

高照度照明が大腦視覚過程に及ぼす影響：脳機能イメージング研究

正会員 川島 康裕 (キヤノン株式会社) 非会員 山城 博幸 (京都大学)
 非会員 山本 洋紀 (京都大学) 非会員 村瀬 智一 (明治国際医療大学)
 非会員 市村 好克 (キヤノン株式会社) 非会員 梅田 雅宏 (明治国際医療大学)
 非会員 樋口 敏宏 (明治国際医療大学)

The Effect of High-Level Illumination on Brain Activity in the Human Visual Cortex : Neuroimaging Study

Member Yasuhiro Kawashima (Canon Inc.), Non Member Hiroyuki Yamashiro (Kyoto University)

Non Member Hiroki Yamamoto (Kyoto University), Non Member Tomokazu Murase (Meiji University of Integrative Medicine),

Non Member Yoshikatsu Ichimura (Canon Inc.), Non Member Masahiro Umeda (Meiji University of Integrative Medicine),

Non Member Toshihiro Higuchi (Meiji University of Integrative Medicine)

KEYWORDS : illumination level, brain, visual cortex, fMRI, color

1. はじめに

晴れた日に見る自然風景が色彩豊かに感じられるように、明所視では色覚をはじめとする様々な視覚機能が暗所視に比べて向上する。そして、明所視の範疇であっても、照明が明るいほど視覚経験はさらに豊かになることが知られている。Stevens らは、心理物理実験の結果より、照明が明るいほどコントラスト感が向上すること¹⁾を、同様に Hunt は、照明が明るいほどカラフルネスが向上すること²⁾を報告している。また、Shin らは、薄明視における色の見えに関する心理物理実験を行い、やはり照明が明るいほどカラフルネスが向上することを報告している³⁾⁴⁾。

しかしながら、この高照度照明がもたらす知覚的恩恵の背後にある神経機構については未解明な点が多い。一方で、少なくとも、視覚処理の初期の段階では、照明に依存しない機能が備わっていることが知られている。明所視では、光受容器である錐体細胞に明順応機構が備わっており、錐体は環境（順応）光が明るくなると、ウェーバーの法則に従った感度低下を起こす。例えば、照明強度が10倍になると、感度が10分の1になる⁵⁾。この錐体順応に即した感度低下が起こっていることは、脳機能イメージングを用いて大腦の1次視覚野(V1)の応答を見た結果からも確認されている⁶⁾。このように、照明強度が大きくなってもそれと同時に網膜での感度低下が起こるため、神経節細胞や大腦のV1での応答に大きな変化が生じることはない。このことは、私たちの視覚能力が明るさの変化によらず常に安定していることを意味するが、同時に、私たちは常に均質な世界を見ていることになり、高照度照明のもたらす効果をうまく説明することができない。

そこで本研究では、高照度照明がもたらす知覚的恩恵は大腦のより高次の視覚野での情報処理の結果として起こるのではないかと、という仮説を設定した。視覚野のなかでも4次視覚野や色覚

関連野(V8)での脳活動変化は、色彩知覚との関連性が高いことが既に報告されている⁷⁾。よって、このV8の脳活動変化が高照度照明下での知覚的恩恵を説明するうえで重要となるのではないだろうか。すなわち、Hunt らの心理物理実験結果のように照明強度の増加に伴ってカラフルネスやコントラスト感が向上するときには、V1ではなくV8での脳活動に変化が生じているのではないだろうか。

近年、私たちが感じる色彩や微妙な質感にかかわる脳活動を、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いた脳機能計測で評価することが可能となってきた⁸⁾⁹⁾。そこで本研究ではfMRIを用い、色彩知覚時に照明強度がもたらす脳活動変化、特に、脳のV1及びV8での脳活動変化について調べた。そして、照明強度の増加に伴ってカラフルネスやコントラスト感が向上するときには、V1ではなくV8での脳活動に変化が生じている、という仮説について検証することを目的とした。

2. 実験方法

2.1 視覚刺激と呈示装置

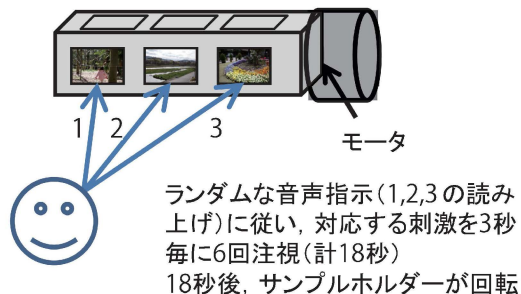
視覚刺激には印刷物を用いた。視覚刺激は図1(a)に示した3種類のカラーまたはモノクロの自然風景画像で、黒枠付きで灰色背景上に一行に並べられた。照明光に関する視覚の手がかりが豊富だと考えられる自然風景画像を視覚刺激として用いた。視覚刺激のサイズは高さ13 mm × 幅20 mm (視角：高さ4.8°, 幅6.4°)であった。視距離は16 cm だった。灰色背景の輝度は3種の自然風景画像の平均輝度であった。統制刺激は一樣背景(視覚刺激と同サイズの黒枠のみ)だった。自然風景画像の撮影には、デジタル一眼レフカメラ(EOS 5D MarkII, キヤノン)を用い、撮影した自然風景画像の印刷には、インクジェットプリンター(PIXUS Pro9000 MarkII, キヤノン)とマットフォトペーパー(MP-101A4,



(a) 印刷物刺激(自然風景画像)とサンプルホルダー上の配置



(b) 実物体呈示装置



(c) 印刷物呈示方法

図1 実験装置と実験方法

Fig.1 Experimental system and method.

キヤノン)を用いた。また、印刷は実験前日に行い、溶剤成分が十分に乾燥した印刷物を、実験当日に用いることで条件を統一した。このようにして準備した印刷物を fMRI 実験の視覚刺激として用いた。

この印刷物刺激は真っ暗な MRI スキャナー内部に置かれ、ハロゲンランプ光源に接続した2本の光ファイバ照明(ELI100DH, MEC)で照らされた(CIE1931: $x=0.388$, $y=0.431$)。照明光をできるだけ均一にするために、拡散板を介して照明した。照明の色温度は4154 Kであった。照明強度は高照度条件(17,000 lux)と低照度条件(1,200 lux)の2条件だった。照明強度の変動は5%以内だった。照明強度の調整には径の異なるアパーチャを用いた(アルミニウム製、口径: 5.4 mm, 1.0 mm)。アパーチャは光源と光ファイバの接続部に挿入した。

印刷物刺激の呈示には図1(b)に示した耐fMRI環境の実物体呈示装置を使用した。この装置は直方体のサンプルホルダーを非磁性の超音波モータ(UN-30A, キヤノンプレジジョン)で回すものである。被験者の顎側に超音波モータとサンプルホルダーが、頭頂側には光ファイバ照明と拡散板が取り付けられている。図1(a)に示すように、サンプルホルダーの4面には上述の2種の視覚刺激と統制刺激が交互に、すなわち、カラー印刷物→様背景→モノクロ印刷物→様背景となるように貼り付けた。回転位置は各面が被験者の視線と正対するよう調整した。被験者が印刷物刺激のみを見ることができるよう視野を制限する枠を設置し

た。超音波モータが90度回転すると、被験者がその枠を通して見る印刷物刺激が次面に切り替わった。刺激の切り替え速度は30 r/min だった。

2.2 印刷物呈示実験

2.2.1 被験者

被験者は正常色覚を有する成人10人であった。fMRIの実験に先立ち、被験者には口頭で実験内容の説明を行い、同意を得た。全ての実験手続は、京都大学大学院人間・環境学研究科の倫理委員会による承認を得た。被験者は単眼視(左目)で視覚刺激である印刷物を観察した。

2.2.2 視覚野同定実験

印刷物呈示実験を行う前に、被験者の視覚野(V1, V8など)を同定するためのfMRI実験(レチノトピー実験)を行い、各被験者の大脳左右半球の視覚野をそれぞれ同定した^{10)~14)}。

2.2.3 印刷物呈示実験手順

カラーとモノクロの印刷物を見たときの脳活動を高照度順応時と低照度順応時で比較するために、ブロックパラダイムと称される手法を用いてfMRI実験を行った。今回用いたブロックパラダイムは、被験者にカラー印刷物を呈示して視覚刺激を与える「タスクブロック(カラー)」、モノクロ印刷物を呈示する「タスクブロック(モノクロ)」、及び、タスクブロックと同じ時間だけ統制刺激(一様背景)を呈示して被験者に安静状態を与える「レストブロック」からなる。1ブロックは18秒間に設定した。ブロック

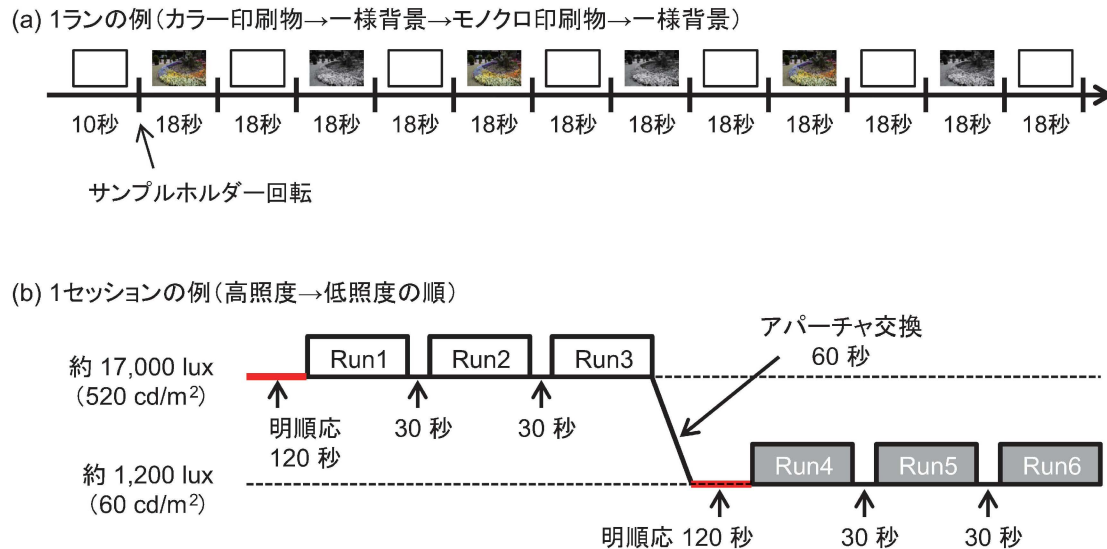


図2 実験手順
Fig.2 Experimental procedure.

の切り替えは超音波モータの回転により制御した。被験者はサンプルホルダー上の3つの印刷物もしくは一様背景を、音声指示に従って3秒毎に注視すると同時にボタンを押した(図1(c))。音声指示は、1, 2, 3の数字をランダムかつ同一数字が連続しないように読み上げられるものであった。ボタンが押されることで、被験者が呈示された印刷物を注視していることを確認した。3種類のブロックを、カラー印刷物→一様背景→モノクロ印刷物→一様背景の順、もしくは、モノクロ印刷物→一様背景→カラー印刷物→一様背景の順で3回繰り返した時間216秒、及び、fMRI測定開始直後にMRI信号を安定させるために必要なダミー時間10秒を加えた226秒をもって、1回のfMRI測定ランとした(図2(a))。

さらに、高照度順応時と低照度順応時の比較を行うために、例えば、図2(b)に示すような、高照度でのfMRI測定を連続3ラン実施後、アパーチャを交換して、低照度でのfMRI測定を連続3ラン実施し、計6ランからなる1セッションのfMRI実験を実施した。各被験者はfMRI実験に2セッション参加した。2回のセッションは別々の日に行った。順応レベルの遷移に際しては、定常状態での脳活動を測定するために、十分な明順応時間をとった。被験者は各照度条件の冒頭で統制刺激に対して2分間以上明順応した。なお、セッション内での明順応レベルを高→低もしくは低→高のどちらで実施するか、及び、各ランにおいてカラー印刷物もしくはモノクロ印刷物のどちらの呈示を先にするか、の2点については被験者間でカウンターバランスした。

2.2.4 fMRI撮像

印刷物呈示実験中の被験者の脳活動を fMRI で撮像した。fMRI の原理を簡単に説明する。fMRI では神経細胞の活動に伴う血流変化を計測している。血液中の酸化ヘモグロビンは反磁性体であるため、脳活動に伴う神経細胞の活動増加に伴い酸化ヘモグロビン濃度が急激に増大すると、fMRI 信号の一時的な増強をもたらす。これは BOLD (Blood oxygenation level dependent) 効果と呼ばれている^{[15][16]}。脳活動に伴う fMRI の信号変化は、一般に 1～3 % であることが知られている^[17]。fMRI はこの BOLD 効果を計測する手法である。

撮像には 1.5T 臨床用 MRI 装置 (GE, Signa) を使用した。信号取得には表面型 Radio Frequency コイルを用いた。fMRI の撮像条

件は、Echo Planner Imaging, Echo Time = 50 ms, Repetition Time (TR) = 2000 ms, Flip Angle = 90°, Field Of View = 200 x 200 mm, Matrix = 64 x 64, Voxel size = 3.125 x 3.125 x 4.0 mm, Thickness = 4.0 mm であった。切断面は冠状断で、後頭部から隣接した20枚の画像を取得した。各切断面について、1ランで113枚の画像を取得した。

2.2.5 網膜照度

1セッションの実験終了後、各照度条件下で十分な明順応の時間をとった後、被験者の瞳孔径をデジタルカメラで撮影した。被験者の瞳孔径は、高照度条件で平均3.6 mm (標準偏差0.5 mm)、低照度条件で平均5.4 mm (標準偏差0.7 mm) であった。各被験者の瞳孔径から求めた網膜照度は、高照度条件で5200 td (±25%)、低照度条件で1400 td (±28%) であり、いずれの照度条件においても、被験者は明所視の範疇だった。

2.3 解析

fMRI 実験で得られた機能画像データは、京都大学で作成したソフトウェアで解析した^{[14][18]}。解析の手順は次の通りだった。(1) 各機能画像の頭部位置を補正した。(2) 撮像開始直後は MRI 信号が安定していないため、最初の10秒分の機能画像は解析対象から除外した。(3) 超音波モータ駆動時に発生する電磁波がノイズとして機能画像に重畳するため、モータ駆動時のタイミングで取得した機能画像も解析対象から除外した。(4) 機能画像を解析して得られた時系列の fMRI 応答から線形トレンド成分を除去した後、各ボクセルでの fMRI 応答の平均を算出し、それを用いて応答コントラストに変換した。(5) 一般線形モデルを用いて、カラー印刷物呈示時のタスクブロック及びモノクロ印刷物呈示時のタスクブロックに対する脳活動の応答を推定した。(6) 被験者毎に同定された腹側一次視覚野 (V1v) および V8 について、時系列変化をサンプリングした。(7) 各視覚野の fMRI 応答の振幅値を用いて、照明条件や印刷物刺激の違いに関する被験者の脳活動変化について、t 検定と分散分析による統計検定を行った。分散分析では、照明条件 (高照度, 低照度), 色条件 (カラー, モノクロ), 順応レベル順序条件 (高→低, 低→高), 視覚野条件 (V1v, V8) に関して検定を行った。

3. 結果

図3に、各照明条件で印刷物刺激を見たときのfMRI応答を時系列で示した。これらは、上記2.3解析(1)~(6)に示した手法に従って解析した。これは被験者10名の平均データである。縦軸に示したsignal changeは1ラン中のfMRI信号強度の平均値である。横軸には計測時間を示した。上記2.3解析の(3)で示したように、超音波モータが駆動したタイミングで取得した2秒分の機能画像を解析対象から除外したため、横軸のグラフ表示が36秒(18秒×2)ではなく、32秒(16秒×2)となっている。

V1vとV8の時系列信号の照明レベル依存性を比べると、明確な違いが見られた。V1vでは、照明条件による違いは、カラーおよびモノクロのいずれの印刷物刺激でも見られなかった。一方、V8では、カラー、モノクロに関わらず、照明が明るくなるとfMRI応答が増加する傾向が見られた。

この照明レベル依存性を定量的に評価するために、全被験者のデータについて時系列信号からfMRI応答の振幅値を推定した。その結果を図4に示した。V1vとV8では照明レベル依存性に明確な違いがあった(ANOVA, $F=4.15$, $p<0.05$)。V1vでは、カラー、モノクロ共に照明条件の違いによる脳活動の差は見られなかった(両側t検定, モノクロ: $p>0.05$, カラー: $p>0.05$)。他方、V8

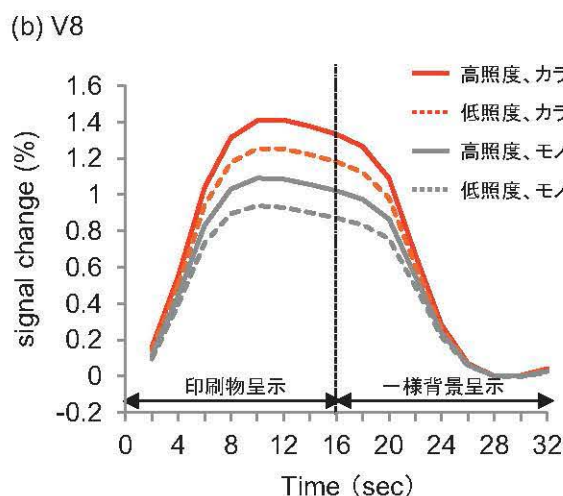
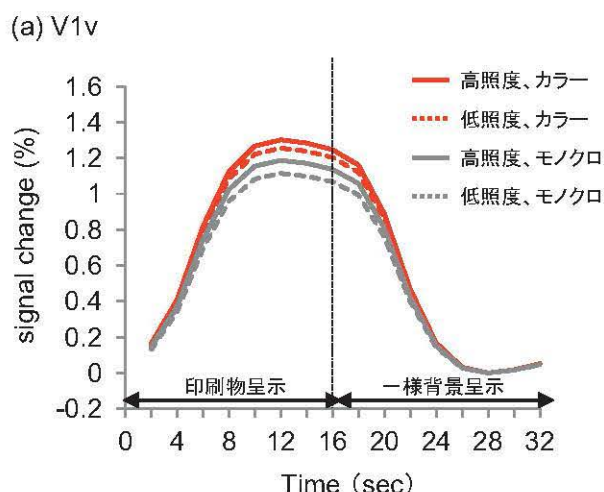
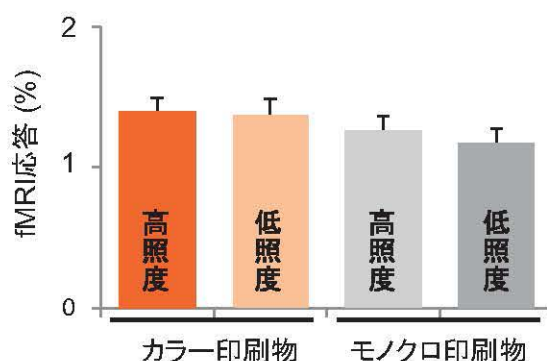


図3 脳活動の時系列応答
Fig.3 Time-series responses in V1v and V8.

(a) V1v



(b) V8

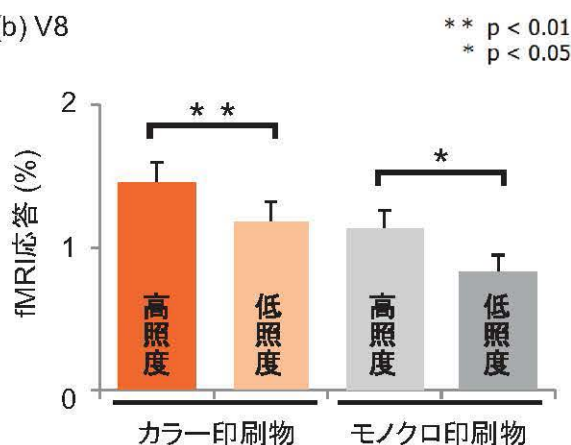


図4 各条件におけるfMRI応答
Fig.4 fMRI response in each condition.

では、カラー、モノクロ共に高照度条件でfMRI応答が大きかった(両側t検定, モノクロ: $p<0.05$, カラー: $p<0.01$)。

4. 考察

高照度照明がヒトの脳視覚過程に及ぼす影響を脳機能イメージングで調べた結果、その影響は脳腹側視覚経路の初期段階であるV1v野ではなく、高次の色覚関連野とされるV8野で確認された。V1vで照明の効果がなかった結果は、ヒトV1の色順応を調べたWadeらの研究⁶⁾に一致する。彼らは、照明レベルを1.25倍(約400 td vs. 約500 td)変化させたときのfMRI信号を比較して、それらが錐体順応を反映したウェーバー則に従うことを示している。対して、本実験では、被験者の網膜照度は高照度条件で5200 td、低照度条件で1400 tdだった。Wadeより3倍以上明るい環境光下で実験を行った結果においても、同様の錐体の順応機構が動作したため、V1vの脳活動が照明条件に依存しなかったと考えられる。

V8の脳活動は照明が明るくなると大きくなった。Stevens, Huntが示したコントラスト感、カラフルネスの向上の神経基盤を支持する結果であることが示唆された。脳活動の増加は直接的には視覚信号の増幅もしくは感度の増加を示唆するが、その他にも色々可能性がある。例えば、照明レベルそのものの増加によって

脳活動が増加する可能性がある。他にも、明順応に伴う空間解像度の向上や質感の向上など、高照度照明下特有の様々な知覚現象を反映している可能性がある。また、脳の視覚野における情報処理過程ではV1で処理された情報は直接V8へ伝達されず、他のいくつかの視覚野を経由して伝達される。よって、照明がもたらす知覚現象を脳機能の側面から知るためには、V1やV8だけではなく他の視覚野の脳活動変化についても、今後は精査していく必要がある。

5. まとめ

印刷物を見るとき照明強度の違いが、視覚皮質の脳活動にどのような影響を及ぼすかについて調べるために、fMRIによる脳機能イメージングを行った。その結果、照明強度が大きくなっても、1次視覚野の脳活動には変化が見られなかった。一方、色覚関連野では、照明強度の増大に伴い、脳活動変化が大きくなることを確認した。よって、高照度照明で印刷物が鮮やかに見える現象には、大脳の色覚関連野の活動が関与していることが示唆された。

本研究は文科省新学術領域研究(23135517)、JSPS科研費(22530793)、及び、JSPS研究活動スタート支援(60582038)の助成を受けたものです。

参考文献

- (1) Stevens, J. C. and Stevens, S. S. : Brightness Function : Effects of Adaptation., J. Opt. Soc. Am., 53, pp.375-385 (1963).
- (2) Hunt, R. W. G. : Light and Dark Adaptation and the Perception of Color., J. Opt. Soc. Am., 42, pp.190-199 (1952).
- (3) Shin, J. C., Yaguchi, H. and Shioiri, S. : Change of Color Appearance in Photopic, Mesopic and Scotopic Vision., Opt. Rev., 11, pp.265-271 (2004).
- (4) Shin, J. C., Matsuki, N. Yaguchi, H. and Shioiri, S. : A Color Appearance Model Applicable in Mesopic Vision., Opt. Rev., 11, pp.272-278 (2004).
- (5) Dunn, F. A., Lankheet, M. J. and Rieke, F. : Light adaptation in cone vision involves switching between receptor and post-receptor sites., Nature, 449, pp.603-607 (2007).
- (6) Wade, A. R. and Wandell, B. A. : Chromatic Light Adaptation Measured using Functional Magnetic Resonance Imaging., J. Neurosci, 22, pp.8148-8157 (2002).
- (7) Hadjikhani, N., Liu, A. K., Dale, A. M., Cavanagh, P. and Tootell, R. B. H. : Retinotopy and color sensitivity in human visual cortical area V8., Nat. NeuroSci, 1, pp.235-241 (1998).
- (8) Hiramatsu, C., Goda, N. and Komatsu, H. : Transformation from image-based to perceptual representation of materials along the human ventral visual pathway, NeuroImage, 57, pp.482-494 (2011).
- (9) Bartels, A. and Zeki, S. : The architecture of the colour centre in the human visual brain: new results and a review., Eur. J. Neurosci, 12, pp.172-193 (2000).
- (10) Engel, S. A., Rumelhart, D. E. Wandell, B. A. Lee, A. T., Glover, G. H., Chichilnisky, E. J. and Shadlen, M. N. : fMRI of human cortex., Nature, 369, 525 (1994).
- (11) Wandell, B. A. Dumoulin, S. O. and Brewer, A. A. : Visual Field Maps in Human Cortex., Neuron, 56, pp.366-383 (2007).

- (12) Wandell, B. A. and Winawer, J. : Imaging retinotopic maps in the human brain. Vision Res., 51, pp.718-737 (2011).
 - (13) 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., Hum. Brain Mapp., 33, pp.121-129 (2012).
 - (14) Yamamoto, H., Ban, H., Fukunaga, M., Tanaka, C. Umeda, M. and Ejima, Y. : Large - and Small - Scale Functional Organization of Visual Field Representation in the Human Visual Cortex., in Visual Cortex : New Research, ed. Portocello T. A. and Velloti R. B., Nova Science Publisher, New York, pp.195-226 (2008).
 - (15) Ogawa, S., Lee, T. M., Kay, A. R. and Tank, D. W. : Brain magnetic resonance imaging with contrast dependent on blood oxygenation, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 87, pp.9868-9872 (1990).
 - (16) Ogawa, S., Tank, D. W., Menon, R., Ellermann, J. M., Kim, S.-G., Merkle, H. and Ugurbil, K. : Intrinsic signal changes accompanying sensory stimulation : Functional brain mapping with magnetic resonance imaging, Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 89, pp.5951-5955 (1992).
 - (17) 宮内哲, 三崎将也 : 非侵襲脳機能計測と感覚・知覚研究, 新編 感覚・知覚心理学ハンドブック Part2, 大山正, 誠信書房, pp.151-170 (2007).
 - (18) Yamamoto, H., Takahashi, S., Azukawa, T., and Ejima, Y. : Software for surface - based analysis of fMRI, IEICE Technical Report (MBE2000-64), 100, pp.79-86 (2000).
- (受付日2013年1月17日/採録日2013年11月7日)



川島康裕 (正会員)

キャノン株式会社 総合 R&D 本部

〒146-8501 東京都大田区下丸子3-30-2

1974年生まれ。2000年3月上智大学大学院理工学研究科修士課程修了。2003年3月東京工業大学大学院総合理工学研究科博士課程修了。2003年4月キャノン株式会社入社。印刷物知覚に関する脳機能イメージング研究などに従事。博士(工学)。



山城博幸 (非会員)

京都大学大学院人間・環境学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

1979年生まれ。2010年3月京都大学大学院人間・環境学研究科博士後期課程単位取得退学。現在京都大学大学院人間・環境学研究科研究員。修士(人間・環境学)。



山本洋紀（非会員）

京都大学大学院人間・環境学研究科

〒606-8501 京都市左京区吉田二本松町

1966年生まれ。1998年3月京都大学大学院人間・環境学研究科博士後期課程単位取得退学。2000

年11月京都大学大学院人間・環境学研究科勤務。現在、同大学助教。博士（人間・環境学）。日本神経科学会，日本視覚学会，日本心理学会会員。



村瀬智一（非会員）

明治国際医療大学 脳神経外科学ユニット

〒629-0392 京都府南丹市日吉町保野田日ノ谷6-1

1986年生まれ。2008年3月鈴鹿医療科学大学鍼灸学科卒。2013年3月明治国際医療大学大学院鍼灸学研究科博士課程修了。博士（鍼灸学）。日本磁気共鳴医学会会員。



市村好克（非会員）

キャノン株式会社 総合 R&D 本部

〒146-8501 東京都大田区下丸子3-30-2

1964年生まれ。1989年3月北海道大学大学院工学研究科修了。1989年4月旭硝子株式会社。

1990年9月ヒューレット・パカード研究所。

2002年9月キャノン株式会社。博士（工学）。応用物理学会員，IEEE 会員。



梅田雅宏（非会員）

明治国際医療大学 医療情報学ユニット

〒629-0392 京都府南丹市日吉町保野田日ノ谷6-1

1956年生まれ。1980年3月上智大学理工学部物理学科卒。1980年4月日本電子株式会社入社。

1988年3月亀田総合病院勤務。1990年4月明治国際医療大学（旧明治鍼灸大学）・脳神経外科勤務。現在明治国際医療大学・医療情報学ユニット教授。日本磁気共鳴医学会会員。



樋口敏宏（非会員）

明治国際医療大学 脳神経外科

〒629-0392 京都府南丹市日吉町保野田日ノ谷6-1

1957年生まれ。1981年京都府立医科大学医学部卒業。1989年明治国際医療大学（旧明治鍼灸大

学）脳神経外科。1990年カリフォルニア大学サンフランシスコ校研究員。1995年京都府立医科大学脳神経外科講師。2004年明治国際医療大学脳神経外科教授。医学博士。日本磁気共鳴医学会会員。