

脳卒中片麻痺患者の痙縮に対する水中ノルディックウォークの効果

Effects of aquatic Nordic Walking on reduction of spastic hypertonia in a patient with hemiplegia

○星野元訓(東京大学大学院), 小幡博基(東京大学大学院), 福崎千穂(東京大学大学院),
中澤公孝(東京大学大学院), 矢野英雄(富士温泉病院)

Motonori HOSHINO, Hiroki OBATA, Chiho Fukusaki, Kimitaka NAKAZAWA, University of Tokyo
Hideo YANO, Fuji Onsen Byoin

Abstract: The aim of present study is to investigate effects of aquatic Nordic Walking (NW) on reduction of spasticity. The patient with chronic hemiplegia over 10 years was participated in the study. The subject walked with custom made poles for NW in hot-spring pool for 10 minutes with and without assistance, respectively. Surface electromyographic (EMG) activities in 3 upper limb muscles and 5 lower limb muscles on the hemiplegic side through the pre-, during-, post-NW and postural sway during quiet standing for 30 seconds between pre- and post-NW were measured. The results showed that locomotor-like EMG activities appeared in Medial Gastrocnemius and Biceps Femoris muscles during and after NW in hot spring pool, though those muscles showed rather spastic and tonic type of EMGs in pre-NW. These results suggest that aquatic NW has some unknown neurophysiological effect on spastic hypertonia in patients after stroke.

Key Words: Nordic Walking, underwater walking, chronic hemiplegia, spasticity

1. 緒言

ノルディックウォーク(Nordic Walking: NW)が本邦に紹介されて10年近くが経過した。NWは身体全体の筋の活用による全身運動であり、運動強度を高めることがクローズアップされる。これ以外にも様々な目的での普及がなされており、その中の一つとして全日本ノルディックウォーク連盟が提唱するディフェンシブスタイルによるリハビリテーション分野への応用がある。高齢者や変形性関節症などの下肢運動器疾患患者に対するNWの適応が試みられているものの、運動特性や効果に関する科学的検証はまだまだ十分に行われていない。

NWは両上肢と両下肢の四肢を交互に接地させる左右対称の4点接地歩行であり、両下肢のみが接地する起立2足歩行とは運動様式が決定的に異なる。筆者らは、この違いに起因するバイオメカニクスのおよび神経科学的影響に関し、次の三つの仮説を設定し、その検証を行うこととした。すなわち、①ポールを用いることにより下肢への荷重が軽減する。②ポールの使用は単なる下肢への荷重軽減と推進力産出ではなく、姿勢制御系における左右対称の身体外部参照点の設定など神経系への作用により力学的貢献以上に姿勢安定性に寄与する。③ポール使用に伴う上肢由来の感覚入力と下行性指令、下肢からの感覚入力が上肢筋支配の脊髄神経回路を強く賦活する。

本研究と、我々のこれまでの脳卒中片麻痺患者を対象とした研究では、上記②との関連から、NWが神経系に何らかの特有の影響を与えるのかを調べてきた。本研究では特に水中でNWを行った時の影響を明らかにしようとした。

一般に脳卒中などの高位中枢損傷では抗重力機能の低下が見られる。重力下の歩行においては下肢のみならず、体幹・上肢に異常な筋緊張指令が脳幹から発令され、正常な自動的プロセスが阻害されやすいと推測される。一方、弱重力下では、抗重力機能軽減にともない異常な筋緊張が生じにくいと考えられることから、水中歩行は高位中枢損傷者に対する効果的な歩行訓練となる可能性がある。しかし、水中では浮力による体重軽減と推進抵抗の増大が、バラン

スのとりにくさにつながり、高位中枢損傷者への適応は容易ではなかった。この弱点に対し、水中でのポールの使用は、バランスの保持にとって力学的、心理的にも有効であることが予想された。

以上の観点から、我々の研究グループでは、弱重力環境である水中を利用したNW訓練を試行的に行ってきた。

本研究では、上位中枢疾患由来であり、なおかつ左右非対称性歩行を呈する脳卒中片麻痺を対象疾患とした。ケーススタディとして他の運動では改善効果が見られない痙縮を有する陳旧症例に対して水中NWを実施し、実施直後の即時的な効果を麻痺側筋電図分析と静止立位姿勢制御能の変化から評価することを目的とした。

2. 方法

2-1 対象症例

64歳の男性。左脳梗塞発症後12年が経過している。右片麻痺、ウェルニッケ・マン肢位を呈し、運動性失語症を合併している。

日常の歩行は左手でT字杖を使用して自立している。

2-2 プロトコール

水中NW訓練は訓練用プールに入水後、温水状況に十分慣れた後に実施した。まず検者が被検者の後ろに寄り添い、被検者の手部と大腿部に検者のそれぞれの同部をあてがい、上・下肢の動作が交互で左右対称となるよう補助したNW(assist underwater NW: assist uw-NW)を10分程度実施した。その後、補助なしで被検者自身のみによるNW(non-assist uw-NW)を10分程度実施した。また、水中NW訓練の前後において陸上でT字杖使用下での静止立位姿勢保持と歩行(Pre/Post uw-NW)を行った。

訓練用プールは縦15m×横4mであり、水深は腋窩レベル(陸上の約80%免荷)とし、水温は36℃とした。訓練前後と途中の試行間休憩時に心拍数と血圧を計測して体調に変動がないことを確認した。歩行は水陸両用の試歩行路(4m)を用意し、陸上・水中歩行それぞれの床表面は同じ

条件とした。

なお、試行間において十分な休憩をとり、また計測において検者は被検者の脇に立ち、転倒を防止した。

2-3 NW ポール

水中 NW 訓練においては水の浮力を考慮し、ポール内部に錘(500g)を内蔵する改造を施した水中専用ポールを用いた。このポールは水中ではグリップ部が上方になるよう、支持がなくとも直立し、これにより陸上に近い感覚でのポール操作が可能であった。

ポール保持において右側は手指の屈曲拘縮より本人による保持ができなかったことから、伸縮バンドにより手背部に固定した。

2-4 計測方法

水中 NW 訓練の効果を検証するために水中 NW と陸上での T 字杖歩行と安静立位姿勢保持を動作課題として、筋電図分析と足圧中心動揺軌跡について各 1 回の計測を実施した。

筋電図分析

試行中の筋活動について表面筋電図法を用いて測定した。筋電図 (electromyogram : EMG) は麻痺側のヒラメ筋 (Soleus : SOL), 内側腓腹筋 (Medial Gastrocnemius : MG), 前脛骨筋 (Tibialis Anterior : TA) 大腿直筋 (Rectus Femoris : RF), 大腿二頭筋長頭 (Biceps Femoris Long Head : BF), 上腕二頭筋 (Biceps brachii : BB), 上腕三頭筋 (Triceps brachii : BT), 僧帽筋上部線維 (Trapezius upper fibers : TP) の計 8 筋から記録した。電極の貼付にあたり測定部位を剃毛, 消毒用エタノールで脱脂し, 皮膚表面の角質除去を行った。電極にはディスク電極を使用し, 電極間距離を 2cm とした。この電極の上から防水フィルムを貼付し, 防水処理を施した。EMG 信号は, 専用アンプ (日本光電社製, AM601G) にて増幅した。

静止立位姿勢における重心動揺

フォースプレート上で静止立位姿勢 (Quiet Standing : QS) をとり, 開眼での重心動揺軌跡を 30 秒間記録した。立位 T 字杖を左手に所持し, 記録にはフォースプレート (Kistler 社製, 9253B11) 1 台を使用し, 得られた床反力信号は専用のアンプ (Kistler 社製, 9865E1Y28) で増幅した後に足底圧中心点座標 (CoP) を算出した。

筋電図データと床反力データはいずれもサンプリング周波数を 1000Hz とし, A/D コンバータ (AD Instruments 社製, PowerLab/16SP) を介して同期して PC に取り込み, 解析を行った。

2-5 解析方法

筋電図分析

得られた筋電図データについて 4 次の Butterworth Bandpass filter (通過帯域 20-300Hz) 処理後の時系列波形パターンの特徴に着目した。

なお, 計測対象 8 筋のうち, SOL, TA, BF は水中試行において電極と皮膚の間に水が入り, 計測が不可能となったため解析対象から除外した。

静止立位姿勢における重心動揺

得られた床反力の時系列波形について 4 次の Butterworth Lowpass filter (Cutoff 3 Hz) 処理を行った。

姿勢動揺の指標として, 足圧中心 (center of pressure : CoP) に関する総軌跡長, 単位時間軌跡長 (平均速度), 矩形面積, 前後・左右方向動揺の最大振幅, 標準偏差, 速度平均を求めた。

3. 結果

3-1 筋電図分析

各歩行条件間 (assist uw-NW, non-assist uw-NW, および Pre/Post uw-NW) において異なる傾向を示したものが MG と RF であった。MG と RF の各条件における筋電図の時系列データを Fig.1,2 に示す。

MG に関する条件間の特徴では, pre uw-NW では測定時間全域に渡り, 筋放電パターンが tonic であった。これに対し, assist uw-NW ではやや phasic な傾向となり, さらに non-assist uw-NW では約 1.8 秒周期の phasic な放電パターンへと変化した。また, その後陸上に戻って測定を行った post uw-NW においても non-assist uw-NW での放電パターンに近い傾向を示した。

また, RF の特徴は各条件で概ね MG と同じ傾向を示した。pre uw-NW では同じ tonic なパターンであったが, 放電量が時間経過とともに微増する変動を示した。non-assist uw-NW においては放電の位相が MG とは 0.5~1.0sec 位相がずれていた。その後, 陸上に戻って測定を行った post uw-NW では non-assist uw-NW と比べると周期性が崩れたパターンであった。

なお, 目視による評価では, 歩行速度や麻痺側支持性の向上などが確認された。

3-2 静止立位姿勢における重心動揺

静止立位に関して水中 NW の前後での重心動揺 (Pre/Post uw-NW) を比較した結果を Table.1 に示す。pre uw-NW に比べて post uw-NW の方がほとんどの項目で数値が減じる安定化傾向を示した。悪化傾向にあったものは左右方向に関する指標であった。

4. 考察

本研究では, 他運動では改善効果が見られない痙縮を有する陳旧症例に対して水中 NW を実施し, 実施直後の急性的效果を麻痺側筋電図分析と静止立位姿勢制御能の変化から評価することを目的とした。

その結果, 水中 NW 実施前に比べて, 膝関節屈曲/伸展筋である MG と RF の波形パターンが水中 NW 実施中および後において変化した。具体的には tonic なパターンが水中 NW 実施により歩行周期に同調した phasic なパターンへと変化した。また, この変化は弱重力環境下の水中のみならず, 訓練後の重力下である陸上歩行においても継続した。水中 NW 実施前に観察された tonic な波形パターンは痙縮を反映すると考えられる。これが歩行リズムに同調した phasic な波形へと変化したことは, 痙性が減弱し, 機能的な筋活動が出現したことを意味する。この背後の神経機序は本研究の結果のみから断定することはできないが, 以下に述べる複数の可能性があると考えられる。

1) 温水の影響

今回水中 NW を行った訓練用プールは温水 (温泉) であった。温水の痙縮に対する効果は筋紡錘の二次終末の活動を減少させ⁶⁾, また, 筋組織の粘弾性を高めることで⁷⁾,

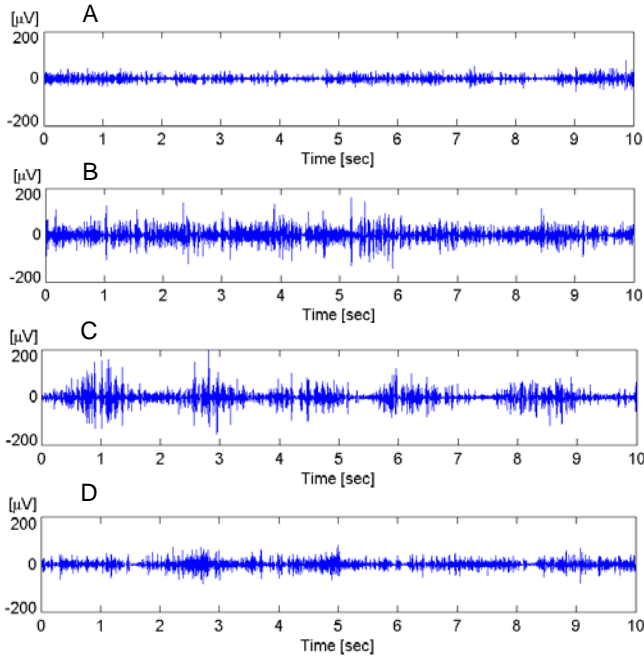


Fig. 2 EMG activities of Rectus Femoris (RF) during a 10-second walk : A: Pre uw-NW, B : assist uw-NW, C : non-assist uw-NW, D : Post uw-NW

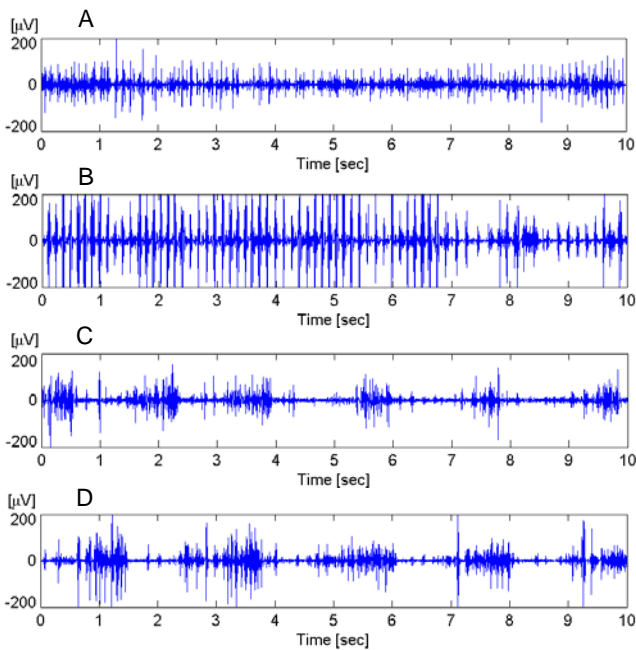


Fig. 1 Surface electromyographic (EMG) activities of Medial Gastrocnemius (MG) during a 10-second walk : A: Pre-underwater Nordic Walking (Pre uw-NW), B : assist uw-NW, C : non-assist uw-NW, D : Post uw-NW

筋伸張時の反射が抑制すると考えられている。さらに、脊髄前角細胞の興奮性を反映し、麻痺肢の筋緊張度と関連する F 波を用いて痙縮が評価されている。全身浴の片麻痺下肢への痙縮抑制効果では全身浴直後と 30 分経過後において F 波の振幅の有意な減少がみられ、その減少度は健常者群より有意に大きかった⁸⁾と報告がある。本研究で観察された水中 NW 実施中、およびその後における RF, MG での痙縮改善について、急性の変化と継続性に関してはこの温水全身浴効果に起因する可能性がある。この点は、適切な対象試行を用いて今後検証する必要がある。

Table 1 Analysis of variance for the results of the Quiet Standing with T-cane comparing pre and post uw-NW in hot-spring pool

Measured CoP Parameters	Pre uw-NW	Post uw-NW
sway path length (cm)	46.5	38.2
sway path Speed (cm/sec)	1.55	1.27
Sway Area (cm ²)	17.12	7.2
sway range (ML) (cm)	3.19	2.77
sway range (AP) (cm)	5.36	2.6
S.D.(CoP _{ML})	0.68	0.53
S.D.(CoP _{AP})	1.13	0.45
mean velocity (ML) (cm/sec)	0.54	0.6
mean velocity (AP) (cm/sec)	1.36	1.01

CoP: center of pressure, S.D.: standard deviation
ML: medio-lateral, AP: anterior-posterior

2) 随意指令の影響

一般に脳卒中後の痙性発現機序は固有脊髄路と脊髄内の抑制性介在ニューロンに対し、脳病変により上位中枢からの下行性コントロールが途切れ、すなわち、下行性抑制が奪われたことが関係すると考えられている。また、脳卒中発症後でも固有脊髄路内の抑制性介在ニューロンの神経回路網が全て絶たれたわけではなく、機能は潜在しているとも考えられている。

そこで、古澤⁹⁾、痙縮の改善には患者自身が能動的に運動を行うことにより、損傷されずに潜在していた上位中枢による下行性のコントロールが顕在化し、固有脊髄路における抑制性介在ニューロンの機能が再疎通することで痙縮を軽減することが可能であるとしている。

RF と MG で確認された痙縮の改善では、前述の温水全身浴効果に加えて、この能動的運動による下行性抑制の再疎通も要因の一つである可能性が考えられる。水中歩行の特徴は制御する四肢が浮力によって免荷されることによる必要筋トルクの減少、および粘性抵抗による歩行速度低下による関節制御時間の延長の二つである。すなわち、水中歩行は陸上歩行と比べ、被検者本人による能動的な運動制御を行いやすいと考える。古澤の説が正しいとすればこの随意性が下行性抑制の再疎通を導いたとも考えられる。

3) Postural threat 軽減の効果

立位時の転倒への不安や恐怖を高める要素を postural threat という。Postural threat がある状況では下肢筋の筋紡錘の感度が上昇し、腱反射が増強する¹⁰⁾。

バランス保持、立位姿勢維持機能が低下した片麻痺患者にとっては、立位姿勢および立位歩行は共に postural threat が高い状態にあるといえる。NW におけるポール使用は高い postural threat を軽減すると考えられることから、それに

よって筋紡錘の興奮度低下→伸張反射興奮性低下→痙縮減弱, との機序が作用した可能性も考えられる。

今回の計測では被検者の体力を考慮したため, 複数回の試行を実施できなかった。それゆえ, 水中 NW 訓練が陸上での静止立位や歩行の運動特性に与える影響を評価するにあたり, 同一被検者内での再現性や他被検者間での比較などの被検者に関する要因, 今回確認された急性の痙性改善効果の持続性, および本研究では検出ができなかった足関節制御筋である SOL, TA への影響などに関する検証が必要であると考えられる。重ねて, F 波など神経生理学的な検証も併せた包括的な検証が必要である。

本症例は発症後 10 年以上経過した陳旧症例であるにもかかわらず下肢痙縮改善の急性効果がみられた。このことは, NW の新たな適用可能性を示唆する。また, 更なる検証により発症経過年数とともに訓練による改善が停滞状態となることが多い慢性期脳卒中片麻痺におけるリハビリテーションの科学的根拠の提示につながると思われる。

5. まとめ

陳旧性脳卒中片麻痺 1 症例に対して水中ノルディックウォークの痙縮に対する効果を調べた。表面筋電図と立位姿勢制御能の変化を検証し, 短時間の水中ノルディックウォークが麻痺側下肢の神経筋機能に急性の影響を与えることが示唆され, NW の新たな可能性を示唆した。

謝辞: 本研究は, 平成 23 年度三菱財団社会福祉事業助成の一部として行った。また, 研究実施にあたり, 多大なご協力を頂いた富士温泉病院の関係諸氏に深謝します。

参考文献

- (1) 三好扶, 中澤公孝, 赤居正美, 水中歩行のバイオメカニクス, リハビリテーション医学, vol.42, pp. 138-147, 2005
- (2) 井上夏香, 内藤健二, 中澤公孝, 福林徹, 水中と陸上運動時における下肢筋群の筋活動量, 日本臨床スポーツ医学会誌, vol.18 no.4, pp. 91-99, 2010.
- (3) Allet L, Leemann B, Guyen E, et al., Effect of different walking aids on walking capacity of patients with poststroke hemiparesis. Arch Phys Med Rehabil, vol.90, pp.1408-1413, 2009.
- (4) Forssberg H, Grillner S, Rossignol S, Phase dependent reflex reversal during walking in chronic spinal cats., Brain Research, vol.85, no.1, pp.103-107, 1975.
- (5) Lance JW, Spasticity: disordered motor control, Symposium synopsis, pp.485-94, 1980.
- (6) Mense S, Effects of temperature on the discharges of muscle spindles and tendon organs. Pflügers Archiv, vol.374, no.2, pp.159-166, 1978.
- (7) Mutungi Ranatunga, Temperature dependent changes in the viscoelasticity of intact resting mammalian (rat) fast and slow twitch muscle fibers, J Physiol, vol. 508, pp.253-265, 1998.
- (8) Matsumoto S, Kawahira K, Etoh S, Ikeda S, Tanaka N, Short-term effects of thermotherapy for spasticity on tibial nerve F-waves in post-stroke patients, Int J Biometeorol. vol.50 no. 4, pp.243-50, 2006.
- (9) 古澤正道, 脳卒中後遺症者の歩行の治療, 理学療法科学, vol.17, pp.33-37, 2002.

- (10) Brian C. Horslen, Chantelle D. Murnaghan, J. Timothy Inglis, Romeo Chua, and Mark G. Carpenter, The effects of postural threat on spinal stretch reflexes, Evidence for increased muscle spindle sensitivity?, J Neurophysiol, 2013.