

2007 年度 修士論文

セット間のスタティックストレッチングが
等張性筋力に及ぼす影響

Effects of static stretching during sets
on isotonic muscular strength

早稲田大学 大学院スポーツ科学研究科
スポーツ科学専攻 コーチング科学研究領域

5 0 0 6 A 0 0 5 - 8

飯田 祐士

Iida, Yuji

研究指導教員： 岡田 純一 准教授

目次

1 序論

1.1	緒言	1
1.2	関連文献の考証	2
1.3	目的	8

2 方法

2.1	被検者	9
2.2	実験手順	9
2.3	測定項目および分析方法	10
2.4	統計処理	12

3 結果

3.1	柔軟性	13
3.2	筋力低下率および MRP test	13
3.3	筋放電量変化率	13

4 考察

4.1	柔軟性	14
4.2	筋力	15
4.3	筋放電量	15
4.4	MRP test のパフォーマンス	16
4.5	レジスタンストレーニングへの応用	18

5 結語

参考文献

謝辞

表・図

1 序論

1.1 緒言

近年，競技やレジスタンストレーニングの実施に伴い，ウォームアップまたはクールダウンの一部としてストレッチングが広く用いられている．

ストレッチングとは，柔軟性向上や疼痛緩和等³⁸⁾，種々の効果があるとされている筋を伸張する方法である．その手法も様々であるが，中でもスタティクストレッチング(Static stretching：SS)は最も一般的な手法であり，数多くの研究^{6,9,10,16,27,33,34,39,46,47,48)}によりその効果についての検討がなされている．そしてこれらの研究では，等速性^{9,10,34,47)} および等尺性^{16,33,39)} の筋力発揮に対するSSの影響について言及したものが多くを占めている．その一方で，一般的なスポーツ活動は主に等張性の筋活動で構成されているが⁴⁶⁾，等張性の筋活動に対するSSの影響を検証した研究は非常に少ない^{27,46)}．また，先行研究の多くは，SS実施後の単発的な力発揮^{9,10,16,27,33,34,39,46)} および筋パフォーマンス^{6,39,48)} について検討したものである．間欠的な力発揮におけるセット間の休息時に実施するSSの影響については，間欠的な等速性筋力発揮（20回3セットの膝伸展・屈曲動作）により顕著に生じる筋力低下を抑制し，また筋力低下に伴う関節可動域低下を予防するといった傾向がみられている⁴⁷⁾．レジスタンストレーニングプログラムのような実際に間欠的な力発揮を用いる場合には，主に等張性のエクササイズが実施されているが，先行研究⁴⁷⁾では，間欠的な力発揮として等速性の筋収縮様式が使用されていること，例数が少ないことなどの課題を残している．以上の知見から，間欠的な等張性筋力発揮のセット間に行うSSが及ぼす影響を検討することは，レジスタンストレーニングプログラムへの応用という観点からも重要であると思われる．

また，SSが筋活動に及ぼす影響については，筋放電量を低下させるという報

告³⁰⁾がなされている一方で，Evetovichら¹⁴⁾は筋放電量への影響は認められないとしており，一定の見解が得られていない．したがって，筋電図分析や柔軟性評価を実施することで，SSが筋に及ぼす影響の要因を検討する必要がある．

そこで本研究では，間欠的な等張性筋力発揮プログラムのセット間に行うSSが，筋力，筋放電量および柔軟性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした．

1.2 関連文献の考証

1.2.1 ストレッチングとは

ストレッチングとは，筋を伸張する方法である．そして，その手法はバリスティックストレッチング，ダイナミックストレッチング，PNFストレッチング，スタティックストレッチングの4手法に大別することができ，一般的には柔軟性の向上，関節可動域の改善，疼痛緩和等の効果があるとされている³⁸⁾．

1.2.1.1 バリスティックストレッチング（Ballistic stretching：以降BS）

反動や勢いを利用して対象となる筋群を伸張させるこの手法は，しばしば関節可動域を超えて急激に伸張されることも少なくない⁴⁴⁾．そのため，動作中に伸張反射が引き起こされる場合もあり，過度の伸張刺激が関節の可動範囲を制限してしまうことにもなる¹⁸⁾．また，伸張反射によって収縮している筋をさらに伸張することで，ついには筋に損傷を引き起こす恐れがある⁴⁴⁾．しかし逆の観点からすると，伸張反射を活用して伸張反射の閾値レベルを下げることで，反応時間を短縮することが可能であると考えられている¹⁸⁾．

BSに関する先行研究には，PNFストレッチング（下記参照）の一手法（コントラクト・リラックス）と比較して，BSは柔軟性の改善効果に乏しいとするもの⁴³⁾や，ストレッチング実施後の筋パフォーマンスを有意に低下させるといっ

たものがある³⁵⁾。

Nelsonら³⁵⁾は、下肢の 5 つの筋群に対し、合計 20 分間のBSを実施し、その後の膝関節伸展 (KE)・屈曲 (KF) 動作における 1RMを測定した。その結果、BSを実施しなかった際の 1RM (KE : 917N , KF : 595N) と比較すると、有意な低下 (KE : 869N , KF : 552N) が認められた。こういった現象の発生機序については明らかにされていないが、最大筋出力が関連するような動作前には、BSを実施すべきではないと結論付けられている。

1.2.1.2 ダイナミックストレッチング (Dynamic stretching : 以降 DS)

例えば歩行やジョギングをしながら、対象となる筋群の反対側に位置する拮抗筋群を、数回にわたり意識的に収縮させることで、相反性抑制を利用して対象筋群を伸張させようとする手法である⁴⁴⁾。素早い動きによって筋を伸張させる点では、前項のBSと類似しているが、相反性抑制を用いることで伸張反射による筋の収縮を抑えているため、筋損傷の危険性は低い。また、スポーツや日常生活と類似した動きで行なわれることがこのストレッチングの大きな特徴であり、動作特異的な柔軟性を改善することが出来るとされている。

山口ら⁴⁵⁾は、DSに先だって脚伸展パワーを測定し (before) , その後測定動作に関わる 5 種目のDSを各 15 回実施した。一方でストレッチングを施さない対照条件 (non-stretching : NS) を設け、計 2 条件で改めて脚伸展パワーの測定を行った (after) 。この研究では、DS後の全被検者において、beforeからafterにかけてパワーの向上が確認され、対照条件と比較しても有意な差が示された (DS before : $1837.6 \pm 131W$, after : $2022.3 \pm 121W$, NS before : $1851.9 \pm 127W$, after : $1784.8 \pm 108W$) 。こういった結果の要因として、筋温の上昇、またはストレッチ対象筋の拮抗筋における自発的な収縮による活性後相乗作用が、DSによって引き起こされたのではないかと考察されている。

そしてFletcherら¹⁵⁾の研究では、5種目各20回のDSを下肢筋群に施した場合、20m疾走時間がDS実施前の $3.24 \pm 0.2\text{sec}$ から $3.18 \pm 0.18\text{sec}$ へと有意に改善されることが示されている。この他にも、アジリティ能力の評価法であるT-テストのパフォーマンスが改善された（DS実施： $9.56 \pm 0.79\text{sec}$ 、ストレッチング無： $9.77 \pm 0.82\text{sec}$ ）という報告²⁹⁾もあり、DSの影響としては、筋パフォーマンス等の改善効果を示唆する研究が多くを占めている。

しかしその一方で、DS実施にあたっては正確な動作が必要とされ、不十分な方法ではかえって伸張反射を引き起こしてしまう恐れがあるとされている¹⁸⁾。

1.2.1.3 固有受容神経筋促通法ストレッチング（PNF stretching：以降 PNF）

主働筋と拮抗筋のどちらか、あるいは両方において、収縮と弛緩を交互に繰り返す手法である。脊髄に本来備わっている神経機構を応用する⁴¹⁾PNFには種々の手法があるが、基本的にホールド・リラックス、コントラクト・リラックス、ホールド・リラックス（アゴニストコントラクション）の3手法が知られている²³⁾。これらは柔軟性の改善に有効であるとされている一方で、実施にはパートナーを必要とし、さらに熟達した技術も要求される¹⁸⁾。

パフォーマンスに及ぼす影響について検討したChurchら⁷⁾は、大腿部の筋群に対し、20秒間×3セットのPNF（ホールド・リラックス・アゴニストコントラクション）を実施し、その後垂直跳びを測定した。その結果、垂直跳びのスコアは、ストレッチングを実施しなかった対照条件（48.7cm）ならびにSSを行った条件（48.1cm）と比較して、PNFを実施することで有意に低値を示した（47.2cm）。

また、Bradleyら⁶⁾も、PNFに関して上記と同様にPNF後のパフォーマンスが低下するという傾向を確認している。一方で、ストレッチング実施の15分後には、こういったPNFの影響が除去されるということも示唆されている。

1.2.1.4 スタティックストレッチング (Static stretching : 以降 SS)

この手法は、対象となる筋群を、反動を用いずにゆっくりと関節可動域の限界まで伸張させ、限界の肢位で 20~30 秒間保持するものである。SSにより筋が伸張されると、筋と骨とを結合する腱も伸長される。この際、ゴルジ腱器官が腱の過伸張を抑制するために筋の伸張を促す。これは自原性抑制といわれ、SSによる柔軟性改善効果に深く関連している。また、SSは反動を用いないことで伸張反射の発生を抑制することを意図している。したがって筋の損傷を引き起こす可能性が低く、安全に柔軟性を改善することが出来ると考えられている⁴⁴⁾。

1.2.2 SS と生理学的諸変量との関係

ストレッチング手法のなかでも、SSは、Bob Andersonによって著された“STRETCHING”²¹⁾の出版以来、広く普及し一般的に行われるようになった。安全に実施出来ることが可能な上、手法自体も非常に簡便であるため⁴⁴⁾、ストレッチングに関する研究においても数多く用いられている。また、筋ポンプ作用を活性化させる働きがあるため疲労産物の除去作用を補助する、身体的・精神的緊張を緩和するといったクールダウン効果¹⁸⁾に加え、連続運動に伴う筋力低下を抑制する作用⁴⁷⁾も報告されており、その用途は非常に広いと思われる。

1.2.2.1 柔軟性に対する SS の影響

一般的にSSの実施には筋の柔軟性向上効果が期待されているが¹⁹⁾、これについては多くの研究によってその効果が支持されている^{3-5,12,13,27,47)}。Kokkonenら²⁷⁾は、膝関節屈曲伸展に関わる 5 つの筋群に対しSSを実施することで、sit-and-reach testのスコアがSS実施前と比較して約 16%有意に改善されたことを確認した。また、PNFと比較して、柔軟性改善にはSSがより効果的であるという報告がなされている¹²⁾。

とくにSSを実施する際の所要時間についてBandyら^{3,4)}は、15 秒間と比較して 30 秒間ないし 60 秒間実施することが関節可動域改善に有効であると示唆している。加えて、30 秒間と 60 秒間の実施には改善効果に差はないということから、30 秒間が最も効果的なSSの所要時間であると結論づけている。

1.2.2.2 SS が神経系（筋活動）に及ぼす影響

神経系、とりわけ筋活動は力発揮に直接関わっているため²³⁾、現在までに多くの研究が行われている。そしてSSが筋活動に及ぼす影響については、その影響の有無に対し互いに相反する報告がなされている。森本ら³⁰⁾は、70%MVCの負荷を用い踵あげ運動（10 回×10 セット）を行うことで筋痛を生じさせた。この際、EMGのRMS値は安静時の 69 μ V から 201 μ V へと顕著に増加したが、15 秒間×3 セットのSSによって安静状態に近似した値（87 μ V）まで回復するという現象を確認している。

一方、市橋ら²²⁾は、SSの影響について筋電図周波数解析により検討した。つま先立ちを疲労困憊まで行わせた後にSSを 30 秒間実施し、筋疲労の回復効果に対照条件（安静保持）と比較した。その結果、安静とSSの疲労回復率に有意な差は認められなかった。この結果から、筋の神経伝導速度の回復に関してはストレッチングの効果はないとし、他の因子すなわち興奮収縮連関や運動終板などが関わっていると考察している。また、等速性筋力発揮（30, 270°/s）における上腕二頭筋のEMG（RMS値）に対し、SSの影響が認められなかったため、SSは活動する運動単位数には影響を及ぼさないということも示唆されている¹⁴⁾。

以上のように、SS が神経系（筋活動）に及ぼす影響については、現在までに一定の見解が得られていない。

1.2.2.3 SS 実施後の力発揮および筋パフォーマンス

近年，数多くの研究者によって，SSの実施が等速性の伸張性筋活動⁹⁾を除いた力発揮^{10,16,27,33,34,46)}および筋パフォーマンス^{6,48)}の低下につながるということが確認されている．そして，こういった現象の要因として，SSにより神経筋活動レベルの低下や筋腱組織の粘弾性減少が起こったのではないかとということが示唆されている．

しかしながらこれらの先行研究では，一つの筋群に対し 60 秒間～20 分間のSSを実施しており，前述した関節可動域の改善に有効なストレッチング所要時間（30 秒間）と比較すると，より長時間SSを行っていたと考えられる．この点を検証した山口ら⁴⁵⁾の結果では，30 秒間のSSはその後の脚伸展パワーに有意な低下を引き起こさなかった．このことから，関節可動域の限界の肢位で 20～30 秒間保持するといった一般的に行われているSSには，その後の力発揮または筋パフォーマンスを低下させるような効果はないということが示唆される．

また，山本⁴⁷⁾は被検者 3 名に対し，間欠的な力発揮（20 回 3 セットの膝伸展・屈曲動作）におけるセット間の休息時にSSを実施させ，筋持久力について検証した．そして，SSを行わなかった条件（対照条件）では，セットの進行に伴い，特に膝屈曲動作においてセット中の筋力低下率が亢進し，筋持久力の低下が認められた．一般的には全力運動を連続して行えば，上記のような筋持久力ないし筋力の低下が生じるが⁴⁷⁾，セット間にSSを行った条件では，筋持久力の低下を抑制するという傾向が示された．しかし，こういった傾向を示す要因については，明言されていない．

先行研究⁴⁷⁾では，間欠的な力発揮として等速性の筋収縮様式が用いられた．また，等尺性でも同様の傾向が示唆されている²⁾．一方で実際のスポーツ活動は等張性の筋活動で構成されており⁴⁶⁾，それに伴いレジスタンストレーニングプログラムのような実際に間欠的な力発揮を用いる場合においても，主に等張性のエクササイズが行われている．しかし，等張性に対するSSの影響を検証した

研究は非常に少ない^{27,46)}。加えて山本ら⁴⁷⁾が設けた測定動作の試行回数は、一般的な筋力向上を意図するトレーニングプログラム(10回×3セット)より、低負荷高回数(20回×3セット)であった。

以上の知見を踏まえると、SSが筋に及ぼす影響については、神経系において力発揮に直接関わる筋活動及び等張性筋力発揮に対して一定の見解が得られていない。また一方で、トレーニングプログラムへの応用という観点も考慮すると、間欠的な等張性筋力発揮プログラムのセット間にSSを実施することで、筋力等にどのような影響を及ぼすかを検証することが、SSの効果を明らかにする上で重要であると思われる。

1.3 目的

間欠的な等張性筋力発揮プログラムのセット間に行うSSが、筋力、筋放電量および柔軟性に及ぼす影響を明らかにすることを本研究の目的とした。

2 方法

2.1 被検者

健康な成人男性 11 名（年齢： 23 ± 2.1 歳，身長： 174.8 ± 6.7 cm，体重： 69.8 ± 7.9 kg）を本研究の被検者とした．実験に先立ち，被検者は本研究の目的，方法および実験参加により起こりうるリスクについて文書ならびに口頭で十分な説明を受けた上，実験参加承諾書に署名した．

2.2 実験手順

本研究では，セット間の休息時に Static Stretching を行う SS 条件と，対照として安静を保つ NS (Non-Stretching) 条件の 2 条件を設けた．被検者は両条件を無作為に実施するため，試行は 1 日 1 条件とし，合計 2 日間にわたり各被検者は実験に参加した．この 2 日間の間隔は 1～2 週間であった．

間欠的な等張性筋力発揮として，被検者に対し膝関節伸展動作（対象：右脚）を行わせた．測定にはウエイトスタック式マルチステーション(Universal 社製) において膝伸展動作を行うレッグエクステンションを使用した．あらかじめ用意したベルトにより身体を固定し，上肢の貢献を制限するため，両腕は胸部付近で交差させることとした．

実験プロトコルについては，図 1 に示すように 1) 柔軟性の測定，2) 軽負荷による測定動作でのウォームアップに続き，3) 12 回×4 セットの膝伸展動作を行った．その後休息を挟み，5 セット目として 4) Maximum repetition performance test (MRP test)⁸⁾を実施し，再び柔軟性を測定した．用いた運動条件は，実際のレジスタンストレーニングプログラムにおいて使用されているプロトコル²³⁾を参考とした．MRP testとは，動作速度および動作可動域を変えことなく挙上可能な最大反復回数を測定する方法であり，レジスタンスト

レーニングのパフォーマンス評価として用いられているものである⁸⁾。12 回の膝伸展動作およびMRP testの動作速度を 2 秒間に 1 回のペースとし、その規定にメトロノーム (SQ100-88, セイコー社製) を使用した。

負荷設定のため、被検者に対し実験に先立ちnRMテスト²³⁾を実施した。そして、得られた推定 1RM値の 67% - 5 ポンドを 12 回 × 4 セットで使用する負荷とした。通常、12 回に相当する負荷は 67%1RMとされているが²³⁾、これは 1 セット実施時の設定であり、本研究では 4 セット行うため、Beachleら¹⁷⁾の調節法を参考にし、事前に負荷を調整した。一方MRP testの負荷は、先行研究⁸⁾と同様の 65%1RMを採用した。

セット間の休息時間は、試行する運動条件を考慮した場合 60 ~ 90 秒間が適当であるため²³⁾、本研究では上記の中央値である 75 秒間を採用した。この休息時間中、NS条件ではストレッチマット上に長座位の姿勢で安静を保った。一方SS条件では、75 秒間の内 30 秒間をSSに充て、長座位での大腿四頭筋のストレッチング (図 2) を実施した。ストレッチングの実施時間については、柔軟性改善に対し最も効果的であり、加えて筋パフォーマンスの低下を引き起こさないという点を考慮し、30 秒間とした。

また、全ての膝関節伸展動作中の筋力および筋放電量を測定した。

2.3 測定項目および分析方法

2.3.1 柔軟性

試行前後における右脚大腿四頭筋の柔軟性測定には、腹臥位での Muscle tightness test⁴²⁾を用いた。これは左脚伸展状態で、右脚の膝を屈曲させた際の踵部から臀部までの距離を測定する方法である。ただ、本研究では、より正確な測定を行うため、ゴニオメータ (KINETO-ANGLE TRANSDUCER TM-511G, 日本光電社製) を膝の関節軸と一致するように装着し、屈曲時の膝関節角度を

記録した。ゴニオメータのアームは、膝関節をまたいで大転子ならびに外顆の延長線上に固定用のバンドを用い取り付けられた(図3)。電気信号は、マルチテレメータシステム(WEB-5000, 日本光電社製)およびA/D変換カード(キッセイコムテック社製)を介し、パーソナルコンピュータに入力された。そしてこのデジタルデータをVital Recorder2(キッセイコムテック社製)によりファイル化し、ハードディスクに保存した。マルチテレメータシステムの設定は、30Hz(HICUT), DC(LOCUT)および50deg/V(SENS)とした。

そして、試行前後の膝関節角度から柔軟性増減率「(Flexibility test post / pre) × 100」を算出した。

2.3.2 等張性筋力およびMRP test

膝伸展動作を行った器具に張力計(LTZ-100KA, 共和電業社製)を連結させ、等張性筋力を測定した。得られた電気信号は、A/D変換カード(キッセイコムテック社製)を介し、パーソナルコンピュータに入力された。そしてこのデジタルデータはVital Recorder2(キッセイコムテック社製)を用いファイル化され、ハードディスクに保存された。波形データに対し3点移動平均による平滑化を行い、各動作中のピークトルクを抽出した。そして、各セットにおける1~3回のピークトルク平均値(初期値)および10~12回のピークトルク平均値(終末値)からセット中の筋力低下率「{(初期値 - 終末値) / 初期値} × 100」⁴⁷⁾を算出した。

MRP testに関しては、先行研究⁸⁾と同様に、動作速度ならびに動作可動域を変えることなく挙上が可能であった回数を、検者が計測した。

2.3.3 筋放電量

被検筋は、右脚の大腿直筋(RF)、内側広筋(VM)、外側広筋(VL)の三筋

とした．筋電図導出には皮膚表面電極（Vitrode F，日本光電社製）を使用し，また電極貼付箇所の同定にあたり，栢森²⁵⁾の方法を参照した．電極の装着については，筋電図導出部位をアルコール綿で十分に拭き，各電極間の抵抗を 5k Ω 以下，間隔を 2cmとした．得られた電気信号は，柔軟性測定と同様の経路でサンプリングしデータ処理された．なおマルチテレメータシステムの設定は，100Hz（HICUT），0.03 秒（LOCUT）および 1mV/V（SENS）とした．

その後，得られた筋電図信号に対し全波整流を施した．分析区間（図 4）は、膝伸展動作における Concentric 局面とし，ゴニオメータとの同期により，各試行動作における Concentric 局面の積分筋電図（integrated electromyography：iEMG）および Root Mean Square（RMS）値を算出した．そして各セットにおける 1～3 回の RMS 平均値（初期値）および 10～12 回の RMS 平均値（終末値）を用い，筋力低下率を応用したセット中の筋放電量変化率「 $\{(終末値 - 初期値) / 初期値\} \times 100$ 」を算出した．これは，予め終末値から初期値を引くことにより，膝伸展動作を反復する過程で筋放電量が変化した割合を表すものである．

2.4 統計処理

各項目の測定結果は平均値 $\pm$ 標準偏差で示した．得られた値の中で，柔軟性増減率および MRP test の挙上回数における 2 条件間の比較には，対応のある t 検定を実施した．また，その他の測定項目の比較には，2 要因の反復測定分散分析を行い，主効果が統計的に有意であったものに関しては，Bonferroni の多重比較検定を実施した．統計処理には SPSS（14.0J for Windows，SPSS 社製）を使用し，いずれも危険率 5%未満をもって有意とした．

3 結果

3.1 柔軟性

図 5 は試行前後の柔軟性増減率を示したものである。増減率は NS 条件($113.4 \pm 16.8\%$)と比較したところ, SS 条件($100.4 \pm 7.6\%$)で有意に低値を示した($p < 0.05$)。

3.2 筋力低下率および MRP test

筋力低下率については, 両条件ともセットの進行に伴い上昇したが(図 6), 条件間またはセット間には, 統計的に有意な差は認められなかった(set1 SS : $3.49 \pm 4.17\%$ NS : $3.52 \pm 7.72\%$, set2 SS : $4.00 \pm 3.74\%$ NS : $6.14 \pm 6.53\%$, set3 SS : $5.88 \pm 4.20\%$ NS : $7.02 \pm 6.25\%$, set4 SS : $6.18 \pm 4.80\%$ NS : $7.67 \pm 6.96\%$)。

また MRP test の挙上回数に関しては, 図 7 に示したとおり NS 条件(6.6 ± 1.3 回)と比較して, SS 条件(8.5 ± 2.3 回)で有意に増加した($p < 0.05$)。

3.3 筋放電量変化率

表 1 に各筋における筋放電量変化率を示した。RF においては, 条件間ならびにセット間に有意な差は認められなかった(図 8)。一方 VL では, NS 条件(set1 : $26.6 \pm 15.8\%$, set2 : $37.1 \pm 20.3\%$, set3 : $28.1 \pm 16.0\%$, set4 : $26.8 \pm 20.2\%$)と比較して(図 9), SS 条件(set1 : $11.6 \pm 25.1\%$, set2 : $21.6 \pm 26.3\%$, set3 : $16.3 \pm 14.8\%$, set4 : $11.6 \pm 21.7\%$)で有意に低値を示した($p < 0.05$)。また VM においても, NS 条件と比較したところ(図 10), SS 条件で有意に低値を示し($p < 0.01$), 加えてセットの進行に伴い(set1 : $30.7 \pm 16.3\%$, set4 : $6.3 \pm 12.8\%$), 筋放電量変化率が有意に低下した($p < 0.05$)。

4 考察

本研究では、間欠的な等張性筋力発揮プログラムのセット間に行うスタティックストレッチング（SS）が、筋力、筋放電量および柔軟性に及ぼす影響を検証した。そして、セット間に安静を保つ NS 条件と比較して、セット間に SS を実施した場合、試行前後の柔軟性増減率が有意に減少し、柔軟性の維持が認められ、また 5 セット目の挙上回数において有意な増加を示した。また各セット内、つまり 12 回の反復中における筋力低下率では、ストレッチングの有無による有意差は認められなかった。一方、筋放電量の変化率において、VL で条件間に、VM で条件間およびセット間に有意な差が確認された。

4.1 柔軟性

一般的に、筋が強く収縮することで、筋の静止長は短縮する。また、疲労により筋は拘縮し柔軟性が低下するため、関節可動域の低下につながる²⁶⁾。これは、筋損傷や、筋付着部および腱の炎症といった傷害を引き起こす危険性があるとされている^{26,28)}。そして、こういった関節可動域の低下は一般的に高強度の持続的な力発揮後に生じるが、間欠的な力発揮（等速性膝伸展・屈曲動作 20 回×3 セット）後にも同様の現象が確認されている⁴⁷⁾。また本研究でも、NS 条件で柔軟性増減率が増加したことから、間欠的な力発揮に伴う関節可動域の低下が引き起こされたと思われる。

一方、山本⁴⁷⁾は間欠的な等速性筋力発揮におけるセット間に SS を実施することによって、SS が筋の柔軟性低下を抑制する効果を有することを確認した。この結果から、SS の実施は筋の柔軟性を高め、筋疲労による関節可動域の低下を予防する効果があるとし唆している。そして、SS による柔軟性改善および関節可動域増大の要因としては、腱の伸長性増加²⁴⁾、筋中血液循環の増大、神経シ

ナプスでのアセチルコリン分泌増加³²⁾等が挙げられている。

本研究においては，NS条件と比較して，SS条件で柔軟性増減率が有意に低値を示した。すなわち，5 セットの等張性筋力発揮後においても柔軟性が維持されたと考えられる。この際のセット間には，柔軟性改善に最も効果的とされている 30 秒間のSSを採用した^{3,4)}。そのため，これは先行研究⁴⁷⁾で用いられたストレッチング実施時間（90 秒間）と比較して短時間であるにもかかわらず，間欠的な力発揮後の柔軟性に対して同様の効果を有するものであったと思われる。したがって，セット間に実施する 30 秒間のSSが，間欠的な力発揮による柔軟性低下に対する抑制効果を持つことが示唆された。

4.2 筋力

セット間にSSを実施することにより，セット中の筋力低下率を抑制させる傾向が確認されている⁴⁷⁾。しかしながら本研究においては，ストレッチングの有無による有意な差は認められなかった。この要因としては，先行研究⁴⁷⁾とのストレッチング実施時間の違いではなく，運動条件の差異が起因しているのであろうと考えられた。すなわち，先行研究⁴⁷⁾での 1 セット 20 回の筋力発揮に対し，本研究で実施した 1 セット 12 回の反復中での筋力低下率が，先行研究と比較して低値であった。したがって，1 セット 12 回の運動条件では，セット内での筋力低下の程度が小さいため，ストレッチングの有無に関わらずset1 からset4 にかけての筋力低下率は同様のものではなかったと思われる。

4.3 筋放電量

通常，最大下での持続的な筋力発揮時に，発揮筋力が一定もしくは低下しても，疲労のため筋放電量は増大する^{31,37)}。筋疲労により運動単位の一部で筋活動の停止（筋放電の停止）が起こり⁴⁰⁾，筋張力が低下するが，筋張力の低下を

補う（筋張力を維持する）ために代償的な運動単位の動員数増加や，運動単位発火頻度の変化が生じることにより筋放電量が増大すると考えられている^{1,37)}．ただし，その後さらに筋力発揮を持続した場合，筋力低下に伴い筋放電量は減少する¹⁾．このような筋活動量の減少は，運動に利用できる運動単位のプールを漸減させ，これがパフォーマンス低下につながると考えられている³⁶⁾．この運動単位プールの漸減は，結果的に筋活動の停止（筋放電の停止）に至った運動単位数が増大したためであると思われる．

本研究においてNS条件では，SS条件と比較して筋放電量変化率が高値を示し，筋放電量の上昇が認められた．これは，最大下での1セット12回の筋力発揮によって，筋力低下を補うための筋放電量増大が引き起こされた結果であると考えられる．一方SS条件における筋放電量変化率は，NS条件と異なるものであった．つまりSS条件では，NS条件同様の筋出力を発揮しながら，set1からset4にかけての筋放電量変化率を低値に保っていたため，筋放電量の増大を抑制していると考えられるものであった．このようにSSがその後の筋活動に影響を及ぼすことに関しては，いくつかの先行研究^{11,48)}により支持されている．例えば，Cramerら¹¹⁾は，16分間のSS後，等速性（60, 240°/s）での膝伸展動作中のRMS値が減少することを確認している．またYoungら⁴⁸⁾は，SSによりRMS値が減少する要因として，神経系における何らかの抑制が働いたのではないかと示唆している．本研究では，先行研究のストレッチング実施時間^{11,48)}に比べ，比較的短時間のSS（30秒間）を用いたが，それら同様にSSが筋活動を抑制している可能性が認められた．

4.4 MRP test のパフォーマンス

5セット目に実施したMRP testの挙上回数に関しては，SS条件で有意な増加が示された．この種のテストにおいてオールアウト，すなわち挙上不能に至る

要因の一つには、運動に利用できる運動単位のプールが、漸減することが考えられている³⁶⁾。それゆえ、運動単位のプールが維持されていれば、より多くの挙上が可能であると思われる。この点から、セット間におけるSSの実施により、このテストの開始時点で、その後の筋力発揮に利用可能な運動単位数（プール）³⁶⁾がNS条件に比べ維持されていたため、SS条件で挙上可能な回数が増加したと推察される。本研究において、NS条件と比べSS条件では、筋放電量変化率を低値に保ち、12回の反復による筋放電量の増大を抑制するということが示された。しかし、筋力低下率に関しては、ストレッチングの有無による有意な差は認められなかった。これらの結果は、12回の反復において、筋力低下の程度（それに伴う筋力維持の程度）がストレッチングの有無に関わらず同様のものであった一方で、SS条件では筋放電量増大が抑制されたということを示している。こういった抑制は、NS条件で生じたと思われる代償的な運動単位の動員等^{1,37)}による筋放電量の増大^{31,37)}とは異なる傾向であった。SS条件では、筋力低下を補うための新たな運動単位の動員がNS条件より少なかったこと、活動中の運動単位が比較的多く、筋活動停止に至らなかったことがその要因として考えられた。そのためset4 終了時点で、ストレッチングの有無により、筋活動停止に至った運動単位および新たに動員される運動単位の数に差が生じたと思われる。したがって、MRP testの開始時点で、その後の筋力発揮に利用可能な運動単位数（プール）³⁶⁾が、NS条件に比べSS条件では維持されていたと推察される。

本研究においては、筋活動以外の神経系および代謝系等へのSSの影響は考慮しなかった。したがってMRP testにおけるストレッチングの有無による差異についての要因をより明確にするためには、今後の研究により他の神経系および代謝系等について検証する必要があると思われる。

4.5 レジスタンストレーニングへの応用

間欠的な等張性膝関節伸展動作におけるセット間に、30 秒間の SS を実施することで、セット内の筋放電量変化率が抑制された。またこれに伴いストレッチングを実施しなかった場合と比較して、5 セット目の挙上回数が増加するとともに、全試行後の柔軟性も維持されるということが示唆された。レジスタンストレーニングプログラムへこの知見を応用すると、SS 条件における挙上回数の増加が、トレーニング中の総仕事量増加に繋がると考えられる。さらに、全試行後に柔軟性が維持されていたことから、SS がエクササイズの進行に伴う筋の拘縮を抑制させるであろう。

5 結語

間欠的な等張性筋力発揮プログラムのセット間に SS を実施することで，セット間に安静を保つ NS 条件と比較して，試行後の柔軟性が改善された．また，5 セット目において筋放電量を抑制し，挙上回数の有意な増加をもたらすという効果が認められた．以上の結果から，セット間における 30 秒間の SS は，間欠的な等張性筋力発揮に対し有効な手法であることが明らかとなった．

参考文献

- 1) 浅井英典 (1982) 筋疲労と筋電図. 体育の科学. 32 : 588-591.
- 2) 浅見俊雄 (1983) 筋のストレッチあるいは軽負荷での動的収縮が間欠的等尺性最大筋力の連続発揮能力におよぼす効果. 昭和 58 年度日本体育協会スポーツ科学研究報告. 4 : 46-50.
- 3) Bandy,W.D. and Irion,J.M. (1994) The effect of time on static stretching on the flexibility of the hamstring muscle. Phys Ther. 74(9) : 845-852.
- 4) Bandy,W.D., Irion,J.M. and Briggler,M. (1997) The effect of time and frequency of static stretching on flexibility. Phys Ther. 77(10) : 1090-1096.
- 5) Bandy,W.D., Irion,J.M. and Briggler,M. (1998) The effect of static stretching and dynamic range of motion training on the flexibility of the hamstring muscle. J.Orthrop.Sports.Phys.Ther. 27(4) : 295-300.
- 6) Bradley,P.S., Olsen,P.D. and Portas,M.D. (2007) The effect of static,ballistic,and proprioceptive neuromuscular facilitation stretching on vertical jump performance. J.Strength.Cond.Res. 21(1) : 223-226.
- 7) Church,J.B., Wiggins,M.S., Moode,F.M. and Crist,R. (2001) Effect of warm up and flexibility treatments on vertical jump performance. J.Strength. Cond.Res. 15(3) : 332-336.
- 8) Corder,K.P., Potteiger,J.A., Nau,K.L., Figoni,S.F. and Hershberger,S.L. (2000) Effects of active and passive recovery conditions and performance during resistance exercise. J.Strength.Cond.Res. 14(2) : 151-156.
- 9) Cramer,J.T., Housh,T.J., Coburn,J.W., Beck,T.W. and Johnson,G.O. (2006) Acute effects of static stretching on maximal eccentric torque production in women. J.Strength.Cond.Res. 20(2) : 354-358.
- 10) Cramer,J.T., Housh,T.J., Johnson,G.O., Miller,J.M., Coburn,J.W. and Be-

- ck,T.W. (2004) Acute effects of static stretching on peak torque in women. J.Strength.Cond.Res. 18(2) : 236-241.
- 11) Cramer,J.T., Housh,T.J., Weir,J.P., Johnson,G.O., Coburn,J.W., and Beck, T.W. (2005) The acute effects of static stretching on peak torque, mean power output, electromyography, and mechanomyography. Eur.J.Appl.Physiol. 93 : 530-539.
- 12) Davis,D.S., Ashby,P.E., McCale,K.L., McQuain,J.A. and Wine,J.M. (2005) The effectiveness of 3 stretching techniques on hamstring flexibility using consistent stretching parameters. J.Strength.Cond.Res. 19(1) : 27-32.
- 13) Devries,H.A. (1962) Evaluation of static stretching procedures for improvement of flexibility. Res.Q. 33 : 222-229.
- 14) Evetovich,T.K., Nauman,N.J., Conley,D.S. and Todd,J.B. (2003) Effect of static stretching of the biceps brachii on torque, electromyography, and mechanomyography during concentric isokinetic muscle actions. J.Strength.Cond.Res. 17(3) : 484-488.
- 15) Fletcher,I.M. and Jones,B. (2004) The effect of different warm-up stretch protocols on 20 meter sprint performance in trained rugby union players. J.Strength.Cond.Res. 18(4) : 885-888.
- 16) Fowles,J.R., Sale,D.G. and MacDougall. (2000) Reduced strength after passive stretch of the human plantarflexors. J.Appl.Physiol. 89 : 1179-1188.
- 17) 福永哲夫総監修 (2005) NSCA パーソナルトレーナーのための基礎知識. 森永製菓株式会社健康事業部 : 東京 p.394.
- 18) 覚張秀樹・広瀬統一 (2004) ウォーミングアップ・クーリングダウンにおけるストレッチ. 理学療法. 21(12) : 1482-1491.

- 19) 後藤篤志・下嶽進一郎 (2005) ストレッチングと疲労回復. からだの科学. 245 : 32-36.
- 20) 堀居昭 (1986) ストレッチのすべて. からだの科学増刊. 18 : 185-192.
- 21) 堀居昭訳 (1981) ポブアンダーソンのストレッチング. ブックハウス・エイチディ : 東京.
- 22) 市橋則明・吉田正樹 (1991) 筋疲労回復におけるストレッチングの効果-筋電図の周波数解析による検討-. 理学療法のための運動生理. 6(4) : 181-185.
- 23) 石井直方総監修 (2002) NSCA 決定版ストレングス&コンディショニング第2版. ブックハウス・エイチディ : 東京.
- 24) 加藤えみか・小田俊明・千野謙太郎・栗原俊之・永吉俊彦・福永哲夫・川上泰雄 (2004) 長時間の静的ストレッチングが下腿三頭筋の伸長に及ぼす急性効果. 体力科学. 53(6) : 660.
- 25) 栢森良二 (1997) 筋電図のための解剖ガイド - 四肢・体幹. 西村書店 : 新潟 p.176-177,188-191.
- 26) 小出清一・福林徹・河野一郎編 (2000) スポーツ指導者のためのスポーツ医学. 南江堂 : 東京 p.234-242.
- 27) Kokkonen,J., Nelson,A.G. and Cornwell,A. (1998) Acute muscle stretching inhibits maximal strength performance. Res.Q.Exerc.Sport. 69(4) : 411-415.
- 28) Krivickas,L.S. and Feinberg,J.H. (1996) Lower extremity injuries in college athletes : Relation between ligamentous laxity and lower extremity muscle tightness. Arch.Phys.Med.Rehabil. 77 : 1139-1143.
- 29) McMillian,D.J., Moore,J.H., Hatler,B.S. and Taylor,D.C. (2006) Dynamic vs static stretching warm up : The effect on power and agility performance. J.Strength.Cond.Res. 20(3) : 492-499.

- 30) 森谷敏夫 (1987) ストレッチングによる筋痛の生理学的効果に関する電気生理学的解明. デサントスポーツ科学. 8 : 212-220.
- 31) 永見邦篤 (1987) 把握動作時の前腕囲変化について-周径変化からみた筋の動態とその利用-. 体力科学. 36 : 243-251.
- 32) 永田晟 (1987) 障害予防のためのウォームアップとクールダウンの意義. 臨床スポーツ医学. 4(11) : 1226-1234.
- 33) Nelson,A.G., Allen,J.D., Cornwell,A. and Kokkonen,J. (2001) Inhibition of maximal voluntary isometric torque production by acute stretching is joint-angle specific. Res.Q.Exerc.Sport. 72(1) : 68-70.
- 34) Nelson,A.G., Guillory,I.K., Cornwell,A. and Kokkonen,J. (2001) Inhibition of maximal voluntary isokinetic torque production following stretching is velocity-specific. J.Strength.Cond.Res. 15(2) : 241-246.
- 35) Nelson,A.G. and Kokkonen,J. (2001) Acute ballistic muscle stretching inhibits maximal strength performance. Res.Q.Exerc.Sport. 72(4) : 415-419.
- 36) Nelson,A.G., Kokkonen,J. and Arnall,D. (2005) Acute muscle stretching inhibits muscle strength endurance performance. J.Strength.Cond.Res. 19(2) : 338-343.
- 37) 大畑光司・市橋則明 (2005) 大腿四頭筋の筋疲労による筋活動比に変化について. 京都大学医学部健康学科紀要. 2 : 15-19.
- 38) 岡田真平・木村貞治・武藤芳照 (2000) ストレッチングの生理. 理学療法. 17(4) : 426-430.
- 39) Power,K., Behm,D., Cahill,F., Carroll,M. and Young,W.B. (2004) An acute bout of static stretching : Effects on force and jumping performance. Med. Sci.Sport.Exerc. 36(8) : 1389-1396.
- 40) 菅原徹・佐渡山亜兵・上條正義・細谷聡・増田正 (2004) 筋の単一運動単位

活動の疲労性変化. バイオメカニズム. 17 : 21-28.

- 41) 鈴木秀次 (1999) ストレッチング運動における神経筋機構. 運動・物理療法. 10(4) : 368-374.
- 42) 鳥居俊・中嶋寛之・中嶋耕平 (1994) 発育期のスポーツ傷害防止のための整形外科的メディカルチェック(第 2 報)関節弛緩性・筋柔軟性と傷害発生との関係. 日本整形外科スポーツ医学会誌. 14(3) : 57-64.
- 43) Wallin,D., Ekblom,B., Grahn,R. and Nordenborg,T. (1985) Improvement of muscle flexibility. Am.J.Sports.Med. 13(4) : 263-268.
- 44) 山口太一・石井好二郎 (2005) ストレッチングの方法と効果. からだの科学. 245 : 24-31.
- 45) Yamaguchi,T. and Ishii,K. (2005) Effects of static stretching for 30 seconds and dynamic stretching on leg extension power. J.Strength.Cond.Res. 19(3) : 677-683.
- 46) Yamaguchi,T. and Ishii,K., Yamanaka,M. and Yasuda,K. (2006) Acute static stretching reduces power output during isotonic muscle action. Jpn. J.Phys.Fitness.Sports.Med. 55(suppl) : S109-S112.
- 47) 山本利春 (1990) スポーツとストレッチング. 理学療法. 7(5) : 351-361.
- 48) Young,W.B. and Behm,D.G. (2003) Effects of running, static stretching and practice jumps on explosive force production and jumping performance. J.Sports.Med.Phys.Fitness. 43 : 21-27.

謝辞

本研究は、早稲田大学スポーツ科学学術院 岡田純一准教授の御指導のもと実施されました。岡田准教授には予備実験を含め、実験に関するアイデア、結果の解釈および論文作成に至るあらゆる面において御指導いただきました。とりわけ論文作成に際しましては、私が作成した文章に対し、何度となく頭を抱えられながらも添削していただき、大変な御迷惑をおかけしました。貴重な御助言をいただきましたこと、誠に有り難く、心より感謝致します。

実験にあたっては、多くの方々にご協力いただきました。特に岡田研究室の飯島康平さん、岡先聖太君には予備実験から本実験に至るまで、毎回のように実験に参加、あるいはお手伝いをしていただきました。そして飯島さんの適切な機器操作、岡先君の豪快な研磨に大変助けられました。また岡田研究室の赤澤暢彦さんには、御自身の論文があるにも関わらず、幾度と無く実験にご協力いただきましたこと、深く感謝致します。加えて、実験の被検者をしてくださった院生ならびに学部生の皆様には、非常に過酷な作業課題ではありましたが、常に全力で取り組んでいただき、本当にありがとうございました。

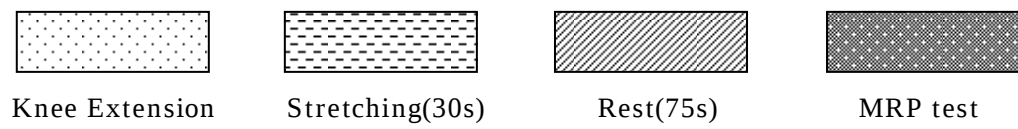
振り返れば、研究室の仲間を始め、周囲の皆様がいなければ、私の研究生生活は成り立たなかったと思っております。改めて御礼申し上げます。

最後に、私の意思を尊重し温かく見守ってくれる両親に感謝しつつ、本研究の謝辞とさせていただきます。

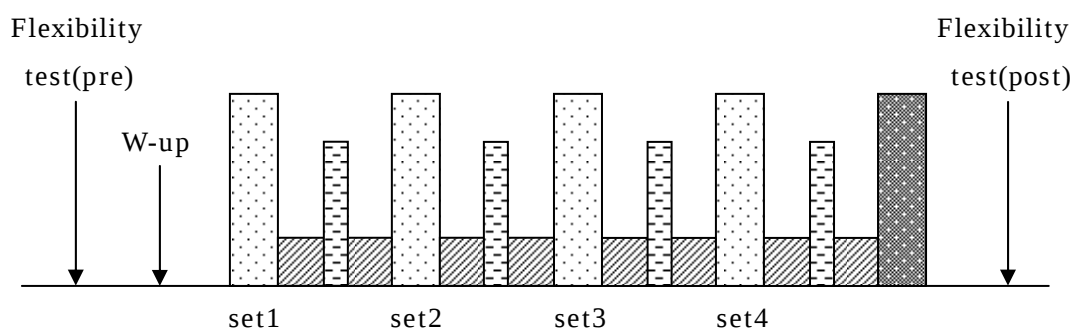
表 1 筋放電量变化率

		set1	set2	set3	set4
RF (%)	SS	20.1 ± 17.9	28.7 ± 28.0	22.8 ± 28.8	2.4 ± 19.5
	NS	23.8 ± 25.1	30.6 ± 39.5	38.6 ± 35.3	27.0 ± 27.3
VL (%)	SS	11.6 ± 25.1	21.6 ± 26.3	16.3 ± 14.8	11.6 ± 21.7
	NS	26.6 ± 15.8	37.1 ± 20.3	28.1 ± 16.0	26.8 ± 20.2
VM (%)	SS	30.7 ± 16.3	24.0 ± 11.8	19.2 ± 11.8	6.3 ± 12.8
	NS	29.6 ± 21.3	33.1 ± 19.3	32.9 ± 19.2	25.3 ± 12.1

* p < 0.05



SS 条件



NS 条件

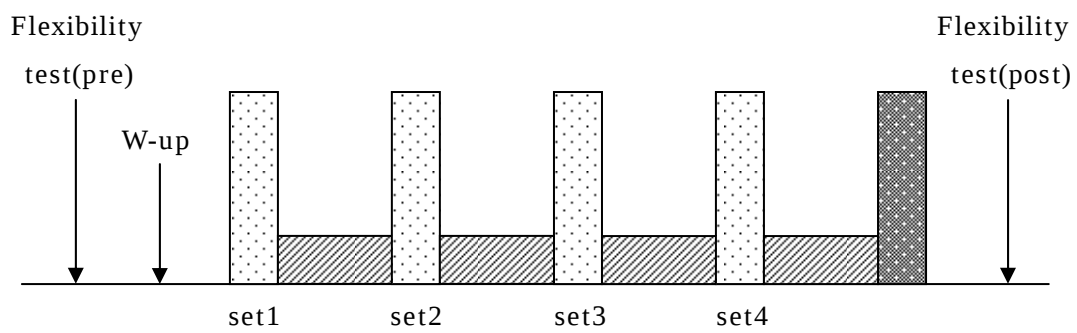


図 1 . 実験プロトコル



図 2 . 長座位での大腿四頭筋のストレッチング



図 3 . ゴニオメータ装着位置

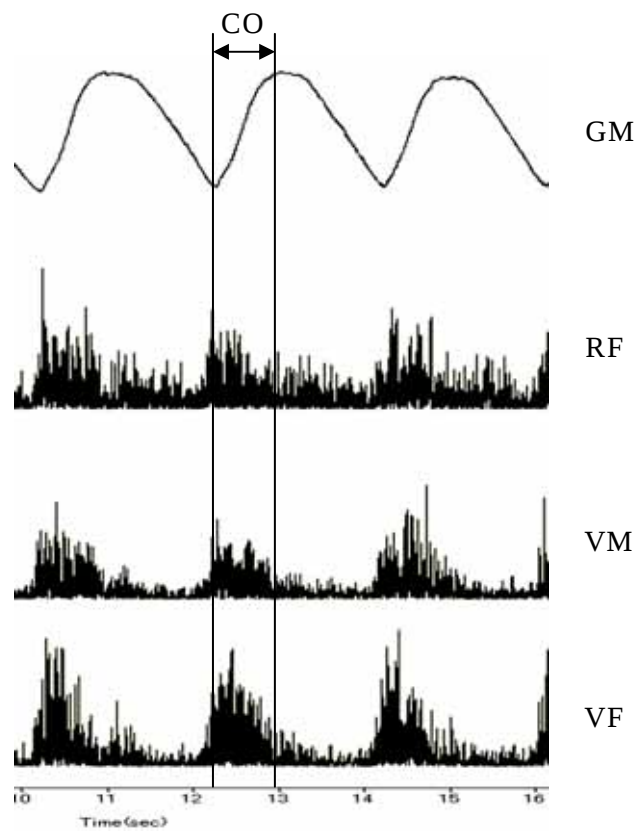


図 4 . 分析区間

CO: Concentric phase , GM: goniometer
 RF: rectus femoris , VM: vastus medialis
 VF: vastus lateralis

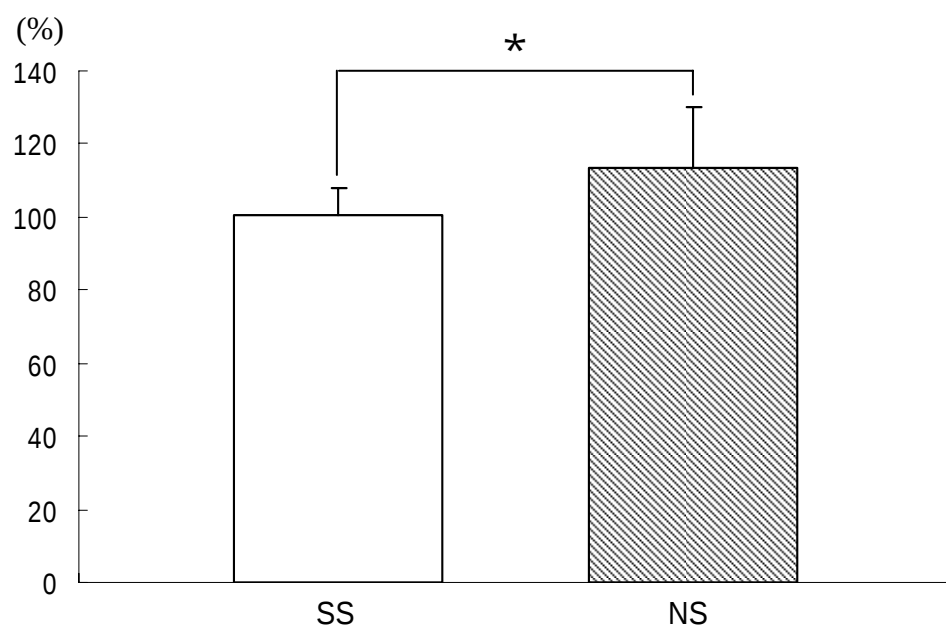


図 5 . 柔軟性増減率

* $p < 0.05$

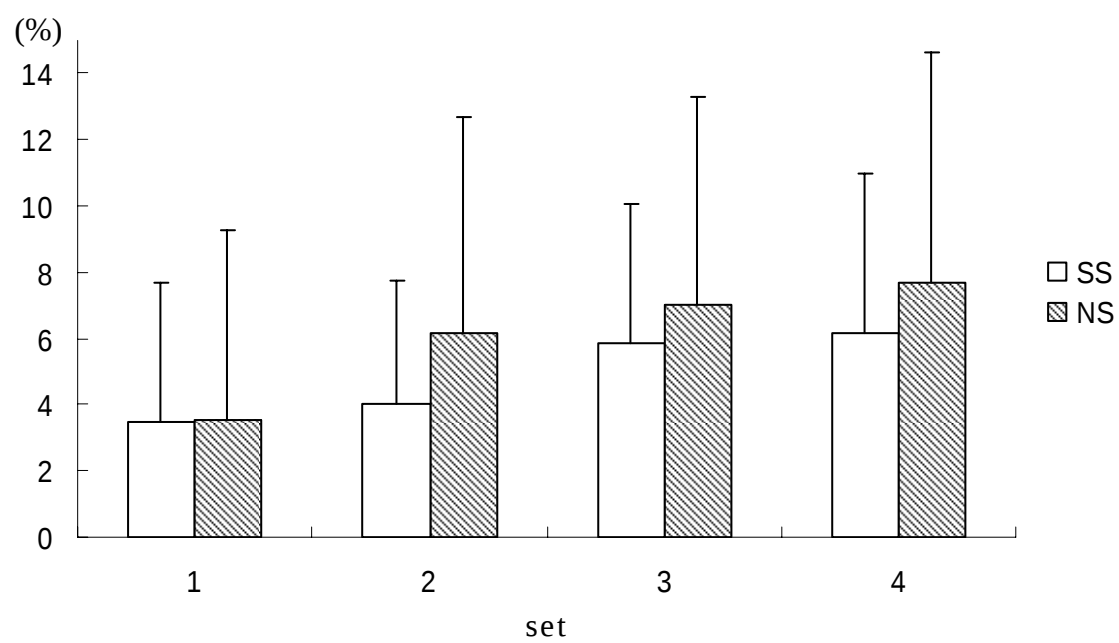


図 6 . 筋力低下率

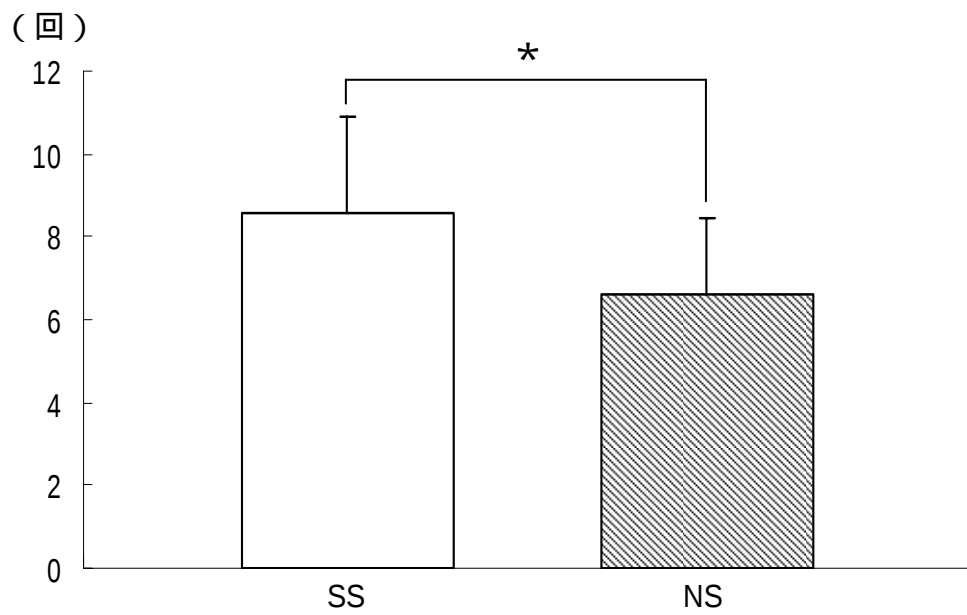


図 7 . MRP test

* $p < 0.05$

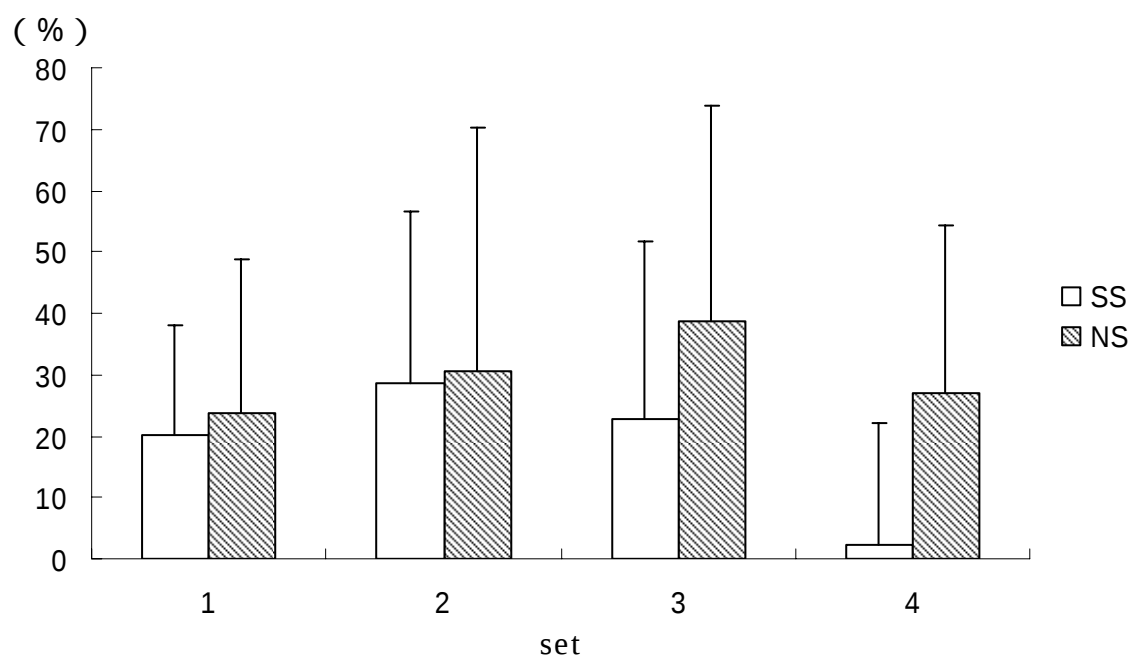


図 8 . 筋放電量変化率 (RF)

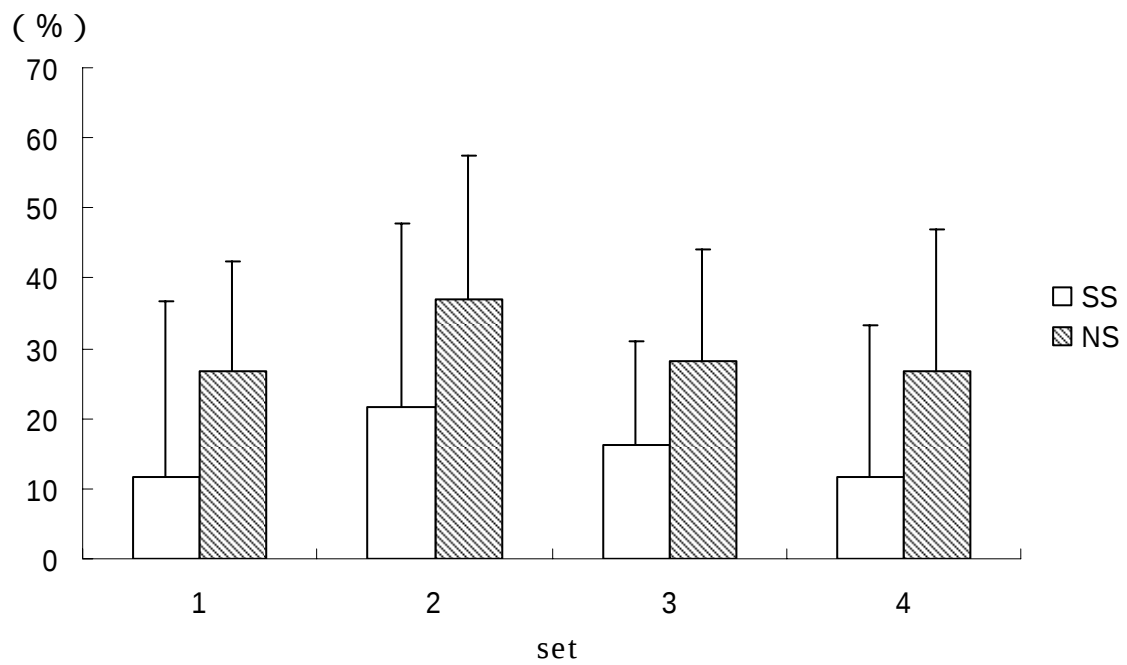


図 9 . 筋放電量変化率 (VL)

NS 条件と比較して , SS 条件において有意に低値 ($p < 0.05$)

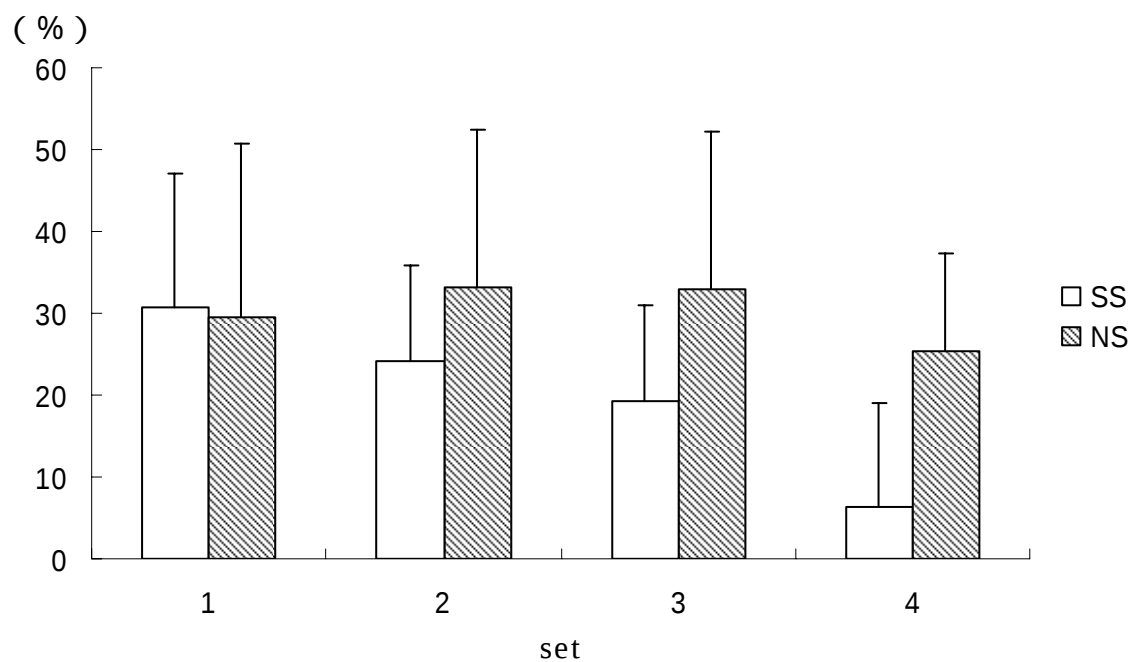


図 10 . 筋放電量変化率 (VM)

NS 条件と比較して , SS 条件において有意に低値 ($p < 0.05$)

set1-3 と比較して , set4 において有意に低値 ($p < 0.01$)