
卒業研究論文集

第 21 卷

ANNUAL REPORTS OF GRADUATION THESES

Vol. 21

長崎大学医学部保健学科

理学療法学専攻 21 期生

2025 年

卒業研究論文集 第 21 卷 2025 年

目次

卒業研究論文

- 高流量鼻カニューラ酸素療法の流量の違いが運動耐容能に与える影響
江頭珠紀・岡部修人 1
- 匂いの好みが階段昇降時の呼吸困難に与える影響
池田陽呂・恩河優真・志水真斗 7
- トランポリン運動による呼吸循環反応と呼吸機能に及ぼす即時的影響
吉村 歩 15
- 地域在住高齢者におけるうつ傾向と生活機能との関連～年齢・性別ごとの比較～
倉田和弥・西田 涼 19
- 車いすの駆動様式における身体活動強度および駆動力の比較
岡本琉夏・平田悠真 28
- 歩行運動は睡眠制限に関連した術後痛の増強を軽減できるか？—ラット術後痛モデルを用いた検討—
嶽野花音・田中野乃・山下陽乃琉 34
- 不動の過程で実施する歩行運動と骨格筋電気刺激がラットヒラメ筋の筋性拘縮におよぼす効果
岩本倫太郎・藤井遥大 41
- 不動後早期からの歩行運動と骨格筋電気刺激がラット腓腹筋の廃用性筋萎縮におよぼす影響
木寺郁人・堀脇千愛 47
- 正常な肩関節における関節超音波検査所見の検討
岩本拓也・大島風人 54

高流量鼻カニューラ酸素療法の流量の違いが運動耐容能に与える影響

江頭珠紀・岡部修人

本研究の目的は、高流量鼻カニューラ酸素療法(High-flow nasal cannula: HFNC)のガス流量の違いが運動耐容能に与える影響を検討することである。健康男性 20 名を対象に、HFNC を 30L/min, 45L/min, 60L/min の 3 条件で使用し自転車エルゴメーターによる漸増抵抗運動負荷試験を行った。運動の前後には VAS にて HFNC 使用時の吸気の忍容性、不快感を測定し、運動中は 1 分毎にバイタルと修正 Borg Scale にて呼吸困難と下肢疲労感を測定した。結果として 3 条件下での運動持続時間に有意差を認められなかった。吸気の忍容性と不快感における VAS は 3 条件での有意差は認められなかったが、運動前後で比較すると有意に低値を示した。また、順位付け後の運動持続時間を比較したところ有意差は認められなかったが、高位と低位の運動持続時間の差は臨床的に意義のあるものであった。

はじめに

呼吸器障害による身体への影響は大きく、活動回避を発端とし、活動量の低下や日常生活動作(Activities of Daily Living; 以下 ADL)制限、運動機能の低下や呼吸困難の増大など様々な悪影響を及ぼす。これらは悪循環を形成するため、呼吸器疾患患者の大きな問題となっている。呼吸器疾患患者の理学療法は、コンディショニング、ADL トレーニング、全身持久力および筋力トレーニングといった運動療法によって構成される。なかでも運動療法は必須のプログラムであり、頻度、強度、種類、時間の設定が重要である¹⁾。

呼吸器疾患患者に運動療法を行うにあたり、近年注目されているのが高流量鼻カニューラ酸素療法 (High-flow nasal cannula: HFNC)であり、これは加温・加湿された空気を鼻カニューラから供給し、必要に応じて酸素を補充するガス供給システムである²⁾。設定できる項目としては吸入酸素濃度(Fraction of Inspired Oxygen; 以下 FIO₂)、ガス流量(FLOW)、温度・湿度がある。HFNC の生理学的効果として、解剖学的死腔のウォッシュアウト、呼吸仕事量の軽減、FIO₂の精度向上、呼気終末陽圧(Positive End Expiratory Pressure; 以下 PEEP)様効果、安定した加温・加湿など^{2,3)}があり、多くの病院で急性期から用いられるようになって

きた。近年では重症患者における早期離床の重要性が報告されており、その中で運動療法における HFNC の有用性が期待されている。

HFNC の運動療法に関連した先行研究はいくつかあり、慢性呼吸器疾患患者の運動耐容能改善における HFNC 療法の有効性が報告されている⁴⁻¹²⁾。また所属研究室では、HFNC によって調整された FIO₂とガス流量が運動耐容能に与える影響を検証している¹²⁾。その結果、HFNC による酸素補給は、定常運動負荷における運動持続時間と経皮的動脈血酸素飽和度(Saturation of percutaneous oxygen; 以下 SpO₂)を有意に改善し、ガス流量のみでも SpO₂を有意に改善した。また、Room Air 条件と FLOW 条件間の運動持続時間の差 46.3 秒は有意ではなかったが、呼吸器疾患患者の運動持続時間における臨床的に意義のある最小差(Minimal Clinically Important Difference; 以下 MCID)である 46~105 秒の範囲であり、臨床的関連性が示唆される結果となった。一方、このガス流量に関して、流量の違いが運動耐容能に与える影響を調べた研究は認められない。

今回我々は、HFNC 療法におけるガス流量が増加するほど労作時の呼吸困難を軽減し、運動持続時間を延長すると仮説を立て実験を行った。本研究の目的は、HFNC 療法のガス流量の違い

が運動耐容能に与える影響を検討することである。

本研究内容が明らかになれば、臨床における運動療法時の HFNC の適切な流量設定や HFNC の健常者での有用性などが明らかになり、今後の理学療法の一助になると考える。

対象

本研究の趣旨を理解し、同意が得られた若年健常男性 20 名を対象とした。除外基準は運動器疾患や下肢の痛みなどで心肺運動負荷試験 (Cardiopulmonary Exercise Testing; 以下 CPX) の実施が困難な者、呼吸器および循環器疾患がある者、過去 1 か月以内に喫煙経験歴がある者とした。対象者に本研究の目的や意義、倫理的配慮について口頭および文書にて説明を行い、研究参加への同意を得た上で実施した。本研究は、長崎大学大学院医歯薬学総合研究科保健学系倫理委員会の承認を得て実施した(許可番号 25041003)。

方法

1. 研究デザインと実施手順

本研究はランダム化比較試験として実施した。HFNC で使用するガス流量設定をそれぞれ 30L/min, 45L/min, 60L/min の 3 条件に設定し、合計 6 パターンの組み合わせを作成し、測定順序はブロックランダム化によって決定した。CPX による漸増抵抗運動負荷試験を実施し、加温加湿器搭載型ハイフローシステム Airvo™2 ならびに大口径鼻プロング Optiflow(ともに Fisher &

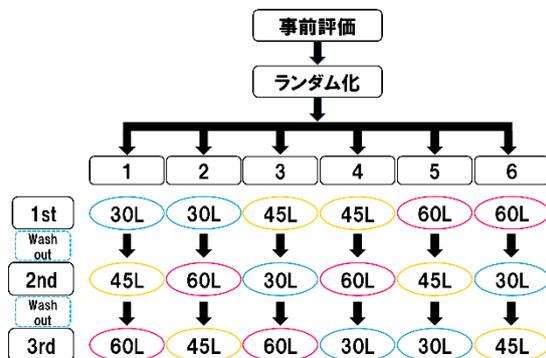


図 1 研究プロトコル

Paykel Healthcare 社製)を使用した。また各ガス流量の試験は 2 日以上ウォッシュアウト期間を設けて 3 回に分けて行った。(図 1)

2. 事前評価

長崎大学医学部保健学科キャンパス内にて、被験者に各測定の方法、手順、リスク等について研究説明書に従って十分なオリエンテーションを行った。また、身長、体重を測定し、運動負荷試験の実施方法、修正 Borg Scale の計測方法、ResMo(テレメトリー式生体信号測定装置; Aimedic MMT 社製)の測定方法を被験者に説明した。

3. 漸増抵抗運動負荷試験

自転車エルゴメーター(COMBI 社製 232CXL)による CPX を実施した。負荷プロトコルには 20W/分の漸増ランプ負荷を適用し、回転数は 50 回/分とした。なお試験開始後に 1 分の安静、その後 1 分のウォームアップを設け、運動負荷開始とした。呼吸困難または下肢疲労により、継続不可能になった際に自己申告を受け運動負荷終了とした。(図 2)

漸増抵抗運動負荷試験

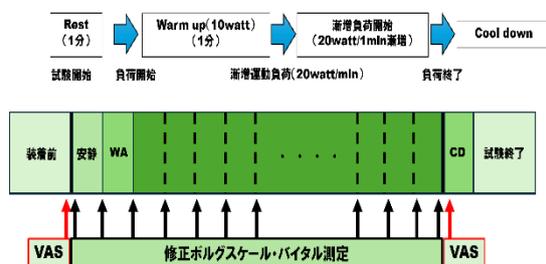


図 2 試験の流れ

バイタルサインの測定に際し ResMo を使用した。ResMo はセンサベルトを搭載したベストを装着し、非侵襲でリアルタイムに呼吸数、SpO₂、脈拍数といったバイタルサインを測定できる医療機器である。

1) 測定項目

測定項目はバイタルサイン、呼吸困難、下肢疲労、運動持続時間、最大負荷量、主観的忍容

性とした。バイタルサインは ResMo を、呼吸困難および下肢疲労は修正 Borg Scale を用いて 1 分毎、試験開始前および運動負荷終了後に記録した。また、主観的忍容性としては Visual Analogue Scale (以下 VAS) を用いて吸気の忍容性および HFNC の不快感を試験開始前および運動負荷終了後に記録した。さらに 3 回すべての実験終了後に運動の忍容性を 3 つの流量の順位付けを行った。

2) 統計学的解析方法

主要評価項目は運動持続時間とした。運動持続時間ならびに、測定で得られた各指標を一元配置分散分析で比較した。また、運動前後における忍容性ならびに不快感は対応のある t 検定を用いた。統計解析には IBM SPSS statistics ver.24.0 を使用し、統計学的有意水準は危険率 5%とした。

結果

1. 対象者背景

平均年齢は、21.7±1.1 歳、身長ならびに BMI は平均でそれぞれ 172.0±5.0cm, 22.0±2.2kg/m²であった。

2. HFNC3 条件下での運動持続時間

運動持続時間は 30L/min で 596.5±96.2 秒、45L/min で 600.7±87.3 秒、60L/min で 614.2±94.2 秒であり、60L/min が最高値で、30L/min が最低値を示した。ガス流量が増加するごとに運動持続時間は延長したが各条件で有意差を認めなかった。(図 3)

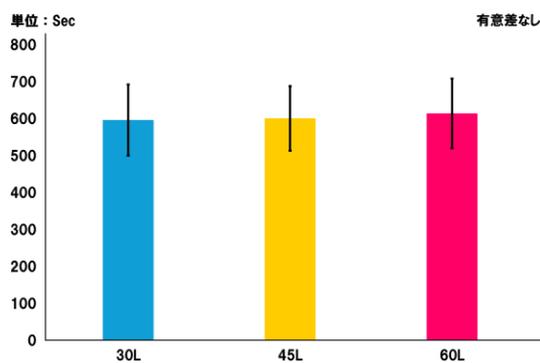


図 3 3 条件での運動持続時間

3. HFNC3 条件下での isotime におけるバイタルサイン

isotime における各バイタルサインを表 1 に示す。すべてのバイタルサインにおいて有意差を認めなかった。

4. 運動前後における HFNC 使用時の吸気の忍容性、不快感

運動前後における吸気の忍容性について、運動前は 30L/min, 45L/min, 60L/min でそれぞれ 48.1±22.2, 46.3±25.9, 49.9±23.2 であり、運動後はそれぞれ 30.1±19.9, 29.0±19.7, 29.6±20.7 となり運動前および運動後の各条件下では有意差を認めなかった(図 4)。

また、不快感について、運動前は 30L/min, 45L/min, 60L/min でそれぞれ 51.7±21.5, 58.8±27.7, 54.8±26.2 であり、運動後はそれぞれ 28.6±22.7, 32.0±24.3, 28.6±23.0 ところらも各条件下で有意差を認めなかった(図 5)。しかし、運動前後で比較すると、運動前と比較して運動後は吸気の忍容性および不快感の各条件いずれにおいても有意に低値を示した。

表 1 isotime におけるバイタルサイン

	60L/min	45L/min	30L/min	p-value
呼吸数 (fpm)	36.4±8.7	35.1±8.0	35.3±7.1	0.861
脈拍数 (bpm)	168.4±13.3	169.5±14.7	166.1±16.8	0.760
SpO ₂ (%)	97.5±1.8	98.1±0.9	98.2±1.2	0.456

平均値 ± 標準偏差, SpO₂= Saturation of percutaneous oxygen

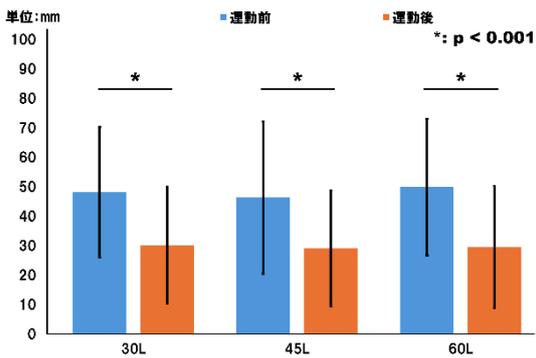


図4 運動前後における吸気の忍容性

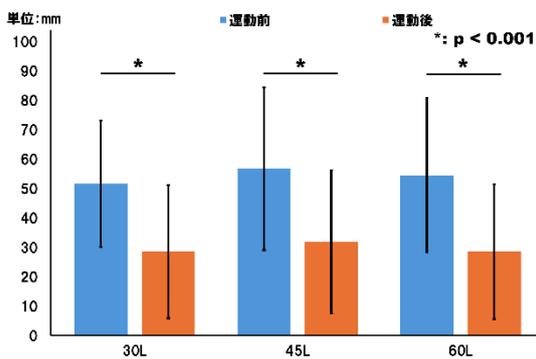


図5 運動前後におけるHFNCの不快感

5. 運動忍容性の程度と運動持続時間

3回の試験終了後、被験者に3条件を高位、中位、低位と順位付けをしてもらい、それぞれの運動持続時間を比較した(図6)。高位が619.0±94.0、中位が609.2±96.2、低位が583.1±84.4であり、高位が最高値、低位が最低値を示したが、それぞれに有意差を認めなかった。高位と低位の差は平均35.9秒であった。

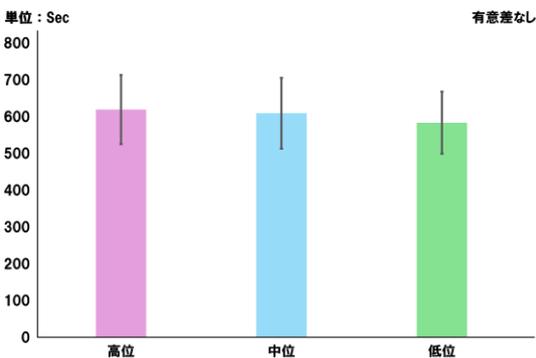


図6 運動忍容性の程度と運動持続時間

考察

本研究では若年健常男性を対象にHFNCのガス流量の違いが運動耐容性に与える影響を検討した。その結果30L/min, 45L/min, 60L/minの3条件下での運動持続時間の有意差を認めなかった。また3条件下でのisotimeにおける有意差も認めなかった。しかし、運動前後における吸気の忍容性およびHFNCの不快感は有意に改善した。さらにHFNCに対する忍容性の高低で比較した場合、有意差は認められなかったものの運動忍容性が高いほど運動持続時間は延長した。

運動耐容性は、呼吸筋機能と末梢筋機能の相互作用によって左右されることが知られている。Harmsら¹³⁾は、呼吸仕事量の増大が呼吸筋代謝受容器反射を介して下肢筋血流を制限し、運動パフォーマンスを低下させることを示している。またJohnsonら¹⁴⁾は、呼吸筋疲労が下肢疲労を促進し、運動限界因子となり得ることを報告している。HFNCは理論的には呼吸仕事量を軽減すると考えられており、FLOWの違いが運動持続時間に影響を及ぼすという仮説の下、研究を行ったが、今回はHFNCのガス流量効果は限定的であった。本研究においてガス流量の差での運動持続時間に有意な差が認められなかった理由として、ガス流量だけでは運動持続時間への影響度が小さいことが考えられる。先行研究¹²⁾では、運動療法時のHFNCのガス流量効果による運動持続時間への影響は、呼吸器疾患患者においても酸素効果と比較して改善率が小さかった。

運動耐容性は呼吸機能のみならず末梢筋機能にも強く依存している。下肢疲労は、運動筋への血流不足や筋内代謝産物の蓄積、筋力低下などに起因し、末梢筋の持久力限界として現れる。HFNCでは呼吸仕事量の軽減や換気効率の向上などにより呼吸困難を軽減するが、本研究では、呼吸困難よりも下肢疲労が運動限界因子となる健常成人を対象としたため、運動中でも呼吸予備能が保たれていたと考えられる。そのためHFNCによる呼吸補助効果が運動持続時間の延長として表れにくかった可能性がある。

ただ、吸気の忍容性ならびに不快感に関してHFNCは運動前後ですべての群で有意に減少

した。これは HFNC が運動負荷に対する呼吸の補助として呼吸仕事量軽減につながっていたことを示唆するものである。

ガス流量の違いによる検討では運動持続時間に差がなかった一方で、忍容性による検討において、忍容性の高位と低位に 35 秒の差が認められた。これは統計学的な有意差を示すものではなかったが、臨床的に意義のある結果であることが示唆される。本研究におけるランブ負荷の増加率および運動負荷の変化に対する VO₂の時間的応答特性を考慮すると Work Rate peak (以下 WR peak)が約 13.3W であり、35 秒の変化量は低位の WR peak の約 5.7%に相当していた。WR peak の改善率は 5~15%程度が目安とされているため、忍容性の高位と低位の運動持続時間の差は、若年健常者での漸増運動負荷試験における生理的改善として妥当な範囲の変化量と結論付けた。

HFNC は、解剖学的死腔の洗い出し(ウォッシュアウト)や軽度の PEEP 様効果といった生理学的作用を有し、これらにより換気効率の向上や呼吸努力の軽減をもたらすと考えられている。これらの結果、呼吸仕事量が軽減し、主観的な忍容性が向上する可能性がある。

一方で、HFNC は理論的に呼吸仕事量を軽減し得るものの、対象者によっては高流量設定に伴う圧迫感や不快感、呼吸パターンの変化が生じる可能性がある。このような場合には、忍容性の低下を介して呼吸努力感が増大し、結果として HFNC の生理学的利点が十分に発揮されないことが考えられる。今回、忍容性が高い流量においては HFNC の生理学的特性を享受できたため、結果として運動持続時間の延長につながったのではないかと考えた。

なお HFNC の効果を最大限に引き出すためには、一律の流量設定ではなく、個々の忍容性を考慮した流量調整が重要である可能性が示唆される。ただし、本研究ではこの点を直接的に検証できていないため、今後の検討が必要である。

本研究の限界として、サンプルサイズが小さいこと、若年健常男性が対象であるため高齢者でも同じ効果が得られるか不明であることなどが挙げられる。

今後の研究の展望として、高齢者や呼吸器疾

患患者での検討すること、定常運動負荷試験や他の運動課題での検討すること、そして体格や呼吸機能などの忍容性の差に与える影響についての検証を深めることなどが挙げられる。

まとめ

本研究では若年健常男性を対象として検討した結果、HFNC のガス流量の差は運動持続時間やバイタルサインに対して有意に影響しないという結果が得られた。しかし、運動前後における吸気の忍容性および HFNC の不快感は優位に減少した。また HFNC 使用下での運動忍容性は高位と低位の間には 35 秒の差があり、臨床的に意義のある差となることが示唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の実施にご協力いただいた研究対象者の皆様、ご指導いただきました本学内部障害リハビリテーション学研究室の方々に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会, 日本呼吸器学会, 日本リハビリテーション医学会, 日本理学療法士協会(編):呼吸リハビリテーションマニュアル-運動療法-(第2版). 照林社, 東京, 2012, pp. 35-41.
- 2) 永田一真:高流量鼻カニューラ酸素療法(HFNC)-急性期から慢性期まで 医学と薬学 80 卷 10 号 2023 年 10 月 985-989.
- 3) 原田惇平:急性期~回復期のハイフローセラピー患者に対するリハビリテーション;みんなの呼吸器. *Respira.* 2023; 6(817): 97-105.
- 4) Dysart K, Miller TL, et al.: Research in high flow therapy: mechanisms of action. *Respir Med.* 2009; 103: 1400-1405.
- 5) Chao KY, Liu WL, et al.: Effects of high-flow nasal cannula with oxygen on self-paced exercise performance in COPD: A randomized cross-over trial. *Medicine*

- (Baltimore). 2021; 100: e28032.
- 6) Chen YH, Huang CC, et al.: Effects of high flow nasal cannula on exercise endurance in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *J Formos Med Assoc.* 2022; 121: 381-387.
 - 7) Cirio S, Piran M, et al.: Effects of heated and humidified high flow gases during high-intensity constant-load exercise on severe COPD patients with ventilatory limitation. *Respir Med.* 2016; 118: 128-132.
 - 8) Suzuki A, Ando M, et al.: The impact of high-flow nasal cannula oxygen therapy on exercise capacity in fibrotic interstitial lung disease: a proof-of-concept randomized controlled crossover trial. *BMC Pulm Med.* 2020; 20: 51.
 - 9) Badenes-Bonet D, Cejudo P, et al.: Impact of high-flow oxygen therapy during exercise in idiopathic pulmonary fibrosis: a pilot crossover clinical trial. *BMC Pulm Med.* 2021; 21: 355.
 - 10) Chikhanie Y, Veale D, et al.: The effect of heated humidified nasal high flow oxygen supply on exercise tolerance in patients with interstitial lung disease: A pilot study. *Respir Med.* 2021; 186: 106523.
 - 11) Harada J, Nagata K, et al.: Effect of high-flow nasal cannula oxygen therapy on exercise tolerance in patients with idiopathic pulmonary fibrosis: A randomized crossover trial. *Respirology.* 2022; 27: 144-151.
 - 12) Yanagita Y, Arizono S, et al.: Enhancing exercise tolerance in interstitial lung disease with high-flow nasal cannula oxygen therapy: A randomized crossover trial. *Respirology.* 2024; 29: 497-504.
 - 13) Harms CA, Wetter TJ, et al.: Effects of respiratory muscle work on exercise performance. *Journal of Applied Physiology* 2000; 89(1): 131-138.
 - 14) Johnson BD, Dempsey JA, et al. Exercise-induced respiratory muscle fatigue: implications for performance. *Journal of Applied Physiology* 2008; 104(3): 879-888.

(指導教員 柳田頼英)

匂いの好みと階段昇降時の 呼吸困難に与える影響

池田陽呂・恩河優真・志水真斗

本研究の目的は、階段昇降時の呼吸困難に対して匂いの好みと与える影響を明らかにすることである。若年健常成人 20 名を対象に、無臭、メントールおよび好みの匂いの 3 条件において階段昇降を実施した。評価項目は、呼吸困難、経皮的酸素飽和度、脈拍数、呼吸数、吸気流速の認知、呼吸の認知・情動的側面、およびメントールの嗜好とし、各条件間で比較した。その結果、メントールおよび好みの匂いはいずれも呼吸困難の軽減には寄与しなかった。一方、呼吸の認知・情動的側面においては、メントールおよび好みの両条件で有意な効果が認められた。また、メントールの効果は、個々の嗜好による影響を受ける可能性が示唆された。

はじめに

慢性呼吸器疾患患者の主症状は、換気制限やガス交換障害などの不可逆的な呼吸機能障害に起因する労作時の呼吸困難である。呼吸困難は運動回避を招き、その結果、日常生活動作 (activities of daily living; ADL) の低下をきたすことが報告されている¹⁾。このような ADL 制限は身体活動量の減少を引き起こし、呼吸困難を増悪させる悪循環を形成する。さらに、呼吸困難は死亡の予測因子であることも示されており²⁾、その改善は慢性呼吸器疾患患者の治療およびケアにおいて重要である。

呼吸困難を生じやすい日常動作には運動強度の高い動作や腕を上げる動作などが挙げられるが、特に階段昇降は軽症の段階から制限される動作の一つとされている¹⁾。階段昇降は下肢筋活動や換気需要が大きく、呼吸器疾患患者にとって負担の大きい動作であることから、呼吸困難の評価や介入効果を検討するための運動課題として有用であると考えられる。

一方、呼吸困難を軽減する方法として、呼吸リハビリテーション、薬物療法、呼吸調整法などが知られており、近年では嗅覚刺激の一つであるメントールに注目した研究が報告されている。先行研究では、健常者や慢性閉塞性肺疾患 (chronic

obstructive pulmonary disease; COPD) 患者を対象とした自転車エルゴメーターによる定常負荷運動や吸気抵抗負荷下において、メントール使用により呼吸困難や呼吸努力、空気飢餓感、呼吸不快が有意に軽減することが示されている^{3,4)}。

さらに、珊瑚らの研究⁵⁾では、若年健常者を対象とした非支持型上肢運動負荷試験において、メントールにより 10 名中 7 名で呼吸困難の軽減が認められた一方で、2 名では呼吸困難の増強が認められた。この結果から、メントールに対する「好み・嫌い」といった個人の嗜好が、呼吸困難の知覚に影響を及ぼす可能性が示唆されている。しかし、匂いの好みと呼吸困難に与える影響について検討した研究は限られている。これまでに、海野らが行った研究⁶⁾では若年健常者を対象に無臭と快臭で安静呼吸を比較すると、快臭で呼吸数が有意に低下した。一方で、階段昇降動作を用いた検討は行われていない。

そこで、本研究の目的は、匂いの好みと階段昇降時の呼吸困難に与える影響を明らかにすることである。本研究の成果は、慢性呼吸器疾患患者に対するリハビリテーションや日常生活のケアにおいて、匂い刺激を用いた簡便かつ非侵襲的な新たな介入手段の検討に寄与する可能性がある。

4. 測定項目

ResMo®で測定可能な 1~4)に加えて、以下の項目について評価した。

- 1) 呼吸困難;修正 Borg scale
- 2) SpO₂
- 3) PR
- 4) RR
- 5) 吸気流速の認知

呼吸の認知的側面の評価の一つとして、先行研究を参考に、吸気流速の認知 (cognition of inspiratory flow; CIF)⁴⁾を用いた。10 cm の定規を用い、左端を「息を止めたときのように、鼻や喉を空気がまったく通らない感覚」、右端を「大量の空気が鼻や喉を通っている感覚」と定義した。対象者には、階段昇降前および終了後に、該当する位置を指差して示してもらった。

6) 呼吸の認知・情動的側面

先行研究を参考に、認知的側面として、「呼吸するために筋肉に力を入れる、または努力が必要」、「十分に空気が得られない、息が詰まっている、または空気が足りないように感じる」、「胸と肺がきつい、または締めつけられているように感じる」、「呼吸するのに意識的に努力または集中力を要する」、「たくさん呼吸をしている」の 5 項目、情動的側面として、「気分の落ち込み」、「不安」、「いら立ち」、「怒り」、「恐怖」、「リラックス」、「清々しい」の 7 項目を設定した。

7) メントールの好き嫌い

メントールを用いた階段昇降運動後に、メントールの匂いについて「好き」または「嫌い」のいずれであるかを、口頭で確認した。

5. 統計学的解析方法

Shapiro-Wilk 検定を用いて正規性を確認後、反復測定分散分析を行い、有意水準 5%未満とした。有意差が認められた項目においては事後検定として Bonferroni 補正を行い、有意水準 5%/3 条件=1.67%未満とした。

結果

1. 対象者背景

平均年齢は 21.8±4.0 歳、身長ならびに体重は、それぞれ 165.7±9.7 cm, 57.6±11.1 kg であった。

2. 呼吸困難 (図 4)

運動前および運動後のいずれにおいても、無臭、メントール、好みの匂いの 3 群間で有意差は認められなかった。

3. RR (図 5)

運動前においては 3 群間で有意差を認めなかった。一方、運動後では、無臭と比較してメントールが有意に低値を示した (p<0.05)。

4. SpO₂ および PR (表 1)

いずれにおいても群間で有意差は認められなかった。

5. 吸気流速の認知 (図 6)

3 群間で有意差は認められなかった。

6. 呼吸の認知的側面 (表 2)

「空気が十分に得られない」の項目では、無臭と比べメントールおよび好みの匂いが有意に低値を示した (p<0.01, p<0.05)。また、「胸と肺がきつい」の項目では、無臭と比較してメントールが有意に低値であった (p<0.01)。

7. 呼吸の情動的側面 (表 3)

「リラックス」と「清々しい」の項目において、無臭と比べメントールと好みの匂いがともに有意に高値を示した (p<0.05, p<0.01, p<0.01, p<0.01)。さらに、「リラックス」ではメントールより好みの匂いが有意に高値を、清々しいでは、好みの匂いよりメントールが有意に高値を示した (p<0.01, p<0.05)。

8. メントールの好みによる呼吸の認知・情動的側面 (表 4)

好きな群では、4 項目でメントールが有意な効果を示した。一方、嫌いな群ではいずれの項目においても効果を認めなかった。

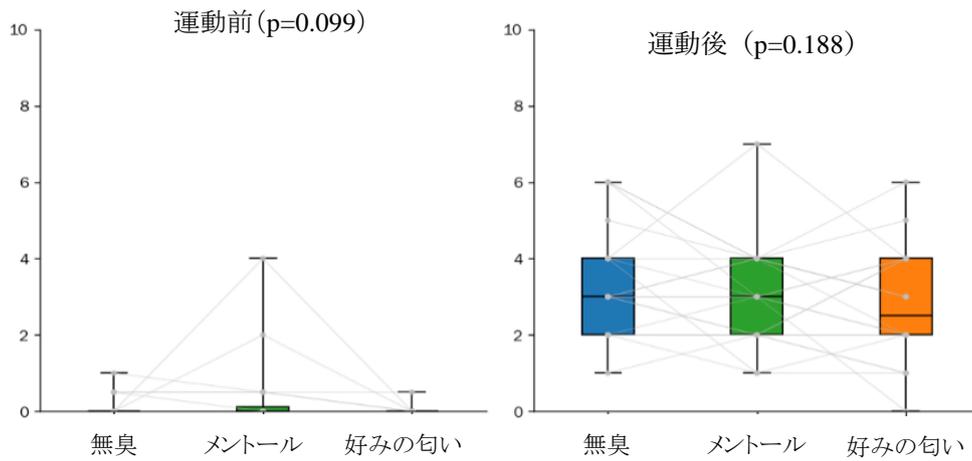


図4 呼吸困難の比較

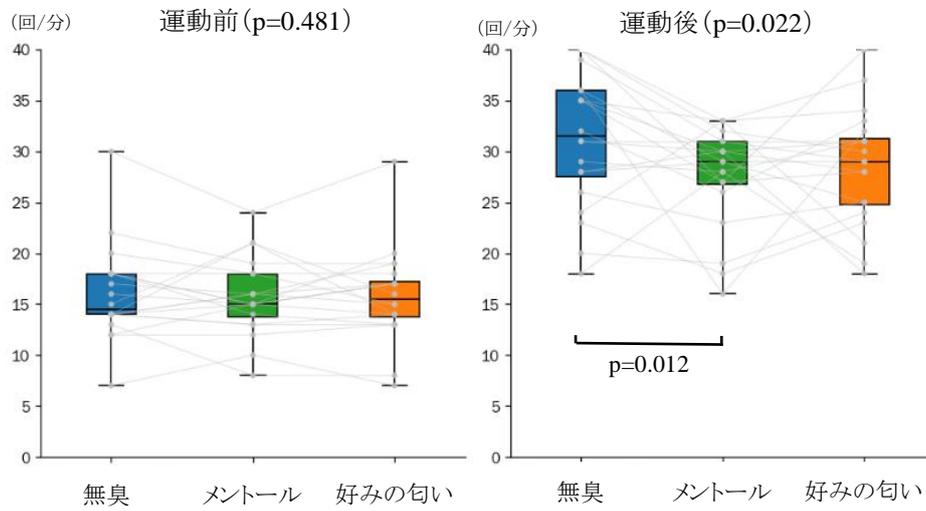


図5 呼吸数の比較

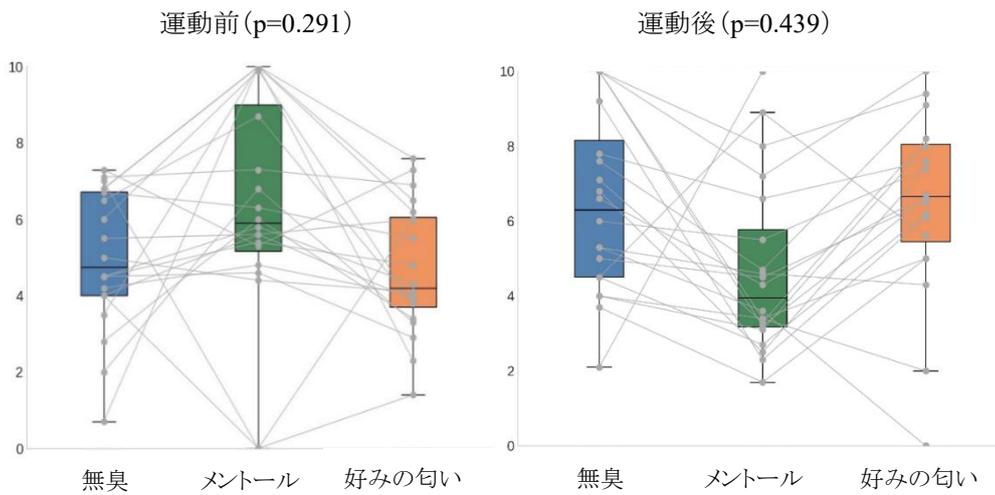


図6 吸気流速の認知の比較

表 1 各測定項目の変化量の比較

	無臭	メントール	好みの匂い	p 値
運動前・SpO ₂	98.0 [97.0-98.0]	97.5 [96.75-98.25]	98.0 [97.0-99.0]	0.882
運動後・SpO ₂	96.0 [95.0-97.0]	94.0 [93.0-96.0]	95.0 [93.0-96.0]	0.566
運動前・PR	72.5 [67.0-80.8]	74.0 [70.0-77.0]	73.5 [70.25-76.5]	0.555
運動後・PR	124.5 [117.8-135.8]	123.5 [117.8-134.0]	131.5 [117.3-136.0]	0.910

表 2 呼吸の認知的側面の比較

	無臭	メントール	好みの匂い	p 値
呼吸に努力が必要	2.0 [0.8-3.3]	0.5 [0.0-3.0]	1.5 [0.0-3.0]	0.096
空気が十分に得られない	3.5 [1.0-6.0]	1.0 ^a [0.8-3.0]	2.5 ^a [1.0-3.5]	0.004
胸と肺がきつい	1.5 [0.8-2.3]	1.0 ^a [0.0-1.0]	1.0 [0.0-2.0]	0.028
呼吸に集中が必要	1.5 [1.0-3.3]	1.5 [1.0-2.3]	0.5 [0.0-3.0]	0.203
たくさん呼吸をしている	2.5 [1.0-4.3]	2.5 [1.0-3.0]	1.0 [1.0-3.0]	0.055

表 3 呼吸の情動的側面の比較

	無臭	メントール	好みの匂い	p 値
気分の落ち込み	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.232
不安	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.867
いら立ち	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.584
怒り	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.670
恐怖	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.670
リラックス	1.5 [0.0-3.0]	3.0 [0.0-4.0]	3.5 ^{a,b} [1.0-5.3]	0.001
清々しい	1.0 [0.0-2.3]	5.0 ^{a,c} [1.5-6.3]	3.0 ^a [0.0-4.0]	0.003

表4 メントールの好みによる呼吸の認知・情動的側面の比較

	無臭	メントール	好みの匂い	p 値
好きな群 (n=12)				
認知的側面				
呼吸に努力が必要	2.0 [0.8-4.5]	0.5 [0.0-2.3] ^a	1.5 [0.0-3.0]	0.023
空気が十分に得られない	3.5 [1.8-6.0]	1.0 [0.0-2.3] ^a	2.5 [0.8-3.3] ^a	0.000
胸と肺がきつい	1.5 [0.8-3.5]	1.0 [0.0-1.5] ^a	1.0 [0.0-2.3]	0.023
呼吸に集中が必要	1.5 [1.0-2.5]	1.5 [0.8-2.25]	0.5 [0.0-2.3] ^a	0.042
たくさん呼吸をしている	2.5 [1.0-5.0]	2.5 [1.0-3.0]	1.0 [0.8-3.0] ^a	0.042
情動的側面				
気分の落ち込み	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.298
不安	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.861
いら立ち	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.601
怒り	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.725
恐怖	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.723
リラックス	1.5 [0.0-3.0]	3.0 [0.0-4.0]	3.5 [2.0-5.3] ^a	0.022
清々しい	1.0 [0.0-2.3]	5.0 [2.8-6.3] ^a	3.0 [0.8-4.3]	0.030
嫌いな群 (n=8)				
認知的側面				
呼吸に努力が必要	2.0 [0.8-3.0]	2.0 [1.0-3.0]	1.0 [0.0-2.5]	0.394
空気が十分に得られない	2.5 [1.0-4.8]	1.5 [1.0-3.0]	1.0 [1.0-2.0]	0.491
胸と肺がきつい	1.0 [0.8-2.0]	1.0 [0.0-1.0]	1.0 [0.0-2.0]	0.967
呼吸に集中が必要	2.0 [1.0-3.8]	2.0 [1.0-2.3]	1.0 [0.8-3.0]	0.506
たくさん呼吸をしている	3.5 [1.8-4.0]	2.5 [1.8-3.0]	2.0 [1.0-3.0]	0.278
情動的側面				
気分の落ち込み	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.5]	0.0 [0.0-0.0]	0.228
不安	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.3]	0.0 [0.0-0.0]	0.366
いら立ち	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-1.0]	0.0 [0.0-0.0]	0.291
怒り	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.3]	0.0 [0.0-0.0]	0.427
恐怖	0.0 [0.0-0.0]	0.0 [0.0-0.3]	0.0 [0.0-0.0]	0.233
リラックス	0.5 [0.0-2.0]	0.5 [0.0-4.3]	2.0 [1.0-4.8] ^a	0.016
清々しい	0.0 [0.0-1.5]	2.5 [0.0-6.5]	2.0 [0.0-3.3]	0.089

中央値[四分位範囲], a: 無臭との有意差 b: メントールとの有意差 c: 好みの匂いとの有意差

考察

本研究は、階段昇降における匂いの好みが呼吸困難に与える影響について検討した。その結果、呼吸困難の有意な軽減は認められなかった。一方で、呼吸の認知的側面において、「空気が十分に得られない」という項目では、無臭と比較してメントールおよび好みの匂いで有意に低値を示し、「胸と肺がきつい」という項目では、メントールが無臭と比較して有意に低値を示した。また、呼吸の情動的側面では、「リラックス」および「清々しい」の項目において、メントールおよび好みの匂いはいずれも無臭と比較して高値を示した。さらに、運動後の呼吸数は、メントール条件において無臭と比較して有意に低値を示した。

呼吸困難の有意な軽減は、メントールおよび好みの匂いのいずれの条件でも認められず、先行研究や本研究の仮説とは一致しない結果となった。その要因として、本研究における運動負荷が不十分であった可能性が考えられた。先行研究では、高強度の定常運動負荷試験を 10 分間実施した研究や、吸気抵抗負荷試験を 5 分間付加した研究など、呼吸困難が十分に惹起される条件が用いられている。一方、本研究では階段昇降 1 往復のみであり、運動時間が 1 分未満と短かったことから、呼吸困難を顕在化させる負荷としては不十分であった可能性が考えられる。

運動後の呼吸数がメントールにおいて減少した要因としては、呼吸時間の変化が関係している可能性があると考えた。先行研究では、メントール使用により運動後の吸気時間、呼気時間、および総呼吸時間が延長したことが報告されている⁶⁾。呼吸時間の延長は呼吸数の低下につながる。本研究では呼吸時間の直接的な測定は行っていないが、同様のメカニズムによって呼吸数が減少したのではないかとと思われる。

呼吸の認知的側面である「空気が十分に得られない」、「胸と肺がきつい」に対してメントールの効果が認められた背景には、メントール刺激による冷感を惹起する一過性受容体メラスタチン 8 (transient receptor potential melastatin 8; TRPM8) の活性化が関係している可能性が考えられる。先行研究では、メントールが気道に存在する TRPM8 に作用して冷感を惹起し、実際の吸気

流と本人主観的に知覚される吸気流との乖離を生じさせることが、呼吸困難の軽減に寄与していると推察されている。⁴⁾

また、呼吸の情動的側面である「リラックス」、「清々しい」に対する効果は、嗅覚刺激が情動処理に関わる中枢神経系へ直接作用する特性を有することと関連している可能性がある。視覚や聴覚刺激は、大脳皮質の感覚連合野を経由して扁桃体に入力されるのに対し、嗅覚刺激は大脳皮質を介さずに直接扁桃体に入力されることが知られている⁷⁾。この神経学的特性により、香り刺激は人間の感情面に直接的な影響を及ぼしやすく、好みの匂いを提示された際に「リラックス」や「清々しさ」が増大した可能性が考えられる。

本研究の限界として、サンプルサイズが 20 名と少数であったこと、好みの匂いの種類や濃度を統一できていなかった点があげられる。

本研究の臨床的示唆として、メントールによる嗅覚刺激が呼吸の認知的側面および情動的側面に好影響を及ぼしたことから、慢性呼吸器疾患患者における階段昇降時の呼吸困難に対するアプローチの一助となる可能性が示された。また、好みの匂いも呼吸の認知的側面に有効であったことから、個々の嗜好を考慮した環境設定に活用することで運動アドヒアランスの維持につながる可能性がある。今後は、実際の慢性呼吸器疾患患者を対象とした検討を行い、臨床応用の可能性をさらに検証する必要がある。

まとめ

本研究では、若年健常成人を対象に、無臭、メントールおよび好みの匂いの 3 条件において、階段昇降時の呼吸困難に与える影響について検討した。その結果、メントールおよび好みの匂いは、いずれも呼吸困難そのものの有意な軽減には寄与しなかった。一方で、呼吸の認知的側面および情動的側面においては、メントールおよび好みの匂いの両条件で有意な効果が認められた。また、メントールの効果は嗜好の影響を受けていた。以上より、呼吸困難に対する嗅覚刺激の効果は一律ではなく、個々の嗜好を考慮したうえで活用する必要性が示された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究実施にご協力いただいた被験者の皆様、ご指導賜りました内部障害理学療法研究室の方々ならびに関係者各位に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田中貴子: 日常生活活動とセルフマネジメント, 内部障害理学療法第 2 版. 高橋哲也, 神津 玲, 野村卓生(編), 医学書院, 東京, 2020, pp.229-230.
- 2) Gimeno-Santos E, Frei A, Steurer-Stey C, et al.: Determinants and outcomes of physical activity in patients with COPD: a systematic review. *Thorax*. 2014; 69: 731-739.
- 3) Kanezaki M, Ebihara S: Effect of the cooling sensation induced by olfactory stimulation by L-menthol on dyspnea. *Eur Respir J*. 2017; 49: 1-4.
- 4) Kanezaki M, Terada K, et al.: Effect of olfactory stimulation by L-menthol on laboratory-induced dyspnea in COPD. *CHEST*. 2020; 157: 1455-1465.
- 5) 珊瑚龍之介: 非支持型上肢運動負荷試験におけるメントールの吸入が呼吸困難に及ぼす影響- 長崎大学医学部保健学科理学療法専攻 19 期生卒業研究論文集, 2023; 19: 29-34.
- 6) 海野智裕, 上村浩信, 他: 異なるニオイと呼吸法が安静時呼吸代謝応答に及ぼす影響. *日本味と匂学会誌*. 2010; 17(3): 441-444.
- 7) 丹羽結子, 大津萌々, 他: 女子大学生を対象とした大学施設を利用した階段昇降時の生理的及び主観的反応. *健康・スポーツ科学*. 2024; 14: 11-18.
- 8) 中野良樹, 畑山俊輝, 他: 香りによる快・不快感が心的作業に及ぼす影響. *感情心理学*. 1997; 4(2): 44-54.

(指導教員 田中貴子)

トランポリン運動による呼吸循環反応と呼吸機能に及ぼす即時的影響

吉村 歩

本研究の目的は、トランポリン運動時における呼吸循環反応および呼吸機能への影響を明らかにすることである。健常者 20 名を対象に、まず、トランポリン運動を 5 分間実施し、運動中の酸素摂取量、心拍数、呼吸数、分時換気量を測定した。また、同運動として 10 回の跳躍時の呼気流速を測定した。結果、同運動中の酸素摂取量、心拍数、呼吸数、分時換気量はいずれも定常状態を示した。運動強度は 5.1METs、本研究対象者の年代に相当する 18~39 歳の VO₂ max の約 50% であった。また、同運動時の呼気流速はピークフローの 43%、咳嗽時のピークフローの 48% であった。以上の結果より、トランポリン運動は有酸素運動の手段として適用できるとともに、排痰の補助になり得る可能性が示唆された。

はじめに

本邦では、高齢化に伴って呼吸器および循環器疾患の罹患率が上昇しており、理学療法の対象患者としても増加している。こうした内部障害患者に対する運動療法のエビデンスは確立しているが¹⁾、虚弱な高齢者の増加に伴い、運動様式や種類の選択の重要性が高まる中、臨床現場でもしばしば課題となることが少なくない。

安全で効果的な運動様式の選択として昨今、トランポリン運動が注目されている²⁾。同運動は、トランポリンの弾力性を利用して跳躍を行うことが特徴で、下肢への負担は比較的軽度であり、楽しみながら行えるというメリットがある。

トランポリン運動の効果に関して検討された研究報告は限られているが、高齢女性を対象とした研究²⁾では、下肢筋力や歩行能力、バランス能力の改善が得られたとしている。また、脳卒中患者に対する 6 週間のトランポリンによるトレーニングが、バランス、歩行、転倒自己効力感を改善したとする報告³⁾や、慢性閉塞性肺疾患の症例に対して、トランポリン運動が呼吸および身体運動機能に良好な影響を及ぼしたといった報告⁴⁾が散見される。しかしながら、トランポリン運動の効果に関わる機序として、同運動による負荷強度や酸素摂取量(以下 VO₂)、心拍数など呼吸循環反応については不明である。

一方、トランポリン運動は喀痰量が多い呼吸器疾患患者の気道クリアランス(排痰)法の一助として用いられることもある⁵⁾。Kriemler ら⁶⁾は、嚢胞性線維症患者に対して気道クリアランス法にトランポリン運動を併用することで喀痰量の有意な増加を認めたとしている。また、大島ら⁷⁾は標準的な呼吸リハビリテーションで改善が困難であった肺切除術後の無気肺・排痰困難合併例に対してトランポリン運動を実施した結果、速やかな無気肺の改善が得られたとしている。しかしながら、これらの報告では、その効果の機序や呼吸機能、特に排痰に作用する呼気流速への影響は明らかにされていない。

以上より本研究では、健常者を対象に、トランポリン運動における呼吸循環反応(酸素摂取動態、負荷強度)および、呼吸機能(呼気流速)への影響の 2 点を明らかにすることを目的とした。これらが明らかになることで、理学療法現場におけるトランポリン運動の適応や実施など、対象者への運動指導の一助となり得ることが期待できる。

対象

本研究の趣旨と内容を理解し、参加への同意が得られた健常者 20 名(男性、女性それぞれ 10 名)を対象とした。除外基準は呼吸器疾患や循環器疾患の既往、喫煙歴(過去・現喫煙)、研究

参加日の前日に行った身体活動に起因する倦怠感や疲労感、筋痛が残存する場合、測定1週間以内の上気道炎罹患の既往がある者とし、気管支喘息の既往に関しては1年以内に症状のある者とした。対象者には、本研究の目的および手順、内容、リスクについて口頭および文書で十分に説明し、書面にて同意を得た上で研究を実施した。なお本研究は、長崎大学大学院医歯薬学総合研究科倫理委員会の承認を得て実施した(許可番号 25041002-2)。

方法

1. 測定内容、手順とプロトコル

まず、検討1として、トランポリン運動時の呼吸循環反応を測定した。プロトコルは安静座位2分ののち、トランポリン運動5分、終了後の回復観察3分とし、その間は呼気ガス分析装置(ミナト医科学社製エアロモニタ AE-300S)にて VO_2 、換気諸量を測定するとともに、運動終了直後に修正 Borg スケールを用いて、呼吸困難と下肢疲労を聴取した。トランポリン運動は1分間に100~120回のテンポで垂直に跳躍するよう指示した。

次に検討2として、トランポリン運動時の呼吸機能を測定した。スパイロメータを使用し努力性肺活量(forced vital capacity, 以下 FVC)測定モードにて、対象者はマウスピースを咥えた状態で、10回の跳躍を行った。その際、深呼吸はさせずに自然な呼吸で、上昇時に吸気、下降時に呼気をするよう指示し、呼気流速の最大値を測定した。

なお、使用したトランポリンは市販のスプリング式家庭用タイプであり、手すりは非使用とした。ただし、対象者がバランスを崩した際には直ちに手すりを支持するよう指示した。

2. 測定項目

長崎大学医学部保健学科内部障害系理学療法学研究室にて、対象者には研究説明書を用いて測定内容と方法の十分なオリエンテーションを行った。その後、以下の項目を評価した。

1) 事前調査

身長、体重、バイタルサイン、握力、呼吸機能[FVC、ピークフロー(peak expiratory flow rate, 以下 PEFR)、咳嗽時のピークフロー(cough peak

flow, 以下 CPF)]。

2) トランポリン運動時の呼吸循環反応

VO_2 、心拍数、呼吸数、分時換気量、自覚症状(呼吸困難、下肢疲労)。

3) トランポリン運動時の呼吸機能

呼気流速。

3. 解析方法

各評価項目は平均値±標準偏差にて表示した。また、 VO_2 、心拍数、呼吸数、分時換気量の推移を安静時、運動時、回復時の時間経過に従って同様に示した。運動強度(METs)の算出にあたっては運動時最終1分間の VO_2 の平均値を用いるとともに、年代別の最大酸素摂取量(以下 $VO_2 \text{ max}$)⁸⁾の割合で示した。また、呼気流速については実測値とともに、事前調査で測定した PEFR、CPF に対する割合も算出した。

結果

1. 対象者背景

全対象者20名がすべての測定を完遂することができ、解析対象となった。測定に伴う気分不良や転倒などの有害事象も皆無であった。全対象者ならびに男性と女性それぞれ10名ずつの対象者背景を表1に示す。

2. トランポリン運動時の呼吸循環反応

トランポリン運動時の VO_2 および心拍数、呼吸数、分時換気量の30秒毎の推移を図1に示す。いずれも定常状態を示し、運動終了とともに緩やかに低下、運動開始前の状態に回復した。運動終了直後に修正 Borg スケールを用いて聴取した全対象者の自覚症状は、呼吸困難が 3 ± 0.9 、下肢疲労は 3.5 ± 1.8 であった。

3. トランポリン運動時の呼吸機能

全対象者ならびに男性と女性それぞれ10名ずつのトランポリン運動中の呼気流速の結果を表2に示す。PEFRを100%と基準にした際の全対象者の呼気流速は43%であった。また、CPFを100%と基準にした際の全対象者の呼気流速は48%を示した。

表 1 対象者背景

	全体(n=20)	男性(n=10)	女性(n=10)
年齢 (歳)	22 ± 1	22 ± 1	22 ± 1
身長 (cm)	166 ± 9	173 ± 5	159 ± 6
体重 (kg)	59 ± 10	66 ± 7	51 ± 7
BMI (kg/m ²)	21 ± 2	22 ± 1	20 ± 2
握力 (kg)	36 ± 10	45 ± 6	28 ± 4
FVC (L)	4.0 ± 0.9	4.6 ± 0.7	3.3 ± 0.5
PEFR (L/min)	432 ± 126	521 ± 100	343 ± 76
CPF (L/min)	378 ± 113	445 ± 116	312 ± 59

平均値 ± 標準偏差, BMI=body mass index; CPF=cough peak flow (咳嗽時のピークフロー); FVC=forced vital capacity (努力性肺活量); PEFR=peak expiratory flow rate (ピークフロー)

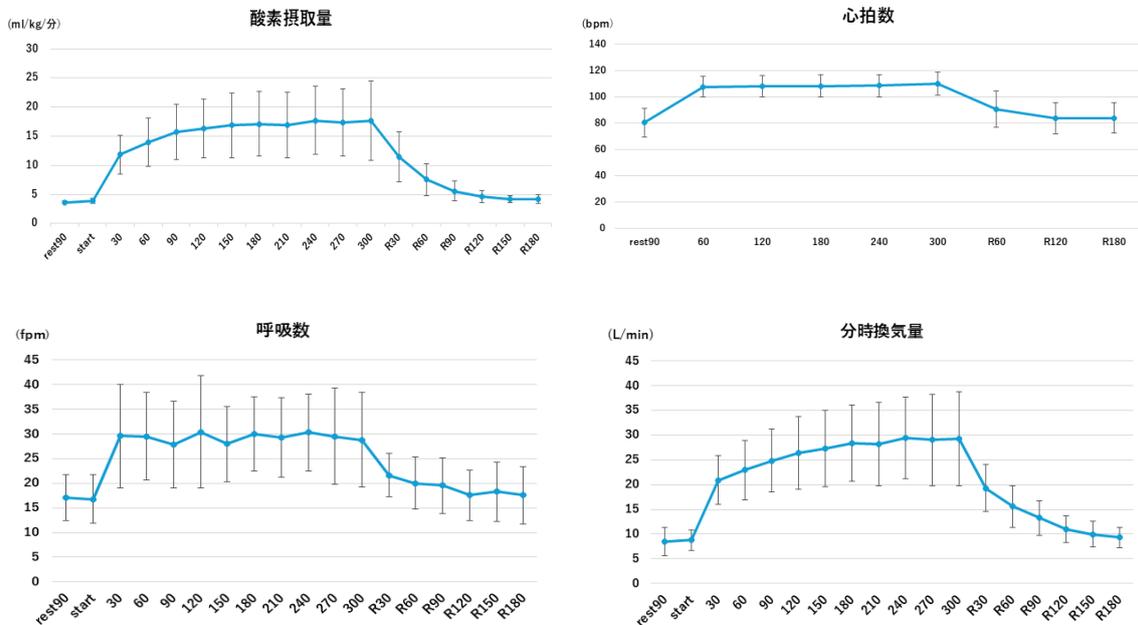


図 1 トランポリン運動時の呼吸循環反応の推移

各グラフは安静時 90 秒間 (Rest), 運動開始 (start) を経て 5 分間 (300 秒) の運動, 3 分間 (180 秒) の回復 (R) までの経時的変化を示している。

表 2 トランポリン運動中の呼気流速

	全体(n=20)	男性(n=10)	女性(n=10)
呼気流速(L/min)	192 ± 132	261 ± 159	123 ± 29

平均値 ± 標準偏差

考察

本研究では健常者を対象に、トランポリン運動時の呼吸循環反応と呼吸機能への影響を検討した。以下、これらの結果について考察する。

まず、トランポリン運動中の VO_2 、心拍数、呼吸数、分時換気量は定常状態を示した。運動強度は、本研究対象者の年代に相当する 18~39 歳の VO_{2max} (男性 39ml/kg/min, 女性 33ml/kg/min)⁸⁾ の約 50% であった。このことから、トランポリン運動は低強度から中等度の有酸素運動に相当することが明らかになった。また、 VO_2 から METs を算出した結果、トランポリン運動は対象者全体で 5.1 METs であることが分かった。5METs は自転車エルゴメーターで「楽からほどほどの労力」、歩行は運動目的で「5.8~7.1km/h」に相当する⁹⁾ ことが判明し、トランポリンによる運動療法実施の際の参考になると考えた。

次に、呼気流速への影響について考察する。山川ら¹⁰⁾ が示した自己排痰の可否の基準となる CPF は 240L/min であり、それと比較すると、男性 (261L/min) ではトランポリン運動によってこの基準を上回る呼気流速が生じていることが分かった。結果で示した通り、トランポリン運動による呼気流速は PEFR の 43%、CPF の 48% に相当し、安静呼吸であっても、トランポリン運動は呼気流速を高めることに有益である可能性が示唆された。この機序として、トランポリン運動によって、腹腔内圧が急激に上昇し、それによって横隔膜が押し上げられ、受動的な呼気が促進された⁷⁾ ののではないかと推察した。また、大島ら⁷⁾ はトランポリン運動時の呼気流量の波形が咳嗽時の波形に類似していることを示している。このことから、トランポリン運動は排痰に必要な呼気流速を促し、その補助として活用できるのではないかと考えた。

本研究の限界として、今回は若年健常者を対象とした研究であるため、この結果を他の年代、特に高齢者に当てはめることは困難である。また、跳躍の高さが腹腔内圧の変化に関係することも考えられ、呼気流速の結果のばらつきに影響を与えた可能性がある。さらに、今回使用したトランポリンの面積が小さく、対象者には同じ場所を跳躍することを意識する必要が生じた可能性もあり、跳躍動作に影響を与えたことも否定できない。

今後の展望として、トランポリン運動では安全対策としてしばしば手すりが使用されるため、その有無での同様の比較を行うことや、高齢者を含めた幅広い年齢層を対象とした検討も必要であると考えた。

まとめ

本研究では、健常者を対象にトランポリン運動時の呼吸循環反応と呼吸機能への影響を検討した。その結果、トランポリン運動中の VO_2 、心拍数、呼吸数、分時換気量は定常状態を示し、運動の負荷強度は 5.1 METs であった。また、同運動時の呼気流速は PEFR の 43% で、CPF の 48% に相当した。これらの結果より、トランポリン運動は有酸素運動の手段として適用できるとともに、排痰の補助になり得る可能性が示唆された。

謝辞

本研究を進めるにあたり、研究の実施にご協力いただいた対象者の皆様、ご助言を賜りました内部障害リハビリテーション学研究室の方々には厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 古川順光, 田屋雅信: 内部障害に対する運動療法: 基礎から臨床実践まで. メジカルビュー社, 東京, 2018.
- 2) 林田はるみ, 佐藤理緒, 他: 高齢女性を対象としたトランポリン運動により下肢運動機能の変化. 日本スポーツリハビリテーション学会誌. 2022; 11: 1-7.
- 3) Hahn J, Shin S, et al. The effect of modified trampoline training on balance, gait, and falls efficacy of stroke patients. J Phys Sci. 2015; 27: 3351-3354.
- 4) 鳥井 亮, 山口雄大, 他: ケア・トランポリンによる音楽療法で身体活動性と呼吸機能が改善した COPD 症例. 日本呼吸ケア・リハビリテーション学会. 2021; 3: 273-276.
- 5) Main E, Denehy L, et al eds.: Cardiorespiratory Physiotherapy: Adults and

- Paediatrics, 5th Edition, Elsevier, 2016, pp254-255.
- 6) Kriemler S, Radtke T, et al. Short-Term Effect of Different Physical Exercise and Physiotherapy Combination on Sputum Expectoration, Oxygen Saturation, and Lung Function in Young Patients with Cystic Fibrosis. *Lung*. 2016; 194: 659-664.
 - 7) 大島洋平, 森 裕樹, 他: 無気肺・排痰困難症例に対するトランポリン運動の効果. *日本呼吸ケア・リハビリテーション学会誌*. 2019; 29: 480-483.
 - 8) 厚生労働省ホームページ: 健康づくりのための身体活動基準 2013. <https://www.mhlw.go.jp/stf/houdou/2r98520002xple-att/2r9852000002xpqt.pdf> (2025年11月28日引用)
 - 9) 中江悟司, 吉村英一, 他: 改訂第2版「身体活動のメッツ (METs) 表」成人版. https://www.nibn.go.jp/activities/documents/2024Compendium_table_adult_ver1_1_5.pdf (2025年11月28日引用)
 - 10) 山川理恵, 横山仁志, 他: 排痰能力を判別する cough peak flow の水準: 中高齢者における検討. *人工呼吸*. 2010; 27: 260-266.
- (指導教員 神津 玲)

地域在住高齢者におけるうつ傾向と生活機能との関連

～年齢・性別ごとの比較～

倉田 和弥・西田 涼

長崎市の介護予防教室参加者を対象に、年齢・性別ごとにうつ傾向の有無と生活機能との関連を検討した。その結果、うつ傾向は全対象者で IADL、運動機能、口腔機能、フレイルと有意に関連していた。年齢別では、前期高齢者は IADL との関連が強く、後期高齢者では身体機能、フレイルとの関連が顕著であった。性別では、男性で運動機能やフレイル、女性で IADL との関連が強かった。以上より、うつ傾向に関連する生活機能は、年齢・性別により異なり、フレイル及び要介護予防のためには、それらを考慮した介入の必要性が示唆された。

はじめに

令和 6 年度の高齢社会白書¹⁾では本邦における高齢化率は 29.1% であり超高齢化社会となっている。高齢化の進行に伴い、要介護高齢者が年々増加しており、令和 7 年度の介護保険事業報告²⁾によると、2000 年では要介護認定者が 200 万人であったが、2022 年では 690 万人と約 3.2 倍に増加している。要介護認定者の増加に伴い、介護予防の必要性が高まっており、要介護に至る主な原因であるフレイル³⁾に対する予防対策が課題として挙げられている。

フレイルは加齢に伴いストレスに対する脆弱性が高まった状態を指す。身体的側面だけでなく、認知的側面、更には独居や閉じこもりといった社会的側面を含んだ包括的な概念と定義されている⁴⁾。その中で社会的フレイルとなる要因として社会参加・対人交流の低下がその要素の一つとして挙げられるが、それらは認知機能の低下と関連し⁵⁾、その低下に抑うつ症状が影響していることが示唆されている⁶⁾。抑うつ傾向は歩行能力低下、転倒、認知症、IADL との関連が報告されており⁷⁾、抑うつに対する早期の介入が、フレイルに対する包括的な支援へとつながり、要介護者の減少に寄与すると考えられる。

うつ病は女性が男性の 2 倍程度なりやすいとされており⁸⁾、抑うつ傾向についてもその有病率の

性差に関する研究が散見される。ヨーロッパのコホート研究において、抑うつ傾向の有病率は女性で高い傾向があり、これは他の健康関連リスクで調整した後においても同様の結果を示した⁹⁾。Joan は高齢者を含む 85 の研究レビューにおいて、抑うつ傾向やうつ病診断が女性に多いことを示した¹⁰⁾。また、その性差は有病率だけでなく、関連因子についてもみられる。Amaike らは日本老年学的評価研究 (JAGES) を用いた縦断研究において、男性においては感情的支援が、女性においては手段的支援が抑うつの予防と関連し、同研究においてジェンダーを考慮した予防戦略の有効性が示唆されている¹¹⁾。また関連因子の違いは、年代についてもみられる。真鳥らは前期高齢者では身体機能が抑うつと関連し、後期高齢者では認知機能が関連していることを示唆した⁷⁾。しかし、地域在住高齢者を対象とした、抑うつ傾向と生活機能をはじめとした様々な要素との関連性を性別・年代ごとに比較した研究は確認できなかった。そこで本研究の目的は、男女別・年代別でのうつ傾向と、生活機能との関連性を調査・比較し、高齢者における、抑うつに対する予防介入の方策を考察することである。

方法

1. 対象

本研究は、平成 19 年度から平成 28 年度の 9 年間に長崎市の一般介護予防教室に参加された 65 歳以上の地域在住高齢者 1,496 名のデータを用いた横断研究である。そのうち、以下に示す評価項目に不備のない 860 名(平均年齢: 74.13 歳, 男性:80 名, 女性 780 名)を対象とした。

2. 評価項目

基本属性として性別, 年齢, 年代を調査し, 生活機能に関する項目として, 抑うつ, IADL, 運動機能, 栄養, 口腔機能, 認知機能, フレイルについて調査した。

抑うつの評価は, 高齢者用うつ尺度短縮版 (Geriatric Depression Scale15:以下, GDS-15)を使用した²⁾。GDS-15 は高齢者の抑うつのスクリーニングに用いられる評価スケールであり, 15 項目の質問に対して, 「はい」「いいえ」で回答し, 5 点以上をうつ傾向ありと判定した。

IADL, 運動機能, 栄養, 口腔機能, 認知機能, フレイルの評価については, 基本チェックリスト (以下, KCL)を使用した。KCL は全 25 項目の質問に対し, 「はい」「いいえ」で回答し, 各小項目の判定基準は厚生労働省の二次予防事業対象者の選定基準に基づき選定する。No. 1~5 の IADL, No. 6~10 の運動機能, No. 18~20 の認知機能は 3 項目以上 No. 11~12 の栄養, No. 13~15 の口腔機能は 2 項目以上該当で機能低下ありと判定する。フレイル判定は KCL の合計点で判定し, 0~3 点をロバスト, 4~7 点をプレフレイル, 8 点以上をフレイルとした。

3. 統計解析

GDS-15 の得点で 5 点以上を GDS 高値群, 5 点未満を GDS 低値群として 2 群に分けた。対象を前期高齢者のみ, 後期高齢者のみ, 男性のみ, 女性のみ群に分け性別, 年齢ごとに GDS 高値群, GDS 低値群における, それぞれの項目の割合を χ^2 検定により比較する。

さらに, うつ傾向の有無を独立変数, χ^2 検定で有意差を示した群のそれぞれの項目を従属変数としたロジスティック回帰分析を行い, オッズ比 (odds ratio: 以下, OR) と 95%信頼区間 (95% confidential interval: 以下, 95%CI) を算出した。共変量に年齢を用いた。

統計解析にはすべて SPSS を用い, 有意水準は 5%とした。

結果

1. 対象者の特性(表 1)

GDS-15 の平均得点は 2.61 点であり, カットオフ値の 5 点を下回る結果となった。うつ傾向ありの該当者は 174 名 (20%) であった。KCL の合計点の平均は 3.14 点であった。各生活機能のリスク該当者は, 運動機能低下 141 名 (16%), 口腔機能低下 166 名 (19%) であった。また, KCL の合計点よりフレイル該当者をみるとロバスト 552 名 (64.2%), プレフレイル 230 名 (26.7%), フレイル 78 名 (9.1%) とロバストが最も多かった。なお, 低栄養と認知機能低下のリスク該当者はそれぞれ 12 名 (1%), 6 名 (0.7%) と少人数のため, 今後の統計解析からは除外することとした。

表1 対象者の特性

		全体(n=860)
平均年齢(歳)		74.13
対象者	前期高齢者(n,%)	472(54.9)
	後期高齢者(n,%)	388(45.1)
	男性(n,%)	80(9.3)
対象者	女性(n,%)	780(90.7)
	平均(点)	2.61
GDS-15	うつ傾向あり(n,%)	174(20.2)
	IADL低下(n,%)	20(2.3)
	運動機能低下(n,%)	141(16.4)
KCL項目	低栄養(n,%)	12(1.3)
	口腔機能低下(n,%)	166(19.3)
	認知機能低下(n,%)	6(0.7)
KCL合計	ロバスト(n,%)	552(64.2)
	プレフレイル(n,%)	230(26.7)
	フレイル(n,%)	78(9.1)
	平均(点)	3.14

2. GDS 低値群と高値群の比較(表 2)

GDS 低値群は 686 名 (79.8%), GDS 高値群は 174 名 (20.2%) であった。年齢は低値群 73.9 ± 5.32 歳, 高値群 75.1 ± 5.87 歳で高値群が有意に高かった。また性別, KCL 小項目の IADL 低下, 運動機能低下, 口腔機能低下のリスク判定と

表2 GDS低値群とGDS高値群の比較

		GDS低値群 (n=686)	GDS高値群 (n=174)	合計 (n=860)	p値	
年齢平均(歳)		73.9±5.32	75.1±5.87	74.13±5.45	0.023 ^{a)}	
性別	男性(n, %)	53(7.7)	27(15.5)	80	0.002 ^{b)}	
	女性(n, %)	633(92.3)	147(84.4)	780		
KCL項目	IADL	低下なし(n, %)	677(98.7)	163(93.7)	20	0.000 ^{b)}
		低下(n, %)	9(1.3)	11(6.3)		
	運動機能	低下なし(n, %)	599(87.3)	120(69.0)	141	0.000 ^{b)}
		低下(n, %)	87(12.7)	54(31.0)		
	口腔機能	低下なし(n, %)	574(83.7)	120(69.0)	166	0.000 ^{b)}
		低下(n, %)	112(16.3)	54(31.0)		
KCL合計	ロバスト(n, %)	492(71.7)	60(34.5)	78	0.000 ^{b)}	
	プレフレイル(n, %)	166(24.2)	64(36.8)			
	フレイル(n, %)	28(4.1)	50(28.7)			

a)Mann-WhitneyのU検定b)x²検定による

フレイル該当の有無についてx²検定より有意差

3. 年齢別の GDS と各項目の関係

1) 前期高齢者における GDS と各項目の関係

前期高齢者における GDS 低値群及び高値群と各項目の x²検定を行った結果、すべての項目で有意差がみられた。その中でも、フレイル判定において、より X 二乗値が高値を示した(表 3-1)。

2) 後期高齢者における GDS と各項目の関係

後期高齢者において、うつ傾向の有無と各項目で x²検定を行った結果、前期高齢者と同様にすべての項目で有意差がみられた。後期高齢者では、前期高齢者より GDS 高値群の割合が高く、フレイル該当者の割合も高くなっている(表 3-2)。

3) 年齢別にみたうつ傾向の要因分析

前期高齢者、後期高齢者ごとにうつ傾向の有無を独立変数、x²検定で有意差を示した項目を従属変数として、共変量に年齢、性別を含めたロジスティック回帰分析を行った結果を表 3-3 と 3-4 に示す。前期高齢者では、すべての項目が抽出され、OR は IADL、フレイル、運動機能、口腔機能の順に高くなっていた。一方、後期高齢者では、IADL 以外の項目が抽出され、フレイル、

が認められ、うつ傾向との関係が示唆された。

運動機能、口腔機能の順に OR が高くなっていた。

4. 性別ごとの GDS と各項目の関係

1) 男性における GDS と各項目の関係

男性における GDS と各項目間の x²検定の結果、IADL 以外で有意差がみられ、GDS 高値群でフレイルに該当している男性が多かった(表 4-1)。

2) 女性における GDS と各項目の関係

女性では x²検定の結果、前期高齢者の結果と同様にすべての項目で有意差がみられた(表 4-2)。

3) 性別ごとにみたうつ傾向の要因分析

男性及び女性、それぞれでうつ傾向の有無を独立変数、x²検定で有意差を示した群のそれぞれの項目を従属変数としたロジスティック回帰分析を行った結果を表 4-3、表 4-4 に示す。男性及び女性ともすべての項目が抽出された。男性において、OR は運動機能が最も高く、次いでフレイル、口腔機能であった。一方、女性では IADL で OR が高くなっていた。

表3-1 前期高齢者におけるGDSと各項目の関係

		GDS低値群 (n=387)	GDS高値群 (n=85)	X二乗値	p値
IADL	低下なし(n, %)	384(99.2)	81(95.2)	7.73	0.007
	低下(n, %)	3(0.8)	4(4.8)		
運動機能	低下なし(n, %)	356(92.0)	67(78.8)	12.985	0.000
	低下(n, %)	31(8.0)	18(21.2)		
口腔機能	低下なし(n, %)	340(87.9)	63(74.1)	10.538	0.001
	低下(n, %)	47(12.2)	22(25.9)		
フレイル判定	ロバスト(n, %)	306(79.1)	37(43.5)	64.626	0.000
	プレフレイル(n, %)	71(18.3)	29(34.1)		
	フレイル(n, %)	10(2.6)	19(22.4)		

表3-2 後期高齢者におけるGDSと各項目の関係

		GDS低値群 (n=299)	GDS高値群 (n=89)	X二乗値	p値
IADL	低下なし(n, %)	293(98.0)	82(92.1)	7.269	0.000
	低下(n, %)	6(2.0)	7(7.9)		
運動機能	低下なし(n, %)	243(81.3)	53(59.6)	17.887	0.000
	低下(n, %)	56(18.7)	36(40.4)		
口腔機能	低下なし(n, %)	234(78.3)	57(64.0)	7.392	0.000
	低下(n, %)	65(21.7)	32(36.0)		
フレイル判定	ロバスト(n, %)	186(62.2)	23(25.8)	63.086	0.000
	プレフレイル(n, %)	95(31.8)	35(39.3)		
	フレイル(n, %)	18(6.0)	31(34.8)		

表3-3 前期高齢者のうつ傾向の要因分析

変数	オッズ比 (OR)	p値	95%CI
IADL	5.492	0.030	1.177-25.619
フレイル	3.757	0.000	2.592-5.444
運動機能	3.333	0.000	1.748-6.357
口腔機能	2.711	0.001	1.517-4.847

表3-4 後期高齢者のうつ傾向の要因分析

変数	オッズ比 (OR)	p値	95%CI
フレイル	3.557	0.000	2.465-5.132
IADL	3.126	0.053	0.985-9.926
運動機能	2.839	0.000	1.683-4.789
口腔機能	1.917	0.014	1.139-3.223

表4-1 男性におけるGDSと各項目の関係

		GDS低値群 (n=53)	GDS高値群 (n=27)	X二乗値	p値
IADL	低下なし(n, %)	49(92.5)	24(88.9)	0.285	0.594
	低下(n, %)	4(7.5)	3(11.1)		
運動機能	低下なし(n, %)	49(92.5)	19(70.4)	6.841	0.000
	低下(n, %)	4(7.5)	8(29.6)		
口腔機能	低下なし(n, %)	47(88.7)	18(66.7)	5.689	0.017
	低下(n, %)	6(11.3)	9(33.3)		
ロバスト(n, %)		38(71.7)	8(29.6)		
フレイル判定	プレフレイル(n, %)	12(22.6)	9(33.3)	17.121	0.000
	フレイル(n, %)	3(5.7)	10(37.0)		

表4-2 女性におけるGDSと各項目の関係

		GDS低値群 (n=633)	GDS高値群 (n=147)	X二乗値	p値
IADL	低下なし(n, %)	628(99.2)	139(94.6)	15.755	0.000
	低下(n, %)	5(0.8)	8(5.4)		
運動機能	低下なし(n, %)	550(86.9)	101(68.7)	28.566	0.000
	低下(n, %)	83(13.1)	46(31.3)		
口腔機能	低下なし(n, %)	527(83.3)	102(69.4)	14.694	0.000
	低下(n, %)	106(16.7)	45(30.6)		
ロバスト(n, %)		454(71.7)	52(35.4)		
フレイル判定	プレフレイル(n, %)	154(24.3)	55(37.4)	21.212	0.000
	フレイル(n, %)	25(3.9)	40(27.2)		

表4-3 男性のうつ傾向の要因分析

変数	オッズ比 (OR)	p値	95%CI
運動機能	5.447	0.018	1.34-22.07
フレイル	4.136	0	1.956-8.749
口腔機能	3.96	0.028	1.161-13.52

表4-4 女性のうつ傾向の要因分析

変数	オッズ比 (OR)	p値	95%CI
IADL	6.54	0.001	2.088-20.479
フレイル	3.6	0.000	2.725-4.756
運動機能	2.856	0.000	1.861-4.382
口腔機能	2.091	0.000	1.384-3.159

考察

本研究では平成 19 年度から平成 28 年度の 9 年間に長崎市の一般介護予防教室の参加者延べ 1,496 名から、GDS 高値群 174 名、GDS 低値群 686 名を抽出し、その年齢、性別、生活機能との比較を行った。さらに、性別、年齢ごとに群を分類し、抑うつ傾向と生活機能及びフレイルとの比較を行った。

対象者の平均年齢は 74.13 歳であり、男性 80 名、女性 780 名と女性が多く、うつ傾向は 20%、フレイルが 9.1%、プレフレイル 26.7%であった。生活機能では運動機能と口腔機能低下のリスクが高い集団であった。

本邦における JAGES コホートを用いた研究において、地域在住高齢者 6,929 名の抑うつ傾向の有病率は 11.2%であった¹¹⁾。この先行研究は本研究と同様の判定基準を用いていた。

また、Murayama らは日本の地域在住高齢者 2,206 名を対象とした研究においてフレイルの割合が 8.7%、プレフレイルが 40.8%と示した¹³⁾。同研究はフレイルの判定基準に Fried らの CHS 基準に基づき判定した。本研究でのフレイル判定は KCL の合計点数を判定基準に用いたが、KCL でのフレイル判定は CHS 基準による判定と高い一致度を示している¹⁴⁾。これらを踏まえると、本研究の集団はうつ傾向を有する割合が高いが、身体機能が比較的保たれていると言える。このような集団において、身体機能やフレイルで有意差が現れたことは、うつ傾向等の心理的側面への予防的介入の重要性を示唆していると考えられる。

表 1 に示されている通り、認知機能、栄養低下の該当者が少なく、フレイル該当者の多くが、運動機能低下、口腔機能低下に該当していたと考えられる。口腔機能低下は身体的フレイルとの関連が示されており¹⁵⁾、本集団のフレイルは身体的フレイルの属性が強いと考えられる。本研究においてフレイルはすべての群で関連性が確認されており、抑うつ傾向は身体機能と一貫して関連している可能性が示唆された。

GDS 高値群における平均年齢は 75.1 ± 5.87 歳であり、GDS 低値群の 73.9 ± 5.32 歳に比べ有意に高く、性別、KCL 小項目、フレイルに関して

も χ^2 検定において有意差が確認された。後期高齢者では前期高齢者に比べ GDS 高値群におけるフレイルの割合が高く、男性では女性に比べ GDS 高値群におけるフレイルの割合が高かった。したがって、後期高齢者、男性で身体機能の低下が顕著であることが確認された。後期高齢者の群は男性が 45 人 (11.6%)、女性が 343 人 (88.4%)と前期高齢者の群の男性 35 人 (7.4%)、女性の 437 人 (92.6%)と男性の割合は後期高齢者で高く、先に述べた機能低下の状況を反映していると言える。

年齢ごとの比較では、前期高齢者においては IADL とフレイル、運動機能、口腔機能と関連しており、IADL で最も高い OR を示したが、後期高齢者ではフレイル、運動機能、口腔機能との関連性が確認されたが IADL と有意差を示さなかった。KCL における IADL の項目は外出や人との交流に関する内容が占めており、その低下は、閉じこもり傾向、社会的孤立、つまり社会的フレイルを反映していると考えられる。前期高齢者において、人との交流、生きがいを高めることがフレイル予防につながると考えられた。そして、後期高齢者では身体機能低下との関連が強く表れていた。このことから、前期高齢者に対しては、社会参加の機会を作る支援が、後期高齢者では身体機能の維持・向上が重要であると考ええる。

また、性別ごとの比較では男性において、うつ傾向は運動機能、フレイル、口腔機能と関連しており、女性においては IADL、フレイル、運動機能、口腔機能との関連が確認された。

女性においては IADL が、男性においては、運動機能、フレイルの OR が強く表れた。本集団は女性が男性に比べ機能が保たれている集団であり、後期高齢者・男性において IADL が有意差を示さずに、前期高齢者と女性で有意差を示したことは早期から、社会参加を促し抑うつ傾向に対するアプローチを行うことの重要性を反映していると考えられる。年代・性別ともにそれぞれの群で関連する因子が異なっており、抑うつに対し年代や性別を考慮した介入の必要性がある可能性が示唆された。

要介護の原因として、転倒も主な要因として挙げられるが、先行研究において、うつ傾向は転倒

のリスク因子として挙げられており⁶⁾、運動機能の低下にうつ傾向を併存している状態では転倒との関連が顕著になるとも報告されている¹⁷⁾。本集団における KCL の No. 9(転倒に対する不安は大きいですか)の問いに対し、「はい」と答えた方は 404 人にのぼり、約半数が、転倒に対する不安を抱えていた。抑うつ傾向をはじめとしたこうした心理状態が、身体活動を減少させ、転倒リスクを高めるとも考えられる。性別・年代ごとで抑うつ傾向との関連因子が異なっていたことを踏まえると、転倒予防のための評価は精神・心理的側面を含む多面的な評価が必要と考えられるが、その検討は充分に行われておらず、今後の研究課題である。

本研究にはいくつかの限界がある。まず、本研究は横断研究であり、抑うつ傾向と生活機能低下との因果関係について言及することはできない。次に本研究の対象者の性別に偏りがあり、そのため、GDS-15 の点数を 3 群に分類し、詳細な比較をすることが困難であった。

本研究は地域在住高齢者を対象とした横断研究により、抑うつ傾向と生活機能の関連因子が性別・年代ごとで異なることが示唆された。今後は縦断研究により因果関係を検討していく必要がある。また、今後は年代・性別を考慮した抑うつ傾向に対する支援を実施し、フレイル予防、介護予防につなげていくことが重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 内閣府ホームページ 令和 6 年度高齢社会白書 1 高齢化の現状と将来像
https://www8.cao.go.jp/kourei/whitepaper/w-2024/html/zenbun/sl_1_1.html (2025 年 12 月 11 日引用)
- 2) 厚生労働省ホームページ 令和 7 年度介護保険事業報告
<https://www.mhlw.go.jp/topics/kaigo/osirase/jigyo/m25/2507.html> (2025 年 12 月 11 日引用)
- 3) Chen S, Honda T, et al.: Physical Frailty and Risk of Needing Long-Term Care in Community-Dwelling Older Adults: a 6-Year Prospective Study in Japan. *J Nutr Health Aging*. 2019; 23(9): 856-861.
- 4) 荒井秀典:フレイルの意義. *日老医誌*. 2014; 51: 497-501.
- 5) Zhang W, Zhang J, et al.: Social isolation and cognitive decline in older adults: a longitudinal study across 24 countries. *BMC Geriatr*. 2025; 25(1): 775.
- 6) Ni P, Chen H, Hu X. et al.: Association between social engagement decline and cognitive function changes: mediating effect of depressive symptoms. *Aging Clinical and Experimental Research*. 2025; 37: 7
- 7) 真鳥伸也, 小田弘海, 他: 地域在住高齢者の抑うつ傾向に関する年代別の比較. *West Kyushu Journal of Rehabilitation Sciences*. 2021; 14: 21-27.
- 8) 厚生労働省ホームページ 平成 16 年地域におけるうつ対策検討会報告書 うつ対策推進方策マニュアル
<https://www.mhlw.go.jp/shingi/2004/01/s0126-5.html#1> (2025 年 12 月 11 日引用)
- 9) Van de Velde S, Bracke P et al.: Gender differences in depression in 23 European countries. Cross-national variation in the gender gap in depression. *Soc Sci Med*. 2010; 71(2): 305-313.
- 10) Girgus JS, Yang K, et al.: The Gender Difference in Depression: Are Elderly Women at Greater Risk for Depression Than Elderly Men?. *Geriatrics (Basel)*. 2017; 2(4): 35.
- 11) Amaike M, Yokoyama A, et al.: Incidence of depressive symptoms and their associations with lifestyle and social support networks among community-dwelling older adults: a sex-stratified longitudinal study using the JAGES study. *Biopsychosoc Med*. 2025; 19(1): 20.
- 12) Sheikh JI, Yesavage JA: Geriatric Depression Scale (GDS): Recent evidence and development of a shorter version. In: Brink TL (eds): *Clinical Gerontology: A Guide to Assessment and Intervention*, Haworth Press, New York, pp.165-173.
- 13) Murayama H, Kobayashi E, et al.: National

- prevalence of frailty in the older Japanese population: Findings from a nationally representative survey. *Arch Gerontol Geriatr.* 2020; 91: 104220.
- 14) Watanabe D, Yoshida T, et al.: Validation of the Kihon Checklist and the frailty screening index for frailty defined by the phenotype model in older Japanese adults. *BMC Geriatr.* 2022; 22(1): 478.
- 15) Hironaka S, Kugimiya Y, et al: Association between oral, social, and physical frailty in community-dwelling older adults. *Arch Gerontol Geriatr.* 2020; 89: 104105.
- 16) Kvelde T, Lord SR, et al.: Depressive symptoms increase fall risk in older people, independent of antidepressant use, and reduced executive and physical functioning. *Arch Gerontol Geriatr.* 2015; 60(1): 190-195.
- 17) Makizako H, Shimada H, et al.: The combined status of physical performance and depressive symptoms is strongly associated with a history of falling in community-dwelling elderly: cross-sectional findings from the Obu Study of Health Promotion for the Elderly (OSHPE) . *Arch Gerontol Geriatr.* 2014; 58(3): 327-331.

(指導教員 井口 茂)

車いすの駆動様式における身体活動強度および駆動力の比較

岡本琉夏, 平田悠真

【目的】車いすの駆動方法における身体活動強度および駆動パフォーマンスを比較し、それぞれの特徴を明らかにすることである。**【方法】**若年健常者 16 名を対象とし、1 周 60m のトラックを快適速度で周回する課題を、①両上肢駆動、②両下肢駆動、③両上下肢駆動、④右上下肢駆動、⑤担送の 5 条件で各 6 分間実施した。慣性センサーから駆動力や駆動効率、駆動距離、また、間接熱量計より METs および NET を算出し、主観的な呼吸困難、上肢・下肢疲労感を修正 Borg Scale にて評価した。**【結果】**駆動様式によって駆動効率や身体活動強度は異なった。両上下肢駆動は、駆動力、駆動効率が高いパフォーマンスの良い駆動様式であることが明らかとなった。**【結語】**両上下肢駆動は高い推進パフォーマンスと比較的低い局所疲労を両立しうる駆動様式であり、上下肢機能が保たれる対象者では移動手段としてのみならず、身体活動量向上の手段として有用である可能性が示唆された。

はじめに

1. 車いすの疫学

車いすは、歩行が困難な者にとって自立移動を可能にする重要な支援機器であり、国内外での利用者は約 8000 万人に至る¹⁾。臨床場面では、疾患の発症や術後に多くの患者が車いす生活を余儀なくされ、その後は回復に応じて歩行生活への改善あるいは車いす生活が継続される。車いす使用者はその障害特性に応じて、多様な駆動様式を用いる。例えば、中等度あるいは重度片麻痺を呈する脳血管疾患患者で片側上下肢駆動、胸髄以上の脊髄損傷患者では両上肢駆動、虚弱高齢者や認知症患者では両上下肢駆動による自走あるいは担送が選択されることが多い。また、車いす駆動は安全な移動手段であることから、骨折リスクや転倒リスクを低下させる²⁾。一方、車いす使用者は日常生活のほとんどを座位で生活することから、身体活動量の低下を招き、筋力低下や運動耐容能の低下のみならず、脳卒中や虚血性心疾患、骨粗鬆症の発症率が増加することが報告されている³⁾。そのため、車いす使用者における身体活動強度の把握は重要である。

2. 車いすの身体活動強度研究の現状

車いす駆動における身体活動強度の先行研究では、脊髄損傷患者を主とした身体活動強度 (Metabolic equivalents: METs) が報告されている³⁻⁵⁾。しかしながら、前述の研究ではいずれも両上肢駆動のみに限定されている。また、駆動力に関する研究においてもホイールに慣性センサーを装着することで定量化することができるが、脊髄損傷者を主とした両上肢駆動に限られている⁶⁾。加えて、車いすの駆動様式の違いに着目した研究は散見されず、多様な駆動方法に対応した客観的な車いす駆動の身体活動強度や駆動力は十分に明らかになっていない。様々な車いす駆動様式におけるパフォーマンスの定量することで、駆動方法間の違いのみならず、駆動効率が高い有用な駆動方法を同定することができ、車いす使用者の運動指導への活用が期待される。

3. 目的

以上のことから、本研究では車いすの多様な駆動様式における身体活動強度を間接熱量計を用いて調査するとともに、慣性センサーを用いて車いす駆動の駆動パフォーマンスを定量化し、駆動様式間の特性を比較検討することを目的とした。

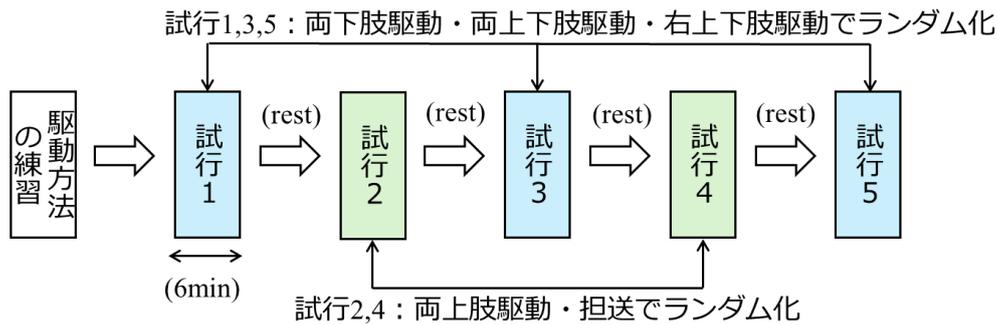


図1 実験プロトコル

対象と方法

1. 対象者

対象は若年健常者 16 名とした。包含基準は右利き, 18 歳以上, 除外基準は現病歴および既往歴に運動器疾患, 呼吸循環器疾患, 脳血管疾患を罹患している者, 疼痛を有する者, 精神障害を有する者とした。対象者には, 本研究の目的及び手順, リスクについて口頭および文書で十分に説明し, 書面にて同意を得た。本研究は, 長崎大学大学院医歯薬学総合研究科倫理委員会の承認を得て実施した(許可番号 25031301)。

2. 実験プロトコル

1 周 60m のトラックを快適速度で 6 分間周回する課題を実施した。条件は①両上肢駆動, ②両下肢駆動, ③両上下肢駆動, ④片側上下肢駆動, ⑤担送の 5 条件とし, 被験者内で全条件を実施した。駆動方法を統一するために, 両上下肢駆動では両上肢は同時に, 両下肢は交互に使用し, 両下肢駆動も同じく両下肢を交互に使用することを指導した。片側上下肢駆動は利き手である右上下肢を使用することとした。試行間は十分に休憩し, 修正 Borg スケールが 2 以下に回復した時点で次試行を行った。課題の順序は下肢の疲労感を考慮し, 1, 3, 5 試行目に両上下肢駆動, 両下肢駆動, 片側上下肢駆動のいずれか, 2, 4 試行目に両上下肢駆動, 担送のいずれかとする疑似ランダム処置を行った(図 1)。

2. 計測機器

慣性センサー(Ax6, Axivity 社製, UK)は加速度・角速度センサーが内蔵されており, サンプル周波数 100Hz, $\pm 8g$, $\pm 1000dps$ にて計測し

た。慣性センサーの装着位置は車いすの両ホイール, 両前腕遠位部, 両下腿遠位部の計 6 カ所とした。

間接熱量計(AT-1100, Anima 社製, 日本)により, 安静時および課題時の酸素摂取量, および二酸化炭素摂取量を計測した。



図2 計測機器の装着位置

慣性センサーは両ホイールおよび両上下肢に装着し(左・中央図), 間接熱量計は右図のように装着した

3. 評価項目

人口統計学的評価として, 年齢, 性別, 利き手, 身長, 体重, Body mass index (BMI)を聴取した。利き手はエディンバラの利き手テストを行い全員が右利きであることを確認した。

疲労感尺度として, 呼吸困難感, 上肢・下肢疲労感を修正 Borg scale を用いて評価を行った。

4. データ処理

駆動力指標として, 各慣性センサーから収集したデータに基づき, 一回の駆動おける最大角速度を駆動力, 一回の駆動におけるホイールの回転数を駆動効率, 6 分間の総移動距離を動距離として算出した。

身体活動強度指標として METs を用い, 間接熱量計の酸素摂取量データから算出した(式①)

$$METs = \frac{\text{課題時酸素摂取量(ml/min/kg)}}{\text{安静時酸素摂取量(ml/min/kg)}} \quad \text{--- ①}$$

また、駆動力に対するエネルギー費効率として機械的エネルギー効率(Net mechanical efficiency: NET)を用い、酸素摂取量および二酸化炭素摂取量からエネルギー消費量を算出し(式②)、駆動距離で除した(式③)。

$$\begin{aligned} \text{エネルギー消費量} &= (3.9 \times \text{VO}_2 + 1.1 \times \text{VC0}_2) \times 1.44 \quad \text{--- ②} \\ \text{NET} &= \frac{\text{エネルギー消費量(kcal/min)}}{\text{駆動距離(m)}} \quad \text{--- ③} \end{aligned}$$

5. 統計処理

各駆動様式における駆動力、駆動効率、駆動距離、自覚的疲労感、身体活動強度、機械的エネルギー効率を一元配置分散分析にて比較し、事後比較は Holm 法で多重比較補正を行った。有意水準は 5%未満とした。

結果

1. 人口統計学的評価

年齢、性別、身長、体重、BMI を表 1 に示す。

表 1 対象者背景

	全体 (n=16)	男性 (n=11)	女性 (n=5)
年齢, 歳	21.9±1.1	21.5±0.7	22.8±1.3
身長, cm	170.1±8.9	175.1±4.6	159.1±5.7
体重, kg	60.9±8.3	64.9±5.5	52.0±6.1
BMI, kg/m ²	21.0±8.3	21.2±1.9	20.5±1.1

平均値 ± 標準偏差, BMI=body mass index

2. 駆動力指標

駆動力を示す最大角速度は、両上下肢駆動は両上肢駆動と比較して有意に高値を示した(図 3A)。

駆動効率では両下肢駆動は両上肢駆動・右上下肢駆動と比較して有意に高値を示した。また、両上下肢駆動は両上肢駆動と比較して有意に高値を示した(図 3B)。

駆動距離は、両上下肢駆動は両上肢駆動と比較して有意に高値を示した(図 3C)。

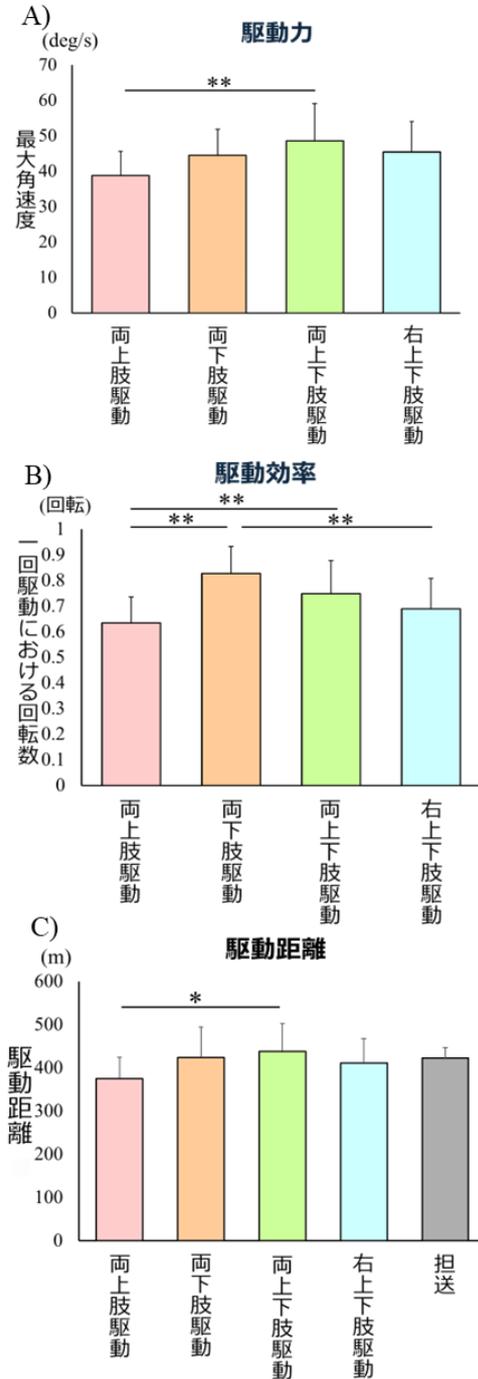


図 3 駆動力指標

*: p < 0.05

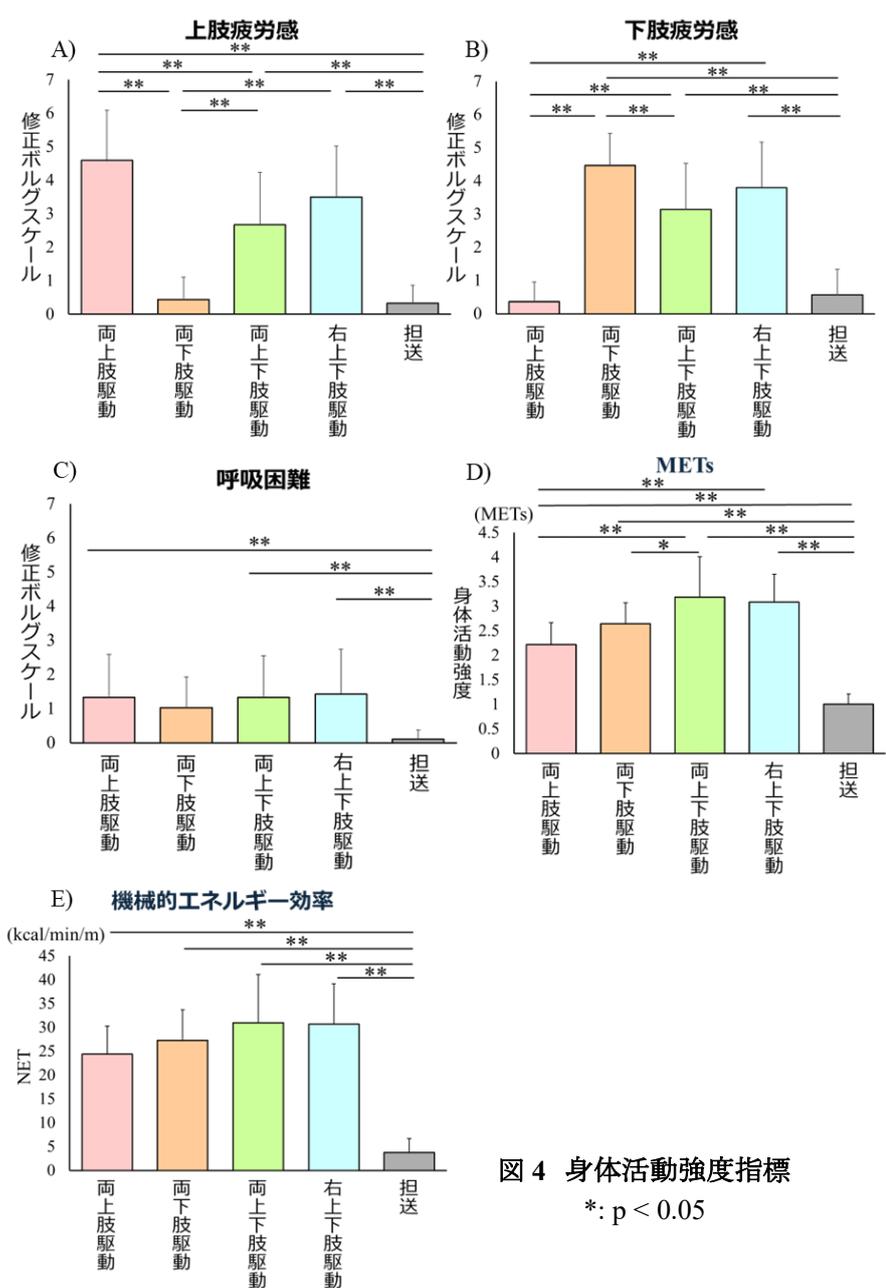


図4 身体活動強度指標
*: p < 0.05

3. 身体活動強度指標
 上肢の疲労感は、上肢を使用する両上肢駆動、両上下肢駆動、右上下肢駆動の3条件は、上肢を使用しない他の2条件と比較して有意に高値を示し、上肢の疲労感が強く、本研究課題が成立していることを確認した。また、両上肢駆動は、上肢、下肢ともに使用する両上下肢駆動と比較して上肢疲労感が有意に高値を示し、上肢のみでの駆動では疲労感がより高くなることが

明らかとなった(図4A)。
 下肢の疲労感は、下肢を使用する両下肢駆動、両上下肢駆動、右上下肢駆動の3条件は、下肢を使用しない他の2条件と比較して有意に高値を示し、下肢の疲労感が強かった。加えて、両下肢駆動は上肢、下肢ともに使用する両上下肢駆動と比較して下肢疲労感が有意に高値を示し、上肢疲労感と同様の結果となった(図4B)。
 呼吸困難感は、全体的に低い数値であるが、

両上肢駆動, 両上下肢駆動, 右上下肢駆動は担送と比較して有意に高値を示した(図 4C).

METs は, すべての駆動条件は担送と比較して有意に高値を示し, 車いす駆動によって身体活動強度が上昇することを確認した. また両上下肢駆動は両上肢駆動, 両下肢駆動と比較して有意に高値を示した. また右上下肢駆動は両上肢駆動と比較して有意に高値を示した(図 4D).

機械的エネルギー効率は, すべて駆動条件は担送と比較して有意に高値を示した. 一方, それぞれの駆動条件間では有意差は認められなかった(図 4E).

考察

本研究では, 車いすの駆動様式により身体活動強度および駆動パフォーマンス指標が異なることが示された.

両上肢駆動は駆動力および駆動効率が低く, パフォーマンスが低い駆動様式だった. 一方, 両上下肢駆動は駆動効率および駆動力が高く, パフォーマンスが高い駆動様式だった. また, 両下肢駆動は両上下肢駆動と比較して, 駆動効率は高いものの, 駆動力は低い点が両上下肢駆動に劣っている. 右上下肢駆動は非対称的な駆動であり, 駆動効率が低い駆動様式であると考えられる.

上下肢の局所疲労感において, 両上肢駆動, 両下肢駆動ではそれぞれ上肢・下肢 Borg scale はややきついーきつい結果となっていた. 両上下肢駆動では, 局所疲労度は低いが, METs が最も高値を示した. 自覚的疲労度と METs には正の相関関係があるが⁷⁾, 本研究結果の条件間の傾向は異なる結果を示した. その要因として, 両上肢や両下肢, 右上下肢駆動では一部の四肢のパターン化された継続運動により, 局所疲労が高くなる一方, 両上下肢駆動では四肢の身体的負担が分散されるため, 局所疲労が他条件より低下することが推察される.

また, 機械的エネルギー効率は駆動条件間で有意差がないことから, 身体活動強度やエネルギー消費量に影響を与えているのは駆動速度等のパフォーマンスの違いであることが考えられる.

本研究における両上肢駆動の METs は

2.2METs であり, 先行研究における脊髄損傷者の両上肢車いす駆動の METs は 2.1–2.8METs と報告されていることから^{3,4)}, 健常者による両上肢駆動は脊髄損傷者と同等の METs であることが明らかとなった. また, 本研究における両上下肢駆動, 右上下肢駆動の METs は 3.0 を超える結果となっている. 健常者において 3.0–3.3METs の活動としては, 平らで固い地面での歩行(4.0km/h)やカーペットやフロアの拭き掃除等が挙げられる⁸⁾. 両上下肢駆動, 右上下肢駆動は平地歩行等と同等の身体活動強度であると言える.

これらの結果より, 例えば椎体骨折患者や股関節疾患等, 上下肢機能が保たれている場合, 駆動効率や局所疲労が少ない両上下肢駆動は車いすの移動手段としてだけでなく, 活動量を向上する方法として優れている可能性がある.

結語

車いすの駆動様式によって, 駆動効率や身体活動強度が異なることが明らかとなった. 健常者による車いす駆動が患者と同等の身体活動強度を示す結果となった. 両上下肢駆動・片側上下肢駆動の活動強度は健常者の通常歩行と同等の可能性が示唆された. また両上下肢駆動はパフォーマンスが高く, 駆動力, 駆動効率の観点から駆動方法として有用であると考えられる.

謝辞

本研究を進めるにあたり研究の実施にご協力いただきました研究対象者の皆様, ご指導いただきまし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) World Health Organization. Wheelchair provision guidelines. Geneva: World Health Organization; 2023. Available from: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240074521>.

- 2) Axelsson KF, Litsne H, et al.: Comparison of Fractures Among Older Adults Who Are Ambulatory vs Those Who Use Wheelchairs in Sweden. *JAMA Netw Open*. 2023; 6(2): e2255645.
- 3) Conger SA, Herrmann SD, et al.: 2024 Wheelchair Compendium of Physical Activities: An update of activity codes and energy expenditure values. *J Sport Health Sci*. 2024; 13(1): 18-23.
- 4) Collins EG, Gater D, et al.: Energy cost of physical activities in persons with spinal cord injury. *Med Sci Sports Exerc*. 2010; 42(4): 691-700.
- 5) 太田啓介, 森田智之, 他 : 市販の計測機器を用いた脊髄損傷者の移動距離と身体活動量の検討. *支援工学理学療法学会誌*. 2022;2 (1), 14-21.
- 6) Ojeda M, Ding D: Temporal parameters estimation for wheelchair propulsion using wearable sensors. *Biomed Res Int*. 2014; 2014: 645284.
- 7) Scherr J, Wolfarth B, et al.: Associations between Borg's rating of perceived exertion and physiological measures of exercise intensity. *Eur J Appl Physiol*. 2013; 113(1): 147-155.
- 8) 中江悟司, 吉村英一, 小野 玲 (編) : 改訂第2版『身体活動のメッツ (METs) 表』成人版. 国立研究開発法人医薬基盤・健康・栄養研究所, 2024 . URL:https://www.nibn.go.jp/activities/documents/2024Compendium_table_adult_ver1_1_5.pdf

(指導教員: 西 祐樹)

歩行運動は睡眠制限に関連した術後痛の増強を軽減できるか？

—ラット術後痛モデルを用いた検討—

嶽野花音・田中野乃・山下陽乃琉

本研究では、入眠遅延による睡眠制限を課したラット術後痛モデルに対して歩行運動を負荷し、睡眠制限に伴う術後痛の増強に対する歩行運動の疼痛軽減効果について検討した。その結果、睡眠制限を課した群における患部の痛覚感受性および荷重時痛は術後痛群のそれらより有意に増強しており、入眠遅延による睡眠制限が術後痛を増強させる可能性が示唆された。一方、術後痛を誘発した翌日から歩行運動を負荷した群における患部の痛覚感受性と荷重時痛は睡眠制限群のそれらとの間に有意差を認めず、歩行運動による疼痛軽減効果は明確には認められなかった。以上の結果は、周術期に睡眠の問題を抱える患者に対しては、単に運動療法のみを実施するのではなく、睡眠の問題を軽減するような介入を併用することが必要になることを示唆するものであると考えられる。

はじめに

各種外科手術後の理学療法において、しばしば中等度以上の強い術後痛を呈するケースを経験することがある。実際、その発生頻度について検討したシステマティックレビュー・メタアナリシス¹⁾では、各種外科術後2週までに Numeric Rating Scale (NRS) で 4 以上の術後痛を呈する患者の割合は 29%~58%であることが示されている。このような強い術後痛は慢性術後疼痛を発症するリスク因子の 1 つであることが知られており、たとえば、人工股関節全置換術 (total hip arthroplasty; THA) および人工膝関節全置換術 (total knee arthroplasty; TKA) 患者を対象とした先行研究²⁾では、強い術後痛が術後 6 か月後における慢性術後疼痛発症のリスク因子となることが示されている。

術後痛の強さに影響をおよぼす要因の1つに睡眠があり、睡眠に問題を抱えたケースでは術後痛が増強することが示されている。具体的には、各種外科術後における質問紙票で評価される主観的な睡眠の質の低下と中等度以上の術後痛の関連性を検討した先行研究³⁾では、主観的な睡眠の質が低下した患者群の術後の自覚的疼痛強度は睡眠の質が低下していない群のそれと

比べて有意に高いことが示されている。また、術前の主観的な睡眠の質と回旋筋腱板再建術後の疼痛の関連を調査した Wu ら⁴⁾の報告によると、主観的な睡眠の質が低い患者群の術後1か月後までの自覚的疼痛強度は主観的な睡眠の質が高い患者群のそれと比べて有意に高いことが示されている。加えて、Hamilton ら⁵⁾は、TKA 患者を対象として術前から TKA12 か月後までの不眠症状と疼痛強度の推移について調査している。その結果、術前に不眠症状があっても術後に改善した群では TKA12 か月後までに術後痛が軽減するものの、術前から TKA6 週間まで不眠症状が持続していた患者群では TKA12 か月後までの経時的な疼痛の軽減が不良であることが示されている。このように、周術期における睡眠の問題は術後痛の増強を誘発し、慢性術後疼痛発症のリスク因子となることが示されている。そのため、このようなケースに対する効果的な理学療法戦略の確立が求められている。

一方、急性痛に対する理学療法では、傷害部位の治癒を進め、痛みを長引かせないこと、また、安静を最小限にとどめて身体活動を維持することが介入のポイントとされている⁶⁾。そのため、対象患者における医学的管理が許容する範囲で積極的な運動療法を実施することが重要となる。

この点に関連して、Yamaguchi ら⁷⁾は、自然気胸に対して胸腔鏡下手術が適用された患者を歩行運動と有酸素運動を中心とした運動療法を実施する群と運動療法を実施しない対照群に振り分け、術後の疼痛強度の推移を検討している。その結果、有酸素運動を実施した群の術後の自覚的疼痛強度の改善は対照群のそれと比べて有意に良好であったことを報告している。このように、術後理学療法における有酸素運動の実施は術後痛の軽減に有効と思われるが、前述したような睡眠の問題を抱える患者の術後痛に対しても有効か否かは明らかではない。そこで、本研究では入眠遅延による睡眠制限を課したラット術後痛モデルに対して歩行運動を負荷し、術後痛の軽減効果について検討した。

材料と方法

1. 実験動物

実験動物には6週齢のWistar系雄性ラット24匹を用い、これらを①後述する方法にて右足底に術後痛を誘発した後、7日間通常飼育する術後痛群(n=4)、②後述する方法にて睡眠制限を課す過程で術後痛を誘発する睡眠制限群(n=6)、③同様に睡眠制限を課す過程で術後痛を誘発し、その後、7日間歩行運動を負荷する運動群(n=7)、④無処置の対照群(n=7)に振り分けた(図1)。本研究は長崎大学動物実験委員会にて承認を受けた後、同委員会が定める動物実験指針に準じ、長崎大学大学院医歯薬学総合研究科バイオメディカルモデル動物研究センターにおいて実施した(承認番号:2505302043-2)。

2. 術後痛モデルの作製方法

術後痛を誘発する群のラットに対しては、3種混合麻酔薬(塩酸メドミジン0.375 mg/kg, ミタゾラム2 mg/kg, 酒石酸ブドルフェノール2.5 mg/kg)を腹腔内へ投与して麻酔した後、右足底面の踵骨隆起から0.5 cm 足趾側の部位から足趾に向かって1 cm にわたり皮膚を切開した。続いて、筋膜を縦に約1 cm 切開した後、足底の筋群を鉗子で持ち上げ足底の長軸方向と平行に切開した後、圧迫して止血し、切開部を縫合した。縫合後の術創部にはポピドンヨードを塗布し、術創部の感

染を予防した。

3. 睡眠制限モデルの作製方法

先行研究⁸⁾の報告に準じて以下に述べる方法にて睡眠制限を誘発した。具体的には、幅80 cm, 奥行47 cm, 高さ46 cm のプラスチック容器内に直径4 cm, 高さ8 cm の円筒形のプラットフォームを10 cm 間隔に配置した。そして、プラットフォーム上面より1 cm 低い位置まで22°Cの水を満たした後、プラットフォーム上にラットを3時間静置し、睡眠制限を課した。なお、この実験操作はラットの入眠時間に合わせて午前8時30分~11時30分の間実施した。なお、先行研究ではこの方法で入眠を阻害するとREM睡眠の減少やそれに伴う空間記憶能力の低下などが誘発されることが報告されている。⁹⁻¹¹⁾

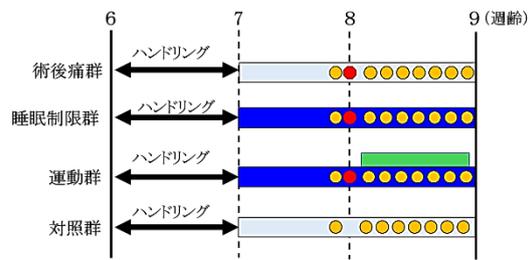


図1 本研究の実験プロトコル

●: 術後痛誘発の処置, ●: 行動学的評価
 ■: 通常飼育, ■: 睡眠制限, ■: 歩行運動

4. 歩行運動の実施方法

ヒトにおける普通歩行時の酸素摂取量は最大酸素摂取量の32.8%であることが知られている¹²⁾。また、Bedford ら¹³⁾は、ラットにトレッドミル運動を負荷した際の歩行速度と酸素摂取量の関係について検討しており、10 m/min の条件では最大酸素摂取量の29.8%、15 m/min の条件では46.7%、20 m/min の条件では63.8%であったと報告している。本研究ではヒトの普通歩行をシミュレーションするため、前述の報告を参考に10 m/min の歩行速度を採用した。そして、運動群に対しては、前述した方法で術後痛を誘発した翌日から7日間、小動物用トレッドミル装置(シナノ製作所、日本)を用いて、10 m/min, 傾斜0°, 1日60分の条件にて歩行運動を負荷した。なお、運動は各日の行動学的評価の終了後に実施し、

小動物用トレッドミル装置内に入ることによるストレスが痛みにおよぼす影響を考慮し、術後痛群および睡眠制限群、対照群は電源を入れていない装置内に同条件で静置した。

5. 活動量の測定方法

前述の方法による睡眠制限がラットの睡眠におよぼす影響について確認するために、以下の方法にて活動量を測定した。すなわち、通常飼育および睡眠制限を課すラットのうち、各 3 匹ずつを対象とし、そのラットの頸部皮下に 3 軸加速度計センサーを内蔵したデバイス(nanotag[®], キッセイコムテック株式会社)を埋め込み、24 時間の活動量を測定した。そして、nanotag[®]内で合成される 3 軸合成波(サンプリング周波数 25Hz)において、12 秒間内に推奨される閾値を下から上へ横切った回数をカウントし、その回数を活動量の指標とした。測定時間はラットの概日リズムに合わせて、19 時から測定を開始し、24 時間測定し、活動状況から睡眠の状況を推定した。

6. 痛みの行動学的評価

実験期間中は、以下に述べる痛みの行動学的評価を実施した。なお、評価を適切に行うため、実験開始に先立ち 7 日間のハンドリング期間を設け、ラットを評価環境に馴化させた。また、これらの評価は、術後痛誘発前日および誘発後 7 日間実施した。

1) 患部の痛覚感受性の評価

患部の痛覚感受性については、足底の機械的刺激に対する痛覚閾値を 4g の von Frey Filament(以下、VFF;North Coast Medical 社)を用いて評価した。覚醒下のラットを自作の亚克力製評価装置内に静置した後、足底を 10 回刺激した際の痛み関連行動(刺激時における刺激側後肢の逃避反応やなき声、非刺激側後肢をばたつかせる動きなど)の出現回数を計数し、これをデータとして採用した。

2) 荷重時痛の評価

各ラットの荷重時痛を評価するため、インキャパンタンステスト装置(バイオリサーチ社製)を用いて左右の後肢荷重量を測定した。具体的には、覚醒状態にあるラットを装置上に設置されたアクリルホルダー内に入れ、2 枚のセンサープレートの上にラットの後肢足部が左右対称になるように静置した。そして、10 秒間安静状態を保った際の左右の後肢荷重量を計測した。次に、得られた測定値から左右後肢の合計荷重量(g)を求め、この値に対する患側後肢の荷重量の百分率を算出した。計測は 7 回行い、算出した各百分率の平均値を各個体のデータとして採用した。

7. 統計学的解析

すべてのデータは平均値±標準偏差で示した。本研究における痛みの行動学的評価においては、同一個体における反復測定データを扱うことから、はじめに時間要因に対する球面性の成否を Mauchly の検定により評価した。その結果、球面性が担保されなかったため、反復測定分散分析の前提が満たされないと判断し、個体差を適切に扱うことが可能な線形混合効果モデル(linear mixed-effects model)を主解析として採用した。線形混合効果モデルでは、群と時間(測定日)を固定効果として、個体をランダム効果として組み込み、群間差および群×時間の交互作用を評価した。なお、事後解析には Kenward-Roger 法を用いて自由度を調整した推定平均値の比較を行った。各時間点における群間比較も同様に推定平均値に基づいて実施し、いずれの検定とも有意水準は 5%未満とした。

結果

1. 活動量

通常飼育したラットでは断続的睡眠期に入ると、活動期と比べて活動量が減少する傾向が認められた。一方、睡眠制限を課したラットでは断続的睡眠期に入ると一旦活動量は減少するものの、その後、活動期に近いレベルで活動量が推移していた。(次頁図 2)

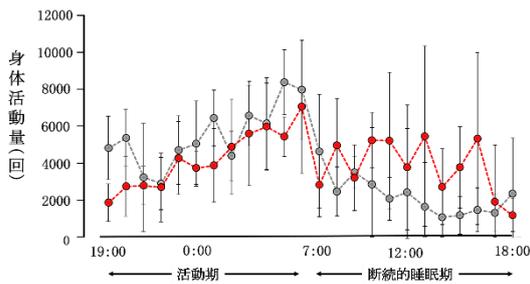


図 2 睡眠制限による活動量の変化

灰色:通常飼育, 赤:睡眠制限

2. 痛覚感受性

術後痛誘発前の逃避反応の出現回数について、4 群間に有意差を認めなかった。次に、術後 1 日目において、術後痛群および睡眠制限群、運動群の逃避反応の出現回数は、対照群のそれと比べて有意に高値を示し、この 3 群間に有意差を認めなかった。そして、2 日目以降の推移をみると、睡眠制限群の逃避反応の出現回数は術後 4 日目および 6 日目において術後痛群のそれと比べて有意に高値を示した。また、運動群の逃避反応の出現回数は術後 6 日目および 7 日目に術後痛群のそれと比べて有意に高値を示した。なお、運動群の逃避反応の出現回数は睡眠制限群のそれとの間に有意差を認めなかった。加えて、術後 1 日目以降の推移を見ると、術後痛

群、睡眠制限群、運動群の 3 群は同様の傾きを示しており、この 3 群の回復の程度に差がないことが伺えた(図 3a)

3. 荷重時痛

術後痛誘発前の荷重時痛について、4 群間に有意差を認めなかった。次に、術後 1 日目において、術後痛群および睡眠制限群、運動群の患肢荷重率は、対照群のそれと比べて有意に低値を示し、この 3 群間を比べると、睡眠制限群および運動群は術後痛と比べて有意に低値を示した。そして、2 日目以降の推移をみると、睡眠制限群および運動群の患肢荷重率は、術後痛群のそれと比べて有意に低値を示した。一方、運動群と睡眠制限群の間に有意差を認めなかった。なお、術後 1 日目以降の推移を見ると、術後痛群および睡眠制限群、運動群の 3 群は同様の傾きを示しており、この 3 群間の回復の程度に差がないことが伺えた(図 3b)。

考察

周術期における不眠症状をはじめとした睡眠の問題は術後痛を増強させ、慢性術後疼痛発症のリスクを高めることが知られている。本研究では、そのようなケースに対する効果的な理学療法戦

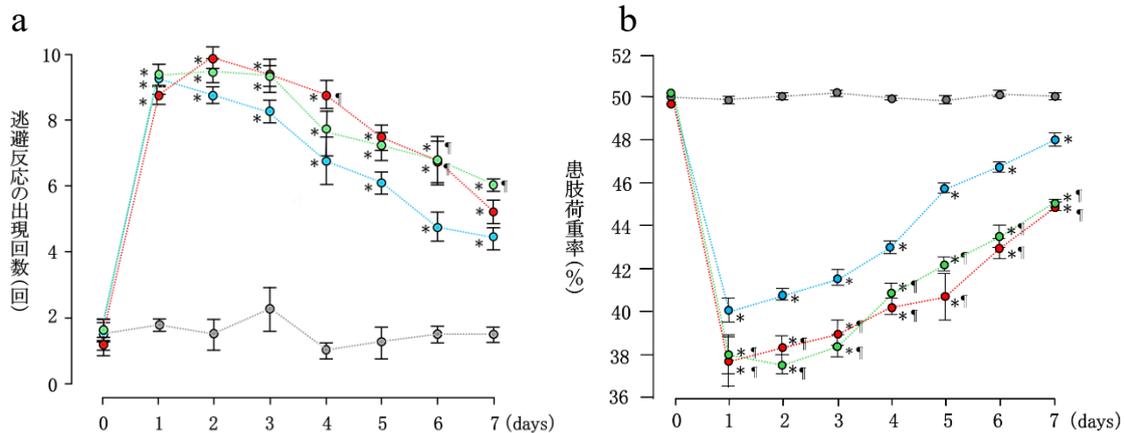


図 3 患部の痛覚感受性および荷重時痛の変化

a: 患部の痛覚感受性, b: 荷重時痛

灰色:対照群, 青:術後痛群, 赤:睡眠制限群, 緑:運動群

*:対照群との有意差. †:術後痛群との有意差, $p < 0.05$. 平均 ± 標準偏差

略を確立するための基礎的知見を得るために、入眠遅延による睡眠制限を課したラット術後痛モデルに対して歩行運動を負荷し、術後痛の軽減効果について行動学的評価から検討した。

本研究で採用した修正マルチプラットフォーム法は睡眠障害を動物モデルに誘発するための方法の1つとして知られており、本法を用いて短時間の睡眠制限を反復的に負荷するとREM睡眠の減少や空間記憶障害が誘発されることが先行研究で示されている⁸⁻¹¹⁾。つまり、軽度の睡眠の問題を誘発するための手法といえる。本研究において睡眠制限を課したラットにおける断続的睡眠期の活動量は通常飼育したラットのそれより増加している傾向が認められた。今回は各飼育条件において3匹ずつから得られた結果ではあるものの、断続的睡眠期における活動量の増加は実験操作により睡眠に問題が生じていた可能性を示唆しているのではないかと考えられる。

次に、睡眠制限が術後痛におよぼす影響について、術後痛誘発前における睡眠制限群の患部の痛覚感受性および荷重時痛は術後痛群のそれらとの間に有意差を認めなかったが、術後1日目以降の推移をみると、患部の痛覚感受性は術後痛群と比べて高い傾向にあり、また、荷重時痛は術後痛群よりも術後1日目から実験終了時まで有意に増強していた。これらの結果より、本研究における睡眠制限は正常状態における痛覚感受性の亢進は惹起せず、足底の軟部組織の切開とそれに続く炎症反応といった侵害刺激入力に対する反応性を増幅した可能性を示唆していると考えられる。一方、睡眠制限群における患部の痛覚感受性および荷重時痛の時間経過に伴う改善の傾向は術後痛群のそれらと同様であった。つまり、本研究における睡眠制限は術後痛を増強させても、術後の時間依存的な回復過程そのものは大きく変化させなかった可能性を示している。本研究で採用した足底の軟部組織を切開することで作成する術後痛モデルでは、切開後に生じる痛覚閾値の低下は末梢組織の損傷およびその後持続する炎症反応に起因し、時間経過とともに収束することが知られている¹⁴⁾。一方、入眠遅延や断眠、中途覚醒といった睡眠の問題は末梢組織における炎症性細胞および炎症性サイトカインの増加ならびに二次侵害受

容ニューロンの興奮性増大や下行性疼痛抑制系の機能低下を引き起こし、侵害刺激に対する反応性が増強される可能性が報告されている¹⁵⁾。これらの知見を踏まえると、本研究の睡眠制限は疼痛を新たに生じさせる要因というよりも、侵害刺激に対する中枢性の感受性を高める修飾因子として作用したのではないかと考えられる。ただし、本研究では術創部の組織学的評価や炎症マーカーの測定を行っていないため、今後はこれらの点について検討を進める必要がある。

次に、睡眠制限によって増強された術後痛に対する歩行運動の効果について、運動群の患部の痛覚感受性および荷重時痛は実験期間を通じて睡眠制限群のそれらと同様の推移を示した。また、回復の推移についても両群で大差は認められなかった。つまり、本研究で採用した歩行運動の条件では、睡眠制限によって増強した術後痛に対する軽減効果は明確には認められなかった。この結果に関して、いくつかの理由が考えられる。まず、睡眠制限が運動による疼痛軽減効果を阻害した可能性が考えられる。一般に、歩行運動をはじめとした有酸素運動は下行性疼痛抑制系の賦活化や内因性オピオイド系の活性化を介して疼痛軽減効果を示すことが知られている。しかし、前述したように入眠遅延や断眠は下行性疼痛抑制系の機能低下や中枢感作を惹起することで侵害刺激に対する反応性を増強することが報告されている。そのため、このような状況下では、有酸素運動によって誘発される疼痛軽減のメカニズムが十分に機能せず、結果として睡眠制限によって増強した術後痛が軽減されなかった可能性が考えられる。また、本研究で採用した歩行運動の条件そのものが影響している可能性が考えられる。動物モデルを用いた先行研究では、有酸素運動による疼痛軽減効果は運動強度・実施期間などに依存することが報告されている^{16, 17)}。本研究では、睡眠制限といった術後痛を増強する因子が存在する条件下で歩行運動を負荷しており、このような状況下において疼痛軽減効果を得るためには、より高強度あるいはより長時間の歩行運動を負荷する必要があった可能性がある。ただし、本研究では睡眠制限が課されない状況下で術後痛が誘発されたラットに対して歩行運動を負荷できていない。つまり、本研究で

採用した歩行運動の条件が術後痛の軽減に有効であるか否かについては明らかでない。そのため、今後は術後痛に対する疼痛軽減効果を明らかにしたうえで、睡眠制限により増強した術後痛に対する効果を検討する必要がある。ただし、本研究の結果から少なくとも、睡眠制限という条件下では、歩行運動単独で増強した術後痛を軽減することは容易ではない可能性が考えられる。加えて、本研究で採用した術後痛モデルに対する歩行運動の特性そのものが影響した可能性も考えられる。本モデルにおいて生じる痛覚過敏は、足底切開による末梢組織の損傷および創部周囲の炎症・創傷治癒反応と関連して生じることが知られている¹⁸⁾。そして、歩行運動は疼痛の主たる発生源である足底の切開部へ荷重や機械的刺激を必然的に加えることになる。前述したように、睡眠制限下では侵害刺激に対する反応性が増幅されるため、歩行運動は疼痛軽減に作用する可能性がある一方で、同時に追加的な侵害入力としても作用し、両者が相殺された結果、行動学的評価の結果に違いが顕在化しなかった可能性が考えられる。ただ、本研究の結果は歩行運動そのものが無効であることを示すものではなく、睡眠制限下では運動介入の処方条件などをより慎重に検討する必要があることを示唆するものと考えられる。

本研究ではいくつかの限界が挙げられる。まず、本研究で採用した睡眠制限の影響を正確に評価できていないことが挙げられる。睡眠の評価については、脳波や筋電図を用いた評価がゴールドスタンダードとされているが、本研究では限られたサンプル数における活動量の評価結果からしか睡眠制限の影響を推測できていない。今回、睡眠制限を課した群においては行動学的評価の結果から術後痛が増強していたことが推察されるが、どの程度の睡眠の問題が誘発され、今回の結果に至ったかは明らかではない。次に、前述したように、睡眠制限を課さない状況下で誘発された術後痛に対する歩行運動の疼痛軽減効果を検討できていないため、歩行運動の条件が適切であったか否か明らかではない。第3に、睡眠制限によって引き起こされた術後痛の増強の機序について検討できていないことが挙げられる。この点についても前述したように、患部の

炎症反応ならびに脊髄後角における二次侵害受容ニューロンの興奮性、下行性疼痛抑制系の評価が必要である。今後はこれらの点について検討を進めることで基礎的なデータを構築していく必要がある。

結論

入眠遅延による睡眠制限下で術後痛を誘発すると術後痛が増強すること、また、その状況下で歩行運動を負荷しても疼痛軽減効果は得られない可能性が示唆された。本研究の結果は、周術期に睡眠の問題を抱えるケースに対しては、単に運動療法のみを実施するのではなく、睡眠の問題を軽減するような介入を併用する必要があることを示唆するものであると考えられる。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導・ご協力いただきまし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) Park R, Mohiuddin M, et al.: Prevalence of postoperative pain after hospital discharge: systematic review and meta-analysis. *PAIN Rep.* 2023; 8: e1075.
- 2) Paredes AC, Costa P, et al.: Presurgical anxiety and acute postsurgical pain predict worse chronic pain profiles after total knee/hip arthroplasty. *Arch Orthop Trauma Surg.* 2025; 145: 118.
- 3) Niklasson A, Finan PH, et al.: The relationship between preoperative sleep disturbance and acute postoperative pain control: A systematic review and meta-analysis. *Sleep Med Rev.* 2025; 79: 102014.
- 4) Wu H, Su W, et al.: Correlation between preoperative sleep disturbance and postoperative pain in patients with rotator cuff tear. *Front Integr Neurosci.* 2022; 16: 942513.
- 5) Hamilton KR, Hughes AJ, et al.:

- Perioperative insomnia trajectories and functional outcomes after total knee arthroplasty. *Pain*. 2023; 164: 2769-2779.
- 6) 松原貴子: 痛みのリハビリテーション, 痛みの集学的診療: 痛みの教育コアカリキュラム. 日本疼痛学会痛みの教育コアカリキュラム編集委員会(編), 真興交易(株)医書出版部, 東京, 2016, pp158-159.
 - 7) Yamaguchi G, Kobayashi T, et al.: Effectiveness of rehabilitation for postoperative pain after surgery for spontaneous pneumothorax in young adults. *Ann Palliat Med*. 2022; 11: 1191-1196.
 - 8) Mahmoudi J, Ahmadian N, et al.: A Protocol for Conventional Sleep Deprivation Methods in Rats. *J. Exp. Clin. Neurosci*. 2017; 4: 1-4.
 - 9) Machado RB, Hipólido DC, et al.: Sleep deprivation induced by the modified multiple platform technique: quantification of sleep loss and recovery. *Brain Res*. 2004; 1004:45-51.
 - 10) Ishikawa H, Yamada K, et al.: Sleep deprivation impairs spontaneous object-place but not novel-object recognition in rats. *Neurosci Lett*. 2014; 580:114-118.
 - 11) Karabulut S, Altuntaş A, et al.: Effects of post-learning REM sleep deprivation on hippocampal plasticity-related genes and microRNA in mice. *Behav Brain Res*. 2019; 361:7-13.
 - 12) 厚生労働省: 個人の健康づくりのための身体活動基準, 健康づくりの為の身体活動基準 2013. 2013; 5:5-12.
 - 13) Bedford TG, Tipton CM, et al.: Maximum oxygen consumption of rats and its changes with various experimental procedures. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*. 1979; 47: 1278-1283.
 - 14) Kumar R, Gupta S, et al.: Diverse characters of Brennan's paw incision model regarding certain parameters in the rat. *Korean J Pain*. 2019; 32: 168-177.
 - 15) Kourbanova K, Alexandre C, et al.: Effect of sleep loss on pain-New conceptual and mechanistic avenues. *Front Neurosci*. 2022; 16: 1009902.
 - 16) Tsai KL, Huang PC, et al.: Incline treadmill exercise suppresses pain hypersensitivity associated with the modulation of pro-inflammatory cytokines and anti-inflammatory cytokine in rats with peripheral nerve injury. *Neurosci Lett*. 2017; 643: 27-31.
 - 17) Sluka KA, O'Donnell JM, et al.: Regular physical activity prevents development of chronic pain and activation of central neurons. *J Appl Physiol* (1985). 2013; 114: 725-733.
 - 18) Goto T, Sapio MR, et al.: Longitudinal peripheral tissue RNA-Seq transcriptomic profiling, hyperalgesia, and wound healing in the rat plantar surgical incision model. *FASEB J*. 2021; 35: e21852.
- (指導教員:坂本 淳哉)

不動の過程で実施する歩行運動と骨格筋電気刺激が ラットヒラメ筋の筋性拘縮におよぼす効果

岩本倫太郎・藤井遥大

本研究では、①既報の設定条件よりも実施時間を延長し、実施頻度を高めた条件で歩行運動を実施する場合と②歩行運動に骨格筋電気刺激を加えた場合を動物実験にてシミュレートし、それぞれの介入が筋性拘縮のパラメータとなる関節可動域制限ならびに線維化におよぼす効果を検証した。実験動物には7週齢のWistar系雄性ラット26匹を用い、無処置の対照群(n=6)と両側足関節を最大底屈位で2週間ギプスにて不動化する不動群(n=6)、不動の過程で小動物用トレッドミルによる歩行運動を負荷する歩行群(n=8)、同様の歩行運動に加えてベルト電極を活用した骨格筋電気刺激を負荷する電気刺激+歩行群(n=6)に振り分けた。なお、電気刺激+歩行群では骨格筋電気刺激の実施後に歩行運動を実施し、介入間には4時間以上のインターバルを設けた。結果として、歩行群ならびに電気刺激+歩行群には関節可動域制限と線維化の抑制効果が認められた。すなわち、不動の過程で行う歩行運動の単独実施ならびに歩行運動と骨格筋電気刺激の併用は筋性拘縮の予防戦略として有効である可能性が示唆された。

はじめに

運動器疾患の罹患後に施されるギプス・シーネ固定や安静期間の長期化などによって骨格筋が不動状態に曝されると、その器質的変化に由来した拘縮、すなわち、筋性拘縮が発生する。筋性拘縮が発生した骨格筋は「硬く、伸びにくい」と触知されるが、これにはその伸張性の低下が関与している¹⁾。そして、このような不動に伴う骨格筋の伸張性低下にはコラーゲンの過剰増生に伴う線維化が関わっており、その発生メカニズムの上流では筋核のアポトーシスを介したマクロファージの集積が重要事象として関与している^{2,3)}。つまり、筋核のアポトーシスを抑えることができれば線維化、ひいては、筋性拘縮の発生を予防できると仮説され、不動早期からの筋収縮運動は有効な介入戦略になり得ると考えられる。

筋収縮運動を誘発できる介入戦略としては歩行運動があげられ、実際に筋性拘縮に対する効果検証も報告されている⁴⁾。これによると、ラットの足関節を最大底屈位で2週間不動化する過程で10 m/分の速度で実施する歩行運動を1回あ

たり10分間、2日おきに1回の頻度で2週間実施すると、筋性拘縮のパラメータである足関節背屈可動域制限の発生を抑制できることが明らかになっている⁴⁾。しかし、この報告では歩行運動による足関節背屈可動域制限の改善は6.4°と小さく、実施時間を延長し、実施頻度を高めた条件で歩行運動を行えば、この効果がさらに高まる可能性がある。

さらに、筋収縮運動を促すための介入戦略には骨格筋電気刺激も挙げられ、特に下肢の広範囲の骨格筋に対して筋収縮運動を誘発できるベルト電極を活用した骨格筋電気刺激は有効な方策として期待できる。先行研究では、前述と同様の不動モデルラットを用い、2週間の不動の過程でベルト電極を活用した骨格筋電気刺激の効果検証が行われているが、この報告では足関節背屈可動域制限の発生予防効果が認められている⁵⁾。すなわち、歩行運動と骨格筋電気刺激を併用すれば、歩行運動の単独実施よりもさらに効果が高まるのではないかと仮説される。

そこで、本研究では①既報の設定条件よりも実施時間を延長し、実施頻度を高めた条件で歩

行運動を実施する場合と②歩行運動に骨格筋電気刺激を加えた場合を動物実験にてシミュレートし、それぞれの介入が筋性拘縮のパラメータとなる関節可動域制限ならびに線維化におよぼす効果を検証した。

材料と方法

1. 実験プロトコル

1) 実験動物

実験動物には7週齢のWistar系雄性ラット26匹(205.4±9.3 g)を用い、これらを無処置の通常飼育を行う対照群(n=6)と両側足関節を最大底屈位で2週間ギプスにて不動化する実験群(n=20)に無作為に振り分けた。実験群は不動処置のみを施す不動群(n=6)と不動の過程で小動物用トレッドミルによる歩行運動を負荷する歩行群(n=8)、同様の歩行運動に加えてベルト電極を活用した骨格筋電気刺激を負荷する電気刺激+歩行群(n=6)に振り分けた。そして、電気刺激+歩行群には骨格筋電気刺激の実施後に歩行運動を負荷し、介入間には4時間以上のインターバルを設けた。なお、本研究は長崎大学が定める動物実験指針ならびに長崎大学動物実験委員会で承認を受けた実験計画書(承認番号:2401261917)に準じ、長崎大学大学院医歯薬学総合研究科バイオメディカルモデル動物研究センターで実施した。

2) 足関節の不動方法

実験群の各ラットに3種混合麻酔薬(5 mg/kg)を腹腔内投与した。その後、両側足関節を最大底屈位の状態で前足部から膝関節上部までギプス固定するといった不動処置を行った。また、不動処置中は浮腫の発生を確認するために足指を露出させ、浮腫やギプスの緩みの発生を認めた場合には麻酔下で適宜巻き替えを行った。

3) 歩行運動の方法

歩行群ならびに電気刺激+歩行群のラットは覚醒下で一旦ギプスを除去し、小動物用トレッドミル(シナノ製作所)を用いた歩行運動を以下の設定条件で負荷した。具体的には、実施速度を10 m/分、実施時間を15分間に設定し、1日1回

の頻度で、週6日、延べ2週間実施した。

4) 骨格筋電気刺激の方法

電気刺激+歩行群は麻酔下で一旦ギプスを除去し、小動物用デバイス(ホーマーイオン株式会社)を用いた骨格筋電気刺激を以下の設定条件で負荷した。具体的には、ベルト電極は両側の大腿近位部と下腿遠位部に装着し、刺激周波数は強縮を誘発する目的で50 Hzに設定した。また、刺激強度は先行研究を参考に足関節の最大底屈筋力の60%(60%MVC)が発揮される4.7 mAとした⁶⁾。さらに、同条件で60%MVCが18分間維持されることが示されているため、刺激時間は15分間に設定した⁵⁾。そして、刺激サイクルは2秒通電、2秒休止の1:1サイクルとし、1日1回の頻度で、週6日、延べ2週間実施した。

2. 検索方法

1) 足関節背屈可動域の測定方法

実験開始前(Baseline)ならびに実験期間中は週ごとに足関節背屈可動域を以下の方法で測定した。具体的には、3種混合麻酔薬の腹腔内投与によってラットを麻酔し、側臥位とした後に股・膝関節を他動的に最大屈曲させ、足底部に丸型テンションゲージ(大場製作所)の先端部をあて、0.3Nの張力で足関節を他動的に背屈させた。そして、膝関節裂隙中央部と腓骨外果を結ぶ線を基本軸、腓骨外果と第5中足骨を結ぶ線を移動軸とし、これらの2つの軸がなす外角を足関節背屈可動域として測定した。なお、測定は3回実施し、その最大値をデータとして採用した。

2) 試料採取および検索準備

実験期間終了後は各ラットに3種混合麻酔薬の腹腔内投与によって麻酔を行い、両側のヒラメ筋を採取した。ヒラメ筋の一部はトラガントゴム(ナカライテスク社)に包埋後、液体窒素で冷却したイソペンタン溶液内に浸漬し、凍結標本作製した。そして、クリオスタット(Leica社, CM1950)を用いて凍結試料から7 μm厚の凍結横断切片を作製し、後述の組織学的検索に供した。また、ヒラメ筋の一部はチューブに収集後に液体窒素による急速凍結を行い、後述する生化学的検索に供した。

3) 組織学的検索

凍結横断切片の一部には Hematoxylin & Eosin (以下, H&E) 染色を施し, オールインワン顕微鏡 (Keyence 社, BZ-X810) で検鏡することで病理学的所見の観察を行った。また, 一部の切片には筋周膜や筋内膜を構成するコラーゲンを可視化する目的で Picrosirius Red 染色を施し, 撮像結果から線維化の発生状況を評価した。

4) 生化学的検索

コラーゲン特有の構成アミノ酸であるヒドロキシプロリン含有量を計測し, 線維化の指標となるコラーゲン含有量を評価した。

① サンプル溶液の作製

ヒラメ筋の一部を細切後, 凍結乾燥機器 (東京理化学器械) で 24 時間処理し, 各筋試料の乾燥重量を計測した。次に, 各筋試料に 6N-HCl を 1 ml 添加し, 110°C で 15 時間加水分解を行い, エバポレータ (スクラム社) にて 6N-HCl を除去後, 蒸留水 1 ml にて溶解した。そして, 溶解液を Millex-GV (Merck 社) で濾過し, これをサンプル溶液として使用した。

② ヒドロキシプロリン含有量の定量

サンプル溶液 10 μ l を 100°C で 2 時間加熱処理した後, 4N-NaOH を 50 μ l 添加し, 攪拌後に 90°C で 2 時間加熱処理を行った。次に, Chloramine-T 溶液を 500 μ l 添加し, 室温にて 25 分間静置した。その後, Ehrlich 溶液を 500 μ l 添加し, 攪拌後に 90°C で 20 分間加熱処理し, サンプル溶液を発色させた。そして, 波長 540 nm にて吸光度を計測し, 検量線からサンプル溶液に

含まれるヒドロキシプロリン含有量を定量した。なお, 定量したデータは乾燥重量で除し, 単位乾燥重量あたりのヒドロキシプロリン含有量をデータとして採用した。

5) 統計処理

データはすべて平均値 \pm 標準偏差で示した。また, 足関節背屈可動域の結果には二元配置分散分析, ヒドロキシプロリン含有量の結果には一元配置分散分析を適用し, いずれも事後検定には Scheffe 法を用いた。なお, すべての統計手法とも有意水準は 5% 未満とした。

結果

1. 足関節背屈可動域

実験開始前 (Baseline) の足関節背屈可動域はすべての群が 160° であり, いずれの実験期間とも対照群のそれは 160° であった。一方, 実験開始 1 週後の足関節背屈可動域は, 不動群が 113.8 \pm 4.3°, 歩行群が 133.8 \pm 3.9°, 電気刺激 + 歩行群が 131.3 \pm 3.1° であった。また, 実験開始 2 週後の足関節背屈可動域は, 不動群が 104.6 \pm 4.0°, 歩行群が 123.1 \pm 4.0°, 電気刺激 + 歩行群が 122.1 \pm 5.0° であった。上記の結果から, 不動群や歩行群, 電気刺激 + 歩行群は実験開始 1, 2 週後とも対照群より有意に低値を示した。しかし, 実験群間の比較では, 歩行群と電気刺激 + 歩行群は実験開始 1, 2 週後とも不動群より有意に高値を示した (図 1)。

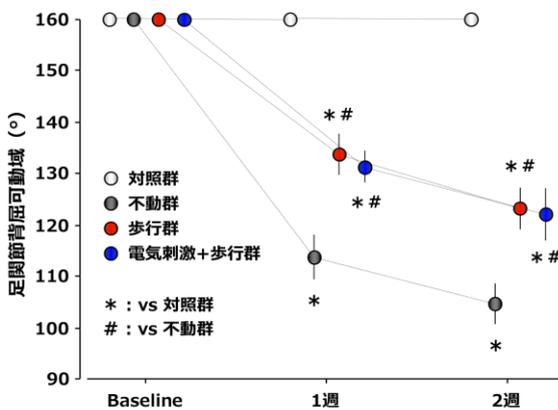


図 1 足関節背屈可動域の変化

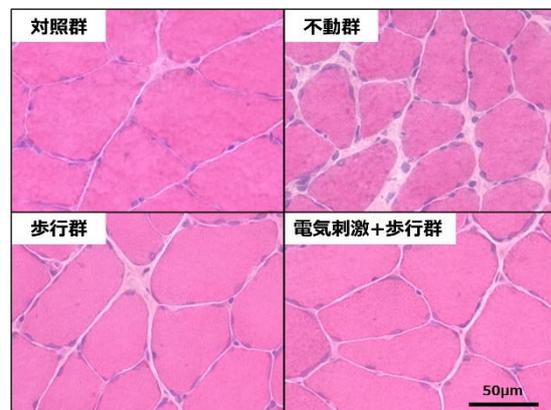
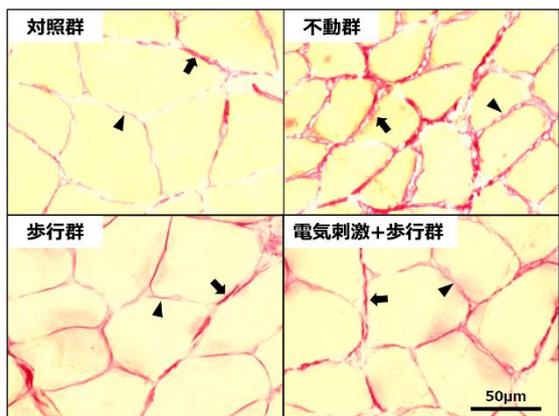


図 2 H&E 染色像



→ : 筋周膜 ▶ : 筋内膜

図3 Picosirius Red 染色像

2. H&E 染色像

H&E 染色像を顕鏡した結果、対照群と比較して不動群や歩行群、電気刺激+歩行群の筋線維サイズは縮小しており、実験群の3群に筋線維萎縮が発生していた。一方、歩行運動や骨格筋電気刺激を負荷した歩行群と電気刺激+歩行群の撮像結果では、すべての個体で炎症の発生を示唆するような細胞浸潤を認める筋線維は観察されなかった(図2)。

3. Picosirius Red 染色像

Picosirius Red 染色像を顕鏡した結果、対照群と比較して不動群の筋周膜や筋内膜は肥厚しており、コラーゲンの過剰増生、すなわち、線維化の発生を認めた。一方、不動群と比較すると、歩行群と電気刺激+歩行群では筋周膜や筋内膜の肥厚が抑えられており、線維化の発生が抑制されている所見が観察された(図3)。

4. ヒドロキシプロリン含有量

実験開始2週後のヒドロキシプロリン含有量は対照群が $2.8 \pm 0.9 \mu\text{g}/\text{mg dry weight}$ 、不動群が $6.1 \pm 1.7 \mu\text{g}/\text{mg dry weight}$ 、歩行群が $3.7 \pm 1.2 \mu\text{g}/\text{mg dry weight}$ 、電気刺激+歩行群が $4.1 \pm 1.1 \mu\text{g}/\text{mg dry weight}$ であった。上記の結果から、不動群は対照群より有意に高値を示したが、歩行群と電気刺激+歩行群は不動群より有意に低値を示し、いずれも対照群との有意差を認めなかった(図4)。

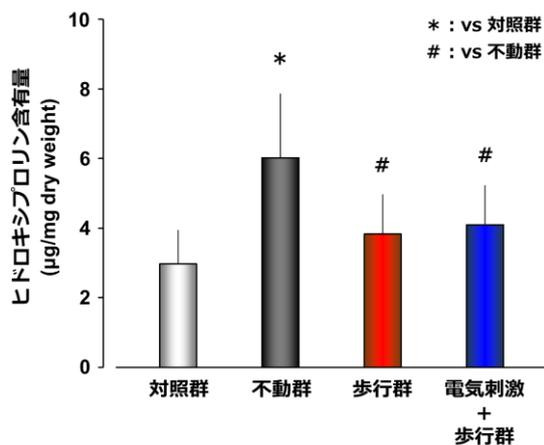


図4 ヒドロキシプロリン含有量の変化

考察

本研究の結果から、今回の設定条件で歩行運動を単独実施あるいは歩行運動と骨格筋電気刺激を併用すると、関節可動域制限と線維化を抑制できることが明らかになった。

1. 異なる設定条件で実施した歩行運動の効果

本研究と前述した先行研究⁴⁾の結果を照合すると、いずれの設定条件であっても歩行運動によって関節可動域制限を抑制する効果が認められた。そこで、これらの研究から実験開始2週後における不動群と歩行群の足関節背屈可動域の結果を抽出し、各研究における関節可動域制限の改善率(2群間の差を不動群のデータで除した割合)を算出した。その結果、先行研究では改善率が6.0%にとどまっていたのに対し、本研究では17.7%と大きな改善率が示され、関節可動域制限が大きく改善していたことが明らかとなった。すなわち、実施時間を延長し、実施頻度を高めた条件で歩行運動を実施すると、関節可動域制限の発生予防効果を高めることができる可能性が示唆された。

2. 歩行運動と骨格筋電気刺激の併用効果

次に、本研究における歩行群と電気刺激+歩行群の足関節背屈可動域ならびにヒドロキシプロリン含有量を比較すると、各パラメータともこの二群間に有意差を認めず、歩行運動に骨格筋電気刺激を併用しても、関節可動域制限や線維

化の発生予防効果を高めることはできなかった。先行研究によれば、歩行運動と骨格筋電気刺激はいずれも好気性代謝を亢進することでアポトーシスを制御するミトコンドリアなどの細胞小器官を活性化し、筋核のアポトーシスの発生予防に寄与することが報告されている⁷⁻⁹⁾。一方、他の先行研究では、歩行運動のような有酸素運動を単独実施する条件と有酸素運動と筋力増強運動を併せて実施する条件を設定し、両条件で実施される運動が好気性代謝におよぼす影響が検討されている。その結果、それぞれの条件で運動を実施しても、好気性代謝の亢進作用に大きな差は認められなかったと報告している^{10,11)}。つまり、本研究における歩行運動の単独実施ならびに歩行運動と骨格筋電気刺激の併用では、いずれの場合も同程度に好気性代謝が亢進された可能性があり、結果、関節可動域制限や線維化の発生予防効果に差が認められなかったと推察された。しかし、先行研究においても、有酸素運動を単独実施する条件と有酸素運動と筋力増強運動を併せて実施する条件で好気性代謝の亢進作用に差が生じない理由は明らかにされていない。そのため、今後はこの点を明らかにするために、線維化関連分子やその上流の分子機構の動態を検索していく必要があると考えている。

以上をまとめると、不動の過程で実施する歩行運動の単独実施ならびに歩行運動と骨格筋電気刺激の併用は関節可動域制限や線維化の発生予防に関して同程度に効果的であり、いずれの介入戦略とも筋性拘縮の発生予防に有効である可能性が示唆された。

謝辞

本研究に際し、ご指導、ご助言等いただきまし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) Honda Y, Tanaka M, et al.: Relationship between extensibility and collagen expression in immobilized rat skeletal muscle. *Muscle Nerve*: 2018; 57: 672-678.
- 2) Honda Y, Sakamoto 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: 419-427.
- 3) Tanaka N, Honda Y, et al.: Myonuclear apoptosis via cleaved caspase-3 upregulation is related to macrophage accumulation underlying immobilization-induced muscle fibrosis. *Muscle Nerve*: 2022; 65: 341-349.
- 4) 中村早紀: 短時間の歩行運動ならびに温熱負荷の併用による筋萎縮と拘縮の進行抑制効果の検討. 長崎大学理学療法専攻卒業論文集: 2013; 9: 39-44.
- 5) Honda Y, Takahashi A, et al.: Muscle contractile exercise through a belt electrode device prevents myofiber atrophy, muscle contracture, and muscular pain in immobilized rat gastrocnemius muscle. *PLoS ONE*: 2022; 17: e0275175.
- 6) Honda Y, Tanaka N, et al.: Effect of belt electrode-skeletal muscle electrical stimulation on immobilization-induced muscle fibrosis. *PLoS ONE*: 2021; 16: e0244120.
- 7) Kim HJ, Kwon O: Aerobic exercise prevents apoptosis in skeletal muscles of high-fat-fed ovariectomized rats. *Phys Act Nutr*: 2022; 26: 1-7.
- 8) Valladares D, Almarza G, et al.: Electrical stimuli are anti-apoptotic in skeletal muscle via extracellular ATP. Alteration of this signal in mdx mice is a likely cause of dystrophy. *PLoS ONE*: 2013; 8: e75340.
- 9) Honda Y, Yoshimura M, et al.: Frequent tetanic exercise through electrical muscle stimulation may reduce immobilization-induced muscle fibrosis by suppressing myonuclear apoptosis. *Muscle Nerve*: 2025; 71: 1104-1112.
- 10) Robinson MM, Dasari S, et al.: Enhanced protein translation underlies improved

metabolic and physical adaptations to different exercise training modes in young and old humans. *Cell Metab*: 2017; 25: 581-592.

- 11) Ruegsegger GN, Pataky MW, et al.: High-intensity aerobic, but not resistance or

combined, exercise training improves both cardiometabolic health and skeletal muscle mitochondrial dynamics. *J Appl Physiol*: 2023; 135: 763-774.

(指導教員 本田祐一郎)

不動後早期からの歩行運動と骨格筋電気刺激が ラット腓腹筋の廃用性筋萎縮におよぼす影響

木寺郁人・堀脇千愛

本研究の目的は、不動後早期からの歩行運動ならびに歩行運動と骨格筋電気刺激(EMS)の併用がラット腓腹筋の廃用性筋萎縮におよぼす影響を筋内深度別、筋線維タイプ別に検討することである。実験動物には7週齢のWistar系ラット26匹を使用し、これらを無処置の対照群(n=6)、両側足関節を2週間不動化する不動群(n=6)、不動化の過程で歩行運動を実施する歩行群(n=8)、不動化の過程でEMSと歩行運動を併用して実施するEMS+歩行群(n=6)に振り分けた。なお、歩行運動は10m/分の速度でのトレッドミル歩行とし、実施時間は15分/日(週6日)とした。また、EMSの刺激条件は先行研究と同様とし、午前にEMS、午後に歩行運動を実施した。結果、浅層のタイプIIb線維は歩行運動による筋線維萎縮の進行抑制効果は認められず、EMSを併用しても同様であった。一方、深層は全ての筋線維タイプで歩行運動による筋線維萎縮の進行抑制効果が認められ、タイプI・IIa線維に関してはEMS併用による相乗効果が認められた。したがって、歩行運動ならびに歩行運動とEMSの併用は深層を構成する筋線維の萎縮予防に有効であることが示唆された。

はじめに

臨床ではギプス固定や術後の免荷など、様々な場面で骨格筋の不動状態が強いられることがあり、廃用性筋萎縮が惹起される。加えて、今日のリハビリテーション医療の対象者の多くが高齢者であり、その場合、元々から身体活動量が少なく、不動を招いているため、上記のような状態に強いられると顕著な廃用性筋萎縮に発展する。そして、その結果として日常生活活動(activities of daily living; ADL)は著しく低下し、その改善には困難を極める。

廃用性筋萎縮に対する理学療法的介入としては、筋収縮運動が有効であることは周知の事実であり、これに関連した基礎研究も報告されている。例えば、Sakakimaら^{1,2)}のラットを用いた実験によれば、トレッドミルを用いた歩行運動は不動によって惹起された腓腹筋、ヒラメ筋の廃用性筋萎縮の回復に有効であることが明らかになっている。そして、この実験では介入頻度の影響も検討しており、高頻度の方がその効果は大きいとされている。しかし、これまで報告されている

先行研究のほとんどは不動によって生じた廃用性筋萎縮の回復に焦点をあてたものが多く、不動後早期から筋収縮運動を基盤とした理学療法的介入を行い、廃用性筋萎縮の予防効果を検討した報告は少ない³⁾。

一方、所属研究室の先行研究⁴⁾では不動後早期から骨格筋電気刺激(electrical muscle stimulation; EMS)を活用した筋収縮運動を実施し、ラット腓腹筋の廃用性筋萎縮におよぼす影響を検討している。なお、ラット腓腹筋の浅層部はタイプIIb線維のみで構成されているのに対し、深層部はタイプI・IIa・IIb線維が混在するとされている⁵⁾。つまり、筋内深度によって筋線維タイプの構成が異なることから、所属研究室の先行研究⁴⁾では筋内深度ならびに筋線維タイプにわけて検討されている。結果をみると、EMSを活用した筋収縮運動は、浅層部を構成するタイプIIb線維の筋線維萎縮の進行を抑制する効果はあるものの、深層部を構成するタイプI・IIa・IIb線維の筋線維萎縮に対しては効果を認めないことが明らかになっている。つまり、EMSは神経サイズの大きい運動単位を優先的に動員できる利点があ

り^{6,7)}, このことが影響し, 浅層部のタイプIIb 線維に対して効果が認められた可能性が高い⁴⁾.

一方, 随意運動の場合はサイズの原理に従い, 神経サイズの小さい運動単位, つまり, タイプI・IIa・IIb 線維の順に動員されるといわれている⁸⁾. したがって, ラット腓腹筋の深層部を構成するタイプI・IIa・IIb 線維の筋線維萎縮に対しては随意運動が有効ではないかと考えられ, 本研究ではこの点を検証するため随意運動の中でも歩行運動に着目した. 加えて, 歩行運動と EMS を併用すれば, 浅層部, 深層部を構成するすべての筋線維タイプの筋線維萎縮に対して有効ではないかと考えた.

以上の点を踏まえ, 本研究の目的は, 不動後早期からの歩行運動ならびに歩行運動と EMS の併用がラット腓腹筋の廃用性筋萎縮におよぼす影響を筋内深度別, 筋線維タイプ別に検討することとした.

材料と方法

1. 実験プロトコル

1) 実験動物

本研究における動物実験に関しては, 長崎大学が定める動物実験指針ならびに長崎大学動物実験委員会で承認を受けた実験計画書(承認番号; 2401261917)に準じ, 長崎大学大学院医歯薬学総合研究科バイオメディカルモデル動物研究センターで実施した.

実験動物には7週齢の Wistar 系雄性ラット 26 匹(体重; 188~222g, 平均体重; 205.4±9.3g)を使用した. そして, これらを実験の対照群 (n=6), 両側足関節を2週間不動化する不動群 (n=6), 不動化の過程で歩行運動を実施する歩行群 (n=8), 不動化の過程で EMS と歩行運動を併用して実施する EMS+歩行群 (n=6) に振り分けた.

なお, 動物実験施設にラットが搬入された後は実験者の操作にラットを慣れさせる目的でハンドリングを行い, 以下の実験処置は8週齢になって以降から開始した.

2) 足関節の不動方法

不動群, 歩行群, EMS+歩行群の各ラットに対

しては3種混合麻酔薬の腹腔内投与(5mg/kg)によって麻酔を行い, 両側足関節を最大底屈位の状態でギプス包帯を用いて2週間不動化した. 不動化の際の留意点として, 足指は浮腫の発生を確認するために露出させ, 不動期間中は浮腫の発生やギプスの緩みを防ぐ目的で毎日ギプスの巻替えを行った.

なお, 麻酔による成長不良などの影響を考慮し, 対照群の各ラットに対しても同頻度で麻酔のみを行った.

3) 歩行運動の方法

中村³⁾はラットに対し10m/分の速度でのトレッドミル歩行を行うとヒラメ筋の廃用性筋萎縮の進行が抑制されたと報告している. そして, Bedford ら⁹⁾の先行研究によれば, ラットにおける10m/分の速度でのトレッドミル歩行は最大酸素摂取量の29.8%の負荷になるとされており, この程度の負荷はヒトでの軽運動に合致する¹⁰⁾. そこで, 今回の歩行運動は10m/分の速度でのトレッドミル歩行とし, 実施時間は15分/日とした. そして, 介入頻度は週6日とし, 不動を開始した翌日から延べ2週間行った.

4) EMS の方法

①電極の設置と刺激周波数

EMS+歩行群の各ラットに対しては3種混合麻酔薬の腹腔内投与(5mg/kg)によって麻酔を行った後, ギプスを外し, 腹臥位とした後に両側の大腿近位部と下腿遠位部にベルト電極を巻いた. そして, 刺激周波数はラット後肢骨格筋に強縮を誘発する目的で50Hzとした.

②刺激強度

所属研究室の先行研究⁴⁾によれば, 正常ラットの足関節最大底屈筋力の60%を本研究のEMS装置で誘発させるためには4.7mAの刺激強度が必要であるとされている. そこで, 本研究における刺激強度も4.7mAとした.

③刺激サイクルと刺激時間

所属研究室の先行研究⁴⁾では, 刺激強度を4.7mAとし, 2秒収縮, 2秒休止の1:1の刺激サイクルで通電した際の足関節底屈筋力の推移が調査されている. この結果によれば, 18分後から筋疲労による筋出力の低下が認められている.

そこで、本研究ではこの結果ならびに今後の臨床適用を考慮し、刺激時間を15分に設定した。

④介入時間と介入頻度

EMS+歩行群の各ラットに対するEMS介入は9:00~12:00の時間帯に実施し、その頻度は1回/日とした。なお、同群に対する歩行運動は後肢骨格筋の筋疲労の影響などを考慮し、EMS介入から4時間以上の間隔をあけた午後の時間帯(概ね13:00~17:00)に実施した。

2. 検索方法

1) 検索試料

2週間の実験期間終了後、各ラットに対しては3種混合麻酔薬の腹腔内投与(5mg/kg)によって麻酔を行った。そして、腓腹筋外側頭を採取し、後述する組織学的検索に供した。

2) 組織学的検索

筋試料は腱に近い遠位端、近位端を切除し、トラガントゴム(ナカライテスク社)に包埋後、液体窒素で冷却したイソペンタン液内で急速凍結した。そして、クリオスタット(Leica社, CM1950)を用いて7 μ m厚の連続横断切片を作製し、一部の切片に対してはヘマトキシリン・エオジン(以下、

H&E)染色を施し、病理所見の観察を行った。また、一部の切片に対しては酸性前処置(pH 4.5)によるミオシンATPase染色を施し、筋線維をタイプI・IIa・IIb線維に分別した。

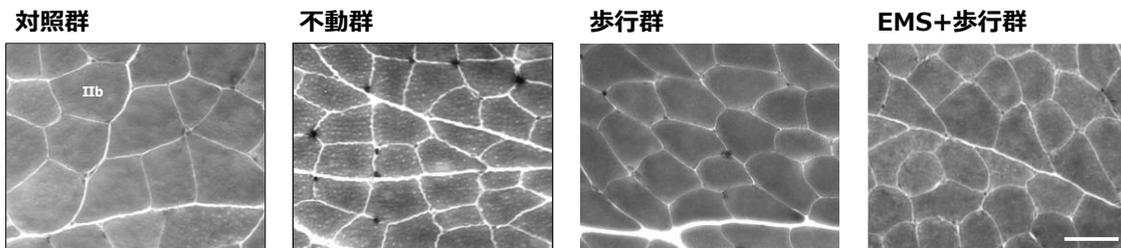
3) 筋線維横断面積の計測方法

ラット腓腹筋外側頭は皮膚に近い浅層部はタイプIIb線維のみで構成されているのに対し、骨に近い深層部はタイプI・IIa・IIb線維が混在している⁵⁾。そこで、ミオシンATPase染色像は浅層部と深層部に分け、オールインワン蛍光顕微鏡(KEYENCE社, BZ-X810)を用いて200倍の拡大像で全視野をパーソナルコンピュータに取り込み、Scion Image Software(W. Rasband, National Institutes of Health)を用いて浅層部を構成するタイプIIb線維、深層部を構成するタイプI・IIa・IIb線維の筋線維横断面積を1筋につき各々100本以上計測した。

3. 統計処理

統計処理には、一元配置分散分析とScheffe法による事後検定を適用し、危険率5%未満をもって有意差を判定した。

a) 浅層部



b) 深層部

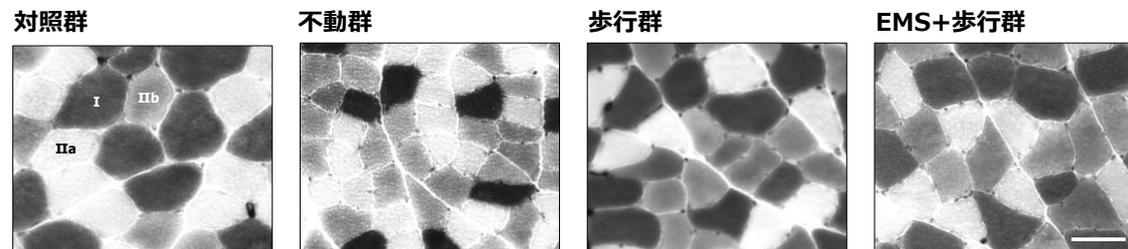


図1 ATPase染色像

Bar: 50 μ m

写真は酸性前処置(pH 4.5)によるATPase染色像で、a)はタイプIIb線維のみで構成される浅層部、b)はタイプI・IIa・IIb線維が混在する深層部を示す。なお、スケールバーは50 μ mを表す。

結果

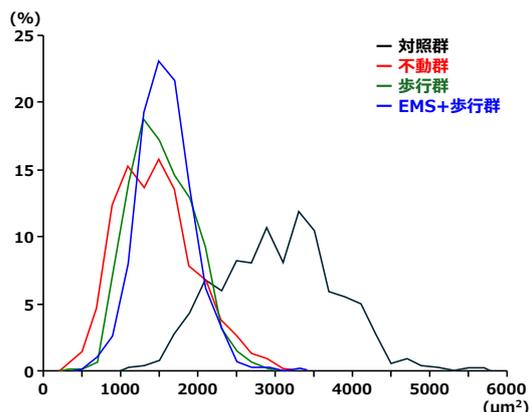
1. 病理所見

H&E 染色像を観察した結果、不動群、歩行群、EMS+歩行群においては筋線維サイズの縮小が認められたが、マクロファージの浸潤が認められる筋線維や中心核を有する筋線維などは認められなかった。したがって、不動処置や歩行運動、EMS 介入といった実験処置による筋線維損傷の発生はないと判断した。

2. 浅層部の筋線維横断面積の変化

タイプ II b 線維のみで構成される浅層部の ATPase 染色像をみると、対照群に比べ不動群は筋線維サイズの縮小が認められ、歩行群と EMS+歩行群も不動群と大差はなかった(図 1a)。実際に筋線維横断面積の分布状況をみると、対

a) 筋線維横断面積の分布状況



b) 平均筋線維横断面積の比較

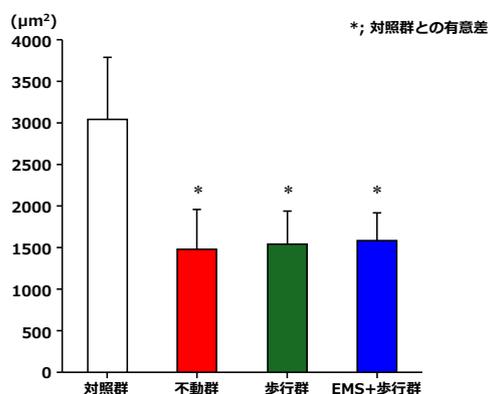


図 2 浅層部のタイプ II b 線維の筋線維横断面積の変化

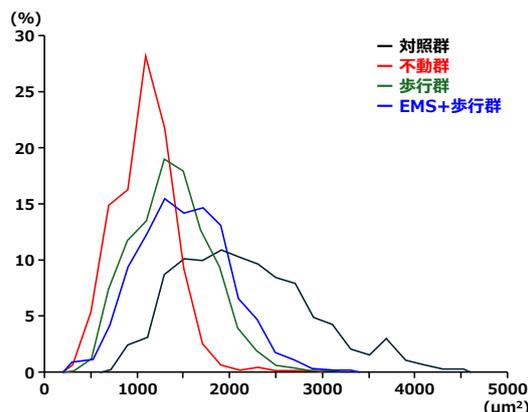
照群に比べ不動群は大きく左方に偏位しており、筋線維横断面積が縮小していた。そして、歩行群と EMS+歩行群も不動群とほぼ同位置に分布していた(図 2a)。そして、平均筋線維横断面積を比較すると、対照群に比べ不動群、歩行群、EMS+歩行群は有意に低値を示し、この 3 群間には有意差は認められなかった(図 2b)。

3. 深層部の筋線維横断面積の変化

タイプ I・IIa・IIb 線維が混在する深層部の ATPase 染色像をみると、不動群はすべてのタイプで筋線維サイズの縮小が認められた。これに対し、歩行群と EMS+歩行群はすべてのタイプとも不動群より筋線維サイズが大きい傾向にあった(図 1b)。

実際に筋線維横断面積の分布状況をみると、タイプ I・IIa 線維は同様の傾向を示し、対照群に

a) 筋線維横断面積の分布状況



b) 平均筋線維横断面積の比較

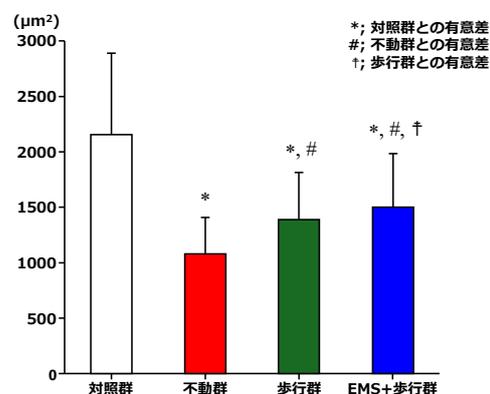
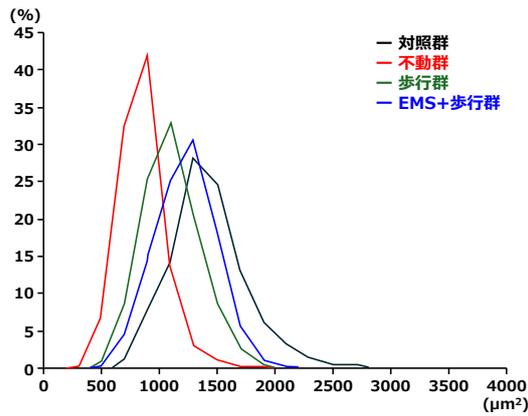


図 3 深層部のタイプ I 線維の筋線維横断面積の変化

a) 筋線維横断面積の分布状況



b) 平均筋線維横断面積の比較

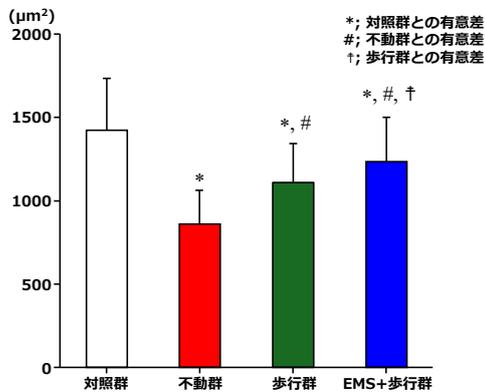
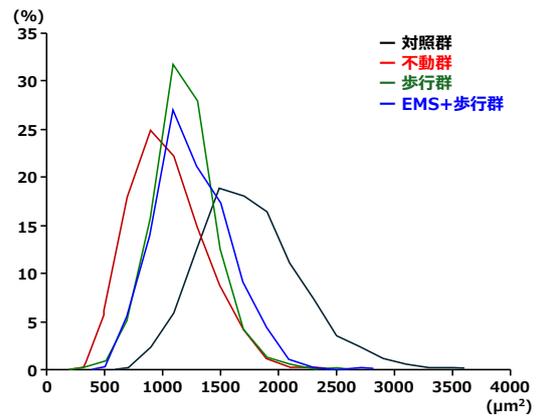


図 4 深層部のタイプ II a 線維の筋線維横断面積の変化

比べ不動群は大きく左方に偏位し、筋線維横断面積が顕著に縮小していた。一方、歩行群は不動群より右方に位置しており、EMS+歩行群は歩行群よりさらに右方に位置していた(図 3a, 4a)。そして、タイプ I・IIa 線維の平均筋線維横断面積を比較すると、対照群に比べ不動群、歩行群、EMS+歩行群は有意に低値を示し、この 3 群間を比較すると、歩行群と EMS+歩行群は不動群より有意に高値を示し、EMS+歩行群は歩行群より有意に高値を示した(図 3b, 4b)。

一方、タイプ II b 線維の筋線維横断面積の分布状況をみると、対照群に比べ不動群は大きく左方に偏位し、筋線維横断面積が顕著に縮小していた。一方、歩行群と EMS+歩行群は、不動群より右方に位置しているものの、この 2 群はほぼ同位置に分布していた(図 5a)。そして、平均筋線維横断面積を比較すると、対照群に比べ不動

a) 筋線維横断面積の分布状況



b) 平均筋線維横断面積の比較

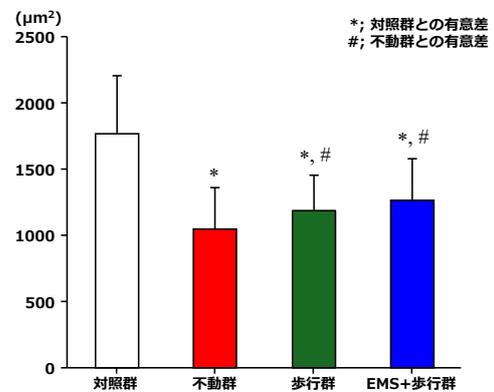


図 5 深層部のタイプ II b 線維の筋線維横断面積の変化

群、歩行群、EMS+歩行群は有意に低値を示し、この 3 群間を比較すると、歩行群と EMS+歩行群は不動群より有意に高値を示すものの、歩行群と EMS+歩行群には有意差は認められなかった(図 5b)。

考察

今回の結果から、浅層部を構成するタイプ II b 線維においては、歩行運動による筋線維萎縮の進行抑制効果は認められず、EMS を併用してもその効果には影響をおよぼさないことが明らかとなった。通常、歩行運動のような随意運動はサイズの原理に従い、神経サイズの小さい運動単位から動員されるといわれている⁸⁾。そして、浅層部を構成するタイプ II b 線維は深層部の全ての筋線維タイプも含めて筋線維サイズが最も大きいこ

とから、支配している神経サイズも最も大きいと推測される。そのため、今回の条件の歩行運動ではタイプ II b 線維は動員されていない可能性が高く、その影響で筋線維萎縮の進行抑制効果も認められなかったのではないかと考えられる。一方、先行研究⁴⁾の実験結果から想定された浅層部のタイプ II b 線維に対する EMS の効果も今回の結果では認められなかった。今回の刺激条件での EMS は正常ラットの足関節最大底屈筋力の 60% を発揮するほどの高強度刺激であることが先行研究⁴⁾で確かめられている。加えて、所属研究室ではその後追加実験を行い、今回の刺激条件で EMS を実施すると、浅層部のタイプ II b 線維にはグリコーゲンが枯渇するほどの強い筋収縮が得られることを確かめている。したがって、EMS による強い筋収縮の後に歩行運動といった有酸素運動を行うと EMS の効果が打ち消される可能性があり、これはコンバインドエフェクトが影響しているのではないかと推察される¹¹⁾。コンバインドエフェクトとは有酸素運動と筋力トレーニングを併用したときに起こる干渉作用のことで、結果、筋肥大が抑制される事象のことである¹¹⁾。メカニズムとしては、有酸素運動によって AMP 活性化プロテインキナーゼ (AMP-activated protein kinase; AMPK) が活性化すると、タンパク質合成に関わる mammalian target of rapamycin (mTOR) という分子が不活性化することが関与するとされている¹¹⁾。したがって、EMS+歩行群における浅層部のタイプ II b 線維の結果もコンバインドエフェクトが影響している可能性があるが、詳細については不明であり、この点は今後の検討課題である。

一方、深層部の全ての筋線維タイプにおいては、歩行運動による筋線維萎縮の進行抑制効果が認められ、これは前述した随意運動による運動単位の動員様式が影響していると推察される。加えて、タイプ I・II a 線維においては EMS を併用すると筋線維萎縮の進行抑制効果が高まることが明らかとなった。所属研究室で行われた追加実験の結果によれば、今回の刺激条件で EMS を実施すると、深層部の全てのタイプの筋線維はパンプアップ現象が認められるものの、グリコーゲンが枯渇するほどの強い筋収縮は得られないとされている。そのため、コンバインドエフェクト

の影響は生じなかったのではないかと推察される¹¹⁾。したがって、全ての筋線維タイプが混在する深層部においては、不動後早期からの歩行運動といった随意運動による介入が廃用性筋萎縮の予防に有効であり、EMS を併用するとタイプ I・II a 線維に対してはその予防効果が高まる可能性があると推察される。しかし、この効果に関わるメカニズムに関しては本研究では明らかにできておらず、この点についても今後の検討課題である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導、ご協力いただきまし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) Sakakima H: Effect of immobilization and subsequent low and high frequency treadmill running on rat soleus muscle and ankle joint movement. *J Phys Ther Sci.* 2004, 16: 43-48.
- 2) Sakakima H, Yoshida Y, et al.: Different frequency treadmill running in immobilization-induced muscle atrophy and ankle joint contracture of rats. *Scand J Med Sci Sports.* 2004, 14: 186-192.
- 3) 中村早紀: 短時間の歩行運動ならびに温熱負荷の併用による筋萎縮と拘縮の進行抑制効果の検討. 長崎大学医学部保健学科理学療法専攻卒業研究論文集. 2013, 9: 39-44.
- 4) Honda Y, Takahashi A, et al.: Muscle contractile exercise through a belt electrode device prevents myofiber atrophy, muscle contracture, and muscular pain in immobilized rat gastrocnemius muscle. *PLoS One.* 2022, 17(9): e0275175.
- 5) 坂本美喜, 内 昌之, 他: ラット骨格筋の筋線維タイプ分布特性—特に膝蓋腱切離による影響について—. *理学療法学.* 1996, 23: 430-433.

- 6) Kubiak RJ, Whitman KM, et al.: Changes in quadriceps femoris muscle strength using isometric exercise versus electrical stimulation. *J Orthop Sports Phys Ther.* 1987, 8: 537-541.
- 7) Trimble MH, Enoka RM: Mechanisms underlying the training effects associated with neuromuscular electrical stimulation. *Phys Ther.* 1991, 71: 273-280.
- 8) Sale DG: Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc Sport Sci Rev.* 1987, 15: 95-151.
- 9) Bedford TG, Tipton CM, et al.: Maximum oxygen consumption of rats and its changes with various experimental procedures. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol.* 1979, 47: 1278-1283.
- 10) Fletcher GF, Balady GJ, et al.: Exercise standards for testing and training: A statement for healthcare professionals from the American Heart Association. *Circulation.* 2001, 104: 1694-1740.
- 11) Methenitis S: A brief review on concurrent training: From laboratory to the field. *Sports (Basel).* 2018, 6(4):127.

(指導教員: 沖田 実)

正常な肩関節における関節超音波検査所見の検討

岩本拓也・大島風人

肩関節に起こる疾患の構造的異常を X 線画像だけで把握するのは難しく、MRI や超音波検査が必要とされている。特に、超音波検査は理学療法の適応や評価の検討における活用が期待されている。そのため、本研究では肩関節に着目し、健常者を対象に超音波検査を実施した。肩関節の全体像や、肘屈曲・伸展時における上腕二頭筋長頭腱の動きを静止画・動画で記録し、初学者にも理解しやすい画像の作成を試みた。さらに、極超短波による血流変化も観察し、その有用性を検討した。その結果、超音波検査画像は肩関節疾患の形態を把握し、温熱療法の有用性を評価することが可能であることが示唆された。一方、適切な利用には解剖学的知識が不可欠で、今後は臨床現場への導入と教育体制の整備が課題であると考えた。

はじめに

近年、画像検査の進歩は著しく、特に超音波（以下、エコー）を活用した検査は理学療法士にとって、診断や体表解剖をはじめ、理学療法評価や治療の補助ツールとして活用できる¹⁾。エコー検査は医師においては徐々に普及しているが、理学療法士への普及は進んでいない。その要因としては、1) 養成校だけでなく卒後教育においても十分な教育体制が整っていないこと。2) 教育効果に関する研究報告が少ないこと。3) エコー機器を用いた研究報告が不十分であり、使用方法が確立していないことなどが考えられる²⁾。

このように、現状、理学療法士によるエコー機器の臨床使用を支援するための基礎知識の提供が十分とは言えない。そのため理学療法士の臨床現場において、エコー検査に対する理解を深める必要性を感じ、本研究を実施した。

これまで所属研究室では手および膝関節の構造理解、理学療法への応用における関節エコー検査の有用性について検討してきた^{3), 4)}。そこで、今回、筆者らは主に肩の正常関節におけるエコー検査所見の検討を行い、単純 X 線などの画像では分からなかった解剖学的所見をもとに、今後のリハビリテーションへ応用することを目的とする。

エコー機器の長所は、1) 生体組織に対する評価を被曝のリスク・痛みも伴わずに行える点、2)

骨だけでなく軟部組織の描出が可能な点、3) 優れた分解能によって忠実な組織の再現が可能な点、4) リアルタイムで即座に描出が可能な点、5) 動的評価ができる点、6) 持ち運び可能でありベッドサイドなど場所を選ばずに評価できる点、7) 安価であり短時間で評価できる点、8) オプション機能を用いて血流評価ができる点などが挙げられる。短所としては、1) 骨や空気、厚い脂肪を通りにくいため、骨に囲まれた部位、肺や胃腸などの空気を含む臓器の描出が適していない点、2) プローブ走査に習熟が必要で検者依存性が高いという点、3) 画像解析の理解や技術の習熟に時間と経験が必要である点があり、今後の大きな課題となる。

これらを踏まえて、理学療法士にとって有用なエコー機器の活用方法を検討していく^{1), 5)}。

対象者と方法

1. 対象者

被験者は肩関節疾患を有さない 20 代の健常男性 1 名である。本研究では、正常な肩関節のエコー画像を撮像した。

2. 方法

エコー検査機器は GE Healthcare 社 Venue 50 を用いた(図 1)。表示モードには、通常の白黒画

像の B モード法, 血流の方向や速度を映すカラー Doppler 法, 炎症などの低速血流領域を映すパワードプラ法の 3 種類の表示モードがある. 本研究では表在臓器や末梢血管の描出が可能なりニア型のプローブを 12 MHz に設定した. 検査時は, 検査を行う部屋の照明を落とし, 暗くして実施した. 検査者と被験者は対面で向き合い, 座位で行った. エコー機器にはモニターのある本体と, 直接関節に当てるプローブがある. 1 画像を撮像するのに 5 分程度要し, 約 30 分撮影するたびに休憩を入れ, 1 日に 20 枚程度撮影した.



図 1 Venue 50(GE Healthcare 社)

1) B モード法

肩関節全体像の静止画像および肘屈伸時の動画は B モード法を用いて撮像した. 画像を描出する際は, プローブにエコー専用ジェルを塗布し, 皮膚表面とプローブの間に 1 mm 以上あげ, プローブの方向マークのある方を末梢側に向け, 標的となる部位に垂直に当てて固定した. プローブ幅は約 4 cm で, 1 画像に肩関節全体を映し出すことができないために, 複数枚画像を撮像した後合成することで肩関節の全体像を作成した.

2) パワードプラ法

パワードプラ法は, 赤血球の動きによる Doppler シフトの強度から, 非侵襲的に血流動態を評価できる方法である 6). この手法で組織内の微小な血流分布が表示され, 血流量が多いほど, パワードプラ信号の強度が高くなる.

本研究では, 肩関節周囲に極超短波 (エモシナ 620) を 200 W で 5 分間, 10 分間の二つのパ

ターンで照射し, パワードプラ法にて, 照射前後の血流量を比較した. 極超短波を照射する際は, 衣類を着用せず, 電極と照射位置を約 10 cm 離して行った. 照射後パワードプラ法を用いてパワードプラ信号を観察した. 検査者は, 今回初めてエコー機器を操作する大学生である.

結果

1. 肩関節の矢状断面画像

図 2 は肩関節全体の矢状断面を撮像した画像である. また, 皮膚表面と骨の距離が近い肩峰上は, プローブ全面を垂直に当てるのが困難であったため, プローブが肩峰の外側を通るように走査し, 撮像した. 実際には図 2 のように肩関節全体が見えるわけではなく, 1 回の撮像では赤枠の範囲を映し出すことしかできない. 実際にはおおよそ半分ずつ画像を重ねて合成している



ため, 合計 10 枚の画像で構成されている.

図 2 肩関節全体像(矢状断合成画像)

2. 肩関節の水平断面画像

図 3 は肩関節全体の水平断面画像である. 図 2 と同様に複数枚の画像から構成されている. 水平断面では結節間溝に上腕二頭筋腱が確認でき, 撮像した画像と解剖書とを照らし合わせることで, 周囲組織の同定が容易であった. 細部の腱も描出され, 大結節には棘下筋腱が, 小結節には肩甲下筋腱が観察できた.

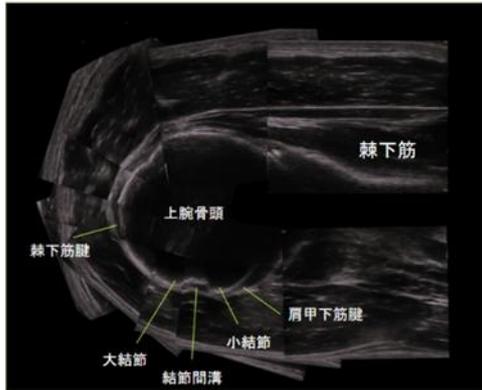


図3 肩関節全体像(水平断合成画像)

3. 肘屈伸時の上腕二頭筋長頭腱(以下, 長頭腱)の動き

静止画像により, 肩関節全体像が把握できたため, 肘関節運動時の長頭腱の動きを肩関節周囲で観察した. 図4, 5は肘最大伸展時から最大屈曲までに至る運動時に, 長頭腱の動きを撮影した動画である. また, 図6, 7は肘最大伸展時と



図4 肘屈伸時の上腕二頭筋長頭腱の動き(水平断面)



図5 肘屈伸時の上腕二頭筋長頭腱(矢状断像)

最大屈曲時の映像を切り抜き比較した画像である. 肘最大伸展時に比べると肘最大屈曲時には, 長頭腱が短軸方向で扁平化し, 長軸方向で細く伸びていることが確認できた.

以上のように, Bモード法を用いることで, 肩関節周囲の筋や腱などの位置, 動きを観察できた.

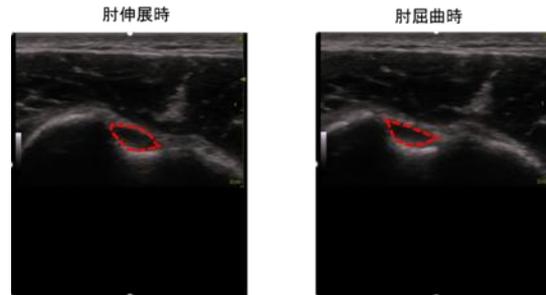


図6 上腕二頭筋長頭腱水平断(静止画)

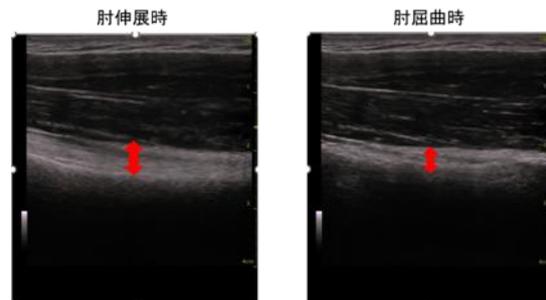


図7 上腕二頭筋長頭腱矢状断(静止画)

4. 温熱による肩関節のパワードプラの変化

肩前面に極超短波を照射し, その前後における血流の変化を, パワードプラ法を用いて観察した.

図8は極超短波照射前の画像と極超短波を5分間, 10分間照射した後, 血流の面積が最も増加したときの画像を撮像したものである. 本研究で使用したエコー機器に備わっている面積計算ツールを用いて, 血流の面積を比較すると, 照射前では 0.01 cm^2 であったのに対して, 5分間照射後では 0.12 cm^2 , 10分間照射後では 0.16 cm^2 であった. このことから, 照射時間が長いほうが, 血流の面積がより大きく描出されると分かった.

図9は極超短波を5分間照射し, 照射後の経過を撮像した画像である. 図10は10分間照射し, 照射後の経過を撮像したものである. また, 図11に各照射パターンにおける時間経過とその

時に描出された血流面積を示す。両パターンともに、照射直後で最も血流量が増加し、時間の経過とともに、映し出される血流の像が減少していくことが観察できた。しかし、5分間照射後は照射後20分で照射前と同様の血流面積に戻ったのに対し、10分間照射後では元の血流面積に戻るまでに40分を要した。このように、10分間照射後では、5分間照射後よりも照射前の血流量に戻るまでの時間が長いことが分かった。

考察

1. 理学療法への応用

1) 理学療法の効果判定

エコー検査は、炎症所見の程度を可視化できるため、理学療法の適否ほか、各疾患の構造的評価、活動性の評価が可能である。このことから、介入前後における理学療法効果を迅速かつ正

確に判定できると考察した。また、本研究で実際にエコーを用いてリアルタイムで筋・腱の画像や動画の撮影を行い、それらの動きを可視化できたという点からも、理学療法介入前後の正確な効果判定に有用であることが示唆された。さらに、本研究では健常者の腱を観察したが、臨床で可動域制限のある症例に対してエコー検査を用いることで、介入前後の関節可動域 (ROM) 測定によるアウトカムだけでなく、介入後の筋や腱の滑走性や柔軟性などの変化をアウトカムとして提示することができる可能性がある。

2) 理学療法との併用

本研究では、エコーを用いて物理 (温熱) 療法実施後の血流の変化を観察できた。一般に、使用する物理療法機器ごとにおおよその推奨実施時間は定められているが、エコーを用いた効果判定を組み合わせることで、患者の脂肪量や筋

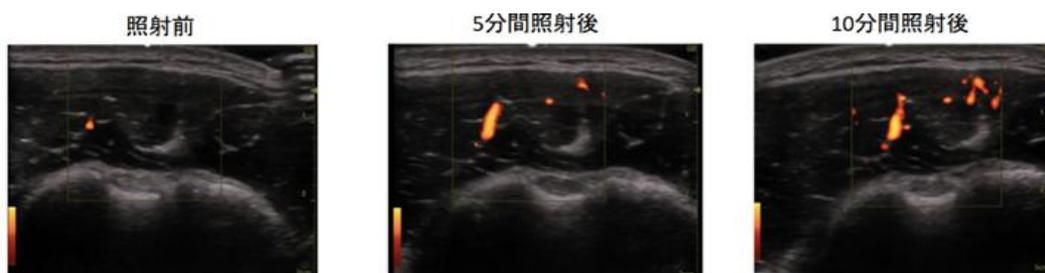


図8 極超短波5分間照射時と10分間照射時のパワードプラ画像

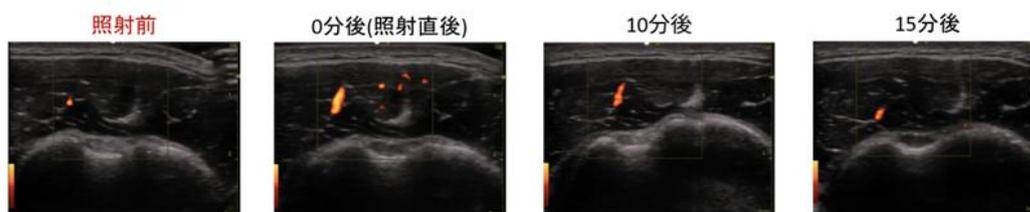


図9 極超短波5分間照射時のパワードプラ画像の経過

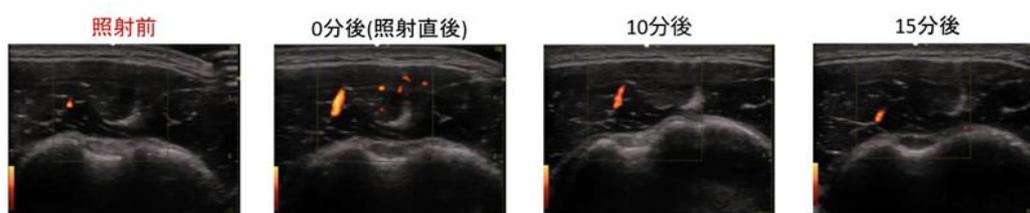


図10 極超短波10分間照射時のパワードプラ画像の経過

	照射前	直後(0分後)	10分後	15分後	20分後	30分後	40分後
5分間照射時(cm ²)	0.01	0.12	0.06	0.05	0.01	—	—
10分間照射時(cm ²)	0.01	0.16	0.07	0.06	0.04	0.02	0.01

図 11 極超短波照射後の経過時間と血流面積

量、深部組織への熱の到達度といった個体差を反映した、より精密な時間の設定が行える可能性がある。また、物理療法だけでなく、関節可動域訓練や徒手療法などと併用することでそれらの効果を向上させることができる可能性もあると考えた。

① 関節可動域訓練との併用による効果

関節可動域訓練とエコー検査を併用することで、関節可動域制限の原因が筋・腱・関節包・滑走不全など、どの組織に起因するかを明確にできる。Morishitaらは、エコーを用いた軟部組織評価が、ROM 制限因子の特定に有用であると報告した⁷⁾。本研究のように血流変化を可視化できれば、加温や徒手療法介入後に組織伸張性がどの程度改善したかを即時に確認でき、個々の組織反応に応じたROM 訓練の強度・方向・時間の調整が可能となる。また、Arifinらは肩関節拘縮患者において、エコーで組織状態を確認しながらストレッチを行うことで、より効率的な可動域改善が得られたと報告した⁸⁾。これらの知見は、エコー併用がROM 訓練の精度を高め、治療効果の最大化に寄与する可能性が示唆された。

② 徒手療法との併用による効果

徒手療法とエコー検査を併用することで、筋膜の滑走不全・筋緊張の局在・組織の厚さや硬さの変化・血流の改善状況などを客観的に評価できる。Sikorskiらは、エコーを用いた筋膜滑走の評価が、徒手療法のターゲット設定に有用であると報告した⁹⁾。また、徒手療法後にエコーで血流や滑走性の改善を確認できれば、治療効果の即時フィードバックが可能となり、施術の妥当性を高めることができる。

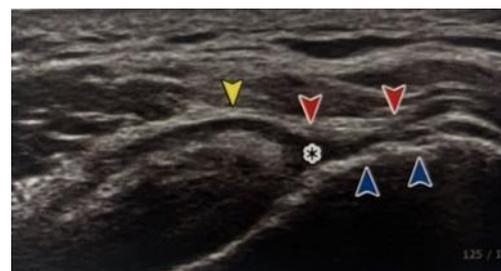
③ 学習ツール

触診や体表解剖の学習ツールとして活用できる。エコーを用いることで、骨や筋、その周囲組

織の位置関係を描出することができたため、解剖学的知識を深め、触診などの理学療法スキルの精度を高めることができる可能性があるといえる。

2. 肩関節におけるエコー検査の使用

実際にエコー検査の適応となる肩関節疾患には、腱板損傷・断裂、関節リウマチ、肩峰下滑液包炎、石灰化沈着性腱炎、上腕二頭筋長頭腱炎、肩関節周囲炎などが挙げられる。ここでは腱板断裂を例に理学療法への応用を検討した(図12)。腱板断裂では、Bモード法やパワードブラ法を用いて、肩関節周囲の腱を順番に走査しながら断裂の有無と種類、位置、大きさ、滑液貯留や炎症所見を評価する。理学療法への応用の仕方として、断裂部位や断裂のサイズから、挙上・外旋など特定方向の筋力低下や痛みの機序を推定し、運動療法のレベルを決定することなどが挙げられる。また、保存療法か手術療法かの判断材料としてエコー検査画像を医師と共有することで、理学療法のゴール設定や介入期間の見通しを立てることができる。



- ▶ 赤：棘上筋の陥凹
- ▶ 青：骨表面の不整像
- ▶ 黄： peribursal fat

図 12 棘上筋断裂のエコー画像¹⁰⁾

このようなことを踏まえ、肩関節を中心としたエコー検査に関する考察を行った。肩関節におけるエコー検査のメリットとして、肩関節ではランドマークとなる腱を描出しやすく、組織の位置関係

が分かりやすいことや、リアルタイムで動的評価を行うことで、肩関節インピンジメント症候群など肩関節周囲の疾患を評価できることを挙げる。その一方で、肩関節は複雑な構造であるため、エコーで鮮明な画像を描出するためには高い技術が必要であることや、エコー撮影時に露出の多い格好になる必要がある場合に、撮影環境の配慮が必要であることなどをデメリットとして挙げた。特に、鮮明な画像を描出するという点で、肩峰など骨が突出している部分は撮影が難しく、筋量が減少し、骨の突出部が多くなっている高齢者などに対しては撮影が困難であると考えられた。

3. 実際に使用した感想

実際にエコー機器を使用してみて、理学療法士にとって有用であるということが分かったが、困難な点もあった。エコー機器を使用するのが初めてであったため、プローブ走査時には力加減やジェルの厚さを保つことなどに苦戦し、正確な画像を描出できるようになるまで苦労した。特に肩関節は複雑な構造であることに加え、腱板や関節包など多くの組織が重なっていること、プローブとの接地面が丸みを帯びていることなどが影響し、正確な画像を描出することがとても難しかった。また、結髪動作などの動的評価を試みたが、動作時の腱板の位置や形の変化、筋肉の動きなどが大きく、筆者らの技術では困難であった。また、描出した画像と解剖書とを何度も参照しながら組織の同定を行ったため、正確な解剖学的所見を捉えるまでに時間を要した。さらに、先生方にエコーの操作方法や解剖学的名称についてご指導をいただかなければいけないことも多々あった。

結論

本研究ではエコー画像診断装置を用いた肩関節を中心とした解剖学的所見について解説し、エコー検査の理学療法への応用を検討した。理学療法の分野でエコー画像を使用することは、臨床効果判定や、臨床思考の可視化に有用であることが分かった。また、運動評価においては検査者の技術や診療場所に左右されながらも、リアルタイムで動的評価が可能であることが分か

った。また、パワードプラ法を用いることで温熱療法の評価も可能であった。今後は臨床現場への導入とともに教育体制の充実を図る義務があると考えた。

謝辞

本研究を進めるにあたり、ご指導を賜りました折口智樹教授、極超短波の使用に関し、ご指導賜りました本田祐一郎助教に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 大矢暢久:運動器障害に対する物理療法の臨床実践～超音波画像診断装置による効果判定を中心に～. 物理療法科学. 2020; 27: 12-18.
- 2) 米山昌司, 南里和秀, 他:超音波検査の過去そして未来. 医学検査. 2015; 64(5): 517-526.
- 3) 佐藤絢音, 堀江芳, 他:正常の膝関節を中心とした関節超音波検査所見の検討. 長崎大学医学部保健学科卒業研究論文集, 2024; 20: 26-33.
- 4) 須内音々, 竹田菜々子:正常関節における関節超音波検査所見の検討. 長崎大学医学部保健学科卒業研究論文集, 2023; 19: 35-41.
- 5) 平山和哉:理学療法における超音波エコーの活用—適切な治療から予防へと繋ぐために—. 理学療法の歩み, 2022; 33(1): 16-21.
- 6) 泉主馬, 山森圭祐, 他:パワードプラ法を用いた筋内血流動態の評価:事例研究. 2022; 45(1): 63-69.
- 7) Morishita K, Karasuno H, et al.: Ultrasound imaging for assessment of soft tissue characteristics in musculoskeletal rehabilitation. J Phys Ther Sci. 2014; 26: 915-918.
- 8) Arifin N, Lee MH, et al.: Ultrasound-guided stretching improves shoulder range of motion in patients with adhesive capsulitis: a randomized controlled trial. Clin Rehabil.

- 2019; 33: 693-702.
- 9) Sikorski D, Zawadka M, et al.: Ultrasound assessment of fascial layer gliding and its relevance for manual therapy interventions. *Man Ther.* 2018; 37: 7-15.
- 10) 岩本 航, 石崎一穂: 基本がわかる! 異常が見える! 運動器エコー. 羊土社, 東京, 2021, pp.231.
(指導教員 折口智樹)