

物理的環境要因（騒音、振動、非電離電磁波）の生体影響

中村裕之（高知大学医学部環境医学教室）

hiro-n@po.incl.ne.jp

要旨：物理的環境要因の健康影響を評価する目的で、騒音、振動、非電離電磁波の健康影響について総説した。職域で問題になる騒音性難聴という音による聴覚への物理的影響以外に、自律神経—内分泌系への影響の結果、食生活の乱れ、飲酒量の増大などの生活習慣の変化が生じ得るが、生活環境における騒音レベルは小さく、通常の生活環境で、これらの騒音影響が生じる可能性は極めて少ない。振動には、手持ち工具での作業のように、手にだけ伝達される手腕振動（局所振動）と、地ならし機などの車両を操作する際や、家屋の揺れに際して全身に暴露される全身振動がある。手腕振動と全身振動を厳密に区別して論じる必要があり、生活環境では、全身振動が問題になる。全身振動による健康影響として、職場での腰椎や妊娠子宮への機械的作用による腰痛や流産、あるいは慢性影響としての不眠や胃潰瘍などがあるが、実際の生活環境では、このような影響を引き起こす振動レベルよりはるかに小さく、生活環境での振動が、このような健康影響を引き起こすことはない。非電離電磁波の生体影響については、特に、通信や電子レンジに用いられるマイクロ波（周波数 300 MHz～30 GHz、波長 1 m～1 mm）の生体影響に焦点を当てた。職域で用いられるレベルはかつては高く、白内障を引き起こされたが、現行の環境基準（全身暴露時の SAR で 0.4 W/kg）を超える暴露はもはや存在しない。その暴露基準以下であれば体温の上昇を伴わないか、あるいは伴っても微小であるために、影響があるとすれば非熱作用によるものということになる。レーダーを扱う軍人における一部の疫学データでは、脳腫瘍や造血器官などの悪性新生物の発生との因果関係を肯定する研究成果が示されてはいるが、その暴露についてのデータが極めて曖昧であるために、疑問視されている。著者らの妊娠ラットにおける一連の実験結果から、非熱作用による正常妊娠に対する影響は、ほとんどなく、逆に、妊娠することでマイクロ波の熱作用に対するホメオスタシスが増加することが証明され、最もリスクが高い妊娠状態においてさえ、現行の環境基準によつての危険性がほとんど否定的であることが示された。したがって、多くの疫学データを同時に考え合わせ、環境暴露基準内での使用であるならば、マイクロ波の影響は存在しないとしてもいいと考えられる。このように、本論では、物理的環境における騒音、振動とマイクロ波の健康影響を、職域と生活域に区別し論じた。 【キーワード：騒音、振動、電磁波、妊娠、生体影響、環境基準】

I. はじめに

物理的環境は、化学的物資が中毒作用を有することで有害性を呈することに対して、エネルギー的作用によってヒトに傷害性を与えるという特徴を有する。熱や気圧環境も重要な物理的

要因であり、生物は、その進化の過程でその物理的環境に対するホメオスタシスを獲得してきた。一方、騒音、振動、非電離電磁波は、人類の文明の発展による負の産物であって、進化の長い過程からみれば、生物環境において、つい一瞬前におけるできごとである。当然、遺伝

子レベルからみれば、これらの物理的環境に対しては周到な準備もできてはいない。一般住民は、低レベルでありながら、受精の瞬間から昼夜、暴露されることになるため、環境医学上の大きな問題である。産業職場では、より高いレベルに労働者が暴露されるため、職業病までもが生まれた。音、振動、非電離電磁波はエネルギーという特徴以外に、波という性質を有するために、そのアプローチを一層、困難にしている。本講では、これまでの音、振動、非電離電磁波における量－反応関係の決定から現行の基準の設定をめぐる現段階での問題点を指摘し、物理的要因に対する環境医学における今後の展望について論じる。

II. 騒音

音は、純粹に物理的現象であって、その性質は周波数、音圧および波形の三要素によって物理的に表現できる。ヒトの聴覚で感じることができる周波数領域は、およそ 20－20 kHz の範囲であって、これを可聴音とよび、20 Hz 以下の波動を超低周波音とよび、20 kHz 以上の波動は超音波とよばれている。騒音の概念は、このような客観的な物理量として定義されるのではなく、主観的なヒトの感覚であるために、騒音を取り扱う場合、特に、その評価に関しては、物理量である一面と、それに対するヒトの生体反応という面を、絶えず同時に考慮する必要がある。音の物理量を表す単位は、音響エネルギー密度レベル (L_e (dB)= $10\log_{10}(E/E_0)$ 、 $E_0=2.94\times 10^{-15}$ J/m³) で表す。

1. 騒音レベルと健康影響

音は、内耳の外毛細胞と内毛細胞が人体における最初の感覚受容器であり、物理量としての

騒音はこれらの細胞の変性やコルチ器の破壊をもたらすことにより、耳痛や聴力損失をもたらす。さらに、音は耳から大脳聴領への固有経路を通るが、このとき、脳幹網様体を介して大脳皮質に到達する非特異的投射経路と特異的経路を刺激し、音の「うるささ」などの不快感が生じる。この音の「うるささ」を、統一的に評価する場合の基本的な量が騒音レベルである。騒音レベルは、一般環境では等価騒音レベルによって頻繁に表され、また、純音に対する周波数ごとの等ラウンドネス曲線を用いた周波数重み付け音圧レベルがよく用いられるのは、騒音に対する評価法として、物理量と感覚量である「うるささ」を最も反映しているものとして理解されている。中でも、A 特性と呼ばれている周波数特性の重みづけをして測定した音圧レベル dB (A) は、様々な産業職場で用いられる。このときの等価騒音レベルを L_{aeq} と記する。騒音レベルが、一般環境では、等価騒音レベル (L_{aeq}) によって頻繁に表される。図 1 に示す騒音による生体反応のほとんどは、この「うるささ」から生じているために、騒音レベルとの間には、量－反応関係が成立することになる。このことは、後述する衝撃音や、低周波音以外では、聴覚に対する影響と他の生体反応がよく一致することを示しており、妥当性に富んだ物理的指標といえる。

騒音の生体影響としては、聴覚への物理的影響以外に、視床下部－下垂体－副腎皮質系をはじめとする内分泌系への影響や、交感神経系の亢進によって唾液、胃液の分泌減少、胃腸運動抑制、瞳孔の散大などが生じる (図 1)。これらの内分泌系や自律神経系への影響は、情動ストレスによる急性期の反応であり、非特異的作用の結果としてみることができる。また情動ストレスの作用の結果、生活習慣の変化、例えば、

食生活の乱れ、飲酒量の増大、運動習慣の低下、喫煙量の増大、睡眠障害などが生じ、様々な生活習慣病が生じる。これが、慢性の間接的な影響として位置づけられるものである。しかしながら、これらの影響が生じるレベルは、職場環

境での騒音レベル以上のものと理解されている[1]。

刺激	受容器		影響	
大	音	耳	物理的作用	急性 鼓膜損傷、耳痛 一過性聴力損失
			慢性	難聴
			直接的作用 (急性)	眼球振とう、吐き気、血圧上昇、末梢血管収縮、発汗、消化機能減退、血糖上昇、好酸球数・好塩基球数・副腎アスコルビン酸・コルチコステロン・ゴナドトロピンなど内分泌系の変化、免疫機能低下、ビタミンA、Bなどの消費増大
			間接的作用 (慢性)	胃潰瘍および十二指腸潰瘍、潰瘍性大腸炎、過敏性大腸、神経性嘔吐、本態性高血圧、神経性狭心症、過呼吸症候群、気管支喘息、悪性新生物 甲状腺機能亢進症、神経性食欲不振症、偏頭痛、筋緊張性頭痛、嚔症、痙攣性斜傾、関節リウマチ、腰痛症、頸肩腕症候群、原発性緑内障、メニエール症候群、円形脱毛症、インポテンツ、更年期障害、心臓神経症、胃腸神経症、膀胱神経症、神経症、不眠症、自律神経失調症、神経症的抑うつ状態、反応性うつ病
小			パフォーマンスへの影響	加算作業の妨害・知能、学習テスト成績の妨害・作業量の低下・誤りの増加・注意力の低下・反応時間の延長
			住民反応	うるささ、精神心理的影響 睡眠妨害、不快

図1 騒音による影響

2. 騒音の特異的影響

騒音レベルが大きい場合、例えば、職場環境で85 dB(A)以上を繰り返し、暴露された場合には、騒音性難聴が生じることもある。これは、騒音による特異的影響であって情動ストレスによる影響にないところである。また、衝撃騒音の場合に、騒音レベル以外に、ピーク値や、単発騒音暴露レベルによって扱われることで評価される。この場合にも、衝撃騒音の場合の聴覚への主観的影響が生体反応とよく比例すること

となる。

慢性影響については、ISO 1999 の加齢と騒音性難聴についての基本的な仮説（図2）では、聴器への慢性影響を、感覚量とほぼ平行であるとしており、騒音に関する限り、周波数補正による等価騒音レベルによって評価することで、一応の解決はしている。

$$\begin{aligned} \text{聴力レベルの実測値(dB)} = & \\ & \text{年齢による難聴(dB)} + \text{騒音による難聴(dB)} \\ & - (\text{年齢による難聴(dB)} \times \text{騒音による難聴})/K \end{aligned}$$

図 2 加齢による聴力低下と騒音性難聴 (ISO 1999)―聴力損失モデル

「うるささ」は、非特異的反応と比例するため、「うるささ」も情動ストレスの1つとしてみなされてしまう傾向があるが、「うるささ」は騒音によってしか生じないため、特異的反応である。この「うるささ」が生じる脳内神経伝達機構を調べた Nakamura ら [2-4]の研究によれば、騒音ストレスの中樞カテコールアミンへの影響をドパミン (DA) でみてみると、騒音刺激によって中脳―前頭葉皮質、中脳―側坐核および中脳―扁桃体 DA 系が活性化されることを確認したが、非特異的反応として中脳―前頭葉皮質 DA 系が賦活化されることは疑いなく、また扁桃体での DA 代謝亢進は騒音だけで生じる特異的反応として位置づけることができた。騒音暴露時の脳内のサブスタンス P (SP) の変化を知るために、その特異的免疫活性、すなわち SP 様免疫活性 (SP-LI) を調べたが、扁桃において SP-LI の低下を認めた。これはこの部位で特異的に認められた DA 代謝の亢進との機能的な関連によって騒音の際の「うるささ」の処理に携わっていると想定された [2-4]。

3. 低周波音の生体影響

以上の生活環境における騒音基準には、騒音レベルが用いられているが、これが 100 dB より低い低周波音に対しても適当かどうかを、睡眠に対する影響について調べた研究がある [5]。

睡眠の浅い段階である S1 の場合には、40 dB の暴露に対しても、反応の発生率は 51 %にも達したことなどから、睡眠が浅い程、交通騒音暴露の影響が大きいこと、また交通騒音暴露の影響は一過性のものとはいえ、睡眠パターンにかなりの影響を与えることが示されている。なお低周波音の睡眠への影響を明らかにするため交通騒音に暴露した場合についても観察し比較したが、いずれの睡眠段階でも 60 dB の方が大きな影響を受け、40 dB で最も影響は小さかった。しかし、S1 の場合には、40 dB の暴露に対しても、反応の発生率は 51%に達した。40 dB 以外では、反応の発生率は S1 で最も高く、レム睡眠時 (SREM) に最も低かった。睡眠率の低下および睡眠段階移行回数の増加は観察されなかった。これに対し、全就床時間に占める S3+4 の割合は模擬交通騒音の暴露初日に対照夜より有意に低下した。これらの結果は、睡眠が浅い程、交通騒音暴露の影響が大きいこと、また交通騒音暴露の影響は一過性のものとはいえ、睡眠パターンに影響を与えることが示唆されている (図 3)。

4. 超低周波音

本来音として感知できないとされた、いわば可聴音周波数以下の低い周波数の空気振動にも関心がもたれるようになった。工場では圧縮機、送風機、振動ふるいなどで、生活環境ではダムの放流、高速道路橋などで騒音、振動とは異なる低周波の空気振動による影響が注目されたことがきっかけとなっている。1973 年のパリ会議では 0.1~20 Hz の周波数範囲の音を超低周波音 (infrasound) と定義しているが、実際には可聴音も混在していることが多く、0.1~20 Hz の空気振動成分を主としながらも可聴域下限の低周波数の音をも含めて超低周波空気振動、超低周

波音とよんでいる。

超低周波空気振動が話題になったのも伝播距離が大きく、波長が長いので工学的に除去、軽減することが難しいことにもよる。人体影響の発現機序や受容の過程などをこれからの問題点としているものの、音としてではないにしても皮膚知覚のほか、すでに述べたようにすくなくとも聴器でも感受されるという意見がある。すなわち、古典的な可聴域の見直しも提起されている。

健康状況に関するアンケート調査を面接法によっておこなったが、低周波音による反応としては、「気分がいらいらする」、「睡眠の妨害」、「咽頭部の振動感・乾燥感」、「低い音が気になる」、「のどのあたりがこそばゆい」、「息苦しいまたはせきがでる」、「鼻の中がかゆい」の順に回答率が高かった。騒音と超低周波音による反応を比較検討したところ、「鼻の中がかゆい」、「咽頭部の振動感・乾燥感」、「のど

のあたりがこそばゆい」、「息苦しい、またはせきがでる」などの咽喉頭部に関連する項目が超低周波音に、より特徴的なものであるとして抽出された [6]。

閾値についての研究も活発であって、図3にその一端を示してある。Johnson の可聴閾値は、10 Hzで低いところは91dB、高いレベルは100dBにあり、超低周波空気振動により胸・腹壁の振動感、のどのくすぐったさ、窒息するような感じなどが訴えられる。Tsunekawa らの研究による結果 [6]を、身体各部位で感知した反応数から得られた反応率を80、50%のレベルで図4に示した。前述のバリ会議で提案された生理的影響の発現しない限界は、2 Hzで130dB、20 Hzで120dB というさらに高い水準におかれており、現実の超低周波音によっては生理的影響はないものの住民反応に近い生理的反応があることを窺わせる。

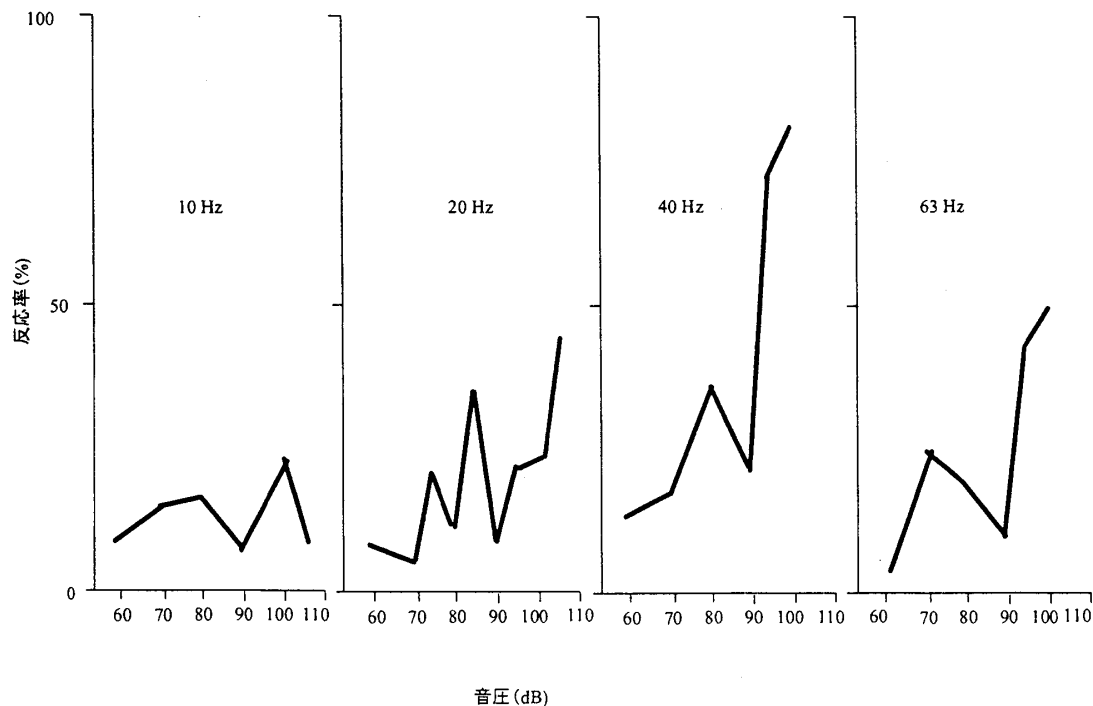


図3 低周波音の睡眠反応率への影響

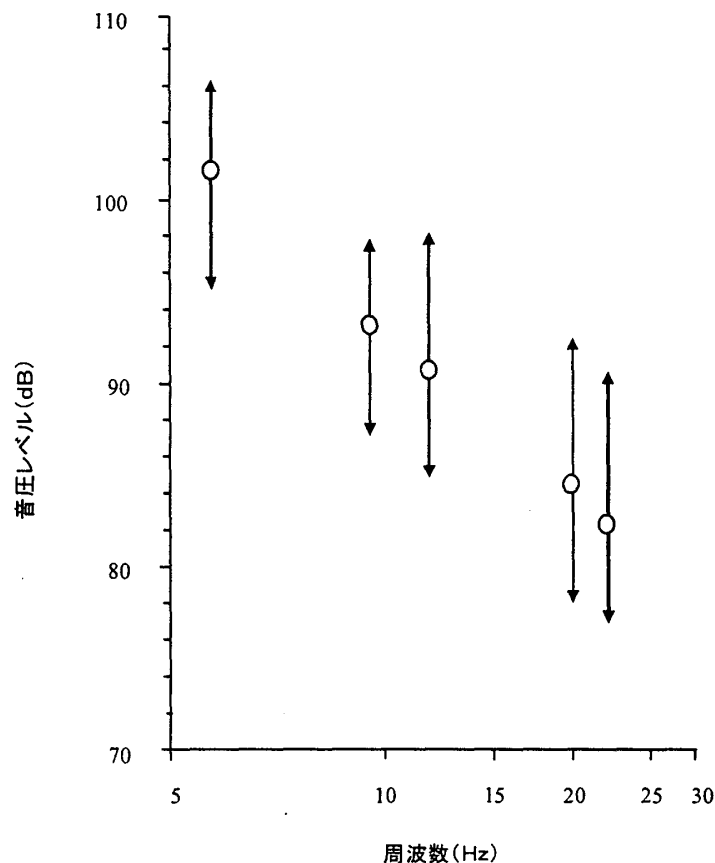


図4 超低周波音圧レベルと主観的反応

5. 超音波

20 KHz 以上の周波数を有する超音波は、温熱作用や振動作用によって血液、リンパ液等体液の循環を促進し、新陳代謝を活発にさせる作用があるために、人体へ有効利用され、あるいは超音波発生装置によって、器具などの消毒、洗浄、溶着、ドリルにも使用される。いずれの場合にも過剰な暴露は、聴覚を通じて耳鳴り、耳内痛を引き起こす。さらには全身性の影響として頭痛、嘔吐、嘔気、めまい、全身疲労感が生じるが、これは、聴覚に加え振動覚、温度覚に影響を与えた結果と考えることができる。生活環境における超音波のレベルは、このような生体影響を与えるほど大きくはない。

II 振動

1. 局所振動と全身振動

振動には、手持ち工具での作業のように、手にだけ伝達される手腕振動（局所振動）と、地ならし機などの車両を操作する際や、家屋の揺れに際して全身に暴露される全身振動がある。手腕振動では、慢性暴露により白指症などの末梢循環障害、末梢神経障害、骨・関節障害が産業医学上の問題となる。これを振動障害とよぶ。欧米諸国では、振動とは全身振動を指し、産業医学上や環境医学上の大きな問題となる。このように、手腕振動と全身振動に厳密に区別して論じる必要がある。本論である室内空気環境では、全身振動が問題になる。

2. 全身振動の生体影響

全身振動では、交通車両、農業用車両、船舶、航空機などのように、立位、座位あるいは体を

もたれたりして振動が足や臀部などから伝播し、体全体がゆれ動かされる条件での振動暴露であるため、振動の人体への影響を知るためには、振動は人体のどの部位にどのように伝達するか、すなわち人体への伝達様相が重要となる。その際には、振動加速度を一定にしたときには、周波数の振動感覚に与える影響は最も特徴的であり、かつ最も重要である。垂直振動と水平振動では、振動数と振動感覚の関係が全く異なり、垂直振動の場合、振動加速度を一定にすると、おおよそ振動数 4-8 Hz において最も振動が大きく感じられ、それより大きくても小さくても振動感覚は小さくなる。一方、水平振動の場合 2 Hz まだが最も振動感覚は大きく、それより振動数が大きくなるにつれて、振動は小さく感じられるのである。この関係は、振動感覚のみならず、上肢の筋活動、循環器系、呼吸器系機能などの生体の生理的機能と周波数との関係にもあてはまり [7] (図 5)、さらに、人体各部位の共振振動数を考慮に入れ、作成された国際的ガイドライン ISO 2631(1978)の振動数評価曲線 (図 6) に寄与している。しかしながら、ごく最近、パフォーマンスをさらに詳細に区別した周波数重み付け曲線が提案されている (図 7)。また、振動暴露時の疲労—上達 (能率) 減退境界 (fatigue-decreased proficiency boundary) を図 8 に示す。健康や安全の保持が目的の暴露限界 (exposure limit) を求めるには、加速度レベルで 6 dB 高く、快適性の保持が目的の快適減退境界 (reduced comfort boundary) を求めるには、10 dB 低くとる。

全身振動による健康影響は、図 9 の如くにまとめられる [1]。振動のヒトに与える不快感は、独特なものがある。その脳内神経伝達機構は、騒音のものとは、大きく異なることが知られている [2-4]。特異的影響としては、振動レベルが大きいときには、出血 (肺・膀胱・心・肝・胃・腸)、内臓の圧迫・伸展・変位・下垂 (胃下垂・

腎下垂)、脊柱の変形異常、流産が生じる。この慢性影響として脊椎骨折と胃潰瘍が知られている。この胃潰瘍と、ストレス性の胃潰瘍の違いは Nakamura ら [8]によって詳細に検討された。結局、胃という宙吊りの臓器が、機械的な振動によって共振状態となるために、胃粘膜が牽引、伸展することによって胃粘膜虚血を生み、胃粘膜病変につながることがわかった。機械的な作用ということで、情動ストレス的因子の関与は少ない。

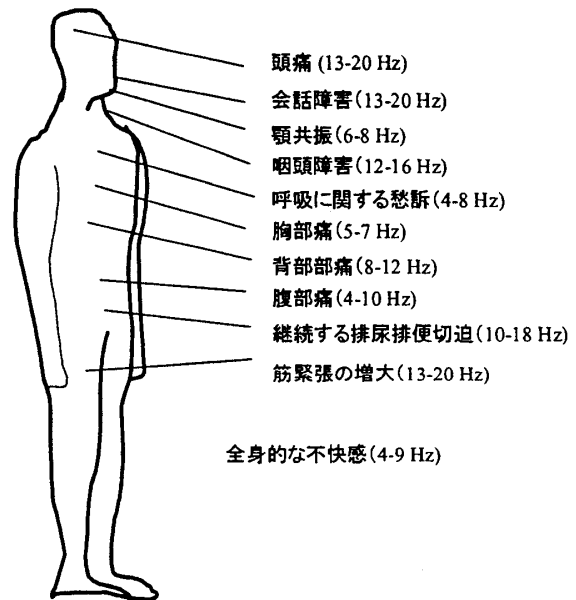


図 5 刺激振動数と種々の器官領域における愁訴との関係 (Magit and Coermann, 1960)

また、妊婦は飛行機に乗ると、流産を起こすなどといわれていたが、極端な機械的振動のせいだとされていた。妊娠子宮は胃と同様、共振によって直接、機械的作用を受ける機序もあったが、プロスタグランディン E_2 系の関与によって、子宮胎盤微小循環障害が生じ、結果的に胎盤機能不全となり、異常妊娠が引き起こされることから、情動ストレスとしての作用が大きいことが判明した [9]。いずれにおいても、このような生体影響が生じるのは、職場環境であって通常の生活環境ではあり得ない。

衝撃型全身振動の影響を調べる研究は昨今、大いに注目されている。それは、多くの研究結果が、現行の ISO 2631 の基準が衝撃型振動の影響を過小視しているという結果を導き出しているからである。Crest factor (振幅に対する衝撃の

大きさ) が、6 以下の場合に衝撃振動を非衝撃振動と同じように評価できるとした現行の制度は、周波数で重み付けされたあとの加速度の 4 乗の積分の 4 乗根により与えられる VDV 値にとって代わるかもしれない。

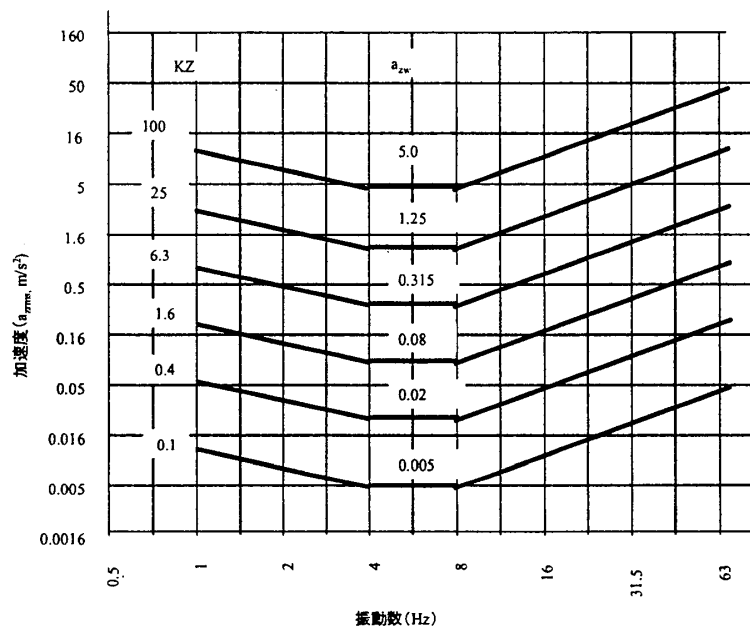


図 6 Z 方向 (垂直方向) の周波数重み付け曲線 (ISO 2631)

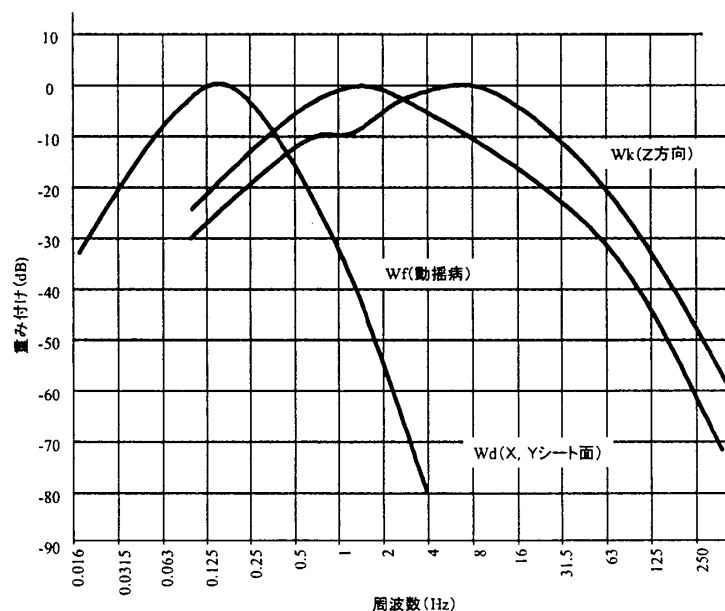


図 7 新しく ISO によって提唱されている周波数重み付け曲線 (revised ISO 2631)

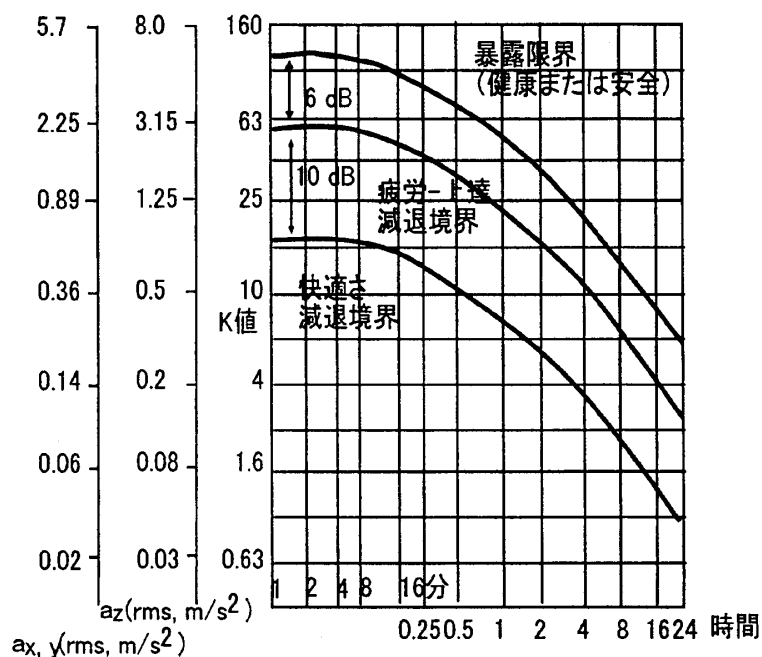


図8 重みづけした加速度 rms による1日暴露時間の評価 (全身振動のガイドライン, ISO2631, DIN4150)

刺激	受容器	影響
大	振動	物理的作用
		急性
		慢性
		直接的な作用 (急性)
小	耳 (前庭器官)・皮膚および深部 (バチニ小体)	ストレス作用
		間接的な作用 (慢性)
		パフォーマンスへの影響
		住民反応

図9 全身振動による影響

3. 振動の騒音の複合影響

振動と騒音は、一方が単独で存在しているというより、むしろその共存が現実では普通であるにも関わらず、その複合影響を問題視するようになったのはそう古いことではない。現実の道路に面する場所での複合影響をみた Nakamura ら [10] の研究結果を図 10 に示した。明らかにパフォーマンスへの影響は騒音と振動の相加作用として認められた。したがって、現行の生活環境における騒音と振動レベルがともに基準以内

であっても、その相加作用によってパフォーマンスへの影響が生じることもありうるが、騒音、振動のそれぞれの項で述べた通り、職域でのレベルによる慢性影響があったとしても、通常的生活環境レベルでの複合暴露によって生活環境で障害が生じる可能性は極めて低いと考えられる。

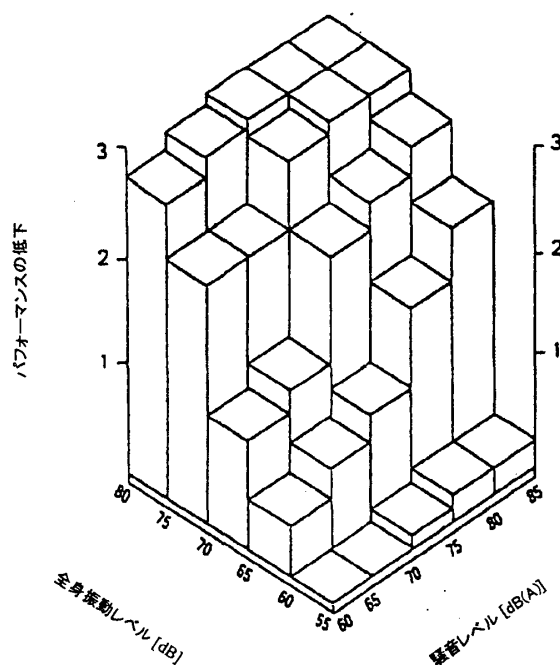


図 10 騒音と振動のパフォーマンスへの複合影響

Ⅲ. 非電離電磁波

10^{15} Hz 以上の紫外線より低いイオン化能を有さない電磁波を非電離電磁波とよび、周波数の低い順に、超低周波から、ラジオ波、マイクロ波がある。電磁界が、生体に及ぼす効果は、電磁界の種類（電界、磁界、電磁波）によって異なり、さらに周波数、照射レベル、照射時間、

波形の種類、照射部位などにも左右される。その生体影響は、電流による刺激作用、熱の発生、その他（非熱作用）に分けられる。刺激作用は、1 kHz 以下に認められ、発熱作用は、電磁エネルギーが吸収されることによって生じることから、1 kHz 以上でも生じる。電磁波は、電磁場の特殊な状態と考えられる。波長/ 2π (=光速/ 2π /周波

数)より近い場では電場強度は距離によって大きく異なり、電場と磁場のインピーダンスが一致しないため、厳密な意味での電磁波(電波)ではない。したがって、環境に対する評価法としては電界強度、磁界強度、電力密度が使われることになるが、この評価法を定める現行の数々の国際基準の根拠は、人体組織1gあたりに吸収される電磁力(specific absorption rate, SAR)と吸収様式によって生体影響が決定されることにある。

非電離電磁波のうち、マイクロ波帯域は、周波数300 MHz~30 GHz(波長1 m~1 mm)の領域を指し、テレビや気象観測、衛星通信、携帯電話、PHS、距離の測定、レーダー、電子レンジ、ジアテルミーなどに利用される。マイクロ波の暴露可能職種として、航空機乗務員、化学者、薬剤消毒者、食品消毒者、家具ベニヤ板張り工、メーザー(maser)操作者、マイクロサーム操作者、マイクロ波開発作業員、マイクロ波ジアテルミー操作者、マイクロ波試運転者、ミサイル発射士、レーダー機械士、レーダー操作者、電子レンジ補修者、電子レンジ操作者がある。最もよく使われている周波数は、産業、科学、医療、携帯電話などに用いられる900 MHzのマイクロ波と電子レンジや産業用マイクロ波加熱等にも使用される2450 MHzのマイクロ波である。

職域で用いられるレベルは比較的高く、かつては白内障[11]が引き起こされたが、現行の環境基準以下における暴露による健康影響については、議論の多いところである。したがって熱作用を有しないとされる現行の基準レベルによる健康影響についての疫学研究および著者らの実験研究を総説する。

1. 疫学的研究

1) 悪性新生物

古くは、Northern New Jersey と Southern Louisiana での死亡記録を、脳腫瘍と職業との関係から解析した Thomas ら [12]の報告から始まる。マイクロ波に暴露した男性における脳腫瘍の相対危険度が1.6(95%信頼区間、1.0-2.4)、星状細胞種では特に高く、相対危険度が4.6(95%信頼区間、1.9-12.2)であったという。電気工や修理工に従事する人では、仕事の年数にしたがって10倍にも上った。しかしながら、これらの仕事がヒュームや溶剤にも同時に暴露されるため、その影響は除外できてはいない。Goldsmith [13]は、レーダー作業を主とする軍人や通信作業に従事する労働者、ジアテルミー作業員などについての疫学を総説しているが、マイクロ波の発がん性に対して、確固とした証拠はないとしている。朝鮮戦争の軍役に従事し、高いレーダー暴露を受けた海軍兵 40,581 人の追跡調査が、最近、Am J Epidemiology に発表された。航空隊の電気技術者における非リンパ球性リンパ腫が有意な上昇を示した以外、脳腫瘍、睾丸腫瘍や肺がん、白血病などの悪性新生物において変化はなく、マイクロ波の悪性新生物への影響はほとんどないと結論されている [14]。

しかしながら、発がん性を肯定する疫学の結果は、おおそ次の通りである。ポーランドにおける軍従事者の15年間(1971-1985年)の経年的記録から全体の2.98%にあたる約3700人がマイクロ波の暴露を受けており、各部位での悪性新生物の発症における観察/期待比は、消化管に対して3.19-3.24、脳腫瘍に対して1.91、造血細胞/リンパ系で、6.31と高かった。造血細胞/リンパ系悪性腫瘍の中では、慢性骨髄性白血病が13.9、急性前骨髄性白血病が8.62、非ホジキン性リンパ種が5.82とマイクロ波の暴露による影響があったとしている [15]。同様に、軍従事

者におけるイスラエルにおける疫学では、10-100 mW/cm² のマイクロ波の暴露を受けたと思われるレーダー技術者である歩哨兵の記録から、目の黒色腫、睾丸がん、上咽頭がん、非ホジキン性リンパ種、乳がんで高い相対危険度を示した。若年発症であった点と潜伏期が短かった点から推察すれば、若年期でのマイクロ波の過剰な暴露を避ける必要性を示している [16]。アメリカ空軍での症例対照研究では、マイクロ波に対して、オッズ比 1.39 (95%信頼区間、1.01-1.90)の有意な上昇が認められている。[17]。Hardellらのスウェーデンなどにおける携帯電話と脳腫瘍についての症例対照研究 (1994-1996 人での脳腫瘍 209 人) [18, 19]では、使用側と同側の側頭部および頭頂部における脳腫瘍のオッズ比は 2.42 (95%信頼区間、0.97-6.05)と有意ではないが、暴露期間が短いこともあるため、慎重に今後の研究を続けるとしてきたが、最近、1997-2000 年に診断された脳腫瘍 1617 人 (20-80 歳) で、アナログ式携帯電話に対するオッズ比が 1.3 (95%信頼区間、1.02-1.6)であり、使用側と同側での側頭部腫瘍のオッズ比が、2.5 (95%信頼区間、1.3-4.9)であった。特に、聴神経腫におけるオッズ比が、OR 3.5 (95%信頼区間、1.8-6.8)と高くなっている。デジタル携帯電話では有意な差はなかったが、暴露期間が短いことから、今後の追跡も重要であることを述べている [20]。

しかしながら、これらの疫学における発がん性を肯定する見解は、ごく一部であり、特に、軍役に従事したデータにおいてはマイクロ波の暴露が極めて曖昧であることから、後ろ向きコホート研究の欠点を示しており、その解釈を慎重にする傾向である。さらには、Negative data が発表されにくい状況を考えれば、Meta-analysis した際には、さらに、マイクロ波の発がん性を示すヒトについてのデータは少なくなると見積

もられる [13]。

2) 生殖器

生殖器系への影響については、マイクロ波による精子への影響や流産への影響を認める疫学結果もないわけではない。ジアテルミーを行う 42,403 人の技師に対して、妊娠とジアテルミーとの関係について疫学調査をした結果、妊娠前あるいは妊娠中の前 1/3 期でのジアテルミー作業による流産が、オッズ比 1.28 (95%信頼区間、1.02-1.59)で有意であったとしている [21]。James [22]は、マイクロ波暴露によって精子数が減少し、女兒の出産が多くなるという疫学的データを提示した。しかしながら、対照群の設定の仕方など多くの反論によってこれらの結果も疑われている。

3) 脳神経系

Frey の最近の総説 [23]では、携帯電話からの低出力マイクロ波が、脳血管関門への影響を引き起こすことで、世にいう携帯電話中の頭痛は、携帯電話から発信されるマイクロ波のエネルギーが脳中枢に数十倍も吸収される熱集中点 (ホットスポット) 現象によりが起ころうることを唱えている。この Frey はマイクロ波の健康への影響を過大評価してきた一人であり、Frey の発言によって多くの世論が左右されてきたといっても過言ではない。例えば、1985 年に Appleton ら [24]がマイクロ波に職業上照射されていた 2,343 名の軍事機関の職員の調査から、マイクロ波によっては眼の障害の罹患率の上昇は認めないとしたが、Frey [25]はそれらのデータを再解析し罹患率は上昇していると結論しているが、直ちに、この主張 [25]に対して、彼が間違った統計方法を使用していることや、混濁、空胞化などの罹患に関するデータが欠如していることを指摘されている [26]。

携帯電話によるマイクロ波の影響を調べた研

究の多くは、人の睡眠への影響を認めていない [27, 28]。

2. 妊娠ラットに対する in vivo の研究

著者らはマイクロ波実験の基本的システムを開発し、一連の研究によって生体機序を解明することによって安全域を確立してきた。その実験デザインは、ラットを用い、周波数 915 あるいは 2,450 MHz、現行の許容値限界値の指標である SAR を 0.4 W/kg とした連続波のマイクロ波を暴露する群（マイクロ波群、90 分で 1 °C の温度上昇をもたらす）、約 1 °C の温度上昇をもたらす水温 40 °C の温水槽に水浸させる群（40 °C の温浴群）、体温を変化させない 34 °C の温水槽に水浸させる群（34 °C の温浴群）、何も暴露しない群（非暴露群）の間で、Corticosterone や Prolactin などのストレス指標（図 11）を比較し、マイクロ波の影響が熱作用によることを示した [29, 30]。さらに、妊娠ラットを用いてマイクロ波の生理的影響における神経内分泌免疫系の機序を解明する実験を行った。妊娠ラットではマイクロ波によって NK 活性（NKCA）の低下が認められ、組織適合性の向上に対する役割の存在が証明された。ところが、CRH 受容体の拮抗剤である α -helical CRH (9-41) の脳室内投与 (icv, 5 μ g) によって、その NKCA の減少が消失する（図 12） [31, 32]。したがって、妊娠期のマイクロ波による細胞性免疫機能低下作用は、脳内の CRH の作用を介して、また側坐核の Neutotensin と下垂体のオピオイド系の作用と協調して、NKCA の低下に代表される細胞性免疫の低下がもたらされるという機序を想定した（図 13） [33-36]。この場合、妊娠することでマイクロ波に対するホメオスタシスが増加することになる。さらに妊娠期には、胎盤 CRH が熱ストレス時の胎児の恒温性に寄与する代償と

して、子宮胎盤の血流量の減少を来すこともわかってきた。したがって、現行の環境基準の指標である SAR の 0.4 W/kg は、915 あるいは 2,450 MHz のマイクロ波に限り、生理的な変化の範囲であり、少なくとも不利な影響はもたらさないと考えられる。

3. 今後の研究展望

我々の一連の研究は妊娠母胎に対しても現行の基準が安全であることを、非常に狭い帯域のマイクロ波ではあるが、その生体機序を用いて証明した [37]。このように量-反応関係を解明することによって安全レベルを設けるといった従来の環境医学的 approach だけでなく、安全レベルでありながら生理的範囲であることを、生体機序の解明にまでさかのぼって追求するといった新たな環境医学的 approach によって、さらに十分、確定していない安全レベルの確立が可能になると考える（図 14）。

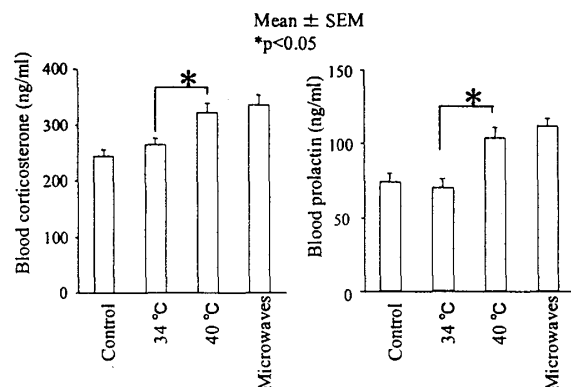


図 11 マイクロ波と温浴ストレスによる生体影響の比較

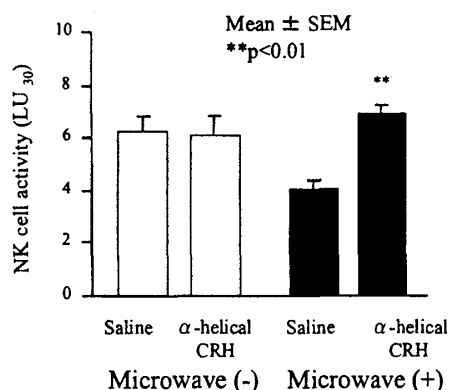


図 12 マイクロ波暴露時の α -helical CRH の NK 活性への影響への影響

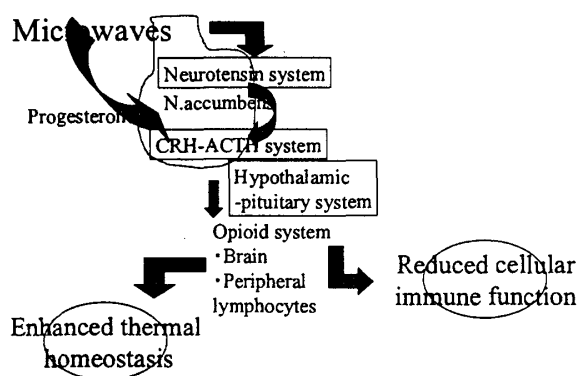


図 13 妊娠時におけるマイクロ波に対する防御機構

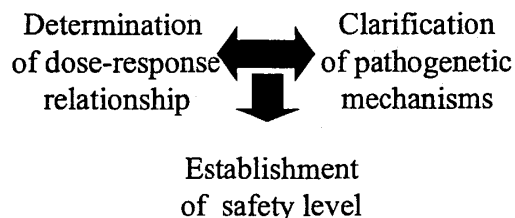


図 14 物理的環境要因に対する研究の展望

参考文献

- [1]. 岡田晃. 騒音・振動と健康. 臨床医学 1978;4:136-40.
- [2]. Nakamura H, Moroji T, Nohara S, Nakamura H, Okada A. Effects of whole-body vibration stress on substance P- and neurotensin-like immunoreactivity in the rat brain. *Environ Res* 1990;52(2):155-63.
- [3]. Nakamura H, Moroji T, Nohara S, Nakamura H, Okada A. Activation of cerebral dopaminergic systems by noise and whole-body vibration. *Environ Res* 1992;57(1):10-8.
- [4]. 中村裕之. 物理的環境刺激と精神生物学. 日本衛生学雑誌 1992;47:785-97.
- [5]. 小森谷豊. 低周波空気振動の睡眠影響に関する実験的研究. 十全医学会雑誌 1987;96:439-47.
- [6]. Tsunekawa S, Kajikawa Y, Nohara S, Ariizumi M, Okada A. Study on the perceptible level for infrasound. *J Sound Vib* 1987;112:15-22.
- [7]. Magid EB, Coermann R. The reaction of the human body to extreme vibration. *Proceedings Institute of Environmental Sciences* 1960;135:38-50.
- [8]. Nakamura H, Katoh A, Nohara S, Nakamura H, Okada A. Experimental studies on the pathogenesis of the gastric mucosal lesions induced by whole-body vibration. *Environ Res* 1992;58(2):220-9.
- [9]. Nakamura H, Ohsu W, Nagase H, Okazawa T, Yoshida M, Okada A. Uterine circulatory dysfunction induced by whole-body vibration and its endocrine pathogenesis in the

- pregnant rat. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol* 1996;**72**(4):292-6.
- [10]. Nakamura H, Nohara S, Nakamura H, Kajikawa Y, Okada A. Field studies on subjective responses to noise and vibration. *Arch Complex Environ Studies* 1990;**2**:25-32.
- [11]. Duke-Elder WS. The pathological action of light upon the eye. *Lancet* 1926;**210**:1137-40.
- [12]. Thomas TL, Stolley PD, Stemhagen A, Fontham ET, Bleecker ML, Stewart PA et al. Brain tumor mortality risk among men with electrical and electronics jobs: a case-control study. *J Natl Cancer Inst* 1987;**79**(2):233-8.
- [13]. Goldsmith JR. Epidemiologic Evidence of Radiofrequency Radiation (Microwave) Effects on Health in Military, Broadcasting, and Occupational Studies. *Int J Occup Environ Health* 1995;**1**(1):47-57.
- [14]. Groves FD, Page WF, Gridley G, Lisimaque L, Stewart PA, Tarone RE et al. Cancer in Korean war navy technicians: mortality survey after 40 years. *Am J Epidemiol* 2002;**155**(9):810-8.
- [15]. Szmigielski S. Cancer morbidity in subjects occupationally exposed to high frequency (radiofrequency and microwave) electromagnetic radiation. *Sci Total Environ* 1996;**180**(1):9-17.
- [16]. Richter E, Berman T, Ben-Michael E, Laster R, Westin JB. Cancer in radar technicians exposed to radiofrequency/microwave radiation: sentinel episodes. *Int J Occup Environ Health* 2000;**6**(3):187-93.
- [17]. Grayson JK. Radiation exposure, socioeconomic status, and brain tumor risk in the US Air Force: a nested case-control study. *Am J Epidemiol* 1996;**143**(5):480-6.
- [18]. Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A, Hansson Mild K. Use of cellular telephones and the risk for brain tumours: A case-control study. *Int J Oncol* 1999;**15**(1):113-6.
- [19]. Hardell L, Nasman A, Pahlson A, Hallquist A. Case-control study on radiology work, medical x-ray investigations, and use of cellular telephones as risk factors for brain tumors. *MedGenMed* 2000;**E2**.
- [20]. Hardell L, Hallquist A, Mild KH, Carlberg M, Pahlson A, Lilja A. Cellular and cordless telephones and the risk for brain tumours. *Eur J Cancer Prev* 2002;**11**(4):377-86.
- [21]. Ouellet-Hellstrom R, Stewart WF. Miscarriages among female physical therapists who report using radio- and microwave-frequency electromagnetic radiation. *Am J Epidemiol* 1993;**138**(10):775-86.
- [22]. James WH. Sperm counts and offspring sex ratio as monitors of reproductive hazard to people exposed to microwave radiation. *Reprod Toxicol* 1998;**12**(4):495-6.
- [23]. Frey AH. Headaches from cellular telephones: are they real and what are the implications? *Environ Health Perspect* 1998;**106**(3):101-3.
- [24]. Appleton B, Hirsch S, Kinion RO, Soles M, McCrossan GC, Neidlinger RM. Microwave lens effects in humans. II. Results of five-year survey. *Arch Ophthalmol* 1975;**93**(4):257-8.
- [25]. Frey AH. Data analysis reveals significant microwave-induced eye damage in humans. *J*

- Microw Power Electromagn Energy* 1985;20(1):53-5.
- [26]. Wike EL, Martin EJ. Comments on Frey's "Data analysis reveals significant microwave-induced eye damage in humans". *J Microw Power Electromagn Energy* 1985;20(3):181-4.
- [27]. Wagner P, Roschke J, Mann K, Fell J, Hiller W, Frank C et al. Human sleep EEG under the influence of pulsed radio frequency electromagnetic fields. Results from polysomnographies using submaximal high power flux densities. *Neuropsychobiology* 2000;42(4):207-12.
- [28]. Hamblin DL, Wood AW. Effects of mobile phone emissions on human brain activity and sleep variables. *Int J Radiat Biol* 2002;78(8):659-69.
- [29]. Nakamura H, Ogino K, Nobukuni Y, Kambayashi Y, Matsuzaki I, Okada A. Do microwaves produce other effects than thermal actions on uteroplacental functions in pregnant rats? *Arch Complex Environ Studies* (http://wwwkochi-msacjp/~ff_evrnm/kyost06htm) 2002;14(3-4).
- [30]. Nakamura H, Matsuzaki I, Hatta K, Nobukuni Y, Kambayashi Y, Ogino K. Nonthermal effects of mobile-phone frequency microwaves on uteroplacental functions in pregnant rats. *Reprod Toxicol* 2003;17(3):321-6.
- [31]. Nakamura H, Nagase H, Ogino K, Hatta K, Matsuzaki I. Heat produces uteroplacental circulatory disturbance in pregnant rats through action of corticotropin releasing hormone (CRH). *Placenta* 2000;21(5-6):510-5.
- [32]. Nakamura H, Nagase H, Ogino K, Hatta K, Matsuzaki I. Involvement of central, but not placental corticotropin releasing hormone (CRH) in heat stress induced immunosuppression during pregnancy. *Brain Behav Immun* 2001;15(1):43-53.
- [33]. Nakamura H, Seto T, Nagase H, Yoshida M, Hatta K, Matsuzaki I et al. Involvement of central neurotensin in thermoregulatory and neuroimmune function in pregnant rats exposed to heat. *Brain Behav Immun* 1997;11(2):141-52.
- [34]. Nakamura H, Seto T, Nagase H, Yoshida M, Dan S, Ogino K. Effects of exposure to microwaves on cellular immunity and placental steroids in pregnant rats. *Occup Environ Med* 1997;54(9):676-80.
- [35]. Nakamura H, Nagase H, Yoshida M, Ogino K, Seto T, Hatta K et al. Opioid peptides mediate heat stress-induced immunosuppression during pregnancy. *Am J Physiol* 1998;274(3 PT 2):R672-6.
- [36]. Nakamura H, Seto T, Hatta K, Matsuzaki I, Nagase H, Yoshida M et al. Natural killer cell activity reduced by microwave exposure during pregnancy is mediated by opioid systems. *Environ Res* 1998;79(2):106-13.
- [37]. Nakamura H, Matsuzaki I, Hatta K, Ogino K. Physiological involvement of placental endothelin-1 and prostaglandin F2alpha in uteroplacental circulatory disturbance in pregnant rats exposed to heat stress. *Can J Physiol Pharmacol* 2004;82(4):225-30.