視覚短期記憶の忘却特性と拡散モデル

京都光華女子大学 酒井浩二 ・ 京都大学 乾敏郎

Characteristics of information decay in short-term visual memory and a diffusion model

Koji Sakai (Department of Human Relations, Faculty of Human Relations, Kyoto Koka Women's College, Nishikyogoku-Kadonochi, Ukyo-ku, Kyoto 615-0882) and Toshio Inui (Department of Intelligence Science and Technology, Graduate School of Informatics, Kyoto University, Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto 606-8501)

The effect of exposure duration of test stimulus on the decay rate in short-term visual memory (STVM) was investigated in a same-different task. In the model, it is assumed that memory noise, the variance of each convex value represented in STVM, increases with time, which causes the decay in STVM. In recognition experiments, the results showed that the decay rate is lower for longer exposure duration regardless of pattern complexity. Furthermore, the decay lasted gradually for 16 s with exposure duration of 1 200 ms, which suggests that prolonged exposure largely acts to reduce the decay rate but does not prevent the decay itself. These experimental data were well predicted by the model, which clearly indicates that memory noise increases as a linear function of retention interval and that the rate of increase of memory noise is inversely proportional to exposure duration. These results are interpreted by an extension of the integration model of Signal Detection Theory: The number of mental scanning, N , monotonically increases with an increase in exposure duration, s , and increase of memory noise is inversely proportional to N , so memory sensitivity d' is predicted to be multiplied by $\sqrt{s}$.

Key words: short-term visual memory, Signal Detection Theory, decay rate, exposure duration, memory noise.

従来、単一のブロックパターン (Inui, 1988) や輪郭図形 (Cermak, 1971) などの視覚情報は、十数秒程度のあいだ忘却され続けることが検証されてきた。そして、視覚短期記憶の忘却特性は、信号検出理論によりうまく説明されることが報告されてきた (Kinchla & Smyzer, 1967; Vogels & Orban, 1986)。Kinchla & Smyzer (1967) の拡散モデル (diffusion model) では、単位時間 (s) 当りに一定の割合で記憶ノイズが増大するため忘却が続くと仮定された。記憶ノイズは、保持過程で生じる記憶表現値の分散に相当する。記憶ノイズにより視覚短期記憶表現にゆらぎが生じるため、表現の安定性が低下する。短期記憶でのドットの位置や純音の大きさなどの遅延弁別成績は、Kinchla らのモデルにより正確に予測される (Kinchla & Smyzer, 1967)。

Lee & Harris (1996) による視覚短期記憶の閾測定の結果から判断すると、Kinchla らのノイズ仮説の妥当性は高い。Lee らは、格子縞パターンのコントラストの閾測定により主観的等価点 (Point of Subjective Equality; PSE) と丁度可知差異 (Just Noticeable Difference; JND) を調べ、1 s から 10 s の保持時間のあいだ、PSE は一定で JND が上昇することを検証した。単色の色相の閾測定 (Nilsson & Nelson, 1981) でも類似した結果が得られている。これらの結果は、視覚短期記憶で外界の刺激値は一定に保持され続ける

が、ノイズが増大するため記憶保持の正確さが低下し、忘却が生じることを明白に示す。

しかし Kinchla らのモデルは、次の 2 点に関して十分でない。一つめは、Kinchla & Smyzer (1967) でも指摘されているが、刺激提示時間が一定に設定された点である。提示時間の増大により視覚短期記憶でのブロックパターンの保持率は高まり (Avons & Phillips, 1980; Inui, 1988)、ドットの位置の忘却率は低下する (Dale, 1973)。刺激提示時間の増大により視覚短期記憶の痕跡強度が高まり、保持情報のゆらぎは大きく弱まることが想定される。提示時間がいかなる関数として記憶ノイズの低下に作用するかを検討する必要がある。

二つめは、Laming & Scheiwiller (1985) も指摘しているが、Kinchla らのモデルでデータが予測されたのは、保持時間が 0.5 s から 2 s までと短い点である。単一刺激の視覚短期記憶において、格子縞パターンのコントラスト閾 (Lee & Harris, 1996) は保持時間が 1 s から 10 s のあいだ、単色の色相 (Nilsson & Nelson, 1981) は 0.1 s から 24.3 s のあいだ、忘却は続いた。保持時間が十数秒程度まで増大した場合も、短期記憶の忘却特性は記憶表現値の分散増大により正確に予測されるかを検証する必要がある。

そこで本論文では、保持時間を 0 s から 16 s までに設定し、主に次の 2 点を検討する。(1) 信号検出理論

に基づく Kinchla らのモデルに準拠し、刺激提示時間を実験変数に含む視覚短期記憶の再認モデルを構築する。(2)視覚短期記憶の忘却率に及ぼす刺激提示時間の効果を心理実験で検討し、本モデルの予測力を検証する。

モデル

まず、本モデルの基本となる Kinchla & Smyzer (1967) のモデルを概観する。そして、刺激が輪郭図形の場合、記憶ノイズはいかに生じるかを説明し、記憶ノイズの増加率と刺激提示時間の関数関係を検討する。

Kinchla & Smyzer (1967) のモデル

Kinchla & Smyzer (1967) は、信号検出理論を第1・第2刺激の再認記憶課題に適用し、短期記憶の忘却特性をモデル化した。Kinchla らのモデルでは、第1・第2刺激が異なる試行での2刺激間の差異が Δs となる。そして被験者の記憶感度は d' は、

$$d' = \frac{\Delta s}{\sqrt{\sigma_m^2}} \quad (1)$$

により正確に予測される (Kinchla & Smyzer, 1967)。 σ_m^2 は、記憶保持過程で生じる第1刺激の記憶表現値の分散 (記憶ノイズ) を示す。

Kinchla らのモデルでは、式(1)の σ_m^2 が増大する原因は、第1刺激の刺激値 s_0 に関する記憶表現値 $s_{0,t}$ が保持過程でランダムウォークするためと仮定された。保持過程で $s_{0,t}$ は $1/\rho(s)$ ごとに ω だけ増減し、増減の確率をそれぞれ $1/2$ とすると、保持時間 $t(s)$ における第1刺激の記憶表現値 $s_{0,t}$ の期待値と分散は、

$$E(s_{0,t}) = s_0 \quad (2)$$

$$Var(s_{0,t}) = \sigma_m^2 = \rho \omega^2 t \quad (3)$$

と表される。つまり、保持時間が増大しても $s_{0,t}$ の期待値は変動せず、分散のみが t の線形関数として増大する。式(3)を式(1)に代入し $\phi = \rho \omega^2$ とおくと、

$$d' = \frac{\Delta s}{\sqrt{\phi t}} \quad (4)$$

となる。 ϕ は拡散率を表す。

ただし、本モデルで Δs は一定に設定されるため、Laming & Scheiwiller (1985) と同様、式(1)を次式に置きかえる。

$$d'_0 = \frac{d'_0}{\sqrt{1 + \sigma_m^2}} \quad (5)$$

d'_0 は保持時間が0sでの第1・第2刺激の弁別力を示す。

輪郭図形の分節表現

酒井・乾 (2001) は Figure 1 のような輪郭図形を刺激に用いて、少なくとも8sのあいだ忘却が続くことを検証した。そして忘却が生じる原因として、保持過程で各凸部の記憶表現値の分散が増大するためと仮定された。この仮定は、図形は凹部で分節されて凸部が部分として知覚される原理 (Hoffman & Richards, 1984) と、保持時間の増大に対して PSE は一定で JND が増大する遅延弁別実験の結果 (Lee & Harris, 1996; Nilsson & Nelson, 1981) に基づく。

本モデルでは酒井・乾 (2001) と同様、各凸部のコードにより図形は視覚短期記憶で表現されるとみなす。記憶保持過程において、各凸部の記憶表現値の期待値は入力時の刺激値と一致するが、記憶ノイズが増大するため忘却が生じると仮定する。そして Kinchla らのモデルと同様、記憶ノイズは保持時間の線形関数として増大すると仮定する。この場合、 f 個の凸部をもつ図形において各凸部の刺激値を $c_0^i (i=1, 2, \dots, f)$ とおくと、式(2)、(3)と同様、 $t(s)$ における各凸部の記憶表現値 $c_{0,t}^i$ は、

$$E(c_{0,t}^i) = c_0^i \quad (6)$$

$$Var(c_{0,t}^i) = \phi_i t \quad (7)$$

と表される。 ϕ_i は、凸部 i の記憶表現値のノイズ増加率を示す。視覚短期記憶でコードされる各凸部の物理変数として、各凸部の深さ、長さ、曲率などが考えられるが、いずれの場合も t の増大により記憶ノイズは増大すると考えられるため、本モデルでは特定化しない。

Bartram (1978) は、視覚短期記憶におけるチャンクの配列関係は刺激図形の特性や課題により異なるが、ランダム図形の場合は分節された各部分は独立に保持されると指摘した。ここで、Figure 1 のようなランダム図形の場合、各凸部は独立に視覚短期記憶に保持され、 σ_m^2 は各凸部に生じる記憶ノイズの総和により表されると仮定すると、次式が成立する。

$$\sigma_m^2 = \sum_{i=1}^f \phi_i t \quad (8)$$

Figure 1. Samples of the target (T) and distracter (D) used in Experiments 1 to 3. Stimulus pattern had 7 and 9 convex parts in Experiments 1 and 2, respectively.

Figure 1 は本実験で用いられる刺激図形例であるが、図形内で各凸部の顕著性に大きな差はないことから、 ϕ_i はどの凸部でもほぼ一定と仮定されうる。そのため、 $\phi_i = \varepsilon$ ($i = 1, 2, \dots, f$) (ε は定数) を仮定すると、式(8)は

$$\sigma_m^2 = \phi t \quad (9)$$

と置きかえられる。ただし $\phi = f\varepsilon$ であり、 ϕ は図形全体に生じる記憶ノイズの増加率を表す。

ノイズ増加率と提示時間の関係

多くの視覚情報処理において、前注意過程で図形の大局的形状が把握され、その後の集中的注意過程で局所的形状が系列処理される。提示刺激の視角が周辺視に及ぶ場合は眼球運動により獲得されるが、中心窩の場合は内的走査 (mental scanning) により獲得される (Inui, Kawato, & Suzuki, 1978)。再認記憶課題の場合、刺激提示時には第1刺激の正確な記憶保持が必要となるため、各凸部の走査回数は刺激提示のあいだ常に増大し、走査された形状情報は視覚短期記憶に転送され続けるとみなされる。その結果、視覚短期記憶で表現される各凸部の形状の痕跡強度は、提示時間の増大により高まると考えられる。

ここで、図形の全凸部が走査されるのに要する時間を $s_1(s)$ とすると、第1刺激の提示時間 $s(s)$ により各凸部が走査される回数 N は次式で表される。

$$N = \frac{s}{s_1} \quad (10)$$

Nosofsky (1983) は、同じ刺激が反復提示される場合、最後の提示時における記憶表現の分散は、各提示時に生じる記憶表現の分散を提示回数で除算した値に等しいと仮定した。そして、モデルとデータとの適合性により、感覚ノイズは提示回数の反比例関数として低下することを実証した。一方 Dale (1973) は、視覚短期記憶におけるドットの位置の忘却率は、提示時間の増大により低下することを心理実験で検証した。Dale (1973) の結果を Kinchla らのモデルの枠組みで解釈すると、短期記憶におけるドットの拡散率は刺激提示時間の増大により低下するとみなされる。

これらの知見に基づき、 N における各走査は互いに独立で、記憶ノイズの増加率は N の反比例関数として低下すると仮定すると、式(9)は

$$\sigma_m^2 = \frac{\phi}{N} t \quad (11)$$

と書きかえられる。式(10)を式(11)に代入すると、

$$\sigma_m^2 = \frac{\Theta}{s} t \quad (12)$$

$$\Theta = \phi s_1 \quad (13)$$

となる。式(12)の記憶ノイズの増加率 Θ/s におけるパラメータ Θ は、式(13)のように空間要因 ϕ と時間要因 s_1 の積により表される。

最後に、式(5)に式(12)を代入すると次式が得られる。

$$d' = \frac{d'_0}{\sqrt{1 + \frac{\Theta}{s} t}} \quad (14)$$

式(14)において、記憶ノイズと保持時間の線形関係、および記憶ノイズの増加率と刺激提示時間の反比例関係の妥当性については、“モデルの評価”の節で検討する。

心理実験

輪郭図形を刺激に用いて、視覚短期記憶の忘却率が第1刺激の提示時間に依存するかを心理実験で検討する。

実験 1

凹凸数7の比較的単純な図形を刺激に用いて、視覚短期記憶の忘却率は入力過程での刺激提示時間に依存するかを検討する。

方法

刺激・装置 刺激は、複数の凹凸部をもつ輪郭図形で、三つの余弦波の加算平均を極座標表現して生成された (酒井・乾, 2001)。刺激の生成および提示は、パーソナルコンピュータ (NEC PC-9801 DA) により行われた。ディスプレイの視角は約 11.1 度 × 約 14.9 度で、図形の大きさは約 3.2 度 × 約 3.2 度であった。

図形の複雑さは、凹凸数により操作された (Figure 1)。凹凸数 n の図形は、凹部 n 個、凸部 n 個をもつ図形を示す。図形の視角および面積は、図形の凹凸数にかかわらず一定に設定された。実験1では、凹凸数7の比較的単純な図形が刺激に用いられた。

ターゲット (Target; T) とディストラクタ (Distracter; D) の類似度は、T と D のずれ率により規定された。T と D のずれ率は、T と D を回転せずに重ねたときのずれた面積の近似値を、1 図形の面積の近似値で除算して算出された。本論文で規定されたずれ率は、T と D を任意に重ねたときのずれ率のうち最小に近い値であった。実験1, 2, 3で、T と D のずれ率は 5.0 % で一定に設定された。

T と D の輪郭線の形状は、全体的に異なるように設定された。T と D の大局的形状を一致させるため、対となる T と D の凹凸数は同じで、極座標における各凹凸部の位置は T と D のあいだでほぼ一致するように設定された (Figure 1)。そのため、第1刺激の

正確な記憶保持が被験者の課題遂行に必要とされた。

手続き 1 試行の手順は以下のとおりである。警告音のあと、左視野に注視点が提示され、続いて第1刺激が実験変数となる提示時間のあいだ提示された。保持時間が0sのセッションでは、その直後に左視野にマスク刺激、右視野に第2刺激が持続提示された。保持時間が2, 4, 8sのセッションでは、第1刺激の提示直後に左視野にマスク刺激が360ms提示され、実験変数となる保持時間後、右視野に第2刺激が持続提示された。保持時にはマスク刺激の提示時間も含まれた。保持時に挿入課題はなく、第1刺激を正確に記憶保持するための自由な戦略が被験者に認められた。被験者の課題は、第2刺激が第1刺激と同じか異なるかを判断することであった。反応に制限時間はなく、正誤のフィードバックは与えられなかった。被験者が反応した直後に画面の図形は消え、約2秒後に次の試行が開始された。

48 試行の練習試行のあと、全480試行が12セッションに分けて行われた。12セッションは、第1刺激の提示時間3種(120, 288, 1200ms)×保持時間4種(0, 2, 4, 8s)により構成され、各セッションで40試行が行われた。セッション間の提示順序はランダムであった。第1・第2刺激が同じ試行と異なる試行は半々で、チャンスレベルは50%であった。全480試行において、凹凸数は同じで形状は異なる図形が第1刺激に用いられた。第1刺激を回転させると第2刺激と一致する試行はなかった。

分析 全被験者のデータをプールして、再認成績として記憶感度 d' が次式により算出された。

$$d' = z(H) - z(FA)$$

$z(H)$ は、第1・第2刺激が異なる試行で正しく“異なる”と判断されたヒットの標準得点、 $z(FA)$ は、第1・第2刺激が同じ試行で誤って“異なる”と判断されたフォールス・アラームの標準得点を示す。

被験者 7名の大学生。

結果

Figure 2 のプロット値は、保持時間に対する d' を表す。 d' は、提示時間が120msの条件でも288ms, 1200msの条件と同程度となった。保持時間の増大に対して、提示時間が短い条件ほど d' は急速に低下した。

再認率に関して、提示時間×保持時間の分散分析の結果、提示時間および保持時間の主効果に有意差がみられた(提示時間, $F(2, 12) = 6.88, p < .05$; 保持時間, $F(3, 18) = 12.76, p < .0001$)。提示時間と保持時間の交互作用に有意差がみられたことから($F(6, 36) = 2.43, p < .05$)、提示時間の短い条件ほど視覚短期記憶の忘却率は高くなることが示された。

考察

Figure 2 で、 d' は提示時間の影響をほとんど受けず高かった結果より、120msの提示時間でも1200msの提示時間のときと同程度の正確さで図形は獲得されることがわかる。100ms程度の提示時間により輪郭図形の凹凸部はかなり正確に獲得されることが示される。

忘却率は提示時間の短い条件ほど高かった。保持時間が2sと比較的短い場合、120msの短い提示時間でもある程度正確に図形は記憶保持されるが、保持時間が4s, 8sと長い場合、120ms, 288msの瞬間視では図形の正確な記憶保持がやや困難になることが示される。Dale (1973) の指摘するように、知覚に要する時間と記憶保持に要する時間は大きく異なると解釈される。

Avons & Phillips (1980) は、視覚短期記憶の表現が長期記憶に固定化されるには、より多くの提示時間が必要になることを示唆した。実験1で提示時間が1200msの条件で忘却が生じたことから、長期的な記憶システムに図形が固定化されるには、1200msの提示時間ではまだ短いと推測される。

実験2

実験1では、比較的単純な凹凸数7の刺激図形の場合、視覚短期記憶の忘却率は提示時間の増大により低下することが明らかにされた。実験2では、主に次の2点に着目して、より複雑な凹凸数9の刺激図形を用いて実験1と同様の実験を行う。

一つめは、実験1で d' はどの提示時間でも同程度

Figure 2. Observed (points) and predicted (lines) values of d' in Experiment 1 as a function of retention interval, with exposure duration as a parameter.

であったが、この結果がより複雑な刺激図形の場合も成立するか、という点である。120 ms の短い提示時間で獲得される視覚情報には、量的に制限があると考えられる。凹凸数9の図形の場合、 d' は120 ms以降の提示時間の増大により上昇することが想定される。

二つめは、より複雑な図形の場合も提示時間の増大により d' は高まるか、という点である。Inui (1988)の再生実験では、単純な図形の場合は1 s程度までの提示時間の増大により再生率は上昇したが、複雑な図形の場合は9 s程度まで提示時間が増大しても再生率は上昇しなかった。凹凸数9の図形の場合、実験1の提示時間の範囲では、提示時間が増大しても d' は上昇しないことも想定される。

そこで実験2では、凹凸数9の図形の場合も実験1と同様の結果が得られるかを検討する。

方法

刺激・装置 実験1と同様。ただし、凹凸数9の図形が刺激に用いられた (Figure 1)。

手続き・分析 実験1と同様。

被験者 8名の大学生で、実験1と異なる被験者群であった。

結果

Figure 3のプロット値は、保持時間に対する d' を表す。 d' は、提示時間が120 msの条件で288 msの条件よりやや低かった。実験1と同様、提示時間の短い条件ほど、保持時間の増大により d' は急速に低下した。

再認率に関して、提示時間×保持時間の分散分析の結果、提示時間、保持時間の主効果に有意差がみられ

Figure 3. Observed (points) and predicted (lines) values of d' in Experiment 2 as a function of retention interval, with exposure duration as a parameter.

た (提示時間, $F(2, 14) = 16.47, p < .001$; 保持時間, $F(3, 21) = 20.70, p < .0001$). 提示時間と保持時間の交互作用に有意差がみられたことから ($F(6, 42) = 2.48, p < .05$), 凹凸数9の図形の場合も、提示時間の増大により視覚短期記憶の忘却率は低下することが示された。

考察

凹凸数9の図形の場合、 d' は提示時間が120 msの条件で288 ms, 1200 msの条件よりやや低かった。図形が正確に獲得されるには、凹凸数7の図形の場合は120 msの提示時間で十分であるが、凹凸数9の図形の場合は120 msではやや短いことがわかる。しかし、300 ms程度の提示時間で凹凸数9の図形の獲得は十分であることが示される。

保持時間が0 s以降の d' は、凹凸数9の図形でも提示時間の増大により上昇した。4 s, 8 sの長い保持時間のとき、提示時間が120 ms, 288 msの条件で d' はかなり低かったが、提示時間が1200 msまで増大すると d' は大きく上昇した。より複雑な図形で保持時間が長い場合でも、提示時間の増大により保持図形の正確さは大きく高まることわかる。

保持時間の増大に対して d' は低下し続けたが、実験1と同様、4 sから8 sの保持時間で d' は漸近傾向となった。輪郭図形を刺激に用いたCermak (1971)の再認実験では、保持時間が12 sから20 sのあいだ再認成績は漸近となった。実験3では、保持時間が8 s以降で再認成績は漸近になるのか、それとも8 s以降も忘却が続くのかを検討する。

実験3

提示時間が1200 msの条件で、8 s以降も忘却が続くかどうかを検討する。

方法

刺激・装置 実験1と同様。ただし、実験1, 2での、凹凸数7と凹凸数9の図形が刺激に用いられた。

手続き・分析 1試行の手順は、実験1, 2と同様。ただし、全160試行が4セッションに分けて行われた。4セッションは凹凸数2種(7, 9)×保持時間2種(8, 16 s)により構成され、各セッションで40試行が行われた。セッション間における提示順序はランダムであった。

被験者 8名の大学生で、実験1, 2と異なる被験者群であった。

結果

Figure 4のプロット値は、保持時間に対する d' を表す。保持時間が0 sから8 sのプロット値は、実験1, 2のデータである。凹凸数7, 9の両条件で、8 s

から 16 s の保持時間の増大により d' は緩やかに低下した。

再認率に関して、実験 3 のみのデータで凹凸数×保持時間の分散分析を行った結果、凹凸数の主効果に有意差がみられた ($F(1, 7) = 7.06, p < .033$)。保持時間の主効果 ($F(1, 7) = 1.73, ns$)、および凹凸数と保持時間の交互作用 ($F(1, 7) = 0.01, ns$) には有意差がみられなかった。

また、提示時間が 1200 ms で保持時間が 8 s の条件での d' において、実験 1, 2 と実験 3 の結果のあいだに大きな差はなかったことから、本実験の信頼性が示された。

考 察

提示時間が比較的に長い 1200 ms でも、保持時間が 8 s から 16 s までの増大により d' は緩やかに低下した。提示時間の長い場合、忘却は緩やかに長いあいだ続くことがわかる。提示時間の増大は、実験 1, 2 の結果にみられるように忘却率の低下に大きく作用するが、忘却をなくすのには作用しないことが示される。Dale (1973) の実験では、提示時間が 3 s までの増大に対して忘却率は低下したが、3 s 以降の増大に対して忘却率は低下しなかった。忘却を弱める提示時間の効果には上限があり、図形が短期記憶で保持される限り、提示時間が増大してもある程度の忘却は不可避であると推測される。

モデルの評価

データフィット

式(14)により、実験データがどの程度正確に予測されるかを検証するためシミュレーションを行った。パラメータ値を探索した結果、 θ の値は実験 1, 2 でそれぞれ 0.09, 0.15 となった。凹凸数 9 の図形では凹凸数 7 の図形より θ は大きい値となった。

Figure 2, 3, 4 は、プロット値が実験データ、曲線が式(14)による予測である。式(14)による説明率 R^2 は、提示時間が 120, 288, 1200 ms の条件において、Figure 2 でそれぞれ .916, .871, .512, Figure 3 でそれぞれ .984, .937, .905 であった。Figure 2 の提示時間が 1200 ms の条件で説明率は低かったが、それ以外の 5 条件で説明率は高い値を示した。1 パラメータをもつ式(14)により、提示時間 s と保持時間 t の 2 実験変数の効果がうまく説明されることが示される。

Figure 4 の曲線は、実験 1, 2 での θ の値を用いて、式(14)によりフィッティングしたものである。保持時間が 16 s の d' に関して、予測曲線が実測値をやや上回る傾向がみられたものの、実測値は比較的に正確に予測された。保持時間が 16 s まで増大しても、式

(14) の予測力は比較的高いことが示される。

提示時間と記憶ノイズの増加率

“モデル”の節では式(12)により、記憶ノイズは保持時間の線形関数として増大し、記憶ノイズの増加率は提示時間の反比例関数として低下すると仮定されたが、これらの仮定の妥当性を検証する。

式(5)を変形すると、次式のようになる。

$$\sigma_m^2 = \left(\frac{d_0'}{d'} \right)^2 - 1 \quad (15)$$

つまり、 σ_m^2 は d_0'/d' の二乗により推定される。

Figure 2, 3 において、式(15)により記憶ノイズ σ_m^2 の推定値をプロットし、最小二乗法により線形回帰したものが Figure 5 である。Figure 5 の回帰直線の傾きは、単位時間(s)当りの記憶ノイズの増加率を示す。線形回帰による説明率 R^2 は、提示時間が 120, 288, 1200 ms のとき、Figure 2 でそれぞれ .879, .918, .741, Figure 3 でそれぞれ .985, .949, .973 であった。凹凸数 7, 9 の両図形、およびいずれの提示時間でも、記憶ノイズと保持時間の線形性が明瞭に示される。

そして、横軸に提示時間、縦軸に Figure 5 の線形回帰式の傾きをプロットし、式(12)における t の係数 θ/s によりフィッティングしたものが Figure 6 である。 θ の値は、Figure 2, 3, 4 で d' の予測に用いられた値と同様、凹凸数 7, 9 のとき、それぞれ 0.09, 0.15 である。 θ/s による説明率 R^2 は、凹凸数 7, 9 のとき、それぞれ .856, .582 であった。凹凸数 9 の条件での説明率はそれほど高くなかったが、Figure 6 から示されるように、記憶ノイズの増加率と提示時

Figure 4. Observed (points) and predicted (lines) values of d' in Experiment 3 as a function of retention interval, with the number of convex parts as a parameter.

間のあいだに反比例関係が成立すると解釈される。

総合的考察

本論文では、視覚短期記憶の忘却要因としてノイズ仮説を提案し、モデルと心理実験により図形の忘却率に及ぼす提示時間の効果を検討した。その結果、記憶ノイズは保持時間の線形関数として増大し、記憶ノイズの増加率は、図形の複雑さにかかわらず提示時間の反比例関数として低下することが示された。また、保持時間が16sまで増大しても図形の忘却は続き、この忘却特性はモデルにより比較的うまく説明された。視覚短期記憶における輪郭図形の忘却特性を説明するのに、信号検出理論は有効であることが示される。

記憶ノイズによる忘却

本実験では、刺激提示時間および図形の複雑さにかかわらず、忘却は8sのあいだ続いた。本モデルでは、保持時間の増大に対してPSEは一定でJNDが増大する閾測定の結果(Lea & Harris, 1996; Nilsson & Nelson, 1981)に基づき、記憶ノイズによる図形の忘却を仮定した。本モデルにより本実験データはうまく説明されたことから、視覚短期記憶の忘却要因としてのノイズ仮説の十分性が示される。

閉図形の場合、図形を構成する局所的形状は、主に線分の方位と凹凸部の曲率とみなせる。線分の方位に関して、記憶ノイズは保持時間の増大により上昇し続けることが検証されている(Vogels & Orban, 1986)。本論文では、輪郭図形の各凸部の記憶保持に関して検討したが、モデルでは凹凸数9の図形は凹凸数7の図形より式(13)の θ の値が約1.67倍大きかった。各凸部の走査に要する提示時間が図形の凹凸数にかかわらずほぼ一定と仮定すると、凹凸数9の図形は凹凸数7

の図形より s_1 の値が約1.29倍だけ大きくなる。この仮定に基づくと、 ϕ の値は凹凸数9の図形のほうが大きくなること導かれ、記憶保持過程で各凸部ごとに記憶ノイズが生じ、図形に生じる記憶ノイズは各凸部に生じる記憶ノイズの総和であるとみなす妥当性が示唆される。

記憶ノイズと保持時間の線形関係

本モデルではKinchlaらのモデルと同様、Figure 5のように、記憶ノイズは保持時間の線形関数として増大することが示された。Kinchlaらのモデルでは、記憶ノイズが増大する要因として記憶表現値のランダムウォークが仮定され、式(3)のように記憶表現値の分散は保持時間の線形関数として増大する。本モデルでは、式(12)による記憶ノイズの線形性の実証されたことから、記憶ノイズが増大する要因は各凸部の記憶表現値がランダムウォークするためであることが、十分条件として成立する。視覚短期記憶において、ドットの位置、曲線の凸形状など、多くの視覚情報の忘却は記憶表現値の分散増大が原因であり、分散増大は記憶表現値のランダムウォークが原因であると仮定される。

実験3では、保持時間が16sまで増大しても忘却は続いたが、この結果は本モデルにより比較的正確に予測された。つまり、記憶ノイズと保持時間の線形関係が16sまで増大しても成立することが示された。保持時間がかなり増大しても記憶ノイズは単位時間当りに一定の割合で生じ続け、それらが累積して図形の忘却に作用することが導かれる。Kinchlaらの拡散モデルは、保持時間が2s以降増大しても予測力は高いと推測される。

Figure 5. Estimated (points) and least-squares regressions (lines) of memory noise as a function of retention interval, with exposure duration as a parameter. Panel (a): Results of Experiment 1; Panel (b): Results of Experiment 2.

ノイズ増加率と提示時間の反比例関係

Nosofsky (1983) は、提示回数が増大により実際の刺激値に関するより多くの情報が得られるため、記憶表現の分散は減少すると指摘した。統計理論において、各提示が互いに独立である場合、同一刺激が n 回提示されたときの分散は、単一提示されたときの分散の $1/n$ となる。そのため、 n 回提示の検出力は単一提示の検出力の $\sqrt{n}$ 倍となる。心理実験でも、反復提示されたときの課題成績は $\sqrt{n}$ 倍により比較的良好く予測される (Swets, Shipley, McKey, & Green, 1959)。

本モデルでは式 (10) により、提示時間の増大により走査回数が増大し、各走査は互いに独立であると仮定して、提示時間の効果を反復提示回数の効果の枠組みで検討した。そして Figure 6 のように、提示時間 s の増大により記憶ノイズの増加率は $1/s$ 倍に低下することが検証された。この結果より、次の二つの知見が導かれる。

1. 提示時間 s の増大を走査回数 N の増大とみなすと、信号検出理論による $\sqrt{n}$ 倍の予測の枠組みにより、提示時間の効果が $\sqrt{s}$ 倍で説明されうる。

2. 従来のモデル (Nosofsky, 1983; Ulehla, Halpern, & Cerf, 1968) では、反復提示は記憶表現の分散の低下に作用したが、本モデルでは、提示時間は分散増加率の低下に作用する。

本モデルでは、 N における各走査は互いに独立であると仮定した。しかし、同一刺激が反復提示される条件で各提示が互いに依存する場合、実測値は $\sqrt{n}$

Figure 6. Estimated (points) and predicted (lines) values of the rate of increase of memory noise as a function of exposure duration, with the number of convex parts as a parameter.

倍による予測値より低くなる (Ulehla et al., 1968)。実験 1 で提示時間が 1200 ms のとき、実測値は予測値をやや下回り、提示時間 s の効果が $\sqrt{s}$ 倍より低い傾向がみられた。この結果は、記憶ノイズの低下に及ぼす提示時間の効果がやや飽和したためと解釈される。ドットの位置弁別実験 (Dale, 1973) では、提示時間が 3 s までの増大に対して忘却率は低下したが、3 s 以降の増大に対して忘却率は低下しなかった。また線分の方位弁別実験 (Ulehla et al., 1968) では、反復提示回数 n が 2 までは $\sqrt{n}$ 倍によりうまく予測されたが、 n が 3 以上になると実測値は $\sqrt{n}$ 倍による予測値をやや下回る傾向となった。本実験の結果より、記憶感度が $\sqrt{s}$ 倍で予測される s の範囲は 1200 ms 前後が上限であると推察される。

引用文献

- Avons, S. E., & Phillips, W. A. 1980 Visualization and memorization as a function of display time and poststimulus processing time. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, **6**, 407-420.
- Bartram, D. J. 1978 Post-iconic visual storage: Chunking in the reproduction of briefly displayed visual patterns. *Cognitive Psychology*, **10**, 324-355.
- Cermak, G. W. 1971 Short-term recognition memory for complex free-form figures. *Psychonomic Science*, **25**, 209-211.
- Dale, H. C. A. 1973 Short-term memory for visual information. *British Journal of Psychology*, **64**, 1-8.
- Hoffman, D. D., & Richards, W. A. 1984 Parts of recognition. *Cognition*, **18**, 65-96.
- Inui, T. 1988 Properties of human visual memory for block patterns. *Biological Cybernetics*, **59**, 179-187.
- Inui, T., Kawato, M., & Suzuki, R. 1978 The mechanism of mental scanning in foveal vision. *Biological Cybernetics*, **30**, 147-155.
- Kinchla, R. A., & Smyzer, F. 1967 A diffusion model of perceptual memory. *Perception and Psychophysics*, **2**, 219-229.
- Laming, D., & Scheiwiller, P. 1985 Retention in perceptual memory: A review of models and data. *Perception and Psychophysics*, **37**, 189-197.
- Lee, B., & Harris, J. 1996 Contrast transfer characteristics of visual short-term memory. *Vision Research*, **36**, 2159-2166.
- Nilsson, T. H., & Nelson, T. M. 1981 Delayed monochromatic hue matches indicate characteristics of visual memory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **7**, 141-150.
- Nosofsky, R. M. 1983 Information integration and the identification of stimulus noise and criterial noise

- in absolute judgment. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **9**, 299-309.
- 酒井浩二・乾 敏郎 2001 視覚短期記憶の忘却率に及ぼす図形の複雑さと類似度の効果 心理学研究, **72**, 36-43.
(Sakai, K., & Inui, T. 2001 Effects of figural complexity and target-distracter similarity on decay rate in short-term visual memory. *Japanese Journal of Psychology*, **72**, 36-43.)
- Swets, J. A., Shipley, E. F., McKey, M. J., & Green, D. M. 1959 Multiple observations of signals in noise. *Journal of the Acoustical Society of America*, **31**, 514-521.
- Ulehla, Z. J., Halpern, J., & Cerf, A. 1968 Integration of information in a visual discrimination task. *Perception and Psychophysics*, **4**, 1-4.
- Vogels, R., & Orban, G. A. 1986 Decision processes in visual discrimination of line orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **12**, 115-132.
- 2000. 4. 18 受稿, 2001. 1. 13 受理——