

脳磁図を用いた色・形識別時の視覚脳活動に関する研究 (第1報)

李 範 爽¹⁾ 酒 井 保治郎²⁾ 荒 木 祐 美¹⁾
勝 山 しおり²⁾ 田 中 志 保³⁾ 椎 原 康 史²⁾
永 松 一 真⁴⁾

(2006年9月30日受付, 2006年12月11日受理)

要旨: 脳磁図を用いて選択的注意課題を行う時の視覚脳活動を測定した。被検者に2種類の色と形からなる4つの刺激を提示し, 色と形の識別によるボタン押しを指示した。誘発磁場波形とボタン押しの反応時間を記録し, 課題間比較を行った。その結果, 全ての課題において刺激提示後100msと370ms付近で後頭葉の磁場活動が記録され, ダイポールとして第一次視覚野が推定された。また, ボタン押しの反応時間は350ms付近であった。ボタン押し後も後頭葉の活動が出現することが示唆された。

キーワード: 選択的注意, 脳磁図, 色, 形, 視野

はじめに

視覚情報は網膜から後頭葉皮質の第1次視覚野(V1)伝わる。その後の経路は, サルなどの動物で研究され, 対象物の動きや立体視に関する情報は頭頂連合野にいたる背側経路, 色覚や形態視に関する情報は下側頭連合野にいたる腹側経路を構成する¹⁾。両系は共に前頭前野に送られ記憶情報との照合が行われて認知が成立すると考えられる。

ヒトは網膜から入力された視覚情報を全て処理するに限界があるため, 重要な情報だけを選択的に処理する能力が備わっている。入力情報の中から特定情報を選択し, 処理する機能を注意という。注意には, 色や形, 運動方向, 空間的位置の選択に関わる初期段階の注意と反応選択に関わる後期段階の注意に分類される²⁾。後期段階の注意は主に心理学分野で研究され, 注意による反応時間や正答率の変化などが調べられてきた。

初期段階の注意は古くから動物実験が行われてきたが, 近年は脳機能画像法を用いて人を対象にすることが可能となった。Martinezら³⁾は機能的磁気共鳴画像法 (functional MRI: fMRI) と脳波

(electroencephalography: EEG)を用いて視空間注意の効果を検討し, V1を含めた視覚野の血流増加を報告した。また, Noesseltら⁴⁾はEEGでみられた潜時140~250msの注意効果による振幅増大がV1を含めた視覚野の血流増加と関係すると報告した。fMRIやポジトロン断層法 (positron emission tomography: PET)を用いた色や形の注意効果については, 側頭・後頭部やV1の血流増加が多数報告されている⁵⁻⁷⁾。

半側空間無視の原因には視空間注意における障害の存在が示唆され, 臨床では図形模写, 線分二等分検査, 線分抹消の机上検査がよく用いられる。机上評価は日常生活活動における予想に有効とされるも⁸⁾, 臨床の場面では異なることをよく経験する。我々はその原因の一つに, 日常における色覚や形態視の重要性を考える。より検出力の高い机上評価には色覚や形態視の評価が必要と考える。

今回, 我々は色や形における選択的注意を評価するため脳磁図 (magnetoencephalography: MEG)を用いた。MEGは非侵襲的な上, 磁場を発生する電流活動がmm単位の三次元的情報として得られ, ms単位の時間的分解能をもつ。fMRIやPETに比べ時間的分解

¹⁾群馬大学大学院医学系研究科博士後期課程

²⁾群馬大学医学部保健学科作業療法学専攻

³⁾群馬大学大学院医学系研究科博士前期課程

⁴⁾医療法人育成会篠塚病院リハビリテーション科

能が高く、経時的な活動部位の追跡に優れている。

方法

1. 対象

被検者は知能に問題なく、麻痺などのない正常者5名（男性2名，女性3名，年齢は20歳～21歳）で，全被検者は裸眼あるいはコンタクトレンズの矯正により両眼共に0.7以上の正常視力を有し，全例右利きであった。検査前に検査についての説明を行い，文書にて同意を得た。

2. 実験状況

被検者は測定前に三次元デジタイザーを用いて，頭部外形状および頭部を入れるヘルメット（デュワー）の空間的位置を登録し，金属物を除去した上，磁気シ

ールドされた測定室に入った。測定は坐位で行い，刺激は液晶プロジェクターを用い測定室の外から小窓を通して室内のスクリーン（横160×縦120cm）に投射した。スクリーンの中心から被検者の鼻根部までは150cm，視野角は12°である（図1.a）。測定中はモニターとインターホンを通して被検者と必要な連絡をとった。

3. 視覚刺激

刺激には黒色（輝度：1 cd/m²）の背景に，赤色（輝度：15cd/m²）の円と正方形，青色（輝度：41cd/m²）の円と正方形を用いた（図1.b）。被検者は左右視野ごとに色または形の識別を課した。中央の青色の十字を固視して，色識別課題では赤色の円または赤色の正方形（1,2）をTargetに，形識別課題では赤

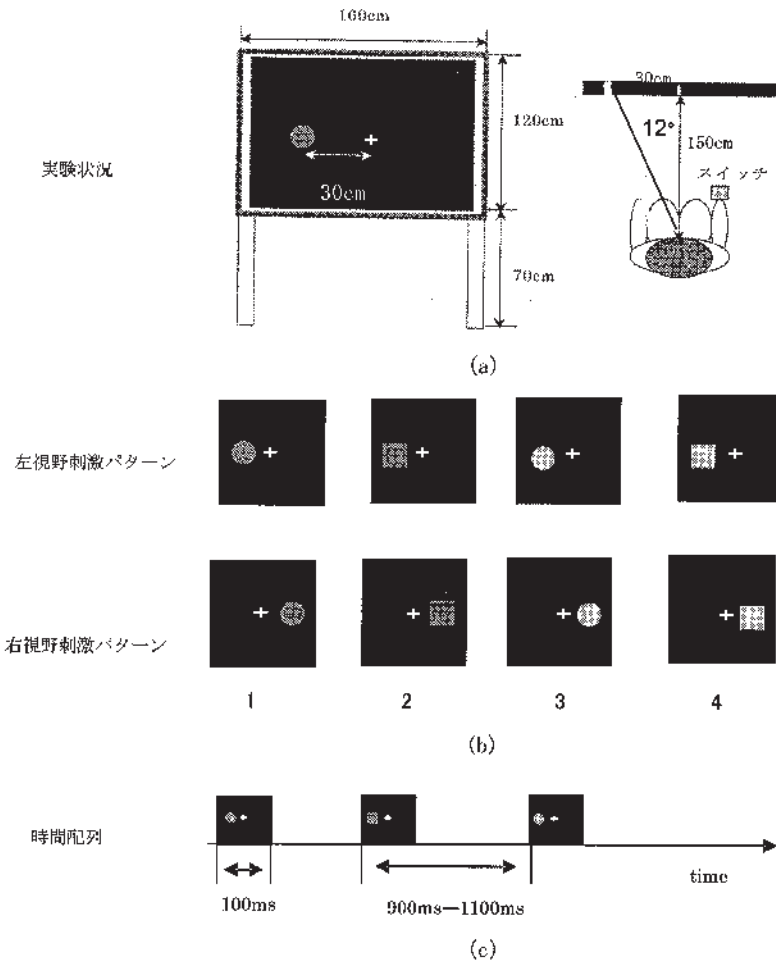


図 1 実験デザイン。(a)実験状況：スクリーン中央の十字を固視し，左右視野別に色と形の識別を行った。(b)刺激パターン：色識別課題では赤色(1, 2: ●, ■)をTargetに，形の識別課題では円(1, 3: ⊙, ⊚)をTargetにした。頻度はTarget 10%×2, Non-target 40%×2とし，Target時にできるだけ速くボタン押しを行うように指示した。(c)刺激の時間配列：刺激提示時間は100ms，刺激間隔は900～1100msとランダムにした。また，同じ刺激が3回以上連続出現しないように設定した。

色の円または青色の円 (1,3) をTargetにした。色識別課題の場合、被験者は赤色の円または正方形 (1,2) が現れたらボタン押しを行う。また、形識別課題では赤色の円または青色の円 (1,3) が現れたらボタン押しを行う。刺激呈示時間は100ms、刺激間隔は900~1100ms (平均1000ms) とランダムにした (図1.c)。1課題の刺激は600回提示し、頻度はTarget 10%×2, Non-target 40%×2とした。また、同じ刺激が3回以上連続出現しないよう設定した。

4. MEG記録

MEGとして全頭型306チャンネル脳磁場計測装置 (ELEKTA Neuromag) を用いた。306チャンネルから検出された磁気信号は、フィルターユニット、超伝導量子干渉素子 (Superconducting Quantum Interference Device : SQUID) エレクトロニクス、データ収集電子装置で不要信号の除去とAD変換 (analog-digital conversion) がなされ、コンピュータシステムに転送される。解析にはマグネトメーターを除いた204チャンネルを用いた。

5. 分析方法

データ収集は、サンプリング周波数600Hz、分析時間900ms (刺激前100ms~刺激後800ms) で行った。S/N比 (Signal to Noise ratio) を高めるために、刺激画像をトリガーとし、Target刺激に対する反応を約120回、Non-target刺激に対する反応を約480回、それぞれ加算平均した。但し、刺激提示後500ms以降にボタン押しをした反応は、反応時間として遅すぎるため、加算平均から除外した。波形は加算平均後に1~100Hzのバンドパスフィルターをかけ、トリガー前100msから0msの波形を用いてベースライン補正した。

誘発磁場波形の統計解析には、神経活動の強さを表すため二乗平均平方根 (RMS) を用いた。後頭葉付近に位置する24チャンネル (12箇所) のRMSを求め、そのピーク潜時 (刺激からピークまでの時間) を課題間で比較した。また、RMSのピーク潜時で電流源を意味する等価電流双極子 (ダイポール) を推定した。ダイポールの解析は、等磁場曲線を確認し、ダイポールモデルを用いて推定した。本法は、ダイポールとして信頼性が高いダイポールを推定する解析法である。その後、推定されたダイポールを三次元T1強調磁気共鳴画像 (MRI) に重ね合わせ、解剖学的部位の推定を行った。

推定されたダイポールの信頼性基準として、①推定ダイポールから計算される磁場と実際に観測された磁場がどれくらい近似しているのかを判定するGOF

(goodness of fit) が80%以上であること、②ダイポールが10ms以上にわたって安定すること、③推定位置が解剖学的に大脳皮質位置していることの3条件を設定した。これらの条件を満たすダイポールを求めた。

6. 反応時間

刺激を600回提示し、頻度はTarget 10%×2, Non-target 40%×2とした。被検者にはTarget時にできるだけ速くボタン押しを行うよう指示した。Targetに対する反応時間を課題間で比較した。

結果

1. 誘発磁場波形

図2にTarget時の誘発磁場加算平均波形を表示した。左側に左視野の、右側に右視野のそれぞれの色識別課題と形識別課題における波形を示した。図2 (a) は頭部を真上から見下ろしたように表示しており、図の上部は前頭部、下部は後頭部を示し、計204チャンネルが示されている。各波形は刺激提示前100msから提示後800msまでを示した。その1チャンネル (後頭部) の波形を図2 (b) に示した。刺激提示後100ms付近で下向きのピーク (*) が出現し、その後いくつかの上向きピークが続いている。色識別課題と形識別課題は同様の潜時のピークを持ち、類似した時間経過を示した。図には示さないがNon-targetでも同様の経過がみられた。

2. RMS波形

図3 (a) に選択した24チャンネルを示した。左側に左視野識別課題を、右側に右視野識別課題を示した。左視野識別課題では後部やや右側に関心領域を選択した。また、右視野識別課題では後部やや左側に関心領域を選択した。

図3 (b) にRMS波形を示した。4課題共に100ms付近 (M1:▼) と370ms付近 (M2:▽) でピークがみられ、それぞれの潜時の等磁場曲線も示した。これらの等磁場曲線は頭部を後方から見たもので、実線が頭部から湧き出る磁界、点線が入り込む磁界を表している。M1ならびにM2潜時の等磁場曲線は色識別と形識別で類似した磁場分布を示した。

RMS波形のピークM1とM2は全ての被検者でも出現した。左視野課題でみられるM1とM2の間にピークは被験者5名中2名のみ確認できた。表1に全被検者のM1とM2のピーク潜時の平均を示した。M1のピーク潜時を左視野と右視野、色識別と形識別の間で比較したが、いずれの間にも有意な差はみられなかった (Wilcoxon順位和検定, $P < 0.05$)。

3. ダイポール推定

推定されたM1, M2のダイポールとMRI上に重ね合わせた(図4)。左側に左視野色識別課題時, 右側に右視野色識別課題時に推定されたダイポールを示した。上段は潜時M1で, 下段は潜時M2で推定されたダイポールをそれぞれ示した。M1, M2のダイポールは左視野色識別課題では, それぞれ115ms, 383msで, 右視野色識別課題ではそれぞれ122ms, 366msで, 視野と反対側の後頭葉の鳥距溝(V1)付近に位置していた。また, 形識別課題では, 左視野では112msと370msで, 右視野では118msと366msで, 同様の部位にダイポールが推定された。

4. 反応時間

4課題に対する反応時間の平均を表2に示した。反応時間を課題間で比較したところ, 右視野における色識別課題が形識別課題より有意に速かった

(Wilcoxon順位和検定, $P < 0.05$)。

考察

MEGを用いて選択的注意課題を行う時の視覚脳活動を検討した。視覚誘発磁場が確認され, 視覚脳が100ms付近と370ms付近で活動することが明らかになった。また, その活動源は後頭葉のV1付近と推定された。370ms付近の活動はボタン押しによる反応時間より遅れ, 視覚野の活動に関する新しい知見と考えられた。ここでは, 各課題のTarget時に得られた結果を中心に, 100ms付近で推定されたV1の活動源, 370ms付近で推定された視覚脳活動の意義, そして選択的注意における課題の種類や提示視野の影響について述べる。

今回確認された100ms付近のV1活動は出現部位から

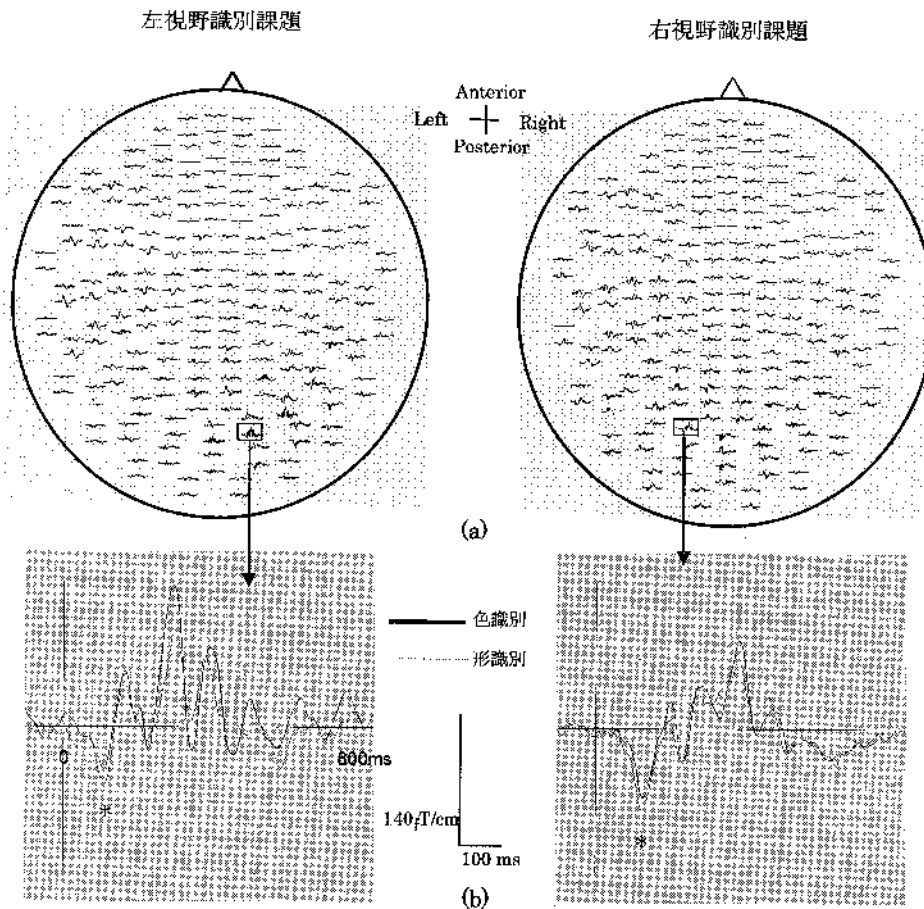


図2 誘発磁場波形の一例。(a)左図は左視野における色識別課題と形識別課題時のTarget誘発磁場加算平均波形。右図は右視野におけるTarget誘発磁場加算平均波形。頭部を覆う204個のチャンネルを平面的に表した。図の上部は前頭部, 下部は後頭部, 右は右側頭部, 左は左側頭部, 中央は頭頂部を表す。太線は色識別課題, 細線は形識別課題を表す。(b)後頭部に位置したセンサーからの信号の拡大表示。刺激提示後100ms付近で下向きピーク(*)が出現し, その後いくつかの上向きピークが続く。

みて視覚誘発電位のP100と同じ活動源をもつと考えられる。全ての被検者に安定的に出現したことや課題の種類や提示視野に影響されないことがその理由である⁹⁾。一方、サルでは潜時70msにV1神経細胞の75%が賦活し、ヒトでは潜時100msでV1以降の視覚野が活動を始めることが明らかになった^{10),11)}。MEGでも潜時30msで既にヒトのV1が活動するとの報告がある¹²⁾。このことから今回確認された潜時100msの活動はV1活動以外の視覚脳活動を含んでいる可能性も考えられる。

潜時370ms付近の視覚脳活動は我々が得た新しい知

見である。潜時100msと非常に類似した磁場分布が確認され、ダイポールも同様の部位で推定された。V1の活動が潜時100msに続き、370msでも出現したことを意味する。但し、370msで推定されたダイポールは100ms付近のダイポールとは向きが異なり、異なる神経活動を示唆した。例えば、図4の右視野色識別課題では潜時122msのダイポールは主に上方を向き、潜時366msのダイポールは下方に向かうダイポールである。Wddrdaら⁶⁾はfMRIを用いた色や形の識別課題を行い、後頭葉と前頭葉外側部、側頭葉の血流増加を報告した。また、後頭葉の血流増加は効率的な識別を行

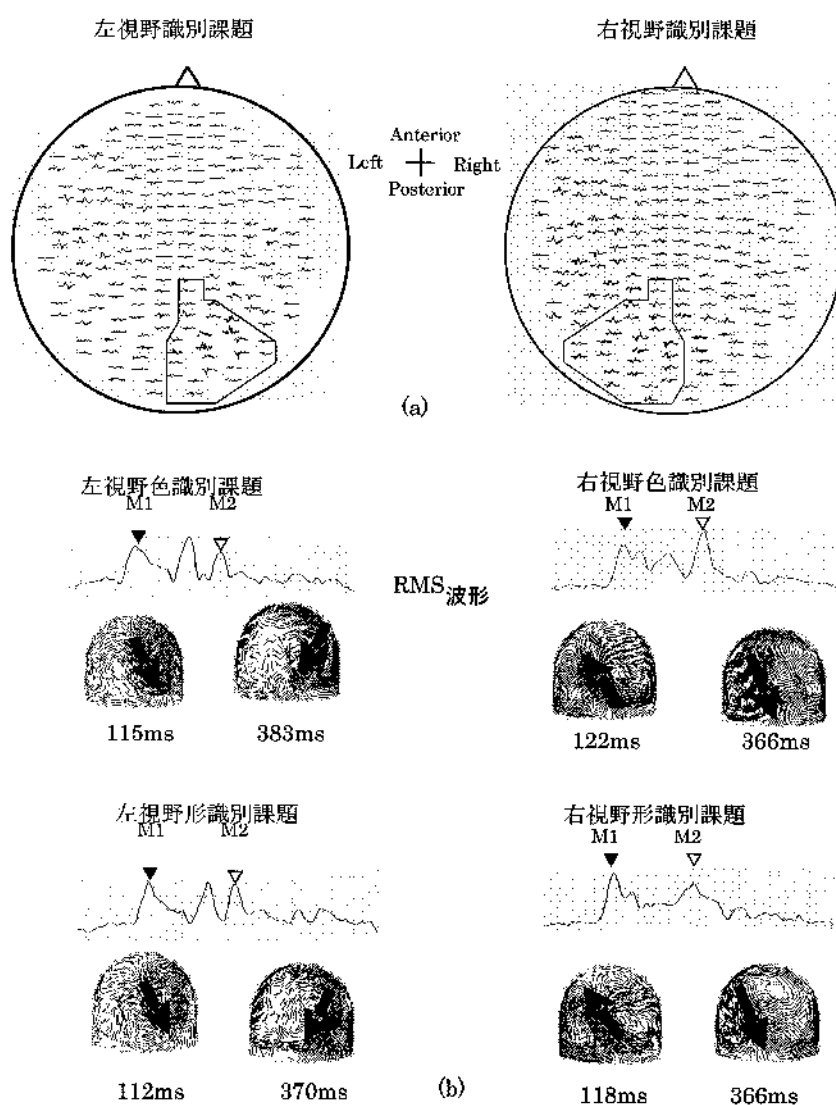


図3 RMS波形と等磁場曲線。(a)RMSに選択した24チャンネルを開んだ。(b)求められたRMS波形とM1(▼), M2(▽)潜時での等磁場曲線。真後ろからみた等磁場曲線を示し、実線が頭部から湧き出る磁界、点線が入り込む磁界を現す。矢印は神経活動の向きを示唆する。磁場分布がM1, M2潜時で左視野, 右視野刺激とも色, 形識別の間で類似していることが分かる。

うために高次脳からV1へ、視覚情報のTop-downプロセスが働いたためと主張した。今回のM2での視覚脳活動はその血流変化と同じ活動を現す可能性が考えられる。また、370ms付近のV1活動はボタン押し後に確認された。このことは、Top-downプロセスはボタン押しに至る情報処理経路とは別の認知経路として働くことを示唆する。今後は刺激を受動的に認知する課題と選択的注意課題を比較し、今回確認された活動が選択的注意課題の特有的活動であるかを検討する必要がある。

次に選択的注意について考える。色や形を対象にした選択的注意課題では、選択対象やその組み合わせの難易度によって反応時間が変化する¹³⁾。特に、周辺視に刺激が提示されると色より形の識別力が低下することが知られている。Bundesenら⁷⁾はPETを用いた色と形識別の課題を行い、反応時間に200msの差があると報告した。反応時間は識別が難しいほど差が大きく、

注意による反応時間の差も大きいとした。今回も形識別課題の反応時間が色識別課題より約20ms遅く、先行研究を支持する結果となった。しかしながら、左視野では課題間の反応時間に統計的有意差はなく、選択対象による注意の効果を考えるには不十分であった。その理由は、今回用いた刺激が赤色と青色、円と正方形という比較的識別しやすいものだったためと考えられる。今後注意の効果を検討するには刺激識別の難易度を上げる工夫が必要とされた。色や形の識別における難易度と注意効果との関係を明確にすれば、半側空間無視の机上検査に適している色や形を検討することが可能であると思われる。

また、今回は提示視野によるダイポール潜時、反応時間の差はみられなかった。視野間の機能差については既に多くのことが知られている。中心視野は周辺視野に比べ識別力が高く、下視野は上視野に比べコントラスト、色、動きに対する分解能が高い¹⁴⁾。左視野の

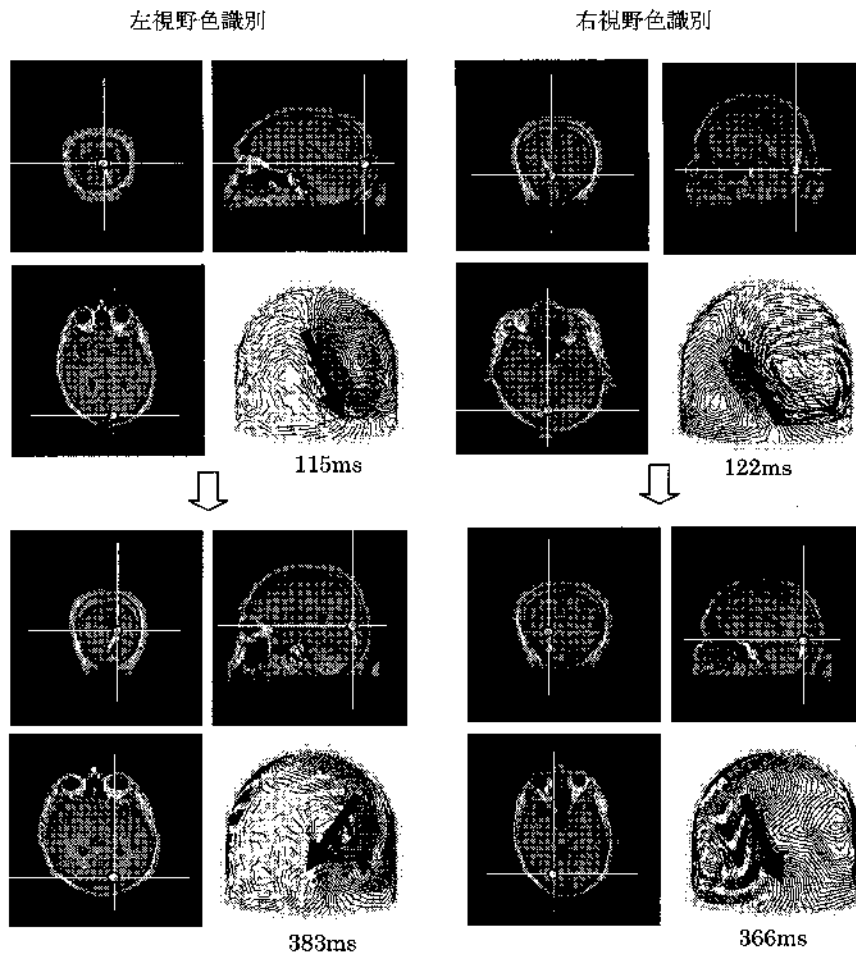


図4 図3bのM1とM2潜時で推定されたダイポール。左図は左視野における色識別課題、右図は右視野における色識別課題、上段はM1潜時、下段はM2潜時のダイポールを表す。ダイポールは共に第一次視覚野付近で推定された。

表 1 M1とM2のピーク潜時(Mean±SD)。誘発磁場加算平均波形から24チャンネルを選択し、RMS波形を求めた。4課題で共にみられたRMS波形のピーク潜時を示す。

	M1(ms)	M2(ms)
右視野 色識別	111. 8(±8. 9)	375. 6(±27. 3)
形識別	114. 2(±6. 6)	383. 2(±34. 1)
左視野 色識別	111. 4(±10. 5)	392. 2(±27. 4)
形識別	110. 0(±8. 2)	377. 8(±18. 4)

表 2 各課題の反応時間(Mean±SD, ms)。ボタン押し課題のTarget時に得られた反応時間を示す。

右視野		左視野	
色識別	形識別	色識別	形識別
342. 3(±60. 1)	370. 7(±58. 8)	344. 7(±58. 2)	363. 3(±56. 3)

*

Wilcoxon 順位和検定* : P<0.05

物体は右視野より気づきやすいとされる^{15),16)}。今後は識別難易度をコントロールした上で色や形の識別における左右視野機能差を再検討することが必要とされた。

文献

- 1) Zeki S, Shipp S. The functional Logic of cortical connections. *Nature* 1988; 335: 311-317.
- 2) 荻阪直行. 意識と注意. 金澤一郎, 編. 脳神経科学. 東京: 三輪書店, 2003: 771-785.
- 3) Martinez A, Anllo-vento L. Sereno MI, Frank LR, Buntun RB, Dubowitz DJ, Wong EC, Heinze HJ, Hillyard SA. Involvement of striate and extrastriate visual cortical areas in spatial attention. *Nat neurosci* 1999; 2: 364-369.
- 4) Noesselt T, Hillyard SA, Woldorff MG, Schoenfeld A, Hagner A, Jäncke L, Tempelmann C, Hinrichs H, Heinze HJ. Delayed striate cortical activation during spatial attention. *Neuron* 2002; 35(3): 575-587.
- 5) Corbetta M, Miezin FM, Dobmeyer S, Shulman GL, Peterson SE. Selective and divided attention during visual discriminations of shape, color, and speed: functional anatomy by positron emission tomography. *J Neurosci* 1991; 11: 2383-2402.
- 6) Wddrda R, Vallines I, Thomas JP, Rutschmann RM, Greenlee MW. Effects of nonspatial selective and divided visual attention on fMRI BOLD responses. *Exp Brain Res* 2006; Epub ahead of print
- 7) Bundesen C, Larsen A, kyllingbaek S, Paulson OB, Law I. Attentionla effects in the visual pathways: a whole-brain PET Study. *Exp Brain res* 2002; 147: 394-405.
- 8) 石川隆志, 山田孝. USN患者に対する机上検査とADL評価との関係. *作業療法*2001; 20: 126-134.
- 9) Kaneoke Y, Watanebe S, Kakigi R. Human visual processing as revealed by magnetoencephalography. *Int Rev Neurobiol* 2005; 68: 197-222.
- 10) Schmolesky MT, Wang Y, Hanes DP, ThompsonKG, Leutgeb S, Schall JD, Leventhall AG. Signal timing across the macaque visual system. *J neurophysiol* 1998; 79(6): 3272-3278.
- 11) Noachtar S, Hashimoto T, Luders H. Pattern visual evoked potentials recorded from human occipital cortex with chronic subdural electrodes. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* 1993; 88(6): 435-446.
- 12) Inui K, Kakigi R, Temporal analysis of the flow from V1 to the extrastriate cortex in humans. *J neurophysiol* 2006; 96(2): 775-784.
- 13) Amid HG, Jakob A, Heinze HJ. An event-related brain potential study of visual selective attention to conjunctions of color and shape. *Psychophysiology* 1999; 36(2): 264-279.
- 14) Levine MW, Mcanany JJ. The relative capabilities of the upper and lower visual hemifields. *Vision Res* 2005; 45: 2820-2830.
- 15) Anderson B. A mathematical model of line bisection behaviour in neglect. *Brain* 1996; 119: 841-850.
- 16) Mapstone M, Weintraub S, Nowinski C, Kaptanoglu G, Gitelman DR, Mesulam MM. Cerebral hemispheric specialization for spatial attention: spatial distribution of search-related eye fixations in the absence of neglect. *Neurophysiologia* 2003; 41: 1396-1409.

Cortical activation during visual discriminations of color and shape : an MEG study

Bum-suk LEE¹⁾, Yasujiro SAKAI²⁾, Yumi ARAKI¹⁾
Shiori KATSUYAMA²⁾, Shiho TANAKA³⁾, Yasufumi SHIIHARA²⁾
and Isshin NAGAMATSU⁴⁾

Abstract : We investigated the activity of the visual cortex during a selective attention task using magnetoencephalography (MEG). Subjects were shown 4 kinds of figures (red circle, red square, blue circle, and blue square), and performed a color-matching task and a shape-matching task. Measurement were performed in the right hemi-field and left hemi-field. Event-related magnetic fields (ERF) and reaction times were recorded. Major responses of ERF were obtained approximately 100 ms and 370 ms after stimulus onset. The equivalent current dipole of these major responses was estimated to lie in the striate cortex. The reaction time was approximately 350 ms after stimulus onset. These results indicate that the activity of the striate cortex also continues after the reaction has finished.

Key words : selective attention, MEG, color, shape, visual fields

¹⁾ Doctoral Course of Health Science, Graduate School of Medicine, Gunma University

²⁾ Department of Occupational Therapy, School of Health Sciences, Gunma University

³⁾ Master Course of Health Science, Graduate School of Medicine, Gunma University

⁴⁾ Department of Occupational Therapy, medical corporation shinoduka hospital