

5. モノイド・群

2022 秋期「哲学者のための数学」授業資料（大塚淳）

ver. 2022 年 11 月 23 日

1 モノイドとは何か、なぜそれを学ぶのか

前章で見た位相は、空間に関する幾何学的な概念であった。一方本章の主題となるモノイドや群は、本質的に代数的な「計算」にまつわる概念である。よって我々は、代数、幾何と来て我々は再び代数の世界に戻ってきた。

文系の学生にとって、「位相」という言葉は耳にしたことくらいはあっても、「モノイド」や「群」となると聞いたこともない、という人も多いかもしれない。しかし実のところ我々は皆、小学生のころからモノイドや群に親しんでいる。というのも、足し算や掛け算などはまさにこのモノイドや群の作用に他ならないからだ。モノイドや群は、そうした四則演算を始めとした「演算」一般の最もプリミティブな形を抜き出したものと言える。それ以外にも、モノイドは対象や系の変化・発展を表すために用いられるし、また群はモノの対称性 (symmetry) の数学的な表現を与える。そしてこの対称性という考え方は、物理学における「法則性」という考えを裏から支えるものであり、また哲学的には客観性の概念と深い結び付きを持っている。こうしたことから、モノイドや群は非常に広範な科学的・哲学的含意を有している。

現代物理学を始め様々な科学で応用される群論は、極めて高度に発展しており、その全体像を掴むことを容易ではない。しかしその基本的な考え方はこれ以上ないくらいシンプルである。ここではその本質的な点のみに的を絞って紹介したい。そこから得られるモノイドや群は、数学者や物理学者からしたらおもちゃみたいに簡単なものでしかないかもしれないが、その哲学的含意を考えるには十分であろう。

2 モノイド

まずは例に倣い、集合をベースにモノイドを定義しよう。

定義 2.1 (モノイド) 集合 M 上に、積と呼ばれる二項写像 $\circ : M \times M \rightarrow M$ が定義されており、以下の条件を満たすとき、組 (M, \circ, i) を**モノイド** (monoid) という。

1. M の任意の元 x, y, z に対して、結合律 $(x \circ y) \circ z = x \circ (y \circ z)$ がなりたつ。
2. **単位元** (identity element) と呼ばれる元 $i \in M$ が存在して、 M の任意の元 x に対して、

$i \circ x = x \circ i = x$ になりたつ.

これだけである. モノイド演算 \circ は, 2つの元 x, y をある元 $x \circ y$ に対応させる演算である. 公理 1 は, この演算が結合律を満たすこと, そして公理 2 はこの演算において「何もしない」単位元が存在することを言っている. しばしば演算記号は省略され, $x \circ y$ は xy のように書かれる. また誤解が生じないときは, 演算や単位元を明示せずに単に M がモノイドである, というように言うこともある.

事例 2.1 ゼロを含む自然数 \mathbb{N} (つまり非負整数) は, 二項演算 $+$ とモノイドをなす. ここでの単位元は 0 である. 実際任意の自然数 x, y, z について, $(x + y) + z = x + (y + z)$ かつ $0 + x = x + 0 = x$. 同様に, \mathbb{N} が乗算 \times についてもモノイドとなることを確認せよ (その単位元はなんだろうか). また明らかのように, 上の議論は自然数の代わりに有理数 \mathbb{Q} , 実数 \mathbb{R} のゼロ以上の部分を用いても成立する.

事例 2.2 足し算や掛け算は, 「与えられた数に作用して変えていく」という動的な仕方で捉えることもできる. 再び足し算のモノイド $(\mathbb{N}, +, 0)$ を考えてみよう. この解釈では, それぞれのモノイド元 (つまり自然数) m, n は, 任意の与えられた数に m を足す, n を足す, という作用として考えられる. それらの作用は合成できて, $m + n$ は, 「 m を足してから n を足す」という一つの作用となる. また単位元 0 は 「 0 を足す」 (つまり何も変えない) という作用である.

このようにモノイドは, 「何らかの対象に作用してそれを変えていく」「それに付け加えていく」という動的なプロセスの数理的なモデルを与える. 例えば料理は, 「切る」「煮る」「焼く」「蒸す」「塩を加える」等々のプロセスからなるモノイドと言えるし, さらに言えば一人の人生は様々な行為というプロセスからなるモノイドかもしれない.

事例 2.3 脳に加えられる外的・内的刺激全体を M とすると, M は脳状態へ作用するモノイドと捉えられる. ここで $m, n \in M$ に対しその合成 mn は, 「刺激 m を加えたあとに刺激 n を加える」こととする (ただし「何も刺激を与えないこと」を単位元と考えるのは良くないかもしれない. その問題点を考えてみよ).

3 可換性

任意の 2つのモノイド元 $m, n \in M$ の合成 $m \circ n$ および $n \circ m$ が常に等しくなるとき, つまり $\forall m, n \in M (m \circ n = n \circ m)$ になりたつとき, M は**可換** (commutative) であるといわれる. そうならないものが一例でもあるときは, 非可換 (noncommutative) であるという.

事例 3.1 足し算や掛け算は可換性が満たされる典型例である (任意の数につき $m + n = n + m, m \cdot n = n \cdot m$). 一方, $n \times n$ 行列の集合は行列積と単位行列 I によりモノイドをなすが, これは可換性を満たさない (2つの行列 A, B について一般に $AB \neq BA$).

足し算や掛け算に慣れ親しんだ身には、可換性は極めて一般的な性質に映るかもしれない。しかし上述の定義の通り、それは非常に強い性質である。モノイドとして表されるような現実世界の「作用」に目を向けると、多くの場面において可換性は必ずしも成立しない。

事例 3.2 ある人の心に生じる様々な心的刺激の集合 M を、その人の心的状態に作用するモノイドであると考えよう。例えば痛みや暖かさという感覚は、人の心的状態を快から苦あるいはその逆へと変化させる心的作用である。連続して与えられた刺激をモノイドの合成と考える。このとき、 M は明らかに可換ではないだろう。というのも、痛みを感じてから暖かさを感じるときと、その逆では結果は異なるだろうからだ。

練習問題 3.1 数学以外の事例で、可換／非可換モノイドによってモデル化できそうな現象をそれぞれ一つ挙げよ。その場合の合成と単位元がそれぞれ何に相当するのかを明示すること。

4 準同型写像

我々は上で、モノイドの例として足し算と掛け算があることを見た。これは別の言い方をすれば、足し算と掛け算はモノイドとして見たら同じ構造を持つ、ということである。同じ構造を持つということは、両モノイドを橋渡しする関係性、つまり足し算を掛け算へとシステムティックに変換するルールがあるはずだ。その「ルール」を正確に表すのが、モノイド間の準同型写像である。

定義 4.1 (準同型) 2つのモノイド $(M, \circ, i), (M', \circ', i')$ が与えられているとき、写像 $f : M \rightarrow M'$ で、任意の $m, n \in M$ について次を満たすものを、 M と M' の間の**準同型写像** (homomorphism) という：

$$f(m \circ n) = f(m) \circ' f(n)$$

位相空間の連続写像のと同様、ここでの f はモノイドのもととなる集合 M, M' の間の写像である。しかし単なる集合上の写像ではなく、ここではモノイド M の構造を保つことが要請されており、それを示すのが上の等式である。この等式の左辺は、モノイド M 上の演算 $m \circ n$ を行ったものを、 f で M' に飛ばしたものを表している。一方右辺は、 M の元 m, n をそれぞれ f で飛ばした結果である $f(m), f(n) \in M'$ に、 M' 上のモノイド演算 \circ' を適用したものを表している。くどいようだが、 \circ は M の演算、 \circ' は M' の演算であるということをしっかり確認しよう。よってこの式全体は、 M の演算 \circ の結果を f で飛ばしたものと、先に f で飛ばしてから M' の演算 \circ' を適用した結果が同じである、ということを表している。モノイドの構造はその演算のあり方によって決定されるのだから、このように作られた準同型写像はモノイドの構造をしっかり保っているといえる。

練習問題 4.1 $f : M \rightarrow M'$ がモノイド準同型のとき、 $f(i) = i'$ 、つまり M の単位元は f によって M' の単位元に移されることを示せ。

ゼロ以上の実数 $\mathbb{R}^+ := \{x \in \mathbb{R} | x \geq 0\}$ 上の足し算と掛け算のモノイドの間の準同型写像はどのようなものがあるだろうか。つまり $M := (\mathbb{R}^+, +, 0), M' := (\mathbb{R}^+, \times, 1)$ としたときの準

同型 $f: M \rightarrow M'$ を見つけたい。それは無数にあるのだが、一つの例として関数

$$2^{\cdot} :: m \mapsto 2^m$$

を考えてみよう。まずこれは $m \in \mathbb{R}^+$ から $2^m \in \mathbb{R}^+$ への関数になっている。さらに

$$2^{m+n} = 2^m \cdot 2^n$$

なので、和を積へとしっかりと移している。これを「2 を底とする指数関数」という。2に限らず、 $a > 0$ を底とする指数関数はすべて足し算としての非負実数から掛け算としての非負実数への準同型を与える。特に底としてネイピア数 $e \approx 2.718$ をとるものを単に指数関数 (exponential function) とよび、 $\exp()$ と表す。

事例 4.1 我々は上で、自然数 \mathbb{N} 上の足し算と非負実数 \mathbb{R}^+ 上の足し算はともにモノイドであると述べた。これらの間にも準同型がある。いま埋め込み $i: \mathbb{N} \rightarrow \mathbb{R}^+$ を、 $i(m) = m$ で定義する。つまり i はある数 m をとって同じ数 m を返す。ただしここで入力される数 m は整数であるが (つまり $m \in \mathbb{N}$)、出力される数 $i(m)$ は実数として解釈されている (つまり $i(m) \in \mathbb{R}^+$) 点に注意しよう。当然 $i(m+n) = i(m) + i(n)$ となり、この関数は足し算を保存するので、準同型写像である。

練習問題 4.2 $(\mathbb{N}, +, 0)$ から $(\mathbb{R}^+, +, 0)$ への準同型写像には埋め込み以外にも沢山ある。その例を考えてみよう。

定義 4.2 (同型) モノイド M, N の間の準同型写像 $f: M \rightarrow N$ が全単射であるとき、 f は **同型写像** (isomorphism)、 M と N はモノイドとして **同型** (isomorphic) といわれる。このとき逆写像 $f^{-1}: N \rightarrow M$ は N から M への準同型写像になっている。

事例 4.2 $\exp(): \mathbb{R}^+ \rightarrow \mathbb{R}^+$ の逆写像は、(e を底とする) 対数関数 $\log()$ である。 $\log(x) = y$ とは、 e を y 乗すると x になる、ということを意味する。よって任意の $x \in \mathbb{R}^+$ につき、 $\log(\exp(x)) = x$ であり、 $\exp(\log(x)) = x$ 。また

$$\log(x \cdot y) = \log(x) + \log(y)$$

かつ

$$\log(1) = 0$$

より、 \log は掛け算 $(\mathbb{R}^+, \times, 1)$ から足し算 $(\mathbb{R}^+, +, 0)$ への準同型写像になっている。

一方で、事例 4.1 と練習問題 4.2 で見たような $(\mathbb{N}, +, 0)$ と $(\mathbb{R}^+, +, 0)$ の間には、当然全単射は存在しない。よって両者は同型ではない。

事例 4.3 心の機能主義 (functionalism) によれば、心的状態は何らかの神経生理学的機能と同一視できる。この見方によれば「痛み」という質的な感じは、鋭い物理的刺激に対する神経生理学的反応の心的対応物に他ならない。これをモノイド準同型の観点からモデル化してみよう。いま、 P を事例 2.3 で見たような脳状態モノイド、 M を事例 3.2 で見た心的モノイドとする。このとき、機能主義とは準同型写像 $f: P \rightarrow M$ が存在する、という主張として捉えることができる。物理刺激から心的刺激へのマッピング f が単射である場合、複数の物理的刺激が

同一の心的刺激（例えば「痛み」）を生み出すことがある．一方、これが全単射（つまり f が同型）である場合、両者は完全にパラレルであることになる．これを心脳同一説 (mind-brain identity theory) という．

練習問題 4.3 機能主義は、心的状態の物理的状态への付随説（2章事例 7.1）と密接に関連する．ある（心的）状態の集合 S_M が（物的）状態の集合 S_P に付随 (supervene) するとは、2つの心的状態 $s, s' \in S_M$ が異なるなら対応する物理状態 $f(s), f(s') \in S_P$ も異なる、つまり f が単射であるということであった．しかしこれは時間スライスごとの静的な対応を見ているだけで、本章で見たような時間発展を考慮していない．では通時的な心的・物的モノイド M, P を考えた場合、共時的に付随説が成立する条件はなんだろうか？

（この問題は様々な粒度で考えることができるが、しっかりと扱うためには、モノイド作用についての正式な定式化が必要になる．）

5 群

群 (group) は、以下のようにモノイドの特殊ケースとして定義される．

定義 5.1 (群) モノイド (M, \circ, i) が、モノイドの2要件に加え次を満たすとき、**群** (group) であるといわれる：

$$\forall m \in M, \exists m' \in M (m \circ m^{-1} = m^{-1} \circ m = i).$$

つまりすべての元 $m \in M$ に対して、それと掛け合わせると単位元になるような $m^{-1} \in M$ が存在する．このような m^{-1} を m の**逆元** (inverse element) という（逆元は、場合によって $-m$ などとも書かれる）．つまり群とは各元が逆元を持つモノイドである．

単位元 i は「何もしない」ことなので、 $m \circ m^{-1} = i$ は元と逆元を合成すると結局「何もしない」ことと同じだといっている．このように、群のすべての元には、それをキャンセルする逆元が備わっている．

逆元については、次の性質が成り立つ．

1. 任意の元 $m \in M$ に対し、その逆元は一意的に定まる．
2. 逆元の逆元はもとに戻る： $(m^{-1})^{-1} = m$ ．
3. 任意の $m, n \in M$ に対し、 $(mn)^{-1} = n^{-1}m^{-1}$ ．

証明は次の通り：

1. 仮に m の逆元として n, n' があるとしてみよう．すると $(n'm) = (mn) = i$ より、 $n = in = (n'm)n = n'(mn) = n'i = n'$ となり、 n と n' が等しいことが示される．
2. $m^{-1}m = i$ であるが、これは m^{-1} の逆元（すなわち $(m^{-1})^{-1}$ ）が m であると述べていることに等しい．

3. $n^{-1}m^{-1}$ を mn の左ないし右からかけると i になることで確かめられる. 例として左からかけると $n^{-1}m^{-1}mn = n^{-1}in = n^{-1}n = i$.

事例 5.1 モノイドの事例として足し算の体系を見たが, 足し算の「逆」は引き算であり, 引き算とは負の数を足すことにほかならない. よって自然数に変えて (負の数を含む) 整数 \mathbb{Z} を考えると, $(\mathbb{Z}, +, 0)$ は二項演算 $+$ について群となる. ここで $m \in \mathbb{Z}$ の逆元は $-m$ であり, 実際 $m + (-m) = 0$ がなりたつ.

練習問題 5.1 掛け算の場合の逆元はなんだろうか. $(\mathbb{Z}, \times, 1)$ は二項演算 \times について群となるだろうか. 有理数 \mathbb{Q} や実数 \mathbb{R} だったらどうだろうか.

しばしば, 群は対象の**対称性** (symmetry) を示すものだといわれる. これはどういうことだろうか. 下のような星型図形を考えよう. 1