

平成 22 年 4 月 8 日現在

研究種目：基盤研究（B）  
 研究期間：2006～2008  
 課題番号：18300217  
 研究課題名（和文） 運動と遺伝的特性が筋の無負荷最大速度に及ぼす影響：スラックテストによる検討  
 研究課題名（英文） Effects of exercise and genetic background on unloaded shortening velocity of muscle: A study with 'slack test'  
 研究代表者  
 石井 直方（ISHII NAOKATA）  
 東京大学・大学院総合文化研究科・教授  
 研究者番号：20151326

研究成果の概要：運動・トレーニング、加齢、性差、遺伝子多型などの環境的要因が、筋の無負荷短縮速度（ $V_0$ ）と筋線維動員パターンに及ぼす効果を調べるため、スラックテスト法（Sasaki & Ishii, 2005）およびその変法（「新スラックテスト法」）、単収縮の強縮後増強効果（PTP）を利用した方法を主に用いて研究を行った。その結果、1）生体内での筋収縮における  $V_0$  は、動員されている運動単位のうち最も速度の速いものの  $V_0$  を反映していること、2）加齢は  $V_0$  および筋線維の動員パターンに有意な影響を及ぼさないが、筋線維の動員パターンには性差があること、3）長期的な筋力トレーニングの実施により筋力および筋サイズの増加が起こっても、 $V_0$  および筋線維の動員パターンには変化が起こらないこと、4） $\alpha$ -アクチニン 3 遺伝子（*ACTN3*）の多型は、 $V_0$  の初期値には影響しないが、高強度筋運動後の筋力回復過程に影響を及ぼし、同時に  $V_0$  の一時的な低下にも関連する可能性のあること、などが判明した。

## 交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
2007年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008年度	3,600,000	1,080,000	4,680,000
年度			
年度			
総計	14,500,000	4,350,000	18,850,000

研究分野：複合領域

科研費の分科・細目：健康・スポーツ科学・スポーツ科学

キーワード：スラックテスト・無負荷短縮速度・運動トレーニング・筋線維組成・遺伝子多型

## 1. 研究開始当初の背景

ヒト骨格筋の生体内での収縮特性に関する研究は多くなされてきたが、生体内の収縮で個々の筋線維が発揮する短縮速度については不明の点が多い。その要因として、1）生体内の筋収縮にはきわめて大きな慣性負荷が作用するため、高速下での運動の定量的制御がむずかしいこと、2）腱（直列弾性要

素）、関節などの構造が筋線維の収縮と末端での運動発現の間に介在し、大きな影響を及ぼすこと、3）単関節動作などの単純な運動でも、複数の筋が相互的に関与すること、などがあげられる。

我々のグループでは、「スラックテスト法」と呼ばれる方法を応用した新しいシステムを開発し、ヒト下腿三頭筋の無負荷短

縮速度 ( $V_0$ ) をさまざまな筋活動レベルのもとで測ることに成功した (Sasaki and Ishii, *J. Physiol.*, 567: 1047-1056, 2005)。この方法は元来, Edman (1978) によって単一筋線維の  $V_0$  を測定するために考案されたものであり, 等尺性強縮下の筋線維にさまざまな大きさの急速解放 (quick release) を与え, 急速解放によって slack した筋線維が無負荷のもとに短縮し再び張力を発揮するまでの時間を計る。急速解放から張力の再上昇までの時間  $t$  に対し, 急速解放の長さ  $L$  をプロットすると直線回帰され, その直線の傾きが  $V_0$ , 縦軸 ( $L$  軸) 上の切片が, 急速解放直前の直列弾性要素 (SEC) の伸張量を示す。慣性質量の大きなヒト四肢に同様の方法を適用することはきわめてむずかしいが, 新規に開発した装置により, ヒト下腿三頭筋の等尺性収縮中に足関節を約  $2000^\circ/s$  の高速度で, 底屈方向に安定して解放することができた。この方法の利点は, 1) 任意の筋活動レベル (%MVC) における  $V_0$  を測定できること, 2) SEC の力学的特性を同時に評価できること, である。また, 上記の研究から, 筋活動レベルの上昇に伴って  $V_0$  が増大することがわかった。得られた  $V_0$  は, 動員されている筋線維のうち最も速いものあるいはそのグループの  $V_0$  を示すと考えられることから, この現象は, 筋線維の動員に関する「サイズの原理」を反映するものと考えられた。

従って, このスラックテスト法を利用すれば, 筋線維組成, 加齢, 運動・トレーニング, 遺伝的背景などのさまざまな環境的要因が,  $V_0$  および筋線維の動員パターンに与える影響について明らかにすることが期待される。本研究はそのための基礎的ステップと位置づけ, 下記の4点を当初の具体的目標とした。

## 2. 研究の目的

### (1) 筋線維組成の違いが $V_0$ および筋線維の動員パターンに与える影響

上記研究 (Sasaki and Ishii, 2005) では, 筋活動レベルの上昇に伴う  $V_0$  の増加の様態に大きな個人差があり, 筋線維組成が関連している可能性が高い。そこで, これらのパターンと筋線維組成の関係について調べる。

### (2) 加齢および性差の影響

加齢に伴って筋量と筋力が低下することは多くの研究が示している。一方, 筋の最大短縮速度 ( $V_{max}$ ) や無負荷短縮速度 ( $V_0$ ) も同様に低下するかについては, 統一した見解が得られていない。従来の筋機能測定法を用いた研究では  $V_{max}$  も低下するという報告が多いが, 標準的測定法は慣性の影響を強く受けるため, 筋力低下が外観上の  $V_{max}$  を低下させている可能性がある。サーボシステムを用いた我々の測定では (Yamauchi and Ishii,

2005),  $V_{max}$  は加齢の影響を強く受けにくいことが示されている。一方, 筋生検により採取した単一筋線維 (グリセリン標本) では,  $V_0$  が加齢とともに低下するという報告もある (Trappe et al., 2004)。したがって, たとえ同一のタイプの筋線維であっても, タンパク質レベルでの加齢変化が起こる可能性もある。そこで, 本システムを用いて加齢および性差が  $V_0$  および筋線維の動員パターンに与える影響について調べる。

### (3) 運動・トレーニングが $V_0$ および筋線維の動員パターンに与える影響

運動・トレーニングは筋量を増大させ, 筋力を増加させる。一方, 筋線維レベルでの  $V_{max}$  や  $V_0$  を変化させるかについては, 統一した見解が得られていない。単一筋線維 (グリセリン標本) では, トレーニングによって  $V_0$  が若干ではあるが増加するという報告があり (Trappe et al., 2004), たとえ同一のタイプの筋線維であっても, タンパク質の分子的修飾などにより  $V_0$  が変化する可能性がある。そこで, 本システムを用いて運動・トレーニングが  $V_0$  および筋線維の動員パターンに与える影響を調べる。

### (4) 遺伝的要因が $V_0$ および筋線維の動員パターンに与える影響

筋力, スピード, パワーなどには, 遺伝子の変異や多型に基づく個人差があると考えられる。筋力やパワーに関連すると考えられる遺伝子とその多型については, これまで約 10 種類が同定されている (Wolfarth et al., 2005)。一方, 筋の速度 ( $V_{max}$  または  $V_0$ ) とこれらの筋力関連遺伝子との関係はよく調べられていない。そこで本システムを用い, これらの遺伝子群の中から, 特にパワー・スプリント能力との関連性が指摘されている *ACTN3* につき, 遺伝子型と  $V_0$  および筋線維の動員パターンの関係を調べる。さらに, 動物実験 (ラット) を行い, 変異型の遺伝子を外的に導入することにより, 筋力,  $V_0$ , トレーニングに対する反応性などがどのような影響を受けるかを調べる足がかりをつくる。

## 3. 研究の方法

### (1) スラックテスト装置

本研究で用いたスラックテスト装置 (Sasaki and Ishii, 2005) は本来, 下腿三頭筋を対象としているが, アレンジメントなどを変更することにより, 足関節背屈筋 (前脛骨筋), 上腕二頭筋に対しても用いることが可能である。 $V_0$  測定の概略は以下の通りである: 筋活動レベル 0, 20, 40, 80% MVC・・・で等尺性収縮を行わせ, 定

常状態に達したときにさまざまな大きさの急速解放を与えた。張力は一旦ゼロに下降した後、再上昇するが、急速解放から張力再上昇までの時間 ( $t$ ) と、急速解放の大きさ ( $L$ ) をプロットすることにより、 $V_0$  と直列弾性要素の伸張量を得た。同時に、主動筋 (足底屈の場合には、腓腹筋およびヒラメ筋)、拮抗筋 (前頸骨筋) より表面筋電図を導出し、筋活動レベルを測定した。また、筋活動開始時間を推定するために、主動筋表面に加速度センサを貼り付け、筋活動に伴う微小な振動を計測した (筋音図)。

## (2) ヒトを対象とした測定

### (i) 筋線維組成の影響

筋線維組成 (%FT) については、単収縮の後強縮後増強 (post-tetanic potentiation; PTP) を利用した新たな方法の開発を試みた (研究成果参照)。また、この方法により、速筋線維の動員が始まる筋活動レベル (%MVC) の推定も試みた。

### (ii) 加齢・性差の影響

20 歳代 ~ 70 歳代の健常な男女 80 名を対象として  $V_0$  および筋線維動員パターンの推定を行い、年齢および性差がこれらに及ぼす効果を調べた。すでに開発済みのスラックテスト法では、急速な関節角度変化に伴うストレスが大きく、特に高齢者への負担が懸念されたため、 $V_0$  の推定には新たに開発した方法 (「新スラックテスト法」; 研究成果参照) を用い、筋線維動員パターンの推定には、PTP を利用した方法 (上記) を用いた。被検筋は下腿三頭筋とした。

### (iii) 運動・トレーニングの影響

日常的な筋力トレーニングが、 $V_0$  および筋線維動員パターンに及ぼす影響を、肘屈筋 (上腕二頭筋および上腕筋) を対象として調べた。健常成人男性 22 名 (平均年齢 24 歳) を、日常的に上腕の筋力トレーニングを行っている群 (12 名) と、行っていない群 (10 名) に分け、 $V_0$ 、最大短縮速度 ( $V_{max}$ : 等張力性ダイナモメータによる力-速度関係から外挿)、上腕二頭筋厚 (超音波 B モード法)、等尺性最大筋力を測定した。

### (iv) 遺伝的特性の影響

-アクチニン 3 遺伝子 (*ACTN3*) の多型が、 $V_0$ 、 $V_{max}$ 、高強度の筋運動後の回復過程などに及ぼす影響について、肘屈筋を対象として調べた。日常的にトレーニングを行っていない健常成人男性 44 名 (平均年齢 21 歳) を対象とした。まず、60 名以上の候補者から毛根を採取し、PCR 法によって *ACTN3* の遺伝子型を決定した。その結果に基づき、RR 型 (13 名)、RX 型 (17 名)、XX 型 (14 名) を被検者として選び、それぞれの遺伝子型のサンプル数が均一になるようにした。実験手順は、採血 等尺性最大肘屈曲筋力の測定 力-速度関係の測定 (等張力性条件) スラックテ

スラックテスト 採血、とした。採取した血液サンプルより、血清 CK 活性およびミオグロビン濃度 (Mb) を測定した。翌日以降 7 日後まで、採血 等尺性最大筋力の測定 力-速度関係の測定 (等張力性条件) スラックテスト、のルーチンを毎日行った。

## (3) 動物モデル

Wistar 系ラット (10 週齢) を用いた。筋への遺伝子導入条件を決めるために、まず GFP 遺伝子の導入を試みた。生理食塩水に溶解した GFP 発現プラスミド (pEGFP-N3) 100  $\mu$ g (濃度 1.5  $\mu$ g/ $\mu$ l) をラットの後肢筋 (腓腹筋、ヒラメ筋) に筋注した。その後直ちに、プラスミド筋注部位を挟むように、5 mm 間隔の一对の針電極を筋肉内に挿入し、パルス発生装置 (CUY21EDIT, ネットパジーン) を用いて電気パルスを与えた。GFP 発現の範囲を調べるために、導入 5 日後に後肢筋を摘出し組織切片を作り、蛍光顕微鏡で観察した。

ヒトを対象とした実験は、東京大学「ヒトを対象とした研究に関する倫理委員会」の指針に従って行い、特に高齢者を対象とする場合と、遺伝子情報を扱う場合については、事前に同委員会の承認を得た上で行った。動物実験に関しては、同「実験動物委員会」の承認を得た上で行った。

## 4. 研究成果

### (1) $V_0$ に及ぼす電気刺激の効果

筋活動レベルに伴う  $V_0$  の変化が、随意収縮における筋線維動員パターンと関連していることを検証するために、前脛骨筋を対象として、腓骨神経を電気刺激して生じさせた強縮時 (0.2 ms, 50 Hz, 2 秒間) の  $V_0$  をスラックテスト法により測定し、随意収縮の場合と比較した。その結果、随意収縮では  $V_0$  が筋活動レベルの増大に伴って次第に増加するのに対し、電気刺激の場合には、 $V_0$  は刺激強度に依存せず一定値 (随意収縮の場合の最大値のレベル) を示した (図 1)。このことは、外部からの電気刺激に対しては、軸索径の大きな速筋線維の運動単位ほど興奮の閾値が低く動員されやすいこと、随意収縮では逆に、中枢での動員閾値の低い遅筋線維の運動単位から順に動員されることを示唆している。さらに、生体内での筋収縮における  $V_0$  は、動員されている運動単位のうち最も速度の速いものの  $V_0$  を反映していることが示唆された。

### (2) 「新スラックテスト法」の開発

スラックテスト法は、 $V_0$  と筋線維動員

パターンを同時に推定できるものの、測定に時間を要する、急速解放に伴う力学的ストレスが大きく高齢者などに対しては負担となる、などの問題点が生じたため、本法の改変を試みた。生体内の筋収縮では、筋活動電位の発生から収縮張力の立ち上がりまでの間にわずかな遅延があり electro-mechanical delay (EMD) と呼ばれる。この EMD は、(i) 興奮-収縮連関の過程での時間的遅延と (ii) 筋内部に存在する slack の影響によるものと考えられる。したがって、(i) の影響を排除できれば、安静時に存在する slack を利用して、急速解放を伴わずにスラックテストを行うことが可能である。そこで、肘屈筋を対象とし、2連の電気刺激 (0.5 ms, パルス間隔 12 ms) による単収縮を行わせ、筋の力学的活動の開始から張力の立ち上がりまでの遅延時間 (立ち上がり時間) をさまざまな関節角度で測定した。力学的活動の開始は、加速度センサを筋腹に接着し、微小な振動 (筋音図) を検知することにより行った。その結果、肘関節角度がある値を下回る (完全伸展位を 180° とする) と、急速に立ち上がり時間が増大することがわかった。この立ち上がり時間の増大は、安静状態における筋の slack によるものと考えられることから、立ち上がり部分を直線回帰すれば、その直線の傾きが  $V_0$  を示すことになる (図 2)。こうして求めた  $V_0$  と、スラックテストで求めた  $V_0$  はよく一致したため、以後この方法を「新スラックテスト」と呼ぶこととした。

図 1 筋力発揮レベル (%MVC) と  $V_0$  の関係。VC, ES はそれぞれ随意収縮, 電気刺激を示す。(n=8)

(3) 筋線維組成および筋線維動員パターンの推定

筋線維組成および筋線維動員パターンを非侵襲的に推定するため、本研究では、PTP を利用した方法を試みた。動物実験から、PTP は速筋線維に特異的に生じることが示唆されていることから、さまざまな筋活動レベルでの随意強縮後の PTP を定量化することにより、速筋線維の割合やその動員パターンを推定できると考えられる。健康若年男女 8 名を対象としてそのような測定を行ったところ、筋活動レベルの上昇に伴い、PTP (peak torque: 強縮前の単収縮張力に対する増加の割合) は sigmoid 状に増大することが分かった (図 3 参照)。この関係を Boltzmann 関数で近似することにより、閾値 (PTP の立ち上がり), 変曲点 ( $I_{50}$ ), 最大値, の 3 つのパラメータを決定した。このようにして得られた sigmoid 状の関係は速筋線維の動員パターンを示し、3 つのパラメータは速筋線維の割合 (%FT) に関連すると考えられる。このようにして推定した %FT は、低筋活動レベルでの  $V_0$  と相関する傾向を示したが、50%MVC 以上の筋活動レベルでの  $V_0$  とは明らかな相関を示さなかった。

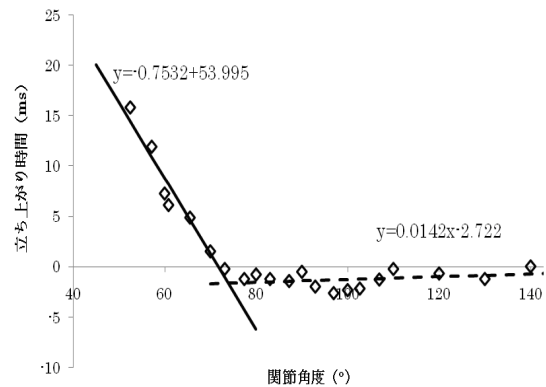


図 2 折れ線回帰による  $V_0$  の決定例

(4) 加齢および性差の影響

加齢と性差が  $V_0$  および筋線維動員パターンに及ぼす影響につき、「新スラックテスト法」と上記の PTP を利用した方法で検討した。随意強縮における筋活動レベルと PTP の関係を、男女別、年代別に図 3 に示す。男女とも、加齢とともに、閾値、 $I_{50}$ , 最大値はいずれも低下する傾向が見られたが、年代間で有意な差は認められなかった。一方、すべての年代において、女性ではこれらのパラメータが男性に比べ有意に低値を示した ( $P < 0.001$ )。  $V_0$  に関しては、年代間、男女間で有意な差は認められなかった。これらの結果から、筋線維組成および筋線維動員パターンには男女差があるものの、加齢による変化は生じないこと、速筋線維の  $V_0$  には加齢および性差は影響しないことが示唆された。

QuickTime<sup>®</sup> C<sup>2</sup>  
TIFF (LZW) éLíÉVÉçÉOÉáÉÄ  
Ç™Ç±ÇÄÉsENE EÉÇ%â@ÇÉÇZÇ%Ç...ÇÖIKóvÇ-ÇAB

QuickTime<sup>®</sup> C<sup>2</sup>  
TIFF (LZW) éLíÉVÉçÉOÉáÉÄ  
Ç™Ç±ÇÄÉsENE EÉÇ%â@ÇÉÇZÇ%Ç...ÇÖIKóvÇ-ÇAB

図3 随意強縮における筋活動レベルとPTP（強縮前のピークトルクからの増加の割合）の関係。上段が男性，下段が女性。20歳代から70歳代のグループごとにプロットした。

#### (5) 運動・トレーニングの影響

トレーニング群では，上腕二頭筋厚，肘屈曲トルク， $V_o$ ， $V_{max}$  の値はそれぞれ， $3.9 \pm 0.5$  cm， $102.6 \pm 15.9$  Nm， $2005 \pm 593$  °/s， $934 \pm 113$  °/s であり，非トレーニング群ではそれぞれ， $2.9 \pm 0.4$  cm， $68.7 \pm 18.6$  Nm， $1923 \pm 656$  °/s， $1000 \pm 562$  °/s（平均±標準偏差）であった。筋厚および肘屈曲トルクについては両群間に有意差が認められた（ $P < 0.05$ ）。一方， $V_o$  および  $V_{max}$  については群間に有意差はなかった。また，筋厚と肘屈曲トルクは有意な正の相関を示したが（ $r = 0.87$ ），筋厚と  $V_o$  および  $V_{max}$  の間には相関は認められなかった（図4）。これらの結果から，長期的な筋力トレーニングは，速筋線維の最大短縮速度には影響を及ぼさないことが示唆された。また，肘屈筋では，力-速度関係から推定した  $V_{max}$  は，スラックテストで求めた  $V_o$  に比べて著しく低値となることが示された。

#### (6) 遺伝子多型（ACTN3）の影響

3つの遺伝子型のそれぞれの群で，高強度伸張性筋運動での相対的強度，運動容量に有意差はなく，同質の運動が行われたことが示された。等尺性最大筋力は，初期値

に群間差はなく，すべての群で運動直後に著しく低下し（平均約60%），以後7日後にかけて徐々に回復したが，7日後の回復率では，RR型がXX型に比べて有意に高値を示した（ $P < 0.05$ ）。また，筋損傷マーカーとしての血中CK活性，Mb濃度のいずれにおいても，運動4日後でXX型がRR型に比べて有意に高値を示した。 $V_o$  は初期値に群間差はなかったが，XX型においてのみ運動直後から4日後にかけて有意な低下が見られた（約80%）。一方， $V_{max}$  については，初期値に群間差が認められ，RR型がXX型に比べ高値を示した（ $P < 0.01$ ）。しかし，運動後にはどの群でも有意な低下は認められず，XX型においてのみ運動直後および4日後で低下傾向（ $P = 0.055$ ）が認められた。これらの結果から， $\beta$ -アクチニン3は，構造タンパク質として高強度伸張性筋運動に対する筋線維の耐性に関係しており，これを産生することのできないXX型では，運動後の筋損傷が大きく，筋力の回復も遅延する可能性が示唆された。一方，*ACTN3* の多型は  $V_o$  の初期値には影響しないが，XX型でのみ運動後に一過的に低下することが示された。XX型では，運動後の微小な筋線維の損傷によって細胞内環境に変化が起こり，アクチンとミオシン間の相互作用や，興奮-収縮連関に影響が及ぶなどの可能性が考えられる。

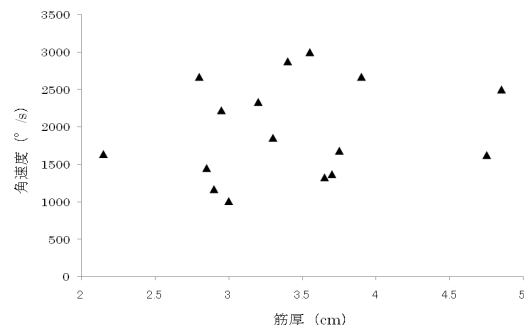


図4 上腕二頭筋の筋厚と  $V_o$  の関係。トレーニング群，非トレーニング群の両者をプロットした。

#### (7) 動物モデルへの遺伝子導入

さまざまな条件で電気パルスを与える実験を試み，パルス幅50ms，パルス間隔100msを3回与え，さらに逆方向にも3パルスを与えるという方法で，多数の筋線維にGFPの発現が認められた（図5）。この方法によりラット筋内にプラスミド遺伝子導入をすることが可能であることが確かめられた。現在，*ACTN3* のベクター設計が終わり，導入を試みている段階

である。

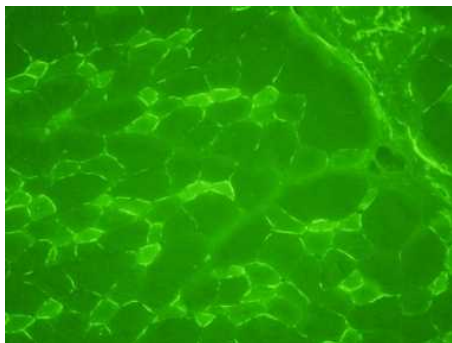


図5 pEGFP-N3を導入したラット腓腹筋組織切片像

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 15 件)

Tanimoto, M. and Ishii, N. Effects of low-intensity resistance exercise with slow movement and tonic force generation on muscular function in young men. *J. Appl. Physiol.*, **100**, 1150-1157, 2006. 査読有

Yamauchi, J. and Ishii, N. Relations between force-velocity characteristics of the knee-hip extension movement and vertical jump performance. *J. Str. Condition. Res.*, **21**, 703-709, 2007. 査読有

Yamauchi, J., Mishima, C., Fujiwara, M., Nakayama, S. and Ishii, N. Steady-state force-velocity relation in human multi-joint movement determined with force clamp analysis. *J. Biomech.*, **40**, 1433-1442, 2007. 査読有

Ochi, E., Nakazato, K. and Ishii, N. Effects of eccentric exercise on joint stiffness and muscle connectin (titin) isoform in the rat hindlimb. *J. Physiol. Sci.*, **57**, 1-6, 2007. 査読有

Goto, K., Ishii, N., Mizuno, A. and Takamatsu, K. Enhancement of fat metabolism by repeated bouts of moderate endurance exercise. *J. Appl. Physiol.*, **102**, 2158-2164, 2007. 査読有

Ochi, E., Ishii, N. and Nakazato, K. Effects of acute eccentric contraction on rat ankle-joint stiffness. *J. Sports Sci. Med.*, **6**, 543-548, 2007. 査読有

Kawada, S. and Ishii, N. Changes in Skeletal Muscle Size and Fiber-Type Composition after Chronic Restriction of Venous Blood Flow in Rats. *Acta Physiol. Scand.*, **192**, 541-549, 2008. 査読有

Hirose, T., Nakazato, K., Song, H. and Ishii, N. TGF-beta1 and TNF-alpha is involved in the transcription of type I collagen alpha 2 gene in soleus muscle atrophied by mechanical unloading. *J. Appl. Physiol.*, **104**, 170-177, 2008. 査読有

Yamauchi, J., Nakayama, S. and Ishii, N. Blood pressure response to force-velocity properties of the knee-hip extension movement. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **102**, 569-575, 2008. 査読有

Matsubayashi, T., Kubo, J., Matsuo, A., Kobayashi, K., Ishii, N.

Ultrasonographic measurement of tendon displacement caused by active force generation in the psoas major muscle. *J. Physiol. Sci.*, **58**, 323-332, 2008. 査読有

Kawada, S. and Ishii, N. Peripheral venous occlusion causing cardiac hypertrophy and changes in biological parameters in rats. *Eur. J. Appl. Physiol.*, **105**, 909-917, 2009. 査読有

Yamauchi, J., Mishima, C., Nakayama, S. and Ishii, N. Force-velocity, force-power relationships of bilateral and unilateral leg multi-joint movements in young and elderly women. *J. Biomech.*, **41**, 2151-2157, 2009. 査読有

Yamauchi, J., Nakayama, S. and Ishii, N. Effects of body weight based exercise training on muscle functions of leg multi-joint movement in elderly individuals. *Geriatrics and Gerontology Int.*, **9**, 262-269, 2009. 査読有

Yamauchi, J., Mishima, C., Nakayama, S. and Ishii, N. Ageing related differences in maximum force, unloaded velocity and power of human leg multi-joint movement. *Gerontology*, **56**, 167-174, 2010. 査読有

Ochi, E., Hirose, T., Hiranuma, K., Min, S., Ishii, N. and Nakazato, K. Elevation of myostatin and FOXOs in prolonged muscular impairment induced by eccentric contractions in rat medial gastrocnemius muscle. *J. Appl. Physiol.*, **108**, 306-313, 2010. 査読有

[学会発表](計 1 件)

Madarame, H., Sasaki, K., Ochi, E., Nakazato, K., Ishii, N. Effects of unilateral resistance exercise with vascular occlusion on muscular function of trained and untrained limbs. 12th Annual Congress of the European College of Sport Science (Finland: July 2007). ほか

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

石井 直方 (ISHII NAOKATA)

東京大学・大学院総合文化研究科・教授  
研究者番号: 20151326

(2) 研究分担者

中里 浩一 (NAKAZATO KOUICHI)

日本体育大学・体育学部・准教授

研究者番号: 00307993

(3) 連携研究者

なし