

厚生労働科学研究費補助金  
障害保健福祉総合研究事業

脊髄損傷後の身体機能低下を抑止する  
立位トレーニング方法の開発

平成18年度 総括・分担研究報告書

主任研究者 中澤 公孝

平成19(2007)年4月

# 目 次

## I. 総括研究報告

脊髄損傷後の身体機能低下を抑止する立位トレーニング方法の開発----- 1

中澤 公孝

II. 研究成果の刊行に関する一覧表----- 6

IV. 研究成果の刊行物・別刷----- 7

脊髄損傷後の身体機能低下を抑止する立位トレーニング方法の開発  
主任研究者 中澤 公孝 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所 室長

## 研究要旨

本研究は脊髄損傷後の麻痺領域の機能低下抑止と二次障害の発現リスク減少の観点から、麻痺領域の筋活動を誘発し、ひいては全身の代謝・循環動態を賦括する新たな立位トレーニング方法を提案することを最終目的とする。本研究では脊髄損傷者に対する新しい立位式トレーニングの特性を上記観点から明らかにすると共に、中長期的なトレーニングが脊髄損傷後の身体機能の適応的变化を促すのか否かを運動・神経生理学的手法を用いて定量化するものである。

### A. 研究目的

脊髄損傷に伴う運動機能障害は多くの場合、立位歩行からの隔離をもたらし、日常生活における活動量を著しく低下させる。慢性的な運動量減少は生活習慣病の発現リスクを増加させ、さらに麻痺領域の不活動は二次障害発現の誘因となる。本研究は立位歩行運動のリハビリテーション効果を最大限に得ることを主眼として立位姿勢下での“歩行様運動”の運動・神経生理学的特性を探求し、麻痺領域の機能低下と二次障害発現リスクの減少に貢献する神経性、代謝性因子を整理する。具体的には、麻痺領域を含む立位姿勢保持下での左右脚交互運動によって、麻痺領域の運動・神経機能を賦活する機序を解明し、さらに中長期的な立位トレーニングの実施による麻痺領域の機能変化を定量的に把握することを目的とした。

### B. 研究方法

全期間を通しての目標は、①立位姿勢下での下肢交互運動によって麻痺領域に筋活動を誘発する神経機序を解明すること、②反射性筋活動が組織の酸素動態を変調しえるのか否かを明らかにすること、③中長期的な立位運動が脊髄損傷後の身体機能の適応的变化を促すのか否か明らかにすること、④日常的に立位・歩行トレーニングを行うための補助犬の利用可能性を明らかにすることである。

本研究では前期に上記目標①、②に関する実験、および④に関する調査研究を行い、既知の立位歩行訓練の効果に新たな知見を加えるための基礎的資料を得ることを目指す。後期には立位歩行様運動による3ヶ月のトレーニングを脊髄損傷者を対象として実施し、前期に検討された下肢麻痺筋活動、酸素動態の変化を中心に、トレーニング経過に伴う身体機能の変化について運動・神経生理学的観点から多面的かつ定量的に検討することとした。

最終年度は1) 脊髄損傷者における受動的歩行様運動中の呼吸循環応答に関する実験（実験A）と、2) トレーニング機を用いた歩行様運動トレーニングに対する脊損者の身体適応に関する実験（実験B）、の2種類の実験を行った。

実験A：被検者は脊髄損傷者8名であった。図1に示したように実験者がトレーニング機のレバーを周期的に動かすことで、被検者の下肢を交互にス

ウィングさせた。その際、膝関節は固定、足関節はフットプレート上で可動とした。呼吸循環系変量の測定を、5分間の静止座位と3分間の静止立位、15分間の受動運動、および運動後3分間の静止立位のそれぞれの期間中に行った。計測した呼吸系変量は毎分換気量 (VE) と酸素摂取量 (VO<sub>2</sub>)、循環系変量は心拍数 (HR) と平均血圧 (MBP) であった。実験B：被検者は外傷性脊髄損傷者7名であった。そのうち3名は立位式トレーニング機を用いた立位でのトレーニングを一回20~40分、週2回から4回行った。残りの4名は動力型歩行トレーニング機を用いた歩行トレーニングを週1回から3回行った。トレーニング期間は10週間から16週間であった。トレーニング前後に血液検査を行い血中脂質、コレステロール、NK活性、骨代謝マーカーなどの項目を比較した。

### （倫理面への配慮）

この研究において、人間を対象として行われる種々の検査、実験に対麻痺者あるいは健常者が参加することに関する倫理上の問題点については、国立身体障害者リハビリテーションセンター倫理審査委員会にて審査を受け、その許可を得た。各実験、検査においては、事前に被検者に内容を十分説明し、インフォームドコンセントを得ると共に、実験、検査の中止は被検者の意志が最優先であり、いかなる場合においてもそれらを即時中止できることを徹底した。

### C. 研究結果

#### 実験A

図1、図2に受動運動中の換気量および酸素摂取量、図3、図4に平均血圧および心拍数の結果を示した。

全ての呼吸循環系変量は、座位から立位へ移行すると有意な増加を示した。運動開始後、VEとVO<sub>2</sub>は静止立位時のレベルを維持した。HRは、運動3分目には静止座位のレベルに戻った。MBPは、運動により安静立位時のレベルよりも高くなり、この高値を運動終了まで維持した。

以上の結果から、立位歩行様運動の効果は、立位姿勢効果と運動効果の2つに区分でき、運動効果は血圧に顕著に現れると考えられた。

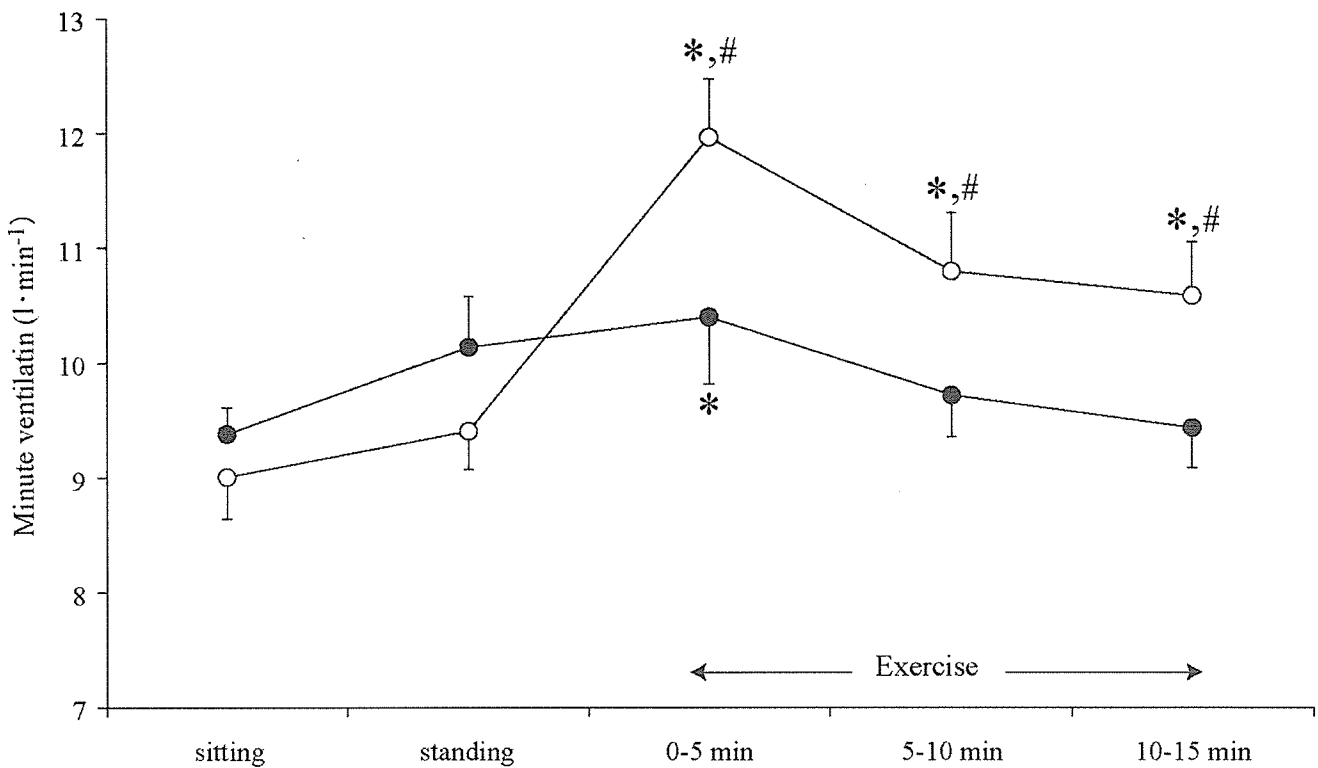


図 1 受動運動中の換気量の変化 白丸：健常者、黒丸：脊髄損傷者

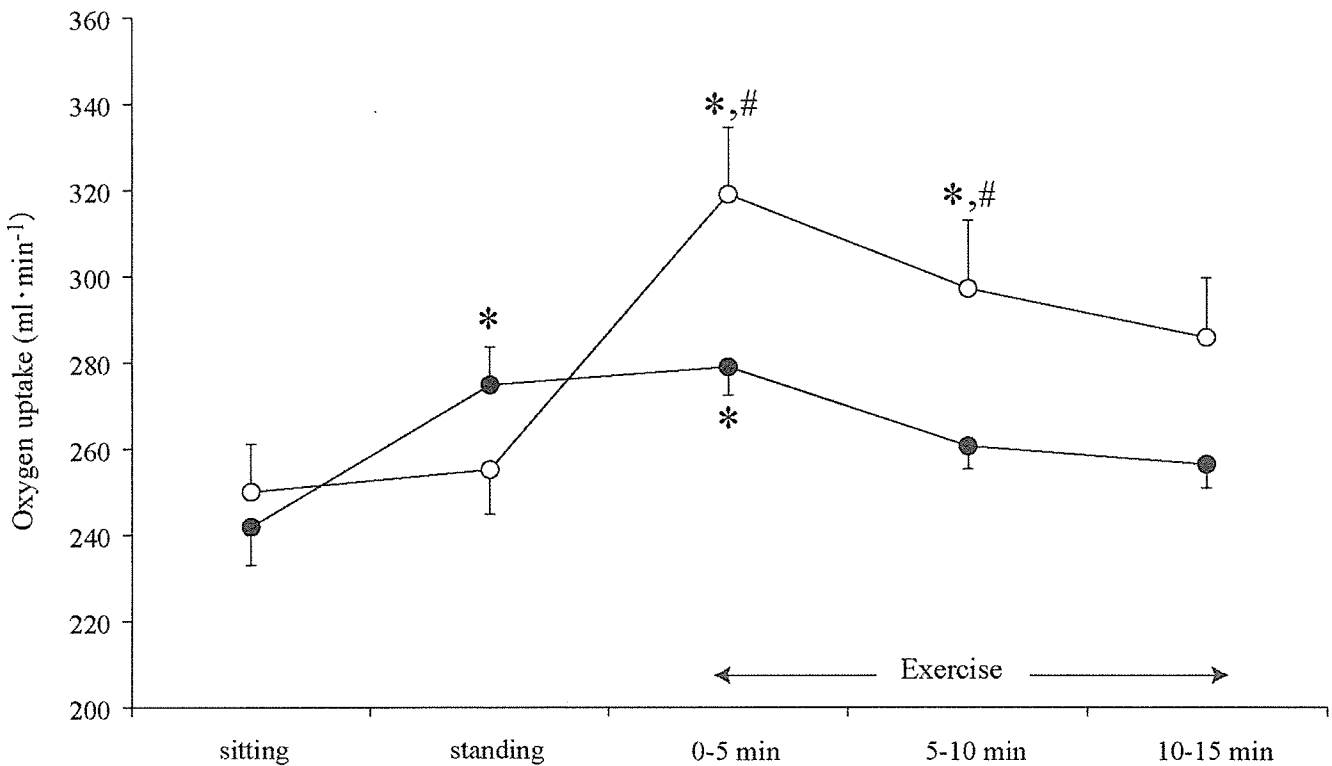


図 2 受動運動中の酸素摂取量の変化

実験B

立位式トレーニング機を用いたトレーニングに参加した3名の被検者の検査結果を表1に示した。すべての被検者で3カ月のトレーニング後に体

重の減少、ウエスト周囲径の減少が認められた。さらに腹腔内脂肪面積も全員で減少、中性脂肪が3名中2名で減少していたことから、体脂肪が総じて減少したと考えられた。またコレステロールも3名中2名でLDLの減少とHDLの増加という

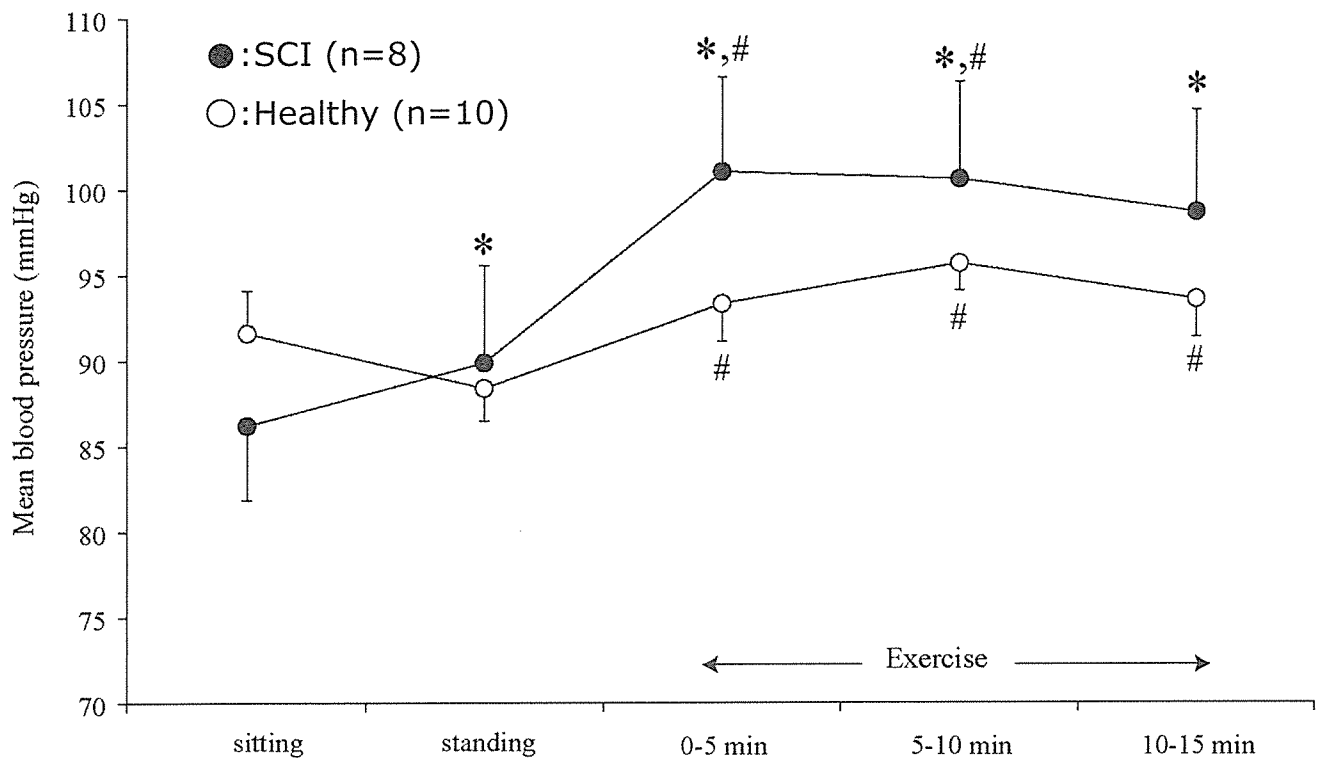


図 3 受動運動中の平均血圧の変化

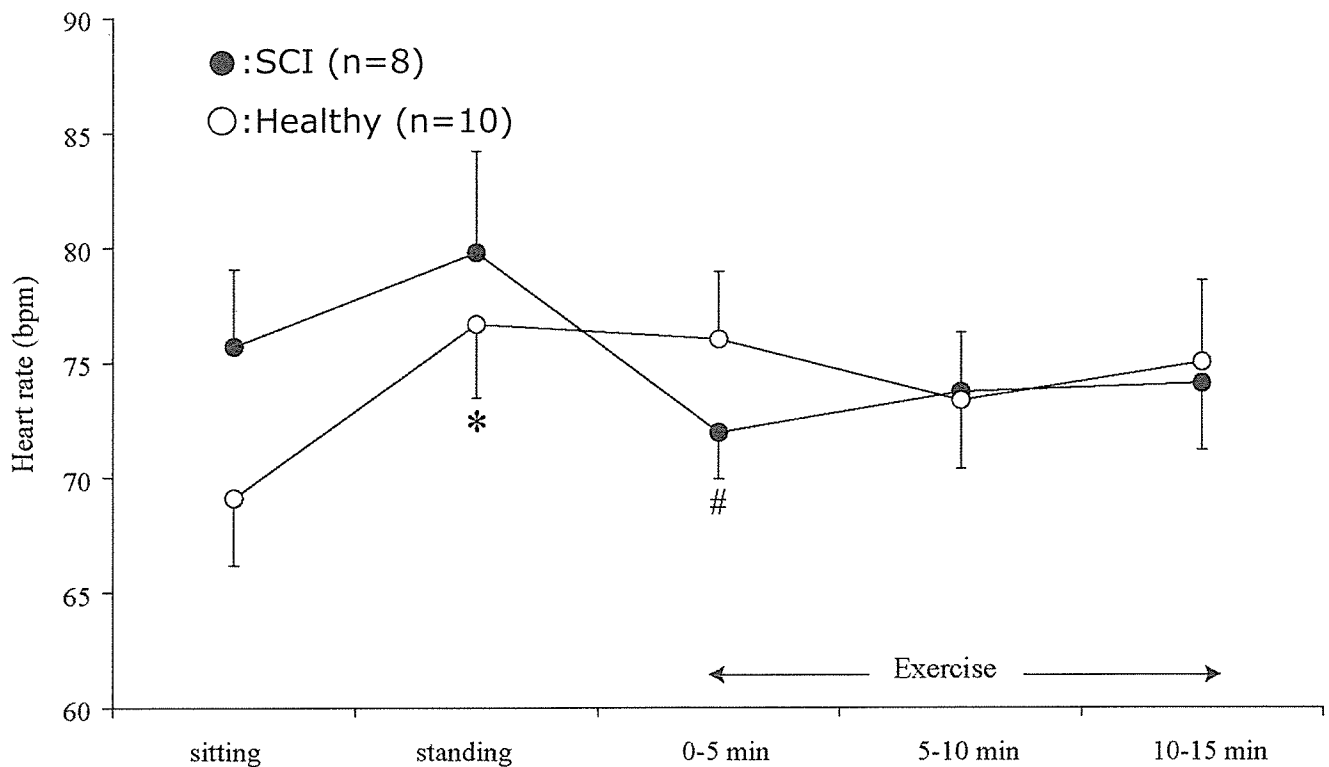


図 4 受動運動中の心拍数の変化

正の効果が観察された。

動力型歩行トレーニング機を用いた歩行トレーニングに参加した4名の脊髄損傷者の血液性状検

査結果を表2に示した。立位式トレーニング機の被検者と共通の検査項目であるコレステロールの変化を見ると、歩行トレーニングの被検者にはほ

表1 立位式トレーニング前後の検査項目の変化

	Subj. A		Subj. B		Subj. C	
	前	後	前	後	前	後
年齢	55		65		35	
性別	f		f		m	
トレーニング	前	後	前	後	前	後
身長	154	154	163	163	173	173
体重	60.4	56.0	62.3	60.9	82.0	78.3
ウエスト周囲径	86.0	82.5	96.0	86.0	93.0	91.0
BMI	25.5	23.6	23.4	22.9	27.4	26.2
腹腔内脂肪面積	132.8	96.7	163.8	157.5	110.9	98.1
総コレステロール	288.0	327.0	229.0	219.0	261.0	241.0
HDL	39.0	45.0	52.0	53.0	61.0	66.0
LDL	195.0	269.0	129.0	125.0	184.0	170.0
動脈硬化指数	6.4	6.3	3.4	3.1	3.3	2.7
中性脂肪	342.0	192.0	189.0	241.0	120.0	89.0

とんど正の効果が見られなかった。免疫系の指標であるNK活性や骨代謝の指標である骨形成および骨吸収マーカーにも正の効果は観察されなかった。

以上、総じて立位式トレーニングでは体脂肪の減少などのトレーニング効果が認められたのに対し、歩行トレーニングには検査した血液性状にトレーニングの効果は認められなかった。立位式トレーニングでは腕の運動など下肢の受動運動に加

E. 研究発表

1. 論文発表

- 中澤公孝、歩行困難者への工学的支援、ウォーキング研究10、31-35、2006
- Higuchi, Y., Kitamura, S., Kawashima, N., Nakazawa, K., Iwaya, T., Yamasaki, M. Cardiorespiratory responses during passive walking-like exe

表2 受動歩行トレーニング前後の検査項目の変化

		Subj. D		Subj. E		Subj. F		Subj. G		
		前	後	前	後	前	後	前	後	
NK活性 E/T比	10:1	8.9~29.5	2.6	3	3.6	4.2	4.7	3.2	22.6	6.7
	20:1	17.1~48.7	5.5	6	7.7	9.1	9.8	5.6	31.2	13.5
骨形成マーカー	オステオカリン ng/ml	3.1~12.7	5	5.1	8.7	7.3	8.7	6.7	5.5	11.3
	骨型ALP μg/l	9.6~35.4	15.7	7.7	15.3	12.6	8.9	8.2	35.8	27.4
骨吸収マーカー	NTX濃度 nMBCE		254.8	430.1	171.3	685.8	191	537.1	1830.5	3131.2
	NTX/CR		43.6	35.7	55.3	42.6	52.6	61.9	96.2	97.5
総コレステロール	mg/dl	150~219	125	150	196	190	203	193	144	165
HDL	mg/dl	40~90	32	30	34	32	71	80	38	47
LDL	mg/dl	70~139	86	85	141	144	114	99	92	107
中性脂肪	TG mg/dl	50~149	175	243	142	126	73	89	119	56
総脂質	T-Li mg/dl	350~800	528	656	628	595	608	605	495	472
リン脂質	P-Li mg/dl	150~250	165	188	192	184	230	226	160	168
アディポネクチン	μg/ml		7.1	5	9	6.8	9.1	15.3	5	6.2

えて多くの筋活動が動員される。これに対し、動力型歩行トレーニングを用いた歩行トレーニングは下肢以外の運動は腕振り程度であって、運動強度的にはかなり低いものと考えられる。そのため、上記の血液検査項目に正の効果をもたらすほどの運動効果が得られなかったと推察される。したがって、立位での下肢の受動運動だけでは、脊髄損傷の二次障害予防には十分ではなく、上肢の運動を加えるなどして、さらに運動強度を上げることが必要となる。

D. 健康危険情報  
特になし

ercise in quadriplegics. Spinal Cord 44(8):480-486, 2006

- Kawashima N, Taguchi D, Nakazawa K, and Akai M. Effect of lesion level on the orthotic gait performance in individuals with spinal cord injuries. Spinal Cord 44(8):487-494, 2006

2. 学会発表

- 中澤公孝、移動型受動歩行訓練機の開発、第45回日本生体医工学会、2006.5.16、福岡
- 中澤公孝、受動歩行中の皮質脊髄路の興奮性、生体医工学会専門別研究会“脊髄損傷のME”2006.5.18、岡山
- 中澤公孝、上林清孝、尾方寿好、赤居正美、

ロボット型歩行訓練機を用いた受動歩行の効果-神経系、呼吸循環系に対する効果-、福祉工学シンポジウム2006、2006.9.13、柏

- 中澤公孝、脊損者の最新歩行リハビリテーション-理論と実際-、在宅リハビリテーション研究会レッツ講演会、2006.5.13、所沢
- 中澤公孝、赤居正美、移動型歩行訓練装置-その神経生理学的背景-、日本リハビリテーション医学会、2006.6.1、東京
- 中澤公孝、歩行困難者への工学的支援、第10回記念日本ウオキング学会シンポジウム“最近10年間に見られるウオキング研究の進歩”、2006.6.24、東京
- 中澤公孝、脊髄歩行パターン発生機構と脊損者の新しい歩行トレーニング、東海リハ工学

研究会、2006.11.17、名古屋

- 中澤公孝、シンポジウム“歩行と姿勢制御の神経機構はどこまでわかったか”、受動歩行中の皮質脊髄路興奮性、第36回日本臨床神経生理学学会、2006.11.29、横浜

F. 知的財産権の出願・登録状況  
(予定を含む。)

1. 特許取得  
特になし
2. 実用新案登録  
特になし
3. その他

# 研究成果の刊行物



研究成果の刊行に関する一覧表レイアウト

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書籍名	出版社名	出版地	出版年	ページ
中澤公孝	第8部 歩行に関する研究の現状と今後	二瓶隆一、木村哲彦、牛山武久、陶山哲夫、飛松好子 編著	頸髄損傷のリハビリテーション 改訂第2版	協同医書出版	東京	2006	pp. 347-349

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
中澤公孝	歩行困難者への工学的支援	ウォーキング研究	10	31-35、	2006
Higuchi Y Kitamura S Kawashima N Nakazawa K Iwaya T Yamasaki M	Cardiorespiratory responses during passive walking-like exercise in quadriplegics.	Spinal Cord	44(8)	480-486	2006
Kawashima N Taguchi D Nakazawa K Akai M.	Effect of lesion level on the orthotic gait performance in individuals with spinal cord injuries.	Spinal Cord	44(8)	487-494	2006

# 頸髄損傷のリハビリテーション

改訂第2版



二瓶隆一・木村哲彦・牛山武久・陶山哲夫・飛松好子 編著  
協同医書出版社

## 2. 歩行に関する研究の現状と今後

近年、人間の脊髄には従来考えられていた以上の能力があることが明らかにされつつあり、脊髄損傷関連の神経科学は大きな変革期を迎えているということができます。そのような神経科学の進歩は新しいリハビリテーションの理論的な枠組みを与え、それに基づいた新たな手法も考案されるに至っています。そして以前では、一生機能回復は見込めないとされていた脊髄損傷者の中にも、リハビリテーションによっては機能が回復する人が存在することがわかってきました。残念ながら、現状ではなお脊髄損傷を根本的に回復させる技術は開発されていませんが、これを成功させるために損傷した脊髄を再生させること、あるいは脳との結合を再び取り戻すこと、等をめざした研究が世界中で先を競って行われており、それらは今後の進展が最も期待されている研究分野です。本稿では、特に脊髄損傷後の歩行回復に関連する近年の研究をまとめるとともに、それらの研究成果を基に開発された免荷式ステップングトレーニングの理論と実際について紹介します。

### 脊髄の歩行パターン発生能力

ネコなどの四足動物には、脊髄の中に基本的な歩行パターンやリズムを生成する神経回路があることが知られています。そのような神経回路を中枢パターン発生器 (central pattern generator : CPG) と呼びます。従来、サルや人間など霊長類の脊髄に CPG は存在しないと考えられてきました。ところが 1990 年代以降、人間の脊髄にも CPG があることをうかがわす実験結果や観察結果が数多く報告されるようになり、CPG が存在しないとされた従来の考え方は否定されつつあります。CPG の存在を示唆する報告の多くは脊髄損傷者を対象とした実験結果に関するものです。中でもトレッドミル上で脊髄損傷者の下肢を受動的にステップングさせることによって観察される麻痺筋群の筋活動は最も多くの研究室で調べられており、脊髄 CPG の存在を強く示唆する現象と考えられています。動物実験によって CPG は脳からの指令がなくても、下肢からの感覚情報を受け、パターン化した運動出力を生成する性質があることがわかっていま

す。トレッドミル上で他者が下肢を動かすことで引き出される麻痺筋群の筋活動はそのような CPG の性質を反映していると考えられるのです。

スイスの Dietz らの研究グループは、トレッドミル上での受動的ステップング時に誘発される筋活動 (歩行様筋活動) と脊髄の損傷高位になんらかの関係があるのかどうかを調べました。その結果、完全麻痺者だけを対象にすると、頸髄損傷のような高位の損傷者のほうが健常者のパターンに近い歩行様筋活動を発生させる能力が高いことがわかりました<sup>1)</sup>。これは、脊髄の CPG を含む神経回路 (歩行中枢) が脊髄内のある髄節に局限して存在するのではなく、広く分布しているために、歩行に関わる神経回路に限っていえば、未損傷部位が多く残存する高位損傷者のほうが末梢入力に反応して歩行様筋活動を発生させる能力が高いことを示していると考えられました。

アメリカの Harkema らのグループは歩行様筋活動が下肢に加わる荷重や下肢の動作速度などに応じて変化することから、脊髄神経はそれら体性感覚情報の一種の解釈を行う能力があると考えています<sup>2)</sup>。私たちのグループは、歩行装具を用いた杖歩行中にも下肢の麻痺筋群に歩行様筋活動が誘発されることを観察しました<sup>3-5)</sup>。歩行装具を用いた歩行も下肢への荷重と股関節の屈曲・伸展運動が確保されており、それらに関する体性感覚情報が歩行様筋活動を誘発する、と考えることができます。

### 脊髄の学習能力

脊髄損傷者のための新しいリハビリテーションを支える理論的枠組みにおいて、脊髄 CPG と並ぶ、もう一つの重要な概念は脊髄の学習能力です。従来、脊髄は脳からの神経指令を筋に伝え、末梢感覚入力に対して反射性出力を応答するだけの器官であって、それ自体に学習能力はないと考えられてきました。しかし近年では、脊髄にはある程度の学習を可能とする可塑的な性質があることが明らかとなってきました。この性質はリハビリテーションにおいては極めて重要な意味をもちます。Dietz らはトレッドミル上での受動的ステップングトレーニン

グを継続して行うことで、歩行様筋活動が改善することを示しました<sup>9)</sup>。筆者らのグループは装具歩行のトレーニングによって完全対麻痺者の歩行様筋活動も改善することを報告しました<sup>5)</sup>。これらの結果は受動的なステップングあるいは装具歩行中の末梢体性感覚情報が繰り返し入力されることによって脊髓神経回路の伝達特性が再組織化されることを示しています。これは学習の基本的性質といえます。

最近では、脊髓より上位の中樞神経と脊髓を結ぶ経路が一部でも残っていると（臨床的にはいわゆる不全麻痺）、再組織化の可能性はさらに高いことが予想されています。

## 新しい歩行リハビリテーションの原理と方法

新たに発見された脊髓の上記性質をその理論的背景として開発されたのが免荷式ステップングトレーニングです（図 356）。図 356 の例では、脊髓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、2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ます。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定期的に繰り返すことと股関節の伸展を引き出すことです。そのために立脚期には膝をロックさせ体重が片側脚にの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位置より後方になるようにしています。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髓歩行中枢を刺激するために最も重要と考えられているからです<sup>2,7)</sup>。

次にステップ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ます。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ます。スイスのチューリッヒ大学バルグリスト病院にある対麻痺センター（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、

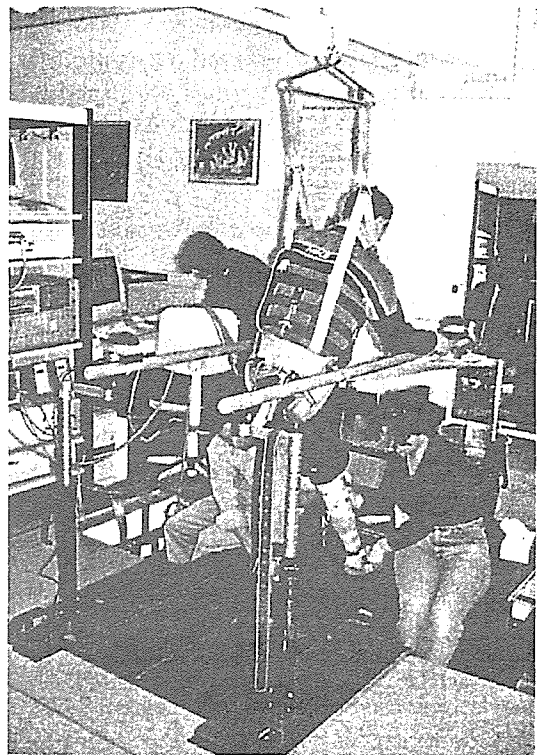


図 356 免荷式ステップングトレーニングの様子

歩行能力回復とともに徐々に免荷量を減じる方法をとっています。ステップ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ます。これも訓練者の状態、回復度に応じて適宜変わるものです。

以上、スイス対麻痺センターで行われている例を基に免荷式歩行トレーニングの具体的方法について述べました。残念ながら、このトレーニングの効果がいくら大きなものであっても、わが国の現況の医療制度のもとにこれを取り入れることは不可能と考えられます。最大の欠点は1人の患者に対し、常時2人以上の理学療法士が必要となる点にあります。さらに、ステップング動作の補助はかなりの労力が必要であり、1人の理学療法士が続けて何人もの患者の補助をすることは現実的に不可能という実施上の制約もあります。これら最大の欠点を克服するために、機械を用いて補助者の代行を行わせようと

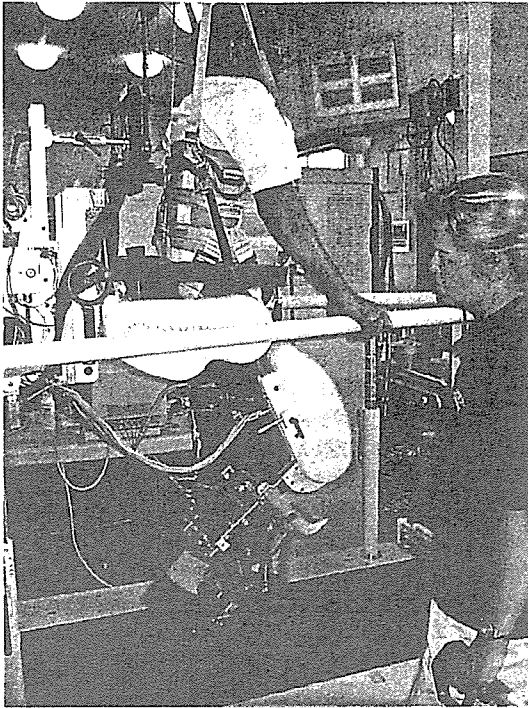


図 357 歩行トレーニング用ロボット Lokomat を用いた歩行トレーニングの様子

いう考えはごく自然な発想といえるでしょう。既にドイツ、スイスなど医療先進諸国においては、そのような発想の基に歩行トレーニング機が開発されています<sup>\*)</sup>。

## ロボティクスを用いたトレーニング

図 357 は上記スイス対麻痺センターとチューリッヒ工科大学において共同開発された歩行トレーニング用ロボット、Lokomat (Hocoma 社、スイス) です。Lokomat の基本機構は長下肢装具の膝と股関節部分に動力機構を取り付けた装具部、トレッドミル上に固定する固定部、および装具の動きを制御するコンピュータから構成されています。これらを免荷装置およびトレッドミルと

組み合わせることで、それまで人間の手で行っていたステッピングの補助を、機械を用いて代替することが可能となったのです。それによって、補助者の疲労という制限因子が克服されたため長時間のトレーニングも可能となりました。Lokomat は既に世界数カ国の施設間ネットワークの中で臨床試験を行っており、実用段階に入っているといえます。今後テクノロジーの発達とともに同様の機器開発がますます加速されるのは必然の流れといえるでしょう。

### 参考文献

- 1) Dietz V, Nakazawa K, Wirz M, et al : Level of spinal cord lesion determines locomotor activity in spinal man. *Exp Brain Res* 128 : 405-409, 1999.
- 2) Harkema SJ, Hurley SL, Patel UK, Requejo PS, Dobkin BH, Edgerton VR : Human lumbosacral spinal cord interprets loading during stepping. *J. Neurophysiol* 77 : 797-811, 1997.
- 3) 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 : 139-142, 1998.
- 4) 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 (3) : 211-213, 1999.
- 5) 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 (1) : 117-123, 2004.
- 6) Dietz V, Colombo G, Jensen L : Locomotor activity in spinal man. *Lancet* 344 : 1260-1263, 1994
- 7) Dobkin BH, Harkema SJ, Requejo, PS, Edgerton VR : Modulation of locomotor-like EMG activity in subjects with complete and incomplete spinal cord injury. *J Neurol Rehabil* 9 : 183-190, 1995.
- 8) Colombo G, Wirz M, Dietz V : Driven gait orthosis for improvement of locomotor training in paraplegic patients. *Spinal Cord* 39 : 252-255, 2001.

(中澤公孝)

# 歩行困難者への工学的支援

中澤 公孝 国立身体障害者リハビリテーションセンター

ウォーキング研究 No. 10, 31 – 35  
Walking Research

# 歩行困難者への工学的支援

## Assistive technology for locomotor disabilities

キーワード：脊髄損傷、歩行、二次障害、歩行訓練機

Keywords : Spinal cord injury, locomotion, secondary disorder, gait trainer

中澤 公孝<sup>1)</sup>

Kimitaka Nakazawa

歩行困難者、中でも脊髄損傷者の歩行リハビリテーション理論は過去10年余りで大きく変貌した。それは脊髄の可塑性の発見に代表されるように、周辺の神経生理学的研究が急速に発展したことによるところが大きい。リハビリテーションの理論的枠組みの転換は、関連する機器開発にも反映され、従来とは異なったさまざまな装置が開発されるようになった。本稿では、近年筆者らのグループが開発した歩行訓練装置の基本コンセプトとそれが構築されるにいたった理論的背景を紹介しながら、この分野の新しい動向を解説したい。

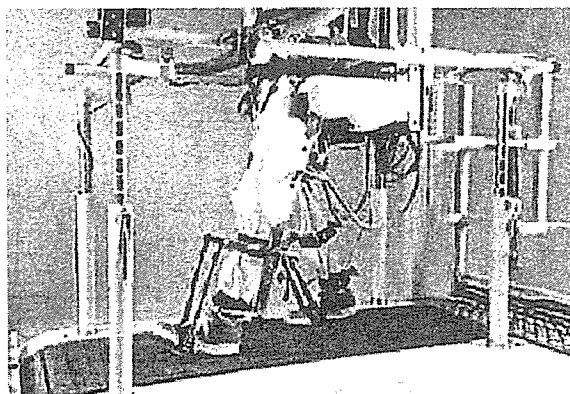
筆者ら国立身体障害者リハビリテーションセンターと東京農工大、芝浦工大の研究グループは近年、動力付き歩行装具と免荷装置から成る移動型の歩行訓練装置を開発した。この装置は、現在のところ自立歩行が困難な後期高齢者や股関節術後患者を主たる対象としているが、近い将来、対麻痺者や片麻痺者の歩行リハビリテーションへとその用途を広げる予定である。以下ではこの装置の基本コンセプトの理論的背景、開発要件ならびに装置の概要について紹介する。

### 理論的背景

#### 神経生理学的視点

本装置の理論的背景の第一は、1990年代中盤以降、主に脊髄損傷のニューロリハビリテーションとして考案さ

れた受動歩行トレーニング理論にある。受動歩行トレーニングでは、トレッドミル上で訓練者の下肢を理学療法士あるいは最近ではロボットがベルトスピードに合わせてステップさせる(図1)。それによって下肢の感覚受容器が刺激され、脊髄への感覚入力が増加される。ステップにともなってパターン化した感覚入力が脊髄の歩行パターンジェネレーターおよび脊髄より上位の中脳神経系を賦活する。それが繰り返されることで中枢神経系の再組織化が促進される<sup>1)</sup>。この時、不全脊髄損傷者のように上位中枢から脊髄運動ニューロンへの入力が増加すると脊髄での伝達効率が改善され、自立歩行回復の可能性が高くなる。これが受動歩行トレーニングの理論である。



ロボット型歩行訓練機 Lokomat

図1

1) 国立身体障害者リハビリテーションセンター Research Institute National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

我々は、受動歩行トレーニングのポイントを次の2点に集約し、新たな歩行訓練装置の要件とした。それは、①受動歩行あるいは半受動歩行による末梢感覚入力の喚起、および②脳からの下行性司令の確保、である。それぞれについて以下で詳しく説明する。

### ① 受動歩行の効果

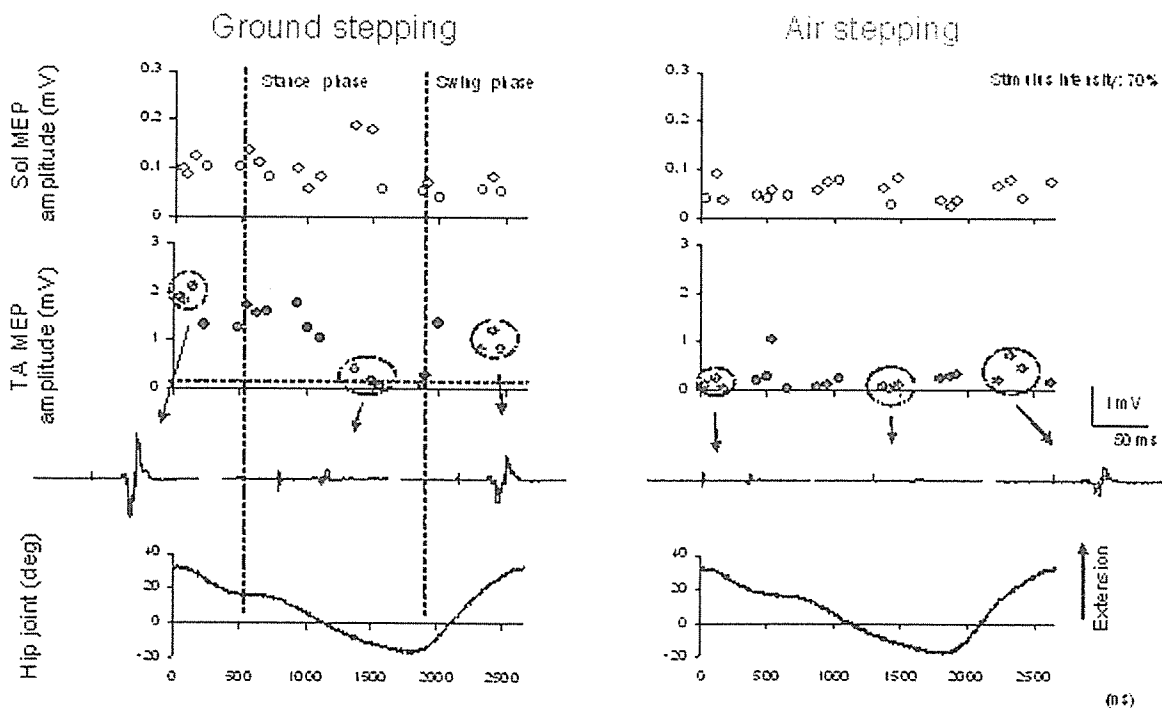
対麻痺患者であっても下肢を受動的に動かしステップングを行うと下肢の各筋群にステップングと同調した筋活動が誘発される。これは下肢のステップングに伴う感覚入力が脊髄の歩行パターンジェネレーターおよびその他の歩行に関連する神経回路を介し反射性出力を誘発した結果生じると考えられている。受動歩行トレーニングを続けると下肢の麻痺筋群に誘発されるそれらの筋放電が増大するとともに筋間の放電パターンも改善することが知られている。筆者らはさらにロボット型歩行訓練機を用いた実験によって、受動的ステップングを行うと足関節屈筋である前脛骨筋の皮質脊髄路興奮性が増大することを見出した(図2)。この筋はそもそも皮質との結合が強く、足関節伸筋のヒラメ筋に比べて歩行中の皮質脊髄路興奮性が高いことが知られている<sup>2) 3)</sup>。今回の筆者

らの結果は、随意歩行に似た下肢の動きを他動的に与えるだけで、皮質脊髄路の興奮性が増強することを示している。それはさらに他動的ステップングを長期的に行うこと、あるいは下行性司令が加わることによってこの経路の再組織化が起こることも示唆する結果といえる。

以上を踏まえ、今回開発する機器には受動的ステップング動作を実現する機構を組み込むこととした。

### ② 下行性司令の効果について

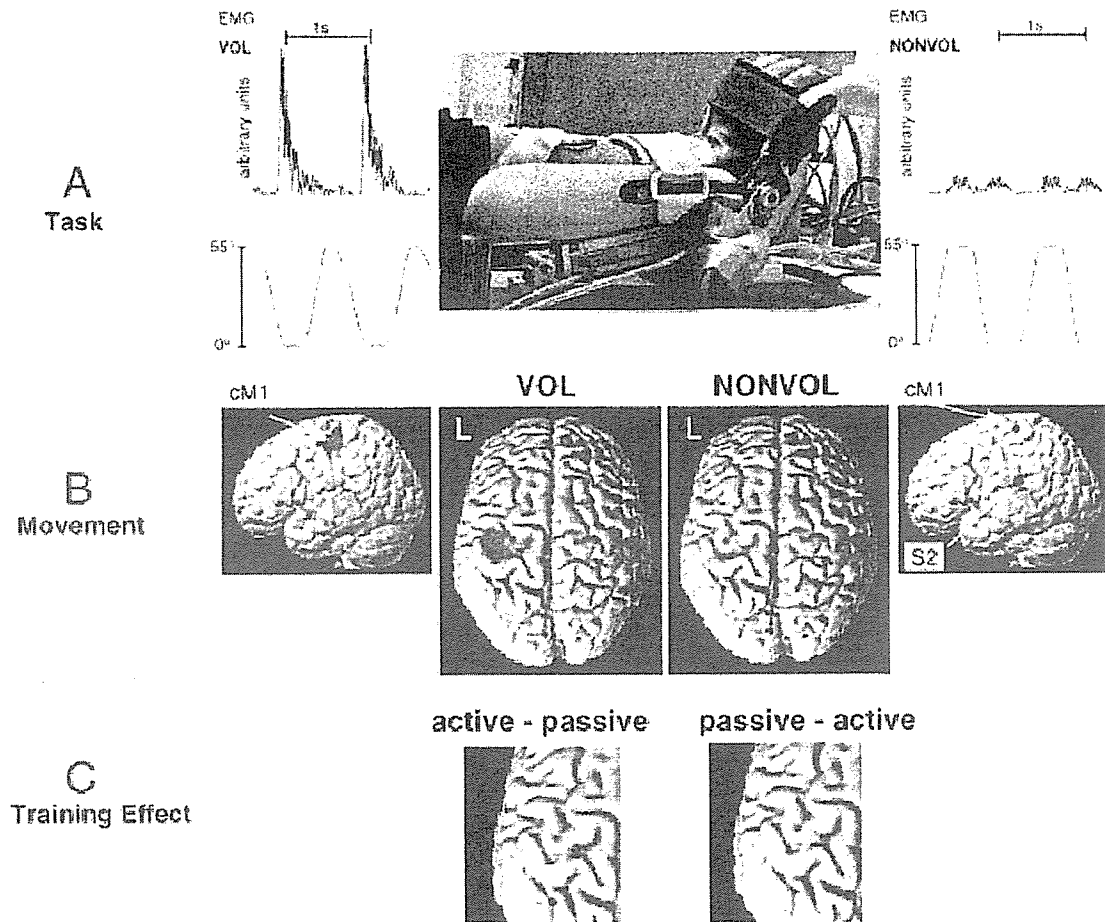
前述したように免荷式受動歩行トレーニングは不全脊髄損傷者の歩行能力回復に効果がある。逆に言えば脳と脊髄との結合が完全に遮断された完全脊髄損傷者では効果が見込めない。自立歩行の回復にはわずかであっても脳から脊髄への下行性入力が必要なのである。最近のThomas and Gorasini (2005)<sup>4)</sup>の報告によれば不全脊髄損傷者の皮質脊髄路機能は歩行トレーニングで改善する。またLotzeら(2003)<sup>5)</sup>は受動運動トレーニングと随意運動を要する随意運動トレーニングを比較し、後者の方が大脳一次運動野の再組織化が著明であることを示した(図3)。この結果は、随意性の低い麻痺肢であっても、運動を起こそうとする意志が運動機能の回復



受動歩行中に経頭蓋磁気刺激によって誘発したヒラメ筋(SOL)と前脛骨筋(TA)の誘発電位(MEP)の変化。Ground stepping; トレッドミルベルト上でのステップング, Air stepping; 空中に吊られた状態でのステップング。

図2





手関節の受動トレーニング（NONVOL）と能動トレーニング（VOL）による脳の再組織化の比較。A:動作課題特性の比較。VOLでは筋活動電位が発生するのに対し、NONVOLではほとんど生じていない。B:それぞれの運動課題で活性化する脳の領域の違い。C:トレーニング後に生じる活性領域の違い。文献5より引用。

図3

には重要であることを示唆している。すなわち、不全脊髄損傷者の受動歩行トレーニングにおいて、ただ他動的に下肢を動かされているのに比べて、自分の意志の下に動かそうとする随意命令がきわめて重要であることが示唆される。随意命令を引き出すためには、強い動機付けが必要である。この動機付けのため、今回の歩行訓練機は自分の意志の下で移動できることを重要な要件の一つとした。

### 体力医学的視点

上記したポイントは歩行回復にかかわる神経生理学的視点であった。もう一方の視点は体力医学的視点である。前述したように、上位中枢と脊髄との連絡が完全に遮

断された完全損傷者では現状で理論的には自立歩行の改善は期待できない。そのため、完全損傷者にとって歩行機能回復を目指した受動歩行トレーニングを行うことの臨床的な意義は無い。しかし、立位での受動運動は麻痺領域の血液循環を促進するなど、神経系以外の運動に関連する諸器官の刺激効果にも優れる。筆者らは、歩行装具を用いた装具歩行トレーニング実験の結果から対麻痺者が立位で運動を行うことのいくつかの利点を知るに至った。例えば、装具歩行中の心拍数は150拍程度、酸素摂取量は16ml/kg/min程度となり<sup>6)</sup>、これらの数値は座位で腕エルゴメーターをオールアウトまで行ったときの最大値で相対化するといずれも80%以上の数値となる。これは上肢の運動では心臓循環系を十分に働かせるに至っていないこと、すなわち最大心拍数と最大酸素摂

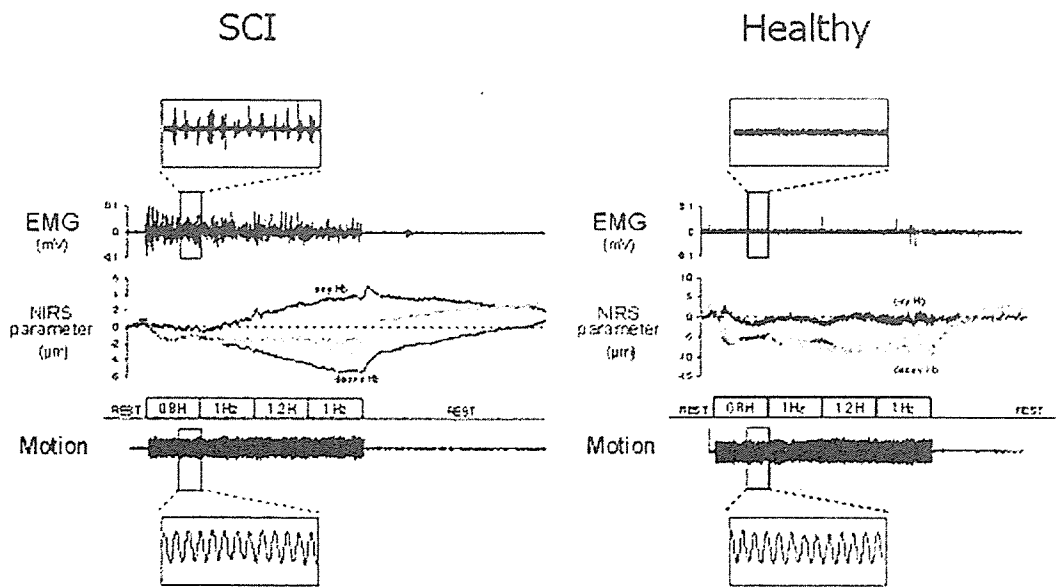
取量を過小評価していることを意味する。歩行装具を用いた立位歩行は体幹の筋など残余機能を十分に賦活させ、結果として心臓循環系、呼吸系へのトレーニングに適した負荷を与えることが容易になると考えられる。筆者らはまた、装具歩行や受動的ステップングにおいて下肢の麻痺筋群に運動周期に一致した筋活動が誘発されることに着目し、それらの筋活動によって筋の末梢循環や代謝レベルが変化するのかどうかを調べた<sup>7)</sup>。実験には立位歩行を模した受動的な下肢の左右交互性スウィング運動を用いた。この運動においても下肢麻痺領域に筋活動が誘発されることを確認した。実験では近赤外分光法を用い下腿三頭筋の酸素化レベルを定量化した。その結果、健常者の場合と異なり、対麻痺者では受動運動の結果、当該筋の酸素化レベルが大きく変化し、末梢循環が変調したことが示唆された(図4)。麻痺領域の末梢循環は普段の生活ではほとんど変化しないことが予想されることから、たとえ受動的運動であってもこれを促進することの意味は大きいと思われる。

脊髄損傷者では麻痺領域の不使用に伴う諸種の二次的障害が深刻な問題となる。その意味で、立位での受動運

動はその予防に有効であるといえる。この点は完全損傷、不全損傷を問わない。したがって、脊髄完全損傷者にとっても立位運動を行うことは十分な臨床的意義があるといえる。本装置の理論的背景の第二のポイントがここにある。

以上の神経生理学的、体力医学的知見を踏まえ、本装置の要件を以下のように設定した。

1. 下肢のステップング運動を装置によって実現可能とする。対麻痺者など自力での歩行が困難な人に対して受動的ステップング運動を実現し、歩行の再学習、神経の再組織化を促す。
2. 移動型免荷装置によって訓練者の意志に基づく移動を可能にする。それによって訓練者の動機付け、トレーニング意欲を高める。上位中枢からの下行性指令を可能な限り高めることで脊髄への伝達効率を改善する。同時に残余機能を最大限動員することで呼吸循環系をはじめとする全身諸機関への刺激効果を高める。



立位での受動的股関節屈曲伸張動作中の下腿三頭筋酸素化レベル。脊髄損傷者(SCI)と健常者(NORMAL)でのデータの比較。SCIでは動作中(Motion)に筋放電(EMG)が誘発され、近赤外分光法で計測した酸素化ヘモグロビンなどの変量(NIRS parameters)が変化していることがわかる。文献7より引用

図4

## 歩行訓練装置の概要

装置の基本構成はモーターで駆動される歩行装具部と身体を支え、あわせて免荷もおこなう免荷機構部から成る(図5)。歩行装具部は訓練者の状態、下肢のサイズに応じたステッピングを行う。免荷機構部は最大で約50kgの免荷をおこなうとともに、26 m/mの速度での移動を可能とする。

既に屋外での動作確認を行い、上記要件を満たす装置の試作機が完成した。今後さらに細部を改良し、臨床試験を行う予定である。



移動型歩行訓練装置を用いた試験歩行の様子

図5

## 参考文献

- 1) Raineteau O, Schwab ME. Plasticity of motor systems after incomplete spinal cord injury. *Nature Rev* 2: 263-273, 2001
- 2) Capaday C, Lavoie BA, Barbeau H, Schneider C, Bonnard M (1999): Studies on the corticospinal control of human walking. I. Responses to focal transcranial magnetic stimulation of the motor cortex. *J Neurophysiol* 81: 129-139
- 3) Christensen LO, Andersen JB, Sinkiaer T, Nielsen J (2001): Transcranial magnetic stimulation and stretch reflexes in the tibialis anterior muscle during human walking. *J Physiol* 531: 545-557
- 4) Thomas S and M A Gorassini: Increases in corticospinal tract function by treadmill training. *J Neurophysiol* 94:2844-2855. 2005  
after incomplete spinal cord injury
- 5) Lotze M, Braun C, Birbaumer N, Anders S, Cohen LG: Motor learning elicited by voluntary drive. *Brain* 126: 866-872, 2003
- 6) Kawashima N, Sone Y, Nakazawa K, Akai M, Yano H: Energy expenditure during walking with weight-bearing control (WBC) orthosis in thoracic level of paraplegic patients. *Spinal Cord* 41, 506-510, 2003
- 7) Kawashima K, Nakazawa K, Akai M. Muscle oxygenation of the paralyzed lower limb in spinal cord injured persons. *Med Sci Sport Exerc* 37, 915-921, 2005.

## Original Article

# Cardiorespiratory responses during passive walking-like exercise in quadriplegics

Y Higuchi<sup>\*1</sup>, S Kitamura<sup>1</sup>, N Kawashima<sup>2</sup>, K Nakazawa<sup>2</sup>, T Iwaya<sup>3</sup> and M Yamasaki<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Department of Physical Training for Remedial Gymnastics, Hospital, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Tokorozawa, Saitama, Japan; <sup>2</sup>Department of Rehabilitation for the Movement Functions, Research Institute of the National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Tokorozawa, Saitama, Japan; <sup>3</sup>Rehabilitation training center, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, Tokorozawa, Saitama, Japan; <sup>4</sup>Department of Health Science, Faculty of Integrated Arts and Sciences, Hiroshima University, Japan

**Study design:** Cross-sectional and comparative investigation using quadriplegics (QP) and nondisabled subjects (ND).

**Objective:** To evaluate cardiorespiratory responses during passive walking-like exercise (PWE) in QP.

**Setting:** National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities in Japan.

**Method:** The subjects were seven male QP with complete lesion (age:  $27.0 \pm 5.4$ , injured level: C6–C7) and six male ND (age:  $26.3 \pm 4.5$ ). Cardiorespiratory responses were measured until voluntary fatigue during PWE, the rhythmical activity of paralyzed lower limbs synchronized with arm movements.

**Results:** There were no significant differences in oxygen consumption ( $\dot{V}O_2$ ), pulmonary ventilation ( $\dot{V}E$ ), heart rate (HR) and oxygen pulse ( $O_2$  pulse) between QP and ND during PWE. ND showed increased ventilatory equivalent for oxygen ( $\dot{V}E/\dot{V}O_2$  ratio) during exercise, while QP showed a significantly greater respiratory rate (RR) during exercise than ND ( $P < 0.05$ ).

**Conclusion:** PWE elicited an increase in  $\dot{V}O_2$  with workload increment in QP similar to ND. However, higher RR suggested the intrinsic dysfunction of RR control during submaximal exercise in QP. From these results, it was thought that respiratory response would be the restriction factor of efficient oxygen transportation during PWE in QP.

*Spinal Cord* (2006) 44, 480–486. doi:10.1038/sj.sc.3101875; published online 29 November 2005

**Keywords:** quadriplegics; passive walking-like exercise; cardiorespiratory response

## Introduction

For individuals with spinal cord injury (ISCI), it is difficult to improve their cardiorespiratory function and to activate the oxygen supply function by exercise training such as wheelchair or arm swinging exercise because of the characteristics of the obstacles.<sup>1,2</sup> In general, the peak oxygen uptake (peak  $\dot{V}O_2$ ) is dependent on the level of spinal cord injury (SCI), and quadriplegics (QP) and high lesion paraplegics (PP) show a lower peak  $\dot{V}O_2$  than nondisabled (ND) or low lesion PP.<sup>3–5</sup> In addition, during submaximal exercise, QP and high lesion PP showed the reduced ventilation efficiency, stroke volume, venous return and sympathetic activity in comparison to ND or low lesion PP.<sup>5,6</sup>

For such ISCI with low physiological responses to exercise, the exercise posture is an important factor enhancing the effect of aerobic training. McLean *et al*<sup>7</sup> investigated the influence of body posture in training on aerobic capacity in ISCI and indicated that although improvements in aerobic capacity could be achieved by training in either a supine or a sitting posture, the supine posture had more effect on aerobic training than the sitting posture. One reason is that the supine posture is advantageous to ISCI circulation, because there is small amount of blood in the paralyzed leg compared to the sitting posture due to the lower effect of gravity.

In contrast, in a sitting posture during exercise, venous blood pools in the legs and abdomen, causing reduced filling pressure and diminished ventricular volume. Therefore, when QP and PP perform exercise in a sitting posture, blood is not efficiently redistributed

\*Correspondence: Y Higuchi, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities, 4-1 Namiki, Tokorozawa, Saitama 359-8555, Japan