

## 3T 装置を用いた fMRI における 自覚症状の調査研究

中井 敏晴, 松尾香弥子

独立行政法人産業技術総合研究所ライフエレクトロニクス研究ラボ

### はじめに

近年, 超高磁場 (静磁場強度が 2T を超えるもの) の MRI 装置が我が国でも導入されはじめている. 超高磁場装置は, 特に脳機能計測や MRS において有用性が認められており<sup>1),2)</sup>, 今後の普及が予想されるが, 静磁場や傾斜磁場装置の磁場強度変化率 (dB/dt) の上昇に伴い, MR 装置の使用上の安全管理<sup>3)</sup>がより一層重要な課題となっている. 本調査研究では, 3T-MRI 装置を用いた脳機能イメージング (fMRI) に参加した成人健常ボランティアに対して実施した, fMRI 測定中の自覚症状に関する調査結果を報告する. ここで言う「自覚症状」とは, 被験者が 3T-MRI 装置内での fMRI 測定中, あるいは装置に出入りするときに特に認知した感覚症状を言う. MRI 装置で使用される物理的効果は何らかの自覚症状の原因となり得る. その物理量は, 1) 静磁場強度 (T), 2) 傾斜磁場の dB/dt, 3) ラジオ波による発熱 (W), 4) 騒音 (dB), の四つに分けられ, IEC 国際規約やそれに基づいた JIS 規格<sup>4)</sup>などで定量的に安全基準が定められている<sup>註</sup>. 臨床用に設計された MRI 装置は, ソフトウェア, ハード

ウェアとも, 仮に誤操作があったとしても, 安全面での問題が生じないように最大限に考慮されているはずである. しかし, 安全面では許容範囲内であったとしても, 被験者に不快感や苦痛を与えないように可能な限りの配慮をしなければならない.

これまでに報告されている代表的な自覚症状としては, 被験者が静磁場内に入るときに生じるめまい感<sup>5)</sup>や, 傾斜磁場の磁場勾配の切り替えにより発生する神経刺激症状<sup>6)</sup>などがあるが, その発生頻度についての報告は少ない. 自覚症状の発生頻度は, 決して MRI 装置の安全性そのものを示すものではないが, 以下の点に留意すべきである. (1)安全基準内で使用する限りは, 自覚症状の発生は, ほとんどの場合人体に有害な影響を意味するものではない. しかし, より一層の安全管理のために自覚症状は注意を払うべき対象である. (2)被験者の不安を取り除くとともに, 測定の快適性を向上させるためには, 自覚症状の発生に対して適切な対応をする必要がある. (3)不測の事態に対応するためには, 無害なレベルの自覚症状の発生状況は有用な情報の一つである. なお, 本報告は安全性そのものを評価することを目的としたものでは

註 1999 年に制定された日本工業規格 (JIS Z 4951) は 1995 年に制定された IEC 規格 (IEC 60601-2-33) に基づいているが, その後 IEC 規格は改訂されており, 日本工業規格も改訂が進められている.

キーワード functional magnetic resonance imaging (fMRI), static magnetic field, oscillating magnetic field, subjective symptoms

ない。安全に関する詳細な解説は Schellock の解説書や<sup>3)</sup> JMRI (Journal of Magnetic Resonance Imaging) の特集号 (volume 12, number 1, 2000) に詳しく記載されている。

## 調査研究の方法

### 1. 調査の実施形態

本調査研究は、調査期間中に我々が直接関与した脳機能研究に基づく測定のみを対象としている。すべての研究課題は装置を管理する研究組織の倫理委員会において承認を得たインフォームドコンセントの方法および内容に従って実施された。すべての被験者は健常成人であり、患者は含まれていない。調査はそれぞれの研究課題に基づく MR 撮影時に、被験者の協力を得て行った。したがって、自覚症状の発生率を調べるために完全に条件統制されたものではない。本調査研究は 2 期に分けて行った。第 1 期は、1997 年 6 月から 1999 年 7 月までの 2 年間に、工業技術院電子技術総合研究所 (現産業技術総合研究所) において、第 2 期調査は、2001 年 6 月から 2003 年 3 月の 1 年 9 か月間に、先端医療センター (神戸市) において行われた。いずれも、被験者からの書面および聞き取り調査により回答を得た。同一被験者からは、初回の測定時に 1 回のみ回答を得た。初回の調査時に特に自覚症状がなかった被験者でも、2 回目以降の測定において何らかの自覚症状があった場合には、その都度アンケート調査を実施した。

### 2. MR システム

使用された装置はいずれも GE 社の 3T-MRI 装置である。第 1 期調査で用いた装置は、3T Signa (ver 5.7) であり、ANMR 社製のリゾナントタイプの echo planar imaging 法 (EPI) 専用傾斜磁場システムを搭載している。装置の主

な規格は以下のとおりである。静磁場部：静磁場強度 3.0T, ボア径 80 cm, 撮影用有効ボア径 55 cm, 磁場均一性 0.1 ppm RMS / 22 cm DSV 以下かつ 0.1 ppm/hr, 傾斜磁場部：アクティブシールド型傾斜磁場コイル, 最大傾斜磁場強度 20 mT/m (通常撮影用) 25 mT/m (EPI 用), 傾斜磁場スルーレート：100 mT/m/ms 相当 (EPI 用), RF 装置部：RF 最大出力 8 kW, 分解能 16 bit, 受信部：最大受信バンド幅 256 kHz (通常撮影用) 又は、2 MHz (EPI 用), 送受信コイル：バードケージ型, 16 エlement, 直径 28 cm, 長さ 38 cm。

第 2 期調査で用いた装置は、Signa VH/i 3.0T (ver 8.3) である。主な規格は以下のとおりである。静磁場部：静磁場強度 3.0T, ボア径 94 cm, 撮影用有効ボア径 55 cm, 磁場均一性 0.5 ppm RMS / 40 cm DSV 以下かつ 0.05 ppm/hr, 傾斜磁場部：アクティブシールド型傾斜磁場コイル, 最大傾斜磁場強度 40 mT/m, 傾斜磁場スルーレート：150 mT/m/ms, RF 装置部：RF 最大出力 8 kW, 分解能 16 bit, 受信部：最大受信バンド幅 1 MHz, 送受信コイル：バードケージ型, 16 エlement, 直径 28 cm, 長さ 38 cm。

すべての撮影において、被験者に -29 dB の遮音効果をもつ耳栓 (PL101, Aearo Company, IN, USA) を装着させた。実験中、実験者は MRI 装置に標準装備されている通話装置を用いて被験者に撮影や課題実行に関する指示を与えた。

### 3. 撮影プロトコル

本調査研究対象となった fMRI 測定で用いられた代表的撮影プロトコルは以下のとおりである。T<sub>1</sub>・T<sub>2</sub>強調画像などの形態画像の撮影プロトコルは全調査期間を通してほぼ共通しているが、fMRI については撮影回数や 1 回の撮影時間は実験ごとに異なっている。

2003 年 5 月 19 日受理 2003 年 6 月 16 日改訂  
別刷請求先 〒563-8577 大阪府池田市緑丘 1-8-31  
中井敏晴

産産業技術総合研究所ライフエレクトロニクス研究ラボ

- (1) Localizer : Fast spoiled gradient recalled echo (FSPGR) 法 TR 51 ms, TE 13 ms, FA 30 degree, FOV 22×22 cm, スライス厚 3.5 mm, スライス間隔 1.5 mm, 画素数 256×128, 加算回数 1 回, スライス数 5 枚.
- (2) T<sub>1</sub> 強調画像 : Spin echo 法, TR 600 ms, TE 40 ms, FOV 22×22 cm, スライス厚 4 mm, interleaved, 画素数 256×192, 加算回数 1, スライス数 30.
- (3) T<sub>2</sub> 強調画像 : Fast spin echo 法, TR 5000 ms, TE 85 ms, ETL 8, FOV 22×22 cm, スライス厚 4 mm, interleaved, 画素数 256×192, 加算回数 1 回, スライス数 30 枚.
- (4) 3D 画像 : 3D-IR-FSPGR 法, TR 74 ms, TE 25 ms, TI 400 ms, FA 15 degree, FOV 22×22×12 cm, 画素数 256×192×60, 加算回数

- 1 回.
- (5) 脳機能画像 (例) : EPI 法, TR 5000 ms, TE 30 ms, FA 90 degree, FOV 22×22 cm, スライス厚 3 mm, スライス間隔 1 mm, 画素数 64×64, スライス数 30 枚, データ収集回数 54 回.

4. 調査内容

被験者アンケートは, 3T-MRI 装置によるすべての測定項目を終了し, 被験者が撮影室から出た後に, アンケート記入および聞き取り調査の形式で行った. アンケート用紙 (2 種類) を Fig. 1 に示す. 左側の用紙の質問 1 は, 測定時間の長さ, 主観的な印象の関係を検討するために設けられた. この項目に対する被験者の回答と, 形態画像の収集も含めた総撮影回数, fMRI 撮影回数 (セッション数), 総撮影時間,

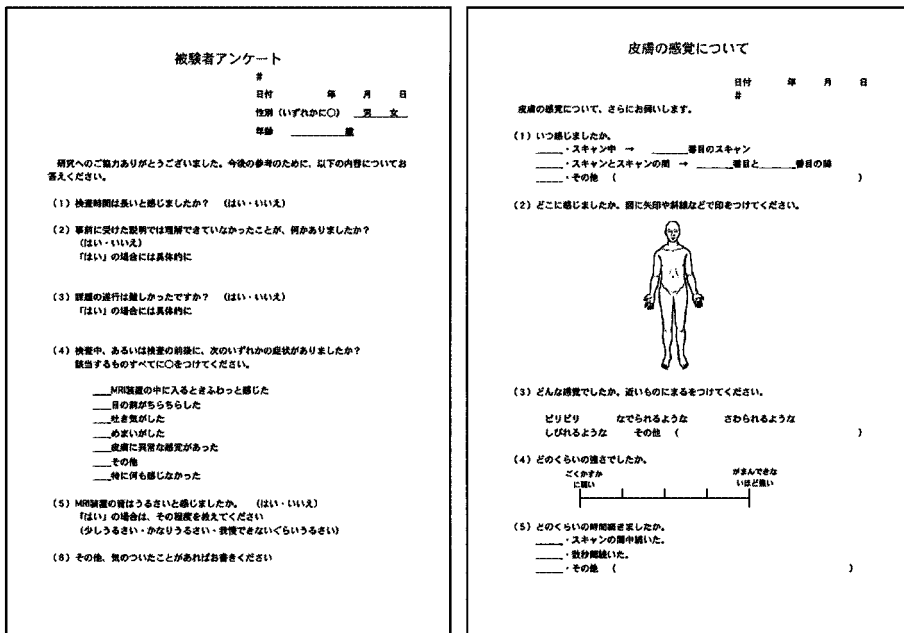


Fig. 1. Questionnaires employed. Subjects filled out a questionnaire of the left side when they had finished all scan and come out from the magnet room. If they reported any symptoms of sensory stimulation in question 4, then they filled out a questionnaire of the right side to provide details. These forms were used in the second period of this investigation from October 2001 until March 2003.

fMRI 総撮影時間, fMRI 撮影平均時間との関係について調べた. ここで, 統計の対象とした撮影回数や撮影時間は, 形態画像と fMRI のデータ収集時間の総和とし, 位置合わせ (localizer) やシム調整スキャンなどは含まれていない. 質問 2 では, 事前の説明の方法を評価, 改善するために, 課題に関する事前の説明で理解できていなかったことがあったかどうかを確認した. 質問 3 では, 主観的な課題の難易度について調査し, それぞれの課題内容の妥当性の参考とした. 質問 4 では, 測定中の自覚症状について尋ねた. 何らかの自覚症状があった場合は, 5 項目の中から該当するものを選択するか, いずれにも該当しない場合には「その他」として具体的に記入した. インフォームドコンセント時に, 被験者には可能性のある自覚症状についてあらかじめ説明しているが, 選択肢はその説明内容に対応している. 第 1 期調査では, いわゆるしびれ感や皮膚の接触感が感じられた場合は, その詳細を口頭で聴取したが, 第 2 期調査では, 体の表面を示す図を準備し, 被験者に刺激感覚のあった部分を記入させた (Fig. 1 の右側の用紙). 質問 5 では, MRI 装置の騒音の程度について尋ねたが, うるさいと感じた場合には, その程度を 3 段階で主観的に回答させた. また, 質問 6 では, 全体を通して気がついたことがあれば, 任意に記入させた. なお, 第 1 期調査では質問 1~3, 5 の回答を「はい, いいえ, どちらでもない」の 3 択にしたが, 第 2 期調査では「はい, いいえ」の 2 択にした.

## 5. 統計処理

被験者アンケートの各項目を集計した上で, 撮像時間の長さや被験者の行動指標と自覚症状の間の関連性について検定を行った. 自覚症状は, MR 撮影に伴う物理的影響により生じるが, その認知には心理的な要素も関係する. 質問 1~3, 5 はそのような心理要因を反映する被験者の行動指標に相当する.

(1) 撮影回数およびそれぞれの撮影時間と, 被

験者の測定時間の長さについての主観的印象, および自覚症状との関係についての検定を行った. 総撮影回数および fMRI 撮影回数についてはその回数により, 総撮影時間および fMRI 総撮影時間については 500 秒ごと, fMRI 撮影平均時間については 100 秒ごとの段階に分け, 第 1 期, 第 2 期およびその合計において, 各段階における被験者数を算出した. この際, 「検査時間は長いと感じましたか?」という問いに「はい」と答えた被験者とそれ以外の被験者とで区別した. また, 「はい」と答えた被験者とそれ以外との間で, 総撮影回数, fMRI 撮影回数, 総撮影時間, fMRI 総撮影時間, fMRI 撮影平均時間に差があるかどうかを, 被験者の回答 (「はい」かそれ以外かの 2 水準) を独立変数として t 検定によって調べた. また fMRI 撮影の平均時間が長いか短いかにより, 「はい」と答えた被験者とそうではない被験者の人数比が異なるかどうか,  $2 \times 2$  のカイ二乗検定 ( $df=1$ ) によって評価した.

(2) 自覚症状の有無と, 行動指標との関係について検定を行った. 何らかの自覚症状があったと回答した被験者と, そうではない被験者の 2 群に分け, 質問 1~3 および 5 (測定時間の長さの印象, 事前説明は理解できたか, 課題遂行の困難さの印象, MRI 装置の騒音) で「はい」と回答した被験者と, そうではない被験者の人数比が異なるかどうか,  $2 \times 2$  のカイ二乗検定 ( $df=1$ ) によって検定した. また, この 2 群の間に, 総撮影時間, fMRI 総撮影時間, fMRI 撮影平均時間に差があるかどうかを t 検定によって検定した.

## 結 果

第 1 期調査で総数 101 サンプルを, 第 2 期調査で 119 サンプルを得た. 同一被験者による 2 回目以降の回答を除外した有効なサンプル数は第 1 期調査で 90, 第二期調査で 105 であった. Table に統計に全体の集計結果を示

Table. Summary of the Volunteers' Answers (percentages are in parentheses).

調査項目		第一期調査	第二期調査
被検者数		90	105
性別	男	62	76
	女	15	29
	不明	13	0
年齢	平均 (歳)	27.2	25.9
	範囲 (歳)	18-49	19-46
	不明 (人)	16	0
質問 1 : 検査時間が長いと感じたか (%)	はい	23 (26)	33 (31)
	いいえ	40 (44)	72 (69)
	いずれでもない	27 (30)	-
質問 2 : 事前説明で理解できなかったことがあったか (%)	はい	9 (10)	3 (3)
	いいえ	78 (87)	102 (97)
	いずれでもない	3 (3)	-
質問 3 : 課題は難しかったか (%)	はい	15 (17)	25 (24)
	いいえ	53 (59)	80 (76)
	いずれでもない	21 (23)	-
質問 4 : 検査中に該当する自覚症状があったか (%)	はい*	33 (37)	33 (31)
	浮遊感	2 (2)	11 (10)
	ちらつき	2 (2)	3 (3)
	悪心	0 (0)	0 (0)
	眩暈	6 (7)	6 (6)
	皮膚の刺激感	10 (11)	6 (6)
	その他	16 (18)	19 (18)
いいえ	57 (63)	72 (69)	
質問 5 : MR装置の音がうるさいと感じたか (%)	はい	39 (43)	56 (53)
	少し	24 (26)	44 (42)
	かなり	13 (14)	11 (10)
	我慢できない	1 (1)	0 (0)
	いいえ	36 (40)	49 (47)
いずれでもない	14 (16)	-	

Notes. \*Multiple answers. Question 1 : Did you feel the whole experiment time long? Question 2 : Did you find anything you did not understand or you were not aware of in the instruction before the scans? Question 3 : Were the tasks you performed difficult? Question 4 : Did you have any symptoms listed below? If yes, when did you have them (before, during and/or after scan sessions)? Please check all of the symptoms you had. Question 5 : Were you annoyed by the scanning sound of MRI?

す。以下、質問項目ごとに結果を要約する。  
(質問 1) 測定時間の長さ: 「検査時間は長いと感じましたか?」

それぞれの撮影に要する時間と測定全体に必要な時間をインフォームドコンセントのときと、測定直前に行う課題説明のときに説明して

いるが、第 1 期・第 2 期ともに、3 割程度の被験者が測定時間全体を長いと回答した。この質問項目に対して「はい」と回答した場合とそれ以外(「いいえ」あるいは「いずれでもない」)の場合とで、撮影回数や撮影時間に差があるかどうかを t 検定により評価した。「はい」と答

えた被験者において、総撮影時間、fMRI 総撮影時間、fMRI 撮影平均時間の三つに有意差が認められ、最も有意差が大きかったのは fMRI

撮影平均時間であった (Fig. 2). しかし、総撮影回数および fMRI 撮影回数には有意差はなかった. 総撮影時間では、第 1 期 ( $df=88$ ) で

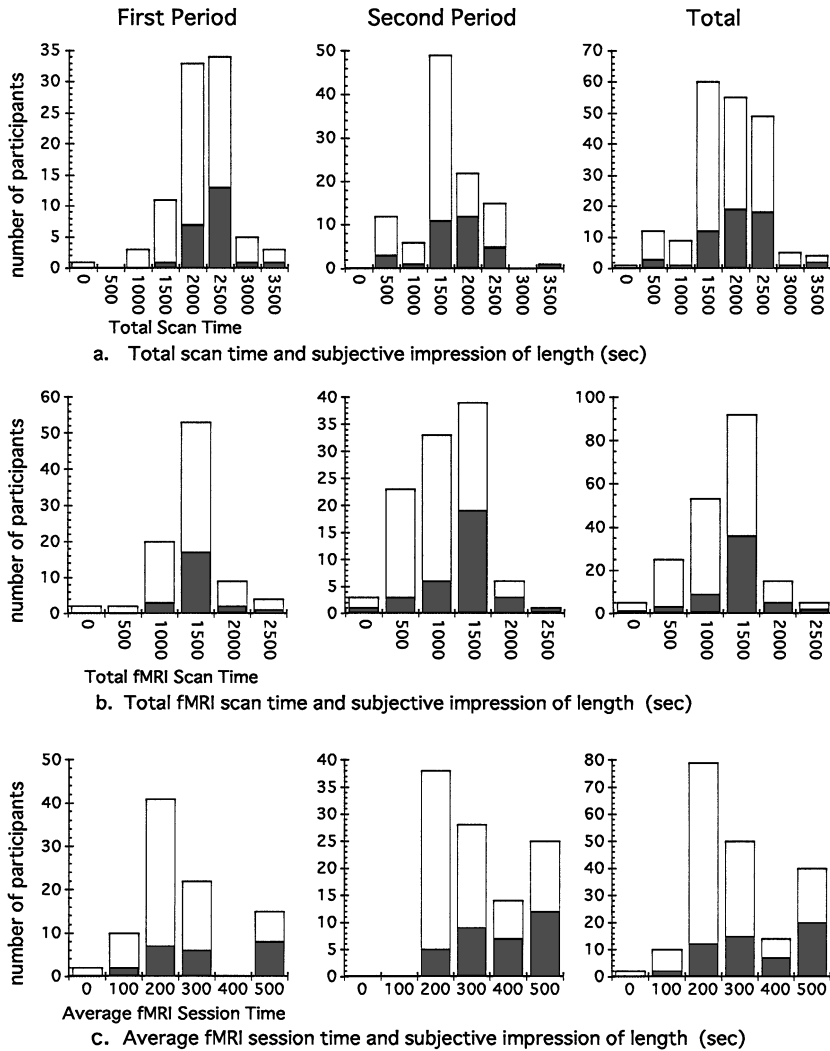


Fig. 2. Analysis of subjective impressions of the length of the experiments. Figures a, b and c show the effect of the total MRI acquisition time, total fMRI acquisition time only and the average of fMRI acquisition time per session, on the impressions of the study length, respectively. These three factors suggested that the subjective impressions correlated with the actual data acquisition times.

は  $p < 0.1$  (有意差なし) であるが, 第 2 期 ( $df = 103$ ) では  $p < 0.05$ , 両者合わせた全期 ( $df = 195$ ) では  $p < 0.05$  の危険率で, 「はい」と答えた場合に総撮影時間が長かった. また fMRI 総撮影時間では, 第 1 期および全期では  $p < 0.1$  (有意差なし) であるが, 第 2 期では  $p < 0.05$ , 最後に fMRI 撮影平均時間においては, 第 1 期では  $p < 0.01$ , 第 2 期では  $p < 0.005$ , 全期では  $p < 0.0001$  の危険率で「はい」と答えた場合に実際の時間が長かった. 以上の結果から, 測定時間の長さに対する被験者の主観的な印象は, 撮影回数よりも, 実際に撮影に要した時間により形成されており, 特に fMRI 撮影の平均時間が影響していることが分かる.

そこで, fMRI 撮影の平均時間が 360 秒 (6 分) 以上かそれ未満か, および, 400 秒 (6 分 40 秒) 以上かそれ未満かで被験者を 2 群に分け, この質問項目に「はい」と答えた被験者とそうではない被験者の人数比について, それぞれ  $2 \times 2$  のカイ二乗検定 ( $df = 1$ ) によって検定した. 第 1 期では 360 秒以上か未満かの分類では  $\chi^2 = 3.048$ ,  $p < 0.1$  (有意差なし), 400 秒以上か未満かの分類では  $\chi^2 = 5.653$ ,  $p < 0.05$ , 第 2 期ではそれぞれ  $\chi^2 = 7.735$  および  $7.388$  で, ともに  $p < 0.01$ , 全期では 360 秒以上か未満かの分類では  $\chi^2 = 12.535$ ,  $p < 0.0004$ , 400 秒以上か未満かの分類では  $\chi^2 = 15.124$ ,  $p < 0.0001$  であった. すなわち, 1 回の fMRI 撮影の時間の平均が 6 分を超えると, 測定時間を長いと感じる被験者が有意に増加した.

(質問 2) 事前説明の妥当性: 「事前に受けた説明では理解できていなかったことが, 何かありましたか?」

第 1 期調査では 10%, 第 2 期調査では 3% の被験者が「はい」と回答した. 第 1 期調査の「いずれでもない」をも含め, 理解できなかったと回答した場合のコメント内容を分類すると, 1) 課題の実行が部分的に分からなかった (第 1 期で 5 名, 第 2 期で 2 名), 2) 課題の実行が部分的にうまくいかなかった (それぞれ 2 名,

0 名), 3) 測定の進行全体が分かりにくかった (3 名, 1 名), の三つに大別された.

(質問 3) 課題遂行の難易度: 「課題の遂行は難しかったですか?」

Table に示すように, 第 1 期調査では 17%, 第 2 期調査では 24% の被験者が「はい」と回答した. 8 名以上の被験者アンケートのサンプルが含まれている研究課題について, 被験者の回答と課題内容との関係を見ると, 視覚運動協応課題 0/8 名 (8 名中で 0 名), 視覚認知課題 0/10 名, 記憶課題 4/13 名 (以上第 1 期), 感覚刺激課題 0/14 名, 運動ペース保持課題 2/12 名, 数字判断課題 1/14 名, 文字判断課題 1 で 1/9 名, 文字判断課題 2 で 5/14 名, ストループ課題 5/10 名 (以上第 2 期) が, 「はい」(難しかった) と回答している. 記憶や判断など高次認知機能を要する課題において, 被験者が難しいという印象をもつ場合があることは当然であろうが, fMRI を臨床に応用する場合には, 健常被験者であらかじめ課題の難易度を検討しておく必要があろう. なお, この質問 3 の回答と, 質問 2 (事前説明の理解) の回答の関連性を  $2 \times 2$  のカイ二乗検定 ( $df = 1$ ) で調べたところ有意差はなく, 関連性は認められなかった.

(質問 4) 自覚症状の有無

第 1 期調査・第 2 期調査ともに約 3 割の被験者が, スキャン中やその前後に何らかの自覚症状を感じたと報告している (Table). 回答項目の中では, 第 1 期では皮膚の感覚刺激 (11%), 第 2 期では装置に入るときの浮遊感 (10%) が最も多かった. 眩暈 (めまい) の発生率はいずれの時期でも 6% 程度であった. 浮遊感は第一期では 2% であるのに対し, 第二期では 10% に増加しており, カイ二乗検定 (フィッシャーの直接法,  $df = 1$ ) の結果, 有意な増加であった ( $p < 0.05$ ). 一方, 皮膚の感覚刺激は第 1 期調査で 11% の回答があったのに対し, 第 2 期調査では 6% の回答となっているが, カイ二乗検定の結果, 有意差はなかつ

た。視覚のちらつきも2~3%の被験者に認められたが、悪心や異味感の訴えは全体を通して全くなかった。なお「その他」には、眠くなる、のどあるいは目がかわく、少し熱を感じた、寒かった、耳栓は閉塞感がある、などが含まれたが、MRIで生じる四つの物理効果との関連が強く疑われる回答は見当たらなかった。本調査はすべての測定終了後に被験者の記憶に基づく聞き取りによって行っており、症状発生の再現性を確認する手続きを取っていない。したがって、静磁場や傾斜磁場などに起因しない、他の要因により生じたもの（例えば、寝台の上での拘束、精神的な緊張、その他）が含まれている可能性があり、集計された数字は起こり得た最大値と解釈すべきであろう。

皮膚の刺激感について、もう少し詳しく述べる。全例で感覚刺激症状の程度は軽微であり、第1期調査の1例を除いて刺激の持続時間は一過性で、多くは数秒から1分以内であったと回答している。感覚刺激発生部位としては顔面、頭部、上肢などが報告された。疼痛、不快感、感覚神経以外の刺激症状を訴えた例は全くなかった。パルスシーケンスとの関係では、第1期調査では11例中少なくとも4例が、第2期調査では6例中3例が、形態画像撮影中（SPGR法によるlocalizerや3D撮影）、あるいはシム調整時に発生したと回答しており、EPIによるfMRIの撮影中に発生したと明確に回答した者は第2期の1例のみである。また、スキャンの合間や、スキャンに入る前、と回答した者もあり、MR撮影と関連が認められないものも含まれていた。

第1期調査では、五つの主な自覚症状のいずれかに回答した者のうち、複数の自覚症状を回答した被験者は16名中4名で、組合わせに傾向は認められなかったが、第2期調査では17名中7名であり、浮遊感と皮膚の刺激感の組合わせを含む者が5名であった。

これらの自覚症状と行動指標（質問1~3, 5）の関連性を2×2のカイ二乗検定( $df=1$ )によ

って検定した。測定時間が長かったと回答した被験者の方が、長かったと回答しなかった被験者よりも、何らかの自覚症状があったとする割合が高かった（第2期 $\chi^2=0.0304$ ,  $p<0.05$ , 両時期合計 $\chi^2=0.0369$ ,  $p<0.05$ , 第1期では有意差なし）。他の質問項目ではいずれも有意差はなかった。測定時間が長かったと回答した56名（全期）のうち、26名が何らかの自覚症状を回答している。なお、長かったと回答しなかった139名の中では41名であった。そこで、何らかの自覚症状を回答したか否かで被験者を分け（全期でそれぞれ67名と128名）、総撮影時間、fMRI総撮影時間、fMRI撮影の平均時間との関係についてt検定によって調べたところ、いずれにおいても有意差はなかった。すなわち、実際の測定時間の長さではなく、長かったという主観的な印象と自覚症状の有無とに関係があることが分かった。

（質問5）MRI装置の騒音：「MRI装置の音はうるさいと感じましたか？」

Tableに示すように、4割から5割程度の被験者がMRI装置の撮影音をうるさいと回答した。しかし「我慢できないぐらいうるさい」と回答した被験者は、第1期の1名のみである。この質問5と質問1（測定時間の長さ）の関連性を2×2のカイ二乗検定( $df=1$ )で検定したところ有意差はなく、関連性は認められなかった。

（質問6）被験者のコメント

第1期・第2期ともに約3割の被験者からコメント（自由記述）が得られた。内容は、測定中に眠くなる、実験者の声が聞き取りにくい、目が乾燥する（目が疲れる）、実験に対する助言などが中心であった。

## 考 察

静磁場そのものによる人体に対する長期的影響や、磁場への暴露が何らかの蓄積効果を生じるとの確実な報告はない。静磁場による一過性



の影響としては、感覚刺激の発生が報告されているが、4T の静磁場で 1.5T よりも発生率が有意な自覚症状は「めまい、金属味感、嘔気」、有意ではないものは「頭痛、耳鳴り、しゃっくり、嘔吐、しびれ感」とされている<sup>5),7)</sup>。本調査結果では、MR 装置に入るときの浮遊感、眩暈、目の前のちらつきなどの一過性の症状が見られたが、悪心嘔吐、金属味感を生じたとの回答はなかった。本調査研究の手続きでは、報告例のすべてが静磁場の影響によるものであったとは断定できない。より厳密には、統制条件として、静磁場が存在しないが実際の MRI 装置と大きさ等をすべて同じ仕様にした模擬装置を準備し、実際の MRI 撮影時と同様の状況を再現して比較する必要がある。浮遊感の発生は、第二期の方が第一期よりも多かったが、一つの可能性として、MR 装置の磁気シールドの性能の向上が考えられる。つまり、MR 装置のセルフシールドの性能が良いほど、MR 装置の中に寝台が送り込まれるときに急激な静磁場の変化を体験することになるので、浮遊感が発生しやすくなる可能性がある。また、被験者を載せる寝台を送り込む速度も関係する要因と考えられる。

動磁場の身体への影響については、動磁場の強さ（単位時間当たりの磁場強度の変化；dB/dt）が一定の基準を超えて強くなると、誘導電流による神経刺激症状が生じ<sup>6),8)~10)</sup>、末梢感覚神経系が最も刺激を受けやすいとされている。軽度の場合は、接触感や皮膚の不快感、強くなるとピリピリとした刺激となる<sup>6)</sup>。これらの感覚は、骨が体表面に隆起している部分（鼻、肋骨、骨盤の外側）に発生する傾向があり、その理由は、骨と周囲の組織の電導性の違いによるものと考えられている。動磁場による神経刺激のモデル研究や健常ボランティアを対象とした研究事例<sup>6),8)~10)</sup>では、主として神経刺激発生の閾値を報告している。神経刺激症状の発生を防ぐための傾斜磁場の dB/dt の制限値<sup>4)</sup>の範囲内で使用していても、軽度の神経刺

激症状が感じられることがあるが、健常人に対しては無害と考えられている。強度が 25 mT/m で 1 kHz の周波数で動作するリゾナント型の傾斜磁場装置を装備した 1.5T の MRI 装置を用いた先行研究では、EPI による通常の撮影時で感覚刺激の発生率は 5%であった<sup>8)</sup>。本調査研究では、第一期において 11%、第二期において 6%の被験者から「皮膚の刺激感」に関連する回答があったが、EPI 法による fMRI の撮影中よりも、むしろ SPGR 法等による形態画像撮影中に発生しているとする回答が多かった。静磁場の効果の場合と同様、上記の発生率は動磁場に起因しない場合を含む可能性があり、起こり得る最大値と解釈すべきであろう。

ラジオ波の影響として起こり得るものは、加温効果とそれに起因する 2 次的な現象であるが、現在の基準値内で運用するかがりラジオ波による加温の影響は無視できるか、許容範囲内と考えられている<sup>11)</sup>。本調査で対象とした自覚症状の中には、加温効果と関連性が考えられる回答はなかった。

MRI におけるもう一つの物理的要因は、撮影中の「騒音」（傾斜磁場の駆動音）である。この騒音は短時間の間に静磁場環境下におかれた傾斜磁場発生用コイルを流れる電流の方向が高速で反転されるため、コイルにローレンツ力によるねじれが生じるものである<sup>12)</sup>。MRI 装置の騒音は 140 dB を超えてはならないが<sup>4)</sup>、EPI 法による撮影では 100 dBA を超えることがあり、耳栓などの騒音対策は不可欠である。本調査結果では、4~5 割の被験者が多少ともうるさいと感じていることが示された。これまでに、パルスシーケンスの改良、打消し音の利用、傾斜磁場コイルそのものの改良など、静音化の方法が幾つか提案されているが<sup>13)</sup>、MR 装置のより一層の静音化が必要と考えられる。

fMRI に限らず、測定時間を長いと感じるかどうかは被験者の負担の程度を考える上で重要である。測定時間が長いと回答した被験者において、実際に総撮影時間、fMRI 総撮影時間、

特に fMRI 撮影平均時間が長かったが、一回の fMRI 撮影が 6 分以上になると、実験全体を長いと感じる被験者が有意に増加した。しかし一方で、Fig. 2 で明らかなように、たとえ fMRI 撮影平均が 400 秒 (6 分 40 秒) 以上であっても、約半数の被験者は特に長いとは感じていないことも事実である。測定時間の長さをはじめ、被験者の印象形成には、実験者の対応、被験者のモチベーションや背景、課題内容など、幾つかの要因が関与すると考えられるが、臨床用途では患者の身体的状況や検査の必要性を十分考慮して検査計画を立てる必要がある。何らかの自覚症状を回答した被験者は、測定時間が長いという印象をもつ傾向があったが、実際に fMRI 撮影平均時間等が長かったのではなく、長かったという印象と自覚症状の有無とに関係があった。それらの被験者では fMRI 実験状況にセンシティブになっていた可能性も考えられ、被験者の印象形成の観点から興味深い結果であった。「自覚症状」の認知に対しては、被験者への事前説明による暗示効果の可能性が排除できないことにも注意すべきであろう。被験者には、起こり得る事象を正確に伝える必要があるが、かと言ってあまり強調しすぎると、不要な不安や暗示効果を引き起こす可能性もあり、必要かつ十分な事前説明の方法を工夫する必要がある。

## 結 語

3T MRI 装置を用いた fMRI 計測において行った被験者調査から以下の内容が判明した。静磁場との関連では浮遊感、眩暈、視覚のちらつきの発生率は 10% 以下で、悪心や異味感の報告はなかった。動磁場と関連する皮膚感覚刺激様の症状は 6~11% であり、軽度かつ一過性であった。ただし、本調査研究の性格上、症状は被験者の主観的な報告に基づいており、その再現性を確認する手順は取っていないので、いずれも発生率の最大値の目安と考えられる。装

置の騒音は、約半数の被験者がうるさいと回答しており、MRI 装置のより一層の静音化が望まれる。1 回の fMRI セッションの平均時間が 6 分を超えると、測定全体を長いと感じる傾向があり、課題の構成方法に工夫が必要と考えられる。

## 謝 辞

本研究の一部は磁気健康科学研究振興財団の研究助成を受けて実施いたしました。

## 文 献

- 1) 中井敏晴：超高磁場装置による fMRI. 日磁医誌 2002 ; 22 : 47-55
- 2) Nakai T, Matsuo K, Kato C, Okada T, Moriya T, Isoda H, Takehara Y, Sakahara H : BOLD contrast on a 3T magnet : detectability of the motor areas. J Comput Assist Tomogr 2001 ; 25 : 436-445
- 3) Shellock FG, Kanal E. Magnetic Resonance : Bioeffects, Safety, and Patient Management. 1st ed. New York, USA : Raven Press, 1994
- 4) 日本工業標準調査会. 磁気共鳴画像診断装置—安全, JIS Z 4951. 日本規格協会, 1999
- 5) Schenck JF : Safety of strong, static magnetic fields. J Magn Reson Imaging 2000 ; 12 : 2-19
- 6) Schaefer DJ, Bourland JD, Nyenhuis JA : Review of patient safety in time-varying gradient fields. J Magn Reson Imaging 2000 ; 12 : 20-29
- 7) Schenck JF, Dumoulin CL, Redington RW, Kressel HY, Elliott RT, McDougall IL : Human exposure to 4.0-tesla magnetic-fields in a whole-body scanner. Med Phys 1992 ; 19 : 1089-1098
- 8) Ehrhardt JC, Lin C, Magnotta VA, Fisher DJ, Yuh WTC : Peripheral nerve stimulation in a whole-body echo-planar imaging system. J Magn Reson Imaging 1997 ; 7 : 405-409
- 9) Ham CLG, Engels JML, van de Wiel GT, Machielsen A : Peripheral nerve stimulation during MRI : effects of high gradient amplitudes and switching rates. J Magn Reson Imaging 1997 ; 7 : 933-937

- 10) Den Boer JA, Bourland JD, Nyenhuis JA, Ham CLG, Engels JML, Hebrank FX, Frese G, Schaefer DJ : Comparison of the threshold for peripheral nerve stimulation during gradient switching in whole body MR systems. *J Magn Reson Imaging* 2002 ; 15 : 520-525
- 11) Shellock FG : Radiofrequency energy-induced heating during MR procedures : a review. *J Magn Reson Imaging* 2002 ; 12 : 30-36
- 12) Mansfield P, Glover PM, Beaumont J : Sound generation in gradient coil structures for MRI. *Magn Reson Med* 1998 ; 39 : 539-550
- 13) McJury M, Shellock FG : Auditory noise associated with MR procedures : a review. *J Magn Reson Imaging* 2002 ; 12 : 37-45

## **A Study of Subjective Symptoms during Functional Magnetic Resonance Imaging at 3T**

Toshiharu NAKAI, Kayako MATSUO

*Medical Vision Lab, Life-Electronics Research Center  
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
1-8-31 Midorigaoka, Ikeda, Osaka 563-8577*

The incidence of subjective symptoms during fMRI studies done using a static magnetic field at 3T with a high power gradient coil system was examined. Ninety samples were obtained in the first investigation period, and one hundred and five in the second period. Symptoms related to the static magnetic field that were observed were : dizziness, vertigo, and the seeing of flashing lights. Dizziness was present in 2% of volunteers in the first investigation period and 10% in the second. Vertigo was present in 6% of volunteers in both periods. The seeing of flashing lights was present in 2% of volunteers in the first period and 3% in the second. Nausea, headache and tinnitus were not reported. Peripheral sensory stimulation was transient for a few seconds or at most under one minute and remained mild. It was present in 11% of volunteers in the first period and 6% in the second. No reports of pain, uncomfortable sensations, or nerve stimulation other than sensory system stimulation were obtained. The most frequent regions of sensory nerve stimulation were the face and upper extremities. Overall, sensory stimulation was more frequent using a fast spoiled gradient recalled echo (FSPGR) sequence than an EPI sequence. More than 40% of volunteers commented on the loudness of the acoustic noise. No significant relationship between the occurrence of subjective symptoms and the total scan time of the study, difficulty of task performance, or the scanner's noise was observed ( $p > 0.05$ ). The volunteers' impression of the length of the study was significantly longer than the actual time if the scan time of the fMRI session was over 6 min. These results indicating the frequency of subjective symptoms will help in improving the comfort of the volunteers and in monitoring safety during fMRI studies using ultra high field MR scanners.