

スポーツ競技者における骨格筋の形態と機能的特性

Structural and functional characteristics of skeletal muscles in competitive athletes

角田直也*, 田中重陽**, 手島貴範**, 高橋佑輔***
平塚和也****, 伊原佑樹****, 熊川大介*****

Naoya TSUNODA*, Shigeharu TANAKA**, Takanori TESHIMA**
Yusuke TAKAHASHI***, Kazuya HIRATSUKA****
Yuki IHARA**** and Daisuke KUMAGAWA*****

プロジェクト研究の概要:

これまでに本プロジェクト研究では、スポーツ選手を対象として骨格筋の形態及び機能的特性を探るために以下の課題について取り組んできた。

- 1) スポーツ選手の筋形態特性
- 2) スポーツ選手の無酸素性パワー発揮特性
- 3) スポーツ選手の筋出力特性

1) の課題に対しては野球選手を対象に上肢、下肢及び体幹の筋形態特性について (平成 18、19 年度) 報告してきた。また、2) の課題については、競技種目別 (平成 18 年度)、負荷重量と回転数の影響 (平成 18、19、20 年度) 及び性差 (平成 19、20、21 年度) の観点から検討してきた。さらに、3) の課題に関しては、野球選手を対象に体幹筋群の筋出力発揮特性 (平成 20 年度) や、筋出力発揮時の筋活動動態 (平成 22 年度) について検討してきた。

本報では、本年度実施した 1) ~ 3) の課題に対する研究成果の一部を報告する。

I. スポーツ選手における大腿部の筋形態特性を探る

ヒトの身体活動は骨格筋の活動によって生じる。これまでに骨格筋の形態特性については多くの報告^{2) 4) 5) 8) 10)} がなされてきた。スポーツ選手においては、長期間に亘る専門種目のトレーニングによって、特異的な筋の発達部位が存在することが明らかにされている^{4) 10)}。スポーツ選手における骨格筋の形態を正確に捉え評価することは、競技能力向上のためのトレーニングプログラム作成において重要な課題である。本研究では、MRI 法及び超音波法を用いて、スポーツ選手の大腿部の筋形態特性を評価した。

被検者は定期的なスポーツ活動を実施している大学生スポーツ選手 16 名とした。被検者の年齢、身長及び体重は、それぞれ 20.5 ± 1.3 歳、 173.6 ± 6.1 cm、 81.8 ± 14.1 kg であった。

大腿部の局所的な筋形態の指標として、超音波診断装置を用いて大腿長の 50% に相当する大腿部前部、外側部、内側部及び後部の筋厚値をそれ

* 国士館大学体育学部身体運動学研究室 (Lab. of Biodynamics and Human Performance, Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

** 国士館大学大学院スポーツ・システム研究科 (Assistant of Graduate School of Sports System, Kokushikan University)

*** 国士館大学体育学部教務助手 (Educational Assistant Faculty of Physical Education, Kokushikan University)

**** 国士館大学体育学部附属体育研究所 (Institute of Health, Physical Education and Sport Science, Kokushikan University)

***** 国立スポーツ科学センター (Japan Institute of Sports Science)

ぞれ計測した。また、磁気共鳴影像法 (MRI) により大腿部の筋縦断画像を撮影した後、腸骨稜から頸骨骨頭までの横断画像をスライス厚 10mm、スライス間隔 0 mm により連続的に撮影した。撮影した横断画像から、伸筋群 (Extensors) の大腿直筋 (Rectus femoris)、外側広筋 (Vastus lateralis)、中間広筋 (Vastus intermedius) 及び内側広筋 (Vastus medialis)、屈筋群 (Flexors) の大腿二頭筋短頭 (Biceps femoris)、大腿二頭筋長頭 (Biceps femoris long head)、半腱様筋 (Semitendinosus)、半膜様筋 (Semimembranosus)、縫工筋 (Sartorius) 及び薄筋 (Gracilis) の解剖学的横断面積を算出した。さらに、各筋の体積を秋間ら²⁾の算出方法によって求め、各筋の総合計

値を大腿部の全筋体積 (Whole muscle volume) として分析の対象とした。

まず、全筋体積と各筋群の体積との関係について検討した (Table 1)。その結果、大腿二頭筋短頭を除く筋群において、全体積との間に有意な相関関係が認められ、いずれも高い相関係数が得られた。次に、全筋体積を独立変数に、各筋群の筋体積を従属変数としてステップワイズ法による重回帰分析を行ったところ、説明変数として選択された筋群は、内側広筋と半膜様筋であった (Table 2)。この 2 つの筋体積によって大腿部の全筋体積を約 98% 推定できることが推察された。また、局所的な筋形態の指標である筋厚値についても全筋体積との重回帰分析を行ったところ、説

Table 1. Significantly regression formula and correlation coefficients of between whole muscle volume and each muscle volume.

	Regression formula	Correlation coefficient
Extensors muscle	$y = 1.4678x + 143.58$	$r = 0.985^{**}$
Flexors muscle	$y = 2.6297x + 347.48$	$r = 0.945^{**}$
Rectus femoris	$y = 5.8864x + 1567.2$	$r = 0.833^{**}$
Vastus lateralis	$y = 3.7512x + 684.36$	$r = 0.911^{**}$
Vastus intermedius	$y = 4.521x + 736.85$	$r = 0.847^{**}$
Vastus medialis	$y = 5.9184x + 171.53$	$r = 0.981^{**}$
Biceps femoris	n.s.	n.s.
Biceps femoris long head	$y = 9.3899x + 1152.3$	$r = 0.843^{**}$
Semitendinosus	$y = 8.9113x + 1408.3$	$r = 0.755^{**}$
Semimembranosus	$y = 7.2841x + 1513.1$	$r = 0.861^{**}$
Sartorius	$y = 8.9843x + 1987.6$	$r = 0.668^{**}$
Gracilis	$y = 12.184x + 2148.9$	$r = 0.587^{*}$

*: $p < 0.05$, **: $p < 0.01$

Table 2. Correlation of multiple regression between whole muscle volume and each muscle thickness.

Invariable	r	r ²	F-value	p-value	bi
Muscle volume	0.988	0.976	252.727	<0.0001	
Vastus medialis					0.819
Semimembranosus					0.201
Muscle thickness	0.873	0.762	44.753	<0.0001	
Thigh lateral					0.873

bi: standardised partial regression coefficient

明変数として選択された部位は、大腿外側部の筋厚値であった。

大腿前部、外側部及び内側部の筋厚値と膝伸筋群の筋体積との関係 (Fig.1-a)、大腿後部の筋厚値と膝屈筋群の筋体積との関係 (Fig.1-b) についてみたところ、全ての項目間に有意な相関関係が認められた。また、各部位の筋厚値と全筋体積の関係についても全ての項目間に有意な相関関係が認められた (Fig.1-c)。これらの結果から、大腿部の筋体積は局所的な筋形態の指標である筋厚値によって、推定可能であることが考えられる。しかしながら、Fig.1-aに示した両者の関係の回帰式を用いて、各部位の筋厚値から伸筋群の筋体積を推定する際は、回帰直線の勾配状況を考慮する

と、筋厚値が約5 cm未満の際は外側部の筋厚値から推定する伸筋群の体積は、大腿部前部及び内側部のそれよりも低値を示す。また、各部位の筋厚値から全筋体積 (Fig.1-c) を推定する際についても、伸筋群の筋厚値 (大腿前部、外側部、内側部) と屈筋群の筋厚値 (大腿後部) では異なることが推察された。

MRI法による筋形態の測定は、これまでに多くの先行研究^{4) 5) 10)} で用いられており、スポーツ選手の筋形態特性を評価する際に有用であるが、医療施設の利用や多額の費用がかかることに加え、トレース技術の精度や分析に多くの時間を費やすことになる。一方、超音波法は局所的な筋形態の指標として比較的簡単に測定することがで

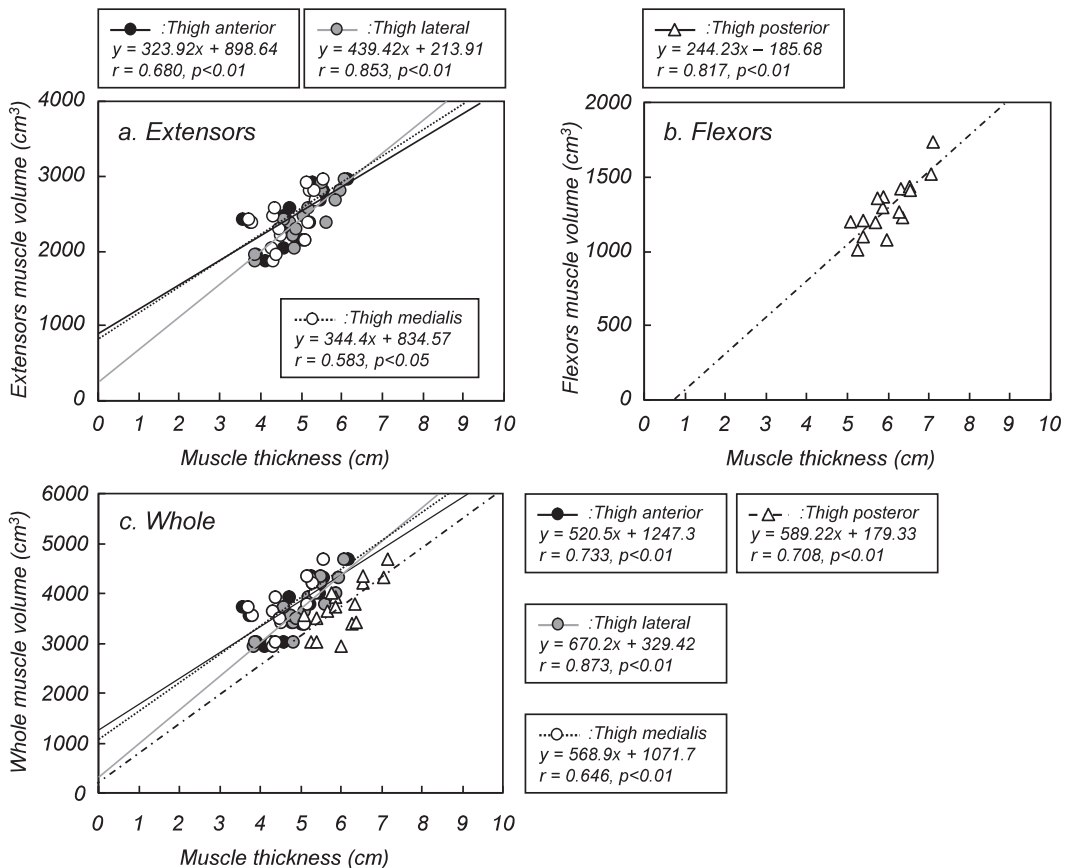


Fig.1. Relationships between muscle thickness and muscle volume.

き、大腿部の筋体積を反映する指標として有効⁸⁾であるものと思われる。しかし、回帰式により推定する筋体積は、部位によって差異が生じることを十分考慮しなければならない。

II. 医科学サポートにおける骨格筋の形態及び機能の年間変化

文部科学省によってスポーツ立国戦略⁹⁾が策定された。このスポーツ政策に対して、体育・スポーツ系大学としての社会的な役割は、スポーツ立国戦略の中で具体的な戦略として挙げられている、世界で競い合うトップアスリートの育成・強化や社会全体でスポーツを支える基盤の整備に貢献することであると考えられる。従って、ジュニアアスリートが世界で通じるトップレベルまで育成するために、長期にわたる継続的なサポートが必要であるものと思われる。

アスリートが国際的な競技スポーツのステージで活躍するためには体力的要素と技術的要素を高めることが重要である。競技スポーツの分野では早期に強い選手を見つけ出し、育成していくことはあらゆる競技種目において重要な課題である。そのため、東京都では優れたジュニアアスリート選手における競技力を飛躍的に向上させるために、医学・科学的サポート事業を実施している。その取り組みは、ジュニアアスリートを対象として体力及び技術的要素について医科学的観点から選手個々にサポートするものである。我々はスポーツ科学的な手法を用いたサポートを継続的に実施し、ジュニアアスリートの発育・発達に応じたスポーツ競技力向上のための体力及び技術的要素に関するトレーニングプログラムを学術的観点から作成することを目的としている。本報では、1)

ジュニアアスリートの基礎運動能力の年間変化、2) ジュニアアスリートの筋形態及び筋機能の年間変化、について報告する。

1) ジュニアアスリートにおける基礎運動能力の年間変化

2010年5月30日から2012年1月29日の期間において、レスリング(5名)、自転車競技(4名)及び空手(2名)のジュニアアスリート選手を対象に、文部科学省が指定する体力テスト及びベンチプレスとスクワットの最大挙上量の測定を行った。1回目の測定をPreとし、1年間の期間において2回目の測定(Post)を実施した。Table 3は、対象者の形態測定の結果をPreとPostで比較したものである。全被検者において身長 of 著しい変化が認められた。次に、レスリング及び自転車競技選手の形態項目について比較したところ、レスリング選手は身長、体重及び全身筋量が著しく向上していた。それに対して、自転車競技は全身筋量のみ有意な増加が確認された。

基礎運動能力については、瞬発的なパワー発揮能力の評価項目である立ち幅跳びとメディシンボール投げにおいてPostがPreよりも有意に高い値を示した(Table 4)。また、敏捷性の評価項目である反復横跳びと、筋力の評価項目であるベンチプレス及びスクワットの最大挙上量において著し

Table 3. Changes of physical characteristics between pre and post.

n=11	Age (yrs)	Body height (cm)	Body weight (kg)	Muscle volume (kg)
Pre	16.4±0.5	162.4±9.0	55.7±6.9	45.5±8.0
Post	17.4±0.5	163.4±9.7	58.8±10.2	46.7±9.5
Change ratio (%)		0.6±0.8	2.2±5.7	5.1±7.6
Wrestler (n=5)	Pre	166.3±5.9	60.0±5.1	50.9±5.8
	Post	168.3±6.8	67.2±7.2	54.5±5.6
Cyclist (n=4)	Pre	162.0±11.9	55.9±3.4	42.4±8.0
	Post	161.9±12.3	54.9±4.5	41.1±8.0

Mean ± S.D.. *: p < 0.05

い向上が確認された。一方、筋持久力及び全身持久力を評価する上体起こし及び20mシャトルランでは、PreとPost間に有意な差は認められなかった。6歳から20歳までの発育期の瞬発的な筋力測定をした先行研究⁶⁾によれば、男子は17歳まで発達し、それ以降の発達速度は減少するものの発達は続くことが報告されている。また、瞬発的な筋力の発達は、筋の収縮によって発揮される筋力の発達に大きく左右されることが報告されている。本研究における被検者の年齢層は、Preが16.4 ± 0.5歳、Postが17.4 ± 0.5歳であり、先行研究⁶⁾で指摘されているように発育期に該当する。そのため、骨格筋の発達に伴って瞬発的な筋力やパワー発揮能力に関連の深い項目の向上が認められたものと推察された。しかしながら、対象者全員が日常より専門的なトレーニングや高強度のトレーニングを反復していることや、全被検者の形態計測の項目において身長以外に著しい変化が認められていないことを考慮すると、基礎運動能力の著しい向上は、自然発育の影響よりもトレーニングの影響を強く受けたものと推察された。

Table 5は、レスリング及び自転車競技選手における1年間の体力テスト項目の変化を示した。レスリングにおいて有意にPreに対してPostで増加した項目は、30mダッシュ、メディシンボール投げ（オーバーヘッドスロー）、ベンチプレスの最大挙上量であった。自転車におけるPreとPost間で有意に増加した項目は、メディシンボール投げ（アンダーハンドスロー）とスクワットの最大挙上量であった。このように、種目において著しく向上する項目が異なるのは、競技特有のトレーニングの影響であるものと思われる。

ジュニア期のスポーツ選手の筋形態や運動能力の変化を縦断的に評価することは、競技力の向上や個人の発育状況に応じたトレーニングプログラムの作成に有効である。今後は、データ収集を継続的に行い、スポーツバイオメカニクス、スポーツ生理学、発育・発達学及びトレーニング科学等の学術的観点から、選手個人に適した（発育・発達度合い）トレーニングプログラムの考案に努めたい。

Table 4. Changes of physical fitness in all subjects.

Parameters		Pre	Post	Change ratio (%)
Instantaneous capacity	30m-dash (m/s)	4.8 ± 0.4	4.7 ± 0.4	-1.2 ± 3.6
	Standing jump (cm)	214.6 ± 24.1	* 223.4 ± 28.2	4.0 ± 5.0
	Medicine boll front throwing (m)	7.4 ± 2.0	* 9.1 ± 1.8	24.8 ± 7.4
	Medicine ball back throwing (m)	7.1 ± 2.5	* 8.8 ± 2.4	28.9 ± 41.2
Agility	Repeated horizontal jump (time)	55.3 ± 6.8	* 59.4 ± 4.8	8.1 ± 8.8
Muscle strength	Grip strength (kg)	36.4 ± 9.0	38.3 ± 10.1	5.1 ± 9.1
	Bench press (kg)	54.0 ± 21.4	* 60.5 ± 26.1	6.4 ± 7.8
	Squat (kg)	80.5 ± 19.4	* 99.5 ± 31.6	24.8 ± 14.8
Endurance	Sit up (time)	33.7 ± 4.7	34.8 ± 4.8	3.8 ± 10.6
	20m-shuttle run (time)	95.6 ± 26.0	96.1 ± 20.5	3.5 ± 14.8

(Wrestler: 5, Cyclist: 4, Karate: 2)

Mean ± S.D.. * : p < 0.05

Table 5. Changes of physical fitness in wrestler and cyclist.

Parameters		Wrestler		Cyclist	
		Pre	Post	Pre	Post
Instantaneous capacity	30m-dash (m/s)	4.6±0.1	*- 4.4±0.2	5.0±0.5	5.0±0.4
	Standing jump (cm)	229.4±14.6	244.0±21.0	203.3±31.1	208.0±26.8
	Medecine boll front throwing (m)	8.5±0.3	*- 10.6±1.4	6.1±2.7	7.6±1.3
	Medecine ball back throwing (m)	8.8±1.1	10.7±1.5	5.5±3.1	*- 7.1±2.2
Agility	Repeated horizontal jump (time)	59.4±6.9	62.8±3.1	52.0±6.1	54.3±2.8
Muscle strength	Grip strength (kg)	42.1±5.6	44.2±7.8	33.7±10.4	35.5±10.5
	Bench press (kg)	74.4±17.4	*- 83.5±19.0	40.6±10.9	40.6±11.6
	Squat (kg)	96.3±18.9	114.0±39.7	75.0±7.1	*- 98.8±2.5
Endurance	Sit up (time)	35.8±1.5	38.0±2.7	30.5±7.0	29.5±2.6
	20m-shuttle run (time)	106.8±11.4	102.0±6.8	85.3±40.6	92.0±34.6

Mean ± S.D.. * :p<0.05

2) ジュニアアスリートにおける筋形態及び筋機能の年間変化

レスリングはフリーとグレコローマンの2つのスタイルが存在し、階級制によるスポーツである。従って、対戦者の体格はほぼ同じであるために、試合を優位に進めるためには、体重に占める筋量の増加、体重当たりの筋力及びパワー発揮能力に加え、動作スピードを高める事が必要である。本報では、ジュニアアスリートのスポーツ競技力向上を支える事を目的とし継続して実施してきた測定結果の内、ジュニアレスリング選手における骨格筋の形態及び機能的特性の年間変化について報告する。

被検者は、ジュニアレスリング選手8名とした。形態の測定項目は、身長、体重、全身筋量、体幹、上肢及び下肢の各筋量とし、身長計と身体組成測定装置（TANITA社製）を用いて測定した。膝の振り上げ、振り下ろし動作における最大速度の測定は、Ballistic Master（COMBI社製）を用い

て行った。また、Stability System（BIODEX社製）を用いて、異なる条件下（Level8-8：比較的静的条件下、Level8-4動的条件下）での平衡性能力を測定し、無酸素性パワーの測定は、Power Max VII（COMBI社製）の無酸素パワーテストにより実施した。体幹の等尺性及び等速性ピークトルクの測定、膝及び肘関節における伸展・屈曲筋力の測定は、総合筋力測定装置（BIODEX SYSTEM III、BIODEX社製）を用いて行った。これらの測定は、1年間の期間を挟んで2回行い、1回目の測定をPre、2回目の測定をPostとし、比較検討した。

Table 6は、被検者の筋形態及び機能的測定項目の結果をPreとPostで比較したものである。全身筋量と四肢の筋量はPreに対してPostで有意に高値を示したが、体幹部の筋量の著しい変化は認められなかった。従って、筋量の増加は四肢の筋量増加に伴うものと考えられた。レスリングナショナルチーム身体的特徴について検討した報告³⁾

Table 6. Changes of muscle structure, agility, stability and power production capacity.

<i>n</i> =8	Parameter	Pre	Post
	Body height (cm)	170.6±7.7	171.5±7.5
	Body weight (kg)	73.2±20.4	74.8±19.8

	Whole muscle volume (kg)	57.0±9.9 *	58.9±9.2
	Trunk muscle volume (kg)	27.4±3.7	28.0±3.4
	Upper limb muscle volume (kg)	3.2±0.6 *	3.4±0.5
	Lower limb muscle volume (kg)	11.4±0.5 *	11.9±2.3

Agility Test	Knee Up (m/s)	3.25±0.4	3.54±0.5
	Knee down (m/s)	3.67±0.2 *	4.04±0.3

Stability Test	Level 8-8	2.2±1.5	2.2±1.0
	Level 8-4	3.1±2.1	3.1±2.6

Power Test	Anaerobic power / body weight (w/kg)	3.2±0.6 *	3.4±0.5

Mean ± S.D.. *:p<0.05

によれば、階級体重に対する除脂肪体重（筋量）の比率を高めることの重要性が指摘されている。また、日本人選手と外国選手の形態特性について検討された報告¹¹⁾においても、特に重量級の選手は体重に占める筋量を増加させることが重要であり、筋力及びパワーアップのトレーニングの必要性を指摘している。これらのことを考慮すると、ジュニア期のレスリング選手においても、体重に占める筋量の増加を目的としたトレーニングの必要性が考えられた。

また、体力的な項目の内、PreとPostで著しい変化が認められたものは、膝の振り下ろし速度及び無酸素性パワーであった。レスリング競技の攻防において、四肢の動作速度は技術的な要素に大きく影響を及ぼすものと考えられる。日常のトレーニングにおいてスパーリング等のトレーニングによって、四肢の動作速度の向上がもたらされたものと推察された。競技能力が高いレスリング選手は一般的な選手に比べ高い無酸素性パワー発揮能力を有している事から、無酸素性パワーは勝敗に大きく関わる因子であることが報告⁷⁾ されてい

る。従って、無酸素性パワー発揮能力の向上は、競技能力の向上に直結するものと推察された。ジュニアのレスリングの試合は1ラウンド2分を30秒のインターバルを挟み3ラウンド行うものである。その中で、攻防が反復され行われるために、瞬発的に発揮するパワー発揮能力や、それを維持する能力が必要である。今後、トレーニングにおいてパワー発揮能力の向上と、高いパワー発揮を間欠的に維持する持続能力を高めるトレーニングを取り入れることの必要性が示唆された。

次に体幹の右回旋筋力、膝関節及び肘関節の伸展屈曲筋力の年間変化をFig.2に示した。全ての項目において、Preに対するPostの筋力値は高値を示していた。統計学的に有意な増加が認められた項目は、体幹の回旋筋力であった。膝及び肘関節の伸展・屈曲筋力の増加は、四肢の部位別の筋量増大の影響が考えられる。しかしながら、体幹部の筋量は1年間を通じて有意に増大していないにも関わらず、筋出力は有意に向上していた。このことは、レスリングのトレーニングにおいて体幹の機能的な要素が改善されたことを意味するも

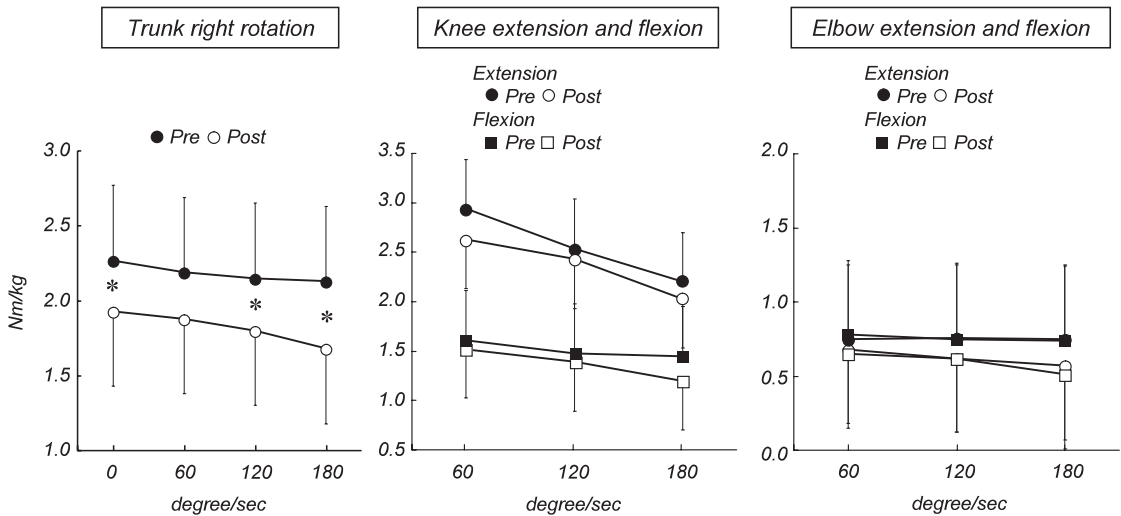


Fig.2. Changes of muscle force output between pre and post.

のと思われる。レスリング競技において、相手を抑え込む動作や、グラウンドの状態での相手の攻撃を防御する際、また、組手や相手をひきつける動作において体幹の回旋筋力、膝及び肘関節の伸展・屈曲筋力は重要な役割を担うものであり、競技力向上には体重に対する筋力発揮能力の向上を目的としたトレーニングの重要性が示唆された。

本研究の結果から明らかになったように、1年間の専門的トレーニングによって骨格筋の形態及び体力的要素は向上していた。ジュニア期においては、形態の発育に伴い体力的な要素は向上することが知られている。従って、この点を十分に考慮した上での、個人の課題に適したトレーニングプログラムの作成が重要であることが示唆された。

本研究の一部は国士舘大学体育学部附属体育研究所の研究助成によって実施した。

参考文献

- 1) 會田宏：女子ハンドボール競技者の一般的および専門的な体力・運動能力の特性，*体育・スポーツ科学*，71-77，1994.
- 2) 秋間広，久野譜也，福永哲夫，勝田茂：MRIによ

るヒトの膝伸展・屈曲における形態的特性および生理学的断面積当たりの筋張力，*体力科学*，44，267-278，1985.

- 3) 廣田正一，堀川浩之，上田幸夫，細川完，角田直也：ナショナルチーム選手の体力測定結果，平成9年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告，第21報，293-297，1998.
- 4) 金久博昭，福永哲夫，池川繁樹，角田直也：スポーツ選手の単位筋断面積当たりの脚伸展筋力，*Jpa. J. Sports Sci.*，5-6，409-414，1986.
- 5) 勝田茂，久野譜也，板井悠二：MRIによる一流アスリートの大腿部筋組成，*筑波大学体育科学系紀要*，16，107-119，1993.
- 6) 松浦義行：体力の発達，朝倉書店，1993.
- 7) McDonagh M., Davies C.：Adaptive response of mammalian skeletal muscle to exercise with high loads. *Eur. J. Appl. Physiol.*，52 139-155，1984.
- 8) 宮谷昌枝，東寿美，金久博昭，久野譜也，福永哲夫：下肢筋厚における加齢変化の部位差および性差 - 20歳代と70歳代の比較 -，*体力科学*，52，133-140，2003.
- 9) 文部科学省，スポーツ立国戦略，2010.
- 10) 角田直也，金久博昭，福永哲夫，近藤正勝，池川繁樹：大腿筋断面積における各種競技選手の特性，*体力科学*，35，192-199，1986.
- 11) 角田直也，矢田秀昭，堀川浩之，堀内岩雄，市口政光，滝山将剛，堀井昭：フリースタイルの日本選手とソ連選手における形態と筋力の比較，平成2年度日本体育協会スポーツ医・科学研究報告，第14報，311-315，1991.