

## 変形性膝関節症患者に対する小型慣性センサを用いた新たな歩行機能評価方法の開発

三栖翔吾 (PT)<sup>1)</sup>, 田中 創 (PT)<sup>2)</sup>, 石原康平 (MD)<sup>3)</sup>, 浅井 剛 (PT)<sup>4)</sup>, 西上智彦 (PT)<sup>5)</sup>

- 1) 甲南女子大学看護リハビリテーション学部  
 2) 福岡整形外科病院リハビリテーション科  
 3) 福岡整形外科病院整形外科  
 4) 関西医科大学リハビリテーション学部  
 5) 県立広島大学保健福祉学部

キーワード：変形性膝関節症，歩行，小型慣性センサ

### はじめに

変形性膝関節症（以下、膝 OA）は、加齢とともに発症、進行する慢性の変性疾患であり、医学的治療やリハビリテーションにより変形の進行、症状の増悪を予防することが重要となる。膝関節への機械的ストレスは変形の進行に影響する要因のひとつであるとされており、特に、歩行時の外側スラストなどの膝関節動揺は、疼痛の増悪や関節変形進行の危険因子であることが報告されている<sup>1-3)</sup>。これらの先行研究では、医師やセラピストによる主観的な評価によって膝関節動揺が評価されており、その動揺の程度は客観的に評価されていない。一方で、膝 OA 患者の長期的な治療経過を客観的に判定していくためには、歩行時の膝関節動揺を量的に評価する必要がある。3次元動作解析装置を用いて量的な膝関節動揺の評価を行っている報告は散見されるが<sup>4)5)</sup>、臨床的には使用できないことが多い。

小型慣性センサは、安価で操作性に富むため臨床的に広く使用可能であり、膝関節に伝わる衝撃や膝関節の動きを直接的に計測できる加速度データは、膝関節動揺のよい指標になりうると考えられる。いくつかの研究では人工膝関節全置換術（total knee arthroplasty；TKA）後の膝 OA 患者に対して、加速度データによる歩行時の膝関節不安定性の評価の妥当性が検討されている<sup>6)7)</sup>。しかし、膝関節不安定性を判別可能だったとする報告がある一方で、判別は困難だったとする報告もあり、その適用に関して一貫した結果は得られておらず、妥当性の高い評価方法は明確にはなっていない。その要因として、加速度データが速度依存性の特徴を有し<sup>8)</sup>、現行の評価法では下肢運動速度の影響を取り除けていないことが考えられる。また、歩行時の膝関節動揺が確認された膝 OA 患者の歩行と、健常者の歩行との比較が行えておらず、膝関節動揺を判定するカットオフ値も明らかではない。

我々は、新たな歩行時の膝関節動揺の指標として、ト

レッドミル上での歩行時における脛骨および大腿骨の加速度データより得られた値を、下肢角速度で除すことで、速度変化によって生じる変化を調整する方法を考案した。本研究では、開発された指標の妥当性について、観察によって歩行時の膝関節動揺を認めた膝 OA 患者と健常者の間で比較を行い、両者を分別できるかどうか検討することを目的とした。

### 対象と方法

#### 1. 対象

対象は、膝 OA と診断された Kellgren and Lawrence 分類がⅡ以上の患者 10 名（膝 OA 群、女性：5 名）と、健常成人 10 名（健常群、女性：5 名）とした。膝 OA 群の対象者は、研究協力機関（一施設）の整形外科を受診し、脛骨骨切り術が予定されていた患者に対してリクルートを行った。健常群は、膝 OA 群のリクルートを行った施設に勤務する職員を対象とした。除外基準は、独歩が困難である者、歩行に影響を及ぼす他の運動器疾患、神経疾患を有する者とした。膝 OA 群については、担当セラピストが観察による評価を行い、すべての患者において患側膝に歩行時の膝関節動揺が指摘された。この評価方法の信頼性はすでに報告されている<sup>8)</sup>。また、疾患の状態を評価するために日本語版 Knee injury and Osteoarthritis Outcome Score<sup>9)</sup> の評価も実施した。

本研究は甲南女子大学および福岡整形外科病院の倫理委員会による承認を得たうえで実施した。ヘルシンキ宣言に基づき、すべての対象者に本研究の内容、リスク、参加の自由等を十分に説明し書面による同意を得た。

#### 2. 歩行評価

対象者には、両側の大腿骨外側顆および脛骨粗面に小型慣性センサ（マイクロストーン社製、MVP-RF8）をベルトで固定し、トレッドミル上を快適速度にて歩行してもらった。センサは、3軸の加速度センサおよび角速度センサを内蔵し、得られたデータは Bluetooth にて無線でノート型パソコンに送信、保存される。対象者は、小型慣性センサを用いた評価を行う前に、歩行条件に慣れるためにトレッドミル上にて歩行練習を十分実施した。

小型慣性センサにより得られたデータは数値計算ソフトウェア（MathWorks, Inc., MATLAB 2019a）を用いて解析し、歩行時の膝関節動揺の指標を算出した。解析は、安定した歩行時における、膝 OA 群は患側、健常群は左側の 10 ストライド分のデータを使用した。歩行時の膝関節動揺が生じると考えられる立脚期前半に注目するために、まず、脛骨粗面の垂直方向加速度データおよび前後方向加速度データより Heel Contact および Toe Off を同定し<sup>10)</sup>、立脚期前半のデータを抽出した。次に、膝関節動揺の指標として、大腿骨・脛骨それぞれの側方・前後方向の加速度データの Root Mean Square（以下、RMS）を算出した。股関節の運動により、遊脚

表 1 対象者特性の比較

		膝 OA 群 n = 10	健常群 n = 10	p 値
年齢	(歳)	60.5 ± 6.4	55.0 ± 4.6	0.04
女性 / 男性	(人)	5/5	5/5	1.00
身長	(m)	1.61 ± 0.11	1.65 ± 0.88	0.47
体重	(kg)	68.8 ± 16.8	58.7 ± 7.6	0.10
BMI	(kg/m <sup>2</sup> )	26.2 ± 4.1	21.5 ± 1.4	<0.01
患側：左 / 右	(人)	6/4	-	
K-L 分類：II/III/IV	(人)	3/7/0	-	
Oxford knee score		32.4 ± 4.0	-	

膝 OA：変形性膝関節症，BMI：body mass index，K-L 分類：Kellgren and Lawrence 分類  
値は平均値 ± 標準偏差を示している。

表 2 小型慣性センサより得られた歩行指標の比較

		膝 OA 群 n = 10	健常群 n = 10	p 値
歩行速度	(km/h)	1.38 ± 0.36	1.95 ± 0.30	<0.01
脛骨：角速度統合 RMS	(deg/s)	40.9 ± 10.6	59.5 ± 8.5	<0.01
大腿骨：角速度統合 RMS	(deg/s)	27.0 ± 6.7	34.3 ± 4.4	0.01
脛骨：側方加速度 A-RMS	(m/s/deg)	0.030 ± 0.006	0.023 ± 0.006	0.01
脛骨：前後方向加速度 A-RMS	(m/s/deg)	0.025 ± 0.009	0.020 ± 0.007	0.22
大腿骨：側方加速度 A-RMS	(m/s/deg)	0.042 ± 0.012	0.039 ± 0.009	0.47
大腿骨：前後方向加速度 A-RMS	(m/s/deg)	0.057 ± 0.016	0.050 ± 0.021	0.44

膝 OA：変形性膝関節症，RMS：root mean square，A-RMS：adjusted RMS  
値は平均値 ± 標準偏差を示している。

期における進行方向に対する下肢の運動軸は変化する可能性があることから、遊脚期の下肢運動速度の指標として、3方向の角速度データの RMS 統合値を算出した。加速度データの RMS を角速度統合 RMS で除した角速度調整 RMS (adjusted RMS；以下、A-RMS) を膝関節動揺の指標とした。

### 3. 統計解析

膝 OA 群と健常群の両群間における対象者特性および小型慣性センサより得られた歩行時の指標に差があるのかどうか、対応のない t 検定を用いて検討を行った。群間に有意な差が得られた脛骨および大腿骨の側方 A-RMS、前後方向 A-RMS については、Receiver Operating Characteristic (以下、ROC) 曲線を作成して Area Under the Curve (以下、AUC) を算出し、Youden index を用いて 2 群を分類する際のカットオフ値、感度、特異度の算出を行った。ROC 曲線は、注目する指標のカットオフ値を変化させた際の偽陽性率、真陽性率の変化を描画する曲線のことであり、横軸に偽陽性率 (つまり 1 - 特異度)、縦軸に真陽性率 (感度) をプロットするこ

とで表される。AUC は、曲線下の面積を算出したものであり、この分類方法の精度を示す。統計学的有意水準は 5% とした。すべての統計解析は、JMP 14.3.0 (SAS Institute Inc.) を用いて実施した。

### 結 果

膝 OA 群および健常群の対象者特性を表 1 に示す。膝 OA 群において、K-L 分類 II の患者が 3 名、III の患者が 7 名であった。膝 OA 群は健常群と比較して年齢が有意に高く (膝 OA 群：60.5 ± 6.4 歳，健常群：55.0 ± 4.6 歳，p = 0.04)，BMI が有意に大きかった (膝 OA 群：26.2 ± 4.1 kg/m<sup>2</sup>，健常群：21.5 ± 1.4 kg/m<sup>2</sup>，p < 0.01)。

小型慣性センサによる歩行評価により得られた歩行指標の群間比較結果を表 2 に示す。膝 OA 群において、歩行速度、脛骨角速度統合 RMS、大腿骨角速度統合 RMS の値が、健常群に比べ有意に低値を示していた。さらに、膝 OA 群における脛骨の側方 A-RMS は (0.030 ± 0.006 m/s/deg)，健常群と比較し有意に低値を示していた (0.023 ± 0.007 m/s/deg，p = 0.01)。

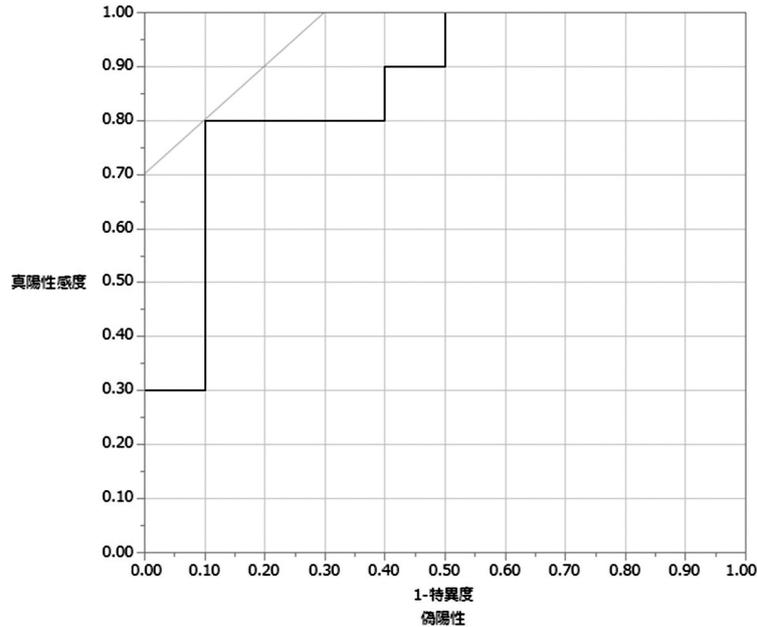


図1 脛骨の側方 A-RMS により膝 OA 群の患側の歩行と健常群の歩行を判別する ROC 曲線

A-RMS: adjusted root mean square, 膝 OA: 変形性膝関節症, ROC: Receiver Operating Characteristic

この ROC 曲線の area under curve (AUC) は 0.86.

脛骨の側方 A-RMS について、膝 OA 群の患側の歩行データを判別する ROC 曲線を図 1 に示す。ROC 曲線の AUC は 0.86 であり、Youden index が最大となるカットオフ値は 0.0268 m/s/deg で、感度と特異度はそれぞれ 80.0%、90.0% であった。つまり、脛骨の側方 A-RMS においてカットオフ値を 0.0268 m/s/deg とするとき、OA 群、すなわち歩行時の膝関節動揺が生じている者を陽性と判定できる確率が 80.0%、健常群、すなわち歩行時の膝関節動揺が生じていない者を陰性と判定できる確率が 90.0% であることを示す。

## 考 察

本研究により、トレッドミル上での歩行時における脛骨の側方 A-RMS は、健常者と比較して観察にて歩行時膝関節動揺を認めた膝 OA 患者で高値を示し、高い正確性で判別を行うことが可能であることが示された。Roberts らは、TKA 術後の膝 OA 患者における、歩行後に立ち止まる際の脛骨加速度データのピーク値が健常者に比べて大きかったことを報告している<sup>7)</sup>。一方で Soeno らは、TKA 術後の膝 OA 患者において、自覚的な膝不安定性の有無では脛骨加速度データからの指標に差がみられなかったことを報告している<sup>6)</sup>。このように、膝 OA 患者における膝関節動揺を小型慣性センサにより評価する過去の研究については一貫した結果が得られていなかった。本研究では、これらの報告では行われていなかった、運動速度の影響を調整した指標によ

て膝関節動揺のある膝 OA 患者と健常者との比較を行った点で優位性がある。最近では、Tsurumiya らが歩行速度により調整を行った脛骨側方方向の加速度ピーク値が、膝 OA の変形重症度と関連することを報告しており、我々の研究結果を支持した結果となっている<sup>11)</sup>。

脛骨における側方方向の A-RMS については膝関節動揺を判別することが可能であることが示されたが、前後方向の A-RMS や大腿骨における A-RMS においては、膝 OA 群と健常群の間に有意な差を認めなかった。この要因として、膝 OA 患者における膝関節動揺は側方に強く生じることが挙げられる<sup>4)</sup>。前後方向の動揺も生じることが想定されたが、本研究の対象となった膝 OA 患者における関節変形は中等程度程度だったため、強い膝関節動揺までは生じていなかった可能性がある。また、サンプルサイズが小さかったことも要因として挙げられる。大腿骨については、脛骨より遠位に位置するため、膝関節の緩衝作用により動揺を鋭敏に判別することが難しかった可能性がある。上記の側方以外の方向への動揺や大腿骨における動揺を評価することで、より多角的な評価となる可能性があると考えられる。

本研究の限界点として、膝 OA 群が健常群に比べ高齢であり、BMI が大きくなっていったことが挙げられる。これらは、交絡因子として結果に影響を及ぼしていた可能性がある。今後、さらなる検討が必要である。

## 文 献

- 1) Wink AE, Gross KD, *et al.*: Association of Varus Knee Thrust During Walking With Worsening Western Ontario and McMaster Universities Osteoarthritis Index Knee Pain: A Prospective Cohort Study. *Arthritis Care Res.* 2019; 71(10): 1353-1359.
- 2) Wink AE, Gross KD, *et al.*: Varus thrust during walking and the risk of incident and worsening medial tibiofemoral MRI lesions: the Multicenter Osteoarthritis Study. *Osteoarthritis Cartilage.* 2017; 25(6): 839-845.
- 3) Lo GH, Harvey WF, *et al.*: Associations of varus thrust and alignment with pain in knee osteoarthritis. *Arthritis Rheum.* 2012; 64(7): 2252-2259.
- 4) Chang AH, Chmiel JS, *et al.*: Varus thrust and knee frontal plane dynamic motion in persons with knee osteoarthritis. *Osteoarthritis Cartilage.* 2013; 21(11): 1668-1673.
- 5) Sosdian L, Hinman RS, *et al.*: Quantifying varus and valgus thrust in individuals with severe knee osteoarthritis. *Clin Biomech.* 2016; 39: 44-51.
- 6) Soeno T, Mochizuki T, *et al.*: No differences in objective dynamic instability during acceleration of the knee with or without subjective instability post-total knee arthroplasty. *PLoS One.* 2018; 13(3): e0194221.
- 7) Roberts D, Khan H, *et al.*: Acceleration-based joint stability parameters for total knee arthroplasty that correspond with patient-reported instability. *Proc Inst Mech Eng H.* 2013; 227(10): 1104-1113.
- 8) Fukutani N, Iijima H, *et al.*: Association of Varus Thrust With Pain and Stiffness and Activities of Daily Living in Patients With Medial Knee Osteoarthritis. *Phys Ther.* 2016; 96(2): 167-175.
- 9) Nakamura N, Takeuchi R, *et al.*: Cross-cultural adaptation and validation of the Japanese Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score (KOOS). *J Orthop Sci.* 2011; 16(5): 516-523.
- 10) Misu S, Asai T, *et al.*: Development and validity of methods for the estimation of temporal gait parameters from heel-attached inertial sensors in younger and older adults. *Gait Posture.* 2017; 57: 295-298.
- 11) Tsurumiya K, Hayasaka W, *et al.*: Quantitative Evaluation Related to Disease Progression in Knee Osteoarthritis Patients During Gait. *Advanced Biomedical Engineering.* 2021; 10: 51-57.

## 発表実績

## 【学会発表】

- 1) 三栖翔吾, 田中 創, 石原康平, 浅井 剛, 西上智彦: 変形性膝関節症患者における, 小型慣性センサを用いた新たな歩行時膝関節動揺指標の開発. 2021 年度 第9 回日本運動器理学療法学会集會. 2021 年 9 月 11 日・12 日

## 【原著論文】

なし