

脊髄損傷者における歩行運動と起立性低血圧の改善

【論者】

Susan J. Harkema, Christie K. Ferreira, Rubia J. van den Brand, 3 and Andrei V. Krassioukov
Kentucky Spinal Cord Injury Research Center, Department of Neurological Surgery, University of Louisville, Louisville, Kentucky.
Frazier Rehab Institute, Louisville, Kentucky.
Department of Neurology and Brain Research Institute, University of California, Los Angeles, California.
International Collaboration on Repair Discoveries (ICORD), Division of Physical Medicine and Rehabilitation, and School of Rehabilitation, Department of Medicine University of British Columbia, and Spinal Cord Injury Program, G.F. Strong Rehabilitation Centre,
Vancouver, British Columbia, Canada.

【要約】

この論文は慢性期脊髄損傷者の心臓血管システムに対する立位トレーニングの反応の前向き評価です。脊髄完全損傷者の心臓血管のパラメーターを、安静時と起立性トレーニング前後で測定しました。この論文の目的は、起立トレーニング・起立性ストレスを脊髄損傷者に与えた際の心拍数や動脈血圧に及ぼす効果や変化を評価することです。脊髄損傷者（8名）のデータを、歩行トレーニングの前、40回後、80回後に測定しました。立位時には、全ての参加者にハーネスを付け、頭上免下式トレッドミルの上に吊るしました。歩行時にはトレーナーが必要に応じて体幹や脚をサポートしました。全ての参加者が立位歩行トレーニングの後、更に脚へ荷重をかけることが出来るようになりました。80回のトレーニングセッションの後、頸髄損傷者の安静時の血圧が著しく増加しました。トレーニングの最終期間には、頸髄損傷者の安静時収縮期血圧は座った状態で24%増加（ 84 ± 5 から 104 ± 7 mmHg）しました。更に、立位トレーニングに対して見られた起立性低血圧（収縮期血圧 24 ± 14 mmHg へ減少）は80回の立位歩行トレーニングセッションの後、表れなくなりました（収縮期血圧 0 ± 11 mmHg 減少）。胸髄損傷者の血行力学パラメーターは80回の立位歩行トレーニングの後も著しい変化はなく一定でした。頸髄完全損傷者においては、激しい立位歩行トレーニング後に、安静時血圧と起立性ストレスに対する反応の改善が見られました。これらの結果は、体重負荷による下肢の神経筋肉活性化、あるいは直立姿勢を繰り返すことによる心臓血管性反応の変化によるのかも知れません。

【イントロダクション】

頸髄損傷や上位胸髄損傷者は心臓血管コントロールが著しく低下している状態です。脊髄損傷者は一生を通して、安静時動脈圧の低下や、自律神経過緊張反射による高血圧の症状に悩まされます。また、体位変換に反応して収縮期動脈圧の著しい低下がおこる起立性低血圧と呼ばれる症状も経験します。起立性低血圧の主な症状は、疲労、虚弱、意識朦朧、眩暈、視力障害、呼吸困難、脳灌流圧低下に関連する不穏状態などです。この心臓血管障害は不快感を起し、リハビリテーションや日常生活動作を妨げてしまいます。エクササイズ的心臓血管機能に対する効果は一般的によく知られて

います。しかし、脊髄完全損傷者の場合は、受傷レベル以下の筋神経系を活性化することができないので、心臓血管に対するエクササイズの効果は低下してしまいます。更に、起立性ストレスの不足により（立位姿勢など）心臓血管反応が低下していることが心臓血管の障害にもつながっています。起立性低血圧や起立性ストレスの低耐性に対応するために腹帯、弾性ストッキング、機能的電気刺激などを含む、治療介入がある程度は行なわれています。歩行トレーニングは脊髄損傷者に免荷式トレッドミルを使用して体重を支え、セラピストの徒手的な補助がある状態で、繰り返し立位と歩行を練習することができるリハビリテーション方法です。継続的な感覚フィードバックに高く依存している立位や歩行特有の脊髄神経内ネットワークは、損傷部位以下の筋神経系を活性化することができます。胸髄完全離断の猫に、立位とトレーニングを繰り返し行っただと、後肢の屈曲と伸展筋群が活性化し、独立して立つことができるようになったという過去の論文で証明されています。今回の研究では、臨床的に脊髄完全損傷者に、集中的に立位歩行トレーニングを繰り返すことが、心臓血管機能に変化をもたらすかどうか評価されています。

【方法】

リサーチ参加者：

脊髄損傷者8名がこの研究に被験者ボランティアとして参加しました。カリフォルニア州立大学のロサンゼルス機関審査委員会は、この研究の全てを承認しており、被験者は実験に参加する前にインフォームドコンセント（医師から手術・治療に際してなされる医学的事実・危険などに対する患者（側）の同意）に署名しています。臨床医が脊髄損傷国際評価基準と米国脊髄損傷協会をもとに損傷レベルを評価しました。片脚側の後脛骨神経の電気刺激の間、大脳皮質の体性感覚誘発電位の反応を記録しました。被験者は全員、AIS-A（仙髄S4-5を含む損傷部位以下の感覚と運動機能がない）、臨床的に完全損傷で、体性感覚誘発電位が全くない状態であると分類されました。被験者の健康状態は安定しており、脊髄損傷に関係のない心臓血管疾患はありませんでした。被験者は、この研究の間、抗痙縮剤や血管作用薬の使用はしていませんでした。

実験計画：

血行力学的なパラメーター（血圧と心拍数（HR））を立位歩行トレーニングの前（0セッション）、間（40セッション）、後（80セッション）に記録しました。測定は3つの異なるポジション（座位、ハーネス付けた状態の座位、ハーネス着けて免荷サポートした状態（*BWS））で行われました。過去に、血行力学的パラメーターにおけるハーネスの効果を示す方法が確立されていますが、その方法を用いて、脊髄損傷者個人に合わせてハーネスをつけました。

*BWS: ハーネスを着用し体重を免荷サポート

立位トレーニングの治療介入：

立位歩行トレーニングセッションの間（60分、週5回）、脊髄損傷者にハーネスを着用させ、免荷式トレッドミル上（BWST）に吊るしました。BWSTは股関節と膝関節屈曲を避ける一方で、可能な限り最大限の体重かけるために使用しました。ハーネスに付属したケーブルと荷重計によりBWSを監視・記録しました。トレーニングが経過する度に、体幹、骨盤、脚へのサポートがなくなり、最小限のサポートで体重をかけるようになってくるにつれて、継続的にBWSを少なくしていきました。8人のうちの4人の脊髄損傷者には片側の立位歩行トレーニングを行ないました。

被験者の後方に位置しているトレーナーは、体幹と骨盤が屈曲、伸展しないように確かめながら、骨盤に前方方向の力、あるいは肩で後方方向への力を加えることで骨盤と体幹を安定させました。トレーナーは脛骨粗面に圧をかけ、体重支持脚への伸展筋群を促進するために膝蓋腱とアキレス腱に刺激を加える事で動的膝伸展を維持しました。また、筋神経活動を刺激するとともに、ロッキング減少を避けるために、伸展位にある肢位の軽度膝屈曲を促進しました。更に、伸展筋群の活動を促進するために、トレーニングセッション中に定期的にBWSを増やしたり・減らしたりを頻繁に行いました。

両脚立位の際、荷重は両脚にかけられ、一方、片脚立位の際、伸展位にて同側に全荷重がかかっていると予想され、反対側は周遊期に似せて屈曲位の状態を維持しました。

片脚立位の際、体重負荷のかかっていない脚のハムストリングスと前脛骨筋を刺激することで屈曲筋の活動を促進しました。全てのトレーナーは、必要な時だけ両脚（両側グループ）の伸展筋群、または片脚の伸展筋群と反対側の屈曲筋群（片側グループ）を促進しました。被験者は体幹の直立性を保つこと、両側への体重移動（両脚立位）をすること、膝伸展を維持することで、活動的にトレーニングセッションに参加しました。

EMG データ収集と分析：

下肢の皮膚に使い捨ての二極式電極の電極間距離を外科用粘着テープで固定しました。トレーニングの前と後に、ヒラメ筋 (SOL)、腓腹筋内側 (MG)、前脛骨筋 (TA)、内側ハムストリングス (MH)、外側広筋 (VL) から全員の両側の EMG を記録しました。EMG シグナルはカットオフ周波数の 20-1000Hz でフィルター処理しました。そして、1000Hz のデジタルへのオンラインアナログ収集によってサンプリングしました。EMG 増幅器システムをデータから電気解釈へと取り次ぐパルス間隔変調器に結合しました。EMG データを分析・収集する際は、カスタマイズされた LabVIEW ソフトウェアを使用しました。

血行力学データの収集と分析：

標準的なキャリブレーション血圧計を使用して、研究を通して同じ試験者が血圧を測定しました。心拍数は血圧を測定する手と反対側の示指にバルオキシメーターをはめて測定しました。被験者は座位の血行動態を測定する前、最低でも 5 分間は、エクササイズをしない、歩かない、車椅子駆動をしないという状態でした。それぞれの状態（例：座位、ハーネスを着用して座位、ハーネスを着用して立位）の間、1 分間のインターバルを設けて合計 5 分間、血圧と心拍数を記録しました。[拡張期血圧 + (収縮期血圧 - 拡張期血圧) / 3] という公式を使って平均動脈圧を計算しました。立位状態になってから 3 分以内に収縮期血圧が最低でも 20mmHg 減少する状態、または拡張期血圧が 10mmHg 低下する状態を起立性低血圧と定義しました。

【結果】

人口統計データ：

8 人の頸髄 (n=4)、胸髄 (n=4) レベルの脊髄損傷者がこの研究に参加しました。大半の脊髄損傷者は男性 (88%) で、年齢は 21 歳～ 55 歳 (平均：33.8±12.6 歳) でした。全ての脊髄損傷者は臨床的に外傷性の脊髄完全損傷で、損傷後平均して 7.6±10.1 年経過していました。

体重負荷と筋活動に対する立位歩行トレーニングの効果：

両側立位グループにおいて、下肢体重負荷はトレーニングと共に上昇増加 (BWS% の減少) しました (トレーニング前 36±11%BWS、トレーニング後 8±6%BWS)、片側立位グループ (トレーニング前 58±15%、トレーニング後 34±20%)。全ての被験者において、立位歩行トレーニング治療の後に、両側立位中の下肢伸展筋群の神経筋活動が増加しました。

安静時の血行動態パラメーターに対する立位歩行トレーニングの効果：

立位歩行トレーニング治療介入前 (0 セッション)、中間地点 (40 セッション)、後 (80 セッション) に、ハーネス装着なしの座位ポジションの心臓血管パラメーターをグループ内 (例：頸髄グループ、胸髄グループ)、グループ同士 (例：頸髄グループと胸髄グループの比較) で比較しました。トレーニング前と 40 セッションのトレーニングの後は、頸髄グループの平均収縮期・拡張期血圧は胸髄グループと比較すると著しく低い状態でした (それぞれ順に収縮期 / 拡張期 84±5/52±8mmHg と 108±8/66±6mmHg) (収縮期 / 拡張期 93±16/60±7mmHg と 114±13/75±5mmHg)。しかし、80 セッション後には二つのグループに著しい違いは見られませんでした。トレーニング前と 80 セッション後に、頸髄グループ内では収縮期血圧・拡張期血圧に著しい増加が見られました。しかし、0 セッションから 40 セッション後では著しい変化がありませんでした。立位歩行とトレーニング治療介入の最終期間には、頸髄グループの座位安静時の収縮期血圧は 20% 上昇しました (84±5mmHg から 104±37mmHg へ)。胸髄グループはどの時点でも (0-40、40-80 セッション) 座位血圧に著しい変化は見られませんでした。座位安静時の心拍数においては、頸髄と胸髄グループにトレーニング前 (それぞれ 65±5 と 75±17bpm) と後 (72±12 と 75±17bpm) に著しい差は見られませんでした。さらに、同じグループ内での異なる時点での心拍数の著しい差もありませんでした。

姿勢変化のトレーニングの血行動態パラメーターへの効果：

ハーネス着用は、心拍数には著しい変化をもたらさなかったが、頸髄損傷グループのみ座位の安静時血圧の上昇が見られました。ハーネス着用での座位状態の収縮期血圧の減少の度合いは、トレーニング前は 26±13% (22±11mmHg) から 8 回のトレーニング後 4±6% (5±5mmHg) に下がりました。

立位歩行トレーニングを行なう前、ハーネス着用の効果は関係なく、頸髄損傷者は起立性ストレスを与えられた際、収縮期血圧 (24±14mmHg) と拡張期血圧 (9±13mmHg) の著しい減少が見られました。立位歩行トレーニングの後、頸髄損傷者の心血管性の反応に著しい改善がありました。例えば、80 回のトレーニング後、頸髄損傷者の収縮期血圧減少の平均は 0±11mmHg で -10 から +15mmHg の範囲でした。しかし、胸髄損傷者はトレーニング前 (0±6mmHg) とトレーニング後 (2±10mmHg) で微小な変化しか見られませんでした。トレーニング 40 回と 80 回後、心拍数はどの時点でもあっても頸髄と胸髄グループ間大きな差はなく、グループ内でも著しい差はありませんでした。

【考察】

この研究は立位歩行トレーニングが慢性期脊髄損傷者の血行動態パラメーターを著しく改善することを証明しています。特に、トレーニング後の頸髄損傷者の安静時血圧上昇が見られました。また、立位歩行トレーニングにより、全ての頸髄損傷者が座位から立位に変わる際の起立不安定性が無くなりました。更に、トレーニングセッションの最後には、免荷した状態で 1 時間立っている間、血圧を保つことが可能となりました。中部胸髄損傷者は、トレーニング前から安定した血行動態パラメーターが見られていたので、立位歩行トレーニング後に著しい変化はありませんでした。

脊髄損傷後、心血管系もひどく障害されており、起立性低血圧は特に急性期の脊髄損傷者の共通の問題でもあります。しかし、起立性低血圧は慢性期においても顕著に表れ続けます。この研究では、慢性期頸髄損傷者の 50% が起立性低血圧を訴えていました。

持続する起立性低血圧と安静時血圧の低下は、健康に悪影響を及ぼします。健常者の中程度の安静時低血圧 (収縮期血圧 110mmHg 以下) は認知パフォーマンスの欠損と関連があります。起立性低血圧は健常者の疲労や、脊髄損傷者の頸部痛にも関連しています。これらの要因は、リハビリテーションの参加や QOL に不利な影響を及ぼします。

立位歩行トレーニングの有益な効果:

身体活動が制限されている状態による、セデンタリー・ライフスタイル（ほとんど体を動かさない生活様式）は心臓血管系の悪化が目立つ体調不良が起こります。残念ながら、特に上部頸髄損傷の方は麻痺のためにセデンタリー・ライフスタイルを強いられます。セデンタリー・ライフスタイルは、脊髄損傷者のすでに損なわれている心臓血管系に更に悪影響を及ぼし、早期死亡へとつながる可能性があります。多くの論文に脊髄損傷者の死因のうち、心臓血管疾患は主要な原因だと証明されています。よって立位歩行トレーニングによる活動性の増加は心臓血管機能の改善をもたらし、健康状態の改善へとつながるかもしれません。長時間の立位をしている脊髄損傷者は、血流の改善、膀胱直腸機能改善、疼痛コントロール、睡眠などの健康的利益を感じていると述べています。しかし、最も一般的だったのは87%の参加者が

自分が健康であると感じると言ったことでした。この研究でも、疲労感が少なくなり、健康状態が良くなったと口頭では伝えられていますが、直接これを評価するパラメーターはありません。

スタンディングフレームを使用した受動的立位ではなく、機能的電気刺激を使った能動的立位の際の、起立性低血圧改善が証明されています。機能的電気刺激による受傷部位以下の筋神経系を活動的にした状態での立位においては、収縮期血圧の減少が見られませんでした。能動的立位よりも受動的立位の方が心拍数の減少があり、能動的立位の方が心臓血管の必要性が高いことを示しています。この論文でも立位歩行トレーニングは遠心性運動を増加するための脊髄回路を活性化すると体重負荷のという感覚を与える事によって、下肢筋肉を活性化するという結果が出ています。おそらく、下肢の大筋群の活性化が脊髄損傷後に損なわれてしまった静脈環流量を増やしています。脊髄自律神経経路が立位歩行トレーニングで活性化されているかは正確に判定する必要があります。

【考察】

動きが制限されていることが骨粗鬆症、下肢筋肉の硬縮、褥瘡、筋委縮のような2次的な病状の原因となるため、車椅子から動き回る自由がない脊髄損傷者にとって立位をとることは良い影響をもたらします。スタンディングフレームは慢性期脊髄損傷者にとって長期間使用するには最も実行可能な選択肢となります。しかし、心臓血管コントロールの改善は示されていません。おそらく、最低限の下肢筋肉活動しか得られないからでしょう。この研究では、立位歩行トレーニングが損傷部位以下の筋神経活動を生じさせることで、頸髄損傷者の心臓血管機能を改善しました。繰り返しの体重負荷や損傷部位以下の筋神経活動の活性化を強調する歩行トレーニングのような運動をベースとした治療は、例え歩行機能回復を実現できなかったとしても、脊髄完全損傷者に関連する二次的合併症においてはとても重要かもしれません。