

Original Article

脳卒中片麻痺患者の体幹機能と皮質網様体線維の関係 ～Probabilistic tractography を用いた解析～

久保田勝徳,^{1,2} 玉利 誠,^{3,4} 早川龍之介,¹ 脇坂成重,^{1,2} 遠藤正英,^{1,2} 丸山仁司^{3,4}

¹ 桜十字福岡病院

² 桜十字先端リハビリテーションセンター

³ 福岡国際医療福祉大学

⁴ 国際医療福祉大学大学院

要旨

Kubota K, Tamari M, Hayakawa R, Wakisaka N, Endo M, Maruyama H. Relationship between trunk function and corticoreticular pathway in stroke hemiplegic patients: analysis using probabilistic tractography. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2019; 10: 96–102.

【目的】脳卒中片麻痺患者の皮質網様体脊髄線維 (corticoreticular pathway : CRP) をProbabilistic tractography にて描出し, CRP の損傷程度と体幹機能との関係について明らかにすることを目的とした。

【方法】回復期脳卒中片麻痺患者 17 名の CRP を Probabilistic tractography にて描出し, CRP の損傷なし群と損傷あり群の Trunk Control Test (TCT), 臨床的体幹機能検査 (Functional Assessment for Control of Trunk : FACT) を比較した。

【結果】CRP の損傷なし群と損傷あり群において, TCT および FACT の得点のすべてにおいて有意差は認められなかった。

【結論】大脑半球において皮質脊髄線維の損傷が認められない場合, TCT および FACT は CRP の損傷に伴う運動効率や抗重力伸展活動の低下といった体幹機能の質的側面を反映しない可能性が考えられた。

キーワード : Probabilistic tractography, 皮質網様体線維, 体幹機能, 脳卒中片麻痺患者, 回復期

はじめに

一般に, 脳卒中片麻痺患者の多くは体幹機能が低下することが知られている [1]. 体幹機能は予測的姿勢制御 (Anticipatory postural adjustments : APAs) やバラ

ンス能力のほか, 歩行能力や日常生活動作 (activities of daily living : ADL) 能力と関係することが知られていることから [2], 近年では体幹機能についての評価も重要視されている. 現在, 臨床場面で頻用されている体幹機能の検査には Trunk Control Test (TCT) [3] と臨床的体幹機能検査 (Functional Assessment for Control of Trunk : FACT) [4] があり, 脳卒中片麻痺患者の入院時の TCT 得点が退院時の Functional Independence Measure (FIM) 運動項目得点や歩行レベルと関係することや [5, 6], ADL 自立群は介助群よりも FACT 得点が有意に高いことなどが報告されている [7]. 体幹筋を支配する主たる白質線維には前皮質脊髄線維と皮質網様体線維 (corticoreticular pathway : CRP) [8] があるが, 前皮質脊髄線維は皮質脊髄線維 (corticospinal tract : CST) の 5~10% を占める小さな神経束であることから, 体幹筋の多くは CRP によって支配されると考えられている. 近年では核磁気共鳴画像 (Magnetic Resonance Imaging : MRI) を用いた CRP の拡散テンソルトラクトグラフィー (Diffusion Tensor Tractography : DTT) により [9, 10], 脳卒中片麻痺患者の CRP の損傷程度と上下肢の近位筋の筋力低下が関係することや [11], CST と CRP の両方を損傷した患者は Motricity Index や modified Brunnstrom classification (MBC), Functional Ambulation Categories (FAC) が低値を示すことなどが報告されているが [12], CRP の損傷程度と体幹機能との関係については知られていない.

そこで本研究の目的は, 脳卒中片麻痺患者の CRP を DTT にて描出し, CRP の損傷程度と TCT および FACT との関係について明らかにすることとした.

方法**1. 対象**

対象は, 当院回復期リハビリテーション病棟に入院した初発脳卒中片麻痺患者のうち, MRI撮像の禁忌事項を有さない者 17 名 (年齢 59.8 ± 16.2 歳, 男性 12 名, 女性 5 名) とした. また, 対象は全例右利きで, 既往に脳血管障害を有する者や, 著明な高次脳機能障害や認知機能障害, 心大血管疾患, 骨関節疾患有する者は除外した.

著者連絡先: 久保田勝徳

桜十字福岡病院

〒 810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通 3-5-11

E-mail : k.katsunr01@gmail.com

2019 年 10 月 8 日受理

利益相反: 本研究において一切の利益相反や研究資金の提供はありません.

また、超音波画像診断装置を用いた筋厚測定の検者内信頼性の検証については、運動器疾患有さず測定時に腰痛がない健常男性12名（年齢25.5±3.6歳）を対象とした。

本研究は、当院倫理委員会（2016112801）および所属大学倫理委員会（16-Ifh-075）の承認を得て実施した。

2. 基本属性と体幹機能の評価

対象の基本属性として、年齢、性別、発症から入院までの日数、発症からMRI撮像までの日数をカルテより調査した（表1）。また、体幹機能評価として、入院時にTCTとFACTを測定した。さらに、超音波画像診断装置（日立メディコ社製、Mylab25、リニアプローブ3MHz）を用い、両側の外腹斜筋（external abdominis oblique: EO）、内腹斜筋（internal abdominis oblique: IO）、腹横筋（transverses abdominis: TrA）の筋厚をBモードの短軸走査にて測定した。筋厚の測定肢位は背臥位とし、安静呼気終末の腹部超音波画像を静止画にて記録した（図1）。測定部位は腋窓線と臍高の交点とし[13]、1名の検者が各筋をそれぞれ3回測定し、平均値を算出した後、非麻痺側に対する麻痺側の筋厚比を算出した。

oblique: IO）、腹横筋（transverses abdominis: TrA）の筋厚をBモードの短軸走査にて測定した。筋厚の測定肢位は背臥位とし、安静呼気終末の腹部超音波画像を静止画にて記録した（図1）。測定部位は腋窓線と臍高の交点とし[13]、1名の検者が各筋をそれぞれ3回測定し、平均値を算出した後、非麻痺側に対する麻痺側の筋厚比を算出した。

3. 脳MRIの撮像条件

MRIの撮像にはGE Healthcare Japan社製のBrivo MR355 1.5 Teslaを用い、拡散テンソル画像（diffusion tensor imaging: DTI）を対象者の入院時に撮像した。DTIの撮像条件は、Single shot EPI, matrix=96×96, field of view (FOV)=280×280 mm², repetition time (TR)=14,285.0 ms, echo time (TE)=65.7 ms, flip angle=90°, ASSET=2.00 Ph, 加算回数=1, slice thickness=3.0 mm,

表1. 対象者特性

年齢	性別	発症から		疾患名 の日数（日）	障害部位	障害名	麻痺の程度 B.R.S	感覚障害の 有無	ADLの 移動手段
		入院までの 日数（日）	MRI撮像まで の日数（日）						
No.1	30代前半	女	24	28	出血	被殻	左片麻痺	2-2-2	有 車いす
No.2	50代前半	女	17	20	梗塞	延髓	左片麻痺	3-2-3	有 車いす
No.3	60代後半	女	13	15	梗塞	内包後脚	右片麻痺	6-6-6	無 歩行
No.4	40代前半	男	21	22	出血	被殻	左片麻痺	2-2-2	有 車いす
No.5	60代後半	男	14	17	出血	側頭葉～頭頂葉	左片麻痺	6-6-6	有 歩行
No.6	70代後半	男	18	19	梗塞	放線冠	右片麻痺	5-5-6	有 歩行
No.7	60代前半	男	30	43	出血	視床	左片麻痺	2-2-2	有 車いす
No.8	30代後半	男	27	30	出血	被殻	左片麻痺	5-5-5	有 歩行
No.9	60代前半	男	30	49	梗塞	中大脳動脈	右片麻痺	6-5-6	無 歩行
No.10	80代後半	男	21	35	梗塞	中大脳動脈	右片麻痺	5-5-5	有 歩行
No.11	30代後半	男	25	29	出血	被殻	左片麻痺	6-6-6	無 歩行
No.12	50代後半	男	25	31	出血	被殻	左片麻痺	2-2-3	有 車いす
No.13	40代前半	男	30	37	出血	被殻	右片麻痺	3-2-4	無 車いす
No.14	60代後半	女	34	38	梗塞	内包後脚～放線冠	左片麻痺	5-5-5	無 車いす
No.15	50代前半	男	14	20	出血	視床	左片麻痺	6-6-6	有 歩行
No.16	80代前半	男	11	17	梗塞	中大脳動脈	右片麻痺	6-5-6	無 車いす
No.17	80代前半	女	13	15	出血	前頭葉～頭頂葉	左片麻痺	6-5-6	有 歩行

B.R.S: Brunnstrom recovery stage (上肢-手指-下肢)。

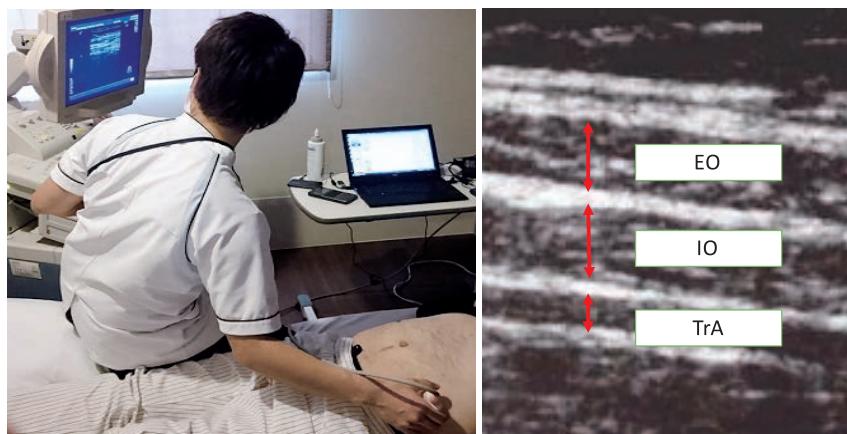


図1. 超音波画像診断装置を用いた筋厚測定の様子と体幹筋群の横断画像
外腹斜筋（external abdominis oblique: EO）
内腹斜筋（internal abdominis oblique: IO）
腹横筋（transverses abdominis: TrA）

スライス数=60枚, b値=1,000 s/mm², 傾斜磁場(motion probing gradient: MPG)=32軸とした。

4. 皮質網様体線維と皮質脊髄線維の画像解析

画像解析にはFunctional Magnetic Resonance Imaging of Brain (FMRIB) Software Library (FSL) [14]を用い, 確率論的トラクトグラフィー (Probabilistic tractography) にて両側半球のCRPとCSTを描出した。まず, 撮像された画像の渦電流補正を行った後, マルコフ連鎖モンテカルロ法を用いて拡散パラメータ分布をボクセルごとに算出した (拡散パラメータ画像)。次に, CRPとCSTの関心領域 (Region of Interest: ROI) をフリー手で設定し, ROI画像を作成した。CRPのROIは延髄網様体, 中脳被蓋, 運動前野とし [10], CSTのROIは延髄腹側, 中脳大脳脚, 一次運動野とした [15]。最後に, 拡散パラメータ画像とROI画像を合成し, CRPとCSTのProbabilistic tractographyを行った。

その後, Probabilistic tractographyにて描出された損傷側半球のCRPとCSTの接続性を目視にて評価し, ROIから逸脱する不要な軌跡を任意の閾値にて削除し, 皮質下まで描出されているものを「損傷なし」, 皮質下まで描出されていないものを「損傷あり」と定義 [12] し, [CRP損傷なし・CST損傷なし] [CRP損傷なし・CST損傷あり] [CRP損傷あり・CST損傷なし] [CRP損傷あり・CST損傷あり] の4群に分類した。また, 接続性の評価は3年以上の脳画像解析の経験を有する者2名で行った。

5. 統計学的解析

統計学的解析には統計ソフトSPSS ver.14を用い, CRP損傷なし群と損傷あり群において, 年齢, 発症から入院までの日数, 発症からMRI撮像までの日数, TCTの総得点, FACTの総得点, EO筋厚比, IO筋厚比, TrA筋厚比をMann-WhitneyのU検定にて比較し, 性別をFisherの正確確率検定にて比較した。TCTの各項目の得点, FACTの各項目の得点については Kruskal-Wallis検定にて比較した。また, 体幹筋筋厚比における測定信頼性は, 対象者のEO筋厚比, IO筋厚比, TrA筋厚比の検者内信頼性をIntraclass Correlation Coefficient (ICC) (1, 3)にて算出した。なお, 有意水準は5%とした。

結果

対象者特性はすべての項目において有意差を認めな

かった (表2)。

Probabilistic tractographyの結果, 非損傷半球のCRPとCSTはすべての対象者において描出されたが, 損傷側半球では [CRP損傷なし・CST損傷なし] 群が7名 (41.2%), [CRP損傷なし・CST損傷あり] 群が0名 (0.0%), [CRP損傷あり・CST損傷なし] 群が9名 (52.9%), [CRP損傷あり・CST損傷あり] 群が1名 (5.9%) であった (表3, 図2)。そのうち, [CRP損傷なし・CST損傷なし] 群と [CRP損傷あり・CST損傷なし] 群を抽出し, 両群間のTCTの総得点および各項目の得点, さらに, FACTの総得点および各項目の得点を比較した結果, すべてにおいて有意差は認められなかった (表4, 5)。また, 筋厚比の検者内信頼性は, EO筋厚比でICC=0.99 (95%信頼区間; 0.98-0.99), IO筋厚比でICC=0.62 (95%信頼区間; 0.25-0.88), TrA筋厚比でICC=0.80 (95%信頼区間; 0.47-0.94) であった。[CRP損傷なし・CST損傷なし] 群と [CRP損傷あり・CST損傷なし] 群のEO筋厚比およびIO筋厚比, TrA筋厚比はいずれも有意差は認められなかった (表6)。

考察

CRPは大脳皮質の運動前野に起始し, 放線冠, 内包後脚の前方部, 中脳被蓋を通過して橋や延髄の網様体に至り, 網様体脊髄線維を修飾して体幹筋を両側性に支配していることから [16], CRPの損傷によって体幹機能が低下すると考えられている。また, 体幹筋は主運動に先行して生じるAPAsや抗重力伸展作用に寄与することが知られていることから [17], 体幹機能の低下により麻痺側や非麻痺側上下肢の代償的な異常筋緊張や運動効率の低下を呈するとされている。しかしながら, CSTに損傷を認めない患者を対象とした本研究においては, CRPの損傷なし群と損傷あり群において, TCT・FACTともに有意差は認められなかった。

Jangらは [18], 決定論的トラクトグラフィー (Deterministic tractography) を用いて慢性期脳卒中患者のCRPを分析し, 非損傷側半球のCRPの体積値が歩行能力に影響する可能性を示唆していることから, 本研究においても回復過程における非損傷側半球のCRPの機能的代償がTCTやFACTの得点に影響した可能性も考えられる。しかしながら, Deterministic tractographyは神経線維が隣接・交叉・分岐する部位では追跡が困難であり, CRPは上縦束や内包近傍の

表2. 対象者特性の比較結果

	損傷なし群 (n=7)	損傷あり群 (n=9)	p-Value
年齢(歳)	66.0±18.7	55.0±14.2	0.204
性別			n.s
男性	3人 (42.9%)	8人 (88.9%)	
女性	4人 (57.1%)	1人 (11.1%)	0.106
発症から入院までの日数(日)	18.4±6.9	24.1±7.2	0.790
発症からMRI撮像までの日数(日)	25.6±12.7	29.3±9.2	0.265

Mean±SD, n.s: not significant.

表3. 対象者の損傷半球における皮質網様体線維と皮質脊髄線維の損傷の分類結果

	CRP	CST	損傷分類
No.1	損傷なし	損傷なし	A
No.2	損傷なし	損傷なし	A
No.3	損傷なし	損傷なし	A
No.4	損傷あり	損傷あり	C
No.5	損傷あり	損傷なし	B
No.6	損傷あり	損傷なし	B
No.7	損傷あり	損傷なし	B
No.8	損傷あり	損傷なし	B
No.9	損傷なし	損傷なし	A
No.10	損傷なし	損傷なし	A
No.11	損傷あり	損傷なし	B
No.12	損傷あり	損傷なし	B
No.13	損傷あり	損傷なし	B
No.14	損傷あり	損傷なし	B
No.15	損傷あり	損傷なし	B
No.16	損傷なし	損傷なし	A
No.17	損傷なし	損傷なし	A

CRP : corticoreticular pathway, CST : corticospinal tract

A : CRP 損傷なし・CST 損傷なし群

B : CRP 損傷あり・CST 損傷なし群

C : CRP 損傷あり・CST 損傷あり群

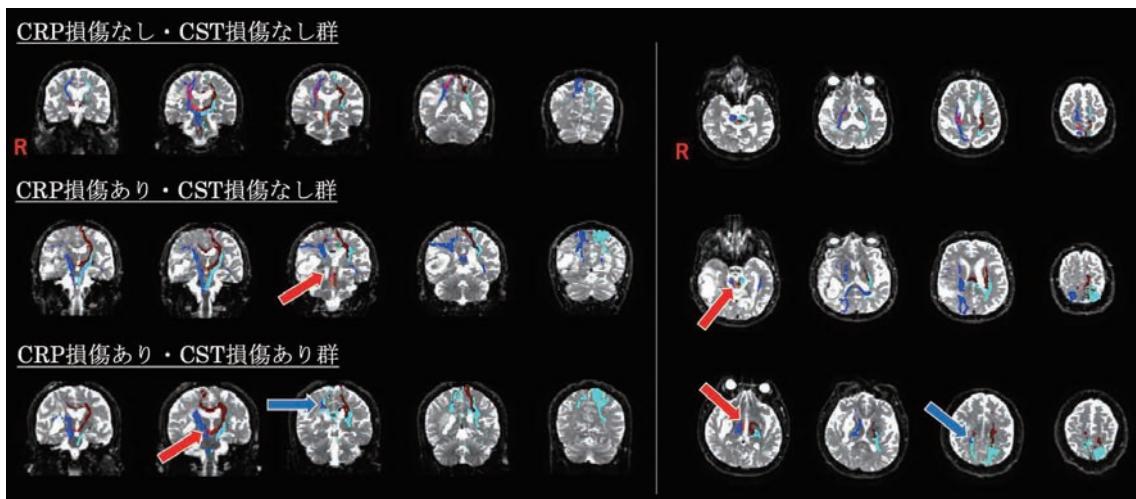


図2. 皮質網様体線維と皮質脊髄線維の損傷程度による分類の代表例（前額断 / 水平断）

Probabilistic tractography を用いて損傷側の皮質網様体線維（赤）、損傷側の皮質脊髄線維（青）、非損傷側の皮質網様体線維（赤茶）、非損傷側の皮質脊髄線維（水色）をそれぞれ描出した（赤矢印：損傷側の皮質網様体線維の途絶、青矢印：損傷側の皮質脊髄線維の途絶を示している）。

CRP 損傷なし・CST 損傷なし群：両方とも皮質下まで描出されている群の代表例を示す。CRP 損傷あり・CST 損傷なし群：CRP は皮質下まで描出されていないが、CST は皮質下まで描出されている群の代表例を示す。CRP 損傷あり・CST 損傷あり群：両方とも皮質下まで描出されていない群の代表例を示す。

CRP : corticoreticular pathway, CST : corticospinal tract.

神経線維と隣接・交叉する線維であることから、Jang らの報告は CRP の一部分を描出できていない可能性が考えられる。そのため、本研究では Deterministic tractography よりも神経線維の追跡に優れる Probabilistic

tractography を用いて CRP を描出している。Probabilistic tractography は神経線維が隣接・交叉・分岐する部位でも神経線維の走行を確率的に推定して追跡することができるから、Deterministic tractography では神

表4. TCTの総得点および各項目の得点の比較結果

		損傷なし群 (n=7)	損傷あり群 (n=9)	p-Value	
麻痺側への寝返り	(点)	21.3±6.3	16.7±12.5	0.560	n.s
非麻痺側への寝返り	(点)	21.3±6.3	20.0±6.5	0.844	n.s
仰臥位から座位への起き上がり	(点)	19.4±6.9	16.7±12.5	0.854	n.s
端座位でのバランス	(点)	23.1±4.9	20.7±6.5	0.398	n.s
総得点	(点)	85.1±21.8	74.7±38.0	0.855	n.s

Mean±SD, n.s : not significant.

表5. FACTの総得点および各項目の得点の比較結果

		損傷なし群 (n=7)	損傷あり群 (n=9)	p-Value	
静的座位保持能力 (上肢支持あり)	(点)	1.0±0.0	1.0±0.0	1.000	n.s
静的座位保持能力 (上肢支持なし)	(点)	1.0±0.0	0.7±0.5	0.101	n.s
片側の手で反対側の足首を握って戻る	(点)	0.9±0.4	0.7±0.5	0.398	n.s
両側臀部を持ち上げ左右に移動する	(点)	1.7±0.8	1.3±1.0	0.398	n.s
片側臀部を座面から離す	(点)	1.2±0.8	1.3±1.0	0.723	n.s
片側大腿を座面から離す	(点)	1.9±0.4	1.3±1.0	0.295	n.s
両側大腿を座面から離す	(点)	1.4±1.0	1.3±1.0	0.844	n.s
前後へのお尻歩き	(点)	1.3±1.6	2.0±1.5	0.356	n.s
臀部を接地した状態での振り向き	(点)	1.7±1.6	2.0±1.5	0.705	n.s
片側上肢の最大拳上	(点)	2.6±1.1	2.3±1.3	0.696	n.s
総得点	(点)	14.7±5.9	14.0±9.0	0.861	n.s

Mean±SD, n.s : not significant.

表6. 体幹筋厚比の比較結果

	損傷なし群 (n=7)	損傷あり群 (n=9)	p-Value	
外腹斜筋筋厚比	0.87±0.17	0.93±0.10	0.337	n.s
内腹斜筋筋厚比	0.93±0.19	1.01±0.21	0.427	n.s
腹横筋筋厚比	0.87±0.17	0.98±0.11	0.119	n.s

Mean±SD, n.s : not significant.

経追跡が困難な部分と思われるCRPも描出されている可能性が考えられる。一方で、本研究ではCRPが皮質下まで描出されるか否かといった損傷の有無によって対象者を2群間に分けたことから、描出されたCRPには発症直後から生じている神経線維の変性やリハビリテーションによる機能的代償といった回復期初期における損傷の程度を詳細に反映していない可能性が考えられる。これらのことから、両側性に支配される体幹機能について、描出されたCRPの程度をより詳細に評価し、損傷側・非損傷側半球のCRPとTCT・FACTとの関係を検討していく必要があると思われる。

その一方で、TCTは各検査項目について「自力ではできない」を0点、「ベッド柵などの安定したものを引っ張るが自力ができる」を12点、「正常にできる」を25点として採点し、また、FACTは「自力ではで

きない」を0点、「正常にできる」を2点もしくは3点として採点しており、いずれも複数の運動課題の実施状況を順序尺度にて評価するものである。そのため、代償運動の有無を問わないTCTとFACTは、CRPの損傷による筋緊張異常や運動効率の低下といった影響を詳細に反映しなかった可能性が考えられる。

次に、本研究ではEO・IO・TrAの筋厚比の検者内信頼性[19]が高値を示したことから、筋厚比の信頼性は高いと考えられる。しかしながら、本研究ではCRPの損傷なし群と損傷あり群において、EO・IO・TrAの筋厚比に有意差は認められなかった。体幹筋群は腹直筋鞘や胸腰筋膜に付着するため、一側性の脳損傷であっても両側の筋活動に影響することが報告されているが、その一方で、体幹筋の神経支配は両側性であるため、一側性の脳損傷による影響は少ない可能性

も指摘されており [20]、脳損傷と体幹筋の関係について統一した見解は示されていない。しかしながら、脳卒中片麻痺患者の体幹筋は急性期から慢性期へ移行するとともに萎縮することが報告されていることから [21]、筋厚には脳損傷後の不活動や活動量の低下に伴う廃用といった二次的な要因が混在している可能性も考えられる。これらのことから、CRPと体幹筋筋厚比の関係については、今後も両側体幹の筋厚を縦断的に測定しつつ、脳損傷後の日数や活動量を踏まえて検討する必要があると考える。

本研究の限界として、本研究で用いた Probabilistic tractography はベイズ定理に基づいて神経線維の方向を確率的に推定しており、また、ROI をフリーハンドで設定していることからも、描出された軌跡が実際の神経線維を完全に捕捉していない可能性がある。さらに、本研究は横断的研究であり、回復過程による CRP の機能的代償が体幹機能に与える影響について言及することは困難である。そのため、今後も画像解析技術の発展に応じて CRP と体幹機能との関係について、症例数を増やすとともに縦断的な調査が必要である。

謝辞

本研究において多大なるご指導を賜りました国際医療福祉大学大学院の丸山仁司教授と玉利誠准教授に厚くお礼申し上げます。また、データの収集にご協力頂いた桜十字福岡病院リハビリテーション部および放射線科のスタッフ各位に感謝申し上げます。

文献

1. Sandin KJ, Smith BS. The measure of balance in sitting in stroke rehabilitation prognosis. *Stroke* 1990; 21: 82–6.
2. Van CT, Saeys W, Hallemand A, Vereeck L, De HW, Van DWP, et al. Effectiveness of additional trunk exercises on gait performance: study protocol for a randomized controlled trial. *Trials* 2017; 18: 249.
3. Collin C, Wade D. Assessing motor impairment after stroke: a pilot reliability study. *J Neurol* 1990; 53: 576–9.
4. Okuda H, Hagino Y, Kozawa Y, Harada S, Edure A, Uchiyama Y. Development and reliability of Functional Assessment for Control of the Trunk (FACT). *Rigakuryoho Kagaku* 2006; 21: 357–62. Japanese.
5. Franchignoni FP, Tesio L, Ricupero C, Martino MT. Trunk control test as an early predictor of stroke rehabilitation outcome. *Stroke* 1997; 28: 1382–5.
6. Masiero S, Avesani R, Armani M, Verena P, Ermani M. Predictive factors for ambulation in stroke patients in the rehabilitation setting: a multivariate analysis. *Clin Neurol Neurosurg* 2007; 109: 763–9.
7. Sato A, Okuda Y, Fujita T, Kimura N, Hoshina N, Kato S, et al. Cognitive and physical functions related to the level of supervision and dependence in the toileting of stroke patients. *Phys Ther Res* 2016; 19: 32–8.
8. Matsuyama K, Mori F, Nakajima K, Drew T, Aoki M, Mori S. Locomotor role of the corticoreticular-reticulospinal-spinal interneuronal system. *Prog Brain Res* 2004; 143: 239–49.
9. Behrens TE, Berg HJ, Jbabdi S, Rushworth MF, Woolrich MW. Probabilistic diffusion tractography with multiple fibre orientations: what can we gain? *Neuroimage* 2007; 34: 144–55.
10. Yeo SS, Chang MC, Kwon YH, Jung YJ, Jang SH. Corticoreticular pathway in the human brain: diffusion tensor tractography study. *Neurosci Lett* 2012; 508: 9–12.
11. Jang SH, Yeo SS. Recovery of an injured corticoreticular pathway via transcallosal fibers in a patient with intracerebral hemorrhage. *BMC Neurol* 2014; 14: 108.
12. Yoo JS, Choi BY, Chang CH, Jung YJ, Kim SH, Jang SH. Characteristics of injury of the corticospinal tract and corticoreticular pathway in hemiparetic patients with putaminal hemorrhage. *BMC Neurol* 2014; 14: 121.
13. Ng JK, Kippers V, Richardson CA. Muscle fibre orientation of abdominal muscles and suggested surface EMG electrode positions. *Electromyogr Clin Neurophysiol* 1998; 38: 51–8.
14. FMRIB Software Library v6.0. Available from: <https://fsl.fmrib.ox.ac.uk/fsl/fslwiki> (cited 2017 February 1).
15. Jang SH. Somatotopic arrangement and location of the corticospinal tract in the brainstem of the human brain. *Yonsei Med J* 2011; 52: 553–7.
16. Fregosi M, Contestabile A, Hamadjida A, Rouiller EM. Corticobulbar projections from distinct motor cortical areas to the reticular formation in macaque monkeys. *Eur J Neurosci* 2017; 45: 1379–95.
17. Chiou SY, Gottardi SE, Hodges PW, Strutton PH. Corticospinal excitability of trunk muscles during different postural tasks. *PLoS One* 2016; 11: 1.
18. Jang SH, Chang CH, Lee J, Kim CS, Seo JP, Yeo SS. Functional role of the corticoreticular pathway in chronic stroke patients. *Stroke* 2013; 44: 1099–104.
19. Landis JR, Koch GG. The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics* 1977; 33: 159–74.
20. Plassman BL, Gandevia SC. Comparison of human motor cortical projections to abdominal muscles and intrinsic muscles of the hand. *Exp Brain Res* 1989; 78: 301–8.
21. Seo D, Lee S, Kwon O. Comparison of the changes in thickness of the abdominal wall muscles of stroke patients according to the duration of their illness as observed using ultrasonographic images. *J Phys Ther Sci* 2013; 25: 817–9.