



2. 電磁界の人体影響

平田 晃正, 藤原 修

名古屋工業大学大学院 工学研究科

(原稿受付: 2012年5月1日)

本章では、電磁波の基本的性質について述べた後、非電離放射線に焦点を絞り、電磁界の何が反応の刺激になるかを説明する。この際、電磁界にさらされると人体にはどのような反応が現れるかではなく、電磁界の何が反応の刺激になるかについて概説する。また、電磁界の人体影響と電波防護に関するガイドラインにおいて、数値ドシメトリが果たす役割について説明する。

Keywords:

health effect of electromagnetic fields, dosimetry, safety guidelines

2.1 はじめに

電磁界の生体影響に関する話題がマスメディアで取り上げ始められたのは、WHO (世界保健機関) が本問題に取り組んだ1980年代に遡る。商用周波 (極低周波, 50, 60 Hz) に関し、電線付近に住む家庭における小児白血病などが話題になった[1]。しかしながら、「電磁波」という大きな枠組みでは、それ以前から同様の話題が持ち上がっていた。電離放射線、つまり非常に周波数が高い領域である X 線等がその代表例であり、医療診断用のレントゲン、CTスキャンの際のばく露による遺伝子影響などが挙げられる。近年では、携帯電話、無線 LAN (Local Area Network) など無線通信の急速な普及に伴い、「電波」の人体への影響に対する関心が高まっている。我が国の電波法によれば、3 THz 以下の周波数の電磁波が電波と定義されるが、無線通信では、主に GHz 帯の電磁波が用いられている。現在、WHO では周波数帯ごとに細分し、優先的研究課題を発表している。これは電磁波といえども、その周波数 (波長) によりその性質が異なり、人体の電気的な振る舞いも大きく異なるためである。そのため、送電線からの電磁界、携帯電話からの電波などの生体影響を X 線や γ 線などの電離放射線のそれと混同して議論することはできない[2]。

WHO の研究機関である IARC (国際がん研究機関) の 2001年の発表では、極低周波磁界を対象にした発がん性の可能性を示すレベルとして限定的な証拠がある「2B (Possibly carcinogenic to humans)」というグループに指定した[3]。また、2010年には携帯電話の長期使用による神経腫瘍や髄膜腫に対する国際疫学調査の結果を発表し、同様に 2B と指定した。なお、この調査では利用者を累積時間により10段階に別けて評価し、最大ばく露グループとして累積通話時間が1640時間以上のグループ (10年間にわたって1日あたり平均30分間の使用を報告した人と定義) について

は統計的に有意な関連が示されていたものの、様々な誤差要因等を考慮すると総合的には携帯電話使用と脳腫瘍について明確な関連性は認められないと結論づけていることを付記する[4]。また、WHO は、電波防護に関する国際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) ガイドライン[2,5]および IEEE/ICES (International Commission on Electromagnetic Safety) 規格[6,7]を推奨している。これらのガイドラインあるいは規格では、過去50年以上に及ぶ様々な分野の研究成果に基づき、既にわかっている健康への有害な影響を防止するための制限値を設けている。健康への有害な影響とは、ばく露を受けた人またはその子孫の健康に確認可能な損傷を与えるものである[2]。一方、健康への有害な影響になるかもしれないし、ならないかもしれないものは生物学的影響とされる。

本章では、電磁波の基本的性質について述べた後、非電離放射線に焦点を絞り、電磁界の何が反応の刺激になるかを説明する。この際、電磁界にさらされると人体にはどのような反応が現れるかではなく、電磁界の何が反応の刺激になるかについて概説する。電磁波の生体への作用を議論する際には、体内の特定個所に誘導される電磁界を定量化する必要があるが、非侵襲に測定することは困難である。人体外部の電磁界と人体内に誘導される電磁界を定量的に関係づけることは、「ドシメトリ (dosimetry)」と呼ばれる。本章では、電波の人体影響と電波防護に関するガイドラインにおける数値ドシメトリが果たす役割について説明する。

2.2 電磁波の生体への影響

2.2.1 電磁波とは

電磁波とは、真空または物質中を電界と磁界の振動が相

伴って伝搬する波動現象と定義することができる。この波動は、波長(周波数)、光子エネルギー、温度のパラメータにより特徴づけることができる。図1は電磁波をスペクトルに分解したものであり、それに対応する上記パラメータを示している。波長が短く周波数が高いほど、それだけ電磁波の持つ運動エネルギーは増大し、また、温度も高くなる。一般に、波長が約100 nm(光子エネルギーに換算すると約12eV)より短い電磁波は電離放射線、それより長い電磁波は非電離放射線と呼ばれている。温度にすると電離放射線とは143,000℃以上の灼熱の電磁波となる。ここで、電波法によると、電波とは波長が0.1 mmより長く、周波数は3 THz以下の電磁波を指し、無線周波とも呼ばれる。ただし、本章ではICNIRPが電波防護の対象とする上限周波数である300 GHzまでを電波と定義する。よって、光子エネルギーでは 1.24×10^{-2} eV以下の電磁波が電波であり、温度では零下26℃より低い極超低温の電磁波になる。体温37℃と同じぬくもりを持つ電磁波は遠赤外線(波長48 μm)に相当することとなる。

2.2.2 電磁波の生体への作用

電磁界の生体への作用は周波数によって異なる。量子電磁気学によれば、電磁波は粒子性と波動性の両面を併せ持つが、生体への影響の側面から電磁波を大雑把に分類すると、エネルギーレベルが高く粒子性が強く作用する電磁波は電離放射線、粒子性と波動性の両方が作用する電磁波は光、低エネルギーで波動性が作用する電磁波は電波と区分できる(図1参照)。これらのスペクトルでは、それぞれ、①電離、②光、③電流が生体への影響の支配的な作用因子となる。①はX線や遠紫外線などの波長100 nm以下の電離放射線において強く現れる作用で、生体組織の構成分子や原子の電離(イオン化)をもたらす。ここで、生体が電離放射線にばく露された場合、電離作用により遺伝子等に障害を与えることが知られている。この障害が蓄積すると発がん、白内障等の健康に重大な悪影響が発生する可能性が高まる。したがって、低レベルでも長期間にわたり電離放射線にばく露することで、健康へのリスクが増大する効果、いわゆる蓄積効果を考慮する必要がある(例えば、[1])。一方で、非電離放射線は電離作用を引き起こすほどの光子エネルギーを持たないため、電離放射線のような電

離作用による生体組織への損傷など、蓄積効果はないと考えられている[1]。②は波長100 nm以上の紫外線、可視光線、赤外線的作用で、紫外線では化学作用、可視光線・赤外線では共鳴振動による刺激作用あるいは熱作用がそれぞれ優勢に働く。紫外線の殺菌作用、視細胞や温受容細胞の興奮による視覚や温覚は②の作用の結果として生ずる。③は体内の電磁界による誘導電流であり、周波数に応じて発熱作用と刺激作用に細分することができ、その境界となる周波数は図2に示すように10-100 kHz程度とされる[8]。なお、刺激閾値に必要な体内電磁界が上昇し始める周波数はおよそ1 kHzである。この境界となる周波数は、それよりも低い周波数帯ではキャパシタンスとして振る舞う末梢神経系の細胞膜が、短絡されることにより決定づけられる[2]。一方、発熱作用は、その閾値が周波数にはあまり依存しないため、刺激作用の閾値を下回る周波数帯(100 kHz以上)で支配的な効果となっていく。

この刺激作用および熱作用の相違は、ICNIRPガイドラインにも反映されている。具体的には、100 kHz以下の周波数帯における安全指針の指標としては体内に誘導される電界が[5]、10 MHz以上の周波数では比吸収率(Specific Absorption Rate: SAR)が[2]、そして両者の間の周波数帯では体内誘導電界およびSARの両者が用いられている。ここで、SARとは単位質量あたりの吸収電力であり、以下

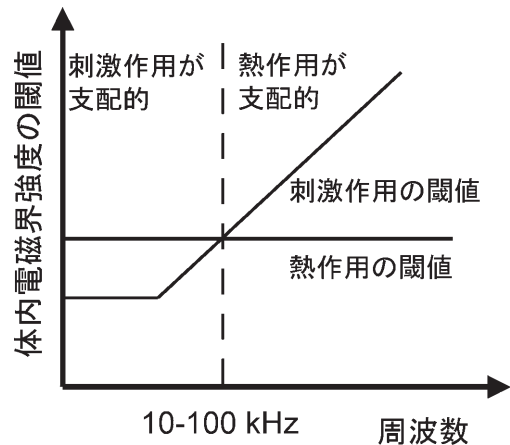


図2 電磁界の生体作用の閾値。低周波では刺激作用が、高周波では熱作用が支配的であることを示す。

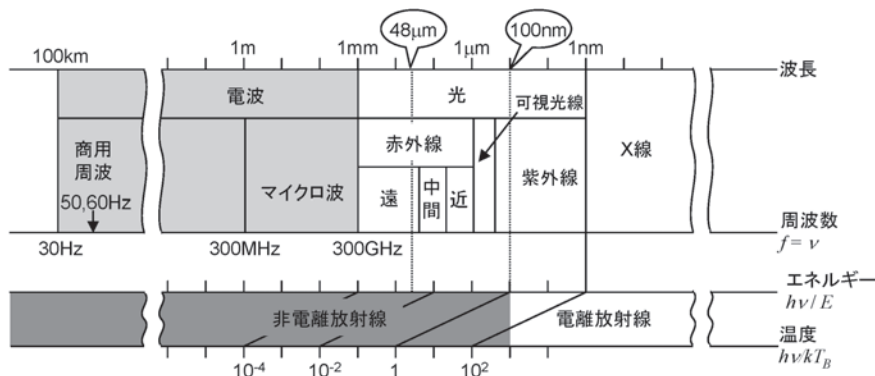


図1 電磁波のスペクトルと各種物理量。周波数 $f = \nu$ 、エネルギー $h\nu/E$ 、温度 $h\nu/kT_B$ 。h: プランク定数、k: ボルツマン定数、E: イオン化エネルギー。

の式で与えられる。

$$\text{SAR} = \frac{\sigma |E|^2}{\rho} \quad (1)$$

ここで、 σ [S/m] は人体組織の導電率、 E [V/m] は体内に誘導された電界、 ρ [kg/m³] は人体組織の密度である。

また、上述のように、周波数により安全性の指標が異なることを電磁気学の立場から考えると、人体組織の電気定数は周波数に依存し、低周波帯（数 MHz 程度以下）では変位電流が導電電流に比べて無視できる一方、無線周波では導電電流および変位電流が同等となる。このため、人体組織は、低周波帯では良導体として振る舞い、無線周波では損失を有する誘電体として振る舞う。

2.3 電波防護ガイドラインについて

2.3.1 低周波ばく露に対する安全性の指標と根拠

極低周波（ELF: Extremely Low Frequency）から概ね 100 kHz までの中間周波数帯と呼ばれる周波数帯域を含む電磁界の生体作用については、電磁界により体内に誘導される電界／電流の神経や筋に対する刺激作用が、科学的根拠のある再現性のある指標と考えられている。低周波の電界へのばく露が引き起こす可能性がある十分に明らかにされている生物学的反応は、表面電荷作用による知覚に伴う不快感に加え、低周波の磁界にばく露されたボランテア実験における中枢および末梢神経組織刺激と網膜閃光現象誘発である。閃光現象とは視野周辺部に点滅する微弱な光を知覚することである。ICNIRP ガイドラインおよび IEEE 規格では、網膜は中枢神経系の一部であり、誘導電界が中枢神経系神経回路に一般的に及ぼす影響の適切かつ安全側のモデルとみなされている。

2010年、ICNIRP はガイドラインの改訂を行った[5]。安全性の指標としては、従来「頭部および体幹」の誘導電流密度であった[2]ものを、「頭部の中枢神経系組織」の誘導電界に変更し、IEEE 規格と同様となった[6]。基本制限（職業ばく露の場合）は、商用周波数 50 Hz において、100 mV/m (50 Hz) であり、IEEE 規格の値 44.3 mV/m と比較して大きい値となっている。この理由は、IEEE では楕円モデルに対して外部磁界に対応する体内誘導電界を概算している一方、ICNIRP ガイドラインでは詳細な人体モデルに対して一様磁界を印加した場合に誘導される体内電界より導出したためである。ここで、詳細な人体モデルとは、CT (Computed Tomography) スキャンあるいは MR (Magnetic Resonance) 画像により得られた画像を基に構築されたものであり、一辺が数ミリメートルの立方体から構成されている。例えば、日本人成人男性および女性を対象に、(独)情報通信研究機構 (NICT) が中心に作成した全身モデルは、一辺が 2 mm の数百万個の立方体から構成されている[9]。また、構成組織数は数十から百数十に及び、組織ごとに異なる電気定数[10]を与えることにより、人体を電氣的に模擬することが可能となる。

IEEE 規格の参考レベルの根拠および ICNIRP ガイドラインにおける基本制限は、[11]によるボランテア実験を

参考としている。この実験では、頭部こめかみの側部に鉄心コイルを配置している。上記、不均質モデルを用いて、[11]のばく露条件を模した場合の体内誘導電界の解析例を図3に示す。眼球を構成する硝子体は、それ以外の組織に比べて高い導電率を有するため、電流が眼球を通過するように流れている様子がわかる。この際に網膜に誘導される電流は 10 mA/m² であり、従来の報告とも合致する[12]。ここで、ICNIRP ガイドラインの根拠となるレビュー[13]では、網膜の導電率として 0.1 S/m を見積もっており、これらの結果より、閃光閾値は 100 mV/m と概算でき、基本制限に比べて余裕を有していることとなる。

2.3.2 高周波全身ばく露に対する安全性の指標と根拠

電波照射に伴う電力吸収のため、体内深部温度が上昇し、生体影響が引き起こされるとされるが、これと電波のばく露量との関係は単純でない。人体は電氣的には不均質な誘電体とみなせるため、周波数、偏波、電波強度分布などにより体内における発熱分布が大きく変化する。加えて、体温上昇に対する人体の熱調整反応は複雑であり、個人差も大きい。熱ストレスに対する熱調整反応は数多く知られているが、最も顕著なものとして視床下部の温度変化に伴う血流量変化、およびそれに伴う代謝量のあるいは発汗量の変化などが挙げられる[3,4]。これらの生体影響を引き起こす発熱量の閾値がわかれば、これを超えない電波強度を逆に決定できることとなる。ラットなどの小動物を用いた電波の照射実験によると、全吸収エネルギーの時間変化率（全吸収電力）を全身に亘って平均した値が単位体重あたり 4~8 W を閾値とし、可逆的な行動異常が生じたとされている[2,7]。この値は、電波の周波数や偏波、実験小動物の種類に依存しないことが確認されている。

ICNIRP ガイドライン[2] および IEEE/ICES 規格[7]は、小動物に比べてヒトの方が熱ストレスに強いと考え、上に述べた発熱量の閾値を人体の防護指針の根拠とできる

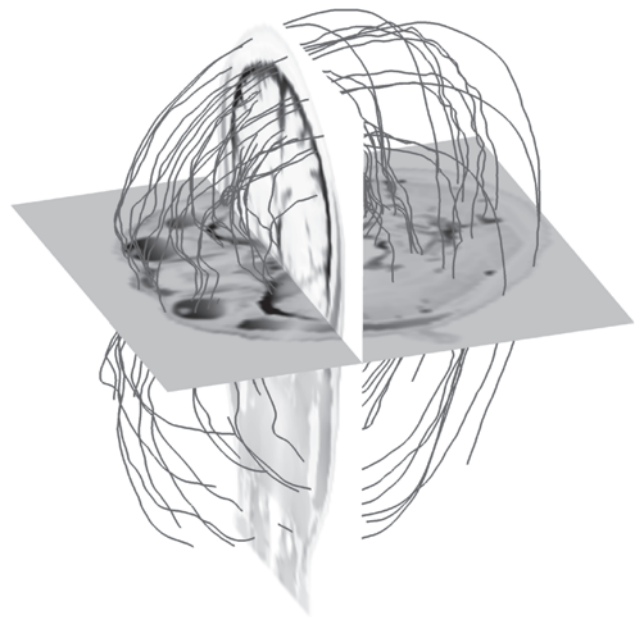


図3 鉄心コイルをこめかみ付近に配置した際の体内誘導電流強度および電流の方向。

ものとして策定されている。具体的には、小動物は体毛に覆われ、汗腺も発達していないため、熱調整機能はヒトよりも格段に劣る[14]。実際、最近では、それを定量的に支持する報告もなされるようになった[15]。哺乳動物の代謝量を発熱量の観点から種別に比較することは興味深い。各種動物の単位体重あたりの基礎代謝量を W/kg で表し、これと体重との関係を示すと図4のようになる。ただし、ヒト以外の動物の基礎代謝量 (BMR: basal metabolic rate) は安静時の代謝量としている。BMR とは生命の維持に必要な最低のエネルギー代謝をいうが、体重あたりの BMR と体重との関係は両対数グラフでは種によらずほぼ直線状に並び、体重が重いほど BMR は低くなる[16]。例えば、0.5 kg 以下の小動物の BMR は 4 W/kg 以上であるのに、乳幼児から成人を含む 10~70 kg のヒトでは 1~3 W/kg の範囲にある。人体の電波による発熱量が BMR の何倍まで許せるかは熱調整機能に強く依存するが、少なくとも BMR と同程度の発熱量が体内で生ずれば自然の状態にはない。

国際ガイドラインでは、人体に対する影響の閾値としては、小動物の実験データで全身平均 SAR が 4~8 W/kg であったことから、その下限である 4 W/kg 程度を基準とし、同閾値の 10 倍の安全率を見込んだ 0.4 W/kg が管理環境（職業人を対象とした環境）における推奨値として世界各国で設定されている。この推奨値は、ICNIRP ガイドラインおよび IEEE/ICES 規格では基本制限[2,7]と呼ばれる。なお、一般環境の推奨値については、さらに 5 倍の安全率を見込んだ 0.08 W/kg が用いられている。全身平均 SAR は電波源、周波数、偏波、人体のサイズなどによって大きく異なる。一般に直立する人体が平面波を照射されたとき、全身平均 SAR が最大（最悪）の場合となることが知られており、この際の SAR に対する推奨値を超えない電磁界強度が定められている。この電磁界強度は、ICNIRP ガイドラインおよび IEEE/ICES 規格では参考レベル[4,7]と呼ばれる。

全身ばく露が想定される現実的なばく露状況としては、携帯電話の基地局、放送塔などからの遠方ばく露が挙げられる。このようなばく露に対し、ICNIRP ガイドラインにおける電波防護指針の電磁界強度に対する推奨値は、回転楕円体あるいは簡略化された人体モデルを基に導出されたものであった[2]。近年では、詳細な人体モデルを用いた解析が可能となってきている。精緻な電磁気学的モデルに対して、国際ガイドラインにおける参考レベルである 10 W/m² の強さの平面波を入射した際の全身平均 SAR 値が周波数に応じてどのように変化するかを図5に示す。図の実線と点線は、それぞれ詳細な人体モデル、ブロック状の人体モデルに対する計算値で、○と△はそれぞれ②と③に対応した模擬人体の実測値である。電波強度が同じでも、周波数や身長に応じて SAR が著しく変わっている。いずれの場合もピーク値は 0.4 W/kg を超えていない。一般に、自由空間においては電界の偏波面と身長方向とが平行で、身長 h がおよそ波長 λ の 0.5 倍に相当する周波数 ($h/\lambda = 0.4 - 0.46$) の電波が最も吸収されやすく、SAR も最大となる。ここで、20年以上も前の簡易なモデルを用いて

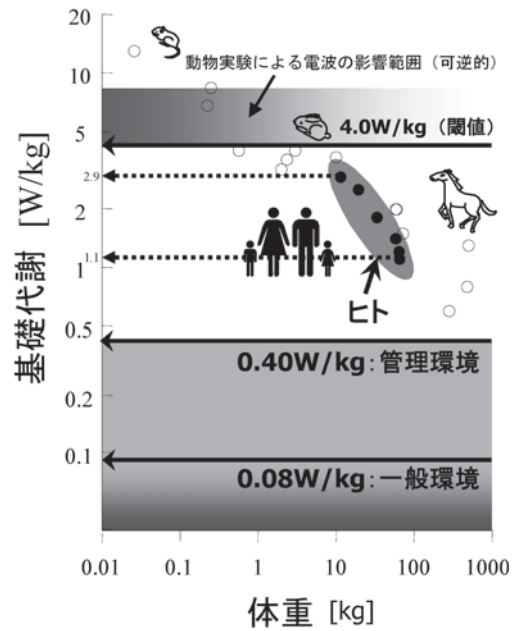


図4 種々の動物の単位体重あたりの基礎代謝量と体重の関係。

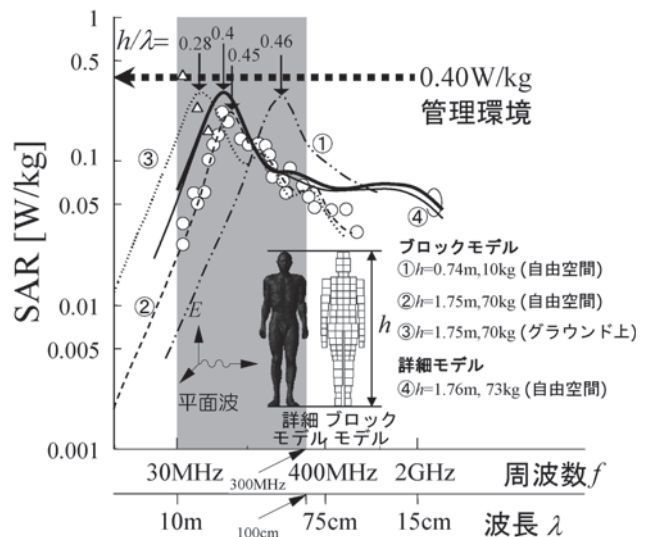


図5 1 mW/cm² 平面波による人体の全身平均 SAR の周波数特性、①~③がブロックモデルの結果、④が詳細モデルの結果（太線：筆者のグループ、細線：Dimbylow）。

得られた結果と精緻なモデルを用いて得られた結果 [17,18] の差異は、高々数%であり、遜色がないことは特筆に値する。なお、参考レベルは、全身平均 SAR が周波数依存するため、それを考慮するよう定められていることを付記する。また、職業人に対する全身平均 SAR の推奨値 0.4 W/kg に対する体内深部温度上昇は、最悪の状況を想定しても 0.1℃ 程度であることが示されている [19]。

2.3.3 高周波局所ばく露に対する安全性の指標と根拠

携帯電話用アンテナに代表される局所的な電波ばく露に関しては、局所 SAR を指標として推奨値が定められている。これは、前述の全身ばく露とは異なり、携帯端末より放射される電力は時間平均電力で数百 mW 程度と、ヒトの全身代謝熱（100 W 程度 [18]）に比べて十分小さいため、血流を介しての全身加熱は無視できる程度であり、局所的

な加熱から防護することが目的となる。ICNIRP ガイドライン[2]では、体の一部または全身の温度上昇が $1-2^{\circ}\text{C}$ により熱損傷が生じることを述べるに留まり、この局所SARと温度上昇の関連については言及されていない。一方で、「家兎眼へのマイクロ波ばく露実験において、白内障発生の閾値が $3-5^{\circ}\text{C}$ であった」ことが引用されている[20]。また、脳内温度上昇の物理的損傷の閾値も同程度とされている。IEEE/ICES規格[7]では、職業人に対するばく露環境における局所SARに関する推奨値に対する眼球および脳の温度上昇が 1°C 程度あるいはそれ以下になるとの説明がある。国際ガイドラインの基準値は、局所10gあたりの平均SARの最大値が 2 W/kg 以下、職業人に対しては5倍緩和した 10 W/kg としている。

電波防護ガイドラインに示された局所SARと温度上昇の相関がヒトを対象とした場合にどうなるかは、近年まで十分な議論はなされていなかった。この一因は、ヒトの体内温度を測定できないことが挙げられる。2000年以降、詳細な人体モデルが構築され、人体の電気定数の測定技術の向上などと相まって、信頼性のあるドシメトリが可能となった。温度上昇のドシメトリは、まず、携帯電話用アンテナを電氣的に模擬し、頭部内に吸収される電力を求め、次に、それに伴う温度上昇を解析する。なお、温度解析には、通常の熱拡散に加えて、血流による熱輸送、代謝量の変化なども考慮されている。詳細な人体モデルに対して、SARおよび温度上昇を解析した結果の一例を図6に示す。平田らは携帯電話を対象に、人体とアンテナの相対位置関係、周波数などを変化させ、数百にも及ぶ場合に対して解析を行い、得られた結果を統計的に処理した[21]。その結果、局所を有限質量（おおよそ10g）に亘り平均化した値と最大温度上昇にはよい相関関係があることを明らかにした。10gという質量は、一辺がおおよそ22mmの立方体に相当し、人体における電力吸収分布および生体組織における熱拡散長の影響を考慮すれば適切なことが示された。IEEE規格は、2005年までSARの平均化質量を1gとされていたが、この結果に基づき10gに変更し[7]、国際ガイドライン間での調和がとれたことは特筆に値する。なお、評価指標であるSARの平均化質量は調和がとれたものの、その適用上限周波数は異なっており、更なる検討が求められている。

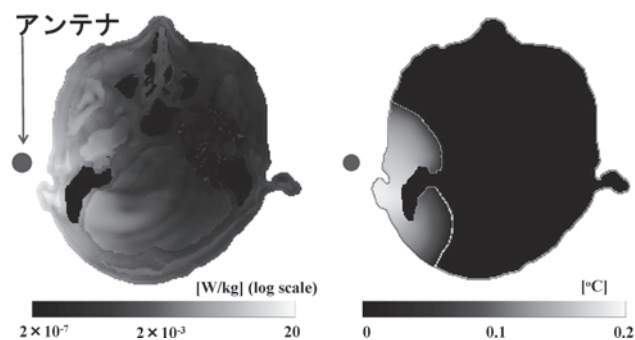


図6 ダイポールアンテナによる頭部内SAR分布とそれに伴う温度上昇分布。

2.4 まとめ

本章では、電磁波の基本的性質について述べた後、非電離放射線に焦点を絞り、電磁界の何が反応の刺激になるかを説明した。この際、電磁界にさらされると人体にはどのような反応が現れるかではなく、電磁界の何が反応の刺激になるかについて概説した。また、生体内に誘導された物理量と生体影響を関連づけるためには物理・工学的なアプローチが必要であり、電波の人体影響と電波防護に関するガイドラインにおいて数値ドシメトリが果たす役割について説明した。

参考文献

- [1] WHO, "Extremely low frequency (ELF) fields", Environmental Health Criteria **35** (1984).
- [2] ICNIRP : Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz), Health Phys. **74**, 494 (1998).
- [3] International Agency for Research on Cancer, "Non-ionizing radiation, Part 1: Static and extremely low-frequency (ELF) electric and magnetic fields," IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans **80** (2002).
- [4] The INTERPHONE Study Group, "Brain tumour risk in relation to mobile telephone use: results of the INTERPHONE international case-control study," Int. J. Epidemiology **1** (2010).
- [5] ICNIRP : Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric and Magnetic Field (1 Hz to 100 kHz), Health Phys. **99**, 818 (2010).
- [6] IEEE : IEEE Standard for safety levels with respect to human exposure to electromagnetic fields, 0-3 kHz (C95.6) (2002).
- [7] IEEE : IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz (C95.1) (2005).
- [8] ICNIRP, "Exposure to high frequency electromagnetic fields, biological effects and health consequences (100 kHz -300 GHz)" 2009 (<http://www.icnirp.de/documents/RFReview.pdf>).
- [9] T. Nagaoka *et al.*, Phys. Med. Biol. **49**, 1 (2004).
- [10] S. Gabriel *et al.*, Phys. Med. Biol. **41**, 2271 (1996).
- [11] P. Lovsund *et al.*, Med. Biol. Eng. Comput. **18**, 326 (1980).
- [12] M. Taki *et al.*, Rad. Prot. Dosimetry, **106**, 349 (2003).
- [13] R.D. Saunders and J. G.R. Jefferys, Health Phys. **92**, 596 (2007).
- [14] E.R. Adair and D.R. Black, Bioelectromagnetics Suppl. **6**, S17 (2003).
- [15] A. Hirata *et al.*, Prog. Electromagnet. Res. **99**, 221 (2009).
- [16] 中山昭雄, 入来正躬: エネルギー代謝・体温調整の生理学 (医学書院, 1987) 47.
- [17] P.J. Dimbylow, Phys. Med. Biol. **47**, 2835 (2002).
- [18] J. Wang *et al.*, Phys. Med. Biol. **51**, 4119 (2006).
- [19] A. Hirata *et al.*, Phys. Med. Biol. **53**, 5223 (2008).
- [20] A.W. Guy *et al.*, IEEE Trans. Microwave Theory Tech. **23**, 492 (1975).
- [21] A. Hirata *et al.*, IEEE Trans. Electromagnet. Compat. **48**, 569 (2006).