

4 生物物理学的メカニズム

4.1 序

本章では、ELF 電界および磁界について提案されている各種の相互作用メカニズムの生物物理学的な妥当性、特に、ELF 界へのばく露によって生物学的プロセスに生じた「シグナル」を、内在的なランダムノイズから識別できるかどうかについて考察する。本章は、直接的なメカニズム（界が身体内の各部位と直接的に相互作用する）と、間接的なメカニズム（界が他の環境因子に影響を及ぼすか、それと関連性を有しており、結果的に身体に影響を及ぼす）を対象とする。

ELF 電界および磁界へのばく露が健康への悪影響を生じさせるためには、以下の事象が連続して起こらなければならない。第一に、界が人体を形成する基本的な構成要素—原子または分子、あるいは双極子モーメントなどの原子または分子の特性—と相互作用しなければならない。この相互作用は、最終的には健康に対して有害と見なされる、人体の生物学的変化をもたらす影響を細胞レベルで生じなければならない。

ここで留意すべきことは、電界または磁界ばく露が、非常に低いレベルでも、健康に有害な影響を与えうるということが証明できるならば、たとえ生物物理学的にもっともらしくなくても、相互作用のメカニズムが存在するはずである、という点である [パリティの保存を基本法則と見なしていた素粒子物理学からの類推である。しかしながら、パリティ対称性の破れが説得力のある実験によって証明された際 (Wu 等、1957)、もはやこの「法則」を守ることはできないと認識された。]。妥当性のある相互作用のメカニズムが存在し得ず、そのようなばく露による健康影響があり得ないならば、その逆は証明できない。それにも拘わらず、妥当性のある相互作用のメカニズムの同定に繰り返し失敗すれば、逆の情報の欠如、すなわちそのような健康影響がありそうにないということが示唆される可能性がある。

本章では、上述した事象、すなわち生物物理学的な相互作用のメカニズムの最初の部分について考察する。まず、提案されている生物物理学的な相互作用のメカニズムが物理的に妥当であるかどうかを評価するための原則について考察する。次に、示唆されている様々なメカニズムを調べ、確立されたクライテリアに従って、それらの妥当性を評価する (Swanson および Kheifets、2006)。

4.2 妥当性の概念

本書の文脈では、メカニズムの妥当性の度合いは、それが科学的原理および現行の科学的知見の疑いの程度に関連する。役割を果たすメカニズムの妥当性の度合いは、検討対象のばく露レベルと強い関連がある。それにも拘わらず、妥当性のあるメカニズムが同定されなくても、

非常に低い電磁界レベルでも健康影響が存在するという可能性は否定されない。

所与の直接的な相互作用のメカニズムのいずれについても、分子レベルでの反応の大きさは、関係する物理学的法則から計算可能である。但し、相互作用のメカニズムが、生物物理学的に妥当性があると見なされるには、幾つかのシグナル伝達メカニズム、例えば細胞内または神経シグナル伝達経路を通じて、外部の界に関する情報を伝達する幾つかの生物学的パラメータ（例えば膜内外電圧）に有意な変化を生じなければならない。但し、問題のパラメータ自体は、生物学的に有意でないランダムな変動に曝される。例えば、どの電圧も、熱擾乱に起因するノイズレベルを有する。ランダムな揺らぎを識別できる場合に限り、界によって生じる影響は生物学的に有意となりうる。

この概念を表す便利な方法は、シグナルーノイズ比 (S/N 比) である。ここでは、「シグナル」は電磁界によって生じる所与のパラメータへの影響であり、「ノイズ」はそのパラメータに生じるランダムな揺らぎのレベルである。S/N 比が 1 未満であれば、そのパラメータには電磁界に起因する「検出可能な」変化はなく、同様に界に起因するその後の生物学的影響が存在する可能性もなくなる。S/N 比が 1 以上であれば、界に起因するパラメータの変化が存在し、生体内に影響を生じる事象が存在しうる。

生体系におけるランダムな揺らぎは、たいてい広範囲の周波数にわたる。生物学的「変換器」、すなわち印加された ELF 界のような外的シグナルに反応する細胞構成要素それ自体が、広範囲にわたる周波数に敏感ならば、その全周波数範囲にわたり、ノイズの振幅を比較すべきである。但し、関係する変換器が狭い周波数範囲だけに敏感ならば、印加されるシグナルは、感受性の高い周波数範囲におけるノイズ成分のみと比較すべきである。視覚および聴覚は、そのような感受性の周波数依存性が高い。

シグナルーノイズ比を大きくする他の要因は、シグナルの増幅メカニズムである。これには、電氣的に結合した細胞の大きな集合体による、細胞の幾何的配置またはシグナル処理によるシグナル増幅が含まれる。これらのメカニズムについては、以降の節で詳述する。

生体系に検出可能な変化を生じるためには、界に影響されるあるいは界と協調して発生する因子（例えば化学物質やイオン等）は十分に大きくなければならないという原則は、間接的な影響にも適用される。

つまり、要約すると、界がいくつかのパラメータに変化を生させ、それがバックグラウンドのノイズよりも大きければ、生体組織と相互作用する界によって疾病を生じるという潜在的可能性について提案されているメカニズムは、妥当性のあるメカニズム構成する。この変動がランダムノイズよりも相当大きい、またはその生体が周波数に特有の感受性を生じる場合、このメカニズムはより妥当性のあるものとなる。

4.3 確率論的影響、閾値および量－反応関係

以下で議論する、様々な可能性のある相互作用のメカニズムの性質は、健康影響を誘発する可能性のある道筋に影響を及ぼす。基本的なレベル、たとえば活性酸素種による DNA へのランダムな遺伝毒性的損傷のような確率論的な相互作用は、突然変異を誘発する確率を高め、結果的にがんをイニシエートするリスクが高まる。一方、決定論的影響は、ある閾値を超過した場合、例えば印可した電界が神経膜におけるナトリウムイオンチャネルを十分に開放し、神経刺激が自動的に持続されるようになる場合に生じる。そのような閾値は通常、(細胞や人間の)集団内での感受性の分布を示し、ある影響の誘発は、集団内における分布の幅にわたって変化する。

その後の健康影響がばく露によって変化するかもしれない道筋は、相互作用の生物物理学的な性質だけで推定可能であるが、これは、細胞や生体全体のレベルでの生物学的応答の連鎖への介入による寄与を無視する傾向があり、示唆的なものでしかない。例えば、イオン流出のような急激な生理学的変化を反転させる能力や、例えば酸化的損傷のような潜在的に長期的な影響を修復する能力が、全体的な健康上の結果に影響を及ぼすことになる。

変動する界に関しては、仮に相互作用の影響が界の大きさに依存し、その空間的方向に依存しないならば、影響の大きさは単に界の大きさに依存するだけである。但し、界の大きさと同様に方向にも依存する影響はいずれも、一次的には、時間平均値はゼロとなる。すなわち、サイクルの半分では影響が増加し、残りの半分では同じ量だけ影響が減少する。

相互作用のメカニズムにおける非線形性は、これらの影響を平均しても正確にはゼロにならないことを意味する(ここで、その後が生じる生物学的応答はいずれも、ほぼ確実に非線形であるという点は注意に値する。)。2つの一次的または線形影響の差として生じる二次的影響は、界ではなく界の二乗(または更に高い累乗値)に比例する。このメカニズムにおけるその後の段階では、影響は更に変化するが、界それ自体に比例する構成に戻ることはなさそうである。

数学的には、界の影響はテイラー展開として表すことができる。界 B に比例するどの影響についても、ゼロおよび最も低い次数のゼロでない項へのテイラー展開平均の最初の次数項は、界の二乗である(Adair, 1994)。但し、 B の係数に比例する影響については、最初の一次項も同様にゼロ以外となりうる。

この実質的な結果は、メカニズムが界の二乗、またはより高い次数に比例するならば、その影響は弱い界への長時間のばく露よりも、強い界への短時間のばく露によって多く生じるということである。特に、強い界は主に家電製品から生じるので、界のより高い次数に比例するメカニズムは、屋内のバックグラウンドの界に関連した影響よりも家電製品使用に関連した影響

の方が明瞭であることを示すと予想される。但し、最初の相互作用がその後の生物学的プロセスによって改変される道筋にある程度左右される可能性がある。

4.4 誘導電流及び電界

4.4.1 電磁界に誘導された電流

商用周波の電界および磁界は共に、身体内に電界を誘導し、その結果電流を誘導する。外部電界は身体内で大幅に減衰するが、内部電界は電流を身体内に生じさせる。磁界は電界を誘導し、これが導電体内に電流を生じる。これについては3章で詳述し、数値モデリングによる結果を示している。

4.4.2 ノイズとの比較

弱い ELF 界に対する幾つかの細胞および細胞膜の反応についての観察結果から、シグナルと細胞膜に存在する固有の電氣的ノイズの大きさをどのように比較するかという問題が生じた。生物学的な細胞膜における電氣的ノイズの主な発生源は3つあり (Leuchtag, 1990)、これらは (1) 生理学的温度で $3\mu\text{V}$ の膜内外電圧のシフトを生じる Johnson-Nyquist 熱由来電氣的ノイズ; (2) イオン電荷担体の個別の性質から生じ、細胞膜の電氣的ノイズの主な発生源となりうる「ショット」ノイズ; および (3) 膜チャネルを通過するイオンの流れと関連し、一般に $10\mu\text{V}$ の膜内外電圧のシフトを生じる $1/f$ ノイズである。

どのような物質でも (生物学的な物質を含むが、これに限らない)、物質の帯電した構成要素のランダムな運動のため、内部の電界およびそれに対応する電流には揺らぎがある。基礎物理学的考察に基づけば、物質のどの構成要素についても、それを横切る2点間に現れる熱的ノイズ電圧または界の下限について、式を導くことができる。この熱的ノイズの界は、構成要素の電気抵抗 (従って、所与の物質のサイズ)、温度 (本稿では常に体温と解釈できる)、および周波数帯域に左右される。(厳密に言えば、電気抵抗に左右されるのは所与の周波数帯域におけるノイズである; 全周波数にわたるノイズの合計は抵抗には依存せず、静電容量に依存する。)

他にもノイズの発生源はあり、熱的ノイズよりも遥かに大きい場合もあるが、熱的ノイズは常にノイズの下限を構成する。他の特定ノイズのひとつであるショットノイズについては次項で別途考察する。

ショットノイズに関しては、あるプロセスが個別の粒子に依存し、そのプロセスによって生じる何らかの特性が何らかの条件を満たす粒子の平均個数に依存する場合、関係する粒子の個数にランダムな変動が生じ、これが平均個数に重なるノイズのレベルとみなすことができる。これが「ショット」ノイズとして知られているものである。これは、細胞膜の電位依存性チャ

ネルを通過するイオンや分子にも適用可能である。界が存在しない場合にそのようなチャンネルを通過するイオンの数は、最大限のイオン流速、細胞膜の特性、ゲートまたはチャンネルの開閉頻度、膜内外電位差の機能、ノイズのエネルギー密度、細胞のゲート開閉電荷、およびばく露時間に依存する。(印加される界の影響を受けないチャンネルの数を最小限にするため) チャンネルが両端に制限されている *in situ* 電界と平行の長い細胞、または(細胞の面積を最大限にするため) 大きな球状細胞を考えることで、S/N比は最大となる。長さ 1mm、半径 $25\mu\text{m}$ の円柱状細胞、または半径 $100\mu\text{m}$ の球状細胞で、かつ他のパラメータが典型的な値の場合、S/N比が 1 の *in situ* 電界の値は約 100mVm^{-1} となる (Weaver および Vaughan, 1998)。ノイズレベルと膜電位を最適化することにより、閾値の界は 10mVm^{-1} 程度まで改善できる。この値は、 5kVm^{-1} および $300\mu\text{T}$ の外部の界に相当する。

上で検討したショットノイズは、大部分は電位型チャンネルの自発的な開閉に関連している。神経伝達物質の到達(シナプス事象)も、神経と筋細胞での電圧変動を引き起こす。Jacobson 等による実験研究(2005)では、ニューロンの電圧ノイズは 0.5mV まで標準偏差で揺らぎ、この揺らぎは $5\sim 100\text{Hz}$ の範囲ではシナプス事象が支配的であることが示された。ゆえに、これらの神経伝達物質事象と関連したショットノイズは、網膜における刺激閾値を推定する上で、より関連性が強い可能性がある (Jacobson 等, 2005)。

熱的ノイズおよびショットノイズの存在にもかかわらず、細胞膜におけるノイズの支配的な発生源は $1/f$ ノイズであり、これがシグナルとノイズに関する考察、およびそれに相当する外部の界の値の評価するための合理的なベースラインを提示するようである。ノイズと区別できるシグナルを生じるのに必要とされる外部の界の値は、問題となる生体系に固有の特性に依存する。但し、少なくとも人体内にある孤立した小さな細胞については、外部の界の範囲は、 10mT および 100kVm^{-1} のオーダーである。

4.4.3 有髄神経線維の刺激閾値

細胞膜において、ニューロン(神経細胞)の電氣的興奮性は、電圧依存性のイオン(主にナトリウム、カリウム、カルシウムおよび塩化物)チャンネルが存在することにより生じる(例えば McCormick, 1998)。ナトリウム、カルシウムおよび塩化物イオンは各ニューロンの外側でより高い濃度で存在し、カリウムおよび膜不透過性の陰イオンは内側で濃度が高い。この結果、細胞の内部は外部に対して負に帯電される; 一般に、哺乳類の不活性のニューロンは、 $60\sim 75\text{mV}$ の「安静時」膜電位を示す。誘導される膜の脱分極が電圧依存性のナトリウムチャンネルを持続的に開放する閾値を十分に上回れば、外部から印加された電界は、末梢神経細胞の軸索を刺激し、結果的に 1 つ以上の活動電位を生じる。多くの神経軸索では、活動電位の閾値は $50\text{mV}\sim 55\text{mV}$ 前後であり、「安静時」電位より約 $10\sim 15\text{mV}$ 高い。

有髄神経線維の電気刺激は、膜コンダクタンス変化に適用される電気ケーブル理論を使って

モデル化できることが、Hodgkin および Huxley (1952) ならびに Frankenhaeuser および Huxley (1964) によって最初に示された。Reilly、Freeman および Larkin (1985) は、有髄神経線維について空間的に拡張した非線形節点モデル (SENN) を提案し、これを様々な印加電界および電流の閾値を導くのに用いた。直径が大きい有髄神経軸索についての最小限の方向依存性の刺激閾値は 6V m^{-1} 前後と推定された (Reilly, 1998b)。この値は、組織の導電率を 0.2Sm^{-1} と仮定すれば、約 1.2Am^{-2} の電流密度に等しい。直径がより小さい神経細胞では、電界の閾値はより大きいと推定された。但し、受動的ケーブル理論は CNS におけるニューロン樹状突起には適用されない点に注意を要する (例えば Takagi, 2000)。

4.4.4 神経網とシグナル検出

前項では、個々の神経線維を刺激するための閾値の推定について述べた。但し、神経系それ自体は、原則として化学的な「接合部」またはシナプスを介して互いに通じている、神経細胞のネットワークで構成されている。シナプスでは、シナプス前端から放出される神経伝達物質がシナプス後細胞上の特定の受容体分子と結合しており、これは通常は一方通行のプロセスである。神経伝達物質による受容体の活性化は、各種のシナプス後応答を引き起こす可能性があり、その多くは結果的に特定の種類のイオンチャネルを開放する確率を変化させる。そのような神経網は複雑な非線形の力学を有すると考えられ、神経網の構成要素全体に拡散的に印加される小さな電圧に対しても、感受性が非常に高い可能性がある (例えば Saunders, 2003)。相互作用しているニューロン単位 N 個の感受性は、理論的には \sqrt{N} に比例して増加する (Barnes, 1992)。本質的に、ノイズがランダムに加えられる場合、 S/N 比は改善されるが、シグナルはコヒーレントに加えられる。

神経網の感受性の理論的な基礎は、サメやその他の軟骨魚類による弱い電界の探知を考慮し、Adair、Astumian および Weaver (1998) ならびに Adair (2001) によって調査された。これらの魚は、ロレンツィーニ器官の「検出器」細胞に 200nV のオーダーの僅かな電位差を生じる、 $0.5\ \mu\text{Vm}^{-1}$ 程度の弱い海水中電界に対して行動学的に反応できることが知られている。Adair (2001) は、そのような弱いシグナルでも、単一の二次ニューロンに収束する約 5000 個の感覚検出細胞が同時に検出すれば、 100ms 以内に 1 より大きい S/N 比を生じるだろうと示唆している。同時検出は、特定の神経伝達物質受容体の特性である (Hille, 2001)。

そのような収束は、感覚器系に共通する特性である；環境中の刺激を検出できるような感受性を最大化するような進化の圧力が存在する。例えば、哺乳類の網膜の周縁部では、最大で 1000 個の杆細胞が 1 つの神経節 (網膜出力) 細胞に集中している (Taylor および Smith, 2004)。加えて、脳の機能は相互作用している非常に多くのニューロンの総体的な活動に依存している。電磁界が神経系の機能および行動に及ぼす影響は 5 章で述べる。但し、ヒトの神経網の感受性の下限値は 1mVm^{-1} 前後と推定されている (Adair、Astumian および Weaver, 1998)；下限値に近い値は、弱電界に対する感受性についての 2003 年の ICNIRP/WHO ワークショップで

同意が得られている (McKinlay および Repacholi, 2003)。ヒトの眼内閃光応答のモデリング、および脳組織の機能に関する神経生理学的研究から、そのような閾値は $10\sim 100\text{mVm}^{-1}$ の範囲にある可能性が高いと示唆されている (5.2.3 項を参照)。

4.4.5 過渡現象

電界および磁界に誘導される電流は、周波数に直接比例する。従って、周波数が高いほど、結果的に S/N 比は改善されうる。連続する高周波シグナルには誘導電流の影響があると考えるのが妥当である。電力系統から生じる界には有意な連続する高周波成分は含まれていない。但し、過渡現象、即ち短時間の高周波成分は含まれている。過渡現象は連続ではなく短時間であるため、異なる考察が適用される。Adair (1991) は、各種の物体への運動量の移動についての考察から、短時間パルスの影響を分析した。外部パルスを指数関数的に増減する項の合計としてモデリングし、対応する内部パルスの周波数及び振幅成分の計算に用いている。代表的なイオン、分子および細胞について、パルスによって移動した運動量と熱運動量を比較している。外部の電界パルスが 100kVm^{-1} の場合、そのパルスの影響は熱運動に比べて小さい。

4.4.6 誘導電流の熱作用

電界または磁界に誘導される電流は、それが通過する組織に熱を生じる。組織および細胞の各種構成要素の電気抵抗率に関する知見から、発生する熱量が計算可能である。組織の熱伝導率および血液循環の影響に関する知見を組み合わせ、温度上昇も計算可能である。

Kotnik および Miklavcic (2000) は、膜を含む細胞の様々な部分における消費電力を計算した。彼等は対応する温度上昇は計算していないが、これは僅かであると予想される。

4.4.7 誘導電流に関する要約

表 32 に示すように、外部の界によって生じるシグナルと、各種のノイズレベルまたは確立されている影響のレベルが比較されている。

本質的に、弱い界がシナプスに及ぼす影響は、収束を示すある種の神経網を通じた、生物学的に意味のあるシグナルとしてのみ検出できる。これは、弱いシグナルを検出するために進化してきた、サメのロレンツィーニ器官や網膜の周縁部のような感覚器系の特徴である^{訳者注 2}。

脳の残りの部位には複雑な神経回路が存在する(レビューについては Shepherd および Koch, 1998 を参照) ; これらが電磁界ばく露に誘導される電界に対してどの程度の感受性を示す可能性があるかについては、5 章で論じる。

表 32 外部の界によって生じるシグナルと、様々な *in situ* 電界ノイズレベルまたは神経系影響の閾値との比較

比較		<i>In situ</i> 電界 (mV m ⁻¹)	対応する外部電界 (V m ⁻¹) ^a	対応する外部磁界 ^b
熱ノイズ	細胞の体積	20	10 ⁴	600 μT
	完全な膜	200	10 ⁵	5 mT
	膜の要素	1000	10 ⁹	40 T
ショットノイズ	典型的な細胞	100	5×10 ⁴	3 mT
	最適化された細胞	10	5,000	300 μT
1/f ノイズ			1×10 ⁵	10 mT
有髄神経刺激閾値 (SENN)		5000		
眼内閃光閾値 (ばく露量計算)		10–100		
神経網閾値のために推定された下限値		1		

^a 出展: Dimbylow, 2000

^b 出展: Dimbylow, 1998

4.5 電磁界によるその他の直接的影響

4.5.1 電離および結合の切断

分子を結び付けている結合は、十分なエネルギーを与えることで切断できる。電磁放射は量子化され、各量子のエネルギーはプランク定数 h に周波数を乗じて得られる。生体系に見られる各種の結合の切断に必要なエネルギーは、例えば Valberg、Kavet および Rafferty (1997) によって数値化されている。典型的な共有結合は 1~10 電子ボルト (eV) を要し、典型的な水素結合は 0.1eV を要する。50Hz の放射の量子エネルギーは 10^{-12} eV である。従って、50 または 60Hz の放射の単一量子は、結合を切断するのに十分なエネルギーを持たないのは明らかである。量子エネルギーが共有結合のエネルギーと同程度になるのは、可視光線の周波数の前後である。

Vistnes および Gjotterud (2001) は、50Hz の波長である 6,000km は身体内で検討される相互作用の距離尺度を遥かに上回っているため、単一量子の事象を検討するには不適切であると指摘している。彼等の計算では、 10kV m^{-1} の電界内の人体は単一光子の状況とは程遠く、単一の光子が専有できると言われている体積内に、実際には 10^{34} 倍にも「重なり合った」光子が存在している。単一光子の吸収では化学結合を切断できないということは正しいが、そのことからその他の可能性のある電磁界の影響を全て排除するというのは適切ではないであろう。

量子エネルギーが結合にエネルギーを与える代わりに、界が荷電粒子を加速することで結合を切断するのに十分なエネルギーを与える可能性がある。ここでの「ノイズ」は、基礎熱力学から決定される粒子の熱運動エネルギーであり、室温または体温では約 0.04eV である。粒子を加速することができる最大距離を、標準的な細胞の寸法である $20\ \mu\text{m}$ までと仮定すると、こ

の熱エネルギーに等しいエネルギーを与えるのに必要な界は 10^9Vm^{-1} および $1 \mu \text{T}$ のオーダーとなる。実際には、最大距離はより短くなるので、更に高い界が必要となるであろう。

4.5.2 荷電粒子に対する力

電界および磁界は共に荷電粒子に力を及ぼす。電界が電荷 q に及ぼす力は $F=qE$ で、その向きは電界と同じである。磁界は電荷が運動している場合にのみ $F=vqB$ の力を及ぼし、その向きは速度 v および界 B の両方に対して直角である。

これらの力は、生体系に様々な影響をもたらすのに必要な力と比較可能である (Valberg、Kavet および Rafferty, 1997)。これらの範囲 (最も近い桁) は、内耳中の単一の有毛細胞を活性化する 1pN から、機械的受容体の膜内外イオンチャネルを開放する 10pN 、リガンド分子をタンパク質受容体と結合させている力に等しい 100pN にまで及ぶ。

1pN を生じるには、(空気中で) 10^{10}V m^{-1} のオーダーの外部電界 (細胞膜に 10 の電荷がある分子 1 個を仮定)、または $10 \mu \text{T}$ の磁界が必要であろう (熱運動速度で移動する同じ分子に作用するローレンツ力は、誘導電界による力よりも小さい)。

4.5.3 磁性粒子に対する力

磁界は、磁気モーメントを有する何らかの物体に回転力 (モーメントまたはトルク) を与える。身体内に強磁性体結晶が存在すれば、それらは磁気モーメントを有する可能性があり、それによって界が結晶に振動モーメントを与え、これを振動させうる。

回転力の大きさは、界の大きさと磁気モーメントの大きさによって決まる。生体系の中に存在することが知られている唯一の磁性材料は、マグネタイトである。1 つのマグネタイト粒子が存在し、そこに個々の磁区がすべて配列していると仮定すれば、その粒子の磁気モーメントは、マグネタイトの飽和磁化と体積の積となる。従って、その粒子に加わる最大の回転力は、その体積に比例する。磁界が静的な界である場合、粒子は、復元力が回転力と等しくなるか、界と向きが揃うまで、回転することになる。但し、交番磁界については、振幅は周囲の媒質の粘性によっても決定される。

この場合、界によって作られる「シグナル」すなわち商用周波における振幅を、熱的ノイズによってランダムに作られる同じ粒子の振幅である「ノイズ」(例えばブラウン運動) と比較しなければならない。Adair (1994) の計算では、直径 $0.2 \mu \text{m}$ の単磁区のマグネタイト粒子と、7 倍の水の周囲媒質の粘性という、いずれも極端な仮定と見なされるケースにおいて、 $5 \mu \text{T}$ の界の場合に「シグナル」が「ノイズ」と等しくなる。別の仮説を用いれば、影響は粒子の直径の三乗と界の二乗に比例することから、同等な界の値を計算できる。より妥当性のある粒子の

大きさと粘性を選択すれば、より高い界レベルでノイズとシグナルが同等となる。

移動のためにマグネタイトを利用して地磁気の僅かな変化を検知する動物がいることが知られている (ICNIRP、2003)。例えば、ある種のハチは 26nT の静磁界の変化を検知することが示されている (Kirschvink および Kirschvink、1991 ; Walker および Bitterman、1985)。これは、空気中のマグネタイト粒子が多数の感覚毛に付着することによって得られるものと思われる。神経系でのシグナル識別によって S/N 比は劇的に改善されるので、そのような感受性では 1 以上の S/N 比を必要としないというのはもっともなことである。

Kirschvink 等 (1992) は、ヒトの脳と他の組織に極微量のマグネタイトが存在することを示し、そのような結晶が変換器として作用して、中枢神経系に仮定される「受容体」ニューロンにおける機械的に感受性のある膜内外イオンチャネルを開放する、と仮定している。そのような「検知器」は上述の制約を受けることになる。但し、ヒトが方位と方向を見つけるために地磁気を利用できることを確認する試みは、これまでのところ成功していない (ICNIRP、2003)。この著者等は、ヒトの脳中におけるマグネタイト結晶の存在は弱い地磁気を検知する能力を与えるものではないと結論付けたが、磁気感受性に関する幾つかのメカニズムは未調査のままである (Kirschvink、1997)。興味深いことに、Scaiano、Monahan および Renaud (2006) は、外部磁界がラジカルペアの相互作用に影響を及ぼす道筋にマグネタイト粒子が劇的に影響を及ぼしうる点に留意している。

4.5.4 フリーラジカル

ラジカルペア・メカニズムは、静的および ELF 磁界が個々の分子の化学的性質に影響を及ぼすことができる、一般に受け入れられている唯一の道筋である (例えば、Brocklehurst および McLauchlan、1996 ; Eveson 等、2000 ; Grissom、1995 ; Hore、2005 ; McLauchlan、1992 ; Steiner および Ulrich、1989)。これにはある特定の化学反応、即ち一対の短寿命の反応性フリーラジカルの再結合が関係している：このフリーラジカルは単独分子からも、2 つの分子間の電子または水素原子のやり取りからも生じる。印加された磁界の影響は、ペアを形成していないラジカルの電子のスピンと磁界それ自体との相互作用に依存する。重要なことには、この影響は非常に弱い界の生物学的影響に関するメカニズムを構成する可能性がある (Adair、1999 ; Timmel 等、1998)。界の感受性は、ラジカルペア形成と再結合の間に生じる。この間は、規定液中では通常は数十ナノ秒だが、ミセルまたはその他の生物学的構造物中では、おそらく数マイクロ秒に及ぶ (Eveson 等、2000)。商用周波の磁界はこのような短い時間間隔では本質的に静的で、等価性は Scaiano 等 (1994) によって実験的に確かめられており、このことは数 MHz の周波数まで拡張できる可能性がある。

フリーラジカルは多くの代謝プロセスの際に形成される化学種で、神経変性疾患 (7 章参照) のような各種の疾病状態に寄与すると考えられている。通常の代謝の際、例えば、酸化的リン

酸化反応によるエネルギー産出の間、ミトコンドリア内で酸素は H_2O に還元される。これには、4つの電子の順次的付加による、スーパーオキシド陰イオンラジカル ($\text{O}_2\cdot^-$)、過酸化水素 (H_2O_2)、ヒドロキシラジカル ($\text{OH}\cdot$) といった中間的な反応性酸素種が関係している。大部分の細胞には、抗酸化防御メカニズムを提供するグルタチオンペルオキシダーゼのような、様々なラジカルスカベンジャーが含まれている。例えば過剰な活性酸素種を生じる長波長の紫外線放射 (UVA) のような因子へのばく露によって、これらが減少すると、結果として組織の損傷が生じる可能性がある (AGNIR, 2002)。

フリーラジカルは、共有結合の開裂によっても形成されうる。大部分の生体分子は、角運動量がゼロの低いエネルギーの一重項状態にある。これは、その分子に含まれる電子対のスピンが逆平行なためである (例えば、Brocklehurst および McLauchlan, 1996 ; Eveson 等, 2000 ; McLauchlan, 1992 ; Timmel 等, 1998 によってレビューされている)。そのような分子における共有結合の開裂によって 2 対のラジカルが生成され、それぞれ相手と逆平行のスピンを有するペアでない電子となる。この反応によって放出されるエネルギーはフリーラジカルの急激な分離を生じるので、結果として比較的短時間の反応が起こる。その後、近傍の水素および窒素原子の核との電子スピンの磁気相互作用 (ハイパーファイン・カップリング) により、ラジカルペアのスピン状態が改変され、若干の三重項特性が付与される (ゼーマン効果)。典型的には印加される磁界が 1~2mT を超える場合、ラジカルの再遭遇の際の反応確率が上昇すると共に、再結合を逃れて周囲の媒質に拡散するフリーラジカルの数が減少する。逆に、~1 mT より小さい磁界では、フリーラジカル濃度は有害な影響の可能性と共に増加する。生化学系におけるそのような影響の実験的な証拠が、Hore, McLauchlan 等によって最近報告されている (例えば、Eveson 等, 2000 ; Liu 等, 2005)。対照的に、相関のないスピンを有する、ランダムに拡散するラジカルが偶然遭遇し、これが再結合することに対する影響は無視しうると考えられている (Brocklehurst および McLauchlan, 1996)。

Hore (2005) は、60 以上の酵素がラジカルまたはその他の常磁性分子を反応中間生成物として利用している点に言及している。但し、これらの大多数は相関する電子スピンを有するラジカルペアを含んでいない。Timmel 等 (1998) は、~1mT より小さい界が多種多様な 2 対のラジカルペアに及ぼす影響の最大の大きさを計算している。地磁気程度の弱い界でも、フリーラジカル再結合の生成量を 15~30% 変化させられることがわかった。但し、これは印加された界が影響を及ぼすのに十分なほど長い時間、近接して存在するラジカルペアに依存する。100~1000ns オーダーの時間が必要であると示唆されている (例えば、Brocklehurst および McLauchlan, 1996 ; Timmel 等, 1998) が、これが存在するのは、例えば膜の内側または酵素との結合といった、何らかの物理的制約が適用される場合に限られるかもしれない。加えて、理論的計算および実験的調査では、磁界強度に伴うこれらの影響の大きさの変化は高度に非線形であることが示されている (Brocklehurst および McLauchlan, 1996 ; Grissom, 1995 ; Hore, 2005 ; Timmel 等, 1998)。

この種の影響の生物学的有意性は、現時点では明らかではない。これについては、動物、特に鳥類が渡りの際の移動のための情報源として地磁気を利用するメカニズムであることが示唆されており（Cintolesi 等、2003；Ritz、Adem および Schulten、2000；Schulten、1982）、この見解は幾つかの実験によって支持されている（Ritz 等、2004）。地磁気は $\sim 50 \mu\text{T}$ で、赤道付近での約 $30 \mu\text{T}$ から両極での約 $60 \mu\text{T}$ の間で変化する。但し、どちらかと言えば特殊なこの例以外に関しては、静的および ELF 磁界はその相互作用において同等なので、Scaiano 等（1994）および Adair（1999）は、約 $50 \mu\text{T}$ より大幅に低い商用周波の界には生物学的有意性は余りないであろうと示唆した。 $50 \mu\text{T}$ における再結合率の僅かだが有意な改変のためには、幾つかの要件を満たす必要があるが、こうした状況は非常に特殊であり、ありそうにないと考えられる（Adair、1999）。Liu 等（2005）は、上述のラジカルスカベンジングメカニズムのような恒常的な緩衝プロセスの効率を考えると、弱い磁界に誘発されるフリーラジカル濃度または流束の変動の結果として、細胞の機能における生理学的に有意な変化、または長期的な突然変異誘発性が生じる見込みは強くはなさそうである、と言及している。加えて、この弱い界の影響検出の下限は、ラジカルの転回による異方性の磁気相互作用の変調のようなプロセスによって決まる可能性がある。

4.5.5 狭帯域幅による影響

シグナルをノイズと比較する際には、正しい周波数帯域でノイズと比較しなければならない。仮説のメカニズムが狭い範囲の周波数にのみ感受性があるなら、ノイズはそれと同じ範囲で評価しなければならない。一般的には広い範囲の周波数よりも小さくなる。通常は静的な界を含む何らかの共鳴条件によって、このような狭い帯域幅を達成する幾つかのメカニズムが提案されている。

4.5.5.1 サイクロトロン共鳴

磁界を移動している荷電粒子は、電荷 q 、磁界 B および質量 m で決まる周波数、即ち Bq/m で、円軌道を描く（十分な時間にわたって攪乱されない場合）。同じ周波数の AC 界は、共鳴の形で相互作用する。但し、商用周波においてカルシウムイオンなど生物学的に関連のある粒子のサイクロトロン共鳴を生じるには、直径 1m 程度の制約のない軌道が数周期続く必要があるが、分子の衝突（即ち減衰）が発生し、それが軌道および共鳴を 10^{-12}s のタイムスケールで破壊してしまう。

4.5.5.2 ラーモア歳差運動

磁界中で振動する荷電粒子は、サイクロトロン周波数の半分のラーモア周波数で界の周囲を回転する振動方向を有するようになる。その界自体をこの周波数で変調した場合、粒子は特定の方向でより長時間振動し、反応確率が変化する潜在的な可能性が生じる（Edmonds、1993）。

このメカニズムについても、ありそうにないほど長い時間にわたって、他の要因によって攪乱されずに振動が続く必要がある。

4.5.5.3 量子機械的な共鳴現象

低レベルのばく露が関係する生物学的観察結果を説明するため、多くの量子力学的現象が提案されている。このうち、ある特定の現象が詳細に調査されている。それはイオンパラメトリック共鳴で、それによって DC 界は各種の振動するイオンを生じ、AC 界はそれらの間の変換を誘導する。それはサイクロトロン共鳴周波数およびその積分比で影響を予測する (Blanchard および Blackman, 1994 ; Lednev, 1991 ; Lednev, 1993 ; Lednev, 1994)。

膨大な調査の結果、このメカニズムには妥当性はないと結論付けられた。このメカニズムは、実行不可能な狭い振動エネルギーレベル、振動状態と外部から印加された界との一定の位相関係、およびイオン結合の妥当でない対称性を必要とする (Adair, 1992 ; 1998)。

4.5.6 確率共鳴

確率共鳴とは、周期的に振動する非線形系統に加えられたランダムノイズが、ノイズのない場合には見られない反応を生じうる現象である。ある状況下では、系にノイズを加えることで応答に劇的な変化をもたらすことも可能である。但し、これは主に、より大きなシグナルに少量のノイズを付加する場合に当てはまる。これは例えば、ショットノイズの正確な閾値を考慮する場合に関連し、それらの計算に含まれる ; 但し、大きなノイズが存在する場合の小さなシグナルへの応答を説明することはできない (Adair, 1996 ; Weaver および Vaughan, 1998)。

4.6 電磁界による間接的影響

4.6.1 表面電荷とマイクロショック

商用周波の電界中では、身体表面に電荷が誘導される。その界が十分に大きければ、これを毛の振動を通して感知できる (5.2.1 項参照)。

電界中では、接地しているかどうかによって、それぞれの対象物ごとに得られる電荷は異なる。ヒトは、一方が接地していて、他方が接地していない導体に触れると、マイクロショックまたは小さな火花放電を受ける (5.2.1 項参照)。これは痛みを伴う場合もあり、極端な状況においては火傷を負う可能性もある。

4.6.2 接触電流

ヒトが異なる電位の2つの導体に同時に接触する場合、その2点間の電気抵抗に反比例する大きさの接触電流がそのヒトに流れる。その経路における抵抗の一部は、物体の接点と皮下層の間に存在する。この割合は、乾燥した指先接触では高く、湿った掌全体での握り（外皮全体で湿気によって短絡するかなりの表面積）では非常に低い。皮膚接触点を除けば、人体の抵抗はそれほど変化しないが、人体の大きさ、筋肉-脂肪含有量、等に依存する。

Kavet 等は、接触電流へのばく露について最も起こりうるシナリオは浴槽内の子供であると特定し、子供の骨髄に誘導される電界にばく露されると、磁界ばく露と関連付けられている小児白血病のリスク上昇（11.4.2 項参照）の原因となるもっともらしい相互作用メカニズムを示す可能性があることを示唆している（Kavet 等、2004; Kavet、2005; Kavet および Zaffanella、2002）。入浴中、幼児はしばしば、蛇口ハンドル、噴流口または水流自体に触るといった探索行動をとる。電気設備の中性点を家の水道管に接続している住居の電気システムでは、水道管および水道設備と地面との間に小さな電圧（通常 1V 未満）が生じる。浴槽の排水管が導電性で、地面に埋設されていれば、子供が水道設備または水流に触れることによって回路が閉じる。接触の両端が湿っているため、人体抵抗は最小になる（恐らく 1~2k Ω 程度）。

水道管の電圧は、水道管と地面との間にオームの電位差を生じる接地系への還流電流から、または中性/接地系へのファラデー誘導の結果として、あるいはその両方から生じる可能性がある。米国における測定研究では、一部の家庭（~4%）において、水道管から排水管への閉回路電圧（即ち、ヒトを 1k Ω の抵抗に置き換えたもの）が 100mV を上回る可能性があることが示された（Kavet 等、2004）。そのような状況では、概算で 50 μ A の電流が子供の手に流れる可能性がある。Dawson、Potter および Stuchly（2001）によるばく露量モデリングでは、50 μ A の電流ばく露によって 18kg の子供（4 歳児の通常の体重）の前腕の骨髄の 5% に 650mV m^{-1} またはそれ以上の電界が生じると評価されている。より小さい（即ちより若い）子供には、より強い内部電界が生じる。Chiu および Stuchly（2005）は、1V m^{-1} の局所電界によって、2つの骨髄間質細胞をつないでいるギャップジャンクション構造を横切る 0.2mV を生じることを計算した；これらの細胞は、リンパ球前駆細胞の増殖を含む造血を編成する細胞である（LeBien、2000）。上述のシナリオでは、Chiu および Stuchly（2005）の値は、ギャップジャンクションを横切って 0.13mV まで増える。この大きさの組織の界と膜内外電位差は、競合するノイズを上回るシグナルを構成する。

しかし、現時点では、骨髄におけるそのような電界または電流に発がん性がある、またはイニシエートされた細胞の増殖を刺激することを示す生物学的証拠はない。また、子供の接触電流と小児白血病のリスクを関連付ける疫学的証拠もない。但し、測定研究（Kavet 等、2004 ; Kavet および Zaffanella、2002）、ならびに米国の典型的な地域についてのコンピュータモデリング（Kavet、2005）では、住民集団をベースとする疫学研究の地理的特徴を通じて、居住環境磁界が接触電流ばく露の発生源と正の関連性を有する可能性が非常に高いことが示されている。これらの結果は、提唱されている仮説を支持している。

これまでのところ、接触電流に関する工学的研究では、主に米国に特有の電気系統に焦点が当てられている。ELF 疫学研究が実施されている国の中には、電気系統に水道を含む複数の接地点がある国もある（例えば英国；Rauch 等、1992 を参照）。接続が明示されていない他の国々では、主に給湯器接続を経由して、無意識に水道管から地面への電圧を生じている可能性が非常に高い。

4.6.3 宇宙線の偏向

宇宙線は太陽によって宇宙空間および大気圏内で生成され、生体組織へのエネルギー沈着を通じてヒトに害を及ぼしうることが知られている。Hopwood (1992) は、電力線からの電界および磁界は、電力線の近くを通る宇宙線を偏向させ、電力線近くに焦点効果を生じると示唆している。Hopwood は、電力線の側面から数 m のところで空中粒子数が 2 倍になることを測定したと報告したが、その後更に綿密な測定を行ったところ、増加は示されなかった (Burgess および Clark、1994)。単純な解析計算によって、屈折はおそらく僅か数 cm 程度であり、導体の極近傍を通過する粒子に限られることが判明している。Skedsmo および Vistnes (2000) は、高度な数値モデリングを実施し、低エネルギー電子（屈折の影響を最も受けやすい粒子）の場合でさえ、電線の下および両側の粒子束密度の差は 0.15% 未満であり、全ての粒子を合わせた場合には 0.01% 未満であることを示した。健康影響に関連するには、この差は小さすぎる。

4.6.4 浮遊汚染物質への影響

架空電力線によって生じる電界が、浮遊汚染物質粒子と相互作用し、これらの粒子が人体に及ぼす有害な影響が増加するという一連のメカニズムが提唱されている (Fews 等、1999b ; Fews 等、1999a ; Fews、2002 ; Henshaw 等、1996a ; Henshaw 等、1996b)。

健康に特に大きな影響を及ぼす浮遊粒子には、たばこ煙、ラドン崩壊生成物、化学汚染物質、孢子、バクテリアおよびウイルスがある (AGNIR、2004)。吸入されると、一部は呼吸器系の気道に沈着する。皮膚に沈着するものもある。荷電粒子は、気道壁または皮膚に近付いた場合、沈着する可能性が帯電していない粒子よりも高いので、荷電粒子の割合の増加は、健康への悪影響の増加につながりうる。Fews 等 (1999b) は、そのような増加が電力線によるコロナイオンの生成に起因しうると示唆した。数千 V またはそれ以上の電位がコロナ放電によって空気の絶縁破壊を生じる場合、これらの陽または陰イオンが発生する。電界が存在する場合、皮膚および呼吸気道の表面にインパクトを及ぼす確率が高まることにより、荷電粒子の沈着が更に増加する可能性がある (Henshaw 等、1996b)。

4.6.4.1 コロナイオンの生成

高電圧 AC 電力線は、コロナ放電の結果として、風下に容易に飛ばされる陽または陰イオンの雲を生じる可能性がある (AGNIR、2004)。特に霧やもやの深い状況では、陰イオンがより頻繁に生じる。高圧 AC 送電線はコロナ放電を生じないように設計されているものの、ちりやほこりの蓄積、または水滴により、導体表面電界の局所的な増大が生じうるので、これが時にはコロナ放電の原因となる。加えて、高圧線の中には当初の計画電圧より高く運用されているものもあり、これらは悪天候ではコロナ放電を生じやすくなりうる。電力線の風下における電荷密度の増加は、しばしば数 km 先まで観察されることがある (Fews 等、1999a; Fews 等、2002; Swanson および Jeffers、1999; Swanson および Jeffers、AGNIR 内の私信、2004)。但し、最近、Bracken Senior および Bailey (2005) は、2 地点の 230kV および 345kV 送電線の風上および風下における DC 電界およびイオン濃度についての 2 年間の測定結果を報告した。彼等は、風下における過剰の証拠を一部見出したが、ほとんどの状況下において、風下の値が風上 (環境中) の値の範囲を上回るのは僅かな時間のみであった。

イオンの雲は、それを通過する粒子を帯電させる。これらの粒子は、空気中に存在する自然発生的なイオンにより、既に電荷を幾らか担っているが、場所によっては、コロナ放電の結果として地表レベルでも増加することがありそうである。粒子のサイズの関数としてこの増加を計算することは可能であるが、それには多くの単純化した仮定が必要である。大多数の人々がほとんどの時間を過ごす場所である屋内での影響は、屋外より小さそうである。これは例えば、建物の空気取り入れ口の小さな開口部の表面にコロナイオンが沈着するためである。

4.6.4.2 汚染物質粒子の吸入

人々はこれらのより高く荷電した汚染物質粒子にばく露される可能性があり、場合によっては静電荷が呼吸器系への沈着を増加させる可能性が認められている (AGNIR、2004)。原理的に、この影響は有意となる可能性があり、AGNIR (2004) は、約 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ の範囲のサイズでは、肺への沈着は通常は低く (約 10%)、粒子のサイズにより、理論的に最大で約 3~10 倍まで増加する潜在的可能性があると評価した。実際の増加は電荷と粒子サイズの値に依存するが、実験結果からも理論的にも、現時点では信頼性のある予測はできない。それでも、実験的および理論的研究では、約 $0.3\mu\text{m}$ より大きい粒子については沈着の増加は極僅かとなるはずであることが示されている。というのは、有意な影響を生じるには粒子あたりの高い電荷が必要なためである。より小さい粒子については、肺の中への汚染物質の沈着に電荷が及ぼす影響は、様々な理由により理論上の最大限より相当小さくなる。実際には、最も小さな (直径が約 10nm より小さい) 粒子については、電荷は肺への沈着の確率を減少させるかもしれない。これは、より高い割合で上気道に沈着するためである。

ばく露が個人に及ぼす影響は、「居住」係数、即ちコロナイオンによって帯電した粒子にばく露される時間の割合により、更に低くなる。Henshaw および Fews (AGNIR 内の私信、2004) は、コロナ中の電力線の風下の人々には、風上の人々よりも 20~60%以上多くの粒子が肺に沈

着する可能性がある」と推定している。この推定は、屋外で生じた汚染物質粒子に屋外でばく露する人々に関するものである。外気が家に入る場合、汚染物質粒子の多くも一緒に運ばれる (Liu および Nazaroff, 2003) が、小さな開口部の表面に汚染物質粒子の一部が沈着するため、屋内における影響は屋外と類似しているが、より小さいと予想される。屋内で生じた粒子の肺沈着にコロナイオンが及ぼす影響は、相当小さくなる。そのような影響をモデル化するには、そのような全ての仮定が非常に不確実となるので、相当困難である。更に、風向きが変化するため、どのグループに対しても、生じる過大な沈着もより低いものとなるが、風向きが一定の場合よりも、影響を受けるグループの数は多くなる。

4.6.4.3 電力線下での沈着

帯電した粒子は、電力線から生じる電界に従い、50Hz の周波数で振動する。粒子が振動する距離は、その電荷および慣性、ならびに、通常は電力線の直下で最も大きくなる界の強さに依存する。但し、界の向きと強さは界の中の物体によって変化し、例えば人体のような導電性物体に対しては通常垂直である。界の強さは特に、先の尖った導体の回りで高い。粒子の振動が表面に当たる場合、一般には固着する。

電界中の粒子の振動は、屋外で電力線の下または近傍にいる人々の衣類や皮膚に沈着する粒子の数を、線から離れた人々よりも増加させる原因となる。建物およびその他の物体が電界を遮蔽するので、電力線は屋内では沈着の増加を生じない。Henshaw 等 (1996a ; 1996b) は、そのような電界が呼吸管内で沈着の増加を生じうるかどうか検討した。彼等は、この界は体内では体外の 10^4 分の 1 であると計算したが、この界が未結合のラドン崩壊生成物に影響を及ぼすかもしれないと示唆した。Stather 等 (1996) は、未結合の崩壊生成物は主に上気道に沈着するので、内部沈着がどの程度増加しても、肺への沈着は恐らく減るだろうと指摘した。

AGNIR (2004) は浮遊粒子の皮膚への沈着に関して、電力線の風下ではコロナ放電によって小さな増加が生じるようであると結論付けた。増加は主に小さな粒子となるので、どのような健康への悪影響も、化学汚染物質による表面への影響ではなくラドン崩壊生成物の表面効果の増加から生じるようである。ラドン崩壊生成物の皮膚表面への沈着の変化は、皮膚の静電荷および風速に対しても非常に敏感である。電力線の風下でさえ、これらの 2 つの変化がコロナイオンからの増加よりも非常に大きくなる可能性がある。

ラドン崩壊生成物と化学汚染物質の両方に関連するサイズの粒子の沈着が、電力線の下では若干大きいという、理論的分析に支持された実験的な証拠がある (Fews 等, 1999a)。ラドン崩壊生成物については～2.4 倍、化学汚染物質については～1.2 倍の増加が報告されている。沈着の増加は、影響率の増加、すなわち、振動している電界中で自然に帯電した粒子の沈着率の増加に起因している。振動の振幅は、粒子の質量に伴い急激に減少する。化学汚染物質の質量はたいがい、より大きな粒子と関係しているので、これらの沈着の増加は風のない空気中では

有意とはならない。但し、Fews 等 (Fews 等、1999a) は、乱流の場合はそうならないと計算している。

Swanson および Jeffers (AGNIR 内の私信、2004) は、電力線の下でラドン崩壊生成物の沈着増加が起こることに同意した。但し彼等は、より大きな粒子に観察された沈着の増加、すなわち、化学汚染物質に生じる沈着の増加は、実験のデザインに起因するとしている。彼等はまた、より大きな粒子について理論的に予測された沈着の増加は、Fews 等 (1999a) が用いた特定のパラメータの値および分析式に起因するとしている。

電力線下での皮膚への沈着の程度は、更なる実験的測定なしには決定できない。更なる研究によって、理論的分析における違いを低減できる可能性がある。但し、物理的状态は非常に複雑であり、信頼しうる情報を提供するのに十分な精度を有するモデル化が可能であるという見込みは、当面なさそうである。

4.6.4.4 健康に対する意味合い

浮遊粒子状汚染物質の主な健康ハザードは、心臓-呼吸器疾患および肺がんである (AGNIR、2004)。主に屋外で生じる自動車排気に由来する粒子、および建物の中で生じる環境たばこの吸引によって、心臓-呼吸器疾患のリスクが増加するという強い証拠がある。肺がんのリスクは、外気中の粒子状汚染物質、ならびに屋内のラドン崩壊生成物および受動喫煙によって増加する。環境中の粒子状大気汚染物質の皮膚への沈着による健康リスクは、いずれも無視しうるようである。

AGNIR (2004) は最近のレビューにおいて、コロナイオンが健康に及ぼす潜在的インパクトは、身体内の標的となる組織に対して関連汚染物質の量が増加する度合いに依存する、と結論付けている。以下の不確実性のため、このインパクトを正確に評価することはできなかった：

- a) 特に建物の中で、コロナイオンが異なるサイズの粒子に対する荷電を増やす影響の度合い；
- b) 肺および呼吸器官のその他の部位への粒子の沈着に荷電が及ぼす正確なインパクト；および
- c) 異なるサイズの粒子の割合に関する健康への悪影響の量-反応関係。但し、コロナイオンは、最も影響を受ける個々人においてさえ、粒子状大気汚染物質に関連する長期的健康リスクに対して小さな影響しか生じることはなさそうである。公衆衛生の観点から、AGNIR は、コロナイオンの発生源の近くに住む、または近くで働く人々は一般公衆の極一部なので、それに釣り合うインパクトは更に低くなるだろうと結論付けている。

4.7 結論

ELF電界および磁界に関する、提案されている様々な直接的および間接的な相互作用のメカニズムの妥当性について調べた。特に、ある界へのばく露により生物学的プロセスで発生する「シグナル」を、固有のランダムノイズと区別できるかどうか、また、そのメカニズムが科学

的原理および現状の科学的知見を疑うものかどうかについて調べた。多くのメカニズムは、ある強度よりも高い界においてのみ、妥当性のあるものとなる。しかしながら、妥当性のあるメカニズムが同定されなくても、基本的な科学的原理が支持されるならば、非常に低い界レベルでの健康影響の可能性を排除することはできない。

電磁界と人体との直接的相互作用について提案されている多くのメカニズムのうち、神経回路における誘導電界、ラジカルペア、およびマグネタイトの3つが、他のものより低い界レベルで潜在的に作用するものとして際立っている。

ELF電界または磁界へのばく露により組織に誘導された電界は、内部電界強度が数 V m^{-1} を超える場合に、生物物理学的に妥当な方法で単一有髄神経線維を直接刺激する。より弱い電界は、単一の細胞とは対照的に神経回路のシナプス伝達に影響を与える可能性がある。多細胞生物では一般的に、神経系によるこのようなシグナルプロセスを使用して弱い環境シグナルを検出する。神経回路による識別の下限値は 1 mV m^{-1} であることが示唆されているが、現時点での証拠に基づけば、閾値は $10\sim 100 \text{ mV m}^{-1}$ あたりにありそうである。

ラジカルペア・メカニズムは、一般に認められている様式であり、磁界が特定の種類の化学反応に影響し、一般的に、低磁界では反応性のあるフリーラジカル濃度が増加し、高磁界ではそれらが減少する。このような増加は、 1 mT 以下で見られている。このメカニズムが渡り鳥の飛行と関連する証拠がいくつかある。理論的根拠に基づき、またELFおよび静磁界によって生じる変化が類似していることから、約 $50 \mu \text{ T}$ の地磁気以下の商用周波数の界は、それほど大きな生物学的意味をもたないと考えられる。

マグネタイト結晶は、様々な形の酸化鉄の小さな強磁性体結晶であるが、動物およびヒトの組織に少量だけが見られる。フリーラジカルと同様、これは移動性の動物の方向付けと誘導に関連している。ヒトの脳にも少量のマグネタイトが存在するが、弱い地磁気を検出する能力をヒトに与えているわけではない。極端な仮定に基づいた計算から、ELF界がマグネタイト結晶に及ぼす影響の下限値は、 $5 \mu \text{ T}$ であることが示唆されている。

化学結合の切断、荷電粒子に対する力、および種々の狭い帯域幅の「共鳴」メカニズムなど、その他の直接的な生物物理学的相互作用は、一般環境および職業的環境で発生する電磁界レベルでの相互作用について妥当性のある説明を提示しているとは考えられていない。

間接的影響には、電界に誘導される表面電荷が感知され、導体に触れた際に痛みを伴うマイクログラウンドがある。接触電流は、例えば小さな子供が家のバスバスの水栓に触れた際に生じる。これにより弱い電界（恐らくバックグラウンドのノイズレベル以上）が骨髄に誘導される。しかしながら、これらが健康へのリスクとなるかどうかは不明である。

高圧電力線は、コロナ放電の結果として帯電したイオンの雲を生じる。これが、浮遊汚染物質の皮膚や体内の気道への沈着を増加させ、健康に有害な影響を及ぼす可能性のあることが示唆されている。しかしながら、最も高いばく露を受ける個人においてさえ、仮に長期的な健康リスクがあったとしても、コロナイオンが大きな影響を及ぼすことはなさそうである。

上記で考察した3つの直接的メカニズムのいずれも、一般的に人々が遭遇するばく露レベルでは疾患発症率を増加させるという妥当性がないと考えられる。事実、これらは数桁以上高いレベルにのみ妥当となり、また間接的メカニズムについてはまだ十分に研究されてはいない。妥当性のあるメカニズムが同定されていないことから、有害な健康影響の可能性を排除することはできないが、このことは生物学と疫学からのより強力な証拠の必要性を高めている。