

さんすうのーと

わたし

2025年11月17日

目次

1	記号論理学	6
1.1	命題	6
1.2	命題結合子と推論規則	6
1.3	いくつかの重要な定理	7
1.4	同値	11
1.5	いくつかの命題結合子と重要な定理	12
1.6	意味論	15
1.7	述語論理	15
1.8	述語論理におけるいくつかの重要な概念と定理	16
1.9	類と関数クラス	19
2	圏論	21
2.1	射の公理	21
2.2	圏と関手	22
2.3	自然変換と関手圏	24
2.4	双対	27
2.5	簡約と逆	28
2.6	普遍	30
2.7	余普遍	33
2.8	随伴	35
3	集合論	39
3.1	集合論の述語	39
3.2	集合の構成	40
3.3	集合の和と幕	42
3.4	集合の置換	44
3.5	順序対と集合の直積	48
3.6	無限系譜	49
4	写像	50
4.1	関係	50
4.2	写像	51
4.3	集合と写像の圏	52
4.4	選択	54
4.5	像と原像	55
4.6	単射と全射	57
5	関係	59
5.1	自己関係	59
5.2	前順序	60
5.3	同値関係	61
6	順序	63
6.1	半順序	63

6.2	束	64
6.3	Zorn の補題	65
6.4	フィルターとネット	68
7	自然数	71
7.1	自然数の公理	71
7.2	自然数の順序	73
7.3	自然数の加法	75
7.4	自然数の乗法	78
7.5	自然数の除法	81
8	有限と可算	82
8.1	有限	82
8.2	可算	85
8.3	濃度の比較	86
9	位相空間	89
9.1	位相	89
9.2	誘導位相	91
9.3	近傍	93
9.4	閉集合	97
9.5	分離	100
9.6	連結	105
9.7	可算な位相	106
9.8	順序位相	108
10	一様空間	109
10.1	近縁	109
10.2	Cauchy	113
10.3	可算な一様構造	116
11	代数	119
11.1	マグマ	119
11.2	マグマと準同型	119
11.3	マグマと準同型定理	120
11.4	半群	120
11.5	モノイド	121
11.6	モノイドと準同型	122
11.7	モノイドと準同型定理	123
11.8	指数と総乗	124
12	群	125
12.1	群	125
12.2	群と準同型	127
12.3	群の作用	128
12.4	部分群の群への作用	129
12.5	群と準同型定理	130
12.6	群の生成	131

12.7	半直積	132
13	有限群	133
13.1	有限群	133
13.2	群と素数	135
13.3	置換と対称群	137
13.4	可解群	139
14	環	141
14.1	環	141
14.2	イデアル	142
14.3	環と準同型定理	143
15	整域	144
15.1	倍元と約元	144
15.2	整域	145
15.3	一意分解整域	146
15.4	体	149
16	多項式	150
16.1	多項式環	150
16.2	体上の多項式	152
17	加群	154
17.1	環上の加群	154
17.2	体上の加群	156
18	整数	158
18.1	整数の構成	158
18.2	整数の性質	160
19	有理数	161
19.1	有理数の構成	161
19.2	有理数の性質	163
20	代数の補足	165
20.1	\mathbb{Z}, \mathbb{Q} から見る代数	165
20.2	素体	166
21	体と拡大	166
22	実数	167
22.1	実数の構成	167
22.2	実数の性質	170
22.3	実数の完備性	172
22.4	実数の連続性	174

まえがき

さんすうの一とです。

私ではない誰かのアイデアを多分に含みます。

引用・注釈はありません。内容が正しいことを保証しません。

間違いや美しくない部分があれば教えてください。私が喜びます。

(追記) いくつかの証明を考察してくれた O 君に感謝を。

1 記号論理学

1.1 命題

Def. 1.1.1. 命題

真偽が確定している言明を、命題と呼ぶ。

Def. 1.1.2. 解釈

各命題のそれぞれに真偽を対応させる対応関係を、解釈と呼ぶ。

Def. 1.1.3. 矛盾

あらゆる解釈において偽を与える命題を、矛盾と呼ぶ。

1.2 命題結合子と推論規則

Def. 1.2.1. 推論

命題 ϕ, ψ について、 ϕ から ψ が推論されることを、 $\phi \vdash \psi$ で表す。

このとき、 ϕ を前提、 ψ を帰結と呼ぶ。

Rem. 1.2.1. 命題論理の推論体系

ここでは推論を行う上で許される規則として、後述する公理 1.2.1、公理 1.2.2、公理 1.2.3、公理 1.2.4、公理 1.2.5、公理 1.2.6、公理 1.2.7 を与える。

Rem. 1.2.2. 命題の結合順序

1つまたは2つの命題から新たな命題を作り出す記号は、命題結合子と呼ばれる。

複数の命題結合子がある場合には結合される順序により与えられる命題が変わるため、厳密さのために()によって結合順序を定める。

Ax. 1.2.1. 同一律

命題 ϕ について、以下を定める。

$$\phi \vdash \phi$$

Ax. 1.2.2. カット規則

命題 ϕ, ψ, χ について、以下を定める。

$$\phi \vdash \psi \text{ と } \psi \vdash \chi \text{ から、 } \phi \vdash \chi$$

Def. 1.2.2. 連言

命題 ϕ, ψ について、 $\phi \wedge \psi$ は命題である。「 ϕ かつ ψ 」と呼ぶ。

Ax. 1.2.3. 連言の導入則

命題 ϕ, ψ, χ について、以下を定める。

$$\chi \vdash \phi \text{ と } \chi \vdash \psi \text{ から、 } \chi \vdash \phi \wedge \psi$$

Ax. 1.2.4. 連言の除去則

命題 ϕ, ψ について、以下の 2 つを定める。

$$\begin{aligned}\phi \wedge \psi &\vdash \phi \\ \phi \wedge \psi &\vdash \psi\end{aligned}$$

Def. 1.2.3. 含意

命題 ϕ, ψ について、 $\phi \rightarrow \psi$ は命題である。「 ϕ ならば ψ 」と呼ぶ。

Ax. 1.2.5. 演繹定理

命題 ϕ, ψ, χ について、以下を定める。

$$\phi \wedge \psi \vdash \chi \text{ から、 } \phi \vdash \psi \rightarrow \chi$$

Ax. 1.2.6. Modus Ponens

命題 ϕ, ψ について、以下を定める。

$$\phi \wedge (\phi \rightarrow \psi) \vdash \psi$$

Ax. 1.2.7. 二重否定の除去

命題 ϕ について、以下を定める。

$$(\phi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp \vdash \phi$$

1.3 いくつかの重要な定理

Thm. 1.3.1. 連言の交換

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\phi \wedge \psi \vdash \psi \wedge \phi$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi$

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \phi$

1、2 行目と公理 1.2.3 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi \wedge \phi$

■

Thm. 1.3.2. 連言の結合

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} (\phi \wedge \psi) \wedge \chi &\vdash \phi \wedge (\psi \wedge \chi) \\ \phi \wedge (\psi \wedge \chi) &\vdash (\phi \wedge \psi) \wedge \chi \end{aligned}$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \phi \wedge \psi$

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \phi$

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi$

1、2 行目と公理 1.2.2 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \phi$

1、3 行目と公理 1.2.2 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \psi$

公理 1.2.4 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \chi$

5、6 行目と公理 1.2.3 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \psi \wedge \chi$ である。

4、7 行目と公理 1.2.3 より、 $(\phi \wedge \psi) \wedge \chi \vdash \phi \wedge (\psi \wedge \chi)$ である。

逆も同様。 ■

Thm. 1.3.3. 連言の幕等

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \phi \wedge \phi$$

Proof.

公理 1.2.1 より $\phi \vdash \phi$

1 行目と公理 1.2.3 より成り立つ。 ■

Thm. 1.3.4. 含意の推移

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$(\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \phi \rightarrow \chi$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \phi$

公理 1.2.4 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash (\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)$

公理 1.2.4 より、 $(\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \phi \rightarrow \psi$

2、3 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \phi \rightarrow \psi$

1、4 行目と公理 1.2.3 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \phi \wedge (\phi \rightarrow \psi)$

公理 1.2.6 より、 $\phi \wedge (\phi \rightarrow \psi) \vdash \psi$

5、6 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \psi$

公理 1.2.4 より、 $(\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \psi \rightarrow \chi$

2、8 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \psi \rightarrow \chi$

7、9 行目と公理 1.2.3 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \psi \wedge (\psi \rightarrow \chi)$

公理 1.2.6 より、 $\psi \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \chi$

10、11 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi)) \wedge \phi \vdash \chi$

公理 1.2.5 より、 $(\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \phi \rightarrow \chi$ ■

Thm. 1.3.5. 逆演繹定理

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \psi \rightarrow \chi \text{ から、 } \phi \wedge \psi \vdash \chi$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \phi$

1 行目、所与の推論と公理 1.2.2 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi \rightarrow \chi$

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi$

2、3 行目と公理 1.2.3 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \psi \wedge (\psi \rightarrow \chi)$

公理 1.2.6 より、 $\psi \wedge (\psi \rightarrow \chi) \vdash \chi$

4、5 行目と公理 1.2.2 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \chi$

■

Thm. 1.3.6. Lukasiewicz の第一公理

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \psi \rightarrow \phi$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $\phi \wedge \psi \vdash \phi$

1 行目と公理 1.2.5 より、 $\phi \vdash \psi \rightarrow \phi$

■

Thm. 1.3.7. 無矛盾律

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\phi \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \perp$$

■

Proof.

公理 1.2.6 より成り立つ。

Thm. 1.3.8. 不条理則

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\perp \vdash \phi$$

■

Proof.

公理 1.2.4 より、 $\perp \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \perp$

1 行目と公理 1.2.5 より、 $\perp \vdash (\phi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp$

公理 1.2.7 より、 $(\phi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp \vdash \phi$

2、3 行目と公理 1.2.2 より、 $\perp \vdash \phi$

■

Thm. 1.3.9. Peirce 則

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$(\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi \vdash \phi$$

Proof.

公理 1.2.4 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \phi \rightarrow \perp$

定理 1.3.7 より、 $(\phi \rightarrow \perp) \wedge \phi \vdash \perp$

定理 1.3.8 より、 $\perp \vdash \psi$

2、3 行目と公理 1.2.2 より、 $(\phi \rightarrow \perp) \wedge \phi \vdash \psi$

4 行目と公理 1.2.5 より、 $\phi \rightarrow \perp \vdash \phi \rightarrow \psi$

1、5 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \phi \rightarrow \psi$

公理 1.2.4 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash (\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi$

6、7 行目と公理 1.2.3 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash (\phi \rightarrow \psi) \wedge ((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi)$

公理 1.2.6 より、 $(\phi \rightarrow \psi) \wedge ((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \vdash \phi$

8、9 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \phi$

1、10 行目と公理 1.2.3 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \phi \wedge (\phi \rightarrow \perp)$

2、11 行目と公理 1.2.2 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \wedge (\phi \rightarrow \perp) \vdash \perp$

12 行目と公理 1.2.5 より、 $((\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi) \vdash (\phi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp$

公理 1.2.7 より、 $(\phi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp \vdash \phi$

13、14 行目と公理 1.2.2 より、 $(\phi \rightarrow \psi) \rightarrow \phi \vdash \phi$ ■

Thm. 1.3.10. 背理法

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\phi \wedge (\psi \rightarrow \perp) \vdash \perp \text{ から、 } \phi \vdash \psi$$

Proof.

所与の推論と公理 1.2.5 より、 $\phi \vdash (\psi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp$

公理 1.2.7 より、 $(\psi \rightarrow \perp) \rightarrow \perp \vdash \psi$

1、2 行目と公理 1.2.2 より、 $\phi \vdash \psi$ ■

Thm. 1.3.11. 対偶法

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\chi \wedge (\psi \rightarrow \perp) \vdash \phi \rightarrow \perp \text{ から、 } \chi \wedge \phi \vdash \psi$$

Proof.

定理 1.5.6 から、 $(\phi \wedge \chi) \wedge (\psi \rightarrow \perp) \vdash \phi \wedge (\chi \wedge (\psi \rightarrow \perp))$

所与の推論と定理 1.3.5 から、 $\phi \wedge (\chi \wedge (\psi \rightarrow \perp)) \vdash \perp$

1, 2 行目と公理 1.2.2 より、 $(\phi \wedge \chi) \wedge (\psi \rightarrow \perp) \vdash \perp$

3 行目と定理 1.3.10 より、 $\phi \wedge \chi \vdash \psi$

定理 1.3.1 より、 $\chi \wedge \phi \vdash \phi \wedge \chi$

4、5 行目と公理 1.2.2 より、 $\chi \wedge \phi \vdash \psi$ ■

1.4 同値

Rem. 1.4.1. 命題の定義記号

定義記号 \leftrightarrow を導入する。

これは左辺を用いて表現された命題は、議論において全てその左辺と一致する部分を右辺に置き換えて理解するという意味である。

以降に定義する述語の定義にも同様に用いる。

Def. 1.4.1. 同値

新たな命題結合子 \leftrightarrow を定める。

命題 ϕ, ψ について、命題 $\phi \leftrightarrow \psi$ を以下で定める。

$$\phi \leftrightarrow \psi : \leftrightarrow (\phi \rightarrow \psi) \wedge (\psi \rightarrow \phi)$$

「 ϕ と ψ は必要十分」と呼ぶ。

Lem. 1.4.1. 連言における命題の代入原理

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$(\phi \wedge \chi) \wedge (\phi \leftrightarrow \psi) \vdash \psi \wedge \chi$$

Proof.

明らか。 ■

Lem. 1.4.2. 含意の前件における命題の代入原理

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$(\phi \rightarrow \chi) \wedge (\phi \leftrightarrow \psi) \vdash \psi \rightarrow \chi$$

Proof.

定理 1.3.4 より明らか。 ■

Lem. 1.4.3. 含意の後件における命題の代入原理

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$(\chi \rightarrow \phi) \wedge (\phi \leftrightarrow \psi) \vdash \chi \rightarrow \psi$$

Proof.

定理 1.3.4 より明らか。 ■

Thm. 1.4.4. 命題の代入原理

命題 ϕ, ψ と、 \wedge, \rightarrow によって … と結合される命題 P について、以下が成り立つ。

$$P(\phi, \dots) \wedge (\phi \leftrightarrow \psi) \vdash P(\psi, \dots)$$

Proof.

補題 1.4.1、補題 1.4.2、補題 1.4.3 から、帰納的に成り立つ。 ■

1.5 いくつかの命題結合子と重要な定理

Def. 1.5.1. 定理

新たな命題 \top を以下で定める。

$$\top : \leftrightarrow \perp \rightarrow \perp$$

Rem. 1.5.1. 定理からの帰結

命題 ϕ について、簡単のために $\top \vdash \phi$ を $\vdash \phi$ で表す。

Def. 1.5.2. 左含意

新たな命題結合子 \leftarrow を定める。

命題 ϕ, ψ について、命題 $\phi \leftarrow \psi$ を以下で定める。

$$\phi \leftarrow \psi : \leftrightarrow \psi \rightarrow \phi$$

Def. 1.5.3. 否定

新たな命題結合子 \neg を定める。

命題 ϕ について、命題 $\neg\phi$ を以下で定める。

$$\neg\phi : \leftrightarrow \phi \rightarrow \perp$$

Def. 1.5.4. 選言

新たな命題結合子 \vee を定める。

命題 ϕ, ψ について、命題 $\phi \vee \psi$ を以下で定める。

$$\phi \vee \psi : \leftrightarrow \neg\phi \rightarrow \psi$$

Rem. 1.5.2. 命題結合子の優先順序

結合の順序は以下で定めるものとする。

1. 否定 \neg
2. 連言 \wedge
3. 選言 \vee
4. 含意 \rightarrow
5. 左含意 \leftarrow
6. 同値 \leftrightarrow

ただし () がある場合は、その中を先に結合する。

Thm. 1.5.1. 定理は全てに導かれる

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \top$$

Proof.

明らか。 ■

Thm. 1.5.2. 否定の導入則

命題 ϕ, χ について、以下が成り立つ。

$$\chi \wedge \phi \vdash \perp \text{ から、 } \chi \vdash \neg\phi$$

Proof.

公理 1.2.5 より明らか。 ■

Thm. 1.5.3. 選言の導入則

命題 ϕ, ψ について、以下の 2 つが成り立つ。

$$\begin{aligned}\phi &\vdash \phi \vee \psi \\ \psi &\vdash \phi \vee \psi\end{aligned}$$

Proof.

第一式を示す。

定理 1.3.7 と定理 1.3.8 より、 $\phi \wedge \neg\phi \vdash \psi$

公理 1.2.5 より成り立つ。

第二式は、定理 1.3.6 より明らか。 ■

Thm. 1.5.4. 選言の除去則

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \chi \text{ と } \psi \vdash \chi \text{ から、 } \phi \vee \psi \vdash \chi$$

Proof.

$\phi \vdash \chi$ から $\neg\chi \wedge \phi \vdash \perp$ であるので、 $\neg\chi \vdash \neg\phi$ である。

$(\phi \vee \psi) \wedge \neg\chi \vdash \psi$ である。

$\psi \vdash \chi$ から、 $(\phi \vee \psi) \wedge \neg\chi \vdash \perp$ であるので、 $\phi \vee \psi \vdash \neg\neg\chi$ である。

二重否定を除去して成り立つ。 ■

Thm. 1.5.5. 選言の交換

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vee \psi \vdash \psi \vee \phi$$

Proof.

明らか。 ■

Thm. 1.5.6. 連言の結合

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} (\phi \vee \psi) \vee \chi &\vdash \phi \vee (\psi \vee \chi) \\ \phi \vee (\psi \vee \chi) &\vdash (\phi \vee \psi) \vee \chi \end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.5.7. 選言の幂等

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\phi \vdash \phi \vee \phi$$

Proof.

定理 1.5.3 より明らか。。 ■

Thm. 1.5.8. 選言三段論法

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$(\phi \vee \psi) \wedge \neg\phi \vdash \psi$$

Proof.

明らか。 ■

Thm. 1.5.9. 吸収律

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \phi \vee (\phi \wedge \psi) &\vdash \phi \\ \phi &\vdash \phi \wedge (\phi \vee \psi) \end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.5.10. 分配律

命題 ϕ, ψ, χ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \vdash \phi \vee (\psi \wedge \chi) &\leftrightarrow (\phi \vee \psi) \wedge (\phi \vee \chi) \\ \vdash \phi \wedge (\psi \vee \chi) &\leftrightarrow (\phi \wedge \psi) \vee (\phi \wedge \chi) \end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.5.11. De Morgan の法則

命題 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\vdash \neg\phi \vee \neg\psi &\leftrightarrow \neg(\phi \wedge \psi) \\ \vdash \neg\phi \wedge \neg\psi &\leftrightarrow \neg(\phi \vee \psi)\end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.5.12. 排中律

命題 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\vdash \phi \vee \neg\phi$$

Proof.

明らか。 ■

1.6 意味論

Def. 1.6.1. 恒真命題

あらゆる解釈において真を与える命題を、恒真命題と呼ぶ。

Def. 1.6.2. 意味論的同値

命題 ϕ, ψ について、あらゆる解釈においてその真偽が一致するとき、 ϕ と ψ は意味論的に同値であると言う。

Def. 1.6.3. 論理的帰結

命題 ϕ, ψ について、 ϕ が真であるあらゆる解釈において ψ が真であるとき、 $\phi \models \psi$ で表す。

特に ψ が恒真命題であるとき、 $\models \psi$ で表す。

Def. 1.6.4. 健全性

ある推論体系（推論規則と命題結合子の解釈）を考える。

あらゆる命題 ϕ について、この推論体系が以下を満たすとき、その推論体系は健全であるという。

$$\vdash \phi \text{ から, } \models \phi$$

Def. 1.6.5. 完全性

ある推論体系（推論規則と命題結合子の解釈）を考える。

あらゆる命題 ϕ について、この推論体系が以下を満たすとき、その推論体系は完全であるという。

$$\models \phi \text{ から, } \vdash \phi$$

1.7 述語論理

Rem. 1.7.1. 述語論理の推論体系

ここでは推論を行う上で許される規則として、後述する公理 1.7.1、公理 1.7.2 を加える。

Def. 1.7.1. 個体

学問における対象を、個体と呼ぶ。

個体を表す記号を項と呼び、各項のそれぞれに個体を対応させる対応関係を、解釈と呼ぶ。

Def. 1.7.2. 議論領域

議論領域とは、個体の全体である。

Def. 1.7.3. 述語

0個以上の個体の列について、その全てが確定したときに命題となる言明を、述語と呼ぶ。

述語を表す記号である述語記号 ϕ と、個体を表す記号である項の列 x, \dots を用いて $\phi(x, \dots)$ で表す。

述語が要求する個体の数を、その述語のアリティと呼ぶ。

Def. 1.7.4. 全称量化子

量化子 \forall を定める。

アリティ 1 の述語 ϕ について、 $\forall x(\phi(x))$ は命題である。

Ax. 1.7.1. 全称の導入則

項 x 、項 x を出現させない命題 ϕ 、アリティ 1 の述語 ψ について、以下を定める。

$$\phi \vdash \psi(x) \text{ から、 } \phi \vdash \forall x(\psi(x))$$

Ax. 1.7.2. 全称の除去則

項 y とアリティ 1 の述語 ϕ について、以下を定める。

$$\forall x(\phi(x)) \vdash \phi(y)$$

1.8 述語論理におけるいくつかの重要な概念と定理

Thm. 1.8.1. 健全性定理

小節 1.2、小節 1.7 により得られる推論は健全である。

Proof.

$\phi \wedge \psi$ は、 ϕ と ψ がともに真であるときに真であるとして、そうでないときは偽とする。

$\phi \rightarrow \psi$ は、 ϕ が真で ψ が偽であるときに偽であるとして、そうでないときは真とする。

$\forall x(\phi(x))$ は、議論領域上のあらゆる x について $\phi(x)$ が真であるときに真であるとして、そうでないときは偽とする。

このとき各推論規則は、真の前提から真の帰結を与える。 ■

Def. 1.8.1. 存在量化子

量化子 \exists を定める。

アリティ 1 の述語 ϕ について、存在量化子 \exists を以下で定める。

$$\exists x(\phi(x)) : \leftrightarrow \neg \forall x(\neg \phi(x))$$

Thm. 1.8.2. 存在の導入則

アリティ 1 の述語 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\phi(y) \vdash \exists x(\phi(x))$$

Proof.

$\forall x(\neg\phi(x))$ を仮定する。

全称の除去則より $\neg\phi(y)$ であり、前提より $\phi(y)$ であるので、矛盾。

定理 1.3.10 より、 $\neg\forall x(\neg\phi(x))$ を得る。 ■

Thm. 1.8.3. 存在の除去則

アリティ 1 の述語 ϕ 、項 x を出現させない命題 ψ, χ について、以下を定める。

$$\chi \wedge \phi(x) \vdash \psi \text{ から、 } \chi \wedge \exists y(\phi(y)) \vdash \psi$$

Proof.

公理 1.2.5 より、 $\chi \vdash \phi(x) \rightarrow \psi$ である。

$\neg\psi$ を仮定する。

$\phi(x)$ を仮定すると、前提 χ より矛盾するので、定理 1.3.10 より $\neg\phi(x)$ である。

$\chi, \neg\psi$ は項 x を出現させないので、 $\forall x(\neg\psi(x))$ である。

$\exists y(\phi(y)) : \leftrightarrow \neg\forall x(\neg\phi(x))$ であるため、矛盾する。

定理 1.3.10 より ψ を得る。 ■

Thm. 1.8.4. 量化子と連言

アリティ 1 の述語 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} &\vdash \forall x(\phi(x) \wedge \psi(x)) \leftrightarrow \forall x(\phi(x)) \wedge \forall x(\psi(x)) \\ &\quad \exists x(\phi(x) \wedge \psi(x)) \vdash \exists x(\phi(x)) \wedge \exists x(\psi(x)) \end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.8.5. 量化子と選言

アリティ 1 の述語 ϕ, ψ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} &\forall x(\phi(x)) \vee \forall x(\psi(x)) \vdash \forall x(\phi(x) \vee \psi(x)) \\ &\vdash \exists x(\phi(x) \vee \psi(x)) \leftrightarrow \exists x(\phi(x)) \vee \exists x(\psi(x)) \end{aligned}$$

Proof.

略。 ■

Thm. 1.8.6. 量化子と否定

アリティ 1 の述語 ϕ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\vdash \forall x(\neg\phi(x)) &\leftrightarrow \neg\exists x(\phi(x)) \\ \vdash \exists x(\neg\phi(x)) &\leftrightarrow \neg\forall x(\phi(x))\end{aligned}$$

Proof.

定義より明らか。 ■

Def. 1.8.2. 一意存在量化子

量化子 $\exists!$ を定める。

アリティ 1 の述語 ϕ について、存在量化子 $\exists!$ を以下で定める。

$$\exists!x(\phi(x)) : \leftrightarrow \exists x(\phi(x)) \wedge \forall y, z(\phi(y) \wedge \phi(z) \rightarrow y = z)$$

Def. 1.8.3. 等号

アリティ 2 の述語記号 $=$ を定める。

$= (x, y)$ を、簡単のために $x = y$ で表す。

Ax. 1.8.1. 等号の反射律

項 x について、以下を定める。

$$\vdash x = x$$

Ax. 1.8.2. 等号の代入原理

アリティ 2 の述語 ϕ 、項 x, y について、以下を定める。

$$\phi(x, x) \wedge x = y \vdash \phi(x, y)$$

Thm. 1.8.7. 等号の対称律

項 x, y について、以下が成り立つ。

$$x = y \vdash y = x$$

Proof.

$x = x \wedge x = y$ である。

左命題の左辺に、右命題から得る代入を行って、 $y = x$ を得る。 ■

Thm. 1.8.8. 等号の推移律

項 x, y, z について、以下が成り立つ。

$$x = y \wedge y = z \vdash x = z$$

Proof.

明らか。 ■

Def. 1.8.4. 等号否定

アリティ 2 の述語記号 \neq を定める。

項 x, y について、以下で定める。

$$\neq(x, y) : \leftrightarrow \neg(x = y)$$

$\neq(x, y)$ を、簡単のために $x \neq y$ で表す。

Rem. 1.8.1. 項の定義記号

定義記号 $:=$ を導入する。

これは左辺にある項は、議論において全てその左辺と一致する項を右辺に置き換えて理解するという意味である。以降に定義する関数クラスの定義にも同様に用いる。

1.9 類と関数クラス

Def. 1.9.1. 類

アリティ 1 の述語 A を、類と呼ぶ。

類であることを強調するために、 $A(x)$ を $x \in A$ と書く。

Def. 1.9.2. 類の否定

類 A と項 x について、記号 \notin を以下で定める。

$$x \notin A : \leftrightarrow \neg(x \in A)$$

Rem. 1.9.1. 類についての略記

略記 \forall , \exists , \in を、アリティ 2 の述語 ϕ について、以下で定める。

$$\begin{aligned}\forall x, y(\phi(x, y)) &: \leftrightarrow \forall x \forall y(\phi(x, y)) \\ \exists x, y(\phi(x, y)) &: \leftrightarrow \exists x \exists y(\phi(x, y))\end{aligned}$$

これは、3 個以上についても同様に定める。

略記 $\forall \in, \exists \in$ を、類 X とアリティ 1 の述語 ϕ について、以下で定める。

$$\begin{aligned}\forall x \in X(\phi(x)) &: \leftrightarrow \forall x(x \in X \rightarrow \phi(x)) \\ \exists x \in X(\phi(x)) &: \leftrightarrow \exists x(x \in X \wedge \phi(x))\end{aligned}$$

Rem. 1.9.2. 類は個体ではない

類は個体ではない（ある制限のもとで類を個体とみなすことはできる、集合論など）。

そのため、類の類を定義することはできない。

Rem. 1.9.3. 存在の誤謬

類 X とアリティ 1 の述語 ϕ について、 $\forall x \in X(\phi(x))$ から $\exists x \in X(\phi(x))$ を導くことはできない。

これは存在の誤謬と呼ばれる初步的な誤謬の一種である。

Def. 1.9.3. 関数クラス

以下を満たす述語 ϕ を考える。

$$\forall x \dots \exists!y(\phi(x, \dots, y))$$

この対応関係を関数クラスと呼び、関数クラスを表す記号である関数記号 F と項の列 x, \dots を用いて、 y を $F(x, \dots)$ で表す。

要求する x, \dots の個数を、関数クラス F のアリティと定める。

Def. 1.9.4. 恒等関数

アリティ 1 の関数記号 id を定める。

項 x について、以下で定める。

$$\text{id}(x) := x$$

2 圈論

2.1 射の公理

Rem. 2.1.1. 対象と恒等射の同一視

本ノートでは対象を恒等射と同一視する。一般的でないことに注意されたい。

Def. 2.1.1. 射

圈論では、6つの公理（公理 2.1.1、公理 2.1.2、公理 2.1.3、公理 2.1.4、公理 2.1.5、公理 2.1.6）が与えられる。項を射と呼ぶ。

Def. 2.1.2. 始域

アリティ 1 の関数記号 $\text{dom}()$ を考える。

射 f について、 $\text{dom}(f)$ を f の始域と呼ぶ。

Ax. 2.1.1. 始域は幂等

$$\forall f(\text{dom}(\text{dom}(f)) = \text{dom}(f))$$

Def. 2.1.3. 終域

アリティ 1 の関数記号 $\text{cod}()$ を考える。

射 f について、 $\text{cod}(f)$ を f の終域と呼ぶ。

Ax. 2.1.2. 終域は幂等

$$\forall f(\text{cod}(\text{cod}(f)) = \text{cod}(f))$$

Ax. 2.1.3. 対象

$$\forall f(f = \text{dom}(f) \leftrightarrow f = \text{cod}(f))$$

Def. 2.1.4. 合成

アリティ 2 の関数記号 $\circ()$ を考える。

$\circ(f, g)$ を、簡単のために $g \circ f$ で表す。

射 f, g について、 $g \circ f$ を f と g の合成と呼ぶ。

Def. 2.1.5. 可合成

アリティ 2 の述語記号 $\text{Comp}()$ を、以下で定める。

$$\text{Comp}(f, g) : \leftrightarrow \text{cod}(f) = \text{dom}(g)$$

Ax. 2.1.4. 合成射の始域と終域

$$\forall f, g (\text{Comp}(f, g) \rightarrow \text{dom}(g \circ f) = \text{dom}(f) \wedge \text{cod}(g \circ f) = \text{cod}(g))$$

Ax. 2.1.5. 合成射の結合

$$\forall f, g, h (\text{Comp}(f, g) \wedge \text{Comp}(g, h) \rightarrow h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f)$$

Ax. 2.1.6. 対象は恒等射

$$\forall f (f = f \circ \text{dom}(f) \wedge f = \text{cod}(f) \circ f)$$

Def. 2.1.6. 対象

以下を満たす射 a を、対象、または、恒等射と呼ぶ。

$$a = \text{dom}(a)$$

2.2 圏と関手

Def. 2.2.1. 圏

類 \mathbf{C} が圏であるとは、以下を満たすことである。

$$\begin{aligned} \forall f \in \mathbf{C} (\text{dom}(f) \in \mathbf{C} \wedge \text{cod}(f) \in \mathbf{C}) \\ \forall f, g \in \mathbf{C} (\text{Comp}(f, g) \rightarrow g \circ f \in \mathbf{C}) \end{aligned}$$

Def. 2.2.2. 対象の類

以下で定める類 $\text{Obj}_{\mathbf{C}}$ を、圏 \mathbf{C} の対象の類と呼ぶ。

$$f \in \text{Obj}_{\mathbf{C}} : \leftrightarrow f \in \mathbf{C} \wedge f = \text{dom}(f)$$

Cor. 2.2.1.

圏 \mathbf{C} について、 $\text{Obj}_{\mathbf{C}}$ は圏である。

Def. 2.2.3. 離散圏

圏 \mathbf{C} が離散であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall f (f \in \mathbf{C} \leftrightarrow f \in \text{Obj}_{\mathbf{C}})$$

このとき、 \mathbf{C} を離散圏と呼ぶ。

Def. 2.2.4. Hom 類

圏 \mathbf{C} と、 \mathbf{C} の対象 a, b について、類 $\text{Hom}_{\mathbf{C}}(a, b)$ を以下で定める。

$$f \in \text{Hom}_{\mathbf{C}}(a, b) : \leftrightarrow f \in \mathbf{C} \wedge \text{dom}(f) = a \wedge \text{cod}(f) = b$$

Rem. 2.2.1. 射の域の明示

$f \in \text{Hom}_{\mathbf{C}}(a, b)$ を、簡単のため、 \mathbf{C} の射 $f: a \rightarrow b$ と表記する。

Def. 2.2.5. End 類

圏 \mathbf{C} と、 \mathbf{C} の対象 a について、類 $\text{End}_{\mathbf{C}}(a)$ を以下で定める。

$$f \in \text{End}_{\mathbf{C}}(a) : \leftrightarrow f \in \text{Hom}_{\mathbf{C}}(a, a)$$

Def. 2.2.6. 圈 1

以下を満たす圏を、**1** で表す。

$$\exists! a \in \mathbf{1}$$

圏 **1** の唯一の射を、* で表す。

Def. 2.2.7. 関手

アリティ 1 の関数記号 F が、圏 \mathbf{C} から圏 \mathbf{D} への関手であるとは、以下の 3 つを満たすことである。

$$\begin{aligned} & \forall f \in \mathbf{C}(F(f) \in \mathbf{D}) \\ & \forall f \in \mathbf{C}(\text{dom}(F(f)) = F(\text{dom}(f)) \wedge \text{cod}(F(f)) = F(\text{cod}(f))) \\ & \forall f, g \in \mathbf{C}(\text{Comp}(f, g) \rightarrow F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)) \end{aligned}$$

Cor. 2.2.2.

圏 \mathbf{C}, \mathbf{D} について、 \mathbf{C} から \mathbf{D} への関手 F を考える。このとき、以下が成り立つ。

$$\forall a \in \text{Obj}_{\mathbf{C}}(F(a) \in \text{Obj}_{\mathbf{D}})$$

Cor. 2.2.3.

圏 \mathbf{C}, \mathbf{D} について、 \mathbf{C} から \mathbf{D} への関手 F を考える。このとき、以下が成り立つ。

$$\forall f \in \mathbf{C}(f \text{ が同型射} \rightarrow F(f) \text{ が同型射})$$

Def. 2.2.8. 関手の合成

圏 $\mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{E}$ を考える。

\mathbf{C} から \mathbf{D} への関手 F と、 \mathbf{D} から \mathbf{E} への関手 G について、以下で示すアリティ 1 の関数記号 H は、 \mathbf{C} から \mathbf{E} への関手である。

$$H(f) := G(F(f))$$

この H を、 F と G の合成と呼び、 $G \circ F$ で表す。

Def. 2.2.9. 恒等関手

圏 C について、関数記号 id は、 C から C への関手である。

圏論において、 id を恒等関手と呼ぶ。また、 C から C への恒等関手であることを、明示的に id_C で表す。

Def. 2.2.10. 圏同型

圏 C, D を考える。

C から D への関手 F と、 D から C への関手 G が存在して、以下が成り立つとき、 C と D は圏同型であると言ふ。

$$G \circ F = \text{id}_C \wedge F \circ G = \text{id}_D$$

2.3 自然変換と関手圏

Def. 2.3.1. 自然変換

圏 C, D と、 C から D への関手 F, F' を考える。

アリティ 1 の関数記号 η が、 F から F' への自然変換であるとは、以下の 3 つ全てを満たすことである。

$$\begin{aligned} & \forall a \in \text{Obj}_C(\eta(a) \in D) \\ & \forall f \in C \left(\text{Comp}(\eta(\text{dom}(f)), F'(f)) \wedge \text{Comp}(F(f), \eta(\text{cod}(f))) \right) \\ & \forall f \in C \left(F'(f) \circ \eta(\text{dom}(f)) = \eta(\text{cod}(f)) \circ F(f) \right) \end{aligned}$$

$$\begin{array}{ccc} & D & \\ C & \xrightarrow{f} & \\ a & \downarrow \eta(a) & \downarrow \eta(b) \\ & F'(a) \xrightarrow{F'(f)} F'(b) & \end{array}$$

Def. 2.3.2. 恒等な自然変換

圏 C, D と、 C から D への関手 F について、関数記号 F は、 F から F への自然変換である。

F が自然変換であることを明示的に、関手 F に対する恒等な自然変換 F と呼ぶ。

Cor. 2.3.1. 恒等な自然変換は自然同型

関手 F に対する恒等な自然変換 F は、 F から F への自然同型である。

Def. 2.3.3. 自然変換の垂直合成

圏 C, D と、 C から D への関手 F, F', F'' を考える。

F から F' への自然変換 η と F' から F'' への自然変換 θ について、以下で定義するアリティ 1 の関数記号 $\theta \circ \eta$ は F から F'' への自然変換である。

$$(\theta \circ \eta)(a) := \theta(a) \circ \eta(a)$$

$\theta \circ \eta$ を、 η と θ の垂直合成と呼ぶ。

$$\begin{array}{ccc}
& \mathbf{D} & \\
C & \xrightarrow{f} b & \begin{array}{c} F(a) \xrightarrow{F(f)} F(b) \\ \eta(a) \downarrow \quad \downarrow \eta(b) \\ F'(a) \xrightarrow{F'(f)} F'(b) \\ \theta(a) \downarrow \quad \downarrow \theta(b) \\ F''(a) \xrightarrow{F''(f)} F''(b) \end{array} \\
& (\theta \circ \eta)(a) & (\theta \circ \eta)(b)
\end{array}$$

Cor. 2.3.2.

圏 C, D と、 C から D への関手 F, F' を考える。

F から F' への自然変換 η について、以下が成り立つ。

$$\forall a \in \text{Obj}_C \left(\eta(a) = (\eta \circ F)(a) \wedge \eta(a) = (F' \circ \eta)(a) \right)$$

Def. 2.3.4. 自然変換の水平合成

圏 C, D, E と、 C から D への関手 F, F' 、 D から E への関手 G, G' を考える。

F から F' への自然変換 η と、 G から G' への自然変換 θ について、以下で定義するアリティ 1 の関数記号 $\theta * \eta$ は $G \circ F$ から $G' \circ F'$ への自然変換である。

$$(\theta * \eta)(a) := \theta(F'(a)) \circ G(\eta(a))$$

$\theta * \eta$ を、 η と θ の水平合成と呼ぶ。

$$\begin{array}{ccc}
& \mathbf{E} & \\
D & & \begin{array}{ccccc} G'(F(a)) & \xrightarrow{G'(F(f))} & G'(F(b)) & & \\ \theta(F(a)) \nearrow & \downarrow G(F(f)) & \theta(F(b)) \nearrow & & \\ G(F(a)) & \xrightarrow{\quad} & G(F(b)) & & G'(F(b)) \\ \downarrow G(\eta(a)) & \searrow (\theta * \eta)(a) & \downarrow G(\eta(b)) & \searrow (\theta * \eta)(b) & \downarrow G'(F(b)) \\ G(F'(a)) & \xrightarrow{\quad} & G'(F'(b)) & & \\ \theta(F'(a)) \nearrow & & \downarrow G(\eta(b)) & \nearrow \theta(F'(b)) & \\ G(F'(a)) & \xrightarrow{G(F'(f))} & G(F'(b)) & & \end{array} \\
C & \xrightarrow{f} b & \begin{array}{ccc} F(a) & \xrightarrow{F(f)} & F(b) \\ \eta(a) \downarrow & & \downarrow \eta(b) \\ F'(a) & \xrightarrow{F'(f)} & F'(b) \end{array}
\end{array}$$

Cor. 2.3.3.

圏 C, D, E と、 C から D への関手 F, F' 、 D から E への関手 G, G' を考える。

F から F' への自然変換 η と、 G から G' への自然変換 θ について、以下が成り立つ。

$$\forall a \in \text{Obj}_C \left((\theta * F)(a) = \theta(F(a)) \wedge (G * \eta)(a) = G(\eta(a)) \right)$$

Lem. 2.3.4.

圏 C, D, E と、 C から D への関手 F, F' 、 D から E への関手 G, G' を考える。

F から F' への自然変換 η と、 G から G' への自然変換 θ について、以下が成り立つ。

$$\forall a \in C \left(\theta(F'(a)) \circ G(\eta(a)) = G'(\eta(a)) \circ \theta(F(a)) \right)$$

Proof.

θ は G から G' への自然変換であるので、明らか。 ■

Thm. 2.3.5. 相互交換法則

圏 C, D, E と、 C から D への関手 F, F', F'' 、 D から E への関手 G, G', G'' を考える。

F から F' への自然変換 σ 、 F' から F'' への自然変換 τ 、 G から G' への自然変換 η 、 G' から G'' への自然変換 θ について、以下が成り立つ。

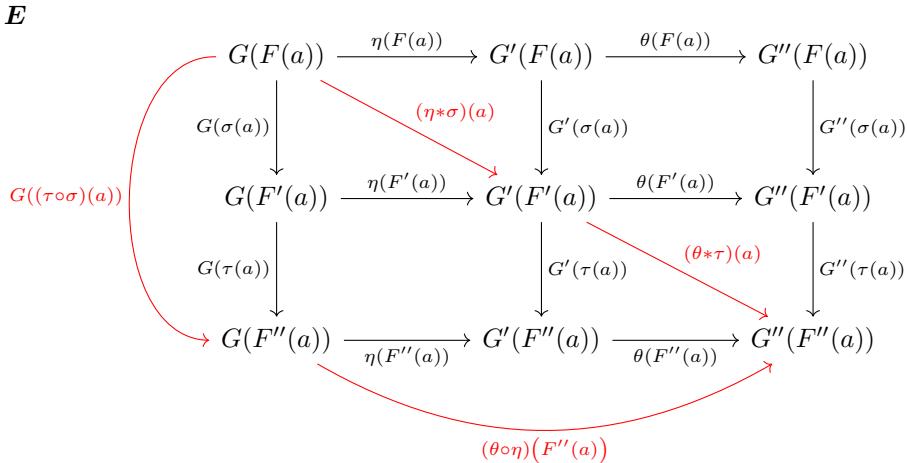
$$(\theta \circ \eta) * (\tau \circ \sigma) = (\theta * \tau) \circ (\eta * \sigma)$$

Proof.

C の任意の対象 a について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} ((\theta \circ \eta) * (\tau \circ \sigma))(a) &= (\theta \circ \eta)(F''(a)) \circ G((\tau \circ \sigma)(a)) \\ &= \theta(F''(a)) \circ \eta(F''(a)) \circ G(\tau(a)) \circ G(\sigma(a)) \\ &= \theta(F''(a)) \circ G'(\tau(a)) \circ \eta(F'(a)) \circ G(\sigma(a)) \\ &= (\theta * \tau)(a) \circ (\eta * \sigma)(a) \\ &= ((\theta * \tau) \circ (\eta * \sigma))(a) \end{aligned}$$

ただし第二行から第三行へは、 η が G から G' への自然変換であることを用いた。 ■



Rem. 2.3.1. 自然変換は射

圏 D から圏 C への関手 F, G について、 F から G への自然変換 η を考える。

$\text{dom}(\eta)$ を F に対する恒等な自然変換 F 、 $\text{cod}(\eta)$ を G に対する恒等な自然変換 G として、合成を垂直合成で定義すると、自然変換は射の公理をみたす。

Def. 2.3.5. 関手圏

圏 C, D について、自然変換を射とみなすと、 D から C への関手間の自然変換であることは、圏となる。

この圏に以下の相等の定義を加えたものを、 D から C への関手圏と呼び、 $\text{Func}(D, C)$ または C^D と表す。

1. 対象（関手） F, F' について、 $\forall f \in C(F(f) = F'(f)) \rightarrow F = F'$
2. 射（自然変換） η, θ について、 $\text{dom}(\eta) = \text{dom}(\theta) \wedge \text{cod}(\eta) = \text{cod}(\theta) \wedge \forall a \in \text{Obj}_C(\eta(a) = \theta(a)) \rightarrow \eta = \theta$

1行目は恒等な自然変換ではなく関手として扱っていることに注意されたい。

Def. 2.3.6. 対角関手

圏 C, D について、 C から $\text{Func}(D, C)$ への以下で定める関手 Δ を考える。

1. $c \in \text{Obj}_C$ について、 D から C への関手 $\Delta(c), \forall d \in D(\Delta(c)(d) := c)$ を与える。
2. $f \notin \text{Obj}_C$ について、 $\Delta(\text{dom}(f))$ から $\Delta(\text{cod}(f))$ への自然変換 $\forall d \in \text{Obj}_D(\Delta(f)(d) := f)$ を与える。

このように定めた関手 Δ を対角関手と呼ぶ。

2.4 双対

Def. 2.4.1. 反対射

射 f について、以下を満たすアリティ 1 の関数記号 op を考える。簡単のために、 $\text{op}(f)$ を f^{op} で表す。

$$\begin{aligned} & \forall f((f^{\text{op}})^{\text{op}} = f) \\ & \forall f(f = \text{dom}(f) \rightarrow f = f^{\text{op}}) \\ & \forall f(\text{dom}(f^{\text{op}}) = \text{cod}(f)^{\text{op}}) \\ & \forall f(\text{cod}(f^{\text{op}}) = \text{dom}(f)^{\text{op}}) \\ & \forall f, g(\text{Comp}(f, g) \rightarrow f^{\text{op}} \circ g^{\text{op}} = (g \circ f)^{\text{op}}) \end{aligned}$$

Def. 2.4.2. 反対圏

圏 C について、以下で定める類 C^{op} は圏である。

$$f \in C^{\text{op}} : \leftrightarrow f^{\text{op}} \in C$$

Def. 2.4.3. 反対関手

C から D への関手 F について、以下で定める C^{op} から D^{op} への関手を、 F^{op} で表す。

$$F^{\text{op}}(f) := (F(f^{\text{op}}))^{\text{op}}$$

Rem. 2.4.1. 双対性

圏論における命題は、 $\text{dom}()$ と $\text{cod}()$ を入れ替えて、合成 $g \circ f$ を $f \circ g$ に置き換えて、その真偽は変わらない。より簡単に言えば、 C で成り立つ命題は、 C^{op} でも成り立つ。

Cor. 2.4.1. 圏 1 の双対

1^{op} は、 1 である。

Cor. 2.4.2. 関手圏の双対

$\text{Func}(D, C)^{\text{op}}$ と $\text{Func}(D^{\text{op}}, C^{\text{op}})$ は圏同型である。

2.5 簡約と逆

Def. 2.5.1. 左簡約可能

圏 C と、 C の射 f について、以下を満たすとき、 f は C において左簡約可能であるという。

$$\forall g, h \in C \left(\text{Comp}(g, f) \wedge \text{Comp}(h, f) \wedge f \circ g = f \circ h \rightarrow g = h \right)$$

左簡約可能な射を単射と呼ぶ。

Def. 2.5.2. 右簡約可能

圏 C と、 C の射 f について、 f^{op} が C^{op} で左簡約可能であるとき、 f は C において右簡約可能であるという。

右簡約可能な射を全射と呼ぶ。

Def. 2.5.3. 左可逆

圏 C と、 C の射 f について、以下を満たすとき、 f は C において左可逆であるという。

$$\exists g \in C (\text{Comp}(g, f) \wedge g \circ f = \text{dom}(f))$$

Cor. 2.5.1.

圏 C について、 C において左可逆な射は、 C において左簡約可能である。

Def. 2.5.4. 右可逆

圏 C と、 C の射 f について、 f^{op} が C^{op} で左可逆であるとき、 f は C において右可逆であるという。

Cor. 2.5.2.

圏 C について、 C において右可逆な射は、 C において右簡約可能である。

Cor. 2.5.3.

圏 C と、 C の射 f, g について、 $\text{Comp}(f, g)$ であるとする。このとき、以下が成り立つ。

1. f, g がともに C において左簡約可能ならば、 $g \circ f$ は C において左簡約可能である。
2. f, g がともに C において右簡約可能ならば、 $g \circ f$ は C において右簡約可能である。
3. f, g がともに C において左可逆ならば、 $g \circ f$ は C において左可逆である。
4. f, g がともに C において右可逆ならば、 $g \circ f$ は C において右可逆である。

Cor. 2.5.4.

圏 C と、 C の射 f, g について、 $\text{Comp}(f, g)$ であるとする。このとき、以下が成り立つ。

1. $g \circ f$ が C において左簡約可能ならば、 f は C において左簡約可能である。
2. $g \circ f$ が C において右簡約可能ならば、 g は C において右簡約可能である。

Def. 2.5.5. 逆射

射 f について、以下を満たす射 g を f の逆射と呼ぶ。

$$\text{Comp}(f, g) \wedge \text{Comp}(g, f) \wedge g \circ f = \text{dom}(f) \wedge f \circ g = \text{cod}(f)$$

Lem. 2.5.5. 逆射の一意性

射 g, h が f の逆射であるとき、 $g = h$ である。

Proof.

以下より成り立つ。

$$g = g \circ \text{dom}(g) = g \circ \text{cod}(f) = g \circ f \circ h = \text{dom}(f) \circ h = \text{cod}(h) \circ h = h \text{ より、成り立つ。} \blacksquare$$

Rem. 2.5.1. 逆射

f の逆射は、補題 2.5.5 より一意に定まるので、これを f^{-1} と表す。

Cor. 2.5.6.

逆射を持つ射 f について、以下が成り立つ。

$$(f^{-1})^{-1} = f$$

Lem. 2.5.7. 同型射

圏 \mathbf{C} と、 \mathbf{C} の射 f について、以下の 2 つは同値である。

1. f は、 \mathbf{C} に逆射を持つ。
2. f は、 \mathbf{C} において、左可逆かつ右可逆である。

Proof.

1. \rightarrow 2. は明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。

左可逆より、射 g が存在して $g \circ f = \text{dom}(f)$ であり、右可逆より、射 h が存在して $f \circ h = \text{cod}(f)$ である。

$$g = g \circ (f \circ h) = (g \circ f) \circ h = h \text{ であるので、} g = h$$

ゆえに、 g は $f \circ g = \text{cod}(f)$ を満たす。 \blacksquare

Def. 2.5.6. 同型射

圏 \mathbf{C} について、 \mathbf{C} において左可逆かつ右可逆な射を、 \mathbf{C} の同型射と呼ぶ。

Cor. 2.5.8. 恒等射は同型射

圏 \mathbf{C} について、 \mathbf{C} の恒等射 f の逆射は自身であり、ゆえに f は \mathbf{C} の同型射である。

Cor. 2.5.9.

圏 \mathbf{C}, \mathbf{D} と、 \mathbf{C} から \mathbf{D} への関手 F を考える。

\mathbf{C} の同型射 f について、 $F(f)$ は \mathbf{D} の同型射である。

Def. 2.5.7. 自然同型

圏 \mathbf{C}, \mathbf{D} を考える。関手圏 $\text{Func}(\mathbf{D}, \mathbf{C})$ の同型射を自然同型と呼ぶ。

Cor. 2.5.10.

圏 \mathbf{C}, \mathbf{D} と、 \mathbf{D} から \mathbf{C} への関手 F, F' を考える。

自然変換 $\eta: F \rightarrow F'$ が自然同型であるとは、以下と同値である。

$$\forall a \in \text{Obj}_{\mathbf{D}} (\eta(a) \text{ は } \mathbf{C} \text{ の同型射})$$

Def. 2.5.8. 圈同値

圏 C, D を考える。

D から C への関手 F と、 C から D への関手 G 、自然同型 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_C, \theta: \text{id}_D \rightarrow G \circ F$ が存在するとき、 C と D は圏同値であると言う。

$$\begin{array}{ccc} D & & C \\ \begin{array}{c} a \xrightarrow{f} b \\ \theta(a)^{-1} \downarrow \theta(a) \quad \theta(b)^{-1} \downarrow \theta(b) \\ (G \circ F)(a) \xrightarrow{(G \circ F)(f)} (G \circ F)(b) \end{array} & & \begin{array}{c} c \xrightarrow{g} d \\ \epsilon(c)^{-1} \downarrow \epsilon(c) \quad \epsilon(d)^{-1} \downarrow \epsilon(d) \\ (F \circ G)(c) \xrightarrow{(F \circ G)(g)} (F \circ G)(d) \end{array} \end{array}$$

Cor. 2.5.11. 圈同型ならば圏同値

圏 C, D について、 C と D が圏同型ならば、 C と D は圏同値である。

2.6 普遍

Def. 2.6.1. 普遍射

圏 C, D と、 D から C への関手 F 、 C の対象 a を考える。

F から a への普遍射とは、 D の対象 x と圏 C の射 $u: F(x) \rightarrow a$ の組であって、以下を満たすものである。

$$\forall y \in \text{Obj}_D \forall f \in \text{Hom}_C(F(y), a) \exists! g \in \text{Hom}_D(y, x)(f = u \circ F(g))$$

$$\begin{array}{ccc} D & & C \\ y & \xrightarrow{\text{red } g} & x \\ & \dashrightarrow & \\ & F(y) & F(x) \\ & \searrow f & \downarrow u \\ & a & \end{array}$$

Lem. 2.6.1. 普遍射の一意性

D から C への関手 F 、 C の対象 a について、 x, u と x', u' が F から a への普遍射であるとする。

このとき、以下を満たす。

$$\exists! h \in \text{Hom}_D(x', x)(u' = u \circ F(h))$$

さらに上で与える h は同型射である。

Proof.

x, u は普遍射であるので、 x', u' について定義より、 D の射 $g: x' \rightarrow x$ であって $u' = u \circ F(g)$ なる射が一意に存在する。

同様に x', u' は普遍射であるので、 x, u について定義より、 D の射 $g': x \rightarrow x'$ であって $u = u' \circ F(g')$ なる射が一意に存在する。

ゆえに、 $u = u' \circ F(g') = u \circ F(g) \circ F(g') = u \circ F(g \circ g')$ が成り立つ。

x, u は普遍射であるので、 x, u について定義より、 D の射 $i: x \rightarrow x$ であって $u = u \circ F(i)$ なる射が一意に存在する。

$x, g \circ g'$ は i の条件を満たすので、 $i = x = g \circ g'$

同様に、 $x' = g' \circ g$ である。

したがって、 g' は g の逆射である。 ■

Def. 2.6.2. 終対象

圏 C を考える。

C から圏 $\mathbf{1}$ への関手は一意に定まる。これを U とすると、 U から $*$ への普遍射 x, u は、 $u = *$ となる。
この x を、 C の終対象と呼ぶ。

$$\begin{array}{ccc} & \mathbf{1} & \\ * = U(y) & \xrightarrow{\text{---} = U(g)} & * = U(x) \\ & \searrow & \downarrow * \\ & * & \end{array}$$

$y \xrightarrow{\text{---} g} x$

Def. 2.6.3. 極限

圏 C, D と、 C から $\text{Func}(D, C)$ への対角関手 Δ を考える。

D から C への関手 X について、 Δ から X への普遍射 x, u を X の極限と呼ぶ。

$$\begin{array}{ccc} & C & \\ & \Delta & \\ a & \xrightarrow{f} & b \\ & \downarrow p(a) & \downarrow p(b) \\ X(a) & \xleftarrow{u(a)} & x & \xrightarrow{u(b)} X(b) \\ & \text{---} q & & \end{array}$$

$\text{Func}(D, C)$

$$\begin{array}{ccc} \Delta(y) & \xrightarrow{\Delta(q)} & \Delta(x) \\ & \searrow p & \downarrow u \\ & X & \end{array}$$

Def. 2.6.4. 積

離散圏 J 、圏 C と、 J から C への関手 X を考える。

このとき、 X の極限を X の積と呼ぶ。 X の積 x, u について、この x を $\prod X$ と表す。

$$\begin{array}{ccc} & C & \\ & \Delta & \\ y & \xrightarrow{\text{---} q} & \prod X \\ & \searrow p(j) & \downarrow u(j) \\ & X(j) & \end{array}$$

$\text{Func}(J, C)$

$$\begin{array}{ccc} \Delta(y) & \xrightarrow{\Delta(q)} & \Delta(\prod X) \\ & \searrow p & \downarrow u \\ & X & \end{array}$$

Def. 2.6.5. 引き戻し

圏 C と、 C の射 f, g を考える。 $\text{cod}(f) = \text{cod}(g)$ とする。

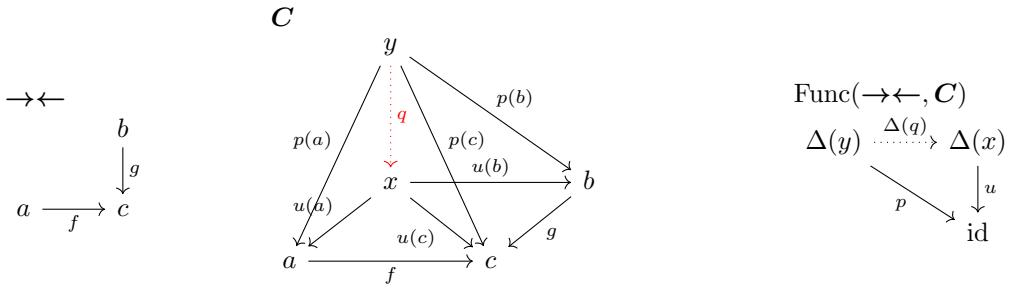
以下で定める類 $\rightarrow \leftarrow$ は、圏である。

$$h \in \rightarrow \leftarrow : \leftrightarrow h = f \vee h = g \vee h = \text{dom}(f) \vee h = \text{dom}(g) \vee h = \text{cod}(f)$$

圏 $\rightarrow \leftarrow$ から C への以下で定める関手 id を考える。

$$\text{id}(h) := h$$

このとき、 id の極限を、 f, g の引き戻しと呼ぶ。



Def. 2.6.6. 等化子

圏 \mathbf{C} と、 \mathbf{C} の射 f, g を考える。 $\text{dom}(f) = \text{dom}(g) \wedge \text{cod}(f) = \text{cod}(g)$ とする。

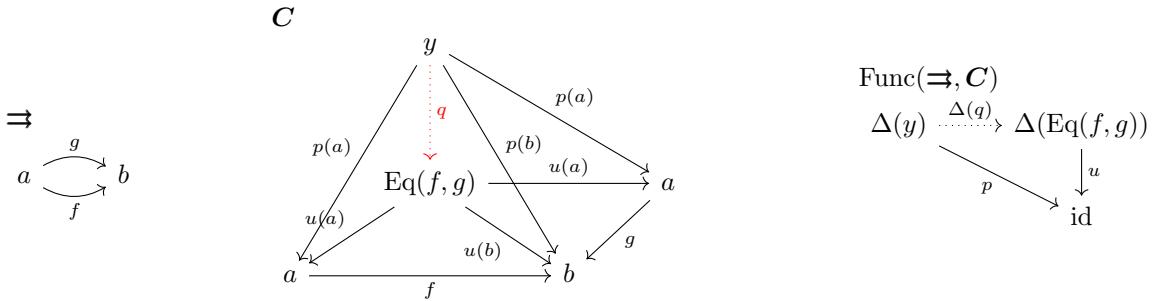
以下で定める類 \Rightarrow は、圏である。

$$h \in \Rightarrow : h = f \vee h = g \vee h = \text{dom}(f) \vee h = \text{cod}(f)$$

圏 \Rightarrow から \mathbf{C} への以下で定める関手 id を考える。

$$\text{id}(h) := h$$

このとき、 id の極限を、 f, g の等化子と呼ぶ。



Lem. 2.6.2. 等化子から得る単射

f と g の等化子 $\text{Eq}(f, g)$, u について、 $u(\text{dom}(f))$ は単射である。

Proof.

$e := u(\text{dom}(f))$ とする。

$e \circ h_1 = e \circ h_2$ なる射 $h_1, h_2: y \rightarrow \text{Eq}(f, g)$ と、射 $w := e \circ h_1$ を考える。

このとき、 $f \circ w = f \circ e \circ h_1 = g \circ e \circ h_1 = g \circ w$ より、等化子の普遍性から $w = e \circ h$ なる h が一意に存在する。

ゆえに、 $h_1 = h_2$ である。

したがって、 e は左簡約可能である。 ■

Thm. 2.6.3. 極限の存在定理

以下を満たす圏 \mathbf{J}, \mathbf{C} を考える。

1. $\text{Obj}_{\mathbf{J}}$ から \mathbf{C} への任意の関手は、積を持つ。
2. \mathbf{J} の射を対象とする離散圏 $\hat{\mathbf{J}}$ について、 $\hat{\mathbf{J}}$ から \mathbf{C} への任意の関手は、積を持つ。
3. \mathbf{C} の任意の射 f, g は、等化子を持つ。

このとき、 \mathbf{J} から \mathbf{C} への関手 X は極限を持つ。

Proof.

$\hat{\mathbf{J}}$ から $\text{Obj}_{\mathbf{J}}$ への関手 cod , $\text{cod}(\hat{f}) = \text{cod}(f)$ と、 $\text{Obj}_{\mathbf{J}}$ から \mathbf{J} への自明な関手 I を考える。

$P = X \circ I$ と、 $R = X \circ I \circ \text{cod}$ を考える。 P の積を $\prod P, \pi$ 、 R の積を $\prod R, r$ とする。

C から $\text{Func}(\hat{J}, C)$ への対角関手 Δ_1 を考える。

自然変換 $s: \Delta_1(\prod P) \rightarrow R$ 、 $s(j) = \pi(\text{cod}(j))$ を考える。積の定義より、一意な射 $\bar{s}: \prod P \rightarrow \prod R$ が存在して、 $s = r \circ \Delta_1(\bar{s})$ である。

自然変換 $t: \Delta_1(\prod P) \rightarrow R$ 、 $t(j) = X(j) \circ \pi(\text{dom}(j))$ を考える。積の定義より、一意な射 $\bar{t}: \prod P \rightarrow \prod R$ が存在して、 $t = r \circ \Delta_1(\bar{t})$ である。

仮定より、 \bar{s} と \bar{t} の等化子 $\text{Eq}(\bar{s}, \bar{t})$ 、 u が存在する。

C から $\text{Func}(J, C)$ への対角関手 Δ_2 を考える。

$\lambda := \pi \circ \Delta_2(u(\prod P))$ が、 $\Delta_2(\text{Eq}(\bar{s}, \bar{t}))$ から X への自然変換であることを示す。

J の射 j について、等化子と積の定義より以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} X(j) \circ \lambda(\text{dom}(j)) &= X(j) \circ \pi(\text{dom}(j)) \circ \Delta_2(u(\prod P))(\text{dom}(j)) \\ &= X(j) \circ \pi(\text{dom}(j)) \circ u(\prod P) \\ &= t(j) \circ u(\prod P) \\ &= r(j) \circ \bar{t} \circ u(\prod P) \\ &= r(j) \circ \bar{s} \circ u(\prod P) \\ &= s(j) \circ u(\prod P) \\ &= \pi(\text{cod}(j)) \circ u(\prod P) \\ &= \lambda(\text{cod}(j)) \end{aligned}$$

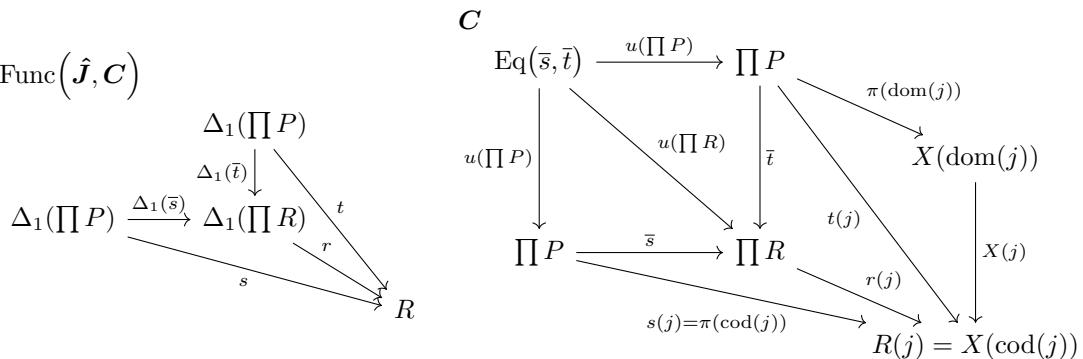
$\text{Eq}(\bar{s}, \bar{t}), \lambda$ が極限であることを示す。

C の対象 y と、自然変換 $p: \Delta_2(y) \rightarrow X$ を考える。

$\prod P$ は積より、一意な C の射 $w: y \rightarrow \prod P$ が存在して、 $\forall j \in \text{Obj}_J(p(j) = \pi(j) \circ w)$ が成り立つ。

等化子より、一意な C の射 $l: y \rightarrow \text{Eq}(\bar{s}, \bar{t})$ が存在して、 $w = u(\prod P) \circ l$ である。

したがって、一意な C の射 l が存在して、 $p = \lambda \circ \Delta_2(l)$ である。 ■

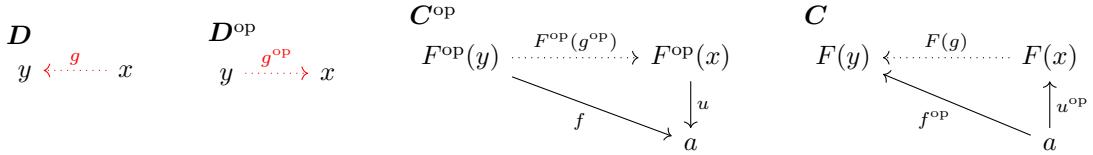


2.7 余普遍

Def. 2.7.1. 余普遍射

圏 C, D と、 D から C への関手 F 、 C の対象 a を考える。

a から F への余普遍射とは、 F^{op} から a への普遍射 x, u について、 x, u^{op} である。



Def. 2.7.2. 始対象

圏 C を考える。

C^{op} の終対象を、 C の始対象と呼ぶ。

Def. 2.7.3. 余極限

圏 C, D と、 C から $\text{Func}(D, C)$ への対角関手 Δ を考える。

D から C への関手 X について、 X から Δ への余普遍射を X の余極限と呼ぶ。

Def. 2.7.4. 和

離散圏 J 、圏 C と、 J から C への関手 X を考える。

このとき、 X の余極限を X の和と呼ぶ。

Def. 2.7.5. 押し出し

圏 C と、 C の射 f, g を考える。 $\text{dom}(f) = \text{dom}(g)$ とする。

このとき、 $f^{\text{op}}, g^{\text{op}}$ の引き戻しを、 f, g の押し出しと呼ぶ。

Def. 2.7.6. 余等化子

圏 C と、 C の射 f, g を考える。 $\text{dom}(f) = \text{dom}(g) \wedge \text{cod}(f) = \text{cod}(g)$ とする。

このとき、 $f^{\text{op}}, g^{\text{op}}$ の等化子を、 f, g の余等化子と呼ぶ。

Lem. 2.7.1. 余等化子から得る全射

f と g の余等化子 x, u について、 $u(\text{cod}(f))$ は全射である。

Proof.

補題 2.6.2 より、双対性から明らか。 ■

Thm. 2.7.2. 余極限の存在定理

以下を満たす圏 J, C を考える。

1. Obj_J から C への任意の関手は、和を持つ。
2. J の射を対象とする離散圏 \hat{J} について、 \hat{J} から C への任意の関手は、和を持つ。
3. C の任意の射 f, g は、余等化子を持つ。

このとき、 J から C への関手 X は余極限を持つ。

Proof.

定理 2.6.3 より、双対性より明らか。 ■

2.8 随伴

Def. 2.8.1. 左随伴関手

圏 C, D を考える。

D から C への関手 F について、 C から D への関手 G と、自然変換 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_C$ が存在して、以下を満たすとする。

$$\forall c \in \text{Obj}_C (G(c), \epsilon(c) \text{ は、 } F \text{ から } c \text{ への普遍射である。})$$

このとき F を、右随伴が G で余単位を ϵ とする左随伴関手と呼ぶ。

Lem. 2.8.1. 随伴の一意性

圏 C, D と、 D から C への関手 F 、 C から D への関手 G, G' と、自然変換 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_C, \epsilon': F \circ G' \rightarrow \text{id}_C$ を考える。

F は、右随伴が G で余単位を ϵ とする左随伴関手であり、右随伴が G' で余単位を ϵ' とする左随伴関手であるとする。

このとき自然同型 $\theta: G \rightarrow G'$ が存在して、以下が成り立つ。

$$\epsilon' \circ (F * \theta) = \epsilon$$

Proof.

$\forall c \in \text{Obj}_C$ について、 $G'(c), \epsilon'(c)$ は F から c への普遍射である。

ゆえに一意な D の射 α が存在して、 $\epsilon(c) = \epsilon'(c) \circ F(\alpha)$ が成り立つ。

c に対して α を与えるアリティ 1 の関数記号を、 θ とする。

θ が G から G' への自然変換であることを示す。

C の射 f を考える。 ϵ, ϵ' の自然性と、 θ の定義より以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon'(\text{cod}(f)) \circ F(\theta(\text{cod}(f)) \circ G(f)) &= \epsilon'(\text{cod}(f)) \circ (F * \theta)(\text{cod}(f)) \circ (F \circ G)(f) \\ &= \epsilon(\text{cod}(f)) \circ (F \circ G)(f) \\ &= f \circ \epsilon(\text{dom}(f)) \\ &= f \circ \epsilon'(\text{dom}(f)) \circ (F * \theta)(\text{dom}(f)) \\ &= \epsilon'(\text{cod}(f)) \circ (F \circ G)(f) \circ (F * \theta)(\text{dom}(f)) \\ &= \epsilon'(\text{cod}(f)) \circ F(G(f) \circ \theta(\text{dom}(f))) \end{aligned}$$

普遍性より、 $\theta(\text{cod}(f)) \circ G(f) = G(f) \circ \theta(\text{dom}(f))$ である。

ゆえに、 θ は自然変換である。

自然同型であることを示す。

同様に自然変換 $\zeta: G' \rightarrow G$ を考えることができる。

定義より、 $\forall c \in C$ について以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon(c) &= \epsilon'(c) \circ F(\theta(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ F(\zeta(c)) \circ F(\theta(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ F(\zeta(c) \circ \theta(c)) \end{aligned}$$

普遍性より、 $\zeta(c) \circ \theta(c) = G(c)$ である。

すなわち、 ζ は θ の逆射である。 ■

Thm. 2.8.2. 三角恒等式

圏 C, D と、 D から C への関手 F 、 C から D への関手 G 、自然変換 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_C$ を考える。

F は、右随伴が G で余単位を ϵ とする左随伴関手であるとする。

このとき、自然変換 $\eta: \text{id}_D \rightarrow G \circ F$ が存在して、以下を満たす。

$$\begin{aligned} F &= (\epsilon * F) \circ (F * \eta) \\ G &= (G * \epsilon) \circ (\eta * G) \end{aligned}$$

Proof.

まず第一式と、自然変換であることを示す。

$d \in \text{Obj}_D$ について、 $(G \circ F)(d), (\epsilon * F)(d)$ は F から $F(d)$ への普遍射である。

したがって、 d と恒等射 $F(d)$ について、射 g が一意に存在して、 $F(d) = (\epsilon * F)(d) \circ F(g)$ である。

d に対して、この g を与える関数記号を η とする。

D の射 $f: d \rightarrow d'$ を考える。

$$\begin{aligned} (\epsilon * F)(d') \circ F((G \circ F)(f) \circ \eta(d)) &= (\epsilon * F)(d') \circ (F \circ G \circ F)(f) \circ (F * \eta)(d) \\ &= F(f) \circ (\epsilon * F)(d) \circ (F * \eta)(d) \\ &= F(f) \\ &= (\epsilon * F)(d') \circ (F * \eta)(d') \circ F(f) \\ &= (\epsilon * F)(d') \circ F(\eta(d') \circ f) \end{aligned}$$

$(G \circ F)(d'), (\epsilon * F)(d')$ は、 F から $F(d')$ への普遍射であるため、 d と $F(f)$ について、 $F(f) = (\epsilon * F)(d') \circ F(f)$ なる e が一意に存在する。

したがって、 $e = (G \circ F)(f) \circ \eta(d) = \eta(d') \circ f$ である。

ゆえに、 η は自然変換である。

第二式を示す。

$c \in \text{Obj}_C$ を考える。

ϵ は自然変換であるので、射 $w: (F \circ G)(c) \rightarrow c$ について $\epsilon(c) \circ (F \circ G)(w) = w \circ \epsilon(F \circ G(c))$ である。

$w = \epsilon(c)$ として、 $\epsilon(c) \circ (F \circ G)(\epsilon(c)) = \epsilon(c) \circ \epsilon(F \circ G(c))$ である。

第一式より、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon(c) &= \epsilon(c) \circ F(G(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ (\epsilon * F)(G(c)) \circ (F * \eta)(G(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ \epsilon((F \circ G)(c)) \circ F((\eta * G)(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ (F \circ G)(\epsilon(c)) \circ F((\eta * G)(c)) \\ &= \epsilon(c) \circ F(((G * \epsilon) \circ (\eta * G))(c)) \end{aligned}$$

$G(c), \epsilon(c)$ は F から c への普遍射であるため、 $G(c)$ と $\epsilon(c): F(G(c)) \rightarrow c$ について、一意な射 $i: G(c) \rightarrow G(c)$ が存在して、 $\epsilon(c) = \epsilon(c) \circ F(i)$ である。

$i = G(c)$ は明らかに条件を満たすので、一意性より以下を得る。

$$((G * \epsilon) \circ (\eta * G))(c) = G(c)$$

■

$$\begin{array}{ccc}
& \textbf{C} & \\
F(d) & \xrightarrow{(F*\eta)(d)} & (F \circ G \circ F)(d) \\
\downarrow F(f) & \searrow F(d) & \swarrow (\epsilon*F)(d) \\
F(d') & \xrightarrow{(F*\eta)(d')} & (F \circ G \circ F)(d') \\
\downarrow F(f) & \searrow (\epsilon*F)(d') & \swarrow F(d') \\
& F(d') &
\end{array}$$

$$\begin{array}{ccc}
& \textbf{D} & \\
d & \xrightarrow{\eta(d)} & (G \circ F)(d) \\
\downarrow f & & \downarrow (G \circ F)(f) \\
d' & \xrightarrow{\eta(d')} & (G \circ F)(d')
\end{array}$$

Def. 2.8.2. 右随伴関手

圏 \textbf{C}, \textbf{D} と、 \textbf{D} から \textbf{C} への関手 F 、 \textbf{C} から \textbf{D} への関手 G 、自然変換 $\eta: \text{id}_{\textbf{D}} \rightarrow G \circ F$ を考える。

G^{op} が、右随伴が F^{op} で余単位を η^{op} とする左随伴関手であるとする。

このとき G を、左随伴が F で単位を η とする右随伴関手と呼ぶ。

Thm. 2.8.3. 三角恒等ならば随伴

圏 \textbf{C}, \textbf{D} を考える。

\textbf{D} から \textbf{C} への関手 F 、 \textbf{C} から \textbf{D} への関手 G と、自然変換 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_{\textbf{C}}, \eta: \text{id}_{\textbf{D}} \rightarrow G \circ F$ について、以下を満たすとする。

$$\begin{aligned}
F &= (\epsilon * F) \circ (F * \eta) \\
G &= (G * \epsilon) \circ (\eta * G)
\end{aligned}$$

このとき、 F は右随伴が G で余単位を ϵ とする左随伴関手となり、 G は左随伴が F で単位を η とする右随伴関手となる。

Proof.

双対性から、 F が左随伴関手であることを示せば十分である。

\textbf{C} の任意の対象 a について、 $G(a), \epsilon(a)$ が F から a への普遍射となることを示す。

\textbf{D} の対象 y と、 \textbf{C} の射 $f: F(y) \rightarrow a$ を考える。

このとき、 $g := G(f) \circ \eta(y)$ を考えると、 ϵ の自然性と $F = (\epsilon * F) \circ (F * \eta)$ より、以下が成り立つ。

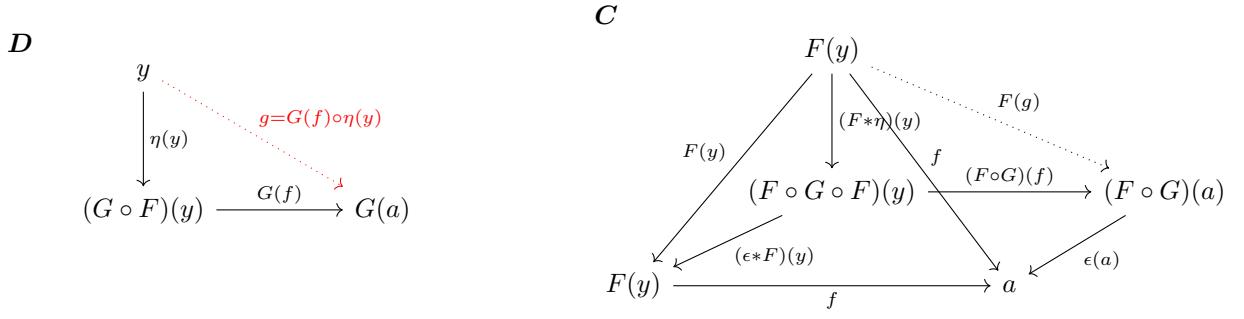
$$\begin{aligned}
\epsilon(a) \circ F(g) &= \epsilon(a) \circ (F \circ G)(f) \circ (F * \eta)(y) \\
&= f \circ (\epsilon * F)(y) \circ (F * \eta)(y) \\
&= f \circ F(y) \\
&= f
\end{aligned}$$

次に、 \textbf{D} の射 $g': y \rightarrow G(a)$ が存在して、 $f = \epsilon(a) \circ F(g')$ であるとする。

このとき、 $G = (G * \epsilon) \circ (\eta * G)$ と η の自然性より、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}
g' &= G(a) \circ g' \\
&= (G * \epsilon)(a) \circ (\eta * G)(a) \circ g' \\
&= (G * \epsilon)(a) \circ (G \circ F)(g') \circ \eta(y) \\
&= G(\epsilon(a) \circ F(g')) \circ \eta(y) \\
&= G(f) \circ \eta(y) \\
&= g
\end{aligned}$$

ゆえに一意である。 ■



Lem. 2.8.4. 圈同値ならば隨伴

圈 **C, D** について、**C** と **D** が圈同値であるとする。

定義 2.5.8 の主張する F, G, ϵ, θ について、 F は、 G を右隨伴で ϵ を余単位とする左隨伴関手である。

Proof.

???

Thm. 2.8.5. 左隨伴は余極限を保存する

圈 **J, C, D** と、**J** から **D** への関手 X 、**D** から **C** への関手 F 、**C** から **D** への関手 G と、自然変換 $\epsilon: F \circ G \rightarrow \text{id}_C, \eta: \text{id}_D \rightarrow G \circ F$ を考える。

F は右隨伴が G で余単位を ϵ とする左隨伴関手であるとする。

x, u が X の余極限であるならば、 $F(x), F * u$ は $F \circ X$ の余極限である。

Proof.

D から $\text{Func}(\mathbf{J}, \mathbf{D})$ への対角関手を Δ_D 、**C** から $\text{Func}(\mathbf{J}, \mathbf{C})$ への対角関手を Δ_C とする。

C の対象 y と、 $F \circ X$ から $\Delta_C(y)$ への自然変換 f を考える。

$G(y), \epsilon(y)$ は、 F から y への普遍射である。

したがって **J** の任意の対象 j について、 $\epsilon(y) \circ F(w(j)) = f(j)$ を満たす射 $w(j)$ が一意に存在する。

ここで、 f は $F \circ X$ から $\Delta_C(y)$ への自然性であるので、**J** の任意の対象 j, j' について以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \epsilon(y) \circ F(w(j') \circ X(i)) &= \epsilon(y) \circ F(w(j')) \circ (F \circ X)(i) \\ &= f(j') \circ (F \circ X)(i) \\ &= f(j) \\ &= \epsilon(y) \circ F(w(j)) \end{aligned}$$

一意性より、 $w(j') \circ X(i) = w(j)$ である。よって、 w は X から Δ_D への自然変換である。

x, u は X から Δ_D への余普遍射であるので、 $w = \Delta_D(h) \circ u$ を満たす **D** の射 h が一意に存在する。

ここで、 $g := \epsilon(y) \circ F(h)$ とすると、**J** の任意の対象 j について以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} g \circ (F * u)(j) &= \epsilon(y) \circ F(h) \circ (F * u)(j) \\ &= \epsilon(y) \circ F(h \circ u(j)) \\ &= \epsilon(y) \circ (F * w)(j) \\ &= f(j) \end{aligned}$$

したがって、 $\Delta_C(g) \circ (F * u) = f$ である。

次に、**C** の射 g' が存在して、 $\Delta_C(g') \circ (F * u) = f$ であるとする。

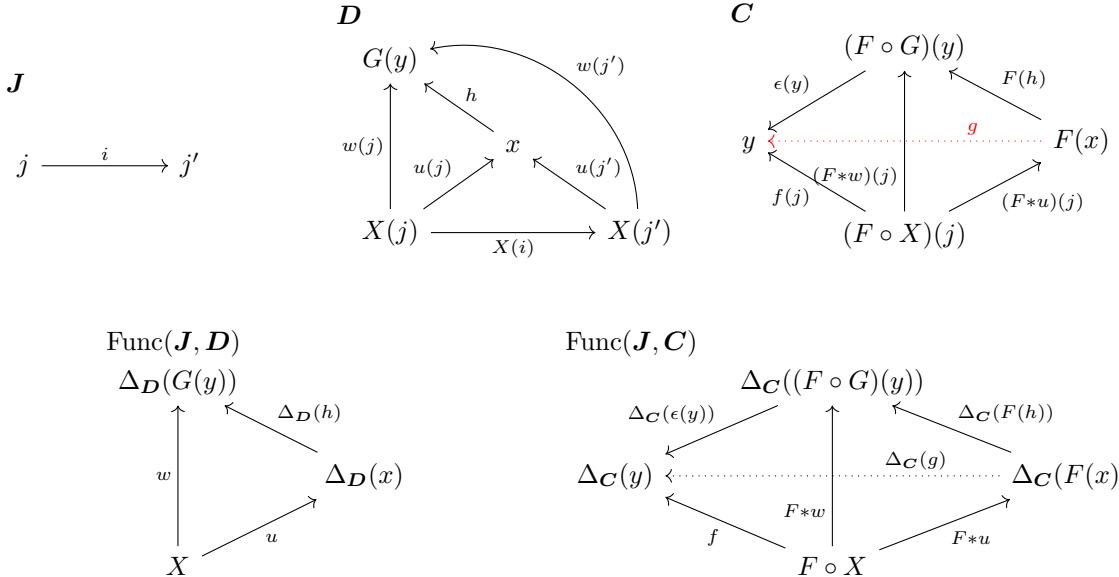
$G(y), \epsilon(y)$ は F から y への普遍射であるため、 $g' = \epsilon(y) \circ F(h')$ を満たす **D** の射 h' が一意に存在する。

\mathbf{J} の任意の対象 j について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\epsilon(y) \circ F(h \circ u(j)) &= f(j) \\ &= g'(j) \circ (F * u)(j) \\ &= \epsilon(y) \circ F(h') \circ (F * u)(j) \\ &= \epsilon(y) \circ F(h' \circ u(j))\end{aligned}$$

再び $G(y), \epsilon(y)$ は F から y への普遍射であるため、一意性より $h \circ u(j) = h' \circ u(j)$ である。ゆえに、 $\Delta_{\mathbf{D}}(h') \circ u = \Delta_{\mathbf{D}}(h) \circ u$ である。

x, u は、 X の余極限であるため、一意性より $h = h'$ である。したがって、 $g = g'$ である。 ■



3 集合論

3.1 集合論の述語

Def. 3.1.1. 集合

集合論では、9つの公理（公理 3.2.1、公理 3.2.2、公理 3.2.3、公理 3.2.4、公理 3.6.1、公理 3.3.1、公理 3.3.2、公理 3.4.1、公理 3.2.5）が与えられる。

項を集合と呼ぶ。

Def. 3.1.2. 所属

アリティ 2 の述語記号 \in を定める。

$\in (x, y)$ を、簡単のために $x \in y$ で表す。

Rem. 3.1.1. 集合は類

集合 y について、 $\in (, y)$ はアリティ 1 の述語、すなわち類となる。

ここで、類の \in と、所属の \in は同一視される。

一方で、類に対して対応する集合を一般には与えることができない点に注意されたい。

Def. 3.1.3. 要素

集合 x, X について、 $x \in X$ であるとき、 x は X の要素または元と呼ぶ。

Rem. 3.1.2. 集合系

その要素に要素があることを強調したいとき、この集合を集合系と呼ぶ。

Def. 3.1.4. 包含

集合 X, Y について、アリティ 2 の述語記号 \subset を以下で定める。

$$\subset (X, Y) : \leftrightarrow \forall x(x \in X \rightarrow x \in Y)$$

$\subset (X, Y)$ を、簡単のために $X \subset Y$ で表す。

Def. 3.1.5. 真包含

集合 X, Y について、アリティ 2 の述語記号 \subsetneq を以下で定める。

$$\subsetneq (X, Y) : \leftrightarrow X \subset Y \wedge X \neq Y$$

$\subsetneq (X, Y)$ を、簡単のために $X \subsetneq Y$ で表す。

Def. 3.1.6. 左包含

集合 X, Y について、アリティ 2 の述語記号 \supset を以下で定める。

$$\supset (X, Y) : \leftrightarrow Y \subset X$$

$\supset (X, Y)$ を、簡単のために $X \supset Y$ で表す。

Def. 3.1.7. 左真包含

集合 X, Y について、アリティ 2 の述語記号 \supsetneq を以下で定める。

$$\supsetneq (X, Y) : \leftrightarrow Y \subsetneq X$$

$\supsetneq (X, Y)$ を、簡単のために $X \supsetneq Y$ で表す。

3.2 集合の構成

Ax. 3.2.1. 外延性の公理

$$\forall X \forall Y (\forall x(x \in X \leftrightarrow x \in Y) \rightarrow X = Y)$$

Cor. 3.2.1. 相等の定義

以下が成り立つ。

$$\forall X \forall Y (X = Y \leftrightarrow \forall x(x \in X \leftrightarrow x \in Y))$$

Cor. 3.2.2. 包含の半順序性

以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \forall X (X \subset X) \\ & \forall X \forall Y (X \subset Y \wedge Y \subset X \rightarrow X = Y) \\ & \forall X \forall Y \forall Z (X \subset Y \wedge Y \subset Z \rightarrow X \subset Z) \end{aligned}$$

Rem. 3.2.1. 集合の外延的定義

公理 3.2.1 より、全ての要素を書き下せば集合は一意に定まる。このような全ての要素を書き下す集合の定義方法を、外延的定義と呼ぶ。

例えば、要素が x, y, z であり、かつ、それのみである集合 X に対して以下のような定義をする。

$$X = \{x, y, z\}$$

Ax. 3.2.2. 空集合の公理

$$\exists A \forall x (x \notin A)$$

Def. 3.2.1. 空集合

公理 3.2.1 から、公理 3.2.2 が主張する集合が一意に定まる。この集合を空集合と呼び、 \emptyset で表す。
外延的に $\{\}$ とも表す。

Cor. 3.2.3.

$$\forall X (\emptyset \subset X)$$

Ax. 3.2.3. 対の公理

$$\forall x \forall y \exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow t = x \vee t = y)$$

Def. 3.2.2. 単集合

$x = y$ を考えることで、集合 $\{x, x\}$ が存在する。この集合は、公理 3.2.1 から、 $\{x\}$ とも表せる。
このような单一の元からなる集合を単集合 (singleton) と呼ぶ。

Ax. 3.2.4. 正則性の公理

$$\forall X (X \neq \emptyset \rightarrow \exists x (x \in X \wedge \forall y (y \in X \rightarrow y \notin x)))$$

Lem. 3.2.4.

$$\forall x \forall y (x \notin y \vee y \notin x)$$

Proof.

公理 3.2.3 より、 $\{x, y\}$ が存在する。

公理 3.2.4 より、

$$\exists z (z \in \{x, y\} \wedge \forall t (t \in \{x, y\} \wedge t \notin z))$$

よって、

$$\forall t (t \in \{x, y\} \wedge t \notin x) \vee \forall t (t \in \{x, y\} \wedge t \notin y)$$

ゆえに、

$$(x \notin x \wedge y \notin x) \vee (x \notin y \wedge y \notin y)$$

したがって、

$$y \notin x \vee x \notin y$$

■

Cor. 3.2.5.

$$\forall x(x \notin x)$$

Ax. 3.2.5. 選択の公理

$$\forall X(\emptyset \notin X \wedge \forall x \forall y(x \in X \wedge y \in X \wedge x \neq y \rightarrow x \cap y = \emptyset) \rightarrow \exists A \forall x(x \in X \rightarrow \exists t(x \cap A = \{t\})))$$

3.3 集合の和と幕

Ax. 3.3.1. 和集合の公理

$$\forall X \exists A \forall t(t \in A \leftrightarrow \exists B(t \in B \wedge B \in X))$$

Def. 3.3.1. 和集合

集合系 X について、公理 3.3.1 の主張する集合 A が存在して、これは公理 3.2.1 から一意に定まる。このような集合 A を、 X の和集合と呼び、 $\bigcup X$ で表す。

和集合 $\bigcup \{x, y\}$ を、簡単のために $x \cup y$ とも表す。

Cor. 3.3.1.

$$\forall X \forall x(x \in X \rightarrow x \subset \bigcup X)$$

Cor. 3.3.2.

$$\forall X \forall Y(X \subset Y \rightarrow \bigcup X \subset \bigcup Y)$$

Cor. 3.3.3.

$$\forall x \forall y \forall z(x \subset y \rightarrow x \cup z \subset y \cup z)$$

Cor. 3.3.4.

$$\bigcup \emptyset = \emptyset$$

Cor. 3.3.5.

$$\forall x \left(\bigcup \{x\} = x \right)$$

Ax. 3.3.2. 幕集合の公理

$$\forall X \exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow t \subset X)$$

Def. 3.3.2. 幕集合

集合 X について、公理 3.3.2 の主張する集合 A が存在して、これは公理 3.2.1 から一意に定まる。このような集合 A を、幕集合と呼び、 $\mathfrak{P}(X)$ で表す。

Rem. 3.3.1. 包含される量化子についての略記

略記 $\forall \subset, \exists \subset$ を以下で定める。

$$\begin{aligned}\forall x \subset X(p(x)) &:\leftrightarrow \forall x \in \mathfrak{P}(X)(p(x)) \\ \exists x \subset X(p(x)) &:\leftrightarrow \exists x \in \mathfrak{P}(X)(p(x))\end{aligned}$$

Cor. 3.3.6.

$$\forall X (\emptyset \in \mathfrak{P}(X) \wedge X \in \mathfrak{P}(X))$$

Cor. 3.3.7.

$$\forall X (\mathfrak{P}(X) \notin X)$$

Cor. 3.3.8.

$$\forall X \forall Y (X \subset Y \rightarrow \mathfrak{P}(X) \subset \mathfrak{P}(Y))$$

Cor. 3.3.9.

$$\mathfrak{P}(\emptyset) = \{\emptyset\}$$

Cor. 3.3.10.

$$\forall x(\mathfrak{P}(\{x\}) = \{\emptyset, \{x\}\})$$

Cor. 3.3.11.

$$\forall X \left(\bigcup \mathfrak{P}(X) = X \right)$$

Def. 3.3.3. 被覆

集合 A について、以下を満たす集合 X を A の被覆と呼ぶ。

$$X \subset \mathfrak{P}(A) \wedge A = \bigcup X$$

3.4 集合の置換

Ax. 3.4.1. 置換の公理図式

アリティ 2 の述語記号 ψ をパラメータとする以下の公理図式を考える。

$$\forall x \forall y \forall z (\psi(x, y) \wedge \psi(x, z) \rightarrow y = z) \rightarrow \forall X \exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow \exists x (x \in X \wedge \psi(x, t)))$$

Rem. 3.4.1. 集合の内包的定義 1

公理 3.2.1 より、公理 3.4.1 より主張される集合 A は一意に定まる。公理 3.4.1 に基づく定義方法を、内包的定義と呼び、公理 3.4.1 の前件を満たすアリティ 2 の述語記号 ψ について、以下で表す。

$$A = \{y \mid \exists x \in X (\psi(x, y))\}$$

Thm. 3.4.1. 分出の公理図式

アリティ 1 の述語記号 ψ について、以下が成り立つ。

$$\forall X \exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow t \in X \wedge \psi(t))$$

Proof.

アリティ 1 の述語記号 P を考える。排中律より、

$$\forall X (\exists a (a \in X \wedge P(a)) \vee \forall a \neg(a \in X \wedge P(a)))$$

$\forall a \neg(a \in X \wedge P(a))$ のとき、 $A = \emptyset$ で示される。

$\exists a (a \in X \wedge P(a))$ のとき、以下のようないべくアリティ 2 の述語記号 ψ を考える。

$$\psi(x, y) : \leftrightarrow (P(x) \wedge y = x) \vee (\neg P(x) \wedge y = a)$$

公理 3.4.1 より、

$$\exists A \forall y (y \in A \leftrightarrow \exists x (x \in X \wedge ((P(x) \wedge y = x) \vee (\neg P(x) \wedge y = a))))$$

すなわち、

$$\exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow \exists x ((x \in X \wedge P(x) \wedge t = x) \vee (x \in X \wedge \neg P(x) \wedge t = a)))$$

\exists を除去して、

$$\exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow (t \in X \wedge P(t)) \vee t = a)$$

$t = a \rightarrow (a \in X \wedge P(a))$ より、

$$\exists A \forall t (t \in A \leftrightarrow t \in X \wedge P(t))$$

■

Rem. 3.4.2. 集合の内包的定義 2

公理 3.2.1 より、定理 3.4.1 より主張される集合 A は一意に定まる。定理 3.4.1 に基づく定義方法も、内包的定義と呼び、以下で表す。

$$A = \{t \mid t \in X \wedge \psi(t)\}$$

簡単のために、以下でも表す。

$$A = \{t \in X \mid \psi(t)\}$$

Def. 3.4.1. 共通集合

集合系 X について、以下で定める集合を、 X の共通集合と呼び、 $\bigcap X$ で表す。

$$\bigcap X := \left\{ x \mid x \in \bigcup X \wedge \forall Y (Y \in X \rightarrow x \in Y) \right\}$$

共通集合 $\bigcap \{x, y\}$ を、簡単のために $x \cap y$ とも表す。

Rem. 3.4.3. 共通集合の定義について

本ノートにおける共通集合の定義は、 $\bigcap \emptyset$ の取り扱いにおいて一般的ではないことに注意されたい。

Cor. 3.4.2.

$$\bigcap \emptyset = \emptyset$$

Cor. 3.4.3.

$$\forall x \forall X (x \in X \rightarrow \bigcap X \subset x)$$

Cor. 3.4.4.

$$\forall x \forall y \forall z (x \subset y \rightarrow x \cap z \subset y \cap z)$$

Cor. 3.4.5.

$$\forall X \forall Y (X \neq \emptyset \wedge X \subset Y \rightarrow \bigcap Y \subset \bigcap X)$$

Cor. 3.4.6.

$$\forall x (\bigcap \{x\} = x)$$

Cor. 3.4.7. 吸収法則

$$\begin{aligned}\forall x \forall y (x \cup (x \cap y) &= x) \\ \forall x \forall y (x \cap (x \cup y) &= x)\end{aligned}$$

Cor. 3.4.8. 分配法則

$$\begin{aligned}\forall x \forall y \forall z (x \cup (y \cap z) &= (x \cup y) \cap (x \cup z)) \\ \forall x \forall y \forall z (x \cap (y \cup z) &= (x \cap y) \cup (x \cap z))\end{aligned}$$

Cor. 3.4.9.

$$\forall X (\bigcap X \subset \bigcup X)$$

Cor. 3.4.10.

$$\forall X \forall Y (\mathfrak{P}(X) \cap \mathfrak{P}(Y) = \mathfrak{P}(X \cap Y))$$

Def. 3.4.2. 分割

集合 A について、以下のを満たす A の被覆 X を A の分割と呼ぶ。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow x \cap y = \emptyset)$$

明示的に以下で表す。

$$A = \bigsqcup X$$

Def. 3.4.3. 差集合

集合 X, Y について、以下のを定める集合を、 X と Y の差集合と呼び、 $X \setminus Y$ で表す。

$$X \setminus Y := \{x \mid x \in X \wedge x \notin Y\}$$

Cor. 3.4.11.

$$\forall X \forall Y (X \setminus Y \subset X)$$

Cor. 3.4.12.

$$\begin{aligned}\forall X (X \setminus X = \emptyset) \\ \forall X (X \setminus \emptyset = X) \\ \forall X (\emptyset \setminus X = \emptyset)\end{aligned}$$

Cor. 3.4.13.

$$\forall X \forall Y \forall Z (X \setminus (Y \setminus Z) = (X \setminus Y) \cup (X \cap Z))$$

Cor. 3.4.14.

$$\forall X \forall Y \forall Z (Y \subset Z \rightarrow X \setminus Z \subset X \setminus Y)$$

Cor. 3.4.15.

$$\forall X \forall Y (X \subset Y \leftrightarrow X \setminus Y = \emptyset)$$

Thm. 3.4.16. De Morgan の法則

集合 X と空でない集合系 A について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}X \setminus \bigcup A &= \bigcap \{X \setminus Y \mid Y \in A\} \\ X \setminus \bigcap A &= \bigcup \{X \setminus Y \mid Y \in A\}\end{aligned}$$

Proof.

第一の定理を示す。

$$\begin{aligned}x \in X \setminus \bigcup A &\leftrightarrow x \in X \wedge x \notin \bigcup A \\ &\leftrightarrow x \in X \wedge \forall Y (Y \in A \rightarrow x \notin Y) \leftrightarrow x \in X \wedge \forall Y (Y \in A \rightarrow x \notin X \setminus Y)\end{aligned}$$

$A \neq \emptyset$ より、

$$\leftrightarrow x \in X \wedge x \in \bigcap \{X \setminus Y \mid Y \in A\} \leftrightarrow x \in \bigcap \{X \setminus Y \mid Y \in A\}$$

第二の定理を示す。

$$\begin{aligned}
x \in X \setminus \bigcap A &\leftrightarrow x \in X \wedge x \notin \bigcap A \leftrightarrow x \in X \wedge (x \notin \bigcup A \vee \exists Y(Y \in A \wedge x \notin Y)) \\
&\leftrightarrow x \in X \setminus \bigcup A \vee \exists Y(Y \in A \wedge x \in X \setminus Y) \\
&\leftrightarrow x \in X \setminus \bigcup A \vee x \in \bigcup \{X \setminus Y \mid Y \in A\} \\
&\leftrightarrow x \in \bigcap \{X \setminus Y \mid Y \in A\} \vee x \in \bigcup \{X \setminus Y \mid Y \in A\} \\
&\leftrightarrow x \in \bigcup \{X \setminus Y \mid Y \in A\}
\end{aligned}$$

最後から 2 行目への変形には、第一の定理を用いた。 ■

3.5 順序対と集合の直積

Def. 3.5.1. 順序対

公理 3.2.3 から、 $\{\{x\}, \{x, y\}\}$ が存在する。このような集合を、順序対と呼び、 (x, y) で表す。

Cor. 3.5.1. 順序対の相等

$$\forall x_1 \forall x_2 \forall y_1 \forall y_2 ((x_1, x_2) = (y_1, y_2) \leftrightarrow x_1 = y_1 \wedge x_2 = y_2)$$

Cor. 3.5.2. 順序対の順序性

$$\forall x \forall y (x \neq y \rightarrow (x, y) \neq (y, x))$$

Cor. 3.5.3. 順序対の取り出し

$$\begin{aligned}
\forall x \forall y (x = \bigcup \bigcap (x, y)) \\
\forall x \forall y (y = \bigcup \bigcap (x, y) \wedge (\bigcap (x, y) = \bigcap (x, y))) \vee (y = \bigcup (\bigcup (x, y) \setminus \bigcap (x, y)) \wedge (\bigcap (x, y) \neq \bigcap (x, y)))
\end{aligned}$$

Lem. 3.5.4.

$$\forall X \forall Y \forall x \forall y (x \in X \wedge y \in Y \rightarrow (x, y) \in \mathfrak{P}(\mathfrak{P}(X \cup Y)))$$

Proof.

$$\begin{aligned}
&x \in X \wedge y \in Y \\
&\{x\} \in \mathfrak{P}(X \cup Y) \wedge \{x, y\} \in \mathfrak{P}(X \cup Y) \\
&(x, y) \in \mathfrak{P}(\mathfrak{P}(X \cup Y))
\end{aligned}$$

Def. 3.5.2. 直積集合

集合 X, Y について、以下を満たす集合を X と Y の直積集合と呼び、 $X \times Y$ で表す。

$$X \times Y := \{z \in \mathfrak{P}(\mathfrak{P}(X \cup Y)) \mid \exists x \exists y (x \in X \wedge y \in Y \wedge z = (x, y))\}$$

Cor. 3.5.5.

$$\forall X (X \times \emptyset = \emptyset \times X = \emptyset)$$

Cor. 3.5.6.

$$\begin{aligned}\forall X_1, X_2, Y ((X_1 \cup X_2) \times Y &= (X_1 \times Y) \cup (X_2 \times Y)) \\ \forall X_1, X_2, Y_1, Y_2 ((X_1 \cap X_2) \times (Y_1 \cap Y_2) &= (X_1 \times Y_1) \cap (X_2 \times Y_2)) \\ \forall X_1, X_2, Y ((X_1 \setminus X_2) \times Y &= (X_1 \times Y) \setminus (X_2 \times Y))\end{aligned}$$

3.6 無限系譜

Ax. 3.6.1. 無限の公理

$$\exists A (\emptyset \in A \wedge \forall x (x \in A \rightarrow x \cup \{x\} \in A))$$

Def. 3.6.1. 無限系譜

集合 X が無限系譜であるとは、以下を満たすことである。

$$\emptyset \in X \wedge \forall x (x \in X \rightarrow x \cup \{x\} \in X)$$

公理 3.6.1 より無限系譜は存在する。

Cor. 3.6.1.

$$\forall X \forall Y (X \text{ は無限系譜である} \wedge Y \text{ は無限系譜である} \rightarrow X \cap Y \text{ は無限系譜である})$$

Lem. 3.6.2.

以下が成り立つ。

$$\forall A (\emptyset \neq A \wedge \forall X \in A (X \text{ は無限系譜である}) \rightarrow \bigcap A \text{ は無限系譜である})$$

Proof.

空でない A を考える。

$\forall X \in A (\emptyset \in X)$ であるので、 $\emptyset \in \bigcap A$ である。

$\forall x \in \bigcap A$ について、 $\forall X \in A (x \in X)$ であり、無限系譜であることから $x \cup \{x\} \in X$ である。

ゆえに、 $x \cup \{x\} \in \bigcap A$ である。

よって、 $\bigcap A$ は無限系譜である。 ■

Lem. 3.6.3.

無限系譜 X について、以下で定める集合は無限系譜である。

$$\bigcap \{Y \subset X \mid Y \text{ は無限系譜である}\}$$

Proof.

$A := \{Y \subset X \mid Y \text{ は無限系譜である}\}$ とすると、 $X \in A$ より、 $A \neq \emptyset$ である。

補題 3.6.2 より成り立つ。 ■

Lem. 3.6.4. 最小無限系譜の一意性

補題 3.6.3 で定める集合は、無限系譜 X の取り方によらずに一意に定まる。

Proof.

$\omega(X) := \bigcap \{Y \subset X \mid Y \text{ は無限系譜である}\}$ とする。

X_1, X_2 の 2 つの無限系譜を考える。

補題 3.6.2 より $X_1 \cap X_2$ も無限系譜であり、定義より $\omega(X_2) \subset X_1 \cap X_2 \subset X_1$ である。

定義より、 $\omega(X_1) \subset \omega(X_2)$ である。

同様に $\omega(X_1) \supset \omega(X_2)$ であるため、示される。 ■

4 写像

4.1 関係

Def. 4.1.1. 関係

集合 X, Y と、集合系 $G \subset X \times Y$ について、順序対 $\mathfrak{R} := ((X, Y), G)$ を関係と呼ぶ。

記号の濫用であるが、 \mathfrak{R} を以下で定めるアリティ 2 の述語としても扱う。

$$\mathfrak{R}(x, y) : \leftrightarrow (x, y) \in G$$

Def. 4.1.2. 左一意的

関係 \mathfrak{R} が以下を満たすとき、 \mathfrak{R} は左一意的であると言う。

$$\forall w, x (\exists y \in Y (\mathfrak{R}(w, y) \wedge \mathfrak{R}(x, y)) \rightarrow w = x)$$

Def. 4.1.3. 右一意的

関係 \mathfrak{R} が以下を満たすとき、 \mathfrak{R} は右一意的であると言う

$$\forall y, z (\exists x \in X (\mathfrak{R}(x, y) \wedge \mathfrak{R}(x, z)) \rightarrow y = z)$$

Def. 4.1.4. 一対一

関係 \mathfrak{R} が左一意的かつ右一意的であるとき、 \mathfrak{R} は一対一であると言う。

Def. 4.1.5. 左全域的

関係 $\mathfrak{R} = ((X, Y), G)$ が以下を満たすとき、 \mathfrak{R} は左全域的であると言う。

$$\forall x \in X \exists y \in Y (\mathfrak{R}(x, y))$$

Def. 4.1.6. 右全域的

関係 $\mathfrak{R} = ((X, Y), G)$ が以下を満たすとき、 \mathfrak{R} は右全域的であると言う。

$$\forall y \in Y \exists x \in X (\mathfrak{R}(x, y))$$

4.2 写像

Def. 4.2.1. 写像

右一意的かつ左全域的な関係 $f = ((X, Y), G)$ を写像と呼ぶ。

記号の濫用であるが、 $f()$ を以下で定める $x \in X$ についての略記としても扱う。

$$f(x) := \bigcup \{y \in Y \mid \mathfrak{R}(x, y)\}$$

$f(x)$ を x での f の値と呼ぶ。

Rem. 4.2.1. 関数クラスによる写像の定義

集合 X, Y と、関数クラス F について、順序対 $((X, Y), \{(x, F(x)) \mid x \in X\})$ は写像である。

このとき、記号の濫用であるが、この写像を F で表す。

Rem. 4.2.2. 集合の内包的定義 3

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下を満たすアリティ 2 の述語記号 $\psi(x, y)$ を考える。

$$\forall x, y (\psi(x, y) \leftrightarrow y = f(x))$$

f が写像であることから公理 3.4.1 の主張する集合 A が存在する。

A は、より簡潔に以下でも表す。

$$A = \{f(x) \mid x \in X\}$$

Def. 4.2.2. 恒等写像

集合 X について、以下で定める集合系 Δ を考える。

$$\Delta := \{(x, x) \mid x \in X\}$$

写像 $((X, X), \Delta)$ を恒等写像と呼び、 id_X で表す。

Cor. 4.2.1.

集合 X, Y について、以下が成り立つ。

$$X = Y \leftrightarrow \text{id}_X = \text{id}_Y$$

Def. 4.2.3. 合成写像

写像 $f = ((X, Y), G_f), g = ((Y, Z), G_g)$ について、以下で定める集合系 G を考える。

$$G := \{(x, z) \mid \exists y \in Y (y = f(x) \wedge z = g(y))\}$$

関係 $((X, Z), G)$ は写像であり、これを f と g の合成写像、または単に合成と呼び、 $g \circ f$ で表す。

Cor. 4.2.2. 写像の合成の結合法則

写像 $f = ((X, Y), G_f), g = ((Y, Z), G_g), h = ((Z, W), G_h)$ について、以下が成り立つ。

$$(h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$$

Rem. 4.2.3. 写像の相等

写像の相等は、集合の相等により定義される。

これは次のように言い換えることができる。写像 f, g について、 $f = g$ とは、以下を満たすことである。

$$\text{dom}(f) = \text{dom}(g) \wedge \text{cod}(f) = \text{cod}(g) \wedge \forall x \in \text{dom}(f) (f(x) = g(x))$$

Def. 4.2.4. 包含写像

集合 X と、その部分 A について、以下で定める関係 $\iota_{A,X}$ は写像である。

$$\iota_{A,X} := ((A, X), \{(x, x) \mid x \in A\})$$

この $\iota_{A,X}$ を部分写像と呼ぶ。

Def. 4.2.5. 制限写像

写像 $f = ((X, Y), G)$ と、 X の部分 A について、以下で定める写像 $f|_A$ を、 f の A への制限写像、または単に制限と呼ぶ。

$$f|_A := f \circ \iota_{A,X}$$

4.3 集合と写像の圏

Rem. 4.3.1. 写像は射

写像 $f = ((X, Y), G)$ を考える。 $\text{dom}(f)$ を id_X 、 $\text{cod}(f)$ を id_Y として、合成を定義 4.2.3 で定義すると、写像は射の公理をみたす。

ここで記号の濫用であるが、 id_X をして X を表し、 X をして id_X を表す。

Def. 4.3.1. 集合と写像の圏

写像を射とみなすと、写像であることは、圏となる。この圏を、集合と写像の圏と呼び、**Set** と表す。

Cor. 4.3.1.

集合 X, Y について、 $\text{Hom}_{\mathbf{Set}}(X, Y)$ は以下を満たす。

$$f \in \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(X, Y) \leftrightarrow f \in \{((X, Y), G) \mid G \subset X \times Y \wedge G \text{ は右一意かつ左全域}\}$$

Def. 4.3.2. 写像の全体

記号の濫用であるが、 X から Y への写像全体がなす集合を、 $\text{Hom}_{\mathbf{Set}}(X, Y)$ で表す。

$$\text{Hom}_{\mathbf{Set}}(X, Y) := \{((X, Y), G) \mid G \subset X \times Y \wedge G \text{ は右一意かつ左全域}\}$$

Cor. 4.3.2.

以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \forall Y (\text{Hom}_{\mathbf{Set}}(\emptyset, Y) &= \{((\emptyset, Y), \emptyset)\}) \\ \forall X (X \neq \emptyset \rightarrow \text{Hom}_{\mathbf{Set}}(X, \emptyset) &= \emptyset) \end{aligned}$$

Cor. 4.3.3.

単集合は \mathbf{Set} の終対象である。

Cor. 4.3.4.

空集合は \mathbf{Set} の始対象である。

Def. 4.3.3. 空写像

空集合は \mathbf{Set} の始対象であるので、終域 Y について、始域が空集合である写像は一意に定まる。
この写像を Y の空写像と呼ぶ。

Cor. 4.3.5.

写像 $f, g: X \rightarrow Y$ を考える。

以下を満たす $\text{Eq}(f, g), u$ は、 f, g の等価子である。

$$\begin{aligned} \text{Eq}(f, g) &:= \{x \in X \mid f(x) = g(x)\} \\ u(\text{dom}(f)) &:= \iota_{\text{Eq}(f, g), \text{dom}(f)} \end{aligned}$$

Def. 4.3.4. 小さい圏

圏 C について、集合 C が存在して以下を満たすとき、 C を小さいと呼ぶ。

$$\begin{aligned} \forall f \in C (f \in \mathbf{Set}) \\ \forall c \in \text{Obj}_C (c \in C) \end{aligned}$$

Cor. 4.3.6.

小さい圏 J について、 Obj_J は小さい。

Cor. 4.3.7.

小さい離散圏 \mathbf{J} と、 \mathbf{J} から **Set** への関手 X を考える。

このとき、以下で定める $\prod X, \pi$ は X の積である。

$$\prod X := \left\{ f \in \text{Hom}_{\mathbf{Set}} \left(\mathbf{J}, \bigcup \{X(j) \mid j \in \mathbf{J}\} \right) \mid \forall j \in \mathbf{J} (f(j) \in X(j)) \right\}$$

$$\pi(j)(f) := f(j)$$

Cor. 4.3.8.

小さい離散圏 \mathbf{J} と、 \mathbf{J} から **Set** への関手 X を考える。

このとき、以下で定める x, u は X の和である。

$$x := \bigcup \{ \{(j, x) \mid x \in X(j)\} \mid j \in \mathbf{J} \}$$

$$u(j)(x) := (j, x)$$

4.4 選択

Thm. 4.4.1. 選択公理が与える写像

集合 X, Y とアリティ 2 の述語記号 ψ について、 $\forall x \in X \exists y \in Y (\psi(x, y))$ が成り立つとする。

このとき、以下を満たす写像 $f: X \rightarrow Y$ が存在する。

$$\forall x \in X \forall y \in Y (f(x) = y \rightarrow \psi(x, y))$$

Proof.

$X = \emptyset$ のとき、空写像が存在する。

$X \neq \emptyset$ のときを考える。以下の集合 Z を考える。

$$Z := \{ \{(x, y) \mid y \in Y \wedge \psi(x, y)\} \mid x \in X \}$$

Z について公理 3.2.5 の主張する集合 A が存在する。

関係 $((X, Y), A)$ は、仮定より X について左全域的で、 A の定義より右一意的である。 ■

Thm. 4.4.2. 選択関数の存在

任意の集合 X について、写像 $f: X \setminus \{\emptyset\} \rightarrow \bigcup X$ が存在して、以下が成り立つ。

$$\forall x \in X \setminus \{\emptyset\} (f(x) \in x)$$

Proof.

$\forall x \in X \setminus \{\emptyset\}$ について、 $\exists y (y \in x)$ である。この y は、 $y \in x$ より、 $y \in \bigcup X$ である。

ゆえに、定理 4.4.1 より存在する。 ■

Thm. 4.4.3. 非空からなる積は非空

空でない集合 J から **Set** への関手 X について、以下が成り立つ。

$$\forall j \in J (X(j) \neq \emptyset) \rightarrow \prod X \neq \emptyset$$

Proof.

$Z := \{X(j) \mid j \in J\}$ について、定義より $Z \neq \emptyset \wedge \emptyset \notin Z$ である。

定理 4.4.2 より、写像 $f: Z \rightarrow \bigcup Z$ が存在して、 $\forall z \in Z (f(z) \in z)$ である。

写像 $g: J \rightarrow \bigcup Z$ を $g(j) := f(X(j))$ で定義すると、 $\forall j \in J (f(j) \in X(j))$ であるので、 $f \in \prod X$ である。ゆえに、 $\prod X \neq \emptyset$ である。 ■

4.5 像と原像

Def. 4.5.1. 像

写像 $f: X \rightarrow Y$ と、 X の部分集合 A について、以下で定める集合を A の f による像と呼び、 $f(A)$ で表す。

$$f(A) := \{f(x) \mid x \in A\}$$

また、 $f(X)$ を $\text{Im}(f)$ でも表す。

Thm. 4.5.1. 像の性質

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} & \forall A_1, A_2 \subset X (A_1 \subset A_2 \rightarrow f(A_1) \subset f(A_2)) \\ & \forall B \subset \mathfrak{P}(X) (f(\bigcup B) = \bigcup \{f(A) \mid A \in B\}) \\ & \forall B \subset \mathfrak{P}(X) (f(\bigcap B) \subset \bigcap \{f(A) \mid A \in B\}) \\ & \forall A_1, A_2 \subset X (f(A_1) \setminus f(A_2) \subset f(A_1 \setminus A_2)) \end{aligned}$$

Proof.

第一式について、 $y \in f(A_1)$ のとき、 $\exists x \in A_1 (y = f(x))$ 、 $\exists x \in A_2 (y = f(x))$ 、ゆえに $y \in f(A_2)$

第二式について、

$$\begin{aligned} & y \in \bigcup \{f(A) \mid A \in B\} \\ & \exists A \in B (y \in f(A)) \\ & \exists A \in B \exists x \in A (y = f(x)) \\ & \exists x \in \bigcup B (y = f(x)) \\ & y \in f(\bigcup B) \end{aligned}$$

上からも下からも成り立つので、公理 3.2.1 より成り立つ。

第三式について、第二式を用いて、

$$\begin{aligned}
& y \in f(\bigcap B) \\
& \exists x(x \in \bigcap B \wedge y = f(x)) \\
& \exists x(x \in \bigcup B \wedge \forall A(A \in B \rightarrow x \in A) \wedge y = f(x)) \\
& \exists x(x \in \bigcup B \wedge y = f(x)) \wedge \exists x(\forall A(A \in B \rightarrow x \in A) \wedge y = f(x)) \\
& y \in f(\bigcup B) \wedge \forall A(A \in B \rightarrow y \in f(A)) \\
& y \in \bigcup \{f(A) \mid A \in B\} \wedge \forall A(A \in B \rightarrow y \in f(A)) \\
& y \in \bigcap \{f(A) \mid A \in B\}
\end{aligned}$$

第四式について、

$$\begin{aligned}
& y \in f(A_1) \setminus f(A_2) \\
& \exists x(y = f(x) \wedge x \in A_1) \wedge \forall x(y = f(x) \rightarrow x \notin A_2) \\
& \exists x(y = f(x) \wedge x \in A_1 \setminus A_2) \\
& y \in f(A_1 \setminus A_2)
\end{aligned}$$

■

Def. 4.5.2. 原像

写像 $f: X \rightarrow Y$ と集合 A について、以下で定める集合を、集合 A の原像と呼び、 $f^{-1}(A)$ で表す。

$$f^{-1}(A) = \{x \in X \mid f(x) \in A\}$$

Cor. 4.5.2. 像と原像

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}
& \forall A \subset X(f^{-1}(f(A)) \supset A) \\
& \forall B(f(f^{-1}(B)) \subset B)
\end{aligned}$$

Thm. 4.5.3. 原像の性質

写像 f について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}
& \forall A_1, A_2(A_1 \subset A_2 \rightarrow f^{-1}(A_1) \subset f^{-1}(A_2)) \\
& \forall B(f^{-1}(\bigcup B) = \bigcup \{f^{-1}(A) \mid A \in B\}) \\
& \forall B(f^{-1}(\bigcap B) = \bigcap \{f^{-1}(A) \mid A \in B\}) \\
& \forall A_1, A_2(f^{-1}(A_1) \setminus f^{-1}(A_2) = f^{-1}(A_1 \setminus A_2))
\end{aligned}$$

Proof.

第一式について、 $x \in f^{-1}(A_1)$ のとき、 $f(x) \in A_1 \subset A_2$ に $x \in f^{-1}(A_2)$

第二式について、

$$\begin{aligned} x &\in \bigcup \{f^{-1}(A) \mid A \in B\} \\ \exists A \in B &(x \in f^{-1}(A)) \\ \exists A \in B &(f(x) \in A) \\ f(x) &\in \bigcup B \\ x &\in f^{-1}\left(\bigcup B\right) \end{aligned}$$

上からも下からも成り立つので、公理 3.2.1 より成り立つ。

第三式について、第二式を用いて、

$$\begin{aligned} x &\in f^{-1}\left(\bigcap B\right) \\ f(x) &\in \bigcap B \\ f(x) &\in \bigcup B \wedge \forall A(A \in B \rightarrow f(x) \in A) \\ x &\in f^{-1}\left(\bigcup B\right) \wedge \forall A(A \in B \rightarrow x \in f^{-1}(A)) \\ x &\in \bigcup \{f^{-1}(A) \mid A \in B\} \wedge \forall A(A \in B \rightarrow x \in f^{-1}(A)) \\ x &\in \bigcap \{f^{-1}(A) \mid A \in B\} \end{aligned}$$

上からも下からも成り立つので、公理 3.2.1 より成り立つ。

第四式について、

$$\begin{aligned} x &\in f^{-1}(A_1) \setminus f^{-1}(A_2) \\ f(x) &\in A_1 \wedge f(x) \notin A_2 \\ f(x) &\in A_1 \setminus A_2 \\ x &\in f^{-1}(A_1 \setminus A_2) \end{aligned}$$

上からも下からも成り立つので、公理 3.2.1 より成り立つ。 ■

4.6 単射と全射

Lem. 4.6.1. 単射

写像 f について、以下の 3 つは同値である。

1. f が左簡約可能 (f が単射)
2. f が左一意的
3. f が、空写像または左可逆

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

f が空写像であるとき、左一意的である。 f が空写像でないときを考える。

$x \in \text{dom}(f)$ について、写像 $g_x: \{\emptyset\} \rightarrow \text{dom}(f), g(\emptyset) := x$ を考える。

$f(x) = f(y)$ であるとき、 $f \circ g_x = f \circ g_y$ であり、左簡約可能より $g_x = g_y$ 、すなわち $x = y$ である。

2. \rightarrow 3. を示す。左一意的かつ空写像でないならば、左可逆であることを示す。

空でないので $\exists x_0 \in \text{dom}(f)$ より、以下で定める集合 G が存在する。

$$G := \{(y, x) \in \text{cod}(f) \times \text{dom}(f) \mid y = f(x)\} \cup \{(y, x_0) \mid y \in \text{cod}(f) \setminus \text{Im}(f)\}$$

写像 $g := ((\text{cod}(f), \text{dom}(f)), G)$ は、定義より f の左逆写像となる。

3. \rightarrow 1. を示す。

f が空写像であるときを考える。

f に右から合成可能、すなわち、終域を空集合とする写像は、 $g_0: \emptyset \rightarrow \emptyset$ のみであるので、左簡約可能である。

f が左可逆であるとき、左可逆ならば左簡約可能であるため、明らか。 ■

Cor. 4.6.2.

包含写像は単射である。

Lem. 4.6.3.

集合 X, Y について、単射 $f: X \rightarrow Y$ が存在するならば、単射 $g: \mathfrak{P}(X) \rightarrow \mathfrak{P}(Y)$ が存在する。

Proof.

$g(A) := \{f(x) \mid x \in A\}$ で定義する写像は、単射である。 ■

Lem. 4.6.4. 全射

写像 f について、以下の 3 つは同値である。

1. f が右簡約可能 (f が全射)
2. f が右全域的
3. f が右可逆

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

右全域的でないとすると、 $\exists y \in Y \forall x \in X (f(x) \neq y)$ である。

$g, h \in \text{Map}(Y, \{\emptyset, \{\emptyset\}\})$ について、 $g(y) = \emptyset, h(y) = \{\emptyset\}$ であり、 $\forall w \in Y \setminus \{y\} (g(w) = h(w))$ とする。

$g \circ f = h \circ f$ であるが、 $g \neq h$ であり、右簡約可能ではない。

対偶法より示される。

2. \rightarrow 3. を示す。

定理 4.4.1 の与える写像は、右逆写像である。

3. \rightarrow 1. は、右可逆ならば右簡約可能であるため、明らか。 ■

Def. 4.6.1. 全単射

写像 f が同型射であるとき、 f を全単射と呼ぶ。

Def. 4.6.2. 逆写像

写像 f の逆射を逆写像と呼ぶ。

Lem. 4.6.5.

全単射 $f: X \rightarrow Y$ と Y の部分集合 A について、原像 $f^{-1}(A)$ と逆写像の像 $f^{-1}(A)$ は一致する。

Proof.

全単射より、 $\forall y \in A \exists x \in X (y = f(x))$ である。定義より明らか。 ■

Thm. 4.6.6. Cantor の対角線論法

単射 $f: \mathfrak{P}(A) \rightarrow A$ は存在しない。

Proof.

存在すると仮定する。

以下の集合 Y を考える。

$$Y := \{f(X) \mid X \subset A \wedge f(X) \notin X\}$$

このとき $Y \subset A$ である。

$f(Y) \notin Y$ とすると、定義より $f(Y) \in Y$ 。ゆえに矛盾。

$f(Y) \in Y$ とすると、 f の単射性より $Y \subset A \wedge f(Y) \notin Y$ 。ゆえに矛盾。

背理法より示される。 ■

5 関係

5.1 自己関係

Def. 5.1.1. 自己関係

関係 $((X, Y), G)$ について、 $X = Y$ であるとき、 X 上の自己関係、または単に X 上の関係と呼ぶ。

Def. 5.1.2. 反射的

集合 X 上の関係 \mathfrak{R} が反射的であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall x \in X (\mathfrak{R}(x, x))$$

Def. 5.1.3. 対称的

集合 X 上の関係 \mathfrak{R} が対称的であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall x, y \in X (\mathfrak{R}(x, y) \rightarrow \mathfrak{R}(y, x))$$

Def. 5.1.4. 反対称的

集合 X 上の関係 \mathfrak{R} が反対称的であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall x, y \in X (\mathfrak{R}(x, y) \wedge \mathfrak{R}(y, x) \rightarrow x = y)$$

Def. 5.1.5. 推移的

集合 X 上の関係 \mathfrak{R} が推移的であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall x, y, z \in X (\mathfrak{R}(x, y) \wedge \mathfrak{R}(y, z) \rightarrow \mathfrak{R}(x, z))$$

Cor. 5.1.1.

\emptyset 上の関係は一意に定まり、それは、反射的、対称的、反対称的、推移的である。

Def. 5.1.6. 完全

集合 X 上の関係 \mathfrak{R} が完全であるとは、以下を満たすことである。

$$\forall x, y \in X (\mathfrak{R}(x, y) \vee \mathfrak{R}(y, x))$$

5.2 前順序

Def. 5.2.1. 前順序

反射的かつ推移的な自己関係 $\preceq := ((X, X), G)$ を、前順序と呼ぶ。

前順序であることを明示的に記号 \preceq で表す。

簡単のため、 $\preceq(x, y)$ を $x \preceq y$ でも表す。

略記 \prec, \succ, \asymp を以下のように定める。

$$\begin{aligned} x \prec y &:\leftrightarrow x \preceq y \wedge x \neq y \\ x \succ y &:\leftrightarrow y \preceq x \\ x \asymp y &:\leftrightarrow y \prec x \end{aligned}$$

組 (X, \preceq) を、前順序集合、または単に前順序と呼ぶ。

Rem. 5.2.1. 前順序の定義

より簡単に、 $x \preceq y :\leftrightarrow \dots$ の形式によって述語として前順序を定義できる。

Cor. 5.2.1.

前順序集合 X について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \forall x, y \in X (x \preceq y \leftrightarrow x \prec y \vee x = y) \\ \forall x, y \in X (x \succ y \leftrightarrow x \asymp y \vee x = y) \end{aligned}$$

Def. 5.2.2. 上界

前順序集合 X について、その部分集合 A を考える。

A が上に有界であるとは、以下を満たすことである。

$$\exists b \in X \forall a \in A (a \preceq b)$$

このとき、 b を A の上界と呼ぶ。

Def. 5.2.3. 下界

前順序集合 X について、その部分集合 A を考える。

A が下に有界であるとは、以下を満たすことである。

$$\exists b \in X \forall a \in A (b \preceq a)$$

このとき、 b を A の下界と呼ぶ。

Def. 5.2.4. 有界

前順序集合 X について、その部分集合 A を考える。

A が有界であるとは、 A が上に有界かつ下に有界であることである。

Cor. 5.2.2.

空でない前順序集合 X について、 \emptyset は有界である。

Def. 5.2.5. 有向集合

前順序集合 Λ が以下を満たすとき、 Λ を有向集合と呼ぶ。

$$\forall \lambda, \mu \in \Lambda (\{\lambda, \mu\} \text{ は上に有界})$$

Def. 5.2.6. 上方集合

有向集合 Λ とその元 $\lambda_0 \in \Lambda$ について、集合 $\Lambda_{\succcurlyeq \lambda_0}, \Lambda_{\succ \lambda_0}$ を以下で定める。

$$\begin{aligned}\Lambda_{\succcurlyeq \lambda_0} &:= \{\lambda \in \Lambda \mid \lambda_0 \preccurlyeq \lambda\} \\ \Lambda_{\succ \lambda_0} &:= \{\lambda \in \Lambda \mid \lambda_0 \prec \lambda\}\end{aligned}$$

Def. 5.2.7. 単調

前順序集合 $(X, \preccurlyeq_X), (Y, \preccurlyeq_Y)$ と、写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下を満たすとき、 f は単調であるという。

$$\forall x, y \in X (x \preccurlyeq_X y \rightarrow f(x) \preccurlyeq_Y f(y))$$

Def. 5.2.8. 狹義単調

前順序集合 $(X, \preccurlyeq_X), (Y, \preccurlyeq_Y)$ と、写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下を満たすとき、 f は単調であるという。

$$\forall x, y \in X (x \prec_X y \rightarrow f(x) \prec_Y f(y))$$

Cor. 5.2.3.

狭義単調な写像は、単調である。

5.3 同値関係

Def. 5.3.1. 同値関係

対称的な前順序を、同値関係と呼ぶ。同値関係であることを明示的に記号 \sim で表す。

Cor. 5.3.1.

等号は同値関係である。集合 X 上の同値関係であることを明示的に、 $=_X$ で表す。

Def. 5.3.2. 同値類

空でない集合 X 上で定義された同値関係 \sim と、 X の要素 a について、以下で定める集合を a の同値類と呼び、 $[a]$ で表す。この a を特に代表元と呼ぶ。

$$[a] := \{x \in X \mid x \sim a\}$$

Cor. 5.3.2.

空でない集合 X 上で定義された同値関係 \sim について、以下が成り立つ。

$$X = \bigsqcup \{[x] \mid x \in X\}$$

Def. 5.3.3. 商集合

同値関係の定義された空でない集合 X について、以下で定める集合を商集合と呼び、 X/\sim で表す。

$$X/\sim := \{[x] \mid x \in X\}$$

Def. 5.3.4. 商写像

写像 $\llbracket \cdot \rrbracket: X \rightarrow X/\sim$ を商写像と呼ぶ。

Cor. 5.3.3.

商写像是全射である。

Thm. 5.3.4. well-defined な写像

空でない集合 X 上の同値関係 \sim_X 、集合 Y 上の同値関係 \sim_Y について、写像 $f: X \rightarrow Y$ を考える。

f が \sim_X, \sim_Y と両立することは、写像 $h: X/\sim_X \rightarrow Y/\sim_Y$ が存在して以下を満たすことと必要十分である。

$$\llbracket_Y \circ f = h \circ \llbracket_X$$

さらに、上で定まる写像 h は一意である。

Proof.

\llbracket_X は全射より、右逆写像 r が存在する。

まず、必要性を示す。仮定より以下を満たす。

$$\forall x \in X / \sim_X \forall z, w \in x ([f(z)]_Y = [f(w)]_Y)$$

ゆえに $h := \llbracket_Y \circ f \circ r$ を考えると、 $\llbracket_Y \circ f = h \circ \llbracket_X$ を満たす。

十分性を示す。 $\forall x, y \in X$ について、 $x \sim_X y$ ならば、 $[f(x)]_Y = h([x]_X) = h([y]_X) = [f(y)]_Y$ である。よって、 $f(x) \sim_Y f(y)$

一意であることを示す。相異なる 2 つが存在すると仮定すると、 $h \circ \llbracket_X = h' \circ \llbracket_X$ である。右から r をかけて、 $h = h'$ であり、矛盾する。 ■

Def. 5.3.5. 写像に付随する同値関係

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、以下で定める X 上の関係 \sim_f は同値関係であり、これを写像 f に付随する同値関係と呼ぶ。

$$x \sim_f y : \leftrightarrow f(x) = f(y)$$

Cor. 5.3.5.

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、 f は $\sim_f, =_Y$ と両立する。

Thm. 5.3.6. 標準分解

写像 $f: X \rightarrow Y$ について、全単射 $\bar{f}: X / \sim_f \rightarrow \text{Im}(f)$ が存在する。

Proof.

定理 5.3.4 より、写像 $\bar{f}: X / \sim_f \rightarrow Y$ が存在して、 $\text{Im}(\bar{f}) = \text{Im}(f)$ である。

単射であることを示す。 $\bar{f}([x]) = \bar{f}([y])$ のとき、 $f(x) = f(y)$ より、 $[x] = [y]$ である。 ■

6 順序

6.1 半順序

Def. 6.1.1. 半順序

反対称的な前順序を、半順序と呼ぶ。

集合 P 上の半順序 \preceq について、順序対 (P, \preceq) を半順序集合と呼ぶ。または単に P と書き、半順序集合と集合どちらも表すものとする。

Cor. 6.1.1.

集合 P について、 (P, \subset) は半順序集合である。また、 (P, \supset) も半順序集合である。

Def. 6.1.2. 単調

半順序 \preceq と両立する写像を単調である、または広義単調であると呼ぶ。

特に、 \prec と両立する写像を、狭義単調であると呼ぶ。

Def. 6.1.3. 極大元

半順序集合 P について、以下の元 b を P の極大元と呼ぶ。

$$b \in P \wedge \forall a \in P (\neg b \prec a)$$

Def. 6.1.4. 最大元

半順序集合 P について、以下の元 b を P の最大元と呼ぶ。

$$b \in P \wedge \forall a \in P (a \preceq b)$$

Def. 6.1.5. 極小元

半順序集合 P について、以下の元 b を P の極小元と呼ぶ。

$$b \in P \wedge \forall a \in P (\neg b \succ a)$$

Def. 6.1.6. 最小元

半順序集合 P について、以下の元 b を P の最小元と呼ぶ。

$$b \in P \wedge \forall a \in P (a \succsim b)$$

Cor. 6.1.2.

半順序集合 P の最大元は、極大元である。

Cor. 6.1.3. 最大元の一意性

半順序集合 P の最大元は存在するならば一意である。これは半順序の反対称性から従う。

ここから、半順序集合 P の最大元 b を $\max P := b$ と表す。

Cor. 6.1.4.

半順序集合 P の最小元は、極小元である。

Cor. 6.1.5. 最小元の一意性

半順序集合 P の最小元は存在するならば一意である。これは半順序の反対称性から従う。

ここから、半順序集合 P の最小元 b を $\min P := b$ と表す。

Def. 6.1.7. 上限

半順序集合 P について、その部分集合 A を考える。

A の上界全体の集合に最小元が存在するとき、これを A の上限と呼び、 $\sup A$ で表す。

Def. 6.1.8. 下限

半順序集合 P について、その部分集合 A を考える。

A の下界全体の集合に最大元が存在するとき、これを A の下限と呼び、 $\inf A$ で表す。

6.2 束

Def. 6.2.1. 束

以下を満たす半順序集合 P を束と呼ぶ。

$$\forall x, y \in P \exists z, w \in P (z = \sup\{x, y\} \wedge w = \inf\{x, y\})$$

Cor. 6.2.1.

束は有向集合である。

Lem. 6.2.2. 分配不等式

束 P について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}\sup\{x, \inf\{y, z\}\} &\preccurlyeq \inf\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\} \\ \inf\{x, \sup\{y, z\}\} &\succcurlyeq \sup\{\inf\{x, y\}, \inf\{x, z\}\}\end{aligned}$$

Proof.

x は $\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\}$ の下界であるので、 $x \preccurlyeq \inf\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\}$ である。

$\inf\{y, z\}$ は、 $\{y, z\}$ の下界であり、推移性より $\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\}$ の下界である。ゆえに、 $\inf\{y, z\} \preccurlyeq \inf\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\}$ である。

よって $\inf\{\sup\{x, y\}, \sup\{x, z\}\}$ は、 $\{x, \inf\{y, z\}\}$ の上界である。

したがって第一式が成り立つ。

第二式も同様に成り立つ。 ■

Def. 6.2.2. 全順序

集合 P 上の以下を満たす半順序 \preccurlyeq を全順序と呼ぶ。全順序であることを明示的に記号 \leq で表す。

$$\forall x, y \in P (x \preccurlyeq y \vee y \preccurlyeq x)$$

集合 P 上の全順序 \leq について、順序対 (P, \leq) を全順序集合と呼ぶ。または単に P と書き、全順序集合と集合どちらも表すものとする。

略記 $<, \geq, >$ を以下のように定める。

$$\begin{aligned}x < y &\Leftrightarrow x \leq y \wedge x \neq y \\ x \geq y &\Leftrightarrow y \leq x \\ x > y &\Leftrightarrow y < x\end{aligned}$$

Cor. 6.2.3.

全順序集合 P の極大元は最大元であり、極小元は最小元である。

Cor. 6.2.4.

全順序集合は束である。

Def. 6.2.3. 区間

全順序集合 P と $a, b \in P$ について、以下で定める P の部分集合をそれぞれ、開区間 $]a, b[$ 、閉区間 $[a, b]$ と呼ぶ。

$$\begin{aligned}]a, b[&:= \{x \in P \mid a < x \wedge x < b\} \\ [a, b] &:= \{x \in P \mid a \leq x \wedge x \leq b\}\end{aligned}$$

開区間、閉区間をまとめて区間と呼ぶ。

6.3 Zorn の補題

Def. 6.3.1. 帰納的

空でない半順序集合 (P, \preccurlyeq) を考える。

P の任意の部分集合 A について、順序対 (A, \preccurlyeq) が全順序集合ならば A が上に有界となるとき、 P は帰納的であると言う。

Lem. 6.3.1.

帰納的な半順序集合 (P, \preccurlyeq) について、以下の集合系 \mathcal{M} 、すなわち P の全順序部分集合の全体を考える。

$$\mathcal{M} := \{M \subset P \mid \forall x, y \in M (x \preccurlyeq y \vee y \preccurlyeq x)\}$$

このとき、 P が極大元を持たないならば、以下を満たす写像 $f: \mathcal{M} \rightarrow P$ が存在する。

$$\forall M \in \mathcal{M} \forall m \in M (m \prec f(M))$$

Proof.

帰納的であることより、 $\forall M \in \mathcal{M}$ に対して上界 u が存在する。

今、 u は P の極大元ではないので、 $\exists v \in P (u \prec v)$ である。 $\forall m \in M (m \preccurlyeq u \prec v)$ である。

定理 4.4.1 より存在する。 ■

Def. 6.3.2. タワー

極大元を持たない半順序集合 P を考える。

補題 6.3.1 で定めた集合系 \mathcal{M} と写像 f を考える。

以下を満たす集合系 $\mathcal{T} \subset \mathcal{M}$ を、 P のタワーと呼ぶ。

$$\begin{aligned} & \emptyset \in \mathcal{T} \\ & \forall T \in \mathcal{T} (T \cup \{f(T)\} \in \mathcal{T}) \\ & \forall S \subset \mathcal{T} ((S, \subset) \text{ は全順序集合} \rightarrow \bigcup S \in \mathcal{T}) \end{aligned}$$

Lem. 6.3.2.

極大元を持たない半順序集合 P について、以下の集合を考える。

$$\mathcal{T}_0 := \bigcap \{\mathcal{T} \subset \mathfrak{P}(P) \mid \mathcal{T} \text{ は } P \text{ のタワー}\}$$

このとき、 \mathcal{T}_0 は P のタワーである。

Proof.

\mathcal{M} は P のタワーであるので、 $\{\mathcal{T} \subset \mathfrak{P}(P) \mid \mathcal{T} \text{ は } P \text{ のタワー}\} \neq \emptyset$ である。

タワーの定義より、明らか。 ■

Lem. 6.3.3.

極大元を持たない半順序集合 P を考える。

補題 6.3.1 で定めた f について、以下で定める写像 $g: \mathcal{M} \rightarrow \mathcal{M}$ を考える。

$$g(M) := M \cup \{f(M)\}$$

このとき、補題 6.3.2 で定めた \mathcal{T}_0 は、以下を満たす。

$$\forall T \in \mathcal{T}_0 (\forall T' \in \mathcal{T}_0 (T \subset T' \vee T' \subset T) \rightarrow \forall T' \in \mathcal{T}_0 (T' \subset T \vee g(T) \subset T'))$$

Proof.

前件を満たす T について、以下の集合系を考える。

$$\mathcal{T}_T := \{T' \in \mathcal{T}_0 \mid T' \subset T \vee g(T) \subset T'\}$$

定義より、 $\mathcal{T}_T \subset \mathcal{T}_0$ である。

今、 $\emptyset \subset T$ であるので、 $\emptyset \in \mathcal{T}_T$ である。

$T' \in \mathcal{T}_T$ を考える。

$g(T) \subset T'$ であるとき、 $g(T) \subset T' \subset g(T')$ より、 $g(T') \in \mathcal{T}_T$ である。

$T' \subset T$ であるとき、 $g(T') \subset T$ ならば $g(T') \in \mathcal{T}_T$ である。

$g(T') \setminus T \neq \emptyset$ ならば、 $g(T') \setminus T = \{f(T')\}$ であるため、 $T = T'$ である。ゆえに、 $g(T') = g(T) \in \mathcal{T}_T$ である。

\mathcal{T}_T の全順序部分 \mathcal{S} を考える。

$\mathcal{S} \subset \mathcal{T}_T \subset \mathcal{T}_0$ より、タワーの定義から $\bigcup \mathcal{S} \in \mathcal{T}_0$ である。

$\forall S \in \mathcal{S}(S \subset T)$ ならば、 $\bigcup \mathcal{S} \subset T$ であり、 $\bigcup \mathcal{S} \in \mathcal{T}_T$ である。

$\exists S \in \mathcal{S}(g(T) \subset S)$ ならば、 $g(T) \subset \bigcup \mathcal{S}$ であり、 $\bigcup \mathcal{S} \in \mathcal{T}_T$ である。

ゆえに \mathcal{T}_T は、 P のタワーである。

よって、 $\mathcal{T}_0 \subset \mathcal{T}_T$ が成り立つので、 $\mathcal{T}_0 = \mathcal{T}_T$ である。

したがって後件を満たす。 ■

Lem. 6.3.4.

極大元を持たない半順序集合 P を考える。

補題 6.3.2 で定めた \mathcal{T}_0 について、 (\mathcal{T}_0, \subset) は全順序集合である。

Proof.

以下の集合系を考える。

$$\mathcal{T}_1 := \{T \in \mathcal{T}_0 \mid \forall T' \in \mathcal{T}_0(T \subset T' \vee T' \subset T)\}$$

定義より、 $\mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_0$ である。

今、 $\emptyset \subset T$ であるので、 $\emptyset \in \mathcal{T}_1$ である。

$T \in \mathcal{T}_1$ を考える。

補題 6.3.3 より、 $\forall T' \in \mathcal{T}_0(T' \subset T \subset g(T) \vee g(T) \subset T')$ であるため、 $g(T) \in \mathcal{T}_1$ である。

\mathcal{T}_1 の全順序部分 \mathcal{S} を考える。

$\mathcal{S} \subset \mathcal{T}_1 \subset \mathcal{T}_0$ より、タワーの定義から $\bigcup \mathcal{S} \in \mathcal{T}_0$ である。

$\forall T' \in \mathcal{T}_0$ を考える。

$\forall S \in \mathcal{S}(S \subset T')$ ならば、 $\bigcup \mathcal{S} \subset T'$ である。 $\exists S \in \mathcal{S}(T' \subset S)$ ならば、 $T' \subset \bigcup \mathcal{S}$ である。

ゆえに、 $T' \subset \bigcup \mathcal{S} \vee \bigcup \mathcal{S} \subset T'$ である。

したがって、 $\bigcup \mathcal{S} \in \mathcal{T}_1$ である。

ゆえに \mathcal{T}_1 は、 P のタワーである。

よって、 $\mathcal{T}_0 \subset \mathcal{T}_1$ が成り立つので、 $\mathcal{T}_0 = \mathcal{T}_1$ である。 ■

Thm. 6.3.5. Zorn の補題

帰納的な半順序集合には極大元が存在する。

Proof.

極大元を持たないと仮定する。

補題 6.3.4 より (\mathcal{T}_0, \subset) は全順序であるため、タワーの定義から $\bigcup \mathcal{T}_0 \in \mathcal{T}_0$ である。

タワーの定義より $g(\bigcup \mathcal{T}_0) \in \mathcal{T}_0$ であるので、から $f(\bigcup \mathcal{T}_0) \in \bigcup \mathcal{T}_0$ である。

これは、補題 6.3.2 における f の定義に反する。

背理法より示される。 ■

6.4 フィルターとネット

Def. 6.4.1. フィルター

半順序集合 (P, \preccurlyeq) と P の空でない部分集合 F について、以下を満たすとき、 F を P のフィルターと呼ぶ。

$$\begin{aligned}\forall x, y \in F &\exists z \in F (z \preccurlyeq x \wedge z \preccurlyeq y) \\ \forall x \in F &\forall y \in P (x \preccurlyeq y \rightarrow y \in F)\end{aligned}$$

Cor. 6.4.1.

フィルターは逆順序について有向集合である。

Def. 6.4.2. 細分

半順序集合 P のフィルター F, G に対して、 $F \subset G$ であるとき、 G は F の細分であると呼ぶ。

Def. 6.4.3. 超フィルター

自身以外の細分を持たないフィルターを超フィルターと呼ぶ。

Thm. 6.4.2. 超フィルターの存在

半順序集合 P のフィルター F について、その細分である超フィルターが存在する。

Proof.

F の細分の全体 \mathcal{F} と半順序集合 (\mathcal{F}, \subset) を考える。

\mathcal{F} の空でない全順序部分集合 A について、上界 $\bigcup A \in \mathcal{F}$ が存在する。

\mathcal{F} の全順序部分集合 \emptyset について、 F は上界である。

ゆえに、 \mathcal{F} は帰納的である。

定理 6.3.5 より極大元が存在する。これは超フィルターである。 ■

Def. 6.4.4. 集合におけるフィルター

集合 X について、半順序集合 $(\wp(X) \setminus \{\emptyset\}, \subset)$ のフィルターを、集合 X のフィルターと呼ぶ。

Cor. 6.4.3.

集合 X のフィルター \mathcal{F} は以下を満たす。

$$\begin{aligned}X &\in \mathcal{F} \\ \forall F_1, F_2 \in \mathcal{F} &(F_1 \cap F_2 \in \mathcal{F})\end{aligned}$$

Thm. 6.4.4. 集合の超フィルター

集合 X のフィルター \mathcal{F} について、以下の 2 つは同値である。

1. \mathcal{F} は超フィルターである
2. $\forall A \subset X (A \in \mathcal{F} \vee X \setminus A \in \mathcal{F})$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$A \in \mathcal{F}$ のとき明らかであるので、 $A \notin \mathcal{F}$ のときを考える。

$\mathcal{S} := \{S \subset X \mid A \cup S \in \mathcal{F}\}$ について、定義より $\mathcal{F} \subset \mathcal{S} \wedge X \setminus A \in \mathcal{S}$ である。

今、 $\forall S_1, S_2 \in \mathcal{S}$ について、 $A \cup (S_1 \cap S_2) = (A \cup S_1) \cap (A \cup S_2) \in \mathcal{F}$ より、 $S_1 \cap S_2 \in \mathcal{S}$ である。

$S \in \mathcal{S} \wedge T \subset X \wedge S \subset T$ とすると、 $A \cup S \in \mathcal{F} \rightarrow A \cup T \in \mathcal{F}$ より $T \in \mathcal{S}$

$A \cup X = X \in \mathcal{F}$ より、 $X \in \mathcal{S}$ である。すなわち、 $\mathcal{S} \neq \emptyset$

$\emptyset \notin \mathcal{S}$ より、 \mathcal{S} はフィルターでありかつ \mathcal{F} の細分である。

ここで、 \mathcal{F} は超フィルターであるので $X \setminus A \in \mathcal{S} = \mathcal{F}$

2. \rightarrow 1. を示す。

超フィルターでないとすると、 \mathcal{F} の細分 \mathcal{F}' が存在して、 $\exists A \in \mathcal{F}' (A \notin \mathcal{F} \wedge A \in \mathcal{F}')$ である。

仮定より、 $X \setminus A \in \mathcal{F} \subset \mathcal{F}'$ であり、 $\emptyset = A \cap (X \setminus A) \in \mathcal{F}'$ よりフィルターの定義に矛盾。背理法より示される。

■

Def. 6.4.5. ネット

有向集合 Λ から集合 X への写像を、 X 上のネットと呼ぶ。

ネットは、明示的に $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ と表す。このとき、 x_λ は X 上の元で、 $\lambda \in \Lambda$ での値を表す。

また誤解のない限り、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ で値域を表す。

Def. 6.4.6. 部分ネット

集合 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ と有向集合 M について、写像 $\varphi: M \rightarrow \Lambda$ が以下を満たすとき、 $(x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M}$ を $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ の部分ネットと呼ぶ。

$$\begin{aligned} \forall \mu_1, \mu_2 \in M (\mu_1 \preceq \mu_2 \rightarrow \varphi(\mu_1) \preceq \varphi(\mu_2)) \\ \forall \lambda \in \Lambda \exists \mu \in M (\lambda \preceq \varphi(\mu)) \end{aligned}$$

Def. 6.4.7. 普遍

集合 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が以下を満たすとき、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は普遍であると呼ぶ。

$$\forall A \subset X \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset A \vee (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset X \setminus A \right)$$

Thm. 6.4.5. ネットの定めるフィルター

集合 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、以下で定める集合系 \mathcal{F} は X のフィルターである。

$$\mathcal{F} := \left\{ F \subset X \mid \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset F \right) \right\}$$

Proof.

明らかに $\emptyset \notin \mathcal{F} \wedge X \in \mathcal{F}$ である。

$F_1, F_2 \in \mathcal{F}$ について、定義より $\exists \lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_1}} \subset F_1 \wedge (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_2}} \subset F_2 \right)$ である。
 Λ が有向集合であることから、 $\exists \lambda_3 \in \Lambda (\lambda_1 \preceq \lambda_3 \wedge \lambda_2 \preceq \lambda_3)$ であり、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_3}} \subset F_1 \cap F_2$ 。
ゆえに $F_1 \cap F_2 \in \mathcal{F}$ である。

$\forall F \in \mathcal{F} \forall G \subset \mathfrak{P}(X)$ について、 $F \subset G$ ならば定義より明らかに $G \in \mathcal{F}$

■

Lem. 6.4.6.

集合 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ と定理 6.4.5 の定めるフィルター \mathcal{F} を考える。

このとき、 \mathcal{F} の任意の細分 \mathcal{F}' について、以下が成り立つ。

$$\forall F \in \mathcal{F}' \forall \lambda_0 \in \Lambda \exists \lambda \in \Lambda (\lambda_0 \preccurlyeq \lambda \wedge x_\lambda \in F)$$

Proof.

$\exists F \in \mathcal{F}' \exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \lambda \in \Lambda (\lambda_0 \preccurlyeq \lambda \rightarrow x_\lambda \notin F)$ とする。

今、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \in \mathcal{F} \subset \mathcal{F}'$ であるので、 $\emptyset = F \cap (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \in \mathcal{F}'$ より、フィルターの定義に矛盾。

背理法より示される。

■

Thm. 6.4.7. フィルターの定める部分ネット

集合 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ と、定理 6.4.5 の定めるフィルター \mathcal{F} について考える。

\mathcal{F} の任意の細分 \mathcal{F}' に対して、ある部分ネット $(x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M}$ が存在して、定理 6.4.5 から定まるその部分ネットのフィルターは \mathcal{F}' の細分となる。

Proof.

$M := \{(\lambda, F) \in \Lambda \times \mathcal{F}' \mid x_\lambda \in F\}$ を考える。

M 上の前順序 $\forall (\lambda_1, F_1), (\lambda_2, F_2) \in M ((\lambda_1, F_1) \preccurlyeq (\lambda_2, F_2) : \leftrightarrow \lambda_1 \preccurlyeq \lambda_2 \wedge F_1 \supset F_2)$ を考える。

$(\lambda_1, F_1), (\lambda_2, F_2) \in M$ とする。

\mathcal{F}' はフィルターより $F_1 \cap F_2 \in \mathcal{F}'$

Λ は有向集合であるので、 $\exists \lambda_3 \in \Lambda (\lambda_1 \preccurlyeq \lambda_3 \wedge \lambda_2 \preccurlyeq \lambda_3)$ である。

補題 6.4.6 より $\exists \lambda_4 \in \Lambda (\lambda_3 \preccurlyeq \lambda_4 \wedge x_{\lambda_4} \in F_1 \cap F_2)$

$(\lambda_4, F_1 \cap F_2)$ は、 $\{(\lambda_1, F_1), (\lambda_2, F_2)\}$ の上界であるので、 M は有向集合である。

ここで、写像 $\varphi: M \rightarrow \Lambda, \varphi(\lambda, F) := \lambda$ を定める。

補題 6.4.6 より $\forall \lambda \in \Lambda \exists F \in \mathcal{F}' \exists \lambda_1 \in \Lambda (\lambda \preccurlyeq \lambda_1 = \varphi(\lambda, F) \wedge (\lambda_1, F) \in M)$ である。

したがって、 $(x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M}$ は部分ネットである。

今、補題 6.4.6 より $\forall F \in \mathcal{F}' \exists \lambda_0 \in \Lambda ((\lambda_0, F) \in M)$

$\forall (\lambda', F') \in M$ について、 $(\lambda_0, F) \preccurlyeq (\lambda', F')$ ならば、 $x_{\lambda'} \in F' \subset F$ となる。

よって、 $F \in \left\{ F \subset X \mid \exists \mu_0 \in M \left((x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M_{\succ \mu_0}} \subset F \right) \right\}$

■

Thm. 6.4.8. 普遍部分ネットの存在

任意のネットは、普遍な部分ネットを持つ。

Proof.

ネットに対して定理 6.4.5 の定めるフィルター \mathcal{F} が存在する。

定理 6.4.2 より \mathcal{F} の細分である超フィルター \mathcal{U} が存在する。

定理 6.4.7 より、定理 6.4.5 の定めるフィルターが \mathcal{U} に一致する部分ネットが存在する。

定理 6.4.4 より、この部分ネットは普遍である。

■

7 自然数

7.1 自然数の公理

Def. 7.1.1. 自然数

自然数論では、3つの公理（公理 ??、公理 ??、公理 7.1.3）が与えられる。
項を自然数と呼ぶ。

Def. 7.1.2. 零

アリティ 0 の函数記号 0 を考える。

Def. 7.1.3. 後者

アリティ 1 の函数記号 s を考える。
自然数 n について、 $s(n)$ を n の後者と呼ぶ。

Ax. 7.1.1. 零は後者ではない

$$\forall n(s(n) \neq 0)$$

Ax. 7.1.2. 後者は単射

$$\forall n, m(s(n) = s(m) \rightarrow n = m)$$

Ax. 7.1.3. 数学的帰納法

アリティ 1 の述語記号 ψ について、以下が成り立つ。

$$\psi(0) \wedge \forall k(\psi(k) \rightarrow \psi(s(k))) \rightarrow \forall n(\psi(n))$$

Def. 7.1.4. 後者関数

無限系譜 X について、以下のように定める写像 $s: X \rightarrow X$ を後者関数（successor）と呼ぶ。

$$s(x) := x \cup \{x\}$$

Def. 7.1.5. 自然数

補題 ??より、無限系譜 X の取り方によらず $\omega(X)$ が一意に定まる。これを自然数 \mathbb{N} （または ω ）と呼ぶ。誤解のない範囲で、自然数 \mathbb{N} の要素も自然数と呼ぶ。

Def. 7.1.6. 数字

数字を定義する。

$$0 := \{\}, 1 := \{0\}, 2 := \{0, 1\}, 3 := \{0, 1, 2\}, \dots$$

Thm. 7.1.1. Peano の公理

以下の全てを満たす。

$$\begin{aligned} & 0 \in \mathbb{N} \\ & \forall n \in \mathbb{N} (s(n) \in N) \\ & \forall n \in \mathbb{N} (s(n) \neq 0) \\ & \forall n, m \in \mathbb{N} (s(n) = s(m) \rightarrow n = m) \\ & \forall E (E \subset \mathbb{N} \wedge 0 \in E \wedge \forall n (n \in E \rightarrow s(n) \in E) \rightarrow E = \mathbb{N}) \end{aligned}$$

Proof.

第一、第二の公理は、無限系譜であることより明らか。

第三の公理は $n \in s(n)$ と、空集合は要素を持たないことから示される。

第四の公理を示す。

$n \in s(n) \rightarrow n \in s(m)$ であり、 $n \in s(m) \rightarrow n = m \vee n \in m$

よって、 $(n = m \vee n \in m) \wedge (m = n \vee m \in n)$

公理 3.2.4 より示される。

第五の公理を示す。

前件より、 $E \subset \mathbb{N}$ である。

$0 \in E \wedge \forall n (n \in E \rightarrow s(n) \in E)$ より、 E は無限系譜である。

定義より $\mathbb{N} = \omega(E) \subset E$ である。 ■

Thm. 7.1.2. 数学的帰納法

アリティ 1 の述語記号 P について、

$$\forall n (n \in \mathbb{N} \rightarrow P(n)) \leftrightarrow P(0) \wedge \forall n (n \in \mathbb{N} \wedge (P(n) \rightarrow P(s(n))))$$

Proof.

右は明らか。

左は、 $E = \{n \in \mathbb{N} \mid P(n)\}$ として定理 7.1.1 第五式から示される。 ■

Def. 7.1.7. 前者関数

後者関数 s は、定理 7.1.1 の第四式より单射であるため、左逆写像を持つ。

これを前者関数 $p \in \mathbb{N} \setminus \{0\} \rightarrow \mathbb{N}$ と呼ぶ。

Lem. 7.1.3.

$$\forall n \in \mathbb{N} (n \neq 0 \rightarrow s(p(n)) = n)$$

Proof.

$n = 0$ のとき前件否定より成り立つ。

ある n で成り立つとき、 p が s の左逆写像より $s(p(s(n))) = s(n)$ が成り立つ。

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

Lem. 7.1.4.

$$\forall n \in \mathbb{N} (m \in n \rightarrow m \in \mathbb{N})$$

Proof.

$n = 0 = \emptyset$ のとき自明。

ある n で成り立つとき、 $s(n) = n \cup \{n\}$ より、 $s(n)$ で成り立つ。

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

7.2 自然数の順序

Def. 7.2.1. 自然数の順序

自然数 \mathbb{N} 上で二項関係 \leq を以下のように定める。包含の半順序性より、 \leq は半順序である。

$$n \leq m : \leftrightarrow n \subset m$$

Cor. 7.2.1.

$$\forall n \in \mathbb{N} (0 \leq n)$$

Cor. 7.2.2.

$$\forall n \in \mathbb{N} (n < s(n))$$

Lem. 7.2.3. 自然数の順序の要素による特徴づけ

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n \subsetneq m \leftrightarrow n \in m)$$

Proof.

0 は空集合より、 $\neg(n \in 0) \wedge \neg(n \subsetneq 0)$ ゆえに、 $n \subsetneq 0 \leftrightarrow n \in 0$

ある m で成り立つとする。

左について、仮定より、

$$\begin{aligned} n &\in s(m) \\ n &\in m \cup \{m\} \\ n &\in m \vee n = m \\ n &\subsetneq m \vee n = m \\ n &\subset m \end{aligned}$$

$$m \notin m \text{ より、} \\ n \subsetneq m \cup \{m\} = s(m)$$

定理 7.1.2 より、左が成り立つ。

右について、既に示した左を用いて、

$$\begin{aligned} m \in n \wedge n \subsetneq s(m) \\ m \subsetneq n \wedge n \subsetneq s(m) \\ \perp \\ n \subsetneq s(m) \rightarrow m \notin n \end{aligned}$$

ゆえに、

$$\begin{aligned} n \subsetneq s(m) &= m \cup \{m\} \\ n &\subset m \\ n \subsetneq m \vee n &= m \end{aligned}$$

選言の一つ目について、仮定より、

$$\begin{aligned} n \subsetneq m \\ n \in m \\ n \in s(m) \end{aligned}$$

選言の二つ目について、

$$n = m \rightarrow n \in s(m)$$

定理 7.1.2 より左が成り立つ。 ■

Lem. 7.2.4. 後者と順序

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n < m \rightarrow s(n) \leq m)$$

Proof.

$$n \leq m \wedge n \neq m \text{ より、} n \subsetneq m$$

$$\text{補題 7.2.3 より、} n \in m. \text{ ゆえに、} s(n) = n \cup \{n\} \subset m$$

Thm. 7.2.5. 自然数の全順序

(\mathbb{N}, \leq) は全順序集合、すなわち以下を満たす。

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n \leq m \vee m \leq n)$$

Proof.

$n = 0$ について、 $\forall m (n \leq m)$ である。

ある $n \in \mathbb{N}$ で成り立つとすると、 $m \leq n$ のとき、 $m \leq n \leq s(n)$

$n \leq m \wedge \neg(m \leq n)$ すなわち $n \leq m \wedge n \neq m$ のとき、補題 7.2.4 より、 $s(n) \leq m$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.2.6. 自然数の順序の後者による保存

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n < m \rightarrow s(n) < s(m))$$

Proof.

$n < m \wedge s(m) \leq s(n)$ を仮定する。

$m < s(m)$ であるので、 $m < s(n)$ 、ゆえに、 $m \in s(n) = n \cup \{n\}$

したがって、 $m \in n \vee m = n$

補題 7.2.3 より、 $m \leq n$ 。矛盾する。

背理法より示される。 ■

Thm. 7.2.7. 最小値原理

自然数 \mathbb{N} の空でない部分集合 A は最小元を持つ。

Proof.

持たないと仮定する。

このとき、 $\forall n \in \mathbb{N} \forall m \in \mathbb{N} (m \leq n \rightarrow m \notin A)$ を示す。

$n = 0$ のとき、 $0 \in A$ ならば仮定に反するので明らか。

ある n で成り立つとする。 $s(n) \in A$ ならば $s(n)$ は A の最小元となるので、 $s(n) \notin A$ 。

定理 7.1.2 を用いて上の命題が示されるので、 $\forall n \in \mathbb{N} (n \notin A)$ が直ちに言える。

これは A が空でないことに反する。背理法より、示される。 ■

Thm. 7.2.8. 無限降下法

アリティ 1 の述語記号 P について、

$$\forall n \in \mathbb{N} \exists m \in \mathbb{N} (m < n \wedge P(n) \rightarrow P(m)) \rightarrow \forall n \in \mathbb{N} (\neg P(n))$$

Proof.

$\exists n \in \mathbb{N} (P(n))$ とすると、 $\{n \in \mathbb{N} \mid P(n)\}$ は空でない。定理 7.2.7 より、最小値 n_0 を持つ。

これは仮定に反するので、背理法より示される。 ■

7.3 自然数の加法

Lem. 7.3.1.

以下で定める部分写像 $+$ は $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ について左全域的である。

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N} (+((n, 0)) &:= n) \\ \forall n, m \in \mathbb{N} (+((n, s(m))) &:= s(n + m)) \end{aligned}$$

Proof.

$\forall (n, m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ に対して、 $+((n, m))$ が存在することを示す。

$m = 0$ のとき定義より成り立つ。

ある m で成り立つとすると、定義より $(n, s(m))$ でも成り立つ。

定理 7.1.2 より、任意の m について示される。 ■

Def. 7.3.1. 自然数の加法

補題 7.3.1 より定まる写像を加法と呼び、 $+$ で表す。

書き直して再掲する。

$$\begin{aligned}\forall n \in \mathbb{N}(n + 0 := n) \\ \forall n, m \in \mathbb{N}(n + s(m) := s(n + m))\end{aligned}$$

Cor. 7.3.2. 1 の和

$$\forall n \in \mathbb{N}(s(n) = n + 1)$$

Lem. 7.3.3. 自然数の加法の結合法則

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N}((n + m) + l = n + (m + l))$$

つまり上の等式の両辺は、 $n + m + l$ と表記してもよい。

Proof.

$l = 0$ のとき、以下より成り立つ。

$$(n + m) + 0 = (n + m) = n + m = n + (m + 0)$$

ある l で成り立つとき、

$$\begin{aligned}(n + m) + s(l) &= s((n + m) + l) \\ &= s(n + (m + l)) \\ &= n + s((m + l)) \\ &= n + (m + s(l))\end{aligned}$$

定理 7.1.2 より、任意の l について示される。 ■

Lem. 7.3.4. 自然数の加法の単位元

$$\forall n \in \mathbb{N}(n + 0 = 0 + n = n)$$

Proof.

定義より、

$$n + 0 = n$$

$\forall n \in \mathbb{N}(0 + n = n)$ を示す。

$n = 0$ のとき、 $0 + 0 = 0$ より満たす。

ある n で成り立つとき、

$$0 + s(n) = s(0 + n) = s(n)$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.3.5.

$$\forall n, m \in \mathbb{N}(s(n) + m = s(n + m))$$

Proof.

$m = 0$ のとき、以下より成り立つ。

$$s(n) + 0 = s(n) = s(n + 0)$$

ある m について成り立つとき、

$$s(n) + s(m) = s(s(n) + m) = s(s(n + m)) = s(n + s(m))$$

定理 7.1.2 より、任意の m について示される。 ■

Lem. 7.3.6. 自然数の加法の交換法則

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n + m = m + n)$$

Proof.

$m = 0$ のとき、補題 7.3.4 より示される。

ある m で成り立つとき、補題 7.3.5 より、

$$n + s(m) = s(n + m) = s(m + n) = s(m) + n$$

定理 7.1.2 より、任意の m について示される。 ■

Lem. 7.3.7. 自然数の順序の加法による保存

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N} (n < m \rightarrow n + l < m + l)$$

Proof.

$l = 0$ のとき、明らか。

ある l で成り立つとき、補題 7.2.6 より、

$$n + s(l) = s(n + l) < s(m + l) = m + s(l)$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.3.8. 自然数の順序の加法による特徴づけ

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (m \leq n \leftrightarrow \exists k \in \mathbb{N} (m + k = n))$$

右について、この k は一意に定まる。

Proof.

左は、全順序性、補題 7.3.7、 $\forall k \in \mathbb{N} (0 \leq k)$ を用いて、背理法により示される。

右について考える。

$n = 0$ のとき、 $m = 0$ ならば $k = 0$ が存在。 $m \neq 0$ ならば前件否定。

ある n で成り立つときを考える。 $n < m \vee m \leq n$ である。

$n < m$ のとき、補題 7.2.4 より $s(n) \leq m$ である。 $s(n) < m$ のとき前件否定より自明。 $s(n) = m$ のとき、 $k = 0$ で存在。

$m \leq n$ のとき、仮定より $\exists k \in \mathbb{N} (m + k = n)$

ゆえに、 $m \leq s(n)$ かつ $s(n) = s(m + k) = m + s(k)$ となる。

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。

$k < k'$ とすると、補題 7.3.7 より矛盾。 $k > k'$ でも同様より、示される。 ■

Def. 7.3.2. 自然数の減法

自然数 n, m について、 $m \leq n$ であるとき、補題 7.3.8 より一意に定まる k を $n - m$ と表す。

7.4 自然数の乗法

Lem. 7.4.1.

以下で定める部分写像 \times は $\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ について左全域的である。

$$\begin{aligned}\forall n \in \mathbb{N}(\times((n, 0)) &:= 0) \\ \forall n, m \in \mathbb{N}(\times((n, s(m))) &:= n + \times((n, m)))\end{aligned}$$

Proof.

$\forall(n, m) \in \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ に対して、 $\times((n, m))$ が存在することを示す。

$m = 0$ のとき定義より成り立つ。

ある m で成り立つとすると、定義と加法の定義より $(n, s(m))$ でも成り立つ。

定理 7.1.2 より、任意の m について示される。 ■

Def. 7.4.1. 自然数の乗法

補題 7.4.1 より定まる二項演算を乗法と呼び、 \times で表す。

書き直して再掲する。

$$\begin{aligned}\forall n \in \mathbb{N}(n \times 0 &:= 0) \\ \forall n, m \in \mathbb{N}(n \times s(m) &:= n + n \times m)\end{aligned}$$

乗法 \times は、加法 $+$ よりも先に演算される。

また、 $m \times n$ を誤解のない範囲で mn と略記する。

Lem. 7.4.2. 左零元

$$\forall n \in \mathbb{N}(0 \times n = 0)$$

Proof.

$n = 0$ のとき、 $0 \times 0 = 0$

ある n で成り立つとき、

$$0 \times s(n) = 0 + 0 \times n = 0 + 0 = 0$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.4.3. 自然数の乗法の単位元

$$\forall n \in \mathbb{N}(n = n \times 1 = 1 \times n)$$

Proof.

左について $1 = s(0)$ より、

$$n \times 1 = n \times s(0) = n + n \times 0 = n + 0 = n$$

右について考える。

$n = 0$ のとき、 $1 \times 0 = 0$

ある n で成り立つとき、

$$1 \times s(n) = 1 + 1 \times n = 1 + n = s(n)$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.4.4. 自然数の右分配法則

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N} ((n + m) \times l = n \times l + m \times l)$$

Proof.

$l = 0$ のとき、以下より成り立つ。

$$(n + m) \times 0 = 0 = 0 + 0 = n \times 0 + m \times 0$$

ある l で成り立つとき、

$$\begin{aligned} (n + m) \times s(l) &= n + m + (n + m) \times l \\ &= n + m + n \times l + m \times l \\ &= n \times s(l) + m \times s(l) \end{aligned}$$

定理 7.1.2 より、任意の l について示される。 ■

Lem. 7.4.5. 自然数の乗法の交換法則

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n \times m = m \times n)$$

Proof.

補題 7.4.2 より、 $m = 0$ について、 $n \times 0 = 0 \times n$

ある m で成り立つとき、

$$\begin{aligned} n \times s(m) &= n + n \times m \\ &= n + m \times n \\ &= m \times n + n \\ &= m \times n + 1 \times n \\ &= (m + 1) \times n \\ &= s(m) \times n \end{aligned}$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.4.6. 自然数の乗法の結合法則

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N} ((n \times m) \times l = n \times (m \times l))$$

つまり上の等式の両辺は、 $n \times m \times l$ と表記してもよい。

Proof.

$l = 0$ のとき、以下より成り立つ。

$$(n \times m) \times 0 = 0 = n \times 0 = n \times (m \times 0)$$

ある l で成り立つとき、

$$\begin{aligned}(n \times m) \times s(l) &= n \times m + (n \times m) \times l \\&= n \times m + n \times (m \times l) \\&= m \times n + (m \times l) \times n \\&= (m + m \times l) \times n \\&= n \times (m + m \times l) \\&= n \times (1 \times m + l \times m) \\&= n \times (s(l) \times m) \\&= n \times (m \times s(l))\end{aligned}$$

定理 7.1.2 より、任意の l について示される。 ■

Lem. 7.4.7. 自然数の分配法則

$$\begin{aligned}\forall n, m, l \in \mathbb{N}((n + m) \times l &= n \times l + m \times l) \\ \forall n, m, l \in \mathbb{N}(n \times (m + l) &= n \times m + n \times l)\end{aligned}$$

Proof.

右分配法則と交換法則より示される。 ■

Lem. 7.4.8. 自然数の順序の乗法による保存

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N}((n \neq 0 \wedge m < l) \rightarrow n \times m < n \times l)$$

Proof.

$n = 0$ のとき、前件否定より明らか。

$n = 1$ のとき、1 が乗法の単位元であることから明らか。

ある $n \geq 1$ で成り立つとき、

$$s(n) \times m = n \times m + m < n \times m + l < n \times l + l = s(n) \times l$$

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Lem. 7.4.9. 自然数の乗法の簡約則

$$\forall n, m, l \in \mathbb{N}(n \times m = n \times l \wedge n \neq 0 \rightarrow m = l)$$

Proof.

$m < l$ のとき、補題 7.4.8 より $n \times m < n \times l$ 。ゆえに、 $n \times m \neq n \times l$ 。

$l < m$ のとき、同様に $n \times m \neq n \times l$ 。

背理法より示される。 ■

Lem. 7.4.10.

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n \times m = 0 \rightarrow n = 0 \vee m = 0)$$

Proof.

$n = 0$ のとき自明。

$n \neq 0$ のとき、 $n \times m = n \times 0$ より、自然数の乗法の簡約則から $m = 0$ 。 ■

7.5 自然数の除法

Lem. 7.5.1.

$$\forall a, b \in \mathbb{N} (b \neq 0 \rightarrow \exists q, r \in \mathbb{N} (a = bq + r \wedge r < b))$$

Proof.

$a = 0$ のとき、 $q = r = 0$ で成り立つ。

ある a で成り立つとき、すなわち n_a, r_a が存在するときを考える。

$r_a < b$ より、 $s(r_a) \leq b$ である。

$s(r_a) < b$ のとき、 $q_{s(a)} = n_a, r_{s(a)} = s(r_a)$ は仮定より満たす。

$s(r_a) = b$ のとき、 $q_{s(a)} = s(n_a), r_{s(a)} = 0$ は仮定より満たす。

定理 7.1.2 より、任意の a について成り立つ。 ■

Lem. 7.5.2.

$$\forall a, b \in \mathbb{N} (b \neq 0 \rightarrow \forall q, r, q', r' \in \mathbb{N} (a = qb + r \wedge r < b \wedge a = q'b + r' \wedge r' < b \rightarrow q = q' \wedge r = r'))$$

Proof.

$q < q'$ とすると補題 7.3.8 より、 $\exists q_d \in \mathbb{N} (q + q_d = q' \wedge q_d \geq 1)$

このとき $a = bq + r = b(q' - q_d) + r'$ より、自然数の加法の簡約則から $r = b(q' - q_d) + r'$

これは $r < b \leq b(q' - q_d) + r'$ より矛盾。よって $q \geq q'$

同様に $q \leq q'$ 。したがって、 $q = q'$

自然数の加法の簡約則から、 $r = r'$

よって示される。 ■

Def. 7.5.1. 自然数の除法

補題 7.5.1、補題 7.5.2 より、以下の写像 $\div: \mathbb{N} \times (\mathbb{N} \setminus \{0\}) \rightarrow \mathbb{N} \times \mathbb{N}$ を定義できる。

$$a \div b = q \cdots r : \leftrightarrow a = bq + r$$

$\div((a, b))$ を $a \div b$ と、値域の元 (q, r) を $q \cdots r$ と表記するものとする。

特に、 q を商、 r を余りと呼ぶ。

Def. 7.5.2. 倍数

自然数 n, m について、 $n \div m$ の余りが 0 のとき、 n は m の倍数、または m は n の約数と言う。

Cor. 7.5.3.

任意の自然数 n について、0 は n の倍数であり、1 は n の約数である。また、 n は n の倍数でも約数でもある。

Def. 7.5.3. 偶奇

自然数 n について、2 で割った余りが 0 であるとき、 n を偶数と呼ぶ。

そうでないとき、 n を奇数と呼ぶ。

Def. 7.5.4. 素数

約数をちょうど 2 つ持つ自然数を素数と呼ぶ。

Cor. 7.5.4.

素数 p の約数は、1 と p である。

8 有限と可算

8.1 有限

Def. 8.1.1. 有限集合

集合 X について、ある自然数 $n \in \mathbb{N}$ が存在して全単射 $f: n \rightarrow X$ が構成できるとき、 X を有限集合と呼ぶ。または、単に X は有限であると呼ぶ。

Lem. 8.1.1. 全射と要素数

$\forall n, m \in \mathbb{N}$ について、 n から m への全射が存在するならば、 $m \leq n$

Proof.

$n = 0$ のとき、 $m \neq 0$ ならば全射が存在しない。 $m = 0$ より示される。

ある n で成り立つとき、全射 $f: s(n) \rightarrow m$ が存在することを考える。

$0^{s(n)} = \emptyset$ より、 $m \neq 0$ である。

$\exists k \in n (f(k) = f(n))$ のとき、自明な全射 $f|_n$ を構成できて、仮定より $m \leq n \leq s(n)$

$\forall k \in n (f(k) \neq f(n))$ のとき、以下のような全射 $g: n \rightarrow p(m)$ を構成できる。

$$g(x) = \begin{cases} f(x) & (f(x) < f(n)) \\ p(f(x)) & (f(x) > f(n)) \end{cases}$$

仮定より $p(m) \leq n$ より、 $m = s(p(m)) \leq s(n)$

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

Lem. 8.1.2. 単射と要素数

自然数 $n, m \in \mathbb{N}$ について、 n から m への単射が存在するならば、 $n \leq m$

Proof.

$n = 0$ のとき、明らか。

$n \neq 0$ のとき、定理 ?? より m から n への左逆写像すなわち全射を構成できて、補題 8.1.1 より $n \leq m$ ■

Thm. 8.1.3. 鳩の巣原理

自然数 $n, m \in \mathbb{N}$ について、 $m < n$ ならば n から m への単射が存在しない。

Proof.

補題 8.1.2 の対偶である。 ■

Lem. 8.1.4.

有限集合 X について、全単射 $f: n \rightarrow X$ が構成できる自然数 $n \in \mathbb{N}$ は一意に定まる。

Proof.

補題 8.1.1、補題 8.1.2 より、背理法より示される。 ■

Def. 8.1.2. 要素数

有限集合 X について、補題 8.1.4 より主張される自然数を要素数 $|X|$ と呼ぶ。

また、集合 X が有限集合であることを主張するときは、アリティ 1 の述語記号 $|X| < \infty$ を用いる。

Lem. 8.1.5. 単射と有限

自然数 n と集合 A について、以下の 2 つは同値である。

1. A は有限集合であり、 $|A| \leq n$
2. 単射 $f: A \rightarrow n$ が存在する。

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

全単射 $f_1: A \rightarrow |A|$ が存在して、単射 $f_2: |A| \rightarrow n$ が存在する。

ゆえに、単射 $f_2 \circ f_1: A \rightarrow n$ が存在する。

2. \rightarrow 1. を示す。

$n = 0$ のとき、 $n^A \neq \emptyset$ より、 $A = \emptyset$ である。

ある n について成り立つとする。

$\forall a \in A (f(a) \neq n)$ のとき、自明な単射 $\tilde{f}: A \rightarrow n$ が存在する。よって $|A| \leq n \leq s(n)$

$\exists a \in A (f(a) = n)$ のとき、単射 $\tilde{f}: A \setminus \{a\} \rightarrow n$ が構成できる。

仮定より $\exists m \in \mathbb{N} (m \leq n)$ であり、全単射 $g: A \setminus \{a\} \rightarrow m$ が存在する。

ここで、以下のような全単射 $h: A \rightarrow s(m)$ を構成できる。

$$h(x) = \begin{cases} m & (x = a) \\ g(f(x)) & (x \neq a) \end{cases}$$

$|A| = s(m) \leq s(n)$ を得るので成り立つ。 ■

Lem. 8.1.6. 有限集合の部分

有限集合 X について、 X の部分 Y は有限であり、 $|Y| \leq |X|$ である。

Proof.

単射 $f: Y \rightarrow X, f(y) = y$ と、 $n \in \mathbb{N}$ で全単射 $g: X \rightarrow n$ が存在する。

ゆえに、単射 $g \circ f: Y \rightarrow n$ が存在して、補題 8.1.5 より成り立つ。 ■

Lem. 8.1.7. 有限集合の像

有限集合 X 、集合 Y 、写像 $f: X \rightarrow Y$ について、像 $f(X)$ は有限であり、 $|f(X)| \leq |X|$ である。

Proof.

定理 ?? より、 $f: X \rightarrow f(X)$ は右逆写像すなわち単射 $f^{-1}: f(X) \rightarrow X$ を持つ。

$n \in \mathbb{N}$ と全単射 $g: X \rightarrow n$ が存在するので、単射 $g \circ f^{-1}: f(X) \rightarrow n$ が存在して、補題 8.1.5 より成り立つ。 ■

Lem. 8.1.8. 有限集合の商

有限集合 X と、 X 上の同値関係 \sim について、商集合 X/\sim は有限であり、 $|X/\sim| \leq |X|$ である。

Proof.

商写像 $[]$ について、 $X/\sim = [X]$ である。補題 8.1.7 より成り立つ。 ■

Lem. 8.1.9. 有限集合の和

有限集合 X, Y について、 $X \cap Y = \emptyset$ ならば、 $X \cup Y$ は有限集合となり、以下が成り立つ。

$$|X \cup Y| = |X| + |Y|$$

Proof.

X, Y は有限より、全単射 $f: |X| \rightarrow X, f': |Y| \rightarrow Y$ が存在する。

ゆえに、以下のような全単射 $g: |X| + |Y| \rightarrow X \cup Y$ を構成できる。

$$g(x) = \begin{cases} g(x) & (x < |X|) \\ g'(x - |X|) & (|X| \leq x < |X| + |Y|) \end{cases}$$
 ■

Lem. 8.1.10. 有限集合の和と共通部分

有限集合 X, Y について、 $X \cup Y, X \cap Y$ は有限集合となり、以下が成り立つ。

$$|X \cup Y| + |X \cap Y| = |X| + |Y|$$

Proof.

単射 $f: X \cap Y \rightarrow X$ が構成できるので、補題 8.1.5 より $X \cap Y$ は有限集合である。

補題 8.1.9 より、 $|X| = |X \cap Y| + |X \setminus Y|$

補題 8.1.9 より、 $|X \cup Y| = |(X \setminus Y) \cup Y| = |X \setminus Y| + |Y|$

したがって、 $|X \cup Y| + |X \cap Y| + |X \setminus Y| = |X \setminus Y| + |Y| + |X|$

定義 7.3.2 より成り立つ。 ■

Lem. 8.1.11. 有限集合の直積

有限集合 X, Y について、 $X \times Y$ は有限集合となり、以下が成り立つ。

$$|X \times Y| = |X| \times |Y|$$

Proof.

全単射 $x: |X| \rightarrow X$ が存在する。

$\forall n \in |X|$ について、 $Z_n := \{(x(n), y) \mid y \in Y\}$ を考えると、 $|Z_n| = |Y|$ である。

$X \times Y = \bigsqcup \{Z_n \mid n \in |X|\}$ が成り立つ。

補題 8.1.9 より、 $|X|$ についての帰納法を用いて、 $|X \times Y| = |X| \times |Y|$ ■

Thm. 8.1.12. 有限有向集合の上界

空でない有向集合の有限部分集合 A は、上界を持つ。

Proof.

$|A| = 1$ のとき、 A は唯一つの元を持ち、上界である。

$|A| = 2$ のとき、 $a_0 \neq a_1$ を用いて $A = \{a_0, a_1\}$ と書ける。有向集合であることより上界が存在する。

$|A| = n$ のとき成り立つとする。

$|A| = s(n)$ について、 A のある元 a を考える。集合 $A \setminus \{a\}$ は要素数が n であるため、仮定より上界 a_n を持つ。

ゆえに、今、集合 $\{a, a_n\}$ は上界 $a_{s(n)}$ を持ち、推移律から A の上界となる。

要素数 $|A|$ について、定理 7.1.2 より示される。 ■

Thm. 8.1.13. 有限全順序集合の最大元

空でない全順序集合の有限部分集合 A は、最大元と最小元を持つ。

Proof.

$|A| = 1$ のとき、 A は唯一つの元を持ち、最大元かつ最小元である。

$|A| = 2$ のとき、 $a_0 \neq a_1$ を用いて $A = \{a_0, a_1\}$ と書ける。全順序性より $a_0 > a_1 \vee a_0 < a_1$ である。

$a_0 > a_1$ のとき、最大元 a_0 、最小元 a_1 である。 $a_0 < a_1$ のとき、最大元 a_1 、最小元 a_0 である。

$|A| = n$ のとき成り立つとする。

$|A| = s(n)$ について、 A のある元 a を考える。集合 $A \setminus \{a\}$ は要素数が n であるため、仮定より最大元 a_{\max} と最小元 a_{\min} を持つ。

ゆえに、 A は最大元 $\max \{a, a_{\max}\}$ を持ち、 A は最小元 $\min \{a, a_{\min}\}$ を持つ。

要素数 $|A|$ について、定理 7.1.2 より示される。 ■

Thm. 8.1.14. 自然数の上界と有限

\mathbb{N} の部分集合 A について、 A が上に有界ならば A は有限である。

Proof.

上界 n について考える。

$n = 0$ のとき、 $A \neq \emptyset$ ならば全射が存在しないので、示される。

ある n で成り立つとき、 A が有限であることを考える。

$s(n)$ が上界で、 n が上界でないとき、 $s(n) \in A$ である。

仮定より、 $\exists m \in \mathbb{N}$ で、全单射 $f_0: m \rightarrow A \setminus \{s(n)\}$ が存在する。

したがって、以下のような全单射 $f: s(m) \rightarrow A$ を構成できる。

$$f(x) = \begin{cases} f_0(x) & (x \neq m) \\ s(n) & (x = m) \end{cases}$$

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

8.2 可算

Def. 8.2.1. 可算

集合 X について、 X が空集合または全射 $f: \mathbb{N} \rightarrow X$ が存在するとき、 X を可算集合と呼ぶ。または、単に X は可算であると呼ぶ。

また、集合 X が可算集合であることを主張するときは、アリティ 1 の述語記号 $|X| \leq \aleph_0$ を用いる。

Cor. 8.2.1.

可算集合の部分集合は可算集合である。

Def. 8.2.2. 有限列

自然数 $n \in \mathbb{N}$ から集合 X へのネットを、 X 上の有限列、または組、 n -組と呼ぶ。

Def. 8.2.3. 点列

自然数 \mathbb{N} から集合 X へのネットを、 X 上の点列と呼ぶ。

Def. 8.2.4. 点列の部分列

単射な写像 $\varphi: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ を用いて表せる部分ネット $(x_{\varphi(m)})_{m \in \mathbb{N}}$ を点列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ の部分列と呼ぶ。

Def. 8.2.5. 非交叉列

点列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について以下が成り立つとき、 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を非交叉列と呼ぶ。

$$\forall n, m \in \mathbb{N} (n \neq m \rightarrow x_n \cap x_m = \emptyset)$$

Def. 8.2.6. 単調列

半順序集合 X 上の点列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について、以下のいずれかを満たす点列を単調列と呼ぶ。

$$\begin{aligned}\forall n \in \mathbb{N} (x_n < x_{s(n)}) \\ \forall n \in \mathbb{N} (x_n \leq x_{s(n)}) \\ \forall n \in \mathbb{N} (x_n > x_{s(n)}) \\ \forall n \in \mathbb{N} (x_n \geq x_{s(n)})\end{aligned}$$

特にそれぞれ、第一式を満たす点列を狭義単調増加列、第二式を広義単調増加列、第三式を狭義単調減少列、第四式を広義単調減少列と呼ぶ。

Thm. 8.2.2. 無限集合は可算部分を含む

有限でない集合 X について、単射 $a: \mathbb{N} \rightarrow X$ が存在する。

Proof.

$\forall A \subset X \setminus \{\emptyset\} \exists a \in A (a \in A)$ である。

定理 4.4.1 より定まる写像 $f: \mathfrak{P}(X) \setminus \{\emptyset\} \rightarrow X, f(X) \in A$ を考える。

X は空でないので、 $\exists a_0 \in X$ である。

$\forall n \in \mathbb{N}$ について、点列 $a_{s(n)} := f(X \setminus \{a_m \mid m \in s(n)\})$ を考えることができる。

なぜなら、 $\exists n \in \mathbb{N} (X \setminus \{a_m \mid m \in s(n)\} = \emptyset)$ とすると、 X は有限となり仮定に反する。

定義より $\forall n, m \in \mathbb{N} (a_n \neq a_m)$

単射 $a: \mathbb{N} \rightarrow X$ を持つ。 ■

Thm. 8.2.3. 自然数の直積は可算

$\mathbb{N} \times \mathbb{N}$ は可算である。

Proof.

全単射 $\varphi: \mathbb{N} \times \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}, \varphi(n, m) = ((n+m) \times (n+m+1)) \div 2 + n$ が存在する。

ただし、 $a \div b$ を除算の商を表すものとする。 ■

8.3 濃度の比較

Lem. 8.3.1.

集合 X について、自然な全単射 $\sigma: \mathfrak{P}(X) \rightarrow 2^X$ が存在する。

Proof.

$x \in X$ について、以下のように σ を定める。

$$\sigma(A)(x) = \begin{cases} 1 & (x \in A) \\ 0 & (x \notin A) \end{cases}$$

以下で定める σ^{-1} は逆写像である。

$$\sigma^{-1}(f) = \{x \in X \mid f(x) = 1\}$$

定理 ??より全単射である。 ■

Lem. 8.3.2. 自然数から集合への写像の全体

集合 X と $n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、全単射 $\sigma: X^n \times X \rightarrow X^{s(n)}$ が存在する。

また、全単射 $\sigma': X \rightarrow X^1$ が存在する。

Proof.

以下で定める σ は全単射である。

$$\sigma((x_m)_{m \in n}, x)(l) = \begin{cases} x_l & (l \in n) \\ x & (l = n) \end{cases}$$

以下で定める σ' は全単射である。

$$\sigma(x)(0) = x$$

■

Thm. 8.3.3.

集合 X, Y, Z について、自然な全単射 $\sigma: (X \times Y) \times Z \rightarrow X \times (Y \times Z)$ が存在する。

Proof.

$\sigma((x, y), z) = (x, (y, z))$ は全単射である。 ■

Thm. 8.3.4. Bernstein の定理

集合 A, B について、 A から B への单射 f が存在して、 B から A の单射 g が存在するならば、 A から B への全単射が存在する。

Proof.

以下のような点列 $(C_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

$$\begin{cases} C_0 := A \setminus g(B) \\ C_{s(n)} := g(f(C_n)) \end{cases}$$

点列の値域全体の和集合 $C := \bigcup \{C_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ を考える。

今、定理 3.4.16 より $A \setminus C \subset g(B)$ と、 g の单射性から、以下のような写像 $h: A \rightarrow B$ が構成できる。

$$h(x) := \begin{cases} f(x) & (x \in C) \\ g^{-1}(x) & (x \in A \setminus C) \end{cases}$$

单射でないと仮定すると、 $x \in C_n \wedge y \in A \setminus C$ について、

$$h(x) = h(y) \rightarrow g(f(x)) = y \in C_{s(n)}$$

矛盾するので、背理法より单射。

$D := \bigcup \{C_{s(n)} \mid n \in \mathbb{N}\}$ について、 $D \subset g(B)$ であり、定理 4.5.1 より、

$$g^{-1}(D) = \bigcup \{g^{-1}(C_{s(n)}) \mid n \in \mathbb{N}\} = \bigcup \{f(C_n) \mid n \in \mathbb{N}\} = f(C)$$

今、 $g(B) \subset A$ より、

$$A \setminus C = A \setminus (C_0 \cup D) = (A \setminus C_0) \setminus D = (A \setminus (A \setminus g(B))) \setminus D = g(B) \setminus D$$

したがって g の単射性と定理 4.5.3 より

$$h(A \setminus C) = g^{-1}(A \setminus C) = g^{-1}(g(B) \setminus D) = B \setminus g^{-1}(D) = B \setminus f(C)$$

ゆえに全射。 ■

Thm. 8.3.5. 濃度の比較可能定理

集合 A, B について、単射 $f: A \rightarrow B$ または単射 $f': B \rightarrow A$ が存在する。

Proof.

以下で定義する半順序集合 (\mathcal{M}, \subset) を考える。

$$\mathcal{M} := \{G \subset A \times B \mid \forall (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in G (x_1 = x_2 \leftrightarrow y_1 = y_2)\}$$

\mathcal{M} の全順序部分 C を考える。

$\forall (x_1, y_1), (x_2, y_2) \in \bigcup C \exists G_1, G_2 \in C ((x_1, y_1) \in G_1 \wedge (x_2, y_2) \in G_2)$ である。

ここで $G_1 \subset G_2 \vee G_2 \subset G_1$ より、 $x_1 = x_2 \leftrightarrow y_1 = y_2$ である。

ゆえに、 $\bigcup C \in \mathcal{M}$ は上界である。

したがって、 \mathcal{M} は帰納的である。

定理 6.3.5 より、極大元 G_0 が存在する。

二項関係 $\mathfrak{R}_0 := ((X, Y), G_0)$ を考える。

$\exists (x, y) \in (A \setminus \text{dom}(\mathfrak{R}_0)) \times (B \setminus \text{ran}(\mathfrak{R}_0))$ とする。

このとき、 $G_1 = \{(x, y)\} \cup G_0 \in \mathcal{M}$ となるので、 G_0 の極大性に反する。

ゆえに、 $A = \text{dom}(\mathfrak{R}_0) \vee B = \text{ran}(\mathfrak{R}_0)$ である。

$A = \text{dom}(\mathfrak{R}_0)$ のとき、 \mathfrak{R}_0 は写像であり、 \mathcal{M} の定義より単射である。

$B = \text{ran}(\mathfrak{R}_0)$ のとき、 $((B, A), \{(y, x) \in Y \times X \mid (x, y) \in G_0\})$ は写像であり、 \mathcal{M} の定義より単射である。 ■

9 位相空間

9.1 位相

Def. 9.1.1. 開基

空でない集合 X について、以下を満たす集合系 $\mathcal{B} \subset \mathfrak{P}(X)$ を開基と呼ぶ。

$$\begin{aligned}\forall x \in X &\exists B \in \mathcal{B}(x \in B) \\ \forall B_1, B_2 \in \mathcal{B} &\forall x \in B_1 \cap B_2 \exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset B_1 \cap B_2)\end{aligned}$$

Def. 9.1.2. 開集合系

空でない集合 X の開基 \mathcal{B} について、以下で与える集合系 \mathcal{O} を開集合系と呼ぶ。

$$\mathcal{O} := \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset O)\}$$

また、 \mathcal{O} の要素を開集合と呼ぶ。

Cor. 9.1.1.

空でない集合 X の開基 \mathcal{B} と、 \mathcal{B} の与える開集合系 \mathcal{O} は、以下を満たす。

$$\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$$

Lem. 9.1.2. 開集合系の一意性

集合 X の開基 \mathcal{B} と集合系 $\mathcal{B}' \subset \mathfrak{P}(X)$ について、以下を満たすとき、 \mathcal{B}' は開基である。

$$\begin{aligned}\forall B' \in \mathcal{B}' \forall x \in B' &\exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset B') \\ \forall B \in \mathcal{B} \forall x \in B &\exists B' \in \mathcal{B}'(x \in B' \wedge B' \subset B)\end{aligned}$$

さらに \mathcal{B} の定める開集合系と、 \mathcal{B}' の定める開集合系、この 2 つは一致する。

Proof.

第一式を考える。定義 9.1.1 第一式から $\exists B \in \mathcal{B}$ であり、 $\exists x \in X$ より、仮定から $\exists B' \in \mathcal{B}'$

第二式を考える。仮定より $\forall B'_1, B'_2 \in \mathcal{B}' \forall x \in B'_1 \cap B'_2 \exists B_1, B_2 \in \mathcal{B}(x \in B_1 \cap B_2 \subset B'_1 \cap B'_2)$ である。

定義 9.1.1 第二式から $\exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset B_1 \cap B_2)$ である。再び仮定より、 $\exists B' \in \mathcal{B}(x \in B' \subset B \subset B'_1 \cap B'_2)$

$\forall O \in \mathcal{O} \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B} \exists B' \in \mathcal{B}'(x \in B' \subset B \subset O)$ である。ゆえに、 $O \in \mathcal{O}'$ である。

同様に $\forall O' \in \mathcal{O}'(O \in \mathcal{O}')$ である。 ■

Thm. 9.1.3. 開集合系の公理

空でない集合 X の開集合系 \mathcal{O} について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}X &\in \mathcal{O} \\ \forall O_1, O_2 \in \mathcal{O} &(O_1 \cap O_2 \in \mathcal{O}) \\ \forall A \subset \mathcal{O} &\left(\bigcup A \in \mathcal{O}\right)\end{aligned}$$

Proof.

第一式を示す。

定義 9.1.1 第一式より、 $\forall x \in X \exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset X)$ であるので、 $X \in \mathcal{O}$

第二式を示す。 $O_1, O_2 \in \mathcal{O}$ について、 $\forall x \in O_1 \cap O_2 \exists B_1, B_2 \in \mathcal{B}(x \in B_1 \cap B_2 \wedge B_1 \cap B_2 \subset O_1 \cap O_2)$

定義 9.1.1 第二式より、 $\exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset O_1 \cap O_2)$ であるので、 $O_1 \cap O_2 \in \mathcal{O}$

第三式を示す。 $A \subset \mathcal{O}$ について、 $\forall x \in \bigcup A \exists O \in \mathcal{O} \exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset O \wedge O \subset \bigcup A)$ であるので $\bigcup A \in \mathcal{O}$

■

Lem. 9.1.4. 開集合系の公理を満たす集合系

空でない集合 X と、定理 9.1.3 を満たす集合系 \mathcal{O} を考える。

このとき \mathcal{O} は開基であり、さらに、 \mathcal{O} の定める開集合系 \mathcal{O}' は \mathcal{O} に一致する。

Proof.

定理 9.1.3 第一式、第二式より、開基である。

定義 9.1.2 より $\mathcal{O} \subset \mathcal{O}'$ を得る。

定義 9.1.2 より $\forall O' \in \mathcal{O}' \forall x \in O' \exists O_x \in \mathcal{O}(x \in O_x \wedge O_x \subset O')$ である。

$O' = \bigcup \{O_x \mid x \in O'\} \in \mathcal{O}$ である。

■

Def. 9.1.3. 位相空間

空でない集合 X と、 X 上の開集合系 \mathcal{O} について、順序対 (X, \mathcal{O}) を位相空間と呼ぶ。または単に X と書き、位相空間と集合どちらも表すものとする。

\mathcal{O} をとくに位相と呼ぶ。また、位相空間の元を点と呼ぶ。

Def. 9.1.4. 連続

位相空間 $(X, \mathcal{O}), (X', \mathcal{O}')$ について、写像 $f: X \rightarrow X'$ が以下を満たすとき、 f は連続であると呼ぶ。

$$\forall O' \in \mathcal{O}'(f^{-1}(O') \in \mathcal{O})$$

Lem. 9.1.5. 開基と連続

位相空間 $(X, \mathcal{O}), (X', \mathcal{O}')$ と X' の開基 \mathcal{B}' 、および写像 $f: X \rightarrow X'$ を考える。このとき、以下の 2 つは同値である。

1. f は連続。
2. $\forall B' \in \mathcal{B}'(f^{-1}(B') \in \mathcal{O})$

Proof.

1. \rightarrow 2. は、 $\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$ より明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。 $O' \in \mathcal{O}'$ について考える。

定理 9.1.3 より $\forall x \in O' \exists B' \in \mathcal{B}'(x \in B' \wedge B' \subset O')$ である。

ゆえに、 $O' = \bigcup \{B'(x) \mid x \in O'\}$ である。

定理 4.5.3 より $f^{-1}(O') = \bigcup \{f^{-1}(B'(x)) \mid x \in O'\}$ であるので、定理 9.1.3 第三式より示される。

■

Thm. 9.1.6. 連続写像の合成

位相空間 X_1, X_2, X_3 について、写像 $f: X_1 \rightarrow X_2, g: X_2 \rightarrow X_3$ がともに連続であるとき、合成 $g \circ f$ は連続である。

Proof.

$\forall O_3 \in \mathcal{O}_3 (g^{-1}(O_3) \in \mathcal{O}_2)$ であり、 $f^{-1}(g^{-1}(O_3)) \in \mathcal{O}_1$ である。 ■

Def. 9.1.5. 同相

位相空間 X, X' と写像 $f: X \rightarrow X'$ について、 f が全単射かつ f と f^{-1} がともに連続であるとき、 f を同相写像と呼ぶ。

また、同相写像 $f: X \rightarrow X'$ が存在するとき、 X と X' は位相同型または同相であると呼ぶ。

Cor. 9.1.7.

位相空間 X について、 id_X は同相写像である。

9.2 誘導位相

Lem. 9.2.1.

空でない集合 X と、位相空間 (X', \mathcal{O}') 、 \mathcal{O}' を与える X の開基 \mathcal{B}' 、写像 $f: X \rightarrow X'$ を考える。

このとき、以下の集合系 \mathcal{B} は X の開基である。

$$\mathcal{B} := \{f^{-1}(B) \mid B \in \mathcal{B}'\}$$

さらに、 \mathcal{B} の与える開集合系 \mathcal{O}_1 と、 \mathcal{O}' からこの補題により与える開基 \mathcal{O}_2 は一致する。

Proof.

第一式を考える。 $\forall x \in X$ について、定義 9.1.1 第一式より $\exists B' \in \mathcal{B}' (f(x) \in B')$ であるので、 $x \in f^{-1}(B')$

第二式を考える。 $\forall B'_1, B'_2 \in \mathcal{B}'$ について考える。

$\forall x \in f^{-1}(B'_1) \cap f^{-1}(B'_2)$ について、定理 4.5.3 より $f(x) \in B'_1 \cap B'_2$ である。

ゆえに定義 9.1.1 第二式より $\exists B' \in \mathcal{B}' (f(x) \in B' \wedge B' \subset B'_1 \cap B'_2)$ である。

定理 4.5.3 より $x \in f^{-1}(B') \wedge f^{-1}(B') \subset f^{-1}(B'_1 \cap B'_2) = f^{-1}(B'_1) \cap f^{-1}(B'_2)$

補題 9.1.4 を用いて、 \mathcal{O}_2 が開集合であることを示す。

第一式を考える。定理 9.1.3 第一式より $X' \in \mathcal{O}'$ であるので、 $X = f^{-1}(X') \in \mathcal{O}_2$

第二式を考える。定理 4.5.3 と定理 9.1.3 第二式より $\forall O'_1, O'_2 \in \mathcal{O}' (f^{-1}(O'_1) \cap f^{-1}(O'_2) = f^{-1}(O'_1 \cap O'_2) \in \mathcal{O}_2)$

第三式を考える。定理 4.5.3 と定理 9.1.3 第三式より $\forall A' \subset \mathcal{O}' (\bigcup \{f^{-1}(O') \mid O' \in A'\} = f^{-1}(\bigcup A') \in \mathcal{O}_2)$

ゆえに \mathcal{O}_2 は開集合系である。

$\forall B' \in \mathcal{B} \forall x \in f^{-1}(B') (f^{-1}(B') \in \mathcal{O}_2 \wedge x \in f^{-1}(B'))$ である。

$\forall O' \in \mathcal{O}' \forall x \in f^{-1}(O')$ について、 $\exists B' \in \mathcal{B}' (f(x) \in B' \wedge B' \subset O')$ である。

よって、定理 4.5.3 より $x \in f^{-1}(B') \wedge f^{-1}(B') \subset f^{-1}(O')$

補題 9.1.2 より成り立つ。 ■

Def. 9.2.1. 誘導空間

空でない集合 X と、位相空間 (X', \mathcal{O}') 、写像 $f: X \rightarrow X'$ について、補題 9.2.1 より定まる開集合系 \mathcal{O} が存在する。

位相空間 (X, \mathcal{O}) を f に誘導された位相空間と呼ぶ。

Def. 9.2.2. 部分空間

位相空間 (X, \mathcal{O}) と、 X の空でない部分集合 A を考える。

$f = \text{id}_X|_A$ に誘導された位相空間 (A, \mathcal{O}_A) を部分空間と呼ぶ。

Lem. 9.2.2.

位相空間 $(X_1, \mathcal{O}_1), (X_2, \mathcal{O}_2)$ と $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2$ を与える開基 $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2$ を考える。

このとき、 $\mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2$ は $X_1 \times X_2$ の開基である。

さらに、 $\mathcal{B}_1, \mathcal{B}_2$ の与える開集合系と、 $\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2$ からこの補題により与える開基の定める開集合系、この 2 つは一致する。

Proof.

第一式を考える。

定義 9.1.1 第一式より $\forall (x_1, x_2) \in X_1 \times X_2 \exists (B_1, B_2) \in \mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2 (x_1 \in B_1 \wedge x_2 \in B_2)$ である。

第二式を考える。 $\forall (B_{11}, B_{21}), (B_{12}, B_{22}) \in \mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2 \forall (x_1, x_2) \in (B_{11} \cap B_{12}, B_{21} \cap B_{22})$ を考える。

定義 9.1.1 第二式より $\exists B_1 \in \mathcal{B}_1 \exists B_2 \in \mathcal{B}_2 (x_1 \in B_1 \subset B_{11} \cap B_{12} \wedge x_2 \in B_2 \subset B_{21} \cap B_{22})$

$(B_{11} \cap B_{12}, B_{21} \cap B_{22}) = (B_{11}, B_{21}) \cap (B_{12}, B_{22})$ であるので成り立つ。

$\mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2 \subset \mathcal{O}_1 \times \mathcal{O}_2$ である。

$\forall (O_1, O_2) \in \mathcal{O}_1 \times \mathcal{O}_2 \forall (x_1, x_2) \in \mathcal{O}_1 \times \mathcal{O}_2$ について考える。

定義 9.1.2 より $\exists (B_1, B_2) \in \mathcal{B}_1 \times \mathcal{B}_2 (x_1 \in B_1 \wedge B_1 \subset O_1 \wedge x_2 \in B_2 \wedge B_2 \subset O_2)$

$(x_1, x_2) \in B_1 \times B_2 \wedge B_1 \times B_2 \subset O_1 \times O_2$ である。

したがって、補題 9.1.2 より成り立つ。 ■

Def. 9.2.3. 直積空間

位相空間 $(X_1, \mathcal{O}_1), (X_2, \mathcal{O}_2)$ について、補題 9.2.2 より定まる位相空間 $(X_1 \times X_2, \mathcal{O})$ を直積空間と呼ぶ。また位相 \mathcal{O} を箱位相と呼ぶ。

Lem. 9.2.3. 直積と連続

位相空間 $(X_1, \mathcal{O}_1), (X_2, \mathcal{O}_2), (Y, \mathcal{O})$ について、連続写像 $f: X_1 \times X_2 \rightarrow Y$ を考える。

このとき、 $\forall w \in X_1$ について写像 $f_w: X_2 \rightarrow Y, f_w(x) = f(w, x)$ は連続である。

Proof.

$\forall O \in \mathcal{O}$ について、 $f_w^{-1}(O) = \{x \in X_2 \mid f(w, x) \in O\}$ である。

f は連続より $\forall x \in f_w^{-1}(O) \exists (O_1, O_2) \in \mathcal{O}_1 \times \mathcal{O}_2 ((w, x) \in O_1 \times O_2 \wedge O_1 \times O_2 \subset f^{-1}(O))$

$\forall z \in O_2$ について、 $(w, z) \in O_1 \times O_2 \subset f^{-1}(O)$ より、 $f(w, z) \in O$ である。したがって $O_2 \subset f_w^{-1}(O)$ である。

$f_w^{-1}(O) = \bigcup \{O_2 \mid x \in f_w^{-1}(O)\} \in \mathcal{O}_2$ より連続。 ■

9.3 近傍

Def. 9.3.1. 基本近傍系

空でない集合 X とその任意の点 x について、以下を満たす集合系 $\mathcal{B}(x) \subset \mathfrak{P}(X)$ を基本近傍系と呼ぶ。

$$\begin{aligned} & \mathcal{B}(x) \neq \emptyset \\ & \forall B \in \mathcal{B}(x)(x \in B) \\ & \forall B_1, B_2 \in \mathcal{B}(x) \exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset B_1 \cap B_2) \\ & \forall B \in \mathcal{B}(x) \exists B' \in \mathcal{B}(x) \forall y \in B' \exists D \in \mathcal{B}(y)(D \subset B) \end{aligned}$$

Cor. 9.3.1. 有向集合としての基本近傍系

空でない集合 X とその点 $x \in X$ について、 $(\mathcal{B}(x), \supset)$ は有向集合である。

Def. 9.3.2. 近傍系

空でない集合 X の基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ について、以下で与える集合系 $\mathcal{N}(x)$ を近傍系と呼ぶ。

$$\mathcal{N}(x) := \{N \subset X \mid \exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset N)\}$$

Cor. 9.3.2.

空でない集合 X の基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ と、 $\mathcal{B}(x)$ の与える開集合系 $\mathcal{N}(x)$ は、以下を満たす。

$$\forall x \in X(\mathcal{B}(x) \subset \mathcal{N}(x))$$

Lem. 9.3.3. 近傍系の一意性

空でない集合 X の基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ と集合系 $\mathcal{B}'(x) \subset \mathfrak{P}(X)$ について、以下を満たすとき、 $\mathcal{B}'(x)$ は基本近傍系である。

$$\begin{aligned} & \forall B' \in \mathcal{B}'(x) \exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset B') \\ & \forall B \in \mathcal{B}(x) \exists B' \in \mathcal{B}'(x)(B' \subset B) \end{aligned}$$

さらに $\mathcal{B}(x)$ の定める近傍系と、 $\mathcal{B}'(x)$ の定める近傍系、この 2 つは一致する。

Proof.

第一式を考える。定義 9.3.1 第一式から $\exists B \in \mathcal{B}(x)$ より、仮定から $\exists B' \in \mathcal{B}'(x)$

第二式を考える。定義 9.3.1 第二式より $\forall B' \in \mathcal{B}'(x) \exists B \in \mathcal{B}(x)(x \in B \subset B')$

第三式を考える。定義 9.3.1 第三式より $\forall B'_1, B'_2 \in \mathcal{B}'(x) \exists B_1, B_2, B \in \mathcal{B}(x) \exists B' \in \mathcal{B}'(x)(B' \subset B \subset B_1 \cap B_2 \subset B'_1 \cap B'_2)$

第四式を考える。仮定より $\forall B' \in \mathcal{B}'(x) \exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset B')$ である。

定義 9.3.1 第四式より $\exists C \in \mathcal{B}(x) \forall y \in C \exists D \in \mathcal{B}(y)(D \subset B)$ である。

仮定より $\exists C' \in \mathcal{B}'(x)(C' \subset C)$ より、 $\forall y \in C' \exists D \in \mathcal{B}(y)(D \subset B)$ である。

仮定より $\exists D' \in \mathcal{B}'(y)(D' \subset D)$ であり、 $D' \subset D \subset B' \subset B$ より成り立つ。

$\forall N \in \mathcal{N}(x) \exists B \in \mathcal{B}(x) \exists B' \in \mathcal{B}'(x) (B' \subset B \subset N)$ である。ゆえに、 $N \in \mathcal{N}'(x)$ である。

$\forall N' \in \mathcal{N}'(x) \exists B' \in \mathcal{B}'(x) \exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset B' \subset N')$ である。ゆえに、 $N' \in \mathcal{N}(x)$ である。 ■

Lem. 9.3.4. 近傍系は基本近傍系

近傍系 $\mathcal{N}(x)$ は基本近傍系である。さらに $\mathcal{N}(x)$ から定義 9.3.2 より定まる近傍系は、 $\mathcal{N}(x)$ に一致する。

Proof.

定義より $\forall N \in \mathcal{N}(x) \exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset N)$ である。

$\mathcal{B}(x) \subset \mathcal{N}(x)$ である。

補題 9.3.3 より成り立つ。 ■

Thm. 9.3.5. 開基の定める基本近傍系

位相空間 (X, \mathcal{O}) と、 \mathcal{O} を与える X' の開基 \mathcal{B} を考える。

X の任意の点 x について、以下を満たす集合系 $\mathcal{B}(x)$ は基本近傍系である。

$$\mathcal{B}(x) := \{B \in \mathcal{B} \mid x \in B\}$$

さらに $\mathcal{B}(x)$ の与える近傍系と、 \mathcal{O} からこの定理の与える基本近傍系 $\mathcal{B}'(x)$ が与える近傍系、この 2 つは一致する。

Proof.

第一式を考える。定義 9.1.1 第一式と定義より成り立つ。

第二式は定義より明らか。

第三式を考える。定義 9.1.1 第二式より $\exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset B_1 \cap B_2)$ が成り立つ。

ゆえに、 $B \in \mathcal{B}(x)$

第四式を考える。定義より $B = B' = D$ として成り立つ。

$\mathcal{B} \subset \mathcal{O}$ より、 $\mathcal{B}(x) \subset \mathcal{B}'(x)$ である。

$\forall B' \in \mathcal{B}'(x)$ について、 $x \in B' \wedge \forall y \in B' \exists B \in \mathcal{B}(y \in B \wedge B \subset B')$ である。ゆえに、 $\exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset B')$ 補題 9.3.3 より成り立つ。 ■

Thm. 9.3.6. 基本近傍系の定める位相

空でない集合 X とその任意の点 x について、基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ が与えられているとする。

このとき、以下の集合 \mathcal{O} は X の開基であり、かつ \mathcal{O} の定める開集合系は \mathcal{O} である。

$$\mathcal{O} := \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset O)\}$$

さらに \mathcal{O} と、 $\mathcal{N}(x)$ からこの定理の与える開集合系 \mathcal{O}' 、この 2 つは一致する。

Proof.

補題 9.1.4 を用いて示す。

第一式を考える。定義 9.3.1 第一式より $\forall x \in X \exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset X)$ であるので、 $X \in \mathcal{O}$

第二式を考える。 $O_1, O_2 \in \mathcal{O}$ とする。

$\forall x \in O_1 \cap O_2$ について、定義より $\exists B_1, B_2 \in \mathcal{B}(x) (B_1 \cap B_2 \subset O_1 \cap O_2)$ である。

定義 9.3.1 第三式より $\exists B \in \mathcal{B}(B \subset B_1 \cap B_2 \subset O_1 \cap O_2)$ であるので、 $O_1 \cap O_2 \in \mathcal{N}(x)$ である。

第三式を考える。 $A \subset \mathcal{O}$ を考える。

$A = \emptyset$ のとき、 $\bigcup A = \bigcup \emptyset = \emptyset \in \mathcal{O}$ より成り立つ。

$A \neq \emptyset$ のとき、 $\forall x \in \bigcup A$ について、 $\exists O \in \mathcal{O}(x \in O \subset \bigcup A)$ である。

定義より $\exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset O \subset \bigcup A)$ である。定義より示される。

$\forall x \in X(\mathcal{B}(x) \subset \mathcal{N}(x))$ より、 $\mathcal{O} \subset \mathcal{O}'$ である。

$\forall O' \in \mathcal{O}' \forall y \in O' \exists N \in \mathcal{N}(y) \exists B \in \mathcal{B}(y)(N \subset B \subset O')$ より、 $\mathcal{O}' \subset \mathcal{O}$ である。 ■

Lem. 9.3.7.

空でない集合 X を考える。

X の開基 \mathcal{B} の定める開集合系 \mathcal{O} と、定理 9.3.5 と定理 9.3.6 により定まる開集合系 \mathcal{O}' は、一致する。

X の基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ について、定理 9.3.6 と定理 9.3.5 の定める基本近傍系 $\mathcal{B}'(x)$ を考える。

$\mathcal{B}(x)$ の定める近傍系と、 $\mathcal{B}'(x)$ の定める近傍系は、一致する。

Proof.

以下より一致する。

$$\mathcal{O}' = \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset O)\} = \{O \subset X \mid \forall x \in O \exists B \in \mathcal{B}(x \in B \wedge B \subset O)\} = \mathcal{O}$$

定義より、以下である。

$$\mathcal{B}'(x) = \{B' \subset X \mid x \in B' \wedge \forall y \in B' \exists D \in \mathcal{B}(y)(D \subset B')\}$$

$\forall B' \in \mathcal{B}'(x)$ について、定義 9.3.1 第二式より $x \in B'$ であるので、定義から $\exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset B')$ である。

$\forall B \in \mathcal{B}(x)$ について、 $B' := \{y \in X \mid \exists E \in \mathcal{B}(y)(E \subset B)\}$ を考える。定義より $B' \subset B$ であり、 $x \in B'$ である。

$\forall y \in B' \exists E \in \mathcal{B}(y)(E \subset B)$ について、定義 9.3.1 第四式より $\exists C \in \mathcal{B}(y) \forall z \in C \exists D \in \mathcal{B}(z)(D \subset E \subset B)$ である。

定義より $z \in B'$ である。したがって $C \subset B'$ である。

よって $B' \subset B$ である。

補題 9.3.3 より成り立つ。 ■

Def. 9.3.3. 収束

位相空間 X と X 上の点 a について、 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が以下を満たすとき、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は a に収束すると呼ぶ。

$$\forall N \in \mathcal{N}(a) \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\geq \lambda_0}} \subset N \right)$$

また、この a を $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ の収束先と呼び、一意に定まるとき $\lim_{\lambda \rightarrow \infty} (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} := a$ と表す。

Cor. 9.3.8.

位相空間 X について、 X 上の点 a に収束するネットの部分ネットは a に収束する。

Lem. 9.3.9. 基本近傍系と収束

位相空間 X と X 上の点 a と、 $\mathcal{N}(a)$ を与える X の基本近傍系 $\mathcal{B}(a)$ 、および X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ を考える。このとき、以下の 2 つは同値である。

1. $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は a に収束する。
2. $\forall B \in \mathcal{B}(a) \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{>\lambda_0}} \subset B \right)$

Proof.

1. \rightarrow 2. は、 $\mathcal{B}(a) \subset \mathcal{N}(a)$ より明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。

$$\forall N \in \mathcal{N}(a) \exists B \in \mathcal{B}(a) \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{>\lambda_0}} \subset B \subset N \right)$$
■

Def. 9.3.4. 点連続

位相空間 X, X' と点 $x \in X$ 、写像 $f: X \rightarrow X'$ について、以下を満たすとき、写像 f は点 x で連続であると言う。

$$\forall N' \in \mathcal{N}(f(x)) \exists N \in \mathcal{N}(x) (f(N) \subset N')$$

Cor. 9.3.10.

位相空間 X_1, X_2, X_3 と点 $x \in X_1$ 、写像 $f: X_1 \rightarrow X_2, g: X_2 \rightarrow X_3$ について、 f は点 x で連続であり、 g が点 $f(x)$ で連続であるとき、合成写像 $g \circ f$ は点 x で連続である。

Thm. 9.3.11. 点連続と収束

位相空間 X, X' と点 $x \in X$ 、写像 $f: X \rightarrow X'$ と、近傍系 $\mathcal{N}(x)$ を与える基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ について、以下の 3 つは同値である。

1. f が x で連続
2. $\forall B' \in \mathcal{B}(f(x)) \exists B \in \mathcal{B}(x) (f(B) \subset B')$
3. x に収束する任意のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、ネット $(f(x_\lambda))_{\lambda \in \Lambda}$ は $f(x)$ に収束する。

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$$\forall B' \in \mathcal{B}(f(x)) \subset \mathcal{N}(f(x)) \exists N \in \mathcal{N}(x) \exists B \in \mathcal{B}(x) (f(B) \subset f(N) \subset B')$$

2. \rightarrow 3. を示す。

$$\forall B' \in \mathcal{B}(f(x)) \exists B \in \mathcal{B}(x) \exists \lambda_0 \in \Lambda \left((f(x_\lambda))_{\lambda \in \Lambda_{>\lambda_0}} \in f(B) \subset B' \right)$$

3. \rightarrow 1. を示す。 f が x で連続でないと仮定する。

$$\exists N' \in \mathcal{N}(f(x)) \forall N \in \mathcal{N}(x) \exists y \in N (f(y) \notin N')$$

定理 4.4.1 より、写像 $g: \mathcal{N}(x) \rightarrow X, f(g(N)) \notin N'$ が存在して、 $(\mathcal{N}(x), \supset)$ は系 9.3.1 より有向集合である。

今、 g から構成されるネットは、順序を包含で定義したことから x に収束するが、 $f \circ g$ から構成されるネットは $f(x)$ に収束しない。背理法より示される。 ■

Thm. 9.3.12. 連続と点連續

位相空間 $(X, \mathcal{O}), (X', \mathcal{O}')$ と写像 $f: X \rightarrow X'$ について、以下の 2 つは同値である。

1. f は X 上の任意の点 x で連続
2. f は連続

Proof.

$\mathcal{O}, \mathcal{O}'$ を与える開基 $\mathcal{B}, \mathcal{B}'$ を考える。

1. \rightarrow 2. を示す。

$B' \in \mathcal{B}'$ について、 $f^{-1}(B') = \emptyset$ のとき明らか。 $f^{-1}(B') \neq \emptyset$ のときを考える。

$\forall x \in f^{-1}(B')$ について、 $B' \in \mathcal{B}(f(x))$ であるので点連續性から $\exists B \in \mathcal{B}(x) (f(B) \subset B')$ となる。

系 4.5.2 より $B \subset f^{-1}(f(B)) \subset f^{-1}(B')$ であるので、定理 9.3.6 より、 $f^{-1}(B')$ は開集合である。

2. \rightarrow 1. を示す。

$\forall x \in X \forall B' \in \mathcal{B}(f(x))$ について、 $B' \in \mathcal{B}'$ より、 $f^{-1}(B') \in \mathcal{O}$ である。

今、 $x \in f^{-1}(B')$ であるので、定義 9.1.2 より $\exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset f^{-1}(B'))$ となる。

したがって、系 4.5.2 より $f(B) \subset f(f^{-1}(B')) \subset B'$

■

9.4 閉集合

Def. 9.4.1. 閉集合系

位相空間 (X, \mathcal{O}) について、以下を満たす集合系 \mathcal{F} を閉集合系と呼ぶ。

$$\mathcal{F} := \{F \subset X \mid X \setminus F \in \mathcal{O}\}$$

また、 \mathcal{F} の要素を閉集合と呼ぶ。

Thm. 9.4.1. 閉集合系

位相空間 X について、閉集合系 \mathcal{F} は以下を満たす。

$$\begin{aligned} & \emptyset, X \in \mathcal{F} \\ & \forall A \subset \mathcal{F} \left(A \neq \emptyset \rightarrow \bigcap A \in \mathcal{F} \right) \\ & \forall F_1, F_2 \in \mathcal{F} (F_1 \cup F_2 \in \mathcal{F}) \end{aligned}$$

Proof.

定理 3.4.16 と定理 9.1.3 より示される。

■

Def. 9.4.2. 閉包

位相空間 X と X の部分集合 A について、以下で定義する集合を閉包と呼び、 \overline{A} で表す。

$$\overline{A} = \bigcap \{F \in \mathcal{F} \mid A \subset F\}$$

Cor. 9.4.2.

位相空間 X について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \forall A, B \subset X (A \subset B \rightarrow \overline{A} \subset \overline{B}) \\ \forall D \subset \mathfrak{P}(X) \left(\bigcup \{\overline{A} \mid A \in D\} \subset \overline{\bigcup D} \right) \end{aligned}$$

Thm. 9.4.3. 閉包

位相空間 X と X の部分集合 A と、近傍系 $\mathcal{N}(x)$ を与える基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ について、以下の 4 つは同値である。

1. $x \in \overline{A}$
2. $\forall N \in \mathcal{N}(x) (A \cap N \neq \emptyset)$
3. $\forall B \in \mathcal{B}(x) (A \cap B \neq \emptyset)$
4. x に収束する A 上のネットが存在する。

Proof.

1. \rightarrow 2. を考える。

$\exists N \in \mathcal{N}(x) (A \cap N = \emptyset)$ と仮定する。

$\exists O \in \mathcal{O}(x \in O \wedge O \subset N)$ であるので、 $x \notin X \setminus O$

$X \setminus O \in \mathcal{F}$ であり、 $A \subset X \setminus N \subset X \setminus O$

$x \in \overline{A}$ とすると、 $x \in X \setminus O$ となり矛盾。背理法より示される。

2. \rightarrow 3. は $\mathcal{B}(x) \subset \mathcal{N}(x)$ より明らか。

3. \rightarrow 4. を考える。

仮定より $\forall B \in \mathcal{B}(x) \exists y \in A (y \in B)$ である。

系 9.3.1 より、 $(\mathcal{B}(x), \supset)$ は有向集合である。

ネット $(y_B)_{B \in \mathcal{B}(x)}$ は、順序を包含で定義したことから x に収束する。

4. \rightarrow 1. を考える。

$x \notin \overline{A}$ に収束するネット $(y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda} \subset A$ が存在すると仮定する。

$\exists F \in \mathcal{F} (x \notin F \cap A \subset F)$ より、 $\exists \lambda_0 \in \Lambda \left((y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{>\lambda_0}} \subset X \setminus F \subset X \setminus A \right)$

これは A 上のネットであることに反する。背理法より示される。 ■

Def. 9.4.3. 開被覆

位相空間 (X, \mathcal{O}) とその被覆 C について、以下が成り立つとき、 C を開被覆と呼ぶ。

$$C \subset \mathcal{O}$$

Def. 9.4.4. コンパクト

位相空間 X について、その任意の開被覆が、開被覆となる有限部分集合を持つとき、 X はコンパクトであると呼ぶ。

Lem. 9.4.4. コンパクトの言い換え

コンパクトな位相空間について、以下が成り立つ。

$$\forall A \subset \mathcal{F} \left(A \neq \emptyset \wedge \bigcap A = \emptyset \rightarrow \exists A' \subset A \left(A' \neq \emptyset \wedge \bigcap A' = \emptyset \wedge |A'| < \infty \right) \right)$$

Proof.

コンパクトの定義と定理 3.4.16 より成り立つ。 ■

Thm. 9.4.5. ネットによるコンパクトの特徴づけ

位相空間 X について、以下の 3 つは同値である。

1. X はコンパクトである。
2. X 上の任意の普遍ネットは収束する。
3. X 上の任意のネットは収束する部分ネットを持つ。

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

X 上の普遍ネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、 $F := \bigcap \left\{ \overline{(x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda}}} \mid \lambda \in \Lambda \right\}$ を考える。

$F = \emptyset$ とすると、補題 9.4.4 より $\exists n \in \mathbb{N} \left(n > 0 \wedge \bigcap \left\{ \overline{(x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda(m)}}} \mid m < n \right\} = \emptyset \right)$ である。

ここで定理 8.1.12 から $\exists \mu' \in \Lambda \forall m \in n (\mu' \succ \lambda_m)$ であり、 $x_{\mu'} \in \bigcap \left\{ \overline{(x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda}}} \mid m \leq n \right\}$ より反する。

背理法より $\exists a \in F$ である。

$\forall \lambda \in \Lambda \left(a \in \overline{(x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda}}} \right)$ であるので、閉包の定義より $\forall N \in \mathcal{N}(a) \forall \lambda \in \Lambda \left(N \cap (x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda}} \neq \emptyset \right)$ である。

すなわち、 $\forall N \in \mathcal{N}(a) \forall \lambda \in \Lambda \exists \mu \in \Lambda (\lambda \preccurlyeq \mu \wedge x_\mu \in N)$

普遍ネットの定義とあわせて、 $\forall N \in \mathcal{N}(a) \exists \lambda \in \Lambda \left((x_\mu)_{\mu \in \Lambda_{\succ \lambda}} \subset N \right)$

2. \rightarrow 3. を示す。

仮定と定理 6.4.8 より明らか。

3. \rightarrow 1. を示す。

コンパクトでないと仮定する。その任意の有限部分集合が開被覆とならない X の開被覆 C が存在する。

$P := \{A \subset C \mid |A| < \infty \wedge A \neq \emptyset\}$ について (P, \subset) は有向集合であり、コンパクトでないことから $\forall A \in P \exists x \in X \setminus \bigcup A$ である。このようなネット $(x_A)_{A \in P}$ を考える。

仮定より、 $a \in X$ に収束する部分ネット $(x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M}$ を持つ。

開被覆であることより $\exists C_0 \in C (a \in C_0 \wedge \{C_0\} \in P)$ であり、定義 6.4.6 より $\exists \mu_0 \in M (\{C_0\} \subset \varphi(\mu_0))$ である。

$a \in \bigcup \varphi(\mu_0) \in \mathcal{O}$ であり、収束することと有向性より $\exists \mu_1 \in M (\varphi(\mu_0) \subset \varphi(\mu_1) \wedge x_{\varphi(\mu_1)} \in \bigcup \varphi(\mu_0) \subset \bigcup \varphi(\mu_1))$ であるが、このネットの定義に反する。

背理法より示される。 ■

Thm. 9.4.6. Tychonoff の定理

コンパクトな位相空間 X, Y について、位相空間 $X \times Y$ はコンパクトである。

Proof.

$X \times Y$ 上の普遍ネット $((x_\lambda, y_\lambda))_{\lambda \in \Lambda}$ を考える。

今、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は普遍ネットである。これは定理 9.4.5 より収束する。収束先を x_0 とする。

同様に $(y_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ も y_0 に収束する。

したがって、もとの普遍ネットは (x_0, y_0) に収束する。定理 9.4.5 より示される。 ■

Thm. 9.4.7. コンパクト空間の連続像はコンパクト

コンパクトな位相空間 (X, \mathcal{O}) と、位相空間 (X', \mathcal{O}') について、連続写像 $f: X \rightarrow X'$ を考える。このとき、像 $f(X)$ はコンパクトである。

Proof.

$f(X)$ の任意の開被覆 C' について、 $C := \{f^{-1}(O') \mid O' \in C'\}$ を考える。

連続性より $\forall O' \in C' (f^{-1}(O') \in \mathcal{O})$ である。

$\forall x \in X \exists O' \in C' (f(x) \in O')$ より、 C は X の開被覆である。

コンパクト性から、 $\exists A' \subset C' (|A'| < \infty \wedge X = \bigcup \{f^{-1}(O') \mid O' \in A'\})$

定理 4.5.1、系 4.5.2 から $f(X) = \bigcup \{f(f^{-1}(O')) \mid O' \in A'\} \subset \bigcup \{O' \mid O' \in A'\}$ より A' は有限開被覆である。 ■

Def. 9.4.5. Lindelöf

位相空間 X について、その任意の開被覆が、開被覆となる可算部分集合を持つとき、 X は Lindelöf であると呼ぶ。

Cor. 9.4.8.

位相空間 X について、 X がコンパクトならば X は Lindelöf である。

Def. 9.4.6. 点列コンパクト

位相空間 X について、 X 上の任意の点列が収束する部分列を持つとき、 X は点列コンパクトであると呼ぶ。

Thm. 9.4.9.

Lindelöf で点列コンパクトな位相空間 X は、コンパクトである。

Proof.

コンパクトでないと仮定する。その任意の有限部分集合が開被覆とならない X の開被覆 C が存在する。

仮定より可算な部分開被覆 $C' := \{O_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ が存在する。

$n \in \mathbb{N}$ について、 $P_n := \{O_m \mid m \in \mathbb{N} \wedge m \leq n\}$ を考える。

C の定義より $\bigcup P_n \neq X$ である。

したがって、 $x_n \in X \setminus \bigcup P_n$ なる点列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を取れる。

点列コンパクトより、 $a \in X$ に収束する部分列 $(x_{n(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ が存在する。

今、開被覆より $\exists l \in \mathbb{N} (a \in O_l)$ であり、収束の定義から $\exists j \in \mathbb{N} \forall j' \in \mathbb{N} (j \leq j' \rightarrow x_{j'} \in O_l)$ 。

定義 6.4.6 より $\exists h \in \mathbb{N} (l \leq n(h))$ であり、 $\forall h' \in \mathbb{N} (h \leq h' \rightarrow a \in X \setminus \bigcup P_{n(h')} \subset X \setminus \bigcup P_{n(l)} \subset X \setminus O_l)$

矛盾するので、背理法よりコンパクト。 ■

9.5 分離

Def. 9.5.1. T_0 空間

位相空間 X の近傍系 $\mathcal{N}(x)$ が以下を満たすとき、 X を T_0 空間と呼ぶ。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists N_x \in \mathcal{N}(x) (y \notin N_x) \vee \exists N_y \in \mathcal{N}(y) (x \notin N_y))$$

Def. 9.5.2. T_1 空間

位相空間 X の近傍系 $\mathcal{N}(x)$ が以下を満たすとき、 X を T_1 空間と呼ぶ。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists N \in \mathcal{N}(x) (y \notin N))$$

Thm. 9.5.1. Frechet 性

位相空間 X と、開基 \mathcal{B} について、以下の 3 つは同値である。

1. X は T_1 空間
2. $\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists B \in \mathcal{B}(x) (y \notin B))$
3. $\forall x \in X (\{x\} \in \mathcal{F})$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists N \in \mathcal{N}(x) \exists B \in \mathcal{B}(x) (y \in X \setminus N \subset X \setminus B))$$

2. \rightarrow 3. を示す。

2. より、 $\forall y \in X (x \neq y \rightarrow \exists B \in \mathcal{B}(y) (x \notin B))$ である。

$X \setminus \{x\} = \bigcup \{B \mid y \in X\}$ より成り立つ。

3. \rightarrow 1. を示す。

$x \neq y$ について、 $y \in X \setminus \{x\} \in \mathcal{O}$ である。

ゆえに、 $X \setminus \{x\} \in \mathcal{N}(y)$ である。 ■

Cor. 9.5.2.

位相空間 X が T_1 空間ならば、 T_0 空間である。

Def. 9.5.3. T_2 空間

位相空間 X の近傍系 $\mathcal{N}(x)$ が以下を満たすとき、 X を T_2 空間と呼ぶ。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists N_x \in \mathcal{N}(x) \exists N_y \in \mathcal{N}(y) (N_x \cap N_y = \emptyset))$$

Lem. 9.5.3. T_2 ならば T_1

位相空間 X が T_2 空間ならば、 T_1 空間である。

Proof.

$\forall x, y \in X (x \neq y)$ を考える。 $\exists N_x \in \mathcal{N}(x) \exists N_y \in \mathcal{N}(y) (N_x \cap N_y = \emptyset)$

$y \in N_y$ より、 $y \notin N_x$ ■

Cor. 9.5.4.

T_2 空間の部分空間は T_2 空間である。

Thm. 9.5.5. Hausdorff 性

位相空間 X と、開基 \mathcal{B} について、以下の 5つは同値である。

1. X は T_2 空間
2. $\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists B_x \in \mathcal{B}(x) \exists B_y \in \mathcal{B}(y) (B_x \cap B_y = \emptyset))$
3. X 上の収束するネットの収束先は一意に定まる。
4. 直積集合 $X \times X$ について、対角集合 $\Delta := \{(x, x) \mid x \in X\}$ は閉集合である。
5. $\forall x \in X (\{x\} = \bigcap \{\overline{B} \mid B \in \mathcal{B}(x)\})$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists N_x \in \mathcal{N}(x) \exists N_y \in \mathcal{N}(y) \exists B_x \in \mathcal{B}(x) \exists B_y \in \mathcal{B}(y) (B_x \cap B_y \subset N_x \cap N_y = \emptyset))$$

2. \rightarrow 3. を示す。

2 点 $x, y \in X (x \neq y)$ に収束するとする仮定する。

仮定より $\exists B_x \in \mathcal{B}(x) \exists B_y \in \mathcal{B}(y) (B_x \cap B_y = \emptyset)$

補題 9.3.9 より $\exists \lambda_0 \in \Lambda ((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda \setminus \lambda_0} \subset B_x \cap B_y)$

これは矛盾する。背理法より示される。

3. \rightarrow 1. を示す。 T_2 でないとすると、

$$\exists x, y \in X (x \neq y \wedge \forall N_x \in \mathcal{N}(x) \forall N_y \in \mathcal{N}(y) \exists z \in X (z \in N_x \cap N_y))$$

定理 4.4.1 より、写像 $g: \mathcal{N}(x) \times \mathcal{N}(y) \rightarrow X, g((N_x, N_y)) \in N_x \cap N_y$ が存在する。

$\mathcal{N}(x) \times \mathcal{N}(y)$ 上の半順序を以下のように定義する。

$$(N_x, N_y) \preccurlyeq (N'_x, N'_y) : \Leftrightarrow N_x \supset N'_x \wedge N_y \supset N'_y$$

系 9.3.1 より、 $(\mathcal{N}(x) \times \mathcal{N}(y), \preccurlyeq)$ は有向集合である。

g の与えるネットは、順序を包含で定義したことから、 x と y の双方に収束する。対偶法より示される。

2. \rightarrow 4. を示す。

$\forall (x, y) \in (X \times X) \setminus \Delta$ について、 $\exists B_x \in \mathcal{B}(x) \exists B_y \in \mathcal{B}(y) (B_x \cap B_y = \emptyset)$ である。

よって $B_x \times B_y \subset (X \times X) \setminus \Delta$ であるので、 $(X \times X) \setminus \Delta$ は開集合である。

4. \rightarrow 2. を示す。

$\forall (x, y) \in (X \times X) \setminus \Delta$ について、 $\exists B_x, B_y \in \mathcal{B}(x, y) \in B_x \times B_y \subset (X \times X) \setminus \Delta$ である。

よって、 $B_x \in \mathcal{B}(x) \wedge B_y \in \mathcal{B}(y) \wedge B_x \cap B_y = \emptyset$ である。

2. \rightarrow 5. を示す。

$\forall x, y \in X (x \neq y \rightarrow \exists B_x \in \mathcal{B}(x) \exists B_y \in \mathcal{B}(y) (B_x \subset X \setminus B_y \in \mathcal{F}))$

よって $\overline{B_x} \subset X \setminus B_y$ であるので、 $y \notin \overline{B_x}$

5. \rightarrow 2. を示す。

$\forall x, y \in X (x \neq y)$ について、 $\exists B \in \mathcal{B}(x) (y \notin \overline{B})$

$y \in X \setminus \overline{B} \in \mathcal{O}$ より、 $\exists B' \in \mathcal{B}(y) (B' \subset X \setminus \overline{B})$ 。

$B \cap B' = \emptyset$ より成り立つ。 ■

Lem. 9.5.6.

T_2 空間 X について、 X のコンパクト部分 A は閉集合である。

Proof.

???

■

Def. 9.5.4. T_3 空間

位相空間 X が以下を満たすとき、 X を T_3 空間と呼ぶ。

$$\forall x \in X \forall F \in \mathcal{F}(x \notin F \rightarrow \exists O_x, O_F \in \mathcal{O}(x \in O_x \wedge F \subset O_F \wedge O_x \cap O_F = \emptyset))$$

Thm. 9.5.7. Vietoris 性

位相空間 X と、開基 \mathcal{B} について、以下の 4 つは同値である。

1. X は T_3 空間
2. $\forall x \in X \forall B \in \mathcal{B}(x) \exists D \in \mathcal{B}(x)(\overline{D} \subset B)$
3. $\forall x \in X \forall F \in \mathcal{F}(x \notin F \rightarrow \exists O_x, O_F \in \mathcal{O}(x \in O_x \wedge F \subset O_F \wedge \overline{O_x} \cap \overline{O_F} = \emptyset))$
4. $\forall F \in \mathcal{F}(F = \bigcap \{\overline{O} \mid O \in \mathcal{O} \wedge F \subset O\})$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\forall B \in \mathcal{B}(x)$ について、 $x \in X \setminus B \wedge X \setminus B \in \mathcal{F}$ である。

仮定より、 $\exists O_x, O_F \in \mathcal{O}(x \in O_x \wedge X \setminus B \subset O_F \wedge O_x \cap O_F = \emptyset)$ である。

ここで $O_x \in \mathcal{N}(x)$ であるので、 $\exists D \in \mathcal{B}(x)(D \subset O_x)$ である。

$D \subset O_x \subset X \setminus O_F$ であるので、閉包の定義より $\overline{D} \subset X \setminus O_F \subset X \setminus (X \setminus B) = B$

2. \rightarrow 3. を示す。

$x \in X \setminus F \in \mathcal{O}$ であるので、 $X \setminus F \in \mathcal{N}(x)$ すなわち、 $\exists B \in \mathcal{B}(x)(B \subset X \setminus F)$ である。

仮定より、 $\exists D \in \mathcal{B}(x)(\overline{D} \subset B)$ であり、再び仮定より、 $\exists E \in \mathcal{B}(x)(\overline{E} \subset D)$

$F = X \setminus (X \setminus F) \subset X \setminus B \subset X \setminus \overline{D} \subset X \setminus D$ である。

$O_F := X \setminus \overline{D}$ とすると、 $X \setminus D \in \mathcal{F}$ より、 $\overline{O_F} \subset X \setminus D \subset X \setminus \overline{E}$

$O_x := E$ として成り立つ。

3. \rightarrow 4. を示す。

$A := \{\overline{O} \mid O \in \mathcal{O} \wedge F \subset O\}$ とする。 $X \in A$ より、 $X \neq \emptyset$ である。

定義より $F \subset \bigcap A$ である。

$\forall x \in X \setminus F$ について、仮定より $\exists O_F \in \mathcal{O}(F \subset O_F \wedge x \notin \overline{O_F})$ であるので、 $x \notin \bigcap A$

ゆえに、 $X \setminus F \subset X \setminus \bigcap A$

■

4. \rightarrow 1. を示す。

$\forall x \in X \forall F \in \mathcal{F}(x \notin F)$ のとき、仮定より $\exists O_F \in \mathcal{O}(x \notin \overline{O_F} \wedge F \subset O_F)$

$O_x := X \setminus \overline{O_F}$ として成り立つ。

Thm. 9.5.8. 正則空間

位相空間 X が T_1 空間かつ T_3 空間であるならば、 X は T_2 空間である。

Proof.

定理 9.5.1 より、一点集合は閉集合である。

T_3 空間の定義より、 T_2 空間である。 ■

Def. 9.5.5. T_4 空間

位相空間 X が以下を満たすとき、 X を T_4 空間と呼ぶ。

$$\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(F_1 \cap F_2 = \emptyset \rightarrow \exists O_1, O_2 \in \mathcal{O}(F_1 \subset O_1 \wedge F_2 \subset O_2 \wedge O_1 \cap O_2 = \emptyset))$$

Thm. 9.5.9. Tietze 性

位相空間 (X, \mathcal{O}) について、以下の 3 つは同値である。

1. X は T_4 空間
2. $\forall O \in \mathcal{O} \forall F \in \mathcal{F}(F \subset O \rightarrow \exists U \in \mathcal{O}(F \subset U \wedge \overline{U} \subset O))$
3. $\forall O_1, O_2 \in \mathcal{O}(O_1 \cup O_2 = X \rightarrow \exists F_1, F_2 \in \mathcal{F}(F_1 \subset O_1 \wedge F_2 \subset O_2 \wedge F_1 \cup F_2 = X))$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$X \setminus O \in \mathcal{F}$ から、仮定より $\exists U, U' \in \mathcal{O}(F \subset U \wedge X \setminus O \subset U' \wedge U \cap U' = \emptyset)$ である。

$U \subset X \setminus U' \in \mathcal{F}$ であるので、 $\overline{U} \subset X \setminus U' \subset X \setminus (X \setminus O) = O$

2. \rightarrow 3. を示す。

$X \setminus O_1 \subset O_2 \wedge X \setminus O_1 \in \mathcal{F}$ より、仮定より $\exists U \in \mathcal{O}(X \setminus O_1 \subset U \wedge \overline{U} \subset O_2)$

$X \setminus U \subset X \setminus (X \setminus O_1) = O_1 \wedge (X \setminus U) \cup \overline{U} = X$ より示される。

3. \rightarrow 1. を示す。

$\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(F_1 \cap F_2 = \emptyset)$ とする。

$(X \setminus F_1) \cup (X \setminus F_2) = X$ であるので、仮定より $\exists H_1, H_2 \in \mathcal{F}(H_1 \subset X \setminus F_1 \wedge H_2 \subset X \setminus F_2 \wedge H_1 \cup H_2 = X)$

$F_1 = X \setminus (X \setminus F_1) \subset X \setminus H_1 \wedge F_2 = X \setminus (X \setminus F_2) \subset X \setminus H_2$

ここで、 $O_1 := X \setminus H_1, O_2 := X \setminus H_2$ として成り立つ。 ■

Thm. 9.5.10. 正規空間

位相空間 X が T_1 空間かつ T_4 空間であるならば、 X は T_3 空間である。

Proof.

定理 9.5.1 より、一点集合は閉集合である。

T_4 空間の定義より、 T_3 空間である。 ■

Lem. 9.5.11. Lindelöf な T_3 は T_4

T_3 空間 X が Lindelöf ならば、 X は T_4 空間である。

Proof.

$\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(F_1 \cap F_2 = \emptyset)$ を考える。

$\forall x \in F_1$ について、 $x \in X \setminus F_2$ より、仮定から $\exists O_1(x) \in \mathcal{O}(x \in O_1(x) \wedge \overline{O_1(x)} \cap F_2 = \emptyset)$

Lindelöf より、 F_1 の可算部分 A_1 が存在して、 $F_1 \subset \bigcup \{O_1(x) \mid x \in A_1\}$

すなわち、写像 $\varphi_1: \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{O}$ が存在して、 $F_1 \subset \bigcup \{\varphi_1(n) \mid n \in \mathbb{N}\} \wedge \forall n \in \mathbb{N}(\overline{\varphi_1(n)} \cap F_2 = \emptyset)$

同様に、写像 $\varphi_2: \mathbb{N} \rightarrow \mathcal{O}$ が存在して、 $F_2 \subset \bigcup \{\varphi_2(n) \mid n \in \mathbb{N}\} \wedge \forall n \in \mathbb{N}(\overline{\varphi_2(n)} \cap F_1 = \emptyset)$

以下に定める集合 U_1, U_2 は定義より開集合である。

$$U_1 := \bigcup \left\{ \varphi_1(n) \setminus \bigcup \left\{ \overline{\varphi_2(m)} \mid m \in n \right\} \mid n \in \mathbb{N} \right\}$$

$$U_2 := \bigcup \left\{ \varphi_2(n) \setminus \bigcup \left\{ \overline{\varphi_1(m)} \mid m \in s(n) \right\} \mid n \in \mathbb{N} \right\}$$

$\exists z \in U_1 \cap U_2$ とする。

$$\exists n_1 \in \mathbb{N} \left(z \in \varphi_1(n_1) \wedge \forall m \in n_1 \left(z \notin \overline{\varphi_2(m)} \right) \right) \wedge \exists n_2 \in \mathbb{N} \left(z \in \varphi_2(n_2) \wedge \forall m \in s(n_2) \left(z \notin \overline{\varphi_1(m)} \right) \right)$$

$n_1 \leq n_2 \vee n_1 > n_2$ の場合分けにより、どちらの場合も矛盾。ゆえに $U_1 \cap U_2 = \emptyset$

$F_1 \subset U_1 \wedge F_2 \subset U_2$ より示される。 ■

9.6 連結

Def. 9.6.1. 連結

位相空間 (X, \mathcal{O}) について、以下の 3つを満たす X を連結であると呼ぶ。

$$\mathcal{O} \cap \mathcal{F} = \{\emptyset, X\}$$

Thm. 9.6.1. 非連結

位相空間 (X, \mathcal{O}) について、以下の 3つは同値である。

1. X は連結でない
2. $\exists U, V \in \mathcal{O} \setminus \{\emptyset\} (X = U \cup V \wedge U \cap V = \emptyset)$
3. $\exists A, B \subset X \setminus \{\emptyset\} (X = A \cup B \wedge A \cap \overline{B} = \emptyset \wedge \overline{A} \cap B = \emptyset)$

Proof.

1. \rightarrow 2. を考える。

開集合、閉集合の定義より $\mathcal{O} \cap \mathcal{F} \supset \{\emptyset, X\}$ であるので、非連結ならば $\exists U \in \mathcal{O} \cap \mathcal{F} \setminus \{\emptyset, X\}$ である。

$V := X \setminus U \in \mathcal{O} \setminus \{\emptyset\}$ より成り立つ。

2. \rightarrow 3. を考える。

$V = X \setminus U \wedge U = X \setminus V$ より、 $U, V \in \mathcal{F}$ である。

したがって、 $U \cap \overline{V} = \overline{U} \cap V = U \cap V = \emptyset$ である。

3. \rightarrow 1. を考える。

$\overline{A} = X \cap \overline{A} = (A \cup B) \cap \overline{A} = (A \cap \overline{A}) \cup (B \cap \overline{A}) = A$ より、 A は閉集合である。

同様に、 B は閉集合であるので、 A は開集合である。

$B \neq \emptyset$ より、 $A \neq X$ である。したがって、 $A \in (\mathcal{O} \cap \mathcal{F}) \setminus \{\emptyset, X\}$ ■

Thm. 9.6.2. 連結空間の連続像は連結

連結な位相空間 (X, \mathcal{O}) と、位相空間 (X', \mathcal{O}') について、連続写像 $f: X \rightarrow X'$ を考える。このとき、像 $f(X)$ は連結である。

Proof.

$f(X)$ が連結でないと仮定する。

定理 9.6.1 より $\exists U, V \in \mathcal{O}' (f(X) \subset U \cup V \wedge U \cap V = \emptyset \wedge U \cap f(X) \neq \emptyset \wedge V \cap f(X) \neq \emptyset)$

$\exists y \in U \cap f(X) \exists x \in X (f(x) = y)$ すなわち $x \in f^{-1}(U \cap f(X)) \subset f^{-1}(U)$ であるので、 $f^{-1}(U) \neq \emptyset$ となる。同様に $f^{-1}(V) \neq \emptyset$

f は連続より $f^{-1}(U), f^{-1}(V) \in \mathcal{O} \setminus \{\emptyset\}$ である。

系 4.5.2、定理 4.5.3 より $f^{-1}(U) \cup f^{-1}(V) = f^{-1}(U \cup V) \supset f^{-1}(f(X)) \supset X$

定理 4.5.3 より $f^{-1}(U) \cap f^{-1}(V) = f^{-1}(U \cap V) = f^{-1}(\emptyset) = \emptyset$

定理 9.6.1 より X は連結でない。矛盾するので背理法より示される。 ■

9.7 可算な位相

Def. 9.7.1. 第一可算

位相空間 X について、その任意の点 x に対して可算な基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ が存在するとき、位相空間 X は第一可算であると呼ぶ。

Lem. 9.7.1. 第一可算空間における基本近傍系の単調列

第一可算な位相空間 X とその任意の点 $x \in X$ について、以下を満たす基本近傍系 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在する。

$$\forall n \in \mathbb{N} (B_{s(n)} \subset B_n)$$

Proof.

第一可算であるので、 \mathbb{N} からの全射 φ が存在するような基本近傍系 $\mathcal{B}(x)$ が存在する。

以下のように定めた B_n は条件を満たす。

$$\begin{aligned} B_0 &:= \varphi(0) \\ B_{s(n)} &:= B_n \cap \varphi(s(n)) \end{aligned}$$

定義と φ の全射性より、 $\forall B \in \mathcal{B}(x) \exists n \in \mathbb{N} (B_n \subset \varphi(n) = B)$ である。

$\varphi(0) \subset B_0$ である。 $\exists B \in \mathcal{B}(B \subset B_n)$ とすると、 $\exists B' \in \mathcal{B}(x) (B' \subset B \cap \varphi(s(n)) \subset B_{s(n)})$

定理 7.1.2 より、 $\forall n \in \mathbb{N} \exists B \in \mathcal{B}(x) (B \subset B_n)$ である。

ゆえに補題 9.3.3 より、 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は $\mathcal{B}(x)$ と同じ近傍系を与える基本近傍系である。 ■

Thm. 9.7.2. Bolzano-Weierstrass の定理

第一可算でコンパクトな位相空間 X は、点列コンパクトである。

Proof.

X 上の点列 $(x_k)_{k \in \mathbb{N}}$ について、 $(F_k)_{k \in \mathbb{N}}, F_k = \{x_l \mid l \in \mathbb{N} \wedge l \geq k\} \subset X$ を考える。

$\bigcap \{\overline{F_k} \mid k \in \mathbb{N}\} = \emptyset$ とすると、補題 9.4.4 より $\exists n \in \mathbb{N} (n > 0 \wedge \bigcap \{\overline{F_{k_m}} \mid m \leq n\} = \emptyset)$ である。

$x_{s(k_n)} \in \bigcap \{\overline{F_k} \mid k \in \mathbb{N}\}$ であるので反する。背理法より $\bigcap \{\overline{F_k} \mid k \in \mathbb{N}\} \neq \emptyset$ を得る。

$\exists a \in X \forall k \in \mathbb{N} (a \in \overline{F_k})$ であるので、補題 9.7.1 の点列 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を用いて $\forall j \in \mathbb{N} (F_k \cap B_j(a) \neq \emptyset)$ である。

ここで、以下の写像 $\varphi: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{N}$ を考える。

$$\begin{aligned} x_{\varphi(0)} &\in B_0(a) \\ x_{\varphi(s(n))} &\in F_{s(\varphi(n))} \cap B_n(a) \end{aligned}$$

$(x_{\varphi(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ は部分列であり、 a に収束する。 ■

Thm. 9.7.3. 第一可算空間における点連續と収束

第一可算な位相空間 X 、位相空間 X' 、点 $x \in X$ 、写像 $f: X \rightarrow X'$ について、以下の 2 つは同値である。

1. f が x で連続
2. x に収束する任意の点列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について、点列 $(f(x_n))_{n \in \mathbb{N}}$ は $f(x)$ に収束する。

Proof.

1. \rightarrow 2. は、定理 9.3.11 と、点列がネットであることより明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。補題 9.7.1 の与える基本近傍系を $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ とする。

$$\exists N' \in \mathcal{N}(f(x)) \forall n \in \mathbb{N} \exists y \in B_n(x) (f(y) \notin N')$$

定理 4.4.1 より、写像 $g: \mathbb{N} \rightarrow X, g(n) \in B_n(x) \setminus f^{-1}(N')$ が存在する。

今、 g から構成される点列は x に収束するが、 $f \circ g$ から構成される点列は $f(x)$ に収束しない。 ■

Def. 9.7.2. 可分

位相空間 X について、 X の可算部分 Y が存在して $\overline{Y} = X$ であるとき、 X は可分であると呼ぶ。

Def. 9.7.3. 第二可算

位相空間 (X, \mathcal{O}) について、 \mathcal{O} が可算な開基から与えられるとき、位相空間 (X, \mathcal{O}) は第二可算であると呼ぶ。

Thm. 9.7.4. 第二可算空間の満たす性質

位相空間 (X, \mathcal{O}) が第二可算ならば、以下の 3 つを満たす。

- X は第一可算
- X は Lindelöf
- X は可分

Proof.

第一可算性を示す。

定理 9.3.5 より、開基の部分となる基本近傍系をとれる。

Lindelöf 性を示す。

第二可算性より、点列 $(B_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在して $\{B_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ は開基である。

開被覆 C について、定義 9.1.2 より $\forall x \in X \exists O \in C \exists n \in \mathbb{N} (x \in B_n \wedge B_n \subset O)$

定理 4.4.1 より $n(x)$ を考える。このとき、 $\{B_{n(x)} \mid x \in \mathbb{N}\} = \{B_m \mid m \in \text{Im}(n)\}$ は開被覆である。

$\forall m \in \text{Im}(n) \exists O \in C (B_m \subset O)$ より定理 4.4.1 の与える $O(m)$ が与えられて、 $C' := \{O(m) \mid m \in \text{Im}(n)\}$ とする。

今、 $X = \bigcup \{B_m \mid m \in \text{Im}(n)\} \subset \bigcup C' \subset X$ より、 C' は開被覆であり、定義より C の可算部分である。

可分性を示す。

第二可算性より、可算な開基 \mathcal{B} が存在する。

$\forall B \in \mathcal{B} \setminus \{\emptyset\} \exists x_B \in X (x_B \in B)$ であり、 $M := \{x_B \mid B \in \mathcal{B} \setminus \{\emptyset\}\}$ を考えると、 M は可算である。

閉包は閉集合より $X \setminus \overline{M}$ は開集合である。

ここで、 $\exists x \in X \setminus \overline{M}$ と仮定する。

$\exists B' \in \mathcal{B} (x \in B' \subset X \setminus \overline{M})$ である。

したがって、 $x_{B'} \in X \setminus \overline{M} \subset X \setminus M$ より矛盾。背理法より示される。 ■

9.8 順序位相

Lem. 9.8.1. 順序の開基

空でない全順序集合 (X, \leq) について、以下を満たす新たな 2 元 $\infty, -\infty$ を加えた集合 \hat{X} を考える。

$$\begin{aligned}\forall x \in X & (-\infty < x \wedge x < \infty) \\ \hat{X} &:= X \cup \{\infty, -\infty\}\end{aligned}$$

このとき、以下の集合系 \mathcal{B} は X の開基である。

$$\mathcal{B} := \left\{]a, b[\mid (a, b) \in \hat{X} \times \hat{X} \right\}$$

Proof.

$\forall B \in \mathcal{B} (-\infty \notin B \wedge \infty \notin B)$ であるので、 $\mathcal{B} \subset \mathfrak{P}(X)$ である。

第一式を示す。 $\forall x \in X (x \in]-\infty, \infty[)$ である。

第二式を示す。 $\forall a_1, b_1, a_2, b_2 \in \hat{X}$ について、 $]a_1, b_1[\cap]a_2, b_2[=]\max\{a_1, a_2\}, \min\{b_1, b_2\}[\in \mathcal{B}$ である。 ■

Lem. 9.8.2. 最大がない場合の順序の開基

空でない全順序集合 (X, \leq) について、 X が最大元、最小元をともに持たないとき、以下の集合系 \mathcal{B}' は開基である。

$$\mathcal{B}' := \{]a, b[\mid (a, b) \in X \times X \}$$

このとき、補題 9.8.1 から得る開集合系と、 \mathcal{B}' の定める開集合系、この 2 つは一致する。

Proof.

■

Def. 9.8.1. 順序空間

補題 9.8.1 と定義 9.1.2 より定まる位相空間 (X, \mathcal{O}) を順序空間と呼ぶ。

Lem. 9.8.3.

順序空間 (X, \mathcal{O}) について、開区間は開集合であり、閉区間は閉集合である。

Proof.

定義より開区間は開集合である。

閉区間 $[a, b]$ を考える。 $X \setminus [a, b] =]-\infty, a[\cup]b, \infty[\in \mathcal{O}$ より成り立つ。 ■

Lem. 9.8.4.

順序空間 (X, \mathcal{O}) と、 X の閉集合 F_1, F_2 を考える。

$F_1 \cap F_2 = \emptyset$ であるとき、 $\forall x \in F_1$ について以下の全てを満たす $a, b \in \hat{X}$ が存在する。

- $x \in]a, b[$
- $]a, b[\cap F_2 = \emptyset$
- $]a, x[= \emptyset \vee a \in F_1 \vee (a \notin F_2 \wedge]a, x[\cap F_1 = \emptyset)$
- $]x, b[= \emptyset \vee b \in F_1 \vee (b \notin F_2 \wedge]x, b[\cap F_1 = \emptyset)$

Proof.

定理 9.4.3 より、 $\exists p, q \in \hat{X}(x \in]p, q[\subset X \setminus F_1)$ である。

$]p, x[= \emptyset$ のとき、 $a := p$ で成り立つ。

$\exists z \in]p, x[\cap F_1$ のとき、 $a := z$ で成り立つ。

$\exists z \in]p, x[\wedge]p, x[\cap F_1 = \emptyset$ のとき、 $a := z$ で成り立つ。

同様に b を定めることができて、条件を満たす。 ■

Thm. 9.8.5. 順序空間は正規

順序空間は T_1 空間かつ T_4 空間である。

Proof.

$\forall x \in X$ について、補題 9.8.3 より $\{x\} = [x, x] \in \mathcal{F}$ である。定理 9.5.1 より、 T_1 である。

$\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F}(F_1 \cap F_2 = \emptyset)$ として、 $\forall x \in F_1$ について考える。

$x \notin F_2$ より補題 9.8.4 の条件を満たす $a_x, b_x \in \hat{X}$ が存在する。

ここで、 $U := \bigcup \{]a_x, b_x[\mid x \in F_1\}$ を考える。明らかに $F_1 \subset U \wedge U \in \mathcal{O}$ である。

$\forall y \in F_2$ を考える。 $y \notin F_1 = \overline{F_1}$ より、 $\exists (c, d) \in \hat{X} \times \hat{X}(]c, d[\cap F_1 = \emptyset)$ である。

$F'_1 := \{x \in F_1 \mid x < y \wedge]a_x, b_x[\cap]c, d[\neq \emptyset\}$ とする。

$\exists x_1, x_2 \in F'_1(x_1 < x_2)$ とすると、 c の定義と補題 9.8.4 第二式より $x_1 < x_2 < c < b_{x_1} \wedge b_{x_1} \notin F_1$ である。

これは補題 9.8.4 第四式に反する。ゆえに、 $\forall x_1, x_2 \in F'_1(x_1 = x_2)$ である。

$\exists x \in X(F'_1 = \{x\})$ のときを考える。補題 9.8.4 第四式より $b_x < y$ である。 $a' := b_x$ とする。

$F'_1 = \emptyset$ であるとき、 $a' := c$ とする。

同様に b' を定めると、 $y \notin U$ より $y \in]a', b'[\wedge]a', b'[\cap U = \emptyset$ である。定理 9.4.3 より $y \notin \overline{U}$

よって、 $F_2 \subset X \setminus \overline{U}$ ■

10 一様空間

10.1 近縁

Def. 10.1.1. 集合算

集合 X と、集合 $A, B \subset X \times X$ について、以下で定める略記 $A \circ B, A^{-1}$ を考える。

$$A \circ B := \{(x, z) \in X \times X \mid \exists y \in X((x, y) \in A \wedge (y, z) \in B)\}$$

$$A^{-1} := \{(x, y) \in X \times X \mid (y, x) \in A\}$$

Def. 10.1.2. 基本近縁系

空でない集合 X について、以下を満たす集合系 $\mathcal{V} \subset \mathfrak{P}(X \times X)$ を基本近縁系と呼ぶ。

$$\begin{aligned}\mathcal{V} &\neq \emptyset \\ \forall V \in \mathcal{V} \forall x \in X &((x, x) \in V) \\ \forall V_1, V_2 \in \mathcal{V} \exists V \in \mathcal{V} &(V \subset V_1 \cap V_2) \\ \forall V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} &(W \circ W \subset V) \\ \forall V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} &(W \subset V^{-1})\end{aligned}$$

Lem. 10.1.1. 基本近縁系の三角性

空でない集合 X の基本近縁系 \mathcal{V} について、以下を満たす。

$$\forall V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} (W \cup W^{-1} \subset W^{-1} \circ W \subset (W^{-1} \circ W) \circ W \subset V)$$

Proof.

定義 10.1.2 第四式より $\exists S \in \mathcal{V} (S \circ S \subset V)$ であり、 $\exists R \in \mathcal{V} (R \circ R \subset S)$ である。

定義 10.1.2 第五式より $\exists T \in \mathcal{V} (T \subset R^{-1})$ である。

定義 10.1.2 第三式より $\exists W \in \mathcal{V} (W \subset S \cap T)$ である。

ゆえに、 $(W^{-1} \circ W) \circ W \subset (T^{-1} \circ T) \circ S \subset (R \circ R) \circ S \subset S \circ S \subset V$

定義 10.1.2 第二式より $(z, z) \in W$ であるので、その他の包含関係も成り立つ。 ■

Def. 10.1.3. 近縁系

空でない集合 X の基本近縁系 \mathcal{V} について、以下で与える集合系 \mathcal{U} を近縁系と呼ぶ。

$$\mathcal{U} := \{U \subset X \times X \mid \exists V \in \mathcal{V} (V \subset U)\}$$

Lem. 10.1.2. 近縁系の一意性

空でない集合 X の基本近縁系 \mathcal{V} と集合系 $\mathcal{V}' \subset \mathfrak{P}(X \times X)$ について、以下を満たすとき、 \mathcal{V}' は基本近縁系である。

$$\begin{aligned}\forall V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} (V \subset V') \\ \forall V \in \mathcal{V} \exists V' \in \mathcal{V}' (V' \subset V)\end{aligned}$$

さらに定義 10.1.3 の定める近縁系 \mathcal{U} と \mathcal{U}' は一致する。

Proof.

第一式を考える。定義 10.1.2 第一式から $\exists V \in \mathcal{V}$ より、仮定から $\exists V' \in \mathcal{V}'$

第二式を考える。 $\forall V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} \forall x \in X ((x, x) \in V \subset V')$ より成り立つ。

第三式を考える。仮定より $\forall V'_1, V'_2 \in \mathcal{V}' \exists V_1, V_2 \in \mathcal{V} (V_1 \cap V_2 \subset V'_1 \cap V'_2)$ である。

定義 10.1.2 第三式より $\exists V \in \mathcal{V} (V \subset V_1 \cap V_2)$ であり、仮定より $\exists V' \in \mathcal{V}' (V' \subset V \subset V'_1 \cap V'_2)$

第四式を考える。 $\forall V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} \exists W' \in \mathcal{V}' (W' \circ W \subset V \subset V' \subset V')$ である。

第五式を考える。 $\forall V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} \exists W' \in \mathcal{V}' (W' \subset V' \subset V^{-1} \subset V'^{-1})$ である。

$\forall U \in \mathcal{U} \exists V \in \mathcal{V} \exists V' \in \mathcal{V}' (V' \subset V \subset U)$ である。ゆえに、 $U \in \mathcal{U}'$ である。

$\forall U' \in \mathcal{U}' \exists V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} (V \subset V' \subset U')$ である。ゆえに、 $U' \in \mathcal{U}$ である。 ■

Lem. 10.1.3. 近縁系は基本近縁系

近縁系 \mathcal{U} は基本近縁系である。さらに \mathcal{U} から定義 10.1.3 より定まる近縁系は、 \mathcal{U} に一致する。

Proof.

定義より $\forall U \in \mathcal{U} \exists V \in \mathcal{V} (V \subset U)$ である。

$\forall V \in \mathcal{V}$ について、 $V \in \mathcal{U}$ である。

補題 10.1.2 より成り立つ。 ■

Lem. 10.1.4. 近縁系の開性

空でない集合 X と、 X の近縁系 \mathcal{U} について、以下を満たす。

$$\forall U \in \mathcal{U} \exists V \in \mathcal{U} \forall (x, y) \in V \exists W \in \mathcal{U} (W[y] \subset V[x] \wedge V \subset U)$$

Proof.

$V := \{(x, y) \in X \times X \mid \exists S \in \mathcal{U} (S[x] \times S[y] \subset U)\}$ を考える。定義より $V \subset U$ である。

補題 10.1.1 より、 $\exists T \in \mathcal{U} ((T^{-1} \circ T) \circ T \subset U)$ である。

$\forall (s, t) \in T$ について、 $\forall (w, z) \in T[s] \times T[t] ((w, z) \in (T^{-1} \circ T) \circ T \subset U)$ であるので、 $(s, t) \in V$ $T \subset V$ より、 $V \in \mathcal{U}$ である。

$\forall (x, y) \in V$ について、 $\exists S \in \mathcal{U} (S[x] \times S[y] \subset U)$ である。

定義 10.1.2 第四式より $\exists W \in \mathcal{U} (W \circ W \in S)$ である。

$\forall z \in W[y]$ について $W[z] \subset S[y]$ より、 $W[x] \times W[z] \subset S[x] \times S[y] \subset U$ 、すなわち $z \in V[x]$ である。 ■

Def. 10.1.4. 一様空間

空でない集合 X と、 X 上の近縁系 \mathcal{U} について、順序対 (X, \mathcal{U}) を一様空間と呼ぶ。または単に X と書き、一様空間と集合どちらも表すものとする。

Thm. 10.1.5. 基本近縁系から定まる位相

一様空間 (X, \mathcal{U}) と近縁系 \mathcal{U} を与える基本近縁系 \mathcal{V} を考える。

X の任意の元 x について、以下で定める集合系 $\mathcal{B}(x)$ は基本近傍系である。

$$\mathcal{B}(x) := \{V[x] := \{y \in X \mid (x, y) \in V\} \mid V \in \mathcal{V}\}$$

さらに、 $\mathcal{B}(x)$ の与える近傍系 $\mathcal{N}(x)$ は、近縁系 \mathcal{U} の与える基本近傍系 $\mathcal{N}'(x)$ に一致する。

この意味で、一様空間は位相空間である。

Proof.

第一式を示す。定義 10.1.2 第一式から、 $\exists V \in \mathcal{V} (V[x] \in \mathcal{B}(x))$ である。

第二式を示す。定義 10.1.2 第二式から、 $\forall V \in \mathcal{V} (x \in V[x])$ より成り立つ。

第三式を示す。定義 10.1.2 第三式から $\forall B_1, B_2 \in \mathcal{B}(x) \exists V_1, V_2 \in \mathcal{V} (B_1 = V_1[x] \wedge B_2 = V_2[x])$ について、 $\exists V \in \mathcal{V} (V[x] \subset (V_1 \cap V_2)[x] = B_1 \cap B_2 \wedge V[x] \in \mathcal{B}(x))$

第四式を示す。 $\forall B \in \mathcal{B}(x) \exists V \in \mathcal{V} (B = V[x])$ である。

定義 10.1.2 第四式から $\exists W \in \mathcal{V}(W \circ W \subset V)$ であり、 $\exists C := W[x] \in \mathcal{B}(x)$

$\forall y \in C \exists D = W[y] \in \mathcal{B}(y)$ である。

$\forall z \in D((x, y), (y, z) \in W)$ より $(x, z) \in V$ すなわち $z \in V[x] = B$ である。よって $D \subset B$ となる。

$\forall N \in \mathcal{N}(x)$ について $\exists V \in \mathcal{V}(V[x] \subset N)$ であり、 $U = V \cup \{(x, y) \mid y \in N\} \in \mathcal{U}$ かつ $N = U[x]$ であるので、 $N \in \mathcal{N}'(x)$

$\forall N' \in \mathcal{N}'(x)$ について $\exists U \subset X \times X \exists V \in \mathcal{V}(V \subset U \wedge U[x] = N')$ であり、 $V[x] \subset U[x] = N' \in \mathcal{N}(x)$ ■

Thm. 10.1.6. 一様空間は T_3

一様空間 (X, \mathcal{U}) は、 T_3 空間である。

Proof.

$\forall x \in X \forall B \in \mathcal{B}(x)$ を考える。

定義より $\exists U \in \mathcal{U}(U[x] = B)$ であり、補題 10.1.1 より $\exists V \in \mathcal{U}(V^{-1} \circ V \subset U)$

定義 10.1.2 第五式より、 $\exists W \in \mathcal{U}(W \subset V^{-1})$ である。

$W[x] \in \mathcal{N}(x)$ より、 $\exists D \in \mathcal{B}(x)(D \subset W[x])$ である。

$\forall y \in \overline{D}$ について考える。

定理 9.4.3 より、 $\exists z \in X(z \in D \cap W[y] \subset W[x] \cap W[y])$ である。

$(x, z), (y, z) \in W$ より、 $(x, y) \in U$ である。

したがって、 $\overline{D} \subset U[x] = B$

定理 9.5.7 より成り立つ。 ■

Def. 10.1.5. 一様連続

一様空間 $(X, \mathcal{U}), (X', \mathcal{U}')$ と写像 $f: X \rightarrow X'$ について、 f が以下を満たすとき、 f は一様連続であると呼ぶ。

$$\forall U' \in \mathcal{U}' \exists U \in \mathcal{U}((x, y) \in U \rightarrow (f(x), f(y)) \in U')$$

Lem. 10.1.7. 基本近縁系と一様連続

一様空間 $(X, \mathcal{U}), (X', \mathcal{U}')$ と写像 $f: X \rightarrow X'$ と、 $\mathcal{U}, \mathcal{U}'$ を与える基本近縁系 $\mathcal{V}, \mathcal{V}'$ を考える。このとき、以下の 2 つは同値である。

1. f は一様連続
2. $\forall V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V}((x, y) \in V \rightarrow (f(x), f(y)) \in V')$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\forall V' \in \mathcal{V}' \subset \mathcal{U}' \exists U \in \mathcal{U} \exists V \in \mathcal{V}((x, y) \in V \subset U \rightarrow (f(x), f(y)) \in V')$ より明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。

$\forall U' \in \mathcal{U}' \exists V' \in \mathcal{V}' \exists V \in \mathcal{V} \subset \mathcal{U}((x, y) \in V \rightarrow (f(x), f(y)) \in V' \subset U')$ より明らか。 ■

Def. 10.1.6. 一様同型

一様空間 X, X' と写像 $f: X \rightarrow X'$ について、 f が全単射かつ f と f^{-1} がともに一様連続であるとき、 f を一様同型写像と呼ぶ。

また、一様同型写像 $f: X \rightarrow X'$ が存在するとき、 X と X' は一様同型であると呼ぶ。

Thm. 10.1.8. 一様連続は連続

一様空間 $(X, \mathcal{U}), (X', \mathcal{U}')$ について、一様連続な写像 $f: X \rightarrow X'$ は連続である。

Proof.

$\forall x \in X \forall N' \in \mathcal{N}(f(x))$ について、定義より $\exists U' \in \mathcal{U}'(N' = U'[f(x)])$ である。

一様連続の定義より $\exists U \in \mathcal{U}((x, y) \in U \rightarrow (f(x), f(y)) \in U')$ である。

今、 $U[x] \in \mathcal{N}(x)$ であり、 $f(U[x]) \subset U'[f(x)] = N'$ より点連続。

$\forall x \in X$ で成り立つので、定理 9.3.12 より示される。 ■

Cor. 10.1.9.

一様同型写像は同相写像。

Lem. 10.1.10.

一様空間 (X, \mathcal{U}) と、 X の空でない部分集合 A を考える。

\mathcal{U} を与える基本近縁系 \mathcal{V} について、以下の集合系 \mathcal{V}' は集合 A の基本近縁系である。

$$\mathcal{V}' := \{(A \times A) \cap V \mid V \in \mathcal{V}\}$$

さらに、 \mathcal{V}' の与える近縁系と、 \mathcal{U} からこの補題により与えられる基本近縁系 \mathcal{U}' 、この 2 つは一致する。

Proof.

明らか。 ■

Def. 10.1.7. 部分一様空間

一様空間 (X, \mathcal{U}) と、 X の空でない部分集合 A を考える。補題 10.1.10 の与える基本近縁系の与える近縁系 \mathcal{U}' について、一様空間 (A, \mathcal{U}') を部分一様空間と呼ぶ。

10.2 Cauchy

Def. 10.2.1. Cauchy

一様空間 (X, \mathcal{U}) について、 X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ が以下を満たすとき、Cauchy であると呼ぶ。

$$\forall U \in \mathcal{U} \exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succcurlyeq \lambda_0} ((x_\mu, x_\tau) \in U)$$

Lem. 10.2.1. 基本近縁系と Cauchy

一様空間 (X, \mathcal{U}) と X 上のネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ と、 \mathcal{U} を与える X の基本近縁系 \mathcal{V} を考える。このとき、以下の 2 つは同値である。

1. $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は Cauchy
2. $\forall V \in \mathcal{V} \exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succcurlyeq \lambda_0} ((x_\mu, x_\tau) \in V)$

Proof.

1. \rightarrow 2. は、 $\mathcal{V} \subset \mathcal{U}$ より明らか。

2. \rightarrow 1. を示す。

$$\forall U \in \mathcal{U} \exists V \in \mathcal{V} \exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succ \lambda_0} ((x_\mu, x_\tau) \in V \subset U)$$

■

Cor. 10.2.2.

Cauchy ネットの部分ネットは Cauchy である。

Lem. 10.2.3. 一様連續と Cauchy

一様空間 $(X, \mathcal{U}), (X', \mathcal{U}')$ と、一様連續写像 $f: X \rightarrow X'$ を考える。

このとき、 X 上の Cauchy ネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、 $(f(x_\lambda))_{\lambda \in \Lambda}$ は Cauchy である。

Proof.

$\forall U' \in \mathcal{U}'$ を考える。

一様連續性から、 $\exists U \in \mathcal{U} ((x, y) \in U \rightarrow (f(x), f(y)) \subset U')$ である。

Cauchy より、 $\exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda_{\succ \lambda_0} ((x_{\lambda_1}, x_{\lambda_2}) \in U)$ である。

ゆえに $(f(x_{\lambda_1}), f(x_{\lambda_2})) \in U'$ である。 ■

Thm. 10.2.4. 収束ネットは Cauchy

収束するネットは Cauchy である。

Proof.

$\forall V \in \mathcal{V}$ について、補題 10.1.1 より $\exists W \in \mathcal{V} (W^{-1} \circ W \subset V)$

定義 9.3.3 より $\exists \lambda_0 \in \Lambda \left((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset W[a] \right)$

a に収束するとすると、 $\forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succ \lambda_0} ((a, x_\mu), (a, x_\tau) \in W)$ であるので、 $(x_\lambda, x_\tau) \in V$ ■

■

Lem. 10.2.5. 収束する部分を持つ Cauchy ネット

一様空間 X と X 上の Cauchy ネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、 $a \in X$ に収束する部分ネットを持つならば、 $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は a に収束する。

Proof.

定義 10.1.2 第四式より $\forall V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} (W \circ W \subset V)$

収束より、 $\exists \mu_0 \in M \left((x_{\lambda(\mu)})_{\mu \in M_{\succ \mu_0}} \subset W[a] \right)$

Cauchy ネットより、 $\exists \lambda_0 \in \Lambda \forall \lambda_1, \lambda_2 \in \Lambda_{\succ \lambda_0} ((\lambda_1, \lambda_2) \in W)$

定義 6.4.6 より $\exists \mu_1 \in M (\lambda_0 \preccurlyeq \lambda(\mu_1))$ であり、有向集合より $\exists \mu_2 \in M (\mu_0 \preccurlyeq \mu_2 \wedge \mu_1 \preccurlyeq \mu_2)$

よって $\lambda(\mu_2) \preccurlyeq \lambda$ ならば $(a, \lambda(\mu_2)), (\lambda(\mu_2), \lambda) \in W$ である。ゆえに $(a, x_\lambda) \in V$ すなわち $x_\lambda \in V[a]$ ■

■

Def. 10.2.2. 全有界

一様空間 (X, \mathcal{U}) が以下を満たすとき、全有界であると呼ぶ。

$$\forall U \in \mathcal{U} \exists A \subset X \left(|A| < \infty \wedge \bigcup \{U[x] \mid x \in A\} = X \right)$$

Cor. 10.2.6. Cauchy 列は全有界

Cauchy 列は全有界である。

Thm. 10.2.7. ネットによる全有界の特徴づけ

一様空間 (X, \mathcal{U}) と、近縁系 \mathcal{U} を与える基本近縁系 \mathcal{V} について、以下の 4 つは同値である。

1. X は全有界
2. $\forall V \in \mathcal{V} \exists A \subset X (|A| < \infty \wedge \bigcup \{V[x] \mid x \in A\} = X)$
3. X 上の任意の普遍ネットは Cauchy である。
4. X 上の任意のネットは Cauchy な部分ネットを持つ。

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\mathcal{V} \subset \mathcal{U}$ より明らか。

2. \rightarrow 3. を示す。

X 上の普遍ネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について考える。

補題 10.1.1 より $\forall V \in \mathcal{V} \exists W \in \mathcal{V} (W^{-1} \circ W \subset V)$

全有界性より $\exists n \in \mathbb{N} (n \neq 0 \wedge \bigcup \{W[x(m)] \mid m \in n\} = X)$ を得る。

普遍ネットの定義より $\forall m \in \mathbb{N} \exists \lambda_0 \in \Lambda ((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset W[x(m)] \vee (x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_0}} \subset X \setminus W[x(m)])$ である。

定理 8.1.12 より、 $\{\lambda_0(m) \mid m \in n\}$ の上界 λ_1 が存在する。

$\forall m \in \mathbb{N} ((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_1}} \subset X \setminus W[x(m)])$ とすると、全有界の定義より矛盾。

背理法より、 $\exists m \in \mathbb{N} ((x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda_{\succ \lambda_1}} \subset W[x(m)])$

ゆえに $\forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succ \lambda_1} ((x[m], x_\mu), (x[m], x_\tau))$ すなわち $(x_\mu, x_\tau) \in V$

3. \rightarrow 4. を示す。

仮定と定理 6.4.8 より明らか。

4. \rightarrow 1. を示す。

全有界でないと仮定する。 X の任意の有限部分 A について、 $\bigcup \{U[x] \mid x \in A\} \neq X$ となる近縁 U が存在する。

$P := \{A \subset X \mid |A| < \infty \wedge A \neq \emptyset\}$ について、 (P, \subset) は有向集合であり、全有界でないことから $\forall A \in P \exists x \in X \setminus \bigcup \{U[x] \mid x \in A\}$ である。このようなネット $(x_A)_{A \in P}$ を考える。

仮定より Cauchy な部分ネット $(x_{\varphi(\mu)})_{\mu \in M}$ を持つ。

ゆえに $\exists \mu_0 \in M \forall \mu \in M_{\succ \mu_0} (x_{\varphi(\mu)} \in U[x_{\varphi(\mu_0)}])$ である。

$\{x_{\varphi(\mu_0)}\} \in P$ であることと、定義 6.4.6 と有向性より、 $\exists \mu_1 \in M (\mu_0 \preccurlyeq \mu_1 \wedge \{x_{\varphi(\mu_0)}\} \subset \varphi(\mu_1))$ となる。

すなわち、 $x_{\varphi(\mu_1)} \in U[x_{\varphi(\mu_0)}] \subset \bigcup \{U[x] \mid x \in \varphi(\mu_1)\}$ であるが、このネットの定義に反する。

背理法より示される。 ■

Thm. 10.2.8. Heine-Cantor の定理

全有界な一様空間 (X, \mathcal{U}) と、一様空間 (X', \mathcal{U}') について、連続写像 $f: X \rightarrow X'$ は一様連続である。

Proof.

$\forall V' \in \mathcal{V}'$ について、補題 10.1.1 より $\exists W' \in \mathcal{V}' (W'^{-1} \circ W' \subset V')$

定理 9.3.12 から $\forall x \in X \exists V \in \mathcal{V} (f(V[x]) \subset W'[f(x)])$ である。

定義 10.1.2 第四式より $\exists W \in \mathcal{V} (W \circ W \subset V)$

今、 $\{W(V', x)[x] \mid x \in X\}$ は被覆である。

全有界性から $\exists Y \subset X \wedge |Y| < \infty$ であり $C := \{W(V', x)[x] \mid x \in Y\}$ は被覆となる。

定義 10.1.2 第三式より $S := \bigcap \{W(V', x) \mid x \in Y\} \in \mathcal{V}$ である。

$\forall(w, z) \in S(V')$ について、 C は被覆より $\exists y \in Y(V')(w \in W(V', y)[y] \subset V(V', y)[y])$ である。
 $(y, w), (w, z) \in W(V', y)$ であり、 $(y, z) \in V(V', y)$ すなわち $z \in V(V', y)[y]$ である。
 $w, z \in V(V', y)[y]$ より $f(w), f(z) \in f(V(V', y)[y]) \subset W'(V')[f(y)]$ である。
したがって $(f(y), f(w)), (f(y), f(z)) \in W'$ より $(f(w), f(z)) \in V'$

■

Def. 10.2.3. 完備

一様空間 X について、 X 上の任意の Cauchy なネットが収束するとき、 X は完備であると呼ぶ。

Thm. 10.2.9. Heine-Borel の被覆定理

一様空間 (X, \mathcal{U}) について、以下の 2 つは同値である。

1. X はコンパクトである。
2. X は全有界かつ完備である。

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

定理 9.4.5 より X 上の任意の普遍ネットは収束するので、定理 10.2.4 より Cauchy である。

定理 10.2.7 より全有界である。

定理 9.4.5 より X 上の任意の Cauchy なネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は収束する部分ネットを持つ。

補題 10.2.5 より $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ は収束する。

2. \rightarrow 1. を示す。

X 上の任意のネットについて、全有界性から定理 10.2.7 より Cauchy な部分ネットが存在して、完備性から収束する。定理 9.4.5 より示される。

■

10.3 可算な一様構造

Def. 10.3.1. 可算一様空間

一様空間 X が可算な基本近縁系 \mathcal{V} もつとき、 (X, \mathcal{U}) を可算一様空間と呼ぶ。

Lem. 10.3.1. 可算一様空間における基本近傍系の単調列

可算一様空間 (X, \mathcal{U}) について、以下を満たす基本近縁系 $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在する。

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N} & \left(\left(V_{s(n)}^{-1} \circ V_{s(n)} \right) \circ V_{s(n)} \subset V_n \right) \\ \forall n \in \mathbb{N} \forall (x, y) \in V_n & \exists m \in \mathbb{N} (V_m[y] \subset V_n[x]) \end{aligned}$$

Proof.

可算であるので、 \mathbb{N} からの全射 φ が存在するような基本近縁系 \mathcal{V} が存在する。

以下のように定めた V_n は条件を満たす。

まず $\varphi(0)$ について、補題 10.1.4 の定める近縁を V_0 とする。

次に $n \in \mathbb{N} (V_n \in \mathcal{U})$ として、補題 10.1.1 の定める近縁を W_n とする。

ここで $W_n \cap \varphi(s(n))$ は定義 10.1.2 第三式より近縁であるので、補題 10.1.4 の定める近縁が存在して $V_{s(n)}$ とする。

定義より、 $\forall n \in \mathbb{N} (V_n \in \mathcal{U})$ である。

定義と φ の全射性より、 $\forall V \in \mathcal{V} \exists n \in \mathbb{N} (V_n \subset \varphi(n) = V)$ である。

補題 10.1.2 より、同じ近縁系を与える基本近縁系である。 ■

Thm. 10.3.2. 可算一様空間の満たす性質

一様空間 (X, \mathcal{U}) が可算一様ならば、以下の 2 つを満たす。

- X は第一可算
- X は T_4

Proof.

第一可算性を示す。定理 10.1.5 より明らか。

T_4 であることを示す。 $\forall F_1, F_2 \in \mathcal{F} (F_1 \cap F_2 = \emptyset)$ とする。

補題 10.3.1 の定める $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

定理 9.4.3 より、 $\forall x_1 \in F_1 \exists n_1 \in \mathbb{N} (V_{n_1}[x_1] \cap F_2 = \emptyset)$ である。

同様に、 $\forall x_2 \in F_2 \exists n_2 \in \mathbb{N} (V_{n_2}[x_2] \cap F_1 = \emptyset)$ である。

以下の集合 U_1, U_2 を考える。定義より明らかに $F_1 \subset U_1 \wedge F_2 \subset U_2 \wedge U_1, U_2 \in \mathcal{O}$ である。

$$\begin{aligned} U_1 &:= \bigcup \{V_{s(s(n_1(x)))}[x] \mid x \in F_1\} \\ U_2 &:= \bigcup \{V_{s(s(n_2(x)))}[x] \mid x \in F_2\} \end{aligned}$$

$\exists y \in U_1 \cap U_2$ とすると、 $\exists x_1 \in F_1 \exists x_2 \in F_2 (y \in V_{s(s(n_1(x_1)))}[x_1] \cap V_{s(s(n_2(x_2)))}[x_2])$ である。

$n_1(x_1) \leq n_2(x_2)$ とする。

$(x_1, y), (x_2, y) \in V_{s(s(n_1(x_1)))}$ より、 $(x_1, y), (y, x_2) \in V_{s(n_1(x_1))}$ であるので、 $(x_1, x_2) \in V_{n_1(x_1)}$ である。

$x_2 \in V_{n_1(x_1)}[x_1] \cap F_2$ より、 n_1 の定義に反する。

$n_1(x_1) > n_2(x_2)$ であるときも、同様に n_1 の定義に反する。

したがって、 $U_1 \cap U_2 = \emptyset$ である。 ■

Thm. 10.3.3. 可算一様空間について

可算一様空間 X について、以下の 3 つは同値である。

1. X は第二可算
2. X は Lindelöf
3. X は可分

Proof.

1. \rightarrow 2. は、定理 9.7.4 より成り立つ。

補題 10.3.1 の定める $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

2. \rightarrow 3. を示す。

$\forall (n, x) \in \mathbb{N} \times X$ について、 $\forall z \in V_n[x] \exists m \in \mathbb{N} (V_m[z] \subset V_n[x])$ であるので、 $V_n[x] \in \mathcal{O}$ である。

$n \in \mathbb{N}$ について、集合系 $D_n := \{V_n[x] \mid x \in X\}$

D_n は開被覆であるので、仮定より可算部分 Y_n が存在して、 $\{V_n[y] \mid y \in Y\}$ は開被覆である。

$Y := \bigcup \{Y_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ を考える。定理 8.2.3 より Y は可算である。

$\forall x \in X \forall n \in \mathbb{N}$ について、 Y_n は開被覆より $\exists y \in Y_n (x \in V_{s(n)}[y])$ である。

ゆえに $y \in V_n[x] \cap Y$ であるので、 $x \in \overline{Y}$

3. \rightarrow 1. を示す。仮定より X の可算部分 Y が存在して、 $\overline{Y} = X$ である。

以下の集合 \mathcal{B} を考える。

$$\mathcal{B} := \{V_n[y] \mid (n, y) \in \mathbb{N} \times Y\}$$

定理 8.2.3 より、 \mathcal{B} は可算。

$\forall (n, y) \in \mathbb{N} \times Y$ について、 $\forall z \in V_n[y] \exists m \in \mathbb{N} (V_m[z] \subset V_n[y])$ であるので、 $V_n[y] \in \mathcal{O}$ である。

$\forall O \in \mathcal{O} \forall x \in O$ について、定理 9.3.6 より $\exists n \in \mathbb{N} (V_n[x] \subset O)$ である。

$x \in \overline{Y}$ より $\exists y \in Y (y \in V_{s(s(n))}[x])$ である。

$V_{s(s(n))} \subset V_{s(n)}^{-1}$ より、 $x \in V_{s(n)}[y]$ である。

$\forall z \in V_{s(n)}[y]$ について $(x, x), (x, y), (y, z) \in V_{s(n)}$ より $(x, z) \in V_n$ 、すなわち $V_{s(n)}[y] \subset V_n[x] \subset O$

補題 9.1.2 より、 \mathcal{B} は \mathcal{O} の開基である。 ■

Thm. 10.3.4. 可算一様空間における完備

可算一様空間 X について、 X 上の任意の Cauchy 列が収束するならば完備である。

Proof.

補題 10.3.1 の主張する基本近縁系 $(V_n)_{n \in \mathbb{N}}$ が存在する。

Cauchy なネット $(x_\lambda)_{\lambda \in \Lambda}$ について、 $\forall n \in \mathbb{N} \exists \lambda_0(n) \in \Lambda \forall \mu, \tau \in \Lambda_{\succ \lambda_0(n)} ((x_\mu, x_\tau) \in V_{s(n)})$

$(x_{\lambda_0(k)})_{k \in \mathbb{N}}$ は Cauchy な点列であるので、仮定より $\exists a \in X$ に収束する。

すなわち $\exists l \in \mathbb{N} \forall k \in \mathbb{N}_{\geq l} ((a, x_{\lambda_0(k)}) \in V_{s(n)})$

$j := \max \{l, n\}$ について $\forall \mu \in \Lambda_{\succ \lambda_0(j)} ((a, x_{\lambda_0(j)}), (x_{\lambda_0(j)}, x_\mu) \in V_{s(n)})$ である。

したがって $(a, x_\mu) \in V_n$ ■

11 代数

11.1 マグマ

Def. 11.1.1. 二項演算

集合 X について、写像 $\cdot: X^2 \rightarrow X$ を、 X 上の二項演算、または X 上の演算と呼ぶ。

$\cdot(a, b)$ を誤解のない範囲で $a \cdot b$ とも表す。

Rem. 11.1.1. 二項演算と両立する同値関係

集合 X 上の同値関係 \sim について、誘導される X^2 上の同値関係 \sim_2 を以下で定める。

$$(x_1, x_2) \sim_2 (y_1, y_2) : \leftrightarrow x_1 \sim y_1 \wedge x_2 \sim y_2$$

X 上の二項関係 \cdot が同値関係 \sim と両立するとは、 \cdot が \sim, \sim_2 と両立することである。

Def. 11.1.2. マグマ

集合 M と M 上の演算 \cdot について、順序対 (M, \cdot) をマグマと呼ぶ。または単に M と書き、マグマを表すものとする。

Def. 11.1.3. 可換マグマ

マグマ $(M, +)$ が以下を満たすとき、 M を可換マグマと呼ぶ。可換であることを明示的に $+$ で表す。

$$\forall x, y \in M (x + y = y + x)$$

11.2 マグマと準同型

Def. 11.2.1. マグマ準同型

マグマ $(M_1, \cdot_{M_1}), (M_2, \cdot_{M_2})$ について以下を満たす写像 $\varphi: M_1 \rightarrow M_2$ が存在するとき、 φ をマグマ準同型写像、または単にマグマ準同型と呼ぶ。

$$\forall x, y \in M_1 (\varphi(x) \cdot_{M_2} \varphi(y) = \varphi(x \cdot_{M_1} y))$$

また、 $(M_1, \cdot_{M_1}) = (M_2, \cdot_{M_2})$ であるとき、マグマ自己準同型と呼ぶ。

Cor. 11.2.1.

マグマ M_1, M_2, M_3 と、マグマ準同型 $f: M_1 \rightarrow M_2, g: M_2 \rightarrow M_3$ について、合成写像 $g \circ f$ はマグマ準同型である。

Def. 11.2.2. 埋め込み

単射なマグマ準同型を埋め込みと呼ぶ。

Def. 11.2.3. マグマ同型

全単射なマグマ準同型写像を、マグマ同型写像、または単にマグマ同型と呼ぶ。

Cor. 11.2.2.

マグマ M について、恒等写像 id_M はマグマ同型である。

Def. 11.2.4. マグマ準同型の全体

マグマ M_1, M_2 について、 M_1 から M_2 へのマグマ準同型写像全体のなす集合を、 $\text{Hom}(M_1, M_2)$ と表す。

また、自己準同型写像の全体を $\text{End}(M) := \text{Hom}(M, M)$ と表す。

11.3 マグマと準同型定理

Def. 11.3.1. 部分マグマ

マグマ (M, \cdot) と、集合 S 、以下を満たす制限写像 $\cdot|_S$ について、順序対 $(S, \cdot|_S)$ を M の部分マグマと呼ぶ。

$$S \subset M \wedge \forall x, y \in S (x \cdot y \in S)$$

Cor. 11.3.1.

マグマ M_1, M_2 と、マグマ準同型 $f: M_1 \rightarrow M_2$ について、像 $f(M_1)$ は M_2 の部分マグマである。

Def. 11.3.2. 商マグマ

マグマ (M, \cdot) を考える。

演算 \cdot と両立する同値関係 \sim について、定理 5.3.4 より定める演算 \cdot' が存在する。

このとき、マグマ $(M / \sim, \cdot')$ をマグマ M の商マグマと呼ぶ。

Cor. 11.3.2.

マグマ (M, \cdot) と、その商マグマ $(M / \sim, \cdot)$ について、商写像 $\llbracket \cdot \rrbracket$ はマグマ準同型である。

Thm. 11.3.3. マグマ準同型定理

マグマ $(M_1, \cdot_{M_1}), (M_2, \cdot_{M_2})$ とマグマ準同型 $f: M_1 \rightarrow M_2$ 、および f に付随する同値関係 \sim_f について、マグマ同型 $\bar{f}: (M_1 / \sim_f, \cdot) \rightarrow (\text{Im}(f), \cdot_{M_2})$ が存在する。

Proof.

定理 5.3.6 より全単射な \bar{f} が存在して、 $f = \bar{f} \circ \llbracket \cdot \rrbracket$

ゆえに、

$$\bar{f}([x] \cdot [y]) = \bar{f}([x \cdot_{M_1} y]) = f(x \cdot_{M_1} y) = f(x) \cdot_{M_2} f(y) = \bar{f}([x]) \cdot_{M_2} \bar{f}([y])$$

したがってマグマ準同型。 ■

11.4 半群

Def. 11.4.1. 半群

マグマ (S, \cdot) が以下を満たすとき、半群と呼ぶ。

$$\forall x, y, z \in S ((x \cdot y) \cdot z = x \cdot (y \cdot z))$$

Thm. 11.4.1. 一般結合法則

半群 (S, \times) について、 S の 2 以上の $n \in \mathbb{N}$ の元の演算結果 $a_0 \times a_1 \times \cdots \times a_{n-1}$ は、括弧の付け方によらず $((\cdots (a_0 \times a_1) \times \cdots \times a_{n-1}))$ に等しい。

Proof.

帰納的に示される。 ■

Def. 11.4.2. 可換半群

半群が可換マグマであるとき、可換半群と呼ぶ。

Thm. 11.4.2. 一般交換法則

可換半群 $(S, +)$ と点列 $a: n \rightarrow S$ を考える。任意の全単射 $\sigma: n \rightarrow n$ について、以下が成り立つ。

$$a_{\sigma(0)} + a_{\sigma(1)} + \cdots + a_{\sigma(n-1)} = a_0 + a_1 + \cdots + a_{n-1}$$

Proof.

帰納的に示される。 ■

Cor. 11.4.3.

半群の部分マグマは半群である。

Cor. 11.4.4.

半群の商マグマは半群である。

11.5 モノイド

Def. 11.5.1. モノイド

半群 (M, \cdot) が以下を満たすとき、モノイドと呼ぶ。

$$\exists e \in M \forall x \in M (e \cdot x = x \cdot e = x)$$

Lem. 11.5.1.

上の定義の主張する e は群に対して一意に定まる。

Proof.

e_1, e_2 の二つが存在するとすると、直ちに矛盾する。

$$e_1 = e_1 e_2 = e_2$$

■

Def. 11.5.2. 単位元

補題 11.5.1 より一意に定まる e をモノイドの単位元と呼ぶ。

モノイド M の単位元であることを明示するために、 e_M とも表す。

Def. 11.5.3. 可逆元の全体

モノイド (M, \cdot) について、集合 M^\times を以下のように定義する。

$$M^\times = \{x \in M \mid \exists y \in M (x \cdot y = y \cdot x = e)\}$$

また、 M^\times の元を可逆元と呼ぶ。

Lem. 11.5.2.

定義 11.5.3 の主張する元 y は元 x に対して一意に定まる。

Proof.

y_1, y_2 の二つが存在するとすると、直ちに矛盾する。

$$y_1 = e \cdot y_1 = (y_2 \cdot x) \cdot y_1 = y_2 \cdot (x \cdot y_1) = y_2 \cdot e = y_2$$

■

Def. 11.5.4. 逆元

補題 11.5.2 より一意に定まる y を元 x の逆元と呼び、 x^{-1} で表す。

さらに、 $x \cdot y^{-1}$ を x/y と略記する。

Cor. 11.5.3.

モノイド M とその単位元 e について、

$$e^{-1} = e \wedge \forall x \in M^{\times} \left((x^{-1})^{-1} = x \right)$$

Def. 11.5.5. 可換モノイド

モノイドが可換マグマであるとき、可換モノイドと呼ぶ。

可換モノイドの場合、可換であることを明示的に、単位元を 0、逆元を $-x$ 、演算 x/y を $x - y$ とも表す。

11.6 モノイドと準同型

Def. 11.6.1. モノイド準同型

モノイド M_1, M_2 について、マグマ準同型 $\varphi: M_1 \rightarrow M_2$ が以下を満たすとき、 φ をモノイド準同型写像、または単にモノイド準同型と呼ぶ。

$$\varphi(e_{M_1}) = e_{M_2}$$

Cor. 11.6.1. モノイド準同型の合成

モノイド M_1, M_2, M_3 と、モノイド準同型 $f: M_1 \rightarrow M_2, g: M_2 \rightarrow M_3$ について、合成写像 $g \circ f$ はモノイド準同型である。

Def. 11.6.2. 核

モノイド準同型 $\varphi: M_1 \rightarrow M_2$ について、以下の原像を核と呼び、 $\text{Ker}(\varphi)$ と表す。

$$\text{Ker}(\varphi) := \varphi^{-1}(\{e_{M_2}\})$$

Def. 11.6.3. モノイド同型

全単射なモノイド準同型写像を、モノイド同型写像、または単にモノイド同型と呼ぶ。

Thm. 11.6.2. 自己写像の全体

集合 X について、順序対 (X^X, \circ) はモノイドである。

Proof.

自明にマグマである。系 4.2.2 より、半群。

id_X は単位元となるので、モノイドである。 ■

Thm. 11.6.3. 自然数は可換モノイド

$(\mathbb{N}, +)$ は可換モノイドである。

(\mathbb{N}, \times) は可換モノイドである。

Proof.

補題 7.3.3、補題 7.3.4、補題 7.3.6 より、 $(\mathbb{N}, +)$ は可換モノイドである。

補題 7.4.6、補題 7.4.3、補題 7.4.5 より、 (\mathbb{N}, \times) は可換モノイドである。 ■

11.7 モノイドと準同型定理

Def. 11.7.1. 部分モノイド

モノイド M の部分マグマ A が、モノイドをなすとき、 A を部分モノイドと呼ぶ。

Cor. 11.7.1. 部分モノイドの判定

モノイド M の部分マグマ A について、 A が部分モノイドであることは以下が成り立つことと必要十分である。

$$e \in A$$

Cor. 11.7.2.

モノイド M について、 M^\times は部分モノイドである。

Cor. 11.7.3.

モノイド準同型 $\varphi: M_1 \rightarrow M_2$ について、 $\text{Ker}(\varphi)$ は M の部分モノイドである。

Cor. 11.7.4.

モノイドの商マグマはモノイドである。 $[e]$ を単位元として持つ。

Thm. 11.7.5. モノイド準同型定理

モノイド M_1, M_2 と、モノイド準同型 $f: M_1 \rightarrow M_2$ 、 f に付随する同値関係 \sim_f について、モノイド同型 $\bar{f}: M_1 / \sim_f \rightarrow \text{Im}(f)$ が存在する。

Proof.

$\text{Im}(f)$ は M_2 の部分モノイドである。

定理 11.3.3 より、得る \bar{f} はマグマ同型。

今、 $\bar{f}([e_{M_1}]) = f(e_{M_1}) = e_{M_2}$ であるので、示される。 ■

Thm. 11.7.6. 自己準同型の全体

マグマ M について、順序対 $(\text{End}(M), \circ)$ はモノイド (X^X, \circ) の部分モノイドである。

Proof.

自明に部分である。

系 11.6.1 よりマグマである。系 4.2.2 より、半群。

id_X は単位元となるので、モノイドである。 ■

11.8 指数と総乗

Lem. 11.8.1.

モノイド (M, \cdot) について、以下のように帰納的に定める部分写像 \prod は $M^{\mathbb{N}} \times \mathbb{N}$ について左全域的である。

$$\begin{aligned} \forall (x_m)_{m \in \mathbb{N}} \in M^{\mathbb{N}} & \left(\prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, 0) := e \right) \\ \forall (x_m)_{m \in \mathbb{N}} \in M^{\mathbb{N}} \forall n \in \mathbb{N} & \left(\prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, s(n)) := \prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, n) \cdot x_n \right) \end{aligned}$$

Proof.

$\forall ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, n) \in M^{\mathbb{N}} \times \mathbb{N}$ に対して、 $\prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, n)$ が存在することを示す。

$n = 0$ のとき定義より成り立つ。

ある n で成り立つとすると、定義より $\prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, s(n))$ でも成り立つ。

定理 7.1.2 より、任意の n について示される。 ■

Def. 11.8.1. 総乗記号

補題 11.8.1 より定まる写像 $\prod: M^{\mathbb{N}} \times \mathbb{N} \rightarrow M$ を総乗記号と呼ぶ。

また、 $\prod ((x_m)_{m \in \mathbb{N}}, n)$ を誤解のない範囲で $\prod_{m \in n} x_m$ と略記する。

書き直して再掲する。

$$\begin{aligned} \forall (x_m)_{m \in \mathbb{N}} \in M^{\mathbb{N}} & \left(\prod_{m \in 0} x_m := e \right) \\ \forall (x_m)_{m \in \mathbb{N}} \in M^{\mathbb{N}} \forall n \in \mathbb{N} & \left(\prod_{m \in s(n)} x_m := \left(\prod_{m \in n} x_m \right) \cdot x_n \right) \end{aligned}$$

可換モノイドであるとき、可換であることを明示的に \sum を、 \prod の代わりに用いる。

Def. 11.8.2. 総和記号

可換モノイド $(M, +)$ と、集合 X 、写像 $f: X \rightarrow M$ について、以下を満たすとする。ただし、 0 は単位元とする。

$$\exists A \in \mathfrak{P}(X) (|A| < \infty \wedge \forall x \in X \setminus A (f(x) = 0))$$

このとき、全単射 $\sigma: |A| \rightarrow A$ が存在する。集合についての総和記号を以下のように定義する。定理 11.4.2 から一意に定まる。

$$\sum_{x \in X} f(x) := \sum_{m \in |A|} f(a_m)$$

Def. 11.8.3. 指数

モノイド M について、以下の写像 ${}^{\wedge}: M \times \mathbb{N} \rightarrow M$ を指数と呼ぶ。

$${}^{\wedge}(x, n) := \prod_{m \in n} x$$

指数 ${}^{\wedge}$ は、演算 \cdot よりも先に計算される。

また、 ${}^{\wedge}(x, n)$ を誤解のない範囲で x^n と略記する。

Lem. 11.8.2. モノイド上の指數法則

モノイド (M, \cdot) について、以下の 2 つのモノイド準同型が存在する。

1. $\forall x \in M$ について、 $\sigma: (\mathbb{N}, +) \rightarrow M$ であり、 $\sigma(n) = x^n$
2. $\tau \in \text{End}(M)^{(\mathbb{N}, \times)}$ であり、 $\tau(n)(x) = x^n$

Proof.

1. を示す。

$x^{n+0} = x^n = x^n \cdot 1_M = x^n \cdot x^0$ である。

$x^{n+m} = x^n \cdot x^m$ であるとき、 $x^{n+s(m)} = x^{s(n+m)} = x^{n+m} \cdot x = x^n \cdot x^m \cdot x = x^n \cdot x^{s(m)}$ である。

定理 7.1.2 より、任意の m について成り立つ。

$x^0 = 1_M$ より単位元を保つので、モノイド準同型。

2. を示す。

$x^{n \times 0} = x^0 = 1_M = (x^n)^0$ である。

$x^{n \times m} = (x^n)^m$ であるとき、 $x^{n \times s(m)} = x^{n \times m+n} = x^{n \times m} \cdot x^n = (x^n)^m \cdot x^n = (x^n)^{s(m)}$ である。

定理 7.1.2 より、任意の m について成り立つ。

$\tau(1)$ は $\text{End}(M)$ の単位元であるので、モノイドである。 ■

Lem. 11.8.3. 有限集合間の写像の全体

空でない有限集合 X, Y について、 Y^X は有限であり、以下が成り立つ。

$$|Y^X| = |Y|^{|X|}$$

Proof.

全単射 $\sigma: Y^{|X|} \rightarrow Y^X$ が存在する。

補題 8.3.2 と補題 8.1.11 より、数学的帰納法を用いて $|Y^{|X|}| = |Y|^{|X|}$ が成り立つ。 ■

12 群

12.1 群

Def. 12.1.1. 群

モノイド (G, \cdot) が以下を満たすとき、群と呼ぶ。

$$G = G^\times$$

以降、誤解のない範囲で、 $x \cdot y$ を xy と略記する。

Cor. 12.1.1.

モノイド M について、 M^\times は群である。

Def. 12.1.2. 自明群

要素数が 1 の群を自明群と呼ぶ。

Def. 12.1.3. 可換群

群が可換マグマであるとき、可換群と呼ぶ。

Lem. 12.1.2. 群の条件

以下を満たすマグマ G は群である。

$$\begin{aligned}\exists e \in G \forall x \in G (xe = x) \\ \forall x \in G \exists x' \in G (xx' = e)\end{aligned}$$

Proof.

e が単位元であることを示す。

$$ex = e(xe) = e(x(x'x'')) = e(xx')x'' = eex'' = (xx')ex'' = x(x'e)x'' = xx'x'' = x(x'x'') = xe = x$$

左逆元であることを示す。

$$x'x = x'(xe) = x'(x(x'x'')) = x'(xx')x'' = x'ex'' = x'x'' = e$$

■

Def. 12.1.4. 部分群

群 G の部分モノイド H が以下を満たすとき、 H は群となり、群 H を群 G の部分群と呼ぶ。

$$\forall x \in H (x^{-1} \in H)$$

Lem. 12.1.3. 部分群の判定

群 G の部分集合 H が部分群であることは、以下と必要十分である。

$$H \neq \emptyset \wedge \forall x, y \in H (xy^{-1} \in H)$$

Proof.

必要性を示す。

$$\text{空でないので、 } \exists x \in H (e = xx^{-1} \in H)$$

$$\text{ゆえに、 } \forall x \in H (x^{-1} = ex^{-1} \in H)$$

$$\text{したがって、 } \forall x, y \in H (xy = x(y^{-1})^{-1} \in H)$$

結合法則も自明に満たす。

十分性を示す。

$$\text{単位元の存在より、空でない。部分群より、 } \forall y \in H (y^{-1} \in H) \text{。} \text{ ただちに、 } \forall x, y \in H (xy^{-1} \in H)$$

■

Cor. 12.1.4. 群の共通部分

群 G について、 $A \subset G$ を考える。

$\forall H \in A$ について H が G の部分群であるとき、 $\bigcap A$ は G の部分群である。

Cor. 12.1.5.

群の商マグマは群である。 $[x^{-1}]$ を逆元として持つ。

12.2 群と準同型

Def. 12.2.1. 群準同型

群 G_1, G_2 について以下を満たすモノイド準同型 $\varphi: G_1 \rightarrow G_2$ が存在するとき、 φ を群準同型写像、または単に群準同型と呼ぶ。

$$\forall x \in G_1 (\varphi(x)^{-1} = \varphi(x^{-1}))$$

Lem. 12.2.1. マグマ準同型は群準同型

群 G_1, G_2 について、マグマ準同型 $\varphi: G_1 \rightarrow G_2$ は群準同型である。

Proof.

モノイド準同型であることを示す。

$$e' = \varphi(e)\varphi(e)^{-1} = \varphi(e)\varphi(e^{-1}) = \varphi(ee^{-1}) = \varphi(e)$$

群準同型であることを示す。

$$\varphi(x)^{-1} = \varphi(e)\varphi(x)^{-1} = \varphi(x^{-1}x)\varphi(x)^{-1} = \varphi(x^{-1})\varphi(x)\varphi(x)^{-1} = \varphi(x^{-1})\varphi(e) = \varphi(x^{-1})$$

■

Thm. 12.2.2. 群準同型の単射性

群準同型 $\varphi: G_1 \rightarrow G_2$ が単射であることは、以下と必要十分である。

$$\text{Ker}(\varphi) = \{e\}$$

Proof.

十分性は、単射性より示される。

必要性を示す。 $\forall x, y \in G_1 \wedge \varphi(x) = \varphi(y)$ について、

$$e' = \varphi(e) = \varphi(x)\varphi(x^{-1}) = \varphi(y)\varphi(x^{-1}) = \varphi(yx^{-1})$$

ゆえに $xy^{-1} \in \text{Ker}(\varphi)$ で、 $x = y$ 。すなわち単射。

■

Def. 12.2.2. 群同型

群準同型 $\varphi: G_1 \rightarrow G_2$ が全単射であるとき、これを群同型写像、または単に群同型と呼ぶ。

また、 G_1 から G_2 への群同型写像が存在するとき、 $G_1 \cong G_2$ と表す。

Def. 12.2.3. 自己同型群

マグマ M について、 $\text{End}(M)^\times$ をは群をなす。これを自己同型群と呼び、 $\text{Aut}(M)$ と表す。

Thm. 12.2.3. 可換群上の準同型全体

可換群 G, H について、 $\text{Hom}(G, H)$ 上の以下の演算 $+'$ を考える。このとき、順序対 $(\text{Hom}(G, H), +')$ は可換群をなす。

$$(f +' g)(x) := f(x) + g(x)$$

Proof.

H が可換マグマであることから、 $\text{Hom}(G, H)$ は可換マグマである。

写像 $0_{\text{Hom}(G, H)}: G \rightarrow H, 0_{\text{Hom}(G, H)}(x) = 0_H$ は群準同型であるので、単位元。

写像 $f_{\text{minus}}: G \rightarrow H, f_{\text{minus}}(x) = -f(x)$ は群準同型であるので、逆元。 ■

12.3 群の作用

Def. 12.3.1. 群の作用

群 (G, \cdot) について、 G から、集合 X 上の全单射の全体への写像 $\varphi: (G, \cdot) \rightarrow ((X^X)^\times, \circ)$ が群準同型であるとき、群作用、または単に作用と呼ぶ。

Def. 12.3.2. 軌道

群 G の集合 X への作用 φ と元 $x \in X$ について、以下の集合を x による G 軌道と呼び、 $\varphi(G, x)$ で表す。

$$\varphi(G, x) := \{\varphi(g, x) \mid g \in G\}$$

Cor. 12.3.1.

群 G の集合 X への作用 φ について、以下が成り立つ。

$$\forall x \in X (x \in \varphi(G, x))$$

Def. 12.3.3. 群作用の軌道分解

群 G の集合 X への群作用 φ について、以下で定義する同値関係 $\sim_{\varphi(G)}$ が与えられる。

$$\forall x, y \in X (x \sim_{\varphi(G)} y \Leftrightarrow \varphi(G, x) = \varphi(G, y))$$

$X / \sim_{\varphi(G)}$ を、集合 X の群作用 φ による軌道分解と呼ぶ。

Lem. 12.3.2. 群作用の軌道分解

群 G の集合 X への群作用 φ について、以下が成り立つ。

$$\forall x, y \in X (x \in \varphi(G, y) \rightarrow x \sim_{\varphi(G)} y)$$

Proof.

$\exists g \in G (x = gy)$ である。

$\forall w_x \in \varphi(G, x)$ について $\exists g_x \in G (w_x = g_x x)$ であり、 $w_x = (g_x g)y \in \varphi(G, y)$ であるので、 $\varphi(G, x) \subset \varphi(G, y)$

$\forall w_y \in \varphi(G, y)$ について $\exists g_y \in G (w_y = g_y y)$ であり、 $w_y = (g_y g^{-1})x \in \varphi(G, x)$ であるので、 $\varphi(G, y) \subset \varphi(G, x)$ ■

Lem. 12.3.3.

群 G の X への群作用 φ と、元 $x \in X$ について、以下で定める集合 $\text{Stab}(G, x)$ を考える。このとき、以下で定める順序対 $(\text{Stab}(G, x), \cdot)$ は G の部分群である。

$$\text{Stab}(G, x) := \{g \in G \mid x = \varphi(g, x)\}$$

Proof.

群準同型より、 $x = \varphi(g, x) = \varphi(h, x)$ のとき、 $x = \varphi(g, x) = \varphi(g, \varphi(h, x)) = \varphi(gh, x)$ 、ゆえに部分マグマ。
 群準同型より、 $\varphi(e, x) = \text{id}_X(x) = x$ 、ゆえに部分モノイド。
 群準同型より、 $\varphi(g, x) = x \rightarrow x = \varphi(g^{-1}g, x) = \varphi(g^{-1}, \varphi(g, x)) = \varphi(g^{-1}, x)$ 、ゆえに部分群。 ■

Def. 12.3.4. 安定化部分群

補題 12.3.3 で定める群 $\text{Stab}(G, x)$ を、元 x における G の安定化部分群と呼ぶ。

Def. 12.3.5. 群作用の不变部分

群 G の X への群作用 φ について、以下で定める集合 $\text{Fix}(G, X)$ を、 G による X の不变部分と呼ぶ。

$$\text{Fix}(G, X) := \{x \in X \mid \varphi(G, x) = \{x\}\}$$

Thm. 12.3.4. 類等式

群 G の有限集合 X への群作用 φ について、 $n \in \mathbb{N}$ と点列 $(x_m)_{m \in n} \in X^n$ が存在して、以下の 2 つが成り立つ。

$$|X| = |\text{Fix}(G, X)| + \sum_{m \in n} |\varphi(G, x_m)| \\ \forall m \in n (|\varphi(G, x_m)| > 1)$$

Proof.

$X / \sim_{\varphi(G)}$ は有限である。

また、 $\forall a \in X / \sim_{\varphi(G)}$ について、 $|a| < \infty \wedge |a| \neq 0$ である。

$\{a \in X / \sim_{\varphi(G)} \mid |a| = 1\} = \{\{x\} \mid x \in \text{Fix}(G, X)\}$ であることに注意して、成り立つ。 ■

12.4 部分群の群への作用

Def. 12.4.1. 右作用と左剰余類

群 G とその部分群 H について、以下で定める H の G への自明な作用 φ が存在する。

$$\varphi(h, g) = gh$$

このような作用を右作用と呼び、定義 12.3.3 から定まる同値類を、左剰余類と呼ぶ。

また、軌道分解 $G / \sim_{\varphi(H)}$ を左剰余集合と呼び、 G/H と表記する。

Def. 12.4.2. 左作用と右剰余類

群 G とその部分群 H について、以下で定める H の G への自明な作用 φ が存在する。

$$\varphi(h, g) = hg$$

このような作用を左作用と呼び、定義 12.3.3 から定まる同値類を、右剰余類と呼ぶ。

Thm. 12.4.1. 軌道・安定化部分群定理

群 G の X への群作用 φ と元 $x \in X$ について、左剰余集合 $G / \text{Stab}(G, x)$ を考える。このとき、全单射 $f: G / \text{Stab}(G, x) \rightarrow \varphi(G, x)$ が存在する。

Proof.

写像 $\hat{f}_x: G \rightarrow X$, $\hat{f}_x(g) = \varphi(g, x)$ を考える。

今 $\forall g, h \in G$ について、 $g \sim_{\hat{f}_x} h \leftrightarrow \varphi(h^{-1}g, x) = x \leftrightarrow h^{-1}g \in \text{Stab}(G, x) \leftrightarrow g \sim_{\varphi(\text{Stab}(G, x))} h$ である。
 $\text{Im}(\hat{f}_x) = \varphi(G, x)$ であるので、定理 5.3.6 より存在する。 ■

Def. 12.4.3. 共役作用と共役類

群 G とその部分群 H について、以下で定める H の G への自明な作用 φ が存在する。

$$\varphi(h, g) = h^{-1}gh$$

このような作用を共役作用と呼び、定義 12.3.3 から定まる同値類を、共役類と呼ぶ。

12.5 群と準同型定理

Def. 12.5.1. 正規部分群

群 G とその部分群 H について、以下を満たすとき、 H を G の正規部分群と呼ぶ。

$$\forall g \in G \forall h \in H (g^{-1}hg \in H)$$

Cor. 12.5.1.

核は正規部分群である。

Cor. 12.5.2.

可換群の部分群は正規部分群である。

Cor. 12.5.3.

群 G の正規部分群 N について、 N の部分群 H は、 G の正規部分群である。

Cor. 12.5.4.

群 G の部分群 H と、 G の正規部分群 N について、 $N \cap H$ は H の正規部分群である。

Lem. 12.5.5. 正規部分群の定める同値関係

群 G とその正規部分群 H について、定義 12.4.1 の定める H の G への自明な右作用 φ を考える。

φ が定める同値関係 $\sim_{\varphi(H)}$ は演算と両立する同値関係である。

Proof.

$x_1 \sim_{\varphi(H)} y_1, x_2 \sim_{\varphi(H)} y_2$ であるとき、 $\exists h_1, h_2 \in H (y_1 = x_1 h_1 \wedge y_2 = x_2 h_2)$

正規部分群より、 $\exists h \in H (x_2^{-1}h_1x_2 = h)$

$$y_1 y_2 = x_1 h_1 x_2 h_2 = x_1 x_2 x_2^{-1} h_1 x_2 h_2 = x_1 x_2 h h_2$$

補題 12.3.2 より、両立する。 ■

Def. 12.5.2. 剰余群

群 G とその正規部分群 H について、補題 12.5.5 の定める同値関係による商マグマを、剰余群と呼び、 G/H と表す。

Cor. 12.5.6.

定義より、剰余群は左剰余集合である。

さらに、右剰余集合である。

Thm. 12.5.7. 群準同型定理

群 G_1, G_2 と、群準同型 $f: G_1 \rightarrow G_2$ 、 f に付随する同値関係 \sim_f について、群同型 $\bar{f}: G_1 / \sim_f \rightarrow \text{Im}(f)$ が存在する。

$G_1 / \sim_f = G_1 / \text{Ker}(f)$ であるため、 $\bar{f}: G_1 / \text{Ker}(f) \rightarrow \text{Im}(f)$ の形で書かれることが多い。

Proof.

$\text{Im}(f)$ は G_2 の部分群である。

定理 11.3.3 より、得る \bar{f} はマグマ同型。補題 12.2.1 より、群同型。 ■

Lem. 12.5.8. 剰余群の部分群は部分群の剰余群

群 G 、 G の正規部分群 N 、 G/N の部分群 Z を考える。

このとき G の部分群 H が存在して、 N は H の正規部分群となり、 $H/N = Z$ が成り立つ。

Proof.

商写像 $[]$ の原像 $H := [Z]^{-1}$ を考えると、商写像の群準同型性より H は G の部分群である。

$[\{e_Z\}]^{-1} = N$ であるため、 $N \subset H$ である。ゆえに N は H の正規部分群である。

商写像は全射であるため、 $H/N = [[Z]^{-1}] = Z$ である。 ■

Lem. 12.5.9.

群 G と G から G への共役作用 φ_G について、以下が成り立つ。

$$\text{Fix}(G, G) = \{g \in G \mid \forall g' \in G (gg' = g'g)\} = \bigcap \{\text{Stab}(G, g') \mid g' \in G\}$$

また、 $\text{Fix}(G, G)$ は G の正規部分群である。

Proof.

$\text{Fix}(G, G) = \left\{ g \in G \mid \forall g' \in G ((g')^{-1}gg' = g) \right\}$ である。

$\bigcap \{\text{Stab}(G, g') \mid g' \in G\} = \{g \in G \mid \forall g' \in G (g \in \text{Stab}(G, g'))\} = \left\{ g \in G \mid \forall g' \in G ((g')^{-1}gg' = g) \right\}$ である。

ゆえに等号が成り立つ。

$\bigcap \{\text{Stab}(G, g') \mid g' \in G\}$ より、 G の部分群であり、定義より正規部分群である。 ■

Def. 12.5.3. 群の中心

群 G について、補題 12.5.9 で定める正規部分群を、 G の中心と呼ぶ。

Cor. 12.5.10.

群の中心は可換群である。

12.6 群の生成

Def. 12.6.1. 群の生成

群 G の部分集合 S について、 S が生成する部分群を以下で定めて、 $\langle S \rangle$ で表す。

$$\langle S \rangle := \bigcap \{H \subset G \mid S \subset H \wedge H \text{ は } G \text{ の部分群}\}$$

Rem. 12.6.1. 生成する集合が単集合であるときの略記

群 G と元 $g \in G$ について、 $\{g\}$ が生成する部分群 $\langle \{g\} \rangle$ を、誤解がない範囲で単に $\langle g \rangle$ で表す。

Def. 12.6.2. 群の生成系

群 G の部分集合 S について、 $G = \langle S \rangle$ であるとき、 S を G の生成系と呼ぶ。

Def. 12.6.3. 単生群

群 G について、以下を満たすとき、 G を単生群と呼ぶ。

$$\exists g \in G (G = \langle g \rangle)$$

Cor. 12.6.1.

単生群は可換群である。

12.7 半直積

Lem. 12.7.1.

群 H, N と、群準同型 $\varphi: H \rightarrow \text{Aut}(N)$ について、 $N \times H$ 上の以下で定義される演算 \cdot を考える。

$$(n_1, h_1) \cdot (n_2, h_2) := (n_1\varphi(h_1, n_2), h_1h_2)$$

このとき、 $(N \times H, \cdot)$ は群である。

Proof.

半群であることは以下の通り。

$$\begin{aligned} ((n_1, h_1) \cdot (n_2, h_2)) \cdot (n_3, h_3) &= (n_1\varphi(h_1, n_2), h_1h_2) \cdot (n_3, h_3) \\ &= (n_1\varphi(h_1, n_2)\varphi(h_1h_2, n_3), h_1h_2h_3) \\ &= (n_1\varphi(h_1, n_2)\varphi(h_1, \varphi(h_2, n_3)), h_1h_2h_3) \\ &= (n_1\varphi(h_1, n_2\varphi(h_2, n_3)), h_1h_2h_3) \\ &= (n_1, h_1)(n_2\varphi(h_2, n_3), h_2h_3) \\ &= (n_1, h_1) \cdot ((n_2, h_2) \cdot (n_3, h_3)) \end{aligned}$$

$e = (e_N, e_H)$ は単位元である。

(n, h) の逆元は、 $(\varphi(h^{-1}, n^{-1}), h^{-1})$ である。 ■

Def. 12.7.1. 外部半直積

補題 12.7.1 で定義される群を、 N, H の φ による外部半直積と呼び、 $N \rtimes_{\varphi} H$ と表す。

Cor. 12.7.2.

外部半直積 $N \rtimes H$ について、以下が成り立つ。

$$\forall (n, h) \in N \rtimes H ((n, h) = (n, e_H) \cdot (e_N, h))$$

Cor. 12.7.3.

外部半直積 $N \rtimes H$ について、以下で定義する H' は $N \rtimes_{\varphi} H$ の部分群である。

$$H' := \{(e_N, h) \mid h \in H\}$$

Lem. 12.7.4.

外部半直積 $N \rtimes_{\varphi} H$ について、以下で定義する N' は $N \rtimes_{\varphi} H$ の正規部分群である。

$$N' := \{(n, e_H) \mid n \in N\}$$

Proof.

明らかに部分群である。

$\forall n, n' \in N \forall h \in H$ について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned}(n, h)^{-1}(n', e_H)(n, h) &= (\varphi(h^{-1}, n^{-1}), h^{-1})(n'n, h) \\ &= (\varphi(h^{-1}, n^{-1})\varphi(h^{-1}, n'n), h^{-1}h) \\ &= (\varphi(h^{-1}, n^{-1}n'n), e_H)\end{aligned}$$

よって、正規部分群である。 ■

13 有限群

13.1 有限群

Def. 13.1.1. 有限群

群 G について、 G が有限集合であるとき、 G を有限群と呼ぶ。

Thm. 13.1.1. Lagrange の定理

有限群 G と、 G の部分群 H 、左剰余集合 G/H について、以下が成り立つ。

$$|G| = |G/H||H|$$

Proof.

商写像 $[]$ は全射より、定理 ?? から右逆写像 r を持つ。

写像 $\varphi: G/H \times H \rightarrow G, \varphi([g], h) := r([g])h$ を考える。

$\varphi([g_1], h_1) = \varphi([g_2], h_2)$ であるとき、 $r([g_2]) = r([g_1])h_1h_2^{-1}$ より、補題 12.3.2 から $[g_1] = [g_2]$ であって、ただちに $h_1 = h_2$

ゆえに φ は単射。

$\forall g \in G$ について、 $r([g])^{-1}g \in H$ であるので、 $g = \varphi([g], r([g])^{-1}g)$ と書ける。ゆえに φ は全射。

したがって、 $|G| = |G/H \times H|$ であり、補題 8.1.11 より成り立つ。 ■

Thm. 13.1.2. Lagrange の定理の拡張

有限群 G と、 G の部分群 H 、さらに H の部分群 K について、左剰余集合 $G/H, G/K$ を考える。このとき、以下が成り立つ。

$$|G/K| = |G/H||H/K|$$

Proof.

定理 13.1.1 より、 $|G/K||K| = |G| = |G/H||H| = |G/H||H/K||K|$ である。

$|K| \neq 0$ より、補題 7.4.9 から成り立つ。 ■

Lem. 13.1.3. 有限群の作用による軌道の大きさ

有限群 G と集合 X について、 G の X への作用 φ を考える。

このとき、 $\forall x \in X$ について軌道の要素数 $|\varphi(G, x)|$ は G の約数である。

Proof.

定理 13.1.1、定理 12.4.1 より以下が成り立つ。

$$\forall x \in X (|G| = |G/\text{Stab}(G, x)||\text{Stab}(G, x)| = |\varphi(G, x)||\text{Stab}(G, x)|)$$
 ■

Def. 13.1.2. 巡回群

群 G について以下が成り立つとき、 G を巡回群と呼ぶ。

$$\exists n \in \mathbb{N} \exists g \in G (G = \{g^m \mid m \in n\})$$

Cor. 13.1.4.

巡回群は单生群である。

Lem. 13.1.5. 位数

有限群 G と元 $g \in G$ に対して、以下の集合は空でない。

$$\{n \in \mathbb{N} \mid g^n = e_G\}$$

Proof.

定理 8.1.3 より、写像 $\tau: s(|G|) \rightarrow G, \tau(n) = g^n$ は単射でない。

よって、 $\exists i, j \in s(|G|) (i < j \wedge g^i = g^j)$

したがって、 $g^{j-i} = e_G$ である。 ■

Def. 13.1.3. 位数

補題 13.1.5 と定理 7.2.7 より、有限群 G と元 $g \in G$ に対して $g^n = e_G$ とする最小の $n \in \mathbb{N}$ が存在する。

これを元 g の位数と呼び、 $\text{ord}(g)$ と表す。

Lem. 13.1.6. 巡回群の位数

有限群 G と元 $g \in G$ について、 $G = \langle g \rangle$ であるとき、以下が成り立つ。

$$\text{ord}(g) = |G|$$

Proof.

写像 $\tau: \text{ord}(g) \rightarrow G, \tau(n) = g^n$ を考える。

$\exists i, j \in \mathbb{N} (i < j \wedge g^i = g^j)$ ならば $g^{j-i} = e_G$ より位数の最小性に反する。ゆえに単射。

$\forall n \in \mathbb{Z}$ について、定義 7.5.1 より $\exists q, r \in \mathbb{N} (n = q \text{ord}(g) + r \wedge r < \text{ord}(g))$ である。

よって $g^n = g^{q \text{ord}(g) + r} = (g^{\text{ord}(g)})^q g^r = g^r$ 、ゆえに全射。 ■

13.2 群と素数

Lem. 13.2.1. 素数群作用の不变部分

有限群 G の有限集合 X への群作用 φ を考える。 $|G|$ が素数であるとき、 $|X| - |\text{Fix}(G, X)|$ は $|G|$ の倍数である。

Proof.

補題 13.1.3 と $|G|$ が素数であることより、 $|\varphi(G, x)| = 1 \vee |\varphi(G, x)| = |G|$ である。

$W := \bigsqcup \{\varphi(G, x) \mid x \in X \wedge |\varphi(G, x)| = |G|\}$ とする。

定理 12.3.4 より、 $|X| = |\text{Fix}(G, X)| + |W|$ であり、 $|W|$ は $|G|$ の倍数であるため成り立つ。 ■

Lem. 13.2.2. 素数群は巡回群

有限群 G について、 $|G|$ が素数ならば G は巡回群である。

Proof.

$|G|$ は素数より、 $\exists g \in G (g \neq e_G)$ である。

今、 $H := \{g^n \mid n \in \mathbb{N}\}$ は G の部分群であり、 $|H| \geq 2$ である。定理 13.1.1 より、 $|H| = |G|$ である。

ゆえに、 $G \setminus H = \emptyset$ であるので $G = H$ 、すなわち G は巡回群である。 ■

Lem. 13.2.3. Cauchy の定理

有限群 G について、 $|G|$ が素数 p の倍数であるならば、以下が成り立つ。

$$\exists g \in G (\text{ord}(g) = p)$$

Proof.

集合 $S := \{(x_n)_{n \in p} \in G^p \mid \prod_{n \in p} x_n = e_G\}$ を考える。

$x_{p-1} = (\prod_{n \in p-1} x_n)^{-1}$ であることに注目すると、全単射 $S \ni (x_n)_{n \in p} \mapsto (x_n)_{n \in p-1} \in G^{p-1}$ の存在から $|S| = |G|^{p-1}$ であり、特に $|S|$ は p の倍数である。

群 \mathfrak{S}_p の S への以下を満たす群作用 φ を考える。

$$\varphi(\sigma, (x_n)_{n \in p}) = (x_{\sigma(n)})_{n \in p}$$

以下の $\sigma_0 \in \mathfrak{S}_p$ は、 $\text{ord}(\sigma_0) = p$ を満たす。

$$\sigma_0(n) = \begin{cases} n+1 & (n \in p-1) \\ 0 & (n = p-1) \end{cases}$$

今、 \mathfrak{S}_p の部分群 $H := \{\sigma_0^n \mid n \in p\}$ を考える。

補題 13.2.1 より、 $|S| - |\text{Fix}(H, S)|$ は p の倍数である。

今、 $|S|$ は p の倍数より、 $|\text{Fix}(H, S)|$ も p の倍数であり、 $(e_G)_{n \in p} \in \text{Fix}(H, S)$ より、 $\exists x \in \text{Fix}(H, S) \setminus \{(e_G)_{n \in p}\}$ である。

$\sigma_0(x) = x$ であるため、 $\exists g \in G \setminus \{e_G\} (x = (g)_{n \in p})$ である。 ■

Thm. 13.2.4. Sylow の第一定理

素数 p と自然数 n を考える。有限群 G について $|G|$ が p^n の倍数であるとき、 G の部分群 H が存在して $|H| = p^n$ が成り立つ。

Proof.

$|G|$ が p^n の倍数である任意の有限群 G について、満たす部分群 H が存在することを $|G|$ についての数学的帰納法により示す。

$|G| = 1$ のとき、 $\{e_G\}$ は G の部分群である。

ある $|G|$ 未満の全ての自然数について成り立つとする。

G の G への共役作用 φ_C と、 G の中心 $\text{Fix}(G, G)$ を考える。

$|\text{Fix}(G, G)|$ が p の倍数でないとき、定理 12.3.4 より $\exists n \in \mathbb{N}(|G| = |\text{Fix}(G, G)| + \sum_{m \in n} |\varphi(G, g_m)|)$ であるので、 $\exists g \in G$ s.t. $|\varphi(G, g)| \neq 1 \wedge |\varphi(G, g)|$ は p の倍数でない、である。

定理 12.4.1、定理 13.1.1 より、 $|G| = |G/\text{Stab}(G, g)||\text{Stab}(G, g)| = |\varphi(G, g)||\text{Stab}(G, g)|$ である。

$|\varphi(G, g)| > 1$ より、 $|\text{Stab}(G, g)|$ は p^n の倍数であり、 $|G|$ より小さい。

仮定より $\text{Stab}(G, g)$ は部分群 H を持ち、 $|H| = p^n$ である。 H は G の部分群でもある。

$|\text{Fix}(G, G)|$ が p の倍数であるときを考える。

補題 13.2.3 より、 $\text{Fix}(G, G)$ は部分群 N を持つて $|N| = p$ であり、 $\text{Fix}(G, G)$ が G の正規部分群であることから、 N は G の正規部分群である。

剰余群 G/N について、定理 13.1.1 より $|G| = |G/N||N|$ であり、 $|G/N|$ は p^{n-1} の倍数であるので、仮定より部分群 K が存在して、 $|K| = p^{n-1}$ である。

補題 12.5.8 より、 G の部分群 L が存在して $L/N = K$ であり、定理 13.1.1 より $|L| = |L/N||N| = |K||N| = p^n$

■

Def. 13.2.1. Sylow 部分群

素数 p 、自然数 n 、 p の倍数ではない自然数 m を考える。有限群 G について、 $|G| = mp^n$ であるとする。

このとき、以下を満たす G の部分群 H を、 G の Sylow p -部分群と呼ぶ。

$$|H| = p^n$$

Thm. 13.2.5. Sylow の第二定理

素数 p 、自然数 n 、有限群 G 、 G の Sylow p -部分群 H を考える。

G の部分群 K について、 $|K| = p^n$ であるとき、以下が成り立つ。

$$\exists g \in G (K \subset \{g^{-1}hg \mid h \in H\})$$

Proof.

K から G への左作用について、 $\forall k \in K$ についての写像 $g \mapsto kg$ は、 H から G への右作用による軌道分解と両立する。

定理 5.3.4 より、 K から G/H への作用 $\bar{\varphi}$ が一意に存在する。

定理 13.1.1 より、 $|G/H|$ は p を約数に持たない。

$G/H = \bigsqcup \{\bar{\varphi}(K, [g]) \mid [g] \in G/H\}$ であるので、 $\exists [g] \in G/H$ s.t. $\bar{\varphi}(K, [g])$ は p を約数に持たない。

補題 13.1.3 より、 $\bar{\varphi}(K, [g])$ は $|K| = p^n$ の約数である。よって、 $|\bar{\varphi}(K, [g])| = 1$ である。

したがって $\forall k \in K ([kg] = [g])$ である。

すなわち $\forall k \in K$ について $\exists h \in H$ あり、 $kg = gh$ すなわち $k = ghg^{-1}$ である。

■

Thm. 13.2.6. Sylow の第三定理

素数 p 、有限群 G を考える。

G の Sylow p -部分群の全体 \mathcal{S} について、以下が成り立つ。

$$\exists n \in \mathbb{N} (|\mathcal{S}| = np + 1)$$

さらに、 G の任意の Sylow p -部分群 H について、 H の中心 $\text{Fix}(H, H)$ を用いた以下が成り立つ。

$$|G| = |\mathcal{S}| |\text{Fix}(H, H)|$$

Proof.

Sylow p -部分群 H を考える。

H から???

■

13.3 置換と対称群

Def. 13.3.1. 置換

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、全単射 $\sigma: n \rightarrow n$ を置換と呼ぶ。

Def. 13.3.2. 対称群

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、置換の全体は群をなす。この群を n 次対称群と呼び、 (\mathfrak{S}_n, \circ) で表す。

Def. 13.3.3. 互換

$n \in \mathbb{N}_{\geq 2}$ について、以下で表される置換 τ を互換と呼ぶ。

$$\exists i, j \in n \left(i \neq j \wedge \tau(m) = \begin{cases} j & (m = i) \\ i & (m = j) \\ m & (\text{otherwise}) \end{cases} \right)$$

誤解のない範囲で互換を (i, j) と表す。

互換の全体を T_n とする。

Cor. 13.3.1.

互換 $(i, j) = (j, i)$

Cor. 13.3.2.

互換 $\tau \in T_n$ について、 $\tau\tau = \text{id}_n$

Thm. 13.3.3. 置換は互換の積

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、以下が成り立つ。

$$\forall \sigma \in \mathfrak{S}_n \exists l \in \mathbb{N} \exists \tau \in T_n^l \left(\sigma = \prod_{m \in l} \tau(m) \right)$$

Proof.

$n = 1$ のとき、 $\mathfrak{S}_1 = \{\text{id}_1\}$ より成り立つ。

ある n で成り立つとする。

$\sigma \in \mathfrak{S}_{s(n)}$ について、全単射より $\exists k \in s(n) (\sigma(k) = n)$ である。

$k = n$ のとき、 $\sigma|_n \in \mathfrak{S}_n$ より互換の積として表せる。

互換 $\tau := (k, n)$ について、 $\sigma' := \tau\sigma$ を考える。

$\sigma'|_n \in \mathfrak{S}_n$ は帰納法の仮定より互換の積として表せる。

$\sigma = \tau\sigma'$ より互換の積となる。

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

Lem. 13.3.4.

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、 id_n は奇数個の互換の積で表すことはできない。

Proof.

$n = 1$ のとき明らか。

$n \geq 2$ のとき、奇数 l 個の互換の積で表すことができると仮定する。

$\text{id}_n \notin T_n$ より、1 個の互換の積で恒等写像を表すことはできない。ゆえに、 $l \geq 3$

id_n を互換の積で表すことができる最小の奇数 l を考える。

互換 2 つの積について、左の項の第一成分は以下の規約で右の項のみに含まれるように変形できる。

$$(i_1, j_1)(i_2, j_2) = \begin{cases} (i_2, j_2)(i_1, j_1) & (\{i_1, j_1\} \cap \{i_2, j_2\} = \emptyset) \\ (j_1, j_2)(i_1, j_1) & (i_1 = i_2 \wedge j_1 \neq j_2) \\ (i_2, j_1)(i_1, i_2) & (i_1 \neq i_2 \wedge j_1 = j_2) \\ \text{id}_n & (\{i_1, j_1\} = \{i_2, j_2\}) \end{cases}$$

l 個の互換の積である id_n について、上の規約により第一番目の互換の第一成分 i を右に移動させる。

このとき、 l の最小性から 4 番目の場合とはならないため、帰納的に最も右の項のみに i が含まれるようにできる。

これは、 $\text{id}_n(i) = i$ に反する。

背理法より示される。 ■

Lem. 13.3.5. 置換の符号

$\forall \sigma \in \mathfrak{S}_n$ について、定理 13.3.3 の定める l (互換の個数) の偶奇は一意に定まる。

Proof.

奇数 l_1 、偶数 l_0 を用いて、 $\sigma = \prod_{m \in l_1} \tau_1(m) = \prod_{m \in l_2} \tau_2(m)$ とする。

$\text{id}_n = \prod_{m \in l_1} \tau_1(m) \times \prod_{m \in l_2} \tau_2(l_2 - 1 - m)$ より、補題 13.3.4 に反する。

背理法より示される。 ■

Def. 13.3.4. 置換の符号

$\forall \sigma \in \mathfrak{S}_n$ について、補題 13.3.5 より定まる偶奇が存在する。

このとき、以下の写像 $\text{sgn}: \mathfrak{S}_n \rightarrow \{-1, 1\}$ を定義する。

$$\text{sgn}(\sigma) = \begin{cases} 1 & (\text{偶数}) \\ -1 & (\text{奇数}) \end{cases}$$

Cor. 13.3.6.

$\{-1, 1\}$ 上の乗法 \times を以下で導入する。

$$-1 \times -1 = 1 \times 1 = 1, \quad -1 \times 1 = 1 \times -1 = -1$$

このとき $(\{-1, 1\}, \times)$ は可換群であり、 $(\{-1, 1\}, \times)^{\mathfrak{S}_n}$ は群準同型である。

Rem. 13.3.1. -1

ここで定義した -1 は、後で定義する \mathbb{Z} 上の -1 と同一視してよい。

Def. 13.3.5. 交代群

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、以下で定める \mathfrak{S}_n の部分群 A_n を、交代群と呼ぶ。

$$A_n := \{\sigma \in \mathfrak{S}_n \mid \text{sgn}(\sigma) = 1\}$$

Lem. 13.3.7. 交代群は対称群の正規部分群

$n \in \mathbb{N}_{\geq 1}$ について、交代群 A_n は対称群 \mathfrak{S}_n の正規部分群である。

Proof.

$\forall \sigma \in \mathfrak{S}_n \forall \alpha \in A_n$ について、 $\text{sgn}(\sigma^{-1}\alpha\sigma) = \text{sgn}(\sigma)^{-1} \text{sgn}(\alpha) \text{sgn}(\sigma) = \text{sgn}(\alpha) = 1$ より、 $\sigma^{-1}\alpha\sigma \in A_n$

■

13.4 可解群

Def. 13.4.1. 可解群

自明でない群 G について、 $n \in \mathbb{N}$ と有限列 $(H_m)_{m \in s(n)}$ が存在して以下を満たすとき、 G を可解群と呼ぶ。

- $H_0 = G$
- $H_n = \{e_G\}$
- $\forall m \in n$ について、 $H_{s(m)}$ は H_m の正規部分群であり、剩余群 $H_m/H_{s(m)}$ が可換群

Cor. 13.4.1.

可換群は可解群である。

Lem. 13.4.2. 可解群の部分

可解群 G の部分群 H は可解群である。

Proof.

G は可解群より、定義 13.4.1 を満たす有限列 $(Z_m)_{m \in n}$ が存在する。

有限列 $Y_m := Z_m \cap H$ を考える。ただちに $Y_{s(m)}$ は Y_m の正規部分群。

埋め込み $f: Y_m \rightarrow Z_m$ と、商写像 $\bar{f}: Z_m \rightarrow Z_m/Z_{s(m)}$ から、準同型 $\bar{f} \circ f: Y_m \rightarrow Z_m/Z_{s(m)}$ を得る。

定理 12.5.7 より、埋め込み $\bar{f}: Y_m/Y_{s(m)} \rightarrow Z_m/Z_{s(m)}$ が存在する。

$Z_m/Z_{s(m)}$ は可換群より、 $Y_m/Y_{s(m)}$ も可換群。したがって可解群。

■

Lem. 13.4.3. 可解群の拡大

群 G と、 G の正規部分群 N について、 $N, G/N$ がともに可解群ならば、 G は可解群である。

Proof.

G/N は可解群より、定義 13.4.1 を満たす有限列 $(Z_m)_{m \in n}$ が存在する。

補題 12.5.8 より、有限列 $(H_m)_{m \in n}$ で、 $H_m/N = Z_m$ かつ $H_{s(m)}$ は H_m の正規部分群が成り立つ。

H_m 上の補題 12.5.5 の定める同値関係について、 $a \sim_N b \rightarrow a \sim_{H_{s(m)}} b$ である。

ゆえに自明な埋め込み $f: H_m/H_{s(m)} \rightarrow H_m/N$ が存在する。

H_m/N は可換群より、 $H_m/H_{s(m)}$ も可換群である。

N は可解群であるため、定義 13.4.1 を満たす有限列 $(I_m)_{m \in l}$ が存在する。

よって、有限列 $G = H_0, H_1, \dots, H_{p(n)} = N = I_0, I_1, \dots, I_{p(l)} = \{e_G\}$ が存在して定義 13.4.1 を満たす。 ■

Lem. 13.4.4.

交代群 A_5 は可解群ではない。

Proof.

A_5 を可解群とする。 A_5 の正規部分群 N が存在して、 A_5/N は可換群となる。

$\forall i_1, j_1, i_2, j_2 \in 5 (i_1 \neq j_1 \wedge i_2 \neq j_2)$ を考える。

$\{i_1, j_1\} \cap \{i_2, j_2\} = \emptyset$ のとき、 A_5/N の可換性より

$$[(i_1, j_1)(i_2, j_2)] = [(i_1, j_2)(j_1, j_2)(i_1, j_2)(j_1, i_2)(j_1, j_2)(j_1, i_2)] = [\text{id}_5]$$

ゆえに、 $(i_1, j_1)(i_2, j_2) \in N$

$i_1 = i_2 \wedge j_1 \neq j_2$ のとき、 $\{k_1, k_2\} = 5 \setminus \{i_1, j_1, j_2\}$ について、 A_5/N の可換性より、

$$[(i_1, j_1)(i_1, j_2)] = [(i_1, j_1)(i_1, k_1)][(j_1, k_2)(j_1, j_2)][(i_1, k_1)(i_1, j_1)][(j_1, j_2)(j_1, k_2)] = [\text{id}_5]$$

ゆえに、 $(i_1, j_1)(i_1, j_2) \in N$

$\{i_1, j_1\} = \{i_2, j_2\}$ のとき、 $(i_1, j_1)(i_1, j_2) = \text{id}_5 \in N$

定理 13.3.3 より、 $A_5 = N$ となる。

$(0, 1)(1, 2) \neq (1, 2)(0, 1)$ より、 A_5 は可換群ではない。

ゆえに定義 13.4.1 を満たす有限列は存在しない。 ■

Thm. 13.4.5. 対称群と可解群

$n = 2, 3, 4$ について、 S_n は可解群である。

$n \in \mathbb{N}_{\geq 5}$ について、 S_n は可解群ではない。

Proof.

$S_2 = \{\text{id}_2, (0, 1)\}$ は可換群である。ゆえに可解群である。

$S_3, A_3, \{\text{id}_3\}$ は定義 13.4.1 の主張する有限列である。ゆえに S_3 は可解群である。

$V_4 := \{\text{id}_4, (0, 1)(2, 3), (0, 2)(1, 3), (0, 3)(1, 2)\}$ を考える。

$S_4, A_4, V_4, \{\text{id}_4\}$ は定義 13.4.1 の主張する有限列である。ゆえに S_4 は可解群である。

$n \in \mathbb{N}_{\geq 5}$ について S_n が可解群と仮定する。

補題 13.4.2 より A_n も可解群となり、さらに A_5 が可解群となる。これは補題 13.4.4 に反する。

背理法より成り立つ。 ■

14 環

14.1 環

Def. 14.1.1. 環

集合 R 上の 2 つの演算、加法 $+$ 、乗法 \times が以下を満たすとき、順序対 $((R, +), \times)$ を環 (ring) と呼ぶ。または単に R と書き、環と集合どちらも表すものとする。

- $(R, +)$ は可換群である。この単位元を 0_R で表す。元 a の逆元を $-a$ と表記する。
- (R, \times) はモノイドである。この単位元を 1_R で表す。
- 左分配する。すなわち、 $\forall x, y, z \in R (x \times (y + z) = x \times y + x \times z)$
- 右分配する。すなわち、 $\forall x, y, z \in R ((x + y) \times z = x \times z + y \times z)$

演算 \times は、演算 $+$ よりも先に演算される。

また、 $a + (-b)$ 、 $a \times b$ を誤解のない範囲で、 $a - b$ 、 ab と略記する。

Rem. 14.1.1. 単位的環

単位的環（乗法についてモノイドをなす）を環と呼ぶことは、必ずしも一般的でないことに注意されたい。

Lem. 14.1.1. 環の性質

環 R について、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \forall a \in R (a0_R &= 0_R a = 0_R) \\ \forall a, b \in R (a(-b) &= (-a)b = -(ab)) \\ \forall a, b \in R (ab &= (-a)(-b)) \end{aligned}$$

Proof.

第一式は以下より示される。

$$\begin{aligned} a0_R &= a0_R + a0_R + -(a0_R) = a(0_R + 0_R) + -(a0_R) = a0_R + -(a0_R) = 0_R \\ 0_R a &= 0_R a + 0_R a + -(0_R a) = (0_R + 0_R)a + -(0_R a) = 0_R a + -(0_R a) = 0_R \end{aligned}$$

第二式は以下より示される。

$$\begin{aligned} a(-b) &= a(-b) + ab + -(ab) = a((-b) + b) + -(ab) = a0_R + -(ab) = -(ab) \\ (-a)b &= (-a)b + ab + -(ab) = ((-a) + a)b + -(ab) = 0_R b + -(ab) = -(ab) \end{aligned}$$

第三式は以下より示される。

$$ab = a(-(-b)) = -(a(-b)) = (-a)(-b)$$

■

Cor. 14.1.2.

環 $((R, +), \times)$ と乗法可逆元の全体 R^\times について、順序対 (R^\times, \times) は群である。

Def. 14.1.2. 零環

環 R について、 $R = \{0_R\}$ である環を零環と呼ぶ。

Cor. 14.1.3.

環 R について、 R が零環であることは、 $0_R = 1_R$ であることと必要十分。

Def. 14.1.3. 部分環

環 R の部分集合 S が、加法について部分群をなして、乗法について部分モノイドをなすとき、 S は環となり、環 S を環 R の部分環と呼ぶ。

Def. 14.1.4. 可換環

環 $((R, +), \times)$ について、 (R, \times) が可換モノイドであるとき、 R を可換環と呼ぶ。

Def. 14.1.5. 環準同型

環 R_1, R_2 について以下を満たす写像 $\varphi: R_1 \rightarrow R_2$ が存在するとき、 φ を環準同型写像、または単に環準同型と呼ぶ。

- 群 $(R_1, +), (R_2, +)$ について、群準同型。
- モノイド $(R_1, \times), (R_2, \times)$ について、モノイド準同型。

Def. 14.1.6. 環同型

全単射な環準同型を、環同型写像、または単に環同型と呼ぶ。

14.2 イデアル

Def. 14.2.1. 左イデアル

環 R を考える。

$(R, +)$ の部分群 I が以下を満たすとき、 I を R の左イデアルと呼ぶ。

$$\forall r \in R \forall a \in I (ra \in I)$$

Cor. 14.2.1.

環 R と、その左イデアル I について、以下が成り立つ。

$$1_R \in I \rightarrow I = R$$

Def. 14.2.2. 極大左イデアル

環 R の左イデアル I について、以下を満たすとき、 I を極大左イデアルと呼ぶ。

- R の任意のイデアル J について、 $I \subset J \rightarrow J = I \vee J = R$
- $R \neq I$

Thm. 14.2.2. 極大左イデアルの存在

環 R と左イデアル I について、 $I \neq R$ ならば、極大左イデアル J が存在して、 $I \subset J$ である。

Proof.

$T = \{J \in \mathfrak{P}(R) \mid J \text{ は左イデアル} \wedge I \subset J \wedge J \neq R\}$ を考える。

$I \in T$ である。

半順序集合 (T, \subset) の部分 S が全順序であるとする。

このとき、 $\bigcup S$ は左イデアルである。 $1_R \notin \bigcup S$ より、 $\bigcup S \in T$ である。

したがって、 T は帰納的半順序集合である。定理 6.3.5 より極大元を持つ。 ■

14.3 環と準同型定理

Def. 14.3.1. 両側イデアル

環 R とその左イデアル I について、以下の条件を満たすとき、 I を R の両側イデアルと呼ぶ。

$$\forall r \in R \forall a \in I (ar \in I)$$

Cor. 14.3.1.

可換環の左イデアルは両側イデアルである。このとき、単にイデアルと呼ぶ。

Cor. 14.3.2.

環準同型写像の核は両側イデアルである。

Def. 14.3.2. 商環

環 $((R, +), \times)$ を考える。

演算 $+$, \times と両立する同値関係 \sim について、定理 5.3.4 より定める演算 $+'$, \times' が存在する。

このとき、環 $((R/\sim, +'), \times')$ を環 R の商環と呼ぶ。

Lem. 14.3.3. 両側イデアルの定める同値関係

環 R とその両側イデアル I について、以下の条件を満たすとき、 \sim は演算 $+$, \times と両立する同値関係である。

$$\forall x, y \in R (x \sim y \Leftrightarrow x - y \in I)$$

Proof.

可換群の部分群が正規部分群であることと、補題 12.5.5 より、加法と両立する同値関係である。

$x_1 - y_1, x_2 - y_2 \in I$ であるとき、

$$x_1 x_2 - y_1 y_2 = x_1(x_2 - y_2) + (x_1 - y_1)y_2 \in I$$

両立する。 ■

Def. 14.3.3. 剰余環

環 R とその両側イデアル I について、補題 14.3.3 の定める同値関係による商環を、剰余環と呼び、 R/I と表す。

Thm. 14.3.4. 環準同型定理

環 R_1, R_2 と、環準同型 $f: R_1 \rightarrow R_2$ 、 f に付随する同値関係 \sim_f について、環同型 $\bar{f}: R_1/\sim_f \rightarrow \text{Im}(f)$ が存在する。

Proof.

$\text{Im}(f)$ は R_2 の部分環である。

定理 12.5.7 より、得る \bar{f} は加法群同型。

定理 11.7.5 より、得る \bar{f} は乗法モノイド同型。 ■

15 整域

15.1 倍元と約元

Def. 15.1.1. 倍元

可換環 R と元 $a, b \in R$ について、以下を満たすとき、 a は b の倍元、または b は a の約元と呼ぶ。

$$\exists c \in R(a = bc)$$

Def. 15.1.2. 単項イデアル

可換環 R と、元 $a \in R$ について、以下で定める集合 $\langle a \rangle$ はイデアルである。

$$\langle a \rangle := \{ra \mid r \in R\}$$

このように構成されるイデアルを単項イデアルと呼ぶ。

Lem. 15.1.1. 倍元と単項イデアル

可換環 R について、以下の 3 つは同値である。

1. a は b の倍元
2. $a \in \langle b \rangle$
3. $\langle a \rangle \subset \langle b \rangle$

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\exists c \in R(a = cb)$ より、 $a \in \langle b \rangle$ である。

2. \rightarrow 3. を示す。

$\forall a' \in \langle a \rangle \exists c' \in R(a' = c'a)$ である。

仮定より $\exists c \in R(a = cb)$ である。ゆえに、 $a' = (c'c)b$

3. \rightarrow 1. を示す。

a は b の倍元でないとする。

$a \in \langle a \rangle \setminus \langle b \rangle \neq \emptyset$ より、対偶法より満たす。 ■

Def. 15.1.3. 既約元

可換環 R の元 a について、以下を満たすとき、 a を既約元と呼ぶ。

$$a \neq 0_R \wedge \forall x, y \in R(xy = a \rightarrow x \in R^\times \vee y \in R^\times)$$

Cor. 15.1.2.

可換環 R と、元 $a \in R$ 、イデアル I について、以下が成り立つ。

$$a \in I \rightarrow \langle a \rangle \subset I$$

15.2 整域

Def. 15.2.1. 整域

可換環 D が以下を満たすとき、 D を整域と呼ぶ。

$$D \neq \{0_D\} \wedge \forall x, y \in D (xy = 0_D \rightarrow x = 0_D \vee y = 0_D)$$

Cor. 15.2.1.

整域 R の部分環 S は整域である。

Lem. 15.2.2. 簡約則

整域 D について以下が成り立つ。

$$\forall a, b, c \in D (c \neq 0_D \rightarrow (ac = bc \rightarrow a = b))$$

Proof.

補題 14.1.1 より、

$$0_D = ac + -(bc) = ac + (-b)c = (a + (-b))c$$

整域より、 $a + (-b) = 0_D$ 。ゆえに、 $a = b$

■

Def. 15.2.2. 素イデアル

可換環 R のイデアル I について、以下を満たすとき、 I を素イデアルと呼ぶ。

$$R \neq I \wedge \forall a, b \in R (ab \in I \rightarrow a \in I \vee b \in I)$$

問題。

$\mathfrak{P}(\mathbb{R})$ 上の演算 $+$, \times を以下で定めると、 $\mathfrak{P}(\mathbb{R})$ は可換環をなす。

$$\begin{aligned} A + B &:= (A \cup B) \setminus (A \cap B) \\ A \times B &:= A \cap B \end{aligned}$$

このとき、多項式環の剰余環 $\mathfrak{P}(\mathbb{R})[X]/\langle \mathbb{Q}X + \mathbb{Z} \rangle$ は整域であるか？

Cor. 15.2.3.

整域 D のイデアル $\{0_D\}$ は素イデアルである。

Thm. 15.2.4. 素イデアルと整域

可換環 R とイデアル I について、以下の 3 つは同値である。

1. I は素イデアル
2. 差集合 $R \setminus I$ は乗法について R の部分モノイド
3. 剰余環 R/I は整域

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\forall a, b \in R \setminus I$ について、 I は素イデアルより対偶法から $ab \in R \setminus I$ である。

素イデアルより、 $1_R \notin I$ より成り立つ。

2. \rightarrow 3. を示す。

$R \setminus I$ が部分モノイドであることから $1_R \notin I$ である。ゆえに $R/I \neq \{0_R\}$

$\forall a, b \in R \setminus I$ について、モノイド性より $ab \in R \setminus I$ 、すなわち $[a][b] = [ab] \neq 0_{R/I}$ である。

ゆえに対偶法により、 $\forall a, b \in R ([a][b] = 0_{R/I} \rightarrow [a] = 0_{R/I} \vee [b] = 0_{R/I})$ である。

3. \rightarrow 1. を示す。

$\forall a, b \in R (ab \in I)$ とする。

$[a][b] = [ab] = 0_{R/I}$ より、整域であることから、 $[a] = 0_{R/I} \vee [b] = 0_{R/I}$ すなわち $a \in I \vee b \in I$

■

Thm. 15.2.5. 極大イデアルは素イデアル

可換環 R について、極大イデアル I は素イデアルである。

Proof.

$\forall x, y \in R (xy \in I)$ とする。

$x \in I$ のとき成り立つ。

$x \notin I$ のとき、 $J := \{rx + i \mid (r, i) \in R \times I\}$ はイデアルである。

ここで、 I は極大かつ $I \subsetneq J$ より、 $J = R$ である。

したがって $\exists (r, i) \in R \times I (1_R = rx + i)$ である。

ゆえに、 $y = rxy + iy \in I$ である。

■

Def. 15.2.3. 素元

可換環 R と元 $a \in R \setminus \{0_R\}$ について、単項イデアル $\langle a \rangle$ が素イデアルとなるとき、 a を素元と呼ぶ。

Lem. 15.2.6. 整域の素元は可逆でない既約元

整域 D について、素元は可逆でない既約元である。

Proof.

素元 a が可逆とすると、 $1_D = a^{-1}a \in \langle a \rangle$ であるので、 $D = \langle a \rangle$ より素イデアルではない。背理法より可逆でない。

素元 a が既約元でないとする。 $\exists x, y \in D \setminus D^\times (xy = a)$

$xy = a \in \langle a \rangle$ であるので、素イデアルの定義から $\exists r \in D (x = ra \vee y = ra)$ である。

$x = ra$ のとき、可換性から $a(ry - 1_D) = 0_D$ である。 D は整域で $a \neq 0_D$ より、 $ry = 1_D$ である。これは $y \notin D^\times$ に反する。

$y = ra$ のときも同様。背理法より既約元である。

■

15.3 一意分解整域

Def. 15.3.1. 素元の全体

可換環 R について、素元の全体を $\mathcal{P}(R)$ と表す。

Def. 15.3.2. 素元分解

整域 D と元 $a \in D$ について、以下が成り立つとき、 a は素元分解可能であると呼ぶ。

- $\exists n \in \mathbb{N} \exists p \in \mathcal{P}(D)^n \exists u \in D^\times (a = u \prod_{m \in n} p(m))$

Def. 15.3.3. 一意分解整域

整域 D について、以下が成り立つとき、 D を一意分解整域、または UFD(unique factorization domain) と呼ぶ。

- $\forall a \in D \setminus \{0_D\}$ は素元分解可能であり、各 $p(m)$ の順序交換と u および各 $p(m)$ の可逆元倍を除いて一意である。

Lem. 15.3.1. UFD の可逆でない既約元は素元

一意分解整域 D について、可逆でない既約元は素元である。

Proof.

可逆でない既約元 $a \in D$ を考える。

a は既約元より $a \neq 0_D$ である。したがって、素元分解 $a = u \prod_{m \in n} p(m)$ ができる。

$n = 0$ とすると、 $a = u$ より可逆でないことに反する。

$n = 2$ とすると、 au^{-1} は既約であることより、 $p(0)$ または $p(1)$ が可逆元であるが、補題 15.2.6 に反する。

$n \geq 3$ についても帰納的に否定される。

よって、 $n = 1$ である。すなわち $a = up(0)$ と表せる。

$\langle a \rangle = \langle p(0) \rangle$ であるので、 a は素元。 ■

Def. 15.3.4. 単項イデアル整域

整域 D のイデアルが全て単項イデアルであるとき、 D を単項イデアル整域、または PID(principal ideal domain) と呼ぶ。

Thm. 15.3.2. PID は Noether

単項イデアル整域 D について、 $\mathfrak{P}(D)$ 上の以下を満たす点列 $(I_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

- $\forall n \in \mathbb{N}$ について I_n はイデアル
- $I_n \subset I_{s(n)}$

このとき、以下が成り立つ。

$$\exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (I_n = I_N)$$

Proof.

$J := \bigcup \{I_n \mid n \in \mathbb{N}\}$ はイデアルである。

単項イデアル整域であるので、 $\exists a \in D (\langle a \rangle = J)$

$a \in J$ より、 $\exists N \in \mathbb{N} (a \in I_N)$ より、 $\langle a \rangle \subset I_N$

$\forall N \in \mathbb{N}_{\geq N} (\langle a \rangle \subset I_N \subset I_n \subset J = \langle a \rangle)$ ■

Thm. 15.3.3. PID の素イデアルは極大イデアル

単項イデアル整域 D の素イデアルは極大イデアルである。

Proof.

極大イデアルでない素イデアル $\langle a \rangle$ を考える。

このとき $\exists b \in D (\langle a \rangle \subsetneq \langle b \rangle \neq D)$

$\exists c \in R (a = cb)$ である。 $b \in \langle a \rangle$ のとき、 $\langle a \rangle = \langle b \rangle$ となり仮定に反する。

素イデアルの定義より $c \in \langle a \rangle$ であるので、 $\exists d \in R (c = da)$

ゆえに $a(bd - 1_D) = 0_D$ であり、整域より $bd = 1_D$

よって $\langle b \rangle = D$ となり矛盾。

背理法より示される。 ■

Thm. 15.3.4. PID は UFD

単項イデアル整域 D は一意分解整域である。

Proof.

素元分解できない $a \in D \setminus \{0_D\}$ が存在すると仮定する。

$1_R \in \langle a \rangle$ とすると、 a は可逆元となり、素元分解できる。ゆえに $\langle a \rangle \neq D$ である。

定理 14.2.2、定理 15.2.5 と D が単項イデアル整域であることより、素元 p_1 が存在して $a \in \langle a \rangle \subset \langle p_1 \rangle$

ゆえに $\exists a_1 \in D (a = a_1 p_1)$ と書ける。 $a \neq 0_D$ より $a_1 \neq 0_D$

$\langle a \rangle \supset \langle a_1 \rangle$ とすると、 $\exists b \in D (a_1 = ba)$ より $a_1(b p_1 - 1_R) = 0_R$ であり、整域と $a_1 \neq 0_R$ から $p_1 \in D^\times$

これは補題 15.2.6 に反する。ゆえに $\langle a \rangle \subsetneq \langle a_1 \rangle$

a は素元分解できないので、 a_1 も素元分解できない。

帰納的にイデアル列 $\langle a \rangle \subsetneq \langle a_1 \rangle \subsetneq \dots$ がつくれるが、これは定理 15.3.2 に反する。

ゆえに素元分解可能である。

一意性を示す。

$a = u \prod_{m=0}^n p(m) = u' \prod_{m \in n'} p'(m)$ とする。 $n \leq l$ とする。

$n = 0$ のとき、 $a = u = u' \prod_{m \in n'} p'(m)$ である。

$n' \neq 0$ のとき、補題 15.2.6 より $\prod_{m \in n'} p'(m)$ は可逆でない。したがって u が可逆でなくなり仮定に反するので、 $n' = 0$ である。ゆえに一意。

ある $n \in \mathbb{N}$ で一意とする。

$a = u \prod_{m \in s(n)} p(m) = u' \prod_{m \in n'} p'(m)$ とする。

$a \in \langle p(n) \rangle$ より、素イデアルの定義から $\exists k \in n' (p'(k) \in \langle p(n) \rangle)$ である。ゆえに $\langle p'(k) \rangle \subset \langle p(n) \rangle$

定理 15.3.3 より $\langle p'(k) \rangle = \langle p(n) \rangle$

以下の $q \in \mathcal{P}(D)^{n'}$ を考える。

$$q(m) = \begin{cases} p(m) & (m \neq k) \\ 1_D & (m = k) \end{cases}$$

整域より $u \prod_{m \in n} p(m) = u'' \prod_{m \in n'} q(m)$ が成り立つ。帰納法の仮定より一意。

定理 7.1.2 より、任意の n について成り立つ。 ■

Def. 15.3.5. Euclid 整域

整域 D について、以下を満たす写像 $f: D \setminus \{0_D\} \rightarrow \mathbb{N}$ が存在するとき、 D を Euclid 整域と呼ぶ。

$$\begin{aligned} \forall a \in D \forall b \in D \setminus \{0_D\} \exists q, r \in D (a = bq + r \wedge (r = 0_D \vee f(r) < f(b))) \\ \forall a, b \in D \setminus \{0_D\} (f(a) \leq f(ab)) \end{aligned}$$

Thm. 15.3.5. ED は PID

Euclid 整域 D は単項イデアル整域である。

Proof.

イデアル I を考える。 $0_D \in I$ である。

$\{0_D\} = I$ であるとき、 $\langle 0_D \rangle = I$

$\{0_D\} \subsetneq I$ であるとき、 $M := \{f(i) \mid i \in I \setminus \{0_D\}\}$ を考える。

M は空でない \mathbb{N} の部分より、定理 7.2.7 から最小限が存在する。よって、 $\exists m \in I (f(m) = \min M)$
 $\forall i \in I$ について、 $\exists q, r \in R (i = mq + r \wedge (r = 0_R \vee f(r) < f(m)))$
今、 $r = i - mq \in I$ であるため、 $r \neq 0_R$ とすると m の最小性に反する。
よって $r = 0_R$ 、すなわち $i \in \langle m \rangle$
 $m \in I$ より $\langle m \rangle = I$

■

15.4 体

Def. 15.4.1. 体

可換環 $((F, +), \times)$ が以下を満たすとき、体と呼ぶ。

$$F^\times = F \setminus \{0_F\}$$

さらに、 $x \times y^{-1}$ を x/y と略記する。

Cor. 15.4.1.

体は零環ではない。

Thm. 15.4.2. 体は ED

体 F は Euclid 整域である。

Proof.

まず、整域であることを示す。

整域でないとすると、 $\forall x, y \in F (xy = 0_F \wedge x \neq 0_F \wedge y \neq 0_F)$ である。

$y = x^{-1}xy = x^{-1}0_F = 0_F$ より矛盾。ゆえに整域。

$\forall a \in F \forall b \in F \setminus \{0_F\}$ について、 $q = ab^{-1} \wedge r = 0_F$ として成り立つ。

■

Thm. 15.4.3. 極大イデアルと体

可換環 R とイデアル I について、以下の 2 つは同値である。

1. I は極大イデアル
2. 剰余環 R/I は体

Proof.

1. \rightarrow 2. を示す。

$\forall a \in R ([a] \neq 0_{R/I})$ を考える。

$a \notin I$ である。ここで、 $J := \{ra + i \mid (r, i) \in R \times I\}$ を考える。

定義より $I \subset J$ であり、 J はイデアル。ゆえに I の極大性から $J = R$

したがって $\exists (r, i) \in R \times I (ra + i = 1_R)$ である。

よって $1_{R/I} = [1_R] = [ra + i] = [r][a] + [i] = [r][a]$ より、 $[r] = [a]^{-1}$

2. \rightarrow 1. を示す。

I が極大イデアルでないとする。すなわちイデアル J が存在して、 $I \subsetneq J \subsetneq R$ である。

$\forall a \in J \setminus I$ について、 $[a] \neq 0_{R/I}$ である。

体であるので、 $\exists b \in R ([b][a] = [1_R])$ である。

したがって $ba - 1_R \in I \subset J$ である。ここで、 $a \in J$ より $ba \in J$

イデアルは加法について群をなすので $1_R = ba - (ba - 1_R) \in J$ である。したがって $J = R$ となり矛盾。

■

Thm. 15.4.4. 体準同型は単射

体 F 、零環ではない環 R について、環準同型 $\varphi \in R^F$ は単射である。

Proof.

$\text{Ker}(\varphi)$ はイデアルであり、 $\{0_F\} \subset \text{Ker}(\varphi)$ である。

$\{0_F\}$ は、定理 15.4.3 より極大イデアルであるため、 $\text{Ker}(\varphi) = \{0_F\} \vee \text{Ker}(\varphi) = F$

零環でない R について、 $\varphi(1_F) = 1_R \neq 0_R$ より、 $1_R \notin \text{Ker}(\varphi)$

したがって、 $\text{Ker}(\varphi) = \{0_F\}$

定理 12.2.2 より単射。 ■

Def. 15.4.2. 部分体

体 F の部分環 R が体をなすとき、体 R を体 F の部分体と呼ぶ。

Def. 15.4.3. 素体

体 F の部分体 F がのみのとき、体 F を素体と呼ぶ。

Lem. 15.4.5. 部分素体の存在

体 F について、 F のある部分体 K が存在して、 K は素体である。

さらに、体 F の素体である部分体は一意に定まる。

Proof.

以下の集合 K は、体をなす。

$$K := \bigcap \{F' \mid F' \text{ は } F \text{ の部分体}\}$$

K の部分体 L は、 F の部分体であるので、定義より $K \subset L$ である。ゆえに、 K は素体である。

体 F の素体である部分体 K' について、 $K \subset K'$ であり、 K' が素体であることより $K = K'$ ■

16 多項式

16.1 多項式環

Def. 16.1.1. 多項式環

可換環 R について、集合 $R[X]$ を以下のように定義する。

$$R[X] := \{\varphi \in R^{\mathbb{N}} \mid \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (\varphi(n) = 0_R)\}$$

ここで、 $R[X]$ 上の加法 $+$ 、乗法 \times を以下のように定める。

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N} ((\varphi + \psi)(n) &:= \varphi(n) + \psi(n)) \\ \forall n \in \mathbb{N} ((\varphi \times \psi)(n) &:= \sum_{k \in s(n)} \varphi(k) \times \psi(n - k)) \end{aligned}$$

定義 16.1.1 より定まる順序対 $((R[X], +), \times)$ は可換環である。この環を多項式環と呼ぶ。

また、多項式環の元を多項式と呼ぶ。

Lem. 16.1.1.

以下で定義する写像 $\gamma \in R[X]^R$ を考える。

$$\gamma(a)(n) := \begin{cases} a & (n = 0) \\ 0_R & (n \neq 0) \end{cases}$$

このとき、 γ は以下のとおり満たす。

1. 単射
2. 加法、乗法について環準同型

Proof.

定義より明らか。 ■

Cor. 16.1.2.

可換環 R と、 R の部分環 S について、 $S[X]$ は $R[X]$ の部分環である。

Lem. 16.1.3.

可換環 R 上の多項式環 $R[X]$ について、以下の成り立つ。

$$\forall \varphi \in R[X] \setminus \{0_{R[X]}\} \exists N \in \mathbb{N} (\varphi(N) \neq 0_R \wedge \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (\varphi(n) = 0_R))$$

Proof.

$M := \{n \in \mathbb{N} \mid \varphi(n) \neq 0_R\}$ とする。

$\varphi \neq 0_{R[X]}$ より、 M は空でない。

定義より M は上に有界。

定理 8.1.14 と定理 8.1.13 より、 M は最大元を持つ。 ■

Def. 16.1.2. 多項式の次数

可換環 R 上の多項式環 $R[X]$ を考える。

$\forall \varphi \in R[X] \setminus \{0_{R[X]}\}$ について、補題 16.1.3 より定まる自然数を次数と呼び、 $\deg(\varphi)$ と表す。

Def. 16.1.3. 多項式の値

可換環 R 上の多項式環 $R[X]$ について、以下で定める写像 $f \in (R^R)^{R[X]}$ が存在する。

$$\forall x \in R \left(f(\varphi)(x) := \sum_{n \in s(\deg(\varphi))} \varphi(n) \times x^n \right)$$

$f(\varphi)(x)$ を $\varphi(x)$ と略記して、多項式の値と呼ぶ。

Rem. 16.1.1. 多項式の値

以降、多項式 φ について、 $\varphi(x)$ と書くときは、特に断らない限り、定義 16.1.1 に基づく写像の値ではなく、定義 16.1.3 多項式の値を表すものとする。

Def. 16.1.4. 根

可換環 R 上の多項式環 $R[X]$ と、多項式 $\varphi \in R[X]$ を考える。

$\varphi(x) = 0_R$ を満たす元 $x \in R$ を、多項式 φ の根と呼ぶ。

Def. 16.1.5. 次数既約

整域 D 上の多項式環 $D[X]$ について、多項式 $f \in D[X]$ が素元であるとき、 f は次数既約であると呼ぶ。

Cor. 16.1.4. 整域上の多項式の次数

整域 D 上の多項式環 $D[X]$ は整域である。さらに、以下が成り立つ。

$$\begin{aligned} \forall f, g \in D[X] \setminus \{0_{D[X]}\} (f + g = 0_{D[X]} \wedge \deg(f + g) \leq \max\{\deg(f), \deg(g)\}) \\ \forall f, g \in D[X] \setminus \{0_{D[X]}\} (\deg(fg) = \deg(f) + \deg(g)) \end{aligned}$$

16.2 体上の多項式

Thm. 16.2.1. 体上の多項式環は Euclid 整域

体 F 上の多項式環 $F[X]$ は Euclid 整域である。

Proof.

F が整域であることから、系 16.1.4 より $F[X]$ は整域である。

$f \in F[X], g \in F[X] \setminus \{0_{F[X]}\}$ を考える。

$f = 0_{F[X]}$ について、 $f = 0_{F[X]} \times g + 0_{F[X]}$ である。

$f \neq 0_{F[X]}$ とする。

$\deg(f) < \deg(g)$ について、 $f = 0_{F[X]} \times g + f$ が成り立つ。

$\deg(f) \geq \deg(g)$ とする。

$\deg(f) = 0$ のとき $\deg(g) = 0$ より、以下の q について、 $f = q \times g + 0_{F[X]}$ である。

$$q(n) = f(n)g(0)^{-1}$$

$n \geq \deg(f)$ について成り立つとき、 $s(n) = \deg(f)$ でも成り立つことを示す。

以下の $h \in F[X]$ を考える。

$$h(m) = \begin{cases} f(m) - f(\deg(f))g(\deg(g))^{-1}g(m - \deg(f) + \deg(g)) & (m \geq \deg(f) - \deg(g)) \\ f(m) & (m < \deg(f) - \deg(g)) \end{cases}$$

$h = 0_{F[X]}$ のとき、以下の q について、 $f = dg + 0_{F[X]}$ で成り立つ。

$$d(m) = \begin{cases} f(\deg(f))g(\deg(g))^{-1} & (m = \deg(f) - \deg(g)) \\ 0_R & (m \neq \deg(f) - \deg(g)) \end{cases}$$

$h \neq 0_{F[X]}$ のとき、 $\deg(h) \leq n$ となる。帰納法の仮定より、 $h = qg + r \wedge \deg(r) < \deg(g)$

ゆえに、 $f = dg + h = (d + q)g + r \wedge \deg(r) < \deg(g)$

定理 7.1.2 より成り立つ。

系 16.1.4 より、 $\forall f, g \in F[X] \setminus \{0_{F[X]}\} (\deg(f) \leq \deg(fg))$ より成り立つ。 ■

Thm. 16.2.2. 剰余の定理

定理 16.2.1 より、体 F 上の多項式環 $F[X]$ には除法が定義される。この除法は一意である。

Proof.

体 F と、 $g \in F[X] \setminus \{0_{F[X]}\}$ を考える。

$q_1g + r_1 = q_2g + r_2 \wedge (r_1 = 0_{F[X]} \vee \deg(r_1) < \deg(g)) \wedge (r_2 = 0_{F[X]} \vee \deg(r_2) < \deg(g))$ とする。

$(q_1 - q_2)g = r_2 - r_1$ である。

$r_2 \neq r_1$ のとき、 $\deg(g) > \deg(r_2 - r_1) = \deg(q_1 - q_2) + \deg(g) \geq \deg(g)$ より矛盾。

したがって $r_1 = r_2$ である。整域より $q_1 = q_2$

■

Def. 16.2.1. 代数的

体 E と、 E の部分体 F 、元 $x \in E$ について、以下を満たすとき、元 x が F 上代数的と呼ぶ。

$$\exists f \in F[X] \setminus \{0_{F[X]}\} (f(x) = 0_E)$$

Thm. 16.2.3. 最小多項式

体 E と、 E の部分体 F 、 F 上代数的な元 $x \in E$ について、 x を根に持つ次数既約な多項式 f が存在する。

Proof.

以下を満たす環準同型 $\varphi \in E^{F[X]}$ を考える。

$$\varphi(g) = g(x)$$

ここで、 E は体すなわち整域より、 $\text{Ker}(\varphi)$ は素イデアルである。

定理 15.4.2 と定理 15.3.5 より、 $\langle f \rangle = \text{Ker}(\varphi)$ なる多項式 $f \in F[X]$ が存在する。

定義より、 $\text{Ker}(\varphi) \neq \{0_{F[X]}\}$ であるので、 f は素元。

■

Def. 16.2.2. 代数的閉体

体 F 上の多項式環 $F[X]$ を考える。

$F[X]$ の任意の次数既約な多項式 f について、 $\deg(f) = 1$ であるとき、 F を代数的閉体と呼ぶ。

17 加群

17.1 環上の加群

Thm. 17.1.1. 可換群上の自己準同型全体

可換群 $(V, +)$ について、 $\text{End}(V)$ 上の以下の演算 $+'$ を考える。このとき、順序対 $((\text{End}(V), +'), \circ)$ は環をなす。

$$(f +' g)(x) := f(x) + g(x)$$

Proof.

定理 12.2.3 より可換群をなす。定理 11.7.6 よりモノイドをなす。

準同型性から $f \circ (g + h)(x) = f(g(x) + h(x)) = f(g(x)) + f(h(x)) = (f \circ g + f \circ h)(x)$

右分配も同様に示せる。 ■

Def. 17.1.1. 左加群

環 R 、可換群 $(V, +)$ 、定理 17.1.1 の主張する環 $\text{End}(V)$ について、作用 $\rho \in \text{End}(V)^R$ が存在して環準同型であるとき、順序対 $((V, +), \rho)$ を左 R -加群と呼ぶ。または単に V と書き、左 R -加群を表すものとする。

作用の値 $\rho(r)(x)$ を rx と略記する。

Rem. 17.1.1. 左加群の補足

左 R -加群 $((V, +), \rho)$ は以下を満たす。 $\forall a, b, c \in V \forall r, s \in R$ とする。

1. V のマグマ性 : $a + b \in V$
2. V の半群性 : $a + (b + c) = (a + b) + c$
3. V のモノイド性 : $\exists 0_V := e$
4. V の群性 : $\exists (-a)$
5. V の可換群性 : $a + b = b + a$
6. 自己準同型性 : $r(a + b) = ra + rb$
7. ρ の群準同型性と $\text{End}(V)$ の定義 : $(r + s)a = ra + sa$
8. ρ のモノイド準同型性 : $r(sa) = (rs)a$

Lem. 17.1.2. 左加群としての環

環 $((R, +), \times)$ と、 R の部分環 S を考える。

以下で定める $\rho \in \text{End}(R)^S$ について、順序対 $((R, +), \rho)$ は左 S -加群である。

$$\forall s \in S \forall r \in R (\rho(s)(r) := s \times r)$$

Proof.

環の分配法則、および積についての結合性から、 ρ は環準同型である。 ■

Def. 17.1.2. 線型

左 R -加群 V_1, V_2 について、群準同型 $f \in V_2^{V_1}$ が以下を満たすとき、 f を加群準同型写像または線型写像と呼ぶ。

$$\forall v \in V_1 \forall r \in R (f(rv) = rf(v))$$

Def. 17.1.3. 線型写像の全体

左 R -加群 V, V' について、 V から V' への線型写像全体のなす集合は定理 17.1.1 と同様の和、積について環をなす。これを $\text{Hom}_R(V, V')$ と表す。

さらに $\text{End}_R(V) := \text{Hom}_R(V, V)$ 、 $\text{GL}(V) := \text{End}_R(V)^\times$ とする。

Def. 17.1.4. 直積加群

環 R と、写像 $V \in Z^\Lambda$ を考える。 $\forall \lambda \in \Lambda$ について、 $V(\lambda)$ は左 R -加群であるとする。

以下で定める順序対 $((\prod V, +), \rho)$ は左加群である。

$$\begin{aligned} \forall v_1, v_2 \in \prod V \forall \lambda \in \Lambda ((v_1 + v_2)(\lambda) &:= v_1(\lambda) + v_2(\lambda)) \\ \forall v \in \prod V \forall r \in R \forall \lambda \in \Lambda ((rv)(\lambda) &:= rv(\lambda)) \end{aligned}$$

この左 R -加群を V の直積加群または直積と呼ぶ。

Def. 17.1.5. 直和加群

環 R と、写像 $V \in Z^\Lambda$ を考える。 $\forall \lambda \in \Lambda$ について、 $V(\lambda)$ は左 R -加群であるとする。

以下で定める順序対 $((\bigoplus V, +), \rho)$ は左加群である。

$$\bigoplus V := \left\{ v \in \prod V \mid |\{\lambda \in \Lambda \mid v(\lambda) \neq 0_{V(\lambda)}\}| < \infty \right\}$$

この左 R -加群を V の直積加群または直和と呼ぶ。

Cor. 17.1.3.

直和 $\bigoplus V$ は、直積 $\prod V$ の部分加群である。

Cor. 17.1.4.

$V \in Z^\Lambda$ を考える。 $\forall \lambda \in \Lambda$ について、 $V(\lambda)$ は左 R -加群であるとする。

$|\Lambda| < \infty$ ならば $\bigoplus V = \prod V$ である。

Def. 17.1.6. 線型包

左 R -加群 V について、 V の部分集合 W を考える。このとき、以下で定める集合 $\text{Span } W$ は V の部分加群である。

$$\text{Span } W := \left\{ v \in V \mid \exists n \in \mathbb{N} \exists (r_m, w_m)_{m \in \mathbb{N}} \in (R \times W)^\mathbb{N} \left(v = \sum_{m \in n} r_m w_m \right) \right\}$$

これを W の線型包と呼ぶ。

Def. 17.1.7. 生成系

左 R -加群 V について、 V の部分集合 W が以下を満たすとき、 W を V の生成系と呼ぶ。

$$V = \text{Span } W$$

Def. 17.1.8. 一次独立

左 R -加群 V と、 V の部分集合 W が以下を満たすとき、 W は一次独立であると呼ぶ。

$$\forall n \in \mathbb{N} \forall (r_m, w_m)_{m \in \mathbb{N}} \in (R \times W)^\mathbb{N} \left(\sum_{m \in n} r_m w_m = 0_V \rightarrow \forall m \in n (r_m = 0_R) \right)$$

Lem. 17.1.5. 一次独立と一意性

左 R -加群 V と、 V の一次独立な部分集合 W について、以下が成り立つ。

$\exists n_1, n_2 \in \mathbb{N} \exists (r_{1,m}, w_{1,m})_{m \in \mathbb{N}}, (r_{2,m'}, w_{2,m'})_{m' \in \mathbb{N}} \in (R \times W)^{\mathbb{N}}$ について、

$$\sum_{m \in n_1} r_{1,m} w_{1,m} = \sum_{m' \in n_2} r_{2,m'} w_{2,m'} \rightarrow \forall m \in n_1 (r_{1,m} = 0_R \vee \exists m' \in n_2 (r_{1,m} = r_{2,m'} \wedge w_{1,m} = w_{2,m'}))$$

Proof.

$0_V = \sum_{m \in n_1} r_{1,m} w_{1,m} = \sum_{m' \in n_2} r_{2,m'} w_{2,m'}$ より、一次独立の定義から成り立つ。 ■

Def. 17.1.9. 基底

左 R -加群 V と V の部分集合 B について、 B が一次独立かつ V の生成系であるとき、 B を V の基底と呼ぶ。

Def. 17.1.10. 自由加群

基底を持つ左 R -加群を自由加群と呼ぶ。

17.2 体上の加群

Def. 17.2.1. 線形空間

体 F について、左 F -加群を F -線形空間と呼ぶ。

Thm. 17.2.1. 基底の存在

体 F について、 $\{0_V\}$ でない F -線形空間 V は自由である。

Proof.

$\mathcal{S} := \{S \in \mathfrak{P}(V) \mid S \text{ は一次独立}\}$ について (\mathcal{S}, \subset) は半順序集合である。

$\exists v \in V \setminus \{0_V\}$ について、 $\exists r \in F (rv = 0_V)$ と仮定すると、 F は体であることより $v = r^{-1}0_V = 0_V$ となり反する。

ゆえに、 $\{v\} \in \mathcal{S}$

\mathcal{S} の全順序部分 T を考える。

$\forall n \in \mathbb{N} \forall (x_m)_{m \in n} \in (\bigcup T)^n$ について、 $\forall m \in n \exists S_m \in T (x_m \in S_m)$

$\{S_m \mid m \in n\}$ は全順序な有限集合であるので、定理 8.1.13 より最大元を持つ。

ゆえに、 $\bigcup T$ は一次独立すなわち、 $\bigcup T \in \mathcal{S}$

したがって \mathcal{S} は帰納的である。

定理 6.3.5 より、極大元 S_0 が存在する。

S_0 が生成系でないと仮定すると、一次独立な新たな元がとれるので、極大性に反する。 ■

Lem. 17.2.2. 次元

体 F について、 F -線形空間 V を考える。 V の任意の基底 B_1, B_2 について、全単射 $f \in B_2^{B_1}$ が存在する。

Proof.

$P := \{\varphi \in \bigcup \{B_2^D \mid D \in \mathfrak{P}(B_1) \wedge B_1 \cap B_2 \subset D\} \mid \varphi|_{B_1 \cap B_2} = \text{id}_{B_1 \cap B_2} \wedge C(\varphi) := \text{dom}(\varphi) \cup (B_2 \setminus \text{Im}(\varphi)) \text{ は一次独立}\}$ を考える。

ここで $p \in B_2^{B_1 \cap B_2}$ について、 B_2 が基底であることから $p \in P$ である。

P 上の半順序 \preccurlyeq を以下のように定義する。

$$\varphi \preccurlyeq \psi : \leftrightarrow \text{dom}(\varphi) \subset \text{dom}(\psi) \wedge \psi|_{\text{dom}(\varphi)} = \varphi$$

P の全順序部分 Q を考える。

自明な単射 $q \in B_2^{\bigcup \{\text{dom}(\varphi) \mid \varphi \in Q\}}$ が存在する。

$C(q)$ が一次独立でないとすると、 $\exists C' \in \mathfrak{P}(C(q)) (|C'| < \infty \wedge C' \text{ は一次独立でない})$

$\forall c \in C' \exists \varphi_c \in Q (c \in \text{dom}(\varphi_c) \cup B_2)$ であり、定理 8.1.13 より、 $\{\varphi_c \mid c \in C'\} \subset Q$ は最大元 φ_q を持つ。

ここで、 $\text{Im}(\varphi_q) \subset \text{Im}(q)$ であるので、 $C' \subset C(\varphi_q)$ であり、 $C(\varphi_q)$ が一次独立であることに反する。

ゆえに q は上界であり、すなわち P は帰納的である。

定理 6.3.5 より、極大元 σ が存在する。

$\exists b' \in B_2 \setminus \text{Im}(\sigma)$ であるとする。このとき $b' \notin B_1$ より、 $b' \notin \text{dom}(\sigma)$ である。

$H := \text{Span}(C(\sigma) \setminus \{b'\})$ を考える。一次独立性から $b' \notin H$

ここで B_1 は基底より、 $\exists n \in \mathbb{N} \exists (r_m, b_m)_{m \in \mathbb{N}} \in (R \times B_1)^{\mathbb{N}} (b' = \sum_{m \in n} r_m b_m)$ と書ける。

$b' \notin H$ より、 $\exists m \in n (b_m \notin H)$ であり、 $b_m \notin \text{dom}(\sigma)$ である。

今、以下を満たす写像 $\tau \in B_2^{\text{dom}(\sigma) \cup \{b_m\}}$ を考える。

$$\tau|_{\text{dom}(\sigma)} = \sigma \wedge \tau(b_m) = b'$$

$b' \notin \text{Im}(\sigma)$ より单射。 F は体より、 $C(\tau) = (C(\sigma) \setminus \{b'\}) \cup \{b_m\}$ は一次独立である。

ゆえに $\tau \in P$ であり $\sigma \prec \tau$ より、 σ の極大性に反する。

背理法より σ は全射である。定理 ?? より、单射な右逆写像 $s \in B_1^{B_2}$ が存在する。

同様に、单射 $t \in B_2^{B_1}$ が存在する。

定理 8.3.4 より、全单射 $f \in B_2^{B_1}$ が存在する。 ■

Def. 17.2.2. 有限次元線形空間

体 F について、 F -線形空間 V を考える。

V について有限である基底 B が存在するとき、 V を F -有限次元線形空間と呼ぶ。

Def. 17.2.3. 次元

体 F について、 F -有限次元線形空間 V を考える。

補題 17.2.2 より V の基底の要素数は一意に定まる。この要素数を V の次元と呼び、 $\dim V$ と表す。

18 整数

18.1 整数の構成

Lem. 18.1.1. 整数の準備：前順序

直積集合 \mathbb{N}^2 上で以下の自己関係 \preceq_Z は前順序である。

$$\forall(a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{N}^2 ((a_1, a_2) \preceq_Z (b_1, b_2) : \leftrightarrow a_1 + b_2 \leq b_1 + a_2)$$

Proof.

反射的である。

推移的であることを示す。

$$a_1 + b_2 \leq b_1 + a_2 \wedge b_1 + c_2 \leq c_1 + b_2 \rightarrow a_1 + b_2 + b_1 + c_2 \leq b_1 + a_2 + c_1 + b_2$$

補題 7.3.7 の対偶をとって、

$$a_1 + c_2 \leq c_1 + a_2$$

したがって、前順序である。 ■

Lem. 18.1.2. 整数の準備：前順序の全域性

直積集合 \mathbb{N}^2 上で補題 18.1.1 の前順序 \preceq_Z は以下を満たす。

$$\forall a, b \in \mathbb{N}^2 (a \preceq_Z b \vee b \preceq_Z a)$$

Proof.

定理 7.2.5 より明らか。 ■

Lem. 18.1.3. 整数の準備：加法可換群

直積集合 \mathbb{N}^2 上の以下の演算 $+$ は可換群をなす。

$$\forall(a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{N}^2 ((a_1, a_2) + (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1 + b_1, a_2 + b_2))$$

Proof.

結合法則は、定理 11.6.3 より明らか。

$(0, 0)$ は単位元である。

(a_1, a_2) に対して、 (a_2, a_1) は逆元である。

交換法則は、定理 11.6.3 より明らか。 ■

Lem. 18.1.4. 整数の準備：可換環

補題 18.1.3 の定める可換群 $(\mathbb{N}^2, +)$ 上の以下の演算 \times は可換環をなす。

$$\forall(a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{N}^2 ((a_1, a_2) \times (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1 b_1 + a_2 b_2, a_1 b_2 + a_2 b_1))$$

Proof.

結合法則を示す。

$$\begin{aligned}
 (a_1, a_2) \times ((b_1, b_2) \times (c_1, c_2)) &= (a_1, a_2) \times (b_1c_1 + b_2c_2, b_1c_2 + b_2c_1) \\
 &= (a_1(b_1c_1 + b_2c_2) + a_2(b_1c_2 + b_2c_1), a_1(b_1c_2 + b_2c_1) + a_2(b_1c_1 + b_2c_2)) \\
 &= ((a_1b_1 + a_2b_2)c_1 + (a_1b_2 + a_2b_1)c_2, (a_1b_1 + a_2b_2)c_2 + (a_1b_2 + a_2b_1)c_1) \\
 &= ((a_1, a_2) \times (b_1, b_2)) \times (c_1, c_2)
 \end{aligned}$$

$(1, 0)$ は単位元である。 ■

交換法則は、定理 11.6.3 より明らか。

右分配法則を示す。

$$\begin{aligned}
 ((a_1, a_2) + (b_1, b_2)) \times (c_1, c_2) &= (a_1 + b_1, a_2 + b_2) \times (c_1, c_2) \\
 &= ((a_1 + b_1)c_1 + (a_2 + b_2)c_2, (a_1 + b_1)c_2 + (a_2 + b_2)c_1) \\
 &= (a_1c_1 + a_2c_2 + b_1c_1 + b_2c_2, a_1c_2 + a_2c_1 + b_1c_2 + b_2c_1) \\
 &= (a_1, a_2) \times (c_1, c_2) + (b_1, b_2) \times (c_1, c_2)
 \end{aligned}$$

左分配法則は、右分配法則と交換法則より示される。 ■

Lem. 18.1.5. 整数の準備：同値類

直積集合 \mathbb{N}^2 上で以下の自己関係 \sim_Z は同値類である。

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{N}^2 ((a_1, a_2) \sim_Z (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1, a_2) \preceq (b_1, b_2) \wedge (b_1, b_2) \preceq (a_1, a_2))$$

Proof.

補題 18.1.1 より前順序。明らかに対称的であるので、同値類である。 ■

Lem. 18.1.6. 整数の準備：両立

直積集合 \mathbb{N}^2 上で補題 18.1.5 の同値類 \sim_Z は、補題 18.1.1 の前順序、補題 18.1.3 の加法、補題 18.1.4 の乗法のそれぞれと両立する。

Proof.

前順序と両立することは、 \sim_Z の定義と前順序の推移性より明らか。

$(a_1, a_2) \sim_Z (a'_1, a'_2) \wedge (b_1, b_2) \sim_Z (b'_1, b'_2)$ とする。

$(a_1 + b_1) + (a'_2 + b'_2) = (a_1 + a'_2) + (b_1 + b'_2) = (a'_1 + a_2) + (b'_1 + b_2) = (a'_1 + b'_1) + (a_2 + b_2)$ より成り立つ。

$(a_1, a_2) \sim_Z (a'_1, a'_2) \wedge (b_1, b_2) \sim_Z (b'_1, b'_2)$ とする。

$$\begin{aligned}
 a_2(b_2 + b'_1) &= a_2(b_1 + b'_2) \\
 a_2(b_2 + b'_1) + a'_1b'_1 &= a_2(b_1 + b'_2) + a'_1b'_1 \\
 a_2b_2 + (a_2 + a'_1)b'_1 &= a_2(b_1 + b'_2) + a'_1b'_1 \\
 a_2b_2 + (a_1 + a'_2)b'_1 &= a_2(b_1 + b'_2) + a'_1b'_1 \\
 a_2b_2 + (a_1 + a'_2)b'_1 + a_1b_2 + a'_1b'_2 &= a_2(b_1 + b'_2) + a'_1b'_1 + a_1b_2 + a'_1b'_2 \\
 a_2b_2 + a_1(b'_1 + b_2) + a'_2b'_1 + a'_1b'_2 &= a_2b_1 + (a'_1 + a_2)b'_2 + a'_1b'_1 + a_1b_2 \\
 a_2b_2 + a_1(b_1 + b'_2) + a'_2b'_1 + a'_1b'_2 &= a_2b_1 + (a_1 + a'_2)b'_2 + a'_1b'_1 + a_1b_2 \\
 a_1b_1 + a_2b_2 + a_1b'_2 + a'_1b'_2 + a'_2b'_1 &= a'_1b'_1 + a'_2b'_2 + a_1b'_2 + a_1b_2 + a_2b_1
 \end{aligned}$$

定義 7.3.2 より

$$a_1b_1 + a_2b_2 + a'_1b'_2 + a'_2b'_1 = a_1b_2 + a_2b_1 + a'_1b'_1 + a'_2b'_2$$

■

Def. 18.1.1. 整数

補題 18.1.6 より定まる商マグマ \mathbb{N}^2 / \sim_Z を整数と呼び、 \mathbb{Z} で表す。また、その元も整数と呼ぶ。

定義より \mathbb{Z} は可換環である。

18.2 整数の性質

Lem. 18.2.1.

\mathbb{Z} は零環でない。

Proof.

$0_{\mathbb{Z}} = [(0, 0)]$, $1_{\mathbb{Z}} = [(1, 0)]$ であり、 $\neg((0, 0) \sim_Z (1, 0))$ より明らか。 ■

Lem. 18.2.2. 整数の全順序

補題 18.1.6 より与えられる \mathbb{Z} 上の前順序 \leq は全順序である。

Proof.

\sim_Z の定義より反対称的である。

補題 18.1.2 より全順序である。 ■

Thm. 18.2.3. 順序環としての整数

(\mathbb{Z}, \leq) は順序環である。

Proof.

補題 18.2.2 より全順序。補題 18.2.1 より零環でない。

$a = [(a_1, a_2)]$, $b = [(b_1, b_2)]$, $c = [(c_1, c_2)]$ として、補題 7.3.7 より、

$$a_1 + b_2 < a_2 + b_1 \rightarrow (a_1 + c_1) + (b_2 + c_2) < (a_2 + c_2) + (b_1 + c_1)$$

$0_{\mathbb{Z}} < a$, $0_{\mathbb{Z}} < b$ より、定義 7.3.2 より $a = [(a', 0)]$, $b = [(b', 0)]$ と置ける。

$$ab = [(a', 0)] \times [(b', 0)] = [(a'b', 0)] > 0$$

■

Lem. 18.2.4.

写像 $\varphi \in \mathbb{Z}^{\mathbb{N}}$, $\varphi(n) = [(n, 0)]$ は以下のを満たす。

1. 単射
2. 加法についてモノイド準同型
3. 乗法についてモノイド準同型
4. 全順序と両立

Proof.

定義より明らか。 ■

Def. 18.2.1. 自然数の整数への埋め込み

補題 18.2.4 の写像 φ について、像 $\varphi(\mathbb{N})$ を誤解のない範囲で自然数 \mathbb{N} と呼ぶ。

Cor. 18.2.5.

$$\mathbb{N} \subset \mathbb{Z}$$

Thm. 18.2.6. 整数は Euclid 整域

整数 \mathbb{Z} は Euclid 整域である。

Proof.

以下で定める写像 $\text{sgn} \in \{1, -1\}^{\mathbb{Z}}$ を考える。

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & (x \geq 0) \\ -1 & (x < 0) \end{cases}$$

写像 $\| \in \mathbb{Z}^{\mathbb{Z}}, |x| = x \text{sgn}(x)$ を考える。

ここで、 $|\mathbb{Z}| = \mathbb{N}$ である。

$\forall a \in \mathbb{Z} \forall b \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$ について、定義 7.5.1 より以下が成り立つ。

$$\exists q, r \in \mathbb{N} (|a| = |b|q + r \wedge r < |b|)$$

ゆえに、

$$a = b(\text{sgn}(a) \text{sgn}(b)q) + (\text{sgn}(a)r) \wedge |\text{sgn}(a)r| < |b|$$

また、 $\forall a, b \in \mathbb{Z} \setminus \{0\}$ について、 $1 \leq |a| \leq |ab|$

Lem. 18.2.7. 整数の乗法の簡約則

$$\forall a, b, c \in \mathbb{Z} (c \neq 0 \wedge ac = bc \rightarrow a = b)$$

Proof.

定理 18.2.6 および補題 15.2.2 より明らか。■

19 有理数

19.1 有理数の構成

Lem. 19.1.1. 有理数の準備：前順序

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上で以下の自己関係 \preceq_Q は前順序である。

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}) ((a_1, a_2) \preceq_Q (b_1, b_2) : \leftrightarrow a_1 a_2 b_2 b_2 \leq b_1 a_2 a_2 b_2)$$

Proof.

反射的である。

推移的であることを示す。

$$\begin{aligned}
 a_1a_2b_2b_2 &\leq a_2a_2b_1b_2 \wedge b_1b_2c_2c_2 \leq b_2b_2c_1c_2 \\
 a_1a_2b_2b_2c_2c_2 &\leq a_2a_2b_1b_2c_2c_2 \wedge a_2a_2b_1b_2c_2c_2 \leq a_2a_2b_2b_2c_1c_2 \\
 a_1a_2b_2b_2c_2c_2 &\leq a_2a_2b_2b_2c_1c_2 \\
 a_1a_2c_2c_2 &\leq a_2a_2c_1c_2
 \end{aligned}$$

したがって、前順序である。 ■

Lem. 19.1.2. 有理数の準備：前順序の全域性

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上で補題 19.1.1 の前順序 \preceq_Q は以下を満たす。

$$\forall a, b \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})(a \preceq_Q b \vee b \preceq_Q a)$$

Proof.

整数の全順序性より明らか。 ■

Lem. 19.1.3. 有理数の準備：加法可換群

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上の以下の演算 + は可換群をなす。

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})((a_1, a_2) + (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1b_2 + b_1a_2, a_2b_2))$$

Proof.

\mathbb{Z} は整域よりマグマである。

結合法則を示す。

$$\begin{aligned}
 a + (b + c) &= (a_1, a_2) + (b_1c_2 + c_1b_2, b_2c_2) \\
 &= ((b_1c_2 + c_1b_2)a_2 + a_1(b_2c_2), a_2b_2c_2) \\
 &= (a_2b_2c_2 + (b_1a_2 + a_1b_2)c_2, a_2b_2c_2) \\
 &= (a_1b_2 + b_1a_2, a_2b_2) + (c_1, c_2) \\
 &= ((a_1, a_2) + (b_1, b_2)) + (c_1, c_2)
 \end{aligned}$$

$(0, 1)$ は単位元である。

(a_1, a_2) に対して、 $(-a_1, a_2)$ は逆元である。

交換法則は、整数の可換環としての性質より明らか。 ■

Lem. 19.1.4. 有理数の準備：乗法可換モノイド

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上の以下の演算 \times について、可換モノイドをなす。

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})((a_1, a_2) \times (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1b_1, a_2b_2))$$

Proof.

\mathbb{Z} は整域より \times はマグマであり、 \mathbb{Z} が環であることから半群である。

$(1, 1)$ は単位元である。

\mathbb{Z} が可換環であることから可換である。 ■

Lem. 19.1.5. 有理数の準備：同値類

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上で以下の自己関係 \sim_Q は同値類である。

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}) ((a_1, a_2) \sim_Q (b_1, b_2) : \leftrightarrow (a_1, a_2) \preccurlyeq (b_1, b_2) \wedge (b_1, b_2) \preccurlyeq (a_1, a_2))$$

Proof.

補題 19.1.1 より前順序。明らかに対称的であるので、同値類である。 ■

Lem. 19.1.6. 約分

$$\forall (a_1, a_2), (b_1, b_2) \in \mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\}) \forall n \in \mathbb{Z} \setminus \{0\} ((a_1, a_2) \sim_Q (b_1, b_2) \leftrightarrow a_1 b_2 = a_2 b_1)$$

Proof.

補題 18.2.7 より明らか。 ■

Lem. 19.1.7. 有理数の準備：両立

直積集合 $\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})$ 上で補題 19.1.5 の同値類 \sim_Q は、補題 19.1.1 の前順序、補題 19.1.3 の加法、補題 19.1.4 の乗法のそれぞれと両立する。

Proof.

前順序と両立することは、 \sim_Q の定義と前順序の推移性より明らか。

$(a_1, a_2) \sim_Q (a'_1, a'_2) \wedge (b_1, b_2) \sim_Q (b'_1, b'_2)$ とする。

$$\begin{aligned} a_1 a'_2 b_2 b'_2 &= a_2 a'_1 b_2 b'_2 \wedge a_2 a'_2 b_1 b'_2 = a_2 a'_2 b_2 b'_1 \\ a_1 a'_2 b_2 b'_2 + a_2 a'_2 b_1 b'_2 &= a_2 a'_1 b_2 b'_2 + a_2 a'_2 b_2 b'_1 \\ (a_1 b_2 + a_2 b_1) a'_2 b'_2 &= (a'_1 b'_2 + a'_2 b'_1) a_2 b_1 \\ (a_1 b_2 + a_2 b_1, a_2 b_2) &\sim_Q (a'_1 b'_2 + a'_2 b'_1, a'_2 b'_2) \end{aligned}$$

$(a_1, a_2) \sim_Q (a'_1, a'_2) \wedge (b_1, b_2) \sim_Q (b'_1, b'_2)$ とする。補題 18.2.7 より、

$$\begin{aligned} a_1 a'_2 b_1 b'_2 &= a'_1 a_2 b'_1 b_2 \\ (a_1 b_1)(a'_2 b'_2) &= (a'_1 b'_1)(a_2 b_2) \end{aligned}$$

Def. 19.1.1. 有理数

補題 19.1.7 より定まる商マグマ $(\mathbb{Z} \times (\mathbb{Z} \setminus \{0\})) / \sim_Q$ を有理数と呼び、 \mathbb{Q} で表す。また、その元も有理数と呼ぶ。定義より \mathbb{Q} は可換群である。

19.2 有理数の性質

Lem. 19.2.1. 体としての有理数

可換群 $(\mathbb{Q}, +)$ 上の補題 19.1.7 より定まる演算 \times は、体をなす。

Proof.

右分配法則を示す。補題 19.1.6 より、

$$\begin{aligned}([(a_1, a_2)] + [(b_1, b_2)]) \times [(c_1, c_2)] &= [(a_1b_2 + b_1a_2, a_2b_2)] \times [(c_1, c_2)] \\&= [((a_1b_2 + b_1a_2)c_1, a_2b_2c_2)] \\&= [(a_1c_1b_2 + b_1c_1a_2, a_2b_2c_2)] \\&= [(a_1, a_2)] \times [(c_1, c_2)] + [(b_1, b_2)] \times [(c_1, c_2)]\end{aligned}$$

左分配法則は、右分配法則と交換法則より示される。

(a_1, a_2) について、 $a_1 \neq 0$ ならば逆元 (a_2, a_1) が存在する。

$a_1 = 0$ のとき、 $[(0, a_2)] = [(0, 0)] = 0_{\mathbb{Q}}$

ゆえに、 $\mathbb{Q}^{\times} = \mathbb{Q} \setminus \{0_{\mathbb{Q}}\}$

■

Lem. 19.2.2. 有理数の準備：全順序

補題 19.1.7 より与えられる \mathbb{Q} 上の前順序 \leq は全順序である。

Proof.

$\sim_{\mathbb{Q}}$ の定義より反対称的である。

補題 19.1.2 より全順序である。

■

Thm. 19.2.3. 順序体としての有理数

(\mathbb{Q}, \leq) は順序体である。

Proof.

補題 19.2.2 より全順序。

第一式について、 $a = [(a_1, a_2)], b = [(b_1, b_2)], c = [(c_1, c_2)]$ として、 \mathbb{Z} が順序環であることより、

$$\begin{aligned}a_1a_2b_2b_2 &< a_2a_2b_1b_2 \\a_1a_2b_2b_2c_2c_2 &< a_2a_2b_1b_2c_2c_2 \\a_1a_2b_2b_2c_2c_2 + a_2a_2b_2b_2c_1c_2 &< a_2a_2b_1b_2c_2c_2 + a_2a_2b_2b_2c_1c_2 \\(a_1c_2 + a_2c_1)a_2b_2b_2c_2 &< (b_1c_2 + b_2c_1)a_2a_2b_2c_2 \\(a_1c_2 + a_2c_1)a_2b_2b_2c_2c_2 &< (b_1c_2 + b_2c_1)a_2a_2b_2c_2c_2 \\(a_1c_2 + a_2c_1)(a_2c_2)(b_2c_2) &< (b_1c_2 + b_2c_1)(a_2c_2)(a_2c_2)(b_2c_2) \\[(a_1c_2 + a_2c_1, a_2c_2)] &< [(b_1c_2 + b_2c_1, b_2c_2)]\end{aligned}$$

第二式について、 $a = [(a_1, a_2)], b = [(b_1, b_2)]$ とすると、 $0 < a_1a_2 \wedge 0 < b_1b_2$ である。

ゆえに、 $0_{\mathbb{Z}} < (a_1b_1)(a_2b_2)$ であるので、 $0_{\mathbb{Q}} < ab$

■

Lem. 19.2.4.

写像 $\varphi \in \mathbb{Q}^{\mathbb{Z}}, \varphi(a) = [(a, 1)]$ は以下を満たす。

1. 単射
2. 加法、乗法について環準同型
3. 全順序と両立

Proof.

定義より明らか。

■

Def. 19.2.1. 整数の有理数への埋め込み

補題 19.2.4 の写像 φ について、像 $\varphi(\mathbb{Z})$ を誤解のない範囲で整数 \mathbb{Z} と呼ぶ。

Cor. 19.2.5.

$$\mathbb{Z} \subset \mathbb{Q}$$

Thm. 19.2.6. \mathbb{Q} 上の Archimedes の原理

順序体 \mathbb{Q} は Archimedes 的である。

Proof.

$\forall a, b \in \mathbb{Q}^+$ を考える。 $a = [(a_1, a_2)], b = [(b_1, b_2)]$ とする。

$a_2 < 0$ のとき、補題 19.1.6 より $a_2 > 0$ とする a_1, a_2 をとることができて、背理法から $a_1 > 0$ 。同様に $b_1, b_2 > 0$ である。

$n = s(a_1 b_2)$ について、 $a < nb$ である。 ■

Thm. 19.2.7. \mathbb{Q} は第二可算

\mathbb{Q} は第二可算である。

Proof.

$\mathcal{B} := \{[a, b] \mid a, b \in \mathbb{Q}\}$ は開基である。

定理 8.2.3 より、 \mathcal{B} は可算。 ■

Thm. 19.2.8. \mathbb{Q} は完全不連結

\mathbb{Q} の部分 S が 2 点以上を含むならば、 S は連結でない。

Proof.

$a, b \in S(a < b)$ とする。

$U := \left\{ x \in \mathbb{Q} \mid \left(1 + \frac{x-a}{b-a}\right)^2 < 2 \right\}$ とする。 $a \in U \wedge b \notin U$ である。

U は開かつ閉集合より、成り立つ。 ■

20 代数の補足

20.1 \mathbb{Z}, \mathbb{Q} から見る代数

Def. 20.1.1. 単生群

群 G について以下が成り立つとき、 G を単生群と呼ぶ。

$$\exists g \in G (G = \{g^n \mid n \in \mathbb{Z}\})$$

Thm. 20.1.1. \mathbb{Z} -加群としての可換群

可換群 $(G, +)$ を考える。以下で定める $\rho \in \text{End}(G)^\mathbb{Z}$ について、順序対 $((G, +), \rho)$ は \mathbb{Z} -加群である。

$$\rho(n)(g) := \begin{cases} \sum_{m \in n} g & (0 \leq n) \\ \sum_{m \in (-n)} (-g) & (n < 0) \end{cases}$$

Proof.

正負の場合の場合分けを考えて、補題 11.8.2 より、成り立つ。 ■

Lem. 20.1.2. 分数体 \mathbb{Q}

有理数 \mathbb{Q} について、以下が成り立つ。

$$\forall q \in \mathbb{Q} \exists a, b \in \mathbb{Z} (q = a/b)$$

Proof.

\mathbb{Q} の定義（節 19）より明らか。 ■

20.2 素体

21 体と拡大

22 実数

22.1 実数の構成

Rem. 22.1.1. 実数の準備

\mathbb{Q} 上の Cauchy 列全体の集合 A を考える。

Lem. 22.1.1. 実数の準備：前順序

A 上の自己関係 \preceq_R は前順序である。

$$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \preceq_R (y_n)_{n \in \mathbb{N}} : \leftrightarrow \forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_n - y_n < \epsilon)$$

Proof.

$x_n - x_n = 0 < \epsilon$ より、反射的である。

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \preceq_R (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \wedge (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \preceq_R (z_n)_{n \in \mathbb{N}}$ のとき、

$$\exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_n - y_n < \epsilon/2 \wedge y_n - z_n < \epsilon/2)$$

ゆえに、 $x_n - z_n < \epsilon$ を得る。推移的である。 ■

Lem. 22.1.2. 実数の準備：前順序の全域性

A 上で補題 22.1.1 の前順序 \preceq_R は以下を満たす。

$$\forall x, y \in A (x \preceq_R y \vee y \preceq_R x)$$

Proof.

成り立たないと仮定する。

$\exists (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in A$ について、

$$\begin{aligned} \exists \epsilon_1 \in \mathbb{Q}^+ \forall N \in \mathbb{N} \exists n \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_n - y_n \geq \epsilon_1) \\ \exists \epsilon_2 \in \mathbb{Q}^+ \forall N \in \mathbb{N} \exists m \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_m - y_m \leq -\epsilon_2) \end{aligned}$$

よって、 $\epsilon = 2 \min \{\epsilon_1, \epsilon_2\}$ として、

$$\forall N \in \mathbb{N} \exists n, m \in \mathbb{N}_{\geq N} ((x_n - y_n) - (x_m - y_m) \geq \epsilon)$$

$(x_n - y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は、補題 ?? より Cauchy 列であるので、

$$\forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq N} (|(x_n - y_n) - (x_m - y_m)| < \epsilon)$$

矛盾する。背理法より示される。 ■

Lem. 22.1.3. 実数の準備：前順序の補足

A 上で補題 22.1.1 の前順序 \preceq_R は以下を満たす。

$$\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in A (\neg x \preceq y \leftrightarrow \exists \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_n - y_n \geq \epsilon))$$

Proof.

右を示す。

補題 ??より $(x_l - y_l)_{l \in \mathbb{N}}$ は Cauchy である。

したがって $\exists N \in \mathbb{N} \forall m \in \mathbb{N}_{\geq N}$ について、 $|(x_n - y_n) - (x_m - y_m)| < \epsilon/2$

ゆえに、 $x_m - y_m > x_n - y_n - \epsilon/2 \geq \epsilon/2$

左を示す。

$x \preccurlyeq y$ とすると定義より矛盾。背理法より示される。 ■

Lem. 22.1.4. 実数の準備：加法可換群

A 上の以下の演算 $+$ は可換群をなす。

$$\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in A((x_n)_{n \in \mathbb{N}} + (y_n)_{n \in \mathbb{N}} : \leftrightarrow (x_n + y_n)_{n \in \mathbb{N}})$$

Proof.

補題 ??よりマグマである。

結合法則は、有理数の可換体としての性質より明らか。

$(0)_{n \in \mathbb{N}}$ は単位元である。

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ に対して、補題 ??より $(-x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は逆元である。

交換法則は、有理数の可換体としての性質より明らか。 ■

Lem. 22.1.5. 実数の準備：可換環

補題 22.1.4 の定める可換群 $(A, +)$ 上の以下の演算 \times は可換環をなす。

$$\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in A((x_n)_{n \in \mathbb{N}} \times (y_n)_{n \in \mathbb{N}} : \leftrightarrow (x_n \times y_n)_{n \in \mathbb{N}})$$

Proof.

補題 ??よりマグマである。

結合法則は、有理数の可換体としての性質より明らか。

$(1)_{n \in \mathbb{N}}$ は単位元である。

交換法則は、有理数の可換体としての性質より明らか。

分配法則は、有理数の可換体としての性質より明らか。 ■

Lem. 22.1.6. 実数の準備：同値類

A 上で以下の自己関係 \sim_R は同値類である。

$$\forall (x_n)_{n \in \mathbb{N}}, (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \in A((x_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (y_n)_{n \in \mathbb{N}} : \leftrightarrow (x_n)_{n \in \mathbb{N}} \preccurlyeq (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \wedge (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \preccurlyeq (x_n)_{n \in \mathbb{N}})$$

さらに、 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ であるとき、 $(x_n - y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は収束して以下を満たす。

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (x_n - y_n) = 0$$

Proof.

補題 22.1.1 より前順序。明らかに対称的であるので、同値類である。

定理 ??より明らか。 ■

Lem. 22.1.7. 実数の準備：両立

A 上で補題 22.1.6 の同値類 \sim_R は、補題 22.1.1 の前順序、補題 22.1.4 の加法、補題 22.1.5 の乗法のそれぞれと両立する。

Proof.

前順序と両立することは、 \sim_R の定義と前順序の推移性より明らか。

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (x'_n)_{n \in \mathbb{N}} \wedge (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (y'_n)_{n \in \mathbb{N}}$ とする。

$(x_n + y_n) - (x'_n + y'_n) = (x_n - x'_n) + (y_n - y'_n)$ であるので、0 に収束する。

$(x_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (x'_n)_{n \in \mathbb{N}} \wedge (y_n)_{n \in \mathbb{N}} \sim_R (y'_n)_{n \in \mathbb{N}}$ とする。

$$|(x_n y_n) - (x'_n y'_n)| = |(x_n - x'_n)y_n + x'_n(y_n - y'_n)|$$

ここで、系 10.2.6 と定理 ?? より 2 つの Cauchy 列は有界で、定理 ?? より、

$$\exists K \in \mathbb{Q}^+ (|(x_n y_n) - (x'_n y'_n)| \leq K(|x_n - x'_n| + |y_n - y'_n|))$$

ゆえに 0 に収束する。 ■

Def. 22.1.1. 実数

補題 22.1.7 より定まる商マグマ A/\sim_R を実数と呼び、 \mathbb{R} と表す。またその元も実数と呼ぶ。
定義より \mathbb{R} は体である。

Lem. 22.1.8. 実数の準備：体としての実数

可換環 $((\mathbb{R}, +), \times)$ は体である。

Proof.

$x = [(x_n)_{n \in \mathbb{N}}]$ について、以下の点列を考える。

$$y_n = \begin{cases} 0 & (x_n = 0) \\ 1/x_n & (x_n \neq 0) \end{cases}$$

全順序性より、 $x < 0 \vee 0 < x$

$0 < x$ のとき、

$$\exists \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \forall N \in \mathbb{N} \exists n \in \mathbb{N}_{\geq N} (\epsilon \leq x_n)$$

Cauchy 列であることより、

$$\exists N \in \mathbb{N} \forall m \in \mathbb{N}_{\geq N} (|x_n - x_m| < \epsilon/2)$$

したがって、

$$\exists N \in \mathbb{N} \forall m \in \mathbb{N}_{\geq N} (\epsilon/2 < x_m)$$

今、 $(y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ について考える。

$k, l \geq N$ について、 $|y_k - y_l| = |1/x_k - 1/x_l| \leq |x_k - x_l|/|x_k x_l|$

定義より、 $\epsilon' \in \mathbb{Q}^+$ に対して $k, l \geq N' \rightarrow |x_k - x_l| < \epsilon' \epsilon^2/4$ とする $N' > N$ が存在するので Cauchy

$x < 0$ のときも同様に示される。 ■

Lem. 22.1.9. 実数の準備：全順序

補題 22.1.7 より与えられる \mathbb{R} 上の前順序 \leq は全順序である。

Proof.

\sim_R の定義より反対称的である。

補題 22.1.2 より全順序である。 ■

Thm. 22.1.10. 順序体としての実数

(\mathbb{R}, \leq) は順序体である。すなわち \mathbb{R} は体で、 \leq は全順序であり、かつ以下を満たす。

$$\begin{aligned} & \forall x, y, z \in \mathbb{R} (x \leq y \rightarrow x + z \leq y + z) \\ & \forall x, y \in \mathbb{R} (0_{\mathbb{R}} < x \wedge 0_{\mathbb{R}} < y \rightarrow 0_{\mathbb{R}} < xy) \end{aligned}$$

Proof.

補題 22.1.9 より全順序。

第一式について、 $x_n - y_n < \epsilon \rightarrow (x_n + z_n) - (y_n + z_n) < \epsilon$ より明らか。

第二式について、 $x = [(x_n)_{n \in \mathbb{N}}], y = [(y_n)_{n \in \mathbb{N}}]$ とする。

補題 22.1.3 より、

$$\exists \epsilon_1, \epsilon_2 \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall k \in \mathbb{N}_{\geq N} (\epsilon_1 \leq x_k \wedge \epsilon_2 \leq y_k)$$

$(x_n y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は補題 ?? より Cauchy 列であり、補題 22.1.3 より $\neg(0)_{n \in \mathbb{N}} \succcurlyeq (x_n y_n)_{n \in \mathbb{N}}$ 補題 22.1.9 より示される。 ■

Lem. 22.1.11.

写像 $\varphi \in \mathbb{R}^{\mathbb{Q}}, \varphi(a) = [(a)_{n \in \mathbb{N}}]$ は以下を満たす。

1. 単射
2. 加法、乗法について環準同型
3. 全順序と両立
4. 一様連続

Proof.

定義より明らか。 ■

Def. 22.1.2. 有理数の実数への埋め込み

補題 22.1.11 の写像 φ について、像 $\varphi(\mathbb{Q})$ を誤解のない範囲で有理数 \mathbb{Q} と呼ぶ。

Cor. 22.1.12.

$$\mathbb{Q} \subset \mathbb{R}$$

22.2 実数の性質

Thm. 22.2.1. 実数の有理数による近似

$$\forall x, y \in \mathbb{R} (x < y \rightarrow \exists a \in \mathbb{Q} (x < a < y))$$

Proof.

$x = [(x_n)_{n \in \mathbb{N}}], y = [(y_n)_{n \in \mathbb{N}}]$ とする。

$x < y$ より補題 22.1.3 より

$$\exists \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (x_n - y_n \geq \epsilon)$$

Cauchy 列の定義より、

$$\exists M \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq M} (|x_n - x_m| < \epsilon/4 \wedge |y_n - y_m| < \epsilon/4)$$

ゆえに $K = \max \{M, N\}$ について、 $a = x_{s(K)} + \epsilon/2 \in \mathbb{Q}$ が存在して

$$\forall n \in \mathbb{N} (n > K \rightarrow x_n + \epsilon/4 < a \wedge a + \epsilon/4 < y_n)$$

■

Thm. 22.2.2. \mathbb{R} 上の Archimedes の原理

$$\forall x \in \mathbb{R} \exists n \in \mathbb{N} (n > x)$$

Proof.

定理 22.2.1 より、有理数 a が存在して、

$$x < a < x + 1$$

定理 19.2.6 より示される。 ■

Thm. 22.2.3. \mathbb{R} は可算一様

\mathbb{R} は可算一様である。

Proof.

定理 22.2.2 より、 $\mathcal{U} := \{\{(x, y) \mid |x - y| < 1/s(n)\} \mid n \in \mathbb{N}\}$ は基本近縁系である。 ■

Lem. 22.2.4.

全単射 $\varphi \in \mathbb{R}^{[0,1]}$ が存在する。

Proof.

以下の写像は、全単射 $f \in \mathbb{R}^{[0,1]}$ である。

$$f(x) := \frac{1/2 - x}{x(x-1)}$$

以下の写像は、全単射 $g \in]0, 1[^{[0,1]}$ である。

$$g(x) := \begin{cases} 1/2 + 1/2^{s(n)} & (\exists n \in \mathbb{N} (1/2 + 1/2^n = x)) \\ 1/2 - 1/2^{s(n)} & (\exists n \in \mathbb{N} (1/2 - 1/2^n = x)) \\ x & (\text{otherwise}) \end{cases}$$

$\varphi = f \circ g$ として成り立つ。 ■

Thm. 22.2.5. 連続体濃度

全単射 $\sigma \in \mathbb{R}^{\mathfrak{P}(\mathbb{N})}$ が存在する。

Proof.

$f \in \mathfrak{P}(\mathbb{Q})^{\mathbb{R}}, f(r) = \{q \in \mathbb{Q} \mid q < r\}$ は定理 22.2.1 より単射である。

以下で定める写像 $g \in \mathbb{R}^{\mathfrak{P}(\mathbb{N})}$ を考える。

$A \in \mathfrak{P}(\mathbb{N})$ について以下の点列 $(y_m)_{m \in \mathbb{N}}$ が与えられる。

$$y_m := \begin{cases} 1 & (m \in A) \\ 0 & (m \notin A) \end{cases}$$

$x_n := \sum_{m \in n} (y_m / 2^m)$ とすると、 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は \mathbb{Q} 上の Cauchy 列である。
 A に対して $[(x_n)_{n \in \mathbb{N}}]$ を定める写像 g は单射である。

定理 8.3.4 より成り立つ。 ■

Thm. 22.2.6. 実数の直積は連続体濃度

全单射 $\sigma \in \mathbb{R}^{\mathbb{R}^2}$ が存在する。

Proof.

$f \in (\mathbb{R}^2)^{\mathbb{R}}, f(r) = (r, 0)$ は单射である。

以下で定める写像 $g \in \mathbb{R}^{\mathfrak{P}(\mathbb{N}) \times \mathfrak{P}(\mathbb{N})}$ を考える。

$(A, B) \in \mathfrak{P}(\mathbb{N}) \times \mathfrak{P}(\mathbb{N})$ について以下の点列 $(y_m)_{m \in \mathbb{N}}$ が与えられる。

$$y_m := \begin{cases} 1 & ((m \text{ は偶数} \wedge m/2 \in A) \vee (m \text{ は奇数} \wedge (m-1)/2 \in B)) \\ 0 & ((m \text{ は偶数} \wedge m/2 \notin A) \vee (m \text{ は奇数} \wedge (m-1)/2 \notin B)) \end{cases}$$

$x_n := \sum_{m \in n} (y_m / 2^m)$ とすると、 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は \mathbb{Q} 上の Cauchy 列である。

(A, B) に対して $[(x_n)_{n \in \mathbb{N}}]$ を定める写像 g は单射である。

定理 8.3.4 より成り立つ。 ■

Thm. 22.2.7. 有界と全有界

\mathbb{R} の部分集合 A について、以下の 2 つは同値である。

1. A は全有界
2. A が有界

Proof.

1. \rightarrow 2. は、定理 ?? より成り立つ。

2. \rightarrow 1. を考える。

有界ならば $\exists d, u \in \mathbb{R} \forall a \in A (d \leq a \wedge a \leq u)$

定理 22.2.2 より $\forall \epsilon \in \mathbb{R}^+ \exists n \in \mathbb{N} ((u - d)/\epsilon < n)$

定理 ?? より $A \subset \{B(\epsilon)[d + m \times \epsilon] \mid m \in s(n)\}$ である。 ■

22.3 実数の完備性

Lem. 22.3.1.

\mathbb{Q} 上の Cauchy 列 $(x_m)_{m \in \mathbb{N}}$ は以下を満たす。

$$\forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (|x_n - [(x_m)_{m \in \mathbb{N}}]| < \epsilon)$$

Proof.

Cauchy 列より $\forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq N} (\epsilon - |x_n - x_m| \geq \epsilon/2)$

補題 22.1.3 より $|x_n - [(x_m)_{m \in \mathbb{N}}]| < \epsilon$ ■

Lem. 22.3.2.

\mathbb{Q} 上の Cauchy 列 $(x_m)_{m \in \mathbb{N}}$ について、以下を満たす部分 Cauchy 列 $(x_{N_0(m)})_{m \in \mathbb{N}}$ を持つ。

$$\begin{aligned} (x_{N_0(m)})_{m \in \mathbb{N}} &\sim_R (x_m)_{m \in \mathbb{N}} \\ \forall n \in \mathbb{N} (\left| x_{N_0(n)} - [(x_m)_{m \in \mathbb{N}}] \right| < 1/s(n)) \end{aligned}$$

Proof.

Cauchy 列より $\forall n \in \mathbb{N} \exists N \in \mathbb{N} \forall m, l \in \mathbb{N}_{\geq N} (|x_m - x_l| < 1/(2s(n)))$ である。

以下のような写像 $N_0 \in \mathbb{N}^{\mathbb{N}}$ を考える。

$$\begin{aligned} N_0(0) &:= N(0) \\ N_0(s(n)) &:= \max \{N(s(n)), s(N_0(n))\} \end{aligned}$$

ここから得る点列 $(x_{N_0(m)})_{m \in \mathbb{N}}$ について考える。

定義より部分列である。さらに Cauchy 列の部分列より Cauchy 列である。

$\forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+ \exists N_1 \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N_1} (|x_n - x_{N_0(n)}| < \epsilon)$ より第一式を満たす。

$\forall m, l \in \mathbb{N}$ について $n := \min \{m, l\}$ とすると $N_0(m), N_0(l) \geq N_0(n)$ より、 $|x_{N_0(m)} - x_{N_0(l)}| < 1/(2s(n)) = 1/(2 \min \{s(m), s(l)\})$ である。

ゆえに $\forall m \in \mathbb{N}_{\geq n} (1/s(n) - |x_n - x_m| > 1/(2s(n)))$

補題 22.1.3 より $|x_n - [(x_m)_{m \in \mathbb{N}}]| < 1/s(n)$

■

Lem. 22.3.3.

\mathbb{R} 上の Cauchy 列 $([(x_{n,m})_{m \in \mathbb{N}}])_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

このとき補題 22.3.2 の主張する N_0 について、 \mathbb{Q} 上の点列 $(x_{n, N_0(n)})_{n \in \mathbb{N}}$ は Cauchy 列である。

Proof.

$\forall \epsilon \in \mathbb{Q}^+$ を考える。

定理 19.2.6 より、 $\exists N_1 \in \mathbb{N} (8/\epsilon < N_1 < s(N_1))$

補題 22.3.2 より、 $\exists N_2 \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq N_2} (|x_n - x_m| < \epsilon/2)$

ゆえに $N := \max \{N_1, N_2\} \in \mathbb{N}$ として $\forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq N}$ について、

$|x_{n, N_0(n)} - x_{m, N_0(m)}| \leq |x_{n, N_0(n)} - x_n| + |x_n - x_m| + |x_m - x_{m, N_0(m)}| < 2/s(n) + \epsilon/2 + 2/s(m) \leq 4/s(N) + \epsilon/2 < \epsilon$ である。

■

Lem. 22.3.4. \mathbb{R} 上の Cauchy 列は収束する

\mathbb{R} 上の Cauchy 列は収束する。

Proof.

\mathbb{R} 上の Cauchy 列を考える。補題 22.3.2 より $([(x_{n, N_0(n)})_{m \in \mathbb{N}}])_{n \in \mathbb{N}}$ と表せる。

補題 22.3.3 より得る $y := [(x_{n, N_0(n)})_{n \in \mathbb{N}}] \in \mathbb{R}$ を考える。

$\forall \epsilon \in \mathbb{R}^+$ を考える。

補題 22.3.1 より $\exists N_1 \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N_1} (|x_{n, N_0(n)} - y| < \epsilon/2)$

定理 22.2.2 より、 $\exists N_2 \in \mathbb{N} (2/\epsilon < N_2 < s(N_2))$

補題 22.3.2 より $|x_n - x_{n, N_0(n)}| < 1/s(n)$

$N := \max \{N_1, N_2\}$ とする。

$\forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (|x_n - y| \leq |x_n - x_{n, N_0(n)}| + |x_{n, N_0(n)} - y| < 1/s(n) + \epsilon/2 \leq 1/s(N) + \epsilon/2 < \epsilon)$

■

Thm. 22.3.5. 実数の完備性

\mathbb{R} は完備である。

Proof.

補題 22.3.4 定理 22.2.3 定理 10.3.4 より完備である。 ■

22.4 実数の連続性

Thm. 22.4.1. 区間縮小法

以下を満たす広義単調増加列 $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ 、広義単調減少列 $(b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

$$\begin{aligned} \forall n \in \mathbb{N} (a_n < b_n) \\ \lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - a_n) = 0 \end{aligned}$$

このとき、 $\bigcap \{[a_n, b_n] \mid n \in \mathbb{N}\}$ は单集合である。

Proof.

$$\forall \epsilon \in \mathbb{R}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n, m \in \mathbb{N}_{\geq N} (|a_n - a_m| < b_N - a_N < \epsilon)$$

よって、 $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は Cauchy 列である。

定理 22.3.5 より $c \in \mathbb{R}$ に収束する。

$\exists n \in \mathbb{N} (c < a_n)$ とすると、 $\forall m \in \mathbb{N}_{\geq n} (c < a_n \leq a_m)$ であり c に収束しない。反する。

$\exists n \in \mathbb{N} (b_n < c)$ とすると、 $\forall m \in \mathbb{N}_{\geq n} (a_m < b_m \leq b_n < c)$ であり c に収束しない。反する。

ゆえに $c \in \bigcap \{[a_n, b_n] \mid n \in \mathbb{N}\}$

$\exists c_1, c_2 \in \bigcap \{[a_n, b_n] \mid n \in \mathbb{N}\} (c_1 < c_2)$ とすると、 $\forall n \in \mathbb{N} (|b_n - a_n| \geq b_n - a_n \geq c_2 - c_1)$ より $\lim_{n \rightarrow \infty} (b_n - a_n) = 0$ に反する。

背理法より示される。 ■

Cor. 22.4.2.

$$\forall n \in \mathbb{N} (s(n) \leq 2^n)$$

Thm. 22.4.3. 上限の存在

\mathbb{R} の空でない部分集合 A について、上に有界ならば上限を持つ。

Proof.

A の上界の全体 U を考える。

A は空でないので $\exists a \in A$ である。 $a \in U$ ならば a は上限である。

$a \notin U$ を考える。上界を持つので $\exists u \in U$

以下の点列 $(a_n)_{n \in \mathbb{N}}, (b_n)_{n \in \mathbb{N}}$ を考える。

$$(a_0, b_0) = (a, u) \quad (a_{s(n)}, b_{s(n)}) = \begin{cases} (a_n, \frac{a_n+b_n}{2}) & \left(\frac{a_n+b_n}{2} \in U\right) \\ (\frac{a_n+b_n}{2}, b_n) & \left(\frac{a_n+b_n}{2} \notin U\right) \end{cases}$$

定義より定理 7.1.2 から $\forall n \in \mathbb{N} (a_n < b_n)$ であり、定理 22.2.2 より $(b_n - a_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は 0 に収束する。

定理 22.4.1 より $\exists r \in \mathbb{R} (\{r\} = \bigcap \{[a_n, b_n] \mid n \in \mathbb{N}\})$ である。

$\forall c \in \mathbb{R} (r < c \rightarrow \exists n \in \mathbb{N} (r < b_n < c))$ である。 $b_n \in U$ より $c \notin A$ 、ゆえに r は上界である。

$\forall c \in \mathbb{R} (c < r \rightarrow \exists n \in \mathbb{N} (c < a_n < r))$ である。 $a_n \in X \setminus U$ より $c \notin U$ 、ゆえに r は上限である。 ■

Lem. 22.4.4.

\mathbb{R} の上に有界な空でない部分集合 A について、 $\sup A \in \overline{A}$

Proof.

$\sup A \notin \overline{A}$ と仮定する。

定理 9.4.3 より $\exists \epsilon \in \mathbb{R}^+ (A \cap [\sup A - \epsilon, \sup A + \epsilon] = \emptyset)$ である。

$\sup A - \epsilon/2$ も上界となり、上限の定義に反する。

背理法より $\sup A \in \overline{A}$

■

Thm. 22.4.5. 有界な単調列は収束する

\mathbb{R} 上の上に有界な広義単調増加列 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は収束する。

Proof.

定理 22.4.3 より、 $(x_n)_{n \in \mathbb{N}}$ は上限 s を持つ。

今、単調性と上界集合の最小元であることから

$$\forall \epsilon \in \mathbb{R}^+ \exists N \in \mathbb{N} \forall n \in \mathbb{N}_{\geq N} (s - \epsilon < x_n \leq s)$$

■

Thm. 22.4.6. \mathbb{R} は連結

\mathbb{R} は連結である。また、 \mathbb{R} 上の区間は連結である。

Proof.

連結でないと仮定する。 $\exists U, V \in \mathcal{O} \setminus \{\emptyset\} (U \cup V = \mathbb{R} \wedge U \cap V = \emptyset)$

U, V は空でないので $\exists u \in U \exists v \in V (u \neq v)$ である。

$u < v$ とする。 $B := \{x \in U \mid x < v\}$ を考える。

$x \in B$ であり、 v は B の上界であるので、定理 22.4.3 から上界 $b := \sup B$ を持つ。

$b \in V$ とすると、 V は開集合であるので $\exists \epsilon \in \mathbb{R}^+ ([b - \epsilon, b + \epsilon] \subset V)$

このとき $b - \epsilon$ も B の上界となり矛盾。ゆえに $b \notin V$ よって $b < v$ である。

$b \in U$ とすると、 U は開集合であるので $\exists \epsilon' \in \mathbb{R}^+ ([b - \epsilon', b + \epsilon'] \subset U)$

$b < b + \min\{\epsilon', v - b\}/2 \in B$ より b は上界でない。ゆえに $b \notin U$

$U \cup V = \mathbb{R}$ に反する。背理法より連結。 $v < u$ の場合も同様である。

区間についても同様に示される。

■

Thm. 22.4.7. 有界閉集合とコンパクト

\mathbb{R} 上の部分集合 A について、以下は同値である。

1. A は有界閉集合
2. A はコンパクト

Proof.

1. \rightarrow 2. を考える。

定理 22.2.7 より全有界。

A 上の Cauchy ネットは定理 22.3.5 と定理 9.4.3 より A に収束する。すなわち A は完備である。

定理 10.2.9 より成り立つ。

2. \rightarrow 1. を考える。

定理 10.2.9 より全有界かつ完備。定理 22.2.7 より有界。

A が閉集合でないとすると、あるネットが存在して $\mathbb{R} \setminus A$ に収束する。

収束ネットは Cauchy より A は完備でない。

背理法より、 A は閉集合である。 ■