

図形の視覚短期記憶に関する実験・モデル による検討

酒 井 浩 二

1. はじめに

輪郭、色、陰影、テクスチャ（物体の模様）など、物体のもつ複数の視覚的な物理属性が脳内で処理・保持されている。これらの属性が手がかりとなり、3次元物体を見て何であるか瞬時に認識できるが、その中で輪郭（contour）が主要な手がかりとなる。この点は、立体的に描かれた2次元図形や遮蔽輪郭（物体の外輪郭）など、輪郭以外の物理属性がない図形を見て何であるか認識できることから理解できる。3次元物体に関する何らかの形状情報が、脳内で長期的に記憶保持されているといえる。

人間の記憶システムを時間軸で捉えると、短期記憶（short-term memory）と長期記憶（long-term memory）に分類される。長期記憶は入力から数ヶ月、数年後の記憶表現（representation）を示すのに対し、短期記憶は入力から数秒、数十秒後の記憶表現を示す。そして、絵画、色、輪郭などの視覚情報を入力とする短期記憶の場合、視覚短期記憶（short-term visual memory）とよばれる。

視覚短期記憶に関する多くの研究では、ドットパターン、線分の長さ、ドットの位置など、記憶保持に言語を媒介しない無意味図形が刺激に用いられてきた。その理由の1つに、絵画などの有意味図形の場合、記憶時に言語による理解や解釈が介在するため、図形の形状情報のみに基づく記憶特性を検証できないためである。しかし、無意味図形として輪郭を刺激に用いた研究例は少ない。輪郭が物体認識の重要な手がかりになることから、輪郭の記憶について検討する必要性は高い。

酒井（2000）は、図1のような輪郭図形の短期記憶の表現および忘却

(decay) 特性を検討した。論文では、輪郭図形の短期記憶特性は刺激図形の提示時間や複雑さなどの時空間要因に大きく影響されることを実験で検証し、輪郭図形の短期記憶モデルが構築された。その結果、輪郭図形の短期記憶に関する現象と機構が包括的に明らかにされた。

本稿は、図形の短期記憶について検討した酒井（2000）の概要と着眼点について論述する。以降、まず2節で図形の短期記憶表現に関する知見を概観し、3節で記憶実験の手続きを説明する。そして、従来の図形の短期記憶研究で十分に検討されてこなかった点として、4節で図形の物理量の規定と心理量の測定、5節で3過程に基づく再認記憶（recognition memory）について述べる。さらに6節で、記憶実験データを予測する輪郭図形の記憶モデルについて言及する。最後に7節で、今後の展望について述べる。

2. 輪郭の短期記憶表現に関する仮定

視覚短期記憶の表現特性に関していくつか実証されているが、酒井（2000）の主な仮定は以下の4つである。

- （1）分節表現：図形は凹部で分節され、凸部が部分として視覚短期記憶で保持される。
- （2）記憶ノイズによる忘却：視覚短期記憶の正確さが低下する原因は、保持時間の増大に対する記憶ノイズの増大である。
- （3）階層ごとの忘却：図形は大局的形状と局所的形状が階層的に記憶表現され、記憶ノイズにより正確さが低下するのは局所的形状の記憶表現のみである。
- （4）記憶容量：視覚短期記憶の容量として、数秒程度保持時間が増大しても記憶の正確さが低下しない図形の複雑さの範囲がある。

これらの4点に関して、やや詳しく述べる。

2.1 分節表現

2つの物体が結合すると結合部に凹部が生成されることから、我々の形状処理システムは凹部で分節（segmentation）して凸状の物体を部分と知覚する特性をもつ（Hoffman & Richards, 1984）。またBiederman（1987）の物体認識モ

デルによれば、深い凹部をもたない凸状の構成要素が空間的に配列されて物体は記憶表現されており、凸状の構成要素をベースとして、入力表現と内部表現の照合 (matching) により認識が達成される。

これらの知見より、視覚短期記憶において図形は各凸部の空間的配列により保持され则认为られるが、部分の配列関係として Bartram (1978) は以下の3つの可能性を示した。

1. 個々のチャンク (chunk) が1対1の配列により線状に記述される。
2. 個々のチャンクが1対多の配列により回路網状に記述される。
3. 各チャンクが独立に記述される。

Bartram (1978) は、記憶時にどの戦略が用いられるかは刺激図形の特性や課題により異なると考えた。対称図形の場合、複数のチャンクの回路網により1つのチャンクが保持されるのに対して、ランダム図形の場合、複数の部分に分節されて各部分が独立に保持されると指摘した。Bartram (1978) の指摘に基づき、酒井 (2000) による刺激は図1のようにランダム図形であったため、各凸部は互いに独立に視覚短期記憶で保持されると仮定される。つまり、ある凸部の記憶の正確さは異なる凸部の記憶の正確さと独立であると仮定される。

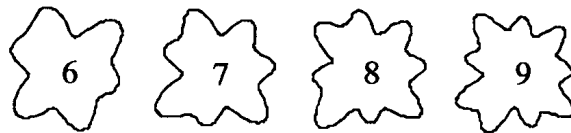


図1 心理実験で用いられた刺激図形例。図形中の数値は凹凸部の数を示す。

2.2 記憶ノイズによる忘却

視覚短期記憶で忘却が生じる要因として、記憶ノイズ (memory noise) を仮定したモデルが提案されてきた (Kinchla & Smyzer, 1967; Vogels & Orban, 1986)。記憶ノイズは、記憶保持過程で生じる記憶表現値の分散に相当する。線分の長さ、運動速度など、通常刺激は値ないし強度をもつが、記憶表現値は記憶システムで表現される入力刺激の値 (the value of an input stimulus represented in memory) のことを示す。Kinchla & Smyzer (1967) のモデルに

よれば、視覚短期記憶で保持される記憶表現値はガウスランダム変数 (Gaussian random variable) により表され、保持時間の増大に対し、記憶表現値の期待値は外界の刺激値と一致するが分散が増大するため記憶感度 (memory sensitivity) が低下する。この提案は、視覚短期記憶の忘却要因が記憶表現値の低下や特定の値への変容でないことを示す。

Lee & Harris (1996) は、格子縞パターン (grating) のコントラストの閾測定で主観的等価点 (Point of Subjective Equality ; PSE) と丁度可知差異 (Just Noticeable Difference; JND) を調べ、視覚短期記憶の忘却要因は記憶ノイズであることを直接的に実証した。PSE は、2 刺激が系列的に瞬間提示されたときの、第 1 刺激と同じ刺激強度と再認される第 2 刺激の強度を示す。JND は一般的にいう閾値であり、第 1 刺激より第 2 刺激のほうが大きい強度と再認される第 1・第 2 刺激間の強度の差異を示す。Lee & Harris (1996) は、1 sec から 10sec の保持時間のあいだ、JND は上昇し続けるが PSE は一定であることを検証した。単色の色相 (Nilsson & Nelson, 1981) においても同様の結果が得られている。これらの結果は、保持時間の増大に対してノイズが増大するため視覚短期記憶の忘却が生じることを明白に示す。

Lee & Harris (1996) の実験結果に基づき、酒井 (2000) では、視覚短期記憶における各凸部の記憶表現値は正規ランダム変数として保持されると仮定される。各凸部ごとに記憶ノイズが生じるために保持図形の正確さが低下し、記憶ノイズの発生が数秒から数十秒程度続くため、視覚短期記憶において忘却が続くと仮定される。

2.3 階層ごとの忘却

Palmer (1977) によれば、図形は複数の階層 (hierarchy) により表現される。上位の階層には図形の対称性、閉合性、緻密性などの大局的 (global) 形状が表現され、下位の階層には図形の角度、方向、位置などの局所的 (local) 形状が表現される。視覚短期記憶において図形の大局的形状は忘却されにくいことから (Inui, 1988), 酒井 (2000) では各凸部の局所的形状は記憶ノイズにより正確さが低下して下位の階層に保持されるが、大局的形状は上位の階層に正確

に保持されると仮定される。

また、視覚短期記憶ではできるだけ少ない分節数で図形は保持される傾向をもつため (Bartram, 1978), 輪郭図形の場合, 全凹部で分節されるのではなく, 負曲率 (negative curvature) の絶対値のより大きい凹部のみで分節されると推測される。そして, 複数の凸部により何らかのまとまりが形成されて視覚短期記憶で保持されると推測される。しかし記憶ノイズは, 視覚短期記憶で形成される1つのまとまりに対して生じるのではなく, 物理的な形状特徴に対して生じるとみなす。酒井 (2000) の輪郭図形の場合, 図1のようにどの凸部も特徴となりうる程度の大きさを持つことから, 記憶ノイズは各凸部ごとに生じ, 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により表されると仮定される。

2.4 記憶容量

視覚短期記憶の容量 (capacity) は, 記憶保持される視覚刺激の個数により測定されることが多いが, 酒井 (2000) では正確に記憶保持されうる単一図形の複雑さレベルとみなして検討される。

Inui (1988) は, 格子を白と黒で塗りつぶしたマトリックスにより構成されるブロックパターン (Block Pattern; BP) の再生実験により, 視覚短期記憶に容量制限があることを検証した。Inui (1988) によると, 3×3 のBPでは300ms程度の提示時間によりほぼ完全な再生率が得られるが, 4×4 のBPでは1 secの提示時間でも再生率は90%に達しなかった。視覚短期記憶の容量はBPを刺激とした場合, 3×3 から 4×4 のマトリックス数程度の複雑さであることが示される。

しかし, 視覚短期記憶では保持時間の増大により忘却が生じるため, 記憶容量を一義的に測定するのは困難となる。Phillips (1974) は, 4×4 のBPで保持時間の増大により忘却が生じた結果から, 4×4 のBPは視覚短期記憶の容量を上回ると言及した。Phillips (1974) の解釈に基づくと, 保持時間が数秒程度経過しても正確な形状情報がほとんど忘却されない図形の複雑さが視覚短期記憶の容量と定義されうる。この定義によると, Phillips (1974) の再認実験で

4 × 4 の BP は記憶容量を上回り，Inui (1988) の再生実験結果と一致する。酒井 (2000) では，Phillips (1974) の解釈に基づいて視覚短期記憶の容量について検討される。

酒井 (2000) では，上記の仮定が事実かどうかについて検討されたわけではなく，主な仮定として上記の 4 つに基づいて記憶モデルを構築し，多くの記憶実験データがモデルにより正確に予測された。そのため，上記の 4 仮定は十分条件として成立することは実証されたことになるが，輪郭図形の短期記憶を説明するための必要条件になるかに関しては，今後の検討を要する。この点に関しては，本稿の 7.2 節で一部述べる。

3. 心理実験の手続き

酒井 (2000) の再認実験の手続きを図 2 に示す。警告音の後，単一の輪郭図形が第 1 刺激 (S_1) としてディスプレイに瞬間提示され，数秒から十数秒の保持時間の後に単一の輪郭図形が第 2 刺激 (S_2) として持続提示される。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る。第 1

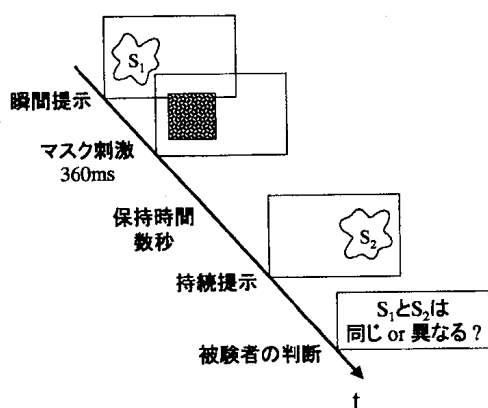


図2 再認実験の手続き。



図3 再認実験での T (Target) と D (Distracter) の図形例。

刺激と第 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（当て推量での正答率）は 50 % である。第 1 ・ 第 2 刺激が異なる試行の場合，図 3 のように両図形の複雑さは一致し，両図形の差異は非常に微妙に設定される。そのため，第 1 刺激の正確な形状を第 2 刺激が提示されるまで記憶保持するのが被験者の課題となる。第 1 ・ 第 2 刺激が異なる試行における両図形の対を，ターゲット (Target ; T) とデイストラクタ (Distracter ; D) とよぶ。そして，

被験者が反応した後にディスプレイの第2刺激は消え、次の試行が開始される。これが1試行で、被験者10人程度の正答率の平均値を再認成績とみなして視覚短期記憶の正確さの指標とする。

この手続きにより、酒井（2000）は4つの実験変数を操作して輪郭図形の短期記憶特性を検討した。操作された4つの実験変数は、第1刺激の提示時間と第1・第2刺激間の保持時間の時間要因、刺激図形の複雑さとTとDの類似度の空間要因である。長期記憶の場合、保持時間が短くて数日、長くて数年であるため、入出力関係を定量化するのは統制上困難であるが、短期記憶の場合は保持時間が数秒、数十秒であるため、入出力関係が厳密に定量化されやすい。

4. 図形の物理量と心理量

従来の図形の短期記憶研究における不足点の1つめは、図形の物理量の規定と心理量の測定が厳密に統制されていない点である。視覚短期記憶の表現は刺激図形の形状特性に大きく依存するため、図4の直線経路のように、図形の形状特性および物理量を明らかにしたうえで再認成績を検討する必要がある。そしてそれに加えて、より直接的に再認成績に影響するのは図形の物理量に対する心理量であるため、図4の点線経路のように、図形の物理量と心理量の対応関係を評定実験により明らかにしたうえで、図形の心理量を説明変数として再認成績を予測したほうが説明力は高くなる。図形の心理量による再認成績の予測の試みは、本稿の6.3節で少し取りあげる。

ここではまず4.1節で、酒井（2000）の記憶実験で用いられた刺激図形（図1を参照）の主な形状特性と、それが図形の処理・記憶保持に及ぼす作用について述べる。次に4.2節で、記憶実験で操作された図形の物理量の規定方法について説明する。そして4.3節で、評定実験による図形の物理量と心理量の関係について述べる。

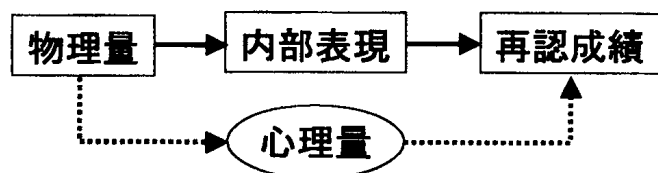


図4 図形の物理量（実線）と心理量（点線）による再認成績の説明。

図形の生成方法に関しては、酒井・乾(1999a)を参照のこと。

4.1 生成図形の特性

ランダム図形：規則性・対称性構造の強い図形の場合、記憶の負荷 (load) が低減される。また、図形の規則性に依存した方向へ記憶表現が変容されることも想定される。これら2点を回避するため、規則性の非常に弱いランダム図形が刺激に用いられる。

円形状の図形：アスペクト比を大きくすると、中心軸に基づいて記憶保持する戦略により、凹凸部の数が同じ図形でも記憶の負荷が低減される。図形の凹凸部の数のみにより記憶の負荷を規定するため、中心軸傾向の弱い円形状の図形が刺激に用いられる。

各凸部の顕著性 (saliency) の均一化：1図形がもつ各凹部の曲率の極値はそれぞれ異なるが、各凸部の曲率の極値はほぼ一定に設定される。より顕著な部分に基づいて再認判断されやすいと思われるが、各凸部の顕著性はどの凸部でも大きく異ならないため、どの凸部も再認手がかりの重みづけはほぼ一定とみなされる。

4.2 図形の物理量の規定

4.2.1 図形の物理的複雑さ

図形の物理的複雑さ (physical complexity) は、BPの場合で角の数 (number of turns) や P^2/A (Perimeter²/Area, 周囲長の二乗/面積) により規定されてきた (Attneave, 1957)。曲率の大きい部分は図形を構成するうえでより重要な部分となるが、BPの角は輪郭図形の凹凸部に相当する。そのため輪郭図形の物理的複雑さは、以下の凹凸数と P/\sqrt{A} (Perimeter/ $\sqrt{\text{Area}}$) により規定される。

凹凸数：図形の凹部、凸部の個数を示す。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1を参照)。

P/\sqrt{A} ：図形の輪郭の長さを面積の平方根で除算した値を示す。 P/\sqrt{A} は、図形の面積 A に対して不変な値をとる。酒井 (2000) では、図形の面積 A は図形の複雑さに関わらず一定に設定されたため、 P/\sqrt{A} は周囲長 P のみにより変

動する。ディスプレイ上における周囲長 P と面積 A の算出方法に関しては、酒井・乾（2000a）を参照のこと。

4.2.2 2図形の物理的類似度

酒井（2000）の記憶実験で用いられたTとDは、図3のように凹凸数が同じで極座標における各凸部の位置はほぼ一致する。この場合、TとDの物理的類似度（physical similarity）の規定方法の1つとして2図形のずれ率（percent distortion）が考えられ、次式により算出される。

ずれ率 = (2図形を重ねたときのずれた面積の近似値) / (1図形の面積の近似値)

酒井（2000）では、極座標上での各凹凸部の位置は2図形のあいだでほぼ一致するように設定されたため、設定されたずれ率は2図形を任意に重ねたときのずれ率のうち最小に近い値である。

4.3 図形の心理量の測定

4.3.1 図形の心理的複雑さ

多角形図形の場合、角の数が心理的複雑さ（psychological complexity）の上限に最も大きく影響する物理的変数となる（Attneave, 1957）。しかし、図形の角の数が大きくなると P/\sqrt{A} の値も増大する。BPの角の数と P^2/A の相関係数は極めて高く、Chipman（1977）によれば.94である。角の数と P^2/A のいずれの物理的変数が心理的複雑さにより大きく影響するのかを明らかにするため、Chipman（1977）は P^2/A は一定で角の数の異なる刺激セットを用いて複雑さの評定実験を行った。結果は、同じ P^2/A の値をもつBPでも、角の数の大きいBPほど複雑さの評定値は大きくなった。

酒井（2000）ではChipman（1977）と同様、図5のように P/\sqrt{A} は一定で凹

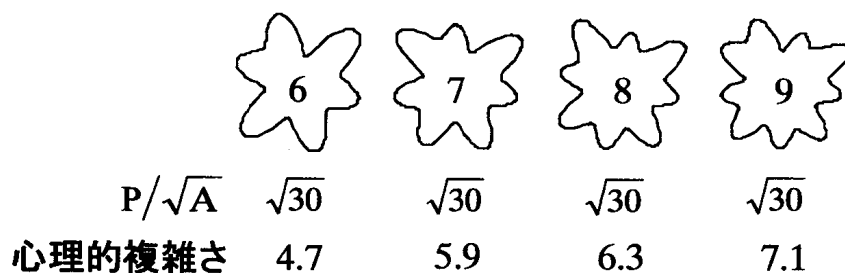


図5 P/\sqrt{A} は一定で異なる凹凸数をもつ刺激セットの図形例。

凸数の異なる刺激セットを用いて複雑さの評定実験が行われた。結果は、 P/\sqrt{A} が一定の場合、凹凸数が大きく各凸部の長さが小さい図形ほど心理的複雑さは大きくなった。 P/\sqrt{A} は輪郭図形の心理的複雑さを正確に予測する物理的変数とならず、凹凸数が心理的複雑さを規定する最大の要因になることがわかる。図形の心理的複雑さを知覚の負荷とみなすと、図形は周囲長でなく凹凸構造に基づいて知覚されることが示される。この実験結果は、BPを刺激に用いたChipman (1977) の結果と整合する。

4.3.2 2図形の心理的類似度

Cortese & Dyre (1996) は、輪郭図形間で複数の次元の刺激値が異なる多次元的な類似度判断モデルを検討したが、酒井 (2000) は、2図形間で1つの次元の刺激値のみが異なる単次元モデルを検討した。図6のように、対となる2図形 (TとD) の複雑さは一致させ、2図形間で異なるのは微妙な形状のみである。2図形間の微妙な形状の差異はどのように心理的類似度 (psychological similarity) に変換されるか、また2図形のずれ率が一定のとき、対となる2図形の複雑さは心理的類似度にどのように影響するかについて検討された。

実験結果は、図6のように2図形のずれ率の増大に対して心理的類似度は線形的に低下した。わずかなずれ率の差異が心理的類似度に大きく影響したことから、微小な形状の差異に対する類似性の感度は非常に高いことが示される。また図7にみられるように、ずれ率が一定の場合でも対となる2図形の凹凸数

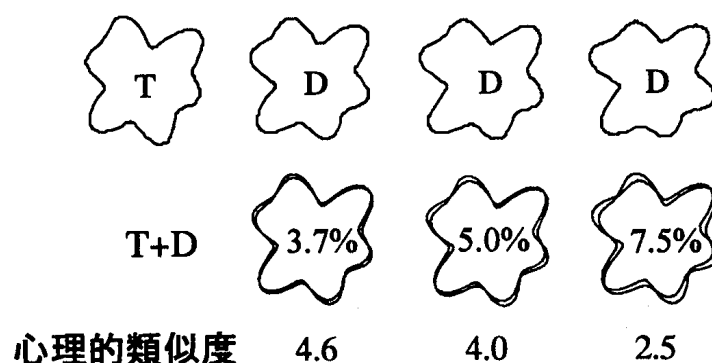


図6 2刺激対の図形例。T + Dの図形はT (Target) とD (Distracter) を重ね合わせた図形で、図形中の数値はTとDのずれ率を示す。

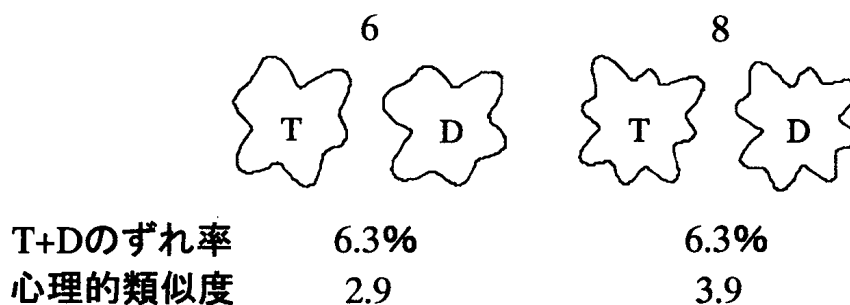


図7 ずれ率は一定で2刺激対の凹凸数が異なる図形例。

の増大により心理的類似度は高まった。心理的類似度は2図形間の物理的差異のみにより規定されず，対となる2図形の複雑さが心理的類似度を高めるのに強く作用することが示される。そして，2図形の各凸部のずれ率が一定のとき，どの凹凸数の対の図形でも心理的類似度はほぼ一定となった。これらの結果より，2図形は各凸部分の特徴照合に基づき，各凸部の差異が平均化されて類似度判断されることが示唆される。

5. 3過程に基づく再認記憶

従来の図形の短期記憶研究における不足点の2つめは，図8のように再認記憶は3つの処理過程の作用に基づく，という視点の欠如である。第1刺激の記憶保持の正確さのみが再認成績に反映するとみなした研究例が多いが，たとえば記憶保持過程で容量に制限がなくても，獲得過程や判断過程で図形の複雑さが作用して課題成績が低下することもありうる。獲得，記憶保持，判断の3過程の作用として，視覚短期記憶の再認成績を説明する必要がある（Kinchla & Smyzer, 1967）。

5.1 獲得過程（feature encoding）

図形が瞬間提示された場合，曲率の大きい凹凸部は並列処理されることから（Inui, 1989），図形の大局的形状に相当する凹凸数や凹凸部の位置などは，複雑さに関わらず瞬間視により並列処理されると考えられる。しかし図形の局所的形状は，図形が中心窩（fovea）に提示された場合には眼球運動を要しない系列処理である内的走査（mental scanning）により獲得される（Inui et al., 1978）。

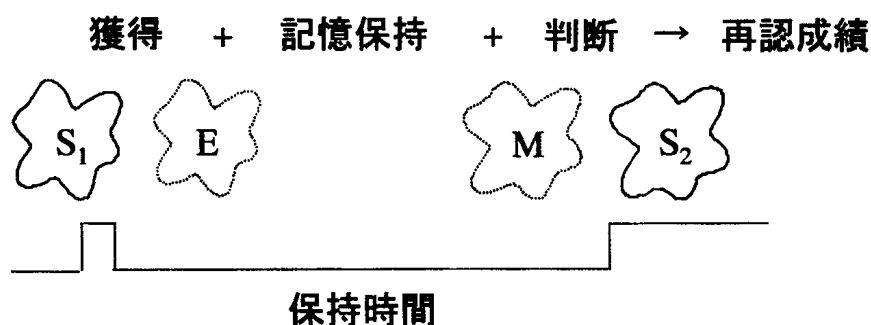


図8 再認記憶に及ぼす3過程の作用。Eは獲得された（Encoded）図形，Mは第1刺激の記憶表現（Memory）， S_1 と S_2 はそれぞれ第1，第2刺激を示す。

そのため、複数の凹凸部をもつ輪郭図形の場合、図形の局所的形状に相当する各凸部は内的走査により獲得されると考えられる。

Rock et al. (1972) は、複雑な図形の再認が困難になる原因として、知覚および記憶保持のいずれの処理過程に容量制限があるためかを問題提起し、複雑な図形では知覚の過程で正確さに制限があると結論づけた。しかし、酒井 (2000) の実験結果はRockらの結論と一致しない。酒井 (2000) は、図2の実験手続きで第1・第2刺激の保持時間が0 secのときの再認成績により、第1刺激の提示時間の増大に対する獲得の正確さの上昇率を調べた。その結果、第1刺激の提示時間が120msの条件でも288ms、1200msの条件と再認成績に大きな差はなく相当高かった。複雑な図形の場合でも瞬間視により正確に知覚・獲得されることが示され、内的走査による視覚情報の獲得は非常に高速であることがうかがえる。

5.2 記憶保持過程 (memory process)

BPの再認実験 (Phillips, 1974) や線分の方位の閾測定 (Vogels & Orban, 1986) によれば、視覚短期記憶の正確さは数秒から数十秒のあいだ低下し続けた。しかしCermak (1971) による輪郭図形の再認実験では、再認成績は、保持時間が1.5secから12secまでは低下し続けたが、12secから20secまではチャンスレベル以上で漸近となった。記憶の正確さの低下は永続的でなく、いずれ視覚短期記憶の忘却はほとんどなくなると解釈される。

酒井 (2000) の実験では、図形の複雑さに関わらず、8 secのあいだ比較的

緩やかに忘却は続いた。単純な図形でも、数秒程度のあいだほぼ完全な正確さで保持され続けるのは困難であることがわかる。その一方で、凹凸数9の複雑な図形で保持時間が8 secまで増大しても再認成績はチャンスレベルまで低下せず、忘却率は比較的低かった。この原因として、記憶保持過程での視覚的リハーサル (visual rehearsal) の効果が考えられる (Shaffer & Shiffrin, 1972)。リハーサルなしの条件で記憶成績は大きく低下することから (Dale, 1973)、リハーサルは視覚短期記憶での正確な保持に大きく機能すると理解される。視覚短期記憶表現の安定性は保持時間が数秒程度経過しても比較的高いと解釈され、それゆえ、複雑な視覚シーンの特徴を系列的にスキャンした場合でも1つの安定した知覚像が得られるといえる。

5.3 判断過程 (decision process)

保持時間後に第2刺激が提示されたときの同異判断 (same-different judgment) の戦略として、第1刺激の既知感に基づくものと、第1・第2刺激の差異感に基づくものがある。前者の場合、ある判断基準 (criterion) より再認される既知感が大きければ「同じ」、小さければ「異なる」と判断される。後者の場合、ある判断基準より再認される差異感が大きければ「異なる」、小さければ「同じ」と判断される。いずれの戦略が用いられるかは課題に大きく依存し、また試行間において一定でない可能性もあるが、第1・第2刺激間の差異が微妙な条件では、差異感に基づく戦略により再認判断されることが考えられる。

酒井 (2000) の実験では、TとDのずれ率の増大により2図形間の心理的距離および再認成績は線形的に上昇した。2図形の心理的類似度と再認の混同 (confusion) は共変することが示され、図形の判断過程は第1刺激の記憶表現と第2刺激の類似度判断に基づくことがうかがわれる。またこの実験結果より、輪郭図形の再認成績はTとDのずれ率を信号 (signal) とする信号検出理論 (Signal Detection Theory) に従うことが示唆された。6節では、酒井 (2000) により構築された、信号検出理論に基づく輪郭図形の再認記憶モデルについて検討する。

6. 信号検出理論に基づく再認記憶モデル

視覚短期記憶における再認成績は、第1・第2刺激が異なる試行での2刺激間の差異が信号となる信号検出理論に従うことが検証されてきた。従来の研究では、線分の方角 (Vogels & Orban, 1986) やドットの位置 (Kinchla & Smyzer, 1967) という1次元的な視覚刺激が用いられたが、酒井 (2000) は2次元の輪郭図形を刺激に用いて、信号検出理論に基づく再認記憶モデルを検討した。ここでは、まず6.1節で信号検出理論について簡潔に説明し、6.2節で再認記憶課題への信号検出理論の適用について紹介する。そして6.3節で、輪郭図形の再認記憶モデルとシミュレーションで得られた知見について述べる。

6.1 信号検出理論

信号検出理論では、刺激に対する被験者の感度 (sensitivity) が確率的に分析される。まず、信号なしのノイズ (Noise) 試行と信号ありのノイズ+信号 (Noise + Signal) 試行を設定する。図9の左の分布が信号なしの試行、右の分布が信号ありの試行で、横軸は刺激に対する被験者の知覚強度を示す。信号ありの試行は信号なしの試行より、信号強度の分だけ刺激強度は大きく設定される。信号検出理論では、刺激に対する知覚強度は常には一定でないとみなす。

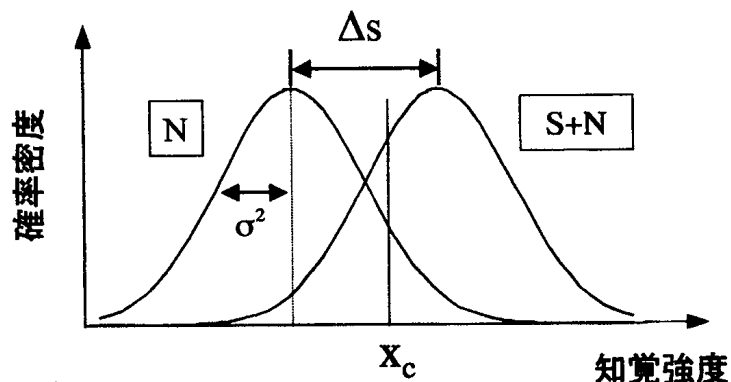


図9 信号検出理論における確率密度分布。 Δs は信号強度、 σ^2 は知覚強度の分散、 X_c は判断基準を示す。試行によって実際の刺激強度より強いまたは弱いと知覚され、知覚強度に分散が生じると考える。そして、知覚強度は実際の刺激強度を平均とした正規分布に従うと仮定する。被験者の信号検出力 d' は、信号強度が大きいほど、また知覚強度の分散が小さいほど高くなり、次式で表される。

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

Δs は信号強度、 σ^2 は知覚強度の分散を示す。

被験者は各試行で「信号あり」「信号なし」のいずれかを判断するが、被験者は判断時にある判断基準を設定するとみなす。判断基準は、「信号あり」「信号なし」を判別する知覚強度の境界レベルであり、図9における縦の直線の値 X_c に相当する。提示された刺激強度が判断基準より大きいと知覚された場合は「信号あり」、小さいと知覚された場合は「信号なし」と被験者は判断するとみなす。図9において、2分布の交差する値より判断基準が大きい場合は「信号なし」と判断する傾向が強く、小さい場合は「信号あり」と判断する傾向が強いことを示す。

6.2 再認記憶課題への信号検出理論の適用

信号検出理論を再認記憶課題に適用すると、図10のようになる。左の分布 ($S_1 = S_2$) が第1・第2刺激が同じ試行、右の分布 ($S_1 \neq S_2$) が第1・第2刺激が異なる試行で、横軸は再認される第1・第2刺激の差異感を示す。記憶ノイズにより第1刺激の記憶表現値が大小の両方向に変動するため、第1・第2刺激の差異感に分散が生じる。そして、保持時間の増大により記憶ノイズが増大するため、図10のように保持時間 $t_1 \rightarrow t_2$ ($t_1 < t_2$) により第1・第2刺激の差異感の分散が増大する。そして、差異感 は第1・第2刺激の刺激強度の差異を平均とした正規分布に従うと仮定する。被験者の記憶感度 d' は、第1・第2刺激の刺激強度の差異が大きいほど、また第1・第2刺激の差異感の分散が小さいほど高くなり、次式で表される。

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

Δs は第1・第2刺激の刺激強度の差異、 σ_m^2 は第1・第2刺激の差異感の分散を示す。

被験者は各試行において、第1・第2刺激が「同じ」「異なる」のいずれかを判断するが、被験者は判断時にある判断基準を設定するとみなす。判断基準は、「同じ」「異なる」を判別する第1・第2刺激の差異感の境界レベルであり、図10における縦の直線の値 X_c に相当する。第1・第2刺激の差異感が判断基

準より大きいと再認された場合は「異なる」、小さいと再認された場合は「同じ」と被験者は判断するとみなす。図10において、2分布の交差する値より判断基準が大きい場合は「同じ」と判断する傾向が強く、小さい場合は「異なる」と判断する傾向が強いことを示す。

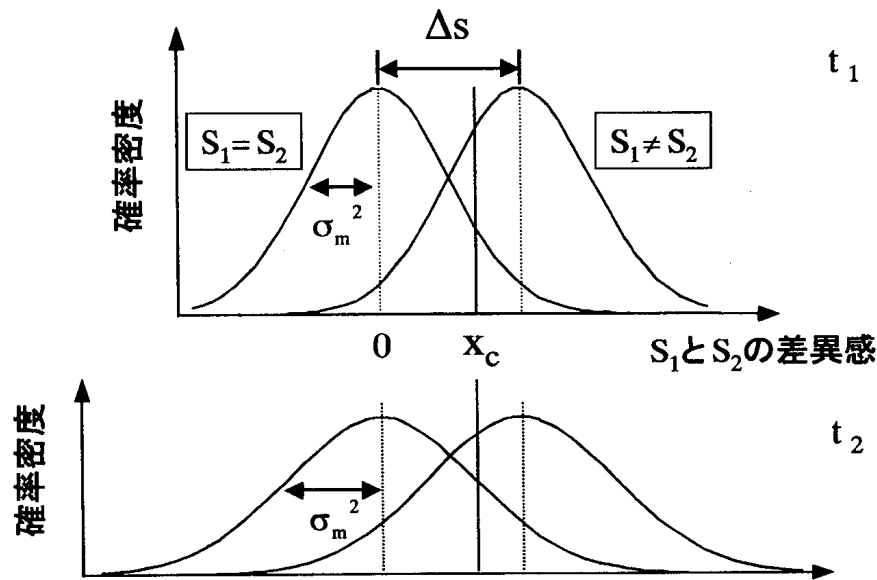


図10 信号検出理論における再認記憶課題での確率密度分布。 Δs は第1・第2刺激の刺激強度の差異、 σ_m^2 は第1・第2刺激の差異感の分散、 x_c は判断基準を示す。

6.3 輪郭図形の再認記憶モデル

Kinchla & Smyzer (1967) は、ドットの位置の再認記憶課題に信号検出理論を適用し、獲得・記憶保持・判断の3過程の作用により短期記憶の再認成績を予測するモデルを構築した。Kinchla & Smyzer (1967) のモデルを参考にして、酒井 (2000) は3過程に基づく輪郭図形の短期記憶モデルを構築した。獲得過程では、瞬間視により獲得される図形の正確さと複雑さに制限が生じる。記憶保持過程では、獲得された形状情報は記憶ノイズにより忘却される。判断過程では、第1刺激の記憶表現と第2刺激の同異判断において、再認される差異感が判断基準より大きければ「異なる」と判断されるが、判断基準は常に一定でなく分散が生じる (Kinchla, 1974)。この3過程の処理制限が記憶感度 d' を説明する要因になると考えた場合、次式が成立する。

$$d' = \frac{g(d) \cdot \Delta s'}{\sqrt{\sigma_m^2 + \sigma_c^2}} \quad \text{式 (3)}$$

Δs は T と D の心理的距離で、T と D のずれ率 Δs の関数である。 $g(d)$ は刺激提示時間 d に対する獲得の正確さの関数、 σ_m^2 は記憶表現値の分散、 σ_c^2 は判断基準の分散を示す。3 過程に分けてモデル化することにより、どの処理過程でどの程度の処理制限が生じるか明らかにされうる。

従来の再認記憶モデルと異なる点は、式 (3) の $\Delta s'$ の部分である。従来は式 (2) のように、第 1・第 2 刺激の物理的な刺激強度の差異 Δs が説明変数となるのに対し、式 (3) では第 1・第 2 刺激の心理的距離 $\Delta s'$ が説明変数になる。この理由は以下のとおりである。図 7 のように対となる 2 図形の複雑さが増大すると 2 図形間の心理的類似度は高くなるため、再認記憶課題で対となる第 1・第 2 刺激の複雑さが大きい試行では同異判断の混同が増大する。従来のモデルでは、対となる第 1・第 2 刺激の複雑さはどの試行も一定であるため物理的な変数 Δs が用いられたが、酒井 (2000) では、異なる複雑さの試行間で予測されるモデルであるため心理的距離 $\Delta s'$ が用いられる。

モデルの数式的な詳細は省略するが (酒井・乾 (1999b) を参照)、酒井 (2000) で行われた多くの記憶実験データがモデル式 (3) によりうまく予測された。そしてモデル構築とシミュレーションにより、心理実験の結果のみでは示されない以下の主な知見が明らかにされた。

(1) 輪郭図形の再認記憶課題への信号検出理論の適用可能性

ドットの位置 (Kinchla & Smyzer, 1967) や線分の方角 (Vogels & Orban, 1986) などの再認成績は、第 1・第 2 刺激間のドット距離や方位差が信号 Δs となる信号検出理論に従うことが実証されてきた。これらの研究では 1 次元的な視覚情報が刺激に用いられたが、2 図形の物理的差異を T と D のずれ率により規定して信号とみなすことで、2 次元的な輪郭図形の場合も信号検出理論で再認記憶成績が予測可能であることが実証された。より多くの短期記憶の忘却現象が、信号検出理論により説明される可能性が示唆される。

(2) 保持時間とノイズの線形関係

視覚短期記憶における記憶ノイズと保持時間の関数関係は、視覚刺激により異なる。ドットの位置弁別 (Kinchla & Smyzer, 1967) では線形関数となり、線分の方位 (Vogels & Orban, 1986) や格子のコントラスト (Lee & Harris, 1996) の弁別閾の場合、べき関数となった。しかし、記憶ノイズは保持時間の単調増加関数である点はこれらの研究で一致している。輪郭図形の場合、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実証された。そして、記憶ノイズと保持時間の線形関係は少なくとも 8 sec は続くことが示された。視覚短期記憶において、一定の増加率で比較的長いあいだ記憶ノイズは増加し続けることが示される。

(3) 提示時間とノイズ率の反比例関係

Nosofsky (1983) は、刺激提示回数の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、記憶表現値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 (Swets et al., 1959)。酒井・乾 (2000b) は、刺激提示時間の増大により獲得の走査回数が増大し、各走査は互いに独立であると仮定して、刺激提示時間の効果を反復提示回数の効果とみなして検討した。その結果、刺激提示時間 d の増大により記憶ノイズの増加率は $1/d$ 倍に低下することが検証された。視覚短期記憶の忘却現象が、反復提示に基づく統計理論に適合することが示される。

(4) 視覚短期記憶の容量は凹凸数 4

保持時間が増大しても、単純な図形で記憶成績が低下しない報告例がある (Christie & Phillips, 1979)。ある複雑さ以下の図形の場合、視覚短期記憶において記憶ノイズによる忘却はほとんど生じないとみなせる。保持時間が増大しても図形の正確な形状情報がほとんど忘却されない複雑さを視覚短期記憶の容量と定義すると、記憶容量は凹凸数 4 の複雑さであることが示された。この複雑さは、Inui (1988) の再生実験により視覚短期記憶の容量として示された、 3×3 から 4×4 程度の BP のマトリックス数に相当すると推測される。

(5) 判断過程が複雑な図形の再認困難性に大きく影響

Rock et al. (1972) は獲得過程で図形の複雑さが大きく作用すると指摘し、Phillips (1974) は記憶保持過程における容量制限に図形の複雑さが大きく作用すると指摘した。しかしモデルでは、図形の獲得の正確さは複雑な図形でも500ms程度で飽和し、また図形の各凸部に生じる記憶ノイズは比較的小さく、図形の複雑さは獲得および記憶保持過程に大きく作用しなかった。それに対して、対となる2図形の複雑さの増大により2図形の心理的距離は大きく低下し、判断過程の混同は大きく増大した。これらの結果より、複雑な図形の再認が困難になるのは、判断過程の混同が大きな要因であることが導かれる。

7. 今後の展望

酒井 (2000) により視覚短期記憶に関する多くの知見が得られたが、検討すべき問題点が残された。ここではその主な3点について述べる。

7.1 定性的な記憶特性

酒井 (2000) では、図1のように刺激図形に強い制約が設定され、制約以外の記憶特性については検討されなかった。たとえば、刺激図形の各凸部の顕著性はほぼ一定に設定され、各凸部の再認手がかりの重みづけに関しては検討されなかった。また、比較的円形に近いランダム図形が刺激に用いられ、規則性や中心軸に基づく記憶方略について着眼されなかった。そして、各凸部は規則的に配列され、特徴の空間的配列に関する記憶特性は検討されなかった。酒井 (2000) により得られた定量的な知見をふまえて、輪郭図形の定性的な短期記憶特性について今後の検討を要する。

7.2 曲率の短期記憶特性

酒井 (2000) では、各凸部の記憶表現値が正規ランダム変数として視覚短期記憶で保持されるという仮定の十分性は示されたが、この仮定が視覚短期記憶の忘却を説明するための必要条件であるかどうかを検証する必要がある。その方法として、視覚短期記憶における曲率の閾測定が考えられる。曲率の短期記憶研究の意義として、以下の点があげられる。(1) 曲率検出に関する研究は

多いが、曲率の短期記憶に関する研究例はほとんどない。(2) 曲率は、2次元図形、および3次元物体を構成する最も基本的な形状特性である。(3) 輪郭図形の場合は図形のもつ物理的変数が多次元的なため、記憶に関する心理現象を生理学的に説明するのは困難であるが、曲率の記憶表現は生理学的に説明されやすい。

測定方法は一般的によく用いられる恒常法であり、Lee & Harris (1996) による格子のコントラスト閾の測定を参考にして、凸形状の曲率閾を測定する。輪郭図形の再認成績が保持時間の増大により低下したことから、保持時間の増大により曲率の閾値は上昇することが十分予想される。PSEの測定により曲率の記憶表現値の期待値は外界の曲率値と一致するか、またJNDの測定により曲率の記憶表現値の分散は保持時間のいかなる関数で増大するか、を検証する。

7.3 忘却時の動的過程

7.2節で視覚短期記憶の忘却要因が記憶表現値の分散増大であることが実証された場合、視覚短期記憶でのいかなる動的プロセスにより分散が増大するかを考察する必要がある。分散増大の要因の1つに、Kinchla & Smyzer (1967) の拡散モデル (diffusion model) で仮定されたランダムウォーク (random walk) があげられる。モデルでは、記憶保持過程でドットの記憶表現位置がランダムウォークするため、記憶表現位置の分散が増大すると仮定された。そしてモデルと実験データとの適合性により、ランダムウォークによる記憶表現位置の分散増大が忘却要因の十分条件として成立することを実証した。

ランダムウォークはブラウン運動 (Brownian motion) を理想化した物理モデルで、時間的な数値の変動が確率的に表されるが、次の2点により、視覚短期記憶の記憶表現値がランダムウォークするため記憶表現値の分散が増大すると仮定されうる。

(1) ランダムウォークモデルでは保持時間 t の増大に対して、 t 時の期待値は入力値と一致し分散のみが増大する。この現象は、保持時間の増大に対して記憶表現値のPSEは一定でJNDのみが増大するLee & Harris (1996) や Nilsson & Nelson (1981) の視覚短期記憶データと一致する。

(2) ランダムウォークモデルでは、分散は保持時間の線形関数として増大する。この現象は、6.3節の(2)で得られた、記憶ノイズは保持時間の線形関数として増大する知見と一致する。

今後、視覚短期記憶における記憶表現値の変動過程を検討する必要があるが、その試みの1つとして、ランダムウォークにより視覚短期記憶の記憶表現値の分散が増大すると仮定して検討するのは興味深い。そして、いかにして短期記憶表現が長期記憶に固定化 (consolidation) されるかの問題に発展させる必要がある。

引用文献

- Attneave, F. 1957 Physical determinants of the judged complexity of shapes. *Journal of Experimental Psychology*, **53**, 221-227.
- Bartram, D. J. 1978 Post-iconic visual storage: Chunking in the reproduction of briefly displayed visual patterns. *Cognitive Psychology*, **10**, 324-355.
- Biederman, I. 1987 Recognition-by-components: A theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**, 115-147.
- Cermak, G. W. 1971 Short-term recognition memory for complex free-form figures. *Psychonomic Science*, **25**, 209-211.
- Chipman, S. F. 1977 Complexity and structure in visual patterns. *Journal of Experimental Psychology : General*, **106**, 269-301.
- Christie, D. F. M., & Phillips, W. A. 1979 Simple drawing and pattern completion techniques for studying visualization and long-term visual knowledge. *Memory & Cognition*, **7**, 360-367.
- Cortese, J.M., & Dyre, B.P. 1996 Perceptual similarity of shapes generated from Fourier descriptors. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **22**, 133-143.
- 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., Kawato, M., & Suzuki, R. 1978 The mechanism of mental scanning in foveal vision. *Biological Cybernetics*, **30**, 147-155.
- Inui, T. 1988 Properties of human visual memory for block patterns. *Biological Cybernetics*, **59**, 179-187.
- Inui, T. 1989 A model of human visual memory: Data compression with multi-resolution. *The 6th Scandinavian Conference on Image Analysis*, 19-22.
- Kinchla, R.A., & Smyzer, F. 1967 A diffusion model of perceptual memory. *Perception & Psychophysics*, **2**, 219-229.

- Kinchla, R.A. 1974 Detecting target elements in multielement arrays: A confusability model. *Perception & Psychophysics*, **15**, 149-158.
- 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.
- Palmer, S.E. 1977 Hierarchical structure in perceptual representation. *Cognitive Psychology*, **9**, 441-474.
- Phillips, W.A. 1974 On the distinction between sensory storage and short-term visual memory. *Perception & Psychophysics*, **16**, 283-290.
- Rock, I., Halper, F., & Clayton, T. 1972 The perception and recognition of complex figures. *Cognitive Psychology*, **3**, 655-673.
- 酒井浩二 2000 視覚短期記憶の時空間特性 京都大学大学院情報学研究科博士論文.
- 酒井浩二・乾敏郎 1999a 視覚短期記憶における図形の変容特性 心理学研究, **70**, 211-219.
- 酒井浩二・乾敏郎 1999b 視覚短期記憶の特徴分節モデル 電子情報通信学会技術研究報告, **HIP99-10**, 13-18.
- 酒井浩二・乾敏郎 2000a 図形の心理的複雑さと視覚短期記憶の保持特性 心理学研究, **71**, 9-16.
- 酒井浩二・乾敏郎 2000b 視覚短期記憶の獲得・忘却モデル 日本心理学会第64回大会発表論文集, P. 737
- Shaffer, W.O., & Shiffrin, R.M. 1972 Rehearsal and storage of visual information. *Journal of Experimental Psychology*, **92**, 292-296.

- Swets,J.A., Shipley,E.F., McKey,M.J., & Green,D.M. 1959 Multiple observations of signals in noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, **31**, 514-521.
- 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.