

高周波電磁界と健康

増田宏

Laboratoire IMS-Site ENSCPB, Universite de Bordeaux 1

Health Effects of Radio-Frequency Electromagnetic Fields

Hiroshi MASUDA

Laboratoire IMS-Site ENSCPB, Universite de Bordeaux 1

抄録

携帯電話などから生じる高周波電磁界に曝露されることで有害な健康影響が生じるのではないかと懸念されている。高周波電磁界曝露の及ぼす生体影響に関するここ10年間の研究では、脳血管が特異的に有する血液脳関門機能が重要な研究対象として位置づけられてきた。血液脳関門機能は神経細胞に対して毒性を示すアルブミンなど複数の分子の脳実質内流入を厳密に調節し脳の恒常性を維持しており、この関門の機能不全が脳神経系に障害をもたらすことが知られている。Salfordらは、高周波の電波を2時間曝露したラット脳実質内に血中アルブミンの漏出を認め、電波曝露が血液脳関門機能に障害をもたらすことを示唆した。さらに、この現象が国際非電離放射線防護委員会 (ICNIRP) の定めている一般環境における電波曝露量の指針値 (全身平均 SAR 0.08 W/kg) よりも低い強度で生じることも示した。このため、この報告が発表されて以来、複数の研究グループにより再現性を確かめる実験が *in vivo* および *in vitro* の系で実施されたが、そのほとんどは電波曝露が血液脳関門に影響を及ぼさないという結果であった。しかしながら、Salfordらの知見の再現性については今でも論議が続いている。彼らと同じ方法を用いた実験が事実上不可能であることがその要因の一つと考えられる。これまで確認実験を実施した多くの研究者は彼らの実験方法には不明な点が多いことを認識しているのである。

キーワード： 電磁波, 血液脳関門 (BBB), 脳機能障害, 局所吸収率

Abstract

There is some concern that the exposure to radio-frequency electromagnetic fields (RF-EMF) emitted by cellular phones could cause adverse health effects. One of the most disputed research topics related to the adverse health effects over the past decade was the blood-brain barrier (BBB) function. The BBB function is important for maintenance of brain homeostasis. The strict control of BBB permeability prevents brain tissue from influx of many molecules including albumin which have toxicity to the brain. Therefore, the dysfunction of BBB leads to several brain disorders. Salford et al. reported that albumin leakage sites were found in the rat brain after RF-EMF exposure for 2 hours, suggesting the BBB disruption. In addition, they obtained these results under low exposure intensity conditions at less than 0.08 W/kg of whole-body averaged specific absorption rate (SAR), which is the current basic restriction of whole body exposure to RF-EMF for general environment in the ICNIRP guidelines. Many confirmation studies *in vivo* and *in vitro* have been performed to confirm since Salford's findings. Most of them suggest no effects of RF-EMF exposure on the BBB. However, these investigators recognize that no one can replicate the Salford's studies with the same methodology they used, because their methodology involves much uncertainty. Therefore, there is still considerable disagreement about the Salford's reports.

Keywords: radio-frequency electromagnetic fields, blood-brain barrier, brain disorders, specific absorption rate

1. はじめに

本稿のタイトルである「高周波電磁界と健康」、言い換えれば「電磁波（以下電波とする）の健康に及ぼす影響」を耳にするとすぐに、携帯電話の使用が人体へ悪い影響を及ぼすのではないかと考える人も少なくはないはずである。昨今の携帯電話の国内普及率を考えればある意味当然のことかもしれない。平成18年度に行われた総務省の調査によれば、世帯保有率は86.8%であり、もはや身近なところに携帯電話、すなわち電波が存在していると感じられる時代である。

ところが、この電波であるが、よく考えると携帯電話が登場する以前から既に我々の身のまわりを飛び交っている。ラジオやテレビに代表されるように、電波そのものはもう半世紀以上も前から利用され、長年にわたり日常生活に恩恵をもたらしてくれている。しかし、電波の存在をこれほど身近に感じるようになったのは、やはり先の携帯電話の普及に起因するところが大きいといえる。

では、電波による健康影響に対して人々がここまで不安を抱くようになったのは何故だろうか。おそらく携帯電話の普及にあわせて電波の生体影響に関する研究が注目され、且つその結果が次々と発表されるようになったからであろう。中でも生体に何かしらの障害を与えるという内容の報告については、内容が十分に精査されないままマスコミを通じて世界中に配信される傾向がある。電波は我々の視聴覚や嗅覚では感知できない。つまり、本人が気づかないうちに浴びてしまうものである。これが電波の安全性に対する不安をより一層強めてしまっている原因なのかもしれない。

本稿では、電波と健康影響に関する様々な報告を紹介することは取立て控え、ひとつの事例に絞って詳述する。1992年の発表より現在に至るまで論議の続いている、スウェーデン・ルンド大学の Salford らの研究報告がそれである。この事例は、電波と健康影響に関するテーマが抱えている問題を考える上で、また、電波と健康影響について今後報道されるであろう様々な情報を理解していく上で、参考にして頂けるのではないかと著者は考えている。以下では、Salford らの報告ならびに問題点を具体的に示し、これに対して実施された検証実験データおよび現在の状況について言及してみたい。

2. 血液脳関門と脳障害

Salford らの報告についての理解を助けるために電波影響の評価対象となっている血液脳関門について簡単に説明しておく（図1）。

血液脳関門は脳内の血管に特異的に存在する一種のバリアーである。このバリアーは、脳血管およびその周りに存在する神経細胞（アストロサイト）によって形成されており、血液と脳実質間の物質交換に制限を設けている。例えば、脳以外に存在する末梢血管では容易に透過できる物質

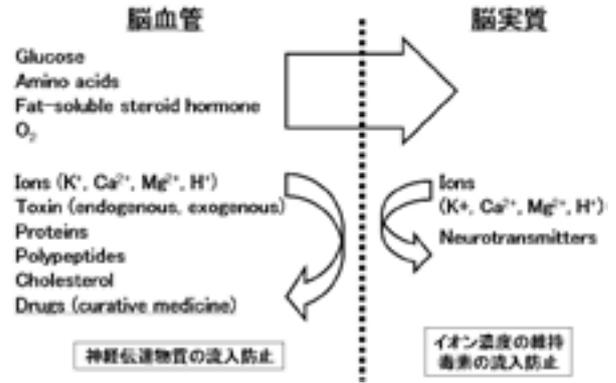


図1 血液脳関門の役割：アルブミンはタンパクの1つであり、血液脳関門が正常であれば脳実質への流入は制限されている。

でも、脳血管においては透過できず脳実質には到達しない。この物質の透過制限のおかげで、血液内での極端なイオン変動や何らかの原因により毒素等が血液内に取り込まれた場合でも、直接脳実質に影響が及ぼされることはない。つまり、脳は血液脳関門により厳重に恒常性が維持されているのである¹⁾。

ところが、この血液脳関門が破綻すると脳には様々な障害が生じる。よく知られているものに脳浮腫がある。これは、血液脳関門が破綻することにより水分子に対する血管透過性が亢進し、血液中の水が脳血管外、すなわち脳実質に異常に溜まることにより生じる疾患である。この症状は感染症等によって関門が破綻された場合に見られる。このように、血液脳関門の破綻は我々の脳に重大な障害を与えるのである^{2,3)}。

3. 血液脳関門に対する電波の影響

高周波電波の照射により血液脳関門の透過性が亢進する結果が示されている。1992年および1994年に相次いで出されたスウェーデン・ルンド大学の Salford らのグループの報告である^{4,5)}。彼らは、欧州の携帯電話で用いられている電波をラットの全身に2時間照射すると、通常は血液脳関門の働きにより血管外に漏出することのない血中アルブミンタンパクが、脳内に漏れ出ていることを示した（図2）。

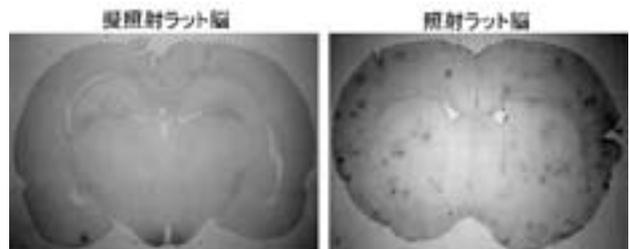


図2 電波を2時間照射した後のラット脳におけるアルブミン免疫染色結果：茶色く染色されている部分がアルブミン陽性である。なお、擬照射ラットの脳底部が茶色いのは、この部分には血液脳関門が存在しないためであり電波照射の有無とは関係ない。（文献5より引用）

さらに彼らは、この血中アルブミン漏出が極めて低レベルの電波照射条件下でも認められることを示した。電波照射強度を全身平均 SAR で $0 \sim 5 \text{ W/kg}$ の間でいくつか定め血中アルブミンレベルを検討した結果、 $0.4 \sim 8 \text{ mW/kg}$ の電波照射においても同様の漏出を認めている。また、2003年発表した報告では、同様の処置を施したラットでは50日後の脳においてもアルブミンが漏出しているデータを示した。

ICNIRP では（我が国においても同様）安全係数を十分に考慮した上で、ヒトへの電波曝露量の一般環境指針値を全身平均 SAR 80 mW/kg と定めている⁶⁾。したがって、Salford らのデータは、この指針値の1割にも満たない強度で血液脳関門に影響が及ぼされることを示したわけである。

前述したように、これはあくまでラットを用いた実験結果である。したがって、直ちにヒトへと外挿出来るものではない。しかし、我が国を含む多くの国が採用している基準値を大きく下回るレベルの電波照射が生体、それも血液脳関門に影響を及ぼすという結果ただただに大変注目されるとともに、電波の脳への影響に関して問題提起される際には、必ずと言ってよいほどこのデータが引き合いに出される。

4. Salford らの報告が抱える問題点

Salford らの結果を読み取るには十分な注意が必要である。前段で示したように結果だけ（特に写真）を示されると、明らかに影響があるように見える。しかし、それ以前に彼らの実験方法には複数の疑問点が存在することを見落としてはならない。

まず、使用している実験動物に関する情報が欠落している。実験に用いているラットの系統は F344 ラットになっているが、雌雄を混合しているばかりでなくその週齢差も非常に大きい。さらにそれらラットの各個体数も示されていない。通常、実験動物を用いた研究を行う場合、性周期に伴うホルモン変動による影響を避けるために雌雄を区別せずに実験を行うことはない。また、本実験では電波照射量が体重により大きく左右されるため、週齢差の大きい動物を同一条件で照射できているかどうか疑問である。

次に電波照射方法に問題がある。彼らは TEM-cell という電波照射箱の中にラットを入れ電波を照射している（図3）。この TEM-cell を用いて電波照射する場合、箱の中のラットの位置や姿勢により電波照射量が大きく変動することが知られている。特に、彼らの実験ではこの箱の中へ同時に2匹のラットを入れて電波照射を行っている。したがって、どちらのラットにどれだけの照射が行われたのかを知ることは一切出来ない。

さらに、提示されている電波照射量についても疑問が残る。彼らが設定した電波照射量 SAR はシミュレーションにより求めたと記載されている。しかし、そのシミュレーション方法については、「いずれどこかで発表する」と示



図3 TEM-cell の全体像：Salford らが使用したものと同一規格。彼らは上下2段の亚克力ボックスそれぞれにラットを配置し電波照射をした。

されたきり、十年以上たった今でも公表されていない。つまり、本実験の根幹とも言える電波照射量について、いったいどのように算出し設定したのかさえ不明確なままなのである。

この他にもいくつか疑問点があるが、以上3点について見ただけでも、本実験結果を捉える上で注意が必要であることがお分かりになるだろう。実は、実験方法に関するこのような不明確さは、次に示すような再現実験を行う際に非常に大きな障壁となる。なぜなら、先行研究と同一条件で再現実験を行うことは事実上不可能だからである。

5. 再現性実験結果

前述したとおり、Salford らの報告に対する再現実験は事実上不可能である。そこで、各国の研究グループは、血液脳関門に及ぼす電波影響の有無を明らかにすることを目的として、それぞれ独自のプロトコルに基づいた確認実験（ここでは敢えて「確認実験：confirmation study」とした）を実施している。以下に、本院で実施した著者らの研究結果も含めて代表的な報告を紹介する。

5. 1. 組織学的検討

釣田らは、Salford らと同じ免疫組織学的手法を用いて、ラットの脳に電波を照射してもアルブミン漏出は認められないことを示した⁷⁾。彼らは、ラットの頭部に局所的に電波照射可能な装置を開発し、シミュレーション結果に基づき SAR も制御した。また、アルブミン漏出の評価方法は Salford らと同じ免疫組織学的手法を用いた。その結果、脳における局所 SAR が 2 W/kg （全身平均 SAR 0.25 W/kg ）の電波照射を4週間にわたり処置しても、脳実質内へのアルブミン漏出は認められなかった。

ちなみに、この研究グループでは、同様の手法を用いて、ラットの脳神経細胞変性や記憶への影響、さらにホルモンに及ぼす影響についても検討したが、いずれの評価対

象においても電波照射の影響を認めていない^{8,9)}。

5. 2. 培養細胞による検討

ドイツの Franke らは、培養細胞を用いた実験を用いて、電波が血液脳関門の透過性に影響を及ぼさないことを示した^{10,11)}。彼らはブタの脳毛細血管から内皮細胞を採取し、細胞培養系において血液脳関門機能を構築した。また、ディッシュ上の培養細胞に電波照射可能な装置も開発し、シミュレーション結果に基づき SAR を設定した。その結果、細胞層平均 SAR 0.3 W/kg を5日間にわたり照射し続けても、構築された血液脳関門を透過するスクロース量に変化は認められなかった。

実は、このグループはこれより前に類似した研究で「血液脳関門透過性に対して影響有り」と報告し、Salford の結果が培養細胞でも確かめられたとして社会的にも取り上げられた。しかし、その後実験方法を精査し再検討した結果、影響がないことを確認したため前言を撤回している。最新の報告ではこのことも明記されている。

5. 3. 直視的観察による検討

著者らは、ラットの脳血管を動物が生きたまま直接観察できる頭窓法を用いて、電波が血液脳関門の透過性に影響を及ぼさないことを急性照射実験（10分間照射）および亜慢性照射実験（1日60分間を4週間）により示した^{12,13)}。ラット頭部に透明な窓を取り付けることで、脳血管網を顕微鏡下で直接観察できる状態にし（図4）¹⁴⁾、静脈内投与した色素が関門を持つ脳血管から漏出するかどうかを観察した。電波照射装置は前述した釣田らと同じものを用い、脳における局所 SAR が急性照射実験では0.6, 2.4, 4.8 W/kg、亜慢性照射実験では2.4 W/kg の電波照射を施した（各全身平均 SAR は局所 SAR の1/3.7）。その結果、いずれの照射条件においても色素が脳血管外に漏出する現象は認められなかった（図5）。

この実験では、血液脳関門機能だけでなく脳が異常をきたすことが分かっている微小循環動態指標、脳血管内白

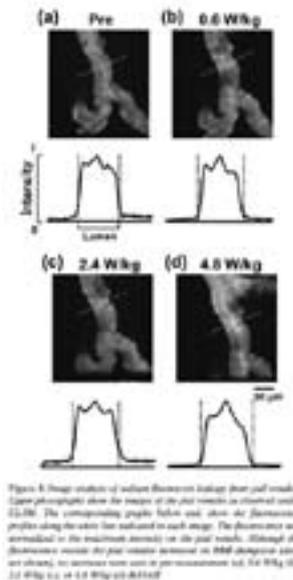


図5 ラット脳細静脈からの蛍光色素の漏出：血液脳関門が破綻すると、血管内を流れている色素（白色）が血管外へと漏出する。この場合、蛍光輝度を示すグラフの波線両側の輝度が上昇するが、いずれの電波照射条件でも輝度上昇は認められない。（文献12より引用）

血球挙動、血管径、血流速度についても合わせて観察した。しかし、これらいずれの指標においても電波照射に起因する変化は認められなかった。以上の結果より、電波は血液脳関門機能を含む脳微小循環動態全体に影響を及ぼさないことが示唆された。

6. 問題の収束に向けて

以上のように、Salford らが報告した「血液脳関門に対する電波影響」は、彼らの実験方法に含まれる問題点からも、またその後の確認実験の結果からも、否定的見解へと収束しつつある。彼らの結果を肯定する報告もあったが、わずかに数グループにすぎず^{15,16)}、それ以外のグループは著者らも含めて血液脳関門への電波影響を認めていない。

しかし、この問題は否定的見解へ収束しつつあるものの已然として燻っている。同一条件で実施される「再現実験」とそうでない「確認実験」との違いに原因があるように思える。確かに、Salford らの発表以降に実施された実験は、著者らのもも含め電波照射方法などが必ずしも彼らのそれと同じではない。つまり、たとえ同じ評価対象について影響が認められないことを示しても、アプローチの方法が異なっているために彼らの結果を直接確かめたことにはならないのである。実験条件の詳細が示されていない先行研究の証明がいかに難しいかを示す典型的な例である。

現在、この問題の解決に向けた共同プロジェクトが日本・フランス・アメリカの3カ国により進められている（資料1）。このプロジェクトでは、実験プロトコルを可能な限り Salford らのそれに合わせ、彼らの実験をそれぞれの国で同時に検証することを目的としている。血液脳関門への電波影響の有無を確認するだけでなく、電波照射レ

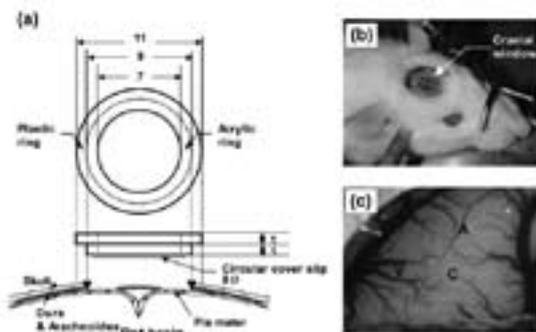


図4 頭窓法によるラット脳表血管網の観察：ラット頭部に埋め込んだ窓を介して脳軟膜微小循環が観察できる。（文献12より引用）

図4 頭窓法によるラット脳表血管網の観察：ラット頭部に埋め込んだ窓を介して脳軟膜微小循環が観察できる。（文献12より引用）



資料1 3カ国共同プロジェクト

ベルなど、Salfordらの報告が抱えていた問題点を浮き彫りにし、どのように解釈するかまで明示される予定である。既に3カ国とも実験は終了しており、まもなく実験に参加した全研究機関より「Salfordらの知見を確認できず」という見解が共同発表されることになっている。血液脳関門に対する電波影響に関する長年の懸念を払拭するためにも、共同プロジェクトに参加した著者らのグループとしても、15年にもわたるこの論争の終焉となることを期待している。

7. 電波と健康に関するその他の知見

本稿では敢えて「血液脳関門」だけを取り上げてきたが、この他にも電波の及ぼす生体影響についての評価対象は多数存在する。最近注目されているのはヒトの認知機能に対して電波影響が認められたとするオランダの研究結果である。現在、国立保健医療科学院を含む各国の研究機関が再現実験を行っているところである。その他にも、脳グリア細胞^{17, 18)}、脳血流や脳波^{19, 20)}、皮膚に対する影響^{21, 22)}、さらに細胞レベルでは、増殖能や染色体異常、突然変異など²³⁾を対象にした調査が進められている。残念ながら結果は「影響あり」と「影響なし」の両者が混在しており、結論を急ぐべき状況ではない。Salfordらの知見に対してもそうであったように、これらについても内容を精査していく必要がある。

8. 課題と展望

実験科学の分野では、肯定的見解すなわち「影響有り」を示すのは比較的容易だが、否定的見解すなわち「影響なし」を示すことはある意味不可能と言ってよい。実験はある特定の条件下でしか実施できず、得られた結果の解釈に

ついても自ずと「特定条件下では」という制約がついてしまうからである。したがって、例えば実験により否定的見解が得られたとしても、その他無数に存在する全ての実験条件を検討したわけではないため、必ずしも「影響なし」とは言い切れないのである。

高周波および低周波を問わず電磁界の健康影響に関して考えるときは、常にこの実験科学による制約がつきまとう。否定的実験結果を提示しても電波の安全性に対する懸念を完全に拭いきれないジレンマがここにある。特に、Salfordらの例で示したように、先行研究が実験条件を明記しないまま肯定的見解を示した場合は、知見の再現性の検証すらできないため、その後否定的見解を述べることはなおのこと難しい。

電波の安全性について解釈する場合は、やはり複数の研究結果を精査し、それらの知見の比較検討が不可欠であるといえよう。現在、高周波電磁界に対する健康影響に関するこういった作業をWHOの国際電磁界プロジェクトが進めている。既に発表されている知見だけでなく現在進行中のものも含め、数多く存在している情報が専門家の手によって整理されることを期待している。

本稿では、電波と健康影響に関して抱えている問題点をより深く理解して頂くために、敢えてSalfordらの報告だけを例にして種々述べさせて頂いた。今後発表される高周波電磁界と健康に関する情報を正しく理解される上で、本稿がその一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) Mayhan WG: Regulation of blood-brain barrier permeability. *Microcirculation* 2001 8:89-104.
- 2) Lehmborg J, Beck J, Baethmann A, Uhl E: Effect of P-selectin inhibition on leukocyte-endothelium interaction and survival after global cerebral ischemia. *J Neurol* 2006 253:357-63.
- 3) Ritter LS, Orozco JA, Coull BM, McDonagh PF, Rosenblum WI: Leukocyte accumulation and hemodynamic changes in the cerebral microcirculation during early reperfusion after stroke. *Stroke* 2000 31:1153-61.
- 4) Persson BR, Salford LG, Brun A, Eberhardt JL, Malmgren L: Increased permeability of the blood-brain barrier induced by magnetic and electromagnetic fields. *Ann N Y Acad Sci* 1992 649:356-8.
- 5) Salford LG, Brun A, Stuesson K, Eberhardt JL, Persson BR: Permeability of the blood-brain barrier induced by 915 MHz electromagnetic radiation, continuous wave and modulated at 8, 16, 50, and 200 Hz. *Microsc Res Tech* 1994 27:535-42.
- 6) 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* 1998 74 :494-522.
- 7) Tsurita G, Nagawa H, Ueno S, Watanabe S, Taki M: Biological and morphological effects on the brain after exposure of rats to a 1439 MHz TDMA field. *Bioelectromagnetics* 2000 21:364-71.
 - 8) Yamaguchi H, Tsurita G, Ueno S, Watanabe S, Wake K, Taki M et al: 1439 MHz pulsed TDMA fields affect performance of rats in a T-maze task only when body temperature is elevated. *Bioelectromagnetics* 2003 24:223-30.
 - 9) Hata K, Yamaguchi H, Tsurita G, Watanabe S, Wake K, Taki M et al: Short term exposure to 1439 MHz pulsed TDMA field does not alter melatonin synthesis in rats. *Bioelectromagnetics* 2005 26:49-53.
 - 10) Franke H, Streckert J, Bitz A, Goeke J, Hansen V, Ringelstein EB et al: Effects of Universal Mobile Telecommunications System (UMTS) Electromagnetic Fields on the Blood-Brain Barrier In Vitro. *Radiat Res* 2005 164:258-69.
 - 11) Franke H, Ringelstein EB, Stogbauer F: Electromagnetic fields (GSM 1800) do not alter blood-brain barrier permeability to sucrose in models in vitro with high barrier tightness. *Bioelectromagnetics* 2005 26 :529-35.
 - 12) Masuda H, Ushiyama A, Hirota S, Wake K, Watanabe S, Yamanaka Y et al: Effects of acute exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain. *In Vivo* 2007 21 :555-62.
 - 13) Masuda H, Ushiyama A, Hirota S, Wake K, Watanabe S, Yamanaka Y et al: Effects of subchronic exposure to a 1439 MHz electromagnetic field on the microcirculatory parameters in rat brain. *In Vivo* 2007 21 :563-70.
 - 14) Masuda H, Ushiyama A, Hirota S, Lawlor GF, Ohkubo C: Long-term observation of pial microcirculatory parameters using an implanted cranial window method in the rat. *In Vivo* 2007 21 :471-9.
 - 15) Aubineau P, Tore F: Head exposure to 900 MHz microwaves induces plasma protein extravasation in the rat brain and dura mater at non-thermal SAR levels. In: *Monografie Workshops; Influences of RF- and Electromagnetic Field Interaction*. Frindrich G (ed.) Forschungsgemeinschaft Funk e. V. Germany, pp. 82-83, 2005.
 - 16) Schirmacher A, Winters S, Fischer S, Goeke J, Galla HJ, Kullnick U et al: Electromagnetic fields (1.8 GHz) increase the permeability to sucrose of the blood-brain barrier in vitro. *Bioelectromagnetics* 2000 21:338-45.
 - 17) Brillaud E, Piotrowski A, de Seze R: Effect of an acute 900MHz GSM exposure on glia in the rat brain: a time-dependent study. *Toxicology* 2007 238 :23-33.
 - 18) Mausset Bonnefont AL, Hirbec H, Bonnefont X, Privat A, Vignon J, de Seze R: Acute exposure to GSM 900-MHz electromagnetic fields induces glial reactivity and biochemical modifications in the rat brain. *Neurobiol Dis* 2004 17 :445-454.
 - 19) Huber R, Treyer V, Schuderer J, Berthold T, Buck A, Kuster N et al: Exposure to pulse-modulated radio frequency electromagnetic fields affects regional cerebral blood flow. *Eur J Neurosci* 2005 21:1000-6.
 - 20) Huber R, Treyer V, Borbely AA, Schuderer J, Gottselig JM, Landolt HP et al: Electromagnetic fields, such as those from mobile phones, alter regional cerebral blood flow and sleep and waking EEG. *J Sleep Res* 2002 11:289-95.
 - 21) Masuda H, Sanchez S, Dulou PE, Haro E, Anane R, Billaudel B et al: Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. I: 2-hour acute exposures. *Int J Radiat Biol* 2006 82 :669-74.
 - 22) Sanchez S, Masuda H, Billaudel B, Haro E, Anane R, Leveque P et al: Effect of GSM-900 and -1800 signals on the skin of hairless rats. II: 12-week chronic exposures. *Int J Radiat Biol* 2006 82 :675-80.
 - 23) 宮越順二：電磁波に対する健康影響評価の現状および国際動向. *保健物理*2005 40: 242-56.