

多値論理における置換と束演算について

島田良作 (徳島大学工学部)

あらまし. 一般に n 個の真理値 (n 値) のすべての置換と, n 値の可能なすべての順序によつて定義されるすべての束演算の重要な諸性質を明らかにし, これらによる多値論理回路の一設計法を提案する. 置換と束演算からなるこの多値論理系は, その n 値を n 線上の信号の有無であらわす多線回路方式によく適合し, もつとも実際的な多値論理系の一つであると考えられる. すなわち, 置換はすべて線の入れ換えだけでおこなわれ, 束演算は既存の半導体回路で容易に, しかもすべてただ一種類の回路で実現される. 束演算の重要な性質としてとくに吸収律と分配律についてやや詳細に検討し, 束演算の置換と置換の置換から, 2 値論理における双対定理に相当する置換定理をみちびく. これらの置換と束演算を用いてまず一致関数を構成し, これらを組み合せて多値論理関数の標準展開式をみちびく. これらの標準項からできる限り多くの文字を除き, えられる主項から必要最少限の主項をえらぶことによつて多値論理関数の簡単化をおこなう. 実際, 多値多変数の論理関数の最簡構成をえるにはいちじるしい手

数を要するが、ここではその手数と、えられる関数構成の簡単さの妥協点を与えている。

1. まえがき

多値論理に関する研究は多数あり、2値論理における論理積と論理和の概念をそのまま多値に適用した系がもつとも古く、^{(1)~(4)} その他1演算子のみで完全系をなす多値論理演算子の研究、^{(5)~(7)} 多値閾値論理系の研究、^{(8)~(11)} 多値論理全般に関する基本的な諸研究^{(12)~(14)} などがある。ここにのべる多値論理系は(1)~(4)などと同類であるが、すべての置換とすべての束演算を取り扱っている点で異っている。3値の場合、すでにこのような系は著者らによつて発表されているが、⁽¹⁵⁾ ここにのべるのはその一般多値への拡張である。

多値論理回路を実現するもつとも実際的な方法の一つは、その n 値を n 線上の信号の有無であらわす方法である。この場合、信号のある線によつて各値が指定され、したがつて $n!$ 個のすべての置換は線の入れ換えだけでおこなわれる。このような方法は2値および3値論理においてすでに提案されている。^{(16)~(20)} また、束演算は既存の半導体回路で容易に実現され、しかも以下で明らかにされるようにただ一種類の回路が任意の束演算の働きをする。したがつて、素演算として置換

および束演算の数を制限する必要はなく、任意の置換と束演算を自由に使用することができ、しかも任意の多値組み合わせ論理回路がただ一種類の基本回路で実現されることになる。

このような意味においても、置換と束演算からなるこの論理系は重要な多値論理系の一つであると考えられる。

多値論理関数の一般的な構成法として、まず置換と束演算を用いて各変数のいわゆる一致関数を構成し、これらと定数を束演算で結合して標準展開式をみるべく、とくに多値多変数の場合にはいって多くの展開が可能である。3値および多値論理関数の単純化についてはすでに二、三の方法が発表されているが、⁽²¹⁾⁽²²⁾置換を用いた論理系における単純化の方法はいまだ知られていないようである。ここにのべる方法は束演算の選択、冗長項の除去、残された項の可能なすべての形の列举、冗長文字の除去、および主項の選択からなり、最後の主項の選択にあたっては2値論理関数に対する手法⁽²³⁾が用いられる。任意の置換と任意の束演算の自由な使用を許すことはこの単純化の手数を増加させることになるが、それだけより単純化できることになると考えられる。

2. 真理値の置換（置換演算）と束演算

一般に n 個の真理値（ n 値）を $t_1, t_2, \dots, t_n$ とし、これ

らの集合を T とする。集合 T から T への 1 対 1 の写像は集合 T の置換である。これら置換は $n!$ 個あつて、それぞれを $P_1, P_2, \dots, P_{n!}$ とあらわし、これらの集合を P とする。一般に置換 P_i ($i = 1, 2, \dots, n!$) を

$$P_i = \left(\begin{array}{cccc} t_1 & t_2 & \dots & t_n \\ t_{i_1} & t_{i_2} & \dots & t_{i_n} \end{array} \right), \quad \left. \begin{array}{l} t_{ij} (j=1, 2, \dots, n) \in T, \\ t_{ij} \neq t_{ik} (j \neq k). \end{array} \right\} \quad (1)$$

のようにならわす。とくに $t_{ij} = t_j$ ($j = 1, 2, \dots, n$) である置換は恒等置換であり、これを P_1 とする。

T を値域とする n 値論理変数 x に置換 P_i をほどこしたものを x^{P_i} とあらわし、2 重に置換をほどこしたものを $(x^{P_i})^{P_j}$ を $x^{P_i \cdot P_j}$ とあらわす。このような 2 重置換も集合 T から T への 1 対 1 の写像であるから、一般に $x^{P_i \cdot P_j} = x^{P_k}$ となる置換 P_k が存在し、これから置換の積 $P_i \cdot P_j = P_k$ が定義される。このとき、集合 P は P_1 を単位元とする群 (n 次対称群) である。とくに $P_i \cdot P_j = P_j \cdot P_i = P_1$ である 2 つの置換 P_i と P_j はたがいに逆置換であるといわれ、 $P_i = P_j^{-1}$, $P_j = P_i^{-1}$ とあらわす。 $n = 2$ の 2 値の場合、 P は P_1 と P_2 のみからなり

$$\left. \begin{array}{l} x^{P_1} = x, \quad x^{P_2} = \text{NOT}(x), \\ P_1^{-1} = P_1, \quad P_2^{-1} = P_2. \end{array} \right\} \quad (2)$$

であつて、この場合置換の積は可換であるが、一般に $n \geq 3$

では非可換である。

集合 Γ に順序を与えゝしかたは $n!$ とおりあり、これらを $r_1, r_2, \dots, r_{n!}$ とする。一般に順序 r_i ($i = 1, 2, \dots, n!$) を

$$\left. \begin{aligned} r_i &= \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in} \rangle, \\ t_{ij} &= t_j^{p_i} \quad (j=1, 2, \dots, n). \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

のようにならめずことにする。また、順序 r_i において値 t_{ij} が t_{ik} に先行することを $t_{ij} <_i t_{ik}$ とあらわす。

Γ の各順序 r_i ($i = 1, 2, \dots, n!$) に対応して、 n 値論理変数 x, y 間の演算 $\wedge_i$ ($i = 1, 2, \dots, n!$) を

$$x \wedge_i y = \begin{cases} x & (x <_i y \text{ の場合}) \\ y & (\text{その他の場合}) \end{cases} \quad (4)$$

で定義する。ここには $x <_i y$ は $x <_i y$ または $x = y$ であることをあらわす。いま $r_i = \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in} \rangle$ とするとき、 $x \wedge_i y$ の真理値表は表 1 で与えられる。ここではこれら $n!$ 個の演算を束演算ということにし、その集合を $\mathcal{L}$ とする。これらの束演算がべき等律、交換律、および結合律

$$\left. \begin{aligned} x \wedge_i x &= x, \\ x \wedge_i y &= y \wedge_i x, \\ x \wedge_i (y \wedge_i z) &= (x \wedge_i y) \wedge_i z, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

($i = 1, 2, \dots, n!$)

をみたすことはその定義から明らかである。この結合律から、束演算を多変数間の演算に拡張することができ、一般に m 変数の $\wedge_i$ による結合を $\bigwedge_{j=1}^m x_j$ のようにあらわすことにする。また、 $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n} \rangle$ とするとき

表 1. $x \wedge_i y$ の真理値表

$x \backslash y$	t_{i_1}	t_{i_2}	$\dots\dots$	$t_{i_{n-1}}$	t_{i_n}
t_{i_1}	t_{i_1}	t_{i_1}	$\dots\dots$	t_{i_1}	t_{i_1}
t_{i_2}	t_{i_1}	t_{i_2}	$\dots\dots$	t_{i_2}	t_{i_2}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		$\vdots$	$\vdots$
$t_{i_{n-1}}$	t_{i_1}	t_{i_2}	$\dots\dots$	$t_{i_{n-1}}$	$t_{i_{n-1}}$
t_{i_n}	t_{i_1}	t_{i_2}	$\dots\dots$	$t_{i_{n-1}}$	t_{i_n}

$$x \wedge_i t_{i_1} = t_{i_1},$$

$$x \wedge_i t_{i_n} = x,$$

$$x \wedge_i t_{i_j} \leq_i t_{i_j}, (j = 1, 2, \dots, n).$$

(6)

であることは明らかである。とくに $n = 2$ の場合、ここに定義される束演算は 2 個で、それぞれ 2 値論理における論理積と論理和にほかならない。

n 値 m 次元ベクトル $t_j = (t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_m}), t_{j_k} (k = 1, 2, \dots, m) \in T$, の集合を T^m とすると、 n 値 m 変数論理関数は T^m から T の部分集合への一意の写像である。いま、 f および g をそれぞれ n 値 m 変数論理関数として、 T^m のすべての元に対して $f(t_j) \leq_i g(t_j), (j = 1, 2, \dots, n^m)$ であるとき、 r_i において f は g に先行するといひ、 $f(x) \leq_i g(x)$, あらうは単に $f \leq_i g$ とあらわすことにする。こ

こに、 x は n 値 m 次元ベクトル変数をあらわす。また $f \leq_i g$ のとき

$$f(x) \wedge_i g(x) = f(x), \quad (f \leq_i g). \quad (7)$$

である。

多線式の場合、 n 値論理信号 x を n 本の線 $l_x^1, l_x^2, \dots, l_x^n$ 上の信号の有無であらわす。信号のある線を 1 本に限り、線 l_x^i 上の信号によって x の値が i であることをあらわすものとする。このとき、束演算 $\wedge_i$ をおこなう回路は、たとえば NOR 回路を用いて図 1 のよう

につくることができる。このような $\wedge_i$ の回路は、図からもわかるように、入出力線をそれぞれ p_i^{-1} および p_i に応じて入れ換えることにより $\wedge_i$ の回路になる。したがって、置換と束演算を用いた多値組み合わせ論理回路はすべて一種類の束演算回路で実現されることになる。

このことはまた後に明確に示される。

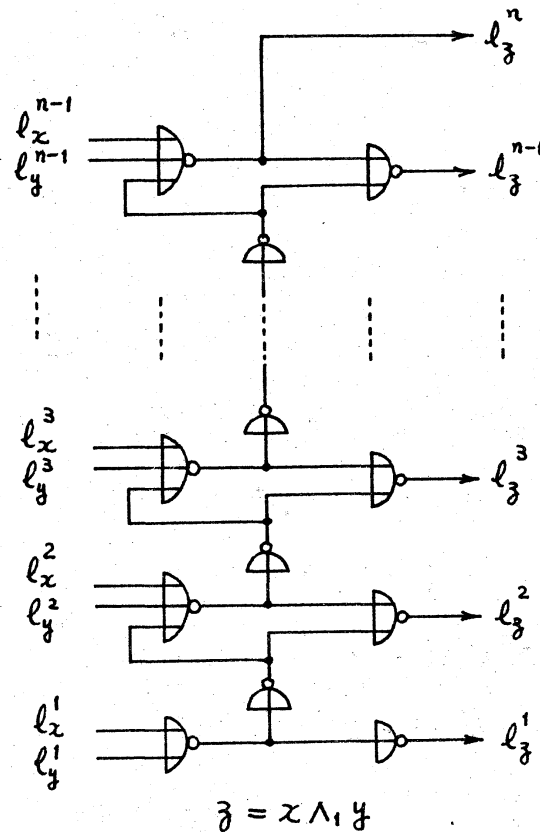


図 1. 束演算回路の例

3. 吸収律と分配律

n 値論理変数 x, y, z の, $y \leq_i z$ である任意の値に對して $(x \wedge_i y) \wedge_j z = z$ をみたす $\wedge_i$ と $\wedge_j$ について考える. いま $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_k}, t_{i_{k+1}}, \dots, t_{i_n} \rangle$ とし, y がある値 t_{i_k} であるとする. 式 (6) によつて $(x \wedge_i y) \leq_i t_{i_k}$ であり, $y \leq_i z$ によつて $t_{i_k} \leq_i z$ である. したがつて, この場合 $(x \wedge_i y) \wedge_j z = z$ が成立するためには, $t_{i_k}, t_{i_{k+1}}, \dots, t_{i_n} \leq_j t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_k}$ でなければならぬ. そこで $k = 1, 2, \dots, n$ のすべての場合を考えるとつぎの定理をえる.

定理 1. n 値論理変数 x, y, z の, $y \leq_i z$ である任意の値に對して

$$(x \wedge_i y) \wedge_j z = z, \quad (y \leq_i z). \quad (8)$$

が成立するための必要十分条件は, $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n} \rangle$ であるとき, $r_j = \langle t_{i_n}, \dots, t_{i_2}, t_{i_1} \rangle$ であることである.

このとき, $\wedge_j$ をとくに V_i と書くことにする. $\wedge_j = V_i$ としてとくに $y = z$ のとき, 式 (8) はいわゆる吸収律になる. この吸収律が $\wedge_i$ と V_i を交換しても成立することは上の定理から明らかである. すなわち

系 1. 1. n 値論理変数 x, y の任意の値に對して吸収律

$$(x \wedge_i y) V_i y = y, \quad (i=1, 2, \dots, n!). \quad (9)$$

が成立する.

条件 $\wedge_j = v_i$ が, x と y の任意の値に対して $(x \wedge_i y) \wedge_j y = y$ をみたすための必要条件であることも同様にして示される. ここでは集合 L のすべての $\wedge_i$ を束演算といつているが, ほんらい $\{T, \wedge_i, v_i, \leq_i\}$ が束をつくっているのである.

つぎに, n 値論理変数 x, y, z の任意の値に対して

$$x \wedge_i (y \wedge_j z) = (x \wedge_i y) \wedge_j (x \wedge_i z), \quad (\text{分配律}). \quad (10)$$

をみたす $\wedge_i$ と $\wedge_j$ について考える. $x \leq_i y, z$ であるか, $y, z \leq_i x$ であれば, あきらかに任意の $\wedge_j$ に対して式 (10) が成立する. $y <_i x <_i z$ の場合, 式 (10) の右辺は $y \wedge_j x$ になる. したがって, この場合式 (10) が成立するためには, $x <_j y$ であれば同時に $z <_j y$ であり, $y <_j x$ であれば同時に $y <_j z$ でなければならぬ. $z <_i x <_i y$ の場合も同様であり, 逆はあきらかである. したがって

定理 2. n 値論理変数 x, y, z の任意の値に対して, 分配律式 (10) が成立するための必要十分条件は, $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n} \rangle$ とするとき, すべての $k = 1, 2, \dots, n-1$ に対して

$$\left. \begin{array}{l} t_{i_k} <_j t_{i_{k+1}}, \dots, t_{i_n}, \\ \text{or } t_{i_{k+1}}, \dots, t_{i_n} <_j t_{i_k}. \end{array} \right\} \quad (11)$$

であることである.

したがって, 値 $t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_{n-1}}$ はそれぞれ r_j において 2

個の位置が許され、1つの $\wedge_i$ に対して条件式(10)をみたす $\wedge_j$ は 2^{n-1} 個存在し、このなかに $\wedge_i$ 自体、および $\vee_i$ が含まれる。また、特別の場合として

系2.1. $x \leq_i y$, z であるか, y , $z \leq_i x$ であれば, 任意の $\wedge_j$ に対して分配律式(10)が成立する。

x , y , z の任意の値に対して, 式(10)と同時に $\wedge_i$ と $\wedge_j$ を交換した分配律

$$x \wedge_j (y \wedge_i z) = (x \wedge_j y) \wedge_i (x \wedge_j z), \quad (12)$$

をみたすための条件を考える。 $r_i = \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in} \rangle$, $r_j = \langle t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jn} \rangle$ とすると, まず式(10)が成立するためには $t_{i1} = t_{j1}$ であるか, $t_{i1} = t_{jn}$ でなければならぬ。 $t_{i1} = t_{jn}$ であるとすると式(12)が成立するためには $t_{j1} = t_{in}$ でなければならぬ。以下同様にして, はじめに $t_{i1} = t_{jn}$ とすると r_i と r_j は逆の順序でなければならぬことになる。また, はじめに $t_{i1} = t_{j1}$ とすると, $t_{i2} = t_{j2}$ であるか, $t_{i2} = t_{jn}$ でなければならぬ。後者の場合, 以後 $t_{i3} = t_{jn-1}$, $t_{i4} = t_{jn-2}$, $\dots$, $t_{in} = t_{j2}$ に限られる。以下同様にして

系2.2. n 値論理変数 x , y , z の任意の値に対して, 分配律式(10)と(12)が同時に成立するための必要十分条件は, $r_i = \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in} \rangle$, $r_j = \langle t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jn} \rangle$ とするとき, $l = 1, 2, \dots, n$ のどれか1つに対して

$$\left. \begin{aligned} t_{i_k} &= t_{j_k} \quad (k < l) \\ \text{and } t_{i_k} &= t_{j_{n+l-k}} \quad (k \geq l). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

であることである。

一つの Λ_i に対して，これら両分配律を同時にみたす Λ_j は $n!$ 個存在し，このなかに Λ_i 自体，および V_i が含まれる。また， $\{T, \Lambda_i, V_i, \leq_i\}$ は分配束である。

4. 束演算の置換と置換の置換，置換定理

置換 p_j ($j = 1, 2, \dots, n!$) を用いた，集合 T の順序 $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n} \rangle$, ($i = 1, 2, \dots, n!$) から順序 $\langle t_{i_1}^{p_j}, t_{i_2}^{p_j}, \dots, t_{i_n}^{p_j} \rangle$ への変換を T の順序の置換という。

$$r_i^{p_j} = \langle t_{i_1}^{p_j}, t_{i_2}^{p_j}, \dots, t_{i_n}^{p_j} \rangle \quad (14)$$

とあらわす。また， $r_i^{p_j}$ で定義される束演算を $\Lambda_i^{p_j}$ とあらわし，このような Λ_i から $\Lambda_i^{p_j}$ への変換を束演算の置換ということにする。このとき

$$\left. \begin{aligned} r_i &= r_1^{p_i}, \quad \Lambda_i = \Lambda_1^{p_i}, \quad (i = 1, 2, \dots, n!), \\ r_i^{p_j} &\neq r_k^{p_j}, \quad \Lambda_i^{p_j} \neq \Lambda_k^{p_j}, \\ r_j^{p_i} &\neq r_j^{p_k}, \quad \Lambda_j^{p_i} \neq \Lambda_j^{p_k}, \end{aligned} \right\} \quad (i \neq k), \quad (15)$$

であることはあきらかである。また，置換の積の定義により

$$\left. \begin{aligned} (r_i^{p_j})^{p_k} &= r_i^{p_j \cdot p_k}, \quad (\Lambda_i^{p_j})^{p_k} = \Lambda_i^{p_j \cdot p_k}, \\ (i, j, k &= 1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

とすることができる。

いま $r_k = r_i^{p_j}$ とすると, $x \leq_i y$ であれば上の定義により, $x^{p_j} \leq_k y^{p_j}$ である。したがって, このとき $(x \wedge_i y)^{p_j} = x^{p_j}$ であると同時に, $x^{p_j} \wedge_k y^{p_j} = x^{p_j}$ である。ここに $\wedge_k = \wedge_i^{p_j}$ であるから

定理 3. n 値論理変数 x, y の任意の値に対して

$$\left. \begin{aligned} (x \wedge_i y)^{p_j} &= x^{p_j} \wedge_i^{p_j} y^{p_j}, \\ (i, j &= 1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

が成立する。

とくに $n = 2$ の場合, これは De Morgan の定理になる。上の関係を多変数, 多束演算の場合に順次適用すると

系 3. 1. 任意の束演算を有限回用いてつくられる任意の関数 $f(x_1, x_2, \dots; \wedge_{i_1}, \wedge_{i_2}, \dots)$ に対して

$$\left. \begin{aligned} f^{p_j}(x_1, x_2, \dots; \wedge_{i_1}, \wedge_{i_2}, \dots) \\ = f(x_1^{p_j}, x_2^{p_j}, \dots; \wedge_{i_1}^{p_j}, \wedge_{i_2}^{p_j}, \dots), \\ (j = 1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

が成立する。

したがって, このような関数は, 適当な置換を用いてその束演算を任意にかえることができ, さらに, このような関数をただ一種類の束演算と適当な置換を用いてあらわすことができる。たとえば, $x \wedge_i y$ に置換 $p_1 = p_i^{-1} \cdot p_i$ をほどこすと

$$\left. \begin{aligned} x \wedge_i y &= (x^{p_i^{-1}} \wedge_1 y^{p_i^{-1}})^{p_i}, \\ (i=1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

となる。これは、多線式回路において置換が線の入れ換えだけでおこなわれるとき、すべての束演算回路が $\wedge_1$ の回路に帰着されることを示している。

つぎに、置換の共役変換 $p_j^{-1} \cdot p_i \cdot p_j$ をここでは置換の置換と
いい、

$$p_i^{p_j} = p_j^{-1} \cdot p_i \cdot p_j, \quad (i, j = 1, 2, \dots, n!). \quad (20)$$

のようにあらわすことにする。このとき

$$\left. \begin{aligned} p_1^{p_j} &= p_1, \quad p_j^{p_1} = p_j^{p_j} = p_j, \quad (j=1, 2, \dots, n!). \\ p_i^{p_k} &\neq p_j^{p_k}, \quad (i \neq j), \\ (p_{i_1} \cdot p_{i_2} \cdot \dots \cdot p_{i_k})^{p_j} &= p_{i_1}^{p_j} \cdot p_{i_2}^{p_j} \cdot \dots \cdot p_{i_k}^{p_j}, \\ &\quad (i_1, i_2, \dots, i_k, j = 1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

は明らかである。また、一般に $(p_j \cdot p_k)^{-1} = p_k^{-1} \cdot p_j^{-1}$ であるから

$$\left. \begin{aligned} (p_i^{p_j})^{p_k} &= p_k^{-1} \cdot (p_j^{-1} \cdot p_i \cdot p_j) \cdot p_k \\ &= (p_j \cdot p_k)^{-1} \cdot p_i \cdot (p_j \cdot p_k) \\ &= p_i^{p_j \cdot p_k}, \\ &\quad (i, j, k = 1, 2, \dots, n!). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

とすることができる。

ここで、たとえば

$$\begin{aligned}
 (x^{p_k} \wedge_i y^{p_l})^{p_j} &= x^{p_k \cdot p_j} \wedge_i^{p_j} y^{p_l \cdot p_j} \\
 &= (x^{p_j})^{p_k^{p_j}} \wedge_i^{p_j} (y^{p_j})^{p_l^{p_j}}, \quad (23)
 \end{aligned}$$

のように，束演算の置換と置換の置換を順次適用することによりつぎの定理をえる．

定理4．（置換定理）．任意の置換と任意の束演算を用いてつくられる任意の n 値論理関数 $f(x_1, x_2, \dots; p_{k_1}, p_{k_2}, \dots; \wedge_{i_1}, \wedge_{i_2}, \dots)$ に対して

$$\left. \begin{aligned}
 &f^{p_j}(x_1, x_2, \dots; p_{k_1}, p_{k_2}, \dots; \wedge_{i_1}, \wedge_{i_2}, \dots) \\
 &= f(x_1^{p_j}, x_2^{p_j}, \dots; p_{k_1}^{p_j}, p_{k_2}^{p_j}, \dots; \wedge_{i_1}^{p_j}, \wedge_{i_2}^{p_j}, \dots), \\
 & \quad (i=1, 2, \dots, n!).
 \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

が成立する．

これを置換定理ということにする．とくに $n=2$ の場合，これはいわゆる双対定理

$$\overline{f(x_1, x_2, \dots; \wedge, \vee)} = f(\overline{x_1}, \overline{x_2}, \dots; \vee, \wedge). \quad (25)$$

になり，したがって上の定理は一般多値双対定理とでもいうことができるであろう．式(25)において“ $\neg$ ”，“ $\wedge$ ”，“ $\vee$ ”はそれぞれ否定，論理積，論理和をあらわす．この置換定理により，論理定数，置換，および束演算に関する性質（恒等関係）の一つがあたえられると，これに同型の（双対の）性質⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾がすべて誘導されることになる．

5. 多値論理関数の展開

集合 T の順序の一つを $r_i = \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in} \rangle$ とし, 値 t_j を t_{in} に, t_k を t_{i1} に変換する置換を $p_{j,k}$ とする. このとき

$$\bigwedge_{\substack{j=1 \\ k \neq j}}^n x^{p_{j,k}} = \begin{cases} t_{i1} & (x \neq t_j) \\ t_{in} & (x = t_j), \end{cases} \quad (26)$$

である. このような関数は一致関数などといわれ, $\delta_j(x)$ とあらわされる. このとき, 式 (6) により任意の n 値 m 変数論理関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ に対して

$$\begin{aligned} & f(t_{j1}, x_2, \dots, x_m) \wedge \delta_{j1}(x_1) \\ &= \begin{cases} t_{i1} & (x_1 \neq t_{j1}), \\ f(t_{j1}, x_2, \dots, x_m), & (x_1 = t_{j1}). \end{cases} \end{aligned} \quad (27)$$

がなりたつ. したがって, 値 t_{i1} を最後位とする T の順序の一つを $r_\ell = \langle \cdot, \cdot, \dots, t_{i1} \rangle$ とすると

$$\begin{aligned} & f(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &= \bigwedge_{j_1=1}^n \{ f(t_{j1}, x_2, \dots, x_m) \wedge \delta_{j1}(x_1) \}. \end{aligned} \quad (28)$$

と展開することができる. さらに, 各 $f(t_{j1}, x_2, \dots, x_m)$ を x_2 について展開して

$$\begin{aligned} & f(x_1, x_2, \dots, x_m) \\ &= \bigwedge_{j_1=1}^n \left[\left\{ \bigwedge_{j_2=1}^n (f(t_{j1}, t_{j2}, \dots, x_m) \wedge \delta_{j2}(x_2)) \right\} \wedge \delta_{j1}(x_1) \right] \\ &= \bigwedge_{(j_1, j_2) = (1, 1)}^{(n, n)} \{ f(t_{j1}, t_{j2}, \dots, x_m) \wedge \delta_{j1}(x_1) \wedge \delta_{j2}(x_2) \}. \end{aligned} \quad (29)$$

とすることが出来る。ここに $\delta_{j_1}(x_1)$ は値 t_{i_1} が t_{i_n} のみしかとらないので、定理 2 系 2. 1 により、任意の Λ_l に対してこの $\delta_{j_1}(x_1)$ を分配することが出来るのである。以下すべての変数について順次同様に展開してつぎの展開定理をえる。

定理 5. 任意の n 値論理関数 $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ は

$$f(x_1, x_2, \dots, x_m)$$

$$= \sum_{(j_1, j_2, \dots, j_m) = (1, 1, \dots, 1)}^{(n, n, \dots, n)} \left\{ f(t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_m}) \right. \\ \left. \wedge_i \left(\bigwedge_{\substack{k_1=1 \\ k_1 \neq j_1}}^n x_1^{p_{j_1, k_1}} \right) \wedge_i \left(\bigwedge_{\substack{k_2=1 \\ k_2 \neq j_2}}^n x_2^{p_{j_2, k_2}} \right) \wedge_i \dots \wedge_i \left(\bigwedge_{\substack{k_m=1 \\ k_m \neq j_m}}^n x_m^{p_{j_m, k_m}} \right) \right\}. \quad (30)$$

のように展開することが出来る。ただし、 $r_i = \langle t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n} \rangle$ とするとき、 $r_l = \langle \cdot, \cdot, \dots, t_{i_l} \rangle$ である。

これは、 $\sum_{(j_1, j_2, \dots, j_m) = (1, 1, \dots, 1)}^{(n, n, \dots, n)} \Lambda_l$ が T^m のすべての要素についての Λ_l による結合をあらわし、各項 $\{ \quad \}$ がそれぞれ一つの要素 $(t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_m})$ に対してのみ値 $f(t_{j_1}, t_{j_2}, \dots, t_{j_m})$ をとり、他のすべての要素に対して値 t_{i_l} をとることからも容易に認められ、いわゆる最大・最小項展開に属する。

展開式 (30) は項 $\{ \quad \}$ を n^m 個もち、この各項はそれぞれ項 $(\quad)$ を m 個もち、この各項はそれぞれ $p_{j, k}$ の形の置換を $n-1$ 個もつ。各置換 $p_{j, k}$ においては t_i と t_k 以外の値の変換は任意であるから、各 $p_{j, k}$ は一つの Λ_i に対して $(n-2)!$

とおりに選ぶことができる。さらに、 $\wedge_l$ は一つの $\wedge_i$ に対して
 $(n-1)!$ とおりに選ぶことができ、しかも任意の $\wedge_i$ を用い
 ることができるから展開式(30)は

$$n! (n-1)! (n-2)! \dots \overset{(n-1)m}{n^m} \quad (31)$$

とあり存在する。とくに $n=2$ の場合には、主加法、ならび
 に主乗法標準展開の2とおりになり、 $n=3$ の場合にも m に
 無関係で12とおりになる。また、 $f(x) = t_{i_k}$, $k < n$ で
 ある項 $\{f(x) \wedge_i \dots\}$ に対しては、 $p_{j,k}$ は t_k を t_{i_1} に、 t_j を
 t_{i_k} , $t_{i_{k+1}}$, $\dots$, t_{i_n} のどれかに変換するものでよい。また、 f
 (x) が縮退関数⁽²⁴⁾であつてその値域が T の一部に限られる
 場合には、 $f(x) \leq_l t_{i_1}$ である任意の順序を n_l として選ぶこ
 とができ、さらに多くの展開が可能である。

展開式(30)によると、任意の n 値 m 変数論理関数が、
 $m(n-1)+1$ 変数入力の束演算 $\wedge_i$ を n^m 個と、 n^m 変数入力
 の束演算 $\wedge_l$ を1個用いて構成される。各 $\wedge_i$ は、全変数をそれ
 ぞれ一つの一致関数に縮退させると同時にこれらの結合をお
 こらっている。それにしても展開式(30)をそのまま実現
 した論理回路は不経済である。

6. 多値論理関数の简单化

ここでは，展開式 (30) からより多くの文字 (x^{f_i}) および項をのぞき，したがって用いる束演算の数とその入力数をより少なくすることを考える．

[1] (束演算の選択)． n 値 m 変数関数 $f(x)$ は T^m の一つの部分集合を T の一つの値に対応させる． T^m のこのような部分集合の濃度のもっとも高いものが対応する値が t_{i_1} であり，つぎに濃度の高い部分集合が対応する値が t_{i_2} であるとして以下同様とする．展開式 (30) の $\wedge_i$ として， T の順序 $i_1 = t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_n}$ で定義される束演算を用い， $\wedge_i$ としては V_{i_1} を用いる．

$\wedge_i$ の選択の範囲が限定されるようなことがあれば，上の t_{i_1} を許された束演算を定義する順序の最前位の値に， t_{i_2} をその次位の値に，以下同様に順次変換する置換とその関数にほどこし，これを展開して単純化し，その結果に上の逆置換をほどこせばよい． V_{i_1} についても，置換定理によりこれを許された任意の束演算に変換することができる．これは，2 値論理関数 $f(x)$ において， $\overline{f(x)}$ を加法 (乗法) 展開し，双対定理を適用することによって $f(x)$ の乗法 (加法) 展開をえるのと同じ原理である．

[2] (冗長項の除去)．展開式 (30) において， $f(t_{i_j}) = t_{i_1}$ であれば，これを含む項 $\{f(t_{i_j}) \wedge \dots\}$ を除く．

このような項は一定値 $\bar{v}_i$ をとるため、すべて他の項に吸収されるからである。手順 [1] のように $\wedge_i, \vee_i$ を選ぶ理由はまずこの手順 [2] で展開式 (30) からもっとも多くの項が除外され、それだけ以下の操作が簡単になるからである。

[3]. 一つの (j, k) に対して置換 $P_{j,k}$ は $(n-2)!$ 個あり、手順 [2] で残された各項 $\{ \quad \}$ にはこのような置換が $(n-1)m$ 個あるから、これらの各項はそれぞれ $(n-2)!$ ^{$(n-1)m$} とおりにあらわされる。これら等価であつても表現のことなる項はすべて列挙する。すなわち、列挙する項の数は手順 2 で残された項の数の $(n-2)!$ ^{$(n-1)m$} 倍になる。

[4] (冗長文字の除去). 上に列挙したある項からいくつかの文字を除いたものを $\bar{f}(x)$ とするとき、この $\bar{f}(x)$ に対して関係 $\bar{f}(x) \leq f(x)$ が保たれる限りできるだけ多くの文字を除く。この操作を上列挙したすべての項についてそれぞれおこなう。

このようにしてつくられる項を主項 (prime implicant) ということにする。ここに、除く文字の順序によつて一つの項から二つ以上の主項を生じることがある。

[5] (主項の選択). McCluskey⁽²³⁾ の方法にしたがつて主項表をつくり、これから必要最少限の主項を選択する。主項の 2 組以上が選択されるときには、文字数の合計がもっと

とも少い組をとる。最後にこれらの主項を V_i で結合する。

例. 表 2 は一つの 3 値 2 変数論理関数の真理値表である。

表 2. 3 値 2 変数関数の例

x	t_1	t_1	t_1	t_2	t_2	t_2	t_3	t_3	t_3
y	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3	t_1	t_2	t_3
f	t_2	t_3	t_2	t_1	t_1	t_1	t_2	t_1	t_3

3 値の置換 6 個を

$$\begin{aligned}
 p_1 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_1 & t_2 & t_3 \end{pmatrix}, & p_2 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_2 & t_1 & t_3 \end{pmatrix}, & p_3 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_1 & t_3 & t_2 \end{pmatrix}, \\
 p_4 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_2 & t_3 & t_1 \end{pmatrix}, & p_5 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_3 & t_1 & t_2 \end{pmatrix}, & p_6 &= \begin{pmatrix} t_1 & t_2 & t_3 \\ t_3 & t_2 & t_1 \end{pmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

とする。手順 [1] により、 r_i として $r_1 = \langle t_1, t_2, t_3 \rangle$ をとる。 $n = 3$ のとき、一つの (j, k) に対して置換 $p_{j,k}$ はただ 1 個しかない。したがって、手順 [2], [3] により検討すべき項は

$$\begin{aligned}
 &t_2 \wedge_1 x^{p_5} \wedge_1 x^{p_6} \wedge_1 y^{p_5} \wedge_1 y^{p_6}, & t_3 \wedge_1 x^{p_5} \wedge_1 x^{p_6} \wedge_1 y^{p_3} \wedge_1 y^{p_4}, \\
 &t_2 \wedge_1 x^{p_5} \wedge_1 x^{p_6} \wedge_1 y^{p_1} \wedge_1 y^{p_2}, & t_2 \wedge_1 x^{p_1} \wedge_1 x^{p_2} \wedge_1 y^{p_5} \wedge_1 y^{p_6}, \\
 &t_3 \wedge_1 x^{p_1} \wedge_1 x^{p_2} \wedge_1 y^{p_1} \wedge_1 y^{p_2}.
 \end{aligned}
 \tag{33}$$

の 5 項である。この中 1 項から、手順 [4] によって 2 個の

主項 $t_2 \wedge x^{p_5} \wedge y^{p_5}$, $t_2 \wedge x^{p_5} \wedge z^{p_6}$ を生じる。これらを表3の主項表に識別記号 A, B, ... とともに記入する。ここでは簡単のためにその置換のみを示した。表上部の5個のベクトルは, $f(t_i, t_j)$ キ t_i である (t_i, t_j) のすべてである。各主項と各ベクトルの交差の記号 “*” は, そのベクトルに対してその主項が関数 f に一致することを示す。

表3. 主項表の例

	x	y	$(t_1 t_1)$	$(t_1 t_2)$	$(t_1 t_3)$	$(t_3 t_1)$	$(t_3 t_3)$
A	p_5	p_5	*		*	*	
B	p_5 p_6	—	*		*		
C	p_5 p_6	p_4	*	*			
D	p_5 p_6	p_3		*	*		
E	p_5	p_2	*		*	*	
F	p_2	p_5	*		*	*	
G	p_2	p_2	*		*	*	*

最後に主項の選抜のためにこの主項表の論理式をつくると

$$(A \vee B \vee C \vee E \vee F \vee G) \wedge (C \vee D)$$

$$\wedge (A \vee B \vee D \vee E \vee F \vee G) \wedge (A \vee E \vee F \vee G) \wedge G$$

$$= (C \vee D) \wedge G$$

$$= (C \wedge G) \vee (D \wedge G) \quad (34)$$

となる。したがって、必要最少限の主項は (C, G) および

(D, G) の 2 組ある。どちらをとつても文字数は同じである。以上から、この 3 値論理関数が

$$\begin{aligned} f(x, y) &= (x^{p_5} \wedge x^{p_6} \wedge y^{p_4}) \vee_1 (x^{p_2} \wedge y^{p_2}) \\ &= (x^{p_5} \wedge x^{p_6} \wedge y^{p_3}) \vee_1 (x^{p_2} \wedge y^{p_2}). \end{aligned} \quad (35)$$

のように構成されることになる。

組み合わせ禁止条件がある場合には、このようなブートル π_d に対して、 $f(\pi_d) = d$ という値 d を仮定し、 $r_i = \langle t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}, d \rangle$, $r_k = \langle d, t_{k1}, \dots, t_{k2}, t_{k1} \rangle$ と考えて主項をつくり、主項表ではすべての π_d を無視すればよい。

また、オ 5 節でのべたように、他に多くの標準項のつくりかたがあり、したがって他に多くの主項のつくりかたがある。このような主項を用いることによつて、多値論理関数のさらに簡単な構成をえることがある。しかし、このような方法をすべて試みるにはいちじるしい手数を要する。しかもその効果はあきらかでない。

7. むすび

ここに、多値論理における置換と束演算の重要な諸性質を示し、これらによる多値論理回路の一設計法についてのべた。すでに、置換、および論理積と論理和を用いた多値論理系

はよく知られているが、ここでは $n!$ 個のすべての置換と、真理値の可能なすべての順序から定義される $n!$ のすべての束演算を導入して、これまでの多値論理系における論理積と論理和の背景をあきらかにした。とくに、ここにみらびいた置換定理は置換と束演算の本質的な重要な関係を示している。

また、多値論理系はいたって多数存在し、多数の系が発表されているが、ここに示した系は、とくに n 値と n 線上の信号の有無であらわす多線回路方式によく適合し、もっとも実際的な多値論理系の一つである。

ここでは、束演算の 2 段以下の構成に限って多値論理関数の簡単化の一般的な方法を示したが、関数によつてはかならずしも最簡構成がえられるとは限らない。とくに多値多変数の論理関数では、とりあつかう標準項、主項ともにいちじるしく多くなり、実際問題として自動計算機を使用することが要求されるであろう。その他、束演算の多段構成、分岐数や集合数の制限、多くの関数の同時構成など、なお残された問題である。

謝辞. 御指導、御支援いただいた京都大学の三根教授、長谷川助教授、茨木氏、高岡氏、ならびに徳島大学の原田教授に深く感謝する。

文 献

(1) E. L. Post : " Introduction to a general theory of elementary propositions ", Am. J. Math., XLIII, (1921)

(2) 伊藤誠: " n 値関数束 (n 値論理) について ", 九大工学集報, 28, 2 (1955)

(3) R. Vacca: " A three valued system of logic and its applications to base three digital circuits ", UNESCO/NS/ICIP/G. 2. 14

(4) 古賀義亮: " 置換演算子による多変数論理関数の展開 ", 信学オートマトン・自動制御研資 (昭38 - 11)

(5) D. L. Webb: " Generation of any n -valued logic by one binary operation ", Proc. Nat. Acad. Sci., 21 (1935)

(6) N. M. Martin: " The Sheffer functions of 3-valued logic ", J. Sym. Logic, 19, 1 (March 1954)

(7) 田中, 田原: " 三値 Polypheck ", 信学電子計算機研資, EC 69 - 1 (1964 - 04)

(8) W. H. Hanson: " Ternary threshold logic ", IEEE Trans. EC - 12, 3 (June 1963)

(9) V. Varshavsky, B. Ovsievich: "Networks composed of ternary majority elements", IEEE Trans. EC - 14, 5 (Oct. 1965)

(10) J. Santos, H. Arango, F. Lorenzo: "Threshold synthesis of ternary digital systems", IEEE Trans. EC - 15, 1 (Feb. 1966)

(11) 北橋, 野村, 手塚, 笠原: "三値論理関数の特徴パラメータとしきい値関数への応用", 信学論文誌, 52-C, 10 (昭44-10)

(12) 後藤以紀: "多元論理代数方程式の一般解について", 電試彙, 20, 2 (昭31-02)

(13) Y. A. Keir: "Algebraic properties of 3-valued compositions", IEEE Trans. EC - 13, 5 (Oct. 1964)

(14) 三根, 古賀: "準自己同型対応をなす3値多変数論理関数", 信学誌, 50, 5 (昭42-05)

(15) 原田, 島田, 為貞: "三線式三値論理回路について", 信学論文誌, 52-C, 1 (昭44-01)

(16) J. von Neumann: "Probabilistic logic and the synthesis of reliable organisms from unreliable components", Automata Studies, Princeton Univ.

Press, (1956)

(17) 東大超高速計算機研究会: “江崎ダイオードによる超高速計算機の可能性について”, 信学電子計算機研資 (昭34-10)

(18) 三根, 長谷川, 古賀, 池田: “三値論理回路の一実現法について”, 信学全大67 (昭40)

(19) 原田, 島田(稔): “位置による3値論理回路の1例について”, 電四学連大373 (昭36)

(20) R. F. Sechler, A. R. Strube, J. R. Turnbull: “ASLT Circuit Design”, IBM. Journal, 11, 1 (Jan. 1967)

(21) M. Yoeli, G. Rosenfeld: “Logical design of ternary switching circuits”, IEEE Trans. EC-14, 1 (Feb. 1965)

(22) D. D. Givone, R. W. Snelsire: “The design of multiple-valued logic systems”, Dep. Elect. Engng, State Univ. N. Y. Buffalo, Final Rep. (June 1968)

(23) E. J. McCluskey: “Minimization of Boolean functions”, BSTJ, XXXV, 6 (Nov. 1956)

(24) 三根, 古賀, 徳山: “多値1変数関数の基礎理論”, 信学インホメーション理論研資(昭40-01)