カオス解析による変形性膝関節症患者の歩行分析

Chaos Analysis of Knee Osteoarthritis (OA) Patients' Gait

青木 修^{1,2)} 香川 真二³⁾ 河村 庄造⁴⁾ 平田総一郎⁵⁾

OSAMU AOKI, RPT^{1,2)}, SHINJI KAGAWA, RPT³⁾, SHOZO KAWAMURA, DE⁴⁾, SOUJIRO HIRATA, MD⁵⁾

¹⁾ Department of Rehabilitation, Rehabilitation Nishi-Harima hospital, Hyogo Prefectural Rehabilitation Center at Nishi-Harima: 1-7-1 Koto, Shingu-cho, Tatsuno, Hyogo 679-5165, Japan. TEL +81 791-58-1050

²⁾ Faculty of Health Science, Graduate School of Medicine, Kobe University

³⁾ Department of Rehabilitation, The Hospital of Hyogo College of Medicine

⁴⁾ Department of Mechanical Engineering, Toyohashi University of Technology

⁵⁾ Faculty of Health Science, Kobe University School of Medicine

Rigakuryoho Kagaku 22(1): 109-113, 2007. Submitted Mar. 30, 2006. Accepted Oct. 10, 2006.

ABSTRACT: Using three-dimensional analysis, we measured the knee joint angle in walking for gonarthrosis patients and healthy elderly people and performed chaos analysis on the knee joint angle data of 3 gait cycles. In the comparison of the patients and healthy people using the Lyapunov index, which is a chaos index, the Knee OA group showed a significantly lower value compared with healthy elderly people (healthy elderly people: 1.90 ± 0.59 , knee OA group: 1.61 ± 0.40 , $p < 0.05$). In correlation analysis of the Lyapunov index of knee OA and clinical data (time from onset; the Japanese Orthopaedic Association knee joint function evaluation, JOA score; femorotibial joint, FTA; knee joint ROM, gait speed), a significant correlation was only obtained for the JOA score ($r = 0.73$, $p < 0.05$). These results show that the more serious the osteoarthritis was, the smaller the Lyapunov index became, suggesting this chaos index is related to the knee joint function.

Key words: osteoarthritis of the knee, gait, chaos

要旨: 3次元動作解析装置を用いて変形性膝関節症患者と健常者の歩行中の関節角度計測を行い、3歩行周期の膝関節角度データをカオス解析した。カオス性を表す指標となるリアプノフ指数を用いて両者を比較すると、膝OA群は健常高齢群に比して有意に低い値を示した（健常群： 1.90 ± 0.59 、膝OA群： 1.61 ± 0.40 、 $p < 0.05$ ）。また膝OA群のリアプノフ指数と、臨床データ（罹患期間、日本整形外科学会膝関節機能評価：JOAスコア、大腿脛骨角：FTA、膝関節ROM、歩行速度）との相関解析では、JOAスコアとのみ有意な相関が得られた（ $r = 0.73$ 、 $p < 0.05$ ）。膝関節の機能障害が重度であるほどリアプノフ指数が小さくなることから、カオス性は膝関節の機能と関連していることが示唆された。

キーワード: 変形性膝関節症、歩行、カオス

¹⁾ 兵庫県立西播磨総合リハビリテーションセンター リハビリテーション西播磨病院リハビリ療法部：兵庫県たつの市新宮町光都1-7-1（〒679-5165）TEL 0791-58-1050

²⁾ 神戸大学大学院 医学系研究科保健学専攻 ³⁾ 兵庫医科大学病院 リハビリテーション部

⁴⁾ 豊橋技術科学大学 機械システム工学系 ⁵⁾ 神戸大学 医学部保健学科

受付日 2006年3月30日 受理日 2006年10月10日

I. はじめに

変形性膝関節症（以下、膝OA）は膝の疼痛を主訴とし、膝関節の機能低下によって特に歩行動作の遂行に支障をきたしやすい疾患である。そのため膝OA患者の歩行分析については、歩行障害を客観的に評価する目的で様々な測定機器を用いた報告が多くなされてきた^{1,2)}。これまでの歩行分析は、1歩行周期あるいはそれより短い時間における特徴的な測定値（関節角度など）の変化に焦点を当てて分析していることが多い。これらの分析は歩行が常に一定のパターンをとるという前提で代表値としての抽出がなされているが、実際のヒトの歩行運動は規則的なリズムが延々と繰り返し続いていることはまれであり、厳密にはゆらぎを伴った微妙な変化を起こしている³⁾。このような歩行周期のゆらぎは単なるランダムノイズではなく、カオスという性質を持っている可能性が示されている⁴⁾。

カオスとは、方程式が確率的要素を持たず、決定論に従うにもかかわらず、軌道が初期値に敏感に依存し、その結果、解の長期予測が不可能な現象のことをいう⁵⁾。つまり、短期的な予測は可能であるが、長期的にはわずかな初期値の違いのためにその予測が不可能となる現象である。カオスは自然現象で観察され様々なデータに遍在し、ヒトの心拍や脳波などの生体信号にも内在することが知られている⁶⁾。そして生体信号に内在するカオスは、健常な状態と密接なかわりをもつことが示唆されている⁶⁾。一方、疾患のとき系列データでは単調な周期現象となり、カオス的ゆらぎが減少することが明らかになりつつある⁷⁾。

我々は連続した歩行周期のゆらぎに着目して、このゆらぎを定量的に評価するために膝OA患者の膝関節角度

に対してカオス解析を行った。膝OA患者の歩行分析では、膝関節の力学情報が得られる関節モーメントやパワーを用いることが多いが、それらの値は仮想剛体リンクモデルを用いて床反力と関節角度から計算される二次的なパラメーターであるため、今回は一次的なパラメーターである関節角度を用いた。

本研究では、健常高齢者と膝OA患者の歩行時の膝関節角度を比較することで疾患によるカオス性の差異を明らかにし、健常高齢者と膝OA患者における歩行の特徴についてカオスの視点から考察した。

II. 対象と方法

対象は全人工膝関節置換術目的で入院中の進行期から末期の膝OA患者9名9関節（膝OA群；年齢 73.2 ± 5.1 歳、男性1名、女性8名）とした。比較対照群は下肢に神経学的、整形外科的疾患を有さない健常高齢者7名14関節（健常群；年齢 71.6 ± 2.7 歳、男性2名、女性5名）とした。全ての被験者には本研究の趣旨を説明し、同意が得られた。

1. 膝OA患者の臨床データ

問診により、罹患期間、日本整形外科学会膝関節機能評価（以下、JOAスコア）を得た。また、レントゲンから大腿脛骨角（以下、FTA）を計測した。さらに、ゴニオメーターを用いて他動的膝関節屈伸角度（以下、ROM）を計測し、歩行速度を10 m歩行速度から算出した。以上を膝OA患者の臨床データとして用いた（表1）。

2. とき系列データの測定

歩行時における膝関節屈伸角度の測定には4台の赤外

表1 膝OA患者詳細

性別	年齢(歳)	罹患期間(年)	JOA スコア(点)	FTA (°)	屈曲角度(°)	伸展角度(°)	ROM(°)	歩行速度(m/min)
F	72	5	50	187	110	-10	100	13.3
M	73	3	55	183	120	-10	110	78.0
F	76	7	50	194	115	-5	110	20.4
F	65	3	50	188	105	0	105	20.1
F	80	1	50	190	100	-10	90	20.0
F	70	10	75	180	120	-25	95	30.3
F	70	20	45	190	120	0	120	38.6
F	81	3	65	189	125	-10	115	25.8
F	72	5	65	184	125	-5	120	54.9
平均値	73.2	6.3	56.1	187.2	115.6	-8.3	107.2	33.49
± SD	5.1	5.8	9.9	4.3	8.8	7.5	10.6	20.84

図1 マーカー位置

線カメラを有する3次元動作解析装置ELITE SYSTEM (BTS社製)を用いた。マーカーの位置は、上前腸骨棘と大転子を結ぶ下1/3の点、膝蓋骨を除く膝関節前後中央、足関節外果中央とし、左右矢状面上に貼り付けた(図1)。

被験者は上肢を前方に組んだ状態で10 mの直線歩行路上を歩行した。歩行速度は自由歩行速度とし、定常状態で3周期分の膝関節角度の時系列データを抽出した。サンプリング周波数は50 Hzとした。

3. フィルタリング処理について

身体運動のカオス解析では、平滑化強度に関する明確な基準がない。横井ら⁷⁾は後ろ向き歩行において下肢関節角度を計測し、カオス関連パラメータに与える平滑化の影響を検討している。その結果、現象に対して適切なデータ数、十分なサンプリング周波数を確保し、かつ同じ周波数で計測したデータであれば、遮断周波数が異なってもリアプノフ指数によって関節間の運動の特徴や安定性の差異を相対的に把握することは可能であろうと述べている。このため、計測データへのフィルタリング処理は行わなかった。

4. カオス解析

カオス解析には、初期値への鋭敏性を表す指標であり時系列データに内在するカオスの性質を見いだすための代表的なパラメータである、リアプノフ (Lyapunov) 指数を用いた。これは、相空間上の極めて近い点が、どのくらい指数関数的に離れていくかを示す指数であり、これが正の値を取ることがカオスの条件として挙げられ

る。このリアプノフ指数を用いてカオス性を定量的に数値評価し、リアプノフ指数の大小によって健常群と膝OA群の比較を行った。

まず、得られた時系列データを解析に必要なデータ数にするため、計測点が2,000点となるように生データをスプライン補間した。その後、埋め込み次元の方法⁵⁾により4次元、5次元、6次元のリアプノフ指数を求め⁸⁾、それぞれが収束する点を読み取り代表値とした。

5. 検討項目および統計方法

膝OA群と健常群の歩行時膝関節屈伸角度の時系列データから求めたリアプノフ指数をそれぞれ比較した。統計処理にはMann-Whitney検定を用い、有意水準を5%未満とした。

また膝OA群のリアプノフ指数と、臨床データ(罹患期間、JOAスコア、FTA、ROM、歩行速度)との相関をSpearmanの順位相関係数を用いて求め、有意水準を5%未満とした。

III. 結 果

1. カオス解析の結果

膝OA群および健常群のリアプノフ指数はともに正の値を示し、両群とも歩行時の膝関節屈伸角度はカオス性を有した。図2は膝OA群と健常群の歩行時における膝関節角度の時系列データの一例である。

次に、両群のリアプノフ指数の度数分布を示す(図3)。両群間の比較では、健常群に比べて膝OA群のリアプノフ指数が有意に低値を示した(健常群: 1.90 ± 0.59 , 膝OA群: 1.61 ± 0.40 , $p < 0.05$)。このことから、健常群に比べて膝OA群では、歩行時の膝関節屈伸角度のカオス性が弱くなっていることが明らかとなった。

2. 膝OA群のリアプノフ指数と臨床指標との相関

リアプノフ指数とJOAスコアとの間には有意な正の相関が得られた ($r=0.73$, $p<0.05$)。

リアプノフ指数と罹患期間、FTA、ROM、歩行速度との間には有意な相関は得られなかった(それぞれ, $r=0.23$, $r=-0.44$, $r=0.50$, $r=0.32$)。

IV. 考 察

ヒトの生体信号におけるカオスについては、脈波や血圧、脳波など、さまざまな時系列データからその存在が発見されている。歩行中の下肢関節角度についてもカオ

図2 上段：膝OA群の膝関節角度の一例（リアプノフ指数1.48）
下段：健常群の膝関節角度の一例（リアプノフ指数2.17）

図3 両群におけるリアプノフ指数の度数分布

スの存在が知られており⁴⁾、我々の結果からも歩行中の膝関節角度はカオス性を有することが示された。そしてその存在は健常群でも膝OA群でも認められた。疾患者では生体信号に内在するカオス性が低下することが明らかになりつつある⁹⁾。例えば指尖容積脈波においては疾患ある

いは老化により、そのカオス性は単純で弱いものになることが知られている⁴⁾。本研究において健常群と膝OA群を比較すると、膝OA群のカオス性が有意に弱くなっていたことは、これらの見解と一致する。さらに、膝OA群のリアプノフ指数とJOAスコアに正の相関が得られたこと

から、膝OAに罹患し、膝関節の機能的状態が低いほどカオス性が弱くなることが示された。

今回用いたリアプノフ指数は、カオスの特長の中でも、軌道不安定性を力学的に定量化する指標である¹⁰⁾。軌道不安定性とは軌道のばらつきであり、歩行では歩行周期のばらつきのことである。歩行周期のばらつきについて健常者のみでの検討では、高齢者の時間相関の強さを表すスケーリング指数が成人に比べ低下することが示されている¹¹⁾。この結果は歩行周期に内在するばらつきが加齢により増加することを示唆している。一方カオスは、このばらつきを単なるノイズとして捉えるのではなく、ある意味を持たせている。桜井¹²⁾によれば、自然界の中で起こるいろいろな現象は、決定論的というよりはむしろある程度の余裕を持った変動幅を伴っており、この変動幅こそが現象の多様性を生むと述べている。生体現象に見られるカオス性は、この現象の多様性を生み出す変動幅を評価できる指標と考えられている。例えば、多義図形認知（ルビンのつぼ：Rubin, 1921, 嫁と姑：Hill, 1915など、複数の解釈が可能で一定の図形）の解釈が切り替わるときに、カオスが関与するとされる¹³⁾。また、閉眼後ろ向き歩行中の下肢関節角度の計測では、学習が進むにつれカオス性が弱くなることがわかっている⁴⁾。これらのことから、カオスはある物事からある物事への変換や、学習に際して重要な働きをすると考えられ、カオス性の強弱は、変換の可能性の大小を表しているといえる。

以上のことから考えると、今回の結果から、膝OA患者は健常高齢者と比較して、変動幅の少ない余裕のない歩行をしているといえる。さらに、膝OAが重症化することでその変動幅はさらに低下すると考えられる。歩行運動は神経系、筋骨格系、環境系が相互に作用して自己組織化することで生成される¹⁴⁾が、膝OAに罹患することでこれらの相互作用がうまく行えなくなるのかもしれない。

生体から生じるさまざまな時系列データにおいて、カ

オス性は発見されているが、その解釈については未だ十分とはいえない。リアプノフ指数の臨床的意義をさらに検討し、明らかにする必要があると考える。

引用文献

- 1) 荻野哲也, 津村暢宏, 黒坂昌弘・他: 変形性膝関節症患者の歩行分析. リハビリテーション医学, 1999, **36**(3): 188-194.
- 2) 木藤伸宏, 島澤真一, 弓削千文・他: 加速度センサを用いた変形性関節症の歩行時下腿運動の解析. 理学療法学, 2004, **31**(1): 86-94.
- 3) Winter DA: Biomechanical motor patterns in normal walking. J Motor Behavior, 1983, **15**: 302-330.
- 4) Tsuda I, Tahara T, Iwanaga H: Chaotic pulsation in human capillary vessels and its dependence on mental and physical conditions. J Bifurcation and Chaos, 1992, **2**(2): 313-324.
- 5) 佐野雅己: 時系列データからのカオスの診断法をめぐって. バイオメカニズム学会誌, 1995, **19**(2): 90-96.
- 6) 田原 孝: 臨床におけるカオスの応用. バイオメカニズム学会誌, 1995, **19**(2): 105-116.
- 7) 横井孝志, 高橋昭彦, 木塚朝博・他: 生体時系列データのカオス解析のためのデータ収集・処理方法の検討. 日本機械学会No.9 9-7, Dynamics and Design Conference '99 論文講演集, 1999, A: 247-250.
- 8) Wolf A, Swift J, Swinney HL, et al.: Determining Lyapunov exponent from a time series. Physica D, 1985, **16**: 285-317.
- 9) 阪本實男: 脳波“α波”からみた脳のカオス地図. 医学の歩み, 2001, **197**(11): 833-837.
- 10) 岩瀬弘和, 村田厚生: リズミカルな関節運動におけるカオスの特徴. 人間工学, 2002, **38**(4): 196-204.
- 11) Hausdorff JM, Peng CK, Ladin Z, et al.: Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in stride interval of human gait. J Appl Physiol, 1995, **78**(1): 349-358.
- 12) 桜井邦朋: ゆらぎの宇宙. 北森出版(株), 東京, 1994, pp35-43.
- 13) 西村治彦: ニューラルカオスとその機能性. Therapeutic Research, 1999, **20**(5): 1449-1457.
- 14) Taga G: A model of the neuro-musculo-skeletal system for human locomotion. Biol Cybern, 1995, **73**: 97-111.