

TR-A-0017

コネクショニストモデルと認知心理学

乾 敏郎

Toshio Inui

1987. 12. 9

A T R 視聴覚機構研究所

コネクショニストモデルと認知心理学

A T R 視聴覚機構研究所

乾 敏 郎

目 次

1. 単語認知モデル

1-1. Mortonの Logogenモデル

1-2. Rumelhart と Siple (1974)の Sophisticated Guessing Model

1-3. Adams の相互促進モデル

1-4. McClellandとRumelhart (1981)のInteractive Activation Model

1-5. McClellandのCID

2. 記憶のモデル

2-1. Raaijmakers と Shiffrinのモデル — 連想記憶と再生・再認 —

2-2. McClellandとRumelhart (1985)の分布型記憶モデル

2-3. Waltz と Pollack (1985)のモデル

補 遺

単純パーセプトロン

Widrow (1963) の Adaline

Rumelhart ら(1986)の Back-propagation

1 単語認知モデル

最近の興味ある認知のネットワークモデルは、主として2つの研究領域から生まれた。一つは、記憶研究であり、もう一つは、単語認知の研究である。単語認知研究の歴史は古く、現在膨大なデータが蓄積されている。本章では、研究の一端を紹介し、どのようにしてネットワークモデルが開発されてきたのかを探ることにする。

まず、単語を瞬間的に提示したときの認知閾（認知に要する提示時間）は、単語の使用頻度の対数と直線関係にあり、使用頻度が高いほど短い提示時間で認知可能であることが知られていた（Solomon と Howes, 1951）。また単語を聴覚的に提示した場合、使用頻度が高いほどSN比が低くても認知可能である（Brown と Rubenstein, 1961）。これらの効果は word frequency effect と呼ばれている。

また、Millerら（1951）は、1000個の単音節語（monosyllable）の中から選択肢を選び、あらかじめ被験者に知らせておき、聴覚的に単語をさまざまなSN比で提示し、正答率を調べた。その結果、選択肢の数とともに正答率が低下することが明らかにされた。

また、Tulvingら（1964）は、9単語から成る文を作り、最後の単語の認知実験を行った。最後の単語は、いずれも8文字3音節から成る使用頻度の高いものであった。彼らは文を構成する8単語あるいは後半の4単語をあらかじめ示し、最後の単語の提示時間と正答率の関係を調べた。その結果、先に多くの文脈を与えるほど高い正答率が得られた。これらの効果は context effect と呼ばれている。

Morton（1969）は、Luceの選択公理に基づく数理モデルを考案し、これらのデータを定量的に解釈することに成功した。彼のモデルは、単語を処理する機能単位を想定しており、logogen と呼ばれている。logogen の特徴は、単語の使用頻度や文脈の効果が対数的に加えられ、これによってlogogen の閾値が低下するというものである（図1）。彼の研究で重要な点は、上記の効果がlogogen の感度（sensitivity）によるものではなく、閾値（threshold）に影響することを明らかにしたことである。

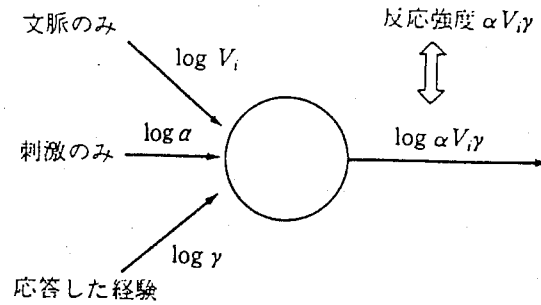


図1 logogen モデル (刺激提示前の効果である $\log V_i$ や $\log \gamma$ が、線形に加重されバイアスとなる。刺激が提示されればさらに $\log \alpha$ が加算される。単語の使用頻度は $\log \alpha$ にはきかず、 $\log \gamma$ にきいている。一般に criterion bias model と呼ばれるものに属する)

瞬間視の条件では、たとえば4文字から成る単語 (W) は、4文字をでたらめに並べた非単語 (NW) と比べて有意に高い同定率が得られる。これを単語優位効果 (WSE) と呼ぶ。Reicher (1969) は、WSE に、推測要因 (4文字中、左の3文字を読めば最後の文字が推測できる) と忘却要因 (NWの構成文字は無関連なので忘却しやすい) を除くために、次のような実験を行った (図2)。

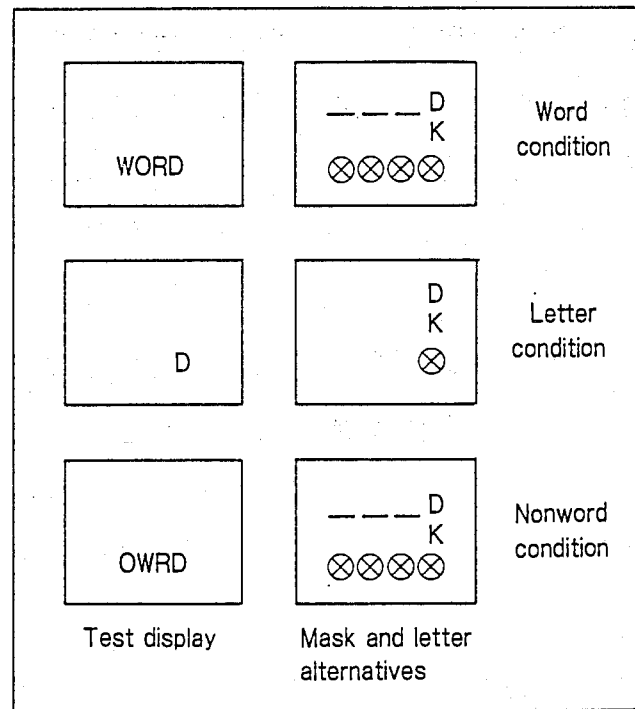


図2 Reicher (1969) の実験

たとえば、W刺激として“WORD”を瞬間提示し、最後の文字だけを“D”か“K”かと強制選択させる。この条件では、最初のWORがわかっていても最後の文字は推測できない。しかも1文字だけを問うので忘却要因は考慮しなくてもよい。彼は、1文字だけ（たとえばD）を提示して強制選択させる（たとえばDまたはK）条件（L）も設けた。その結果、正答率は $W > L > NW$ の順であった。

したがって、推測要因、忘却要因を除外してもWSEは得られたのである。しかも単語中の文字の方が単独文字よりも高い正答率が得られた。これを単語文字現象（WLP）と呼ぶ。このことは、単語という一種の文脈に埋め込まれることによって文字の検出率が上昇することを示すものである。これも広い意味での context effectである。

さらに70年代に入り、発音可能なNW（擬似単語と呼ぶ）の文字は発音できないNWの文字より高い検出率が得られること、および擬似単語の文字は単独文字より高い検出率が得られることが明らかにされた。また、単語全体の形をくずしてもWSEやWLPが得られた。たとえば、単語を構成する文字の字体を文字ごとに変えたり、大文字と小文字を混合して単語を作っても効果は現れたのである。

また、Wに比べてNWや擬似単語では文字の位置情報が低いことが正答率の差のひとつの原因になっていることも判明した（たとえば左端の文字と左から2番目の文字が入れかわって報告される）。さらに、選択肢をPとRのように視覚的に類似している場合と、MとRのように類似していない場合を比較した結果（PEAL, REAL, MEAL）、正答率に差がないことから、特徴抽出が充分なされた後の効果であるといえる。

以上の結果はすべて刺激パターンが提示された後ただちにマスクパターンを提示する条件で得られたものである。通常マスクは×や\$といったパターンが用いられ、各文字が提示された位置に提示される。もしマスクパターンを使わずに刺激文字をきわめて短い時間提示した場合（energy-reduction条件）ではWSEもWLPも得られない。

以下の節では、単語認知の研究とモデルの変遷を少し詳しく見てみよう。

1-1 Mortonの Logogenモデル

最初に単語の単位をはっきりと想定したモデルが、1968年ケンブリッジのJohn Morton によって発表された。彼のモデルは言語の反応をする多数の単語単位である logogen から成り立っている。図3のように単語が提示されるとそれに対応する logogen が活性化される。また文脈によっても同様に活性化される。logogen は閾素子であり、閾値を越えるとある確率で出力を出す。閾値は、単語の使用頻度が高いものほど低い値に設定される。

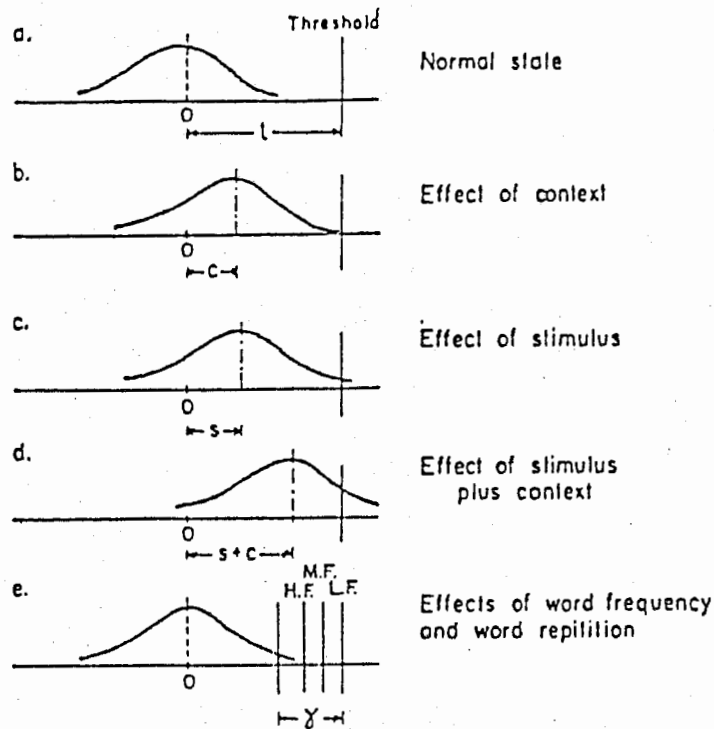


図3 logogen の活性水準

さて、被験者に単語が提示されたときの反応確率は Luce の選択公理 (choice axiom) によって決まると考えるとさまざまな実験データを定量的に説明できる。まず Brownと Rubenstein (1961) の実験を紹介する。彼らは、6500個の単音節単語を使用頻度に応じて、500 個ずつ13グループに分け、この内の1300個 (各グループ 100個) を視覚的に提示し被験者に答えさせた。ここで、各グループに属する単語の logogen の閾値 (反応バイアスと等価) が V_1, V_2, \dots, V_n であるとし (n はグループ数)、各グループに属する単語の選択肢数を $M (=500)$ とする。

表1 反 応 強 度

Stimu- lus class	Correct re- sponses	Incorrect responses of interval			Total of strengths
		1	i	n	
1	$\alpha_1 V_1$	$(M-1)V_1$	MV_i	MV_n	T_1
i	$\alpha_i V_i$	MV_1	$(M-1)V_i$	MV_n	T_i
n	$\alpha_n V_n$	MV_1	MV_i	$(M-1)V_n$	T_n

また、i 番目に属する単語が提示されたとき logogen が活性化する強さを α_i とする。このとき反応強度は表1のようになる。すると Luce の選択公理によって、i 番目のグループに属する単語の正答率 c_i は、

$$c_i = \frac{\alpha_i V_i}{T_i}$$

また、i 番目のグループに属する単語が提示されたとき、誤って i 番目のグループに属する他の単語を答える割合 e_i は、

$$e_i = \frac{(M-1) V_i}{T_i}$$

となる。両式より、

$$c_i = \frac{\alpha_i}{M-1} e_i$$

なる関係が導かれる。ここで、もし刺激によって活性化される強さがその使用頻度によらないなら、 α_i は一定となり c_i と e_i は線形関係になる。事実、BrownとRubenstein (1961) の結果は直線関係になるのである (図4)。

次に単音節単語の選択肢数と正答率の関係を聴覚提示実験でしらべたMillerら (1951) の場合をモデルで検討しよう。

まず、簡単化のため使用頻度による差はないものとしよう。この場合表2より、刺激単独提示条件での正答率 P_s は、選択肢数を n として

$$P_s = \alpha / [\alpha + (n-1)]$$

となる。よって、

$$\text{logit } P_s = \text{log } \alpha - \text{log}(n-1)$$

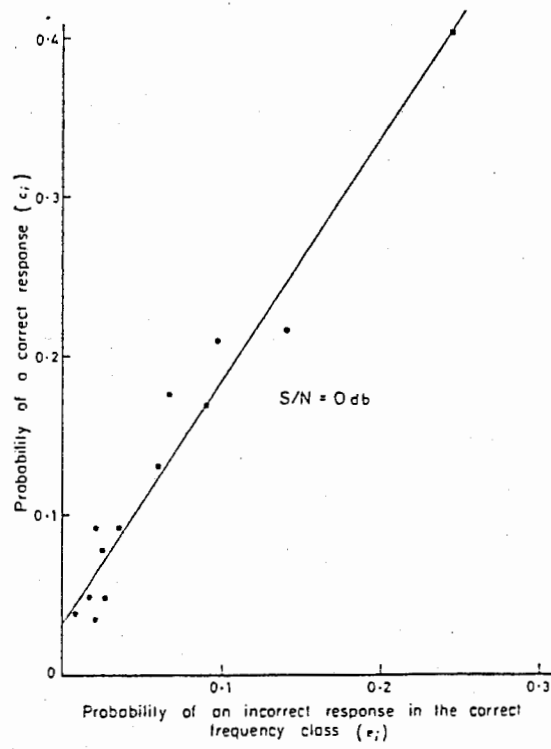


図4 Brown と Rubinstein (1961) の実験結果

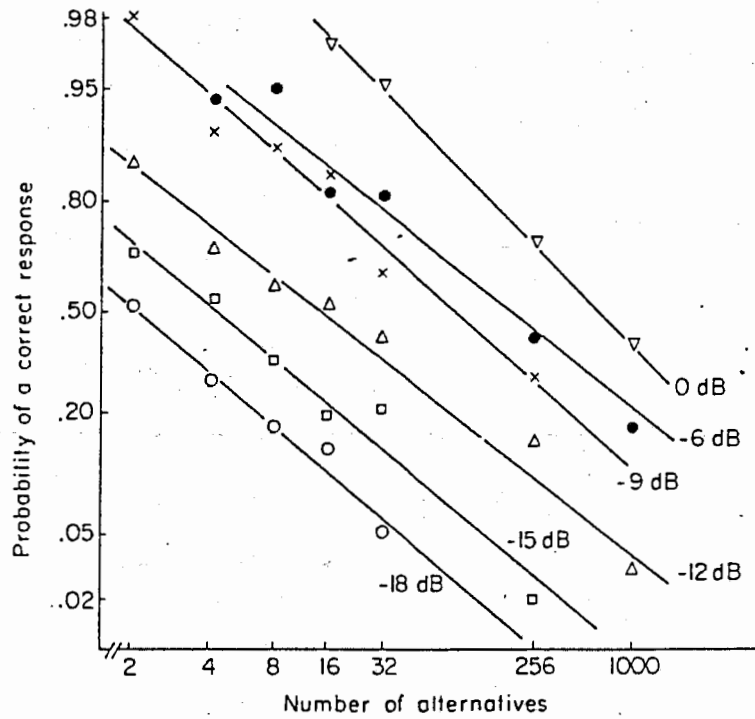


図5 Millerら(1951)の実験結果

表2 反応強度

	Response						Total of response strengths
	1	2	-	i	-	n	
Context alone	V_1	V_2	-	V_i	-	V_n	$T = \sum_{i=1}^n V_i$
Stimulus alone	1	1	-	α	-	1	$\alpha + (n-1)$
Stimulus and context	V_1	V_2	-	αV_i	-	V_n	$T + (\alpha - 1) V_i$

ここに $\text{logit } P_{sc} = \log[P_{sc} / (1 - P_{sc})]$ である。

そこで Miller ら (1951) のデータをプロットしなおすと、かなりの精度でこの関係が確められた (図5)。

Tulving ら (1964) は、表3に示すようにあらかじめ4語ないし8語の文脈を与えた後で使用頻度がきわめて高い8文字3音節単語を短時間提示し、答えさせる実験を行なった。モデルによれば文脈を与えた場合の刺激に対する正答率 P_{sc} は、

$$P_{sc} = \alpha V_i / [\sum_j V_j + (\alpha - 1) V_i]$$

となり、文脈だけによって刺激が答えられる割合 P_c は、

$$P_c = V_i / \sum_j V_j$$

となる。よって、

$$P_{sc} = \alpha P_c / [(1 - P_c) + \alpha P_c]$$

となり、

$$\text{logit } P_{sc} = \text{logit } P_{sc} + \text{logit } P_c + \text{定数}$$

となる。Tulving ら (1964) のデータを図6のようにプロットしなおすことにより、モデルの予測が確められた。このように、Mortonのlogogenモデルは当時知られていたデータをかなり高い精度で説明したが、このモデルには次の3つの重要な仮定が置かれている。

- (1) 単語が閾素子で表現できる。
- (2) 活性化の強さ (感度) は使用頻度によらない。
- (3) 使用頻度の高いものほど閾値が低い。

彼の研究で重要な点は、上記の効果が logogen の感度 (sensitivity) によるものではなく、閾値 (threshold) に影響することを明らかにしたことである。彼のモデルは一般に *criterion bias model* と呼ばれるものに属する。

表3 Tulving ら(1964)の用いた文脈と単語

Countries in the United Nations form a military *alliance*
 The political leader was challenged by a dangerous *opponent*
 A voter in municipal elections must be a local *resident*
 The huge slum was filled with dirt and *disorder*
 The ten Canadian provinces united to form a *dominion*
 The light bulb was discovered by an American *inventor*
 June sixth was the date of the allied *invasion*
 The talented young violinist eventually became a professional *musician*
 Occupationally his lack of education was a serious *obstacle*
 He was sentenced to hang as a convicted *murderer*
 A deadly type of bomb is made of *hydrogen*
 Her closest relative was appointed as her legal *guardian*
 The hermit retired to a place of lonely *solitude*
 Many ethnic groups were represented at the folk *festival*
 Honesty and courage are qualities which merit wholehearted *approval*
 The first of the seven deadly sins is *jealousy*
 Baseball games are covered by the newspaper's sports *reporter*
 He built his new house in a desirable *location*

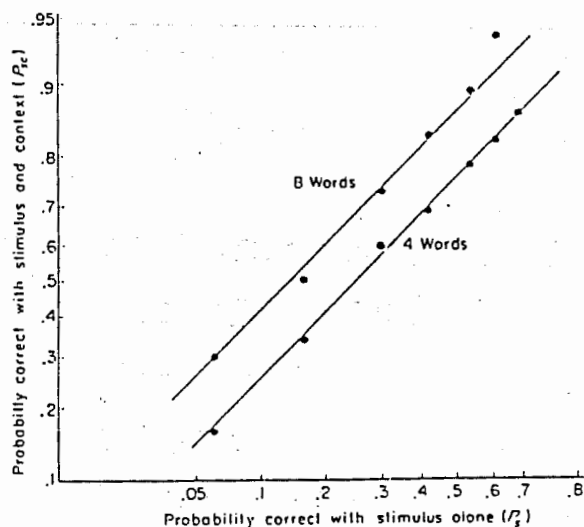


図6 Tulving ら(1964)の実験結果

1-2 Rumelhart と Siple (1974) の Sophisticated guessing model

Rumelhart と Siple (1974) は、特徴抽出過程と決定過程から成る数理モデルを考案し、種々の実験が正確にシミュレートできることを示した。図7に示されたような文字から成る3文字綴りが用いられた。彼らのモデルでは、3文字綴りが提示されたとき、まず、特徴抽出過程ではその一部分の特徴が抽出される。次にその特徴と矛盾しない3文字綴りの候補が上げられ、それぞれの3文字綴りがその先験的確率(期待)にしたがって反応するというものである。このようなモデルは、単なる guessing model と区別され、Sophisticated guessing model と呼ばれる。特徴抽出過程のより詳しい解説が乾(1983)にある。

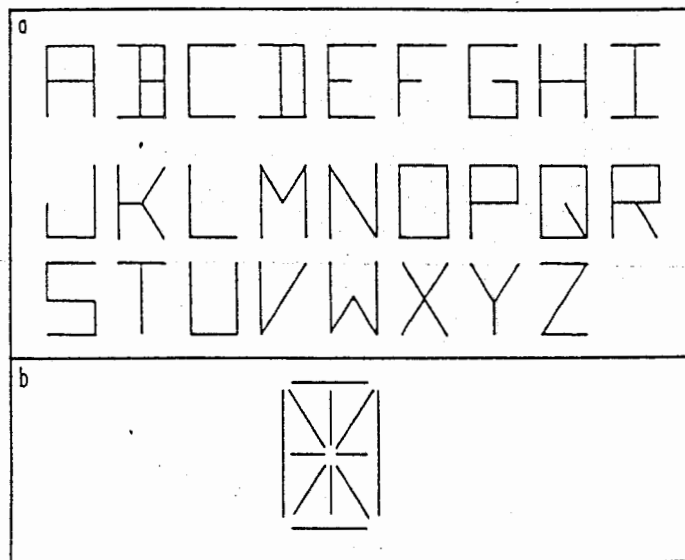


図7 Rumelhart と Siple(1974) の実験
で用いられた文字

ここで、 S_1 を3文字刺激、 F を抽出された特徴の集合とすれば、3文字綴りの候補集合 $C(F)$ は、Rumelhart (1971) と同様に、

$$C(F) = \{r_1 \mid F \subseteq S_1 \text{ \& } N(S_1) - N(F) \leq c\}$$

と書ける。ここに、 $N(S_1)$ 、 $N(F)$ はそれぞれ刺激に含まれる機能的特徴の数、抽出された特徴の数であり、 c は定数(整数)である。また、反応 r_1 は Bayes 反応決定則に従って選択される。

$$P(r_i) = \begin{cases} P(S_i) & C(F) = \phi \\ \frac{P(F|S_i)P(S_i)}{\sum_k P(F|S_k)P(S_k)} & r_i \in C(F) \\ 0 & r_i \notin C(F) \text{ \& } C(F) \neq \phi \end{cases}$$

ここに、 $P(S_i)$ の被験者の S_i が提示されたという主観的確率である。モデルのパラメータは感覚パラメータである α と、判断基準 c ならびにすべての刺激 S_i に対する被験者の期待 $P(S_i)$ である。このパラメータの中で、決定するのが最もむずかしいのは $P(S_i)$ である。3文字綴りが理解され得るレベルは少なくとも3つ存在する。まず第1に、単語であると理解されるものであり、2番目には、シラブルもしくはシラブルの列として理解されるものである。第3は、無意味な文字列として理解されるものである。彼らは以下に示すような単純な仮定を採用している。すなわち、 $P(S_i)$ を刺激が単語もしくはシラブルもしくはランダムな文字列であるとする主観確率の重みづけられた平均値であると仮定した。

$$P(S_i) = f_w(S_i) \cdot P(\text{WORD}) + f_s(S_i) \cdot P(\text{SYL}) + f_r(S_i) \cdot P(\text{LETTER})$$

ここに、 $f_w(S_i)$ は、刺激 S_i が単語であるという仮定のもとでの S_i の主観確率である。 $P(\text{WORD})$ は、刺激の単語としての性質に与えられる重みの度合いを示している。彼らは主観確率が綴りの客観的な生起頻度の関数になっていると仮定し、

$$f_w(S_i) = \frac{\log [aP(S_i | w) + 1]}{\sum \log [aP(S_i | w) + 1]}$$

とした。 $f_r(S_i)$ は、 $1/26^3$ とした。

Rumelhart と Siple (1974) のデータは熟知性の高い単語ほど正確に知覚できることを示しており、モデルでは、決定過程で期待の効果 [$f_w(S_i)$] がきくようになっている。Rumelhart と Siple (1974) のモデルでは、反応確率 $P(r_i)$ が、

$$\begin{aligned}
P(r_1) &= \frac{P(F|S_1)P(S_1)}{\sum_j P(F|S_j)P(S_j)} \\
&= P(\text{WORD}) \frac{P(F|S_1)fw(S_1)}{\sum_j P(F|S_j)P(S_j)} \\
&\quad + P(\text{SYL}) \frac{P(F|S_1)fs(S_1)}{\sum_j P(F|S_j)P(S_j)} \\
&\quad + P(\text{LETTER}) \frac{P(F|S_1)fr(S_1)}{\sum_j P(F|S_j)P(S_j)}
\end{aligned}$$

とされている。すなわち、刺激 S_1 が提示されると3つのレベルで照合がなされるのである。もし、単語が提示されれば、どのレベルでも出力があるが、非単語が提示されれば、単語レベルの出力は出ない。したがって、

$$P(\text{単語}) > P(\text{非単語})$$

となり、単語優位効果 (word superiority effect) が得られる。詳細は乾 (1983) を参照されたい。

1-3 Adams の相互促進 (mutual facilitation) モデル

Adams (1979) は単語優位効果について多くの実験を行ない、その後の研究に大きな影響を与えた相互促進モデルを提案した。彼女の実験では、4文字を5ミリ秒間提示し、種々の SOA (Stimulus Onset Asynchrony) をおいて文字の断片から成るパターンマスクを提示した。

このとき、被験者に4文字を順序どおり答えさせた。図8は、3種の文字列 (単語、擬似単語、非単語) 別に、1つの文字列でも完全に答えられた SOA を基準に正答率を示したものである。したがって実際の SOA とは異なる。図からまずわかることは、1つの文字列が完全に答えられる SOA で、どの型の文字列も「有意」に正答率が上昇していることである。それ以前ではどの型にも有意な差は見られない。この結果から Adams は、型によって感度が変わらないと結論した。また、各 SOA

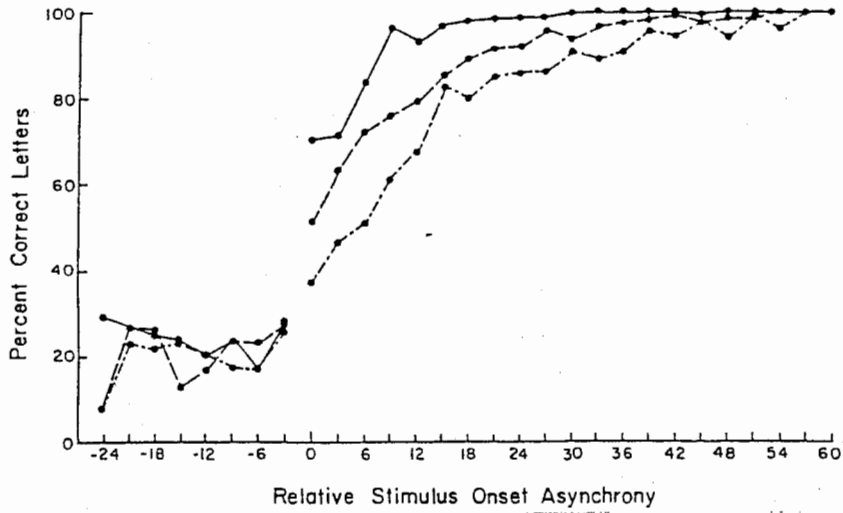


図8 Adams (1979)の実験結果
 実線、破線、一点鎖線はそれぞれ単語、
 擬似単語、非単語のデータを示す。

で文字ごとに（位置は無視して）正答率をとり、図8の正答率（4文字を一まとめにした正答率）と比較したのが図9である。単語の場合は、

$$P_t(\text{Quadrigram}) > P_t(\text{Letter})^4$$

となり、単語の場合は4文字が独立に処理されているのではないことを示している。

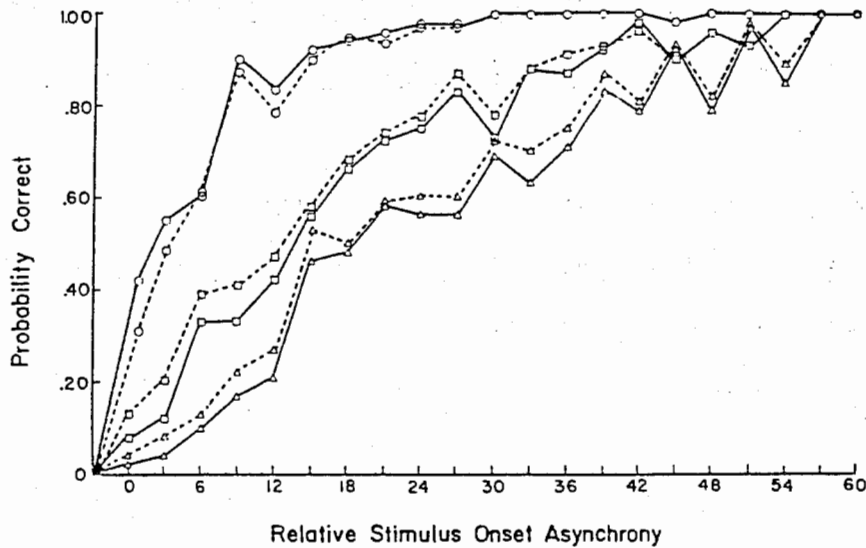


図9 $P_t(\text{Quadrigram})$ と $P_t(\text{Letter})^4$ が
 それぞれ実線と破線で示されている。

これは文字の位置が単語の場合より正確に処理されているからである。図10のように字体を変えても全体に正答率が低下するだけで以上の関係はかわらなかった。これは、単語全体の形などの大域的情報がこの現象の基本的要因ではないことを示している。

back

su_cE

gTsi

図10 単語、擬似単語、非単語の例

また、次の実験では文字を答えさせずに、「単語」「非単語」「分からない」だけを答えさせた。さらにこの実験では正答なら1セントを被験者に払い、誤答なら5セントの罰金を支払わせた。このような状況では、不十分な手がかりによる推測はなくなるだけでなく、部分情報だけで非単語であることが分かるのでむしろ非単語優位性が見られるはずである。だが結果は依然として単語優位効果が生じたのである。これらの結果は、

- (1) 単語優位効果が、前節で述べた sophisticated guessing modelによって説明できず、むしろ criterion bias model によってよく説明できる。
- (2) 単語優位効果が知覚の現象である。
- (3) 単語に対する文字の位置が他と比べて正確に処理されていることが単語優位効果の一因である

ことを示している。

しかし、criterion bias modelでは、

単語 > 擬似単語 > 非単語

という関係を説明できない。そこで、Adams は次のように考えた。

- (i) 4つの文字はほぼ独立に処理され、形態情報、位置情報とも徐々に抽出される。
- (ii) 同時に生起する頻度の高い文字対は、互いに促進効果が働き活動水準を上昇させる。

この2つの仮定から、

単語、擬似単語 > 非単語

が説明できる。しかし

単語 > 擬似単語

を説明するためには

- (iii) 単語の処理単位があり、これと構成文字との間に両方向性の促進作用 (positive feedback) がある

ことをさらに仮定する必要がある。このように、Adams (1979) は、文字間の並列処理、相互促進作用、単語-文字間の相互促進作用というモデルを考えたのである。

1-4 McClellandとRumelhart (1981) のInteractive Activation Model

McClellandとRumelhart (1981) は、階層的ネットワークモデルを提案し、WSE, WLPを定量的に説明することに成功した。その特徴は次のとおりである。

- (1) 特徴検出器、文字検出器、単語検出器の3つの水準を仮定する。(図11, 図12)
- (2) 検出器は閾値をもたず、興奮性および抑制性のシナプスで結合している。したがって、各階層の処理は並列に進行する(文字検出器の活動レベルが少し上昇すると、それから興奮性の入力を受ける単語検出器の活動レベルも少し上昇する)。
- (3) 単語検出器間には強い相互抑制が存在する。

- (4) 単語検出器から文字検出器に逆方性の興奮性シナプスが存在する (positive feedback)。
- (5) 単語検出器の活性化レベルの基準値 (resting level) は単語の使用頻度の高いものほど低い値に設定している。
- (6) 特徴検出器から文字検出器には、強い抑制が存在する (たとえば斜め線の検出器は文字“F”の検出器に強い抑制をかけている)。

シミュレーションで用いられたパラメータの値を表4に示す。まず上記の(4)の条件からWSEが生ずる。図13はシミュレーションの結果で、条件(6)によってマスクパターンが提示されると、ただちに文字検出器の出力は低下する。しかし、READの中のEは単語検出器からのfeedbackがかかり、単独のEよりも高い活動度になっている。また、擬似単語の効果は次のように説明される。

表4のように、文字→単語の抑制は比較的弱いので正確に一致しない単語 (neighbourと呼ぶ) も活性化される。たとえば、擬似単語 MAVE を考えよう。このとき先頭の文字Mだけが異なる単語には HAVE, GAVE, SAVE などがあり、Mに対する enemy と呼ばれる。また先頭の文字がMでありかつMAVEと3文字共通のものは MALE, MAKE などでありMに対する friend と呼ばれる。

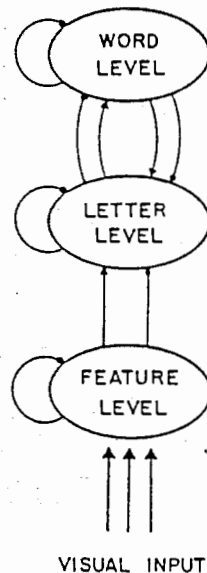


図11 McClellandとRumelhart(1981)のモデル

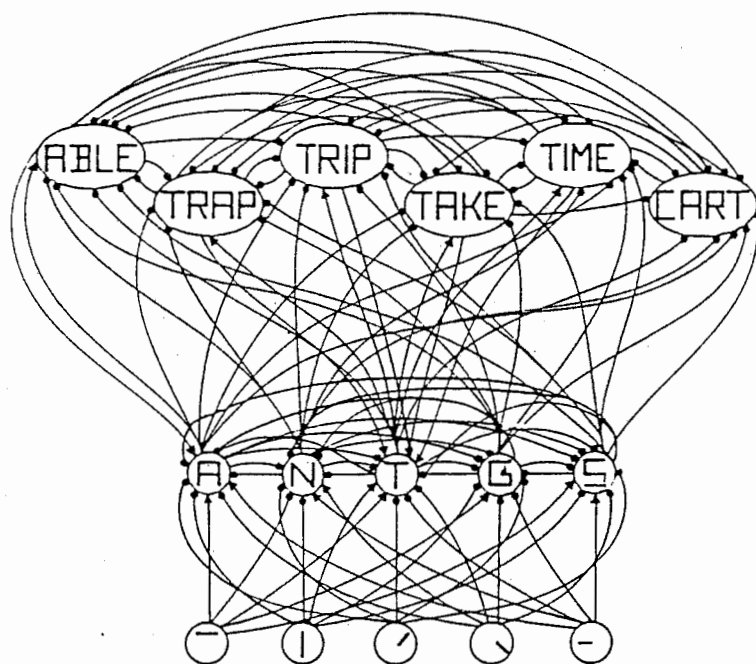


図12 単語の左端の文字に対するネットワークの例。
 (矢印が興奮性、丸印が抑制性の結合を示す。
 たとえば文字Tの検出器にはTRAP, TRIP, TAKE, TIMEからのpositive feedbackがある)

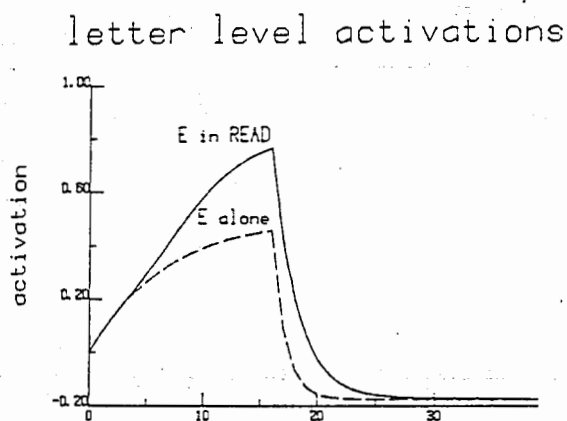


図13 READを提示したときの文字Eの検出器の活性化度とEを単独に提示したときの文字Eの検出器の活性化度(時刻15でマスクが提示されている)

表4 シミュレーションに用いられたパラメータ値

Parameter	Value
Feature-letter excitation	.005
Feature-letter inhibition	.15
Letter-word excitation	.07
Letter-word inhibition	.04
Word-word inhibition	.21
Letter-letter inhibition	0
Word-letter excitation	.30

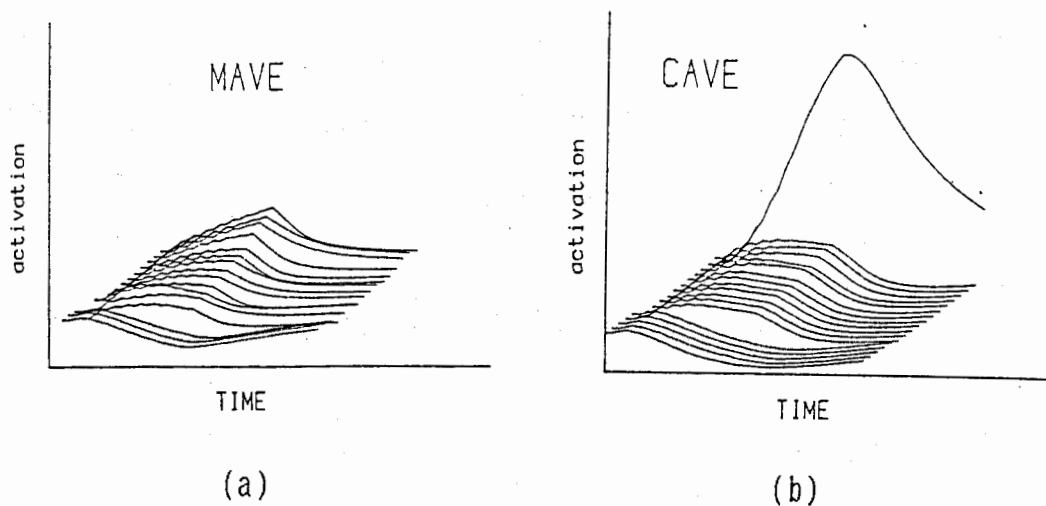


図14

M A V Eを提示したとき、最初16個の単語検出器が活性化する（図14a）。これらはどれも同程度に活性化されるので、M以外の文字検出器にも positive feedback がかかる。しかし、M以外の文字検出器には特徴検出器から強い抑制がかかるので、最終的にはM-node だけが活性化する。次に単語C A V Eを提示したとしよう。このときは、単語C A V Eの検出器が強く活性化され、相互抑制の結果neighbour は押えられてしまう（図14 b）。単語検出器間の相互作用は単語レベルの全体の活動

度を一定にする傾向に働く。その結果、単語と類似単語の文字に及ぼす効果には差がなくなってしまうのである。

ところで、Aderman と Smith(1971) や Carrら(1978)によれば、擬似単語の効果は、実験中に擬似単語が出ると被験者が知っているときにのみ生ずる。Rumelhart と McClelland (1981) は、文字→単語の抑制を強くすると擬似単語の効果は起こりにくくなることから、状況に応じて被験者がこの抑制パラメータの値を変えているのではないかと考えている。

McClelland と Rumelhart (1981) のモデルは、本質的に logogenモデルと同じ考えに立つものといえる。また Adams (1979)のモデルとの相違点は、文字間の相互促進効果がないことである。

なお、反応確率の算出は Luce の選択公理に従って行なわれた。ノードの出力の一種の時間加重をとる。すなわち、ノードの活動を $a_i(t)$ とすれば、

$$a_i(t) = \int_{-\infty}^t a_i(x) e^{-(t-x)r} dx$$

このとき Luce の選択公理により、反応強度は

$$S_i(t) = e^{\mu a_i(t)}$$

となる。従って、提示時間が t のとき、 R_i を選択する確率は

$$P(R_i, t) = \frac{S_i(t)}{\sum_{j \in L} S_j(t)}$$

ここに L は活動しているノードの集合である。

1-5 McClellandのCID

前節で述べたモデルは非常にうまくWSEやWLPを説明することが可能であった。しかし、2つの単語を同時に処理するような場合、モデルをどのように拡張すればよいのだろうか。McClelland(1985)はCID (Connection Information Distributor)と呼ぶモデルを提案している。CIDはprogrammable moduleと呼ばれる低レベルのネットワークとcentral knowledge storeから構成されている。

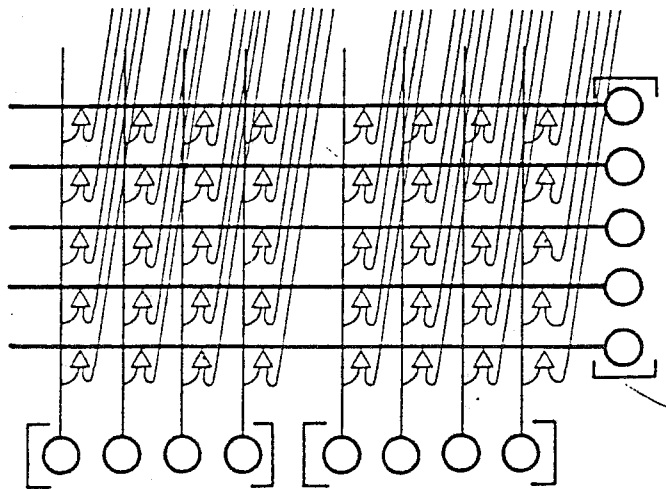


図15 プログラマブルモジュールの配線図

programmable networkを図15に示す。図は簡単のため、2文字の単語のみを考えている。図15の下に記されたノードは、左側が最初の文字に対応するノードを、右側が2番目の文字に対応するノードを示している。図15の右側の5つのノードは単語ノードである。いま、IN, IS, NO, ON, SOを考えよう。このとき、左側の文字ノードはI, N, O, Sに対応し、右側の文字ノードはN, S, Oに対応する。INノードには左のIノードと右のNノードから入力を受ける。しかし、図に示されたようにプログラマブルモジュールには外部からの信号が入力されており、これがgate信号になっており、外部信号があったときのみI, Nのノードからの信号がINノードに伝わり、単語INが活性化されるようになっている。

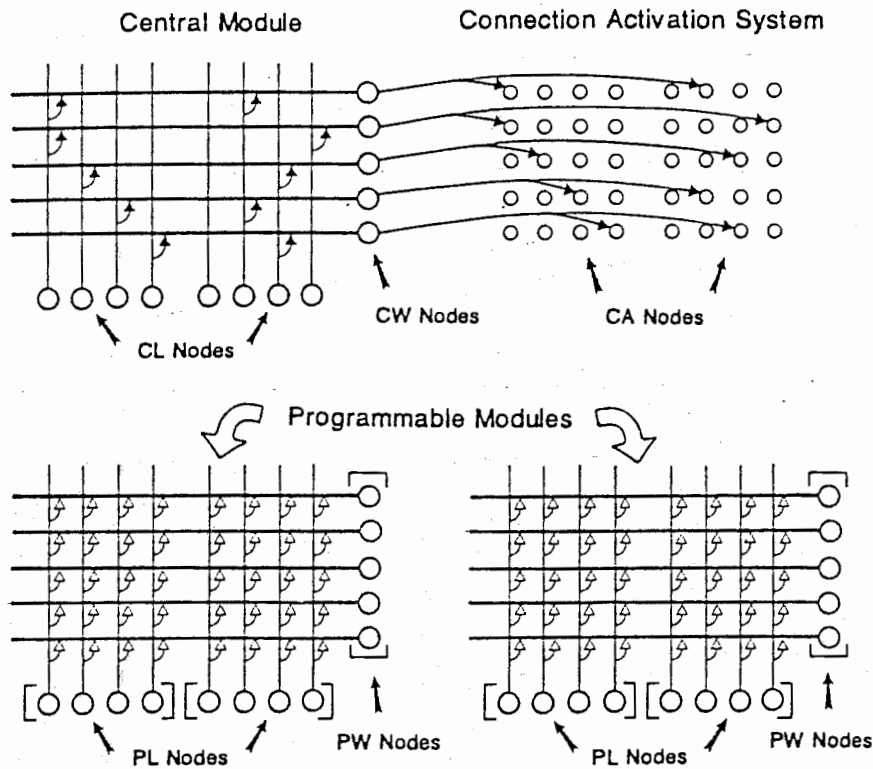


図16 CID の subsystem

2つの単語を同時に提示したときには、図16のように2つのプログラマブルモジュールが同時に働く。central knowledge store は、図のように、中枢モジュールと結合活性化システムから構成される。中枢モジュールはプログラマブルモジュールと同じ機構を持っている。しかし、CLノードもCWノードもPLノードやPWノードと異なり、いずれに提示された文字や単語にも応答するのである。CAノードはCWノードから信号を受けとり、各プログラマブルモジュールへ外部信号を送る(図17)。

CAノードはCWノードに含まれる文字に対応する信号を2つのプログラマブルモジュールに送り、PLノードの信号のゲートとして働く。McClellandとRumelhart (1981)のモデルと同様、PWノード間には相互抑制が働く。さらにPLノード間にも相互抑制が働く。PW間の抑制結合の強さおよび文字→単語の興奮性

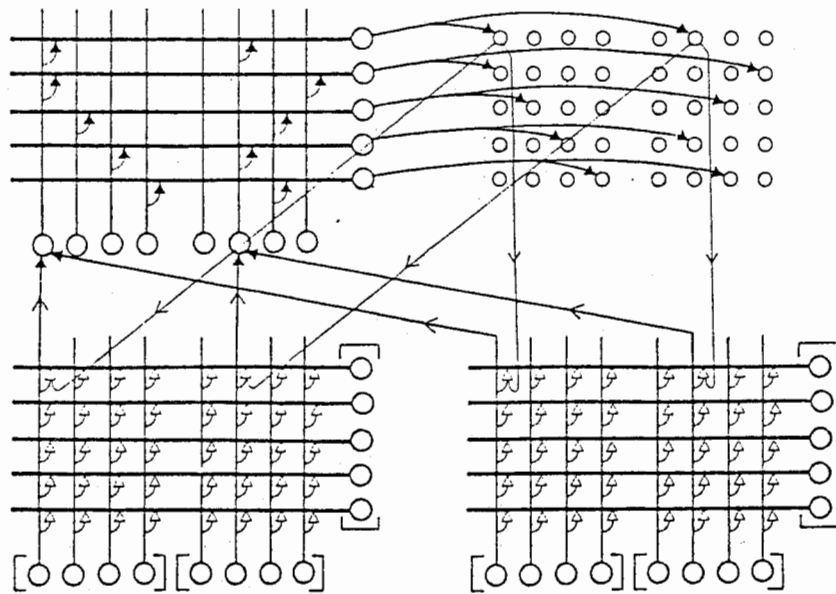


図17 CID の結線例 (下の2つが programmable module, 左上が central knowledge store, 右上が central activation system。central knowledge store の下に記されているノードが central letter (CL) ノード, 右に記されているノードが central word (CW) ノードである)

結合の強さは表4と同じである。CIDでは、文字→単語の抑制性結合はない。しかし、PWノードの活性化の大きさは、PLノードからの入力数とCWからのfeedback(これもPLノードからの入力数に比例している)に依存している。すなわち、PLノードの2乗に比例するのである。その結果、文字→単語の抑制がなくても同じような結果が出るのである。

このモデルによって、同時に2つの単語を処理することができるが、情報が重ね合わされるので単語間の混同が生じる。McClelland(1985)は、このような混同データをモデルで説明している。

シミュレーションでは、2つのプログラマブルモジュールを用いて行なわれた。各プログラマブルモジュールは、16個の文字の処理ユニットと32個の単語の処理ユニットから成る。文字の処理ユニットは、表5のような4文字単語を用いるため、4グループ(各グループは4文字の位置に対応している)に分けられている。

表5 Mozer(1983)の実験で用いられた単語

BAND	BARE	BEND	BIND
BIRD	BOND	BONE	BORE
LAND	LANE	LARD	LEND
LINE	LINT	LIVE	LONE
LORD	LOVE	PANE	PANT
PART	PINE	PINT	POND
PORE	PORT	SAND	SANE
SAVE	SEND	SORE	SORT

Mozer (1983)の実験では、1対の単語(例えば SAND, LANE)が固視点の左右に同時提示され、続いてマスクパターンが提示された。マスクパターンと同時にどちらの単語を報告すべきかが指示された。さらに、1対の単語の2文字は共通でしかも共通でない2文字のうち1文字をもう一方の単語の同じ場所に移しても、やはり単語になるものだけが選ばれた。例えば、SAND-LANEの場合、LANEのLもしくはEをSANDのSまたはDととりかえても、やはり単語(LAND, SANE)になる。表6にMozer (1983)の実験方法と結果が示されている。CIDのシミュレーションでは、うまくこのcrosstalkが説明できる。

なお、McClelland (1986)は、本モデルを読書時の処理モデルに発展させようと試みている(Programmable Blackboard Model)。

表6 Mozer(1983)の実験

Method	SAND	LANE
Example Display		
Target Cue	IIII	
Results		
Response Type		% of total
Correct response (SAND)		69.0
Single migration (SANE or LAND)		13.3
Double migration (LANE)		0.5
Other		17.2
Total		100.0
Pseudo-migration rate*		5.3

*Pseudo-migration rate is the percentage of reports of the given single migration responses (SANE, LAND) when a context word which does not contain these letters is presented. In this example, the context string might have been BANK.

2. 記憶のモデル

60年代末に、AtkinsonとShiffrin (1968) が、バッファーモデルを提案したことは周知のとおりであるが、ちょうどその頃から短期記憶 (STM) および長期記憶 (LTM) に関する数理モデルが数多く考案されてきた。言うまでもなく、AtkinsonとShiffrinのモデルもまた数理モデルであった。当時の主たるモデルは、Norman (1970) が「Models of human memory」として1冊の本にまとめている。認知心理学における記憶のモデルは数多く存在するが、記憶システムが複雑であるがゆえに、数学的なとりあつかいが異なるばかりでなく、問題とする現象そのものが異なり、簡単に要約することは困難である。しかし、それらはいくつかの大きなグループに大別できる (図18)。第1に、Estes が、1958年に発表した刺激標本化理論という学習理論の流れをくむものであり、記憶をいくつかの属性の集合として捉えていこうとするものである。その代表例はBowerの属性理論 (Attribute theory) である。第2に、やはり学習理論の流れを引くものだが、マルコフモデルによるものである。このモデルでは記憶項目がSTMに存在する状態、LTMに存在する状態、忘却された状態を考え、状態間の遷移確率をもとにして記憶の再生実験の結果を説明しようというものである。第3は、AtkinsonとShiffrinらのモデルを基礎にしたものである (Atkinson & Shiffrin, 1968; Atkinson et al., 1967)。第4は、特に連想記憶に関係しているが、いくつかの項目の記憶が相互に関連づけられたネットワークであるという考えに基づくものである。最近ではRaaijmakersとShiffrin (1981) のモデルがこのグループに入る。

一方、生理学的研究からヒトや動物の記憶が分散型記憶であると考えられてきた。この事実とホログラフィーとの特徴の類似性も指摘されていた (hologram metaphor: Westlake 1970)。ホログラフィーモデルによる初期の心理学的研究としてCavanagh (1972, 1976) の研究がある。学習によって神経細胞の結合部位であるシナプスの荷重が変化すると古くから考えられてきた。同一信号が同一のシナプスを通過すればする程、通りやすくなるという考えは、一般に信号間の相関値にシナプス荷重が変化するという学習方式であることが明らかにされ (たとえば、甘利, 1978参照)、学習や連想記憶の神経回路網モデルの研究が進歩した (たとえば、

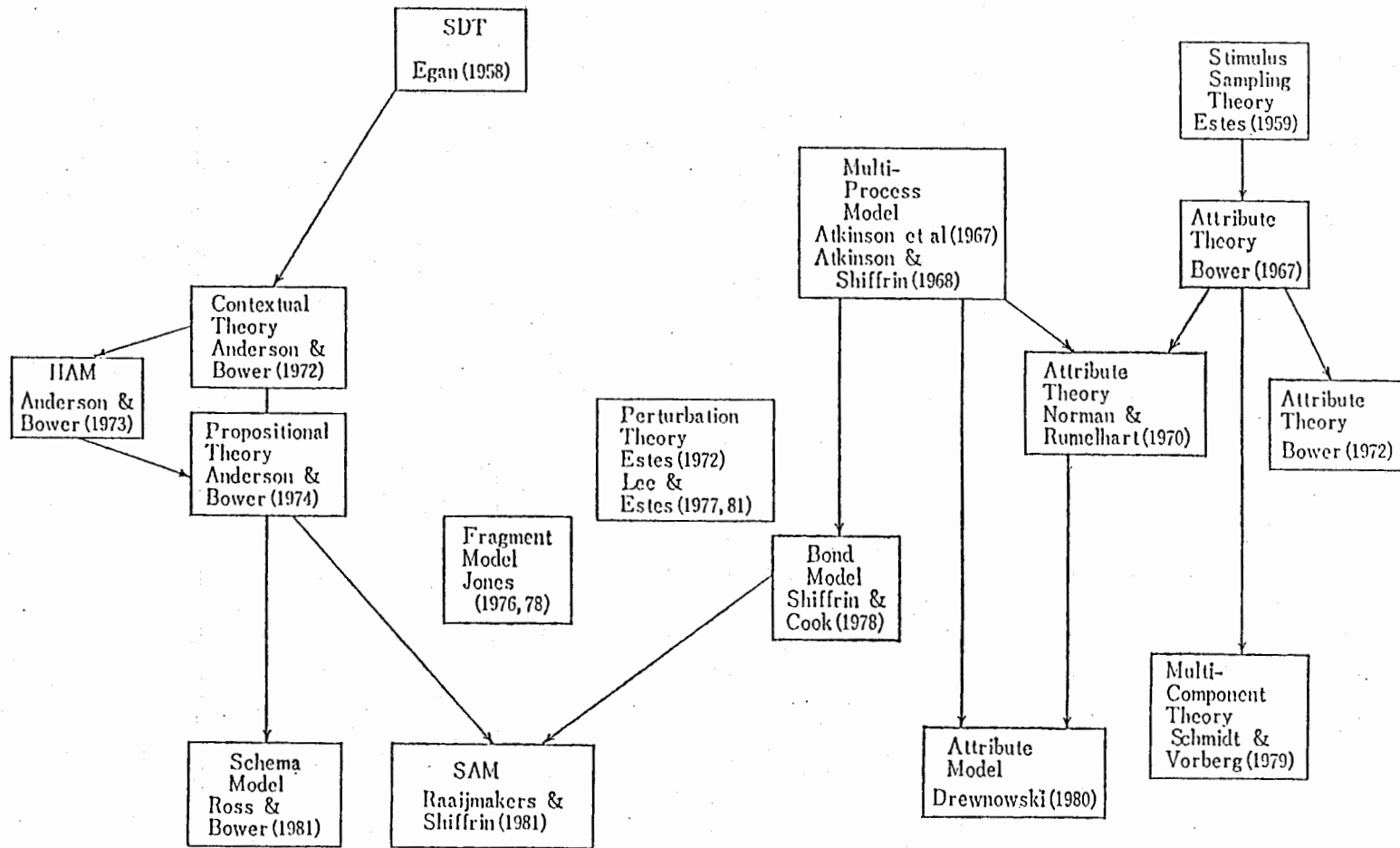


図 18 記憶モデルの系譜

Kohonen, 1977参照)。心理学的研究においても、最近並列処理モデルが強調され、神経科学との関係が深まりつつある (Hinton & Anderson, 1981; Eich, 1982; Murdock, 1982)。以上のような状況から種々の記憶研究が連想記憶の立場から統合されていくものと思われる。

また、Jones (1976, 1979) の研究を除き、視覚記憶を扱ったものはない。最近、視覚短期記憶の特性が詳しく検討されるようになってきた (乾, 1981, 1982; 市川, 1982)。乾 (1985, 1987) は、視覚短期記憶の数理モデルを提案している。なお、認知心理学における記憶のモデルの包括的な解説が乾 (1982) にある。

2-1 Raaijmakers と Shiffrin のモデル — 連想記憶と再生・再認 —

Raaijmakers と Shiffrin (1980, 1981) は、長期記憶からの想起に関する理論を作り、それを自由再生実験、一対連合学習による再生実験に適用している。彼らの理論は “search of associative memory” の頭文字を取って SAM と呼ばれる。まず彼らのモデルを説明しよう。

STS (short-term store) には、 r 個の項目しか同時に貯えることができない。 r 個の項目が貯えられている STS に新しい項目が入るときは、既に蓄えられていた単語のいずれかが消えるものとする。新しい項目と既に貯えられていた単語とが入れかわる確率は $1/r$ であると仮定する。LTS には、(1) 文脈と単語情報の連想関係と、(2) 1つの単語に対する文脈+単語情報の集合と他の単語のそれとの連想関係が貯えられている。前者を word-context 情報と呼び、後者を word-word 情報と呼ぶ。word-context 情報の量は STS に単語が存在していた時間に比例するものとする。word-word 情報は、2つの単語が同時に、STS に存在した時間に比例するものと考えられる。word 情報とは、単語の名前を生成するのに必要な情報で、context 情報とは、名前の情報とは直接関係しないもので、単語が STS に存在したときの環境情報や物理的感覚、感情などを含む時間的、ならびに状況的要因である。

L T Sの呼び出しは、まず手がかりがS T Sに集められてL T Sのprobe として利用されることから始まる。そして、イメージと呼ばれるL T Sの局在化した集合がサンプリングされる。サンプリングされる確率は、手がかりとしL T Sにある種々のイメージの間の連合の強さの関数である。

サンプリングされたイメージの情報は“recovery”と呼ばれる過程にアクセスされて評価される。単語の名前を再生させるに足る情報が recoverする確率は、手がかりとサンプリングされたイメージの間の連合の強さの関数である。S A Mにおいては、手がかりとしては一般的な文脈手がかり C_T と、提示リスト中の単語 W_{1T} が用いられる。また、貯えられている n 個の単語の情報は、それぞれ W_{1S} , W_{2S} , ... W_{nS} と書くことにする。

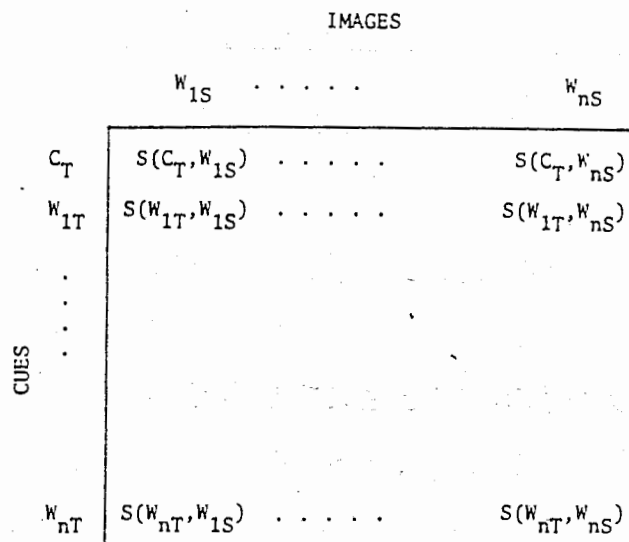


図19 手がかりが与えられとき単語がサンプルされる確率のマトリクス (Raaijmakers & Shiffrin, 1980)

文脈による手がかり C_T が与えられたとき単語 i がサンプリングされる強さを $S(C_T, W_{iS})$ 、単語 j が手がかりとして与えられたとき、単語 i がサンプリングされる強さを $S(W_{jT}, W_{iS})$ とする (図19)。 t_{i1} を単語 i がバッファに存在した時間、 t_{ij} を単語 i と単語 j が同時にバッファに存在した時間とすれば、

$$S(C_T, W_{1s}) = a t_1$$

$$S(W_{1T}, W_{js}) = b t_{1j}$$

$$S(W_{1T}, W_{1s}) = c t_1$$

が成立するものとする。ここに a, b, c は定数である。ただし、 t_{1j} が 0 ならば、

$$S(W_{1T}, W_{js}) = d$$

とする。 C_T が与えられたとき、 W_{1s} がサンプリングされる確率は、

$$P_s(W_{1s}/C_T) = \frac{S(C_T, W_{1s})}{\sum_{j=1}^n S(C_T, W_{js})}$$

C_T と W_{KT} が与えられたとき、 W_{1s} がサンプリングされる確率は、

$$P_s(W_{1s}/C_T W_{KT}) = \frac{S(C_T, W_{1s}) S(W_{KT}, W_{1s})}{\sum_{j=1}^n S(C_T, W_{js}) S(W_{KT}, W_{js})}$$

この関係は、手がかりのうちの片方と関連性の高い、イメージよりも両方の手がかりと関連性の高い、イメージをサンプリングする傾向を示す。次に手がかりが与えられたとき、イメージの単語の名前を生成できる確率は、

$$P_R(W_1/C_T) = 1 - \exp\{-S(C_T, W_{1s})\}$$

$$P_R(W_1/C_T, W_{KT}) = 1 - \exp\{-S(C_T, W_{1s}) - S(W_{KT}, W_{1s})\}$$

うまく recovery が生じたとき、手がかりと再生されたイメージとの連合の強さは増加し、incrementing と呼び、以下の関係が成立する。

$$S'(C_T, W_{1s}) = S(C_T, W_{1s}) + e;$$

$$S'(W_{1T}, W_{js}) = S(W_{1T}, W_{js}) + f;$$

$$S'(W_{1T}, W_{1s}) = S(W_{1T}, W_{1s}) + g;$$

サンプリングや回復が試みられても、新しい単語が再生できなかった場合を「失敗」と定義する。走査の結果、失敗の積算された数が K_{max} を越えると引き出しの過程は停止するものと仮定している。

さて、手がかりが全く与えられないときは文脈情報のみを手がかりとして用いる。この probe は、新しい単語が再生されるまで用いられる。新しい単語が再生されるときはいつでも、文脈情報とたった今再生された単語が手がかりとして用いられる。文脈情報と単語が走査の L_{max} 回の連続したループに対して probe として用いられ、しかも、全く新しい単語が再生されないならば、被験者はその単語を probe としては使わずに文脈情報のみを probe とする。主要な走査が終了すれば (K_{max} に達したら)、再チェックが行なわれる。これは文脈情報と再生された各単語によってなされ、それぞれについて L_{max} 回の失敗が起こるまで続けられる。この再チェックは、先の走査では新しい単語が出るたびに probe が代えられたのに対して、完全に各単語による連想的引き出しルートをチェックしようとするものである。

最初に述べた短期記憶の仮定 (buffer size) と、単語がサンプリングされる確率に関する仮定から系列位置曲線のデータを記述することが可能である (Raaijmarker & Shiffrin, 1980)。彼らはまず Murdock (1962) のデータにモデルがうまく適合することを示した (図20)。パラメータ値は、 $r=4$, $K_{max}=30$, $a=c=0.055$, $b=0.02$, $d=0.004$, $e=f=g=0.6$ である。しかし、彼らのモデルの特徴は、自由再生実験における再生時間と再生数の関係や、項目の再生時間間隔 (IRT) と再生数の関係等をもシミュレーションできるということにある。図21は Roberts (1972) のデータのシミュレーションである。彼の実験では、リストの長さ (10, 20, 30, 40 項目) と提示速度 (0.5, 1, 2, 4, 8 秒に1項目提示) の関係をしらべている。全体のリスト提示時間の増加とともに再生数は飽和すること、リストの長さの増加とともに再生数の増分は低下することがわかる。モデルは、この結果によく適合している。パラメータ値は、 $r=4$, $K_{max}=30$, $L_{max}=3$, $a=c=0.1$, $b=0.1$, $d=0.02$, $e=f=g=0.7$ である。モデルの適合度は、 d の値や K_{max} の値を変えてもあまり変わらないことが確かめられている。 K_{max} を変えることは、被験者の再生に与えられる許容時間を変えることに対応す

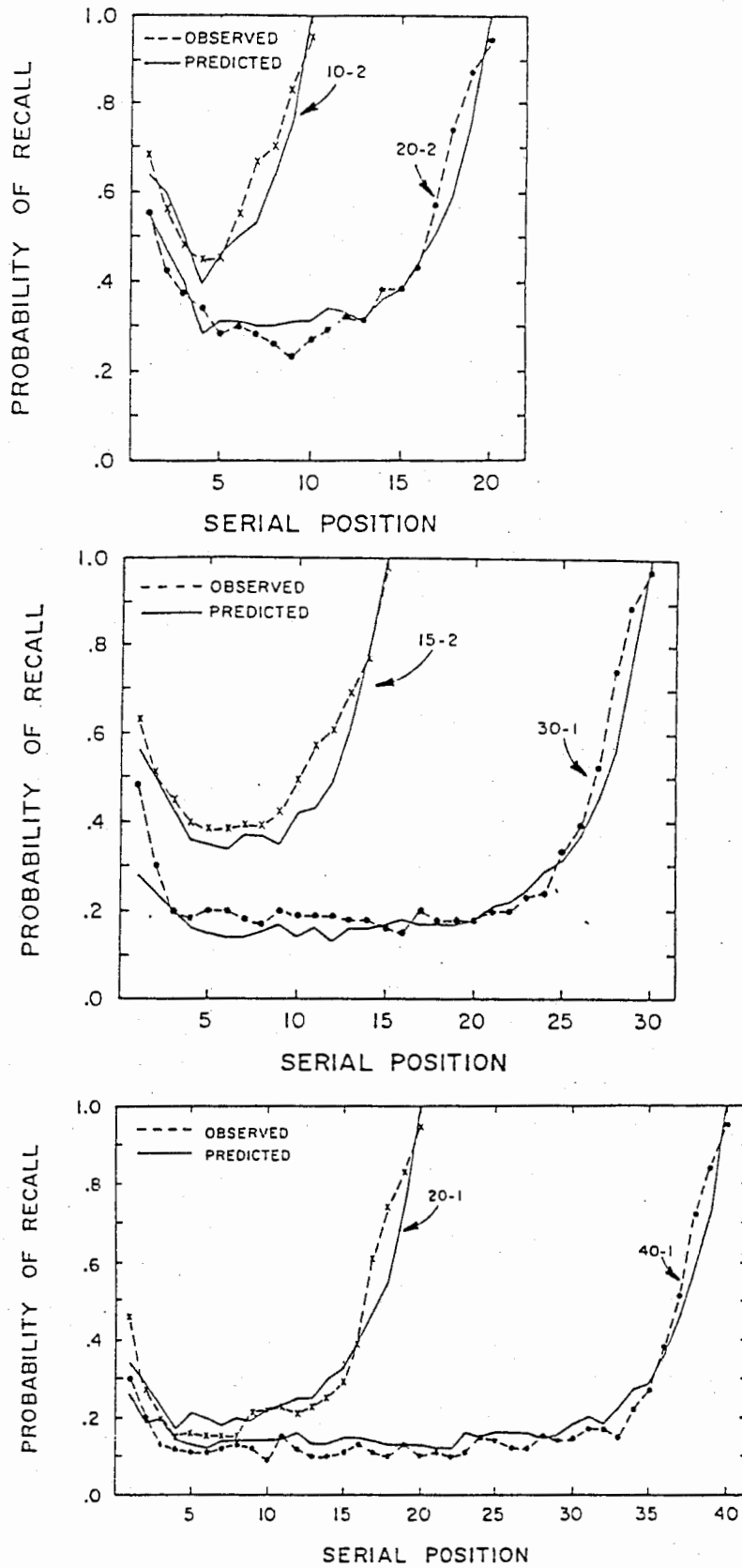


図20 SAMにはMurdock(1962)の実験のシミュレーション
 図中の数字は、たとえば10-2は、10項目を2秒おきに提示したことを示す。

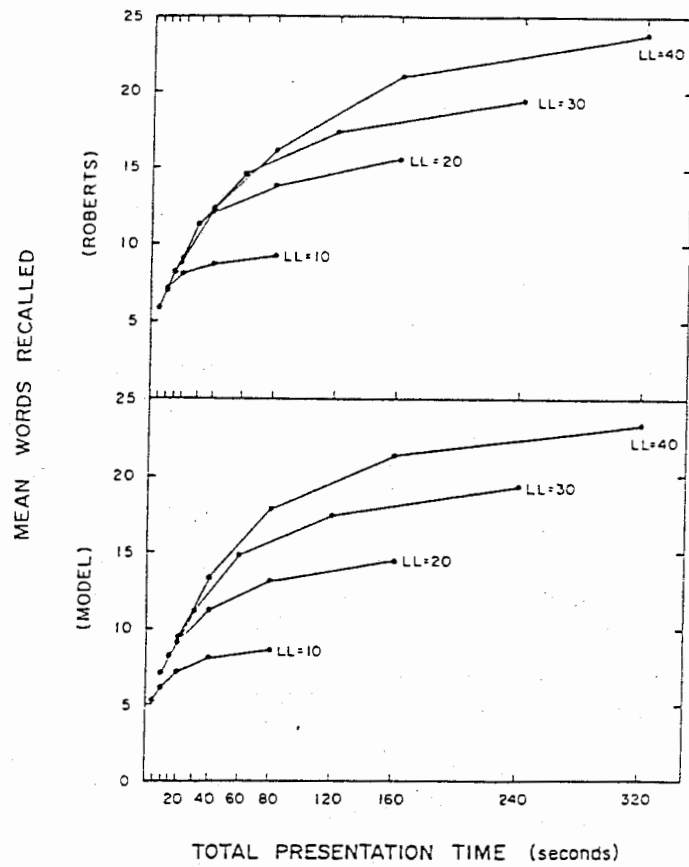


図21 Roberts (1972)のデータとSAM モデルによるシミュレーション (Raaijmakers & Shiffrin, 1980)

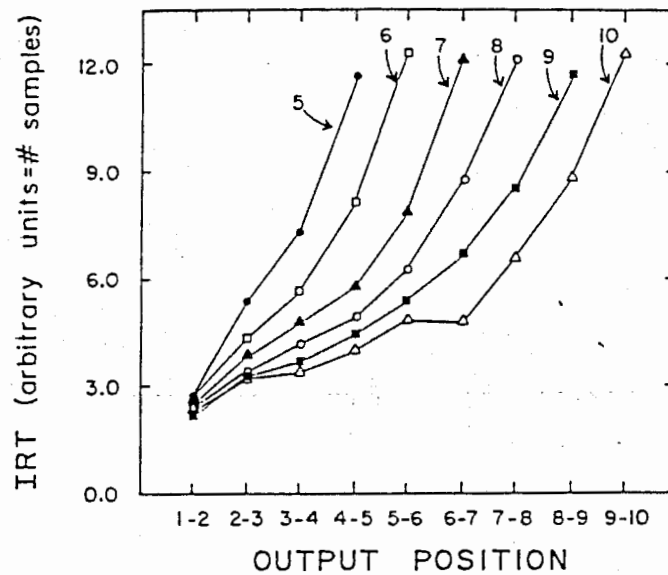


図22 SAM による再生時間間隔と再生数の関係の予測値 (Raaijmakers & Shiffrin, 1980)

るであろう (Roediger & Thorpe, 1978, 等の実験)。また、上述のRoberts (1972)の実験データをシミュレートした際に推定されたパラメータで、IRTと再生数の関係をしらべたのが図22である。このデータはMurdockとOkada (1970)のデータにきわめて類似している。すなわち、IRTは再生が進むにしたがい増加すること、再生位置が同じ場合再生数が多いほどIRTは小さいことなどの主要な傾向が一致している。

以上述べたように Raaijmakersと Shiffrin (1980, 1981) のモデルは、パラメータが他のモデルとくらべても多いものの従来のモデルでは説明できない多くの実験結果をシミュレートすることが可能である。

再認実験は通常、何項目かを記憶させておいて (その項目をターゲットと呼ぶ)、その後ターゲットとターゲット以外の項目 (ディストラクタと呼ぶ) を提示し、ターゲットかどうかを答えさせるという手続きをとる。SAMではディストラクタとの連合強度はないので、再認は常に完全正答になってしまう。

そこで、GillundとShiffrin (1984)は連合強度の最小値 (> 0) を決め、いったん出来上がったイメージを雑音によってわずかに乱れさせた後に再認を行うようにモデルを変更した。再生手続きは前記と同じであるが再認の場合は走査 (サンプリング) を行わず、テスト項目 (ターゲットまたはディストラクタ) との連合強度の総和のみで判断すると仮定している。

すなわち、 C_T と W_{JT} が手がかりのとき、

$$F(C_T, W_{JT}) = \sum_{k=1}^n S(C_T, W_{ks}) \cdot S(W_{JT}, W_{ks})$$

の値が規準値 C_r より大きいときはターゲットであると答え、 C_r より小さいときはディストラクタであると答えるというモデルである (図23)。このモデルによって、多くの再認データが説明可能である。

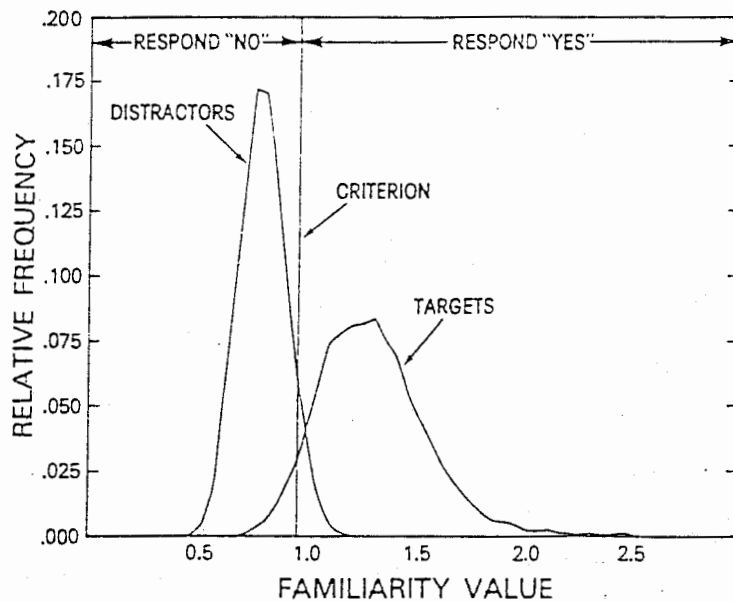


図23 SAM の活動レベル

2-2 McClelland と Rumelhart (1985) の分布型記憶モデル

McClelland と Rumelhart (1985) のモデルは、記憶が多くのモジュールから成り、各々のモジュールは相互に結合する多くの処理ユニットから構成されていると考えている (図24)。

彼らは、各モジュールが何千、何万という数の処理ユニットから成り、記憶システムは何千というモジュールから構成されていると考えた。

各ユニットの活動レベルは -1 から +1 の間の値をとり、0 が静止レベル (resting level) である。したがって各ユニットは、興奮性にも抑制性にも成り得る。i 番目のユニットへの (モジュール内のユニットからの) 入力 i_1 は

$$i_1 = \sum_j a_j W_{1j}$$

とする。ここに a_j は j 番目のユニットの活動水準であり、 W_{1j} は j から i への結合係数である。ユニット i への外部入力を e_1 とすれば、ユニット i への全入力 net_1 は

$$net_1 = i_1 + e_1$$

で与えられる。

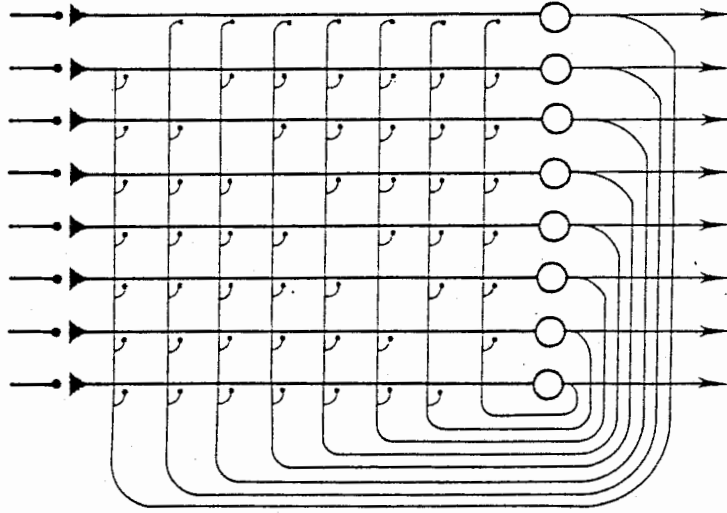


図24 McClellandと Rumelhart (1985) より

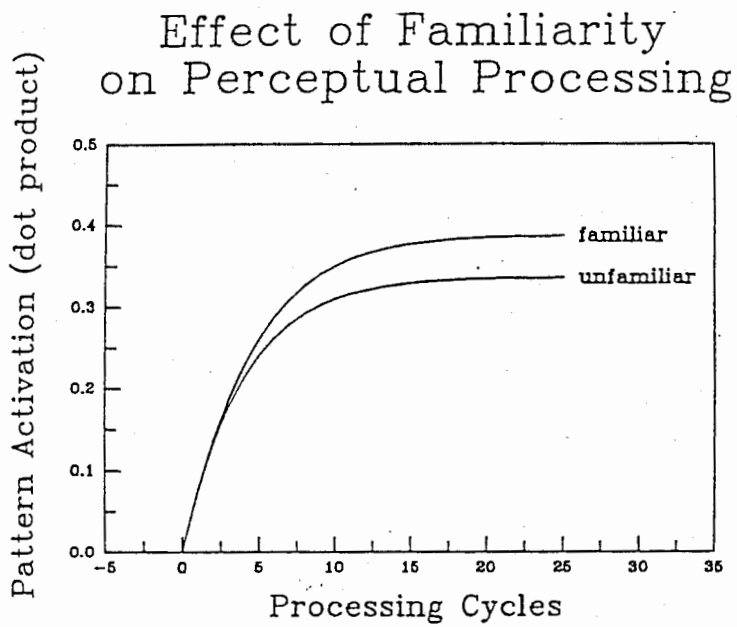


図25 McClellandと Rumelhart (1985) より

ユニットへの入力と活動水準との関係は

$$\Delta a_i = \begin{cases} E \text{net}_i \cdot (1 - a_i) - D a_i & (\text{net}_i > 0) \\ E \text{net}_i \cdot (a_i - (-1)) - D a_i & (\text{net}_i \leq 0) \end{cases}$$

で与えられる。シミュレーションでは、あまり a_i が急に変化しないように $E = D = 0.15$ と小さい値に設定されている。

次に、重み W_{ij} の変え方（学習則）について述べよう。まず、外部入力と内部（の他のユニットからの）入力との差を δ_i とする。すなわち

$$\delta_i = e_i - i_i$$

このとき W_{ij} は次のように変化させる

$$\Delta W_{ij} = \eta \delta_i a_j$$

このような学習則をデルタ規則と呼ぶ。この方式だと、外部入力と内部入力と一致するまで W_{ij} が変化する。

表7 McClellandとRumelhart (1985)より

Case	Input or response for each unit							
Pattern 1								
The Pattern:	+	-	+	-	+	+	-	-
Response to Pattern before learning	+5	-5	+5	-5	+5	+5	-5	-5
Response to Pattern after 10 learning trials	+7	-7	+7	-7	+7	+7	-7	-7
Test Input (Incomplete version of Pattern)	+	-	+	-	+	+	-	-
Response	+6	-6	+6	-6	+4	+4	-4	-4
Test Input (Distortion of Pattern)	+	-	+	-	+	+	-	+
Response	+6	-6	+6	-6	+6	+6	-6	+1
Pattern 2								
The Pattern:	+	+	-	-	-	+	-	+
Response to Pattern with weights learned for Pattern 1	+5	+5	-5	-5	-5	+5	-5	+5
Response to Pattern after 10 learning trials	+7	+7	-7	-7	-7	+7	-7	+7
Retest of response to Pattern 1	+7	-7	+7	-7	+7	+7	-7	-7

さて、このような学習則をもつモジュールに表7に示すようなパターンを（外部信号として）提示してみよう。表で+は+1.0、-は-1.0を示す。W_{ij}の初期値は0である。このときの出力は小さくモジュールは「知らない」パターンとして処理する。しかし、10回提示した後では、大きな出力を出す。一端学習すると、パターンの一部分を提示しても、モジュールは全体のパターンを再生することがわかる。また一部分をノイズで乱しても正しいパターンを再生している。別のパターンを学習した後でも、最初のパターンを入力すると正しく反応している。このようにモジュールは、ノイズ除去、部分手がかりによる復元などの機能をもつことがわかる。また、一つのモジュールに多くのパターンを憶えさせることが出来る。

部分パターンを入れたとき、全体のパターンを正しく復元できるので表のように、パターンを視覚情報、名前の情報に分けておくと、視覚情報を入れたとき、名前を言わせることが可能となる。

次にベクトルの各要素を0.2の確率で符号をかえて新しいパターンを作ってモジュールに入力してみよう。このときの出力の活動水準の時間経過を示したのが図25である。原パターンが十分学習したパターンの場合、新しく作ったパターンに対して大きい出力を出すことがわかる。出力の強さがわかると、Luceの選択公理にしたがって反応確率が計算できる。しかし、選択肢の全体の出力の強さは不明なので、ここでは定数(c)として

$$P(r_j) = e^{K\alpha_j} / (c + e^{K\alpha_j})$$

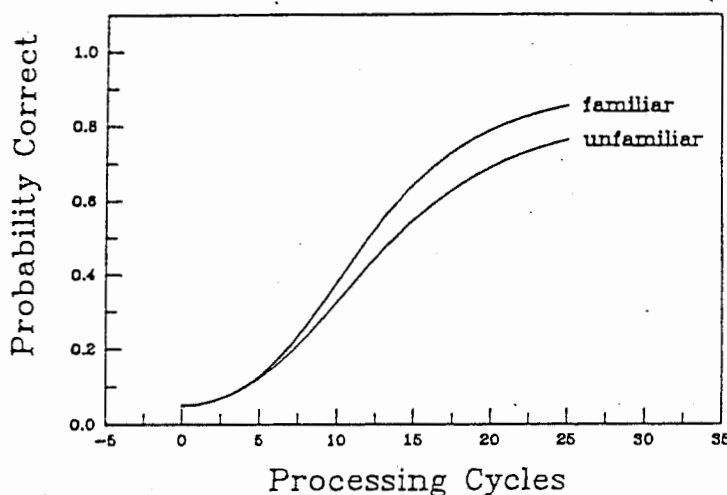


図26 McClellandと Rumelhart (1985) より

として計算した(1.4 節参照)。その結果は、図26のようになり、熟知度が高いもの(に近い)ほど短時間で高い正答率が得られることがわかる。

2-3 Waltz と Pollack (1985) のモデル

知識の構造を知る上で、プライミング効果は重要な現象である。

被験者に、2つの文字列を継時的に提示し、2番目に提示された文字列が単語であるか否かを問う(語彙判断課題: lexical decision task)。このとき、判断に要する時間(RT)を測定すると、2つの文字列が同一のカテゴリーに属する場合(たとえば Apple-Orange)や何らかの意味的関連がある場合(Nurse-Doctor)にはRTが短縮される。これをプライミング効果と呼ぶ。Collins と Loftus(1975)は、意味ネットワークを活動が伝播すると考え、プライミング効果を説明した(spreading activation model)。すなわち、第一刺激によって一つの概念が活性化されると、その活動がネットワークを伝播し、意味的関連の強い活性レベルを上げる。それゆえ、意味的に関係ある刺激が次に提示されるとRTに促進効果が生ずるのである。なお、第一刺激と第二刺激の間隔が100ms程度でもプライミング効果が生ずることが知られている(Ratcliff と Mckoon, 1981)。

Waltz と Pollack(1985)は、spreading activationとlateral inhibitionの機構をもつ文理解のネットワークモデルを考えた。このモデルでは単語の意味決定と文の構文決定が同時に相互作用しながら進行する。図27は「John shot some bucks」という文を「狩」という文脈で読んだときのネットワークの初期状態を示している。図28は spreading activation と lateral inhibition の操作を50回くりかえした後の状態である。「shot」にはT I R E D, F I R E, B U L L E T, W A S T Eの4つの意味があるがFIREが正しく選択されている。これは文脈である「HUNT」によって「F I R E」がプライムされているからである。ところで、彼らは人間が存在する上で不可欠な特徴項目(危険か安全か、生物か無生物か、食べられるか否か、屋内か屋外か、動いているか止まっているか、時間のオーダー(秒、分、時)、

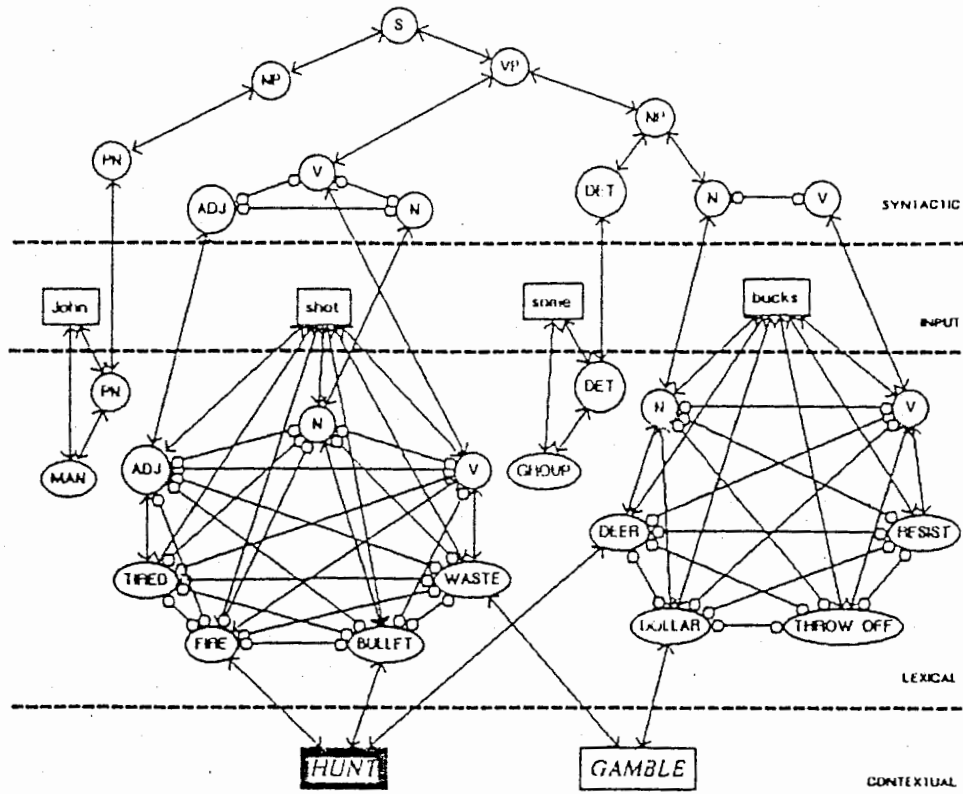


図27 Waltz と Pollack (1985) のモデル

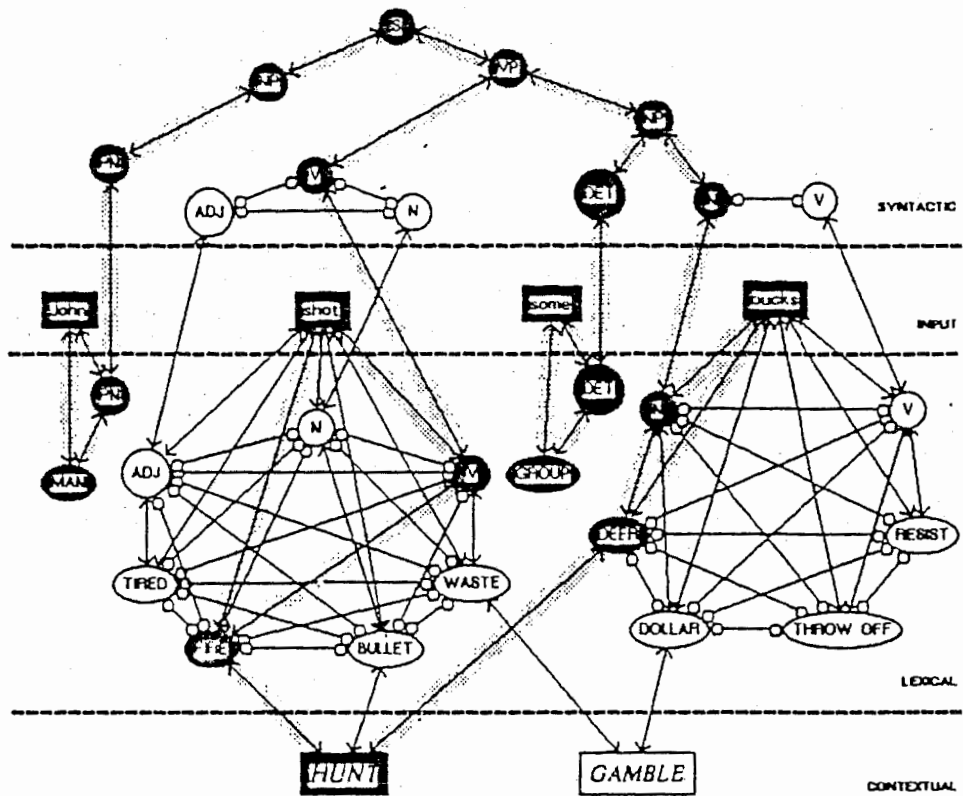


図28 Waltz と Pollack (1985) のモデル

時刻、場所（町かいなかか）などを microfeature と呼び、概念は各 microfeature との関連度で特徴づけられると考えた。ある概念が活性化すれば、microfeature を通して関連する概念がプライムされるようになっている図29。たとえば、上記の文の前に、「John spent his weekend in the woods」があれば、weekend や wood によって FIRE や DEER がプライムされる。このように、文脈は microfeature を通じてきくようになっている。

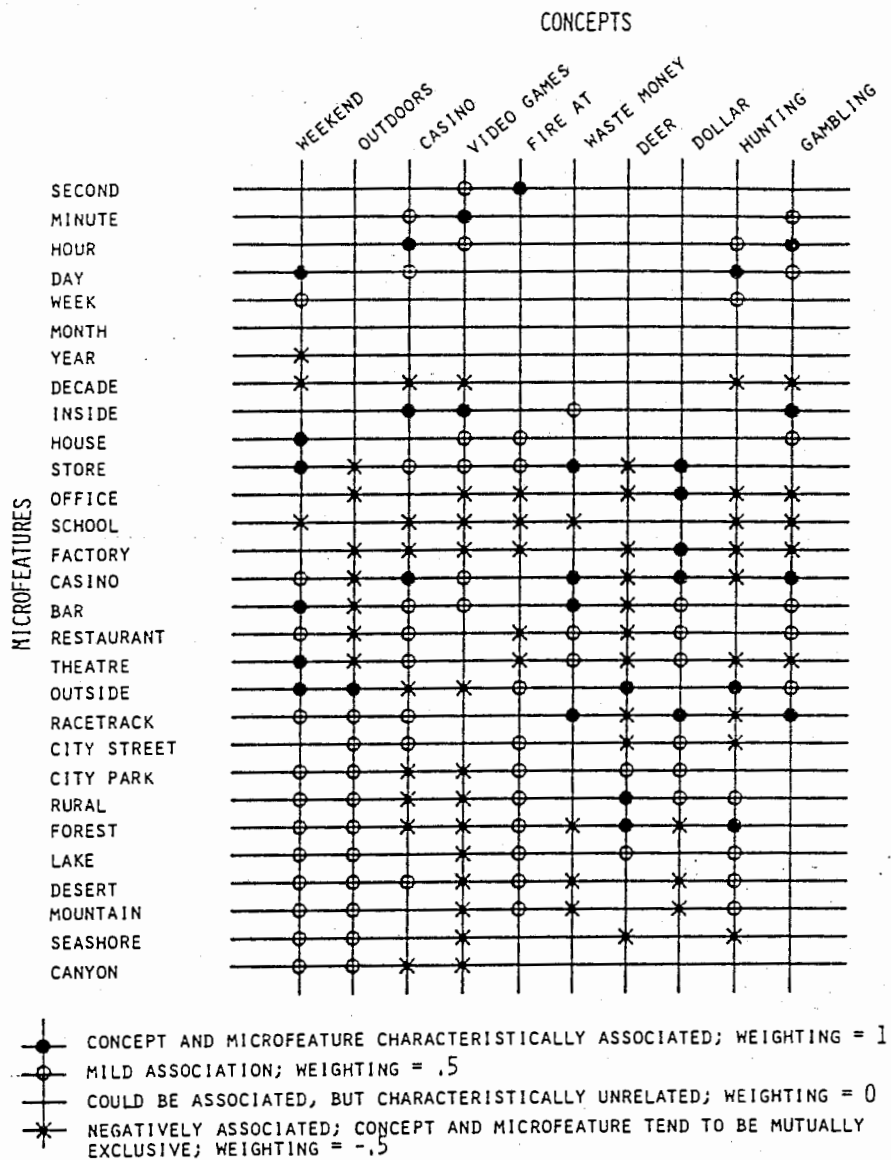


図29 microfeature

単純パーセプトロン

Rosenblatt (1962) は、単純パーセプトロンという神経回路を考案し、これを用いて学習や識別、連想などを含む高次の情報処理が行なえることを示した。

その本質は、

C₁ カテゴリーに属する入力 X の場合は $Z = 1$

C₀ カテゴリーに属する入力 X の場合は $Z = -1$

になるように、 W を調節させることである (図30)。

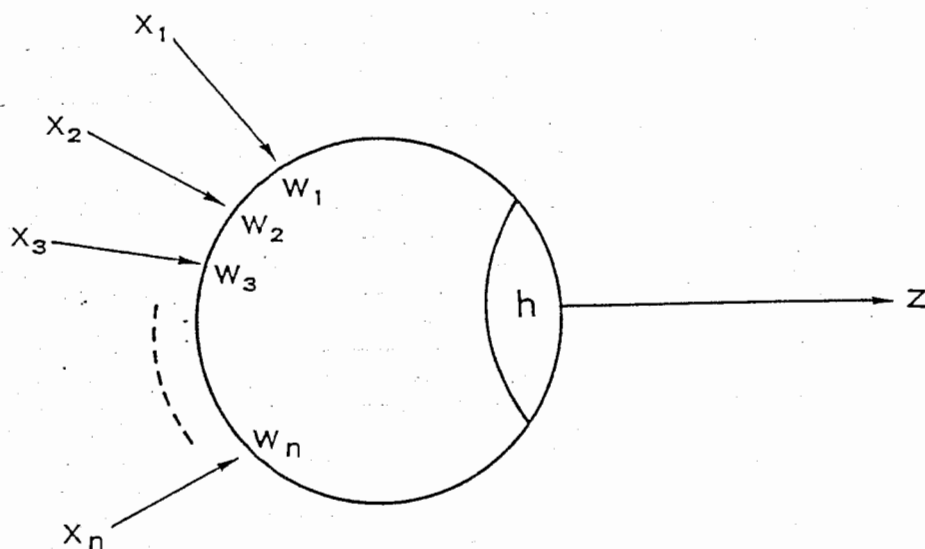


図30 閾素子ニューロン

学習則は次のとおりである。

[方法] 正解のときは変化させない

誤りのときは

$$\Delta W = \alpha Y X \quad (\alpha : \text{定数})$$

$$Y = -Z$$

この方法は、 $Z = 1$ を出して、誤ったときは出力を低下させるようにし、 $Z = -1$ を出して誤ったときは、出力を上昇させる。これが Y の項である。また、誤り出力を出した寄与率に応じて ΔW の大きさを変えているのが X の項である。

Widrow (1963) の Adaline

Adaline の場合の学習則は、

$$\Delta W = \alpha Y X$$

$$\alpha = 1 / (n+1)$$

$$Y = \begin{cases} 1 - W \cdot X & (X \in C_1) \\ -1 - W \cdot X & (X \in C_0) \end{cases}$$

この学習則では、誤差に比例して W を変化させ、同時に寄与率に応じてその量を調節している。

Rumelhart ら(1986)の Back-propagation

Perceptronも Adalineも共に学習則として

$$\Delta W = (\text{定数}) \times (\text{誤差}) \times (\text{寄与率})$$

という形式をとっていた。Rumelhart ら(1986)は、多層神経回路網における教師あり学習アルゴリズムを開発した(図31)。その本質は、

1. 神経細胞の入出力特性を、微分可能な関数(具体的にはロジスティック曲線)にする。
2. 誤差を最小にするように W を調節する。

の2点である。

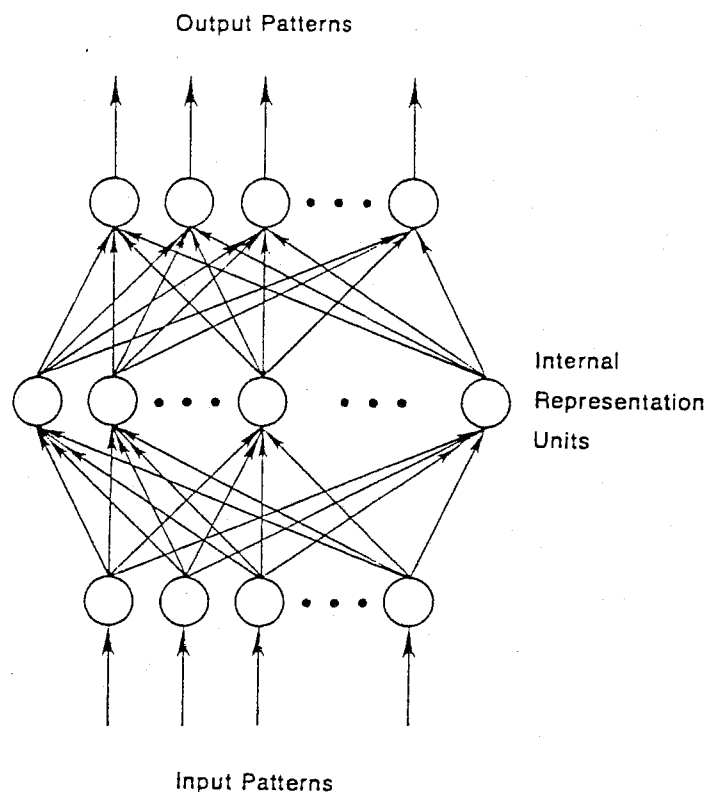


図31 多層神経回路網 (Rumelhart ら, 1986)

出力層での誤差を、パターンPを与えたときの

$$E_p = \frac{1}{2} (t_{pj} - O_{pj})^2$$

とする。ここに t_{pj} は希望出力であり、 O_{pj} は実際の出力である。このとき W_{ji} (i番目のニューロンからj番目のニューロンへの重み) を、

$$\Delta_p W_{ji} = \eta \times \left(- \frac{\partial E_p}{\partial W_{ji}} \right)$$

とする。これを実際に計算するとj番目のニューロンが出力層のときは

$$\Delta_p W_{ji} = \eta \times (t_{pj} - O_{pj}) \times f'_{pj}(\text{net}_{pj}) \times O_{pi}$$

となる。 $f_j(\text{net}_{pj})$ は、 j ニューロンの現在の活動水準でのロジスティック曲線の傾きである。すなわち、活動水準が非常に小さい(0)か、非常に大きい(1)のときは、ほとんど調節せず、中間の水準の場合に大きく調節するようになっている。

したがって、

$\Delta W_{ji} = (\text{定数}) \times (\text{誤差}) \times (\text{非飽和度}) \times (i\text{ニューロンの寄与率})$ となっている。

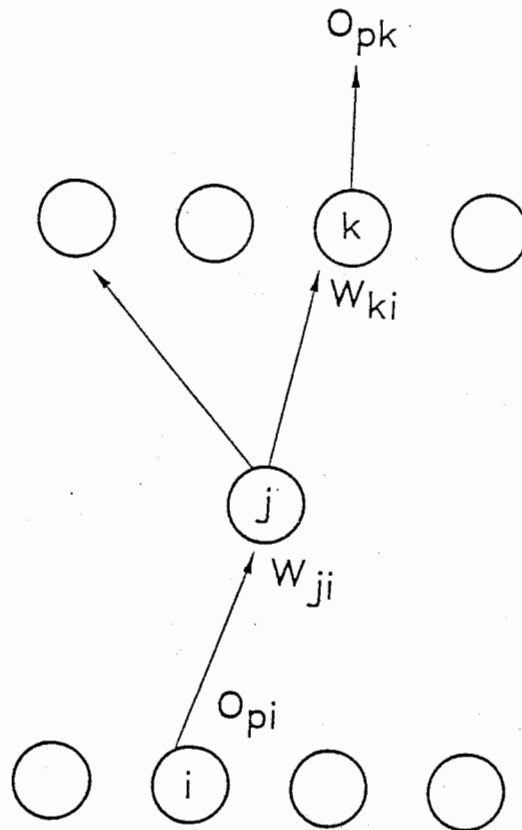


図32 j ニューロンが中間層の場合

一方、 j 番目のニューロンが中間層の場合は(図32)、

$\frac{\partial E_p}{\partial W_{ji}}$ がただちに計算できず、いわゆる微分の推移律

$$\frac{\partial Z}{\partial u} = \frac{\partial Z}{\partial Y} \cdot \frac{\partial Y}{\partial u}$$

を用いて計算せねばならない。これは出力層での変化率が計算された後で決まることを意味する。それゆえこの方法は、Back-propagation（逆伝搬）法と呼ぶ。

この場合は、

$$\Delta_p W_{ji} = \eta \times \left\{ \sum_k (t_{pk} - O_{pk}) f'_k(\text{net}_{pk}) W_{kj} \right\} \times f'_j(\text{net}_{pj}) \times O_{pi}$$

$$\Delta_p W_{ji} = (\text{定数}) \times (\text{出力段への } j \text{ ニューロンの誤差の寄与率}) \\ \times (\text{非飽和度}) \times (i \text{ ニューロンの寄与率})$$

となる。

参 考 文 献

- 1) Adams, M. J. (1979) Models of word recognition. *Cognitive Psychology*, 11, 133-176.
- 2) Aderman, D. & Smith, E. E. (1971) Expectancy as a determinant of functional units in perceptual recognition. *Cognitive Psychology*, 2, 117-129.
- 3) 甘利俊一 (1978) 神経回路網の数理 産業図書.
- 4) Atkinson, R. C., Brelsford, J. W. & Shiffrin, R. M. (1967) Multiprocess models for memory with applications to a continuous presentation task. *Journal of Mathematical Psychology*, 4, 277-300.
- 5) Atkinson, R. C., Shiffrin, R. M. (1968) Human Memory: A proposed system and its control processes. In Spence, K. W. & Spence, J. T. (Eds. *Advances in the Psychology of Learning and Motivation*, Vol. II. New York: Academic press.
- 6) Bower, G. (1967) A multicomponent theory of the memory trace. In Spence, K. W. & Spence, J. T. (Eds.) *Advances in the Psychology of Learning and Motivation*, Vol. I. New York: Academic Press.
- 7) Brown, C. R. and Rubenstein, H. (1961) Test of response bias explanation of word-frequency effect. *Science*, 133, 280-281.
- 8) Carr, T. H., Davidson, B. J. & Hawkins, H. L. (1978) Perceptual flexibility in word recognition: Strategies affect orthographic computation but not lexical access. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 4, 674-690.
- 9) Cavanagh, J. P. (1972) Holographic processes realizable in the neural realm: Prediction of short term memory performance. (Doctoral dissertation, Carnegie-Mellon University)

- 10) Cavanagh, J. P. (1976) Holographic and trace strength models of rehearsal effects in the recognition task. *Memory & Cognition*, 4, 186-199.
- 11) Collins, A. M. and Loftus, E. F. (1975). A spreading-activation theory of semantic memory. *Psychological Review*, 82, 407-428.
- 12) Drewnowski, A. (1980) Attributes and priorities in short-term recall: A new model of memory span. *Journal of Experimental Psychology: General*, 109, 208-250.
- 13) Eich, J. M. (1982) A composite holographic associative recall model. *Psychological Review*, 89, 627-661.
- 14) Gillurd, G. & Shiffrin, R. N. (1984) "A retrieval model for both recognition and recall", *Psychological Review*, 91, 1-67.
- 15) Hinton, G. E., & Anderson, J. A. (1981) *Parallel Models of Associative Memory*. Hillsdale, N. J.: Lawrence Erlbaum.
- 16) 市川 伸一 (1982) 視覚的短期イメージの忘却要因と refreshing model
日本心理学会第46回大会予稿集, 130.
- 17) 乾 敏郎 (1981) 図形の複雑さと視覚短期記憶の保持率 日本心理学会第45回大会発表論文集, 297.
- 18) 乾 敏郎 (1982) 記憶の数理モデル。心理学評論, 25, 333-358.
- 19) 乾 敏郎 (1982) 視覚短期記憶の諸特性 (1) 再生実験 電子通信学会研究会資料, MBE 81-94, 133-140.
- 20) 乾 敏郎 (1982) 図形の複雑さと視覚短期記憶の保持率 (II) 再生実験
日本心理学会第46回大会予稿集, 57.
- 21) 乾 敏郎 (1983) 文字認知の数理モデル。心理学評論, 26, 85-107.
- 22) 乾 敏郎 (1985) 視聴覚情報処理の基礎的メカニズムに関する心理学的研究。
京都大学文学博士論文
- 23) 乾 敏郎 (1987) Properties of visual memory for block patterns. ATR Technical Report TR-A-0012.

- 24) Jones, G. V. (1976) A fragmentation hypothesis of memory: Cued recall of pictures and of sequential position. *Journal of Experimental Psychology: General*, 105, 277-293.
- 25) Jones, G. V. (1979) Multirate forgetting. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 5, 98-114.
- 26) Lee, C. L. & Estes, W. K. (1977) Order and position in primary memory for letter strings. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 13, 644-655.
- 27) Lee, C. L. & Estes, W. K. (1981) Item and order information in short-term memory: Evidence for multilevel perturbation process. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning & Memory*, 7, 149-169.
- 28) Luce, R. D. (1959) *Individual Choice Behavior*. New York: Wiley.
- 29) McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1981) "An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 1 An account of basic findings", *Psychological Review*, 88, 375-407.
- 30) McClelland, J. L. (1985) "Putting knowledge in its Place: A scheme for programming parallel processing structures on the fly", *Cognitive Science*, 9, 113-146.
- 31) McClelland, J. L. & Rumelhart, D. E. (1985) Distributed memory and the representation of general and specific information. *Journal of Experimental Psychology: General*, 114, 159-188.
- 32) McClelland, J. L. (1986) The programmable blackboard model of reading. In: J. L. McClelland, D. E. Rumelhart and the PDP Research Group: *Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructure of Cognition*. Vol. 2: *Psychological and Biological Models*, MIT Press.
- 33) Miller, G. A., Heise, G.A. and Lighten, W. (1951) The intelli-

- gibility of speech as a function of the context of the test materials. *Journal of Experimental Psychology*, 41, 329-335.
- 34) Morton, J. (1969) "interaction of information in word recognition", *Psychological Review*, 76, 165-178.
- 35) Mozer, M. C. (1983) Letter migration in word perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 9, 531-546.
- 36) Murdock, B. B., Jr. (1962) The serial position effect in free recall. *Journal of Experimental Psychology*, 64, 482-488.
- 37) Murdock, B. B., Jr. & Okada, R. (1970) Interresponse times in single trial free recall *Journal of Experimental Psychology*, 86, 263-267.
- 38) Murdock, B. B., Jr. (1982) A theory for storage and retrieval of item and associative information. *Psychological Review*, 89, 609-626.
- 39) Norman, D. A. (1970) *Models of Human Memory*. New York: Academic Press.
- 40) Norman, D. A. & Rumelhart, D. E. (1970) A system for perception and memory. In Norman, D. A. (Ed.) *Models of Human Memory*. New York: Academic Press.
- 41) Raaijmakers, J. G. W. & Shiffrin, R. M. (1980) SAM: A theory of probabilistic search of associative memory. In Bower, G. (Ed.) *The Psychology of Learning and Motivation*, Vol.14. New York: Academic Press.
- 42) Raaijmakers, J. G. W. & Shiffrin, R. M. (1981) Search of associative memory. *Psychological Review*, 88, 93-134.
- 43) Ratcliff, R. and Mckoon, G. (1981) Does activation really spread? *Psychological Review*, Vol. 88, 454-462.

- 44) Reicher, G. M. (1969) Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81, 274-280.
- 45) Roberts, W. A. (1972) Free recall of word lists varying in length and rate of presentation: A test of total time hypotheses. *Journal of Experimental Psychology*, 92, 365-372.
- 46) Roediger, H. L. & Thorpe, L. A. (1978) The role of recall time in producing hypermnesia. *Memory & Cognition*, 6, 296-305.
- 47) Rosenblatt, F. (1962) *Principles of Neurodynamics*. New York: Spartan.
- 48) Rumelhart, D. E., Hinton, G. E. and Williams, R. J. (1986) Learning representations by back-propagating errors. *Nature*, 323, 533-536.
- 49) Rumelhart, D. E. & McClelland, J. L. (1982) "An interactive activation model of context effects in letter perception: Part 2 The context enhancement effect and some tests and extension of the model", *Psychological Review*, 89, pp. 60-94.
- 50) Rumelhart, D. E. & Siple, P. (1974) Process of recognizing tachistoscopically presented words. *Psychological Review*, 81, 99-118.
- 51) Shiffrin, R. M. & Cook, J. M. (1978) Short-term forgetting of item and order information. *Journal of Verbal Learning & Verbal Behavior*, 17, 189-218.
- 52) Solomon, R. L. & Howes, D. H. (1951) Word frequency, personal values, and visual duration thresholds. *Psychological Review*, 58, 256-270.
- 53) Tulving, E., Mandler, G. and Baumal, R. (1964) Interaction of two sources of information in tachistoscopic word recognition.

Canadian Journal of Psychology, 18, 62-71.

- 54) Waltz, D. L. and Pollack, J. B. (1985) Massively parallel parsing:
A strongly interactive model of natural language interpretation.
Cognitive Science, Vol. 9. 51-74.
- 55) Westlake, P. R. (1970) The possibility of neural holographic
processes in the brain. Kybernetik, 7, 129-153.
- 56) Widrow, B. (1963) Pattern recognition and adaptive control.
IEEE Trans. Applications and Industry, 83, 269-277.