

短期記憶の連続時間モデルの検証

(平成10年11月18日 原稿受付)

九州工業大学工学部電気工学科 横井博一

Verification of Time-continuous Model of Short-term Memory

by Hirokazu YOKOI

あらまし

本論文は、筆者が提案した短期記憶の連続時間モデルの検証を目的としている。そのためまず、短期記憶の容量や忘却特性に関する代表的知見について整理し、考察を加えた。次に、短期記憶の連続時間モデルについて述べ、このモデルに含まれる定数の標準値を、英文字と英単語を提示する場合について、認知実験や自由再生実験により得られた結果を元に決定した。最後に、短期記憶の連続時間モデルを用いて計算機シミュレーションを行い、短期記憶に関する代表的知見との比較を行った。その結果、短期記憶の連続時間モデルは、短期記憶に関する4つの代表的知見すべてと定性的にも定量的にもよい一致を示し、その妥当性が証明された。

キーワード 人間の情報処理, 記憶, 短期記憶, 数理モデル, シミュレーション

1. まえがき

心理学の分野では、1960年代の終わり頃から情報処理という新しい観点が導入され始め、その結果、人間の心理過程、特にその知的な面がこれまで以上に明確に記述できるようになり、パターン認知より更に高次の心理過程、すなわち記憶、理解、判断、思考等においては短期記憶が重要な役割を果していることが明らかにされた。

したがって、人間がインタフェースを介して機械と情報をやりとりしながら作業をする場合、機械側から与えられる重要な情報ができるだけ多く短期記憶の中に保持されることが、人間の高次心理過程を円滑に進め、作業の効率を高める一つの重要な要因となる。そのため、人間-機械インタフェースの設計に際しては、人間の短期記憶との整合を特に考慮する必要がある。

ところが、短期記憶における情報処理過程は大変複雑であり、人間工学でよく用いられてきた、実験だけに頼る方法や過去に得られた断片的知見をそのまま利用する方法では、十分な整合をはかることはできない。このためには、短期記憶における情報処理過程のシミュレーションや予測ができる定量的モデルを必要とする。しかし、短期記憶に関する従来のモデルは、短期記憶内で起こる干渉をきわめて単純化して扱っているため、短期記憶のもつ複雑な諸特性を正確に実現できず、人間-機械インタフェースの整合設計には応用できない。

そのため筆者は、従来のモデルに大幅な変更を加え、

干渉が時々刻々継続的に起きるとした連続時間形式のモデルを新しく提案し、これを短期記憶の連続時間モデル^{(1)~(3)}と名づけた。さらに、このモデルを用いて、無作為に選んだ6個および7個の英文字を同一位置に逐次提示する場合^{(4)~(8)}、無作為に選んだ6個の英文字を横1列に逐次提示する場合^{(5),(9)}、無作為に選んだ6個の英単語を同一位置に逐次提示する場合⁽¹⁰⁾それぞれについて、提示項目が短期記憶に最も保持されやすくなる提示時間の最適配分様式を、個人ごとに決定した。しかしながら、用いたモデルの検証に関しては行っていない。

そこで本論文では、短期記憶に関する代表的知見を元に短期記憶の連続時間モデルの検証を行う。すなわち、2. で心理学的知見すなわち人間の情報処理系、単語認知、短期記憶に関する知見をまず整理する。3. では従来の短期記憶のモデルの問題点と短期記憶の連続時間モデルについて述べる。4. では短期記憶の連続時間モデルに含まれる定数の標準値を決定する。5. ではこれらの標準値を用いて計算機シミュレーションを行い、短期記憶に関する代表的知見と比較する。6. はまとめと今後の課題である。

2. 心理学的知見

2.1 人間の情報処理系

図1に示すように、脳を基礎とした人間の情報処理系は、感覚情報貯蔵(SIS)、短期記憶(S TM)、長期記憶(L TM)の3つの記憶要素と、注意とパターン認

知, リハーサルの2つの処理要素の合計5つの基本要素で構成されている。ただし, 感覚は感覚情報貯蔵に含め, 知覚はパターン認知に含めて考える。各感覚に対応してそれぞれ異なった感覚情報貯蔵があると考えられ, 視覚の場合は視覚情報貯蔵(V I S), 聴覚の場合は音響情報貯蔵(A I S)とよぶ。

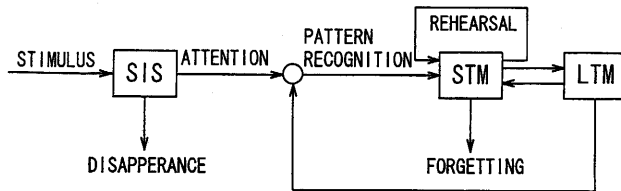


図1 人間の情報処理系

Fig.1 Human information-processing system.

外界から刺激が提示されると, その刺激の情報は, 意味づけされない, なまの形で, まず感覚情報貯蔵に入力され, 感覚的表象を形成し, そこに保持される。表象とは, 刺激が心理的諸過程内に取り込まれたときの形態をさし, 各過程に特有な存在形態ないし表現形態がある。視覚情報貯蔵の場合, 容量には制限はなく, 提示された視覚刺激の情報はほとんどすべて入力・保持される⁽¹¹⁾。刺激強度がある程度大きく, 時間的にステップ状に変化したときには, 感覚情報貯蔵内に形成された表象がもつ情報量はほとんど瞬間的に0から上限, すなわち全情報量に達すると考えられている。表象の情報は, 刺激の提示後きわめて短時間のうちに消失する⁽¹¹⁾。これを受動的崩壊とよぶ。

複数個の刺激が続けて提示された場合には, 先行刺激の処理が後続刺激により妨害される逆向マスキングと, 後続刺激の処理が先行刺激により妨害される順向マスキングが起こる⁽¹²⁾。2刺激が等強度の場合, 一般に順向マスキングは逆向マスキングに比べてはるかに弱く, 視覚刺激では順向マスキングはほとんど起きない^{(13),(14)}。このようなマスキング現象は感覚情報貯蔵内で起きると考えられており⁽¹⁵⁾, このような立場に立てば, 逆向マスキングは先行刺激の感覚情報貯蔵内の表象が後続刺激により抹消される現象, 順向マスキングはその逆の現象と解釈できる。

心理実験においては, 提示刺激の利用時間を正確に制御しなければならないことがしばしばある。このようなとき, 刺激の提示直後にマスクを提示し, 意図的に逆向マスキングを生じさせ, 感覚情報貯蔵内の刺激の表象をほとんど瞬間的に抹消し, 刺激の表象がその提示期間内だけ感覚情報貯蔵に保持されるようにする⁽¹⁵⁾。この場合,

刺激強度がある程度大きく, 時間的に矩形パルスのように変化すれば, 感覚情報貯蔵内の刺激の表象がもつ情報量もほぼ同様の变化をすると考えられる。

提示刺激の表象が感覚情報貯蔵内にあるうちに注意が向けられると, その表象の情報はそこから取り出される。文字配列のように, 多くの要素からなる刺激が提示される場合には, 感覚情報貯蔵内に形成された刺激の表象の要素1つ1つに注意が向けられていき, 1要素ずつその情報が取り出される⁽¹⁶⁾。これを走査とよぶ。視覚情報貯蔵の場合, 注意の過程での情報取り出し速度は英文字については10msで約1文字の速度である⁽¹⁷⁾。視覚情報貯蔵の表象上の走査速度に関しても, 英文字では10msで約1文字の速度であることが明らかになっている⁽¹⁶⁾。

感覚情報貯蔵から取り出された情報はパターン認知の過程で長期記憶内の情報をもとに意味づけされる。すなわち, パターン認知の過程は, 感覚情報を意味情報に変換するための手段である。パターン認知は, 分析, 比較, 決定の三つの過程に分けられる。本論文では, 意味づけに要する時間をパターン認知時間とよぶ。視覚情報貯蔵の場合, 英文字については10msで約1文字の速度で走査されるが, この走査過程では単に感覚情報が取り出されるにすぎない。パターン認知のためにはもっと多くの時間が必要であることが示されている⁽¹⁸⁾⁻⁽²¹⁾。したがって, 注意の過程では, すでに情報の取り出された要素がパターン認知されたかどうか確認せずに, 次から次へと走査していくものと考えられる。なお, 多くの要素からなる刺激の各要素と1つの要素からなる刺激は, パターン認知より後の過程においてはほとんど同様の処理を受けるので, 本論文ではパターン認知後の処理対象を一括して項目とよぶ。

パターン認知の過程で意味づけされた情報は短期記憶に入力されて意味的表象を形成し, そこに保持される。しかし, 短期記憶は, 提示刺激を意味的表象として保持するだけではない。刺激が, 命名できるような場合には音声化されるので, 音響的表象としても保持される⁽²²⁾。視覚刺激の場合には, 長期記憶内の視覚情報をもとに非感覚的な視覚的表象が短期記憶内で形成・保持される⁽²³⁾。すなわち, 短期記憶は提示刺激を少なくとも3種類の形態で保持する。短期記憶からの情報の取り出しは再生とよぶ。

短期記憶の情報保持には時間的制限があり, 短期記憶内の情報は比較的短時間で消失する。これを忘却とよぶ。忘却の原因としては, 受動的崩壊⁽²⁴⁾のほかに干渉がある。先に短期記憶に入力された項目の表象に, 後で入力された項目の表象が干渉して, その項目の情報を消失させる

ことを逆向干渉⁽²⁵⁾、その逆の場合を順向干渉⁽²⁶⁾とよぶ。順向干渉に関しては、後から入力された項目のほうがより以前に入力された項目よりも干渉しがちであることを示唆する実験結果が得られている⁽²⁷⁾。受動的崩壊の時定数は英文字の場合には約150sとなり⁽²⁸⁾、英単語の場合には約100sとなる⁽²⁹⁾。短期記憶の中に保持されている項目の数が増加していくと、各項目の再生率が時間とともに急速に低下するようになることが示されている⁽²⁸⁾。これは、複数個の項目が保持されている場合には、受動的崩壊だけでなく、干渉が時々刻々継続的に進行しているためと推察される。

短期記憶には、以上述べたような情報保持の時間的制限があるが、提示刺激が音声化される場合にはリハーサルにより情報をいつまでも保持することが可能である。リハーサルは短期記憶内の情報を長期記憶に転送する手段にもなる。ただし、単に機械的に繰り返されるリハーサルでは情報の保持がなされるだけで、長期記憶への転送は起こらない。そのためには、リハーサル中に、保持されている情報に対して積極的な処理がなされる必要がある。このような処理を体制化とよぶ。前者のリハーサルを維持リハーサル、後者のリハーサルを精緻化リハーサルとよぶ。

さらに短期記憶にはチャンキング機能がある。チャンキングとは、短期記憶内に保持されている個々の項目をより大きな項目にまとめあげてをいう。短期記憶の情報保持には忘却のような時間的制限だけでなく、容量制限もあるが、このチャンキングをうまく利用すれば、容量を実質的に大きくすることが可能である。

長期記憶は短期記憶から転送されてきた情報をほとんど永久的に、しかも無制限に保持することができる。情報は少なくとも3種類の表象、すなわち意味的表象、音響的表象、視覚的表象として保持される。推論等の思考過程においては、短期記憶と長期記憶との間に複雑な情報交換がなされる。

2.2 単語認知

本論文では単語認知というとき、単語を構成する文字を一度に提示する場合だけに限定し、それらを1つずつ提示する場合を除外する。単語認知に関しては、単語優位効果⁽³⁰⁾とよばれる現象があり、意味をもたない文字列よりも単語を提示したほうが文字をはるかによく報告できる。しかも、この効果は使用頻度の高い単語ほど強く現れる。この説明として、単語の場合には一部分が見えただけで単語全体を正しく推測できるためだとする反応バイアス説⁽³¹⁾がある。このほか、単語に含まれる文字の

ほうがチャンキングされやすく、効率的に短期記憶に保持されるので、その結果よく報告できると解釈することも可能である⁽³²⁾。しかし、推測の影響と短期記憶の影響を取り除いて実験を行っても、やはり単語優位効果が現れることが明らかになった⁽³³⁾。このことは、意味を持たない文字列と単語とでは処理過程に違いがあることを示唆している。

このため、単語の直接認知説⁽³⁴⁾が主張されるようになった。これは、単語の各位置の特徴情報が長期記憶内の情報と直接比較・照合されることにより、単語は個々の文字に分解されることなく、全体として把握され認知されるとする説である。この説によれば、単語の綴り字の冗長性のゆえに、単語を構成する1つ1つの文字を処理対象とするよりも特徴比較が少なく済み、本を読むとき単語認知が非常に速く行われる点についてもうまく説明できる。実際、単語の認知過程には1文字ごとの処理は含まれないことを示唆する実験結果も得られている⁽³⁵⁾。それに対して、1文字ごとの処理がなされていることを積極的に支持する実験結果は得られていない⁽¹³⁾。以上のことから、単語の認知過程においては、直接認知説そのものではないにしても、これに近い処理が行われている可能性が高いものと思われる。

以上、人間の情報処理系の構造と5つの基本要素の機能ならびに単語認知について概略を述べた。本論文は、短期記憶の連続時間モデルの検証を目的としているので、次に短期記憶の特性に関する代表的知見を4つ述べる。

2.3 短期記憶に関する代表的知見

2.3.1 知見 I

Sperling⁽¹¹⁾は文字配列の瞬間提示実験を行った。すなわち、文字配列をタキストスコープにより50msだけ提示してから、直ちにできるだけ多く見た文字を被験者に書かせた。ただし、文字配列の提示直後にマスクが与えられないので、被験者は実際には50ms以上長く見ることができる。

図2の破線は正しく報告された文字数すなわち報告文字数を、文字配列に含まれる文字数すなわち配列文字数の関数として表したもので、5名の被験者の平均である。報告文字数は配列文字数が少ないうちは直線的に上昇するが、やがて頭打ちになる。このときの値は、約4.3文字となる。同様の結果はSperling以前からすでに得られており、人間が短時間に見ることができる文字数に限界があるためと考えられ、知覚の範囲とか注意の範囲とよばれていた。

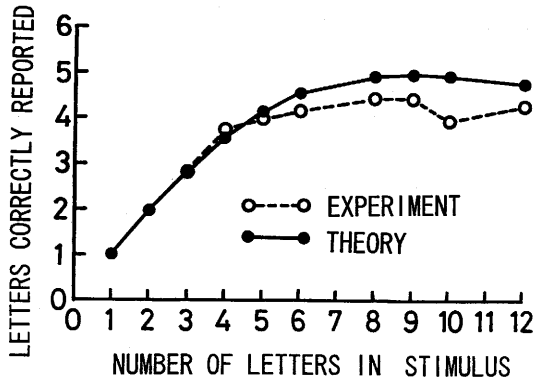


図2 配列文字数の関数として表された報告文字数
Fig.2 Letters available as functions of the number of stimulus letters.

Sperling は以上述べたような報告法を全体報告法とよび、報告文字数は文字配列が英文字だけか数字が混じっているかにはほとんど影響されないこと、また、文字配列の提示時間を500 ms まで長くしていてもほとんど変化しないことを明らかにした。

Sperling はさらに、部分報告法により文字配列の瞬間提示実験を行い、全体報告法で約4.3文字で報告文字数が頭打ちになる事実は、短時間に見ることができる文字数に限界があるためではなく、また視覚情報貯蔵の容量に限界があるためでもないことを明らかにした。すなわち、報告文字数の上限は、視覚情報貯蔵庫よりも後の記憶要素の容量を示していると考えられる。そこで、Sperling は注意の範囲を直接記憶範囲とよんだ。直接記憶とは短期記憶のことである。

2. 3.2 知見II

Murdock⁽³⁶⁾は、英単語の自由再生実験を行った。すなわち、相互に無関係な複数個の英単語を被験者に1語ずつ読んで聞かせ、全部読み終わった後、被験者に記憶している単語を書かせた。リハーサルに関しては被験者は特に禁止されていない。英単語系列の長さとして1単語当りの提示時間は、10-2, 20-1, 15-2, 30-1, 20-2, 40-1の6つのグループが用意された。ただし、最初の数字は英単語系列の長さ、2番目の数字は1単語当たりの提示時間 [s] を示す。

図3は実験結果で、単語の再生率を系列位置ごとに表した系列位置曲線を六つのグループについて示したものである。それぞれ15名から19名の被験者の平均である。系列位置曲線は一般にU字型曲線となり、系列位置が始めの方の再生率の高い部分を初頭部位、中間の平坦な部分を中間平坦部位、系列位置の終わりの方の再生率の高い部分を新近性部位とよぶ。また、系列位置の始めの方と終わりの方で再生率が高くなる効果をそれぞれ初頭効果、新近性効果という。

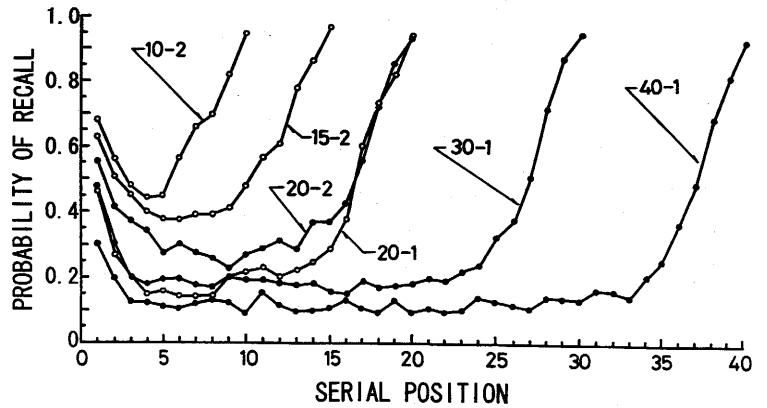


図3 系列位置曲線
Fig.3 Serial position curves for the six groups.

Postman と Phillips⁽³⁷⁾は、保持時間をもうけた自由再生実験により新近性効果は短期記憶からの再生によることを明らかにした。さらに、Lindsay と Norman⁽¹⁵⁾は、系列位置曲線で示される再生率について、次式を提案している。

$$P = P_{STM} + P_{LTM} (1 - P_{STM}) \quad (1)$$

ここで、P は再生率、 P_{STM} は短期記憶からの再生率、 P_{LTM} は長期記憶からの再生率である。新近性部位に関しては、 P_{LTM} は系列位置曲線の中間平坦部位の高さに等しくなる。

図4の破線は、図3に示された30-1の場合について、式(1)を用いて新近性部位における各英単語の短期記憶からの再生率 P_{STM} を系列位置ごとに推定して得た保持曲線である。この図より、再生率が系列位置の前の方にいくにしたがって徐々に低下していくのがわかる。30-1以外の場合についても同様の結果が得られ、英単語に関する短期記憶の忘却特性の一つとみなすことができる。

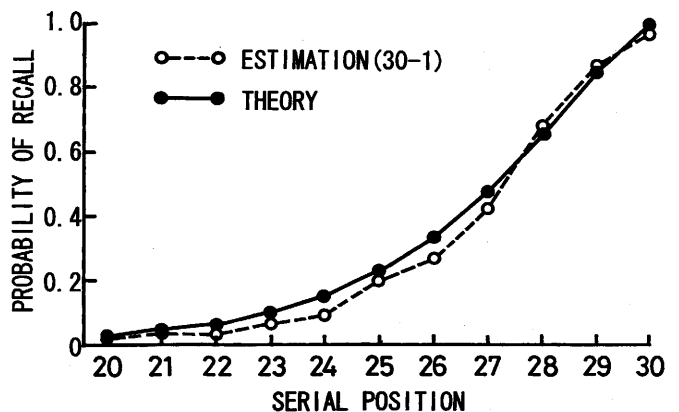


図4 短期記憶における保持曲線
Fig.4 Retention curves in the short-term memory.

表1は、再生単語数の実験値と短期記憶からの再生単語数の推定値を各グループごとに示したものである。ただし、Lindsay と Norman の推定式(1)は定量的にそれ

ほど厳密なものではないので、1単語当たりの提示時間が1sのグループに対してのみ適用した。短期記憶からの再生単語数の推定値は、平均すると約3.5となり、これは英単語の自由再生実験における短期記憶の容量とみなすことができる。

表1 再生単語数の実験値と短期記憶からの再生単語数の推定値

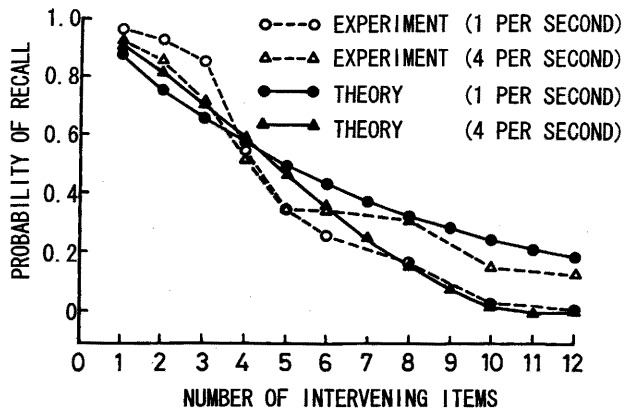
グループ	再生単語数の実験値	短期記憶からの再生単語数の推定値
20-1	6.9	3.6
30-1	8.8	3.6
40-1	8.2	3.8
平均	8.0	3.7

ところで、Hayes⁽³⁸⁾やPollack⁽³⁹⁾らは、記憶範囲実験により、短期記憶の容量は項目の種類にあまり関係なく約7項目であることを明らかにした。記憶範囲とは、被験者が完全に反復できる項目数の最大値のことで、短期記憶の容量を示すと考えられている。しかし、英単語の自由再生実験により求められる容量はすでに述べたように約3.5項目である。また、文字配列の瞬間提示実験により求められる容量は約4.3項目で、前の二つの容量の中間の大きさである。表1に示された英単語の自由再生実験の結果をみると、再生単語数の平均値は8で記憶範囲に大変近い。この中には長期記憶から再生された英単語約4.5が含まれているが、記憶範囲実験で得られた約7項目の中にもこのような成分が含まれていないとは断言できない。なぜなら、記憶範囲実験においても、自由再生実験と同様リハーサルがひそかに行われる可能性があるからである。

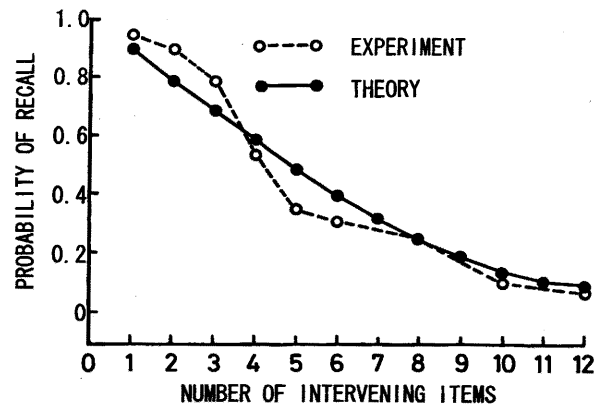
以上のことから、短期記憶の容量に制限があることは確かであるが、容量を一定とする考え方には無理があるようである。Hayesの記憶範囲実験では、記憶項目が2進数字、10進数字、英文字、英単語と変化するにつれて、記憶範囲が多少小さくなるので、容量を決定する要因として項目の種類が挙げられる。また、文字配列の瞬間提示実験においては10msで約1文字の速度で短期記憶に入力されるのに対して、英単語の自由再生実験においては、1sあるいは2sで1単語の速度で入力されるので、項目の短期記憶への入力速度も容量を決定する要因の一つになっている可能性がある。記憶範囲実験において得られた容量がいちばん高くなったのは、被験者が短期記憶に項目が最も保持されやすいように、無意識のうちに項目の短期記憶への入力速度を調節しているためかもしれない。いずれにしても、短期記憶の容量は一定のものではなく、保持される項目の種類や入力速度などによって変化するものであると考えるのが妥当であろう。

2.3.3 知見Ⅲ

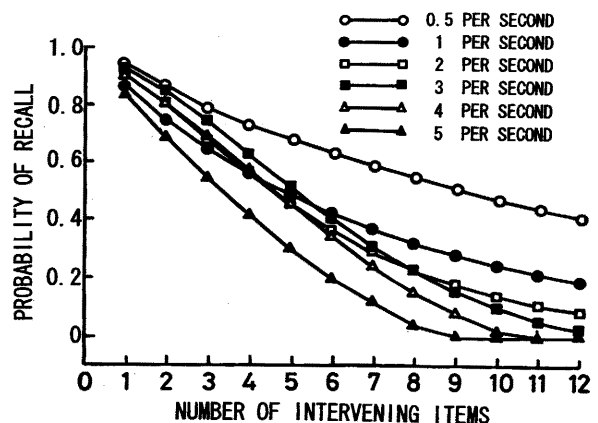
WaughとNorman⁽²⁵⁾はプローブ数字実験を行った。すなわち、無作為に選んだ16個の1桁の数字を、1s当たり1数字と4数字の2種類の速度で被験者に読んで聞かせた。数字系列の最後の数字はその数字系列の中で既に1回出たもので、数字系列の終わりを示す信号音を伴っており、プローブ数字とよばれる。全部読み終わった後、プローブ数字の1回目の出現に続く数字を再生させた。この実験では、被験者は聞いたばかりの数字だけを考え、



(a) Under two rates of presentation



(b) Average



(c) Under six rates of presentation

図5 介入数字の個数の関数として表された数字の再生率
Fig.5 Probability of recall as functions of the number of items intervening between successive presentations of the probe-digit.

それ以前に聞いた数字のことはいっさい考えないようにとの教示を受けるので、リハーサルは不可能である。

図5(a)の破線は、プローブ数字の1回目の出現に後続する数字の再生率を、その数字の出現と再生までの間に介在する数字の個数の関数として表したもので、4名の被験者の平均である。最後のプローブ数字は介在数字の中に含める。丸は提示速度が1 s当り1数字、三角は1 s当り4数字の場合である。この図より、介在数字の個数が多くなるほど、再生率が急速に低下していくことがわかる。この結果は、数字の場合の短期記憶における忘却特性の1つとみなすことができる。この実験の場合、数字の提示速度は再生率にほとんど影響していない。

2. 3.4 知見IV

WaughとNorman⁽⁴⁰⁾はさらに、3文字からなる英単語を用いてプローブ単語実験を行った。英単語は1 s当り1単語の速度で被験者に読んで聞かせた。

図6の破線は、プローブ単語の1回目の出現に後続する英単語の再生率を、介在英単語の個数の関数として表したもので、10名の被験者の平均である。この図より、介在英単語の個数の増加と共に再生率は急速に低下することがわかるが、全体的にプローブ数字実験の場合より再生率が低い。この結果は、英単語の場合の短期記憶における忘却特性の1つとみなすことができる。

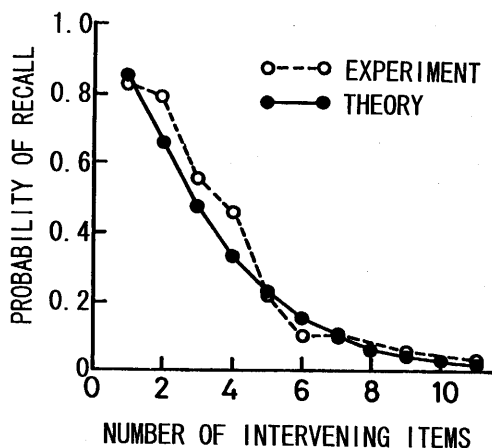


図6 介在英単語の個数の関数として表された英単語の再生率
Fig.6 Probability of recall as functions of the number of items intervening between successive presentations of the probe-word.

3. 短期記憶の連続時間モデル

3.1 従来のモデル

従来の代表的モデルとしては、Atkinson-Brelford-Shiffrin⁽⁴¹⁾がまず挙げられる。このモデルは感覚情報貯蔵から長期記憶までを含んでいるが、短期記憶の部分については、項目を保持できる場所の数に制限を設けるこ

とにより容量制限を実現している。このようなモデルは単純スロットモデルとよばれ、1項目を保持できるスロットを一定数持つ。短期記憶に転送されてきた項目は、順々にスロットの中に置かれ、そこに保持される。すべてのスロットがいっぱいであるとき新しい項目が入力されると、すでに保持されている項目のうちの1つが捨てられ、忘却が起こる。これは一種の逆向干渉である。項目の再生率は、項目が保持されていれば1、保持されていなければ0としている。

しかし、短期記憶内の項目の音響的表象が互いに類似している場合には、そうでない場合よりも忘却が激しいことが実験により明らかにされている⁽¹⁹⁾。この結果は、短期記憶では項目自身の性質に基づいて忘却すなわち干渉が起きることを示唆しており、スロット数の制限により忘却が起きるとする単純スロットモデルとは矛盾する。短期記憶のように情報が直列的に入力・保持される場合には、忘却と容量制限を二つの別個の現象として分離することができず、忘却のゆえに容量制限が生じると解釈することも可能である。このことを考えあわせると、干渉を忘却と容量制限両方の原因とする方がより自然であろう。

Waugh-Norman⁽²⁵⁾のモデルは単純スロットモデルの修正版であるが、以上述べた点からみて単純スロットモデルより優れている。このモデルは、短期記憶と長期記憶を含んでいるが、短期記憶の部分については、スロット数に制限を設けず、項目が新しく短期記憶に入力されたときに、この項目がすでに保持されている各項目に対して、項目自身の性質に基づいて逆向干渉を起こすと仮定しており、逆向干渉は短期記憶にいくつ項目が保持されているかに関係なく起きる。逆向干渉により各項目はある確率で除去され、忘却が起こる。短期記憶の容量は、この除去確率より求められる。すなわち、Atkinsonらのモデルがスロット数の制限により、短期記憶の容量と忘却を実現しようとしたのに対して、Waughらのモデルは、逆向干渉によりそれらを実現しようとしている。ただし、後者のモデルも結果的には短期記憶からの再生率に関してほとんど同じような式が導かれる。

Norman-Rumelhart⁽⁴²⁾のモデルは、Waugh-Normanのモデルを更に発展させたものである。このモデルは短期記憶だけでなく、感覚情報貯蔵、注意とパターン認知、長期記憶のすべてを含んでいる。短期記憶の部分は、指数減衰する受動的崩壊と逆向干渉を取り入れているが、逆向干渉に関してはWaugh-Normanのモデルとほとんど同じである。

しかし、以上述べたモデルは、短期記憶の部分に関し

ては、いずれもスロットモデルであり、干渉は項目が短期記憶に入力されたときだけ、しかもその入力項目と既に保持されている項目との間でだけ起きるとしている。したがって、項目がすべて短期記憶に入力し終わった後は、短期記憶では忘却は全く起きないことになる。また、たとえモデルの中に受動的崩壊を取り入れても、複数個の項目が保持されているときの急速な忘却は実現できない。すでに述べたように、短期記憶における干渉は、入力項目とすでに保持されている項目との間あるいはすでに保持されている項目間で時々刻々継続的に起きると考えられる。よって、このような性質をもった干渉を正しく記述するためにはスロットモデルではなく、連続時間形式のモデルが必要となる。

3.2 連続時間モデル

以上述べた要求にそうように、従来のモデルに大幅な変更を加え、連続時間形式にしたものが短期記憶の連続時間モデルである。これは、筆者の一人が提案した視覚情報貯蔵からパターン認知までの連続時間モデル^{(2),(17)}の後にくるので、後者のモデルの概略を先に説明する。

図7はその概念図である。ここでは1要素からなる刺激も特殊な場合として含め、複数個の刺激が順々に提示される場合を想定している。したがって、視覚情報貯蔵内には刺激が提示されるたびに各要素の感覚的な視覚的表象が形成される。

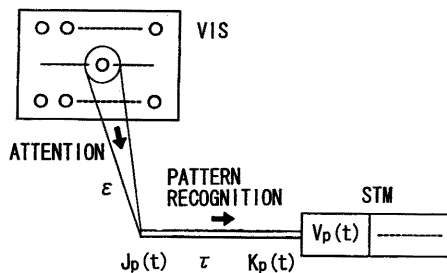


図7 視覚情報貯蔵から注意とパターン認知までの連続時間モデル
Fig.7 Time-continuous model of VIS, attention and pattern recognition.

図中の $J_p(t)$ は、注意の過程で p 番目に選択された要素について視覚情報貯蔵から取り出された情報量の総和を時間に関して微分したもので、時刻 t における視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度、すなわち 1 s 間に視覚情報貯蔵から取り出される第 p 要素の情報量を表す。

情報取り出し速度 $J_p(t)$ は、Rumelhart⁽⁴³⁾ のモデルにしたがって、時刻 t において視覚情報貯蔵内に保持されている第 p 要素の情報量をその全情報量 h_p で割った値に比例し、その比例定数 ϵ は情報の種類に関係なく一定で

あると仮定している。したがって、視覚情報貯蔵内の情報量が矩形パルスのように変化すれば、 $J_p(t)$ も時間的には同じ形で変化することになる。比例定数 ϵ は、視覚情報貯蔵内に全情報量が保持されているときの情報取り出し速度とも解釈できる。 $J_p(t)$ は 0 から ϵ の範囲の値をとる。ただし、情報取り出し速度 ϵ そのものを実験データから決定することはできない。決定できるのは ϵ を項目の全情報量で割ったもので、これを C とする。 C は項目数で表した情報取り出し速度である。 C の標準値は、すでに述べた知見より、英文字の場合毎秒100となる。

τ はパターン認知時間である。このモデルでは、パターン認知の過程を、分析、比較、決定の三つに分けて詳細に記述することはせず、パターン認知時間 τ のみを定数として含む。刺激が複数個の文字より成る1個の単語である場合には、簡単のため直接認知説の立場に立ち、文字と同じように1つの要素として情報の取り出しがなされ、パターン認知の過程で意味づけされるものとする。

$K_p(t)$ は、時刻 t における第 p 項目の短期記憶への情報入力速度、すなわち 1 s 間に短期記憶に入力される第 p 項目の情報量を表す。 $K_p(t)$ は $J_p(t)$ と式(2)に示す関係で結ばれる。

$$K_p(t) = J_p(t - \tau) \quad (2)$$

短期記憶に入力された情報はそこに蓄積されていく。1つの要素がある時刻に正しくパターン認知される確率は、その時刻に短期記憶に蓄積されているその要素の情報量に比例するとし、短期記憶からの再生率と本質的には同じものとみなす。したがって、一定の速度で短期記憶に情報が入力されれば、蓄積される情報量とパターン認知確率は、情報の入力開始から終了までの間、時間とともにほぼ直線的に増加することになる。

以上述べた視覚情報貯蔵からパターン認知までの連続時間モデルは、英文字のパターン認知実験により、モデルからの予測と実験結果とが定性的にも定量的にもよい一致を示すことが明らかにされ、その妥当性がすでに証明されている。

図8は、短期記憶の連続時間モデルの概念図である。このモデルは、短期記憶内で受動的崩壊、順向干渉、逆干渉の三つの過程が時々刻々継続的に進行することにより、忘却が起きるだけでなく、同時に容量に制限が生じるとしている。したがって、容量制限を別個に与えることはしない。ただし、短期記憶の保持機能だけに着目し、チャンキング機能やリハーサル機能については考慮されていない。

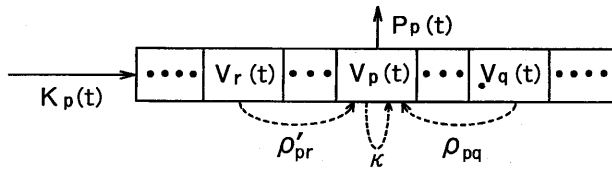


図8 短期記憶の連続時間モデル

Fig.8 Time-continuous model of short-term memory.

$V_p(t)$ は、時刻 t において短期記憶内に保持されている第 P 項目の情報量であり、0 から h_p の範囲の値をとる。ただし、すでに述べたように短期記憶内には意味的表象、非感覚的な視覚的表象、非感覚的な音響的表象の少なくとも3種類の表象が存在するので、ここでいう情報量は、それぞれの表象が持つ情報量を加えたものを意味する。

x は受動的崩壊の時定数で、受動的崩壊により短期記憶内の情報量が $1/e$ に減少するまでの時間を表す。 x の標準値は、すでに述べたように、英文字の場合150 s、英単語の場合100 s となる。

本モデルでは、1つの項目が干渉により1 s 間に失う情報量すなわち情報消失速度は、干渉する項目の情報量に比例すると仮定しており、このときの比例定数を干渉係数とよぶ。 ρ_{pq} は第 q 項目から第 p 項目への順向干渉係数、 ρ'_{pr} は第 r 項目から第 p 項目への逆向干渉係数である。 $P_p(t)$ は、時刻 t における第 p 項目の短期記憶からの再生率である。

短期記憶に入力された項目の総数を L とすると、 $V_p(t)$ と $P_p(t)$ はそれぞれ式(3)、(4)に従う。

$$\frac{d}{dt} V_p(t) = K_p(t) - V_p(t)/x - \sum_{q=1}^{p-1} \rho_{pq} V_q(t) - \sum_{r=p+1}^L \rho'_{pr} V_r(t) \quad (3)$$

$$(0 \leq V_p(t) \leq h_p, \quad 1 \leq q \leq p-1, \quad p+1 \leq r \leq L)$$

$$P_p(t) = V_p(t)/h_p \quad (4)$$

すでに述べたように、後から入力された項目の方がより以前に入力された項目よりも干渉しがちであることを示唆する実験結果が得られている。この結果は、順向干渉に関するものであるが、逆向干渉に関しても同様であろうと考えられる。そこで、モデルでは、干渉係数を二つの項目の短期記憶への入力時間差の関数とし、入力時間差が長くなるほど小さくなるように、式(5)、(6)を仮定している。ただし、干渉係数を始めから入力時間差の2乗の関数としたのではない。1乗から7乗まで変化させ、後に述べる英文字の自由再生実験の結果とシミュレーション結果とを比較したところ、2乗の場合に両者の適合が最もよかったためである⁽³⁾。

$$\rho_{pq} = R \exp(-(T_p - T_q)^2 / (2\sigma^2)) \quad (5)$$

$$\rho'_{pr} = R' \exp(-(T_r - T_p)^2 / (2\sigma'^2)) \quad (6)$$

ここで、 T_p は第 p 項目が短期記憶に入力される時の入力開始時刻と入力終了時刻のちょうど中間にあたる時刻である。 R と R' は順向干渉度および逆向干渉度で、2つの項目の入力時間差を短くしていったときの干渉係数の極限である。 σ と σ' は順向干渉範囲および逆向干渉範囲で、干渉係数が干渉度の $1/\sqrt{e}$ になる入力時間差である。本論文では R 、 σ 、 R' 、 σ' を干渉定数とよぶ。

本モデルでは、短期記憶の容量は情報量で表したとき $\max_{t,L} \sum_{p=1}^L V_p(t)$ 、項目数で表したとき $\max_{t,L} \sum_{p=1}^L P_p(t)$ で与えられ、別個に制限条件を与えなくても、主として項目間の干渉により容量制限が実現できるようになっている。

4. 定数の決定

短期記憶の連続時間モデルの検証を行うためには、まずモデル中の定数を決めなければならない。すでに述べたように、筆者らは本モデルを用いて、英文字を同一位置に逐次提示する場合と横1列に逐次提示する場合、英単語を同一位置に逐次提示する場合について、提示項目が短期記憶に最も保持されやすくなる提示時間の最適配分様式を、個人ごとに決定した。

その際、英文字を提示する場合には、情報取り出し速度 C と受動的崩壊の時定数 x は、多少変化させても短期記憶からの再生率にはほとんど影響しないのに対し、干渉定数 R 、 σ 、 R' 、 σ' は少し変化させても再生率に大きく影響する。そこで、情報取り出し速度と受動的崩壊の時定数は標準値を用い、干渉定数は、自由再生実験を行って個人ごと決定した。また、英単語を提示する場合には、受動的崩壊の時定数 x については再生率にほとんど影響しないのに対し、情報取り出し速度 C と干渉定数 R 、 σ 、 R' 、 σ' は再生率にある程度影響する。そこで、受動的崩壊の時定数は標準値を用い、情報取り出し速度と干渉定数は、それぞれ認知実験と自由再生実験を行って個人ごとに決定した。本論文では、以上述べた個人ごとに決定した定数について、その標準値を全被験者の実験値の平均を元に決定する。

英文字を同一位置に逐次提示する場合の自由再生実験では、CRT表示装置の画面の中央の同一位置に、無作為に選んだ6個あるいは7個の英大文字を各文字とも同じ提示時間で逐次提示し、最後の文字の提示直後にドットパターンマスクを500 ms 提示した。1文字当りの提示時間は、100, 200, 300, 400, 500, 600, 700の7種類で、試行回数は各提示時間とも50回である。被験者は、

20代の男性が3名, 20代の女性が2名, 30代の男性が2名の計7名で, 視力は全員正常(矯正も含む)であった。図9の破線は, 再生文字数の実験値を1文字当りの提示時間の関数として表したもので, 全被験者の平均である。

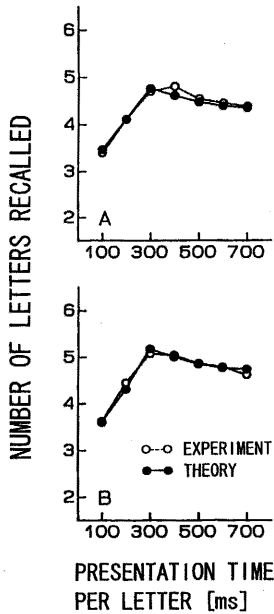


図9 英文字同一位置提示の場合の1文字当りの提示時間の関数として表された再生文字数(Aは6文字提示, Bは7文字提示)
Fig.9 Number of letters recalled as functions of presentation time per letter for same-position presentation. 'A' represents a six-letter presentation and 'B' represents a seven-letter presentation.

そこで, まず6文字提示と7文字提示それぞれの場合の再生文字数の実験値に, 計算機シミュレーションで得られる再生文字数の理論値が近づくように, 干渉定数を試行錯誤的に変化させる。計算機シミュレーションにおいては, 再生文字数を求めるのが目的であるので, パターン認知時間は簡単のため0とし, 情報取り出し速度にはCを用い, K_p , V_p の代わりにそれらを英文字1個の全情報量 h_E で割った K_p/h_E , P_p を用いる。なお, 微分方程式の数値解析には, Runge-Kutta法を用い, 時間のさざみ幅は10msとする。表2は, 再生文字数の理論値が実験値と比較的良好一致を示すようになった干渉定数である。次に, 表2の値を中心にして干渉定数を表3に示す範囲で変化させ, 最小自乗法によりその値を決定する。このとき, 定数の値の組み合わせは全部で 11^4 通りで, 最小にすべき量を6文字提示と7文字提示それぞれの場合の残差自乗和の合計とする。表4は, 以上の方法で決定した英文字を同一位置に逐次提示する場合の干渉定数の標準値である。図9の実線は, 表4の値を用いてシミュレーションを行ったとき得られる再生文字数の理論値である。

表2 英文字同一位置提示の場合の試行錯誤法によって得られた干渉定数

R	σ	R'	σ'
7	0.09	0.14	1.6

表3 英文字同一位置提示の場合の干渉定数の変化範囲

R	σ	R'	σ'
Step 1	Step 0.01	Step 0.01	Step 0.1
2-12	0.04-0.14	0.09-0.19	0.1-2.1

表4 英文字同一位置提示の場合の最小自乗法によって決定した干渉定数の標準値

R	σ	R'	σ'
9	0.09	0.11	1.2

英文字を横1列に逐次提示する場合の自由再生実験では, CRT表示装置の画面の中央付近に, 無作為に選んだ6個あるいは7個の英大文字を, 横1列等間隔に各文字とも同じ提示時間で逐次提示した。各文字の提示直後には, 英文字を同一位置に逐次提示した場合と同様のマスクがそれぞれの文字の提示位置に与えられ, 最後の文字の提示後, 提示時間500msのマスクの提示が終了するまで続く。その他の点については, 英文字を同一位置に逐次提示した場合と全く同じである。被験者は, 20代の男性が3名, 30代の男性が2名の計5名で, 視力は全員正常(矯正も含む)であった。図10の破線は, 再生文字数の実験値を1文字当りの提示時間の関数として表したもので, 全被験者の平均である。

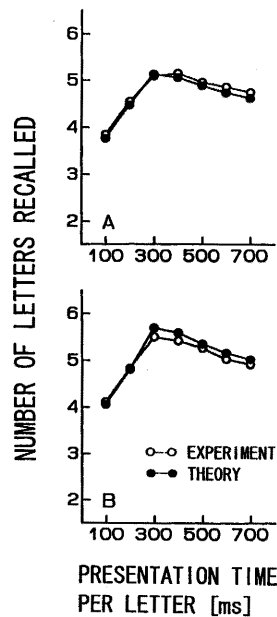


図10 英文字横1列提示の場合の1文字当りの提示時間の関数として表された再生文字数(Aは6文字提示, Bは7文字提示)
Fig.10 Number of letters recalled as functions of presentation time per letter for horizontal-row presentation. 'A' represents a six-letter presentation and 'B' represents a seven-letter presentation.

干渉定数の標準値の決定方法は、同一位置提示の場合と全く同様で、表5は、試行錯誤法により再生文字数の理論値が実験値と比較的良好一致を示すようになった干渉定数である。表7は、表5の値を中心にして干渉定数を表6に示す範囲で変化させ、最小自乗法により決定した干渉定数の標準値である。図10の実線は、表7の値を用いてシミュレーションを行ったとき得られる再生文字数の理論値である。

表5 英文字横1列提示の場合の試行錯誤法によって得られた干渉定数

R	σ	R'	σ'
6	0.10	0.07	1.7

表6 英文字横1列提示の場合の干渉定数の変化範囲

R	σ	R'	σ'
Step 1	Step 0.01	Step 0.01	Step 0.1
1-11	0.05-0.15	0.02-0.12	1.2-2.2

表7 英文字横1列提示の場合の最小自乗法によって決定した干渉定数の標準値

R	σ	R'	σ'
5	0.10	0.06	2.2

英単語の認知実験では、60個の4文字英単語の中から無作為に選ばれた1個を、CRT表示装置の画面の中央に提示し、さらにその直後には、ドットパターンのマスクを500 ms 提示した。英単語の提示時間は、25, 50, 75, 100, 125, 150, 175, 200, 225, 250の10種類で、試行回数は各提示時間とも50回である。被験者は20代の男性2名、30代の男性が1名の計3名で、視力は全員正常(矯正の含む)であった。

図11は、英単語の認知率を提示時間の関数として折れ線グラフで表したもので、全被験者の平均である。認知率は提示時間と共に上に凸の曲線にしたがって増大していき、やがて1に達している。

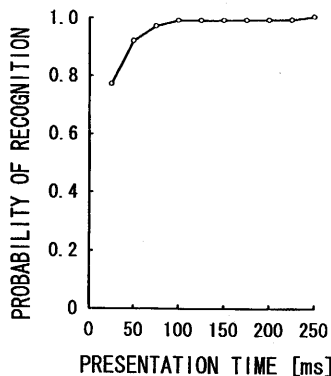


図11 提示時間の関数として表された英単語の認知確率
Fig.11 Probability of recognition as a function of presentation time.

本来なら、このような実験結果は累積正規曲線で近似すべきであろう。しかし、提示時間の短いところでの実験データが少なく、またそれらのデータが必ずしも累積正規曲線によく合うわけでもない。しかも、1個の単語の認知を短期記憶の連続時間モデルで考えると、すでに述べたように、視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度が一定であることから、認知率が提示時間と共にほぼ直線的に増大するという結果が得られる。そこで、やや粗っぽくはあるが、実験で得られた折れ線グラフ上で認知率が0.95になる点を1に引き上げ、この点と原点とを直線で結び、直線近似を行うことにする。そして、この直線の傾きから、情報取り出し速度Cを決定する。その結果、英単語の場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度Cの標準値は16となった。

英単語を同一位置に逐次提示する場合の自由再生実験では、CRT表示装置の画面の中央の同一位置に、60個の中から無作為に選んだ6個あるいは7個の4文字英単語を、各単語とも同じ提示時間で逐次提示した。その他の点については、英文字を同一位置に逐次提示した場合と全く同じである。被験者は、英単語の認知実験の場合と同じである。図12の破線は、再生単語数の実験値を1単語当りの提示時間の関数として表したもので、全被験者の平均である。

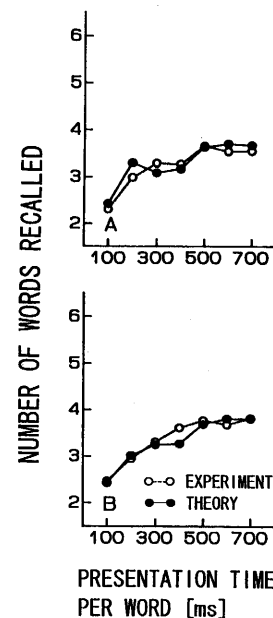


図12 英単語同一位置提示の場合の1単語当りの提示時間の関数として表された再生単語数(Aは6文字提示、Bは7文字提示)
Fig.12 Number of words recalled as functions of presentation time per word for same-position presentation.
'A' represents a six-word presentation and 'B' represents a seven-word presentation.

干渉定数の標準値の決定方法は、英文字同一位置提示の場合と全く同様で、表8は、試行錯誤法により再生単

語数の理論値が実験値と比較的良好一致を示すようになった干渉定数である。表10は、表8の値を中心にして干渉定数を表9に示す範囲で変化させ、最小自乗法により決定した干渉定数の標準値である。図12の実線は、表10の値を用いてシミュレーションを行ったとき得られる再生単語数の理論値である。

表8 英単語同一位置提示の場合の試行錯誤法によって得られた干渉定数

R	σ	R'	σ'
9	0.17	0.16	1.2

表9 英単語同一位置提示の場合の干渉定数の変化範囲

R	σ	R'	σ'
Step 1	Step 0.01	Step 0.01	Step 0.1
4-14	0.12-0.22	0.11-0.21	0.7-1.7

表10 英単語同一位置提示の場合の最小自乗法によって決定した干渉定数の標準値

R	σ	R'	σ'
12	0.16	0.17	1.4

以上のようにして短期記憶の連続時間モデルに含まれる定数の標準値が決定されたので、これらを用いて計算機シミュレーションを行い、すでに述べた短期記憶に関する代表的な知見 I, II, III, IV と比較し、一致するかどうか調べる。

5. 検証

5.1 知見 I との比較

文字配列が提示されたとき、視覚情報貯蔵内の表象は 10 ms で約 1 文字の速度で走査される。したがって、文字配列を一度に提示する代わりに、1 文字の提示時間を 10 ms として 1 文字ずつ逐次提示してもパターン認知より後の処理はほとんど同じとなる。

そこで、英文字を横 1 列に逐次提示する場合の干渉定数の標準値を用いて、文字配列の瞬間提示の計算機シミュレーションを行い、報告文字数すなわち再生文字数と配列文字数の関係を求めた。シミュレーションでは、時間 t のきざみ幅を 1 ms にして Runge-Kutta 法を用いた。図 2 の実線はその結果である。計算機シミュレーションによって得られた理論値においても、報告文字数は、4 文字と 5 文字の間で頭打ちとなっており、実験値と理論値はかなり良好一致を示している。

5.2 知見 II との比較

英単語の自由再生実験においては、英単語は音響的に提示される。したがって、英単語を同一位置に視覚的に

提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C と短期記憶における受動的崩壊の時定数および干渉定数は厳密にはシミュレーションに用いることはできない。

しかし、短期記憶においては、音響的表象が主要な表象であるので、英単語を音響的に提示した場合のシミュレーションに、視覚的に提示した場合の受動的崩壊の時定数と干渉定数を用いてもさしつかえないと思われる。また、シミュレーションによれば 1 単語の提示時間が 1 s ないし 2 s と比較的長い場合には、情報取り出し速度 C が多少変化しても再生単語数はほとんど変化しない。したがって、英単語を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度を、英単語を音響的に提示した場合の音響情報貯蔵からの情報取り出し速度の代わりに用いてもさしつかえないと思われる。

そこで、英単語を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C の標準値、短期記憶における受動的崩壊の時定数と、干渉定数の標準値を用いて、英単語の自由再生の計算機シミュレーションを行った。シミュレーションでは、時間 t のきざみ幅を 10 ms にして Runge-Kutta 法を用いた。

図 4 の実線は、30-1 の場合のシミュレーションで得られた理論値である。実験値から得られた推定値と理論値はかなり良好一致を示している。1 単語あたりの提示時間が 1 s で 30-1 以外の他のグループについても同様の結果が得られた。

表 11 は各グループに対する短期記憶からの再生単語数の推定値と理論値を比較したものである。理論値の方がやや大きい、両者は良好一致を示している。

表11 短期記憶からの再生単語数の推定値と理論値の比較

グループ	短期記憶からの再生単語数の推定値	短期記憶からの再生単語数の理論値
20-1	3.6	4.0
30-1	3.6	4.0
40-1	3.8	4.0
平均	3.7	4.0

5.3 知見 III との比較

プローブ数字実験では、提示されるのは数字でしかも音響的である。したがって、英文字を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C 、短期記憶における受動的崩壊の時定数と干渉定数は厳密にはシミュレーションに用いることはできない。

しかし、数字と英文字は音響的にも大体同じような刺激であると考えられ、知見 II との比較の場合に述べたと同様に、短期記憶においては音響的表象が主要な表象で

あるので、数字を音響的に提示した場合のシミュレーションに、英文字を同一位置に視覚的に提示した場合の受動的崩壊の時定数と干渉定数を用いてもさしつかえないと思われる。しかも、それらの定数を用いてシミュレーションを行った場合、情報取り出し速度 C を幅広く変えても、項目の再生率はあまり変化しない。したがって、英文字を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度を、数字を音響的に提示した場合の音響情報貯蔵からの情報取り出し速度の代わりに用いてもさしつかえないと思われる。

そこで、英文字を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C の標準値、短期記憶における受動的崩壊の時定数と干渉定数の標準値を用いて、プローブ数字実験の計算機シミュレーションを行った。シミュレーションでは、時間 t のきざみ幅を 10 ms にして Runge-Kutta 法を用いた。

図 5(a)の実線は、シミュレーションにより得られた理論値である。実験値と理論値は比較的良い一致を示している。図 5(b)は、実験値と理論値それぞれについて、 1 s 当たり 1 数字と 1 s 当たり 4 数字の場合の結果を平均したものである。この図において、実験値と理論値はかなり良い一致を示している。

Waugh と Norman のプローブ数字実験においては、数字の提示速度は数字の再生率に大きな違いを与えない。しかし、数字の提示速度を 1 s 当たり 0.5 数字から 1 s 当たり 5 数字まで広い範囲にわたって変え、連続時間モデルに基づいて計算機シミュレーションを行ったところ、図 5(c)のような結果が得られた。この結果は、数字の提示速度により数字の再生率は当然変化するが、提示速度が 1 s 当たり 1 数字から 4 数字の範囲は、数字の再生率にあまり大きな変化を生じないことを示している。したがって、Waugh と Norman の言うように数字の提示速度がプローブ実験の結果に影響を与えないというのではなく、Waugh と Norman のプローブ実験では、数字の提示速度がたまたま数字の再生率に余り影響を与えない範囲にあったと、連続時間モデルからは解釈できる。

5. 4 知見IVとの比較

プローブ単語実験では、英単語は音響的に提示され、英単語を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C 、短期記憶における受動的崩壊の時定数と干渉定数は厳密にはシミュレーションに用いることはできない。しかし、プローブ数字実験の場合と同様の理由で、それらの定数を用いてもさしつかえないと思われる。

そこで、英単語を視覚的に提示した場合の視覚情報貯蔵からの情報取り出し速度 C の標準値、短期記憶における受動的崩壊の時定数と干渉定数の標準値を用いて、プローブ単語実験のシミュレーションを行った。ただし、Waugh と Norman のプローブ単語実験では、 1 s 当たり 1 単語の速度で被験者に聞かせているので、シミュレーションにおいては 1 単語を 1 s の間見せたとしている。

図 6 の実線は、シミュレーションにより得られた理論値である。実験値と理論値はかなり良い一致を示している。

6. むすび

本論文では短期記憶の連続時間モデルが、短期記憶の容量や忘却特性に関する代表的な 4 つの知見をすべて説明できるかどうかを調べるため、まずモデルの定数の標準値を決定した。次に、それらの標準値を用いて、それぞれの場合について計算機シミュレーションを行った。その結果、短期記憶に関する 4 つの代表的知見すべてと定性的にも定量的にも良い一致を示すことが確かめられた。すなわち、短期記憶の連続時間モデルの妥当性が証明された。

今後課題としては、短期記憶に関するさらに多くの知見と比較すること、音声表示の場合におけるモデルの定数の標準値を決定すること等が挙げられる。

謝辞 最後に本研究を進める上で御指導を頂いた東京電機大学工学部斎藤正男教授に深謝致します。

文 献

- (1) 横井博一, 斎藤正男: “SIS より STM への情報伝達のモデル”, 信学技報, MBE 83-26 (1983).
- (2) 横井博一, 斎藤正男: “定量的記憶モデルの提案”, 信学技報, MBE 83-94 (1984).
- (3) 横井博一, 斎藤正男: “短期記憶の連続時間モデルにおける干渉係数の検討”, 信学論 (D), J71-D, 6, pp. 1151-1154 (1988).
- (4) 横井博一, 久間英樹: “短期記憶の連続時間モデルに基づいた文字列の最適提示速度”, 信学論 (D), J70-D, 11, pp. 2327-2337 (1987).
- (5) Yokoi H. and Kuma H.: “Optimum apportionment of character presentation time by time-continuous model of short-term memory”, Display, 12, pp. 156-166 (1991).
- (6) 横井博一, 久間英樹: “短期記憶の連続時間モデルによる文字提示時間の最適配分”, Progress in Human Interface, 1, 1, pp. 66-77 (1992).
- (7) 横井博一, 久間英樹: “視覚表示での提示時間最適配分”, 医用電子と生体工学, 31, 2, pp. 24-34 (1993).
- (8) Yokoi H. and Kuma H.: “Optimum apportionment of presentation time in a visual display”, Frontiers Med.Biol.Engng, 6, 3, pp. 209-232 (1994).
- (9) 横井博一: “横 1 列に逐次表示される文字の最適提示速度”, 信学論 (D), J73-D-II, 10, pp. 1801-1803 (1990).

- (10) 横井博一：“短期記憶の連続時間モデルに基づく単語の提示時間の最適配分”，人間工学，29，3，pp.185-195 (1993).
- (11) Sperling G.：“The information available in brief visual presentations”，Psychol. Monogr., 74, 11, pp. 1-29(1960).
- (12) Eriksen C.W. and Collins J.F.：“Reinter-pretation of one form of backward and forward masking in visual perception”，J.exp.Psychol., 70, pp. 343-351 (1965).
- (13) 御領謙：“読むということ”，東京大学出版会 (1987).
- (14) Elliot L.L.：“Backward masking:Monotonic and dichotic conditions”，J.Acoust. Soc. Am.,34,8, pp.1108-1115(1962).
- (15) Lindsay P.H. and Norman D.A.：“Human Information Processing :An Introduction to Psychology”，Academic Press (1977)；中溝，箱田，近藤訳：“情報処理心理学入門 II”，サイエンス社 (1983).
- (16) Sperling G.：“A model for visual memory tasks”，Human Factors, 5, pp.19-39 (1963).
- (17) 吉野慶一，横井博一：“視覚情報貯蔵の諸特性とそのモデル化”，信学技報，MBE 88-106 (1989).
- (18) 渡辺茂：“漢字と図形”，日本放送出版協会 (1976).
- (19) Tresselt M.E. and Mayzner M.E.：“Estimates of” SVS “processing time”，Psychonomic Science, 16, pp, 103-104 (1969).
- (20) 今田俊明，淀川英司：“人間の文字認識処理時間”，信学技報，MBE 82-98 (1983).
- (21) Card S.K., Moran T.P. and Newell A.：“The psychology of human-computer interaction, Lawrence Erlbaum (1983).
- (22) Wickelgren W.A.：“Acoustic similarity and intrusion errors in short-term memory”，J.exp.Psychol., 70, pp. 102-108 (1965).
- (23) Posner, M.I., Boies, S.J., Eichelman, W.H. and Taylor R.L.：“Retention of visual and name codes of single letters”，J.exp. Psychol.Monogr., 79, pp. 1-16 (1969).
- (24) Reitman J.S.：“Without surreptitious rehearsal, information in short-term memory decays”，J.verb.Learn.verb.Behav., 13, pp. 365-377 (1974).
- (25) Waugh N.C. and Norman D.A.：“Primary memory”，Psychol.Rev., 72, 2, pp. 89-104 (1965).
- (26) Keppel G. and Underwood B.J.：“Proactive inhibition in short-term memory retention of single items”，J.verb.Learn.verb.Behav., 1, pp. 153-161 (1962).
- (27) Loftus G.R. and Patterson K.K.：“Components of short-term proactive interference”，J. verb.Learn.verb.Behav., 14, pp. 105-121 (1975).
- (28) Melton A.W.：“Implication of Short-term memory for a general theory of memory”，J.verb.Learn.verb.Behav., 2, pp. 1-21 (1963).
- (29) Murdock, Jr B.B.：“The retention of individual items”，J.exp.Psychol, 62, pp. 618-625 (1961).
- (30) Cattell J.Mck.：“The inertia of the eye and brain”，Brain, 8, pp. 295-312, pp. 1885-1886.
- (31) Broadbent D.E.：“Word-frequency effect and response bias”，Psychol.Rev., 74, pp. 1-15 (1967).
- (32) Spoehr K.T. and Lehmkuhle S.W.：“Visual information processing”，W.H.Freeman and Company (1982).
- (33) Reicher, G.M.：“Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material”，J.exp.Psychol., 81, pp. 275-280 (1969).
- (34) Smith F.：“Understanding reading”，Holt, Rinehart and Winston (1978).
- (35) Johnson N.F.：“On the function of letters in word identification :Some data and a preliminary model”，J.verb. Learn.verb. Behav., 14, pp. 17-29 (1975).
- (36) Murdock, Jr B.B.：“The serial position effect in free recall”，J.exp. Psychol., 64, 5, pp. 482-488 (1962).
- (37) Postman L. and Phillips L.W.：“Short-term temporal changes in free recall”，Quart. J.exp.Psychol., 17, pp. 132-138 (1965).
- (38) Hayes J.R.M.：“Memory span for several vocabularies as a function of vocabulary size”，Quarterly Progress Report, Cambridge, Massachusetts :Acoustics Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Jan.-June (1952).
- (39) Pollack I.：“The assimilation of sequentially coded information”，Amer.J.Psychol., 66, pp. 421-435 (1953).
- (40) Waugh N.C. and Norman D.A.：“The measure of interference in primary memory”，J.verb. Learn.verb.Behav., 7, pp. 617-626 (1968).
- (41) Atkinson R.C., Brelsford J.W. and Shiffrin R.M.：“Multiprocess models for memory with applications to a continuous presentation task”，J.math.Psychol., 4, 2, pp. 277-300 (1967).
- (42) Norman D.A. and Rumelhart D.E.：“A system for perception and memory”，In Norman D.A. (Ed.)，Models of human memory, Academic Press, pp. 21-64 (1970).
- (43) Rumelhart D.E.：“A multicomponent theory of the perception of briefly exposed visual displays”，J.math.Psychol., 7, pp. 191-218 (1970).