

Title	神経力学
Author(s)	大貫, 信
Citation	物性研究 (1970), 13(4): 259-271
Issue Date	1970-01-20
URL	http://hdl.handle.net/2433/87254
Right	
Type	Departmental Bulletin Paper
Textversion	publisher

神 經 力 学

早大理工 大 貫 信

(12月18日受理)

(II) 動的相互作用

§ 4. 非線型性の持つ意味

シナプス伝播の遅延時間と等しい時間間隔ですべての細胞の発火がなされるという同期的興奮の仮定の上に立つ Caianiello の Neural equation の特殊性を克服する為に § 2 で導入された一般的な Neural equation (2.5) は、第一式右辺第一項の長時間加重効果及び発火に伴う促通効果、第二項の絶対閾値の存在、第三項及び第二式の閾値の時間変動等が分離された形でみられることにその特徴がある。

この複雑な非線型論理素子は、一見“何故そのような高度の非線型性が有用なのか”という疑問を抱かせる。長時間加重や絶対閾値の存在は互いに独立ではないけれど、これらは素子に多重意志決定 (multi decision-making) を持たせるものであるという意義付け (多数の細胞からの入力統合されて始めて発火を起すことを拡張解釈したもの) が一般に行なわれているし、神経応答の安定性が、単一の入力のみで発火が行なわれない処から得られるとする意見もある。ある一ヶの固定された閾値を持つ細胞が意志決定素子として果たす役割は神経発達の初期に於ける行動様式として十分注目されてよい。一方、これらの素子が多数集った時の情報処理を扱う時、避けられない複雑さが生じる。内部相互作用のある集団の運動から如何なる動的側面が生じてくるであろうか。これを考える前にいくつかの問題が存在する。

- (1) シナプス電位のゆらぎや不安定性によって、単一刺激によるシナプス電位を完全に安定な一定のデジタル信号とは考えられない。
- (2) 入力情報それ自身による入力の情報処理が行なわれていると見られる場面がある (例えば、視覚系で、フリッカー光を照射する時、最も高い sensitivity を持たらずフリッカー周波数が background の入力光の明るさに

大貫 信

よって変化する)。

(3) 他細胞からの刺激，或いは入力ゆらぎによって刺激の効果が制御される。

これらのものは互いに関連ある問題であり，集団内の状態がその集団内の2点間の相互作用に影響を与えるという動的相互作用が考えられる。したがって意志決定素子としての意義付けはもっともであるが，そのメカニズムを知ろうとするとき，多くの細胞からなる集団が内部相互作用を通して動的情報処理を如何にして行なうかという問題が生じる。このことは高等動物に於ては更に著しい問題と思われる。相互作用の動的側面を見るのに，非線型性が分離された形で表示されている(2.5)を出発点とするのが便利であり，非線型性が動的相互作用を顕著に呈示する形が確率化によって得られる。

閾値の時間変動は，(3.7)によって仮想的細胞の興奮確率と実在細胞の間の関係を生じて(3.3)左辺の第二項，三項にあらわれ，それは細胞それ自身の興奮確率の deviation を持たらすことが判る。ここでは，時間加重，促通，絶対閾値の持たらす動的相互作用を見てみよう。

§ 5. 不完全促通の効果

発火によって促通が起る場合に，それまでの加重が完全に清算されると考えられる場合と，一部が清算されずに残る場合とが考えられる。前者を非蓄積性，¹⁾後者を蓄積性と呼ぶ。

加重されていたもののうち清算されるものの比を m とすると，(2.5) は次のように書き換えられる。

$$\begin{aligned} \nu_i(t+dt) = & m \nu_i(t) (1 - 1_X[\nu_i(t)]) + F(t) \\ & - T + X + \tau(T-X) (1 - 1_X[\nu_i(t)]) \\ & + b(1-m) \nu_i(t) + \tau(1-m)(T-X) \\ & - L_1(1 - 1_X[\nu^0(t+dt)]) \end{aligned} \quad (4.1)$$

$$\nu^0(t+dt) = -L_1 1_X[\nu_i(t)] - \sum_{j=2}^N L_j F_{j-1}(\nu^0(t)) \quad (4.2)$$

(4.2) × (1-b+bm) + (4.1) をつくることによって、§3と同様にして確率化された方程式が導出され、次のようになる。

$$P_i(0, t) = \sum_{j \neq i} \frac{a_{ij}}{b_m T_i} P_j(0, t - \tau_j) + \frac{1}{b_m T_i} \langle f_{si}(t) \rangle + d_i$$

但し

$$d_i = \frac{1}{b_m T_i} (m T_i - \sum_{j \neq i} a_{ij} - d_i')$$

$$d_i' = \frac{m}{2} \left\{ 1 - \frac{(b-1)b(1-m)}{b_m(1-b+bm)} \right\} \quad (4.2)$$

$$\langle \sigma_i(t) \rangle = \sum_{j \neq i} \frac{a_{ij}}{b_m T_i} \langle \sigma_j(t - \tau_j) \rangle - \frac{1}{b_m T_i} \langle f_{si}(t) \rangle + \epsilon_i$$

但し

$$\epsilon_i = 1 - \frac{1}{b T_i} \left(T_i - \frac{d_i'}{m} \right) \quad (4.3)$$

蓄積性が高いほど (mが小さいほど), 興奮性相互作用 ($a_{ij} > 0$) では興奮が起され易くなり, 抑制性相互作用 ($a_{ij} < 0$) では抑制がよく働くようになる。(両者をまとめて以後伝達率がよくなると称する)。又, 蓄積性の, 自分自身の興奮確率の deviation ϵ_i への寄与は, ($dt \approx 0$ のとき $b \approx 1$ で, $\frac{d_i'}{m}$ は殆んどmによらないので) ない。

§6. 自己雑音システム

雑音の原因及びその形態には種々の場合がある。脳に於ける雑音の真の原因はまだ判っていない。原因は別として形態を考える場合, 大別して二通りある。一つは出所の不明な刺激入力によるもので, 外場とみなして導入出来る。この雑音の特徴は, 他細胞からの刺激入力と同様に, 細胞が興奮に到るまでは加重され得るということで, (2.5) 第一式の $F(t)$ の中に (3.5) の形で含まれることが出来た。

もう一つの形態はシナプス或いは細胞体付近の機能に引き起されるゆらぎ或

大貫 信

いはその他の理由で、膜静止電位に非加重型のゆらぎを持たらすものでこれを自己雑音と呼んでおく。自己雑音を $f_{si}'(t)$ とするとき、その非蓄積性によって (2.5) の中に

$$f_{si}'(t) - bf_{si}'(t-dt) (1 - 1_X[\nu_i(t)])$$

の形で組み込まれる。これは閾値 T にゆらぎがあると見なすのと全く等価である。従って、自己雑音及び出所不明の加重型雑音 (これを従来通り $f_{si}(t)$ とする) を含むシステムの運動は ($dt \approx 0$ で $b \approx 1$ とすると)

$$\begin{aligned} \langle \sigma_i(t) \rangle &= \sum_{j \neq i} \left\langle \frac{a_{ij}}{T_i(t)} a_j(t - \tau_j) \right\rangle \\ &- \left\langle \frac{1}{T_i(t)} f_{si}(t) \right\rangle \\ &+ \langle \varepsilon_i(t) \rangle \end{aligned} \quad (4.1)$$

であらわされる。

但し

$$\langle \varepsilon_i(t) \rangle = \frac{1}{2} \left\langle \frac{1}{T_i(t)} \right\rangle \quad (4.2)$$

ここで $\varepsilon_i'(t) = \varepsilon_i(t) - \frac{1}{T_i(t)} f_{si}(t)$ とし

$$\varepsilon'(t) = \begin{pmatrix} \varepsilon_1'(t) \\ \varepsilon_2'(t) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$A(t) = \left(\frac{a_{ij}}{bT_i(t-dt)} \right)$$

とし、 E を単位マトリックス

$$\varepsilon''(t) = (E - A(t))^{-1} \varepsilon'(t)$$

とするとき

$$S_i(t) = \sigma_i(t) - \varepsilon_i''(t) \quad (4.3)$$

とする。

$$\frac{a_{ij}}{b T_i(t-dt)} = a_{ij}(t) \quad (4.4)$$

とおきかえると

$$\langle S_i(t) \rangle = \sum_{j \neq i} \langle a_{ij}(t) S_j(t - \tau_{ij}) \rangle \quad (4.5)$$

(4.5) は $a_{ij}(t)$ のゆらぎが小さい場合には

$$\langle S_i(t) \rangle = \sum_{j \neq i} \langle a_{ij}(t) \rangle \langle S_j(t - \tau_{ij}) \rangle$$

と近似され、更に $\langle T_i(t) \rangle$ が時間に依存しないとき $\langle a_{ij}(t) \rangle = \tilde{a}_{ij}$ とおくと

$$\langle S_i(t) \rangle = \sum_{j \neq i} \tilde{a}_{ij} \langle S_j(t - \tau_{ij}) \rangle \quad (4.6)$$

であらわされる。

このようにして、入力情報の非加重型雑音部分によって伝達率が制御され得る。又、他細胞からの刺激に対しても、その刺激の中に非加重型雑音が介在してくる場合には、伝達率に利いてくる。決定論的方程式の非線型性は、線型性（閾値の非加重性及び非加重型雑音）と巧妙に組み合さって線型確率方程式の伝達率の動的側面に如実に反映している。

(4.3) で $\sigma_i(t)$ は1又は0をとる量で $\varepsilon_i''(t)$ はそのゆらぎを示すので、確率化された系では以後 $\sigma_i(t)$ の代りに $S_i(t)$ の時間発展を見ることにする。

(3.9) ないしは (4.4), (4.5) から判るように、興奮確率の従う方程式に於ては、閾値が割算の形で伝達率に利いてくる。これは、決定論的方程式 (2.1) 或いは (2.5) で閾値が引算の形で利いていたのと対比される。この割算形の効果は、閾値が非加重型で発火と同時に急激な変化をするという (3.1) の構造に帰因する。他細胞からの入力も、もし非加重型であるならば

大貫 信

割算形の効果になるであろう。

G. G. Furman²⁾ は哺乳類の蝸牛殻モデルで割算形の抑制 (shunting inhibition) を導入している。

(Ⅲ) 局在興奮

§ 7. 多重空間展開

脳の機能局在の考えを更に進めて、視覚領野の皮質ニューロン結合について、Hubel, Wiesel³⁾ は細胞間の抑制作用によって方向検知をなす結合があり得ることを示した。このようにニューロン群の中の局在化した興奮がパターンの弁別に寄与するという考えは、古くは興奮が回路網を巡回する現象に記憶の原因を求めた Eccles⁴⁾ にさかのぼることができる。記憶に関する Penfield⁵⁾ の知覚連合領野の刺激による記憶再生の実験がある一方、Young⁶⁾ の記憶の global な存在の考えがある。人間の創造活動についての心理学的アプローチの諸説は、記憶内容間の無意識のうちの相互作用による発想を唱えているように、局在化した興奮間の結合、解離が存在すると思われる。記憶の local 性、global 性についての対立する見解に結論は出ていないか、Pribram⁸⁾ はホログラフィによって記憶の global 性を説明している。そうした local と global の錯綜した現象へ近づく道として、局在興奮を特徴付ける物理量を抽出する解析を進める必要がある。

回路群の興奮は種々のモードの波からなっているが、機能局在の考えに従えば、それらのモードとその空間分布の間の対応を見出す必要がある。

回路群の部分空間 (Ω) のすべての回路の興奮確率が 0 である時に、 $t=0$ である細胞 (M) に加えられた興奮確率 $\langle S(0) \rangle$ は他細胞へ伝わり再び M 細胞に帰還する回路網から Ω がなりたっているとする。 M 細胞に帰還するすべての閉回路を番号づけて、 i 閉回路を一巡するに要する時間を τ_i 、伝達確率を g_i とする。 $t=0$ に M を出発した興奮は各閉回路に同時に出て行き、異なった時刻に帰還するそれぞれは再び各閉回路に出て行く。このうちからあるプロセスのみをとり出し、そのプロセスでは l 閉回路を t 時間中に n_l 回通過するとす

る。このプロセスを経た後でのその興奮確率の大きさは

$$g_i^{n_i} g_j^{n_j} \dots \langle S(0) \rangle$$

で与えられ、同じ結果を持たらす巡り方は $(\sum_i n_i)! / \prod_i n_i!$ であるから、時刻 t での M 細胞の興奮確率は

$$\langle S(t) \rangle = \sum_{\{n_i\}} \frac{(\sum_i n_i)!}{\prod_i n_i!} \prod_i g_i^{n_i} \langle S(0) \rangle \quad (7.1)$$

となる。 $\sum_{\{n_i\}}$ は

$$\sum_i n_i \tau_i = t \quad (7.2)$$

を満たすすべての n_i の組合せについての総和を示す。(7.1) の右辺のすべての項の総和をとる代わりに、Most probable part のみを引出す。条件(7.2)の下で(7.1)の \sum の中の項を最大にすることで、

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{t}{\tilde{\tau}} g_i e^{-\alpha \tau_i} \\ \tilde{\tau} &= \sum_i g_i \tau_i e^{-\alpha \tau_i} \\ \frac{t}{\tilde{\tau}} &= \sum_i n_i \end{aligned} \quad (7.3)$$

を得る。 $g_i e^{-\alpha \tau_i}$ は興奮が i 閉回路を一巡する時の、回路網による平均伝達確率である。但し α は

$$\sum_i g_i e^{-\alpha \tau_i} = 1 \quad (7.4)$$

を満たすようにきめられ、それらを $\alpha^1, \alpha^2, \dots, \alpha^m$ とする。それぞれに対応した平均一巡時間 $\tilde{\tau}^i$ が存在し、 Ω 空間には周期 $1/\tilde{\tau}^i$ の波動が存在する。その回路網による平均興奮確率は

$$\langle \tilde{S}(t) \rangle^i = e^{\alpha^i t} \langle \tilde{S}(0) \rangle \quad (7.5)$$

大貫 信

で与えられる。 e^{α^i} が1より大きい場合は、興奮確率は次第に増大し最大値1に達し、波動は消失する。このタイプの興奮を promoted excitation と呼ぶ。 e^{α^i} が1より小さい場合は、次第に減衰して0に達し、波動は消失する。これを diminishing excitation と呼ぶ。 e^{α^i} が1の場合は、初期値が保持され、波動が続く。regular excitation と呼ぶ。以上の取り扱いは、部分空間に限定したが、ある部分空間は他の部分空間と相互作用がある。この限定のメリットは次に議論される。

M細胞と直接間接に結合している全空間を Ω とする時、 Ω 空間に関して (7.1) と同様の式がなりたち

$$\langle S(t) \rangle = \sum_{\{\Omega\}} \frac{(\sum n_i)!}{\prod n_i!} \prod_{\Omega} g_i^{n_i} \langle S(0) \rangle \quad (7.6)$$

Ω のすべての部分空間を $\Omega^1, \Omega^2, \dots, \Omega^n$ とし、(7.6) の右辺の項の中で、 Ω^i に属する閉回路のみによってあらわされるものを Γ_{Ω^i} とする。 Γ_{Ω^i} の most probable part を I_{Ω^i} とする時、部分空間を生理的条件下で可能な限り連続にとれば、 $\langle S(t) \rangle$ は $\sum_i I_{\Omega^i}$ で近似される。この様に、 Ω 空間を互いに重なり合った部分空間 $\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_n$ からなる多重空間とみなすと各部分空間に対応した局在定常興奮が存在し、それを特徴づける周期が存在する。入力パターンは、細胞群に分布され固定されるとするよりも、むしろ回路群に分布されると考える方がホログラフィとしての解釈の参照波を無理に、すべての細胞に同期的に入る信号としてとらえる必要がなく便利である。部分空間の特性周波数を持つ波を参照波として加えることによって部分空間の共鳴興奮が得られる。その特性周波数を持つ部分空間は多重空間内に重なり合っ、到る処 local に分布している。参照波をかえることによって像を拡大することが出来る。

§ 8. 特異的応答

ニューロン群からなる空間を多重空間とみなすと、入力に応じて特異的に応答する空間が存在することが知られる。その簡単なモデルとしてある細胞Mを含む空間が、Mから出てMに帰還し、長さ $l, 2l, 3l, \dots, nl$ の回路から

なる部分空間 Ω_n を含むとし、均質で l 当りの伝達確率 g 、伝達時間が τ であるとする。

規格化条件 (7.4) は

$$\sum_{m=1}^n g^m e^{-m\alpha\tau} = 1. \quad (8.1)$$

$x = g e^{-\alpha\tau}$ について

$$x^{l+1} - 2x + 1 = 0 \quad (8.2)$$

がなりたち

$$y = x^{l+1}$$

$$y = 2x - 1$$

の交点の一つは $x=1$ で、他の一つを $a(n)$ とすると、平均興奮確率は

$$\langle \tilde{S}(t) \rangle = \left\{ \left(\frac{g}{a(n)} \right)^{\frac{t}{\tau}} + g^{\frac{t}{\tau}} \right\} \langle \tilde{S}(0) \rangle \quad (8.3)$$

となる。 $g < 1$ の場合を考える。

このシステムの出方には、十分時間が経過した時、次の3通りが考えられる。

$$g < a(n) \text{ の場合} \quad \langle \tilde{S} \rangle_{\text{出}} = 0$$

$$g = a(n) \text{ の場合} \quad \langle \tilde{S} \rangle_{\text{出}} = \langle \tilde{S}(0) \rangle$$

$$g > a(n) \text{ の場合} \quad \langle \tilde{S} \rangle_{\text{出}} = 1$$

$a(n)$ は n の減少函数であるから、 $g = a(l)$ となるような空間 Ω_l が存在し、regular excitation をする。この空間の特性周波数は (4.3) より、

$$\tilde{\tau}_l = \frac{1}{2} l(l+1) g\tau \quad (8.4)$$

となる。 Ω_l より大きい空間は、promoted excitation をし平均興奮確率は生理的最大限度 1 に達し波動は消滅する。 Ω_l より小さい空間では平均興奮確

率は次第に減少して0になり noise のみになる。

この例では入力に対し空間は波動を生ずるものだけでなく、興奮が最大に達する空間も存在する。もし Ω_ℓ が興奮するとそれより大きい空間に抑制が働らくよう抑制ニューロンを介して IPSP (抑制後シナプス電位) が発せられる機構になっていれば Ω_ℓ のみが興奮する。これは細胞間に特殊な結合のあるモデルであるが、前述の現象はもっと一般的な結合の場合にも議論される。その場合空間内に隣り合った細胞の伝達時間が τ になるよう、適当な細胞点を仮想的に設置することが出来る。そうして新たに番号付けられた細胞体からなる空間で i, j 間の伝達確率が g_{ij} , 伝達時間が τ であるとき, i, j 要素が g_{ij} であるようなマトリックスを g であらわす。ある点 M に関する多重空間について議論する。 g の M 行を \mathbf{m}' , M 列を \mathbf{m} とすると M 点に関する規格化条件 (7.4) は

$$\left\{ \begin{array}{c} \mathbf{m} \mathbf{m}' e^{-2\alpha\tau} \\ \mathbf{E} - g e^{-\alpha\tau} \end{array} \right\}_{MM} = 1 \quad (8.5)$$

で与えられる。但し \mathbf{E} は単位行列, サフィックス MM は MM 要素を意味する。

Secular equation

$$|\lambda^2 \mathbf{E} - \lambda g - \mathbf{m} \mathbf{m}' \mathbf{I}| = 0 \quad (8.6)$$

の根の一つを λ^i とすると平均興奮確率は

$$\langle \tilde{S}^i(t) \rangle = (\lambda^i)^{t/\tau} \langle \tilde{S}^i(0) \rangle \quad (8.7)$$

で与えられる。但し \mathbf{I} は i, i 要素が 1 で他がすべて 0 のマトリックスを意味する。この興奮波の周期は

$$\tilde{\tau}^i = \frac{\tau}{\lambda_i} \left\{ \frac{\mathbf{m} \mathbf{m}' (g - 2\lambda^i \mathbf{E})}{(\lambda^i \mathbf{E} - g)^2} \right\}_{MM} \quad (8.8)$$

となる。

§ 9. 脳波の移行

前節の議論から帰結する興味深い現象として脳波の移行の問題がある。前節の簡単な例をとれば、生理的活性の低下に伴い伝達確率が減少したとすれば、regular excitation の存在する領域は次第に大きくなる。それに伴ない (5.4) から興奮モードの周期は次第に大きくなる。このことによって覚醒から睡眠への移行に伴い脳波がゆるやかな波になっていくことが説明される。覚醒から睡眠への移行は localized excitation から global excitation への移行を伴うことが知られる。覚醒時の意識作用が活性の高い状態で、且、promoted excitation の抑制の働いた多数の局所的興奮からなる状態であるならば、睡眠（逆説睡眠は除いて）は活性の低い、抑制の少ない非局所的興奮状態と考えることが出来よう。では活性の低下は何によって持たられるか？考えられる原因の一つは加えられる noise の変化に伴って閾値や伝達確率が減少することである。或いはシナプス間伝達物質などに対する直接的な生理的減少が加えられるのかも知れない。この点に関して現在は何も云えない。

ニューロン群の Collective motion によって脳波を説明しようとの試みは Farley⁹⁾ の実験に見られる。各細胞体を結合する line はその伝達率に於てはすべて等しいが、伝達の時間遅れが確率分布するとして計算機実験が行なわれた。その結果、近い細胞体間のみ結合がある場合は、引き続いた二つの適当な timing の刺激によって、巡回する周期的波動が生じ、遠い細胞体間に結合がある場合は一つの刺激で恒久的発火を引起すことが出来るが、計算機実験の時間内では周期性は見られなかった。前者は β 波に、後者は α 波に似ている。前者で二つの適当な timing の入力が必要な理由は、始めの入力による発火が他へ伝わる後に、細胞体の不応期の存在によって、発火不能領域の帯が従うからであり、その帯の間をぬって発火が伝わる。二番目に加えられる入力は、始めの入力による発火不能領域及びそれ自身による不能領域の間をぬって伝わる為に、伝達経路が時間的に変動する流動回路網が生じ、それが適当な形の時にのみ恒久的発火源が自己再生される為である。Farley は閾値のあるシステムで、閾値が random に変動することを、単位長さ当りの伝達確率の確率分布としてモデル化した。その場合従う方程式を結合定数が確率分布する Caianiello eq. としたが、ここでの解析では

大貫 信

(神経力学 (I), § 3.) 線型な確率方程式に従うとせねばならない点で異なり、一つの入力でも周期性が見られるという異った結果をもたらす。閾値を random に変動させ、且 Caianiello eq. を用いる場合は、ここでの解析が適用され、その場合恒久的発火に必要な加える二つの入力の timing も random に変動する。その平均は一つのモードとみなし得るから、入力モードに対するシステムの特異的応答が予想される。そのような場合についての計算機実験が望まれる。確率分布を導入しない固定的な回路網での同様の実験¹⁰⁾は Farley の場合と似た結果を持たらした。noise のないシステムの応答は加える入力の timing により異なってくることが知られ、timing の違いによる網状神経系の活動の違いが調べられている。¹¹⁾ 脳に於ては常に noise が存在すると見なす方が自然で、noise による閾値の変動を導入した実験は入力刺激を各細胞に与える駆動ニューロンの存在する環状神経系で、noise の存在による伝達の非対称性 ($e_{ij} \neq a_{ji}$) によって各細胞の興奮に位相差が生ずるという実験が Suzuki¹²⁾らによって行なわれている。この例に見られるように、ここでの解析は興奮モードの特異性を議論したが、位相差による興奮の時間的ずれも運動制御系では特に大切になってくる。

(未 完)

文 献

- 1) 田村 博：神経回路網の数学的モデル，「神経の生物物理」 生物物理学講座，日本生物物理学会編，吉岡書店，1966
- 2) G. G. Furman：Kybernetik, BAND 2, 1963 ~ 65
- 3) D. H. Hubel and T. H. Wiesel：J. Physiol., 148(1959), 574
" " " " : J. Physiol., 160(1962), 106
- 4) J. C. Eccles：Neurophysiological Basis of Mind, Oxford University Press (1953)
- 5) W. Penfield：The brain and human behavior, ed. H. C. Solomon, S. Cobb, W. Penfield, William & Wilkins, Baltimore 1958

- 6) J. Z. Young: A model of the brain, Clarendon Press, Oxford 1964
- 7) 例えば, W. J. ゴードン (大鹿 譲, 金野正訳)
「シネクティックス」 ラティス (丸善), 1964
- 8) K. H. Pribram: Scientific American, (1969. 01) 73
- 9) B. G. Farley: Self-Organizing Systems, ed. M. C. Yovits et al., Spartan, 1962
B. G. Farley: Neural Theory and Modeling, proceedings of the 1962 Ojai symposium, ed. R. F. Reiss, Stanford university press, 1964
- 10) 佐藤俊輔: 電気通信学会非直線理論研究会資料 (1964)
- 11) L. G. Fehmi et al: Kybernetik 35 (1967) 240
- 12) 鈴木良次, 末松辰美, 勝野生子: 第8回 SICE 学術講演会資料 (1969)