

電磁界生体影響問題の最近の動向

電磁界生体影響問題調査特別委員会

2011年11月18日



社団法人 電 気 学 会

電磁界生体影響問題の最近の動向

電磁界生体影響問題の経緯と最近の動向（総論）	座長・多氣昌生（首都大学東京）……………	1
電磁界の生物影響研究の動向	重光 司（電気安全環境研究所）……………	3
疫学研究の動向	山口直人（東京女子医科大学）……………	7
電磁界生体影響問題のリスク・コミュニケーション	世森啓之，倉成祐幸，大久保千代次（電気安全環境研究所）……………	9
ドシメトリ研究の動向	山崎健一（電力中央研究所）……………	13
人体ばく露に関連する電磁界の測定方法	水野幸男（名古屋工業大学）……………	17

電磁界生体影響問題の経緯と最近の動向(総論)

多氣 昌生(首都大学東京)

Recent Topics in Health Risk Issues of Electromagnetic Fields: An Overview
Masao Taki (Tokyo Metropolitan University)

1. はじめに

商用周波数電磁界による健康影響については、1970年代から関心が持たれてきた。1992年から1998年に米国でEMF RAPID計画が実施され、1996年から世界保健機関(WHO)による国際電磁界プロジェクトが進められ、現在に至っている。電気学会に電磁界生体影響調査特別委員会(以下、特別委員会)が設置されたのは1995年12月であり、国際的な取り組みと並行して、わが国の低周波電磁界安全性に対する取り組みの中核的な役割を果たしてきた。本講演会は、16年間にわたる特別委員会の取り組みを踏まえ、電磁界生体影響問題の最新の状況をさまざまな切り口からレビューし、この分野の現状と今後の展望について取りまとめることを目的に企画されたものである。

2. 特別委員会設立の趣旨・活動

電気学会では、社会的に関心の高い「電磁界の生体、特に人の健康に与える影響の問題」について、中立、公平な立場から調査・評価活動を行うとともに、このテーマに関して社会一般の理解を深め、正しい知識を広めることを目的として、1995年12月に会長直属の機関として、関根泰次先生を委員長とする「電磁界生体影響問題調査特別委員会」(以下、特別委員会という)を設置し、調査研究活動を進めてきた。

特別委員会では、第1作業部会(部会長・宅間董先生)で低周波電磁界の実態調査、測定方法の整理を行い、第2作業部会(部会長・上野照剛先生)で環境レベルにおける低周波電磁界の健康影響評価と、内外の研究動向の整理を進め、1998年10月に、同年4月までの第I期の調査結果をまとめた報告書として「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」を刊行した。また、電磁界の影響問題についての正確な情報を提供するため、1997年7月から2001年2月まで、8回にわたって「電磁界の健康影響に関するシンポジウム」を開催し、開催時点での最新の研究情報、評価結果などを伝える活動を進めた。

2003年3月には、1998年4月から2002年3月までの調査結果をまとめた「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題—第II期報告書」を刊行した。また、この調査期間中の2001年2月に、電磁界とはどんなものか、その作用、身の回りの電磁界、健康とのかかわりについて基礎的

内容から最新の情報まで解説した小冊子「電気の暮らしと健康不安—電界・磁界の影響はどこまで分かったか」を刊行した。

第II期報告書の刊行をもって特別委員会の活動は一段落したものの、関連した新たな課題に備えて、その後も電磁界が生体に与える影響の研究動向、リスクコミュニケーション、国内外の規制動向などの調査・研究を継続した。また、2011年1月に、健康リスク評価と人体防護ガイドラインの最新情報を反映した、小冊子の改訂版「新・電気の暮らしと健康不安—電界・磁界の影響をどう考えるか」を発刊し、2011年3月には、電気学会全国大会において、関連する調査専門委員会とも協力して、シンポジウム「電磁界生体影響問題の最近の動向」を企画した(東日本大震災のため開催中止)。このような経緯を経て、本特別委員会の活動のまとめとして、今回の講演会「電磁界生体影響問題の最近の動向」の開催に至っている。

3. 電磁界生体影響問題の国内外の動向

特別委員会の活動の背後で、国内外でさまざまな取り組みが行われてきた。国際的には、1996年に世界保健機関(WHO)による国際電磁界プロジェクトがスタートし、世界60カ国以上が参加して、電磁界ばく露の健康影響についての評価を行った。このプロジェクトにおいて、2005年にWHOの附属組織である国際がん研究機関(IARC)が、低周波及び静電磁界のばく露による発がん性について評価し、低周波磁界の発がん性分類をグループ2B(発がん性があるかもしれない)、静電磁界と低周波電界をグループ3(発がん性を分類できない)に分類した。この評価結果に、その他の健康影響評価を加えて、WHOは2007年に100kHzまでの低周波電磁界の健康リスク評価をまとめた環境保健クライテリア(EHC) No. 238を公表した。また、ここで得られた知見を基に、WHOの公式見解をファクトシート No. 322として公表した。この中で、人体への電磁界ばく露を制限するための目安として、科学的根拠に基づく国際的なガイドラインの採用が推奨された。

国際的なガイドラインとしては、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)によって、1998年に「時間的に変化する電磁界のガイドライン」が刊行されていたが、米国でもIEEEの国際電磁安全性委員会(ICSES)が0-3 kHzの人体安全基準を2002年に刊行した。また、ICNIRPは、WHOによる健

康リスク評価文書、EHC No.232「静電磁界」の結果を踏まえて、1994年に公表していた「静磁界のガイドライン」を2009年に改訂した。さらに、EHC No.238を受けて、2010年には、1998年のICNIRPガイドラインにおける100kHzまでの周波数部分を改訂した「低周波電磁界に対するガイドライン」を刊行した。

一方、国内における、電磁界に関する調査・研究については、経済産業省原子力安全・保安院が電力設備電磁界情報調査提供を継続し、国内外の研究及び規制動向の正確な情報を調査し、講演会やシンポジウムを通して情報の伝達を行ってきた。電気学会でも、特別委員会の活動と並行して、基礎・材料・共通部門のマグネティクス技術委員会において磁場の生体効果についての調査専門委員会が継続して活動を続けており、1999年に設置された電磁環境技術委員会にも調査専門委員会が設置され、現在「生体を含む電磁界解析技術調査専門委員会」（委員長・上村佳嗣先生）、「電磁界の生体防護ガイドラインおよび適合性評価技術動向調査専門委員会」（委員長・平田晃正先生）が調査研究活動を行っている。また、人体防護ガイドライン・規制及び人体ばく露評価技術の最新動向については、電気学会規格調査会に「人体ばく露に関する電界、磁界、及び電磁界の評価方法標準化委員会」及び低周波委員会が設置され、IEC/TC106国内委員会としての活動を通して、研究者及び電磁界にかかわる電力・電気機器などの業界団体で情報共有が図られている。

わが国の磁界規制に関しては、2007年に経済産業省原子力安全・保安部会電力安全小委員会のもとに「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」が設置され、商用周波の電力設備からの磁界規制の在り方を検討し、2008年6月に報告書がまとめられた。報告書の提言を受け、2008年7月に電磁界リスクコミュニケーションの増進を目的とした「電磁界情報センター」（所長・大久保千代次先生）が財団法人電気安全環境研究所（現一般財団法人電気安全環境研究所）に設立された。また、2011年3月に、経済産業省は、「電気設備に関する技術基準を定める省令」を一部改正し、変圧器、開閉器等や電線路等を変電所等以外の場所に施設する場合には、当該施設の周辺において測定した空間の磁束密度の平均値が、ICNIRPの新ガイドラインに準拠した $200\mu\text{T}$ 以下となるように設置しなければならないと定めた。

このように、わが国の取り組みは、リスク評価、リスク管理、リスクコミュニケーションのさまざまな側面において定常的に行われており、特別委員会が設立当初に目指していた状況になっている。

4. 講演会の概要

本シンポジウムでは、この総論に続き、5件の講演が予定されている。最初の講演は、重光 司先による、生体影響

研究の動向に関する講演である。近年は携帯電話など、高周波電磁界に関心が高まり、超低周波電磁界の生体影響に関する研究は目立たないが、生物科学の進歩を踏まえた新たなアプローチや、疫学研究のフォローアップなど、研究は続いている。また、誘導加熱（IH）調理器などで使われる中間周波帯（300Hz～10MHz）の電磁界を対象にした研究が、日本、韓国を中心に盛んになっている。これらの、最新の研究動向について紹介いただく。

2番目の講演は疫学研究の動向である。EHC No.238刊行後の新たな研究や国際機関の評価を中心に、最新動向のレビューが行われる。また、最近関心の高まっている、携帯電話などの高周波の健康影響についても紹介される。実際に研究に従事されている山口直人先生に講演いただく。

3番目の講演は、電磁界生体影響問題のリスクコミュニケーションである。電磁界情報センターの世森啓之先生に講演いただく。電磁界の安全性についての不確かな情報が氾濫する中で、不安を抱く人が数多くいる。それらの方々と接して、非常に意義ある活動をされている。その経験を踏まえた講演は、電磁界安全性の取り組みの難しさを再認識させるものであり、同時に、真摯な取り組みが決して無駄ではないということに勇気づけられるものであると思う。

4番目の講演は、ドシメトリの最近の発展について、電力中央研究所の山崎健一先生にご講演いただく。電磁界に対する生体影響の研究の中で、ドシメトリ、特に数値解析の進歩が著しい。しかし、複雑な形状と不均一な電気定数の生体組織からなる人体を、電磁気学の対象にするために開発されたさまざまな数値解析手法により計算された結果が、どこまで真実であるか、という難しい問題がある。本講演では、比較計算の報告を通して、その現状が紹介される。

最後の講演は、電磁界ばく露評価手法の標準化についてである。1999年に国際電気標準会議にTC106「人体ばく露に関する電界、磁界、電磁界の評価方法」が設置されて以来、人体防護に関する測定評価方法の国際標準化が進められてきた。講演者の水野幸男先生（名工大）は、わが国が提案した、電力設備からの電磁界の評価方法についての国際標準IEC 62110のプロジェクトチームリーダーとして、この国際標準化に尽力された。国際標準の成立に至る過程は、平坦なものではなく、多くの課題を克服してのものであった。その経験を踏まえた講演を聞くことができる。

講演の後に総合討論が予定されている。パネラーとして、特別委員会発足時の委員長関根泰次先生、第1作業部会長宅間董先生、第2作業部会長上野照剛先生、電磁界情報センター所長大久保千代次先生を迎えての貴重な機会である。

本講演会を通して、特別委員会及び関連分野の活動経緯、現状及び将来の展望について、理解を深めて頂くことができれば幸いである。

電磁界の生物影響研究の動向

重光 司*

The Recent Research Trend on the Biological Effects of ELF Electromagnetic Fields
Tsukasa Shigemitsu

1. まえがき

1979年に米国の疫学者 Wertheimer と Leeper が、小児白血病と磁界ばく露（ワイアコード）との関連性の可能性についての疫学研究結果を公表して以来、電磁界ばく露の人への影響に対する影響の有無が活発に議論されてきました。生活環境には、家電製品から発生する電磁界をはじめ、送電線や変電所などの電力設備から発生する電磁界、医療におけるMRIなどの機器からの電磁界、更に携帯電話に代表される高周波電磁界など、自然界に存在する以上の人工的な電磁界に人が曝される機会が増加しています。

電磁界の人体影響については、当初の問題提起が、高圧送電線の近くに住む子供の白血病の発症率が高いことを発症した疫学研究、すなわち人の発がんに対する影響の有無であったことから、1980年以降、世界中で低周波電磁界の疫学研究、動物や細胞を用いた実験研究が活発に行われてきました。1996年には、世界保健機関（WHO）が国際電磁界プロジェクトを立ち上げ、電磁界の健康リスク評価を進め、現在に至っています。

1995年、電気学会は電磁界生体影響問題調査特別委員会（委員長：関根泰次東大名誉教授）を立ち上げ、電磁環境の実態調査、低周波電磁界の生物影響に関する国内外の研究の現状を調査する活動を開始し、1998年に調査結果報告書を公にしました⁽¹⁾。この間、同委員会は電磁界の生体影響に関するシンポジウムを開催し、正しい知識と正確な情報を提供していました。同委員会は1998年以降に公になった研究を取り入れた評価報告書の取りまとめに重点を置いた調査活動を継続させ、その結果を2003年に公表しました⁽²⁾。その後、同委員会は活動をさらに継続させ、電磁界の健康問題についての解説小冊子を発刊してきました⁽³⁾。

2. 低周波電磁界の評価

表1にこれまで行われた低周波電磁界の生体影響研究の主たる指標を示します。当初、問題とされた内容が発がんに関する事柄であったことからそれに関連する指標が個人・細胞レベルで取り扱われてきました。

<2.1>疫学研究

1980年代以降、低周波電磁界と発がんとの関連性に関する疫学研究が国際的に進められました。2000年に入り、わが国でも小児白血病の発症と低周波電磁界ばく露に関する疫

学研究が行われました。小児白血病の発症と低周波電磁界ばく露との関係について、2000年にカロリンスカ研究所の Ahlbom らがそれまで個別に行われた疫学研究を統合したプール解析を行い、低周波電磁界と小児白血病との関連性を限定的ながら示唆されました。

<2.2>動物実験

動物実験として、表1にあるようにラット・マウスなどの実験動物を用いて、低周波電磁界の発がん性に焦点を当てた実験研究、胎仔の発育や催奇形性等の生殖への影響、神経系・免疫系への影響に関する研究が行われました。特に、低周波電磁界が発がん過程に影響を及ぼすか（イニシエーション、プロモーション、プログレッション）が、大きな問題として研究が進められました。発ガン以外の実験も行われましたが、殆どの研究で低周波電磁界の影響はないとする結果でありました。このような結果から、低周波電磁界の影響は見られず、影響があると十分な証拠はないと判断されています。

<2.3>細胞実験

細胞を対象にした研究としては、表1に示すような指標が取り上げられて実験研究が行われてきました。これらは、発がんに関連する指標であり、DNAの損傷、染色体異常、突然変異、微小核形成など細胞の遺伝毒性、細胞の機能変化に関する遺伝子発現、ストレスタンパクなどに対する低周波電磁界ばく露の影響を明らかにする研究が数多くなされました。我々の生活環境レベルでの磁界ばく露では、当初、影響が見られた研究結果もその後の研究で再現されていないなど、多くの研究は生活環境レベルの電磁界の影響に否定的な結果であります。

表1：電磁界の生体影響研究の主な指標

The main parameters on the studies of ELF EMF

分野	対象	研究指標
疫学	ヒト	白血病（小児、成人）、乳がん、リンパ腫、メラノーマ、アルツハイマー病、ALS、流産、生殖
人体ばく露	ヒト	生理・心理影響、神経内分泌、免疫機能等
In Vivo	動物	行動変化、乳がん、白血病、皮膚がん、肝臓、リンパ腫、生殖・発育、神経内分泌、免疫機能等
In Vitro	細胞	遺伝子発現、シグナル伝達、突然変異、染色体異常、細胞増殖・細胞周期、DNA合成、微小核形成、ストレス、アポトーシス他縁

3. 国際機関の評価

世界保健機関 (WHO) は 1996 年から開始した国際電磁界プロジェクトの成果として、低周波電磁界に関する環境保健クライテリア (EHC No. 238) を 2007 年に発刊しました⁽⁴⁾。同クライテリアでは、短期 (急性) 影響ならびに潜在的な長期 (慢性) 影響を取り上げ、1) 短期影響では、強い電磁界では体内に誘起される電流による生物学的な影響が生じる、刺激作用が科学的に確立している。その結果、神経・筋肉への刺激や中枢神経系の興奮を起こすことが知られている。2) 長期影響では、小児白血病に関する疫学結果のメタ解析により、磁界は「発がん性があるかもしれない」とする国際がん研究機関 (IARC) の分類があり、この結果を変更するものではないとしています。その他の病気では、磁界ばく露との関連性は指摘されていません。このような結果から、3) WHO は短期影響より、政策立案者は、職業者と一般公衆を急性ばく露から防護する国際的なばく露ガイドラインを採用すること。長期影響を考慮して、低周波電磁界に関する科学的情報の収集や研究プログラムの更なる推進をはかること。全ての利害関係者を交えた効果的で公開されたコミュニケーションをはかることを推奨しています。加えて、電気設備の新設、電気製品の新設計時など、ばく露を低減する低コストな方策を探索することなどが、議論されています。

環境保健クライテリア発行に先立ち、2001 年の IARC ならびに、2005 年には WHO が主催してタスクグループ会議が開催され、クライテリアはこれらの機関における生体影響評価の結果に基づいたものであります。この生体影響評価を踏まえ、国際的なガイドラインの見直しもなされました⁽⁵⁾。一方、BioInitiative 報告で提案されているように、より厳しい規制を設ける必要性も叫ばれました⁽⁶⁾。

欧州では、SCENIHR (新興・新規特定の健康リスクに関する科学委員会)¹ から低周波、中間周波ならびに高周波電磁界と健康に関する研究論文についての評価報告書が公表されているなど⁽⁷⁾、定期的に電磁界研究の現状の紹介が進められている。

電気学会では、生体および医療における磁気利用調査専門委員会が、直流電磁界ならびに低周波電磁界の健康リスク評価の状況を 2009 年に公表しています⁽⁸⁾。

4. 最近の研究

歴史的には、1979 年に提起された「電磁界の健康影響—人の発がんに対する影響—」問題について、ほぼ 30 年にわたる研究から、2007 年に WHO より環境保健クライテリアが発刊され、健康リスク評価がなされたと考えることができます。その後、電磁界の生物影響に関連する研究が幾つか進められています。特に、携帯電話の普及に伴う高周波

電磁界の影響解明が主たる目標となっており、WHO も国際電磁界プロジェクトを延長して、高周波電磁界の健康リスク評価を進めています。

これまで主導的に研究を進めてきた欧州では、WHO を中心に、電磁界の健康への影響に不安を抱く人が多数いることから、コミュニケーションの重要性が認識され、電磁界の影響に関する健康リスク・コミュニケーションが今後取り組むべき課題として取り上げられています。

しかし、電磁界の不確実性が残っていること、特に、人の発がんへの影響の有無が低周波電磁界の健康影響問題の発端であったことから、米国では電力研究所 (EPRI) を中心として、磁界ばく露評価の精密化を考慮した疫学研究が進められています。また、実験研究についても幾つかの進展が見られますが、従来の評価に影響を与えるまでには至っていません。

<4.1> 低周波電磁界 (300 Hz 以下)

小児白血病については、Wertheimer と Leeper による研究から始まり、2000 年には Ahlbom らの低周波磁界ばく露と小児白血病のプール解析結果による健康影響リスク評価がなされました。その後、2000 年以降に行われた低周波磁界と小児白血病に関する研究をプール解析した結果が報告されています^(9, 10)。その結果は、全体として低周波磁界ばく露と小児白血病の関連性は、より最近計画され、結果が発表された研究で弱い。また、これらの研究の規模が小さく、明確な関連性を導き出すに必要な方法的な改善が欠けているようなことから、現時点における低周波磁界と小児白血病に関する最近の研究で、磁界が発がんの可能性があると (possibly carcinogenic)、以前の評価を変えることはないとするのが結論であります。更に低周波磁界の居住ばく露と小児の脳腫瘍についての解析も行われましたが、影響の有無について明確な傾向性は得られていません^(11, 12)。加えて、低周波磁界と小児の脳腫瘍についてのプール解析が行われています⁽¹³⁾。低周波電界についての疫学研究のプール解析結果の報告がありますが⁽¹⁴⁾、結論を得るには証拠が不十分であるとされ、職業的な低周波磁界ばく露については、アルツハイマー病との関連性が指摘される報告がなされています⁽¹⁵⁾。

疫学研究は、現在、EPRI が屋内変電所 (変圧器) を備えているアパートでの磁界ばく露評価研究 (TransExpo 研究) が進められており^(16, 17)、英国 Draper らが行った小児白血病と送電線からの距離と磁界との関連性についての再現研究が進められました。Draper らは結果を取りまとめており⁽¹⁸⁾、小児白血病と送電線からの距離との関連性はないとしています。TransExpo 研究では、パイロット研究に引き続き、小児白血病発症のリスクが高いダウン症候群の子供による前向きな疫学研究の実施の可能性が検討されています。

¹ Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks の略

In vivoならびに In vitro な実験研究は、WHOの健康リスク評価以降、従来の研究評価指標（表1参照）に焦点を当てた研究結果が幾つか散見されるが、健康リスク評価に影響を与えるほどのデータベースとはなっていないのが現状であります。例えば、マウスの用いたリンパ腫発症への低周波磁界ばく露の報告⁽¹⁹⁾、韓国から AKR マウスを用いた低周波磁界ばく露実験が報告されていますが⁽²⁰⁾、共に影響はみられず、従来の評価を変えるまでには至っていません。

ドイツの研究者グループから、小児白血病の病因を明らかにするために小児の主要な白血病である急性リンパ性白血病 (ALL) に焦点を絞った研究を進めるための議論がなされている⁽²¹⁾。特に、白血病発症の適切な動物モデル作成を試みることの必要性が指摘されています。

<4.2> 中間周波電磁界 (300 Hz-100 kHz)

IH 調理器 (クッキングヒータ) は、数 10kHz の中間周波電磁界で駆動しています。このような中間周波数帯の電磁界の健康への影響が懸念され始めたことから、疫学、実験研究がなされるようになってきました。しかし、健康影響に焦点を絞った疫学研究は殆どなされていません。動物を用いた生殖毒性試験、遺伝毒性試験などが電力中央研究所の研究者から発表されていますが^(21, 22, 23)、中間周波電磁界の健康リスク評価を行うには、データベースが不足しているのが現状であります。

5. まとめ

2007年にWHOが低周波電磁界の健康リスク評価を行った結果、これまで主導的に研究を進めてきた国々では、電磁界のリスクコミュニケーションの重要性、電磁界に不安を抱いている人々と研究を進めてきた人々との双方向的な対話の必要性が認識され始めました。そのため、科学的な情報を正確に収集、発信できる組織が必要となってきた状況であると考えられます⁽²⁴⁾。これまで以上に、電磁界を用いた様々な先端的な技術が増加の一步をたどっている現状を考えますと、科学に基づいた、より正確なコミュニケーションが必要であり、そのためには、これまで以上に研究の推進、正確な情報の収集、ならびにコミュニケーション手法の改良など従来の手法の問題点を明確にして、新たな方策を模索する必要がある。

文 献

- (1)電気学会・電磁界生体影響問題調査特別委員会編：電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題。1998年。
- (2)電気学会・電磁界生体影響問題調査特別委員会編：電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題。第Ⅱ期報告書、2003年。
- (3)電気学会・電磁界生体影響問題調査特別委員会編：新電気の暮らしと健康不安。2010年。

- (4)World Health Organization, Extremely Low Frequency Fields, Environmental Health Criteria 238, Geneva, Switzerland, ISBN 978-92-4-157238-5, 2007.
- (5)ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz). Health Phys. 99:818-836 (2010).
- (6)BioInitiative Working Group: BioInitiative Report: A Rational for a Biologically-based Public Exposure Standards for Electromagnetic Fields (ELF and RF). (2007/8/31)
<http://www.bioinitiative.org/report/docs/report.pdf>
- (7)SCENIR: Health Effects of Exposure to EMF.
<http://ec.europa.eu/health>.
- (8)電気学会・生体および医療における磁気利用調査専門委員会編：電磁界の健康リスク評価の現状。技術報告書。第1167号 (2009/8)。
- (9)Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Draper GJ, Hagihara J and Lowenthal RM: Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukemia. Br J Cancer 103: 1128-1135 (2010)
- (10)Schüz J: Exposure to extremely low-frequency magnetic fields and the risk of childhood cancer: Update of the epidemiologic evidence. Prog Biophys Mol Biol. 2011 (in press).
- (11)Mezei G, Gadallah M and Kheifets L: Residential magnetic field exposure and childhood brain cancer: a meta-analysis. Epidemiology 19: 424-430 (2008)
- (12)Filho V, Pelissari DM, Barbieri FE, et al: Exposure to magnetic fields and childhood acute lymphocytic leukemia in Sao Paulo, Brazil. Cancer Epidemiology (2011) (in press).
- (13)Kheifets L, Ahlbom A, Crespi CM, Feychting M, Johansen C, Montoe J, et al: A pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. Am J Epidemiology 172: 752-761 (2010).
- (14)Kheifets L, Renew D, Sias G and Swanson J: Extremely low frequency electric fields and cancer: assessing the evidence. Bioelectromagnetics 31: 89-101 (2010).
- (15)Huss A, Spoerri A, Egger M and Rössli M: the Swiss National Cohort Study: Residence near power lines and mortality from neurodegenerative disease: longitudinal study of the Swiss population. Am J Epidemiology 169: 167-175 (2009)
- (16)Rössli M, Jenni D, Kheifets L and Mezei G: Extremely low frequency magnetic field measurements in buildings with transformer stations in Switzerland. Sci Total Environ 409: 3364-3369 (2011).
- (17)Hareuveny R, Kandel S, Yizhak NM, Kheifets L and Mezei G: Exposure to 50 Hz magnetic fields in apartment buildings with indoor transformer stations in Israel. J Expo Sci Environ Epidemiol 21: 365-371 (2011).
- (18)Kroll ME, Swanson J, Vincent TJ and Draper GJ: Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. Br J Cancer 103: 1122-1127 (2010).
- (19)Negishi T, Imai S, Shibuya K, Nishimura I and Shigemitsu T: Lack of promotion effects of 50 Hz magnetic fields on 7,12-dimethylbenz (a) anthracene-induced malignant lymphoma/lymphatic leukemia in mice. Bioelectromagnetics 29: 573-582 (2008).
- (20)Chung MK, Yu WJ, Kim YB and Myung SH: Lack of a co-promotion effect of 60Hz circularly polarized magnetic fields on spontaneous development of lymphoma in AKR mice.

- Bioelectromagnetics 31: 130-139 (2010).
- (21)Ziegelberger G, Baum C, Borkhardt A, Cobaleda C, Dasenbrock C et al: Research recommendations toward a better understanding of the causes of childhood leukemia. Blood Cancer Journal (2011). doi:10.1038/bcj.2010.1
- (22)Shigemitsu T, Negishi T, Yamazaki K, Kawahara Y, et al: A newly designed and constructed 20 kHz magnetic field exposure facility for in vivo study. Bioelectromagnetics 30: 36-44 (2009).
- (22)Nishimura I, Imai Sand Negishi T: Lack of chick embryotoxicity after 20 kHz, 1.1 mT magnetic field exposure. Bioelectromagnetics 30: 573-582 (2009).
- (23)Nakasono S, Ikehara M, Dateki M et al: Intermediate frequency magnetic fields do not have mutagenic, co-mutagenic or gene conversion potentials in microbial genotoxicity test. Mutation Research 649: 187-200 (2008)
- (24)例として、2010年にドイツで作られた“EMF & Environment” (<http://www.wik-emf.org/>) 電磁界に着目して健康影響、コミュニケーション等の最先端情報、その背景情報の提供。

疫学研究の動向

山口 直人(東京女子医科大学)

1. 超低周波電磁界に関する疫学研究の動向

1.1. 小児白血病に関する最近の報告

Ahlbom らによるプール分析が IARC モノグラフ 80 巻における超低周波電磁界と白血病のリスク評価で大きな位置を占めたが、その後に発表された疫学研究のプール分析が報告されている (Kheifets et al. 2010a)。ブラジル、ドイツ、英国、イタリア (2 研究)、日本、オーストラリアの 7 研究を対象としたプール分析であり、 $<0.1 \mu\text{T}$ を基準とした場合のオッズ比は、 $0.1\text{--}0.2 \mu\text{T}$ では 1.07 (95%信頼区間: 0.81–1.41)、 $0.2\text{--}0.3 \mu\text{T}$ では 1.16 (95%信頼区間:0.69–1.93)、 $>0.3 \mu\text{T}$ では 1.44 (0.88–2.36)であったと報告されている。

この中で、最も症例数が多かったのは英国の症例対照研究であり (Draper et al. 2005)、症例は、England, Scotland, Wales で 1962-95 に診断された 0-14 歳の小児白血病 9,700 症例、対照は、性、誕生日、出生地を個人マッチングした健康者を Birth Registers から無作為抽出したものである。ばく露指標は National Grid から 21,800 鉄塔の位置情報を得て出生時の住所と高圧線との距離を推計したものが用いられた。距離 600m 以上を基準とした場合、社会経済レベルを調整したオッズ比は、200~599m では 1.22 (95%信頼区間:1.01–1.47)、199m 以下では 1.68 (95%信頼区間:1.12–2.52) あったと報告されている。

Draper らの報告では、高圧線からの距離をばく露評価に用いたことに限界があったが、Kroll ら (2010) は、磁界レベルの推計を行った結果を基に再分析を行った結果を報告している。その結果として、 $<0.1 \mu\text{T}$ 群は症例 9645 名、対照 9647 名、 0.1 to $<0.2 \mu\text{T}$ 群は症例 6 名、対照 3 名、 0.2 to $<0.4 \mu\text{T}$ 群は症例 0 名、対照 2 名、 $>0.4 \mu\text{T}$ 群は症例 2 名、対照 1 名という内訳であり、 $0.1 \mu\text{T}$ 以上の症例、対照はわずかであって統計的に有意な増加は認められなかったと報告している。

ダウン症患者を対象とした症例対照研究がメキシコから報告されている (Mejia-Arangure, et al. 2007)。ダウン症候群は先天的な染色体異常で、白血病リスクが染色体異常を持たない者よりも 20 倍程度高いことが分かっている。この症例対照研究ではダウン症患者で白血病を発症した 42 例を症例群、ダウン症患者で白血病を発症していない 124 例を対照群として分析が行われた。1.00mG 以下を基準とした場合、出生体重、性、年齢、母親の年齢、社会経済レベル、癌の家族歴、交通密度、居住地を調整したオッズ比は、1.01–3.99 mG では 0.94 (95%信頼区間:0.37–2.4)、4.00–5.99 mG では 0.88 (95%信頼区間:0.15–5.1)、6.00mG 以上では 3.7

(1.05–13)であって、高ばく露群に 4 倍近いリスク上昇が認められたと報告されている。

以上のように、これまでに我が国の研究も含めて数多くの症例対照研究が実施されてきた。しかし、Ahlbom らのプール分析、Kheifets らのプール分析で示されているように、磁界レベルの高い群で小児白血病リスクが高くなる傾向が示されているが、症例対照研究に固有の問題点である参加バイアス (selection bias) などは解決されず、因果関係の可能性はあるがバイアスの影響も否定できないという評価結果は変わらない。そこで、今後の研究の方向性について若干の考察を加えたい。

小児白血病の発症メカニズムの解明は急速に進んでいる。多くの小児白血病、特に、B 前駆細胞急性リンパ芽球性白血病 (precursor B-cell ALL) では、出生前に第一ヒット、出生後に第二ヒットが起こって発症する、いわゆる 2 段階発がんメカニズムが明らかになっている。第一ヒットは、染色体転座、染色体の高二倍性の形成によって起こり、前白血病クローン (preleukemic clone) が形成される。そして出生後に、前白血病クローン中の細胞に第二ヒットが起こって白血病が発症する。また、小児白血病の中でも、骨髄性かリンパ芽球性かなど、サブタイプによって発症プロセスも異なる。

以上の小児白血病発症メカニズムから考えると、超低周波電磁界が発症リスクに影響するとしたら、どのサブタイプに影響するのか、発症プロセスのどの部分に影響するのか、発症プロセスに配慮した研究が待たれる。また、発症における遺伝的因子の影響も加味し、遺伝・環境相互作用 (gene-environment interaction) を考慮した研究デザインによる研究の推進が望まれる。

1.2. 小児脳腫瘍に関する最近の報告

Kheifets らは、これまでに実施された症例対照研究のプール分析の結果を報告している (Kheifets, et al. 2010b)。英国 (2 研究)、米国 (2 研究)、スウェーデン、フィンランド、ノルウェー、デンマーク、ドイツ、日本の 10 の研究のプール分析であり、 $<0.1 \mu\text{T}$ の群を基準にした場合のオッズ比は、 $0.1\text{--}0.2 \mu\text{T}$ で 0.95 (95%信頼区間:0.65, 1.41)、 $0.2\text{--}0.4 \mu\text{T}$ で 0.70 (95%信頼区間:0.40, 1.22)、 $>0.4 \mu\text{T}$ で 1.14 (95% 0.61, 2.13)であり、磁界レベルとともにリスクが上昇する傾向は認められなかったと報告している。

以上から、今後の方向性として、超低周波電磁界と小児脳腫瘍の発症リスクの関連については、疫学研究を更に実

施する必要性は低いと言える。

2. 高周波（ラジオ波）電磁界に関する疫学研究の動向

2.1. 成人における携帯電話端末使用

IARCによる発がん性評価が実施され、携帯電話が使用するラジオ波電磁界に対して、グループ 2B「possibly carcinogenic to humans（人に発がん性のある可能性がある）」に分類するという結果が公表された（Baan et al. 2011）。モノグラフは未刊行なので詳細は分からないが、携帯電話端末使用に関する症例対照研究であるインターフォン研究、Hardell らによるスウェーデンの症例対照研究、さらに我が国で実施された case-case 研究などが評価対象になったと報告されている。腫瘍としては神経膠腫、聴神経鞘腫について上述の「可能性あり」という評価が下されたが、その他の腫瘍についてはグループ 3、すなわち証拠が十分でないという評価であった。今後の課題として、携帯電話端末使用による電磁界ばく露が果たして発がん性を有するのか、想起バイアス（recall bias）などの問題に配慮した信頼性の高い疫学研究で確認する必要がある。また、その他のばく露形態での影響の有無についても疫学研究を実施する必要がある。

2.2. 小児における携帯電話端末使用

小児は身体的な発達途上であり、また、頭蓋部の解剖学的な形状も成人と異なることから、携帯電話端末使用が健康に影響するとしたら、それは成人とは異なる可能性がある。また、小児期の携帯電話使用のパターンは、成人とは異なっていることが明らかにされている。そこで、世界保健機関では、小児期における携帯電話端末使用と健康の疫学研究を、最も優先度の高い研究課題のひとつに位置づけている。

ヨーロッパにおいて実施された研究（通称、CEFALO 研究）の結果が最近報告された（Aydin et al. 2011）。デンマーク、スウェーデン、ノルウェー、スイスの 4 カ国で実施された小児脳腫瘍（7～19 歳）の症例対照研究であり、352 症例と住民対照 646 例を比較した結果が報告されている。非使用者と比較した場合の使用者のオッズ比は 1.36（95%信頼区間:0.92–2.02）で有意な増加は認められなかった。使用開始から 5 年を超えた者でのオッズ比は 1.26（95%信頼区間:0.70–2.28）、累積使用期間（契約年数による）が 4 年を超えた者のオッズ比は 1.58（95%信頼区間:0.86–2.91）、累積使用時間が 144 時間（75 パーセントイル値）を超えた者のオッズ比は 1.55（95%信頼区間:0.86–2.82）、累積使用回数が 2638 回（75 パーセントイル値）を超えた者のオッズ比は 1.42（95%信頼区間:0.79–2.53）であり、いずれも 1 を超えていたが、統計的に有意な増加ではなく、傾向性

の検定も有意ではなかったと報告されている。ただし、通信事業者からのデータが入手できた症例・対照に限った分析では、使用開始からの年数（契約期間による）が 2.8 年を超えた者のオッズ比は 2.15（95%信頼区間:1.07–4.29）と有意な増加が示されており、傾向性の検定でも有意であった（ $P=0.001$ ）と報告されている。

我が国を含めた 14 カ国（オーストリア、オーストラリア、カナダ、フランス、ドイツ、ギリシャ、イスラエル、イタリア、ニュージーランド、スペイン、台湾、オランダ、インド、日本）が参加する国際共同の症例対照研究 Mobi-Kids プロジェクトが進行中である。我が国では、東京都を調査地域として症例、対照のインタビュー調査が進められている。2014 年頃まで調査が進められる予定であり、結果の公表は 2015 年頃になる見込みである。

3. 考察

我が国では第三世代通信システムの普及が急速に進んでおり、それに伴って携帯電話端末使用による電磁界ばく露も第二世代までと比較して格段に小さくなっている。一方、bluetooth、WiFi 通信など、電磁波を利用した新しい製品が登場しており、それらの評価も必要となってきた。このような状況から考えると、工学専門家との連携によって最適な研究デザインによる研究の推進が引き続き求められる。また、小児白血病で述べたように疾患の発症メカニズムの解明も急速に進んでおり、問題となっている疾患の専門家との連携によって疫学研究の質を向上させることも重要である。

文 献

- Aydin D, et al. (2011) Mobile phone use and brain tumors in children and adolescents: A multicenter case-control study. *J Natl Cancer Inst* 103, 1264-1276.
- Baan R, et al. (2011) Carcinogenicity of radiofrequency electromagnetic fields. *Lancet Oncology*, 12, 624–626.
- Draper G, et al. (2005) Childhood cancer in relation to distance from high voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br Med J* 330: 1290–1294.
- Kheifets L et al. (2010a) Pooled analysis of recent studies on magnetic fields and childhood leukaemia. *Br J Cancer*, 103, 1128–1135.
- Kheifets L et al. (2010b) A Pooled analysis of extremely low-frequency magnetic fields and childhood brain tumors. *Am J Epidemiol*, 172, 752–761.
- Kroll ME, et al. (2010) Childhood cancer and magnetic fields from high-voltage power lines in England and Wales: a case-control study. *Br J Cancer* 103, 1122–1127.
- Mejia-Arangure JM, et al. (2007) Magnetic fields and acute leukemia in children with Down syndrome. *Epidemiology*, 18, 158–161.

電磁界生体影響問題のリスク・コミュニケーション

世森 啓之*, 倉成 祐幸, 大久保 千代次
(一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター)

Risk communication on possible health effects of exposure to electric and magnetic fields
Hiroyuki Yomori, Yuko Kuranari, Chiyoji Ohkubo
(Japan EMF Information Center, Japan Electrical Safety & Environment Technology Laboratories)

1. はじめに

商用周波数 (50/60Hz) を含む, 超低周波数磁界の健康影響については, 1979 年に米国の研究者が居住地近くの送配電線の形状とその居住地に住む子供のがんと関連を疫学的に示唆⁽¹⁾して以降, いくつかの国際機関や各国の専門機関が総合的な健康影響評価活動を行ってきた。現在のところ, 2007 年の世界保健機関 (WHO) による環境保健クライテリア EHC No. 238 「超低周波数電磁界」の公表⁽²⁾と, それに引き続き, 2010 年に国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) が 100kHz までの電界および磁界のばく露制限に関するガイドラインを公表した⁽³⁾ことで, とりあえず超低周波数磁界 (以下, 特に断らない限り「磁界」と表記する。) の健康リスク評価活動は一段落したように見える。

その一方で, このような磁界の健康影響に関しては, 人々の間にいまだに根強い不安が残っている。その背景として, 磁界の発がん性について, 国際がん研究機関 (IARC) が「2B」(possibly carcinogenic to humans) と評価し⁽⁴⁾, それを「発がん性があるかもしれない」と日本語に翻訳され, このわかりづらいつい概念が一般の人々の解釈・判断を困難にしていることを否定できない。また, 電界や磁界, およびその発生源となる電力設備や, その周辺でのばく露状況などは, 「未知性」や「非自発性」などの特徴を含んでおり, 心理学的にはそれらに関わるリスクに対する人々の認知を高めるバイアスが働くとされている⁽⁵⁾。さらには, インターネット上に磁界の健康影響, 特に発がん性や電磁過敏症の誘発を明確に肯定するような情報が溢れていて, このような情報に容易にアクセスできることも人々を不安に導く要因の 1 つとなっている。

このような状況を改善するには, 人々が不安を感じる要因および人々に科学的な情報がうまく伝わらない要因を分析し, それに応じた具体的な対策およびその効果を 1 つずつ検討する必要があるが, ここではその詳細については触れない。本稿では, 対策の 1 つとして考えられる, 「中立的機関によるリスク・コミュニケーション」の必要性を踏まえて設立された一般財団法人電気安全環境研究所 電磁界情報センター (JEIC) の設立の経緯と JEIC によるリスク・

コミュニケーションの実践について概説する。

2. JEIC とは

2.1 設立の経緯

WHO による EHC No. 238 の公表に向けた作業と並行して, 経済産業省原子力安全・保安院は, 2007 年 4 月, 一般の人々が生活する環境における電力設備から発生する磁界に関する規制のあり方を検討するため, 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会に「電力設備電磁界対策ワーキンググループ」を立ち上げた。

当時, 電力設備から発生する電界および磁界については, 電界のみ, 「電気設備に関する技術基準を定める通商産業省令」によって市街地の架空送電線下での値が制限 (地上 1m で 3kV/m) されていた⁽⁶⁾。一方磁界については制限の対象となっていなかったため, WHO でのリスク評価結果を踏まえて, 磁界の制限値導入の必要性について検討することとしたものである (2011 年 10 月 1 日に, 磁界を 200 μ T に制限する条項を導入する改正省令が施行されている)。

ワーキンググループでの議論の結果は, 2008 年 6 月に報告書としてまとめられ, 公表された⁽⁷⁾。ワーキンググループによる政策提言は, 基本的には WHO が EHC No.238 に併せて公表したファクトシート No.322⁽⁸⁾の内容に沿ったものである。すなわち, ICNIRP が定めたガイドライン (当時は, 1998 年に公表されたガイドライン⁽⁹⁾を引用していた) に基づく磁界制限の導入を提言したほか, 人々の不安の対象となっている磁界の発がん性などの長期的影響の可能性については, 因果関係が不明確であって制限値の根拠にはならないとしつつ, それ以外に取るべき政策として, ①研究の推進, ②リスク・コミュニケーション活動の充実, および③ばく露低減のための低費用の方策, が提言された。JEIC は, このうち②の政策提言に基づき設立されたものである。

2.2 組織

JEIC は, 一般財団法人電気安全環境研究所 (JET) の一部局として 2008 年 7 月に誕生した。JET は, 電気用品取締法に基づく指定試験機関として 1963 年に設立された一般財

団法人である。また、近年では、電力設備電磁界情報調査提供事業を経済産業省から受託している。

JEIC の組織構成を図 1 に示す。2.3 に後述するが、リスク・

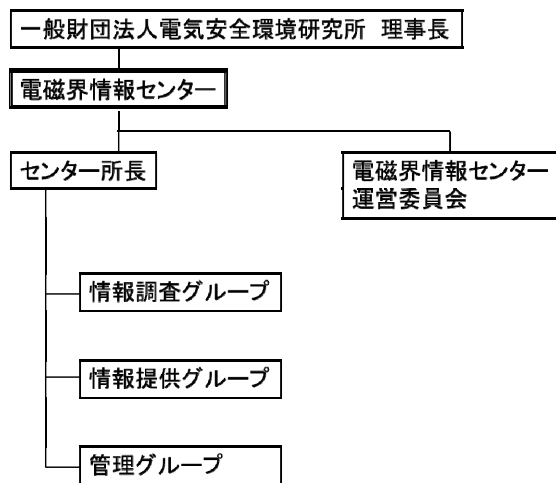


図 1.JEIC の組織

コミュニケーションを担う組織に対する信頼性とリスク・コミュニケーションの効果とは、表裏一体の関係があると考えられる。組織が信頼されるためには、組織が中立的であり、業務運営が公平であることが必要である。JEIC ではその点を重視し、第三者からなる「電磁界情報センター運営委員会」を設置している。その役割は、「JEIC の運営に関する重要事項を審議し、JET 理事長に対して意見具申を行う」ことであり、このような外部の監視の目を入れることで、JEIC の業務運営の透明性、中立性、および公平性などを担保していることが大きな特徴である。

2.3 活動理念・目的

JEIC は、「中立な立場から、電磁界に関する科学的な情報をわかりやすく提供するとともに、リスク・コミュニケーションの実践を通じて、電磁界の健康影響に関する利害関係者のリスク認知のギャップを縮小する」ことを活動理念として掲げている。リスク・コミュニケーションを効果的に実践するには組織への信頼を得ることが必要であり（逆に、リスク・コミュニケーションの目標が信頼の獲得なのかもしれないが）、そのために、「専門的知見の高さ」と「誠実さ・熱意」を組織運営の両輪にすべきであるとわれわれは考えている。

次項以降では、このような組織能力を活かしながら、また能力をさらに高めるために JEIC が取り組んでいる活動について、その方法と効果について述べる。

3. JEIC によるリスク・コミュニケーション活動 — 基本的な考え方

3.1 何を指す組織なのか。

上述のとおり、JEIC の使命は、第三者機関として電磁界の健康影響に関するリスク・コミュニケーションを実施することである。このような第三者機関の機能として、たとえば次のようなものが考えられる。

「政策提言機関」：行政機関の諮問を受け、科学的・専門的見地から分析・評価を行い、政策提言を行うもので、高度な専門性が要求される。

「オンブズマン」：行政などに対する調査権を持ち、市民の苦情解決や紛争処理に当たる。多くの場合、行政機関などから任命を受ける。

「仲介機関」：リスクに関わる利害関係者間の対話を仲介し、スムーズな意志決定を促進する。対話促進および利害調整のために、社会心理学的知見が要求される。

「情報提供機関」：科学的情報を、必要な人に必要な形でわかりやすく提供する。科学情報の解説者の役割を果たすため、当該科学に関する専門性と対話能力が要求される。

JEIC はこれらの第三者機関の役割のうち、まずは「情報提供機関」としての役割を果たすことを目指している。そのために必要な「専門性」と「対話能力」、さらには第三者機関としての「信頼性」を獲得し、磨くための JEIC の取り組みを以下に示す。

3.2 「専門性」を高め、活かすために

a. 電磁界文献データベースの構築

電磁界の健康影響問題は、医学、生物学、物理学、電気工学など多くの専門分野の知見を必要とする学際的問題であり、様々な分野の学術誌から多くの論文が公表されている。また、電磁界のリスク評価ばかりでなく、リスク管理という観点では防護のためのガイドラインや各国で定められている法律などの公文書が存在するし、さらには、リスク・コミュニケーションに関する論文なども存在する。これら多くの文献を、「電磁界」というひとつの枠で一元的に収集している組織は国際的にもきわめてまれで、日本国内にはまったくない。JEIC では、このような文献を収集し、内容を把握し解釈できる能力を備えた専門スタッフが文献の概要をまとめた上で、電磁界文献データベースとして一般公開している。2013 年までに、10,000 件の文献を蓄積する予定である。

なお、著作権等の制限により、学術論文や一部の公文書については、そのものをウェブ上で公開することができないため、印刷文書として JEIC に保管し、希望者には閲覧してもらうような体制を取っている。

b. 専門家ネットワークの構築と専門的活動

JEIC の限られたスタッフでは、あらゆる分野の専門性を確保することは困難である。したがって、様々な分野の専

門家に協力いただき、必要な都度専門的見地からのアドバイスをいただけるような体制を構築している。

具体的には、JEIC 内にアドホックな検討チームを立ち上げ、上記専門家の助言をいただきながら、環境中の磁界測定、4 で述べるリスク・コミュニケーション活動の効果分析、海外の電磁界リスク管理政策調査、などの専門的調査活動を行っている。また、電磁界の健康影響問題を取り扱う上で重要な役割を果たすと思われる学术论文が公表されたり、国際機関や各国において電磁界問題に関わる何らかの重大なイベントがあった場合には、それらについての専門的知見を有する専門家に協力いただきながら、講演会の開催やウェブでの情報公開など様々な形で人々への情報普及を図っている。

3.3 「誠実さ・熱意」の示しどころ

第三者機関としての信頼性を高めるためには、3.2 で述べたような「専門性」を備えるだけでなく、電磁界の健康影響について不安を抱えていたり、電磁界のリスク管理方針に不満を感じている人々との対話において「誠実さ・熱意」といった人間的側面を示すことも重要であろう。JEIC がこのような人々と対話する機会は、日常的にある電話やメールなどでの問い合わせや、JEIC が主催する電磁波セミナー（4.1 に後述）などである。

図 2 に、JEIC への問い合わせの件数の推移を示すが、2008

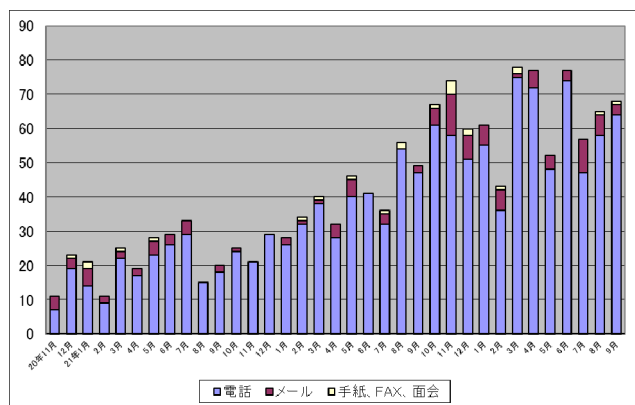


図 2. JEIC への問い合わせ件数の推移

年 11 月に JEIC としての活動を開始して以来、2011 年 9 月末までに累積で約 1,400 件の問い合わせがあった。原則として、電磁界とまったく関係のない問い合わせでない限り、JEIC のスタッフがすべてきちんと対応するようにしている。また、問い合わせの内容によってはかなり長時間の対応を要する場合もあるが、それらにもすべて対応している。

相手の話をきちんと聞くこと、安易な妥協はせず、かといってわれわれの考えを押しつけることもなく、真摯な姿勢で対話に臨むこと（科学に基づく情報をわかりやすく提供するように努めること）、調査が必要な場合はその旨を伝

え、約束した期日までにきちんと調査し、その結果を伝えること、を対話時の基本姿勢としている。電磁波セミナーなどでの対話でも同様である。

4. JEIC によるリスク・コミュニケーション活動 — 具体的な活動 —

4.1 知名度を高めるための活動

1 でも述べたように、電磁界の健康影響に関する科学的な情報のわかりにくさや一方的な視点からの情報の氾濫が人々の電磁界に対する不安を高める要因になっているのではないかという考察に基づき、JEIC では、まずは 3 で述べたような「専門性」や「誠実さ・熱意」を備えた上で、JEIC の存在をより多くの人々に認知してもらい、電磁界の健康影響問題に関して信頼できる情報源の 1 つと認識してもらうこと、さらには、不安や関心を持ったより多くの人に、国際的・科学的コンセンサスに基づく情報をよりわかりやすい形で提供することを第 1 の活動目標としている。

そのために、インターネットが有力なツールであると考え、インターネット上での JEIC の存在感を高めるために、バナー広告を掲載するなどの工夫を凝らしている。また、電磁界の健康影響に関する基本的な情報をわかりやすい言葉や図表を使って解説する機会として、1 ヶ月に 1 度以上の頻度で、全国各地で電磁波セミナーを開催している。2011 年 9 月末までにのべ 30 箇所以上で開催し、のべ 1,400 人以上の人が参加している。

電磁波セミナーでは参加者にアンケート調査への協力を依頼しているが、図 3 に、アンケート結果をまとめた結果

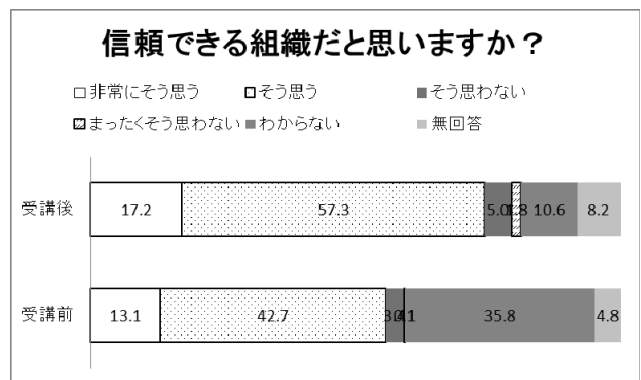


図 3. 電磁波セミナー参加者へのアンケート結果の例

の例を示す。電磁波セミナーは、電磁界およびその健康影響問題について漠然とした知識や関心・不安を持つ人を想定対象層としているため、新聞や地域情報誌などのメディアを利用して情宣している。したがって、参加者の多くは JEIC のことをあまり知らずに参加しているものと思われる。図 3 では、電磁波セミナー受講前には JEIC のことを「わからない」としていた人の割合が受講後には減少し、その分「信頼できる」と感じる人の割合が増加していることがわ

かる。このような活動が、JEICの知名度向上と人々への情報普及に大いに寄与していると言える。

4.2 対話の実践

3.3で述べた、電話などでの問い合わせへの対応は日常的な対話活動であり、継続していく必要がある。また、電磁波セミナーも人々との対話の機会ととらえ、セミナー後に個別相談の時間を設けるなど、「誠実さ・熱意」をもって対話に臨むように心がけている。

人々の中には、既に電磁界の健康影響について強い関心や不安と知識を持ち、また、国などの電磁界リスク管理政策に不満を持つ人やグループもある。このような人々との対話においては、単純な情報提供ではなく、議論や意見交換が必要となることが多い。JEICでは、このような対話スタイルの手始めとして、電磁界の健康影響およびその管理に関する問題について意見を異にする専門家などによる、公開での討論会（フォーラムと呼んでいる）を実施している。

まだそれほど開催実績はないが、図4に同じくこのよう

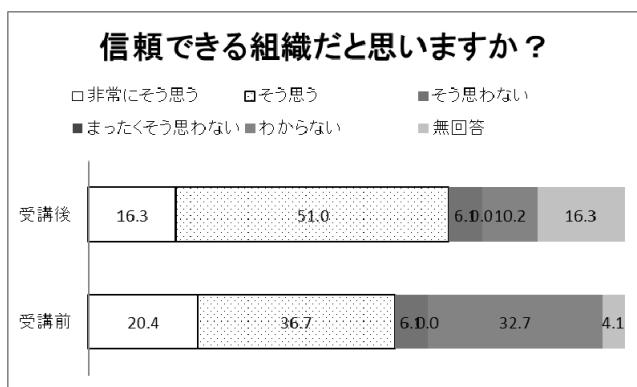


図4.フォーラム参加者へのアンケート結果の例

な討論会に参加した参加者のアンケート結果の例を示す。これまでのフォーラムでは、人々に様々な観点からの意見を聞く機会を提供するため、JEICのスタッフが専門家として他の専門家と対峙する形で討論に加わってきた。したがって、その発言内容や討論姿勢などによっては、逆に信頼度が下がることも懸念された。しかしながらアンケート結果で図3と同じような傾向が見られたことから推測すると、科学的事実を粛々と伝えようとする真摯な姿勢が信頼感の向上に寄与したのかもしれない。また、このように意見を異にする両者間での公開討論という試みは、少なくとも電磁界に関わる分野ではこれまでに行われてこなかったもので、期待感もあったのかもしれない。

5. 今後の課題

これまでJEICは、第三者的「情報提供機関」として、電

磁界の健康影響に関する科学的な情報の提供と、電磁界の健康影響に対して不安を持つ人々との対話に活動の中心を置いてきた。そのような活動を通じて、今後検討していかなければならない課題も明らかになってきた。

まず、伝えるべきメッセージの工夫がある。そもそも電磁界という難しい概念を取り扱うばかりでなく、リスクの存否があいまいという事情もあるので、よほどメッセージを工夫しないと、人々が「実感する」という意味での理解促進は達成できない。これまでも専門用語をわかりやすく解説するなどの努力をしているが、専門家の助言も得ながら、メッセージの伝達手段や電磁波セミナーのあり方なども含め、さらに改善していく必要がある。

また、人々の関心の対象となる電磁界発生源は多岐に亘る。技術の急速な進歩によって、発生源の形態や動作方式も日々変化している。これらすべての発生源について、電界および磁界発生の仕組みを理解し、そのレベルを知るとは困難ではあるが、少なくとも人々の関心の高いものについては、可能な限り電界および磁界の発生状況を調査しておく必要がある。

さらに、「電磁過敏症」と呼ばれる症状に苦しむ人が相当数存在する。「電磁過敏症」には明確な診断基準はなく、電磁界ばく露と症状との因果関係は確認できていないが、このような症状を有すると訴える人々が存在することは事実である。こうした人々との対話および救済のために、何らかの有効な対話方法あるいは別の方策を考えないといけないのかもしれない。

文 献

- (1) Wertheimer N, Leeper E, Electrical wiring configurations and childhood cancer, Am J Epidemiol. 109(3): 273-284, 1979
- (2) World Health Organization, Extremely low frequency fields, Environmental Health Criteria No.238, 2007
- (3) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1Hz to 100kHz), Health Physics 99(6), 818-36, 2010
- (4) International Agency for Research on Cancer, Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields, Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 80, 2002
- (5) リスク研究会編, リスク学事典, 阪急コミュニケーションズ, 2006
- (6) 電気設備に関する技術基準を定める省令, 平成9年3月27日通商産業省令第52号
- (7) 原子力安全・保安部会 電力安全小委員会 電力設備電磁界対策ワーキンググループ報告書, 平成20年6月
- (8) World Health Organization, Electromagnetic fields and public health: Exposure to extremely low frequency fields, Fact Sheet No.322, 2007
- (9) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Physics 74(4), 494-522, 1998

ドシメトリ研究の動向

山崎 健一（電力中央研究所）

Current Status of Studies on Dosimetry for Human Exposure to ELF Magnetic Field
Kenichi Yamazaki (Central Research Institute of Electric Power Industry)

1. はじめに

ドシメトリ (Dosimetry) とは、電磁界へのばく露により体内に生じる電気量を、測定や計算により求めることを意味する。平成7年に発足した電気学会「電磁界生体影響問題調査特別委員会」では、工学的側面を扱う第1作業部会（宅間董部会長）においてドシメトリ研究のレビューがなされ、平成10年[1]および平成15年[2]に報告書が発行された。その後、電気学会電磁環境技術委員会に、「電磁界による体内誘導電界・電流調査専門委員会（宅間董委員長）」ならびに後継の「不均一および過渡的な電磁界による体内誘導量評価技術調査専門委員会（藤原修委員長）」が組織され、委員比較計算を含む、ドシメトリ研究の詳細な検討・レビューがなされてきた[3]。これらの活動は、現在においても後継の委員会（「生体を含む電磁界解析技術調査専門委員会（上村佳嗣委員長）」ならびに「電磁界の生体防護ガイドラインおよび適合性評価技術動向調査専門委員会（平田晃正委員長）」において継続されている。本稿では、電磁界、特に磁界の人体ばく露における体内誘導量の計算評価（ドシメトリ評価）をめぐる最近の動向について述べる。

2. 体内誘導量評価方法

<2.1 体内誘導量評価の概要> 低周波（概ね100 kHz以下）の領域では、電磁界により体内に誘導される電界や電流の、神経や筋に対する刺激作用が、電磁界影響の科学的根拠のある再現性のある指標と考えられている[4]。この考え方にに基づき、体内誘導量（誘導電界）を指標として、ICNIRP（国際非電離放射線防護委員会）[5]やIEEE/ICES（米国電気電子学会／非電離放射の電磁界安全性に関する国際委員会）などの国際機関が人体防護指針を制定している[6,7]。これらの指針においては、基準となる体内誘導量から、これに対応する測定可能量である外部電磁界を定めるプロセスがあり、これを研究課題として、これまでさまざまな研究が進められてきた。特に近年では、数値計算技術の進歩と人体の断層画像に基づく数値モデルの開発も相まって、詳細な人体モデルを用いた体内誘導量の数値計算が各機関において行われるようになってきている。

磁界による体内誘導量の評価においては、計算対象の人

体モデルを仮定し、与えた外部磁界条件（大きさ、分布、周波数等）に対し、体内誘導量を計算する。特に人体防護指針における「基本制限」と呼ばれる、体内誘導量で表された制限値との適合性評価を行う用途においては、その結果が重要な意味を持つ。しかしながら、同一の磁界ばく露条件であっても、計算に使用するコード、人体モデル形状の差異、人体モデルに与える電気定数（導電率）の差異、および数値計算上の不確かさなどを反映し、体内誘導量の計算結果は異なる値を取り得るため、評価の妥当性についての議論を避けることができない。以下に、体内誘導量評価研究（ドシメトリ研究）の手法、すなわち数値計算手法、人体モデルについて、概要を述べる。

<2.2 解析的手法> 数値計算技術が著しく発展した昨今においても、透明性の確保が要求されるガイドライン[6]や標準化の分野等において、解析的手法が好まれることがある。また、解析解が存在する条件（モデル形状およびばく露磁界の条件）は、数値計算コード開発における検証においても用いられる。低周波領域においては、モデル中に生じる誘導電流による二次磁界が、外部磁界に対して十分に小さく無視できるため、比較的単純な解析式になることが多く、これまでにいくつかの条件における、解析式が示されている。これらは、①一様磁界中の均質球、②均質回転楕円体、③2媒質偏心球[8]、④均質直方体、ならびに⑤磁気ダイポール近傍の均質球[9]、などである[3]。

<2.3 数値計算手法> 近年の進展著しい数値計算手法については、さまざまな計算手法が提案されているが、詳細人体モデルを対象とした体内誘導量計算には、ボクセル（立方体形状のセル）を用いる手法が多く適用されている。人体においては、数10 MHzまでの周波数では、変位電流に対して伝導電流が支配的であること、ならびに人体の寸法に対して波長が十分に長いことから、準静的近似が適用されている。以下に、これまでに用いられている代表的な手法について概要を記す。

インピーダンス法： 人体を抵抗からなるボクセルでモデル化し、回路網方程式を解く手法である。米国 Utah 大学の Gandhi らによって開発され[10]、これまで、Stuchly らの初期の研究[11,12]をはじめ、低周波の体内誘導量計算に多く用いられてきた[13-16]。インピーダンス法では、作用項

として、扱いが容易な磁束密度を用いるため、磁界分布測定値に基づく評価が容易[14]になる利点がある。一方、SPFD法に比べ計算量が多くなる。

SPFD (Scalar Potential Finite Difference : スカラーポテンシャル有限差分) 法 : スカラーポテンシャルを未知数とする有限差分法であり、ボクセル頂部の各接点の電位を未知数として求める。外部磁界はベクトルポテンシャルで与えられ、インピーダンス法に比べ計算量は少ない。Dawson, Stuchly ら[17], イギリス HPA (Health Protection Agency, 健康保護局) の Dimbylow[18,19]をはじめ、近年ではもっとも多く適用されている手法である[20-23]。なお、太良尾・林・伊坂ら[21,22]は、未知数をボクセル中心に置く手法を用いている。なお、電気機器など実際の磁界発生源のモデル化のため、西澤ら[23]は等価波源モデルとして、電気機器周辺磁界分布の測定値より、円筒上に配置した複数個の磁気ダイポールの推定を行っている。

準静的時間領域差分(Quasi-Static FDTD)法 : 高周波電磁界の解析で多く用いられている FDTD (Finite-Difference Time-Domain) 法の一種であり、マクスウェルの方程式を差分化し、時間領域で解く手法である。FDTD 法を低周波に適用するには、膨大な解析時間(繰り返し数)が必要とされていたが、平田ら[24]は、入力波源を工夫することにより、低周波への適用を可能としている。また、FDTD 法では入射波源として磁界のみを発生させることは容易ではないことから、同一振幅で逆方向に伝搬する平面波を入射することにより、磁界のみのばく露を可能としている。

境界分割型の手法 : 境界分割型の手法として、境界要素法および表面電荷法が適用されており、これらの手法においては、モデル内の電界分布を、境界における量のみで表す。境界要素法では、電位とその法線方向微係数を、表面電荷法では表面電荷を未知数とする。境界分割型の手法は入力データ数を少なくでき、媒質数が少ない場合には計算精度の面でも有利である。従来、人体詳細モデルを用いた計算には不向きとされ、比較的単純な形状の人体モデルへの適用にとどまっていたが、最近では、高次曲面要素解析が行われるとともに、膨大な数の表面分割を可能とする高速多重極法を用いる手法が開発され [25,26]、本課題のような大規模複雑形状系の解析が可能となっている。

<2.4 数値人体モデル> 体内誘導量計算に用いられる人体モデルについては、人体の形状ならびに内部組織を数 mm の解像度で模擬する数値人体モデルが開発され、適用されている。これまで米国の Visible Human Project による米国人男性モデル (Brooks モデル) [17]が多く用いられるとともに、イギリスでは HPA による男女モデル (NORMAN, NAOMI) [18,19]が開発され、国内では情報通信研究機構が中心となり平均体型の日本人男女の数値人体モデル (TARO,

HANAKO) [27,28]が開発されている。なお、日本人数値人体モデルのボクセルサイズは 2 mm であり、51 種類の組織が同定されている。

一方、数値人体モデル内部の各組織に割り当てられる電気的特性(低周波磁界による誘導電流計算では導電率)については、出典によりさまざまな数値が存在するが、現在では、Gabriel[29]らにより示されている値が多く用いられている。図 1 に日本人男性モデルおよび米国 Brooks モデルにおける誘導電界分布の計算結果の一例を示す。

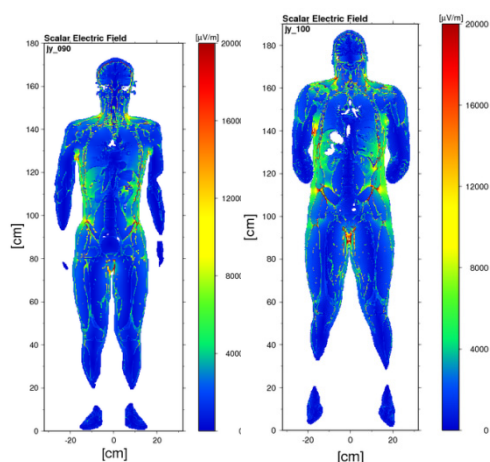


図 1 日本人男性モデルおよび米国 Brooks モデルにおける正面方向の一樣磁界(50 Hz, 0.1 mT)ばく露時の誘導電界分布の例

3. ドシメトリ研究の動向

<3.1 体内誘導量評価指標と ICNIPR ガイドライン>

特に防護指針との適合性評価において、用いる体内誘導量の評価指標についての関心が高い。評価指標として、下記の項目について議論がなされてきたが、2010年に改訂された ICNIPR 低周波ガイドライン[5]では、以下のように評価指標が明記されている。

- (a) 体内誘導量: 従来の誘導電流密度ではなく、誘導電界を用いる。
- (b) 体内誘導量の評価部位: 頭部の中樞神経系組織、および全身の全組織の 2 通りを評価する。
- (c) 領域での平均化: 辺長 2 mm の立方体空間での体積平均を扱う。平均化領域に他の組織を含む場合はこれを除くが、薄い組織である網膜と皮膚については、周辺組織まで含める。
- (d) 数値計算における不確かさの考慮: 上記の辺長 2 mm の立方体空間での体積平均を得たのち、組織ごとの 99 パーセンタイル値により、ガイドライン値と比較することとなった。これは、ボクセルを用いた数値計算手法においては、曲面をボクセルで模擬することに伴う不可避な不確かさが存在し、ボクセル最大値が過度に大きく評価されるため

[30,31], この影響を除去するために採用された指標である。しかしながら, その妥当性の検証は一般に困難である。

<3.2 同一の磁界ばく露条件による体内誘導量数値計算の比較例> 前述の電気学会の調査専門委員会においては, 委員参加による同一の磁界ばく露条件における比較計算が行われた[3, 32]。前述の日本人男性数値人体モデル(ボクセルサイズ 2 mm)を対象に, 国内の 6 研究機関(情報通信研究機構, 高松高専, 宇都宮大, 京都大, 名古屋工大, 電力中研)の参加を得て, 人体側方・正面方向・直立方向のそれぞれの様磁界(0.1 mT, 50 Hz)に対し, 体内誘導電界(ボクセル最大値, 全身の 99 パーセント値, 中枢神経系各組織の 99 パーセント値の最大値)および体内誘導電流密度(ボクセル最大値, 全身の 1 cm²断面の平均値, 中枢神経系各組織の 1 cm²断面の平均値の最大値)の計算が行われた[32]。この結果の一例として, 誘導電界の全身の 99 パーセント値は, いずれも人体の正面方向磁界ばく露において最大となり, 5.76 mV/m~12.4 mV/m の範囲に分布した[32]。

図 2 では, 脳における誘導電界の 99 パーセント値の計算結果について, 各文献に示された値を比較するとともに[19, 24, 33, 34], ICNIRP ガイドライン[5]における基本制限と磁界参考レベルの換算に用いられた関係についても示している。これらの結果は, 2.38 mV/m~3.3 mV/m の範囲に分布し, モデル間の差異も含む結果のばらつきが極めて小さいことが示されている。なお, Dimbylow ら[19], 平田ら[24], および Bahr ら[33]の結果は, ICNIRP ガイドライン[5]において参照されており, このうち Dimbylow ら[19]の結果が採用されている。すなわち 0.1 mT, 50 Hz の条件に対し, 誘導電界 3.3 mV/m を対応させ, さらに数値計算における不確かさとして低減係数 3 を見込んだ 10 mV/m が, 採用されている(頭部中枢神経系(CNS)組織の場合)。

<3.3 ドシメトリ研究の最近の話題と今後の展望>最後に, ドシメトリ研究をめぐるいくつかの最近の話題と今後の展望について述べる。

接触電流: 人体接触電流のばく露制限に関連し, 電磁界の誘導により帯電した物体への接触による人体電流を制限するため, ICNIRP ガイドラインにおいて参考レベルが示されている(1 Hz~2.5 kHz の周波数範囲では, 職業ばく露で 1.0 mA, 公衆ばく露で 0.5 mA)。これらは, 帯電した物体への接触による心臓通過電流の心室細動の閾値との対比により示されているが, 近年, 指針値レベルの接触電流により体内に生じる電流・電界の大きさについて, 数値計算により, 体内誘導量の基本制限と比較することについての関心が高まっており, 今後も検討が進展することが予想される[35,36]。

新たな技術に伴う電磁界ばく露への関心: ここ数年の

IH 電磁調理器, RF-ID の普及や, 最近では非接触電力伝送[37], EV(電気自動車), PV(太陽光発電)など, 新たな電気利用・電磁界利用技術の進展に伴い, 周辺に生じる電磁界の人体ばく露についても関心があり, 実態把握に加え, 解析や測定による評価の標準化手法が整備されていくものと考えられる。

数値計算におけるハード・ソフト・数値人体モデルの進歩: 最近の話題として, 体内誘導量計算における高速化が挙げられ, 特に GPU(Graphics Processing Unit)を数値演算に用いることにより, 計算速度が大幅に向上する事例が報告されている[38,39]。また, 市販のソフトにおいても進展が見られており[40], これらのソフトの数値人体モデルへの適用についても, 今後, 検討が進むことが予想される。

数値人体モデルについては, 最近では情報通信研究機構において妊娠女性・胎児モデルの開発や, 任意姿勢変形モデルの開発などが進められ, より現実に即した磁界ばく露条件における数値計算が可能となっている[41]。また, Virtual Family と呼ばれる数値人体モデル群が開発され, 体内誘導量計算に用いられるようになっている[42]。

国際ガイドライン間の整合: ICNIRP と並ぶ国際的なガイドラインである IEEE 規格[6,7]では, 現在の指針値に ICNIRP との乖離がある状況である。IEEE 規格では, 解析解のある単純モデルが用いられているが, 最近の詳細人体モデルを用いた, 脳や網膜における誘導量の計算結果[43]の, 規格改定への反映などが関心の対象である。

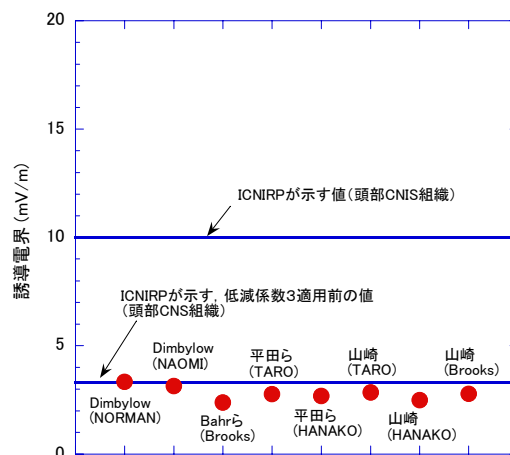


図 2 各種人体モデルに対する一様磁界(50 Hz, 0.1 mT)ばく露時の脳組織における誘導電界(全身のボクセルの 99 パーセント値)の比較ならびに ICNIRP ガイドラインの換算との比較。カッコ内は数値人体モデル名を表す。

4. おわりに

本稿では, ドシメトリ評価をめぐる最近の動向について述べた。本分野は, ここ数年最も進展が見られた分野であ

るが、引き続き動向の注視が必要である。

文 献

- [1] 電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会：「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題」（1998-10）
- [2] 電気学会電磁界生体影響問題調査特別委員会：「電磁界の生体影響に関する現状評価と今後の課題 第Ⅱ期報告書」（2003-03）
- [3] 電気学会：「電磁界による体内誘導電界・電流の計算」，電気学会技術報告 第1067号（2006-10）
- [4] World Health Organization: “Extremely Low Frequency Fields”, Environmental Health Criteria Monograph No. 238 (2007) (URL: http://www.who.int/peh-emf/publications/elf_ehc/en/index.html)
- [5] ICNIRP: “Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz to 100 kHz)”, Health Physics, Vol. 99, pp. 818-836 (2010)
- [6] IEEE: “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz”, IEEE Std C95.6 (2002)
- [7] IEEE: “IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz-300 GHz”, IEEE Std C95.1 (2005)
- [8] 太良尾・林・伊坂：「ELF 磁界による2媒質偏心球生体モデル内の誘導電界分布特性の解析」，電学論，Vol. 118-A, pp. 475-482 (1998)
- [9] L. Heller, D. B. van Hulsteyn: “Brain stimulation using electromagnetic sources: theoretical aspects”, Biophys. J. Vol. 63, pp. 129-138 (1992)
- [10] O. P. Gandhi, J.F. DeFord, and H. Kanai: “Impedance method for calculation of power deposition patterns in magnetically induced hyperthermia”, IEEE Trans Biom Eng, Vol. 31, pp. 644-651 (1984)
- [11] W. Xi and M.A. Stuchly: “High spatial resolution analysis of electric currents induced in man by ELF magnetic fields”, Appl Comput Electromagn Soc J, Vol. 9, pp. 127-134 (1994)
- [12] W. Xi and M.A. Stuchly: “Induced electric currents in models of man and rodents from 60 Hz magnetic fields”, IEEE Trans Biom Eng, Vol. 41, No. 11, pp. 1018-1023 (1994)
- [13] 和氣・渡辺・多氣：「日本人男女モデルを用いた50 Hz変動磁界による体内誘導電流の解析」，平成16年度電気学会基礎・材料・共通部門大会 8-1 (2004)
- [14] 鈴木・多氣：「誘導加熱調理器近傍の加熱周波数磁界の測定と人体誘導電流推定」，電学論 A, Vol. 125-A, No. 5, pp. 427-433 (2005)
- [15] Y. Kamimura, T. Akutsu, Y. Yamada, and K. Wake: “Induced current inside the human head in the vicinity of an electric shaver”, Proc. EMC'04/Sendai, 4B3-2 (2004)
- [16] 山崎・河本・藤波・重光：「非一様磁界中の人体ばく露評価手法に関する考察」，電学論 A, Vol. 127-A, No. 4, pp. 239-247 (2007)
- [17] T. Dawson and M.A. Stuchly: “High-resolution organ dosimetry for human exposure to low-frequency magnetic fields”, IEEE Trans Magnetics, Vol. 34, No. 3, pp.708-718 (2002)
- [18] P.J. Dimbylow, “Induced current densities from low-frequency magnetic fields in a 2 mm resolution, anatomically realistic model of the body”, Phys Med Biol, Vol. 43, pp.221-230 (1998)
- [19] P.J. Dimbylow, “Development of the female voxel phantom, NAOMI, and its application to calculations of induced current densities and electric fields from applied low frequency magnetic fields”, Phys Med Biol, Vol.50, pp.1047-1070 (2005)
- [20] Y. Kamimura, K. Ito, and Y. Yamada: “Calculation of induced current inside a human body near an IH cooker by SPFD method”, International Workshop on Biological Effects of EMFs, 970-974 (2006)
- [21] 太良尾・林・伊坂：「電磁調理器からの中間周波漏れ磁界による体内誘導電流の解析と平均化処理」，電気設備学会誌，Vol. 25, No. 2, pp.142-151 (2006)
- [22] H. Tarao, N.Hayashi and K.Isaka: “Effect of human model height and sex on induced current dosimetry in household heater users”, IEEE Trans FM, Vol. 126, No. 9, pp.947-948 (2007)
- [23] S. Nishizawa, H-O. Ruoss, F.M. Landstorfer, and O. Hashimoto: “Numerical study on an equivalent source model for inhomogeneous magnetic field dosimetry in the low-frequency range”, IEEE Trans Biom Eng, Vol. 51, No. 4, pp. 612-616 (2004)
- [24] A. Hirata, K. Wake, S. Watanabe, and M. Taki.: “*In-situ* electric field and current density in Japanese male and female models for a uniform magnetic field exposures”, Rad Prot Dosimetry, Vol. 135, pp. 272-275 (2009)
- [25] 濱田・小林：「ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法による低周波磁界誘導電界計算」，電気学会論文誌，Vol. 126-A, No. 5, pp. 355-362 (2006)
- [26] 濱田・小林：「ボクセルデータ用高速多重極表面電荷法の誘導電界計算精度の評価」，電気学会論文誌 A, Vol. 128, No. 4, pp. 223-234 (2008)
- [27] 長岡・櫻井・国枝・渡辺・本間・鈴木・河合・酒本・小川・此川・久保田・金・多氣・山中・渡辺：「日本人成人男女の平均体型を有する全身数値モデルの開発」，生体医工学，Vol. 40, No. 4, pp. 239-246 (2002)
- [28] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki and Y. Yamanaka: “Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry”, Phys Med Biol, Vol. 49, pp. 1-15 (2004)
- [29] C. Gabriel: “Compilation of the dielectric properties of body tissues at RF and microwave frequency”, Technical Report of Brooks Air Force Base, AL/OE-TR-1996-0037 (1996)
- [30] T. W. Dawson, M. Potter and M. A. Stuchly: “Evaluation of modeling accuracy of power frequency field interactions with eth human body”, ACES Journal, 16, 2, 162-172 (2001)
- [31] A. Hirata, Y. Takano, Y. Kamimura, and O. Fujiwara: “Effect of averaging volume and algorithm on *in-situ* electric field for uniform electric and magnetic field exposures”, Phys Med Biol. Vol. 55, pp. N243-N252 (2010)
- [32] A.Hirata, K. Yamazaki, S. Hamada, Y. Kamimura, H. Tarao, K. Wake, Y. Suzuki, N. Hayashi, and O. Fujiwara: “Intercomparison of induced fields in Japanese male model for ELF magnetic field exposures -effect of different computational methods and codes-”, Radiation Prot Dosimetry, Vol. 138, pp. 237-244 (2010)
- [33] A. Bahr, T. Boltz, and C. Hennes: “Numerical dosimetry ELF: accuracy of the method, variability of models and parameters, and the implication for quantifying guidelines”, Health Physics, Vol. 92, No. 6, pp. 521-530 (2007)
- [34] 山崎：「電磁界の人体防護に関する新 ICNIRP ガイドラインにおける体内誘導量評価指標の数値計算」，電中研究報告 H10010 (2010)
- [35] T. W. Dawson, M. A. Stuchly, K. Caputa, and R. Kavet: “Electric fields in the human body from 60-Hz contact currents”, IEEE Trans Biomed Eng, Vol. 48, pp. 1020-1026 (2001)
- [36] N. Hayashi, H. Tarao, and K. Isaka: “Numerical characterization of dosimetry human body resistance and heart current resulting from power frequency touch-current for an anatomically realistic human model”, IEEE Trans, Vol. 4, No. 4, pp. 523-533 (2009)
- [37] 土田・梁瀬・平田・上村：「磁気共鳴型無線電力伝送に伴う電磁界による体内誘導量解析」，電子情報通信学会環境電磁工学研究会 EMCJ2011-71 (2011)
- [38] 濱田：「GPU で高速化したボクセルモデル用表面電荷法」，平成21年電気学会基礎・材料・共通部門大会 O-24-I (2009)
- [39] 濱田：「GPU 上の対角変換版 FMM を用いるボクセルモデル用表面電荷法」，平成22年電気学会全国大会 I-162 (2010)
- [40] たとえば <http://www.speag.com/products/semcad/solutions/elf/>
- [41] <http://emc.nict.go.jp/bio/model/index.html>
- [42] A. Christ, W. Kainz, E. G. Hahn, K. Honegger, M. Zefferefer, E. Neufeld, W. Rascher, R. Janka, W. Bautz, J. Chen, B. Kiefer, P. Schmitt, H-P. Hollenbach, J. Shen, M. Oberler, D. Szczerba, A. Kam, J. W. Guag, and N. Kuster: “The Virtual Family—development of surface-based anatomical models of two adults and two children for dosimetric simulations”, Phys Med Biol, Vol. 55, pp. N23-N38 (2010)
- [43] A. Hirata, Y. Takano, O. Fujiwara, T. Dovan, and R. Kavet: “An electric field induced in the retina and brain at threshold magnetic flux density causing magnetophosphene”, Phys Med Biol, Vol.56, pp. 4091-4101 (2011)

人体ばく露に関連する電磁界の測定方法

水野 幸男 (名古屋工業大学)

1. はじめに

人体ばく露に関連する電磁界の測定方法の IEC (国際電気標準会議) 規格としては、「人体ばく露に関する低周波磁界及び電界の測定—測定器の特別要求事項及び測定の手引き (IEC 61786)」、「家庭用電気機器及び類似機器からの人体ばく露に関する電磁界の測定方法 (IEC 62233)」、「交流電力システムから発生する磁界及び電界の強さ—公衆の人体ばく露を考慮した測定手順 (IEC 62110)」がある。

ここでは、わが国から IEC TC106 に新業務提案を行い、規格作成のために設置されたプロジェクトチーム PT62110 の構成および規格内容審議の過程においてもわが国が主導して 2009 年 8 月 31 日に制定された IEC 62110 (Electric and magnetic field levels generated by AC power systems - Measurement procedures with regard to public exposure) に関し、制定に至るまでの過程と規格内容の概要、その後の動向について報告する。

2. IEC TC106 の概要

TC106 (Methods for the assessment of electric, magnetic and electromagnetic fields associated with human exposure) は、1999 年の IEC 京都会議で設立が承認された。電界、磁界および電磁界への人体ばく露を評価する測定法および計算法に関する国際規格制定を目的としている。掌握するタスク⁽¹⁾は表 1 に示す通りであり、ばく露制限値の設定および電磁界低減方策は除外されている。P メンバおよび O メンバ国数は、2011 年 10 月時点でそれぞれ 26 および 8 である。

国内においては電気学会が審議団体となり、電気規格調査会電磁環境部会に設置されている「人体ばく露に関する電界、磁界及び電磁界の評価方法標準化委員会 (委員長: 多氣昌生・首都大学東京教授)」が IEC/TC106 国内委員会を兼ねている。国内委員会には、実質的かつ効率的な審議を行うため、低周波国内委員会 (山崎健一委員長: (財)電力中央研究所) と高周波国内委員会 (渡邊聡一委員長: (独)情報報通信研究機構) が設置され、それぞれ学識経験者、関係省庁、産業界等からの委員で構成されている。事務局は、電気学会標準化推進室に置かれている。

表 1 IEC TC106 のタスク

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">・人体ばく露に関連する電磁環境の特徴付け・測定法、測定器および測定手順・計算法・特定発生源からの電磁界へのばく露の評価方法 (製品関連の TC が規定しない場合)・他の発生源に対する基本規格・不確かさの評価 |
|--|

3. 電力線 WG

3.1 設置の経緯

電力設備から発生する商用周波電界・磁界測定のための国際規格作成は、表 2 に示すように当時の IEC TC106 WG2 において優先順位 1 の作業課題のひとつであった⁽²⁾。この種の規格としては、交流架空送電線から発生する電界・磁界の測定手順に関する IEEE 規格 644-1994⁽³⁾がある程度であった。人体ばく露という観点から商用周波磁界の測定・評価手順を明確にする規格・基準類は、わが国のみならず世界的にもほとんど存在しなかった。IEC 内においても発生源を電力設備に特化した規格成文化の動きは見られなかった。

都市部においては送配電線の地中化が進んでおり、変圧器や開閉器をはじめとする機器などが、歩道の端など公衆が比較的容易にアクセスできる場所に設置されるようになってきている。このような電力設備が発生する磁界は一様ではないため、電界・磁界の空間的分布や人体へのばく露を考慮した磁界レベルを測定・評価するための国際規格制定が強く要望されていた。

このような状況に鑑み、また、近い将来のわが国における磁界規制値導入も視野に入れて、電力システムから発生する不平等磁界の測定および評価方法に主眼を置いた全文わが国発の IEC 規格制定を目指すことになった。この作業をするために、平成 14 年 12 月に TC106 低周波国内委員会に電力線 WG (発足時 8 名) が組織された。

表 2 TC106 WG2 の優先課題

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">・家電製品 [優先順位 1]・電力線 (公衆) [優先順位 1]・電力線 (職業者) [優先順位 1]・工業用電力機器 [優先順位 1, 2]・小型・中型工業用機器 [優先順位 1, 2]・鉄道 [優先順位 1, 2] |
|--|

3.2 活動の概要

電力線 WG 設立経緯を踏まえて次の 4 点を考慮し、IEC TC106 への新業務提案 (NP) を行うための作業を行った。

- (1) 公衆が近接し得る場所に設置される配電設備などから発生する不平等磁界の測定・評価方法に重点を置く。
- (2) 水平方向に磁界の不平等分布がある場合には、人体の幅を考慮して人体全体のばく露を代表できる測定点 (発生源からの水平距離) を決める。
- (3) 鉛直方向 (直立した人体の軸方向) に磁界の不平等分布がある場合には、身長を考慮して人体全体のばく露を代表できる測定 (鉛直方向の測定位置) を決める。

(4) 架空送配電線については、従来の測定手順 (IEEE Std. 644-1994) を踏襲する。

当時、人体影響を考慮した商用周波電界・磁界へのばく露制限に関しては、国際的に認知されたガイドラインが幾つかあった。このうち、1998年発行のICNIRP (国際非電離放射線防護委員会) ガイドライン⁽⁴⁾では、基本制限値として外部電界・磁界によって体内に発生する誘導電流密度を与えつつ、測定可能な物理量として外部電界・磁界を参考レベルとして示していた。参考レベルは人体の占める空間における平均値として評価する必要があったが、現実的ではないため、再現性がありしかも簡易な代替の測定手順を定める必要があった。(2)および(3)はこれを実現するために考案されたものであり、NPの最も肝要な部分であった。

当初は磁界のみを対象とし、約1年半にわたる議論・検討を経て取り纏めた案を、2004年5月にIEC事務局に提出した。直後に、電界も含めるようTC106国際幹事から指示があり、当初案に電界の測定手順を加筆した”Measurement procedures of electric and magnetic fields generated by AC power lines with regard to human exposure”なる規格案を急遽取り纏めた。この規格案は、106/75/NPとして2004年7月16日にIEC事務局から公表された。

電力線WGの精力的な活動は、この後も2009年のIEC規格成立まで継続された。詳細は割愛するが、後述するPT62110会議での議論を踏まえた規格案の修正、CDあるいはCDVなどIEC回覧文書に対する各国国内委員会からのコメントへの対応など、わが国としての対処方針は全て電力線WGで審議・決定した。電力線WGで承認された方針は、TC106国内委員会低周波委員会およびTC106国内委員会の承認を得てPT62110会議などに諮られた。

4. PT62110の設置およびその活動

4.1 構成および活動の概要

106/75/NPに対する各国からの投票を経て、2004年12月10日にTC106WG2傘下にプロジェクトチーム(PT62110)が発足した。表3に示すように、PTは規格成立時には9カ国12名のメンバで構成されていた。PTの活動履歴を表4

表3 PT62110メンバ (規格成立時)

	氏名	国
Project leader	Yukio Mizuno	Japan
Secretary	Hiroyuki Yomori	Japan
Experts	Thanh Dovan	Australia
	François Fortin	France
	Ulf Grape	Sweden
	Hannah Heinrich	Germany
	P.G.F.J. Ligtoet	Netherlands
	Sung-Ho Myung	Korea
	Duc-Hai Ngyuen	Canada
	David Renew	United Kingdom
WG1 Convenor	Jun Yoshinaga	Japan
	François Deschamps	France

に示す。PT会議は第1回を日本で、その後は欧州で計6回開催し、CD (委員会原案)、CDV (投票用委員会原案) およびFDIS (最終国際規格案) の作成、回覧文書に対する各国国内委員会からのコメントへの対処を行った。かなり厳しい議論がなされた時もあったが、我が国の方針はほぼ採り入れられた。

表4 PT62110の活動履歴

年月	内容	備考
2002.12	電力線WG設置	
2004.07	106/75/NP	新業務提案
2004.12	106/85/RVN, PT62110設置	
2005.06	第1回PT会議 (大阪)	CD案審議
2005.11	第2回PT会議 (フォートスロー)	CD案審議
2006.01	106/108/CD	1st CD
2006.09	第3回PT会議 (ロンドン)	コメント対処 CD修正案審議
2007.02	106/123/CD	2nd CD
2007.10	第4回PT会議 (パリ) 第5回PT会議 (ロンドン、コペンハーゲン)	コメント対処 CDV案審議
2008.05	106/154/CDV	
2009.01	第6回PT会議 (パリ)	コメント対処 FDIS案審議
2009.05	106/177/FDIS	
2009.08	IEC 62110発行	

4.2 他機関およびIEC内の他TCとの協調

106/75/NP回覧当時、CIGRE (国際大電力システム会議) では、磁界の定量化および測定手順に関する2つのTF; C4.203 (Measurement of Low Frequency Electric and Magnetic Fields near Overhead Power Lines)、C4.205 (Characterization of ELF Magnetic Fields) が活動中あるいは活動を開始しようとしていた。内容重複のおそれなどの理由で、TF参加国からNPへの反対投票および批判的なコメントがあった。

電力線WGメンバ3人がこれらのTF会議に参加して折衝を行った結果、作業の重複を避けること、それぞれが相手の文書を引用すること、互いに相手の組織にメンバとして加わることで合意に達した。その後のPT62110においては、CIGRE関係メンバの多大な協力が得られた。

一方、IECの中では、SC17C WG23およびTC9との協調が必要になったが、折衝の結果、ほぼ棲み分けができた。

4.3 後方支援

平成15~20年度に経済産業省から、国際規格共同開発調査研究事業として経費援助を受けた。本事業の一環として大韓民国およびオーストラリアの専門家との交渉を行い、PT62110メンバとして参加してもらうことができた。特に大韓民国の関係者とは規格案作成の段階で数回にわたる議論を行い、IEC 62110制定に向けて全面的な支援を受けた。また、筆者は本事業の経費により、PT62110会議やTC106総会などほぼ全ての会議に出席することができた。

一方、電力線 WG や国際開発共同開発調査研究事業の事務処理に関しては、電気学会標準化推進室の全面的な支援を受けた。

5. IEC 62110 の概要

5.1 内容および適用範囲

本規格は、交流電力システムの発生する電界・磁界への人体ばく露を考慮した人体全身平均値に相当する値（平均ばく露レベル）および電力システム周辺のある区域内での平均ばく露レベルの最大値（最大ばく露レベル）を求める基本的な手順を示したものである。得られた値は、ICNIRP の示すガイドラインにおける一般公衆向け参考レベルや IEEE（電気電子学会）の示す MPE（最大許容ばく露）あるいは各国の規制値との比較に用いることができる。

居住環境あるいは一般公衆が近づくことのできる区域を対象としており、職業的環境は対象外である。また、直流電力システムには適用されない。

IEC 62110 の目次（附属書を除く）を表 5 に示す。

表 5 IEC 62110 の目次

1. 適用範囲
2. 引用規格
3. 用語および定義
4. 電界および磁界の測定原理
4.1 一般的事項、4.2 測定器、4.3 高調波成分、
4.4 測定結果の記録、4.5 測定時の留意点
5. 電界および磁界の基本的測定手順
5.1 一般的手順、5.2 1点測定、5.3 3点測定、
5.4 5点測定
6. 電界への最大ばく露レベルを探すための測定手順
6.1 架空送配電線、6.2 地中ケーブル、
6.3 変電所および電力システム機器
7. 磁界への最大ばく露レベルを探すための測定手順
7.1 架空送配電線、7.2 地中ケーブル、
7.3 変電所および電力システム機器

5.2 平均ばく露レベルを求める手順

次の3つの手順のいずれかに準拠して行う。

5.2.1 1点測定

架空送配電線下の地表付近の電界・磁界など、平等性が高いとみなすことができる場合に適用する。地上あるいは床上 1m の高さの1点において磁界・電界レベルを測定し、それを平均ばく露レベルとする。

5.2.2 3点測定

電界・磁界が不平等と考えられる場合に適用する。地上あるいは床上 0.5m、1.0m および 1.5m の3点で電界・磁界レベルの測定を行い、それらの平均値を平均ばく露レベルとする。電力設備近傍あるいは建物内においては、設備表面あるいは壁から水平方向に 0.2m 離れた地点で測定を実施する。設備の高さが 1.5m に満たない場合には、機器の高さ

を3等分した3点で測定を行う。

地中ケーブル、地上置き配電機器、ケーブル立ち上がり部などが発生する電界・磁界を評価する場合に適用する。例として、地中ケーブルおよび配電用機器を対象とする場合の例を、図1および図2にそれぞれ示す。

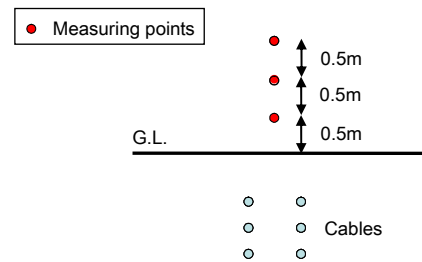


図1 3点測定の例（地中ケーブル）

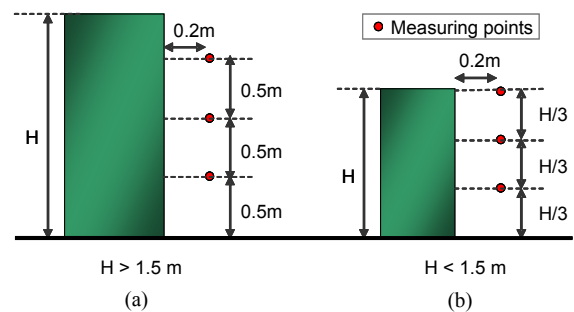


図2 3点測定の例（機器近傍）

5.2.3 5点測定

地下あるいは床下に磁界発生源がある住居において、人が発生源上方の部屋内の床で横になる合理的な可能性がある場合には、次の手順に従って5点測定を行う。

- (1) 地上あるいは床上 0.2m の高さで測定器を部屋内で移動させ、磁界が最大値を示す点 (P1) を見つける。その点で磁界を測定する。
- (2) P1 を中心とする半径 0.5m の円周上で磁界を測定し、磁界が最も大きい点 (P2) を探し、その点で磁界を測定する。
- (3) P2 と P1 を結ぶ直線を延長し、(2)の半径 0.5m の円と交わる点 (P3) で磁界を測定する。
- (4) P2 と P3 を結ぶ直線に直交し P1 を通る直線が(2)の半径 0.5m の円と交わる点 (P4, P5) における磁界を測定する。
- (5) 以上5箇所における測定値の大きい方から3つの値の平均値を平均ばく露レベルとする。

5点測定の概要を図3に示す。屋内変圧器の上の階にある部屋内の磁界測定などに適用されるが、その部屋で人が横になる可能性がない場合には、前述の3点測定に従って平均ばく露レベルを求める。

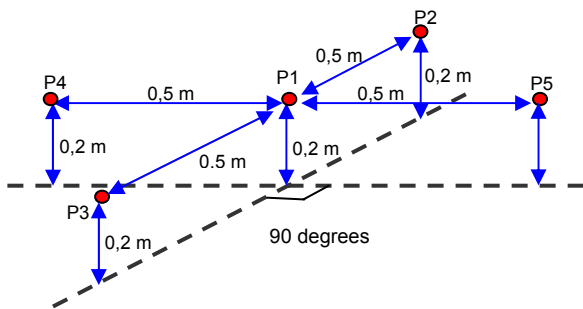


図3 3点測定

5.3 電界および磁界の最大ばく露レベルを求める手順

電界・磁界が最大となる場所がわかっている場合には、その地点において、架空送電線の場合には1点測定、その他の場合には3点測定により最大ばく露レベルを求める。最大値を示す場所がわからない場合には、次の手順に従う。

5.3.1 架空送電線

送電線導体下で送電線に沿って適切な間隔で地上1mにおける電界あるいは磁界を測定し、最大値を示す点を求める。さらにその点を通り送電線に垂直方向の直線に沿って同様の測定を行い、最大値を最大ばく露レベルとする。

5.3.2 地中ケーブル

地中ケーブル外部に電界は発生しないので、電界測定を行う必要はない。磁界はケーブルに垂直と予想される直線に沿って地上1mの高さで測定し、最大値を示す点を見つける。その点で3点測定により最大ばく露レベルを求める。ケーブル長さ方向の磁界は場所に依らずほぼ同じであるが、ジョイント部やケーブル埋設深さが変わる箇所では変化する。このような場所においては、ケーブルに沿って地上高1mで磁界を測定して最大値を示す点を探した後、上述の手順に従って測定を行う。

5.3.3 変電所および電力システム機器

変電所の送電線引き込み箇所以外の場所では、一般公衆の近づくことができる区域内に電力システム機器が発生する電界は極めて小さいと考えられる。送電線引き込み箇所では、変電所のフェンスから0.2m離れた地上高1mの地点の電界をフェンスに沿って測定し、最大値を示す点で3点測定により最大ばく露レベルを求める。

磁界については、電力システム機器あるいは変電所の周囲において、機器表面あるいは境界（フェンスなど）から水平方向に0.2m離れた地上高1mで測定し、最大値を示す点で3点測定により最大ばく露磁界を求める。機器の高さが1.5m未満の場合には、地上高1mの代わりに機器の最大高さにおいて同様の測定を実施する。

変電所周辺の磁界の最大値は、送電線あるいは地中ケーブル引き込み部で観測されることが一般的であり、5.3.1項あるいは5.3.2項に従って測定を行う。

6. IEC 62110 制定後の動き

6.1 ICNIRP ガイドラインの改訂

2010年11月にICNIRPガイドラインが改訂された⁽⁵⁾。発生源から0.2m以上離れた地点で電界・磁界が不平等な場合には身体に沿って、あるいは身体の一部についての空間平均を取ることができると記載されており、IEC 62110に準拠して得られる平均ばく露レベルを用いて参考レベルとの適合性評価を行うことができる。

6.2 磁界規制値の導入

2011年3月31日に電気設備の技術基準を定める経済産業省令の一部を改正する省令により、我が国の一般公衆に対する磁界の規制値 200 μ T を導入することが公布⁽⁶⁾され、同年10月1日に施行された。この規制値は、6.1で述べたICNIRPガイドラインに基づくものである。また、規制値との適合性評価をするための磁界の測定方法は、電気設備の技術基準の解釈の一部改正⁽⁷⁾として省令と同時に公開されたが、IEC 62110規定の手順と同じものである。

6.3 IEC 62110 の JIS 化

一般公衆や電気事業者が電力設備周辺で磁界測定をする際には、日本語の規格があることが望ましいとの観点から、2011年6月からIEC 62110のJIS化作業が進められている。

7. おわりに

IEC 62110 制定に至るまでの過程と規格内容をそれぞれ概説するとともに、規格制定後の動きを紹介した。

規格制定に至る約7年間の活動が結実した要因は、次の3点にあると筆者は考えている。(1)IEC TC106 国内委員会、電気学会をはじめ国内関係組織の全面的支援を受けたこと。(2)電力線WGメンバの結束が固かったこと。(3)反対国関係者がPT62110のメンバとして加わるよう取り計らったこと。

IEC TC106 PT62110、IEC TC106 国内委員会、IEC TC106 低周波国内委員会、同電力線WG、経済産業省、(社)電気学会標準化推進室の各位には、強力かつ温かいご支援・ご協力をいただいた。感謝の意を表す。とりわけ、世森啓之氏(財)電気安全環境研究所) および吉永淳氏(東京電力株)には、PT62110 および電力線WGの幹事・メンバとして多大な貢献をいただいたことを記し、謝意を表す。

文 献

- (1) http://www.iec.ch/dyn/www/?p=103:7:0:::FSP_ORG_ID:1303
- (2) 富田、山崎、田中、水野： EMC, No.202, pp.53-61, 2005.
- (3) IEEE Std. 644-1994.
- (4) ICNIRP, Health Physics, Vol. 74, No. 4, pp.494-522, 1998.
- (5) ICNIRP, Health Physics, Vol. 99, No. 6, pp.818-836, 2010.
- (6) 経済産業省：電気設備に関する技術基準を定める省令、2011年3月31日官報、(号外第65号)。
<http://www.nisa.meti.go.jp/oshirase/2011/files/230331-5-1.pdf>
- (7) 経済産業省：電気設備の技術基準の解釈の一部改正、2011年3月31日。
<http://www.nisa.meti.go.jp/oshirase/2011/files/230331-5-2.pdf>