

# 急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激治療が歩容および内側感覚運動皮質のヘモグロビン濃度へ及ぼす即時的効果

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2014-05-13 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 久保田, 雅史, 山村, 修, 神澤, 朋子, 五十嵐, 千秋, 松尾, 英明, 成瀬, 廣亮, 嶋田, 誠一郎, 加藤, 龍, 横井, 浩史, 内田, 研造, 馬場, 久敏 メールアドレス: 所属:
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10098/8250">http://hdl.handle.net/10098/8250</a>

研究論文

# 急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激治療が歩容および内側感覚運動皮質のヘモグロビン濃度へ及ぼす即時的効果\*

久保田雅史<sup>1)</sup># 山村 修<sup>2)</sup> 神澤 朋子<sup>2)</sup> 五十嵐千秋<sup>1)</sup> 松尾英明<sup>1)</sup> 成瀬廣亮<sup>1)</sup>  
嶋田誠一郎<sup>1)</sup> 加藤 龍<sup>3)</sup> 横井浩史<sup>3)</sup> 内田研造<sup>4)</sup> 馬場久敏<sup>4)</sup>

## 要旨

【目的】本研究の目的は、急性期脳梗塞患者に対する歩行中の機能的電気刺激 (functional electrical Stimulation : FES) が運動学的・運動力学的歩行パラメータおよび内側感覚運動皮質 (medial sensorimotor cortices : mSMC) のヘモグロビン濃度に及ぼす即時的影響を検証することである。【方法】対象は発症後14日以内の脳梗塞患者8名とし、FESは遊脚期に前脛骨筋を、立脚後期に腓腹筋を刺激した。歩行パターンの変化は三次元動作解析システムを用い、mSMCのヘモグロビン濃度変化は近赤外線分光法を用いて計測した。【結果】FES実施前と比較してFES実施中に、歩行速度や、麻痺側立脚期の股関節屈曲モーメント、膝関節伸展モーメントおよび足関節底屈モーメントが有意に上昇し、FES終了後も持続した。また、FES実施中の非損傷側 mSMC の酸素化ヘモグロビン濃度は、FES非実施時と比較して加速期・定速期とも有意に低下していた。【結論】FESは麻痺側立脚期の支持性向上や麻痺側立脚後期の roll-off 機能向上といった歩行パターンを変化させ、さらに非損傷側 mSMC の過剰な脳活動を抑制している可能性が示された。

キーワード 機能的電気刺激, 動作解析, ヘモグロビン濃度

## はじめに

機能的電気刺激装置 (functional electrical Stimulation : 以下、FES) は、脳卒中や脊髄損傷などにより損なわれていた運動機能に対し、電気刺激を用いて麻痺筋

を収縮させ、合目的な動作を再建しようとする治療法である。1961年に Liberson ら<sup>1)</sup> が片麻痺性下垂足の歩行に対し電気刺激を用いて再建を試みたことがFES治療のはじまりとされ、近年ではFESを用いた治療の有用性が広く知られている<sup>2)3)</sup>。一般的に、脳卒中患者の下肢FESはdrop footに対して遊脚期に背屈筋を電気刺激し、歩行機能を再建することが目的とされてきたが、Kesar ら<sup>4)</sup> は遊脚期の背屈筋電気刺激のみでなく、terminal stanceに底屈筋にも電気刺激をすることで即時的にtoe off時の足関節底屈角度増加、遊脚期の膝関節屈曲角度増加することを示し、さらにEmbreyら<sup>5)</sup> は底背屈筋へのFESが3ヵ月間の治療でより歩行機能を高めることを示した。しかし、FESの効果検証は、慢性期の脳卒中患者を対象にしたものが多く、発症後早期に底背屈筋FESの即時的効果に関してはあきらかにされていない。また、FESによる歩行の運動力学的変化に関して述べられた報告はない。

FESによりなぜ運動機能が高まるかに関しては未だ議論されているところである。近年、末梢神経への電気刺激は、感覚入力を増大させることで反対側の体性感覚皮質の活動を高めることや同側皮質脊髄路の興奮性が高

\* Immediate Effects of Functional Electrical Stimulation on Kinematic and Kinetic Variables and Oxygenation in Medial Sensorimotor Cortices during Gait in Patients with Acute Cerebral Infarction

1) 福井大学医学部附属病院リハビリテーション部 (〒910-1193 福井県吉田郡永平寺町松岡下合月23-3) Masafumi Kubota, PT, PhD, Chiaki Igarashi, PT, Hideaki Matsuo, PT, Hiroaki Naruse, PT, Seiichiro Shimada, PT: Division of Physical Therapy and Rehabilitation Medicine, University of Fukui Hospital  
2) 福井大学医学部第二内科 Osamu Yamamura, MD, PhD, Tomoko Kamisawa, MD: Second Department of Internal Medicine, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui  
3) 電気通信大学大学院知能機械工学専攻 Ryu Kato, PhD, Hiroshi Yokoi, PhD: Department of Mechanical Engineering and Intelligent System, The University of Electro-Communications  
4) 福井大学医学部器官制御学講座整形外科領域 Kenzo Uchida, MD, PhD, Hisatoshi Baba, MD, PhD: Department of Orthopaedics and Rehabilitation Medicine, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui  
# E-mail: kubotama@u-fukui.ac.jp (受付日 2013年6月12日/受理日 2013年11月13日)

表1 対象者の臨床所見

No	性別	年齢	麻痺側	病型分類	入院時 NIHSS	実験初日			
						発症後日数	下肢麻痺 G	CSS	歩行補助具・装具
1	女	60	右	アテローム血栓性脳梗塞	4	9	8	5	T杖
2	男	62	右	アテローム血栓性脳梗塞	3	7	8	8	T杖
3	男	62	右	アテローム血栓性脳梗塞	3	8	10	6	T杖
4	男	81	左	アテローム血栓性脳梗塞	4	12	5	2	T杖+背屈補助装具
5	男	67	右	アテローム血栓性脳梗塞	5	11	6	4	T杖+背屈補助装具
6	女	74	右	アテローム血栓性脳梗塞	10	13	5	3	T杖+背屈補助装具
7	女	67	右	心原性脳塞栓症	5	12	6	4	T杖+背屈補助装具
8	男	76	右	ラクナ梗塞	4	6	11	6	T杖

CSS: Composite Spasticity Score, NIHSS: National Institute of Health Stroke Scale, 下肢麻痺 G: 下肢 12段階麻痺グレード

まることが示されてきた<sup>6-9)</sup>。Francisら<sup>11)</sup>も同程度の関節運動であれば、随意運動と比較して電気刺激による運動において両側の体性感覚野や島の脳活動が高まると報告しており、電気刺激による末梢からの感覚入力が高まると報告<sup>12)</sup>されているが、脊髄の興奮性のみ高めるとの報告<sup>13)</sup>もあり未だ議論されているところである。また、歩行などのダイナミックな動作中のFESが脳卒中患者の脳活動に及ぼす影響に関してはこれまで報告がない。脳皮質神経活動の計測には陽電子放射断層撮影 (PET)、脳波 (EEG)、機能的磁気共鳴画像法 (fMRI)、脳磁界計測法 (MEG) などがあるが、歩行などの運動中の脳活動計測は困難である。一方、近赤外線分光法 (near-infrared spectroscopy: NIRS) は、神経活動にカップリングした脳血流変化に伴うヘモグロビン濃度変化の計測から脳の活動状態を推定することが可能であり、非侵襲的かつ歩行中にも測定可能とされている<sup>14)</sup>。

そこで、本研究の目的は、急性期脳梗塞患者に対して、FESの実施および終了直後において運動学的・運動力学的歩行パラメータに及ぼす効果をあきらかにすること (実験1)、さらにFES実施中の大脳皮質感覚運動野領域のヘモグロビン濃度に及ぼす影響をあきらかにすること (実験2) である。

## 対象および方法

### 1. 対象

初発脳梗塞を発症し、下記の基準を満たし、FESおよび各評価の実施に同意した8名を対象とした。本研究の対象基準は、1) 発症後14日以内であること、2) 小脳および前庭障害や著しい感覚障害がないこと、3) 足関節背屈の可動域が0度以上有していること、4) HDS-Rが22点以上でありコミュニケーションに問題が

ないこと、5) 理学療法士の介助なしで10 m以上歩行可能であること、6) 歩行に影響を与える整形外科的疾患などがなかったこととした。対象の8名はアテローム血栓性脳梗塞6名、心原性脳塞栓症1名、ラクナ梗塞1名であり、発症時のNational Institute of Health Stroke Scale (NIHSS)、実験時の下肢12段階麻痺グレード (下肢麻痺 G) およびComposite Spasticity Score (CSS) は表1に示す。本研究は福井大学医学部附属病院医薬品等臨床研究審査委員会の承認 (承認番号2012829) を得て実施しており、症例には十分インフォームドコンセントを行い、書面にて同意署名を受けた。

### 2. 実験方法

#### 1) 電気刺激

4チャンネル機能的電気刺激装置 (電気通信大学, YK-001) を用い、刺激用表面電極 (5×5 cm) は前脛骨筋および腓腹筋内側頭に貼りつけ、歩行周期中の電気刺激を制御した。歩行周期は検者が目視で確認し、遊脚期は前脛骨筋を、立脚中期から終期までは腓腹筋を手動スイッチにて刺激 (ramp up timeは0秒) した。電気刺激は高頻度パルス (Carrier波) を断続的に発振 (Burst波) させる双極矩形波とし、実質的な刺激量はパルス幅をパルス周期で割ったDuty比で決定した<sup>15)</sup>。本研究では、Carrier周波数2,000 Hz、Burst周波数を100 Hzと50 Hzを7対3の比、Duty比50%とした。刺激強度は電気刺激を痛みとして感じない最大強度とし、実験前に安静座位にて足関節運動が生じる程度の筋収縮が得られていることを確認した。

#### 実験1: 歩行解析 (図1A)

実験初日は、FES実施前後の歩行パターンの変化を三次元動作解析装置を用いて解析した。

歩行解析は大型床反力計 (AMTI社, OR6 series) 4枚、カメラ (Vicon, MX-T) 10台を同期したVICON

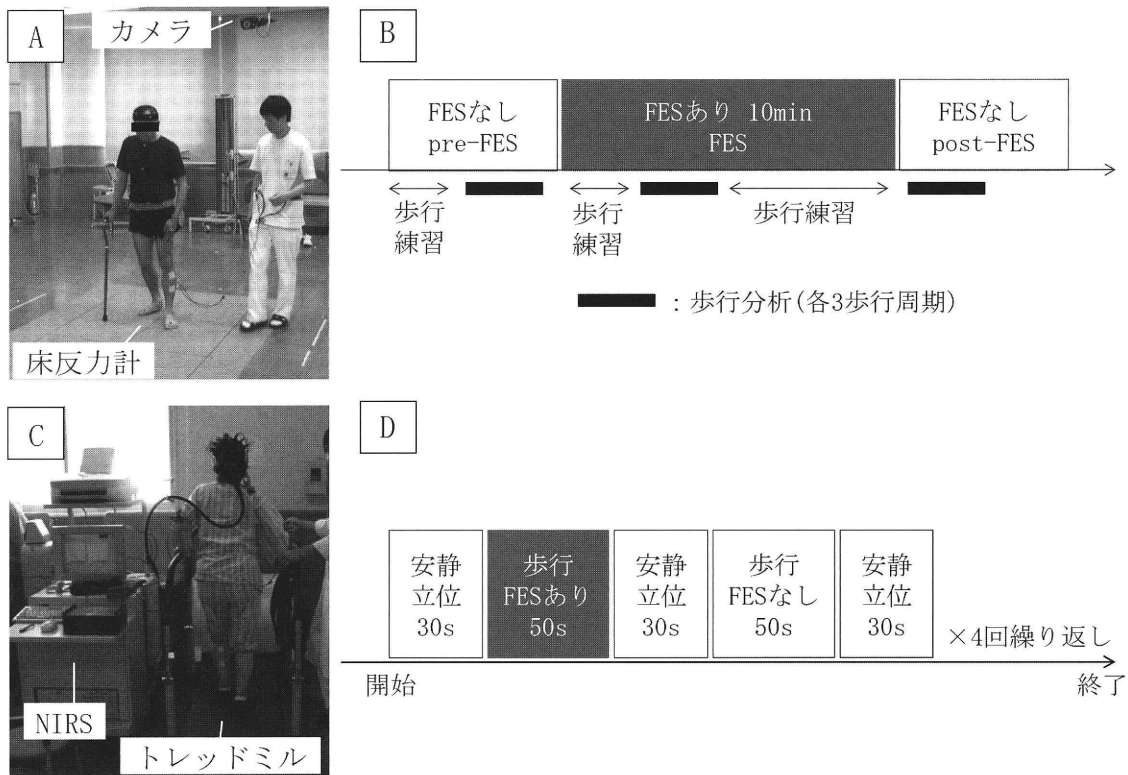


図1 実験風景およびプロトコル

歩行解析は10台のカメラと同期した4枚の床反力計上を被検者が歩行し、FES前とFES中および10分間のFunctional electrical Stimulation (FES)実施後の各歩行パターンを計測した(A, B)。大脳皮質感覚運動野ヘモグロビン濃度測定では、被検者はトレッドミル上を歩行し、FESありとFESなしでの歩行を各4回ずつ繰り返してNear-infrared spectroscopy (NIRS)を用いて測定した(C, D)。

MXを用いて評価した。床反力計のサンプリング周波数は1,000 Hz、カメラのサンプリング周波数は100 Hzとした。まずPlug-In-Gaitモデルにしたがい、直径15 mmの反射マーカを体表に貼りつけた。歩行路は8 mとし、歩行速度は自由歩行、必要な症例には歩行補助具や背屈補助装具(NAKAMURA BRACE社、プロフッター)を使用した。症例は、まずFESなしで歩行(pre-FES)、その後10分間FESありで歩行(FES)、最後に再びFESなしで歩行(post-FES)を行い、各歩行タスク中から3歩行周期を抽出した(図1B)。抽出した歩行は、1歩行周期で正規化した後に加算平均を行った。解析にはVicon Nexusを用い、得られた床反力データと反射マーカの三次元位置データから、時間距離因子として歩行速度、ケイデンス、ストライド長を算出し、股関節、膝関節、足関節の運動学的因子、運動力学的因子を算出した。運動学的因子と運動力学的因子では、歩行周期中のピーク値を抽出し、pre-FES、FES、post-FESの各歩行タスク間で比較した。

#### 実験2：大脳皮質感覚運動野ヘモグロビン濃度測定(図1C)

実験二日目(実験1の翌日)にはFESの有無による

大脳皮質ヘモグロビン濃度変化の違いを解析した。

ヘモグロビン濃度測定には発光プローブ10個と吸光プローブ8個から構成される24チャンネルの近赤外線分光法(near-infrared spectroscopy: NIRS)(日立メディコ、光トポグラフィシステムETG-100)を用い、サンプリング周波数は10 Hzとした。歩行はトレッドミル(ミナト医科学、オートランナーAR-100)上で行い、歩行速度は前日に行った歩行解析時の歩行速度で設定した。歩行中に安定した計測ができるように、頭皮にあてたオプトードは専用ホルダーで十分固定した。プローブ間の距離は3.0 cmに設定し、両側の前頭頭頂領域を12チャンネルずつ、それぞれ9×9 cmの範囲をプローブで覆った。また、国際10-20法におけるCzを基準点とし、Kuboyamaら<sup>16)</sup>やMiyaiら<sup>14)</sup>の方法を参照して、チャンネル5および15がそれぞれ両側の内側感覚運動皮質(medial sensorimotor cortices: 以下、mSMC)に該当するようプローブは設置した。タスクは、30秒間の安静立位の後に、50秒間のFESありとFESなしでの歩行タスクを4回ずつ交互に行い、各歩行タスク間には30秒間の安静立位を取り入れた(図1D)。また、測定中には頭位を可能な限り動かさないよう指示し、前方の壁に張りつけた点を常に注視してい

表2 時間距離因子

		平均値 ± 標準偏差			p 値		
		pre FES	FES	post FES	pre-FES vs. FES	pre-FES vs. post-FES	FES vs. post-FES
ケイデンス	Steps/min	44.1 ± 7.0	51.1 ± 7.9	52.7 ± 7.2	0.204	0.086	1.000
ストライド長	m	0.56 ± 0.10	0.61 ± 0.07	0.61 ± 0.13	0.406	0.302	1.000
歩行速度	m/sec	0.20 ± 0.04	0.26 ± 0.05	0.27 ± 0.07	0.042	0.030	1.000

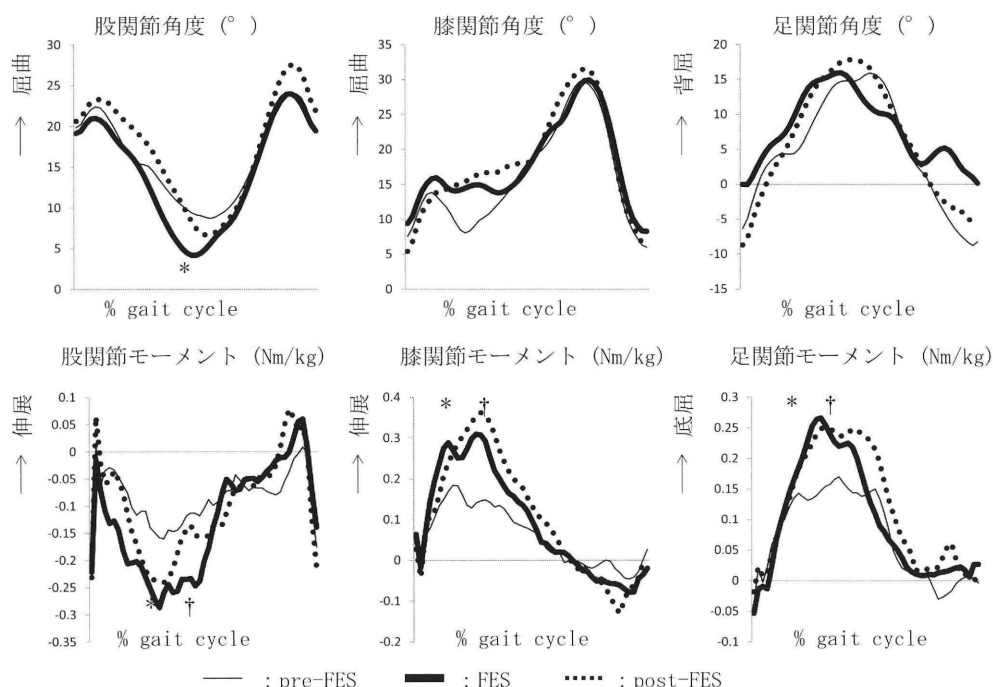


図2 関節角度および関節モーメント

pre-FES, FES, post-FESの各歩行タスクにおける1歩行周期中の股関節, 膝関節, 足関節の矢状面関節角度および矢状面関節モーメントを示す。

\*:  $p < 0.05$  (pre-FES vs. FES)

†:  $p < 0.05$  (pre-FES vs. post-FES)

た。大脳皮質ヘモグロビン濃度の評価として両側のmSMCにおける酸素化ヘモグロビン濃度 (oxy-Hb), 脱酸素化ヘモグロビン濃度 (deoxy-Hb) および総ヘモグロビン濃度 (total-Hb) を経時的に計測した。各歩行タスク直前の安静立位期間中のヘモグロビン濃度を基準として, 歩行タスク中のヘモグロビン濃度の変化量を抽出し, さらに4回の各歩行タスクをそれぞれ加算平均した。 $\Delta$  oxy-Hbはタスクに関連した脳活動量をもっともよく反映する<sup>14)17-19)</sup>と報告されており, 局所脳皮質の活動量の指標として $\Delta$  oxy-Hbを用いた。設定した歩行速度によって異なるが, 静止位から十分一定速度になるまでに最大20秒程度要するため, 歩行開始から20秒間を加速期, 歩行開始30秒後~50秒までの20秒間を定速期とし, 加速期および定速期でのoxy-Hbのピーク値をFESありとFESなしで比較した。

## 2) 統計解析

統計解析は, SPSS15.0J for Windowsを使用した。

pre-FES, FESおよびpost-FESにおける歩行パラメータの比較は一元配置分散分析を用いた後, post hocとしてBonferroni testを用いた。FESの有無における大脳皮質感覚運動野の $\Delta$  oxy-Hbの比較はMann-Whitney U testを用いた。有意水準は5%とした。

## 結 果

### 1. 歩行解析

ケイデンスとストライド長はタスク間で有意差がなく, 歩行速度はpre-FESと比較して有意にFESおよびpost-FESは増加していた。(表2)

立脚期では, pre-FESと比較してFESでは股関節屈曲モーメント, 膝関節伸展モーメントおよび足関節底屈モーメントが有意に上昇しており, 膝関節のDouble knee actionが消失しており, こういった歩行パターンはpost-FESにも同様にみられた(図2)。

一方, 立脚期の股関節伸展角度はpre-FESと比較してFESでは有意に増大していたが, post-FESでは有意

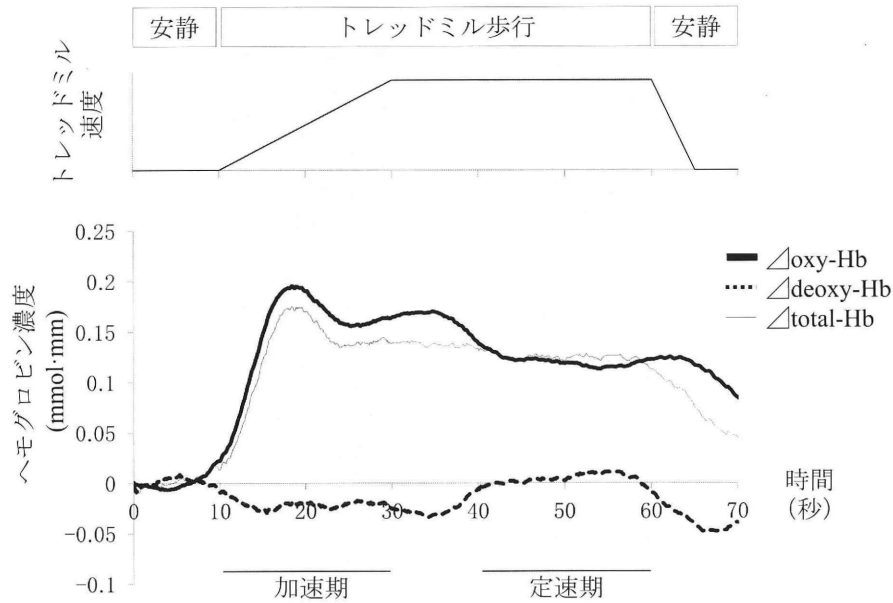


図3 トレッドミル速度と歩行時の各ヘモグロビン濃度変化 (代表例, FESなし)  
 酸素化ヘモグロビン濃度: oxy-Hb, 脱酸素化ヘモグロビン濃度: deoxy-Hb, 総ヘモグロビン濃度: total-Hb

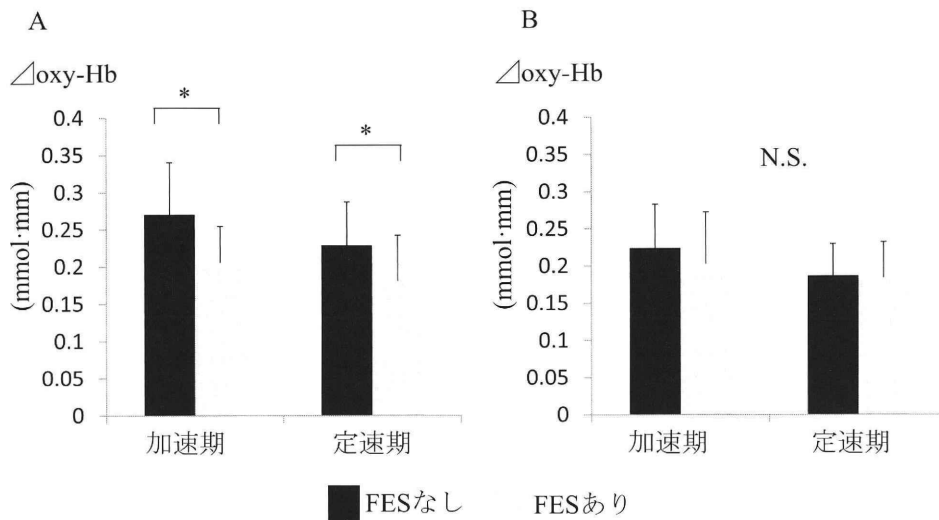


図4 歩行中 $\Delta$ oxy-Hbの最大値  
 非損傷側(A), 損傷側(B)における加速期と定速期の最大 $\Delta$ oxy-Hbの平均値を示す。  
 \*:  $p < 0.05$ , N.S.: 有意差なし

差は消失していた。また、遊脚期の足関節背屈角度は pre-FESと比較して FESでは背屈位であったが、post-FESでは、pre-FESと同様に底屈位であった。

## 2. 大脳皮質感覚運動野ヘモグロビン濃度

トレッドミル速度の変化(図3上段)に伴う $\Delta$ oxy-Hb,  $\Delta$ deoxy-Hbおよび $\Delta$ total-Hb波形の代表例を図3下段に示す。トレッドミルが加速する加速期には $\Delta$ oxy-Hbおよび $\Delta$ total-Hbが増加し, $\Delta$ deoxy-Hbが減少した。その後、トレッドミルが一定の速度で推移する定速期には $\Delta$ oxy-Hbおよび $\Delta$ total-Hbが軽度低下した値で変化は少なく、歩行終了とともに各ヘモグロビン

濃度は基線に収束するよう変化した。FESの有無にかかわらず同様な波形パターンを示していた。

非損傷側 mSMC の $\Delta$ oxy-Hbは、FESの実施により加速期・定速期とも有意に低下していた(図4A)。一方、損傷側 mSMC の $\Delta$ oxy-Hbは、FESの有無による有意差は認めなかった(図4B)。

## 考 察

本研究のもっとも重要な結果の1つは、腓腹筋と前脛骨筋へのFESによって麻痺側立脚期の支持性や立脚後期のroll-off機能、遊脚期のdrop footを即時的に高めるといった運動学的・運動力学的歩行パラメータの変化を

明らかにできたことである。

Kesar ら<sup>4)</sup> は、前脛骨筋のみでなく腓腹筋へも FES を実施することで toe off 時の足関節底屈角度が増加し、矢状面床反力が増加し、歩行速度が増加することを報告している。本研究では、FES を実施することで足関節底屈角度に変化はなかったが、立脚期足関節底屈モーメントは増加し、歩行速度も上昇した。健常人の歩行においても、下腿三頭筋による立脚後期の roll-off 機能は推進力を高め効率的な歩行をするためにも非常に重要な要素であるとされており<sup>20)</sup>、立脚後期の下腿三頭筋 FES の実施によりこの roll-off 機能を高めることができ、歩行速度の増加に関与したと考えられた。

FES の実施により立脚期の股関節伸展角度や股関節屈曲モーメントは有意に増加した。これは、立脚後期に roll-off が可能となり下肢を後方へ蹴りだせることにより股関節の伸展角度が増加し、結果として歩行速度の上昇に関与すると推察できた。さらに、FES 中に立脚期の股関節屈曲モーメントおよび膝関節伸展モーメントが増加したことは、FES により麻痺側への支持性を増加させながら歩行することができていたためと考えられた。一方、FES により Double knee action が消失していたが、これは pre-FES では立脚期に反張膝を呈する症例も、FES により膝関節屈曲位で立脚支持が可能となった症例が多かったためと考えられた。脳卒中片麻痺症例の歩行特性には、歩行速度の低下、麻痺側立脚期時間の減少、立脚初期の背屈角度の減少、立脚期の荷重量の減少、立脚後期から遊脚期にかけた推進力の低下、toe off の早期化などが挙げられる<sup>21)</sup> が、FES を実施することでこの歩行特性を修正した歩行パターンで歩行が可能となり、発症後早期から良好な歩行パターンで練習を行っていることは非常に重要であると考えられる。

本研究の2つ目に重要な結果は、FES を実施することで非損傷側の体側感覚運動野領域における  $\Delta$  oxy-Hb 上昇が減少し、過剰な脳活動を抑制している可能性が示されたことである。

一般的に、脳活動が随意運動を引き起こす際には運動野の神経活動が興奮するが、局所脳血流が脳活動に伴う酸素消費や代謝亢進を先駆的に上回るため該当する皮質の酸素消費を過剰に補うために  $\Delta$  oxy-Hb が上昇することが報告されている<sup>17)18)22)</sup>。NIRS はこの点に注目し、局所ヘモグロビン濃度の変化から間接的に脳活動の変化を推測している。歩行中の NIRS 計測では mSMC や補足運動野の  $\Delta$  oxy-Hb が上昇することが報告されており<sup>14)</sup>、一定速度での歩行を継続すると歩行制御中枢が脳幹や脊髄の CPG へシフトするため  $\Delta$  oxy-Hb は低下し、歩行開始時や歩行比が変化すると高値を示すとされている<sup>23)24)</sup>。本研究結果でも同様に、加速期に  $\Delta$  oxy-Hb は急激に上昇し、定速期には軽度低下した値で一定

となり、先行研究と同様な結果を示した。

脳卒中症例では歩行中の mSMC や補足運動野・運動前野の脳活動が非損傷側では損傷側と比し過剰に活動しており、さらに歩行中脳活動の左右非対称性の改善は歩行非対称性と相関関係を有していることが示されている<sup>25)</sup>。脳卒中発症後の非損傷側における過剰な脳活動が運動パフォーマンスの低下と関連していることは歩行以外のタスクでも報告<sup>26)</sup>されており、損傷側と非損傷側の脳活動対称性を再構築することが運動機能回復に重要であると考えられている。本研究の結果では、FES 中に非損傷側の  $\Delta$  oxy-Hb は有意に低下し、損傷側の  $\Delta$  oxy-Hb と同程度の増加量であった。これは、FES により麻痺側下肢の支持性が向上することで非損傷側の脳活動が過剰に生じる必要がなくなったため、脳活動が左右対称的に生じるようになったのか、または電気刺激の感覚入力による影響かはあきらかにできない。しかし、FES により即時的に歩行パターンを変化させるだけでなく、脳活動の対称性を改善させる可能性を示せたことは、FES の有効性を示すうえで重要である。

一方で、歩行のような全身運動は心拍数や血圧などの生理的パラメータに変化をもたらす。NIRS で計測する局所酸素化動態に影響を与える<sup>23)27)</sup>。このため、本研究の歩行中 mSMC 領域の  $\Delta$  oxy-Hb 増加は脳活動以外の変化も捉えていたかもしれない。しかし本研究では同一速度の歩行課題中に FES を施行することにより非損傷側のみ  $\Delta$  oxy-Hb 増加量が減少したことから、我々は生理的パラメータ上昇に伴う変化だけではなく、脳活動に伴う局所循環変化も反映していたと推察している。

本研究の3つ目に重要な結果は、FES 終了後にも立脚期の歩行パターンは維持されており、治療的効果の存在が示されたことである。

FES 治療の効果として装具的效果のみか、治療的効果 (carry over) があるかは未だ議論されているところである。Kottink ら<sup>28)</sup> や Pereira ら<sup>29)</sup> の review では、FES 後に電気刺激を止めても歩行速度が向上したことや足関節背屈の随意運動が拡大したなどの報告もあるが治療的効果の機序はあきらかでない結論づけられている。Rushton<sup>30)</sup> は、患者の随意運動の指令と FES が同期することで前角細胞のシナプス前とシナプス後興奮が同期し、結果として残存する錐体路を活性化させることが carry over effect の機序ではないかと提案しているが、未だ仮説の段階である。本研究結果では、FES 終了後にも麻痺側立脚期の股関節屈曲モーメント、膝関節伸展モーメントおよび足関節底屈モーメントが増加したまま維持されていたが、drop foot の改善は維持できなかった。立脚期では、FES 中に麻痺側への荷重を増加させた歩行パターン (発症前の歩行パターン) を再学習し、FES 終了後にも麻痺側下肢機能を最大限発揮して

学習した歩行パターンを維持させることができたが、遊脚期では重力に抗せる背屈筋力の増大は生じなかったのではないかと推察された。本研究は発症前の歩行イメージを有している可能性が高い発症早期の症例を対象としており、FESにより即時的に歩行パターンが改善し、さらに治療後も維持されるということは急性期リハビリテーションとして重要であり、今後は一定期間の介入効果を検証する必要がある。

本研究の限界点の1つは対象者が8名と少ないことである。FESの有効性は脳梗塞重症度など様々な要因に影響を受ける可能性が高いが、どういった症例に有効であるか、どういった症例では逆に有効性を得ることができないかは今後検証していく必要がある。2つ目に、本研究の電気刺激のタイミングは検者の手動スイッチで決定しており、客観的に毎回まったく同じタイミングで電気刺激を実施することは困難である。しかし足底圧センサーを使用した先行研究と比較しても大きな違いは生じておらず、手動スイッチでもFESの有効性を十分発揮できると推察している。3つ目に、床反力上の歩行とトレッドミル上の歩行では、厳密には環境が異なり歩行パターンや脳活動は異なる可能性がある。今後は歩行パターンの変化と脳活動の変化を同時に測定することが必要になるであろう。

## 結 語

急性期脳卒中患者において、腓腹筋と前脛骨筋へのFESによる即時的な歩行パターンの変化やmSMC領域の $\Delta$ oxy-Hb変化を測定した。FESを実施することにより、歩行速度の増加、麻痺側立脚期の支持性向上、麻痺側立脚後期のroll-off機能向上、遊脚期の足関節背屈角度増加といった歩行パターンが即時的に改善し、さらに非損傷側のmSMC領域の過剰な脳活動が抑制された可能性が示された。

**謝辞**：本研究の一部は総務省「戦略的情報通信研究開発推進事業（SCOPE）」の助成のもとに行われた。

## 文 献

- 1) Liberson WT, Holmquest HJ, *et al.*: Functional electrotherapy: stimulation of the peroneal nerve synchronized with the swing phase of the gait of hemiplegic patients. *Arch Phys Med Rehabil.* 1961; 42: 101-105.
- 2) Pomeroy VM, King L, *et al.*: Electrostimulation for promoting recovery of movement or functional ability after stroke. *Cochrane Database Syst Rev.* 2006; 19(2): CD003241.
- 3) Daly JJ, Roenigk K, *et al.*: A randomized controlled trial of functional neuromuscular stimulation in chronic stroke subjects. *Stroke.* 2006; 37(1): 172-178.
- 4) Kesar TM, Perumal R, *et al.*: Functional electrical stimulation of ankle plantarflexor and dorsiflexor muscles: effects on poststroke gait. *Stroke.* 2009; 40(12): 3821-3827.
- 5) Embrey DG, Holtz SL, *et al.*: Functional electrical stimulation to dorsiflexors and plantar flexors during gait to improve walking in adults with chronic hemiplegia. *Arch Phys Med Rehabil.* 2010; 91(5): 687-696.
- 6) Khaslavskaja S, Ladouceur M, *et al.*: Increase in tibialis anterior motor cortex excitability following repetitive electrical stimulation of the common peroneal nerve. *Exp Brain Res.* 2002; 145(3): 309-315.
- 7) Spiegel J, Tintera J, *et al.*: Functional MRI of human primary somatosensory and motor cortex during median nerve stimulation. *Clin Neurophysiol.* 1999; 110: 47-52.
- 8) Kampe K, Jones R, *et al.*: Frequency dependence of the functional MRI response after electrical median nerve stimulation. *Hum Brain Mapp.* 2000; 9: 106-114.
- 9) Kimberley TJ, Lewis SM, *et al.*: Electrical stimulation driving functional improvements and cortical changes in subjects with stroke. *Exp Brain Res.* 2004; 154(4): 450-460.
- 10) Niederhauser BD, Rosenbaum BP, *et al.*: A functional near-infrared spectroscopy study to detect activation of somatosensory cortex by peripheral nerve stimulation. *Neurocrit Care.* 2008; 9(1): 31-36.
- 11) Francis S, Lin X, *et al.*: fMRI analysis of active, passive and electrically stimulated ankle dorsiflexion. *Neuroimage.* 2009; 44(2): 469-479.
- 12) Khaslavskaja S, Sinkjaer T: Motor cortex excitability following repetitive electrical stimulation of the common peroneal nerve depends on the voluntary drive. *Exp Brain Res.* 2005; 162(4): 497-502.
- 13) Lagerquist O, Mang CS, *et al.*: Changes in spinal but not cortical excitability following combined electrical stimulation of the tibial nerve and voluntary plantarflexion. *Exp Brain Res.* 2012; 222(1-2): 41-53.
- 14) Miyai I, Tanabe CH, *et al.*: Cortical mapping of gait in human: a near-infrared spectroscopic topography study. *Neuroimage.* 2001; 14: 1186-1192.
- 15) 横井浩史, 山村 修, 他: 歩行運動補助のための反射系の電気刺激装置開発. *BRAIN and NERVE.* 2010; 62: 1227-1238.
- 16) Kuboyama N, Nabetani T, *et al.*: The Effect of Maximal Finger Tapping on Cerebral Activation. *J Physiol Anthropol Appl Human Sci.* 2004; 23: 105-110.
- 17) Hoshi Y, Kobayashi N, *et al.*: Interpretation of near-infrared spectroscopy signals: a study with a newly developed perfused rat brain model. *J Appl Physiol.* 2001; 90: 1657-1662.
- 18) Strangman G, Culver JP, *et al.*: A quantitative comparison of simultaneous BOLD fMRI and NIRS recordings during functional brain activation. *NeuroImage.* 2002; 17: 719-731.
- 19) Miyai I, Yagura H, *et al.*: Premotor cortex is involved in restoration of gait in stroke. *Ann Neurol.* 2002; 52: 188-194.
- 20) Neptune RR, Kautz SA, *et al.*: Contributions of the individual ankle plantar flexors to support, forward progression and swing initiation during walking. *J Biomech.* 2001; 34(11): 1387-1398.
- 21) Bensoussan L, Mesure S, *et al.*: Kinematic and kinetic asymmetries in hemiplegic patients' gait initiation patterns. *J Rehabil Med.* 2006; 38(5): 287-294.
- 22) Wolf M, Wolf U, *et al.*: Different time evolution of oxyhemoglobin and deoxyhemoglobin concentration changes in the visual and motor cortices during functional stimulation: a near-infrared spectroscopy study. *NeuroImage.* 2002; 16: 704-712.



- 23) Suzuki M, Miyai I, *et al.*: Prefrontal and premotor cortices are involved in adapting walking and running speed on the treadmill: an optical imaging study. *NeuroImage*. 2004; 23: 1020-1026.
- 24) 久保田雅史, 松尾英明, 他: 歩行比の違いが脳活動に及ぼす影響—近赤外線分光法 (NIRS) を用いた検討—. 国立大学法人リハビリテーションコ・メディカル学術大会誌. 2010; 31: 38-41.
- 25) Miyai I, Yagura H, *et al.*: Longitudinal optical imaging study for locomotor recovery after stroke. *Stroke*. 2003; 34(12): 2866-2870.
- 26) Takeda K, Gomi Y, *et al.*: Shift of motor activation areas during recovery from hemiparesis after cerebral infarction: a longitudinal study with near-infrared spectroscopy. *Neurosci Res*. 2007; 59(2): 136-144.
- 27) Jaszewski G, Strangman G, *et al.*: Differences in the hemodynamic response to event-related motor and visual paradigms as measured by near-infrared spectroscopy. *Neuroimage*. 2003; 20(1): 479-488.
- 28) Kottink AI, Oostendorp LJ, *et al.*: The orthotic effect of functional electrical stimulation on the improvement of walking in stroke patients with a dropped foot: a systematic review. *Artif Organs*. 2004; 28(6): 577-586.
- 29) Pereira S, Mehta S, *et al.*: Functional electrical stimulation for improving gait in persons with chronic stroke. *Top Stroke Rehabil*. 2012; 19(6): 491-498.
- 30) Rushton DN: Functional electrical stimulation and rehabilitation -an hypothesis. *Med Eng Phys*. 2003; 25(1): 75-78.

### 〈Abstract〉

#### Immediate Effects of Functional Electrical Stimulation on Kinematic and Kinetic Variables and Oxygenation in Medial Sensorimotor Cortices during Gait in Patients with Acute Cerebral Infarction

Masafumi KUBOTA, PT, PhD, Chiaki IGARASHI, PT, Hideaki MATSUO, PT, Hiroaki NARUSE, PT, Seiichiro SHIMADA, PT

*Division of Physical Therapy and Rehabilitation Medicine, University of Fukui Hospital*

Osamu YAMAMURA, MD, PhD, Tomoko KAMISAWA, MD

*Second Department of Internal Medicine, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui*

Ryu KATO, PhD, Hiroshi YOKOI, PhD

*Department of Mechanical Engineering and Intelligent System, The University of Electro-Communications*

Kenzo UCHIDA, MD, PhD, Hisatoshi BABA, MD, PhD

*Department of Orthopaedics and Rehabilitation Medicine, Faculty of Medical Sciences, University of Fukui*

**Purpose:** The aim of this study was to determine the immediate effects of functional electrical stimulation (FES) on kinematic and kinetic gait variables and oxygenation in medial sensorimotor cortices (mSMC).

**Methods:** We performed gait analysis using Vicon motion capture system and brain oxygenation in mSMC using near-infrared spectroscopy (NIRS) in eight subjects with acute cerebral infarction. FES was performed during walking on the tibialis anterior muscles and gastrocnemius of the paretic limb during the swing and terminal stance phases, respectively.

**Results:** Gait velocity, paretic hip flexion, knee extension, and ankle plantar flexion moments in the stance phase significantly increased when FES was performed during walking compared with those with walking before FES. Moreover, these improvements of gait quality were carried over after performing FES. Oxygenated hemoglobin levels in unaffected mSMC were significantly lower during walking with FES than that during walking without FES.

**Conclusion:** FES can improve weight shifting to the paretic limb during the stance phase and improve propulsion as a roll-off function in the late stance. Furthermore, FES may inhibit cortical excitability in unaffected mSMC.