

アスリートにおけるレジスタンストレーニングによる筋サイズおよび等尺性筋機能の変化が力・速度特性に与える影響

中 谷 深友紀^{*}（鹿屋体育大学スポーツイノベーション推進機構）
高 井 洋 平（鹿屋体育大学スポーツイノベーション推進機構、
鹿屋体育大学スポーツ生命科学系）

Influences of muscle hypertrophy and isometric strength adaptation following resistance training on force-velocity profile in the elbow flexors of athletes

Miyuki Nakatani¹⁾ and Yohei Takai^{1), 2)}

Abstract

This study aimed to clarify how the training-induced changes in muscle size and function during maximal voluntary isometric contraction are associated with those in mechanical parameters derived from force-velocity relationship in the elbow flexors for judo athletes. Twenty-six collegiate male judo athletes were involved in a 6-week resistance training with dumbbell curl. Before and after the training, muscle thickness (MT), maximal voluntary isometric elbow flexion force (MVC), explosive elbow flexion force, and mechanical parameters derived from force-velocity relationship during elbow flexion were determined. Multiple regression analysis revealed changes in MT and MVC as predictors of that in theoretical maximal force. MVC relative to muscle size and explosive elbow flexion force at 50 ms from the onset of force exertion relative to MVC were selected as predictors for that in theoretical maximal velocity. Explosive elbow flexion force at 150 ms from the onset of force exertion was identified as a predictor of theoretical maximal power. Additionally, the change in MT was selected as an independent variable to explain variations in the slope obtained from the force-velocity relationship. The current findings suggest that, in the upper extremity of judo athletes, training-induced changes in the mechanical variables derived from the force-velocity relationship are associated with those in muscle size and isometric muscle function, although the associations differ among the mechanical variables.

Key words: athletes, maximal voluntary isometric contraction, muscle thickness, rate of force development, force-velocity relationship

緒 言

多くのアスリートにとって高いパワーを発揮できる能力は、専門とする競技で高いパフォーマンスを発揮するために必要な体力要因の1つである（Cronin and Sleivert, 2005）。パワーは力と速度の積で規定されるため、筋力または動作速度およびその両方が高いと発揮されるパワーが大きくなる。したがって、最大筋力の増加

によるパワー向上のトレーニング手段の1つとして、レジスタンストレーニングが有効であると考えられる。しかしながら、レジスタンストレーニングによる最大筋力の向上がパワーに及ぼす影響について検討した先行知見は、パワーの向上につながるとするもの（Cormie et al., 2011; Haff et al., 2001; Newton and Kraemer, 1994）とつながらないとするもの（Cormie et al., 2010; Häkkinen et al., 1985）に分かれる。

* : 責任著者 中谷深友紀 〒891-2393 鹿児島県鹿屋市白水町1番地 Email: nakatani@nifs.k.ac.jp Tel: 0994-46-5015

1) Sports Innovation Organization, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

2) Faculty of Sports and Life Science, National Institute of Fitness and Sports in Kanoya

先行研究間で一致した見解が得られていない要因としては、発揮されるパワーと関連する爆発的な力発揮能力の適応に先行研究間で違いが生じていた可能性がある (Tillin et al., 2010). 爆発的な力発揮能力は、力・時間関係より、力発揮開始から力が最大に到達するまでの間で最も急峻になった傾きを rate of development (RFD) として指標とするもの (Aagaard et al., 2002; Andersen and Aagaard, 2006; Maffuletti et al., 2016) や、ある規定の時間内 (力発揮開始から50ms や100ms までなど) に発揮された筋力として評価されるもの (Tillin et al., 2012) がある。どちらも爆発的な力発揮能力を表す指標であるが、算出方法や力発揮開始からの時間によって筋力に与える生理学的な機序が異なることから、本研究ではこれらを総称して“力の立ち上がり能力”と呼ぶこととした。レジスタンストレーニングが力の立ち上がり能力に与える影響に関しては、先行研究間で一致していない。例えば、4週間の爆発的な等尺性膝関節伸展力トレーニングの効果を検証した Tillin et al. (2012) の研究によると、トレーニング後に最大筋力および力発揮開始から150ms 後の膝関節伸展力の増加が観察されている。一方で、Ingebrigtsen et al. (2009) は、外的負荷や動作速度を変えた3週間のレジスタンストレーニングの結果として、いずれの負荷条件においても力の立ち上がり能力に有意な変化が認められなかったと報告している。これらの知見は、最大筋力の変化との関連で、レジスタンストレーニングがパワーの発揮能力に及ぼす影響を検証する場合に、力の立ち上がり能力の適応との関連も検討する必要があることを示唆している。

パワーの測定に関しては、近年、複数の負荷条件で発揮される力と速度から力・速度関係を求め、理論的最大筋力 (F_0) および最大パワー (P_{max}) を算出するという方法が数多くの研究で採用されている (Jelic, 2015; Samozino et al., 2012; Sreckovic et al., 2015)。アスリートのレジスタンストレーニングプログラムは、一般的に高強度で長時間行うものになりやすく (Hartmann et al., 2015; Rhea et al., 2003)，それは力の立ち上がり能力に対してはポジティブな効果が生じない可能性が指摘されている (Alcazar et al., 2021; Pareja-Blanco et al., 2020)。横断的な研究では、 F_0 および P_{max} は、筋サイズ、最大筋力および力の立ち上がり能力とそれぞれ関連する (Morales-Artacho et al., 2018)。しかしながら、アスリートを対象に、レジスタンストレーニングによる筋サイズおよび等尺性筋機能（本研究では、力の立ち上がり能力、随意最大筋力や関節パワーなど骨格筋の収縮によって発揮される力やパワーのことを総称して筋機能と定義する）における変化との関連から力・速度関係で得られる力学的変

数の変化を検討した例はない。そこで本研究では、レジスタンストレーニングの効果として、筋サイズ、等尺性最大筋力および力の立ち上がり能力における変化が、力・速度関係から得られる力学的変数の変化と関連するか否かを明らかにすることを目的とした。

方 法

1. 対象者

本研究は、大学男子柔道選手26名を対象とした (20.0 ± 0.7 歳, 170.5 ± 5.6 cm, 78.1 ± 10.0 kg)。本研究の対象者は先行研究 (Nakatani et al., 2024) から用いたものであったため、該当の雑誌社から2次利用の許諾を得た上でデータの分析を行った。なお、Nakatani et al. (2024) で報告したトレーニング内容や得られた結果を補足資料に簡単にまとめている。柔道選手は、上肢の筋が他の競技のアスリートより発達し (Takai et al., 2018)，パワー発揮能力が優れていること (Nakatani et al., 2021) から、上肢を対象に先述した目的を達成できると考えた。すべての対象者は、10年以上競技として柔道に特化したトレーニングと試合を実施していた。対象者は、柔道に特化したトレーニングを週に5・6回 (1日2・3時間)，レジスタンストレーニングを週に2・3回それぞれ行っていた。本研究の対象者の競技水準は、McKay et al. (2022) の分類法に基づくと、国内地方レベル (Tier 3) から全国レベル (Tier 4) に相当し、対象者は前年度には大学の全国大会またはシニアの国際大会に参加した。また、対象者は筋機能の障害や外科的および内科的疾患を有しておらず、筋機能に影響する薬も服用していなかった。

本研究は、所属機関に設置された倫理委員会 (鹿屋体育大学倫理小委員会 第11-102号) の承認を得た上で行われた。本研究を開始する前に、すべての対象者に本研究の目的、研究手法の手順、実験参加に伴う危険性および参加者の権利について十分な説明が行なわれた上で、すべての対象者から書面による同意を得た。

2. 実験プロトコル

筋サイズおよび等尺性筋機能の変化が、力・速度関係から得られる力学的変数の変化に影響するか否かを明らかにするために、6週間のダンベルトレーニング前後で、肘関節屈曲筋群を対象に筋サイズ、肘関節屈曲動作における等尺最大張力および爆発的な筋力、および異なる3負荷での短縮性筋力を測定した。トレーニングプログラムの詳細は、先行研究 (Nakatani et al., 2024) に示す。後述するすべての測定方法は、先行研究で用いられた方法に倣った (Balshaw et al., 2016; Nakatani et al., 2021, 2024)。

3. 上腕前部の筋厚（MT）

上腕長（肩峰から肘頭までの長さ）を計測した後に、上腕前部の筋厚（MT）をBモード超音波診断装置（ProSound Alpha 6, Hitachi Aloka Medical, Japan）を用いて測定した。探触子プローブの超音波発信周波数は7.5MHzであった。MTは、上腕長の遠位60%の部位で計測された。計測中は、対象者に両腕を自然に下垂した立位姿勢をとらせた。超音波の伝播をよくするために探触子プローブには専用のゼリーを塗布した後、皮膚表面を押しつぶさないように探触子プローブ皮膚に垂直に当たった。上腕前部のMTは、皮下脂肪組織と筋組織の境から筋と上腕骨の境目までとして、画像解析ソフト（Image J ver. 1.47, NIH, USA）を用いて算出した。後述する等尺性最大肘関節屈曲力を正規化する際には、MTを筋横断面積（mCSA）の指標に変換した $\{mCSA = \pi \times (MT/2)^2\}$ 。

4. 等尺性最大肘関節屈曲力（MVC）

肘関節屈曲力は、ロードセル（TR22S, SOHGOH KEISO CO., Japan）が付いた専用の筋力計で計測された。対象者は、肩関節および股関節が90度屈曲位になる座位姿勢で肘関節屈曲動作による力発揮を行った。力発揮中に姿勢が変化しないように、肩関節および股関節を椅子の背もたれに非伸縮性ベルトを用いて固定した。肘関節角度は、40度屈曲位（肘関節完全伸展位を0度とする）とした。対象者の肘関節中心を筋力計の回転中心に合わせた後、前腕を中間位にした姿勢でレバーアームに固定した。力信号は増幅器（DPM-912B, KYOWA, Japan）を用いてローパスフィルター(<100Hz)で減衰させた。肘関節角度の変化に伴う電圧変化を検出するために、ポテンショメーターをレバーアームの軸に取り付けた。電圧信号は電圧と角度の関係から角度(deg)に変換された。力と角度の信号は16ビットのアナログ/デジタル変換器（PowerLab/16s, AD Instruments Sydney, Australia）を介してサンプリング周波数2kHzで、パーソナルコンピュータに取り込んだ。

対象者は、標準化されたウォーミングアップ（主観的努力度の50%, 80%および100%での力発揮）と課題に慣れる試技後に、等尺性最大肘関節動作における力発揮を、3分間の休息を挟んで2回行った。2回の最大筋力の値の差が10%以上であった場合に、追加の試技を行った。2または3回の値のうち最も高い値を代表値とした。mCSAで正規化するために、MVCをmCSAで除した。

5. 力の立ち上がり能力

測定姿勢は、MVCの測定と同様であった。対象者は、

等尺性肘関節屈曲動作における爆発的な張力発揮を10回（15秒間隔に1回）行った。対象者には、検者の合図後に、できるだけ早く、強く力発揮を行うように指示した。また、力発揮レベルがMVCの80%を超えるように指示した。対象者の前方にモニターを設置し、力信号を対象者にフィードバックした。力発揮の開始は、MVCで正規化した力信号が2.5%を超えた地点とした。力の立ち上がり能力の指標として、力発揮開始時点から50ms, 100msおよび150ms時の肘関節屈曲力を算出した（F50, F100, F150）（Balshaw et al., 2016）。力の立ち上がり能力は、MVCの大きさに依存することから、MVCで除した値をそれぞれ算出した（Rel. F50, Rel. F100, Rel. F150）。

6. 肘関節屈曲動作における力と速度の関係

MVCおよび力の立ち上がり能力の測定後に、対象者は短縮性肘関節屈曲課題を行った。なお、MVCおよび力の立ち上がり能力の測定後には、5分間の休息を設けた。測定姿勢は、MVCの測定と同様であった。対象者は3つの異なる負荷条件下（無負荷、30% MVCおよび75% MVC）で、できるだけ早く、強く肘関節を屈曲した。肘関節の可動域は、40度から120度までとした。検者が肘関節角度40度屈曲位までレバーアームを移動させ、対象者が力を発揮するまでレバーアームを支えていた。各負荷の試技数は、5回とした。試技間の休息時間は、同一負荷の試技間では少なくとも30秒、負荷条件間では3分間設けた。

課題動作中の肘関節角度を時間微分し、角速度を算出した後、その値に肘関節の回転中心からロードセルまでの長さを乗じることで接線速度(m/s)に算出した。肘関節屈曲パワーは、肘関節屈曲力と接線速度の積とした。各負荷の平均肘関節屈曲パワー、平均肘関節屈曲力および平均速度は、肘関節角度40度から100度までの平均値とした。各負荷で得られた平均肘関節屈曲力をy軸に、平均速度をx軸にとり、線形回帰し、y切片を理論的最大筋力(F_0)、x切片を理論的最大速度(V_0)とした。理論的最大パワー(P_{max})は、以下の式から算出した：

$$P_{max} = F_0 \times V_0 / 4$$

また、力または速度優位な特性を表す指標は、力・速度関係から得られる回帰式の傾き(S_{FV})とした。力・速度関係の傾きは負の値になるが、本研究では絶対値に変換して分析した。すなわち、値が大きいと、力優位な特性を有することを表す。

7. 統計処理

本研究では、先行研究で設定したトレーニング群と時間の2要因分散分析の結果、両要因間に有意な交互作用

は認められなかった (Nakatani et al., 2024) ことから、ダンベルカールのレジスタンストレーニングを実施した群をプールして相関分析を実施した（詳細は補足資料を参照）。記述統計量は、平均値および標準偏差で示す。力・速度関係から得られる力学的変数 (F_0 , V_0 , P_{\max} , S_{FV}) と MT, MVC, 力の立ち上がり能力の各変数との関係および独立変数における相対的变化量の関係は、ピアソンの積率相関係数 (r) を算出した。力・速度関係から得られる力学的変数を従属変数として、MT, MVC, 力の立ち上がり能力の各変数を独立変数とする重回帰分析（ステップワイズ法）を行った。選択された変数の標準回帰係数 (β) に、相関係数 (r) を乗じて貢献度 (%) を算出した。選択された独立変数に多重共線性が生じていなければ判断するために、許容度が0.25以上、変動インフレーション (VIF) が4以下であることを確認した（小田, 2007）。その結果、本研究で得られた許容度は0.975

から1、VIFは1から1.025であった。いずれの場合も危険率5%未満をもって統計的に有意とした。統計処理は、統計処理ソフトを用いた（SPSS statistics 25, IBM, Japan）。

結果

Table 1に、力・速度関係から得られる力学的変数の変化率と筋サイズおよび等尺性筋機能の変化率との相関係数を示す。 F_0 の変化率は、MT ($r = 0.355$, $p = 0.021$) およびMVC ($r = 0.314$, $p = 0.043$) の変化率とそれぞれ有意な正の相関関係にあった。 V_0 の変化率は、MVC/mCSA ($r = 0.345$, $p = 0.025$), F50 ($r = 0.322$, $p = 0.038$) およびF100 ($r = 0.338$, $p = 0.028$) の変化率とそれぞれ有意な正の相関関係にあった。 S_{FV} は、MT ($r = 0.354$, $p = 0.022$) と有意な正の相関関係にあった。

Table 2に、ステップワイズ法による重回帰分析の結

Table 1. Correlation coefficients between the relative change in mechanical parameters derived from a force-velocity relationship and muscle size and function in the elbow flexors

	F_0	V_0	P_{\max}	S_{FV}
Muscle size & maximal voluntary strength				
MT	0.355 *	-0.250	0.104	0.354 *
MVC	0.314 *	0.192	0.494 *	0.110
MVC/mCSA	-0.081	0.345 *	0.254	-0.219
Explosive voluntary strength				
F50	0.118	0.322 *	0.514 *	-0.161
F100	0.120	0.338 *	0.518 *	-0.159
F150	0.205	0.265	0.523 *	-0.069
Rel. F50	-0.097	0.253	0.236	-0.265
Rel. F100	-0.133	0.197	0.131	-0.251
Rel. F150	-0.106	0.105	0.072	-0.202

Values are expressed as correlation coefficients.

MT: muscle thickness, MVC: maximal voluntary strength in elbow flexion, mCSA: muscle cross-sectional area,

F50, F100 and F150: explosive forces at 50, 100, and 150 ms, Rel.: relative value to MVC,

F_0 : theoretical maximal force, V_0 : theoretical maximal velocity, P_{\max} : theoretical optimal joint power;

S_{FV} : slope of the relationship between force and velocity during the elbow flexion

*, a significant correlation ($p < 0.05$)

Table 2. Predictors of relative changes in mechanical parameters derived from force-velocity relationship and estimated R^2

Dependent variables	Explanatory variables	95%CI							Contribution (%)	R	R^2	Adjusted R^2
		B	SE	β	t value	p value	lower	upper				
F_0	Constant	-7.18	3.49		-2.05	0.047	-14.25	-0.11	12.9	0.48	0.23	0.19
	MT	0.93	0.36	0.36	2.59	0.013	0.21	1.65				
	MVC	0.45	0.19	0.33	2.31	0.026	0.06	0.83				
V_0	Constant	1.55	2.30		0.68	0.504	-3.10	6.21	13.6	0.46	0.22	0.18
	MVC/mCSA	0.35	0.13	0.39	2.75	0.009	0.09	0.60				
	Rel. F50	0.52	0.24	0.32	2.19	0.034	0.04	1.01				
P_{\max}	Constant	-3.22	2.37		-1.36	0.182	-8.01	1.57	27.4	0.52	0.27	0.26
	F150	0.64	0.17	0.52	3.88	0.000	0.31	0.98				
S_{FV}	Constant	-3.31	5.89		-0.56	0.578	-15.22	8.60	12.5	0.35	0.13	0.10
	MT	1.68	0.70	0.35	2.39	0.022	0.26	3.11				

F_0 : theoretical maximal force, V_0 : theoretical maximal velocity, P_{\max} : theoretical maximal power,

S_{FV} : slope derived from force-velocity relationship, MT, muscle thickness; MVC, maximal voluntary strength in elbow flexion; mCSA, muscle cross-sectional area, F50, F100 and F150: explosive forces at 50, 100, and 150 ms, Rel.: relative value to MVC

Table 3. Correlation coefficients among the relative changes in the independent variables.

	MT	MVC	MVC/mCSA	F50	F100	F150	Rel. F50	Rel. F100	Rel. F150
MT									
MVC	-0.029								
MVC/mCSA	-0.747 *	0.675 *							
F50	0.003	0.233	0.147						
F100	-0.052	0.349 *	0.260 *	0.853 *					
F150	-0.082	0.554 *	0.410 *	0.647 *	0.898 *				
Rel. F50	-0.016	-0.256	-0.157	0.842 *	0.697 *	0.407 *			
Rel. F100	-0.027	-0.417 *	-0.257	0.646 *	0.698 *	0.443 *	0.882 *		
Rel. F150	-0.058	-0.427 *	-0.249	0.474 *	0.615 *	0.510 *	0.716 *	0.919 *	

Values are expressed as correlation coefficients. *, a significant correlation ($p < 0.05$)

MT, muscle thickness; mCSA: muscle cross-sectional area, MVC: maximal voluntary strength in elbow flexion, F50, F100 and F150: explosive forces at 50, 100, and 150 ms, Rel.: relative value to MVC

果を示す。 F_0 の変化率を説明する変数として、MT および MVC が選択された。それぞれの貢献度は、12.9% および 10.2% であった。 V_0 の変化率を説明する変数として、MVC/mCSA と力の立ち上がり能力である Rel. F50 が選択された。それぞれの貢献度は、13.6% と 8.0% であった。 P_{max} の変化率を説明する変数として、力の立ち上がり能力である F150 が選択された。その貢献度は、27.4% であった。 S_{FV} の変化率を説明する変数として、MT が選択された。その貢献度は、12.5% であった。

Table 3 に、筋サイズおよび等尺性筋機能の変化率における各変数間の相関係数を示す。MT は、MVC/mCSA と負の相関関係にあった ($r = -0.747$, $p < 0.001$)。MVC は、MVC/mCSA ($r = 0.675$, $p < 0.001$), F100 ($r = 0.349$, $p = 0.012$) および F150 ($r = 0.554$, $p < 0.001$) と正の相関関係に、Rel. F100 ($r = -0.417$, $p = 0.003$) と Rel. F150 ($r = -0.427$, $p = 0.002$) と負の相関関係にあった。MVC/mCSA は、F100 ($r = 0.260$, $p = 0.048$) と F150 ($r = 0.410$, $p = 0.003$) と正の相関関係にあった。力の立ち上がり能力の各変数間にはいずれも有意な正の相関関係が認められた。

考 察

本研究の結果、レジスタンストレーニングによる筋厚、等尺性最大肘関節屈曲力および力の立ち上がり能力の変化は、肘関節屈曲動作における力・速度特性の変化と関連するが、その変化に寄与する変数は、力・速度関係から得られる力学的変数によって異なることが明らかとなった。

F_0 の変化率は、MVC/mCSA の変化率と有意な相関関係を示さなかった。MVC は、筋横断面積と大脳の興奮水準に規定される (Aagaard et al., 2000)。このことは、 $MVC = \text{筋横断面積} \times \text{大脳の興奮水準}$ と表すことができる (猪飼・石井, 1961) ため、MVC/mCSA は大脳の興奮水準を表す指標となり得る。Balshaw et al. (2017) は、レジスタンストレーニングによる等尺性最大筋力の増加は、筋肥大だけでなく主働筋の筋活動量の増加も寄与す

ることを示している。一方、柔道選手を対象に実施したダンベルカールを用いたレジスタンストレーニングは、筋厚と MVC を増加させるが MVC/mCSA には変化をもたらさなかった (Nakatani et al., 2024)。レジスタンストレーニング鍛錬者の等尺性随意最大収縮時の大脳の興奮水準は、非鍛錬者と比較して高い (del Olmo et al., 2006)。さらに、MVC/mCSA が高い者と比較して、MVC/mCSA が高い者は疲労困憊まで力発揮するトレーニングによる筋力の向上が小さい (Zou et al., 2023)。以上のことから、柔道選手の最大筋力発揮時の大脳の興奮水準は高い水準にあることが予想され、そのことが MVC/mCSA の変化率が F_0 の変化率と関連しなかった可能性が考えられる。

F_0 の変化率を説明する変数として、MT および MVC の変化率が選択された。横断的な研究では、外側広筋の筋厚および等尺性最大膝関節伸展力は、理論的最大膝関節伸展力とそれ正の相関関係にある (Morales-Artacho et al., 2018)。また、12週間の等尺性膝関節伸展力のトレーニングによる膝関節伸展筋量の変化率は、等尺性膝関節伸展力の変化率に寄与する (Balshaw et al., 2017)。本研究の結果は、これらの知見を支持するものとなつた。

V_0 の変化率を説明する変数として、MVC/mCSA および Rel. F50 の変化率が選択された。横断的研究の結果によると、 V_0 と等尺性最大筋力および力の立ち上がり能力との間に有意な相関関係は認められていない (Morales-Artacho et al., 2018)。一方、縦断的研究である本研究の単相関分析では、 V_0 の変化率は MVC/mCSA や力発揮開始から短時間 (<100ms) における力の立ち上がり能力と正の相関関係にあった (Table 1)。単相関分析では、MVC/mCSA の変化率と Rel. F100 および Rel. F150 の変化率との間には有意な相関関係が認められたが、Rel. F50 の変化率とは有意でなかった (Table 3)。このことは、MVC/mCSA の変化率は、100ms 以降の力の立ち上がり能力の変化率の代わりとなる変数であることを示唆している。Rel. F50 は、F50 と正の相関関係にあること ($r = 0.842$, $p < 0.001$) から、初期の力の立ち上がり能力を表

す変数である。Pareja-Blanco et al. (2020) は、レジスタンストレーニング時の速度の低下が力の立ち上がり能力に与える影響を調べた結果、速度低下が生じないようにトレーニングを実施した群のみ初期の力の立ち上がり能力が増加し、速度低下が25%および50%に達するまでトレーニングする群では後期の力の立ち上がり能力が増加することを示している。また、Alcazar et al. (2021) は、トレーニング時の速度低下の度合いが力・速度関係から得られる V_0 の変化に影響することを示している。すなわち、トレーニング時の速度低下が小さい場合に V_0 は増加するが、その低下が大きい場合に V_0 は変化しない。以上のことから考えると、レジスタンストレーニングによる V_0 の改善は、力の立ち上がり能力が寄与することが示唆できる。つまり、本研究では、Rel. F50は初期の力の立ち上がり能力、MVC/mCSA は100ms 以降の力の立ち上がり能力と V_0 の変化率を説明する変数として選択された可能性がある。

P_{\max} の変化率は、力発揮開始から F150 が説明変数として選択された。単相関分析の結果から、いずれの局面における力の立ち上がり能力の変化率は、 V_0 の変化率と相関関係にある ($r = 0.260 - 0.338$, $p = 0.014 - 0.045$)。また、F150 の変化率は、MVC の変化率と関連した ($r = 0.554$, $p < 0.001$)。この結果は、力発揮開始から 100ms 以降の発揮張力は、最大筋力と関連するという先行知見と一致している (Andersen and Aagaard, 2006)。 P_{\max} は、 $F_0 \times V_0 / 4$ によって算出されていることから、両変数と関連する F150 が P_{\max} の変化率を説明する変数として選択された可能性がある。

S_{FV} の変化率は、上腕前部の筋厚の変化率が説明変数として選択された。このことは、レジスタンストレーニングによって筋肥大が生じると、 S_{FV} は急峻、すなわち力優位なタイプになることを示している。筋厚以外の変数は S_{FV} の変化率と有意な相関関係になかったことから (Table. 1)，筋肥大が独立して S_{FV} に寄与している可能性がある。幾何学的な観点から、レジスタンストレーニングによる筋肥大は、モーメントアームを長くする (Sugisaki et al., 2015)。関節の角速度が同程度であった場合、筋の短縮速度はモーメントアームが短い者と比較して長い者のほうが高くなることから、力・長さ関係に基づくと筋で発揮される張力が低くなる (Van Hooren et al., 2024)。この影響は、高い角速度で特に大きい (Nagano and Komura, 2003)。これらの先行研究から考えると、レジスタンストレーニングによる筋肥大は高い速度での力発揮を低下させる可能性があり、 S_{FV} を力優位な方向へ変化させる要因となり得る。

本研究の限界として、先行研究で3つの異なるレジ

タンストレーニングの効果を検証したが、それらのトレーニング効果に群と時間の間の交互作用が認められなかつた (Nakatani et al., 2024)。このことから、本研究では、ダンベルカールのレジスタンストレーニングを、高負荷・低速度および低負荷・高速度で疲労困憊まで実施するトレーニング群、低負荷・高速度で疲労困憊まで実施しないトレーニング群をプールして相関分析を行つたものである。統計学的に負荷、速度、疲労の有無の要因が影響しないことを前提に分析したものであるが、それらの要因を個別に検討した先行知見では効果の違いを示すものもある (Davies et al., 2017; Hermes and Fry, 2023; Schoenfeld et al., 2017)。しかし、パワー発揮能力への影響はほとんどみられていない。そのため、各要因を制限してレジスタンストレーニングによる筋サイズおよび等尺性機能の変化が力・速度特性に与える影響についてさらなる研究が必要である。

結論

柔道選手におけるレジスタンストレーニングによる筋厚の増加および等尺性最大肘関節屈曲力および力の立ち上がり能力の変化が肘関節屈曲動作における力・速度特性の変化と関連する。しかしながら、それぞれの力学的変数に貢献する筋サイズおよび等尺性筋機能は異なる。

付記

本研究は、2020年度九州体育・スポーツ学会課題研究助成を受けて実施したものです。

また、本論文の一部の内容は、著者らの先行研究 「Nakatani et al. (2024) Resistance training leading to repetition failure increases muscle strength and size, but not power-generation capacity in judo athletes. PLoS ONE 19 (8): e0307841. doi: 10.1371/journal.pone.0307841.」にて報告された成果を基にしており、クリエイティブ・コモンズ表示ライセンス (CC BY) に基づき適切に再利用しています。

参考文献

- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, S. P., Halkjaer-Kristensen, J. and Dyhre-Poulsen, P. (2000) Neural inhibition during maximal eccentric and concentric quadriceps contraction: effects of resistance training. *J. Appl. Physiol* (1985), 89 (6): 2249-2257.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P. and Dyhre-Poulsen, P. (2002) Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J. Appl. Physiol* (1985), 93

- (4): 1318-1326.
- Alcazar, J., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., Alegre, L. M. and Pareja-Blanco, F. (2021) Dose-Response Relationship Between Velocity Loss During Resistance Training and Changes in the Squat Force-Velocity Relationship. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 16 (12): 1736-1745.
- Andersen, L. L. and Aagaard, P. (2006) Influence of maximal muscle strength and intrinsic muscle contractile properties on contractile rate of force development. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 96 (1): 46-52.
- Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maden-Wilkinson, T. M., Tillin, N. A. and Folland, J. P. (2016) Training-specific functional, neural, and hypertrophic adaptations to explosive- vs. sustained-contraction strength training. *J. Appl. Physiol.* (1985), 120 (11): 1364-1373.
- Balshaw, T. G., Massey, G. J., Maden-Wilkinson, T. M., Morales-Artacho, A. J., McKeown, A., Appleby, C. L. and Folland, J. P. (2017) Changes in agonist neural drive, hypertrophy and pre-training strength all contribute to the individual strength gains after resistance training. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 117 (4): 631-640.
- Cormie, P., McGuigan, M. R. and Newton, R. U. (2010) Influence of strength on magnitude and mechanisms of adaptation to power training. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 42 (8): 1566-1581.
- Cormie, P., McGuigan, M. R. and Newton, R. U. (2011) Developing maximal neuromuscular power: part 2 - training considerations for improving maximal power production. *Sports Med.*, 41 (2): 125-146.
- Cronin, J. and Sleivert, G. (2005) Challenges in understanding the influence of maximal power training on improving athletic performance. *Sports Med.*, 35 (3): 213-234.
- Davies, T. B., Kuang, K., Orr, R., Halaki, M. and Hackett, D. (2017) Effect of Movement Velocity During Resistance Training on Dynamic Muscular Strength: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Sports Med.*, 47 (8): 1603-1617.
- del Olmo, M. F., Reimunde, P., Viana, O., Acero, R. M. and Cudeiro, J. (2006) Chronic neural adaptation induced by long-term resistance training in humans. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 96 (6): 722-728.
- Haff, G. G., Schroeder, C. A., Koch, A. J., Kuphal, K. E., Comeau, M. J. and Potteiger, J. A. (2001) The effects of supplemental carbohydrate ingestion on intermittent isokinetic leg exercise. *J. Sports Med. Phys. Fitness*, 41 (2): 216-222.
- Häkkinen, K., Alén, M. and Komi, P. V. (1985) Changes in isometric force- and relaxation-time, electromyographic and muscle fibre characteristics of human skeletal muscle during strength training and detraining. *Acta Physiol. Scand.*, 125 (4): 573-585.
- Hartmann, H., Wirth, K., Keiner, M., Mickel, C., Sander, A. and Szilvas, E. (2015) Short-term Periodization Models: Effects on Strength and Speed-strength Performance. *Sports Med.*, 45 (10): 1373-1386.
- Hermes, M. J. and Fry, A. C. (2023) Intentionally Slow Concentric Velocity Resistance Exercise and Strength Adaptations: A Meta-Analysis. *J. Strength Cond. Res.*, 37 (8): e470-e484.
- 猪飼道夫・石井喜八 (1961) 筋力の生理的限界と心理的限界の筋電図学的研究. *体育学研究*, 5(4) : 154-165.
- Ingebrigtsen, J., Holtermann, A. and Roeleveld, K. (2009) Effects of load and contraction velocity during three-week biceps curls training on isometric and isokinetic performance. *J. Strength Cond. Res.*, 23 (6): 1670-1676.
- Jaric, S. (2015) Force-velocity Relationship of Muscles Performing Multi-joint Maximum Performance Tasks. *Int. J. Sports Med.*, 36 (9): 699-704.
- Maffiuletti, N. A., Aagaard, P., Blazevich, A. J., Folland, J., Tillin, N. and Duchateau, J. (2016) Rate of force development: physiological and methodological considerations. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 116 (6): 1091-1116.
- McKay, A. K. A., Stellingwerff, T., Smith, E. S., Martin, D. T., Mujika, I., Goosey-Tolfrey, V. L., Sheppard, J. and Burke, L. M. (2022) Defining Training and Performance Caliber: A Participant Classification Framework. *Int. J. Sports Physiol. Perform.*, 17 (2): 317-331.
- Morales-Artacho, A. J., Ramos, A. G., Pérez-Castilla, A., Padial, P., Argüelles-Cienfuegos, J., de la Fuente, B. and Feriche, B. (2018) Associations of the Force-velocity Profile with Isometric Strength and Neuromuscular Factors. *Int. J. Sports Med.*, 39 (13): 984-994.
- Nagano, A. and Komura, T. (2003) Longer moment arm results in smaller joint moment development, power and work outputs in fast motions. *J. Biomech.*, 36 (11): 1675-1681.
- Nakatani, M., Murata, K., Kanehisa, H. and Takai, Y. (2021) Force-velocity relationship profile of elbow flexors in male gymnasts. *PeerJ*, 9: e10907.
- Nakatani, M., Takai, Y. and Kanehisa, H. (2024) Resistance training leading to repetition failure increases muscle

- strength and size, but not power-generation capacity in judo athletes. *PLoS One*, 19 (8): e0307841.
- Newton, R. U. and Kraemer, W. J. (1994) Developing Explosive Muscular Power: Implications for a Mixed Methods Training Strategy. *Strength & Conditioning Journal*, 16 (5): 20-31.
- 小田利勝 (2007) ウルトラ・ビギナーのためのSPSSによる統計解析入門。 プレアデス出版。
- Pareja-Blanco, F., Alcazar, J., Cornejo-Daza, P. J., Sánchez-Valdepeñas, J., Rodriguez-Lopez, C., Hidalgo-de Mora, J., Sánchez-Moreno, M., Bachero-Mena, B., Alegre, L. M. and Ortega-Becerra, M. (2020) Effects of velocity loss in the bench press exercise on strength gains, neuromuscular adaptations, and muscle hypertrophy. *Scand. J. Med. Sci. Sports*, 30 (11): 2154-2166.
- Rhea, M. R., Alvar, B. A., Burkett, L. N. and Ball, S. D. (2003) A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35 (3): 456-464.
- Samozino, P., Rejc, E., Di Prampero, P. E., Belli, A. and Morin, J. B. (2012) Optimal force-velocity profile in ballistic movements--altius: citius or fortius? *Med. Sci. Sports Exerc.*, 44 (2): 313-322.
- Schoenfeld, B. J., Grgic, J., Ogborn, D. and Krieger, J. W. (2017) Strength and Hypertrophy Adaptations Between Low- vs. High-Load Resistance Training: A Systematic Review and Meta-analysis. *J. Strength Cond. Res.*, 31 (12): 3508-3523.
- Sreckovic, S., Cuk, I., Djuric, S., Nedeljkovic, A., Mirkov, D. and Jaric, S. (2015) Evaluation of force-velocity and power-velocity relationship of arm muscles. *Eur. J. Appl. Physiol.*, 115 (8): 1779-1787.
- Sugisaki, N., Wakahara, T., Murata, K., Miyamoto, N., Kawakami, Y., Kanehisa, H. and Fukunaga, T. (2015) Influence of muscle hypertrophy on the moment arm of the triceps brachii muscle. *J. Appl. Biomech.*, 31 (2): 111-116.
- Takai, Y., Nakatani, M., Aoki, T., Komori, D., Oyamada, K., Murata, K., Fujita, E., Akamine, T., Urita, Y., Yamamoto, M. and Kanehisa, H. (2018) Body shape indices are predictors for estimating fat-free mass in male athletes. *PLoS One*, 13 (1): e0189836.
- Tillin, N. A., Jimenez-Reyes, P., Pain, M. T. and Folland, J. P. (2010) Neuromuscular performance of explosive power athletes versus untrained individuals. *Med. Sci. Sports Exerc.*, 42 (4): 781-790.
- Tillin, N. A., Pain, M. T. and Folland, J. P. (2012) Short-term training for explosive strength causes neural and mechanical adaptations. *Exp. Physiol.*, 97 (5): 630-641.
- Van Hooren, B., Aagaard, P. and Blazevich, A. J. (2024) Optimizing Resistance Training for Sprint and Endurance Athletes: Balancing Positive and Negative Adaptations. *Sports Med.*, 54 (12): 3019-3050.
- Zou, Z., Morimoto, N., Nakatani, M., Morinaga, H. and Takai, Y. (2023) Short-term strength adaptation in isometric training to volitional failure depends on initial specific tension in elbow flexors. *J. Phys. Fitness Sports. Med.*, 12 (6): 161-167.

(令和6年11月10日受付)
(令和7年4月30日受理)

補足資料

Nakatani et al. (2024) の概要

レジスタンストレーニングを長期間継続してきたアスリートは、筋肥大および筋機能の向上が起こりにくい。本研究では、この課題を克服するための手段として疲労困憊に至るレジスタンストレーニングが有効であるかを検討した。本研究の結果から、低負荷・高速度および高負荷・低速度トレーニングは、それぞれ疲労困憊まで実施するかどうかに関係なく、柔道選手の筋肥大および等尺性筋力の向上に有効であることが示唆された。しかしながら、これらのトレーニング方法ではパワー発揮能力の向上は認められなかった。

トレーニングプロトコル

26名の大学男子柔道選手を、すべての測定変数に群間差が生じないよう3つのトレーニング群に分類し、6週間のダンベルカールトレーニングを週に2日の頻度で実施した。トレーニングの動作域は、約40度の屈曲位（完全伸展位 = 0度）から肘関節の完全屈曲位までとした。各群のトレーニングの内容を下記に示す。各トレーニングセッションは、ダンベルシャフト（2kg）を使った10回の反復からなるウォームアップで開始された。全群が1セッションにつき3セットを行い、セット間の休息は2分間とした。トレーニング負荷は、ダンベルカールの1RMの測定結果に基づいて2週間ごとに調整した。

低負荷・高速度で疲労困憊まで実施するトレーニング群

30% 1 RM の錘を付けたダンベルを、コンセントリック期はできるだけ速く拳上し、エキセントリック期はメトロノーム音に合わせ4秒かけて降下した。拳上ができなくなるまで実施した後、検者の補助のもと、3回反復させた。

高負荷・低速度で疲労困憊まで実施するトレーニング群

80% 1 RM の錘を付けたダンベルを、コンセントリック期およびエキセントリック期のそれを2秒間ずつ行なった。拳上ができなくなるまで実施した後、検者の補助のもと、3回反復させた。

低負荷・高速度で疲労困憊まで実施しないトレーニング群

30% 1 RM の錘を付けダンベルを、コンセントリック期はできるだけ速く拳上し、エキセントリック期はメトロノーム音に合わせ4秒かけて降下した。ダンベルカールを1セット20回行い、5回ごとに30秒の休息を挟んだ。トレーニング量は、絶対負荷 (kg)、総反復回数 (rep)、およびコンセントリック期とエキセントリック期に要した総時間 (s) の積として定義した。

統計方法

一元配置分散分析を用いて、トレーニング前の測定変数の群間差を調べ、総トレーニング量と総反復回数に関する群の主効果を検定した。群の主効果が有意であった場合は、ボンフェローニ検定を用いて、対応する変数の群間差を検討した。さらに、二元配置分散分析（2回 × 3群）を用いて、測定変数に対する時間の主効果および群との交互作用を検証した。すべてのデータを SPSS ソフトウェア (SPSS statistics 27; IBM, Japan) を用いて分析した。

研究の結果

トレーニング介入前後で全ての測定変数に有意な交互作用は認められなかった。筋厚および筋力はトレーニング前後で有意な増加が認められたが、力・速度関係から算出された全パラメータおよび力の立ち上がり能力には有意な変化は認められなかった。

測定変数（単位）	二元配置分散分析		
	時間	群	交互作用
1RM (kg)	<0.001	0.68	0.12
MT (cm)	<0.001	0.93	0.66
CSA _{index} (cm ²)	<0.001	0.92	0.78
MVC (N)	<0.001	0.93	0.60
MVC/CSA _{index} (N/cm ²)	0.38	0.91	0.69
RFD _{max} (N/s)	0.72	0.17	0.09
F ₀ (N)	0.56	0.28	0.63
V ₀ (ms)	0.98	0.21	0.80
P _{max} (W)	0.49	0.15	0.92
S _{FV}	0.83	0.77	0.55

1RM, one repetitions maximum; MT, muscle thickness; CSA_{index}, muscle cross-sectional area; MVC, maximal voluntary strength in elbow flexion; F₀, theoretical maximal force; V₀, theoretical maximal velocity; P_{max}, theoretical maximal power; S_{FV}, slope derived from force-velocity relationship.