

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 24 年 5 月 25 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2009～2011

課題番号：21300103

研究課題名（和文）

視覚性ワーキングメモリにおける注意制御機構の認知神経科学的研究

研究課題名（英文）

Attentional control in visual working memory: A cognitive neuroscience study

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（和文）：ヒトが外界を認識する際の必須の機能である視覚性ワーキングメモリ（VWM）と注意の関連について、情報の選択、特徴の統合、表象の更新という 3 つの機能に焦点を当てて、実験的な検討を行った。VWM には特徴次元の柔軟な選択的符号化・保持が可能だが、位置情報は特別な機能を持っていること、特徴が独立に位置情報と結合するのではなく、特徴の組合せが位置と結びついていること、こうした機能が頭頂葉を中心とした多くの脳領域のネットワーク活動によって実現していることを見出した。

研究成果の概要（英文）：Visual attention and visual working memory (VWM) are essential functions for our adaptive behavior. Their interaction was systematically investigated by focusing on the following functions; attentional selection, feature integration, and updating of mental representations. We can perform selective maintenance of feature dimensions in VWM, but location plays special functions. Feature conjunctions, not independent features are bound to locations. Functional brain imaging data revealed that selection, integration, and updating are executed by network activity among various brain regions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	6,300,000	1,890,000	8,190,000
2010 年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2011 年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,100,000	4,230,000	18,330,000

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：視覚的注意、ワーキングメモリ、特徴統合、機能的脳イメージング、表象の更新

1. 研究開始当初の背景

（1）視覚による外界の認識は能動的な過程であり、視覚情報を一時的に保持する視覚性ワーキングメモリ（visual working memory、以下 VWM と記述）と注意が必須の機能であるといわれてきた。しかし、VWM と注意の概念的な区別には曖昧さがありその関係は不明な点が多い。本研究は

視覚的注意の重要な機能とされてきた情報選択、特徴統合、表象の更新に焦点を当て、VWM におけるこれらの機能的特性と神経機構を実験的に検討した。

（2）本研究では、注意制御の機能的アーキテクチャの問題にアプローチするために、VWM における注意の機能に注目した。VWM は内的表象であるが、外界の認識に

不可欠であり感覚対象と密接な関係を持つ。同時に、VWM は物体表象の変換、更新など内的な行為といえる側面も持ち、知覚と行動の間の橋渡しをする機能と言える。従って、視覚的注意と行動制御における注意の機能を直接比較することは困難でも、VWM における知覚的側面を視覚的注意、またその行為的側面を行動制御における注意とをそれぞれ対比的に検討することは可能である。

2. 研究の目的

(1) 本研究では、VWM における注意機能の役割を、情報選択、特徴統合、表象の更新という3つの機能に焦点を当て、行動実験と機能的脳イメージングを併用して検討した。

(2) 情報選択

視覚的注意を含む注意機構の主要な機能の一つは情報の選択である。本研究では、情報の選択に関して、次の2つの研究を行った。

①VWM における次元選択的な保持メカニズムに関する研究。我々を取り巻く事物は、様々な特徴を持っているが、常にそれら全てを記憶する必要があるわけではない。不要な特徴を無視して記憶の負荷を低減できるのか、またどのような神経機構によって実現されているのかを行動実験と脳波測定実験を併用して検討した。

②VWM における事後手がかりの効果の検討。一度、物体の情報を記憶に保持した後で、その中の一部だけを選択的に事後的に活性化できることが近年示されている。この機能を、物体の位置、特徴を手掛かりとする場合の間で比較し、注意研究で空間ベースの注意と特徴ベースの注意として対比されてきた機能が VWM に対して果たす役割を検討した。

(3) 特徴統合

視覚的注意の研究は、物体が持つ様々な特徴を統合して一つの物体として認識するためには注意が必要であると主張している。また、VWM の記憶表象は特徴が統合された物体ベースの表象であると言われているが、この妥当性についてはまだ議論がある。さらに、VWM における特徴統合が脳のどの領域で実現しているかは不明である。本研究では、この問題に対し、次の2つの研究を行った。

①VWM における特徴統合表象の保持。多くの明示的な記憶課題の成績は特徴ベースの振る舞いをすることが多い。しかし、こうしたデータは記憶の検索や照合の過程を反映しており、統合された表象の保持の可能性を否定するものではない。そこで、明示的な検索照合の効果を低減した課題を作り、反応時間解析や脳波測定により、統合表象が保持されている証拠を探索した。また、ドットの集団からなる表面において、色と運動方向の統計的な関連性がどのように保持されるのか

を運動透明視刺激を用いて検討した。

②VWM における特徴統合に関わる脳ネットワークの検討。特徴を統合した物体表象の保持に関わる脳領域の機能的結合を分析するために fMRI 実験を実施した。

(4) 表象の更新

外界との適応的な相互作用には、外界の変化に伴う心的表象の適切な更新が求められる。本研究では、運動する物体の状態を内的表象を更新しながら保持する過程に着目した。

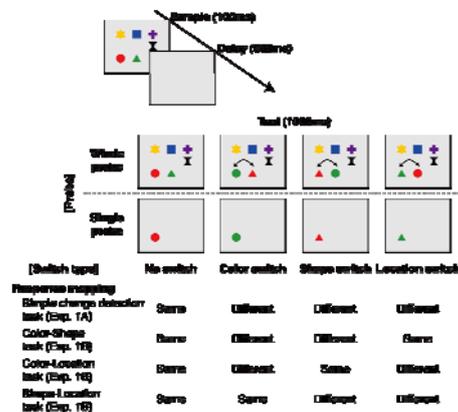
①MOPT 課題による VWM における物体表象の変換と更新の検討。MOPT 課題は VWM における物体表象の変換と更新を検討するための課題で、規則的に運動する複数物体の特徴(色や形態)交替を探索するものである。この課題を用いて、運動物体の追跡、特徴と位置のバインディングそれぞれに関与する脳領域を同定し、さらに、記憶保持期間の活動と、変化検出時の活動を分離した。

②VWM におけるトポグラフィ表象の探索。最近、VWM の容量に比例した脳活動が頭頂間溝や LOC で観察されている。まず、頭頂間溝や LOC におけるトポグラフィを観測できる手法を確立した。次に、通常の変化検出課題遂行時の脳活動を計測し、記憶のトポグラフィ表象の観測を試みた。

3. 研究の方法

(1) 情報選択

①VWM における次元選択的な符号化と保持のメカニズム。

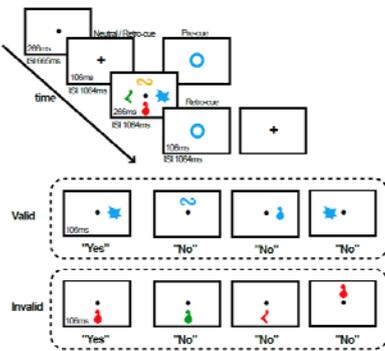


特徴の組合せの VWM を調べる課題の一つである結合記憶課題を修正改変し、課題関連特徴次元のみに関して変化の検出を行う課題関連結合記憶課題を作成した。刺激項目は、色、形態、位置の3つの特徴次元で定義される。基準条件では、これら3つの特徴次元すべてに関して組合せの変化検出が求められる。これに対して、特定の次元を課題非関連とした3条件を設定した。色の変化は無視する色無視条件、形の変化は無視する、形無視条件、位置の変化は無視する位置無視条件である。行動実験では、これら4条件での記憶成績が比較された。

脳波測定実験では、脳波測定のために刺激画面に改変を加えた上で、4条件を被験者内条件として実施した。刺激画面の改変とは、VWMの脳波実験の標準的手法として、記憶画面、テスト画面とも、左右視野に分割して提示し、手がかりによって左右半視野いずれかの項目だけを記憶させた (Vogel & Machizawa, 2004)。

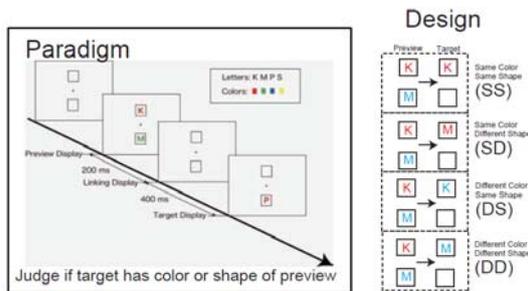
②VWMにおける事後手がかりの効果。

本研究は、同一の刺激画面を用いて、事後手がかりとして刺激の空間位置、特徴値を用いる場合を比較検討した。4つの物体からなる刺激画面を呈示し、その後、ブランク期間の途中で画面中央に刺激の位置を示す矢印 (位置手がかり)、または、刺激の色、或いは形態 (特徴手がかり) が呈示される。変化検出成績を比較検討した。



(2) 特徴統合

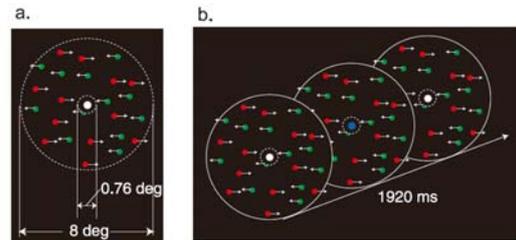
①VWMにおける特徴統合表象の保持。



VWMにおける色と形態情報の統合を検討するために、Kahneman et al. (1992)の Object reviewing paradigm を修正改変した。複数特徴次元からなる事態を扱うために、事前提示した複数物体の色、形態いずれかを標的物体が含むか否かを位置と無関係にできるだけ速く判断した。課題非関連な位置情報の共有の効果を検討した。VWMが特徴ベースとする仮説は、位置共有効果が特徴ごとに独立、加算的と予測する。一方、VWMが特徴が統合された物体ベースとする仮説は、色、形態とも位置を共有する場合のみ効果を予測する。さらに、プライミング効果を反映すると考えられる反応時間の非決定過程成分を推

定するために EZ diffusion model を用いた。行動実験と脳波測定実験を実施した。

もう一つの実験として、表面刺激におけるドットの色と運動方向の組合せのVWMを検討した。局所的なドット刺激の集団として表面の印象を生成する刺激では、特徴統合は、局所ドットのレベル、表面全体のレベルで階層的に可能である。本実験は、局所的、大局的特徴統合を乖離させる刺激を作成し、変化検出課題により、ヒトがどちらのレベルの特徴統合を用いるのか検討した。具体的には、運動透明視刺激を用い、ドットの色と運動方向の相関関係を定量的に操作した。もし、すべてのドットの色を反転させた場合、局所情報を用いた変化検出が可能なら、相関関係に関係なく容易に変化検出が可能である。一方、大局的な相関情報しか保持できないとすれば、大局的相関が高いときにのみ変化を検出できると予測される。



②VWMにおける特徴統合に関わる脳ネットワーク。

物体の色、方位、位置の組合せの情報を保持するときに活動する脳領域、及びその機能的結合性を fMRI 実験によって検討した。色、方位、位置で定義された4つの物体が見え隠れを繰り返す系列をモニターし、物体間の特徴の入れ替わりを検出した。その際、3つの特徴次元すべての入れ替わりをモニターする条件、色-位置間、方位-位置間の入れ替わりのみをモニターする条件を設定した。課題遂行中の脳活動のうち、変化検出期間を取り除き、モニター期間の活動に注目した。

(3) 表象の更新

①MOPT課題によるVWMにおける物体表象の変換と更新。

MOPT課題はVWMにおける物体表象の変換と更新を検討するための課題で、規則的に運動する複数物体の特徴 (色や形態) 交替を探索するものである。本実験では、色の異なる4つの物体が規則的に回転する刺激を用いて、色と時空間的位置の組合せを運動に伴って更新していく過程の脳活動を fMRI 実験によって観測した。実験条件としては、物体が運動している条件と、静止している条件によって表象の更新に関与する領域を探索し、色と位置の交替検出条

件と、色の値の変化検出条件の比較により、特徴の統合に関与する領域を探索した。

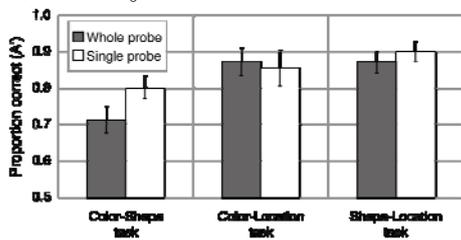
②VWMにおけるトポグラフィ表象の探索。

VWMにおいては、刺激の位置を基準としたトポグラフィックな記憶表象が形成されているという仮説の検証の最初の段階として、VWMに関与すると考えられる頭頂間溝領域のトポグラフィ表象構造を標準的な手法によって観測し、そのトポグラフィックな下位領域がVWMに関与する度合いを記憶課題を用いて検討した。VWM課題としては、物体の形態を記憶する課題を用いた。

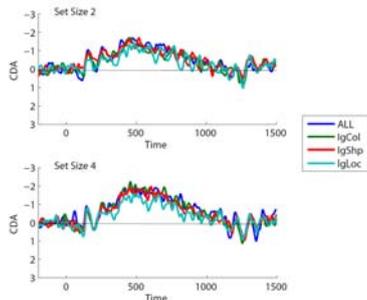
4. 研究成果

(1) 情報選択

①VWMにおける次元選択的な符号化と保持のメカニズム。



行動実験から、課題非関連次元の効果は、特徴によって異なることがわかった。色や形態が課題非関連でも課題成績の変化は見られなかったのに対し、位置が課題非関連の場合、課題成績が有意に低下した。このことは、知覚特徴はVWMの中で等質な機能を持つのではなく、位置情報が記憶表象の保持に重要な役割を果たすことを示唆する。この研究成果は、現在、国際誌論文に投稿、審査中である。

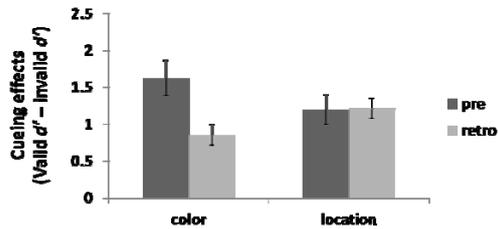


また、脳波データは記憶保持期間中に条件間差異を明らかにした。Contralateral delay activity (CDA)は位置無視条件でのみ平均振幅が有意に低下し、行動結果と一貫する結果であった。また、 θ 成分と γ 成分の位相同期の指標は次元無視条件において、基準条件よりも有意に低下した。さらに、側性化 α 振幅は形無視条件においてのみ他の条件よりも有意に低下した。これらの結果は、(1) 記憶保持期間中の脳活動の変化から、行動実験の結果を記憶検索・照合過程のみでは説明できない、(2) 記憶負荷と相関するとされる諸指標は、特徴の選択的保持に関して異なる

パターンを示しており、認知過程の異なる側面を反映している。この成果は、2011年の北米神経科学学会大会において口頭発表され、現在国際誌論文の投稿準備中である。

②VWMにおける事後手がかりの効果

位置による手がかりは、事後手がかりが事前手がかりと同様の効果を示した。特徴による事後手がかりでも効果が見られることが示されたが、特徴事後手がかりの効果は、事前手がかりに比べて効果量が有意に縮小した。このことは、位置手がかりと特徴手がかりの効果は同一メカニズムではなく、異なる機構を経ている可能性を示唆する。この成果は、国際会議(OPAM2010)でポスター発表された。現在、国際誌論文の執筆中である。

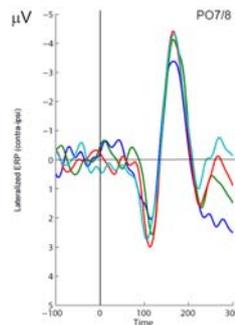


(2) 特徴統合

①VWMにおける特徴統合表象の保持

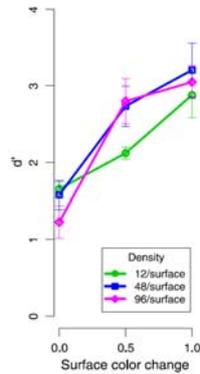
A. 色と形態の統合

平均反応時間分析は、特徴ベースの仮説を支持したが、非決定成分の推定データは一貫して物体ベース仮説を支持するパターン、即ち、色、形態ともに位置共有する条件でのみ反応時間が減少した。この結果は、先行刺激によって生成されたVWM表象が物体ベースに保持されており、後続の標的刺激の符号化を促進したと解釈できる。脳波実験では、刺激の符号化を反映する事象関連電位のP1, N1成分に着目した。反応時間の非決定成分とはほぼ同様のパターン、即ち、色、形態ともに位置共有する条件でのみ、指標の振幅が縮小した。この結果は、反応時間分析の結果が刺激の符号化過程を反映しているという解釈を補強する。この成果は、Psychonomic Society 年次大会、Vision Sciences Society 年次大会、で口頭発表された。



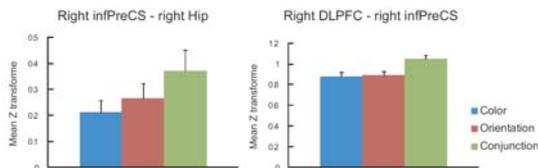
B. 色と運動方向の統合

運動透明視刺激を用いた変化検出課題実験から、大局的な相関関係がない場合すべての要素が変化しても、変化検出が極めて困難になることが分かった。また、大局的な色と運動方向の相関関係の上昇につれて変化検出成績が単調に向上することが示された。この研究成果は、*Journal of Vision* 誌に掲載された(Saiki & Holcombe, 2012)。



②VWM における特徴統合に関わる脳ネットワーク

MOPT の修正課題を用いた fMRI 実験の結果、特徴の値の変化ではなく、特徴の組合せの複雑性に相関して活動強度が上昇する領域として、背外側前頭前野 (DLPFC)、上頭頂小葉 (SPL)、中前頭回 (MFG)、下中心前溝 (infPreCS)、海馬が同定された。また、特徴統合の複雑さが増大すると、下中心前溝と背外側前頭前野、及び下中心前溝と海馬の機能的結合性が上昇した。これらの結果は、複雑な特徴統合を行う場合、下中心前溝が海馬、背外側前頭前野と協調することによって制御が行われていることを示唆する。この研究成果は、*Vision Sciences Society* 年次大会などでポスター発表された。現在、国際誌に論文を投稿中である。

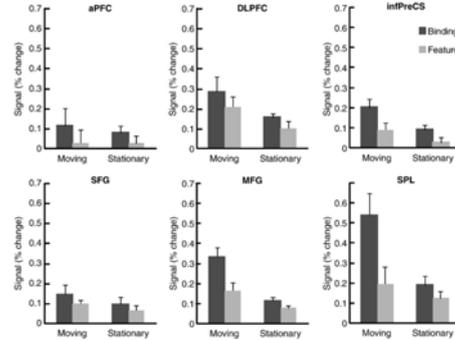


(3) 表象の更新

①MOPT 課題による VWM における物体表象の変換と更新

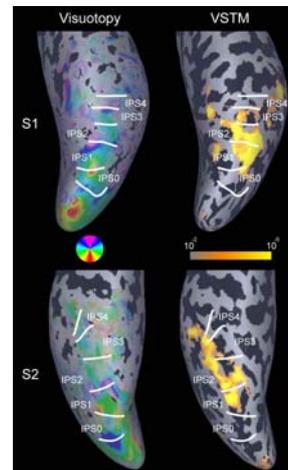
MOPT 課題においては、前部前頭前野と前頭頭頂ネットワークの関与が示されている (Imaruoka, et al., 2005)。本実験から、保持時は、前部前頭前野の関与はほとんどなく、前部前頭前野の活動は主として変化検出時の活動であった。一方、保持時に特徴統合の更新に特に関与している領域として上頭頂

小葉 (SPL)、中前頭回 (MFG)、下中心前溝 (infPreCS) が同定された。この結果を先行研究の結果と総合すると、下中心前溝は表象の更新一般に関与する領域、下頭頂小葉、上前頭回は視覚物体の位置情報の更新に特化した領域、上頭頂小葉、中前頭回は視覚物体の特徴統合の更新に特化した領域と解釈できる。この研究成果は、*NeuroImage* 誌に掲載された (Takahama et al., 2010)。



②VWM におけるトポグラフィ表象の探索

まず、標準的手法を用いた頭頂葉のトポグラフィックマッピングから頭頂葉中に網膜部位対応を持つ下位領域を IPS0-IPS4 まで 5 つ同定した。先行研究同様に、ほぼすべての被験者で頭頂葉のトポグラフィ表象をマッピングすることに成功した。



物体の形態の VWM 課題時の脳活動計測結果は、IPS の中で中間部に位置する IPS2, IPS3 において記憶成績と強く相関した脳活動が観測されたのに対し、その他の領域では、記憶との関連は明確にされなかった。この成果は、北米神経科学学会大会などでポスター発表され、現在、国際誌に投稿、審査中である。

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 4 件)

- ① Saiki, J., & Holcombe, A. O. Blindness to a simultaneous change of all elements in a scene, unless there is a change in summary statistics. *Journal of Vision*, 12(3)2: 1-11, 2012. doi: 10.1167/12.3.2. 査読有
- ② Yamamoto H., Fukunaga M., Takahashi S., Mano H., Tanaka C., Umeda M., and Ejima Y. Inconsistency and Uncertainty of the Human Visual Area Loci following Surface-based Registration: Probability and Entropy Maps. *Human Brain Mapping*, 33, 121-129, 2012, doi: 10.1002/hbm.21200. 査読有
- ③ Saiki, J., Yoshioka, A., & Yamamoto, H. Type-based associations in grapheme-color synaesthesia revealed by response time distribution analyses. *Consciousness and Cognition*, 20, 1548-1557, 2010. doi:10.1016/j.concog.2011.07.005. 査読有
- ④ Takahama, S., Miyauchi, S., & Saiki, J. (2010). Neural basis for dynamic updating of object representation in visual working memory. *NeuroImage*, 49, 3394-3403, 2010. 査読有

[学会発表] (計 9 件)

- ① Saiki, J., Li, Q., Kikuno, Y., & Banno, H., Effects of dimension exclusion in visual working memory on contralateral delay activity and alpha-band oscillation. The 41st Annual Meeting of the Society for Neuroscience 2011/11/15, Washington, DC. USA.
- ② Saiki, J., Conjunction Specific Preview Benefit In Dynamic Object Reviewing. Psychonomic Society 52nd Annual Meeting, 2010/11/6 Seattle, WA, USA.
- ③ Yamamoto H., BAVIEW: software for visualization and analysis of probabilistic atlases of human visual areas. ESMRMB(European Society for Magnetic Resonance in Medicine & Biology) Congress 2011, 2011/10/6, Leipzig, Germany.
- ④ Saiki, J., Formation and maintenance of feature bundles in dynamic object files. Asia-Pacific Conference on Vision, 2011/7/15, HongKong.
- ⑤ Li, Q., & Saiki, J., Effects of feature-based selection by retro-cues in visual working memory. Object Perception Attention and Memory (OPAM) 2010/11/18, St. Louis, MO, USA.

- ⑥ 齋木 潤. 視覚性ワーキングメモリの動的更新と特徴統合. 日本心理学会第 74 回大会. 2010/9/20, 大阪府豊中市.
- ⑦ Saiki, J., Yoshioka, A., & Yamamoto, H. Type-token distinction and response time distribution analysis reveal the unique characteristic of binding in grapheme-color synesthesia. Vision Sciences Society 11th Annual meeting, 2010/5/10, Naples, FL. USA.
- ⑧ Takahama, S., Ohzawa, I., Yoshioka, Y., & Saiki, J. Neural basis for monitoring of multiple features-location binding: an event-related functional magnetic resonance imaging study. Vision Sciences Society 10th Annual meeting, 2010/5/8, Naples, FL. USA.
- ⑨ Kanazu, M., Yamamoto, H., Sawamoto, N., Fukuyama, H., & Saiki, J. Individual-based fMRI analysis of visual short-term memory mechanism in human intraparietal sulcus. The 39th Annual Meeting of the Society for Neuroscience 2009/10/20, Chicago, IL. USA.

[図書] (計 4 件)

- ① 齋木 潤 (2012). 知覚と記憶における特徴の統合 (分担執筆). 現代電子通信選書「知識の森」感覚・知覚・認知の基礎 オーム社.
- ② 齋木 潤 (2011). 注意、認知 (分担執筆). 心理学概論. ナカニシヤ出版.
- ③ 山本洋紀 (2011). 知覚 (分担執筆). 心理学概論. ナカニシヤ出版.
- ④ 齋木 潤 (2010). 情報の統合 1 (心理)、注意の生物学的過程 (分担執筆). よくわかる認知科学. ミネルヴァ書房.

[その他]

ホームページ等
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