

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24330205

研究課題名(和文) 視覚特徴要素信号の脳内でのフローに関する研究

研究課題名(英文) Study on the flow of elementary visual feature signal in the cortex.

## 研究代表者

栗木 一郎 (Ichiro, Kuriki)

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) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：脳内における視覚情報は色などの特徴情報ごとに一度分離され、異なる部位での処理を経て統合される。特徴要素情報とその相互作用について、心理物理と脳活動計測を組み合わせた研究を行った。色と輝度の相互作用を運動視の順応残効によって調べた結果、残効の初期と後期で異なる相互作用が生じる事が示された。また、脳内での色情報表現を調べる fMRI 実験を行い、中間色を表現する細胞が豊富に存在する事を示した。さらに、視野中で選択的に情報処理を行なう視覚的注意について定常視覚誘発脳波(SSVEP)を用いて調べた結果、図形認識のフィードバックを受けて発生する物体の形に依存した注意形状の存在を示す結果を得た。

研究成果の概要(英文)：Visual information signal in human brain is known to be once divided into elementary components, such as motion, shape, color, and etc., and combined after independent process at different regions in the brain. We investigated the representation of each elementary component of visual information in the brain and their way of interactions in the brain. We used motion signal modulated by color and luminance, and confirmed the interactions of these motion signals in human brain. Our results suggest that the way of interaction varies as a function of time after the offset of adapting stimulus. Next, we investigated the representation of color signal in the brain and found neurons that respond selectively to intermediate colors, in addition to those selective to opponent colors (red/green, yellow/blue). Also, we investigated the shape of visual attention is affected by a feedback signal from the object-shape recognition process, by monitoring EEG components called SSVEP.

研究分野：実験心理学

キーワード：脳活動計測 fMRI 視覚情報処理 色 運動 相互作用 フィードバック

### 1. 研究開始当初の背景

視覚の特徴要素である色・運動・形などの脳内での結合に関し、脳活動の分類解析 (classification analysis; デコーディング) を用いた研究が報告され始めている。しかし、先行研究は主に刺激画像の物理的変化に対応した脳活動の変化の分類に留まっているため、(1)特に初期視覚野での高次視覚野からのフィードバック信号が分離されていない、(2)知覚的变化と脳活動の対応が不明瞭、(3)脳信号の差異の定量評価が不十分、などの問題がある。

### 2. 研究の目的

本研究では、上記の問題を解決するために、心理物理学と脳活動データを照合した研究を行う。視覚刺激のタイミング操作や共分散解析による解析を組み合わせることで、個々の視覚特徴要素および特徴要素の再結合処理に対応した脳内信号のフローと、関連する脳部位の解明を試みた。

### 3. 研究の方法

当初の計画では、脳内の voxel に対する受容野 (population receptive field: pRF) を特定し、その内外でフィードバック信号の差異を生じさせる計画だったが、特に pRF の周辺部が想定以上に広がった事、周辺部からの信号の重み付けが小さかった事から、脳活動計測によって差異を見出すのは困難と判断し、他の方法による研究を模索し推進した。

#### (1) 特徴要素信号の特定

基本的な視覚特徴要素信号の1つである色情報が脳内でどのように表現されているか脳活動計測により調べた。

##### ① 差分位相符号化法による視覚情報の計測

脳内における視野の表象を特定する際に用いる位相符号化法を改良した方法を用い、スクリーン上に呈示された視覚刺激の色相が時間的に変化する際の脳活動の変化を解析し、fMRI で計測した各画素における脳活動の位相変調から色相選択性のバリエーションを調べ、ヒストグラムを作成した。

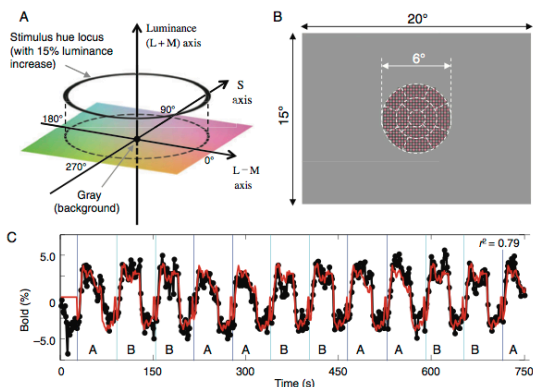


図 3-1①. 視覚刺激として色相変化(A)を画面上に示し(B)、その間の脳活動を測定(C). (Kuriki et al., 2015 より)

##### ② 乳幼児被験者における高次色情報表現

我々は、言語フィードバックの影響を排除するため、言語獲得前の乳幼児 (生後 5-7 ヶ月) を用いて色カテゴリに対応した脳活動が存在するかを調べた。言語が知覚の形成を支配しているという学説 (Sapir-Whorf 仮説) が存在するが、我々も日常的には色名を使って色の見え方を表現する。色名は色の見え方を大雑把にカテゴリ化する際にも用いられ、カテゴリカル色知覚は言語の影響を強く受けていると考えられている。乳幼児にカテゴリ内/カテゴリ間の色変化を呈示し、観察中の脳活動の変化を解析した。

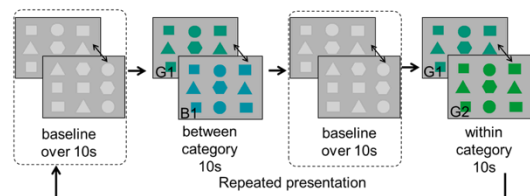
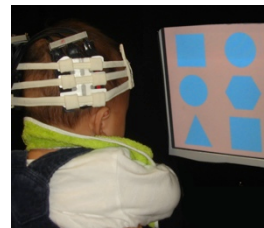


図 3-1②. (上) 乳児の脳活動計測の状況. (下) 白黒から色変化 (緑⇄青 or 緑⇄緑) への切り替えを繰り返し呈示し計測. (Yang et al., 2016 より)

#### (2) 心理物理学的手法によるフィードバック/フィードフォワード信号の切り分け

連続フラッシュ抑制 (Continuous Flash Suppression: CSF) という技術では、高次の信号を抑制することができる。この抑制下での見え方の変化を調べる事により、フィードバックの影響を受ける現象と受けない現象との切り分けを試みた。

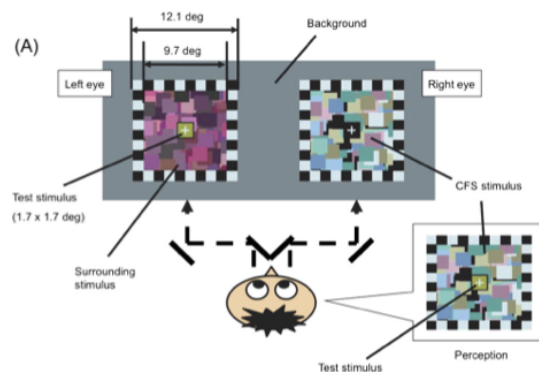


図 3-2. 利き目に高速で連続変化する画像 (CFS) を呈示すると、他眼の画像で CFS が重なる部分は知覚が抑制される. (Horiuchi et al., 2014 より)

#### (3) 視覚的運動の神経信号の相互作用

色と運動の情報の脳内での結合メカニズムを解明するため、輝度または色 (赤〜緑)

を正弦波変調させた円環型の視覚刺激を回転させ、長時間 (> 20 秒) 一定方向の回転運動に順応した後、順応と同方向/逆方向の運動刺激を呈示した時の脳活動を解析した。

direction modulation	Counterclockwise (CCW)	Clockwise (CW)
Color-defined motion (CM)		
Luminance-defined motion (LM)		

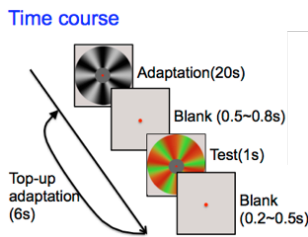


図 3-3. (上): 順応/テスト刺激の種類. (左): 順応/テスト刺激の呈示タイミング. (栗木ら, 2014 より)

#### (4) 脳波による物体随伴性注意の計測.

人が視覚情報処理を絞り込む脳内プロセス(視覚的注意)の一種で物体形状の拘束を受ける物体随伴性注意について調べた。

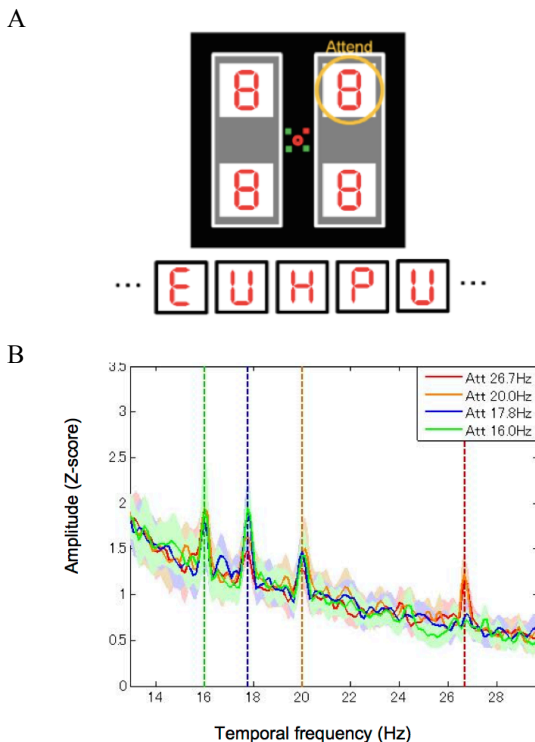


図 3-4. A. 背景が特定の時間周波数で点滅し、文字課題を行う。画面中央の注視点の傍らに、注意すべき方位の手がかり (Cue) を示す。B. 各場所の点滅に対応した時間周波数に生じた誘発脳波。この振幅の増減を評価する。(Kuriki et al., 2016 より)

脳波によって物体随伴性注意に関与した信号を測定する事ができれば、注意範囲が物体

形状によるフィードバックを調べられるようになる。本研究では、視覚定常誘発脳波 (Steady-state visually evoked potential: SSVEP) を用いた。図形の 4 カ所に一定周波数で点滅する図形を呈示し、対応する脳波成分の変化に着目して解析を行う。被験者は指示された 1 カ所に注意を向けて課題を行った。

#### 4. 研究成果

##### (1) 特徴要素信号の特定

##### ① 差分位相符号化法による視覚情報の計測

色相が連続変化する間の fMRI 信号を解析し、1 周期中でピーク応答が生じる色相を画素毎に推定した結果、中間色に選択的な細胞が多数存在する事が示された (図 4-1①. F.)。

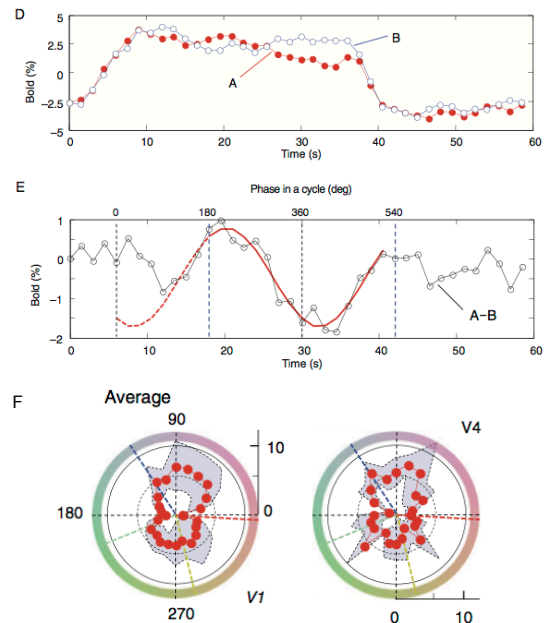


図 4-1①. (D) 色相に対する脳活動変化. (E) 色相以外への反応を除外するため差分を取る. (F) 第 1 次/第 4 次視覚野 (V1/V4) における被験者平均の % ヒストグラム. (Kuriki et al., 2015 より)

##### ② 乳幼児被験者における高次色情報表現

青と緑の色カテゴリ境界をまたぐ 2 色のペアと、同じ色差だが緑の色カテゴリに入る 2 色のペアを見せたとき (図 3-1②下)、側頭葉の脳活動には差が生じ (左右半球には有意差なし)、後頭葉には差が見られなかった。

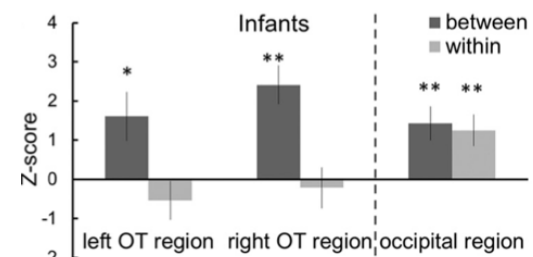


図 4-1②. 暗いバーはカテゴリ間、明るいバーはカテゴリ内の色ペアに対する脳活動を示す。左 2 つは左右の側頭部、右は後頭部の応答の平均 (N=12)。後頭部では条件間に有意差が無かった。(Yang et al., 2016 より)

この結果は、乳幼児はいずれの色ペアも同様に区別可能（後頭部の信号上昇）だが、側頭部では色カテゴリに対応した脳活動の差異が存在する事を示した。言語によるフィードバックとは独立に、複数の異なる色を1つの範疇で扱うカテゴリカル色知覚に対応した何らかの神経信号が、乳幼児の脳内で形成され始めている事を世界で初めて示した。

## (2) 心理物理学的手法によるフィードバック／フィードフォワード信号の切り分け

周辺に赤／緑が示されると中央の色の見え方が補色の緑／赤方向にシフトする。そのシフト量をプロットしたところ、周辺領域がCFSにより知覚的にブロックされた場合とされない場合とで差異はあったが、CFSが呈示されていても補色へのシフトが生じた。

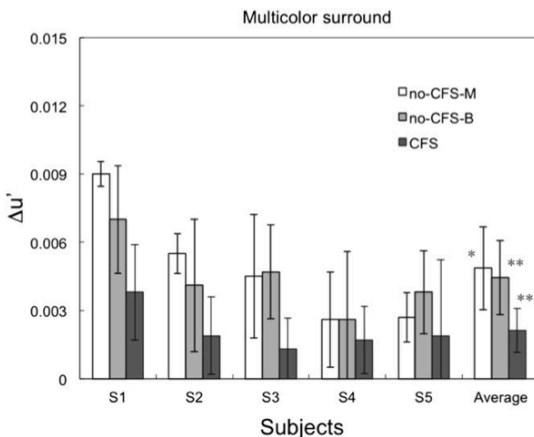


図 4-2. 3つのバーの組みは被験者5人と平均の色誘導量を示している。各被験者で左2つのバーは知覚抑制無し、黒いバーは知覚抑制ありの場合の効果量。(Horiuchi et al., 2014 より)

以上より、少なくとも CFS の影響を受ける部位（両眼融合以降）と受けない部位に色対比を生じるメカニズムがある事が示された。

## (3) 視覚的運動の神経信号の相互作用

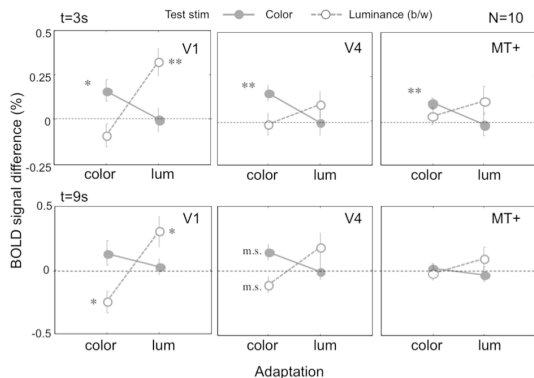


図 4-3①. 色と輝度運動の相互作用の時間経過。上段は順応終了後の潜在時間が 3s、下段は 9s の結果で、左から V1, V4, MT+ の結果を示す。縦軸はテスト刺激に対する脳活動の差分（逆方向-順方向）で示した運動残効。\* ( $p < 0.05$ ), \*\* ( $p < 0.01$ ) は統計的に有意な残効。(栗木ら, 2014 より)

実験の結果、色と輝度の運動に対する相互作用では、順応の初期 ( $t=3s$ ) には色と輝度で独立に運動方向選択的な順応が生じたものの、後期 ( $t=9s$ ) では異なる相互作用が生じる傾向が認められた。特に第一次視覚野 (V1) では、色と輝度の相互作用が、典型的な運動残効と逆方向に生じる可能性を示す結果を得た (図 4-3 (1) 左下)。

一方、色パタンの運動は、同じ速度の輝度パタンの運動より知覚的には遅く知覚される。そこで輝度パタンの早い運動 (6 cycles / round, 8Hz) と遅い運動 (18 cycles / round, 1 Hz) を比較する実験も行なった。

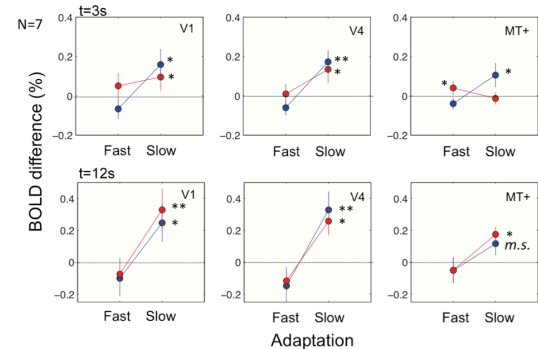


図 4-3②. 早い運動と遅い運動の相互作用。t=12s では相互作用は見られるが、色順応後の V1 で生じた負の運動残効 (図 4-3①左下) は認められない。(栗木ら, 2014 より)

その結果、 $t=3s$  では独立、 $t=12s$  では相互作用が生じるが、色順応で見られた逆方向の運動残効は生じなかった。従って、色の運動により生じた負の運動残効は色覚系に特有である事を示唆する結果を得た (図 4-3 (2))。

逆方向-同方向の BOLD 信号の差分を運動残効の指標とし、共分散構造分析により領野間の結合性の変化を解析する試みも行った。

## (4) 脳波による物体随伴性注意の計測.

視野内の 4 カ所の 1 つに「手がかり (cue)」が示され、注意が向いている場合、注意箇所と同一物体 (長方形の輪郭: 図 3-4 A) 中に位置する標的に対し、心理物理学に物体随伴性注意の存在を示す応答時間の短縮が見られた。cue の場所 (図 3-4 A の丸印: 右上) から等距離に un-cued 部位が 2 つ (同左上・右下) 存在するが、同じ物体内の un-cued within に対する応答時間が un-cued between より短い (図 4-4. A)。これは物体随伴性注意の証左である。

同時に計測した脳波では、cued の標的の次に un-cued within の振幅が高く、2 カ所の un-cued 位置では within の振幅が between より大きかった (図 4-4. B.)。以上より、脳波成分である SSVEP で物体随伴性注意のトップダウン効果が計測できた事を示している。

## 【成果全体のまとめ】

上述のように、本研究課題では心理物理学的に視覚刺激の時空間特性を工夫する方法



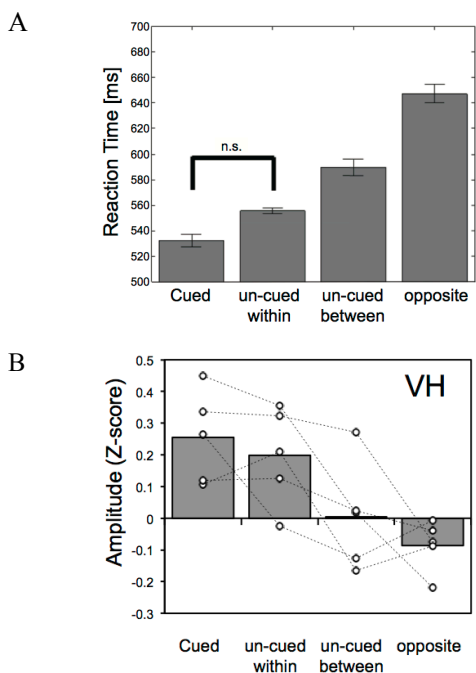


図 4-4. A. 手がかり方向注意を向けた方位 (cued) と同じ枠に含まれる他部位 (un-cued within) では、それ以外と比べて有意に応答時間が短く、物体随伴性注意の効果を示す。B. un-cued within と between の間には統計的な有意差が存在し、物体随伴性注意が脳波 (SSVEP) で観測可能である事が示された。(Kuriki et al., 2016 より)

や、言語未習得の乳幼児を被験者にする方法など複数のアプローチで、フィードバック／フィードフォワードの切り分けを試み、視覚特徴要素信号の研究を進めた。その結果、多数の論文発表に繋げることができた。

中でも、基本的な特徴要素信号である色情報の表現形式に関する研究 (Kuriki et al., 2015; Yang et al., 2016) は大きな反響を呼び、神経科学分野でも高インパクトのジャーナルに掲載された。色カテゴリー信号の発達過程における言語フィードバックからの独立性を示した論文 (Yang et al., 2016) は、国内の一般紙に加え米国の Scientific American Mind, イタリアの La Repubblica, Il Venerdì 等の一般紙にも記事が掲載されるなど、世界的に大きな反響を呼んだ。

脳波による物体随伴性注意の計測に関する研究 (Kuriki et al., 2016) は、物体形状に関する高次視覚領野からのフィードバックの効果が、脳波 (SSVEP) で客観的に計測できる事を示した。今後、視覚的注意の分布やそのダイナミクスを研究するためのツールとして、有効性が期待される。

さらに色と輝度の運動視信号の相互作用に関する脳活動を順応残効で調べた研究では、通常の逆の運動残効という新たな知見を得ることができた。この研究については、刺激条件を改善した追加実験を実施し、論文投稿の準備を進めている。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 15 件)

- (1) Kuriki I, Omori N, Kashiwase Y, Matsumiya K, Tokunaga R, and Shioiri S. (2016; in print) Measurement of object-based attention using steady-state visual evoked potentials. *Japanese Journal of Physiological Psychology and Psychophysiology*. (査読あり)  
doi: 10.5674/jjppp.1505si (早期公開)
- (2) Yang J, Kanazawa S, Yamaguchi MK, and Kuriki I. (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.* 113(9), 2370-2375. (査読あり)  
doi: 10.1073/pnas.1512044113
- (3) Kuriki I, Sun P, Ueno K, Tanaka K, and Cheng K. (2015) Hue selectivity of neurons in human visual cortex revealed by BOLD fMRI. *Cerebral Cortex*, 25, 4869-4884. (査読あり)  
doi: 10.1093/cercor/bhv198
- (4) Horiuchi K, Kuriki I, Tokunaga R, Matsumiya K and Shioiri S (2014). Chromatic Induction from Surrounding Stimuli under Perceptual Suppression. *Visual Neuroscience*, 31(6), 387-400, 2014. (査読あり)  
doi: 10.1017/S0952523814000224
- (5) 栗木一郎・謝 鴻飛・山田祥之・徳永留美・松宮一道・塩入 諭. 脳機能計測を用いた運動視情報の脳内でのフローに関する研究. 映像情報メディア学会技術報告, 38(46), 17-20, 2014.  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110009885402>

[学会発表] (計 33 件)

- (1) 石井 慶, 松宮一道, 栗木一郎, 塩入 諭. 静止刺激および運動刺激に対する視覚的注意の空間的広がり測定. 日本視覚学会 2016 年冬季大会, 2016/1/22. 工学院大学 (東京都・新宿区)
- (2) Yang J, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Kuriki I. Cortical representation for the categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. *Neuroscience* 2015, 10/21/2015. Chicago, IL (U.S.A.).
- (3) 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非線形性. 第 25 回日本神経回路学会全国大会. 2015/9/3. 電気通信大学 (東京都・調布市).
- (4) Yang J, Kanazawa S, Yamaguchi MK, Kuriki I. Cortical response to categorical color perception in infants investigated by near-infrared spectroscopy. *ICVS 2015*, 7/4/2015. 東北大学 (宮城県・仙台市)
- (5) Kuriki I, Muto Y, Fukuda K, Tokunaga R, Lindsey DT, Brown AM, Uchikawa K, Shioiri S. Categorical color clusters of Japanese color lexicon. *ICVS 2015*, 7/6/2015. 東北大学 (宮城県・仙台市).
- (6) Maemura W, Kuriki I, Matsumiya K & Shioiri S. Differences in fMRI responses to cardinal and unique hues in human visual cortex. *ICVS 2015*, 7/4/2015. 東北大学 (宮城県・仙台市).

- (7) 栗木一郎, 謝 鴻飛, 山田祥之, 徳永留美, 松宮一道, 塩入 諭. 脳機能計測を用いた運動視情報の脳内でのフローに関する研究. 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. 2014/11/28. 鹿児島大学 (鹿児島県・鹿児島市).
- (8) Kuriki I, Yamada Y, Matsumiya K, & Shioiri S. Velocity selective mechanisms for fast and slow visual motion studied by behavioral and fMRI techniques. Neuroscience 2014, 11/19/2014. Washington D.C. (U.S.A.).
- (9) Kuriki I, Yamada Y, Matsumiya K, & Shioiri S. Neural basis of visual motion perception with velocity selectivity studied by fMRI with direction selective adaptation. Neuroscience Research, 9/11/2014. パシフィコ横浜 (神奈川県・横浜市)
- (10) Ishii K, Matsumiya K, Kuriki I, & Shioiri S. Spatial spread of visual attention while tracking a moving object. APCV 2014, 7/20/2014. かがわ国際会議場 (香川県・高松市) .
- (11) Shioiri S, Kashiwase Y, Matsumiya K, & Kuriki I. Correlation between amplitude and phase of SSVEP as an attention measure. APCV 2014, 7/21/2014. かがわ国際会議場 (香川県・高松市) .
- (12) Kuriki I, Sun P, Ueno K, Tanaka K, & Cheng K. Hue selectivity in human visual cortex studied by fMRI with a novel stimulation paradigm. APCV 2014, 7/19/2014. かがわ国際会議場 (香川県・高松市) .
- (13) Shioiri S, Honjo H, Matsumiya K, & Kuriki I. Different spatial attention for different stages of visual processing. VSS 2014, 5/20/2014. St Pete Beach, FL (U.S.A.)
- (14) Kuriki I, Xie H, Tokunaga R, Matsumiya K, & Shioiri S. Interactions of color- and luminance-defined motion signal in human visual cortex. VSS 2014, 5/17/2014. St Pete Beach, FL (U.S.A.).
- (15) 栗木一郎, 楊 嘉樂, 金沢 創, 山口真美. 乳幼児の色カテゴリー知覚と関連脳活動の計測. 日本色彩学会 視覚情報基礎研究会 第19回研究発表会. 2014/3/1. 千葉大学 (千葉県)
- (16) 山田祥之, 栗木一郎, 松宮一道, 塩入 諭. 速度選択的な順応効果を用いた運動視メカニズムの研究. 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 2014/1/24. 工学院大学 (東京都・新宿区).
- (17) 塩入 諭, 大森暢喬, 松宮一道, 栗木一郎. オブジェクト内注意拡散の時間特性の検討. 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 2014/1/24. 工学院大学 (東京都・新宿区).
- (18) 栗木一郎, 謝 鴻飛, 徳永留美, 松宮一道, 塩入 諭. 色運動・輝度運動信号の脳内での相互作用. 日本視覚学会 2014 年冬季大会, 2014/1/24. 工学院大学 (東京都・新宿区).
- (19) Kuriki I, Xie H, Tokunaga R, Matsumiya K, & Shioiri S. Mechanisms for color-defined and luminance-defined motions in human visual system studied by psychophysical and functional brain-imaging techniques. Neuroscience 2013, 11/11/2013, San Diego, CA (U.S.A.).
- (20) Shioiri S, Honjo H, Kashiwase Y, Tokunaga R, Matsumiya K, Kuriki I. Attention spreads measured by steady state visual evoked potential and by event related potential. ECVF 2013, 8/26/2013. Bremen (Germany).
- (21) Kuriki I, Sun P, Ueno K, Tanaka K, & Cheng K. Hue selectivity in human visual cortex studied by fMRI. ICVS 2013, 7/15/2013. Winchester (U.K.).
- (22) Shioiri S, Omori N, Kashiwase Y, Matsumiya K, Kuriki I, Tokunaga R: Object based attention and attention spreading. APCV 2013, 7/8/2013. Suzhou (China).
- (23) Xie H, Kuriki I, Tokunaga R, Matsumiya K, Shioiri S: The interactions and separation of color- and luminance-motion signals in human visual system measured by adaptation effect in psychophysics and fMRI. APCV 2013, 7/7/2013. Suzhou (China).
- (24) Shioiri S, Kashiwase Y, Omori N, Matsumiya K, & Kuriki I: Temporal order of attentional disengagement and reengagement investigated by steady-state visual evoked potentials and event-related potentials, VSS 2013, 5/14/2013. Naples, FL (U.S.A.).

[その他]

ホームページ等

<http://www.vision.riec.tohoku.ac.jp/ikuriki/index-j.html>

## 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 : 80282838

### (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 : 70226091

徳永 留美 (TOKUNAGA, Rumi)

立命館大学・立命館グローバルイノベーション研究機構・研究員

研究者番号 : 80573914

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 : 90395103

### (3) 研究協力者

柏瀬 啓起 (KASHIWASE, Yoshiyuki)

大森 暢喬 (OMORI, Nobutaka)

謝 鴻飛 (XIE, Hongfei)

山田 祥之 (YAMADA, Yasuyuki)

前村 和貴子 (MAEMURA, Wakiko)