

総 説

電磁環境と健康の国際動向 ～WHO の評価より～

宮越順二^{1*}

International Trends in Electromagnetic Environment and Health

～ Overview of WHO evaluation ～

Junji Miyakoshi^{1*}

概要

我々の生活環境には種々の電磁波が飛び交っている。特に、世界中で携帯電話や無線 LAN の利用、携帯電話基地局の新設などが急速に進展したことが主な要因となっている。さらに近未来社会では、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。電磁環境は目に見えないこともあり、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多い。ここでは、高周波の電磁環境について世界保健機関(WHO)や国際がん研究機関(IARC)をはじめとした国際機関によるこれまでの人の健康への評価を紹介する。

1. はじめに

現代社会は急速な科学の発展により、生活環境には、我々の生存に関わる種々雑多の事象が潜んでいる。生存圏科学は、将来を見据えて、人類の持続的な発展を可能とするような研究を目指している。その1つにミッション研究がある。このミッション研究の1つに「高品位生存圏」として、人の健康・環境調和に関して研究を進展させている。電磁環境と健康の問題は、このミッション研究の1つとして行われてきた。

現代社会の生活環境には、静磁場、極低周波、中間周波、高周波、さらにミリ波やテラヘルツ波など、種々の電磁波が飛び交っている。ちなみに、静磁場は、医療のMRI や将来のリニアモーターカーを代表とした強磁場、極低周波は、家電製品や高圧送電線の商用周波 (50 Hz、60 Hz)、中間周波は、IH調理器や将来のワイヤレス給電技術に使用される数 10 kHz 帯、高周波は、本稿で紹介する携帯電話や基地局などからの数 GHz 帯 (将来的には数 10 GHz 帯も予想される)、ミリ波は、空港の検査機器や衝突防止電波の 70 GHz 帯、さらにテラヘルツ波は、将来の無線通信や先進医療の応用が期待されている 100～300 GHz 帯であり、それぞれの周波数帯で特徴がある。高周波に関しては、特に、世界中で携帯電話の 5G への移行や急激な WiFi の汎用化、5G に伴う携帯電話基地局の新設が急速に進展している。さらに中間周波電波に関しては、ワイヤレス給電技術の急速な普及などが近い将来に予想される。近未来社会では、人が生活する上で、多種多様な電磁環境は、ますます増加の一途をたどるであろう。

電磁環境は目に見えないこともあり、電離放射線と同様に、電磁波の健康への影響について不安を抱いている人が多いのも事実である。高周波の健康影響については、本格的な研究の歴史は放射線に比

2021年6月16日受理.

¹〒611-0011 宇治市五ヶ庄 京都大学生存圏研究所 生存圏電波応用分野.

* E-mail: miyakoshi@rishi.kyoto-u.ac.jp

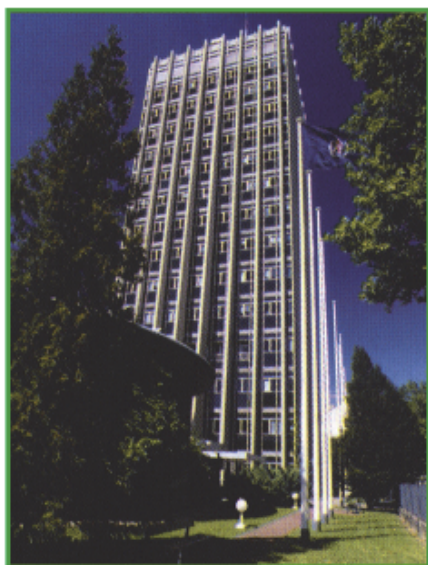
べれば非常に浅い。ここでは、歴史的背景ならびに世界保健機関(WHO)や国際がん研究機関(IARC)をはじめとした国際機関の健康への評価をまとめる。例えば、1990年後半からこれまでの間に、世界中の国々で携帯電話は急速に普及した。当初から、携帯電話は人の脳に近付けて使用するものであり、高周波の影響として、脳腫瘍をはじめ、脳への影響として不安視されるようになっていた。さらに、熱以外の、いわゆる「非熱作用」の有無について議論が高まり、特に子供への影響が問題視されてきた。なお、電磁波の生体影響に関する詳細は、すでに刊行されている資料を参照されたい¹⁻⁵⁾。電磁波の発生源として、我々が現在から将来にかけて生活環境の中で曝される可能性が高いのは、医療、通信、家電、運輸など、幅広い周波数領域に渡っている。ここでは、これまでの高周波電磁波と健康に関する評価研究についての国際動向を WHO の役割と活動を中心に紹介する。

2. WHO（世界保健機関）の役割

1990年以降、国際的に電磁波の健康影響に関する議論が高まる中、WHOは、1996年に国際電磁波プロジェクト(International EMF Project)を立ち上げた⁶⁾。国際電磁波プロジェクトは、WHOの組織として、電離放射線の健康影響を担当する部署に所属している。また、このプロジェクトはシンポジウムやワークショップなどの開催をはじめとして、その時々における生体影響評価の現状報告や取り組むべき課題の提案などを行ってきた。IARCはWHO内の1組織として、がんに特化した健康影響を評価している。図1にWHOとIARCの役割を簡単に示す。



図1: 電磁環境と健康に関する世界保健機関(WHO)の役割



<WHO-IARC本部（リヨン、フランス）>

～Working group 4の編集作業風景～
(Room: Sasakawa Hall B)



左から、Sounders教授(イギリス)、宮越(日本)、Juutilainen教授(フィンランド) Blackman教授(アメリカ)、Anderson教授(アメリカ)

図2: 国際がん研究機関 (IARC)における極低周波 (ELF)発がん性評価会議

筆者は、IARC の発がん性評価ワーキングメンバーとして、これまでに極低周波（主として商用周波）および高周波（主として携帯電話に使用してきた周波数）を評価対象として、2 回の評価会議に参加してきた。ワーキングメンバーの就任については 2 段階の手続きがあり、まず、WHO から会議の半年ほど前に本学総長宛に招請依頼があり、次に総長からの問い合わせで、本人の承諾後、利益相反がないことなどをチェックされて就任する。メンバーは欧米を中心として、世界各国から、恐らく、研究実績を基に、20～30 名程度選ばれている。ほとんどのメンバーはそれまでの国際学会や会議で同席していた人たちが招請されていた。図 2 は、フランスのリヨンにある IARC 本部と筆者が参加した編集作業の風景である。それぞれのメンバーが各々専門分野の 150 編ほどの論文を事前に渡され、会議の 10 日間ほどで一人 30～40 ページ（総ページ 600～800 ページ）にまとめ、モノグラフを作成する。会議の最終日には、IARC の規定に沿って、メンバー全員による投票で、発がん性の程度を評価する。このような手順を経て、投票による発がん性グループ分類の結果は、直ちに IARC からプレスリリースとして世界各国へ通達が行われる。

IARC の発がん性評価が終了すると、数年後に WHO による、がんを含むヒトの健康全般に関して、Environmental Health Criteria (EHC：環境保健クライテリア)の作成会議が開催される。筆者は、極低周波の EHC 作成会議のタスクグループメンバーとして招請され、参加した。図 3 は、スイス、ジュネーブの WHO 本部ビルと筆者が担当したタスク第 4 グループのメンバーである。WHO で開催されたタスク会議は IARC での進め方とほぼ同様で、WHO の本部で 10 日間ほどかけて、20 数名のタスクグループメンバー全員で千編以上の論文を参考に討論し、600～800 ページにまとめた EHC を作成し、WHO が出版する。

しかし、携帯電話の電磁環境影響評価の場合、2011 年に IARC の発がん性評価を実施したが、10 年経過した現在も WHO でのタスクグループによる EHC 作成会議は開催されていない。全く WHO としては、異例の動きとなっている。これまで何度となく EHC 作成に関するやりとりがあり、EHC ドラフトの作成までこぎつけ、WHO は、2014 年 9 月 30 日に、EHC のドラフト⁷⁾を公開し、同年 12 月 15 日まで、パブリックコメントを求めた。これには、700 件以上のコメントがあった。EHC は全 14 章からなっているが、ドラフトは第 2 章から第 12 章までが公開された。EHC については、第 1 章（要約や推奨研究）、第 13 章（健康リスク評価）および第 14 章（防護対策）が重要である。しかしながら、パブリックコメントを受け取った後、作業は停止している。この主な理由としていくつかあるが、その点については後述する。



図 3：WHO での ELF 環境保健クライテリア(EHC)の策定会議

なお、WHO と IARC がヒトの発がんやその他の健康に関して評価すると、この結果を受けて、電磁波に関する国際機関、国際非電離放射線防護委員会(ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection)や米国電気電子学会(IEEE : The Institute of Electrical and Electronics Engineers) の国際電磁安全委員会 (ICES : International Committee on Electromagnetic Safety) がガイドラインや規格を作成し、世界各国に発信する。わが国も、このガイドラインや規格に沿って、高周波であれば、総務省が防護指針を策定し、電波法に反映させている。

3. 電磁環境影響評価の研究方法

電磁環境の生体影響を研究する主な手法としては、(1) ヒトの疫学研究やヒトのボランティア研究、(2) 動物実験研究、および (3) 細胞実験研究がある。表 1 に、細胞レベル、動物レベルからヒト個体を対象として、これまで研究が行われてきている電磁波生体影響の主な評価指標をまとめた。研究内容の多くは、電磁波による遺伝毒性への影響を主体とした発がん性への影響評価に主眼がおかれている。疫学研究では、発がん以外のアルツハイマー症などの神経変異症も対象とし、評価指標が広がりつつある。近年、細胞研究では免疫応答やストレス応答、細胞損傷が生体に影響を及ぼさないように自滅することを示すアポトーシス、遺伝子の働きに関与する生理・機能的側面からの研究も注目されている。実験動物研究では、ほとんどが発がん性の有無に焦点が当てられている。一部、免疫機能や行動、記憶への影響なども報告されている。

4. 高周波電磁環境に対する IARC の評価

携帯電話を主たる対象とした高周波 (IARC は RF(Radiofrequency)と表記) については、2011 年 5 月に、IARC で発がん性評価会議が開催された。評価会議には筆者を含め、15 カ国 30 名のワーキンググ

表 1: 電磁波生体影響を評価する主な研究内容

研究分類	対象	研究内容
疫学研究	ヒト	発がんやがん死亡 (脳腫瘍、小児および成人白血病、乳がん、メラノーマ、リンパ腫など)、生殖能力、自然流産、アルツハイマー病、パーキンソン病など
人体影響	ヒト	心理的・生理的影響 (疲労、頭痛、不安感、睡眠不足、脳波、心電図、記憶力など)、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能など
細胞実験研究	細胞	細胞増殖、DNA合成、染色体異常、姉妹染色分体異常、小核形成、DNA鎖切断、遺伝子発現、シグナル伝達、イオンチャンネル、突然変異、トランスフォーメーション、細胞分化誘導、細胞周期、アポトーシス、免疫応答、エピジェネテックスなど
動物実験研究	実験動物 (ラット、マウスなど)	発がん(リンパ腫、白血病、脳腫瘍、皮膚がん、乳腺腫瘍、肝臓がんなど)、生殖や発育 (着床率、胎仔体重、奇形発生など)、行動異常、メラトニンを主とした神経内分泌、免疫機能、血液脳関門 (BBB) など

ループメンバーが参加した。携帯電話を対象とした高周波に関する疫学研究は、1990年代後半から、国際的に活発に行われてきた。大がかりな研究として、IARCがとりまとめる形で、日本、イギリス、スウェーデンなど13カ国（ただし米国は不参加）が参加して「The INTERPHONE Study」として行われた。種々の脳腫瘍を疾患対象として、症例-対照研究(case-control study)で実施された。IARCでは参加国全ての研究をとりまとめ、この国際共同研究の最終結論の概要を2010年5月にプレスリリースの形で発表した^{8,9)}。結果をまとめると、(1) 定常的携帯電話の使用者の神経膠腫と髄膜腫でオッズ比(OR)がやや低下した。(2) 10年以上長期使用者についての、ORの上昇は観察されていない。(3) 1640時間以上の累積長時間通話者で、神経膠腫のORが1.40(95%信頼区間:1.03~1.89)とわずかな増加を示した。ここでのオッズ比とは、脳腫瘍発症患者で、携帯電話使用者の確率を携帯電話非使用者の確率で除した統計量の比を表す。結論として「10年以上の長期使用者に対する携帯電話使用による脳腫瘍(神経膠腫と髄膜腫)の上昇はないと考えられる。観察されたORの低下や、累積長時間通話者のORの上昇、その他、携帯使用側頭葉での神経膠腫の上昇など、因果関係の正確な解釈は難しい。」と述べている。その他、多くの疫学研究で、発がん増加を示す証拠は見つかっていない。しかし、スウェーデンでの疫学プール分析に見られるように、2000時間を超える通話者は、神経膠腫が3倍になるという報告¹⁰⁾や、我が国の疫学研究で、1日20分以上の通話を超える場合に、聴神経鞘腫しやうしゅうの増加を示唆する報告¹¹⁾がある。これらの概要を簡単に表2にまとめた。

疫学研究の評価に加えて、動物実験研究、細胞実験研究の評価を以下にまとめる。(1) 疫学研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、上述した一部の“陽性結果”を判断材料の基礎として、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in humans)」と評価した。(2) 実験動物研究の評価：これまでの研究結果を総合すると、陰性の結果が多いものの、上述した一部の複合的発がん研究の“陽性結果”は発がんの証拠として認められ、ワーキンググループは、「限定的証拠(Limited evidence in experimental animals)」と評価した。(3) 細胞実験研究の評価：一部の論文で“陽性”を示す結果があるものの、ワーキンググループの総合的判断として、「発がんメカニズムについては、弱い証拠(Weak mechanistic evidence)」として評価した。(4) 総合評価：ヒトの疫学研究および実験動物の発がん

表2：IARCでの疫学研究の評価

I. 携帯電話使用と神経膠腫(Glioma)	
インターホン国際共同研究 (The INTERPHONE study)	・症例-対照研究での通話時間 最長群(>1640時間)において、OR(オッズ比)は1.40(95%CI; 1.03-1.89)(CI: 信頼区間)
スウェーデン研究のプール分析	・症例-対照研究での使用時間 最長群(>2000時間)において、ORは3.2(95%CI; 2.0-5.1)
II. 携帯電話使用と聴神経鞘腫(acoustic neuroma)	
インターホン研究 (The INTERPHONE study)	・グリオーマの結果とほぼ同様の傾向(通話期間が最大5年に渡り、通話時間最長群(>1640時間)においてのみ、聴神経鞘腫の有意な増加)を示している
スウェーデン研究のプール分析	・グリオーマの結果とほぼ同じ 長期携帯電話使用者の聴神経鞘腫が増加している
日本の疫学研究	・携帯電話使用と同側において、 聴神経鞘腫の増加を示している

◎これらの結果は、バイアス*の可能性を完全には排除できないが、RFばく露と神経膠腫の因果関係を示唆している (*バイアス：電波以外の影響による効果)

ん研究について、それぞれ「限定的証拠」と評価した。細胞研究などの「メカニズムとしての弱い証拠」も含めて、ワーキンググループの高周波発がん性総合評価は、「グループ 2 B(Possibly carcinogenic to humans)」（発がん性があるかもしれない）と決定した。

今回の高周波に関する「2B」の評価は、あくまで、携帯電話からの電磁波と脳腫瘍との関係を「限定的な証拠」として認めたものである。この結果は評価速報として、その概要が報告されている¹²⁾。詳細は、モノグラフ 102 巻として、2013 年に出版された¹³⁾。なお、モノグラフ 102 巻が発刊されたとほぼ同時に、この評価委員の座長や IARC 関係者らが、携帯電話の発がん評価に関する独自のコメントを発表した¹⁴⁾。今後も十分な情報を継続して社会へ発信することが重要であると述べている。IARC がこれまでに発がん性を評価してきた、化学物質、電磁波、嗜好品、飲食（料）物、薬、大気環境など、生活や労働環境での 1017 項目に達している¹⁵⁾。（2020 年 2 月 18 日現在）発がん性を評価・分類された各分類グループにおける該当総数とそれらの代表例を表 3 に示す。

IARC の発がん性評価が 2011 年に実施されたにもかかわらず、WHO の EHC 作成会議が進んでいない 1 つの理由として、国際電磁波プロジェクトは、2018 年 6 月 21-22 日に国際諮問委員会をスロベニアで開催し、WHO 技術文書と EHC の 2 つの文書作成を決めた。前者は、主に文献レビューが主体となる。これで EHC に関しては、多くの専門家によるシステムティックレビューがさらに必要なため、現時点で EHC の発刊はさらに遅れる見込みである。

表 3 : IARC による発がん性の分類とその主な例

発がん性の分類及び分類基準	既存分類結果 [1017例]
グループ 1 : 発がん性がある (Carcinogenic to humans)	電離放射線、紫外線(100~400nm)、アスベスト、カドミウムおよびカドミウム化合物、ホルムアルデヒド、太陽光曝露、喫煙、アルコール飲料、コールタール、ディーゼルエンジンの排気ガス、受動喫煙、ベンゾピレン、紫外線を用いた日焼け用ランプ、加工肉、粒子状物質 など [他を含む120例]
グループ 2 A : おそらく発がん性がある (Probably carcinogenic to humans)	アクリルアミド、熱いマテ茶、概日リズムを乱す交代制勤務、メタンスルホン酸メチル、ポリ塩化フェノール、木材などのバイオマス燃料の室内燃焼、赤肉（牛、豚、羊、などの肉）シスプラチン など [他を含む83例]
グループ 2 B : 発がん性があるかもしれない (Possibly Carcinogenic to humans)	極低周波(ELF)磁界 、 高周波(RF)電磁波 、アセトアルデヒド、A F-2、ブレオマイシン、クロロホルム、ダウノマイシン、鉛、メルファラン、メチル水銀化合物、マイトマイシンC、フェノバルビタール、漬物、ガソリン、ベンズアントラセン など [他を含む314例]
グループ 3 : 発がん性を分類できない (Unclassifiable as to carcinogenicity to humans)	静磁界 、 静電界 、 極低周波電界 、コーヒー、茶、アクチノマイシンD、原油、軽油、カフェイン、ベンゾ(e)ピレン、コレステロール、ジアゼパム、蛍光灯、エチレン、水銀、塩化メチル、フェノール、トルエン、キシレン、カプロラクタム(ナイロンの原料) など [他を含む500例]

(2020年2月18日現在)

5. 高周波電磁環境評価に関する欧州機関の報告書

欧州委員会から要請された、Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risk (SCENIHR：新興および新規に同定される健康リスクに関する委員会)が2015年1月に、電磁波ばく露の健康影響の可能性に関する科学的意見、Opinion on Potential health effects of exposure to electromagnetic fields (EMF)、を公表した¹⁶⁾。SCENIHRのRF電磁波に関する健康影響のまとめを要約すると、以下の通りである。

- ・疫学研究結果については、脳腫瘍のリスク上昇について、十分なエビデンスを示していない。頭頸部の他のがんや小児がんを含む他の悪性疾患のリスク上昇を示していない。
- ・初期の研究結果は、携帯電話のヘビーユーザーにおいて、神経膠腫および聴神経鞘腫のリスク増加の問題を提起した。IARC評価以後に発表されたコホート研究（ここでは携帯電話の使用頻度と脳腫瘍の発症率について、長期にわたる数十年単位で調査する前向き疫学手法）および発症率の時間に依存した研究によると、神経膠腫のリスク上昇の証拠は弱まっている。聴神経鞘腫とRFばく露の関連の可能性については未解決である。
- ・RFばく露がヒトの認知機能に影響を及ぼすという証拠はない。
- ・現行のばく露限度値を下回るRFばく露レベルによる生殖および発達への有害な影響はない、と結論した先のSCENIHR意見書内容は、最近の研究データを含めても、この評価結果に変更はない。

6. 米国国立衛生研究所で実施された携帯電話からの電波と発がんに関する大規模な動物実験研究

2016年6月に米国から大規模な動物実験研究の中間報告¹⁷⁾が、BioEM2016(ケント、ベルギー)の学会中に行われた。それは、National Institute of Health (NIH、米国国立衛生研究所)のNational Toxicological Program (NTP)研究の一つとして実施されていた。この動物実験研究には約28億円の研究費が費やされていた。中間報告の研究結果概要は以下の通りであった。(1)寿命：電波ばく露群の方が、コントロール群より、寿命が延びる傾向がある。(2)脳腫瘍：電波ばく露によりオスのラットで増加しているGSM(第2世代(2G)規格の通信方式の1つ)ではすべてのばく露で、CDMA(第3世代(3G)規格の通信方式の1つ)ではSAR(specific absorption rate; 比吸収率; 電波により生体の単位重量あたりに吸収されるエネルギーをW/kgで示したもの)が6W/kgのみで増加している。(3)心臓シュワンノーマ(心臓原発性の神経鞘腫、シュワン細胞の腫瘍)：SAR依存的(～6W/kg)に、オスのラットにおいて、GSM、CDMAともに増加している。(4)メスのラットについて：すべてのばく露による、脳、心臓への影響は認められていない。(5)細胞の遺伝毒性について：脳細胞のコメットアッセイ(DNA鎖切断評価法の1つ)試験では、SAR依存的に増加している。しかし、赤血球細胞の小核形成(細胞核フラグメントの分離)試験では、影響なしであった¹⁸⁾。表4にNTP研究の材料と方法、ならびにNTPファクトシートによる研究成果概要を簡単に示す。2018年3月26-28日に、本研究の査読会議(Peer Review of the Draft NTP Technical Reports on Cell Phone Radiofrequency Radiation)が実施された¹⁹⁾。マウスのデータでは、メスの悪性リンパ腫がばく露群で有意に高かった。当初の判定では、発がん性に関して、何らかの(some)、曖昧な(equivocal)証拠という判断だったが、このレビュー結果から、someは、明確な(clear)証拠へ、equivocalは、someへと格上げされる勧告があった。その理由としては、線量-反応関係が成り立っていることが挙げられた。この動物実験は、米国における国際的に最も権威の高いNIHの主導する研究成果であり、今後の、携帯電話からの電波による発がん性評価について、新たな、そして極めて大きな議論を投げかけた形になっている。

表4：米国 NTP Study 動物実験研究の方法と成果概要

動物実験研究の方法	電波ばく露	CDMA, GSM, 1900MHz (マウス), 900MHz (ラット)
	ばく露方法	全身ばく露, 1, 1.5, 3, 6W/kg, 10分 ON/OFF (~9時間), 毎日, 107週間
	動物	ラット, マウス (実験ポイント1群, 各90匹)
成果概要	電波ばく露による雄ラット	心臓腫瘍の発症については明確な (clear) 証拠がある
	電波ばく露による雌ラット	脳および副腎の腫瘍発症については”何らかの (some) 証拠があった
	電波ばく露による雌ラットならびに雌雄マウス	がんとの関連については、曖昧な (equivocal) 証拠であった

そこで、2019年の秋に、WHOがこのNTP Studyの科学的評価について、それぞれの研究内容に沿った専門家による会合を開催するための準備を始めた。ところが2020年に入ってから、ほぼ全世界各国への新型コロナウイルスのパンデミックにより、WHOでは、新型コロナの国際的な感染状況や有効なワクチンの生産状況などに関して総力を挙げることになり、WHOのNTP Study科学的評価会合に関しては、計画よりかなり遅れている。恐らく、この会合が開催され、WHOの評価が固まれば、少なくともIARCの発がん性再評価へと進む可能性も考えられる。さらに、関連した話題として、日本の総務省が主体となって、令和元年度から5年間の計画で、日韓共同プロジェクトによるNTP Studyの再現実験がスタートした。NTP Studyに関しては、高く評価する一方、各国の専門家からいくつかの疑問点などが示されている。筆者も欧米の研究者と共に、このことに関して、疑問となる点をまとめて論文発表した²⁰⁾。以下にNTP研究の国際的な影響と問題点をまとめた。

- 1) NIH (米国国立衛生研究所) の研究であり、権威が高く、国際的な影響は極めて大きい。
- 2) なぜ、ラットのオスだけが発がん陽性になっているか、科学的説明が薄い。
- 3) 陽性効果となっている脳腫瘍、シュワンノーマについて、コントロール (シャム) の発生数が90匹中で“ゼロ“である。1群当たりのラットの数90匹では少ないことによる影響も否定できない。
- 4) 他の器官の神経 (手足、腕、耳、腰など) の神経鞘腫のデータがなく、より多くの比較ができない。
- 5) 細胞遺伝毒性評価において、コメットアッセイで陽性、小核試験で陰性について、やや疑問を感じる。コメットアッセイの実験手法過程におけるアーチファクトの可能性も考えられる。
- 6) 上述の疑問点などがあり、日本 - 韓国の共同プロジェクトでNTP研究の再現実験が実施されている。

以上の米国国立衛生研究所による電波と発がんに関する大規模な動物実験研究は、WHOも重く受け止めており、IARC発がん性評価会議終了以来、WHOでのEHCタスク会議開催が10年以上遅れている理由の1つとなっている。

7. WHO の 5G ネットワークと健康に関する Q&A

携帯電話の高周波領域における健康影響評価研究で、どうしても足かせとなっているのは、使用する周波数帯や変調方式が、携帯電話のモデルチェンジとともに変わることである。第〇世代と表して、2012 年ころから現在までの主体は第 4 世代 (4G) である。1980 年代の 1G はアナログであった。前述の NIH の動物実験で使用した電波ばく露は 2G から 3G を使用している。そして今年あたりから、高速通信の 5G へ移ってゆく。5G 等の先進的無線システムで用いられる機器では、現在の携帯電話等の無線通信よりも高い周波数帯 (超高周波) を利用する。従って、生体影響研究もその周波数帯での研究が少なく、新たに、極めて高額なばく露装置を作製して、引き続き生命科学でのエビデンスの収集が必要となってくる。さらに、生物研究用電波ばく露装置は、もちろん汎用ではない。細胞研究や動物研究では、周波数が変わると、それぞれ新規にばく露装置を作製しなければならないので、医工 (または生物-工学) 融合が無くして成り立たない。この研究分野の問題点 (困難な点) は、ここらあたりにありそうである。WHO が 2020 年 2 月 27 日に HP で、5G ネットワークと健康に関する Q&A 公開したので、表 5 にその内容をまとめた²¹⁾。5G ネットワークはこれまでの周波数よりさらに高くなり、生体へのエネルギー吸収は体表面に限定される。そのため、皮膚や目への影響評価が注目されている。

表 5 : WHO の 5G ネットワークと健康に関する Q & A

Q	A
5G とは何ですか？	5G、つまり第 5 世代は、2019 年に導入された、最新のワイヤレス携帯電話テクノロジーである。 5G は、遠隔医療、遠隔監視、遠隔手術を含む、幅広い新しいアプリケーションの向上が期待されている。
5G とそれ以前の世代との主な違いは何ですか？	5G は、電気通信規格の進化を表している。5G は 3.5GHz 付近から数十 GHz までのより高い周波数が利用されている。 5G はさらに、現在の基地局アンテナのように信号を広い方向に拡散させるのではなく、使用中のデバイスに向けて信号をより効率的に集束させている。
ばく露レベル	5G テクノロジーは現在展開の初期段階にあることを考えると、無線周波電磁波へのばく露のレベル変化の程度はまだ調査中である。
5G による潜在的な健康リスクは何ですか？	これまでの携帯電波に使用された周波数帯で行われた研究成果はあるが、5G で使用される周波数で行われた研究はごくわずかである。従って、リスクはまだよく分からない。 ただ、周波数が高くなると、エネルギーの吸収が体の表面 (皮膚と目) に限定される。全体的なばく露が国際的なガイドラインを下回っていれば、公衆衛生への影響は小さいと考えられる。
国際ばく露ガイドラインとは何ですか？	2 つの国際機関 (ICNIRP (国際非電離放射線委員会) と IEEE (米国電気・電子工学会)) が、電波に関するばく露ガイドラインを作成している。現在、多くの国が推奨ガイドラインを順守している。5G の周波数もカバーしている。
WHO は何をしていますか？	WHO は、2022 年までに 5G を含む無線周波数範囲全体をカバーする、無線周波数へのばく露による健康リスク評価を実施してゆく。 WHO は、より多くの公衆衛生関連データが集積されるにつれて、5G のばく露による潜在的な健康リスクに関連する科学的証拠をレビューする。 WHO は、移動体通信に関して、長期的に健康に及ぼす可能性のある影響についてさらに調査することを提唱し、広報資料を作成し、科学者、政府、一般市民の間の対話を促進して、健康と通信に関する理解を深める。

8. 発がん性や電磁過敏症とリスクコミュニケーション

上述のように、現代社会はいたるところで電気をエネルギーとして動いており、さらに情報通信をはじめ、生活環境における多種多様な電磁波利用の役割は極めて大きく、この流れは、将来にかけてますます加速してゆくものと考えられる。利便性が高くなる一方で、電磁波に対する健康への危惧を抱く人々が多いことも事実である。ここで取り上げた高周波は、そのエネルギーとして電離能力もなく、一般的に「放射線」といわれている電離能力のあるエックス線やガンマ線とは異なる電磁波である。エネルギー面からいえば、細胞の DNA を直接傷つけることはないと考えられるが、一般社会における「電磁波」ということばは、「放射線」と同じように受け止められているようにも思われる。特に、携帯電話が汎用化されて以来、発がんへの影響に加えて、「電磁過敏症」と称される人々がヨーロッパを中心に現れてきた。皮膚反応や頭痛、不眠などの症状を訴えている。ただ、これまでのところこれらの症状に対する科学的証明はない。WHO も電磁過敏症について、一時大きく取り上げていたが、科学的証明のないことでファクトシートの発刊にとどめている²²⁾。発がんや神経変性疾患、さらに電磁過敏のような症状に関しては、先端生命科学を用いて、生体影響研究をさらに進めつつ、それらの科学的な成果を基にした、電磁波と健康を理解するための、リスクコミュニケーションの必要性を強く感じる。このことは、WiFi や 5G、6G への汎用化に向けてさらに重要な役割を果たすものと考えられる。

9. おわりに

電磁波生命科学は、その主たる目標の一つとしては、科学的に信頼のおける研究成果から、電磁波の生体影響を正当に評価することにある。その一方、環境レベルをはるかに超えた磁束密度での生体、細胞や高分子重合体などの電磁波応答研究の成果も本分野の将来への発展につながる重要なものである。これらの成果は、電磁波の線量-効果関係（現在のところ、高周波の場合、線量を電波のエネルギー比吸収率としており、さらにばく露時間も因子として加えている）に基づいたしきい値の推定を可能とする。これからの生体影響研究を評価方法の観点から考えた場合、現代は多種多様な電波環境利用の社会となっており、電波影響に関するヒトを対象とした疫学研究は重要であるが、新しい周波数帯の評価は、過去のばく露実績を資料として解析する疫学研究には、実施の限界ではないかと考えられる。従って、生命科学において、ヒトゲノム解析が急速に進展し、さらに電波工学的には、ばく露評価も高精度で行えることから、今後の細胞・遺伝子レベルでの研究推進が、より精度の高い評価を可能とするであろう。

高周波の健康への影響評価と近い将来の推奨研究を以下に簡単にまとめた。

- 1) これまでの国際的評価を総合すると、携帯電話や基地局からの電波で人の健康に重篤な影響を及ぼしているとは考えにくい。
- 2) IARC の発がん性評価で、限定的と結論付けたポジティブ研究については、再現実験の必要性もあるが、作成が遅れている WHO の RF-EHC の研究推奨が大きな参考となる。また、WHO が米国の動物実験研究の結果をどのように評価するかによって、発がん性の重さも変更されるだろう。
- 3) 5G（さらには将来の 6G）での使用周波数領域に対する生体影響研究の推進は急務である。
- 4) 新しく利用される 5G を含む周波数帯の評価は、疫学研究としては、実施の限界と考えられる。従って、生命科学において、先端的な細胞・遺伝子レベルでの研究推進が、より高い精度の評価を可能とするであろう。
- 5) 評価研究や解析の遅い、神経変性疾患、電磁過敏症（自覚的）については、これまでのところ科学的証明はないが、重篤な人については、分子生命科学の中でも、感受性遺伝子の検索研究も 1 つの方法であると考えられる。

携帯電話をはじめとして、無線エネルギー伝送など、社会生活の中の電波利用に関する工学的技術の進歩は目を見張るものがある。その一方、電磁波は新しい環境因子として、人の健康と関連して社会的に注目されることも考えておかなければならない。このように増加の一途をたどる将来の電磁環境を考えると、電磁波の安全性を科学的なデータから判断・評価するため、未解明な部分については、生命科学の先端技術を駆使して、研究を推進してゆく必要があると考える。

参考文献

- 1) 宮越順二(編者), 電磁場生命科学, 京都大学学術出版会, 2005.
- 2) J.C. Lin (Ed.), *Advances in Electromagnetic Fields in Living Systems*, Vol. 5, pp.1-33, *Springer*, New York, 2009.
- 3) J. Miyakoshi, *Proceedings of the IEEE*. 101, 1494-1502, June, 2013.
- 4) J. Miyakoshi, *Recent Wireless Power Transfer Technologies via Radio Waves*, N. Shinohara (Ed.) pp.257-276, *River Publisher*, Denmark, 2018.
- 5) 宮越順二, 電磁波の生体影響 「空間伝送型ワイヤレス給電技術の最前線」, (監修: 篠原真毅), シーエムシー出版, 2021, pp.255-267.
- 6) <http://www.who.int/peh-emf/project/en/>
- 7) http://www.who.int/peh-emf/research/rf_ehc_page/en/
- 8) INTERPHONESTUDY ([http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf#search='IARCWHO Press Release No. 200'](http://www.iarc.fr/en/media-centre/pr/2010/pdfs/pr200_E.pdf#search='IARCWHO%20Press%20Release%20No.%20200')) .
- 9) E. Cardis *et al.*, *Occup Env, Med*, published online June 9. DOI:10.1136/oemed-2011-100155, 2011.
- 10) L. Hardell *et al.*, *Int. J. Oncol.*, 38, 1465-1474, 2011.
- 11) Y. Sato *et al.*, *Bioelectromagnetics*, 32, 85-93, 2011.
- 12) News: Carcinogenicity of Radiofrequency electromagnetic fields, *The Lancet Oncology* (online June 22, 2011) *Lancet Oncology*. Volume 12, Issue 7, 624-626, 2011.
- 13) IARC Working Group: Non-Ionizing Radiation, Part 2, Radiofrequency Electromagnetic Fields. Vol. 102, IARC Monographs on The Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans, 2013.
- 14) J.M. Samet *et al.*, *Epidemiology*, 25, 23-27 (2014).
- 15) <http://monographs.iarc.fr/ENG/Classification/>
- 16) http://ec.europa.eu/health/scientific_committees/emerging/opinions/index_en.htm
- 17) <http://dx.doi.org/10.1101/055699>
- 18) Falcioni, L *et al.*, *Environ Res.*, 165, 496-503, 2018.
- 19) https://ntp.niehs.nih.gov/ntp/about_ntp/trpanel/2018/march/roster_20180328_508.pdf#search='NTP+Peer+Review+March+2628%2C+2018'
- 20) Vijayalaxmi, K. R. Foster, J. Miyakoshi, L. Verschaeve, *Environ. Mol. Mutagen*, 291-293, Feb., 2020. DOI: 10.1002/em.22353
- 21) <https://www.who.int/news-room/q-a-detail/radiation-5g-mobile-networks-and-health>
- 22) WHO Fact Sheet No 296, *Electromagnetic Fields and Public Health -Electromagnetic Hypersensitivity - 2005:* https://www.who.int/pehemf/publications/facts/EHS_Factsheet_296_English.pdf

著者プロフィール



宮越 順二 (Junji Miyakoshi)

<略歴> 1981年大阪市立大学大学院医学研究科修了／1987年アルバータ大学附属がんセンター（カナダ）特別研究員／1989年京都大学医学部講師／1996年京都大学大学院医学研究科助教授／2002年弘前大学医学部教授／2010年京大大学生存圏研究所特定教授／2016年京大大学生存圏研究所特任教授、現在に至る／世界保健機関（WHO）評価委員／国際がん研究機関（IARC）評価委員 <研究テーマと抱負> 21世紀に入り携帯電話をはじめ、多種多様な生活環境の電磁波は、さらに増加の一途をたどることが予想され、電磁環境と人の健康について、先端生命科学により評価・究明したい。

<趣味> 地方の市場巡り、写真、鴨川散策