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—

Effect of Prolonged Stretching on Prevention of Range of Motion Limitation in Rats

陳之内将志¹⁾ 小野 武也²⁾ 沖 貞明²⁾ 梶原 博毅²⁾
金井 秀作²⁾ 長谷川正哉³⁾ 坂口 顕⁴⁾ 島谷 康司²⁾
清水ミシェル・アイズマン²⁾ 大塚 彰²⁾

MASASHI JINNOUCHI, PT¹⁾, TAKEYA ONO, PT, PhD²⁾, SADAOKI OKI, MD, PhD²⁾, HIROKI KAJIHARA, MD, PhD²⁾,
SHUSAKU KANAI, PT, PhD²⁾, MASAKI HASEGAWA, PT³⁾, AKIRA SAKAGUCHI, PT⁴⁾, KOJI SHIMATANI, PT²⁾,
MICHELE EISEMANN SHIMIZU, PhD, RPT²⁾, AKIRA OTSUKA, PT, PhD²⁾

¹⁾ Nozomi Orthopaedic Clinic: 1182-1 Sukezane, Saijyouchou, Higashihiroshima-city, Hiroshima 739-0021, Japan.
TEL +81 82-422-6000

²⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health and Welfare, Prefectural University of Hiroshima

³⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Medicine and Health, University of Kinjo

⁴⁾ Department of Physical Therapy, School of Rehabilitation, Hyogo University of Health Sciences

Rigakuryoho Kagaku 23(1): 169-173, 2008. Submitted Aug. 9, 2007. Accepted Oct. 3, 2007.

ABSTRACT: The purpose of this study was to examine the amount of stretch time necessary for preventing ROM limitation and morphologic changes in muscles. Thirty-five 9-week-old female Wistar rats were divided into 5 groups: group a control (n=7), a group with ankles immobilized for 1 week (n=7), and groups that had the casts removed daily and the foot held in dorsiflexion for periods of 10 minutes (n=7), 30 minutes (n=7), and 60 minutes (n=7). Prolonged stretching had the effect of preventing the generation of ROM limitation. In addition, 30 minutes prolonged stretching was the most effective. Moreover, morphological phenomena suggest that more than 30 minutes of prolonged stretching may cause muscle fiber weakness.

Key words: ROM limitation, prolonged stretching, contraction bands

要旨: 本研究は、関節可動域制限発生の予防に必要な持続的伸張運動時間を関節角度と筋の形態学的な変化から検討した。実験動物には9週齢のWistar系雌ラット35匹を正常群7匹と足関節を最大底屈位で1週間ギプス固定した固定群7匹、1日1回ギプスを除去し持続的伸張運動を実施した伸張群21匹に振り分けた。さらに伸張群は10分、30分、60分の伸張時間の違いによって7匹ずつ振り分けた。結果は、関節角度の変化から見ると、30分の持続的伸張運動が最も効果的に関節可動域制限の発生を抑制することができた。また筋の形態学的な変化から見ると、30分を超える持続的伸張運動では筋線維を脆弱化させる可能性が示唆された。

キーワード: 関節可動域制限, 持続的伸張運動, contraction bands

¹⁾ のぞみ整形外科クリニック：広島県東広島市西条町助実1182-1（〒739-0021）TEL 082-422-6000

²⁾ 県立広島大学 保健福祉学部理学療法学科

³⁾ 金城大学 医療健康学部理学療法学科

⁴⁾ 兵庫医療大学 リハビリテーション学部理学療法学科

受付日 2007年8月9日 受理日 2007年10月3日

I. はじめに

関節可動域制限の発生を予防するために理学療法士は持続的伸張運動を用いることが多い¹⁾。しかし、これまでの報告²⁻⁶⁾によると、関節可動域制限の発生を完全に予防できる持続的伸張運動の時間については、未だ統一された結果が得られていない。その原因は、持続的伸張運動時に加える力が一定でない可能性があること、また効果判定に用いる関節可動域測定において加える力が明確でないことなどが考えられる。関節角度は加える力を増やすと増加し、加える力を減らせば減少する⁷⁾。このことから持続的伸張時や関節可動域測定時に加える力が一定でなければ、その影響が測定結果に反映されることになる。そのため持続的伸張運動において効果的な伸張時間を検討するためには、加える力を一定にして行う必要がある。

一方、過度な運動や不適切な運動は筋損傷を生じさせる⁸⁾。これは持続的伸張運動を行う際にも、その方法を誤って実施すると筋線維に損傷をきたす可能性を示唆している。よって、持続的伸張運動による関節可動域制限発生の予防効果を検討するためには関節角度の変化だけでなく、筋の損傷についても着目する必要がある。

本研究の目的は、持続的伸張運動時と関節可動域測定時に加える力を一定にして持続的伸張運動を行い、関節可動域制限の発生を予防するために必要な実施時間を関節角度と筋の形態学的変化から検討することである。

II. 対象と方法

実験動物には9週齢、体重183～238 g (平均 211 ± 13.8 g) のWistar系雌ラット35匹を用いた。これらを正常群7匹と足関節最大底屈位で大腿部からMP関節部にかけてギプス固定した固定群7匹および固定群と同様にギプス固定を行い、翌日から最終日まで1日1回ギプスを外し、持続的伸張運動を実施した伸張群21匹に振り分けた。さらに伸張群21匹はその実施時間の違いによって、10分間持続的伸張運動を実施した群7匹 (以下、10分伸張群)、30分間持続的伸張運動を実施した群7匹 (以下、30分伸張群)、60分間持続的伸張運動を実施した群7匹 (以下、60分伸張群) に振り分けた。本研究での実験期間および固定期間は1週間とした (図1)。

なお、今回の実験は、県立広島大学保健福祉学部付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諾を受けて行った。

持続的伸張運動を行う時の肢位は、まず麻酔下で右後

図1 足関節固定方法

肢を固定していた金網、ギプスを外し、その後ラットを右上側臥位にし、股関節、膝関節を最大屈曲位とした。そして持続的伸張運動は、ばね秤 (Uchida yoko CO., LTD. SA-1Ng) で足関節背屈方向へ足底に対して垂直に0.3 Nの力で押した。

足関節背屈角度は、初日と最終日の背屈角度を測定した。測定肢位は、麻酔下でラットを右上側臥位とした後、徒手にて股関節、膝関節を最大屈曲位とした。関節可動域測定時に加える力はデジタルテンションメーターを用いて0.3 Nとした。背屈角度はデジタルカメラにて垂直上方より撮影しパソコンに取り込んだ。足関節の背屈角度の測定は画像上で画像解析ソフトウェアScion imageを用いて実施した。基本軸は腓骨頭と外果を結ぶ線、移動軸は踵骨足底面に平行な線とした。そのため、足関節の背屈制限が増えた場合、角度表示は大きい値を示すことになる (図2)。

各ラットは、1週間の実験期間終了後、屠殺しヒラメ筋を摘出した。その後、筋をその中央部で2分割し、一方の筋組織をコルク上にのせたトラガントゴムに付着させ、液体窒素で冷却したイソペンタン液内で急速凍結し、クリオスタットを用いて、10 μm 厚の縦断切片を作製した。そして、形態学的観察のためHematoxylin-eosin (以下、H & E) 染色を施し、光学顕微鏡で検鏡した。その後各試料は顕微鏡用デジタルカメラにて200倍の拡大像で無作為に16枚撮影し、順次パソコンに取り込んだ。取り込んだ画像は、16枚それぞれに関して、画像に含まれる全ての筋線維数を計測し、さらにその中でcontraction bands (以下、CB) を含む筋線維数の割合を算出した。CBとは種々の原因で筋の細胞膜が損傷されると、その細胞膜を経由

図2 関節可動域測定方法

- a: 腓骨頭を示すために用いた棒で先端が腓骨頭を示している。
 b-c: 腓骨頭と外果を結ぶ線
 c-d: 踵骨足底面に平行な線
 e: 測定した角度
 f: デジタルテンションメーター

して細胞外液，特に Ca^{2+} が過剰に細胞内に侵入し，筋原線維が過収縮する病変といわれている⁹⁾。本研究では，CBをその筋原線維の過収縮の強さに応じてmild, moderate, severeの3段階に分けた。mildとは筋原線維の過収縮が軽度認められ，H&E染色像では濃い部分と薄い部分が不明瞭ながら見られるものとした。またmoderateとは，筋原線維の過収縮がmildよりも強く認められ，H&E染色像では濃い部分と薄い部分がはっきりと分かれているものとした。最後にsevereとは，明瞭な筋原線維の過収縮がみられ，過収縮と過収縮との間に筋原線維の断裂が見られるものとした（図3）。

今回の実験では，各群の初日と最終日の足関節背屈角度，CBの出現率について統計処理を行った。統計処理には統計処理ソフトウェアStatView-J5.0を使用し，群間で有意差があるかどうかをKruskal-Wallis検定によって確かめた後，有意差を認めた場合は多重比較検定にScheffe法を適用した。また，初日の足関節背屈角度と2日目以降の足関節背屈角度の比較には，Dunnett法を適用した。なお，全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。

III. 結 果

初日の足関節背屈角度の平均値と標準誤差は，正常群

図3 mild, moderate, severeなcontraction bandsの例

a: mild, b: moderate, c: severe

が $34.9 \pm 0.5^\circ$ ，固定群が $36.9 \pm 0.6^\circ$ ，10分伸張群が $35.6 \pm 0.9^\circ$ ，30分伸張群が $37.0 \pm 1.1^\circ$ ，60分伸張群が $36.0 \pm 0.8^\circ$ であった。統計処理の結果，全ての群間に有意差を認めなかった。最終日の足関節背屈角度の平均値と標準誤差は，正常群が $34.6 \pm 1.2^\circ$ ，固定群が $77.4 \pm 1.1^\circ$ ，10分伸張群が $66.3 \pm 2.1^\circ$ ，30分伸張群が $51.3 \pm 3.6^\circ$ ，60分伸張群が $63.8 \pm 2.7^\circ$ であった。統計処理の結果，固定群と10分，30分，60分伸張群は正常群よりも有意に関節可動域制限が発生した。また，10分，30分，60分伸張群は固定群よりも有意に関節可動域制限の発生を抑制することができた。さらに，10分，30分，60分伸張群に着目してみると，30分伸張群が10分伸張群と60分伸張群よりも有意に関節可動域制限の発生を抑制することができた。10分伸張群と60分伸張群の間には有意差を認めなかった（表1）。

CBは，H&E染色像で観察すると全ての群で出現していた。mildなCBの出現率の平均値と標準誤差は，正常群が $0.72 \pm 0.36\%$ ，固定群が $10.30 \pm 1.73\%$ ，10分伸張群が $5.56 \pm 1.33\%$ ，30分伸張群が $7.47 \pm 1.45\%$ ，60分伸張群が $6.19 \pm 2.00\%$ であった。統計処理の結果，固定群が正常群に比べて有意にCBが出現した。それ以外のCBの出現率には有意差を認めなかった。またmoderateなCBの出現率は，正常群が $0.05 \pm 0.05\%$ ，固定群が $18.46 \pm 3.46\%$ ，10分伸張群が $5.25 \pm 1.22\%$ ，30分伸張群が $3.15 \pm 0.86\%$ ，60分伸張群が $17.13 \pm 3.26\%$ であった。統計処理の結果，固定群と60分伸張群は正常群と10分伸張群および30分伸張群に比べて有意にCBが出現した。また，severeなCBは60分伸張群にのみ出現していた（表2）。

表1 足関節背屈角度の比較 (度)

	初日の 足関節背屈角度	最終日実験終了後の 足関節背屈角度
正常群	34.9 ± 0.5	34.6 ± 1.2
固定群	36.9 ± 0.6	77.4 ± 1.1 ^a
10 分伸張群	35.6 ± 0.9	66.3 ± 2.1 ^{a,b,c}
30 分伸張群	37.1 ± 1.1	51.3 ± 3.6 ^{a,b}
60 分伸張群	36.0 ± 0.8	63.8 ± 2.7 ^{a,b,c}

平均値±標準誤差.

^a: 正常群との有意差 ($p<0.05$), ^b: 固定群との有意差 ($p<0.05$), ^c: 30 分伸張群との有意差 ($p<0.05$).

表2 contraction bandsの出現率 (%)

	mild	moderate	severe
正常群	0.72 ± 0.36	0.05 ± 0.05	0.00 ± 0.00
固定群	10.30 ± 1.73 ^a	18.46 ± 3.46 ^a	0.00 ± 0.00
10 分伸張群	5.56 ± 1.33	5.25 ± 1.22 ^{b,c}	0.00 ± 0.00
30 分伸張群	7.47 ± 1.45	3.15 ± 0.86 ^{b,c}	0.00 ± 0.00
60 分伸張群	6.19 ± 2.00	17.13 ± 3.26 ^a	0.19 ± 0.19

平均値±標準誤差.

^a: 正常群との有意差 ($p<0.05$), ^b: 固定群との有意差 ($p<0.05$), ^c: 60 分伸張群との有意差 ($p<0.05$).

IV. 考 察

一般的に持続的伸張運動を行う場合、伸張時間は長時間行うべきであるといわれている¹⁰⁾。今回の結果でも、10分伸張群よりも30分伸張群の方が関節可動域制限の発生を抑制することが出来た。このことから30分までの伸張時間においては伸張時間が長いほど関節可動域制限発生の抑制効果があると考えられる。一方、30分以上の持続的伸張運動については60分伸張群より30分伸張群の方が関節可動域制限の発生を抑制することが出来た。つまり30分を超える伸張時間では、効果的な関節可動域制限発生の予防が期待できないものと考えられる。このように今回の結果は30分以上の伸張時間においては過去の報告^{3,10)}と異なった。その原因として、過去の研究と我々の研究で行った持続的伸張運動方法の違いがあげられる。一般的に臨床では持続的伸張運動を行う際、滑車などを用いて常に同じ力で伸張できるようにする。そこで本研究においてもバネ秤を用いて常に一定の力で伸張できるようにした。しかし、過去の研究^{2,3)}は持続的伸張運動に非伸縮性のテープを用いている。この方

法では、持続的伸張運動中に関節可動域が改善した場合、一定の力を加え続けることができない。つまり持続的伸張運動時に加える力が異なったことが過去の報告と我々の結果が異なることになった要因であると推測される。

また、我々は持続的伸張運動が筋におよぼす影響を検索するために筋損傷を示す筋の形態学的変化の1つであるCBの出現に着目した。本研究では伸張時間以外の全ての作業を同条件で行った。そのため、本研究結果で生じたCBの出現率の差は不動と伸張時間の違いにより生じたものと考えられる。固定群のCBの出現に関しては筋の不動が影響していると思われる。今回の研究から、固定群に見られたCBの成因は不明であった。しかし、筋の不動は筋毛細血管網の形態学的変化を起こし筋血流量の減少を招く^{11,12)}ことなどが、CBの成因に何らかの影響をおよぼしたものと推測される。また、10分伸張群と30分伸張群は固定群よりCBの出現率が少なかった。筋は伸張運動実施後に一時的な血流増加を示す¹³⁾。つまり10分伸張群と30分伸張群は、持続的伸張運動によって循環が改善し筋細胞膜の脆弱化を抑制することが出来たと考えられる。これらは、ギプス固定などで不動を続けた筋に対して実施される適度な筋伸張運動が筋線維に好影響を与えている可能性を示唆している。一方、60分伸張群にはsevereなCBがみられたことから、過剰なストレッチが筋の損傷を惹起した¹⁴⁾ものと推測される。

今回の伸張強度は0.3 Nとした。これは、Kottke¹⁰⁾が教科書的に足関節を背屈方向に矯正する時に加える力として報告した値を参考に、成人男性とラットの体重比から求めた値であった。しかし、この報告には根拠が示されていない。そのため、本研究で用いた持続的伸張強度については今後、検討の余地が残る。

今回我々は、関節可動域制限の発生を予防するために必要な持続的伸張運動時間について検討した。その結果、30分の持続的伸張運動は関節可動域制限の発生を完全に予防し得ないが、最も効果的であった。一方、意外にも30分を超える伸張時間では、関節可動域制限は悪化した。関節可動域運動は、一日につき複数回実施することが効果的である¹⁵⁾。そのため、今後は30分の持続的伸張運動時間を基本として一日に行う頻度、伸張強度を変えてさらに検討する必要がある。

引用文献

- 1) 嶋田智明：関節拘縮の基礎科学：その発生要因・病態ならびに理学療法アプローチの現状. 理学療法科学, 1994, 21(2): 86-89.
- 2) 中田 彩, 沖田 実, 吉村俊朗・他：持続的身長運動の実施

- 時間の違いが関節拘縮の進行抑制効果に及ぼす影響. 理学療法学, 2002, **29**(1): 1-5.
- 3) Williams PE: Use of intermittent stretch in the prevention of serial sarcomere loss in immobilized muscle. *Ann Rheum Dis*, 1989, **49**(5): 316-317.
- 4) 小野武也, 伊橋光二, 鈴木幹男・他: 脳血管障害患者の麻痺側足関節における底背屈運動と可動域制限発生との関係—発症後1ヶ月以内の定量的検討—. 理学療法学, 2003, **30**(5): 288-295.
- 5) Tardieu C, Lespargot A, Tabary C, et al.: For how long must the soleus muscle be stretched each day to prevent contracture? *Dev Med Child Neurol*, 1988, **30**(1): 3-10.
- 6) Harvey LA, Batty J, Herbert RD, et al.: A randomized trial assessing the effects of 4 weeks of daily stretching on ankle mobility in patients with spinal cord injuries. *Arch Phys Med Rehabil*, 2000, **81**(10): 1340-1347.
- 7) Flowers KR, Pheasant SD: The use of torque angle curves in the assessment of digital joint stiffness. *J Hand Ther*, 1988, **1**: 69-74.
- 8) McCully KK, Faulkner JA: Injury to skeletal muscle fibers of mice following lengthening contractions. *J Appl Physiol*, 1985, **59**(1): 119-126.
- 9) 丸林誠二: 虚血の生化学. 広島医学, 1983, **36**(1): 92-99.
- 10) Kottke FJ, Pauley DL, Ptak RA: The rationale for prolonged stretching for correction of shortening of connective tissue. *Arch Phys Med Rehabil*, 1966, **47**(6): 345-352.
- 11) Oki S, Itoh T, Desaki J, et al.: Three-dimensional structure of the vascular network in normal and immobilized muscles of the rat. *Arch Phys Med Rehabil*, 1998, **79**(1): 31-32.
- 12) 灰田信英: 廃用性筋萎縮の基礎科学. 理学療法学, 1994, **21**(2): 94-97.
- 13) 横澤仁美, 村岡慈歩, 加賀谷淳子・他: 静的ストレッチ中の筋束長の変化と筋酸素動態. 脈管学, 2002, **42**(Suppl): 25-29.
- 14) 西田まとか, 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. 理学療法学, 2004, **31**(5): 304-311.
- 15) 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. 運動・物理療法, 2004, **15**(4): 312-314.