

## 論文の内容の要旨

### 論文題目

# 高齢者・有疾患者のための低負荷レジスタンス運動に関する研究 (Study on low-intensity resistance exercises for elderly and patients)

竹並 恵里

#### 【第1章：緒言】

世界に先駆けて超高齢社会を迎えている我が国では「健康寿命」の延伸が喫緊の課題であり、その健康施策は「高齢による衰弱の予防」により比重を置く内容に変遷しつつある。高齢者が健康寿命を損なう理由は様々だが、根本的な原因になりうるものとしてサルコペニア（加齢による骨格筋量・筋力の低下）が挙げられる。実際、骨格筋は最大のエネルギー消費器官として代謝恒常性に深く関わるため、サルコペニアは糖尿病をはじめとする加齢関連疾患のリスクを増大させる一因となる。したがって、レジスタンス運動によるサルコペニアの予防・改善は、健康寿命の延伸に直結する有効な対策である。

通常、筋肥大・筋力増強を目的としたレジスタンス運動には、高負荷（最大挙上重量[1RM]65%以上）が用いられる。しかし、筋・骨格系や循環器系の障害のリスクが高い高齢者・有疾患者に対して高負荷のレジスタンス運動を処方することは現実的でない。一方、近年では運動条件の工夫により低負荷（50%1RM 以下）のレジスタンス運動でも十分な筋肥大・筋力増強効果を得られる場合があることが報告されているが、その生理学的機序、運動条件と効果の関係性、安全性については不明な点が多い。高齢者・有疾患者向けに低負荷レジスタンス運動の条件を最適化するためには、効果、安全性、実行しやすさなどを包括的に考慮する必要がある。

そこで、本研究ではレジスタンス運動により発生する関節トルクと、運動直後の筋疲労度を定量化できる独自の測定系を構築した。運動中に測定された関節ピークトルクは筋・骨格系や循環器系に対するストレス、すなわち安全性の指標として活用できる一方、運動によって生じる筋疲労の程度は急性の筋タンパク質合成効果や長期的な筋肥大効果の指標となることが近年の研究から示唆されている。いずれも間接的な指標ではあるが、複数の低負荷レジスタンス運動の安全性や効果を同一対象者で比較検討できることは大きなメリットである

と考えられる。

以上より、本研究では高齢者・有患者でも安全に実施可能で、かつ確実な効果が期待できる低負荷レジスタンス運動の条件を検討すること、およびその知見を反映させた低負荷レジスタンス運動が高齢有患者に及ぼす効果について検討することを目的として、以下の研究1と2を実施した。

## 【第2章：研究1】

### 研究1-1：レジスタンス運動直後における筋疲労の定量化の検討

研究1-1の主な目的は、前述した独自の測定系の信頼性を確認することであった。18歳以上の健常男性7名(27.0±4.6歳)を対象として、伝統的な高負荷(随意最大筋力[MVC]の70%)を用いたレジスタンス運動(右脚の膝伸展運動、動作速度：挙上と降下を各1.5秒、反復回数：疲労困憊まで×3セット、セット間インターバル：2分)の実施直後における筋疲労の程度とその回復過程を詳細に検討した(図1、2)。なお、本研究では「疲労困憊」を、疲労により規定の動作範囲または規定の動作速度で運動を遂行できなくなった状態と定義する。

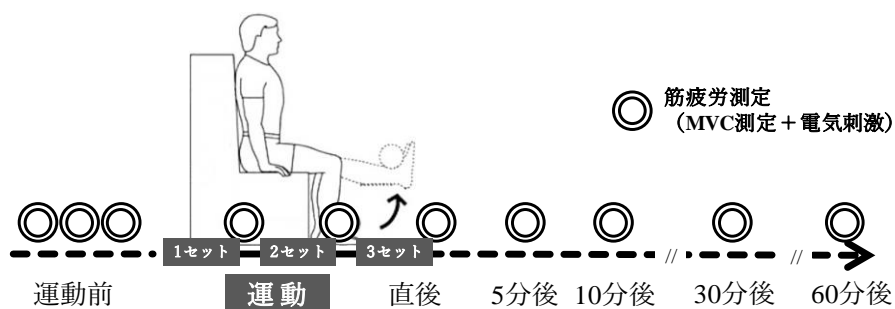
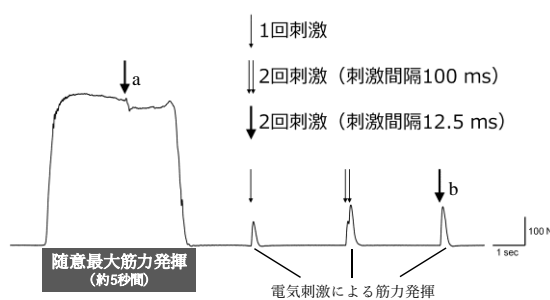


図1：研究1の実験プロトコル



- ・末梢性疲労：電気刺激により誘発された筋力(膝伸展トルク)の瞬間最大(ピーク)値
- ・中枢性疲労：随意活動レベル=1-a/b

図2：電気刺激による筋疲労測定法の詳細

上述のレジスタンス運動および筋疲労の測定を14日以内の間隔で二度にわたり実施し、その結果から本測定系の信頼性を確認したところ、MVCの低下率や中枢性・末梢性疲労(図2)の程度など、ほぼ全ての指標において高い信頼性が確認された。MVCは運動前との比較で運動終了直後に有意に低下し、運動終了5分後にかけて有意な回復を示した(運動前：245±39 N·m、運動終了直後：162±33 N·m、運動終了5分後：199±34 N·m、いずれも平均±標準偏差)。末梢性疲労の各指標についてもほぼ同様の変化が認められたが、中枢性疲労の各指標について有意な変化は認められなかった。

## 研究 1-2：異なる運動条件での低負荷レジスタンス運動における関節トルクと筋疲労の評価

### ～高負荷レジスタンス運動実施時との比較検討～

研究 1-2 では、18 歳以上の健康男性 8 名 ( $26.8 \pm 4.5$  歳) を対象として、研究 1-1 で信頼性が確認された測定系を用いて、3 種の異なる低負荷 (MVC の 30%) レジスタンス運動条件で運動中の膝関節トルクおよび運動後の筋疲労の程度を測定し、その結果を高負荷レジスタンス運動条件と比較することを目的とした。低負荷レジスタンス運動における 3 種の運動条件は、A) 通常速度 (挙上と降下を各 1.5 秒) で疲労困憊まで反復、B) 低速度 (挙上と降下を各 4 秒) で疲労困憊まで反復、C) 通常速度 (挙上と降下を各 1.5 秒) で規定回数 (高負荷レジスタンス運動条件の反復回数と同じ) まで反復、とした。各運動条件での 1 セット目の反復回数 (平均  $\pm$  標準偏差) は、高負荷運動条件および条件 C では  $8.7 \pm 2.4$  回、条件 B では  $10.9 \pm 3.2$  回であったのに対し、条件 A では  $29.5 \pm 7.8$  回にも及んだ。運動中の膝関節トルクの変動 (一例: 図 3) からピーク値を解析したところ、低負荷運動条件間の比較では条件 B ( $95 \pm 13$  N·m) が A ( $116 \pm 21$  N·m) および C ( $114 \pm 19$  N·m) よりも有意に低い値を示した。運動による MVC の低下および末梢性疲労の程度は条件 A が最も大きく、次いで B が高負荷運動条件と同等、C が最も小さかった (図 4)。

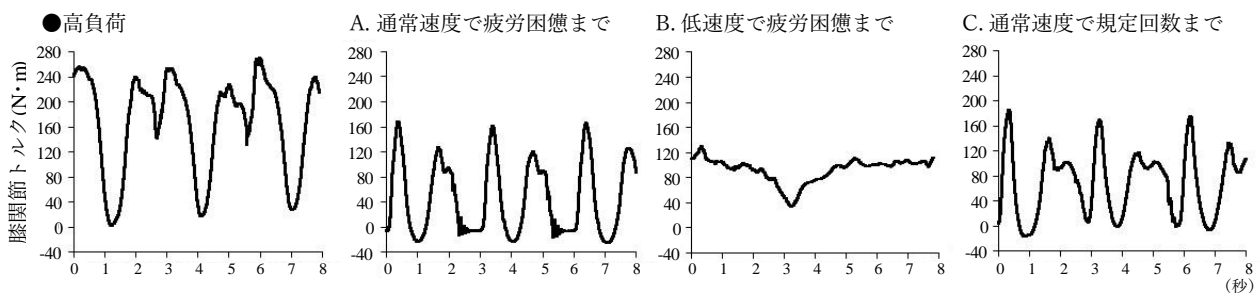


図 3：運動中の膝関節トルクの一例

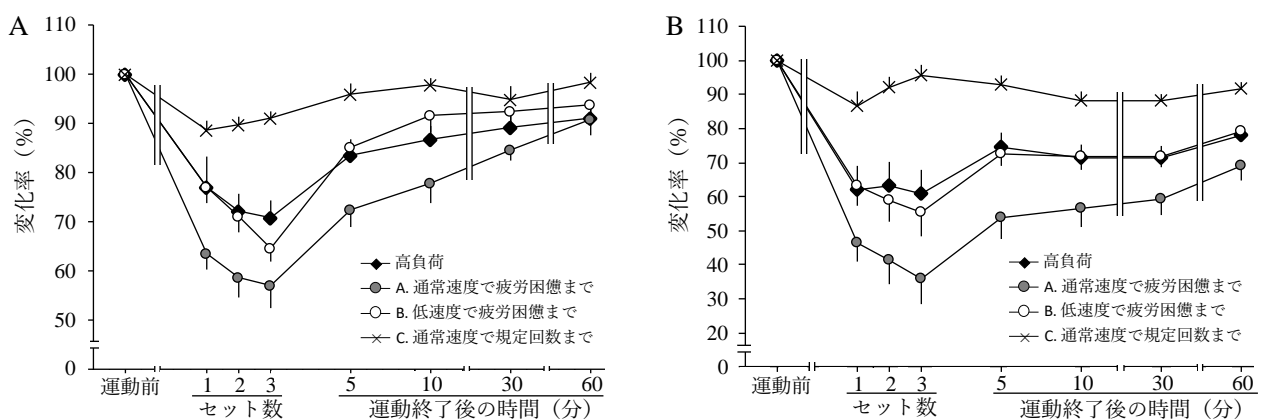


図 4：運動による MVC(A)と末梢性疲労指標(B)の変化

以上の結果から、低負荷レジスタンス運動の中でも条件 B、つまり低速度で疲労困憊まで反復する条件が、安全性と効果の両立、また実用性 (反復回数が少なくてすみ、その個人差も小さい) という点で優れていることが示唆された。

### 【第3章：研究2】高齢2型糖尿病患者の筋機能と血糖コントロールにおける低負荷低速度レジスタンス運動の急性および長期効果の検討

研究2では、研究1より得られた知見に基づき、有患者を対象として低速度で疲労困憊まで反復する低負荷レジスタンス運動の急性および長期効果を検討することを目的とした。運動には、どこでも実施可能で習慣化が期待できるという理由から自体重負荷での股関節外旋位スクワット、ランジスクワット、クランチの3種目を採用した。それぞれの種目において挙上と下降を各3秒かけて疲労困憊まで反復することを1セットとし、2~3セット実施した。北里研究所病院の外来患者である高齢2型糖尿病患者10名(68.2±9.7歳、男性と女性それぞれ5名)を対象に、上述の運動を10時間の絶食後に実施し、その前後において血中乳酸濃度、血中グルコース濃度(血糖値)、血清インスリン濃度および糖代謝関連各種ホルモン濃度を測定し、臨床上問題となるような変化が起こらないことを確認した。続けて、同一の対象者に週2回の頻度で4か月間の運動介入を実施したところ、大腿前部の筋厚と筋力(等速性随意最大発揮トルク)が有意に増加し、血中HbA1c値には改善傾向が認められた(図5)。介入前後のHbA1c値の変化と体組成および筋力の変化との関係を調べたところ、高速度での等速性膝伸展随意最大発揮トルクの変化率との間にのみ有意な負の相関関係が認められたことから、低速度で疲労困憊まで反復する低負荷レジスタンス運動の継続による血糖コントロール改善の機序に、特に速筋線維の肥大や機能改善が関与していることが示唆された。

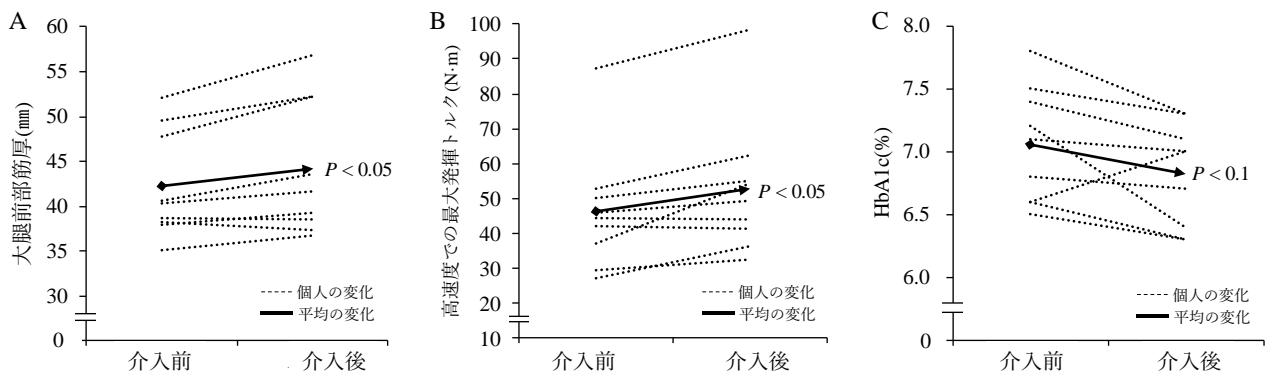


図5：運動介入前後の大腿前部筋厚(A)、高速度での最大発揮トルク(B)、HbA1c値(C)の変化

### 【総括】

近年、動作速度や反復回数などの工夫によって筋肥大・筋力増強効果を得られることが報告されている低負荷レジスタンス運動だが、研究1より、動作速度に関わらず疲労困憊まで反復することで高負荷レジスタンス運動に匹敵する筋疲労が引き起こされることが明らかとなった。高齢者や有患者向けには、安全性や実用性の面から、低速度で疲労困憊まで行う条件が総合的に優れていることが示唆された。研究2で、この条件での運動を自体重負荷の手法で高齢2型糖尿病患者に実施したところ、トレーニングの有効性が示され、速筋線維の機能改善の関与が示唆された。したがって、運動中に速筋線維を動員させるために十分な筋疲労を生じさせる条件下であれば、その他の運動条件は対象者に応じてリスクの低い形や目的に叶う形に調節しても、一定のトレーニング効果を確保できるものと考えられる。本研究で得られた知見は、トレーニング処方を選択肢を大きく広げることとなり、今後、高齢有患者のための最適なレジスタンス運動法の開発につながるであろう。