

児童期の習慣的な運動が 思春期後の力調節安定性に及ぼす影響

大分県立看護科学大学 吉 武 康 栄
(共同研究者) 同 品 川 佳 満
東京大学大学院 神 崎 素 樹
コロラド大学 篠 原 稔

The Effect of Habitual Physical Activity on the Force Control in Children and Postpubertal Persons

by

Yasuhide Yoshitake, Yoshimitsu Shinagawa,
Department of Human Sciences,
Oita University of Nursing and Health Sciences

Motoki Kouzaki
Department of Life Sciences,
The University of Tokyo

Minoru Shinohara
Department of Integrative Physiology, University of Colorado

ABSTRACT

The purpose of this study is to examine the effect of habitual physical activity on the force control (steadiness) in children and postpubertal persons. Nine children (9-11 yr) were assigned to the group who had habitual physical activity over 12-h per week (C-ACTIVE), and nine subjects (9-11 yr) were assigned to the group who did not have habitual physical activity (C-CONT). Eight postpubertal persons (18-22 yr) were also assigned to the group who had habitual physical activity over 12-h per week (Y-ACTIVE) from children, and seven subjects (9-11 yr) were assigned to the group who did not have

habitual physical activity (Y-CONT) from children. Subjects performed unilateral isometric contractions with the plantarflexor muscles to exert a steady force to match the target force at 2.5-20 % maximal voluntary contraction. Surface electromyogram (EMG) was recorded from the right gastrocnemius medialis (MG) and soleus muscles (SOL). The standard deviation (SD) of force and averaged EMG (aEMG) were calculated by the standard methods. The slope and y-intercept for the linear relation between the SD of force and mean force were compared between ACTIVE and CONT with an ANCOVA with mean force as a covariate using the individual data. The smaller SD of force in C-ACTIVE compared with C-CONT was confirmed by the smaller y-intercept in C-ACTIVE compared with C-CONT ($p < 0.05$, ANCOVA) and no differences in slope ($P > 0.05$, ANCOVA) in the linear relation between the SD and mean force. aEMG of MG in ACTIVE was significantly greater ($p < 0.05$) than CONT at 5-10% MVC. There was no significant difference in EMG amplitude of SOL between groups except for 10% MVC. In contrast, there were no differences in SD of force and aEMG between Y-ACTIVE and Y-CONT. These data suggest that habitual physical activity reduces the fluctuations in plantar flexion force during steady contractions with respect to children. In addition, force fluctuations during plantar flexion are attenuated with greater activation level of the medial gastrocnemius muscle as suggested by our prior study (Shinohara et al. 2005).

要 旨

本研究は、児童期の運動習慣の有無が、児童自身および思春期後の力を精確に発揮する能力（力調節安定性）に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。対象は定期的な運動習慣がある児童（運動児童群：9名）と運動習慣がない児童（非運動児童群：9名）、および児童期より運動習慣が持続している18歳以上の若齢者（運動若齢群：8名）と児童期より運動習慣がない若齢者（非運動若齢群：7名）とした。課題動作は等尺性の足関節底屈動作とし、各被験者の最大筋力の2.5-20%を目標値とし、各目標値に対して力を精確に合わせる力調節試行を行った。その際、力、筋電図（腓腹筋内側頭およびヒラメ筋）を導出した。力調節安定性は、力の標準偏差から力変動として評価した。力調節試行時の力の標準偏差は運

動児童群の方が非運動児童群よりも有意に小さかった（ $p < 0.05$, ANCOVA）。また、運動群の方が腓腹筋の筋活動量が高く、腓腹筋/ヒラメ筋活動比が有意に高かった（ $p < 0.05$ ）。一方、18歳以上の若齢者においては運動習慣の有無による差はなかった（ $p > 0.05$ ）。以上の結果から、18歳以後については本実験条件では運動習慣による差が認められなかったが、児童においては運動習慣は力調節安定性をより向上させており、児童期に定期的な運動を行うことは、神経・筋機能の発育・発達促進に有効であると考えられる。

緒 言

ヒトが意図した力を精確に発揮する能力は力調節安定性と呼ばれており²⁾、日常生活をおくる上で頻繁に要求される（例；姿勢維持、箸でモノをつかむ等）。そのため、この能力が低い

場合、ヒトが自律的に生活することが困難となり、QOLが低下する。ゆえ、力調節安定性の生理学的機序を明らかにすることは社会的に意義があると考えられる。

たとえば車のアクセル・ブレーキ操作のように、ある目標値に精確に一致するように力を発揮した場合、発揮された力は完璧に目標値に一致することはなく、絶えず力の変動が伴う。神経・筋生理学分野においては、この力変動の値が小さいほど力調節安定性が高いとされている。力調節安定性に関する研究でも明らかにしていることは、1) 高齢者は若齢者と比較して筋活動リズムが変容していることに由来して力の変動が顕著に大きい^{1-3, 6, 17)}、2) 高齢者に数週間の筋力トレーニングを行わせると力調節安定性が回復する⁷⁾、3) 成人男性に20日間のベッドレスト生活（不活動状態）を行わせると協働筋間の筋活動比の顕著な変化とともに力調節安定性が顕著に低下する¹⁶⁾、などがあげられる。これらの研究報告により、力調節安定性は筋活動動態に依存し、また、日常生活活動量と大きく関係していることが示唆される。

一方、児童期は神経・筋機能の発育・発達が著しい時期であり、神経・筋機能は思春期終了後には成人とほぼ同程度にまで発達する¹⁴⁾。そのため児童期は基礎的運動能力を養うために適切な時期であり、児童が定期的に運動を行うことの重要性が唱えられている¹¹⁾。しかし、近年では、テレビゲームやインターネットが普及したことや、塾や習い事に通う児童数が増加するなどの生活様式の変化によって身体活動量が減少してきている¹⁰⁾。さらに、児童が骨折を発症する頻度が年々増加していることから⁴⁾、意思どおりに力発揮ができず、転倒時に適切な受身が取れていないことも指摘されている。これらのことから、児童期における身体活動量の低下が、力を調節する神経・筋機能の発育・発

達の遅延を引き起こしていると推察される。一方、児童でも筋力トレーニングを行ったところ、神経系の改善による筋力の向上が認められた^{12, 13)}ことから、逆に、運動習慣のある児童は、運動習慣のない児童に比べ、より神経・筋機能の発育・発達が促進されていると考えられる。さらに、児童期からの運動習慣の有無により、思春期後においても神経・筋機能に影響を及ぼしていることも推測される。この仮説を立証するため、本研究では、児童期の運動習慣の有無が児童自身、および思春期後の若齢者の力調節安定性と筋活動動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

1. 方 法

1. 1 被験者

児童において、学童期にある神経・筋関連の疾患の既往歴がない健康な18名（男9名、 10.6 ± 0.7 歳）を対象とした。身長（平均 $\pm$ SD）は 141.6 ± 8.0 cm および体重は 32.8 ± 6.9 kgであった。そのうち9名は定期的な運動習慣（体育の授業などを除いて週12時間以上；運動児童群）があり、他の9名は定期的な運動習慣を持っていなかった（非運動児童群）。一方、思春期後の若齢者においては、同様に神経・筋関連の疾患の既往歴がない健康な15名（男9名、18-22歳、 19.7 ± 1.5 歳）を対象とした。身長は 170.3 ± 8.9 cm および体重は 63.8 ± 12.6 kgであった。そのうち8名は児童期より運動習慣があり両群において、身長、体重、BMI、体脂肪率に差はなかった（ $p > 0.05$ ）。また、被験者および児童の保護者には実験の目的、方法、実験の安全性について文書ならびに口頭で説明をし、同意を得てから実験を行った。

1. 2 実 験

実験はわれわれの先行研究の方法に従った¹⁵⁾

19). 課題動作は利足(全員右足)の等尺性の下腿三頭筋収縮(足関節底屈動作)とした。被験者は椅子型の装置に座り、足関節を90度、膝関節180度に固定した。足関節底屈力は、足底に取り付けられた踏み板と装置との間に接続されたロードセル(LUR-A-100NSA1, 共和電業社製)によって導出した。

1. 3 最大随意等尺性収縮(maximal voluntary contraction, MVC)

まず、被験者は最大随意等尺性収縮(MVC)を行った。力発揮は、約3秒間かけてMVCに到達するよう少しずつ増加させ、その後約3秒間維持するよう行わせた。この試行は3回行い、そのうち最大値を各被験者のMVCとした。各試行の間には最低3分間の休憩を与えた。

1. 4 力調節試行

力調節試行時には被験者の視覚的フィードバックのために、21インチ型モニタに目標値となる負荷および実際に発揮した力をそれぞれラインで表示し、被験者の約1m前方に設置した。力調節時における目標値は各被験者の2.5, 5, 7.5, 10, 20% MVCとした。各目標値での力調節試行はそれぞれ2試行ずつ無作為な順番で行った。力調節は、モニタ上に表示した目標値のラインに実際に発揮した力のラインができるだけ一致するよう行わせた。試行時間は、目標値が2.5-10% MVCの場合は20秒間であったが、20% MVC時には筋疲労の発生を避けるために10秒間とした。すべての試行において、まず練習試行を2-3回行った後に本試行を行った。全ての試行の間には最低1分間の休憩が与えられた。

1. 5 データ取得

力発揮中、下腿三頭筋の腓腹筋内側頭(MG)

とヒラメ筋(SOL)より、表面筋電図(EMG)信号を導出した。筋電図はAg/AgCl電極(直径9mm)を用い、電極間距離2cmの双極誘導とした。力(<100 Hz)はDCアンプ(DPM-700, 共和電業社製)によって増幅した。筋電図(5-300 Hz)はACアンプ(AB-610J, 日本光電社製)で増幅した。増幅されたこれら2つの信号は16ビットのA/D変換器(Power 1401, CED社製)を用いてサンプリング周波数1000 Hzでデジタル信号に変換後、パーソナルコンピュータに取り込んだ。

1. 6 解析

MVC試行では、MVCに到達した時点を中央にした300ミリ秒間の筋電図振幅値を算出した。力調節試行では、目標値が2.5-10% MVCの場合は試行の中央16.384秒間を、また目標値が20% MVCの場合は試行の中央8.192秒間を解析区間とした。筋電図振幅値は平均振幅値を算出し、その後MVC時の筋電図振幅値を基準に正規化を行い、最大の筋活動に対する比率(%表示, aEMG)を算出した。さらに、主働筋の筋活動比を定量化するために、正規化した筋電図振幅値を用いて腓腹筋/ヒラメ筋比を算出した。力においては、トレンドの除去をした後、標準偏差を算出し力変動の指標とした。

1. 7 統計処理

最大随意筋力は、2元配置の分散分析(2年齢層×2群)を行い、比較を行った。力調節試行における筋電図振幅値においては、3元配置の分散分析(2年齢層×2群×4目標値)を行った。必要の際には、個々の有意差はNewman-Keuls検定を用いて調べた。力調節試行における力の標準偏差は発揮する力の増大とともに直線的に増加する²⁾。そこで、力の標準偏差においては、発揮する力の絶対値と力の標準偏差

(力変動)との直線関係において共分散分析を用いて比較を行った。すべての検定において、有意水準は5%とした。結果は、文中は平均±標準偏差、図中は平均±標準誤差で表記した。

2. 結果

最大随意筋力 (maximal voluntary contraction :MVC)

足関節底屈動作時において、若齢者および児童ともに運動群のほうが非運動群よりも最大随意筋力が高かった (図1, $p < 0.05$)。

2. 1 力変動

図2は、力調節試行時における力および筋電図波形の例を表している。目標値に合うよう努力しているにもかかわらず、張力は変動していることがわかる。力の標準偏差は、発揮する力の大きさにともない、直線的に増加することが示されている²⁾。そこで、運動群と非運動群の力の標準偏差を比較するために、共分散分析を行った。児童において、発揮した力-力の標準偏

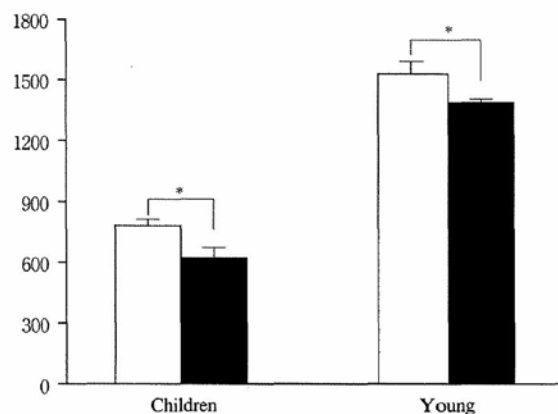


図1 各被験者149グループの最大随意筋力
* $p < 0.05$

差の回帰式の傾きは両群で非常に類似していた (運動群: 0.032 ± 0.005 N / N, 非運動群: 0.033 ± 0.005 N / N) が、切片は運動群のほうが有意に低値を示した (図3A, 運動群: -0.071 ± 0.239 N, 非運動群: 0.700 ± 0.191 N, $p < 0.05$)。このことから、同一の力を発揮する場合は、運動群の方が常に力変動が小さいことが明らかとなった。

一方、若齢者においては、発揮した力-力の標準偏差の回帰式の傾きおよび切片ともに差は

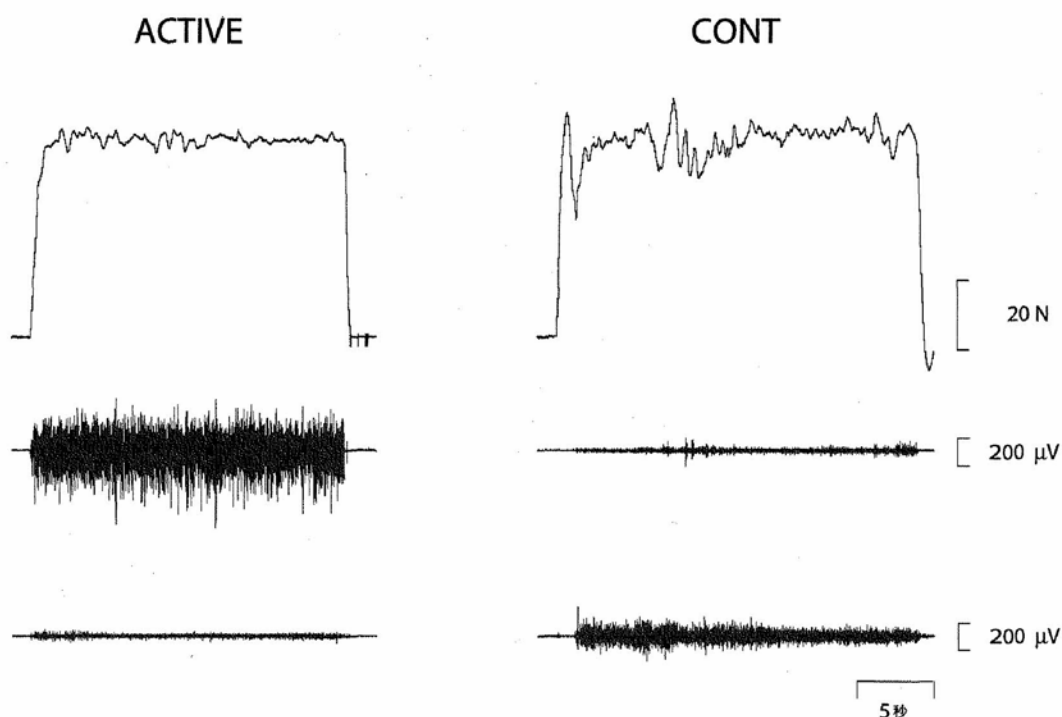


図2 運動群および非運動群の力調節中の各信号の例 (児童, 10% MVC).
上から力, 腓腹筋内側頭およびヒラメ筋の筋電図

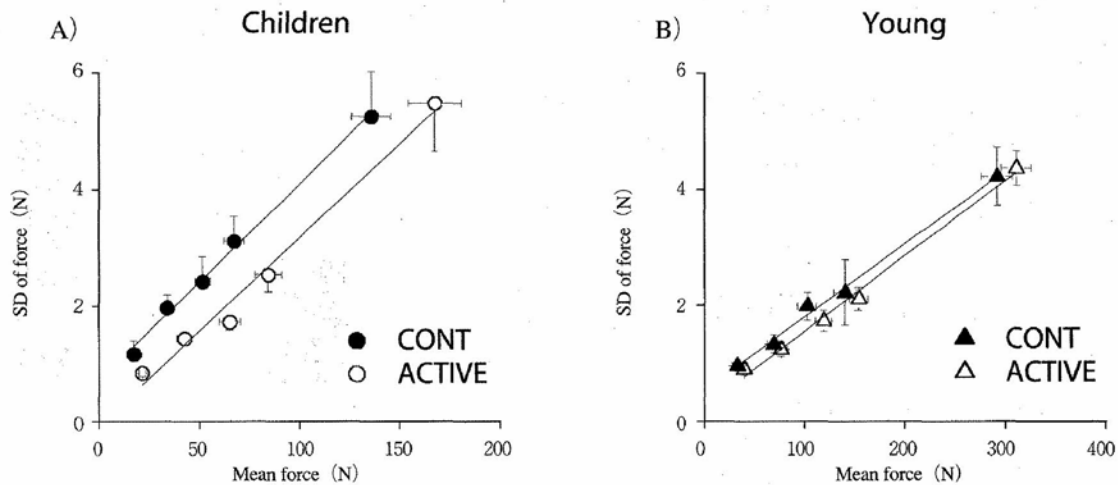


図3 各被験者149グループの力の標準偏差. A) 児童, B) 若齢者.

なく (図3B, $p > 0.05$) 非常に類似していた. このことから, 若齢者においては運動習慣の有無は力変動には影響しないといえる.

2. 2 筋電図 (aEMG)

すべての筋において, 発揮筋力の増大とともに

にaEMGは増加した (図4). 児童において, 腓腹筋の筋活動は, 5-10% MVC時に運動群のほうが有意に高かった (図4A左). もうひとつの主働筋であるヒラメ筋ではほとんど差はなかったが, 10% MVC時においてのみ, 運動群のほうが活動レベルが有意に低かった (図4A右, $p < 0.05$). 主働筋であるこれらの2つの筋の活

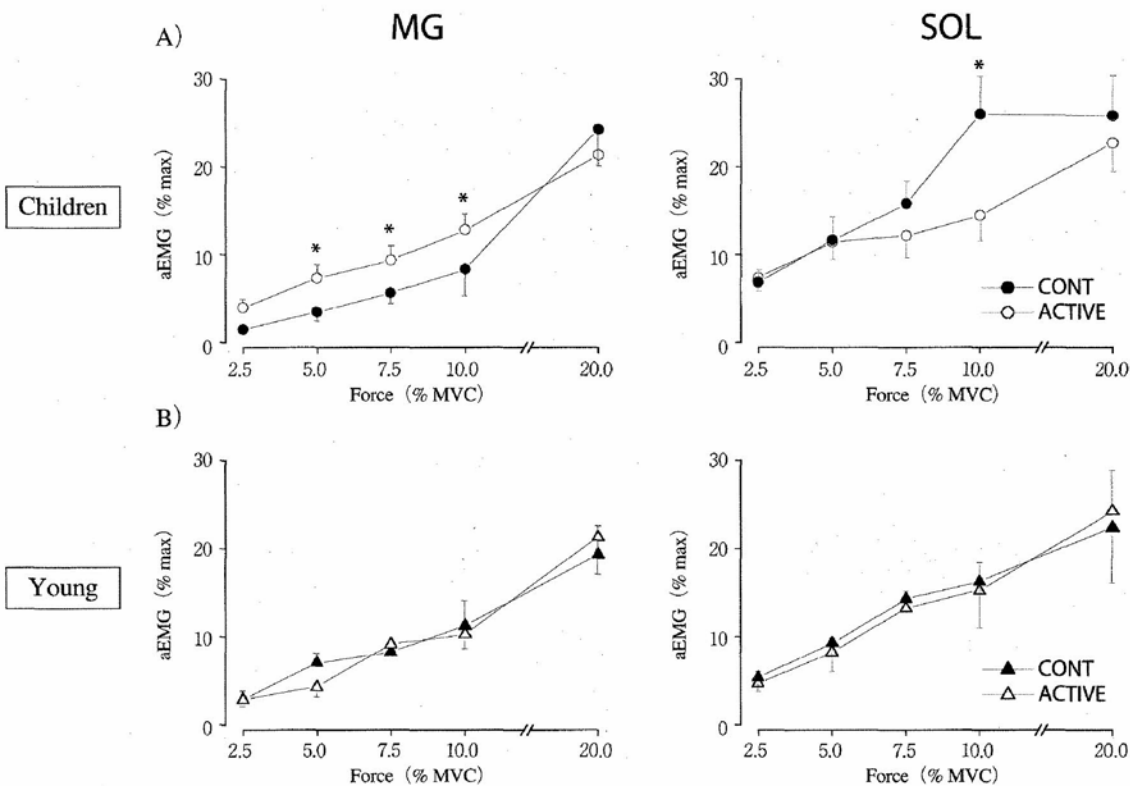


図4 各被験者149グループの筋電図振幅値. A) 児童, B) 若齢者. MG: 腓腹筋, SOL: ヒラメ筋. * $p < 0.05$.

動比を比較したところ、運動群のほうが全体的に腓腹筋の活動比が高く、5-10% MVC時に有意差が認められた ($p < 0.05$)。このことから、児童においては腓腹筋の活動レベルが高いほうが力変動が少ないことを示しており、足関節底屈動作では運動群のほうがより腓腹筋を活動させて力調節していることが示唆される。一方、若齢者においては、2筋において活動レベルに差は認められなかった (図4B, $p > 0.05$)。

3. 考 察

本研究では、児童期の運動習慣の有無が児童および思春期後の若齢者の力調節安定性と筋活動動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。課題動作は足関節底屈動作とし、運動群と非運動群の力調節安定性および筋活動動態の比較を行った。その結果、以下のような結果が得られた。

1. 児童において、力変動は運動群の方が非運動群よりも有意に小さかった。よって、運動群の方が力調節安定性が高いことが示された。力調節試行時に、腓腹筋/ヒラメ筋の活動比は運動群の方が有意に高かった。

2. 若齢者においては、力変動および筋活動動態に運動習慣の有無による差は認められなかった。

3. 1 最大随意筋力 (MVC)

MVCの測定において、若齢者および児童において、運動群のMVCは非運動群よりも高い値を示した。筋力増加には、筋肥大と神経系の改善が関係している^{5, 8)}。男子児童に筋力トレーニングを施した後の筋肥大は認められない^{12, 13, 18)}。ことから、思春期前の児童の筋力向上の要因は神経系の改善によるものがおもである^{12, 13)}。本研究では、筋量を測定していないた

め運動習慣による筋肥大の有無は不明であるものの、児童において運動群の方がより高いMVCを示したことは、定期的な運動によって神経系の改善が起こっていると考えられる。

3. 2 力変動

児童の力の標準偏差において、運動群の方が非運動群よりも有意に小さな値を示した (図3)。これは、運動群の方が力調節安定性が高いことを意味している。先行研究では、高齢者に2週間の筋力トレーニングを行わせると力調節安定性が回復し⁷⁾、また、成人男性に20日間のベッドレスト生活 (不活動状態) を行わせると力調節安定性が顕著に低下する¹⁶⁾ ことが報告されている。このことから、力調節安定性は日常生活活動量に大きく依存していることが考えられる。本研究の結果から、児童期においても日常生活活動量が力調節安定性に大きく影響を及ぼしており、定期的な運動が力を精確に調節する神経・筋機能の発育発達を促していることが示唆される。

また、運動群のほうが力変動が小さかった要因として、9歳から11歳の少年に筋力トレーニングを行うことにより筋力の増加が認められた研究報告と同様に^{12, 13)}、習慣的な運動を行うことによって神経・筋機能が発達し、神経系の改善が起こったことが考えられる。

3. 3 筋活動動態

5-10% MVCの力調節試行において、腓腹筋/ヒラメ筋活動比は運動群の方が有意に高かった。このことから、力変動が小さい運動群においてはおもに腓腹筋によって力調節が行われていることが考えられる。さらにこの結果は、力を精確に調節する役割は腓腹筋が主に担っている可能性を示した先行研究¹⁵⁾の結果を支持するとともに、このような機能は児童期の運動によ

て形成されることを示唆する。

スポーツの場面で頻繁に行われるジャンプ等の下肢の素早い動作時には、下腿三頭筋の活動比として腓腹筋のほうがヒラメ筋よりも高い⁹⁾。これは、素早い動作時には遅筋線維の筋線維組成比が高いヒラメ筋よりも速筋線維の筋線維組成比が高い腓腹筋を用いたほうが機能的であることに由来している。つまり、日常生活活動量の高い運動群は、腓腹筋の神経・筋活動量が高いレベルで確保されていると考えられる。よって、運動群の方が力調節時に腓腹筋の活動が高い要因として、習慣的な運動のため、腓腹筋の活動量が高く神経・筋機能の発達が促されていることや、下腿三頭筋群の各筋を適時・適切に活動させる（大脳も含めた）神経・筋の命令伝達経路の確立がなされていることが考えられる。

3. 4 思春期後の若齢者の力調節

思春期後の若齢者において、本研究で行った実験プロトコル（等尺性収縮、低強度、足関節底屈動作）では、児童とは異なり運動習慣の有無によって力調節安定性に差は認められなかった。この原因は不明であるが、実際のスポーツで行われるような動的動作を課題とした力調節安定性では異なるかもしれない。今後、詳細に検討する必要がある。

まとめ

本研究においては、児童期の運動習慣の有無が力調節安定性と筋活動動態に及ぼす影響を明らかにすることを目的とし、足関節底屈動作の力調節安定性および筋活動動態の定量化を行った。その結果、思春期後の若齢者においては運動習慣の有無による差は認められなかったが、児童においては定期的な運動習慣がある方が力調節安定性が高いことが示された。また、足関節底屈動作の力調節は、足関節底屈筋群のうち、

腓腹筋で行ったほうが力の変動を抑制しており、その傾向は運動群のほうで顕著に認められた。以上の結果から、児童期の運動習慣は力調節安定性をより向上させており、児童期に定期的な運動を行うことは、神経・筋機能の発育・発達促進に有効であると考えられる。

謝 辞

本研究の助成を賜りました財団法人石本記念デサントスポーツ科学財団に厚く御礼申し上げます。本研究の実施に関し、実験補助をして頂いた平池みぎわさん（大分県立看護科学大学看護学部）に感謝いたします。

文 献

- 1) Burnett R.A., Laidlaw D.H. and Enoka R.M., Coactivation of the antagonist muscle does not covary with steadiness in old adults. *J. Appl. Physiol.*, 89, 61-71 (2000)
- 2) Enoka R.M., Christou E.A., Hunter S.K., Kornatz K.W., Semmler J.G., Taylor A.M. and Tracy B.L., Mechanisms that contribute to differences in motor performance between young and old adults. *J. Electromyogr Kinesiol*, 3, 1-12 (2003)
- 3) Evangelos A.C. and Carlton L.G., Old adults exhibit greater motor output variability than young adults only during rapid discrete isometric contractions. *J. Gerontol*, 12, 524-532 (2001)
- 4) Hagino H., Yamamoto K., Ohshiro H. and Nose T., Increasing incidence of distal radius fractures in Japanese children and adolescents. *J. Orthop. Sci.*, 5, 356-360 (2000)
- 5) Ikai M. and Fukunaga T., A study on training effect on strength per unit cross-sectional area of muscle by means of ultrasonic measurement. *Int. Z. Angew. Physiol.*, 28, 173-180 (1970)
- 6) Laidlaw D.H., Bilodeau M. and Enoka R.M., Steadiness is reduced and motor unit discharge is more variable in old adults. *Muscle Nerve*, 3, 600-

- 612 (2000)
- 7) Laidlaw D.H., Kornatz K.W., Keen D.A., Suzuki S., Enoka R.M., Strength training improves the steadiness of slow lengthening contractions performed by old adults. *J. Appl. Physiol.*, 87, 1786-1795 (1999)
- 8) Moritani T. and deVries H.A., Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am. J. Phys. Med.*, 58, 115-130 (1979)
- 9) Moritani T., Oddsson L. and Thorstensson A., Activation patterns of soleus and gastrocnemius muscles during different motor tasks. *J. Electromyogr Kinesiol*, 1, 81-88 (1991)
- 10) 中村和彦. 子どもの遊びの変貌. 体育の科学 49, 25-27 (1999)
- 11) 大山良徳, 小西博喜. 発育発達と体力づくり改訂版. 三和書房; pp217-218 (1983)
- 12) Ozmun J.C., Mikesky A.E. and Surburg P.R., Neuromuscular adaptations following prepubescent strength training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 26, 510-514 (1994) .
- 13) Ramsay J.A., Blimkie C.J., Smith K., Garner S., MacDougall J.D. and Sale D.G., Strength training effects in prepubescent boys. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 22, 605-614 (1990)
- 14) Scammom R.E., The measurement of the body in childhood. In: Harris JA, Jacson CM, Paterson DG, Scammom RE, eds. The measurement of man. Minneapolis: University of Minnesota Press; pp 193 (1930)
- 15) Shinohara M., Yoshitake Y., Kouzaki M. and Fukunaga T., The medial gastrocnemius muscle attenuates force fluctuations during plantar flexion. *Exp. Brain Res.*, 29, 1-9 (2005) .
- 16) Shinohara M., Yoshitake Y., Kouzaki M., Fukuoka H. and Fukunaga T., Strength training counteracts motor performance losses during bed rest. *J. Appl. Physiol.*, 95, 1485-1492 (2003) .
- 17) Tracy B.L. and Enoka R.M., Older adults are less steady during submaximal isometric contractions with the knee extensor muscles. *J. Appl. Physiol.*, 92, 1004-1012 (2002)
- 18) Weltman A., Janney C., Rians C.B., Strand K., Berg B., Tippitt S., Wise J., Cahill B.R. and Katch F.I., The effects of hydraulic resistance strength training in pre-pubertal males. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 18, 629-638 (1986)
- 19) Yoshitake Y., Shinohara M., Kouzaki M., Fukunaga T., Fluctuations in plantar flexion force are reduced after prolonged tendon vibration. *J. Appl. Physiol.*, 97, 2090-2097 (2004)