

## ハイブリッドエルゴ訓練と立位・歩行の機能改善

## Improvement of stand-up motion and walking by hybrid ergometer training

○ 田川善彦(九州工大) 高野吉朗(帝京大) 松瀬博夫(久留米大) 志波直人

Yoshihiko TAGAWA, Kyushu Institute of Technology

Yoshio TAKANO, Teikyo University

Hiroo MATSUSE, Kurume University

Naoto SHIBA, Kurume University

**Abstract:** Several training devices for individuals with degenerated motor functions due to stroke, spinal cord injury, and aging have been developed to improve the function. We developed a simple ergometer without actuator. In a six-week hybrid ergometer training (cycling against electrically stimulated antagonists), the elderly strengthened their lower limb and iliopsoas muscles. The training in elderly men increased significantly their muscle strength on one-leg standing, repetitive sit-to-stand test, stair-case stepping, 10-meter walking and moments about the hip and knee joints. The result of voluntary ergometer training was compared with the hybrid ergometer training. These training results suggest that the ergometer training has the benefit of decrease fall risk and the contribution to restore stand-up and walking abilities.

**Key Words:** Elderly people, Ergometer, Electrical stimulation, Hybrid method

## 1. はじめに

座位から立位は歩行に至る重要な動作である。さて、脊損受傷から長期経過した人へのFESサイクリング運動による下肢筋の強化によって、萎縮筋の肥大、筋の出力や持久性および酸素摂取量の向上<sup>(1)</sup>、FES援用立位やステップ動作、下肢の概観や座位時のクッション性の改善<sup>(2)</sup>などの効果がある。下位運動神経が損傷した場合でも2年以内でのFESトレーニングであれば筋線維が肥大し筋強化に効果がある<sup>(2)</sup>。さらに効果的なFESトレーニングには、家庭での日常的使用を可能とするシステムが重要である<sup>(2),(3)</sup>。

脳卒中や脊髄損傷による麻痺は、不全麻痺の場合には適切なリハビリテーション(以下、リハビリ)を行うことで短い距離や松葉杖を利用した随意歩行が可能になると指摘されている<sup>(4)</sup>。現在、歩行リハビリ装置としてハーネスなどを利用して上体を牽引あるいは持ち上げて支え、トレッドミル上で歩行を行う体重免荷式トレッドミルトレーニング(BWSTT: Body weight supported treadmill training)が盛んに行われており、ロボットの活用が盛んで成果を上げている<sup>(4),(5)</sup>。装置が大掛かりであり設置箇所が病院などに限られているが、理学療法士の省力化に向け、非常に活発に行われている。歩行訓練機DGO<sup>(6)</sup>やLokomat<sup>(7)</sup>はその典型である。一方、Hidlerら<sup>(8)</sup>はロボットのよる正確な運動の繰り返しだが、理学療法士による訓練と比較して必ずしも好成績となっていないことを、脳卒中患者を対象とした両訓練の比較で示した。そこでは従来の理学療法士の訓練にみられる多様性が歩行能力の回復には効果的である、と考えられている。

ところで車いすは元々、下肢の障害や高齢による下肢の筋力低下によって歩行が困難な方の移動手段である。一般的な上肢駆動の車いすでは、下肢は全く使用されず、肩の障害や下肢の筋力低下や関節拘縮の原因となっている。足漕ぎ車いすは筋力低下や関節拘縮などの予防や改善を日常生活において可能とする。Newhamら<sup>(9)</sup>やDonaldsonら<sup>(10)</sup>は足漕ぎ車いす移動を取り上げ、後者ではT11/12レベルの不全麻痺者の下肢の運動機能が向上したと報告している。

われわれは麻痺下肢への相反的な繰り返し運動が、Lokomat等の歩行訓練機と同様の機能を有するのではないかと期待から、簡便な足漕ぎ車いす<sup>(11),(12)</sup>やエルゴメータ(以下、エルゴ)の開発を試みた<sup>(13)-(15)</sup>。足漕ぎ車いす移動にはモ

ータによるアシストを行いつつ、搭乗者の下肢を電気刺激することで下肢萎縮や歩行機能の改善・強化を意図した。

エルゴによる下肢トレーニングやFESサイクリング動作は長期臥床の人や高齢者だけではなく、麻痺患者の筋力増強、血液の循環障害の防止、繰り返し運動による中枢神経系の再学習などに有用である。結果として、立位・歩行機能改善や転倒防止に効果がある、と考えている。

ここでは高齢者の立位・歩行能力向上を目的に、膝関節周囲筋や腸腰筋を、随意エルゴ運動に電気刺激による拮抗筋収縮力を付加したハイブリッドエルゴ訓練を実施した。また随意エルゴのみの訓練を実施し、両結果の比較・検討を行った。

## 2. 方法

## 2.1 ハイブリッド法

ハイブリッド法は、ヒトの動作中、拮抗筋に電気刺激を与え、これを運動抵抗とする運動を行うとき、主動筋は自発的な求心性収縮を行うが、電気刺激を受けて収縮する拮抗筋は遠心性収縮を行う。図1に屈曲運動時の例を示す。骨格筋は遠心性収縮時では筋張力が大きくなる特性があり<sup>(16)</sup>、同一刺激を用いても、同速度での求心性収縮時の数10%大きな筋力が発生する。この特性を利用すれば、比較的弱い電気刺激による拮抗筋収縮力でも主動筋の抵抗として有効である。また骨格筋の自発性収縮では負荷の増大につれ遅筋線維から速筋線維へと順次腭活するが、電気刺激では運動神経の軸索径が太く電気抵抗が小さい速筋線維が主に収縮する<sup>(17)</sup>。ハイブリッド法を利用した訓練(ハイブリッド訓練)は、自発筋収縮と電気刺激収縮の混合運動であるので、遅筋と速筋の両線維が同時収縮する特徴を持つ訓練方法である。同訓練法における筋の同時収縮は骨長軸方向

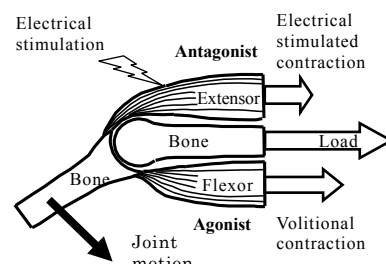


Fig.1 Hybrid method in flexion

に大きな圧縮力を与え、微小重力下で擬似的重力に相当する作用を有する。こうした筋収縮様式と骨圧縮力が筋骨格系の減弱防止<sup>(18)-(20)</sup>あるいは強化強化<sup>(21), (22)</sup>に効果的と考えられる。

2.2 ハイブリッドエルゴ訓練

家庭内で使用することを考慮し極力簡便な構造のエルゴとした。駆動部や制動部をもたず、操作者への電気刺激による主動筋と拮抗筋の収縮力制御により、定常なサイクリング動作を実現した。実験は、被験者に対し十分な説明を行い、同意を得た後に行った。

高齢者の立位・歩行機能強化と転倒防止のため下肢筋と腸腰筋の筋力強化を検討する。腸腰筋の運動抵抗とするため大殿筋を電気刺激した。またエルゴ運動時の膝伸展による反対側の大腿部挙上を抑制するため、その伸展動作への抵抗として拮抗筋であるハムストリングスに電気刺激を加える。図2に刺激パターン(右脚が前方でクランクが水平となる位置で角度0°)を示す。図3は刺激電極の貼付位置を示す。また刺激強度は耐用電圧の80%とした。被験者は全て男性で、ハイブリッドエルゴ(Hybrid ergometer)群6

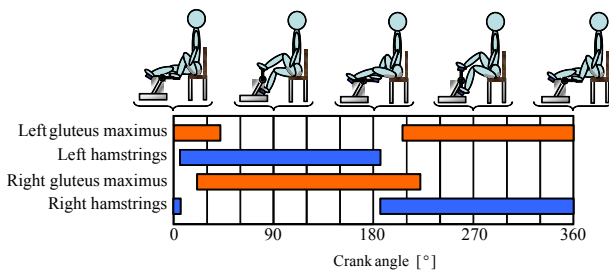


Fig.2 Stimulation patterns



Fig.3 Electrode placement  
GM: Gluteus maximus,  
HM: Hamstring muscles



Fig.4 Hybrid ergometer training  
against electrically induced  
antagonist resistance

名(72.5±5.3歳),週2回で15分/回,6週間の実験である。また図4は実験風景である。効果を対比するため、実験条件を同じにしたエルゴ訓練のみのエルゴ(Ergometer)群6名(70.8±4.7歳),何もしなかった(Control)群6名(68.0±2.8歳)の結果と比較した。

3. 結果

表1に実験結果をまとめた。ハイブリッドエルゴ訓練では、片脚立位,5回立ち上がり,階段昇降,10m歩行の何れにおいて、その前後に有意差がみられた。膝関節の伸展力・屈曲力に有意差がみられ、股関節伸展力には有意な傾向がみられた。股関節の屈曲力では訓練による筋力増大は確認できるが有意差はなかった。一方エルゴ訓練のみでは、階段昇降に有意な傾向がみられるが、片脚立位,股関節力には有意差がなかった。なおトルクは各人の全質量で割った値であり、統計処理にはJMP9(SAS Institute)を用いた。

4. 考察

ハイブリッドエルゴ訓練では、高齢者の歩行時の転倒防止のために大腿部屈曲筋である腸腰筋を強化することを目的の一つとした。大腿部の屈筋である腸腰筋を強化することで、歩行時の下腿部の挙上を十分な高さとし、つま先転倒を防止する意図がある。しかし腸腰筋は深部筋であるため、表層にある大殿筋を電気刺激して大腿部の屈曲運動の抵抗力とするハイブリッド訓練を採用した。腸腰筋は、その抵抗力に打ち勝つためより大きな収縮力を発揮して、股関節屈曲運動を担うことになる。このとき他脚の膝伸展力が股関節屈曲運動のアシストとなることを防止するため、膝伸展筋の拮抗筋であるハムストリングスを電気刺激した。図2のクランク角20~190度,200~370度(便宜上,クランク角10度を370度とした)がこれにあたり、その間の膝伸展運動の抵抗力となる。

今回、随意エルゴ訓練前後で股関節の伸展力・屈曲力に増強は認められなかったが、ハイブリッド法を考慮した場合、股関節伸展力では有意な増強が認められ、屈曲力では有意差はないが増強を認めた。電気刺激の有無によらず、膝関節の伸展・屈曲の両筋群とも筋力増大がみられた。座位でのエルゴ下肢運動が膝周囲筋の増大に寄与でき、安全な訓練手法と言える。片脚立位ではハイブリッドエルゴ訓練の効果がみられた。これには股関節周囲筋の強化や、同時収縮屈伸動作に伴う外転筋収縮<sup>(20)</sup>による筋力強化が寄与していると推察される。

Table 1 Comparison of pre- and post-training

Training/test	Hybrid ergometer		t	Wilcoxon	Ergometer		t	Wilcoxon	Control		t	Wilcoxon
	Pre-	Post-			P	P			Pre-	Post-		
Pre- and Post-training												
One-leg standing, [s]	35.88±18.30 [4.49-60.00]	50.03±20.50 [8.78-60.00]	<b>0.022</b>	0.063	37.07±25.29 [9.23-60.00]	41.08±22.21 [18.96-60.00]	0.219	0.250	42.75±22.00 [9.08-60.00]	42.74±21.91 [7.27-60.00]	0.985	1.000
5-repetition sit-to-stand, [s]	11.43±0.93 [10.8-13.21]	9.37±0.97 [7.76-10.40]	<b>0.003</b>	<b>0.031</b>	10.87±1.44 [8.57-11.97]	8.28±1.28 [6.52-9.95]	<b>0.008</b>	<b>0.031</b>	7.93±1.78 [5.87-10.57]	8.24±1.82 [5.97-10.57]	0.126	0.219
Stair-case stepping, [s]	7.44±0.84 [6.48-8.47]	6.03±1.54 [4.29-8.34]	<b>0.029</b>	<b>0.031</b>	11.19±1.21 [9.63-13.03]	9.96±1.68 [7.05-12.15]	0.069	0.063	7.36±0.53 [5.89-8.58]	6.97±0.42 [5.64-8.76]	0.339	0.438
10-meter walk, [s]	7.38±0.72 [6.48-8.40]	5.80±0.58 [5.39-6.84]	<b>0.010</b>	<b>0.031</b>	7.15±0.84 [5.69-8.20]	6.43±0.59 [5.69-7.37]	<b>0.047</b>	0.063	6.16±0.63 [5.12-6.30]	5.94±0.57 [5.51-7.06]	0.563	0.438
Hip flexion torque at 60°/s, [Nm/kg]	1.24±0.48 [0.83-1.82]	1.56±0.49 [1.21-2.26]	0.557	0.688	1.53±0.68 [0.47-2.38]	1.62±0.77 [0.58-2.87]	0.361	0.625	1.79±0.81 [0.83-3.08]	1.84±0.73 [1.11-3.01]	0.487	0.813
Hip extension torque at 60°/s, [Nm/kg]	2.05±0.94 [1.13-3.29]	2.36±0.76 [1.47-3.40]	0.084	0.063	1.51±0.37 [1.00-2.12]	1.64±0.41 [1.16-2.05]	0.285	0.406	1.79±0.60 [0.63-2.31]	1.67±0.39 [1.22-2.17]	0.558	0.563
Knee flexion torque at 60°/s, [Nm/kg]	1.11±0.45 [0.37-1.56]	1.51±0.48 [0.85-2.02]	<b>0.005</b>	<b>0.031</b>	1.40±0.68 [0.36-2.4]	1.65±0.69 [0.50-2.55]	<b>0.041</b>	0.063	1.54±0.41 [1.00-2.12]	1.53±0.45 [0.93-2.11]	0.935	1.000
Knee extension torque at 60°/s, [Nm/kg]	1.98±0.76 [1.08-3.11]	2.50±0.93 [1.32-3.73]	<b>0.021</b>	<b>0.031</b>	2.35±0.83 [1.07-3.54]	2.59±0.85 [1.21-3.75]	<b>0.015</b>	<b>0.031</b>	2.54±1.07 [1.34-4.25]	2.66±1.01 [1.40-4.14]	0.073	0.094

## 5. 結論

家庭でも使用可能な非常に簡素なエルゴを用いて、電気刺激による抵抗運動を高齢者に与え、下肢筋と腸腰筋の強化を試み、一定の成果を得た。本研究の一部は、科学研究費(B20360118, C20500469)の助成で行われた。

## 参考文献

- (1) More, T. et al., Long term adaptation to electrically induced cycle training in severe spinal cord injured individuals, *Spinal Cord*, 35, 1-16, 1997.
- (2) Kern, H. et al., Home-based functional electrical stimulation rescues permanently denervated muscles in paraplegic patients with complete lower motor neuron lesion, *Neurorehabil Neural Repair*, 24(8), 709-721, 2010.
- (3) Ring, H. and Rosenthal, N., Controlled study of neuroprosthetic functional electrical stimulation in sub-acute post-stroke rehabilitation, *J Rehabil Med*, 37, 32-26, 2005.
- (4) 中澤公孝, 赤居正美, 脊髄損傷と歩行の可能性, *J Clin Rehabil*, 11(3), 193-203, 2002.
- (5) 赤居正美, 佐久間一郎(座長), シンポジウム 下肢術後リハビリテーションの進歩と実践—歩行補助技術などを中心に—, *Jpn J Rehabil Med*, 44, 261-275, 2007.
- (6) Colombo, G., et al., Treadmill training of paraplegic patients using a robotic orthosis, *J Rehabil Res Dev*, 37(6), 693-700, 2000.
- (7) Riener, R., et al., Patient-cooperative strategies for robot-aided treadmill training: first experimental results, *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 13(3), 380-394, 2005.
- (8) Hidler, J., et al., Multicenter randomized clinical trial evaluating the effectiveness of the Lokomat in subacute stroke, *Neurorehabilitation and Neural Repair*, 23(1), 5-13, 2009.
- (9) Newham, D.J. and Donaldson, N., FES cycling, *Acta Neurochir Suppl*, 97(1), 395-402, 2007.
- (10) Donaldson, N., et al., FES cycling may promote recovery of leg function after incomplete spinal cord injury, *Spinal Cord*, 38, 680-682, 2000.
- (11) 井上貴嗣, 他, 電気刺激駆動による足漕ぎ車いすの運動制御, *バイオメカニカル・フジィ・システム学会誌*, 8, 1-10, 2006.
- (12) Ogawa, Y., et al., Locomotion assistance for the person with mobility impairment: Fuzzy control of cycling movement by means of surface electrical-stimulation, *Proceedings of the 29th Annual Int'l Conf. of the IEEE EMBS*, 2420-2423, 2007.
- (13) 天野 智, 他, 電気刺激を利用した家庭用リハビリ装置, *ROBOMEC 2008*, 招待展示, 長野ビッグハット, 2008.6.6-7.
- (14) 天野 智, 他, 電気刺激を用いた歩行訓練装置について, 第29回バイオメカニズム学術講演会, 予稿集, 279-282, 広島, 2008.10.25-26.
- (15) 今泉洋平, 他, 拮抗筋への電気刺激による腸腰筋と下肢筋の強化, 第17回日本FES研究会学術講演会, 40-42, 久留米大学, 2010.12.4.
- (16) Kralj, A., et al., *Functional electrical stimulation, standing and walking after spinal cord Injury*, CRC Press, 1989.
- (17) Delitto, A., et al., Two theories of muscle strength augmentation using percutaneous electrical stimulation, *Phys Ther*, 70(3), 158-164, 1990.
- (18) Ito, T., et al., Development of practical and effective hybrid exercise for use in weightless environment, *Proc. of the 26th Annual Int'l Conf. of the IEEE EMBS (San Francisco, USA)*, 4252-4255, Sept. 1-5, 2004.

- (19) 伊藤 毅, 他, 極限環境下におけるヒトの筋骨格系への効果的運動法に関する研究, *日本機械学会論文集 C編*, 71(711), 3231-3238, 2005.
- (20) Takeuchi, R., et al., A countermeasure for preventing atrophy of musculoskeletal system under microgravity, *SICE-ICCAS 2006 SICE-ICASE International Joint Conference 2006*, 5862-5867, Oct.18-21, 2006, Busan, Korea.
- (21) Yanagi, T., et al., Agonist contractions against electrically stimulated antagonist, *Arch Phys Med Rehabil*, 84, 843-848, 2003.
- (22) Matsuse, H., et al., Muscle training by means of combined electrical stimulation and volitional contraction, *Aviation, Space, and Environmental Medicine*, 77(6), 581-585, 2006.