

3. 代数

2022 秋期「哲学者のための数学」授業資料（大塚淳）

ver. 2022 年 11 月 2 日

1 構造

前章までで、集合論の（ほんの）基礎的なところを見た。現代数学において、集合はあらゆる理論的構造の「素材」としての役割を担っている。例えば線形代数や解析学やリー代数や確率論や・・・あらゆる数学理論は、「かくかくしかじかの性質を持った集合」と定義できるのである^{*1}。つまり語弊を恐れずにいえば、数学の理論とは、何らかの構造を持った集合である。実際、この章以下で我々は、ブール代数や群、位相などを、特定の構造を持つ集合として導入する。集合が持つそうした構造は、一般に**公理** (axioms) の形で表される。まず手始めに、一番簡単な、順序構造を集合に入れるところから考えてみよう。

2 順序

同値類とは反射的、対称的かつ推移的な関係なのだった (2 章 3 節)。ここで対称性を反対称性に替えた関係を、**半順序** (partial order) という。きちんと書き下せば、集合 X 上の 2 項関係 \preceq が半順序であるとは、

- 反射性： $x \preceq x$
- 推移性： $x \preceq y$ かつ $y \preceq z$ ならば $x \preceq z$
- 反対称性： $x \preceq y$ かつ $y \preceq x$ ならば $x = y$

がすべての $x, y, z \in X$ について満たされることをいう。身近なところでは、 \geq, \leq などがこの条件を満たすことを確認しよう。

練習問題 2.1 身近な半順序の例を挙げよ。

半順序関係を持つ集合を、**半順序集合** (partially ordered set または縮めて poset) という。せっかくなので、ちゃんと定義すると以下のようになる：

^{*1} こうした集合論に根ざした数学の統一的理解は、20 世紀のニコラ・ブルバキ (Nicolas Bourbaki) の仕事に多くを負っている。ブルバキは集合論をいわば数学の共通言語に見立て、各数学理論を集合論の枠内で再構築した。ちなみにブルバキはペンネームで、実際は複数の数学者の集まり（集合！）である。

定義 2.1 (半順序集合) 集合 X とその上に定義された半順序関係 \preceq の組 $\langle X, \preceq \rangle$ を、半順序集合という。

この定義は、半順序集合を、集合 X とその上に定義された関係の組として定めている。この組を半順序集合たらしめているのは、この関係 \preceq が半順序であるということ、つまり上に挙げた反射性・推移性・反対称性を満たすということであり、これがいわばこの関係の特徴づける公理となっている。一般に「構造を持つ集合」ということで意味されているのは、このような「集合 & 一定の条件（公理）を満たす関係や関数や元など」の組のことである。

半順序集合の例はいくらでもある。 $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$ はその最も身近な一例だろう。また集合の包含関係 \subset は半順序関係なので、冪集合と包含関係の組 $\langle \mathcal{P}(X), \subset \rangle$ も半順序集合になる。

ところでなぜ「半」順序なのか？それは、一般に考える順序には少し及ばないからだ。一般的に順序というと、すべてが一行に並んでいるイメージがある。一行に並んでいるとは、任意の $x, y \in X$ について、 $x \preceq y$ か $y \preceq x$ の少なくとも一方が成り立つということだ（両方成立してても良い。その場合は反対称性より $x = y$ となる）。これを**完備性** (completeness) という。半順序は完備性を要求しないので、「枝分かれした」順序を許す。完備性を満たす半順序は**全順序** (total order) という*2。上の例では、 $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$ は全順序だが、 X が2つ以上の元を持つときの $\langle \mathcal{P}(X), \subset \rangle$ はそうではない。

練習問題 2.2 全順序集合と、全順序でない半順序集合の例を挙げよ。

ここでいくつかの定義を確認しておこう。 $\langle X, \preceq \rangle$ を半順序集合、 $A \subset X$ としたとき：

- $a \in A$ が A の**最大元**であるとは、 $\forall x \in A (x \preceq a)$ が成り立つこと。逆に**最小元**であるとは、 $\forall x \in A (a \preceq x)$ が成り立つこと。最大／最小元は存在するとは限らないが、あれば一つしかない。
- $b \in X$ が A の**上界** (upper bound) であるとは、 $\forall x \in A (x \preceq b)$ が成り立つこと。 A に上界が存在するとき、 A は**上に有界**であるという。最大元との違い、 A の上界は A に含まれている必要がないことに注意。同様の仕方、 A の下界 (lower bound) が定義される。 A が上に有界かつ下に有界のとき、 A は有界であるという。
- A の上界は複数ありえる。例えばもし b が上界で $b \preceq c$ なら c も上界である。でもその中で一番小さい、いわば「スレスレの上界」があれば、これを**上限**ないし**最小上界** (least upper bound) という。つまり A の上限とは、 A の上界の集合 B の最小元（あれば）である。上界が存在しても（つまり $B \neq \emptyset$ でも）上限は存在しないこともある。同様に、 A の最大下界を**下限** (greatest lower bound) という。

事例 2.1 順序集合の有界性についての問題は、哲学で非常によく出くわす。例えば「不動の第一動者」（アリストテレス）や「神の存在論的証明」（デカルト）の議論を順序の概念を用いてモデル化するとどうなるだろうか。

*2 ちなみに完全性は反射性を含意する（「任意の $x, y \in X$ 」の両方が x の場合）ので、全順序の定義は推移性、反対称性と完備性で事足りる。

3 束

次に紹介するのは、束 (lattice) である。

定義 3.1 (束) 束とは半順序集合 $\langle X, \preceq \rangle$ であり、どの 2 元 $x, y \in X$ に対しても、上限および下限が存在するものである。 x, y の上限を**結び** (join) といい、 $x \vee y$ で表す。 またその下限を**交わり** (meet) といい、 $x \wedge y$ で表す。

つまり束は特殊な半順序集合と定義される。束を特徴づける性質は、すべてのペアが結びと交わりを持っている、ということである。 x, y の結び $x \vee y$ は x や y よりも「大き」く、なおかつそうしたもののの中で最小のものとして定義される (交わりはその逆)。視覚的には、束の任意の要素のペアは結びと交わりによって上下で束ねられている、とイメージできる。

練習問題 3.1 $\langle \mathcal{P}(X), \subset \rangle$ は束である。 X の 2 つの部分集合 $A, B \in \mathcal{P}(X)$ の結びと交わりはなんだろうか。

結びと交わりは、 X の 2 つの元 x, y を別の元 $x \vee y, x \wedge y$ に対応させる「演算」だとみなすこともできる (ちょうど足し算が 2 つの数に別の数に対応させるように)。この演算は足し算や掛け算のように結合的かつ可換である。つまり交わりについてだけ見れば、 $x, y, z \in X$ に対し

$$(x \wedge y) \wedge z = x \wedge (y \wedge z) \quad (1)$$

$$x \wedge y = y \wedge x \quad (2)$$

が成立する (気になる人は確認してほしい)。

束では任意の 2 点の結び・交わりがあるので、 $x \vee y \vee z \vee \dots$ というように結び (あるいは交わり) を連結していけば、任意の有限集合 $A \subset X$ が上限と下限を持つことがわかる。とくに X 自体が有限の場合、 X 全体の上限と下限、つまり最大元と最小元が存在する。束の最小限を 0、最大限を 1 と書く。つまりすべての $x \in X$ について、 $0 \preceq x \preceq 1$ が成り立つ。こうして、有限束は、上と下がきゅつと縛られたダイヤモンド型 (\diamond) をしている。

注意 ここで「有限」と釘を差していることには理由がある。というのも無限集合の場合、その中の任意のペアが上限・下限を持ったとしても、集合全体の上限や下限は存在しないことがあるからだ。簡単な例として、自然数全体の全順序集合 $\langle \mathbb{N}, \leq \rangle$ を考えてみよう。いかなる 2 整数 $n, m \in \mathbb{N}$ について、その上限・下限は m, n のどちらか ($m = n$ の場合は両方) なので、これは束である (全順序なので「束」っぽさはあまりないが)。しかし明らかに \mathbb{N} 全体ないしその無限部分集合 (例えば「423 以上の数」) には上限が存在しない。このように、無限束は必ずしも最小元や最大元を持つとは限らない。有限無限に関わらず、任意の部分集合が上限・下限を持つような束を、**完備束** (complete lattice) という^{*3}。有限束は必然的に完備だが、無限だとそうでない場合がある。このように、無限はときにややこしい事態をもたらす。数学的に

^{*3} 前節で見た順序の完備性とは意味が異なるので注意。

はそこが面白いところでもあるのだが、とりあえず本授業ではそうしたややこしさを避けるため、以下では主に有限束に話を限って進めることにする。

以上で、束を特徴付ける公理と、そのもとで定まる演算 \vee, \wedge の大枠を見た。こうした公理から、演算についての様々な事実、すなわち定理が帰結する。実際そうした定理は沢山あり、すべて公理から示すことができる（上の (1)-(2) も定理である）。ここでは更に、以下の 3 つを挙げておこう：すべての $x, y \in X$ に対し、

$$x \wedge x = x, \quad x \vee x = x \quad (3)$$

$$1 \wedge x = x, \quad 0 \vee x = x \quad (4)$$

$$x \wedge (y \vee x) = x = (x \wedge y) \vee x. \quad (5)$$

練習問題 3.2 $\langle \mathcal{P}(X), \subseteq \rangle$ で 0,1 に対応するのはなにか。またそこで上の (3)-(5) が成立することを確かめよ。

事例 3.1 束は、抽象的概念の間の階層構造を表すためにしばしば用いられてきた。 C を概念の集合、 $a \preceq b$ を「 a は b の事例（インスタンス）である」という関係だとして、すると例えば $\text{human} \preceq \text{animal}$ であり、 $\text{human} \vee \text{dog} = \text{mammal}$ だといえる。また $\text{rational} \wedge \text{animal} = \text{human}$ かもしれない。つまり結びは複数の事例を抽象して共通概念を得る操作、交わりは複数の概念を兼ね備える具体例を作り出す操作だと考えることができる。このように、概念間の抽象構造（しばしば「アリストテレス的抽象主義」）は束によってモデル化できる。

練習問題 3.3 概念の束 $\langle C, \preceq \rangle$ において、0,1 に対応する概念はあるだろうか。

4 ハイティング代数

有限束にさらに公理を加えて、パワーアップさせてみよう。

定義 4.1 (ハイティング代数) (有限) **ハイティング代数** (Heyting algebra) とは、0 と 1 を持つ束 $\langle X, \preceq \rangle$ であり、かつ結びと交わりが以下の**分配則** (distributive law) を満たすものである：すべての $x, y, z \in X$ に対し、

$$x \wedge (y \vee z) = (x \wedge y) \vee (x \wedge z) \quad (6)$$

$$x \vee (y \wedge z) = (x \vee y) \wedge (x \vee z). \quad (7)$$

結びと交わりを $+$ と \times に置き換えれば、これは小学校で習った分配則と全く同じ形をしている^{*4}。ハイティング代数とは、この分配則が成り立つ完備束である。

ハイティングは直観論理 (intuitionistic logic) で知られるオランダの数学者。実際、ハイティング代数は直観論理（排中律が成り立たない）のモデルとして提唱された。また後の章で見るように、位相空間とも密接に対応している。

^{*4} 実際、圏論的な観点からいえば、結びと足し算は余積 (co-product)、交わりと掛け算は積 (product) という一般的な構造の例である。

上で、束には2つの演算 \vee, \wedge が備わっていることを見た。ハイティング代数では更に、**含意** (implication) と呼ばれる次の演算 \Rightarrow が定義できる。

$$z \preceq (x \Rightarrow y) \iff z \wedge x \preceq y$$

これはどう読めばよいのだろう。まず左辺は、 x, y という2つの元に「含意」演算を施して得られる元 $x \Rightarrow y$ が他のある元 z よりも上にある、という事態を表している。そして右辺と合わせた条件式全体は、こうした事態が成立するのは、 $z \wedge x$ が y より下にあるとき、そのときのみであるということを行っている。このようにしてこの式は、「含意」演算を施して得られた元 $x \Rightarrow y$ が束上で占める位置を右辺によって定めることにより、演算を定義している。

具体的には、 $x \Rightarrow y$ は $z \wedge x \preceq y$ を満たすような z たちの上限になっている。 y 自身は $y \wedge x \preceq y$ を満たすので、 $y \preceq (x \Rightarrow y)$ 、つまり $x \Rightarrow y$ は y の上にある。しかし同時に、 $x \Rightarrow y$ と x の交わりは y より下、つまり $(x \Rightarrow y) \wedge x = y \wedge x$ でなければならない。 $x \Rightarrow y$ はそのような条件を満たす元の中で一番上にある元である。

事例 4.1 含意の定義はややこしい。しかし論理学を知っていると少しそのややこしきは和らぐかもしれない。その名前から推察されるように、含意 $x \Rightarrow y$ は命題論理における実質含意を念頭においている。そしてその記号から推察されるように、結び \vee と交わり \wedge はそれぞれ「または」と「かつ」に対応している。では順序 \preceq は何に対応しているかということ、帰結関係 \vdash である。例えば $x \wedge y \preceq z$ は、 $x \wedge y \vdash z$ 、つまり x かつ y なら z が成り立つ、という論理的真理を表している（同様のことを \vee でも確かめよ）。これを念頭に上で定義した含意を論理式に翻訳すると、

$$z \vdash (x \Rightarrow y) \iff z \wedge x \vdash y$$

となる。これは、 z から「 x ならば y 」が帰結するならば、「 z かつ x 」から y が帰結するし、また逆もしかり、という**演繹定理** (deduction theorem) を表している。こう考えると、上で述べたように $x \Rightarrow y$ が y の上にあるのも納得できるし (y が成り立っていれば $x \Rightarrow y$ は必ず成り立つ)、 $(x \Rightarrow y) \wedge x = y \wedge x$ も真理表から確認できる。

さて、ハイティング代数には0があるので、任意の $x \in X$ について $x \Rightarrow 0$ が存在する。これを**擬補元** (pseudo-complement) と呼び、 $\neg x$ で表す。これは x をとって $x \Rightarrow 0$ を返す演算

$$\neg :: x \mapsto \neg x = x \Rightarrow 0$$

と考えることもできる。

ハイティング代数で新たに加わった演算についても、様々な定理が成立する。例えば \Rightarrow については

$$x \Rightarrow x = 1 \tag{8}$$

$$((x \wedge (x \Rightarrow y)) \Rightarrow y) = 1 \tag{9}$$

$$(x \vee y) \Rightarrow z = (x \Rightarrow z) \vee (y \Rightarrow z) \tag{10}$$

$$x \Rightarrow (y \wedge z) = (x \Rightarrow y) \wedge (x \Rightarrow z) \tag{11}$$

などが任意の $x, y, z \in X$ について成立する。また \neg に関しては

$$x \preceq \neg \neg x \tag{12}$$

$$\neg(x \vee y) = \neg x \wedge \neg y \tag{13}$$

などが成立する.

事例 4.2 上述したように, ハイティング代数は直観主義論理のモデルを与える. それを見るには, $\vee, \wedge, \Rightarrow, \neg$ をそれぞれ論理和 (または), 論理積 (かつ), 実質含意 (ならば), 否定 (\sim でない) に読み替え, 各元を命題記号と考えれば良い. この観点からは, 例えば (8) と (9) はそれぞれ同一律および modus ponens が常にトートロジーであること, (10) と (11) は「ならば」の分配則に対応していることがわかる. 一方 (13) はド・モルガン法の一方を示す (もう片方はすぐ後で見るブール代数のみで成り立つ). また (12) において, x の二重否定が x と一致しないのにも注意せよ. これは直観主義論理において二重否定が除去できないことに対応する.

練習問題 4.1 ハイティング代数を (直観主義) 論理として解釈した際, 0 と 1 はそれぞれ何を表すだろうか.

事例 4.3 概念の束 $\langle C, \preceq \rangle$ はハイティング代数だろうか. そうだとしたらその含意と擬補元はどう解釈できるだろうか.

発展 4.1 ここでの取り扱いはずべて有限束を前提としている. 無限束の場合は, ハイティング代数であるためには完備性と**無限分配束**を満たさなければならない. 前節で触れたように, 完備性とは任意の (無限でも良い) 部分集合に上限と下限が存在すること. そして無限分配束とは, 任意の (無限でも良い) 部分集合 $Y \subset X$ について, $x \wedge (\bigvee_{y \in Y} y) = \bigvee_{y \in Y} (x \wedge y)$ が成立する (交わりも同様) ことである. 完備性のときと同様, 無限束においては, 分配束が満たされていても無限分配束は満たされないことがありうる.

こうした無限・有限の区別を避けるために, 教科書によっては, ハイティング代数を「任意の 2 元が含意を持つ完備束」と定義することもある. その場合, (無限) 分配束はそこからの定理として導かれる. いずれにせよ, 両流儀の定義は一致する.

5 ブール代数

最後に, ハイティング代数に更に公理をもう一つ付け加えて, **ブール代数** (Boolean algebra) を作ろう.

定義 5.1 (ブール代数) ブール代数とは, ハイティング代数 $\langle X, \preceq \rangle$ であって, 各元 $x \in X$ の擬補元 $\neg x$ が次を満たすものである:

$$x \vee \neg x = 1, \quad x \wedge \neg x = 0 \quad (14)$$

ブール代数の擬補元 $\neg x$ は補元 (complement) と呼ばれる.

ブール代数を特徴付けるこの公理 (14) は, **排中律** (law of excluded middle) とよばれる. つまりブール代数とは排中律が成り立つハイティング代数である. このおかげで, ブール代数ではド・モルガン則のもう一方が成立する

$$\neg(x \wedge y) = \neg x \vee \neg y. \quad (15)$$

ブール代数は、命題論理の構造を表すものとしてよく知られている。ハイティングのときと同様、演算子は論理演算子として解釈できる。上の (14) は、まさに命題論理における排中律と矛盾律そのものだ。

練習問題 5.1 $\langle \mathcal{P}(X), \subset \rangle$ もまた、ブール代数としての構造を持つ。 $X = \{a, b, c\}$ として、その束構造を図示してみよ。

練習問題 5.2 2つの命題変項 P, Q のみを持つ命題論理の体系に対応するブール代数を図示せよ (ヒント: ブール代数の一番真ん中の層の要素は $P, Q, \neg P, \neg Q$ の4つであり、それらのペアの \vee, \wedge を上下に書き込んでいけば良い)。

練習問題 5.3 $A, B \subset X$ としたとき、 $\langle \{A, B, A^c, B^c\}, \subset \rangle$ はブール代数となる (これは問い 5.1 の部分になっている)。このブール代数を図示せよ。

発展 5.1 問題 5.2 と 5.3 は、命題論理の理論と部分集合の体系が、ブール代数として見ると同じ構造を持っている、ということを (非常にシンプルなケースで) 示している。しばしばいわれるように、命題論理というのは記号の間に成り立つ統語論的な関係であり、集合はその意味論を与える (例えば命題 P に対して P が成り立つ可能世界の集合が対応する)。するとこの対応は、統語論 (論理) と意味論 (集合) との対応だといえる。では、こうした関係は一般に成り立つのだろうか。答えは Yes であって、任意の命題論理の体系は、何らかの集合の体系と一対一に対応する、ということが証明できる。しかしそのためには、どのような集合の体系であれば命題論理との体系と対応するのか、ということを定める必要がある (というのも、明らかに任意の集合を命題論理の意味論を与えるものとして解釈することはできないからだ)。具体的には、そのためには位相構造 (次章参照) を集合に入れてやる必要がある。その上で、命題論理の体系は、そうした特定の位相構造を持つ集合の系、具体的には**ストーン空間** (stone space) と呼ばれる位相空間と同型であることが示せる。この命題論理の統語論と意味論を結びつける結果は、**ストーンの表現定理** (Stone's representation theorem) と呼ばれている。これは非常に重要な定理であり、あとで扱う位相や圏論とも関連が深いのだが、この授業内では扱うことができない。関心がある向きは、Hans Halvorson, *The Logic in Philosophy of Science*などを参照されたい (ただしちょっとむずかしい)。