

ISSN 1343-9480  
MBPT

---

# 理学療法の 医学的基礎

---

Volume 2. No 2. December  
1998

理学療法の医学的基礎研究会雑誌

The Society for the Study of Medical Basis of Physical Therapy

*MBPT*

## 総 説

# 電磁波の基本的性質と生体刺激効果

藤原 修

### 緒 言

19世紀末に電磁波の存在がヘルツの実験で実証されてからわずか百十年の間に電磁波の利用技術はさまざまに発展した。放送・通信分野はいうに及ばず、計測・制御、電力や医療面、最近では爆発的に普及している携帯電話など広範囲な分野で電磁波が使われるようになり、今日の情報化社会も電磁波によって築かれたとって過言でない。こうした電磁波の利用機器・装置が巷に溢れるにしたがい放射電磁波の人体影響が懸念され、人体に対する電波の安全基準が世界各国において策定・構築されるようになった<sup>1,2)</sup>。わが国においても1990年6月に「電波利用における人体の電波防護指針」に関する答申書<sup>3)</sup>が電気通信技術審議会から郵政省へ初めて提出され、1997年4月には携帯電話等の移動体端末に対する「電波利用における人体防護の在り方」が新たに答申された<sup>4)</sup>。このような電磁波の人体に対する安全基準や防護指針は、通常、周波数が数kHzから数百GHzに及ぶ無線周波のいわゆる電波だけを対象としているが、直流または送電線のような商用周波の電界あるいは磁界による人体影響や、ときにはエックス線やガンマ線などの放射線影響までを電波のそれと混同して議論される例がみられる。また、極めて微弱な無線

電波がヒトに有害な蓄積影響を与えるのではないか、などといった杞憂の論議も呼んだりしている。

電磁波のバイオエフェクト (biological effect)<sup>5,6)</sup>には薬効と同じくプラス面とマイナス面とを併せもつが、これら両面の効果を適切に制御・運用するにはバイオエフェクトを引き起こす電磁波の基本的な物理作用を正しく知ることが必要である。

本稿は、電磁波の理学療法の適用についての解説が理想ではあるが、筆者は理学療法の専門家ではないので、電磁波が引き起こす生体刺激効果の電磁気学的解説を目的として、標題の内容を次の順序で述べる。まず、電気量の定義と諸単位を説明した後、電磁波とは何かを述べ、今話題となっている電磁界・電波(非電離線)と放射線(電離線)とでは人体に及ぼす物理作用が全く異質であることを示す。つぎに、電波の何が生体反応の刺激になるかに焦点を絞り、この観点から、電波のバイオエフェクトに対する作用因子と尺度とを述べ、世界各国において制定されている電波安全基準の共通の考え方を解説する。最後に電磁波のもつ生体刺激効果の医療面における応用例を紹介する。

### 電磁界の定義と単位

#### 1. 電界とは

電荷を帯びた物体(帯電体)の近くでは他の電荷に力(クーロン力)を働かせる作用があり、このような作用をもつ空間を「電界」という。「単位正電荷1C(クーロン)に働く力の大きさ」を「電界の強さ」または「電界強度」と呼んでいる。単位は[N/C](ニュートン/クーロン)であるが、電気工学の分野

---

名古屋工業大学工学部電気情報工学科  
(〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

Osamu FUJIWARA, Ph.D : Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology

では[V/m](ボルト/メートル)に換算された単位が使われる。導体内では電界の代わりに「電流密度」が使われる。電流密度とは、単位面積あたりの電流をいい、単位は[A/m<sup>2</sup>](アンペア/平方メートル)である。導体内の電界を  $E$ 、電流密度を  $J$  とすれば、両者の間には

$$J = \sigma E \quad (1)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 $\sigma$  は導体の導電率とよばれ、単位は[S/m](ジーメンズ/メートル)である。上式から、同じ電界でも  $\sigma$  が大きい導体ほど電流が流れやすいことがわかる。生体も導体の一種であるので、生体が電界に曝されると体内に侵入した電界によって生体内に電流が流れる。

2. 磁界とは

運動する電荷に対して電気的な力を及ぼす空間を「磁界」という。「単位正磁荷 1 Wb (ウエーバ) に働く力の大きさ」を「磁界の強さ」または「磁界強度」という。単位は[N/Wb](ニュートン/ウエーバ)であるが、電気工学の分野では[A/m](アンペア/メータ)に換算された単位が使われる。磁界強度の代わりに「磁束密度」を使うことも多い。磁束密度とは、単位面積あたりの磁束数(磁荷量)であり、単位は[Wb/m<sup>2</sup>]である。この単位はテスラ[T]とも呼ばれ、一万分の一テスラを1 Gauss[G]という。なお、磁束密度を  $B$ 、磁界強度を  $H$  とすれば、

$$B = \mu H \quad (2)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 $\mu$  は媒質の透磁率といい、単位は[H/m](ヘンリー/メートル)である。

真空中(≒空气中)または生体などの常磁性体では  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  [H/m] である。したがって、例えば空气中や生体内では、 $B=1 \mu T=10 \text{ mG}$  は  $H=(10/4\pi) \text{ A/m} \approx 0.8 \text{ A/m}$  であり、 $H=1 \text{ A/m}$  は  $B=(4\pi/10) \mu T \approx 1.26 \mu T=12.6 \text{ mG}$  に相当する。

電磁波の諸元とバイオエフェクト

1. 電磁波とバイオエフェクト

電界と磁界の振動が伝播する波動を「電磁波」という。この波動は波長  $\lambda$  [m]、周波数  $f$  [Hz](ヘルツ)、光量子エネルギー  $E$  [J](ジュール)、温度  $T$  [K](ケルビン)の四つのパラメータで特徴づけられ、それらの間には

$$\lambda = c/f, E=hf, T=E/k=hf/k \quad (3)$$

という関係式が成り立つ。ここに、 $c$  は波動速度で真空中では  $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 、 $h=6.626 \times 10^{-34} \text{ Js}$  はプランク定数、 $k=1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  はボルツマン定数である。上式から、周波数が高いほど波長が短くなって、光量子エネルギーや温度は増大することがわかる。

電磁波を周波数ごとの成分に分解したものを「スペクトル」というが、これを図1に示す。一般に、周波数が約3000 THz(テラヘルツ,  $1 \text{ THz}=10^{12} \text{ Hz}$ )より高い電磁波は電離放射線、それより低い電磁波は非電離放射線と慣例的に呼ばれている<sup>7)</sup>。この周波数は、波長では100 nm(ナノメートル,  $1 \text{ nm}=10^{-9} \text{ m}$ )、光量子エネルギーでは12.4 eV(電子ボルト,  $1 \text{ eV}=1.60 \times 10^{-19} \text{ J}$ )、温度では143,666°Cにそれぞれ対

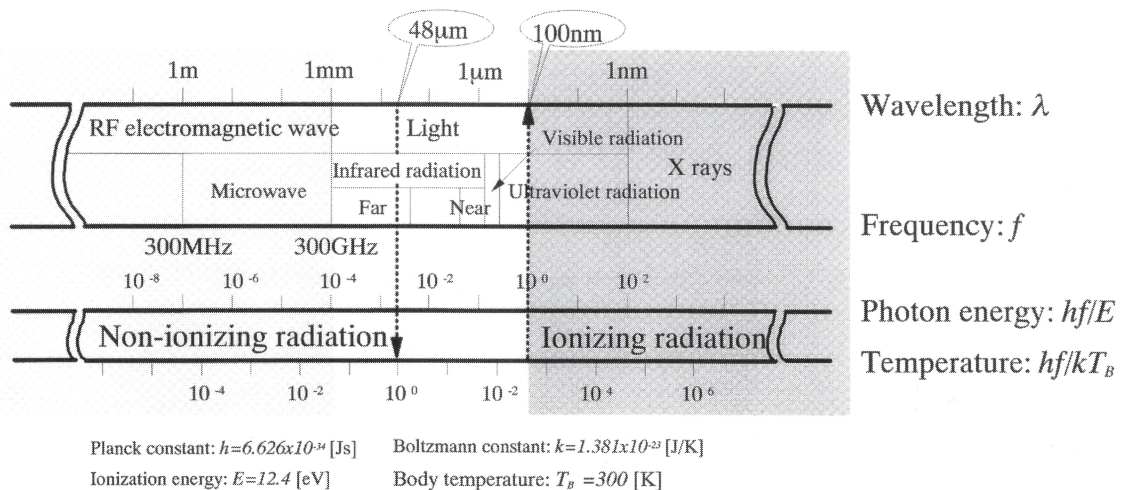


図1 電磁波のスペクトルと諸元

電離放射線とは温度が143,700°C以上の灼熱の電磁波を指し、電波とは零下260°C以下の極超低温の電磁波をいう。体温と同じ温もりの電磁波は波長48 μmの遠赤外線にあたる。

応する。電波とは周波数が300 GHz以下（波長では1 mm以上）の電磁波を指し、無線周波とも呼ばれる（わが国の電波法では3 THz以下の電磁波を電波と定義している）。光量子エネルギーでは $1.24 \times 10^{-3}$  eV以下の電磁波であり、温度では零下260℃より低い極超低温の電磁波になる。なお、体温（37℃）と同じぬくもりの電磁波は波長46  $\mu$ mの遠赤外線にあたる。

一般に人体が電磁波を浴びて体内に誘導された電磁界が引き起こす生物学的反応を「バイオエフェクト(bioeffect)」という。界成分の作用は周波数によって大きく異なる。これらの界成分は体内においてはそれぞれ①電離②光③電流がバイオエフェクトの支配的な作用因子となる。①はX線や遠紫外線などの電離放射線において強く現れる作用で、生体組織を構成する分子や原子の破壊をもたらす。②は非電離放射線の紫外線や赤外線的作用で、紫外線では化学作用、可視光線・赤外線では共鳴振動の刺激作用がそれぞれ優勢に働く。紫外線の殺菌効果、視細胞や温受容細胞の興奮による視覚や温覚は②の作用の結果として生ずる。③は体内の電磁界による誘導作用をいうが、周波数に応じて発熱か刺激の作用に分かれる。一般には、周波数「100 kHz」以上でジュール損に基づく発熱作用、それ以下の周波数では電流の直接的な刺激作用が優勢に働くとされる<sup>9)</sup>。体温の上昇や神経細胞・感覚器の興奮などはいずれも電流作用の結果として生ずる。欧米やわが国における電波の安全基準は③に基づいて構築されている。

## 2. 電波の発熱作用とバイオエフェクトの尺度

### (1)電波の強さ

電波の強さは電界または磁界の大きさを表すが、放送アンテナから遠く離れた空間を伝播する電波の強さに対しては「電力密度」で表す場合が多い。このような電波は「平面波」と呼ばれ、伝播する電界または磁界を「遠方界」という。さて、電力密度とは、単位面積あたりの電波が運ぶ電磁界の電力をいい、単位は[W/m<sup>2</sup>]（ワット/平方メートル）である。一般に、平面波の電界の大きさを $E$ 、磁界のそれを $H$ 、電力密度を $S$ とすれば、これらの間には

$$S = E \times H / 2 = E^2 / 2Z = Z \times H^2 / 2 \quad (4)$$

という関係式が成り立つ。ここで、 $Z$ は空間の固有インピーダンスといい、空気中では $Z \doteq 120 \pi \doteq 377 \Omega$ である。例えば、電力密度 $S$ が1 mW/cm<sup>2</sup>(=10 W/m<sup>2</sup>)の電波とは、電界強度 $E$ が $E = \sqrt{S \times 2Z} \doteq 86.8$  V/m（実効値では61.4 V/m）、磁界強度 $H$ が $H = \sqrt{2S/Z} \doteq 0.230$  A/m（実効値では0.163 A/m）の電波をいう。なお、携

帯電話の発する電波はアンテナの近くでは平面波ではなく、上式は成り立たない。この場合の電波の強さは電力密度ではなく電界または磁界の大きさを表す。これらの電磁界は、遠方界に対して「近傍界」と呼ばれる。

### (2)発熱作用

電波の発熱作用は体温を上昇させることで熱ストレスによるバイオエフェクトを起こすとされるが、これと電波のパラメータとの関係は単純でない。人体は電気的には複雑な複合損失誘電体であるため、電波の強さ、周波数や偏波などで体内の発熱分布が大きく変わってしまうからである。バイオエフェクトを引き起こす発熱量の閾値がわかれば、これを超えない電波のパラメータは逆に決定できる。ラットなどの小動物を用いた電波の照射実験によると、全吸収エネルギーの時間率（全吸収電力）を全身にわたって平均した値が体重1 kgあたり「4～8 W」という狭い範囲で可逆的な行動分裂が生じたという<sup>9)</sup>。しかも、この値は、電波の周波数や偏波、実験小動物の種に依存しないことが確認されている。米国規格協会（ANSI: American National Standards Institute）やわが国の電波の安全基準は発熱量の上述した閾値がヒトに対しても適用できるものとして構築されている。この根拠を科学的に立証することは困難であるが、ほ乳動物の代謝量を発熱量の観点から種別に比較すれば、電波安全基準の考え方が妥当なものであることが理解できる。いろいろな動物の体重あたりの基礎代謝率（BMR: basal metabolic rate）を「W/kg」という単位で表し、これと体重との関係を示すと図2のようになる<sup>9)</sup>。但し、ヒト以外の動物のBMRは安静時の代謝率に代えている。BMRとは生命の維持だけに必要な最低のエネルギー代謝をいうが、体重あたりのBMRと体重との関係は両対数グラフでは種によらずほぼ直線上に並び、体重が重い動物ほどBMRは低くなる。例えば、0.5 kg以下の小動物のBMRは4 W/kg以上であるのに、乳・幼児から成人を含む10～70 kgのヒトでは1～3 W/kgの範囲にある。ヒトの電波による発熱量がBMRの何倍まで許せるかは熱調節機能に強く依存する。しかしながら、少なくともBMRと同じ程度の発熱量が体内で生ずれば自然の状態になく、バイオエフェクトの発現確率は高まる。

### (3)SARとは

電波による発熱量は生体内への侵入電界で誘起された電流のジュール損で表され、これは電波の吸収電力に相当する。生体内の侵入電界を $E$ 、誘起電流密度を $J$ 、生体組織の導電率を $\sigma$ とすれば、単位体積あ

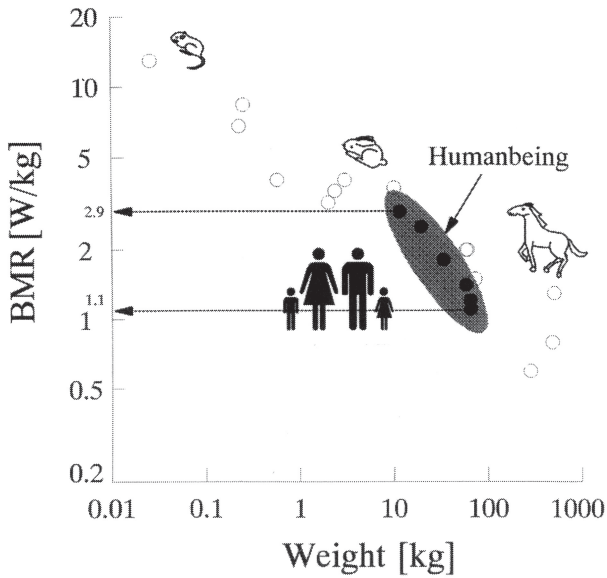


図2 種々の動物の体重当たりの基礎代謝量と体重との関係

体重当たりの基礎代謝量と体重との関係は両対数グラフの直線上に乗る。

たりのジュール損は  $F/2 \sigma (= \sigma E^2/2)[W/m^3]$  で与えられ、これを単位体重あたりに換算した物理量が「SAR (specific absorption rate: 比吸収率)」と呼ばれる。単位は  $[W/kg]$  である。したがって、生体組織の密度を  $\rho$  とすれば、SAR は

$$SAR = F^2 / \sigma \rho = \sigma E^2 / 2 \rho \quad (5)$$

と表される。体重  $W[kg]$  のヒトの全身平均 SAR については、これを  $\langle SAR \rangle$  と記せば、体重  $dm[kg]$  あたりの電波の吸収電力が  $SAR \times dm[W]$  となるので、

$$\langle SAR \rangle = \frac{1}{W} \int_{Whole-body} SAR \times dm \quad (6)$$

で与えられる。組織  $\Delta m$  グラム当たりの局所的な SAR は、これを  $SAR_{\Delta m}$  と記せば、

$$SAR_{\Delta m} = \frac{1}{\Delta m} \int_{\Delta m} SAR \times dm \quad (7)$$

となる。全身平均 SAR と局所 SAR は、電波の発熱作用によるバイオエフェクトの評価尺度として用いられている。

(4)安全基準の考え方

電波のバイオエフェクトは全身平均 SAR の一定レベルを超えると現れ、その程度が SAR の全身平均値に並行するとの考えは、電離放射線に対する急性効果 (非確率的影響) のそれに類似し、微弱電波の人体

に及ぼす晩発効果 (確率的影響) はないという仮説に基づく。この仮説は非電離放射線の電波に対しては合理的と認識され、人体に対するバイオエフェクトの閾値としては全身平均 SAR が ANSI では  $4 \sim 8 W/kg$ 、米国環境保護庁 (EPA: United State Environmental Protection Agency) では  $1 \sim 2 W/kg$  と見積もられ、同閾値の 10 倍または 2.5 倍の安全率を見越した「 $0.4 W/kg$ 」が世界各国における電波安全基準の指針値として確立されたものとなっている<sup>1,3)</sup>。この値を超えない電波の強さが安全基準となるが、SAR は電波源、周波数や偏波、人体のサイズなどによって大きく変わる。それ故に、平面波を全身に対して浴びたときを最悪ケースとし、この場合の SAR 指針値を超えない電波レベルを基準値としている。

図3は  $1 mW/cm^2 (= 10 W/m^2)$  の強さの平面波に対する人体の全身平均 SAR 値<sup>9,10)</sup> が周波数に応じてどのように変わるかを示している。図の実線は人体ブロックモデルの計算値である。電波の強さが同じでも周波数や身長的高低に応じて SAR が著しく変わっているが、いずれもピーク値は  $0.4 W/kg$  を超えていない。一般に、自由空間においては電界と身長方向とが平行で身長の半波長に相当した周波数の電波が最も吸収されやすく、SAR も最大となる。グラウンド面上の人体では身長の  $1/4$  波長の周波数で SAR は最大となり、このときの値は自由空間の場合の倍近くにもなる。結局、乳・幼児から成人までの人体に対しては同じ強さの電波でも周波数  $30 \sim 300 MHz$  の範囲 (図中の網掛け領域) で SAR が極大になるので、世界各国の安全基準ではこの周波数帯の電波レベルを最も厳しく抑えている。

なお、携帯電話などの低電力電波放射機器に関しては、アンテナ近傍の電磁界レベルが指針値を超えても全身平均 SAR は上述の「 $0.4 W/kg$ 」を大幅に下回ることが知られているので、以前にはその適用を特別措置として除外している場合が多かった。しかしながら、移動体通信技術の飛躍的な発達と携帯電話の爆発的な普及でアンテナ近傍界の人体影響が懸念され、今日では無線周波の電波を利用する小型端末機に対しては局所的な組織での SAR 指針値が決められている。例えば式 (7) において、米国指針では  $\Delta m = 1 g$  のとき  $1.6 W/kg$ 、欧州・日本では  $\Delta m = 10 g$  で  $2 W/kg$  がそれぞれ局所 SAR の指針値として採用されている<sup>2,4,11)</sup>。

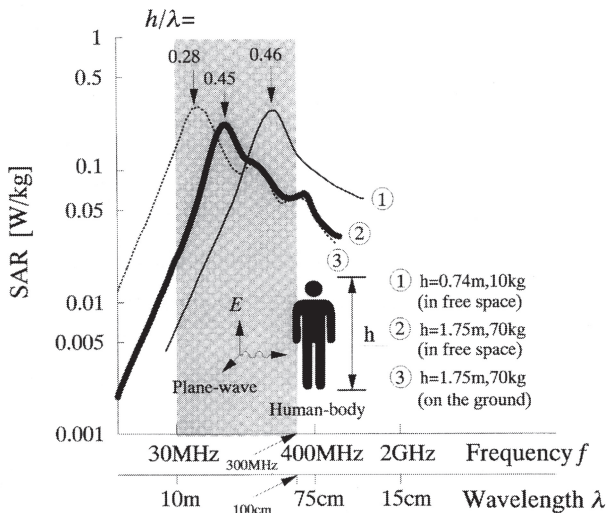


図3 1mW/cm<sup>2</sup>の平面波による人体の全身平均 SAR の周波数依存性

同じ強さの電波でも周波数や身長的高低で全身に吸収される平均の電磁界電力量は著しく異なる。

## 電磁波の医療応用

電気メスや放射線治療等に代表されるように、電磁波を使った医療は臨床面で既に活用されているが、ここでは出力レベルの比較的低い電磁波の医療応用として、ハイパーミアと低出力レーザーについて簡単に述べる<sup>12)</sup>。

### 1. ハイパーミア

高周波電磁界や電波の発熱効果を医療分野に応用した代表例には温熱療法があり、「ハイパーミア (Hyperthermia)」と呼ばれる。これは、がん細胞が正常細胞に比べて熱に弱いことを利用する温熱療法の一種で、今世紀前半においてがんの治療法として既に知られていたが、近年の電波利用技術の発達に伴い電波加温によるハイパーミアが見直され、それに関する研究が医学・工学の両分野において盛んに行われるようになった。加温原理は体内誘起電流の発熱作用に基づく。即ち、人体は一種の損失誘電体 (常磁性) とみなすことができるので、電磁界を用いる生体加温も結局は体内誘起電流のジュール熱に基づく。体内電流は①高周波電界②高周波磁界③電磁波により誘起でき、人体加温はこれらの誘起法に応じて、①誘電加温 (Capacitive heating), ②誘導加温 (Inductive heating), ③電波加温 (Electromagnetic heating) に大別される。①は、加温部位を平板電極間に配置し、この間に 13.56 MHz, 27.17 MHz の高周波

電圧をかけて加温するもので、ジアテルミーとして臨床で広く用いられている。②は、加温部位をソレノイドコイル内またはコイル下に配置し、コイルに①と同程度の高周波電流を流すことによって加温するもので、やはりジアテルミーの一方式として用いられている。③は、電波を用いて①と②とを同時に実行するものである。ハイパーミアを目的とした高周波電磁界による人体加温は、非観血無侵襲であること、がん部位を急速加温できること、温度制御が容易であること、などの点からきわめて優れた治療技術とされ、表在性のがんについては臨床で既に活発に使用され成果をあげている。

### 2. 低出力レーザー

レーザーを用いたハイテク治療法は高出力レーザー光の熱作用と集束性を積極的に利用するものであるが、近年は低出力の弱いレーザー光のもつ生体刺激作用を活用した新しいレーザー治療法が注目を浴び、最近の半導体レーザー技術の発達・普及と相まって、その臨床的研究が極めて盛んに行なわれるようになった。低出力レーザー光の発揮する治療効果は創傷の治癒促進と鎮痛・消炎に大別されるが、これらの発現機序はいずれも解明されていない。現時点においては、創傷の治癒促進はレーザー光が特定の酵素の活性を高めコラーゲン繊維の新生を活発化させる結果として生ずるとし、鎮痛や消炎については自律神経への刺激が血行を促進させることで治療効果が発現されるとしている。しかしながら、これらの仮説は推測の域を脱せず、弱いレーザー光の何がどのような生体細胞を刺激するかについてはほとんど何もわかっていない。ここでは、低出力レーザー光のバイオエフェクトを引き起こすであろう刺激作用についてだけ述べる。

一般にレーザー光の生体に対する刺激作用は定性的には①光作用②電磁界作用③熱作用④圧力作用とに分けて説明されている。低エネルギーのレーザー治療は照射ビームの平均出力が数百  $\mu$  W から数十 mW の微弱なレーザー光を用いるので、この場合の刺激作用としては②③は考えにくく、①④が有力となろう。例えば、レーザー鍼をパルスモードで使用するには尖頭出力は数 W にも達するが、この程度でも②の影響は小さいとしてよく、また、その場合の臨床例によれば照射部位には熱感を伴わずに機械的刺激感覚を生ずるといふ。このことはパルスモードのレーザー鍼では④が優勢に働いているように思わせるが、連続モードのレーザー鍼では照射直後しか圧力が生じないので、圧力作用だけで生体細胞の活性や治療の発現

効果を説明することはできない。故に、低出力レーザー光の生体刺激効果は①が支配的に働く結果として生ずるものと思われる。

①の光作用は光子の粒子的振る舞いによって生ずる。一般に、レーザー光は近赤外・可視域から紫外域に渡る位相の揃った光波で、その波長は数 $\mu$ mから数百nmの範囲にある。故に、光量子エネルギーは10分の数eVから数eV(37℃の体温に相当する熱エネルギーは約0.03eVであるので、これの数十倍から百数倍にも相当)に達し、蛋白質などの生体高分子の結合エネルギー(水素結合:約0.03eV;炭素原子間:約4eV)に匹敵する。それ故、上述の波長帯の光波であればレーザー光でなくても生体細胞を共鳴振動させ、それによって種々の生理的応答を引き起こす。例えば、赤外線は温受容細胞、可視光線では視細胞をそれぞれ興奮させる結果として温覚や視覚が生ずるのである。一方、こうした通常の光波は創傷などの患部組織に対しては何の効果も発現せず、治療効果にはレーザー光に固有なコヒーレンスが大きく関与しているものと推察される。ちなみに、500~3000nmの広帯域ランプ光や発光ダイオード光でも直線偏光成分でヒトの難治性潰瘍に対して治療効果が得られたという事実は刺激の作用因子としては波長よりも偏光が重要であることを示唆している。しかしながら、偏光による刺激の発現機序は依然不明のままである。レーザー光の生体に対する光作用の機序を解明し、低出力レーザーの有効な治療法を確立することが今後の研究に期待される。

## 結 言

電磁波が引き起こすバイオエフェクトの電磁気学的解説を目的として、電磁波の基本的性質と生体刺激効果を述べ、併せて電磁波の医療面での応用例を紹介した。

非電離線としての電波の人体影響に関しては、誘導電流の発熱作用に基づく急性効果が主流であり、影響度は閾値を超えた曝露界のレベルに並行するとの考えが世界の共通認識に達していることを述べた。なお、この種の急性効果は人体の健康にとってプラスかマイナスかさえも不明であるにも拘わらず、安全性の観点からは有害性だけが暗示される傾向にある。また、人体の影響発現が閾値以下の曝露界のレベルに依存するといった晩発効果の存在は未だみだされていないにも拘わらず、微弱電波の蓄積効果や無害性を立証する研究が現在でも続けられようとしている。非電離線スペクトルの電磁界や電波によ

る生体刺激効果を健康や治療面へ積極的に生かす研究こそ推進すべきであり、また期待されるべきと考ええる。

## 文 献

- 1) 例えば, Gandhi, OM P., Editor, "Biological effects and medical applications of electromagnetic energy", Prentice Hall, pp.10-24, pp.29-44, 1990..
- 2) American National Standards Institute, "American National Standard Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz", ANSI C95.1-1991.
- 3) 郵政省電気通信技術審議会答申, 諮問第38号「電波利用における人体の防護指針」, 1990.
- 4) 郵政省電気通信技術審議会答申, 諮問第89号「電波利用における人体防護の在り方」, 1997.
- 5) 雨宮好文, "高周波電磁界の生体影響と防護基準", 信学誌, 78, 5, pp.466-475, 1995.
- 6) 藤原修, "電磁波のバイオエフェクト", 電子情報通信学会誌, 75, 5, pp.519-522, 1992.
- 7) 森山節二(訳), "無線周波数及びマイクロウェーブの生体・環境構築基準と安全対策", ニューテクノロジーアンドサイエンス, pp.19-20, pp.40-44, 1984.
- 8) 斉藤正男, "電磁界の生体への影響", テレビジョン学会誌, 42, 9, pp.945-950, 1988.
- 9) 例えば, Gandhi OM P.: "Biological effects and medical applications of RF electromagnetic fields", IEEE Trans.on Microwave Theory and Techniques, MTT-30, 11, pp.1831-1847, 1982.
- 10) 赤尾保男: "環境電磁工学の基礎", 電子情報通信学会, pp.145-160, 1991.
- 11) International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, "ICNIRP statement - Health issues related to the use of hand-held radiotelephones and base transmitters", Health Physics, vol.70, 4, pp.587-593, 1996.
- 12) 電気学会, 高周波電磁界の生体効果に関する計測技術調査専門委員会編: "電磁界の生体効果と計測", コロナ社, pp.212-236, 1995.

# Fundamental Properties and Biological Stimulation Effects of Electromagnetic Waves

Osamu FUJIWARA

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology

**Abstract:** With the rapid development and the increase of electronic devices utilizing electromagnetic waves, public concerns regarding potential health hazards due to the absorption of electromagnetic energy have been growing. In this article, the fundamental properties of electromagnetic waves are reviewed from the standpoint of their resultant biological stimulation effects. The thermal effects due to RF (radio-frequency) electromagnetic fields and their basic idea for safety standards are described in conjunction with SARs (specific absorption rate) being used as bioeffect evaluation measures. Also the clinical applications for using the biological stimulation effects of electromagnetic waves are briefly reviewed.

**key words:** electromagnetic waves, biological stimulation effects, thermal effect, specific absorption rate, clinical application.



原 著

## 廃用性萎縮筋の機能回復に対する等尺性収縮運動の負荷量の影響

中野 治郎<sup>1)</sup>, 沖田 実<sup>2)</sup>, 吉村 俊朗<sup>3)</sup>, 辻畑 光宏<sup>1)</sup>

### 緒 言

临床上、長期間の臥床やギブス、装具などによる関節の不動化によって廃用性筋萎縮が発生する。そして、この廃用性筋萎縮に基づく筋力低下は種々の疾病によって生じた機能・能力障害をより悪化させる結果となる。したがって、廃用性筋萎縮の発生を予防、治療することは、理学療法においても重要な課題であり、特に高齢化が進展している今日では極めて重要なものとなっている。

先行研究では、廃用性筋萎縮の発生過程において荷重刺激<sup>1)</sup>や骨格筋への他動的<sup>2)</sup>あるいは持続的伸張運動<sup>3)</sup>を加えると、萎縮予防効果が期待できると報告されている。しかしながら、実際の臨床では廃用性筋萎縮が進行した状態から理学療法を実施することも少なくなく、効果的な治療法の確立も要求されている。現に廃用性萎縮筋に対する運動負荷によって筋損傷などの過用症候群が生じることも報告

されており<sup>4,5)</sup>、治療にあたっては運動負荷量や運動様式などにも注意が必要となる。しかし、どの程度の運動負荷量によって過用性の廃用性筋損傷を招くかは明らかにされていないのが現状である。そこで本研究では、マウスの骨格筋に発生させた廃用性萎縮筋に対して異なる負荷量の等尺性収縮運動を行い、骨格筋におよぼす影響を組織病理学的に検討したので報告する。

### 対 象 と 方 法

#### 1. 対象

##### 1) 実験1.

本実験は、等尺性収縮運動の負荷量の違いが正常なマウス骨格筋におよぼす影響を検索するために行った。実験動物には10週齢のC57BL/10ScN雄マウス12匹を用い、それらを4匹ずつ1) 対照群、2) 体重の50%の重錘を尾部につけ、等尺性収縮運動を負荷した群(以下、E50群)、3) 体重の100%の重錘を尾部につけ、等尺性収縮運動を負荷した群(以下、E100群)に振り分けた。また、E50群、E100群は運動負荷以外の時間は通常飼育とし、各群すべて餌と水は自由に摂取させた。

##### 2) 実験2.

本実験は、廃用性萎縮筋の機能回復に対する等尺性収縮運動の負荷量の影響を検索するために行った。実験動物には、8週齢のC57BL/10ScN雄マウス25匹を用い、それらを5匹ずつ1) 対照群、2) 後肢懸垂を2週間実施した群(以下、HS群)、3) HS後、2週間、通常飼育の群(以下、HS-NE群)、4) HS後、2週間、体重の50%の重錘を尾部につけ、等尺性収縮運動を負荷した群(以下、HS-E50群)、5) HS後、2

- 
- 1) 長崎北病院リハビリテーション科  
(〒852-8061 長崎市滑石5丁目4-61)  
Jiro Nakano, PT, Mitsuhiro Tsujihata, MD: Department of Rehabilitation, Nagasaki-KITA Hospital
- 2) 長崎大学医療技術短期大学部理学療法学科  
Minoru Okita, PT: Department of Physical Therapy, School of Allied Medical Science, Nagasaki University
- 3) 長崎大学医療技術短期大学部作業療法学科  
Toshiro Yoshimura, MD: Department of Occupational Therapy, School of Allied Medical Science, Nagasaki University  
(受付日 1998年6月15日/受理日1998年12月5日)

週間、体重の100%の重錘を尾部につけ、等尺性収縮運動を負荷した群(以下、HS-E100群)に振り分けた。また、HS-E50群、HS-E100群は運動負荷以外の時間は通常飼育とし、各群すべて餌と水は自由に摂取させた。

なお、今回の実験は長崎大学が定める動物実験指針に従った<sup>6)</sup>。

## 2. 等尺性収縮運動の方法

実験1ならびに実験2で用いた等尺性収縮運動は、Exner<sup>7)</sup>の方法に基づき、80°に傾斜した金網にマウスを静止・維持させることにより行った。1回当たりの実施時間は10分間で、これを週5回、2週間継続して行った。また、この等尺性収縮運動は、足関節筋群に対してトレーニング効果が期待できることが報告されており<sup>7,8)</sup>、マウスの尾部につける重錘により容易に運動負荷量が変われるという利点がある。

## 3. 光学顕微鏡による検索

実験終了後は、マウスをエーテル麻酔し、長趾伸筋とヒラメ筋を摘出した。筋は液体窒素で冷却したイソペンタン液中で凍結し、クラリオスタットを用いてこの試料の10 μm厚の横断切片を作製した。そして、ヘマトキシリン・エオジン染色を施し、光学顕微鏡にて検鏡した。

## 4. 定量解析

実験1においては、1筋あたり250本、延べ1000本の筋線維直径を計測し、さらにこの1000本の筋線維に対する中心核線維ならびにfiber splittingの割合を算出した。実験2においては、全筋線維の筋線維直径を計測し、全筋線維数に対する中心核線維ならびにfiber splittingの割合を算出した。なお、中心核線維とは筋線維が壊死した後の再生した筋線維を示すもので<sup>9)</sup>、fiber splittingとは筋線維が分裂することで<sup>10,11)</sup>、今回は筋線維の分割が進行しつつあるもののみを検索対象とした。

統計処理には一元配置分散分析(以下、ANOVA)とχ<sup>2</sup>検定を用い、ANOVAにて有意差を認められた場合は多重比較法としてScheffeの方法を適用し、2群間の差の検定を行った。また、すべての統計手法とも有意水準は5%未満とした。

## 結 果

### 1. 実験1(表1, 2)

#### 1) 長趾伸筋

表1 実験1—平均筋線維直径の比較—

groups	n	長趾伸筋(μm)	ヒラメ筋(μm)
対照群	1000	41.3±11.4	39.3±7.9
E50群	1000	40.6±12.3	40.6±8.9 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>: 対照群との有意差(p<0.01). <sup>b</sup>: E50群との有意差(p<0.01)

表2 実験1—病理学的所見の比較—

muscle	groups	n	中心核線維(%)	fiber splitting(%)
長趾伸筋	E50群	1000	9(0.9%)	5(0.5%)
	E100群	1000	9(0.9%)	3(0.3%)
ヒラメ筋	対照群	1000	7(0.7%)	7(0.7%)
	E50群	1000	8(0.8%)	6(0.6%)
	E100	1000	5(0.5%)	4(0.4%)

対照群、E50群の平均筋線維直径はそれぞれ41.3±11.4 μm、40.6±12.3 μmであり、この2群間に有意差は認められなかった。一方、E100群の平均筋線維直径は44.1±12.8 μmであり、対照群ならびにE50群より有意に大きかった。中心核線維ならびにfiber splittingの出現頻度は3群間に有意差は認められなかった。

#### 2) ヒラメ筋

対照群の平均筋線維直径は39.3±7.9 μmであるのに対し、E50群、E100群の平均筋線維直径はそれぞれ40.6±8.9 μm、40.8±8.0 μmであり、両群とも対照群より有意に大きかった。しかし、E50群とE100群には有意差は認められなかった。中心核線維ならびにfiber splittingの出現頻度は3群間に有意差は認められなかった。

## 2. 実験2(表3, 4)

### 1) 長趾伸筋

対照群の平均筋線維直径は38.1±11.5 μmであるのに対し、HS群は34.8±10.2 μmと対照群の約91%に縮小し、有意差が認められた。しかし、中心核線維の割合やfiber splittingの割合は対照群とHS群での有意差はなかった。次に、HS-NE群、HS-E50群、HS-E100群の平均筋線維直径はそれぞれ37.1±10.4 μm、38.9±11.7 μm、38.7±12.0 μmであり、3群ともHS群より有意に大きかった。また、HS-NE群に比べHS-E50群、HS-E100群の平均筋線維直径は有意に大きかったが、HS-E50群とHS-E100群の間には有意差

表3 実験2—平均筋線維直径の比較—

groups	n	長趾伸筋 (μm)	n	ヒラメ筋 (μm)
HS群	3790	34.8±10.2 <sup>a</sup>	3391	29.7±9.1 <sup>a</sup>
HS-NE	3619	37.1 10.4 <sup>a, b</sup>	3109	35.4 9.7 <sup>a, b</sup>
HS-E50群	3382	38.9±11.7 <sup>b, d</sup>	3047	37.0±8.8 <sup>a, b, c</sup>
HS-E100群	3393	38.7±12.0 <sup>b, d</sup>	3717	35.5±9.3 <sup>a, b, d</sup>

<sup>a</sup>; 対照群との有意差(p<0.01), <sup>b</sup>; HS群との有意差(p<0.01)  
<sup>c</sup>; HS-NE群との有意差(p<0.01), <sup>d</sup>; HS-E50群との有意差(p<0.01)

表4 実験2—病理学的所見の比較—

muscle	groups	n	中心核線維 (%)	fiber splitting (%)
長趾伸筋		2849	20 (0.7%)	12 (0.4%)
	HS群	3790	26 (0.7%)	12 (0.3%)
	HS-NE群	3619	26 (0.7%)	14 (0.4%)
	HS-E50群	3382	30 (0.9%)	11 (0.3%)
	HS-E100群	3393	43 (1.3%) <sup>**</sup>	32 (0.9%) <sup>**</sup>
	対照群	2230	11 (0.5%)	11 (0.5%)
	HS群	3391	23 (0.7%)	23 (0.7%)
		3109	23 (0.8%)	21 (0.7%)
	HS-E50群	3047	33 (1.1%)	20 (0.7%)

対照群との有意差; <sup>\*\*</sup>(p<0.05)

は認められなかった。さらに、HS-E100群の中心核線維ならびにfiber splittingの割合は対照群と比較して有意に多かった。

2) ヒラメ筋

対照群の平均筋線維直径は39.0±8.2 μmであるのに対し、HS群は29.7±9.1 μmと対照群の約76%に縮小し、有意差が認められた。しかし、中心核線維割合やfiber splittingの割合は対照群とHS群で有意差は認められなかった。次に、HS-NE群、HS-E50群、HS-E100群の平均筋線維直径はそれぞれ35.4±9.7 μm、37.0±8.8 μm、35.5±9.3 μmであり、3群ともHS群より有意に大きかった。また、HS-E50群の平均筋線維直径はHS-NE群、HS-E100群より有意に大きかったが、HS-NE群とHS-E100群には有意差はなかった。さらに、HS-E100群の中心核線維割合ならびにfiber splittingの割合は対照群と比較して有意に多かった。

考 察

従来より、廃用性筋萎縮の実験モデルとしては関節固定法、腱切断法、space flight法ならびにHS法<sup>12, 13)</sup>などが用いられ、廃用性筋萎縮の発生メカニズムについて検索されている<sup>4, 14-16)</sup>。その中で、HS法は、

廃用性筋萎縮の発生だけでなく骨代謝、水分代謝、体液電解質組成の点から見ても、ヒトの長期臥床の状態に類似した実験モデルであると報告されている<sup>17)</sup>。また、HS法の期間としては様々な報告があるが、本研究では石原ら<sup>18)</sup>の報告を参考にして2週間と設定した。その結果、対照群の平均筋線維直径に比べ長趾伸筋は約91%、ヒラメ筋は約76%に縮小し、両筋ともに廃用性筋萎縮の発生が認められ、特にヒラメ筋において著明であった。大平ら<sup>19)</sup>によると廃用性筋萎縮の発生は、速筋線維より遅筋線維の方が著しいと報告しており、主に遅筋線維によって構成されているヒラメ筋の方が、速筋線維を主とする長趾伸筋より筋萎縮の発生が著しかったのではないかと考えられる。また、吉永ら<sup>14)</sup>は、マウスの足関節はHSの間底屈位となり、ヒラメ筋などの足関節伸筋群は短縮位を呈し、張力発揮は非常に少ない状態となるが、長趾伸筋は重力により他動的に伸張され、ある程度の張力が維持されると報告している。したがって、このこともヒラメ筋に筋萎縮の発生が著しかった原因と考えられる。一方、病理学的所見については、長趾伸筋、ヒラメ筋ともに中心核線維やfiber splittingの割合はHS群と対照群で有意差はなかった。そして、灰田ら<sup>4)</sup>もHSを行ったマウスの骨格筋には病理学的所見の異常は認められなかったと報告しており、これは今回の結果と一致している。

次に、HS-NE群の平均筋線維直径は、長趾伸筋、ヒラメ筋ともにHS群より有意に大きく、中心核線維やfiber splittingの割合は対照群と有意差はなかった。したがって、これは飼育ゲージ内でのマウスの随意的行動による自然回復と考えられるが、正常なマウスは約20週齢まで体重が増加すると言われており<sup>20)</sup>、成長に伴う筋線維肥大も含まれていると考えられる。また、自然回復において筋線維の壊死や分裂は起こらなかったといえよう。一方、HS-E50群では長趾伸筋、ヒラメ筋ともにその平均筋線維直径はHS群ならびにHS-NE群より有意に大きかった。また、中心核線維やfiber splittingの割合は対照群と有意差はなかった。従来より、等尺性収縮運動は1日1回の実施でも筋力増強がみられるとされており<sup>21)</sup>、ジストロフィー筋においても筋線維肥大をもたらす有効なものであった<sup>22)</sup>。また、山内ら<sup>23)</sup>は本研究とほぼ同じ方法での等尺性収縮運動をラットの廃用性萎縮筋に行った結果、ヒラメ筋の最大張力の回復が助長されたと報告している。したがって、組織病理学的には、体重の50%の重錘を尾部につけて実施した等尺性収縮運動は、自然回復の場合よりも廃用性萎縮筋の機能回復に対して有効に作用し、負荷量としても適当

であったと考えられる。これに対し、HS-E100群の長趾伸筋の平均筋線維直径はHS-NE群と比較して大きいものの、HS-E50群とは有意差はなかった。さらに、ヒラメ筋の平均筋線維直径はHS-NE群と有意差はなく、HS-E50群より有意に小さかった。また、中心核線維や fiber splitting の割合も対照群と比べ有意に多かった。実験1の結果では、体重の100%の重錘を尾部につけて実施した等尺性収縮運動は、正常な筋線維に対して筋線維肥大をもたらす、組織病理学的にもなんら影響をおよぼさないことが確かめられた。しかしながら、HS-E100群では両筋ともに中心核線維は増加しており、これは壊死に陥った筋線維が増加したことを示唆している<sup>9)</sup>。したがって、100%の重錘を尾部につけて実施した等尺性収縮運動は廃用性萎縮筋に対しては、筋線維自体へのストレスが大きく、運動負荷量の許容範囲を越えていたのではないかと推測される<sup>5)</sup>。また fiber splitting の割合の増加も、運動負荷自体がストレスとなり、筋線維の分裂が生じるのではないかと考えられる<sup>11)</sup>。

以上のことから、廃用性萎縮筋は運動負荷量に対する許容範囲が小さいと考えられ、より強度な運動負荷を行ったほど筋線維肥大が得られるとは限らず、中心核線維や fiber splitting の出現を助長する可能性があるかと推測される。しかしながら、今回の結果のみからは廃用性萎縮筋の運動負荷に対する許容範囲を限定することはできず、今後は負荷量の設定を詳細にし、検討を加える必要がある。

## 文 献

- 1) 山崎俊明、灰田信英、立野勝彦：荷重がラット後肢筋の廃用性萎縮予防に及ぼす影響。理学療法学 22 (3) : 108-113, 1995.
- 2) Yamazaki T, Tachino K, Haida N, Musha S : Effect of Short Duration Stretching for Prevention of Disuse Muscle Atrophy in Mature Rats. J Japanese Physical Therapy Association 23 (6) : 349-354, 1996.
- 3) 山崎俊明、立野勝彦、灰田信英、田中正二：麻酔下における短時間筋伸張位保持がラットの廃用性萎縮予防に及ぼす効果。PTジャーナル 29 (2) : 135-138, 1995.
- 4) 灰田信英：廃用性筋萎縮の基礎科学。理学療法学 21 (2) : 94-97, 1994.
- 5) 伊藤晶生、春日規克：筋収縮時伸張にともなう筋線維の傷害発生—発育期の収縮特性と構造変化—。体力科学 39 : 324-330, 1990.
- 6) 長崎大学医学部附属動物実験施設：動物実験施設

利用の手引き。1995.

- 7) Exner GU, Staudte HW, Pette D: Isometric training of rat-effects upon fast and slow muscle and modification by an anabolic hormone (nandrolone decanoate). Pflugers Arch 345:1-14, 1973.
- 8) 山内秀樹、春日規克：ジャンプおよびアイソメトリックトレーニングに伴う骨格筋の機能変化：筋線維組成との関連。体育学研究 37 : 87-95, 1992.
- 9) 埜中征哉：臨床のための筋病理。日本医事新報社、pp36-39, 1993.
- 10) Swash M, Schwartz MS, Margaret KS : Pathogenesis of longitudinal splitting of muscle fiber in necrogenic disorders and in polymyositis. Neuropathol Appl Neurobiol 4 : 99-115, 1978.
- 11) Schmalbrunn H : Muscle fiber splitting and regeneration in diseased human muscle. Neuropathol Appl Neurobiol 2 : 3-19, 1976.
- 12) Musacchia XJ, Steffen JM, Deavers DR : Rathindlimb muscle response to suspension hypokinetic/hypodynamia. Aviat Space Environ Med 54 (11) : 1015-1020, 1983.
- 13) Steffen JM, Robb R, Dombrowski MJ, Musacchia XJ, Mandel AD, Sonnenfeld G : A suspension model for hypokinetic/hypodynamia and antiorthostatic response in the mouse. Aviat Space Environ Med 55 (7) : 612-616, 1984.
- 14) 吉永智雄、大原誠、田中隆人、大平充宣：抗重力活動の抑性に伴い筋はなぜ萎縮するか？ラット足関節背屈筋での検討。宇宙航空環境医学 33 : 151-159, 1996.
- 15) Templeton GH, Sweeney HL, Timson BF, Padalion M, Dudenhoefter GA : Change in fiber composition of soleus muscle during rat hindlimb suspension. J Appl Physiol 65 (3) : 1191-1195, 1998.
- 16) Steffen JM, Musacchia XJ : Disuse atrophy, plasma corticosterone, and muscle glucocorticoid receptor levels. Aviat Space Environ Med 58 (10) : 996-1000, 1987.
- 17) 灰田信英：運動療法の科学的基礎・1。PTジャーナル 23 (3) : 203-209, 1989.
- 18) Akihiko Ishihara, Yasuhara Oishi, Roy RR, Edgerton TR: Influence of two weeks non-weight bearing on rat soleus motoneurons and muscle fiber. Aviation, Space, and Environmental Medicine 68(5): 421-425, 1997.
- 19) Ohira Y, Jiang B, Roy RR, Oganov V, Ilyra-Kakueva EI, Marini JF, Edgerton VR : Rat soleus muscle fiber response to 14 days of spaceflight and hindlimb suspension. J Appl Physiol 73 : 51S-57S, 1992.

- 20) Christian P, Alain S : mdx mice show progressive weakness and muscle deterioration with age. J Neurolo Sci 129 : 97-105, 1995.
- 21) 岩倉博光、田口順子 : 理学療法士のための運動療法. 金原出版株式会社、pp64-70、1993.
- 22) 中野治郎、沖田実、吉村俊郎、東登志夫、加藤克知、田原弘幸、大木田治夫、辻畑光宏 : mdx マウスの後肢筋群に対する等尺性収縮運動の影響. 理学療法学 25 (2) : 86-92、1998.
- 23) 山内秀樹、米本恭三 : 廃用性萎縮に対する等尺性運動の効果と加齢の影響. リハ医学 34 : 46-51、1997.

## Effects of Isometric Exercise on Disuse Muscle Atrophy in Mice

Jiro NAKANO<sup>1)</sup>, Minoru OKITA<sup>2)</sup>, Toshiro YOSHIMURA<sup>3)</sup>,  
Mitsuhiro TSUJIHATA<sup>1)</sup>,

1) Department of Rehabilitation, Nagasaki-KITA Hospital

2) Department of Physical Therapy, School of Allied Medical Science, Nagasaki University

3) Department of Occupational Therapy, School of Allied Medical Science, Nagasaki University

**Abstract:** There are some reports on the effect of prevention by exercise for atrophic muscle fiber

in the normal mice. However, it is still unclear how much exercise would be beneficial for the atrophic muscle fibers. We therefore studied the effect of two types of isometric exercise on atrophic muscles after hindlimb suspension (HS). Twenty five male C57BL/10ScN mice (aged with 8 weeks) were used and divided randomly into five groups: control, the HS only (HS), non-exercise for 2 weeks after the HS (HS-NE), isometric exercise with a load equal to 50% of body weight after the HS (HS-E50), and isometric exercise with a load equal to the body weight after the HS (HS-E100). The HS was carried out for 2 weeks. The isometric exercise was done with stationary support on a grid at 80 with weights attached to the tail for 10 min/ day, 5 days/ week for 2 weeks. We obtained extensor digitorum longus (EDL) and soleus (SOL) muscles and stained these sections with hematoxylin-eosin. Quantitative assessment of the muscles including the diameter of muscle fibers, the rate of the internal nuclei fibers and splitting fibers. The fiber diameter of the EDL and SOL in the HS group was significantly small compared with control. The fiber diameter of both muscles in the HS-NE, the HS-E50 and the HS-E100 groups showed significantly hypertrophic compared with the HS group. However, there were no difference between the HS-E50 and the HS-E100 groups. The rate of the internal nuclei fibers and splitting fibers in the HS-E100 group increased compared to other groups. We found that strenuous exercise always would not bring muscle fiber hypertrophy, and it is possible that strenuous exercise would promote internal nuclei fibers and fiber splitting.

**key words:** atrophic muscle, isometric exercise, strength of exercise

原 著

## 神経学的徴候検査における歩行の定量解析

小塚 直樹<sup>1)</sup>・高橋 敏雄<sup>2)</sup>・高島 香苗<sup>3)</sup>・堀本 佳誉<sup>1)</sup>・辻村千鶴子<sup>1)</sup>  
小島 悟<sup>1)</sup>

### 緒 言

人間の運動発達は、生下時より存在する多くの無目的な不随意運動や原始反射から始まり、様々な運動経験を蓄積する中で体性感覚の統合と大脳などの中枢神経系のネットワーク化が進むにつれて、不要な反射運動が潜在化し、視性立ち直り反応や保護伸展反応に代表される合目的な高次反応と随意運動が顕在化する。粗大運動は生後1年間で臥位から立位へと発達し、身体の動的コントロールが可能となる一方、巧緻運動は5本の指を屈曲する原始的な把握から示指が母指と向き合う、いわゆるpinchへと移行していく。そして、学童期には粗大運動に関する体力、運動能力が発達し、一方、巧緻運動に関する器用さ、正確さ、速さなども著しく発達していく。これら運動の適切な組合せと粗大な全身運動から微細な局所運動への分化と独立は主として大脳制御によっ

てもたらされ、この能力はその後、数年かかって発達し習熟していく。この発達過程において、脳の成熟のわずかなずれ、あるいは遅れに基づいて出現する徴候を神経学的徴候 Soft Neurological Sign<sup>11), 15)</sup>という。

Soft Neurological Signの概念は、Bender<sup>4)</sup>が小児分裂病を対象とした研究に用いたのが最初である。運動の面からSoft Neurological Signを評価しようとする報告は1960年に入り散見される。Precht<sup>11), 12)</sup>は小児に観察される頸部、手指、目などの筋に出現するphasicな運動(choreiform movement)の特徴を指摘した。Garfield<sup>2)</sup>は一定の運動や姿勢を維持し得ないmotor impersistence testの意義を明らかにした。また、ぎこちなさ(clumsy)、発達期に出現する特有な連合反応(associated movement; 随伴運動)、共同運動障害(dyssynergia)を客観的に把握しようと試みた。Touwen<sup>16)</sup>は神経学的徴候検査を系統化し、検査所見を点数化して評価し、年齢による正常異常の判定基準を明らかにした。本邦では鈴木<sup>13-15)</sup>により改編され現在に至っている(表1)。

Soft Neurological Signの判定には常に年齢の考慮が必要であるが、この検査における各年齢の正常値が明らかでなく発達過程を把握しにくい、また associated movementについてもその出現契機や出現パターンが分類、検討されていない。

今回の研究目的は、TouwenとPrechtの神経学的検査中の歩行に関連した検査項目について、4~9歳の正常児の発達過程を歩行時の重心動揺により評価し、その際の associated movementのパターンおよび associated movementと歩行の関連性を検討することである。

- 
- 1) 札幌医科大学保健医療学部理学療法学科  
(〒060-8556 札幌市中央区南3条西17丁目)  
Naoki Kozuka, PT, Yoshitaka Horimoto, PT, Chizuko Tsujimura, PT, Satoru Kojima, PT: Department of Physical Therapy, School of Health Sciences, Sapporo Medical University
  - 2) 札幌市発達医療センター  
Toshio Takahashi, PT: Sapporo Municipal Rehabilitation Center for Disabled Children
  - 3) 北翔会岩見沢整形外科内科病院  
Kanae Takabatake, PT: Iwamizawa Orthopaedic and Internal Medicine Hospital  
(受付日 1997年9月2日/受理日1998年10月1日)

表1 Touwen and Prechtl<sup>16)</sup> の検査表

<p>1. 立位における検査</p> <p>A 開口指伸現象</p> <p>B 変換運動およびそれに関連した運動</p> <p>C 指鼻試験</p> <p>D 指先接触試験</p> <p>E 指対立試験</p> <p>F 微少な不随意運動</p> <p>G 閉眼起立</p>	<p>2点～上肢と手指の伸展が著明であるか、または手指を握って上肢を伸展させる。</p> <p>3点～以上の他に上肢を外転したり唇や舌を動かしたりする。</p> <p>2-3. 踵歩き</p> <p>踵で20歩の直線距離を歩き、そのまま後方に戻る。</p> <p>[点数]</p> <p>0点～ associated movement はない。</p> <p>1点～軽度に肘関節を屈曲、手関節を過伸展する。</p> <p>2点～肘関節を著しく屈曲(60°まで)、手関節を過伸展する。</p> <p>3点～以上の他に肘関節が60°以上屈曲したり、肩関節の外転、唇や舌の運動を伴う。</p>
<p>2. 歩行に関する検査</p> <p>A 直線上歩行</p> <p>B つま先歩き</p> <p>C 踵歩き</p> <p>D 片脚起立</p> <p>E 片脚跳び</p>	<p>3. 検査施設および機器</p> <p>検査施設は札幌医科大学保健医療学部動作解析室を使用し、重心動揺測定は運動総合解析システム(MP JAPAN社製)を使用した。また、映像歩行解析に使用した機器は、SONY 8mm Video Movie、SONY 8mm Video Deck、NEC RGB Multi Display、NEC PC98-VMとPC98-RX、NEC 2M RAM-Disk、NEC Super Impose Boardによって構成されるハードウェアと映像分析用ソフトウェアSystem VIDAS Ver. 2を使用した二次元専用運動解析ユニットを用いた。</p>
<p>3. 眼球運動に関する検査</p> <p>A 固視</p> <p>B 追視運動</p> <p>C 輻輳</p>	<p>4. 検索項目</p> <p>4-1. 歩行時の重心動揺</p> <p>直線歩行、つま先歩き、踵歩きの際の重心移動を、それぞれの歩行の安定性を示す一つの指標と考え、重心動揺側方移動幅と重心動揺軌跡長を計測した。これらはいずれも前述の運動総合解析システムにより、自動的に算出されるものである。重心動揺側方移動幅は歩行立脚時の側方偏位の平均値を、重心動揺軌跡長は歩行時の重心移動点の軌跡長を算出するように設定した。</p> <p>重心動揺側方移動幅および重心動揺軌跡長の歩行種類別の差については、繰り返しのない二元配置分散分析(two-way ANOVA)を用いて統計処理を実施した。また重心動揺側方移動幅の4～6歳群と8～9歳群の差については、t検定により統計処理した。</p>
<p>4. 舌運動に関する検査</p>	<p>4-2. 上肢 associated movement の解析</p> <p>全検査項目で正面からのVTR撮影による記録を実施し、このVTR映像を二次元専用運動解析ユニットにより、映像中の身体を25のスティックに分画したセグメントモデルとして処理した。</p>

対象と方法

1. 対象

対象は、札幌市内の幼稚園児9例と小学校低学年児10例の計19例である。年齢分布および性別は、4～6歳群(男児6例、女児3例)、8～9歳群(男児7例、女児3例)であった。対象児は、出生時の状況および既往歴より神経学的異常はなく、運動器系にも何ら障害を認めなかった。

2. 検査方法と点数化

検査は、Touwen と Prechtl の神経学的検査法に従った。その中で、重心動揺評価を実施した歩行種類は、直線歩行、つま先歩き、踵歩きであり、歩行速度および歩隔については特に規定していない。つま先歩きと踵歩きについては associated movement を点数化<sup>16)</sup>することにより、その出現強度を段階づけた。

2-1. 直線歩行

20歩の直線距離を歩き、そのまま後方に戻る。この時、一方の足部を他側足部の前方に接地する必要はない。

2-2. つま先歩き

つま先で20歩の直線距離を歩き、そのまま後方に戻る。

[点数]

0点～ associated movement はない。

1点～上肢と手指にわずかに運動が見られる。



結 果

1. 歩行時の重心動揺側方移動幅 (図1)

1-1. 歩行種類別の差 (表2)

4~6歳群のそれぞれの平均値は、直線歩行7.0±1.7cm、つま先歩き10.5±4.1cm、踵歩き13.8±6.9cmを示し、各種歩行間に有意差を認めた ( $\alpha = 0.01$ )。また、8~9歳群のそれぞれの平均値は、直線歩行5.0±1.3cm、つま先歩き6.3±1.9cm、踵歩き11.4±7.3cmであり、4~6歳群と同様な有意差を示した ( $\alpha = 0.01$ )。

1-2. 年齢別の差 (表2)

結果、直線歩行、つま先歩きでは、4~6歳群と8~9歳群において有意差を認めた ( $p < 0.05$ )。踵歩きに関しては、有意差を認めなかった。

1-3. 重心動揺軌跡長 (図2、表3)

直線歩行、つま先歩き、踵歩きとなるにつれ4~6歳群は196.1±26.3、252.2±38.1、368.4±49.5、8~9歳群は153.6±20.9、204.2±24.4、281.7±36.3と有意に増加した ( $\alpha = 0.01$ )。年齢群間における有意差は認めなかった。

2. associated movement 出現強度の段階づけ

2-1. つま先歩き

4~6歳群 (N=9) では9例にassociated movementが観察され、8~9歳群 (N=10) では5例に観察された。その点数は両群ともに1点レベルであった。前方つま先歩きと後方つま先歩き間の点差は見られなかった。

2-2. 踵歩き

両群とも、前方踵歩きと後方踵歩き間に差はなく、全員に3点レベルのassociated movementが出現した。

3. 上肢の associated movement パターン

3-1. 直線歩行時の associated movement

4~6歳群では、associated movementが片側に強く出現し非対称的パターンをとる7例、8~9歳群では、associated movementが出現していないか、両側に軽度に対称的パターンで出現する6例が存在した。

手関節に出現する associated movement は、片側の背屈が4~6歳群で4例観察された。他の5例についても何らかのassociated movementが出現したが、多様なパターンで統一性はなかった。一方、8~9歳群では2例にのみ出現が認められた。

肘関節においては、4~6歳群では両側に中等度屈曲の associated movement を5例に認め、軽度屈曲の associated movement を5例に認めた。それに対し、8~9歳群では両側に軽度屈曲の associated movement を6例に認め、他の4例は associated movement を認めなかった。

両群ともに前方歩行より後方歩行の方が associated movement 出現部位、程度が増加した。

3-2. つま先歩き時の associated movement

4~6歳群では、直線歩行と同様に片側に強く出現する associated movement を6例に認めた。また対称的パターンも3例に認めた。8~9歳群では、片側に軽度出現する associated movement を4例認め、他の6例は associated movement が出現していないか、両側に軽度出現した対称的パターンであった。

手関節に出現する associated movement は、4~6歳群では直線歩行と同様の結果であるが、8~9歳群では associated movement が5例に認められ、両側掌屈の出現が増加した。

肘関節においては、4~6歳群では両側軽度屈曲を6例に認め、片側中等度屈曲が増加した。8~9歳群では associated movement を9例に認め、両側、片側で軽度から中等度の屈曲が存在した。

前方つま先歩きと後方つま先歩き間の差は、両群

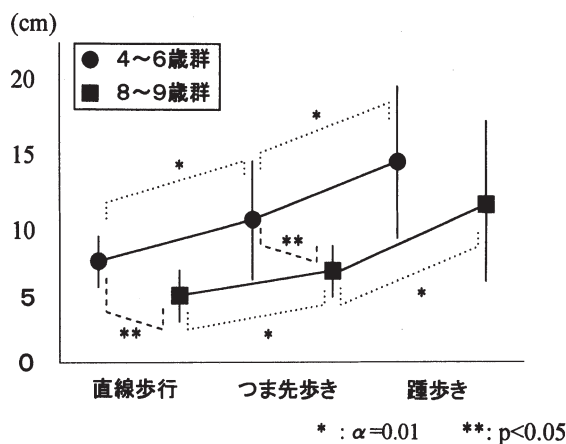


図1 重心動揺側方移動幅の歩行種類別、年齢別の差

表2 重心動揺側方移動幅の年齢別推移

	4~6歳児 (N=9)	8~9歳児 (N=10)
直線歩行	7.0±1.7	5.0±1.3
つま先歩き	10.5±4.1	6.3±1.9
踵歩き	13.8±6.9	11.4±7.3

\*:  $\alpha = 0.01$     \*\*:  $p < 0.05$

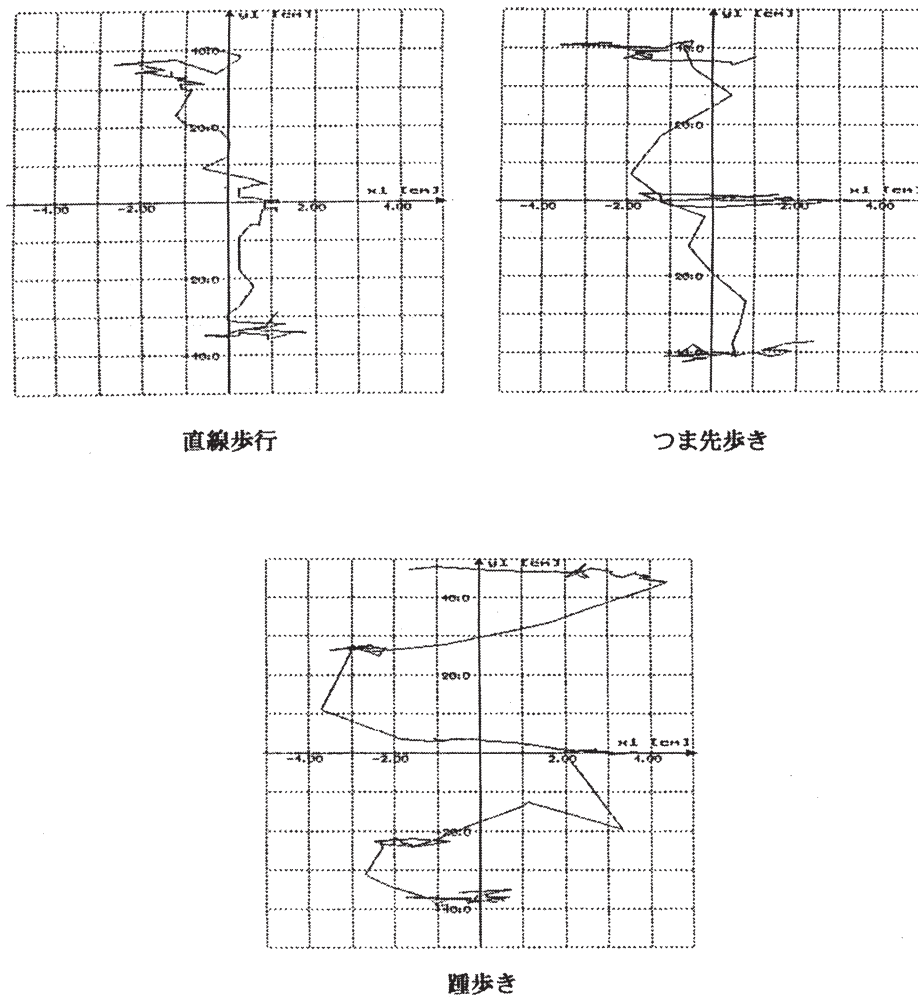


図2 重心動揺軌跡長

床反力から算出される重心動揺軌跡で、直線歩行、つま先歩き、踵歩きの順に側方動揺が大きくなる。

表3 重心動揺軌跡長の年齢別推移

	4～6歳児(N=9)	8～9歳児(N=10)
直線歩行	196.1±26.3	153.6±20.9
つま先歩き	252.2±38.1	204.2±24.4
踵歩き	368.4±49.5	281.7±36.3

\*:  $\alpha=0.01$

ともに後方つま先歩きの方が associated movement 出現部位・程度が増加した。

### 3-3. 踵歩き時の associated movement

4～6歳群では、両側に強く associated movement が出現している対称的パターンが全例に観察された。8～9歳群でも同様なパターンを8例に認めた。

手関節に出現する associated movement は、4～6歳群と8～9歳群の両群とも8例に両側の背屈が出現した。

肘関節に出現する associated movement は、4～6歳群では全例両側に出現し、中等度から過剰な肘屈曲を6例に認めた。8～9歳群は8例で両側に出現し、屈曲程度は軽度か過剰という結果だった。口腔周囲に出現する associated movement については、4～6歳群で6例に開口が出現、また8～9歳群では2例に同様の開口が出現した。

前方踵歩きと後方踵歩き間の差は、後方踵歩きの方が両群ともに associated movement 出現部位、程度が増加した。

### 3-4. associated movement の映像解析

直線歩行、つま先歩き、踵歩きにおける対称的な associated movement と非対称的な associated movement

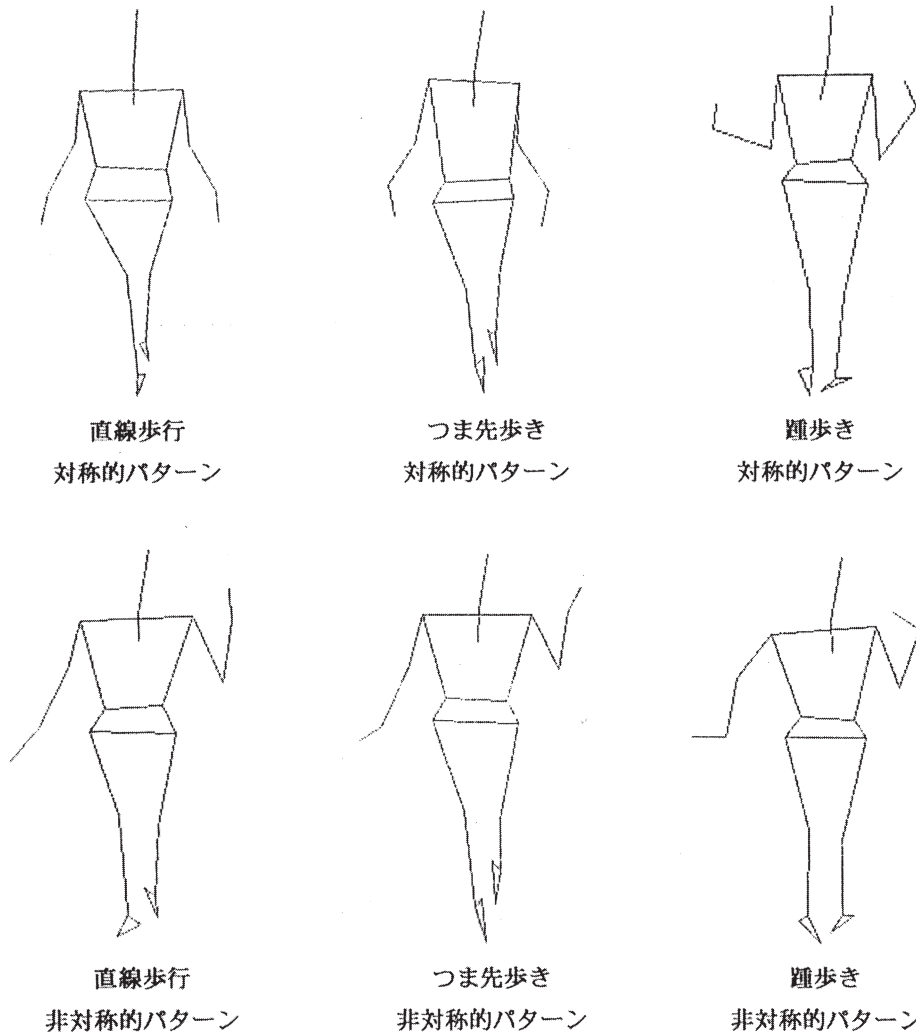


図3 スティックピクチャにより解析された随伴運動(associated movement)パターン  
肘関節と手関節を中心に associated movement が出現している。

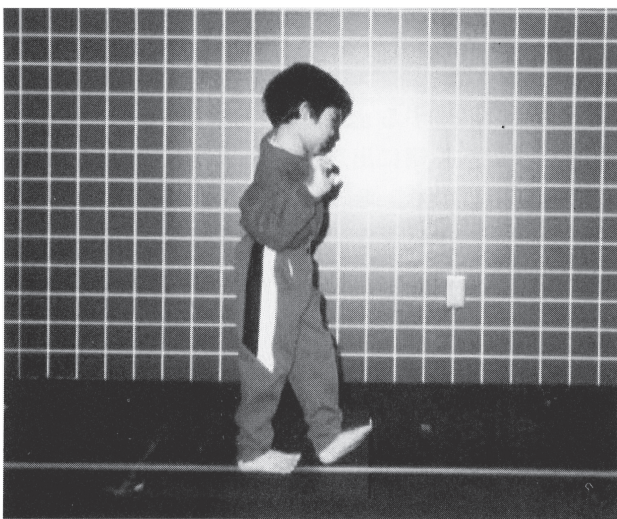


図4 associated movement  
5歳児の踵歩きに出現した associated movement

となった(図3、4)。

#### 考 察

1. Soft Neurological Signと今回の研究に至った経緯  
発達障害児の中に微細脳障害症候群(minimal brain dysfunction、以下MBDと略す)と呼ばれる症候群があるが、このMBDとは、知能はほとんど正常でありながら、いろいろな程度の学習や行動の異常があり、しかも中枢神経機能の偏り(deviation)を伴うものをいう<sup>14)</sup>。このような小児に古典的神経学的診断、あるいはCTやMRI等の画像診断を行なってもほとんど所見は得られない。そこで、このような小児に対して脳の成熟、発達過程を基準にして開発された小児神経学、あるいは発達神経学的診断により、中枢神経系の微細な異常あるいは発達遅延の存在を疑わ

す異常な所見が得られる<sup>8)</sup>。Soft Neurological Sign の診断的意義について、各疾患の臨床診断と必ずしも一致しない点が臨床ではしばしば問題となる。この臨床診断との不一致について、川崎<sup>6)</sup>は、診断の多くは評価方法あるいは分析方法に必ずしも妥当でない点があるとしている。また、Benedetto<sup>1)</sup>は、改訂されたNESS (Neurological Examination for Subtle Signs) を使用し点数化を実施した際、つま先歩きの associated movement について、テスト-再テスト間の信頼性と踵歩きの associated movement の被験者間の信頼性が低く、実施上の問題点としている。この原因の一つに、小児期の正常値を十分検討せずに正常、異常の判定を行なった点が考えられる。

現在までに、正常児の発達過程と Soft Neurological Sign との関連性を検討する研究が行われてきたが、その中で、川崎<sup>7)</sup>は、直線歩行時の偏位回数は、3～8歳で加齢に伴う減少傾向がみられたと報告している。鈴木<sup>13)</sup>によれば、直線歩行は5～7歳では3回程度偏位しても異常とは言えず、つま先歩きは3歳以上で可能となり、この際の associated movement は加齢に伴い減少、7～8歳で消失する。また踵歩きは3歳以上で可能となり、この際の associated movement はつま先歩きより遅くまで残り9～10歳頃までは観察されることがあると報告している。前川<sup>8)</sup>によれば、①5～6歳では、直線歩行はバランスが崩れたり、不随意運動が見られたりしても異常とは言えず、つま先歩きは3歩以上可能であれば associated movement が見られても異常とは言えない。②踵歩きは3歳過ぎより可能となるが、歩行時に肘関節を曲げたり手を開いたり、顔を動かしたりする associated movement が観察される。この場合も、3歩以上歩行が可能なら、異常とは言えないとしている。③8歳頃までは、つま先歩きで多少の associated movement が観察されても異常とは言えず、踵歩きでは9～10歳頃まで associated movement が観察されると報告している。今回我々が着目したのは、小児の歩行時の重心動揺と associated movement の加齢に伴う変化であり、それらを定量化し、詳細な発達指標を検討し、運動発達評価に示唆を与えることが有用であると考え、今回の研究に至った。

## 2. 研究結果について

### 2-1. 重心動揺の特徴

運動学的に、通常の歩行に比べて直線歩行は、支持基底面が前後に広く、左右に狭くなり、側方への安定性が低下し歩行の難易度が高くなる。つま先歩

きと踵歩きはさらに支持部位が小さくなり、足関節は正常歩行のような可動性を得られず、歩行の難易度が高くなる。今回の結果は、個体差はあるものの、重心動揺側方移動幅が、4～9歳で直線歩行、つま先歩き、踵歩きの順に困難となることを示唆した。

従来からの報告によれば正常歩行については、6歳で正常パターンになり<sup>9)</sup>、日本人成人の一步行周期における身体重心点の運動範囲では、重心点の側方移動幅が $3.5 \pm 0.9$ cm となっている<sup>10)</sup>。これを今回の測定値と比べると、4～6歳群で、直線歩行は正常歩行の約2倍の数値であり、つま先歩きは約3倍、踵歩きは約4倍の数値となった。8～9歳群では、直線歩行で約1.4倍の数値であり、つま先歩きで約1.8倍、踵歩きで約3.3倍の数値となった。つまり、各年齢において上記の割合で難易度の高い歩行になると考えられる。4～6歳群はほぼ同比率で難易度が上昇したにもかかわらず、8～9歳群は踵歩きだけが著しく難易度が高いといえる。側方移動幅の比較では、4～6歳群と8～9歳群の間にのみ、有意差を認めなかった。

これらより、直線歩行、つま先歩きは4～9歳で習熟されつつあるが、踵歩きは9歳になっても未だ習熟途上であると考えられる。

### 2-2. associated movement の特徴

上肢 associated movement は、基本的に肩関節外転、肘関節屈曲、手関節背屈で構成されていたが、個体差も観察された。年齢による違い、歩行様式による違いはおおよそ以下の通りである。4～6歳群では、直線歩行から踵歩きにかけて片側に associated movement が出現し、それが強調され、両側に対称性を呈するパターンを示した。8～9歳群では、直線歩行で出現していなかった associated movement が、つま先歩きで両側に軽度に出現し、踵歩きの際に両側に著しく出現するパターンを示した。また、両群ともに前方歩行に比べて後方歩行時に associated movement が著明になった。鈴木<sup>15)</sup>によれば8～9歳は、associated movement が消失し始める時期であるが、両側の手関節で、半数に背屈か掌屈が出現し、肘関節では軽度～中等度の屈曲が10例中9例に出現しており、消失してるとは言い難く、異常とされない多少の associated movement が観察されるとしている前川の見解<sup>8)</sup>と一致した。Touwen と Prechtl の点数化によれば、肘関節伸展を associated movement としているが、実際は肘関節屈曲の associated movement を示す被験者が多く、従来の点数化に疑問を残した。

踵歩きでは、4～6歳群と8～9歳群の両群に as-

sociated movementが著明に出現し、TouwenとPrechtlの点数化によれば3点と極めて著明な associated movementを示した。また両群ともに、直線歩行、つま先歩きに比べ、かなり著明にassociated movementが出現し、4～6歳群では8例が両側の手関節背屈となり、肘関節については中等度以上となった。以上より、associated movementは直線歩行の際、8～9歳は消失傾向であるが、つま先歩きでは8～9歳でも associated movementが出現するといえる。この2つの歩行では、4～6歳群と8～9歳群の associated movementに量的な差があると考えられる。一方踵歩きにおける associated movementは、4～9歳で大きな変化がないと考えられる。また、TouwenとPrechtlのつま先歩きの点数化は、今回の研究結果と一致せず、評価基準の適応については慎重に考慮する必要があると考える。

### 2-3. 歩行難易度と associated movement

始歩期の小児では、high-guardやmedium-guardと呼ばれる肘屈曲を伴った肩の外転運動が存在する<sup>3)</sup>。この運動の意味は、前傾傾向の上体を起こし挙上させるため、または、バランスを保持するために挙上した上肢を回す事で上体の回旋を補強し推進力を作り出すためだと考えられる<sup>3)</sup>。しかし、これらは始歩期の歩行という生理的非分離運動から分離運動に移行するにつれて、潜在化し、上肢に協調性が出現する。前川<sup>8)</sup>は、このように潜在化しても、速く歩かせたりすると途端に顕在化してしまうと報告している。正常児に観察される associated movementはこれに相当すると考えられる。強制的に非分離運動をさせることにより、潜在化していた associated movementの顕在化を誘発していると推測される。associated movementを質的、量的に評価することは、小児の神経系の成熟を判定する手段として妥当であると考えられる。

今後、被験者の年齢層を増やすこと、また今回の被験者の発達経過を見ていくことにより、これらの歩行習熟時期と associated movementの消失時期をより明らかにしていくことが必要であると考えられる。

### 文 献

1) Benedetto V.: Reliability of Subtle (Soft) Neurological Signs in children. J. of Am. Acad. of children. 28:749-753, 1989  
 2) Garfield JC.: Motor impersistence in normal and brain damaged children. Neurology. 14: 623-630, 1964  
 3) 五味重春:脳性麻痺(第2版).医歯薬出版:85、1996

4) Hilda K., Benjamin P., :Bender Visual-Motor Gestalt Test.:新発達診断学、新井清三郎監訳、日本小児医事出版社 p.315-316, 1977  
 5) Kalverboer AF., Touwen BC., Prechtl HF.: Follow up of infants at risk of minor brain dysfunction. Ann.N.Y.Acad.Sci. 28(205): 173-187, 1973  
 6) 川崎千里:注意欠陥多動障害の神経学的徴候および神経心理学的所見.日本小児科学会雑誌、97(11): 2295-2303、1993  
 7) 川崎千里:神経学的徴候.感覚統合障害研究. 5: 20-24、1994  
 8) 前川喜平:小児の運動発達と Soft Neurological Sign.小児医学 9、(8): 1-28、1976  
 9) 中村隆一:基礎運動学(第四版).医歯薬出版:325、1994  
 10) 中村隆一:臨床運動学(第二版).医歯薬出版:226、326、1994  
 11) Prechtl HF., Stemmer J.: Choreiform syndrome in children. Develop.Med. Child.Neurol. 4: 119-127, 1962  
 12) Prechtl HF.: Neurological sequelae of prenatal and perinatal complications. Br.Med.J. 4(582): 763-767, 1967  
 13) 鈴木昌樹:微細脳損傷の臨床.医学のあゆみ、67(12):617-621、1968  
 14) 鈴木昌樹:微細脳損傷の検査法.小児医学、6:108-129、1973  
 15) 鈴木昌樹:小児神経学における Soft Neurological Signs -その評価と意義-序論.脳と発達、9:31-33、1977  
 16) Touwen BC., Prechtl HF.: The neurological examination of the child with minor nervous dysfunction. Clin.Develop.Med. 38: 280-293, 1970  
 17) 米田稔彦:姿勢評価法.PTジャーナル、30(5): 298-304、1996

## The study of gait analysis in the test for soft neurological sign

Naoki Kozuka<sup>1)</sup>, Toshio Takahashi<sup>2)</sup>, Kanae Takabatake<sup>3)</sup>, Yoshitaka Horimoto<sup>1)</sup>,  
Chizuko Tsujimura<sup>1)</sup> and Satoru Kojima<sup>1)</sup>

- 1) Department of Physical Therapy, School of Health Sciences, Sapporo Medical University
- 2) Sapporo Municipal Rehabilitation Center for Disabled Children
- 3) Iwamizawa Orthopaedic and Internal Medicine Hospital

**Abstract:** We studied the deviation of the center of pressure during walking (gait along a straight line, gait along a straight line on tiptoes, and gait along a straight line on heels). Methods scored by Touwen's tests and motion analyzed by stick picture were used for evaluating the associated movement of the upper limbs during gait. Observations were made in 19 normal children aged 4 to 9 years, and the results were as follows:

(1) In increasing order, deviation of the center of pressure was gait along a straight line, gait on tiptoes, and gait on heels. In gait along a straight line, the deviation observed among 4-6 year-old subjects was greater than that observed among those aged 8-9 years. In gait on tiptoes, similar results were obtained.

(2) In gait on tiptoes, the associated movements scored by Touwen's tests showed that movements disappeared with aging.

(3) The associated movement analyzed by stick picture showed that most motions were composed of shoulder abduction, elbow flexion, and wrist extension. In increasing order, the quantity of the associated movement was gait along a straight line, gait on tiptoes, and gait on heels. In gait along a straight line, the associated movements disappeared with aging. In gait on tiptoes, similar results were found.

It is necessary to study normal children aged 10 years and over, to elucidate the relationship between motor development and associated movement.

**key words:** gait analysis, soft neurological sign, associated movement, center of pressure