

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03460

研究課題名(和文) 脳内における順行性・逆行性の視覚信号の相互作用

研究課題名(英文) Interactions of bottom-up and top-down signal of vision in human brain

研究代表者

栗木 一郎 (Kuriki, Ichiro)

東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号：80282838

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,400,000円

研究成果の概要(和文)：脳内における視覚情報の順行性・逆行性のフローについて、心理物理学と脳機能計測を組み合わせた研究を行った。脳内における色/輝度により作成された運動視情報の相互作用について、fMRIによる脳機能計測を用いた研究を行った。その結果、色の情報と輝度の情報の相互作用が脳内における視覚野の広い範囲で生じている事を確認した。また、脳内の色情報の表現形式について、脳機能計測ならびに心理物理実験による研究を行った。その結果、カテゴリー的な色情報の表現が、言語獲得前の乳児において存在していること、日本語の色カテゴリーが過去30年において分化していることを発見し、報告した。

研究成果の概要(英文)：Interactions of feed forward and feed back signals in human visual cortex was studied by using psychophysics and functional brain imaging techniques. The interactions of color and luminance signal in visual motion was examined by functional MRI and we observed the interaction takes place in wide range of visual area. Also, we investigated the representation of color information in human brain by using functional brain imaging and psychophysical techniques. We reported that categorical color representation has been obtained in the brain of pre-lingual infants (5-7mo) by brain activity recording by near infrared spectroscopy. Also we observed the evolution of color category in the last 30 years in Japanese, revealed by applying an analysis by clustering algorithm to psychophysically recorded data of color categories.

研究分野：視覚科学

キーワード：脳内情報 相互作用 巡行性 逆行性 色情報 輝度情報 色カテゴリー 脳活動計測

1. 研究開始当初の背景

視覚情報には、比較的処理時間を要する色や形の情報と、比較的素早く処理される運動や空間知覚の情報とが混在している。神経生理学では、それぞれの情報は色に感度を持つ情報経路(parvo/konio-cellular 経路: 腹側経路)と色に感度を持たない経路(magnocellular 経路: 背側経路)において分離して情報処理されていると考えられている。一方、色も形も動きもまとまった物体により構成された視知覚空間を我々は得ており、このような特徴要素を統合する情報処理の存在を示唆する心理物理学的な報告もある(図1)。

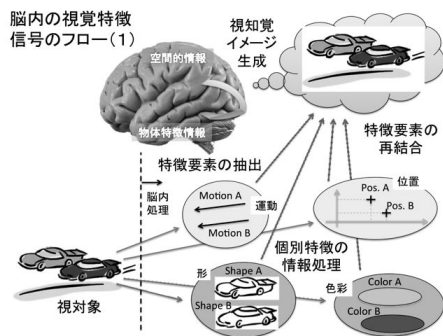


図1. 脳内の信号フロー(イメージ)

人の脳活動計測による研究では、色/運動、色/形の情報が統合された信号が第一次視覚野(V1)を含む視覚野に広く存在するという報告がある。我々も知覚との対応に着目した実験を行い、同様の現象を確認した。しかし、これらの先行研究では低次から高次へのフィードフォワード(順行性)信号と高次からのフィードバック(逆行性または逆行性)信号が区別されていなかった。

2. 研究の目的

本研究では、脳内において生じるフィードフォワード(順行性)とフィードバック(逆行性)の視覚関連信号が相互作用することによって生じる知覚について、心理物理学的アプローチと脳機能計測を併用して研究を行ない、その神経機序について明らかにすることを目的とした。

3. 研究の方法

[1] 第1のアプローチとして、色/輝度の時空間的な変調により表現される運動が相互作用する様子について、脳活動計測を用いた研究を実施した。具体的には、色または輝度の空間変調で作成された放射状のゲーティングが回転する図形(図2)を用い、方向選択的な運動残効によって生じる知覚/脳活動の変化を調べる。例えば、時計回りの方向に運動する放射状の色のパターンを数10秒観察した後に輝度/色のパターンを同方

向/逆方向に回転させた際に、運動の知覚または脳活動が変化する様子について調べた。脳活動計測はfMRIにより計測した。

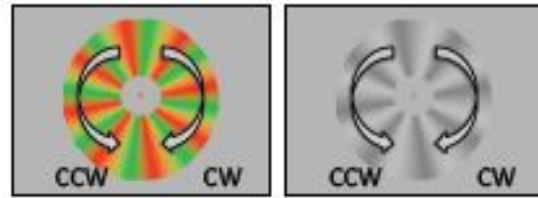


図2 脳活動計測に用いた視覚刺激: 色(L/M)運動(左), 輝度運動(右)(任ら, 2017)

運動信号の相互作用に關与する順行性/逆行性信号の相互作用を検討するため、脳内における部位間の結合性を評価する共分散解析(Structural Equation Modeling: SEM)を行ない、脳内の部位間における信号のフローを可視化する試みを行なった。

[2] 第2のアプローチとして、脳内の色情報の表現が言語など高次の認知的情報のフィードバックにより変容される様子について、脳機能計測と心理物理を用いて調べる。具体的に用いた色情報としては、ユニーク色の脳内表現およびカテゴリーの色情報の脳内表現について、順行性/逆行性信号の相互作用の観点から研究を行った。

(a) ユニーク色の脳内情報表現

ユニーク色とは知覚的に混じり気を感じない赤/緑/青/黄の4色の事を指す。知覚的な色空間の基準点であり、排他的な判断基準(例: 赤でも緑でもない=黄)で特定されるが、ユニーク色は錐体反対色空間の軸と異なり(図3), その神経機構は明らかではない。

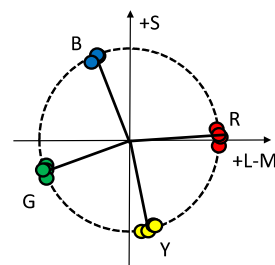


図3. 刺激の色相と色空間。横軸は錐体拮抗空間のL-M(赤/緑)軸, 縦軸はS-(L+M)(青/黄)軸。R,G,Y,Bにおける複数のシンボルは、被験者10名のユニーク色。(前村ら, 2017)

ユニーク色を含んだ視覚刺激を呈示し、同時に(1)色の見え方に関する課題を行なう場合と、(2)色と関係ない文字記憶課題を行なう場合で脳活動計測実験を行なった。文字記憶課題では、1秒置きにランダムな順序で呈示されるアルファベットを注視点に示し、2つ前の文字と同じ文字が出た際にボタンを押す two-back 課題を行なった。これは認知的

な負荷が非常に高い課題であり、課題遂行中には色刺激が出現した事も自覚できない。two-back 課題を行なう場合には高次視覚メカニズムからのフィードバックが阻害され、ユニーク色の脳内表象が変化する可能性が予想される。色の見え方を直接評価する課題と比較し、認知的フィードバックによって色情報の脳内表現の変容を調べる。

脳活動は fMRI により 3mm x 3mm x 3mm の voxel (fMRI 画像の画素) サイズで計測した。125 (= 5 x 5 x 5) voxel の立方体の領域を全脳に渡って切り分け (サーチライト), 脳活動の 3 次元的な空間パターンが被験者の行なう課題によって変化する様子について、125 voxel の条件間における相関係数を類似性尺度とした相関行列 (Representation Dissimilarity Matrix: RDM) ならびに多次元尺度構成法 (Multiple Dimensional Scaling: MDS) を用いて解析した。

(b) 脳内の色カテゴリー情報表現

言語による高次のフィードバックが存在しない乳幼児の脳活動計測では、言語的な情報によるフィードバックの影響を受ける前に、ボトムアップ的に決まる色カテゴリーの様相を明らかにする事ができると期待される。また、成人における実験では、乳幼児に見られる色カテゴリーが言葉によって受ける変容を観察できると期待される。

乳幼児における研究では、2色は緑を、1色は青を選び、この3色の間の色差が等しくなるように調整した。青⇄緑を1秒間隔で交代させる画像と緑⇄緑を交代させる画像を見せた場合の脳活動を近赤外分光法 (Near infrared spectroscopy: NIRS) にて測定し比較した。乳児における色カテゴリーの境界 (青/緑) は馴化実験により確認した。

成人における色カテゴリーの研究では、言葉の解析により展開が複雑になるのを避けるため、k-平均法を用いて解析を行なった。この方法により、言語の語源や発達に触れることなく、色カテゴリー形状について客観的な議論が可能になる。

4. 研究成果

[1] 色/輝度運動信号の脳内相互作用。

色運動に順応した後で輝度 (白/黒) パターンの運動図形を呈示した場合に特異的に、通常と反対の運動残効が得られた (図4)。この傾向は V1, V3, V4 で特に顕著であり、運動関連領域である MT+でも強く通常と反対の傾向が見られた。

SEM による信号フローの解析を行なった結果、色パターンの運動に順応した後の状態で、輝度パターンの運動を呈示すると、色に対して特に選択的に応答する V4 から運動信号を主に処理する MT+への強い結合性を示す結果が

得られた。数十秒の色パターンへの順応により V4 から MT+への信号のフローが継続的に生じ、観察していた色運動の方向へのバイアスが掛かった可能性が考えられる。その状況下で輝度の運動を呈示した場合、通常の運動残効と反対に、順応刺激と同方向への反応が大きくなり、相対的に通常の運動残効とは反対の脳活動が現れた可能性が考えられる。

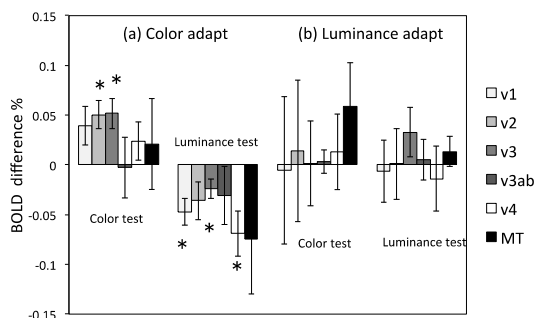


図4. 運動方向に選択的な脳活動 (fMRI: BOLD 信号) の変化 (任ら, 2017)

[2] 脳内の色情報の表現

(a) ユニーク色の脳内情報表現

脳内情報表現の相違を相関係数により評価した場合、文字課題と色同定課題で大きな差が見られた領域 (図5右上の視覚野底部ハイライトで示した部位) において解析を行なった。この領域での RDM の平均 (左上) および、色同定課題 (左下) 言語課題 (右下) を実施中の脳活動パターンの MDS 解析の結果を示す。MDS の結果では、まず色同定課題 (図5左下) においては、ユニーク色 (unique hues) と錐体拮抗空間の基軸色 (cardinal hues) における4色の表象がいずれも凸図形となり色相の順序 (図3) を保持している。次に文字記憶課題中の、同じ視覚刺激に対する脳活動パターンを MDS 解析したところ (図5右下)、脳内表現の構造が色相環と合致しなかった。

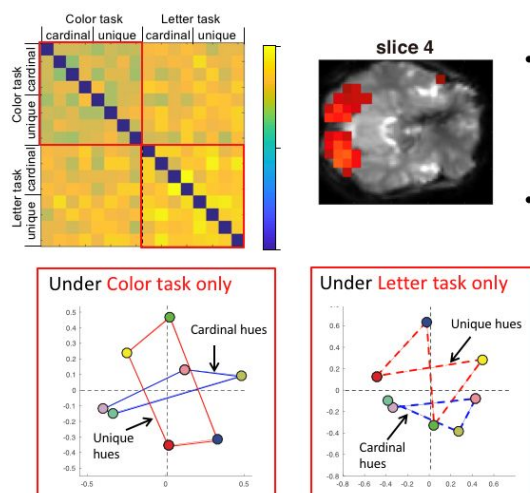


図5. 色刺激で生じた脳活動の認知課題による変容。詳細は本文を参照。(前村ら, 2017)

この結果は、脳内の色情報表現が順行性の信号だけでは確立せず、高次の認知過程から

の逆行性の信号により補強されて色知覚が成立している事を示している。

(b-1) 乳幼児における色カテゴリーの脳内情報表現

図6は乳幼児における脳活動をNIRSにより測定した結果である。2つの色のペアが1秒おきに交代する際に、色カテゴリーをまたぐ(青⇔緑)場合には、脳活動が優位に上昇しているが、同一色カテゴリー内(緑⇔緑)の場合には、脳活動が変化しない。この結果は、言語獲得前の乳幼児の脳内に色カテゴリーが形成されている事を示している。すなわち、順行性の処理によって脳内情報のカテゴリー化が進行し、色カテゴリーの獲得が言語や文化に依存しない、ユニバーサル性(universalism)を示した。

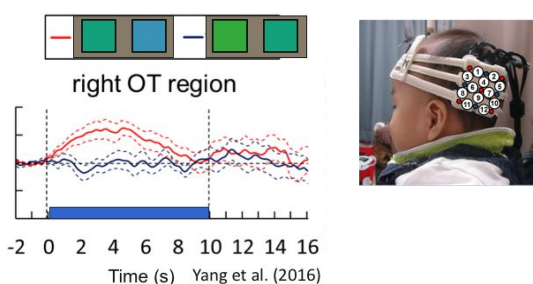


図6. 乳幼児における色カテゴリーの脳活動変化 (Yang et al., 2016).

(b-2) 成人における色カテゴリー研究

日本人被験者57名に対し、330色の色票について単一色名での色名称呼実験を行った。その結果をk-平均法というクラスター解析の手法により分析した結果、日本語には16の基本的色カテゴリーが存在する事が明らかになった。その中には、30年前の日本語における基本色名の先行研究で基本色から除外された水色/空色に相当する明るい青の領域が含まれていた。

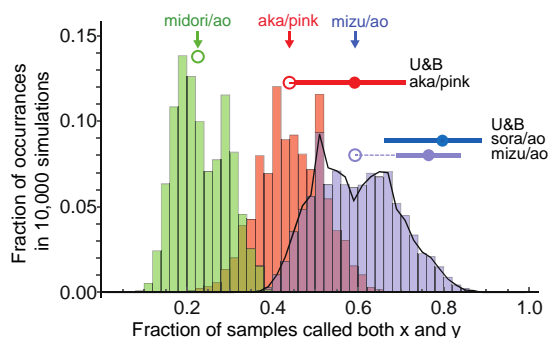


図7. 色カテゴリーの重複率 (Kuriki et al., 2017)

先行研究でこの領域が基本色から除外された理由は、水色と呼称された色票が約80%の確率で青と呼称され、2つのカテゴリーの重複が大きいと考えられたためである。我々の研究結果について重複率の推定を行ったところ、約60%に低減しており、先行研究でも独立した色カテゴリーと認められた赤/ピ

ンクの重複率にほぼ一致する(図7)。従って、水色に相当する明るい青の領域は、独立した基本色カテゴリーであると考えられる。これは、30年間に基本的な色カテゴリーが分離した過程を本研究で観察したことを意味している。

色カテゴリーに関する研究結果(b-1, b-2)について得られた成果をまとめると、視覚情報のカテゴリー化は言語獲得と独立に進行し(b-1)、言語自体の変化に伴うフィードバックを受けてカテゴリー自体の変容が生じる(b-2)過程が明らかになった。

研究成果の全体をまとめると、視覚情報は、脳内における順行性・逆行性信号の相互作用によって確立される事が明らかになり(4[1], 4[2](a)), また言語レベルからのフィードバックにより色カテゴリー知覚が形成されていく過程も明らかにすることができた(4[2](b))。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計7件)

- (1) I Kuriki. (2018) A novel method of color-appearance simulation using achromatic point locus with lightness dependence. *i-Perception*, 査読有り. 9(2), 1-16. doi: 10.1177/2041669518761731
- (2) 栗木一郎, Ryan Lange, 武藤ゆみ子, Angela M Brown, 福田一帆, 徳永留美, Delwin T. Lindsey, 内川恵二, 塩入 諭. k-平均法による日本語話者の色カテゴリー領域と個人差類型の導出. 日本画像学会 Imaging Conference Japan 2017 Fall meeting 抄録集, 査読なし. pp.23-24, 2017.
- (3) S Kaneko, S Anstis, and I Kuriki. (2017) Brief presentation enhances various simultaneous contrast effects. *Journal of Vision*, 査読有り. 17(4), 7, 1-13. doi:10.1167/17.4.7
- (4) 任 薇静, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. fMRI 順応を用いた色運動情報と輝度運動情報の相互作用に関する検討. 映像情報メディア学会技術報告. 査読なし. 41(9), 33-36, 2017.
- (5) 前村和貴子, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. ヒト視覚野におけるユニーク色と枢軸色の脳活動パターン解析. 映像情報メディア学会技術報告. 査読なし. 41(9), 29-32, 2017.
- (6) I Kuriki, R Lange, Y Muto, K Fukuda, R Tokunaga, D.T. Lindsey, A M. Brown, K Uchikawa, and S Shioiri. (2017) The modern Japanese color lexicon. *Journal of Vision*, 査読有り. 17(3), 1, 1-18. doi: 10.1167/17.3.1
- (7) J Yang, S Kanazawa, M Yamaguchi, and I Kuriki. (2016) Cortical response to

categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. Proceedings of The National Academy of Sciences of U.S.A. 査読有り . 113(9), 2370-2375. doi: 10.1073/pnas.1512044113

[学会発表](計 29 件)

- (1) I Kuriki, W Maemura, K Matsumiya, S Shioiri. Representation dissimilarity analysis of cortical responses to color stimuli. ISMRM-Japanese Chapter 2nd meeting, Wako-shi, Saitama, 2/22-23/2018.
- (2) 金子沙永, Søren K Andersen, 栗木一郎. 定常視覚誘発電位を使ったヒト色相選択性応答の検証. 日本視覚学会 2018 冬季大会, 東京, 2018/1/17-19.
- (3) 金子沙永・村上郁也・栗木一郎・David Peterzell. 明るさ・色同時対比の個人データの相関パターンに基づく因子分析 第 36 回日本基礎心理学会大会, 大阪, 2017 年 12 月.
- (4) 栗木一郎, Ryan Lange, 武藤ゆみ子, Angela M. Brown, 福田一帆, 徳永留美, Delwin T. Lindsey, 内川恵二, 塩入 諭. k-平均法による日本語話者の色カテゴリー一領域と個人差類型の導出. 日本画像学会, 京都, 2017/11/30.
- (5) I Kuriki, W Maemura, K Matsumiya, S Shioiri. Representation dissimilarity analysis of cortical responses to color stimuli. Neuroscience 2017. Washington, D.C., U.S.A., 11/11-15/2017.
- (6) 栗木一郎, Lange Ryan, 武藤ゆみ子, Brown Angela M, 福田一帆, 徳永留美, Lindsey Delwin T, 内川恵二, 塩入 諭. 日本語色カテゴリーとその個人差類型. 日本視覚学会 2017 夏季大会, 島根, 2017/9/8.
- (7) K EM Tregillus, J E Vanston, D.I.A. MacLeod, I Kuriki, S A Engel, M A Webster. Color compensation in anomalous trichromats assessed with fMRI. International Colour Vision Society 2017, Erlangen, Germany. 8/18-22, 2017.
- (8) I Kuriki, W Ren, K Matsumiya, S Shioiri. Interactions of colour- and luminance-defined motion signals in human visual cortex measured by fMRI. International Colour Vision Society 2017, Erlangen, Germany. 8/18-22, 2017.
- (9) I Kuriki, W Maemura, K Matsumiya, S Shioiri. Difference in Brain Activities for Unique and Cardinal Hues Investigated by fMRI. Asia-Pacific Conference on Vision 2017, Tainan, Taiwan, July 13-17, 2017.
- (10) S Kaneko, S Anstis, I Kuriki. Effect of temporal modulations of dynamic inducer on tilt illusion. Vision Sciences Society 17th annual meeting, St Petes Beach, FL, U.S.A., May 19-24, 2017.
- (11) 任 薇静, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. fMRI 順応を用いた色運動情報と輝度運動情報の相互作用に関する検討. 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 東京, 2017/3/8.
- (12) 前村和貴子, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. ヒト視覚野におけるユニーク色と枢軸色の脳活動パターン解析. 映像情報メディア学会ヒューマンインフォメーション研究会, 東京, 2017/3/8.
- (13) 栗木一郎, Pei Sun, 上野賢一, Kang Cheng. fMRI による視覚野の色相選択性ヒストグラムの統合に関する検討. 日本視覚学会 2017 年冬季大会, 東京, 2017/1/19.
- (14) 金子沙永, S Anstis, 栗木一郎. 動的変調する誘導刺激からの傾き対比と変調速度の関係. 日本視覚学会 2017 年冬季大会, 東京, 2017/1/18.
- (15) I Kuriki, P Sun, K Ueno, & K Cheng. Unifying Histogram for the Population of Hue-Selective Voxels in Human Visual Cortex. OSA Fall Vision Meeting 2016, Rochester NY, U.S.A., October 20-22, 2016.
- (16) 前村和貴子, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. 脳活動の共分散構造解析を用いたユニーク色情報の生起部位に関する検討. 日本視覚学会 2016 年夏季大会, 新潟, 2016/8/18.
- (17) 任 薇静, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. 色運動順応後の輝度運動に対する逆方向選択性の運動残効. 日本視覚学会 2016 年夏季大会, 新潟, 2016/8/18.
- (18) I Kuriki, J Yang, S Kanazawa, M K. Yamaguchi. Cortical representation for the categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. Asia-Pacific Conference on Vision 2016, Fremantle, Australia, July 2016.
- (19) I Kuriki, P Sun, K Ueno, & K Cheng. Generation of a Combined Histogram for the Population of Hue-Selective Voxels in Human Visual Cortex. Human Brain Mapping 2016, Geneva, Switzerland, June 27 2016.
- (20) I Kuriki, Y Muto, K Fukuda, R Tokunaga, A M. Brown, D T. Lindsey, K Uchikawa, S Shioiri. Study of the Japanese color lexicon using cluster analysis. Vision Sciences Society 2016, St Pete Beach, FL, May 15, 2016.
- (21) S Kaneko, S Anstis, I Kuriki. Brief presentation enhances various simultaneous contrast effects. Vision Sciences Society 2016, St Pete Beach, FL, May 14, 2016.

- (22)金子沙永, S Anstis, 栗木一郎: 瞬間呈示での傾き同時対比と誘導刺激方位の関係. 日本視覚学会 2016 年冬季大会, 東京, 2016/1/22.
- (23) W Maemura, I Kuriki, K Matsumiya, S Shioiri. Differences in fMRI responses to cardinal and unique hues in human visual cortex. 23rd Symposium of International Colour Vision Society, Sendai, Japan, Jul, 2015.
- (24) J Yang, S Kanazawa, M K. Yamaguchi, I Kuriki. Cortical representation for the categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. Society for Neuroscience, Chicago, IL, Oct. 2015.
- (25) 栗木一郎, 孫 沛, 上野賢一, 田中啓治, 程 康. ヒト視覚野の色選択性応答における錐体入力の非線形性. 第 25 回日本神経回路学会全国大会, 東京, 2015/9/2-4.
- (26) I Kuriki, T Muto, K Fukuda, R Tokunaga, D T. Lindsey, A M. Brown, K Uchikawa, S Shioiri. Categorical color clusters of Japanese color lexicon. 23rd Symposium of International Colour Vision Society, Sendai, Japan, Jul, 2015.
- (27) J Yang, S Kanazawa, M K. Yamaguchi, I Kuriki. Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. 23rd Symposium of International Colour Vision Society, Sendai, Japan, Jul, 2015.
- (28) T Sato, T Nagai, I Kuriki, S Nakauchi. Dissociation of neutral chromatic points for color discrimination and color appearance under incomplete chromatic adaptation. 23rd Symposium of International Colour Vision Society, Sendai, Japan, Jul, 2015.
- (29) Y Hatori, I Kuriki, K Matsumiya, & S Shioiri. Study on image statistics when color attracts human attention. 2015 AIC midterm meeting, Tokyo, May 21, 2015.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

栗木 一郎 (KURIKI, Ichiro)
東北大学・電気通信研究所・准教授
研究者番号: 8 0 2 8 2 8 3 8

(2) 研究分担者

塩入 諭 (SHIOIRI, Satoshi)
東北大学・電気通信研究所・教授
研究者番号: 7 0 2 2 6 0 9 1

松宮 一道 (MATSUMIYA, Kazumichi)
東北大学・電気通信研究所・准教授

研究者番号: 9 0 3 9 5 1 0 3

程 康 (CHENG, Kang)

理化学研究所・脳科学総合研究センター・
副チームリーダー

研究者番号: 7 0 4 2 5 6 3 5
(平成 28 年 11 月まで)

田中 啓治 (TANAKA, Keiji)

理化学研究所・脳科学総合研究センター・
チームリーダー

研究者番号: 0 0 2 2 1 3 9 1
(平成 28 年 12 月より)

(3) 連携研究者

金子 沙永 (KANEKO, Sae)

東北大学・電気通信研究所・研究員 / 日本
学術振興会・特別博士研究員 (SPD)

研究者番号: 6 0 7 6 3 1 8 3

(4) 研究協力者

前村 和貴子 (MAEMURA, Wakiko)

東北大学大学院・情報科学研究科・修士課
程 (平成 29 年 4 月まで)

任 薇静 (REN, Weijing)

東北大学大学院・情報科学研究科・修士課
程 (平成 29 年 4 月まで)

越坂 若奈 (KOSHIZAKA, Wakana)

東北大学・工学部・電気情報システム工
学 (平成 29 年 4 月から)

Delwin T. Lindsey

Ohio State University, Department of
Psychology, Professor

Angela M. Brown

Ohio State University, Department of
Optometry, Professor

Michael A. Webster

University of Nevada, Reno, Department
of Psychology, Professor

Søren K. Andersen

University of Aberdeen, U.K.,
Department of Psychology, Senior
Lecturer