

運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術(第2報)

曾賀野 健一 青木 隆明* 李 鵬 渡辺 博己 棚橋 英樹

A Study on Inexpensive Body Sway Analysis for Rehabilitation Support of Locomotorium (2nd report)

Kenichi SOGANO Takaaki AOKI* Peng LI Hiroki WATANABE Hideki TANAHASHI

あらまし 身体の動揺を安価な計測器を用いて定量化し、リハビリテーションの経過観察等に資する情報としてPT(理学療法士)等に提供することを目的に、Wii Board(WB)を利用した床反力計測・解析システムの構築を進めている。これまでに、WBに配置された4箇所のフォースセンサ情報をBluetooth経由で取得し、足圧中心(Center of foot Pressure; COP)の位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出する独自のプログラムを試作した。さらに、股関節機能に衰弱がみられる患者4名と非患者11名を被験者とした床反力情報取得実験を行い、特徴量の傾向を確認した。しかし、被験者数の問題から身体のバランス評価手法の精度は高いとはいえなかった。そこで本報では、被験者数を確保し、股関節症患者群にみられる重要度の高い特徴量を導くための解析手法について報告する。さらに、リハビリテーションの経過観察等に応用可能な可視化手法について報告する。

キーワード 床反力, COP, 身体バランス, ロコモティブシンドローム, 股関節機能, リハビリテーション

1. はじめに

加齢や生活習慣(運動不足, 肥満等)により筋肉や骨等の運動器機能が衰弱すると疼痛やよろめく等の症状, いわゆるロコモティブシンドローム^[1]を発症する。運動器の中でも特に股関節は骨盤と下肢をつなぐ要の荷重関節であり, 立つ, 歩く等の姿勢や動作を安定して行うために必要な筋肉や骨等で構成されているが, この関節機能が衰弱すると身体のバランスを保持する機能が低下し, 更衣や階段の昇り降り等の幅広い日常生活動作が制限される。股関節機能障害の発生率は人口の高齢化とともに増加傾向にあり, その回復措置として医学的リハビリテーションを必要とする患者数も急増している状況である。

股関節機能が日常生活に支障のない状態かを判定する基準には日本整形外科学会が定める股関節機能判定基準(JOA SCORE)があり^[2], 立位や歩行等の検査課題の遂行度を得点化し, その合計得点で股関節機能を評価する。臨床現場ではリハビリ経過観察や術前後等における股関節機能の定量的な計測と解析により評価の信頼性を確保することが求められており, 重心動揺計や足圧計測装置等が使用されているが, これらの装置は高価であることや検査に手間がかかること等から臨床の場での日常的な使用は困難である。

前年度の研究開発では, 安価に床反力情報を取得する

装置として任天堂社製のWii Board(以下, WBという)を採用し, 床反力計測・解析システムを構築した^[3]。このシステムでは, WBに配置された4箇所のフォースセンサ情報をBluetooth経由で取得し, 足圧中心(Center of foot Pressure; COP)の位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出することが可能である。さらに, 岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部に通院する股関節機能に衰弱がみられる患者(以下, 股関節症患者という)4名と非患者11名を被験者とした床反力情報取得実験を行い特徴量の傾向を確認した。しかし, 被験者数の問題から身体のバランス評価結果の精度は高いとはいえなかった。

本報では, 被験者数を確保するとともに, 取得した床反力情報からCOPの位置や床反力の時間変化等に注目した諸種の特徴量を抽出し, 統計的手法を用いて股関節症患者群において重要度が高いと考えられる特徴量を導き, 股関節症患者群にみられる傾向を確認した。さらに, リハビリテーションの経過観察等への応用例として, 重要度の高い特徴量に関して履歴観察やリハビリ前後の比較を行うための可視化手法について報告する。

2. 計測・解析

2. 1 床反力情報取得・解析方法

WBを利用した床反力情報取得・解析技術の構成を図1に示す。WBにはパソコンと通信する機能を有していない

* 国立大学法人岐阜大学医学部附属病院

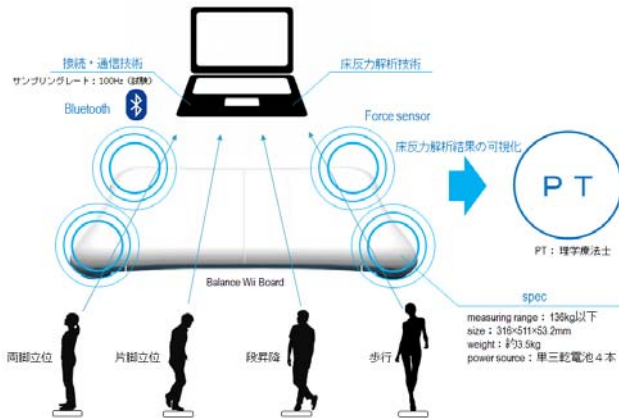


図1 WBを利用した床反力情報取得・解析技術の構成

が、独自に開発したプログラムを用いることでWBに配置されたフォースセンサの情報をBluetoothを利用しパソコンに受信することが可能である。プログラムの手順については後述の2. 3計測対象姿勢と動作の内容に基づいて構築した。取得した各フォースセンサの情報からサンプリング時間ごとに床平面座標系における左右前後の荷重比率を計算することによりCOPの位置を求め、COP位置の時間変化等に基づいて諸種の特徴量を抽出する。なお、歩行等の動作では特徴量を抽出する際に、単脚支持期(片側の脚で全体重を支える時期)を抽出の対象区間とした。単脚支持期の抽出方法については、前年度の研究開発^[3]において検討した方法を用いた。

2. 2 WBの有用性

WBを用いて得られたCOPの位置精度を検証するため、医療現場等で重心動揺の計測に用いられているアニマ社製グラビコーダGP-5000との比較を行った。比較に用いた数値は身体における重心動揺を評価する指標として用いられるCOP総軌跡長とした^[4]。被験者は股関節機能に衰弱のみられない成人被験者10名とし、両脚立位と片脚立位の姿勢を10秒間保持したときのCOP総軌跡長を測定した。いずれの姿勢もWBとグラビコーダで抽出したCOP軌跡長に有意差はみられなかった ($p \geq 0.05$)^[3]。このことはWBで抽出したCOPの位置情報が一般的な重心動揺計測で用いられるグラビコーダと同程度の数値であることを示唆している。

2. 3 計測対象姿勢と動作

股関節機能を評価する場合、対象者が日常生活の中で行う姿勢や移動動作の安定性を尺度としており^[4]、臨床現場では日本整形外科学会が定めるJOA SCOREの評価基準に沿って日常生活動作(立位、段昇降等)や歩行等の遂行度を判定する方法が最も普及している^[5]。

床反力の計測対象とする姿勢・動作の種類及びWBを用いた計測方法については、JOA SCOREに記載されている股関節機能評価基準及び岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部で行われている臨床検査に準拠する内容とし、以下のように定めた。

【姿勢】

・両脚立位姿勢

WBに両下肢を接し、両腕を体側につけ眼の高さで約3m離れた正面の指標を注視し10秒間静止姿勢を保持する。

・片脚立位姿勢

WBに片脚で立位し、両腕を体側につけ眼の高さで約3m離れた正面の指標を注視し10秒間静止姿勢を保持する。(左右脚別に行う。)

【動作】

・段昇降

前方のWB(段差:約5cm)に昇段し、WBから後方に降段する移動を行う。(左右脚別に行う。)

(例) 右脚から昇段する場合

右昇段→左昇段→右降段→左降段

・歩行

3歩以上歩行後、WBに片脚で乗り前方へ移動する。(左右脚別に行う。)

WBの段差が平坦となる歩行路を整備した。

すべての姿勢・動作についてサンプリングレートを100Hzに設定し、計測時は開眼で靴を脱いだ状態で行い、靴下の着用は許可した。

2. 4 特徴量

歩行の床反力分析において、股関節機能等に衰弱がみられない場合の床反力パターン(垂直分力)は踵接床時とつま先離床時にピークを呈する二峰性の形状を示すことが知られているが、股関節症の片側罹患例では左右脚で等しい二峰性の床反力形状とならず、患側下肢の床反力(垂直分力)に二峰性の平坦化が観察されるという報告がある^[6]。また岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部では、股関節症患者の特徴的な跛行として患側下肢の単脚支持期に体幹が患側に側屈する現象がみられるという所見がある。

以上の臨床所見と先行研究の報告にみられる二峰性の平坦化及び側屈の影響は、床反力及びCOP位置の時間変化にあらわれると考えた。身体のバランス機能を評価するために検討した主な特徴量を表1に示す。

表1 主な特徴量の内容

特徴量	説明
MX, MY	COP最大振幅(側方, 前後方)
TdX, TdY	COP総軌跡長(側方, 前後方)
SDX, SDY	COP位置の標準偏差(側方, 前後方)
RX, RY	荷重割合(側方, 前後方 各最大値)
TdZ, MdZ	床反力の総変化量, 最大変化量 (被験者の体重で標準化)

※両脚/片脚立位姿勢は10秒間、段昇降と歩行は単脚支持期の床反力情報に基づいて算出

※側屈等はCOP位置の変化や荷重割合に作用すると想定

※二峰性の平坦化は床反力の変化に作用すると想定

3 実験

股関節症患者が2. 3の姿勢と動作を行った場合にCOP位置と床反力にあらわれる傾向を確認するため、股関節症患者と非患者を対象とした床反力情報取得実験を実施した。股関節症患者は岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部に通院する患者とし、非患者は医療・福祉・介護関連の展示会、企業訪問、研修、見学等の場を活用して募集した。実験への参加に対するインフォームドコンセントについては、事前に実験参加の安全性や個人情報の秘密保持等を十分に説明した後、書面をもって行った。特に股関節症患者の実験にあたっては、岐阜大学大学院医学系研究科の医学研究等倫理審査委員会の承認を受けて実施した。床反力情報取得実験に用いた実験機材と実験風景を図1に示す。



図2 床反力情報取得実験に用いた機材と実験風景

非患者を対象とした床反力情報取得実験ではアンケート調査をあわせて実施し、下肢の疾患(現在の治療状況、既往歴の有無)や日常生活機能の支障に関するチェックを行い、すべての項目に該当がみられない場合は非患者に分類した。この結果、本稿で扱うサンプル数は股関節症患者13名、非患者147名の計160名となった。股関節症患者群(以下、患者群という)と非患者群のサンプルの構成を表2に示す。

表2 床反力情報取得実験で取得したサンプルの構成

	非患者群			患者群		
	全	男	女	全	男	女
性別						
被験者数(人)	147	102	45	13	6	7
平均値(歳)	39	41	35	48	29	64
標準偏差(歳)	14	13	15	22	9	16
最大値(歳)	84	81	84	83	39	83
最小値(歳)	19	20	19	15	15	42

4 実験結果と考察

4.1 サンプルの傾向分析

3の実験で取得した各被験者の床反力情報からCOPの位置や床反力の時間変化等に関する特徴量を2. 3の姿

勢・動作別に抽出した。サンプルデータは、両脚立位姿勢では患者群に患者13名のデータ13件、非患者群に非患者147名のデータ147件を用い、片脚立位姿勢、段昇降、歩行では患者群に患者13名の患側のデータ13件、非患者群に非患者の左右脚をあわせたデータ294件を用いた。以上のデータを用いて個々のサンプル間の類似性を分析し、サンプルの分布傾向を確認するため、階層的クラスタ分析を行った。階層的クラスタ分析は、サンプルや変数の類似度(主に距離)に基づいてデンドログラム(樹形図)と呼ばれる階層構造を生成し、サンプルの分類を行う手法であり、分類されたサンプルの集団はクラスタ(cluster)と呼ばれる。サンプルの類似度の指標に関しては、一般的に用いられるユークリッド距離による群平均法とした。分析では、統計解析ソフトJUSE-StatWorks/V4.0を用いた。

歩行のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図3に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②, ③に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②, ③の特徴をみるとTdZすなわち床反力の総変化量(体重比)が他のclusterと比較して小さい傾向を示している。これは、患側の単脚支持期初期において患側に荷重をかけることが困難であることから、非患側に働かせる推進力を低減し患側の荷重負担を軽減する影響と、患側の単脚支持期後期において患側に十分な推進力を働かせることができないことが考えられ、患側の床反力波形において二峰性の平坦化が観察される一因と推察される。また、cluster②, ③に属する股関節症患者の症例には、伸筋群の衰弱が確認できることから患側の推進力の低下が床反力に作用していると考えられる。さらに、cluster③の特徴をみるとTdXすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster③のCOP軌跡(図3)は、患側(右脚)単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが右前方に移動した後に左

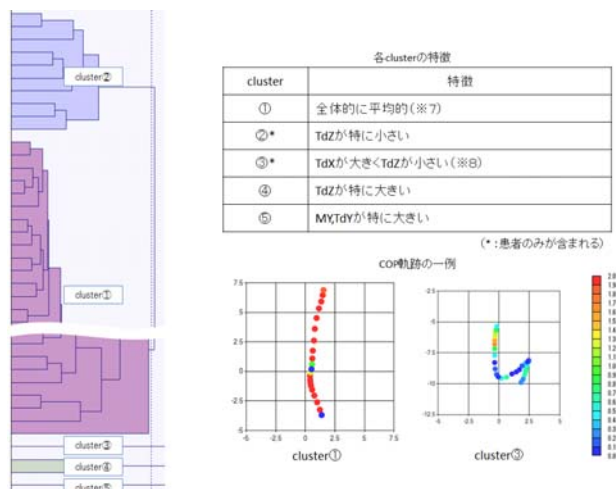


図3 階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴(歩行)

側方に屈曲している様相がみられる。これは、患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持していることが考えられ、患側の単脚支持期において側屈が観察される一因と推察される。また、cluster③に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから、患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

段昇降のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図4に示す。cluster①, ②, ③に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster④, ⑤に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster④, ⑤をみると、Tdxすなわち床反力の総変化量（体重比）が他のclusterと比較して小さい傾向を示している。これは、歩行と同様に患側の単脚支持期初期及び後期において非患側及び患側に推進力を働かせることができないことが考えられる。また、cluster④, ⑤に属する股関節症患者の症例には、伸筋群の衰弱が確認できることから、患側の推進力の低下が床反力に作用していると考えられる。さらに、cluster⑤の特徴をみるとTdxすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster⑤のCOP軌跡（図4）は、患側（右脚）単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが右前方に移動した後に左側方に屈曲している様相がみられる。これは歩行と同様に、患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持している影響が考えられ、患側の単脚支持期において側屈が観察される一因と推察される。また、cluster⑤に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

片脚立位姿勢保持のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図5に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②, ③, ④, ⑤に属

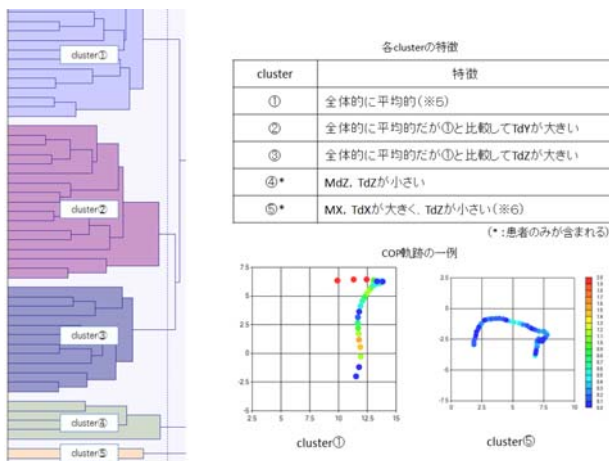


図4 階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（段昇降）

するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②, ③の特徴をみるとTdxすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。cluster②のCOP軌跡（図5）は、患側（左脚）単脚支持期におけるCOP位置の時間変化を示しているが、COPが特に側方に往来している様相がみられる。これは、歩行や段昇降にもみられるように患側の支持性が衰弱していることから体幹を側方に傾倒することによりバランスを保持していることが考えられる。また、cluster②, ③に属する股関節症患者の症例には、外転筋群の衰弱が確認できることから患側の支持性の低下がCOPの軌跡に作用していると考えられる。

両脚立位姿勢保持のサンプルデータを用いて階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterごとの特徴を図6に示す。cluster①に属するサンプルには非患者が多数含まれ、cluster②, ③, ④, ⑤に属するサンプルには股関節症患者のみが含まれる結果となった。股関節症患者のみが含まれるcluster②の特徴をみるとRXすなわち側方の最大荷重割合が大きい傾向がみられた。これは、患側への荷重負担を軽減させるために非患側に荷重を移動させていることが考えられる。また、cluster②, ③, ④, ⑤に属する患者の症例には患側に股関節部骨構造の変形にともなう疼痛が確認できることから、患側の荷重負担を軽減する働きが荷重移動に作用していると考えられる。ここで股関節症患者のみが含まれるcluster③, ④, ⑤の特徴をみるとTdxすなわち側方のCOP総軌跡長が他のclusterと比較して大きい傾向を示している。ただし、これらのclusterに属するサンプルは、cluster④のCOP軌跡（図6）にみられるようにRXすなわち側方の最大荷重割合が小さい傾向がみられた。これは、患側への荷重負担を軽減させるために非患側に荷重を移動させることを行わず、

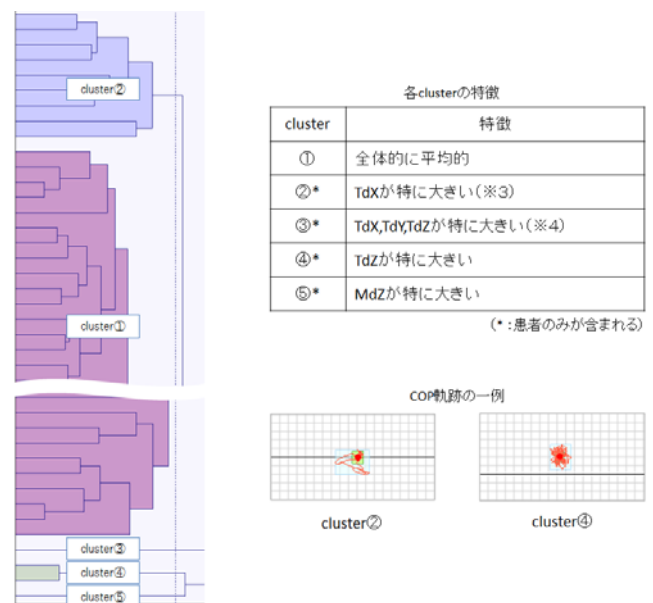


図5 階層的クラスタ分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（片脚立位姿勢保持）

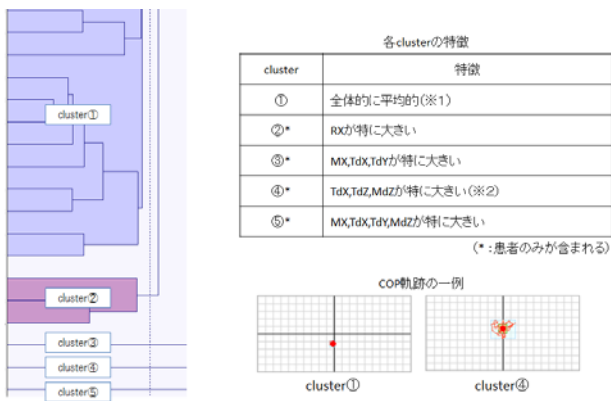


図6 階層的クラスター分析により生成されたデンドログラムと分類されたclusterの特徴（両脚立位姿勢保持）

両脚立位姿勢を保持しようとする過剰な働きがCOPの軌跡に作用したと考えられる。なお、cluster②に属するサンプルにおいてはTdXが平均的な数値を示すことから、両脚立位姿勢保持において股関節症の傾向をみる場合には、RXとTdXをあわせて観察する必要がある。

以上の結果から、股関節症患者の特徴的な跛行にみられる二峰性の平坦化や側屈の現象等は、股関節症患者が属するclusterの特徴としてよくあらわれており、clusterの特徴に共通してみられる特徴量を股関節症に関わる重要度の高い特徴量と考えることができる。

4. 2 特徴量の妥当性

4. 1の階層的クラスター分析の結果、姿勢・動作別に患者が属するclusterの特徴をみると共通する特徴量が複数存在するが、これらの特徴量が股関節症に関わる実質的な意義を有しているかを検証するため、統計的手法を用いて特徴量の妥当性を検証した。例として、図4の段昇降において患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdZに注目し、患者群と非患者群の平均値と標準誤差をそれぞれ求め、その結果を図7に示す。患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。同様に、両脚立位姿勢を保持した場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdX、RX、片脚立位姿勢を保持した場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdX、歩行の場合に患者が属するclusterに共通してみられる特徴量TdZに関して、それぞれ患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、いずれも患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。図7において患者群と非患者群の平均値の差を求めると約31%となる。このことは、体重70kgの人が高さ5cmの段を昇る際に、患者群は非患者群よりも体重を支える側の脚への荷重負担を平均で約21kg軽減していることを示している。この患者群と非患者群の平均値の差（約21kg）と標準誤差の意義、すなわち特徴量TdZが体重を支える側の脚における支持性の評価尺度の一つとして臨床的に意義を有するかについては医学的見地に基づいた検討が一層重要であると考えている。

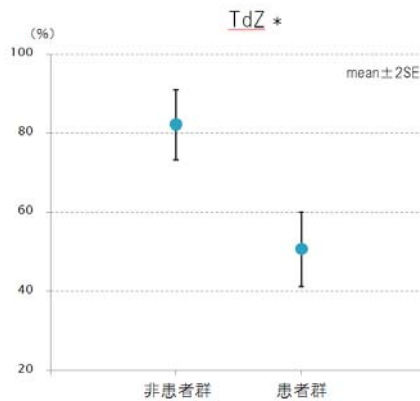


図7 段昇降運動における患者群と非患者群の傾向 (TdZ:単脚支持期における床反力の総変化量(体重比) *: $p<0.05$)

5 床反力解析結果の可視化

4. 2の検証の結果、患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる特徴量に注目し、これらの特徴量がリハビリテーションの経過や術前後において、どのような変化がみられるかを視覚的に確認し、日常生活への復帰の時期予測を検討するためのツールを試作した。

図8は、重要度の高い特徴量に関する履歴管理機能を示しており、管理対象者と特徴量を選択すると、管理対象者の計測回ごとの特徴量の数値を時系列にグラフ上に表示する。また、非患者群の特徴量の数値から算出した平均値ラインとの差を確認することにより自分自身の位置を把握することが可能であり、その後の運動療法を計画する際の検討材料として活用できる。

図9は、今回の実験結果において患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる5つの特徴量をリーダーチャート上に示したものである。自分自身の身体バランス機能を全体的に把握することが可能である。各特徴量の数値は、非患者群の特徴量の数値から算出した平均値に対する倍率を示しており、非患者群の平均値ラインを「1」として、これより外側に位置するほど身体バランス機能の低下が疑われることをあらわす。また、片脚立位姿

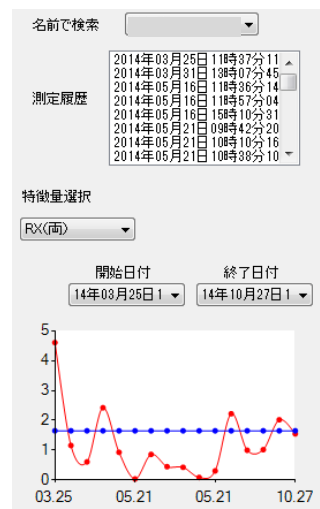


図8 重要度の高い特徴量の履歴管理

勢、段昇降、歩行に関しては左右脚別に5つの特徴量の数値を確認することが可能であり、体重を支える片側の脚の支持機能が低下していないか等、身体の左右のバランスを視覚的に確認できる。このような情報は、転倒等の危険性が高まるロコモティブシンドロームの予兆に気づき、股関節機能の回復措置を早期に適用する場合の検討材料として活用できる。さらに、今回の身体バランス機能評価結果を示すレーダーチャートの隣に別のレーダーチャートを用意し、計測履歴データを選択することにより、5つの特徴量を並べて比較することが可能である。このような情報は、リハビリテーションや術前後の比較を行う場合に、股関節機能等の改善効果を数値として視覚的に確認することが可能であり、その後の運動療法や治療計画を策定する際の検討材料として活用できる。

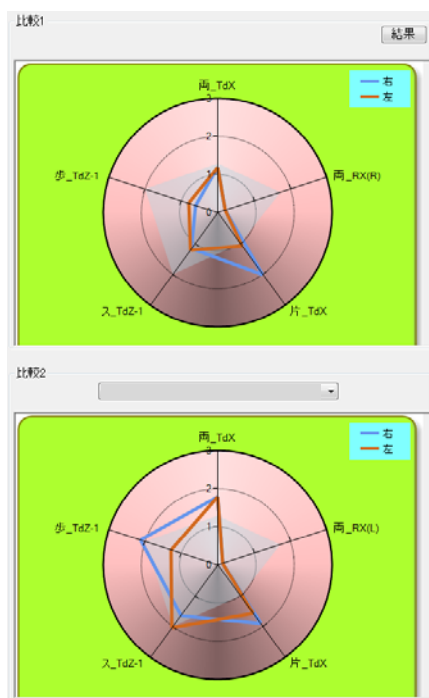


図9 身体バランス機能評価指標の比較

6 まとめ

安価で計測精度の良い床反力情報取得装置としてWBを採用し、独自に開発した床反力情報取得・解析プログラムを用いて4種類の姿勢・動作を対象とした床反力情報取得実験を行った。実験で取得したサンプル160件の床反力情報から諸種の特徴量を抽出し、姿勢・動作別にサンプルの傾向を確認するため階層的クラスター分析を行った。分析の結果、股関節症患者の特徴的な跛行にみられる二峰性の平坦化や側屈の現象等は、股関節症患者が属するclusterの特徴としてよくあらわれており、clusterの特徴に共通してみられる特徴量を股関節症に関わる重要度の高い特徴量と考えることができる。これらの重要度の高い特徴量が股関節症に関わる実質的な意義を有しているかを検証するため、統計的手法を用いて特徴量の妥当性を検証した。重要度の高い各特徴量に対し、

患者群と非患者群について母平均の差の検定を行った結果、患者群と非患者群の平均値の95%信頼区間において有意水準5%で有意であった。患者群と非患者群を分類する上で重要度が高いと考えられる5つの特徴量に注目し、リハビリテーションの経過観察や術前後の比較において、これらの特徴量の変化を視覚的に確認し、日常生活への復帰の時期を検討するためのツールを試作した。今後、これらの特徴量の信頼性を高め身体バランス機能の評価指標として扱うためには、さらに多くの患者及び非患者のサンプルを取得しデータの傾向を観察する必要がある。

本県では第2次ヘルスプランぎふ21^[7]において日常生活に制限のない期間を延ばす「健康寿命の延伸」を目標に掲げ健康支援への取り組みを強力に推進している。疾病リスクの低減を図るための健康維持・増進・疾病予防にかかる健康度評価やIT融合型健康サービス等の需要が一層高まり、健康で暮らしやすい社会の形成が望まれている中で^[8]、本研究開発成果である床反力情報取得・解析技術は、身体バランス機能を測る“ものさし”と考えることができ、臨床の場でのリハビリ効果や術前後の評価に限らず、早期にロコモティブシンドロームの兆候に気づき予防を促すセルフケアツールとしての応用展開も考えられる。

謝辞

岐阜大学医学部附属病院リハビリテーション部の皆様、床反力情報取得実験にご協力いただいた皆様に深く感謝いたします。

文献

- [1]日本整形外科学会，“ロコモティブシンドローム”，<http://www.joa.or.jp/public/locomo/>(2014.3現在)
- [2]奈良勲，“運動療法学 各論”，医学書院，2010。
- [3]曾賀野健一，青木隆明，可児純子，渡辺博己，棚橋英樹，“運動器機能のリハビリ支援を目的とした安価な身体動揺解析技術”，岐阜県情報技術研究所研究報告第15号，pp.9-14，2013。
- [4]望月久，峯島孝雄，“重心動揺計を用いた姿勢安定度評価指標の信頼性および妥当性”，理学療法学 第27巻第6号，pp.199-203，2000。
- [5]日本整形外科学会，“変形性股関節症診療ガイドライン”，南江堂，2008。
- [6]吉良秀秋，“股関節障害患者の歩行分析”，日整会誌55，pp.735-745，1981。
- [7]岐阜県，“第2次ヘルスプラン岐阜21”，<http://www.pref.gifu.lg.jp/kenko-fukushi/kenko-iryu/kenko/seikatsu-shukambyo/2-herusupurann.html>(2014.3現在)
- [8]中部経済産業局，“新ヘルスケア・サービス産業”，新ヘルスケア・サービス産業創出懇談会資料，2012。