

Biological Effects of Electromagnetic Waves

Masao Taki

Department of Electrical Engineering, Tokyo Metropolitan University

(E-mail:taki@eei.metro-u.ac.jp)

FAX:+81-426-77-2763

ABSTRACT Possible health hazard of microwave radiation is a crucial issue in developing SPS with respect to public acceptance of this new technology. This paper describes the current state of scientific knowledge on the biological effects of microwaves.

It has been established that excessive exposures to high frequency electromagnetic fields can cause thermal damage on human body. Current safety guidelines are based on this knowledge. There have been controversies on possible biological effects with some “nonthermal” mechanisms. There is no convincing evidence, however, to support the presence of any health risks derived from such effects so far.

The recent penetration of mobile telephony into daily life stirred up the public concerns on the possible health risks of microwaves from cellular telephones and its base stations. International and national research programs have been organized in many countries to clarify the presence or absence of any health risks due to the exposure to microwaves from mobile telephone systems. New data have been obtained which have been focused on this problem. A number of results have suggested absence of any adverse health effects, especially of carcinogenicity which is the greatest concern of general public. Only one study suggested possible carcinogenicity based on a long term animal study. This study is not regarded as conclusive evidence, however, but as a study that requires replication with more careful design of exposure procedure. A replication study is now ongoing. The current state of knowledge suggests that we should just adhere to the safety guidelines which have been published by national and international authorities.

In spite of the lack of any established evidence of health risks, there are arguments in some countries to adopt “Precautionary Principle” in the protection of human body from exposure to low level electromagnetic fields. It recommends avoidance from unnecessary exposures with minimum cost. This principle has nothing to do with scientific basis. The decision should be made on the basis of politics. It should be noted that such decision requires precise information dissemination on the risk with quantitative basis. It is important that possible exposure to microwaves from SPS is recognized as no unnecessary exposure to achieve public acceptance for this technology.

生体への電磁波の影響

多氣 昌生

東京都立大学工学部電気工学専攻

(E-mail:taki@eei.metro-u.ac.jp)

FAX:+81-426-77-2763

1. はじめに

電磁波による人体の健康への影響については、1940年代から関心が持たれてきた。ジアテルミー療法による副作用から電波が熱的に健康影響を及ぼすことがわかり、軍用の強力なマイクロ波利用機器による健康障害が懸念されたことが契機であった。このような経緯から、米国では、熱作用を基礎にした考察が行われ、 10mW/cm^2 という安全基準が作られた。同じ頃ソビエト連邦では、疫学的な観察に基づき、 $1\ \mu\text{W/cm}^2$ という厳しい基準が設けられた。熱によらない「非熱作用」があるという考えによるものであった。現在では、ソ連の指針値にはあまり信頼できる根拠はないと考えられているが、このギャップの記憶が、今でも電磁波に対する人々の不安感の根底に残っている。

近年の携帯電話の普及にともない、電磁波とくにマイクロ波の健康影響に対する人々の関心が高まっている。世界中で、携帯電話の基地局建設に対する懸念の声が上がっている。

宇宙太陽発電衛星 (SPS) では、マイクロ波で地上へ送電を行う計画である。その場合、健康影響問題に関して携帯電話以上の反響が予想される。1970年代に実施された、SPSによる環境へのインパクトに関する2つの調査結果では、いずれもマイクロ波による健康影響が問題の筆頭に挙げられた⁽¹⁾。パブリックアクセプタンスが深刻な問題となることは明らかである。

本稿では、このような観点から、SPSで利用されるマイクロ波の人体影響についての知識の現状と取り組みを概説する⁽²⁾。

2. 高周波電磁界の生体影響

2.1 熱作用

哺乳動物の体内は 37°C 付近の一定の温度環境に維持されている。体温を一定に保つには、エネルギーの収支が平衡しなければならない。電磁界が外界からのエネルギー流入をもたらすとき、代謝熱に加えて電磁界で生じた熱も外界に放散しなければならない。したがって、高周波電磁界は人体の熱調節に影響する。

体内での熱発生の尺度として比吸収率(Specific Absorption Rate, SAR [W/kg])が用いられる。SARは、単位時間に単位質量の組織に吸収されるエネルギーである。人体の代謝による熱の発生と電波の吸収で発生する熱が同程度になれば何らかの変化が現れる。安静時の代謝量は $1\ \text{W/kg}$ 程度である。軽作業では $2.5\ \text{W/kg}$ 、激しい運動では $10\ \text{W/kg}$ の代謝熱が発生する。これらより、全身平均SARが数 W/kg になれば、血流の増加、発汗や呼吸数の増加などによる熱調節が必要になる。長時間の曝露では、熱の蓄積により深部体温が上昇する。外部の熱源によって体温がだいたい 1°C 上昇するとき、健康への障害の恐れがある。 $2 - 3\ \text{W/kg}$ の全身平均SARでこのような体温上昇が生じると見積もられている。

体温が上昇するとさまざまな生体影響が生じる。その影響は、温熱生理学の分野でよく研究されている。

2.1.2 局所の温度上昇

体の一部分が電波にさらされると、そこが集中的に加温される。組織が 50°C 程度になると短時間でも熱傷になる。 44°C 程度でも長時間ではいわゆる低温やけどになる。眼

が約 43℃になると白内障になる。局所の熱の発生率は局所 SAR で表される。発生した熱は血流で運ばれ拡散するので、温度上昇は局所の SAR だけでは決まらず、血液の循環にも依存する。循環量は身体の部位によって異なり、また体温によって複雑に変化するため、温度上昇を厳密に見積もることは難しい。

ウサギを実験動物として用いて白内障の閾値を調べた実験では、眼の局所 SAR が 138W/kg 以上で 20 分間以上の曝露を受けた場合に白内障が発生し、これ以下の強度×時間では影響が見られなかった。また、ボランティアによる実験から、手足だけを加温したときに 20W/kg の局所 SAR では組織温度が 40℃を超えることはないと推定されている。

2.2. 人体での電力吸収特性

高周波電磁界による人体での電力吸収は周波数に依存する。生体組織は損失のある誘電体とみなすことができる。したがって、表皮効果のために、周波数とともにエネルギーが組織深部へ侵入しにくくなる。入射した平面波電磁界の振幅が e^{-1} になる深さを侵入深さという。2.45GHz における高含水組織への侵入深さは 2cm 程度、300GHz では 1mm 程度となる。数 GHz 以上の周波数では侵入深さが小さくなるため、高周波電磁界が人体に入射しても体表面付近でほとんどが吸収される。このため、人体とのカップリングは体表付近に限られる。したがって、体表で温熱感を生じない程度であれば、深部の重要臓器に影響及ぼす恐れは考えにくい。ミリ波の生体作用は、赤外線による生体作用の延長として考えることができる。

2.3 非熱的作用

熱以外にも電波の生体作用が存在するという考えは昔からある。信頼性の乏しい研究報告も多いが、科学的に説明されている現象もある。

ピーク電力の大きなマイクロ波パルスを頭に当てると、平均電力が低くても音が聞こえる現象が古くから知られている。これをマイクロ波聴覚効果という⁽³⁾。パルス波のエネルギーが頭部で吸収されたとき、絶対値はわずかでも、急激な温度上昇が生じて組織が熱膨張し、弾性波が発生する。これが骨伝導のように直接に聴覚器官に伝わって知覚される現象と説明されている。実験的にもこのメカニズムを裏付ける結果があり、解析的にもこの解釈が妥当であることが示されている⁽⁴⁾。発生する弾性波のエネルギーは小さいので、可聴レベル程度では健康への影響はない⁽⁵⁾。

3. 防護指針

わが国を含めて、世界の多くの国で高周波電磁界についての防護指針が示されている⁽⁶⁾⁽⁸⁾。防護指針の根拠は、熱作用のしきい値による。非熱作用が無視されているのではなく、熱作用の起きないレベルでは、非熱的な作用で健康に悪影響が生じる根拠が見つかっていないためである。但し、パルスマイクロ波に対して、マイクロ波聴覚効果が生じない条件を取り入れている防護指針もある。

SPS で利用される可能性のあるマイクロ波領域（数 GHz 以上）に関する防護指針値を表 1 に示す。

表 1 防護指針のマイクロ波での指針値（公衆の曝露の場合）

防護指針	適用周波数範囲	電力密度の防護指針値
ICNIRP(1998) 欧州勧告(1999)	2 – 300GHz	1 mW/cm ²
ANSI/IEEE (1999)	3 – 15 GHz 15 – 300 GHz	f/1.5 mW/cm ² 10 mW/cm ²
郵政省電波防護指針 (1990/1997)	1.5 – 300 GHz	1 mW/cm ²

4. 最近の研究と動向

以上のように、高周波電磁界の生体作用についての研究には 50 年以上の歴史があり、多くの知識がある。それでも近年、携帯電話の普及による携帯電話マイクロ波の健康影響への社会的な関心に後押しされて、高周波電磁界の生体影響の研究が盛んに行われている。

社会の関心は、がんとの関連に集まる。高周波電磁界は遺伝子を傷つけないと考えられているので、がんを発生させること（イニシエーション）より、イニシエーションを受けた細胞を悪性腫瘍化させる（プロモーション）作用を持つかどうか重要であると指摘されている。このため、プロモーション作用についての多くの実験が行われている。

ENU という化学物質でイニシエートされたラットの頭部に、携帯電話と同じ波形の高周波電磁界を集中的に照射したとき、脳腫瘍をプロモート（促進）されるかどうかを調べるための 2 年間にわたる長期実験が米国で行われた。800MHz のアナログ方式の FM 変調波と、米国の IS54 規格のデジタル変調波⁽⁹⁾でそれぞれ実験が行われた。それぞれ計 520 匹（6 群）、計 236 匹（4 群）のラットを用いた大規模な実験であり、信頼性の高い曝露条件のもとで行われた実験である。いずれの実験でも脳腫瘍の促進は示されなかった。

オーストラリアで、遺伝子操作によりイニシエートされたマウス(E μ -Pim1 マウス)計 201 匹(2 群)に、18 ヶ月間にわたり 800MHz 帯の GSM 規格の電波を全身に照射し、リンパ腫の促進を調べる実験が行われた。その結果、高周波電磁界を照射したマウスにリンパ腫が増加する傾向が示唆された⁽¹⁰⁾。しかし、曝露条件がよく管理されていないこと、本来は 10 ヶ月以下の短期間で発がん性試験を行うために開発された E μ -Pim1 マウスに 18 ヶ月の試験を行うことの妥当性などの問題点が指摘された。現在オーストラリアで、より精度の高い曝露装置を用いて追試実験が行われている。また、欧州でも近く追試実験が開始される予定である。

わが国でも、DEN という化学物質でイニシエートしたラットの肝臓がんの促進についての実験が行われた⁽¹¹⁾⁽¹²⁾。わが国の PDC 方式の波形を用い、900MHz 帯と 1.5GHz 帯のそれぞれで計 2 回の実験が行われた。動物数はそれぞれ計 120 匹（3 群）で、肝臓に集中して、90 分/日、6 週間曝露した。実験結果は、いずれもがんの促進が認められなかった。

これらの実験ですぐに結論を出すことはできないが、高周波電磁界を浴びても、極端な影響がないことが確かめられた、と理解してよさそうである。

この他にも、多くの研究が行われている⁽¹³⁾。シアトルのワシントン大学のライ博士らは、電波をあてたラットの脳で DNA の切断が増加すると報告した。しかし、別の 2 つの独立な研究グループが追試をしてもこの現象は再現されなかった。

ライ博士はまた、電波をあてたネズミでは迷路学習の能力が低下するという報告をしている。しかし、英国の研究グループが追試を行った結果、やはり再現されなかった。ライ博士は、レーダーで使われている、パルス幅 2ms のピーク電力の大きなパルス波を用いた。英国のグループは、平均電力は同程度だが、GSM 方式の携帯電話の波形を

模擬したパルス幅 580ms の波形を用いた。ライ博士の用いた波形だと、ラットにマイクロ波聴覚効果が生じていた可能性がある。聴覚的なストレスが学習を妨げた可能性が考えられる。

電磁波の影響が新たに見つかったというニュースがたびたび伝えられる。しかし、今までに科学的に誰もが認めることのできるような信頼性の高い結果はない。追試を行っても、実験に何らかの問題点があったことがわかったり、偶然のばらつきをデータとして公表したと考えざるを得ない例も多い。研究者は膨大な手間と研究費を費やして健康影響の可能性を追求している。このような努力が社会にあまり理解されていないのはもったいない。

5. むすび

マイクロ波帯の連続波がこれまでに確立されている生体影響と著しく異なる生体作用を示すことを示唆する信頼できる研究結果はない。但し、Repacholiらによる Pim1 マウスの実験のみ健康影響の可能性を示唆しており、指摘されている問題点を考慮した追試実験の結果を待つ必要がある。現状の認識としては、防護指針のレベルを守れば、健康影響に関する問題はないと考えられる。

近年、不確かなリスクに対する態度として「慎重な回避」(Prudent Avoidance)あるいは、「用心の原則」(Precautionary Principle、以下 PP と略記)と呼ばれる考え方が盛んに議論されている。もともとの PP の意味は、目的地に向かう 2 つのルートがある場合、それらが等距離なら安全な方のルートを選ぶ、というものである。より安全なルートが遠回りであれば、そちらを通ることを強制できない。近道を通る利益がどの程度であり、そのリスクがどの程度か、適切な情報を示して判断すべき問題である。大切なのはリスクについての適切な情報の収集と伝達である。PP は、適切な情報に基づく自発的な判断で成立する。

欧州のいくつかの国では、電磁界の問題に PP に準じた法的規制を開始している。スイスでは欧州勧告(すなわち ICNIRP 指針)の 100 分の 1 以下の SAR(電界強度では、10 分の 1)で規制される動きである。イタリアではさらに厳しい規制が行われている。これらの規制は科学的な根拠に基づくものではない。携帯電話の基地局などは、この程度の値を十分守れるので、政策的に余分の安全率を導入したものである。科学とは別の次元で論じなければならない問題であることに注意が必要である。

PP に基づく規制は、政策の問題であり、「遠回り」のコスト負担に対し大多数の支持があって初めて成り立つ。その判断に適切な情報が必要であることは前に述べたとおりであるが、電磁界問題については、そのリスクの情報が適切に伝えられているとはいえない。この点において、多くの科学者が電磁界の規制に PP を導入する動きに批判的である。拙速に電磁界の規制に PP を導入することには、著者自身も賛成できないと考えている。

PP の考えを採用するにしても、「不要な曝露」を制限しようということであり、それが「必要」であれば制限の対象とならない。今後 SPS の開発において、マイクロ波で地上に送電することが「必要である」と認識されるかどうか、パブリックアクセプタンスの成否に関わる。

文献

- (1) J.M. Osepchuk, "Environmental issues for the SPS", Space Power, 6, pp.165-173 (1986).
- (2) 斎藤正男、多氣昌生:「電波の生体影響と健康リスク」電子情報通信学会誌, Vol.82, No.6, pp.572-579(1999).
- (3) J.C.Lin: "Auditory perception of pulsed microwave radiation", in O.P. Gandhi(ed.), "Biological Effects and Medical Applications of Electromagnetic Energy", Prentice Hall, New Jersey (1990).

- (4) Y.Watanabe, T.Tanaka, M.Taki, S. Watanabe: "Numerical analysis of microwave hearing", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.(submitted).
- (5) K.R. Foster, "Electromagnetic field effects and mechanisms", IEEE Eng. Med. Biol. Mag., Vol.15, No.4, pp.50-56 (1996).
- (6) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields. Health Physics 74:494-522 (1998).
- (7) IEEE Standards Coordinating Committee 28: Standard for safety levels with respect to human exposure to radiofrequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz (ANSI/IEEE C95.1-1999), IEEE, New York (1999).
- (8) 電気通信技術審議会、諮問第 38 号答申: 人体に対する電波防護指針, 平成 2 年 6 月.
- (9) W. R. Adey, 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, pp.293-302 (1999).
- (10) M.H. Repacholi, A. Basten, V. Gebiski, D. Noonan, J. Finni, A.W. Harris, "Lymphomas in Em-*Pim1* transgenic mice exposed to pulsed 900 MHz electromagnetic fields", Radiat. Res., 147, 631-640 (1997).
- (11) K. Imaida, M. Taki, T.Yamaguchi, T. Ito, S. Watanabe, K. wake, A. Aimoto, Y. Kamimura, N. Ito, T. Shirai, "Lack of promoting effects of the electromagnetic near-field used for cellular phones (929.2 MHz) on rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay, Carcinogenesis, 19, pp.311-314 (1998).
- (12) K. Imaida, M. Taki, S. Watanabe, Y. Kamimura, T. Ito, T. Yamaguchi, N. Ito, T. Shirai, "The 1.5GHz electromagnetic near-field used for cellular phones does not promote rat liver carcinogenesis in a medium-term liver bioassay, Jpn. J. Cancer Res., 89, 995-1002(1998).
- (13) 携帯電話の健康影響については、J.E Moulder による FAQ, <http://iago.lib.mcw.edu/gcrc/cop/cell-phone-health-FAQ/toc.html> の情報が詳しい。