

京都大学全学共通講義 平成21年度前期

科目名：自然の不思議を探る：文系・生命科学系向け現代物理学

担当教員名：吉川 研一（理学研究科 物理学専攻）

村瀬 雅俊（基礎物理学研究所 統計動力学分野）

講義ノート： 村瀬 雅俊 担当分

日時： 毎週木曜日 第2時限

E-mail: [murase@yukawa.kyoto-u.ac.jp](mailto:murase@yukawa.kyoto-u.ac.jp)

Tel: 075-753-7013: Fax: 075-753-7010

第7回 21世紀の環境問題

生命の科学は、生体がその下に横たわる電気と磁気の方に支えられていることを解明した。われわれの身体と脳は、われわれの体内と体外に電磁場を生じさせている。この新しい見地は、われわれの地球環境の電氣的、磁氣的要素と生物とを関連づけて見せてくれたのである。つまり、われわれは地球の自然な磁場のなかで生きているが、一方で、膨大な地球規模の人工的な電磁波のネットワークを作り出している。今日の生命とは、電磁場の中の電磁場、そのまた中の電磁場と見なすことができる。この『クロス・カレント』では、人間の身体の電気と、地球本体の電気の両方が、いかにこの人工の電磁エネルギーの濫用により変質し、損なわれてきたかを明らかにする。さらに、差し迫りつつある破局を回避するために、どのような第一歩を踏み出すべきかを説き明かしたい。

ロバート・ベッカー

電磁波暴露に関してこれまでの物理学では、対象が生きた生体であるか死んだ物質であるかという差異を特に問題としてこなかった。すなわち、電磁波の影響は対象によらず同じように作用すると考えてきた。具体的には、電磁波の影響は単純にエネルギーに比例するという前提のもとで、X線や紫外線による電離作用、およびマイクロ波などの発熱作用しか考えてこなかった（表1）。

<p><b>電離相互作用</b>：原子や分子から電子を奪うことによって、フリーラジカルと呼ばれる反応性の高い化学種が作られる。このフリーラジカルによって、生体分子や細胞に、損傷が作られる。</p>
<p><b>熱的相互作用</b>：現行の被爆制限の根拠は電磁波の熱源としての性質にもとづいている。電磁波被爆の際、そのエネルギーは最終的には熱に変換され、この熱によって引き起こされる温度上昇が、生体に起こる障害の原因と考える。</p>

(表 1) 電離相互作用と熱的相互作用

例えば、極めてエネルギーレベルが高い X 線などの放射線は、生体の内部組織にまで到達し、その組織における正常細胞をがん細胞へと悪性化する。それよりエネルギーレベルが低い紫外線は、生体の表層組織にとどまり、その表層組織における正常細胞をがん化することが理解できる。一方、携帯電話に使用されているマイクロ波に関しては、この周波数帯の電磁波の発熱作用を念頭において、その熱源としての性質に基づいて現行の被爆制限基準値は算出されている。つまり、生体が電磁波によって被爆した際に、エネルギーは最終的に熱に変換されるが、その熱によって引き起こされる温度上昇が、生体における機能的・構造的障害の原因と考えているのである。

ところが、現行の被爆制限基準値以下でも、ペースメーカーなどの医用電子機器の誤作動が起こることから、熱吸収とは無関係な非熱的相互作用の重要性が認識されるようになってきた。一般に、電磁波は吸収後に発生する熱よりも高い自由エネルギー状態にあるために、熱への変換を伴わないこの種の非熱的相互作用が電磁波固有のコヒーレントな特性を伴って働くならば、医用電子機器の場合と同様に生体への影響すら、現行の基準値以下でも起こり得ることになる(表 2)。

<p><b>非熱的相互作用</b>：電磁波は吸収後に発生する熱よりも高い自由エネルギー状態にある。熱への変換を伴わない相互作用により、基準値以下でも影響がある。実際に、医用電子機器(ペースメーカー等)の誤作動は、熱吸収とは無関係に起こる。そのため、現行の被爆制限基準値以下でも誤作動は起こる。</p>
--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

(表 2) 非熱的相互作用

そこで、問題点は次のように指摘できる。

問題点：電子機器が携帯電話等の人工電磁波によって誤作動する

それならば

自然界の生物もさまざまな電磁波の影響を受けているのではないか

ここで、電磁波の生体への影響を考える際には、第一に電磁波の種類（表3；図1 a, b）、第二に影響の内容（表4）、そして第三には両者の様々な組み合わせ（表5）を検討することが必要となる。

自然界の電磁波	人工の電磁波
<ul style="list-style-type: none"><li>・ X線</li><li>・ 紫外線</li> <li>・ 稲妻</li> <li>・ シューマン共振極電磁波</li><li>・ 地球磁場</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>・ マイクロ波（携帯電話）</li><li>・ TV電磁波</li><li>・ FMラジオ波</li><li>・ 短波</li><li>・ AMラジオ波</li><li>・ 送電線などの低周波電磁波</li></ul>

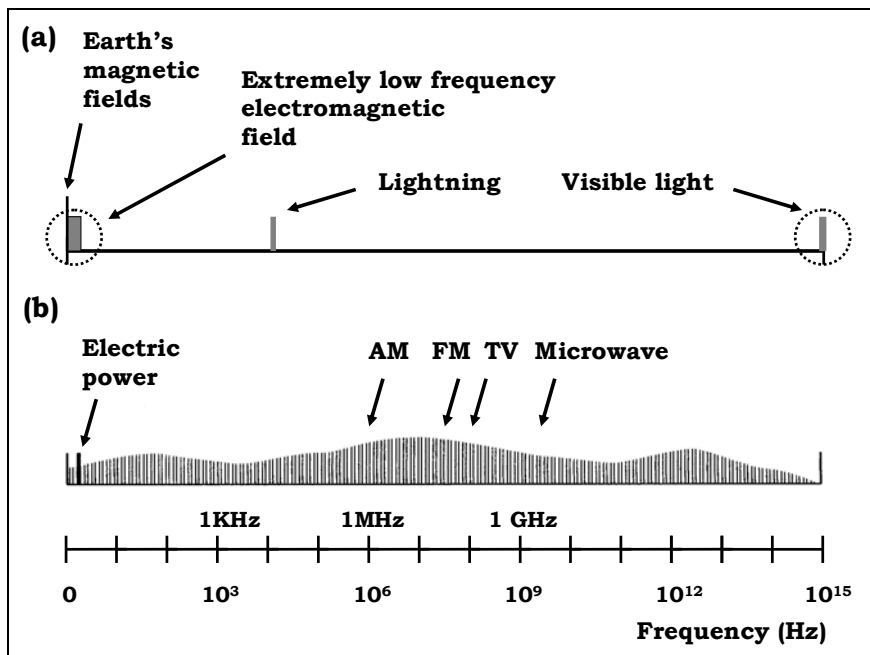
（表3）自然界の電磁波、人工の電磁波とも、高周波から低周波に向かって上から記している。

短期：遺伝子、細胞、個体のレベルにおける機能、行動、認知、学習  
長期：実験動物の発がんや病態、疫学調査（がん、アルツハイマー病）  
超長期：生殖細胞および胎児の発生過程を経て発現する世代間効果

（表4）電磁波の生体への影響の内容

<p>I. 自然界の電磁波（場）の影響</p> <p>1) 地球磁場の影響</p> <p>定常、非定常的変動に対する生物行動の影響</p> <p>超長期的変動（磁場逆転）と生物種絶滅関係</p> <p>————— 磁気感知メカニズムの探求</p> <p>2) シューマン共振電磁波（0.5~40Hz）</p> <p>脳波との関係</p> <p>————— ヒト発生・成長過程における脳波への影響</p>
<p>II. 人工電磁波の影響</p> <p>1) 単一周波数の電磁波</p> <p>1~2GHz 高周波電磁波</p> <p>50~60Hz 極低周波電磁波</p> <p>————— 細胞レベルの研究および疫学調査研究</p> <p>2) 共存する複数電磁波、低周波に変調された高周波電磁波</p> <p>Window 効果、ゲームてんかん症候群</p> <p>高圧線と携帯電話基地局が近接しているときの生体効果</p> <p>————— 閉鎖空間における複数携帯電磁波の影響</p> <p>複合被爆による過敏性発現についての研究</p>

(表5) 自然界の電磁波および人工電磁波の生体への影響



(図1a) 自然界の電磁波スペクトル (図1b) 人工の電磁波スペクトル  
(Masatoshi Murase *Sansai* 3, 1-35 (2008) より)

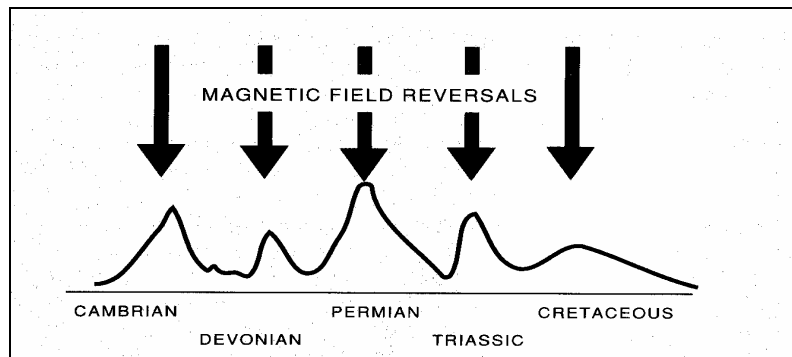
## I. 自然界の電磁波（場）の影響

### 1) 地球磁場の影響

これまでに報告されてきた自然界の電磁波の影響として、まず地球磁場の影響がある。地球磁場は、自転にともなって 24 時間周期で規則的に変動しており、これが生体のサーカディアンリズムと呼ばれる概日周期の駆動力の一つと考えられている。この地球磁場は、主として2つの要因によって劇的に変化する。

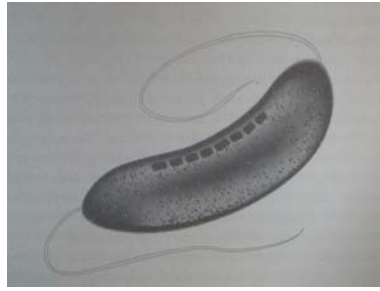
第一の要因は、太陽フレアと呼ばれる太陽活動の周期的変化に伴う磁気嵐である。2003 年 10 月下旬にも大規模な太陽フレアが観測され、電子機器への影響が報告された。ニューヨーク州立大学医学部のロバート・ベッカーは、1960 年代にこうした磁気嵐の際に、人間の精神活動に影響が生じることを報告している(H.Friedman, R.O.Becker, C.H.Backman, 1963)。

磁気変動のもう 1 つの要因は、太陽活動といった外的・短期的影響ではなく、地球内コアの運動変化による内的・長期的な影響である。1929 年京都大学の松山基範は、地球磁場が反転することをはじめて説いた。1960 年代になって生物種の絶滅と地磁気逆転の相関関係が指摘されている。特に、過去 5 回の生物種の大量絶滅がいずれも地磁気逆転と時期的に対応していることは注目し得る。また、ジェームズ・ヘイズによれば、単細胞生物の放散虫では、8 回の種の絶滅のうち 6 回までが地磁気の逆転と一致しているということである。

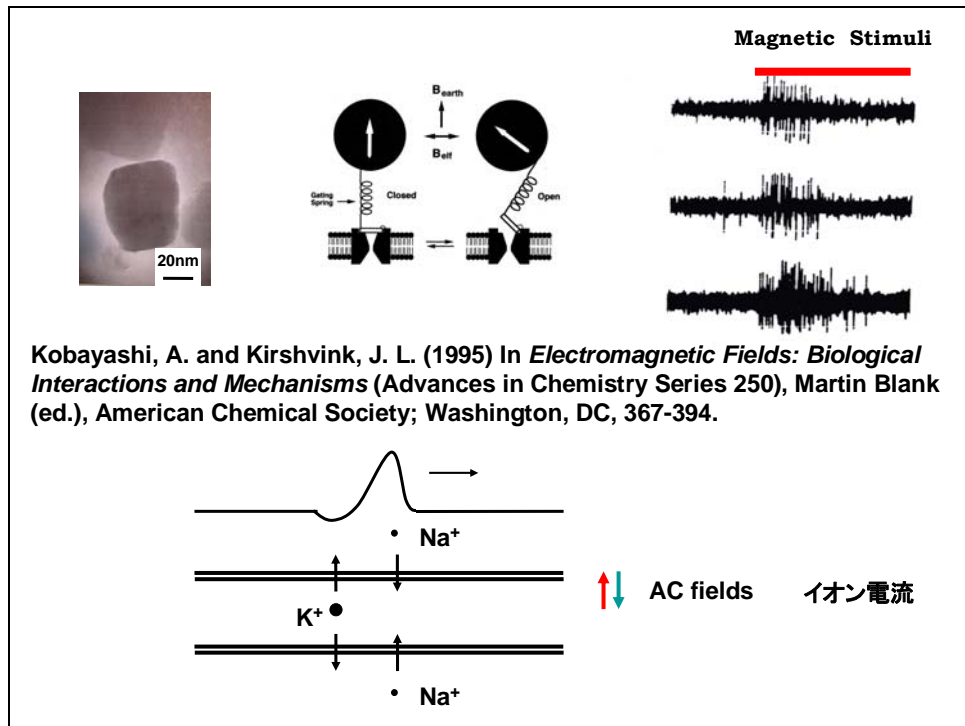


(図 2) 生物種絶滅と地球磁場逆転 (R.O.Becker, “Cross Currnts”より)

こうした磁場の影響を考える上で、1975 年にウッズホール海洋研究所のリチャード・ブレイクモアによって発見されたマグネタイトと呼ばれる磁石の存在は、重要である。彼は、走磁性バクテリアを顕微鏡で観察することによって、この磁石を発見した。このバクテリアは、水溶液中の鉄イオンから磁石を結晶化している。その後、昆虫、鳥、さらにはヒトの脳組織からもマグネタイトが発見され、磁場の重要な作用部位の一つと考えられるようになった。



William Agosta “Thieves Deceivers and Killers” Princeton University Press 2001, p141

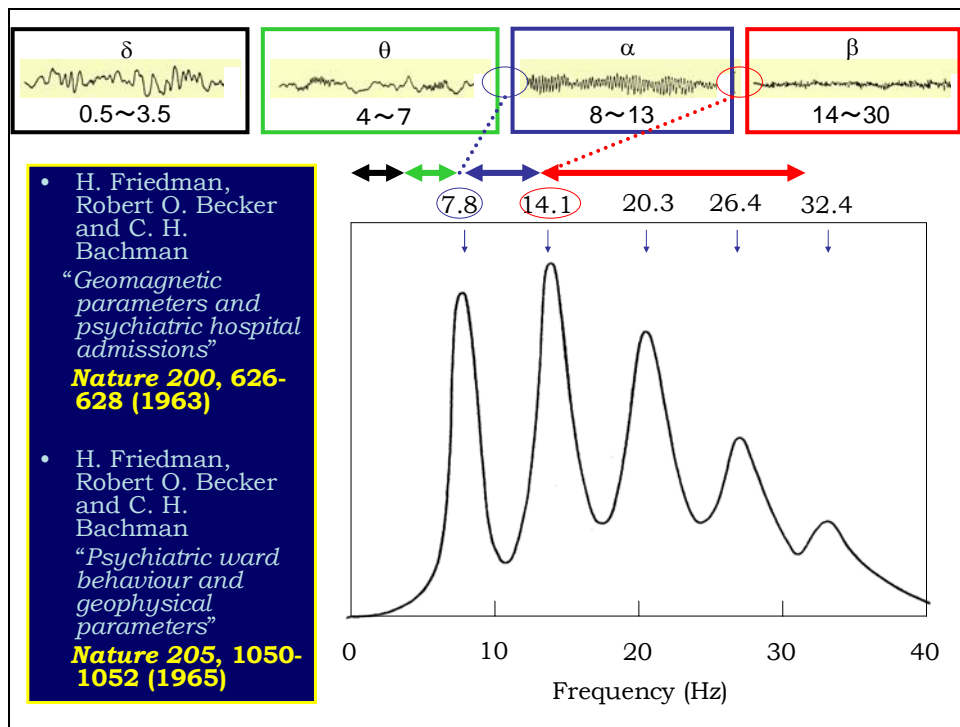


左上の写真は、ヒトの脳組織から得られた磁石結晶である。中央は、磁石が神経膜に結合しているモデルである。右のデータは、渡り鳥の三叉神経節に磁石を近づけると、磁石の強度に応じて神経活動が激しくなることを示している。下の図は、神経膜の活動電位は、イオン電流がナトリウムやカリウムの流入、流出によって発生する様子を模式的に示している。

## 2) シューマン共振低周波電磁波および可視光の生体への影響

上述した地球磁場の影響以外に、電磁波スペクトルの2つの領域—低周波電磁波と可視光—の生物への影響も忘れてはならない。逆の言い方をすれば、生命の起源以来、数十億年におよぶ進化の過程で、生物は電磁波スペクトルの2つの領域をうまく利用してきた。これらの電磁波は海水中をよく透過する性質があり、海で誕生した生命には欠かせないエネルギー源であり情報源であった。1952年イリノイ大学のシューマンによって発見された地球と共振する低周

波電磁波は、特にシューマン共振電磁波と呼ばれ、そのピークは7.8 Hz, 14.1 Hz, 20.3 Hz, 26.4 Hz, 32.4 Hz にあり、特徴的な電磁波スペクトルを示す(図3下)。そして、実際に現存する水棲生物が餌を見つける時に使う電磁波が低周波であり、わたしたちの脳波に現れている電磁波も低周波である。1972年ミュンヘン大学のコーニングは、脳波との明確な対応を指摘した(図3上)。



(図3) シューマン共振電磁波 (荻野晃也、“ガンと電磁波”より改変)  
 図の上部には、脳波のパターンと周波数帯を、下部にはシューマン共振電磁波を示している。シューマン共振電磁波は、図1aの左端に囲った部分に相当する。

一方、わたしたちの目は可視光線を感じするすぐれた機能をもっている。ところが、この可視光を10Hz程度の低周波数で間欠的に遮光すると、数秒も経たないうちに被験者の脳波がいつせいに同期しはじめ、てんかん発作を引き起こしてしまう。この観点に立つと、電磁波の生体への影響は、周波数に基づいて捉え直す必要があるように思われる。

このように自然界の電磁波による生体への影響は、さまざまな時間スケールにおいて、また多様な生物種において存在している。

## II. 人工電磁波の生体への影響の解明に向けて

研究会『電磁波の生体への影響』では、まず電磁波の非熱的相互作用によって生体にどのような影響があるかについて、分子レベル、細胞レベル、個体レベル、集団レベルといった生体レベルごとに具体的な実験事実が報告された。

例えば、単細胞生物であるゾウリムシは磁場の影響を受けると、その運動性が変化してしまう（中岡保夫、大阪大学大学院生命機能研究科）。また、多細胞生物においては、メラトニンと呼ばれるホルモンによる細胞増殖抑制効果が低周波電磁波によって減衰する（石堂正美、国立環境研究所）。この電磁波による細胞増殖抑制機構の減衰こそ、細胞の異常な増殖—すなわち、発がん—のメカニズムではないかと考えられる。さらに、我が国ではじめて行われた低周波電磁波と小児白血病の相関性に関する疫学調査によると、磁場強度にして4 mG以上では、小児白血病の発症率は約2倍になるという統計データが公開された（兜真徳、国立環境研究所）。これら国立環境研究所の細胞レベルおよび集団レベルの研究から、少なくとも低周波電磁波は、生体との非熱的相互作用によって、発がんの危険性があると考えられる。また、反射壁に囲まれた閉鎖空間で携帯電話を使用すると、熱的作用に基づいて算出された我が国の基準値すら超えうるという計算結果が得られた（本堂毅、東北大学大学院理学研究科）。

一方、臨床医学の現場では、化学物質過敏症に加えて、近年、電磁波過敏症を訴える患者数の増加が見られており、それぞれのケースについて客観的な診断基準が整備されてきている（宮田幹夫、北里研究所病院）。また、太陽光過敏症の分子メカニズムについて多くの知見も蓄積している（松田外志朗、大阪大学大学院生命機能研究科）。さらに、電磁波問題の歴史的背景（荻野晃也、電磁波環境研究所）やゲーム脳と呼ばれる現代病の事例が報告された（森昭雄、日本大学文理学部）。また、痛みおよび温度感覚の分子生物学に関する最近の知見も示された（富永真琴、三重大学医学部生理学第一講座）。この研究は、電磁波とは異なる刺激である温度などの影響についてであるが、生体反応のプロトタイプとしてとらえることによって、電磁波の影響が発現するメカニズムを予見できるのではないかとと思われる。

こうした研究報告を踏まえ、特定周波数、特定強度の電磁波は、特定時間照射によって生体にホルモン作用を及ぼしうるという‘電磁波ホルモン作用仮説’が提示された（村瀬雅俊、京都大学基礎物理学研究所）。

もちろん、表5に一部だけ示したように、人工電磁波の生体への影響を研究する際には、さまざまな組み合わせが考えられる。今日使用されている携帯電



話のマイクロ波は低周波で変調されていることを考えると、その電磁波の影響は、家庭送電線などから受ける低周波電磁波の場合とも共通した低周波成分による影響発現のメカニズムが普遍的に存在する可能性がある。逆に、電磁波の生体への影響を情報源という意味から周波数や波形に基づいて考察することによって、生命現象の基本的な情報統合メカニズムを解明できることも期待できる。

研究会では、物理学者、工学者、生物学者、医学者などが多角的に意見を交わしながら、電磁波が生体へ与える影響について、学術的・学際的討論が二日間にわたり活発に行なわれた。

### 図版出典

1. Masatoshi Murase (2008) “An interdisciplinary study of the emergence of new diseases associated with environmental pollution” *Sansai* **3**, 1-35
2. Becker, R. O. (1990) *Cross Currents: The Promise of Electromedicine, The Perils of Electropollution*. Jeremy P. Tarcher/Putnam, New York  
ベッカー、R. O. 『クロス・カレント』（船瀬俊介 訳）新森書房、1993
3. William Agosta “Thieves Deceivers and Killers” Princeton University Press 2001, p141
4. Kobayashi, A. and Kirshvink, J. L. (1995) Magnetoreception and electromagnetic field effects: sensory perception of the geomagnetic field in animals and humans. In *Electromagnetic Fields: Biological Interactions and Mechanisms* (Advances in Chemistry Series 250), Martin Blank (ed.), American Chemical Society; Washington, DC, 367-394.
5. 萩野晃也 (1995) 『ガンと電磁波』技術と人間