

京都大学原子炉実験所

非電離放射線の生体影響専門研究会報告書

## 非電離放射線の生体影響

Non-Ionizing Radiations for the Biological Systems

日時：平成6年8月11日

Date：August 11, 1994

場所：京都大学原子炉実験所原子力科学館

Place：Reactor Utilization Center, Research Reactor Institute

編集 福井 崇 時

宮原 昭

辻本 忠

Edited by Shuji FUKUI

Akira MIYAHARA

Tadashi TSUJIMOTO

京都大学原子炉実験所

Research Reactor Institute, Kyoto University

# 目 次

1. 研究会プログラム ..... 1
2. 開会にあたって ～経緯と本研究会の目的～ .....帝京大学経済学部..... 2  
宮 原 昭
3. 生体と地球環境との関係についての考察 .....名古屋大学理学部..... 8  
～特に地磁気を含む磁場の影響の研究について～ 福 井 崇 時
4. 低磁場環境の生物への影響 .....椛山女学園大学..... 23  
～ウニ胚の発生に及ぼす低磁場の影響～ 石 川 優  
福 井 崇 時
5. 化学的環境の変化と生体への影響 .....名古屋大学理学部..... 32  
古 川 路 明
6. 分子構造への強磁場の影響 .....東京大学医学部..... 41  
岩 坂 正 和  
上 野 照 剛
7. 低レベル電離放射線環境の生体への影響 .....東京大学医学部..... 51  
酒 井 一 夫
8. マウス尾部の血液循環におよぼす静磁場の影響 .....帝京大学医学部..... 55  
杉 晴 夫  
小 林 孝 和  
柴 山 理 恵
9. 電磁波の生体への影響 ～加熱作用と非熱効果～ .....大同工業大学工学部... 57  
柴 田 長 吉 郎
10. 放射線研究者から見た非電離放射線 .....ラドン科学研究所..... 63  
岡 部 茂
11. 超音波の生体影響について .....アロカ（株）研究所... 68  
佐 藤 博 夫
12. コメントと討論 核融合科学研究所 .....核融合科学研究所..... 73  
大 林 治 夫

# 生体と地球環境との関係についての考察

—特に地磁気を含む磁場の影響の研究について—

On the Biological Effects of Earth's Environment

—Biological Effects of Magnetic Fields including Geomagnetic Field—

名古屋大学理学部 福井崇時

Nagoya University Shuji Fukui

生体は現在の地球上の全ての物理学・化学諸環境の現在の強度水準のもとでこれらと共存していると考えられる。諸環境と生体との相互作用を研究する方法、特に磁場との相互作用を調べる方法を例にして論ずる。

It is reasonably noticed that all organism are in activity reacting actively or passively upon every physical and chemical environment on the earth. The experimental results of the biological effects of the magnetic fields are presented as an example of a studying method to find the reaction of the organism against each physical or chemical environment.

Key words : biological effect, earth's environment, magnetic effect, geomagnetic field

## 1. はじめに

生体は生命誕生以前に原子が原始蛋白質として分子結合したときから地球上の物理学・化学諸環境のもとで行動している。諸環境のそれぞれの現在の強度水準が現在の個々の生体にとって最適条件であるかどうかは分からないが、必要不可欠なものと、有害だが Hormesis として作用しているものと、影響を与えずあっても無くてもよいものと、があると言える。

また、これらの環境は独立して生体と相互作用をしているもの、相加的 additive、また重畳的 superimposing に、あるいは相乗的 synergistic に影響を与えているものなど様々である。何れにしても、生体は現在の地球上の全ての諸環境の現水準のもとでこれらと共存していると考えべきであろう。

ここで、物理学・化学諸環境と生体との関係について論じ、特に磁場との相互作用を調べた実験例から、諸環境の生体への影響を研究する上で最適と思われる方法を提案する。

## 2. 生体と環境との関係—環境強度水準の変化に対する生体の反応—

生体と地球上の環境各要素との関わりは、各要素全てが生体に対して関与しているものとする。その関わりには、生体の維持に積極的に positive に関わるものと、生体の維持にはその作用としては negative に関わるが生体はその環境要素に抵抗することで活性度を維持し、結果として生体に必要ないいわゆる Hormesis<sup>1)</sup>として作用しているものがあると考える。環境の各要素がそれぞれ独立に生体に影響を与えているか、相加的か、相乗的か、は必ずしも明らかではないが、ここではそれぞれが独立に影響を与えるものとする。

ある環境の現在の強度水準  $E_0$  のもとで生体はその強度水準  $E_0$  に対応して生体内で物質を生産しているか、あるいはその環境と相互作用をしていると考えられる。その物質生産量または相互作用の大きさを  $F_0$  とする。 $E_0$  と  $F_0$  は生体内で平衡状態にあり、1つの環境要素に対し生体は1対1に対応しているとする。この  $F_0$  は生体の現在の活性度としてもよい。

環境が変化するとき、生体は現状を維持しようとして生体防御機構により反応する。ここでは、防御機構による生体内の変化も、防御機構ではないが何か生体内で反応する変化も、同じように取り扱う。つまり、環境の変化により、とにかく、生体内に変化が起こるとする。また、生体内の何処で変化が起こるか、その部位は問わないことにする。

### 2.A 環境強度水準が増加する場合

環境変化に対する生体の反応を調べる研究では大抵の場合、環境の強度水準を高めて実験を行っている。この場合生体内の変化は大きく分けて、生体防御機構により現状を維持しようとするが、あるシキイ値  $E_{th}$  から活性度が減少してゆく Fig.1-1 に示す場合と、現状より活性度が増し極大値に達しやがて減少してゆく Hormesis 現象を示す Fig.1-2 の場合とが考えられる。

これらの場合、環境強度水準の生体への具体的な許容限度を調べるという研究では重要であるが、生体内の変化は生体防御機構により隠蔽されて実際の正確な直接の反応を知ることは困難ではないかと考えられる。

### 2.B 環境強度水準が減少する場合

生体内の対応は、この場合も生体は防御機構を働かせるだろうが、環境水準のある範囲では linear に反応すると考えてよいだろう。さらに、環境強度水準が下がり 0 に近づく時、生体内の変化は linear に減少して 0 の原点に達する場合 Fig.2-1、ある値  $E_{th}$  から  $F$  は linear よりずれ環境強度 0 で、ある値  $F_1$  となる場合 Fig.2-2、ある値  $E_{th}$  から  $F$  は linear よりずれ  $F$  の減少が早まり環境強度水準のある値で既に物質生産が無くなるか相互作用が無くなるかの場合 Fig.2-3 が考えられる。

Fig.2-4 と Fig.2-5 は生体内での変化あるいは相互作用の変化が linear であるが原点に向かわない場合で、Fig.2-4 は Fig.2-2 の場合に対応し影響を与えている環境の要素が1つだけではないと考えられる。Fig.2-5 の場合は Fig.2-3 の場合に対応していて、環境の強度水準がある大きさ  $E_{th}$  で影響が現われ出すと考えられる。この場合、生体は活性維持のためにこの環境を必要としているものと考えられるべきであろう。環境の強度水準が下がるときに

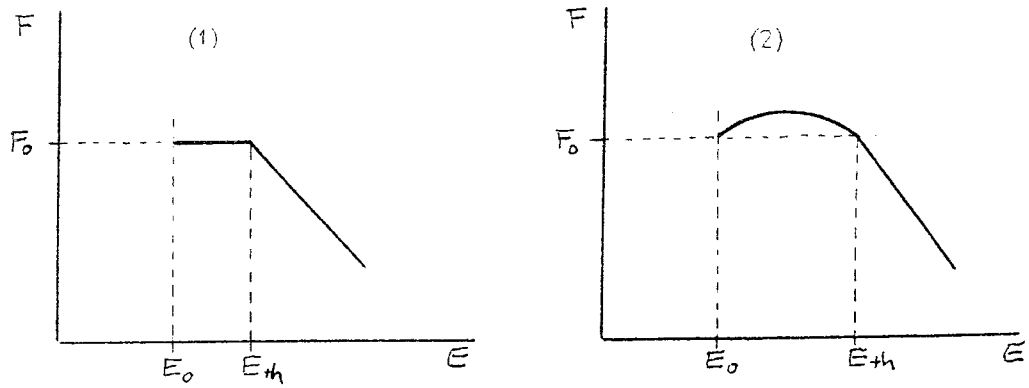


Fig. 1 The biological response,  $F$ , against an increasing level,  $E$ , of an environmental condition. (1) The case of a biological defense mechanism. (2) The case of the Hormesis.

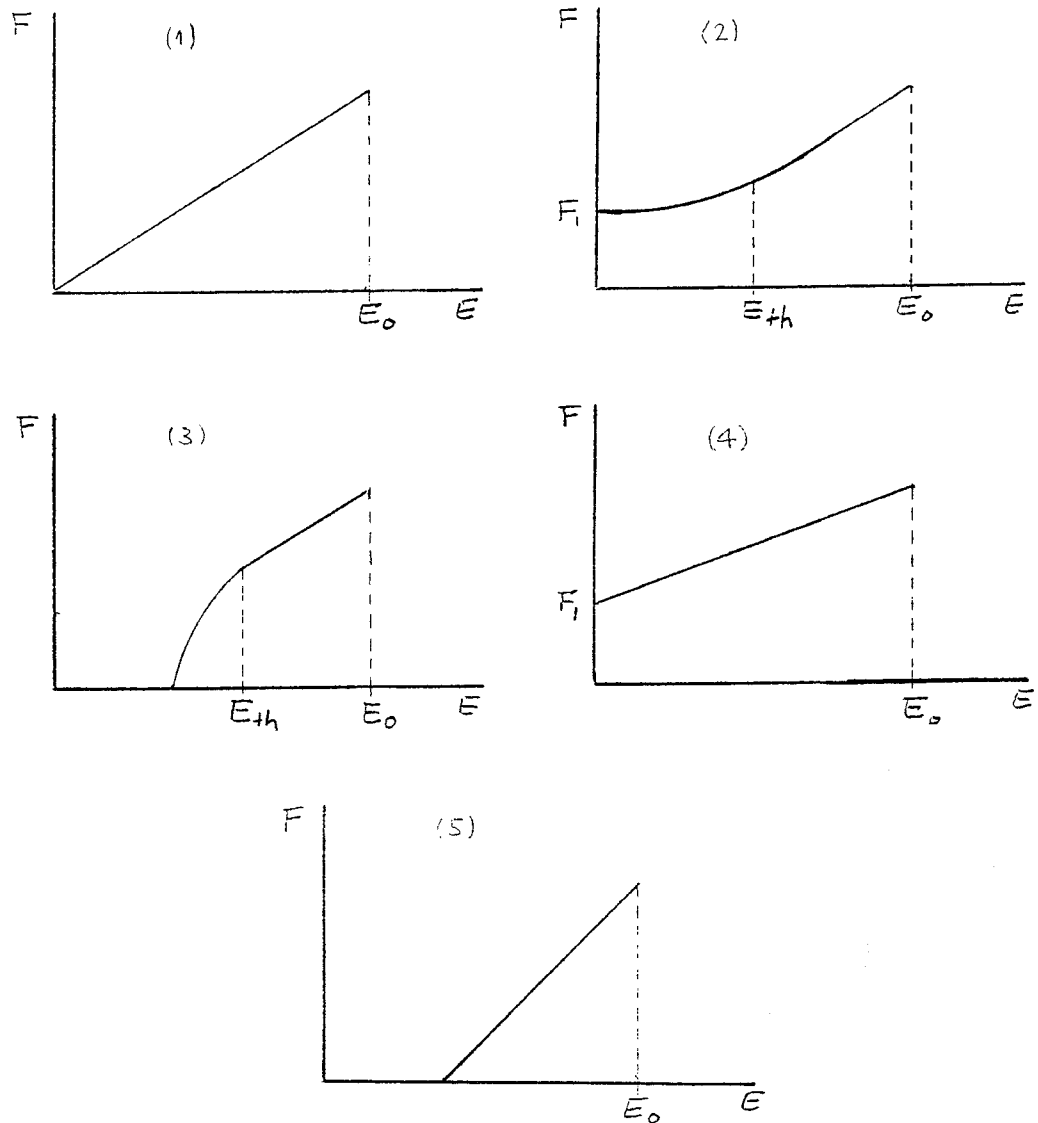


Fig. 2 The biological response,  $F$ , against a decreasing level,  $E$ , of an environmental condition. (1) The zero-linear response. (2) The response reaching to a constant value,  $F_1$ . (3) The decreasing response from a level of  $E_{th}$ . (4) The no-zero linear response reaching to  $F_1$ . (5) The no-zero response falling to zero of  $F$  at a certain level of  $E$ .

生体内に発生する変化の割合がこの環境の必要度を示すものだと言える。

## 2.C 環境水準の時間変化と生体固有の反応時間

生体固有の時間を、細胞分裂の一巡時間あるいは分裂各段階の時間、化学物質の取り込みまたは排出する生体反応の平均時間、受精に関わる各段階の時間、受精胚の分裂成長時間など、対象とする生体の状態及びその部位が持つ生体固有の時間としよう。

今、問題にする影響が有るか無いかを調べるとき、環境水準の時間変化の割合  $dE/dt$  の大きさと共に変化をする時間幅  $\Delta t$  とを考慮することである。特に  $\Delta t$  を生体固有の時間  $\tau$  と比較して厳密に定める必要がある。

例えば、ある環境水準に一気に置かれると生体は生存しえないという環境水準でも、その水準に達するまでに、 $\Delta E$  及び  $dE/dt$  とともにシキイ値より低い値で長時間をかけてゆっくり環境変化が持続して起こる場合、結果として生体は悪環境の元で生存し続けることができる<sup>2)</sup>。これらの例は、生体固有の時間あるいは生体が反応をする時間  $\tau$  より環境が変化する時間幅  $\Delta t$  の方が短いか、環境水準の時間変化  $dE/dt$  の大きさが小さな値の場合である。この反対の現象が生物大量絶滅の場合である<sup>3)</sup>。絶滅した生体に対しては  $\Delta t$  が  $\tau$  より遥かに長く  $dE/dt$  も大きかった場合である。この過酷な環境変化の場合でも、生き延びた生体が存在している。その生体に対しては  $\Delta t$  が  $\tau$  より長くはなく時間変化  $dE/dt$  に対して生体が反応できたのだと解釈する。

## 3. Planelらの実験の場合— Hormesis —

Planelらの実験<sup>4)</sup>は自然放射線を鉛で遮蔽してその強度を下げた空間でゾウリムシ (*Paramecium aurelia*) などを飼育した。すると、時間と共にゾウリムシなどの活性度が減少してきた。次に、その空間に  $^{232}\text{Th}$  を入れその  $\gamma$  線の強度を自然の放射線強度水準に近い量にして照射すると再び活性度が戻った。この実験結果から Luckey は電離放射線は本来生体に有害な環境であるという立場に立てば Stebbing の言う Hormesis 効果と考えられるので、電離放射線には Radiation Hormesis という効果があると唱えた<sup>4)</sup>。このように Planel らの実験は Hormesis に対する具体例として重要な証拠となっている。また、ある種の生体はその活性維持のために、生体に対しては破壊作用をする自然電離放射線のある強度水準で照射を受けて少量の損傷を修復する作業で活性度を維持しているというように、生体にはこの環境が必要であるということを示している。

生体はどの種の環境のどの強度水準を最適としているかは不明だが、生体が成長し活動し生命を維持してゆく上で環境との相互作用が必要であることを生体はその遺伝子プログラムに組み込んでいると言えるのではないか。

このように、生体が正常に成長し活動するためにそれぞれのDNAからRNAへの転写等を司っている遺伝子プログラムに環境諸要素との相互作用が組み込まれているとすれば、その環境要素の強度水準を下げて0水準に近か付けると相互作用が殆ど無くなるから、遺伝子プログラムは対応できなくなる。従って生体には必ず異常が現われると思われる。

Planelらの実験では生体の活性維持のための遺伝子プログラムには自然電離放射線との相互作用が組み込まれていて、相互作用の大きさがシキイ値以下となると遺伝子プログラ

ムが正常には進まず生体が不活性となると理解できる。

#### 4. 磁場の生体影響

磁場と生体との相互作用については、既に19世紀に人体を対象として取り上げられているが、学術研究としては1962年頃から多くの実験がされ論議が盛んになって来た。1964年当時としては指導的な内容の本が出版された<sup>5,a)</sup>。以後、いくつかの会合で議論されそれぞれそれらの報告が出版されている<sup>5,b,c,d,e)</sup>。

1980年には国際的な協会として Bioelectromagnetics Society が組織され各国で数多くの研究が行われていて、協会誌 "Bioelectromagnetics" (Wiley-Liss, New York, John Wiley & Sons, Inc., Publication) にそれらの研究が報告されている。にも拘わらず、現在でも磁場の生体への影響がはっきりと解明されたとは言えない。1つには、WHOが必要とする磁場環境の生体影響へのデータを得るため強磁場や交流磁場と人間など高等動物とを対象とした実験が主であることによる。

Bassett らは骨折の部位を1対のコイルで挟んでパルス磁場 (パルス幅 150 $\mu$ s、繰り返し回数 65Hz、尖頭値は骨の位置で 20mv/cm) を照射すると治癒が早まると報告した<sup>6)</sup>。この方法はその後骨折治療に応用されている。また、50-60Hzの時間変化磁場の生体への影響について多数の研究者が種々な生体を対象に研究を始めた<sup>7)</sup>。Falugi らはウニ

(*Paracentrotus lividus*) の受精胚に上記の骨折治療用と同等のコイルを使い非常に短い時間幅のパルス磁場 (パルス幅 $\sim$ 20 $\mu$ s、繰り返し時間 $\sim$ 200 $\mu$ s、尖頭磁場強度 $\sim$ 20 gauss) を照射すると成長が促進すると報告した<sup>8)</sup>。磁場の生体影響に対して最も顕著な実験結果を発表したのが浅島らである<sup>9)</sup>。この実験結果については次項で詳しく紹介する。

前述したように協会誌 "Bioelectromagnetics" には磁場の影響について多くの研究が発表されているが、静磁場の元での研究は少ない。興味ある報告の1つは、Lednev が $Ca^{++}$ イオンは結合している蛋白質ではその $Ca^{++}$ イオンが地球磁場との相互作用としてサイクロトロン振動をし、これが共鳴状態をとるとき、大きな影響が現われると論じた<sup>10)</sup>。この説に対して、Adair は直ちに反論した<sup>11)</sup>。Adair の説は、熱運動が主である生体内では低い強度の地球磁場による  $Ca^{++}$ イオンのサイクロトロン振動がたとへ共鳴振動をしても、その運動エネルギーは非常に小さいから生体細胞内の分子の熱運動により熱平衡化されるから、このような共鳴状態は起こり難いということである。物理学だけの議論からは Adair の説の方が正しいと言える。

磁場が時間と共に変わる ELF などの交番磁場の場合、その影響は磁場本来のものよりは誘導される電場や渦電流などによる影響を考慮すべしと、Bassen らが論じている<sup>12)</sup>。この誘導電場が発生することは物理学の常識であって、時間変動磁場では磁場内に置かれた電解質誘電体である生体内には電氣的相互作用が起こっていることを考慮せねばならないのは当然である。

確かに生体内では熱運動が主で他の低いエネルギーの現象は熱運動により熱平衡化されてしまうと考えるのが物理学上の常識である。しかし、生体では非常に特殊な化学反応が起こっている。たとえば、生体を作るアミノ酸20個のうち、19が左旋性で1つが対称性で右旋性のものは存在しない。左、右旋性間のエネルギー差は非常に小さく $10^{-16}$ eVである。

だから、試験管内で化学合成すれば左右の光旋性アミノ酸が同量生産され、どちらかに偏ることはない。生体内での左、右旋性間の極端な偏在がこのわずかなエネルギー差によるものとすれば、物理学及び化学の常識を越えた生体だけの選択的反応が起こっているのではないかと考えねばならないだろう。

また、骨の生産では、リン酸カルシウムや炭酸カルシウムは生体の温度で酵素により結晶化が行われているが、人工でこれらの結晶を作るとすれば80℃という高温および数10気圧以上の高圧が必要である。生体内では骨形成という特殊な生産反応が、相当な早さで進んでいる。この現象を統計力学で説明できるだろうか。

生体内での物質生産の化学反応エネルギーは特殊な酵素が媒介しているので、ことによると磁場との相互作用という小さいエネルギーでもこれらの化学反応に選択的な寄与をしているのかも知れない。

磁場は方向を持っているので磁場との相互作用の結果に方向性がでてきてもよい。しかし、生体は常に不規則な運動をしているから磁場の方向との関係は平均化されている。

磁場内で荷電粒子が動けばローレンツの力が働く。また、磁場内で荷電粒子が誘電物質内を動くときホール効果が発生する。

時間と共に変わる磁場の場合、生体内に起電力が発生し円電流が流れる。また、電場が発生しこれによる電流も考慮せねばならない。これらの電流により局所的な熱が発生し化学反応を促進させるのかも知れない。

生体が持っている磁気モーメントは小さいから相互作用も小さい、しかし、先に述べたように生体内では常識的な化学反応エネルギーより遥かに小さいエネルギーで化学反応が進行している。さらに、未知の酵素的分子が活躍して化学反応エネルギーを下げているのかも知れない。

Barnothy の本<sup>7b)</sup>のp.29-p.51には Charles C.Conley "Effects of near-zero magnetic fields upon biological systems" にて1967年までの研究がまとめられている。また、p.261-p.306 には F.E.Senftle and W.P.Hambright "Magnetic susceptibility of biological materials" にて生体の組成の磁気性質がまとめられている。

## 5. 磁場の生体影響のいくつかの実験例

### 5-1 極超低磁場中におけるアカハライモリ *Cynops pyrrhogaster* の受精卵の成長

#### — 浅島らの実験<sup>7)</sup> —

浅島らの論文<sup>7)</sup>の一部を転載することを著者から許可を得たので以下に示す。

極超低磁場環境は相模原の宇宙科学研究所が建設した磁気シールド室を使った。シールド室内の磁場強度はその中心付近で5nTである<sup>9a)</sup>。東京近郊の地磁気強度は凡そ30μTであるから磁気シールド室中心付近では地磁気強度の約1万分の1になっている。

イモリの卵は未卵割期から神経胚期まで、発生段階ごとに8クラスに分けて、各々20~30個をプラスチック・ケースに入れシールド内にそれぞれ5日間おいた。発生段階のクラスは、1：未卵割期、2：2~8細胞期、3：16細胞期~桑実胚期、4：胞胚初期~中期、5：胞胚後期~原腸胚初期、6：原腸胚中期、7：原腸胚後期、8：神経胚期 に分けた。

コントロールとしてシールド外に同様のものを置いた。温度は20℃に保ちシールド内外



の磁気以外の他の環境条件も同じになるようにした。Fig.3 で実験環境を模式的に示す。

5日後シールド内から取り出し、1日後と20日後に形態学的及び組織学的な比較観察を行った。Fig.4 とFig.5 とはそれぞれ1日後及び20日後におけるイモリの卵の各発生段階ごとの異常発生率を示すヒストグラムである。

クラス1では異常発生率が高い。コントロールの場合でも高いので、これはホルモン処理によって人為的に採卵をしたことが原因と考えられこのクラスは除く。クラス5、6、と7とに異常発生が多くなっている。これらの時期はイモリの初期発生で原口からの細胞の陥入、胚葉の形成、胚葉間の相互作用によって胚に軸（体軸の原形で生物の形を考える上で最も重要なもの）をつくったりする形態形成期である原腸胚期で、個体の原型をつくる時期である。細胞運動、遺伝子発現、胚葉間の相互作用が胚の中に初めて明確にみられる時期である。

Fig.6、7、及び8 に20日後に見られる発生異常の例で矢印でそれぞれの異常箇所を示す。Fig.6のA はコントロールである正常な形態である。Fig.6のB 及びFig.7 では”脱腸”を、Fig.6のC では”頭部が2つ”発生している。Fig.8 では脊柱側湾症のように脊柱が曲がっている例を示す。

このよに、イモリの発生初期において発達するための遺伝子プログラムには地磁気との相互作用を組み込んでいるので、この相互作用が無いと形態形成が正常に進行しないのだと考えられる。

## 5-2 低磁場中での受精ウニ卵の囊胚の成長実験

### 5-2A 石川らの実験<sup>13)</sup>

電磁軟鉄で作った箱による磁気シールド中でバフンウニ *Hemicentrotus puleherrimus* の受精卵を発生させ、初期囊胚 early-gastrula の胞胚 *plastula* 腔内へ造骨細胞である第一次間充識細胞 primary mesenchyme cell からの骨片形成 *spicule formation* 速度を測定した。

シールド内の磁場強度は実験室での地磁気強度の約1/5の $\sim 5\mu\text{T}$ である。対照実験として同じ厚さの真鍮板の箱内と何も覆わないで単純に室内とで受精ウニ卵を成長させた。実験室内の温度はほぼ一定なので特に制御はしなかった。しかし、全ての箱内及び室内の各所での温度を自記記録計にて連続記録した。計測の結果温度はほぼ一様に安定していて18℃であった。

観測は偏光板を通して顕微鏡下で行った。磁場シールド内に置いた卵ではコントロールの卵と比較して骨片形成が早くなり大きく成長しているのが見られた。観察した結果の写真をFig.9 に示す。

### 5-2B 沼 輝之の実験<sup>14)</sup>

石川らの実験と同様、電磁軟鉄で作った箱による磁気シールド中で受精バフンウニ卵を発生させ、初期囊胚の胞胚腔内へ造骨細胞である第一次間充識細胞からの骨片形成速度を測定した。

磁気シールド内の磁場強度は $\sim 5\mu\text{T}$ である。箱内の温度は約19℃、室温は約22℃で一定であった。測定結果のグラフをFig.10 にて示す。

沼の実験は石川らの実験とはその場所、ウニ卵、等全て独立した別個の実験である。両

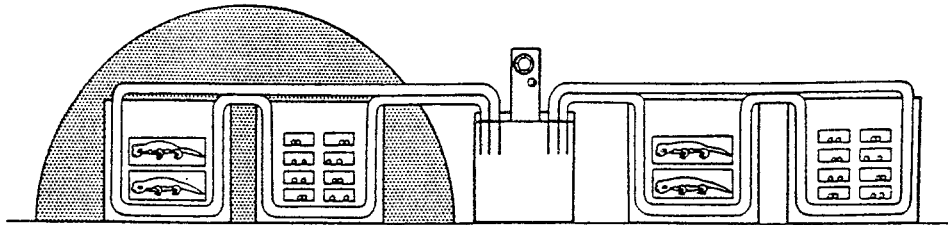


Fig. 3. Diagram illustrating magnetically shielded ova and larvae, and the control amphibia outside the shielded room (right side of figure). Both groups were in a temperature-controlled environment.

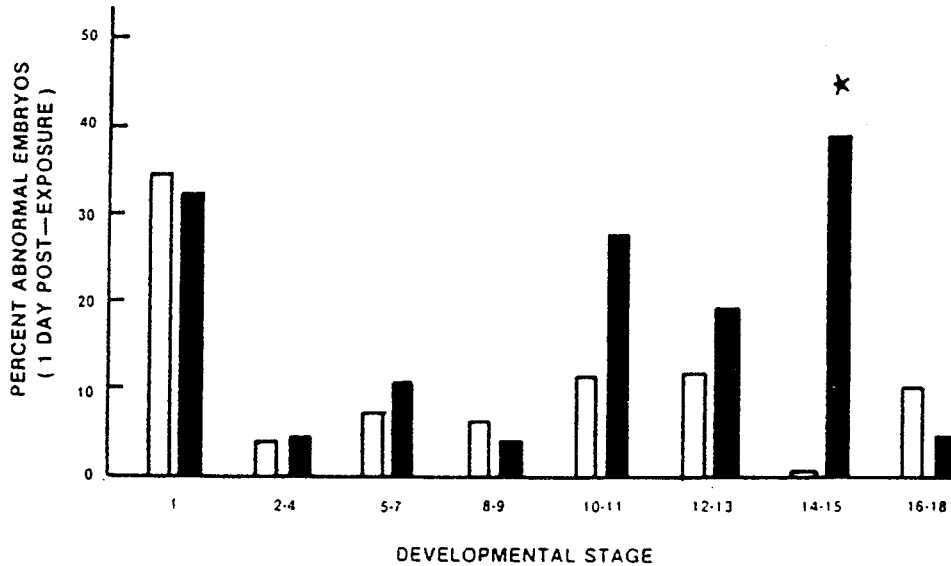


Fig. 4. Histogram depicting percentages of embryos with developmental abnormalities, 1st day post-exposure, for magnetically shielded and control groups, based on developmental stage at time of exposure. The star indicates a significant difference ( $P < .01$ , chi square test) between exposed and control groups. The solid bars represent data for magnetically shielded embryos, and the open bars represent data for control embryos.

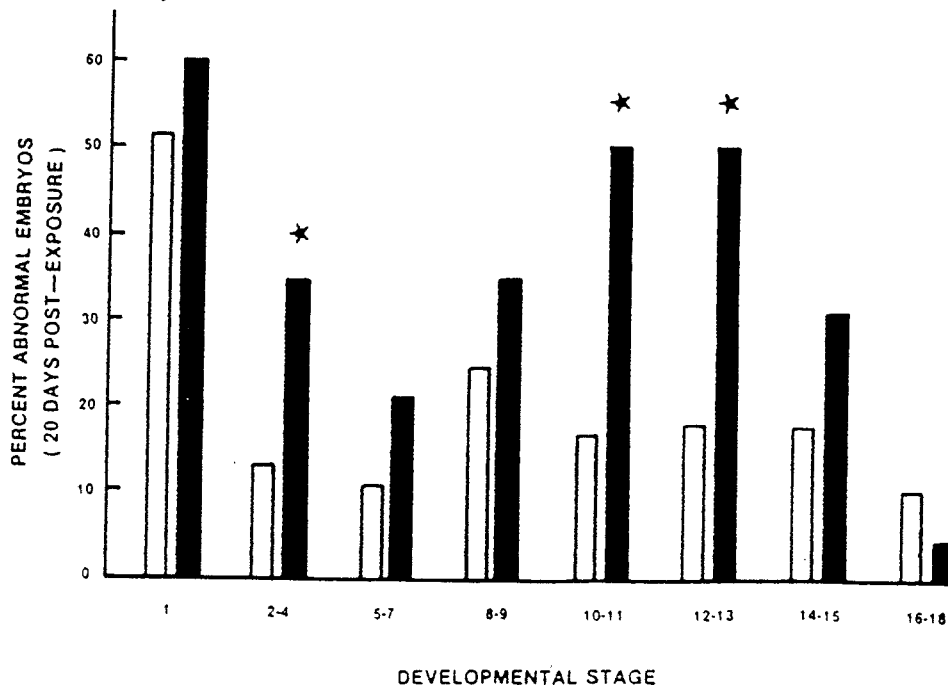


Fig. 5. Histogram of data as shown in previous figure, but for embryos allowed to develop for 20 days after growth in a magnetically shielded enclosure (solid bars). Open bars = control. Stars indicate difference between groups significant at  $P < .05$ .

[Figs. 3, 4, and 5 Source: Asashima et al.<sup>9-11</sup>]

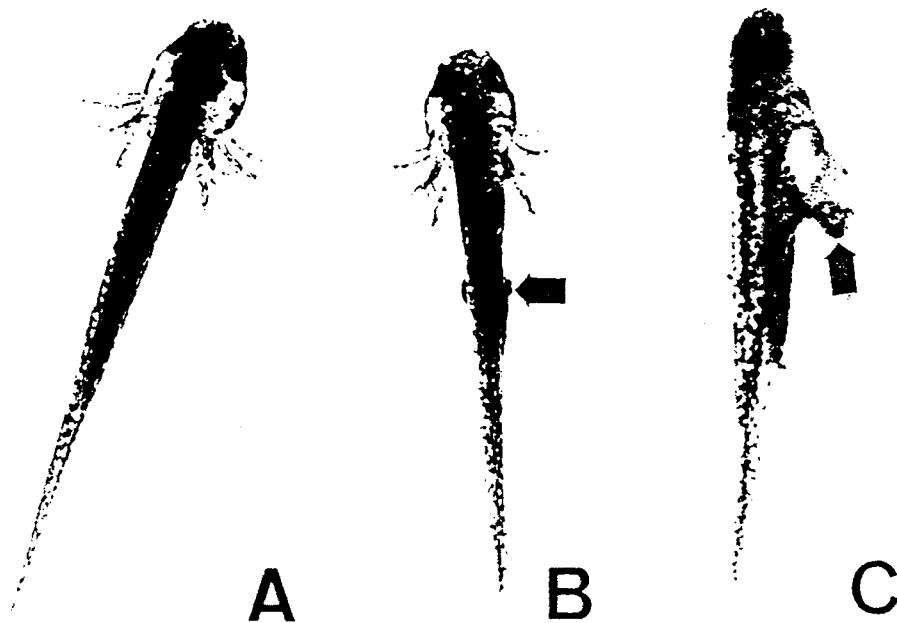


Fig. 6. Several types of developmental abnormalities were observed only in magnetically shielded larvae at 20 days post-exposure, including a gastroschisis-like condition (B; dorsal aspect) and bi-headed embryos (C). Arrows indicate abnormalities. A control, normal newt larva is shown at A.  $\times 8.8$ .

[Source: Asashima et al.<sup>9-11</sup>]

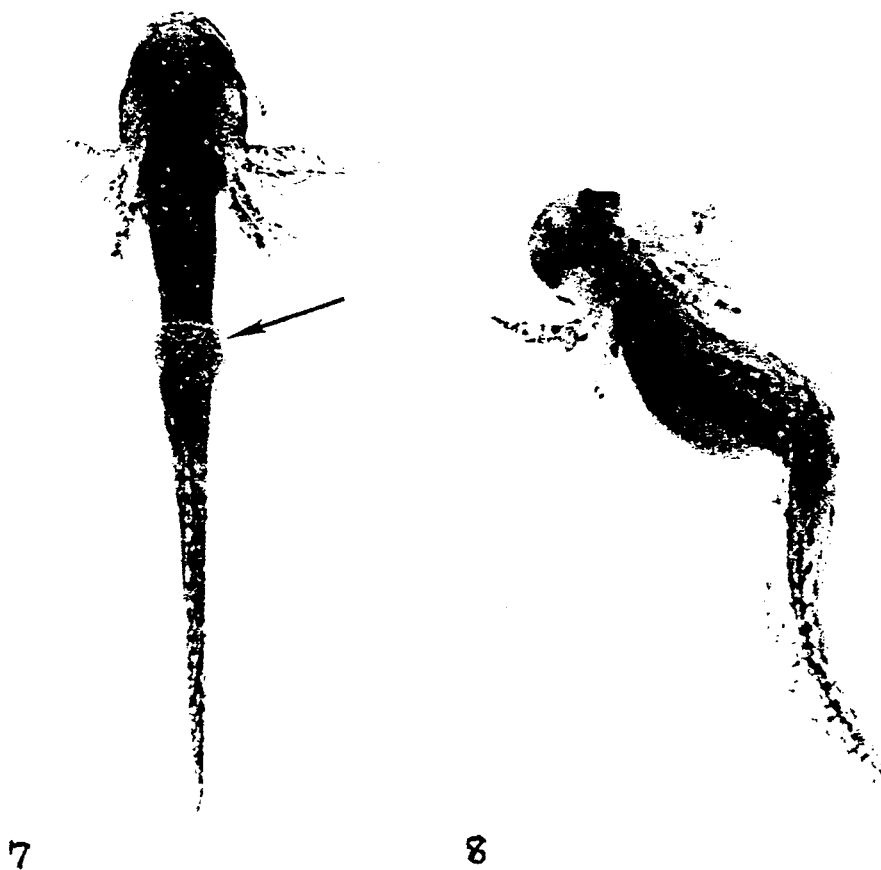


Fig. 7. Illustration of intestinal protrusion (gastroschisis-like defect) in the ventral aspect of a magnetically shielded newt larva.  $\times 10.5$ . [Source: Asashima et al.<sup>9-11</sup>]

Fig. 8. Another type of developmental abnormality observed in magnetically shielded larvae was spinal curvature (scoliosis-like condition).  $\times 10.0$ . [Source: Asashima et al.<sup>9-11</sup>]

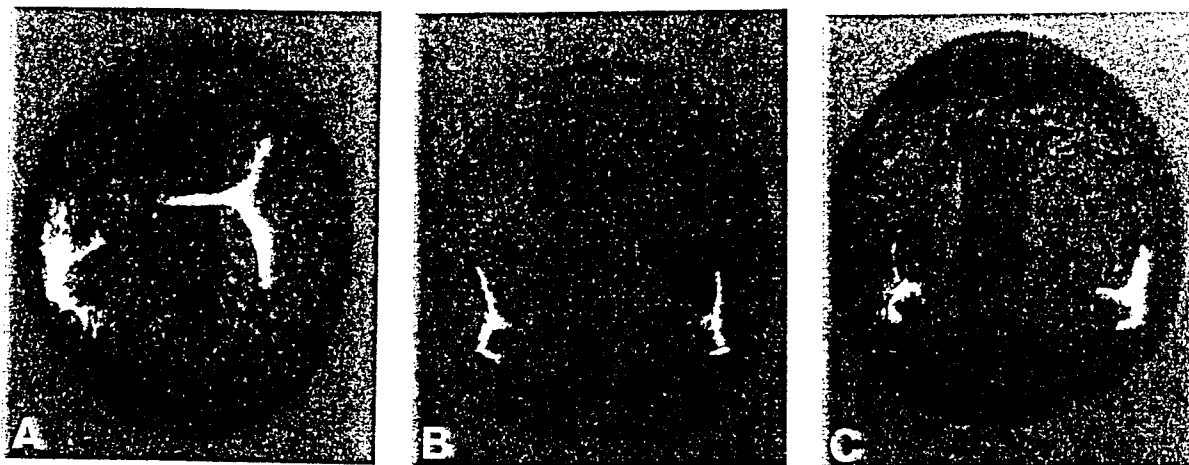


Fig.9 Triradiate spicules at the late-gastrula stage observed by a polarization microscope at 46 hrs after fertilization. Photo A is taken from the eggs cultured in the rectangular box which was constructed with high magnetic permeability metal. The measured intensity of the magnetic field in the box is  $5\mu\text{T}$ . Photo B is taken from the eggs cultured in the brass box (control 1) and Photo C is taken from the eggs cultured on the desk (control 2). The measured intensity of the magnetic fields of control 1 and 2 is  $30\mu\text{T}$ . [Source: Ishikawa and Fukui<sup>19)</sup>]

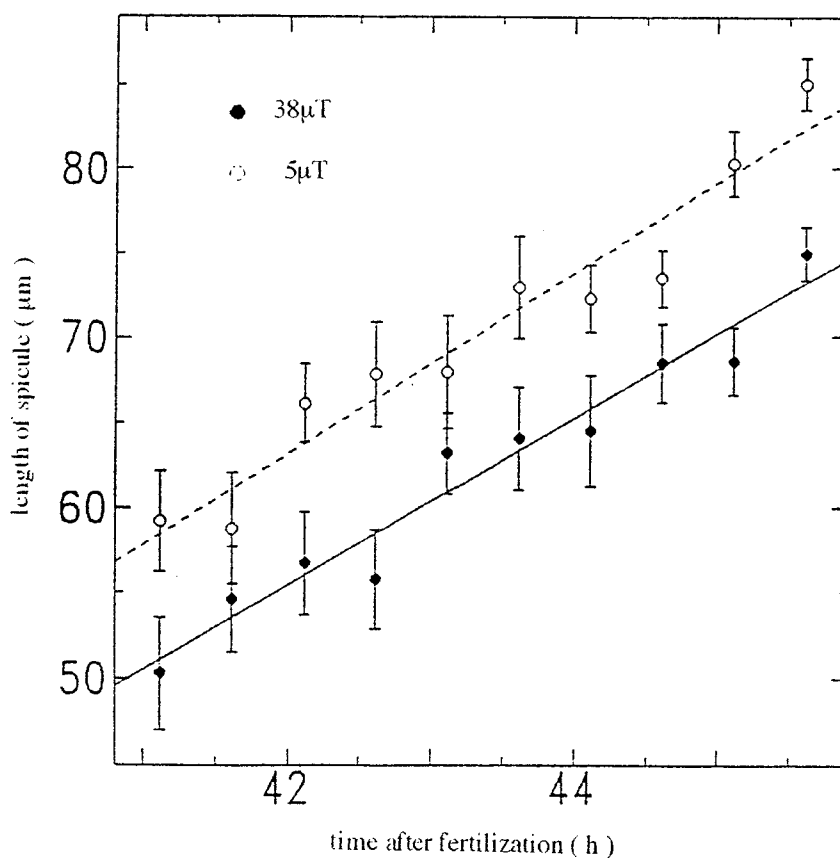


Fig.10 The effects of magnetic fields on the growth of triradiate spicules in *Hemicentrotus pulcherrimus*. ●: In the eggs cultured in the normal room (control). The measured intensity of the magnetic field is  $38\mu\text{T}$ . ○: In the eggs cultured in the rectangular box which was constructed with high magnetic permeability metal. The measured intensity of the magnetic field in the box is  $5\mu\text{T}$ . [Source: Numa<sup>14)</sup>]

者ではほぼ同じ結果を得たことは有意義であって、低磁場では骨形成速度がある段階まで促進されることは、骨片の成長遺伝子プログラムに地磁気との相互作用が組み込まれていて骨形成速度をある早さに制御するようになっていると考えられる。低磁場でその制御が弱くなっているから早く骨形成が進むので、浅島らの場合は石川、沼の場合より磁場強度が遥かに低いので骨形成速度の制御が殆ど無くなり骨の異常形成となって現われたと言える。

## 6. まとめと環境の生体影響の研究への1つの提案

### 6-1 まとめ

環境と生体との関係は非常に複雑で Hormesis のように生体に破壊的作用をする環境もある強度水準を生体は必要としている。この必要度を解明するには Planel らの実験が示すように環境強度水準を下げて生体の反応を調べ、分子レベルでの研究が必要となる。

ウニの受精卵の初期囊胚における骨片成長について、団ら<sup>15)</sup>及び G.Czihak<sup>16)</sup>がまとめた報告を参考にすると次のような経過になっている。

初期骨片は透明な鞘型構造の中で成長することが観測されていた。これは一次間充織細胞 primary mesenchyme cell の虚足 pseudopodial につくられる特殊な膨らみが融合してできるもので、この虚足の融合体の中にできる液胞 vacuole の中で成長することが解った。

初期骨片 spicule の母床を spicular matrix と名付けられ、骨片は1対の単結晶の magnesian calcite で比 Mg/Ca は約 5/100 になっている。spicular calcium は消化管を通らず直接海水中から取り込まれる。先ず炭酸カルシウムの顆粒 calcareous granule が spicular matrix の中心にできる。この顆粒は、針状骨片原基で初めは6面体そして球体、三角形という段階を経て三方向に伸びた形ができる。

骨片原基が初めにできる位置は胚軸には関係無いが、外胚葉壁 ectodermal wall の最も厚い部分の平面に平行した平面内に伸び時間と共に明瞭に1つは動物極、他は背部 dorsal と腹部 ventral に向かって伸びる。三方向の角度は互いに120° になっている。

顕微鏡下で観察する限り、受精ウニ卵は成長段階中繊毛の働きで常に激しく回転していて、その回転軸は一定していない。従って地磁気の方角とは関連が無いように思われる。自然界でも海水は絶えず動いているから受精ウニ卵の回転軸が地磁気の方角とは無関係になっていると考えてよいだろう。しかし、初期骨片が形成されてからカルシウムが炭酸化され単結晶に成長する段階及び三方向に伸びて行く段階で地磁気はその成長速度を制御していると考えれば、低磁場では相互作用の大きさが小さいから制御が弱くなって骨形成速度が早くなると言えるのではないだろうか。

ウニ卵が持っている化学物質の磁気能率は小さく地磁気との相互作用も非常に小さいので、この相互作用が骨形成に影響しているとは通常の物理学の現象としては考え難いが、生体内での化学反応エネルギーは各種酵素の働きで非常に低い状態になっていることを考慮すれば、またアミノ酸の左、右旋性の極端な偏り、炭酸カルシウムの結晶化が生体内で実現していることを考慮すれば、地磁気との相互作用という非常に小さいエネルギーも生体内では無視できないのではないか。

浅島らの実験でも奇形が発生した卵の成長時期では地磁気との相互作用が骨や腸の成長速度を制御していて、この相互作用が殆ど無かったから骨形成や腸形成が暴走した結果が

奇形となって現われたと言えるのではないか。

イモリの場合もウニの場合も骨形成や生体根幹の基本形成に関与する化学物質が解明されればこの議論を発展させることができる。

## 6-2 環境の生体影響の研究への一つの提案

### 6-2A 人工的に環境の変化させる場合

人体などに対する環境許容限度を見つける研究は別だが、生体影響の原理的な内容の研究では環境要素の強度水準を上げると生体防御機構のため生体内の反応が基本的な変化を隠蔽する。

環境要素の強度水準を下げてゆくと、もしその環境要素が生体に影響を与えているものならば、環境要素の強度水準がある値から相互作用の大きさが減り生体内に変化が現われ始める。Fig.1-3 の場合であり、浅島ら、石川らや沼の実験の場合である。

環境要素の強度水準を下げる実験が有効な方法であることを強調しておきたい。

### 6-2B 環境を時間的に変化させる場合

実験は時間変化をしない静の環境水準で行うべきだが、もし、環境の時間変化による影響を調べる時は、時間変化の遅速の度合を変えて実験をする必要がある。先の2C項で論じたが、生体の反応時間が今与えようとしている環境の時間変化と比べて長いか短いかで現われる影響が変化する。これら両者の時間変化の度合を明確にして実験を行わねばならない。

特に、磁場の場合、時間と共に変わる磁場は生体へは磁場として作用するよりは電場として作用していることや生体内物質中に電流が流れることなどのために、生体内の各部で複雑な物理学的作用とそれらに関連した化学的作用が起こっていることを知って生体内の変化を解析すべきである。

### 6-2C 実験対象に選ぶ生体

環境保健の資料のため生体として成熟した動物や細胞組織を対象としている場合が殆どであるが、これらの生体が持っている生物防御機構が働いて環境の生体影響を定性的にも定量的にも確定することが困難な結果となっている。生物防御機構自体の内容はよく解明されていない。

この生物防御機構が出現する前期の段階である受精胚など生体発生初期の状態ものを対象とすれば環境の影響が明瞭に発現することは前述の幾つかの例で明らかである。

さらに、マクロスコピックな変化の解明から一歩進んで分子レベルのミクロスコピックな解明をすべきである。

## 7. 謝辞

椋山女学園大学 石川 優教授からウニの受精卵や生物に関する種々の解説を受け、非生物分野を専攻している著者が報告書に仕上げることができた。厚く感謝する。論文から

の図の引用掲載を快く承諾された東京大学教養学部 浅島 誠教授にも感謝する。また、'94 KUMATORI サマーセミナーの1つとして「非電離放射線の生体影響」というテーマで研究会を開催する機会と援助を我々に与えて頂いた京都大学原子炉実験所および研究会の準備から開催そして締めくくりまでの繁雑な作業を一手に引き受けて実行して頂いた実験所 辻本 忠助教授に心から感謝する。

## References

- 1-a) Luckey, T.D. "Hormesis with ionizing radiation." Boca Raton: CRC Press, (1980).
- 1-b) Luckey, T.D. "Physiological benefits from low levels of ionizing radiation." *Health Physics* 43. 771-789, (1982).
- 1-c) Stebbing, A.R.D. "Hormesis -The stimulation of growth by low levels of inhibitors." *Sci.Total Environment* 22. 213-234, (1982)
- 1-d) Sagan, Leonard A. (Ed.). "Special Issue on Radiation Hormesis." *Health Phys.* 52. 517-680, (1987)
- 2-a) Hildebrand, Carl E., Brian D. Crawford, Ronald A. Walters, M.Duane Enger, and Roger Eckhardt. "Gene Expression." *Los Alamos Science*, 29-51, (1983).
- 2-b) Thurman, David, and Keith Hardwick. "How plant survive an overdose of metal." *New Scientist*. No.1603, 45-46, (1988).
- 2-c) Baker, Alan, Robert Brooks, and Roger Reeves. "Growing for gold . . . and copper . . . and zinc." *New Scientist*. No.1603, 45-48, (1988).
- 3-a) McLaren, D.J. "Time, life, and boundaries : Presidential address." *J. of Paleontology* 44. 801-815, (1970).
- 3-b) Raup, David M. "Size of the Permo-Triassic bottleneck and its evolutionary implications." *Science* 206. 217-218, (1979).
- 3-c) Alvarez, Luis W., Walter Alvarez, Frank Asaro, and Helen V. Michel. "Extraterrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction." *Science* 208. 1095-1108, (1980).
- 3-d) Raup, David M., and JJohn Sepkoski Jr. "Mass extinctions in the marine fossil record." *Science* 215. 1501-1503, (1982).
- 3-e) Ganapathy, R. "Evidence for a major meteorite impact on the Earth 34 million years ago: Implication for Eocene extinctions." *Science* 216. 885-886, (1982).
- 3-f) Alvarez, Walters, Frank Asaro, Helen V. Michel, and Luis W. Alvarez. "Iridium anomaly approximately synchronous with terminal Eocene extinctions." *Science* 216. 886-888, (1982).
- 3-g) Alvarez, Walter, Erle G. Kauffman, Finn Surlyk, Luis W. Alvarez, Frank Asaro, and Helen V. Michel. "Impact theory of mass extinctions and the invertebrate fossil record." *Science* 223. 1135-1141, (1984).
- 3-h) Raup, David M., and JJohn Sepkoski Jr. "Periodicity of extinctions in the geologic past." *Proc.Natl.Acad.Sci.(USA)* 81.801-805, (1984).
- 3-i) Rampino, Michael R., and Richard B. Stothers. "Terrestrial mass extinctions, cometary

- impacts and the Sun's motion perpendicular to the galactic plane." *Nature*. 308. 709-712, (1984).
- 3-j) Schwartz, Richard D., and Philip B. James. "Periodic mass extinctions and the Sun's oscillation about the galactic plane." *Nature* 308 712-713, (1984).
- 3-k) Whitmire, Daniel P., and Albert A. Jackson IV. "Are periodic mass extinctions driven by a distant solar companion?" *Nature* 308. 713-715, (1984).
- 3-l) Davis, Marc. Piet Hut, and Richard A. Muller. "Extinction of species by periodic comet showers." *Nature* 308. 715-717, (1984).
- 3-m) Alvarez, Walter, and Richard A. Muller. "Evidence from crater ages for periodic impacts on the Earth." *Nature* 308. 718-720, (1984).
- 4-a) Planel, H., J.P. Soleilhavoup, and R. Tixador. "Recherches sur l'action des radiations ionisantes naturelles sur la croissance d'etres unicellulaires." *Compte-Rendus Acad.Sci.* 260. 3770-3775. (1965)
- 4-b) Planel, H., J.P. Soleilhavoup, R. Tixador, F. Croute, and G. Richoilley. "Demonstration of a stimulating doses on cell multiplication." *Proc. IAEA on Biol. & Environ. Effects of Low Level Rad.* 1. 127-140. (1976)
- 4-c) Planel, H., J.P. Soleilhavoup, R. Tixador, F. Croute, and G. Richoilley " *Paramecium aurelia* as a cellular model used for studies of the biological effects of natural ionizing radiation or chronic low-level irradiation." *IAEA-AG 134/17*. 335-346.(1979)
- 4-d) Planel, H., J.P. Soleilhavoup, R. Tixador, G. Richoilley, A. Conter, F. Croute, C. Carateno, and Y. Gaubin. "Influence on cell proliferation of background radiation or exposure to very low, chronic gamma radiation." *Health Phys.* 52. 571-578. (1987)
- 5-a) Barnothy, Madeleine F. (Edited by). "Biological effects of magnetic fields." New York: Plenum Press, (1964).
- 5-b) Barnothy, Madeleine F. (Edited by). "Biological Effects of Magnetic Fields." Vol.2. New York: Plenum Press, (1969).
- 5-c) Grandolfo, Martino, Sol M. Michaelson, and Alessandro Rindi, (Edited by). "Biological Effects and Dosimetry of Static and ELF Electromagnetic Fields." New York: Plenum, (1985).
- 5-d) Maret, G., J. Kiepenheuer, and N.d. Boccara, (Edited by). "Proc. of Workshop on Biophysical Effects of Steady Magnetic Fields." Berlin: Springer-Verlag, (1986).
- 5-e) Polk, Charles and Elliot Postow, (Editors). "CRC Handbook of Biological Effects of Electromagnetic Fields." Boca Raton: CRC Press, (1991).
- 6) Bassett, C.A.L., R.J. Pawluk, and A.A. Pilla. "Augmentation of bone repair by inductively coupled electromagnetic fields." *Science* 184, 575-577, (1974).
- 7-a) Dixey, R., and G. Rein. " <sup>3</sup>H-noradrenaline release potentiated in a clonal nerve cell line by low-intensity pulsed magnetic fields." *Nature(Lond.)* 296, 253-256, (1982).
- 7-b) Luben, R.A., C.D. Cain, M.C. Chen, D.M. Rosen, and W.R. Adey. "Effects of electromagnetic stimuli on bone and bone cells in vitro: Inhibition of responses to parathyroid hormone by low-energy low-frequency fields." *Proc.Natl.Acad.Sci.(USA)* 79, 4180-4184, (1982).
- 7-c) Blackman, C.F., S.G. Benane, J.R. Rabinowitz, and D.E. House. "A role for the earth's



- magnetic field in biological effects caused by ELF electromagnetic signals." *Biophys.J.* 47.T-Pos 56, 244a., (1985).
- 8) Falugi, C., M. Grattarola, and G. Prestipno. "Effects of low-intensity pulsed electromagnetic fields on the early development of sea urchins." *Biophys.J.* 51.999-1003, (1987).
- 9-a) Asashima, M., Y. Mogami, M. Okuno, and S.A. Baba. "Embryonic development of the newt *Cynops pyrrhogaster* in very weak magnetic fields." *ISAS Res.Note ISAS RN 357.1-14*, (January, 1987).
- 9-b) 島田 和典, 都丸 直子, 浅島 誠. "極超低磁場内での動物の発生について." *日本マイクログラビティ応用学会会報* 5.2-4, (No.1, 1988).
- 9-c) Asashima, M., K. Shimada, and C.J. Pfeiffer. "Magnetic shielding induces early developmental abnormalities in the newt, *Cynops pyrrhogaster*." *Bioelectromagnetics* 12.215-224, (1991).
- 9-d) Hirao, K., K. Tsuruda, I. Aoyama, and T. Saito. "Large spherical magnetic shield room." *J. Geomag.Geolectr.* 37.581-588, (1985).
- 10) Lednev, V.V. "Possible mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems." *Bioelectromagnetics* 12. 71-76, (1991).
- 11) Adair, Robert K. "Criticism of Levedev's mechanism for the influence of weak magnetic fields on biological systems." *Bioelectromagnetics* 13.231-235, (1992).
- 12) Bassen, H., T. Litovitz, M. Penafiel, and R. Meister. "ELF in vitro exposure systems for inducing uniform electric and magnetic fields in cell culture media." *Bioelectromagnetics* 13. 183-198, (1992)
- 13-a) 石川 優、福井 崇時、中島 晴子. 相山女学園研究報告 平成4、5年度.
- 13-b) 石川 優、福井 崇時."低磁場環境の生物への影響—ウニの発生に及ぼす低磁場の影響—." 本報告書 頁
- 14) 沼 輝之. 名古屋大学理学部物理学科平成5年度卒業論文. "プルテウス幼生の成長における磁場の影響"
- 15) 団 勝麿、関口晃一、安藤 裕、渡辺 浩. 共編. "無脊椎動物の発生—下—." 培風館. (1988).
- 16) Czihak, G. (Ed.). "The Sea Urchin Embryo - Biochemistry and Morphogenesis - ." Springer-Verlag. Berlin (1975).