

関節拘縮改善のための
ストレッチングに関する実験的研究

県立広島大学大学院

総合学術研究科

生命システム科学専攻

博 士 論 文

平成 28 年 3 月

(2016 年)

石 倉 英 樹

目次

第1章 緒言	1
第2章 関節拘縮モデルラットの作成	11
2-1 小序	12
2-2 対象と方法	14
2-3 結果	16
2-4 考察	16
2-5 小括	19
第3章 関節拘縮に対して1回のストレッチングが与える影響に関する検討	25
3-1 小序	26
3-2 対象と方法	27
3-3 結果	30
3-4 考察	30
3-5 小括	33

第4章	関節拘縮に対して1回のストレッチングが与える	
	経時的影響についての検討	37
4-1	小序	38
4-2	対象と方法	39
4-3	結果	42
4-4	考察	44
4-5	小括	48
第5章	関節拘縮に対する臨床に即したストレッチング方法の検討	59
5-1	小序	60
5-2	対象と方法	61
5-3	結果	64
5-4	考察	65
5-5	小括	70
第6章	総括	76
	謝辞	79
	引用文献	81

第 1 章

緒言

人は身体の各関節が十分に可動することができる範囲である関節可動域を有している。この関節可動域は、健全な人であれば自身の力や他人の力で動かすことができる。しかしリハビリテーションの臨床において、この関節可動域は正常関節に比べて低下することがある。こうした関節可動域の制限は関節拘縮と呼ばれる（図1-1）。

関節拘縮は長期的な関節の不動から、関節周囲に存在する皮膚や骨格筋、関節包などといった軟部組織¹⁾が変化することによって発生する（図1-2）。関節拘縮が発生すると、人は日常生活を送る上で当たり前に行える立ち上がりや歩行などといった基本的動作を遂行することが困難になってしまう²⁾。また、リハビリテーションの臨床において、関節拘縮は筋力低下に続いて2番目に多い治療対象である³⁾（表1-1）。このように関節拘縮は臨床において多くの場面で遭遇し、治療対象となっている。

関節拘縮について、先行研究では動物を対象に関節を一定期間不動にして関節拘縮を発生させた実験モデルが多く用いられている。Trudel et al.⁴⁾は、ラットの膝関節を約135°屈曲位で内固定を行った後の膝関節伸展可動域が、関節周囲の筋群をすべて切除すると改善したことから、関節拘縮に骨格筋が関与していることを明らかにしている。また、灰田ら⁵⁾は、ラットの膝関節を屈曲位でギプス固定を行った後に膝関節を他動的に伸展するために必要な力について、固定期間の終了後、関節周囲の皮膚を切除した後、膝関節伸展筋および屈曲筋を切除した後で比較することで皮膚・骨格筋・関節包が関節拘縮に関与する割合を調査しており、皮膚が約19%、骨格筋が約43%、関節包が約30%の割合で関節拘縮に関与していることを明らかにしている。このように皮膚や骨格筋、関節包は関節拘縮の原因組織として関節可動域に関与している。

関節拘縮の原因組織は関節の不動期間によって関節可動域に関与する割合が変化する。沖田ら⁶⁾はラット足関節を用い、不動期間と関節可動域制限の原因組織との関係を縦断的に観察したところ、不動4週後で骨格筋の影響が約5割を占めており、それ以上不動期間が延長すると関節包などの関節構成体の影響が大きくなることを報告している。このように、骨格筋は4週間までの関節不動において、最も可動域の制限に影響している。骨格筋単独の柔軟性について調査した実験的研究によると、Tabary et al.⁷⁾は4週間の関節不動を実施した後に骨格筋を採取して筋の柔軟性を測定するために引張試験を実施したところ、正常な骨格筋と比較して柔軟性の低下を認めたことを報告している。また、沖ら⁸⁾は1・2・4・6・8・10・12週間の各不動期間の後に骨格筋を採取して引張試験を行い、ヒラメ筋を10 mm伸張するのに必要な力を柔軟性の指標として測定したところ、不動期間が3週間以上になると柔軟性が低下し始め、10週間以降でプラトーに達することを明らかにしている。関節拘縮において、骨格筋の柔軟性低下は筋膜の主要成分であるコラーゲン線維が影響している。骨格筋の筋膜を形成するコラーゲン線維は、多くがタイプIコラーゲン線維とタイプIIIコラーゲン線維である⁹⁾。Järvinen TA et al.¹⁰⁾はラット足関節に対して最大底屈位で関節固定を3週間行い、ヒラメ筋の組織切片を免疫組織化学染色にて調査したところ、筋膜組織のタイプIIIコラーゲン線維の増加があったことを報告している。また、沖田ら⁶⁾はラット足関節を最大底屈位で1・2・4・8・12週間関節固定し、ヒラメ筋内のタイプIコラーゲン線維とタイプIIIコラーゲン線維に対する蛍光免疫染色を行ったところ、関節固定1週目からタイプI・IIIともにコラーゲン線維の量が増加し、中でもタイプIコラーゲン線維は関節固定4週目まで固定期間に準拠して増加していったことを報告している。

リハビリテーションの臨床において、関節拘縮に対する介入方法は、正常な関節に対して関節拘縮が発生しないように予防する方法と、関節拘縮が発生した関節に対して改善を図る方法がある。関節拘縮が発生しないように予防する方法は、疾病などで長期臥床状態となり身体の安静状態が余儀なくされた場合、関節運動が減少することで関節拘縮が発生しないように関節運動を行う治療介入を行う。一方で関節拘縮が発生した関節に対して改善を図る方法は、骨折後に関節固定を行わなければならなくなった場合、骨折が治癒して関節固定が解除された後、発生した関節拘縮に対して関節可動域改善を図るための治療介入を行う。どちらも治療介入として、治療者は関節拘縮が起こった関節に対して外力を加え、短縮した骨格筋をストレッチングすることで関節可動域の改善を図っている¹²⁾ (図1-3)。

関節拘縮を予防することについて検討した先行研究は動物を用いた実験的研究が多数報告されている。Williams et al.¹¹⁾は、マウス足関節を最大底屈位で関節固定した後、足関節底屈筋群に対して毎日1回関節固定を解除して1日30分間のストレッチングを実施したところ、2週間の関節固定を行っても関節可動域や筋節数が正常な骨格筋と同様であり、関節拘縮の発生が予防できたことを報告している。また、陳之内ら¹³⁾はラット足関節を最大底屈位で関節固定した後、毎日1回関節固定を解除して10・30・60分間のストレッチングを行った影響を比較したところ、30分間のストレッチングを行うことで関節可動域の維持や筋線維の損傷を予防し、関節拘縮の予防に効果があったことを報告している。これらの先行研究から、関節拘縮の発生を予防するにはストレッチングを行い、骨格筋の柔軟性を維持することが重要であると考えられる。このように関節拘縮の発生を予防するためのストレッチングは30分間の持続的伸張を行うことが関節可動域の維持、筋線維の損傷を予防するのに効果的であることが明らかにされている。

関節拘縮が発生した関節に対して改善を目的としたストレッチングを行った先行研究について、Benedini et al.¹⁴⁾はラットを用いた実験的研究において関節拘縮を発生させた後、検者の徒手を用いてラット足関節を最大まで背屈させたところ、足関節背屈可動域の改善が起こったが、筋線維間隙の拡大や核の中心化、筋線維の壊死などの骨格筋への損傷像が観察されたことを報告している。武村ら¹⁵⁾は同様に関節拘縮を発生させた後、検者の徒手を用いてストレッチングを行ったところ、関節可動域の改善が見られた一方で筋線維の壊死が見られたことを報告している。Cornachione et al.¹⁶⁾は関節固定を行って関節拘縮を発生させた後、粘着テープを用いたストレッチングを行ったところ、マクロファージの増加などの炎症反応が起こったことを報告している。

これらの先行研究において、ストレッチングに加える力は主に徒手が用いられている。Flowers et al.¹⁷⁾は関節可動域の測定時、加える力が大きければ大きいほど関節可動域が増大することを報告している。よって、研究手法として徒手を用いたストレッチングを行う場合、常に同様の力が加えられたことを示す必要がある。しかし、徒手で常に同様の力を加えることは難しい。ストレッチングに徒手を用いた先行研究の結果は、加えた力を特定できないため、単純に比較することができない。このように、ストレッチングに加える力を明らかに示したうえで検討する必要がある。

また、これらの先行研究では骨格筋の形態について検討されているが、筋の柔軟性が変化したかどうか検討されていない。先行研究において、骨格筋はストレッチングを行うことで壊死や炎症反応などの損傷が加わっており、損傷した骨格筋の柔軟性が十分確保されているのか検討する必要がある。

以上のことから、関節拘縮に対するストレッチングの方法は、まだ十分検討されているとは言い難いのが現状である。本研究では、関節拘縮の改善を目的としてストレッチングに加える力を定量的に示す手法を取り入れ、特に骨格筋の柔軟性の変化にも着目し、ストレッチングが関節拘縮に与える影響について検討することを目的とする。



図 1 - 1 関節拘縮

図は足関節に関節拘縮があり，他者が背屈方向へ動かそうとしても足関節が動かない。

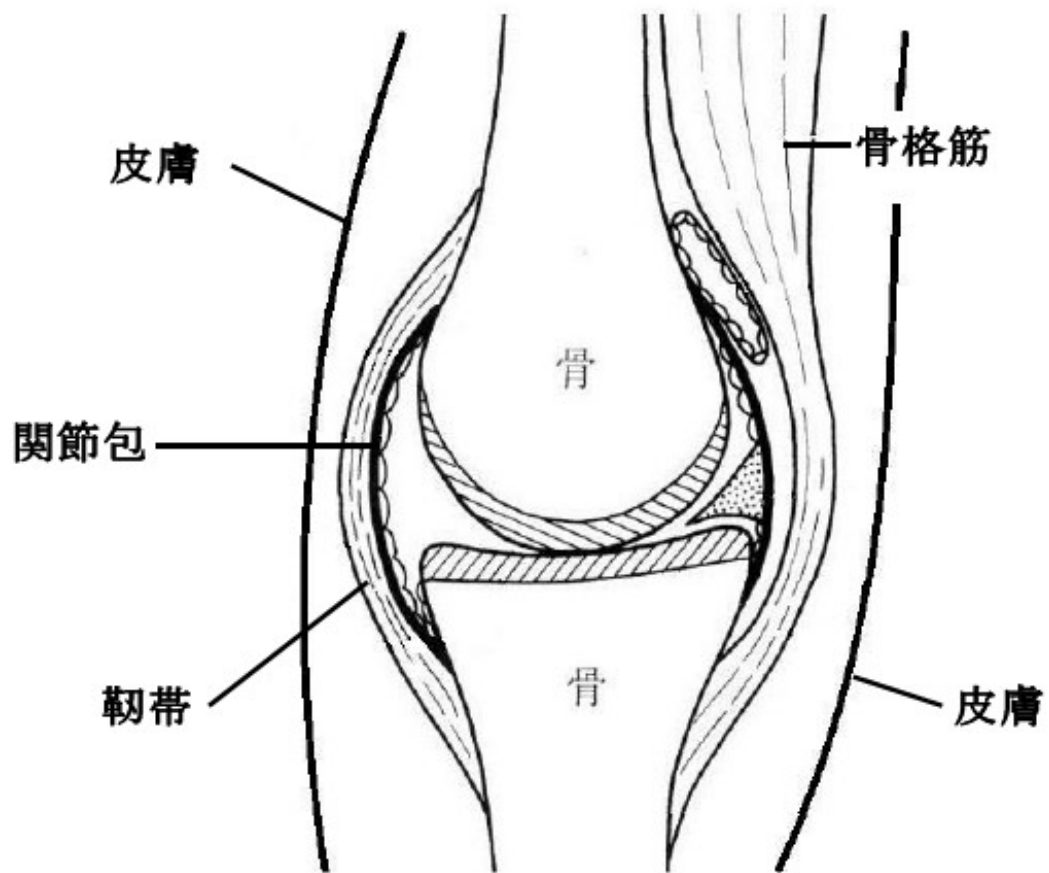


図1-2 関節を構成する軟部組織

(文献¹)より改変して引用)

1位		2位	
	2010年(n=8556)		2010年(n=8493)
関節可動域障害	14.7 (%)	関節可動域障害	18.0 (%)
筋力低下	18.1	筋力低下	26.1
異常姿勢	3.1	異常姿勢	5.4
呼吸障害	2.2	呼吸障害	2.8
感覚障害	0.8	感覚障害	3.5
平衡機能障害	1.1	平衡機能障害	2.6
嚙下障害	0.2	嚙下障害	0.6
疼痛	18.3	疼痛	9.7
四肢切断	0.1	四肢切断	0.1
片麻痺	18.9	片麻痺	6.6
四肢麻痺	2.3	四肢麻痺	1.9
対麻痺	0.2	対麻痺	0.6
その他の麻痺	0.3	その他の麻痺	0.5
運動発達遅延	1.3	運動発達遅延	0.7
知的障害	0.2	知的障害	0.5
全身体力低下	6.9	全身体力低下	7.6
高次脳機能障害	3.8	高次脳機能障害	6.5
認知症	5.6	認知症	5.1
精神障害	0.6	精神障害	0.6
その他	1.3	その他	0.8

3位		4位	
	2010年(n=8377)		2010年(n=8067)
関節可動域障害	13.7 (%)	関節可動域障害	10.5 (%)
筋力低下	17.5	筋力低下	9.2
異常姿勢	7.2	異常姿勢	8.1
呼吸障害	4.0	呼吸障害	5.3
感覚障害	3.7	感覚障害	5.4
平衡機能障害	3.7	平衡機能障害	5.0
嚙下障害	0.7	嚙下障害	1.3
疼痛	14.8	疼痛	10.3
四肢切断	0.2	四肢切断	0.3
片麻痺	8.1	片麻痺	10.0
四肢麻痺	1.3	四肢麻痺	1.6
対麻痺	0.5	対麻痺	0.7
その他の麻痺	0.5	その他の麻痺	0.6
運動発達遅延	0.7	運動発達遅延	0.9
知的障害	0.8	知的障害	0.6
全身体力低下	9.7	全身体力低下	13.6
高次脳機能障害	5.1	高次脳機能障害	5.7
認知症	6.6	認知症	9.0
精神障害	0.5	精神障害	0.7
その他	0.8	その他	1.4

5位	
	2010年(n=7600)
関節可動域障害	8.7 (%)
筋力低下	5.9
異常姿勢	5.6
呼吸障害	5.6
感覚障害	6.0
平衡機能障害	5.7
嚙下障害	1.8
疼痛	7.6
四肢切断	0.7
片麻痺	8.5
四肢麻痺	1.7
対麻痺	0.8
その他の麻痺	1.1
運動発達遅延	0.9
知的障害	0.5
全身体力低下	13.9
高次脳機能障害	6.6
認知症	11.9
精神障害	1.0
その他	5.5

表 1-1

治療した患者の最も問題となった障害について多いものから順に5つ選択した割合

(文献³⁾より引用)



図 1 - 3 徒手的に行われるストレッチング方法

第 2 章

関節拘縮のモデルラットの作成

2-1 小序

動物実験には目的にふさわしいモデルを作成し、実験が行われてきた。リハビリテーションの臨床に関しては、もともと正常であった身体に対してケガや病気によって障害が発生した場合を想定する必要がある。そのため、リハビリテーションに関わる動物実験でも、正常な動物に対して何らかの方法で障害を発生させ、実験モデルとする必要がある。今回、我々が実験対象としている関節拘縮については、一般的にモデルラットを作成して実験が行われてきた¹⁸⁻²⁰⁾。ラットを用いた動物実験では、実験対象の条件を統一することが容易であり、再現性の高い結果を得られる。動物実験における関節拘縮に関する実験では、関節拘縮を発生させるモデルとして関節を固定する方法が用いられる。関節の固定方法は内固定もしくは外固定が行われている^{4,21)}。

内固定は、対象関節を形成している骨と骨を麻酔下にてプレートやピンを使用して固定する方法であり、手術による侵襲の影響などを検討するために行われている。内固定の一般的な方法として Evans et al.²²⁾は、ラットの膝関節を対象として大腿骨と脛骨にドリルで穴を開け、屈曲位の状態で橋を渡すようにプレートをあてがい、穴を開けた箇所にて体外からピンを刺入して骨とプレートを固定している。八百板²³⁾はラット膝関節を対象として大腿骨と脛骨を露出して小孔を開け、約60度屈曲位でステンレス内副子を使用して固定している。Turdel et al.^{4,24)}はラットの膝関節を対象として麻酔下にて Evans et al.²²⁾と同様に屈曲位の状態で大腿骨の大転子部と脛骨遠位の脛腓関節部でプレートを使用して固定している。内固定の利点は、骨と骨を外科的にプレートとピンを用いて固定するため、非常に強固な固定性が得られ、脱落の可能性が低いことが挙げられる。しかし欠点として、外科的処置による侵襲が加えられているため、創部周囲の感染や炎症が起こる可能性がある。

外固定は、対象関節の周囲にテープやギプスなどを巻き付けることで固定する方法であり、術後のギプス固定などで起こる廃用の影響を検討するために行われている。外固定の一般的な方法として Oki et al.²⁵⁾は、ラットの足関節を対象として足部から大腿部までギプスを巻きつけて関節固定を行っている。また、Ono et al.²⁶⁾は同様にラットの足関節を対象として、足部から大腿部まで非伸縮性テープを巻きつけて関節固定を行っている。外固定の利点は、侵襲による感染や炎症の影響を排除できる。しかし欠点として、ラット足部から大腿部までの形状が円錐形であり、足部側へと固定が抜けにくい日々固定状態を管理する必要がある。以上のことより、廃用の影響を検討するためには、内固定による侵襲を避ける必要がある。そのため、本研究では外固定を採用することとした。

また、関節拘縮の原因組織としての骨格筋の関与は、発生した関節拘縮において骨格筋を切除した際に関節可動域が拡大することから示されている^{4,25,27)}。また、Tabary et al.⁷⁾はネコの足関節を最大底屈位で4週間固定した後にヒラメ筋を採取し、筋の引張試験を実施して柔軟性の変化について調べたところ、正常なヒラメ筋と比較して4週間固定した後のヒラメ筋の柔軟性が低下したことを報告している。

本研究では関節拘縮において骨格筋の柔軟性に着目して検討を行うため、ラットの足関節を対象に、関節拘縮のモデルラットを作成した。関節拘縮のモデルラットの条件は、足関節背屈可動域が低下することと、足関節背屈を制限する単関節筋であるヒラメ筋の柔軟性が低下していることとした。また、本研究では作成した関節拘縮モデルラットと過去に報告された関節拘縮のモデルラットを比較し検証することを目的とした。

2-2 対象と方法

対象動物

実験動物は8週齢のWistar系雄ラット12匹（体重290～320g）とした。全てのラットは、室温が23℃と一定になるように空調でコントロールされた飼育室で、1匹ずつケージ内に収容して飼育し、市販の固形餌（MF飼料、オリエンタル酵母工業株式会社、東京）と水道水を自由に摂取させた。飼育室内の照明は午前7時に点灯し午後7時に消灯するように12時間サイクルで人工的に昼と夜を設定した。全てのラットは購入してから環境に慣れさせる目的で実験開始時に1週間通常飼育した。

本研究は、県立広島大学保健福祉学部附属動物実験施設を使用し、県立広島大学研究倫理委員会の承認を受けて行った（承認番号：第15MA007号）。

方法

関節拘縮のモデルラットは足関節への関節固定を行うことで作成した（図2-1）。ラットは無作為に各6匹を2つの群に分けた。6匹のラットは介入を行わない対照群とした。残りの6匹のラットは左足関節を最大底屈位で固定する固定群とした。固定期間は4週間とした。ラットに対する実験は、導入麻酔として30%イソフルランによる吸入麻酔の後、腹腔内にペントバルビタールナトリウム（40 mg/kg）を投与し、苦痛が伴わないよう十分に麻酔が効き、骨格筋が弛緩した後に開始した。

関節固定を実施する前、ラットは体表上から骨指標の確認を容易にするために股関節周囲から足部にかけて剃毛をした。関節固定は非伸縮性テープを用いて行い、ラットの左足関節を最大底屈位で保持して足趾から大腿部にかけて巻き付けた。巻き方はラットの足趾

部が露出して観察できるようにし、固定期間中に浮腫などの問題が発生しないか確認できるようにした。非伸縮性テープを巻き付けた後、破損および脱落を防止する目的でステンレス製のネットを使用して非伸縮性テープの上からカバーした。固定期間中は、非伸縮性テープの緩みや固定による浮腫の影響を足趾部から観察し、必要に応じて巻き替えを行った。

実験期間終了後、対照群と固定群の足関節背屈可動域を測定した。関節可動域の測定は麻酔下にて行い、田坂ら²⁸⁾と小野ら²⁹⁾の方法を参考に実施した。まず田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし、結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し、鉄製の網に体幹とともに固定した。また、股関節の内転を防ぐために、アクリル板を用いて下肢を内側から保持した(図2-2)。そのままデジタルテンションメーターを用いて測定中に表示されている力を確認しながら中足部に0.3 Nを加えて足関節を背屈した。背屈している状態を記録するため、デジタルカメラを用いて動画を撮影した。撮影した動画はパーソナルコンピューターに取り込み、0.3 Nで背屈させた時の静止画を抽出した。得られた静止画は画像解析ソフト(Image J ver.1.44p, USA)を使用してパーソナルコンピューター上で足関節背屈可動域を測定した。なお、可動域測定の際は、基本軸を腓骨頭と外果を結んだ線とし、移動軸を踵骨底面とした(図2-3)。

足関節背屈可動域の測定後、対照群と固定群のヒラメ筋引張試験を実施した。全てのラットは麻酔下で腹大動脈より脱血して屠殺した。その後、大腿骨を切断し、足関節最大底屈位となるように踵骨と脛骨を鋼線で固定した状態で、足根骨にワイヤーを刺入した。そして引張試験機(オートグラフ AG-50kNG, 株式会社島津製作所, 京都)に取り付け、脛骨・腓骨とヒラメ筋以外の軟部組織を切断し、ヒラメ筋のみを起始部から停止部までの連続性が断たれるまで伸張した。伸張速度はOno et al.¹⁸⁾の報告を参考に10 mm/minとした。また、沖ら⁸⁾は正常なラットヒラメ筋が最大底屈位から最大背屈位までに10 mm伸張すること

から、ヒラメ筋を 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性の指標としている。よって本研究でもヒラメ筋が 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性として定義した。

統計処理は統計ソフト（エクセル統計 2012，株式会社社会情報サービス，東京）を用いて実施した。対照群と固定群の足関節背屈可動域，引張試験時のヒラメ筋の柔軟性は，正規分布に従うかどうかを確認するために Kolmogorov-Smirnov test を実施した。そして 2 群間の比較について，正規分布に従う場合は Unpaired t-test を用い，正規分布に従わない場合はノンパラメトリックである Wilcoxon signed-rank test を実施し，危険率 5%未満をもって有意差を判定した。

2-3 結果

足関節背屈可動域の結果を図 2-4 に示した。足関節背屈可動域は対照群 137.3 ± 2.5 度，固定群 72.1 ± 5.7 度であった。統計処理の結果，2 群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired t-test を実施したところ，固定群は対照群と比較して足関節背屈可動域が有意に低下した。

ヒラメ筋柔軟性の結果を図に示した。ヒラメ筋柔軟性は対照群 0.19 ± 0.09 N，固定群 1.73 ± 0.40 N であった。統計処理の結果，2 群は正規分布に従うことが認められたため，Unpaired t-test を実施したところ，固定群は対照群と比較してヒラメ筋柔軟性が有意に低下した。

2-4 考察

関節可動域の測定方法について

関節可動域は測定時に加える力が大きいほど増大する¹⁷⁾。関節可動域の測定は、徒手で行うよりも力量計を用いて押す力を一定にして行う方ことで再現性が高くなることが知られている³⁰⁾。今回、我々はテンションメーターを使用して定量的に行った。また、我々が関節可動域測定に用いた0.3 Nは正常なラット足関節を最低限度の力で背屈できる力であり、検者の主観を排除した定量的な可動域測定を行うことができたと考えられる。

関節可動域結果について

関節拘縮に関する実験的研究は一般的に動物が用いられ、関節を固定することで拘縮を発生させることで実施されてきた^{4,20)}。岡本ら³¹⁾はラット足関節を対象とし、4週間の関節固定を行ったところ、足関節背屈可動域が 79.5 ± 8.6 度となったと報告している。本研究ではラット足関節を対象とし、4週間の関節固定を行ったところ足関節背屈可動域が 72.1 ± 5.7 度となった。本研究の結果は、岡本ら³¹⁾の結果と同様に足関節背屈可動域制限を認めたと、その程度が大きかったと言える。岡本ら³¹⁾の可動域測定時に加えた力は、徒手で足関節背屈を行っていることから本研究の可動域測定時に加えたとは異なる可能性がある。岡本ら³¹⁾の可動域測定の方法が徒手で足関節背屈を行っていたのに対し、本研究の可動域測定の方法がデジタルテンションメーターを使用して定量的に行ったため、測定結果の差が生じたと考えられた。本研究の可動域測定はデジタルテンションメーターを用いて定量的に行うことでより検者の測定誤差を取り除くことで、岡本ら³¹⁾の可動域測定結果と比較して標準偏差が小さくなっており、より信頼性の高い結果を得ることができたと考えられる。

関節拘縮に対するヒラメ筋柔軟性の関与について

Salter et al.³²⁾は対象としている関節の可動域測定結果は、近接している関節の肢位によって二関節筋の影響を受けることを報告している。本研究ではヒラメ筋の柔軟性に着目

し、足関節背屈可動域も二関節筋の影響を排除し、単関節筋であるヒラメ筋のみの柔軟性が影響するように配慮した。

ヒラメ筋の柔軟性結果について

Ono et al.¹⁸⁾や沖ら⁸⁾はラット足関節を対象に関節固定を行い、ヒラメ筋に対して引張試験を行ったところ、ヒラメ筋柔軟性が低下したことを報告している。本研究における関節固定による筋の柔軟性低下は、Ono et al.¹⁸⁾や沖ら⁸⁾の先行研究と本研究ではラットの性差や固定期間の差があり純粋な比較ができないが、関節固定による筋の柔軟性が低下することについて、他の研究と同様の結果が見られた。

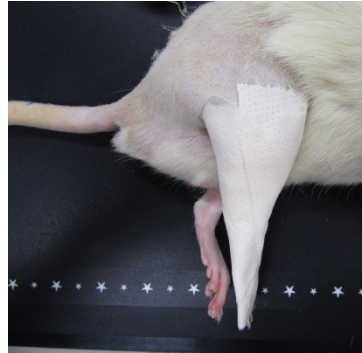
以上のことより、本研究で行った関節拘縮のモデルラットは足関節背屈可動域の低下とヒラメ筋の柔軟性低下が起こっており、先行研究と同様に関節拘縮を発生することができた。

2-5 小括

本研究の目的は関節拘縮を発生させるために必要な関節固定の方法を、先行研究を参考に検討することである。ラットを対象とし、足関節を最大底屈位で固定する固定群と処置を行わない対照群の2群に分けた。4週間の固定期間が終了した後に2群の足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性を測定した。その結果、足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性は対照群よりも固定群で有意に低下した。今回我々が用いた関節固定は、先行研究と同様に関節拘縮を発生することが確認できた。



足関節最大底屈位



関節固定



金網によるカバー

図 2 - 1

関節固定方法

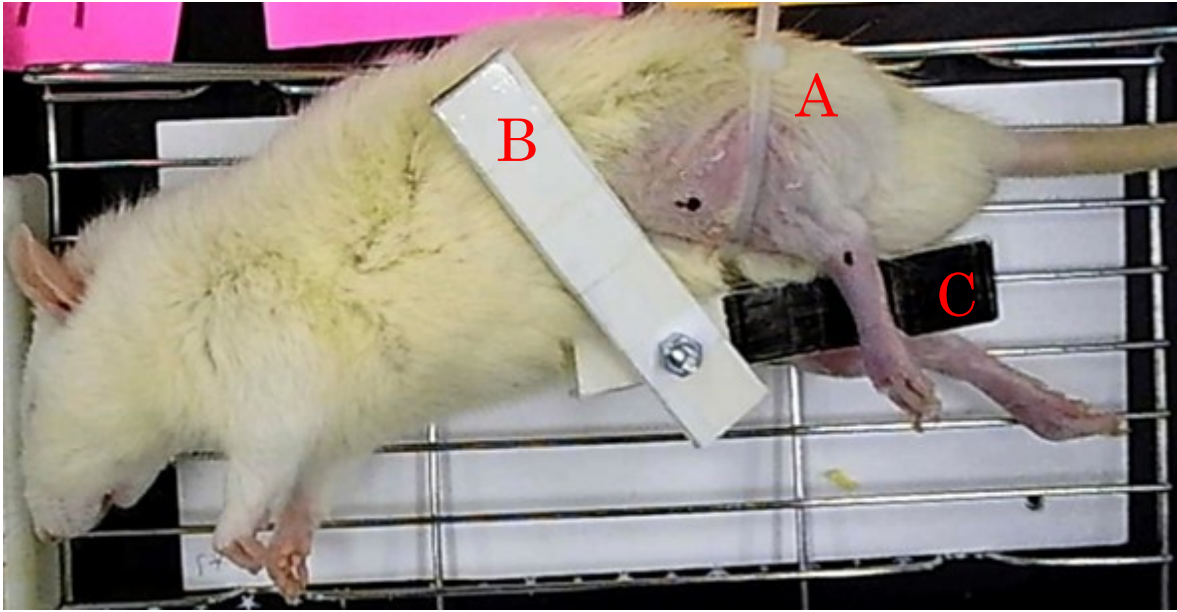


図 2 - 2

田坂ら²⁸⁾が使用しているラット固定器具

A : 股・膝関節を屈曲位で固定台に固定する結束バンド

B : 膝関節を保持するアクリル板

C : 後肢を内側から保持するアクリル板

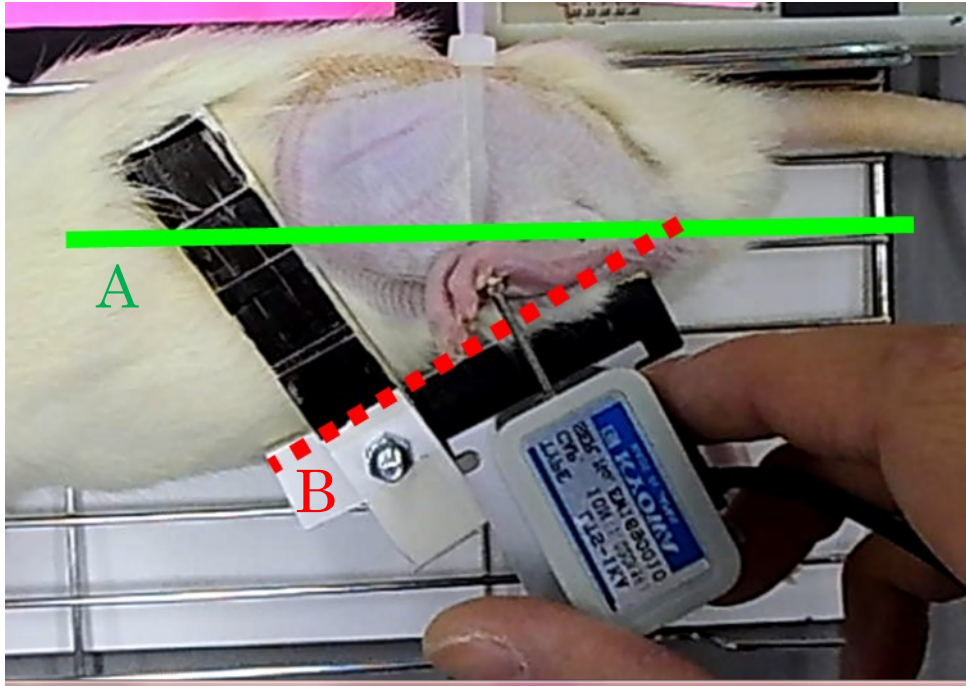


図 2 - 3

関節可動域測定方法

A : 基本軸 (腓骨と外果を結ぶ線)

B : 移動軸 (踵骨底面)

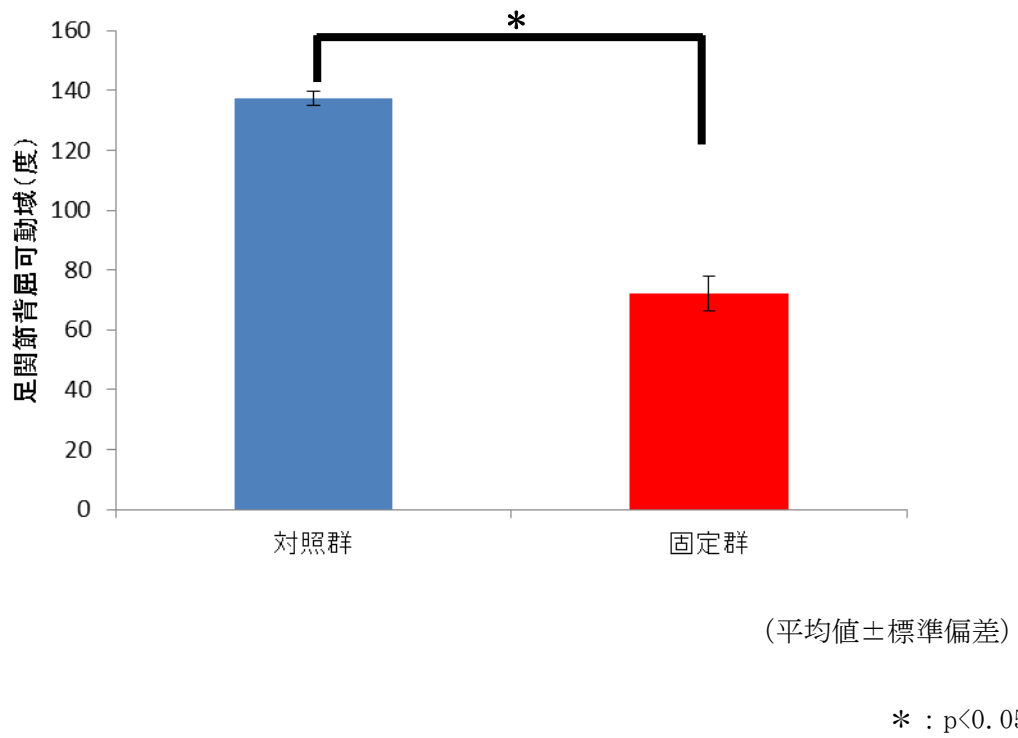


図 2-4

足関節背屈可動域

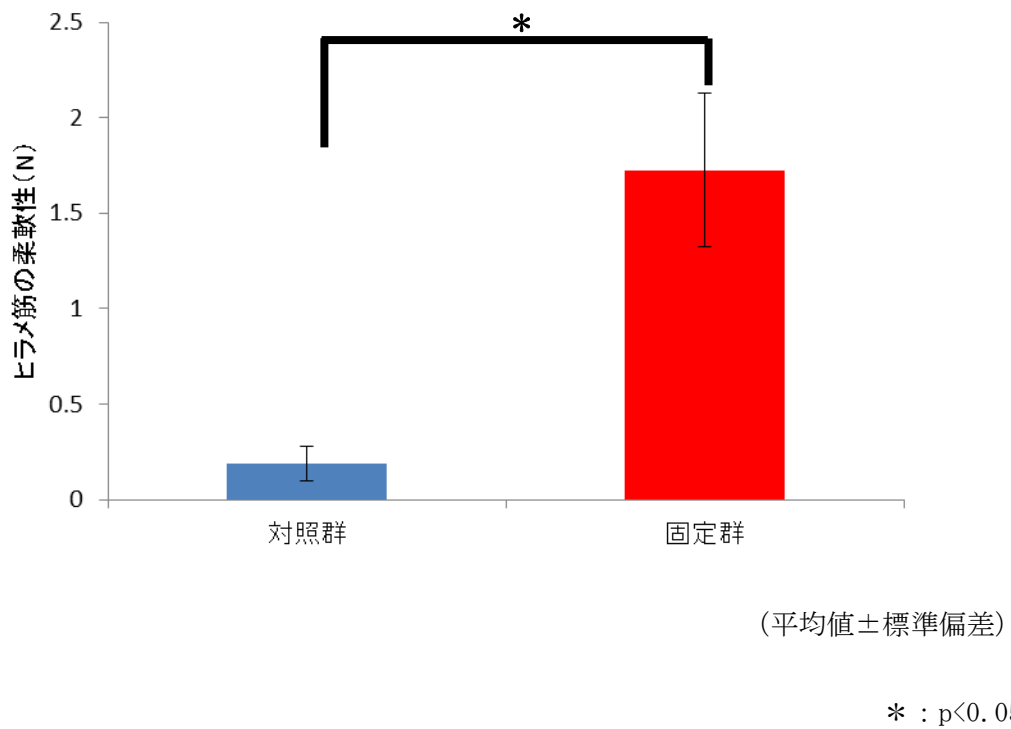


図 2-5

ヒラメ筋の柔軟性

第3章

関節拘縮に対するストレッチングが 与える影響に関する検討

3-1 小序

関節拘縮とは、長期的な関節の不動から関節周囲に存在する皮膚、皮下組織、骨格筋、腱、靭帯、関節包などの軟部組織が変化して起こる関節可動域の制限である。岡本ら³¹⁾はラット足関節を最大底屈位で関節固定を行い、固定期間と可動域制限への骨格筋の関与率を調べたところ、関節固定1週後で80.5%、2週後で65.4%、4週後で54.8%、8週後で35.4%、12週後で25.4%の関与率であったと報告している。また、Tabary et al.⁷⁾は4週間の足関節固定後、ヒラメ筋を採取して柔軟性を測定するために引張試験を行ったところ、正常な筋よりも柔軟性が低下したことを報告している。本研究では関節拘縮における骨格筋の柔軟性低下に着目している。

臨床では、ギプス固定などで発生した拘縮に対し、筋の柔軟性改善を図る目的で筋へストレッチングを行う。ストレッチングの方法はゆっくりと他動的に筋を伸張し、その肢位を持続的に保持することで行う³³⁾とされているが、加える力については明確にされておらず、治療者の主観に基づいて行われると考えられる。先行研究ではラットを用いた検討が行われており、発生した拘縮に対するストレッチングの影響を検討している^{15,34)}。Benedini et al.¹⁴⁾はラットを用いた実験的研究において、ラット足関節に対して10日間の関節固定により関節拘縮を発生させた後、検者の徒手を用いてラット足関節を最大まで背屈させてストレッチングを1日10回の頻度で10日間行ったところ、足関節背屈可動域の改善が起こったことを報告している。また、武村ら¹⁵⁾はラット膝関節に対して2週間の関節固定によって関節拘縮を発生させた後、検者の徒手を用いてラット膝関節のストレッチングを1日5回の頻度で9日間行ったところ、関節可動域の改善が起こったことを報告している。

このように、先行研究では関節拘縮に対してストレッチングを行うことで関節可動域が改善することが報告されている。しかし、先行研究におけるストレッチングは徒手的に行われており、どの程度の力が加わっていたか不明である。関節拘縮に対するストレッチン

グの影響を明らかにするために、加える力は定量的な力を用いて検討する必要があると考えられる。また、ストレッチングは1日に行う回数や実施した日数などが影響すると考えられる。先行研究におけるストレッチングは、1日10回を10日間実施したものや1日5回を9日間実施したものなど、回数が統一されていない。ストレッチングを繰り返し行うことは回数の影響やストレッチング間のインターバル時間などが影響すると考えられる。そのため、ストレッチングの影響を検討するには回数を1回に統一して検討する必要がある。

そこで本研究は発生した関節拘縮に対してストレッチングに加える力を示すことができる方法で、回数を1回に統一した影響について検討を行った。

3-2 対象と方法

対象動物

実験動物は8週齢のWistar系雄ラット24匹（体重280～310g）とした。すべてのラットは、室温が23℃と一定になるように空調でコントロールされた飼育室で、1匹ずつケージ内に収容して飼育し、市販の固形餌（MF飼料，オリエンタル酵母工業株式会社，東京）と水道水を自由に摂取させた。飼育室内の照明は午前7時に点灯し午後7時に消灯するように12時間サイクルで人工的に昼と夜を設定した。すべてのラットは環境に慣れさせる目的で1週間通常飼育した。

本研究は、県立広島大学保健福祉学部附属動物実験施設を使用し、県立広島大学研究倫理委員会の承認を受けて行った（承認番号：第15MA007号）。

方法

対象は無作為に関節固定を行った固定群（n=6）、関節固定を行った後に0.3Nの力で足

関節背屈ストレッチングを行う 0.3 N 群 (n=6), 関節固定を行った後に 3.0 N の力で足関節背屈ストレッチングを行う 3.0 N 群 (n=6), 関節固定を行わない正常群 (n=6) に分けた。ラットに対する実験は, 導入麻酔として 30%イソフルランによる吸入麻酔の後, 腹腔内にペントバルビタールナトリウム (40 mg/kg) を投与し, 苦痛が伴わないよう十分に麻酔が効き, 骨格筋が弛緩した後に開始した。

関節固定を実施する前, ラットは体表上から骨指標の確認を容易にするために股関節周囲から足部にかけて剃毛をした。関節固定は非伸縮性テープを用いて行い, ラットの左足関節を最大底屈位で保持して足趾から大腿部にかけて巻き付けた。巻き方はラットの足趾部が露出して観察できるようにし, 固定期間中に浮腫などの問題が発生しないか確認できるようにした。非伸縮性テープを巻き付けた後, 破損および脱落を防止する目的でステンレス製のネットを使用して非伸縮性テープの上からカバーした。固定期間中は, 非伸縮性テープの緩みや固定による浮腫の影響を足趾部から観察し, 必要に応じて巻き替えを行った。固定期間は 4 週間とした。

関節固定終了後, すべての群に対して体重を測定した。0.3 N 群と 3.0 N 群に対して足関節背屈ストレッチングを行った。ストレッチングは 30 分間持続伸張を 1 回のみ実施とした。ストレッチングを行う際は, 田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし, 結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し, 鉄製の網に体幹とともに固定した。また, 股関節の内転を防ぐために, アクリル板を用いて下肢を内側から保持した。ストレッチングに加える力は押しばねばかりを用いて定量的な力を加えた。

実験終了後, すべての群に対して足関節背屈可動域を測定した。関節可動域の測定は麻酔下にて行い, 田坂ら²⁸⁾と小野ら²⁹⁾の方法を参考に実施した。まず田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし, 結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し, 鉄製の網に体幹とともに固定した。また, 股関節の内転を防ぐために, アクリル板

を用いて下肢を内側から保持した。そのままデジタルテンションメーターを用いて測定中に表示されている力を確認しながら中足部に 0.3 N を加えて足関節を背屈した。背屈している状態を記録するため、デジタルカメラを用いて動画を撮影した。撮影した動画はパーソナルコンピューターに取り込み、0.3 N で背屈させた時の静止画を抽出した。得られた静止画は画像解析ソフト (Image J ver.1 44p. USA) を使用してパーソナルコンピューター上で足関節背屈可動域を測定した。なお、可動域測定の際は、基本軸を腓骨頭と外果を結んだ線とし、移動軸を踵骨底面とした。

足関節背屈可動域の測定後、すべての群のヒラメ筋引張試験を実施した。すべてのラットは麻酔下で腹大動脈より脱血して屠殺した。その後、大腿骨を切断し、足関節最大底屈位となるように踵骨と脛骨を鋼線で固定した状態で、足根骨にワイヤーを刺入した。そして引張試験機 (オートグラフ AG-50kNG, 株式会社島津製作所, 京都) に取り付け、脛骨・腓骨とヒラメ筋以外の軟部組織を切断し、ヒラメ筋のみを起始部から停止部までの連続性が断たれるまで伸張した。伸張速度は Ono et al.¹⁸⁾ の報告を参考に 10 mm/min とした。また、沖ら⁸⁾ は正常なラットヒラメ筋が最大底屈位から最大背屈位までに 10 mm 伸張することから、ヒラメ筋を 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性の指標としている。よって本研究でもヒラメ筋が 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性として定義した。

統計処理は統計ソフト (エクセル統計 2012, 株式会社社会情報サービス, 東京) を用いて実施した。正常群, 固定群, 0.3 N 群, 3.0 N 群の足関節背屈可動域, ヒラメ筋の柔軟性は、正規分布に従うかどうかを確認するために Kolmogorov-Smirnov test を実施した。そして 4 群間の比較について、正規分布に従う場合は one-way Analysis of Variance (以下, one-way ANOVA と略す) を用い、正規分布に従わない場合はノンパラメトリックである Kruskal-Wallis test を実施した。その結果有意差を認めた場合は多重比較検定を行った。なお、すべての統計手法は危険率 5%未満をもって有意差を判定した。

3-3 結果

各群の体重の結果を図 3-1 に示した。体重は正常群が 344.6 ± 26.6 g, 固定群が 304.0 ± 21.6 g, 0.3 N 群が 305.1 ± 7.5 g, 3.0 N 群が 301.4 ± 21.8 g であった。

足関節背屈可動域の結果を図 3-2 に示した。足関節背屈可動域は正常群が 136.5 ± 1.6 度, 固定群が 66.4 ± 3.5 度, 0.3 N 群が 74.0 ± 4.9 度, 3.0 N 群が 89.1 ± 5.2 度であった。統計処理の結果, 各群は正規分布に従うことが認められたため, one-way ANOVA を実施したところ, 足関節背屈可動域に有意差を認めた。次に多重比較検定として Tukey 法を用いたところ, 正常群はその他の 3 群よりも足関節背屈可動域が有意に大きかった。0.3 N 群は固定群よりも足関節背屈可動域が有意に大きかった。3.0 N 群は 0.3 N 群よりも足関節背屈可動域が大きかった。

ヒラメ筋柔軟性の結果を図 3-3 に示した。ヒラメ筋柔軟性は正常群が 0.20 ± 0.06 N, 固定群が 2.18 ± 0.47 N, 0.3 N 群が 2.22 ± 0.39 N, 3.0 N 群が 1.80 ± 0.85 N であった。統計処理の結果, 各群は正規分布に従うことが認められたため, one way ANOVA を実施したところ, ヒラメ筋柔軟性に有意差を認めた。次に多重比較検定として Tukey 法を用いたところ, 正常群はその他の 3 群よりもヒラメ筋柔軟性が有意に高かった。

3-4 考察

ストレッチングに用いた力について

沖ら³⁵⁾は正常なラット足関節を最低限度の力で背屈できる力として 0.3 N を報告している。本研究における 0.3 N 群はストレッチングに 0.3 N の力を用いている。そのため, 0.3 N 群には発生した関節拘縮に対して正常な関節を最低限度で背屈できる力がストレッチ

ングとして加わっていると考えられる。一方で 3.0 N は約 300 g に相当する力であり、本研究における 3.0 N 群の平均体重と同等の力である。臨床において、傾斜台などを用いて足部に体重をかけてストレッチングを行うことがある。本研究において、3.0 N 群は体重と同等の力をストレッチングとして用いることで、傾斜台などを用いたストレッチングを想定した力である。

関節可動域の結果について

正常な関節において、加える力が大きいほど関節可動域は増加することが報告されている³⁶⁾。また、Mark et al.³⁷⁾は正常な筋に対してストレッチングを行い、ストレッチング後は筋の抗張力が減少し、筋の柔軟性が向上することを報告している。本研究では関節拘縮に対してもストレッチングに加える力が大きいほど関節可動域が増加していた。しかし、筋の柔軟性は 0.3 N の力をストレッチングに加えても改善していなかった。このことから、0.3 N の力を用いたストレッチングは関節可動域を改善しても、筋の柔軟性を改善しなかったことがわかる。このことについて、岡本ら³¹⁾は関節拘縮が起こった際の関節可動域には皮膚・筋・関節包が関与していると報告している。本研究において、ストレッチングの方法は足関節を背屈して行っており、筋だけでなく皮膚や関節包にもストレッチングの影響が加わったと考えられる。そのため、0.3 N でのストレッチングにおいて、骨格筋の柔軟性が改善していないにも関わらず、関節可動域が改善したのは皮膚や関節包であると考えられた。一方で 3.0 N の力を用いたストレッチングは関節可動域と筋の柔軟性が改善していた。このことから、3.0 N の力は筋の柔軟性の改善が関節可動域改善を増強したと考えられる。

ヒラメ筋柔軟性の結果について

また、筋は関節固定 3 週間以降で筋内のコラーゲン量が増加し、架橋結合が起こることが示唆されている^{38,39)}。また、Okita et al.⁴⁰⁾はラットに対して 1 週間から 12 週間まで関

節固定を行って筋内膜コラーゲン線維の形態を観察し、関節固定 4 週以降に形態変化が著明であったと報告している。本研究は 4 週間の関節固定を行っており、先行研究で報告されているように骨格筋形態に強固な形態変化が起こっていると考えられる。ストレッチングに用いる力は、強固な骨格筋の形態変化に対して、より大きい力が改善に必要であったと考えられる。

本研究は関節拘縮に対する 1 回のストレッチングが与える影響について検討したところ、関節を最低限度の力で動かす程度の力で関節可動域が改善するが筋の柔軟性が改善しないこと、体重と同等の力で関節可動域と筋の柔軟性が改善することを初めて明らかにした。先行研究では関節拘縮に対してストレッチングを行うことで関節可動域が改善するが、骨格筋に損傷が加わることが報告されている。今後はストレッチングが骨格筋の損傷におよぼす影響についても検討する必要がある。

3-5 小括

本研究の目的は関節拘縮が発生した関節に対して、統一した条件でストレッチングを行い、加える力について比較を行った。ラットを対象とし、正常な関節である正常群、4週間の関節固定を行う固定群、関節固定の後に正常な関節を最低限度で動かせる力でストレッチングを行う0.3 N群、関節固定の後に体重と同等の力でストレッチングを行う3.0 N群に分けた。実験終了後、4群の足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性を測定した。その結果、0.3 N群は足関節背屈可動域が改善したが、ヒラメ筋の柔軟性は改善しなかった。その一方で3.0 N群は足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性が改善していた。今回我々がストレッチングに用いた力は、体重と同等の力である3.0 Nを加えることで関節可動域と筋の柔軟性を改善することができた。

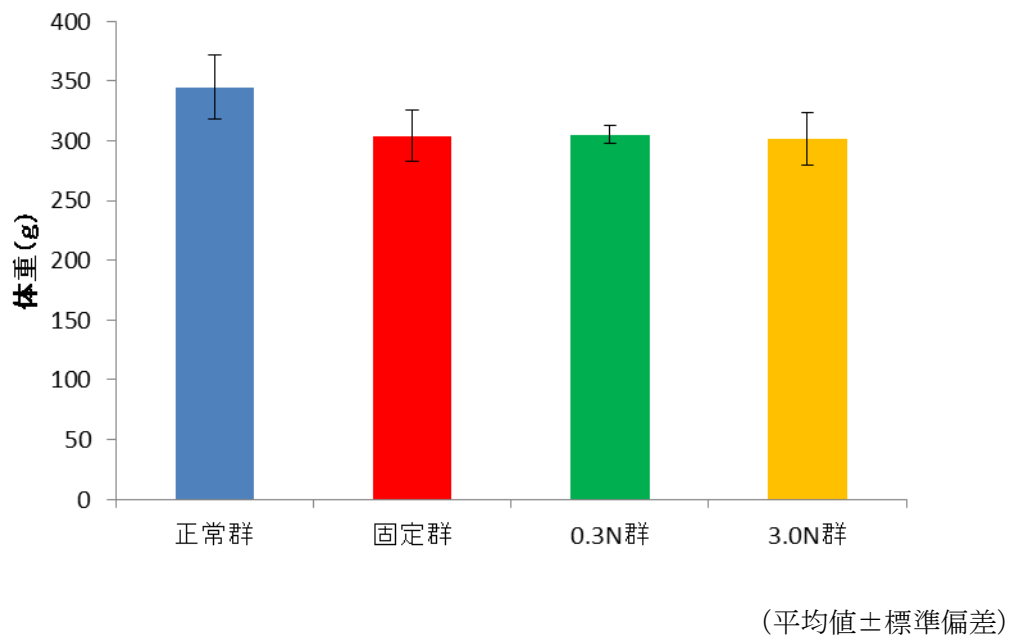


図 3 - 1

各群の体重

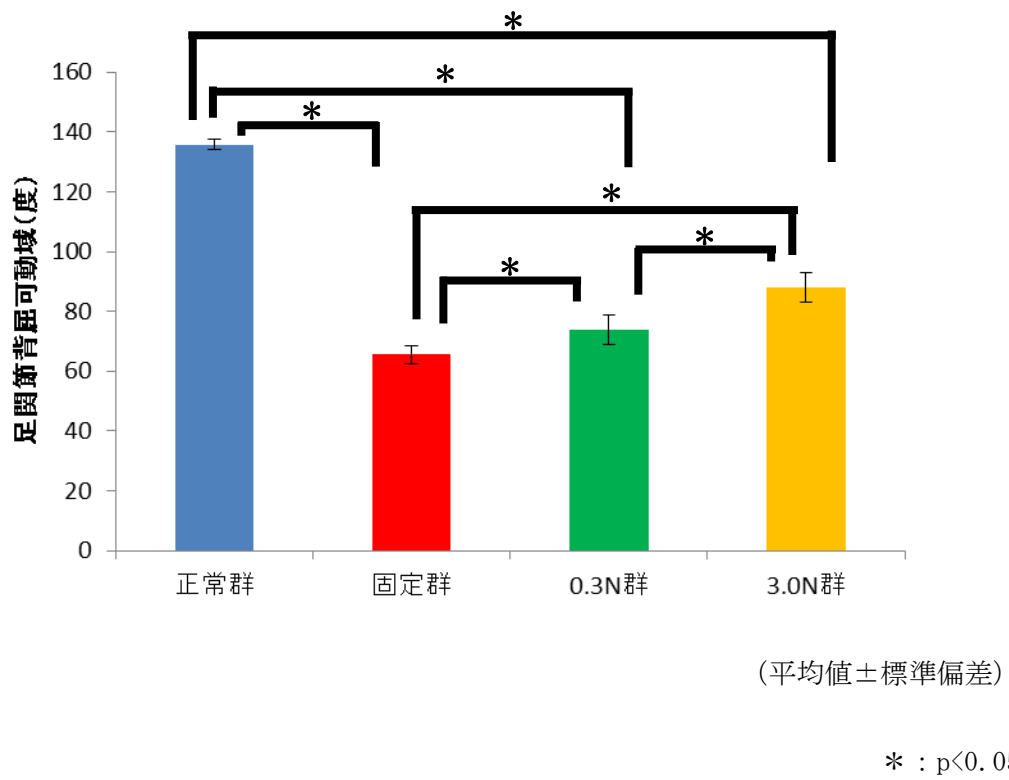
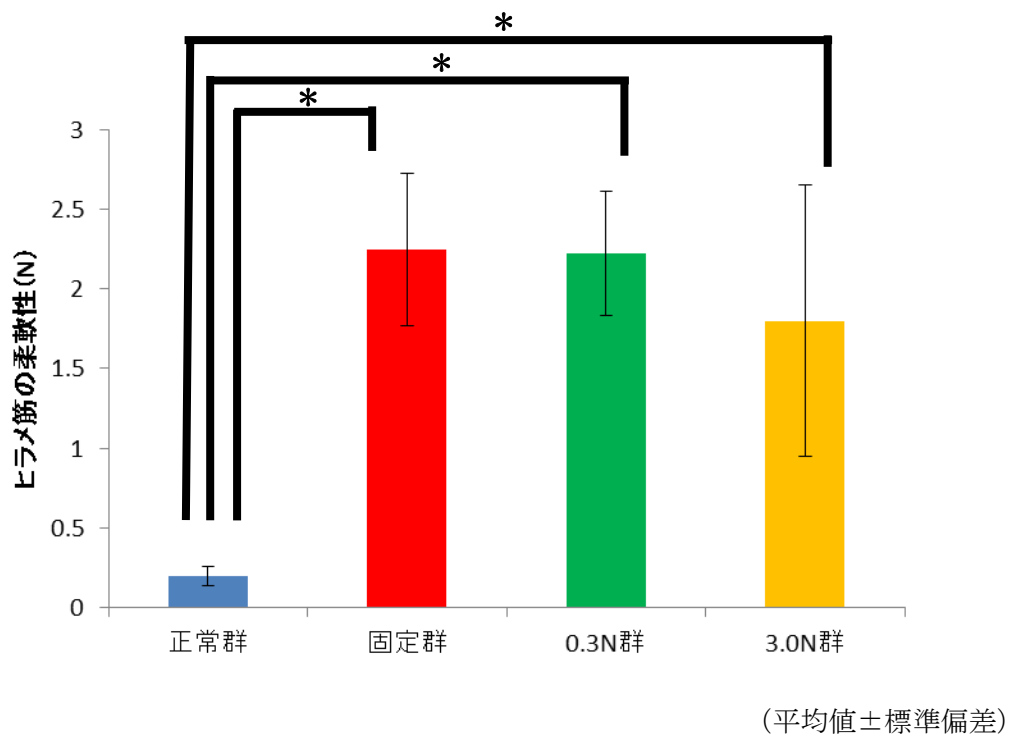


図 3 - 2

足関節背屈可動域



* : p<0.05

図 3 - 3

ヒラメ筋の柔軟性

第 4 章

関節拘縮に対して 1 回のストレッチングが
与える経時的影響についての検討

4-1 小序

関節拘縮は関節の不動などで発生し、関節周囲に存在する皮膚、皮下組織、筋、腱、靭帯、関節包などの軟部組織が変化して起こる関節可動域の制限である。発生した関節拘縮に対する治療介入は、短縮した組織にストレッチングすることで関節可動域の改善を図る⁴²⁾。本研究では関節拘縮における骨格筋の柔軟性を改善させるためのストレッチングの影響を明らかにすることを目的として検討を行ってきた。これまでの実験では、4週間の関節固定で発生した関節拘縮に対し、1回のストレッチングに正常な関節を最低限度で動かせる力と体重と同等の力を加えた結果、ストレッチングに用いる力は体重と同等の力を加えることで骨格筋の柔軟性を改善させることができた。

発生した関節拘縮にストレッチングを行った先行研究では、ある程度の期間ストレッチングを毎日繰り返し、最終日に評価を行ったところ、関節可動域の改善効果が認められた一方で筋線維の壊死などの損傷が起こることが報告されている^{14, 43)}。また、骨格筋に対して損傷が加わると24時間から72時間後に炎症反応が出現し、筋節数や筋長が減少することが報告されている^{44, 45)}。このことから、ストレッチングを行ってから時間が経過すると骨格筋の柔軟性に変化が生じることが考えられる。本研究において前章では、ストレッチングが筋の柔軟性に与える影響について検討した。しかし、検討を行った時期はストレッチング直後であり、先行研究^{44, 45)}の報告からも、ストレッチングからの経時的な変化を調査する必要がある。

そこで本研究では発生した関節拘縮に対して、1回のストレッチングがおよぼす経時的影響について比較を行った。

4-2 対象と方法

対象動物

実験動物は8週齢のWistar系雄ラット48匹（体重290～310 g）とした。全てのラットは、室温が23℃と一定になるように空調でコントロールされた飼育室で、1匹ずつケージ内に収容して飼育し、市販の固形餌（MF飼料，オリエンタル酵母工業株式会社，東京）と水道水を自由に摂取させた。飼育室内の照明は午前7時に点灯し午後7時に消灯するように12時間サイクルで人工的に昼と夜を設定した。全てのラットは環境に慣れさせる目的で1週間通常飼育した。

本研究は，県立広島大学保健福祉学部附属動物実験施設を使用し，県立広島大学研究倫理委員会の承認を受けて行った（承認番号：第15MA007号）。

方法

対象は関節固定を行った後に0.3 Nの力で足関節背屈ストレッチングを行う0.3 N群（n=18），関節固定を行った後に3.0 Nの力で足関節背屈ストレッチングを行う3.0 N群（n=18）に分けた。また，それぞれの群は経時的な変化をみるためにストレッチング直後（n=6），3日後（n=6），7日後（n=6）に評価を行った。ラットに対する実験は，導入麻酔として30%イソフルランによる吸入麻酔の後，腹腔内にペントバルビタールナトリウム（40 mg/kg）を投与し，苦痛が伴わないよう十分に麻酔が効き，骨格筋が弛緩した後に開始した。

関節固定を実施する前，ラットは体表上から骨指標の確認を容易にするために股関節周囲から足部にかけて剃毛をした。関節固定は非伸縮性テープを用いて行い，ラットの左右足関節を最大底屈位で保持して足趾から大腿部にかけて巻き付けた。巻き方はラットの足

趾部が露出して観察できるようにし、固定期間中に浮腫などの問題が発生しないか確認できるようにした。非伸縮性テープを巻き付けた後、破損および脱落を防止する目的でステンレス製のネットを使用して非伸縮性テープの上からカバーした。固定期間中は、非伸縮性テープの緩みや固定による浮腫の影響を足趾部から観察し、必要に応じて巻き替えを行った。固定期間は4週間とした。

関節固定終了後、すべての群は関節固定を解除して体重を測定した後、左右足関節に背屈ストレッチングを行った。ストレッチングは30分間持続伸張を1回のみ実施とした。ストレッチングを行う際は、田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし、結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し、鉄製の網に体幹とともに固定した。また、股関節の内転を防ぐために、アクリル板を用いて下肢を内側から保持した。ストレッチングに加える力は押しばねばかりを用いて定量的な力を加えた。0.3 N群と3.0 N群はストレッチング直後、3日後、7日後に評価として左側の足関節背屈可動域とヒラメ筋の形態観察、右側のヒラメ筋柔軟性測定を行った。ストレッチング終了後、ラットはケージ内で通常の飼育を行った。

足関節背屈可動域の測定は麻酔下にて行い、田坂ら²⁸⁾と小野ら²⁹⁾の方法を参考に実施した。まず田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし、結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し、鉄製の網に体幹とともに固定した。また、股関節の内転を防ぐために、アクリル板を用いて下肢を内側から保持した。そのままデジタルテンションメーターを用いて測定中に表示されている力を確認しながら中足部に0.3 Nを加えて足関節を背屈した。背屈している状態を記録するため、デジタルカメラを用いて動画を撮影した。撮影した動画はパーソナルコンピューターに取り込み、0.3 Nで背屈させた時の静止画を抽出した。得られた静止画は画像解析ソフト (Image J ver. 1.44p. USA) を使用してパーソナルコンピューター上で足関節背屈可動域を測定した。なお、可動域測定の際

は、基本軸を腓骨頭と外果を結んだ線とし、移動軸を踵骨底面とした。

ヒラメ筋柔軟性の測定は、麻酔下で腹大動脈より脱血して屠殺後にヒラメ筋引張試験を実施した。引張試験は大腿骨を切断し、足関節最大底屈位となるように踵骨と脛骨を鋼線で固定した状態で、足根骨にワイヤーを刺入した。そして引張試験機（オートグラフ AG-50kNG, 株式会社島津製作所, 京都）に取り付け、脛骨・腓骨とヒラメ筋以外の軟部組織を切断し、ヒラメ筋のみを起始部から停止部までの連続性が断たれるまで伸張した。伸張速度は Ono et al.¹⁸⁾の報告を参考に 10 mm/min とした。また、沖ら⁸⁾は正常なラットヒラメ筋が最大底屈位から最大背屈位までに 10 mm 伸張することから、ヒラメ筋を 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性の指標としている。よって本研究でもヒラメ筋が 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性として定義した。

ヒラメ筋の形態観察は摘出したヒラメ筋を凍結し、ヒラメ筋組織の標本を作製した。凍結したヒラメ筋組織の標本からクリオスタットを使用し、10 μm 厚でヒラメ筋組織の横断切片を作成した。作成した横断切片はヘマトキシリン・エオジン染色（以下、HE 染色とする）とタイプ I・タイプ III コラーゲンの蛍光免疫染色を行った。HE 染色では染色を行った後、オールインワン顕微鏡デジタルカメラを用いてヒラメ筋組織の横断切片を 200 倍の拡大像で撮影した。撮影した写真から画像解析ソフト（BZ-X Analyzer, 株式会社キーエンス, 大阪）を用いて標本毎に 200 本以上の筋線維短径の計測を実施し、その平均値を求めた。蛍光免疫染色では Honda et al. の方法⁴⁶⁾を参考に、抗タイプ I コラーゲン抗体と抗タイプ III コラーゲン抗体、ならびに蛍光標識を含んだ二次抗体を用いた蛍光免疫染色を実施し、オールインワン顕微鏡デジタルカメラを用いてヒラメ筋組織の横断切片を 200 倍の拡大像で撮影した。撮影した写真からランダムに 5 視野を画像解析ソフト（BZ-X Analyzer, 株式会社キーエンス, 大阪）で筋膜の輝度を測定し、その発光部分の面積をコラーゲン線維量として測定した。

統計処理は統計ソフト（エクセル統計 2012，株式会社社会情報サービス，東京）を用いて実施した。ストレッチング直後，3 日後，7 日後にそれぞれ 0.3 N 群，3.0 N 群の足関節背屈可動域，ヒラメ筋の柔軟性，筋線維短径，タイプ I・タイプ III コラーゲン線維量は，正規分布に従うかどうかを確認するために Kolmogorov-Smirnov test を実施した。そして 2 群間の比較について，正規分布に従う場合は Unpaired t-test を用い，正規分布に従わない場合はノンパラメトリックである Wilcoxon signed-rank test を実施し，危険率 5% 未満をもって有意差を判定した。

4-3 結果

関節固定終了後の各群の体重を図 4-1 に示した。関節固定終了後の体重は 0.3 N 群が 304.2 ± 11.4 g，3.0 N 群が 303.7 ± 9.0 g であった。0.3 N 群と 3.0 N 群におけるストレッチング直後，3 日後，7 日後の体重を図 4-2 に示した。0.3 N 群の体重はストレッチング直後で 0.3 N 群が 300.2 ± 6.5 g，3 日後で 0.3 N 群が 342.0 ± 14.5 g，7 日後で 0.3 N 群が 351.5 ± 5.0 g であった。3.0 N 群の体重はストレッチング直後で 307.7 ± 12.9 g，3 日後で 339.5 ± 5.9 g，7 日後で 357.3 ± 7.7 g であった。

足関節背屈可動域の結果を図 4-3 に示した。0.3 N 群の足関節背屈可動域はストレッチング直後で 74.7 ± 2.4 度，3 日後で 84.2 ± 3.0 度，7 日後で 82.3 ± 1.1 度であった。3.0 N 群の足関節背屈可動域はストレッチング直後で 92.2 ± 1.8 度，3 日後で 81.6 ± 0.7 度，7 日後で 79.3 ± 0.4 度であった。統計処理の結果，各時期において 2 群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired t-test を実施した。その結果，ストレッチング直後の足関節背屈可動域は 0.3 N 群に比べて 3.0 N 群が有意に大きかった。また，3 日後・7 日後の足関節背屈可動域は 3.0 N 群に比べて 0.3 N 群が有意に大きかった。

ヒラメ筋の柔軟性の結果を図4-4に示した。0.3 N群のヒラメ筋柔軟性はストレッチング直後で 2.09 ± 2.8 N, 3日後で 3.02 ± 0.72 N, 7日後で 2.01 ± 0.40 Nであった。3.0 N群のヒラメ筋柔軟性はストレッチング直後で 1.29 ± 0.52 N, 3日後で 3.90 ± 0.46 N, 7日後で 2.56 ± 0.28 Nであった。統計処理の結果, 各時期において2群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired t-test を実施した。その結果, ストレッチング直後のヒラメ筋柔軟性は0.3 N群に比べて3.0 N群が有意に大きかった。また, 3日後・7日後のヒラメ筋柔軟性は3.0 N群に比べて0.3 N群が有意に大きかった。

ヒラメ筋のHE染色像を図4-5に示した。0.3 N群は3日後に細胞間質に浮腫が発生しているが, 7日後には軽減している。3.0 N群は3日後に細胞間質に浮腫が発生し, 7日後でも浮腫が多く残存している。

筋線維短径の結果を図4-6に示した。0.3 N群の筋線維短径はストレッチング直後で 45.8 ± 3.3 μm , 3日後で 50.7 ± 2.9 μm , 7日後で 56.3 ± 3.3 μm であった。3.0 N群の筋線維短径はストレッチング直後で 46.0 ± 1.3 μm , 3日後で 45.2 ± 3.2 μm , 7日後で 49.5 ± 3.0 μm であった。統計処理の結果, 各時期において2群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired t-test を実施した。その結果, 3日後・7日後の筋線維短径は3.0 N群に比べて0.3 N群が有意に大きかった。

筋線維横断面におけるタイプIコラーゲン線維の蛍光免疫染色像を図4-7に示した。タイプIコラーゲン線維は3.0 N群の7日後において, 増加している傾向が見られた。

タイプIコラーゲン線維量の結果を図4-8に示した。0.3 N群のタイプIコラーゲン線維量はストレッチング直後で 55070 ± 10464 μm^2 , 3日後で 59399 ± 9157 μm^2 , 7日後で 59576 ± 9869 μm^2 であった。3.0 N群のタイプIコラーゲン線維量はストレッチング直後で 55378 ± 18085 μm^2 , 3日後で 67904 ± 8570 μm^2 , 7日後で 86134 ± 9755 μm^2 であった。統計処理の結果, 各時期において2群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired

t-test を実施した。その結果、7 日後のタイプ I コラーゲン線維量は 0.3 N 群に比べて 3.0 N 群が有意に大きかった。

筋線維横断面におけるタイプ III コラーゲン線維の蛍光免疫染色像を図 4-9 に示した。タイプ III コラーゲン線維は 3.0 N 群の 7 日後において、増加している傾向が見られた。

タイプ III コラーゲン線維量の結果を図 4-10 に示した。0.3 N 群のタイプ III コラーゲン線維量はストレッチング直後で $31349 \pm 6739 \mu\text{m}^2$ 、3 日後で $30246 \pm 3691 \mu\text{m}^2$ 、7 日後で $29530 \pm 5282 \mu\text{m}^2$ であった。3.0 N 群のタイプ III コラーゲン線維量はストレッチング直後で $30199 \pm 8054 \mu\text{m}^2$ 、3 日後で $30873 \pm 2089 \mu\text{m}^2$ 、7 日後で $35209 \pm 2253 \mu\text{m}^2$ であった。統計処理の結果、各時期において 2 群は正規分布に従うことが認められたため Unpaired t-test を実施した。その結果、7 日後のタイプ III コラーゲン線維量は 0.3 N 群に比べて 3.0 N 群が有意に大きかった。

4-4 考察

ラットの体重について

Tanaka et al.⁴⁷⁾ は正常なラットが成長するのに伴って体重が増加していったことを報告している。本研究においてラットの体重は経時的に増加していき、0.3 N 群と 3.0 N 群の間に差がなかった。このことから、0.3 N 群と 3.0 N 群は同様に成長していったことが確認できる。

関節可動域の結果について

関節拘縮に対する 1 回のストレッチング直後の影響について、我々は前章で 0.3 N よりも 3.0 N をストレッチングに加えた方が関節可動域の増大が起こったことを報告した。今回の結果において、ストレッチング直後の関節可動域は 0.3 N 群よりも 3.0 N 群の方が関

関節可動域の増大が起こった。このことから、ストレッチング直後は 3.0 N 群の方が関節可動域の増大が起こっており、前章と同様の結果が得られた。

次に、関節可動域の経過についてみると、関節拘縮発生後の関節可動域の自然回復について、椰ら⁴⁸⁾はラットに対する実験的研究で、20 日間の関節固定を行った後、関節固定を解除して関節可動域が自然回復する過程を調査したところ、関節可動域が改善していったことを報告している。本研究において、0.3 N 群はストレッチング直後から 3 日後にかけて関節可動域が改善していたが、3 日後から 7 日後にかけて変化がなかった。一方 3.0 N 群はストレッチング直後から 7 日後まで関節可動域が悪化していった。このことから、体重と同等の力である 3.0 N は関節可動域の自然回復を阻害していることがわかった。

関節拘縮に対する 1 回のストレッチング 3 日以降の影響について、Lannin et al.⁴⁹⁾はストレッチングを行って増大した関節可動域が、ストレッチングから 24 時間後にストレッチング前の関節可動域に戻ることを報告している。しかし、関節拘縮に対してストレッチングを行った先行研究^{50,51)}では、最終日にストレッチングを行った後に関節可動域が改善することを報告している。Lannin et al.⁴⁹⁾の報告から、関節拘縮にストレッチングを行った先行研究^{50,51)}の関節可動域結果は一時的なものであり、時間経過でストレッチング前の関節可動域に戻ることが考えられる。本研究において、ラット足関節背屈可動域はストレッチング直後で 3.0 N 群の方が改善していたが、3 日後以降で 0.3 N 群の方が改善していた。このことから、関節拘縮に対するストレッチングはストレッチング直後の即時的な影響と時間経過で変化する長期的な影響があることがわかった。

ヒラメ筋柔軟性の結果について

関節拘縮に対する 1 回のストレッチング直後の影響について、Palmer et al.⁵²⁾は正常な骨格筋を生体外に取り出してストレッチングを加えると、骨格筋の柔軟性が向上することを報告している。また、Tabary et al.⁷⁾は骨格筋を長く伸張するためにより大きな力が必

要であることを報告している。本研究において、ヒラメ筋の柔軟性はストレッチング直後
で 0.3 N 群よりも 3.0 N 群の方が大きかった。このことから、ストレッチング直後におい
て、3.0 N 群は 0.3 N 群よりも大きい力をストレッチングに加えたことが、骨格筋の柔軟性
を向上させたと考えられる。

関節拘縮に対する 1 回のストレッチング 3 日以降の影響について、骨格筋に損傷を加え
ると、48~72 時間後に炎症反応が出現し、筋節数や筋長が減少することが報告されている
^{45, 53)}。本研究において、ストレッチング 3 日後のヒラメ筋柔軟性は 0.3 N 群と 3.0 N 群とも
に低下し、3.0 N 群の方が 0.3 N 群よりもその程度が大きかった。ストレッチング 7 日後の
ヒラメ筋柔軟性は 0.3 N 群がストレッチング直後に戻ったのに対し、3.0 N 群がストレッチ
ング直後よりも低下していた。このことから、3.0 N でのストレッチングはヒラメ筋の損傷
が大きく、柔軟性を低下させたと考えられる。

ヒラメ筋の形態について

骨格筋に損傷が起こった場合、損傷から 3 日後をピークに炎症反応が起こり、4 日以降で
回復に転じることが報告されている^{54, 55)}。本研究では、0.3 N 群と 3.0 N 群ともにストレッチ
ングを実施してから 3 日後に筋線維に浮腫が発生しており、ストレッチングを実施して
から 7 日後でも 3.0 N 群の筋線維の浮腫が残存していた。このことから、3.0 N 群はストレッチ
ング実施してから 4 日以降も回復が起こっておらず、筋線維の損傷が大きかったこと
が考えられる。

筋線維短径について

骨格筋は運動などによって加えられる負荷が適切な場合、筋線維の肥大による適応が起
こる⁵⁶⁾。本研究では、ストレッチング実施後 3 日以降で 0.3 N 群が 3.0 N 群に比べて筋線
維短径の増加が起こっていた。このことから、0.3 N 群で行ったストレッチングは骨格筋の

回復を促し、筋線維の状態を改善するのに適切な力が加わっていたと考えられる。

コラーゲン線維量について

Jozsa et al.⁵⁷⁾は骨格筋に対して関節固定や骨格筋に対する損傷を加えたとき、骨格筋内のコラーゲン線維量が増加することを報告している。また、タイプ I コラーゲン線維は関節固定期間に比例してその量が増加していくことから、関節拘縮と関係していると考えられている^{58,59)}。本研究において、ストレッチング直後は 0.3 N 群・3.0 N 群のタイプ I・III コラーゲン線維量に差はなかった。一方、3 日以降で 3.0 N 群は 0.3 N 群に比べてタイプ I コラーゲン線維量が増加していたのに加えて、足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性も低下していた。このことから、3.0 N 群でストレッチングに用いた体重と同等の力はヒラメ筋に損傷が加わり、ヒラメ筋内のタイプ I コラーゲン線維量が増加したことで足関節背屈可動域が低下したと考えられた。

体重と同程度の力はストレッチング直後に足関節背屈可動域・ヒラメ筋の柔軟性が向上するが、3 日以降でヒラメ筋内に浮腫の出現やタイプ I コラーゲン線維の増加が起こり、足関節背屈可動域・ヒラメ筋の柔軟性の低下が起こった。一方で正常な関節を最低限度で動かすことのできる力は 3 日以降でヒラメ筋線維の肥大が起こり、足関節背屈可動域やヒラメ筋柔軟性が改善していた。

2-5 小括

本研究の目的は発生した関節拘縮に対して、統一した条件でストレッチングを加えた力の違いがおよぼす経時的変化について比較を行った。ラットを対象とし、4週間の関節固定を行った後に正常な関節を最低限度で動かせる力でストレッチングを行う0.3 N群、体重と同程度の力でストレッチングを行う3.0 N群に分けた。そしてストレッチング実施後、ストレッチング直後・3日後・7日後に評価を行った。その結果、ストレッチング直後は3.0 N群が0.3 N群よりも足関節背屈可動域、ヒラメ筋柔軟性が増大していた。しかし3日後は0.3 N群が3.0 N群よりも足関節背屈可動域、ヒラメ筋柔軟性が増大していた。また、3.0 N群は3日以降に筋線維内のタイプ I コラーゲン線維が増加しており、ヒラメ筋柔軟性や足関節背屈可動域低下に影響したと考えられた。

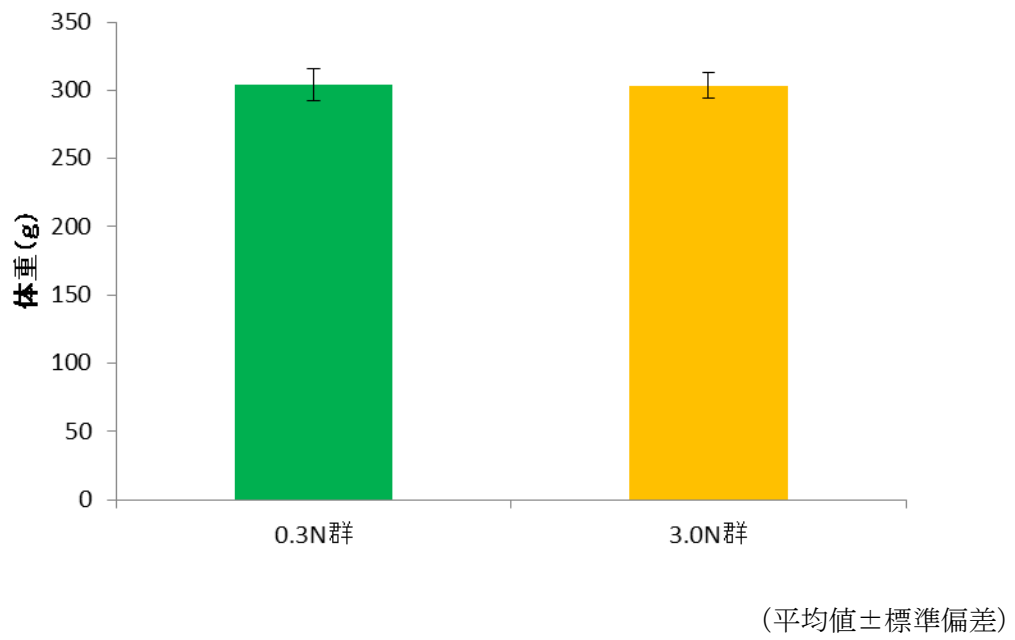


図4-1

固定終了後における各群の体重

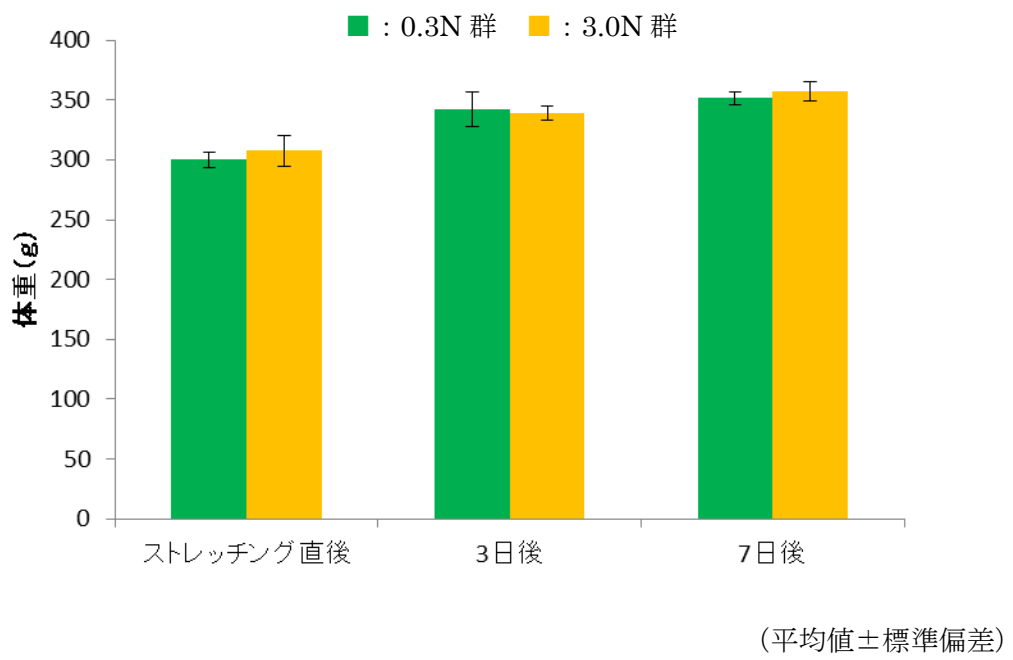


図 4 - 2

ストレッチング直後・3日後・7日後における各群の体重

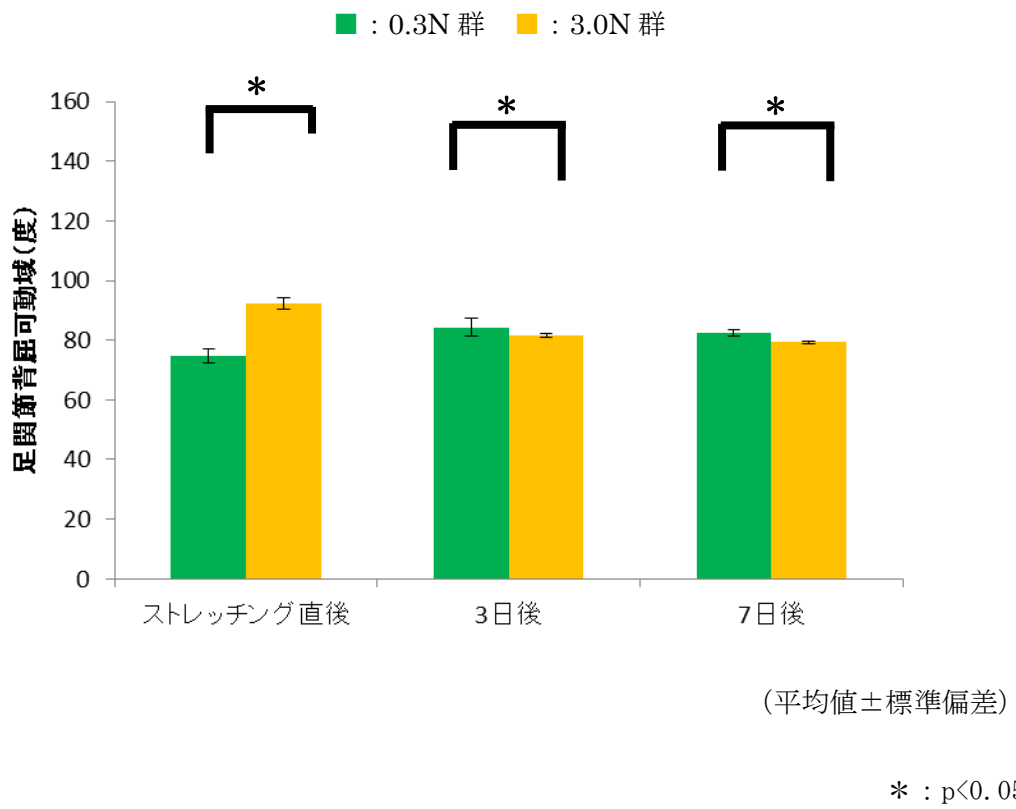


図 4 - 3

ストレッチング直後・3日後・7日後における各群の足関節背屈可動域

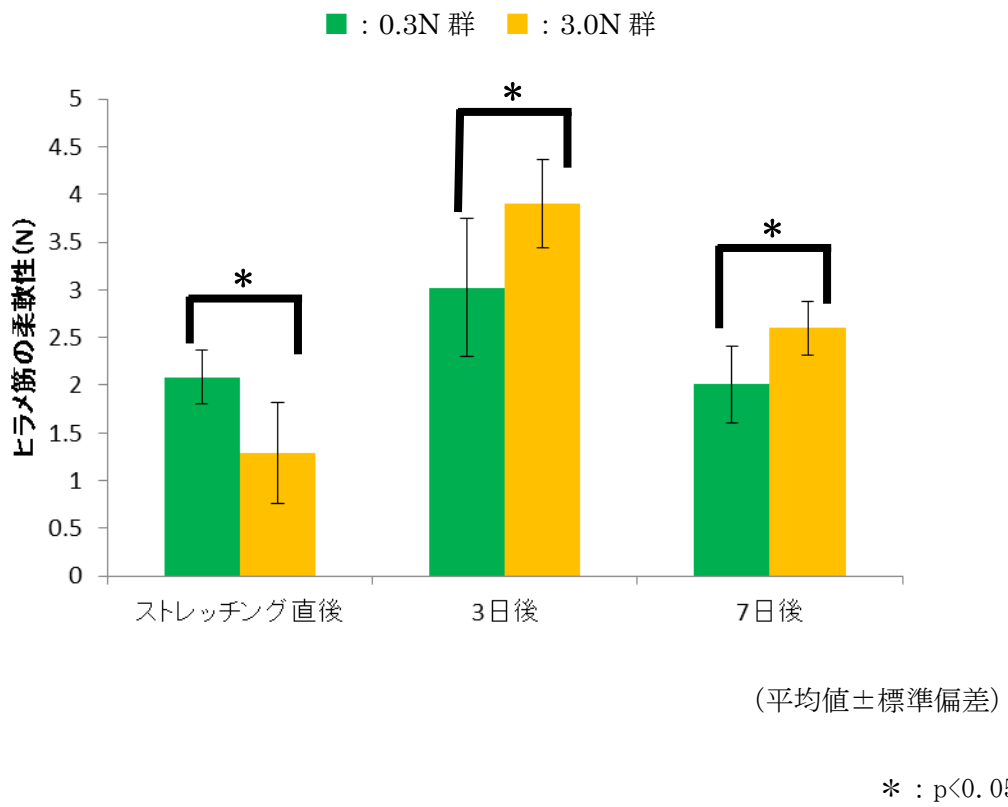


図 4 - 4

ストレッチング直後・3日後・7日後における各群のヒラメ筋の柔軟性

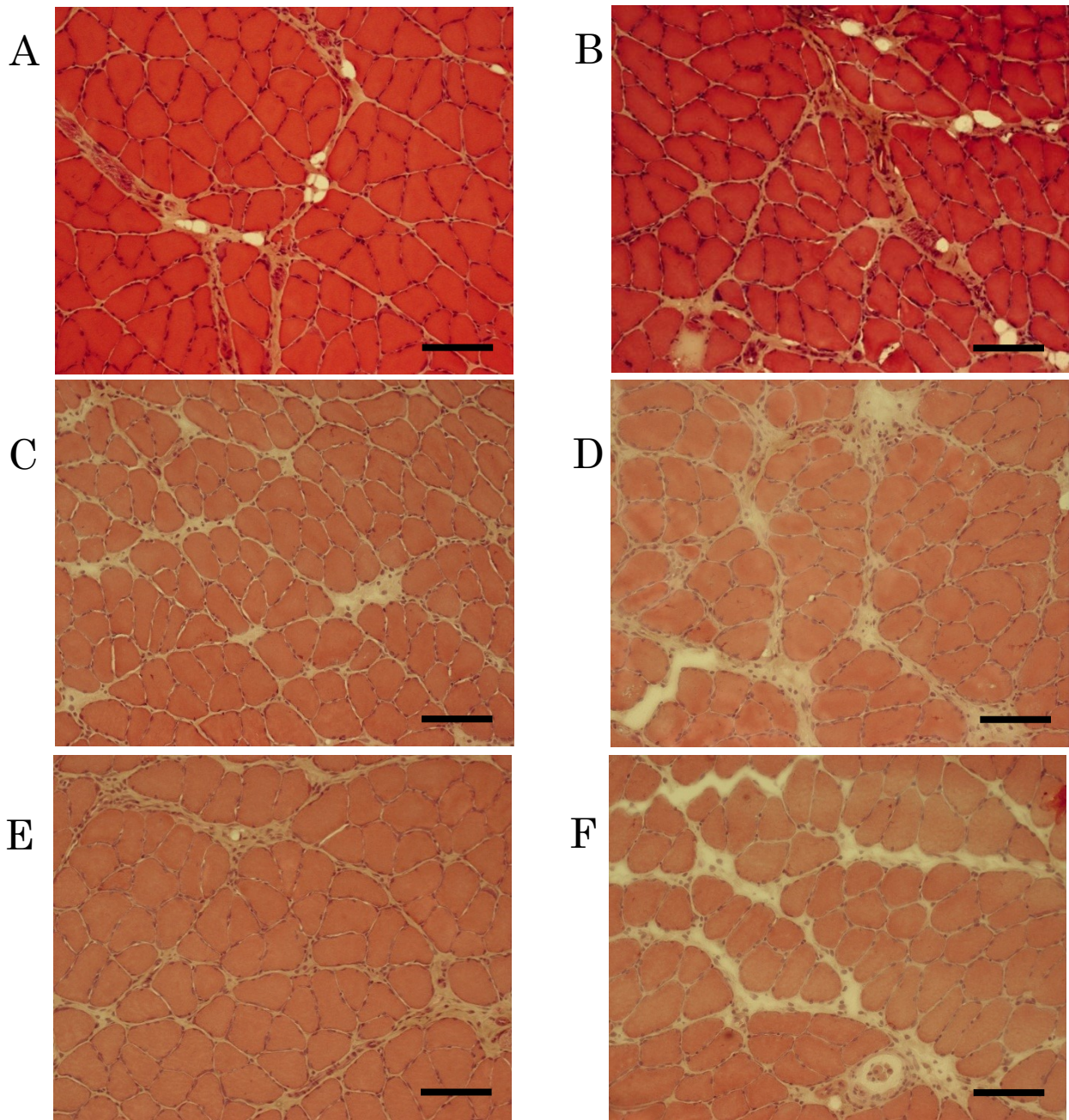


図4-5 各群のヒラメ筋横断面 (HE 染色) (Bar100 μm)

ストレッチング直後 (A : 0.3 N 群 B : 3.0 N 群) 3日後 (C : 0.3 N 群 D : 3.0 N 群)

7日後 (E : 0.3 N 群 F : 3.0 N 群)

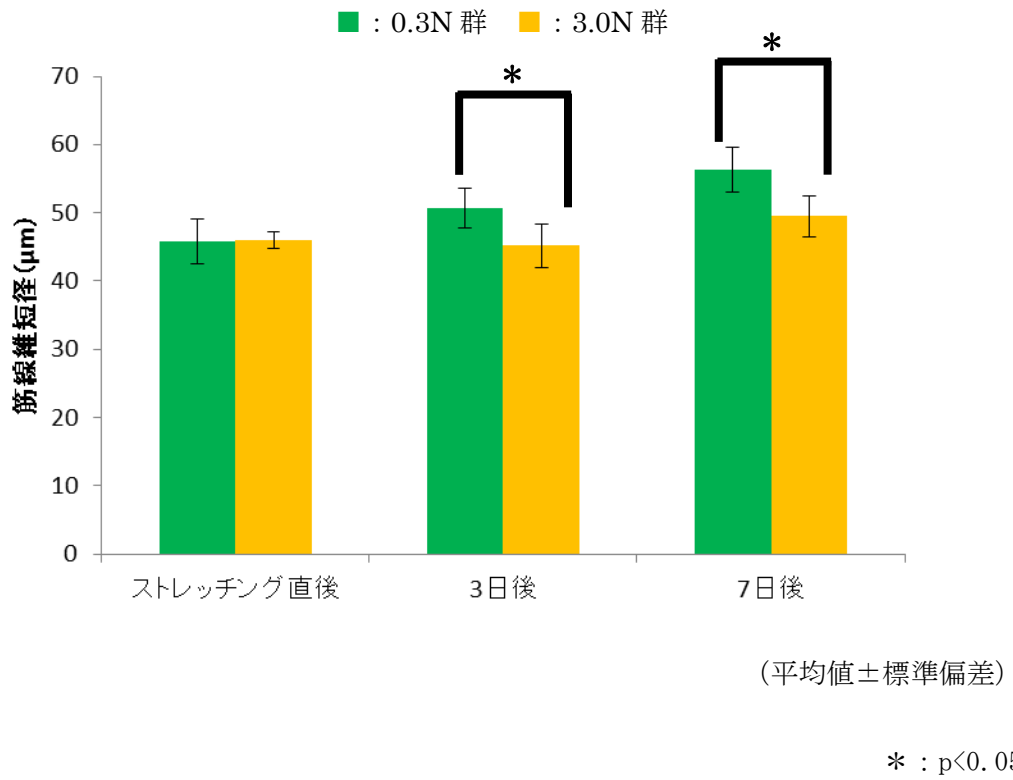


図 4 - 6

ストレッチング直後・3日後・7日後における各群のヒラメ筋線維短径

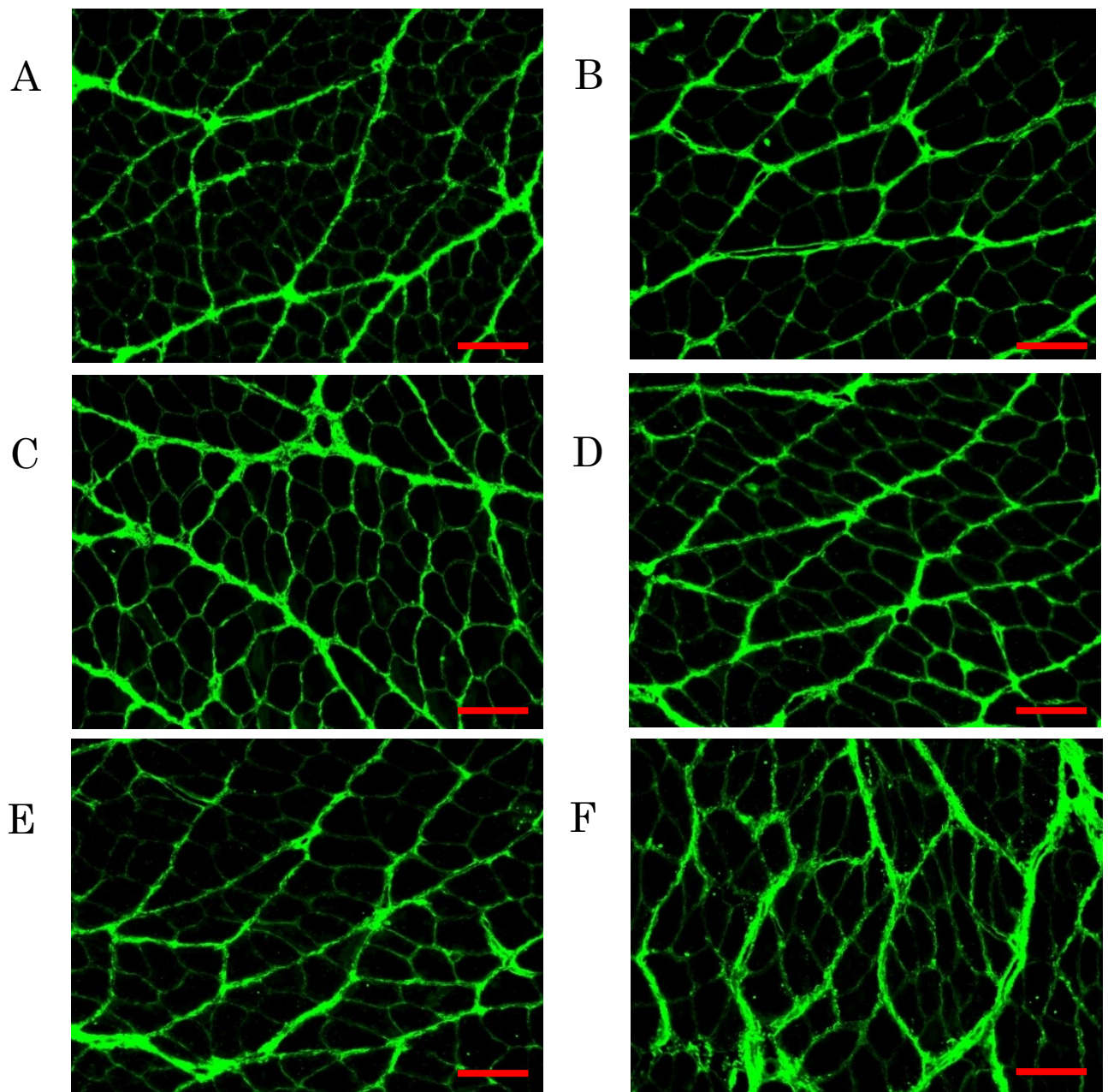
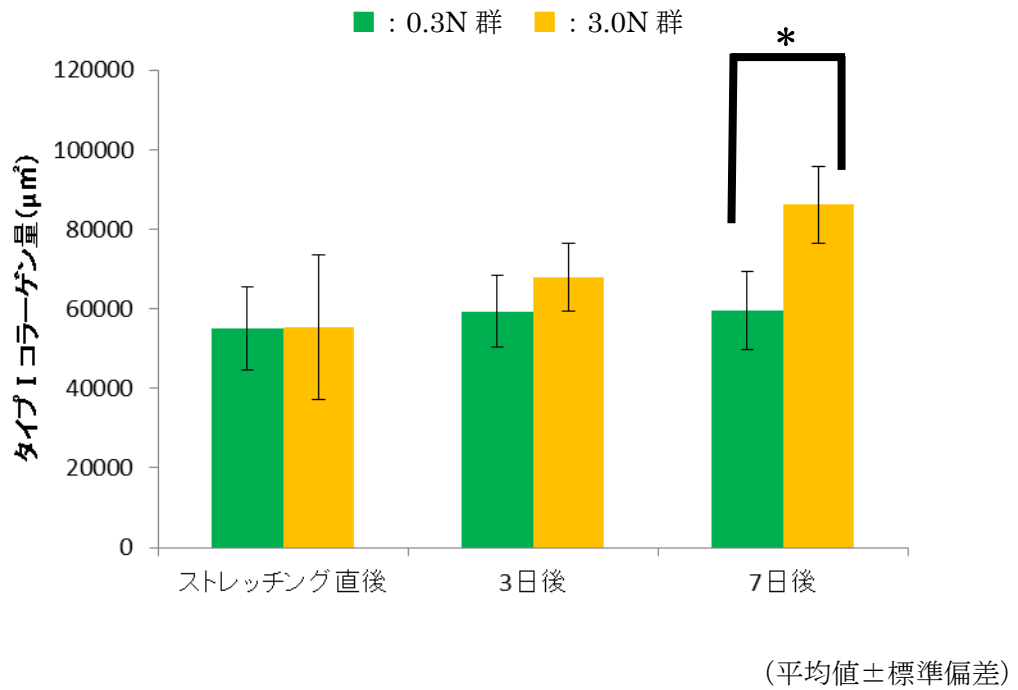


図4-7 各群のヒラメ筋横断面（蛍光免疫染色：タイプIコラーゲン線維）（Bar100 μ m）

ストレッチング直後（A：0.3 N群 B：3.0 N群） 3日後（C：0.3 N群 D：3.0 N群）

7日後（E：0.3 N群 F：3.0 N群）



* : p<0.05

図 4-8

ストレッチング直後・3日後・7日後における

各群のタイプ I コラーゲン量

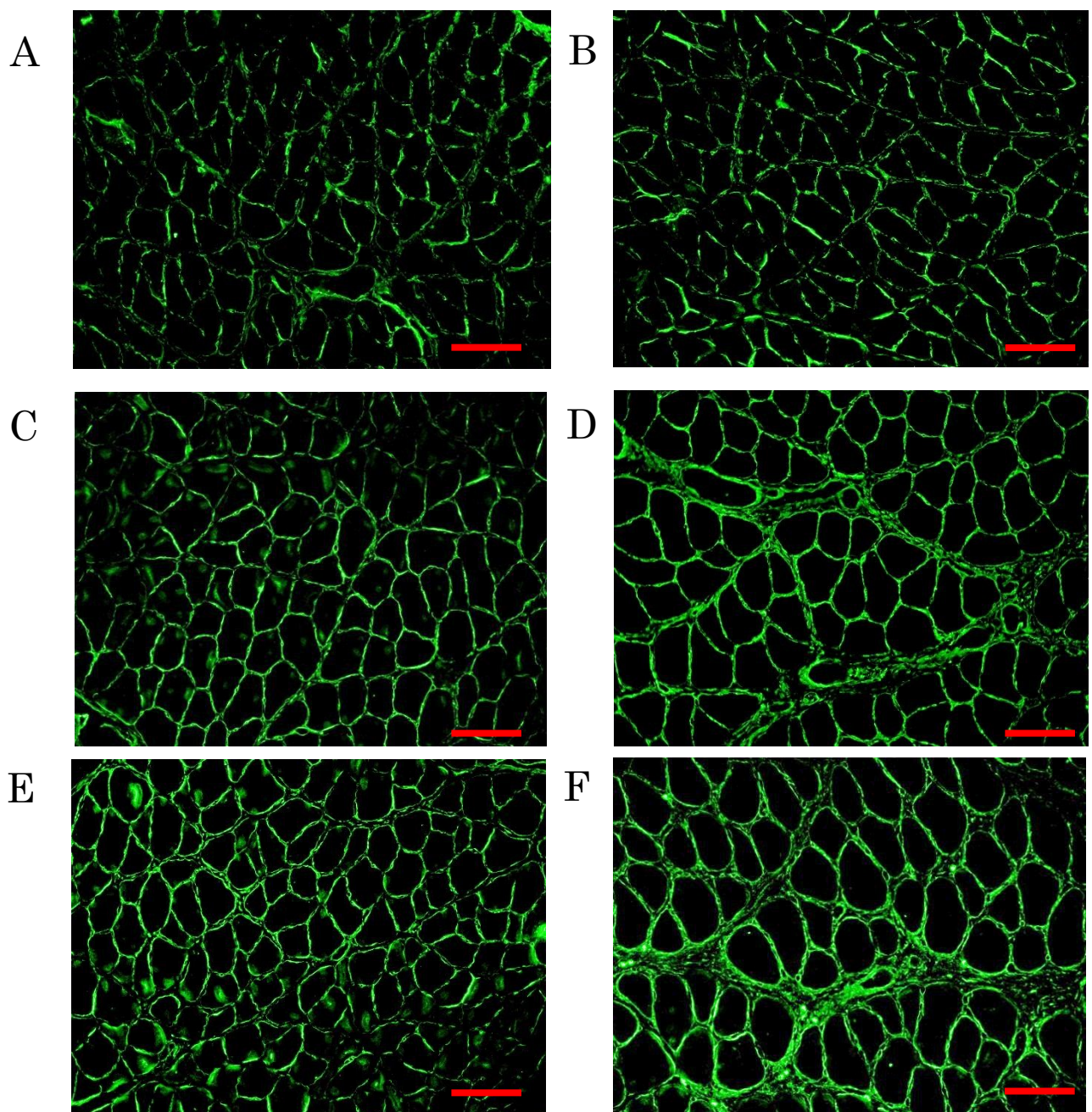


図4-9 各群のヒラメ筋横断面（蛍光免疫染色：タイプⅢコラーゲン線維）（Bar100 μm）

ストレッチング直後（A：0.3 N群 B：3.0 N群） 3日後（C：0.3 N群 D：3.0 N群）

7日後（E：0.3 N群 F：3.0 N群）

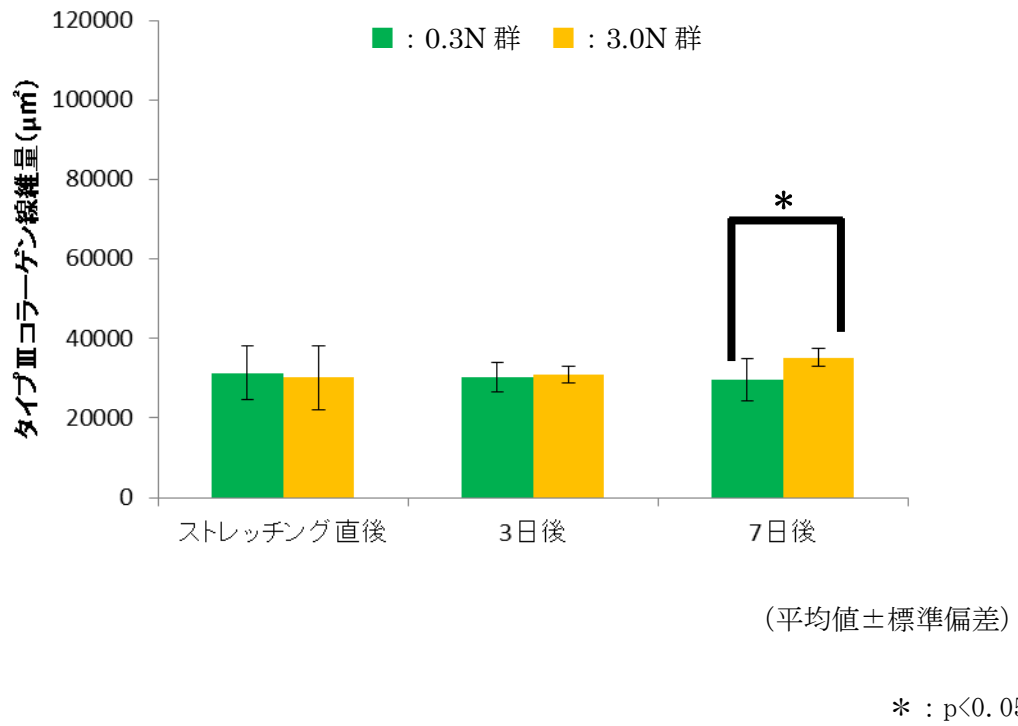


図 4 - 1 0

ストレッチング直後・3日後・7日後における

各群のタイプⅢコラーゲン量

第5章

関節拘縮に対する

臨床に即したストレッチング方法の検討

5-1 小序

前章では関節拘縮に対して 1 回のストレッチングに加える力の違いが関節可動域や骨格筋に与える影響について比較してきた。その結果、ストレッチングに加える力はストレッチング直後で 0.3 N よりも 3.0 N の方が関節可動域と筋の柔軟性を改善していたが、ストレッチングから 7 日後で 3.0 N よりも 0.3 N の方が関節可動域と筋の柔軟性を改善していた。また、3.0 N の力はストレッチングから 7 日後でストレッチング直後よりも関節可動域と筋の柔軟性が悪化しており、筋線維形態も炎症像が観察され、筋線維のコラーゲン線維増加が起こっていた。このように、前章までは 1 回のストレッチングが関節可動域、骨格筋に与える影響について明らかにしてきた。そこで本研究では、前章まで着目してきたストレッチングに加える力の違いについて、実際にリハビリテーションの臨床を想定したストレッチングの方法を行って検討を行った。

我が国でのリハビリテーションの臨床では、医療保険・介護保険に則り、1 日に実施する時間の規定がある。リハビリテーションの時間は、対象となる患者の疾患や年齢などで異なるが、1 回 20 分を基本としている。リハビリテーションの内容はストレッチングや筋力増強運動、日常生活動作練習などを行い、患者の機能回復を図っている。しかし、前章まで行ってきたストレッチングは 1 回 30 分のストレッチングであり、臨床で応用するためには医療保険・介護保険に定められている 1 回 20 分以内にストレッチングを実施できず、臨床への応用が難しい。そのため、より臨床に即した形のストレッチング方法を検討する必要がある。臨床に即した形のストレッチング方法としては、1 回 30 秒程度のストレッチングを 10 回行う方法が成書などで示されている^{33,60)}。

そこで本研究は、関節拘縮に対して成書などで示されている臨床に即した形でのストレッチングを行い、関節可動域と筋の柔軟性に与える影響について検討を行った。

5-2 対象と方法

対象動物

実験動物は8週齢のWistar系雄ラット24匹（体重280～310 g）とした。全てのラットは、室温が23℃と一定になるように空調でコントロールされた飼育室で、1匹ずつケージ内に収容して飼育し、市販の固形餌（MF飼料，オリエンタル酵母工業株式会社，東京）と水道水を自由に摂取させた。飼育室内の照明は午前7時に点灯し午後7時に消灯するように12時間サイクルで人工的に昼と夜を設定した。全てのラットは環境に慣れさせる目的で1週間通常飼育した。

本研究は，県立広島大学保健福祉学部附属動物実験施設を使用し，県立広島大学研究倫理委員会の承認を受けて行った（承認番号：第15MA007号）。

方法

対象は無作為に関節固定を行った固定群（n=6），関節固定を行った後に0.3 Nの力で足関節背屈ストレッチングを行う0.3 N群（n=6），関節固定を行った後に3.0 Nの力で足関節背屈ストレッチングを行う3.0 N群（n=6），関節固定を行わない正常群（n=6）に分けた。ラットに対する実験は，導入麻酔として30%イソフルランによる吸入麻酔の後，腹腔内にペントバルビタールナトリウム（40 mg/kg）を投与し，苦痛が伴わないよう十分に麻酔が効き，骨格筋が弛緩した後に開始した。

はじめにラットは体表上から骨指標の確認を容易にするために股関節周囲から足部にかけて剃毛をした。関節固定は非伸縮性テープを用いて行い，ラットの左右足関節を最大底屈位で保持して足趾から大腿部にかけて巻き付けた。巻き方はラットの足趾部が露出して観察できるようにし，固定期間中に浮腫などの問題が発生しないか確認できるようにした。

非伸縮性テープを巻き付けた後、破損および脱落を防止する目的でステンレス製のネットを使用して非伸縮性テープの上からカバーした。固定期間中は、非伸縮性テープの緩みや固定による浮腫の影響を足趾部から観察し、必要に応じて巻き替えを行った。固定期間は4週間とした。

関節固定終了後、すべての群は関節固定を解除して体重を測定した。その後、固定群・0.3 N 群・3.0 N 群は自由飼育を行った。0.3 N 群と 3.0 N 群に対しては自由飼育中に左右足関節へ背屈ストレッチングを行った。ストレッチングの方法は先行研究^{14, 61, 62)}を参考に、リハビリテーションの臨床で可能な範囲である1日につき30秒間のストレッチングを10回行い、7日間行った。ストレッチング間のインターバルは30秒とした。ストレッチングを行う際は、田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし、結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し、鉄製の網に体幹とともに固定した。また、股関節の内転を防ぐために、アクリル板を用いて下肢を内側から保持した。ストレッチングに加える力は押しばねばかりを用いて定量的な力を加えた。ストレッチング終了後、左側の足関節背屈可動域とヒラメ筋形態観察、右側のヒラメ筋柔軟性測定を行った。

足関節背屈可動域の測定は麻酔下にて行い、田坂ら²⁸⁾と小野ら²⁹⁾の方法を参考に実施した。まず田坂ら²⁸⁾が用いたラット固定器具を使用してラットを側臥位にし、結束バンドを用いて膝関節を最大屈曲位で保持し、鉄製の網に体幹とともに固定した。また、股関節の内転を防ぐために、アクリル板を用いて下肢を内側から保持した。そのままデジタルテンションメーターを用いて測定中に表示されている力を確認しながら中足部に0.3 Nを加えて足関節を背屈した。背屈している状態を記録するため、デジタルカメラを用いて動画を撮影した。撮影した動画はパーソナルコンピューターに取り込み、0.3 Nで背屈させた時の静止画を抽出した。得られた静止画は画像解析ソフト (Image J ver. 1.44p. USA) を使用してパーソナルコンピューター上で足関節背屈可動域を測定した。なお、可動域測定の際

は、基本軸を腓骨頭と外果を結んだ線とし、移動軸を踵骨底面とした。

ヒラメ筋柔軟性の測定は、麻酔下で腹大動脈より脱血して屠殺後にヒラメ筋引張試験を実施した。引張試験は大腿骨を切断し、足関節最大底屈位となるように踵骨と脛骨を鋼線で固定した状態で、足根骨にワイヤーを刺入した。そして引張試験機（オートグラフ AG-50kNG, 株式会社島津製作所, 京都）に取り付け、脛骨・腓骨とヒラメ筋以外の軟部組織を切断し、ヒラメ筋のみを起始部から停止部までの連続性が断たれるまで伸張した。伸張速度は Ono et al.¹⁸⁾ の報告を参考に 10 mm/min とした。また、沖ら⁸⁾ は正常なラットヒラメ筋が最大底屈位から最大背屈位までに 10 mm 伸張することから、ヒラメ筋を 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性の指標としている。よって本研究でもヒラメ筋が 10 mm 伸張するのに必要な力を筋の柔軟性として定義した。

ヒラメ筋の形態観察は摘出したヒラメ筋を凍結し、ヒラメ筋組織の標本を作製した。凍結したヒラメ筋組織の標本からクリオスタットを使用し、10 μm 厚でヒラメ筋組織の横断切片を作成した。作成した横断切片はヘマトキシリン・エオジン染色（以下、HE 染色とする）を行った。HE 染色では染色を行った後、オールインワン顕微鏡デジタルカメラを用いてヒラメ筋組織の横断切片を 200 倍の拡大像で撮影した。

統計処理は統計ソフト（エクセル統計 2012, 株式会社社会情報サービス, 東京）を用いて実施した。正常群, 固定群, 0.3 N 群, 3.0 N 群の足関節背屈可動域, ヒラメ筋の柔軟性は正規分布に従うかどうかを確認するために Kolmogorov-Smirnov test を実施した。そして 4 群間の比較について、正規分布に従う場合は one-way Analysis of Variance（以下、one-way ANOVA と略す）を用い、正規分布に従わない場合はノンパラメトリックである Kruskal-Wallis test を実施した。その結果有意差を認めた場合は多重比較検定を行った。なお、すべての統計手法は危険率 5%未満をもって有意差を判定した。

5-3 結果

関節固定終了後の各群の体重の結果を図5-1に示した。関節固定終了後の体重は正常群が 344.55 ± 26.6 g, 固定群が 303.7 ± 21.5 g, 0.3 N群が 302.8 ± 6.1 g, 3.0 N群が 299.4 ± 19.5 g であった。ストレッチング期間が終了した後7日目の各群の体重の結果を図5-2に示した。ストレッチング期間が終了した後の体重は正常群が 384.3 ± 15.5 g, 固定群が 366.3 ± 11.1 g, 0.3 N群が 374.3 ± 6.1 g, 3.0 N群が 363.0 ± 9.5 g であった。

足関節背屈可動域の結果を図5-3に示した。0.3 N群の足関節背屈可動域は正常群が 138.0 ± 2.6 度, 固定群が 67.0 ± 7.2 度, 0.3 N群が 99.9 ± 9.9 度, 3.0 N群が 85.8 ± 5.5 度であった。統計処理の結果, 各群は正規分布に従うことが認められたため, one-way ANOVA を実施したところ, 足関節背屈可動域に有意差を認めた。次に多重比較検定として Tukey 法を用いたところ, 正常群はその他の3群よりも足関節背屈可動域が有意に大きかった。0.3 N群は固定群と3.0 N群よりも足関節背屈可動域が有意に大きかった。3.0 N群は固定群よりも足関節背屈可動域が有意に大きかった。

ヒラメ筋柔軟性の結果を図5-4に示した。ヒラメ筋柔軟性は正常群が 0.29 ± 0.13 N, 固定群が 2.03 ± 0.24 N, 0.3 N群が 1.30 ± 0.24 N, 3.0 N群が 2.89 ± 1.01 N であった。統計処理の結果, 各群は正規分布に従うことが認められたため, one way ANOVA を実施したところ, ヒラメ筋柔軟性に有意差を認めた。次に多重比較検定として Tukey 法を用いたところ, 正常群はその他の3群よりもヒラメ筋柔軟性が有意に高かった。0.3 N群は3.0 N群よりもヒラメ筋柔軟性が有意に大きかった。

各群のヒラメ筋 HE 染色像を図5-5に示した。3.0 N群は細胞間質の浮腫が著明に発生

していた。

5-4 考察

ラットの体重について

先行研究では、ラットに関節固定を行ったところ、固定期間中にラットの活動量が低下し、正常なラットに比べて体重が減少することが報告されている^{63,64}。本研究では、正常群と比較して関節固定を行った固定群・0.3 N群・3.0 N群のラットの体重が減少していた。このことから、本研究でも関節固定を行ったラットは固定期間中のラットの活動量が減少したことで体重減少が起こったと考えられる。

正常なラットは成長に伴って体重が増加していく⁶⁵。本研究において関節固定を解除した後は固定群・0.3 N群・3.0 N群のラット体重が増加している。このことから、固定解除後の固定群・0.3 N群・3.0 N群の体重増加は成長によるものと考えられる。

関節可動域の結果について

Moseley et al.⁶¹は足関節の骨折後にギプス固定が実施され、関節拘縮が発生した患者に対し、1日12回30秒間のストレッチングを4週間実施したところ、関節拘縮が改善しなかったことを報告している。一方でWeng et al.⁶²は変形性膝関節症により、関節拘縮が発生した患者に対し、1日10回30秒間のストレッチングを8週間実施したところ、関節拘縮が改善したことを報告している。Moseley et al.⁶¹とWeng et al.⁶²の報告では得られた結果が異なっているが、対象がヒトであり、対象の疾患や日々の活動量、体格、性別など様々な要素が異なっているため、この2つの研究を単純に比較できない。本研究ではラットを対象に関節拘縮に対し、ストレッチングを行うことで0.3 N群と3.0 N群ともに関節拘縮の改善を認めた。本研究の対象はラットを用いており、対象の条件を統一して検討が可能であるため、単純に1日10回30秒間のストレッチングが関節拘縮に及ぼす影響について

検討できた。その結果、臨床に即した方法である1日10回30秒間のストレッチングは関節拘縮に対して関節可動域改善の効果があると考えられた。

井上ら³⁴⁾はラットの足関節を対象に4週間の関節固定を行って発生した関節拘縮に対して、1日30分間、回転式モーターを用いて最大底屈位から最大背屈位までの間歇的ストレッチングを1週間行ったところ、ストレッチングを行わなかった群の背屈可動域が 114.9 ± 14.3 度であったのに対し、ストレッチングを行った群の背屈可動域が 127.1 ± 7.5 度であり、ストレッチングによる関節拘縮改善効果があったことを報告している。本研究において、背屈可動域は固定群が 67.0 ± 7.2 度であったのに対し、0.3 N群が 99.9 ± 9.9 度、3.0 N群が 85.8 ± 5.5 度であった。井上ら³⁴⁾の報告と本研究結果を詳細に比較すると、関節可動域の改善は井上ら³⁴⁾が約13度だったのに対し、本研究が0.3 N群で約32.9度、3.0 N群で約18.8度であり、本研究のストレッチングの方が関節可動域の改善効果が大きかったと言える。

井上ら³⁴⁾の報告と本研究結果で関節可動域改善の程度が異なった原因について考察する。Williams et al.¹¹⁾は関節拘縮の発生を予防するのに1日30分間のストレッチングが効果的であると報告している。このWilliams et al.¹¹⁾の報告は関節拘縮改善の研究でも参考にされており、関節拘縮改善に対するストレッチングを検討した井上ら³⁴⁾の報告でも参考にされている。また、陳之内ら¹³⁾はラットを対象に1週間の関節固定を行い、関節固定期間中に1日1回持続的ストレッチングを行い、ストレッチング時間について10分間・30分間・60分間を比較したところ、30分間のストレッチング時間が最も関節拘縮の予防効果があり、より長時間の60分間のストレッチング時間で筋線維に損傷が起こったことを報告している。井上ら³⁴⁾と我々は間歇的なストレッチングを行っており、ストレッチングを行った時間が井上ら³⁴⁾で1日30分間に対し、本研究で1日10分間であった。このことから、間歇的な

ストレッチングの時間は、Williams et al.¹¹⁾や陳之内ら¹³⁾が推奨している 30 分間よりも、より短時間のストレッチングの方が関節可動域改善に効果があることが考えられた。

西田ら⁴³⁾は関節拘縮の発生予防について検討するため、ラットの足関節を対象に 2 週間の関節固定を行い、固定期間中に毎日間歇的ストレッチングと持続的ストレッチングをそれぞれ 30 分間行ったところ、持続的ストレッチングを行う方が間歇的ストレッチングを行うよりも関節可動域が改善したが、筋線維の損傷が著明であったと報告している。前章では 1 回の持続的ストレッチングに加える力として 0.3 N と 3.0 N を経時的に比較したところ、ストレッチング 7 日後で 0.3 N でのストレッチングが関節可動域を改善させた一方、3.0 N でのストレッチングで関節可動域が悪化しており、筋線維の損傷も 3.0 N 群の方が著明であった。本研究では間歇的ストレッチングを行った結果、0.3 N 群と 3.0 N 群ともに関節可動域が改善していたが、0.3 N 群の方が関節可動域の改善が大きく、筋線維の損傷も 3.0 N 群の方が著明であった。1 回のストレッチングを行った前章と毎日ストレッチングを行った本研究を単純に比較ができないが、前章では持続的ストレッチングが行われており、西田ら⁴³⁾の報告から、本研究の間歇的ストレッチングを行った結果よりも筋線維の損傷が著明に発生していたと考えられる。このことから、間歇的ストレッチングは持続的ストレッチングに比べて 3.0 N の力を加えても筋線維の損傷が少なく、関節可動域を改善させたと考えられた。また、0.3 N の力は筋線維の形態に損傷がなく、関節可動域も改善していたことから、今回臨床に即した形でのストレッチングとして用いた間歇的ストレッチング方法でも関節可動域改善に適していることがわかった。

ヒラメ筋柔軟性の結果について

筋に対するストレッチングは筋長の延長やタンパク質合成の促進や筋線維直径増大が起ることが報告されている^{35,66,67)}。本研究において、ヒラメ筋の柔軟性は 0.3 N 群で改善

した。このことから、0.3 Nの力は筋長の延長や筋線維直径の増大などが起こり、ヒラメ筋の柔軟性が改善したと考えられた。

一方で、骨格筋に損傷が起こったとき、骨格筋は筋内の結合組織を増加し、柔軟性を低下することが報告されている^{68,69)}。本研究において、ヒラメ筋の柔軟性は3.0 N群で悪化していた。このことから、3.0 Nの力は骨格筋の損傷が起こり結合組織の増加などが起こったことでヒラメ筋の柔軟性が悪化したと考えられた。

関節可動域とヒラメ筋柔軟性の比較について

骨格筋に対して損傷が加わると炎症反応が出現し、骨格筋に浮腫や筋節数・筋長の減少が起こると報告されている^{44,45)}。本研究では、0.3 N群のヒラメ筋柔軟性が改善していたが、3.0 N群のヒラメ筋柔軟性が悪化しており、ヒラメ筋内の浮腫も確認された。また、本研究の関節可動域結果は0.3 Nの方が3.0 Nよりも改善していた。このことから、0.3 N群はヒラメ筋の柔軟性を改善し、関節可動域改善を促進したと考えられた。一方、3.0 Nの力はヒラメ筋を損傷させ、ヒラメ筋の柔軟性を悪化させたことで関節可動域を減少させたと考えられた。

灰田ら⁵⁾は、関節拘縮に関与する組織について、皮膚が約19%、骨格筋が約43%、関節包が約30%の割合で関節可動域に関与していると報告している。本研究において、3.0 N群はヒラメ筋柔軟性が悪化していたが、関節可動域が改善していた。灰田ら⁵⁾の報告から、本研究の3.0 N群における関節可動域の改善は、皮膚や関節包の柔軟性が改善したことによるものであると考えられた。

リハビリテーションの臨床において、発生した関節拘縮に対して体重と同程度の力を用いたストレッチングは経験的に多く行われている。また、ストレッチングに用いる力も治

療者の主観に基づいて決定されることが多い。本研究において、体重と同程度の力はストレッチングに用いると関節可動域が改善していても、筋の柔軟性が悪化する傾向を見出した。また、本研究は臨床的に実現可能なストレッチング方法として正常な関節を最低限度で動かす力を加えることで関節可動域・筋の柔軟性が改善することを明らかにした。

5-5 小括

本研究の目的は発生した関節拘縮に対し、これまでの検討で明らかにしたストレッチングに加える力を臨床に即した形で行い、その影響を検討することであった。ラットを対象とし、4週間の関節固定を行った後に正常な関節を最低限度で動かせる力でストレッチングを行う0.3 N群、体重と同程度の力でストレッチングを行う3.0 N群に分けた。ストレッチングは臨床で実現可能な範囲で1日30秒のストレッチングを10回、7日間実施した。その結果、0.3 N群は足関節背屈可動域、ヒラメ筋柔軟性が増大していた。一方で3.0 N群は足関節背屈可動域が改善していたが、ヒラメ筋柔軟性や筋線維の形態は悪化していた。このことから、正常な関節を最低限度で動かせる力は発生した関節拘縮に対するストレッチングに適した力であることが明らかになった。一方で体重と同程度の力は発生した関節拘縮に対し、骨格筋に悪影響を与えることが明らかになった。

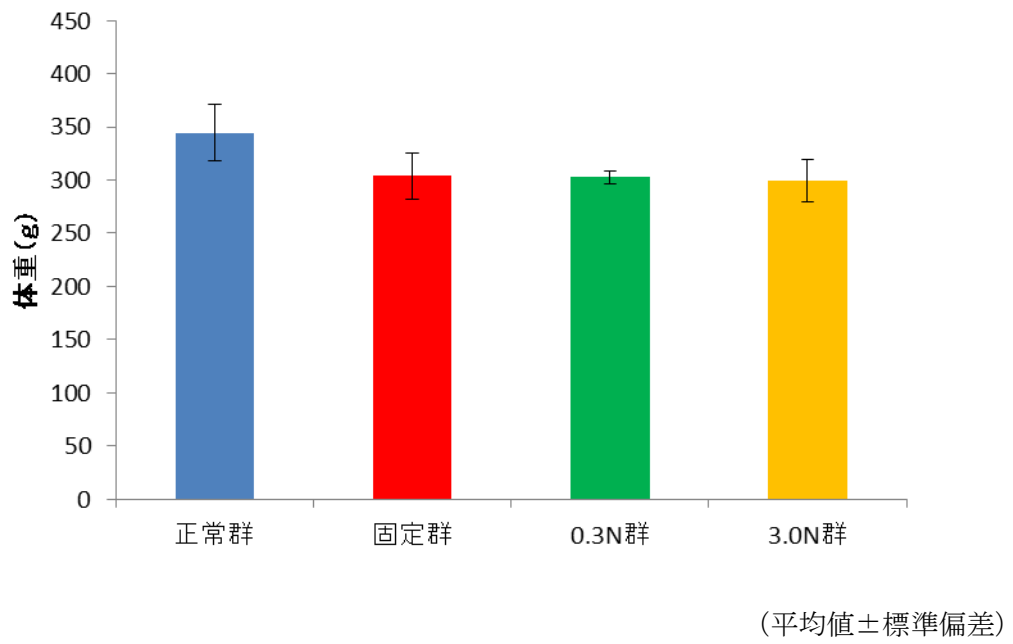


図 5 - 1

固定終了後における各群の体重

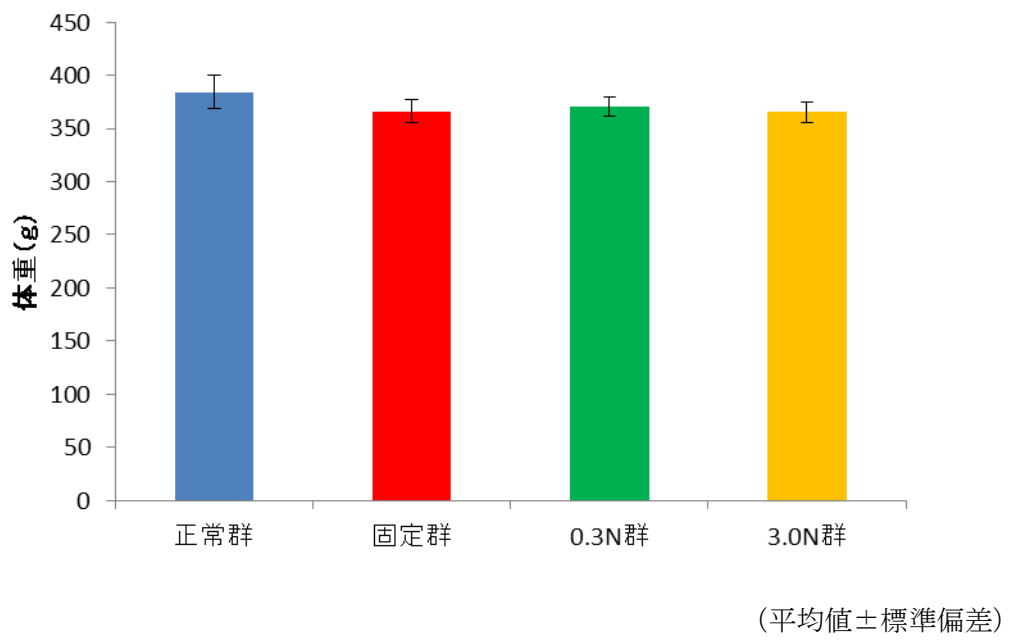


図 5 - 2

ストレッチング期間終了後における各群の体重

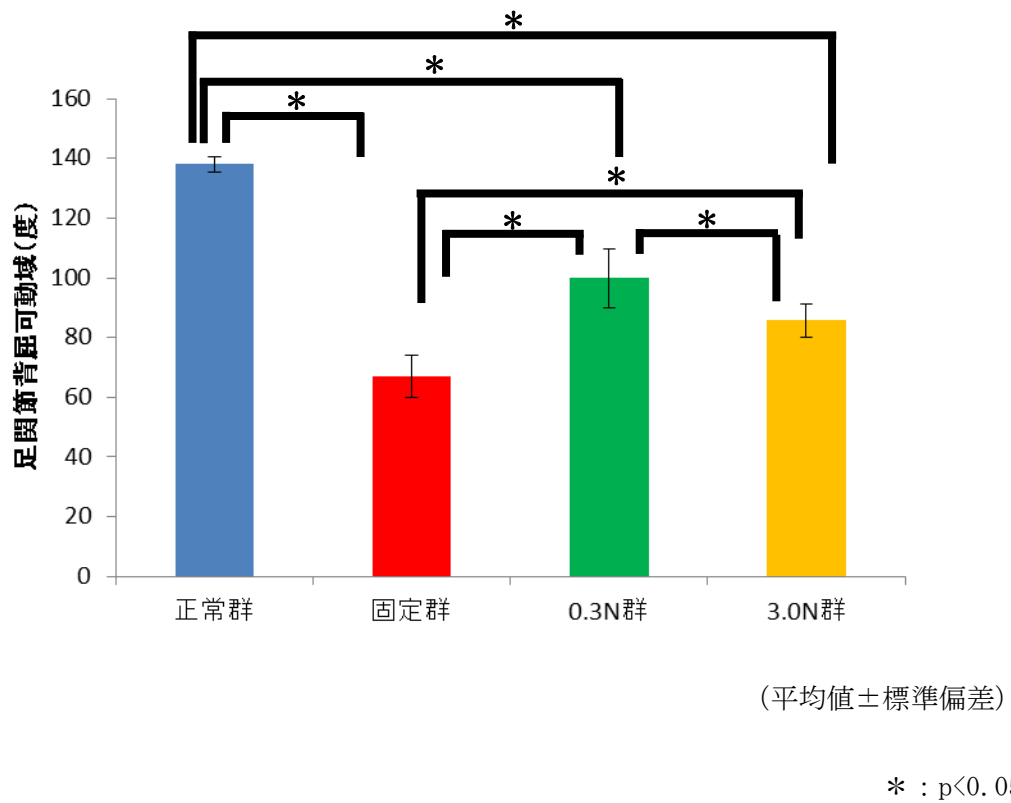


図 5 - 3

各群の足関節背屈可動域

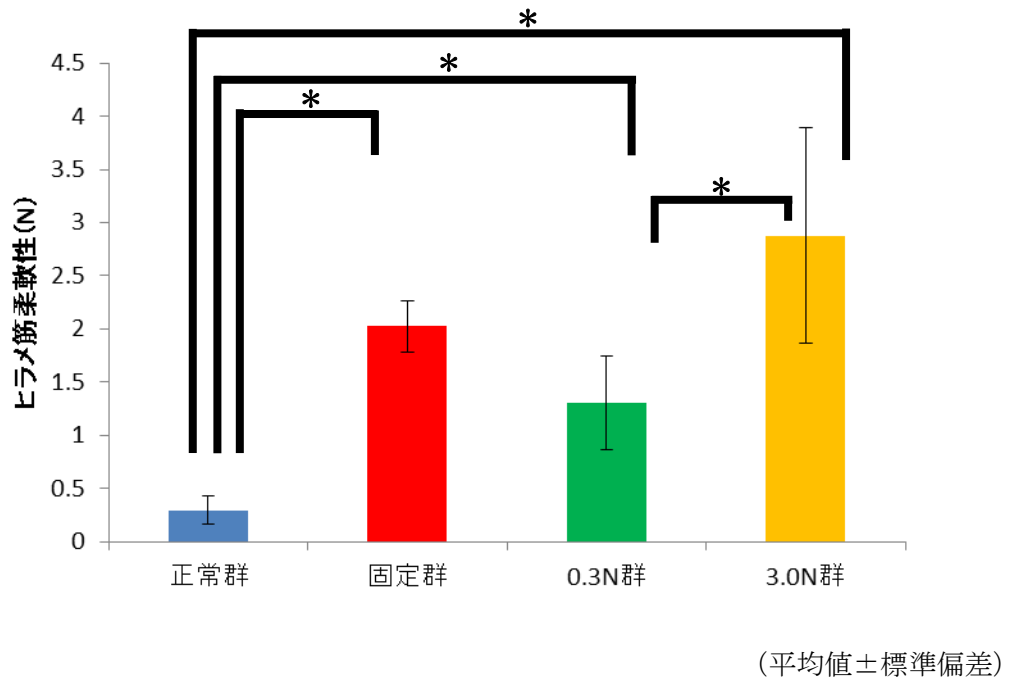


図 5 - 4

各群のヒラメ筋柔軟性

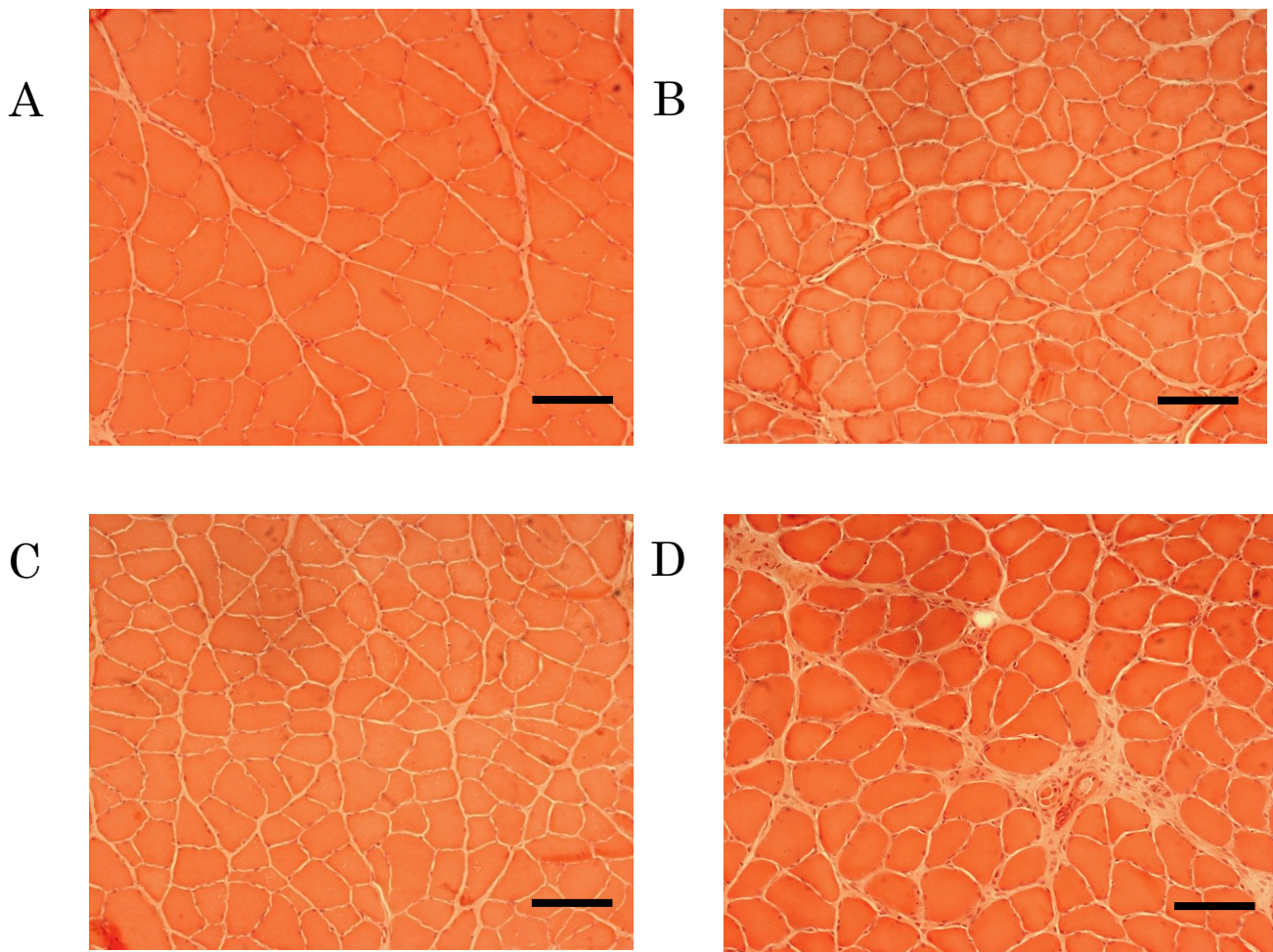


図5-5 各群のヒラメ筋横断面 (HE染色) (Bar100 μ m)

A: 正常群 B: 固定群 C: 0.3 N群 D: 3.0 N群

第 6 章

総括

第1章は、本論文の緒言として関節拘縮に対するストレッチングの影響について概要を述べた。先行研究において、ストレッチングは関節可動域の改善を起こすことが報告されているが、同時に筋の柔軟性を検討している先行研究はなく、筋の柔軟性を改善させるかは検討されていない現状について説明した。本研究の目的は、関節拘縮の改善を目的としてストレッチングに加える力を定量的に示す手法を取り入れ、特に骨格筋の柔軟性の変化に着目し、ストレッチングが関節拘縮に与える影響について検討することとした。

第2章では関節拘縮のモデルラットの作成について述べた。モデルラットは先行研究を参考に、足関節を最大底屈位で4週間の関節固定を行って作成した。結果は足関節背屈可動域制限が見られ、可動域制限の原因となるヒラメ筋に柔軟性低下が発生していた。以上のことより、本章で行った関節拘縮のモデルラットは足関節背屈可動域の低下とヒラメ筋の柔軟性低下が起こっており、先行研究と同様に関節拘縮を発生させることを確認することができた。

第3章では作成した関節拘縮のモデルラットに対して、統一した条件でストレッチングを行い、加える力について比較を行った。正常な関節である正常群、4週間の関節固定を行う固定群、関節固定の後に正常な関節を最低限度で動かせる力でストレッチングを行う0.3 N群、関節固定の後に体重と同等の力でストレッチングを行う3.0 N群に分けた。実験終了後、4群の足関節背屈可動域とヒラメ筋柔軟性を測定した。その結果、0.3 N群よりも3.0 N群の方が足関節背屈可動域とヒラメ筋の柔軟性が改善していた。このことから、本章では体重と同等の力を加えることが関節可動域とヒラメ筋の柔軟性が改善することを明らかにした。

第4章では第3章で行ったストレッチングの経時的な変化について検討を行った。関節拘縮のモデルラットに対して、ストレッチングを行った後、ストレッチング直後・3日後・7日後に評価を行った。その結果、ストレッチング直後は3.0 N群が0.3 N群よりも足関節

背屈可動域，ヒラメ筋柔軟性が増大していた。しかし3日後は0.3 N群が3.0 N群よりも足関節背屈可動域，ヒラメ筋柔軟性が増大していた。また，3.0 N群は3日以降に筋線維内のタイプIコラーゲン線維が増加しており，ヒラメ筋柔軟性や足関節背屈可動域低下に影響したと考えられた。本章は先行研究で述べられているようにストレッチングにより関節可動域改善の効果があり，その原因の1つが筋の柔軟性であることを初めて裏付けるものとなった。また，体重と同程度の力で関節可動域やヒラメ筋の柔軟性悪化が起こり，ストレッチングに適していないことが明らかになった。一方，正常な関節を最低限度で動かすことのできる力で関節可動域やヒラメ筋の柔軟性が改善しており，ストレッチングに適していることが明らかになった。

第5章では関節拘縮に対し，臨床に即した形でストレッチングを行い，その影響を検討した。関節拘縮のモデルラットに対して，正常群，固定群，0.3 N群，3.0 N群に分けた。ストレッチングの方法は臨床で実現可能な範囲で1日30秒のストレッチングを10回，7日間実施した。その結果，0.3 N群は足関節背屈可動域，ヒラメ筋柔軟性が増大していた。一方で3.0 N群は足関節背屈可動域が改善していたが，ヒラメ筋柔軟性や筋線維の形態は悪化していた。このことから，正常な関節を最低限度で動かせる力は発生した関節拘縮を改善するためのストレッチングに適した力であることが明らかになった。一方で体重と同程度の力は発生した関節拘縮に対し，骨格筋に悪影響を与えることが明らかになった。

謝辭

本研究を学位論文としてまとめるのにあたり、長きにわたり多大なるご指導を賜りました公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科生命システム科学専攻、公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科保健福祉学専攻兼務 小野武也教授に厚く御礼申し上げます。

また、大変お忙しい中、副査として本学位論文へのご高見を賜るとともに、ご教示を頂きました公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科生命システム科学専攻、公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科保健福祉学専攻兼務 沖貞明教授、公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科生命システム科学専攻 堀内俊孝教授、公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科生命システム科学専攻 斉藤靖和准教授に心より御礼申し上げます。

また、本研究に対して多くのご協力・ご助言を頂きました公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科生命システム科学専攻 小野研究室の相原一貴氏、佐藤勇太氏、公立大学法人県立広島大学大学院総合学術研究科保健福祉学専攻 小野研究室の松本智博氏に心より感謝いたします。

引用論文

- 1) 寺山和雄, 広畑和志 : 標準整形外科学 第6版. 医学書院, 東京, 1996, pp28-39.
- 2) 金村尚彦, 森山英樹, 木藤伸宏・他 : (1) 関節可動域運動の実際 拘縮の治療法. リハビリナース, 2008, 1(5) : 464-473.
- 3) 沼田憲治, 金承革, 櫻井愛子・他 : 理学療法士実態調査報告-2005年6月実施-. 理学療法学, 2006, 33(6) : 338-352.
- 4) Trudel G, Uthoff HK : Contractures secondary to immobility: is the restriction articular or muscular? An experimental longitudinal study in the rat knee. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2000, 81(1) : 6-13.
- 5) 灰田信英, 細正博 : 拘縮の病理と病態. 奈良勲 (編) : 拘縮の予防と治療. 医学書院, 東京, 2003, pp18-36.
- 6) 沖田実 : 関節可動域制限の病態生理. 理学療法, 2003, 20(6) : 603-611.
- 7) Tabary JC, Tabary C Tardieu C, et al. : Physiological and structural changes in the cat's soleus muscle due to immobilization at different lengths by plaster casts. The Journal of Physiology, 1972, 224(1) : 231-244.
- 8) 沖貞明, 柴田大法, 松田芳郎・他 : 不動性萎縮筋における筋性拘縮の発生と進行. 運動療法と物理療法, 1998, 9(1) : 38-41.
- 9) Light N, Champion AE : Characterization of muscle epimysium, perimysium and endomysium collagens. The Biochemical Journal, 1984, 219(3) : 1017-1026.
- 10) Järvinen TA, Józsa L, Kannus P, et al. : Organization and distribution of intramuscular connective tissue in normal and immobilized skeletal muscles. An immunohistochemical, polarization and scanning electron microscopic study. Journal of Muscle Research and Cell Motility, 2002, 23(3) : 245-54.

- 1 1) Williams PE : Use of intermittent stretch in the prevention of serial sarcomere loss in immobilized muscle. *Annals of the Rheumatic Diseases*, 1990, 49(5) : 316-317.
- 1 2) 赤居正美 : 関節拘縮—その予防・治療について—. *リハビリテーション医学*, 2003, 40(1) : 76-80.
- 1 3) 陳之内将志, 小野武也, 沖貞明・他 : 関節可動域制限を予防するために必要な持続的伸張運動時間の検討—ラットにおける実験的研究—. *理学療法科学*, 2008, 23(1) : 169-173.
- 1 4) Cação-Benedini LO, Ribeiro PG, Gomes AR, et al. : Remobilization through stretching improves gait recovery in the rat. *Acta Histochem*, 2013, 115(5) : 460-469.
- 1 5) 武村啓住, 細正博, 由久保弘明・他 : ラット膝関節 2 週固定後の拘縮に対するストレッチが関節固定成体に及ぼす病理組織学的影響. *理学療法学*, 2004, 31(1) : 76-85
- 1 6) Cornachione AS, Cação-Benedini LO, Benedini-Elias PC, et al. : Effects of 40min of maintained stretch on the soleus and plantaris muscles of rats applied for different periods of time after hindlimb immobilization. *Acta Histochemica*, 2013, 115(5) : 505-511.
- 1 7) Flowers KR, Pheasant SD : The use of torque angle curves in the assessment of digital joint stiffness. *Journal of Hand Therapy*, 1988, 1(2) : 69-74.
- 1 8) Ono T, Oki S, Shimizu ME, et al. : The Influence of Spinal Cord Injury and Peripheral Nerve Injury on Muscle Elasticity in Contractures of the Soleus Muscle of Rat. *Journal of Physical Therapy Science*, 2006, 18(1) : 1-3.

- 1 9) Goldspink G, Tabary C Tabary JC, et al. : Effect of denervation on the adaptation of sarcomere number and muscle extensibility to the functional length of the muscle. The Journal of physiology, 1974, 236(3) : 733-742.
- 2 0) Akesson WH : An experimental study of joint stiffness. The Journal of Bone & Joint Surgery, 1961, 43(7) : 1022-1034.
- 2 1) Ono T, Tsuboi M, Oki S, et al. : Preliminary report: Another perspective on the effect of prolonged Stretching for joint contractures. Journal of Physical Therapy Science, 2007, 19(1) : 97-101.
- 2 2) Evans EB, Eggers GWN, Butler JK, et al. : Experimental immobilization and remobilization of rat knee joints. The Journal of Bone & Joint Surgery, 1960, 42(5) : 737-758.
- 2 3) 八百板沙 : 長期固定による膝関節拘縮の発生と修復に関する実験的研究. 日本整形外科学会雑誌, 1966, 40 : 431-453.
- 2 4) Trudel G, Kilborn SH, Uhthoff HK : Bone growth increases the knee flexion contracture angle: A study using rats. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2001, 82(5) : 583-588.
- 2 5) Oki S, Ono T, Shimizu ME, et al. : Contribution of articular and muscular structures to the limitation of range of motion after joint immobility : An experimental study on the rat ankle. Biomedical Research, 2008, 19 : 78-81.
- 2 6) Ono T, Oki S, Umei N, et al. : Effect of an Intermittent Eight-hour Joint Fixation Period on Joint Contractures in Rats. Journal of Physical Therapy Science, 2014, 26(1) : 53-55.

- 27) 市橋則明, 武富由雄, 金子翼・他: 膝関節可動域制限に関与する皮膚と筋の影響. 理学療法学, 1991, 18(1) : 45-47.
- 28) 田坂厚志, 小野武也, 沖貞明・他: ラット足関節背屈可動域測定法の信頼性に関する検討. 理学療法科学, 2014, 29(1) : 143-145.
- 29) 小野武也, 富田瑛博, 沖貞明・他: 一日30分の持続伸張がラットの足関節拘縮の発生子予防に与える影響. 理学療法科学, 2010, 25(6) : 947-949.
- 30) 宮前珠子, 小川恵子: 関節可動域テストの信頼性. 理学療法と作業療法, 1978, 12(2) : 139-144.
- 31) 岡本眞須美, 沖田 実, 加須屋茜・他: 不動期間延長に伴うラット足関節可動域制限因子の変化—軟部組織(皮膚・筋)と関節構成体由来の制限因子について—. 理学療法学, 2004, 31(1) : 36-42.
- 32) Salter N: Methods of measurement of muscle and joint function. The Journal of Bone and Joint Surgery, 1955, 37(3) : 474-491
- 33) 平野幸伸, 山本武, 櫻井博紀・他: 理学療法におけるセラピューティック・ストレッチの意義と留意点. 理学療法, 2010, 27(8) : 945-954.
- 34) 井上貴行, 沖田実, 高橋裕司・他: 不動終了後のラットヒラメ筋に対する間歇的伸張運動が関節可動域と筋線維におよぼす影響. 理学療法学, 2007, 34(1) : 1-9.
- 35) 沖貞明, 大塚彰, 金井秀作・他: 関節可動域維持に必要な関節可動域運動の検討—ラットにおける実験的研究—. 運動・物理療法, 2004, 15(4) : 312-316.
- 36) Bohannon RW, Tiberio D, Zito M: Effect of five minute stretch on ankle dorsiflexion range of motion. Journal of Physical Therapy Science, 1994, 6 : 1-8.

37) Mark LP, Dennis R, John AF, et al: Non-uniform distribution of strain during stretch of relaxed skeletal muscle fibers from rat soleus muscle. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*, 2011, 32(1) : 39-48.

38) 須釜聡, 立野勝彦, 灰田信英: 関節固定が腱組織コラーゲンの可溶性に及ぼす影響—ラットアキレス腱におけるコラーゲンの生化学的分析—. *理学療法学*, 1995, 22(5) : 196-201.

39) 須釜聡, 立野勝彦, 灰田信英: 関節固定が筋および腱組織コラーゲンの可溶性に及ぼす影響—ラットの筋・腱組織におけるコラーゲンの生化学的分析—. *理学療法学*, 1996, 23(2) : 72-79.

40) Okita M, Yoshimura T, Nakano J, et al. : Effects of reduced joint mobility on sarcomere length, collagen fibril arrangement in the endomysium, and hyaluronan in rat soleus muscle. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*, 2004, 25 : 159-166.

41) De Weijer VC, Gorniak GC, Shamus E: The effect of static stretch and warm-up exercise on hamstring length over the course of 24 hours. *The Journal of Orthopaedics and Sports Physical Therapy*, 2003, 33(12): 727-733.

42) 赤居正美: 関節拘縮—その予防・治療について—. *リハビリテーション医学*, 2003, 40(1): 76-80.

43) 西田まどか, 沖田実, 福田幸子・他: 持続的伸張運動と間歇的伸張運動が拘縮と筋線維におよぼす影響—関節固定法と後肢懸垂法を組み合わせたラットの実験モデルによる検討—. *理学療法科学*, 2004, 31(5): 304-311.

44) Okamoto M, Atsuta Y: Cartilage degeneration is associated with augmented chemically-induced joint pain in rats; a pilot study. *Clinical Orthopaedics and*

Related Research, 2010, 468(5): 1423-1427.

4 5) Huet de la Tour E, Tardieu C, Tabary JC, et al.: Decrease of muscle extensibility and reduction of sarcomere number in soleus muscle following a local injection of tetanus toxin. Journal of the Neurological Science, 1979, 40(2-3): 123-131.

4 6) Honda Y, Sakamoto J, Nakano J, et al.: Upregulation of interleukin-1 β /transforming growth factor- β 1 and hypoxia relate to molecular mechanisms underlying immobilization-induced muscle contracture. Muscle Nerve, 2015, 52(3): 419-427.

4 7) Tanaka M, Kusuda M, Abe K, et al.: Effects of iron deficiency anemia on growth rate of rats. 形態・機能, 2009, 7(2): 67-75.

4 8) 榑千磨, 沖貞明, 小野武也・他: 関節拘縮の自然回復に関する実験的研究—中間位固定のラット足関節を用いた検討—. 運動療法と物理療法, 2012, 23(1): 95-99.

4 9) Lannin NA, Cusick A, McCluskey A, et al.: Effects of splinting on wrist contracture after stroke: a randomized controlled trial. Stroke, 2007, 38(1): 111-116.

5 0) 渡邊昌規, 細正博, 由久保弘明・他: 拘縮に対するストレッチが関節包に及ぼす病理組織学的影響—ラット膝関節4週間固定モデルを用いた検討—. 理学療法科学, 2009, 24(3): 403-409.

5 1) 渡邊昌規, 小島聖, 日比野至・他: 関節可動域制限に対するストレッチおよびモビライゼーションの効果—ラット膝関節不動化モデルを用いた検討—. 名古屋学院大学論集; 医学・健康科学・スポーツ科学篇, 2012, 1(1): 19-25.

- 5 2) Palmer ML, Claflin DR, Faulkner JA, et al. : Non-uniform distribution of strain during stretch of relaxed skeletal muscle fibers from rat soleus muscle. *Journal of Muscle Research and Cell Motility*, 2011, 32(1): 39-48.
- 5 3) Nonaka I, Takagi A, Ishiura S, et al. : Pathophysiology of muscle fiber necrosis induced by bupivacaine hydrochloride (Marcaine). *Acta Neuropathologica*, 1983, 60(3-4) : 167-174.
- 5 4) Kasper CE, White TP, Maxwell LC: Running during recover from hindlimb suspension induces transient muscle injury. *Journal of Applied Physiology*, 1990, 68: 533-539.
- 5 5) Umei N, Ono T, Oki S, et al. : Preventive effects of antioxidants and exercise on muscle atrophy induced by ischemic reperfusion. *Journal of Physical Therapy Science*, 2014, 26(12): 1891-1893.
- 5 6) 白田茂 : 筋力低下に対する過用に配慮した理学療法. *PT ジャーナル*, 2003, 37(6) : 503-506.
- 5 7) Jozsa L, Kannus P, Thoring J, et al. : The effect of tenotomy and immobilization on intramuscular connective tissue. A morphometric and microscopic study in rat calf muscles. *The Journal of Bone and Joint Surgery*, 1990, 72(2): 293-297.
- 5 8) Hibino I, Okita M, Inoue T, et al. : Effect of Immobilization on Insoluble Collagen Concentration and Type I and Type III Collagen Isoforms of Rat Soleus Muscle. *Journal of Japanese Physical Therapy Association*, 2008, 11(1): 1-6.
- 5 9) 友利幸之介, 小砂哲太郎, 古関友美・他 : 不動がラットヒラメ筋におけるタイプ I ・ III コラーゲン mRNA の発現量に及ぼす影響. *日本作業療法研究学会雑誌*, 2009, 12(1): 11-15.

- 6 0) 鈴木重行, 井上貴行, 坂野裕洋・他:セラピューティック・ストレッチングの適応となる筋の病態生理学. 理学療法, 2010, 27(8): 955-966.
- 6 1) Moseley AM, Herbert RD, Nightingale EJ, et al.: Passive stretching does not enhance outcomes in patients with plantarflexion contracture after cast immobilization for ankle fracture: a randomized controlled trial. Archives of Physical Medicine and Rehabilitation, 2005, 86(6): 1118-1126.
- 6 2) Weng MC, Lee CL, Chen CH, et al.: Effect of different stretching techniques on the outcomes of isokinetic exercise in patients with knee osteoarthritis. The Kaohsiung Journal of Medical Sciences, 2009, 25(6): 306-315.
- 6 3) 西川彰, 西尾俊亮, 西川晃子・他:骨折を伴う外固定が関節拘縮と廃用性筋萎縮に及ぼす影響. 体力科学, 2012, 61(1): 95-101.
- 6 4) 山本綾, 古島秦子, 長谷川多美子・他:ラット足関節不動化による活動制限は傷みを促進する. 理学療法学, 2009, 36(6): 305-311.
- 6 5) Tanaka M, Kusuda M, Abe K, et al.: Effects of iron deficiency anemia on growth rate of rats. 形態・機能, 2009, 7(2): 67-75.
- 6 6) Goldspink G: Changes in muscle mass and phenotype and the expression of autocrine and systemic growth factors by muscle in response to stretch and overload. J Anat, 1999, 194(3): 323-334.
- 6 7) Cornachione AS, Cacao-Benedini LO, Benedini-Elias PC, et al.: Effects of 40min of maintained stretch on the soleus and plantaris muscles of rats applied for different periods of time after hindlimb immobilization. Acta Histochem, 2013, 115(5): 505-511.
- 6 8) Jozsa L, Kvist M, Kannus P, et al.: The effect of tenotomy and immobilization

on muscle spindles and tendon organs of the rat calf muscles. A histochemical and morphometrical study. *Acta Neuroathol*, 1988, 76(5): 465-470.

6 9) Williams PE, Goldspink G: Connective tissue changes in immobilized muscle. *J Anat*, 1984, 138(2): 343-350.