

立位他動的歩行様運動に対する脊髄損傷者の呼吸循環系応答

尾方寿好*

Cardiorespiratory Responses to Passive Walking-like Exercise in Motor-complete Spinal Cord-injured Humans

Hisayoshi OGATA*

Abstract

Quiet standing and passive walking-like exercise in the standing posture with an aid of standing device are known to be useful therapies in the rehabilitation for individuals with spinal cord injury. This paper summarizes the recent findings on cardiorespiratory responses to quiet standing and passive walking-like exercise in the standing posture in motor-complete spinal cord-injured humans. Minute ventilation and ventilatory equivalent for oxygen uptake increase with a decrease in arterial blood pressure during passive standing. Arterial blood pressure increases during passive walking-like exercise especially in individuals with spinal cord injury at or above thoracic 6. Although the increase in arterial blood pressure is not accompanied with a reduction of minute ventilation due to concomitant increase in oxygen uptake, ventilatory equivalent for oxygen uptake during passive walking-like exercise is lower than that during quiet standing. The increase in arterial blood pressure during passive walking-like exercise may represent an inhibitory effect on orthostatic hypotension, which is prevalent among individuals with spinal cord injury at cervical and higher thoracic levels. In addition, the reduction of ventilatory equivalent for oxygen uptake during passive walking-like exercise may represent an alleviation of difficulty in breathing.

キーワード：脊髄損傷、リハビリテーション、立位姿勢、他動的運動

2009年 8月20日 受付

2010年 1月 8日 採択

1. はじめに

脊髄損傷に伴う下肢運動機能の麻痺によって車椅子を主体とした生活を余儀なくされると、2次障害として下肢の筋萎縮、骨密度低下、関節拘縮、血流停滞に伴う諸症状（深部静脈血栓症や褥瘡）に代表される廃用性症候群が引き起こされる。また、車椅子主体の生活はエネルギー消費量が少ないので、肥満・過体重に

なりやすくなる^[1]。このような問題点に対し、立位姿勢を支持する器具を用いて立位姿勢をとることが、骨密度低下の遅延効果や^[2]、関節拘縮の予防効果^[3]を有することが報告されている。さらに、立位姿勢で麻痺下肢を他動的かつ歩行様に動かすことで、下肢筋活動を伴う血流増大が生じること^[4]やエネルギー消費量が僅かではあるが増大すること^[5]が報告されている。こ

* 国立障害者リハビリテーションセンター研究所運動機能系障害研究部

* Department of Rehabilitation For Movement Functions, Research Institute, National Rehabilitation Center for Persons with Disabilities

これらの効果から、脊髄損傷者の廃用性症候群や肥満・過体重といった問題の解決に、立位他動的歩行様運動 (Passive walking-like exercise, PWE) が有効であることが示唆される。しかしながら、未だ、PWE時の生理学的応答については不明な点が多く、生命維持に直結した呼吸循環系の応答については近年までほとんど研究がなされてこなかった。本特集では、近年、Ogata et al.^[6-9]によって明らかにされてきた脊髄損傷者の静止立位時およびPWE時の呼吸循環系応答とその生理学的メカニズム、および研究結果の臨床的意義を中心に概説する。なお、本特集では、下肢運動機能の完全麻痺を有する者への運動療法としてPWEを捉えているため、全ての研究結果は、運動機能完全麻痺 (ASIAグレード：AまたはB) と診断された脊髄損傷者から得られたものを扱っていることに留意されたい。

2. 立位他動的歩行様運動に対する循環系応答

Ogata et al.^[6]は、脊髄損傷者において、図1に示す立位運動器具 (Easy stand glider 6000) を用いて、6分間の座位時、6分間の静止立位時、12分間のPWE時の心拍・血圧応答について検討した。

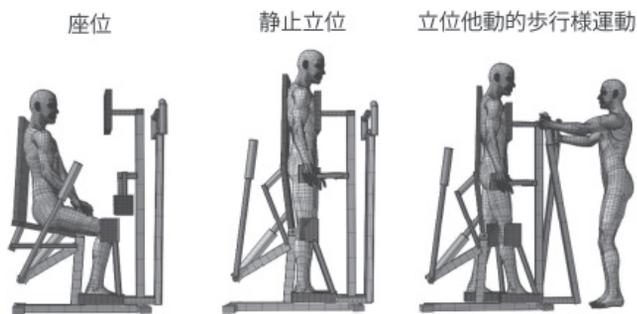


図1. 立位運動器具

本器具は油圧式レバーを引くことによって、被験者を座位から立位へ姿勢変換させることができる。立位姿勢の保持は、体幹部、骨盤部、膝部をそれぞれ体幹部前後のパッド、骨盤部側部のパッドおよび膝部のパッドを用いて固定することで可能になる。体幹部前方にある2つのハンドルは足部プレートに連結されており、ハンドルを交互に前後に押し引きすることで一方の脚を前方へ、もう一方の脚を後方へ動かすことができる。

PWEは、検者が足部プレートと連結したハンドルを動かすことによって課された。Ogata et al.^[6]は、脊髄損傷レベルが頸髄 (C) 6番から胸髄 (T) 6番までの高位損傷者群 (HSCI, 7名) と、T10番からT12番の低位損傷者群 (LSCI, 5名) に区分し、健常者群 (CON, 12名) と合わせて3群の心拍・血圧応答を比較・検討した。座位時の平均血圧は、HSCI、LSCI、CONについて、それぞれ 77 ± 3 mmHg (平均値 \pm 標準誤差)、 87 ± 4

mmHg、 92 ± 2 mmHgであり、HSCIの平均血圧は他の群よりも低かった。静止立位時の血圧に関しては (図2)、全ての群において、座位時の血圧と差が認められなかったが、HSCIに属する頸髄損傷者では血圧が低下する傾向にあった。PWE時の血圧に関しては、HSCIとCONのみで静止立位時の血圧よりも高い値を示した。収縮期血圧の上昇比率はHSCIが約30%、

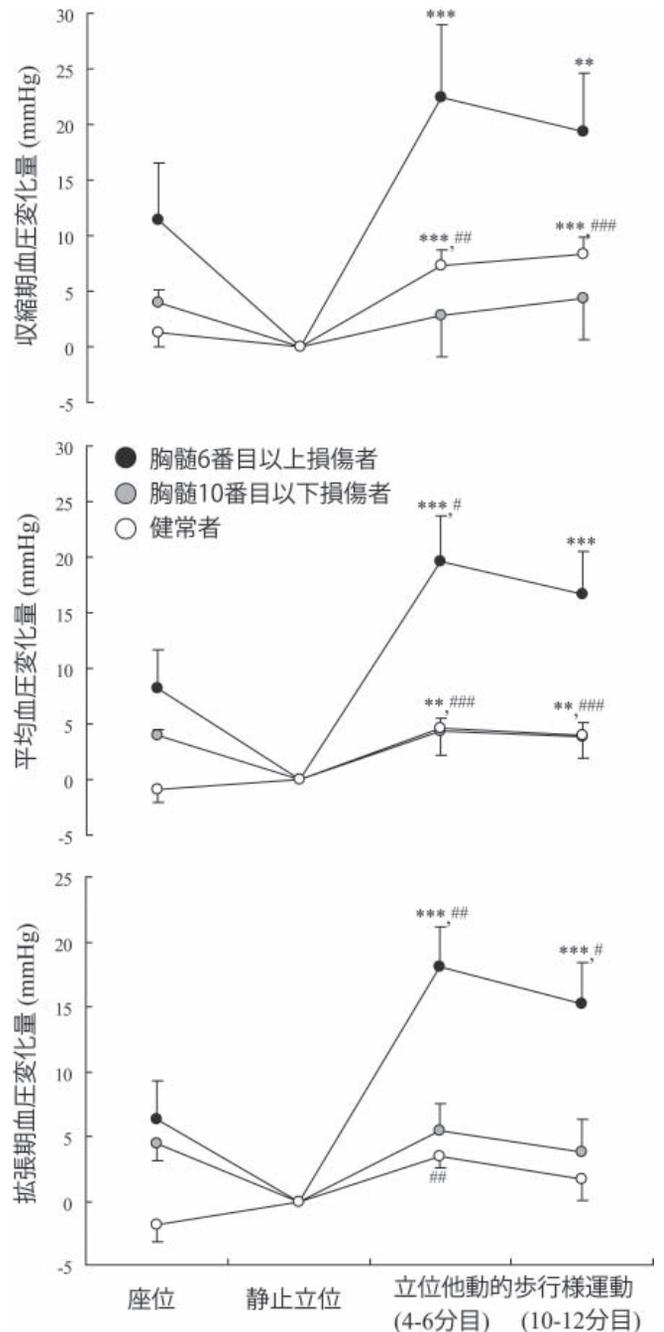


図2. 静止立位時の血圧レベルからの変化量

*, **, ***: $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$. 静止立位時の血圧レベルと比較した際の有意差を表す。
#, ##, ###: $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$. 座位時の血圧レベルと比較した際の有意差を表す。

CONが約7%であり前者の方が大きかった。

心拍数 (HR) に関しては、座位時において、HSCI、LSCI、CONについて、それぞれ 76 ± 3 bpm、 75 ± 3 bpm、 65 ± 2 bpmであり、HSCIとLSCIのHRはCONのHRよりも高い値を示した。静止立位時のHRに関しては (図3)、HSCIとCONにおいて座位時のHRよりも高い値を示した。一方、PWEを開始すると、両群ともに、HRは座位時と同レベルにまで低下した。LSCIでは、静止立位とPWEに対してHRは有意な変化を示さなかった。

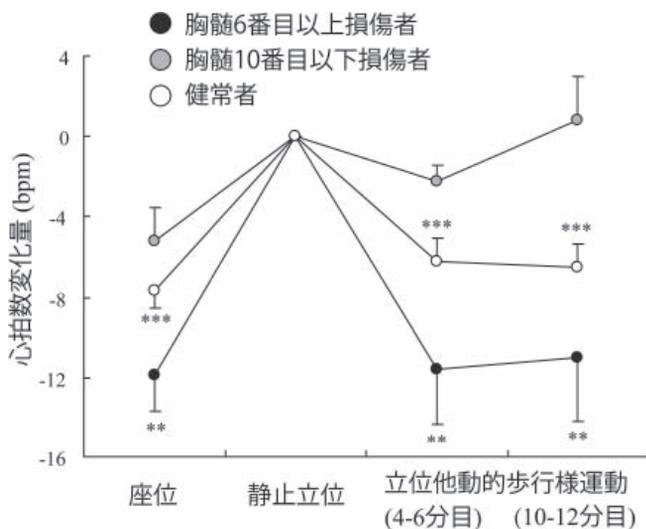


図3. 静止立位時の心拍数レベルからの変化量

*, **, ***: $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$. 静止立位時の心拍数レベルと比較した際の有意差を表す。

脊髄損傷者では、麻痺領域に侵害性・非侵害性刺激が加わると、脊髄反射性の交感神経活動が誘発され、麻痺領域に属する血管が収縮する場合がある^[10, 11]。特に、胸髄5・6番目以上を損傷した者では、下肢のみではなく腹部内臓の血管も麻痺領域に属するため、大部分の血管が収縮することにより血管抵抗が大きく高まり、昇圧反応として現れやすくなるとされる^[6, 12]。Ogata et al.^[6]によって発見されたHSCIの昇圧反応も、脊髄反射性の交感神経活動によって引き起こされたものであると考えられている。また、HSCIで観察されたPWE時のHRの低下は、圧受容器反射による迷走神経活動の亢進によってもたらされたものであると考えられている。

3. 立位他動的歩行様運動に対する呼吸系応答

脊髄損傷者 (ASIAグレード: A) の静止立位時およびPWE時の換気応答については、Ogata et al.^[7, 8]の

一連の研究で明らかにされてきている。はじめに、彼らは脊髄損傷レベルがC6番からT12番までの者16名を、C6番からT7番までの高位損傷者群 (HSCI, 9名) とT10番からT12番までの低位損傷者群 (LSCI, 7名) に区分し、健常者群 (CON, 18名) と合わせて6分間の静止立位時の換気応答について比較・検討した^[7]。座位から立位への姿勢変換による平均血圧の変化については、HSCIでは 81 ± 11 mmHg (平均値 \pm 標準偏差) から 75 ± 16 mmHgまで低下したが、CONでは 92 ± 7 mmHgから 94 ± 6 mmHgまで上昇した。LSCIでは有意な変化が認められなかった。一方、換気量に関しては、HSCIで 8.4 ± 1.1 l \cdot min⁻¹から 9.9 ± 1.0 l \cdot min⁻¹まで、CONでは 8.5 ± 1.2 l \cdot min⁻¹から 8.7 ± 1.3 l \cdot min⁻¹まで共に上昇したが、LSCIでは有意な変化が認められなかった。HSCIにおいて、血圧低下率と換気量上昇率の相関関係を検討したところ (図4)、血圧低下率が大きいほど、換気量上昇率が大きくなることが明らかになった。LSCIでも同様の傾向が相関分析によって得られた。このような関係性は、CONでは認められなかった。換気量は、酸素摂取量が増えれば増加するが、この研究の場合、脊髄損傷者群の換気量増大は酸素摂取量の増大を伴っていなかった。また、換気量上昇率と酸素摂取量上昇率の関連性も認められなかった (図5)。これらのことから、脊髄損傷者群の静止立位時の換気量の上昇は血圧低下と密接に関連していることが明らかにされた。これは、圧受容器への脱負荷によって反射性に換気亢進が生じたことや、血圧低下によって産生されるアンジオテンシンが換気亢進を引き起こしたことなどがメカニズムとして想定されている^[7]。

もし、脊髄損傷者の静止立位時の換気亢進が血圧低下と密接に関連するならば、PWEによって血圧が上昇した場合、換気量増大が抑制されるはずである。そこで、Ogata et al.^[8]は、先行研究^[6]でPWEによって顕著な昇圧反応が生じることが明らかとなったT6番以上損傷者7名を対象に、15分間の静止立位とその後の6分間のPWEを課した際の換気量の変化について検討した。なお、Ogata et al.^[8]の研究では、T7番損傷者1名も含まれているが、これはT6番以上損傷者と同様の昇圧反応をPWE時に示したためである。計8名の呼吸循環変量の平均値の変化を図6に示した。平均血圧は、静止立位時に比べてPWE時の方が高い値を示した。換気量に関しては、静止立位時とPWE時に差は認められなかったが、酸素摂取量が静止立位時よりもPWE時の方で高い値を示したため、結果として、換気当量 (換気量/酸素摂取量) は静止立位時よりもPWE時の方が

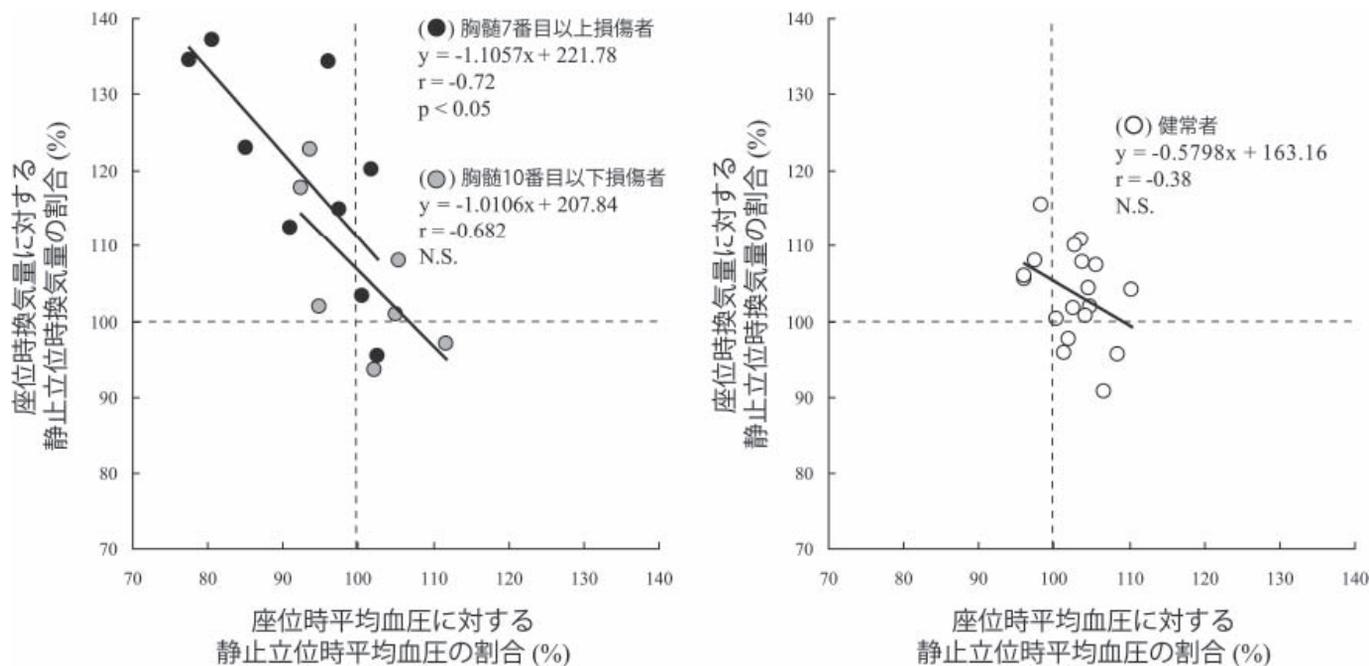


図4. 脊髄損傷者および健常者における座位から立位への姿勢変換に伴う平均血圧の変化と毎分換気量の変化の関連性。

各軸の値は座位時の値に対する立位時の値の割合である。

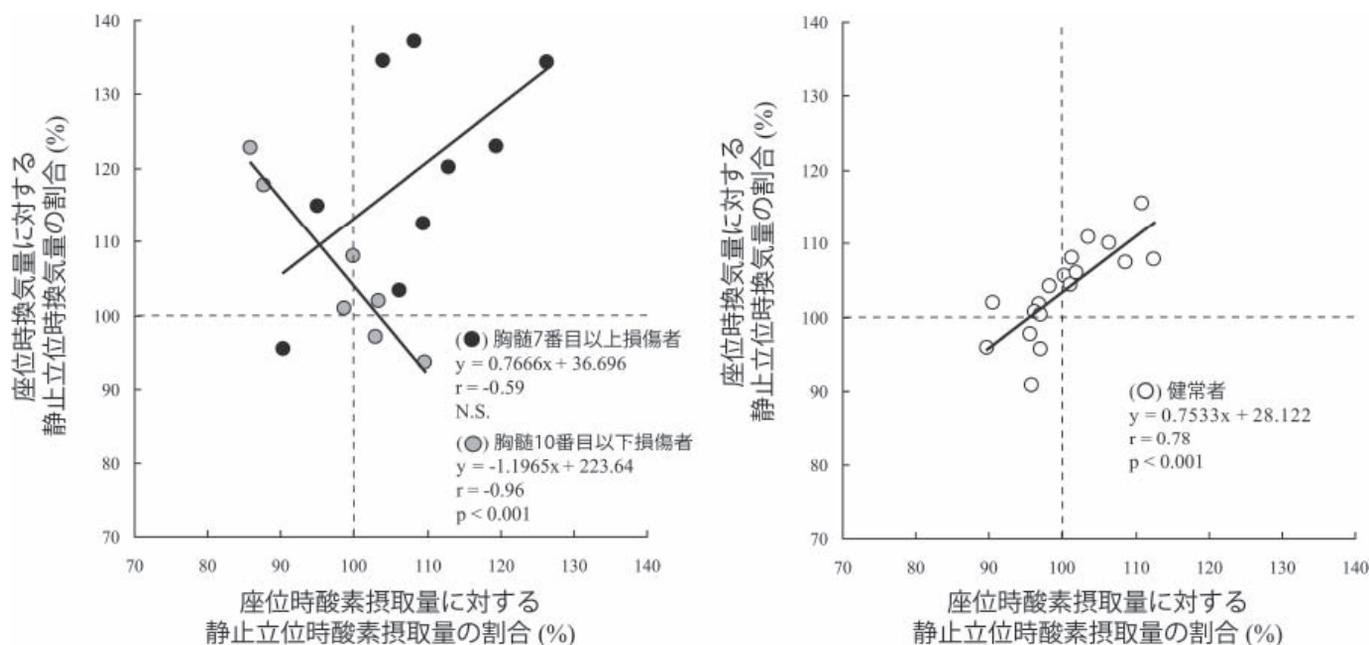


図5. 脊髄損傷者および健常者における座位から立位への姿勢変換に伴う酸素摂取量の変化と毎分換気量の変化の関連性。

各軸の値は座位時の値に対する立位時の値の割合である。

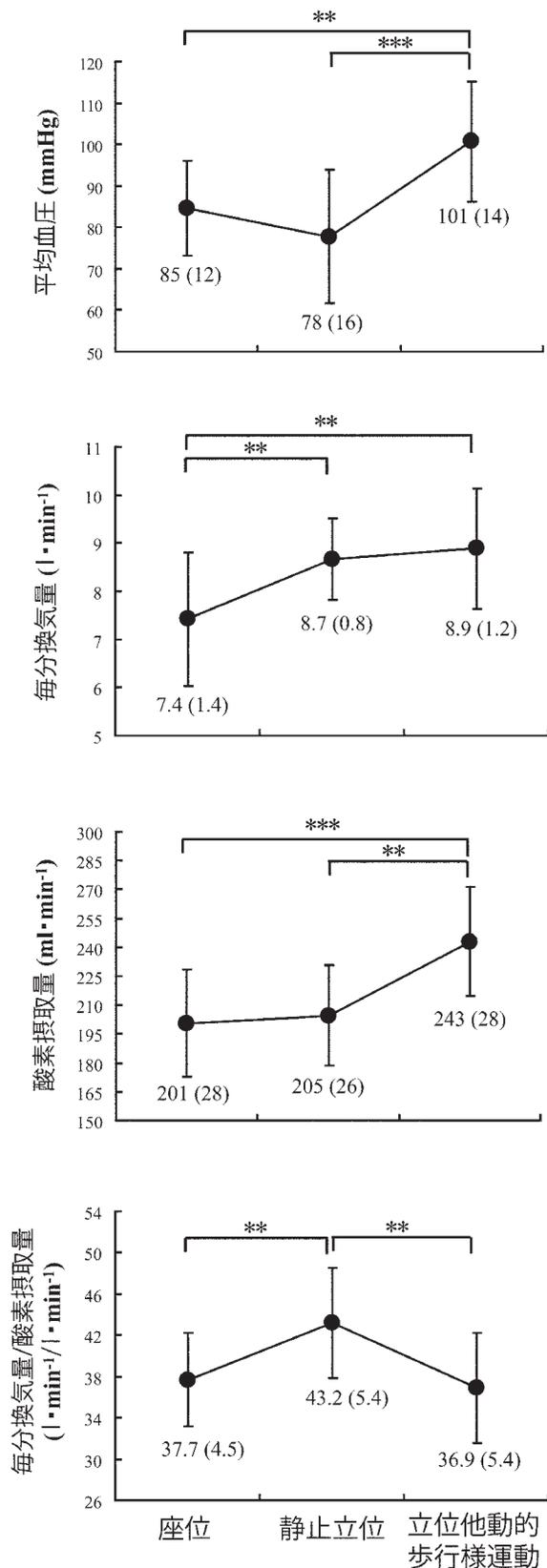


図6. 脊髄損傷者における座位時、静止立位時および立位他動的歩行様運動時の平均血圧、毎分換気量、酸素摂取量および毎分換気量/酸素摂取量（換気等量）の変化。

*, **, ***: $p < 0.05$, $p < 0.01$, $p < 0.001$.

図中の値は平均値（標準偏差）である。

低い値となった。この研究からは、血圧上昇によって換気量の増大が抑制されたか否かを直接的に示すことはできなかった。

4. 臨床的意義

起立訓練で最も問題となるのは起立性低血圧に伴う諸症状（眩暈、吐き気、意識喪失など）である。これは、頸髄損傷者で顕著に現れることが知られている^[13]。先行研究では^[14]、60分間の起立訓練を週5回のペースで40セッション行うことで、頸髄損傷者の起立性低血圧を防止できることが報告されているが、即効性を考えた場合、別の方法を用いる必要がある。Ogata et al.^[6]は、PWEには昇圧反応を引き起こす作用があることから、起立性低血圧の防止方法として有用であることを提唱している。PWEは、起立訓練を行っていない者にとっても起立性低血圧のリスクを軽減して起立訓練を行えるという点で、有用な方法であると言える。

また、脊髄損傷者において、起立性低血圧に付随する症状として呼吸困難感の増大がある^[15]。呼吸困難感の増大は、換気当量の増大と密接に関連すると考えられている^[16]。Ogata et al.^[8]は、静止立位時およびPWE時の換気当量の検討に加えて、10段階のスケール（0 = 全くない、1 = こぐ僅か、2 = 僅か、3 = 中程度、4 = やや激しい、5 = 激しい、7 = かなり激しい、9 = 非常に激しい、10 = 最高に激しい）で表される呼吸困難感レベルについても評価している。その結果、8名中2名では、静止立位時に5および6段階目の“激しい”という自覚症状を訴えたが、PWE時の自覚症状は3段階目以下まで低下した。先に述べたとおり、この呼吸困難感の低下は換気当量の低下を伴っていた。したがって、PWEには呼吸困難感を低減する作用もあることが示唆されよう。

以上のように、PWE時に血圧が上昇することは、脊髄損傷者でも安全に起立訓練を行うことができるという意味において、非常に意義が大きいものである。ただし、血圧が高くなりすぎることは大きな問題点である。Ogata et al.^[6]は、頸髄損傷者において、普段の血圧（座位時血圧）よりもPWE時の血圧が20 mmHg以上上昇したことを報告している。この上昇幅は、脊髄医学コンソーシアム（Consortium for Spinal Cord Medicine）が提唱する自律神経過反射に相当する血圧上昇幅である^[17]。先行研究では、過度な自律神経過反射のケースとして、収縮期血圧が200mmHgを超えること^[18, 19]、そして、過度な血圧上昇と関連して肺水腫^[18]や脳出血^[19]などの重篤な症状が現れ、引いては死

に至らしめること^[18, 19]を報告している。今のところPWEによって、200 mmHgを越えるような血圧レベルに至るとい報告は無いが、昇圧反応誘発因子となる膀胱内圧上昇や腸管内圧上昇がPWEによる昇圧反応に加わった場合、過度な血圧上昇が起きる可能性を否定できない。このため、PWEを行う前に排尿などの適切な処置を行っておくことが推奨されている^[6]。

一方、PWEを行っても血圧上昇が起きないケースが報告されている^[9]。この研究では、C7番を損傷した頸髄完全損傷者1名について、6分間の座位時、6分間の静止立位時とその後の12分間のPWE時の血圧応答を検討している(図7)。本来ならば、頸髄損傷者では静止立位時での起立性低血圧の発生リスクが高いが、この被験者では逆に血圧が大きく上昇し、一過性に収縮期血圧が180 mmHgを超えた。この時、痙性による大きな筋活動が生じていた。PWEを開始すると筋活動の急激な低下に伴って血圧も急激に低下した。PWE後半の血圧は、座位時のそれよりも低くなった。このPWE時の低血圧の原因については次のように考えられている。すなわち、静止立位時に生じた筋活動が、PWE開始後に急激に低下したことから、PWE時には運動後低血圧と同様の血圧低下作用が生じており、これがPWEによって引き出される昇圧反応に勝ったために、結果として低血圧が生じたというものである。

5. 終わりに

本特集では、下肢運動機能の完全麻痺を有する脊髄損傷者を対象としたPWE時の呼吸循環系応答について述べてきた。Ogata et al.^[9]の症例報告からも明らかなように、損傷レベルが同一でも必ずしもPWEに対する呼吸循環系応答が典型的な変化を示すとは限らない。また、呼吸循環系応答を引き起こすメカニズムについては未だ不明な点が多い。PWEを運動療法として普及させることを考えた場合、更なる研究を進め多くの知見を得ることが必要であろう。

6. 参考文献

- 1) Buchholz, A. C., McGillivray, C. F., Pencharz, P. B. Physical activity levels are low in free-living adults with chronic paraplegia. *Obes. Res.* 11, 2003, p.563-570.
- 2) Alekna, V., Tamulaitiene, M., Sinevicius, T. Juocevicius, A. Effect of weight-bearing activities on bone mineral density in spinal cord injured patients during the period of the first two years. *Spinal Cord.* 46, 2008, p.727-732.

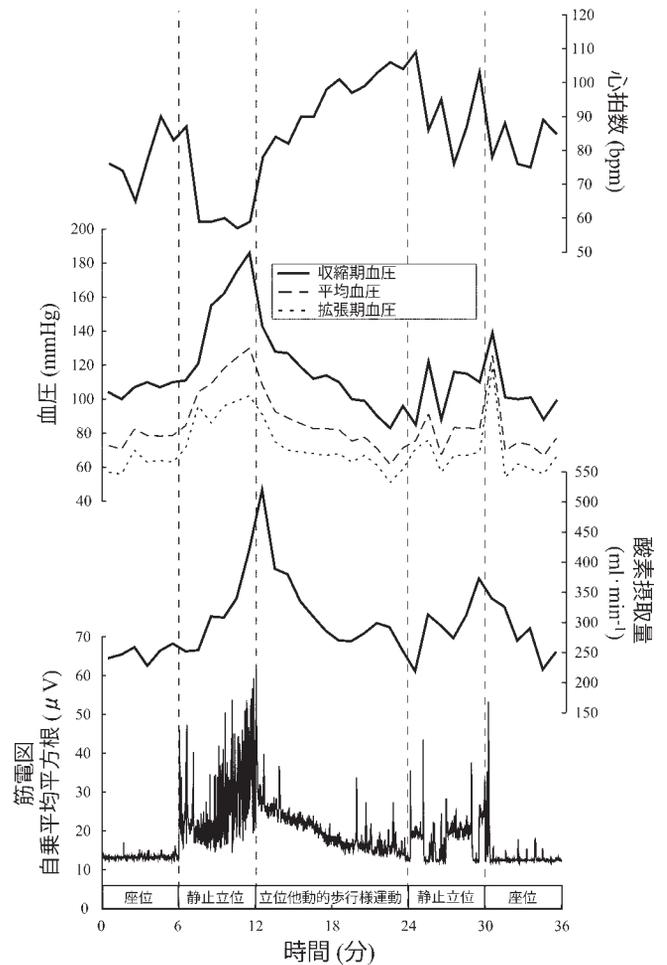


図7. 頸髄損傷者における座位時、静止立位時および立位他動的歩行様運動時の呼吸循環変量および筋電図自乗平均平方根の変化。

筋電図自乗平均平方根は、左脚の各筋(大腿直筋、大腿二頭筋、腓腹筋内側頭、および前脛骨筋)の自乗平均平方根の合計値である。

- 3) Faghri, P. D., Yount, J. P., Pesce, W. J., Seetharama, S., Votto, J. J. Circulatory hypokinesia and functional electric stimulation during standing in persons with spinal cord injury. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 82, 2001, p.1587-1595.
- 4) Kawashima, N., Nakazawa, K., Akai, M. Muscle oxygenation of the paralyzed lower limb in spinal cord-injured persons. *Med. Sci. Sports Exerc.* 37, 2005, p.915-921.
- 5) Ogata, H., Isobe, K., Higuchi, Y., Kitamura, S., Akai, M., Nakazawa, K. Oxygen uptake responses during passive walking-like exercise in persons with spinal cord injury. 国立身体障害者リハビリテーションセンター研究紀要. 2007, p.81-91.

- 6) Ogata, H., Higuchi, Y., Ogata, T., Hoshikawa, S., Akai, M., Nakazawa, K. Pressor response to passive walking-like exercise in spinal cord-injured humans. *Clin. Auton. Res.* 19, 2009, p.113-122.
- 7) Ogata, H., Nakahara, M., Sato, T., Hoshikawa, S., Ogata, T., Nakazawa, K. Hyperventilation during orthostatic challenge in complete spinal cord-injured humans. *Clin. Auton. Res.* 19, 2009, p.327-334.
- 8) Ogata, H., Ogata, T., Hoshikawa, S., Ogawa, T., Uematsu, A., Saitou, S., Kitamura, T., Nakazawa, K. Hypoventilation during passive leg movement in spinal cord-injured humans. *Clin. Auton. Res.* 20, 2010, p.101-103.
- 9) Ogata, H., Ogata, T., Hoshikawa, S., Uematsu, A., Ogawa, T., Saitou, S., Kitamura, T., Nakazawa, K. Unusual blood pressure response during standing therapy in tetraplegic man. *Clin. Auton. Res.* 20, 2010, p.47-50.
- 10) Marsh, D. R., Weaver, L. C. Autonomic dysreflexia, induced by noxious or innocuous stimulation, does not depend on changes in dorsal horn substance P. *J. Neurotrauma.* 21, 2004, p.817-828.
- 11) Teasell, R. W., Arnold, J. M., Krassioukov, A., Delaney, G. A. Cardiovascular consequences of loss of supraspinal control of the sympathetic nervous system after spinal cord injury. *Arch. Phys. Med. Rehabil.* 81, 2000, p.506-516.
- 12) Garrison, M. K., Ng, A. V., Schmit, B. D. Leg sympathetic response to noxious skin stimuli is similar in high and low level human spinal cord injury. *Clin. Neurophysiol.* 119, 2008, p.466-474.
- 13) Krassioukov, A. V., Harkema, S. J. Effect of harness application and postural changes on cardiovascular parameters of individuals with spinal cord injury. *Spinal Cord.* 44, 2006, p.780-786.
- 14) Harkema, S. J., Ferreira, C. K., van den Brand, R. J., Krassioukov, A. V. Improvements in orthostatic instability with stand locomotor training in individuals with spinal cord injury. *J. Neurotrauma.* 25, 2008, p.1467-1475.
- 15) Frisbie, J. H., Steele, D. J. Postural hypotension and abnormalities of salt and water metabolism in myelopathy patients. *Spinal Cord.* 35, 1997, p.303-307.
- 16) Szidon, J. P., Fishman, A. P. Approach to the pulmonary patient with respiratory signs and symptoms. In: *Pulmonary diseases and disorders.* 2nd edn. New York, McGraw-Hill Book Company, 1988, p.313-366.
- 17) Consortium for Spinal Cord Medicine Acute Management of Autonomic Dysreflexia: Individuals with Spinal Cord Injury Presenting to Health Care Facilities. 2nd edn. Washington, D.C., Paralyzed Veterans of America, 2001.
- 18) Calder, K. B., Estores, I. M., Krassioukov, A. Autonomic dysreflexia and associated acute neurogenic pulmonary edema in a patient with spinal cord injury: a case report and review of the literature. *Spinal Cord.* 47, 2009, p.423-425.
- 19) Dolinak, D., Balraj, E. Autonomic dysreflexia and sudden death in people with traumatic spinal cord injury. *Am. J. Forensic. Med. Pathol.* 28, 2007, p.95-98.