

Boole 代数値の行列

東大 教養 難波完爾

P. J. Cohen の forcing method の代数的・位相的記述として、
R. M. Solovay, D. Scott によって Boole 代数値の集合論が考え
られ、その体系の構造や可能性に対する研究が進められてい
る。ここでは Boole 代数値の 2 項関係に対応する Boole 代数
値の行列について記してみようと思う。

Boole 代数は中等性に見られる通り特殊な代数であるが、
それだけに色々の特殊な性質が得られ、その何々の性質がさ
らに一般の体系の性質、引断かれたり、また変形されて成立
したりするので、色々の性質を理解するには都合のよい面も
あると思う。

さて集合の概念は表現函数を通じて

$$\langle a \in b \rangle = b^*(a)$$

なる関係で結ばれている。ここに b^* は集合 b の表現函数であ
って $\langle a \in b \rangle$ は論理式 $a \in b$ の正しさであり、通常は $\{0, 1\}$
(= 2 であるが、一般に完備ブール代数を考える訳である。

函数の帰納的定義をたどって見ると、例えは和、積、中などについて

$$\begin{cases} n+0 = n \\ n+m' = (n+m)' \end{cases} \quad \begin{cases} n \cdot 0 = 0 \\ n \cdot m' = n \cdot m + n \end{cases}$$

$$\begin{cases} n^0 = 1 \\ n^{m'} = n^m \cdot n \end{cases} \quad \begin{cases} n^{(0)} = 1 \\ n^{(m')} = n^{n^{(m)}} \end{cases}$$

となる訳であるが、この4番目の函数が集合論にも特徴的である。

$$n^{(m')} = \underbrace{n^{n^{\dots^n}}}_m$$

であるが、これを極限に於ては連続性

$$a^{(\alpha)} = \bigcup_{\nu < \alpha} a^{(\nu)}$$

で定める訳である。上記説明では自然数の函数として帰納的に定められている訳であるが、一般に直和、直積、中等も考えるのである。

さて、順序数の全体を On とし B を一つの完備ブール代数とするとき

$$V(b) = B^{(On)}$$

とする訳であるが、第4の函数を考えると、これは、その中で和、積、中が"自由"に展開できる最小の類ということの意味している。

集合論の基本的述語 $\epsilon, =$ は帰納的に

$$\langle u \in v \rangle = \sum_{x \in \text{dom}(v)} v(x) \cdot \langle u = x \rangle$$

$$\langle u = v \rangle = \prod_{x \in \text{dom}(u)} (u(x) \Rightarrow \langle x \in v \rangle) \cdot \prod_{x \in \text{dom}(v)} (v(x) \Rightarrow \langle x \in u \rangle)$$

によって定められている。ブール代数の二項関係 $a \Rightarrow b$ は “
ならば” に対応するもので指数函数

$$a \Rightarrow b = b^a = -a + b$$

である。

$$V(B) = B^{(O_n)}$$

なる関係は $V(B)$ が simple type theory の model である：とを意味
しているが、和、積、中等が必ずしも自然な形で表現されて
いる訳ではなくて、 \in 、 $=$ の定義によらなければならぬが
この定義は何か Russell の環元の公理を思い出させるものがある。
そして基本的なことはこの体系の中で Zermelo-Fraenkel の
集合論の公理がすべて値 1 をとる：とである。

上記では完備ブール代数 B を値に考えたが、例えば完備な
体 R とか Euclid 空間への函数を考へるときには

$$V(R) = R^{(O_n)}$$

はどの様になるであろうか。その最初の部分は

$$R^{(0)} = \{0\}$$

$$R^{(1)} = \{0 \mapsto x : x \in R\}$$

等であつて、唯一つの元 0 上で値 x をとる函数を x と同一視
（これは $R^{(1)}$ と R は同じものである）

$$R^{(2)} = R^R$$

即ち R から R への函数の "全体" である。勿論通常は可測函数の全体とか何らかの条件を満足する函数の全体とするのである。

ここで少し集合論からの類推の "糸" をたどってみよう。
 \in 関係に対応するのは

$$\langle x \in u \rangle = u(x)$$

であった。そして同値律 (equality axiom) は

$$\langle A(a) \rangle = \sum_x \langle x = a \rangle \cdot \langle A(x) \rangle$$

であった。これに対応するのは

$$f(a) = \int \delta(x, a) \cdot f(x) dx$$

と考えるのが自然であろう。即ち $\langle x = y \rangle$ は $\delta(x, y)$ と解釈し、
 包含関係 (inclusion) に対応する

$$\langle u \subset v \rangle = \prod_{x \in \text{dom}(u)} (u(x) \Rightarrow \langle x \in v \rangle)$$

に対応するのは

$$\exp \left(\int u(x) \log v(x) dx \right)$$

とするのが自然のまうに見える。この様なものについて集合論で成立する性質がそのままの形とかそれに近い形で成立すると考えてはいいないが、他の分野でこの様な形の積分がしば

しは用いられていることも考えて、この様な形式やその意味を考えてみることは全く意味のないことは考えにくいと思う。

さてブール代数値の集合論の model では最大値定理が成立する。これは任意の論理式に対して

$$\langle \exists x A(x) \rangle = \langle A(u) \rangle$$

となる u が存在するというものである。この性質はブール代数の双対位相空間が compact で totally disconnected なことに対応している。ブール代数の埋込み $\nu: 2 \rightarrow \beta$ は自然に $V = V^{(2)}$ から $V^{(B)}$ への埋込みに covariant な形で拡張できる。即ち

$$V = V^{(2)} \subset V^{(B)}$$

と考えることが出来る。 $V^{(B)}$ の中に於て $V^{(2)}$ の元であること、 $\langle u \in V^{(2)} \rangle = 1$ であれば、 u は

$$u = \sum_x \langle u = \check{x} \rangle \check{x}$$

の様に直交系に展開できる。直交の意味は equality によって

$$\langle u = \check{x} \rangle \langle u = \check{y} \rangle \leq \langle \check{x} = \check{y} \rangle = \delta(x, y)$$

が成立することであり、 1 の分解として $V^{(2)}$ の元であることが同値であることを意味している。

例えば順序数 (ordinal number) の概念は推移性と元の推移性

$$\forall x \in a \forall y \in x (y \in a)$$

$$\forall x \in a \forall y \in x \forall z \in y (z \in x)$$

によって定められるので常に V の元であるが、選択公理によれば $V^{(B)}$ の元は一つの順序数と対応出来るので

$$\langle \exists f: u \xrightarrow[\text{onto}]{} \alpha \rangle = 1$$

となる訳である。最大値定理と展開定理によれば

$$\sum_{\alpha \in O_n} \langle f: u \xrightarrow[\text{onto}]{} \alpha \rangle$$

であり、完備ブール代数が一つの集合であるから

$$\{ \alpha \in O_n : \langle f: u \xrightarrow[\text{onto}]{} \alpha \rangle \neq 0 \}$$

直交性によって、有界な集合になる。この事は可能性

$\langle f: u \xrightarrow[\text{onto}]{} \alpha \rangle$ で u は α と 1 対 1 対応していることを意味しており、これらの可能性の場合に一意的に分解出来ることを意味する。

基数の概念は

$$\forall x \in \alpha \forall f: x \rightarrow \alpha \exists y \in \alpha \forall z \in x (f(z) \neq y)$$

であるから制限されていない束縛記号は $\forall f: x \rightarrow \alpha$ のみであり、 V であるから $V^{(B)}$ で基数であれば $V^{(B)} = V$ の中でも基数である。したがって上記の直交分解は基数の一部分を用いて可能である。この様にして同様な性質については、元は 1 の分解、部分集合はブール値のベクトル、二項関係はブール値の行列に対応している。

(a, b) 型の行列はそれに対応する関係 R と

$$A(x, y) = \langle \check{x} R \check{y} \rangle$$

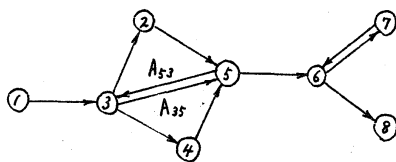
なる関係で結ばれている。その積については

$$AB(x, y) = \langle \exists z \in \check{C} (xRz \wedge zSy) \rangle$$

で定められ通常の方法にしたがう。そして、その中についても、正方行列については

$$A^0(x, y) = \langle \check{x} = \check{y} \rangle$$

そして勿論 $A^{n'} = A^n A$ で定まる。これは推移行列と考えられる。



このようなブール代数値の関係の標準的表示にはやはり固有方程式

$$Ax = ax$$

に着目するのが自然である。ここに A は行列、 x はベクトル、 a はブール代数 \mathcal{B} の元である。 $x \neq 0$ であるとき、 a は固有値、 x は固有ベクトルと呼ばれる。内容的には

$$a \leq \langle Ax = x \rangle$$

である。すなわち x は関係 A で不変の集合である。これを意味している。

関係の中で特に重要なものは函数の概念で、これは

$$\forall x \in \check{a} \exists y \in \check{b} (xRy)$$

$$\forall x \in \check{a} \forall y \in \check{b} \forall z \in \check{b} (xRy \wedge xRz \rightarrow y = z)$$

と記すことが出来る。行列の言語で記せば

$$y \neq z \rightarrow \sum_{x \in A} A(x, y) A(x, z) = 0$$

$$\sum_{y \in A} A(x, y) = 1$$

であることと意味している。即ち行ベクトルの長さ1, 異なる列ベクトルが直交することと意味している。onto であることは列ベクトルの長さ1, one to one であることは行ベクトルの直交性, 逆の関係には転置行列, そして1対1対応には直交行列 (unitary matrix) が対応している。直交行列 U の転置行列を U^* とするとき

$$U^* A U$$

関係 A の1対1函数による変形である。

$$U^* A U x = a x$$

$$A U x = a U x$$

は同値であるから $U^* A U$ の固有ベクトル x と A の固有ベクトル Ux は対応している。

行列 A の trace

$$\sum_{x \in A} A(x, x)$$

や主対角線上の二次の行列式の和

$$\sum_{x, y \in A} (A(x, x) A(y, y) - A(x, y) A(y, x))$$

等も unitary matrix による不変量である。即ち A による固定点の存在とか, 二元の入替えのない組の存在等である。測度を考へるときは, これらの "恒数" とか "割合" が対応している。

さて A を a 上の推移関係と考えて, Neumann 級数をとって,
ノルム値の順序を

$$\langle \check{x} \leq \check{y} \rangle = \sum_{n \in \omega} A^n(x, y)$$

で定めれば, これは一つの部分順序である. また

$$\langle \check{x} < \check{y} \rangle = \sum_{n=1}^{\omega} A^n(x, y)$$

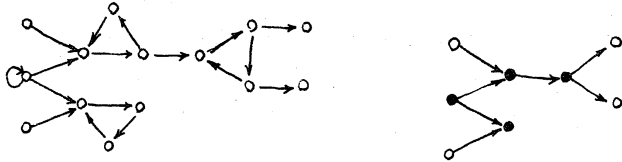
とすれば

$$x \leq y \equiv x < y \vee x = y$$

が成立するか必ずしも $x < y$ ならば $x \neq y$ を意味するものではない. 同値関係

$$x \sim y \equiv x \leq y \wedge y \leq x$$

によって同値類に分解すると出来る.



ここに \bullet は $x < x$ となるものを示してある.

この部分順序に対応した位相空間が考えられる. 即ち

$$y \in V(x) \equiv y \leq x$$

として $V(x)$ を x の唯一つの近傍とする訳である. この空間はいわゆる Kolmogorov 空間であって, 順序による位相空間は任意の開集合の共通部分が再び開集合であるという性質で特徴づけられている.

集合については A が不変であることとこの順序に関する位

相と深く関係している。即ち $Ax = x$ なる性質は

$$\forall x \in X \exists y \in X (yAx)$$

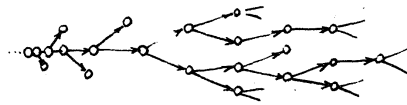
$$\forall x \in X \forall y \in U (xAy \rightarrow y \in X)$$

であって、関係 $<$ を用いて記すと

$$\forall x \in X \exists y \in X (y < x)$$

$$\forall x \in X \forall y \in U (x \leq y \rightarrow y \in X)$$

故に $V^*(x) = \{y \in U : x \leq y\}$ で決定される位相空間の開集合，したがって，もとの順序による位相空間の開集合である：とを意味している。前の方の性質は X には極小元がないこと，即ち well-founded でないことを意味している。well-founded な開集合の任意の和は再びこの性質を有する。これが A の中零元の全体で，その補集合が最大の不変集合である。不変集合の全体の族は任意和の和について閉じている。



ここで極小な不変集合について記しておく

$$\dots < x_n < \dots < x_1 < x_0$$

なる無限下降列に対して

$$\bigcup_{n \in \omega} V^*(x_n)$$

は不変集合であるから，極小不変集は

$$\forall x \in X \forall y \in X \exists z \in X (z < x \wedge z < y)$$

を満足するという意味で compatible である。即ち \mathfrak{x} は filter である。また $x \in \mathfrak{x}$ に対して $V^*(x)$ は well-founded である。不変集合 \mathfrak{x} が minimal である為の必要十分条件は \mathfrak{x} がその中の任意の無限下降列で生成されることである。例えば順序が有理数の全体の様に稠密な場合は minimal でない訳である。

特別な場合として A の転置行列が函数を定める場合は

$$\dots < A^{*n}(x) < \dots < A^*(x) < x$$

によって決定される集合は極小であり、この場合は異なる極小不変集合は互に素である。したがって任意の不変集合は互に共通部分のない極小不変集合の和集合として表現できる。

任意の不変集合が互に素な極小不変集合の和である為の必要十分条件は、任意の無限下降列

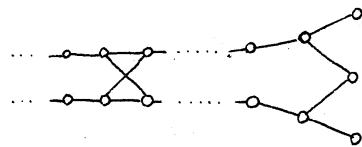
$$\dots < x_n < \dots < x_1 < x_0$$

$$\dots < y_n < \dots < y_1 < y_0$$

に対して

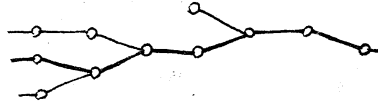
$$\exists n \exists z (x_n < z \wedge y_n < z) \rightarrow \exists n \forall m (y_m < x_n \wedge x_m < y_n)$$

が成立する：とである。



A が函数である場合には任意の不変集合は極小の不変集合の和であるが互に素とは限らない。この場合には木構造とか

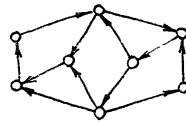
枝の概念とも関係している。



unitary 行列では互に素な巡回置換の積に分解出来る。また symmetric な行列では互に素な連結成分に分解できる。

$$x \approx y \equiv x \leq y \wedge y \leq x$$

による同値律に対しては次の様な graph が対応している。



これらの概念の記述の為に 2 値の graph の記述を用いたが勿論：これらは任意のブール値の関係とすべしで、その内容は少し広いものであるが、これらの概念で記述できるものかどの程度の範囲のことに結びついているのかは興味深いところである。

そこで \mathcal{B} を Borel 集合族, μ を \mathcal{B} 上の σ -finite な測度, I_μ を measure ideal

$$a \in I_\mu \equiv a \in \mathcal{B} \wedge \mu(a) = 0$$

とすると、その quotient algebra

$$\mathcal{B} = \mathcal{B} / I_\mu$$

は完備ブール代数である。 \mathcal{B} 値の集合論の中での関係を表現する行列にはその成分各の測度を対応させる行列が対応して

いる。即ち $A(x, y)$ に $\mu(A(x, y))$ を対応させる行列で、これを $\mu(A)$ と記する。一般に通常の行列として

$$\mu(AB) = \mu(A)\mu(B)$$

が成立すべくもないが、それでも自然な概念のうちこれに満足するものが多く存在するであろうことは想像できる。

例えば、 A が函数を表現している場合は

$$y_1 \neq y_2 \rightarrow A(x, y_1) \cdot A(x, y_2) = 0$$

であるから、互に素 (disjoint) であり、また $A(x, y), B(y, z)$ が独立 (independent) ならば

$$\mu(A(x, y)B(y, z)) = \mu(A(x, y)) \cdot \mu(B(y, z))$$

であるから

$$\mu(AB(x, z)) = \sum_{y \in \mathcal{L}} \mu(A(x, y)) \cdot \mu(B(y, z))$$

が成立する訳である。

また $V^{(B)}$ の中での実数は実数の可測函数であり、実数の n 変数の函数が常に $n+1$ 変数の函数として表現は出来ないのは当然であるが、Baire 函数に限ればそれは成立する。この様なことを考に入れて $V^{(B)}$ の中での解析学、確率論、微分方程式の理論等を考えるとき、自分にはまだ明らかではないのであるけれども、その組合せ論的意味づけは重要なものと思う。特に、積分に対応する \exists とその双対の役割を演ずる \forall と微分や束法的算法

$$\exp \int \log v(x) dx$$

の役割とか意味づけは恐らくはすでに良く知られた概念に落ちるのであろうが興味あるところである。