

免荷式トレッドミル歩行トレーニングの理論と実際

中澤公孝*

Body-Weight Supported Treadmill Training –Theory and Practice–

Kimitaka NAKAZAWA*

Abstract

The body-weight supported treadmill training (BWSTT) is a well-established neurorehabilitation strategy for those patients with incomplete spinal cord injury or stroke. The theoretical base of BWSTT consists of a large body of animal and human neurophysiological data that have been obtained during the last two decades. However, superiority of BWSTT to more conventional gait rehabilitation interventions is now in matter of discussion, since the multi-center randomized control trial (RCT) conducted by the North-American neurologist team reported that there were no differences in any of outcome measures related to patients' walking abilities after interventions between BWSST and a more conventional gait therapy. The RCT, however, also reported at the same time that after both training interventions unexpectedly high percentages of patients obtained the independent walking, i.e., 93% of ASIA C spinal cord injury patients regained the independent walking after the trainings. This debate-provoking report intentionally or unintentionally highlighted importance of roughly two different directions of future researches in the relevant field. First, large RCT studies are still needed to establish more effective rehabilitative interventions. Second, there is the growing importance of fundamental studies investigating acute and chronic plasticity of spinal and supraspinal neural circuitries especially for promising neural repair or regeneration therapy expected to be applicable to patients in the near future.

キーワード：免荷式歩行トレーニング、脊髄損傷、ニューロリハビリテーション

2009年12月10日 受付

2010年1月8日 採択

1. はじめに

1990年代の後半以降、脊髄損傷のリハビリテーションは、脳と脊髄の連絡を実験的に離断した動物モデルを用いた研究の華々しい成績を受け、根本的な考え方の見直しを迫られた。すなわち、ネコなどの四足動物では脊髄損傷後の歩行トレーニングによって歩行

が大きく改善することが証明されたことで、ヒトの二足歩行も同様に回復することが期待されたのである。このような流れの中から生まれたのがトレッドミル上で患者を上方に牽引し、カウンターウエイトによって体重を一部軽減して行う歩行トレーニング、すなわち免荷式トレッドミル歩行トレーニング (body weight

* 東京大学大学院総合文化研究科

* Department of Life Sciences, The University of Tokyo

supported treadmill training、以下BWSTT)であった。BWSTTでは、立位歩行が不可能な患者であっても療法士がステップングを補助して、トレッドミル上で繰り返しステップングを行う。前記したように、四足動物の場合、脊髄損傷後であってもトレッドミル上で胴体を支えてベルトを動かせば、やがて自発的なステップングが生じ、これを繰り返し行くとステップングが改善していく。この事実は四足動物の脊髄にステップングを発生する能力があること、およびトレーニングによってそれが改善する能力があることを意味する。BWSTTの臨床試験はそもそも、これらの能力がヒトの脊髄にも存在するとの想定に基づき開始された。故に、BWSTTに関連する研究は当初、ヒトの脊髄にこれら二つの能力が存在するの否かを検証しようとするものが主流であった。そして現在までの研究結果は概ね、四足動物と比べて程度の差こそあれ、ヒトの脊髄にも歩行パターンを発生する能力があること、そして出力された歩行パターンはトレーニングによって改善することを支持している。

2. 理論

BWSTTと従来の歩行トレーニングとの最大の相違は、前者において補助者や機械が交互性の両脚ステップングを補助する点にある。その目的は健常者の歩行に近い動きを実現することで、ステップングに伴って喚起される末梢感覚入力を残存する中枢神経に与え、脊髄および脊髄より上位の中枢神経の再組織化を促すことにある。脊髄神経回路の再組織化はシナプスおよび神経ネットワークの可塑性が担うと考えられている。しかし、脊髄の損傷部以下の残存神経回路が再組織化されても、結局のところ高位中枢からの下行性指令が脊髄運動ニューロンに届かなければ、本人の意志に基づく歩行は不可能である。残念ながら現状では下行性経路が完全に遮断されている完全麻痺では、意志の下での歩行は理論的には回復しない。とはいえ、臨床的完全麻痺も精査すると下行性経路が一部残存していることもあり^[1]、実際上は、完全麻痺と診断されている脊髄損傷者すべてが歩行再獲得の見込みがないということにはならない。いずれにしても現状では、脊髄完全損傷はトレーニングによる歩行回復の見込みが極めて低いものに対して、高位中枢と脊髄運動ニューロンとの連絡が一部残存する不全損傷はBWSTTによって歩行を再獲得できる確率が高い^[2]。不全損傷者の歩行再獲得に関与する神経機序は、現在のところ完全に明らかになっているわけではないが、次のように考えることができる。第一に受動的あるいは半受動的

ステップングによって周期に応じた求心性入力が増え喚起される。それらは脊髄のパターン発生器 (central pattern generator; CPG) を形成する神経経路を介して、運動出力を誘発する。運動出力の表出はそれに関与する求心性路と脊髄運動神経を結合する経路が活性化したことを意味する。受動的ステップングを繰り返すことによって、周期的な求心性入力を介在する神経回路内のシナプス伝達特性が強化される。ここまでは、脊髄神経回路と末梢感覚入力との関係の変化であり、完全損傷においても同等である。これに対し、上位中枢からの下行性経路が一部残存するか否か、言い換えれば、完全損傷か不完全損傷か、は極めて大きな違いを意味する。脊髄損傷後の残存神経組織には神経発芽や側枝伸長等の解剖学的変化が生ずる (injury-induced plasticity^[3]、anatomical plasticity^[4,5])。さらに、残存下行路と脊髄間のシナプス伝達特性が、受容体密度の上昇を受けて変化し、一方で慢性期不全脊損者によくみられる痙性など過反射を引き起こす神経機序、すなわち脊髄反射経路の興奮性増大が生じる^[6]。これらの変化は脊髄の不全損傷後数ヶ月の間起こると考えられている。すなわち、損傷後の急性期から慢性期に至るまでに神経活動のダイナミックな変動が生じる。その際、脊髄では末梢感覚入力を介在する脊髄反射の経路と高位中枢からの下行性入力間の競合が生じる。BWSTTは、Hebbの学習則に則りそこに参画する下行性神経経路のシナプス伝達特性を使用依存性に強化し、下行性指令を優位に導くとされる。まとめると、BWSTTを行うことによって、不全損傷者では脊髄神経回路のみならず、高位中枢および下行性神経経路にも再組織化が生じ、これらが相まって自立的な歩行再獲得に大きく貢献する、と考えられる。

3. 実際

図1はトレッドミルを用いた免荷式歩行トレーニングの様子である。この図の例では、脊髄損傷者をパラシュート用ハーネスと免荷装置を用いてトレッドミル上で上方に牽引して立たせ、二人の理学療法士がベルトスピードに合わせて両サイドで交互にステップングを行っている。重要な点は体重が脚全体に加わる立脚期と加わらない遊脚期を周期的に繰り返すことと股関節の伸展を引き出すことである。そのために立脚期には膝をロックさせ体重が片側脚に乗るようにするとともに立脚期の終了時点での足部離床位置が股関節中心より後方になるようにする。この2点が強調されるのは、脚全体に加わる荷重情報と股関節の伸展に関わる感覚情報が脊髄歩行中枢を刺激するために最も重要と



図1 免荷式歩行トレーニングの様子

考えられているからである^[7,8]。

次にステッピング時の体重免荷は通常、重量物とばねを組み合わせた牽引装置を用い訓練者の体重に応じて行われる。その量は、トレーニングの進行、改善度によって適宜変更される。スイス対麻痺センターバルグリスト病院 (Swiss Paraplegic Centre, University Hospital, Balgrist) で行われている例では、トレーニング初期には体重の50%程度を免荷し、歩行能力回復と共に徐々に免荷量を減じている。ステッピング頻度はトレッドミルのベルトスピードと歩幅との関係から決定され、同病院の例ではトレーニング初期で1.5 km/hのベルトスピードが採用されている。これも訓練者の状態、回復度に応じて適宜変わるものである。1回の歩行トレーニング時間も、訓練者の歩行能力、回復度によって異なる。特に自力でのステッピングがほぼ不可能な訓練者の場合は、左右脚をそれぞれ補助する理学療法士ら補助者の負担がきわめて大きく、通常1セット、2、3分が限界である。これを1回の訓練で休憩を挟みながら数セット行なうことになる。

免荷式歩行トレーニングを療法士が行なう場合には、1人の訓練者に対し、最低2名の療法士が必要と

なること、療法士の体力的負担が大きいこと、が実施上の大きな障壁となる。訓練者がある程度の歩行能力を有する場合には、この限りではない。一般の病院で行なう場合には、おおよその目安として、機能的自立度評価表 (FIM) の歩行能力評価4 (最小介助) 以上、あるいは脊髄損傷歩行能力指標 (WISCI II) の8以上の患者であれば療法士1名の監視で、トレッドミル上での歩行トレーニングが可能であり、実施可能な適応対象となろう。歩行補助ロボット、ロコマット (Lokomat[®]) を用いれば、FIMスコア1以下の患者、言い換えれば2名の療法士によるステッピング介助が必要な患者の歩行トレーニングを行なうことができる。

4. 効果

BWSTTの効果について最初に報告したのは、ドイツのWernigのグループである^[9]。彼らの報告によれば、受傷後数週間の不全麻痺者では90%以上 (36人中33人) がこのトレーニング後に自立歩行 (杖、歩行器等を含む) を再獲得し、これは従来の平行棒等を用いた歩行リハビリテーションに比べて高確率であった (24人中12人)。さらには、受傷後の経過時間が長い脊髄損傷者 (1年以上) でも33人中25人が自立歩行を再獲得することができ、従来の方法では14人中1人だったのに比べ、劇的な効果が認められた。以後、Dietzらの報告など、不全損傷の歩行回復には効果があるとの報告がほとんどであった^[10,11]。しかし、トレッドミルや免荷装置無しで行われる通常のリハビリテーションより効果があるのか否かに関しては、2006年の大規模な無作為化比較試験 (randomized control trial, RCT) までまたねばならなかった^[2]。RCTの結果は予想に反し、この方法が他の方法に比べて特に有効ということを示さなかった。ただし、この結果は免荷式歩行トレーニングそのものの効果が無いという意味ではない。逆に、この比較試験では免荷式歩行トレーニングも、比較されたトレッドミル上以外での歩行トレーニング (over-ground mobility therapy, 以下CONT) もともに、予想外に高い歩行機能の回復を導いたのである。すなわち、受傷後8週以内のASIA Cレベルの不全脊髄損傷者では、両方のトレーニングともに結果として92%が自立歩行 (FIM Lのスコア6以上) を再獲得することができた。両方のトレーニング共に、参加した被検者のトレーニング前の機能レベルがほぼ歩行能力なしのFIM L1以下であり、これは驚くべき数値であった。結局この結果をそのまま解釈すると、免荷式歩行トレーニングは、一定の条件を満たす不全脊髄損傷者 (受傷8週以内、ASIA

Cレベル、損傷高位：頸髄から胸髄11番）の歩行機能を改善する効果があるが、それはトレッドミルを使わず、免荷もしないで行う歩行トレーニングの効果と差がない、ということになる。この論文は発表後大きな反響を呼んだ。異なるリハビリテーション手法の優劣を科学的に比較する方法は、今のところこの論文で用いられた無作為化比較試験しか確立されたものが無い。DobkinらのRCTは、ほぼ取りうる限界まで統制されており、比較試験としての条件を満たしていた。また急速に進歩しているニューロリハビリテーション領域において、特に脊髄損傷の歩行リハビリテーションにおいては初めて大規模に行なわれたRCTとして、その意義は臨床的にも学術的にも大きなものであった。

Dobkinらの研究では、BWSTTと比較するためのオーソドックスなリハビリテーション手技としてCONTを行なったとされている^[2]。CONTの具体的な内容は被検者の状態によって異なっていたが、自力でのステップングが可能な被検者に対しては、平行棒内での歩行練習、あるいは補助器具や装具をつけての歩行練習、療法士1名から2名の介助による歩行練習などが行なわれた。このような歩行練習は、BWSTTで最も重要とされている荷重に関連する体性感覚を喚起するであろう事は容易に想像がつく。この点はDietzも指摘しているところであり^[12]、BWSTTとCONTはその意味で本質的に大きな違いがなくなるのである。著者らも過去に歩行用装具を用いた歩行練習も荷重に関連する体性感覚を喚起し、脊髄歩行中枢を活性化していること^[13,14]、さらに3ヶ月程度のトレーニングによって歩行中枢に再組織化が起こっている可能性を示した^[15]。BWSTTにおいて体重を免荷し、トレッドミル上でステップングを行なうメリットは自力でのステップングが不可能な急性期およびASIA Bレベルの患者において享受されるのであって、自力でのステップングが可能な患者に対しては、この限りではない。また、ASIA Bレベルの被検者に対する効果に関しては、DietzはDobkinらが用いたトレーニングは、ドイツやスイスで行なわれたものに比べて期間が短く（12週間 vs 16～20週間）、受傷後の開始時期が遅い点を指摘している（受傷後8週 vs 4～5週）。さらにDietzは1回のトレーニング時間も30分では十分な効果を引き出すには短い可能性があることを、脳卒中では1時間のトレーニングの方が有効とのRCTの結果を引き合いに出して論じている。これらの指摘はASIA Bに対しても、もっと効果がある可能性が高いことを暗に述べているようにも思える。こうして見てくると、

Dobkinらの比較試験は現状では最高レベルにデザインされているものの、同時に今後更なる検証が必要な課題をいくつも提供しているといえる。いずれにしても、DobkinらのRCTはBWSTTを用いようが、CONTを用いようが、歩行能力改善に特化したリハビリテーションによって、少なくとも急性期の不全脊髄損傷者（ASIA CおよびD）ならば、自立歩行を再獲得できる可能性が極めて高いことを図らずも示したといえよう。

5. 基礎研究の必要性

繰り返しになるが、BWSTTは1990年代後半以降の、主に四足動物を対象とした神経生理学研究の成果を理論的基盤として登場した脊髄損傷者のための新しいニューロリハビリテーションである。前記したように理論が先行していたため、ヒトに対する効果の検証に関してはいまだ多くの課題が残されている。特に、2000年代に入ってから再生医療の発展は脊髄組織の再生も実現可能な段階に入ろうとしており、BWSTTに限らず、運動療法、物理療法が脊髄を含む中枢神経系全体にいかなる反応をもたらすのかは、再生医療の実現後に向けてさらに精査する必要がある。それによって、再生後の脊髄神経を実際に機能する組織に再構築するリハビリテーション技術の創出に貢献できるはずである。

6. 参考文献

- 1) Bunge, R. P., Puckett, W. R., Hiester, E. D. Observations on the pathology of several types of human spinal cord injury, with emphasis on the astrocyte response to penetrating injuries. *Adv. Neurol.* 72, 1997, p.305-315.
- 2) Dobkin, B., Apple, D., Barbeau, H., Basso, M., Behrman, A., Deforge, D., Ditunno, J., Dudley, G., Elashoff, R., Fugate, L., Harkema, S., Saulino, M., Scott, M. Spinal Cord Injury Locomotor Trial Group.; Weight-supported treadmill vs overground training for walking after acute incomplete SCI. *Neurology.* 66, 2006, p.484-493.
- 3) Muir, G. D., Steeves, J. D. Sensorimotor stimulation to improve locomotor recovery after spinal cord injury. *Trends Neurosci.* 20, 1997, p.72-77.
- 4) Bareyre, F. M., Kerschensteiner, M., Raineteau, O., Mettenleiter, T. C., Weinmann, O., Schwab, M. E. The injured spinal cord spontaneously forms

- a new intraspinal circuit in adult rats. *Nature Neurosci.* 7, 2004, p.269-277.
- 5) Raineteau, O., Schwab, M. E. Plasticity of motor systems after incomplete spinal cord injury. *Nature Rev.* 2, 2001, p.263-273.
 - 6) Little, J. W., Ditunno, J. F. Jr., Stiens, S. A., Harris, R. M. Incomplete spinal cord injury: neuronal mechanisms of motor recovery and hyperreflexia. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 80, 1999, p.587-99.
 - 7) Dobkin, B. H., Harkema, S. J., Requejo, P. S., Edgerton, R. Modulation of locomotor-like EMG activity in subjects with complete and incomplete spinal cord injury. *J. Neurol. Rehabil.* 1995, p.183-190.
 - 8) Harkema, S. J., Hurley, S. L., Patel, U. K., Requejo, P. S., Dobkin, B. H., Edgerton, V. R. Human lumbosacral spinal cord interprets loading during stepping. *J. Neurophysiol.* 77, 1997, p.797-811.
 - 9) Wernig, A., Müller, S., Nanassy, A., Cagol, E. Laufband therapy based on "rules of spinal locomotion" is effective in spinal cord injured persons. *Eur. J. Neurosci.* 7, 1995, p.823-829.
 - 10) Dietz, V., Colombo, G., Jensen, L. Locomotor activity in spinal man. *Lancet.* 344, 1994, p.1260-1263.
 - 11) Dietz, V., Colombo, G., Jensen, L., Baumgartner, L. Locomotor capacity of spinal cord in paraplegic patients. *Ann. Neurol.* 37, 1995, p.574-582.
 - 12) Dietz, V. Good clinical practice in neurorehabilitation. *Lancet Neurol.* 5, 2006, p.377-378.
 - 13) Kojima, N., Nakazawa, K., Yamamoto, S.-I., Yano, H. Phase-dependent electromyographic activity of the lower-limb muscles of a patient with clinically complete spinal cord injury during orthotic gait. *Exp. Brain Res.* 120, 1998, p.139-142.
 - 14) Kojima, N., Nakazawa, K., Yano, H. Effects of limb loading on the lower-limb EMG activity during orthotic locomotion in a paraplegic patient. *Neurosci. Lett.* 274, 1999, p.211-213.
 - 15) Nakazawa, K., Kawashima, N., Kakihana, W., Akai, M., Yano, H. Induction of locomotor-

like EMG activity in paraplegic persons by orthotic gait training. *Exp. Brain Res.* 157, 2004, p.117-123.