

強制法セミナー第3回：強制法の基礎理論

Hiromi ISHII (@mr_konn)

2024-XX-XX

目次

1	Boole 代数の基本性質	1
2	集合の Boole 値モデル	3
2.1	V と $V^{\mathbb{B}}$ で何が一致するのか：推移的クラスと Δ_1 -絶対性	8
3	強制法定理： $V^{\mathbb{B}}$ が ZFC のモデルとなること	12
4	Boole 値モデル $V^{\mathbb{B}}$ と (V, \mathbb{B}) -生成的フィルター	17
5	Boole 完備化と擬順序による強制法	20
5.1	擬順序の Boole 完備化	20
5.2	強制関係と擬順序による強制法	23
6	集合論のモデルの生成拡大と強制法拡大	32
6.1	推移的モデル上の強制法と強制関係	32
6.2	Hamkins–Seabold の強制法の自然主義的正当化	33
6.3	強制法の実際	33
7	参考文献	33

1 Boole 代数の基本性質

定義 1.1. 以下を満たす $\mathbb{B} = (\mathbb{B}, 0, 1, -, +, \cdot, \leq)$ を Boole 代数と呼ぶ：

- \leq は B 上の半順序である。
- $0, 1$ はそれぞれ \leq に関する最小・最大元である。
- 任意の二元 $p, q \in \mathbb{B}$ に対して、 $p + q, p \cdot q$ はそれぞれ二元の上限・下限を与える。
 - つまり $p, q \leq p \cdot q$ かつ $\forall r [p, q \leq r \implies p \cdot q \leq r]$ が成り立つ。+ についてはこの双対を取った性質が成り立つ。
- $p \in \mathbb{B}$ に対し、 p の補元 (complement) $-p$ は、 $p + (-p) = 1$ および $p \cdot (-p) = 0$ を満たす。

更に \mathbb{B} の濃度 κ -未満の任意の部分集合 $A \subseteq \mathbb{B}$ に上限 $\sum A$ ・下限 $\prod A$ が存在するとき、 \mathbb{B} を κ -完備 Boole 代数と呼び、濃度の制限なく上限・下限が存在する Boole 代数を完備 Boole 代数 (cBa) と呼ぶ。

(完備とは限らない) 一般の Boole 代数について、以下の代数法則が成り立つ：

補題 1.1. \mathbb{B} を Boole 代数とし、 $a, b, c, d \in \mathbb{B}$ とすると以下が成立：

1. 結合律： $a + (b + c) = (a + b) + c$, $a \cdot (b \cdot c) = (a \cdot b) \cdot c$
2. 交換律： $a + b = b + a$, $a \cdot b = b \cdot a$
3. 両方向の分配律： $a + (b \cdot c) = (a + b) \cdot (a + c)$, $a \cdot (b + c) = (a \cdot b) + (a \cdot c)$
4. 吸収律： $a + (a \cdot b) = a$, $a \cdot (a + b) = a$
5. 補元： $-a + a = 1$, $(-a) \cdot a = 0$
6. 単位律： $a + 0 = a = 0 + a$, $a \cdot 1 = a = 1 \cdot a$
7. $a \cdot b = a \iff a \leq b \iff a + b = b$

実は、上の公理は Boole 代数を代数的に特徴づける：

演習 1.1. B を集合、 $0, 1 \in B$, $- : B \rightarrow B$, $+, \cdot : B \times B \rightarrow B$ とする。

1. 補題 1.1 を示せ。
2. 代数系 $(B, -, +, \cdot, 0, 1)$ が補題 1.1 の (1) から (5) の法則を満たすなら、(6) も成り立つことを示せ。また $a + b = b \iff a \cdot b = a$ が成り立つことも示せ。
3. 上の状況の下で、(7) のいずれか一方の条件によって \leq を定義すると B 上の半順序となり、この順序について定義 1.1 の意味での Boole 代数なることを示せ。

以下、Boole 値モデルを扱う上で頻出となる Boole 代数の基本性質を列挙しておく：

補題 1.2. \mathbb{B} を Boole 代数とし、 $a, b, c \in \mathbb{B}$, $A, B \subseteq \mathbb{B}$ とする。以下の略記法を用いる：

$$a \multimap b := -a + b, \quad a \cdot A = \{a \cdot b \mid b \in A\}$$

$$a + A := \{a + b \mid b \in A\}, \quad -A = \{-b \mid b \in A\}$$

このとき以下が成立：

1. $a \cdot b \leq a \leq a + b$
2. $a \leq (a \cdot b) + (-b)$
3. 二項 de Morgan 則： $-(a + b) = (-a) \cdot (-b)$, $-(a \cdot b) = (-a) + (-b)$
4. 単調性： $a \leq b \implies a + c \leq b + c$ & $a \cdot c \leq b \cdot c$
5. 反変性： $a \leq b \iff -b \leq -a$
6. 冪等律： $a \cdot a = a = a + a$
7. 随伴律： $a \cdot b \leq c \iff a \leq b \multimap c$
8. 対合律： $-(-a) = a$
9. $a \not\leq b \iff a \cdot (-b) > 0$
10. $a \leq (b \multimap c) \cdot (c \multimap b) \iff a \cdot b = a \cdot c$
11. 無限項対二項分配律 (和)： A が下限を持つなら $a + A$ も下限を持ち、 $\prod (a + A) = a + \prod A$ 。
12. 無限項対二項分配律 (積)： A が上限を持つなら $a \cdot A$ も上限を持ち、 $\sum (a \cdot A) = a \cdot \sum A$ 。
13. 多項 de Morgan 則 (和積)： A が上限 $\sum A$ を持つ $\iff -A$ が下限を持つ。さらに、このどちら

か (よって両方) が存在するとき、 $-\sum A = \prod(-A)$, $\sum A = -\prod(-A)$ 。

14. 多項 de Morgan 則 (積和) : 上で \prod, \sum を入れかえた双対。

演習 1.2. 上を示せ。

注意 1.1. 分配律を無限項対無限項にしたものは成り立つとは限らない。これは、対応する強制法が基数を保つ条件と密接に関連がある。

実は、任意の擬順序集合は完備 Boole 代数に稠密に埋め込むことができ、しかもこの Boole 代数は同型を除いて一意である。このことは、擬順序による強制法を扱う節で詳しく見る。

2 集合の Boole 値モデル

定義 2.1. \mathbb{B} を完備 Boole 代数とすると、 \mathbb{B} -名称の全体 $V^{\mathbb{B}}$ を次のように超限帰納法で定める：

$$\begin{aligned} V_0^{\mathbb{B}} &:= \emptyset \\ V_{\alpha+1}^{\mathbb{B}} &:= \mathcal{P}(V_{\alpha}^{\mathbb{B}} \times \mathbb{B}) \\ V_{\gamma}^{\mathbb{B}} &:= \bigcup_{\alpha < \gamma} V_{\alpha}^{\mathbb{B}} \quad (\gamma : \text{limit}) \end{aligned}$$

$V^{\mathbb{B}}$ の元を渡るメタ変数としてドット付きの文字 $\dot{a}, \dot{b}, \dots, \dot{A}, \dot{B}, \dots$ を使う。また、基礎理論を作るときだけ、 $\sigma, \tau, \varpi, \vartheta$ も使う。

$\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}$ の \mathbb{B} -階数 (**B-rank**) $\text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{x})$ を、 $\dot{x} \in V_{\alpha+1}^{\mathbb{B}}$ なる最小の α として定める。

注意 2.1. 第 0 回では、集合の特性関数の多値化という点を強調するため、 $V^{\mathbb{B}}$ -名称はランクの低い \mathbb{B} -名称から \mathbb{B} への関数として定めていた。一方、上の定義はあくまでも \mathbb{B} -名称は \mathbb{B} -集合と \mathbb{B} の元の対からなる任意の集合として定めており、初回の定義よりも広いものになっている。 \mathbb{B} が完備 Boole 代数であるときは、上の定義による \mathbb{B} -名称 \dot{x} が与えられたとき、以下のように関数となるように \mathbb{B} -名称 \dot{x}' を取り直すことができる：

$$\dot{x}'(\dot{y}) := \sum_{(\dot{y}, b) \in \dot{x}} b.$$

わざわざ上限を取らずに、ここでより広い定義を取っているのは、一般の擬順序による強制法を考える場合、そうした上限が常に存在するとは限らず、今回の定式化の方を使う必要があるためである。もちろん、擬順序の場合になってから名称の定義を変更してもよいが、そうするよりは最初からより一般的な定義を採用する形にした。

もとの宇宙 V の元を $V^{\mathbb{B}}$ に埋め込むために、 $x \in V$ に対する **check-name** \check{x} を次のように再帰的に定義する：

定義 2.2. 集合 x の **check-name** \check{x} を、 \in -関係に関する超限帰納法により次のように定める：

$$\check{x} := \{(\check{y}, 1) \mid y \in x\}$$

以下、check-name の全体を $\check{V} := \{\check{x} \mid x \in V\}$ により表す。

さて、 $V^{\mathbb{B}}$ は V を拡張するような \mathbb{B} -値集合の宇宙として振る舞うことが期待されるのだった。このために、 $V^{\mathbb{B}}$ の性質を記述するための強制法の言語 \mathcal{FL} を定義しよう。

定義 2.3. 強制法の言語 \mathcal{FL} は、二項述語記号 \in 、単項述語記号 \check{V} を持つ言語である。

以後、 $x \in \check{V}$ は $\check{V}(x)$ の略記とする。

記号から類推できるように、 \in は所属関係を、 \check{V} は基礎モデルの元であることを表す述語記号として想定されている。

注意 2.2. 実は、 \check{V} は $V^{\mathbb{B}}$ で定義可能クラスとなっていることが知られている（Bukovský の定理）。この証明は擬順序の反鎖条件という組合せ論的性質と強制拡大の基礎モデルに対する被覆性質の関連を使うもので興味深いが、基礎理論を終えてから立ち戻ることにする。

さて、強制法で用いる言語が定まったので、 $V^{\mathbb{B}}$ における \mathcal{FL} -論理式の真偽値を定義しよう。

定義 2.4. \mathcal{FL} -原子論理式の真偽値 $\llbracket - \rrbracket_{\mathbb{B}}$ を \mathbb{B} -階数に関する帰納法で以下のように定める：

$$\begin{aligned} \llbracket \dot{x} \in \dot{y} \rrbracket_{\mathbb{B}} &:= \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{y}} b \cdot \llbracket \dot{x} = \dot{z} \rrbracket_{\mathbb{B}}, \quad \llbracket \dot{x} = \dot{y} \rrbracket_{\mathbb{B}} := \llbracket \dot{x} \subseteq \dot{y} \rrbracket_{\mathbb{B}} \cdot \llbracket \dot{y} \subseteq \dot{x} \rrbracket_{\mathbb{B}}, \quad \llbracket \dot{x} \in \check{V} \rrbracket_{\mathbb{B}} := \sum_{z \in V} \llbracket \dot{x} = \check{z} \rrbracket_{\mathbb{B}} \\ \llbracket \dot{x} \subseteq \dot{y} \rrbracket_{\mathbb{B}} &:= \prod_{\dot{z} \in \text{dom}(\dot{x})} (-\llbracket \dot{z} \in \dot{x} \rrbracket_{\mathbb{B}} + \llbracket \dot{z} \in \dot{y} \rrbracket_{\mathbb{B}}). \end{aligned}$$

$V^{\mathbb{B}}$ の元をパラメータに持つ \mathcal{FL} -論理式 φ の真偽値 $\llbracket \varphi \rrbracket_{\mathbb{B}}$ を、論理式の構成に関するメタレベルの帰納法で以下のように定める：

$$\llbracket \perp \rrbracket := 0, \quad \llbracket \varphi \rightarrow \psi \rrbracket := -\llbracket \varphi \rrbracket + \llbracket \psi \rrbracket, \quad \llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket := \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket_{\mathbb{B}}.$$

$p \in \mathbb{B}$ と \mathcal{FL} -論理式 φ について、 $p \leq \llbracket \varphi \rrbracket$ が成り立つとき、 p が φ を強制するといい、記号 $p \Vdash \varphi$ で表す。また、 $1 \Vdash \varphi$ が成り立つとき（つまり $\llbracket \varphi \rrbracket = 1$ となるとき）、 $V^{\mathbb{B}} \models \varphi$ または $\Vdash \varphi$ と書く。

注意 2.3. 完備 Boole 代数は、任意の部分集合が上限・下限を持つような Boole 代数であった。ところで、上の定義では $\dot{x} \in \check{V}$ や $\exists x \varphi$ の定義で、上限はクラスを渡っているように見える。これはちゃんと定義になっているだろうか？ と心配になるかもしれない。

簡単に言えば、パラメータ自体は真クラスを渡っているが、 \mathbb{B} 自体はあくまでも集合であり、**集合の部分クラスは集合だから大丈夫**、というのが答えである。より詳しく言えば、ZFC（というか、Z）の**分出公理（内包公理）**のおかげで我々は安心してこの操作が出来ている。たとえば、 $\dot{x} \in \check{V}$ の真偽値の定義を（上限記号以外は）略記せずに書くと次のようになる：

$$\llbracket \dot{x} \in \check{V} \rrbracket_{\mathbb{B}} := \sum_{z \in V} \llbracket \dot{x} = \check{z} \rrbracket_{\mathbb{B}} = \sum \{ b \in \mathbb{B} \mid \exists z \in V \ b = \llbracket \dot{x} = \check{z} \rrbracket_{\mathbb{B}} \}.$$

上限の渡る範囲が \mathbb{B} の部分であることが明確になっている。 $\exists x \varphi$ の場合も同様なので、自分で書き下して納得してみるとよいだろう。

このように $V^{\mathbb{B}}$ に「真偽値」によるそれらしい意味論を与えたが、前回までに導入した証明体系が健全であることを見ておこう。我々は公式の証明体系としてシーケント計算を導入したが、直観としては、 $\psi \vdash \psi$ が LK で証明可能なら、 $\llbracket \varphi \rrbracket \leq \llbracket \psi \rrbracket$ が成り立つということを示したい。

補題 2.1. Γ, Δ を自由変数が x_0, \dots, x_{n-1} しか含まない \mathcal{FL} -論理式の有限集合とする。このとき、 $\Gamma \vdash \Delta$ が LK で証明可能なら、任意の $\sigma_0, \dots, \sigma_{n-1} \in V^{\mathbb{B}}$ について $\prod_{\varphi(\bar{x}) \in \Gamma} \llbracket \varphi(\bar{\sigma}) \rrbracket_{\mathbb{B}} \leq \sum_{\psi(\bar{x}) \in \Delta} \llbracket \psi(\bar{\sigma}) \rrbracket_{\mathbb{B}}$ が成り立つ。

証明 証明図の段数に関する帰納法により示す。論理公理のうち $A \vdash A$ および $\perp \vdash \emptyset$ が $V^{\mathbb{B}}$ で成り立つことは明らか。等号公理は $V^{\mathbb{B}}$ -階数に関する帰納法で示せる。

一般の場合について示す。最後に使われた規則について場合分けする。以下、 Γ を論理式の有限集合とするとき、 $\prod[\Gamma] := \prod \{ \llbracket \varphi \rrbracket \mid \varphi \in \Gamma \}$, $\sum[\Gamma] := \sum \{ \llbracket \varphi \rrbracket \mid \varphi \in \Gamma \}$ と略記する。弱化規則は明らか。

(CUT) : 以下の形の推論図である：

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta, \varphi \quad \varphi, \Theta \vdash \Xi}{\Gamma, \Theta \vdash \Delta, \Xi} \text{ (CUT)}$$

帰納法の仮定は次の通り：

$$\prod[\Gamma] \leq \sum[\Delta] + \llbracket \varphi \rrbracket, \quad \llbracket \varphi \rrbracket \cdot \prod[\Theta] \leq \sum[\Xi]$$

しかるに：

$$\begin{aligned} \prod[\Gamma] \cdot \prod[\Theta] &\leq (\sum[\Delta] + \llbracket \varphi \rrbracket) \cdot \prod[\Theta] && \text{(帰納法の仮定)} \\ &= \sum[\Delta] \cdot \prod[\Theta] + \llbracket \varphi \rrbracket \cdot \prod[\Theta] && \text{(和・積の分配法則)} \\ &\leq \sum[\Delta] \cdot \prod[\Theta] + \sum[\Xi] && \text{(帰納法の仮定)} \\ &\leq \sum[\Delta] + \sum[\Xi] && \text{(+) の単調性} \end{aligned}$$

(\rightarrow L):

$$\frac{\Gamma \vdash \Delta, \varphi \quad \psi, \Theta \vdash \Xi}{\varphi \rightarrow \psi, \Gamma, \Theta \vdash \Delta, \Xi} \text{ (\rightarrow L)}$$

CUT をちょっと変えればできる。

(\rightarrow R):

$$\frac{\varphi, \Gamma \vdash \Delta, \psi}{\Gamma \vdash \Delta, \varphi \rightarrow \psi} \text{ (\rightarrow R)}$$

帰納法の仮定は次の通りである：

$$\varphi \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket \leq \sum \llbracket \Delta \rrbracket + \llbracket \psi \rrbracket$$

から次を示せばよい：

$$\llbracket \Gamma \rrbracket \leq \sum \llbracket \Delta \rrbracket + \llbracket \varphi \rightarrow \psi \rrbracket$$

しかるに、

$$\begin{aligned} \prod \llbracket \Gamma \rrbracket &= \llbracket \varphi \rrbracket \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket + (-\llbracket \varphi \rrbracket) \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket && (\text{Boole 代数の基本法則}) \\ &\leq \llbracket \varphi \rrbracket \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket + (-\llbracket \varphi \rrbracket) && (+ \text{ の単調性}) \\ &\leq \prod \llbracket \Delta \rrbracket + \llbracket \psi \rrbracket + (-\llbracket \varphi \rrbracket) && (\text{帰納法の仮定}) \\ &= \sum \llbracket \Delta \rrbracket + \llbracket \varphi \rightarrow \psi \rrbracket && (\llbracket \varphi \rightarrow \psi \rrbracket \text{ の定義}) \end{aligned}$$

よって OK。

($\exists L$): $x \notin \text{FV}(\Gamma) \cup \text{FV}(\Delta)$ とする。

$$\frac{\varphi(x), \Gamma \vdash \Delta}{\exists x \varphi(x), \Gamma \vdash \Delta} (\exists L)$$

ここで帰納法の仮定が非自明になる。任意の $\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}$ について以下が成り立つ、というのが帰納法の仮定である：

$$\varphi(\dot{x}) \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket \leq \sum \llbracket \Delta \rrbracket$$

\sum は単調なので、両辺を \dot{x} を渡って上限を取れば：

$$\sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \{ \varphi(\dot{x}) \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket \} \leq \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \sum \llbracket \Delta \rrbracket$$

しかし、仮定より変数 x は Γ, Δ に自由に現れないので結局次を得る：

$$\llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket = \left\{ \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \varphi(\dot{x}) \right\} \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket = \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \{ \varphi(\dot{x}) \cdot \prod \llbracket \Gamma \rrbracket \} \leq \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \sum \llbracket \Delta \rrbracket = \sum \llbracket \Delta \rrbracket.$$

($\exists R$): アタリマエ。 □

演習 2.1. 省略したケースを補い、上の証明を完成させよ。

補題 2.2. 以下が成り立つ：

1. $(\dot{x}, b) \in \dot{A} \implies b \leq \llbracket \dot{x} \in \dot{A} \rrbracket$.
2. $\llbracket \exists x \in \dot{A} \varphi(x) \rrbracket = \sum_{(\dot{x}, b) \in \dot{A}} b \cdot \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket$.
3. $\llbracket \forall x \in \dot{A} \varphi(x) \rrbracket = \prod_{(\dot{x}, b) \in \dot{A}} (-b + \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket)$.

証明 (1): $\llbracket \dot{x} = \dot{x} \rrbracket = 1$ なので明らか。

(2) が言えれば (3) は補元を取れば明らかなので、(2) を示す。しかるに、

$$\begin{aligned}
\llbracket \exists x \in \dot{A} \varphi(x) \rrbracket &= \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \llbracket \dot{x} \in \dot{A} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket && (\text{by definition}) \\
&= \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} b \cdot \llbracket \dot{x} = \dot{z} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket && (\text{定義、分配則}) \\
&\leq \sum_{\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}} \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} b \cdot \llbracket \varphi(\dot{z}) \rrbracket && (\text{等号公理}) \\
&= \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} b \cdot \llbracket \varphi(\dot{z}) \rrbracket \\
&\leq \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} \llbracket \dot{z} \in \dot{A} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi(\dot{z}) \rrbracket && (1) \\
&\leq \sum_{\dot{z} \in V^{\mathbb{B}}} \llbracket \dot{z} \in \dot{A} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi(\dot{z}) \rrbracket && (\text{上限の範囲が広がっただけ})
\end{aligned}$$

よって示せた。 \square

系 2.3.

1. $\llbracket \check{x} \in \check{V} \rrbracket = 1$
2. $\llbracket \exists x \in \check{V} \varphi(x) \rrbracket = \sum_{x \in V} \llbracket \varphi(\check{x}) \rrbracket$
3. $\llbracket \forall x \in \check{V} \varphi(x) \rrbracket = \prod_{x \in V} \llbracket \varphi(\check{x}) \rrbracket$

以上から、 $V^{\mathbb{B}}$ は少なくとも演繹について閉じていることがわかり、特に三段論法（というか Modus Ponens）を自由に使ってよいことがわかった。

我々の目標は、強制法により ZFC の新しいモデルをつくることであった。なので、 V で ZFC が成り立つなら、 $V^{\mathbb{B}}$ の中でも ZFC が成り立つことを示すのが当面の目標である。

結論から言えば、ZF や ZFC の公理は、基礎モデル \check{V} で成り立つのなら $V^{\mathbb{B}}$ でも成り立つ。逆に言えば、 $V^{\mathbb{B}}$ で成り立つ公理は、 \check{V} の性質に依存する。この事を念頭に、 $V^{\mathbb{B}}$ の中で \check{V} がどう見えているかを調べてみよう。まず、 \check{V} は V と「全く同じ命題を満たす」ことがわかる：

定理 2.4. ZF- 論理式 $\varphi(x_0, \dots, x_{n-1})$ と $a_0, \dots, a_{n-1} \in V$ について、以下が成り立つ：

1. $\llbracket \varphi(\check{a}_0, \dots, \check{a}_{n-1}) \rrbracket_{\mathbb{B}} \in \{0, 1\}$.
2. $V \models \varphi(a_0, \dots, a_{n-1}) \iff V^{\mathbb{B}} \models \varphi^{\check{V}}(\check{a}_0, \dots, \check{a}_{n-1})$.

証明 論理式の複雑性に関する帰納法。非自明なので $\exists x \varphi(x)$ の場合だけ示す。

$V \models \exists x \varphi(x)$ とすると、 V は普通の二値モデルなので $x \in V$ で $V \models \varphi(x)$ を満たすものがとれる。すると、帰納法の仮定より $V^{\mathbb{B}} \models \varphi^{\check{V}}(\check{x})$ が成り立つ。よって $\check{x} \in \check{V} \subseteq V^{\mathbb{B}}$ より

$$1 = \llbracket \varphi^{\check{V}}(\check{x}) \rrbracket = \llbracket \check{x} \in \check{V} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi^{\check{V}}(\check{x}) \rrbracket \leq \sum_{\dot{x}} \left\{ \llbracket \dot{x} \in \check{V} \rrbracket \cdot \llbracket \varphi^{\check{V}}(\dot{x}) \rrbracket_{\mathbb{B}} \right\} = \llbracket \exists x \in \check{V} \varphi(x) \rrbracket$$

となるのでよい。

逆向きを示す： $\llbracket \exists x [x \in \check{V} \wedge \varphi(x)] \rrbracket = 1$ とする。この時系 2.3 から：

$$1 = \llbracket \exists x \in \check{V} \varphi(x) \rrbracket = \sum_{x \in V} \llbracket \varphi(\check{x}) \rrbracket$$

よって、ある $x \in V$ が存在し、 $\llbracket \varphi^{\check{V}}(x) \rrbracket > 0$ となる。すると、帰納法の仮定より $\llbracket \varphi^V(\check{x}) \rrbracket = 1$ となり、再び帰納法の仮定から $V \models \varphi(x)$ が成り立つ。よって $V \models \exists x \varphi(x)$ を得る。 \square

演習 2.2. 残りのケースを補い、証明を完成させよ。

系 2.5. $V \models \text{ZF} \iff \check{V} \models \text{ZF}$ 。また、 $V \models \text{AC} \iff \check{V} \models \text{AC}$ 。

定理 2.6. $V^{\mathbb{B}} \models [\check{V}: \text{推移的クラス}]$ 。

証明 \dot{x}, \dot{y} を任意に取れば、

$$\begin{aligned} \llbracket \dot{x} \in \dot{y} \in \check{V} \rrbracket &= \llbracket \dot{x} \in \dot{y} \rrbracket \cdot \sum_{w \in V} \llbracket \dot{y} = \check{w} \rrbracket && (\text{系 2.3 より}) \\ &= \sum_{w \in V} \llbracket \dot{x} \in \dot{y} \rrbracket \cdot \llbracket \dot{y} = \check{w} \rrbracket && (\text{分配則}) \\ &\leq \sum_{w \in V} \llbracket \dot{x} \in \check{w} \rrbracket && (\text{等号公理}) \\ &= \llbracket \dot{x} \in \check{V} \rrbracket && (\text{系 2.3 より}) \end{aligned}$$

よって $V^{\mathbb{B}} \models [\check{V}: \text{推移的クラス}]$ が示せた。 \square

2.1 V と $V^{\mathbb{B}}$ で何が一致するのか：推移的クラスと Δ_1 -絶対性

さて、以上で $V^{\mathbb{B}}$ の中には \check{V} という V の現し身があり、 V と \check{V} で真偽は一致することがわかった。特に、 $V^{\mathbb{B}}$ も \check{V} も ZF のモデルになっているようだが、両者の間でどんな概念が常に一致するのだろうか？

大事なのは、前節最後の定理が示したように $V^{\mathbb{B}}$ が \check{V} の推移的クラスになっていることである。十分に強い ZF の推移的モデルの間では、色々な概念が一致する（絶対的である）ことがわかる。本節では、主に Δ_1 と呼ばれる論理式のクラスで表現できる概念が、 V と $V^{\mathbb{B}}$ の間で一致することを見る。特に、自然数や有限性、順序数、整礎性、「対であること」「関数であること」などといった基本的な概念が V と $V^{\mathbb{B}}$ で一致することを確認する。

定義 2.5 (Levy 階層). 論理式の階層 $\Delta_0 = \Pi_0 = \Sigma_0 \subsetneq \Delta_1 \subsetneq \Pi_1, \Sigma_1 \subsetneq \Delta_2 \subsetneq \dots$ を次のように定める：

- $\exists x \in t$ の形の量化子を有界であるという。
- 全ての量化子が有界な論理式を Δ_0 -論理式と呼ぶ。 $\Pi_0 = \Sigma_0 = \Delta_0$ とする（が、あまりこの記号は用いられない）。
- Π_n -論理式 φ について、 $\exists \bar{x} \varphi$ の形の論理式を Σ_{n+1} -論理式と呼ぶ。
- Σ_n -論理式 ψ について、 $\forall \bar{x} \psi$ の形の論理式を Π_{n+1} -論理式と呼ぶ。
- 論理式 χ が理論 T 上 Δ_n であるとは、 Σ_n -論理式 φ と Π_n -論理式 φ が存在して、 $T \vdash \varphi \leftrightarrow \chi \leftrightarrow \psi$ が成り立つこと。

Γ を論理式のクラスとすると、集合 x が Γ -概念であるとは、 x が Γ -論理式で定義できることである。

論理式 $\varphi(x, y)$ が関数 f を定めるとき、つまり $\forall x \exists! y \varphi(x, y)$ が成り立つとき、関数 f がモデル $M \subseteq N$ の間で絶対的であるとは、 f は M, N どちらで見ても関数であり、 $\text{dom}^M(f) \subseteq \text{dom}^N(f)$ かつ任意の $x \in M$ について $f^M(x) = f^N(x)$ が成り立つことである。

注意 2.4. Δ_0 -論理式で定義できる概念は、つまり与えられたパラメータの範囲だけ調べれば真偽が決定できるような局所的な性質である。なので、与えられた二つの集合論のモデル $M \subseteq N$ の \in -関係が小さい方のモデルの範囲で見たときに完全に一致するのなら、 Δ_0 -論理式の真偽（そして任意の Δ_0 -概念）は M と N の間で一致してくれそうである。この「 \in -関係が小さいモデルで一致する」というのを精緻化したのが、次の「推移的モデル」の概念である：

定義 2.6. クラス M が推移的（transitive）であるとは、 $x \in y \in M \implies x \in M$ を満たすことである。 M が特に集合論のモデルであるとき、そのような M を推移的モデル（transitive model）と呼ぶ。

定理 2.7. $M \subseteq N$ を集合論の推移的モデルとする。このとき、任意の Δ_0 -概念は M, N の間で絶対的である。

証明 論理式の複雑性に関する帰納法。

□

Δ_0 -概念には次のようなものが挙げられる：

定理 2.8. 次の概念はすべて Δ_0 である：

1. $x = \emptyset$ 。つまり、 $x = 0$ 。
2. $x \subseteq y$ 。
3. 「 x は推移的」
4. $x = \{y, z\}$
5. $x = \langle y, z \rangle$
6. $x = y \cup z$
7. $x = y \cap z$
8. $x = y \cup \{y\}$ 。特に、 $x = x + 1$
9. 任意の遺伝的有限集合 S について、「 $x = S$ 」。

概念の Δ_0 -性を判定するには、次の定理が役に経つ：

補題 2.9. 和集合公理の下で、 $k < \omega$ および Δ_0 -論理式 φ について $\exists x \in \bigcup^{(k)} y \varphi$ も Δ_0 で表現可能。ただし：

$$\bigcup^{(0)} x = x, \quad \bigcup^{(k+1)} x = \bigcup \left(\bigcup^{(k)} x \right).$$

系 2.10. 以下は BST で Δ_0 -概念であり、従って BST の推移的モデルで絶対的：

- x は順序対、 x は非順序対
- x は関数
- x は関係
- x は順序数
- x は後続順序数
- x は極限順序数
- x は自然数
- $x = \omega$
- $x \subseteq \omega$
- $x = \bigcup y$
- $y = \text{dom}(f), y = \text{cod}(f)$
- f は全単射
- f は関数で、 $x \in \text{dom}(f)$ で $f(x) = y$
- 次で定義した場合の「 x は有限集合」： $\exists n < \omega \exists f \ f : n \rightarrow x$ 全単射
- 次で定義した場合の「 x は遺伝的有限」：

$$\exists n < \omega \exists t \in \text{HF} \exists f : n \rightarrow t \ [f : \text{全単射} \wedge t : \text{推移的集合} \wedge x \subseteq t]$$

定義 2.7. 構造 $\langle \text{HF}, \in \rangle$ 上で定義される n -項関係を算術的 (arithmetical) と言う。

Δ_1 -概念も絶対である：

補題 2.11. Δ_1 -概念は BST の推移モデルについて絶対的である。

証明 $\varphi(x), \psi(x)$ を Δ_0 -論理式とし、 $T \vdash \forall x \varphi(x) \leftrightarrow \chi \leftrightarrow \exists x \psi(x)$ とする。 $M \subseteq N \models T$ を推移的モデルとする。 $M \models \chi$ から $N \models \chi$ を示すには $\exists x \psi(x)$ との同値性と $\psi(x)$ の Δ_0 -性を使って M での証拠が N でも証拠になっていることからわかる。逆に $N \models \chi$ から $M \models \chi$ を示すには、 $N \models \forall x \varphi(x)$ と $M \subseteq N$ より任意の $x \in M$ についても $N \models \varphi(x)$ が言え、 Δ_0 からこれが M でも成り立つことからわかる。 \square

注意 2.5. Δ_1 -論理式は、HF に制限すると決定可能命題や計算可能関数のクラスと一致する。よって、上の命題から次が言える：

系 2.12. 推移的モデルの間で、計算可能関数は絶対的。

Δ_1 -絶対性のほかの重要な応用は、整礎性の絶対性を保証してくれることである：

補題 2.13. $M \subseteq N$ を ZF - P の推移的モデル、 $R \in M$ を $A \in M$ 上の二項関係とすると、 R は A 上の整礎関係は絶対的。

証明 整礎関係を「 A の任意の空でない部分集合が R - 極小元を持つ」という形で定式化すれば、これは Π_1 である：

$$\forall X [\emptyset \neq X \subseteq A \implies \exists x \in X \forall y \in X \neg yRx]$$

他方で、整礎ならばランク関数 $\rho : A \rightarrow \text{On}$ が取れるのだった。とくに、 $x R y \implies \rho(x) < \rho(y)$ を満たす関数 $f : A \rightarrow \text{On}$ が必ずとれ、またこのような f が存在すれば R は必ず整礎となる。順序数の概念は絶対的であったので、以上を踏まえれば R の整礎性は次の Σ_1 - 論理式と同値である：

$$\exists f \exists \alpha \in \text{On} [f : A \rightarrow \alpha \wedge \forall x, y \in A \ x R y \implies f(x) < f(y)]$$

以上より、 R の整礎性は Δ_1 - 概念なので、推移的モデルについて絶対的である。 \square

絶対的な論理式・整礎関係を使って超限帰納法で定義できるような概念も推移モデルの間で絶対的である：

補題 2.14 (超限帰納法で定義される関数の絶対性). $M \subseteq N$ を ZF - P の推移的モデル、 A を定義可能なクラス、 $G(x, y)$ が定義可能な関数、 R を A 上で set-like な整礎関係（つまり、任意の $x \in A$ について $x \downarrow = \{y \mid y R x\}$ が集合であるような整礎関係）とする。更に、 G, A, R は M, N の間で絶対的であるとする。ここで、関数 $F(x)$ が $F(x) := G(x, F \upharpoonright (x \downarrow))$ を満たす超限帰納法で定義された関数のとき、 F も M と N の間で絶対的である。

証明 $F^M(a) \neq F^N(a)$ となるような最小な a を取れば $(F \upharpoonright a \downarrow)^M = (F \upharpoonright a \downarrow)^N$ となる。すると G, R, A の絶対性より $F^M(a) = G^M(a, F \upharpoonright (a \downarrow)) = G^N(a, F \upharpoonright (a \downarrow))$ となり矛盾。 \square

これまでの議論の系として以下の絶対性が得られる：

補題 2.15. 以下は ZF - P の推移的モデルの間で絶対的：

1. 二引数関数 $x, y \mapsto x \cup y$ および $x, y \mapsto x \cap y$
2. 集合のランク関数 $x \mapsto \rho(x)$
3. 単項関数 $x \mapsto \bigcup x$ および $x \mapsto \bigcap x$ (ただし $x = \emptyset$ のときは未定義とする)。
4. 推移閉包関数 $x \mapsto \text{trcl}(x)$
5. 対関数 $x, y \mapsto \langle x, y \rangle$ および $x, y \mapsto \{x, y\}$ 。
6. 二引数関数 $x, y \mapsto x \times y$ 。
7. 任意の算術的關係
8. \mathcal{L} を言語とすると、 φ は \mathcal{L} - 論理式」「 $M \models \varphi$ 」

以上を踏まえれば、 V^B と V の間で上で述べたような概念は全て一致する。

系 2.16. 上で挙げた概念はぜんぶ V と V^B の間で絶対的。特に大事なものは：

1. 順序数の概念。
2. 集合の和・直積・共通部分、順序・非順序対。
3. 自然数、有限集合、遺伝的有限集合の概念。決定可能な命題・計算可能な関数。
4. 順序数の算術。

5. 関係の整礎性、整列性、超限再帰で定義された関数・関係。

演習 2.3. 本節で触れた概念が、実際に Δ_0 なり Δ_1 なりその超限再帰なりで書けていることを確かめよ。

3 強制法定理： $V^{\mathbb{B}}$ が ZFC のモデルとなること

さて、かねての宣言通り、いよいよ $V^{\mathbb{B}}$ が集合論の公理系を満たしているを見ていく。

定理 3.1. $V \models \text{ZF}$ なら $V^{\mathbb{B}} \models \text{ZF}$

証明 内包、外延性、無限、和、対、冪、基礎、収集公理が成り立つことを示す。本証明中では、選択公理は使わない。

外延性は $=$ や \in の解釈の定義から明らかに成り立つ。

まずは**内包公理**を示す。というのも、この先 $f(x) = \dot{y}$ となるような \dot{y} をつくるときに、 $[f(\dot{x}) \subseteq \dot{p}]$ となるような \dot{p} を作るだけで済み、経済的だからである。 $\varphi(x)$ を $V^{\mathbb{B}}$ をパラメータに持つ \mathcal{FL} - 論理式、 \dot{A} を \mathbb{B} - 名称とする。名称 \dot{C} で任意の \dot{x} について次が成り立つものを取ればよい：

$$[\dot{x} \in \dot{C}] = [\varphi(\dot{x}) \wedge \dot{x} \in \dot{A}].$$

結論から言えば、次で十分である：

$$\dot{C} := \{ \langle \dot{z}, [\dot{z} \in \dot{A} \wedge \varphi(\dot{z})] \rangle \mid \dot{z} \in \text{dom}(\dot{A}) \}.$$

実際：

$$\begin{aligned} [\dot{x} \in \dot{C}] &= \sum_{\dot{z} \in \text{dom}(\dot{A})} [\dot{x} = \dot{z}] \cdot [\dot{z} \in \dot{A} \wedge \varphi(\dot{z})] && \text{(by definition)} \\ &\leq [\dot{x} \in \dot{A} \wedge \varphi(\dot{x})] && \text{(等号公理)} \\ &= \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} b \cdot [\dot{x} = \dot{z}] \cdot [\varphi(\dot{x})] && \text{(by definition)} \\ &\leq \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{A}} [\dot{z} \in \dot{A}] \cdot [\dot{x} = \dot{z}] \cdot [\varphi(\dot{x})] && (\because (\dot{y}, c) \in \dot{A} \implies c \leq [\dot{y} \in \dot{A}]) \\ &= \sum_{\dot{z} \in \text{dom}(\dot{A})} [\dot{z} \in \dot{A}] \cdot [\dot{x} = \dot{z}] \cdot [\varphi(\dot{x})] && (b \text{ が右辺に現れないので}) \\ &\leq \sum_{\dot{z} \in \text{dom}(\dot{A})} [\dot{z} \in \dot{A}] \cdot [\varphi(\dot{z})] \cdot [\dot{x} = \dot{z}] && \text{(等号公理、冪等性、交換則)} \\ &= \sum_{(\dot{z}, b) \in \dot{C}} b \cdot [\dot{x} = \dot{z}] && (C \text{ の定義}) \\ &= [\dot{x} \in \dot{C}] && \text{(by definition)} \end{aligned}$$

よって $[\dot{x} \in \dot{C}] \leq [\dot{x} \in \dot{A} \wedge \varphi(\dot{x})] \leq [\dot{x} \in \dot{C}]$ が言え、 \dot{C} が \dot{A} と $\varphi(x)$ についての内包公理の証拠となることがわかった。

和、対、冪については、 $\dot{x}, \dot{y} \in V^{\mathbb{B}}$ に対して $\bigcup \dot{x}$ や $\{\dot{x}, \dot{y}\}$ 、 $\mathcal{P}(\dot{x})$ として振る舞う名前を直接作ってやればよい。特に、対はとても簡単である（ヒント：1 を使おう）。

例として、ここでは**冪集合公理**が成り立つことを見よう。 \dot{x} が任意に与えられたときに、 $\llbracket \mathcal{P}(\dot{x}) = \dot{p} \rrbracket = 1$ となるような \dot{p} をでっちあげる。**内包公理**を既に示してあるので、 $\llbracket \mathcal{P}(\dot{x}) \subseteq \dot{p} \rrbracket = 1$ となるような \dot{p} さえ取れば十分である。これは次のようにすればよい：

$$\dot{p} := \{ (\dot{z}, \llbracket \dot{z} \subseteq \dot{x} \rrbracket) \mid \dot{z} \subseteq \text{dom}(\dot{x}) \times \mathbb{B} \}.$$

そこで \dot{z} を任意に取り、 $\llbracket \dot{z} \subseteq \dot{x} \rrbracket \leq \llbracket \dot{z} \in \dot{p} \rrbracket$ を示そう。ここで、上の内包公理の証明で $\dot{A} = \dot{x}$ 、 $\varphi(z) \equiv z \in \dot{z}$ として得られるものを \dot{z}' とおくと、 $\llbracket \dot{z}' = \dot{z} \cap \dot{x} \rrbracket = 1$ となっている。よって、特に $\llbracket \dot{z} \subseteq \dot{x} \rrbracket = \llbracket \dot{z} = \dot{z}' \rrbracket$ となる。他方、取り方より $\llbracket \dot{z}' \subseteq \dot{x} \rrbracket = 1$ なので、定義より $(\dot{z}', 1) \in \dot{p}$ である。以上を踏まえれば、

$$\begin{aligned} \llbracket \dot{z} \subseteq \dot{x} \rrbracket &= \llbracket \dot{z} = \dot{z}' \rrbracket = 1 \cdot \llbracket \dot{z} = \dot{z}' \rrbracket \\ &\leq \sum_{(\dot{w}, b) \in \dot{p}} b \cdot \llbracket \dot{z} = \dot{w} \rrbracket = \llbracket \dot{z} \in \dot{p} \rrbracket \end{aligned}$$

よって示せた。

無限公理は ω がそのまま証拠となる。

基礎の公理を示す。 \dot{A} を任意にとり $\llbracket \dot{A} \neq \emptyset \rightarrow \exists z \in \dot{A} \forall x \in z \ x \notin \dot{A} \rrbracket = 1$ を示せばよい。本質的には、 \dot{A} の \mathbb{B} -階数最小の名称をとってくればよいだけだが、必ずしも全ての $\text{dom}(\dot{A})$ の元が確率 1 で \dot{A} に含まれるわけではないので、すこし工夫が必要になる。そこで、

$$\llbracket \dot{A} \neq \emptyset \rightarrow \exists z \in \dot{A} \forall x \in z \ x \notin \dot{A} \rrbracket < 1$$

として矛盾をしめす。このとき補元をとれば、

$$b := \llbracket \dot{A} \neq \emptyset \wedge \forall z \in \dot{A} \exists x \in z \ x \in \dot{A} \rrbracket > 0$$

である。このとき、 \dot{z} で $\llbracket \dot{z} \in \dot{A} \rrbracket \cdot b > 0$ となるものが存在する。そこで、 \dot{z} をそのような中で $V^{\mathbb{B}}$ -階数最小のものとする。すると、

$$\begin{aligned} 0 &< \llbracket \dot{z} \in \dot{A} \rrbracket \cdot b \cdot b \leq \llbracket \exists x \in \dot{z} \ x \in \dot{A} \rrbracket \cdot b \\ &= \sum_{(\dot{x}, c) \in \dot{z}} c \cdot \llbracket \dot{x} \in \dot{A} \rrbracket \cdot b && (\text{補題 2.2 の (2)、分配則}) \\ &\leq \sum_{\dot{x} \in \text{dom}(\dot{z})} b \cdot \llbracket \dot{x} \in \dot{A} \rrbracket && (\sum \text{の単調性}) \end{aligned}$$

とくに $b \cdot \llbracket \dot{x} \in \dot{A} \rrbracket > 0$ となる $\dot{x} \in \text{dom}(\dot{z})$ が存在する。しかし、 $\dot{x} \in \text{dom}(\dot{z})$ より $\text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{x}) < \text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{z})$ となり、これは \dot{x} の \mathbb{B} -階数の極小性に矛盾する。

収集公理を示す。つまり、 $\varphi(x, y)$ を \mathcal{FL} -論理式、 \dot{X} を \mathbb{B} -名称としたとき、次を満たすような \dot{Y} の存在を示せばよい：

$$\llbracket \forall x \in \dot{X} [(\exists y \ \varphi(x, y)) \rightarrow (\exists y \in \dot{Y} \ \varphi(x, y))] \rrbracket = 1.$$

このために、 V での置換公理を使う。そこで、次の論理式 $\Phi(x, y)$ を考える：

$$\Phi(x, b, y) := x \in \text{dom}(\dot{X}) \wedge b \in \mathbb{B} \wedge y \in V^{\mathbb{B}} \wedge \llbracket \varphi(x, y) \rrbracket = b$$

V での置換公理を Φ と $\text{dom}(\dot{X}) \times \mathbb{B}$ に適用すれば、集合 $S \subset V^{\mathbb{B}}$ で次を満たすものがとれる：

$$\forall \dot{x} \in \text{dom}(\dot{X}) \forall b \in \mathbb{B} [\exists \dot{y} \llbracket \varphi(\dot{x}, \dot{y}) \rrbracket = b \implies \exists y \in S \llbracket \varphi(\dot{x}, y) \rrbracket = b]$$

そこで $\dot{Y} := \{(\dot{y}, 1) \mid \dot{y} \in S\}$ において、これが求めるものであることを示す。そこで適当に $\dot{x} \in \text{dom}(\dot{X})$ を取り、次を示せばよい：

$$\llbracket \exists y \varphi(\dot{x}, y) \rrbracket \leq \llbracket \exists y \in \dot{Y} \varphi(\dot{x}, y) \rrbracket$$

これは結局次の不等式と同値である：

$$\sum_{\dot{y} \in V^{\mathbb{B}}} \llbracket \varphi(\dot{x}, \dot{y}) \rrbracket \leq \sum_{\dot{y} \in \dot{Y}} \llbracket \varphi(\dot{x}, \dot{y}) \rrbracket$$

しかし、 $\text{dom}(\dot{Y})$ は $\llbracket \varphi(\dot{x}, \dot{y}) \rrbracket$ のありうる値すべてを実現するのに十分な元を含むので、両辺は明らかに一致する。 \square

演習 3.1. 省略した部分を埋め、証明を完成させよ。また、余力があれば、証明中で定義した名称をどう修正すると \mathbb{B} が一般の擬順序の場合でも証明が通るようになるか考えよ。

強制法により ZF が保たれるのと同じように、AC も強制法により保たれる¹⁾：

定理 3.2. $V \models \text{AC}$ なら $V^{\mathbb{B}} \models \text{AC}$

証明 $V^{\mathbb{B}}$ で整列可能定理が成立することを示せばよい。以下、 \dot{X} を一つ固定し、 $\llbracket \dot{X} : \text{整列可能} \rrbracket = 1$ を示していく。特に、ある順序数 γ と写像 $f : \gamma \rightarrow S$ があって、 $\dot{X} \subseteq f[\gamma]$ となっていることが示せればよい。

いま、 V で選択公理を仮定しているので、順序数 γ を適当にとり、 $\text{dom}(\dot{X}) = \{\dot{x}_\xi \mid \xi < \gamma\}$ と並べておく。このとき、 \dot{f} を以下のように定める：

$$\dot{f} := \{(\text{otp}(\check{\xi}, \dot{x}_\xi), 1) \mid \xi < \gamma\}.$$

ただし、 $\text{otp} : V^{\mathbb{B}} \times V^{\mathbb{B}} \rightarrow V^{\mathbb{B}}$ は二つの \mathbb{B} -名称 \dot{x}, \dot{y} が与えられたときに、その非順序対の名称を返すような関数である。

いま、系 2.10 より $\check{\gamma}$ は $V^{\mathbb{B}}$ でも順序数であることに注意しよう。また定め方より次が成り立っている：

$$\llbracket \dot{f} : \gamma \rightarrow V^{\mathbb{B}} \rrbracket = 1, \quad \forall \xi < \gamma \llbracket \dot{f}(\check{\xi}) = \dot{x}_\xi \rrbracket = 1.$$

更に、 \dot{x} を任意に取れば、定め方から明らかに

$$\begin{aligned} \llbracket \dot{x} \in \dot{X} \rrbracket &= \sum_{\xi < \gamma, (\dot{x}_\xi, b) \in \dot{X}} b \cdot \llbracket \dot{x}_\xi = \dot{x} \rrbracket \\ &\leq \sum_{\xi < \gamma} \llbracket \dot{x}_\xi = \dot{x} \rrbracket \\ &= \sum_{\xi < \gamma} \llbracket \dot{x}_\xi = \dot{x} \rrbracket \cdot \llbracket \dot{f}(\check{\xi}) = \dot{x}_\xi \rrbracket \\ &= \sum_{\xi < \gamma} \llbracket \dot{f}(\check{\xi}) = \dot{x} \rrbracket \end{aligned}$$

1) 逆に $\text{ZF} + \neg \text{AC}$ のモデルから AC を強制できるか？という問題は、 V が特定の形をしていない限り巨大基数公理とかかわってくる問題になる。選択公理があるとかなり強制法が便利になるかわり、そのものを強制しようとおもうと大変なのである。

$$= \llbracket \dot{x} \in f[\gamma] \rrbracket$$

よって示せた。 \square

補題 3.3. V で $\dot{x} \in V^{\mathbb{B}}$ が V で $\text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{x}) = \alpha$ を満たすとき、 $V^{\mathbb{B}} \models \rho^{V^{\mathbb{B}}}(\dot{x}) \leq \alpha$

証明 \mathbb{B} -階数に関する帰納法で示す。帰納法の仮定は、任意の $\xi < \gamma$ について $\forall \dot{z} \in V_{\xi+1}^{\mathbb{B}} \ V^{\mathbb{B}} \models \rho^{V^{\mathbb{B}}}(\dot{z}) \leq \xi$ である。 $\text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{x}) = \xi$ を取る。このとき定義より、

$$V^{\mathbb{B}} \models \rho(\dot{x}) = \sup\{\rho(\dot{y}) + 1 \mid \dot{y} \in \dot{x}\}.$$

である。すると、帰納法の仮定より任意の $\dot{y} \in \text{dom}(\dot{x})$ について $V^{\mathbb{B}} \models \text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{y}) < \gamma$ である。よってとくに、

$$\llbracket \forall \dot{y} \in \dot{x} \ \rho^{V^{\mathbb{B}}}(\dot{y}) \leq \xi \rrbracket = \prod_{(\dot{y}, b) \in \dot{x}} (-b + \llbracket \text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{y}) < \gamma \rrbracket) = \prod_{(\dot{y}, b) \in \dot{x}} 1 = 1$$

今 $V^{\mathbb{B}}$ は ZF のモデルだったので、 $V^{\mathbb{B}} \models \rho(\dot{x}) \leq \gamma$ が従う。 \square

補題 3.4. $V^{\mathbb{B}} \models \text{On} \subseteq \check{V}$

証明 $\dot{\alpha}$ を \mathbb{B} -名称とし、 V で $\gamma := \text{rank}_{\mathbb{B}}(\dot{\alpha}) + 1$ とする。すると上の補題から $V^{\mathbb{B}} \models \rho(\dot{\alpha}) < \gamma$ である。順序数上の順序は \in と一致するので、これは $V^{\mathbb{B}} \models \rho(\dot{\alpha}) \in \gamma$ ということである。

一方で、順序数 α について $\rho(\alpha) = \alpha$ が成り立つことは ZF の定理であるから、

$$\llbracket \dot{\alpha} \in \text{On} \rrbracket \leq \llbracket \dot{\alpha} = \rho(\dot{\alpha}) \in \check{\gamma} \in \check{V} \rrbracket \leq \llbracket \dot{\alpha} \in \check{V} \rrbracket$$

以上より $\llbracket \dot{\alpha} \in \text{On} \rightarrow \dot{\alpha} \in \check{V} \rrbracket = 1$ を得る。 \square

これまでの結果をまとめた次の定理が概ね「強制法定理」と呼ばれるものである。

定理 3.5 (強制法定理). $\mathbb{B} \in V$ を V における完備 Boole 代数とする。このとき次が成り立つ：

1. $V \models \text{ZF}$ ならば $V^{\mathbb{B}} \models \text{ZF}$ 。
2. $V \models \text{ZFC}$ ならば $V^{\mathbb{B}} \models \text{ZFC}$ 。
3. \check{V} は $V^{\mathbb{B}}$ の中で推移的なクラスであり、 $\text{On}^{V^{\mathbb{B}}} = \text{On}^{\check{V}}$ 。
4. V での真偽と $V^{\mathbb{B}}$ でみた \check{V} の真理は一致する。つまり、任意の ZF-論理式 $\varphi(x_0, \dots, x_{n-1})$ と $x_i \in V$ について：

$$V \models \varphi(x_0, \dots, x_{n-1}) \iff V^{\mathbb{B}} \models \varphi^{\check{V}}(\check{x}_0, \dots, \check{x}_{n-1}).$$

ところで、 \exists の $V^{\mathbb{B}}$ での解釈は上限で定義されていた。特に、 $V^{\mathbb{B}} \models \exists x \varphi(x)$ であった場合、 $\llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket > 0$ を満たすような \dot{x} は定義より直ちに取れる。つまり、「成り立ち得る」 \dot{x} 見付けることは容易い。一方で二値的 (Tarski) モデルの場合のように、 $V^{\mathbb{B}} \models \varphi(\dot{x})$ が成り立つようなただ一つの \dot{x} が取れるかは直ちには明らかではない。実は、選択公理の下でこれは常に成り立つ：

定理 3.6 (Maximal Principle). $V \models AC$ とする。 $\varphi(x)$ を \mathcal{FL} -論理式とした時、次を満たす \dot{x} が存在：

$$\llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket = \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket$$

これには次の補題を使う：

補題 3.7 (Mixing Lemma). \mathbb{B} を完備 Boole 代数とし、 $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{B}$ を反鎖、 $\langle \dot{x}_a \mid a \in \mathcal{A} \rangle$ を \mathcal{A} で添え字づけられた \mathbb{B} -名称の族とする。このとき、次を満たす名称 \dot{x} が存在する：

$$\forall a \in \mathcal{A} \quad a \leq \llbracket \dot{x} = \dot{x}_a \rrbracket.$$

証明 以下で定めればよい：

$$\dot{x} := \bigcup_{a \in \mathcal{A}} \{ (y, b \cdot a) \mid (y, b) \in \dot{x}_a \}$$

ここで、 \mathcal{A} は反鎖なので、

$$a \cdot a' = \begin{cases} a & a = a' \\ 0 & a \neq a' \end{cases}$$

が成り立つことに注意する。このとき \dot{x} を任意にとれば：

$$\begin{aligned} a \cdot \llbracket \dot{z} \in \dot{x} \rrbracket &= a \cdot \sum_{(w, b) \in \dot{x}} b \cdot \llbracket \dot{z} = w \rrbracket \\ &= \sum_{\substack{a' \in \mathcal{A} \\ (y, c) \in \dot{x}_{a'}}} a \cdot c \cdot a' \cdot \llbracket \dot{z} = y \rrbracket && \text{(定義と分配則)} \\ &= \sum_{(y, c) \in \dot{x}_a} a \cdot c \cdot \llbracket \dot{z} = y \rrbracket = a \cdot \sum_{(y, c) \in \dot{x}_a} c \cdot \llbracket \dot{z} = y \rrbracket && (a \cdot a' = a \cdot \delta_{a, a'}) \\ &= a \cdot \llbracket \dot{z} \in \dot{x}_a \rrbracket \end{aligned}$$

よって $a \leq \llbracket \dot{x} = \dot{x}_a \rrbracket$ が言えた。 \square

Proof of Maximal Principle. 定義より $\llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket \leq \llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket$ は任意の任意の \dot{x} について成り立つので、特に $\llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket \leq \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket$ を満たす \dot{x} を見付ければよい。また、 $\llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket = 0$ の時は自明なので、以下 $b := \llbracket \exists x \varphi(x) \rrbracket > 0$ として議論を進める。

いま、 $D := \{ \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket \mid \dot{x} \in V^{\mathbb{B}}, \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket > 0 \}$ とおけば、 $b = \sum D$ 、つまり D は b 以下で前稠密である。そこで、 $\mathcal{A} \subseteq D$ を $D \downarrow$ に含まれる中で極大な反鎖とすれば、 $\sum \mathcal{A} = \sum D = b$ である。更に、各 $a \in \mathcal{A}$ に対して \dot{x}_a を $\llbracket \varphi(\dot{x}) = a \rrbracket$ を満たすような \dot{x} の一つとして取る。

すると、Mixing Lemma より \dot{x} で任意の $a \in \mathcal{A}$ について $a \leq \llbracket \dot{x} = \dot{x}_a \rrbracket$ を満たすものが取れる。よって、

$$b = \sum \mathcal{A} = \sum_{a \in \mathcal{A}} \llbracket \varphi(\dot{x}_a) \rrbracket \leq \sum_{a \in \mathcal{A}} \llbracket \varphi(\dot{x}_a) \rrbracket \cdot \llbracket \dot{x} = \dot{x}_a \rrbracket = \sum_{a \in \mathcal{A}} \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket = \llbracket \varphi(\dot{x}) \rrbracket$$

\square

注意 3.1. Maximal Principle を完備 Boole 代数から擬順序に一般化した命題は、実は ZF 上選択公理と

同値になる。ことが知られている。この事は、5 で一般の擬順序による強制法が導入されたら、再び立ち返る。

4 Boole 値モデル $V^{\mathbb{B}}$ と (V, \mathbb{B}) - 生成的フィルター

定義 4.1. (V, \mathbb{B}) - 生成的フィルターの標準的な名称 \dot{G} を次で定める：

$$\dot{G} := \{ (\check{b}, b) \mid b \in \mathbb{B} \}.$$

また、 \mathbb{B} - 名称 \dot{x} について、超フィルター U による解釈 \dot{x}_U を以下で定める：

$$\dot{x}_U := \{ \dot{y}_U \mid \exists b \in U (\dot{y}, b) \in \dot{x} \}.$$

定理 4.1 (真理補題). φ を $V^{\mathbb{B}}$ の元をパラメータに持つ \mathcal{FL} - 論理式、 $b \in \mathbb{B}$ とする。

1. $b = \llbracket \check{b} \in \dot{G} \rrbracket$
2. $V^{\mathbb{B}} \models [\varphi \leftrightarrow \llbracket \check{\varphi} \rrbracket \in \dot{G}]$ 。よって特に $p \Vdash \varphi \iff V^{\mathbb{B}} \models [\check{p} \in \dot{G} \rightarrow \varphi]$

定義 4.2. \mathbb{P} を擬順序とする。

- $\mathbb{P}^+ := \{ p \in \mathbb{P} \mid \exists q \in \mathbb{P} [p \not\leq q] \}$.
- $p, q \in \mathbb{P}$ が両立する (compatible、記号： $p \parallel_{\mathbb{P}} q$) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \exists r \in \mathbb{P}^+ (r \leq p, q)$.
- p, q が両立しないとき、記号 $p \perp_{\mathbb{P}} q$ と書く。
- $D \subseteq \mathbb{P}^+$ が $p \in \mathbb{P}^+$ 以下で前稠密 (predense below p) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \forall q \leq p \exists r \in D (q \parallel_{\mathbb{P}} r)$.
- D が前稠密 (predense) $\stackrel{\text{def}}{\iff} D$ が $\mathbb{1}$ 以下で前稠密。
- $U \subseteq \mathbb{P}$ が開集合 $\stackrel{\text{def}}{\iff} c \leq b \in U \implies c \in U$.
- $D \subseteq \mathbb{P}^+$ が $p \in \mathbb{P}^+$ 以下で稠密 (dense below p) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \forall q \leq_{\mathbb{P}} p \exists r \in D (r \leq_{\mathbb{P}} q)$.
- D が稠密 (dense) $\stackrel{\text{def}}{\iff} D$ が $\mathbb{1}$ 以下で稠密。
- $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{P}^+$ が反鎖 (antichain) $\stackrel{\text{def}}{\iff}$ 任意の相異なる $p, q \in \mathcal{A}$ について $p \perp_{\mathbb{P}} q$.
- $\mathcal{A} \subseteq \mathbb{P}^+$ が極大反鎖 (maximal antichain) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \mathcal{A}$ は反鎖であり、包含関係 \subseteq について極大。
- \mathcal{F} を集合の族とする。 \mathbb{P} のフィルター $G \subseteq \mathbb{P}$ が \mathcal{F} - 生成的フィルター (\mathcal{F} -generic filter) である $\stackrel{\text{def}}{\iff}$ 任意の \mathbb{P} の前稠密集合 $D \in \mathcal{F}$ について $D \cap G \neq \emptyset$ 。特に、 M が $\mathbb{P} \in M$ なる十分強い (あるいは弱い) 集合論のモデルであるとき、 (M, \mathbb{P}) - 生成的フィルターとは、 $\{ A \in M \mid A \subseteq \mathbb{P} \}$ - 生成的フィルターのことを指す。

注意 4.1. 上の定義は一般の擬順序でも Boole 代数でも使えるように定義しているが、擬順序による強制法を考える場合は最小元を持たない場合が多く、ほとんどすべての例で $\mathbb{P}^+ = \mathbb{P}$ となっている。なので、

Boole 代数による強制法を明示的に考えているのではない限り、議論の上で \mathbb{P}^+ の元かどうかを気にする必要はほとんどない。一方、ランダム強制法などの場合は完備 Boole 代数による強制法を考えるので、そういう場合はちゃんと気にする必要がある。

補題 4.2. \mathbb{B} が Boole 代数とし、 $b, c \in \mathbb{B}$ のとき、以下が成り立つ：

1. $\mathbb{B}^+ = \{b \in \mathbb{B} \mid b > 0\}$.
2. $b \perp c \iff b \cdot c = 0$. また、 $b \parallel c \iff b \cdot c > 0$.
3. \mathbb{B} が D の上限 $\sum D$ を持つとき、 $D \subseteq \mathbb{B}$ が前稠密 $\iff \sum D = 1$

演習 4.1. 示せ。

補題 4.3. \mathbb{B} を Boole 代数とする。

1. $D \subseteq \mathbb{B}^+$ が前稠密 \iff 任意の $b \in \mathbb{B}^+$ について、 $d \in D$ で $d \parallel b$ となるものが取れる。
2. 極大反鎖は前稠密である。
3. 稠密集合は前稠密である。

注意 4.2. 稠密集合・前稠密集合は「ほとんど至るところ」で成り立つ普遍的な性質に対応していると思える。一方で、極大反鎖は完全な「場合分け」を与えていることに相当する。つまるところ、生成的フィルターとは、「ほとんどすべて」の元が満たすような性質は全部満たすような条件に対応しており、また次の補題で見るように、満たすべき場合分けが与えられればどの枝が選ばれているのか完全に決定するようなものである。この意味で、生成的フィルターは一般的な条件に対応している。

補題 4.4. \mathbb{B} を完備 Boole 代数とし、 M を $\mathbb{B} \in M$ となる十分強い集合論のモデル（選択公理、冪集合、対、和、分出公理あたりがあれば大丈夫）とする。このとき、次は同値：

1. G は (M, \mathbb{B}) -生成的フィルター。つまり、 G は M に属する任意の \mathbb{B} -前稠密集合と交わる。
2. 任意の \mathbb{B} -極大反鎖 $\mathcal{A} \in M$ について $\mathcal{A} \cap G \neq \emptyset$ 。
3. 任意の \mathbb{B} -稠密集合 $D \in M$ について $D \cap G \neq \emptyset$ 。
4. 任意の \mathbb{B} -稠密開集合 $D \in M$ について $D \cap G \neq \emptyset$ 。

証明 (1) \implies (2): 極大反鎖は前稠密なのであたりまえ。

(2) \implies (3): D を稠密集合とする。このとき、 $\mathcal{A} \subseteq D$ となるような中で極大な反鎖 \mathcal{A} を取れば、これは \mathbb{B} の極大反鎖になっている。

(3) \implies (4): 条件が強くなっているだけなのであたりまえ。

(4) \implies (1): D を前稠密集合とすると、 $E := D \downarrow = \{b \leq d \mid d \in D\}$ は稠密開集合である。仮定より $b \in G \cap E$ が取れるが、これは定義より $G \cap E \ni b \leq d$ となる $d \in D$ が取れることを意味する。 G はフィルターなので、特に上に閉じているから、結局 $d \in G \cap D$ となる。 \square

定理 4.5. M を十分強い集合論のモデルとする。 $\mathbb{B} \in M$ を完備 Boole 代数、 G を (M, \mathbb{B}) - 生成的フィルターとすると、 G は \mathbb{B} の超フィルターである。

証明 任意の $p \in \mathbb{B}^+$ について $\{p, -p\}$ は極大反鎖なので、 G と交わる。

擬順序の場合も通用する証明にしたい場合は、かわりに $\{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p \vee q \perp p\}$ を考えてもよい。 \square

定理 4.6. $V^{\mathbb{B}} \models \dot{G} : (V, \mathbb{B})$ - 生成的。つまり、 $V^{\mathbb{B}} \models \forall D \in \check{V} [D \subseteq \mathbb{B} : \text{前稠密} \rightarrow D \cap \dot{G} \neq \emptyset]$ 。

証明 $D \subseteq \mathbb{B}$ を前稠密とする。 \mathbb{B} : 完備 Boole 代数より $\sum D = 1$ に注意すれば、

$$[\check{D} \cap \dot{G} \neq \emptyset] = [\exists d \in \check{D} (d \in \dot{G})] = \sum_{d \in D} [\check{d} \in \dot{G}] = \sum D = 1$$

よって示せた。 \square

定理 4.7. 任意の $\sigma \in V^{\mathbb{B}}$ について $V^{\mathbb{B}} \models \sigma = \check{\sigma}_{\dot{G}}$ 。

証明 \mathbb{B} - 階数による帰納法により示す。 \dot{x} を任意に取れば、

$$[\dot{x} \in \sigma] = \sum_{(\tau, b) \in \sigma} b \cdot [\dot{x} = \tau] = \sum_{(\tau, b) \in \sigma} b \cdot [\dot{x} = \tau] \cdot [\tau = \check{\tau}_{\dot{G}}] = \sum_{(\tau, b) \in \sigma} [\check{b} \in \dot{G}] \cdot [\dot{x} = \check{\tau}_{\dot{G}}] = [\dot{x} \in \check{\sigma}_{\dot{G}}]$$

よって示せた。 \square

系 4.8. $V^{\mathbb{B}} \models \forall x \exists \sigma \in \check{V} x = \sigma_{\dot{G}}$ が成り立つので、つまり $V^{\mathbb{B}} \models$ 「私は $\check{V}[\dot{G}]$ です」

「面白い」ような完備 Boole 代数 \mathbb{B} については、 (V, \mathbb{B}) - 生成的フィルターは決して V には属さないことがわかる：

定義 4.3. $p \in \mathbb{P}$ が擬順序 \mathbb{P} の原子 (atom) $\stackrel{\text{def}}{\iff}$ 任意の $q, r \leq p$ について $q \parallel r$ 。

注意 4.3. 完備 Boole 代数の場合、 p が原子であることは、 \mathbb{B}^+ の極小元であることと同値である。

補題 4.9. \mathbb{P} が原子を持たず、 $F \subseteq \mathbb{B}$ がフィルターなら、 $\mathbb{B} \setminus F$ は稠密である。

証明 まず、 F がフィルター、 $q \perp r$ の $q \in \mathbb{B} \setminus F$ または $r \in \mathbb{B} \setminus F$ の少なくとも一方は成り立たなければならない。なぜなら、どちらも属さないなら $q, r \in F$ となり、 $0 = q \cdot r \in F$ となって $0 \notin F$ に矛盾するからである。

そこで \mathbb{P} が原子を持たないとすると、どんな $p \in \mathbb{P}$ についても $q \perp r$ となる $q, r \leq p$ が取れる。よって上の議論から $q \in \mathbb{P} \setminus F$ か $r \in \mathbb{P} \setminus F$ の少なくとも一方が成り立つ。よって $\mathbb{P} \setminus F$ は稠密である。 \square

系 4.10. 次は同値：

1. \mathbb{B} が原子を持たない
2. (V, \mathbb{B}) - 生成的フィルターは V に存在しない。

証明 (1) \Rightarrow (2)：補題 4.9 から $G \in V$ とすると $G \cap (\mathbb{B} \setminus G) = \emptyset$ となり G の生成性に矛盾する。

(2) \Rightarrow (1)：対偶を示す。 p が原子としたとき、 $F := \{b \in \mathbb{B} \mid p \leq b\}$ はフィルターであり、これは p の極小性から任意の稠密集合と交わる。明らかに $F \in V$ なので、これが V に属す (V, \mathbb{B}) - 生成的フィルターである。□

5 Boole 完備化と擬順序による強制法

前節までは、主に完備 Boole 代数による強制法を考えてきた。実用上はより一般の擬順序による強制法が使われることが多い。本節では、完備 Boole 代数による強制法理論から擬順序による定式化を導出する。

記法． 以下、特に断わらない限り、 $\mathbb{P}, \mathbb{Q}, \mathbb{R}, \dots$ などの P 以降の黒板太字は (Boole 代数かもしれない) 擬順序を、 $\mathbb{B}, \mathbb{C}, \mathbb{D}$ などは Boole 代数を表すものとする。

5.1 擬順序の Boole 完備化

擬順序による強制法を完備 Boole 代数による強制法に帰着するには、擬順序の **Boole 完備化** と呼ばれる操作を経ることになる。より詳しく、任意の擬順序 \mathbb{P} に対し、それが埋め込める「素性のよい」完備 Boole 代数が **同型を除いて一意に存在** することを以下では示す。

擬順序 \mathbb{P} を含む完備 Boole 代数が欲しいなら、単に $\mathcal{P}(\mathbb{P})$ に対して $p \mapsto \{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p\}$ という埋め込みを考えればよい、と思うかもしれない。たしかに、この埋め込みは単調だが、これだけでは強制法の文脈では不適當である。結論からいうと、強制法は基本的に**稠密埋め込みで不変な性質**を扱うものだと思える²⁾ので、 \mathbb{P} はその完備化の中で稠密になっていてほしい。また、我々は命題の真偽を議論するために強制法を使う。この観点からは、**完備化の前後で成り立つ命題がかわってしまつては困る**。特に、 \mathbb{P} - 強制拡大では両立しなかった命題が、完備化による強制拡大では両立してしまつたりすると、それはもはや同値な強制法であるとはいえないだろう。真理補題 定理 4.1 より、命題の両立性は**命題の真偽値が両立するか** (正の交わりを持つか) で判定できた。この観点でいえば、**完備化の前後で両立関係は不変であつてほしい**³⁾。こうした要請を念頭におくと、 $\mathcal{P}(\mathbb{P})$ を与える例は明らかに不適當である。以上を念頭に、Boole 完備化と関連する定義について見ていこう。

定義 5.1.

- $\mathbb{P} = (\mathbb{P}, \leq_{\mathbb{P}}, 1_{\mathbb{P}})$ が**擬順序** (pseudo-order、略して **poset**) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \leq_{\mathbb{P}}$ は \mathbb{P} 上の反射的かつ推移的な二項関係であり、 $1_{\mathbb{P}}$ は $\leq_{\mathbb{P}}$ に関する (一意とは限らない) 最大元である。

2) 厳密には、Baumgartner の Axiom A など、稠密埋め込みによって保たれない性質を扱うこともある。

3) これは、後ほど導入する完備埋め込みの気持ちとざっくりいって同じである。

- 擬順序 \mathbb{P} が分離的 (separative) $\stackrel{\text{def}}{\iff} \forall r \leq p \ (r \parallel_{\mathbb{P}} q) \text{ ならば } p \leq q$ が成り立つ。
- 一般の擬順序 \mathbb{P} について、このセミナーでは以後 $p \leq_{\mathbb{P}} q \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall r \leq_{\mathbb{P}} p \ (r \parallel_{\mathbb{P}} q)$ と書くことにする。つまり、 \mathbb{P} が分離的 $\iff \leq_{\mathbb{P}} = \leq_{\mathbb{P}^0}$ 。
- $d : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が稠密埋め込み (dense embedding、ここだけの記号： $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{Q}$) $\stackrel{\text{def}}{\iff}$
 - (a) 単調性： $p \leq_{\mathbb{P}} q \implies d(p) \leq_{\mathbb{Q}} d(q)$,
 - (b) \perp -準同型： $p \perp_{\mathbb{P}} q \implies d(p) \perp_{\mathbb{Q}} d(q)$,
 - (c) $d[\mathbb{P}^+]$ は \mathbb{Q} で稠密。
- 擬順序 \mathbb{P} の Boole 完備化 (Boolean completion) $\mathbb{B}(\mathbb{P})$ とは、稠密埋め込み $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ が存在するような完備 Boole 代数 $\mathbb{B}(\mathbb{P})$ のことである。

注意 5.1. 擬順序には一般に反対称律 $p \leq q \leq p \implies p = q$ は要求しない。

演習 5.1. Boole 代数は分離的であることを示せ。

演習 5.2. 一般の擬順序 \mathbb{P} において、 \leq は \leq を拡張する (つまり $x \leq y \implies x \leq y$ となるような) \mathbb{P} 上の擬順序となることを示せ。

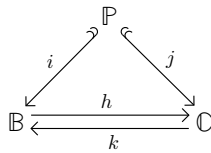
演習 5.3. $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ を Boole 完備化、 $b \in \mathbb{B}(\mathbb{P})$ とするとき以下を示せ。

$$b = \sum \{ d(p) \mid d(p) \leq_{\mathbb{B}(\mathbb{P})} b \}$$

補題 5.1 (Boole 完備化の一意性). 擬順序 \mathbb{P} が Boole 完備化を持つなら、同型を除いて一意。

証明 $i : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}$ および $j : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{C}$ が共に \mathbb{P} の Boole 完備化だったとする。このとき、以下のようにして \mathbb{P} の元による「下からの近似」を使って $h : \mathbb{B} \rightarrow \mathbb{C}$ および $k : \mathbb{C} \rightarrow \mathbb{B}$ を定めることができる：

$$h(b) := \sum^{\mathbb{C}} \{ j(p) \mid i(p) \leq_{\mathbb{B}} b \}, \quad k(c) := \sum^{\mathbb{B}} \{ i(p) \mid j(p) \leq_{\mathbb{C}} c \}$$



このとき h, k は明らかに単調。あとは h, k が順序同型であること、つまり $h \circ k = \text{id}_{\mathbb{C}}, k \circ h = \text{id}_{\mathbb{B}}$ を地道に確かめればよい。対称性より、 $k \circ h = \text{id}_{\mathbb{B}}$ を示せばよい。それには次が示せば十分：

$$i(p) \leq_{\mathbb{B}} b \iff j(p) \leq_{\mathbb{C}} h(b) \quad (\star)$$

実際、これを認めれば、

$$k(h(b)) = \sum \{i(p) \mid j(p) \leq_c h(b)\} = \sum \{i(p) \mid i(p) \leq_{\mathbb{B}} b\} = b$$

となり、 $k \circ h = \text{id}_{\mathbb{B}}$ を得る。 \square

演習 5.4. (\star) を示し、上の証明を完成させよ (ヒント: \leq は演習 5.3 から直ちに従う。 \geq は Boole 代数の分離性と、 \mathbb{P} の像が \mathbb{B} で稠密であること、 \perp -同型になっていることを使う)。

演習 5.5. 上の i, j, h, k の図式が可換であること (つまり $k \circ j = i$ および $h \circ i = j$) を示せ。(ヒント: 一方の順序関係は \sum の性質から従う。反対方向は h, k が順序同型であり特に互いに逆写像な単調写像である事を使う。)

補題 5.2 (分離商). 任意の擬順序 \mathbb{P} に対して、分離的な擬順序 $\tilde{\mathbb{P}}$ と全射 $h : \mathbb{P} \rightarrow \tilde{\mathbb{P}}$ で次を満たすようなものが存在する:

1. $p \leq q \implies h(p) \leq h(q)$,
2. $p \perp_{\mathbb{P}} q \iff h(p) \perp_{\tilde{\mathbb{P}}} h(q)$.

また、このような $\tilde{\mathbb{P}}$ は同型を除いて一意であり、 \mathbb{P} の**分離商 (separative quotient)** と呼ぶ。

証明 $p \sim q \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall r \in \mathbb{P} [r \parallel_{\mathbb{P}} p \iff r \parallel_{\mathbb{P}} q]$ は \mathbb{P} 上の同値関係を定めるので、 $\tilde{\mathbb{P}} = \mathbb{P} / \sim$ とすればよい。順序は代表元上で \leq で定めてやれば、これは \sim の定義から well-defined となり、しかもこれは分離的である。一意性: 分離性と条件 (2) および全射性から従う。 \square

補題 5.3 (分離的擬順序の Boole 完備化). 任意の分離的擬順序 \mathbb{P} に対し、Boole 完備化は一意に存在し、特にその埋め込みは稠密となる。

証明に必要な定義をしておく:

定義 5.2.

1. \mathbb{P} 上の**順序位相**とは、 $p \downarrow := \{q \in \mathbb{P} \mid q \leq p\}$ を開基とする \mathbb{P} 上の位相のことである。
2. $U \subseteq \mathbb{P}$ が**開集合 (open)** $\stackrel{\text{def}}{\iff}$ 順序位相について開集合。つまり、 U は下に閉: $q \leq p \in U \implies q \in U$ 。
3. $U \subseteq \mathbb{P}$ が**正則開集合 (regular open)** $\stackrel{\text{def}}{\iff} U$ は $\leq_{\mathbb{P}}$ について下に閉じている $q \leq p \in U \implies q \in U$ 。

注意 5.2.

1. $q \leq p \implies q \leq p$ より、 U が正則開集合なら U は開でもある。
2. U が正則開集合 $\iff U$ が順序位相について正則開集合。つまり $(\bar{U})^\circ = U$ 。
3. \mathbb{P} が分離的 \iff 開基 $p \downarrow$ は正則開集合。

証明 $\text{RO}(\mathbb{P})$ を \mathbb{P} 上の正則開集合全体の集合とする。このとき、位相空間論の一般論より RO は任意共通部分について閉じている。よって、あとは RO に Boole 演算が入ることが示されればよい。以下、 $U \subseteq \mathbb{P}$ に対し、

$U^* := (\bar{U})^\circ$ と略記する。だいたい演算も自明だが、 $U + V := (U \cup V)^*$ および $-U := \{p \in \mathbb{P} \mid p \downarrow \cap U = \emptyset\}$ と定めればよい。

P から $\text{RO}(\mathbb{P})$ への埋め込みは、単純に開基 $p \mapsto p \downarrow$ によって定めればよい。先の注意より、この部分に分離性を使っていることがわかる（まあ、仮定しない場合はあらためて $*$ を取ればいいんですが）。像が稠密なのはあたりまえ。単射性と残りの条件も確かめればわかる。□

以上の結果の系として、一般の擬順序の Boole 完備化の存在が言える：

定理 5.4. 任意の擬順序 \mathbb{P} に対し、Boole 完備化が一意に存在する。

演習 5.6. $\mathbb{B}(\mathbb{P})$ が（順序）単射であることと、 \mathbb{P} が分離的であることの同値性を示せ。

我々が完備 Boole 代数による Boole 値モデルを経由する形で強制法を定式化したのは、この Boole 完備化が常に一意に存在し⁴⁾、擬順序の強制法の定義よりも完備 Boole 代数による強制法の定義の方が直観がわかりやすいからである。

5.2 強制関係と擬順序による強制法

さて、Boole 値モデルでは最初に真偽値 $\llbracket \varphi \rrbracket \in \mathbb{B}$ を定義し、その上で強制関係を $p \Vdash \varphi \iff p \leq \llbracket \varphi \rrbracket$ として定義していた。一般の擬順序についても、Boole 完備化を介してこの定義を採用することで強制関係 $p \Vdash \varphi$ を定義することができる。定義のために、擬順序・Boole 代数間に対応する名称間の読み替えを行うための方法を与えておく。

定義 5.3. $e : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ を写像とする。 $\dot{x} \in V^{\mathbb{P}}$ に対して、 $e_*(\dot{x}) \in V^{\mathbb{Q}}$ を以下のように \mathbb{P} -階数に関する帰納法で定義する：

$$e_*(\dot{x}) := \{ (e_*(\dot{y}), e(p)) \mid (\dot{y}, p) \in \dot{x} \}$$

上の記号法の下で、一般の擬順序に関する強制関係 \Vdash を次のように定義する：

定義 5.4. \mathbb{P} を擬順序、 $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ をその Boole 完備化とする。 $p \in \mathbb{P}$ 、 \mathcal{FL} -論理式 $\varphi(\bar{x})$ および \mathbb{P} -名称 $\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1} \in V^{\mathbb{P}}$ に対して、 $p \Vdash \varphi(\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1})$ を以下で定義する：

$$p \Vdash_{\mathbb{P}} \varphi(\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1}) \iff d(p) \leq_{\mathbb{B}(\mathbb{P})} \llbracket \varphi(d_*(\dot{x}_0), \dots, d_*(\dot{x}_{n-1})) \rrbracket$$

特に、 $\Vdash_{\mathbb{P}} \varphi \equiv \mathbb{1} \Vdash_{\mathbb{P}} \varphi$ という略記を用いる。

極論、上の定義さえあれば擬順序による強制法を利用することができる。とはいえ、一般に作りたい対称を付加する強制法が一発で完備 Boole 代数になるとは限らず、そういう場合にいちいち一回完備化を取って往き来して計算するのは、正直いって面倒である。そこで、この強制関係 $p \Vdash \varphi$ を完備化 $\mathbb{B}(\mathbb{P})$ に言及せずに \mathbb{P} の擬順序のみを使って特徴づけることを以下当面の目標とする。

こうした名称の読み替えのうち、 $e^{-1}[G]$ と e_* は、稠密埋め込みまで要求せずとも、より弱い性質を満たす埋

4) 基礎モデルで弱い集合論の公理系しか成り立たない場合 Boole 完備化は常に存在するとは限らないが、その場合も強制法関係 \Vdash の定義から出発すれば問題ない。

め込みがあれば十分「機能」する。特に、以下では種々の擬順序や完備 Boole 代数の間の埋め込みについて議論をするが、その中で稠密埋め込みと並んで重要な役割を果たすのが**完備埋め込み**である。

定義 5.5. $f: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が**完備埋め込み** (complete embedding、記号: $f: \mathbb{P} \leq \mathbb{Q}$) $\stackrel{\text{def}}{\iff}$

1. 単調性: $p \leq_{\mathbb{P}} q \implies f(p) \leq_{\mathbb{Q}} f(q)$,
2. \mathcal{A} が \mathbb{P} の極大反鎖なら、 $f[\mathcal{A}]$ も \mathbb{Q} で極大反鎖である。

演習 5.7. 稠密埋め込みは完備埋め込みであることを示せ。

注意 5.3. $f: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{B}$ で \mathbb{B} が Boole 代数のとき、完備埋め込みおよび稠密埋め込みは、暗に $f[\mathbb{P}^+] \subseteq \mathbb{B}^+$ を要請していることに注意する。これは、完備埋め込みの場合は「反鎖」を \mathbb{P}^+ の部分集合として定義しているからであり、稠密埋め込みは稠密集合が \mathbb{Q}^+ の部分集合として定義しているからである。

こういったことを一々気にするのは面倒くさい。Boole 代数でないような擬順序で強制法を使う場合、考える擬順序はほとんどすべての例で最小元を持たないものである。そこで、以下では断わらない限り擬順序は最小元を持たない、 $\mathbb{P} = \mathbb{P}^+$ となるようなものであると思って扱うことにする。この立場に立つても、証明を微妙に変えてやれば最小元を持つような擬順序にも対応できる。あるいはあらかじめなくなるまで最小元を取り除いてやってから適用している、と思ってもよい。

稠密埋め込みの定義は \mathbb{P}, \mathbb{Q} に関して Δ_0 -論理式で書けるので、「 $f: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が稠密埋め込みである」という概念は強制拡大の前後で不変である。一方、完備埋め込みは上の定義が直感的でわかりやすいが、 \mathbb{P}, \mathbb{Q} に関する Δ_1 -論理式で書けるかは直ちにはわからず、強制拡大の前後で性質が変わらないか不安に思うかもしれない。しかし、次の特徴付けが知られており、これは明らかに \mathbb{P}, \mathbb{Q} に関して Δ_0 である：

補題 5.5. $f: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ について次は同値：

1. f は完備埋め込み
2. f は以下を満たす：
 - (a) 単調性: $p \leq_{\mathbb{P}} q \implies f(p) \leq_{\mathbb{Q}} f(q)$,
 - (b) \perp -準同型: $p \perp_{\mathbb{P}} q \implies f(p) \perp_{\mathbb{Q}} f(q)$,
 - (c) 任意の $q \in \mathbb{Q}$ に対し、 f による q の \mathbb{P} への簡約 (reduction) $q^* \in \mathbb{P}$ が存在し、次を満たす：

$$\forall p \in \mathbb{P} [f(p) \perp_{\mathbb{Q}} q \rightarrow p \perp q^*]$$

演習 5.8. 上の補題を示せ。

まず、完備埋め込みにより \sim -名称が保たれることがわかる：

補題 5.6. $e: \mathbb{P} \leq \mathbb{Q}$ が完備埋め込みなら、 $\llbracket \check{x} = e_*(\check{x}) \rrbracket = 1$ 。ただし、左辺の \check{x} は $V^{\mathbb{Q}}$ の、右辺の e_* の内側の \check{x} は $V^{\mathbb{P}}$ のチェック作用素である。

証明 V -階数に関する帰納法で $\llbracket \sigma \in \check{x} \rrbracket = \llbracket \sigma \in e_*(\check{x}) \rrbracket$ を示せばよい。 □

系 5.7. $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P}), p \in \mathbb{P}$ について $d(p) = \llbracket d_*(\check{q}) \in d_*(\dot{G}) \rrbracket = \llbracket \check{d(p)} \in \dot{G} \rrbracket$.

上の系から、特に $d_*(\dot{G})$ と \dot{G} は \mathbb{P} に関する限りは同一視して構わないことがわかった。

また、以下の議論では擬順序 \mathbb{P} とその Boole 完備化 $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ の間を頻繁に往き来して議論する。この際に、行き先で $d(p) \leq_{\mathbb{B}(\mathbb{P})} d(q)$ が成り立つことと、もとの擬順序での $p \leq_{\mathbb{P}} q$ が成り立つこととの関係をしっかり意識する必要がある。

一般の擬順序の Boole 完備化を考える際には、分離商 (separative quotient) というものを經由するのであった：

定義 5.6.

1. 擬順序 \mathbb{P} が**分離的 (separative)** $\stackrel{\text{def}}{\iff} \forall p, q \in \mathbb{P} [p \leq q \iff \forall r \leq p (r \parallel q)]$ 。
2. 一般の擬順序について、このセミナーでは以後 $p \leq_{\mathbb{P}} q \stackrel{\text{def}}{\iff} \forall r \leq_{\mathbb{P}} p (r \parallel_{\mathbb{P}} q)$ と書くことにする。

補題 5.8. 任意の擬順序 \mathbb{P} について、次を満たす分離的擬順序 \mathbb{Q} と全射 $e : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が同型を除いて一意に存在する：

1. $p \leq_{\mathbb{P}} q \implies e(p) \leq_{\mathbb{Q}} e(q)$
2. $p \perp_{\mathbb{P}} q \iff e(p) \perp_{\mathbb{Q}} e(q)$

このような擬順序 \mathbb{Q} を \mathbb{P} の分離商 (separative quotient) と呼ぶ。

ここで \leq を導入したのは次の補題が欲しいからである：

補題 5.9. 擬順序 \mathbb{P}, \mathbb{Q} と単調写像 $e : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が $p \perp_{\mathbb{P}} q \implies e(p) \perp_{\mathbb{Q}} e(q)$ を満たすとき：

$$e(p) \leq_{\mathbb{Q}} e(q) \implies p \leq_{\mathbb{P}} q$$

証明 まず、対偶を取れば仮定から $e(p) \parallel_{\mathbb{Q}} e(q) \implies p \parallel_{\mathbb{P}} q$ であることに注意する。 $e(p) \leq e(q)$ とする。 $r \leq p$ を任意に取り、 $r \parallel q$ となることを示す。すると e の単調性から $e(r) \leq e(p)$ となる。すると演習 5.2 より特に推移性から $e(r) \leq e(q)$ となる。特に $e(r) \parallel e(q)$ となるので、 $r \parallel q$ を得る。 \square

系 5.10. 稠密埋め込み $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{Q}$ について、 $p \leq_{\mathbb{P}} q \iff d(p) \leq_{\mathbb{Q}} d(q)$ 。また、 \mathbb{Q} が分離的なら $p \leq_{\mathbb{P}} q \iff d(p) \leq d(q)$ 。

分離性の概念はいかにも技術的に見えるかもしれない。しかし、実は \leq は強制関係を使うと非常に自然な概念であることがわかる：

補題 5.11. $p, q \in \mathbb{P}$ とし、 $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ を完備埋め込みするとき、次は同値：

1. $p \leq q$,
2. $d(p) \leq d(q)$
3. $p \Vdash \check{q} \in \dot{G}$

証明 (1) \iff (2) は系 5.10 そのもの。

(2) \iff (3) は系 5.7 および真理補題（定理 4.1）の (1) から従う。

□

系 5.12. $p \leq q \Vdash \varphi \implies p \Vdash \varphi$

特に、擬順序版の真理補題が直ちに従う：

系 5.13 (真理補題・擬順序版).

1. $p \Vdash \dot{p} \in \dot{G}$
2. $\Vdash [\varphi \longleftrightarrow \exists p \in \dot{G} (p \Vdash \varphi)]^V$
3. $p \Vdash \varphi$ ならば $\Vdash [\dot{p} \in \dot{G} \rightarrow \varphi]$

また、稠密性・前稠密性については \leq を使っても \leq を使っても同値となる：

補題 5.14. $D \subseteq \mathbb{P}, p \in \mathbb{P}^+$ について以下は同値：

1. D は p 以下で前稠密
2. 任意の $q \leq p$ について、 $r \parallel_p q$ となる $r \in D$ が存在。

補題 5.15. $D \subseteq \mathbb{P}, p \in \mathbb{P}^+$ について以下は同値：

1. D は p 以下で稠密
2. 任意の $q \leq p$ について、 $r \leq_p q$ となる $r \in D$ が存在。

補題 5.16. $D \subseteq \mathbb{P}$ が開集合（つまり $q \leq p \in D \implies q \in D$ ）のとき、任意の $p \in \mathbb{P}$ について次は同値：

1. $\exists r \in D \ r \leq p$,
2. $\exists r \in D \ r \parallel p$.
3. $\exists r \in D \ r \leq p$.

演習 5.9. 上の三つの補題を示せ。

以上の準備の下で、論理式を帰納的にバラしていくと、 \Vdash は次の特徴付けを満たすことがわかる：

定理 5.17 (Definability Lemma). \mathbb{P} を擬順序、 $p \in \mathbb{P}^+$ とする。

1. $p \Vdash \dot{x} \in \sigma \iff \{r \in \mathbb{P} \mid \exists (\dot{y}, b) \in \sigma [r \leq b \wedge r \Vdash \dot{x} = \dot{y}]\}$ が p 以下で稠密。
2. $p \Vdash \dot{x} = \dot{y} \iff \forall \dot{z} \in \text{dom}(\dot{x}) \cup \text{dom}(\dot{y}) \forall q \leq p [(q \Vdash \dot{z} \in \dot{x}) \longleftrightarrow (q \Vdash \dot{z} \in \dot{y})]$ 。
3. $p \Vdash \dot{x} \in \check{V} \iff \{q \mid \exists z \in V (q \Vdash \dot{x} = \dot{z})\}$ が p 以下で稠密。
4. $p \Vdash \neg \varphi \iff \forall q \leq p \ q \nVdash \varphi$
5. $p \Vdash \varphi \vee \psi \iff \{q \mid (q \Vdash \varphi) \vee (q \Vdash \psi)\}$ が p 以下で稠密。
6. $p \Vdash \varphi \wedge \psi \iff p \Vdash \varphi$ かつ $p \Vdash \psi$ 。
7. $p \Vdash \varphi \rightarrow \psi \iff \nexists q \leq p [(q \Vdash \varphi) \wedge (q \nVdash \psi)]$ 。

8. $p \Vdash \exists x \varphi(x) \iff \{q \mid \exists \dot{x} (q \Vdash \varphi(\dot{x}))\}$ が p 以下で稠密。

証明 パラメータの \mathbb{B} -階数と論理式の複雑さに対する帰納法で示す。 \in の場合のみ示してみよう。

$$D := \{r \in \mathbb{P} \mid \exists(\dot{y}, b) \in \sigma [r \leq b \wedge r \Vdash \dot{x} = \dot{y}]\}$$

が p 以下で稠密であることを示す。このとき、

$$E_{\dot{y}} := \{r \in \mathbb{P} \mid r \Vdash \dot{x} = \dot{y}\},$$

は \Vdash の定義より開集合であることに注意すれば、

$$D : p \text{ 以下で稠密} \iff \forall q \leq p \exists r \in D r \leq q \quad (\text{補題 5.15})$$

$$\iff \forall q \leq p \exists(\dot{y}, b) \in \sigma \exists r \in E_{\dot{y}} r \leq q, b \quad (\text{定義})$$

$$\iff \forall q \leq p \exists(\dot{y}, b) \in \sigma \exists r \in E_{\dot{y}} r \leq q, b \quad (\text{補題 5.16})$$

$$\iff \forall q \leq p \exists(\dot{y}, b) \in \sigma \exists r [r \leq q, b \wedge r \Vdash \dot{x} = \dot{y}]. \quad (\text{定義})$$

となる。これを踏まえれば、

$$d(p) \leq \llbracket d_*(\dot{x}) \in d_*(\sigma) \rrbracket = \sum_{(\dot{y}, b) \in \sigma} d(b) \cdot \llbracket d_*(\dot{x}) = d_*(\dot{y}) \rrbracket$$

$$\iff \forall q \leq_{\mathbb{B}(\mathbb{P})} d(p) \exists(\dot{y}, b) \in \sigma [q \cdot d(b) \cdot \llbracket d_*(\dot{x}) = d_*(\dot{y}) \rrbracket > 0] \quad (\text{上限の定義})$$

$$\iff \forall d(q) \leq_{\mathbb{B}(\mathbb{P})} d(p) \exists(\dot{y}, b) \in \sigma [d(q) \cdot d(b) \cdot \llbracket d_*(\dot{x}) = d_*(\dot{y}) \rrbracket > 0] \quad (d \text{ の稠密性})$$

$$\iff \forall d(q) \leq d(p) \exists(\dot{y}, b) \in \sigma \exists r \in \mathbb{P} [d(r) \leq d(q), d(b) \wedge r \Vdash \dot{x} = \dot{y}] \quad (d \text{ の稠密性})$$

$$\iff \forall q \leq p \exists(\dot{y}, b) \in \sigma \exists r \in \mathbb{P} [r \leq q, b \wedge r \Vdash \dot{x} = \dot{y}] \quad (\text{補題 5.11})$$

$$\iff D : p \text{ 以下で稠密} \quad (\text{上の議論より})$$

残りも同様。 \square

演習 5.10. Definability Lemma の残りの節を埋め、証明を完成させよ。

以下の補題は \Vdash を計算する上で非常によく使われる：

系 5.18.

1. $p \Vdash \varphi \iff \forall q \leq p (q \Vdash \varphi)$
2. $p \Vdash \varphi \rightarrow \psi \iff \forall q \leq p [(q \Vdash \varphi) \rightarrow \exists r \leq q (q \Vdash \psi)]$
3. $p \Vdash \exists x \in \tilde{A} \varphi(x) \iff \{q \mid \exists a \in A (q \Vdash \varphi(\check{a}))\}$ が p 以下で稠密。
4. $p \Vdash \varphi \iff \{r \leq p \mid r \Vdash \varphi\} : \text{dense below } p$
5. $p \nVdash \varphi \iff \exists r \leq p r \Vdash \neg \varphi$

注意 5.4. 我々は Boole 完備化を前提に \Vdash を定義し上の性質を導いたが、逆に **Definability Lemma** の各節を \Vdash の定義だと思ってもできる。実際、擬順序による強制法では、もっぱら上の特徴付けを基に強制関係の計算を行うことになる。

こうした理論構成は、Boole 完備化が常に取れるとは限らない弱い集合論上で強制法をする場合に必要となる。そんなに見えないかもしれないが、冪集合公理が必ずしも成り立たない $H(\kappa)$ やその可算初等部分モデル上で強制法をすることはよくある。こういう場合は擬順序の一階の理論で展開できる Definability Lemma による定義が威力を発揮することになる。

演習 5.11. 上の補題を、Definability Lemma のみを仮定して証明せよ。

注意 5.5. 上の系 5.18 の (1) と系 5.12 とは \leq と \leqslant の差しかない。この意味で、強制法に関する限りでは \leqslant は \leq と同値であるということがわかり、分離的擬順序はこれらがちゃんと一致する、ということを要請している。

以上で擬順序で強制法を使う最低限の道具が整った。ところで、我々は $V^{\mathbb{P}}$ の元を $d_*(-)$ によって $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ に埋め込んで扱っており、これにより \mathbb{P} -による強制法で付加され得る元は $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ に常にあると思ってよかった。しかし、 $\mathbb{B}(\mathbb{P})$ による強制法と \mathbb{P} が「同値」であるというからには、この逆も成り立ってほしい。つまり、 $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ の元が与えられたときに、それと完全に値が一致するような $V^{\mathbb{P}}$ の元があるだろうか？という疑問が湧いてくる⁵⁾。

また、 $\dot{G}_{\mathbb{P}}$ を d_* で送ってやると真理補題が成り立つようないい感じのフィルターになっていた。では $d_*(\dot{G}_{\mathbb{P}})$ は (V, \mathbb{P}) -生成的になっているだろうか？また、 $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ には $\dot{G}_{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ があるが、これと $d_*(\dot{G}_{\mathbb{P}})$ はどのような関係にあるだろうか？

以下ではこうした疑問を解決し、 $V^{\mathbb{P}}, V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ 両者が本当の意味で「強制法について同値」であることを見ていく。

定義 5.7. $d : \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ を写像とする。

1. $\dot{x} \in V^{\mathbb{Q}}$ に大して、 $e^*(\dot{x}) \in V^{\mathbb{P}}$ を以下のように \mathbb{Q} -階数に関する帰納法で定義する：

$$e^*(\dot{x}) := \left\{ (e^*(\dot{y}), q) \mid (\dot{y}, q) \in \dot{x}, e(p) \leq_{\mathbb{Q}} q \right\}$$

2. $F \subseteq \mathbb{P}$ を \mathbb{P} のフィルターとすると、 $\tilde{e}(F) \subseteq \mathbb{Q}$ を以下で定める：

$$\tilde{e}(F) := \left\{ q \in \mathbb{Q} \mid \exists p \in F (e(p) \leq_{\mathbb{Q}} q) \right\}$$

つまり、 $\tilde{e}(F)$ は $e[F]$ が \mathbb{Q} で生成するフィルターである。

補題 5.19. $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ を完備化、 $\sigma \in V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ とするとき、 $\llbracket d_*(d^*(\sigma)) = \sigma \rrbracket = 1$ 。

演習 5.12. 上を示せ。 \mathbb{B} -階数に関する帰納法で $\llbracket \dot{x} \in d_*(d^*(\sigma)) \rrbracket = \llbracket \dot{x} \in \sigma \rrbracket$ を示せばよい。演習 5.3 を使う。

5) 最初から完備 Boole 代数を使って強制法を導入している Jech [1] では、なんと $V^{\mathbb{P}} \cong V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ としてしまっているためこの問題は出ない。が、こうした場合でも暗黙裡にこうした名称の変換を間にも囁かせていることになる。

系 5.20. $\Vdash_{\mathbb{P}} d^*(d_*(\dot{x})) = \dot{x}$

以上から、 $V^{\mathbb{P}}$ と $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ は本質的に同値であることが確かめられた。あとは生成的フィルターの対応関係を調べれば十分そうである。

結論からいうと、完備埋め込み $f: \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{Q}$ の存在は、実は「 \mathbb{Q} による強制法で \mathbb{P} の生成的フィルターも付加される」という形で特徴づけることができ、更に埋め込みが稠密の場合この対応が同型になる。

補題 5.21. $e: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が完備埋め込みとする時、次が成立：

1. $V^{\mathbb{Q}} \models e^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{Q}}] : (V, \mathbb{P})\text{-generic}$
2. $\sigma \in V^{\mathbb{P}}$ に対して、 $V^{\mathbb{Q}} \models \check{e}_*(\check{\sigma})_{\dot{G}_{\mathbb{Q}}} = \check{\sigma}_{e^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{Q}}]}$ が成り立つ。

証明 我々の \Vdash の定義から、値域が完備 Boole 代数 $\mathbb{Q} = \mathbb{B}(\mathbb{Q})$ であるときだけ具体的に計算すればよい。

(1): 完備埋め込みが極大反鎖を保つことから直ちに従う。

(2): \mathbb{B} -階数に関する帰納法で示せる。 □

系 5.22. $d: \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{B}(\mathbb{P})$ を完備化とすると、 $\llbracket d_*(\dot{G}_{\mathbb{P}}) = d^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{B}(\mathbb{P})}] \rrbracket = 1$

ここまでで、 $V^{\mathbb{B}(\mathbb{P})}$ と $V^{\mathbb{P}}$ の元の対応関係は明らかになり、更に $\dot{G}_{\mathbb{P}}$ が d を介して無事 (V, \mathbb{P}) -生成的フィルターの役割を果たしてくれることがわかった。以上から、強制法定理の擬順序版が得られる：

系 5.23 (強制法定理・擬順序版).

1. $\Vdash_{\mathbb{P}} \text{ZF}$
2. $V \models \text{AC}$ なら $\Vdash_{\mathbb{P}} \text{AC}$
3. $\Vdash_{\mathbb{P}} \check{V}$: 推移的モデル
4. $\Vdash_{\mathbb{P}} \text{On} \subseteq \check{V}$
5. $V \models \varphi(x) \iff \Vdash_{\mathbb{P}} \varphi(\check{x})$
6. $\Vdash_{\mathbb{P}} \dot{G} : (V, \mathbb{P})\text{-generic filter}$
7. $\Vdash_{\mathbb{P}} \dot{G} : \text{俺は } \check{V}[\dot{G}]$

実は、擬順序が分離的であるとき、補題 5.21 の逆も成り立つことがわかる。

補題 5.24. \mathbb{Q} が分離的擬順序で写像 $e: \mathbb{P} \rightarrow \mathbb{Q}$ が次を満たすとする：

$$V^{\mathbb{Q}} \models e^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{Q}}] : (V, \mathbb{P})\text{-generic filter}$$

このとき、 e は完備埋め込みである。

証明 単調性を示す。 $p \leq_{\mathbb{P}} q$ とすると、 $V^{\mathbb{Q}} \models [p \in e^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{Q}}] \rightarrow q \in e^{-1}[\dot{G}_{\mathbb{Q}}]]$ が成り立ち、特に定義より $V^{\mathbb{Q}} \models [e(p) \in \dot{G}_{\mathbb{Q}} \rightarrow e(q) \in \dot{G}_{\mathbb{Q}}]$ となる。よって、 \mathbb{Q} の分離性と補題 52 より $e(p) \leq e(q)$ を得る。

$e(1) \in \dot{G}_Q$ より 1 上の議論と同様に $\forall q \ q \leq e(1)$ が言え、 $e(1_P) = 1_Q$ が常に成り立つ。

一旦 \perp を保つことも見ておく。対偶を示す： $e(p) \parallel e(q)$ ならば $p \parallel q$ であることを示す。 $e(p) \parallel e(q)$ なので、 $r \leq_Q e(p), e(q)$ となる $r \in Q$ をとっておく。すると、 $r \Vdash e(p), e(q) \in \dot{G}_Q$ であり、定義より $r \Vdash p, q \in e^{-1}[\dot{G}_Q]$ となる。このとき、 $\Vdash e^{-1}[\dot{G}_Q] : \text{filter}$ であるので、 $r \Vdash p \parallel q$ でなくてはならない。 $r \parallel q$ は \mathbb{P} に関する一階の命題であり、特に \check{V} に相対化された論理式で書け、 $r \in \mathbb{P}^+$ なので V でも $p \parallel q$ となる。

以上から e は反鎖を反鎖に移すことがわかったので、極大性が保たれることを言えばよい。 \mathcal{A} を \mathbb{P} の極大反鎖とし、 $q \in Q$ を適当にとり、 $r \in e[\mathcal{A}]$ で $r \parallel q$ となるものがとれればよい。いま仮定から $q \Vdash \mathcal{A} \cap e^{-1}[\dot{G}_Q] \neq \emptyset$ であり、これは定義より $q \Vdash \exists r \in e[\mathcal{A}] \ [r \in \dot{G}_Q]$ と同値である。すると、系 5.18 から $s \leq q$ と $r \in e[\mathcal{A}]$ で $s \Vdash \check{r} \in \dot{G}_Q$ を満たすものが取れる。このとき $s \Vdash \check{r}, \check{q} \in \dot{G}_Q$ より特に $s \Vdash \check{r} \parallel \check{q}$ となり、 Δ_0 絶対性より V で見ても $r \parallel q$ が成り立つ。 \square

更に、上では e を個別に固定したが、完備化まで込めて考えれば、単純に「 Q が \mathbb{P} の (V, \mathbb{P}) -生成的フィルターを付加する」という条件と「完備埋め込みがなんでもいいから存在する」は同値になる：

補題 5.25. \mathbb{P}, Q が擬順序のとき、次は同値：

1. \mathbb{P} から $B(Q)$ への完備埋め込みが存在する
2. $\exists \dot{H} \in V^{B(Q)} \ V^{B(Q)} \models [\dot{H} : (V, \mathbb{P})\text{-generic}]$

証明 (1) \implies (2) はすでに見たので、(2) \implies (1) を示す。結論から言うと、次の写像が求めるものである：

$$e(p) := [\check{p} \in \dot{H}]$$

めちゃくちゃ素直な定義である。単調性や 1 を保つことは自明である。 \perp を保つこともこれまでと同様に（というか B が Boole 代数なのでもっと簡単に）示せる。

あとは \mathcal{A} を \mathbb{P} の極大反鎖として $e[\mathcal{A}]$ が B でも極大であることが言えればよい。特に、 $e[\mathcal{A}]$ が前稠密であるということが示せればよいが、今 B は完備 Boole 代数なので $\sum e[\mathcal{A}] = 1$ が示せればよい。しかるに：

$$\begin{aligned} \sum e[\mathcal{A}] &= \sum_{a \in \mathcal{A}} e(a) = \sum_{a \in \mathcal{A}} [\check{a} \in \dot{H}] && (\text{定義}) \\ &= [\exists a \in \check{\mathcal{A}} \ \check{a} \in \dot{H}] && (\text{系 2.3 (2)}) \\ &= [\check{\mathcal{A}} \cap \dot{H} \neq \emptyset] = 1 && (\dot{H} : (V, \mathbb{P})\text{-生成的}, \mathcal{A} : \text{極大反鎖より}) \end{aligned}$$

よって示せた。 \square

注意 5.6. 擬順序 \mathbb{P} と $V^{\mathbb{P}} \models [\dot{Q} : \text{擬順序}]$ となるような擬順序の \mathbb{P} -名称 \dot{Q} が与えられたときに、「 \mathbb{P} の後に今度は \dot{Q} で強制拡大する」という操作を一つにまとめた (V での) **二段階反復擬順序** $\mathbb{P} * \dot{Q}$ が定義できる。実は、 \mathbb{P} から Q に完備埋め込みが存在するとき、**商の \mathbb{P} -名称** ($Q : \mathbb{P}$) を定義することができる。これは $V^{\mathbb{P}}$ の中で「 \check{Q} のうち V^Q にいくのに足りない分」になるような名前である。より詳しく、 Q から $\mathbb{P} * (Q : \mathbb{P})$ への稠密埋め込みが存在し、特に両者は強制法として同値になる、ということが示せる。このように、完備埋め込みの存在は、「一方の強制法が他方の強制法の途中に現れる」という

状況の特徴づけるとても良い概念であることがわかる。

演習 5.13. 本セミナーでは完備 Boole 代数による強制法を基に Definability Lemma を導出した。先述したように、逆に Definability Lemma を \Vdash の定義として採用した上で本節の内容を逆向きに再現することもできる。とても時間がかかるが、余力があればこのことを実践してみよ。

特に、 $d : \mathbb{P} \hookrightarrow \mathbb{Q}$ を稠密埋め込みとし、次を Definability Lemma のみから示せ：

1. $V^{\mathbb{P}} \models \dot{G}_{\mathbb{P}} : (\check{V}, \mathbb{P})\text{-generic filter}$
2. $V^{\mathbb{P}}$ において次が成立： $H := \check{d}(G_{\mathbb{P}})$ は (V, \mathbb{Q}) -生成的フィルターで、 $G_{\mathbb{P}} = d^{-1}[H]$ 。
3. $V^{\mathbb{Q}}$ において次が成立： $H := d^{-1}[G_{\mathbb{Q}}]$ は (V, \mathbb{P}) -生成的フィルターで、かつ $G_{\mathbb{Q}} = \check{d}(H)$ 。

以上で $G_{\mathbb{P}} \mapsto \check{d}(G_{\mathbb{P}}), G_{\mathbb{Q}} \mapsto d^{-1}[G_{\mathbb{Q}}]$ はある意味で逆演算であることがわかった。そこで、この対応を念頭に、この定理では以下 $\dot{G}_{\mathbb{P}}, \dot{G}_{\mathbb{Q}}$ は共に \mathbb{P} -名称としても \mathbb{Q} -名称としても用いることにする。たとえば、 \mathbb{P} -名称としての $G_{\mathbb{P}}$ は普通の標準的名称であり、 \mathbb{P} -名称としての $\dot{G}_{\mathbb{Q}}$ は $\check{d}(G_{\mathbb{P}})$ を指す \mathbb{P} -名称とする。逆に $\dot{G}_{\mathbb{P}}$ を \mathbb{Q} -名称として用いたとき、これは $d^{-1}[G_{\mathbb{Q}}]$ の名称を指すものとする。

4. $\sigma \in V^{\mathbb{P}}, \tau \in V^{\mathbb{Q}}$ について、 $V^{\mathbb{P}} \models \check{\tau}_{\dot{G}_{\mathbb{Q}}} = d^*(\check{\tau})_{\dot{G}_{\mathbb{P}}}$ かつ $V^{\mathbb{Q}} \models \check{\sigma}_{\dot{G}_{\mathbb{P}}} = d_*(\check{\sigma})_{\dot{G}_{\mathbb{P}}}$
5. $\sigma \in V^{\mathbb{P}}, \tau \in V^{\mathbb{Q}}$ について、 $V^{\mathbb{P}} \models d^*(d_*(\sigma)) = \sigma$ かつ $V^{\mathbb{Q}} \models d_*(d^*(\tau)) = \tau$
6. $\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1} \in V^{\mathbb{P}}, \mathcal{FL}$ -論理式 $\varphi(x_0, \dots, x_{n-1})$ について、

$$p \Vdash_{\mathbb{P}} \varphi(\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1}) \iff d(p) \Vdash_{\mathbb{Q}} \varphi(d_*(\dot{x}_0), \dots, d_*(\dot{x}_{n-1}))$$

7. $\dot{y}_0, \dots, \dot{y}_{n-1} \in V^{\mathbb{Q}}, \mathcal{FL}$ -論理式 $\varphi(y_0, \dots, y_{n-1})$ について、

$$q \Vdash_{\mathbb{Q}} \varphi(\dot{x}_0, \dots, \dot{x}_{n-1}) \iff \forall p \in \mathbb{P} [d(p) \leq q \implies p \Vdash_{\mathbb{P}} \varphi(d^*(\dot{x}_0), \dots, d^*(\dot{x}_{n-1}))]$$

TODO: 以下の結果を自然に繋ぐ

補題 5.26 (Maximal Principle, 擬順序版). $\varphi(x)$ を $\mathcal{FL}_{\mathbb{P}}$ -論理式、 \mathbb{P} を擬順序、 $p \in \mathbb{P}$ とする。このとき、

$$p \Vdash \exists x \varphi(x) \iff \exists \dot{x} \in V^{\mathbb{P}} [p \Vdash \varphi(\dot{x})]$$

証明 完備化を取ったあと完備 Boole 代数版を適用し、その名称を引き戻してくればよい。 □

定理 5.27. ZF 上では同値：

1. AC
2. 擬順序の Maximal Principle

証明 (1) \implies (2) は明らか。(2) \implies (1) を示せば十分。

$\langle X_i \mid i \in I \rangle$ を空でない集合からなる族とする。擬順序 \mathbb{P} を次で定義する：

$$\mathbb{P} := \{1\} \sqcup I$$

$$p \leq q \stackrel{\text{def}}{\iff} p = q \vee q = 1$$

つまり、最大元が一つだけあって、その下に I の各元が極小元としてぶら下がって極大反鎖を成しているような擬順序である。 \mathbb{P} -名称 \dot{X} を次で定める：

$$\dot{X} := \{(\check{X}_i, i) \mid i \in I\}$$

つまり、 $i \Vdash \dot{X} = \check{X}_i$ となるような名称である。各 X_i は空でないので、このとき次が成り立つ：

$$1 \Vdash \exists x (x \in \dot{X})$$

すると、Maximal Principle により、 $\dot{x} \in V^{\mathbb{P}}$ で $1 \Vdash \dot{x} \in \dot{X}$ となるものが取れる。

このとき $i \in I$ を任意にとると、 \dot{X} と \dot{x} の取り方より $i \Vdash \dot{x} \in \check{X}_i$ である。これは

$$D := \{q \leq i \mid \exists x \in X_i (q \Vdash \check{x} \in \check{X}_i)\}$$

が i 以下で稠密であるということである。しかし、今 i は極小元なので結局 $i \in D$ となる他なく、従って $x \in X_i$ で $i \Vdash \dot{x} = \check{x}$ となるものが取れる。しかも、このような x は一意である。なぜなら、ほかに $i \Vdash \dot{x} = \check{x}'$ となるような $x' \in X_i$ が存在したとすると、等号公理から $i \Vdash \check{x} = \check{x}'$ となるが、これは Δ_0 -論理式なので V で見ても $x = x'$ が成り立つからである。そこで、この一意な $x \in X_i$ を x_i と書くことにする。

以上から、 \dot{x} から選択関数 $(x_i)_{i \in I} \in \prod_i X_i$ が定義できた。 \square

6 集合論のモデルの生成拡大と強制法拡大

6.1 推移的モデル上の強制法と強制関係

定義 6.1. M を $\text{ZF} - \mathbb{P}$ の推移的モデルとし、 $\mathbb{P} \in M$ とする。

1. $M^{\mathbb{P}} := V^{\mathbb{P}} \cap M$ を M における \mathbb{P} -名称の全体とする。
2. (M, \mathbb{P}) -生成的フィルター G について、 M の G による**生成拡大** (generic extension) $M[G]$ を以下で定める：

$$M[G] := \{\dot{x}_G \mid (\dot{x}, p) \in M^{\mathbb{P}}, p \in G\}$$

M が真のクラスの場合も考えることがある。特に、 V はどんな $M \subseteq V$ の生成拡大 $V = M[G]$ になりうるか？という問いを扱う**集合論の地質学** (set-theoretic geology) というのがここ十年弱で現れた集合論の新たな分野である。

一般に M が集合サイズの推移的モデルであったとしても、 (M, \mathbb{P}) -生成的フィルターが V 内に存在するとは限らない。しかし、 M が**可算**であれば必ず (M, \mathbb{P}) -生成的フィルターが存在する。これは、無限組合せ論パートで採り上げた Rasiowa-Sikorski の定理の系である。

補題 6.1. M が $\text{ZF} - \mathbb{P}$ の可算推移的モデル、 $\mathbb{P} \in M$ が擬順序、 $p \in P$ のとき、 $p \in G$ となる (M, \mathbb{P}) -

生成的フィルター G が存在する。

定理 6.2. M を $\text{ZF} - \text{P}$ の推移的モデルとし、 φ を $M \cap V^{\mathbb{P}}$ のみをパラメータに持つ論理式、 $\mathbb{P} \in M$ とし、 G を (V, \mathbb{P}) -生成的フィルターとする。

1. $p \Vdash \varphi$ かつ $p \in G$ ならば $M[G] \models \varphi$ 。
2. $M[G] \models \varphi$ のとき、 $p \Vdash \varphi$ となる $p \in G$ が存在する。

系 6.3. M を $\text{ZF} - \text{P}$ の推移的モデルとし、 φ を $M \cap V^{\mathbb{P}}$ のみをパラメータに持つ論理式、 $\mathbb{P} \in M$ とし、 G を (V, \mathbb{P}) -生成的フィルターとする。

1. $M[G]$ は推移的。
2. $M[G] \models \text{ZF} - \text{P}$ 。
3. $M \models \text{ZF}$ ならば $M[G] \models \text{ZF}$ 。
4. $M \models \text{AC}$ ならば $M[G] \models \text{AC}$ 。
5. $M \cap \text{On} = M[G] \cap \text{On}$ 。
6. $\check{M}_G = M$ 。

特に、 M が可算のときは、Rasiowa-Sikorski のおかげで上の逆も成り立つ：

定理 6.4. $\text{ZF} - \text{P}$ の推移的モデル M 、 $M \cap V^{\mathbb{P}}$ のみをパラメータに持つ \mathcal{FL} -論理式 φ 、擬順序 $\mathbb{P} \in M$ 、 $p \in \mathbb{P}$ に対し、次は同値：

1. $p \Vdash \varphi$ 。
2. $p \in G$ なる任意の (M, \mathbb{P}) -生成的フィルター G に対し、 $M[G] \models \varphi$ 。

6.2 Hamkins-Seabold の強制法の自然主義的正当化

6.3 強制法の実際

TODO: 強制法関係、c.t.m.、自然主義的強制法のどれをつかって、あたかも V の外に出て $V[G]$ を扱っているかのように振る舞ってもいいよ、ということを書く。論文によって強制関係を地道に計算する方法と V 上の強制法を使うのと使い分けがあるよ。c.t.m. は無矛盾性証明のときに使うというよりも、無限組合せ論的な議論を行うときに使うことが多いよ。と書く

7 参考文献

- [1] T. Jech, “Set Theory: The Third Millennium Edition, Revised and Expanded,” 3rd ed., ser. Springer monographs in mathematics. Springer Berlin, Heidelberg, 2012, ISBN: 978-3-540-44761-0.