

発育期の子どもにおける運動制御の正確性と 運動単位活動との関連

岩手大学・中京大学 奥平 柁道
(共同研究者) 京都大学大学院 廣野 哲也
中京大学 竹田 良祐
同 渡邊 航平

The Association between Accuracy of Motor Control and Motor Unit Activity in Developing Children

by

Masamichi Okudaira

Faculty of Education, Iwate University

School of Health and Sport Sciences, ChukyoUniversity

Tetsuya Hirono

Graduate School of Medicine, Kyoto University

Ryosuke Takeda, Kohei Watanabe

School of Health and Sport Sciences, ChukyoUniversity

ABSTRACT

The accuracy of force production in children is recognized to be less than that of adults, yet the motor unit (MU) activation pattern, the smallest unit of the neural system and muscle fiber, remains incompletely understood. This research aimed to clarify the accuracy of force production and MU activity in children. Eighteen children aged 6 to 12 and 18 healthy young adults performed the maximal voluntary isometric contraction (MViC) and ramp-up contraction to 50 %MViC in knee extension. High-density surface electromyography was recorded from the vastus lateralis and

decomposed into individual MU activity. Children exhibited significantly lower accuracy of force production during the ramp-up phase compared to adults ($p < 0.001$). Regarding MU activity, children demonstrated a significantly higher MU firing rate (FR) compared to adults ($p < 0.05$). The increase in FR was significantly greater for the lower-threshold MUs in children during the initial recruitment phase ($p < 0.05$), whereas adults displayed a greater increase in FR for higher-threshold MUs during the later phase of ramp-up contraction ($p < 0.05$). These findings suggest that children not only regulate MUs at a high FR but also show a tendency to rapidly increase FR during the initial recruitment phase. Differences in force production accuracy between children and adults could be linked to the characteristics of MU activity.

キーワード

力の正確性, 発火頻度, 高密度表面筋電図, デコンポジション, 外側広筋

Keyword

force steadiness, firing rate, high-density surface electromyography, decomposition, vastus lateralis

要旨

子どもは大人と比較して力発揮の正確性が劣ることが知られているが、筋収縮を行うための指令を伝達している運動単位 (Motor unit, 以下MU) の活動特性については十分に理解されていない。本研究は、子どもにおける力発揮の正確性とMU活動の特徴について明らかにすることを目的とした。6歳から12歳の子ども18名と健康な大人18名が、等尺性最大膝伸筋力 (Maximal voluntary contraction, 以下MVC) と50% MVCまでのランブアップ (徐々に発揮筋力を増加させる) 課題を実施した。外側広筋より運動中の高密度表面筋電図を収集し、個々のMU活動に分解した。結果より、子どもは大人と比較して発揮筋力の増加時に力発揮の正確性が有意に低かった ($p < 0.001$)。MU活動について、子どもは大人と比較して有意に高いMUの発火頻度 (Firing rate, 以下FR) を示し ($p < 0.05$)、全ての動員閾値 (Recruitment threshold, 以下RT) のMUにおいて同様の傾向

が見られた。MU FRの増加量は、最もRTの低いMUについて動員初期に大きく、対照的にRTがより高いMUについては、動員初期を除く区間において大人が大きい結果を示した。以上のことから、子どもはMUを高いFRで制御しているだけでなく、動員初期に急激にFRを高めている傾向が見られた。子どもと大人における力発揮の正確性の違いは、このMU活動の特徴に関連している可能性が示唆された。

緒言

子どもは大人と比較して、発揮筋力を正確に調整する能力に劣ることが知られている¹⁻⁵⁾。このような特徴は、子どもの未発達な神経系機能に起因していると考えられている^{6,7)}。しかしながら、神経系の発育発達過程については、脳や眼球の大きさといった解剖学的な変化に基づいて理解されているため⁸⁾、神経系の機能的な評価に基づく解釈が十分に行われていない。特に筋力発揮を制御している脊髄内の運動神経細胞から筋線維までを

指す運動単位 (Motor unit, 以下MU) の活動については, 子どもの特徴が十分明らかになっていないのが現状である。

ヒトが発揮筋力を増加させる場合, 1) 新たなMUを動員する, 2) 既に動員されているMUの発火頻度 (Firing rate, 以下FR) を増加させる (レートコーディング), という主に2つの方略が取られる⁹⁾。後者は特に発揮筋力の正確性と関連付けられる生理指標として先行研究で用いられてきた^{10, 11)}。子どものMU活動の特徴について検討した先行研究では, 定常筋力発揮中に見られるMU FRを大人と比較しているが, 意図的に発揮筋力を調整するような正確性の課題においては検討されていない。

そこで本研究では, 発揮筋力を目標まで一定の割合で正確に増加させていくランプアップ課題を採用し, 1) ランプアップ局面における力の正確性に子どもと大人で違いが見られるか, 2) ランプアップ局面でのMU活動について子どもと大人で違いが見られるかについて, 明らかにすることを目的とした。

1. 研究方法

1. 1 対象者

健康な子ども18名 (年齢 9.46 ± 1.62 歳 [6.68 ~ 11.94 歳], 身長 1.35 ± 0.09 m, 体重 28.8 ± 5.1 kg) と, 健康な大人18名 (年齢 22.1 ± 3.4 歳, 身長 1.71 ± 0.57 m, 体重 65.2 ± 8.8 kg) が本研究に参加した。いずれの群も男性16名, 女性2名で構成されている。対象者からは書面によるインフォームドコンセントを得ており, 子どもの対象者については保護者から書面によるインフォームドコンセントを得た。本研究はヘルシンキ宣言に基づき, 中京大学研究倫理委員会によって承認された (承認番号: 2021-101)。

1. 2 実験デザイン

測定に先立ち, 対象者は最大努力の50%で2回, 70%で1回の標準化されたウォーミングアップおよび馴化プロトコルを行った。対象者は右脚で等尺性最大膝伸展筋力 (MVC) の測定を2回実施し, より大きな値が分析に用いられた。その後, 50%MVCを目標として, 17秒間で直線的に発揮筋力を増加させるランプアップ局面と, 10秒間の維持局面から構成されるランプアップ課題を実施した。対象者は正確な力発揮を行うために, ランプアップ課題の測定に先立って2~3回の練習試技を実施した。運動中の右脚外側広筋から高密度表面筋電図を収集し, 個々のMU活動の解析に用いた。各試行間には, 疲労の影響を避けるために十分な回復時間が設けられた。

1. 3 力の計測

発揮される力のデータは, 特製の膝伸展筋力計 (T.K.K.5715a, 竹井機器工業, 新潟) に取り付けられたフォーストランスデューサー (LU-100KSE, 共和電業, 東京) から取得された。対象者は, 股関節および膝関節を90度とした状態で筋力計に座り, 座面を握った状態で, 全ての測定試技を実施した。フォーストランスデューサーは対象者の足首 (外果から5cm上) に緩みが無いよう十分に固定された。力のデータはストレインアンプ (TSA-210, 竹井機器工業, 新潟) を介して2,000 Hzで収集され, 16ビットマルチチャンネルアンプ (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) によってデジタルデータに変換された。

ランプアップ課題中は, 対象者の正面に設置されたモニタ上に目標筋力と発揮筋力をリアルタイムで提示し, 目標筋力に可能な限り, 近似した発揮筋力となるように指示した。

1. 4 高密度表面筋電図の計測

高密度表面筋電図の測定には、64チャンネル高密度電極グリッド (GR08MM1305; 13行×5列; 直径1mm; 電極間距離8mm, OT Bioelettronica, Torino, Italy) が用いられた。貼付位置の基準として、対象者の大転子から膝蓋骨外側上端を結ぶ基準線を設け、電極の3列目を基準線に沿わせ、7行目を基準線の midpoint に合わせた位置に貼付した。電極の貼付箇所は必要に応じて剃毛し、清潔な水で洗浄された。電極は伝導性ペースト (Elefix V, 日本光電, 東京) が充填された両面粘着フォーム (KIT08MM1305, OT Bioelettronica, Torino, Italy) によって貼付された。湿った電極ストラップ (WS2, OT Bioelettronica, Torino, Italy) が下腿近位端に固定され、アース電極として用いられた。筋電図信号は単極モードで記録し、16ビットマルチチャンネルアンプ (Sessantaquattro, OT Bioelettronica, Torino, Italy) を用いてデジタルデータに変換され、力のデータと同期された。これらの信号は256倍に増幅された後に2,000Hzでサンプリングされ、バンドパスフィルター (10-500Hz) によって処理された。

1. 5 力と高密度表面筋電図の解析

解析は、MATLAB (MATLAB R2019a, MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts) を用いて行われた。発揮された力のデータは、4次の low-pass digital butterworth filter (カットオフ周波数6Hz) によって処理された。ランプアップ局面における力の正確性の評価として、分析区間における発揮筋力 (%MVC) とターゲットの差の標準偏差から力の安定性 (Force steadiness, 以下FS) を求めた。このFSは発揮筋力の変動性を示しており、数値が高いほど力の正確性が低いことを意味している。高密度表面筋電図から得られた64個の単極信号は、電極グリッドの長軸方向に隣接する電極間で差動導出した。次に59個の双極信号に対して

Decomposition of Motor Unit Surface EMG (DEMUSE) ソフトウェア (ver. 5.0.1; University of Maribor, Slovenia) と Convulsion Kernel Compensation法を使用した分解分析を行った^{12, 13)}。検出された全てのMUは、経験豊富な1名の研究者によって注意深く解析処理が行われ、パルスノイズ比が30dBを超えるMUのみが分析に使用された¹⁴⁾。各MUについて、ランプアップ課題中のスパイク間隔の逆数よりMU FRが算出された。各MUの最初の発火の瞬間に発揮されている発揮筋力 (%MVC) が、そのMUの動員閾値 (RT) として定義された。10, 20, 30, および40%MVCにおけるMU FRは、それぞれ7.5 - 12.5, 17.5 - 22.5, 27.5 - 32.5, および37.5 - 42.5%MVCの区間におけるMU FRの中央値から定義し、隣接する区間での発火頻度の変化量 (Δ MUFR) を算出した (図1)。MU FRは動員閾値 (Recruitment threshold, 以下RT) の影響を受けるため、検出されたMUをRT別に4つのグループに分け、対応するMUを群間で比較した: 1) RTが10%MVC未満のMU, 2) RTが10%以上20%未満のMU, 3) RTが20%以上30%未満のMU, および4) RTが30%以上40%未満のMU。

1. 6 統計

測定データは、平均値±標準偏差で示された。独立したサンプルのt検定を用いて、グループ間のMVC、体重に対するMVC (MVC/BW)、FSを比較した。MU FRと Δ MU FRを比較するために、被験者間因子として群 (子ども vs 大人)、被験者内因子として発揮筋力 (10, 20, 30, および40%MVC; 10 - 20, 20 - 30, および30 - 40%MVC) とする二要因分散分析を行った。有意な交互作用が認められた場合は、Bonferroni法による事後検定を用いた。全ての統計分析は、SPSS 26.0 (IBM Corp., Armonk, NY) によって実行され、有意水準は0.05に設定された。

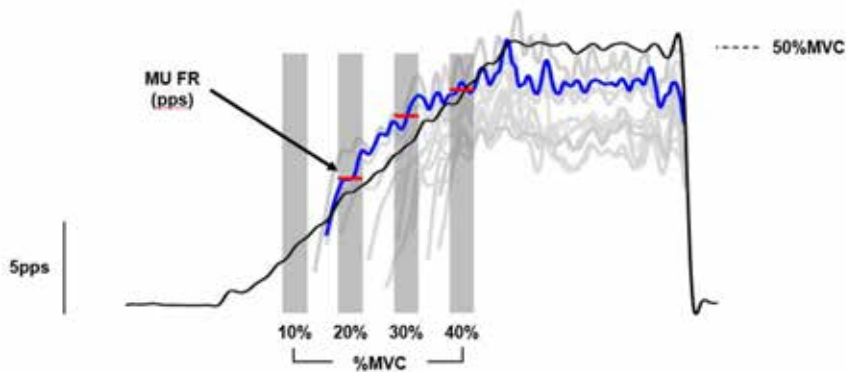


図1 ランプアップ収縮中における個々の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の典型例
 黒い線は発揮筋力を示し、青色および灰色の線は個々の MU FR を示している。赤い線は、MVCの20, 30, および 40%MVCにおける MU FR を示している。MU FRは、それぞれMVCの17.5~22.5%, 27.5~32.5%, および37.5~42.5%の区間で見られる MU FR の中央値から計算されている。MU FR の増加量 (Δ MU FR) は隣接する区間の MU FR との差から計算されている。

表1 対象者の身体特性と最大筋力, 力の安定性

	子ども (n = 18)	大人 (n = 18)	p value
年齢 (歳)	9.46 ± 1.62	22.1 ± 3.4	
身長 (m)	1.35 ± 0.09	1.71 ± 0.57	
体重 (kg)	28.8 ± 5.1	65.2 ± 8.80	
MVC (Nm)	57.4 ± 19.7	210.8 ± 57.9	<0.001
MVC/BW (Nm/kg)	2.0 ± 0.5	3.2 ± 0.7	<0.001
FS (%MVC)	1.80 ± 0.62	0.96 ± 0.28	<0.001

MVC, maximal voluntary isometric contraction, 等尺性最大膝伸筋力; BW, body weight, 体重; FS, force steadiness 力の安定性

2. 結果

2.1 最大筋力と力の正確性

子どもは大人よりも MVC および MVC/BW おいて有意に低い値を示した。ランプアップ局面における FS について、子どもが大人と比較して高い FS を示した (表1)。

2.2 運動単位発火頻度

各群においてランプアップ課題中に検出された MU の数と RT を図2に示した。大人と比較して子どもでは少ない数の MU が検出されたが、群間で RT に有意な差は確認されなかった ($p=0.154$)。子ども (9.6歳) と大人 (23.5歳) における MU FR の典型例を図3に示す。

RT が 10%MVC 未満の MU においては、MU FR に対する 群 × 発揮筋力の交互作用が統計的

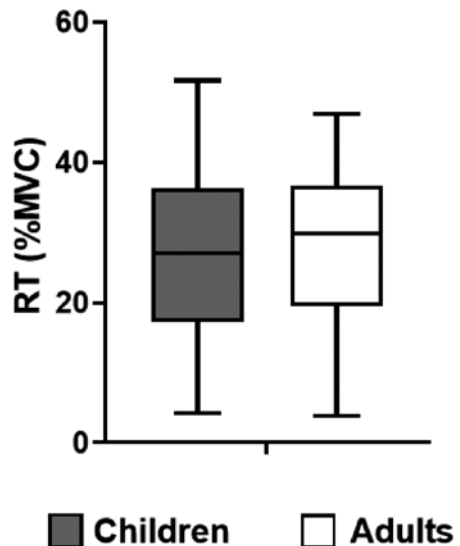


図2 子ども (Children) と大人 (Adults) におけるランプアップ課題中に検出された運動単位 (MU) の数と動員閾値 (RT) 群間で RT に有意差は認められなかった。

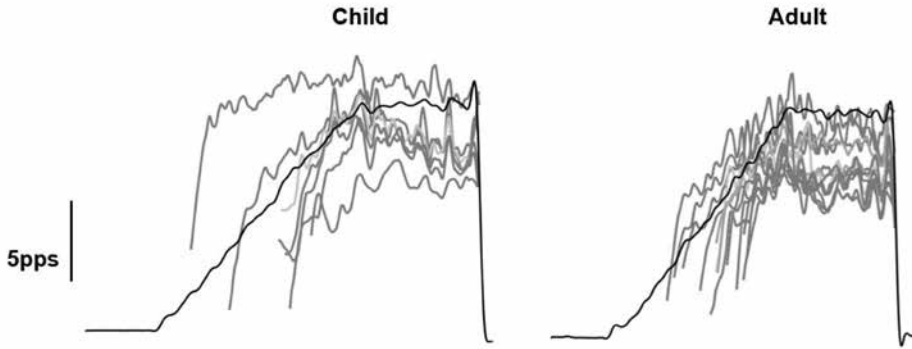


図3 子ども (Child, 9.6 歳) と大人 (Adult, 23.5 歳) におけるランプアップ課題中における個々の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の典型例
黒い線は発揮筋力を示し, 灰色の線は個々の MU FR を示している。

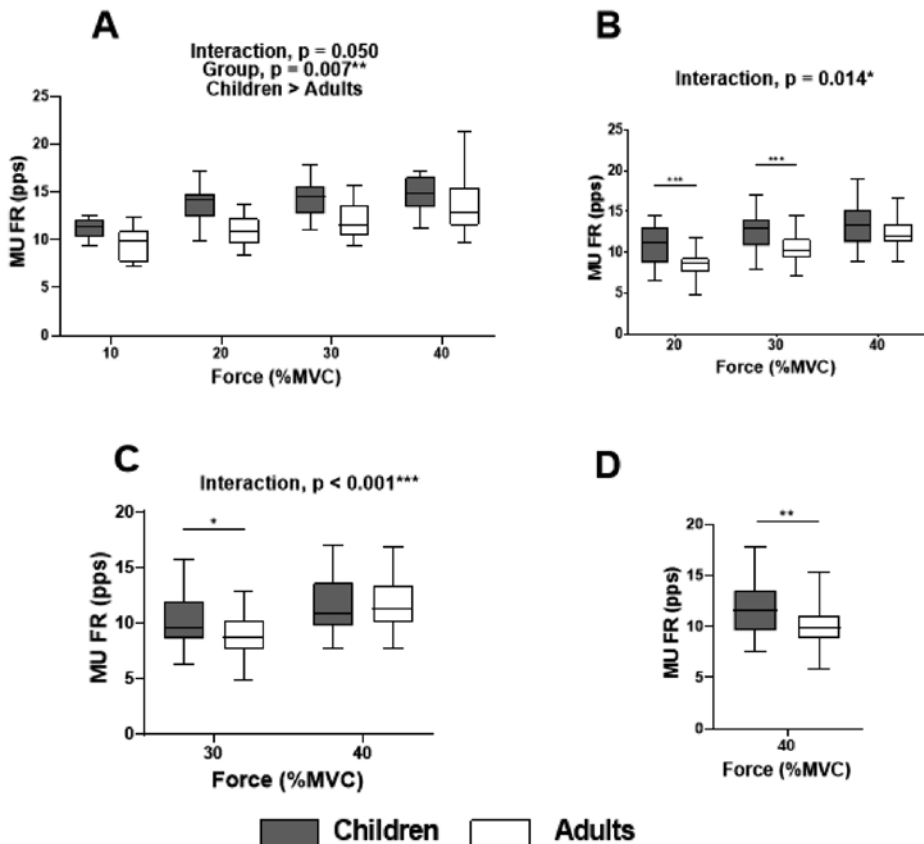


図4 ランプアップ課題中における, 子ども (Children) および大人 (Adult) の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR)
(A) 動員閾値 (RT) が10%MVC未満のMU, (B) RTが10%以上20%未満のMU,
(C) RTが20%以上30%未満のMU, (D) RTが30%以上40%未満のMU. *, $p < 0.05$. **, $p < 0.01$. ***, $p < 0.001$.

に有意ではないものの, 傾向として確認された ($p=0.050$). MU FR に対する有意な群の主効果が確認され ($p=0.007$), 子どもは大人よりも有意に高い MU FR を示した (図4A).

RT が 10%MVC 以上 20%MVC 未満の MU においては, MU FR に対する 群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた ($p=0.014$). 子どもは大人よりも, 20 および 30 % MVC の区間で有意に高い

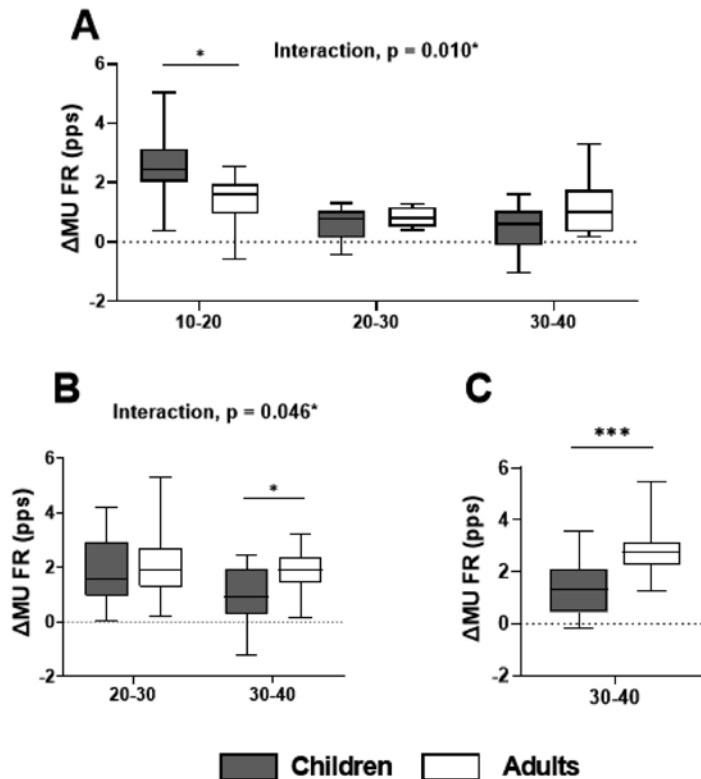


図5 ランプアップ課題中における,子ども (Children) および大人 (Adult) の運動単位 (MU) 発火頻度 (FR) の増加量 (Δ MU FR) (A) 動員閾値 (RT) が10%MVC未満のMU, (B) RTが10%以上20%未満のMU, (C) RTが20%以上30%未満のMU. *, $p < 0.05$. **, $p < 0.01$. ***, $p < 0.001$.

MU FRを示したが, 40%MVCの区間では有意な差は認められなかった(図4B)。

RTが20%MVC以上30%MVC未満のMUにおいては, MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた($p < 0.001$)。子どもは大人よりも, 30%MVCの区間で有意に高いMU FRを示したが($p = 0.030$), 40%MVCの区間では有意な差は認められなかった(図4C)。

RTが30%MVC以上40%MVC未満のMUにおいては, 子どもは大人よりも, 40%MVCの区間で有意に高いMU FRを示した(図4D, $p = 0.001$)。

2. 3 運動単位発火頻度の増加量

RTが10%MVC未満のMUにおいては, Δ MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた($p = 0.010$)。子どもは大人よりも, 10-

20% MVC区間において有意に高い Δ MU FRを示した(図5A, $p = 0.034$)。

RTが10%MVC以上20%MVC未満のMUにおいては, Δ MU FRに対する群×発揮筋力の有意な交互作用が認められた($p = 0.046$)。子どもは大人よりも, 30-40%MVC区間において有意に低い Δ MU FRを示したが($p = 0.046$), 20-30%MVC区間においては有意な差が認められなかった(図5B, $p = 0.046$)。

RTが20%MVC以上30%MVC未満のMUにおいては, 子どもは大人よりも, 30-40%MVCの区間で有意に低い Δ MU FRを示した(図5C, $p < 0.001$)。

3. 考察

本研究では, 1) ランプアップ課題中の力の正

確性に子どもと大人で違いが見られるか、2) ランプアップ課題中のMU活動に子どもと大人で違いは見られるかを検討した。結果より、子どもは大人と比較してランプアップ課題中の力の正確性が劣ることが示された。さらにMU活動に着目すると、MU FRは多くの分析区間において子どもが高い値を示すことが明らかとなった。ΔMU FRについては、RTの低いMUにおいて動員初期の区間で高いΔMU FRが認められ、対照的にRTのやや高いMUにおいては動員初期を除く区間において子どもが低いΔMU FRを示すことが明らかとなった。

子どもは大人と比較し、ランプアップ局面のあらゆる区間でFSが高いことが示され、すなわち力の正確性が劣っていることが示された(表1)。これまでの先行研究では、一定の筋力発揮を維持するような課題を採用し、子どもにおける低い力の正確性を報告してきた¹⁻⁵⁾。本研究は、発揮筋力の正確な調整に着目し、一定の割合で発揮筋力を増加させるランプアップ局面においても、大人と比較して子どもの力の正確性が劣ることを示した初めての研究である。以降は、このランプアップ局面に見られる運動単位活動の特徴について検討する。

子どものMU FRは、ほとんどの分析区間において大人よりも有意に高いことが示された(図4)。検出された全てのMUはRTに基づいて分類され比較されたが、RTに特有の結果は確認されず、ほとんどの区間で子どものMU FRが高い結果を示した。これらの結果は、子どもの筋線維に見られる収縮特性によって説明される可能性がある。先行研究では、子どもの筋線維において後過分極時間が大人と比較して短いことが報告されている¹⁵⁾。この後脱分極時間の長短は、筋線維が完全強縮するために必要な発火頻度(電気刺激による誘発筋力発揮の場合は刺激頻度)の高低と関連する。すなわち子どもの筋線維に見られる短い

後過分極時間は、完全強縮のためにより高い発火頻度を要求する特性を有していることを示している。子どもにおいて電気刺激による誘発筋力発揮を調査した先行研究では、最大下での刺激周波数(10Hz)において、より年齢の低い子ども(9歳)はより年齢の高い子ども(15歳)に比べて誘発筋力が低いことが示されている¹⁶⁾。このことは子どもの中でも、より年齢が低いほど、完全恐縮には、より高い頻度での運動単位の発火が必要であることを意味している。本研究では、末梢の筋線維特性に関する直接的な評価は実施できていないが、子どもにおいて観察されたより高いMU FRは、筋線維が有する電気生理学的な特性によって説明づけられると考えられる。

また子どものΔMU FRについて着目すると、RTが低いMUにおける動員初期の区間を除いて、ΔMU FRは大人と同等もしくは低い傾向が見られた(図5)。子どもは筋線維の特性に応じて動員初期にFRを急激に増加させている。そのため、個々のMUによってより大きな筋力を発揮するためにFRを増大する余地が限られている可能性がある。本研究では、40%MVC未満で動員されたMU活動を調査したため、RTが高いMUについてさらなる調査が必要である。しかしながら、ランプアップ課題中における子どものMUは、動員初期において大きくFRが増加し、発揮筋力の増大に伴うΔMU FRが小さい特徴を有していることが明らかとなった。

以上の結果は、子どもにおけるMUの動員戦略に関して示唆を与えるものである。一般的に、子どもは随意最大筋力を発揮する際の随意活動レベルが低いということが指摘されている¹⁷⁻¹⁹⁾。すなわち、子どもは発揮筋力の大きさに寄与する神経的要因の貢献が小さいとされている。しかしながら、本研究では子どもにおいてより高いMU FRが確認されたため、これらの見解と矛盾する傾向であった。一方で、本研究の結果は、子ども

において大きな筋力発揮を行う際に、新たなMUを動員することができていない可能性も示唆。理論的には、発揮筋力の増大に寄与するMU活動には、MU FRを増大させることと、新たなMUを動員することという2つが考えられる⁹⁾。このような生理学的な背景に基づけば、個々のMUがより高いFRを示す場合、子どもにおける神経的要因の小さな貢献は、動員されるMUの数がより少ないということを意味するだろう。筋収縮中に見られるMUの動員数を評価する方法はこれまで確立されていないため、この示唆に関してはさらなる研究が必要であると考えられる。しかしながら本研究は、子どもが大人よりも高いMU FRで筋力の発揮を制御していること、そして新たなMUの動員が十分に行われていない可能性を示した。

本研究で示された、子どもの低い力の正確性、高いMU FR、小さい Δ MU FRは、子どものための筋力トレーニングと運動プログラムに対して重要な示唆を与える。子どもでは大人と比較して神経的要因が著しく劣っているとされており、そのため長期的なアスリートの育成モデルにおいては神経的要因の機能を向上させる運動プログラムが推奨されている^{6,7)}。しかし本研究では、動員されているMUは高いFRを示すことが明らかとなり、これは子どもがより大きなサイズのMUを動員できていない可能性を示している。現在の子どもの向けのガイドラインでは、安全上の理由から低強度のトレーニングや運動プログラムが推奨されているが^{6,7)}、我々の研究は、より少ないMUの動員のみで遂行される低強度のトレーニングでは、子どもの神経的要因の機能を改善するには不十分であることを示唆している。安全に配慮した上で、大きな発揮筋力を必要とするトレーニングや運動プログラムが、運動機能の発達のために重要である可能性がある。また、神経系の機能に関する特徴が末梢の筋線維特性に起因しているという点に基づけば、子どもにおいては中枢神経より

も末梢の筋線維特性の適応が運動機能の発達に寄与している可能性が考えられる。今後、これらのMU活動が何歳で大人と同じレベルに達するのか、さらに末梢の筋線維特性との関連について詳細な検討が行われることが期待される。

本研究にはいくつかの限界がある。第一に、方法論上の制約により拮抗筋からのMU活動を評価することができなかったため、主動筋と拮抗筋の共収縮による影響が本研究の結果に影響を与えている可能性が考えられる。子どもにおいて、より大きな共収縮が見られるかについては議論があるが^{17,20,21)}、今後方法論上の発展とともにさらなる研究が期待される。さらに、ランプアップ課題の目標を50%MVCとしたため、より高い収縮強度ではMU活動が異なる可能性がある²²⁾。

4. 結 論

結論として、6歳から12歳の子どもにおいては、ランプアップ課題中に見られる力の正確性が大人と比較して劣っていた。神経系の特徴に着目すると、子どものMU FRは大人と比較して高いことが明らかとなり、動員初期の段階で高いMU FRが獲得され、その後の Δ MU FRについては大人と比較して小さいことが示された。これらの結果は、子どものMU活動の特徴として、大人よりも高いFRで活動することができるものの、新たなMUの動員が行われにくい可能性を示唆している。

謝 辞：

本研究に対して助成を賜りました公益財団法人石本記念デサントスポーツ科学振興財団に厚く御礼申し上げます。また、本研究の実施に当たり多大なご協力を頂きましたみよしスポーツアカデミーならびに研究協力者の皆様に厚く御礼を申し上げます。

文 献

- 1) Smits-Engelsman B.C., Westenberg Y., Duysens J., Development of isometric force and force control in children., *Brain Res. Cogn. Brain Res.*, 17 (1) :68-74 (2003)
- 2) Smits-Engelsman B.C., Van Galen G.P., Duysens J., Force levels in uni- and bimanual isometric tasks affect variability measures differently throughout lifespan., *Motor Control.*, 8 (4) :437-49(2004)
- 3) Deutsch K.M., Newell K.M., Age differences in noise and variability of isometric force production., *J. Exp. Child. Psychol.*, 80 (4) :392-408(2001)
- 4) Deutsch K.M., Newell K.M., Children's coordination of force output in a pinch grip task., *Dev. Psychobiol.*, 41 (3) :253-64(2002)
- 5) Potter N.L., Kent R.D., Lindstrom M.J., Lazarus J.A., Power and precision grip force control in three-to-five-year-old children: velocity control precedes amplitude control in development., *Exp. Brain Res.*, 172 (2) :246-60(2006)
- 6) Ford P., De Ste Croix M., Lloyd R. et al., The long-term athlete development model: physiological evidence and application., *J. Sports Sci.*, 29 (4) :389-402(2011)
- 7) Lloyd R.S., Cronin J.B., Faigenbaum A.D. et al., National Strength and Conditioning Association Position Statement on Long-Term Athletic Development., *J. Strength Cond. Res.*, 30 (6) :1491-509(2016)
- 8) Scammon R.E., The measurement of body in childhood., *The Measurement of Man.*, (1930)
- 9) Enoka R.M., Morphological features and activation patterns of motor units., *J. Clin. Neurophysiol.*, 12 (6) :538-59(1995)
- 10) Ely I.A., Jones E.J., Inns T.B. et al., Training-induced improvements in knee extensor force accuracy are associated with reduced vastus lateralis motor unit firing variability., *Exp. Physiol.*, 107 (9) :1061-70(2022)
- 11) Vila-Cha C., Falla D., Strength training, but not endurance training, reduces motor unit discharge rate variability., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 26:88-93 (2016)
- 12) Holobar A., Farina D., Gazzoni M., Merletti R., Zazula D., Estimating motor unit discharge patterns from high-density surface electromyogram., *Clin. Neurophysiol.*, 120 (3) :551-62(2009)
- 13) Holobar A., Zazula D., On the selection of the cost function for gradient-based decomposition of surface electromyograms., *Annu. Int. Conf. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, 2008:4668-71 (2008)
- 14) Holobar A., Minetto M.A., Farina D., Accurate identification of motor unit discharge patterns from high-density surface EMG and validation with a novel signal-based performance metric., *J. Neural. Eng.*, 11 (1) :016008(2014)
- 15) Piotrkiewicz M., Kudina L., Mierzejewska J., Jakubiec M., Hausmanowa-Petrusewicz I., Age-related change in duration of afterhyperpolarization of human motoneurons., *J. Physiol.*, 585 (Pt 2) :483-90(2007)
- 16) Backman E., Henriksson K.G., Skeletal muscle characteristics in children 9-15 years old: force, relaxation rate and contraction time., *Clin. Physiol.*, 8 (5) :521-7(1988)
- 17) Grosset J.F., Mora I., Lambertz D., Perot C., Voluntary activation of the triceps surae in prepubertal children., *J. Electromyogr. Kinesiol.*, 18 (3) :455-65(2008)
- 18) Paasuke M., Ereline J., Gapeyeva H., Twitch contraction properties of plantar flexor muscles in pre- and post-pubertal boys and men., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 82 (5-6) :459-64(2000)
- 19) Martin V., Kluka V., Garcia Vicencio S., Maso F., Ratel S., Children have a reduced maximal voluntary activation level of the adductor pollicis muscle compared to adults., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115 (7) :1485-91(2015)
- 20) Dotan R., Mitchell C., Cohen R., Klentrou P., Gabriel D., Falk B., Child-adult differences in muscle activation--a review., *Pediatr. Exerc. Sci.*, 24 (1) :2-21(2012)
- 21) Kellis E., Unnithan V.B., Co-activation of vastus lateralis and biceps femoris muscles in pubertal children and adults., *Eur. J. Appl. Physiol. Occup. Physiol.*, 79 (6) :504-11(1999)
- 22) Gillen Z.M., Housh T.J., Schmidt R.J. et al., Comparisons of muscle strength, size, and voluntary activation in pre- and post-pubescent males and females., *Eur. J. Appl. Physiol.*, 121 (9) :2487-97 (2021)