

# 磁気暴露に関する生物学的アプローチ

## — 特にフリーラジカルとの相互作用について —

岡山大学医学部附属分子細胞医学研究施設神経情報学部門 (主任: 森 昭胤教授)

河野 雅弘, 森 昭胤

(平成6年4月22日受稿)

Key words : Free Radicals, Magnetic Properties, Brain, Hemoglobin

### 1. 緒 言

ここ数十年の科学技術の進歩によって分析装置を使った計測技術が向上し、生体関連分野で、これまで未知であった多くの情報が入手されるようになった。例えば、各種の疾患や老化、癌に深く関与すると言われていた活性酸素種やフリーラジカルの計測には、電子スピン共鳴分光装置 (ESR) や化学発光計測装置 (CL) などの新しい計測装置が導入され、生体内や生体外での挙動の解明に貢献している<sup>1-4)</sup>。同様に、最近、注目されているアルカリイオン水や酸性水の生体作用や、フェライト磁石の示す生体の磁気作用等に関する研究は、核磁気共鳴分光装置 (NMR) や微弱磁場の測定可能な超伝導量子干渉素子 (スクイッド) 装置が使われ、水の特性の一つであるクラスタの形成、酸性水やアルカリイオン水の分子レベルでの形態変化、生体磁化と呼ばれる固有の磁石の存在などが見いだされている<sup>5)</sup>。しかしながら、未だに解明できず積極的な取り組みが望まれているのが、磁場 (磁気) の生体への作用 (影響) である。特に、脳や心臓のまわりから発している生体磁場の存在意義や、外部磁場を作用させると惹起される心臓の機能異常や、脳への神経の情報伝達、平衡感覚、方向感覚、時間感覚などへの影響に関心が持たれている<sup>6)</sup>。

磁場 (磁気) に関する今日的な課題として、磁気治療器や無侵襲生体内画像測定装置である核磁気共鳴画像装置 (MRI) から発せられる磁場の生体への影響がある。このような問題を解

決するには多岐にわたっての検討がなされて<sup>7)</sup>その結果に基づいて対策が行われている。また、それに付随して、暴露磁場に対する規制値の統一が望まれている。同時に、暴露磁場の問題解決には、磁場の生体に対する作用メカニズムの早急なる解明が望まれている。

本総説においては、静磁場の生体影響、特に脳への作用機序を、フリーラジカル (常磁性種) の磁氣的性質と、磁場 (磁気) との相互作用に注目し、(1) 生体磁場がなぜ発生するか、(2) 生体中のフリーラジカルは、どのような磁気作用を受けるか、などの課題について各種検証を行い理論的な解明を試みる。

### 2. 暴露磁場の強さと生体影響

生体がどの位の磁場 (磁力線) でどのような影響を受けるかは公的機関で決められている規制値を目安にすることができる。世界保健機関 (WHO) では、人間が何等かの自覚作用を訴える磁場強度を指標に、暴露磁場の上限を 5 mT としている。この規制値は 10 mT だとほとんどの人が幻覚を訴える (脳に何等かの作用をしている) ので、その半分になっているとのことで、この値に理論的な根拠があるとは言えない。一方、国際非電離放射線委員会 (INIRC) では、WHO の 1/50 の強さの磁場、0.1 mT を規制値とし勧告している。このように公的機関により規制値に幅があることは、科学的な裏づけをとることの難しさを意味している。

規制値の存在は、生体が常時磁場に暴露されると何等かの影響を受けることを示唆しており、

磁場は生体に悪い影響を与える“悪玉”であるとする考え方と言える。しかし、その一方で規制値を越える、数10 mT から数100 mT の静磁場を発するフェライト磁石を使った磁気ネックレスや寝具などの磁気医療器が使用され、この場合、磁場が生体に良い影響を与える力をもつ“善玉”として扱われている。

### 3. 磁気的生体に関係する研究

磁気的生体影響に関する先駆的、学際的な研究への取り組みは、本邦においては志賀、宮本、上野らにより行われ、既報の成果を加味した多くの成果が総括報告されている<sup>8,9)</sup>。その内容は、1) 人間が磁場を感知する固有の器官を有する、2) 人体を構成する“何か”が電磁場を感知する、などの可能性が実験結果とともに詳細に述べられている。

既報の論文や総説を整理してみると、先に述べた磁場の生体影響にマクロとマイクロな作用があることが考えられる。例えば、フェライト磁石を利用した磁気医療器は、形状的にマイクロな環境下での生体作用を利用している。この場合、生体に対する磁気作用の理論では、加えられた静磁場により、磁気的に誘導されて発生した電界エネルギー（電磁誘導理論で説明される）の熱的な作用により血行等改善がはかられると考えられている。しかしながら、医療装置として注目されている MRI 装置の場合、全身（マクロ）が磁気により暴露されるためであろうが、磁場が生体に悪い影響を与えるとして規制値が設けられている。そのため、MRI の被検者に対しては暴露時間が短いことを前提として、最大暴露磁場を2.5T に制限しているし、オペレータに対しては長期暴露を前提に、20 mT 以下とする規制が設けられている<sup>9-13)</sup>。

### 4. 生体内磁石の存在意義

生体が示す磁石としての性質（生体磁石）とその役割に関する研究は、磁気生物学、生物磁気学と呼ばれる学問分野で進められている。生体磁場の存在が認知されたのはごく最近のことで、磁場が生物の感覚や生命活動に何等かの影響を与えていることが明らかにされている。例

えば、伝書バトの帰巢行動や渡り鳥の繁殖地への渡りの能力が地球磁場（0.05 mT）を感知していることや、イルカやクジラが浅瀬に迷い込む理由の一つが、地磁気の異常によって方向感覚が狂うためである、太陽コンパスと呼ばれる生物時計が25時間周期である、などの事例が生体磁石の存在を示唆している。特に、1970年半ばに、マサチューセッツ工科大学（MIT）のR. P. ブレイクモアによって、地磁気の磁力線の方向に沿って動く嫌気性バクテリアの体内に、10-40個のマグネタイト（磁石）があることが発見されて以来、同様な研究が活発に行われ、クサズリガイ、ミツバチ、サメ、伝書バトや高等哺乳類動物であるイルカの頭部にもマグネタイトの存在することが確認されている。生体内に存在する磁場を感知する機能物質、生体磁石（磁場）の発見は、生体に対する磁気作用との関連から多くの関心を集めている<sup>14-16)</sup>。

### 5. 磁場の生体影響とフリーラジカル

#### 1) 磁気的な特性を示す活性酸素種とフリーラジカル

磁場の生体作用を論じるとき、生体中にこれまで報告されていない磁気を発する、あるいは感じる未知物質の存在が必要である。人の場合はマグネタイトの存在は確認されてはいないので、脳と心臓のまわりから検出されている生体磁場は、生体成分の中に磁気を発する、あるいは磁気特性を持つ物質の存在を示唆している。体内には、マグネタイトほどは強くないが、マグネタイトと同様に磁気特性を示す化合物である“フリーラジカル”が存在している。そこで、生体内に存在する代表的なフリーラジカル物質を調べてみると、酸素分子、ビタミンC、ビタミンE、NADPなどの有機の低分子ラジカルと、ヘモグロビン、ミオグロビン、トランスフェリン、シトクロームCのような鉄イオンを含む化合物、セルロプラスミンや、スーパーオキシドジスムターゼ（SOD）のような、銅イオンやマンガンイオンを含む化合物の存在が挙げられる。

他にも、生体は電気を流す性質を持ち一種の電導体である、常に微弱電流が流れて弱い電圧を帯びると、結果的に、電荷（不対電子の性質）

を帯びることになり、フリーラジカル的な磁気特性を示す事になる。

生体内で酸素を運搬するヘモグロビンや溶存酸素が磁石としての性質を示すと考えれば、体内の全酸素消費の20%を消費している脳と、酸素を大気から取り込む肺や心臓が生体磁場を示すことは充分考えられる。

#### 2) フリーラジカルの磁性と磁場の影響<sup>14-17)</sup>

フリーラジカル (常磁性物質) の持つ不対電子は、その一つ一つが磁気モーメントを示し磁石としての特性を持っている。しかし、通常、フリーラジカルは置かれた場の熱エネルギーの作用により、無秩序な運動をしており、互いに磁気特性を打ち消しあって、フリーラジカルの示す磁化は平均化されゼロとなる。しかし、生体内に存在するフリーラジカル物質が高濃度の高分子物質で平均化が起こらない場合や、血管内を一定方向に流れていることで運動抑制を受ける時は磁気を帯びる可能性がある。志賀らの報告でも、常磁性物質と磁場との相互作用を、量子力学的な作用と古典力学的な作用の範疇に大別し検討しており、血液成分の一つであるヘモグロビンが磁場によって配向や分離をすることが確認されている。先に述べたようにヘモグロビン中には鉄イオンが存在しており、デオキシ及びオキシヘモグロビンの鉄は、表1のようにフリーラジカルとしての特性を示す。常磁性のヘモグロビンに外部から磁場を作用させると流速が変化することが報告され、ヘモグロビンの流れを磁場がどれくらい抑制するかの率をあらわす指標 (f) を、式-1で表している。

$$f = \text{帯磁率} (\chi) \times \text{磁場強度} (H_0) \times \text{磁場勾配} (G) \quad (\text{式-1})$$

式中のfの強さは、帯磁率(フリーラジカル量：

表1 ヘモグロビンと酸素、一酸化炭素、一酸化窒素の酸化状態

-----	未結合ヘモグロビン(常磁性 2個)
酸素 (常磁性)	オキシヘモグロビン(反磁性 2個)
一酸化炭素 (反磁性)	一酸化炭素ヘモグロビン (反磁性 2個)
一酸化窒素 (常磁性)	ニトロシルヘモグロビン (常磁性 3個)

$\chi$ ), 加えられた磁場強度(G), 磁場勾配で強さの積で示される。実際、一定の空間に流れているデオキシヘモグロビンに、外部から磁場を加えると、磁場配向と分離率には比例関係が見いだされている。しかし、磁場強度に対しては一定磁場以上で飽和が観測され、式-1で説明できない現象も報告されている。

#### 3) 生体内に存在するフリーラジカル物質の濃度

フリーラジカルが磁化を示すには、一定濃度 (1mM) 以上が存在する必要がある。生体内に比較的多く存在するフリーラジカル (常磁性物質) の濃度を調べたところ、最も高濃度存在するのは、ヘモグロビン中の鉄イオンで、血液中に約10 mM 存在する。しかし、フリーラジカルとして存在する量は多くないであろう。次に多いのが酸素分子で、0.2~1.0 mM が、血液や組織中に溶存している。これ以外のフリーラジカル物質 (金属化合物) の濃度は、1~100  $\mu$ M 程度である<sup>17)</sup>。

#### 4) 磁場に影響される体内酸素濃度

ヘモグロビンと酸素の生体内挙動を、酸化還元に伴うヘモグロビンの磁気特性の変化、酸素や二酸化炭素 ( $\text{CO}_2$ ), 一酸化窒素 ( $\cdot\text{NO}$ ) など結合にともなう平衡関係と結び付けて論理的に検証できれば、磁場の生体に対する作用機構を明らかにできると考え詳細な検討を行った。まず最初に、生体内で磁気特性を示す可能性をもつヘモグロビンと酸素分子の関係を明らかにするため、生体内外での酸素濃度を求めた。大気中の酸素濃度は、ボイル-シャルル法則、式-2より求められている。

$$PV = nRT \quad (\text{式-2})$$

式中のPは圧力、Vは容積、nは濃度、Tは絶対温度、Rはガス定数で、0.0821である。この式を使って、酸素分圧より大気中の酸素濃度を求めてみる、大気中の酸素分圧は、約150mmHgであり、体積：V=1l, 温度：T=298とすると、式-2より大気中の酸素濃度 (n) は、8.07 mMと計算される。

また、水のような溶媒に溶解される物質の濃度を求める場合は、

$$nV = nRT \quad (\text{式-3})$$

と表される。求められる濃度は、式-2と同様、圧力（浸透圧力：II）と温度に依存し変化する。生体内での酸素濃度の分布を求めるには、圧力への考慮が必要で、ヘンリーの法則（式-4）により求められている。この場合も溶存酸素濃度は圧力に（血圧）比例することが確認されている。

$$w = kP \quad (\text{式-4})$$

式中のWは溶存酸素濃度、kは定数、Pは圧力である。

この式は、生体が存在している外部環境下では、Pは一定であるが、体内での血圧が変化すると酸素濃度が連動して、変化することを意味している。

以上のように、式-2から式-4を使うことで、様々な環境下での酸素濃度が求められる。大気中の酸素濃度は、式-2で、体内に存在する酸素濃度は、式-4を使い計算される。

水溶液中の酸素濃度は酸素電極を使う方法や比色定量法にて実測される。超純水中に溶解した酸素濃度を実験的に求めた結果を表2に示す。測定された酸素濃度は、測定温度に依存して変化しており、低温ほどその濃度が高くなっている。298kでの酸素濃度を、式-2を使い分圧に計算すると、4.6mmHgとなる。この様にして求めた、大気中と水中の溶存酸素の関係を表したのが表3である。

表2を使い、各温度の溶存酸素濃度をアレニウスプロットすると、水の特性を表す指標として、活性エネルギー（約3.0キロカロリー/モル）が求められる。空気にかえて純酸素（100%酸素）

表2 超純水中に溶解した酸素濃度の温度依存性  
1気圧の空気と平衡した蒸留水O<sub>2</sub>濃度

温度	5	10	15	20	25	30	35	40
(O <sub>2</sub> ) μM/l	397	351	314	284	258	237	222	209

表3 大気中と水中の酸素濃度の相関

大気中の酸素濃度	8.07 mM / 150 mmHg
水溶液中の酸素濃度	0.25 mM / 4.6 mmHg

を使い溶解実験をすると、大気中の酸素分圧、760mmHgに相当する実験が行え、その結果、酸素分圧に比例する形で、溶解する酸素濃度も増加した。その結果、実測された溶存酸素量は、室温で、1.10 mMであった。溶存酸素濃度の、0.25~1.1 mMの変化は、既報の血管内の酸素濃度や細胞の局所の酸素濃度変化と良く一致している。

#### 5) 酸素濃度、ヘモグロビンと磁気（磁場）

血液中のヘモグロビンは、外部から加えられた磁場に影響され、磁気的な滞留を起こすことが報告されているので、

磁場→生体→ヘモグロビン→溶存酸素及び二酸化炭素の代謝、と関係づけて論じることの可能性を検討した。

大気及び体内血液中のヘモグロビン濃度は、約15g/dlであると報告されている。そこでヘモグロビンを濃度換算し、体内の酸素分圧(mmHg)を絶対濃度に換算したのが表4である。

表から明らかのように、人の体内酸素濃度は超純水中の溶存酸素濃度の約20倍である。この濃度はヘモグロビンによりコントロールされていることが知られている。体内への酸素取り込み機構として、大気中の酸素が肺毛細血管壁を呼吸の形で通過する過程で、毛細血管中のヘモグロビンと結合し取り込まれると機構で説明されている。

結合のヘモグロビン酸素分子の機構は、肺胞に対する酸素の拡散により説明され、大気中の酸素分子が、その分圧に依存して、“化学結合や磁気的結合”により、ヘモグロビンに引き込まれると言われている。

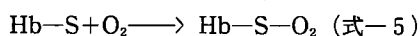
ヘモグロビン（Hb）は、酸素運搬に極めて適している特異な蛋白質である。Hbの1分子は、

表4 酸素の体内濃度分布

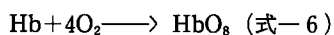
大気中の酸素濃度	:	8.07	mM
人の肺胞	:	5.01	mM
動脈血	:	4.91	mM
静脈血	:	2.06	mM
筋組織	:	1.03	mM
水溶液中の酸素濃度	:	0.25~1.10	mM

4個の構成単位 (サブユニット: Hb-S) からなり、各サブユニットは、ヘムと呼ばれる化学物質が蛋白のポリペプチド鎖に結合したものである。ヘム構造とは、ポルフィリンに2価の鉄原子1個が結合した化合物である。In vitro の実験では、1分子中にある4個の鉄分子は全てが、可逆的に酸素1分子と結合しうることが報告されている。この結合機構として興味深いのは、酸素未結合のヘモグロビン鉄 (デオキシヘモグロビン: 常磁性) が酸素結合後 (オキシヘモグロビン: 反磁性) も2価鉄として存在することで、2価から3価、3価より高い酸化状態をとる反応 (HRP, P-450, Catalase, Transferrin) と区別して、酸素付加反応 (oxygenation) と呼んでいる。この事は、酸素付加反応が特殊な結合様式であることを示唆している。これまでの研究で、Hb-Sのもつ鉄の常磁性は酸素結合前の状態で2価、スピンの状態は高スピン状態 (常磁性: フリーラジカル) であると報告されている。更に、酸素結合後も電子状態は変化していない。このような電子状態をとる酵素の存在は、生体内では知られておらず、特殊な鉄蛋白質といえる。

ヘモグロビンのサブユニット (Hb-S) と酸素 (O<sub>2</sub>) との反応では、Hb-Sの一つが1つの酸素分子を結合させるので、



と説明されている。1分子のHbには、4個のHb-Sが存在するので、酸素との結合は



と説明されている。

以上の知識をもとに、酸素分圧とヘモグロビン濃度の関係を調べた。正常男性、女性の血液中のHb量は、平均150g/lであるので、平均分子量を、64,500として、絶対濃度を求めると、2.33 mMとなる。式-6に従えば、血液中のHb-Sは、9.32 mMとなる。この濃度は、表3の大気中の酸素濃度とほぼ一致しており、地球環境や生物の進化の歴史を調べる上で大切な情報を提供する可能性がある。また、この値が偶然でなければ、人類は大気中の酸素を効率よく利用するように構成されているとも言える。

表4の体内の酸素濃度から、表2の溶存酸素

を差し引いた後、Hb濃度、2.33 mMを一つの濃度単位 (1単位) として、書き換えると表5に示す計算値が求められる。この値は、動脈血液、静脈血液の酸素濃度変化がHb濃度と密接に関係することを示唆している。また、体内でHbと結合する酸素濃度は、既報の体外での実験結果のように、Hbと結合する酸素濃度が連続的に変化する機構と異なることを示し、表5のように、Hbの4個のHb-Sの全てが、酸素と結合して飽和しておらず、2個のHb-Sのみに酸素は結合していることを示している。静脈血液中では、酸素、二酸化炭素 (CO<sub>2</sub>) 濃度も、Hb濃度に一致しており、酸素とCO<sub>2</sub>と交換反応後も、1個の酸素分子は結合していることを示している。

次に、静脈血の残り2個のHb-Sが、どのような形で存在しているのであろうかを検討した。酸素分圧を変化させる物質として、2, 3-ジホスホグリセリン酸 (DPG) の存在がよく知られている。DPGの体内の濃度を調べると、血中濃度は、約4.5 mMで、Hb濃度の2単位分であった<sup>19)</sup>。これらを考慮して各々の濃度関係を表6に示す。表から明らかなように動脈血のHbは、Hb-Sの3個が、二単位の酸素と一単位の二酸化炭素の運搬に関与すると、残りのHb-Sには、DPGが関与していると考えるとよく説明できる。このような各濃度変化は、酸素や二酸

表5 酸素の体内濃度分布  
(ヘモグロビン濃度, 2.33 mMを一単位として換算)

大気中の酸素濃度	:	3.34
人の肺胞	:	2.06
動脈血	:	2.01
静脈血	:	0.79
筋組織	:	0.50

表6 血液中の酸素と二酸化炭素の濃度関係  
(ヘモグロビン濃度, 2.33 mMを一単位として換算)

	酸素	二酸化炭素	DPG
動脈血	5.01 (2)	2.06 (1)	4.5 (2)
静脈血	2.15 (1)	2.38 (1)	4.5 (2)

化炭素, DPG が相互に交換し, 各々の物質の代謝や運搬に携わることが示唆される。

Hb と酸素あるいは二酸化炭素の結合がどのような反応機構により制御されているか仮説として, 永田らはヘモグロビン鉄と酸素, 一酸化炭素の結合をフロンティア電子論で説明している。ここでは, 酸素と一酸化炭素の Hb に対する結合力の差を量子論的に展開している。理論的な計算によれば, 鉄と一酸化炭素の結合は, 電子の結合軌道である HOMO—LUMO 間の孤立電子が対となる  $\sigma$  結合形であり, 酸素の場合は, HOMO—SONO, 即ち酸素分子の  $P\pi$  軌道と鉄の軌道の重なりによる弱い結合とされている<sup>19)</sup>。

ヘモグロビンの酸素運搬は, ヘモグロビンの酸素や二酸化炭素, DPG の結合能に対する平衡を利用しており, 内的, 外的環境変化に依存して変化する。また, 最近研究が進んでいるニトロシルヘモグロビン (Hb—NO) も一酸化炭素が Hb 鉄イオンに結合した物質で, Hb は  $\cdot$ NO で酸化され, 鉄イオンの価数は三価である。Hb—NO は強磁性的な特性を示すことが報告されているので, それ自身が, デオキシヘモグロビンと同様に磁気的な滞留を行う可能性も考えられる。もし, 生体内の  $\cdot$ NO の多くが Hb と結合して運搬されていると考えると, 磁場の影響により滞留がおり,  $\cdot$ NO の体内の代謝を変化させ, 血管の拡張因子として働くなどの作用が考えられる<sup>20)</sup>。

## 6. 結 論

1) Hb の含む鉄は, オキシ, デオキシ, ニトロシル, 二酸化炭素, DPG 等との結合により, 酸化還元状態が変化し, 酸化数 (価数) を変化させ常磁性物質であるフリーラジカルになると, 磁場との相互作用を行う。

2) 血液中の高濃度存在する Hb に外部から

磁場が加えられると, オキシヘモグロビンは影響されず, デオキシヘモグロビンのみの滞留が惹起されることは, 磁場→生体→ヘモグロビン→溶存酸素及び二酸化炭素の代謝と連鎖的な作用を引き起こし, 酸素, 二酸化炭素,  $\cdot$ NO の生体組織への供給や代謝に関係する可能性を示唆する。

3) 脳では, ヘモグロビンにより運搬される酸素, NO, 二酸化炭素などの局所的な濃度変化が, 磁气的に導かれ, 間接的に血管の拡張, 弛緩などの生理現象として現れる事が示唆された。

4) Hb と同様に, 生体内の酸素,  $\cdot$ NO, セルロプラスミン銅, トランスフェリン鉄などのフリーラジカルは, 外部から加えられた静磁場により動きが抑制され, 生理的な作用を惹起する可能性がある。

5) 磁気医療器の生体への作用は誘導電流による発熱効果の寄与が大きいと考えられている。既報の, 1,000 mT の強い磁場で暴露した時の血流改善率が約10%程度であるとの結果を拡大解釈し, 暴露した静磁場の効果が, 磁場強度に比例すると仮定すると, 磁気医療器に使われている50~100 mT の磁場による血流改善はごく僅かと計算されるし, 電磁誘導による熱エネルギーも, 人では平均体温の37度に対して, 局所的な発熱量からするとその寄与は僅かと言える。この場合も, 局所的に加えられた磁場で Hb などのフリーラジカルの磁気滞留が起り, 代謝を促進するという考え方もある。

6) 以上, 生体への磁場の作用を, “フリーラジカル”と結び付け説明した, この様な作用機構が詳細に実験されれば, 生体の持つ未知の機能についても明らかにできる可能性がある。

本研究を行うに当たり, 日本物療医学研究会の学術研究助成を頂いたことを感謝致します。

## 文 献

- 1) 中野 稔: 活性酸素, 生体内での活性酸素をめぐる諸問題; 活性酸素, 萩田善一, 大浦彦吉編, 共立出版, 東京 (1987) pp 1—22.
- 2) 近藤元治: フリーラジカルって何だ. 日本医学館, 東京 (1991).
- 3) 大柳義彦: スーパーオキシドと医学. 共立出版, 東京 (1981).

- 4) 今井洋一編：生物発光と化学発光。広川書店，東京（1989）。
- 5) 綿抜邦彦，久保田昌治監修：新しい水の化学と利用技術。サイエンスフォーラム，東京（1992）。
- 6) Rusovan A and Kanje M : Magnetic field stimulated peripheral nerve regeneration in hypophysectomized rats. *Neuro Report* (1992) **3**, 1039—1041.
- 7) Magin RL, Liburdy RP and Persson B : Biological effects and safety aspects of nuclear magnetic resonance imaging and spectroscopy. *Ann NY Acad Sci* (1992) **649**, 1—400.
- 8) 志賀 健，宮本博司，上野照剛編著：磁場の生体影響。てらべいあ，東京（1991）。
- 9) 志賀 健：磁場の人に対するリスク評価法に関する学際的研究。日産科学振興財団（1989）。
- 10) Alpen EL : Magnetic field exposure guidelines ; in *Magnetic field effects on biological systems*, Tenford TS ed, Plenum, New York (1978) pp 25—32.
- 11) WHO/IRPA Task Group : Extremely low frequency (ELF) fields. *WHO Environm. Health Criteria*, WHO, Geneva (1984) pp 35.
- 12) WHO/IRPA Task Group in *Magnetic Fields : Magnetic fields*, WHO Environm. Health Criteria, WHO, Geneva (1987) pp 69.
- 13) Maruyama M : Orientation of sicked erythrocytes in a magnetic field. *Nature* (1965) **206**, 420—422.
- 14) Okazaki M, Kon K, Maeda N and Shiga T : Distribution of erythrocyte in a model vessels exposed in to homogeneous magnetic fields. *Physiol Chem Phys Med NMR* (1988) **20**, 3—14.
- 15) Milville D, Paul F and Roath S : Direct magnetic separation of red cells from whole blood. *Nature* (1975) **255**, 706.
- 16) 精山明敏，前田信治，志賀 健：不均一磁場中の管内を流れる赤血球の偏り；マグネティックス研究資料（1988）pp 67—73.
- 17) 桜井 弘，田中英彦編：生体微量元素。広川書店，東京（1994）。
- 18) 田宮信雄，八木達彦，吉田 浩訳：ストライヤの生化学。東京化学同人，東京（1987）。
- 19) 永田親義：新しい量子生物学。講談社，東京（1989）。
- 20) Palmer RMI , Ferrige AG and Moncada S : Nitric oxide release accounts for the biological activity of endothelium derives relaxing factor. *Nature* (1987) **327**, 524.

**Biological approach for the stress of magnetic fields :  
Involvement of free radicals in stress mechanism in magnetic fields**

**Masahiro KOHNO and Akitane MORI**

**Department of Neuroscience,  
Institute of Molecular and Cellular Medicine,  
Okayama University Medical School,**

**Okayama 700, Japan**

**(Director : Prof. A. Mori)**

The magnetic properties of free radicals and paramagnetic compounds such as hemoglobin and oxygen are principal factors in evaluating the biological stress of magnetic fields. These compounds exist in high concentrations, i. e. 0.2—10 mM, in human bodies and their environment. Irons in hemoglobin play an important role in the stress induced by magnetic fields. For instance, concentrations of oxygen, nitric oxide and carbon dioxide, which are transported by hemoglobin, are modulated by a magnetic field in the brain, and physiological and biochemical changes, such as accelerated circulation and metabolism, may occur thereafter. Moreover, free radicals, i. e. oxygen, nitric oxide, ceruloplasmin-Cu, and transferrin-Fe, may be controlled by an external static magnetic field, and these mechanisms may be related to physiological functions such as circulation. A therapeutic effect of magnetic medical instruments may result, in part at least, from the control of free radicals by magnetic fields and accelerated metabolism described above.