

脳卒中片麻痺患者の内反尖足に対する 足部ストレッチング手技の主成分分析

Principal Component Analysis of the Techniques of Manual Stretching for Equinovarus

山田 南欧美^{1,2)} 岡本 正吾¹⁾ 山田 陽滋¹⁾ 磯貝 香^{1,3)}
宮本 靖義⁴⁾ 河上 敬介^{5,6)}

NAOMI YAMADA, RPT^{1,2)}, SHOGO OKAMOTO, PhD¹⁾, YOJI YAMADA, PhD¹⁾, KAORU ISOGAI, RPT, MSc^{1,3)},
YASUNORI MIYAMOTO, RPT, MSc⁴⁾, KEISUKE KAWAKAMI, RPT, PhD^{5,6)}

¹⁾ Department of Mechanical Science and Engineering, Graduate School of Engineering, Nagoya University: Furo-cho,
Chikusa-ku, Nagoya-shi, Aichi 464-0814, Japan TEL +81 52-789-5330 E-mail: yanagihara.naomi@b.mbox.nagoya-u.ac.jp

²⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Rehabilitation, Aichi Medical College for Physical Therapy and Occupational
Therapy

³⁾ Department of Physical Therapy, Faculty of Health and Medical Sciences, Tokoha University

⁴⁾ Department of Physical Therapy, College of Life and Health Sciences, Chubu University

⁵⁾ Faculty of Welfare and Science, Oita University

⁶⁾ Department of Physical and Occupational Therapy, Graduate School of Health Sciences, Nagoya University

Rigakuryoho Kagaku 31(5): 705-710, 2016. Submitted Mar. 30, 2016. Accepted May 23, 2016.

ABSTRACT: [Purpose] The aim of this study was to develop a method to statistically analyze the techniques of manual stretching for equinovarus. [Subjects and Methods] Six physical therapists (PTs) and three stroke survivors participated in this study. The manual stretching motions of PTs and forces and torques applied to the patient's heel were measured by a motion capture system and a six-axial force sensor. For statistical analysis, principal component analysis (PCA) was expanded and performed on the recorded data. [Results] Three principal components were extracted by the statistical analysis. According to the primary component, PTs increased their force, on the toe side, and moment on dorsiflexion with slight abduction moments. The second and third components indicated the differences in the abduction/adduction and eversion/inversion torques around the heel and in the forces pulling or pushing the heel. [Conclusion] Our method based on PCA enables the statistical analysis of the similarities and differences of complex manual stretching techniques among PTs.

Key words: equinovarus, manual stretching techniques, principal component analysis

要旨:〔目的〕拡張した主成分分析を用いた脳卒中片麻痺患者の内反尖足に対する足部ストレッチング手技の分析方法の開発。〔対象と方法〕理学療法士6名および脳卒中片麻痺患者3名。ストレッチング手技を定量化するため、力覚センサと三次元動作解析装置を用いて踵部に加わる力とモーメントおよび足部の角度を計測し、拡張した主成分分析を適応した。〔結果〕第1主成分は内がえしを校正しながら足部を背屈位へ導く共通した手技を、第2主成分は踵部に加わる内外転・回内外モーメントと背屈角度の個人差を、第3主成分は踵を押し引きする力の個人差を示した。〔結語〕我々が開発した分析方法を用いて、複雑なストレッチング手技を統計的に分析できる可能性が示された。

キーワード: 内反尖足, ストレッチング手技, 主成分分析

¹⁾ 名古屋大学大学院 工学研究科 機械理工学専攻: 愛知県名古屋市千種区不老町 (〒464-0814) TEL 052-789-5330

²⁾ 愛知医療学院短期大学 リハビリテーション学科 理学療法専攻

³⁾ 常葉大学 保健医療学部 理学療法学科

⁴⁾ 中部大学 生命健康科学部 理学療法学科

⁵⁾ 大分大学 福祉健康科学部 理学療法コース

⁶⁾ 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

I. はじめに

脳卒中の後遺症の一つに痙性麻痺がある。上位運動ニューロンの障害により伸張反射が亢進し、下肢においては、足関節底屈筋群の筋緊張亢進に伴って内反尖足が生じる¹⁾。その結果、歩行立脚期では麻痺側の踵接地が困難になり、歩行の安定性が低下する^{2,3)}。この痙性に対する治療として、痙性筋のストレッチングが頻繁に実施される。筋を持続的に伸張することは、痙性筋の過剰な伸張反射を抑制し、筋、腱などの非反射性要素の硬化も防ぐと考えられている^{4,5)}。実際に、痙性を有する脳卒中片麻痺患者の足部に対するストレッチングについて、筋緊張亢進の緩和、可動域の改善といった効果が示されている⁶⁻⁹⁾。

臨床現場において、痙性筋のストレッチングは徒手的に行われることが多い。理学療法士が手を介して抵抗を感じながら、ストレッチングの力と方向を調整し、対象部位を伸張していく。しかしながら、各療法士が感覚的、経験的に手技を習得するため、この徒手ストレッチングは療法士ごとに加える力の大きさやタイミングが異なったり、伸張する肢位が異なったりする。そのため、複数の療法士が同一患者に対して徒手ストレッチングを施した場合、その効果に差が出てしまう可能性がある。また、経験年数により、治療効果の程度も異なる可能性がある。しかし、現在のところ、ストレッチング手技の特徴を統計的に分析する方法が存在しないため、療法士の徒手ストレッチングの手技とその治療効果との関係性を明らかにすることができない。

以上の背景のもと、本研究の目的は、脳卒中片麻痺患者の内反尖足に対する足部ストレッチング手技の特徴を

分析する方法を開発することである。自作の装具を用いてストレッチング中に足部に加わる力および姿勢変化を計測し、拡張した主成分分析を適用することで、手技の特徴を分類した。

II. 対象と方法

1. 対象

本研究で開発する足部ストレッチング手技の分析方法を臨床での手技に実際に適用するため、脳卒中片麻痺患者に対するリハビリテーションの経験が4年以上ある理学療法士6名と痙性麻痺を有する脳卒中片麻痺患者3名(年齢 77.7 ± 8.4 (平均 \pm 標準偏差) 歳)が実験に参加した。対象者の特性については、表1に示す。なお、この実験は名古屋大学大学院医学系研究科生命倫理審査委員会(平成26年6月6日承認、承認番号:14-501)および名古屋大学大学院工学研究科倫理部会(平成25年12月25日承認、受付番号:13-8)の承認を得たうえで行った。対象者には口頭および書面で実験内容の説明を行い、書面にて実験参加の同意を得た。

2. 方法

ストレッチング手技を評価・分析するために、まずストレッチング手技を定量化し、その後、統計的に手技の特徴を同定した。

徒手ストレッチングは、療法士が自身の手で対象の抵抗を感じ取り、それに相応しい力量を調節しながら、対象部位を連続的かつ三次元的に押す、引く、捻じる行為である。そこで、ストレッチング手技を定量的に表現するために、対象に加えられる直線方向および回転方向へ

表1 対象者特性

	PT1	PT2	PT3	PT4	PT5	PT6
経験年数(年)	5	5	4	20	4	15
性別	男性	男性	男性	男性	男性	男性

PT: Physical Therapist.

	患者 A	患者 B	患者 C
年齢(歳)	68	83	82
性別	男性	女性	男性
発症後期間(月)	3	4	5
麻痺側	左	右	右
BRS	IV	V	II
MAS	1	1+	3
他動関節可動域			
背屈/底屈(°)	5/45	10/25	0/45
外がえし/内がえし(°)	10/30	10/15	5/35

BRS: Brunnstrom Recovery Stage, MAS: Modified Ashworth Scale.

の力の程度と対象部位の姿勢変化とを時系列的に計測した。

ストレッチング手技における力の計測には、6軸力覚センサ (IFS-67M25A50-I40, ニッタ社製) を踵部に内蔵した自作の靴型の測定装具を用いた (図1, A)。一般に、理学療法士は患者の踵を把持して足部をストレッチングする。よって、理学療法士が対象者の足底面に装着された測定装具の踵部を把持して足部をストレッチングすることで、踵部に加わる力 (f_x, f_y, f_z) とモーメント (m_x, m_y, m_z) が計測される。測定装具は全て足関節よりも遠位の位置で固定されているため、装具に加えられた力は全て足部に伝わる。この剛体装具を介して足部に理学療法士の力が加わり、足部がストレッチングされる。ただし、足趾にも装具が装着されているため、理学療法士は足趾を狙ったストレッチングを行うことはできない。一方、足部姿勢の計測には、三次元動作解析装置

(VENUS3D Ver4.0, ノビテック社製) を用いた。計測用の反射マーカは、脳卒中片麻痺患者の麻痺側下腿と麻痺側足部に装着した測定装具上に貼付した (図1, B)。下腿上の反射マーカは、脛骨前縁上に2点、それらの中央の高さの脛骨内側縁上に1点、計3点設置した。測定装具上の反射マーカは、装具足底面の前縁上に2点、内側縁上に2点、計4点設置した。これらのマーカ座標より下腿の姿勢と足部の姿勢を算出し、下腿に対して足部が三次元的にどのように動いたかをロール角・ピッチ角・ヨー角で算出することで、足部の3軸周りの角度変化を算出した ($\theta_x, \theta_y, \theta_z$)。以上のようにして得られる各変量 ($f_x, f_y, f_z, m_x, m_y, m_z, \theta_x, \theta_y, \theta_z$) の基準座標系は、図1に示す通りである。また、各変量の臨床的意味を表2に示す。

計測実験では、脳卒中片麻痺患者はベッド上に横たわり、膝下にクッションを置いて膝関節軽度屈曲位にした状態で麻痺側足部に測定装具を装着した。そして、装具を介して理学療法士が足部をストレッチングした。理学療法士は患者の麻痺肢の外側にて椅子に座り、患者の麻痺側と同側の手で測定装具の踵部を把持し、測定装具足底面前方のパッドに前腕を当て、片側上肢を用いて足部をストレッチングした。1回のストレッチングの時間は10秒に設定し、各理学療法士は、10秒のストレッチングを5秒の間隔をあげながら3試行を行い、これを3セット行った。患者の負担を軽減するため、1回の実験で1人の患者に対してストレッチングを行う理学療法士は3名とした。セット間の休憩時間は約1分、理学療法士の交代時間は約5分であった。ストレッチング手技は理学療法士のみならず、患者の症状に合わせて適応的に表出されるものなので、この実験を3名の患者に対して行った。患者Aに対しPT1, 2, 3が、患者Bに対しPT4, 5, 6が、患者Cに対しPT1, 4, 5がストレッチングを行い、合計81試行分のデータを取得した。

データ取得後、各変量についての時系列データを、初期姿勢から背屈位に至るまでの移行期と背屈位で持続伸張を行う維持期とに角速度をもとに分割した。これは、移行期と維持期とにおける手技の性質が異なるため、それぞれの周期の特徴を分析できるようにするためである。なお、本研究では、足部の動きが大きく観察される移行期のデータについて解析を行った。

次に、移行期におけるストレッチング手技の特徴を明らかにするために、主成分分析を応用した。近年、個人

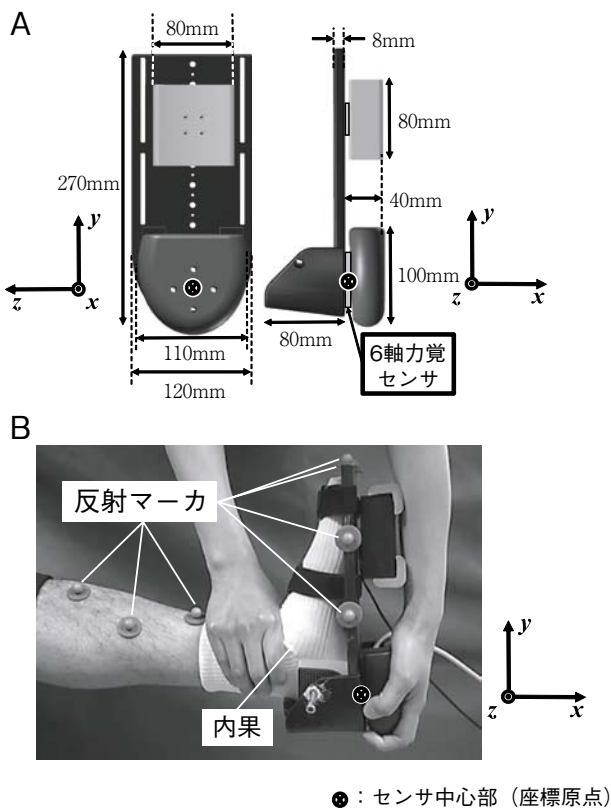


図1 A: 測定装置の概要
B: 測定時の姿勢・力の計測に用いた反射マーカ位置および基準座標系

表2 各変量の臨床的意味

変量	+x / -x	+y / -y	+z / -z
力 (f)	足底面方向 / 頭方向	爪先方向 / 踵方向	内側方向 / 外側方向
モーメント (m)	内転 / 外転	回内 / 回外	背屈 / 底屈
角度 (θ)	内転 / 外転	回内 / 回外	背屈 / 底屈

の特性が反映される動作の解析に、特異値分解や主成分分析が利用され始めている¹⁰⁻¹³⁾。例えば、Nakanishiらは、特異値分解の適用範囲を拡張した手法を提案し¹²⁾、複数の関節角度の時系列データで表現された動作を分析することが可能であるとした。我々の研究では、これらの手法を元に、変量を角度のみならず、力、モーメントにまで拡張した。これら9変量の時系列データを全て縦に並べたベクトルを作成し、これを全試行分横に並べたデータ行列を作成した。そして、この行列に主成分分析を適用し、各主成分の寄与率、因子負荷量、および全試

行における主成分得点を得た。なお、各変量は、全試行内での力、モーメント、角度の変化量の最大値でそれぞれ除することで、事前に標準化した。また、各試行における移行期のデータ長を揃えるため、データ長が100になるようダウンサンプリングした。その結果、1試行のデータは長さ900(9変量×100サンプル)のベクトルで表現された。解析対象は、累積寄与率がはじめて80%以上になる主成分までとした。なお、主成分分析には、MATLAB R2014bを用いた。

III. 結果

表3 寄与率および累積寄与率

主成分	寄与率 (%)	累積寄与率 (%)
1	68.8	68.8
2	10.8	79.6
3	8.3	87.9
4	2.9	90.8
5	2.4	93.2

計測した試行のうち、途中でストレッチングが中断してしまったものや、マーカの追跡に欠損があった試行を除き、最終的に73試行を解析対象とした。主成分分析によって得られた寄与率および累積寄与率を表3に示す。第3主成分までの累積寄与率が87.9%となるため、第3主成分までを解析対象とした。

第1主成分から第3主成分までの因子負荷量を力、

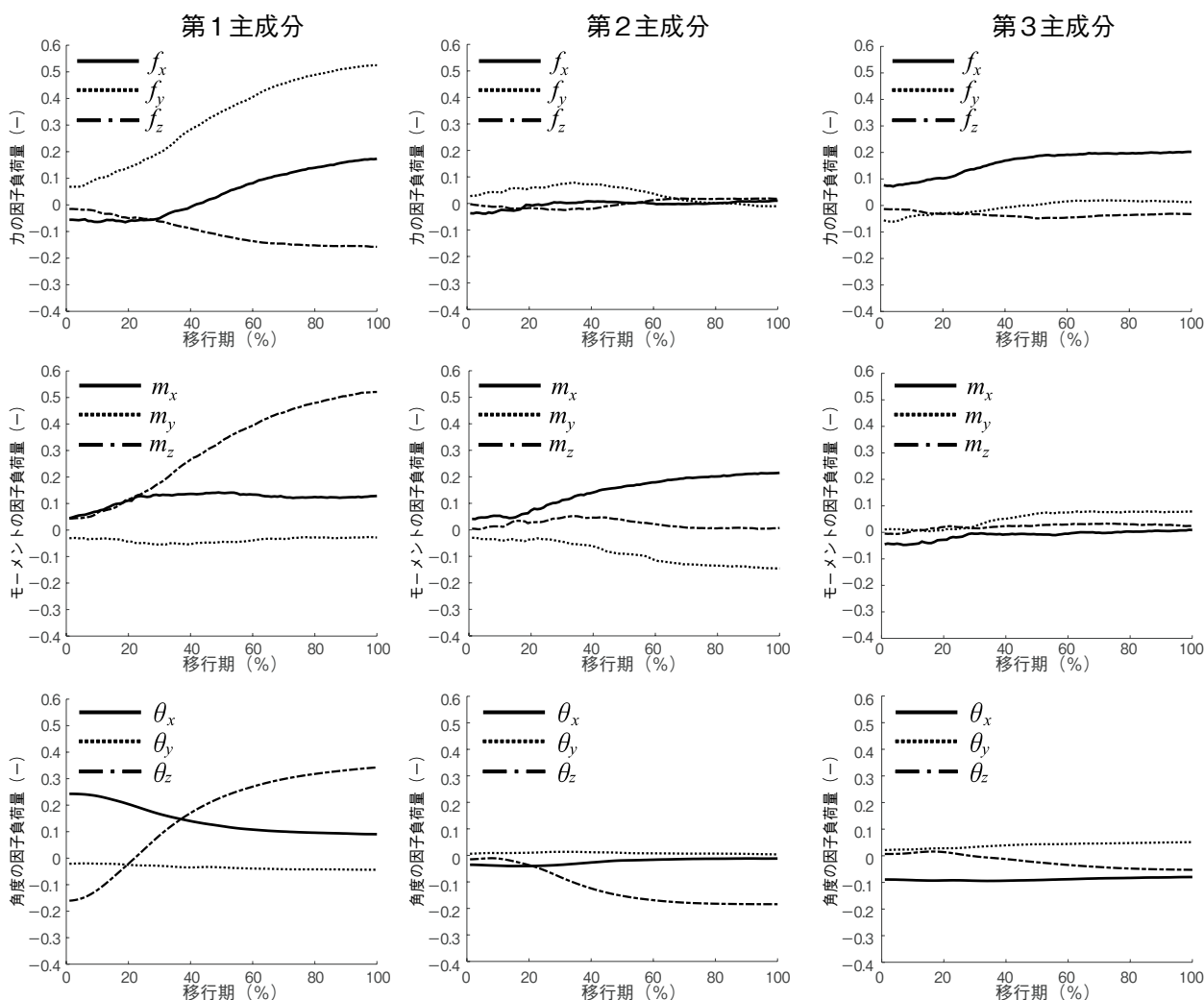


図2 第1主成分(左)、第2主成分(中)、第3主成分(右)の因子負荷量

モーメント、角度毎に図2に示す。第1主成分では、ストレッチングの過程で、力については、最大の変化量と比較して f_y が45.7%増大、 f_x が23.8%増大、 f_z が14.2%減少した。モーメントについては、 m_z が47.8%増大した。角度については、 θ_z が負の初期値（底屈位）から正の値（背屈位）へと50.3%増大したのに対し、 θ_x は15.2%減少し、外転方向への変化を示した。第2主成分では、 m_x が17.4%増大したのに対し、 m_y が11.6%減少し、第3主成分では、 f_x のみ13.1%増大した。上記以外の変量については、全て10%未満の変化量であった。

主成分得点は、絶対値の大きさがその試行に対する各成分の影響力の大きさを示し、得点が負の場合はその成分は負の方向に影響する。第1主成分の主成分得点は全ての試行において正であった。第2、3主成分の主成分得点は試行ごとにばらつきがみられたため、分布図にて図3に示す。

IV. 考 察

ストレッチングに関する先行研究では、その指標に底背屈周りの関節トルクが用いられることが多い^{7,8)}。しかし、これらの研究では機械によるストレッチングで生じる関節トルクを計測しており、セラピストの手技における力、モーメントを適切に計測しているものはない。今回、我々はストレッチング中に理学療法士が加える力とモーメントを計測できる測定装具を作製し、三次元動作解析装置と同期して理学療法士のストレッチング手技を計測した。これにより、ストレッチング手技における力、モーメントおよび対象部位の姿勢変化を時系列データとして得ることができた。

時系列で変化する動作の解析には、工学分野において、主成分分析を応用した方法が用いられている。特異値分解の適用範囲を拡張することで、時系列データの複数サンプル間に潜在する特徴を明らかにできるとされており¹⁰⁻¹³⁾、実際にヒトの上肢の運動解析¹¹⁾や歩行の動作解析が行われている¹³⁾。本研究では、ストレッチング手技が作用力特性および患部姿勢の時系列変化で表現できるとし、この方法を用いて分析できると考えた。しかし、工学分野では、これまで複数の関節角度の時系列データしか分析対象とされていなかった。そこで我々は、この方法をさらに拡張することで、力、モーメントおよび角度で表現されるストレッチング手技を分析する方法を開発した。そして、この方法を用いて脳卒中片麻痺患者に対するストレッチング手技を分類した。これにより、これまで行われてこなかったストレッチング手技の統計的分析が可能となった。

拡張した主成分分析を行った結果、第1主成分の寄与率は68.8%、第2主成分は10.8%、第3主成分は8.3%であった。第1主成分は計測されたデータのばらつきを

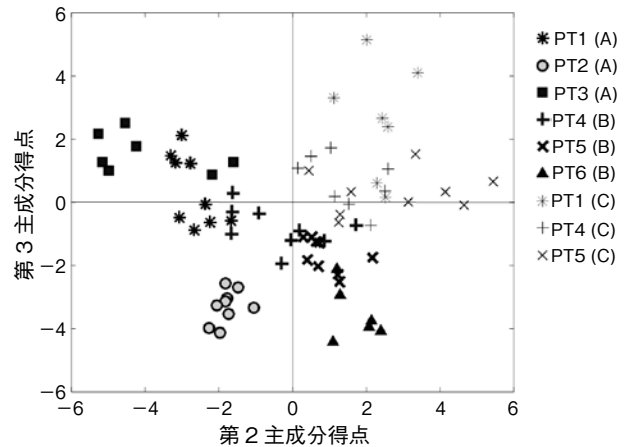


図3 全試行の第2主成分得点、第3主成分得点の分布図
6名のPT (PT1-6) が3名の患者 (A, B, C) に対して行ったストレッチング全試行について、主成分分析によって得られた第2、3主成分の主成分得点を示す。

最も反映し、ストレッチング手技の共通性を示す成分とみなせる。第2、3主成分については、その背後に隠れた個人差が生じる手技を示す成分とみなせる。

因子負荷量については、その絶対値が大きい変量を各主成分の特性とみなすと、下記の通りそれぞれの成分が解釈できる。第1主成分は、わずかに踵を引きながら、爪先方向の力と背屈モーメントで足部を大きく背屈させ、徐々に外転方向の力を加えて足部を外転させるという手技を示した。全試行の第1主成分得点は正であったことから、全ての試行が第1主成分の正の影響を受ける。つまり、第1主成分の特徴は背屈と外転を同時に加えて足部を制動するという手技の共通性を示す。これは、内反尖足に対するストレッチング手技として、解剖学的にも合理的かつ標準的な手技である。ただ、本実験では踵部の制動にのみ着目していたため、今後前足部に加わる力についても計測し、前足部、踵部それぞれにどのような力やモーメントが生じ、合力として足部全体にどのように作用しているかを確認する必要がある。一方、第2主成分では、 θ_z の因子負荷量が第1主成分の特徴と反対の特徴を示したことから、第1主成分の特徴を打ち消すため、あまり背屈せず内転モーメントと回外モーメントを加えるという特徴を示した。すなわち、主成分得点の大きさが、内反変形に抗するモーメントをどの程度加えるか、そしてどの程度背屈させるかの違いを示す個人差の成分である。あまり背屈せず内転モーメントと回外モーメントを加えるという手技は、足部の内がえしを効率的に矯正するには適さないと考えられる。第2主成分における主成分得点を確認すると、患者Cに対する試行が正の得点を、患者Bに対する試行が-2~2の付近を、患者Aに対する試行が負の得点を示している。このことから、患者Cに対するストレッチング手技では

第2主成分の正の影響を、患者Aに対するストレッチング手技では負の影響を受けていた可能性が考えられる。痙縮の程度は患者Cの方が重度であり、背屈および外がえし角度の制限もみられることから、患者Cに対しては無理に内反を矯正しないように、理学療法士が手技を調整していたことが予測される。一方、患者Aの痙縮の程度は軽度であり、内がえし外がえしともにある程度の可動域が確保されているため、内反変形に抗するモーメントを十分に加えることができ、第2主成分得点が負となったと考えられる。第3主成分の因子負荷量は、足底面方向へ踵を引くという特徴を示した。すなわち、この成分は、踵を足底面方向へ引く、もしくは頭方向へ押す力の違いを示す個人差の成分であった。足底面へ踵を引く力については、距腿関節を離開し、距骨の滑りを誘導することで確実に背屈を行おうとする手技を示していると考えられる。第3主成分得点は、PT4、5が0付近を推移しているのに対し、PT1、3は正、PT2、6は負に分布している。よって、第3主成分の特徴は理学療法士間の手技の個人差を示していると考えられる。第2、3主成分で確認された個人差は、ストレッチングの治療効果や効率に直結することが予想され、主成分分析を用いたストレッチング手技の分析が、理学療法における徒手ストレッチングの発展に有用であることがうかがえる。ストレッチングの治療効果の検証は、一般的に関節可動域の変化や筋粘弾性の変化を対象に行われており¹⁴⁾、これらを用いて、手技の分析により得られた特徴と治療効果の関係性を明らかにしていくことが今後の課題である。

本研究はストレッチング手技分析方法を開発することを目的とし、その臨床応用方法を示すために、複数の理学療法士の複数の患者に対するストレッチングを解析した。拡張した主成分分析を用いたことにより、ストレッチング手技の共通性および個人差を抽出することができた。これにより得られた手技の特徴は、複数の理学療法士および患者の特徴を包含している。今後、理学療法士の特徴を明らかにしたい場合は、同一の患者に対する複数の理学療法士の手技を解析し、患者の特徴を明らかにしたい場合は、同一の理学療法士の複数の患者への手技を解析する必要があることに留意しなければならない。

結びに、本研究では、脳卒中片麻痺患者の内反尖足に対する足部ストレッチング手技の特徴を、統計的に分析する方法を開発することを目的とし、自作の測定装具を用いてストレッチング中の力学的特性を計測し、角度変化と合わせて拡張した主成分分析を適用した。その結果、理学療法士間に内在する脳卒中片麻痺患者に対する足部ストレッチング手技の共通性および個人差を特定することができた。我々が本研究で用いたストレッチング手技の分析方法は、治療効果の高いストレッチング手技の同定に寄与することが期待される。

謝辞 本研究を実施するにあたり、多大なご協力を頂きました医療法人喜峰会東海記念病院の井戸尚則先生、松永拓洋先生、関係各位の皆様へ御礼申し上げます。そして、本研究にご参加いただきました患者の皆様へ深謝致します。なお、本研究の一部は、科学研究費補助金（課題番号：15K12610）、御器谷科学技術財団研究開発助成、笹川科学研究助成（課題番号：27-634）の支援を受けて行われました。ここに謝意を表します。

引用文献

- 1) Lawrence SJ, Botte MJ: Management of the adult, spastic, equinovarus foot deformity. *Foot Ankle Int*, 1994, 15(6): 340-346.
- 2) Lamontagne A, Malouin F, Richards CL: Locomotor-specific measure of spasticity of plantarflexor muscles after stroke. *Arch Phys Med Rehabil*, 2001, 82(12): 1696-1704.
- 3) Lamontagne A, Malouin F, Richards CL, et al.: Mechanisms of disturbed motor control in ankle weakness during gait after stroke. *Gait Posture*, 2002, 15(3): 244-255.
- 4) 長谷谷 隆: 伸張を続けければ痙縮は改善する? 総合リハビリテーション, 2000, 28(8): 781-784.
- 5) 鈴木重行, 平野幸伸, 鈴木敏和: IDストレッチング, 第2版. 鈴木重行(編), 三輪書店, 東京, 2006, pp5-7.
- 6) Yeh CY, Chen JJ, Tsai KH: Quantifying the effectiveness of the sustained muscle stretching treatments in stroke patients with ankle hypertonia. *J Electromyogr Kinesiol*, 2007, 17(4): 453-461.
- 7) Bressel E, McNair PJ: The effect of prolonged static and cyclic stretching on ankle joint stiffness, torque relaxation, and gait in people with stroke. *Phys Ther*, 2002, 82(9): 880-887.
- 8) Selles RW, Li X, Lin F, et al.: Feedback-controlled and programmed stretching of the ankle plantarflexors and dorsiflexors in stroke: Effects of a 4-week intervention program. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(12): 2330-2336.
- 9) Yeh CY, Tsai KH, Chen JJ: Effects of prolonged muscle stretching with constant torque or constant angle on hypertonic calf muscles. *Arch Phys Med Rehabil*, 2005, 86(2): 235-241.
- 10) 井手 剛, 井上恵介: 非線形変換を利用した時系列データからの知識発見. 第4回データマイニングワークショップ(DM2004) 論文集, 2004, 東京, pp1-8.
- 11) Bokman L, Syungkwon R, Park FC: Movement primitives, principal component analysis, and the efficient generation of natural motions. *IEEE Robotics and Automation Society, ICRA*, 2005, Barcelona, 4630-4635.
- 12) Nakanishi H, Kanata S, Hattori H, et al.: Extraction of coordinative structures of motions by segmentation using singular spectrum transformation. *J Adv Comput Intell and Intell Info*, 2011, 15(8): 1019-1029.
- 13) 船戸徹郎, 青井伸也, 土屋和雄: ヒトの歩行における全身の関節協調動作の定量的評価. *日本ロボット学会誌*, 2010, 28(8): 996-1003.
- 14) 鈴木重行: ストレッチングの科学. 三輪書店, 東京, 2013, pp2-5.