

非線形時系列解析による整形疾患患者の歩行評価

Gait assessment of orthopedic disease with non-linear time series analysis

深堀辰彦¹⁾²⁾ 宮原洋八³⁾ 綾部雅章⁴⁾ 楠 正和⁵⁾

TATSUHIKO FUKAHORI¹⁾²⁾, HIROYA MIYABARA³⁾, MASAOKI AYABE⁴⁾, MASAKAZU KUSU⁵⁾

要旨：本研究の目的は、非線形時系列解析としてリヤプノフ指数を用いてADL尺度、整形疾患患者における歩行機能と関連性を明らかにすることである。対象は、整形疾患患者25名（男性6名、女性19名、平均年齢76.52±10.82歳）とした。三軸加速度計は第3腰椎棘突起部付近に装着し、できるだけ速く歩行させた。1歩行周期のデータから歩行指標を算出して、歩行機能、FIM（Functional Independence Measure）との関係、整形疾患患者の歩行の特徴を検討した。FIM120点以上群と120点未満群の比較では、FIM120点以上群が、最大歩行速度、歩行率において有意に高値を示し、歩数が有意に低値を示した。その他の項目では有意差を認めなかった。バランス機能と歩行機能、リヤプノフ指数の相関関係の検討では、BBS（Berg Balance Scale）と最大歩行速度に正の相関、BBSと歩数に負の相関を認めた。これらの結果から、整形疾患患者におけるバランス機能と歩行機能との関連が明らかとなった。

キーワード：三軸加速度計、非線形時系列解析、リヤプノフ指数

はじめに

内閣府による平成24年度の高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況報告によると、2013年10月1日現在、65歳以上の高齢者人口は3,190万人であり、総人口に占める割合は25.1%に達する。今後この総人口は減少し、一方で高齢化率は上昇すると見込まれる（内閣府2014）。岩瀬ら（2013）は高齢者が社会との関わりの中で、高次の活動を保持するための基礎的能力として、歩行能力が重要であると述べている。歩行能力の低下は、高齢者の活動範囲に対する制限、日常生活活動（Activities of Daily Living：ADL）や生活の質の低下（Furuta

et al 1998；新開 1999）のみならず、施設入所や死亡率の増加（Guralink et al 1994；Gibbs et al 1996）とも関係する。Chavesら（2000）は、片足立ちテスト、椅子立ち座りテスト、通常歩行速度、階段昇降の他に、筋力、運動能力に関する自己評価、健康状態、慢性疾患数、病歴、認知機能も含めて18ヶ月後のADL障害の危険因子を検討したところ、片足立ち、通常歩行速度、運動能力に関する自己評価においてADL障害との関連が認められたとしており、歩行能力とADLは密接な関係にあるといえる。

ADLを客観的に評価する指標としてFIM（Func-

受付日：平成26年10月6日、採択日：平成26年11月13日

1) 高良台リハビリテーション病院

Kouradai Rehabilitation Hospital

2) 西九州大学大学院健康福祉学研究所

Graduate School of Health and Social Welfare Science, Nishikyushu University

3) 西九州大学リハビリテーション学部

Faculty of Rehabilitation Science, Nishikyushu University

4) 専門学校久米リハビリテーション学院

Kurume Rehabilitation Institute

5) 嶋田病院リハビリテーション科

Department of Rehabilitation Medicine, Shimada Hospital

tional Independence Measure) が用いられる。FIM は、ADL の必要最小限の項目が集められ、ADL の運動面だけでなく、認知面の評価も含まれることが特長である。健常高齢者では、ADL 低下予測の際に総合的な運動機能の評価が重要とされており、Guralnik ら (2000) は、健常高齢者を対象に ADL 障害発生の追跡調査を実施し、ベースラインにおける立位バランス、通常歩行速度、椅子からの立ち上がり時間を統合した運動機能が低い群は高い群に対して 4 年後の ADL 障害発生の危険性が 4 倍になることを明らかにした。このような ADL に関する報告の多くは、健常高齢者を対象にしたものであり整形疾患患者を対象としたものは少ない。また、ADL 能力に加え歩行能力に関して多面的に検討することも重要と考えられる。

歩行分析の手法として、床反力計、三次元動作解析装置などの測定機器が使用される。これらは測定できる範囲が設定された歩行路に限局されること、測定機器が高価であること、機器のセッティングに熟練を要することなどから一般に臨床に浸透した測定方法とはいえない。近年、このような制約を受けずに歩行を分析する手法として、軽量、比較的安価、簡便性の面から小型加速度計が有用と考えられる (高田ら 2004; 田中ら 1996)。小型加速度計を用いた歩行評価の中で、Digwell ら (2000) は、歩行に係る力学系から動的システムの状態の時間発展をリヤプノフ指数により定量化することにより、歩行の動的安定性を評価する方法を示している。リヤプノフ指数はその値が高いほど動的安定性が低いことを示し、躓きなどの予期せぬ摂動が加わった場合の回復力が低いことを示唆する (猪岡 2003)。大瀧ら (2002) は、高齢者の不安定歩行の特徴としても、動作の非正常性が報告されており、高齢者の歩行周期のリズム現象に対して、内在する動的システムの性質を踏まえた評価が行えれば、加齢と歩行能力の関係、転倒回避に係る歩行安定性の評価に有用であると述べている。しかし、実際にリヤプノフ指数を用いて歩行分析を行った研究は少なく、他の運動機能や ADL との関連を検討した報告は散見するのみである。

そこで、本研究の目的は、非線形時系列解析としてリヤプノフ指数を用いて、整形疾患患者におけるバランス・歩行機能、ADL との関連性を明らかにすることとした。

・対象と方法

1. 対象

対象は入院中の回復期リハビリテーション対象患者の内、以下の条件を満たした整形疾患患者 25 名 (男性 6 名、女性 19 名、平均年齢 76.5 ± 10.8 歳) とした。対象の選択条件は、1) 日常生活内での歩行が監視レベル以上で可能であること、2) 測定者の指示について理解可能な者とした。全ての被験者に対し、事前に研究の趣旨を口頭および文書にて十分説明、参加の同意を得られた対象者のみ実施している。また本研究は高良台リハビリテーション病院の研究倫理に関する承諾 (第 016 号、2014 年) を得て実施した。

2. 方法

1) 歩行解析システム

加速度の測定には、歩行解析機器として、ワイヤレス型 3 軸加速度計 (Micro Stone 社製) を用いた。加速度センサー MVP-RF 8 の重量は 60 g、大きさは $45 \times 45 \times 18$ mm、サンプリング周波数 100 Hz で記録される。加速度センサーは圧電式で、感度は 500 mV/G、測定範囲は ± 60 m/sec² (± 6 G) である。記録された加速度データは Bluetooth 受信機 (Parani 社製 UD100) によりリアルタイムでパーソナルコンピュータに転送され、機器の動作に異常がないか目視にて確認した。加速度計は体幹の前後方向 (前: +, 後: -), 左右方向 (左: +, 右: -), 垂直方向 (上: +, 下: -) の加速度を取らえられるよう腰部用ベルト (シンメン株式会社) に固定し、Moe-Nilssen (2002) 諸角ら (2008) にしたがって被験者の重心位置に近く、重心移動に近似する第 3 腰椎棘突起部付近に接するように装着した。歩行中の加速度の測定は、被験者に靴を装着した状態で 15 m の直線を歩行してもらった。歩行は最大速度で、できるだけ速く歩いてもらうように指示を与えた。測定から得られた垂直方向の体幹加速度波形から、波形が定常状態にある 1 stride を選択した。

リヤプノフ指数は力学系のアトラクタが示す軌道不安定性を定量化する指標である。アトラクタとは、力学系の状態空間内における漸近的な振る舞いをいう。リヤプノフ指数が大きい値であれば状態空間におけるアトラクタの発散を意味し、摂動に対する系の感度の直接的な尺度となる。計測により得られる時系列のデータでは、元の力学系そのものが未知である。そこで、リヤプノフ指数を時系列データから直接的に求める方法としてアトラクタ軌道間の伸張を計算し、そこからリヤプノフ指数を推定する方法を用いた。はじめ

に、計測された時系列の加速度データから、状態空間におけるアトラクタを再構成する。図1に示すように、時系列から時間遅れの座標系へ変換する方法を用いた。得られた加速度信号から、カオス時系列解析システム

Sunday Chaos Times Windows 版1ライセンス(株式会社あいはら)を用いてリヤプノフ指数を算出した。リヤプノフ指数は以下の式より求めた。

$$\lambda(\Delta t) = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \ln \left[\frac{1}{M} \sum_{i=1}^M \|D_i(t + \Delta t)\| \right]$$

λ : リヤプノフ指数 l : log n : 自然対数
 D_i : 変位ベクトル t : 時間

2) 歩行機能

15mの直線を「できるだけ早く歩いてください」と指示を与え中間10mの歩行に要する時間、歩数を計測した。測定した値より最大歩行速度(m/sec), 歩行率(cadence, steps/min)を算出した。

3) ADL 評価

ADLの評価としてFIMを用いた。FIMは運動項目13項目、認知項目5項目の計126点で評価した。

4) バランス機能評価

バランス能力の評価としてBBS(Berg Balance Scale)を用いた。BBSは14項目の計56点にて評価した。

5) 統計解析

FIM120点以上群, 120点未満群の2群に分け, 各方向の平均リヤプノフ指数, 各方向最大リヤプノフ指数, 最大歩行速度, 歩数, 歩行率, BBSを比較した。バランス機能と歩行機能, リヤプノフ指数との関連をみた。統計解析にはSPSS18.0を用い, 統計学的な有意水準は5%とした。

結果

1. FIM120点以上群と120点未満群の比較(表1)

120点以上群が, 最大歩行速度, 歩行率において有意に高値を示し, 歩数が有意に低値を示した。その他の項目では有意差を認めなかった。

2. バランス機能と歩行機能, リヤプノフ指数との関連(表2)

BBSと最大歩行速度に正の相関, BBSと歩数に負の相関を認めた。

考察

本研究の目的は, 非線形時系列解析としてリヤプノ

表1 FIM120点以上群と120点未満群の比較

	120点以上群	120点未満群
BBS(点)	52.44 ± 3.61	45.50 ± 11.30
最大歩行速度(m/sec)	1.43 ± 0.31	0.97 ± 0.29**
歩数(steps)	16.62 ± 3.20	22.33 ± 6.27**
歩行率(steps/min)	137.92 ± 18.82	120.98 ± 17.29**
平均リヤプノフ指数		
左右方向	0.04 ± 0.05	0.45 ± 0.04
垂直方向	0.60 ± 0.56	0.53 ± 0.54
前後方向	0.81 ± 0.52	0.72 ± 0.52
最大リヤプノフ指数		
左右方向	0.27 ± 0.21	0.21 ± 0.21
垂直方向	0.27 ± 0.35	0.30 ± 0.37
前後方向	0.40 ± 0.37	0.43 ± 0.31

*p < 0.05 **p < 0.01

表2 バランス機能と歩行機能, リヤプノフ指数との関連

	BBS
最大歩行速度	0.65**
歩数	-0.70**
歩行率	0.38
平均リヤプノフ指数左右方向	-0.02
平均リヤプノフ指数垂直方向	0.06
平均リヤプノフ指数前後方向	0.35
最大リヤプノフ指数左右方向	-0.01
最大リヤプノフ指数垂直方向	0.06

Pearsonの相関係数 *p < 0.05 **p < 0.01

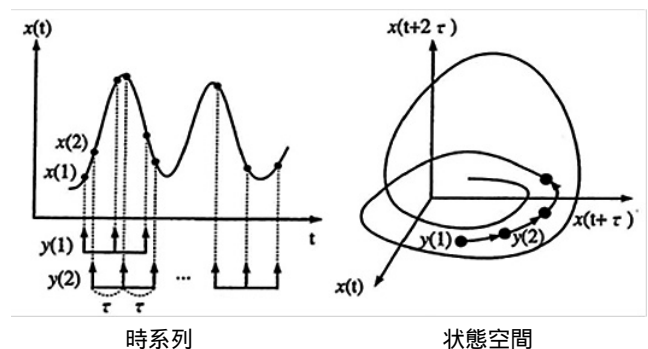


図1 状態空間におけるアトラクタ軌道の再構成(埋め込み次元d=3の場合)

フ指数を用いてADL尺度, 整形疾患患者における歩行機能との関連性を明らかにすることである。

FIM120点以上群と120点未満群の比較では, 120点以上群が, 最大歩行速度, 歩行率において有意に高値を示し, 歩数が有意に低値を示した。120点未満群では, 歩数が有意に高値を示した。地域在住の大腿骨頸部・転子部骨折後患者におけるADLと運動機能との関連を調査した。

猪岡ら(2003)の報告では, 歩行速度が速いほどADL能力が高いという関係性が示されており, 本研究の結

果からも同様のことがいえると考えられる。高齢者の歩行機能とADL能力の関連を分析した岩瀬ら(2013)の報告では、最速歩行の測定においてADL能力と歩幅に有意な正の相関を示している。このことから、高齢者ではADL能力が高いほど最速歩行時に歩幅が大きく、歩数が少なくなるといえる。また、高齢者の歩行動作特性を分析した柳川の報告(2008)では、若年者と高齢者の自由歩行を比較し、歩行速度・歩調・において有意に若年者が高値を示している。本研究では、整形疾患患者においてADL能力が高いほど歩行速度、歩行率が高値を示した。

脊椎圧迫骨折患者の体幹加速度由来指標と運動機能を調査した綾部らの報告(2014)では、脊椎圧迫骨折患者は垂直方向の動揺性が高いことが示唆されている。また、変形性股関節患者の体幹加速度由来歩容指標による歩容異常を調査した山田らの報告(2006)では、体幹加速度が歩容異常の客観的評価に有用なことが示唆されている。しかし、本研究のバランス機能と歩行機能、リヤブノフ指数との関連では、リヤブノフ指数のみ関連しなかった。加速度計を用いた人工股関節全置換術患者の歩行評価を行った加藤らの報告(2007)では、歩行器歩行時は疼痛、杖歩行および独歩時は股関節外転筋、年齢、BMIに%スペクトラムと関連があり、術後の各歩行段階で歩行安定性に与える影響が異なることが示唆されている。今回の研究は、対象者を日常生活内での歩行が監視レベル以上で可能であることを条件にしたため、歩行手段に関しては限定しおらず、歩行様式が統一されていない。また、脊椎疾患患者と下肢疾患患者が混同されていることから、リヤブノフ指数との関連がなかったのではないかと考えられる。

今後は、疾患別の歩行特性を検討して行きたい。

引用文献

- 綾部雅章, ら (2014) 脊椎圧迫骨折患者の体幹加速度由来指標と運動機能の関連および歩行分析. ヘルスプロモーション理学療法研究第4巻(3): 177-182
- Chaves PH, et al (2000) Predicting the Risk of Mobility Difficulty in Older Women With Screening Nomograms. Arch Intern Med 160: 2525-2533.
- Dingwell JB, et al (2000) Slower speeds in patients with diabetic neuropathy lead to improved local dynamic stability of continuous overground walking. Journal of Biomechanics 33: 1269-1277.
- Furuta T, et al (1998) Longitudinal change in the physical performance of older adults in the community. J Jpn Phys Ther Assoc 1 (1): 1-5.

- Gibbs J et al (1996) Predictors of change in walking velocity in older adults. J Am Geriatr Soc 44: 126-132.
- Guralnik JM et al (1994) A short physical performance battery assessing lower extremity function: association with self-reported disability and prediction of mortality and nursing home admission. J Gerontol 49: 85-94.
- Guralnik JM, et al (2000) Lower Extremity Function and Subsequent Disability: Consistency Across Studies, Predictive Models, and Value of Gait Speed Alone Compared With the short Physical Performance Battery. J Gerontol A Biol Sci 55(4): M221-M231.
- 猪岡光, ら (2003) 加速度計測による高齢者歩行の安定性評価と転倒予防に関する研究. デザントスポーツ科学 24: 61-67.
- 岩瀬弘明, ら (2013) 高齢者の歩行パラメーターと下肢筋力およびAFDL能力との関連 - 最速歩行と最大低速歩行の比較 -. 理学療法科学 28(3): 347-350.
- 加藤良一 (2007) 加速度計を用いた人工股関節全置換術患者の歩行評価. 日本臨床バイオメカニクス学会誌 28: 281-286
- Moe-Nilssen R, et al (2002) Trunk accelerometry as a measure of balance control during quiet standing. Gait and Posture 16: 60-68.
- 諸角一記, ら (2008) Bluetooth通信式3軸加速度計・筋電計歩行解析装置の信頼性及びその応用について. 日本生理人類学会誌 13: 51-58.
- 内閣府: 平成25年度高齢化の状況及び高齢社会対策の実施状況(平成26年版高齢社会白書). http://www8.cao.go.jp/kourei/w-2014/zenbun/26pdf_index.html 閲覧日2014年6月1日
- 大瀧保明, ら (2002) 歩行の周期リズムの非線形時系列解析による高齢者の歩行安定性評価. 日本機械学会第2回福祉工学シンポジウム講演論文集 34(2): 103-106.
- 新開省二, ら (1999) 地域在宅老人の歩行移動力の現状とその関連要因. 日本公衆衛生雑誌 46(1): 35-46.
- 高田耕太郎, ら (2004) 小型三次元加速度計を用いた歩行評価の臨床的有用性の検討. 慈恵医大誌 119: 331-338.
- 田中尚文, ら (1996) 小型加速度計による歩行分析の再現性および妥当性の検討. リハビリテーション医学 33(8): 549-553.
- 柳川和優 (2008) 高齢者の歩行動作特性. 広島経済大学研究双書 30: 55-58.
- 山田実, ら (2006) 体幹加速度由来歩容指標による歩容異常の評価 歩容指標の変形性股関節症患者と健常者の比較, および基準関連妥当性. 理学療法科学 33(1): 14-21.