

電磁波は本当に有害か？

非電離電磁波の生体影響

平成 16 年 9 月 16 日

担当：高知大学医学部環境医学（衛生学） 中村裕之

hiro-n@po.incl.ne.jp

1. 電磁波

電磁波とは電場と磁場から成り、 10^{25} Hzのガンマ線から極低周波 (ELF, <300 Hz) まであり、 10^{15} Hzより高い紫外線、X線、 γ 線はイオン化能をもつため、遺伝子障害力を有する。このため、この周波数帯の電磁波を電離電磁波あるいは放射線と呼ぶ。紫外線を非電離放射線に含めるには、慎重である理由は、紫外線にも電離作用があり、これによる遺伝子障害が証明されるからである。また、 10^{14} Hzより下の赤外線から超短波付近(100 MHz)までは生体に対しては誘電加熱と誘導加熱による産熱が主効果であるが、電流による刺激作用、その他の作用もあるともいわれている。非電離電磁波の過度の暴露は、職業上、明らかな生体影響をもたらす。一方、一般住民は、低レベルでありながら、受精の瞬間から昼夜、暴露されることになるため、環境医学上、その生体影響について早急に解決すべき大きな問題である。

非電離電磁波は、波という性質を有する以外に、電界と磁界という両面の性質を有するため、そのアプローチを一層、困難にしている。本講では、マイクロ波を含めた非電離電磁波、電磁界の生体影響を基盤に、

その評価法と環境管理、生体影響について論じる。

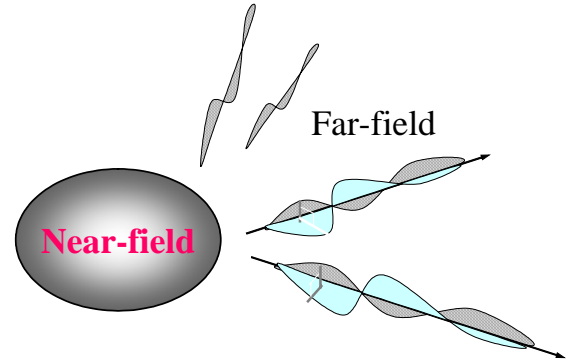
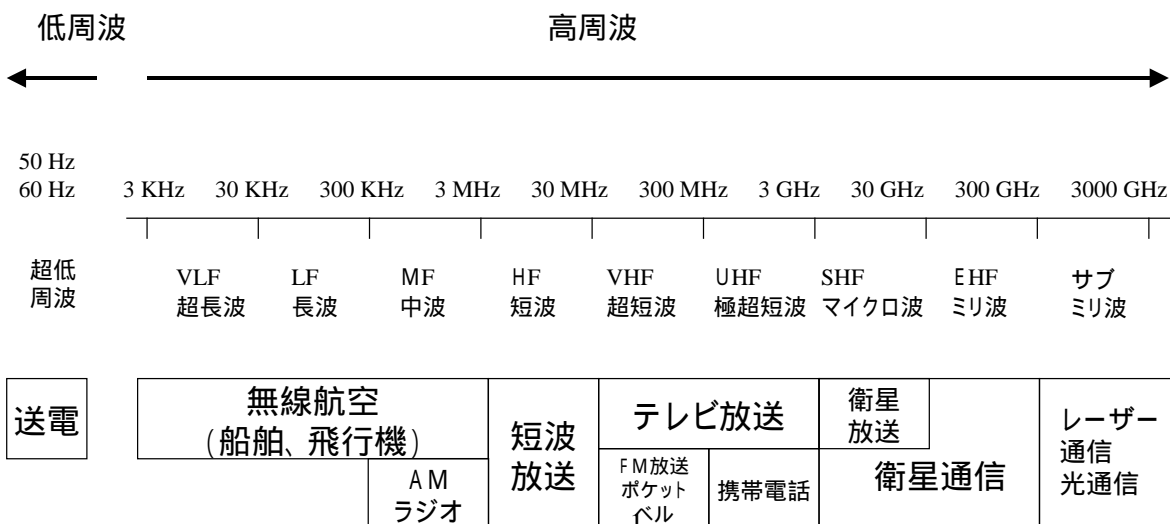


図 1 電界と磁界

1) 非電離電磁波と電磁界の評価法

電磁波は、電磁場の特殊な状態と考えられる。波長/2 (=光速/2 /周波数)より近い場では電場強度は距離によって大きく異なり、電場と磁場のインピーダンスが一致しないため、厳密な意味での電磁波(電波)ではなく、一方、狭義の電磁場はこれより近い場を指す。例えば、50 Hzの商用周波数では約 950 km 以内が電磁場となる(図 1)。図 2 には、電磁波の周波数別の呼称を示した。

図 2 周波数と電磁波



生体の発熱は、電界、磁界のどちらに起因しているかによって、誘電加熱と誘導加熱作用に分けられる。誘導加熱は、比較的周波数(数百 kHz から数 MHz 程度)においてのみ認められる。一方、誘電加熱による発熱は、周波数にそれほど依存しない。すなわち、電子レンジや高周波ウェルダは、マイクロ波帯で相当な高周波(915 MHz と 2.45 GHz)であるため、その熱作用は誘電加熱作用に基づく。波源から波長/2 より短いところで使用される(ことに、800 - 900 MHz で使われる携帯電話も頭では電磁場)ことから、電磁場の性質を有するため、電界と磁界の作用を考える必要があるが、加熱作用に関していえば、磁界の作用は無視できる。電界[E]は、電界中に単位電荷[C]をもってきたときにそれに作用する力として定義され、 $\lim F/Q$ で表される。力 F がニュートン[N]、電荷 Q がクーロン[C]であるから、その単位は、 $[N/C] = [Nm/Cm] = [J/Cm] = [V/m]$ となる。

表1 マイクロ波の分類

名称	周波数(波長)	主な用途
ミリ波(EHF)	30GHz ~ 300GHz (1mm ~ 1cm)	衛星通信 軍用レーダー
センチ波(SHF)	3GHz ~ 30GHz (1cm ~ 10cm)	衛星通信 気象航空 船舶レーダー
極超短波(UHF)	300MHz ~ 3GHz (10cm ~ 1m)	UHF テレビ, 衛星通信 気象レーダー 携帯電話 PHS 電子レンジ

磁界[H]は、磁界中の単位磁荷[Wb]をおいたときに、これに働く力として定義され、 $\lim F/M$ で表される。

Mは、ウェバー[Wb]である。Hの単位は、 $[A/m]$ である。なお、磁束密度[B]と磁界[H]の関係は、 $B = \mu H$ $[Wb/m^2]$ (μ は透磁率)であり、SI単位ではテスラ[T]とよび、ガウス[G]で表されることもある。

2) 非電離電磁波と電磁界の生体影響

電磁界が、生体に及ぼす効果は、電磁界の種類(電

界、磁界、電磁波)によって異なり、さらに周波数、照射レベル、照射時間、波形の種類、照射部位などにも左右される。その生体影響は、電流による刺激作用、熱の発生、その他に分けられることは上述した。刺激作用は、1 kHz以下に認められ、発熱作用は、電磁エネルギーが吸収されることから生じることから、1 kHz以上でも生じる。

a) 紫外線

紫外線は、アーク溶接、溶断、殺菌作業などで使用され、眼に対する有害性が最も大きく、特に角膜が侵されやすい。電光性眼炎、雪眼炎(雪盲)、皮膚がんを引き起こす。

b) 赤外線

赤外線は、生体に照射されると組織の深部まで透過し、吸収されて熱になり、その部分を暖めるので熱線ともいう。太陽光線以外では、灼熱している物から放射されるので、炉の監視とか製鉄工や鍛冶およびガラス工などが大量に赤外線に暴露されることになる。特に、白内障が問題になる。

c) レーザー光線

通信や情報処理また医療現場で使用されるレーザー光線は人工の光であり、自然光と比べると、一定の波長を持つこと、位相がそろっていること、指向性と集光性にすぐれていることの性質を有する。レーザー光線は網膜火傷や皮膚障害を引き起こす。

d) マイクロ波

マイクロ波は、レーダー、高周波炉、医療用ジアルミー、電子レンジなどで暴露され、赤外線よりさらに深層に到達する(表1)。その生体影響は、発熱作用とその他(ストレス作用、マイクロ波固有の影響)に分けられる。発熱作用の場合、比較的高周波数であるマイクロ波の生体の発熱は、誘電加熱によるものであるから、波源との距離にかかわらず、つまり近傍界であろうと、遠傍界であろうと、人体組織1gあたりに吸収される電磁力(specific absorption rate, SAR)によってマイクロ波の暴露量の大きさが評価されることがわかっている。このように、体温上昇作用を有するため、放熱機構の乏しい眼や睾丸への影響を引き起こし、白内障や無精子症が問題になる。また、妊娠期における

子宮への影響も注目されている。

e) ラジオ波以下の周波数帯

1979 年に Wertheimer & Leeper (Electric wiring configurations and childhood cancer, Am J Epidemiol 1979; 109: 273-284)が配電線の近くにに住む小児のがん罹患率が通常の 2-3 倍であったという報告以来、極低周波の電磁場と白血病などのがんとの関連が多く論じられているが、未だ結論には達していない。

3) 非電離電磁波、電磁界の暴露ガイドライン

人体に暴露される電磁界については、電磁波放射源と暴露地点との距離が、波長に比して短い近傍電磁界であるかによって取り扱いが異なる。近傍界では、電界と磁界の比が一定とならないため、電界と磁界の両方の強度によって暴露基準を記す。また、遠方界では、一定の関係（電界/磁界 377 ）があるため、その一方で評価が可能である。基本的には、距離によって大きく減衰し、さらには、金属性構造物によって効果的に遮断される。

マイクロ波による規制は、1950 年代から始まり、ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 1982) と DIN (Deutsche Industrie-Norm, 1984) の許容値では、誘電加熱による発熱を 1 までに抑えること、あるいは SAR を 0.4 W/kg (0.1 h) 以内にすることが定められている。電磁波の場合、SAR の周波数依存曲線 (1 mW/cm² に対する平均 SAR 値) をもとに、0.4 W/kg を与える電力密度 [mW/cm²] を求め、これを安全基準で数 Hz まで与えられることができるので、下記のように、低周波数帯では、電磁波としてより、磁界の影響も考慮した限界値が現実となる。

一方、携帯電話における体表面 1 cm² 当たりの被曝量 (6 分間) の規制値は、米国では 0.2 mW/cm² に対して、日本では、周波数 ÷ 1500 あるいは最大 1 mW/cm² 以下、また出力規制では、SAR (0.1 h) を指標とし、米国と日本ではそれぞれ 1.6 W/kg, 8 W/kg 以下となっている。

1 MHz 以下の誘電加熱作用は少ないため、SAR を評価の基準にせず、磁場強度の実効値 (H_g, A/m) としている (図 3)。なお、80.15 A/m 0.1 mT である。DIN 案では、50 Hz では磁束密度の限界値は 5 mT (50 G) となる。

現在、問題になっている極低周波域の磁束密度は、

10⁻³ 付近が生体影響の限界値とも考えられ、送電線の平均的な磁束密度 10⁻⁵ とはかなりの隔たりがある。

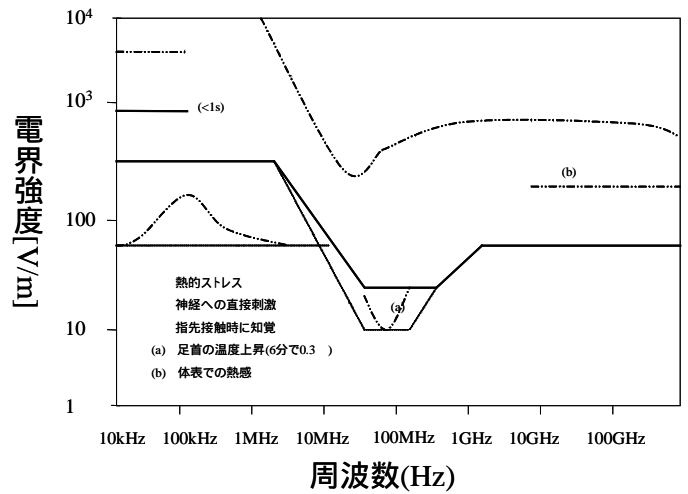


図3 電界強度指針 (条件G)

・ 携帯電話 (ラジオ波帯電磁波) は安全か？

1. はじめに

非電離電磁波のうち、ラジオ波帯域は、周波数 3 kHz ~ 300 MHz (波長 100 km ~ 1 m) の領域を指し、「電波」と言うとき普通、ラジオ波のことを指す。主に通信 (ラジオ、テレビ、コードレスホン、各種無線) などに利用されている。マイクロ波帯域は、周波数 300 MHz ~ 30 GHz (波長 1 m ~ 1 mm) の領域を指し、テレビや気象観測、衛星通信、携帯電話、PHS、距離の測定、レーダー、電子レンジ、ジヤテルミーなどに利用される。しかしながら、マイクロ波とラジオ波との厳密な境はなく、したがって、ラジオ波とマイクロ波をまとめて RF/MW (Radiofrequency/Microwave) と呼ぶ慣わしもあることから、本稿でもこの呼び名に統一する。

RF/MW の暴露可能職種として、航空機乗務員、化学者、薬剤消毒者、食品消毒者、家具ベニヤ板張り工、メーザー (maser) 操作者、マイクロサーム操作者、マイクロ波開発作業員、マイクロ波ジヤテルミー操作者、マイクロ波試運転者、ミサイル発射士、レーダー機械士、レーダー操作者、電子レンジ補修者、電子レンジ操作者がある。最もよく使われている周波数は、産業、科学、医療、携帯電話などに用いられる 900 MHz の RF/MW

と電子レンジや産業用マイクロ波加熱等にも使用される 2450 MHzのRF/MWである。職域で用いられるレベルは比較的高く、かつては白内障や無精子症が引き起こされたが、現行の環境基準以下における暴露による健康影響については、議論の多いところである。したがって熱作用を有さないとされる現行の基準レベルによる健康影響についての疫学研究および実験研究を総説する。また、職域ではないものの、携帯電話に用いられる 900 MHz付近の暴露による健康影響を、上記の職域での暴露から外すことは本稿での目的に沿わない。なぜならば、本稿では、温度変化をもたらさない（熱作用を有さない）レベルのRF/MWの生体影響を基に生活環境への影響を考察することは、同時に職域での影響を論じることにもつながるからである。

2. マイクロ波の熱作用

RF/MWの生体影響については、歴史的には、Duke-Elder¹⁾が 1920 年代にRF/MWの電磁波の照射が白内障を引き起こす可能性があることを初めて指摘して以来、特に第 2 次世界大戦後、RF/MWの水晶体に対する有害な効果に対して関心が高まってきた。結局、白内障生成の閾値は実験によって差異はあるが短時間照射の場合には、全吸収エネルギー量すなわち電力密度と照射時間の積で定まる。言い換えると、電力密度が大きければ短時間照射でも危険であり、逆に電力密度がある程度小さくても長時間照射ではやはり注意が必要である。Elyら²⁾やCarpenterら³⁾の白内障発生の閾値曲線では、100 mW/cm²以下の電力密度ならいくら長時間照射しても影響がないことも示されている。Cutz⁴⁾の総説からも熱作用による水晶体混濁が生じるのは、100 mW/cm²以上の暴露が生じたときと考えられる。眼がRF/MWはもちろんのこと、可視光や赤外線、レーザーなど一般に電磁波に弱い理由としては、熱を放散あるいは他へ運搬する特別な冷却機構をもっていないことから温度上昇が早いこと、障害が起こった場合、自ら細胞交換によって機能を回復することができないことがあげられる⁴⁾。

3. マイクロ波の非熱作用と国際基準

現在のRF/MWにおいては、生活環境ではもちろん、産業環境においても水晶体の混濁が生じるような高いレベルに暴露されることはあり得ない。警察官が用いるレーダーでのマイクロ波レベルは、0.04 mW/cm²を超えない⁵⁾。電子レンジからの漏れがあっても、1 mW/cm²を超えることはない⁶⁾。そもそも、動物における研究データをヒトへ外挿できるように組織 1gあたりの吸収電力であるSAR (Specific absorption rate、比吸収率) という概念ができた。これは、同じ周波数、同じ強さの電磁波に暴露されても、被動物の大きさ、熱放散によって実際の温度上昇が異なるからである。SARの各種動物の比較を示した(表 2)^{7, 8)}。American National Institute (ANSI)により、5 mW/cm²が職業的暴露の限界値(一般住民環境では 1 mW/cm²)とされている⁹⁾。この基準の根拠は、ヒトでは、1-2 W/kgで深部体温 1 の上昇があり、これを越すと生物学的影響が生じることもあり得る。このSAR 1 -2 W/kgをもとにそのエネルギー吸収に対応する電波強度に安全係数を見込んでSARで 0.4 W/kgに対応する電力密度 5 mW/cm²を職業的暴露の基準値としている⁹⁾。この場合の体温上昇は計算上、0.08 以下とされる。携帯電話を含めRF/MWの全身各部位あるいは全身への暴露基準が、表 3 の如く、SARにおいても職域および一般生活環境に対して示されている^{10, 11)}。

実際の携帯電話の測定では、眼部で、0.007 - 0.21 W/kg、頭部で 0.12 - 0.83 W/kgであった¹²⁾ように、現行のIEEEの基準により、携帯電話のRF/MWの暴露がこの基準を超えることはなく、また、各国独自の基準はこの基準内で作られている。例えば、携帯電話における体表面 1 cm²あたりの被曝量(6 分間)の規制値は、米国では 0.2 mW/cm²に対して、日本では、周波数 ÷ 1500 あるいは最大 1 mW/cm²以下、また出力規制では、SAR(0.1 h)を指標とし、米国と日本ではそれぞれ 1.6 W/kg、8 W/kg以下となっている。

4. RF/MWの非熱作用は本当に存在するか？

現行の基準内の暴露であれば、熱作用を示すことがないから、本稿では、疫学データを除いて、現行の暴露基準以下で行われた研究を主に総説し、非熱作用が

あるかどうかについて、発がん性、生殖器系、脳神経系への影響を検討する。

1) 発がん性

RF/MWに発がん性があるかどうか最も議論の大きいところである。あるとすれば、その影響は極めて深刻であるが、発がん性を正しく評価する方法が困難であるために、様々なアプローチから、その発がん性についての有無を報告している。

(1) 疫学

疫学的には、古くは、Northern New JerseyとSouthern Louisianaでの死亡記録を、脳腫瘍と職業との関係から解析したThomasら¹³⁾の報告から始まる。RF/MWに暴露した男性における脳腫瘍の相対危険度が 1.6 (95%信頼区間、1.0 - 2.4)、星状細胞種では特に高く、相対危険度が 4.6 (95%信頼区間、1.9 - 12.2)であったという。電気工や修理工に従事する人では、仕事の年数にしたがって 10 倍にも上った。しかしながら、これらの仕事がヒュームや溶剤にも同時に暴露されるため、その影響は除外できてはいない。Goldsmith¹⁴⁾は、レーダー作業を主とする軍人や通信作業に従事する労働者、ジアテルミー作業者などについての疫学を総説しているが、RF/MWの発がん性に対して、確固とした証拠はないとしている。朝鮮戦争の軍役に従事し、高いレーダー暴露を受けたでの海軍兵 40,581 人の追跡調査が、最近、Am J Epidemiologyに発表された。航空隊の電気技術者における非リンパ球性リンパ腫が有意な上昇を示した以外、脳腫瘍、睾丸腫瘍や肺がん、白血病などの悪性新生物において変化はなく、マイクロ波の悪性新生物への影響はほとんどないと結論されている¹⁵⁾。

しかしながら、発がん性を肯定する疫学の結果は、おおよそ次の通りである。ポーランドにおける軍従事者の 15 年間 (1971-1985 年) の経年的記録から全体の 2.98%にあたる約 3700 人がRF/MWの暴露を受けており、各部位での悪性新生物の発症における観察/期待比は、消化管に対して 3.19-3.24、脳腫瘍に対して 1.91、造血細胞/リンパ系で、6.31 と高かった。造血細胞/リンパ系悪性腫瘍の中では、慢性骨髄性白血病が 13.9、急性前骨髄性白血病が 8.62、非ホジキン性リンパ種が 5.82 とRF/MWの暴露による影響があったとしている¹⁶⁾。同様

に、軍従事者におけるイスラエルにおける疫学では、10-100 mW/cm²のRF/MWの暴露を受けたと思われるレーダー技術者である歩哨兵の記録から、目の黒色腫、睾丸がん、上咽頭がん、非ホジキン性リンパ種、乳がんで高い相対危険度を示した。若年発症であった点と潜伏期が短かった点から推察すれば、若年期でのRF/MWの過剰な暴露を避ける必要性を示している¹⁷⁾。アメリカ空軍での症例対照研究では、RF/MWに対して、オッズ比 1.39 (95%信頼区間、1.01-1.90)の有意な上昇が認められている¹⁸⁾。Hardellらのスウェーデンなどにおける携帯電話と脳腫瘍についての症例対照研究 (1994-1996 年での脳腫瘍 209 人)^{19, 20)}では、使用側と同側の側頭部および頭頂部における脳腫瘍のオッズ比は 2.42 (95%信頼区間、0.97-6.05)と有意ではないが、暴露期間が短いこともあるため、慎重に今後の研究を続けるとしてきたが、最近、1997-2000 年に診断された脳腫瘍 1617 人 (20-80 歳) で、アナログ式携帯電話に対するオッズ比が 1.3 (95%信頼区間、1.02-1.6)であり、使用側と同側での側頭部腫瘍のオッズ比が、2.5 (95%信頼区間、1.3-4.9)であった。特に、聴神経腫におけるオッズ比が、OR 3.5 (95%信頼区間、1.8-6.8)と高くなっている。デジタル携帯電話では有意な差はなかったが、暴露期間が短いことから、今後の追跡も重要であることを述べている²¹⁾。

しかしながら、これらの疫学における発がん性を肯定する見解は、ごく一部であり、特に、軍役に従事したデータにおいてはRF/MWの暴露が極めて曖昧であることから、後ろ向きコホート研究の欠点を示しており、その解釈を慎重にする傾向である。さらには、Negative dataが発表されにくい状況を考えれば、Meta-analysisした際には、さらに、RF/MWの発がん性を示すヒトについてのデータは少なくなると見積られる¹⁴⁾。

(2) in vivo研究

最近のほとんどのin vivo研究では、発がん性が否定されている。そもそも、発がん性について指摘したのは、Szudzinskiら²²⁾であるが、彼らのいうところの熱作用をもたない 5 mW/cm²のRF/MW (2450 MHz)の 6 ヶ月連続照射が、マウスのbenzo(a)pyreneによる皮膚がん発生を

促進させるという結果が報告されている。Repacholiら²³⁾によれば、SARが 0.13-1.4 W/kg (0.26-1.3 mW/cm², 900 MHz)のRF/MW暴露によってtransgenicマウスにおけるリンパ腫の発生が有意であったという。また、2450 MHzで電力密度 5-15 mW/cm²のRF/MWで、ラットの白血球、リンパ球の減少が報じられている²⁴⁾。

これらが、発がん性を肯定する数少ない研究である。それに対して、Freiら^{25, 26)}はSARが 0.3 - 1.0 W/kgのRF/MW (2450 MHz)では、マウスの乳がんの発生率、発生までの潜伏期、組織学的変化において有意な差は認めていない。SARが 0.35 - 1.5 W/kgのRF/MW (902 MHz) 付近によるマウスの放射線暴露後の悪性腫瘍発生への影響をHeikkinenら²⁷⁾は調べたが、対照群との差を見いだしてはいない。SARが 0.25 - 4.0 W/kgのRF/MW (898.4 MHz)の104週の長期暴露によっても、マウスのリンパ腫の発生頻度を増加させない²⁸⁾。SARが 0.075-0.27 W/kg (0.055 - 0.2 mW/cm²)のRF/MW (900-MHz)の2週間暴露によって、ラットにおいてbenzo(a)pyreneによる腫瘍形成の指標である自己抗体への影響はなかった²⁹⁾。SARが 1.0 -1.2 W/kgのRF/MW (836.55 MHz)を、妊娠期から生後、約2年間、脳へ局所照射しても、脳腫瘍の発生頻度に変化を認めていないどころか、抑制効果があるかもしれないことも報告されている^{30, 31)}。

(3) in vitro研究

in vitroの実験では、非熱作用としての発がん性の有無についてかなり錯綜している。かつては、SARが 50 W/kg (2450 MHz)と熱作用を有するとみられるRF/MWで神経膠腫の発生³²⁾が知られていた。非熱作用としては電力密度が 0.5- 30 mW/cm²のRF/MW (7700 MHz)の暴露によって、ハムスターの培養細胞におけるDNAへの合成過程に対する影響が示されている^{33, 34)}。最近では、SARが 1.2 W/kgのRF/MW (2450 MHz)を照射されたラットの脳細胞で、遺伝子を構成するDNAの鎖が切断される現象が有意に多く見られたとされている^{35, 36)}。また、RF/MW (960 MHz)が細胞増殖性を示した研究³⁷⁾も非熱作用として記されている。電力密度が 5.0 mW/cm²のRF/MW(2450-MHz)によるヒト培養リンパ球への影響をみたZhangら³⁸⁾によれば、RF/MW自体には、DNAへの影響はないが、マイトマイシンCによるDNA傷害を増

強させる可能性を示唆している。同様にヒト培養リンパ球でDNA傷害と染色体傷害を評価したTiceら³⁹⁾によれば、SARが 5.0 W/kgのRF/MWを24時間、暴露すると有意な傷害をもたらすとしている。また、SARが 5 W/kgのRF/MW (1748 MHz)の暴露の際の位相変調によってヒト末梢血培養細胞における遺伝子傷害性が認められている⁴⁰⁾。Paciniら⁴¹⁾は、SARが 0.6 W/kgのRF/MW (900 MHz付近)はヒト皮膚線維芽細胞のMAP kinase kinase 3などのシグナル伝達遺伝子の発現を増強させるとしている。SARが 7 W/kgのRF/MW (864.3 MHz)によるヒト肥満細胞におけるprotein kinase Cと転写因子への有意な非熱作用も報告されている⁴²⁾。

以上の研究結果から、発がん性について肯定的に総説^{43, 44)}されたりしているが、上記の実験結果を否定する研究も多い。非熱作用としての発がん性についての議論は、近い将来、結論をださなければならないが、この数年は、大いに議論しても尽きないテーマであることは疑いない。否定的な研究結果としては、例えば、Liらは、SAR、0.9 - 9.0 W/kg (837 MHz)の2時間暴露による培養ヒト線維芽細胞におけるTP53がん抑制遺伝子に対する影響はなかったとしている⁴⁵⁾。人の乳がんのモデルとして、ラットでの7,12-dimethylbenz[a]anthracene (DMBA)誘導性の乳がんの発達を指標に、SARが 0.0175-0.070 W/kgのRF/MW (900 MHz)での影響を観察したところ、有意な差は認めていない⁴⁶⁾。さらに、SARが 0- 10 W/kgのRF/MW(900 MHz)では、mitomycin CとX線照射との相乗作用も含めて、染色体への傷害性を示さなかった⁴⁷⁾。また、SARが 0.13 - 1.3 W/kgのRF/MW (900-MHz)の照射で、酵母菌に対する変異原性を示さなかった⁴⁸⁾。

2) 生殖器への影響

Robertの総説⁴⁹⁾によれば、RF/MWの子宮胎盤機能への影響についての因果関係は否定的である。催奇形性を含めた胎児への影響についての総説⁵⁰⁾も同様である。例えば、Jensh⁵¹⁾は、妊娠中のラットに対して、電力密度が 10 -35 mW/cm²のRF/MW (2450 MHz)によって、出生後の形態あるいは行動に有意な変化をもたらさなかった。Dasdagら⁵²⁾は、SARが 0.52 - 3.13 W/kgの携帯

電話によるラットの精子数や形態への影響を認めていない。彼ら⁵³⁾は、それ以前に、SARが 0.141 W/kgの RF/MW (890-915 MHz) の 1 ヶ月、1 日 2 時間、全身暴露による有意な睪丸への組織学的な影響を認めているが、有意な温度上昇を伴っているからだとしている。このように、かつての大量暴露をシミュレーションした実験では、精子への影響は熱作用としては認められようが^{54,55)}、現在の職業暴露による生殖器などの影響は無視できるほどであると考えられる。Nakamuraも妊娠ラットに対する子宮循環動態あるいは胎盤ホルモンに対する観察によって、影響があるとすれば熱作用であることを一連の研究によって明らかにしている⁵⁶⁻⁵⁹⁾

しかしながら、マイクロ波による精子への影響や流産への影響を認める疫学結果もないわけではない。ジアテルミーを行う 42,403 人の技師に対して、妊娠とジアテルミーとの関係について疫学調査をした結果、妊娠前あるいは妊娠中の前 1/3 期でのジアテルミー作業による流産が、オッズ比 1.28 (95% 信頼区間、1.02-1.59)で有意であったとしている⁶⁰⁾。James⁶¹⁾は、マイクロ波暴露によって精子数が減少し、女児の出産が多くなるという疫学的データを提示した。しかしながら、対照群の設定の仕方など多くの反論によってこれらの結果も疑われている。

3) 脳神経系などへの影響

Freyの最近の総説⁶²⁾では、携帯電話からの低出力 RF/MWが、脳血管閉門への影響を引き起こすことで、世にいう携帯電話中の頭痛は、携帯電話から発信される RF/MWのエネルギーが脳中枢に数十倍も吸収される熱集中点(ホットスポット)現象により起こりうることを唱えている。このFreyはマイクロ波の健康への影響を過大評価してきた一人であり、Freyの発言によって多くの世論が左右されてきたといっても過言ではない。例えば、1985年にAppletonら⁶³⁾がRF/MWに職業上照射されていた 2,343 名の軍事機関の職員の調査から、RF/MWによっては眼の障害の罹患率の上昇は認めないとしたが、Frey⁶⁴⁾はそれらのデータを再解析し罹患率は上昇していると結論しているが、直ちに、この主張⁶⁴⁾に対して、彼が間違った統計方法を使用していることや、

混濁、空胞化などの罹患に関するデータが欠如していることを指摘されている⁶⁵⁾。

携帯電話によるRF/MWは人の睡眠への影響を認めないとする報告が大勢ではある^{66,67)}が、脳波を含めて睡眠への影響を認めるとする報告もないわけではない^{68,69)}。例えば、Leszczynskiら⁷⁰⁾は、脳機能への有意な影響を認めた数少ない研究者であるが、彼らは、熱作用を伴わないRF/MW(900 MHz)の人の内皮細胞由来のEA.hy926への影響を調べたところ、hsp27 のリン酸化の増加、hsp27 とp38MAPK系の変化などが認められたため、脳血液閉門(blood-brain barrier)の透過性が増加し、結果として脳機能への影響が出現する可能性があることを示唆している。

しかしながら、ほとんどの研究は脳神経系への影響を否定している。Finnieら⁷¹⁾によれば、SARが 4 W/kgの RF/MW (898.4 MHz) によるマウスの脳における血管透過性においては有意な差はなかった。RF/MW (900 MHz) の慢性暴露でも、マウスの脳血管閉門に影響をもたらさないという⁷²⁾。SARが 0.3 W/kg- 1.5 W/kgの RF/W(900 MHz付近)の場合も、FOSやJUNといった脳におけるストレス性蛋白への影響はない⁷³⁾。SARが 2 W/kgのRF/MW (915 MHz) で照射によるヒト白血病T細胞(Jurkat細胞)でのカルシウムレベルとカルシウム伝達機構への影響は認めていない⁷⁴⁾。実際の携帯電話から生じる異常感覚をdouble blind試験で調査しても、携帯電話の有意な影響は証明されない⁷⁵⁾。さらには、SARが 0.05 W/kgのRF/MW (900 MHz) は、マウスの空間認知機能には影響を与えなかった⁷⁶⁾。ラットへの頭部に限定した携帯電話からのSARが 1 - 3.5 W/kgのRF/MW (900 MHz) では空間学習能力への有意な差はなかった⁷⁷⁾。SARが 0.0175 -0.075 W/kgのRF/MW (900 MHz) では、妊娠中の暴露では、生まれて来たラットの学習能力を含めたオペラント行動には差は認めなかった⁷⁸⁾

また、脳神経機能と密接な関係がある自律神経 内分泌系⁷⁹⁻⁸¹⁾、免疫系⁸²⁾、心血管系⁸³⁾においても同様にRF/MWによる有意な影響は認めない。したがってFrey⁶²⁾が主張するところの脳機能への影響は、携帯電話もふくめてRF/MWの非熱作用としては極めて考え難い。

5. 終わりに

RF/MWによる非熱作用として一部のin vitroの研究において発がん性が示された。このことが完全にはまだ否定されていないが、in vivoの研究では、ほとんどがその発がん性を否定する研究であったことから考えれば、生体の中での何らかの修復機構が働いて、結果として悪性新生物の発症には結びつかないような防御機構の存在があると思われる。このような防御機構はがん抑制因子などについての今後の詳細な研究によって解明されると考えられる。このように、RF/MWによる発がん性に対するアプローチは、発がん性の有無に対する早急な解決をもたらすだけでなく、同時にがんの発現機序の解明をもたらすことで、文明の発達とともに生じる新たな環境因子に際して生じる健康影響に対する予防法ともなることも、十分考えられるため、今後の最も重点的に研究されるべき領域である。

文献

- 1) Duke-Elder, W.S. :The pathological action of light upon the eye. Lancet 210: 1137-1140, 1926.
- 2) Ely, T.S. et al. :Heating characteristics of laboratory animals exposed to ten-centimeter microwaves. IEEE Trans. Biomed. Eng. 11: 123-135, 1964.
- 3) Carpenter, R.L. :Ocular effects of microwave radiation. Bull. N. Y. Acad. Med. 55: 1048-1057, 1979.
- 4) Cutz, A. :Effects of microwave radiation on the eye: the occupational health perspective. Lens Eye Toxic. Res. 6: 379-386, 1989.
- 5) Fink, J.M. et al. :Microwave emissions from police radar. Am. Ind. Hyg. Assoc. J. 60: 770-776, 1999.
- 6) Alhekail, Z.O. :Electromagnetic radiation from microwave ovens. Journal of Radiological Protection 21: 251-258, 2001.
- 7) Durney, C.H., C.C. Johnson, P.W. Barber, H. Massoudi, M.F. Iskander and J.L. Lords Durney CH, Johnson CC, Barber PW, Massoudi H, Iskander MF, Lords JL, et al. Radiofrequency radiation dosimetry handbook. 2nd ed. Brooks Air Force Base, TX, USAF School of Aerospace Medicine, 1978; SAM-TR-78-22. Radiofrequency radiation dosimetry handbook.(2nd ed.). SAM-TR-78-22., 1978.Brooks Air Force Base, TX, USAF School of Aerospace Medicine, TX.
- 8) Michaelson, S.M. :Health implications of exposure to radiofrequency/microwave energies. Br. J. Ind. Med. 39: 105-119, 1982.
- 9) American National Standards, I. Safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields (300 kHz to 100 GHz). Safety Levels of Electromagnetic Radiation with respect to Personnel. C95-1, 1981.ANSI, New York.
- 10) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection :Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz). International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection. Health Phys. 74: 494-522, 1998.
- 11) The Institute of Electrical and Electronics Engineers, I. Standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz. IEEE Standard. C95-1, 1999.IEEE.
- 12) Anderson, V. & Joyner, K.H. :Specific absorption rate levels measured in a phantom head exposed to radio frequency transmissions from analog hand-held mobile phones. Bioelectromagnetics 16: 60-69, 1995.
- 13) Thomas, T.L. et al. :Brain tumor mortality risk among men with electrical and electronics jobs: a case-control study. J. Natl. Cancer Inst. 79: 233-238, 1987.
- 14) Goldsmith, J.R. :Epidemiologic Evidence of Radiofrequency Radiation (Microwave) Effects on Health in Military, Broadcasting, and Occupational Studies. International Journal of Occupational and Environmental Health 1: 47-57, 1995.
- 15) Groves, F.D. et al. :Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. Am. J. Epidemiol. 155: 810-818, 2002.
- 16) Szmigielski, S. :Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. Sci. Total Environ. 180: 9-17, 1996.
- 17) Richter, E. et al. :Cancer in radar technicians exposed to radiofrequency/microwave radiation: sentinel episodes. International Journal of Occupational and Environmental Health 6: 187-193, 2000.
- 18) Grayson, J.K. :Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. Am. J. Epidemiol. 143: 480-486, 1996.
- 19) Hardell, L. et al. :Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study. International Journal of Oncology 15: 113-116, 1999.
- 20) Hardell, L. et al. :Case-control study on radiology work, medical x-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors for brain tumors. MedGenMed [Computer File] : Medscape General Medicine E2. 2000.
- 21) Hardell, L. et al. :Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours. Eur. J. Cancer Prev. 11: 377-386, 2002.

- 22) Szudzinski, A. et al. :Acceleration of the development of benzopyrene-induced skin cancer in mice by microwave radiation. *Arch. Dermatol. Res.* 274: 303-312, 1982.
- 23) Repacholi, M.H. et al. :Lymphomas in E mu-Pim1 transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields. *Radiat. Res.* 147: 631-640, 1997.
- 24) Trosic, I. et al. :Animal study on electromagnetic field biological potency. *Arh. Hig. Rada Toksikol.* 50: 5-11, 1999.
- 25) Frei, M.R. et al. :Chronic, low-level (1.0 W/kg) exposure of mice prone to mammary cancer to 2450 MHz microwaves. *Radiat. Res.* 150: 568-576, 1998.
- 26) Frei, M.R. et al. :Chronic exposure of cancer-prone mice to low-level 2450 MHz radiofrequency radiation. *Bioelectromagnetics* 19: 20-31, 1998.
- 27) Heikkinen, P. et al. :Effects of mobile phone radiation on X-ray-induced tumorigenesis in mice. *Radiat. Res.* 156: 775-785, 2001.
- 28) Utteridge, T.D. et al. :Long-term exposure of E-mu-Pim1 transgenic mice to 898.4 MHz microwaves does not increase lymphoma incidence. *Radiat. Res.* 158: 357-364, 2002.
- 29) Chagnaud, J.L. et al. :No effect of short-term exposure to GSM-modulated low-power microwaves on benzo(a)pyrene-induced tumours in rat. *Int. J. Radiat. Biol.* 75: 1251-1256, 1999.
- 30) Adey, W.R. et al. :Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats chronically exposed to 836 MHz modulated microwaves. *Radiat. Res.* 152: 293-302, 1999.
- 31) Adey, W.R. et al. :Spontaneous and nitrosourea-induced primary tumors of the central nervous system in Fischer 344 rats exposed to frequency-modulated microwave fields. *Cancer Res.* 60: 1857-1863, 2000.
- 32) Cleary, S.F. et al. :Glioma proliferation modulated in vitro by isothermal radiofrequency radiation exposure. *Radiat. Res.* 121: 38-45, 1990.
- 33) Garaj-Vrhovac, V. et al. :The effect of microwave radiation on the cell genome. *Mutat. Res.* 243: 87-93, 1990.
- 34) Garaj-Vrhovac, V. et al. :The relationship between colony-forming ability, chromosome aberrations and incidence of micronuclei in V79 Chinese hamster cells exposed to microwave radiation. *Mutat. Res.* 263: 143-149, 1991.
- 35) Lai, H. & Singh, N.P. :Acute low-intensity microwave exposure increases DNA single-strand breaks in rat brain cells. *Bioelectromagnetics* 16: 207-210, 1995.
- 36) Lai, H. & Singh, N.P. :Single- and double-strand DNA breaks in rat brain cells after acute exposure to radiofrequency electromagnetic radiation. *Int. J. Radiat. Biol.* 69: 513-521, 1996.
- 37) Velizarov, S. et al. :The effects of radiofrequency fields on cell proliferation are non-thermal. *Bioelectrochemistry and Bioenergetics* 48: 177-180, 1999.
- 38) Zhang, M.B. et al. :Study of low-intensity 2450-MHz microwave exposure enhancing the genotoxic effects of mitomycin C using micronucleus test and comet assay in vitro. *Biomed. Environ. Sci.* 15: 283-290, 2002.
- 39) Tice, R.R. et al. :Genotoxicity of radiofrequency signals. I. Investigation of DNA damage and micronuclei induction in cultured human blood cells. *Bioelectromagnetics* 23: 113-126, 2002.
- 40) d'Ambrosio, G. et al. :Cytogenetic damage in human lymphocytes following GSM phase modulated microwave exposure. *Bioelectromagnetics* 23: 7-13, 2002.
- 41) Pacini, S. et al. :Exposure to global system for mobile communication (GSM) cellular phone radiofrequency alters gene expression, proliferation, and morphology of human skin fibroblasts. *Oncol. Res.* 13: 19-24, 2002.
- 42) Harvey, C. & French, P.W. :Effects on protein kinase C and gene expression in a human mast cell line, HMC-1, following microwave exposure. *Cell Biol. Int.* 23: 739-748, 2000.
- 43) Verschaeve, L. & Maes, A. :Genetic, carcinogenic and teratogenic effects of radiofrequency fields. *Mutat. Res.* 410: 141-165, 1998.
- 44) French, P.W. et al. :Mobile phones, heat shock proteins and cancer. *Differentiation* 67: 93-97, 2001.
- 45) Li, J.R. et al. :TP53 tumor suppressor protein in normal human fibroblasts does not respond to 837 MHz microwave exposure. *Radiat. Res.* 151: 710-716, 1999.
- 46) Bartsch, H. et al. :Chronic exposure to a GSM-like signal (mobile phone) does not stimulate the development of DMBA-induced mammary tumors in rats: results of three consecutive studies. *Radiat. Res.* 157: 183-190, 2002.
- 47) Maes, A. et al. :Cytogenetic effects of 900 MHz (GSM) microwaves on human lymphocytes. *Bioelectromagnetics* 22: 91-96, 2001.
- 48) Gos, P. et al. :No mutagenic or recombinogenic effects of mobile phone fields at 900 MHz detected in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. *Bioelectromagnetics* 21: 515-523, 2000.
- 49) Robert, E. :Intrauterine effects of electromagnetic fields--(low frequency, mid-frequency RF, and microwave): review of epidemiologic studies. *Teratology* 59: 292-298, 1999.
- 50) O'Connor, M.E. :Intrauterine effects in animals exposed to radiofrequency and microwave fields. *Teratology* 59: 287-291, 1999.

- 51) Jensch, R.P. :Behavioral teratologic studies using microwave radiation: is there an increased risk from exposure to cellular phones and microwave ovens? *Reprod. Toxicol.* 11: 601-611, 1997.
- 52) Dasdag, S. et al. :Whole body exposure of rats to microwaves emitted from a cell phone does not affect the testes. *Bioelectromagnetics* 24: 182-188, 2003.
- 53) Dasdag, S. et al. :Whole-body microwave exposure emitted by cellular phones and testicular function of rats. *Urol. Res.* 27: 219-223, 1999.
- 54) Ely, T.S. et al. :Heating characteristics of laboratory animals exposed to ten-centimeter microwaves. *Trans. Bio. Med. Electron.* 11: 123-135, 1964.
- 55) Lebovitz, R.M. & Johnson, L. :Acute, whole-body microwave exposure and testicular function of rats. *Bioelectromagnetics* 8: 37-43, 1987.
- 56) Nakamura, H. et al. :Effects of exposure to microwaves on cellular immunity and placental steroids in pregnant rats. *Occup. Environ. Med.* 54: 676-680, 1997.
- 57) Nakamura, H. et al. :Natural killer cell activity reduced by microwave exposure during pregnancy is mediated by opioid systems. *Environ. Res.* 79: 106-113, 1998.
- 58) Nakamura, H. et al. :Uteroplacental circulatory disturbance mediated by prostaglandin f2alpha in rats exposed to microwaves. *Reprod. Toxicol.* 14: 235-240, 2000.
- 59) Nakamura, H. et al. :Nonthermal effects of mobile-phone frequency microwaves on uteroplacental functions in pregnant rats. *Reprod. Toxicol.* 17: 321-326, 2003.
- 60) Ouellet-Hellstrom, R. & Stewart, W.F. :Miscarriages among female physical therapists who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am. J. Epidemiol.* 138: 775-786, 1993.
- 61) James, W.H. :Sperm counts and offspring sex ratio as monitors of reproductive hazard to people exposed to microwave radiation. *Reprod. Toxicol.* 12: 495-496, 1998.
- 62) Frey, A.H. :Headaches from cellular telephones: are they real and what are the implications? *Environ. Health Perspect.* 106: 101-103, 1998.
- 63) Appleton, B. et al. :Microwave lens effects in humans. II. Results of five-year survey. *Archives of Ophthalmology* 93: 257-258, 1975.
- 64) Frey, A.H. :Data analysis reveals significant microwave-induced eye damage in humans. *J. Microw. Power Electromagn. Energy* 20: 53-55, 1985.
- 65) Wike, E.L. & Martin, E.J. :Comments on Frey's "Data analysis reveals significant microwave-induced eye damage in humans". *J. Microw. Power Electromagn. Energy* 20: 181-184, 1985.
- 66) Wagner, P. et al. :Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields. Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. *Neuropsychobiology* 42: 207-212, 2000.
- 67) Hamblin, D.L. & Wood, A.W. :Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables. *Int. J. Radiat. Biol.* 78: 659-669, 2002.
- 68) Lebedeva, N.N. et al. :Investigation of brain potentials in sleeping humans exposed to the electromagnetic field of mobile phones. *Crit. Rev. Biomed. Eng.* 29: 125-133, 2001.
- 69) Hyland, G.J. :Physics and biology of mobile telephony. *Lancet* 356: 1833-1836, 2000.
- 70) Leszczynski, D. et al. :Non-thermal activation of the hsp27/p38MAPK stress pathway by mobile phone radiation in human endothelial cells: Molecular mechanism for cancer- and blood-brain barrier-related effects. *Differentiation* 70: 120-129, 2002.
- 71) Finnie, J.W. et al. :Effect of global system for mobile communication (gsm)-like radiofrequency fields on vascular permeability in mouse brain. *Pathology* 33: 338-340, 2001.
- 72) Finnie, J.W. et al. :Effect of long-term mobile communication microwave exposure on vascular permeability in mouse brain. *Pathology* 34: 344-347, 2002.
- 73) Fritze, K. et al. :Effect of global system for mobile communication microwave exposure on the genomic response of the rat brain. *Neuroscience* 81: 627-639, 1997.
- 74) Cranfield, C.G. et al. :Effects of mobile phone type signals on calcium levels within human leukaemic T-cells (Jurkat cells). *Int. J. Radiat. Biol.* 77: 1207-1217, 2001.
- 75) Hietanen, M. et al. :Hypersensitivity symptoms associated with exposure to cellular telephones: no causal link. *Bioelectromagnetics* 23: 264-270, 2002.
- 76) Sienkiewicz, Z.J. et al. :Low-level exposure to pulsed 900 MHz microwave radiation does not cause deficits in the performance of a spatial learning task in mice. *Bioelectromagnetics* 21: 151-158, 2000.
- 77) Dubreuil, D. et al. :Does head-only exposure to GSM-900 electromagnetic fields affect the performance of rats in spatial learning tasks? *Behav. Brain Res.* 129: 203-210, 2002.
- 78) Bornhausen, M. & Scheingraber, H. :Prenatal exposure to 900 MHz, cell-phone electromagnetic fields had no effect on operant-behavior performances of adult rats. *Bioelectromagnetics* 21: 566-574, 2000.
- 79) Radon, K. et al. :No effects of pulsed radio frequency electromagnetic fields on melatonin, cortisol, and selected markers of the immune system in man. *Bioelectromagnetics*

- 22: 280-287, 2001.
- 80) Koivisto, M. et al. :GSM phone signal does not produce subjective symptoms. Bioelectromagnetics 22: 212-215, 2001.
- 81) Braune, S. et al. :Influence of a radiofrequency electromagnetic field on cardiovascular and hormonal parameters of the autonomic nervous system in healthy individuals. Radiat. Res. 158: 352-356, 2002.
- 82) Tuschl, H. et al. :Occupational exposure to high frequency electromagnetic fields and its effect on human immune parameters. Int. J. Occup. Med. Environ. Health 12: 239-251, 1999.
- 83) Jauchem, J.R. :Exposure to extremely-low-frequency electromagnetic fields and radiofrequency radiation: cardiovascular effects in humans. Int. Arch. Occup. Environ. Health 70: 9-21, 1997.

表2 電力単位 (1 mW/cm²) あたりのSAR (W/kg)^{7,8)}

種	最大吸収力を示す周波数 (MHz)	周波数 (MHz)						
		20-30	70	300	1000	2450	3000	10000
マウス	2000	8×10 ⁻⁸ (0.05)	0.008 (0.04)	0.06 (1.5)	0.4 (13)	1 (36)	0.965 (36.6)	0.322 (12.4)
ラット	600	1.8×10 ⁻³ (0.12)	0.0125 (0.06)	0.3 (7.5)	0.6 (20)	0.23 (8)	0.26 (9.6)	0.25 (9.6)
うさぎ	320	0.015 (1.00)	0.05 (0.22)	0.8 (20)	0.25 (8.3)	0.15 (5.4)	0.08 (2.96)	0.07 (2.69)
猿	300	1.7×10 ⁻³ (0.01)	0.0125 (0.06)	0.195 (5.00)	0.1 (3.33)	0.07 (2.5)	0.065 (2.41)	0.06 (2.3)
犬	200	1.5×10 ⁻³ (0.1)	0.01 (0.04)	0.1 (2.5)	0.05 (1.67)	0.04 (1.4)	0.037 (1.4)	0.03 (1.15)
ヒト (1歳)	150	0.004	0.04	0.15	0.065	0.055	0.05	0.042
ヒト (平均)	70	0.015	0.225	0.04	0.03	0.028	0.027	0.026

括弧内はヒト (平均) との比を示す。

表3 各ガイドラインによる SAR 値の上限

ガイドライン	暴露対象	平均SAR (W/kg)		
		全身	頭部・胸部	下肢・上肢
ICNIRP ¹⁰⁾ [100 kHz - 10 GHz]	職域	0.4	10	20
	生活域	0.08	2	4
IEEE ¹¹⁾ [100 kHz - 6 GHz]	コントロール可能な環境	0.4	8	20
	コントロールできない環境	0.08	1.6	4