

今後の検討課題について

令和5年12月8日

電波防護指針の在り方に関する検討作業班事務局

①WHO

高周波領域の電磁界については、現在、世界保健機関（WHO）において健康リスク評価が進められている。これまでの作業として、コアメンバーを中心に、健康アウトカム（指標）ごとにスコアリングレビューと系統的レビューが実施されている。他方、コアメンバーとは重複しないエキスパートグループが組織されており、これらのレビューについて評価を確定させ、刺激作用及び熱作用以外の健康リスク（がん等）の評価を含んだ環境保健基準（Environmental Health Criteria）が発刊される見込みである。新たな環境保健基準が発刊された場合には、それを踏まえた対応を検討することが望ましい。

②ICNIRP、IEEE

現行の我が国の電波防護指針において、全身ばく露に対する電磁界強度指針は、ICNIRPガイドラインやIEEE規格との比較では一部に相違があるものの、電磁界強度指針の根拠である基礎指針における全身平均SARの指針値は、ICNIRPガイドラインやIEEE規格と同一である。将来的に、ICNIRPガイドラインやIEEE規格については、最新の研究成果に基づいた、より信頼性の高い全身ばく露の参考レベル（電磁界強度指針に相当）が設定され、かつ、双方を整合させる方向で議論される可能性が高い。このため、我が国の電波防護指針についても、将来決定されると見込まれるそれらの国際ガイドライン改定版と整合させるよう検討することが望ましい。

研究課題(1/4)

電波防護指針は、十分な安全率を考慮した人体防護を前提として、電波が人体の健康に好ましくない影響（生体作用）を及ぼさないようにするためのものであり、これが適切に運用され、また、新たな科学的知見が見出された場合には、必要に応じて見直されることが望ましい。日常生活における電波利用機会の増大とともに、公衆の間で電波に対する漫然とした不安や誤解を生ずる可能性も引き続き存在することから、これらの不安や誤解に対応するために科学的なアプローチに基づく研究の推進を継続する必要がある。

これまでの研究で、電波による健康影響の可能性に関して、全てが解明されている訳ではなく、なお残されている研究課題の例としては、次のようなものが挙げられる。電波防護指針の基本概念は国際ガイドラインの指針値の設定根拠と共通しており、今後の研究推進に当たっても、国際的な協調を視野に入れつつ、我が国として戦略的に取り組んでいくことが適当である。

①ミリ波ばく露による痛覚閾値

総務省の生体電磁環境研究を除けば、皮膚ばく露と痛覚閾値との関係を調査した研究は、Waltersら（2000）によるものが代表的である。被験者の背中領域（直径4cm）を94GHzのパルス変調電波により3秒間ばく露したところ、ばく露前の初期皮膚温は $34.0 \pm 0.2^{\circ}\text{C}$ であったのに対し、痛みの閾値は、平均入射電力密度 $12.5 \pm 0.05\text{kW}/\text{m}^2$ 、皮膚温度は $43.9 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ であった。

電波ばく露は、周波数により浸透深さが異なるため、様々な周波数での実験的研究と、温度上昇のシミュレーションによる検証研究を組み合わせることで知見を得ていくことが望まれる。

②眼障害閾値

電波防護指針、ICNIRPガイドライン（1998年）等では、熱に対して感受性の強いとされる眼球について斟酌し、閾値が設定されてきた。他方、近年改定された国際ガイドラインでは、その言及は限定的となるものの、国際ガイドラインにおける附録などの記述から、眼球に対応した閾値設定が行われていると解釈できる。指針値の検討に当たっては、被験者実験により取得したデータが最も有用であるが、眼球を対象とする実験は倫理的に実施できない。そのため、目の大きさと位置に関して人間に近い動物実験から得られた知見から、眼組織に対する障害閾値導出が望まれる。また、詳細な体温調節を考慮した人間の眼のドシメトリ研究も有用である。

研究課題(2/4)

③深部温度の上昇

電波防護指針及び国際ガイドラインにおいては、全身平均SARに対して健康への悪影響の運用上の閾値が設定されている。近年の研究によれば、深部温度上昇 1°C に相当する全身平均SARは 4W/kg であり、これが閾値に対応する。全身平均SARの基本制限の上限周波数は、電波防護指針と同様に 300GHz までである。ICNIRPガイドラインでは基本制限を、また、IEEE規格では参考レベル（電磁界強度指針に相当）を 300GHz までに拡張しており、平均化時間を30分に変更している。様々な周波数及びばく露継続時間について、それらに対応する全身平均SARを明確にするため、ミリ波を含めた多様な周波数帯でのばく露（動物実験）に対する深部温度上昇の測定及びそれらに対応するドシメトリ実験的研究が必要である。

④熱ストレス、熱の影響・障害及び体温調節

WHOでも系統的レビューは実施されているが、あらゆる種類のばく露による熱関連の健康影響（熱ストレスや熱中症など）に関するものは必ずしも十分ではない。ヒトに対する電波ばく露実験による温度上昇や生理学的反応の検証、それらのモデル化研究も同様である。なお、モデル化研究では、主に健康な成人を対象として体温調節系をモデル化しているため、子供と高齢者に対する追加調査も必要であり、これは安全係数の妥当性検証などに有用である。

⑤接触電流による痛み

接触電流による知覚・痛みの閾値は、極超長波とは異なり、kHz範囲以上での研究のみに基づいている。Chatterjeeら（1986）は、367人のボランティアを対象に、知覚と痛みの閾値接触電流を測定しており、 100kHz から 3MHz までの閾値電流は、ほぼ一定であり、それぞれ 35mA と 46mA であった。上原ら（2023）は、88人のボランティアの知覚に対する閾値接触電流の測定を実施し、刺激作用から熱作用への遷移周波数が 100kHz から 300kHz に存在することを示唆した。閾値は体の部位のみでなく接触面積にも依存する場合があるため、刺激作用から熱作用への遷移周波数及び閾値、接触電流の振幅、接触面積、ばく露時間を定量化することを目的とした実験及びドシメトリ研究が必要である。

研究課題(3/4)

⑥人体モデルの開発

従来の解剖学的モデルは、医用画像に基づき開発されているため、十分な解像度を持っていない。しかしながら、ミリ波ばく露では、皮膚表層組織に電波吸収が集中するため、表層組織の誘電特性と熱特性は大きく変化する。そのため、外部物理量と内部物理量の関係や基準レベルの導出等に用いられる計算ドシメトリ研究の品質と信頼性を向上させるため、人体モデルのうち、特に皮膚モデリングに対し、更なる検討が求められている。

⑦参考レベル

現在、2つの国際ガイドライン間では、中間周波から超高周波までの参考レベル（電磁界強度指針に相当）は完全には合致していない。このため、解剖学的人体数値モデルを用いた基本制限及び参考レベルに関するドシメトリ研究が求められる。今般検討を行った6GHzから300GHzまでにおける吸収電力密度に関しては、国際ガイドライン双方で、また、我が国の電波防護指針とも整合が図られている。他方で、入射電力密度については、国際ガイドライン間での整合がとれていない。FindlayとDimbylow（2009）は、特定のばく露シナリオについて空間平均電界強度と局所SARを評価したのみであり、局所ばく露に対するより適切な基準レベルを設定するには、より多面的な検証・評価が必要である。また、300GHz以上を対象とする国際レーザーガイドライン（ICNIRP2013）では、測定におけるプローブの開口部の直径を11mmとしており、平均化面積としては1cm²に準ずる形となる。この平均化面積も、特に小さなビームが形成される可能性がある高周波数での更なる検証が必要である。

⑧短時間ばく露

国際ガイドラインでは、瞬間的な温度上昇を考慮した短時間（特に数秒未満）ばく露の基準値を導入しているが、このトピックに関して報告されている測定結果はわずかである(Walters et al. 2000)。最近の研究では、短時間ばく露による瞬間的な温度上昇が計算されている例がある(Morimoto et al. 2017、Kodera et al. 2018)。実験的な閾値の評価に加えて、基準レベルへの複数回パルスばく露などの非定常ばく露、特に300 GHzを超える高強度短時間ばく露を含むドシメトリ研究が必要である。

研究課題(4/4)

⑨公衆のばく露実態の把握（モニタリングデータの蓄積）と疫学研究への応用

多様なライフスタイルにおける電波利用を踏まえ、生活環境中のばく露実態を把握する必要がある。現在、進行しているモニタリング調査を更に推進し、経年推移や屋内外環境による特性を明らかにするとともに、適切な研究デザインの下、蓄積データを踏まえた健康影響に関する疫学調査を実施することが望ましい。

⑩電磁界ばく露の細胞レベルでの影響解析

電磁界ばく露による細胞レベルでの影響を理解するため、短期から長期にわたるばく露影響を捉える研究を進める必要がある。特に、単一細胞に対する即時反応を評価することで、短期間のばく露が細胞の生理機能に与える影響を把握できるようにすることが重要である。また、長期的なばく露に対しては、細胞がどのように適応し、機能的な変化を示すかを明らかにすることで、長期ばく露の影響を理解することも求められている。これらの研究では、細胞レベルのマイクロシメトリの技術に基づく評価が必要であり、低いばく露レベルの生体作用を評価するためには、微弱な生体応答の高感度計測が可能な一細胞計測のような新しい手法を導入するとともに、細胞の遺伝子配列を変化させるような変異原性だけでなく、エピジェネティックな変化についても解析することが望ましい。

⑪国際的な生体電磁環境研究における文献の品質評価とメタ分析

生体電磁環境研究における文献の品質は、電波の生体影響を正確に理解・評価する上での基礎となる。しかし、動物実験や細胞研究に関する国際的な論文において、研究方法や結果の報告に品質のばらつきが存在し、これが科学的知見の一貫性やリスク評価の精度を脅かす要因となっている。このような問題に対処するため、文献の品質評価基準を定め、それに基づいた評価を行うことが急務である。また、厳選された高品質なデータを用いてメタ分析を実施し、電波ばく露の様々なパラメータと生体影響の関係を明らかにする必要がある。大規模言語モデルなどの最新AI技術を活用した文献解析を通じて、研究トレンドの把握、未解決の研究ギャップの特定、そして方法論的な弱点の明確化が期待されるほか、評価された文献情報を集積するデータベースの構築と、研究デザインのためのガイドライン策定により、将来の研究の質を向上させることも期待される。これらを通じて、生体電磁環境研究における論文の品質を向上させ、エビデンスレベルの高い研究成果の蓄積を進めることが望ましい。