

# 身体動揺を指標にした磁界ばく露の影響評価

山口さち子\*1, ソンスヨン\*2, 岩切一幸\*3, 関野正樹\*4, 中井敏晴\*5

磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging : MRI) 検査は地磁気の数万倍以上の静磁界を利用し、臨床では 0.5-3 T, 研究用途では 7 T 以上の高強度の静磁界が利用されている。現在までの研究で静磁界中の体動でめまい、頭痛等の一時的体調変化が発生することが知られているが、しかしながら、作業前後の身体動揺の程度や経時的変化については報告がない。そこで本研究では実際の MRI 検査業務と同等程度の高磁界環境での作業 (約 15 分間の静的静磁界ばく露と、約 1 分の動的静磁界ばく露として頭部回転動作 2 回) において、ばく露前後の身体動揺の変化を重心動揺計にて計測し検討した。実験参加者は実験前に重心動揺の計測を行い、前室および MRI 室で作業を行った。ばく露環境は頭部で最大  $982 \pm 263$  mT であった。ばく露順序は前室 (コントロール条件) の後に MRI 室 (MRI 条件), MRI 条件の後にコントロール条件と実験参加者によりランダム化した。全てのタスク終了 5 分後に再度重心動揺の計測を行った。重心動揺は開眼および閉眼にて測定した。測定データからは総軌跡長、左右・前後軌跡長、単位軌跡長、左右・前後単位軌跡長、矩形・外周面積、左右・前後最大振幅を算出した。解析では開眼・閉眼条件ごとに、ばく露の有無と実験参加者の年齢 (25 歳未満群・25 歳以上群) を二元配置分散分析にて解析した。その結果、磁界ばく露による主効果は開眼条件の外周面積を除き認められなかった。年齢による主効果は開眼と閉眼条件ともにほぼ全ての条件 (開眼条件の前後軌跡長、前後単位軌跡長を除く) にて認められた ( $p < 0.05$ )。磁界ばく露と年齢の交互作用は認められなかった。これらのことから、約 1 T の環境で 15 分間の静磁界ばく露をとともう作業においては、重心動揺の変化を生じさせるものではなかった。

**キーワード:** 静磁界, 身体動揺, モーションキャプチャ

## 1. 背景

磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging : MRI) 検査は国内で 6000 台以上稼働する臨床で重要なイメージングモダリティである<sup>1)</sup>。MRI 装置は地磁気の数万倍以上の静磁界を利用し、臨床では 0.5-3 T, 研究用途では 7 T 以上の高強度の静磁界が利用されている<sup>2)</sup>。超伝導 MRI 装置から発生する静磁界は装置末端のアクティブシールドにより装置近傍で急激に減衰し、高強度かつ高勾配の特性を有する分布を示す<sup>2)</sup>。このような作業環境では、体動による誘導電界によって、めまい・頭痛等の一時的体調変化が生じることが報告されており<sup>3), 4)</sup>、高強度の磁界単独 (頭部回転動作など) あるいは中-高強度で高勾配の磁界 (直線運動など) によって影響が生じると報告がある<sup>3)</sup>。影響の防護策としては、国際非電離

放射線防護委員会 (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection : ICNIRP) 等から自発的な体動制御があげられている<sup>3), 4)</sup>。

このような磁界ばく露に基づくめまいに関連して、これまでに、高磁界ばく露中でバランス機能に関する評価 (Romberg's test 又は Unterberger's stepping test) を行った結果、機能が低下する報告がなされている<sup>5)-7)</sup>。しかしながら、これらは研究用 7 T 装置における実験であり、作業前後の身体動揺の変化の程度や経時的変化について強度の低い臨床 MRI 装置 (主に 0.5-3 T の範囲) の条件における報告はない。そこで本研究では実際の MRI 検査業務と同等程度の高磁界かつ高勾配の環境でのばく露 (約 15 分間の静的な磁界ばく露と、1 分程度の頭部回転動作による動作をとともう静磁界ばく露 2 回) について、ばく露前後の身体動揺の変化を重心動揺計にて計測し検討したので報告する。

## 2. 方法

実験は国立長寿医療研究センター研究所の 3 T MRI 装置 (Magnetom : Siemens 社製, ドイツ) の周辺環境で実施した。実験は独立行政法人 労働者健康安全機構 労働安全衛生総合研究所の研究倫理審査委員会の承認 (H2828) および国立長寿医療研究センター研究所の研究倫理審査委員会の承認 (No.530-4) のもと実施した。

1) ばく露環境および対象者

\*1 労働安全衛生総合研究所 産業毒性・生体影響研究グループ (現: 環境計測研究グループ)。

\*2 労働安全衛生総合研究所 人間工学研究グループ (現: Kyungpook National University)。

\*3 労働安全衛生総合研究所 産業疫学研究グループ (現: 人間工学研究グループ)。

\*4 東京大学 大学院工学系研究科。

\*5 国立長寿医療研究センター 研究所 (現: 大阪大学 大学院歯学研究科 歯科放射線学教室)

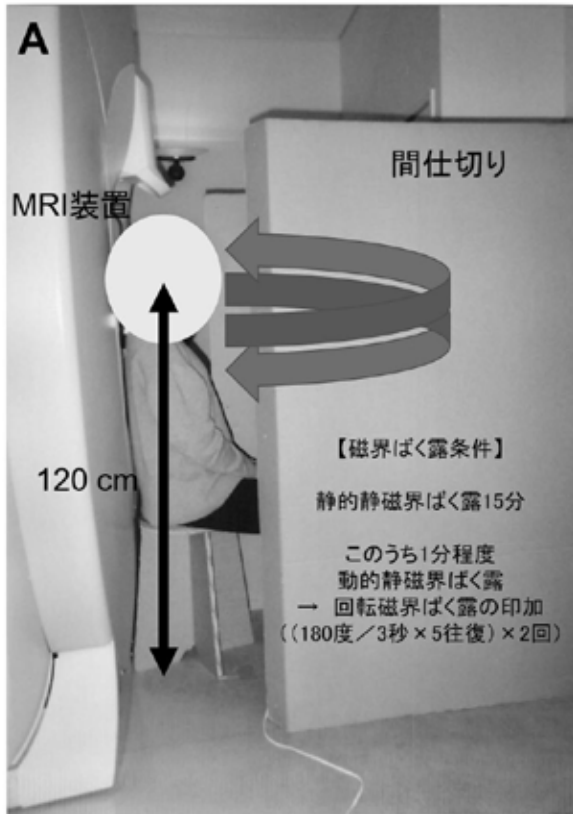


図1 実験の概要 (つづき) C:重心動揺測定の様子。

**B**

		Case1 内容、ばく露	
条件名	時間	コントロール条件	インフォームドコンセント 測定
ばく露1	15 min	コントロール条件	Shamばく露
		5分休憩	
ばく露2	15 min	MRI条件	磁界ばく露
		5分休憩	
実験後	5 min	コントロール条件	測定

		Case2 内容、ばく露	
条件名	時間	コントロール条件	インフォームドコンセント 測定
ばく露1	15 min	MRI条件	磁界ばく露
		5分休憩	
ばく露2	15 min	コントロール条件	Shamばく露
		5分休憩	
実験後	5 min	コントロール条件	測定

図1 実験の概要 A: 静磁界ばく露条件および頭部回転動作の様子。 B: 本研究のプロトコル。

実験参加者は男性 11, 女性 16 の計 27 名であった。全実験参加者の平均年齢 (標準偏差) は 25.7 (6.5) 歳で、身長 (標準偏差) については 162.9 (8.6) cm であった。実際の MRI 検査においては、①静的な静磁界ばく露、②頭部動作など体動をともしない動的な静磁界ばく露が混在しており、①については MRI 装置近傍 (磁束密度: 約 1 T) をのぞき込む際や寝台送りのボタン操作時に最大で 5-10 分程度発生する。そこで本研究では MRI 装置末端の高さ 120 cm 部分 (磁束密度: 約 1 T) に頭部が来るよう着座を依頼し、安静時間も含め約 15 分間の静的な静磁界ばく露条件を設定した (図 1A)。②については、作

業によって非常に幅があるため、先行研究<sup>6)</sup>を参考に頭部回転動作 (水平 180 度/3 秒を 5 往復) を 2 回付与することとした (図 1A)。したがって、ばく露条件としては、静的な静磁界ばく露 15 分で、うち 1 分程度の動的静磁界ばく露を印可することとなった。

2) 実験プロトコルと身体動揺の評価

図 1B に本研究の実験プロトコルを示す。実験参加者はインフォームドコンセントおよび体調チェックの後、第一回目の重心動揺測定を行った。重心動揺の測定は重心動揺計 (GW-5000, アニマ社製) を用いて測定した (図 1C)。測定は開眼および閉眼条件にて各 3 回行い、開眼・閉眼の指示はランダム化した。その後、地磁気レベルの前室 (以後、コントロール条件と標記) 又は MRI 室 (以後、MRI 条件) にてばく露を実施した。コントロール条件におけるばく露は磁界ばく露をともしないため、本研究では Sham ばく露 (磁界ばく露に対する対義語; 本研究では地磁気レベルのばく露に相当) と標記した (図 1B)。コントロール条件を先に実施する群を Case 1, MRI 条件を先に実施する群を Case 2 とした。コントロール条件・MRI 条件の順序はランダム化し終了 5 分後に再度重心動揺測定を行った。

測定データは、総軌跡長 (cm), 単位軌跡長 (cm/秒), 左右軌跡長 (cm), 左右単位軌跡長 (cm/秒), 前後軌跡長 (cm), 前後単位軌跡長 (cm/秒), 矩形面積 (cm<sup>2</sup>), 外周面積 (cm<sup>2</sup>), 左右最大振幅 (cm), 前後最大振幅 (cm) を付属ソフトウェアにて算出した。

3) ばく露磁界の計測

3軸ホール素子磁界計 (THM1176: Metroab 社製, スイス) で実験参加者着座位置のばく露磁界を計測した(図2)。測定はサンプリングレート 120 Hz, 1 秒間, 分解能 0.3 mT の条件で行い, 各データポイントから 3 軸の値, 3 軸合成値を取得した。ばく露レベルの評価には 1 秒間の時間平均値を用いた。ばく露環境は頭部で最大磁束密度が  $982 \pm 263$  mT で勾配は 381 mT/10 cm (3810 mT/m) であった。Sham ばく露中の静的静磁界ばく露は地磁気レベル ( $< 50$   $\mu$ T) であった。

#### 4) 統計解析

重心動揺のデータは, 磁界ばく露の有無, 年齢 (中央値に基づき 25 歳未満群・25 歳以上群に分類), ばく露順序との関連についてそれぞれ二元配置分散分析にて解析した。統計ソフトは SPSS statistics 25 を用いて, 統計的有意差は  $p < 0.05$  とした。

### 3. 結果

表 1 と表 2 に, 開眼条件および閉眼条件における, 25 歳未満群と 25 歳以上群ごとの磁界ばく露前後の重心動揺計測値と分散分析の結果を示す。磁界ばく露による主効果は, 開眼条件の外周面積を除き, 認められなかった。一方, 年齢による主効果は, 開眼と閉眼条件ともに, ほぼ全ての条件 (開眼条件の前後軌跡長, 前後単位軌跡長を除く) で認められた。磁界ばく露と年齢の交互作用は認められなかった。図 3 には, 代表例として, 開眼条件における総軌跡長を示す。開眼条件における 25 歳以上群の総軌跡長は, 25 歳未満群に比べて長かった。(表 1)。

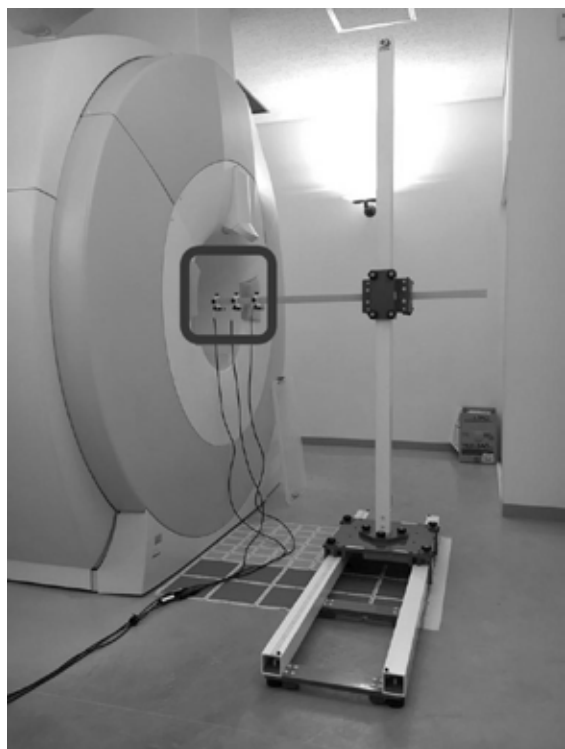


図 2 ばく露磁界の測定。

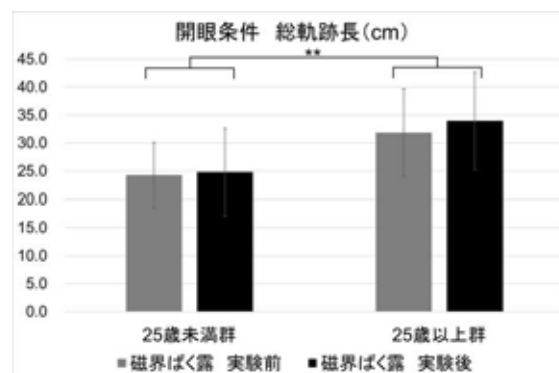


図 3 実験結果の例。開眼条件における総軌跡長。\*\*:  $p < 0.01$

表 3 に磁界ばく露前後の重心動揺の変化について, ばく露順序との関連について解析した結果を示す。磁界ばく露の主効果, ばく露順序の主効果および交互作用いずれにおいても有意差は認められなかった。

### 4. 考察

本研究で解析を行った重心動揺のパラメーターについて年齢による影響が観察されたが, 重心動揺の制御においては加齢が影響を与えていることが知られている<sup>8)</sup>。一方で, 幾つかの開眼時の重心動揺のパラメーター (総軌跡長, 単位軌跡長, 前後軌跡長, 前後単位軌跡長, 矩形面積, 外周面積, 左右最大振幅) において, 年齢に関わらず実験前に比べて実験後にパラメーター値が上昇する傾向が示された。このため磁界ばく露の影響が考えられたが, 統計解析において磁界ばく露の主効果は開眼条件の外周面積を除き認められなかったことから, 実験前の測定から実験後の測定まで約 40 分経過したことによる疲労が影響を与えている可能性が考えられる。今回のばく露及び Sham ばく露中は被験者は静止しているものの椅子に背もたれがないため, 単なる姿勢維持であっても疲労をもたらした可能性がある。

本研究のばく露条件では, 開眼条件の外周面積においてのみ磁界ばく露の主効果が観察された。しかしながら, ばく露前後の絶対値の差分は 25 歳未満群で  $0.24$   $\text{cm}^2$ , 25 歳以上群で  $0.36$   $\text{cm}^2$  であり, それぞれの群の標準偏差 (25 歳未満群:  $0.58$   $\text{cm}^2$  又は  $0.82$   $\text{cm}^2$ , 25 歳以上群:  $0.89$   $\text{cm}^2$  又は  $1.33$   $\text{cm}^2$ ) より小さい。このため, 統計的有意差は検出されたものの, 実際にバランス機能に影響を与えると判断するには不十分であると考えられる。

なお, 本研究では実験参加者ごとに 15 分程度の高磁界ばく露があるが, 順序はランダム化されていたため半数程度は磁界ばく露から 15 分後, 残りは磁界ばく露直後に測定を行っている。ばく露順序の主効果あるいは磁界ばく露との交互作用が検出されなかったことから, ば

表1 開眼条件における、磁界ばく露前・後の重心動揺計測値一年齢の影響。

	磁界ばく露	25歳未満群 (N=15)	25歳以上群 (N=12)	主効果		
				磁界ばく露	年齢	交互作用
総軌跡長 (cm)	実験前	24.28±5.82	31.82±7.83	p=0.283	p=0.003	p=0.222
	実験後	24.83±8.04	33.93±8.73			
単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	0.80±0.20	1.05±0.25	p=0.287	p=0.003	p=0.227
	実験後	0.83±0.27	1.13±0.29			
左右軌跡長 (cm)	実験前	14.93±3.82	20.20±6.31	p=0.601	p=0.001	p=0.051
	実験後	14.65±3.21	21.81±6.46			
左右単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	0.50±0.13	0.67±0.21	p=0.599	p=0.001	p=0.050
	実験後	0.49±0.11	0.73±0.22			
前後軌跡長 (cm)	実験前	15.34±4.91	19.70±3.86	p=0.188	p=0.063	p=0.676
	実験後	16.51±8.74	21.25±5.24			
前後単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	0.51±0.16	0.66±0.13	p=0.186	p=0.062	p=0.672
	実験後	0.55±0.29	0.71±0.17			
矩形面積 (cm <sup>2</sup> )	実験前	2.38±1.49	4.68±2.49	p=0.144	p=0.007	p=0.948
	実験後	3.13±2.31	5.15±3.28			
外周面積 (cm <sup>2</sup> )	実験前	0.90±0.58	1.73±0.89	p=0.041	p=0.005	p=0.446
	実験後	1.14±0.82	2.09±1.33			
左右最大振幅 (cm)	実験前	1.48±0.54	2.07±0.60	p=0.511	p=0.011	p=0.625
	実験後	1.67±0.67	2.04±0.62			
前後最大振幅 (cm)	実験前	1.50±0.49	2.16±0.77	p=0.112	p=0.004	p=0.955
	実験後	1.68±0.64	2.35±0.67			

表2 閉眼条件における、磁界ばく露前・後の重心動揺計測値一年齢の影響。

	磁界ばく露	25歳未満群 (N=15)	25歳以上群 (N=12)	主効果		
				磁界ばく露	年齢	交互作用
総軌跡長 (cm)	実験前	37.61±12.18	36.38±14.39	p=0.577	p=0.004	p=0.989
	実験後	36.52±8.89	35.57±15.27			
単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	1.25±0.41	1.21±0.48	p=0.579	p=0.004	p=0.987
	実験後	1.22±0.30	1.19±0.51			
左右軌跡長 (cm)	実験前	22.80±8.22	22.69±9.90	p=0.473	p=0.001	p=0.831
	実験後	22.07±5.47	21.87±9.80			
左右単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	0.76±0.27	0.76±0.33	p=0.497	p=0.001	p=0.856
	実験後	0.74±0.18	0.73±0.33			
前後軌跡長 (cm)	実験前	24.72±8.37	23.35±9.24	p=0.592	p=0.026	p=0.906
	実験後	23.88±8.43	23.08±9.88			
前後単位軌跡長 (cm/秒)	実験前	0.82±0.28	0.78±0.31	p=0.596	p=0.026	p=0.925
	実験後	0.80±0.28	0.77±0.33			
矩形面積 (cm <sup>2</sup> )	実験前	4.73±3.49	4.35±2.71	p=0.621	p=0.003	p=0.453
	実験後	4.36±2.68	5.06±4.44			
外周面積 (cm <sup>2</sup> )	実験前	1.77±1.25	1.74±1.17	p=0.938	p=0.005	p=0.499
	実験後	1.61±0.90	1.92±1.79			
左右最大振幅 (cm)	実験前	2.06±0.81	1.93±0.72	p=0.705	p=0.003	p=0.705
	実験後	1.94±0.64	2.00±0.70			
前後最大振幅 (cm)	実験前	2.07±0.69	2.08±0.62	p=0.329	p=0.001	p=0.159
	実験後	2.07±0.64	2.21±1.05			

表3 開眼・閉眼条件における、磁界ばく露前・後の重心動揺計測値—ばく露順序の影響。

	開眼			閉眼		
	主効果			主効果		
	磁界ばく露	ばく露順序	交互作用	磁界ばく露	ばく露順序	交互作用
総軌跡長 (cm)	p=0.391	p=0.415	p=0.590	p=0.575	p=0.777	p=0.996
単位軌跡長 (cm/秒)	p=0.393	p=0.413	p=0.606	p=0.578	p=0.774	p=1.000
左右軌跡長 (cm)	p=0.816	p=0.654	p=0.695	p=0.470	p=0.883	p=0.799
左右単位軌跡長 (cm/秒)	p=0.812	p=0.652	p=0.704	p=0.491	p=0.877	p=0.793
前後軌跡長 (cm)	p=0.218	p=0.382	p=0.709	p=0.603	p=0.728	p=0.788
前後単位軌跡長 (cm/秒)	p=0.218	p=0.387	p=0.663	p=0.610	p=0.733	p=0.779
矩形面積 (cm <sup>2</sup> )	p=0.130	p=0.951	p=0.692	p=0.561	p=0.934	p=0.161
外周面積 (cm <sup>2</sup> )	p=0.053	p=0.901	p=0.922	p=0.886	p=0.804	p=0.214
左右最大振幅 (cm)	p=0.475	p=0.953	p=0.947	p=0.837	p=0.918	p=0.211
前後最大振幅 (cm)	p=0.101	p=0.875	p=0.881	p=0.394	p=0.914	p=0.584

く露後の経過時間についてもバランス機能に影響を与えるものでないと考えられる。

本研究では重心動揺により磁界ばく露の影響を検討したが、今後の展開として、より検出力高くバランス機能の変化を検出するために身体各部位の動揺の計測が必要とされる。特に磁界ばく露中の身体動揺の測定は7 Tの研究用MRI装置でのみ事例が限定されており<sup>5)7)</sup>、臨床用で用いられている3 T装置での事例は本研究のみである。先行研究では、一時的体調変化の発生に資すると考えられる動的静磁界ばく露のない静的磁界ばく露のみであっても静止立位の変化が報告されている<sup>5)</sup>。このため本プロジェクトでは静磁界ばく露による生体影響評価をより深めるため本実験とは独立してモーションキャプチャによる磁界ばく露中の身体動揺の測定を試みており、今後、本研究の結果と合わせ考察を行う予定である。

## 5. 結論

本研究では実際のMRI検査業務と同等程度の高磁界環境での作業（約15分の静磁界ばく露と頭部回転動作2回を含む）において、ばく露前後の身体動揺の変化を重心動揺計にて計測した。その結果、約1 Tの環境で15分間の静磁界ばく露をともなう作業においては、重心動揺の変化を生じさせるものではなかった。

## 参 考 文 献

- 1) 山口さち子, 中井敏晴, 今井信也, 井澤修平, 奥野勉. MR検査業務従事者の職業ばく露磁界の測定と作業内容との関連性. 労働安全衛生総合研究所特別研究報告, JNIOHS-SRR 2014; 44:47-54.
- 2) Kangarlu A and Robitaille PML, Biological Effects and Health Implications in Magnetic Resonance Imaging. *Concepts in Magnetic Resonance* 2000; 12(5):321-359.
- 3) ICNIRP, Guidelines on Limits of Exposure to Static Magnetic Fields. *Health Physics* 2009; 96(4):504-514.
- 4) ICNIRP, Guidelines for Limiting Exposure to Electric Fields Induced by Movement of the Human Body in a Static Magnetic Field and by Time Varying Magnetic Fields Below 1 Hz. *Health Physics* 2014; 106(3):418-425.
- 5) Glover PM, Cavin I, Qian W, Bowtell R, Gowland PA. Magnetic-Field-Induced Vertigo: A Theoretical and Experimental Investigation. *Bioelectromagnetics* 2007; 28:349-361.
- 6) van Nierop L E, Slottje P, Kingma H, and Kromhout H. MRI-Related Static Magnetic Stray Fields and Postural Body Sway: A Double-Blind Randomized Crossover Study. *Magnetic Resonance in Medicine* 2013; 70:232-240.
- 7) Theysohn JM, Kraff O, Eilers K, Andrade D, Gerwig M, Timmann D, Schmitt F, Ladd ME, Ladd SC, Bitz AK. Vestibular Effects of a 7 Tesla MRI Examination Compared to 1.5 T and 0 T in Healthy Volunteers. *PLoS One* 2014; 9(3):e92104.
- 8) Roman-Liu. Age-related changes in the range and velocity of postural sway. *Archives of Gerontology and Geriatrics* 2018; 77:68-80.