

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11回 ‘物質の科学’ としての物理学の ‘生命の科学’ としての限界

### 電磁波のホルモン作用仮説の根拠と 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間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とを対応させようとした。

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、突然変異が起こっていないように‘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’を解決を試みるより、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。

メタ認知的アプローチ Albert Oliverio

- 学習者が新たな問題に直面した時、自己の学習方法を考慮して認識プロセスを分析する能力。これは生得的な能力ではなく、意識して身につける能力。しかも、学校教育の枠外。

↓

- 認識のイリュージョン(幻想): 感覚に近い方が実際にはそうではないのに、理論的に正しいと思いつく。
- フォールス・コンセンサス(偽りの同意): 過去の体験・知識・想像力が、出来事を認識する方法、ある状況を体験する方法を変える。しかも、そのことに気づかない。他者の行動の判断・予測が困難。

アレルギーと心の病気 —依存症の恐怖—

- アレルギーは身体的な症状の原因となるばかりでなく、心の病気の原因でもある。1種類(あるいは複数種類)の特定食物を除去すると精神症状がよくなり、それらを再摂取すると「精神病」が再現される。  
(セロン・G・ランドルフ、1963)
- ふつう、アレルギーと言えば、発疹、下痢、鼻づまり、副鼻腔炎、くしゃみを連想するが、実は、アレルゲンは体のどの部分も攻撃でき、どんな症状でももたらすことができる。脳を攻撃するアレルギーは脳アレルギーと呼ばれる。  
(キャロル・サイモンタッチ、2000)

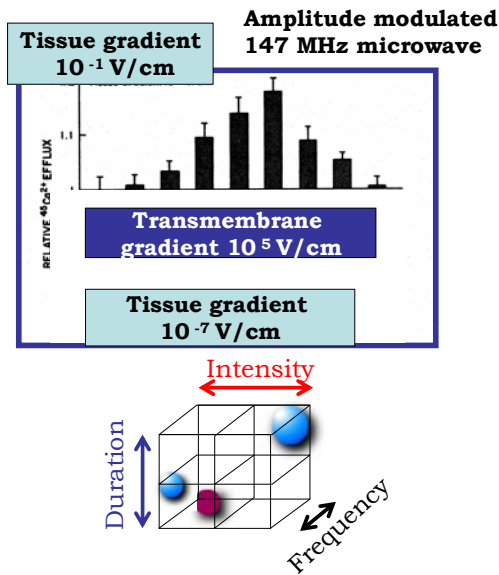
物理学の考え方を安易に生命現象に応用するのではなく、‘生命の科学’に適した‘ものの見方’を、生命現象に即して作り上げていかなければならない。私は、1つの‘ものの見方’として、‘活性系’と‘抑制系’の拮抗に基づく調節原理に着目したい。例えば、細胞レベルでは、膜を介した「内」と「外」の情報統合分子に着目し、その分子の活性化レベルが活性系と抑制系によって調節され、その調節レベルの差によって、学習、過敏性、発がんなどが統一的に理解できることを、次節以降に、順を追って論じていきたい。

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を、もう少し述べておきたい。

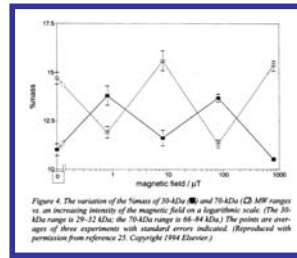
北里研究所病院・臨床環境センターの宮田幹夫(2004)は、一般に化学物質刺激に対する生体反応においては、微量な刺激で増強し、大量の刺激で抑制されることを強調している。これは、これまでの毒性学の常識では考えにくい現象である。しかし、活性系と抑制系の作用する閾値がそれぞれ異なるならば、こうした現象は生じる。東京都神経科学研究所の黒田洋一郎(2003)も、「用量作用曲線が逆U字形となることがあるのは、体内のホメオスタシスを保つために、高濃度になるとフィードバック系が働き出すためであろう」と述べている。

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。カリフォルニア大学ロサンゼルス校、脳研究所のR. Adey(1983)は、次に述べるWindow効果を発見していた。

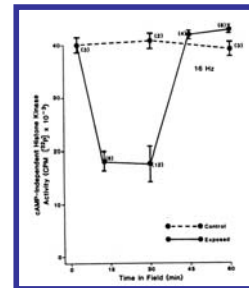
**Window 効果 周波数感受性**



**Window 効果 強度感受性**



**Window 効果 時間感受性**



図版出典：(左上)：Adey, W. R. *Physiol. Rev.* 61, 435-514 (1981), (右上)：Blank, M. “Electromagnetic Fields” *Advances in Chemistries* 250, 423-436 (1995), (右下)：Adey, W. R. (1988) *The cellular microenvironment and signaling through cell membranes*, In: *Electromagnetic Fields and Neurobehavioral Function*, Alan R. Liss, Inc.

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、147MHz、 $8W/m^2$ 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16Hz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16Hz、電場強度56V/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130V/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。

無矛盾性を追求する‘客観’科学の課題

### Conflicting Results

Several investigators have reported robust, statistically significant results that indicate that weak ( $\sim 1\mu T$ ) magnetic fields (MFs) increase the rate of **morphological abnormalities** in chick embryos. However, other investigators have reported that weak MFs do not appear to affect embryo morphology at all.

J. M. Farrell, et al. *Bioelectromagnetics* 18, 431-438 (1997).

電磁場の生体影響に関して、「影響あり」と「影響なし」という矛盾する実験事実が認められる。従って、現時点では、生体の影響があるか否か確定的な結論は得られていない。

電磁場の生体への影響のあらわれ方は多様である。

### Conflict Results I

矛盾する結果が見られるのは、観察すべき次元、領域、時間が多様であるためである (中村 元)。

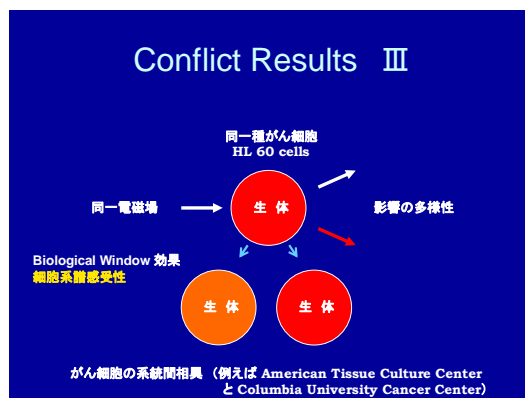
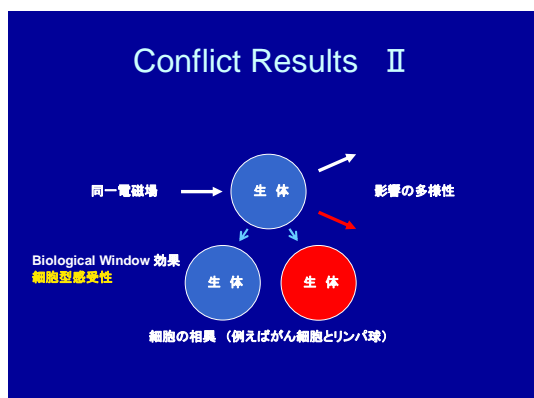
電磁場の相異

生体

影響の多様性

Window 効果  
周波数、強度、時間

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、16Hz に振幅変調された 450MHz、10W/m<sup>2</sup> のマイクロ波を照射したところ、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。私が本稿で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、次表に示すとおり、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。そして、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。

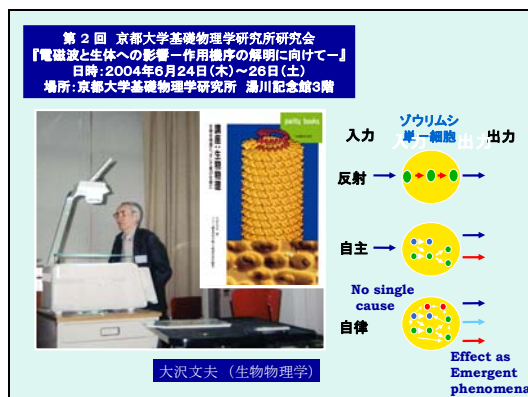
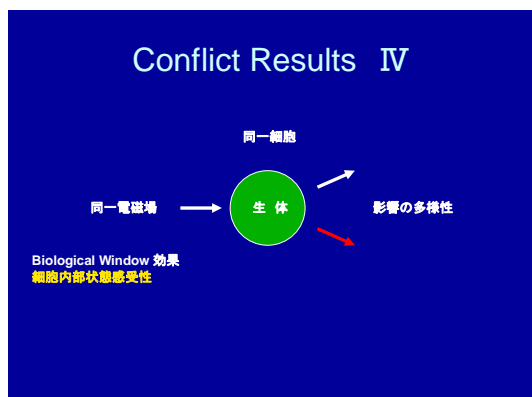
環境ストレス	生物学的ストレス	生体内正常過程
熱ショック	ウイルス感染	細胞分裂
遷移元素に属する重金属	発熱	分化と発生
エネルギー代謝の阻害剤	炎症	
アミノ酸の類似物	虚血	
化学療法剤	酸化反応	
電磁波	フリーラジカル反応	
	悪性腫瘍	

(表2) 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。刺激が物理的であるか、化学的なのものであるか、あるいは生物学的なの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8mG、60Hz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同じとすると、 $2.3 \times 10^7 \text{J/m}^3$ となる。一方、8mG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。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。

	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	$2.6 \times 10^{-7} \text{J/m}^3$

(表3) 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。



# Bipolar Responses

Model system	Reference	Response
Cell Motility	Smith et al (1987)	Enhanced Inhibited
Embryonic Bone	Smith et al (1991) Regling et al (2002)	Enhanced Inhibited
Plant Growth	Smith et al (1993)	Enhanced Inhibited
Rat Behavior	Zhadin et al (1999)	Enhanced Inhibited

## Epidemiological Studies

**Nancy Wertheimer and Ed Leeper**

**Electrical wiring configurations  
and childhood cancer**

*American Journal of Epidemiology*  
109, 273-284 (1979)

City	Author	Year
Denver	Wertheimer	1979
Denver	Savitz	1988
Los Angeles	London	1991
Sweden	Feychting	1993
Japan	Kabuto	2003

第1回 京都大学基礎物理学研究所研究会 『電磁場と生体への影響』  
(村瀬 雅俊、2003年)