

平成 21 年 5 月 29 日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2007-2008
 課題番号：19500226
 研究課題名（和文）視覚性ワーキングメモリにおける情報統合機構の認知神経科学的研究

研究課題名（英文）Feature integration in visual working memory

研究代表者

齋木 潤 (SAIKI JUN)
 京都大学・人間・環境学研究科・教授
 研究者番号：60283470

研究成果の概要：ヒトが短時間記憶できる視覚情報は3-5個の物体にすぎないが、特徴の組合せを正確に記憶できる量はさらに少ない。これは、記憶情報の読み出しの問題ではなく保持できる量自体の減少による。また、知覚情報の欠如を補完できるのは物体1個の情報に限られる。特徴の組合せの記憶に関連する脳活動を調べた結果、特徴統合の保持は頭頂葉と前頭葉の後部、変化検出のための記憶と知覚の比較照合は前頭葉の前部が主に関与していることが示唆された。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2008年度	1,700,000	510,000	2,210,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・認知科学

キーワード：視覚性ワーキングメモリ、情報統合、認知神経科学、fMRI

1. 研究開始当初の背景

(1) ワーキングメモリは思考、推論、言語理解、物体やシーンの認識を含む広範な人の認知活動にとって中心的な役割を果たすと考えられる。とりわけ重要な機能は、情報の変換、統合である。ワーキングメモリ研究はその歴史的経緯から言語材料を用いた研究が中心であったが、近年、視覚性ワーキングメモリの研究が急増している。視覚性ワーキングメモリの研究においては、物体認識や注意研究で議論されてきた視覚情報の統合の問題がここ数年本格的に広く取り込まれ始めてきた。本研究では、研究代表者自身のこれ

までの研究成果を踏まえて、視覚性ワーキングメモリにおいて、物体を構成する様々な視覚属性が統合、保持される機構を行動実験、とfMRI実験を併用して明らかにする。

(2) 結びつけ問題(binding problem)と視覚性ワーキングメモリ

視覚認知の研究における一つの中心テーマは結びつけ問題である。これは、初期視覚システムが物体情報を色、形状、運動などの要素属性に分解して処理し、高次視覚システムは一般に一つのニューロンが複数の物体情報を処理する脳情報処理の制約の下で脳が如何にして、各物体とその属性の対応を認識

するのかという問題である。これに対する最終的な解答はまだ得られていないが、物体認識を含む視覚研究は、ヒトが実際に結びつけの誤りを頻繁に犯すこと、正確な結び付けには焦点的注意が必要なことがほぼ明らかになっている。では、注意を向けて結び付けられた属性情報は視覚性ワーキングメモリではどのように保持、処理がなされるのだろうか？この重要な問題に対して、現在、研究者の間では意見が激しく対立している。大別すると、一般の視覚性ワーキングメモリの容量といわれる3-5個程度の物体に対して特徴の結びつけが保持されるという立場(Luck & Vogel, 1997)と結びつけが保持された物体の保持容量はずっと少ないという立場である(Wheeler & Treisman, 2002, Saiki, 2003)。

(3) 方法論上の諸問題

視覚性ワーキングメモリ研究におけるこの対立の裏には方法論上の問題が潜んでいる。この分野の標準的な実験パラダイムに変化検出課題があるが、サル神経生理研究で用いられる遅延見本合わせとの構造的類似性もあり、多くの研究がこの課題を用いてきた。しかし、この課題は、サンプルとテスト刺激の異同を問うだけなので、課題遂行に属性の組合せ情報(正しい結び付け)を用いている保証がない。Saiki & Miyatsuji (2007)では変化検出課題の問題点を実験的に明らかにした。属性の統合の記憶を評価するための適切な行動課題の開発が問題の解決には必須である。第2に、視覚性ワーキングメモリにおける特徴統合の脳内機構を検討する場合の諸制約がある。視覚性ワーキングメモリ研究は、サル神経生理学の成果をヒトでのfMRI研究に一般化して進歩してきた面があるが、結びつけ問題は動物で検討することが難しい。これは、結びつけ問題はあらかじめ組合せが決められていない属性情報を実験場面で組合せて処理することで検討するが、サルの場合には、事前の大量の学習時に組合せ自体を記憶してしまう可能性が高いためである。現在、fMRI研究では、記憶容量などに関する多くの成果とは対照的に、結びつけがなされる脳部位はほとんどわかっていない(Saiki, 2007)。

2. 研究の目的

(1) 行動実験を用いて、属性の結び付けの記憶の限界(容量)を正確に推定し、同時に結び付けの記憶の困難さが、記憶の保持、検索いずれに起因するのかを明らかにする。研究代表者が作成した多物体恒常性追跡法(MOPT)を修正、改変して検討するとともに、より一般的な課題への知見の一般化を図る。並行して、新たな実験手法を開発し、特徴統合の記憶の生成過程の時間的メカニ

ムや大局的な特徴統合プロセスを実験的に検討する。

(2) fMRI 実験を用いて、特徴統合の保持とその動的な更新のメカニズムに関連する脳活動を計測し、特徴統合の脳内メカニズムを探る。MOPTを用いた脳機能計測実験の先行研究を修正、改変し、より厳密な脳活動測定を試みる。特に、記憶の保持過程と変化検出過程の脳活動を分離し、前頭前野前部、後部頭頂葉、いずれの活動が結び付けの記憶に関与しているのかを明確にすることを目標にする。

3. 研究の方法

(1) 行動実験

研究代表者がここ数年来進めてきた多物体恒常性追跡法(MOPT)という方法を用いた視覚性ワーキングメモリにおける情報統合とその変換に関する研究成果を基盤として、知見の一般性を確認し、統合された物体表象に関して推定される記憶容量の減少が、ワーキングメモリの符号化、保持、検索のいずれを反映しているかを定量的に明らかにする。また、記憶情報と知覚情報の比較の時間発展を調べる課題を作成し、視覚性ワーキングメモリのダイナミクスを検討した。

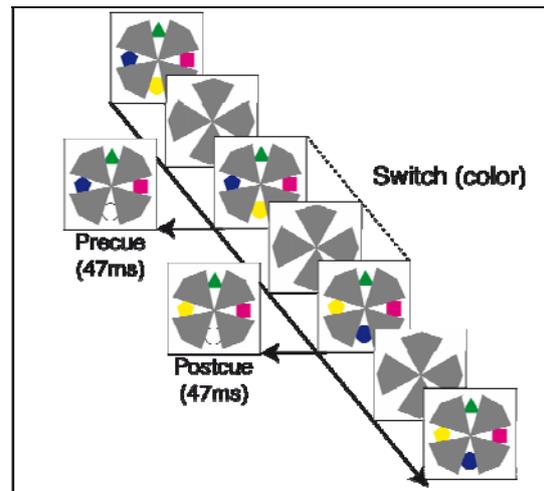


図1. MOPTを用いた検索手がかり課題

①MOPTを用いた検索手がかりの効果の検討

MOPT課題を用いた研究は、属性の組み合わせの記憶をより厳密に評価できる変化のタイプの同定課題、または、課題関連属性の変化かどうかを弁別する課題(以後関連属性変化検出課題と呼ぶ)を用いると、推定記憶容量が有意に減少することを示した(Saiki & Miyatsuji, 2007)。しかし、この結果は記憶保持、検索いずれを反映するか不明である。MOPT課題と空間手がかり課題を結び付けることにより(図1)、記憶検索の手がかりの効果の評価することで記憶容量の減少が記

憶検索のコストか保持される記憶自体の限界かを検討する。本来推定容量以上の記憶が保持されているが検索の際に失敗していれば、検索手がかりが有効であると予想される。一方、推定容量がほぼ保持容量を反映しているとすれば検索手がかりは効果がないと予想される。

②通常の変化検出課題による検索手がかりの効果の検討

視覚性ワーキングメモリ研究では、変化検出課題が標準的な課題として用いられることが多い。変化検出課題と MOPT では視覚刺激の状況がかなり異なるので、MOPT で見出された知見が単なる刺激状況の違いを反映している可能性は完全に排除はできない。そこで、関連属性変化検出課題を通常の変化検出課題の刺激状況に適用し、MOPT での知見の一般性を確認する。標準的な刺激状況である 2 枚の複数属性を持つ多物体ディスプレイを 1 秒程度の間隔をおいて継時的に提示し、通常の変化検出課題と関連属性変化検出課題のパフォーマンスを比較検討する。また、色、形、位置の 3 属性が課題に関連する通常の変化検出課題、そのうちの 2 つが課題に関連する関連属性変化検出課題を体系的に比較することで、従来の特徴統合の記憶に関する知見の一般性を検討する。

③時空間視覚探索課題による記憶と知覚の照合過程の検討

視覚性ワーキングメモリの一つの機能として遮蔽などによる視覚入力欠如を補償することが挙げられる。こうした知覚の補償機能の有効性が記憶される物体数とどのように関連するのかを時空間視覚探索課題を作成して検討した。この課題では、8 色の色つきのバーが遮蔽物の裏を運動し、バーの先端が再度見えたときに色が変化したかどうかを判断する。バーの色情報が完全に利用可能な条件（知覚+記憶条件）に加えて、先端の再登場までバーの色を付けずに、先端と尾部の知覚的な比較によってのみ課題を行なう条件（知覚条件）、逆に、再登場の際にバーの尾部の色を削除し、先端部の知覚色とバーの記憶色を比較する条件（記憶条件）を設定した。知覚条件と知覚+記憶条件の比較から記憶情報が知覚的な比較を促進する度合いが、知覚+記憶条件と記憶条件の比較から、記憶による知覚の補償の程度が評価できる。8 色の物体のうち何個をモニターするかにより記憶の負荷を操作した。

④運動透明視刺激を用いた色と運動の大局的な統合とその保持過程の検討

多くの視覚性ワーキングメモリ研究は少数の物体の特徴の記憶を検討しているが、我々は多くの要素の統計的な情報を抽出することもできる。統計的な特徴の統合過程を検討するために、ランダムドットで作られた運動

透明視刺激を用いて、色と運動方向の関連性の統計情報がどのように形成され、保持されるかを検討した。200 個のドットのうち、半数ずつ、右と左、赤と緑である刺激を作成し、秒速 2 度程度のゆっくりとしたスピードで運動させる。この途中で、200 個全ての色を反転させ、色の反転を検出する課題を行なう。1 個のドットを追跡すれば極めて簡単な課題なので、これを防ぐための第 2 課題を課し、個別のドットの追跡を防ぐ。もし、この状況で我々がある方向に動くドット群の布置の情報を生成保持できれば、色と運動方向の相関とは無関係に色の反転は容易に検出できると予想される。一方、ある方向に運動するドットの平均の色のような統計的情報しか生成、保持できないとすると、色と運動の相関が高いときにのみ色反転が検出できると予想される。

(2) fMRI 実験

研究代表者らが MOPT 課題を用いて脳機能を計測した研究 (Imaruoka et al. 2005) では変化の検出課題を用いていたため、真に属性の組合せの保持を反映していない可能性がある。また、ブロックデザインを用いていたため、記憶の保持に関連した活動と、検索、変化の検出、同定に関連した活動が分離できない。こうした問題を改良した fMRI 実験を実施した。課題は単純な変化の有無の検出ではなく、提示されている色が別の新しい色と入れ替わる特徴条件と、提示される 2 色の位置が入れ替わる結合条件を設けて比較した (図 2)。特徴条件では、提示される 4 色のみを位置とは無関係に保持すればよいのに対し、結合条件では、各色とその位置の組合せの保持が必要である。この両条件の比較により特徴統合に関与する脳領域の同定が期待される。また、物体が運動する条件と静止している条件を設け、特徴やその結合を単に保持している時の活動とそれを動的に変換しているときの活動を比較した。さらに、事象関連デザインを用い、物体情報の保持期間の活動と変化検出時の活動を分離した。

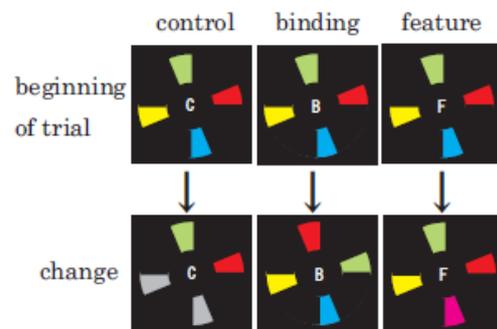


図 2. fMRI を用いた MOPT 実験の課題デザイン

4. 研究成果

(1) 行動実験

①MOPT を用いた検索手がかりの効果の検討

色と位置、形と位置のみの組合せに注目させる関連属性変化検出課題を用いた場合は、検索手がかりを呈示しても課題成績の向上が見られなかった。一方、変化の種類には関係なくとにかく変化があったか否かを判断する単純変化検出課題を用いると、検索手がかりを与えることにより課題成績が有意に向上したことから、検索手がかり自体の有効性には問題はないことが確認された。これらの結果は、関連属性変化検出課題を用いることで推定される記憶容量が有意に減少するのは、記憶検索時の問題を反映しているのではなく、保持の容量自体が減少していることを示している。この成果は、**Vision Sciences Society** の年次総会で発表され、論文は **Journal of Vision** 誌に掲載された。

②通常の変化検出課題による検索手がかりの効果の検討

この研究では、検索手がかりとして、単一プローブ呈示を用いたが、検索手がかりの効果は、実験条件によってかなり変動し、先行研究で主張されるような一般性の高い効果であるとはいえないことが明らかになった。まず、先行研究の多くは、2つの知覚属性の組合せの記憶を用いていたが、色、形、位置の3つが課題関連属性になった場合、検索手がかりの効果は消失した。また、2つが課題関連属性の場合、色と形が関連属性の場合のみ、検索手がかりの有意な効果が見られ、色と位置、形と位置の条件では、手がかりの効果は見られなかった。さらに、これら全ての条件において、課題成績は新しい色や形が出現する通常の変化検出課題よりは有意に低下しており、組合せの記憶のコストが見られた。これらの結果は、検索手がかりの効果はあらゆる特徴の組合せで一般的に見られるものではなく、むしろ、色と形の組合せの記憶時にのみ観察されるかなり特殊な効果であることを示している。また、エラーのパターンの分析の結果などから、視覚性ワーキングメモリにおける特徴の組合せの記憶は、全ての特徴が統合されたものというよりは、位置を基準として、位置と他の単一の知覚属性（色や形）の組合せが並列的に保持され、必要に応じて、色と形の統合が行なわれる可能性が示唆された。この成果は **Vision Sciences Society** の年次総会で発表された。現在、英文の学術誌に投稿準備中である。

③時空間視覚探索課題による記憶と知覚の照合過程の検討

図3に、標的物体数と各条件の比較照合閾値を示した。知覚条件と知覚+記憶条件を比

較すると、モニターすべき物体数とは無関係に課題成績に差は生じなかった。つまり、記憶情報を用いることができて、現前の知覚情報を用いた比較照合過程を促進することはなかった。これは、言い換えると、比較照合を行なうべき物体の位置が予め明示されていると、照合すべき色に関する情報を事前に与えても役に立たないことを示している。一方、記憶条件と知覚+記憶条件を比較すると、モニターすべき物体数が1個の時には課題成績に差が見られなかったが、2個以上になると記憶条件の成績が有意に低下することがわかった。このことは、物体の色と位置の組み合わせについての記憶は物体1個に対してしか知覚的な比較対照過程を補償できないことを示すものである。この成果は、**Visual cognition** 誌に論文として掲載された。

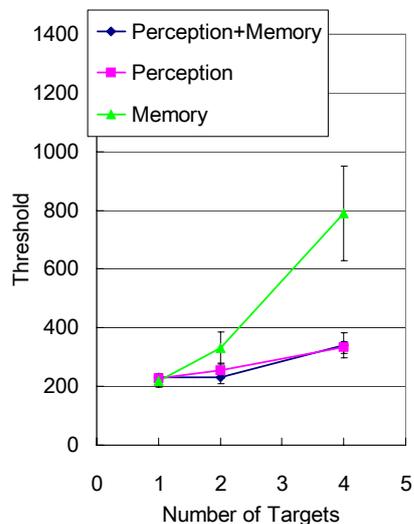


図3. 比較照合時間の閾値と標的物体数

④運動透明視刺激を用いた色と運動の大局的な統合とその保持過程の検討

まず、色と運動方向に相関がない場合、すなわち、右に動くドットの半数が赤で半数が緑の場合は、運動系列の途中で全てのドットの色が反転してもそれに気づくことは著しく困難であった。この結果は、我々が局所的なドットに注意を集中できない状況においては、ある運動方向を持つドット群（主観的には一つの表面として知覚される）の色の布置の情報を生成、保持することが困難であることを示唆するものである。色の反転の検出は色と運動方向の相関が高くなるほど向上し、これは、ある表面の平均的な色の情報は利用可能であることを示唆する。相関がない場合は、色の反転により平均の色情報に変化は起こらないが、相関が高くなると色反転により平均色が大きく変動するからである。さらに、この色と運動情報の相関は自動的に抽出できるのかを検討するために色、運動方向

に対して選択的に注意をする条件を追加して検討したところ、ある特定の運動方向に注意したときにのみ課題成績に向上が見られることがわかった。このことは、大局的な知覚特徴の相関情報の抽出が表面ベースの注意を媒介としていることを示唆する。また、色に対する注意では効果がないことは、色の反転を検出するのに色に注意を向けても効果がないという極めて直観に反する結果であるが、特徴ベースの注意機構が空間位置と独立したものである可能性を示唆している。この成果は、Vision Sciences Societyの年次総会で発表された。

(2) fMRI 実験

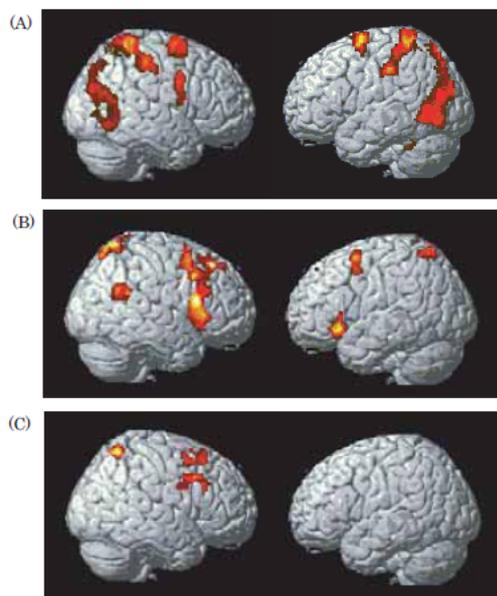


図4. 特徴統合に特異的に活動する脳領域。(A) 運動条件、保持期間、(B) 運動条件、変化検出時、(C) 静止条件、変化検出時

本実験では、実験開始前に多くの練習を行ない、課題の困難度による脳活動の差異をできる限り少なくするように努めた。その結果、結合条件でも先行研究よりもずっと高い正答率が得られ、脳活動が単に課題の困難度を反映している可能性は低い。まず、事象関連デザインにより、保持期間と変化検出期間の活動を分離すると、MOPTを用いた先行研究で有意な活動が観察された前頭前野前部(BA10)の活動は変化検出時にのみ有意に見られた。このことは、いくつかの先行研究とは異なり、前頭前野前部は特徴が統合された物体表象自体を保持するのではなく、保持された記憶表象と知覚表象の比較照合、及び変化の検出に関与している可能性が高い。保持、更新期間中の活動に関しては、MOPTのような色と位置の結合を予測可能な運動に関して更新する場合とランダムに運動する物体を追跡する多物体追跡課題(MOT)とで相補的な脳活動のパターンが観察された。す

なわち、上前頭回(SFG)と下頭頂小葉(IPL)はランダムな空間的移動の更新に強く関与するのに対し、中前頭回(MFG)と上頭頂小葉(SPL)は特徴統合の更新に強く関与することが示された。また、特徴が統合された物体表象の更新においては、MFG,SPLに加えて中心前回下部(infPreCS)からなるネットワークが重要であることが示唆された。この成果は現在、英文学術誌に投稿準備中である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① Saiki, J., & Miyatsuji, H., Estimated capacity of object files in visual short-term memory is not improved by retrieval cueing. *Journal of Vision*, 9, 1-15, 2009. 査読有
- ② Saiki, J., Functional roles of memory for feature-location binding in event perception: Investigation with spatiotemporal visual search. *Visual Cognition*, 17, 212-231, 2009. 査読有
- ③ Saiki, J., Stimulus-driven mechanisms underlying visual search asymmetry revealed by classification image analyses. *Journal of Vision*, 8, 1-19, 2008. 査読有
- ④ Takahashi, K., Saiki, J., & Watanabe, K. Realignment of temporal simultaneity between vision and touch. *NeuroReport*, 19, 319-322, 2008. 査読有
- ⑤ 高橋康介、齋木潤、動的な変形に対する視触覚間同時性判断、*心理学研究*、78、599-606, 2008. 査読有
- ⑥ 上田祥行、齋木潤、視覚と触覚を用いた物体認識における視点独立性、*基礎心理学研究*、26, 11-19, 2008. 査読有

[学会発表] (計 5 件)

- ① Saiki, J. & Holcombe, A. O., Surface-based, unpaired feature representations mediate detection of change to feature pairings. *Vision Sciences Society 8th Annual meeting*, 2007/5/14, Naples, FL, USA.
- ② Yamamoto, T., Yamamoto, H., Saiki, J., Mano, H., Umeda, M. & Tanaka, C., Functional magnetic resonance imaging of monocular depth cue integration using a stereokinetic effect stimulus. *Society for Neuroscience 37th Annual Meeting*, 2007/11/06, San

- Diego, CA. USA.
- ③ Yamashiro, H., Yamamoto, H., Saiki, J., Mano, H., Umeda, M. & Tanaka, C., Retinotopic responses to visible and invisible stimulus in human early visual areas during continuous flash suppression. Society for Neuroscience 37th Annual Meeting, 2007/11/04, San Diego, CA. USA.
 - ④ Saiki, J. & Miyatsuji, H., Binding deficit in visual short-term memory reflects maintenance, not retrieval. Vision Sciences Society 7th Annual meeting, 2007/5/15, Sarasota, FL. USA.
 - ⑤ Kondo, A. & Saiki, J., Single-probe advantage in standard change detection task does not reflect memory for feature binding. Vision Sciences Society 7th Annual meeting, 2007/5/14, Sarasota, FL. USA.

[図書] (計 5 件)

- ① Saiki, J., Koike, T., & DeBrecht, M. (2008). Saliency map models for stimulus-driven mechanisms in visual search: Neural and functional accounts. (pp. 527-530) In R. Wang, F. Gu, & E. Shen (Eds.) *Advances in Cognitive Neurodynamics*. Springer-Verlag.
- ② Saiki, J. (2008). Multiple object permanence tracking: Maintenance, retrieval, and transformation of dynamic object representations. (pp. 243-264) In C. Rossi (Ed.) *Brain, Vision, and AI*. In-Teh.
- ③ Saiki, J. (2007). Feature binding in visual working memory. (pp. 173-185) In N. Osaka, I. Rentschler, & I. Biederman (Eds.) *Object Recognition, Attention & Action*. Springer-Verlag.
- ④ Saiki, J. (2007). Representation of objects and scenes in visual working memory in human brain. (pp. 103-119) In S. Funahashi (Ed.) *Representation and Brain*. Springer-Verlag.
- ⑤ 齋木 潤 (2008). 視覚性ワーキングメモリ、チェンジブラインドネス (分担執筆). (pp.10-17) キーワードコレクション、心理学フロンティア. 新曜社.

[その他]

研究室ホームページ
<http://www.cv.jinkan.kyoto-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

齋木 潤 (SAIKI JUN)
京都大学・人間・環境学研究科・教授
研究者番号：60283470

(2) 研究分担者

山本 洋紀 (YAMAMOTO HIROKI)
京都大学・人間・環境学研究科・助教
研究者番号：10332727