超音波照射が疼痛閾値に与える影響

Effect of Therapeutic Ultrasound on Pain Threshold

森下 勝行^{1,2)} 烏野 大¹⁾ 横井 悠加^{1,2)} 諸角 一記¹⁾ 萩原 久佳^{1,2)}
花岡 正明¹⁾ 藤原 孝之^{1,2)} 藤本 哲也²⁾ 阿部 康次²⁾

KATSUYUKI MORISHITA, RPT, MS^{1,2)}, HIROSHI KARASUNO, RPT, PhD¹⁾, YUKA YOKOI, RPT, MS^{1,2)},
KAZUNORI MOROZUMI, RPT, PhD¹⁾, HISAYOSHI OGIHARA, RPT, MS^{1,2)}, MASAOKI HANAOKA, DE¹⁾,
TAKAYUKI FUJIWARA, RPT, MD, PhD, DE^{1,2)}, TETSUYA FUJIMOTO, DE²⁾, KOJI ABE, DE²⁾

¹⁾ Koriyama Tohto Academy Educational Foundation, Koriyama Institute of Health Sciences: 2-9-3 Zukei, Koriyama, Fukushima 963-8834, Japan. TEL+81 24-936-7784 E-mail: k-morishita@k-tohto.ac.jp

²⁾ Interdisciplinary Graduate School of Science and Technology, Shinshu University

Rigakuryoho Kagaku 29(2): 271-275, 2014. Submitted Sep. 26, 2013. Accepted Oct. 29, 2013.

ABSTRACT: [Purpose] The purpose of this study was to clarify the effect of therapeutic ultrasound on pain threshold. [Subjects] The subjects were 10 healthy males. [Methods] All participated in three trials: ultrasound (US) without powered ultrasound (placebo), and rest (control). US was applied at 3 MHz, 1.0 W/cm², and a duty cycle of 100%, for 10 minutes. The outcome measures were the pin-pricking pain threshold (PPPT), the pressure pain threshold (PPT), the visual analog scale (VAS) of PPPT and PPT measurements, and skin surface temperature (SST). Measurements were taken 10 minutes before trials, just before and after trials, 10 minutes after trials, and 20 minutes after trials. [Results] After the US trial, PPPT, PPT, and SST increased significantly more than after the placebo and control trials at 20 minute after the trials. There were no significant differences in VAS. [Conclusion] The results suggest that US has a sustained effect on the pain threshold.

Key words: ultrasound, pin-pricking pain threshold, pressure pain threshold

要旨:〔目的〕超音波照射が疼痛閾値に与える影響を明らかにすることとした。〔対象〕健康成人男性10名とした。〔方法〕施行条件を、(1) 超音波照射あり (US 群)、(2) 超音波照射なし (placebo 群)、(3) 安静 (control 群) とし、これらの中で疼痛閾値の経時的変化を比較した。超音波は、周波数 3 MHz、強度 1.0 W/cm²、照射時間率 100%、照射時間 10 分間にて照射した。測定項目は、痛覚閾値、圧痛閾値、それぞれの閾値測定時の visual analog scale (VAS)、および皮膚表面温度とした。〔結果〕US 群が placebo 群と control 群に比べ照射後 20 分間において痛覚閾値、圧痛閾値、皮膚表面温度が高かった。〔結語〕超音波は、照射後 20 分間において疼痛閾値を上昇させる持続効果があることが示唆される。

キーワード: 超音波、痛覚閾値、圧痛閾値

¹⁾ 学校法人こおりやま東都学園 郡山健康科学専門学校: 福島県郡山市図景 2-9-3 (〒963-8834) TEL 024-936-7784

²⁾ 信州大学大学院 総合工学系研究科 生命機能・ファイバー工学専攻

I. はじめに

超音波とは、ヒトの可聴範囲である16 Hz～20 kHzを超えた周波数の音の波であり、超音波療法とは、超音波の振動エネルギーを医療に応用した物理療法である。超音波療法における周波数や強度、照射時間率、照射時間、照射範囲などの設定は治療効果に影響を与える¹⁾。このことを利用して例えば、周波数を1 MHzで深部組織の、3 MHzで表在組織の治療に適応させ、強度や照射時間率の設定により超音波の機械的効果と温熱効果を調整することが可能である。このため、病期や症状および治療標的により照射条件を判断する臨床的推論が重要とされる²⁾。超音波の高強度の連続照射は温熱効果をもたらす、筋硬結や筋スパズムなどの臨床症状に適応される¹⁾。超音波療法の温熱効果には、組織代謝の亢進、局所血流の促進、組織伸張性の増加などがあり¹⁾、運動器疾患の疼痛管理を目的とした物理療法として臨床応用されている³⁻⁷⁾。このため、鎮痛を目的とした超音波療法の使用がなされているが、その効果判定には主観的疼痛評価であるvisual analog scale (VAS) が多用されている³⁻⁷⁾。国際疼痛学会によると、疼痛とは、組織の実質的あるいは潜在的な傷害に結びつくか、このような傷害を表す言葉を使って述べられる不快な感覚・情動体験であると定義⁸⁾されている。この性質より、VASをはじめ多くの疼痛評価は主観的であり、患者自身の精神的・心理的影響や治療者との関係性などのバイアスを受ける。特に慢性疼痛に対する評価の信頼性は低い^{9,10)}。それゆえ、疼痛に対する超音波療法の効果については更なる検証が必要である。

我々は既に僧帽筋上部線維に対する超音波療法が照射後20分間における筋硬度の低下と自動関節可動域を増大させることを報告している^{11,12)}。しかしながら、筋硬度の増加や関節可動域制限の要因である疼痛そのものの改善には閾値の変化が必要となる。このため、本研究では超音波照射が疼痛閾値に与える影響について明らかにすることを目的とした。

II. 対象と方法

1. 対象

対象は、健康成人男性10名とした。対象の属性(身長・体重・BMI)は平均値±標準偏差で示す。対象は、平均年齢26(範囲:21-31)歳、身長172.5±6.1 cm、体重61.0±4.5 kg、BMI 20.5±1.5、利き手は全員右手であった。

本研究は、こおりやま東都学園研究倫理委員会の承認(承認番号:倫理委08-004)を得て行われたものである。全ての対象者には事前に本研究の目的と内容、利益およびリスクについて口頭および書面にて説明を行い、参加

同意書への自筆による署名を得て研究協力の同意を得た。

2. 方法

施行条件とする、同一被験者に対し超音波照射あり(US群)、超音波照射なし(placebo群)、安静のみ(control群)の3つを無作為な順序にて実施した。異なる条件を施行する間隔は1週間以上とした。超音波は、周波数を3 MHz、強度を1 W/cm²、照射時間率を100%(連続照射)、照射時間を10分間、照射範囲を超音波導子面積の約2倍とし、ストローク法にて照射した。照射には超音波治療器(EU-940、伊藤超短波社製)を用いた。US群は上記方法による超音波照射を実施し、placebo群では強度0 W/cm²(超音波照射なし)とした。control群には安静(超音波用ゲルのみ塗布)を指示した。皮膚と超音波導子の間には超音波用ゲルを十分に塗布した。さらに盲検化(placebo)を行うため、超音波用ゲルの温度を平均33℃の不感温度まで加温したのち皮膚に塗布した。

測定項目は、痛覚閾値、圧痛閾値、痛覚閾値測定時のVAS、圧痛閾値測定時のVAS、皮膚表面温度の5つとした。VASは100 mmの指標を用いて評価した。なお、全ての測定は同一検者が実施した。測定機器は、痛覚計(TKK-2335、竹井機器工業社製)、圧痛計(OE-220、伊藤超短波社製)、および放射温度計(THI-700L、Tasco Japan社製)を使用した。痛覚閾値は針刺激により0～10 gfまで変位する痛覚計を測定部位に静かに押していき、痛みを感じた時点における刺圧力(gf)として測定した¹³⁾。各3回施行して得られる閾値の合計を代表値として解析を行った¹³⁾。さらに、痛覚閾値での疼痛の程度をVASにて評価した。圧痛閾値は、測定部位に圧痛計を静かに押圧していき、閾値における押圧力(N)として測定した。その閾値は圧痛計に付属する被検者用フィードバックスイッチを被験者自身が痛みを感じた時点で押し、その際の押圧力を測定値とする本圧痛計の測定方法に準じ評価した¹⁴⁾。各3回施行して得られる閾値の平均を代表値として解析を行った¹⁴⁾。さらに、圧痛閾値での疼痛の程度をVASにて評価した。US群とplacebo群の照射部位および3つの施行条件の測定部位は僧帽筋上部線維部(C7棘突起～鎖骨肩峰端上縁最突出部の中点上)とした。測定肢位は、可及的に体幹中間位を保持し、左右上肢をそれぞれの大腿上に乗せた椅座位とした。測定環境は、室温(24～26℃)、湿度(40～60%)を可及的に一定に保たれたものとした。測定を開始する前に対象者を測定室の環境に順応させるため20分間の順化時間を設定した。測定プロトコルは、各施行(US・placebo・control)の10分間を含めた計40分間を10分間隔に分割し5回の測定を行った。測定順序は、T1(測定開始時)、T2(測定開始時より10分後、各施行の直前)、T3(各施行直後)、T4(各施行後10分)、T5(各施行後

20分)に分け、それぞれの時点で測定した。統計解析においては、施行条件と測定時間を2要因とする反復測定による二元配置分散分析を行った後に多重比較 (Tukey) 検定を実施した。有意水準は5%未満とした。解析には、統計解析ソフトウェアSPSS社製 for Windows ver. 21を使用した。

III. 結果

痛覚閾値と圧痛閾値およびそれぞれのVAS値、皮膚表面温度の結果は表1から表5に示す。二元配置分散分析の結果、痛覚閾値 ($F_{(2, 8)}=9.48, p<0.01$) と圧痛閾値 ($F_{(2, 8)}=9.67, p<0.01$)、皮膚表面温度 ($F_{(2, 8)}=108.12, p<0.01$) において施行条件と測定時間の間に交互作用が認められた。痛覚閾値と圧痛閾値のVASにおいては交互作用が認められなかった。多重比較の結果、痛覚閾値と圧痛閾値、皮膚表面温度はT3, T4, T5でUS群がplacebo群とcontrol群に比べ有意に高かった ($p<0.05$)。しかし、US群の皮膚表面温度はT3 (施行直後) で上昇

したが、T5では照射前のT1およびT2と同程度の温度に下降した。

IV. 考察

本研究では、超音波照射が疼痛閾値に与える影響を検討した。その結果、超音波照射後に痛覚および圧痛刺激の閾値が増加し、主観的疼痛評価であるVASの変化が認められなかった。この結果は、超音波が侵害刺激に対する閾値を上昇させたことを示している。超音波照射後では照射前に加えた痛覚・圧痛刺激量以上の強い刺激が加えられているが、主観的に感じる痛みの程度は照射前やplacebo群およびcontrol群と変わらなかった。すなわち、各閾値に差がありVASのみ各条件間に差がなかったということは侵害刺激に対する閾値が上昇したことを示している。さらに、超音波照射後20分の時点でも侵害刺激に対する閾値が上昇したことは、超音波による疼痛抑制効果が20分間持続することを証明している。

痛覚や圧痛刺激に応答する皮膚上の感覚受容器として

表1 超音波照射のある (US)、ない (placebo)、および安静のみの (control) 群における痛覚閾値の経時的変化

	T1	T2	T3	T4	T5
US	3.2 ± 0.4	3.7 ± 1.3	9.2 ± 4.6**	7.4 ± 3.9**	6.5 ± 2.4* ††
placebo	3.8 ± 1.9	3.9 ± 1.9	3.9 ± 1.4	3.6 ± 1.1	4.3 ± 1.2
control	3.3 ± 0.7	3.7 ± 1.2	3.5 ± 1.1	3.8 ± 1.3	4.0 ± 1.2

mean ± s.d. (gf).

** : $p<0.01$ (US vs. placebo, control), * : $p<0.05$ (US vs. placebo), †† : $p<0.01$ (US vs. control)

表2 超音波照射のある (US)、ない (placebo)、および安静のみの (control) 群における圧痛閾値の経時的変化

	T1	T2	T3	T4	T5
US	13.9 ± 3.2	14.5 ± 3.1	18.6 ± 4.1**	18.6 ± 3.1**	18.4 ± 4.0**
placebo	14.1 ± 3.2	14.3 ± 3.4	14.1 ± 3.0	14.6 ± 3.4	15.0 ± 3.0
control	14.9 ± 3.3	15.3 ± 3.2	15.0 ± 3.0	14.3 ± 3.3	14.5 ± 3.0

mean ± s.d. (N).

** : $p<0.01$ (US vs. placebo, control)

表3 超音波照射のある (US)、ない (placebo)、および安静のみの (control) 群における痛覚閾値測定時のVASの経時的変化

	T1	T2	T3	T4	T5
US	12.6 ± 11.2	11.6 ± 13.5	12.6 ± 12.7	14.9 ± 13.4	12.1 ± 12.2
placebo	10.4 ± 7.3	8.8 ± 6.4	12.4 ± 8.0	9.3 ± 6.2	8.4 ± 5.1
control	7.0 ± 6.2	7.5 ± 7.8	7.8 ± 6.6	7.7 ± 4.7	7.1 ± 4.8

mean ± s.d. (mm).

VASの値に、3群間で有意差は認められなかった。

表4 超音波照射のある (US), ない (placebo), および安静のみの (control) 群における圧痛閾値測定時の VAS の経時的変化

	T1	T2	T3	T4	T5
US	15.8 ± 10.1	16.7 ± 10.6	17.2 ± 10.9	24.5 ± 14.4	21.9 ± 15.2
placebo	13.4 ± 7.1	16.9 ± 11.5	14.8 ± 8.5	16.4 ± 11.5	15.0 ± 10.0
control	11.5 ± 9.3	13.8 ± 10.7	14.3 ± 11.8	16.6 ± 10.6	15.3 ± 10.6

mean ± s.d. (mm).

VAS の値に, 3 群間で有意差は認められなかった.

表5 超音波照射のある (US), ない (placebo), および安静のみの (control) 群における皮膚表面温度の経時的変化

	T1	T2	T3	T4	T5
US	33.5 ± 0.4	33.7 ± 0.3	35.2 ± 0.8**	34.5 ± 0.3**	34.0 ± 0.6**
placebo	33.3 ± 0.4	33.4 ± 0.5	29.5 ± 0.6	32.4 ± 0.6	33.3 ± 0.3
control	33.3 ± 0.7	33.2 ± 0.6	29.1 ± 0.7	32.2 ± 0.5	33.0 ± 0.6

mean ± s.d. (°C).

**: p<0.01 (US vs. placebo, control)

は, 高閾値侵害受容器やポリモーダル受容器が存在する. 刺すような鋭い痛みは高閾値侵害受容器の発火による興奮が A δ 線維を伝導し, 皮膚上を圧迫して生じる鈍く疼くような痛みはポリモーダル受容器の発火による興奮が C 線維を伝導する¹⁵⁾. このことから, 本実験における痛覚および圧痛の侵害刺激は上記の各侵害受容器の発火量を増大させるものと考えられる. 疼痛抑制には侵害受容器の感度を低下させ, 疼痛閾値を上昇させる必要がある. 本実験では, 超音波刺激と超音波導子の圧刺激により皮膚上の触圧覚受容器と, 本実験に示された皮膚表面温度の上昇から, 温痛覚受容器の閾値を上昇させたものと推察される. このことから, 高閾値侵害受容器やポリモーダル受容器の感度の低下を引き起こした可能性がある. さらに, 超音波の組織深達性^{1,16)}を考慮すると筋膜および骨格筋の血管壁に存在する深部の感覚受容器¹⁷⁻²⁰⁾の閾値においても影響を与えたものと推察される. これらから, 超音波により皮膚表面および筋深部の感覚受容器の閾値が上昇し, これが痛覚や圧痛などの侵害刺激の感度の低下と痛覚および圧痛閾値の上昇をもたらしたと考えられる.

上記の効果は, 皮膚表面温度の変化からみても超音波の温熱効果が影響したものと考える. Draper ら¹⁶⁾は, 本実験と同様の条件にて深部 0.8 cm と 1.6 cm の温度が 5.8°C 上昇したことを報告している. 本実験では, 皮膚表面温度が超音波照射直後にて 1.7°C の上昇を示した. 組織加温による生体反応の変化では, 組織温度が 1°C 上昇すると代謝の促進や軽度の炎症の軽減, 2~3°C の上昇では疼痛および筋スパズムの軽減と血流の増加, 4°C の上昇で組織伸張性の増加が起こる¹⁾. 本実験における皮膚表面温度は疼痛抑制に達する 2°C の温度上昇には至

らなかったが, 先行研究における深部温度の上昇を考慮すると超音波の温熱効果が疼痛閾値の上昇に影響を与えたと考えられる.

このような超音波の温熱効果にもかかわらず, 皮膚表面温度は超音波照射後 20 分に照射前と同程度の温度に下降した. このことは超音波による加温効果が低下していることを示している. 疼痛閾値の上昇が維持されていることから, 疼痛抑制における超音波療法の持続効果は, 筋深部の温熱の残存効果に加え超音波の機械的効果が軟部組織に分布する感覚受容器の感度に対して直接的に作用していることにより引き起こされている可能性がある. また, 圧痛閾値の変化においては超音波による筋硬度の低下^{11,12)}も影響したものと考えられる.

一方, placebo 群と control 群においては皮膚表面温度が照射後 20 分間において低下した. これは超音波ゲルが気化熱の影響で冷却されたためと考えられる. 一般的に, 組織に対する冷却効果としては疼痛閾値の上昇²¹⁾があるが, placebo 群と control 群においてはその効果は認められなかった. このため, placebo 群と control 群の 2 つの施行条件は臨床的意義が低いものとする.

本研究の結果から, 超音波療法における有痛性疾患の治療戦略として, 疼痛抑制が生じている超音波照射後 20 分間以内の運動療法の積極的施行が推奨される. この期間は, 超音波と運動療法の複合効果が期待される治療時期である. これは超音波療法と併用する運動療法の効果的な治療指標を示唆し, 疼痛治療に対する臨床的意義は高いといえる.

本研究の限界として, 第 1 に対象が健康成人であるため閾値測定による効果判定に留まり, 実際の有痛性疾患症例の鎮痛効果を検討することはできなかった. このため,

臨床研究における無作為化比較対照試験にて超音波療法の鎮痛効果を実証する必要がある。第2に痛覚閾値と圧痛閾値測定時のVASが3群とも低値を示し、実験的に誘起された侵害刺激量の程度に問題があった可能性のあることで更なる検証が必要である。今後は、超音波における鎮痛の神経生理学的メカニズムの解明や、間接的效果である組織の酸素動態を含めた血液循環への影響、さらにはこれらの臨床効果を検証し、疼痛治療に対する超音波療法の科学的根拠を明らかにしたい。

引用文献

- 1) Knight KL, Draper DO: Therapeutic modalities. The art and science 2th ed, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia, 2013, pp252-282.
- 2) Cheng GA: 物理療法のEBM: 臨床的推論・医療判断学. 理学療法学, 2012, 39(4): 253-256.
- 3) Gam NA, Johannsen F: Ultrasound therapy in musculoskeletal disorders: a meta-analysis. Pain, 1995, 63(1): 85-91.
- 4) van der Windt DA, van der Heijden GJ, van der Berg SG, et al.: Ultrasound therapy for musculoskeletal disorders: a systematic review. Pain, 1999, 81(3): 257-271.
- 5) Robertson JV, Baker GK: A review of therapeutic ultrasound: effectiveness studies. Phys Ther. 2001, 81(7): 1339-1350.
- 6) Özgonenel L, Aytekin E, Durmusoglu G: A double-blind trial of clinical effects of therapeutic ultrasound in knee osteoarthritis. Ultrasound Med Biol, 2009, 35(1): 44-49.
- 7) Dündar Ü, Solak Ö, Samli F, et al.: Effectiveness of ultrasound therapy in cervical myofascial pain syndrome: a double blind, placebo-controlled study. Turk J Rheumatol, 2010, 25: 110-115.
- 8) Merskey H, Bogduk N: The following pain terminology is updated from "Part III: Pain Terms, A Current List with Definitions and Notes on Usage" Classification of Chronic Pain 2th ed, IASP Task Force on Taxonomy. IASP Press, Seattle, 1994, pp209-214.
- 9) 松原貴子: 慢性疼痛症候群の評価法. 理学療法, 2011, 28(6): 782-787.
- 10) 渡部一郎: 新しい疼痛評価法. 日本物理療法学会誌, 2006, 13: 1-12.
- 11) 森下勝行, 烏野 大, 宇都宮雅博・他: 超音波照射が軟部組織硬度に与える影響. 日本物理療法学会誌, 2010, 17: 25-30.
- 12) 森下勝行, 烏野 大, 藤原孝之・他: 超音波照射が筋硬度と関節可動域に与える影響. 生体応用計測, 2011, 2: 7-10.
- 13) 荻原久佳, 烏野 大, 森下勝行・他: 経皮的電気刺激における生体の反応—低頻度刺激と高頻度刺激の比較検討—. 生体応用計測, 2011, 2: 27-31.
- 14) Morozumi K, Fujiwara T, Karasuno H, et al.: A new tissue hardness meter and algometer: a new meter incorporating the functions of a tissue hardness meter and an algometer. J Phys Ther Sci, 2010, 22(3): 239-245.
- 15) 松原貴子, 沖田 実, 森岡 周: Pain Rehabilitation, 三輪書店, 東京, 2011, p135.
- 16) Draper OD, Castel CJ, Castel D: Rate of temperature increase in human muscle during 1 MHz and 3 MHz continuous ultrasound. J Orthop Sports Phys Ther, 1995, 22(4): 142-150.
- 17) Stacey MJ: Free nerve endings in skeletal muscle of the cat. J Anat, 1969, 105(2): 231-254.
- 18) Mence S, Stahnke M: Responses in muscle afferent fibers of slow conduction velocity to contractions and ischaemia in the cat. J Physiol, 1983, 342: 383-397.
- 19) Adrahams VC, Lynn B, Richmond FJ: Organization and sensory properties of small myelinated fibres in the dorsal cervical rami of the cat. J Physiol, 1984, 347: 177-187.
- 20) Mence S: Nociception from skeletal muscle in relation to clinical muscle pain. Pain, 1993, 54(3): 241-289.
- 21) Cameron MH: EBM物理療法 原著第2版. 渡部一郎 (訳), 医歯薬出版, 東京, 2006. pp144-146.