

膝関節機能評価のためのマルチモーダル歩行評価システムの開発と 地域在住高齢者を対象とした実証研究

安 在 絵 美*

DEVELOPMENT OF A MULTIMODAL GAIT EVALUATION SYSTEM FOR ASSESSING KNEE JOINT FUNCTION AND AN INTERVENTION STUDY FOR COMMUNITY-DWELLING OLDER ADULTS

Emi Anzai

Key words: knee osteoarthritis, older adults, inertial sensor, walking assessment.

緒 言

変形性膝関節症（以下、膝 OA）は、膝関節の関節軟骨が変性し、疼痛を伴い、重度だと歩行困難となる代表的な運動器疾患である。国内の大規模縦断的疫学調査によると膝 OA の推計罹患者は 2530 万人であり、このうち有症状有病者数は 780 万人と推計されている¹⁰⁾。すなわち、多くの罹患者は無症状のまま発症、あるいは重症化する可能性がある。特に山間部や農村部では、都市部よりも膝 OA の有病者数が多いことが報告されており⁴⁾、医療アクセスや専門家の不足などの課題も相まって、潜在的に重症化する対象者が多い。一方で、膝 OA の重症度評価は、X 線検査に基づいて診断されるため、症状が進行してから発見されることとなる。したがって、効果的な介護予防の実現には、地域で適応可能な膝 OA の早期発見手法と評価に基づく運動介入が求められる。

先行研究では、膝 OA の重症度に関連する身体特性として、膝関節可動域の減少、歩行中の膝の不安定性増大が示唆されている²⁾。不安定性は歩

行などの活動時に起こる膝の動的な不安定性（ぐらつきなど）を示す⁹⁾。力学的な検証を含む研究では急激な膝内反運動、内反モーメントの増大と表現することもある⁷⁾。急激かつ異常な荷重移動が伴うことから、6～8 割の膝 OA 患者が症状を自覚していることが明らかになっている³⁾。先行研究ではこれらの評価は、モーションキャプチャシステムを用いており、重症度推定に有用と報告されてきた⁷⁾。しかしながら、大型かつ限定的な場所での計測に制限されることから、地域在住高齢者への適用は難しい。

以上より、本研究では、地域在住高齢者に適用可能な膝 OA リスク評価手法を構築することを目的とした。具体的には、下肢の運動と足底圧を評価可能な足部・膝運動評価システムを開発した。そして、開発したシステムを用いて地域在住高齢者を対象としたフィールド計測実験を実施し、膝痛や関節可動域減少がある対象者の歩行特徴を明らかにするとともに、健康運動指導士の運動介入による介入研究を実施した。これらの取り組みについて以下に報告する。

* 奈良女子大学研究院工学系 Faculty of Engineering, Nara Women's University, Nara, Japan.

方 法

A. 足部・膝運動評価システムの開発

本研究では、足部と膝の運動連鎖理論に基づき、膝の変形に伴う(a)膝の不安定性と(b)足底部の荷重変化に着目した評価システムを開発した(図1)。

初めに、(a)膝の急激な内反運動について、慣性センサ(TSND121, ATR-Promotions)を用いた運動計測システムを構築した。Android 端末用のアプリケーションを開発し、Bluetooth 通信にてデータ収集を行えるようにした。センサの配置は、先行研究の手法を参考に、足首・膝下・膝上の前面3箇所とした^{5,6,8)}。

次に、(b)足底部の荷重変化をとらえるため、インソール型足底圧分布計測装置の開発を行った¹⁾。本装置は、7つの圧力センサと無線データ通信ユニットで構成される。各センサの圧力-抵抗特性について予め加圧試験を行うことでキャリブレーションを行った。センサ位置は、踵、中足部外側、前足部外側、前足部中心、第一中足骨頭、中足部中央、拇趾に配置され、歩行時の接地や離床および足部形状を推定できるような構成とした¹⁾。無線ユニットは靴の甲側に設置され、通常の靴と同様に日常生活での歩行計測が可能のように設計した。足底圧データは、スマートフォン等のアプリケーション上でリアルタイム表示される。これまで1000名以上の高齢者に対する歩行計測を行い、有用性を示してきた。加えて、膝 OA 患者

を対象とした臨床実験により、足底圧分布から重症度を推定する手法を明らかにしてきた。なお、(a)(b)の両計測システムはそれぞれの Bluetooth 通信を経由してデータ収集されるため、計測の際、一時的に共通のトリガ信号を入力することで同期できる設計にした。サンプリング周波数は両計測器ともに100 Hz とした。

B. 地域在住高齢者を対象とした歩行計測実験 (横断研究および介入研究)

A で開発した足部・膝運動評価システムを用いて、膝痛をもつ地域在住高齢者を対象としたフィールド計測実験を行った。具体的には、秋田県の各自治体が実施する介護予防運動プログラムと連携し、健康運動指導士による4~5か月間の運動介入(全10回)と介入前後(初回と最終回)に膝痛に関する調査と歩行計測を実施した。調査および計測の詳細は以下のとおりである。

プログラムの参加者は、秋田県の潟上市、五城目町、三種町に在住する高齢者43名(男性5名、女性38名、平均年齢 72.0 ± 5.8 歳)であった。参加者のうち16名が膝 OA の診断を受けていた。対象者は、独立歩行が可能な高齢者とした。実験前に、対象者には、質問紙を用いて年齢、身長、体重、医師による膝 OA の診断の有無とその時期、手術経験の有無を確認した。そのうえで6か月以内に下肢のけがや手術経験のある者、重度の心疾患、脳血管疾患の後遺症ならびに認知症をもつ者は除外された。なお、本研究は奈良女子大学研究倫理審査委員会の審査と承認を経て実施された(承認番号:第19-09号)。実験実施にあたり、すべての対象者には口頭と文書にて説明を行い書面にて実験参加の同意を得た。

実験では、介入前後において膝痛や疾患に関する情報として、膝関節可動域計測、膝の疼痛強度を調査した。膝関節可動域計測では、正座時の踵臀部間距離を計測した。膝の疼痛強度では、数日間の膝の状態について、「朝、動き出すとき膝がこわばるか」、「朝起きたとき膝が痛むか」、「夜間、睡眠中に膝が痛くて目が覚めることがあるか」、「階段を昇るときに膝が痛むか」、「階段を降りるときに膝が痛むか」、「ずっと立っているとき膝が痛むか」、「歩いているとき膝が痛むか」、「椅子か

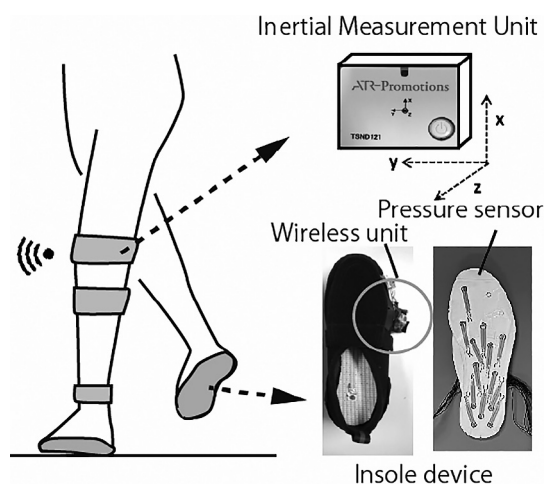


図1. 足部・膝運動評価システム
Fig.1. Foot and knee motion evaluation system.

ら立ち上がる時膝が痛むか」の8項目について、フェイススケールを用いた調査を実施した。フェイススケールは疼痛の程度やその頻度について、6段階で調査され、それぞれの項目について0～5点で点数化し、その合計値を算出した。数値が大きいほど痛みの程度や頻度が大きいことを示す。

歩行計測実験では、Aで開発した足部・膝運動評価システムを用いて歩行中の足底圧分布、足圧中心軌跡、足首・膝下・膝上の加速度ならびに角速度を計測した。計測で使用する靴は、底面がフラットな靴で統一し、実験対象者に最適なサイズを選定した。裸足でインソール型足底圧分布計測装置を装着し、快適な速度で10 m歩行してもらうよう指示した。慣性センサは実験対象者の膝痛を強く感じる側の脚（膝痛症状のない場合は右）に設置し、伸縮ベルトを用いて固定した。

歩行データの処理について、歩行開始直後2歩と、歩行終了直前2歩を除いたデータを解析対象とした。慣性センサの時系列データは、4次のButterworth low-pass フィルタにかけ、ノイズを除去した⁸⁾。カットオフ周波数は10 Hzに設定した。両計測器のデータは立脚期1歩ごとのデータに分割した。慣性センサでは、歩行周期時間、立脚期時間、遊脚期時間、立脚期および遊脚期の足首・膝下・膝上の各3軸に対する加速度・角速度の最大振幅値を算出した。左脚に着用した場合は関連するパラメータについて反転処理を行った。そして、平均を0、分散を1とする標準化処理を行い、解析に用いた。インソール型足底圧分布計測装置のデータでは、立脚期時間とそのうちの片脚支持割合、各センサのピーク圧力値、ピーク時点、積分値の平均等の項目を算出した。片脚支持割合やピーク時点は立脚期時間に対する割合を算出した。

分析では、まず膝の機能と歩行計測結果の関連を調べるため、横断研究（介入前）のデータについて正座の可否、すなわち踵臀部間距離が0より大きい者と0である者に分類し、2つの群における各項目の平均値を比較した。その際、5%を有意水準とし、Welchの検定を実施した。次に、上記であげられたパラメータについて、介入研究のデータを分析し、膝の機能の改善とともにどのように変化するかを検証した。その際、踵臀部間距

離が改善した対象者における介入前後のデータを分析した。統計解析では、5%を有意水準とし、対応のあるt検定を実施した。

結 果

A. 横断研究の結果

介入前の参加者は43名（男性5名、女性38名）であった。介入前では、正座ができない対象者、すなわち踵臀部間距離が0より大きい対象者は23名、0である対象者は20名であった。

歩行計測の結果では、正座ができる人はできない人と比べて片脚支持時間割合が長く（ $63.0 \pm 3.9\%$ vs $59.0 \pm 7.7\%$: $P = 0.04$ ）、踵の圧力ピークがみられる時間が早かった（ $19.8 \pm 3.79\%$ vs $23.2 \pm 5.7\%$: $P = 0.02$ ）。また、歩行中の踵接地直後における膝上の進行方向の加速度が大きく（ 0.96 ± 0.86 vs -0.50 ± 1.1 : $P < 0.01$ ）、正座ができない人では進行方向と逆向きの加速度が増大していた。

B. 介入研究の結果

介入後は12名がプログラムを途中辞退あるいは介入後の計測に不参加となり、介入前後の回に参加した者は31名（年齢： 72.5 ± 5.7 歳，身長： 154.7 ± 6.1 cm，体重： 56.9 ± 7.1 kg）となった。そのため、介入研究の分析対象は31名とした。表1に31名の運動介入前後における踵臀部間距離計測、膝の疼痛強度の結果を示した。31名のうち、介入前に正座ができなかった対象者は18名であった。そのうち、17名で改善がみられ、半数の9名においては運動介入後に踵臀部間距離が0 cmになり、正座ができるまで改善した。平均では、左右ともに30 mm程度改善していた。膝痛に関する8項目についても、有意な改善がみられた（表1）。図2は介入前後における1名の踵臀部間距離の測定例である。

次に、歩行計測について、踵臀部間距離が改善した対象者（ $n = 17$ ）における介入前後の足底圧および慣性センサのデータを分析した。結果として、介入後の歩行計測では介入前に比べて片脚支持時間が有意に延長した（ $60.8 \pm 3.9\%$ vs $62.8 \pm 3.4\%$: $P = 0.04$ ）。一方、踵の圧力ピークがみられる時間では、有意な変化は認められなかった。

その他、介入前で正座の可否で分けた群におい

表 1. 運動介入前後における踵臀部間距離計測、膝の疼痛強度の結果
Table 1. Assessment results before and after exercise program.

	Pre	Post	<i>P</i> value
Distance between heel and hip (right), mm	68.7 ± 85.0	38.7 ± 75.0	< 0.01
Distance between heel and hip (left), mm	69.7 ± 94.3	40.1 ± 86.5	< 0.01
Knee pain (total score of 8 items), points	11.4 ± 8.3	7.4 ± 7.4	< 0.01

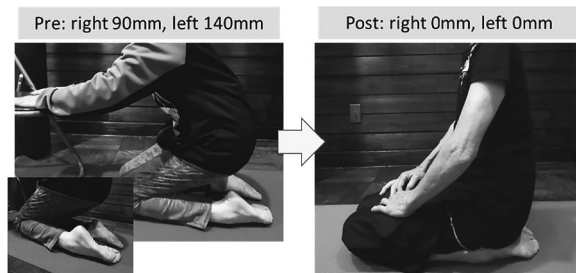


図 2. 介入前後の踵臀部間距離

Fig.2. Distance between heel and hip before and after exercise program.

て有意差がみられなかったパラメータについても、介入前後で有意な差が認められた項目があった。例えば、立脚時間が短縮し (648.3 ± 84.9 ms vs 580.2 ± 130.2 ms : $P = 0.03$)、足部の外側に位置する中足部外側および前足部外側の圧力ピーク値が減少した (中足部 : 3.9 ± 4.0 N vs 2.0 ± 1.6 N : $P = 0.04$, 前足部 : 7.4 ± 5.7 N vs 5.2 ± 5.2 N : $P < 0.01$)。更に、全センサから荷重中心を算出し、立脚期における前後左右方向の荷重中心位置を検証した結果、左右方向の最大荷重中心点が減少し、より内側に位置していた (0.97 ± 0.60 cm vs 0.57 ± 0.41 cm : $P < 0.01$)。

考 察

本研究では、足底圧と膝の運動をマルチモーダルに評価可能な歩行評価システムの開発を行った。本システムは、キネティクスおよびキネマティクスの観点から疼痛や膝の機能に関連した歩行特徴を明らかにできるだけでなく、膝痛の改善に有効とされる運動指導等の具体的な提案につながると考えられる。

開発したシステムを用いたフィールド実験を実施した成果として、横断研究の結果より、片脚支持時間、踵の圧力ピーク時間、踵接地直後における膝上の進行方向加速度の3つのパラメータは膝

の可動域や疼痛と関連する可能性が示された。また、介入研究の結果より、片脚支持時間は膝の可動域や疼痛と横断的なデータで関連しているだけでなく、改善に伴って変化することが明らかとなった。我々の先行研究で、片脚支持時間は膝 OA の重症度と関連することが明らかになっていることから、膝 OA と診断されないリスク群のなかでも膝の機能を推定可能なパラメータとなる可能性が示唆された。しかし、片脚支持時間は膝痛による結果である可能性が高く、具体的な運動介入には結び付きにくいパラメータである。リスク評価のための指標としては検討の余地がある。

更に、介入研究では上記3つのパラメータ以外にも介入後に多くの変化がみられた。立脚時間の短縮は痛みの改善による可能性がある。また、足部の外側の圧力ピーク値や左右方向の荷重中心の移動距離が減少したことについては、歩行指導による影響の可能性が考えられる。具体的には、膝の不安定性による急激な膝の内反運動を抑制するため、運動プログラムの歩行指導において足部接地後に内側荷重を意識するような指導が行われていた。介入後の計測ではこれが反映された可能性がある。このように、開発したシステムでは介入による歩行の変化をとらえられることも明らかとなった。なお、慣性センサについては通信環境や対象者への装置の装着等に不備があり、介入前後でデータが揃う対象者が少なかったため、今後の検討課題としたい。

総 括

本研究では、地域在住高齢者に適用可能な膝 OA のリスク評価手法として足部・膝運動評価システムの開発を行った。そして、健康運動指導士が提供する運動の介入前後における膝の疼痛や機能に関する調査と開発したシステムを用いた歩行

計測を実施した。その結果、次の知見が得られた。

- 1) 正座が困難な対象者は片脚支持時間、踵の圧力ピークがみられる時間において有意な差が認められ、これらのパラメータが膝の機能と関連する可能性が示された。
- 2) 片脚支持時間は膝の機能改善に伴い、改善がみられたことから、経時的な変化への関連性も明らかとなった。
- 3) 開発したシステムは高齢者が集まる運動プログラムのなかで適用でき、現場での実用可能性が確認できた。
- 4) 本システムを用いて歩行指導の効果を評価できる可能性が示された。

以上より、本研究の成果は潜在的な膝 OA に対する早期対策に向けた評価手法の第一歩となり、地域の現場における定量的な歩行評価が可能なが示唆された。今後、効果的な運動指導への貢献が期待される。

謝 辞

本研究を遂行するにあたってご協力をいただきました株式会社ピーベリー健康運動指導士 児玉美幸先生、加藤光葉先生、秋田県湯上市、五城目町、三種町の各市町役場の皆様に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Anzai E, et al. (2020): Comparative study between a novel 7-sensor plantar pressure measurement insole and the F-scan device. 2020 IEEE 2nd Global Conference on

- Life Sciences and Technologies (LifeTech), 339-342.
- 2) Astephen JL, et al. (2008): Biomechanical changes at the hip, knee, and ankle joints during gait are associated with knee osteoarthritis severity. *J Orthop Res*, **26**(3), 332-341.
- 3) Fitzgerald GK, et al. (2004): Reports of joint instability in knee osteoarthritis: its prevalence and relationship to physical function. *Arthritis Rheum*, **51**(6), 941-946.
- 4) Kang X, et al. (2009): The high prevalence of knee osteoarthritis in a rural Chinese population: the Wuchuan osteoarthritis study. *Arthritis Rheum*, **61**(5), 641-647.
- 5) Kobsar D, et al. (2017): Wearable sensors to predict improvement following an exercise intervention in patients with knee osteoarthritis. *J Neuroeng Rehabil*, **14**(1), 94.
- 6) Rueterbories J, et al. (2010): Methods for gait event detection and analysis in ambulatory systems. *Med Eng Phys*, **32**(6), 545-552.
- 7) Teng HL, et al. (2015): Higher knee flexion moment during the second half of the stance phase of gait is associated with the progression of osteoarthritis of the patellofemoral joint on magnetic resonance imaging. *J Orthop Sports Phys Ther*, **45**(9), 656-664.
- 8) Turcot K, et al. (2009): The responsiveness of three-dimensional knee accelerations used as an estimation of knee instability and loading transmission during gait in osteoarthritis patient's follow-up. *Osteoarthritis Cartilage*, **17**(2), 213-219.
- 9) Wallace DT, et al. (2019): The assessment of instability in the osteoarthritic knee. *EFORT Open Rev*, **4**(3), 70-76.
- 10) Yoshimura N, et al. (2009): Prevalence of knee osteoarthritis, lumbar spondylosis, and osteoporosis in Japanese men and women: the research on osteoarthritis/osteoporosis against disability study. *J Bone Miner Metab*, **27**(5), 620-628.