

脊髄不完全損傷の子供における歩行トレーニングとその後2年間の持続的な歩行機能の回復

Ongoing Walking Recovery 2 Years After Locomotor Training in a Child With Severe Incomplete Spinal Cord Injury

【論者】

Emily J. Fox, Nicole J. Tester, Chetan P. Phadke, Preeti M. Nair, Claudia R. Senesac, Dena R. Howland, Andrea L. Behrman

E.J. Fox, PT, MHS, DPT, NCS, is a doctoral candidate in the Rehabilitation Sciences Doctoral Program (PhD), Department of Physical Therapy, College of Public Health and Health Professions, University of Florida, Gainesville, Florida.

N.J. Tester, PhD, is Research Health Scientist, Brain Rehabilitation Research Center, Malcom Randall VA Medical Center, Gainesville, Florida, and Postdoctoral Fellow, Department of Physical Therapy, University of Florida.

C.P. Phadke, PT, PhD, is Postdoctoral Fellow, Motor Performance Lab, School of Rehabilitation Therapy, Queen's University, Kingston, Ontario, Canada.

P.M. Nair, PT, PhD, is a faculty member at the School of Health and Medical Sciences, Seton Hall University, South Orange, New Jersey.

C.R. Senesac, PT, PhD, PCS, is Clinical Assistant Professor, Department of Physical Therapy, University of Florida.

D.R. Howland, OT, PhD, is Associate Professor, Department of Neuroscience, College of Medicine and the McKnight Brain Institute, University of Florida, and Research Neurobiologist, Brain Rehabilitation Research Center, Malcom Randall VA Medical Center.

A.L. Behrman, PT, PhD, FAPTA, is Associate Professor, Department of Physical Therapy, College of Public Health and Health Professions, PO Box 100154, University of Florida, Gainesville, FL 32610-0154 (USA), and Research Scientist, Brain Rehabilitation Research Center, Malcom Randall VA Medical Center.

Corresponding author.

Address correspondence to Dr Behrman at ; Email: abehrman@pnhp.ufl.edu.

Received May 26, 2009; Accepted January 17, 2010.

【要約】

以前、この論者の研究で慢性期不完全頸髄損傷の歩行不能な子供に 76 セッションの歩行トレーニングした後、歩行回復が認められたと報告がありました。臨床的にはこのような回復を予想していなかったにも関わらず、*ローリング歩行器を逆向きにした状態で、独立歩行に差し支えないような、パターン化された下肢の交互動作が現れるようになりました。小児発症の脊髄損傷に関連して長期に渡って起こり得る、機能的制限や2次的合併症の追跡調査は継続する必要があります。この症例報告の目的は、子供が歩行トレーニングプログラムに参加してから、その後2年間に起こった歩行機能、筋骨格系の成長と発達、そしてそれによって起こった歩行機能回復を表しています。

*ローリング歩行器を逆向きにする（歩行器の前方に車輪がついている歩行器を表す。それを前後逆にし、車輪の部分を身体の後ろにし、前方に広いスペースがある状態）

【症例の説明】

この研究に参加した子供は、歩行トレーニング後、全時間歩行者として小学校に通うことができるようになりました。歩行トレーニングのあと1ヶ月後（ベースライン）、1年後、2年後にこの子供の評価を行いました。歩行機能の検査には、独立歩行、歩行スピード、時間空間的パラメーター、歩行の運動学的分析、一日にどれくらいステップを行なっているかなどの測定が含まれていました。成長と発達は子供の身長、体重、筋骨格系の合併症、**粗大運動のパフォーマンスを記録することによって評価されました。

*粗大運動：微細運動と対になって使われる言葉で、手足の大きな運動をいいます。立つことも含めて、立つまでの赤ちゃん・小さい子どもがおこなう手足を動かす、腹這いになる、這う、這って越える等の運動を指します。

【結果】

歩行トレーニング後、2年以上経過しても、子供はローリング歩行器を逆向きに使用し、最高歩行スピードを増加させながら独立歩行を続けました。歩行の時間空間的パラメーターや、運動学的にも歩行の改善が見られ、1日のステップ動作も増加しました。身長や体重も健常の子供と同じ軌跡をたどっており、年齢に適した水準の範囲内のままでした。筋骨格系の合併症は程度の低いものでした。更に、三輪車をこいだり、補助付きで階段を登るような特定の動作の際に、パターン化された下肢の交互運動が使えるようになりました。

【結論】

歩行機能回復をした後の2年間も、不完全脊髄損傷のこの子供は歩行機能を維持・改善し、年齢に適した成長と発達段階を踏みました。

小児脊髄損傷は全体の脊髄損傷の3-5%を占めており、アメリカ国内で100,000人の子供のうち2人ということになります。脊髄損傷の子供には運動と感覚障害があり、結果として一生を通して耐えなければならない機能的障害が起こります。更に、このような子供たちが成長し発達するにつれて、受傷後の体重負荷の減少が原因による骨や関節奇形などのような合併症を発症します。機能的な動きを増やすことがリハビリテーションの主なゴールですが、これまでは残存機能の運動性欠損を補うために、車椅子、補助具や装具などを使用し、代償運動をしてきました。一方、歩行回復を促進するためのリハビリテーション（受傷前の歩行パターンと比較）は、歩行コントロールの本質的な神経生物学と神経可塑性に頼っています。

歩行トレーニングは脊髄不完全損傷後に歩行機能を回復するための目的で行われているリハビリテーションです。歩行トレーニングの原理は歩行回復と脊髄パターン発生器の研究に基づいています。基本的なステップパターンを生み出すために欠かせない求心性感覚情報は、繰り返し歩行練習ができる免荷式トレッドミルのような環境が最も適しています。成人の脊髄損傷者においても、同様の治療効果が報告されており、不完全損傷の子供の症例も報告されています。下記の2つの例はともに6歳以下の不完全脊髄損傷の子供の著しい歩行回復の報告です。1つ目の症例は、受傷1ヶ月後に5歳の子供に歩行トレーニングを開始し、入院患者のリハビリテーションの一部として歩行トレーニングプログラムの実行可能性を報告しました。この急性期脊髄損傷の子供は歩行機能を急速に獲得し、それに付随して下肢筋力の改善がありました。2つ目の症例は、この論文の研究グループによって発表されていますが、歩行回復が見られなかった慢性期脊髄損傷（受傷後16カ月）の子供に行った歩行トレーニングについて報告しています。この子供は下肢の交互のステップパターンを取り戻し、全時間歩行者として小学校に通うことができるようになりました。しかし、筋力、随意的、分別した動きの臨床的指標における改善は全く見られませんでした。

上記で報告されている2人の子供には著しい変化が見られましたが、2人のように幼齢で受傷しているということは、側弯症、股関節形成不全、下肢骨格奇形などの2次的合併症の重症度や危険度の上昇との関係性があります。特に、青年期前に受傷したほとんどの子供に側弯症と股関節脱臼が起こってしまいます。2次的合併症は脊髄損傷の子供のリハビリテーションをする上で重大な問題となります。特に、医療的合併症や機能的独立性の低下は鬱の増加、社会参加レベルの低下、大人へ移り変わるのに困難が生じます。脊髄損傷の子

供に共通して起こる合併症は、小児脊髄損傷の長期的な結果と合わせて、このような子供たちを評価し続けることの必要性を表しています。

この論文の症例は頸髄不全損傷 16 ヶ月後に、独立歩行と交互足踏み動作を取り戻した子供の症例報告の追跡調査をおこなったものです。この症例報告の目的は、子供の歩行機能を説明することと、歩行トレーニングに参加し、歩行回復を遂げた後の2年間の成長と発達を報告することです。逆向きローリング歩行器を使った自立歩行を達成したことで、定期的に歩行練習をすることができるようになり、様々な条件下において自分でトレーニングをすることができるようになりました。従って、歩行スピードの増加、歩行パターンの時間空間的特徴の改善、運動学的な歩行パターンの改善、そして自宅やコミュニティ内での1日の足踏み動作の回数の増加などで分かるように、この子供は2年間で補助具を使った独立歩行を維持し、歩行機能の改善を示すと仮定しました。また、子供の成長と発達は、(1)年齢に適した身長と体重の増加と、不完全脊髄損傷から2次に起こる比較的軽度な筋骨格系の合併症、(2)粗大運動機能の評価スコアの改善やその他の歩行運動の臨床的評価が証拠になっているように、粗大運動の発達によって特徴づける事が可能であると仮定しました。

【症例説明とリハビリテーション履歴】

誤って自分自身を銃で撃ってしまうという事故により、3歳半の子供が頸髄(C6-7)損傷を負ってしまいました。歩行、走行、ジャンプ、自転車、水泳の能力に基づくと、事故以前の子供の運動機能は正常でした。受傷16ヶ月後C8のASIA-Cで下肢運動機能のスコアは4/50で歩行不可能でした。この子供は不完全損傷後の歩行機能回復の研究に参加し、トレッドミルと地面での歩行トレーニングセッションを76回行いました。すると、歩行トレーニングの際、自発的なステップが出現するようになり、補助具を使用した地上での歩行機能を取り戻しました。76回の歩行トレーニングを終えた後、この子供が以前通っていた幼稚園がある地域に帰ってからも、ローリング歩行器を逆向きに使用した独立歩行を続けました。子供の医療履歴の詳細、歩行トレーニング直後からトレーニングを通しての発達、歩行トレーニング方法はBehrmanなどによって説明されています。

歩行トレーニング後2年間を通して、外来の理学療法と作業療法に週2-3回通いました。治療には歩行トレーニングは含まれておらず、立位バランス、膝立ち、座位から立位への体位変換、また乗物への移乗、上半身の筋力強化などの自宅や学校で必要とされる特定のスキル獲得のためのものでした。歩行スキルや下肢の交互運動に焦点を当てた治療はほとんどなく、前腕クラッチなどのような制限性の低い補助具を使うことに焦点を当てていました。また、2年間以上、小児科医や脊髄損傷専門医による基本的に必要な医療は受けていました。

【検査】

評価や測定は歩行トレーニング後1カ月(ベースライン)、1年後、2年後に理学療法士が行いました。1年と2年目の検査には、子供のステップ動作を評価するために10回の歩行トレーニングを行い、それには両親へのアドバイスも含まれていました。子供の母親は医療保険の相互運用性と説明責任に関する法律(HIPPA)に従い、参加と医療記録の使用のためのインフォームドコンセントを提出しました。子供の筋骨格系発達を追い、受診した外来治療の種類や量を見直すために、医療記録を入手しました。

【テストと側定】

神経学的状態

AISAとは脊髄損傷の神経学的機能の基本的評価方法です。このテスト方法の成人の脊髄損傷者に対する妥当性は確立していますが、脊髄損傷の子供にこの評価方法を使う場合には疑問があります。しかし、代替りの評価方法は確立されていないので、1年に一回の子供の評価(感覚レベルと運動障害、受傷レベル分類)にASIAを使用しました。

歩行機能

独立歩行

独立歩行はWISCI II(Walking index for spinal cord injury II)を使用しました。平らな10mの地面を歩くのに必要なサポートの程度と、どのような装具や補助具を使用するかどうかを基に歩行を21のレベル(0-20)に分類する方法です。

歩行スピードと時間空間的パラメーター

子供の歩行パターンのスピードと時間空間的パラメーターは、歩行振動を記録するコンピューター制御された感圧性マットで検査しました。子供には逆向きにしたローリング歩行器を使用し、3.6mの通路を最も速く且つ快適な歩行スピードで最低でも2回歩いてもらいました。歩行スピード、ケータンス、歩長、歩幅は関連したソフトウェアを使用して計算しました。

観察的歩行分析

歩行は子供の側面からビデオで記録し、2人の理学療法士が別々に評価しました。子供の歩行パターンの定性分析と代償方法の使用は2人の理学療法士によって別々に行われ、そして2人の評価の比較を行いました。

自宅やコミュニティでの1日のステップ動作

自宅やコミュニティでの、子供の1日のステップ運動の数をステップアクティビティモニター(Step Activity Monitor)で調べました。ステップアクティビティモニターとは足関節の周りに巻く小さな加速度計で、成人の脊髄損傷者や健康な子供のステップの数を正確に数えることができます。評価を行なう場合は、最低でも2日間に渡ってこの装置を付けてもらい、ステップの合計数と、一区切りの運動(子供が静止状態から動作に入る数)の回数を測定し、2日間の平均値を出しました。73回目のビデオ記録から、歩行トレーニングの際のステップの合計数も数えました。この1時間のトレーニングセッションは、歩行環境下で子供が行なった一日の歩行練習の量を表しています。

成長と発達

筋骨格系成長と発達

身長、体重、筋骨格系障害の発生率を観察するために、子供の医療記録を調べました。身長と体重は同年齢の子供の全国平均と比較しました。脊柱と骨の奇形発生率はレントゲン写真と医学的評価を使って調べました。

粗大運動の発達

粗大運動の発達は2種類の方法で評価しました。1つ目は、Goss Motor Function Measure(GMFM-66)(粗大運動機能側定)です。5つの運動スキルの変化(臥位・寝返り、座位、はいはい・膝立ち、立位、歩行・走行・ジャンプ)を数値化する測定方法です。この粗大運動評価を脊髄損傷の子供に使用する際の、心理的特性は報告されていませんが、この側定方法は脳性麻痺の子供の基本的評価法で、外傷性脳損傷などにおいても正確です。

2つ目は、子供の下肢の交互動作の臨床検査を行いました。子供が歩行トレーニングを行った直後、ステップするための粗大運動能力評価を行いました。ステップを3-4歩出すという予想外の能力を基

盤に、階段登りの際の下肢の交互動作を歩行トレーニング開始から1ヶ月後に評価しました。ハイハイ、階段登り、水泳や適応三輪車を漕ぐ評価を行う一方で、歩行トレーニング開始1年後と2年後に仰臥位での下肢交互動作の評価を行うまでになりました。

【結果】

2年間以上、子供のASIAスコアに変化はなく安定しており、目立った感覚・運動障害は起こりませんでした。下肢の運動コントロールは、大きな相乗動作と、単関節コントロールが少しあるか、まったくないかという状態のままでした。下肢の単関節コントロールが不足している状態にも関わらず、歩行トレーニングの1年後と2年後に行った追跡評価はこの論文の仮説を証拠立てるものでした。子供の歩行パターン回復は維持・改善され、筋骨格系の合併症もほとんどなく、身長、体重は同年代の健康な子供の平均水準と比較しても変わらない状態で増加しました。粗大運動スキルも発達し続け、その他の自発運動をする上でも下肢の交互動作が表れるようになりました。

神経系の状態

脊髄損傷の神経学的レベルはベースラインから変化はありませんでした。歩行トレーニング終了から1年後も2年後も下肢の独立運動の不足はありました。ASIAの運動検査は、膝伸展のような単関節の自発的動作の際の筋分節を評価するために、基本的な徒手抵抗テストを行い、主要大筋群をグレードで分類しました。基本的な徒手抵抗テストが行えない時は、筋肉はテスト不可能としてグレード分けされています。従って、子供が下肢の単関節運動が行えず、多関節の相乗運動（例：股関節屈曲を膝関節屈曲と足関節背屈をすることで行う。）しか行うことができない場合、筋分節はテスト不可能としてスコアをつけています。表在感覚と痛覚の感覚スコアには変化が観察されました。

歩行機能

独立歩行

歩行トレーニングの1年後と2年後、歩行の独立性の変化はありませんでした。独立して歩くためには、逆向きにしたローリング歩行器が必要な状態でした。従って彼のWISCI-IIのスコアは13/20のみでした。

歩行スピードと時間的空間パラメーター

最速歩行スピードはベースラインの0.45m/sから歩行トレーニング2年後には0.67m/sへと上昇しました。身長と体重の増加に伴って、歩幅と歩長も増加しました。2年後には歩幅は左右で異なっていたけれども、歩長は左右同じで、ケードンスも増加しました。

観察的歩行分析

逆向きのローリング歩行器を使用した地面上での歩行パターンの質的分析によって、交互にステップを行う際、手への体重負荷は最小限の直立姿勢状態で歩行する能力があることが明らかになりました。歩行周期を通して、周遊期につま先が地面に当たらないように強調し、体重移動をするために体幹と腕を使うという歩行偏倚は明らかに表れていました。もっとも顕著だったのは、歩行器を交互に押しこむ上肢の使用でした。これは、体重移動を強調するために肩と上部体幹を周遊脚の反対側前方に動かし、同側の体を振って歩くのを容易にするためのものです。これらの代償運動は左側に顕著に表れていました。身体を振って脚を出す際、脚は時々中心線を交差したり、反対の下腿の後ろに引っかかることがありました。この動きも左側に顕著に見られました。

歩行トレーニングから2年後、彼の歩行パターンには改善が見られました。ベースラインで見られた肩と体幹の顕著な代償運動もなく交互ステップを出すことができるようになりました。この改善は特に代償運動がひどかった左側にはっきりと表れていました。交互にステップを出し、停止や方向転換のための基本的な適応ができるよ

うになっていました。しかし、上肢のサポートなしでは後ろ歩き、横歩きは困難で、また直立バランスを保つことはできませんでした。

自宅やコミュニティでの毎日のステップ動作

歩行トレーニングの1年後と2年後には、自宅やコミュニティ内で行っていた毎日のステップの平均数は、ベースラインの1600歩から3000歩以上に増えました。ちなみに比較してみますが、免荷式トレッドミル上でのアシスト歩行練習を1時間行った際のステップ合計数は2732歩でした。歩行トレーニングの2年後、一区切りのステップ平均数はベースラインの31歩から88歩へと増加しました。

成長と発達

筋骨格系の成長と発達

受傷以前は、身長と体重は同年齢比較の90-95%の範囲にいました。受傷後、身長は90-95%のままで、体重は80%に位置していました。レントゲン写真の医療記録によると、脊柱の湾曲と股関節のアラインメントにはほとんど変化がなかったと報告されています。2年間の間、彼は側湾症との診断は受けていませんが、股関節に軽度の外反股が認められました。レントゲン記録にはこの全ての所見は安定していると示されています。歩行トレーニング後から1年後、両側にAFOをつけて年1回の評価を行う為に研究所にきました。彼の母親は、内科医が尖足を考慮して装具を処方したのだと説明してくれました。歩行時間中の足と足首のアラインメントを改善するために装具をつけていましたが、装具をつけている間、最初は歩行困難がみられ、ステップパターンを順応しなければなりませんでした。この研究の全評価は装具の使用はなしで行われています。

粗大運動スキルの発達

GMFM-66の結果から、歩行トレーニングから2年間の間、粗大運動機能は安定していたという結果が証明されています。5種類の動作を反映している合計パーセントスコアは65%でした。しかし、5種類の粗大運動のそれぞれ個々の運動のパフォーマンスに変化はありませんでした。テスト項目のパフォーマンスに影響する疲労や下肢筋肉のトーン（受動的ストレッチに抵抗した）は見られました。例えば、ベースラインと比較して、歩行トレーニング1年後に立位のスコアが10%減少しました。このスコア減少の原因は、下肢伸筋群のトーンが増加したため、立位の際に片脚を屈曲することができなくなったためだと考えられます。直立動作の際、バランスをとるために上肢のサポート（例、逆向きローリング歩行器）は必要な状態のままでしたが、歩行・走行・ジャンプの項目ではスコアは11%増加しました。停止、方向転換、ボールを蹴るなどの更に高い歩行適応能力を必要とする運動タスクをクリアしたことで全体的なスコア増加は達成されました。

ベースラインで行った下肢交互動作の臨床検査によると、バランスのためのサポートをつけて3-4歩を出し、四つん這いのハイハイ(GMFM-66)ができた表しています。歩行トレーニングの1年後と2年後、仰臥位で脚の交互動作を出すようになり、三輪車漕ぎ、階段登り、はいはい、水泳をするという状況でもこの交互動作が見られるようになりました。これらのタスクには屈曲と伸展の相乗交互動作が使用されています。相乗動作とは例えば、仰臥位での下肢屈曲動作は股関節屈曲と外旋、膝関節屈曲、足関節背屈を伴っており、伸展動作の際は、足関節が底屈になるにつれて股関節と膝関節が伸展しました。

【考察】

6歳半の頸髄不完全損傷の子供に歩行トレーニングをした後2年間経過しても、ローリング歩行器を使用した独立歩行が可能な状態でした。臨床的評価では歩行回復を予測していませんでしたが、脊髄損傷16ヶ月後、逆向きローリング歩行器を使用して独立歩行に差し支えない程度の歩行パターンを発達させることができました。こ

の初期の回復の 2 年後、全時間歩行を続け、最速スピードと 1 日の歩数は次第に増加しました。

運動学習とスキル習得において反復と練習が重要な要素なため、コミュニティ内での自立歩行達成は、様々な環境で歩行パターンを継続させるための最低限度のラインであると言えます。さらに、回復してから、1 日に 3000 歩近く歩き、それは 1 時間の歩行トレーニングの際の 2500 歩を越えています。1 日 3000 歩歩くということは怪我をしていない子供が 1 日に歩く 8000 歩よりはかなり少ないですが、このレベルでの毎日の歩行と直立運動は、全時間を車椅子上で過ごしている子供とは著しく異なります。また、体重負荷がかかるステップを含む直立運動は、彼の健康的な身体成長へ貢献したのではないのでしょうか。受傷後 4 年近く、彼は 10 歳以前に受傷した子供たちに 97% の確率で発症する側弯症の診断を受けていません。

逆向きのローリング歩行器が必要ではあるけれども、この補助具は代償歩行動作を最小限に抑え、継続した歩行回復を促進するために、特別に選んで使用されています。前方歩行器と比較すると、逆向きのローリング歩行器であれば支持基盤が体の後ろにきています。これは上肢にかかる体重負荷を最低限に抑え、体幹の直立姿勢と正しい四肢の運動学を促進します。このある特別なタスクの知覚運動性の経験は、歩行におけるリズムカルなステップパターンを発生させる為の、下肢の交互動作を促進します。

2 年間の間に、子供が成長し社会的活動性が増えるにつれて、友達についていきたいという思いが、歩行器の使用方法を変えるモチベーションになりました。歩行パターンをそれに順応させ、スピードを早くするためにローリング歩行器で“スケート”するか“乗る”ために腕で代償しました。友達と過ごす時間が増えるにつれて、特に青年期に入ってくると、仲間についていくという社会的需要が、歩行パターンに更に影響を及ぼし、結局は身体成長にも影響を及ぼしたのかもしれない。子供が思春期や青年期に入ってくるに従って、このような複雑な相互作用は研究され続けるでしょう。

この 2 年後の追跡調査の予想していなかった結果は、三輪車漕ぎ、はいはい、階段登り、水泳などのタスクをこなす上で伴った下肢の交互動作を出す能力です。受傷 16 ヶ月後初めて歩行トレーニングに参加したとき、下肢をいっぺんに伸展させることは出来ましたが、屈曲と伸展を交互におこなうことはできませんでした。下肢の交互動作は歩行トレーニング (20 セッション後) を通して発達し、直立姿勢や股関節の運動学などのタスクに特化したきっかけに依存しています。よって、その他のタスクを行う際の下肢交互動作おこなう能力は、もはや歩行に関連している求心性情報に頼らなくなっていることを示唆しています。興味深いことに、最近の研究では様々な下肢交互動作のタスクにも同じようなメカニズムがあるのではないかと示唆しています。しかし、この子供の歩行回復に貢献している可能性のある神経メカニズムの証拠はこの研究では示されていません。さらに、この症例の結果は、子供の歩行パターンの細かい生態力学的分析はされておらず、臨床的評価までに限られています。この子供が思春期や成人期に入るにつれて、現在これらの方法を発達している段階です。

脊髄不完全損傷の子供の歩行機能回復の改善における歩行トレーニングの有効性を更に調査することは重要で、包括的、計量的な評価を行うことで回復の維持と進歩の長期的な見解が明らかになるでしょう。脊髄損傷後の機能回復と筋神経系の活性化を目的としたリハビリテーション治療は 2 次的合併症の発生率を減少する上で有益かもしれません。しかし、このような人たちの現在可能な方向性を更に理解するうえで、怪我、回復、筋骨格系の発達などの複雑な相互作用を長期に渡って調査することが必要になってきます。

【結果】

受傷時年齢 3.5 歳、受傷後 16 ヶ月であったこの子供は、常に車椅子が必要であり歩くことはないであろうと予測されていました (LEMS4/50 (ASIA の運動スコア))。歩行トレーニング 76 回後に初めての回復により、四肢の自発的独立動作が歩行回復に欠かせないものであると示唆しています。この歩行トレーニング 2 年後に継続して起こった回復の症例は、脊髄損傷の子供に歩行トレーニングによって回復したスキルを維持することが出来る可能性があることを示しています。このような症例結果は、長期間の車椅子使用による悪影響や、成長と発達における体重負荷の不足がある小児の症例において特に重要です。