

神経の数学モデルの応答特性

東大 工学部 吉田 利信

あらまし Harmon は電子回路によつて神経細胞のモデルを作り、実験によつて入力の大きさと出力の興奮頻度との関係が“特異的”であることを示した。Nagumo and Sato は神経細胞を不応期を持つ閾素子とみなし、これを非線形差分方程式によつて記述した。不応特性として、過去の影響が時間と共に指數的に減少する形式を仮定し、また入力としては定常入力を仮定した。この場合、(1) 構成的に定義されるある集合と周期的な出力全体との間に一対一の対応が存在し、(2) Harmon の示した“特異的”な入出力関係が一般化された Cantor 関数で表わされることを示した。

本稿では、不応特性として狭義単調減少かつ下に凸の形式を仮定し、入力は周期入力を仮定する。この場合上と同様に次のことが示される。(1) すべての正整数 m に対して、集合 A_m を構成的に定義する。この A_m と、周期が m の入力に対

する周期出力全体との間に一対一の対応が存在する。(2) m が 1, 2 および 3 のとき, m 周期入力と出力頻度との関係が一般化された Cantor 関数で表わされる。

1. まえがき

Harmon⁽¹⁾ は電子回路によつて神経細胞のモデルを作り、実験によつて "特異的な現象" を見出した。すなわち神経モデルに一定の大きさの入力を加えたとき、その入力の大きさと神経モデルの興奮頻度との関係が図 1 に示すように階段状になることを示した。

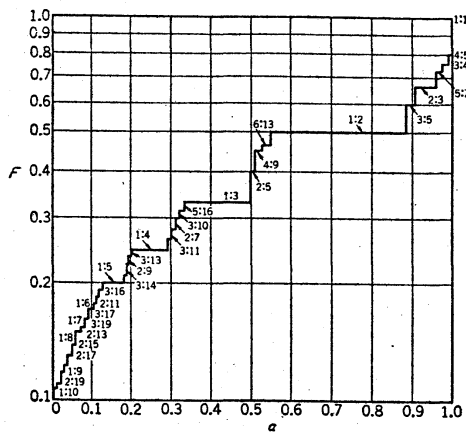


図 1 a : 入力の大きさ, F : 出力頻度, 图中 x/y は周期が y の出力で, x 回神経が興奮することを示す。

Nagumo and Sato⁽²⁾ は神経細胞を不応期を持つ関素子とみなし、これを非線形差分方程式で記述した。不応特性として過去の影響が時間と共に指數的に減少する形式を仮定し、また入力としては定常入力を仮定した。この場合、構成的に定義されるある集合

と周期的な出力全体との間に一対一の対応が存在し、Harmon の示した "特異的" な入出力関係が一般化された Cantor 関

数で表わされることを示した。

南雲⁽³⁾は $O^m A$ の形の周期入力に対しても定常入力の場合と同様に扱えることを示した。また Sato, Hatta and Nagumo⁽⁴⁾は, OAA の形の周期入力に対する周期出力について考察している。しかし, 一部不十分な所がありすべての周期出力列を尽していない。

増田, 南雲⁽⁵⁾は不応特性をある特殊な形にしたときの定常入力に対する周期出力を記述し, さらに定常入力の大きさと出力頻度との関係が本来の Cantor 関数と一致することを示した。

永見, 他⁽⁶⁾⁽⁷⁾は, 有限の過去のみの影響を受けようとする不応特性のもとで, 定常入力に対する周期出力について考察している。

本稿では, 不応特性として狭義単調減少かつ下に凸の形式を仮定し, 入力は周期入力を仮定する。この場合における周期出力全体を構成的に記述し, 入力空間の構造について調べる。

2. 神経モデル

神経細胞は不応期を持つ関素子とみなすことができる。時刻 t における神経細胞の状態を $x(t)$ と表わし, 静止状態の

とき値 0 をとり、興奮状態のとき値 1 をとることにする。時刻 t において加えられる入力の大きさを $a(t)$ で表わす。不応特性を数列 $\{b_r\}$ で表わす。これは t 単位時間過去に神経細胞が興奮してゐるとき b_r だけ現時点の興奮が抑えられることを意味してゐる。閾値は入力に含めて考えここでは 0 と仮定する。このとき神経細胞を *Caianiello* 流に次のようにモデル化する。

$$x(t) \equiv \mathbb{1} \left[a(t) - \sum_{r=1}^{\infty} b_r x(t-r) \right]$$

$$\mathbb{1}[u] \equiv \begin{cases} 1 & (u \geq 0) \\ 0 & (u < 0) \end{cases}$$

Nagumo and Sato⁽⁴⁾ は次の場合における応答特性を調べた。

(i) 入力が一一定 $a(t) \equiv a, t = 0, 1, 2, \dots$

(ii) 不応特性が指数的に減少 $b = \{b_r \mid b_r = c^{-r}, c > 1, r = 1, 2, \dots\}$

(iii) 初期状態がすべて静止状態 $I = \{x(t) = 0 \mid t = -1, -2, \dots\}$

本稿では上の場合を拡張し、次の場合における応答について調べる。

(i') 入力周期的 $a(t) = a_i, t \equiv i \pmod{m}, i = 0, 1, \dots, m-1$

(ii') 不応特性が狭義単調減少かつ下に凸

$$b = \{b_r > 0 \mid b_r - b_{r+1} > b_{r+1} - b_{r+2} > 0, r = 1, 2, \dots, \sum_{r=1}^{\infty} b_r < \infty\}$$

(iii) 初期状態は任意

周期が m の入力を m 入力ベクトル

$$\alpha = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{m-1}) \in \mathbb{R}^m, \quad \mathbb{R}: \text{実数全体}$$

で表わし, 不応特性と初期状態をそれぞれ \mathcal{b} と I で表わす。
不応特性 \mathcal{b} , m 入力ベクトル α , 初期状態 I に対する神経モデルの出力がある過渡変化の後に周期的に存する場合, この周期列を $\mu(\alpha, I, \mathcal{b})$ と書く。つまり, ある $n = \ell m$ と $T = km$ が存在して $t \geq T$ なる任意の t に対して

$$x(t) = x_i, \quad t \equiv i \pmod{n}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

となるとき, この n 周期列 $x_{n-1}, x_{n-2}, \dots, x_0$ を $\mu(\alpha, I, \mathcal{b})$ と表わす。

0 と 1 よりなる列 $\alpha = \alpha_{n-1}, \alpha_{n-2}, \dots, \alpha_0$ に対して次の記号を定義する。

$$|\alpha| \equiv n, \quad \alpha \text{ の長さ}$$

$$\|\alpha\| \equiv \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i, \quad \alpha \text{ 中の } 1 \text{ の数}$$

$$\rho(\alpha, i) \equiv \alpha_{i-1} \dots \alpha_0 \alpha_{n-1} \dots \alpha_i, \quad \alpha \text{ が末尾となるような } \alpha \text{ の}$$

回転

$$\tilde{\alpha} \equiv \{\rho(\alpha, km) \mid n = \ell m, k = 0, 1, \dots, \ell-1\},$$

m の倍数の回転全体

不応特性が \mathcal{b} のとき, 周期が m の入力に対する周期出力全体を $H_m(\mathcal{b})$ と表わし, 次のように定義する。

$$H_m(b) \equiv \{ \alpha \mid \alpha = \kappa(a, I, b), R^m \ni \forall a, \forall I \}$$

次節で周期列の集合 A_m を構成的に定義し、4節以降で A_m と $H_m(b)$ との関係を調べる。

3. A_m の定義とその性質

$$0 \text{ と } 1 \text{ より成る列 } u = u_{k-1} u_{k-2} \cdots u_0, v = v_{l-1} v_{l-2} \cdots v_0$$

に対して、連接と繰り返しをそれぞれ次のように定義する。

$$uv \equiv u_{k-1} u_{k-2} \cdots u_0 v_{l-1} v_{l-2} \cdots v_0$$

$$u^n \equiv \underbrace{u u \cdots u}_{n \text{ 個}}$$

A_1 を次のように帰納的に定義する。

(i) A_1 は 0 と 1 を含む。0, 1 をそれぞれ $[0], [1]$ と表わす。

(ii) A_1 が $u = [i_0, i_1, \dots, i_{k-1}, i_k]$ と $v = [i_0, i_1, \dots, i_{k-1}, i_{k+1}]$ を共に含むとき、任意の整数 i_{k+1} に対して A_1 は $[i_0, i_1, \dots, i_{k-1}, i_k, i_{k+1}]$ を含む。これは次のように定義される。

$$i_{k+1} < 0 \text{ のとき } u^{i_{k+1}+1} v$$

$$i_{k+1} \geq 0 \text{ のとき } u v^{i_{k+1}+1}$$

(iii) A_1 は (i), (ii) で定義される要素以外の要素を含まない。

A_1 の要素 $\alpha = [i_0, i_1, \dots, i_k]$ に対して、整数上の関数 $\tau(\alpha)$ を次のように定義する。

$$\alpha(\alpha) \equiv \begin{cases} -|[i_0, i_1, \dots, i_{k-1}]| & , k \geq 1, i_k < 0 \\ |[i_0, i_1, \dots, i_{k-1} + 1]| & , k \geq 1, i_k \geq 0 \\ 0 & , k = 0 \end{cases}$$

$$\tau(\alpha) \Leftrightarrow i^{\tau(\alpha)} \equiv \alpha(\alpha) i \pmod{|\alpha|}, 0 \leq i^{\tau(\alpha)} < |\alpha|$$

このように定義された A_1 および τ に対して、次の補題が成立する。

補題 1.

A_1 の要素 $\alpha = \alpha_{l-1} \alpha_{l-2} \dots \alpha_0$ に対して、 $\tau = \tau(\alpha)$ と置くと、

(i) τ は $\{0, 1, \dots, l-1\}$ 上の置換である。

$$(ii) \alpha_{j\tau} = \begin{cases} 1, & 0 \leq j < \|\alpha\| \\ 0, & \|\alpha\| \leq j < |\alpha| \end{cases}$$

(証明は省略)

この補題 1 は α 中の 1 が置換 τ による順序に配置されていることを示している。 A_m の定義はこの補題を拡張した形で行なう。

A_1 の要素 α' とパラメータ $j = (j_0, j_1, \dots, j_{m-1})$ に対して、 $l = |\alpha'|$, $\tau = \tau(\alpha')$ と置いたとき、

$$\alpha(\alpha', j) \equiv \alpha_{lm-1} \alpha_{lm-2} \dots \alpha_0$$

$$x_{j^{\tau_{m+i}}} \equiv \begin{cases} 1, & j_{i-1} + 1 \leq j \leq j_i \\ 0, & j_i + 1 \leq j \leq j_{i-1} + l \end{cases} \quad i=0, 1, \dots, l-1$$

と定義する。この定義から明らか存よりに、パラメータ j は部分列 $\{x_{k^{m+i}} \mid k=0, 1, \dots, l-1\}$ 中の 1 の数が $j_i - j_{i-1}$ 個であることを示している。

【1】と異なる α' に対するパラメータ全体 $J_m(\alpha')$ および A_m を次のように定義する。

$$J_m(\alpha') \equiv \left\{ (j_0, j_1, \dots, j_{m-1}) \mid 0 \leq j_i - j_{i-1} \leq l, \right. \\ \left. j_{-1} = -1, j_{m-1} \equiv \|\alpha'\| - 1 \pmod{l} \right\}$$

$$A_m \equiv \left\{ \xi(\alpha', j) \mid A_1 \ni \alpha' \neq [1], J_m(\alpha') \ni j \right\}$$

次に A_m の性質を調べる。不変特性 $b = \{b_r\}$ に対して、0 と 1 の列 $\alpha = \alpha_{m-1} \dots \alpha_0$ から実数への写像 φ を次のように定義する。

$$\varphi(\alpha, b) \equiv \sum_{k=0}^{n-1} b_{n-k}^{(n)} \alpha_k, \quad b_k^{(n)} \equiv \sum_{l=0}^{\infty} b_{ln+k}, \\ k=1, 2, \dots, n$$

A_m の要素 $\alpha = \xi(\alpha', j)$, $A_1 \ni \alpha'$, $J_m(\alpha') \ni j$ に対して不変特性 b の狭義単調減少性より次の補題が成立する。

補題 2

$j = (j_0, j_1, \dots, j_{m-1})$, $\tau = \tau(\alpha')$ と置く。

$j_{i-1} + 1 \leq j < j_{i-1} + l$ を満たす任意の整数 j に対して

$$\varphi(\rho(\alpha, j^{\tau_{m+i}}), b) < \varphi(\rho(\alpha, (j+1)^{\tau_{m+i}}), b)$$

が成立する。ただし $i=0, 1, \dots, m-1$ 。

(証明は省略)

この補題2は、 \mathcal{X} が周期出力のとき各時点における不応特性の影響の大きさの間の関係を述べている。

4. $\tilde{A}_m \subseteq H_m(b)$

この節では A_m の任意の要素が m 周期入力に対する周期出力に作りうることを示す。

0 と 1 よりなる列 $\mathcal{X} = x_{lm-1} x_{lm-2} \dots x_0$ に対して i に周期した x_{km+i} を末尾に持つ回転 $\rho(\mathcal{X}, km+i)$, $k=0, 1, \dots, l-1$ を考える。末尾が 1 に等しい回転 $\rho(\mathcal{X}, km+i)$ のそれぞれに対して不応特性 b のもとでの φ の値の最大値を $l_{i,m}(\mathcal{X}, b)$ と表わし, 末尾が 0 に等しい回転 $\rho(\mathcal{X}, km+i)$ のそれぞれに対して b のもとでの φ の値の最小値を $u_{i,m}(\mathcal{X}, b)$ と表わす。つまり次のように定義する。 $i=0, 1, \dots, m-1$ とする。

$$l_{i,m}(\mathcal{X}, b) \equiv \begin{cases} \max_{\substack{x_{km+i}=1 \\ 0 \leq k < l}} \varphi(\rho(\mathcal{X}, km+i), b), & x_{km+i}=1 \text{ と なる } k \text{ が 存在,} \\ -\infty, & x_{km+i}=1 \text{ と なる } k \text{ が 存在 しない,} \end{cases}$$

$$u_{i,m}(\mathcal{X}, b) \equiv \begin{cases} \min_{\substack{x_{km+i}=0 \\ 0 \leq k < l}} \varphi(\rho(\mathcal{X}, km+i), b), & x_{km+i}=0 \text{ と なる } k \text{ が 存在,} \\ +\infty, & x_{km+i}=0 \text{ と なる } k \text{ が 存在 しない} \end{cases}$$

補題 1, 2 および τ の定義より A_m の要素 $x = \tau(x', j)$ に対して $l_{i,m}, u_{i,m}$ はそれぞれ次のように表わされる。

$l = |x'|, j = (j_0, j_1, \dots, j_{m-1}), \tau = \tau(x')$ とする。

$$l_{i,m}(x, b) = \begin{cases} \varphi(\rho(x, j_i^{m+i}), b) & , j_i > j_{i-1} \\ -\infty & , j_i = j_{i-1} \end{cases}$$

$$u_{i,m}(x, b) = \begin{cases} \varphi(\rho(x, (j_{i+1})^{m+i}), b) & , j_i < j_{i-1} + l \\ +\infty & , j_i = j_{i-1} + l \end{cases}$$

$$i = 0, 1, \dots, m-1$$

再び補題 2 より

$$l_{i,m}(x, b) < u_{i,m}(x, b) \quad i = 0, 1, \dots, m-1$$

が成立する。そこで m 次元ベクトル $a = (a_0, a_1, \dots, a_{m-1})$ が、

$$l_{i,m}(x, b) \leq a_i < u_{i,m}(x, b) \quad i = 0, 1, \dots, m-1$$

を満たすように定めることができる。初期状態として x の周期列を仮定する。つまり $x = x_{lm-1} x_{lm-2} \dots x_0$ とするとき、

$$I = \{x^{(-1)}, x^{(-2)}, \dots\}$$

$$x(t) = x_i, \quad t \equiv i \pmod{lm}, \quad t = -1, -2, \dots$$

と定義する。このとき任意の t に対して

$$x(t) = x_i, \quad t \equiv i \pmod{lm} \quad \dots (1)$$

が成立することを示そう。 t_0 以下の t に対して (1) が成立していると仮定する。

$$t_0 + 1 = Tlm + km + i, \quad 0 \leq k < l, \quad 0 \leq i < m$$

と存する T, k および i が存在する。モデルの定義と帰納法の仮定より

$$x(t_0 + 1) = \mathbb{1} [a_i - \varphi(\rho(x, km + i), b)]$$

が成立している。 $x_{km+i} = 1$ とすると、 $l_{i,m}$ の定義より

$$\varphi(\rho(x, km + i), b) \leq l_{i,m}(x, b) \leq a_i$$

が成立し、 $x(t_0 + 1) = 1$ である。同様に、 $x_{km+i} = 0$ とすると、 $u_{i,m}$ の定義より

$$\varphi(\rho(x, km + i), b) \geq u_{i,m}(x, b) > a_i$$

が成立し、 $x(t_0 + 1) = 0$ と存り (1) が成立する。ゆえに A_m の要素 x は m 入力ベクトル a および初期状態 I に対する周期出力 $\mu(a, I, b)$ と一致する。次の定理が得られる。

定理 1

任意の不応特性 b に対して

$$A_m \ni x \text{ ならば } H_m(b) \ni \tilde{x}.$$

$$5. H_m(b) \subseteq \tilde{A}_m$$

前節の逆を示そう。0 と 1 よりなる列 $x = x_{lm-1} x_{lm-2} \cdots x_0$ が

$$\tilde{A}_m \ni \tilde{x} \quad \text{つまり} \quad A_m \ni \rho(x, km), \quad k = 0, 1, \dots, l-1$$

を満たすとき、任意の不応特性 b に対して $H_m(b) \ni \tilde{x}$ が

成立することを示す。

補題3

\tilde{A}_m 中 \tilde{x} ならば, 2つの m に関して同期した部分列 $1 \times 1, 0 \times 0$ を共に含む。つまりある k_1, k_2 と i が存在して,

$$\rho(x, k_1, m+i) = 1 \times 1 \beta \quad \text{ただし } \alpha, \beta, \gamma \text{ は } 0, 1 \text{ であり}$$

$$\rho(x, k_2, m+i) = 0 \times 0 \gamma \quad \text{なる列. } |\beta| = |\gamma|$$

が成立する。

(証明は省略)

0 と 1 よりなる列 $z = z_{n-1} z_{n-2} \cdots z_0, z' = z'_{n-1} z'_{n-2} \cdots z'_0$ に対して, $z_i \cdots z_0$ 中の 1 の数が $z'_i \cdots z'_0$ 中の 1 の数を引いた数を $f(i, z, z')$ と表わし, i に関する最大値, 最小値をそれぞれ $f_{\max}(z, z'), f_{\min}(z, z')$ と表わす。つまり次のように定義する。

$$f(i, z, z') \equiv \sum_{j=0}^i (z_j - z'_j)$$

$$f_{\max}(z, z') \equiv \max_{0 \leq i < n} f(i, z, z')$$

$$f_{\min}(z, z') \equiv \min_{0 \leq i < n} f(i, z, z')$$

この f, f_{\max}, f_{\min} に関して次の補題が成立する。

補題4

$z = z_{n-1} z_{n-2} \cdots z_0, z' = z'_{n-1} z'_{n-2} \cdots z'_0, \|z\| = \|z'\|$ が

$$f_{\max}(z, z') - f_{\min}(z, z') \geq 2$$

を満たし, $f(i, z, z') = f_{\max}(z, z')$ とする i の数より,
 $f(i, z, z') < f_{\max}(z, z') - 1$ とする i の数が少なくなければ,
ある i_0 が存在して,

$$(i) z_{i_0} = 1, z'_{i_0} = 0$$

(ii) 任意の不安特性 b に対して,

$$\varphi(\rho(z, i_0), b) > \varphi(\rho(z', i_0), b)$$

が成立する。

(証明は省略)

補題3より \hat{A}_m 中 \hat{x} ならば, ある k, k' が存在して,
 $z = \rho(x, k, m), z' = \rho(x, k', m)$ と置くと, 補題4の条件を
満足する。したがって補題4より, ある i_0 が存在して

$$(i) z_{i_0} = 1, z'_{i_0} = 0$$

$$(ii) \varphi(\rho(z, i_0), b) > \varphi(\rho(z', i_0), b)$$

が成立する。ゆえに $l_{i_0, m}, u_{i_0, m}$ の定義より

$$l_{i_0, m}(x, b) > u_{i_0, m}(x, b) \quad \dots (2)$$

が成立する。

補題5

ある不安特性 b が存在して \hat{x} が $H_m(b)$ の要素で
あると仮定する。つまり m 入力ベクトル $a = (a_0, a_1, \dots, a_{m-1})$
と初期状態 I が存在して $\hat{x} = \hat{\rho}(a, I, b)$ が成立している
と仮定する。このとき

$$l_{i,m}(x, b) \leq a_i \leq u_{i,m}(x, b), \quad i=0, 1, \dots, m-1$$

が成立することを必要である。

(証明は省略)

\tilde{A}_m 中 \tilde{x} ならば (2) とこの補題より, 任意の b に対して $H_m(b)$ 中 \tilde{x} が成立する。次の定理が得られた。

定理 2

$$H_m(b) \ni \tilde{x} \quad \text{ならば} \quad \tilde{A}_m \ni \tilde{x}$$

定理 1 と定理 2 より不応特性 b に依らずに

$$H_m(b) = \tilde{A}_m$$

が成立することがわかった。つまり周期 m の入力に対するすべての周期出力を構成的に記述できたことになる。

6. 入力空間の構造

0 と 1 よりなる列 $x = x_{lm-1} x_{lm-2} \dots x_0$ を周期出力とするような m 入力ベクトル全体を考える。これを x の入力空間と呼び, 次のように定義する。

$$R_m(x, b) \equiv \{ a \in \mathbb{R}^m \mid x = \mu(a, \mathbb{I}, b) \}$$

また m 次元実数空間に測度 μ を次のように導入する。

$0 \leq a < b < 1$ を満たす任意の a, b に対して,

$$\mu([a, b)) \equiv b - a, \quad \mu([a, +\infty)) \equiv 1 - a$$

$\mu((-\infty, b)) \equiv b + 0$, $\mu((-\infty, +\infty)) \equiv 1 + 0$
と定義する。ただし $0, 1$ はそれぞれ $(-\infty, 0), [0, +\infty)$ の
測度を表わす記号である。この μ を m 次元に拡張し、 m 次元
実数空間の測度とする。

この節では、不応特性の条件 $\sum_{r=1}^{\infty} b_r < \infty$ を強めて、
 $\sum_{r=1}^{\infty} b_r = 1$ と仮定する。これは m 入力ベクトル α の尺度を変更
するだけで本質的な影響を与えない。この仮定のもとで、す
べての周期出力の入力空間の測度

$$\mu\left(\bigcup_{A_m \ni \alpha} R_m(\alpha, b)\right)$$

を調べる。入力空間の重なりについて次の補題が成立する。

補題6

1 の頻度の異なる周期出力 α, α' の入力空間
 $R_m(\alpha, b), R_m(\alpha', b)$ は共通部分を持たない。

(証明は省略)

この補題6より次の系1, 2が得られる。

系1

A_1 の相異なる要素 α, α' の入力空間 $R_1(\alpha, b),$
 $R_1(\alpha', b)$ は共通部分を持たない。

系2

A_1 の相異なる要素 α, α' から生成される A_m の要素

$\mathcal{Y} \equiv \{ (x, j), j \in J_m(x) \}$, $\mathcal{Y}' \equiv \{ (x', j'), j' \in J_m(x') \}$

に対して,

$R_m(\mathcal{Y}, b)$, $R_m(\mathcal{Y}', b)$ は共通部分を持たない。

0 と 1 よりなるベクトルの集合 E_m を次のように定義する。

$$E_m \equiv \{ e = (e_0, e_1, \dots, e_{m-1}) \mid e_i = 0, 1, i = 0, 1, \dots, m-2, \\ e_{m-1} = 0 \}$$

E_m に順序関係 \leq を次のように導入する。 $e = (e_0, e_1, \dots, e_{m-1})$

$e' = (e'_0, e'_1, \dots, e'_{m-1})$ とするとき,

$$e \leq e' \Leftrightarrow e_i \leq e'_i, i = 0, 1, \dots, m-1$$

$$e < e' \Leftrightarrow e \leq e' \text{ か } e \neq e'$$

と定義する。

入力空間が重なった場合について次の補題が成立する。

補題 7

$A_1 \ni x, J_m(x) \ni j, j'$ に対して $\mathcal{Y} = \{ (x, j) \}$,

$\mathcal{Y}' = \{ (x, j') \}$ と置くとき,

$$R_m(\mathcal{Y}, b) \cap R_m(\mathcal{Y}', b) \neq \emptyset$$

となるための必要十分条件は

$$j - j' \in E_m \text{ または } j' - j \in E_m$$

が成立することである。

(証明は省略)

以上の系と補題より周期出力 A_m の入力空間の測度は次の

ように表わされる。

補題 8

$$\begin{aligned} & \mu \left(\bigcup_{A_m \ni x} R_m(x, b) \right) \\ &= \sum_{\substack{A_m \ni x \\ x \neq 1}} \sum_{J_m(x) \ni j} \sum_{k=1}^m (-1)^{k-1} \sum_{E_m(k, j, x) \ni \epsilon} \mu \left(\bigcap_{l=1}^k R_m(\xi(x, j + e_l), b) \right) \end{aligned}$$

ただし

$$\begin{aligned} E_m(k, j, x) \equiv & \{ \epsilon = (e_1, e_2, \dots, e_k) \mid e_i \in E_m, \\ & j + e_i \in J_m(x), i=1, 2, \dots, k, \\ & e_1 < e_2 < \dots < e_k \} \end{aligned}$$

(証明は省略)

補題 8 を用いて $m=1, 2, 3$ に対して計算すると次の定理が成立することが示された。

定理 3

$m=1, 2, 3$ に対して

$$\mu \left(\bigcup_{A_m \ni x} R_m(x, b) \right) = \mu(\mathbb{R}^m)$$

(証明は省略)

この定理 3 は、ある m 入力ベクトル a に対して出力が周期的に存することがないとき、 a は測度 μ に関する零集合に入っていることを示している。

周期出力 x が得られるような m 入力ベクトル a を考える。

このとき、ある初期状態 I が存在して、 $x = p(\alpha, I, \beta)$ が成立しているが、他の初期状態 I' に対して出力が周期的に存しない可能性がある。(周期的に必ず存するという証明は、応答特性が指数的に減少する場合に対してできているが、狭義単調減少かつ下に凸の場合に対してはまだできていない。) また x と異なる周期出力に存することもある。しかし、出力頻度は同一に存することが示される。

補題 9

$R_m(\alpha, \beta) \ni \alpha$ とする。入力 α 、初期状態 I' のときの出力を $x'(t)$ と書くとき、出力頻度

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \sum_{t=0}^T x'(t)$$

は $\|x\| / |\alpha|$ と一致する

(証明は省略)

この補題 9 と定理 3 より、入力と出力頻度との関係が一般化された Cantor 関数で表わされることが示された。

定理 4

$m = 1, 2$ および 3 のとき、 m 周期入力と出力頻度との関係が一般化された Cantor 関数で表わされる。

7. おすび

神経細胞の数学モデルに周期入力を加えた場合の周期出力全体を構成的に記述した。また入力の周期が1, 2および3のとき, 入力と出力頻度の関係が一般化された Cantor 関数で表わされることを示した。

$R_m(x, b) \rightarrow \alpha$ のとき任意の初期状態に対して出力が周期的に存在することが示されるならば, 定理3より "ほとんどあらゆる入力に対して周期出力が得られる" ことが示せる。この命題に対する証明と定理3の m が4以上の場合に対する証明が残された問題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり, 御助言を下す, 左東大工学部南雲仁一教授をはじめに同研究室の皆様へ深く感謝致します。

参考文献

- (1) L.D. Harmon: "Studies with artificial neurons, I: Properties and functions of an artificial neuron", *Kybernetik*, vol. 1, No. 3, pp. 89-101, Dec. 1961.
- (2) J. Nagumo and S. Sato: "On a Response Characteristic

of a Mathematical Neuron Model", *Kybernetik*,
vol. 10, No. 3, pp. 155-164, Mar. 1972.

- (3) 南雲仁一: "非線形差分方程式の解から作られる振動関数の性質 — 非自立系 —", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 72-10, (1972-08)
- (4) S. Sato, M. Hatta and J. Nagumo: "Response Characteristics of a Neuron Model to a Periodic Input", *Kybernetik*, vol. 16, pp. 1-8 (1974)
- (5) 増田正, 南雲仁一: "コントロール型応答特性をもつ神経細胞モデル", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 76-15, (1977-03)
- (6) 永見, 北橋, 田中, 阿江, 吉田: "しきい素子フィードバック形シフトレジスタのオートノマス動作について" 信学論 (A), 58-A, 8, p. 530 (昭50-08)
- (7) 永見, 北橋, 田中: "フィードバック フトレジスタ形しきい素子回路網により生成される周期系列", 信学論 (D), 59-D, 5, p. 307 (昭51-05)
- (8) 吉田利信, 南雲仁一: "神経モデルの周期入力に対する応答", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 75-18 (1976-2)

- (9) 吉田利信, 南雲仁一: "神経モデルの周期入力に対する応答(続)", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 76-4 (1976-9)
- (10) 吉田利信: "神経モデルの性質—2及び3周期入力に対する入力空間の構造—", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 76-14 (1977-1)
- (11) 吉田利信: "神経モデルの周期入力に対する応答", 信学会非線形問題研究会資料 NPL 77-11 (1977-8)