

電磁波の安全性および防護指針に関する考察

二 川 佳 央*

Study on Safety and Protection Guideline of Electromagnetic Waves

Yoshio NIKAWA*

Abstract: Growing utilization of electromagnetic (EM) waves arise the discussion of their hazardous effects to biological systems. The mechanism of the effects of EM waves can be separated into the frequency range in the extremely low frequency (ELF) and in the radio frequency (RF). In ELF, static electric field and static magnetic field can independently exist. Therefore the effects of the electric field and the magnetic field can be considered independently. In RF, the presence of the electric fields depends on the magnetic fields. Therefore the effects of the electric field and magnetic field can not be separated.

In this paper, physical properties of the biological systems are investigated and safety and protection guideline of electromagnetic waves is introduced. Further discussion is made to the present point at issue for the protection guidelines of EM waves.

1. はじめに

要 旨：電磁波すなわち非電離放射線について、その影響に対する議論が近年活発になってきた。電波法上は「電波とは10 kHz から 3 THz までの電磁波をいう」とあり、これから電波は電磁波の一部と定義できる。しかしながら、これらの言葉の使用は必ずしも厳密ではなく、電磁波、あるいは電波という言葉が何れの場合も用いられている。一方、低周波の電磁界については、低周波の中でも、直流を除いた300 Hz 以下の周波数範囲を ELF (Extremely Low Frequency) と呼ぶことがある。但しこの ELF は分野や国等によっても若干周波数範囲が異なるようである。ELF では波長が1000 km 以上となるので電界のみの影響、磁界のみの影響を区別して考えることが容易であり、いずれも静電界、静磁界と近似し取り扱うことができる。

本稿では、まず生体の電磁波に対する特性の検討を行い、電磁波に関する安全基準を含めた生体への影響およびその防護指針等の紹介を行うとともに、現状の問題点などに関する考察を行う。

2. 電磁界の生体物性

電磁界の生体に対する影響・効果を考察する上で、生

体の電磁気的な特性を知る必要がある。生体の透磁率 μ は真空中の透磁率 $\mu_0(4\pi \times 10^{-7} \text{H/m})$ とほぼ等しいと考えられ、一般に生体については $\mu = \mu_0$ としている。また導電率 σ は誘電率を複素量 $\epsilon^*(=\epsilon' - j\epsilon'')$ として扱うと、虚部である ϵ'' を σ/ω (ω : 角周波数) とまとめて表現することができ、誘電率を複素誘電率として示すことにより、生体の電気的定数を複素誘電率という一つの複素定数にまとめて扱うことができる。ここで、 ϵ' は誘電率、 ϵ'' は誘電損率、 j は純虚数 ($\sqrt{-1}$) である。生体に高周波電流が流れたり、電波が照射されたときの生体内の高周波電流、電磁界分布の様子を知るためには、まず生体の電気的一次定数である複素誘電率を知る必要がある。複素誘電率は、真空の誘電率 ϵ_0 に対する複素誘電率という形で、複素比誘電率 $\epsilon_r^* = \epsilon_r' - j\epsilon_r''$ によって表示することもある。但し $\epsilon^* = \epsilon_0 \epsilon_r^*$ である。ここで ϵ_0 は真空の誘電率、 ϵ_r' は比誘電率、 ϵ_r'' は比誘電損率といい、比誘電損率と比誘電率との比を $\tan \delta$ と記し誘電正接と呼び、 δ は損失角である。尚、誘電正接は媒質の損失の程度を示す。

ELF 領域では、生体組織の導電率を 1 S/m 程度に見積って計算を行うことが多い^{[1],[2]}。これは、電磁界が暴露される生体の大きさが電磁界の波長に対して無視できるためである。

一方、電波の領域では、生体組織の複素誘電率は組織の種類によって大きく 2 種類に分けることができる。一方は筋肉や皮膚のように水分含水量の大きい組織 (高含水率組織)、他方は脂肪や骨などの水分含水量の小さい

* 電気工学科 教授 工学博士
Ph.D., Professor, Department of Electrical Engineering,
Faculty of Engineering

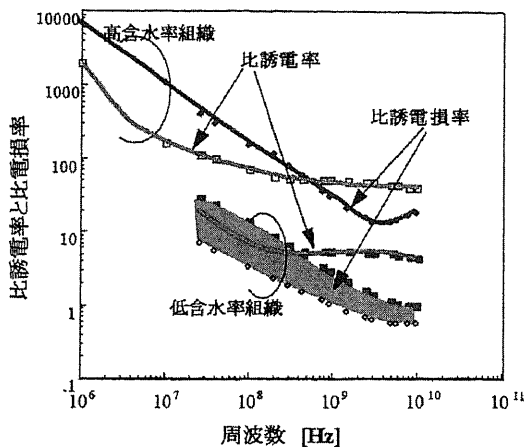


図1 生体組織の比誘電率と比誘電損率

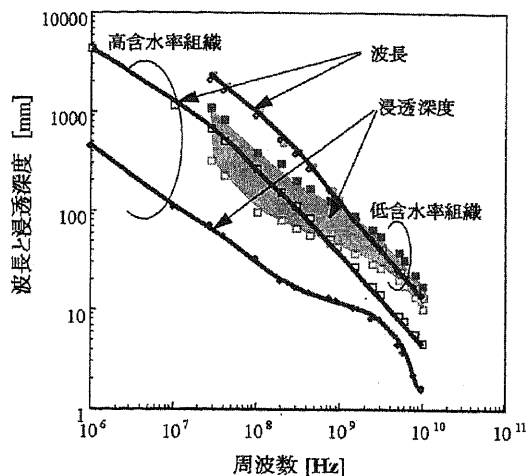


図2 生体組織中における平面波の波長と浸透深度

組織（低含水率組織）である。それぞれの複素誘電率特性を図1に示す[3],[4]。

組織の複素誘電率を基に伝搬定数 k^* 、減衰定数 α 、位相定数 β 等の二次定数が定まる。組織が一樣で平面波が伝搬する等の単純な条件では、これらの二次定数から生体内の電波伝搬特性を容易に求めることができる。位相定数は媒質内部を伝搬する電波の波長に、減衰定数は電波が透過する深さに関する定数であり、伝搬定数と位相定数、減衰定数の関係は、

$$k^* = \beta - j\alpha \quad (1)$$

となる。式(1)の中で表される位相定数によって、媒質内の波長 λ は以下のように求められる。

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} \quad (2)$$

また、電波が式(1)で示される伝搬定数で示される媒質中を伝搬するとき、電力密度が $1/e$ (約37%) になる深さを浸透深さ (浸透深度) というが、(e は自然対数の底) このときに浸透深さ d は以下のように示される。

$$d = \frac{1}{2\alpha} \quad (3)$$

従って、式(3)より、電力密度が入射電力に対して約37%に減少する深さを求めることができる。但し、式(2)および式(3)で示した減衰定数 α よび位相定数 β の関係は次の式(4)、(5)によって得られる。

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{2} \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 (\sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} - \epsilon_r')} \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt{\frac{1}{2} \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 (\sqrt{\epsilon_r'^2 + \epsilon_r''^2} + \epsilon_r')} \quad (5)$$

但し、 ω は角周波数である。図2には上式から求めた、周波数に対する高含水率組織および低含水率組織内部の波長、および浸透深さを示す。図1に示すように、高含水率組織の誘電率および誘電損率は低含水率組織の誘電率の10倍近くにも及ぶ。これによって、図2に示すよう

に、高含水率組織中における波長および浸透深さは、低含水率組織に対し約10分の1となる。一般に、高含水率組織と低含水率組織が複雑に分布する生体内部における高周波電磁界分布は、組織の不連続部分の反射、定在波の発生等で複雑になる。

3. 低周波電磁界と生体

3.1 低周波電磁界の特性・性質

低周波電磁界の生体作用は非熱作用、刺激作用（筋や神経に対する）が支配的である。電磁界の刺激作用とは電磁界中に置かれた生体組織に電流が誘起され、神経・筋の興奮が誘発されることをいう。100 kHz 以下の周波数では、熱作用を伴わない非熱作用が主体である。刺激作用については、古くから感知電流という形でその周波数特性が知られてきた。この特性について、図3に示す。さらに、電流を感知しながらも自らの意思で筋を動かすことができる可随電流は、感知電流の10倍以上である。この特性については図4に示す。生体にこれ以上の電流が流れると、離脱電流を越え、筋肉が収縮し自らの意思で筋を動かすことができなくなる（不随意電流）。低周波電磁界の生体への影響は、感知電流以下の電流が長期にわたり生体に流れ続けたとき、生体がいかなる影響を受けるかということを知ることが大きな課題である。

3.2 低周波電磁界細胞レベルにおける影響・効果

細胞レベルの暴露実験において、一般に認められている影響として、脳細胞におけるカルシウムイオンの結合が、電界暴露により影響を受けるという現象がある[5],[6]。この現象は、放射線同位元素でラベルしたカルシウムイオンを用い、培養された鶏の脳細胞からのイオン流出を *in vitro* で検出することにより見いだされたものである。この現象は特定の周波数領域（10-100

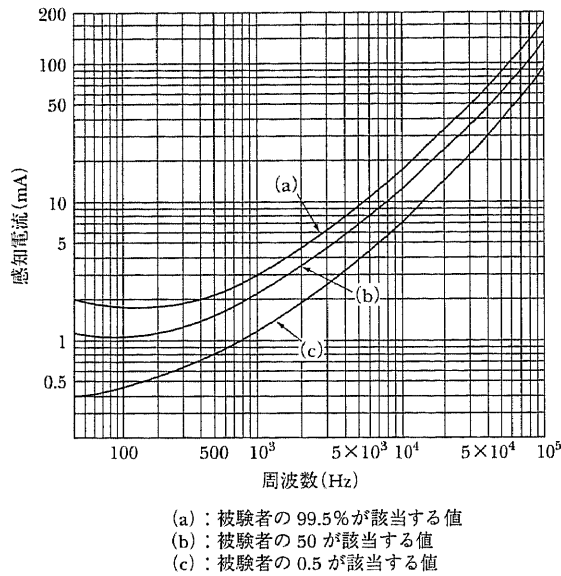


図3 感知電流に及ぼす周波数の影響

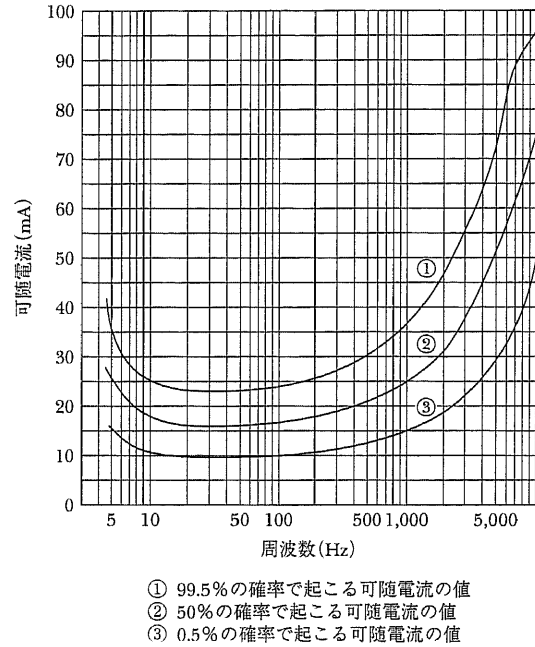


図4 可随電流に及ぼす周波数の影響

Hz) および特定の電界強度範囲 (5-56 V/m) のみに現れる現象であり、「窓」効果 (Window effect) を持っている^[7]。この現象を解明するために、様々な実験が行われているが^{[8],[9]}、現在のところその原因は不明である。また、16 Hz で振幅変調された915 MHz の電磁波照射によって、ヒト神経芽細胞腫からのカルシウムイオン流出の増加^[10]や、60 Hz, 2.85 V/m の電界暴露によるチャイニーズハムスタ卵巣細胞へのカリウムイオン流入の減少^[11]なども報告されている。

このような結果から、詳細な機序は不明であるにもかかわらず、電界が細胞膜に影響していることは間違いないものと思われる。但し生体系における *in vivo* での影響については未だ不明である。

3.3 生体への影響と防護指針

低周波電磁界の生体影響については、電磁界の周波数が、特に生体内部における信号 (細胞内活動電位、網膜電図、筋電図、脳波、心電図等) の帯域と重なることから、古くから考えられてきた。特に ELF 電磁界の生体影響が本格化したのは、1970年代に入り電力周波数 (商用周波数, 50, 60 Hz) の電磁界の生体影響が注目され始めてからである。この周波数の電磁界は、高圧送電線近傍等で公衆が長期間暴露を受けたり、電力関係の作業員が職業上、高レベルの暴露を受けることから、大きな問題として取り上げられるようになった。しかしながら、危険性から人体への実験的研究ができず、疫学的調査がほとんどである。少ない実験的研究の中で、生体の反応時間を調査した例がある。当初、反応時間は ELF の暴露量により変化すると報告されたものの^{[12],[13]}、厳密な追試の結果再現性のないことが報告された^[14]。ま

たボランティアによる実験で、生体の血圧、心拍、心電図、脳波、反応時間、血液成分等の影響を調査した報告でも、50 Hz, 20 kV/m までの電界強度では、影響は見られなかった^[15]。疫学調査によっても、ELF 電磁界暴露とガンや白血病との関連等は未だ明確な結論が得られていない。一方、心筋への刺激作用のような重大な刺激作用は 1 A/m² 以上の電流密度で生じる。商用電力周波数領域の外部磁界との結合によって、組織内部にこれだけの電流密度が生じるためには、0.5 T 以上の磁束密度が必要である。この磁束密度は、日常暴露される比較的強い磁界 (μ T) に対しても、100,000倍以上大きい。

刺激作用の中で、しきい値が低いのは、網膜付近の電流刺激により生じる閃光の知覚であり、20 Hz 付近で最も感度が高く電流密度が20 mA/m² 程度である。また、骨折の修復促進等の作用が、10-100 mA/m² で生じることが知られている。これらから、低周波電磁界に対する防護指針では、電磁界による誘導電流密度を10 mA/m² 以下となることを基本的な制限としている例が多い。

人体組織内部に流れる電流密度を実測することはできない。また誘導電流密度や接触電流と生体を取り巻く環境の電磁界強度との関係は、電磁界と人体の結合状態に依存するため一定ではない。人体内部の誘導電流、接触電流等の制限を基本制限というが、これに対して実際の電磁環境を基本制限に基づいて、全身暴露の限られた条件の下で基本制限条件に対応するよう、電磁界指針値が示されている。従って、局所暴露の場合などでは電磁界指針値を超えても、基本制限を越えないのが普通である。防護指針の数値についての議論が十分に収束して

いる訳ではないが³, 1990年に国際放射線防護協会 (IR-PA) の非電離放射線委員会は商用電力周波数の電磁界強度の暫定指針として, 一般公衆に対して電界強度 5 kV/m, 磁束密度 0.1 mT, 職業者に対してそれぞれ 10 kV/m, 0.5 mT という値を示し, この暫定指針の数値は各方面で引用されている。

4. 高周波電磁界の生体への影響・効果

4.1 電磁界の熱作用

電磁界の生体への影響は, 熱作用によるものと非熱作用によるものに分類される^[16]。しかしながら, 電磁波エネルギーが生体に照射されると, エネルギーの吸収により温度上昇が生じるため熱作用を非熱作用と完全に切り離すことは一般に難しい。生体が電磁界に曝された場合, 高周波電界により生体の持つ導電性により電流が流れ (高周波電流), ジュール熱により発熱する。これに加え, 生体を構成している分子は一般に分極しているため, 周波数が高くなると, ジュール熱に加えて高周波電界により分子が振動, 回転し, 分子同士の衝突による発熱を生じる。高周波電流は高周波電界によって発生する。発生するエネルギー密度 P は次式で示される。

$$P = kfE^2 \epsilon' \tan \delta \quad (6)$$

但し, k は定数, f は周波数である。また, 高周波電界についても同様に生体に渦電流を誘起し, やはりジュール熱が発生する。

電磁界による発熱量を見積るためには, 生体組織 1 kg あたりの吸収電力 (時間当たりの電磁波吸収エネルギー) を用いる。この量を比吸収率 (Specific Absorption Rate, SAR) と呼ぶ。生体の全吸収電力を体重で割った値を全身平均 SAR と呼ぶ。多くの種に対する動物実験結果から, 動物の行動パターンに変化が現れる全身平均 SAR の閾値は, ANSI (米国基準協会) が収集したデータでは 4-8 W/kg, EPA (米国環境保護庁) の報告では 1-2 W/kg であるとされている。生体において全身 SAR が 1-2 W/kg となる吸収電力があるときには, その基礎代謝量をもとに計算をすると, 約 1°C の深部における体温の上昇があるといわれている。

電磁界の熱作用による影響は, 時間あたりに吸収されるエネルギーに依存する。

4.2 電流による発熱

生体内部に高周波電流が流れることにより発熱が起きる場合, SAR は, 発熱に起因する物理量を電流 J あるいは電界 E を用いて求めることができる。

主として人体が高周波電流の流れている物体に触れることにより, 人体に RF 電圧が加わり, これによって組織内部にイオンが運動することにより, 電流 J が流れる。発熱はジュール熱によるものである。発熱のメカニズムは生体の一部あるいは全体に外部から電流が流れることによる。組織中に流れる電流により組織中の単位体

積当たりに消費される電力 P_d は以下の通りとなる。

$$P_d = \frac{1}{2} JE = \frac{1}{2} rJ^2 \quad (7)$$

但し J は電流密度で, E は電界, そしては r 媒質の抵抗率である ($r=1/\sigma$)。従って式(7)から SAR はを組織の密度とすると,

$$SAR = \frac{1}{2\rho} rJ^2 \quad (8)$$

となる。これより SAR は組織を流れる電流の 2 乗と抵抗率の積に比例していることが分かる。このような場合, 高周波電流が生体深部まで通過する可能性もあり, 抵抗率の低い筋肉等の高含水率組織に比べ, 抵抗率の高い脂肪等の低含水率組織の方が発熱しやすい。

4.3 電界による発熱

マイクロ波等の高い周波数領域では, 高周波電磁界結合により生体内部に電磁界分布が生じる。組織中の単位体積当たりに消費される電力 P_i は電界を用いると以下の通りとなる。

$$P_i = \frac{1}{2} JE = \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad (8)$$

電界が励起され生体内部に SAR が生じる場合, エネルギーの伝搬方向と電磁界の振動方向は一般に垂直である。式(8)から SAR は以下のように示される。

$$SAR = \frac{1}{2\rho} rE^2 \quad (9)$$

これより SAR は組織に加わる電界と導電率の積に比例していることが分かり, 導電率の低い脂肪等の低含水率組織に比べ, 導電率の高い筋肉等の高含水率組織の方が発熱しやすいことが理解できる。このような場合, 筋肉等の高含水率組織では組織の高い導電率によって, マイクロ波が急激に減衰する。そのため深部までエネルギーが伝搬することは一般にはないと考えられる。

4.4 電磁界の非熱作用

非熱作用には, 刺激作用という作用がある。これは, 電磁界によって脳波, 心電のような内因性電流の作用に影響を与える電流を誘起する作用, および電磁界によって高電圧を得た非接地の金属物体に接触した際に電撃を受ける作用である。これらの人の健康への影響は明かであり, それを防ぐための電磁界の限界値も数値的に決定できる。

また, 細胞レベルの研究においては血球膜の陽イオン透過性の変化, ラットの脳エネルギー代謝の変化, 低周波で変調したマイクロ波暴露によるヒヨコ脳組織からのカルシウムイオン流出等の作用が報告されている。これらの作用の機序は未だ不明であり, これらがヒトの健康に与える影響を指摘できるまでには至っていない。

熱作用の影響は式(5)で示されるように, 周波数が高くなるに従ってより大きくなるが, 刺激作用の影響は約 100 kHz 以下の低い周波数領域において生じる。

4.5 安全基準

高周波エネルギーの生体に対する影響は、かなり以前より疑われており、内外の多くの研究者による報告がある^{[16],[17]}。

欧米先進国では、1970年代に人体に対する放射電磁界強度の保護基準についての法的処置がとられている。例えば、米国では1966年に最初の基準が作られ1979年に改正されている。カナダが1966年、当時の西ドイツが1975年、当時のソ連とスウェーデンは1976年、オーストラリアは1979年に各々安全基準を設けている。

高周波エネルギーの生体への効果は、電離放射線のように蓄積されるものではないが、従来いわれている熱的作用、神経刺激のほかの効果もあり、1981年世界保健機関 (WHO) から“Environmental Health Criteria 16-Radiofrequency and Microwaves”として無線周波数およびマイクロ波の生体・環境構築基準と安全対策についての勧告案が提出されている。

わが国でも1990年6月に、郵政省の電気通信技術審議会より電磁波による人体への影響についての防護指針が郵政大臣に答申された^[18]。この指針の基本思想は電磁波の熱的作用であり、職業人に対しては全身に平均して吸収される電磁波エネルギーが6分間で平均0.4 W/kg、一般人では0.08 W/kg以下であれば障害を引き起こす恐れがない許容値としている。吸収エネルギーとなる電磁界強度の数値は、電磁波の周波数より算出したものであり、米国のANSI規格の数値と共に電波防護指針に定められた電界強度と電力密度を表1に示す^[19]。

4.6 指針値の意味

各国の基準は、熱作用を主な対象にし、低い周波数領

域の一部に刺激作用を盛り込み電磁界強度指針値を定めている。このことは電磁界の影響の主なものは熱作用に由来するものであり、これからヒトを防護すればよいとするのが、現時点における各国の共通の認識である。

電磁界の熱作用による影響は、放射線の影響とは性格が大きく異なる。熱作用による体温上昇が大きければ自覚症状が現れ、電磁界から遠ざかれば回復し、電磁界の特異的な蓄積効果は何もない。

指針値は安全率を考慮した上で定められているので、測定値が仮に指針値に達していても自覚症状を呈するほどの体温上昇には至らない。従って、指針値は、実際の測定値がこの程度なら安全（健康に影響を与えない）という目安の値になるが、そのとき深部の体温上昇は僅かではあるが上昇する。

4.7 条件Pと条件G

わが国の電波防護指針は、電磁波に曝される状況を条件Pと条件Gに区別している。条件P (Professional) は、健康な成人が、電磁界は健康に影響を与えたとの知識を有し、必要があれば電磁界から逃避することが可能で、1日のうち限られた時間だけ曝されるという条件である。職業人等がこの条件に該当する。これに対して、一般人は条件G (General Public) に該当し、小児、老人、弱者、病者等も含む。一般人は電磁界に曝されているという認識もなく、1日中曝され続ける恐れもある。

熱作用を評価する尺度は全身平均 SAR である。全身平均 SAR の指針値を安全率をいれて条件Pでは0.4 W/kgと定め、条件Gでは0.08 W/kgと厳しく定めている。条件Pおよび条件Gの電磁界強度については表2(a)、(b)および表3(a)、(b)に各々示された通りである。

表1 電波防護指針に定められた電界強度と電力密度の比較

	周波数 f	電界強度の実効値 (V/m)	日本の電力密度の実効値 (mW/cm ²)	ANSI の電力密度の実効値 (mW/cm ²)
職業人の場合	10 kHz- 30 kHz	614		
	30 kHz- 3 MHz	614	100	100
	3 MHz- 30 MHz	1824/f (MHz) (614-61.4)	900/f ²	900/f ²
	30 MHz-300 MHz	61.4	1.0	1.0
	300 MHz-1.5 GHz	3.54√f (MHz) (61.4-137)	f (MHz)/300 (1-5)	f (MHz)/300 (1-5)
	1.5 GHz-300 GHz	137	5.0	5.0
一般人の場合	10 kHz- 30 kHz	275		
	30 kHz- 3 MHz	275		
	3 MHz- 30 MHz	824/f (MHz) (275-27.5)		
	30 MHz-300 MHz	27.5		
	300 MHz-1.5 GHz	1.585√f (MHz) (27.5-61.4)		
	1.5 GHz-300 GHz	61.4		

4.8 電磁界強度指針と補助指針

生体における SAR (W/kg) の実測はきわめて難しいのに対し、電界強度 E (V/m)、磁界強度 H (A/m) の実測は容易で慣用的である。各国の基準は、対象地点に人体が存在しないときの電界強度指針値、磁界強度指針値（併せて電磁界強度指針値という）を与えている。

遠方にある放送局からの電波（電磁界）に大地上に立つ人体が曝される場合（理想モデルとする）において全身 SAR の指針値を 0.4 W/kg （条件 P）と定めれば、対象地点に人体が存在しないときの電界強度および磁界強度が周波数の関数として計算される。この値を電磁界強度指針値と定める。言い換えれば、人体が存在しないときに対象地点の電磁界強度を測り、この測定値が電磁界強度指針値に等しいときは、もしそこに人体を持ち込むならば、その全身平均 SAR が 0.4 W/kg になるというわけである。

しかし近傍にある機器から発生する電磁界に従事者が曝される場合（実際モデルと略す）には、人体（従事者）が存在しないときに対象地点の電磁界強度を測り、この測定値が電磁界強度指針値に等しいときは、もしそこに

人体を持ち込むならば、その全身平均 SAR は 0.4 W/kg を下回ることが知られている。このことは、実際モデルにおいては、全身平均 SAR が 0.4 W/kg に達するまでは、人体の占めると考えられる空間についての部分的には上記の電磁界強度指針値を超えて電磁界強度の測定値が高くなっていても良いことを意味する。

わが国の電波防護指針は電磁界強度指針と補助指針とからなる。電磁界強度指針は、周波数 10 kHz から 300 GHz に至る領域について、上記のように熱作用を対象とした電磁界強度指針値を式の形で与えた表 2(a)、表 3(a) と、周波数 10 kHz から 100 kHz に至る領域についての刺激作用のうち内因性電流の作用に影響を与える電流の誘起を対象とした電磁界強度指針を与えた表 2(b)、表 3(b) よりなる。これらの表より求められる周波数に対する条件 P における電界強度指針および磁界強度指針に関するグラフをそれぞれ図 5(a)、(b) に示し、さらに条件 G における電界強度指針および磁界強度指針に関するグラフをそれぞれ図 6(a)、(b) に示す。

また、電磁界強度指針ではヒトへの均一曝露を想定しているため、不均一・局所曝露に対しては大変厳しいも

表 2(a) 条件 P の電磁界強度（平均時間 6 分間）の指針値

周波数 f [MHz]	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm ²]
0.01~0.03	614	163	
0.03~3	614	$4.9/f$ (163~1.63)	
3~30	$1842/f$ (614~61.4)	$4.9/f$ (1.63~0.163)	
30~300	61.4	0.163	1
300~1500	$3.54 f^{1/2}$ (61.4~137)	$f^{1/2}/106$ (0.163~0.365)	$f/300$ (1~5)
1500~300000	137	0.365	5

表 2(b) 条件 P の低周波領域における（平均時間 < 1 秒）の指針値

周波数 f [MHz]	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]
0.01~0.1	2000	163

注 1：接触ハザードが防止されていない場合の電界強度の実効値は、 15 MHz 以下の周波数では 137 V/m 以下（平均時間 < 1 秒）でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表 2(a) および表 2(b) の指針値を下回るときは、補助指針 (2) を適用することができる。

注 2：人体の非接地条件を満たさない場合の電界強度の実効値（平均時間 6 分間）は、 3 MHz から 30 MHz までの周波数では $3200 f \text{ [MHz]}^{-3/2} \text{ V/m}$ （すなわち $614 \sim 20 \text{ V/m}$ ）、 30 MHz から 100 MHz までの周波数では 20 V/m 、 100 MHz から 300 MHz までの周波数では $0.2 f \text{ [MHz]} \text{ V/m}$ （すなわち $20 \sim 61.4 \text{ V/m}$ ）以下でなければならない。ただし、これを満たさない場合であって、表 2(a) の指針値を下回るときは補助指針 (3) を適用することができる。

注 3：表 2(a) に示した平均時間内において、電界強度または磁界強度が変化する場合は平均時間内で実効値を自乗平均平方根した値を用い、電力密度が変化する場合に平均時間内の平均値を用いる。

注 4：電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は、電界強度および磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め、電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

表 3(a) 条件 G の電磁界強度 (平均時間 6 分間) の指針値

周波数 f [MHz]	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]	電力密度 S [mW/cm ²]
0.01~0.03	275	72.8	
0.03~3	275	2.18/ f (72.8~0.728)	
3~30	824/ f (275~27.5)	2.18/ f (0.728~0.0728)	
30~300	27.5	0.0728	0.2
300~1500	1.585 $f^{1/2}$ (27.5~61.4)	$f^{1/2}/237.8$ (0.0728~0.163)	$f/1500$ (0.2~1)
1500~300000	61.4	0.163	1

表 3(b) 条件 G の低周波領域における電磁界強度 (平均時間 < 1 秒) の指針値

周波数 f [MHz]	電界強度の実効値 E [V/m]	磁界強度の実効値 H [A/m]
0.01~0.1	894	72.8

- 注 1: 接触ハザードが防止されていない場合の電界強度の実効値は, 15 MHz 以下の周波数では 61.4 V/m 以下 (平均時間 < 1 秒) でなければならない。ただし, これを満たさない場合であって, 表 3(a) および表 3(b) の指針値を下回るときは, 補助指針 (2) を適用することができる。
- 注 2: 人体の非接地条件を満たさない場合の電界強度の実効値 (平均時間 6 分間) は, 3 MHz から 30 MHz までの周波数では $1430 f$ [MHz]^{-3/2} V/m (すなわち 275~9 V/m), 30 MHz から 100 MHz までの周波数では 9 V/m, 100 MHz から 300 MHz までの周波数では $0.09 f$ [MHz] V/m (すなわち 9~27 V/m) 以下でなければならない。ただし, これを満たさない場合であって, 表 3(a) の指針値を下回るときは補助指針 (3) を適用することができる。
- 注 3: 表 3(a) に示した平均時間内において, 電界強度または磁界強度が変化する場合に平均時間内で実効値を自乗平均平方根した値を用い, 電力密度が変化する場合は平均時間内での平均値を用いる。
- 注 4: 電磁界が指針値に対して無視できないレベルの複数の周波数成分からなる場合は, 電界強度および磁界強度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の自乗和を求め, 電力密度に関しては各周波数成分の指針値に対する割合の和を求める。これらの総和が 1 を超えてはならない。

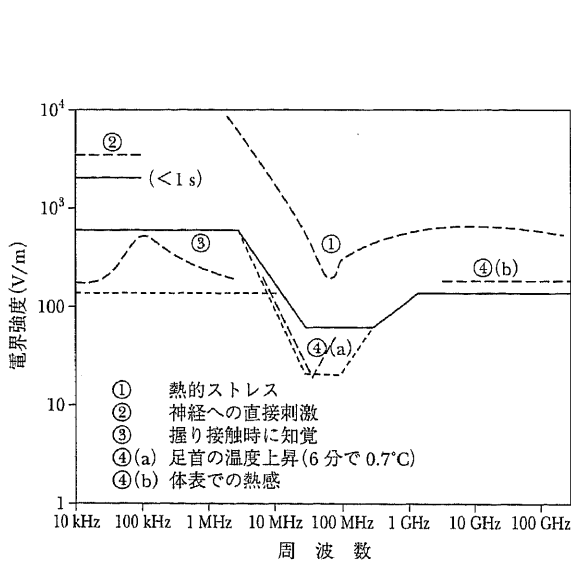


図 5(a) 電界強度指針 (条件 P)¹⁶⁾

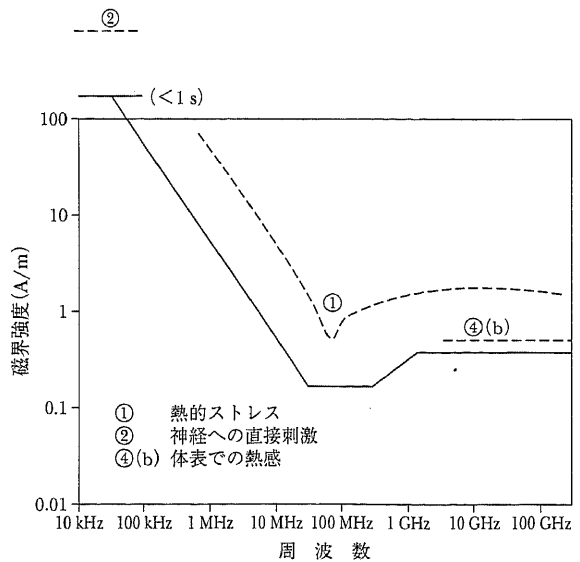


図 5(b) 磁界強度指針 (条件 P)¹⁶⁾

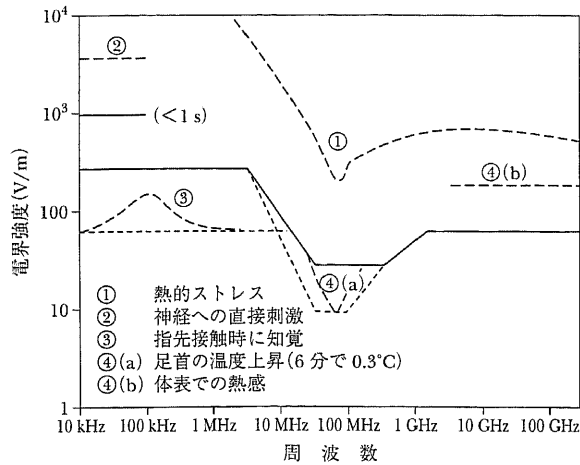


図 6(a) 電界強度指針 (条件 G)¹⁶⁾

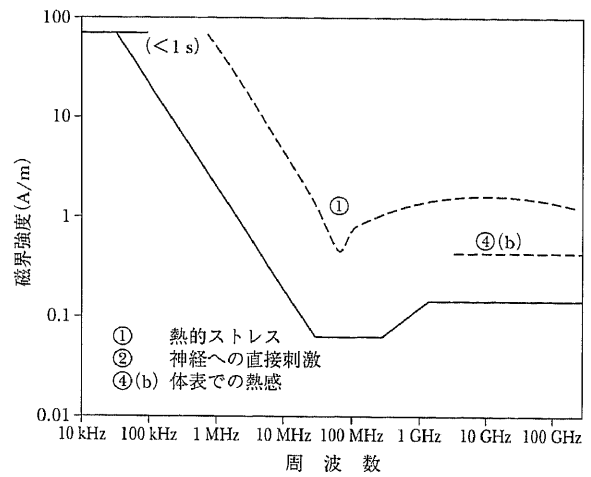


図 6(b) 磁界強度指針 (条件 G)¹⁶⁾

表 4 補助指針(1): 不均一または局所的に曝される場合

	① 10 kHz～300 MHz～	② 300 MHz～1 GHz	③ 1 GHz～3 GHz	④ 3 GHz～300 GHz
電磁界強度の空間的平均値	(a) 条件 P: 付表 2 の電磁界強度指針値以下 (注 1 から注 4 も適用) 条件 G: 付表 3 の電磁界強度指針値以下 (注 1 から注 4 も適用)			
電磁界強度の空間的最大値 (注 3 および注 4 適用)	(b) 四肢以外: 20 mW/cm ²		(b) 体裁: 条件 P: 50 mW/cm ² 条件 G: 10 mW/cm ²	
			(c) 頭部: 10 mW/cm ²	(c) 眼 10 mW/cm ²
適用する空間	電磁放射源, 金属物体から 20 cm 以上離れた人体の占める空間		電磁放射源, 金属物体から 10 cm 以上離れた人体の占める空間	
平均時間	6 分間			

のとなっている。また、接触電流や足首誘導電流を防ぐため、電界に対して必要以上に厳しい制約を課している可能性がある。また、低電力機器は電磁界を測定するより電力で制限するのが利用者にとって分かりやすい。これらの個々の状況に対してきめ細かくチェックするのが補助指針である。具体的な数値等を表 4 から表 7 に示す。

表 5 補助指針(2): 接触電流

周波数 f [kHz]	接触電流/[mA]		平均時間
	条件 P	条件 G	
10～100	f	$0.45f$	<1 秒
100～15000	100	45	<1 秒

郵政省電気通信技術審議会答申「電波防護指針」は「指針値」に関する条文ともいうべきものである。指針には記述はないものの、指針値には安全率がいっており、

表 6 補助指針(3): 足首誘導電流

周波数 f [MHz]	足首誘導電流/[mA] (片足当り)		平均時間
	条件 P	条件 G	
3～200	100	45	6

表 7 補助指針(4): 低電力放射源

周波数 f [MHz]	定格出力 P [W]
0.1～3000	7

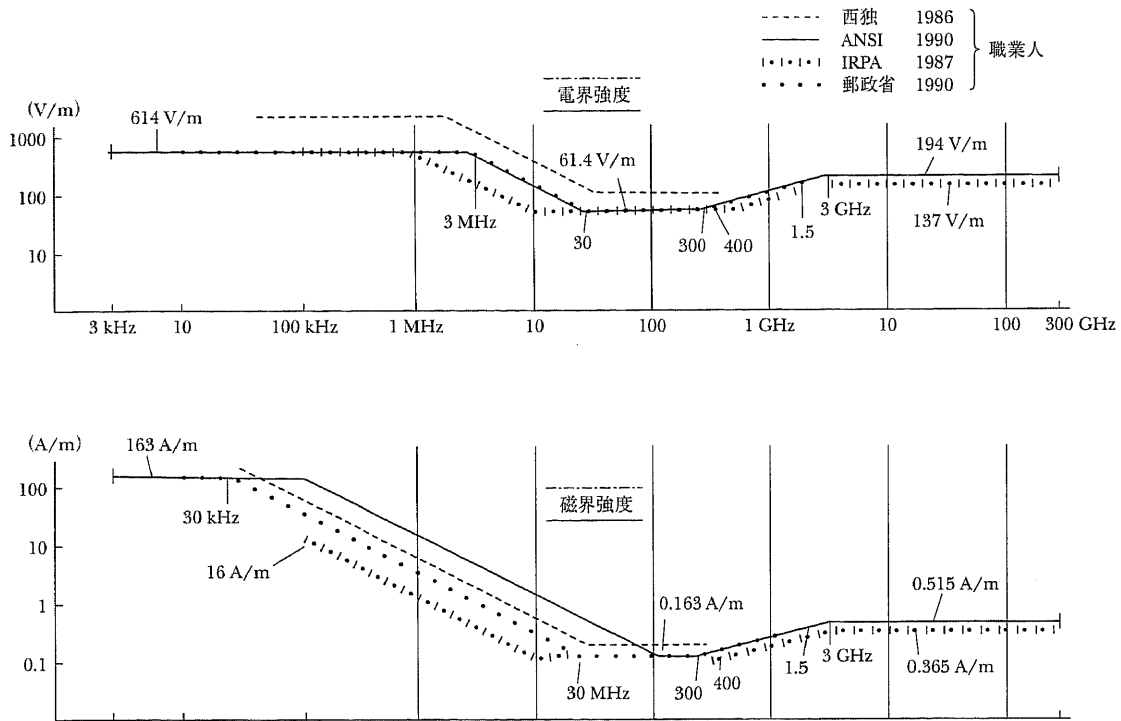


図7 各基準における電界および磁界強度の指針値の違い¹⁷⁾

表8 8 MHz および2450 MHz における各基準の電界強度, 磁界強度の指針値¹⁷⁾

周波数	8 MHz		2450 MHz	
	E [V/m]	H [A/m]	E [V/m]	H [A/m]
西独	375	0.938	100	0.24
ANSI	230	2.04	175	0.467
IRPA	76.8	0.2	137	0.36
郵政省	230	0.613	137	0.365

各国の指針値には大きい幅があることから、電磁界の測定値が電磁界強度指針値程度であれば安全である（健康に影響を与えない）と考えることは妥当であろう。各国の指針値の隔たりについて図7に示すが、例えば8 MHz および2450 MHz について、西独、ANSI、IRPA、郵政省の電界強度 E、磁界強度 H の指針値を示すと表8 のようになる。例えば8 MHz では、E についてはANSI の指針値はIRPA の3倍、H については10倍にもなっている¹⁷⁾。

5. 今後の動向

以上述べてきたように、現在の各国の基準は、熱作用を主な対象にし、低い周波数領域の一部に刺激作用を盛り込むことにより、電磁界強度の安全指針値を決定している。このことは電磁界の非熱的影響が細胞レベルで必

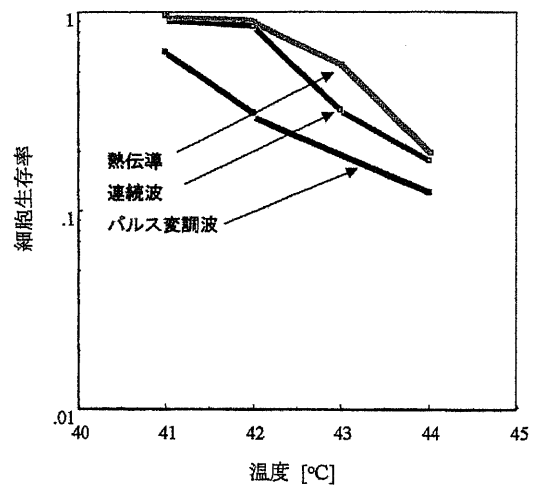


図8 30分加熱時の細胞生存率比較
(連続波: 430 MHz, パルス変調波: 搬送周波数450 MHz, デューティー比 1.5%, 熱伝導: 恒温槽)

ずしも明確になっていないことも意味する。また、100 MHz 以上の高い周波数においては、6分間の平均をとっているために変調波の波形による影響の違い等は表面に出てこない。図8に示すように、細胞の生存率が加熱方法によって異なるという報告も行われている^[20]。このような意味では、特にピーク電力が大きいパルス振幅変調された電波の影響を平均電力が等しい連続波と同様

に考察して良いのか等は今後検討を要する課題となろう。また、厳密には生体組織の誘電率特性には温度依存性があるのであるから、SAR分布も組織の温度に依存して変化する^[21]。いたずらに防護指針を複雑にすることは避けなければならないが、より信頼性の高い防護指針を検討するための研究も必要とされる。これらの検討をバックアップするためのシミュレーション技術、生体等価モデル（ファントムモデル）の開発^[22]、より簡易で精度の高い無指向性電磁界センサーの開発等は今後残された研究課題になるであろう。無線通信技術、各種センサー技術の益々の進歩に伴い、ヒトへの電磁界曝露の機会は増加の一步を辿っている。この分野に対し、より多くの技術者が興味を持ち、貢献することが今後益々期待される。

参考文献

- [1] 多気昌生, 根本幾, “電磁界の影響とその細胞工学への応用”, 電学誌, Vol. 115, No. 5, pp. 289-292, 1995.
- [2] J. Bernhardt, “The direct influence of electromagnetic fields on nerve and muscle cells of man within frequency range of 1 Hz to 30 MHz”, *Rad. and Environm. Biophys.*, 16, pp. 309-323, 1979.
- [3] C. C. Johnson and A. W. Guy, “Nonionizing electromagnetic wave effects in biological materials and systems,” *Proc. of the IEEE*, vol. 60, no. 6, pp. 692-718, 1972.
- [4] M. A. Stuchly and S. S. Stuchly, “Dielectric properties of biological substances-Tabulated”, *J. Microwave Power*, vol. 15, no. 1, pp. 19-26, 1989.
- [5] S. M. Bawin and W. R. Adey, “Sensitivity of calcium binding in cerebral tissue to weak environmental electric fields oscillating at low frequency”, *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 73, pp. 1999-2003, 1976.
- [6] C. F. Blackman, S. G. Benane, L. S. Kinney, W. T. Joines and D. E. House, “Effects of ELF fields on calcium-ion efflux from brain tissue in vitro”, *Radiat. Res.*, 92, pp. 510-520, 1982.
- [7] W. R. Adey, “Frequency and power windowing in tissue interactions with weak electromagnetic fields”, *Proc. IEEE*, 68, pp. 119-125, 1980.
- [8] W. T. Joines and C. F. Blackman, “Power density, field intensity, and carrier frequency determinants of RF-energy-induced calcium-ion efflux from brain tissue”, *Bioelectromagnetics*, 1, pp. 271-275, 1980.
- [9] C. F. Blackman, S. G. Benane, D. E. House and W. T. Joines, “Effects of ELF (1-120 Hz) and modulated (50 Hz) RF fields on the efflux of calcium ions from brain tissue in vitro”, *Bioelectromagnetics*, 6, pp. 1-11, 1985.
- [10] S. K. Dutta, A. Subramonian, B. Ghosh and R. Parshad, “Microwave radiation-induced calcium ion efflux from human neuroblastoma cells in culture”, *Bioelectromagnetics*, 5, pp. 71-78, 1984.
- [11] A. P. Stevenson and R. A. Tobey, “Potassium ion influx measurements on cultured chinese hamster cells exposed to 60-Hz electromagnetic fields”, *Bioelectromagnetics*, 6, pp. 189-198, 1985.
- [12] J. R. Hamer, “Effects of low level, low frequency electric fields on human reaction time”, *Communications in Behavioral Biology (Abstract in 5th Int. Biometeorol. Cong.)*, A-2, P. 217, 1968.
- [13] H. L. Konig, “Behavioral changes in human subjects associated with ELF electric fields”, *ELF and VLF Electromagnetic Field Effects* (ed. Persinger, M. A., Plenum Press), pp. 81-99, 1974.
- [14] J. P. Rupilius, “Untersuchungen uber die Wirkung eines elektrischen und magnetischen 50 Hz Wechselfeldes auf den Menschen”, M. D. Dissertation (Leiter: R. Hauf), Albert-Ludwig-Universitat, Freiburg, Germany, 1976.
- [15] R. Hauf, “Influence of 50 Hz alternation electric and magnetic fields on human beings”, *Revue Generale de l'Electricite*, special issue, pp. 31-49, 1976.
- [16] “電磁界の生体効果と計測”, 電気学会高周波電磁界の生体効果に関する計測技術調査専門委員会編, コロナ社, 1995.
- [17] “ハイパーサーミアマニュアル効果的な癌温熱療法を実施するために”, 日本ハイパーサーミア学会監修 松田忠義編集, マグブロス出版, 1991.
- [18] 電気通信技術審議会答申, 諮問第38号 “電波利用における人体の防護指針”, 1990.
- [19] IEEE Standards Coordinating Committee 28: IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz, IEEE C95.1-1991, 1992.
- [20] Y. Nikawa, N. Hoshi, K. Yamamoto and N. Kubota, “Study of Non-Thermal Effects on Cells Using Pulse Modulated Microwaves”, *Medical & Biological Engineering & Computing*, Vol. 35, Supplement Part 1, p. 49, Sept. 1997.
- [21] Y. Nikawa, “Temperature depending SAR distribution in human body during hyperthermia treatment”, *IEICE Trans. Electron.*, vol. E78-C, no. 8, pp. 1063-1070, 1995.
- [22] Y. Nikawa, M. Chino and K. Kikuchi, “Soft and dry phantom modeling material using silicone rubber with carbon fiber”, *IEEE Trans. on Microwave Theory Tech.*, vol. 44, no. 10, pp. 1949-1953, 1996.