

電波が人体に与える影響に関する研究評価・系統的レビュー 諸外国の実施状況について

MRI 三菱総合研究所

2023年3月10日

デジタル・イノベーション本部

電波が人体に与える影響に関する研究評価・系統的レビュー

- 電波が人体に与える影響に関する研究の最新動向を把握することを目的として、諸外国の電波の人体防護に関わる機関で実施された、電波が人体に与える影響に関する研究評価・系統的レビューについて調査。
- 主に、3年以内に公表された研究評価・系統的レビュー、かつ他機関からも参照されるなど信頼性の高い取組を対象。
- 評価・レビューの結果だけでなく、評価・レビュー対象とする研究を選定する基準やプロセスにも注目。

実施機関・発表年	評価・レビューの目的	評価対象期間 (論文の発表年)	評価対象周波数	評価対象研究
米国食品医薬品局 (FDA) (2020)	公衆衛生の規制当局として、無線周波数の人体への影響に関する科学的エビデンスの監視活動として実施。	2008～2018年	100kHz-6GHz	<ul style="list-style-type: none"> 高周波電磁界による腫瘍形成への影響に関する、動物研究125件(最終的には39件に絞り込み)及び疫学研究69件
オランダ保健評議会 (2020)	オランダ議会下院の諮問を受けて、政府の独立諮問機関である保健評議会が5G周波数帯の電磁界が健康に影響を与える可能性について評価。	～2020年 (～5GHzのがんへの影響に関する研究のみ、2015～2020年を対象とした)	700-2200MHz 2.2-5GHz 20-40GHz	<ul style="list-style-type: none"> 高周波電磁界とがん及びその他の影響(男性の生殖能力、妊娠結果、先天性異常等)の関係に関する既存研究 疫学研究／ボランティア研究／動物研究／細胞研究すべてを対象
フランス国立食品環境労働衛生安全庁 (ANSES)(2022)	2018年に政府の5Gロードマップで示された「5G展開と公衆ばく露に関する透明性と対話の確保」の方針に基づき、5Gの展開に伴う電磁界へのばく露と関連する健康影響に関する評価を実施。	2012～2020年	(700-2100MHz) 3.5GHz帯 26GHz帯	<ul style="list-style-type: none"> (700-2100MHzは過去のANSESの専門家評価報告等を再確認する形で実施) 特定条件での文献検索で抽出された研究 ANSESの速報版レビュー(2019)に掲載された研究 有識者によって特定された研究など
オーストラリア放射線防護・原子力安全庁(ARPANSA) (2021)	5Gなどによる6GHzを超える周波数の電波の利用が増加している背景を踏まえて、ARPANSAのEME (Electromagnetic Energy) Program)の一環として実施。	～2019年	6GHz超	<ul style="list-style-type: none"> ICNIRPガイドラインの職業ばく露レベル以下のばく露による生物学および健康影響に関する107件の実験研究 6GHz超レーダーへのばく露を調査した31件の疫学研究
スウェーデン放射線安全庁(SSM)(2022)	電磁界ばく露による健康リスクのリスク評価の一環としてSSMの電磁界に関する科学評議会が毎年実施。	2020年	静磁界～高周波	<ul style="list-style-type: none"> 疫学、ヒト研究、動物研究、細胞研究すべてを対象

米国FDA(2020)

テーマ	高周波電磁界による腫瘍形成への影響
対象周波数	100KHz-6GHz
対象文献 文献抽出方法	<p>動物研究 高周波電磁界ばく露による腫瘍形成の因果関係を評価する動物研究(遺伝毒性に関するエンドポイントの研究も含む)(2008年1月1日から2018年8月1日に発表された査読済み科学文献(NTP研究のみ2018年11月の最終報告を対象))</p> <ul style="list-style-type: none"> PubMedでキーワード検索し、EMFポータルを検索結果や、他の機関の評価レポート(SCENIHR(2015)、スウェーデンSSMLレポート、オランダ保健評議会報告書など)とも比較して、文献を追加/絞り込み。最終的に39件の文献をレビュー。 <p>疫学研究 携帯電話使用による腫瘍リスクの存在に関する疫学データ (2008年1月1日から2018年5月8日に発表された査読済み科学文献)</p> <ul style="list-style-type: none"> PubMedでキーワード検索し、複数回のフィルタリングと事前レビューを行い、最終的に69文献をレビュー。
評価実施者	FDAが分析した上で、疫学、保健物理学、公衆衛生などの分野を専門とする科学者によるピアレビューを受けた。
評価結果	<p>動物研究 一定の限界に基づき、評価した研究から高周波電磁界が何らかの腫瘍形成効果を有するという明確な証拠は示されていない。</p> <p>疫学研究 評価した疫学データから、高周波電磁界ばく露と腫瘍形成の間に定量的な因果関係はないとしたFDAの判断を引き続き支持する。</p>
研究の質の評価	<p>動物研究 高周波電磁界による潜在的な体温上昇の影響は交絡因子であり、評価を行うことが重要であるにもかかわらず、参照した文献の大半に動物の体温測定が含まれていない。 実験デザインが一貫していないことが、動物研究において発散した或いは矛盾した結論の理由になっていると考えられる。</p> <ul style="list-style-type: none"> 実験中の動物への投薬や拘束方法 対照群の使用方法 生体試料の採取方法と扱い方(動物にばく露後、犠牲にしてから生体試料にするまでのプロセス及び所用時間) 盲検化の欠如 <p>疫学研究 疫学研究の焦点を、全体的なリスクが検出されない一般集団から、腫瘍形成のリスクに対して本質的に素因があり、強い高周波電磁界ばく露による推定上のリスク修飾を受けやすい少数のサブセットに移す必要性を示唆している。 RF電磁界の直接測定は実験室以外では難しく、疫学研究における電磁界ばく露に関するエビデンスの収集が困難である。</p>

<https://www.fda.gov/media/135043/download>

オランダ保健評議会(2020)

テーマ	5Gの電磁界による健康影響
対象周波数	700-220MHz, 2.2-5GHz, 20-40GHz
対象文献 文献抽出方法	各周波数におけるがん及びがん以外の影響に関する研究について、PubMedとEMF Portalによるキーワード検索 他機関のレビューレポート(WHO、スウェーデンSSMLレポート、フランスANSES報告書、Simko and Mattsson(2019年)など)参照
評価実施者	オランダ保健協議会の電磁界委員会
評価結果	<p>総評</p> <ul style="list-style-type: none"> がんの発生、男性の生殖能力の低下、妊娠結果の悪化、先天性異常に関しては高周波電磁界へのばく露と関連している「可能性」を排除することはできないが、ばく露とこれら及びその他の疾患や状態との関連は証明されていない。 高周波電磁界へのばく露と生物学的プロセスの変化との関係の可能性に関して、脳の電氣的活動の変化は高周波電磁界ばく露と関連している可能性は高いが、それが健康の観点で好ましいかどうかは不明。 その他の大部分の生物学的プロセスについては、その変化が高周波電磁界へのばく露と関連していることは証明されておらず、またその可能性も低い。可能性自体を排除することはできない。免疫系とホルモンレベルの変化に対しては、関連性が示されなかった。 26GHz前後の周波数へのばく露による影響については、ほとんど研究されていない。
研究の質の評価	<p>以下の基準に1つ以上適合しない、或いは判断できない文献は分析から除外。分析の対象とされた論文についても、研究手法別に一般的に用いられる既存の品質評価基準やチェックリストにより品質を評価。</p> <p>疫学研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 研究基盤が特定されており、被験者や被験者の選定について適切な判断ができるよう、十分な情報が提供されている 記述的研究及び発生率研究において有病率／発生率を計算する際に適切な分母を使用する 少なくとも2つのレベルのばく露を考慮する(発生率時間推移研究を除く) 関連する統計解析を行っている <p>ボランティア研究</p> <ul style="list-style-type: none"> ばく露条件が被験者に対して盲検化されており、この点を評価するために十分な情報が提供されている <p>ボランティア研究・動物研究・細胞研究共通</p> <ul style="list-style-type: none"> 少なくとも2つのばく露レベル(1つはシャムばく露)を含み、それ以外は同等の条件で実験されている(携帯電話の待機モードのみは不可) ばく露レベルが十分に制御され、文書化(ばく露量を決定する方法が提供)されている ばく露が固定の順番で行われていない 統計的優位性を結論づけるために必要な場合は関連する統計解析を行っている <p>細胞研究</p> <ul style="list-style-type: none"> 生物学的アッセイが適切に実施されている 独立した実験回数が十分(3回以上)である

フランスANSES(2022)

テーマ	5Gの展開に伴う電磁界への集団ばく露と関連する健康への影響
対象周波数	700-2100MHz、3.5GHz帯(3-4GHz)、26GHz帯(18-100GHz)
対象文献 文献抽出方法	<p>700-2100MHz</p> <ul style="list-style-type: none"> 過去にANSESが行った高周波電磁界の健康影響に関する評価や近年の国際専門家評価に依拠 <p>3.5GHz帯／26GHz帯</p> <ul style="list-style-type: none"> ScopusとPubMedによる検索(対象期間2012年1月～2020年7月)で抽出された文献 ANSESの速報版レビュー(2019年)に掲載された文献 Simko and Mattsson(2019年)のレビューに掲載された文献 電波と健康に関する対話委員会からの推奨文献 <p>※フランス規格NF X 50-110「専門家評価の品質-専門家による評価のための能力の一般要件(2003年5月)」に準拠</p>
評価実施者	<p>ANSESの物理的因子と新規技術に関する専門家委員会に設置された5Gワーキンググループ</p> <ul style="list-style-type: none"> 電磁界、眼科学、神経科学、皮膚科学、膜生物学、社会科学に関する専門家の公募により結成。 文献ごとに2人の専門家が詳細レビュー→ばく露システムの質に関して専門家が批判的レビュー→全体会で議論。 2020年1月から2021年3月にかけて14回の会合を開催。 2021年4月の報告書公表後の意見募集の分析と対応で、同年12月までに追加で9回の会合を開催。
評価結果	<p>700-2100MHz</p> <p>ANSESが過去に行った専門家評価以降、他国の機関から発表された報告において、これらの周波数帯でモバイル技術からの電磁界へのばく露と健康影響の出現に新たな因果関係は示されていない。</p> <p>3.5GHz帯</p> <p>3.5GHz帯で起こり得る健康影響について研究を行った科学文献は非常に少ない(異なる分野の5件の研究のみ)ため、考えられる関連影響を評価するため、2G, 3G, 4G, Wi-Fiなど近い周波数帯(840MHz～2.5GHz帯)で利用できる科学文献についても評価した結果、現時点で制限値以下のばく露レベルにおいて、これらの周波数に関連した健康への悪影響についていかなる結論も導きだすことはできなかった。3.5GHz帯で平均ばく露量が大きく増加していない点も踏まえ、3.5GHz帯前後の周波数帯の5G展開により誘発されるばく露が新たな健康リスクにはならないことを示唆している。</p> <p>26GHz帯</p> <p>この周波数帯の電磁界のばく露に伴う健康への悪影響について結論を出すには現時点で利用できるデータでは不十分。</p>
研究の質の評価	方法論的に大きな弱点がある文献は除外。

<https://www.anses.fr/en/system/files/AP2019SA0006EN-2.pdf>

オーストラリアARPANSA(2021)

目的	5G等を想定した6GHz超の電磁界放射の生物学的および健康への影響
対象周波数	6GHz超
対象文献 文献抽出方法	ICNIRPガイドラインの職業ばく露制限値以下のばく露による生物学的及び健康影響に関する研究(～2019年12月まで) 細胞研究91件、動物研究15件、ヒト研究1件、レーダーへのばく露に関する疫学研究31件 ・ PubMed, EMF-Portal, Google Scholar, Embase, Web of Scienceでのキーワード検索や他機関のレビュー(英国AGNIR(2012)やSCENHIR(2015))の対象文献から抽出した上で、スコープの範囲の研究を絞り込み。
評価実施者	ARPANSA及び保健省の研究助成を受けて、ARPANSA及びスウィンバーン工科大学研究者が実施。
評価結果	<p>遺伝毒性、細胞増殖、遺伝子発現、細胞内シグナル伝達、膜機能:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 遺伝毒性に関する十分にデザインされた研究において皮膚細胞におけるDNA損傷の証拠は一貫して見つかっていない。 ・ 染色体異常、微小核形成、紡錘体障害など、遺伝毒性を示す他の指標についても研究方法は一般的に厳密であったが、研究により矛盾する結果が報告されている。 ・ 細胞増殖への影響についても矛盾した結果が出ている。一部の陽性の結果ではドシメトリと温度制御が不適切であった。 ・ 遺伝子発現に関しては多くの研究が影響がないことを報告しているが、盲検法が使用されていないため実験的バイアスを結果から排除できない。一部陽性の報告については、生物学的妥当性に関しての独立された検証が行われていない。 ・ 細胞内シグナル伝達と電気的活性に関しては様々な結果が報告されているが、殆どの研究で盲検法が行われておらず、一貫した影響は見つからなかった。また温度の影響を排除できていない、サンプル数が少ないなどの問題がある研究もあった。全体として報告された電気的活動への影響は正常な変動の範囲内であることは否定できない。 ・ 膜機能に関しては、全体として様々な膜機能への影響が報告されているが、独立して再現されていない。研究に用いられた統計的手法が記載されていない、温度管理が不十分、盲検化が行われていないなど、様々な方法論上の問題があった。 <p>その他:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 他の影響に関する報告(発がん促進、生殖機能、免疫機能など)も、一貫した影響が報告されていない。 <p>総評:</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 6GHz以上の低レベルな電磁界が人間の健康に有害であるという明確な証拠は示されなかった。
研究の質の評価	<p>研究の質に基づき、レビュー対象から除外することはしていないが、実験方法の妥当性の評価は別途実施。</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 実験方法に関して、①盲検法、②ドシメトリへの適切な配慮、③陽性対照、④シャムばく露、⑤温度測定・制御の品質基準で評価した結果、5点満点の研究は1件のみ。品質スコアが低い研究ほど、より大きな影響を示す可能性が高いことが示された。今後の研究への課題として、加熱による影響の可能性を排除するために、ドシメトリと温度制御の改善が必要。

<https://www.nature.com/articles/s41370-021-00297-6>

スウェーデンSSM(2022)

テーマ	電磁界へのばく露に関連する潜在的な健康リスクに関する研究の監視(今回で16回目の実施)
対象周波数	全周波数
対象文献 文献抽出方法	2020年1月～12月に発表された電磁界と健康リスクに関する研究 周波数は静磁界～高周波電磁界、研究手法は疫学研究、ヒト研究、生物学的研究(動物研究、細胞研究)をカバー
評価実施者	SSMの電磁界に関する科学評議会
評価結果	<p>(総評) 電磁界ばく露と健康リスクとの間に新たな確立された因果関係は確認されていない。</p> <p>(小児白血病)</p> <ul style="list-style-type: none"> 対象の研究では、疫学的に一貫的に観察されている超低周波(ELF)磁界と小児白血病との関連が因果関係なのかという点については解決されていない。 <p>(脳腫瘍)</p> <ul style="list-style-type: none"> 携帯電話の使用と脳腫瘍の関係に関する新たな研究は非常に少ない。 <p>(各種症状)</p> <ul style="list-style-type: none"> 携帯電話の使用と不眠症症状との関連は例年同様に観察されているが、ばく露レベルよりも使用期間と関連しており、高周波電磁界以外の要因が観察された関連性を説明している可能性を示唆している。 青年期における認知機能および脳容積に関する新しい研究では、高周波電磁界ばく露によるリスクは示されていない。 <p>(酸化ストレス)</p> <ul style="list-style-type: none"> 動物研究において、以前の報告と同様に電磁界ばく露による酸化ストレスの増加が引き続き観察された。一部は現在の基準値以下でも見られる。微弱な電磁界のばく露による酸化ストレスがどのような状況で人の健康に影響を及ぼすかは、まだ調査されていない。 <p>(中間周波による影響)</p> <ul style="list-style-type: none"> 中間周波数(IF)範囲(300Hz-10MHz)のアプリケーションの使用が増加しているにもかかわらず、この範囲における潜在的な健康リスクに関する科学的評価は乏しい。確認された数少ない研究は、基準値以下の健康影響を示していない。
研究の質の評価	品質基準を満たさなかった研究は分析から除外 、付録に分析から除外された理由(シャムばく露なし、ドシメトリなし、携帯電話をそのままばく露源としている、など)とともにリストアップされている。

<https://www.stralsakerhetsmyndigheten.se/publikationer/rapporter/stralskydd/2022/202216/>

周波数帯毎の結果と今後の研究の必要性について

- これらの研究評価・系統的レビューによる周波数帯ごとの結果及び今後必要とされる研究の例は以下のとおり。
- また、いずれも研究の質に関して様々な観点で、一定の水準を満たしていない研究が多くあると指摘している。

周波数	主な評価・レビュー結果	今後必要とされる研究
超低周波	<ul style="list-style-type: none"> 超低周波磁界へのばく露と小児白血病の発症については、疫学研究の結果、関連性が認められているが、因果関係は確立されていない。(疫学的には超低周波電磁界へのばく露と小児白血病の発生率の増加に一貫した関連があることは広く認められているが、実験モデルでの観察から因果関係を裏付けるものはなく、もっともらしい生物物理学的な作用機序も不明) スウェーデンSSM(2022)	低周波磁界へのばく露と小児白血病に関連する実験研究
中間周波	<ul style="list-style-type: none"> この周波数帯の研究は殆ど行われていない。 ばく露評価、特に内部誘導電界の評価が困難。 現行のガイドラインを下回るばく露による健康への悪影響は示されていないが、研究の数が限定されるため、結論は導き出せない。 スウェーデンSSM(2022)	研究が不足しているため特に研究が必要 <ul style="list-style-type: none"> WPTなどの新しいアプリケーションによる局所的に強いばく露による影響の研究
高周波 主に2G-4G周波数	<ul style="list-style-type: none"> 高周波電磁界へのばく露と健康影響の間に新たな因果関係は示されていない。特に、高周波電磁界による腫瘍形成や発がんとの間に新たな因果関係は示されていない。 ただし、高周波電磁界による健康影響の可能性自体を排除することはできない。 米国FDA(2020)、オランダ保健評議会(2020)、フランスANSES(2022)、スウェーデンSSM(2022)	携帯電話、特に5Gで使われる周波数帯に対する研究 <ul style="list-style-type: none"> 発がん、認知機能、生殖機能、電磁過敏症など 動物研究で観察されているばく露と酸化ストレスの関係が人間においても存在するのかについての研究 5Gも含む、現在/将来の電波のばく露状況に関する研究
高周波 主に5Gのsub6帯 (例:3.5GHz帯)	<ul style="list-style-type: none"> この周波数に特化した研究は非常に少ない。 ただし、2G-4GやWi-Fiなど近い周波数帯を対象にした健康影響やばく露量に関する研究を評価した結果、新たな健康リスクがある可能性は低い。 フランスANSES(2022)、オランダ保健評議会(2020)	研究が不足しているため特に研究が必要 <ul style="list-style-type: none"> 皮膚や眼など体表の器官への影響(免疫・神経系の影響も含む) 新しいコホート研究 5Gも含む、現在/将来の電波のばく露状況に関する研究
超高周波 (6GHz超) 主に5Gのミリ波帯	<ul style="list-style-type: none"> 電磁界のばく露と健康影響の因果関係について、結論を示すには研究データが不十分である。 フランスANSES(2022)、オランダ保健評議会(2020)、オーストラリアARPANSA(2021)	研究が不足しているため特に研究が必要 <ul style="list-style-type: none"> 皮膚や眼など体表の器官への影響(免疫・神経系の影響も含む) 新しいコホート研究 5Gも含む、現在/将来の電波のばく露状況に関する研究