

# 低強度の筋収縮運動と温熱刺激の併用が 痛覚感受性および中枢性疼痛修飾系におよぼす影響

盛田日菜子

## 要旨

筋骨格系疼痛を有する対象者への理学療法介入では、運動療法を実施する前に温熱療法を併用することが多い。しかし、そのような介入方法が痛みに対して有効であるか否かについてはほとんど検討されていない。そこで、本研究では大腿四頭筋の圧痛閾値を痛覚感受性の指標として、また、痛みの時間的加重(Temporal Summation)を中枢性疼痛修飾系の指標として、低強度の筋収縮運動と温熱刺激の併用がそれらにおよぼす影響について検討した。その結果、いずれの指標とも実験期間を通して3群間に有意差は認められなかったが、各群における経時的变化をみると、大腿四頭筋の圧痛閾値は3群とも実験開始前と比較して、実験開始2週後以降は有意に上昇していた。また、痛みの Temporal Summation は、実験開始前と比べて減衰傾向にあった。以上の結果より、低強度の筋収縮運動と温熱刺激のいずれも痛覚感受性を低下させることが示唆されたが、それらを併用しても痛覚感受性や中枢性疼痛修飾系に対する相乗効果は得られないと推察される。

## はじめに

痛みは主観的な感覚であり、理学療法において対象者の痛みを可能な限り客観的に評価することは、そのマネジメントを進めるうえで重要となる。従来、臨床や研究において痛みを評価する際には Visual analog scale や Numeric rating scale などが使用されてきたが、近年では、痛みを数値化する評価方法として定量的感覚検査(Quantitative Sensory Testing, 以下, QST)が用いられている。これには、スタティックQSTとダイナミックQSTがあり、前者は、皮膚に対する機械刺激や熱刺激、また、骨格筋に対する圧刺激など、単回の侵害刺激を加えた際の痛覚閾値や痛覚強度といった主観的な痛覚感受性を評価する方法である<sup>1)</sup>。一方、後者は、熱刺激や圧刺激を反復して入力した際の反応を評価する方法であり、その一つに痛みの時間的加重(Temporal Summation, 以下, TS)がある。これは、熱刺激や圧刺激などの侵害刺激を反復して入力した際の痛覚強度の変化を評価するものであり、一般に、0.3Hz以上の頻度

で侵害刺激を反復的に入力すると、刺激回数の増加にしたがって疼痛強度が高まるような反応を示すことが知られている<sup>2)</sup>。このような反応は、一次侵害受容ニューロンを介して侵害刺激が繰り返し脊髄に入力されることで、脊髄後角において二次侵害受容ニューロンである広域値作動性ニューロンの興奮度が高まるウィンドアップ現象を反映していると考えられている。また、痛みの抑制経路である下行性疼痛抑制系が賦活化されると、前述のような痛覚強度の高まりが減少することも知られている<sup>3)</sup>。つまり、痛みのTSは脊髄における侵害刺激の処理、すなわち、中枢性疼痛修飾系を評価できるとされている。そして、疼痛医学領域では健常人<sup>4)</sup>や変形性膝関節症患者<sup>5)</sup>を対象にこれらの主観的な痛覚感受性や中枢性疼痛修飾系を指標として運動による疼痛軽減効果が報告されている。

一方、変形性膝関節症をはじめとした筋骨格系疼痛を有する患者に対する理学療法介入では、運動療法を実施する前のコンディショニングとして温熱療法が併用されることが多い。

前述したように、運動によって痛覚感受性が低下することや痛みの TS が減衰することは健常人<sup>4,5)</sup>や変形性膝関節症患者<sup>6)</sup>を対象とした先行研究において明らかにされている。しかし、温熱療法や運動療法と温熱療法の併用が痛覚感受性や中枢性疼痛修飾系におよぼす影響についてはほとんど検討されておらず、広く臨床で実施されている運動療法と温熱療法の併用が痛みに有効であるか否かは明らかにされていない。

そこで本研究では、理学療法の臨床で広く行われている低強度の筋収縮運動と温熱刺激の併用が主観的な痛覚感受性ならびに中枢性疼痛修飾系におよぼす影響について、健常成人を対象として検討した。

## 対象と方法

### 1. 対象者

健常成人 28 名を対象とし、1) 8 週間の実験期間中、低強度の筋収縮運動のみを実施する群(以下、Exercise 群)、2) 実験期間中、温熱刺激のみを負荷する群(以下、Heat 群)、3) 実験期間中、筋収縮運動と温熱刺激を併用する群(以下、Exercise + Heat 群)の 3 群に無作為に振り分けた。なお、下肢の整形外科疾患の既往がある者、末梢神経障害を有する者、鎮痛薬や睡眠薬などを使用している者、定期的な運動習慣がある者は本研究の対象者から除外した。

### 2. 低強度筋収縮運動の実施方法

Exercise 群の対象者には、以下の方法にて低強度の筋収縮運動を実施した。股関節および膝関節 90°屈曲位の端座位とし、非利き脚の下腿遠位部を自作の筋力測定器に固定することで大腿四頭筋の等尺性筋収縮運動を実施した。運動強度は最大随意収縮の 30%とし、1 セット 30 回、1 日 3 セット、週 3 日の頻度で実施した。なお、運動強度を設定するための最大膝伸展筋力は、2 週毎にハンドヘルドダイナモメーターを用いて評価した。

### 3. 温熱刺激の負荷方法

Heat 群および Exercise + Heat 群の対象者への温熱負荷には、市販の電気式湿性ホットパック(フィットアンボ、丸央産業株式会社)を用いた。具体的には、対象者を背臥位とし、電気式湿性ホットパックで非利き脚の大腿部を覆うことで温熱刺激を負荷した。なお、大腿部以外からの熱放散を抑制するために下腿部はタオルで覆い、足部には靴下を着用した。温熱刺激の負荷時間は 60 分とし、週 3 回の頻度で実施した。なお、この予備実験として本方法での温熱刺激による皮膚温の変化について検討しており、その結果、温熱刺激開始後 10 分で約 38°C に達し、その後は緩やかに上昇し、開始 50 分後には 39.5°C に達していた。

### 4. 筋収縮運動と温熱刺激の併用方法

Exercise + Heat 群の対象者には以下の方法にて、筋収縮運動と温熱刺激を負荷した。まず、前述した方法にて温熱刺激を 30 分間負荷した後、大腿部の温熱刺激を負荷したまま状態で、筋収縮運動を実施した。筋収縮運動の実施方法は前述したとおりである。そして、温熱刺激は負荷開始から 60 分が経過した時点で終了した。筋収縮運動と温熱刺激の併用についても週 3 回の頻度で実施した。

### 5. 評価項目

#### 1) 基本属性

各群の対象者の基本属性として、年齢、性別、身長、体重を測定した。なお、体重については、実験開始前および実験開始 2, 4, 8 週後に測定した。

#### 2) 大腿四頭筋の圧痛閾値

大腿四頭筋の筋圧痛閾値の測定は、市販のデジタルフォースゲージ(RZ-100、アイコーエンジニアリング株式会社)を用いて実施した。具体的には、上前腸骨棘と膝蓋骨上縁を結ぶ直線上の遠位 1/4 の部位を刺激点とし、デジタルフォースゲージを垂直にあて、約 3 N/s の加速度で圧刺激を加えていき、対象者が痛みを感じた際の圧力値(N)を圧痛閾値とした。なお、測定は 3 回行い、その平均値を圧痛閾値として採用した。

### 3) 大腿四頭筋の圧痛強度

圧痛強度は、前述した方法で計測した圧痛閾値の120%の強度で圧刺激を加え際のVAS値を圧痛強度とした。なお、測定は3回実施し、その平均値を圧痛強度として採用した。

### 4) 痛みの Temporal Summation (TS)

膝蓋骨上縁と上前腸骨棘を結ぶ直線上の遠位1/4の部位を刺激点とし、各対象者の圧痛閾値の120%の強度でデジタルフォースゲージを垂直にあて、0.5 Hzの間隔、すなわち2秒に1回の頻度で圧刺激を連続10回加え、各刺激時の圧痛強度をVASにて評価した。そして、2回目以降の各回のVAS値から初回のVAS値の差し引いた値、すなわちVASの変化量を算出し、これらを合計した値をTS magnitudeと定義し、各評価時における群間比較ならびに群内における経時的変化の比較に用いた。

## 6. 統計学的解析

各群の性別、非利き足については $\chi^2$ 二乗検定を適用した。また、各評価時期における群間の比較には、一元配置分散分析を適用した。さらに、各群内における経時的変化の比較については反復測定分散分析を適用した。なお、すべて有意水準は5%未満とした。

## 結果

### 1. 実験開始前の各群の比較

実験開始時の各群の基本属性ならびに膝伸展筋力、圧痛閾値、圧痛強度を表1に示す。男女比、利き脚、身長、体重ともに3群間に有意差は認められなかったが、BMIについてはHeat群と比べてHeat + Exercise群は有意に高値を示した。また、膝伸展筋力、圧痛閾値、圧痛強度、TS magnitudeとも3群間に有意差は認められなかった。

### 2. 膝伸展筋力

各評価時における膝伸展筋力を体重で標準化して比較したところ、いずれの評価時においても3群間に有意差を認めなかった。また、各

群の経時的変化についても有意差は認められなかった(図1)。

### 3. 大腿四頭筋の圧痛閾値

各群の大腿四頭筋の圧痛閾値の経時的な変化をみると、3群とも実験開始前と比較して実験開始2, 4, 8週後はいずれも有意に高値を示した。ただ、実験開始2週目以降は実験期間の延長に伴う有意な上昇は認められなかった。また、各評価時において3群間に有意差は認められなかった。(図2)。

### 4. 大腿四頭筋の圧痛強度

各群の大腿四頭筋の圧痛強度の経時的な変化をみると、Heat群とExercise + Heat群では実験開始前と比べて実験開始4, 8週後で有意に高値を示し、Exercise群では実験開始8週後において有意に高値を示した。ただ、実験開始2週目以降は実験期間の延長に伴う有意な上昇は認められなかった。また、各評価時において3群間に有意差は認められなかった(図3)。

### 5. 痛みの Temporal Summation (TS)

各群の痛みのTSは、3群とも実験開始時と比較して、実験開始2, 4, 8週後とも減衰傾向にあった。次に、VAS値の変化量の合計であるmagnitudeを算出し、各群内で経時的な変化を検討したところ、有意差は認められなかった。また、各評価時において3群間に有意差は認められなかった(図4, 5)。

表1 実験開始時の各群の比較

	Exercise群	Heat群	Exercise+Heat群
年齢	21.5	21.1	22.1
性別(男/女)	3/5	5/5	6/4
非利き足(R/L)	0/8	0/10	2/8
身長(m)	161.0±9.0	167.7±11.2	169.1±8.1
体重(kg)	54.4±8.4	54.5±5.0	61.9±7.9
BMI(kg/m <sup>2</sup> )	20.9±2.2	19.4±1.3	21.6±1.9 <sup>a</sup>
膝伸展筋力(体重比)	0.70±0.06	0.70±0.17	0.69±0.20
圧痛閾値(N)	33.3±15.9	30.6±13.4	32.8±8.8
圧痛強度(mm)	3.80±1.50	2.78±1.39	3.62±1.65
TS magnitude	8.74±4.97	7.15±3.70	9.06±3.89

平均値±標準偏差 a: vs Heat群, p < 0.05

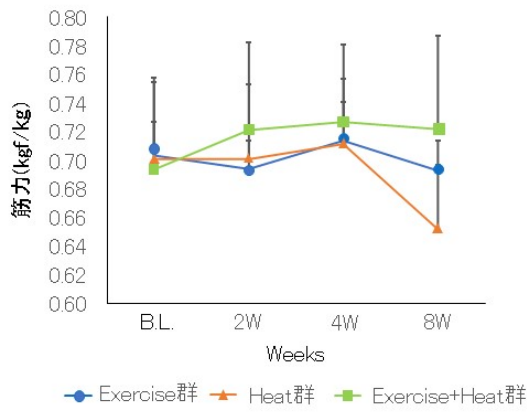


図1 膝伸展筋力  
 平均値±標準誤差.

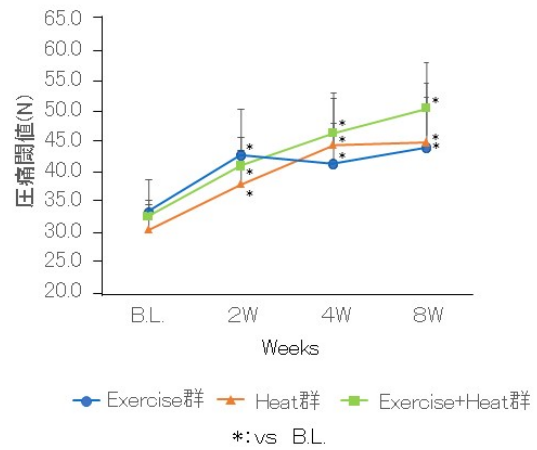


図2 大腿四頭筋の圧痛閾値  
 平均値±標準誤差.

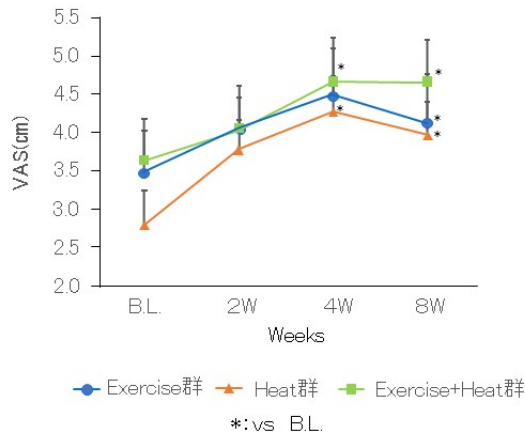


図3 大腿四頭筋の圧痛強度  
 平均値±標準誤差.

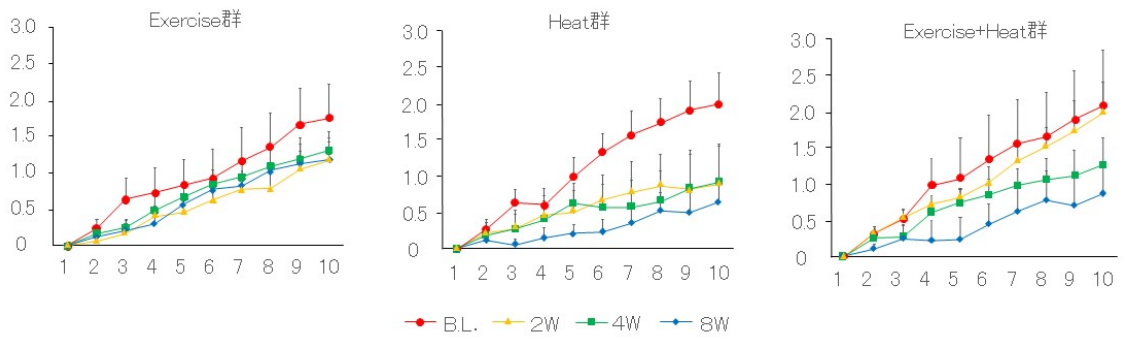


図4 Temporal Summation  
 平均値±標準誤差.

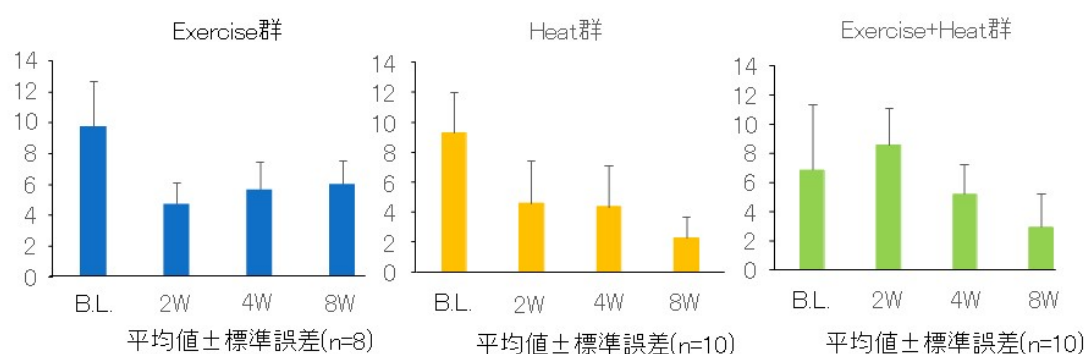


図 5 TS magnitude

平均値±標準誤差.

## 考察

理学療法の臨床では、筋骨格系疼痛を有する対象者への介入として、運動療法を実施する前に温熱療法を併用することが多い。ただ、そのような介入方法が痛みにおよぼす影響については、これまでほとんど検討されていない。そこで、本研究では、低強度の筋収縮運動と温熱刺激の併用が痛覚感受性および中枢性疼痛修飾系におよぼす影響について、健康成人を対象として検討した。

まず、実験開始時の各群の基本属性、圧痛閾値、圧痛強度、TS magnitude に有意差は認められなかったことから、本研究の実験開始時における各群の対象者の特性については同等であったといえる。また、低強度の筋収縮運動を負荷した Exercise 群および Heat + Exercise 群の膝伸筋筋力は、実験期間を通して経時的な変化が認められておらず、今回採用した条件での筋収縮運動は筋力増強効果がない低強度の運動であったことが確認された。

次に、痛覚感受性におよぼす影響についてみると、3 群ともに実験開始前と比べて実験開始 2 週目以降において有意な痛覚閾値の上昇が認められた。低強度の等尺性収縮運動による痛覚閾値の上昇は、多くの先行研究で報告されており、例えば、Vaegter ら<sup>5)</sup>の先行研究では、最大随意収縮の 30% の運動強度で大腿四頭筋の等尺性収縮運動を 3 分間実施すると、運動実施前の圧痛閾値と比較して運動実施直

後では約 20% 上昇し、運動終了 15 分後においても約 10% 上昇することが報告されている。本研究における Exercise 群の圧痛閾値は、実験開始前と比べて実験開始 2 週後では 28.5% 上昇しており、運動を継続したことで痛覚感受性が上昇したのではないかと考えられる。一方、Heat 群の結果より、温熱刺激を継続的に負荷するだけでも圧痛閾値が上昇する可能性が示唆された。一般に、温熱療法による痛みの軽減効果のメカニズムについては明らかにされていない点が多いが、血管拡張に伴う血流増加や筋リラクセーションが図られることで痛みの悪循環が断ち切られることが考えられている。実際、変形性膝関節症患者を対象とした Seto ら<sup>7)</sup>の先行研究では、湿性ホットパックのみを 2 週間継続して適用すると、VAS が低下することが示されている。しかし、本研究における対象者は痛みを有しない健康者であり、前述のようなメカニズムによって圧痛閾値が上昇した可能性は考えにくい。本研究で認められた Heat 群における圧痛閾値の上昇のメカニズムについては不明であり、今後の検討課題である。そして、Heat + Exercise 群においても Exercise 群、Heat 群と同様に圧痛閾値の上昇が認められたものの、他の 2 群と同程度だった。つまり、今回の結果からは低強度の筋収縮運動と温熱刺激の併用による痛覚感受性に対する相乗効果は乏しいと考えられる。

一方、圧痛強度について、実験開始前と比較して、Exercise 群では実験開始 8 週後にお

いて Heat 群と Exercise + Heat 群では実験開始 4 週後以降において圧痛強度の有意な上昇が認められた。本研究では、圧痛強度を評価する際には圧痛閾値の 120%の強度で圧刺激を加えている。そのため、圧痛強度は圧痛閾値の変動に依存する可能性が考えられ、各群の圧痛閾値の変化をみると、有意差を認めないものの経時的に上昇傾向にあり、これに伴い圧痛強度を測定する際の圧刺激が増加したことが影響しているのではないかと考えられる。

次に、中枢性疼痛修飾系におよぼす影響についてみると、TS magnitude は 3 群とも実験開始前と比べて実験開始後で有意差を認めず、また、実験開始後も各評価時において 3 群間で有意差は認められなかった。TS は反復して入力される侵害刺激に対する脊髄における反応性を示す現象であり、上行性の侵害刺激入力を増幅させる中枢性疼痛修飾系の機能を反映するとされている。つまり、今回の運動条件および温熱刺激の条件では中枢性疼痛修飾系への影響は少なく、それらを併用しても相乗効果は得られないものと推察される。最大随意収縮の 30%の運動強度で行う大腿四頭筋の等尺性収縮運動が圧刺激による痛みの TS におよぼす影響について検討した先行研究<sup>5)</sup>では、運動終了 15 分後に有意な TS の減衰を認めているものの、その変化量は運動実施前の 10%に満たない程度である。また、変形性膝関節症患者を対象とした Koltyn<sup>ら</sup><sup>8)</sup>の先行研究では、週 3 回の頻度で 12 週間運動療法を継続すると、圧刺激に対する痛みの TS が約 20%減衰している。これらの先行研究と本研究とは痛みの

TS の解析方法が異なるため直接的な比較はできないものの、本研究における各群の TS magnitude の変化をみると先行研究と同程度の減衰を示しているのではないかと考えられる。ただ、先行研究と比べて本研究における対象者は各群 10 人程度と少なく、このことが統計学的解析の結果に影響をおよぼしている可能性が考えられる。したがって、今後は各群の対象者数を増やし、再検討する必要がある。また、本研究では、いずれの介入も行わない対照群を設定しておらず、この点も本研究の限界であり、今後の検討課題である。

本研究の結果からは、低強度の筋収縮運動と温熱刺激を併用しても痛覚感受性や中枢性疼痛修飾系におよぼす影響は、それぞれを単独で実施した場合と大差ないと推察される。筋骨格系疼痛を有する患者では、身体活動量活動が低下することで不活動症候群を呈していることが少なくなく、運動療法を行う前のコンディショニングとして温熱療法が有効なケースもある。ただ、受動的な治療であり、患者が依存してしまう可能性もあるため、長期間にわたり漠然と温熱療法を併用することは避け、運動療法を主体として身体活動量を向上させるような介入を進める必要があると考えられる。

## 謝辞

今回の研究において、ご指導・ご協力いただいた長崎大学大学院医歯薬学総合研究科運動障害リハビリテーション学研究室の諸先生方に厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) Kong TJ, Johnson KA, et al.: Test-Retest reliability of thermal temporal summation using an individualized protocol. PAIN. 2013; 79-88.
- 2) Price DD, Dubner R: Mechanisms of first and second pain in the peripheral and central nervous systems. J Invest Dermatol. 1977; 69:167-171.
- 3) Eide PK: Wind-up and the NMDA receptor complex from a clinical perspective. Eur J Pain. 2000; 4:5-15.
- 4) Vaegter H.B., Handberg G, et al.: Similarities between exercise-induced hypoalgesia and conditioned pain modulation in humans. PAIN. 2013; 155:158-168.
- 5) Vaegter H.B., Handberg G, et al.: Isometric exercises reduce temporal summation of pressure pain in

- humans. *Eur J Pain*. 2015; 19:973-983.
- 6) Henriksen M, Klokke L, et al.: Association of exercise therapy and reduction of pain sensitivity in patients with knee osteoarthritis: a randomized controlled trial. *Arthritis Care Res (Hoboken)*. 2014; 66: 1836-1843.
  - 7) Seto H, Ikeda H, et al.: Effect of heat- and steam-generating sheet on daily activities of living in patients with osteoarthritis of the knee: randomized prospective study. *J Orthop Sci*. 2008; 13:187-191.
  - 8) Koltyn KF: Exercise-induced hypoalgesia and intensity of exercise. *Sports Med*. 2002; 32:477-87.  
(指導教員:坂本 淳哉)