

Original Article

主成分分析による脳卒中片麻痺患者における異常歩行パターンの分類

本谷竜太郎,¹ 山本澄子,² 直江 緑,¹ 谷口瑠美,¹ 河原 梓,¹ 岩田拓也¹¹アルペンリハビリテーション病院リハビリテーション部²国際医療福祉大学大学院

要旨

Motoya R, Yamamoto S, Naoe M, Taniguchi R, Kawahara A, Iwata T. Classification of abnormal gait patterns of poststroke hemiplegic patients in principal component analysis. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2021; 12: 70-77.

【目的】三次元トレッドミル歩行分析による異常歩行の定量的指標を用いて脳卒中片麻痺患者における10種類の異常歩行パターンの分類を試みる。

【方法】対象者90名における異常歩行10種類の定量的指標である各偏差値を用いて主成分分析を行った。異常歩行10種類の第1・第2主成分の因子負荷量を散布図に示し、その位置関係から異常歩行のパターンの分類を行った。

【結果】遊脚期の膝屈曲不全と骨盤挙上と反対側への体幹側方移動の遊脚期における異常歩行パターン、遊脚期の分回し歩行に加えた立脚期の前足部接地に伴う急激な膝関節の伸展パターン、立脚期の内側ホイップ・遊脚期の外旋歩行に加えた骨盤後退に伴う膝屈曲位歩行パターンに分類できる可能性が考えられた。

【考察】主成分分析により、異常歩行10種類の定量的指標結果の持つ情報が、いくつかの異常歩行パターンに圧縮され、これらの結果を臨床現場に活用することができれば、観察による歩行分析の精度向上に寄与できると考えられた。

キーワード：片麻痺, 異常歩行, 歩行分析, 三次元動作解析, 主成分分析

関節の動きによる歩行パターン分類が行われている [1-3] のみで、片麻痺患者に特徴的なさまざまな異常歩行パターンにおいて包括的に言及した報告はないのが現状である。臨床現場でよく行われる観察による歩行分析における評価者間のばらつき [4] を減らすためにも、臨床場面で遭遇する片麻痺患者の異常歩行パターンを定量的に捉えた上で、それらを包括的に解釈することが望ましいと考えられる。そこで、われわれは三次元トレッドミル歩行分析 [5] により得られる異常歩行の定量的指標に着目した。三次元トレッドミル歩行分析では異常歩行分析として現在10種類の異常歩行の特徴量を抽出することができる [5]。立脚期の異常歩行は骨盤後退・急激な膝関節の伸展・膝屈曲位歩行・前足部接地・内側ホイップ、遊脚期の異常歩行は反対側への体幹側方移動・遊脚期の膝屈曲不全・骨盤挙上・分回し歩行・外旋歩行である。この三次元トレッドミル歩行分析により得られる各異常歩行パターンの特徴量を用いてその関係性を明らかにすることにより、片麻痺患者における異常歩行パターンの分類として包括的に解釈されれば、臨床現場で特徴的な一つの異常歩行の所見からさまざまな異常歩行パターンの観察に視点を置くことができるようになるため、観察による異常歩行分析という点においてもその精度を向上できるものとして活用できる。本研究の目的は10種類の異常歩行の定量的指標を用いて多変量解析を行うことにより、片麻痺患者に特徴的な異常歩行10種類の分類を試みることである。

はじめに

脳卒中片麻痺患者の歩行分析において、一つの異常歩行パターンから複数の異常歩行パターンを観察的に捉えることは多く、片麻痺患者に特徴的な複数の異常歩行パターンには関連があると考えられる。しかし、片麻痺患者の歩行パターン分類は、麻痺側立脚期の膝

方法

対象は、2016年8月～2019年8月までに回復期病棟入院中の片麻痺患者90名とした。選定条件においては、片麻痺患者であっても整形外科疾患の既往を有する者は除外した。計測方法は、療法士が対象のトレッドミル歩行を確認し計測可能と判断した後、三次元トレッドミル歩行分析システムを用いて計測を行った (図1)。

三次元トレッドミル歩行分析による異常歩行の定量的指標は、三次元動作解析装置 Kinema Tracer[®] の標準プログラムとして搭載されている10種類 [5] を用いた。異常歩行の定量的指標においては、片麻痺患者の典型的な歩行10種類を文献的検討から表1に示すような定義づけをした後、それぞれの異常歩行の定義に相当する算出方法が考案されている。これらの分析

著者連絡先：本谷竜太郎
アルペンリハビリテーション病院リハビリテーション部
〒931-8442 富山県富山市楠木300番地
E-mail: reha-pt@alpen-reha.jp
2021年10月28日受理

利益相反：一切の利益相反はありません

指標は、時間距離因子、運動軌跡などの運動学的因子を用いて作成しているもの（表2）で、経験年数が長く歩行分析に習熟した複数の理学療法士数名が観察により5段階に順位付けした重症度と高い相関関係があり、妥当性が報告されている[6-9]。各異常歩行の定量的指標は偏差値（＝（症例の異常値－健常者の平均値）×10 / 健常者のSD + 50）として自動算出される[10]ため、各異常歩行間の比較ができる仕様になっている。本研究の対象者は計測時に計測データを活用することについて説明書を用いて説明し、口頭にて同意を得ている者とした。本研究は国際医療福祉大学倫理委員会の承認（17-Ig-129）を得て実施した。

1. 統計手法

多変量解析の中でも主成分分析は、多変量解析の一般的な分類において、目的変数のない諸変量の統合整理・分類を目的とした量的な分析手法と定義される[11]。主成分分析では、考慮したすべての変量と高い相関を示す合成変量と、一部のものとのみ高い相関

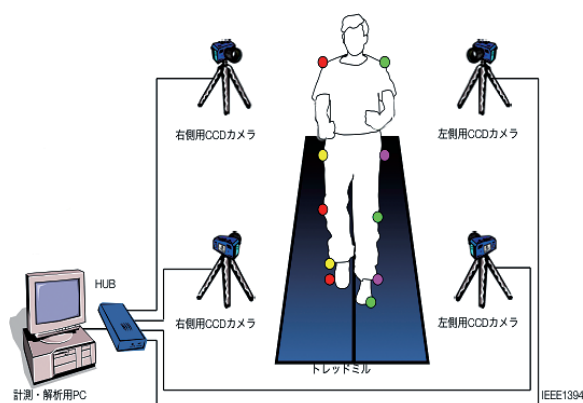


図1. 三次元トレッドミル歩行分析（文献5より改変して引用）

動作解析装置のKinemaTracer®は1台の収録、解析用コンピュータとトレッドミルの周囲に配置する4台のCCDカメラから構成する。コンピュータとCCDカメラ間はIEEE1394ケーブルにて接続するのみであり、撮影時のカメラ間の同期は不要である。

表1. 異常歩行の定義（文献9より改変して引用）

異常歩行	定義
立脚期の異常歩行	
骨盤後退	麻痺側荷重応答期～立脚中期に足部に対して股関節が後方に残るもの。
急激な膝関節の伸展	麻痺側荷重応答期～立脚終期に麻痺側膝関節が急激に後方に向かい伸展するもの。
膝屈曲位歩行	麻痺側立脚期に麻痺側膝関節が屈曲したままであるもの。
前足部接地	麻痺側の初期接地時に前足部から接地するもの。
内側ホイップ	麻痺側立脚期～前遊脚期につま先を支点に踵部が内側に移動するもの。
遊脚期の異常歩行	
反対側への体幹側方移動	麻痺側遊脚期に体幹が非麻痺側へ過度に側方移動するもの。
遊脚期の膝屈曲不全	麻痺側遊脚期に麻痺側膝関節の最大屈曲角度が減少しているもの。
骨盤挙上	麻痺側遊脚期に麻痺側骨盤が過度に挙上するもの。
分回し歩行	麻痺側遊脚初期～中期に麻痺側股関節外転・外旋し、遊脚中期～終期に内転・内旋し麻痺側下肢が半円の軌跡を描くもの。
外旋歩行	麻痺側遊脚期に麻痺側股関節が正常よりも常に大きく外旋しているもの。

を示す合成変量とを求め、前者すなわち第1主成分を用いて変量の要約を、後者すなわち第2主成分～それ以降の主成分を用いて変量の分類を行うことができる。分類の方法は、主成分分析を行い、第1主成分と第2主成分、第1主成分と第3主成分、とそれぞれの組み合わせについて順次X・Y2次元平面に変量の位置を打点すると、主成分が同じものは互いに近い所、異なるものは遠い所に配置されるため[11]、それらの位置関係から変量の群別を行うというものである。

2. 統計解析の方法

異常歩行パターン分類は対象者90名における異常歩行10種類の各偏差値を用いて主成分分析を行った。統計解析にはJMP®12（SAS Institute inc., Cary, NC, USA）を用いた。主成分分析の計算には相関行列を用いた。まず、異常歩行10種類の第1・第2主成分の因子負荷量を散布図に示し、その位置関係から近いもの同士をまとめて郡別を行うことにより異常歩行のパターン分類を行った。同様に第1・第3主成分の因子負荷量においても散布図に示した。次に、主成分得点を主成分分析の結果より得られた因子負荷量を用いて計算し、第1～3主成分得点と運動麻痺の重症度の関係についてSpearmanの順位相関係数を求め、有意水準5%とした。

結果

対象の属性は、男性52名女性38名、年齢68.9±11.2歳、発症後期間（発症後計測までの期間）は64.5±31.5日、入院後計測までの期間は40.2±30.2日であった（表3）。対象者のSIAS下肢麻痺合計は10.5±3.8点、計測時のFIM歩行は4.3±2.4点であり、装具使用者は29名、手すり使用者は57名であった。

主成分分析の結果得られた各主成分の固有値および寄与率と累積寄与率を表4に示す。固有値が1以上の主成分は第1から第3主成分であり、第3主成分までの累積寄与率は62.9%であった。慣例では固有値が1以上の主成分が意味のある主成分とする[12]ため、以降の解析は第1から第3までの主成分について行った。

表 2. 異常歩行指標の算出方法（文献 9 より改変して引用）

異常歩行	指 標
立脚期の異常歩行	
骨盤後退	単脚支持期における足関節マーカの Y 座標と股関節マーカの Y 座標の差の平均値を下肢長で補正 ^{*1} した値.
急激な膝関節の伸展	膝関節マーカが立脚期に後方移動する速度の最大値とトレッドミル歩行速度の差.
膝屈曲位歩行	単脚支持期の膝関節最大伸展角度.
前足部接地	初期接地時の足関節マーカの Z 座標と第 5 中足骨頭マーカの Z 座標の差から静止立位時の両マーカの Z 座標の差を引いた値を、足長で補正 ^{*2} した値.
内側ホイップ	足関節マーカの、立脚期 25-75% 時間における最内側 X 座標と同 75-100% 時間の最外側 X 座標の差を足長で補正 ^{*2} した値.
遊脚期の異常歩行	
反対側への体幹側方移動	麻痺側後の両脚支持期～麻痺側遊脚期における、両側肩関節マーカの中点の非麻痺側方向の最外側 X 座標と、麻痺側後の両脚支持期における両側足関節マーカの中点の X 座標の平均値との差を下肢長で補正した ^{*1} 値.
遊脚期の膝屈曲不全	健常者と対象者の遊脚期の膝関節最大屈曲角度の差を健常者の最大屈曲角度で除して 100 を乗じた値.
骨盤挙上	股関節マーカの遊脚期の最大 Z 座標と同時期の股関節マーカの Z 座標値の差から、両側支持期の両股関節マーカの Z 座標の平均値の差を引いた値を静止立位時の左右股関節マーカの前額面上の距離で除して 100 を乗じた値.
分回し歩行	足関節マーカの遊脚期 25-75% 時間における最外側 X 座標と立脚期の 25-75% 時間における最内側 X 座標の差を下肢長で補正 ^{*1} した値.
外旋歩行	麻痺側遊脚期における足関節マーカ X 座標と第 5 中足骨頭マーカ X 座標の差を足長で補正 ^{*2} した値.

X, Y, Z 座標はそれぞれ三次元空間における左右方向, 前後方向, 鉛直方向を示す.

^{*1} 静止立位時の左右股関節マーカ Z 座標の平均値を除して 100 を乗じる.

^{*2} 静止立位時の足関節マーカと第 5 中足骨頭マーカの距離を除して 100 を乗じる.

表 3. 対象者の基本属性

性 別	男性 52 名 女性 38 名
年 齢	68.9 ± 11.2 歳
発症後期間	64.5 ± 31.5 日
計測までの入院期間	40.2 ± 30.2 日
SIAS 下肢麻痺合計 ^{*1}	10.5 ± 3.8 点
SIAS 下肢麻痺合計 0～5 点	重度麻痺群 11 名
SIAS 下肢麻痺合計 6～10 点	中等度麻痺群 26 名
SIAS 下肢麻痺合計 11～15 点	軽度麻痺群 53 名
計測時の FIM 歩行 ^{*2}	4.3 ± 2.4 点
装具の使用	あり 29 名 なし 61 名
手すりの使用	あり 57 名 なし 33 名
トレッドミル歩行速度	1.4 ± 0.7 km/h

年齢, 発症後期間, 計測までの期間, SIAS 下肢麻痺合計, FIM 歩行, トレッドミル速度は平均 ± 標準偏差で表記した.

^{*1}SIAS 下肢麻痺合計: Stroke Impairment Assessment Set の運動機能下肢 3 項目合計点 0 点から 15 点で採点される. 下肢 3 項目は, Hip-Flexion Test (0～5 点), Knee-Extension Test (0～5 点), Foot-Pad Test (0～5 点) 0 点は筋収縮が認められない, 1 点はわずかな動きあり, 2 点は課題遂行不十分, 3 点は課題遂行可能だが著明なぎこちなさあり, 4 点は課題遂行可能だが軽度のぎこちなさあり, 5 点は正常を示す.

^{*2}FIM 歩行: Functional Independence Measure の歩行項目 1 点から 7 点までの 7 段階で採点される.

1 点が 25% 未満している, 2 点が 25% 以上 50% 未満している, 3 点が 50% 以上 75% 未満している, 4 点が 75% 以上 100% 未満している, 5 点が監視または屋内歩行自立, 6 点が修正自立, 7 点が完全自立を示す.

表 4. 固有値と寄与率と累積寄与率

主成分	Z_1	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5	Z_6	Z_7	Z_8	Z_9	Z_{10}
固有値	3.43	1.54	1.32	0.97	0.76	0.60	0.48	0.40	0.25	0.24
寄与率 (%)	34.3	15.4	13.2	9.7	7.6	6.0	4.8	3.9	2.5	2.4
累積寄与率 (%)	34.3	49.7	62.9	72.6	80.2	86.2	91.0	95.0	97.5	100

for JMP®12 (SAS Institute inc., Cary, NC, USA)

1. 異常歩行パターンの分類

歩行パターン分類を目的に、各異常歩行指標値において第1・第2主成分の因子負荷量の散布図および第1と第3主成分の因子負荷量の散布図を図2, 3に示す。図2より、遊脚期の異常歩行において遊脚期の膝屈曲不全・骨盤挙上・反対側への体幹側方移動は近い所に位置した。また、分回し歩行の第2主成分が負の値、外旋歩行の第2主成分が正の値を示した。遊脚期の異常歩行である外旋歩行と立脚期の異常である内側ホイップは近い所に位置した。立脚期の異常歩行においては、骨盤後退と膝屈曲歩行は第2主成分が正の値、前足部接地と急激な膝関節の伸展の第2主成分が負の値を示した。

図3より、立脚期の異常歩行において骨盤後退・膝屈曲歩行・前足部接地は近い所に位置した。一方、内側ホイップはこれらと対称的な所に位置し、急激な膝関節の伸展は遊脚期の異常歩行と近い所に位置した。

2. 主成分得点と運動麻痺の重症度との関連

対象者90名の主成分得点と運動麻痺の重症度の関係において、第1主成分得点から第3主成分得点と運動麻痺の重症度との関係を図に示す(図4)。第1主成分得点は運動麻痺の重症度と有意な相関を認めた($p < 0.01$)。第2・第3主成分得点は運動麻痺の重症度と有意な相関は認めなかった。

考察

1. 主成分分析の性質

第1主成分 Z_1 は固有値も大きく、遊脚期の異常歩行の項目はすべて正の値を示して、立脚期の異常歩行の項目を加えても10項目のうち8項目で正の値を示した。これらは「大きさの因子」と言われるものであり、主成分分析における「異常歩行の程度」を表す因子と考えられた。

第2主成分 Z_2 は、遊脚期の膝屈曲不全・骨盤挙上・反対側への体幹側方移動が近い値を示し、遊脚期の異常歩行においては、外旋歩行が正の値、分回し歩行が負の値を示した。立脚期の異常歩行においては、骨盤後退・膝屈曲歩行・内側ホイップが正の値、前足部接地と急激な膝関節の伸展は負の値を示し、これらは遊脚期と立脚期における股関節の動きについて示す因子と考えられた。第3主成分 Z_3 は立脚期の異常歩行である骨盤後退・膝屈曲歩行・前足部接地において正の値、内側ホイップで負の値を示す一方、遊脚期の異常歩行は0に近い値であったことから、立脚期における膝関節の動きについて示す因子であると考えた。

2. 異常歩行パターンの分類

歩行パターン分類では、第1と第2主成分の因子負荷量の散布図(図2)を用いてその位置関係を見ることにより、遊脚期の膝屈曲不全と骨盤挙上と反対側

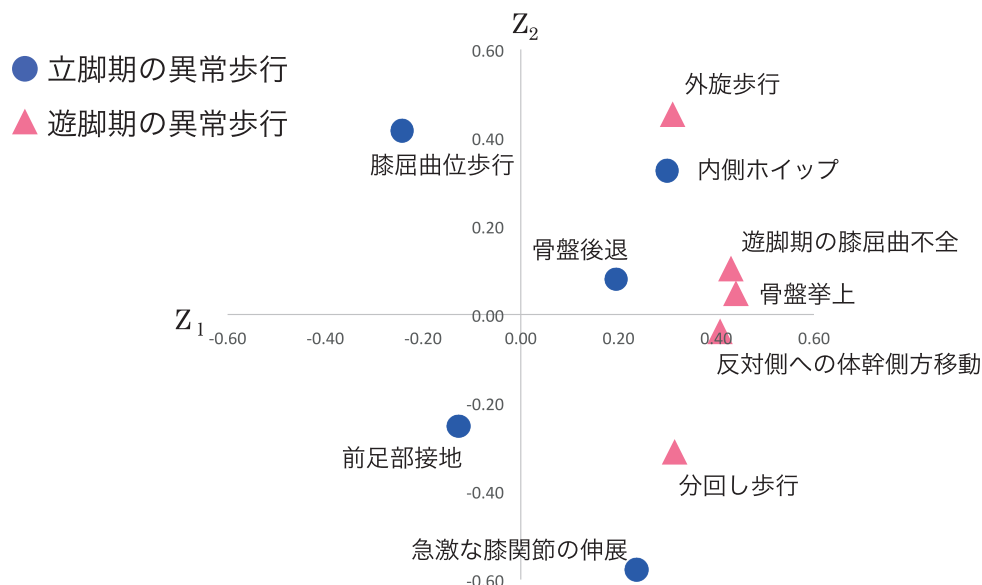


図2. 第1主成分と第2主成分の因子負荷量による異常歩行指標の散布図
横軸は第1主成分の因子負荷量、縦軸は第2主成分の因子負荷量を示す。
丸は立脚期の異常歩行、三角は遊脚期の異常歩行を示す。

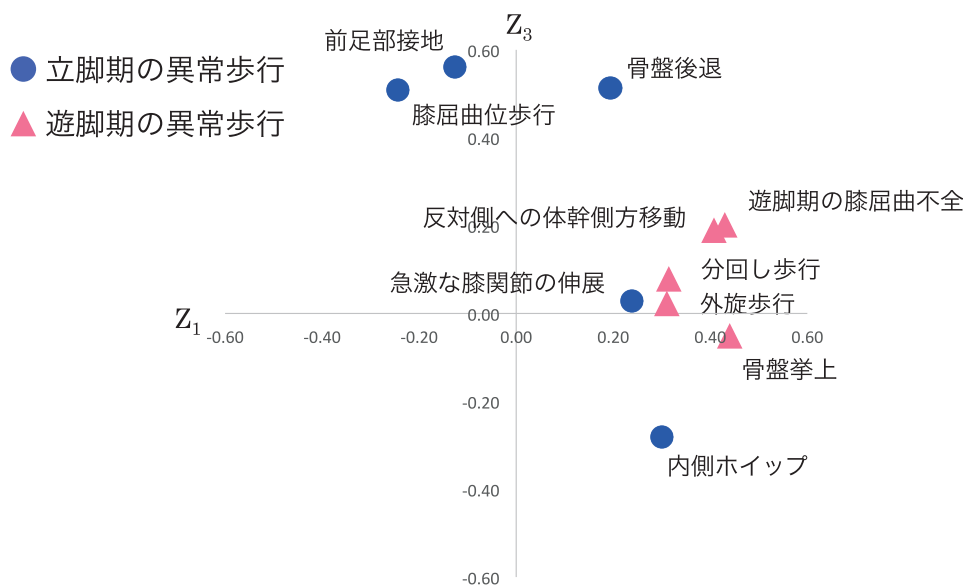


図 3. 第 1 主成分と第 3 主成分の因子負荷量による異常歩行指標の散布図
横軸は第 1 主成分の因子負荷量，縦軸は第 3 主成分の因子負荷量を示す。
丸は立脚期の異常歩行，三角は遊脚期の異常歩行を示す。

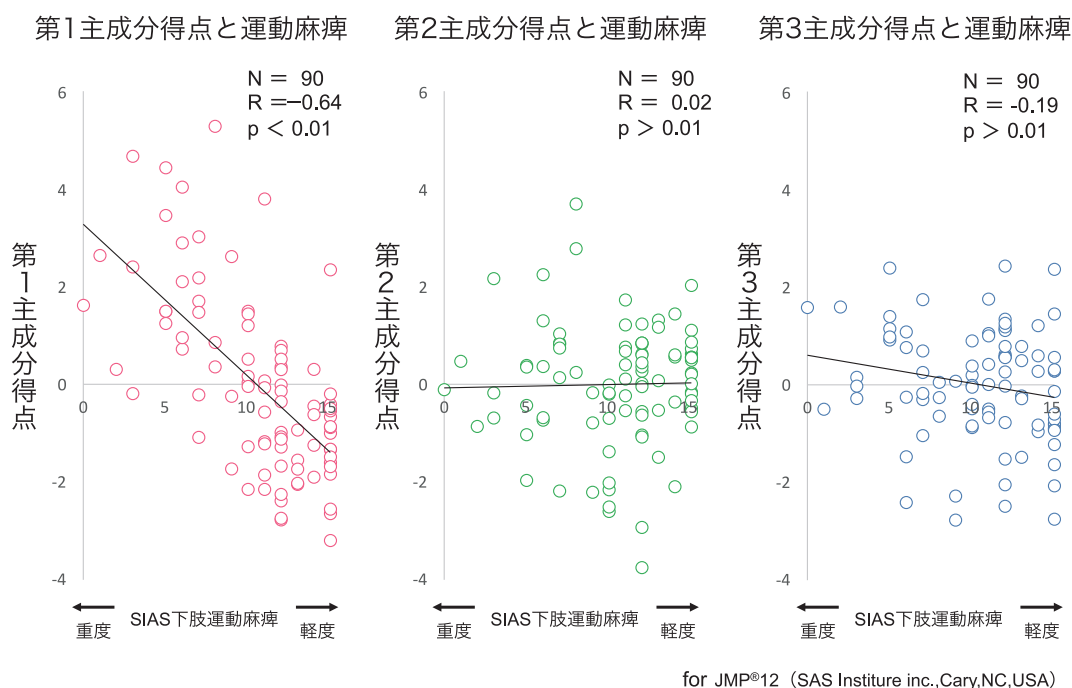


図 4. 第 1 から第 3 主成分得点と運動麻痺の重症度との関係
縦軸左は第 1 主成分得点，中央は第 2 主成分得点，右は第 3 主成分得点を示す。
横軸は SIAS 下肢運動麻痺を示す。丸は対象を示す。

への体幹側方移動の遊脚期における異常歩行パターン、遊脚期の分回し歩行に加えた立脚期の前足部接地に伴う急激な膝関節の伸展パターン、立脚期の内側ホイップ・遊脚期の外旋歩行に加えた骨盤後退に伴う膝屈曲位歩行パターン（図 5）に分類できる可能性が考えられた。

第 1 と第 3 主成分の因子負荷量の散布図は、立脚期の異常歩行について示していることが考えられ、立脚期の歩行周期で捉えると骨盤後退・膝屈曲位歩行・

前足部接地は立脚初期から中期にかけての異常歩行であり、急激な膝関節の伸展が荷重応答期から立脚終期にかけて、そして内側ホイップが立脚中期から前遊脚期にかけての異常歩行パターンであり、立脚期の出現時期によるパターン分類と考えた。

3. データの統合と解釈

これらの主成分分析によって、脳卒中片麻痺患者 90 名における異常歩行 10 種類の定量的指標結果の

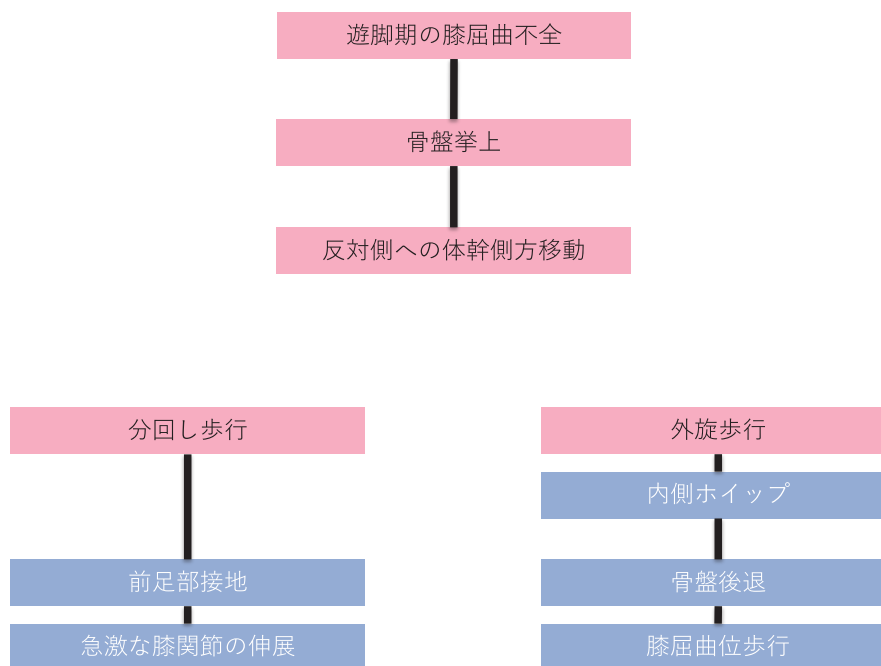


図 5. 異常歩行パターンの分類

持つ情報が、異常歩行の程度、立脚期における股関節の動き、立脚期における膝関節の動きに影響される異常歩行パターンに圧縮されることを示した。そして、因子負荷量の散布図を用いてその位置関係を見ることにより関連性の高い異常歩行として3つのパターンに分類でき、さらに立脚期の出現時期による異常歩行パターンに分類できると考えられた。

4. 主成分の臨床的意味付け

最後に、第1主成分得点は運動麻痺の程度と相関が高く、運動麻痺が重度であるほど、高い得点を示したことは、運動麻痺の重症例において異常歩行が大きくなることと一致しており、主成分得点による評価が有用であることが示唆された。

おわりに

本研究の結果によって、脳卒中片麻痺患者において特徴的な異常歩行パターンを分類することを試みたが、この結果はどのような発生機序によって分類されるかを明らかにしたものではない。今後、対象者を増やし身体機能評価や計測条件によって対象者を層別化した上で、分析していく必要がある。さらに、これらのパターンの典型例における運動学的分析や筋電図学的分析などをもとに、その発生機序について明らかにしていく必要がある。

また、主成分分析では、説明しやすい成分を大きい方から見つけていくという特質から情報の損失があり、第3主成分までの累積寄与率の値より約37%の情報を損失していることを考慮しておく必要がある。

次に、三次元トレッドミル歩行分析を当院の片麻痺患者のみを対象に行っていること、そして三次元動作解析装置 Kinema Tracer[®]という一つの計測機器による指標を用いた結果であることが本研究の限界であり、

その普遍性は十分ではないため今後検証する必要がある。異常歩行の定量的指標においては、異常歩行の種類が10種類のみであり、臨床場面で遭遇する片麻痺患者の異常歩行のすべてを網羅しているわけではない。さらに、補装具の使用効果については、同一対象者において比較検討する必要があると考えているが、重度麻痺患者が、補装具を使用せずに歩行するという無謀な話となるため、片麻痺患者の異常歩行においてすべての因子を明らかにできないことは自明の理である。しかしながら、このような歩行パターンの分類を理解した上で、観察による異常歩行分析に臨むことができれば、何か一つでも特徴的な異常歩行パターンを見つけた際に、同パターン分類の異常歩行パターンの出現有無について観察の視点を持つことができると考えられ、観察による異常歩行分析の精度向上という点において十分意味のある知見であると考えられる。

謝辞

本研究に関し多大な助力いただきましたアルペンリハビリテーション病院室谷ゆかり理事長、山口昌夫院長に心から感謝申し上げます。また、データ収集、解析など多大な協力を賜りましたアルペンリハビリテーション病院リハビリテーション部の方々に感謝致します。

文献

1. Mulroy S, Gronley J, Weiss W, Newsam C, Perry J. Use of cluster analysis for gait pattern classification of patients in the early and late recovery phases following stroke. *Gait Posture* 2003; 18: 114-25.
2. De Quervain IA, Simon SR, Leurgans S, Pease WS, McAllister D. Gait pattern in the early recovery period after stroke. *J Bone Joint Surg* 1996; 78A: 1506-14.
3. Tanaka S, Yamamoto S. Kinetics and electromyographic

- analysis of hemiparetic gait patterns in patients. *J Soc Biomech* 2016; 23: 107–17.
4. Tanikawa H, Otsuka K, Saitoh E, Itoh N, Yamada J, Muraoka Y, et al. Inter-rater reliability of visual inspection about abnormal gait. *Sogo Rehabil* 2010; 38: 1175–81.
 5. Ohtsuka K, Saito E, Matsuda F, Kanada Y. Three-dimensional treadmill gait analysis. *J Clin Rehabil* 2014; 23: 871–9.
 6. Itoh N, Kagaya H, Saitoh E, Ohtsuka K, Yamada J, Tanikawa H, et al. Quantitative assessment of circumduction, hip hiking, and forefoot contact gait using Lissajous figures. *Jpn J Compr Rehabil Sci* 2012; 3: 78–84.
 7. Tanikawa H, Ohtsuka K, Mukaino M, Inagaki K, Matsuda F, Teranishi T, et al. Quantitative assessment of retropulsion of the hip, excessive hip external rotation, and excessive lateral shift of the trunk over the unaffected side in hemiplegia using three-dimensional treadmill gait analysis. *Top Stroke Rehabil* 2016; 23: 311–7.
 8. Hishikawa N, Tanikawa H, Ohtsuka K, Mukaino M, Inagaki K, Matsuda F, et al. Quantitative assessment of knee extensor thrust, flexed-knee gait, insufficient knee flexion during the swing phase, and medial whip in hemiplegia using three-dimensional treadmill gait analysis. *Top Stroke Rehabil* 2018; 13: 1–6.
 9. Saitoh E, Ohtsuka K. *Gait analysis and motion analysis*. Tokyo: Center for Academic Publications Japan, 2015: 71–88.
 10. Ohtsuka K, Mukaino M, Tanikawa H, Saitoh E. Actual clinical gait analysis in physical therapy of central nervous system disease patients. *Jpn J Phys Ther* 2018; 35: 156–68.
 11. Kaneko S. *Outline of multivariate analysis centering principal component analysis, multiple regression analysis, and discriminant analysis*. *Vet Sci Stat Methods* 1980; 5: 1–4.
 12. Tsuchida T, Moriya H, Yoshinaga K, Kubota T. Quantitative evaluation of hemiplegic gait using principal component analysis. *Jpn J Rehabil Med* 1998; 35: 477–84.