

総 説**電磁場過敏症研究：物理学者からみた課題**

本 堂 毅 宮 田 英 威

東北大学大学院理学研究科

**Research on intolerance to electromagnetic fields:
from physicists' viewpoint**

Tsuyoshi Hondou Hidetake Miyata

Graduate School of Science, Tohoku University

要約

電磁場（電磁波）過敏症と呼ばれる症候群がある。しかし現状では、症状の多様性、その原因として疑われている電磁場（電磁波）の多様性もあり、専門家間でも理解が十分に進んでいるとは言えない。著者らは、その大きな原因に、電磁場の物理的特性が研究手法や解釈に、必ずしも適切に反映されていない点を見る。この問題は、専門家だけでなく、患者自身の症状把握にも影響し、疾患の的確な理解の妨げになっている。そこで、本稿では電磁場（電磁波）過敏症と呼ばれる疾患群を研究・理解するために必要と思われる概念としての電磁場の性質を、この疾病に関する研究知見を参照しながらまとめてみたい。また、アメリカの原子核物理学者、ワインバーグが指摘した、トランス・サイエンス概念に関わる論点を紹介することで、電磁場過敏症に関わる議論が、今後よりの確かつ建設的に進むための条件を論ずる。

〈キーワード〉電磁場、共鳴、スペクトル、トランス・サイエンス、不定性

Abstract

There are many people who claim that they are suffering from electromagnetic fields. Although they attribute their symptoms to the exposure to electromagnetic fields, the cause is not well known. The difficulty in studying the symptoms has created a need for the concepts of physics in analyzing and interpreting the results of the studies, which are not familiar to medical doctors, engineers and so on. In this review, we provide and explain several concepts of physics that are essential for this study, by referring to the biological and health effects of electromagnetic fields. We also introduce the concepts of the studies of science, technology and society (STS) in order to clarify the conditions that make the study constructive and fruitful.

〈Key words〉electromagnetic fields, resonance, spectrum, trans-science, scientific incertitude

別刷請求宛先：本堂 毅

〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3 東北大学大学院理学研究科

Reprint Requests to Tsuyoshi Hondou, Graduate School of Science, Tohoku University, 6-3 Aramaki-aza-Aoba, Aoba-ku, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan

I. はじめに

電磁場（電磁波^①）の健康影響は、専門家間でも、また専門家と患者の間でも「すれ違い」の多い研究対象である。この「すれ違い」の背景には、様々な階層・類型を見ることができる。たとえば、a) 物理への不理解から発生する問題、b) 医学・生物学への不理解から発生する問題、c) 科学と価値判断を混同することから発生する問題、d) 科学的理解が時に原理的難しさを避け得ないことへの無理解から発生する問題、などがあるだろう。c) や d) は、アメリカの原子核物理学者である A. ワインバーグが「トランス・サイエンス」¹⁾ と名付けた問題でもあり、広い意味での「科学論」の対象でもある²⁾。

電磁場過敏症研究では、これらの多様な階層・類型が整理されないことから、不必要な混乱が生じている点があり、問題の科学的・社会的理解、研究自体の双方を妨げている。本稿では物理学の視点を中心にしながら、科学技術社会論の視点も交えて、この問題の整理を試みる。

II. 自然科学から見た電磁場と生物

まずは健康影響から敢えて離れ、電磁場と生物の関係を考えよう。生物は、電磁場過敏症で問題とされるような曝露強度、すなわち生活環境中の電磁場を、そもそも知覚したり、利用したりできるのだろうか？ この問題に対し、基礎科学としての生物物理学は、この10年で大きな進歩を遂げた。

近年の研究は、様々な生物が地球磁場を捉え、活用する能力を持つことを明らかにしている。代表例として渡り鳥を取り上げよう。渡り鳥は、季節変化に応じて長旅をする。その際に、どのように正しい方向を認識し、飛行を続けているのかは長年の謎であった。昼間であれば太陽、夜なら星座を観察して飛ぶとの推論もあろうが、曇天の夜間を考えれば、この考えには無理がある。現実の渡り鳥は、曇天の夜間でも届く地球磁場を活用して飛行をしている。渡り鳥は、いわば「磁場コンパス」を持ち、活用しているのである^{3,4)}。

一連の研究からは、さらに興味深い知見も見つかる。地球磁場を磁場コンパスで知覚する鳥は、

その地球磁場より2～3桁低い強度の磁場を持つ電磁波（0.1～10MHzの電波帯）を浴びると、その磁場コンパス機能が損なわれるという⁵⁾。この実験はまるで、電磁場過敏症のモデル研究のようだが、目的は鳥が磁場を感知する「メカニズム」の解明であった。鳥の身体の中に磁石（magnetite）のような物質が存在しているのか、あるいは、化学反応が磁場によって変化することが素過程なのか、というメカニズム論争への解を調べる目的で行われた研究の結果である。メカニズムに関わる論争は未だに続いているものの、Nature誌における Lohmann の総説等^{3,4)} にあるように、渡り鳥だけではなく、様々な生物が地球磁場を認識できる磁場コンパスを持っていることは、今や疑う人がいない知見である。

この例のように、環境中の（電磁場過敏症で問われているような強度や周波数の）電磁場が多様な生物に作用を及ぼし、生物がその電磁場を活用したり、影響を受けたりしていること自体は、自然科学としてよく知られた事実である。したがって、電磁場過敏症研究で問われるべきは、ヒトにとって、その（生物影響の有無ではなく）健康影響が、（個人的または社会的に）受容できるレベルで生じるかどうかという意味での「程度問題」といえるだろう。残念なことに、電磁場の健康影響に関連するこのような基礎科学の進展は、電磁場過敏症に関わる研究分野や論文等では殆ど引用されていない。

III. 電磁場？ 電磁波？：物理学の諸概念

本稿で「電磁波過敏症」ではなく「電磁場過敏症」という用語を用いていることに読者はお気づきだろうか。電磁波（electromagnetic wave）は、物理学者であるマクスウェルが1864年、その存在を理論的に予測し、1888年に同じく物理学者のヘルツが存在を実験的に確かめたものである。これは変動する電場（electric field）が変動する磁場（magnetic field）と相互作用することで遠くまで伝わる^②「波」の性質を持つ。光や放射線、通信に使われる電波などが「電磁波」に含まれる。一方、送電線や家庭内での配線、電気器具などから

発生する低周波磁場や電場なども健康影響が懸念され、「電磁波問題」という名称で呼ばれることが多い。しかし、こちらは上で述べた、「遠くまで伝わる波」の性質を持たない。それゆえ本稿では、上に述べた狭義の電磁波だけでなく、低周波磁場や電場などを含めた概念である「電磁場」(electromagnetic field)を総称として用い、「遠くまで伝わる波」の性質を持つ電波などに対してのみ電磁波という言葉を用いる。

このように、一口で電磁場といっても、それらはパラメータ(周波数、強度、変調等)によって異なった性質を示す。例えば、電磁波の一種であるマイクロ波は、物理学辞典(培風館)⁶⁾によれば「波長が1mm(周波数300GHz)程度から1m(周波数300MHz)程度までの電磁波」とされる(傍点筆者)。では、上記のマイクロ波の範囲にある電磁波は、みな性質が同じだろうか。答えは否である。同じくマイクロ波と呼ばれる、波長が0.9mの電磁波と波長が10mmの電磁波よりも、0.9mの電磁波と(マイクロ波帯の外にある)1.1mの電磁波の方が性質は近い。つまり、「マイクロ波」という同じ名前がついている電磁波よりも、異なった名前がついている電磁波の方が似た性質を持っていたりする。電磁場では、周波数などのパラメータが変化することによって、その性質は一般に「連続的」に変わる。波長が1mm、あるいは1mの前後で、「別のもの」に急激に変化するようなことはないのである。同様の事情は、可視光線と赤外線、可視光線と紫外線、紫外線とX線などの境界でも同様である。このような事情は、これまでの医学等でなじみ深い「化学種」などと電磁場の差異の典型例だろう。化学種の名前が異なれば、その性質の違いは自ずと明確に異なるだろうが、電磁場では事情が異なるのだ。

環境負荷としての電磁場の(化学種などと比較した場合の)特異性は電磁場過敏症の解釈、建設的な議論に不可欠なものであるが、医学者や、基礎科学に必ずしも通じていない技術者(生体電子工学等)には馴染みがないためか、誤った解釈を目にすることも珍しくない。ここでは3つの具体例を挙げる。(電磁場の基礎概念は以前、本誌⁷⁾

で解説を行ったので参照されたい。)

1. 共鳴現象

ダイヤル式(アナログ)のラジオを使うと、そのチューニングに応じて特定の放送局だけを聴くことができる(すべての放送局が同時に聞こえてきたら、ラジオとして使い物にならない)。これは、ラジオの回路が持つ「周波数共鳴」という特性で実現している。ラジオのダイヤルを回すチューニングは、その共鳴周波数(波長)を変えらることに対応する。

共鳴現象は電気回路に限らず、自然界の至るところに存在する。磁場の中にある物質の対電子への電磁場の影響は、「電子スピン共鳴(ESR)」によって調べることができる。この共鳴現象は、負荷されている磁場の強さと電磁波(マイクロ波)の周波数の組み合わせが、特定の条件を満たしたときだけ生ずる。たとえば、ある特定周波数で「共鳴」が生じる対象が見つかった場合、磁場の強さを変えて実験を行うと、同じ周波数でも「共鳴」は起こらない。

共鳴に着目した *in vitro* 研究は、スウェーデン・ルンド大学医学部の物理学者 Eberhardt らのグループ⁸⁾ など、複数のグループで行われている。

2. 周波数スペクトル

電磁場の生物への影響は、その電磁場の周波数分布によって大きく異なる。日中の太陽からは1平方メートルあたり1キロワットを超えるエネルギーが電磁波の形で地球表面に降り注いでいる。太陽からの電磁波は、可視光線だけでなく赤外線や紫外線も含む幅広い周波数分布を持っている。

さて、赤外線リモコンで使われる電磁波(赤外線)は、太陽からのエネルギー密度より遙かに低い強度だけれど(赤外線リモコンを浴びても暖かくはない!)、屋外で、すなわち太陽の下で操作しても誤作動することはない。なぜだろう。これは、赤外線も含む太陽からの電磁波と、赤外線リモコンの周波数スペクトル(周波数分布)が異なるからである。太陽からの光は、広い範囲の周波数を連続的に含むけれども、赤外線リモコンでは特定の周波数だけを含む(図1)。そのため、周波数スペクトルが、太陽とリモコンでは大きく異

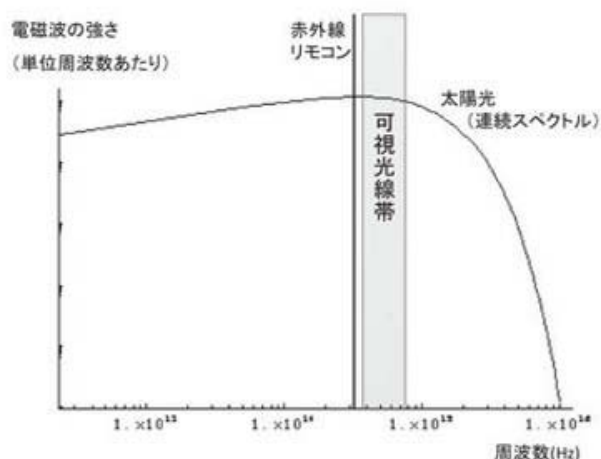


図1 太陽光と赤外線リモコンの周波数スペクトルの違い。

太陽光は紫外線、可視光線、赤外線などに亘って幅広い連続スペクトルを持っているのとは対照的に、赤外線リモコンは特定の周波数だけにピークを持つ線スペクトルを持つ。グラフは縦軸、横軸ともに対数プロットで表示している。

なるのである。これは、100人を超える大編成のオーケストラを聴いているときでも、一人一人のソロ奏者（オーボエ、フルートなど）の音が聞こえてくると似ている（オーケストラ全体より音量では何桁も低くても、フルートやオーボエのソロが聞こえることは珍しくない）。

低周波磁場でも同じ状況がある。送電線や家庭用電力線から実際に発生する磁場は、50/60Hz以外の周波数成分も含んでいる。そのような複数の周波数成分を含む磁場の影響と、50/60Hzのみの単純な低周波磁場の細胞への影響を比較すると、その影響が異なることも示されている⁹⁾。

3. 変調

マイクロ波などの電波（電磁波）は多くの場合、通信に使われる。一定周波数の単純な電波には情報を載せることができないため、「変調」という技術を用いて電波に情報を載せる。変調には様々な手法があるが、結果としての電磁波は「単一周波数の連続波」とは異なる物理的性質を持ち、生物への影響も、その変調に応じたものとなることが知られている。¹⁰⁾

図2では、変調の原理を示すため、連続波と変

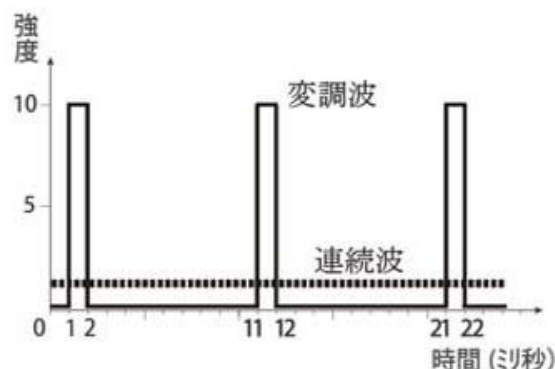


図2 変調：連続波と変調波

調波を模式的に記した。連続波は一定の強度（振幅）で振動を続ける電磁波であり、この図では簡単のため、単位時間あたりの電磁場エネルギーの強さを時間の関数として描いている。連続波と比較するため、変調波にはパルス的な変調を受けたものを選んで、連続波と変調波のエネルギー強度の時間平均を等しくしている。

ここに描かれた2種類の電磁波は、平均エネルギー密度だけで見れば「同じ強度、同じ周波数」の電磁波である。しかし、上で触れた「共鳴」を通した相互作用にとっては、共鳴条件の一つである強度が異なるため、全くの別物である¹¹⁾。何らかの変調が加わっている電磁場の影響を調べる際、電磁場のパラメータとして周波数と平均強度だけを等しく揃えて研究を行っても、共鳴が関わる状況では、再現性ある結論を得ることは原理的に困難であることが分かるだろう。

これら3つの概念を用いて電磁場過敏症を検討する前に、次章では電磁場過敏症の研究の現状を、スイスの疫学者 Martin Röösli のレビュー¹¹⁾などを参照しながら振り返ってみよう。

IV. 電磁場過敏症の現状と課題：物理の視点から

1. これまでの知見

電磁場過敏症の症状と電磁場曝露の因果関係解明のためには、大きく分けて2つの手法で研究が行われてきた。それらは、1) ボランティア研究、2) 特定地域住民を対象とした疫学的研究の二種類に分けることができる。1) ボランティア研究は、実験室などのコントロールされた環境下で

電磁場を対象者（ボランティア）に曝露し、その最中、前後での自覚症状や他覚的症状を調べるものである。2）疫学的研究は、電磁場曝露を受けている地域と受けていない地域で発症率の違いを調べる手法が一般的に行われる。

Martin Rössli の電磁場過敏症の総説¹¹⁾でも指摘されているように、地域住民を対象とした研究では、電磁場曝露と症状の関係が示唆されることが少なくない一方で、ボランティア研究では関係が認められない例が多い。

これらの結果を大まかにまとめると、次のようになる。

- A) 地域住民を対象とする疫学的研究では、電磁場曝露と症状の関係が示唆されることが少なくない。
- B) ボランティア研究では、少なくとも個々の曝露実験では、電磁場曝露と症状との統計的有意な違いが見られない場合が多い。しかし、電磁場曝露の有無を知覚できるかどうかについて、複数の研究結果を重ね合わせた解析（プール解析）を行うと、 $P=0.05$ での有意水準には届かないものの、確率的偶然（by chance）よりも関連が認められる方向にシフトしたデータが、一般ボランティア群、電磁場過敏症を訴える者の群、双方で示されている。特に電磁場過敏症を訴える者の群では、 $P=0.05$ の統計的有意水準ギリギリの値である¹¹⁾。
- C) 電磁場過敏症を訴える者の多くは、マイクロ波曝露などを正しく知覚できると語る者が多いが、B) が示すように、盲験法で曝露を行うと、個々の患者の訴えは必ずしも正しくないことが多い。
- D) 電磁場曝露を患者に知らせた上で実験を行うと、実際には電磁場曝露がない場合でも、統計的有意な水準で、症状を訴える患者が増える例が報告される（ノセボ効果）。

2. これまでの知見・研究の適用限界、課題

- (ア) 疫学的研究とボランティア研究には双方に長所と短所がある。ボランティア研究は、実験条件をコントロールでき、盲験条件を満たしやすい点などが優れているが、一般

に急性曝露の急性影響しか捉えることができず、症状を訴える者の生活環境条件での曝露、特に慢性曝露の影響を捉えることが困難である。

- (イ) 個々のボランティア研究は、実験対象者数が多い場合でも100名程度のオーダーである。電磁場知覚を訴える者の多くが電磁場知覚、自覚症状、他覚症状を示す場合には、この程度の人数でも問題ないが、一部の者だけが影響を示す場合には、統計的パワーの関係から因果関係が捉えられない場合がある。選択バイアスの問題もある。
- (ウ) (イ) で指摘した統計的パワーの問題を回避するためプール解析による研究があり、電磁場過敏症を訴える者の中の少数のグループが、電磁場曝露を原因としてなんらかの症状を呈している可能性が示唆されている。ただし、プール解析の対象となった実験のプロトコルに従う限り、この仮説を示すためには十分多数の実験協力者が必要となるだろう。また、プール解析の対象となった実験の詳細を検証すると、マイクロ波の曝露強度や変調の種類が個々の実験毎に異なっている。先に議論したように、被験者の反応が曝露強度や変調の種類によって異なる場合には、プール解析を用いた場合でも、実効的な統計的パワー（検出能）はあまり上がらず、統計的有意な影響を捉えられていない可能性がある。Rea らの研究¹²⁾は、多段階のテストを重ねる中で、電磁場に過敏と思われる患者群を絞り込んでいく研究プロトコルを採用することで上述の問題を回避する工夫を行っている。ただし、そのReaの論文には、曝露条件や検査プロトコルなどの詳細かつ客観的な記述に欠ける部分があり、他者によるデータの再分析や再試を難しくしている。
- (エ) 近くの携帯電話から生ずるマイクロ波曝露などを常に知覚できるとする訴えは少なくないが、この訴えが多くの場合、必ずしも正しくないことは、これまでの諸研究で繰

り返し示されてきた。筆者自身もこれを確認している。しかし、この事実を電磁場過敏症の存在自体を否定するものと飛躍して解釈する専門家もいるが、それも論理的ではない。なぜなら、

- ① 実験で曝露に用いる電磁場は、現実的な制約から一つ、または少数のパラメータ（強度、周波数、変調方式など）とせざるを得ない
- ② 症状を訴える者は、症状を自覚した場合に電磁場の存在（ソース）を確認するという作業を繰り返すことで、経験的に「電磁場を知覚できる」と考えるに至っている。現実には、電磁場一般ではなく、特定の曝露源（パラメータ）からの影響だけ受ける場合でも、その者自体は、その特殊性を理解しえないためである。科学の基礎的トレーニングを受けていない患者、そして専門家が、自らの経験の有限性や電磁場の多様なパラメータを踏まえずに（過度の単純化によって）非論理的な解釈を行っている場面は散見される。

(オ) 電磁場曝露と症状の間に、（曝露があると被験者に告げた場合に症状が引き起こされる）ノセボ効果が存在することは、これまでの多くの研究結果から明らかと思われる。プラセボ効果が一般的であることと同様に、ノセボ効果が電磁場曝露においても存在すること自体は自然であろう。プラセボ効果の存在が本当の薬の効果を否定しないように、ノセボ効果自体も電磁場曝露による過敏症の発生を否定はしない。ボランティア研究において、ノセボ効果が発生しないように盲験条件を整えることの必要性、疫学的研究では、ノセボ効果が発生していないか、発生していた場合には、ノセボ効果がどの程度寄与しているのかの検討が必要であろう。

3. 用量反応関係と共鳴現象

電磁場過敏症に関する研究データの解釈に必要な

な課題・問題を挙げてきたが、ここでは電磁場過敏症研究で混乱を招いていると思われる最も典型例として「用量反応関係」を、共鳴現象の視点を踏まえて取り上げる。

シグモイド型の用量反応関係の成立は毒性学のドグマ¹³⁾の一つであり、電磁場過敏症の疫学的研究でも、データを解析する際に暗黙の前提とされることが多い。図3にあるように、シグモイド型の曲線では、右肩上がりに「強度が強くなれば反応も強くなる」という単調性が仮定される。電磁場の場合であれば、その強度が高くなる（強くなる）程、症状などの影響が右肩上がりに強くなることが仮定されることになる。この仮定は内分泌かく乱物質などでの逆U字曲線などから、必ずしも成り立たないことがあることは有名である。電磁場の生物・健康影響では、シグモイド型の用量反応関係が成立するとする仮定を行うと、電磁場の物理的影響メカニズムの典型である共鳴現象（図3の破線）が生じる場合に、シグモイド型に合わないとして破棄される結果を招く⁽¹⁴⁾。

例として、携帯電話のマイクロ波などを含む電波の作用を考えてみよう。電波の分子レベルでの作用メカニズムには大きく分けて2種類ある。電波が物質に吸収されて熱緩和した後の「熱効果」と、電磁波としての電波自身の直接的作用による「非熱効果」である。「熱効果」に関してはシグモイド型の影響が起こる可能性がありそうだ。しかし、「非熱効果」では原子・分子レベルでの共鳴現象などを通じた作用を考えることは物理学の常識を踏まえれば当然である。それゆえ、非熱

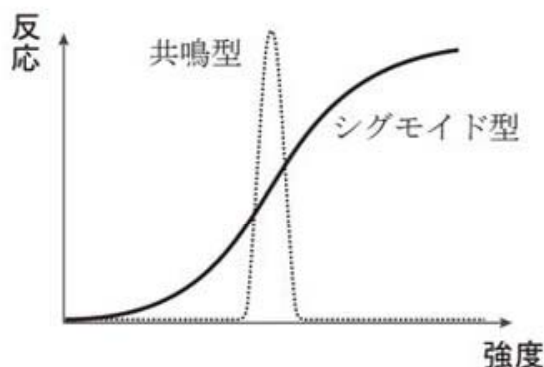


図3 用量作用曲線（シグモイド型、共鳴型）

的効果の場合に用量反応関係が常に成り立つと考えることの方がむしろ困難である。

この点に着目した実証的研究は多い。たとえばスウェーデン・ルンド大学の物理学者、Eckhardtらのチームは、ほうれん草の細胞膜におけるカルシウムチャンネルの透過性を、周波数、磁場強度の双方を変化させながら調べた⁸⁾。その結果、低周波磁場の周波数と強度の双方に共鳴的応答を返すことを確認している。この結果は、電子スピン共鳴 (ESR) などを通し、物理学の世界では常識的である共鳴現象が、生物への影響でも同様に存在することを確認するものである。共鳴現象が存在する場合、低周波磁場であれば、磁場の強さと周波数が特定の組み合わせを持った場合だけ、生物に強い影響が生ずる。高周波電磁波 (電波) による非熱的相互作用も、数多くの研究で繰り返し示されている事実であることを考え合わせると、物質の一部としての生物への電磁場作用でも、共鳴現象が存在すると考えるのが自然である。

共鳴現象が存在するときには、反応の単調性を仮定する用量反応関係は成立しない。それゆえ、シグモイド曲線的な用量反応関係が成り立たないデータに対し、科学的に不整合なデータとする解釈を繰り返してきた多くの研究は、その解釈を再検証されるべきであろう。過去の毒性学で成り立つことが多かった反応曲線を、化学種とは異なった作用メカニズムを持つ電磁場でも同様に成り立つとすることは「根拠なき仮定」に過ぎないからである。

尚、生体内の対電子が磁場に応答し、それが生物に影響を与える可能性については、冒頭に取り上げた渡り鳥などを使った基礎研究で多く議論されていることを付言する。対電子への影響を考える際、共鳴を考慮する議論が必要であることは、基礎科学としてあまりにも自明である。

V. 社会の中での電磁場過敏症：科学論の視点から

1. トランス・サイエンスとしての電磁場問題

電磁場過敏症を巡る混乱は、先端科学技術が引き起こす社会問題の一つであり、科学技術社会論の一般的知見が有用な視点を与える。アメリカの

原子核物理学者として著名なアルヴィン・ワインバーグは、低線量被曝を含む原子力発電が引き起こしうる問題などを考察し、「科学に問うことが出来ても、科学 (だけ) では答えが出ない問題群」を「トランス・サイエンス」と名付け、後の科学論、特に科学技術社会論に大きな影響を与えた^{1,10)}。電磁場過敏症を巡る混乱にも、「科学で答えられる」問題と「科学だけでは答えられない問題」の差異を、症状を訴える市民と専門家の双方が、十分に踏まえていない (気づき得ていない) ことから発生する問題が多い。端的にいうなら「科学的」なる言葉・概念の誤用である。そこで、電磁場過敏症に見られる「科学」を巡った混乱を、科学論の視点から少し整理したい。

2. 科学の不定性：リスク、不確実性、多義性、無知

電磁場過敏症では、「確たる科学的証拠はない」、「科学的証拠に基づいて決定すべき」等の意見が、様々な場面で唱えられる。一方で確たる科学的証拠がない場合にも予防原則の適用を、という意見もある。いずれの立場でも、「確たる科学的証拠」の存在は認め合っているようにも見える。では、「確たる科学的証拠」とは何かと問われたら、市民は無論のこと、専門家もどのように答えるのであろうか？

科学技術社会論、特に科学技術政策論の専門家として世界的に著名な、英国サセックス大学のスターリングは、科学的知識の不定性^{15,16)} (scientific incertitude) の状態として4つの類型 (リスク、不確実性、多義性、無知) を示し、科学技術が関わる社会的問題への、より合理的な対応方法を議論している。ここでは、これら4つの類型を用いることで、電磁場問題での議論の混乱を整理したい。

「リスク」は、経済学者フランク・ナイトの著名な書 (Knight F: *Risk, Uncertainty and Profit*. Houghton Mifflin, 1921) にも記されているように、「定量可能な不確実性」を意味する。真の不確実性 (uncertainty) は確率的にも定量困難な状態を指し、リスクとは区別される。研究の進展によって、ある環境負荷によって生ずる疾病の発症率変化が明らかになれば、その環境負荷は、真の不確実性の状態からリスクの状態に移る。しかし、定量的

な知見が明らかではない不確実性の状態にあるものを、リスクの状態と混同して用いてしまうと混乱が生ずる。不確実性の状態では、影響がどの程度まで生ずるのか分からないことを前提に対策を考えねばならない。

「多義性」は、リスクや不確実性とは別の側面である。電磁波問題では、多様な疾病への影響が懸念されているが、科学的な研究・調査では多くの場合、特定の内容に絞り込んだ調査をせざるを得ない。この時、どの疾病を優先的に研究すべきかは科学の知見自身では決まらず、価値判断を要する。また、携帯電話の利用者の中にはマイクロ波の影響で特定の音が聞こえるマイクロ波ヒアリング現象が一定数起こり、基地局には景観上の問題もある。これらは科学的には争いが無い問題であるが、何が社会的問題とされるべきかは、やはり価値判断に属する問題であり、科学的知見自体が答えを出せる問題でない。

「無知」の状態では、そもそも、定量的な影響以前に、どのような問題が生じるのか自体が分からない状態である。世の中で新しい物質・製品などが使われ出した当初は、それらがもたらしうる影響は、原理的に分かり得ないことが多い。石綿(アスベスト)は、当初は負の環境影響が存在しうることを自体、全く認識されておらず、学校の理科実験室を始め、様々なところで無自覚に使われていた。発がん性自体の可能性が認識されていない状況では、発がん性研究を含めた研究自体が存在しえない。

このように、科学技術の影響評価に関わる知識の状態には、様々な類型があり、その類型に応じた議論が必要である。新しい科学技術のもたらしうる影響については、上に述べたように、確たる科学的証拠は存在しないし、そもそも「何が問題か」が分からない無知の状態を含む以上、科学的研究の対象にさえなっていない可能性がある。また科学的研究の対象となっている場合でも、何を「確たる科学的証拠」と考えるかは、価値判断に基づく線引き問題にならざるを得ない性質があるため、何を確たる証拠とするかも科学自身では答えが出ない¹⁷⁾。仮に、何を確たる証拠と考えるか

が専門家間で合意されたとしても、社会的対策を取るために確たる証拠が必要かどうかは別の話であり、社会的価値判断の必要な問題である。電磁場問題では、科学的知見だけでは解決出来ない様々な階層・類型の問題が「科学だけで答えが出る」問題と誤認識されることで生じる問題・混乱が多い。この「もつれた糸」をほぐすために、専門家も市民も「科学の適用限界」を意識し、市民と専門家、それぞれの役割を整理し直すことが必要である。

専門家にあっては、科学的知見では決まらない問題、すなわち科学の不定性(の存在と、その類型と性質)に自覚的である必要がある。むしろ、科学の不定性を意図的(恣意的)に用いて、特定の価値判断に基づく意見を「科学的」と称して社会に伝える行為等は、科学の公平性・中立性を損なう行為であり、厳に戒められるべきものである¹⁸⁾。一方、症状や懸念を訴える市民側も、科学には多様な不定性があること、価値判断に関わる問題は科学自体では決まらないことを理解し、専門家との適切な役割分担のあり方を考える必要があろう^{17, 19, 20)}。市民の価値判断が多様である以上、社会的判断は科学自体で決まるものではなく、社会的「選択」の問題だからである。

VI. まとめ

本稿では、電磁場過敏症研究の現在について、基礎科学としての物理学の視点から総説を試みた。第二章では、私たちが日常曝露する程度の環境電磁場の生物への影響について、基礎科学(生物物理学)の最新知見を紹介した。第三章では環境負荷としての電磁場の特徴を、共鳴、周波数スペクトル、変調に着目して説明した。第四章では、第三章で明らかにした環境負荷としての電磁場の特徴を踏まえて、これまでの電磁場過敏症研究の問題点、特に作用用量曲線の仮定について詳細に議論した。第五章では、基礎科学と科学論の視点から、新しい科学技術のもたらしうる問題の一つとしての電磁場過敏症の混乱を整理するために、科学の不定性についての理解が、専門家と市民の双方に必要であることを述べた。

電磁場過敏症に関わる研究は、医学、基礎生物学、物理学など、学際的な研究が不可欠である。そして、異なった分野の専門家たちの議論が、社会に開かれた場でなされること^(注v)は、学問自体の進歩とともに、価値判断を不可避とする社会的判断にも資するものであろう。本稿がこの分野の研究の、科学としての健全な発展と、社会との建設的対話に資することを願っている。

謝辞

本原稿の執筆にあたっては、東北大学大学院理学研究科の大石亜衣さんに図を作成してもらうなど、様々な支援を受けた。また、本研究は、文科省科研費 No. 21200025 の援助を受けている。また、JST/RISTEX 研究「不確実な科学的状況での法的意思決定」および文科省科研費 No. 21500862 の研究成果を活用している。ここに記して感謝する。

注釈

- i) 電磁場と電磁波の用語の使い分けについては第 III 章で後述する。
- ii) ここで「遠くまで伝わる」とは、電磁波のエネルギーが、何かに吸収されない限り全体として保存すること（エネルギー保存則）の反映である。
- iii) 原子・分子レベルでの共鳴では、ミリ秒以上の平均強度ではなく、ミリ秒以下での強度が共鳴条件として働く。
- iv) これは、科学論で「観測の理論負荷性」と呼ばれる現象の一つである。
- v) オーストラリアの裁判所で始まった「コンカレント・エヴィデンス」方式は、専門家たちの議論を社会的意思決定に活用する優れた試みである。（参考文献15を参照）

文献

- 1) Weinberg AM: Science and Trans-Science. *Minerva*, 10: 209-222, 1972
- 2) 野家啓一: 科学の哲学. 放送大学教育振興会, 2004
- 3) Lohmann KJ: Magnetic-field perception. *Nature* 464: 1140-1142, 2010
- 4) カステルベッキ D: 動物の体内コンパス. *日経サイエンス*, 42: 44-51, 2012
- 5) Ritz T, Thalau P, Phillips JB, Wiltschko R & Wiltschko

- W: Resonance effects indicate a radical-pair mechanism for avian magnetic compass. *Nature* 429: 177-180, 2004
- 6) 物理学辞典編集委員会 (編): 物理学辞典 改訂版. 培風館, 1992
- 7) 本堂 毅: 電磁場の基礎概念と生体影響の関係. *臨床環境医学* 14: 83-87, 2005
- 8) Baureus Koch CLM, Sommarin M, Persson BRR, Salford LG, Eberhardt JL: Interaction between weak low frequency magnetic fields and cell membranes. *Bioelectromagnetics* 24: 395-402, 2003
- 9) Risk Evaluation of Potential Environmental Hazards From Low Frequency Electromagnetic Field Exposure Using Sensitive *in vitro* Methods.
<http://www.verum-foundation.de/eu-projekte/reflex.html> (2012.12.11)
<http://www.itis.ethz.ch/assets/Downloads/Papers-Reports/Reports/REFLEXFinal-Report171104.pdf> (2012.12.10.)
- 10) たとえば Penafiel LM, Litovitz T, Krause D, Desta A, Mullins JM: Role of modulation on the effect of microwaves on ornithine decarboxylase activity in L929 cells. *Bioelectromagnetics* 18: 132-141, 1997
- 11) Rössli M: Radiofrequency electromagnetic field exposure and non-specific symptoms of ill health: a systematic review. *Environ Res.* 107: 277-287, 2008
- 12) Rea WJ et al.: Electromagnetic field sensibility. *Journal of Bioelectricity*, 10: 241-256, 1991
- 13) Fagin D: Toxicology: The learning curve. *Nature*, 490: 462-465, 2012
- 14) 小林傳司: トランス・サイエンスの時代——科学技術と社会をつなぐ. NTT 出版, 2007
- 15) Stirling A: Keep it Complex. *Nature* 468: 1029-1031, 2010
- 16) 吉澤剛、中島貴子、本堂毅: 科学技術の不定性と社会的意思決定——リスク・不確実性・多義性・無知. *科学 (岩波)* 82: 788-795, 2012
- 17) 尾内隆之、本堂毅: 御用学者がつくられる理由. *科学 (岩波)* 81: 887-895, 2011
- 18) 日本学術会議 声明「科学者の行動規範について」
<http://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/pdf/kohyo-20-s3.pdf> (2012.12.2.)
- 19) 平川秀幸: 科学は誰のものか——社会の側から問い直す. 日本放送出版協会, 2010
- 20) J.A. ミュア・グレイ (著)、斉尾 武郎 (監訳): 患者は何でも知っている——EBM 時代の医師と患者. 中山書店 2004