

200836011A

厚生労働科学研究費補助金
労働安全衛生総合研究事業

職場における電磁場環境および人体ばく露の実態と
労働衛生管理の在り方に関する調査研究

平成20年度 総括研究報告書

| | | |
|-------|----|----|
| 主任研究者 | 多氣 | 昌生 |
| 分担研究者 | 山崎 | 健一 |
| | 水野 | 幸男 |
| | 城内 | 博 |

平成 21 (2009) 年 3 月

目 次

| | |
|---------------------------|----|
| A. 研究目的 | 2 |
| B. 研究方法 | 3 |
| C. 研究結果 | 5 |
| 1. 電磁場の生体影響と健康リスク評価 | 5 |
| 2. 職場における電磁場ばく露に関する人体防護指針 | 12 |
| 3. 職場における電磁場環境の実態 | 26 |
| 4. 諸外国の規制と安全管理の状況 | 36 |
| 5. 電磁場ばく露の測定法と防護法 | 69 |
| D. 考察 | 77 |
| E. 結論 | 86 |
| F. 研究発表 | 86 |

別紙 1 聞き取り調査報告書

別紙 2 磁場測定用センサーと測定例

.....

| | |
|------|---|
| 資料 A | ICNIRP ガイドラインに基づいた電界・磁界への職業的曝露の実態(NRPB-W24) |
| 資料 B | 物理的要因（電磁場）に起因するリスクへの労働者の曝露についての健康および安全の最低要求事項に関する 2004 年 4 月 29 日付欧州議会・理事会指令 2004/40/EC |
| 資料 C | 物理的要因（電磁場）に起因するリスクへの労働者の曝露についての健康および安全の最低要求事項に関する指令 2004/40/EC を改定する欧州議会・理事会指令の提案（欧州委員会 提出） |
| 資料 D | 職場における健康・安全の保護に関する 2007 年 8 月 3 日法律第 123 号第 1 条の施行(2008 年 4 月 9 日付け立法令第 81 号)(イタリア) |
| 資料 E | 英国物理学会報告 MRI と物理的要因（EMF）指令 |
| 資料 F | 欧州規格 EN50499 労働者の電磁界への曝露評価の手順 |

職場における電磁場環境および人体ばく露の実態と
労働衛生管理の在り方に関する調査研究

研究要旨

世界保健機関(WHO)が低周波電磁場による健康影響に関するファクトシートで、公衆および職場環境における電磁場の人体ばく露について、科学的に確立されている生体影響を基礎とした、国際的なガイドラインによる防護の実施を求めたことを受けて、わが国における職場環境の電磁場に対する労働衛生管理の在り方を早急に検討する必要がある。本研究は、わが国の職場における電磁場環境の実態と諸外国の動向を的確に把握し、WHOによる勧告を踏まえて、今後のわが国の電磁場に関する労働衛生管理の在り方を示すことを目的とする。対象は低周波磁場を中心とする。本研究は、電磁場ばく露評価、電磁場測定、労働衛生管理のそれぞれの側面から電磁場に関する人体防護の経験が深い主任研究者と分担研究者が緊密に協力した研究体制を取る点を特色とする。

本研究では、WHOによる国際電磁界プロジェクトやその周辺でまとめられたレビュー文書でリスク評価の現状を調査する。また、職場環境における電磁場の実態を、文献的に調査するとともに、わが国で平成9～14年度に実施された、中央労働災害防止協会による「電磁場ばく露に関する調査研究」の測定結果の比較検討を行う。また、欧州における職場の電磁場を規制するための欧州指令の状況について調査する。

その結果、職場環境における電磁場は、ICNIRP指針の参考レベル（欧州指令のアクション値）を超える値が検出される場合がある。しかし、遵守すべきレベルである、ICNIRP指針の基本制限（欧州指令の曝露限度値）を超える事例は非常に限られていると推定される。このことは、諸外国の事例とわが国の測定報告で一貫している。

参考レベルを超える場合の評価の方法は、簡易とはいえないものの、標準化が進んでいる。IECでは職場の電磁場環境への取り組みがまだ進んでいないが、今後、わが国の職場環境に適合した実用的で有効な測定評価方法の開発に努める必要がある。

職場における電磁場曝露に関する欧州指令の国内法への転換のための法律制定期限は2012年4月30日まで延期された。今後の方向について、利害関係者の意見では、現在引用されている1998年刊行のICNIRP指針とは異なる基準値を採用するか、あるいは職場の特性に応じた例外規定を設ける方向の意見が多い。

わが国の電磁場環境に関する法規制は、高周波については総務省、低周波については経済産業省が行ってきた。これらの規制は、電磁場のエネルギーを利用するにあたっての、一般公衆の安全を確保する責任を果たすことを目的としており、職業的な電磁場曝露による労働者の保護は視野に含まれていない。厚生労働省が、この問題に一層の取り組みを行うことが望まれる。

主任研究者

多氣昌生 首都大学東京理工学研究科電気電子工学専攻 教授

分担研究者

山崎健一 財団法人電力中央研究所電力技術研究所高電圧・電磁環境領域 主任研究員

水野幸男 名古屋工業大学大学院ながれ領域機能工学専攻 教授

城内 博 日本大学大学院理工学研究科医療・福祉工学専攻 教授

A. 研究目的

2007年6月に、世界保健機関(WHO)は、低周波電磁場の健康影響に関する環境保健クライテリア (EHC) No.238およびファクトシートNo.322を刊行した。これらの文書でWHOは、公衆および職場環境における電磁場による人体ばく露について、科学的に確立されている生体影響を基礎とした、国際的なガイドラインによる防護の実施を求めた(WHO, Fact sheet No.322, June2007)。これを受けて、経済産業省原子力安全保安院では、磁場規制の在り方についてのワーキンググループを電力安全小委員会に設置し、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)のガイドラインに基づき、一般公衆の生活環境における、電力設備から発生する電磁場を規制する方針を示した。高周波電磁場についても、総務省が電波法のもとで、無線設備から放射される高周波電磁場の一般環境におけるレベルを規制している。

これに対し、職場環境における職場環境における電磁場からの人体防護については、十分な取り組みが行われていない。本研究は、わが国の職場における電磁場環境の実態と諸外国の動向を的確に把握し、WHOによる勧告を踏まえて、今後のわが国の電磁場に関する労働衛生管理の在り方を示すことを目的とする。なお、本調査研究の対象は、今回のファクトシートNo.322においてWHOによる提言の対象となった低周波磁場を重点とし、加えて、2006年にEHC が刊行された静電磁場も対象とする。高周波電磁場については、現在WHOにおい

て検討の途上であり、一部関連事項として言及するものの、直接の調査対象に含めない。

主任研究者及び分担研究者（城内）は、平成 9～14 年度に労働省が中央労働災害防止協会に委託して実施した、「電磁場ばく露に関する調査研究」で、電力、鉄道、医療、溶接・工業加熱などの職場環境での磁場の実態調査を行った。本研究は、この調査研究を基礎とし、最近の状況を踏まえて、発展させるものである。状況の大きな変化は、2007 年の WHO による上述の文書が 10 年間に及ぶリスク評価を取りまとめ、提言を行ったこと、加えて 1999 年に国際電気標準会議(IEC)に TC106「人体ばく露に関する電場、磁場、電磁場の評価方法」が設置され、電磁場人体ばく露の評価方法の国際標準化が進みつつあることである。これらの変化を踏まえた新たな調査研究が緊急に必要である。主任研究者および分担研究者（山崎、水野）は、この TC106 国内委員会の中核として活動している。本研究の特色は、ICNIRP の委員として電磁場ばく露ガイドラインに関する経験の深い主任研究者と、測定方法の国際標準化に直接に寄与する研究分担者、及び電磁場環境を含む労働衛生管理の経験の深い研究分担者の参加により、人体ばく露に関する電磁場評価と労働衛生管理の在り方について適切に提言を行うことのできる体制が組織されている点である。

職場における電磁場の人体ばく露については、欧州では 2004 年に職場の電磁場環境に関する欧州指令(2004/40/EC)が採択され、欧州連合加盟国にばく露限度値を遵守するための法律制定が義務づけられた。この動きに対し、わが国の労働衛生行政の在り方を、早急に検討しなければならない。電磁場の問題は、潜在的な不安の要因となる恐れがあり放置できないものの、深刻なリスクではなく、バランスのとれた的確な対応が必要である。本研究は、この問題への取り組みの方向性を見極めるために必要な客観的資料を提供するものであり、今後の本件に係る労働衛生行政に貢献することが期待される。社会の電磁場に対する関心が高まっており、電磁場環境が必要以上に深刻なリスクと認知される傾向がある。諸外国でのこの問題への取り組みと職場環境の実態把握を通して、適切なリスク認知のための客観的な手がかりを示すことが本研究の目的である。

B. 研究方法

主任研究者の統括のもとで、山崎、水野は電磁場測定の工学的立場から、城内は労働衛生管理の医学的立場からそれぞれ全員で協力して担当した。

電磁場環境についてのレビュー文書として、世界保健機関(WHO)による静電磁場及び超低周波電磁場についての環境保健クライテリア、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP)によるガイドラインおよびレビュー、英国放射線防護局(NRPB)による職場環境の電磁場についてのレビュー等、多数の報告書がこれまでにとりまとめられている。これらの文献から職場環境における電磁場の実態を抽出した。

本研究を実施する主たる動機は、欧州において、「物理的要因（電磁場）に起因するリスクへの労働者の曝露についての健康および安全の最低要求事項に関する 2004 年 4 月 29 日付 欧州議会・理事会指令 2004/40/EC」（以下、電磁場リスク欧州指令と略称する）が出され、職場における電磁場環境からの人体防護が法規制の対象となる動きであるという背景にある。この指令関連文書については、詳細に調査検討した。

電磁場リスク指令にともない、そのインパクトについての分析が行われ、多くの意見が表明された。これらの意見の中で最も重要な役割を果たした磁気共鳴映像法（MRI）を用いた医療従事者の状況と、この分野からの意見が指令に及ぼした影響について調査した。

イタリアでは、電磁場リスク指令に対応して職場の電磁場環境の規制を国内法に転換するための法律制定として、労働安全衛生法を改定している。イタリア労働安全衛生法の規定を通して、本指令の具体的な実施方法を調査した。

関連して、この指令の実施に向けて欧州電気標準会議（CENELEC）で審議されている、欧州規格 EN50499「労働者の電磁場への曝露評価の手順」（2008 年 12 月に採択された）について調査検討した。

次項に述べるヒアリングを通して得た情報に基づく文献等の分析も本研究では行った。特に、研究実施期間中に多くの関連会議が開催された。これらの会議情報をできる限り入手し、調査検討に加えた。

主任研究者および分担研究者は、国内外で生体電磁環境に関するさまざまな活動に従事している。これらの活動を通して、電磁場応用産業の実情についてのヒアリング調査を行った。結果的に国内に関しては、業界としての取り組みにいたっていないため、報告すべき具体的なデータの入手はできなかったものの、関係者との情報交換を行い、また海外の動向についての調査に協力してあたることができた。

海外でのヒアリング調査は、ドイツ（ジーメンス社、主に鉄道関連）、フィンランド（国立労働衛生研究所）、フランス（RTE 社、主に電力事業関連）、韓国（韓国電気研究院、主に電力事業関連）、米国（米国労働安全衛生局 OSHA）、カナダ（保健省、カナダ労働プログラム）をそれぞれ訪問し、職場における電磁場に関する労働衛生管理について聞き取り調査を行った。また、関連資料の収集及び、関連する会議情報などを入手した。

平成 9 年度～14 年度に実施された、中央労働災害防止協会による「電磁場ばく露に関する調査研究」で対象とした発生源については、業界の協力により、多くのデータが収集されている。この調査には本研究の主任研究者（多氣）と分担研究者（城内）が参加しており、そのときのデータを再検討した。調査当時と現在では、測定方法の標準化について多くの進展がある。測定方法の状況変化を踏まえて、上記測定調査結果についての再確認を行った。また、この測定調査で対象とされなかった発生源として、図書館に設置された盗難防止装置について検討した。

本研究は、今後の行政での取り組みに必要な基礎となる知見を収集することを第一の目標としている。このため、研究計画の中で完結するのではなく、総括としての提言が重要である。上記の(1)～(3)に基づき、わが国の職場環境での電磁場ばく露に対する今後の取り組みに必要とされる事項を総括した。

C. 研究結果

1. 電磁場の生体影響と健康リスク評価

電磁場の生体影響については、これまでの多くの研究から、高周波(>100kHz)では熱作用、低周波(<100kHz)では刺激作用が支配的な作用であるという認識が確立されている。一方、熱作用、刺激作用以外の生体影響があるかもしれない、という問題提起は絶えることがない。このため、生体影響に関しては現在でも研究が続いている。WHOによる国際電磁場プロジェクトでは研究の現状をレビューし、環境保健クライテリア(EHC)文書として、健康リスク評価の結果を取りまとめている。EHC文書は2005年に静電磁場¹⁾、2007年に低周波電磁場²⁾について刊行された。ここでは、電磁場の生体影響の知識の現状について、主に上記のEHC文書等の文献調査によって調査した結果の概略を述べる。詳細は、これらのEHC文書を参照されたい。なお、高周波電磁場についてのEHC文書の完成はまだ見通しがたっておらず、刊行は2011年以降になると予測される。

1.1 静電場

人体が静電場中に置かれると、人体が良導体であることから、静電誘導により、体表面で電荷の移動が生じ、人体内部は静電遮蔽される。このため人体内部には、ほとんど電場の侵入はない。したがって、静電場が人体内において人体の機能に影響を及ぼす可能性は考えにくい。静電場による短期的影響として、体表面で体毛に作用する静電気力に伴う感知がもっとも低閾値の現象である。感知閾値より相当高いレベルで不快感や放電にともなう痛みを生じる。このことが健康への悪影響とされる。しかし、静電場の感知は衣服の帯電などによって日常的に経験される現象である。職場環境では、静電場による電撃による驚愕が、工具の誤操作や落下、作業者の転落など、二次的な災害を引き起こさないように注意が必要であるが、静電場による生体影響そのものについて、不確かな問題点は指摘されていない。WHOの環境保健クライテリアNo.232「静電場および静磁場」¹⁾では、今後の研究に関する勧告として、静電場が健康に及ぼす影響についての研究を継続することにはほとんど便益がないとしている。

1.2 静磁場

静磁場の生体作用は、次の3種類のメカニズムに由来するとされている¹⁾。

(1) 電気力学的作用

静磁場中を運動するイオンなどの荷電粒子にはローレンツ力が作用する。この作用は電

場と等価と見なすことができ、速度起電力(electro-motive force, emf)と呼ばれる。また、磁場中を運動すると、鎖交磁束が時間的に変化し、ファラデーの法則による誘導起電力が生じる。静磁場中を物質が運動して生じる起電力による効果は、誘導電流を介して顕著な影響を示す。このような作用は電気力学的作用と呼ばれる。磁気流体効果(MHD)による作用もこの作用に分類される。血液にはイオンなどの荷電粒子が含まれるので、このような作用を受ける。

(2) 磁気双極子への作用(磁気力学作用)

磁場中に置かれた物質の磁気双極子モーメントには、磁気モーメントの向きを磁場の方向に配向させるトルクが生じる。また、空間的に勾配のある磁場では、双極子の両極に働く力の大きさが偏るために、トルクとともに並進力も作用する。並進力は磁場の大きさとその勾配の積に比例するので、磁場の空間分布の形状が同じであれば、磁場の大きさの2乗に比例する。物質の磁気双極子モーメントは、スピンによる永久磁気双極子モーメント(常磁性)と、磁場中で生じる磁気双極子モーメント(反磁性)がある。生体組織はほとんど非磁性体(反磁性体、常磁性体)であり、磁化はほとんど無視できほど小さいが、数テスラ以上の強い磁場では、磁気力が磁場の大きさ2乗に比例することから無視できない効果を示すことがある。例えば、勾配のある磁場において、磁場の勾配と磁束密度の大きさの積が1400 T²/m程度になると、水の反磁性による並進力が重力と等しくなる。勾配のある磁場中に置かれた水が反磁性によって押し出される効果は、モーゼ効果として知られている³⁾。

(3) 量子的効果による化学反応への影響

磁場の量子的効果による化学反応への影響は数ミリテスラ程度でも生じるといわれる。化学反応への量子的効果については、スピン化学と呼ばれる研究分野で多くの研究が行われている⁴⁾。スピン相関ラジカル対の化学反応は、10~100mTの静磁場により、中間生成物の電子スピン状態に影響し、有機化学反応に影響を及ぼす可能性があると考えられている。

以上の3つのメカニズムの中で、健康影響の点で確かなものは、電気力学的作用による誘導電流に起因する現象である。例えば、2~4T以上の強い静磁場中で頭部を動かしたときに、目眩を経験する現象は再現性のある影響である。この現象は、電気力学的作用による誘導電場が、前庭の機能を妨げるためであると考えられている。また、頭部を動かしたときに、金属味や酸味を知覚する現象も多くの被験者が報告している。これも誘導電場による口内の電流によると考えられている。頭部を振ることによって網膜付近に誘導電場が生じると、磁気閃光現象が知覚されることも知られている。これら影響は、磁場中で頭部を急に動かさなければ避けることができる。

数テスラ以上の強い磁場では、実験容器内では磁気力学的作用によるさまざまな現象が見られる。強い不均一磁場で、磁気泳動現象が見られたり、磁化率に異方性のある生体物質で磁場配向が生じたりするなど、多くの現象が観察されている。しかし、人体の健康に直接関わる作用は知られていない。

量子的作用についても、ラジカル対の再結合速度の変化を通して、化学反応に影響することが報告されているが、生体内の化学反応への影響は、ほ乳類では見いだされた例が無く、植物の生化学反応で唯一の例が報告されているにすぎない⁵⁾。

静磁場の遺伝毒性に関する研究は多数行われている。しかし、10T を超える曝露によっても、遺伝毒性を示す証拠は見いだされていない。但し、電離放射線など、他の因子の作用を修飾する可能性については未確認の点があり、今後さらに研究が必要であるとされている⁶⁾。

WHO による環境保健クライテリア No. 232 における静磁場の健康リスク評価は以下の通り要約される。疫学研究および実験研究は、慢性的影響について結論を導くには不十分である。国際がん研究機関(IARC)は、人に対する静磁場の発がん性については十分な証拠がなく、また動物実験からも関連性のあるデータは入手できないとし⁶⁾、「ヒトに対する発がん性については分類できない」(グループ3)とした。

数テスラの強い静磁場ならびに強い磁場勾配への短期曝露はいくつかの急性影響を引き起こす。人間のボランティアや動物に関する研究では、血圧や心拍数の変化といった心臓血管系の反応が時々観察されている。ただし、最大 8T の静磁場への曝露でも、影響は通常の生理的変動の範囲内である。

1.3 低周波電磁場

低周波の電場、磁場の作用は、静電場および静磁場の作用と共通の部分が多い。一方、電磁場の時間変化に固有の現象もある。電場については、静電場の場合のように過渡的な電荷の移動で静電遮蔽が完了することなく、変位電流が流れ続ける点である。磁場については、電磁誘導により、磁場の時間変化が生体内に電場を発生させることである。

100kHz までの周波数範囲の電場および磁場への曝露については、組織内に誘導される電場あるいは内部電場による電流によって引き起こされる、神経・筋の興奮現象による刺激作用が、健康に悪影響の恐れがある急性の生物学的影響である。現在の防護指針は、刺激作用による急性影響を根拠に構成されている⁷⁾。

一方、慢性的な低強度(0.3~0.4 μ T以上)の商用周波数(50/60Hz)磁場への曝露による健康リスクを示す科学的証拠として、小児白血病のリスク上昇が一貫したパターンを示すという疫学研究からの示唆がある。しかし、この評価においては、選択バイアスおよび交絡因

子による不確かさが排除できない。加えて、事実上すべての実験室研究による証拠と、作用メカニズムに関する証拠は、低レベルの超低周波（ELF、300Hz以下の周波数）磁場が生物学的機能や疾患状態に変化を与えるという因果関係を支持していない。このような評価を踏まえて、WHOに国際がん研究機関（IARC）は、低周波磁場の健康リスクについて、グループ2B「ヒトに対する発がん性があるかもしれない(possibly carcinogenic to humans)」と分類した⁶⁾。超低周波電磁場についてのEHC文書²⁾では、低周波電磁場の健康リスクについて、環境レベルの弱い低周波磁場による健康リスクに関して、磁場曝露との因果関係を示す証拠は弱い、但し、関心を持ち続けるに値する、と評価している。

ELF磁場の発がん性評価がグループ2Bとされたことで、リスク管理の在り方についてさまざまな見解がある。EHC文書では、不必要な曝露を低コストの範囲で用心のために避けることに言及している。一方、急性影響を根拠とした現在の防護指針が不十分であると誤解されないことが大切だと述べている。EHC文書はタスクグループの見解であり、WHOによる公式見解ではない。WHOは、誤解を生じないように公式見解としてのファクトシート⁸⁾を同時に刊行し、precaution（「予防」と訳されることが多いが、preventionではなく用心の意味）という表現を廃するとともに、推奨の順序を変更して、不確かなリスクの可能性を過大評価しないように書き改めている。

中間周波（300Hz-10MHz）については、低周波のEHC文書の対象範囲に含まれているものの、十分な研究を踏まえた評価が完了していないため、今後の研究が待たれている⁹⁾。現状においての見解では、これまでに実施された研究結果からは、中間周波電磁場による固有の健康リスクは認められず、1kHz以下で顕著な刺激作用と、100kHz以上で支配的な熱作用の周波数依存性に基づいてそれぞれの作用を外挿することにより、健康リスクが評価されている。

最新のレビューとして、欧州委員会の、「新たな健康リスクに関する科学委員会」（SCENIHR）が2009年1月19日の第28回総会において「電磁場ばく露の健康影響」と題する意見書を公表した¹⁰⁾。この委員会は、2006年にこの問題についての準備意見書¹¹⁾を公表し、意見公募の結果承認された意見書¹²⁾を2007年3月に公表していたが、本意見書はその後の研究の進捗を取り入れたものである。低周波電磁場のリスク評価の大筋に変化はないが、「動物実験や細胞実験では、疫学研究で小児白血病やアルツハイマー病のような疾病との関連性が示唆される μT レベルよりもかなり高い曝露レベル（0.1mT以上）で影響が示されている¹³⁾という点が重要である。さらなる調査が必要とされる。」と述べている点が注目される。この記述は、ICNIRPの職業ばく露の商用周波数における参考レベル0.5mTより低いレベルでの影響の可能性に注意を喚起している。

1.4 高周波電磁場

人体の組織は、損失のある誘電体であり、高周波電磁場にさらされると、誘電損によるエネルギー吸収が生じて発熱し、局所の組織温度が上昇するとともに、血流により全身に熱が運ばれて深部体温の上昇を招く。温度上昇によってさまざまな熱生理学的影響が生じる¹⁴⁾。これを高周波電磁場の熱作用と呼ぶ。熱作用は確立された高周波電磁場の生体影響である。深部体温が1℃程度上昇すると、人体の熱調節系に負荷がかかる。ヒトを含むほ乳類では、体重1kgあたり4-8Wの電力が吸収されると1℃程度の体温上昇が見られる。深部体温の上昇が熱調節系に負荷（具体的には血管の拡張、発汗、呼吸による熱放散の増加など）を及ぼすと、長期的には健康への悪影響につながる可能性が指摘されており、防護指針の根拠となっている^{7,15)}。

温度上昇をとまなわないレベルでも、熱作用によらない作用（非熱作用）が存在する可能性が古くから指摘されてきた。レーダーの前に立つとクリック音が知覚される現象が1950年代に米軍人の間で報告され、研究された結果、レーダーの高ピーク電力のパルスマイクロ波が、頭部に瞬間的にわずかな温度上昇（10⁻⁶℃程度）をもたらし、それが頭部内を伝搬する熱弾性波となって、頭部の音響的な共振周波数のクリック音として知覚されるメカニズムが明らかにされた¹⁶⁻¹⁸⁾。この現象はマイクロ波聴覚効果とよばれる。マイクロ波聴覚効果を除いて、高周波電磁場による確立された非熱作用は知られていない。

携帯電話などの無線通信技術が日常生活で欠かせないものになるにともない、日常での長期にわたる高周波電磁場へのばく露が及ぼす健康リスクの可能性への関心が高まっている。世界各国で非常に多くの研究が行われているものの、現在までに、明らかな健康リスクは認められていない。しかし、多くの人々に関わる問題であり、関心が高いことから、容易には結論を出せない状況である。

WHOはRF電磁場についてのEHC文書の刊行を予定しているが、その進捗は遅れている。リスクの存在を明確に示す研究はなく、新たな研究は過去に指摘された影響の可能性を否定する結果が多い。疫学研究では、対象者数の少ない長期利用者でのみ、若干のリスク上昇が示唆される傾向があるが、バイアスの影響である可能性を排除できない。国際がん研究機関(IARC)が進めてきた、携帯電話端末使用と頭頸部腫瘍の関連に関する国際共同疫学研究(INTERPHONE)の最終論文が重要な判断材料になるはずであるが、がんの潜伏期に比べて携帯電話が日常的に利用されるようになってからの期間が十分でないため、結論を出すことは難しい。

WHOによるリスク評価に先立ち、いくつかの専門機関がリスク評価を行っている。その概要は以下の通りである。

総務省の生体電磁環境研究推進委員会では、1997年から10年間におよぶ研究計画を実

施した。2007年3月に提出された報告書では、「本委員会におけるこれまでの10年間の研究の成果では、いずれも携帯電話基地局及び携帯電話からの電波が人体に影響を及ぼさないことを示している他、過去に影響があると報告された結果について生物・医学/工学的な手法を改善した実験においては、いずれも影響がないという結果を得ている。」と述べている¹⁹⁾。

スウェーデン放射線防護機関 (SSI) は、2006年の報告書²⁰⁾で、次のように述べている。電磁過敏症については、「電磁場曝露に特に敏感で、症状を自覚する人々は、症状が現実にも重く苦しむ人もいるが、電磁場がこれらの症状の原因であることを示すデータはほとんどない。」。基地局周辺の住民の不安に対しては、「基地局周辺に居住する住民の健康リスクに関する研究には、方法論的な欠点がある。基地局からの電磁場による一般住民の曝露は大変弱く、健康リスクを生じるとは考えにくい。もしそのような低レベルの高周波曝露が健康リスクに関連したとすると、携帯電話使用者や、より大きな職業的な曝露を受けるグループの研究で、簡単に影響が検出されるはずであり、基地局からの曝露は健康リスクではないであろう。」としている。また、携帯電話端末の使用によるがんリスクについては、「携帯電話使用者のがんリスクについて、短期の使用は、成人の脳、頭頸部のがんリスクには関連しないようである。しかし、その他のリスクは研究されておらず、また子供や思春期の使用者についても研究されておらず、また長期使用については、完全な評価は終わっていない。とくに、聴神経腫瘍については、長期使用との関連に懸念がある。」としている。

欧州委員会では、第5次および第6次枠組計画で実施した電磁場の影響に関する研究の成果を受けて、「新たな健康リスクに関する科学委員会(Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, SCENIHR)」において、電磁場の健康影響に関する準備意見書を公表した¹¹⁾。RF電磁場については、結論の総括として、「ICNIRPガイドライン以下の曝露レベルでは、一貫性のある健康影響は示されていない。しかし、評価のためのデータベースが、特に長期低レベルの曝露に関しては、限定されている。」と述べている。この報告について意見公募が行われた後に採択された報告書も公表された¹²⁾。2009年1月には、その後の研究の進捗を含めて更新された報告が公表されている¹³⁾。報告書の高周波電磁場の影響についての結論には変更がない。

以上のように、RF電磁場の健康影響に関しては、特に長期ばく露の影響について明確な結論がでていないものの、現在の防護指針を満たす限りにおいては、健康への悪影響を示す証拠が得られていない、という見解で一致している。

参考文献

- 1) World Health Organization: Environmental Health Criteria Monograph No.232. Static Fields. 2006.
- 2) World Health Organization: Environmental Health Criteria Monograph No.238. Extremely Low Frequency Fields, 2007.
- 3) S. Ueno and M. Iwasaka: Parting of water by magnetic fields, IEEE Trans. on Magn., 30(6), 4698-4700, 1994.
- 4) S. Nagakura, H. Hayashi and T. Azumi: Dynamic Spin Chemistry, Kodansha; Wiley Tokyo; New York, 1998.
- 5) Report of the Independent Advisory Group on Non-ionizing Radiation, Documents of Health Protection Agency, Radiation, Chemical and Environmental Hazards, Static Magnetic Fields (RCE-6), 2008. <http://www.hpa.org.uk/>
- 6) WHO/IARC: IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans. Vol.80. Non-ionizing radiation, part1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields. IARC Press, Lyon, 2002.
- 7) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. Health Phys. 1998; 74:494-522.
- 8) World Health Organization: Electromagnetic fields and public health Exposure to extremely low frequency fields. Fact Sheet No.322 (2007).
- 9) Tsukasa Shigemitsu, Kenichi Yamazaki, Satoshi Nakasono, Makiko Kakikawa. A Review of Studies of the Biological Effects of Electromagnetic Fields in the Intermediate Frequency Range. IEEJ Trans 2007; 2: 405-412.
- 10) SCENIHR (2009) , Health Effects of Exposure to EMF : adopted this opinion at the 28th plenary on 19 January 2009
- 11) SCIENTIFIC COMMITTEE ON EMERGING AND NEWLY IDENTIFIED HEALTH RISKS (SCENIHR) Preliminary Opinion on Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health. EU 2006. http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_006.pdf (2006) .
- 12) SCENIHR: Possible effects of Electromagnetic Fields (EMF) on Human Health, The SCENIHR adopted this opinion at the 16th plenary of 21 March 2007 after

public

consultation,

http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihp/docs/scenihp_o_007.pdf

- 13) García AM, Sisternas A, Hoyos SP. Occupational exposure to extremely low frequency electric and magnetic fields and Alzheimer disease: a meta-analysis. *Int J Epidemiol* 2008; 37:329-40.
- 14) Stolwijk JAJ, Hardy JD: Control of body temperature. In *Handbook of Physiology, Section 9, Reactions to environmental agents* Edited by: Douglas HK. Bethesda, MD: American Physiological Society; 1977:45-69.
- 15) IEEE International Committee on Electromagnetic Safety (SCC39). IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE Std C95.1-2005. (2005)
- 16) C. K. Chou, R. Galambos, A. W. Guy, and R. H. Lovely, "Cochlea microphonics generated by microwave pulses," *J. Microwave Power*, vol.10, pp. 361-367, 1975.
- 17) Watanabe, Y.; Tanaka, T.; Taki, M.; Watanabe, S. FDTD analysis of microwave hearing effect. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, Volume 48, Issue 11, Page(s): 2126 - 2132 (2000)
- 18) J. C. Lin, "Microwave auditory phenomenon," *Proc. IEEE*, vol. 68, pp.67-68, Jan. 1980.
- 19) http://www.soumu.go.jp/s-news/2007/070427_12.1.pdf (2007)
- 20) IEGEMF. Recent Research on EMF and Health Risks. Fourth annual report from SSI's Independent Expert Group on Electromagnetic Fields. Stockholm: Statens Strålskyddsinstitut. (2006)

2. 職場における電磁場ばく露に関する人体防護指針

先に述べた WHO による低周波電磁場の健康影響に関する科学的知見の評価結果についてのファクトシートおよびEHC文書^{1,2)}においては、各国において国際的なガイドライン(人体防護指針)による限度値を採用することが推奨された。国際的なガイドラインとして、ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection、国際非電離放射線防護委員会)によるガイドライン³⁾と、IEEE/ICES (The Institute of Electrical and Electronics Engineers/International Committee on Electromagnetic Safety, 米国電気電子学会/国際電磁場安全委員会)による安全基準^{4,5)}の2通りが挙げられている。本章では、これらの人体防護

指針について述べる。

2.1 ICNIRP ガイドライン

(1) 低周波及び高周波電磁場のガイドライン

低周波電磁場および高周波電磁場に関する国際的な防護指針のうち、現在まで最も広く受け入れられているのが ICNIRP によるガイドライン^③である。本ガイドラインは 1998 年に公表されたもので、特に欧州では 1999 年の公衆ばく露に関する欧州勧告 (recommendation)^④や 2004 年の職業ばく露についての欧州指令 (directive)^⑤に採用されるなど、広く認知されている。ICNIRP の設立は 1992 年であり、前身の IRPA/INIRC (国際放射線防護学会/国際非電離放射委員会) が独立専門組織となったものである。ICNIRP メンバーは中立者によるメンバー制となっており、利害関係者の参加はできない。ICNIRP ガイドラインは、超低周波領域については、1990 年の IRPA/INIRC による 50/60 Hz の暫定指針^⑥を置きかえるもので、高周波領域については 1988 年の 100kHz-300GHz についてのガイドライン^⑦を置き換えるものであり、静電磁場を除き 300GHz 以下の全周波数の電磁場をカバーする。100 kHz 以下の低周波数では、体内に誘導される電気現象の神経系機能への影響がその指標である。すなわち、変動する電磁場中に人体が置かれると、静電誘導・電磁誘導作用によって体内に電流が生じ、これが神経系に対して刺激作用を与える。この作用を根拠として、ICNIRP ガイドラインでは、作用の閾値(周波数特性を有する)に十分な安全率を考慮して、体内の誘導電流密度で表された「基本制限」が規定されている。この体内の電気量を測定により評価することは現実的ではないため、適合性評価の便宜のために、評価可能な電磁場の大きさ(電界強度および磁束密度)で表された参考値(「参考レベル」と呼ばれる)が示されている。これは、「基本制限」に等価な電磁場の大きさが、計算により導きだされたものであり(磁場については、安全側のばく露条件である一様磁場ばく露が仮定されている)、「参考レベル」を満たすことを示せば「基本制限」を満足することが保障され、「参考レベル」を超えた場合でも、計算など別の手法で「基本制限」を満たすことを示せば良いことになる。このように ICNIRP ガイドラインでは、遵守すべき指針値である「基本制限」と、これに対応する簡易な評価が可能な「参考レベル」という 2 段階の指標が扱われ、基本制限の遵守に重点が置かれていることが特徴である。また、公衆と職業的なばく露とでは指針値に差が設けられ、公衆に対しては、年齢層、健康状態や影響の受けやすさが多様であることなどから、職業的なばく露よりも厳しい指針値が示されている。表 2.1 に ICNIRP ガイドラインの低周波領域(<100kHz)における基本制限を、図 2.1 に ICNIRP ガイドラインの参考レベルを後述の IEEE/ICES 安全基準と比較した図をそれぞれ示す。たとえば 50 Hz における基本制限は、職業ばく露については誘導電流密度

10 mA/m² (磁場の参考レベルは 0.5 mT) であるのに対し、公衆ばく露については 2 mA/m² (磁場の参考レベルは 0.1 mT) と、指針値に 5 倍の差が設けられている。なお、これらの指針値はピーク値ではなく実効値である。

表 2.1 ICNIRP ガイドライン³⁾における基本制限
(100 kHz までを示す。値は実効値)

| 種別 | 周波数範囲 | 頭部および胴体の電流密度 (mA/m ²) |
|-------|------------|-----------------------------------|
| 職業ばく露 | 1 Hz まで | 40 |
| | 1-4 Hz | 40/f |
| | 4 Hz-1 kHz | 10 |
| | 1-100 kHz | f/100 |
| 公衆ばく露 | 1 Hz まで | 8 |
| | 1-4 Hz | 8/f |
| | 4 Hz-1 kHz | 2 |
| | 1-100 kHz | f/500 |

※電流密度の値は電流方向に直交する 1cm² の断面での平均値とする
 ※パルス幅 t_p のパルス波の場合は、等価な周波数を $f=1/2t_p$ として計算する

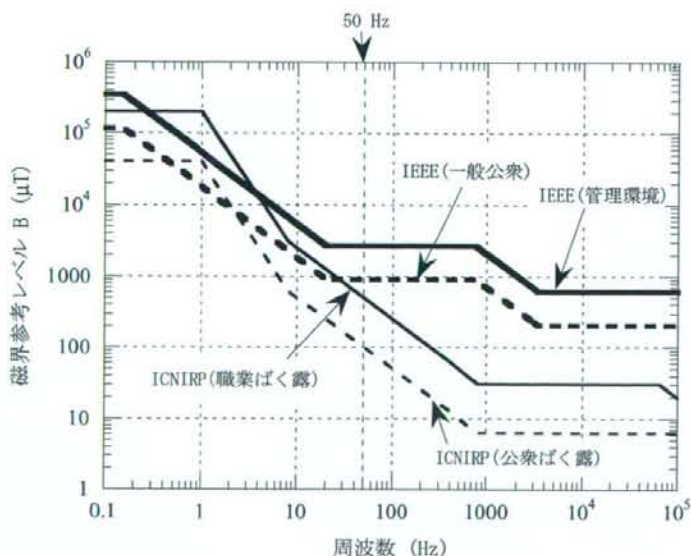


図 2.1 ICNIRP ガイドライン³⁾と IEEE/ICES 安全基準^{4.5)}の
磁場参考レベルの比較 (100 kHz までを示す)

本ガイドラインでは、ばく露を制限するための生物学的根拠として、

- ・ 細胞および動物実験研究で、誘導電流密度が 10 mA/m^2 以下では、健康への悪影響が懸念されるような低周波電磁場の影響は認められていない
- ・ さらに大きい誘導電流密度 ($10 \text{ mA/m}^2 \sim 100 \text{ mA/m}^2$) では、神経系の機能的な変化や生体組織へのその他の影響など、重大な影響が一貫して観察されている
- ・ 実験研究およびボランティア実験の結果より、生命に影響のない神経系機能への作用の電流密度の閾値は、 1 kHz までの周波数で 10 mA/m^2 と推定された
- ・ ボランティアによる実験において、磁気閃光現象およびばく露直後の心拍数のわずかな減少が見られたが、これらの一時的な現象が長期的健康影響に関連するかどうかの証拠はない

などを挙げており、これらの根拠に基づき、基本制限として、「 1 Hz から 10 MHz の範囲では、神経系機能への影響を防ぐために誘導電流密度に対する基本制限を設ける。数 Hz から 1 kHz の範囲では、 100 mA/m^2 を超えると中枢神経系興奮の急性変化および視覚誘発電位の反転などの急性影響のいき値を超える。これに安全係数を 10 としたものを職業ばく露の制限値とする」としている。

ICNIRP ガイドラインでは、参考レベルの導出において、単純な円ループ換算式 (導電率 0.2 S/m) の記載もあるが、以下の3つの文献が引用されて換算が決定されている。

- (a) ドイツ CRP (Commission on Radiological Protection, 1997)¹⁰⁾
→ 0.1 mT , 50 Hz の一様磁場に対して、 $0.2 \text{ mA/m}^2 \sim 2 \text{ mA/m}^2$ (人体外周部)
- (b) 米国 NRC (National Research Council, 1997)¹¹⁾
→ 0.1 mT , 60 Hz の一様磁場に対して、平均 $0.28 \text{ mA/m}^2 \sim$ 最大 2 mA/m^2
- (c) Xi, Stuchly による数値人体モデルを用いた初期の数値計算結果 (1994)¹²⁾
→ 0.1 mT , 60 Hz の一様磁場に対して、 2 mA/m^2 以上

これらの知見に基づき、 0.1 mT , 50 Hz の一様磁場に対して、 2 mA/m^2 となる換算を採用し、基本制限 10 mA/m^2 に対して 0.5 mT の関係を導き、これが職業ばく露の参考レベルとしている。この関係は、先の IRPA/INIRC 暫定指針における換算 (半径 10 cm ループモデルで、導電率を 0.2 S/m を仮定し、 $0.5 \text{ mT} = 1 \text{ mA/m}^2$ の関係が導かれた) から、1桁変更され、厳しいものになっている。なお、ICNIRP ガイドラインは、前述の WHO の評価結果の公表を受け、改定作業が進められている。特に人体モデルを用いた数値計算の最近の進歩は著しく、基本制限と参考レベルの関係に変化が生じるかどうかの関心が高い。

高周波電磁場 ($100 \text{ kHz} \sim 300 \text{ GHz}$) での主な根拠となる生体作用は熱作用である。 $100 \text{ kHz} \sim 10 \text{ GHz}$ では、比エネルギー吸収率 (Specific Absorption Rate, SAR [W/kg]) が曝露指標

であり、影響が無視できない 1°C 程度の深部体温の上昇がみられる閾値を、全身平均 SAR で 4W/kg と推定している。これに低減係数（安全率と呼ばれることが多いが、ICNIRP では reduction factor と呼んでいる）を 10 として、職業曝露の全身平均 SAR に関する基本制限値を 0.4W/kg と定めている。公衆の曝露ではさらに 5 倍の付加的低減係数をとり、 0.08W/kg としている。局所に集中した曝露に対しては、全身平均 SAR が上記の値を満たすことに加えて、局所での SAR が 10W/kg （公衆では 2W/kg ）を超えないことを基本制限として要求している。局所的な加熱による障害を防ぐためである。但し、熱の拡散を考慮し、連続した組織・器官では、任意の 10g での SAR の平均値に対してこの制限が適用される。

重要な点は、高周波電磁場による熱作用では、体温上昇が瞬時のばく露では起きないことである。このため、SAR に関する基本制限は、6 分間の平均値について適用される。すなわち、1 分間のばく露の後、5 分間の休止があれば、基本制限の 6 倍の SAR が許容される。 10GHz 以上では、基本制限は入射電力密度で与えられ、基本制限は職業曝露で 50W/m^2 、公衆では 5 倍の付加的低減係数を考慮して 10W/m^2 である。入射電力密度についても時間平均値が適用されるが、周波数とともに平均時間が異なり、 10GHz では 6 分間であるのに対し、 300GHz では 10 秒間になる。また、入射する面積についても 20cm^2 の面積で平均化した電力密度の値が用いられる。

高周波電磁場についての時間平均の適用は、職場環境で作業手順が管理される場合には、ばく露時間を管理することにより、制限の緩和に取り入れることも可能である。一方、低周波領域での根拠になっている刺激作用は、時定数の短い現象なので、ばく露時間の管理による制限の緩和はできない。

(2) 静磁場のガイドライン

ICNIRP は、1992 年の発足後まもなく、静磁場に関するガイドライン¹³⁾を示した。それまで、米国および欧州で、職場や公衆の曝露に対するガイドラインはなく、新たな試みであった。

この指針で考慮されている静磁場と人体のインタラクションは、磁場中での運動にともなう電場の誘導、磁気力、電子スピン作用の 3 つの作用である。これらのメカニズムは確立されている。しかし、これらの作用が実際にヒトの健康に明確な悪影響を及ぼす閾値は十分に明らかではない。ガイドラインでは、 4T を超える静磁場中で頭部を動かしたときに、一過性の影響ではあるが目眩や吐き気を感じることを、当時の生物学実験の研究報告で扱われていた磁場強度の多くが 2T までであり、この強度の静磁場への短期的な曝露が高等生物の発育、行動、生理学的指標に影響を与えないことを根拠に、安全側の判断として静磁

場曝露の防護指針値の天井値を 2 T とした。但し、手足には重要な器官や大きな血管がないので、天井値を 5 T とした。また、職場環境での継続的な静磁場曝露については、天井値を満たした上で、労働時間内の時間加重平均値を 200mT に制限することとした。この数値は、静磁場中での身体の動きや血流による磁気誘導によって生じる電流密度の制限値を 10-100mA/m² と見積もり、この電流密度を生じる静磁場の大きさに安全率を考慮して、導かれたと説明されている。ここで、誘導電流密度の制限値に対応する磁場強度を換算することについては、基本制限と参考レベルの關係に類似している。しかし、静磁場の影響の場合、基本制限という表現は使われていない。これらの指針値は職業的曝露に適用される。公衆の曝露では、職業的曝露の指針値を満たした上で、さらに連続的な静磁場曝露の限度値を 40mT と定めている。これらの防護指針値を表 2.2 に示す。

表 2.2 静磁場に関する ICNIRP 指針(1994)¹³⁾

| 曝露条件 | | 磁束密度 |
|-------|----------------|--------|
| 職業的曝露 | 労働時間帯 (時間加重平均) | 200 mT |
| | 天井値 (全身) | 2 T |
| | 天井値 (四肢のみ) | 5 T |
| 公衆の曝露 | 連続曝露 | 40 mT |

- a. 注意：心臓ペースメーカーなどの電子機器や強磁性体を体内に埋め込んでいる場合は、上記の限界値で適切に防護できるとは限らない。心臓ペースメーカーの多くは 0.5mT 以下の静磁場では誤動作しないと考えられる。強磁性体や電子機器（心臓ペースメーカー以外）の体内埋め込み物を持つ人は数 mT 以上の静磁場で影響を受ける可能性がある。
- b. 磁束密度が 3mT 以上の場合、金属物体の飛来による危険に注意する必要がある。
- c. アナログ式の時計、クレジットカード、磁気テープ、コンピュータディスクなどは 1mT の曝露でも影響を受けることがあるが、これは人体の健康とは無関係である。
- d. 一般公衆が磁束密度が 40mT を超える特別な施設にたまたま出入りすることがあっても、職業的な曝露限界値を超えず、適切に管理された条件においては許容される。

注：この限界値は一般的な静磁場に適用されるものである。不均一な静磁場については、100cm² の面積での平均値に適用する。

1994 年の静磁場ガイドラインは、1999 年に欧州委員会が欧州理事会勧告^④として、時間変動する電磁場のガイドライン(0-300GHz)を公衆のばく露に対して守るよう勧告した際には取り入れられなかった。職場環境における静磁場の管理についても、電磁場リスク指令

2004/40/EC に、このガイドラインは引用されなかった。1994年のガイドラインでは、データがないことがばく露限度値の根拠の一部になっていることから、最新のデータによって、再検討することが必要であった。磁気共鳴画像（MRI）装置周辺の磁場環境に問題が生じるという懸念から、再検討の必要性があると認識されたことから、早急な更新の必要が要請されていた。

このような経緯を経て、ICNIRPの静磁場ガイドラインは2009年に改訂された¹⁴⁾。公表されたのは本報告書の執筆中であったが、重要な新規情報なので、簡潔に追記する。

新しいガイドラインの値を表2.3に示す。1994年のガイドラインと比べて、基礎となる健康影響評価に変化はない。しかし、ばく露限度値の表の脚注に見られるように、頭部・体幹でも、条件によっては最大で8Tまで許容され、四肢では14Tまで許容されることなど、指針値がかなり緩和されている。1994年のガイドラインで、誘導電流の推定値に基づく説明がなされているものの、職場環境に対する2Tの指針値についての主な根拠は、2T以上のデータがほとんど無いことであった。これに対して、最近ではより強い磁場を用いた研究報告が入手できるようになったことが緩和の理由である。4T以上の磁場中では、動いたときに目眩や吐き気を感じる場合があるので、8Tまで許容されるのは、磁場中での動きの制限などの作業手順の管理をとともなう場合に限られる。また、研究目的など、さらに強いばく露を容認せざるを得ない場合、研究機関の倫理委員会の議により許容されるかの静にも言及している。

表2.3 新ICNIRP指針¹⁴⁾ (2009)における静磁場のばく露限度値^{a)}

| ばく露の特性 | 磁束密度 |
|----------------------|--------|
| 職業ばく露 ^{b)} | |
| 頭部と体感のばく露 | 2 T |
| 四肢のばく露 ^{c)} | 8 T |
| 公衆 ^{d)} | |
| 身体の任意の部分 | 400 mT |

- ICNIRPは、これらの限度値を、運用上は空間ピーク値と見なすことを推奨する。
- 特殊な職場への適用に関しては、8Tまでのばく露が正当化される。但し、環境が制御され、動きによる誘導効果を制御するために適切な作業実施が履行されていることが条件である。
- 8T以上の曝露限度値の根拠となるような十分な情報は無い。
- 有害な間接的影響の可能性を理由として、ICNIRPは植え込み型医用電子機器や強磁性体物質を含むインプラントを装着した人への不注意による有害なばく露、および飛来物体の危険を予防する