

電磁波と生体への影響

—作用機序解明をめざす統合生命科学—

村瀬 雅俊*

理論の飛躍はしばしば理論の内部にある矛盾の発展の結果としておこなわれるといえよう。例えば量子論の発展を見ても、光や物質に対する波動と粒子という互いに矛盾する考え方があって、それらが相互に他を否定する結果として一つの新しい考え方に統一されたのが量子力学であるともいえるであろう。この意味において理論物理学の発展の仕方は弁証法的だともいえるであろう。

湯川秀樹

1. はじめに

私は、これまで 20 余年間、さまざまな分野における理論的研究を統合的な視野に立って行ってきた。具体的には、1992 年に、振動的筋収縮現象、神経興奮現象、鞭毛・繊毛運動の時間・空間カオスの現象、ソリトンの波動現象、およびバーストの発振現象を総合的に論じた‘細胞運動理論’ (M. Murase, 1992) を提唱した。1996 年には、プリオン病・アルツハイマー病、さらにはがんや自己免疫疾患を含む老化現象を、ダーウィン進化論 (C. Darwin, 1859) および免疫系の自然選択説 (N. K. Jerne, 1955; F. M. Burnet, 1957) を統合的に論考した‘生体内分子選択説’ (M. Murase, 1996) を提唱した。2000 年には、生命の起源や分化・発生・進化に見られる自己組織化現象、および疾患や老化・死といった自己崩壊現象を統一的に捉えた‘自己・非自己循環理論’ (村瀬雅俊、2000) を構築した。さらに、2001 年には、統合失調症をはじめとする、認識過程の成立と破綻に着目し、ピアジェの発生的認識論 (J. ピアジェ、1960; 1972) とリードルの進化論的認識論 (R. リードル、1990) を統合した‘構成的認識論’ (村瀬雅俊、2001) を提唱した。

このような統合的視野に立った研究を行ってきた背景には、冒頭に挙げたような先人の教えによって、科学的‘真理’の持つ宿命を知ることができたからである。

科学的‘真理’というものは、その適用範囲を拡大していくにつれて互いに矛盾する事実と直面するのが常である。その際、私たちは互いに矛盾する事実の一方のみを排除し、物事の一面性・明白性に固執したくなる誘惑に駆り立てられる。しかし、それはちょうど何人かの盲人が一匹のゾウに触り、「へビのようだ」、「扇子のようだ」、「丸太のようだ」などと、それぞれが自分勝手に自己主張を繰り返しているようなものではないだろうか。それぞれの主張を補い合わなければ、ゾウという全体の姿は決して捉えられるものではない。同じように、相矛盾しあう事実を一つの全体として統合する‘ものの見方’が障害されている限り、科学の発展は望めない。逆に、相矛盾しあう事実がより高次の‘ものの見方’の中に統合された時、新たな科学的‘真理’が発見されたことになる。つまり、‘統合の障害’による‘科学崩壊の危機’と‘統合の成

* 京都大学基礎物理学研究所 非平衡系物理学
京都市左京区北白川追分町

立'による'科学発展の可能性'が共存するのである。しかも科学的'真理'の探求においては、人間的要素を完全に排除することはできず、その'客観性'がその時代精神とともに変容することになる。つまり、科学的'真理'は、その時代に新たに発見された最新の知識を統合しながら、常に再認識され続けねばならない。そのために、現在の'常識'は将来の'非常識'へ、また逆に、現在の'非常識'は将来の'常識'へと転化してしまう可能性を、どこまでもはらみつづけることになる。その意味では、科学的'真理'は、あくまでも主観的'客観性'を持つに過ぎないといえる。

2. 21世紀における化学物質と電磁波の複合汚染

このような観点に立って、まず、現代社会に広く浸透している化学物質について考えてみたい。人類が開発した科学技術の成果として化学物質が日常生活の中に広く適用される時、私たちはその安全性は十分に確立しているものと信じている。しかし、この'安全神話'が崩壊してきたことは、この半世紀におよぶ科学史が示している通りである(レイチェル・カーソン、有吉佐和子、William, Rea、シーア・コルボーン)。つまり、「全体がどのようになっているか」ということは、絶対的な時間が経過し、矛盾しあう事実が浮き彫りになってこない限り、誰にもわからないことなのである。

このような考えに立つと、私には、化学物質に関してこの半世紀において見られてきた歴史が、電磁波に関して再び繰り返されているように思われてならない。しかも、単に環

境汚染の歴史が繰り返されているにとどまらず、化学物質汚染と電磁波汚染の関係には単なるアナロジー以上の深刻さがある。なぜなら、刺激が機械的なものであろうと、化学的なものであろうと、視覚的なものであろうと、そして電磁気学的なものであろうと、こうした質的に異なる情報は、生体が営む生命過程にあつては同等に扱われてしまうからである(村瀬雅俊、2004)。

電磁波の生体への影響に関しては、これまでもさまざまな研究がなされてきた。それらの研究においては、生体への「影響あり」という報告とともに、生体への「影響なし」という報告が混在していた。そのため、「現時点では、確定的なことは結論づけられない」という常套句に終始するばかりであった。しかし、こうした事態は冒頭に述べたように、あらゆる科学的'真理'がたどる宿命であるにすぎず、電磁波に関して生体への「影響なし」という主張を保証するものではない。同一刺激の反応の多様性こそ、生体反応の本質である(ヴァイツゼッカー、1942; アントニオ・ダマシオ、1994)。生体は単に'刺激'に対して反応するばかりでなく、'刺激に対する反応'にも反応してしまう。つまり、単純な'刺激への反応'から、より複雑な'反応への反応'へと転換するのである。しかも、入力刺激の外面的な多様性は、内面的には基本的に共通の反応ネットワークの自己組織化過程として捉えられることになるのである。

こうした反応ネットワークの自己組織化によって、ある種の'記憶'効果がもたらされることにもなる。そのために、複雑な反応の自己組織化過程を繰り返しながら絶えず統合をはかろうとしている生体という巨大なシス

テムーいわゆる、スーパーシステム（多田富雄、1993）—の中で、実際にどのような反応カスケードが‘構成的に選択’されるかが、興味をそそられる問題となる。なぜなら、それによって、生体反応の結果には、ありとあらゆる可能性が内包されるからである。つまり、‘統合の成立’による‘発展の可能性’から‘統合の障害’による‘崩壊の危険性’をも含むことになるのである。これを生命現象の言葉で‘翻訳’するならば、‘進化と老化’、あるいは‘認識と病気’といった全く相反する現象が、同一過程の異なる展開として捉えられるということである（村瀬雅俊、2000）。

全く同じ人間が世界に二人と存在しない以上、‘構成的な選択’のあり方も全く異なる。同一刺激に対して、どのような反応を最終的に‘自覚’するか、個々人によって異なるのは当然である。しかも、同一の人間であっても、全く同一の状態は二度と再現しない。そのために、同一刺激であるにもかかわらず、‘構成的な選択’によって、全く異なる反応を‘自覚’することにもなる。‘再現性’ばかりを重視する物質科学の方法が、必ずしも生命科学の方法としてそのまま適用できない理由がここにある（寺田寅彦、1936、中谷宇吉郎、1958、湯川秀樹、1976）。そして、このように考えてくると、電磁波曝露の実験結果に生体への‘影響あり’と生体への‘影響なし’というバラツキがあるということは、生体への‘影響なし’を意味しているのではなく、生体への‘影響の現れ方が多様である’—ということを意味していることに過ぎないことに気づかされる。

3. 電磁波の生体への影響における病理学と健康科学

コロンビア大学の Blank によれば、‘微弱な電磁波であっても、その生体分子や細胞への影響は疑う余地がない。現時点で確証されていない点は、電磁波曝露と生体レベルでの病気発症との明白な因果関係である’—ということである。この‘生体レベルでの病気発症との明白な因果関係を探る’——ということは、分子・細胞レベルの影響が生体という個体レベルにどのように現れるかというメカニズムの探求に他ならない。そして、この‘構成的な選択’過程で行われる、いわゆる‘情報増幅作用’を明らかにすることこそ、‘生命とは何か’を問う生命科学の重要なテーマなのである。しかも、脳科学者であるアントニオ・ダマシオ（1994）が提唱している、ソマティック・マーカー仮説 — すなわち、身体反応を媒介とする認識論 — を思い起こすならば、身体レベルの‘情報増幅作用’は、究極的には‘認識とは何か’を問う脳神経科学の重要なテーマと考えるべきなのである。そういう意味では、私たちの関心を‘電磁波’—という狭い領域に限定してしまうことは、問題の全体像を捉え、かつその問題を解決に導くためには、必ずしも賢明ではないことが理解できる。

統合的な‘ものの見方’を意識的に構築していく際に、電磁波による生体・環境汚染としての‘負’の側面ばかりでなく、再生医学の観点からも有効な治療法としての‘正’の側面をも念頭におかなければならない。この両面性を科学的データに基づいてはじめて総合的に論じたのが、ニューヨーク州立大学医学部の Robert, O. Becker である。彼は、そ

の著書“Cross Currents”の冒頭を、次のように書き出している。

“Cross Currents” describes the meeting of two opposing trends: the rapid rise of electromedicine, which promises to unlock the secrets of healing, and the parallel rise of electropollution, which poses a pressing environmental danger.

The book explains that current popular healing practices use an invisible common source: the body's innate electrical systems. While this discovery is coming to light, “Cross Currents” reports evidence that these same bodily resources are being adversely affected by man-made electromagnetic fields from widespread technologies.

Robert, O. Becker

この著書で、Beckerは、骨折時にしばしば問題となる‘癒合欠如’という骨細胞の不癒合における治療効果として、電磁波の影響を詳説している。ここに、生体を単なる化学反応系と見なしてしまう従来までの生物化学の‘ものの見方’への反省が込められている。このように、電磁波の生体への影響を考える際には、分子・細胞レベルにおける、いわゆる‘ストレス反応’ばかりでなく、‘癒合欠如’の治療効果としての細胞レベルの‘再生現象’をも含めた、さまざまな形で現れている現象に着目し、そうした分子・細胞レベルの現象が、個体レベルへどのように増幅していくかを調べる必要があるのではないだろうか。

4. 研究会『電磁波と生体への影響』開催の意義

以上のような理由から、昨年、『電磁波と生体への影響』についての京都大学基礎物理学研究所研究会を企画した。企画するにあたって、私がとくに留意した点は、電磁波の生体への影響を研究してきた専門家以外の研究者にも参加して頂くことであった。数十億年の進化の歴史を刻んできた生命にとって、「未だ経験したことのない人工電磁波が、どのような作用を及ぼしうるのか」について考察する際に、先入観にとらわれない斬新な視点がどうしても欠かせないからである。

この研究会は、2003年に創立50周年を迎えた京都大学基礎物理学研究所で行われた『電磁波と生体への影響』に関する、はじめての学術的かつ学際的の研究会であった。参加者は90名を超え、物理学者・医学者・生物学者・工学者との間で、学際的・学術的な議論が2日間にわたり、活発に行われた。その報告書は150ページに及び、2004年4月号の『物性研究』に特集として掲載される(資料1)。この研究会を契機に、閉鎖空間においてホットスポットと呼ばれる電磁波強度の著しい場所がどのように形成しうるかに関する計算機実験、および測定器を用いた実測実験が始まるとともに、電磁波負荷実験によって脳血流量がどの程度変動するかに関する定量的研究も行われる段階になる等、新たな研究活動へと発展する動きが見られている。

こうして、研究会を終えて、現時点で言えることは、電磁波の生体への影響についてこれまで確定的な結論が得られなかったのは、電磁波の生体への影響が無視できるほど小さいからではなく、既に得られている生命科

学・脳神経科学の知識、あるいは現在新発見が相次いでいる生命科学・脳神経科学の知識が十分に統合されていないためであることに気づかされた。その意味では、‘統合生命科学’や‘高次脳神経科学’が未だ発展途上なのである。さらに、私たちの意識的な認識過程に先行して進化してきた生命過程を基盤として、多様な現象を統合的に捉える哲学—いわゆる、生命哲学—が未だ発展途上だとも言える。

このような統合的な‘ものの見方’の構築への努力とは独立に、現実の状況は予断を許さない。例えば、低周波電磁波の曝露に関する疫学研究によって、小児白血病のリスクが高くなる傾向が、この四半世紀に繰り返し報告されてきた (Wertheimer, N. and Leeper, E., 1979)。既に明白になってきた化学物質の生体への影響から学んだ貴重な教訓を、無駄にしないためにも、「電磁波の生体への影響に関して確定的な結論が得られていない」という現時点においてこそ、その影響の可能性を視野に入れた防御策を事前に検討・実施するという‘予防原則’に真剣に取り組まなければならない。1996年1月、私は当時全く知られていなかった‘プリオン’に着目し、その知見が、アルツハイマー病をはじめとする医学・生物学の重要な問題解決の糸口となるばかりでなく、その起源と進化を探ることによって新たなプリオン病の発症が起ころうることを予見したのである (M. Murase, 1996)。そして、不幸にもその予見が論文発表から数ヶ月もたたないうちに、いわゆる‘狂牛病パニック’として現実のものとなってしまった (村瀬雅俊、2000)。しかも、今日に至っても、狂牛病の発症は衰えを知らない。そのことを考えると、電磁波に関して‘予防原則’

にのっとった対策が今こそ求められるということ、ここで、大いに強調しておきたいと思う。

電磁波の生体への影響を考える場合、その影響として病理的側面と治療的側面の両面性に着目することが必要不可欠である。どちらの側面からアプローチするにしても、電磁波の作用部位はどこか、また電磁波の作用機序は何かに関して、同じような学問的な寄与が期待できるのではないかと私は思う。もちろん、こうした問題は、まだまだわからないことが多い。従って、これらの本質的な問題の解決に向けて、研究会を継続していかねばならないと思う。

5. 人工電磁波の生体への影響の解明に向けて

電磁波曝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に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。そのために、たとえば携帯電話に使用されているマイクロ波に関する現行の被曝制限基準値は、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算出されてきた。つまり、生体が電磁波に被曝した際に、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、現行の被曝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。

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、私は、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’を提示した (村瀬雅俊、京都大学基礎物理学研究所)。

6. 電磁波ホルモン作用仮説

私が提唱する‘電磁波ホルモン作用仮説’とは、特定周波数、特定強度の電磁波を細胞や脳神経系に特定時間照射することによって生理活性作用 — いわゆる、ホルモン作用 — が及ぼされるという仮説である。電磁波の作

用部位の候補として、細胞レベルでは、細胞の「内」と「外」の情報を統合し、細胞増殖やホルモン分泌などを制御する、‘G-タンパク質’ (M. I. Simon, *et al.*, 1991; T. D. Lamb and E. N. Pugh, Jr., 1992; M. E. リンダー、A. G. ギルマン、1992; R. A. Luben, 1995; 兜真徳、石堂正美、2001) と呼ばれる情報統合分子が考えられる。また、脳神経系レベルでは、体温や血液成分の変化といった生体からの「内部環境」の情報と、感覚系を介して知覚される外界からの「外部環境」の情報とを統合する大脳辺縁系が考えられる。

この‘ホルモン作用仮説’の重要な点は、細胞レベルあるいは脳神経系レベルのそれぞれの階層レベルにおいて、入力刺激が機械的なものか、化学的なものか、生物学的なものか、あるいは電磁気学的なものかにかかわらず、各階層レベルごとに同じような情報伝達経路が‘構成的に選択’されてしまうことである。しかも、‘構成的に選択’された情報伝達経路の‘表現型’を眺めてみると、入力刺激の‘影響’の発現のあり方が実に多様なものである。言い換えるならば、環境認識のあり方に多様性があり、その多様な反応様式のなかに、いわゆる環境病が発症してしまう危険性も含まれてしまうことになる。しかも、環境病の発症にあつては、認識過程自体が支障をきたすために、本人は自らの病的状態を認識することが極めて困難となる。こうしたいわゆる‘病徴不覚症’ (A. ダマシオ、1994) のような病態が、環境因子の生体への影響に関する評価を難しくしている。

また、‘電磁波ホルモン作用仮説’の提唱にあたっては、さまざまな病理や病態を、細胞レベルや脳神経系レベルでの情報統合の障害

として捉え直す‘ものの見方’を提示し、その有効性を強調した。なぜなら、そのような‘ものの見方’を持つことによって、細胞増殖抑制を逃れるがん細胞の発生、環境刺激因子に対して過敏に反応してしまう過敏症、さらに高次レベルの発達異常や行動障害といった病態を、それらの見かけ上の多様性・複雑性に惑わされることなく、統一的に理解することが可能となるからである。

7. 電磁波ホルモン様作用仮説の根拠と

Window 効果

理論物理学者シュレーディンガーは、名著『生命とは何か』の中で、‘遺伝子のジレンマ’について言及している。遺伝子という分子は文字通り‘遺伝子’として機能するためには、生物の遺伝情報をコードできるくらい大きくなければならない。しかし、その分子は、細胞の核に収まっていなければならないくらい小さい。そして、小さい分子は熱運動によって激しく損傷を受け、それによって突然変異が起こってしまう。そのために、‘遺伝子’としての情報保存機能がなくなってしまう。

この‘遺伝子のジレンマ’を解決するために、シュレーディンガーは量子力学を持ち出した。エネルギー準位がとびとびの値をとることと、遺伝子のそれぞれの突然変異とを対応させ、それによって隣り合った2つのエネルギー準位の中間のエネルギーが現れないことと、生物の変異個体と正常個体の中間形が現れないことを対応させようとしたのである。

これは、‘物質の科学’を通して培ってきた‘ものの見方’を、‘生命の科学’にも適用しようとした例である。ところが、実際にはそ

うした考え方は、全くの誤りであったことが、DNA修復酵素の発見(例えば、Friedberg、1985)によって明らかになった。

実際には、遺伝子は日常的に突然変異を受けている(例えば、近藤宗平、1982; 松田外志朗、2004)。見かけ上、突然変異が起きているように「遺伝子」として遺伝情報の安定性が保持されているのは、DNA修復酵素が機能しているためである。シュレーディンガーが量子力学によって「遺伝子のジレンマ」の解決を試みるより数十億年も前に、自然は日常的な刺激因子(例えば、太陽光)に対して、その影響を「消去」する抑制系を進化させることで解決してきたのである。

物理学の考え方を安易に生命現象に応用するのではなく、「生命の科学」に適した「ものの見方」を、生命現象に即して創り上げていかなければならない。その1つの「ものの見方」として、私は「活性系」と「抑制系」の拮抗に基づく調節原理に着目したいと思う。ここでは、この活性系と抑制系がどのような実験結果と関連するかについて述べておきたい。

北里研究所病院・臨床環境センターの宮田幹夫(2004)は、一般に化学物質刺激に対する生体反応においては、微量な刺激で増強し、大量の刺激で抑制されることを強調している。これは、これまでの毒性学の常識では考えにくい現象である。しかし、活性系と抑制系の作用する閾値がそれぞれ異なるならば、こうした現象は生じる。東京都神経科学研究所の黒田洋一郎(2003)も、「用量作用曲線が逆U字形となることがあるのは、体内のホメオスタシスを保つために、高濃度になるとフィードバック系が働き出すためであろう」と述

べている。

同じことが、電磁波の生体への影響についても調べられている。その1つが、カリフォルニア大学ロサンゼルス校、脳研究所の R. Adey (1983) による、Window 効果の発見である。

Window 効果として、3つのタイプが知られている。第一のタイプは、周波数感受性である。脳神経細胞からのカルシウムイオンの流出に基づいて、147 MHz、 8 W/m^2 のマイクロ波曝露の影響を調べたところ、目立った影響は見られなかった。ところが、このマイクロ波に 16 Hz の振幅変調を加えて、同じ実験を試みたところ、カルシウムイオンの流出が見られたのである。また、周波数 16 Hz、電場強度 56 V/m というさらに弱い電磁波 — ちなみに、地球上の電場強度はだいたい 130 V/m (Blank, 1995) である — を照射したところ、やはり、カルシウムイオンの流出が観測された。こうして、脳神経組織には、特定周波数の電磁波に敏感に感受性を示すという Window 効果の存在が明らかになった。

Window 効果の第二のタイプは、時間感受性である。ヒトリンパ球における cAMP 非依存型タンパク質リン酸化活性を、16 Hz に振幅変調された 450 MHz、 10 W/m^2 のマイクロ波を照射して調べたところ、照射開始から 15 ~ 30 分間にその活性が半減した。ところが、電磁波の照射をそれ以後も続けていくうちに、リン酸化活性が正常値に回復したのである。これが、電磁波の連続照射における特定時間効果としての Window 効果である。

第三のタイプは、電磁波の強度感受性である。私が提唱している電磁波のホルモン作用仮説の有力な証拠として、電磁波照射がスト

レスタンパク質と呼ばれる特殊なタンパク質 (ウエルチ、1993) の遺伝子発現を引き起こすという実験がある (Goodman and Blank、1995)。このストレスタンパク質のいくつかは、‘分子シャペロン’ とも呼ばれ、狂牛病の原因タンパク質とされるプリオンとの関連が指摘されている (Murase、1996)。このストレスタンパク質が産生される条件は、表 1 に示すとおり、実に多様である。その中で、コントロールしやすい環境ストレスとして、熱

ショックとともに電磁波がある。こうしたストレスを用いて、ショウジョウバエなどの双翅類幼虫唾液腺細胞への影響が調べられている。それによると、ある特定温度範囲に限ってストレスタンパク質が特異的に産生されるのと同様に、ある特定強度の電磁波に対してもストレスタンパク質が産生されるのである。これが、電磁波の強度感受性を示す Window 効果である。

表 I ストレスタンパク質を発現する、環境ストレス、生物学的ストレス、および生体内の正常過程

環境ストレス	生物学的ストレス	生体内正常過程
熱ショック 遷移元素に属する重金属 エネルギー代謝の阻害剤 アミノ酸の類似物 化学療法剤 電磁波	ウイルス感染 発熱 炎症 虚血 酸化反応 フリーラジカル反応 悪性腫瘍	細胞分裂 分化と発生

刺激が物理的であるか、化学的なものであるか、あるいは生物学的なものであるかという違いによらずに、同一の遺伝子発現によってストレスタンパク質が産生される。

ストレスタンパク質が、熱ショックによっても、電磁波によっても同じように産生されることを述べた。ここで、両者のエネルギー密度についての計算値を紹介したい (Goodman and Blank、1995)。5.5 度の加熱によって産生されるストレスタンパク質と同程度の反応が 8 mG、60 Hz 電磁波によって引き起こされている。5.5 度の温度上昇による熱ショックのエネルギー密度は、生体での熱容量を水の熱容量とすると、 $2.3 \times 10^7 \text{ J/m}^3$ となる。一方、8 mG の磁場上昇に伴うエネルギー密度は、生体での透磁率を空中と同じとすると、 $2.6 \times 10^{-7} \text{ J/m}^3$ であった (表 II)。エネルギー

密度の計算では 14 桁もの差があるにもかかわらず、遺伝子発現に見る生体反応としては同じなのである。物理学の計算に基づいて、生命現象を捉えようとする試みがなかなか成功しないのは、こうした生命現象特有の問題が至る所に存在しているためである。

表 II 同程度のストレスタンパク質を産生する温度上昇と磁場上昇に対応するエネルギー密度

	エネルギー密度
温度上昇 5.5 度	$2.3 \times 10^7 \text{ J/m}^3$
磁場上昇 8 mG	$2.6 \times 10^{-7} \text{ J/m}^3$

8. 2004 年京都大学基礎物理学研究所研究会『電磁波と生体への影響—作用機序の解明に向けて—』の課題

昨年の研究会における報告では、電磁波の非熱的相互作用によって、単細胞レベル、多細胞レベル、個体レベル、集団レベルなどで細胞運動の変化、細胞分裂の異常、過敏症の発症、小児白血病の増加が見られている。このように多様な影響が現れる根拠として、電磁波が生体に対して単一な作用部位に働き、その作用機序も単純であるとは考えにくい。

物理学者リボフ (Liboff, 2003) が提唱しているサイクロトロン共鳴理論では、地球磁場の影響で回転運動している生体膜内のイオンが、さらに人工電磁波に被曝すると、その低周波数成分に共鳴し、イオンが生体膜の外へと流出 (あるいは、うちへと流入) する。確かに、この理論に適合する実験事実は、細胞レベル、組織レベルでいくつも報告されている。しかし、国立環境研究所の実験で示されている発がん機構など、サイクロトロン共鳴理論で説明できない実験も多数ある。しかも、サイクロトロン共鳴理論は、電磁波被曝の対象が生体であるか物質であるかにかかわらず、同一の作用機序を想定している。

ところが近年、ヒトの脳組織からマグネタイトと呼ばれる磁石が発見された (Kobayashi and Kirshvink, 1995)。この点を考慮すると、電磁波の作用部位、作用機序はともに多様であると考えられる。具体的な作用部位としては、マグネタイトが結合している組織はもちろんのこと、細胞内外の情報を統合している細胞膜、さらには 10~1000 Hz で活性化・不活性化を繰り返している機能タンパク質などが考えられる。生体ごとに、また細胞ごとに、

これらの機能タンパク質の種類や構造が異なるために、同一の電磁波刺激に対して反応は実に多様に現れることになる。この反応が多様であるということは、同一実験に対して矛盾する結果が得られる可能性も含まれる。これまでは、こうした矛盾する結果があるために、電磁波の影響は立証されていないという主張が繰り返されてきた。しかし、このように矛盾した結果があるという事実こそ、電磁波の影響が無視できないことを意味しているのではないだろうか。しかも、これまでの疫学研究では、低周波電磁波と小児白血病といった特定の相関しか問題としてこなかった。ところが、電磁波の作用部位と作用機序が多様であるならば、例えば、アルツハイマー病と電磁波の相関、あるいは不定愁訴と高周波電磁波の相関といった様々な組み合わせを考慮する必要も生じてくる。

もちろん、疫学研究では長期間にわたる調査が必要となるため、因果関係を特定することは困難である。また、仮に因果関係が明らかになったとしても、作用機序はわからない。そこで、これまでに蓄積されてきた医学、生物学、物理学の成果をもとに、電磁波の非熱的相互作用のメカニズムを同定することが重要な課題となる。低エネルギーの電磁波が、生体反応を引き起こす作用機序としては、生体特有のメカニズムを考える必要がある。これは、対象が生体であるか物質であるかにかかわらず、同一のメカニズムを想定していた従来までの視点とは著しく異なる。具体的には、生体内の情報増幅過程に着目したい。というのは、生体内の情報増幅酵素が、電磁波の作用部位となるならば、人工化学物質が環境ホルモンとして作用する場合と同じように、

電磁波にもホルモン作用が認められることになるからである。そのような情報増幅酵素は、連合学習や記憶を伴う学習過程に機能していることが明らかになっている。つまり、学習メカニズムが電磁波の影響を発現するメカニズムへと転化している可能性があるということである。逆に言えば、記憶障害や学習能力の低下といった脳機能の変調が、電磁波のホルモン作用を通して起こりうることが考えられる。このような観点から、本年度の研究会では、脳科学者、細胞生物学者、臨床医学者、物理学者、工学者とのクロストークを行い、作用機序の解明を目視したいと思う(資料2)。皆さんの積極的な議論への参加をお願いしたい。

9. おわりにー‘環境物理学’への期待ー

『物理学序説』の中で寺田寅彦も強調しているように、従来までの‘物質の科学’としての物理学の対象は、「吾人の認識する万象の中からあらゆる精神の作用に関するものを排除し、またあらゆる生活現象を捨象し残るところの物」としての「物質界である」。そのおかげで、私たちは自己の存在を忘れて、外界に存在する対象の分析ーすなわち、対象「内」分析ーおよび異なる対象の比較ーすなわち、対象「間」比較ーを行い、いくつかの現象や関係性を統合し、自然法則の発見に専念できたのである。

しかし、こうした対象認識のあり方に飽きたらず、より高次の認識・統合過程を経て、「外なる対象」の認識から「内なる認識」の認識へと‘認識対象の転換’が起こり、いわゆる‘認識の科学’が誕生したのである。これが‘認識の系統発生’たる科学史における

第一のパラダイム転換である。ところが、この‘認識の科学’は認識機構の進化というダイナミックな過程を忘れて、進化の結果として発生・分化してきた高次脳神経系に、多様な認識機構をすべて還元して理解しようとする誤謬を冒してしまった。ここに、心身二元論の起源がある。そのため、こうした‘認識の科学’からは、環境問題への提言がなされてこなかったのもっともなことである。

環境認識は、高次脳神経系に限って行われるわけではない。脳神経系および身体系を含む、いわゆる生体系が、環境認識を可能にできたのである。そして、この生体系の環境認識機構こそが、環境汚染の際に、いわゆる‘環境病’発症機構へと転化してしまうのである。このように眺めるならば、「生活現象」に密着した‘環境の科学’という立場は、「生活現象」を捨象した伝統的な‘物質の科学’の立場と対極に位置づけられる。その意味から、‘環境物理学’の誕生は、科学史における第二のパラダイム転換といえよう。

私が主張したいことは、電磁波に限らず、あらゆる環境因子が、複合的に私たちの認識機構に影響を与えており、それゆえに自己認識の変容を認識できなくなっているという事実である。そうした事実は、一般の人々には非常に敏感に‘認識’されてきている。ところが、従来までの物理学に捕らわれている専門家には、なかなか‘認識’されないようである。そのような学問的弊害の中で、2003年5月30日(金)～31日(土)に、京都大学基礎物理学研究所において、研究会『電磁波と生体への影響』を開催し、多くの成果をあげ、さらに、2004年1月22日(木)～23日(金)に行われた、京都大学基礎物理学研究所第

129 回研究部員会議で、次回の研究会『電磁波と生体への影響—作用機序の解明に向けて—』(2004 年 5 月 20 日(木)～21 日(金)に開催)が、満場一致で 10 分足らずで審議採択されたことは、大きな前進ではないだろうか。

私は、‘環境物理学’を従来までの伝統的な‘物質の科学’の延長線上で捉えるのではなく、主体である‘自己’と対象である‘非自己’の分離を高次レベルでの統合を目指す、いわゆる‘自己・非自己循環原理’(村瀬雅俊、2000)の一貫として捉えたいと思う。古来からの哲学者の思索に、‘環境物理学’はどこまで近づくことができるか、現代に生きる私たちの人智が今こそ問われている。

謝辞

研究会『電磁波と生体への影響』の講演をこころよくお引き受けいただいた、すべての講演者の方々、ならびに世話人をお引き受けいただいた方々に、心より感謝いたします。また、研究会にご参加いただいたすべての方々にも感謝いたします。

また、以下の講義、講演の機会を与えて頂いた機関、ならびに大学院生、大学生、高校生、小学生、さらに教職員ならびに一般の聴講者の方々に、いろいろな励まし、貴重なご意見などをいただきました。ここに記して、感謝いたします。

1. 立命館大学理工学部物理学科夏期集中特別講義『歴史としての生命—自己・非自己循環理論の構築』 2002 年 9 月 17 日～9 月 20 日(午前 9:00～午後 5:00)

2. 京都市立大枝小学校出張授業 『身のま

わりの電磁波』 2002 年 12 月 6 日(午後 1:00～3:00)

3. 京都大学高大連関公開講座『統合生命科学への招待 I、II』

滋賀県立膳所高等学校 2003 年 5 月 2 日、6 月 20 日(午後 5:00～6:30)

奈良県西大和学園高校 2003 年 8 月 26 日(10:30～12:00、1:30～3:00)

4. 京都大学大学院理学系研究科物理学専攻大学院講義『構成的認識の理論と実践—生命マンドラにおける「内」と「外」の対立から統合へ—』2003 年 7 月 1 日～10 月 28 日(毎週火曜日、午前 10:30～12:00)

5. 立命館大学理工学部物理学科夏期集中特別講義『構成的認識論—自己・非自己循環理論とその実践—』 2003 年 9 月 16 日～9 月 19 日(午前 9:00～午後 5:00)

6. 奈良県立医科大学特別講演『電磁波と生体への影響』 2003 年 12 月 4 日(午後 14:40～16:10)

7. 京都市立小学校西京区教員研修 『電磁波と生体への影響』 2003 年 8 月 19 日(午前 10:00～12:00)

8. 京都市立大枝小学校出張授業 『環境』 2003 年 12 月 4 日(午前 10:00～12:00)

9. 琉球大学理学部物質地球科学物理系集中講義『統合生命科学への招待—構成的認識の意味論—』 2004 年 2 月 4 日～2 月 7 日



文 献

1. 湯川秀樹 (1966) 「科学的思考について」『学問について』(湯川秀樹著作集1) 岩波書店、1989年。
2. 湯川秀樹 (1976) 『目に見えないもの』講談社学術文庫。
3. 中谷宇吉郎 (1958) 『科学の方法』岩波新書。
4. ピアジェ, J.、ガルシア, R. (1983) 『精神発生と科学史—知の形成と科学史の比較研究』(藤野邦夫、松原望 訳) 新評論、1996年
5. Murase, M. (1992) *The Dynamics of Cellular Motility*. John Wiley & Sons; Chichester.
6. Murase, M. (1996) Alzheimer's Disease as Subcellular 'Cancer': The Scale-Invariant Principles Underlying the Mechanisms of Aging. *Progress of Theoretical Physics* 95, 1-36.
7. 村瀬雅俊 (2000) 『歴史としての生命—自己・非自己循環理論の構築』京都大学学術出版会。
8. 村瀬雅俊 (2001) 「こころの老化としての『分裂病』—創造性と破壊性の起源と進化」『講座・生命 vol. 5』(中村雄二郎、木村敏 監修) 河合文化教育研究所、河合出版。
9. 村瀬雅俊 (2004) 『電磁波の生体への影響—ホルモン様作用仮説の提唱』物性研究、4月号。
10. カーソン, R. (1962) 『沈黙の春』(青樹梁一 訳) 新潮社、2001年。
11. Rea, W. J. (1992) *Chemical Sensitivity Vol.1: Mechanisms of Chemical Sensitivity*. Lewis Publishers; Boca Raton, FL
12. Rea, W. J. (1994) *Chemical Sensitivity Vol.2: Sources of Total Body Load*. Lewis Publishers; Boca Raton, FL
13. Rea, W. J. (1996) *Chemical Sensitivity Vol.3: Clinical Manifestations of Pollutant Overload*. Lewis Publishers; Boca Raton, FL
14. Rea, W. J. (1997) *Chemical Sensitivity Vol.4: Tools of Diagnosis and Methods of Treatment*. Lewis Publishers; Boca Raton, FL
15. コルボーン, T.、ダマノスキ, D.、マイヤーズ, J. P. (1996) 『奪われし未来』(長尾力 訳) 翔泳社、2001年。
16. 有吉佐和子 (1975) 『複合汚染』新潮文庫。
17. ヴァイツゼッカー, V. (1942) 『生命と主体—ゲシュタルトと時間/ アノニューマ』(木村敏 訳) 人文書院、1995年。
18. ダマシオ, A. R. (1994) 『生存する脳—心と脳と身体の神秘』(田中三彦 訳) 講談社、2000年
19. 多田富雄 (1993) 『免疫の意味論』青土社。
20. 寺田寅彦 (1936) 『物理学序説』(寺田寅彦全集第十巻) 岩波書店 1997年。
21. Becker, R. O. (1990) *Cross Currents: The Promise of Electromedicine, The Perils Electropollution*. Jeremy P. Tarcher/ Putnam, New York.
22. Blank, M. (1995) *Electromagnetic Fields: Biological Interactions and Mechanisms* (Advances in Chemistry Series 250). American Chemical Society; Washington, DC.
23. Wertheimer, N. and Leeper, E. (1979) Electrical Wiring Configurations and Childhood Cancer. *American Journal of Epidemiology* 109 273-284.
24. Luben, R. A. (1995) Membrane signal-transduction mechanisms and biological effects of low-energy electromagnetic fields. In *Electromagnetic Fields: Biological Interactions and*

- Mechanisms* (Advances in Chemistry Series 250), Martin Blank (ed.), American Chemical Society; Washington, DC, 437-450.
25. Goodman, R. and Blank, M. (1995) Biosynthetic stress response in cells exposed to electromagnetic fields. In *Electromagnetic Fields: Biological Interactions and Mechanisms* (Advances in Chemistry Series 250), Martin Blank (ed.), American Chemical Society; Washington, DC, 423-436.
26. 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.
27. Liboff, A. R. (2003) Ion cyclotron resonance in biological systems: experimental evidence. In *Biological Effects of Electromagnetic Fields: Mechanisms, Modeling, Biological Effects, Therapeutic Effects, International Standards, Exposure Criteria*. Peter Stavroulakis (ed.) Springer-Verlag; Berlin, Germany, 76-113.
28. Adey, W. R. (1983) Field effects on neural nets: molecular aspects of cell membranes as substrates for interaction with electromagnetic fields. In *Synergetics of the Brain*, E. Basar, H. Flohr, H. Haken, and A. J. Mandell (eds.) Springer-Verlag; Berlin, Germany, 201-211.
29. リンダー, M. E., ギルマン, A. G. (1992) Gタンパク質、日経サイエンス9月号、46-55。
30. ウエルチ, W. J. (1993) 細胞はどのようにストレスに反応するか、日経サイエンス7月号、106-117。
31. Darwin, C. (1859) *The Origin of Species*. Prometheus Books; New York, 1991.
32. Jerne, N. K. (1955) The natural-selection theory of antibody formation. *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.A.* 41, 849-857.
33. Burnet, F. M. (1957) A modification of Jerne's theory of antibody production using the concept of clonal selection. *The Australian Journal of Science* 20, 67-69.
34. Simon, M. I., Strathmann, M. P. and Gautam, N. (1991) Diversity of G proteins in signal transduction. *Science* 252, 802-808.
35. Lamb, T. D. and Pugh, E. N., Jr (1992) G-protein cascades: gain and kinetics. *TINS* 15, 291-298.
36. ピアジェ, J (1952) 『知能の心理学』(波多野完治、滝沢武久 訳) みすず書房、1960年。
37. ピアジェ, J. 『発生的認識論』(滝沢武久 訳) 白水社、1972年。
38. リードル, R. 『認識の生物学—理性の系統発生史的基盤』思索社、1990年。
39. 黒田洋一郎 (2003) 「子どもの行動異常・脳の発達障害と環境化学物質汚染: PCB、農薬などによる遺伝子発現のかく乱」科学 73、11月号、1234-1243。
40. 近藤宗平 (1982) 『生命を考える—遺伝子・進化・放射線—』岩波現代選書。
41. 兜真徳、石堂正美 (2001) 「電磁波の健康リスク—超低周波の磁界が発がん性はあるか—」科学 71、2月号、150-159。
42. Friedberg, E. C. (1985) *DNA Repair*, W. H. Freeman and Company; New York.