

電気溶接作業環境における低周波磁界の数値解析と実測

Numerical Simulation and Measurement of Low Frequency Magnetic Fields in Electric Welding Environment

エコ・エレクトロニクス研究室 06ME226 山本 恭子 (Yasuko Yamamoto)

指導教員 山根 敏 准教授

Abstract

Recently, effects of low frequency magnetic fields to human health from power cables and electric appliances are worried, and many research and investigation of exposure of magnetic are studied. The strength of electromagnetic wave in the welding field is stronger than public environment. It was pointed out by European and American investigation. DIRECTIVE 2004/40/EC of the European Parliament and the Council was published. This directive is for the protection of workers from an electromagnetic field (EMF). Unfortunately, there is no standard concerning EMF in Japan. In near future, standards for protecting worker should be prepared. However, in working environment, especially in welding environment, it is difficult to evaluate magnetic field, since magnetic fields are complicated due to layout of welding cable and iron plates. Iron is a ferromagnetic material. The magnetic flux is intended to pass in to ferromagnetic materials. In this study, the effect of magnetic fields from iron plates is investigated by numerical simulation and measurement.

Keywords: EMF, Simulation, Measurement, Welding, Iron plate, ICNIRP

1. 緒言

近年、高圧送電線や電気製品から発生する低周波(1Hz~3kHz)の磁界の身体への影響が懸念され、世界各国で磁界暴露の研究・評価がなされている。また、電気加熱炉や電気溶接など低電圧・大電流を扱う職場環境では、一般生活環境よりも強い磁界が発生している。これらの強い磁界の暴露は、労働者に即時的な健康影響をもたらす可能性があり、欧州連合では2004年4月に、「労働者の電磁界暴露に関する指令^[1]」を発行、労働者の磁界暴露をICNIRP(国際非電離放射線防護委員会: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)のガイドライン^[2]における制限値内に抑えることを要求し、加盟国は2012年4月までにこれを法令化し遵守することになっている^[3]。本研究では、労働環境として電気溶接作業環境に着目し、労働者近傍の磁界発生源である溶接ケーブル付近の低周波磁界を、数値解析および実測により評価した。

2. 電気溶接作業環境における磁界曝露

2.1 労働環境の暴露評価

労働環境での磁界の職業曝露について、厚生労働省は、中央労働災害防止協会の労働衛生調

査分析センターに職業別の暴露状況の調査を委託^[4]し、同センターは、「電磁場ばく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)^[5]」を作成し、職業暴露磁界をICNIRPガイドラインと比較した。それによると、電気溶接作業環境における平均暴露磁界はガイドラインを満足するものであったが、測定した作業者の一部にガイドラインの値を大きく超えるような結果が検出されていた。これより、電気溶接により発生する磁場は、極めて局所的かつその分布がゆがんでいることが予想され、報告書では、「溶接作業者のばく露磁場の定量化はもっとも難しく、従ってそのばく露低減化対策も容易ではない」としている。

2.2 電気溶接作業環境の磁界

電磁環境としての溶接作業環境の特徴は、1) 低電圧・大電流のケーブルが作業者の近傍に敷設されている。2) 溶接母材に鉄など透磁率の高い金属が多く用いられるため、周囲に強磁性体が存在する。

主にこの二点の特徴が、溶接環境の磁界曝露の客観的評価を非常に困難なものにしている。ケーブルの配置は溶接対象の材料形状、機器の配置、周囲の作業環境によって定まる。さらに、溶接対象物は強磁性体である事が多く、その影

響でケーブルから発生する磁場はゆがめられている可能性が高い。特に後者の強磁性体による磁場のゆがみにより、単にケーブルからの直線距離での暴露評価が行えない。そのため本研究では、この強磁性体の磁界への影響に着目し、強磁性体が溶接ケーブルから発生する磁界にどのような影響を与えるのかを数値シミュレーション及び実測により評価し、溶接作業環境での磁界暴露評価につなげることを目的とする。

3. 磁界の数値解析

3.1 解析の概要

解析は二次元で、3m×3m の空間内に一本の溶接ケーブルあるいは一本の溶接ケーブルと、その付近に単純な形状の鉄板を配置したモデルについて行った。溶接電流は、パルス溶接を対象とした。このため、時間変化に対し電流変化が大きいので大きな時間変化磁界が大きくなる事が予想される矩形波電流を用いる。また、解析を行う上で、低周波磁界は、溶接作業現場に比べて波長が非常に長い(60Hz で 5000km) ため、電界の時間変化の影響を受けないものとした。これらの条件をふまえて、矩形波のピーク電流・ベース電流について、それぞれの電流値と等しい低電流を流した際に発生する静磁界を数値解析し、得られた磁束密度のピーク値とベース値から、溶接電流と等しい周波数の磁束密度波形を求めた。静磁界解析の支配方程式は、透磁率を μ とすると、磁束密度 B について、 $B = \text{rot}A$ である磁気ベクトルポテンシャル A を用いて、

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 A = 0 \quad (1)$$

である。なお、渦電流の影響については考慮していない。解析は、有限要素法を用いた数値解析ソフト marc 及び mentat(共に MSC 社)によって行った。

3.2 解析モデル

Fig. 1 の左側に解析モデルの一例を示す。溶接ケーブルのみを配置した場合と、溶接ケーブル近傍に(b)のような L 字形の鉄板を配置した場合について解析を行い、鉄板がある場合とない場合の結果を比較した。

3.3 解析結果

ここでは、ベース電流を 100A、ピーク電流を 400A とした。Fig.1 右側にピーク電流 400A の静磁界解析結果を示す。Fig.1(a)はケーブルのみ配置した場合、Fig.1(b)はケーブルから 0.3m 離して、縦横 0.9m、厚さ 10mm の L 字形鉄板を設置した。その結果を Fig.1 右側に示

す。Fig.1(b)の磁束密度分布は Fig.1(a)に対して扇状に歪んでいる。これは、鉄板の透磁率が空気に対して高いため、ケーブルから発生した磁束が鉄中に集中したためである。鉄板の縦横の長さが大きくなると、この傾向はより大きくなる。

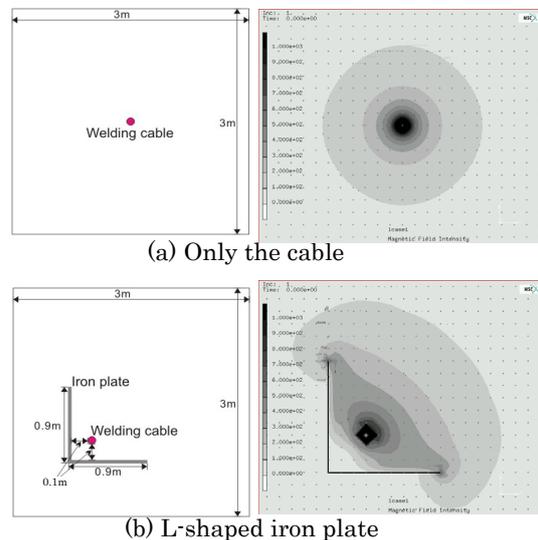


Fig.1 The numerical models and the results of simulation

4. 磁場の計測

4.1 測定方法

解析結果を確認するために、実測を行った。測定は、ケーブルのみの場合と、ケーブル近傍に 0.9m で厚さ 2.4mm の正方形鉄板を繋いで作成した L 字形鉄板を配置した場合について行った。Fig.2 に鉄板を配置した場合の測定の結果を示す。鉄板から縦横 0.1m 離れた地点にケーブルを配置し、ケーブル近辺 0.1m~0.5m を 0.1m 毎に測定した。1~400kHz で測定可能な Narda 社の磁界測定器 ELT-400 を用い計測を行った。この測定器は直交する 3 つのコイルを持っており、そのため磁束密度は、3 方向分解されて出力される。それらをオシロスコープを介して PC に取り込んだ。このうち、それぞれを FFT 処理を行った後、3 方向を合成した。ケーブルのみの場合の磁界測定は Fig.2 から鉄板を取り去った状態で行った。溶接電流波形は 60Hz に設定したため、発生した磁界の周波数成分は 60Hz が最も大きくなる事が予想される。地磁気の影響を避けるため、周波数 30Hz 以下の磁束密度をカットした。

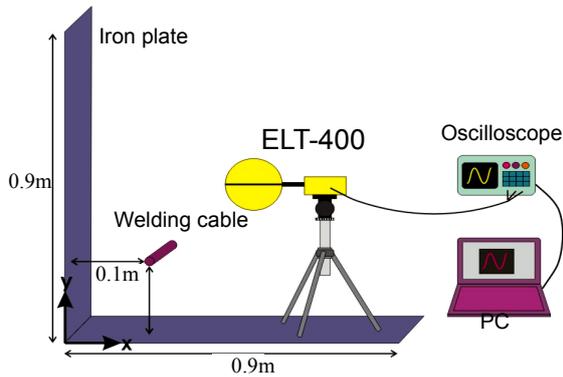


Fig.2 The method of measurement (about L-shaped)

4.2 測定結果と解析結果の比較

周波数に対する影響を調べるため、各測定点・解析点において得られた磁束密度の波形を、それぞれ FFT により各周波数成分に分解し、同じ周波数成分ごとに比較した。Fig.3 に基本調波である 60Hz における磁束密度を等高線に表示した。両者を比べると、ケーブルから遠い部分の磁界の減衰が解析よりも激しい。これは、計測場所である実習工場での周囲の磁界発生源(電流を使用するすべての装置)や磁性体の影響と考えられる。また、解析結果の図が、磁束密度の変化の激しい点などを細かく、合計約 100 ポイント近い点を反映しているのに対し、計測結果の図で使用した点は 0.1m おきの 50 ポイント程度なので、滑らかに表示できない。なお、鉄板近傍の磁束集中が実測で現れないのは、測定プローブが半径 0.06m 程度の大きさがあり (Fig.2)、鉄板やケーブル付近の測定

を細かくする事が出来なかったためである。しかし、測定結果においても、解析結果に見られる鉄板による磁束の歪みが分かる。さらに、ケーブルから 0.1~0.3m の部分では、両者 60Hz の成分の誤差は 5~30% に収まっている。これらより、強磁性体の影響を検討するために、解析結果が妥当であると判断できる。

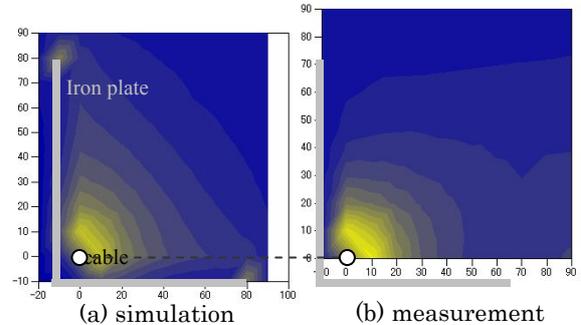


Fig.3. result of simulation and measurement (at elements of 60Hz)

5. 数値解析を用いた強磁性体の影響の検討

前項で解析結果の妥当性を確認したので、この結果を基に様々な形状の強磁性体の影響を数値解析により検討した。

5.1 鉄の形状の違いによる影響

Fig.4 に、ケーブルの傍に数種類の形状をした鉄板を配置した場合の二次元静磁界解析結果を示す。鉄板の形状によって磁界分布が大きく変化するのが分かる。鉄板が 3 方向に閉じている (d) の状態では、鉄板内部(ケーブル側)において磁界の減衰が少ない。これは、磁束が鉄板

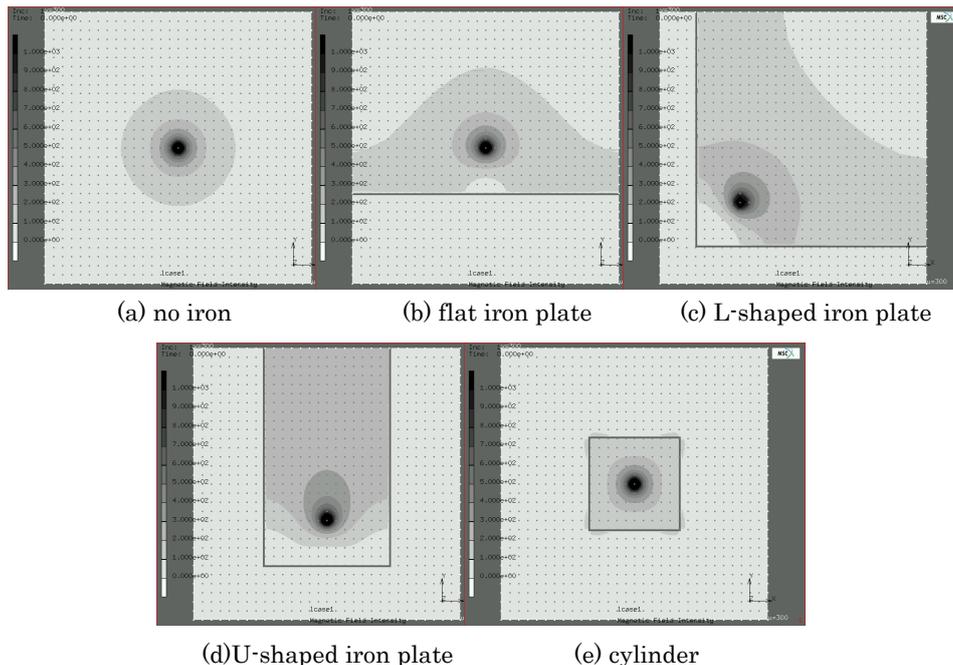


Fig.4. magnetic field with various shaped iron plates

の形状に沿って分布するためと思われる。

5.2 鉄板のサイズ及びケーブルまでの距離の違いによる影響

Fig.5 及び Fig.6 に、平板・L 字状鉄板の大きさを1辺 0.1m~1m まで変化させた場合の解析結果を示す。鉄板のサイズの増加に伴い、磁界分布が広がっている一方、鉄板が小さくなるにつれ、磁界は鉄板の無い場合の磁界分布に近くなっている。この事より、縦横 2 方向に辺のある L 字状鉄板に対し、横のみの平板の傍にケーブルがある方が、発生する磁界は縦方向に広がらず、分布が小さく収まる事と考えられる。

5.3 考察

磁界の分布は、ケーブル近傍の鉄板の形状によって、その形を大きく変える。これは、磁束が鉄板内に集中し、鉄板の形状に沿って分布するためと考えられる。Fig.4(c)(d)(e)に示す様に、鉄板によって 2 方向以上に閉じられた空間内において、鉄板近傍にケーブルがある場合、鉄板の影響で閉じられた空間内に磁束が集中し、外部に対し強い磁界が発生することが予想される。

6. 結言

溶接作業環境における低周波磁界暴露の評価のため、溶接ケーブルから発生する磁界が、鉄等の強磁性体の影響でどのように変化するかを数値解析及び実測により検討した。解析結果と測定結果では、基本周波数 60Hz で、両者の誤差はケーブル付近で 5~30%程度であり、解析結果の妥当性を確認した。この結果に基づいて、鉄板の形状を様々に変化させたモデルについて解析結果から磁界の分布の特徴を検討した。その結果、鉄板の形が 2 方向以上に閉じられた様な状態で、その内部にケーブルがある

場合、磁束の集中により内部の磁界は鉄板の無い状態よりも大きくなる傾向があり、鉄板のサイズの増加により磁界分布も広がる事が分かった。

しかし、これらの結果は、静磁界解析によって得られた結果であるため、低周波の磁界が発生する実際の作業現場をすぐに定量的に表現する物としては不十分である。また、本研究では磁界分布の特徴を大まかにつかむため、解析はすべて 2 次元解析であった。このため、周波数を持つ磁界の解析により、より定量的に、強磁性体の影響を検討すべきである。

強磁性体による磁界の歪みが大きいと、単純に磁界発生源からの直線距離で暴露評価を行うことが出来ない。また、強磁性体を用いる事で、磁界の分布を最小限に抑える事が出来る可能性もある。今後、さらに解析・実測を進め、客観的な暴露評価法について調査していく必要がある。

【参考文献】

- (1)EU: DIRECTIVE 2004/40/EC of the European Parliament and of the Council (2004)
- (2) ICNIRP,多氣昌生訳: 時間変化する電界、磁界及び電磁界による暴露を制限するためのガイドライン (1998)
- (3)EU: DIRECTIVE of The European Parliament and of the Council (2007)
- (4)独立行政法人国立環境研究所: 環境庁調査業務報告書 平成 16 年度生活環境中電磁界にかかる調査業務 報告書(2005)
- (5)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)

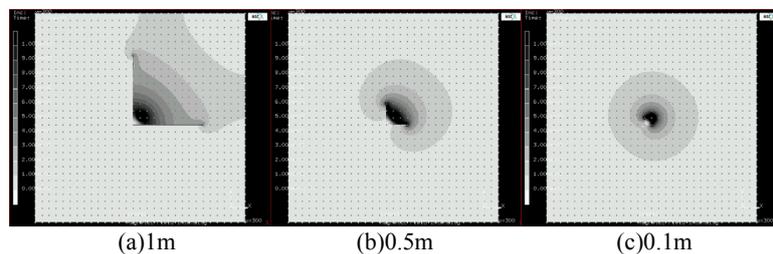


Fig.5. magnetic field with different size iron plates (L-shaped iron plate)

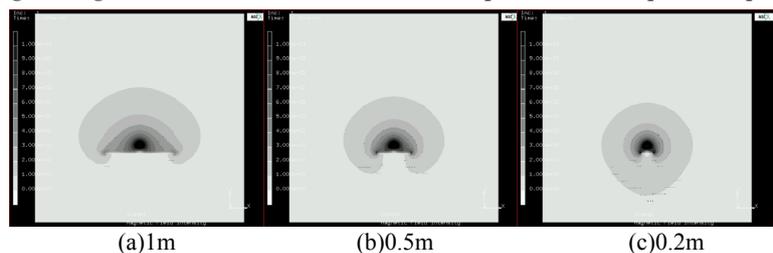


Fig.6. magnetic field with different size iron plates (flat iron plate)