

電子移動反応と電磁波

京大基礎物理学研究所協力研究員 山田 耕作

(2006年8月21日受理)

1. はじめに

今年(2006年)6月の基礎物理学研究所の研究会「環境物理学」で「生体と電磁波」の問題でコメントしたが、その内容を本誌「物性研究」に投稿し、問題を提起したい。

問題は国立環境研究所の兜さんたちの電磁波によるわが国の小児白血病増大の疫学研究が文部科学省の評価でC判定とされたことである。¹⁾ 0.4 μ テスラ(4ミリガウス)以上の強さの交流(振動)磁場で小児白血病が2.6倍に、急性リンパ性白血病に限れば4.7倍に増大する結果である。アメリカ物理学会など多くの物理学者は数ミリガウスという弱い磁場で影響が出るというのが信じがたいという。静磁場である地磁気が約50 μ テスラ(500ミリガウス)であるから、それに比べ2桁も小さいからである。しかし、疫学は科学であって、ミクロな機構までを明らかにしないかもしれないが、正しく適用されておれば電磁波と病気の発生との関係を証明するものである。現実にスウェーデンはじめ世界各国における疫学調査は数ミリガウスの振動磁場で小児白血病が倍増するという共通の結果を示している。物理学者は生物に対する知識を十分持たないにも関わらず、時々生物の領域にまで踏み込んで、越権行為と思われる判定を下すことがある。このような時、私たち物理学者に、物理的判断ですべてが決定できるという傲慢な態度が見られることがある。科学者は常に謙虚で自分の判断できる領域について慎重でなければならない。単純な物理的な機構では不可能に見えることでも、40億年の進化の過程を経た生物は巧妙な機構を持っているかもしれない。特にこのような境界領域の分野における先人たちの努力に学び、それを真摯に検討しなければならない。疫学が正しいとすると本当に数ミリガウスで影響するミクロな機構があるのであろうか。それはどのような機構であらうか。これがこの小論のテーマである。

2. 電子移動反応

昨年(2005年)の電磁波と生体の研究会では基礎物理学研究所の村瀬雅俊さんの推薦で、基礎物理学研究所の援助によって、コロンビア大学のMartin Blankさんを招待し、講演して頂くことができた。結局、今年、1年遅れて私が手元の文献等で調べた限り、数ミリガウスでの影響を調べた実験がほとんどないことがわかった。そして、Blankさんたち少数の

実験と説明が数ミリガウスでの影響を捉えているのみであることがわかった。微弱な電磁波であり、ウィンドウ効果といわれる特定の条件下（周波数や強度など）でのみ影響が現れ、実験が難しいのである。

なぜそのような弱い磁場で影響が出るのかということであるが、鍵は電子であるというのが Blank さんたちの主張である。通常、K（カリウム）やCa（カルシウム）イオンが細胞膜を通過することによってイオン電流が流れ、それらのイオンは神経伝達物質として注目される。しかし、Blank さんたちの考えによると、同じ力が働いても、イオンの数千倍も軽い電子の方が数千倍の加速度を受け、大きな影響を受けるのである。加速度は働く力を加速度を受ける運動体の質量で割ったものであるから、このような考察は物理的に正しい。磁場によって働く力は qvB とかけるから、重力と違って質量によらない。qは粒子の電荷であり、vは粒子の速度である。Bは磁場の強さである。力はローレンツ力として良く知られているように、速度vと磁場Bに垂直な方向に働く。遺伝子DNAの内部を秒速400m/sから1000m/sで電子が移動しているという実験が報告され、強い力が働いている可能性がある。実はこのDNA鎖に垂直に働く力が2重螺旋を解いて、転写反応を引き起こす上で重要であるとBlankさんたちは考えているようである。

なお、静磁場中のイオンの回転運動が振動磁場に共鳴することによる機構（サイクロトロン共鳴）が提案されているが、はっきりしたデータが得られていないように思う。

3. 電子移動反応が電磁場で影響される時の特徴²⁾

- ①電磁場が電子移動反応を加速する。
- ②電磁場は化学反応の力（反応の強さ）と競合する。反応力が強いと電磁場の影響が弱いが反応が弱いと強い影響を受ける。
- ③電磁場はDNA中の電子を1nsecに1nm移動させることができる（後述）。

2本のDNA鎖を結合する水素結合の距離は0.2から0.3nmである。そのためDNAの遺伝子を担う基の転写反応に影響する。

④DNA中で長い二重螺旋の方向に電子は400から1000m/sの速度vで移動する。電荷eを持つ粒子に磁場Bがかかると evB の力を受ける。ここで $e=1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ 、 $v=1000 \text{m/s}$ 、 $B=10 \mu \text{T}=10^{-5} \text{T}$ を代入すると（Tはテスラ）、電子に働く力は、 $F=10^{-21} \text{N}$ となる。電子の質量は $9.1 \times 10^{-31} \text{kg}$ であるから、加速度は 10^{-9}m/s^2 となる。この加速度では等加速度運動を仮定すると1nsの間に0.5nmから1nm移動する。これはvに垂直な加速度であるから、螺旋に垂直な方向である。つまり、二重螺旋を引き離す運動となる。これが③で得られた結論である。そこで述べたように、水素結合の長さが約0.3nmであるので、電磁場は十分水素結合の電子を移動させたり、摂動を与えることができる。こうして遺伝子の転写反応がかく乱される。そして遺伝子の発現が阻害される。これは環境ホルモンと似た性質である。胎児や幼児など遺伝子発現が活発に起こる時期には影響が大きいと考えられる。なお、水素結合のプロトンの振動数は 10^{12} 程度（周期1ps）であり、1nsはその振動周期

の1000倍に当たる。そのくらいの時間でDNA鎖が切れると考えるのであろう。

さらに Blank さんたちは電子移動反応である BZ (Belousov-Zhabotinsky) 反応を調べ、①、②と同じような磁場の影響に関する結果が得られることを示した。ここで大切なことは、BZ 反応は細胞膜無しに起こるから、この実験は膜を通じてのイオンの移動ではなく、電子移動反応が本質的であることを示しているのである。したがって、同じ現象を示す細胞膜のある系も共通に存在する電子移動が本質的であると考えることができる。

②の反応の強さに関連して次の事実も注目されている。骨折の治療に電磁波が古くから有効であるとして用いられてきた。正常な電子移動が活発な骨には影響が少ないが、骨折して電子移動が妨げられ、電子移動が起こりにくい骨には影響が大きく治療に有効であると考えられているようである。

4. Blank さんたちの論文より³⁾

以下に紹介するのは Blank さんたちの最近の論文にある実験データのまとめである。先に述べた法則性がかなり整備されていることが理解されることと思う。日本語に訳して表にするほうが良いと思うが誤訳を避けるためそのまま転載する。文献はリストの3)である。Table 1 のデータは数ミリガウスで電磁場の影響が現れることを示している。Table 2 は電子移動反応において、それぞれの反応の反転速度に対応する周波数で最も大きく影響を受け、反応速度が増大することを示している。

Table 1. Estimated biological thresholds

Biological system	EM field(mG)	Reference
Enzyme reaction rates		
Na,K-ATPase	2-3	Blank and Soo(1996) ⁴⁾
Cytochrome oxidase	5-6	Blank and Soo(1998) ⁵⁾
Ornithine decarboxylase	~20	Mullins et al. (1999) ⁶⁾
Oxidation-reduction reaction rate		
Belousov-Zhabotinski	<5	Blank and Soo(2001a) ⁷⁾
Biosynthesis of stress proteins		
HL60,Sciara,yeast cells	<8	Goodman et al.(1994) ⁸⁾
Breast(HTB124,MCF7)cells	<8	Lin et al.(1998b) ⁹⁾
Chick embryo(anoxia protection)	~20	DiCarlo et al.(2000) ¹⁰⁾
Disease related		
Block inhibition of (MCF7)breast		
Carcinoma cells by melatonin	2<12	Liburdy(2003) ¹¹⁾
Leukemia epidemiology	3-4	Ahlbom et al.(2000),Greenland et al.(2000) ¹²⁾

Table 2. Optimal stimulation frequency

Biological system	Frequency(Hz)	Reference
Enzyme reaction rates		
Na,K-ATPase(EM field)	60	Blank and Soo(2001a)
Cytochrome oxidase(EM field)	800	Blank and Soo(2001a)
F ₀ F ₁ ATPase(low E field)	1,000	Martirosov and Blank(1995)
(high field)	30	Martirosov and Blank(1995)
Oxidation-reduction reaction rate		
Belousov-Zhabotinski(EM field)	250	Blank and Soo(2001b)
In vitro biosynthesis		
Human HL60 cells(EM field)	45	Wei et al.(1990)
In vitro biosynthesis(mammalian)		
'First' muscle(E field)	150	Pette and Vrbova(1992) ¹⁴⁾
'Slow' muscle(E field)	20	Pette and Vrbova(1992)

さらに遺伝子配列として、C,T,A,Gの4種の基が重要であるが、結合が弱いのがC,Tの基である。この基の繰り返しが多い遺伝子の部分が電磁波の影響を受ける感受性を持つことが示されている。さらにBlankさんたちはこのC,Tの集団を遺伝子組替で埋め込むことによって、電磁波感受性を持たせることができることを示している。

基	C	T	A	G
電子親和力	0.57	0.81	0.97	1.51
反応性	あり	あり	—	なし

電子親和力は Electron Affinity と呼ばれ、電子の結合の強さを表す。

5. おわりに

以上述べたように、生物に対する電磁波の影響として、電子移動反応が重要な場合があることが明らかになってきた。その影響は①反応の強さと競合する。反応が弱い方が影響が大きい。②周波数依存性がある。電子移動反応の反転速度に共鳴して影響する。個々の反応によって速さが異なれば、影響する周波数が異なる。一般に繰り返し、同じ周期の電磁波を受けて影響が出ることが多いのであろう。電子移動反応の中でも、遺伝子が発現し、たんぱく質を合成するとき、水素結合が重要であると考えられるが、その結合が電磁波で影響を受け易いと考えられる。この影響は疫学調査で見られる微弱の電磁波に相当する。

こうして、数ミリガウスという弱い磁場が影響する機構が存在することが示されたことになる。この機構がどの程度普遍的であるのか、その現実における影響の大きさ、量子力学的に考察するとどのような機構になるかなど、さらに研究の余地があると思われる。しかし、電磁波の生体への影響のなぞを解く 1 つの鍵として注目される。電磁波の生体への影響が電子移動の問題として科学的にミクロに解明される可能性が見えてきたということであり、すでにその方向で努力している Blank さんのような研究者がいるということである。独学で見抜いた村瀬さんの眼力もすばらしい。

このコメントの内容については本堂毅さん、池田研介さんなどに賛否両論で議論して頂きました。文献 1) の兜さんたちの英論文の文献について荻野晃也さんに教えていただきました。兜さんたちはメラトニン作用の細胞内情報伝達系や細胞間情報伝達系への影響などを含めて、可能性のあるメカニズムについてさらに検討が必要であると述べられている。

参考文献

- 1) 兜真徳, 「生活環境中電磁界による小児の健康リスク評価に関する研究」物性研究 82-1 (2004-4)、および「電磁界の人への影響」科学 74-1, 74-76 (岩波書店 2004)、M. Kabuto et al. "Childhood leukemia and magnetic fields in Japan: A case-control study of childhood leukemia and residential power-frequency magnetic fields in Japan", *Int. J. Cancer* 119 : 643-650 (2006)
- 2) M. Blank and R. Goodman, "A Biological Guide for Electromagnetic Safety" *Bioelectromagnetics* 25 : 642-646 (2004)
- 3) M. Blank and R. Goodman, "Initial Interactions in Electromagnetic Field-Induced Biosynthesis", *J. Cellular Physiology* 199 : 359-363 (2004)
- 4) M. Blank and L. Soo, The threshold for Na,K-ATPase stimulation by electromagnetic fields, *Bioelectrochem. Bioenerg* 40 : 63-65 (1996)
- 5) M. Blank and L. Soo, Enhancement of cytochrome oxidase activity in 60 Hz magnetic fields, *Bioelectrochem Bioenerg* 45 : 253-259 (1998)
- 6) J.M. Mullins et al., Dose-response of electromagnetic field-enhanced ornithine decarboxylase activity, *Bioelectrochem Bioenerg* 48 : 193-199 (1999)
- 7) M. Blank and L. Soo, Optimal frequencies for magnetic acceleration of cytochrome oxidase and Na,K-ATPase reactions, *Bioelectrochem* 53 : 171-174 (2001a)
- 8) S. Martirosov and M. Blank, Inhibition of F_0F_1 -ATPase activity in AC-fields, *Bioelectrochem Bioenerg* 37 : 153-156 (1995)
- 9) M. Blank and L. Soo, Electromagnetic acceleration of electron transfer reactions, *J. Cell Biochem* 81 : 278-283 (2001b)

- 10) AL. DiCarlo et al., Thresholds for EM field-induced hypoxia protection: Evidence for a primary electric field effect, *Bioelectrochem Bioenerg* 52 : 9-16 (2000)
- 11) R. P. Liburdy, Electromagnetic fields and control of cell growth, drugs, hormones, and human tumor cells: A summary of replication studies at five laboratories. In: MJ McLean, S. Engstrom, R.R. Holcomb, editors. *Magnetotherapy; Potential therapeutic benefits and adverse effects*, New York : TFG Press. p. 57-88 (2003)
- 12) H. Ahlbom et al., A pooled analysis of magnetic fields and childhood leukemia. *Br J Cancer* 83 : 692-698 (2000)
- 13) LX Wei et al., Changes in the levels of c-myc and histone H2B following exposure of cells to low-frequency sinusoidal electromagnetic fields: Evidence for a window effect, *Bioelectromagnetics* 11 : 269-272 (1990)
- 14) D. Pette and G. Vrbova, Adaptation of mammalian skeletal muscle fibers to chronic electrical stimulation, *Rev. Physiol. Biochem Pharmacol.* 120 : 115-202 (1992)