

溶接作業における作業者の磁界ばく露の実態調査

山口 さち子^{*1} 小嶋 純^{*1} 関野 正樹^{*2} 北條 稔^{*3} 奥野 勉^{*1}

溶接は産業の基盤技術であり、国内で二十～三十万人が従事している。しかしながら、アーク溶接では 100A 単位の比較的大きな電流を使用することや、抵抗溶接においては数 KA 単位の大電流を使用することから、近年、作業時の電磁界ばく露が懸念されている。本研究では、アーク溶接作業者の作業中の磁界ばく露について、最もばく露磁界が大きくなると予想される手首部分に着目して実態調査を行った。その結果、溶接作業者の最大ばく露磁界は、0.35—3.35 mT (Mean ± S.D.: 1.55 ± 0.93 mT, N=17), 1日平均は0.04—0.12 mT (Mean ± S.D.: 0.07 ± 0.02 mT, N=17)であった。そこで、被験者の手首における磁束密度分布と電流密度分布を得るために、電磁界解析を行った。その結果、手首では最大ばく露磁界は 1.49 mT で作業環境でのばく露磁界測定の結果と大きな離れはなくモデル計算と測定値は良い一致を示した。このとき筋組織では 4.28 mA/m² (300 Hz, 手首から 6 mm) の誘導電流が推定された。この誘導電流の値は、ICNIRP ガイドラインの基本制限値 10 mA/m² (300 Hz) を下回っていた。

キーワード: 溶接, 磁界ばく露, 誘導電流

1 緒言

溶接は産業の基盤技術であり、国内で約二十～三十万人が従事している。しかしながら、アーク溶接では 100A 単位の比較的大きな電流を使用することや、抵抗溶接においては数 KA 単位の大電流を使用することから、近年、作業時の電磁界ばく露が懸念されている^{1,2,3)}。

電磁界ばく露の生体影響は主に生体内誘導電流による神経刺激作用と、発熱が知られており、概ね 100 kHz を境界として 100 kHz より低周波では神経刺激作用、それ以上の高周波では発熱を考慮する必要がある^{4,5,6,7)}。生体組織には周波数応答性があることから、電磁界ばく露のガイドラインでは周波数ごとにばく露磁界の上限値が示される⁷⁾。国際ガイドラインとしては、ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) ガイドラインや⁷⁾、ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) 許容濃度の勧告⁸⁾などが挙げられる。現在、日本国内では労働環境の磁界を規制する法律はないが、これら国際的ガイドラインが広く受け入れられている。

溶接時に発生する磁界の実態調査は、城内らの報告⁹⁾、NRPB の報告¹⁰⁾、HSE の報告¹⁾などがあげられる。これら報告書では、大電流を使用する抵抗溶接では ICNIRP ガイドラインを超過し得ること、アーク溶接でも条件によっては超過し得ることが示されている。しかしながら作業者を対象にした実態調査では測定端子は腰部部分に装着されており、最も磁界発生源(ケーブル)に近い部位である手首でのばく露実態は明らかでない。

そこで本研究では溶接作業者を対象に、作業中にばく露される磁界の計測を行った。測定端子をケーブルに最も近い部位である被験者の手首に装着し、労働時間中の最大および平均ばく露を記録した。また、被験者の手首

における磁束密度分布と電流密度分布を調査しガイドラインとの比較を行うために、電磁界解析を行った。

2 方法

1) 溶接電流の測定

溶接機が発生する電流波形を電流プローブ (PR430: LEM, Measuring range ±60 A and ±600 A, frequency range: DC to 20 kHz) と、データロガー (8807: HIOKI, sampling rate: 8, 又は 400 kHz) で行った。記録した波形は高速フーリエ変換 (FFT) により、周波数解析を行った。

2) 電磁界解析

作業現場で測定されたばく露磁界を元に、被験者の手首における磁束密度分布と電流密度分布を調査するために、人為的なモデルの作成と数値計算による電磁界解析を行った。電磁界解析は、関野らの有限要素法に基づく手法で行った¹¹⁾。モデルは、手首の皮膚、筋、血管、骨組織を模擬した長径 60 mm, 短径 50 mm だ円形断面を、半径 6 mm の銅線に対して 6, 10, 20 mm 離れた条件とした。解析条件は、銅線に流れる電流は、1) で測定された溶接電流の FFT 解析の結果から、300 Hz で 30 A とした。300 Hz における各組織の導電率は文献^{12,13)}に基づき設定した (skin dry: 2.000 X 10⁻⁴ S/m, muscle: 2.020 X 10⁻¹ S/m, bone: 2.003 X 10⁻² S/m, blood vessel: 2.506 X 10⁻¹ S/m and nerve: 1.713 X 10⁻² S/m)。モデルは 2 mm 間隔で要素数は 37500 であった。モデル作成と解析には電磁界解析プログラム Eddy (Photon 社) を用いて行った。

3) 溶接現場におけるばく露磁界の測定

測定フィールドは、日本国内の製造業の 5 社から計 17 人を対象とした。加えて VDT 作業者 (PC operators) を 2 研究所から 5 人対象とした。作業者がばく露される磁界の測定には、3 軸ホール素子テスラメータ

*1 労働安全衛生総合研究所健康障害予防研究グループ。

*2 東京大学大学院電子工学科

*3 大田地域産業保健センター

表 1 電磁界解析が示す、各条件の最大電流密度と観察された組織名。

動線からの距離	最大電流密度 [mA/m ²]	
	最大値 [mA/m ²]	最大値が観察された組織名
6 mm	4.28	筋肉
10 mm	3.80	筋肉
20 mm	3.17	筋肉



図 1 作業環境における磁界計測。磁界データは 3 軸磁界計測器を用いて取得した。磁界センサーは被験者の右手に装着した。

(THM1176: Metrolab, Measuring range: 8.0 mT, frequency range: DC—2.048 kHz) を用いた。サンプリングレートは 2.048 Hz で 5 秒毎に最大ばく露磁界の記録を行った。測定端子は、溶接トーチを持つ利き手手首に装着した (図 1)。THM1176 を作業者の始業時から終業時まで 8 時間 (昼食時を除く) 計測を行った。バックグラウンドレベルは測定前 5 分の平均を示した。

3 結果

1) 電磁界解析

図 2 に手首部分のばく露磁界に関する電磁界解析の結果を示す。電流が 30A で周波数 300 Hz の時、手首部分を受ける磁界はケーブルから 6 mm 離れた場合で最大で 1.49 mT であった。モデルに誘導される渦電流密度と最大値を示した組織を表 1 に示す。誘導電流の影響が懸念される神経および筋では、筋で最大で 4.28 mA/m² の値を示したが、神経では 0.54 mA/m² 以下の値であった。

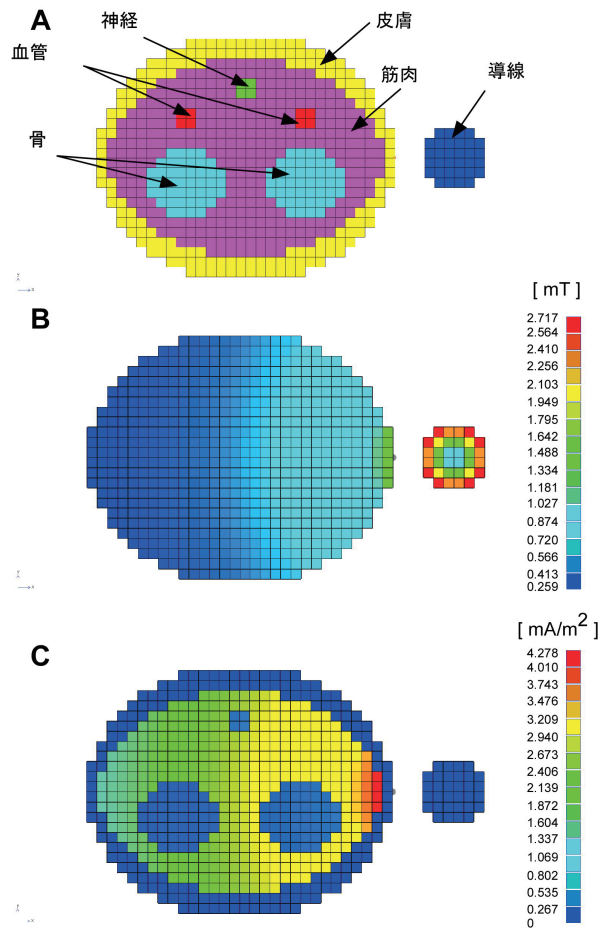


図 2 溶接で発生する磁界と渦電流の電磁界解析。A: 2 mm ギャップの計算モデル B: 磁束密度分布 C: 電流密度分布

表 3 作業環境の電磁界発生源と最大磁束密度[mT]

	最大磁束密度[mT]
溶接	8.69
グラインダー	1.01
ドリル*	1.70
エアハンマー	1.68

*電磁マグネット固定式

2) 作業者のばく露磁界

被験者の属性と溶接の種類、最大と平均ばく露磁界、溶接頻度、溶接以外の電磁界発生源を表 2 に示す。被験者 17 人の最大ばく露磁界は 0.35—3.35 mT (Mean ± S.D.: 1.55 ± 0.93 mT, N=17), 平均ばく露磁界は 0.04—0.12 mT (Mean ± S.D.: 0.07 ± 0.02 mT, N=17) であった。バック mT (Mean ± S.D.: 0.07 ± 0.02 mT, N=17) であった。バックグラウンドレベルは平均 0.05 mT であった。溶接作業者は、VDT 作業者 (最大ばく露磁界: 0.07—0.09 mT) と比較して強い磁界にばく露されていた (表 2)。本研究の被験者は溶接以外の業務も行う場合があったが、溶接以外の磁界発生源については、ばく露する磁界全体への寄与は小さかった (表 3)。溶接以外の電磁界発生源として、サンダー、電磁マグネット固定式ドリル、エアハンマーなどがあった (表 3)。図 3 に溶接作業者の作業中の磁界ばく露の経時的変化の一例を示す。しばしば数ミリテスラの高い磁界強度が観察された。図 4 に代表的

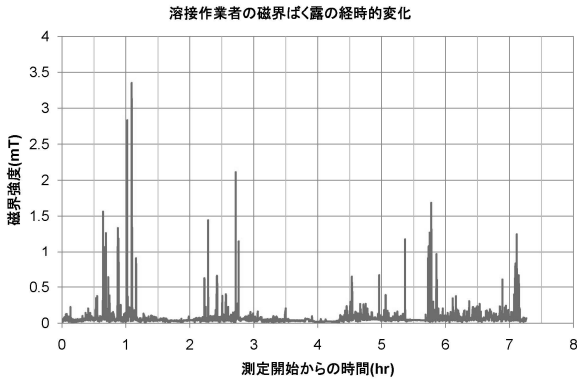


図3 溶接作業者の作業中の磁界ばく露の経時的変化の一例

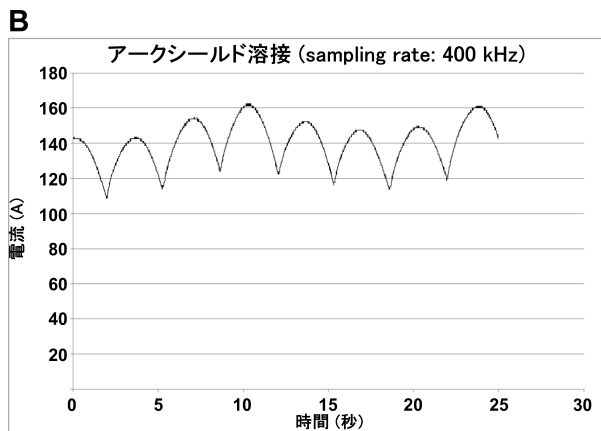
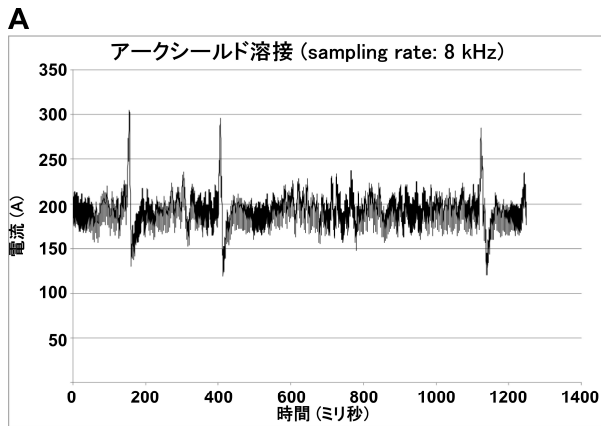


図4 典型的な溶接電流。A: アークシールド溶接における溶接電流 (sampling rate: 8 kHz)。B: アークシールド溶接における溶接電流 (sampling rate: 400 kHz)。

な溶接電流波形と、図5に周波数解析の結果を示す。直流 (DC) 成分に重畳した交流 (AC) 成分が不規則なピークを伴って観察されたが (図4A)、詳細に観察すると規則的なピークが観察された (図4B)。FFT解析を行った結果、DC成分をフィルタリングしAC成分だけにすると、300 Hzを基本周波数とした高調波が2 KHz付近まで、また低周波側に幾つかのピークが観察された (図5)。THM1176の計測範囲を超える2.048 kHz以上の高周波の影響は無視できるものであった。

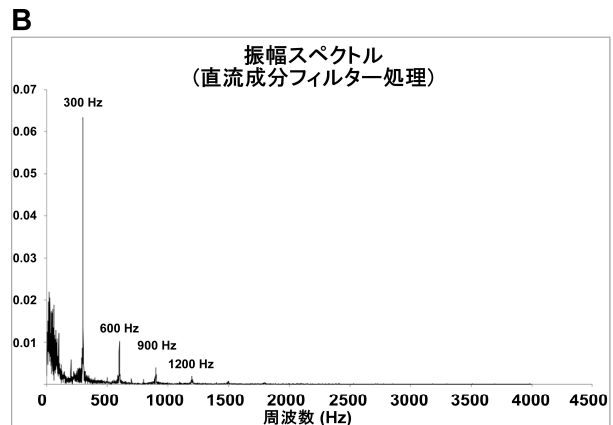
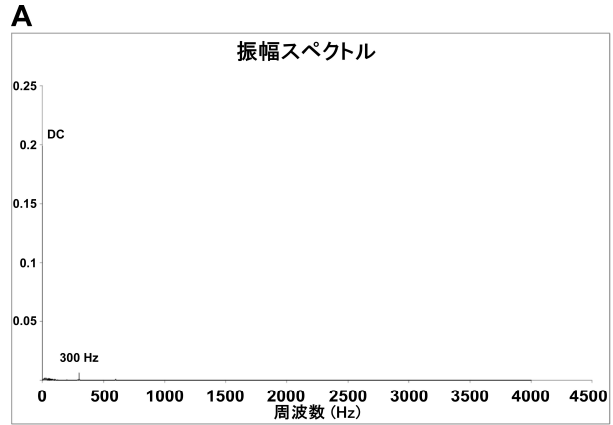


図5 溶接電流の高速フーリエ変換(FFT)。A: 元波形のFFT解析。B: DC成分を除去した波形のFFT解析。300 Hzに最も高いピークが観察された。

4 考察

先行研究で、溶接時に発生する磁界の周波数成分について解析が行われている。交流溶接については主に商用周波数とその高調波、直流溶接については、DC—100 Hzの極低周波の影響が大きい^{1,3)}。今回、電流プローブで溶接電流について周波数成分分析を行ったところDC成分が殆どを占めるが、交流成分では300 Hzに最も高いピークが観察された。これは、電源で3相交流を整流した際のリップル (東日本の場合300 Hz) であると考えられる。また、300 Hz以下に多数の低周波成分が観察された。本研究で使用したケーブルは、Bx、By、Bzの各成分について信号ケーブルは個別にシールド処理が施されており、被験者の動きによるアーチファクトは低減されているが、一部については体動由来である可能性も考えられる。

ICNIRPガイドラインの場合、参考レベルとして周波数成分ごとの磁界強度の値が提示されているが、今回のような直流磁界成分に多種類の周波数成分から構成される交流磁界成分が重畳している場合は、直流成分と交流成分を分離して考える必要がある。ACGIHやICNIRPの直流磁界のガイドライン値は最大8 T (ICNIRP)、または20 T (ACGIH) となっており、今回計測された値はその1/1000以下である^{14,15)}。交流成分については、周波数成分ごとに個別に磁界強度を求め、各周波数ごと

に定められたガイドライン値に対する相対値の周波数成分ごとの積算値が1を超えないこと、とされている⁷⁾が、今回の場合は、含まれる周波数成分が非常に多い事、また近年欧州で溶接で発生する磁界の測定規格が公表されていることから¹⁶⁾、現在詳細に検討中である。

電磁界解析で得られた予想値では、ケーブルから至近距離(6 mm)に手首がある場合、300 Hz, 30 Aの条件で最大1.49 mTであった。これは、実測で得られた値と大きな離れはなかった。100 kHz以下の低周波電磁界の生体影響は神経や筋肉などへの刺激作用が懸念されている^{4,5,6,7)}。これまでに、神経や筋に活動電位を発生させるには100 mA/cm²の渦電流が閾値であると報告があるが⁷⁾、解析で得られた値は、最大値を示した筋で4.28 mA/m² (4.28 X 10⁻⁴ mA/cm²)であり、神経や刺激の許容値よりは下

と考えられる。最も国際的に認知されているICNIRPのガイドラインは計算ベースの基本制限と実測値を利用する参考レベルからなりたっており、基本制限がガイドライン遵守に必要となる。今回の場合、電流波形から得られた周波数成分は300 Hzであるので、ガイドラインと照会すると基本制限は10 mA/m²であり、本解析結果から得られた値は許容値より下であると考えられる。

他の生体組織では、循環器系は電気的な刺激に対して感受性が高く、心室細動など重篤な影響が生じる恐れがある。しかしながら、これまでの先行研究の結果からは、電撃のような明確な健康有害事象を除けば、短期ばく露も長期ばく露いずれにおいても、低周波磁界に関連した心室細動などの重篤な症状が、公衆環境や労働環境で起こる確率は極めて低いと報告されている⁴⁾。

5 結論

本研究では、溶接作業者の作業中の電磁界ばく露について、最もばく露磁界が大きくなると予想される手首部分に着目して、磁界ばく露の実態調査を行った。その結果、溶接作業者の最大ばく露磁界は、0.35—3.35 mT (Mean ± S.D.: 1.55 ± 0.93 mT, N=17)、1日平均は0.04—0.12 mT (Mean ± S.D.: 0.07 ± 0.02 mT, N=17)であった。電磁界解析の結果から、手首では最大ばく露磁界は1.49 mTで作業環境でのばく露磁界測定の結果と大きな離れはなかった。このとき筋組織では4.28 mA/m² (300 Hz, 手首から6 mm)の誘導電流が推定された。この誘導電流の値は、ICNIRPガイドラインの基本制限値10 mA/m² (300 Hz)を下回っていた。

参 考 文 献

- Melton GB. Health and Safety Executive Research Report 338. Suffolk: HSE books; 2005.
- Directive 2004/40/EC. Official Journal of the European Union L 159 47; 2004.
- Mair P. Assessment of EMF (electromagnetic fields) and biological effects in arc welding applications. International Institute of Welding, Commission XII, Intermediate Meeting, Fronius International, 2005: 1-10.
- World Health Organization. Environmental Health Criteria 238 Extremely low frequency fields Monograph. Geneva: WHO Press; 2007.
- Barnes T. Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields Third Ed. Florida: CRC Press; 2006.
- Ueno S. Biological effects of magnetic and electromagnetic fields. Jpn J Magn Reson Med. 1999; 19: 289-294.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). Health Phys Soc. 1998; 74: 494-522.
- Sub-radiofrequency (30 KHz and below) magnetic fields. TLVs and BEI. Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2009: 1-12.
- 中央労働災害防止協会 労働衛生調査分析センター. 電磁場暴露に関する調査研究報告書(平成9年度~平成14年度 総括報告書). 中災防. 2002.
- Cooper TG. NRPB - W24 Occupational Exposure to Electric and Magnetic Fields in the Context of the ICNIRP Guidelines. National Radiological Protection Board, Oxon. 2002.
- Sekino M, Hirata M, Sakihara K, Yorifuji S, Ueno S. Intensity and localization of eddy currents in transcranial magnetic stimulation to the cerebellum. IEEE Trans Magn. 2006; 42: 3575-3577.
- Gabriel C, Gabriel S, Corthout E. The dielectric properties of biological tissues: I. Literature survey. Phys Med Biol. 1996; 41: 2231-2249.
- Gabriel S, Lau RW, and Gabriel C. The dielectric properties of biological tissues: II. Measurements in the frequency range 10 Hz to 20 GHz. Phys Med Biol. 1996; 41: 2251-2269.
- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines on limits of exposure to static magnetic fields. Health Phys Soc. 2009; 96: 504-514.
- Static magnetic fields. TLVs and BEI. Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists. 2009: 1-8.
- EN 50444:2008. Basic standard for the evaluation of human exposure to electromagnetic field from equipment for arc welding and allied processes. British Standards Institution; 2008.

表2 作業環境のばく露磁界

被験者	会社	作業内容	最大ばく露磁界 (mT)*	平均ばく露磁界 (mT)**	溶接以外のばく露源***
1	A	アークシールド溶接	2.79	0.05	グラインダー
2	A	アークシールド溶接	3.35	0.08	ドリル#
3	A	アークシールド溶接	1.44	0.05	グラインダー
4	A	アークシールド溶接	1.67	0.07	ドリル#
5	A	アークシールド溶接	0.99	0.07	グラインダー
6	A	アークシールド溶接	2.42	0.07	ドリル#
7	B	TIG 溶接	0.60	0.04	グラインダー
8	B	TIG 溶接	0.35	0.05	グラインダー
9	C	アークシールド溶接	0.59	0.12	エアハンマー
10	D	アークシールド溶接	0.81	0.07	グラインダー
11	D	アークシールド溶接	1.00	0.07	ドリル#
12	D	アークシールド溶接	0.85	0.06	グラインダー
13	D	アークシールド溶接	3.05	0.08	ドリル#
14	E	アークシールド溶接	1.70	0.10	グラインダー
15	E	アークシールド溶接	2.18	0.05	グラインダー
16	E	アークシールド溶接	0.74	0.05	グラインダー
17	E	アークシールド溶接	1.77	0.07	グラインダー
18	F	VDT 作業##	0.07	0.06	PC
19	F	VDT 作業##	0.09	0.06	PC
20	F	VDT 作業##	0.07	0.06	PC
21	F	VDT 作業##	0.09	0.05	PC
22	F	VDT 作業##	0.08	0.06	PC
23	-	バックグラウンドレベル###	0.06	0.05	-

* 全計測を通じた最高値

** 全計測を通じた平均

*** 溶接以外の電磁界発生源

電磁マグネットを利用したドリル

コンピューター (PC) 操作

バックグラウンドレベルは測定前5分の平均