

中高年者の運動調節能力

——脚の追跡運動の場合——

北本 拓* 吉田 健一* 松永 郁男**

MOTOR CONTROL ABILITY OF MIDDLE AND HIGH AGES ON PURSUIT TRACKING OF LEG

HIRAKU KITAMOTO, KENICHI YOSHIDA AND IKUO MATSUNAGA

The purpose of this study was to clarify compensating element of motor control system on the leg, and to analyze the effect of the variation in various loads on pursuit movement in the exercise of flexion and extension of the leg. The subjects for this study were sixteen healthy males, from 22 years of to 64.

As the means of the experiment, the pursuit movement of the leg was used and the sitting position was applied.

The experiment conditions were decided to sinu waves of 0.4 Hz of exercise rhythm and 1, 2, 4, and 8kg loads attached on the leg.

The following results were obtained.

1. About amplitude ratio of pursuit movement, the optimal control was young ages (22-29 years) of extension, but middle and high ages were shown lower than command amplitude. When leg is flexed, the pursuit amplitude of all subjects were larger than command amplitude.

2. About exercise rhythm, both flexion and extension, young ages were shown about 5-10 degree slower than that of command wave, but middle and high ages were shown both slow and quick on -15-20 degree.

3. About error of between command and response waves, both young and middle ages were shown about 5-15cm². The high ages were shown a value two times as much young and middle ages.

(J. Physical Fitness Japan 1981, 30 : 231~239)

I. 緒 言

中高年者の運動パターンには、種々の特徴的な運動発現がみられる。例えば、目標物に対する応答の遅延、平衡機能の不安定性、瞬発的な筋力発揮の低下等多くの運動機能面の低下が考えられる。これらの低下が中高年者特有の運動パターンを形成⁸⁷⁾し、スポーツ場面や日常の生活等でも多々出現する現象である。それは、各種筋群の発現レベルの低下のみならず、情報の入力・出力過程における神経-筋の協応のスムーズ性が主要に関

与するのではないかと考えられる。

中高年者の呼吸^{例えば¹⁾⁶⁾¹⁴⁾¹⁷⁾¹⁹⁾³⁰⁾³⁴⁾³⁸⁾}、循環、筋力等に関する研究は数多くみられる。特に、亀崎¹⁸⁾や大島³⁸⁾が機能上の老化度測定としてタッピング回数と握力の相関が高齢者に大きいことを報告し、又岡田³²⁾が64才~72才の老人についての対体重あたりの伸脚力の低下が顕著であると述べているが、いずれも運動調節系に関する研究にまでいたっていない。

そこで今回、中高年者の運動特性を知る一環として、あるきめられた運動速度を目標入力にし

* 国学院大学体育学研究室

Kokugakuin University, 〒150, Shibuya-ku Higashi 4-10-29 Tokyo, Japan.

** 埼玉大学教養部体育研究室

Saitama University, Saitama, Japan.

て、その目標を脚の伸展と屈曲運動のくり返しによって、連続的に目標値を追跡する実験的な手法を用いて、神経-筋の協応のメカニズムを知る基礎的実験を行なった。

II. 実験方法

1. 実験条件

図1は実験システムである。実験姿勢は、椅子で上体と腰部を固定し、膝関節部を支点とし、足関節部を作用点とする脚部の伸展・屈曲運動である。足関節部の運動距離は、膝関節を90度に屈曲した位置から、前後に10cmの合計20cmである。目標波形は、ヒトの追跡運動調節の場合に最適な調節状態を示すといわれる²⁵⁾0.4 Hzの正弦波形を用いた。その時の運動負荷は、1, 2, 4, 8 kgの4種類の錘である。

足関節部の移動は、ポテンシオメータから増幅器を通して、記録器に記録される。と同時に視覚系のフィードバック情報としてブラウン管面上に線分表示し、発振器からの目標波形をそのブラウン管面上で追跡した。ブラウン管面と被検者の目の距離は、視覚系のフィードバック情報として最適といわれる⁸⁶⁾目標点が照準線のやや下に位置するように約40cmの間隔で設置した。目標線分はブラウン管面上で10cm上下に移動した。

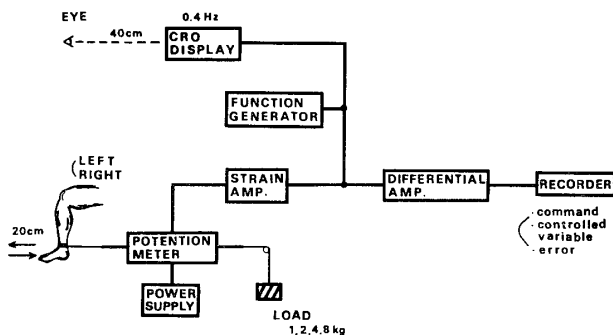


Fig. 1. Diagrammatic illustration of the experimental conditions

2. 被検者

被検者は大学の教職員男子、20才代(平均年齢26.8才)4名、30才代(35.5才)4名、40才代(45.8才)4名、50才代以上(62.3才)4名の合計16名である。

3. 評価方法²⁴⁾²⁵⁾

4種類の運動負荷に対して、それぞれ9周期連

続的に追跡運動を行ない、その中間値5周期の平均値を用いた。目標波形に対する応答波形の位相ずれは脚の屈伸の往復運動1回が360度であるから²⁴⁾膝関節が直角になる時点で何度のずれがあるかを記録紙上から求め、それを運動のリズム性とし、振幅比は $\frac{\text{目標波形の振幅}}{\text{応答波形の振幅}}$ を記録紙上から求め、

運動の変位(ゲイン)性とし、誤差面積としては、目標波形に対する応答波形の偏差量を記録紙上から求め、それを制御成績を知る指標とした。記録器は電磁オシログラフであり、目標波形、応答波形、そしてその偏差量を毎秒5cmの速度で記録した。

4. 調節システム系

図2のようなブロック線図によって、脚の伸展・屈曲運動による目標値への調節学習の運動システムが構成されると考えた¹⁵⁾。視覚系を主な情報受容器とし、中枢・脊髄神経系を調節部、筋力発揮の脚部を操作部、ブラウン管面上の波形を制御対象とした。運動システムを安定させる要素では、運動の補償的役割——スポーツ場面における道具の質に相当するとも考えられる——として4種類の錘を挿入した。各種スポーツや作業の場面で、運動用具あるいは工具の形状や重量がそのヒトの筋調節系とマッチングすれば有効な運動技術を発揮したり、熟練性の高い作業が遂行される。すなわちこの錘が運動調節システムを有効に働かす——良好な調節状態を得る主要な一要素と考えられる。これはまたサーボ機構の直列補償⁵⁾とも呼ばれている。

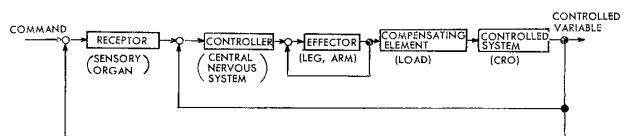


Fig. 2. Block diagram of motor control in the exercise of flexion and extension

フィードバックには、図にみられるように視覚系、関節受容器系、筋紡錘や器器官系の3種類が考えられる。特に視覚系は、ブラウン管面上の光線分を追跡するという実験システムから考えても当然主要なフィードバック系となる⁸⁾¹⁸⁾。関節受容器系のフィードバックは関節囊の結合組織にあるルフィニ小体で関節の位置、運動の方向、速度

等を検出し、小脳一視床一大脳皮質へと伝達される²¹⁾²⁹⁾。筋紡錘、腱器官のフィードバックは、筋と並列に筋紡錘が、また筋と直列に腱器官が位置することによって、二重のフィードバック構造になっている⁹⁾²⁰⁾²⁷⁾。またこれに加えて、伊藤¹¹⁾⁴⁰⁾や原島⁹⁾らが報告しているようなフィードフォワード系も複雑に時々関与し、時間的な遅れを取り戻す時に働いている⁴⁰⁾。

III. 結 果

1. 振幅比の変化

図3は、年齢別による目標波形に対する応答波形の振幅比を示したものである。上部に伸展時（膝関節部の伸展時に錘がネガティブに加えられる）をプロットし、下部に屈曲時（膝関節部の屈曲時に錘がポジティブに加えられる）をプロットした。

(1) 負荷による影響

伸展時の場合、被検者22~29才では負荷の増大とともに振幅値が増大し、最小負荷の1kgで約0.9、最大負荷の8kgで約1.1の値がみられ、各被検者間のバラツキも少なかった。2kgと4kgの負荷では、最適調節状態を示しゼロであった。

被検者32才以上では、各負荷とも約0.9の振幅比を示し、目標波形よりも小さい振幅がみられた。

屈曲時の場合、各被検者群、各負荷とも約1.1の振幅比を示し、目標波形よりも大きな振幅がみられた。

(2) 左右差

各被検者群とも有意な左右差はみられなかった。

2. 位相ずれの変化

図4は被検者22~29才と32~36才を、図5は45~48才、55~64才の目標波形に対する応答波形の位相ずれを示したものである。

(1) 負荷による影響

伸展時、被検者20~29才では、各負荷とも約-5~-10degreeの位相おくれがみられる。被検者30才以上では、約-15~+20 degreeの位相おくれからすすみの範囲に広がり、各負荷によってバラバラな位相ずれがみられた。

屈曲時でも伸展時と同様な傾向がみられた。なかでも40才代の被検者Kでは、伸展、屈曲時ともに各負荷で約-15 degreeの位相おくれがみられた。60才代の被検者Pでは、伸展、屈曲時とも各負荷で約25 degreeの著明な位相すすみがみられ

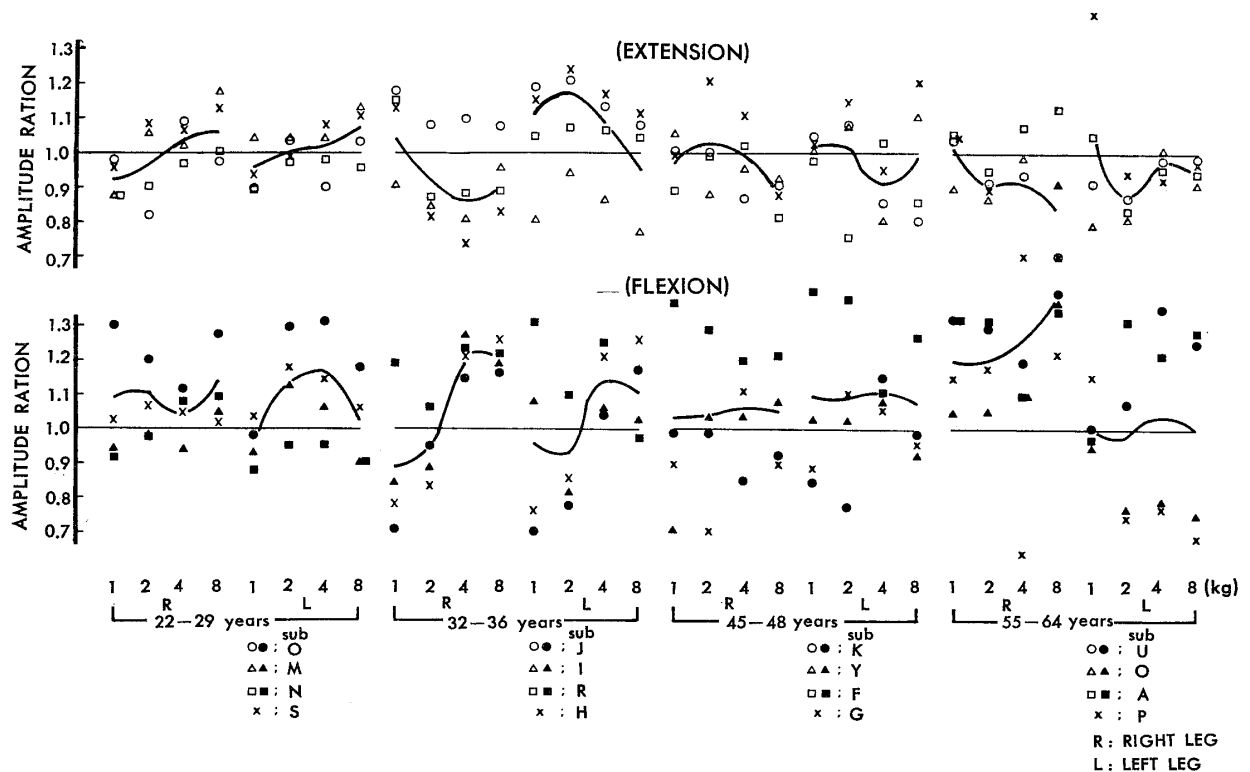


Fig. 3. Changes of gain (amplitude) in the exercise of flexion and extension

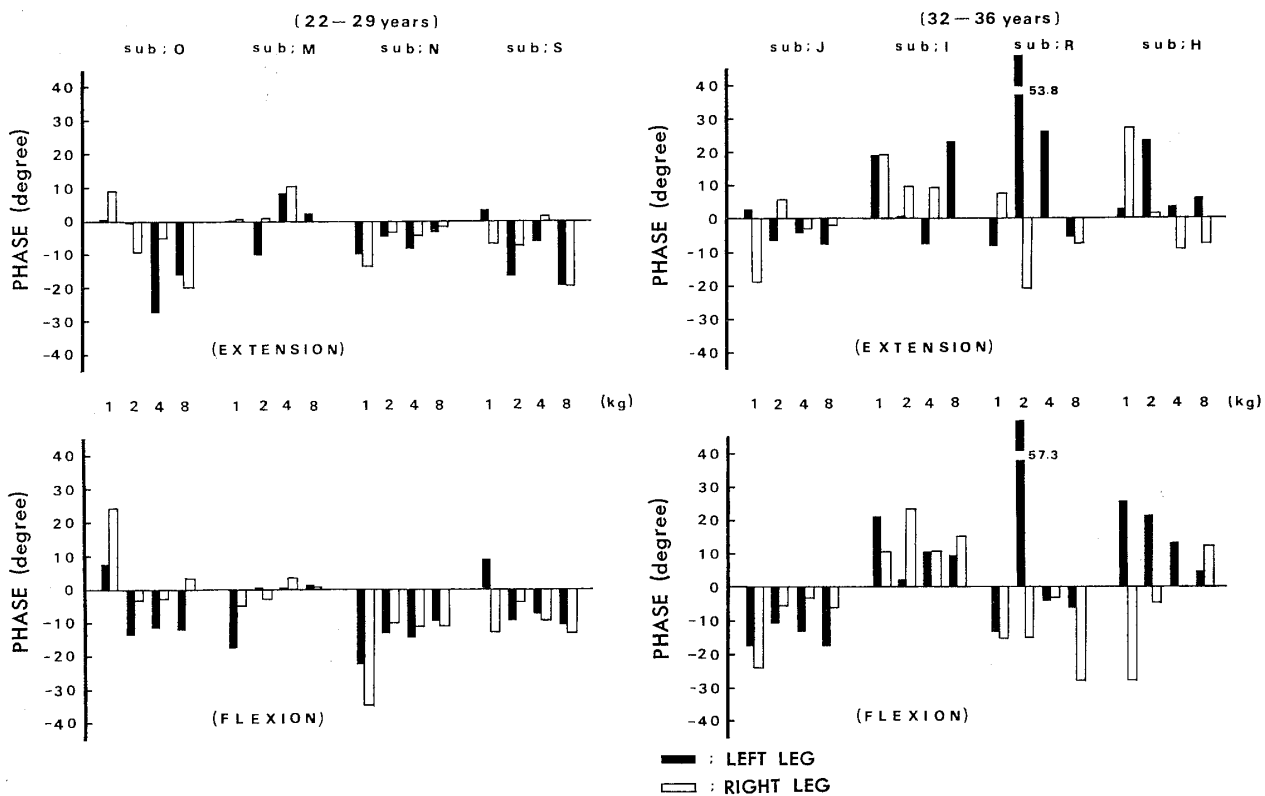


Fig. 4. Changes of phase in the exercise of flexion and extension of the young and middle ages.

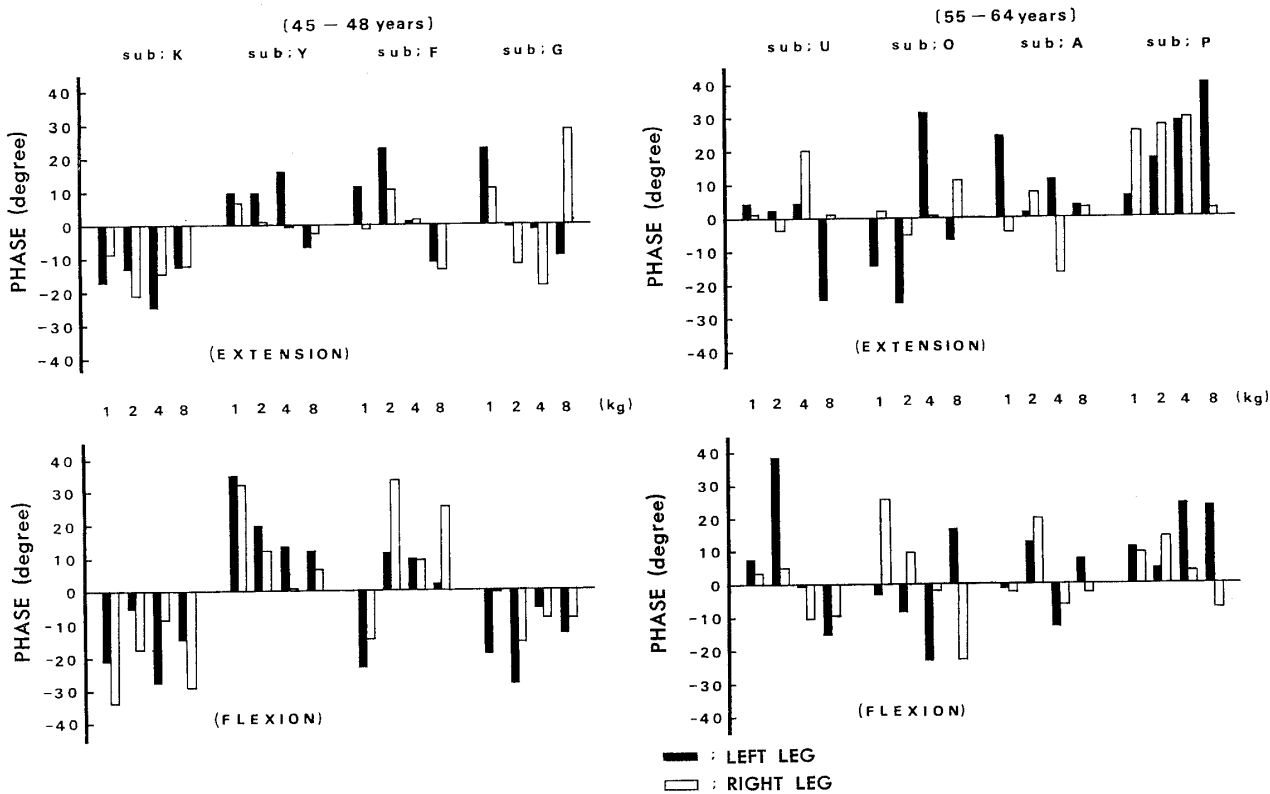


Fig. 5. Changes of phase in the exercise of flexion and extension of the high ages

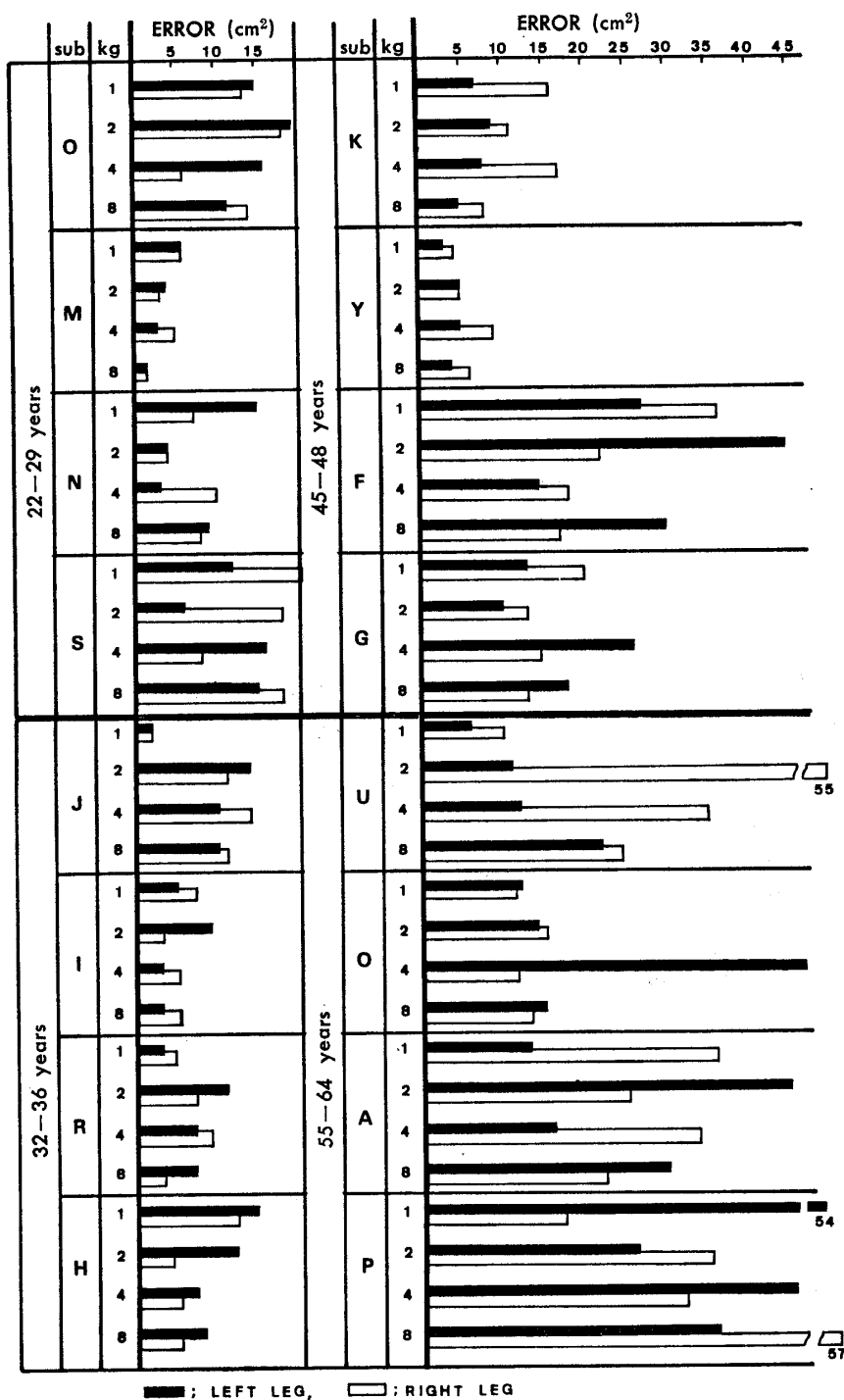


Fig. 6. Changes of performance in the pursuit movement

た。

(2) 左右差

各被検者群とも有意な差はみられなかった。

3. 誤差面積

図6は各被検者ごとによる目標波形と応答波形の偏差量を示したものである。追跡運動系では、

この誤差面積としての偏差量は運動調節システムの全体を総合的に評価するための評価関数²⁴⁾として、あるいは、制御性能としての精度を評価するものといわれている⁴⁾。そこで、この項では、伸展時と屈曲時を区別せずに運動調節状態を総合的に検討した。

(1) 負荷による影響

被検者22~29才と32~36才では、各被検者、各負荷ともに約 5~15cm² の偏差量がみられた。しかし、被検者Mのみ、負荷の増大とともに比例的に偏差量が減少する傾向がみられた。被検者45~48才では、被検者K, Yが各負荷とも約 5~15cm² で、20才代と30才代と同程度の値がみられたが、被検者FとGでは、約 10~35cm² と約2倍の値がみられた。被検者55~64才では、各被検者とも負荷の増大にもなって偏差量が增大する傾向がみられたが、比例的な増大ではなかった。その偏差量は、約 15~45cm² と、20才代、30才代、40才代の被検者に比較して約2~3倍の増大であった。

(2) 左右差

各被検者群とも有意な差はみられなかった。

IV. 考 察

1. 運動調節システムの補償的役割

運動調節システムを安定させる要素として各種の負荷を用いることは有効であるが、逆に外乱的な作用をすることも十分に考慮する必要がある。

運動の変位量すなわち膝関節角度の変位は、位置制御システム⁸⁵⁾といわれているが、この面からみると、脚の伸展時に20才代の若年者では、2kgと4kgの負荷時に最適な運動の変位がみられたが、30才以上の中老年者では、目標振幅よりも運動変位が小さい傾向がみられた。これは、伸展時に筋肉系に負荷がネガティブに作用することになり、筋力の低下現象¹⁴⁾³⁰⁾⁸²⁾と変位の減少が結びついたものではないかと考えられる。そのことは、屈曲時の調節状態で運動変位が目標振幅よりも増大していることから理解できる。すなわち、屈曲時には負荷がポジティブに作用し、伸展から屈曲運動へ移行する時の筋の収縮パターンの切り換えが負荷によって混乱し、その負荷が結果として屈曲運動を推進するような働きとなり、オーバーシュート現象が出現するものと推察される。運動調節システムを安定させる要素として各種負荷を使用することは有効であると思われるが、逆に外乱的な作用をすることも十分に考慮しなければならない。永田²⁸⁾はインデンシャル応答時の各種外部負荷(外乱的要素)として一定張力、弾性抵

抗、粘性抵抗を運動調節システムに挿入し検討しているが、一定張力としての2kgまでの小さい負荷では、追跡運動の成績に有意な差を示さなかったと報告している。今回の実験でも、中老年者の運動変位の側面からみると4種類の負荷は運動調節システムを良好な状態にする補償的要素としての任務を果たしていないものと推察される。

運動のリズム性、特に正確な追跡リズムという面からみると、今回は規則的な運動リズム(0.4 Hz)での追跡運動であり、筋力値の増大と低下がゆるやかで、筋肉の収縮と弛緩のパターンも一定のリズムであることから¹⁶⁾、早期に習熟すれば良好な調節状態が出現するものと考えられた。しかし、伸展時、屈曲時の区別にかかわらず、若年者では各負荷とも運動リズムのおくれ現象が出現し、中老年者では、負荷による一定の様相はみられず、運動リズムのすすみやおくれ現象がバラバラに出現している。最年長の64才の被検者Pでは、各負荷とも運動リズムの顕著なすすみ現象が出現し、ブラウン管面上の目標波形を無視した、すなわち関節や視覚系のフィードバック機構を遮断したような調節状態がみられた。追跡運動における視覚系のフィードバックは各種運動学習過程の中でも主要な役割を司²⁸⁾。特にスポーツ技術の習熟では、図2における筋固有感覚系は運動の方向や空間的位置を知り、巧緻運動活動の自動化になくなくてはならないものである⁸⁵⁾。しかし、運動距離が長くなると、運動感覚情報の正確性が失われるという報告¹⁸⁾にもあるように、視覚系のフィードバック情報によって正確な運動パターンの形成がおこなわれる必要がある。この被検者Pでは、運動リズムを先取りするという伊藤¹²⁾が報告しているような良好なフィードフォワード系の調節状態ではない。そのことは、変位や偏差量の調節状態が良好でないということからも理解できるし、ただ単なる位相すすみによる運動リズムのタイミング制御が反射的な運動制御⁸⁹⁾でおこなわれたものと推察される。

若年者の運動リズムのおくれ現象は、視覚系のフィードバックが有効に利用され、ブラウン管面上の目標線分にわずかにおくれながら追跡している。それは伸展から屈曲に移行する時期を予測して相反神経支配に基づく反復動作¹⁰⁾を遂行するた

めの良好なフィードフォワード系を用いて、顕著なおくれ現象やすすみ現象を防いで、偏差量をも少なくし、総合的に良好な調節状態を示すものと考えられる。

中高年者では、若年者にみられるような良好なフィードフォワード系ではなく、視覚系のみ依存したすすみやおくれの極端な繰り返し制御が出現したものと推察され、老化現象の尺度³⁷⁾としてのギクシャク運動に結びつくものであろう。

2. 制御成績と老化

図6での偏差量からも明確なように、中高年者の成績が若年者の約2倍に増大していることは興味深い。運動リズムが0.4 Hzというのは周波数応答の種々の報告²⁵⁾²⁶⁾からも最適値を示すといわれているがいずれも20才代の被検者を対象にしたものである。今回の実験は高年齢者の被検者も多く、必ずしもそれらの報告とは一致しなかった。0.4 Hzの周波数は周期から言えば、2.5秒に1回の割合いで、図1にあるように20cmの脚の伸展・屈曲運動をすることになるがそんなに速い運動とは思われない。しかし、亀崎¹³⁾も報告しているが、15秒間のタッピング数では、50才代以上が20才代より約12%減少している。また Feibel & Foca⁷⁾ や Caruson et al²⁾によれば、知覚神経線維の最大伝導速度が老年者で約10%低下すると述べ、皮膚感覚も下肢において顕著に低下するといわれている²²⁾。Corbin & Gardner³⁾は運動性神経線維の最大伝導速度も老年者では約10%低下すると述べている。また脊髄レベル系の遅延をアキレス腱反射からみると、腱反射の大きさは変わらないが、潜伏時間が老年者で約6~10msec遅れるといわれている³¹⁾、この遅延には、求心性や遠心性神経線維の伝導速度、筋自身の収縮速度の低下等が関連し、老人では1回の刺激の後効果が長時間持続するために、ある運動を開始するまでにより多くの信号が必要となり、その結果、反応が遅延し、なおかつ信号を適確に判別する能力も低下し、適切な反応を欠き、外界刺激に対する老人特有の運動パターンが出現するといわれる³¹⁾⁴¹⁾。これらのことが複雑に絡み合っ制御成績に影響しているものと推察される。今回の実験は、細部に至る神経系の遅延様相を検討したのではなく、老人特有の運動調節状態を総合的に把握したもの

であり、今後、詳細な実験システムによる検討が必要と思われる。

V. 要 約

目標値としての0.4 Hzの正弦波を視覚情報として与え、それを脚の伸展・屈曲運動で追跡するという実験から若年者(22~29才)と中高年者(32~64才)の運動調節状態を検討した。特にその運動調節システムに補償的要素として、1, 2, 4, 8 kgの錘の負荷を加えその要素が運動の調節状態にいかにか作用するかを解析した。その結果、以下のことが明らかになった、

1. 目標波形に対する応答波形の振幅比では、伸展時の場合、22~29才の2kgと4kgで最適調節状態がみられた。32~64才では各負荷とも目標波形より小さい振幅がみられた。屈曲時の場合、各被検者で各負荷とも目標波形より大きな振幅がみられた。
2. 目標波形に対する応答波形の位相ずれでは、伸展時、屈曲時ともに22~29才で各負荷で約-5~-10 degreeの位相おくれがみられた。
3. 目標波形に対する応答波形の総合的な評価として、制御成績からみると、22~29才と32~36才では、各負荷とも約5~15cm²、45才以上では、その約2倍の偏差量がみられた。
4. 特に55~64才の4人の被検者では、錘の増加に伴って、偏差量が次第に増加する傾向がみられた。
5. 脚の運動調節システムでは、左右の差はいずれの指標とも有意な差はみられなかった。

(本研究の要旨の一部は第33回日本体力医学会大会において発表した)。

(受付 昭和56年3月5日)

参 考 文 献

- 1) Åstrand, I., P.-O. Åstrand and K. Rodahal (1959): Maximal heart rate during work in older man. *J. Appl. Physiol.* **14**, 562-566.
- 2) Caruse, G., O. Labianca and E. Ferrannini (1973): Effect of ischaemia on sensory potentials of normal subjects of different ages, *J. Neurol. Neurosurg. Psychiatr.*, **36**, 455-466.

- 3) Corbin, K. B. and E. D. Gardner (1937) : Decrease in number of myelinated fibers in human spinal roots with age. *Anat. Rec.*, **68**, 63-74.
- 4) 電気学会通信教育会 (1972) : 制御工学, 7版, 制御性能, 電気学会, 東京, 95-144.
- 5) 電気学会通信教育会 (1972) : 制御工学, 7版, サーボ機構, 電気学会, 東京, 155-204.
- 6) De Vries, H. A. (1979) : *Health science, first, Less controllable health factors*, Good-year Publishing Company, California. 285-344.
- 7) Feibel, A., and F. J. Foca (1974) : Sensory conduction of radial nerve, *Arch. phys. Med. Rehabil.*, **55**, 314-316.
- 8) 畑 四郎, 津村俊弘 (1973) : 人間の制御動作における体感情報の効果に関する一実験的考察, *人間工学*, **9**, 49-57.
- 9) 原島 博 (1978) : 工学基礎理論からのアプローチ, 宇都宮敏男編, 生体の制御情報システム, 初版, 朝倉書店, 東京, 73-88.
- 10) 猪飼道夫編著 (1975) : 身体運動の生理学, 初版, 運動の制御, 杏林書院, 東京, 54-112.
- 11) 伊藤正男 (1970) : シナプス, 神経網, 脳, 数理科学, **2**, 11-19.
- 12) 伊藤正男 (1972) : 小脳による運動制御, 医学のあゆみ編, 生体の制御機構, 初版, 医歯薬出版, 東京, 288-295.
- 13) 亀崎善江 (1963) : 日本人男女における老化現象の年齢的推移に関する研究, *東邦医学会雑誌*, **10**, **3**, 195-219.
- 14) 勝木新次 (1976) : 中高年齢者の体力と労働, 初版, 中高年齢者の体力, 労働科学研究所, 東京, 51-70.
- 15) 北本 拓, 増永正幸 (1979) : 脚屈伸追跡運動調節の左右差について, *国学院大学体育学研究室紀要*, **11**, 46-50.
- 16) 北本 拓 (1980) : ヒト上肢筋の各種応答動作の解析, 生体システムシンポジウム, バイオメカニズム学術講演会, 前刷, 102-103.
- 17) 今野道勝, 千綿俊機, 安永 誠, 吉水 浩, 増田卓二, 勝田 茂 (1976) : 出力一持続時間特性からみた中年者の作業能力の特徴, *体力科学*, **25**, 37-44.
- 18) 工藤考幾 (1980) : 運動感覚に対する視覚の優位性とその定量化, *体育学研究*, **25**, 13-20.
- 19) 増田 允, 芝山秀太郎, 江橋 博 (1966) : 体位血圧反射よりみた中高年齢者の循環機能の特性について, *体力研究*, **9**, 1-13.
- 20) Matthews, P. B. C. (1964) : Muscle spindles and their motor control, *Physiol. Rev.*, **44**, 219-288.
- 21) 森 茂美 (1972) : 中枢神経系にみられる2, 3の運動制御機構, 医学のあゆみ編, 生体の制御機構, 初版, 医歯薬出版, 東京, 296-303.
- 22) 村田成子, 入来正躬 (1974) : 老人の体温, 一皮膚感覚点分布頻度に及ぼす加齢の影響, *日老医誌*, **11**, 157-162.
- 23) 永田 晟 (1974) : 追跡運動のシステムの研究, 一各種負荷による運動調節の変化について一, *体育学研究*, **19**, 137-145.
- 24) 永田 晟 (1976) : 身体運動調節のシステム, 初版, 運動制御系の基準評価, 道和書院, 東京, 73-102.
- 25) 永田 晟, 北本 拓, 室 増男 (1976) : 運動調節の巧みさ——正弦波入力 of 周波数応答特性から——, キネシオロジー研究会編, 身体運動の科学(II), 初版, 杏林書院, 東京, 84-95.
- 26) 永田 晟, 北本 拓 (1976) : 身体運動の外乱予測能力に関する基礎的研究, *体育学研究*, **20**, 269-279.
- 27) 南雲仁一編著 (1971) : 生体システム, 初版, 運動システム(I)筋, 日刊工業新聞, 東京, 269-294.
- 28) 中村隆一, 齊藤 宏 (1976) : 基礎運動学, 初版, 運動学習と運動巧緻性, 医歯薬出版, 東京, 313-328.
- 29) 中村隆一, 齊藤 宏 (1976) : 基礎運動学, 初版, 人体の構造と機能, 医歯薬出版, 東京, 26-78.
- 30) 名取礼二, 倉田 博 (1973) : 都市生活者の運動能力の特性, ——中高年齢者の運動能力を中心として, *体力科学*, **22**, 148-156.
- 31) 太田邦夫, 村上元考監修 (1976) : 神経と精神の老化, 初版, 加齢と神経機能, 医学書院, 東京, 42-56.
- 32) 岡田信子 (1969) : 高年齢者の運動能の一解析, *体力科学*, **18**, 47-52,
- 33) 大島正光, 狩野広之編 (1955) : 労働科学叢書VIII, 労働と年齢, 初版, 生体機能の年令変化, 労働科学研究所, 東京, 43-74.
- 34) Pollock, M. L., H. S. Miller, R. Janeway,

- A. C. Linnerud, B. Robertson, and R. Valentino (1971) : Effects of Walking on body composition and Cardiovascular function of middle-aged men. *J. Appl. Physiol.*, **30**, 126-130.
- 35) Radonjic, D., and C. Long, 加藤一郎訳 (1973) : 続人間の手足の制御, 初版, なぜ筋電制御はむずかしいか, 学献社, 東京, 54-63.
- 36) ラプラ, ジャック, 篠田勝郎訳 (1973) : 現代心理学II, 感覚と運動, 2版, 感覚—運動の結合, 白水社, 東京, 189-247.
- 37) 酒井敏夫, 岩垣丞恒 (1973) : 体力づくりの生活化, 小野三嗣編, 老化防止の体力づくり, 初版, 不味堂, 東京, 156-206.
- 38) 塩田憲三, 山田耕司, 矢野敏夫, 大谷遷, 宮崎喜重郎, 井関敏之, 小田俊郎, 中家道晴, 佐々木美雄 (1963) : 老人の筋力に関する2~3の考察, *体力科学*, **12**, 109.
- 39) 土屋和夫 (1972) : 追跡動作の分析, 真島英信, 猪飼道夫編, 生体の運動機構とその制御, 初版, 医歯薬出版, 東京, 303-325.
- 40) 渡辺 格, 森田弘道, 伊藤正男, 天野武彦編著 (1978) : 神経科学講座(5) 運動と制御, 初版, 小脳, 理工学社, 東京, 121-145.
- 41) 山本高司 (1979) : 直立時動揺の年齢による変化, *体力科学*, **28**, 249-256.