

まえがき

本日は「数学科展示 ますらぼ」にご来場いただき誠にありがとうございます。本企画は2年前に数学科2013年度進学先輩方(現在多くの方が修士1年生となっています)が始めたもので、それを私達数学科2015年度進学(現学部3年生)が引き継いだものです。つまり「ますらぼ」という企画名や「 $e^{\pi i}$ sode(えびそーど)」という冊子の名前こそ受け継いでいますし、先輩方からご協力・ご指導は頂いていますが、運営している人間はガラッと変わった企画となっています。数学科や「ますらぼ」という名前に泥を塗らないように頑張りたいと思います。

東京大学理学部数学科・大学院数理科学研究科は駒場キャンパスにある学科・研究科です。数学科には東大中の数学を愛する天才・秀才たち約45名が集まります。私達が日々勉強・研究を行う“数理科学研究棟”(別名数理病棟)では、個性豊かな数学を愛する人達が飛んだりはねたり踊ったりしています。院試にじゃがいもを持ってくる人やインターネット上で女子大生と仮定しても矛盾しない発言を繰り返す人や院試の合格発表から逃げるために山にこもる人やいつも裸足で大学に来る人や友人の誕生日をすべて暗記している人や美術や音楽や経済学などの才能もある山岳ガイドや自称女子小学生などがいます。(もちろん普通の人々もたくさんいて多種多様な学科ですが、みな数学が好きという共通点によってまとまりを持っています。)みんなとても面白い人ばかりでここに書いていたらきりがありません。私はこの学科が大好きです。この大好きな学科のありのままの姿を伝えたくて、駒場から本郷まで井の頭線と銀座線と丸ノ内線を乗り継いでやって来ました。

そんな私の大好きな数学科が有志で作上げたこの冊子 $e^{\pi i}$ sodeも今回でvol.3となりました。vol.1では岡潔やブルバキ、ワイエルシュトラスなどの数学者の伝記、vol.2では古田教授へのインタビューや数学科・大学院数理科学研究科の学生へのアンケートや4年生のセミナーの紹介などをしました。vol.3では、数学的なバックグラウンドを持つ方だけでなく数学好きの高校生や一般の方などにも読んでもらえるような記事をたくさん揃えました。普段数学に慣れ親しんでいない方には、数式がたくさん並んでいてびっくりしてしまうかもしれませんが、じっくり読んでいただければと思います。

本企画・冊子を通じて数学に興味を持っていただけたのなら、私達にとってこれほどまでに嬉しいことはありません。図書館や大きな書店に行って数学書を手に入れば家にいながらさらに広い数学の世界を旅する事ができます。東大数学科に興味を持ったという場合は高校生や大学生向けに説明会を開いていますので是非参加してみてください。(伊藤克哉)

目 次

まえがき	i
積分の歩み (山本)	1
§1. 積分のはじまりから微分との関係性まで	1
§2. 厳密化の流れ - Riemann 積分	3
§3. 積分の一般化 - Lebesgue 積分	6
§4. さいごに	11
数理ファイナンス入門 (菊地)	12
§1. はじめに	12
§2. 数理ファイナンスとは	12
§3. 価格づけとは?	13
§4. 確率論からの準備	15
§5. Black-Scholes モデル	17
§6. BS 方程式を解く	18
参考文献	19
あなたにも (間違いが) 分かるフェルマーの定理不完全証明 (笠浦)	20
§0. はじめに	20
§1. 証明は驚くほどたやすかった	20
§2. 数学王国	25
§3. おまけ そのほかの小野田襄二氏の本	26
§4. おわりに	26
ゼータ関数 (田村)	27
§0. はじめに	27
§1. 予備知識	27
§2. $\zeta(s)$ の解析接続	28
§3. 関数等式	30
§4. $\zeta(s)$ の値	30
§5. 解析接続の意味	31
参考文献	31
アーベル圏入門 (鯖白 (奴隷))	33
§1. 圏について	33
§2. アーベル圏について	36
参考文献	48
パズルのコーナー (SP1)	49
スリザーリンク	49

カックロ	50
半群論入門 (佐藤)	51
§0. まえがき	51
§1. 半群論の基礎	51
§2. 商半群, 直積半群	56
§3. 群の概念の一般化	58
§4. あとがき	67
Counterexamples in Topology 傑作撰 (宮本)	68
§1. 概説	68
§2. 分離公理に関する反例	68
§3. コンパクト性に関する反例	70
§4. 連結性に関する反例	71
§5. おわりに	72
編集後記	73

積分の歩み（山本）

高校数学の花形でもある「微分積分」は、解析学という大きな一分野の基本的な操作となっています。しかしながら、これらが現在の解析学においてどのように利用されているか、それに至るまでには数百年に渡る紆余曲折がありました。そこで今回は、特に「積分」という操作について、歴史の中でどのような道を辿ってきたのか、それを大雑把に概観してみたいと思います。

§1. 積分のはじまりから微分との関係性まで

区分求積法

そもそも積分というものは、もともと図形の面積を求める目的で生まれた操作です。面積を求めたい図形を、既に面積をよく知っている図形（長方形、三角形など）で近似していき、その近似した図形の面積の和を考えることで、元の図形の面積の近似値を考えます。図形による近似の精度が上がるほど、面積の近似値も元の面積の値に限りなく「近づいていく」ことが期待できます。このとき「近づいていく」値を図形の面積と定める。つまり、知っている図形によって面積を近似し、極限まで近似することにより面積を得る操作として、積分という概念は誕生しました。

さて、面積を求めたい図形として、「閉区間 $[a, b]$ 上で定義された連続関数 $y = f(x)$ のグラフ、 x 軸、そして2直線 $x = a, b$ で囲まれる部分」というものを考えてみましょう。 a, b の値は何でも同じような議論になるので、 $a = 0, b = 1$ としておきます。面積の近似法としては色々なものが考えられるでしょう。その1つとして、次に紹介する「区分求積法」というものがあります。高校数学でも最後の方に出てくるものですね。

定理 (区分求積法)

閉区間 $[0, 1]$ 上で定義された実数値連続関数 $y = f(x)$ のグラフ、 x 軸、2直線 $x = 0, 1$ で囲まれる部分の符号付き面積 S は、
$$S = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n f\left(\frac{k}{n}\right)$$
 で表される。

ここで、「符号付き面積」というものは、 x 軸より上の部分は正のまま、 x 軸より下の部分は負の面積を持つとしたものです。

さて、この区分求積法がどのようなことを言っているのか説明します。まず、閉区間 $[0, 1]$ を n 等分します。次に、各 $k = 1, 2, \dots, n$ に対し、 $f(x)$ の区間 $\left[\frac{k-1}{n}, \frac{k}{n}\right]$ における振る舞いを、グラフの右の端点 $f\left(\frac{k}{n}\right)$ により近似します。そうすると n 個の長方形により図形が近似されます。左から k 番目の長方形の面積は $\frac{1}{n} f\left(\frac{k}{n}\right)$ です。これら n 個の長方形の面積の総和を取ったのち、 n を ∞ に持っていく極限操作を行ったものが上の区分求積法です。

高校数学では「積分は微分の逆演算」として積分が定義されますが、実際の歴史ではむしろ、高校数学の最後の方に出てくる、この「区分求積法」の方が積分の定義に近いことをしていたというわけです。

微分積分学の基本定理

積分は「図形の面積を求める」ための操作として定義されたということを見ました．この定義において、微分というものは一切出てきません．しかし高校数学で「積分は微分の逆演算」として定義されるように、微分と積分は密接な関係を持っています．では、積分が微分と結びついたのはいつごろでしょうか？ それは Newton や Leibniz が微分法を作り上げた 17 世紀ごろにさかのぼります．彼らはそれぞれ独自に、積分と微分の次のような関係性を見出しました．

定理 (微分積分学の基本定理)

a, b を、 $a < b$ となる実定数、また x_0 を $t \in (a, b)$ を満たす実変数とする．閉区間 $[a, b]$ 上で定義された実数値連続関数 $y = f(x)$ のグラフ、 x 軸、2 直線 $x = a, t$ により囲まれる部分の符号付き面積を $S(t)$ とおくと、 $S(t)$ は t で微分可能で、

$$\frac{dS}{dt}(t) = f(t)$$

が成り立つ．

Leibniz, Newton らによるこの結果は、それまでまったく関係ないと思われていた微分学・積分学を統合するとても強力な定理であり、今日では「微分積分学の基本定理」と呼ばれています．高校数学ではかなり簡単に説明されていますが、歴史的にはこの結論にたどり着くまでにかなり長い時間がかかっていたわけです．この定理が見つかるまで、積分学は近似の仕方等かなり技巧的な議論を要していたのですが、この定理により原始関数を求められさえすれば面積を求められることが分かり、議論が大幅に簡潔になりました．

さて、彼らはこの定理を次のように証明しました．

$t \in (a, b)$ とします．また、 $t < t+h < b$ となる h を考えます．ここで、 $S(t+h) - S(t)$ の値を不等式評価してみましょう． $S(t+h) - S(t)$ の値は、 $y = f(x)$ のグラフ、 x 軸、2 直線 $x = t, t+h$ により囲まれる部分の符号付き面積と考えられます．ですから、 $[t, t+h]$ における f の“最大値”を $M(h)$ 、“最小値”を $m(h)$ とおくと、

$$m(h) \cdot h \leq S(t+h) - S(t) \leq M(h) \cdot h$$

$$m(h) \leq \frac{S(t+h) - S(t)}{h} \leq M(h)$$

が成り立ちます．さて、最大値 $M(h)$ 、最小値 $m(h)$ について、 h が 0 に「限りなく近づく」につれ、ともに $f(t)$ に「限りなく近づく」はずです．つまり、

$$\lim_{h \rightarrow +0} M(h) = \lim_{h \rightarrow +0} m(h) = f(t)$$

が成り立つはずですが、したがって、上の不等式と合わせれば、はさみうちの原理により、

$$\lim_{h \rightarrow +0} \frac{S(t+h) - S(t)}{h} = f(t)$$

が分かります．これと同様に、 $a < t+h < t$ となる h を考えれば

$$\lim_{h \rightarrow -0} \frac{S(t+h) - S(t)}{h} = f(t)$$

が分かりますから、これらを合わせて

$$\frac{dS}{dt}(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{S(t+h) - S(t)}{h} = f(t)$$

が成り立ちます．これで定理が証明されました．

これでめでたしめでたし、と言いたところですが、よく見るとこの証明には曖昧な部分がいくつかあることが分かります．特に「近づいていく」とはどういうことか、その概念が非常にフワフワしています．これは「関数の連続性」という概念に関わってきます．彼らはこれを「無限小」という概念によって説明しようとしたのですが、無限小の厳密な定式化は(当時において)得られませんでした．この定理の証明、そして積分という操作、それらの厳密化はいつごろ、どのように行われたのでしょうか？次の節では、それを見てみようと思います．

§2. 厳密化の流れ - Riemann 積分

極限、連続性の定式化 (ε - δ 論法)

まず、実数や極限、関数の連続性といったものを厳密化しようとする流れが起こったのは18～19世紀ごろのことです．この流れにより、「限りなく近づく」といった表現、関数の連続性という概念は次のように定式化されました．

定義 (関数の極限、関数の連続性)

1. 実数値関数 $f(x)$ について、「 x が a に近づくとき、 $f(x)$ が実数 α に限りなく近づく」とは、「正数 ε を1つ固定したとき、 $^{\exists}|x - a| < \delta (< h)$ を満たす、 $f(x)$ の定義域中の x をどう取っても、 $|\alpha - f(x)| < \varepsilon$ が成り立つような正数 δ が存在する」ことである．このとき、 α を $f(x)$ の $x = a$ における極限といい、

$$\alpha = \lim_{x \rightarrow a} f(x)$$

と表す．

2. 実数値関数 $f(x)$ の定義域の点 a について、

$$f(a) = \lim_{x \rightarrow a} f(x)$$

が成り立つとき、 $f(x)$ は $x = a$ において連続であるという． $f(x)$ の定義域中の全ての点において $f(x)$ が連続であるとき、単に $f(x)$ は単に連続であるという．

これがいわゆる「 ε - δ 論法」というものです．「」内の条件がどういう意味なのか説明します．最初に固定する正数 ε は、極限值 α との誤差に相当します．この ε に対して、 $x = a$ との距離に相当する正数 δ を十分小さくとってやります．これが「 a に限りなく近づく」ということを意味します．そして、 a との距離が δ より小さいような、そんな定義域中の点 x における $f(x)$ の値と、 α の値との“誤差”が ε より小さくなる、ということを要請しているというわけです．

Riemann 積分の定義

こうして、関数の極限や連続性が厳密に定式化されました．この流れの中で、積分の厳密化、区分求積法の一般化として考案されたものが、Riemann による積分の定式化、Riemann 積分です．どのような定式化がなされたのか、それを見てみます．以下、閉区間 $[a, b]$ を定義域とする実数値関数 $f(x)$ を1つ固定します． $f(x)$ の連続性は仮定していないことに注意してください．

まず、Riemann 積分の概念に必要な準備をいくつか行います．

4 積分の歩み (山本)

定義 (分割, 代表点)

1. $a = t_0 < t_1 < \cdots < t_{n-1} < t_n = b$ (n は自然数) となる $n+1$ 個の実数の組 $\Delta = \{t_i\}_{i=0}^n$ を, 閉区間 $[a, b]$ の分割という. この Δ に対し, $t_i - t_{i-1}$ ($i = 1, 2, \dots, n$) の最大値を Δ の分割の幅といい, $|\Delta|$ と表す.
2. n 個の実数の組 $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ が $\Delta = \{t_i\}_{i=0}^n$ の代表点であるとは, 各 $i = 1, 2, \dots, n$ に対して, $\xi_i \in [t_{i-1}, t_i]$ となっていることをいう.

これにより, $y = f(x)$ のグラフ, x 軸, 2 直線 $x = a, b$ により “囲まれる” 部分の符号付き面積を, いくつかの長方形の面積により近似しようとする「Riemann 和」の概念を定義します.

定義 (Riemann 和)

$f(x)$ を上の通りとする. また, $\Delta = \{t_i\}_{i=0}^n$ を $[a, b]$ の分割, $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ を Δ の代表点とする. この $f, \Delta, \{\xi_i\}_{i=1}^n$ に対し,

$$S(f, \delta, \{\xi_i\}_{i=1}^n) = \sum_{i=1}^n f(\xi_i)(t_i - t_{i-1})$$

を, 分割 Δ , 代表点 $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ における f の Riemann 和という.

これは何をしているかということ, $i = 1, 2, \dots, n$ について, 閉区間 $[t_{i-1}, t_i]$ における f の振る舞いを $f(\xi_i)$ により近似し, 各長方形の面積 $f(\xi_i)(t_i - t_{i-1})$ の総和をとるということです. これは「有限個の長方形による近似」であるという点で区分布積法における近似と似ていますが, ところどころ違う点があります. 区分布積法が「区間を等分割」し, 「各区間の右端点など, 分割が決まれば自動的に決まる代表点」を用いるのに対し, Riemann 和による近似は「区間の分割が任意」かつ, 「代表点の取り方も任意」です. この意味で, Riemann 和は区分布積法による近似の一般化となっています.

さて, この近似は, 閉区間 $[a, b]$ の分割が「十分細くなる」と精度が上がっていくことが期待されます. しかし, これは一般には成り立ちません. 先ほどの「連続関数」の概念と同様に, 「閉区間の分割が細くなると近似の精度が上がるような関数」というものを, 次のように定式化します.

定義 (Riemann 可積分関数, 定積分)

閉区間 $[a, b]$ 上で定義された実数値関数 f が Riemann 可積分とは, ある実数値 S が存在して, 次のような性質が成り立つことをいう.

「正数 ε を 1 つ固定したとき, $[a, b]$ の分割 Δ であって, その幅 $|\Delta| < \delta$ であるようなもの, および Δ の代表点 $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ をどのように取っても, Riemann 和 $S(f, \delta, \{\xi_i\}_{i=1}^n)$ に対し, $|S - S(f, \delta, \{\xi_i\}_{i=1}^n)| < \varepsilon$ となるように正数 δ をとることができる。」

また, このときの実数値 S を, f の $[a, b]$ における定積分といい, $\int_a^b f(x)dx$ と表す.

この定義はということが説明します. まず近似の極限值 S を与えます. 続いて, この S と Riemann 和との間に許される誤差 ε が与えられたとします. このとき, 正数 δ を小さくすることが「分割の幅を小さくする」, すなわち「分割を細かくする」ことに相当します. そして, このとき分割 Δ の幅 $|\Delta|$ が δ 未満ならば, Δ の代表点 $\{\xi_i\}_{i=1}^n$ をどのように取っても, その Riemann 和 $S(f, \delta, \{\xi_i\}_{i=1}^n)$ と S との誤差が ε 未満となるということを要請しているわけです. 関数の連続性

のときと似ていますね．

そして，この性質を満たしているような関数，Riemann 可積分関数のみ，その定積分の値を定めるといふことになります．では，Riemann 可積分関数とはどのようなものでしょうか？逆に，Riemann 可積分関数でないような関数とはどのようなものでしょうか？その例をいくつか考えてみましょう．

まず，Riemann 可積分関数の例をみてみます．

- 閉区間 $[a, b]$ 上で連続な関数 f は $[a, b]$ 上で Riemann 積分可能です．証明は実数の性質などの準備がさらに必要になるので省略しますが，これにより先ほどの議論が正当化されたことになります．
- 閉区間 $[a, b]$ 上で有界な関数 f であって，そのうち連続でない点が有限個のみであるようなものは Riemann 積分可能です．なお，ここで「有界な関数」とは，「ある十分大きな正数 M が存在して， $[a, b]$ のどんな点 x であっても $|f(x)| < M$ となる」ことをいいます．

一方，Riemann 可積分でない関数を見てみます．

- 閉区間 $[a, b]$ 上で非有界な関数 $f(x)$ は Riemann 可積分ではありません．なお，非有界であるとは，「どんな正数 M に対しても， $|f(x)| > M$ となる $x \in [a, b]$ が存在する」ということです．この例としては，例えば $[0, 1]$ 上の関数 f であって， $f(0) = 0$ ， $x \in (0, 1]$ なる x に対し $f(x) = 1/x$ となるようなものが該当します．
- 有界な関数であっても，連続でない点全体の集合が「十分大きい」ような関数は Riemann 可積分ではありません．例えば， $[0, 1]$ 上の関数であって， $[0, 1]$ 内の有理数において 1，無理数において 0 となるような関数を考えると，これは $[0, 1]$ のどの点においても不連続です．なお，この関数のグラフは非常に病的な振る舞いをします．そこで，この関数は作者にちなんで「Dirichlet の関数」と呼ばれています．

上の例でも言及したとおり，連続関数は Riemann 積分可能です．また，以上の準備を踏まえると，Leibniz らの「微分積分学の基本定理」の証明も厳密に正当化することができます．こうして，区分求積法から始まった積分の厳密な一般化，定式化が正当に行われました．

Riemann 積分のデメリット

このようにして，積分というものが厳密なものとして再定義されました．実際，この定義の積分で十分な実用性をもつ分野も存在します．ところが，解析学の発展に伴い，この積分の定義では関数の扱い方に若干の不自由が生じることが分かりました．

それは，例えば関数の列 $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ を考えた場合に起こります．この関数列として，「閉区間 $[0, 1]$ において定義される Riemann 可積分関数」の列を取ったとします．さらに，その極限関数，すなわち定義域上の各 x に対して極限値 $\lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ が存在するとき， $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ として定まる関数 f ，が存在するとしましょう．では，この極限関数 f は Riemann 可積分関数でしょうか？そう言い切りたい願望はありますが，残念ながら答えは No です．つまり，各関数が Riemann 可積分関数である列であっても，その極限関数は必ずしも Riemann 可積分とは限りません．極限関数が Riemann 可積分となるような十分条件はいくつか見つっていますが(例えば関数列が「よい収束(一様収束)」をするなど)，それを調べるのは大変なものが多いことが分かっています．つまり，Riemann 積分は極限操作に対してあまり良い振る舞いをしてくれないのです．

しかしながら，極限操作は解析学においては基本的かつ重要な操作であり，それが容易に行えないというのは相当な不自由を強いられるようになります．これについて，極限操作に関してより

よく振る舞うような関数の集合があるのではないだろうか？その1つの答えとして、20世紀初めに積分の新たな定義を与えたのが Lebesgue です。この Lebesgue により与えられた定義が、現代の解析学でもっとも普遍的といっても過言ではない積分の定義、Lebesgue 積分です。以下では、Lebesgue 積分がどのようなものなのか見ていきましょう。

§3. 積分の一般化 - Lebesgue 積分

“大きさ”の公理化・一般化 (測度論)

Lebesgue が積分を再定義するために行った仕事としてまず挙げられるのが、「測度」という概念の導入です。これは、ある集合の部分集合の“大きさ”というものがどのようなものか、その概念を一般化するものです。この“大きさ”というのは、実数直線 \mathbb{R} でいうところの“長さ”， xy 平面 \mathbb{R}^2 でいうところの“面積”に相当します。

似たような概念に、集合上の2点間の「距離」とはどのようなものかということを一一般化した「距離空間」というものがあります。これは次のようなものです。

定義 (距離, 距離空間)

X を集合とする。 X の2点 x, y に対して実数 $d(x, y)$ を返す関数 d が、任意の $x, y, z \in X$ に対して

1. $d(x, y) \geq 0, d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$
2. $d(x, y) = d(y, x)$
3. (三角不等式) $d(x, z) \leq d(x, y) + d(y, z)$

となるとき、 d を X 上の距離関数、あるいは単に距離であるという。また、このとき集合 X と関数 d の組 (X, d) を距離空間という。

これはどういうことでしょうか。端的に述べると、「距離」とはどのような性質を持っているかを考えて、その性質を満たしているものは全部距離と言ってしまう、ということです。極端なものを示すと、集合 X の2点 x, y に対して実数 $d(x, y)$ を返す関数 d を

$$d(x, y) = \begin{cases} 0 & (x = y) \\ 1 & (x \neq y) \end{cases}$$

により定めると、これは上の性質を全て満たしているので、 X 上の距離といえることになります。このように、「満たしてほしい性質」を規定することによる定義の仕方を「公理的に定義する」などと言い、現代数学においてよく用いられます。

これと同様にして、“大きさ”という概念を、測度として公理的に定義してみましょう。以下、この節では xy 平面 \mathbb{R}^2 における部分集合の面積を思い浮かべながらお読みいただければ分かりよいかと思います。

まず、測度というものを考える前段階として、集合 X 上の「有限加法的測度」というものを考えます。そのために、「大きさがちゃんと測れるような X の部分集合」全体の集合 \mathcal{F} と、「そのような部分集合の面積」を与える関数 m とはどのような性質を持っているか考えましょう。

まず \mathcal{F} について、

- 全体の集合 X の大きさは測れてしかるべきでしょう。

- A の大きさが測れるなら, X から A をくり抜いた残り, 補集合 A^c の大きさも測れるはずです.
- A, B の大きさが測れるなら, A と B を合わせたものも測れるはずでしょう.

次に, 実際の “大きさ” の測り方について,

- “大きさ” は 0 以上の値でしょう. 平面 \mathbb{R}^2 の面積が ∞ であることを考えると, “大きさ” は「0 以上の実数が ∞ 」であることが望ましいと考えられます.
- 空集合 \emptyset は全体集合 X の補集合だから “大きさ” が測れるはずですが, 空集合は「何もない」ことの象徴ですから, その “大きさ” は 0 であるでしょう.
- A, B の “大きさ” がはかれて, かつ A と B に共通部分がないとき, A と B を合わせた集合の “大きさ” は A, B の “大きさ” の和であるはずですが.

以上を元に, 次のような定義をします.

定義 (有限加法族, 有限加法的測度)

X を集合とする.

1. 各要素が X の部分集合であるような集合 \mathcal{F} が X 上の有限加法族であるとは, 次が成り立つことをいう:

- (1) $X \in \mathcal{F}$
- (2) $A \in \mathcal{F}$ ならば, $A^c \in \mathcal{F}$
- (3) $A, B \in \mathcal{F}$ ならば, $A \cup B \in \mathcal{F}$

2. X 上の有限加法族 \mathcal{F} の要素 A に対し, 0 以上の実数または ∞ である値 $m(A)$ を対応させる関数 m が \mathcal{F} 上の有限加法的測度であるとは, 次が成り立つことをいう:

- (1) $m(\emptyset) = 0$
- (2) (有限加法性) $A, B \in \mathcal{F}, A \cap B = \emptyset$ ならば, $m(A \cup B) = m(A) + m(B)$

これで “大きさ” というものが有限加法的測度として定式化されました. 長さや面積というのが実際にこれらの性質を満たしているだろうことは直感的にも理解できます. しかし, ここで Lebesgue はこの概念を極限操作に沿うように拡張する一大飛躍を敢行します. それが次に定める「測度」という概念になります.

定義 (完全加法族, 測度)

X を集合とする.

1. 各要素が X の部分集合であるような集合 \mathcal{M} が X 上の完全加法族であるとは, 次が成り立つことをいう:

$$(1) X \in \mathcal{M}$$

$$(2) A \in \mathcal{M} \text{ ならば, } A^c \in \mathcal{M}$$

$$(3) n = 1, 2, \dots \text{ に対して } A_n \in \mathcal{M} \text{ ならば, } \bigcup_{n=1}^{\infty} A_n \in \mathcal{M}$$

2. X 上の完全加法族 \mathcal{M} の要素 A に対し, 0 以上の実数または ∞ である値 $\mu(A)$ を対応させる関数 μ が \mathcal{M} 上の測度であるとは, 次が成り立つことをいう:

$$(1) \mu(\emptyset) = 0$$

$$(2) (\text{完全加法性}) n = 1, 2, \dots \text{ に対して } A_n \in \mathcal{M} \text{ で, } n \neq m \text{ となるとき } A_n \cap A_m = \emptyset \text{ であるならば,}$$

$$\mu\left(\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n\right) = \sum_{n=1}^{\infty} \mu(A_n) \left(= \lim_{m \rightarrow \infty} \sum_{n=1}^m \mu(A_n) \right)$$

またこのとき, 集合 X , 完全加法族 \mathcal{M} , 測度 μ の組 (X, \mathcal{M}, μ) を測度空間という.

なお, $\bigcup_{n=1}^{\infty} A_n$ とは, 「ある自然数 n に対し $x \in A_n$ となっているような x 全体の集合」, すなわち「 A_n たちを全て合わせてできる集合」のことです. つまり, 測度というものは,

- “大きさ” の測れる集合を可算無限個 (自然数全体の集合 \mathbb{N} と同じだけの “個数”) だけ持ってきたとき, それを全て合わせてできる集合の “大きさ” も測れて,
- それぞれの部分集合同士に共通部分がないとき, 合わせてできた集合の “大きさ” は元の集合の “大きさ” を可算無限回足し合わせたものに等しい

ことを要請していることになります. ですから, 完全加法族ならびに測度の定義は, 最後の条件がそれぞれ有限加法族, 有限加法的測度の強化版になっていることが分かります. (あるいは, $n \geq 3$ において $A_n = \emptyset$ においても分かります.) このように「有限個」から「可算無限個」に拡張した部分が, 極限との親和性を上げる決定的な役割を果たします.

さて, 測度をこのように定義しましたが, 有限加法的測度よりも条件が強くなっているのが, 実数直線 \mathbb{R} における「標準的な長さ」や, xy 平面 \mathbb{R}^2 における「標準的な面積」は測度になっているのか? という疑問が残ります. しかしそれは大丈夫で, (証明のためには更なる概念がいくつか必要なので割愛しますが,) 例えば実数直線 \mathbb{R} において, すべての开区間や閉区間, 半开区間を元に持つ完全加法族 \mathcal{M} と, 閉区間 $[a, b]$ に対し $\mu([a, b]) = b - a$ となるような \mathcal{M} 上の測度 μ は確かに存在します. そのような μ はいくつもあります, その中で Lebesgue が作った測度のことを「1次元 Lebesgue 測度」といいます. これは xy 平面 \mathbb{R}^2 , xyz 空間 \mathbb{R}^3 などでも同様です. また, Lebesgue 測度の定義域である完全加法族 \mathcal{M} を「Lebesgue 可測集合」といいます.

\mathbb{R} における Lebesgue 可測集合の例をいくつかみてみましょう. 先述のとおり, \mathbb{R} の开区間, 閉区間, 半开区間はすべて Lebesgue 可測集合です. 特に1点集合 $\{a\}$ は $[a, a]$ とみなせて, Lebesgue 可測集合です. また, Lebesgue 可測集合の可算個の合併も Lebesgue 可測集合なので, \mathbb{R} の可算部分集合 (例えば自然数全体の集合 \mathbb{N} , 整数全体の集合 \mathbb{Z} , 有理数全体の集合 \mathbb{Q}) はすべて Lebesgue 可測集合です. とくに有理数全体の集合 \mathbb{Q} が Lebesgue 可測集合であるので, 無理数全体の集合,

すなわち実数全体における有理数全体の補集合 \mathbb{Q}^c も Lebesgue 可測集合になります。

Lebesgue 積分の定義

ここまで測度論の話をしてきましたが、これが Lebesgue 積分にどのように関わってくるのでしょうか？実は、Lebesgue 積分は、測度空間 (X, \mathcal{M}, μ) を定義域とし、実数全体(あるいは実数全体に $\pm\infty$ を加えた集合)を値にとりうる関数のうち、ある特別な性質を満たす関数に対して定義される操作なのです。

では、以上をもとに、いよいよ Lebesgue 積分を定義します。測度空間 (X, \mathcal{M}, μ) 、および \mathcal{M} の元 E を 1 つ固定します。

まずは Lebesgue 積分が定義できるような関数である「可測関数」から定義していきます。そのために、さらにもう 1 段階、「単関数」という関数の定義をはさみます。

定義(単関数)

定義域 E 上の実数値関数 f が E 上の単関数であるとは、 $f(x)$ の値が 0 以上の実数 a_1, a_2, \dots, a_n のどれかであって、各 $i = 1, 2, \dots, n$ に対し、 X の部分集合

$$E_i = f^{-1}(\{a_i\}) = \{x \in E \mid f(x) = a_i\}$$

が \mathcal{M} の元である ($E_i \in \mathcal{M}$) ことをいう。

1次元 Lebesgue 測度空間としての \mathbb{R} 上の単関数の簡単な例としては、例えば $(0, 1], (1, 2], \dots, (n-1, n]$ 上でそれぞれ 0 以上の実数 a_1, \dots, a_n を値に取り、それ以外では 0 となるような「階段のような」関数が挙げられます。一見病的な例としては、 \mathbb{Q} 上で 1、 \mathbb{Q}^c 上で 0 となる関数(先述した Dirichlet の関数)が挙げられます。

この上で、可測関数を定義します。

定義(可測関数)

1. E を定義域とし、各点 $x \in E$ に対し $f(x) \geq 0$ となるような実数値関数 f が E 上の正值可測関数であるとは、次が成り立つことをいう： E 上の単関数の単調増大列 $\{f_n(x)\}_{n=1}^\infty$ 、すなわち各 $f_n(x)$ が単関数で、 $x \in E, n \leq m$ ならば $f_n(x) \leq f_m(x)$ となるような列、であって、その列の極限関数が $f(x)$ であるような列が存在する。

2. E を定義域とする実数値関数 f が E 上の可測関数であるとは、次が成り立つことをいう： f の“正の部分” f_+ 、“負の部分” f_- を、各 $x \in E$ に対し、

$$f_+(x) = \max\{f(x), 0\}, f_-(x) = \max\{-f(x), 0\}$$

として定めたとき、 f_+, f_- が正值可測関数になっている。

なお、上の f_+, f_- は後に出てくる Lebesgue 積分の定義でも用います。

可測関数の例を挙げてみます。例えば、単関数はそのまま可測関数です。上で定義した正值可測関数 f について、 $f_+(x) = f(x)$ は当然正值可測関数、 $f_-(x) \equiv 0$ は単関数だから正值可測関数です。したがって、正值可測関数もまた可測関数であることが分かります。また、1次元 Lebesgue 測度空間の入った \mathbb{R} 上の連続関数もまた可測関数であることが分かっています。

これで準備が整いました。 E 上の可測関数 f に対し、その Lebesgue 積分 $\int_E f d\mu$ を考えます。簡単のため、まず正值可測関数における Lebesgue 積分から考えます。

定義域 E の正値可測関数 f に対し, 極限関数を f とする単関数の単調増大列 $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ をとります. 各 $f_n(x)$ の取り得る値を $a_{n,1}, a_{n,2}, \dots, a_{n,m_n}$ とおき, さらに各 $i = 1, 2, \dots, m_n$ に対し, $E_{n,i} = \{x \in E \mid f(x) = a_{n,i}\}$ と定めます. このときの値

$$\sum_{i=1}^{m_n} a_i \mu(E_{n,i})$$

は n について単調増加ですので, この値の $n \rightarrow \infty$ における極限は実数値か ∞ のどちらかです. この値の $n \rightarrow \infty$ における極限値を f の Lebesgue 積分, すなわち

$$\int_E f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^{m_n} a_i \mu(E_{n,i})$$

と定めます. なお, この定め方には「単関数の単調増大列の取り方によるのではないか?」という疑問が残りますが, これは取り方によることなく, 全て同じ値になることが分かっています.

この操作は何をしているのでしょうか? 1 次元 Lebesgue 測度空間 \mathbb{R} を例に説明します. 単関数により $f(x)$ を下から近似し, f により定まる部分集合の面積を下から近似します. 都合のいいことに, その値は n について単調増大であることが分かっているので, その $n \rightarrow \infty$ における極限をとることで面積を求めようとしているということになります.

以上を踏まえて, 一般の可測関数 f の Lebesgue 積分を次のように定めます.

定義 (Lebesgue 積分, Lebesgue 可積分関数) —

定義域 E の可測関数 f について, 可測関数の定義同様に f_+, f_- を考える.

1. $\int_E f_+ d\mu, \inf_E f_- d\mu$ のうち, 少なくとも一方が実数であるとき, f は定積分をもつといい,

$$\int_E f d\mu = \int_E f_+ d\mu - \int_E f_- d\mu$$

を f の E における定積分という. これは実数値か $\pm\infty$ のいずれかの値をとる.

2. さらに, $\int_E f d\mu$ が実数値となるとき, f は E 上の Lebesgue 可積分関数であるという.

さて, このように Lebesgue 積分を定義しましたが, これは既に定義されていた Riemann 積分とどのような関係があるのでしょうか? 実は, 1 次元 Lebesgue 測度空間 \mathbb{R} の閉区間 $[a, b]$ における Riemann 可積分関数 f は可測関数かつ Lebesgue 可積分関数であって, さらにその Lebesgue 積分は Riemann 積分と一致することが示されます. この意味で, Lebesgue 積分は Riemann 積分の拡張といえるでしょう.

Lebesgue 積分の恩恵

Lebesgue 積分を定義しましたが, これがどのような利点を持っているのでしょうか? いくつかありますが, まず思いつくこととしては, 1 次元 Lebesgue 測度空間 \mathbb{R} における Riemann 積分の真の拡張になっていることがあります. すなわち, Lebesgue 可積分関数全体の集合は Riemann 可積分関数全体の集合を真に包含していて, しかも Riemann 可積分関数においては, その Riemann 積分と Lebesgue 積分が一致しているということです. Riemann 可積分でなく Lebesgue 可積分であるような関数としては, 先述の Dirichlet の関数を挙げられます.

また, Lebesgue 積分を導入するモチベーションの 1 つでもありましたが, 極限操作との親和性が高いことも利点として挙げられます. 例えば, Lebesgue 積分の定義において用いた「可測関数」と

いう概念について、可測関数列 $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ の極限関数 $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ が存在するとき、極限関数 $f(x)$ もまた可測関数になることが分かります。また、Lebesgue 可積分関数の列 $\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ の極限関数 $f(x) = \lim_{n \rightarrow \infty} f_n(x)$ は残念ながら一般には Lebesgue 可積分関数とは限りませんが、それが Lebesgue 可積分関数となる十分条件としては比較的簡単なものが見つかっています。例えば、次のような定理があります。

定理 (Lebesgue の優収束定理)

$\{f_n(x)\}_{n=1}^{\infty}$ を、測度空間 (X, \mathcal{M}, μ) の可測集合 $E \in \mathcal{M}$ を定義域とする可測関数の列とする。すべての自然数 n および点 $x \in E$ に対し、 $|f_n(x)| \leq \varphi(x)$ となるような Lebesgue 可積分関数 $\varphi(x)$ が存在すれば、極限関数 $f(x)$ も Lebesgue 可積分関数で、さらにその定積分について、

$$\int_E f d\mu = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_E f_n d\mu$$

が成り立つ。

さらに、Riemann 積分はあくまで \mathbb{R} (あるいは一般化して \mathbb{R}^n) 上の積分しか考えることができませんでしたが、Lebesgue 積分は測度の定まった空間上の可測関数であれば何でも積分することができます。これは“大きさ”というものを測度として一般化した結果です。この応用例として顕著なものとしては、確率論をあげることができます。これは、「見本空間」と呼ばれる集合において、「事象」を見本空間の部分集合を要素とする完全加法族の元、「ある事象のおこる確率」というものを測度としてみなすことで、見本空間を測度空間とします。その上での Lebesgue 積分としては、見本空間を定義域とする実数値可測関数 (確率関数) の積分などがあります。

このようにして、単なる「図形の面積」という概念から離れて、積分というものがより様々な状況に対応できるように抽象化・一般化されていきました。

§4. さいごに

現代数学までの「積分」という概念の変遷を見てきました。数学の基本的な概念 1 つ取ってみても、その定式化には長い紆余曲折があったということがお分かりいただけたのではないのでしょうか。1 つの概念をより厳密に考察し、さらに元来の目的以外でも用いることが出来るような一般化・抽象化を行っていく。そういった数学の奥深さといったものを感じていただければ幸いです。

数理ファイナンス入門（菊地）

§1. はじめに

この記事では、数理ファイナンスという分野を紹介します。数理ファイナンスというとなんだか数学科らしくないではないかと思われる方もいらっしゃるかもしれませんが、現在では数学の中の応用数理の中の分野の一つとして認められています。数理ファイナンスでは、株価などの資産の値動きを確率的事象として捉えます。ここでは、主に数理ファイナンスのさきがけとなった Black-Scholes モデルについて解説します。この業績で Scholes と Merton¹⁾ は 1973 年のノーベル経済学賞を受賞しました。²⁾ 数学的な用語は最低限に抑えて解説をしたつもりです。

§2. 数理ファイナンスとは

数理ファイナンスはもともとデリバティブ（金融派生商品）の価格付けを目的に始まりました。

基本的な用語

- 危険資産：株式や債券などの不確実な出来事の影響で価格が決まる資産のこと。
- 安全資産：銀行預金のように確実な資産。
- デリバティブ³⁾：株式や債券、農産物や鉱石などを原資産とする派生商品。
- ポートフォリオ：投資家が保有している資産の組み合わせのこと。たとえば、A 社の株式 a 単位、銀行預金 b など。

例 ヨーロピアンオプション

ヨーロピアンオプションは 2 つのパラメータ満期日 T と行使価格 K によって特徴づけられます。満期日 T 、行使価格 K のヨーロピアンコールオプションとは、満期日 T （現在時刻は $t = 0$ とします。）にある危険資産 1 単位を行使価格 K で購入できる権利のことを言います。（権利なので、満期日に買わなくてはならないというわけではありません。）また、逆に満期日 T に行使価格 K である危険資産を 1 単位売ることができる権利のことをヨーロピアンプットオプションといいます。他にも、満期日以前のどのタイミングでも権利を行使できるアメリカンオプションなどデリバティブの種類はかなりたくさんありますが、今回はヨーロピアンコールオプションの適切な価格付けを考えます。まずは、ヨーロピアンコールオプションのペイオフ（購入者への支払い）について考えておきましょう。

時刻 $t(0 \leq t \leq T)$ における原資産の価格を $S(t)$ とします。合理的なヨーロピアンコールオプションの購入者は、

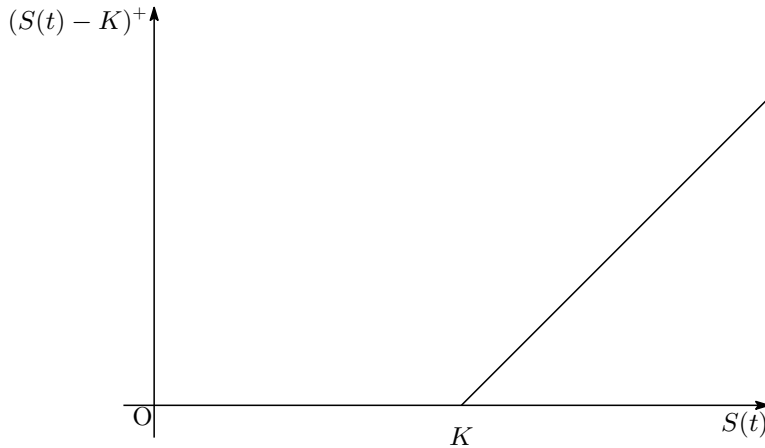
$$\begin{cases} S(t) > K \implies \text{権利行使} \\ S(t) \leq K \implies \text{権利破棄} \end{cases}$$

¹⁾ Merton は誰かということ、Black と Scholes の議論を厳密に証明した人です。

²⁾ Black は 1995 年に亡くなってしまったのでノーベル賞は受賞していません。

³⁾ 実はデリバティブの考え方は自然なものです。例えば、<http://www.shiruporuto.jp/finance/kinyu/deriv/> に起源などに関する説明が載ってます。

となるように行動します．したがって、ペイオフは $(S(t) - K)^+$ となります．ただし、 $(S(t) - K)^+ = \max\{S(t) - K, 0\}$ とします．グラフは次のようになります．



基本的な仮定

数学的なモデルを作るにあたって、以下のような仮定をします．

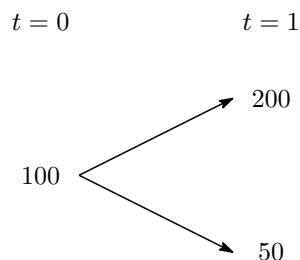
- 株式に配当はない．
- 任意の時刻で危険資産に価格が付いており、その価格で任意の実数単位での売買が可能．
- 空売り（保有していない資産を他者から借りてきて売る行為．当然、借りた資産は将来の適当な時点で返却しなければならない．）も可能．
- 任意の時刻で任意の実数金額の銀行預金、借り入れが可能．
- 預金金利と借り入れ金利は等しい．
- 手数料や税金は一切なし．

他にも、現実の世界との差を書くべきところがあるかもしれませんが、以降は理想的な市場であると考えてください．

§3. 価格づけとは？

ここでは、1 期間二項モデルと呼ばれる単純なモデルで価格付けはどのようにして行われるべきかを考えます．

ある株式を原資産とする満期日 $T = 1$ 、行使価格 $K = 125$ のヨーロピアンコールオプションについて考えます．二項モデルでは、時間は離散的なもの ($t = 1, 2, 3, \dots$) として、各時点において株価は次の時点に移るときに 2 つの可能性のみを考えます．ここでは、原資産である株式の値動きは次のようになるとします．また、金利は $r = 0.25$ とします．



この場合のペイオフは

$$\begin{cases} S(1) = 200 \implies 75 \\ S(1) = 50 \implies 0 \end{cases}$$

となります．このとき，次の投資戦略を考えます．

$t = 0$:

	現金	株式保有数
初期保有	30	0
銀行から 20 借り	+20	± 0
株式 0.5 単位買い	-50	+0.5
	0	0.5

$t = 1$:

$S(1) = 200$ のとき	現金	株式
$t = 0$ での保有	0	0.5
株式 0.5 単位売り	+100	-0.5
銀行に 25 返す	-25	± 0
	75	0

$S(1) = 50$ のとき	現金	株式
$t = 0$ での保有	0	0.5
株式 0.5 単位売り	+25	-0.5
銀行に 25 返す	-25	± 0
	0	0

この投資戦略のペイオフはヨーロピアンコールオプションと一致しています．このとき，この投資戦略はヨーロピアンコールオプションを複製すると言います．この複製にかかった費用は初期費用の 30 だけです．このとき，ヨーロピアンコールオプションの価格は 30 になることが次のような経済学的な議論によって確認できます．

実際，価格が 30 よりも高いとすると，ヨーロピアンコールオプションを売って，上と同じ投資戦略を，30 よりも低い場合は，ヨーロピアンコールオプションを買って，上と逆の投資戦略を取ると，それぞれ 30 との差額分の利益が確実に得られる．（これを裁定機会という．）このように複製費用と市場価格の間に乖離があるとすれば，市場の人たちはみな裁定機会を用いて利益をあげようとするので，需要と供給の関係によって，価格が 30 よりも高い場合は，価格が下がり，30 よりも低い場合は価格が上がる．また，均衡価格は 30 である．

このように経済学的に妥当な議論を加えることによって，適正な価格付けを以下のように定めることができます．⁴⁾

デリバティブの市場価格は複製費用と一致する．また，この価格のことを裁定価格という．

以下，価格付けと言ったら，裁定価格を求めることを指すことにし，裁定価格は複製費用であるとします．

⁴⁾ 実際にはデリバティブがいつでも複製可能とは限りません．また，複製の方法もひと通りとは限りません．

§4. 確率論からの準備

前節では二項モデルを用いて適正価格とはなにかを考えました．しかし，二項モデルはあまりにも現実世界との乖離が大きいです．したがって，これからは時間を連続（時間を実数にして考えるということです．）⁵⁾ にとって考えることを考えます．⁵⁾

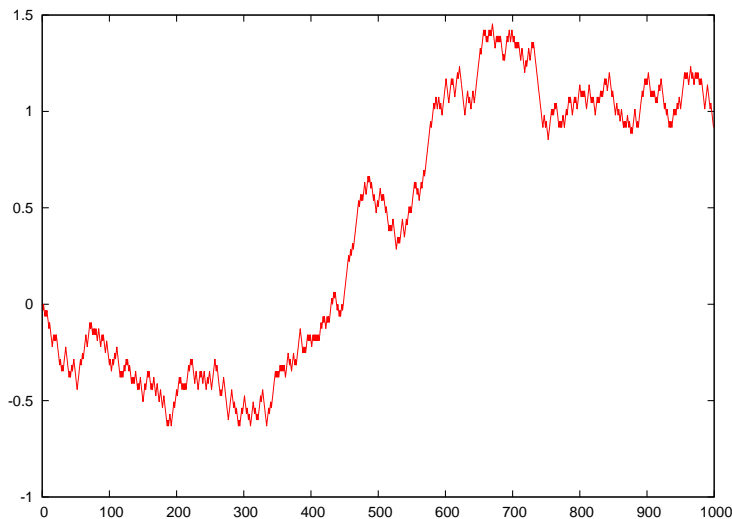
ブラウン運動

連続時間でランダムな動きを記述する最もスタンダードな方法は次にあげるブラウン運動を用いる方法です．

ブラウン運動 $W(t)$ とは，以下を満たすものです．⁶⁾

- i) $W(0) = 0$.
- ii) $0 = t_0 < t_1 < \cdots < t_n = T$ に対して，各増分 $W(t_{i+1}) - W(t_i)$ は互いに独立で平均 0, 分散 $t_{i+1} - t_i$ の正規分布に従う．

たとえば，ブラウン運動は次のような道を持ちます．



確率積分

確率積分とはブラウン運動に沿った積分のことです．つまり，被積分関数と微小時間におけるブラウン運動の差分をかけあわせたものを足しあげたものが確率積分です．⁷⁾ これは数理ファイナンスで言うと，ある時刻から他の時刻までの利益を計算するときに使います．確率積分は次のように書かれます．

$$X = \int_0^T f(t) dW(t).$$

また，これは直感的な理解がしやすいように微分形で書かれることもあります．

⁵⁾ もちろん，現実世界でも連続的に取引は行われているわけではありませんが，最近ではミリ秒単位で売買を繰り返す HFT (High Frequency Trade) が主流になっているようなので，近似として連続時間を考えることはそれほど的外れではありません．

⁶⁾ 数学的に厳密な定義ではありません．

⁷⁾ これはざっくりとした説明です．数学的に厳密に確率積分を構成するには確率論の知識が必要です．

$$dX = f dW.$$

伊藤の公式と伊藤過程

次は伊藤の公式と呼ばれているもので、通常の微積分で言うと合成関数の微分公式にあたります。

$$df(t, W(t)) = \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial f}{\partial x} dW + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dt.$$

これは、形式的に左辺を Taylor 展開することによって、次のような規則であると考えられます。

$$dW dW = dt, \quad dt dW = dW dt = 0, \quad dt dt = 0.$$

また、次のような形を持つものを伊藤過程と言います。

$$dX(t) = \Delta(t) dW(t) + \theta(t) dt.$$

伊藤過程についての積分を次のように定義します。

$$\int_0^T \Gamma(t) dX(t) = \int_0^T \Gamma(t) \Delta(t) dW(t) + \int_0^T \Gamma(t) \theta(t) dt.$$

伊藤過程についても伊藤の公式が成り立ちます。

$$\begin{aligned} df &= \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial f}{\partial x} dX + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2} dt dt + \frac{\partial^2 f}{\partial t \partial x} dt dX + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dX dX \\ &= \frac{\partial f}{\partial t} dt + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta dW + \frac{\partial f}{\partial x} \theta dt + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \Delta^2 dt. \end{aligned}$$

例 幾何ブラウン運動

定数 α と σ に対して、

$$X(t) = \int_0^t \sigma dW(s) + \int_0^t \left(\alpha - \frac{1}{2} \sigma^2 \right) ds$$

とおきます。また、定数 $S(0)$ と $f(x) = S(0) \exp x$ に対して

$$S(t) = f(X(t))$$

を幾何ブラウン運動と言います。実は、幾何ブラウン運動は1期間二項モデルを多期間にして、極限を取ると現れます。

伊藤の公式によって次が成り立ちます。

$$\begin{aligned} dS(t) &= df(X(t)) \\ &= \frac{\partial f}{\partial x} dX(t) + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} dX dX \\ &= S(t) dX(t) + \frac{1}{2} S(t) \sigma^2 dt \\ &= \alpha S(t) dt + \sigma S(t) dW(t). \end{aligned}$$

§5. Black-Scholes モデル

それではファイナンスの話題に戻りましょう．ここでは最もスタンダードな Black-Scholes モデルを考えます．このモデルは，1 種類の株式と 1 種類の銀行預金が存在する市場について分析します． $S(t)$ を時刻 t での株価とします．ここでは， $S(t)$ は幾何ブラウン運動に従うものとします．

$$dS(t) = \alpha S(t)dt + \sigma S(t)dW(t).$$

また，金利は $r > 0$ とします．次に， $X(t)$ を時刻 t でのポートフォリオの価値とします．すると， $X(t)$ は次の確率微分方程式を満たします．

$$dX(t) = \Delta(t)dS(t) + r(X(t) - \Delta(t)S(t))dt.$$

ただし， $\Delta(t)$ は時刻 t での株式保有数とします．この式は，右辺の第 1 項が株式への投資額，第 2 項が銀行預金の額の微小時間における差分を表しています． $dS(t)$ に幾何ブラウン運動を代入して計算を進めると，

$$dX(t) = rX(t)dt + \Delta(t)(\alpha - r)S(t)dt + \Delta(t)\sigma S(t)dW(t)$$

となります．ここで， $c(t, x)$ を時刻 t ，株価 x でのヨーロピアンコールオプションの価格とします．すると，伊藤の公式より，

$$\begin{aligned} dc(t, S(t)) &= \frac{\partial c}{\partial t}dt + \frac{\partial c}{\partial x}dS + \frac{1}{2}\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}dSdS \\ &= \frac{\partial c}{\partial t}dt + \frac{\partial c}{\partial x}(\alpha S(t)dt + \sigma S(t)dW(t)) + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}dt \\ &= \left(\frac{\partial c}{\partial t} + \alpha S(t) \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \right) dt + \sigma S \frac{\partial c}{\partial x}dW \end{aligned}$$

となります．したがって，ポートフォリオ $X(t)$ でヨーロピアンコールオプションを複製するためには，

$$X(0) = c(0, S(0)), \quad dX(t) = dc(t, S(t))$$

となれば良いので， dW の項を比較して

$$\Delta(t) = \frac{\partial c}{\partial x}(t, S(t)),$$

dt の項を比較して，

$$\begin{aligned} rX(t) &= rc(t, S(t)) \\ &= \frac{\partial c}{\partial t}(t, S(t)) + rS(t) \frac{\partial c}{\partial x}(t, S(t)) + \frac{1}{2}\sigma^2 S^2(t) \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}(t, S(t)) \end{aligned}$$

となります．最初の式は，株式保有数は右辺のようにすればよいということを示しています．これはデルタヘッジと呼ばれます．また，第 2 式から

$$rc(t, x) = \frac{\partial c}{\partial t}(t, x) + rx \frac{\partial c}{\partial x}(t, x) + \frac{1}{2}\sigma^2 x^2 \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}(t, x)$$

と適当な境界条件を満たす $c(t, x)$ を見つければ良いことが分かります．この偏微分方程式を Black-Scholes 方程式と言います．

§6. BS 方程式を解く

では,最後に Black-Scholes 方程式を解きましょう.まずは, $y = \log x$ と変数変換します.すると,

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial x} &= \frac{1}{x} \frac{\partial}{\partial y}, \\ \frac{\partial^2}{\partial x^2} &= -\frac{1}{x^2} \frac{\partial}{\partial y} + \frac{1}{x^2} \frac{\partial^2}{\partial y^2}\end{aligned}$$

となります.また, $\tau = T - t$ とすると,

$$\frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\partial}{\partial \tau}$$

となります.これらの変数変換によって Black-Scholes 方程式は次のように変形できます.

$$-\frac{\partial c}{\partial \tau} + \left(r - \frac{1}{2}\sigma^2\right) \frac{\partial c}{\partial y} + \frac{1}{2}\sigma^2 \frac{\partial^2 c}{\partial y^2} - rc = 0.$$

次に,

$$\begin{cases} \alpha = \frac{1}{2} - \frac{r}{\sigma^2} \\ \beta = -\frac{1}{8\sigma^2}(\sigma^2 + 2r)^2 \end{cases}$$

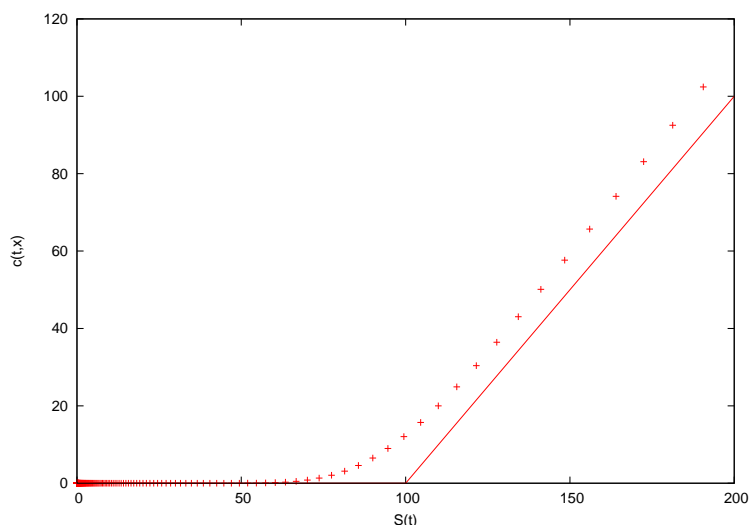
に対して, $c = \exp(\alpha y + \beta \tau)U$ とすると,

$$-\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{2}\sigma^2 \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} = 0$$

となります.ここで, τ を改めて $\frac{1}{2}\tau\sigma^2$ とすると,

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} = \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$$

となります.これは,熱伝導を記述する熱方程式というものになっています.このように変形して数値計算すると, $c(t, x)$ は次のような形になることが分かります.⁸⁾ ただし,実線はペイオフを表し,点が数値計算により得られたヨーロピアンコールオプションの価格を示しています.



⁸⁾ Black-Scholes 方程式は解析解を持ちますが,長くなるのでここでは省略します.

参考文献

- [1] Steven E. Shreve, “Stochastic Calculus for Finance II Continuous-Time Models”, Springer
- [2] 関根順, “数理ファイナンス”, 培風館

あなたにも (間違いが) 分かるフェルマーの定理不完全証明 (笠浦)

§0. はじめに

厳密な論証のみを主張の根拠とする数学の分野においては、「トンデモ」とよばれるものは存在しないと思われがちだが、実はそうでは無い。

長年数学雑誌の編集に携わってきた亀井哲治郎氏によると、「フェルマーの定理」や「四色問題」といった有名な数学の問題を「解いた」という投書が後を絶たないのだという。当然それらの「証明」が数学雑誌に掲載されることはないため、彼らがいかなる誤りを犯していたのかは知るよしもない。しかし中には、自身の「証明」の出版にまでこぎつけたアマチュア数学者もいる。

この記事ではそうした例の一つを紹介する。

あるとき私は、東大駒場図書館の数学書の棚に、数論の教科書に交じって「あなたも解けるフェルマーの定理完全証明」という本が置かれているのを見つけた。

フェルマーの定理とは、 $n \geq 3$ のとき方程式

$$a^n + b^n = c^n$$

は自然数解を持たないという主張である。

17 世紀の数学者フェルマーが本の余白にこの式を書き込んで以後、三百年以上もの間、多くの数学者が証明に取り組み、ついに 1995 年にアンドリュウ・ワイルズによって完全な証明がなされた。(証明までの経緯はサイモン・シンによるドキュメンタリー「フェルマーの最終定理」に詳しく書かれている。)

ワイルズによる証明は極めて専門的かつ長大であるので、「あなたにも解ける」とはどういうことかと中身を覗いてみたところ、案の定「アレな本」であった。こんな本を開架においておく駒場図書館もどうかと思ったが、これはきっと「情報の正しさを自分で判断するリテラシーを身につけてほしい」という司書さんからのメッセージだと判断し、「証明」の検証を行うことにした。

§1. 証明は驚くほどたやすかった

小野田襄二著「あなたも解けるフェルマーの定理完全証明」(めいけい出版 2003 年)は 300 ページほどの本だが、6 部構成になっており、定理の証明自体は最初の 20 ページほどを占める第 1 部「フェルマーの定理の証明 I」で済んでいる。残りの第 2 部～第 6 部はその解説や別証明に充てられている。第 1 部の扉には(証明は驚くほどたやすかった)と書かれており、なるほど人類を三百年以上も悩ましてきた難問がなんの前準備もなく 20 ページで解けるならば驚くべきことだろう。

第 1 部の扉の文言をさらに引用すると、

ビックリ玉手箱の蓋を開けたら【証明の王子】がささやいた

2003 年 4 月 17 日のことでした。【証明の王子様】がささやいてくれたのです。それはそれは、驚くほど簡単で、喉から手が出るほど欲していたものでした。【証明の王子様】のしめくくりのことばを紹介します。

【人間の英知】のために人類に贈り物を捧げよう．

ユーモアのつもりなのかもしれないが，完全に危ない人である．玉手箱の蓋を開けてはいけない．

それでは小野田氏による証明を見ていこう．なお，この本の文章はところどころわかりにくいところがあり，わたしが読み取れた範囲で論理を組み立てなおしている部分があることをお断りしておく．変数名や括弧の付け方は小野田氏のオリジナルに従った．

まずフェルマーの方程式

$$a^n + b^n = c^n$$

の両辺を a, b, c の最大公約数で割り， a, b, c はそれぞれ互いに素としてよいことを示している．こままでは普通である．つぎに「 $n = 3$ の証明によって， $n \geq 3$ のすべてを証明してくれる」と主張して $n = 3$ の場合の証明に移っている．

$n = 3$ のときの証明 矛盾とその解消

小野田氏はまず，

$$b^3 = c^3 - a^3 = P$$

とおき，この式を①としている．さらに

$$c^3 - a^3 = b \cdot b^2$$

と変形し，この式を②としている．さきほどほとんど変わらない式なのでわざわざ②とおく必要もない気がするが，まあいいだろう．

②の左辺を因数分解して，

$$(c - a)(c^2 + ca + a^2) = b \cdot b^2$$

とし，さらに $(c - a)^2 \neq c^2 + ca + a^2$ であることから，

$$(c - a) \neq b$$

$$(c^2 + ca + a^2) \neq b^2$$

を導いている．こままではよい．

ところがこの式が書いてある部分の小見出しは「①と②は矛盾を引き起こす」である．べつに $(c - a)(c^2 + ca + a^2) = b \cdot b^2$ と上の式とは矛盾していない．これはどういうことなのだろうか？

さらにこの 3 ページ後，「①と②との矛盾をクリアーする」という謎の小見出しが登場する．「矛盾をクリアー」するとはどういうことなのだろうか．

「矛盾をクリアーする」という節の内容を読んでみると，

最初の因数分解

$$(c^3 - a^3) = b \cdot b^2$$

$$(c^3 - a^3) = (c - a)(c^2 + ca + a^2)$$

が引き起こした矛盾は，素数の要素が二つ以上あることを念頭に入れていなかったからである．つまり，素数の要素が一つのときは，互いに素な二つの因数， $(c - a)$ と $(c^2 + ca + a^2)$ に b^3 を分けられない，あまりに当たり前のことを語っていただけのことである．

要するに、「 b が素数の時しか考えてなかったから矛盾したような気がしたけど、よく考えたらそんなことなかったぜテヘペロ」ということらしい。しかし読者としては、小野田氏が b が素数の場合しか考えてなかったことなど知る由もないし、こんな初歩的な混乱に読者をつき合わせる必要がどこにあるのだろう。

さらに言うと、 $(c-a) \neq b$ という式は今後使わない。なんのための議論だったのか。

$n=3$ のときの証明 つづき

気を取り直して先に進もう。小野田氏によると、 a, c は互いに素であることから、 $(c-a)$ と $(c^2 + ca + a^2)$ の最大公約数は 1 か 3 である。 $c^2 + ca + a^2 = (c-a)^2 + 3ca$ なのでこれは正しい。このことから小野田氏は

- $(c-a)$ と $(c^2 + ca + a^2)$ が互いに素なとき、

$$\begin{aligned}(c-a) &= (b_1)^3 \\ (c^2 + ca + a^2) &= (b_2)^3 \\ b &= b_1 b_2\end{aligned}$$

- $(c-a)$ と $(c^2 + ca + a^2)$ の最大公約数が 3 のとき、

$$\begin{aligned}(c-a) &= 3(b_1)^3 \\ (c^2 + ca + a^2) &= 3^{3q-1}(b_2)^3 \\ b &= 3^q b_1 b_2\end{aligned}$$

または、

$$\begin{aligned}(c-a) &= 3^{3q-1}(b_1)^3 \\ (c^2 + ca + a^2) &= 3(b_2)^3 \\ b &= 3^q b_1 b_2\end{aligned}$$

と場合分けする。二番目の場合分けは実際には不要だが、ここまではいい。問題はそのあとの節である。

小野田氏は、第一の場合の二番目の式

$$(c^2 + ca + a^2) = (b_2)^3$$

の左辺を因数分解して、

$$(c^2 + ca + a^2) = (c - \sqrt{ca} + a)(c + \sqrt{ca} + a)$$

とする。 ca が平方数でなければ、右辺の因数は整数にはならない。ここで小野田氏は奇妙な主張をする。

\sqrt{ca} が整数でなければ (無理数ならば)、 $(c^2 + ca + a^2)$ は、 $1 \cdot (c^2 + ca + a^2)$ を除いて、整数の積で表せないことを意味する。

意味するとは思えない。小野田氏の主張によれば、 a, c がいくつかの条件を満たしさえすれば $(c^2 + ca + a^2)$ は必ず素数になることになるが、そんなに簡単に素数が作れたら大変である。実際、

$a = 3, c = 5$ とでも置いてみれば $c^2 + ca + a^2 = 49 = 7^2$ となるが, $ca = 15$ は平方数ではない. どうして意味すると思ったのかよくわからない.

この主張は完全に誤りであるが, これを認めてしまえば証明はすぐそこである.

$(b_2)^3$ は素数ではないので, ca は平方数で, a, c は互いに素なので $a = A^2, c = C^2$ と書ける. すると

$$(C^2 + CA + A^2)(C^2 - CA + A^2) = (b_2)^3$$

ここで A と C は互いに素であることから, $(C^2 + CA + A^2)$ と $(C^2 - CA + A^2)$ も互いに素であることが導かれる. このことから,

$$(C^2 + CA + B^2) = (B_1)^3$$

$$(C^2 - CA + B^2) = (B_2)^3$$

と書ける.

ここで,

$$(C^2 + CA + B^2) = (C - \sqrt{CA} + A)(C + \sqrt{CA} + A)$$

$$(C^2 - CA + B^2) = (C - \sqrt{3CA} + A)(C + \sqrt{3CA} + A)$$

を用いれば, 先ほどと同様の (破綻した) 論法により CA と $3CA$ はともに平方数となるが, これは $\sqrt{3}$ が無理数であることに矛盾する. 証明終了.

先ほどの場合分けの第二, 第三の場合も本質的には同じである.

証明の問題点

上記の証明の問題点は, そもそも論理が破綻しているというのもあるのだが, $(c - a) = (b_1)^3$ という条件を使わず, $(c^2 + ca + a^2) = (b_2)^3$ という式のみから矛盾を導こうとしていることである. 小野田氏は「 $(c^2 + ca + a^2) = (b_2)^3$ の条件吟味が全てだ」と小見出しで宣言しているが, これはまずい. なぜなら $(c^2 + ca + a^2) = (b_2)^3$ には

$$1^2 + 1 \cdot 18 + 18^2 = 7^3$$

$$17^2 + 17 \cdot 36 + 36^2 = 13^3$$

$$17^2 + 17 \cdot 73 + 73^2 = 19^3$$

などの解があるし, $(c^2 + ca + a^2) = 3(b_2)^3$ のほうも,

$$17^2 + 17 \cdot 20 + 20^2 = 3 \cdot 7^3$$

$$19^2 + 19 \cdot 70 + 70^2 = 3 \cdot 13^3$$

などの解がある.

したがって第一の条件を無視し第二の条件に的を絞った小野田氏の方針は, 失敗が宿命づけられていたといえる.

$n \geq 3$ のときの証明

$n = 3$ のときの証明ですすでに破綻しているが、それ以上に気になるのは n が一般の場合に拡張できないことである。「 $n = 3$ の証明によって、 $n \geq 3$ のすべてを証明してくれる」とはなんだったのか。

「 $n \geq 3$ のときの証明」の章は次のように始まっている。

$$b^n = c^n - a^n$$

において、 b^n の約数 $b^{n-1}, b^{n-2}, \dots, b^2$ に対応する $(c^n - a^n)$ の約数が存在するためには

$$c^n - a^n = (c - a)(c + a)^{n-1}$$

で表されなければならない。

なぜだ。どうしてそうなるのかわたしには全く分からない。

$c^n - a^n = (c - a)(c + a)^{n-1}$ が成り立つのは $n = 2$ のときのみだ、だから $n \geq 3$ のときは自然数解は存在しない、証明終了、となっているが、証明になっていないだけでなく、 $n = 3$ のときの証明ともつながっていない。

実は「 $n = 3$ のときの証明」の章の最後で小野田氏は、 $(c^2 + ca + a^2) = (b_2)^3$ の左辺が $(c^2 + 2ca + c^2)$ か $(c^2 - 2ca + a^2)$ だったら、 $(c + a)^2$ や $(c - a)^2$ と因数分解できるので無数の整数解を簡単に見つけられることを指摘している。それはそうなのだが、しかしそのことがこの式にどうつながるのだろうか？ なんにせよ飛躍が多すぎて証明になっていない。

第二の証明

この本の第四部は「フェルマーの定理の証明 II」と題されており、第 1 部とは別の「証明」が書かれている。この証明は「第 1 部の証明を知ってしまった今となっては、まことに色あせたもの」らしく、なるほど第 1 部より長く、さらに読みづらい。

しかしどうも第 1 部と同種の誤りを犯しているようである。まず、 $(c^2 + ca + a^2)^{\frac{1}{3}}$ が整数になりえないことを示す、という間違った方針をとっている。

$$L = (c^2 + ca + a^2)^{\frac{1}{3}}$$

とおき、 $M = c + a$ においてこれを

$$ca = M^2 - L^3$$

と変形する。ここまではいい、しかしこのあと、 $M^2 - L^3$ の「因数分解」として

$$M^2 - L^3 = (M^{\frac{2}{3}} - L)(M^{\frac{4}{3}} + M^{\frac{2}{3}}L + L^2)$$

および

$$M^2 - L^3 = (M - L^{\frac{3}{2}})(M + L^{\frac{3}{2}})$$

なる計算を行い、左辺が合成数なので、右辺の因数が整数になると考えてしまっているようである。もちろん実際にはこれらが整数になるとは限らない。

まとめ

どうして小野田氏はこのような奇妙な「証明」を行ってしまったのだろう。

どうも小野田氏は、式として因数分解できるということと、その式に値を入れた結果が因数分解できるということを混同しているように思える。たしかに式として因数分解できれば値を入れても (因数の値が ± 1 にならなければ) 因数分解されることになるが、逆は成り立たない。たとえば $f(X) = X$ という多項式はもちろん既約だが、 $X = 6$ を代入すれば $f(6) = 6$ となり素数にはならない。

そのうえで、中途半端に無理式を考慮している。 $(c^2 + ca + a^2)$ を無理式の積で表すなら、

$$(c^2 + ca + a^2) = (c + \sqrt{3ca + 3a^2} + 2a)(c - \sqrt{3ca + 3a^2} + 2a)$$

でもよいはずなのだが、なぜ上記の \sqrt{ca} が出てくる式だけ考えるのかよくわからない。

§2. 数学王国

証明の検討はこれくらいにして、この本のほかの部分を読みしてみよう。

まず本を開くと、目次より先に「社主激白」としてめいけい出版社長の言葉が載っている。「激白」とあるので出版の裏事情の暴露でもするのかと思ったら、小野田氏に対する狂わんばかりの賞賛の言葉が並んでいる。特に印象的なのが次の文句だ。

いま、社主が夢みることは、小野田氏を核に集う数学大好き人間が打ち立てる数学王国の実現である。危機の日本を救うのは数学立国の建設を措いてない。小野田氏の魅惑的なプランはもう次々と仕掛けられている。日本の未来は明るく輝いてきた。ひとなつこい小野田氏の輝く笑顔を見ると、だれでもこの人とともに、数学王国の建設に着手したい明るい気持ちになってくる。

どこまで本気なのかよくわからない文章だが、なんだか「日本シャンバラ化計画」みたいで恐ろしい。

第5部「証明への道のり」には、小野田氏の「証明」完成までの経緯が書かれてる。それによると、「コンピュータのハードを開発している友人」に「小野田さん、フェルマーの定理を証明したら」と「挑発」されたのが発端らしい。罪作りな友人である。そのあとの記述。

友人の挑発に乗り、証明のイメージをつかむことはできたのだが、高校1年で数学を捨て、大学入学と同時に数学と完全に縁を切った私である。

やっぱりな、という感じである。小野田氏の証明文の妙な読みにくさは、数学の高等教育を受けていないためなのだろう。

そして小野田は「証明」を完成させると、「読売年鑑の人名事典を調べ、およそ20人に近い数学者に原稿を送った」とのこと。さらにどうも証明を改訂するたびに数人の数学者に原稿を送っていたらしい。そのうち織田孝幸教授と浪川幸彦教授からは否定的な返事をもらい、織田教授は親切にも Paul Ribenboim 著『13 Lectures on Fermat's Last Theorem』からの抜粋をコピーして送ってくださったらしい。しかし小野田氏は英語が読めず、それどころか $A^3 + B^3 + C^3 = 0$ という式だけを見て「何というセンスの無さ」というコメントをしてる有様である。

また著者の友人である田吉隆夫教授とは膨大な量の手紙のやり取りをしているらしい。この本にはそのうちのいくつかが載っており、田吉教授はきわめて誠実な態度で著者の「証明」の不明瞭

な点を指摘していることがわかる．持つべきものは友達である．

§3. おまけ そのほかの小野田襄二氏の本

小野田襄二氏にはほかにもさまざまな著作があるらしいので，おまけとして最後に紹介しておく．

- 自然数解が存在する全構造の解明 (社会評論社)
今回紹介した本の続編らしい．タイトルが壮大すぎる．
- 相対性理論の誤りを完全解剖する (小野田書店)
理系トンデモ本の王道(?) の相対性理論批判であり、『完全証明』のカバーに広告が載っている．面白いのは次の指摘だ．
動物の目は網膜に入った光に反応し，空間を伝播している光を見ているのではない．
ゆえに，光の相対速度は観測できない．
何を言っているのかよくわからないが，いままでの光速度の測定は人間が肉眼で行ってきたとでも思っているのだろうか．
- やりなおし基礎数学 (ちくま新書)
小中学生向けの数学の本らしい．注目すべきはこれがちくま新書から出ていることである．ブランド名にだまされてはいけない．
- 夫婦耐性実験 (小野田書店)
小説である．「父親・夫として破綻したゲオが，ノイローゼの駿台生を引きとることによって巻き起こす家族騒動物語」らしい．タイトルが面白い．ちょっとよみたい．

§4. おわりに

この手の本を読むことはよい暇つぶしになるが，そんなことをする暇があったらまともな数学書を読みましょう．

ゼータ関数（田村）

§0. はじめに

ますらぼには数学が好きな高校生も来るということで、なるべく高校生にもわかるよう書いてみた。正則性など細かい条件をごまかしているが、多項式や e^x などの高校で出てきた関数の組み合わせなら大体成り立つと思っておけばいい。興味のある人は複素解析の本を読んでみるといいと思う。さて、タイトルのゼータ関数とは

$$\zeta(s) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^s} = \frac{1}{1^s} + \frac{1}{2^s} + \cdots$$

という関数で、リーマンの論文「与えられた数よりも小さな素数の個数について」[?] にも現れる重要な関数である。

具体的な値を挙げておくと次の通りである。

$$\begin{aligned}\zeta(2) &= \frac{1}{1^2} + \frac{1}{2^2} + \cdots = \frac{\pi^2}{6} \\ \zeta(4) &= \frac{1}{1^4} + \frac{1}{2^4} + \cdots = \frac{\pi^4}{90} \\ \zeta(6) &= \frac{1}{1^6} + \frac{1}{2^6} + \cdots = \frac{\pi^6}{945}\end{aligned}$$

偶数ゼータに対しては、なぜ π が出てくるのかは不思議だが、上の様な値になることが知られている。

では次の式を見てどう思うだろうか。

$$\begin{aligned}\zeta(0) &= 1 + 1 + \cdots = -\frac{1}{2} \\ \zeta(-1) &= 1 + 2 + \cdots = -\frac{1}{12}\end{aligned}$$

中辺は明らかに発散する無限和である。それが有限の値になるというのは理解し難い。少しずつその謎を紐解いていこうと思う。

§1. 予備知識

初等関数の複素数での値

オイラーの公式 $e^{iz} = \cos z + i \sin z$ を用いると

$$\cos z = \frac{e^{iz} + e^{-iz}}{2}, \sin z = \frac{e^{iz} - e^{-iz}}{2i}$$

となる。

また、絶対値が $r > 0$ 、偏角が θ の複素数は $z = r(\cos \theta + i \sin \theta) = re^{i\theta}$ となるので、 z の対数は

$$\log z = \log r + i\theta$$

となる. ただし, 偏角は 2π の整数倍だけ異なることができるので, \log は一般には多価関数となる. そこで定義域を 0 と負の実数を除く領域に制限し, 偏角を $-\pi < \theta < \pi$ とすることで一価に定まる. これを対数関数の主枝と呼ぶ.

複素数平面上的の積分

$f(z)$ が連続, $\gamma(t): [0, 1] \rightarrow \mathbb{C}$ が区分的 C^1 であれば, $f(z)$ の γ に沿った積分は

$$\int_{\gamma} f(z) dz = \int_0^1 f(\gamma(t)) \gamma'(t) dt$$

となる.

D を複素数平面上的の区分的 C^1 の境界をもつ領域とし, ∂D を D の境界で D を左手に見て進む向きをもつ閉曲線とする. このとき次の公式が成り立つ.

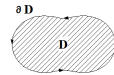
$s \in \mathbb{Z}$ とする. $a \in D$ のとき

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\partial D} \frac{dz}{(z-a)^s} = \begin{cases} 1 & s = 1 \\ 0 & s \neq 1 \end{cases}$$

正則関数 $f(z)$ に対し $\lim_{z \rightarrow a} f(z)$ が発散し, $\lim_{z \rightarrow a} (z-a)^m f(z)$ が 0 以外の値に収束するとき, $z = a$ を $f(z)$ の m 位の極という.

$f(z)$ が D 内に 1 位の極 $z = a_n$ ($n = 1, 2, \dots$) をもち, $\lim_{z \rightarrow a_n} (z-a_n)f(z) = b_n$ とすると次が成り立つ

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\partial D} f(z) dz = \sum_n b_n$$



§2. $\zeta(s)$ の解析接続

リーマンは $\zeta(s)$ について, 1 以外の全ての複素数 s について成り立つ式を求めた. それは $\operatorname{Re} s > 1$ をはみ出した領域での値を求めることであり

$$\Pi(s-1) = \int_0^\infty e^{-x} x^{s-1} dx$$

から始まる. この関数は s が正の整数の時 $(s-1)!$ に等しい関数である. x を nx に置き換えると

$$\begin{aligned} \Pi(s-1) &= \int_0^\infty e^{-nx} (nx)^{s-1} n dx \\ &= n^s \int_0^\infty e^{-nx} x^{s-1} dx \\ \frac{\Pi(s-1)}{n^s} &= \int_0^\infty e^{-nx} x^{s-1} dx \end{aligned}$$

両辺の和をとり

$$\Pi(s-1)\zeta(s) = \int_0^\infty \frac{x^{s-1} dx}{e^x - 1} \quad (1)$$

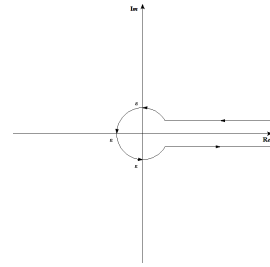
が求まる.

ここで以下の積分を考える.

$$\int_{\infty}^{\infty} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1}$$

積分経路は, 実軸よりわずかに上を通って ∞ から 0 へと向かい, 0 の周りを回ったのち, 実軸のわずかに下を通って 0 から ∞ へと向かうものとする.

ただし, $(-z)^{s-1} = e^{(s-1)\log(-z)}$ とし, $\log z$ は主枝を選ぶ.



この積分を

$$\int_{\infty}^{\epsilon} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} + \int_{|z|=\epsilon} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} + \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} \quad (2)$$

と分割すると, 中央の項は $\operatorname{Re}(s) > 1$ において $\epsilon \rightarrow 0$ のとき 0 に近づく.

なぜなら, $|z| = \epsilon$ のとき $|e^z - 1| > 1 - e^{-\epsilon} > 0$ より $\frac{1}{|e^z - 1|} < \frac{1}{1 - e^{-\epsilon}}$ であるから

$$\left| \frac{(-z)^{s-1}}{e^z - 1} \right| \leq \frac{\epsilon^{\operatorname{Re}(s)-1}}{1 - e^{-\epsilon}}$$

であり, $\epsilon \rightarrow 0$ のとき

$$\begin{aligned} \left| \int_{|z|=\epsilon} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} \right| &\leq 2\pi\epsilon \frac{\epsilon^{\operatorname{Re}(s)-1}}{1 - e^{-\epsilon}} \\ &= 2\pi \frac{\epsilon}{1 - e^{-\epsilon}} \epsilon^{\operatorname{Re}(s)-1} \rightarrow 0 \end{aligned}$$

となるからである.

残った 2 つの項をまとめると

$$\begin{aligned} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left(\int_{\infty}^{\epsilon} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} + \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} \right) &= \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \left(\int_{\infty}^{\epsilon} \frac{e^{(s-1)(\log z - i\pi)} dz}{e^z - 1} + \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{e^{(s-1)(\log z + i\pi)} dz}{e^z - 1} \right) \\ &= (e^{-\pi si} - e^{\pi si}) \int_0^{\infty} \frac{z^{s-1} dz}{e^z - 1} \\ &= -2i \sin(\pi s) \int_0^{\infty} \frac{z^{s-1} dz}{e^z - 1} \end{aligned}$$

これを式 (1) と合わせれば次を得る.

$$-2i \sin(\pi s) \Pi(s-1) \zeta(s) = \int_{\infty}^{\infty} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1}$$

右辺の積分は全ての s に対して収束し, 正則である.

$$\Pi(s-1) \Pi(-s) = \frac{\pi}{\sin(\pi s)}$$

を用いれば

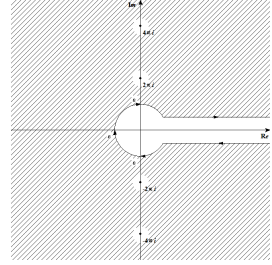
$$\zeta(s) = -\frac{\Pi(-s)}{2\pi i} \int_{\infty}^{\infty} \frac{(-z)^{s-1} dz}{e^z - 1} \quad (3)$$

となる. この式は複素平面上における $s = 1$ を除いて解析的な関数 $\zeta(s)$ を定義し, $\operatorname{Re} s > 1$ において $\sum n^{-s}$ と一致する.

§3. 関数等式

式 (3) において, 積分経路を逆向きにとることで 0 以外の 1 位の極 $z = 2n\pi i$ ($n = \pm 1, \pm 2, \dots$) を含む領域に沿った積分とすることができる. 値は -1 倍になる事に注意して

$$\begin{aligned} \lim_{z \rightarrow 2n\pi i} (z - 2n\pi i) \frac{(-z)^{s-1}}{e^z - 1} &= \lim_{z \rightarrow 2n\pi i} \frac{z - 2n\pi i}{e^z - e^{2n\pi i}} (-z)^{s-1} \\ &= (-2n\pi i)^{s-1} \end{aligned}$$



より

$$\begin{aligned} \zeta(s) &= \Pi(-s) \sum_{n=1}^{\infty} ((-2n\pi i)^{s-1} + (2n\pi i)^{s-1}) \\ &= \Pi(-s) (2\pi)^{s-1} (i^{s-1} + (-i)^{s-1}) \sum_{n=1}^{\infty} n^{s-1} \\ &= \Pi(-s) (2\pi)^{s-1} 2 \sin\left(\frac{s\pi}{2}\right) \zeta(1-s) \end{aligned} \quad (4)$$

が得られる.

§4. $\zeta(s)$ の値

さて, $\zeta(s)$ の値をいくつか求めてみよう.

$s = -n$ ($n \in \mathbb{N}$) のとき, 式 (3) より

$$\zeta(-n) = -\frac{\Pi(n)}{2\pi i} \int_{\infty}^{\infty} \frac{(-z)^{-n-1} dz}{e^z - 1}$$

式 (2) と同様に分割すると, 今度は第 1 項と第 3 項が打ち消し合い第 2 項のみが残るので

$$\begin{aligned} \zeta(-n) &= -\frac{\Pi(n)}{2\pi i} \int_{|z|=\epsilon} \frac{(-z)^{-n-1} dz}{e^z - 1} \\ &= (-1)^n \frac{\Pi(n)}{2\pi i} \int_{|z|=\epsilon} \frac{z}{e^z - 1} z^{-n-2} dz \\ &= (-1)^n \frac{\Pi(n)}{2\pi i} \int_{|z|=\epsilon} \left(\sum_{m=0}^{\infty} \frac{B_m z^m}{m!} \right) z^{-n-2} dz \\ &= (-1)^n \Pi(n) \sum_{m=1}^{\infty} \frac{B_m}{m!} \frac{1}{2\pi i} \int_{|z|=\epsilon} z^{m-n-2} dz \\ &= (-1)^n n! \frac{B_{n+1}}{(n+1)!} \\ &= (-1)^n \frac{B_{n+1}}{n+1} \end{aligned}$$

ただしここでの B_n とはベルヌーイ数のことであり, ベルヌーイ数は $\frac{x}{e^x - 1}$ のマクローリン展開の係数によって以下のように定義される

$$\frac{x}{e^x - 1} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{n!} x^n$$

また, n を $2n-1$ とすれば

$$\zeta(-(2n-1)) = (-1)^{2n-1} \frac{B_{2n}}{2n}$$

となるが, 関数等式 (4) を用いると

$$\zeta(-(2n-1)) = \Pi(2n-1)(2\pi)^{-2n} 2 \sin\left(\frac{-(2n-1)\pi}{2}\right) \zeta(2n)$$

である. 従って

$$\zeta(2n) = (-1)^{n+1} \frac{(2\pi)^{2n} B_{2n}}{2(2n)!}$$

を得る.

これらより最初に述べた式

$$\begin{aligned} \zeta(2) &= \frac{\pi^2}{6}, \zeta(4) = \frac{\pi^4}{90}, \zeta(6) = \frac{\pi^6}{945} \\ \zeta(0) &= -\frac{1}{2}, \zeta(-1) = -\frac{1}{12} \end{aligned}$$

等が求まるのである.

§5. 解析接続の意味

ゼータ関数を解析接続することで通常の和の意味では発散してしまう値を求めたわけのだが, これはどういう意味をもつのであろうか.

実は, 例えば $\operatorname{Re} s > -3$ なるすべての複素数に対して

$$\zeta(s) = \lim_{N \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{n=1}^N n^{-s} - \left(\frac{1}{1-s} N^{1-s} + \frac{1}{2} N^{-s} - \frac{s}{12} N^{-s-1} \right) \right\}$$

となっている.

オイラーマクローリンの公式によれば

$$\sum_{n=1}^N n^{-s} = \frac{1}{1-s} N^{1-s} + \frac{1}{2} N^{-s} - \frac{s}{12} N^{-s-1} + o(N^{-s-2})$$

であるから, これと比較すればゼータ関数の解析接続は $\sum_{n=1}^N n^{-s}$ の発散する部分を取り除いた和を求める, いわゆる繰り込みを行っているのである. 従って最初に述べた

$$\begin{aligned} \zeta(0) &= 1 + 1 + \cdots = -\frac{1}{2} \\ \zeta(-1) &= 1 + 2 + \cdots = -\frac{1}{12} \end{aligned}$$

は正確ではなく, あくまで $\sum_{n=1}^{\infty} n^{-s}$ を解析接続した関数 $\zeta(s)$ が $\zeta(0) = -\frac{1}{2}, \zeta(-1) = -\frac{1}{12}$ であると解釈の方が良いだろう.

参考文献

[Harold] ハロルド, M. E. 鈴木治郎訳 (2012) 『明解 ゼータ関数とリーマン予想』講談社

[Kurokawa] 黒川信重 (2014) 『ゼータの冒険と進化』現代数学社

[Riemann] Riemann, B. (1859). Ueber die anzahl der primzahlen unter einer gegebenen grösse. *Monatsberichte der Berliner Akademie*, November 1859, 671-680.

アーベル圏入門 (鯖白 (奴隷))

§1. 圏について

定義 1. 圏 \mathcal{C} は,

- 対象 (object) のクラス $\text{Ob}(\mathcal{C})$. 誤解の恐れがない時は $\text{Ob}(\mathcal{C})$ を単に \mathcal{C} と書く. X が \mathcal{C} の対象であるとき, $X \in \text{Ob}(\mathcal{C})$ (または $X \in \mathcal{C}$) と書く.
- 任意の対象 X, Y に対し X から Y への射 (arrow, morphism) の集合が存在する. $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ で表す. $f \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ のとき, X は f のドメイン, Y は f のコドメイン, と呼ぶ. この f について, $f: X \rightarrow Y$, または $X \xrightarrow{f} Y$ と書く.
- 任意の対象 X, Y, Z に対し, $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \times \text{Hom}_{\mathcal{C}}(Y, Z)$ から $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Z)$ への写像が存在し, 合成と呼ばれる. (f, g) の像是 $g \circ f$ または gf で表し, f と g の合成と呼ぶ.

以上から構成され, 次の 2 つの条件を満たす.

- $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z \xrightarrow{h} W$ のとき, $h \circ (g \circ f) = (h \circ g) \circ f$ (結合律)
- 任意の対象 X に対し恒等射 (identity morphism) $\text{id}_X \in \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, X)$ が存在し, 任意の $f: X \rightarrow Y, g: Z \rightarrow X$ に対し

$$f \circ \text{id}_X = f, \text{id}_X \circ g = g$$

が成り立つ.

■

例 2. 集合の圏 Sets . 対象は任意の集合であり, $X, Y \in \text{Sets}$ に対し $\text{Hom}_{\text{Sets}}(X, Y)$ は X から Y への写像全体, 合成は通常の写像の合成である.

■

例 3. アーベル群の圏 Ab . 対象は任意のアーベル群であり, $X, Y \in \text{Ab}$ に対し $\text{Hom}_{\text{Ab}}(X, Y)$ は X から Y への準同型写像全体, 合成は通常の写像の合成である.

■

例 4. 位相空間の圏 Top . 対象は任意の位相空間であり, $X, Y \in \text{Ab}$ に対し $\text{Hom}_{\text{Top}}(X, Y)$ は X から Y への連続写像全体, 合成は通常の写像の合成である.

■

例 5. 任意の半順序集合 C は以下のようにすると圏 \mathcal{C} とみなせる.

$\text{Ob}(\mathcal{C}) = C$ とし, $x, y \in C$ に対し $x \leq y$ のとき $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(x, y)$ は一元集合, $x \not\leq y$ のときは $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(x, y) = \emptyset$ とする. このとき合成は推移律により定義でき, 恒等射は反射律により存在する.

逆に, 圏 \mathcal{C} , $\text{Ob}(\mathcal{C})$ が集合であり, $X, Y \in \mathcal{C}$ に対し $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ が 1 元以上持たないならば, $\text{Ob}(\mathcal{C})$ は $X \leq Y \stackrel{\text{def}}{\iff} \text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \neq \emptyset$ と定めることにより前順序集合となる. これに加え, 任意の対象はそれと同型な対象が自分自身しかないとき, 半順序集合となる.

例 6. 任意のモノイド M は, 1 つのみの対象 e を持つ圏 \mathcal{C} と見ることができる. 実際 $\text{Ob}(\mathcal{C}) = e, \text{Hom}_{\mathcal{C}}(e, e) = M$ とすると, \mathcal{C} は二項演算を合成として圏をなす. 逆に 1 つのみの対象を持つ圏 \mathcal{C} について, $\mathcal{C} = \{e\}$ とすると $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(e, e)$ は合成を二項演算としてモノイドになる. 特に群 G はモノイドなので, 上のようにして 1 元のみの圏とみなせる.

定義 7. $\mathcal{C}, \mathcal{C}'$ を圏とする. \mathcal{C}' が \mathcal{C} の部分圏 (subcategory) であるとは,

- $\text{Ob}(\mathcal{C}') \subset \text{Ob}(\mathcal{C})$
- 任意の $X, Y \in \mathcal{C}'$ に対し $\text{Hom}(\mathcal{C}')(X, Y) \subset \text{Hom}(\mathcal{C})(X, Y)$
- 任意の $X, Y, Z \in \mathcal{C}', f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$ に対し, $g \circ f$ が \mathcal{C}' と \mathcal{C} で一致する.
- 任意の $X \in \mathcal{C}'$ に対し X の恒等射が \mathcal{C}' と \mathcal{C} で一致する.

をみたすことである.

さらに $\text{Hom}(\mathcal{C}')(X, Y) = \text{Hom}(\mathcal{C})(X, Y)$ を満たすとき, \mathcal{C}' は \mathcal{C} の充満部分圏 (full subcategory) という.

大雑把に, 圏とは「ある構造を持つモノ (対象) とその間の写像など (射) を全体で考えよう」というものです. 対象と射は, 集合と写像のようなものですが, 対象に関しては一般の圏では何らかの集合とは限らず, ただのラベルに過ぎません. 射に関しても同じで, 射は一般には集合から集合への写像とは限らず, ドメインとコドメインが指定されているだけです. ここで, 一般の圏において写像の全射, 単射に相当する概念を定義しよう.

定義 8. \mathcal{C} を圏とする.

$m: Y \rightarrow Z$ が mono とは任意の $f, g: X \rightarrow Y$ に対し,

$$m \circ f = m \circ g \Rightarrow f = g$$

が成り立つことである.

$e: X \rightarrow Y$ が epi とは任意の $f, g: Y \rightarrow Z$ に対し,

$$f \circ e = g \circ e \Rightarrow f = g$$

が成り立つことである.

命題 9. $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow Z$ において, $g \circ f$ が mono ならば f は mono, $g \circ f$ が epi ならば g は epi である.

(証明) 略

Sets では f が単射であることと mono であること, 全射であることと epi であることは一致する.

定義 10. $f: X \rightarrow Y, g: Y \rightarrow X$ を圏 \mathcal{C} の射とする. $g \circ f = \text{id}_X, f \circ g = \text{id}_Y$ が成り立つ時, f, g を同型射 (isomorphism) という. このとき, X と Y は同型 (isomorphic) であるといい, $X \sim Y$ で表す.

■

Sets では mono かつ epi なら同型射だが, 一般には成り立たない. 例えば Top で, $X = \{0, 1\}$ に離散位相, 密着位相を入れたものをそれぞれ $(X, \mathcal{O}_0), (X, \mathcal{O}_1)$ とする. $\text{id}_X: (X, \mathcal{O}_0) \rightarrow (X, \mathcal{O}_1)$ は mono かつ epi だが, その逆写像は連続ではない.

定義 11. \mathcal{C} を圏とする. \mathcal{C} の始対象 (initial object) とは, 対象 $I \in \mathcal{C}$ であり, 任意の対象 $X \in \mathcal{C}$ に対し I から X へ唯一の射が存在するものである. \mathcal{C} の終対象 (terminal object) とは, 対象 $T \in \mathcal{C}$ であり, 任意の対象 $X \in \mathcal{C}$ に対し X から T へ唯一の射が存在するものである. 始対象かつ終対象である対象をゼロ対象 (zero object) と言う.

■

始対象, 終対象, ゼロ対象は存在すれば同型を除いて一意である.

Sets において, 空集合 \emptyset は始対象で, 任意の一元集合は終対象となる. Sets にはゼロ対象は存在しない. Ab において, 自明な群 $0 = \{e\}$ は始対象かつ終対象, すなわちゼロ対象となる.

定義 12. \mathcal{C} を圏, $A, B \in \mathcal{C}$ とする. A, B の直積 (product) とは対象 $A \times B$ であり, 射 $\pi_A: A \times B \rightarrow A, \pi_B: A \times B \rightarrow B$ が存在し, 任意の $X \in \mathcal{C}, f_A: X \rightarrow A, f_B: X \rightarrow B$ に対し $f_A = \pi_A \circ f, f_B = \pi_B \circ f$ を満たす $f: X \rightarrow A \times B$ が一意に存在するようなものをいう (このような性質を直積の普遍性という). $A \amalg B$ とも書く.

$$\begin{array}{ccccc} & & X & & \\ & f_A \swarrow & \downarrow f & \searrow f_B & \\ A & & A \times B & & B \\ & \xleftarrow{\pi_A} & & \xrightarrow{\pi_B} & \end{array}$$

A, B の直和 (coproduct) とは対象 $A \oplus B$ であり, 射 $\iota_A: A \rightarrow A \oplus B, \iota_B: B \rightarrow A \oplus B$ が存在し, 任意の $X \in \mathcal{C}, f_A: A \rightarrow X, f_B: B \rightarrow X$ に対し $f_A = f \circ \iota_A, f_B = f \circ \iota_B$ を満たす $f: A \oplus B \rightarrow X$ が一意に存在するようなものをいう (このような性質を直和の普遍性という). $A \amalg B$ とも書く.

$$\begin{array}{ccccc} & & X & & \\ & f_A \nearrow & \uparrow f & \nwarrow f_B & \\ A & & A \oplus B & & B \\ & \xrightarrow{\iota_A} & & \xleftarrow{\iota_B} & \end{array}$$

■

定義 13. \mathcal{C}, \mathcal{D} を圏とする. \mathcal{C} から \mathcal{D} への関手 (functor) F とは

- $\text{Ob}(\mathcal{C})$ から $\text{Ob}(\mathcal{D})$ への対応
 $\text{Ob}(\mathcal{C}) \ni X \mapsto F(X) \in \text{Ob}(\mathcal{D})$
- $X, Y \in \text{Ob}(\mathcal{C})$, $\text{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y)$ から $\text{Hom}_{\mathcal{D}}(F(X), F(Y))$ への写像

$$\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \ni f \mapsto F(f) \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(X), F(Y))$$

であって、以下を満たすものである。

- $X \in \mathcal{C}, \mathrm{id}_X \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, X)$ に対し $F(\mathrm{id}_X) = \mathrm{id}_{FX} \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(FX, FX)$
- $X, Y, Z \in \mathcal{C}, X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$ に対し $F(g \circ f) = F(g) \circ F(f)$
 $F(X), F(f)$ を単に FX, Ff と書いたりもする。

写像 $\mathrm{Hom}_{\mathcal{C}}(X, Y) \ni f \mapsto F(f) \in \mathrm{Hom}_{\mathcal{D}}(F(X), F(Y))$ が全射のとき F を充満関手 (full functor) , 単射のとき, 忠実関手 (faithful functor) という。

■

定義 14. \mathcal{C}, \mathcal{D} を圏. F, G を \mathcal{C} から \mathcal{D} への関手とする. F から G への自然変換 η とは, 各対象 $X \in \mathcal{C}$ に対して射 $\eta_X : FX \rightarrow GX$ が定まっていて, 次の図式を可換にするようなものである。

$$\begin{array}{ccc} FX & \xrightarrow{Ff} & FY \\ \eta_X \downarrow & & \downarrow \eta_Y \\ GX & \xrightarrow{Gf} & GY \end{array}$$

■

§2. アーベル圏について

定義 15. 圏 \mathcal{A} が加法圏 (additive category) であるとは, 以下を満たすことである。

- 任意の $X, Y \in \mathcal{A}$ に対し, $\mathrm{Hom}_{\mathcal{A}}(X, Y)$ がアーベル群となる。
- \mathcal{A} がゼロ対象 0 と, 直積 $X \times Y$ (任意の $X, Y \in \mathcal{A}$) を持つ。
- 射の加法と合成が可換である。すなわち, 任意の $X, Y, Z, W \in \mathcal{A}, f : X \rightarrow Y, g_1, g_2 : Y \rightarrow Z, h : Z \rightarrow W$ に対し

$$h \circ (g_1 + g_2) \circ f = h \circ g_1 \circ f + h \circ g_2 \circ f$$

が成り立つ。

■

加法圏のモデルは加法群の圏 \mathbf{Ab} である。 \mathbf{Ab} は実際 Hom 集合はアーベル群となり, ゼロ対象 $0 = e$ を持ち, アーベル群 G_1, G_2 に対して直積 $G_1 \times G_2$ が存在するので, 加法圏である。

加法圏 \mathcal{A} において, 対象 X から 0 , 0 から X への唯一の射を同じ記号 0_X で表す。対象 X, Y に対し $0 : X \rightarrow Y$ を $0_{XY} = 0_Y \circ 0_X$ とする。 \mathcal{A} は加法圏より, $\mathrm{Hom}_{\mathcal{A}}(X, Y)$ はアーベル群をなすが, その単位元は 0_{XY} であることが容易に確かめられる。また, $f : W \rightarrow X, g : Y \rightarrow Z$ に対し $0_{XY} \circ f = 0_{WY}, g \circ 0_{XY} = 0_{XZ}$ もわかる。以下, 0_{XY} などを単に 0 と書く。

$$\begin{array}{ccccc} & & X & \xrightarrow{0_{XY}} & Y \\ & f \nearrow & & \searrow g & \\ W & & & & Z \\ & 0_{WY} \searrow & & \nearrow 0_{XZ} & \end{array}$$

\mathcal{A} において (圏論的) 直積と (圏論的) 直和は一致するが, 実は一般の加法圏においてもこれが成り立つ.

命題 16. 加法圏 \mathcal{A} の任意の対象 X, Y に対し, 直和 $X \oplus Y$ が存在し. 直積と一致する.

(証明) $\text{id}_X : X \rightarrow X, 0 : Y \rightarrow X$ に対し, 直積 $X \times Y$ の普遍性を用いると,

$$\pi_X \circ \iota_X = \text{id}_X \quad \pi_Y \circ \iota_X = 0$$

をみたす $\iota_X : X \rightarrow X \times Y$ が一意に存在する.

$$\begin{array}{ccccc} & X & & & \\ & \swarrow \text{id}_X & \downarrow \iota_X & \searrow 0 & \\ X & \xleftarrow{\pi_X} & X \times Y & \xrightarrow{\pi_Y} & Y \end{array}$$

同様にして, $0 : Y \rightarrow X, \text{id}_Y : Y \rightarrow Y$ に対し, 直積 $X \times Y$ の普遍性を用いると,

$$\pi_X \circ \iota_Y = 0 \quad \pi_Y \circ \iota_Y = \text{id}_Y$$

をみたす $\iota_Y : Y \rightarrow X \times Y$ が一意に存在する.

$$\begin{array}{ccccc} & Y & & & \\ & \swarrow 0 & \downarrow \iota_Y & \searrow \text{id}_Y & \\ X & \xleftarrow{\pi_X} & X \times Y & \xrightarrow{\pi_Y} & Y \end{array}$$

さて, 次の図式は上の ι, π の式より可換である.

$$\begin{array}{ccccc} & X \times Y & & & \\ & \swarrow \pi_X & \downarrow \iota_X \circ \pi_X + \iota_Y \circ \pi_Y & \searrow \pi_Y & \\ X & \xleftarrow{\pi_X} & X \times Y & \xrightarrow{\pi_Y} & Y \end{array}$$

また, 上の $\iota_X \circ \pi_X + \iota_Y \circ \pi_Y$ を $\text{id}_{X \times Y}$ に取り替えても可換である. 直積の普遍性より, 上の図式を可換にする $X \times Y$ から $X \times Y$ への射は唯一なので,

$$\iota_X \circ \pi_X + \iota_Y \circ \pi_Y = \text{id}_{X \times Y}$$

が成り立つ. この ι_X, ι_Y が直和の普遍性を満たすことを示そう.

$Z \in \mathcal{A}, f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ とする. $h : X \times Y \rightarrow Z$ を $h = f \circ \pi_X + g \circ \pi_Y$ とすると, この h は下図を可換にする.

$$\begin{array}{ccccc} & Z & & & \\ & \swarrow f & \uparrow h & \searrow g & \\ X & \xrightarrow{\iota_X} & X \times Y & \xleftarrow{\iota_Y} & Y \end{array}$$

よって可換にするものの存在はいえた. このようなものが唯一であることを示すために, $h_1, h_2 : X \times Y \rightarrow Z$ は

$$h_1 \circ \iota_X = f \quad h_1 \circ \iota_Y = g$$

$$h_2 \circ \iota_X = f \quad h_2 \circ \iota_Y = g$$

としよう．これより

$$(h_1 - h_2) \circ \iota_X = 0 \quad (h_1 - h_2) \circ \iota_Y = 0$$

となる，それぞれ右から π_X, π_Y を合成して和を取ると

$$\begin{aligned} 0 &= (h_1 - h_2) \circ (\iota_X \circ \pi_X + \iota_Y \circ \pi_Y) \\ &= (h_1 - h_2) \circ \text{id}_{X \times Y} \\ &= h_1 - h_2 \end{aligned}$$

より $h_1 = h_2$ がわかる．

■

さて，加法圏において，Ab の準同型の核，像に相当するものを定義したい．しかし mono, epi のときと同様，対象は一般には集合ではないので，アーベル群と同じようには定義できない．まず，核，余核を，普遍性を使って定義する．

定義 17. 加法圏 \mathcal{A} の射 $f: X \rightarrow Y$ の核とは，射 $\ker(f): \text{Ker}(f) \rightarrow X$ で， $f \circ \ker(f) = 0$ をみたし，次の普遍性を満たすものである．

(核の普遍性) $f \circ k = 0$ をみたす任意の $k: K \rightarrow X$ に対し，下図を可換にする一意的な射 $i: K \rightarrow \text{Ker}(f)$ が存在する．

$$\begin{array}{ccc} \text{Ker}(f) & \xrightarrow{\ker(f)} & X \xrightarrow{f} Y \\ \uparrow i & \nearrow k & \\ K & & \end{array}$$

また，加法圏 \mathcal{A} の射 $f: X \rightarrow Y$ の余核とは，射 $\text{cok}(f): Y \rightarrow \text{Cok}(f)$ で， $\text{cok}(f) \circ f = 0$ をみたし，次の普遍性を満たすものである．

(余核の普遍性) $c \circ f = 0$ をみたす任意の $c: Y \rightarrow C'$ に対し，下図を可換にする一意的な射 $p: \text{Cok}(f) \rightarrow C$ が存在する．

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{f} & Y \xrightarrow{\text{cok}(f)} \text{Cok}(f) \\ & & \searrow c \downarrow p \\ & & C \end{array}$$

■

加法圏の核，余核は常に存在するとは限らない．対象より射の方に着目することが多いので，ここでは射の核，余核は射を指すことにする． $\text{Ker}(f), \text{Cok}(f)$ は，2 つあったら同型である．

Ab の準同型 $f: G_1 \rightarrow G_2$ において包含写像 $i: \text{Ker}(f) \rightarrow G_1$ は f の核であり，自然な全射 $p: G_2 \rightarrow \text{Cok}(f)$ は f の余核である．

定義 18. 加法圏 \mathcal{A} の射 $f: X \rightarrow Y$ の像とは，余核 $\text{cok}(f): Y \rightarrow \text{Cok}(f)$ の核 $\text{im}(f): \text{Im}(f) \rightarrow Y$ である．

また，加法圏 \mathcal{A} の射 $f: X \rightarrow Y$ の余像とは，核 $\ker(f): \text{Ker}(f) \rightarrow X$ の余核 $\text{coim}(f): X \rightarrow \text{Coim}(f)$ である．

■

命題 19. 加法圏において、核は mono であり、余核は epi である .

(証明) 略

■

命題 20. 加法圏 \mathcal{A} の射 $f : X \rightarrow Y$ に対して

- f が mono $\Leftrightarrow f \circ e = 0$ ならば $e = 0$ ($e : W \rightarrow X$)
- f が epi $\Leftrightarrow g \circ f = 0$ ならば $g = 0$ ($g : Y \rightarrow Z$)

(証明) 略

■

定義 21. 圏 \mathcal{A} がアーベル圏 (abelian category) であるとは、 \mathcal{A} が加法圏であり、任意の射 f について

- 任意の射は核と余核をもつ .
- 任意の mono 射 m はその余核の核である . つまり $m = \ker(\text{cok}(m))$
- 任意の epi 射 e はその核の余核である . つまり $e = \text{cok}(\ker(e))$

をみたすことである .

■

命題 22. アーベル圏 \mathcal{A} の射 f は、mono かつ epi ならば同型射になる .

(証明) f は mono より $f = \ker(\text{cok}(f))$. $\text{cok}(f) \circ f = 0 = 0 \circ f$. f は epi なので $\text{cok}(f) = 0$ これより、 $\text{id}_Y : Y \rightarrow Y$ は $0 = \text{cok}(f)$ の核になることがわかる . 核のドメインは同型より、 f は同型射となる .

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow[\quad f \quad]{\ker(\text{cok}(f))} & Y & \xrightarrow[\quad 0 \quad]{\text{cok}(f)} & C \\ & \searrow \cong & \uparrow \text{id}_Y & & \\ & & Y & & \end{array}$$

■

アーベル圏 \mathcal{A} の射 $f : X \rightarrow Y$ について、次の分解がある .

$$\begin{array}{ccc} & \text{Im}(f) & \\ e \nearrow & & \searrow m \\ X & \xrightarrow{\quad f \quad} & Y \end{array}$$

ここで、 $m = \text{im}(f)$ である . この分解は、次のように得る .

余核の定義により $\text{cok}(f) \circ f = 0$. $\text{im}(f) = \ker(\text{cok}(f))$ なので、核の普遍性より、下図を可換にする一意的な射 $e : X \rightarrow \text{Im}(f)$ がのびる .

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{Im}(f) & \\
 e \nearrow & & \searrow \text{im}(f) \\
 X & \xrightarrow{f} & Y \\
 & & \searrow \text{cok}(f) \\
 & & \text{Cok}(f)
 \end{array}$$

$m = \text{im}(f)$ は核なので mono である．実は e が epi であることも示せる．

補題 23. 上の f に対し, mono 射 $m' : K \rightarrow Y$ と射 $e' : X \rightarrow K$ について $f = m' \circ e'$ が成り立つとき, 次を可換にする一意的な射 $t : \text{Im}(f) \rightarrow K$ が存在する．

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{e} & \text{Im}(f) \\
 e' \downarrow & \nearrow t & \downarrow m \\
 K & \xrightarrow{m'} & Y
 \end{array}$$

(証明) $p = \text{cok}(m)$, $p' = \text{cok}(m')$ とおく． m は mono なので $m' = \ker(p')$ ． $p'm' = 0$ より $p'm'e' = p'f = 0$ ．よって $\text{Cok}(f)$ の普遍性より一意的な射 $w : \text{Cok}(f) \rightarrow C$ が存在して $p' = wp$ ．

$$\begin{array}{ccccc}
 X & \xrightarrow{e} & \text{Im}(f) & & \\
 e' \downarrow & \searrow f & \downarrow m & & \\
 K & \xrightarrow{m'} & Y & \xrightarrow{p'} & C \\
 & & \downarrow p & \nearrow w & \\
 & & \text{Cok}(f) & &
 \end{array}$$

これより $p'm = wpm = 0$ ． $m' = \ker(p')$ なので, 核の普遍性より一意的な射 $t : \text{Im}(f) \rightarrow K$ が存在して $m = m't$ ．これより右下の可換が言えた．また $m'te = me = f = m'e'$ ． m' は mono なので, $te = e'$ ．これより左上の可換が言えた．

■

定理 24. アーベル圏 \mathcal{A} の射 $f : X \rightarrow Y$ の分解

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{Im}(f) & \\
 e \nearrow & & \searrow m \\
 X & \xrightarrow{f} & Y
 \end{array}$$

において, m は mono, e は epi である．

(証明) m は核なので mono である． e が epi を示す．射 $r, s : \text{Im}(f) \rightarrow Z$ で $re = se$ をみたすとする． $k = \ker(r - s)$ とおく．核の普遍性より, 下図を可換にする $e' : X \rightarrow \text{Ker}(r - s)$ が一意に存在する．

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{Ker}(r-s) & \\
 & \uparrow & \searrow k \\
 & e' & \nearrow e \\
 X & & \text{Im}(f) \begin{array}{c} \xrightarrow{r} \\ \xrightarrow{s} \end{array} Z
 \end{array}$$

k, m は mono よりその合成も mono . よって上の補題より , 下図を可換にする一意的な射 t が存在する .

$$\begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{e} & \text{Im}(f) \\
 e' \downarrow & \nearrow t & \downarrow m \\
 \text{Ker}(r-s) & \xrightarrow{k} & \text{Im}(f) \xrightarrow{m} Y
 \end{array}$$

$m = mkt$ で m は mono より $kt = \text{id}_{\text{Im}(f)}$. $k = \text{ker}(r-s)$ であつたので $(r-s)k = 0$. 右から t を合成して $(r-s)kt = r-s = 0$. すなわち $r = s$.

■

$\text{Coim}(f)$ を使っても同様の分解が得られる . mono と epi , 核と余核は双対であるので , 上と同様に f は mono 射 m と epi 射 $\text{coim}(f)$ によって分解されることが示される .

$$\begin{array}{ccc}
 & \text{Coim}(f) & \\
 \text{coim}(f) \nearrow & & \searrow m \\
 X & \xrightarrow{f} & Y
 \end{array}$$

$\text{Im}(f), \text{Coim}(f)$ による分解によって得られた epi 射 , mono 射をそれぞれ e, m とする . $\text{Im}(f), \text{Coim}(f)$ の普遍性を使うと下図を可換にする $i : \text{Im}(f) \rightarrow \text{Coim}(f)$ が一意的に存在する .

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{Coim}(f) & \xrightarrow{\cong} & \text{Im}(f) \\
 & \nearrow \text{coim}(f) & & \nearrow i & \\
 & X & \xrightarrow{e} & \text{Im}(f) & \xrightarrow{\text{im}(f)} Y \\
 & \searrow \text{ker}(f) & \nearrow f & \searrow m & \\
 \text{Ker}(f) & & & & \text{Cok}(f)
 \end{array}$$

$e = i \circ \text{coim}(f), m = \text{im}(f) \circ i$ なので i は mono かつ epi , したがって同型射である . よって次を得る .

定理 25. アーベル圏 \mathcal{A} の任意の射 $f : X \rightarrow Y$ に対し $\text{Coim}(f) \cong \text{Im}(f)$ である .

■

定義 26. アーベル圏 \mathcal{A} の射の列 $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$ が Y において完全 (exact) とは , $\text{im}(f) = \text{ker}(g)$ となることである .

■

定義 27. \mathcal{C} を圏, $f: X \rightarrow Z, g: Y \rightarrow Z$ を射とする. f, g の引き戻し (pullback) とは, 下図の可換図式であり, 以下の普遍性を満たすものである.

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{q} & Y \\ \downarrow p & & \downarrow g \\ X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

普遍性. $p': P' \rightarrow X, q': P' \rightarrow Y$ で $f \circ p' = g \circ q'$ を満たすような p', q' に対し一意的な射 $t: P' \rightarrow P$ が存在し, 下図を可換にする.

$$\begin{array}{ccccc} P' & & & & \\ & \searrow q' & & & \\ & & P & \xrightarrow{q} & Y \\ & \searrow p' & \downarrow p & & \downarrow g \\ & & X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

(Note: The diagram shows a curved arrow t from P' to P and a curved arrow p' from P' to X .)

■

定義 28. \mathcal{C} を圏, $f: X \rightarrow Y, g: X \rightarrow Z$ を射とする. f, g の押し出し (pushout) とは, 下図の可換図式であり, 以下の普遍性を満たすものである.

$$\begin{array}{ccc} X & \xrightarrow{g} & Z \\ \downarrow f & & \downarrow q \\ Y & \xrightarrow{p} & P \end{array}$$

普遍性. $p': Y \rightarrow P', q': Z \rightarrow P'$ で $p' \circ f = q' \circ g$ を満たすような p', q' に対し一意的な射 $t: P \rightarrow P'$ が存在し, 下図を可換にする.

$$\begin{array}{ccccc} X & \xrightarrow{g} & Z & & \\ \downarrow f & & \downarrow q & & \\ Y & \xrightarrow{p} & P & & \\ & \searrow p' & & \searrow q' & \\ & & P' & & \end{array}$$

(Note: The diagram shows a curved arrow t from P to P' .)

■

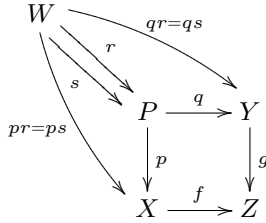
上の対象 P はどちらも同型を除いて一意である.

命題 29. 圏 \mathcal{C} において, $f: X \rightarrow Z, g: Y \rightarrow Z$ を射とし,

$$\begin{array}{ccc} P & \xrightarrow{q} & Y \\ \downarrow p & & \downarrow g \\ X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

を引き戻しとする. このとき, f が mono ならば q も mono である.

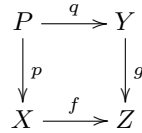
(証明) f は mono であるとする . $r, s : W \rightarrow P$ を射とし , $qr = qs$ であるとする . このとき $fpr = gqr = gqs = fps$. f は mono なので $pr = ps$. これより引き戻しの普遍性から $r = s$ がわかる .



■

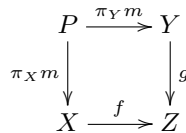
アーベル圏では epi の場合も成り立つ .

命題 30. アーベル圏 \mathcal{A} において , $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ を射とし ,



を引き戻しとする . このとき , f が epi ならば q も epi である .

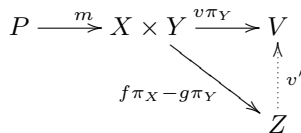
(証明) f は epi とする . 直積 $X \times Y$ から Z への射 $f\pi_X - g\pi_Y$ の核を $m : P \rightarrow X \times Y$ とすると , 下図は引き戻しになる . (m が $f\pi_X - g\pi_Y$ の核であることから可換性がわかり , 直積と核の普遍性により引き戻しの普遍性が導かれる .)



上の P は同型を除いて一意であったので , 上の図で f が epi ならば $\pi_Y m$ も epi を示せばよい . このとき $f\pi_X - g\pi_Y$ は epi である . ある $h : W \rightarrow X \times Y$ について $h(f\pi_X - g\pi_Y) = 0$ とする . 命題 16 より直積は直和でもあるので , ι_X を合成すると

$$0 = h(f\pi_X - g\pi_Y)\iota_X = hf\pi_X\iota_X = hf$$

f は epi だったので $h = 0$, よって $f\pi_X - g\pi_Y$ は epi . これより $f\pi_X - g\pi_Y = \text{cok}(m)$ となる . ある $v : Y \rightarrow V$ について $v\pi_Y m = 0$ とする . $\text{cok}(m)$ の普遍性により $v\pi_Y = v'(f\pi_X - g\pi_Y)$ をみたす $v' : V \rightarrow Z$ が一意的存在する .



ι_X を右から合成すると , $\pi_Y\iota_X = 0$ なので

$$0 = v\pi_Y\iota_X = v'(f\pi_X - g\pi_Y)\iota_X = v'f\pi_X\iota_X = v'f$$

f は epi なので $v' = 0$, よって $v\pi_Y = 0$, $v = v\pi_Y\iota_Y = 0$.

■

系 31. アーベル圏において常に引き戻しが存在する .

■

命題 32. アーベル圏 \mathcal{A} において , $f : X \rightarrow Z, g : Y \rightarrow Z$ の引き戻しを考える . $k = \ker(f)$ とすると下図のような一意的な分解 $k = pk'$ が得られ , $k' = \ker(q)$ となる

$$\begin{array}{ccccc} & & P & \xrightarrow{q} & Y \\ & \nearrow k' & \downarrow p & & \downarrow g \\ \text{Ker}(f) & \xrightarrow{k} & X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

(証明) $\text{Ker}(f)$ から Y へのゼロ射 0 を考えることにより , 引き戻しの普遍性から一意的な射 $k' : \text{Ker}(f) \rightarrow P$ が存在して $pk' = k, qk' = 0$ となる .

$$\begin{array}{ccccc} & & K & & \\ & \nearrow u' & \downarrow u & & \\ & & P & \xrightarrow{q} & Y \\ & \nearrow k' & \downarrow p & & \downarrow g \\ \text{Ker}(f) & \xrightarrow{k} & X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

この k' が q の核となることを示そう . $u : K \rightarrow P$ を $qu = 0$ をみたす射とする . 右から g を合成すると $0 = uqg = upf$ となる . これより $\text{Ker}(f)$ の普遍性から一意的な射 $u' : K \rightarrow \text{Ker}(f)$ が存在して $ku' = pu$. これにより引き戻しの普遍性が使えて , $u = k'u'$ が導かれる . これより k' は q の核となる .

$$\begin{array}{ccccc} K & \xrightarrow{0} & Y \\ & \searrow k'u' & \downarrow q \\ & & P & \xrightarrow{q} & Y \\ & \searrow u & \downarrow p & & \downarrow g \\ & & X & \xrightarrow{f} & Z \end{array}$$

$ku' = pu$

■

引き戻しについて上で示されたことの双対は , 押し出しについても同様に示される .

定義 33. アーベル圏 \mathcal{A} の対象 $X \in \mathcal{A}$ をコドメインに持つ射 f を X のメンバと呼び , $f \in {}_m X$ で表す .

■

\mathcal{A} をアーベル圏 , $X \in \mathcal{A}$ とする . X のメンバ f, g について , ある epi 射 u, v が存在して $fu = gv$ をみたすとき , $f \equiv g$ と定義する . 明らかにこれは反射律 , 対称律をみたす . 推移律を確かめる .

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{w'} & \cdot & \xrightarrow{u} & \cdot \\
 \downarrow v' & & \downarrow v & & \downarrow f \\
 \cdot & \xrightarrow{w} & \cdot & \xrightarrow{g} & \cdot \\
 \downarrow r & & \downarrow g & & \\
 \cdot & \xrightarrow{h} & \cdot & &
 \end{array}$$

$f \equiv g, g \equiv h$ とすると, epi 射 r, u, v, w が存在して $fu = gv, gw = hr$ をみたす. 下図において, v, w の引き戻しを考える. v, w は epi なので命題 30 より v', w' も epi. よって $f \equiv z$ である. アーベル圏の任意の対象 X について, $0 \in_m X$ であり, $f \in_m X$ なら $-f \in_m X$ である.

$f: X \rightarrow Y$ をアーベル圏の射とする. $p \in_m X$ に対し $fp \in_m Y$ となる. $p, q \in_m X, p \equiv q$ とすると $fp \equiv fq$ となる. これより射 f は, あたかも写像のように X のメンバを Y のメンバにうつす.

定理 34. (図式追跡のための基本法則). アーベル圏におけるメンバについて, 以下の性質が成り立つ.

1. $f: X \rightarrow Y$ が mono \Leftrightarrow 任意の $x \in_m X$ に対し $fx \equiv 0$ ならば $x \equiv 0$
2. $f: X \rightarrow Y$ が mono \Leftrightarrow 任意の $x, x' \in_m X$ に対し $fx \equiv fx'$ ならば $x \equiv x'$
3. $f: X \rightarrow Y$ が epi \Leftrightarrow 任意の $y \in_m Y$ に対し $x \in_m X$ が存在し $gx \equiv y$
4. $f: X \rightarrow Y$ がゼロ射 \Leftrightarrow 任意の $x \in_m X$ に対し $fx \equiv 0$
5. $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$ が Y で完全 $\Leftrightarrow gf = 0$ かつ $gy \equiv 0$ を満たす $y \in_m Y$ に対し $x \in_m X$ が存在して $y \equiv fx$ となる.

(証明) 3. と 5. だけ示す.

3. $f: X \rightarrow Y$ を epi, $y \in_m Y$ とする. f と y に対し引き戻しを考える.

$$\begin{array}{ccc}
 \cdot & \xrightarrow{e} & \cdot \\
 \downarrow x & p.b. & \downarrow y \\
 X & \xrightarrow{f} & Y
 \end{array}$$

このとき f は epi なので e も epi, よって $y \equiv fx$ がわかる.

逆に f が epi でないとすると, どの $x \in_m X$ に対しても fx は epi でないので, $fx \neq \text{id}_Y \in_m Y$ である.

5. $X \xrightarrow{f} Y \xrightarrow{g} Z$ が Y で完全とする. $\text{Im}(f)$ による f の分解 $f = me$ を考える. Y で完全より $m = \text{im}(f) = \ker(g)$. よって $gf = gme = g\ker(f)e = 0$. $y \in_m Y$ で, $gy \equiv 0$ なもの考える. \equiv の定義から直ちに $gy = 0$ がいえる. ここで, 次の図式を考える.

$$\begin{array}{ccccc}
 \cdot & \xrightarrow{e'} & \cdot & \xrightarrow{\quad} & \cdot \\
 \downarrow x & & \downarrow p & & \downarrow y \\
 X & \xrightarrow{e} & \text{Ker}(g) & \xrightarrow{m} & Y
 \end{array}$$

核の普遍性から上を可換にする p が唯一存在する. e, p の引き戻しを上図のように考えると $ye' = mex = fx$. e は epi なので e' も epi. よって $y \equiv fx$ となる.

逆に $gf = 0$ かつ $gy \equiv 0$ を満たす $y \in_m Y$ に対し $x \in_m X$ が存在して $y \equiv fx$ となるとする.

$k = \ker(g)$ は $gk \equiv 0$ を満たすので $x \in {}_m X$ が存在して $k \equiv fx$. よって $\text{cok}(f)k \equiv \text{cok}(f)fx \equiv 0$ なの $\text{cok}(f)k = 0$. よって $\text{Im}(f)$ の普遍性から下図を可換にする射 p が存在する .

$$\begin{array}{ccccccc}
 \bullet & \longrightarrow & \text{Ker}(g) & \xrightarrow{\quad p \quad} & \text{Im}(f) & & \\
 \downarrow & & \searrow k & & \downarrow \text{im}(f) & & \\
 \bullet & \xrightarrow{x} & X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z \\
 & & & & \downarrow \text{cok}(f) & & \\
 & & & & \text{Cok}(f) & &
 \end{array}$$

また $gf = 0$ と f の分解 $f = me$ より $gf = gme = 0$. e は epi より $gm = 0$ がわかる . よって $\text{Ker}(g)$ の普遍性から , 下図を可換にする射 q が存在する .

$$\begin{array}{ccccc}
 & & \text{Im}(f) & \xrightarrow{\quad q \quad} & \text{Ker}(g) \\
 & \nearrow e & & \searrow m & \downarrow \text{ker}(g) \\
 X & \xrightarrow{f} & Y & \xrightarrow{g} & Z
 \end{array}$$

この p, q に対して , qp, pq を考えると核と像の普遍性によりどちらも恒等射になる . これより Y で完全であることがわかった .

■

この定理を用いると , アーベル圏における図式の補題が図式の追跡により示すことができる .

補題 35. 五項補題 (five lemma)

下図の可換図式

$$\begin{array}{ccccccccc}
 X_1 & \xrightarrow{g_1} & X_2 & \xrightarrow{g_2} & X_3 & \xrightarrow{g_3} & X_4 & \xrightarrow{g_4} & X_5 \\
 \downarrow f_1 & & \downarrow f_2 & & \downarrow f_3 & & \downarrow f_4 & & \downarrow f_5 \\
 Y_1 & \xrightarrow{h_1} & Y_2 & \xrightarrow{h_2} & Y_3 & \xrightarrow{h_3} & Y_4 & \xrightarrow{h_4} & Y_5
 \end{array}$$

において , 行は完全であるとする . このとき , f_1, f_2, f_4, f_5 が同型射ならば , f_3 も同型射である .

(証明) f_3 が mono を示せば , 双対的に epi も示されるので , f_3 が mono を示せば十分である . $x \in {}_m X$ で $f_3 x \equiv 0$ とする . これと図の可換から $f_4 g_3 x = h_3 f_3 x \equiv 0$. f_4 は mono なので $g_3 x \equiv 0$. 完全性を用いて定理 33 の 5. より $x_2 \in {}_m X$ が存在して $x \equiv g_2 x_2$. $h_2 f_2 x_2 \equiv f_3 x \equiv 0$. これより再び定理 33 の 5. を用いると $y_1 \in {}_m Y$ が存在して $f_2 x_2 \equiv h_1 y_1$. f_1 は epi なので定理 33 の 3. より $x_1 \in {}_m X$ が存在して $y_1 \equiv f_1 x_1$. $f_2 g_1 x_1 \equiv f_2 x_2$ と f :mono より $x_2 \equiv g_1 x_1$. よって $x \equiv g_2 g_1 x_1 \equiv 0$.

$$\begin{array}{ccccccc}
 x_1 & & x_2 & \xrightarrow{\quad} & x & \xrightarrow{\quad} & g_3 x \\
 \downarrow \text{epi} & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \text{mono} \\
 y_1 & \xrightarrow{\quad} & f_2 x_2 & \xrightarrow{\quad} & 0 & \xrightarrow{\quad} & f_4 g_3 x
 \end{array}$$

■

もうひとつ図式の補題を示すために , 以下の列が完全である可換図式を考えよう .

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \longrightarrow & X & \xrightarrow{m} & Y & \xrightarrow{e} & Z \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow h \\
 0 & \longrightarrow & X' & \xrightarrow{m'} & Y' & \xrightarrow{e'} & Z' \longrightarrow 0
 \end{array}$$

この図式で f, g, h の核, 余核をとると, 普遍性から以下の可換図式が得られ, 一番上と一番下の行は完全である.

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & \longrightarrow & \text{Ker}(f) & \xrightarrow{m_0} & \text{Ker}(g) & \xrightarrow{e_0} & \text{Ker}(h) \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 0 & \longrightarrow & X & \xrightarrow{m} & Y & \xrightarrow{e} & Z \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow h \\
 0 & \longrightarrow & X' & \xrightarrow{m'} & Y' & \xrightarrow{e'} & Z' \longrightarrow 0 \\
 & & \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 & & \text{Cok}(f) & \xrightarrow{m_1} & \text{Cok}(g) & \xrightarrow{e_1} & \text{Cok}(h) \longrightarrow 0
 \end{array}$$

蛇の補題では上の完全列と下の完全列をつなぐ射の存在を示す.

補題 36. 蛇の補題 (snake lemma)

上の図式に対し, 以下の列が完全になるような射 $\delta : \text{Ker}(h) \rightarrow \text{Cok}(f)$ が存在する.

$$0 \longrightarrow \text{Ker}(f) \xrightarrow{m_0} \text{Ker}(g) \xrightarrow{e_0} \text{Ker}(h) \xrightarrow{\delta} \text{Cok}(f) \xrightarrow{m_1} \text{Cok}(g) \xrightarrow{e_1} \text{Cok}(h) \longrightarrow 0$$

(証明) $K = \text{Ker}(h)$, $k = \text{ker}(h)$, $C = \text{Cok}(f)$, $c = \text{cok}(f)$ とする. k と e の引き戻し u, k' を取ると, e は epi より u も epi. m の $S = \text{Im}(f)$ による分解を $m = pq$ とすると, 命題 32 より s による p の分解を得る. (q は mono かつ epi なので実は同型射である). 下半分についても双対で同様のことを考える. 下図はすべて可換になる.

$$\begin{array}{ccccc}
 S & \xrightarrow{s} & P & \xrightarrow{u} & K \\
 \uparrow q \cong & \searrow p & \downarrow k' & & \downarrow k \\
 X & \xrightarrow{m} & Y & \xrightarrow{e} & Z \\
 \downarrow f & & \downarrow g & & \downarrow h \\
 X' & \xrightarrow{m'} & Y' & \xrightarrow{e'} & Z' \\
 \downarrow c & & \downarrow c' & \nearrow q' \cong & \uparrow p' \\
 C & \xrightarrow{v} & Q & \xrightarrow{t} & T
 \end{array}$$

$\delta_0 = c'gk'$ とする. $u = \text{cok}(s)$ かつ $v = \text{ker}(t)$ から δ_0 は一意的に

$$\delta_0 = v\delta u : P \xrightarrow{u} K \xrightarrow{\delta} C \xrightarrow{v} Q$$

と分解できる. この δ が求める射である.

メンバ $x \in {}_m K$ から $\delta x \in {}_m C$ は次の図式の追跡によって得られることを示そう.

パズルのコーナー（SP1）

スリザーリンク

9)

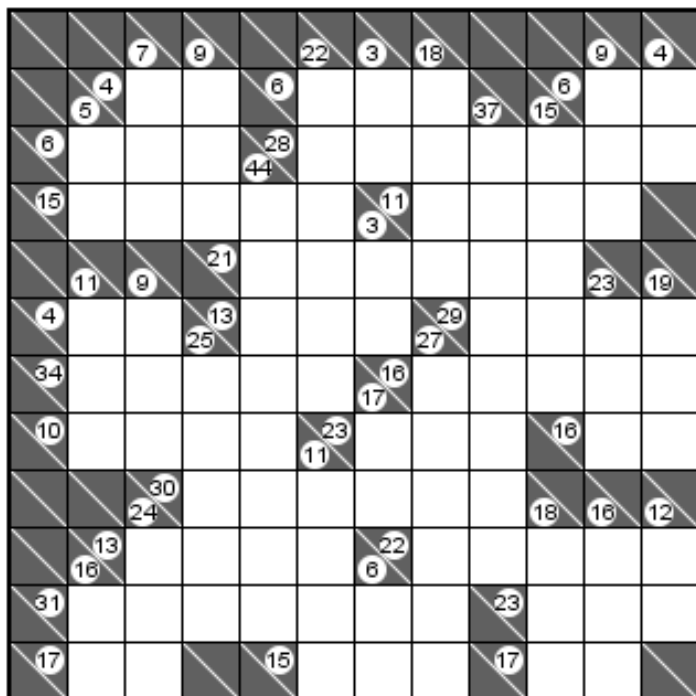
2	1	1		3			2	2	1
2		2			2				1
2		2					0	2	1
			1	1	3	1			
3			1			2			0
2			2			2			2
			1	2	3	3			
2	2	3					3		1
2				3			1		2
1	3	2			3		2	2	2

スリザーリンクのルール

1. 点と点をタテヨコにつなげ、全体で1つの輪っかをつくります。
2. 4つの点で作られた小さな正方形の中の数字は、その正方形に引く辺の数です。数字のない小さな辺には、何本線を引くかは分かりません。
3. 線を交差させたり、枝分かれさせたりはしません。

⁹⁾ 「スリザーリンク」「カックロ」の名称は(株)ニコリの登録商標です。

カックロ



カックロのルール

1. すべての白マスに1から9までの数字のどれかひとつを入れます。
2. ナナメの線の右上の数字は、その右に連続した白マスに入る数字の合計を表し、左下の数字は、その下に連続した白マスに入る数字の合計を表します。
3. タテヨコへの1つの白マスのつながりには、同じ数字を入れてはいけません。

宣伝文

SP1 といいます。パズルを作りました。息抜きにどうぞ。

宣伝ですが、文学部 210 教室でペンシルパズル同好会の展示を行っています。

たくさんのパズルの載った冊子のほか、知恵の輪など触れるパズルも置いています。

パズルに興味を持った方はぜひお越しください。

半群論入門（佐藤）

§0. まえがき

一見異なる数学的構造が抽象化によって同一の構造を持っていることを解明出来たときが、代数の醍醐味であると言われる。抽象化の度合いが高まれば高まるほど、そこに出てくる概念は具体性を離れて、計算はより洗練されていきます。例えば圏論などはその最たるもので、代数的構造そのものを一般化することで、統一的な視点から数学を見渡すことが出来ます。それに比べると、この記事で紹介している半群はかなり具体的な概念です。そういう意味で半群は、圏論などの抽象的な概念の具体例の1つとしてとらえることも出来ます。一方でオートマトンや関数解析など広く応用をもつことから、半群それ自体が一般的な概念であることがわかります。この魅力的な半群の世界を少しでも伝えられたら幸いです。

なお、この記事を通して、写像 φ による x の像を $\varphi(x)$ ではなく $x\varphi$ と書くことにし、 φ, ψ の合成を $x(\varphi\psi) = (x\varphi)\psi$ で定義することとします。

§1. 半群論の基礎

ここでは以降で用いる用語の定義や具体的な半群の例を挙げる。なお半群の特徴である結合法則については少し詳しく紙面を割いた。

用語の定義

マグマ、半群

集合 $G (\neq \emptyset)$ 上に二項演算 $*$ が定義されているとき、 $(G, *)$ をマグマといい、さらに G が結合的、すなわち任意の $a, b \in G$ について $(a * b) * c = a * (b * c)$ が成り立つ (結合的である) とき、 $(G, *)$ を半群という。また二項演算が可換であるマグマ (半群) を可換マグマ (可換半群)、また、マグマ (半群) G の部分集合 $H (\neq \emptyset)$ が演算について閉じているとき、 H を部分マグマ (部分半群) という。なお以降では特に断りがない限り $a * b$ を単に ab と略記する。

単位元、零

S を半群とする。 S の元 e が任意の $x \in S$ について $ex = x (xe = x)$ を満たすとき、 e を左 (右) 単位元という。左単位元かつ右単位元であるものを単位元という。右単位元と左単位元が存在するとき、ただ一つ単位元が存在する。

また S の元 0 が任意の $x \in S$ について $0x = 0 (x0 = 0)$ を満たすとき、 0 を左 (右) 零という。左零かつ右零であるものを零という。右零と左零が存在するとき、ただ一つ零が存在する。左 (右) 零が存在するとき、2 個以上の左 (右) 零が存在するか、あるいは両側零が存在する。

S の元 a が $a^2 = a$ を満たすとき、 a を巾等元という。

1-添加、0-添加

S をマグマとし、 $S^1 = S \cup \{1\}$ 上の演算 $*$ を、 $x, y \in S$ なら $x * y = xy, x * 1 = 1 * x = x, 1 * 1 = 1$ と定めると、 $(S^1, *)$ は半群となる。これを S の 1-添加といい、この操作により単位元が存在しな

い半群に単位元を持つように出来る．なお， S がもともと単位元を持っていた場合，この操作により S の単位元は S^1 では単位元とならない．同様に $S^0 = S \cup \{0\}$ 上の演算 $*$ を， $x, y \in S$ なら $x * y = xy, x * 0 = 0 * x = 0, 0 * 0 = 0$ と定めると， $(S^0, *)$ は零元を持つ半群となる．これを S の 0-添加という．

生成系

マグマ S の任意の元が S の部分集合 K の元の有限個の積で表されるとき， K を生成系という． S の生成系のうち，包含関係に関して極小のものを基底 (極小生成系) という． B が S の基底であるということは， B が S を生成し，かつ B のいかなる元もそれ以外の B の元の積で表されないということと同値である． S が有限ならば基底は必ず存在する． S の生成系 K のいかなる元も，それ以外の S の元の積で表されないとき， K を既約生成系という．明らかに既約生成系は基底である．

イデアル

半群 S の部分集合 $I (\neq \emptyset)$ が， $SI \subset I (IS \subset I)$ を満たすとき， I を S の左 (右) イデアルという．左イデアルかつ右イデアルであるものをイデアルという． S の元 a について，明らかに $Sa \cup \{a\} = S^1a$ は $S(Sa) \cup Sa = (SS)a \cup Sa \subset Sa \cup \{a\}$ より左イデアルとなる．これを a で生成する主左イデアルという．同様に主右イデアルも定義される．また， $S^1aS^1 = \{a\} \cup aS \cup Sa \cup SaS$ はイデアルとなる．これを主イデアルという．半群 S が S 以外にイデアルを持たないとき，単純であるといい， 0 が存在する半群で $0 \subsetneq I \subsetneq S$ なるイデアル I が存在しないとき，0-単純であるという．

準同型

半群 S, S' 間の写像 φ が $(xy)\varphi = (x\varphi)(y\varphi)$ を満たすとき， φ を準同型 (写像) という．準同型が全射ならば全射準同型 (上への準同型)，単射ならば単射準同型 (中への同型)，全単射ならば同型という．準同型の合成が準同型であることはすぐに示される．

Caley table (乗積表)

有限マグマ G について， G の要素を表の行と列に並べ， $a \in G$ と $b \in G$ の積 ab を a 行 b 列に書き込んでいった表を Caley table という．以後基本的に有限マグマの例については Caley table を用いて演算を表現することとする．例えば次のように表す．

	a	b	c
a	a	b	c
b	b	b	c
c	c	c	b

表 0.1 群 $G = \{b, c\}$ の 1-添加 G^1 の Caley table

簡単な例

一元半群

一元からなる集合 $\{e\}$ において， $ee = e$ で演算を定めれば，これは一つの元からなる半群であ

り, 自明な半群 (一元半群) と呼ばれる.

数半群

自然数の集合 \mathbb{N} , 正整数の集合 \mathbb{Z}^+ , 有理数の集合 \mathbb{Q} , 実数の集合 \mathbb{R} , 複素数の集合 \mathbb{C} は, いずれも加法と乗法に関して半群である.

変換半群

集合 E が与えられたとき, 写像 $\varphi: S \rightarrow S$ 全体の集合 $\mathfrak{T}(E)$ は写像の合成に関して半群をなす. これを集合 E 上の変換半群という. 例えば $E = \{1, 2\}$ 上の変換半群は次のようになる.

$$\mathfrak{T}(E) = \{\alpha, \beta, \gamma, \delta\}$$

ただし

$$\alpha = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 1 \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 2 \end{pmatrix}, \gamma = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 1 & 2 \end{pmatrix}, \delta = \begin{pmatrix} 1 & 2 \\ 2 & 1 \end{pmatrix}$$

	α	β	γ	δ
α	α	β	α	β
β	α	β	β	α
γ	α	β	γ	δ
δ	α	β	δ	γ

表 0.2 $\mathfrak{T}(E)$ の Cayley table

零半群, 右 (左) 零半群

0 を S の特定の元として, 任意の $x, y \in S$ について $xy = 0$ を満たすとき, S は半群となる. これを零半群という. また, 任意の $x, y \in S$ について, $xy = y$ ($xy = x$) であるとき, S を右 (左) 零半群という. このとき S のすべての元が右 (左) 零である.

帯, 半束

全ての $x \in S$ が巾等元となる半群を帯 (巾等半群) と呼ぶ. 特に可換な帯は半束と呼ばれる.

結合律の検証

正則表現

S をマグマ, S の元 a を 1 つ固定し, 写像 $\varphi_a, \psi_a: S \rightarrow S$ を, $x \in S$ に対して, $x\varphi_a = xa, x\psi_a = ax$ で定める. $\Phi: S \rightarrow \mathfrak{T}(S); a \mapsto \varphi_a, \Psi: S \rightarrow \mathfrak{T}(S); a \mapsto \psi_a$ を考えることができ, それらの像を $R = \Phi(S), L = \Psi(S)$ とおく. S が半群の場合は $\varphi_a\varphi_b = \varphi_{ab}, \psi_a\psi_b = \psi_{ba}$ より, Φ, Ψ はそれぞれ準同型, 反準同型となる. それぞれ, 右正則表現, 左正則表現という. これらの正則表現が単射となる場合, 忠実であるという. 例えば群の場合は右正則表現と左正則表現はいずれも正則となる. ただし一般の場合は必ずしもそうとは言えない. たとえば, 零半群 S では, 任意の $a \in S$ について, φ_a, ψ_a は零写像となる. ($x\varphi_a = xa = 0, x\psi_a = ax = 0$ よりわかる.)

このように Φ, Ψ が忠実でない場合は, S の 1-添加 S^1 上の変換 $\mathfrak{T}(S^1)$ を考えると, $a \in S$ に対して $1\varphi_a = 1 \cdot a = a$ から $a \neq b \Rightarrow x\varphi_a \neq x\varphi_b$ より, $\Phi^1: S \rightarrow \mathfrak{T}(S^1)$ は単射となる. 同様に Ψ^1 も

考えることができ、単射となる。このとき、 $R^1 = \Phi^1(S)$, $L^1 = \Psi^1(S)$ とおく。(R^1, L^1 は任意のマグマについて考えることができる。)

次の命題はほとんど結合法則のいいかえである。

命題 1. 次の 3 条件は同等である。

- (i) マグマ G が半群である。
- (ii) 任意の $a, b \in G$ について、 $\varphi_a \varphi_b = \varphi_{ab}$ が成り立つ。
- (iii) 任意の $a, b \in G$ について、 $\psi_a \psi_b = \psi_{ba}$ が成り立つ。

命題 2. 次の 3 条件は同等である。

- (i) マグマ S が半群である。
- (ii) R^1 が $\mathfrak{T}(S^1)$ の部分半群となる。
- (iii) L^1 が $\mathfrak{T}(S^1)$ の部分半群となる。

(証明)

(i) \Rightarrow (ii)

S を半群とすると、任意の $a, b \in S$ について $\varphi_a \varphi_b = \varphi_{ab}$ より、 $\varphi_a, \varphi_b \in R^1 \Rightarrow \varphi_a \varphi_b \in R^1$ が成り立つので、 R^1 は部分半群となる。(i) \Rightarrow (iii) も同様。

(ii) \Rightarrow (i)

$a, b, c \in G$ とする。このとき、 $(ab)c = a\varphi_b\varphi_c$ である。 R^1 は写像の合成について閉じているから、ある $x \in G$ が存在して、 $\varphi_b\varphi_c = \varphi_x$ を満たす。このとき、 $1 \in S^1$ について $1\varphi_b\varphi_c = 1\varphi_x$ より $bc = x$ が成り立つので、 $(ab)c = a\varphi_b\varphi_c = a\varphi_{bc} = a(bc)$ となるので、 G は半群。(iii) \Rightarrow (i) も同様。

(証明終)

(注意) R または L が $\mathfrak{T}(S)$ の部分半群であっても S は半群とはなるとは限らない。たとえば表 3 の例を参照せよ。また次の命題も証明は簡単だが、結合法則が成り立つか判定するのによくもちい

	a	b	c
a	a	a	a
b	a	b	b
c	a	a	a

表 0.3 $R = \{\varphi_a, \varphi_b = \varphi_c\}$ および $L = \{\psi_a = \psi_c, \psi_b\}$
はいずれも $\mathfrak{T}(S)$ の部分群だが、 $(bc)b = b \neq a = b(cb)$

られる。

命題 3. マグマ S が半群であるための必要十分条件は、すべての $a, b \in S$ について $\varphi_a \psi_b = \psi_a \varphi_a$ が成り立つことである。

Light の方法

S をマグマ、 $a \in S$ を一つとる。 S 上の二項演算 $*_a, *_a$ を次のように定める。

$$x_a * y = (xa)y, x *_a y = x(ay)$$

任意の $a, x, y \in S$ について $x_a * y = x *_a y$ が成り立つことが、 S が半群である必要十分条件である。さて、 K を S の生成系、すなわち S の任意の元は K の有限個の積であるとし、任意の $a \in K$ について $x_a * y = x *_a y$ が成立するとする。このとき、 $b, c \in K$ について、任意の $x, y \in S$ につい

て $(xb)y = x(by)$, $(xc)y = x(cy)$ が成立するから, $(x(bc))y = ((xb)c)y = (xb)(cy) = x(b(cy)) = x((bc)y)$ となるから, $x_{bc} * y = x *_{bc} y$ が成立する. よって, K の任意の元について $x_a * y = x *_{bc} y$ が成り立つことを調べれば十分である. このことを使うと有限マグマについて結合法則を調べる手間が減る.

例えば $S = \{a, b, c, d\}$ として, 次の Cayley table で与えられる半群を考える. $bb = b, db =$

	a	b	c	d
a	a	a	c	c
b	a	b	c	c
c	c	c	a	a
d	c	d	a	a

表 0.4 もとの Cayley table

$d, bd = c, dd = a$ より $\{b, d\}$ が S の生成系となる. $_d*$ の Cayley table は, x 行に xd 行を移すことで得られる. 同様に $*_d$ の Cayley table は x 列に dx 列に移すことで得られる (表 5 と表 6 を参照せよ). これを b に関しても確認すると, S は半群であることがわかる.

$d*$	a	b	c	d
a	c	c	a	a
b	c	c	a	a
c	a	a	c	c
d	a	c	c	c

表 0.5 $_d*$ の Cayley table

$*_d$	a	b	c	d
a	c	c	a	a
b	c	c	a	a
c	a	a	c	c
d	a	c	c	c

表 0.6 $*_d$ の Cayley table

基底について

有限半群 S には必ず基底が存在するが, 一般の S には存在するとは限らない. 具体例として, 正有理数の加法半群 \mathbb{Q}^+ があげられる. もし \mathbb{Q}^+ に基底 B が存在するとする. $x \in B$ とすると, $\frac{x}{2} \in B$ とすれば $x = \frac{x}{2} + \frac{x}{2}$ となって, 他の B の元の和で表されることになり不適. よって $\frac{x}{2} \notin B$ だから, ある $x_1 \dots x_n \in B$ が存在して $\frac{x}{2} = x_1 + \dots + x_n$ のとき, $x = x_1 + \dots + x_n + x_1 + \dots + x_n$ となるが, これは x が他の B の元の和で表されていることになり不適. よって基底は存在しない.

補題 1. 半群 S が基底を持つとき, $S - S^2 \subset B$.

(証明)

一般に S の生成系 K について, $S - S^2 \subset K$ を示せばよい. $a \in S - S^2$ とする. このとき, K が生成系であることからある $a_1 \dots a_n \in K$ が存在して $a = a_1 \dots a_n$ となる. ところが, $a \in S - S^2$ より $n = 1, a_1 = a$. よって, $a \in K$ となるから, $S - S^2 \subset K$.

(証明終)

(注意) 一般には基底が存在しても $S - S^2 \neq B$. たとえば次の Cayley table で表される半群を考える.

定理 1. S が既約生成系をもつとき, $I = S - S^2$ であり, 逆に $S - S^2$ が S の生成系であるとき, $S - S^2$ は既約生成系である.

(証明)

	a	b	c	d	e
a	a	b	c	a	a
b	b	c	a	b	b
c	c	a	b	c	c
d	a	b	c	a	a
e	a	b	c	a	a

表 0.7 基底は $B = \{c, d, e\}$ または $\{b, d, e\}$ となるが, $S - S^2 = \{d, e\}$ より, $S - S^2 \subsetneq B$

補題 1 を用いると, $S - S^2 \subset I$ となる. また, $a \in I$ とすれば, a は他の S の元の積で表されないから $a \notin S^2$. よって $I \subset S - S^2$ から $I = S - S^2$. 逆に, $S - S^2$ が S の生成系であるとき, $I = S - S^2$ とおくと, I は他の S の元の積で表されないから, 既約である.

(証明終)

以上より, 既約生成系はよい性質を持つ生成系であることがわかる.

§2. 商半群, 直積半群

群で商群や直積群を考えたように, 与えられた半群から新たな半群を生成することが半群においても時に強力な手段となる. なお, ここでの議論は全て一般のマグマについて成り立つ.

商半群

合同関係と商半群

半群 S 上の同値関係 ρ が任意の $z \in S$ について

$$x\rho y \Rightarrow xz\rho yz \quad (zx\rho zy)$$

を満たすとき, ρ は右 (左) 両立的であるという. 右両立的かつ左両立的のとき, $x\rho y, z\rho u \Rightarrow xz\rho yu$ が成り立ち, このとき ρ を合同関係という. このとき半群 S の ρ による商集合 S/ρ 上の演算を $\bar{a}\bar{b} = \overline{ab}$ によって定めることができ (well-defined), また S/ρ は半群となる. これを商半群という. (証明)

$\bar{a} = \bar{a'}, \bar{b} = \bar{b'}$ とすれば, $\bar{a}\bar{b} = \bar{a'b'}$ を示せばよい. $\bar{a} = \bar{a'}, \bar{b} = \bar{b'}$ とすると, $a\rho a', b\rho b'$ が成り立つ. このとき $ab\rho a'b'$ より $\bar{a}\bar{b} = \bar{a'b'}$ が成り立つ. 半群となることは, $(ab)c = a(bc)$ から明らか.

(証明終)

S/ρ の各同値類を $\{S_\lambda\}_{\lambda \in \Lambda}$ とし, $S = \bigcup_{\lambda \in \Lambda} S_\lambda$ と表示することを分解という.

分解と準同型

$\varphi: S \rightarrow S'$ を準同型とする. S 上の同値関係 ρ を $x\rho y \iff x\varphi = y\varphi$ によって定める. このとき, φ が準同型であることから ρ は合同関係となる. このとき, ρ を φ によって引き起こされた関係といい, ρ による S の分解を準同型 φ による S の分解という. 次の定理が成り立つ.

定理 2. (準同型定理)

$\varphi: S \rightarrow S'$ を準同型, ρ を φ によって引き起こされた関係とする. このとき中への同型 $\bar{\varphi}: S/\rho \rightarrow S'$ が存在する.

(証明)

一般に, A, B, C を集合として写像 $f: A \rightarrow B$ と全射 $p: A \rightarrow C$ が与えられたとき, $xp = yp \Rightarrow xf = yf$ が成り立てば, $f = p\bar{f}$ を満たす写像 $\bar{f}: C \rightarrow B$ が一意的に存在する. このことを用いれば, $A = S, B = S', C = S/\rho, f$ を φ , 全射 p を標準全射 $\pi: S \rightarrow S/\rho$ として, $\varphi = \pi\bar{\varphi}$ を満たす写像 $\bar{\varphi}: S/\rho \rightarrow S'$ の存在が言え, ρ の定義から単射がわかる. また, $(\bar{a}\bar{b})\bar{\varphi} = (\bar{a}\bar{b})\bar{\varphi} = (ab)\pi\bar{\varphi} = (ab)\varphi = (a\varphi)(b\varphi) = (\bar{a}\bar{\varphi})(\bar{b}\bar{\varphi})$ が成り立つので, $\bar{\varphi}$ は準同型.

(証明終)

Rees の剰余半群

I を半群 S のイデアルとする. S 上の合同関係 τ を $x\tau y \iff x = y$ または $x, y \in I$ によって定める. これが合同関係であることはすぐにわかる. このとき商半群 S/τ を S/I と書き, S の I による Rees 剰余半群という. また, $Z \cong S/I$ となる半群 Z が与えられたとき, S を I の Z によるイデアル拡大という.

半群の直積について

直積

半群 S_1, S_2, \dots, S_n が与えられたとき, 直積集合 $S = S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ 上の演算を, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n), y = (y_1, y_2, \dots, y_n) \in S$ について $xy = (x_1y_1, x_2y_2, \dots, x_ny_n)$ と定めるとこれは半群となる. $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ を直積半群という.

直交

半群 S の n 個の分解 $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ が与えられたとする.

$$\Delta_1: S = \bigcup_{\lambda \in \Lambda_1} S_{1\lambda}, \Delta_2: S = \bigcup_{\lambda \in \Lambda_2} S_{2\lambda}, \dots, \Delta_n: S = \bigcup_{\lambda \in \Lambda_n} S_{n\lambda}$$

このとき, 各 Δ_i から 1 個ずつ類 $S_{1\lambda_1}, S_{2\lambda_2}, \dots, S_{n\lambda_n}$ を勝手にとったとき, $S_{1\lambda_1} \cap S_{2\lambda_2} \cap \dots \cap S_{n\lambda_n}$ がただ一つの元からなるとき, $\Delta_1, \dots, \Delta_n$ は直交するという.

直交と直積の関係

次の定理が成り立つ.

定理 3. 半群 S が直積半群 $S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ に同型であるための必要十分条件は, S から S_i への全射準同型 $\varphi_i (i = 1, 2, \dots, n)$ が存在して, φ_i が引き起こす分解が直交することである.

(証明)

(必要性の証明) $\varphi: S \rightarrow S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ を同型, $p_i: S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n \rightarrow S_i$ を標準射影とする. $\psi_i = \varphi p_i$ とおくと, 標準射影が全射であることと, 準同型の合成が準同型であることから ψ_i は S から S_i への全射準同型である. ψ_i によって引き起こされる分解を $\Delta_i: S = \bigcup_{a_i \in S_i} S_{i,a_i}$ とお

く. ただし, $S_{i,a_i} = \{x \in S \mid x\psi_i = a_i\}$ である. このとき $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ より類を 1 つずつ取り, $S_{1,a_1}, S_{2,a_2}, \dots, S_{n,a_n}$ とする. $x \in S_{1,a_1} \cap S_{2,a_2} \cap \dots \cap S_{n,a_n}$ とすれば, $i = 1, 2, \dots, n$ について $x\psi_i = a_i$ となるから, $x\varphi = (a_1, a_2, \dots, a_n)$. φ は逆写像が存在するから $x = (a_1, a_2, \dots, a_n)\varphi^{-1}$. 逆に $x = (a_1, a_2, \dots, a_n)\varphi^{-1}$ について, $i = 1, 2, \dots, n$ について $x\psi_i = a_i$ となるから, $x \in S_{1,a_1} \cap S_{2,a_2} \cap \dots \cap S_{n,a_n}$. よって $S_{1,a_1} \cap S_{2,a_2} \cap \dots \cap S_{n,a_n} = \{(a_1, a_2, \dots, a_n)\varphi^{-1}\}$ は一つの元からなるので $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ は直交する.

(十分性の証明) $i = 1, 2, \dots, n$ について全射準同型 $\psi_i : S \rightarrow S_i$ が存在し, $\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_n$ による分解 $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ が直交するとする. ψ_i によって引き起こされる分解を $\Delta_i : S = \bigcup_{a_i \in S_i} S_{i, a_i}$ とおく. ただし, $S_{i, a_i} = \{x \in S \mid x\psi_i = a_i\}$ である. このとき, 写像 φ を $\varphi : S \rightarrow S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$; $x \mapsto (x\psi_1, x\psi_2, \dots, x\psi_n)$ と定める. $(a_1, a_2, \dots, a_n) \in S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$ とする. 各 ψ_i が全射であるから, $\exists x \in \{x \in S \mid x\psi_i = a_i\} = S_{i, a_i}$ であり, $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ が直交するから, $\exists x \in S_{1, a_1} \cap S_{2, a_2} \cap \dots \cap S_{n, a_n}$. このとき各 $i \in S$ について $x\psi_i = a_i$ だから, $x\varphi = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ となる. よって φ は全射. また $x\varphi = y\varphi = (a_1, a_2, \dots, a_n)$ とすれば, $x, y \in S_{1, a_1} \cap S_{2, a_2} \cap \dots \cap S_{n, a_n}$ で, $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_n$ が直交することから $x = y$. よって φ は単射. 最後に, $(xy)\varphi = ((xy)\psi_1, (xy)\psi_2, \dots, (xy)\psi_n) = ((x\psi_1)(y\psi_1), (x\psi_2)(y\psi_2), \dots, (x\psi_n)(y\psi_n)) = (x\psi_1, x\psi_2, \dots, x\psi_n)(y\psi_1, y\psi_2, \dots, y\psi_n)$ となるので, φ は同型. よって, $S \cong S_1 \times S_2 \times \dots \times S_n$.
(証明終)

§3. 群の概念の一般化

半群という概念は群に比べてかなり広く, 一般論を展開するのは難しい. そこで半群ほどではないが, 群をより一般化した概念を考えて, その構造を調べることにする. 群の概念の一般化として右群と逆半群の2種類を紹介する.

群の公理の検討

次の3つを満たせば G は群になることはよく知られている.

- (1) 任意の $x, y, z \in G$ について $(xy)z = x(yz)$
- (2) ある $e \in G$ が存在して, 任意の $x \in G$ について $ex = x$. (左単位元の存在)
- (3) 任意の $x \in G$ について, ある $y \in G$ が存在して, $yx = e$ を満たす. (左逆元の存在)

公理として, 次の (1)(2')(3') を採用しても, G は群となる.

- (2') ある $e \in G$ が存在して, 任意の $x \in G$ について $xe = x$. (右単位元の存在)
- (3') 任意の $x \in G$ について, ある $y \in G$ が存在して, $xy = e$ を満たす. (右逆元の存在)

また, 群においては次の性質が成り立つ.

- (4) 任意の $a, b \in G$ に対し, $ac = b$ を満たす $c \in G$ が存在する. (左可約的)
- (4') 任意の $a, b \in G$ に対し, $ac = b$ を満たす $c \in G$ がただ一つ存在する.
- (5) 任意の $a, b \in G$ に対し, $ca = b$ を満たす $c \in G$ が存在する. (右可約的)
- (5') 任意の $a, b \in G$ に対し, $ca = b$ を満たす $c \in G$ がただ一つ存在する.
- (6) 任意の $a, b, c \in G$ に対し, $ab = ac \Rightarrow b = c$ が成り立つ. (左消約的)
- (7) 任意の $a, b, c \in G$ に対し, $ba = ca \Rightarrow b = c$ が成り立つ. (右消約的)

ここで, (4) の条件は任意の $a \in G$ について $aG = G$ であることと同値. G の右イデアルを I とすると, $G = aG \subset IG \subset I \subset G$ より $I = G$. よって G は右単純である. 逆に G が右単純であるとすると, 任意の $a \in G$ について, aG は右イデアルとなるから $aG = G$. よって左可約的である. 同様に (5) \iff 左単純が成り立つ. まとめると次のようになる.

命題 4. 半群 S について, 左(右)可約的 \iff 右(左)単純

また次の性質が成り立つ．

定理 4. (1),(4),(5) を満たすとき, G は群である．

(証明)

$S \neq \emptyset$ よりある元 $a \in S$ が存在する． S の左可約性より, $ae = a$ なる $e \in S$ が存在する． $b \in S$ とする． S の左可約性より $be' = b$ なる $e' \in S$ が存在する．また S の右可約性より $a'a = e'$ を満たす $a' \in S$ が存在する．このとき, $be = (be')e = (b(a'a))e = (ba')(ae) = b(a'a) = be' = b$ より e は左単位元となる．同様にして右単位元の存在も言えるので両側単位元 e がただ一つ存在する．このとき可約性から逆元の存在が言えるので, S は群となる．

(証明終)

定理 5. 有限半群 S が (6)(7) を満たすとき, S は群である．

(証明)

$S \neq \emptyset$ よりある元 $a \in S$ が存在する． S は有限だから, ある正整数 $m, n (m > n)$ が存在して, $a^m = a^n$ となる．ここで, $e = a^{m-n}$ とおく． $b \in S$ について, $be = y$ とすると, 両辺に右から a^n をかけて, $ya^n = ba^{m-n}a^n = ba^m$ ． $a^n = a^m$ および右消約律より $y = b$ ．よって e は右単位元であり, 同様にして左単位元となる．このとき, $b \in S$ とすると, ある正整数 $m', n' (m' > n')$ が存在して, $b^{m'} = b^{n'}$ であり, $b^{m'-n'}b^{n'} = b^{n'} = eb^{n'}$ から $b^{m'-n'} = e$ となるので, 逆元が存在する．よって S は群である．

(証明終)

右群

右群の定義

群の公理の考察により, 公理 (2)(3) を満たす半群は群であることがわかった．それを一般化し, 公理 (2)(3') を満たす半群を右群と定義する．同様に公理 (2')(3) を満たす半群を左群と定義する．

右群の性質・構造

群は公理 (2)(3') を満たすので右群である．では群以外の右群はどんな例があるだろうか．極端な例として右零半群 S , すなわちすべての $x, y \in S$ について $xy = y$ を満たす半群は右群である．また, 次の命題が成り立つ．

命題 5. S_1, S_2 を右群とすると, 直積半群 $S_1 \times S_2$ は右群となる．

(証明)

S_1, S_2 が右群であることから左単位元 $e_1 \in S_1, e_2 \in S_2$ が存在する．このとき $(e_1, e_2) \in S_1 \times S_2$ は $(e_1, e_2) \cdot (x_1, x_2) = (e_1x_1, e_2x_2) = (x_1, x_2)$ となるので左単位元であるから $S_1 \times S_2$ は (2) を満たす．また任意の $a_1 \in S_1, a_2 \in S_2$ について $a_1x_1 = e_1, a_2x_2 = e_2$ を満たす $x_1 \in S_1, x_2 \in S_2$ が存在するので, このとき, $(a_1, a_2)(x_1, x_2) = (a_1x_1, a_2x_2) = (e_1, e_2)$ となる．よって $S_1 \times S_2$ は (3) を満たす．

(証明終)

よって群 G と右零半群 R の直積 $G \times R$ もまた右群となる．次の定理はその逆が成り立つことを示している．

定理 6. S が右群である必要十分条件は, ある群 G , 右零半群 R が存在して $S \cong G \times R$ となるこ

とである．

十分であることは既に示されているので，必要条件であることを示せばよい．そのために次の補題を示す．

補題 2. 半群 S について次の条件は全て同値である．

- (I) S は右群である．(公理 (2)(3')) を満たす，すなわち左単位元を含み右逆元が存在する．)
- (II) 任意の $a \in S$ について $ac = e$ なる元 c および左単位元 e が存在する．
- (III) 任意の $a \in S$ について $ca = e$ なる元 c および左単位元 e が存在する．
- (IV) S は公理 (4')(任意の $a, b \in G$ に対し， $ac = b$ を満たす $c \in G$ がただ一つ存在する) を満たす．
- (V) S は公理 (4)(6) を満たす．(左消約的かつ右単純である)
- (VI) S は公理 (4) を満たし，巾等元を含む．(右単純で巾等元を含む)
- (VII) S は公理 (2)(4) を満たす．(右単純で左単位元を含む)

(証明)

(I) \Rightarrow (II) は右逆元が存在することから明らか．

(II) \Rightarrow (III) 任意の $a \in S$ に対して， $ac = e$ を満たす $c \in S$ と左単位元 e が存在する．このとき $caca = c(ac)a = c(ea) = ca$ より ca は巾等元． $ca = d$ とおくと， $dx = f$ を満たす $x \in S$ と左単位元 $f \in S$ が存在する． $df = d(dx) = d^2x = dx = f$ となるので，任意の $y \in S$ について $dy = d(fy) = (df)y = fy = y$ を満たすため， d は左単位元となる．よって (III) が成り立つ．

(III) \Rightarrow (II) 任意の $a \in S$ に対して， $ca = e$ を満たす $c \in S$ と左単位元 e が存在する．このとき $acac = a(ca)c = a(ec) = ac$ より ac は巾等元． $ac = d$ とおくと， $xd = f$ を満たす $x \in S$ と左単位元 $f \in S$ が存在する． $fd = (xd)d = xd^2 = xd = f$ となるので，任意の $y \in S$ について $dy = f(dy) = (fd)y = fy = y$ を満たすため， d は左単位元となる．よって (II) が成り立つ．

(II) かつ (III) \Rightarrow (IV) $a, b \in G$ とする．(II) より $ax = e$ なる $x \in S$ と左単位元 e が存在するので， $a(xb) = (ax)b = eb = b$ となって， $ac = b$ を満たす $c \in S$ が存在する．次に一意性を示す． $ac = ac' = b$ とする．(III) より $xa = f$ を満たす $x \in S$ および左単位元 f が存在するから， $xac = xac'$ より $c = fc = fc' = c'$ ．よって $ac = b$ を満たす $c \in S$ は一意である．

(IV) \Rightarrow (V) 公理 (4') は公理 (4) よりも強いので，公理 (4) が成り立つ．また $ax = ay = b$ とすれば， $ac = b$ を満たす c は一意であることから $x = y$ ．よって左消約的である．(公理 (6) が成り立つ．)

(V) \Rightarrow (VII) $S \neq \emptyset$ よりある $a \in S$ が存在する．(V) より $ac = a$ を満たす $c \in S$ が存在する．このとき， $x \in S$ に対して $a(cx) = (ac)x = ax$ と左消約的であることより $cx = x$ ．よって $c \in S$ は左単位元．

(VII) \Rightarrow (VI) 左単位元は巾等元だから成り立つ．

(VI) \Rightarrow (VII) 巾等元を $e \in S$ とする．公理 (4) より，任意の $x \in S$ に対して $ey = x$ を満たす $y \in S$ が存在するから， $ex = e(ey) = e^2y = ey = x$ となって， e は左単位元．

(VII) \Rightarrow (I) 左単位元が存在するので公理 (2) は満たされる．公理 (3') は (4) よりも弱い仮定なので公理 (3') が成り立つ．

(証明終)

それでは定理の証明に入る．補題より右群には左単位元 e_0 が存在する．このとき， Se_0 を考えると， $ae_0, be_0 \in Se_0$ について $(ae_0)(be_0) = (ae_0b)e_0 \in Se_0$ から Se_0 は部分半群であり，

$(ae_0)e_0 = ae_0^2 = ae_0$ から e_0 は Se_0 の右単位元, したがって Se_0 の単位元である. S が左可約であることから $(ae_0)c = e_0$ を満たす $c \in S$ が存在するから, このとき, $ce_0 \in Se_0$ は $(ae_0)(ce_0) = (ae_0c)e_0 = e_0^2 = e_0$ となり, Se_0 における右逆元となる. よって Se_0 は公理 (2')(3') を満たすので群である. $G = Se_0$ とおく. 写像 $\psi_1: S \rightarrow G; x \mapsto xe_0$ を考える. ψ_1 は明らかに全射. また $(xy)\psi_1 = xye_0 = (xe_0)(ye_0) = (x\psi_1)(y\psi_1)$ より ψ_1 は準同型写像. ψ_1 による分解を $\Delta_1: S = \bigcup_{p \in G} S_p$ とおく. ただし, $S_p = \{x \in S \mid xe_0 = p\}$ とする.

次に, 右群の左可約性より $x \in S$ にたいして, $xe_x = x$ を満たす e_x がただ一つ存在する. このとき, 任意の $y \in S$ について $(xe_x)y = xy$ と左消約的であることから $e_xy = y$. よって e_x は左単位元である. 左単位元の集合 R を考えると, $e, f \in R$ について $ef = f$ より R は右零半群. 写像 $\psi_2: S \rightarrow R; x \mapsto e_x$ を考えると, $e \in R$ に対して, $ee = e$ より $e\psi_2 = e$ となるから ψ_2 は全射であり, かつ $x, y \in S$ に対して $(xy)e_y = x(ye_y) = xy$ より $e_{xy} = e_y$ だから, $(xy)\psi_2 = e_y = y\psi_2 = (x\psi_2)(y\psi_2)$ より ψ_2 は準同型. (最後の等式は R が右零半群であることを用いた.) ψ_2 による S の分解を $\Delta_2: S = \bigcup_{e \in R} T_e$ とする. ここで $T_e = \{x \in S \mid xe = x\}$ である.

このとき Δ_1, Δ_2 から一つずつ類を選び S_p, T_e とする. $pe \in S$ を考えると, e が左単位元であることと $p \in G$ であることから $(pe)\psi_1 = p(ee_0) = pe_0 = p$. 最後の等式は e_0 が G の単位元であることを用いた. よって, $pe \in S_p$ となる. また, $(pe)e = pe^2 = pe$ より $pe \in T_e$. したがって, $pe \in S_p \cap T_e$ である. 逆に, $y \in S_p \cap T_e$ とすると, $ye_0 = p$ かつ $ye = y$ であるから, 最初の等式に e を右から掛けると, $pe = ye_0e = ye = y$ となるので, 結局 Δ_1, Δ_2 は直交する. 定理 3 より, $S \cong G \times R$ となる.

(証明終)

右群の例

例えば, $S = \mathbb{C} - \{0\}$ とし, S 上の演算 $*$ を $x, y \in S$ に対して $x * y = |x|y$ で定める. このとき, $(S, *)$ が右群になることは容易にわかる. S の巾等元全体は $U = \{z \in \mathbb{C} \mid |z| = 1\}$ であり, $S * 1 = \mathbb{R}^+$ であるから, $S \cong \mathbb{R}^+ \times U$ が成り立つ. $S = \mathbb{R} - \{0\}$ としても同様に議論出来る.

正則半群, 逆半群

逆元, 正則元

単位元が必ずしも存在しない場合に, 逆元を次のように定義する.

定義 半群 S の元 $a, b \in S$ について, $aba = a, bab = b$ なる関係があるとき, a は b の逆元であるという.

もし S が群ならば, $b = a^{-1}$ が導かれるので, 従来の逆元概念と一致する.

命題 6. (Thierrin) 半群 S の元 a が逆元をもつための必要十分条件は, $axa = a$ を満たす $x \in S$ が少なくとも一つ存在することである. このとき逆元は xax である.

(証明)

必要条件であることは明らか. $axa = a$ を満たす $x \in S$ が存在するとする. このとき $b = xax$ と置くと, $aba = a(xax)a = (axa)xa = axa = a, bab = (xax)a(xax) = x(axa)(xax) = xa(xax) = x(axa)x = xax = b$ より b は a の逆元となる.

(証明終)

逆元が存在する元を正則元と言い, 全ての元が正則であるような半群は正則半群と呼ばれる. S に

正則な元が少なくとも1つ存在するとき, S は巾等元を含む. ($a \in S$ を正則として, その逆元 b を考えると, $(ab)^2 = abab = ab, (ba)^2 = baba = ba$ から ab, ba は巾等元)

逆半群

定義 半群 S がただ一つ逆元をもつとき, S を逆半群という.

逆半群について次の性質が成り立つ.

定理 7. (Liber) 半群 S が逆半群であるための必要十分条件は, S が正則で, 任意の2つの巾等元が可換なことである.

(証明)

(必要条件であること) S を逆半群とする. このとき S は正則である. $e, f \in S$ を S の巾等元とする. ef の逆元がただ一つ存在するので, これを a とおくと, $a(ef)a = a, efaef = ef$ を満たす. このとき, $(ae)ef(ae) = ae^2fae = (ae)fae = ae, ef(ae)ef = efae^2f = efaef = ef$ から ef の逆元は ae となる. 逆元の一意性より $ae = a$. 同様に, $(fa)ef(fa) = faef^2a = f(aefa) = fa, ef(fa)ef = ef^2aef = efaef = ef$ より, ef の逆元は fa となるから, 一意性より $fa = a$. このとき $a^2 = (ae)(fa) = a(ef)a = a$ となるから, a は巾等元であり自身が逆元となるから, 逆元の一意性より $a = ef$ となり ef は巾等元. 同様に fe も巾等元となるから, ef, fe は自身が逆元となる. ところで, $ef(fe)ef = ef^2e^2f = efef = (ef)^2 = ef, fe(ef)fe = fe^2f^2e = fefe = (fe)^2 = fe$ より ef と fe は互いに逆元の関係にあるから, $ef = fe$.

(十分条件であること) S を正則半群で, 任意の2つの巾等元が可換とする. b, b' を2つの a の逆元とする. (よって $aba = a, bab = b, ab'a = a, b'ab' = b'$) このとき, $ab, ba, ab', b'a$ はいずれも巾等元となるので可換であり, $ab' = (aba)b' = (ab)(ab') = (ab')(ab) = (ab'a)b = ab, ba = b(ab'a) = (ba)(b'a) = (b'a)(ba) = b'(aba) = b'a$ となるから, $b = bab = b'ab = b'ab' = b'$. よって逆元の一意性が導かれるので逆半群となる.

(証明終)

群はもちろん逆半群であり, そのほか半束(可換な帯)も逆半群を満たしている. 他に有限な逆半群の例として次の Cayley table で演算を定義したものを考える. 表9の例は一見群とは似ても

	e	a	b	f	c
e	e	a	b	e	e
a	a	b	e	a	a
b	b	e	a	b	b
f	e	a	b	f	c
c	e	a	b	f	a

表 0.8 $S = \{e, a, b, f, c\}$ は2つの群 $S_1 = \{e, a, b\}$, $S_2 = \{f, c\}$ の和集合であり, 巾等元 e, f は可換

	0	a	b	c	d
0	0	0	0	0	0
a	0	a	b	0	0
b	0	0	0	a	b
c	0	c	d	0	0
d	0	0	0	c	d

表 0.9 $S = \{0, a, b, c, d\}$. 巾等元 $0, a, d$ は互いに可換

似つかないが, 逆半群となっている.

逆半群の逆元はただ一つなので, a の逆元を a^{-1} と書くことにする. このとき次の性質が成り立つ.

命題 7. 逆半群 S の逆元について次の性質が成り立つ.

- (1) $(a^{-1})^{-1} = a$
 (2) $(ab)^{-1} = b^{-1}a^{-1}$

(証明)

(1) は逆元の対称性よりわかる。(2) について, $a^{-1}a, bb^{-1}$ が巾等元で可換であることから,
 $(ab)(b^{-1}a^{-1})(ab) = a(bb^{-1})(a^{-1}a)b = a(a^{-1}a)(bb^{-1})b = (aa^{-1}a)(bb^{-1}b) = ab, (b^{-1}a^{-1})(ab)(b^{-1}a^{-1}) =$
 $b^{-1}(a^{-1}a)(bb^{-1})a^{-1} = b^{-1}(bb^{-1})(a^{-1}a)a^{-1} = (b^{-1}bb^{-1})(a^{-1}aa^{-1}) = b^{-1}a^{-1}$ となりわかる.

(証明終)

イデアルと逆半群

正則であるという条件とイデアルの間には次のような関係がある.

命題 8. 次の 3 条件は同値である.

- (1) 半群 S の元 a は正則である.
 (2) a の左主イデアル S^1a について, $S^1a = Se$ を満たす巾等元 e が存在する.
 (3) a の右主イデアル aS^1 について, $aS^1 = fS$ を満たす巾等元 f が存在する.

(証明)

(1) \Rightarrow (2) $a \in S$ が正則とすると, $aba = a, bab = b$ なる $b \in S$ が存在する. $e = ba$ と置くと e は巾等元であり, $xa \in Sa$ とすると, $xa = xaba = (xa)ba = (xa)e \in Se$ と $a = aba \in Se$ より $S^1a \subset Se$ となる. また $xe \in Se$ とすると, $xe = xba = (xb)a \in Sa$ だから $Se \subset S^1a$. よって $S^1a = Se$.

(2) \Rightarrow (1) $S^1a = Se$ を満たす巾等元 e が存在するとする. このとき, $S^1ae = See = Se^2 = Se = S^1a$ であるから, $a \in S^1a = S^1ae$ より, $a = ae$ または $a = xae$ なる $x \in S$ が存在する. $a = xae$ なる $x \in S$ が存在するとき, 右から e をかけて, $ae = xae = xae = a$ となるので, いずれの場合も $ae = a$. ここで, $e = ee \in Se = S^1a$ より, $e = a$ または $e = ya$ なる $y \in S$ が存在する. $e = a$ なら a は巾等元となるので正則. また $e = ya$ なる $y \in S$ が存在するときも, $ae = a$ に代入して $aya = a$ となるので, 命題 6 より a は正則. いずれの場合も (1) が成り立つ.

(1) \Rightarrow (3) および (3) \Rightarrow (1) も同様.

(証明終)

以上より, 正則半群であることとすべての主左イデアルが巾等元で生成されることは同値である. では逆半群であることをイデアルを用いた表現に書き換えるとどうなるか.

定理 8. 半群 S が逆半群であることの必要十分条件は, S が正則であり, また e, f を S の巾等元とすると, $Se = Sf \Rightarrow e = f$ かつ $eS = fS \Rightarrow e = f$ が成り立つことである.

(証明)

(必要条件であること) S を逆半群とする. $Se = Sf$ とすれば, $e = ee \in Se, f = ff \in Sf$ より, ある $x, y \in S$ が存在して $e = xf, f = ye$ となる. このとき $ef = xf^2 = xf = e, fe = ye^2 = ye = f$ となるが, S が逆半群のとき e と f は可換だから $e = ef = fe = f$ となる. $eS = fS \Rightarrow e = f$ も同様.

(十分条件であること) S において $Se = Sf \Rightarrow e = f$ かつ $eS = fS \Rightarrow e = f$ が成り立つとする. このとき, $a \in S$ が 2 つの逆元 x, y を持つとすると, $Sxa \subset Sa \subset Saya \subset Sya$ より $Sxa \subset Sya$. 同様 $Sya \subset Sxa$ だから $Sya = Sxa$. ところが xa, ya は巾等元だから $xa = ya$. 同様に $ax = ay$

も示されるから, このとき $x = (xa)x = (ya)x = y(ay) = y$ となって一致する. よって逆元の一意性がわかる.

(証明終)

命題 8 と定理 8 をまとめると次のようになる.

定理 9. 半群 S が逆半群であるための必要十分条件は, すべての主左イデアルと主右イデアルがただ一つの巾等元で生成されることである.

また巾等元の生成する主左イデアルと主右イデアルについて次の関係がある.

命題 9. $e, f \in S$ を巾等元とすると, $Se \cap Sf = Se f, eS \cap fS = e f S$ が成り立つ.

(証明)

$ef = fe \in Se \cap Sf$ だから, $Se f \subset S(Se) \cap S(Sf) \subset Se \cap Sf$ となる. 一方, $x \in Se \cap Sf$ とすれば, $a, b \in S$ が存在して $x = ae = bf$ となる. このとき, $xe = ae^2 = ae = x, xf = bf^2 = bf = x$ だから, $xef = xf = x$. よって $x \in Se f$ となるから $Se \cap Sf \subset Se f$. 以上より $Se f = Se \cap Sf$. $eS \cap fS = e f S$ も同様.

(証明終)

逆半群と準同型

命題 10. 正則半群の準同型像は正則である.

(証明)

S を正則半群, 全準同型 $\varphi: S \rightarrow S'$ が存在するとする. $a' \in S'$ とすると $a' = a\varphi$ なる $a \in S$ が存在する. a は正則だから $axa = a$ を満たす $x \in S$ が存在する. このとき, $x' = x\varphi$ とおくと, $a'x'a' = a'$ となるから, 命題 6 より a' は正則である.

(証明終)

それでは逆半群の準同型像は逆半群となるだろうか. それを示すためにまず次の補題を示す.

補題 3. S を逆半群, 全射準同型 $\varphi: S \rightarrow S'$ が与えられたとき, S' の任意の巾等元 e について $e\varphi^{-1}$ は部分逆半群となる.

(証明)

$e \in S$ を巾等元とする. $e\varphi^{-1} = T (\neq \emptyset)$ とおく. $x, y \in T$ ならば $(xy)\varphi = (x\varphi)(y\varphi) = ee = e$ より $xy \in T$ より T は部分半群である. $a \in T$ とするとき, $a^{-1} \in T$ を示せばよい. $a^{-1}\varphi = f$ とおく. a と a^{-1} が逆元の関係にあることより, $fef = f, efe = e$. また, aa^{-1} と $a^{-1}a$ は巾等元であるから可換. したがって $fef = (fe)(ef) = (ef)(fe) = ef^2e$ となる. このとき, $e = e^2$ に注意して $e = e^2 = (efe)^2 = e(fe)(ef)e = e(fef)e = e(ef^2e)e = e^2f^2e^2 = ef^2e = fef = f$. よって $a^{-1}\varphi = e$ より, $a^{-1} \in T$.

(証明終)

この補題を用いて次の定理を示す.

定理 10. 逆半群の準同型像は逆半群である.

(証明)

S を逆半群, 全射準同型 $\varphi: S \rightarrow S'$ が存在するとする. 命題 10 より準同型像が正則半群となるこ

とは示されている．このとき， S' の任意の2つの巾等元 e, f が可換であることをしめせば，定理7より逆半群であることが示される． e, f の逆像を $E = e\varphi^{-1}, F = f\varphi^{-1}$ とする．補題3より E, F は逆半群であり，巾等元 a, b を含む．このとき S が逆半群であることから $ab = ba$ であり，その像として $ef = fe$ が成り立つ．よって S' は逆半群となる．

(証明終)

逆半群と Rees 剰余半群

正則半群の部分半群は必ずしも正則とならないことに注意する．たとえば表9における $\{0, b\}$ は零半群であり正則半群 S の部分半群であるが， b の逆元が存在しないため正則ではない．逆半群の部分半群 T は，任意の $a \in T$ について $a^{-1} \in T$ が成り立つときに限り逆半群となる．また，逆半群の部分半群が正則であるとき，巾等元は可換となり逆半群である．

正則半群の部分半群が正則半群とならない例を見たが，特別な部分半群であるイデアルは正則半群となる．

命題 11. 正則半群のイデアルは正則である．また逆半群のイデアルも逆半群である．

(証明)

正則半群 S のイデアルを I とおく． $a \in I$ とすると，ある $x \in S$ が存在して $axa = a$ となる．命題6より，このとき xax が a の逆元となるが， I がイデアルであることから $xax \in I$ ．よって I は正則．特に逆半群のイデアルは正則半群となるから，逆半群である．

(証明終)

半群 S とイデアル I ，および Rees 剰余半群 S/I があるとき，今までの結果より

S が (正則/逆半群) $\Rightarrow I$ が (正則/逆半群) かつ S/I が (正則/逆半群)

が成り立っていることがわかる．(2つ目は標準全射 $\pi: S \rightarrow S/I$ が準同型であることによる) では逆に，Rees 剰余半群 Z とイデアル I が (正則/逆半群) であることがわかっているとき，そのイデアル拡大 Z/I は正則と言えるだろうか．

定理 11. 半群 S のイデアル I と Rees 剰余半群 S/I が正則半群のとき， S は正則半群である．また半群 S のイデアル I と Rees 剰余半群 S/I が逆半群のとき， S は逆半群である．

(証明)

正則半群の方から示す． $a \in S$ とする． $a \in I$ ならば I が正則なので a は正則である． $a \notin I$ とし，標準全射 $\pi: S \rightarrow S/I$ による a の像を a' とする． S/I は正則だから，ある元 $x' \in S/I$ が存在して $a'x'a' = a'$ となる． π が全射であることから，ある $x \in x'\pi^{-1}$ が取れる．このとき， $(axa)\pi = a'x'a' = a' = a\pi$ である． π の $S - I$ 上の制限は単射で， $a \in S - I$ だから， $axa = a$ ．よって命題6より a は正則である．よって S のすべての元が正則なので， S は正則である．

次に逆半群の方を示す． S が正則であることはすでに示されている．逆元の一意性を示せばよい． $a \in S$ ， a の2つの逆元を x, y とする． $a \in I$ ならば $x = xax \in I, y = yay \in I$ より $x, y \in I$ であり， I は逆半群であることから逆元の一意性が成り立ち， $x = y$ ．一方 $a \notin I$ とする．ここで $a' = a\pi$ とおくと， S/I が逆半群であることから $a' = a'z'a', z' = z'a'z'$ を満たす z' はただ一つ．ここで， $x' = x\pi, y' = y\pi$ は $a' = a'x'a', x' = x'a'x', a' = a'y'a', y' = y'a'zy'$ を満たすから $x\pi = x' = y' = y\pi$ ．ここで， $x \in I$ とすると $a = axa \in I$ より不適だから $x \in S - I$ ．同様に $y \in S - I$ が成り立つ． π の $S - I$ 上の制限は単射で， $a \in S - I$ だから $x = y$ ．よっていずれの場

合も逆元の一意性が成り立つ.

(証明終)

対称逆半群

集合 X の部分集合 Y (\emptyset も含む) から集合 X の部分集合 Y' への写像であって, 全単射となるものを偏置換といい, 偏置換全体の集合を $\mathcal{T}(X) = \{\alpha : Y \rightarrow Y' \mid Y, Y' \subset X, \alpha \text{ は全単射}\}$ とおく. このとき, $\alpha : A \rightarrow A'$ が $\mathcal{T}(X)$ の元ならば $\alpha^{-1} : A' \rightarrow A$ も $\mathcal{T}(X)$ の元であることに注意する. $\alpha, \beta \in \mathcal{T}(X)$ に対して, 積 $\alpha\beta$ を次のように定義する. $\alpha : A \rightarrow A\alpha, \beta : B \rightarrow B\beta$ としたとき, $\alpha\beta : A \cap B\alpha^{-1} \rightarrow (A \cap B\alpha^{-1})\alpha\beta; x \mapsto x\alpha\beta$. $\alpha\beta$ が $\mathcal{T}(X)$ の元であることはすぐにわかる. このとき, $\mathcal{T}(X)$ は逆半群となり, 対称逆半群と呼ばれる.

(逆半群となることの証明) $\alpha, \beta, \gamma \in \mathcal{T}(X)$ に対して, $(\alpha\beta)\gamma = \alpha(\beta\gamma)$ を示す. $\alpha : A \rightarrow A\alpha, \beta : B \rightarrow B\beta, \gamma : C \rightarrow C\gamma$ とする. $(\alpha\beta)\gamma$ の定義域は $D_1 = (A \cap B\alpha^{-1}) \cap C(\alpha\beta)^{-1}$. 一方 $\alpha(\beta\gamma)$ の定義域は $D_2 = A \cap (B \cap C\beta^{-1})\alpha^{-1}$. 一般に f, g が全単射のとき, $f(X \cap Y) = f(X \cap Y), X(fg)^{-1} = Xg^{-1}f^{-1}$ を用いて, $D_2 = A \cap (B \cap C\beta^{-1})\alpha^{-1} = A \cap B\alpha^{-1} \cap C(\alpha\beta)^{-1} = D_1$. よって, $(\alpha\beta)\gamma$ と $\alpha(\beta\gamma)$ の定義域は等しく, さらに定義域を D として, $x \in D$ に対して, $x(\alpha\beta)\gamma = x\alpha(\beta\gamma)$ となる. よって $(\alpha\beta)\gamma = \alpha(\beta\gamma)$ が成り立つ.

次に, 正則であることを示す. $\alpha : A \rightarrow A\alpha$ に対して, $\alpha\alpha^{-1}\alpha$ の定義域は $A \cap A\alpha\alpha^{-1} \cap A(\alpha\alpha^{-1})^{-1} = A \cap A \cap A = A$ となり, かつ $x \in A$ に対して $x\alpha\alpha^{-1}\alpha = x\alpha$. よって命題 6 より正則. 最後に 2 つの巾等元が可換であることを示す. $\alpha \in \mathcal{T}(X)$ が巾等であるとする. このとき, $\alpha^2 = \alpha$ より $A\alpha^2 = A\alpha$. α^{-1} を施して $A\alpha = A$. よって $\alpha : A \rightarrow A$ であり, $x \in A$ に対して $x\alpha^2 = x\alpha$ だから, α^{-1} を施して $x\alpha = x$. よって α は A 上の恒等写像となる. よって α, β を巾等元とすると, $\alpha\beta$ の定義域は $A \cap B$, $\beta\alpha$ の定義域は $B \cap A = A \cap B$ であり, $x \in A \cap B$ に対して $x\alpha\beta = x = x\beta\alpha$ となる. よって $\alpha\beta = \beta\alpha$ だから定理 7 より逆半群となる.

(証明終)

さて長々と対称逆半群について説明してきたわけだが, 対称逆半群は単に逆半群の例となっただけではなく, 次の定理が成り立つ.

定理 12. 任意の逆半群はある対称逆半群の部分逆半群と同型である.

(証明)

S を逆半群とし, $\mathcal{T}(S)$ を S 上の対称逆半群とする. $a \in S$ に対して, 写像 $f_a : Sa^{-1} \rightarrow Sa; x \mapsto xa$ を考える. $Sa^{-1} \subset S$ より $Sa^{-1}f_a = Sa^{-1}a \subset Sa$ であり, かつ $xa \in Sa$ について $xa = ((xa)a^{-1})a \in Sa^{-1}a = Sa^{-1}f_a$ より f_a は全射. また $xa^{-1}, ya^{-1} \in Sa^{-1}$ について $xa^{-1}f_a = ya^{-1}f_a$ とすると, $xa^{-1}a = ya^{-1}a$. 右から a^{-1} をかけて $xa^{-1} = ya^{-1}$. よって f_a は全単射となるから, $f_a \in \mathcal{T}(S)$. さらに $f_a^{-1} : Sa \rightarrow Sa^{-1}$ を考えると, $f_{a^{-1}}$ と定義域が等しく, また $x \in Sa$ について $xa = (xaa^{-1})a \mapsto xaa^{-1}$ となるから, $xf_a^{-1} = xf_{a^{-1}}$. よって $f_a^{-1} = f_{a^{-1}}$. 写像 $\varphi : S \rightarrow \mathcal{T}(S); x \mapsto f_x$ を考える. $a, b \in S$ について $f_a f_b$ の定義域は $D_1 = Sa^{-1} \cap (Sb^{-1})f_a^{-1}$, また f_{ab} の定義域は $D_2 = S(ab)^{-1}(ab)$. このとき, $D_1 = D_2$ を示す. 一般に $Sx = Sx^{-1}x, Sx^{-1} = Sxx^{-1}$ が成り立つことから, $D_1 = Sa^{-1} \cap (Sb^{-1})f_a^{-1} = (Sa^{-1}a \cap Sbb^{-1})f_a^{-1} = (Sa^{-1}a \cap Sbb^{-1})a^{-1}$. $a^{-1}a$ および bb^{-1} が巾等元であることから, 命題 9 を用いると, $D_1 = (Sa^{-1}abb^{-1})a^{-1} = (Sa^{-1}a)bb^{-1}a^{-1} = (Sa)bb^{-1}a^{-1} = S(ab)(ab)^{-1} = D_2$ となるので, $f_{ab}, f_a f_b$ の定義域は一致する. また, $x \in D_1 = D_2$ について, $xf_a f_b = (xa)f_b = xab = xf_{ab}$ となる. よって $f_a f_b = f_{ab}$ が成り立つから, $(ab)\varphi = (a\varphi)(b\varphi)$ となるので φ は準同型である. また, $f_a = f_b$ と

すれば、定義域が等しいことから $Sa^{-1} = Sb^{-1}$ で、 $Sxx^{-1} = Sx^{-1}$ を用いると $Saa^{-1} = Sbb^{-1}$ 、 aa^{-1}, bb^{-1} が巾等元であることと、定理 8 から $aa^{-1} = bb^{-1}$ 。このとき、 $aa^{-1} \in Sa^{-1}$ から、 $aa^{-1}f_a$ を考えることができ、 $aa^{-1}f_a = bb^{-1}f_b$ より $a = aa^{-1}a = bb^{-1}b = b$ が成り立つ。よって φ は単射。よって φ は中への同型となるから、 $S\varphi \cong S$ は $\mathcal{T}(S)$ の部分逆半群となる。

(証明終)

上記のように任意の群が対称群の部分群と同型であるように、任意の逆半群は対称逆半群の部分逆半群と同型になる。ここにも群と逆半群の類似が見られる。

§4. あとがき

半群論入門を書くにあたって、何の話題を中心にするか悩みました。たとえば「半群から群への準同型と K 群 (Grothendieck 群)」の話や、半群の表現論など、他にも魅力的な話題があるほか、もっと抽象的に、 $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$ という恒等式を満たす半群のクラスの分類をしたり、逆に具体的にオートマトンへの応用を挙げたり...。結局は記事の分量からスタンダードな話題に落ち着いたわけですが、さらに詳しい理論に興味のあるかたは是非 [1] を読んでみることをおすすめします。また、[1] はかなり古い本であり、長い割に多少分野の偏りがあるように思われるので、Tero Harju というトゥルク大学 (フィンランドにあります) 教授の書いた lecture notes がインターネット上にあり、コンパクトでかつ新しい話題も載っているのもそちらを読んでみても面白いと思います。(“Tero Harju” で検索すれば出てきます。勿論フィンランド語ではなく英語です。) 最後にこの記事を読んでくださったあなた、そしてこの冊子を編集してくれたすうさんに感謝を述べて終わりにしたいと思います。ありがとうございました。

参考文献

- [1] 田村孝行, 「復刊 半群論」, 共立出版

Counterexamples in Topology 傑作撰 (宮本)

§1. 概説

反例の本

数学は定理と証明を繰り返すだけではなかなか身につにくく、適切な反例を考えることで概念の有用性を理解できることが多い、というのは皆さん経験したことだと思います。歴史的にも、ワイエルシュトラスが連続かつ至るところ微分不可能な「病理的関数」を発見したことで、それまで「連続関数は大体のところで微分可能なんじゃないの〜?」と信じられていた雰囲気がぶち壊され、解析学が $\varepsilon - \delta$ 論法による厳密化へと進展した。このようなことが度々あります。証明によって世界を広げていくというのが数学の基本だと思いますが、反例が「ある」という事実もまた心強いものです。

今回は位相空間論の反例集である“Counterexamples in Topology” (Lynn Steen and J. Arthur Seebach, Jr) の内容から幾つか参考になりそうな例を紹介してみたいと思います。

内容紹介

本書は位相空間論の反例を大量に収録したある意味「病的な」本といえるかもしれませんが、学習の上で参照するにはうってつけの本だと思います。本書最大の特徴は、豊富なチャートにあります。例えば、正則であって正規でない位相空間を探そうと思ったら、分離公理について書かれた19ページの表を見て、反例90番が該当するということがすぐに分かります。定義間の主従関係が反例付きで載っていますし、巻末には各例について、どの公理を満たし、どの公理を満たさないかが網羅された表が掲載されており、検索に供するようになっています。

第一部では位相の様々な定義（分離公理、コンパクト性、連結性、距離空間）を簡単に復習することができます。第二部がメインコンテンツの反例集で、143個の例が掲載されています。第三部は「位相空間はいつ距離空間になるか?」という距離化定理にまつわるサーベイとなっています（ここにも反例が載っています）。付録の第四部では前述の網羅された表や演習問題、参考文献等が掲載されています。

§2. 分離公理に関する反例

正則・正規

まずは定義を簡単に復習しましょう。

定義 1 (正則空間). 位相空間 X が正則であるとは、以下の2つの条件をみたすことを言う。

1. X の任意の1点集合は閉集合である。
2. X の任意の閉集合 A と、 A に含まれない任意の点 x は開集合で分離される。すなわち、開集合 U, V が存在して、 $A \subset U$, $x \in V$ かつ $U \cap V = \emptyset$ が成立する。

定義 2 (正規空間). 位相空間 X が正規であるとは、以下の2つの条件をみたすことを言う。

1. X の任意の1点集合は閉集合である。

2. X の任意の交わらない閉集合の組 A, B は開集合で分離される. すなわち, 開集合 U, V が存在して, $A \subset U, B \subset V$ かつ $U \cap V = \emptyset$ が成立する.

定義から明らかですが, 正規性からは正則性が従います. また, 距離空間は正規ですから, 普通のユークリッド空間 \mathbb{R}^n は正規になります. 正則であって, 正規でない空間とはどのようなものでしょうか?

例 3 (Sorgenfrey 空間). \mathbb{R} の開集合の基底を $U = [a, b)$ ($a, b \in \mathbb{R}$) とした空間を S とする (Sorgenfrey 直線). Sorgenfrey 空間 X を $X = S \times S$ で定義する.

X での典型的な開集合は $[a, b) \times [c, d)$ という形をしており, これが X の開集合の基底になっています. ここで部分集合 $\Delta = \{(x, -x) \mid x \in \mathbb{R}\}$ を考えてみると, これは閉集合です. Δ 内の任意の点 x に対して $\{x\}$ は誘導位相の下で開集合になるので, Δ に誘導される位相は離散位相となり, $\Delta_1 = \{(x, -x) \mid x \in \mathbb{Q}\}, \Delta_2 = \Delta \setminus \Delta_1$ とすると, これらは X の閉集合です. ところが Δ_1 を含む開集合と Δ_2 を含む開集合は必ず交わってしまうことが示せるので X は正規ではありません.

また, Sorgenfrey 直線 S は正則かつ正規であり, 2 つの正則空間の直積は正則なので X は正則です. このことから X が「正規空間の直積は正規」という命題の反例ということも分かりますね.

正規空間は部分空間をとるという操作とも相性が悪く, 正規空間の部分空間は正規とは限りません.

定義 4 (全部分正規). 任意の部分空間が正規となるような正規空間 X を全部分正規であるという.

全部分正規でないような正規空間の例は, 集合論的に少しむずかしい操作をして構成します.

定義 5. ω を最小の超限順序数 (自然数の集合 \mathbb{N} に対応する順序数¹⁰⁾), Ω を最小の非可算順序数とする. 順序数には濃度の比較により全順序が入るので順序数 α, β に対して $[\alpha, \beta] = \{x \mid \alpha \leq x \leq \beta\}$ とする.

例 6 (Tychonoff の板). $[0, \omega], [0, \Omega]$ にそれぞれ区間から定まる位相を入れ, $T = [0, \omega] \times [0, \Omega]$ とする.

順序数 α に対して $[0, \alpha]$ に区間位相を入れた空間はコンパクトハウスドルフになり, その直積である T もコンパクトハウスドルフですから, コンパクトハウスドルフ空間が正規なことより T は正規空間です¹¹⁾.

ところが, T から (ω, Ω) という一点を除いた空間 T_∞ は正規で無くなってしまいます. これは T_∞ の部分空間 $A = \{(\omega, \alpha) \mid 0 \leq \alpha < \Omega\}, B = \{(n, \Omega) \mid 0 \leq n < \omega\}$ が分離できない2つの閉集合であることを示すことで分かります.

距離づけ可能定理と第二可算性

位相空間というのは点同士の「近さ」が定義されている空間ですから, ある空間に「距離¹²⁾」が定まっていれば, その空間は自動的に位相空間になります. これを距離空間といいます. では逆に, 位相空間を与えたとき, その位相構造と両立する距離が存在する (距離づけ可能である) のは

¹⁰⁾ 選択公理を認めさせてください.

¹¹⁾ 「 $[0, \alpha]$ が正規だから, 正規空間の直積である T も正規である」というのはダメですよ.

¹²⁾ 集合 X 上の距離とは以下の3つの公理を満たす X 上の非負実数値関数 d のことを言います. (i) $d(x, y) = 0 \Leftrightarrow x = y$, (ii) $d(x, y) = d(y, x)$, (iii) $d(x, y) + d(y, z) \geq d(x, z)$

どんなときか？ということが気になります．この間は距離化の理論 (Metrisation theory) と言われる一般位相空間論の大テーマに発展しており，本書でもこの話題を扱った章に詳しく書かれています．

距離空間は正規ですから，正規空間になにか $+\alpha$ すれば距離空間になるであろうと思うと，次のような定理があります．

定理 7 (Urysohn の定理). 正規かつ第二可算公理¹³⁾をみたす位相空間 X は距離づけ可能である．

証明の方針は以下ようになります．

1. 距離づけ可能な位相空間の直積は距離づけ可能になる (可算個の直積でも OK)．
2. X の可算な開集合の基底を \mathfrak{B} として， $\mathfrak{M} = \{(U, V) \mid \bar{U} \subset V\} \subset \mathfrak{B} \times \mathfrak{B}$ とする (この集合の濃度は勿論可算)．
3. 正規性より Urysohn の補題を使って \mathfrak{M} の各元に対して \bar{U} 上で 0, V の補集合上で 1 をとる連続関数を作る．
4. これによって X から $[0, 1]^{\mathbb{N}}$ へ連続写像が定まる．これが中への同相写像であることを示す．
5. I は距離づけ可能なので 1. より $I^{\mathbb{N}}$ も距離づけ可能．その部分空間 (とみなせる) X も距離づけ可能である．

実は，正則 + 第二可算は正規性を導くので，Urysohn の定理は通常「正則第二可算ならば距離づけ可能」と書かれます．Sorgenfrey 直線は正規ですが，第二可算でなく距離づけ可能ではありません．また，第二可算でない距離空間が存在する¹⁴⁾ので，この定理は必要十分条件を与えているわけではないことにも注意しないといけません．距離づけ可能定理は他にも色々存在します．

多様体は局所的にユークリッド空間と見れるハウスドルフ空間なので，局所コンパクトハウスドルフ，したがって正則となります．ふつう「多様体」というときは第二可算公理を仮定するので，多様体は距離づけ可能であることが分かります．第二可算性を満たさないような異常な「多様体」の例として「長い直線」は有名です．

例 8 (長い直線). Ω を最小の非可算順序数として， Ω と区間 $[0, 1)$ の直積集合 L に辞書式順序から定まる順序位相を入れる．これを長い半直線という．長い半直線の端をつなげて出来るのが長い直線である．

普通の半直線 $[0, \infty)$ は $\omega \times [0, 1)$ (ω は可算順序数) と思えます．順序数で非可算なものを使ってやることで「長い」感を出しているわけですね．直感的に考えて長い直線は「長すぎる」ために第二可算公理を満たさない．距離づけ可能でない多様体となっているわけです．

§3. コンパクト性に関する反例

コンパクト性にまつわる概念にもいろいろあるのですが，ここでは最も基本的なコンパクト性と点列コンパクト性の関係を見て行きましょう．

¹³⁾ 位相空間 X が可算個の基底をもつとき， X を第二可算であるといいます．

¹⁴⁾ 簡単な反例があります，よね？

コンパクト vs 点列コンパクト

定義 9. 位相空間 X が

- コンパクトであるとは、 X の任意の開被覆に対して有限部分被覆が存在することをいう。
- 点列コンパクトであるとは、 X 内の任意の点列が収束する部分列を持つことをいう。

この2つの定義は距離空間では同値になりますが、そうでないときは互いに何の関係もない性質です。

例 10 (I^I). $I = [0, 1]$ (単位閉区間) とし、 $I^I = \prod_{i \in I} I_i$ (ただし $I_i = I$) とする。位相は I にユークリッド位相を入れたものの直積位相とする。

Tychonoff の定理¹⁵⁾ より I^I はコンパクトですが、点列コンパクトではありません¹⁶⁾。 I^I は I から I への写像全体の集合と見れて、 I^I 内の点列 $\{a_k\}$ が収束する部分列をもつということは、対応する写像の列 $\{f_k\}$ が部分列 $\{f_{k_i}\}$ をもって各点 $x \in I$ で $\{f_{k_i}(x)\}$ が収束するということです。ここでたとえば $f_k(x) = (x \text{ を } 2 \text{ 進展開したときの小数点第 } k \text{ 位})$ とすると、どんな部分列 $\{f_{k_i}\}$ に対しても $\{f_{k_i}(p)\}$ が収束しないような小数 p が存在してしまいます。

点列コンパクトだが、コンパクトでない例としては前節で定義した $[0, \Omega]$ から $\{\Omega\}$ を取り除いた $[0, \Omega)$ があります。 $[0, \Omega]$ はコンパクト¹⁷⁾ なのですが、 $[0, \Omega)$ はコンパクトではありません¹⁸⁾。また、 $[0, \Omega]$ のコンパクト性から $[0, \Omega)$ 内の任意の点列は $[0, \Omega]$ 内に集積点をもちますが、 Ω が集積点になることはないので、 $[0, \Omega)$ は点列コンパクトであることがわかります。

§4. 連結性に関する反例

連結性とは位相空間が「つながっている (ちぎれていない)」ことを表す概念です。本書では不連結な概念についても多く語られていますが、ここでは基本的な連結性に関する2つの概念について見ていきましょう。

定義 11. 位相空間 X が

- 連結であるとは、2つの開集合 U, V が $U \cup V = X$, $U \cap V = \emptyset$ をみたすならば、 $U = X$ または $V = X$ をみたすことをいう。
- 弧状連結であるとは、 X 上の任意の2点 x, y に対して、単位閉区間 $[0, 1]$ からの連続写像 ϕ が存在して $\phi(0) = x$, $\phi(1) = y$ をみたすことをいう。

連結性に関する反例といえば、弧状連結 \Rightarrow 連結であるが逆は成立しないということの説明として「位相幾何学者の正弦曲線」を持ち出すのが常です¹⁹⁾ が、あまりにも有名なので割愛します²⁰⁾。

¹⁵⁾ コンパクト位相空間の任意個の直積空間が再びコンパクトになるという定理。

¹⁶⁾ 点列コンパクト性は可算個の直積に対しては保存されます。

¹⁷⁾ 順序数の性質からわかります。

¹⁸⁾ $[0, \alpha)$ のような開集合たちで覆うと有限部分被覆が取れません。

¹⁹⁾ 勿論本書にも収録されています、というか表紙に書いてある。

²⁰⁾ そういえば「長い直線」も連結だが弧状連結ではないという例になっていますね。

直積と連結性

Tychonoff の定理 (コンパクト集合の任意個の直積はコンパクト) と同様に, 連結集合の任意個の直積も連結な位相空間です. ところで位相空間の直積をとる際, 直積位相というのは各射影 $\text{pr}_\alpha: \prod_{\lambda \in A} U_\lambda \rightarrow U_\alpha$ がすべて連続となるような「最弱の」位相というように決めました. 開集合を「各空間の開集合の直積」とする位相とは異なる (コッチのほうが開集合の数が多い) わけですが, このようにすると変なことが起こります²¹⁾.

例 12 (Box product topology). $B = \mathbb{R}^\omega$ を無限数列全体の集合とし, B の開集合を $\prod_{i=1}^{\infty} U_i$ (U_i は \mathbb{R} にユークリッド位相を入れたときの開集合) とする.

B は連結ではありません. なぜなら有界な無限数列全体の集合と非有界な無限数列全体の集合がともに開集合になってしまうからです.

§5. おわりに

今回紹介した反例は本書の反例のごくごく一部です. これらの他にも面白い反例が沢山あるので是非手にとって読んでみてください. 本書は値段も 1800 円ほどと (他の数学書と比べて) 安いですし, 位相空間論の (日本語だと特に) ややこしい定義が英語でスッキリとまとめられているので, 日本語以外の数学書を初めて読む際などにも参考になると思います (反例の紹介部分の書き方は読みにくい感じですが.....).

Counterexample シリーズはこの本がきっかけになって Analysis や Probability も刊行されているようです. Group theory とか Commutative Algebra とかがあればバカ売れだと思うんですけど, どうでしょうか. 誰か書きませんか?

²¹⁾ Tychonoff の定理も当然不成立になってしまいます.

編集後記

$e^{\pi i}$ sode Vol.3

2015 年 5 月 16 日発行

著 者 東京大学理学部数学科有志

発行人 伊藤克哉

表 紙 郷田昌稔
