生物の磁場感受性と電磁過敏症

宮田英威*

東北大学理学部物理学科
〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉6-3

Magnetic sense of living organisms and electromagnetic hypersensitivity

Hidetake MIYATA*

Department of Physics, Faculty of Science, Tohoku University, Aramaki, Aza-aoba 6-3,
Aoba-ku, Sendai Miyagi 980-8578, Japan

要 旨

モバイル通信, 無線LANなどが近年急速に普及している。一方で電磁場に起因すると思われる多種多様な症状(電磁過敏症)を訴える患者の数が増えており, 両者に関係があるのではないかと考えられている。このような背景の下, 国際非電離放射線防護委員会(International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection; ICNIRP)は電磁場の安全性に関するガイドラインを設けている。しかしそこで示されている電磁場強度のレファレンスレベルは, 物理学的・生理学的に確立した電磁波と生体との相互作用に基づいて設定され, 電磁過敏症がみられるとされる電磁場の強さにくらべて3桁あまり高い。現状ではヒトがレファレンスレベルを下回るような弱い磁場を感じることはあり得ないとする見方が支配的であるため, この設定に疑問が呈されることはない。しかし一方では, 細菌, 鳥類, 爬虫類, 魚類など, 意外と多くの生物種がレファレンスレベルより弱い地磁気を移動方向の制御に利用していることが解明されつつある。本解説では前半で電磁場の規制値に関してふれ, 後半で研究の進んでいる走磁性細菌と伝書バトの地磁気感受性に触れる。さらに, マイクロテスラ未満の微弱な電磁場でも生体に影響するという, 物理学分野で最近提案された理論の一端を紹介し, 電磁過敏症との関連を議論する。

Abstract

Mobile telecommunication and internet technologies have been rapidly developed during last two decades. Concomitantly, the number of people is growing, who suffer from electromagnetic hypersensitivity (EHS). Hence, a causal relation between the electromagnetic waves and EHS has been suspected. International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) set a limit of the exposure to electromagnetic waves. However, the limit is based on the physiological limit that has been derived from the physically accepted interaction of the electromagnetic waves and the human body. Thus, the limit is three orders of magnitude higher than the level above which the patients of EHS normally develop their symptoms. The prevailing view is that humans do not feel magnetic fields that are lower than the above limit. Hence, the principle of the setting of the limit has not been questioned. However, some species such as bacteria, birds, reptiles and fishes seem to possess geomagnetic sense and utilize it for navigation. In this commentary, I will first explain how the limiting values for the electromagnetic waves have been determined and then briefly explain geomagnetic sense of bacteria and that of homing pigeons. It turned out that these sensing mechanisms cannot detect the magnetic field that has been attributed to the cause of EHS. Thus, I will explain a recently proposed hypothesis based on the interaction between radicals and the local magnetic fields (= geomagnetic field + time-varying magnetic field originated from the electromagnetic wave). It has been hypothesized that the precession of the radical in the local magnetic field is highly sensitive to the presence of the time-varying component in the local magnetic field, and even the time-varying magnetic field of less than 1 microtesla can modulate the chemical reaction that involves the radical.

Key words: 電磁過敏症 (Electromagnetic hypersensitivity), 電磁波 (Electromagnetic waves), ICNIRP (ICNIRP), 走磁性細菌 (magneto-tactic bacteria), ラジカル (radical)

*Corresponding author (責任著者) Email: miyata@bio.phys.tohoku.ac.jp, Tel: 022-795-6465

受付日: 2019年2月18日 (Received: 18 February 2019)

受理日: 2019年2月27日 (Accepted: 27 February 2019)

1. はじめに一電磁場と電磁波・電波

電場は電気を帯びた物体に力を及ぼす空間で、磁場は磁石に力を及ぼす空間と考えてよい。電場と磁場を合わせて電磁場とよぶ。電磁波は電場と磁場の2成分から成り、両者が時間的に変動しつつ空間を進む波である¹⁾。電磁波を特徴づける物理量の一つは周波数である。周波数はヘルツという単位で表され、電磁波を構成する電場と磁場がそれぞれ1秒間に何回振動するかを示す。電波、赤外線や紫外線、エックス線、ガンマ線などの放射線も電磁波の仲間であり、この順に周波数が大きくなる²⁾。電磁波の周波数は連続的に変化する(下限はゼロで上限はない)。なお、上に述べた電磁波の分類は便宜的であってそれぞれの間に明確な境界はない。

電磁波が空間を伝わる性質はレーダー、無線通信あるいはラジオなどに利用される。この時用いられる電磁波(電波)の周波数は 10^4 から 10^{11} ヘルツにわたる³⁾。電磁波はその周波数に比例した大きさのエネルギーをもつ。紫外線は可視光より周波数が高い分エネルギーは高く、皮膚に吸収されると日焼けを起こす。またエックス線の周波数、従ってエネルギーは紫外線よりさらに高く組織を透過する力が強い⁴⁾ため、医学検査に応用されることはよく知られている。一方、電波の一種であるマイクロ波は水に吸収され、水の温度を上昇させる。この性質は電磁波の吸収による生体影響を考える上で重要である。

電磁波を放射する目的でない場所、たとえば、電灯線や自動車のスパークプラグなどでも電磁波は発生する⁵⁾。様々な分野で応用される電磁場に加えて「不可避免的に」放出される電磁場をあわせると、現代人は人工電磁場・電磁波があふれる環境に暮らしているといえるだろう⁶⁾。

2. 電磁波の健康影響と各国際機関の見解(本節と次節に関してはこの項の他の著者による総説を参照されたい)

近年、電磁過敏症が問題となっている。これはコンピュータのモニタ、携帯電話基地局、コードレス電話機、IH調理器を含む家電製品一般、高圧送電線など多種多様な電磁波源に曝露されると、発がん、生殖機能異常や白内障あるいは子供の行動、発育異常など種々の症状が出るというものである⁷⁻⁹⁾。

世界保健機関(World Health Organization; WHO)やICNIRPなど、人間の健康や福祉を推進する国際機

関は、複数の報告の間で結論の一致を見ない場合や電磁波の強度が公衆に対する被ばく規制値を下回っている場合は、電磁波影響といえるだけの明確な科学的証拠はないと結論するのが一般的である。たとえばWHOは、携帯電話や携帯基地局の発信する電波が原因となるかどうかは確立されていないと述べている⁹⁾。

ただし、電灯線起源のごく微弱な50ヘルツ/60ヘルツ磁場^(註1)に対する長期曝露と小児白血病リスク上昇の相関⁷⁾や、磁場強度が0.3ないし0.4マイクロテスラを越えるとリスク上昇が認められること⁸⁾については言及がある⁹⁾。もっともその一方で、結論の異なるメタアナリシスが存在することから¹⁰⁾、この磁場強度は曝露基準(次節参照)の参考にはされていない。一方、国際がん研究機関(International Agency for Research on Cancer; IARC)は、2011年までに行われていた電磁波と発がんの間の関係を調べた多数の研究結果に基づき、 3×10^4 ヘルツ～ 3×10^{11} ヘルツの電磁波が脳・中枢神経系の発がんの原因である可能性を否定できない、としてクラス2B(人に対する作用について限られた証拠を有する要因; agents with limited evidence in humans)に分類している¹¹⁾。以上の2点は電磁過敏症が社会的に認知されているとは言えない状況においては注目に値する。

3. 電磁波曝露に関するICNIRPのガイドライン設定について

ICNIRPは放射線以外の電離作用を示さない電磁波について、すでに確立している生体への影響—誘導電流による神経刺激と組織に吸収される電磁波による温度上昇—に基づいて基本的規制の指針を示している^{9,12)}。更にこれをもとにレファレンスレベルと呼ばれる値が周波数に応じて設定される。たとえば50/60ヘルツの磁場に対する公衆の被ばくのレファレンスレベルは0.1ミリテスラとなる。この値は小児発がんリスクに関係する磁場強度である0.3～0.4マイクロテスラに比べてはるかに高い。一方、携帯電話で用いられる電波に対してSAR(specific absorption rate)値が定められる^(註2)。坂部らは、1.5歳児が片手に出力800 mWの携帯電話を保持して頭に当て、出力の半分が身体、頭部ならびに手のひらで吸収される場合の試算を行い、 $SAR = 0.26 \text{ W/kg}$ を得ている。なお坂部らは、この値が局所におけるレファレンスレベル2 W/kgを十分下回るものの、もし同じ出

力がもっと狭い領域に集中すればSAR値は大きくなることを注意している³⁾。ICNIRPの示したレファレンスレベルは国が電磁波を規制する際の参考にされるが、世界的にはより厳しい基準を定めている国もある。

4. なぜレファレンスレベルは高いか

これは電磁場と生体物質の相互作用エネルギーが熱エネルギーに比べて十分大きい¹³⁾場合だけを考慮したためである。ちなみに筆者の職場がある鉄筋コンクリート造の建物内で電気ストーブから放射される50/60ヘルツを含む「超低周波磁場」を測定してみると、その値が1マイクロテスラ程度になるのは電気ストーブからおおよそ50センチ以内に限られる。もっと近づいても数マイクロテスラ程度である。そのような意味では上記のレファレンスレベルは十分クリアされていることになる。しかしながら問診票を用いた最近の研究¹⁴⁾では、そのような環境下でも電磁過敏症を発症する場合のあることが示唆されている。また次節で述べるように、強さが50マイクロテスラくらいしかない地磁気を生存戦略に利用する生物が存在している。これらのことから、人が感じないような微弱な電磁場に対する生体応答を知ることは重要である。

5. 生物の地磁気感受性

細菌、鳥類、爬虫類、魚類など、意外と多くの生物種が地磁気に感受性をもつ¹⁵⁾。このことは、生物が非常に古い時代に地磁気感受性を獲得したことを示唆する¹⁶⁾。上に挙げた生物種ではICNIRPのレファレンスレベルより弱い地磁気を検知してそれぞれの生存戦略に役立てていると考えられている。ここでは例として走磁性細菌と伝書バトを取り上げる。

走磁性細菌は地磁気のセンサーとしてマグネトソームと呼ばれる細長い細胞内小器官をもつ。マグネトソームは、数十ナノメートル立方くらいのマグネタイト結晶(永久ナノ磁石)がいくつか直列に連なり生体膜で包まれたものである。この直列配置のため各マグネタイトが地磁気から受ける回転モーメントは足し合わされ、マグネトソームの長軸は地磁気方向を向く¹⁷⁾。このため細菌は水中に潜る方向に遊泳し、結果的に生存に有利な水深へ導かれる^{16,17)}。

一方、伝書バトが帰巢する際には地磁気センサーを使って正しい方向を見出していることが初期の研究

において明らかにされていた¹⁸⁾。その後この地磁気感受性が前庭神経(内耳にある前庭という器官と脳をつなぐ)を損傷すると消失することから、センサーは内耳にあることが示された¹⁹⁾。原田は、内耳の中の壺囊という器官にある、鉄を含んだ耳石が重要だと述べている。耳石は感覚細胞に乗っており、ハトの運動に伴ってその位置が感覚細胞上で変わり、それが脳に伝えられて体勢の変化として認識されると一般に考えられているが、原田は、ハトの耳石は鉄を含むため地磁気に対する体勢変化も感じると述べている²⁰⁾。

6. 地磁気センサーの増幅機構

走磁性細菌と伝書バトがそれぞれ持っている地磁気センサーの共通点として、地磁気と相互作用する磁気微粒子を持つということのほかに信号の増幅ということが挙げられる。細菌のマグネタイト結晶一個が地磁気から受ける回転モーメントは結晶の熱運動エネルギーと同程度である。そのため一個のマグネタイト結晶の向きは絶えずふらついて地磁気の方角からずれてしまう。しかしマグネトソーム中ではいくつかのマグネタイト結晶が直列につながっているためマグネトソームの方向が安定すると考えられる¹⁷⁾。一方、壺囊の耳石は12000個の感覚細胞の上に位置しているため²⁰⁾、耳石から各細胞が受け取る刺激は脳で足し合わされ、これが神経を伝わる際にノイズに埋もれることを防ぐのではないと思われる。

7. 電磁場センサーとしてのクリプトクローム

しかし、最近になって、伝書バトよりはるかに長距離をわたるヨーロッパコマドリが定位する(渡りの季節に飛ぶべき方向を向く)機構について研究が進み、新たな原理と増幅機構をもって働く高感度センサーの存在が認められつつある。センサーの中心はクリプトクロームという、網膜上に固定された蛋白質である。クリプトクロームに光が当たると活性化状態になる。その後再び元の状態に戻るまでのプロセスが地磁気に対するクリプトクロームの向き、いいかえれば鳥の飛行方向に影響され、さらにその影響が何らかの情報(例えば視覚野内の明暗のパターン)に変換されるという可能性が考えられている²¹⁾。この鳥は渡りの時期になると定位行動を行うが、注目すべきことに、特定の周波数(1.3×10^6 ヘルツ)をもつ電磁波(磁場成分の強さは地磁気の3000分の一)

によってそれが乱される。このように特定の周波数に対して鋭く応答することを共鳴というが、この驚くべき応答性について次のような説明がなされている。クリプトクロームは光により励起されるとその内部に2個のラジカル(不対電子)からなるラジカル対が生じる。このラジカル対は最初一重項と呼ばれる状態にあるが、一部がその後三重項と呼ばれる別の状態へ遷移する。励起状態はいずれ一重項を経て緩和し、クリプトクロームは元の状態にもどる。ここに外部から振動磁場が加わると一重項と三重項のバランスが変化する。緩和はかならず一重項を経て起こるので、一重項と三重項のバランスが変化すれば元の状態にもどるクリプトクロームの割合も変化する。それが上述のように視覚野での情報に変換される。一重項から三重項への遷移は振動磁場に対する共鳴によって起こるため非常に高感度となる¹⁸⁾。

8. 電磁過敏症と電磁場センサー

電磁過敏症発症のメカニズムは今なお不明であるが、少なくとも電磁場が人体に対して作用しなければならないはずである。とすれば電磁場という入力を受け取って何らかの生理学的プロセスに変換する電磁場センサーが存在するに違いない。上では生体における地磁気センサーとしてマグネタイトや鉄などの磁性体ならびに電磁場センサーとしてラジカルペアについて述べた。これらは電磁過敏症発症においてもセンサーになるのだろうか。電磁過敏症の大きな特徴は、前述のように非常に弱い電磁場(磁場成分にして高々1マイクロテスラ)に応答して多彩な症状を呈することである⁴⁾。従って電磁過敏症のセンサーがもしあるとすれば、高感度かつ体内のいろいろな組織において電磁場を検知できるものでなければならない。だとすれば、磁性体を介して応答するというのは感度の点で考えにくい。なぜなら一個のマグネタイトが地磁気から受ける回転モーメントは熱運動エネルギー程度にしかならず、生体の応答につながるとは期待できないからである。走磁性細菌のようにマグネタイトが直列に並んだマグネトソームならよいのではないかとも思われるが、これまでのところ人間にマグネトソームは見つかっていない。また、細胞内にはヘモグロビンなどに由来する鉄の沈着が認められることもあるが、それが伝書バトのように何らかの感覚細胞と関係するという証拠はない。一方ラジカル対は地磁気に対して応答するだけ

でなく定位妨害実験の結果、電磁過敏症を説明するのに必要な高感度の応答性を有していると思われる。しかし、ラジカル対を作るために光などによる分子の励起が必要で、しかも磁場に対する応答が共鳴を介して起こるためターゲットが限られ、電磁過敏症を説明するのは難しいと思われる。以上のことから、これらの地磁気センサーが電磁過敏症と結びつくという根拠は弱い。そこで以下では、最近可能性が指摘された、電磁過敏症にも関係する可能性を持つと考えられる磁気センサーについて紹介したい。

9. 電磁過敏症につながるセンサーとしてのラジカル

化学反応においては単独のラジカル(不対電子)が生成する場合がかなりある。反応に際して結合の組み換えが起こることに伴い、生成したラジカルは他のラジカルと新たに対を作る。ラジカルは棒磁石のように向きを持っているため、対になる2つのラジカルの相対的向きが問題となる。図1に細矢印で示すように、ラジカルはそれが存在する場所の磁場(局所磁場)の周りに歳差運動(回転運動)する²⁰⁾ため、磁場があればその向きは絶えず変化する。

次に、地磁気(静磁場とみなせる)が引き起こす歳差運動について述べる。歳差運動はラジカルの回転角(Fig.1)で表され、地磁気中では回転角が経過時間に比例して増加する(Fig.2, グレーの直線)。地磁気は他の電磁波の有無にかかわらず生体内のどこにおいても局所磁場として存在するため、これはバックグラウンドとして存在する歳差運動と考えられる。

Fig.1 ラジカルが磁場の周りに行う歳差運動

ラジカルの歳差運動を量子力学に基づいてイメージで表したもの；太い矢印が局所磁場の向きをあらわし、細い矢印がラジカルを表す。ラジカルは局所磁場に平行な直線(点線)の周りに歳差運動し、その先端は円運動を行う。この円運動を基準線から測った角度(回転角)で表すことができる。

Fig.2 ラジカルの歳差運動に磁場が与える影響を例示したグラフ

縦軸は回転角(Fig.1)、横軸は基準となる時刻(時刻ゼロ)からの経過時間(いずれも任意単位)。グレーの直線、静磁場による歳差運動の回転角の時間変化；グレーの曲線、周期的に変動する外部磁場による歳差運動の回転角の時間変化；黒い曲線、静磁場＋変動磁場による歳差運動の回転角；太い矢印で示すように回転が非常に遅くなる時刻がある。

この歳差運動のため、化学反応にあずかる2つのラジカルの向きは絶えず変化し、反応の速さは影響を受けるはずである。しかしBinhiは、生体が進化の過程で地磁気に適応したため、ラジカルが関与する化学反応においてこの歳差運動は織り込み済みであると考えた²³⁾。最近、地磁気を1マイクロテスラ以下にまで弱めた微弱磁場環境下における細胞増殖^{24,25)}や細胞内における過酸化水素産生^{26,27)}が、地磁気を弱める前と比べて変化するという結果が報告されている。これらの結果はBinhiの考えと矛盾しない。

電磁波が入射する場合、その磁場成分は電波と同じ周波数で周期的に変動する。このため歳差運動の回転角も同じ周期で変動する(Fig.2, グレーの曲線)。もし地磁気と電磁波の磁場成分が同時に存在する場合は、ラジカルの回転角はそれぞれの場合の回転角の足し合わせとなる(Fig.2, 黒い曲線)。この結果、反応にあずかる2つのラジカルの相対的向きは地磁気だけがある場合とは異なり、化学反応が影響を受けると考えられる²³⁾。

興味深いのは、Fig.2に示すように静磁場はゼロではないのに太い矢印で示した時刻において黒い曲線が水平になっていることである。これは歳差運動の回転が完全に止まることを表し、地磁気が一時的にゼロになったのと同じである。この場合には回転が止まる時刻近辺で、地磁気を減弱した時と同様に化学反応速度が変調されると考えられる。Binhiは、生

体内化学反応は連鎖していることも多いため、どこか一つの反応でもこのような変調を受ければ最終産物の生成・分解量などが影響されることを指摘している²³⁾。生体内のラジカルはその周囲の環境が千差万別であるため、入射電磁波の周波数や強さに応じてどのラジカルの歳差運動も影響されうる。いわゆる酸化ストレスはラジカルの生成、消滅と不可分の関係にある。このため生体中でラジカルが関与する反応は「同時多発的」に磁場影響を受け、その結果酸化・還元バランスがくずれ、酸化ストレスが各所で高まる可能性がある。

このメカニズムでは外部磁場が弱くなれば当然その影響は小さくなるが、それでも歳差運動の回転角の時間変化が直線から外れることは同じである。BinhiとPrato²⁸⁾によれば、ラジカルの熱運動の緩和時間などの物理的条件が満たされれば、1マイクロテスラ程度の弱い外部変動磁場でもラジカルの歳差運動は影響され、化学反応の変調が起き始めるという。上述のように、生体の化学反応は進化の過程を通じて地磁気の影響下にあったために各ラジカルが行う歳差運動は地磁気存在に対してだけ最適化されていると考えれば、地磁気以外の電磁波あるいは静磁場の変化は、たとえ弱くても生体にとっては「未経験」であり、「戸惑う」原因となるかもしれない。ただしBinhiとPratoはまた、生体においてはホメオスタシスが働くため、たとえ個々の化学反応が外部磁場により変調を受けても補償的反応が起きて、生体レベルでは影響が現れないこともあると述べている。

上記メカニズムは、もし正しければ電磁過敏症の理解に貢献する可能性は高い。なぜなら、このメカニズムは磁場が弱くても働き、ターゲットを選ばず、しかも電磁過敏症と同様に磁場曝露の結果が個人ごとに異なる可能性まで示唆しているからである。

10. Binhiの仮説の価値

生物の中には電磁波の曝露基準を下回る磁場を感知する地磁気センサーを持つものがあるが、人はそのようなセンサーを持たないため、これまでに知られているメカニズムでは電磁過敏症を説明できない。むしろこれまでに医学的視点に立った電磁過敏症の発症メカニズムとして「メラトニン仮説」に基づくもの³⁾、磁場による細胞内酸化ストレス上昇²⁹⁾に基づくもの、Pallの提唱した化学物質過敏症発症メカニズムに基づくもの³⁾など多くの説が提案されてきたが、

いずれの場合もセンサーの実体は明瞭になっていない。これに対し、Binhiの仮説は、ラジカルがセンサーの実体として提案されており、また細胞を用いた実験結果とも矛盾しない。むしろ電磁過敏症のメカニズムとして可能なものがこれだけとは断言できないが、少なくとも酸化ストレス関連の種々の細胞内プロセスが磁場の影響を受けるという数多くの報告²⁹⁾の意味付けは可能になったといえる。

11. おわりに

筆者の研究グループもDNA鎖切断やスーパーオキシドアニオン産生などの細胞内酸化ストレス関連の指標が50ヘルツ磁場により変調されることを示してきた^{30,31)}が、ラジカルそのものに注目してはいなかった。上述のように50ヘルツ磁場が細胞機能に影響することを示すための指標として酸化ストレス関連の現象を利用したに過ぎない。しかし、DNA鎖切断はラジカルによって起き、スーパーオキシドアニオンはラジカルそのものである。すなわちいずれの例においてもBinhiの仮説が予想したように、ラジカルが関与する反応に対して50ヘルツ磁場が影響を与えている。筆者はこの結果が仮説の有効性の例示になっており、ラジカルが電磁場センサーだと考えることは生体への磁場影響を研究する際に有効ではないかと考えている。特に今後、ラジカルをキーワードにミトコンドリアを対象とした研究に取り組みたいと考えている。ミトコンドリアは生体エネルギー源であるアデノシン3リン酸を作り出す、細胞のエネルギー産生工場である³²⁾。ATP産生の過程において副産物としてラジカルであるスーパーオキシドアニオンが生成される。これが細胞において非酵素的に生成されるスーパーオキシドアニオンのかなりの部分を占めている³³⁾。この分子は細胞傷害性を持つと同時に細胞内信号伝達過程にも関与する³⁴⁾。この意味でスーパーオキシドアニオン生成ならびにその下流でスーパーオキシドアニオンにより調節を受ける細胞機能が細胞を磁場に曝露した時にどのように影響されるかを解明することは電磁過敏症メカニズム解明の面からも重要に違いない。

なお、電磁場と生体、特に人体とのかかわりは複雑でありこの小論では到底カバーできない。読者は本項目の他の著者による総説、本文で挙げた参考図書や、他の総説³⁵⁾などを参照されたい。

注 釈

- 注1) 生体が低周波電磁場に曝露された場合、体内に高濃度で存在する電解質のため入射電場だけが弱められ、磁場は弱められない⁹⁾。このため50ヘルツ／60ヘルツの電磁場に曝露された生体内においては磁場だけが残ると考えてよい。
- 注2) SARは携帯電話の出力だけでなく、電波を受ける部分の形状、寸法にも依存するので例えば異なる携帯電話のSAR値同士の比較には注意を要する。

引用文献

- 1) 川村清：電磁気学，岩波書店，第1章（1994）。
- 2) ハリディD., レズニックR., ウォーカーJ.: 物理学の基礎 [3]電磁気学，培風館，第34章（2002）。
- 3) 坂部貢，羽根邦夫，宮田幹夫：生体と電磁波，丸善出版，第1章（2012）。
- 4) 北条祥子，土器屋美貴子：電磁過敏症に関する最新知見と今後の課題，臨床環境医学，21，131-151（2012）。
- 5) WHO Fact Sheet No193: Electromagnetic fields and public health: mobile phones. <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs296/en/>; accessed on January 29 (2019).
- 6) WHO Fact Sheet No226: Electromagnetic fields and public health: radars and human health. <https://www.who.int/peh-emf/publications/facts/fs226/en/>; accessed on January 15 (2019).
- 7) Wertheimer N. and Leeper E.: Electrical wiring configurations and childhood cancer, *Am. J. Epidemiol.*, 109, 273-284 (1979).
- 8) 兜真徳，石堂正美：科学，71，150-159（2002）。
- 9) ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), *Health Phys.*, 74, 494-522 (1998).
- 10) Grelie J., Ravazzani P. and Cardis E.: Potential health impacts of residential exposures to extremely low frequency magnetic fields in Europe. *Environ. Int.*, 62, 55-63, (2014).
- 11) IARC: IARC classifies radiofrequency electromagnetic fields as possibly carcinogenic to humans. Press Release, No 208, May 31 (2011).

- 12) ICNIRP: Guidelines for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields (1 Hz - 100 kHz). *Health Phys.*, 99, 818-836 (2010).
- 13) Adair R.: Static and low-frequency magnetic field effects: health risks and therapies, *Rep. Prog. Phys.*, 63, 415-454 (2000).
- 14) Hojo S., Tokiya M., Mizuki M., Miyata M., Kanatani K. T., Takagi A., Tsurikisawa N., Kame S., Katoh T., Tsujiuchi T., Kumano H.: Development and evaluation of an electromagnetic hypersensitivity. Questionnaire for Japanese people, *Bioelectromagnetics*, 37, 353-372 (2017).
- 15) Lohman K. J.: Q&A: Animal behaviour: Magnetic-field perception, *Nature*, 464, 1140-1142 (2010).
- 16) Kirschvink J. L. and Walker M. M., Diebel C. E.: Magnetite-based magnetoreception. *Curr. Opin. Neurobiol.*, 11, 462-467 (2001).
- 17) Kalmijn A. J.: *IEEE Trans. Mag.*, MAG-17, 1113-1124 (1981).
- 18) ジム アル=カリーリ, ジョンジョー マクファデン: 量子力学で生命の謎を解く, SBクリエイティブ, 第6章, (2015).
- 19) Wu L.-Q. and Dickman J. D.: Neural correlates of a magnetic sense, *Science*, 336, 1054-1057 (2012).
- 20) 原田康夫: 放射光, 15, 191-201 (2002).
- 21) Ritz T., Wiltschko R., Hore P. J., Rodgers C. T., Stapput K., Thalau P., Timmel C. R. and Wiltschko W.: Magnetic compass of birds is based on a molecule with optimal directional sensitivity, *Biophys. J.* 96, 3451-3457 (2009).
- 22) 坂口喜生: スピン化学, 裳華房, 第2章 (2005).
- 23) Binh V. N.: A primary physical mechanism of the biological effects of weak magnetic fields, *Biophysics*, 61, 170-176 (2016).
- 24) Fu J.-P., Mo W.-C., Liu Y., Bartlett P. F. and He R.-Q.: Elimination of the geomagnetic field stimulates the proliferation of mouse neural progenitor and stem cells, *Protein & Cell*, 7, 624-637 (2016).
- 25) Martino C. F., Portelli L., McCabe K., Hernandez M. and Barnes F.: Reduction of Earth's magnetic field inhibits growth rates of model cancer cell lines, *Bioelectromagnetics*, 31, 649-655 (2010).
- 26) Zhang H.-T., Zhang Z.-J., Mo W.-C., Ding H.-M., Liu Y., Hua Q. and He R.-Q.: Shielding of the geomagnetic field reduces hydrogen peroxide production in human neuroblastoma cell and inhibits the activity of CuZn superoxide dismutase, *Protein & Cell*, 8, 527-537 (2017).
- 27) Martino C. F. and Castello P. R.: Modulation of hydrogen peroxide production in cellular systems by low level magnetic fields, *PlosOne*, 6, e22753-1-6 (2011).
- 28) Binh V. N. and Prato F. S.: Biological effects of the hypomagnetic field: an analytical review of experiments and theories, *PlosOne*, 12, e0179340 (2017).
- 29) Mattsson M.-O. and Simko M.: Grouping of experimental conditions as an approach to evaluate effects of extremely low-frequency magnetic fields on oxidative responses in *in vitro* studies, *Front. Pub. Health*, 2, 1-11 (2014).
- 30) Nakayama M., Nakamura A., Hondou T. and Miyata H.: Evaluation of cell viability, DNA single-strand breaks, and nitric oxide production in LPS-stimulated macrophage RAW264 exposed to a 50-Hz magnetic field, *Int. J. Radiat. Biol.*, 92, 583-589 (2016).
- 31) Pooam M., Nakayama M., Nishigaki C. and Miyata H.: Effect of 50-Hz sinusoidal magnetic field on the production of superoxide anion and the expression of heat-shock protein 70 in RAW264 cells. *Int. J. Chem.* 9, 23-36 (2017).
- 32) Alberts B., Bray D., Hopkin K., Johnson A., Lewis J., Raff M., Roberts K., Walter P.: *Essential Cell Biology*, 3rd Ed., Garland Science, New York and London, p.453-462 (2010).
- 33) Turrens J. F., Mitochondrial formation of reactive oxygen species. *J. Physiol.*, 552, 335-344 (2003).
- 34) 井出友美, 筒井裕之: ミトコンドリア活性酸素生成とシグナル制御, 実験医学, 27, 38-42 (2009).
- 35) 中村孝夫, 小野寿樹, 野村保友, Feng Zhonggang: 磁界の生体に及ぼす影響, 山形医学, 24, 25-34 (2006).