

自己増殖オートマトンの設計と試作[†]

—生命の数学モデル—

高橋 磐郎^{††} 早迫 亮 一^{††}

オートマトンによる自己増殖器官の実現には多くの試みが行われている。基本的アイディアは Neumann によって、そしてそれを引き継いだ Burks らによって理論的には一応完成した¹⁾と考えられる。またその改良なども多く報告されている²⁾。しかし実際に動作可能な実体として設計されたものは報告されていない。本論文では、2次元格子による Neumann のモデルを3次元格子に拡張することにより、オートマトンによる自己増殖器官の設計に成功したので、その概要について報告する。Neumann のモデルは、2次元格子における 29 種の状態のオートマトンによるものであるが、2次元格子では混線なしに情報を交差させることが難しい。Neumann は Crossing Organ 等を導入することによりそれを解決しようとしたが、膨大な容量が必要であり、またきわめて複雑な同期操作を行わなければならなかった。われわれは、領域を3次元格子空間に拡張することにより、その情報の交差の問題を解決した。そのため、オートマトンの状態の種類は 41 種に増えたが、情報の交差は著しく簡単になった。その他いくつかの改良を加え、各機能における構造を極度に簡潔化するため、オートマトンによる自己増殖器官が実現できた。われわれの作成した自己増殖器官は 100×200 の 2 層からなり、おそらく最も簡単なものであろうと確信している。

1. ま え が き

生命の基本的特徴は自己増殖、つまり自分自身と同じものを複製するところにある。カボチャの種子をまくと、またカボチャができ、そのカボチャの中の種子がまたカボチャになる。これは、まさに神秘である。一体その構造の基本は何か？ この機構を細胞になるまで分解して考えれば、それは細胞分裂に帰着される。

現代の生物学は、その構造が DNA の中の 4 種類の塩基 A, T, G, C の配列であることを突き止めた。この塩基の 3 個の系列によって決まるアミノ酸からタンパク質が作られ、それによって細胞の本体が作られることが明らかになった³⁾。しかし、生物学が述べるタンパク質合成の 1 つ 1 つのプロセスがどのような制御によって行われるかは依然として謎である。現代の生物学ではデータの動きは分かっても、それを動かすプログラムの構造が全く明らかにされていない（それは細胞の中に組み込まれた意識のようなもので、この 3 次元現象界では観測ができないものなのかもしれない²⁾）。

Watson & Clac が DNA モデルを考える以前に、実は Neumann は自己増殖オートマトンを考えていた^{3), 4)}。これは、ある意味で生命の数学モデルであり、

またコンピュータ技術の面から見れば、並列処理のコンピュータである。その器官は、2次元格子上の各格子に同一の機能を持つオートマトンがあって、それらが離散時間の進行とともにその状態を変えていくという構造を持っている。各オートマトンは前後左右の 4 つの隣りのみに関連する一定の変換規則に従って 1 時点経つごとに、その状態を変えていくという仕組みを持つ。

このオートマトンは 29 種の状態（そのうち 1 つは空状態 U と呼び空白を意味するものである）のいずれかを取り、次の時点で前後左右のオートマトンの状態からの影響を受けて次の状態に移移することになる。この構造はつまり時間変数を持つ 2 次元差分方程式の解として、各格子点の状態が決定されるものであるとみなすことができる。自己増殖器官として Neumann の作ろうとしたものは、この 2 次元格子のある大きさを持つ矩形組織のまわり M である（それ以外の格子点の状態はすべて空状態 U となっている）。時間の経過とともに M の影響がまわりに現れてきて、しばらく経つと、M と全く同じ構造を持つ M' が M の隣りの位置に出現するというものである。Neumann 自身は M に自己増殖の機能のほかに万能チューリング機械の機能を持たせたものを考えているが、いずれにせよ完成に至らずして、この世を去った。

自己増殖を可能ならしめるキーポイントは、M 自身のほかに M の各格子の状態をコード化した情報を記憶しているテープ ℓ を M に付着させることにある（図 7）。M はまず ℓ のそのままのコピー ℓ' を作り、次に

[†] Design and Implementation of Self-Reproducing Automata
—Mathematical Model of Life—by IWARO TAKAHASHI and
RYOICHI HAYASAKO (Institute of Socio-Economic Planning,
University of Tsukuba).

^{††} 筑波大学社会工学研究科

ℓ 上に記憶されているコードを順に読んで、Mの各格子の状態をM'の位置に順次書き込んでいくという手順で自己増殖を完成させる。鏡を見なければ自画像が描けないように ℓ なしにはMは自分自身をM'に移すことができないのである。思えばテープ ℓ はDNAであり、Mは細胞の実体である。

この論文の目的は、Neumannの路線に沿って実際に自己増殖器官を完成し、コンピュータでそれをシミュレートするプログラムを完成したことを報告することにある。Neumannは2次元格子に限定したため、情報を混線なしに交差させるためCrossing Organ等を導入して解決しようとしている。そのため膨大な容量を必要とし、またきわめて複雑な同期操作を行わなければならない。この方法では完成はおそらく不可能であつたろう。われわれのアイデアは、情報の交差を立体交差にするため、ただ領域を3次元格子に拡張したことにある（3次元といっても2層構造にしたにすぎない）。そのため状態の種類は41種類に増えたが、情報の交差が著しく簡単になった。その他いくつかの改良を加え、各機能における構造を極度に簡潔にしたため、実現可能に至ることができたのである。なお2層構造の各層の直積をとって、2次元上のものにするとは、形式論理上は可能かもしれないが、それによる情報の流れの制御はきわめて複雑になり、以下にのべるような簡潔さが失われてしまう。

Neumannの研究³⁾が発表されて以来、これを改良して自己増殖器官を実現しようとする多くの試みがされている。その多くは各オートマトンの状態の数を減らそうとするものである⁵⁾。いずれにせよ、筆者らの知る限り、その完成された全体像の報告はいまだにない。われわれのものは、 100×200 の2階建て、おそらく最も簡単なものであろうと確信している。

もっとも、自己増殖というものを狭く解釈すれば、いわゆるライフゲーム⁶⁾や有限体上の差分方程式の2重周期解⁷⁾もその範ちゅうに入るかもしれない。前者はその機構がきわめて簡単であるため一般によく知られているが、後者は一般にはほとんど知られていない。しかし、前者は後者の特殊な例にすぎない。いずれにせよ、これらは初期値、つまりMに相当する部分がある特定のもののしか、周期性を示さないのである。これに対して、Neumann流の自己増殖器官では、その中に自己増殖の機能が含まれている限りMはどのようなものであってもよいのである。この点がライフゲーム的なものと本質的に異なる点である。思えば、

ライフゲーム的なものは結晶構造の数学モデルとはなり得ても、生命の数学モデルとはいえない。

以上、2章ではわれわれの考えた3次元格子モデルでのオートマトンの状態とその変換規則について述べ、3章では設計した自己増殖器官の基本的器官を説明する。4章では自己増殖器官の自己増殖の概要について述べ、5章では設計した自己増殖器官をコンピュータでシミュレートした結果を示す。

2. 41 状態と変換規則

2.1 基本構造

自己増殖器官の基本構造は3次元格子の各点（セル）

$$\mathbf{i} = (i, j, k) \in \mathbb{Z}^3 \quad (\mathbb{Z} \text{ は整数全体}) \quad (1)$$

に配置された同一機能を持つオートマトン全体からなる。各オートマトンの取りうる状態は、2.2節で述べる41種であるが、それらは離散時間 $t=0, 1, 2, \dots$ の経過とともに変化し、

$\theta_{\mathbf{i}t}$ を $\mathbf{i}$ にあるオートマトンの t 時点での状態とすると、その変換規則は次の関数 F で定まっている。

$$\theta_{\mathbf{i}t} = F(\theta_{\mathbf{i}t-1}, \theta_{\mathbf{j}t-1} | \mathbf{j} = \mathbf{i} + \mathbf{e}_\alpha, \alpha = 0, 1, \dots, 5) \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{e}_\alpha$ は次のような3次元ベクトルである。

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_0 &= (1, 0, 0) \quad \mathbf{e}_1 = (0, 1, 0) \quad \mathbf{e}_2 = (0, 0, 1) \\ \mathbf{e}_3 &= (-1, 0, 0) \quad \mathbf{e}_4 = (0, -1, 0) \quad \mathbf{e}_5 = (0, 0, -1) \end{aligned} \quad (3)$$

以上から分かるように、 $\mathbf{i}$ にいるオートマトンの時点

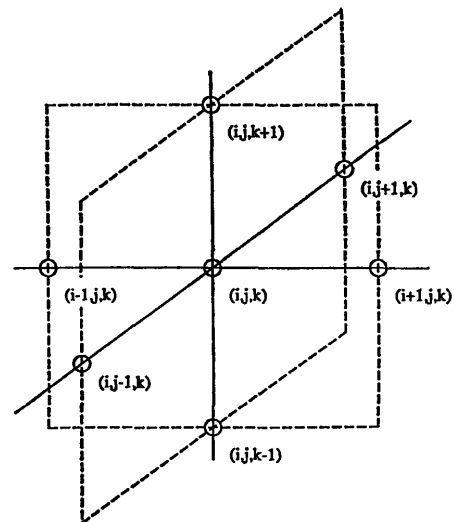


図1 3次元格子
Fig. 1 The 3-dimensional lattice.

t での状態は時点 $t-1$ の自分自身と前後左右上下の6つの隣接するオートマトン(図1)により一意に定まる。 F の具体的機能は、2.3節の変換規則で示す。

2.2 状態の種類

図2にオートマトンの取りうる41種の状態を示す。大別すると、空、推移、特殊推移、合流、生成の5つの状態に分かれる。これらの状態のうち $\vee$ 印の付かないものは次の14種である。

$$U \rightarrow \uparrow \cdot \leftarrow \downarrow + \rightarrow \uparrow \cdot \leftarrow \downarrow \# \circ \quad (4)$$

これらを静状態と呼ぶことにする。静状態は変換規則が示すように、隣接するオートマトンになんら影響を与えない状態である。これに対し、隣接するオートマ

トンに影響を与えるのが $\vee$ 印の付いた次の15状態である。

$$\rightarrow \uparrow \cdot \leftarrow \downarrow + \rightarrow \uparrow \cdot \leftarrow \downarrow \# \circ \circ \circ \quad (5)$$

これらを動状態と呼ぶことにする。

空状態はただ1種のみで、図示する場合は何も書かない。推移状態と特殊推移状態は、ともに図2に示すように、前後左右上下の6方向からなる。それぞれが静状態と動状態を持つ。推移状態を $T_{\alpha\epsilon}$ で示し、添字 $\alpha(=0,1,\dots,5)$ は方向を、 $\epsilon(=0,1)$ は静状態か動状態かを示す。図に表す場合は、図2に示すような矢印等を用いる。特殊推移状態 $T'_{\alpha\epsilon}$ もほぼ同様で、図に示す場合は二重矢印等を用いる。

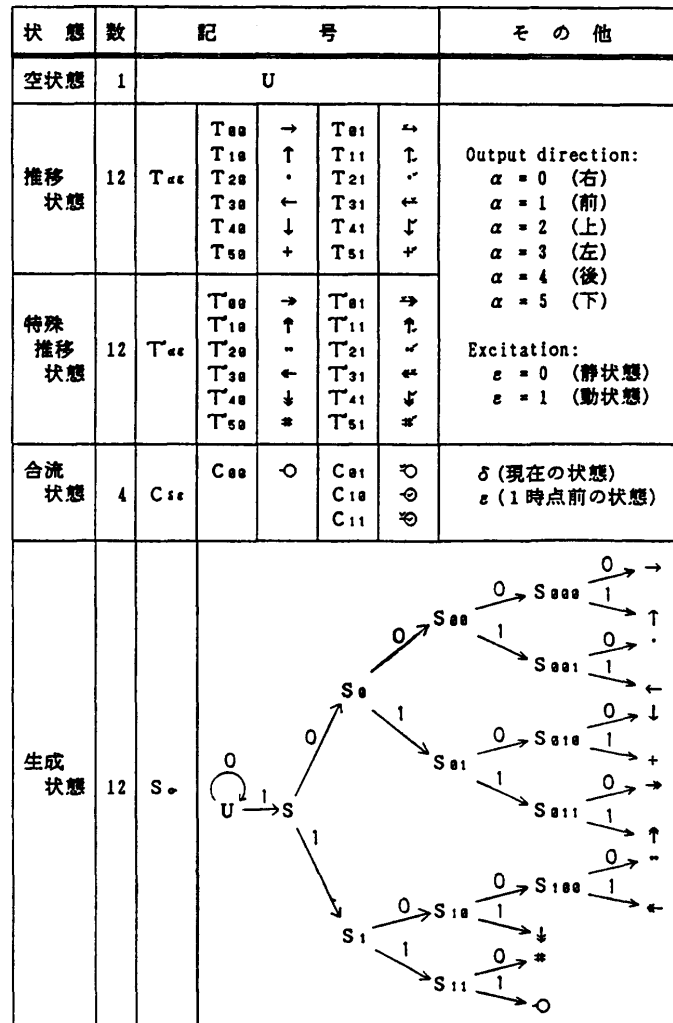


図2 41状態と記号

Fig. 2 The 41 states and their symbols.

合流状態 $C_{\delta\epsilon}(\delta, \epsilon=0, 1)$ は, δ, ϵ の組合せで 4 種類の静, 動状態に分かれるが, ϵ は 1 時点前, δ は現在の静, 動状態に対応すると考えればよい. 図に示すときは, 丸印に柄の付いたスプーンのような記号を書き, 柄の部分に 1 時点前の静, 動状態を, 丸の部分に現在の静, 動状態を記す.

さて, この 14 種の静状態を空状態 U から作り出すために必要な中間記憶のための状態が生成状態と呼ばれるもので

$$S_{\sigma}, \sigma \in \{\phi, 0, 1, 00, 01, 10, 11, 000, 001, 010, 011, 100\} \quad (6)$$

で示される 12 種である. 図 1 に示した 6 つの隣接するオートマトンの中に自分の方向に向かう動状態が存在するならば, 入力が 1 である, また単に入力があるという. 動状態が存在しないならば, 入力が 0 であるという. 例えば, あるオートマトンの状態が S_{01} であるとき, 隣接からの入力が 0 なら, 次の時点で S_{010} となり, 1 なら S_{011} となる (図 2). 図 2 の各状態の横に書いた 0, 1 系列は, U からその状態になるのに必要な入力系列である.

2.3 変換規則

変換規則 F ((2)式) を具体的に示すと, 表 1 のようになる. これは, Neumann の表現³⁾をまとめたものである. 変換規則は論理的には表 1 のとおりであるが, 直感的につかむため, いくつかの例を図 3 に示す.

表 1 変換規則 (F)
Table 1 Transition rule.

変換規則	θ_i^{t-1}	θ_i^t	θ_j^{t-1}	$i-j$
(1) 推 移	$T_{\alpha\beta}$	$T_{\alpha 1}$	$T_{\beta 1}$ or C_{11}	$e_{\beta}(\neq -e_{\alpha})$
		$T_{\alpha 0}$	otherwise	
(2) 合 流	$C_{\alpha\beta}$	$C_{\alpha 1}$	$T_{\beta 1}$ and never $T_{\alpha 0}$	e_{β}
		$C_{\alpha 0}$	otherwise	
(3) 特殊推移	$T'_{\alpha\beta}$	$T'_{\alpha 1}$	$T'_{\beta 1}$ or C_{11}	$e_{\beta}(\neq -e_{\alpha})$
		$T'_{\alpha 0}$	otherwise	
(4) 消 去	$T'_{\alpha\beta}$ $C'_{\alpha\beta}$	U	$T'_{\beta 1}$	e_{β}
(5) 特殊消去	$T'_{\alpha\beta}$	U	$T_{\beta 1}$	e_{β}
(6) U からの生成	U	S	$T_{\beta 1}$ or $T'_{\beta 1}$	e_{β}
		U	otherwise	
(7) 生成からの生成	S_{δ}	S_{11}	$T_{\beta 1}$ or $T'_{\beta 1}$	e_{β}
		$S_{\delta 0}$	otherwise	

注) (4), (5)は(1)~(3)に優先する.

変換規則	t-1	t	変換規則	t-1	t
推移	$\leftrightarrow \rightarrow$	$\rightarrow \leftrightarrow$	特殊推移	$\leftrightarrow \rightarrow$	$\rightarrow \leftrightarrow$
	$\leftrightarrow \uparrow$	$\rightarrow \uparrow$		$\leftrightarrow \uparrow$	$\rightarrow \uparrow$
	$\leftrightarrow \leftarrow$	$\rightarrow \leftarrow$		$\leftrightarrow \leftarrow$	$\rightarrow \leftarrow$
	$\leftrightarrow S$	$\rightarrow S_1$		$\leftrightarrow S$	$\rightarrow S_1$
	$\downarrow \leftrightarrow \downarrow$	$\downarrow \rightarrow \downarrow$		$\downarrow \leftrightarrow \downarrow$	$\downarrow \rightarrow \downarrow$
合流	$\leftrightarrow \bigcirc$	$\rightarrow \bigcirc$	消去	$\leftrightarrow \rightarrow$	$\rightarrow U$
	$\rightarrow \bigcirc$	$\rightarrow \bigcirc$		$\leftrightarrow \uparrow$	$\rightarrow U$
	$\downarrow \leftrightarrow \bigcirc$	$\downarrow \rightarrow \bigcirc$		$\leftrightarrow \bigcirc$	$\rightarrow U$
	$\downarrow \leftrightarrow \bigcirc$	$\downarrow \rightarrow \bigcirc$	特殊消去	$\leftrightarrow \rightarrow$	$\rightarrow U$
	$\downarrow \leftrightarrow \bigcirc$	$\downarrow \rightarrow \bigcirc$		$\leftrightarrow \leftarrow$	$U U$
	$\rightarrow \bigcirc \rightarrow$	$\rightarrow \bigcirc \leftrightarrow$	U から生成	$\leftrightarrow U$	$\rightarrow S$

図 3 変換規則の例

Fig. 3 Examples of transition rule.

す.

規則(1)の推移とは; あるオートマトンは, 入力があるとき動状態になる, というものである. また, 規則(6), (7)は空状態 U のオートマトンは, 入力があるとき生成状態 S になり, その後図 2 の順でいずれかの静状態に変化することを示す.

また, 規則(2)は合流に関するもので, 静状態の合流状態にあるオートマトンに入力があれば, その柄の部分動状態になり, その次の時点で丸の部分動状態になり, それが近接の推移状態に入力される.

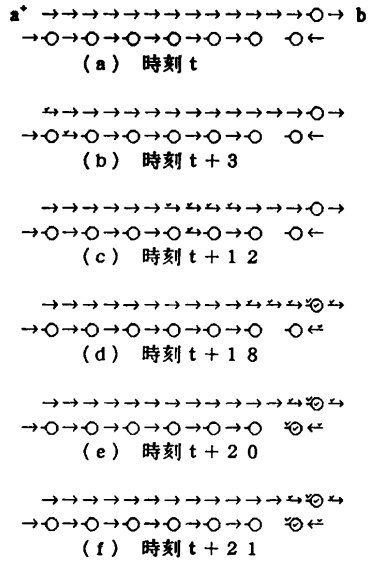
規則(3)は, $T_{\alpha\beta}$ を $T'_{\alpha\beta}$ に置き換えて, 規則(1)と同じである. しかし, 合流状態との関係がやや異なり, 特殊推移状態から合流状態への入力があれば, これを空状態にする (規則(4)) が, 合流状態からの入力があれば, 動状態になる.

規則(4), (5)は状態を消去する (空状態にする) 規則で, 特殊推移状態からの入力があれば, 特殊推移状態以外のすべての状態は静, 動状態にかかわらず消去され, 特殊推移状態は推移状態からの入力によって消去される, というものである.

3. 基本器官

3.1 連続パルサ (Periodic Pulser)

連続パルサの動作の概要を図 4, 5 に示す. 図 4



注) 時刻 $t+20$ 以降は同じ動作

図 4 連続パルサの発火動作

Fig. 4 Operation of periodic pulser.

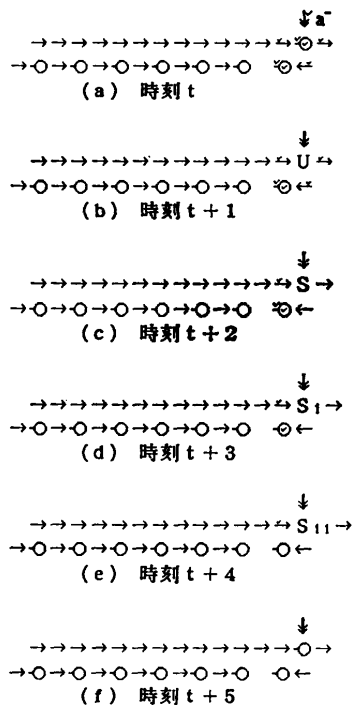


図 5 連続パルサの消火動作

Fig. 5 Operation of periodic pulser.

(a)の a^+ に1が入力されれば, b から1が出続ける.
図5(a)の a^- に1が入力されれば, 出力が止まる.

3.2 工作手 (Constructing Arm)

図6に動作の概要を示す。(a)で b に「10001」を入力する(このことを, 以後「↑」を入力するという)

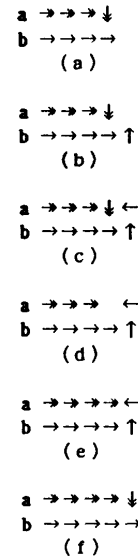


図 6 工作手の動作

Fig. 6 Constructing arm.

と(b)になる。(b)で b に「←」を入力すると(c)になる。(c)で b に「U」を入力する(これは1を入力するのと同値)と(d)になる。(d)で b に「→」を入力すると(e)になる。(e)で a に「U↓U→」を順に入力すると(f)になり, これは(a)が1セル分だけ伸びた形になっている。(a)のような構造を持つものを工作手(CA)と呼ぶ。また, (a)に上記のような入力を行うことを

$$\uparrow \leftarrow U \rightarrow \quad \underline{U \downarrow U \rightarrow}$$

と書くことにする。

CAは, 伸ばすこと, 縮めること, 方向を垂直に変えることなどが必要であるが, これらに必要な入力を出すパルサを表4に示す。

3.3 判別器 (Discriminator)

入力系列を判定するもので, 指定された系列が入力された場合とそれ以外の場合で, それぞれ違った出口から1を出力する。今回使用した判別器を表4に示す。

4. 自己増殖の概要

4.1 Mの構造

細胞に相当するMは3次元格子, 縦の長さ $k=100$, 横の長さ $2k=200$ の2層(1階と2階)よりなる(図8)。そのDNAに相当する ℓ はMの各階の右下角に付いている。

Mは, 左から順に解読器官(Corded Organ) CO.

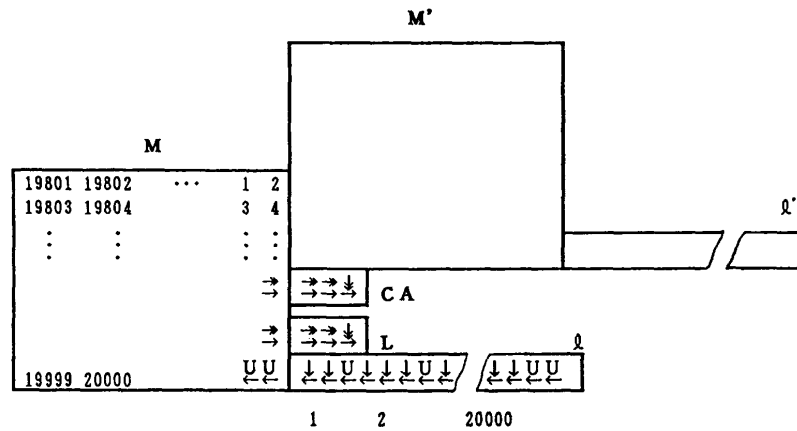
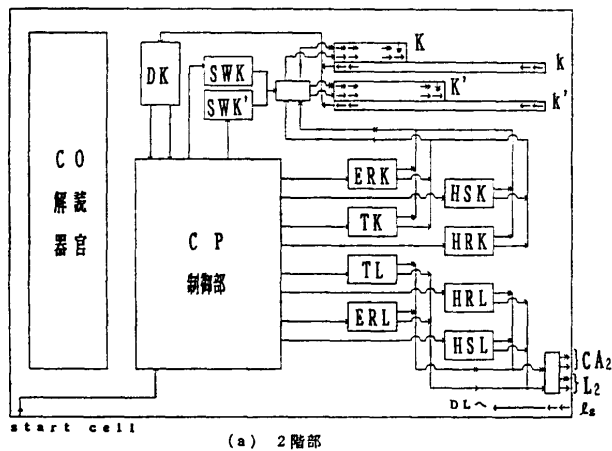
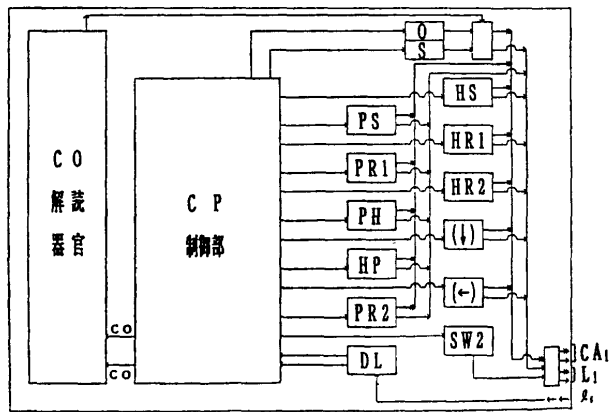


図 7 M と M' との関係

Fig. 7 Relation between M and M'.



(a) 2階部



(b) 1階部

図 8 M の構成図

Fig. 8 Design of M.

制御器官 CP, 各種パルスおよび判別器 (総称して PD と略す) の 3 つに大別される (図 8)。このほか、2 階の右上部には K という工作手の構造で、 k を測定する

表 2 ℓ のコード
Table 2 State code of ℓ .

状態	コ ー ド
..	↓↓ 14. ↓ U
*	↓↓ 13. ↓ U
←	↓↓ 12. ↓ U
↑	↓↓ 11. ↓ U
.	↓↓ 10. ↓ U
+	↓↓ 9. ↓ U
→	↓↓ 8. ↓ U
↓	↓↓ 7. ↓ U
○	↓↓ 6. ↓ U
↓	↓↓ 5. ↓ U
←	↓↓↓↓ U
↑	↓↓↓↓ U
→	↓↓ U
U	↓ U

ための伸縮する物差しがある (M は 100 とか 200 という数を数えることができないから、100 という長さを持つ実体 k を自分自身の中に持たなくてはならない。200 は 100 の 2 倍だから k を利用できる)。

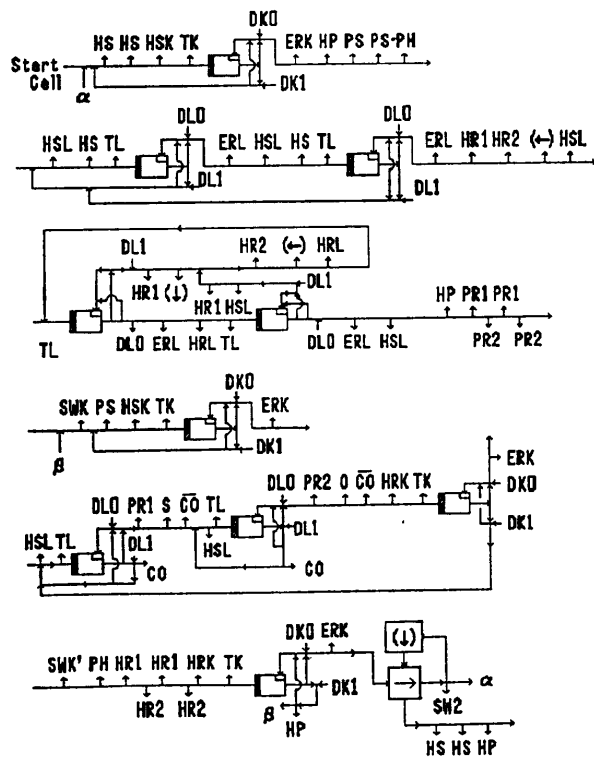
さらに、M が活動を開始すると、 L_1 , L_2 および CA_1 , CA_2 (総称して L, CA と書くことがある) が、M の外部に手を伸ばし出す。L は ℓ の上部にあって伸縮して ℓ の情報を読む役割を果たす。CA は子である M' および ℓ' を作る主役である (図 7)。K, L, CA はすべて工作手の構造 (3.2 節参照) を持つ。

4.2 ℓ の構造 (ℓ_1 , ℓ_2 を総称して ℓ と書く)

ℓ の上段には M の各セルの静止状態 (14 種) が “↓”

表 3 M の各階の番地
Table 3 Address of constructor M.

19801	19802	...	201	202	1	2
19803	19804	...	203	204	3	4
⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
19999	20000	...	399	400	199	200



(は連続パルサーを示す)

図 10 制御部 CP
Fig. 10 CP.

として、CO はその符号を読んで、表 2 の静止状態のどれかを認識し、その状態を CA が M' の各セルまで送り、そこに移す。その順序は右上端から始まって、表 3 と同じ順で埋められていき、左下端に達する。

こうして M' , ℓ' つまり M の子が生まれ、その後 M から出る CA によって M' のスタートセルが点火され、 M' が M と同じ動作を行い、自己増殖が続けられる。詳細は図 9 に示されている。図 9 を実行する実際の構造が図 10 に示されているが、図 10 の内容が M の制御部 CP を構成しているのである。

5. シミュレーション実験結果

設計した自己増殖器官Mが実際に増殖するかどうか

を確認するために、コンピュータ・シミュレーションを行った。2章で述べたように、動状態にあるオートマトンのみが隣接するオートマトンに影響を及ぼす。したがって、動状態のオートマトンとそれが影響を及ぼすオートマトンのみを、変換規則 F により推移させることで次の時点の3次元格子空間を求めることができる。シミュレーションでは、3次元格子空間のオートマトン、現時点で動状態、次の時点で動状態となるオートマトンをそれぞれ別々の変数で扱った(図11)。3次元格子空間は3次元配列で扱っているが、記憶領域をなるべく少なくするため、現時点の動状態、次の時点で動状態となるオートマトンは各座標、状態の順で1次元配列で扱っている。まず、現時点で動状態のオートマトンからその影響を及ぼす方向を算出し、動状態のオートマトンとその影響するオートマトンを変換規則 F で推移させる。推移した状態を3次元格子空間に書き込み、また推移した状態の中で動状態のものを動状態の変数に書き込む。プログラムには、C言語を使用した。PC-9801で自己増殖器官を設計し(図12)、そのデータを大型計算機に転送して、シミュレーションを行った。

自己増殖器官は、 K , K' の長さとおのづから ℓ を変えるだけで、自己増殖する部分を調整できる。縦 4、横 4 のオートマトンのコードを ℓ とした場合と縦 100、横 4 の場合での計算結果を表 5 に示す。ステップ数は、 F の時間関数 t が進んだ数を示している。それぞれの場合においてコード化されたオートマトンを正確に複写した。縦 100、横 4 の場合は M の $1/50$ の大きさであるが、大型計算機 (FACOM M 780/20) でも約 7 時



図 11 シミュレーションの構成
Fig. 11 Design of simulation.

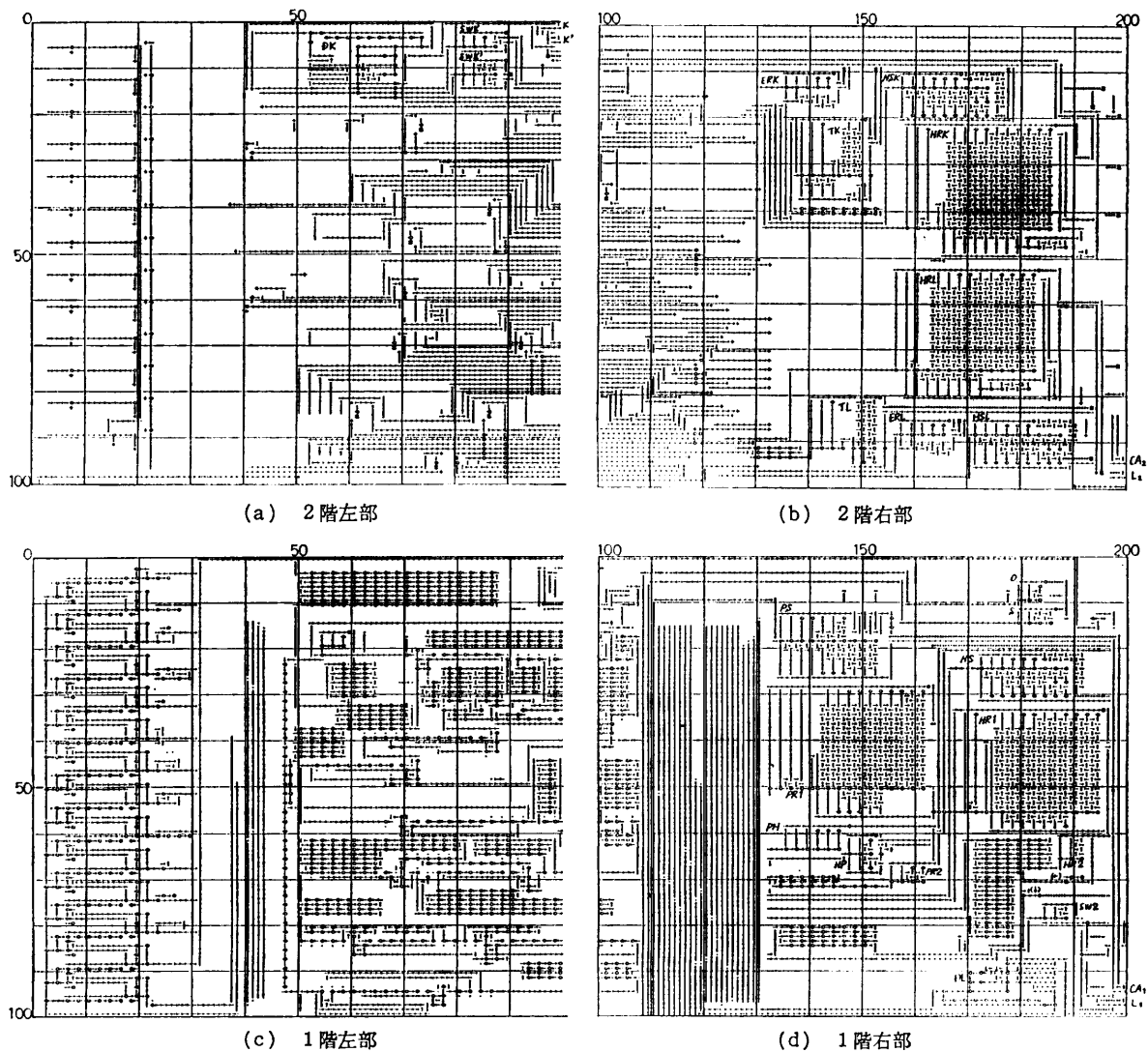


図 12 自己増殖器官 M
Fig. 12 Self-reproducing organ M.

間かかるため全体のシミュレーションはできなかったが、自己増殖器官の設計には成功したものと思われる。

6. おわりに

Watson & Clie 以来、生命科学が驚くべき発展を遂げている現在、この Neumann の自己増殖器官を再び取り上げ、それを実際に完成してみることが、生物学の面からもまたコンピュータサイエンスの面からも意味のないことではないと思いつつ、この仕事を完成してみたが、その作業はただ辛抱強さのみが要求される機械的なもので神秘のかけらもなかった。しかし、その自己増殖のプロセスがコンピュータの上で逐次実行

されていく姿を見ていると、ある種の神秘感が漂ってきたのも事実である。神秘とは、単にその内部機構を知らないときに受ける人間の感じなのかもしれない。

謝辞 この研究は、開始してからすでに3年以上を経過して、ここにやっと完成を見たのであるが、初期の段階では防衛庁の田中通夫、中辻史郎両氏の貢献が大きい。特に、中辻氏は2年間この研究に専念されたといってよく、本来なら著者の一人とすべきであったが、完成時に職務の都合でこの研究から離れたこともあって一応現在の形にした。この両氏に心からなる謝意を表すものである。

表 4 各種パルサと判別器
Table 4 Pulser and discriminator.

分類	名 称	説 明
パ ル サ	C	CAを右へ1つ伸ばす。HSL, HSKなども同じ。 出力: $\uparrow \leftarrow U \rightarrow U \downarrow U \rightarrow$
	A	CAを左へ1つ縮め, γ, δ を残す。 2つのパルサーに分かれており, それぞれHR1, HR2 と呼ぶ。単に縮めるだけの場合は, $\gamma = \delta = U$ とする。 出力: $\underline{U \uparrow U \leftarrow U \downarrow U \rightarrow U \uparrow U} \quad \underline{\gamma \quad U \rightarrow U \quad \delta}$ HR1 HR2
	P	CAを上へ1つ伸ばす。 出力: $\leftarrow \downarrow U \uparrow U \rightarrow U \uparrow$
	P	CAを下へ1つ縮め, γ, δ を残す。 2つのパルサーに分かれており, それぞれPR1, PR2 と呼ぶ。単に縮めるだけの場合は, $\gamma = \delta = U$ とする。 出力: $\underline{U \leftarrow U \downarrow U \rightarrow U \uparrow U \leftarrow U} \quad \underline{\gamma \quad U \uparrow U \quad \delta}$ PR1 PR2
	H	CAの方向を水平から垂直に変える。 出力: $\underline{U \uparrow U \uparrow}$
	P	CAの方向を垂直から水平に変える。 出力: $\underline{U \downarrow U \rightarrow}$
判 定 用 パ ル サ	T	Lに入力して, lの内容がUか↓かを見るためのパルス を出力する。 出力: $\underline{U \downarrow 1 0 1 0 0 1 U \rightarrow}$
	T	Kに入力して, Kの長さが0かkかを見るためのパルス を出力する。 出力: $\underline{U \downarrow 1 0 0 1 1 1 U \rightarrow}$
判 別 器	D	TLからLへ入力されたパルスがlの内容により変化し それを入力することで, 内容がUか↓か判定する。
	D	TKからK, K'へ入力されたパルサーがK, K'の長さ により変化し, それを入力することで長さを判定する。
そ の 他 パ ル サ	O, S	パルスの流れをそれぞれ推移, 特殊推移へ切り替える。
	S	パルスの流れをK, K' または, 2階へ切り替える。 それぞれSWK, SWK', SW2と呼ぶ。
	E	TK, TLのパルスで生じた状態を消す。 ERL, ERKがある。

表 5 実験結果
Table 5 Result of computer simulation.

ℓデータ量	ステップ数	実行時間 (CPU Time: sec)	
4×4	197,539	PC-9801 VM 21	12,439.0
		SONY NEWS	3,291.2
		FACOM M 780/20	156.6
4×100	21,619,224	FACOM M 780/20	26,451.4

参 考 文 献

- 1) 三浦謹一郎: DNAと遺伝情報, 岩波新書 (1988).
- 2) アーサー・ケストラー (日高敏隆, 長野 敬訳):

機械の中の幽霊, ペリカン社 (1987).

- 3) Von Neumann, J.: *Theory of Selfreproducing Automata*, Univ. of Illinois Press (1966).
- 4) 南雲仁一編: 生体における情報処理, 岩波講座情報科学 (第24巻), 岩波書店 (1982).
- 5) Codd, E.F.: *Cellular Automata*, Academic Press (1968).
- 6) 別冊サイエンス “数学ゲーム”, 日経サイエンス (1980).
- 7) Sakata, S.: General Theory of Doubly Periodic Array over an Arbitrary Finite Field and Its Application, *IEEE Trans. I. T.*, Vol. IT-24, No. 6, pp. 719-730 (1978).

(平成元年 3 月 16 日受付)

(平成元年 11 月 14 日採録)

**高橋 馨郎**（正会員）

1929年生。東京大学工学部応用数学科卒業。現在筑波大学教授社会工学系。オペレーションズリサーチ、組合せ理論等を研究。著書；「シミュレーション」日科技連出版。「組合せ理論とその応用」岩波全書。「離散数学」岩波情報科学講座。日本オペレーションズリサーチ学会，日本数学会各会員。

**早迫 亮一**（正会員）

昭和34年生。昭和57年防衛大学校電気工学専攻卒業。昭和63年防衛大学校理工学研究科オペレーションズリサーチ専攻修了。現在，陸上自衛隊勤務。