

研究報告



痙直型脳性麻痺児の歩行時の立脚期における 膝関節屈曲角度と下肢の分離運動能の関係*

川口大輔¹⁾・伊藤 忠¹⁾・高橋秀平¹⁾・富田秀仁^{1) 2)}
深谷佳希¹⁾・山本佳司¹⁾・則竹耕治³⁾

【要 旨】

【目的】痙直型脳性麻痺児の下肢の分離運動能と歩行時の立脚期の膝関節平均屈曲角度の関係について明らかにすること。【方法】対象は8名の痙直型脳性麻痺児（平均年齢8.3歳〔標準偏差（±）2.3歳〕）であった。三次元歩行分析によって立脚期の膝関節平均屈曲角度を算出した。Modified Trost Selective Motor Control test と Gillette's Selective Motor Control test を用いて、股関節（屈曲と伸展、外転、内転）と膝関節（屈曲と伸展）、足関節（背屈と底屈）の分離運動能を評価した。立脚期の膝関節平均屈曲角度と分離運動能の相関関係を分析した。【結果】立脚期の膝関節平均屈曲角度と有意な相関が認められた分離運動は、股関節伸展（膝関節伸展位）（ $r = -0.78$, $p < 0.01$ ）と、股関節伸展（膝関節90°屈曲位）（ $r = -0.81$, $p < 0.01$ ）、股関節内転（ $r = -0.67$, $p < 0.01$ ）、膝関節屈曲（ $r = -0.81$, $p < 0.01$ ）、膝関節伸展（ $r = -0.84$, $p < 0.01$ ）、足関節底屈（ $r = -0.68$, $p < 0.01$ ）であった。【結論】股関節伸展、股関節内転、膝関節屈曲、膝関節伸展、足関節底屈の分離運動能が高い痙直型脳性麻痺児ほど立脚期の膝関節屈曲角度が小さいという関係性があることが示唆された。この知見は様々な二次障害に繋がるリスクがある立脚期の膝関節屈曲角度の増大に対する理学療法の幅を広げる可能性がある。

キーワード：痙直型脳性麻痺児，歩容，下肢の分離運動能

はじめに

小児理学療法分野で最も一般的な疾患である脳性麻痺は、「受胎から生後4週以内に生じた脳の非進行性病変に基づく、永続的な、しかし変化する運動及び姿勢の異常である。その症状は満2歳までに発現する。進行性疾患や一過性運動障害、または将来正常化するであろうと思われる運動発達遅延は除外する。」と定義されている¹⁾。脳性麻

痺には種々の病型があるが、約8割を占めるのは痙性麻痺を主体とする痙直型であり、錐体路に生じた病変が主な原因といわれている²⁾。痙直型脳性麻痺の主な症状は、筋力低下と筋腱の短縮、痙縮、選択的運動制御の障害であり、これらの症状が歩容の異常を引き起こす要因となる³⁾。痙直型脳性麻痺児に最も一般的に見られる歩容の異常として、歩行時の立脚期を通して膝関節屈曲角度が

* Relationship between knee flexion angle in stance phase of gait and selective motor control of lower extremity in children with spastic cerebral palsy

1) 愛知県三河青い鳥医療療育センター
リハビリテーション科
(444-0002 愛知県岡崎市高隆寺町小屋場9番地)
Daisuke Kawaguchi, PT, MSc, Tadashi Ito, PT, PhD,
Shuhei Takahashi, PT, MSc, Hidehito Tomita, PT,
PhD, Yoshiki Fukaya, PT, BSc, Yoshiji Yamamoto,
PT: Department of Rehabilitation, Aichi Prefectural
Mikawa Aitori Medical and Rehabilitation Center for
Developmental Disabilities, Okazaki, Japan

2) 豊橋創造大学大学院 健康科学研究科
Hidehito Tomita, PT, PhD: Graduate School of Health
Sciences, Toyohashi SOZO University, Toyohashi, Japan

3) 愛知県三河青い鳥医療療育センター 整形外科
Kouji Noritake, MD, PhD: Department of Orthopedic
Surgery, Aichi Prefectural Mikawa Aitori Medical and
Rehabilitation Center for Developmental Disabilities,
Okazaki, Japan

E-mail: s1255102@sc.sozo.ac.jp

増大するかがみ歩行が挙げられる⁴⁾。かがみ歩行は膝関節伸展筋に大きな活動が求められること⁵⁻⁷⁾や、将来的に膝関節の痛みや骨変形を引き起こすリスクが高いこと^{8) 9)}、歩行機能の制限に繋がる^{10) 11)}ことが懸念されている。

近年、選択的運動制御の評価として下肢の分離運動能の評価が開発され、歩容異常との関連性についての検証が進められている^{12) 13)}。痙直型脳性麻痺児を対象とした研究では、初期接地時の膝関節屈曲角度と分離運動能に、分離運動能が低いほど初期接地時の膝関節屈曲角度が大きいという関係性が認められたことが報告されている¹⁴⁾。しかしながら、痙直型脳性麻痺児の歩行時の膝関節屈曲角度の増大は初期接地時だけでなく立脚期を通して見られることも多いものの⁴⁾、下肢の分離運動能が初期接地以降の立脚期の膝関節屈曲角度にまで関係するのかは明らかになっていない。かがみ歩行の特徴は、立脚期を通して膝関節屈曲角度が増大することであるため、痙直型脳性麻痺児の歩容異常の要因である選択的運動制御の障害が、歩行時の立脚期全体に渡って膝関節屈曲角度に影響を及ぼしているかを検討する必要がある。

また、痙直型脳性麻痺児の立脚期の膝関節屈曲角度の増大には、下肢の筋力低下と筋腱の短縮が関連することも報告されている^{15) 16)}。したがって、立脚期の膝関節屈曲角度を増大させる要因を検証する上で、下肢の分離運動能の評価とともに、下肢の筋力評価と筋腱の短縮の指標としての関節可動域 (Range of motion; 以下, ROM) 評価も重要であるといえる。

そこで本研究では、痙直型脳性麻痺児の下肢の分離運動能と立脚期の膝関節平均屈曲角度の関係について、筋力とROMの影響も含めて検証した。

対象および方法

1. 対象者

対象は2016年～2019年の間に当院で三次元歩行分析と分離運動能の評価を行った5～12歳までの8名の痙直型両麻痺児（男児3名、女児5名；身長124.3 cm [± 13.6 cm]；体重26.8 kg [± 7.1 kg]；年齢8.3 歳 [± 2.3 歳]）であった。粗大運動能力分類システム (Gross Motor Function Classification System; 以下, GMFCS¹⁷⁾) のlevelは、I（制限なしに歩く）が2名、II（歩行補助具なしで歩く）が3名、III（歩行補助具を使って歩く）が3名であった。取り込み基準は、1) 医師によって痙直型両麻痺の脳性麻痺と診断されていること、2) 医師によって脳性麻痺以外の遺伝的

あるいは神経学的疾患の診断がなされていないこと、3) 過去1年以内の手術の既往がないこと、4) 過去6ヶ月以内にボツリヌス毒素注射を受けていないことであった。除外基準は、1) GMFCS level IVまたはVであること、2) 18歳以上であることであった。対象者の両下肢16肢のデータを分析に用いた。

本研究はヘルシンキ宣言に基づき、全ての対象者とその保護者から、書面と口頭にてインフォームドコンセントおよびインフォームドアセントを得た上で実施された。

2. データ記録と分析

2-1. 歩行時の運動学的データ

対象者は前後3 mの補助路を付加した2 mの歩行路を至適歩行速度にて裸足で歩行した。GMFCS level IIIの対象者3名は後方支持型の歩行器 (Kaye Products Inc., ポスチャーコントロールウォーカー) を使用した歩行、GMFCS level IとIIの対象者5名は独立歩行の計測を行った。対象者の歩行時の矢状面の膝関節角度を算出するために三次元歩行分析を行った。Plug-in Gait Modelに従って、三次元歩行分析に精通した専任の理学療法士が39個の14 mmの反射マーカを身体各部位に貼付した。8台の光学式赤外線カメラからなる動作解析システム (Vicon Motion Systems Ltd., VICON MX-T20) を用いて100 Hzのサンプリング周波数で反射マーカの位置情報を計測した。

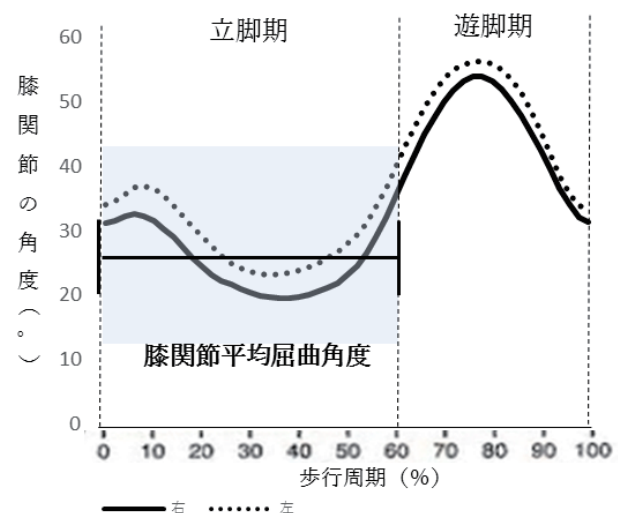


図1. 全対象者の立脚期における膝関節平均屈曲角度の平均の波形

全対象者の一歩行周期における膝関節屈曲角度の波形の平均を示す。実線は右下肢、破線は左下肢の波形を表す。対象者の立脚期における膝関節平均屈曲角度を算出した。

Vicon Polygon 4 (Vicon Motion Systems Ltd) を使用し、一歩行周期を100%に正規化した上で立脚期の膝関節平均屈曲角度¹⁸⁻²¹⁾を算出した(図1)。立脚期は解析対象の下肢が床に接地している時間と定義し、初期接地から足部が床から離れた時点と床反力のデータを用いて立脚期として同定した。算出した立脚期の膝関節平均屈曲角度の3試行の平均値を解析対象として用いた。

2-2. 分離運動能の評価

対象者8名の両下肢16肢の選択的運動制御能を定量化するために、Modified Trost Selective Motor Control test²²⁾とGillette's Selective Motor Control test²³⁾を用いて下肢の分離運動能を評価した。Modified Trost Selective Motor Control testは、評価する関節運動が股関節屈曲と股関節外転、膝関節伸展、足関節背屈に限定されている。そこで、Modified Trost Selective Motor Control testの評価項目に含まれている関節運動に対して反対方向への関節運動も評価するために、Gillette's Selective Motor Control testを使用した。これら2つの評価ツールを使用して股関節(屈曲と伸展、外転、内転)と膝関節(屈曲と伸展)、足関節(背屈と底屈)の分離運動能を理学療法士が評価した。

2-3. 下肢の筋力とROMの評価

対象者8名の両下肢16肢のROMを、日本整形外科学会および日本リハビリテーション医学会提唱の方法²⁴⁾にて理学療法士が評価した。また、背

臥位で股関節を90°屈曲位に保ったまま膝関節が伸展する角度を膝窩角として評価した²⁵⁾。

下肢の筋力評価には徒手筋力検査(Manual Muscle Testing; 以下、MMT²⁶⁾)を使用した。MMTについては、評価が行えなかった2名を除く、6名の両下肢12肢を理学療法士が評価した。

3. 統計解析

立脚期の膝関節平均屈曲角度と分離運動能、MMTのデータの相関関係を分析するために、スピアマンの順位相関分析を行った。立脚期の膝関節平均屈曲角度とROMのデータの相関関係を分析するために、Shapiro-Wilkの正規性の検定にてデータに正規性が認められた場合にはピアソンの相関分析を、正規性が認められなかった場合にはスピアマンの順位相関分析を行った。有意水準は5%に設定した。統計解析は全てEZR Ver. 1.37(自治医科大学附属さいたま医療センター)を使用して行った。

結果

1. 立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の分離運動能

対象者の立脚期の膝関節平均屈曲角度は27.4°[±8.6°]であった。分離運動能の評価結果を表1に示す。

立脚期の膝関節平均屈曲角度と分離運動能との

表1. 下肢の分離運動能の評価方法と評価結果

評価方法				各評価点における対象下肢数（肢）			
				初期姿勢	Unable	0点	1点
股関節	屈曲	T	背臥位	0	0	10	6
	伸展（膝関節伸展位）	G	腹臥位（膝関節伸展位）	/	6	2	8
	伸展（膝関節90° 屈曲位）	G	腹臥位（膝関節90° 屈曲位）		8	3	5
	外転	T	側臥位	0	2	7	7
	内転	G	側臥位	/	2	6	8
膝関節	屈曲	G	腹臥位		/	3	5
	伸展	T	端座位	0	0	8	8
足関節	底屈	G	腹臥位	/	9	3	4
	背屈	T	長座位（体幹60° 後傾位）		5	1	6

T: Modified Trost Selective Motor Control test の評価基準

2点: 検査肢位で規定の運動を単独で行うことができる。

1点: 検査肢位での規定の運動に他関節の運動が伴う。

0点: 検査肢位では規定の運動を行えず、促通肢位でなければ規定の運動を行える。

Unable: 促通肢位でも規定の運動を行えない。

G: Gillette's Selective Motor Control test の評価基準

2点: 共同運動が生じずに規定の運動を行うことができる。

1点: 規定の運動における可動域の一部で共同運動が生じる。

0点: 規定の運動における可動域の全体に渡って共同運動が生じる、または、規定の運動を行えない。

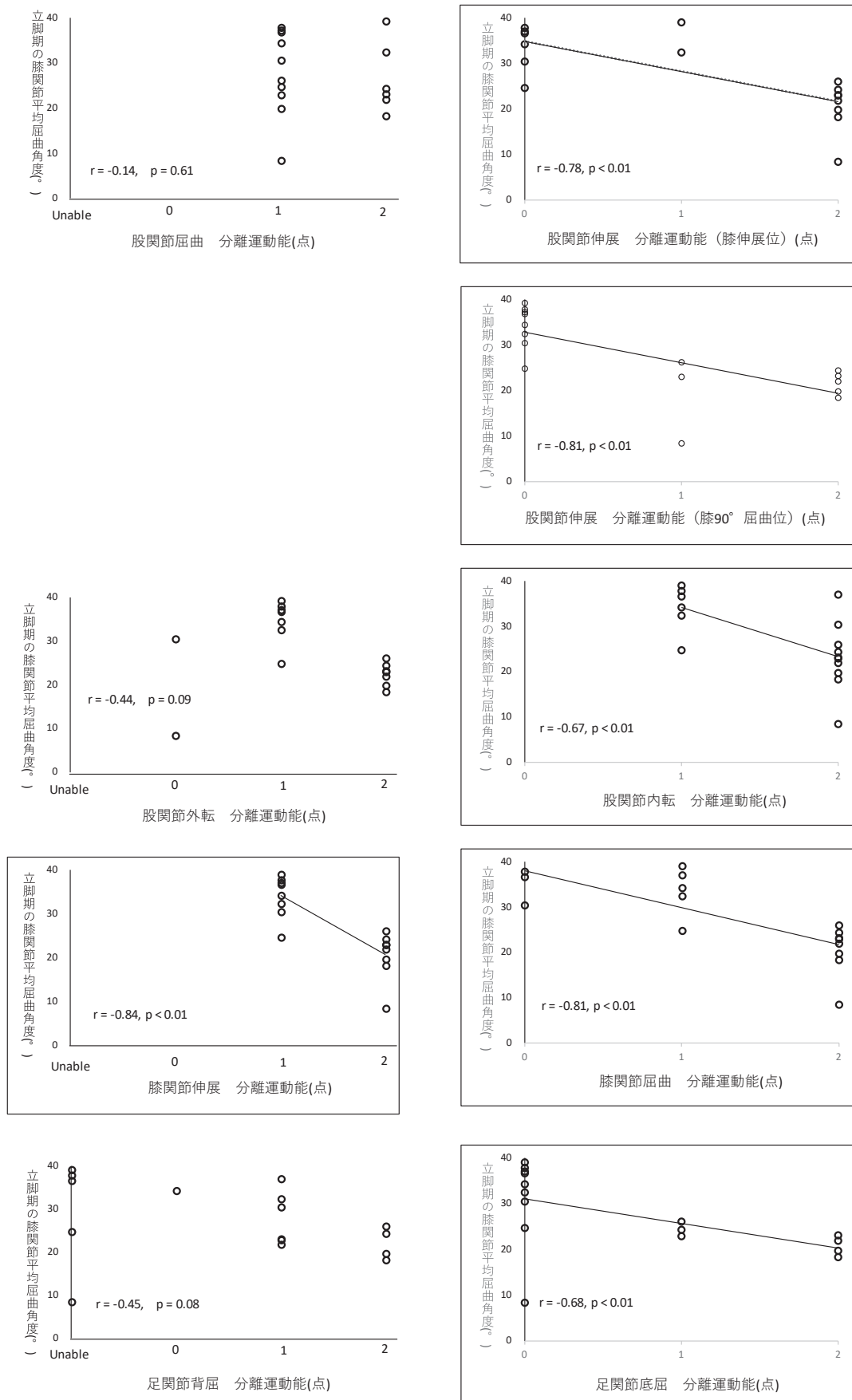


図 2. 立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の分離運動能の評価の散布図

立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の分離運動能の評価の散布図を示す。縦軸は立脚期の膝関節平均屈曲角度、横軸は分離運動能の評価の結果である。有意な相関関係が認められた組み合わせの散布図を実線で囲った。

相関関係の結果を図2に示す。立脚期の膝関節平均屈曲角度と有意な負の相関が認められたのは、股関節伸展（膝関節伸展位）（ $r = -0.78$, $p < 0.01$ ）と、股関節伸展（膝関節90°屈曲位）（ $r = -0.81$, $p < 0.01$ ）、股関節内転（ $r = -0.67$, $p < 0.01$ ）、膝関節屈曲（ $r = -0.81$, $p < 0.01$ ）、膝関節伸展（ $r = -0.84$, $p < 0.01$ ）、足関節底屈（ $r = -0.68$, $p < 0.01$ ）の分離運動能であった。

2. 立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の筋力、ROM

下肢の筋力とROMの評価結果を表2に示す。

立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の筋力の相関関係の結果を図3に示す。立脚期の膝関節平均屈曲角度と股関節屈曲筋力（ $r = -0.70$, $p = 0.01$ ）、股関節伸展筋力（膝関節90°屈曲位）（ $r = -0.62$, $p = 0.03$ ）、股関節内転筋力（ $r = -0.62$, $p = 0.03$ ）、膝関節屈曲筋力（ $r = -0.72$, $p < 0.01$ ）、足関節背屈筋力（ $r = -0.74$, $p < 0.01$ ）に有意な負の相関が認められた。

立脚期の膝関節平均屈曲角度とROMの相関関係の結果を図4に示す。立脚期の膝関節平均屈曲角度と股関節屈曲可動域（ $r = -0.59$, $p = 0.02$ ）、股関節伸展可動域（ $r = -0.58$, $p = 0.02$ ）、股関節外転可動域（ $r = -0.70$, $p < 0.01$ ）、足関節背屈可動域（ $r = -0.65$, $p < 0.01$ ）に有意な負の相関が認められた。

考察

本研究では、痙直型脳性麻痺児の立脚期の膝関節平均屈曲角度と下肢の分離運動能の関係性を検証した。相関分析の結果から、股関節伸展と股関節内転、膝関節屈曲、膝関節伸展、足関節底屈の分離運動能が高い対象者ほど、立脚期の膝関節平均屈曲角度が小さいという関連性があることが示された。FowlerとGoldberg¹⁶⁾は初期接地時の膝関節屈曲角度と下肢の分離運動能の関連性について検証し、下肢の分離運動能が低い痙直型脳性麻痺児ほど遊脚期において股関節の屈曲とともに生じる膝関節の伸展が制限され、結果的に初期接地時の膝関節の屈曲角度が大きいくことを報告した。本研究の結果をこの知見と併せて考えると、痙直型脳性麻痺児の下肢の分離運動能の低下が、立脚期を通して膝関節屈曲角度が増大するかがみ歩行に繋がる可能性が示唆された。

1. 下肢の分離運動能

選択的運動制御は、屈曲共同運動パターンや伸展共同運動パターンを使用することなく、また、意図しない関節運動が生じることなく関節運動を分離して行う能力と定義されている²⁷⁾。選択的運動制御の障害が生じると股関節と膝関節、足関節に特徴的な共同運動パターンが生じる²⁸⁾。歩行時の筋電図活動を検証した研究において、痙直型脳性麻痺児には歩行時に屈曲共同運動パターンと伸

表2. MMTとROMの評価結果

		MMT 各段階における対象下肢数（肢）						ROM (°)
		0	1	2	3	4	5	
股関節	屈曲	0	0	2	0	6	4	130.6(±7.9)
	伸展（膝関節伸展位）	0	0	4	5	1	2	-8.0(±9.6)
	伸展（膝関節90°屈曲位）	0	5	3	2	0	2	
	外転	0	0	4	2	3	3	27.1(±10.8)
	内転	0	2	2	5	1	2	12.5(±6.3)
膝関節	屈曲	0	2	2	1	1	6	151.9(±9.3)
	伸展	0	0	0	0	6	6	-1.9(±8.5)
	膝窩角							63.6(±14.7)
足関節	底屈	0	2	10	0	0	0	52.2(±3.6)
	背屈（膝関節伸展位）							-5.1(±19.2)
	背屈（膝関節屈曲位）	0	0	5	2	2	3	6.6(±15.4)

筋力（MMT）とROMの評価結果を示す。ROMの数値は全対象者の平均値（標準偏差）を表す。

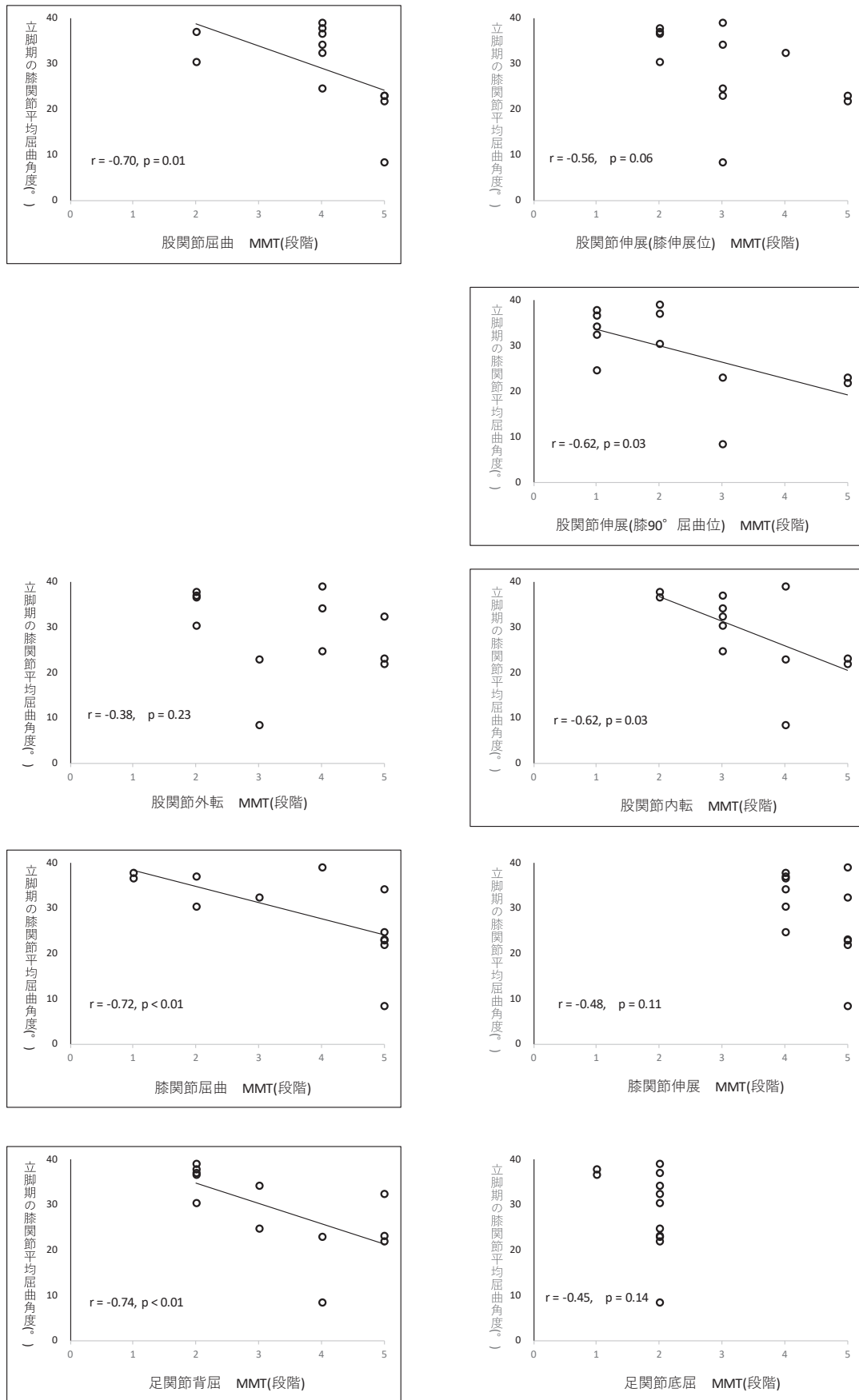


図3. 立脚期の膝関節平均屈曲角度とMMTの散布図

立脚期の膝関節平均屈曲角度とMMTの散布図を示す。縦軸は立脚期の膝関節平均屈曲角度、横軸はMMTの結果である。有意な相関関係が認められた組み合わせの散布図を実線で囲った。

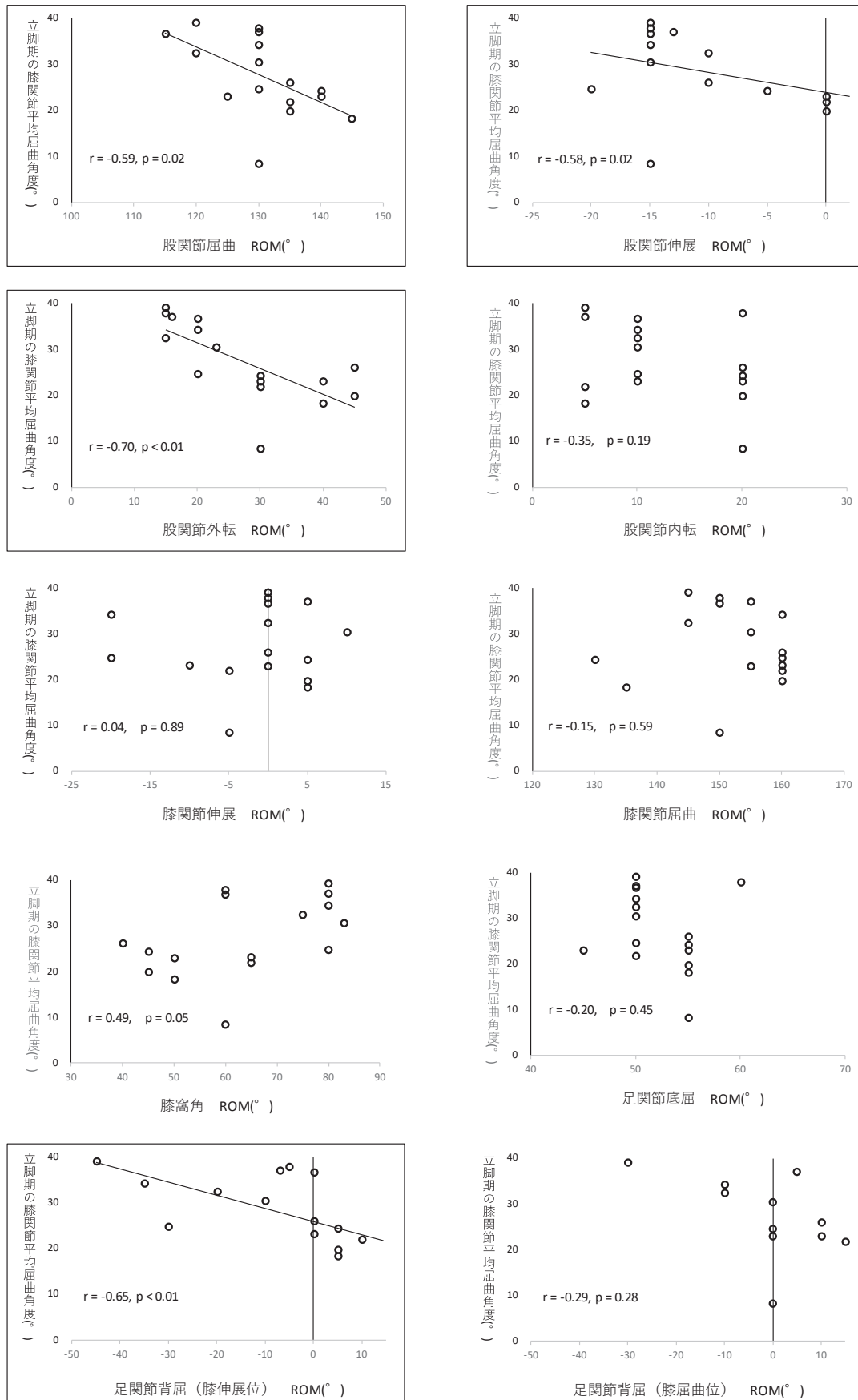


図4. 立脚期の膝関節平均屈曲角度とROMの散布図

立脚期の膝関節平均屈曲角度とROMの散布図を示す。縦軸は立脚期の膝関節平均屈曲角度、横軸はROMの結果である。有意な相関関係が認められた組み合わせの散布図を実線で囲った。

展共同運動パターンが認められることが報告されている²⁹⁻³¹⁾。本研究の分離運動能の評価の中で、立脚期の膝関節屈曲角度との有意な負の相関関係が認められた股関節伸展と膝関節伸展、足関節底屈の運動はいずれも立脚期において膝関節を伸展させる作用を持つ^{32) 33)}。また、股関節内転筋群は立脚期において股関節を伸展させる作用を持つ³⁴⁾ことから立脚期において股関節伸展筋群とともに膝関節の伸展に関与すると考えられる。正常歩行の立脚期において、これらの下肢の筋群の協調的な活動により、膝関節の過度な屈曲を制動しつつ股関節が伸展し足関節が背屈していく運動が達成される³²⁾。これらの知見から、股関節伸展と股関節内転、膝関節屈曲、膝関節伸展、足関節底屈の分離運動能が低下しているほど、屈曲共同運動パターンから逸脱することが困難となり、立脚期において膝関節を伸展位に保ったまま股関節が伸展し、足関節が背屈するという分離された運動が難しくなると推察される。結果的に股関節屈曲角度と足関節背屈角度とともに膝関節屈曲角度が大きくなると考えられる。これまで、足関節底屈筋力のトレーニングによって立脚期の膝関節屈曲角度が改善することが報告されている³⁵⁾。本研究の結果から考えると、立脚期の膝関節屈曲角度を改善させるために足関節底屈筋力のトレーニングだけでなく足関節の分離運動能のトレーニングも必要かもしれない。

2. 筋力と ROM

立脚期の膝関節平均屈曲角度と股関節伸展筋力、股関節内転筋力に有意な負の相関関係が認められた。前述のように股関節伸展の運動は立脚期において膝関節の伸展に関与し^{32) 33)}、股関節内転筋は股関節伸展作用を持つために³⁴⁾立脚期において股関節伸展筋群の膝関節伸展作用を補助すると考えられる。したがって、本研究において股関節伸展筋力と股関節内転筋力が低下している対象者ほど立脚期の膝関節屈曲角度が大きかったと考えられる。本研究では立脚期の膝関節屈曲角度と足関節底屈筋力には相関関係が認められなかった。この結果は歩行時の足関節底屈筋力の低下が立脚期の膝関節屈曲角度の増大に関与することを示す先行研究^{32) 33)}と相反する。本研究の足関節底屈筋力の測定には6段階の分類であるMMTを用いた。その結果、全ての対象者の足関節底屈筋力がMMTの段階1または2に分類された。実際には足関節底屈筋力には個人差があるものの、MMTにおいては個々人の足関節底屈筋力の差が反映されなかつ

たために、立脚期の膝関節屈曲角度と足関節底屈筋力に相関関係が認められなかったと考えられる。

立脚期の膝関節平均屈曲角度と股関節伸展および股関節外転の可動域制限に有意な負の相関関係が認められた。股関節伸展の制限因子である股関節屈曲筋群の短縮は、立脚中期から立脚終期における股関節伸展を制限する³⁶⁾。また、股関節外転の制限因子である股関節内転筋群には恥骨筋や長内転筋のように股関節伸展を制限する筋が含まれる³⁷⁾ため、立脚期の股関節伸展を制限すると考えられる。痙直型脳性麻痺児の筋腱の短縮と、かがみ歩行との関係を検証した研究において、股関節伸展制限によって立脚後半で膝関節屈曲角度が増大することが報告されている³⁶⁾。一般的に、立脚中期から立脚後期にかけて、膝関節伸展位を保ったまま股関節が伸展することで十分な歩幅が確保される。しかし、股関節伸展制限の強い痙直型両麻痺児は、立脚後半で膝関節を屈曲させることで、股関節伸展制限に伴う歩幅の狭小化を代償しているのかもしれない。

立脚期の膝関節平均屈曲角度と膝関節伸展位での足関節背屈の可動域制限に、有意な負の相関関係が認められた。痙直型脳性麻痺児において、単関節筋であるヒラメ筋の長さは比較的保たれる一方で、膝関節と足関節をまたぐ二関節筋である腓腹筋の長さは短い傾向にあることが報告されている³⁸⁾。一般的に、立脚中期には膝関節が軽度屈曲位から伸展位に保たれたまま足関節が背屈する。しかし、腓腹筋の短縮が重度である痙直型脳性麻痺児は、立脚中期において膝関節の屈曲角度を増大させることで腓腹筋の短縮の影響を軽減していると推察される。立脚期の膝関節平均屈曲角度と股関節屈曲の可動域制限にも有意な負の相関関係が認められたが、今回の結果から関係性の詳細な理由までは言及することはできない。このことから、このような関係性が認められたメカニズムについては、今後さらなる検証が必要である。

以上のことから、痙直型脳性麻痺児の歩容のアプローチには、立脚期の膝関節屈曲角度と下肢の分離運動能を考慮した評価とトレーニングを活用できる可能性がある。本研究では、立脚期の膝関節屈曲角度を定量化するために三次元歩行分析を用いたが、本研究で得られた知見は観察による歩行分析でも応用できると考えられる。ただし、本研究の結果では因果関係に言及することはできないため、今後は縦断的に分離運動能と膝関節平均屈曲角度との関係を検証する必要がある。

研究の限界

本研究の限界として、まず、対象者の GMFCS レベルにばらつきがあり、脳性麻痺の重症度が立脚期の膝関節平均屈曲角度と分離運動能、筋力、ROM との関係性に影響を与えた可能性があることが挙げられる。次に、筋力の評価に2名分の欠損値があり、相関分析の結果に影響を与えた可能性がある。また、対象者の人数が少ないため、本研究の知見を一般化する際には得られた結果を慎重に解釈する必要がある。本研究では相関分析によって下肢の分離運動能と立脚期の膝関節平均屈曲角度の検証を行っているが、複数の評価の中でどの評価が立脚期の膝関節平均屈曲角度との関係性が強いかを検討するためには、重回帰分析などの多変量解析を行う必要がある。

結論

本研究では、痙直型脳性麻痺児の下肢の分離運動能と立脚期の膝関節平均屈曲角度との関係を検証した。その結果、股関節伸展と股関節内転、膝関節屈曲、膝関節伸展、足関節底屈の分離運動能が高い痙直型脳性麻痺児ほど立脚期の膝関節平均屈曲角度が小さいという関係性があることが示唆された。痙直型脳性麻痺児の下肢の分離運動能とかがみ歩行の関係性の強さを明らかにするためには今後の詳細な検討が必要である。

謝辞

本研究を実施するにあたり、測定にご参加いただいた対象者とその保護者の皆様、測定にご協力いただいた愛知県三河青い鳥医療療育センターリハビリテーション科の皆様と名古屋大学大学院医学系研究科リハビリテーション療法学専攻の皆様感謝します。

利益相反

開示すべき利益相反はない。

【文 献】

- 1) 厚生省特別研究「脳性小児麻痺の成因と治療に関する研究」昭和43年度第2回班会議 1969.
- 2) 永井利三郎：ナースとコメディカルのための小児科学(第2版)．日本小児医事出版社，東京，2009，pp. 339-341.
- 3) Zhou J, Lowe, et al.: Influence of impaired selective motor control on gait in children with cerebral palsy. J Child Orthop. 2019; 13: 73-81.
- 4) Gage JR : The identification and treatment of gait problems in cerebral palsy. Mac Keith Press, London, 2009, pp. 555.
- 5) Hsu AT, Perry J, et al.: Quadriceps force and myoelectric activity during flexed knee stance. Clin Orthop Relat Res. 1993; 288: 254-262.
- 6) Lin CJ, Guo LY, et al.: Common abnormal kinetic patterns of the knee in gait in spastic diplegia of cerebral palsy. Gait Posture. 2000; 11: 224-232.
- 7) Steele KM, Seth A, et al.: Muscle contributions to support and progression during single-limb stance in crouch gait. J Biomech. 2010; 10: 2099-2105.
- 8) Graham H, Selber P : Musculoskeletal aspects of cerebral palsy. J Bone Joint Surg Br. 2003; 85: 157-166.
- 9) Jahnsen R, Villien L, et al.: Locomotion skills in adults with cerebral palsy. Clin Rehabil. 2004 ; 18 : 309-316.
- 10) Johnson RK, Hildreth HG, et al.: Total energy expenditure in adults with cerebral palsy as assessed by doubly labeled water. J Am Diet Assoc. 1997; 97: 966-970.
- 11) Opheim A, Jahnsen R, et al.: Walking function, pain, and fatigue in adults with cerebral palsy : a 7-year follow-up study. Dev Med Child Neurol. 2009; 51: 381-388.
- 12) Fowler EG, Staudt LA, et al.: Selective Control Assessment of the Lower Extremity (SCALE) : development, validation, and interrater reliability of a clinical tool for patients with cerebral palsy. Dev Med Child Neurol. 2009; 51: 607-614.
- 13) Chruscikowski E, Fry NRD, et al.: Selective motor control correlates with gait abnormality in children with cerebral palsy. Gait Posture. 2017; 52: 107-109.
- 14) Fowler EG, Goldberg EJ : The effect of lower extremity selective voluntary motor control on interjoint coordination during gait in children with spastic diplegic cerebral palsy. Gait Posture. 2009; 29: 102-107.
- 15) Gage JR : Surgical treatment of knee dysfunction in cerebral palsy. Clin Orthop Relat Res. 1990; 253: 45-54.
- 16) Gage JR : The treatment of gait problems in cerebral palsy. Mac Keith Press, London, 2004, pp. 180-204.
- 17) Palisano R, Rosenbaum P, et al.: Development and reliability of a system to classify gross motor function in children with cerebral palsy. Dev Med

- Child Neurol. 1997; 39: 214-223.
- 18) Hicks JL, Delp SL, et al.: Can biomechanical variables predict improvement in crouch gait? *Gait Posture*. 2011; 34: 197-201.
- 19) Balzer J, Schelldorfer S, et al.: Effects of simulated crouch gait on foot kinematics and kinetics in healthy children. *Gait Posture*. 2013; 38: 619-624.
- 20) Steele KM, Shuman B, et al.: Crouch severity is a poor predictor of elevated oxygen consumption in cerebral palsy. *J Biomech*. 2017; 60: 170-174.
- 21) Abbasi L, Rojhani-Shirazi Z, et al.: Trunk kinematic analysis during gait in cerebral palsy children with crouch gait pattern. *J Biomed Phys Eng*. 2018; 8: 281-288.
- 22) Smits DW, van Groenestijn AC, et al.: Selective motor control of the lower extremities in children with cerebral palsy : inter-rater reliability of two tests. *Dev Neurorehabil*. 2010; 13: 258-265.
- 23) Gage JR : The identification and treatment of gait problems in cerebral palsy. Mac Keith Press, London, 2009, pp. 185-189.
- 24) 米本 恭三, 石神 重信・他 : 関節可動域表示ならびに測定法(平成7年4月改訂) : リハビリテーション医学. 1995; 32: 207-217.
- 25) Gage JR : The Treatment of Gait Problems in Cerebral Palsy. Mac Keith Press, London, 2004, pp. 77.
- 26) Hislop HJ, Avers D, et al.: 新・徒手筋力検査法 原著第9版 : 協同医書出版社, 東京, 2014, pp. 182-238
- 27) Fowler E, Staudt L, et al.: Selective Control Assessment of the Lower Extremity (SCALE) : development, validation, and interrater reliability of a clinical tool for patients with cerebral palsy. *Dev Med Child Neurol*. 2009; 51: 607-614.
- 28) Perry J : Determinants of muscle function in the spastic lower extremity. *Clin Orthop Relat Res*. 1993; 288: 10-26.
- 29) Berger W, Quintern J, et al.: Pathophysiology of gait in children with cerebral palsy. *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1982; 53: 538-548.
- 30) Davids JR, Holland WC, et al.: Significance of the confusion test in cerebral palsy. *J Pediatr Orthop*. 1993; 13: 717-721.
- 31) Rose J, Martin JG, et al.: Electromyographic differentiation of diplegic cerebral palsy from idiopathic toe walking : involuntary coactivation of the quadriceps and gastrocnemius. *J Pediatr Orthop*. 1999; 19: 677-682.
- 32) Anderson FC, Pandy MG : Individual muscle contributions to support in normal walking. *Gait Posture*. 2003; 17: 159-169.
- 33) Arnold AS, Anderson FC, et al.: Muscular contributions to hip and knee extension during the single limb stance phase of normal gait : a framework for investigating the causes of crouch gait. *J Biomech*. 2005; 38: 2181-2189.
- 34) Perry J, Burnfield J : Gait Analysis 2nd Edition Normal and Pathological Function. Slack Inc. 2010: pp. 72.
- 35) Engsberg JR, Ross SA, et al.: Increasing ankle strength to improve gait and function in children with cerebral palsy : a pilot study. *Pediatr Phys Ther*. 2006; 18: 266-275.
- 36) Matjacic Z, Olensek A : Biomechanical characterization and clinical implications of artificially induced crouch walking: Differences between pure iliopsoas, pure hamstrings and combination of iliopsoas and hamstrings contractures. *J Biomech*. 2007; 40: 491-501.
- 37) 山崎敦, 佐藤俊輔・他 : オーチスのキネシオロジー 身体運動の力学と病態力学 原著第2版, ラウンドフラット, 東京, 2012, pp. 730-733.
- 38) Gage JR : The treatment of gait problems in cerebral palsy. Mac Keith Press, London, 2004, pp. 382.