

令和 5 年 6 月 2 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2021～2022

課題番号：21K21218

研究課題名（和文）個別的な変形性膝関節症予防に繋げるウェアラブルセンサーでの半月板ストレス検出

研究課題名（英文）Detection of the meniscal stress leading to individual prevention of knee osteoarthritis progression using wearable sensor

研究代表者

石井 陽介 (Yosuke, Ishii)

広島大学・医系科学研究科（保）・助教

研究者番号：70908227

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：変形性膝関節症者における歩行中に生じる半月板の逸脱挙動は、健常者と比較し増悪しており、また多彩な動態を有していた。さらに、この挙動に関連する力学因子は、逸脱動態ごとで異なっていた。これらが関節進行に寄与する力学因子であったことから、半月板の逸脱動態は、個別的な力学病態を説明する可能性が示唆された。

また逸脱動態に関連する力学因子は、ウェアラブルセンサーから得られる加速度・角速度値とそれぞれ関連していた。したがって、個別半月板ストレスはウェアラブルセンサーで簡易可視化でき、早期から異常力学病態を検出し、進行予防に寄与する臨床的に重要な知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

半月板の動態分類で個別的な運動力学的ストレスを同定し、そしてウェアラブルセンサーを用いた簡易ストレス可視化は、変形性膝関節症（膝OA）の早期段階から異常な力学病態の検出を可能とし、本分野の予防知見に大きく貢献したと考えられる。また同じ膝OA症例内でも半月板逸脱の力学的な進行機序が異なる知見は、膝OA患者への進行予防に向けた適切な治療介入に導き、結果として病態悪化に伴う医療・介護費の抑制に繋がるなど、大きな社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：In knee osteoarthritis (OA), the behavior of meniscus extrusion during walking was greater than that in healthy volunteers and presented a variety of dynamics meniscus extrusion. Moreover, the mechanical stresses correlated with the behavior of meniscus extrusion were differ in each dynamics meniscus extrusion, respectively. These stresses are known to contribute to the knee OA progression, and indicating that the dynamics of the meniscus extrusion and its classification could explain the knee OA pathology underlying mechanical stress, individually. Additionally, these mechanical stresses were also correlated with values of acceleration and angular velocity using wearable sensors, respectively. Therefore, individual stress of the meniscus can be easily visualized by wearable sensors, in which our finding indicates the clinically meaningful detection of abnormal mechanical stress in the knee OA at an early stage and contributes to the prevention of the progression of the knee OA.

研究分野：リハビリテーション学

キーワード：半月板逸脱 変形性膝関節症 動態解析 歩行 動的超音波

1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症(膝 OA)病態は多岐にわたり、進行スピードも直線的ではないことが予防を困難とする原因の一つである。しかしながら、これらの特徴を持つ膝 OA 進行をなるべく初期段階で予測し、予防的取り組みに繋げることが重要である。内側半月板逸脱(半月板逸脱)は、異常な力学負荷を背景とした膝 OA 進行を加速させる重要な介入因子であると考えられてきた。しかし半月板逸脱と力学負荷との関係性は直線的ではなく、複雑に関わっていることが予測される。我々は超音波装置と特殊プローブを用いて歩行中の逸脱動態を把握する手法を実証し、従来手法より鋭敏な逸脱反応および多岐にわたる動態パターンを確認している。したがって、これらの半月板逸脱の動態情報は、複雑な力学病態を有す膝 OA 進行を予見する重要なバイオマーカーであると考えている。一方で本手法には特殊機器を用いた技術が前提にある。加えて、背景となる力学負荷の評価においても、三次元動作解析機器を用いた評価が主流である。この装置によって正確な力学負荷の把握を可能とするが、高価で大型な機器設備のため、一般的な臨床現場の評価としては不向きである。初期段階から膝 OA 予防を考えれば、地域病院やクリニックに来院する場を含めた様々な環境下で早期発見できる簡易検出手法の確立が必須である。一方で、最近のウェアラブルセンサーは、機器の小型化や高精度化に伴い歩行中の詳細情報を提供するが、情報量の増加に伴い、データの臨床的意義づけにはエビデンスが乏しいのが現状である。そこで本研究では、半月板の逸脱動態をパターン化し、それぞれ関連する力学的特徴をウェアラブルセンサーで抽出、つまり個別的な半月板ストレスの“簡易可視化”によって、早期より膝 OA 患者における力学病態の検出を目指す。

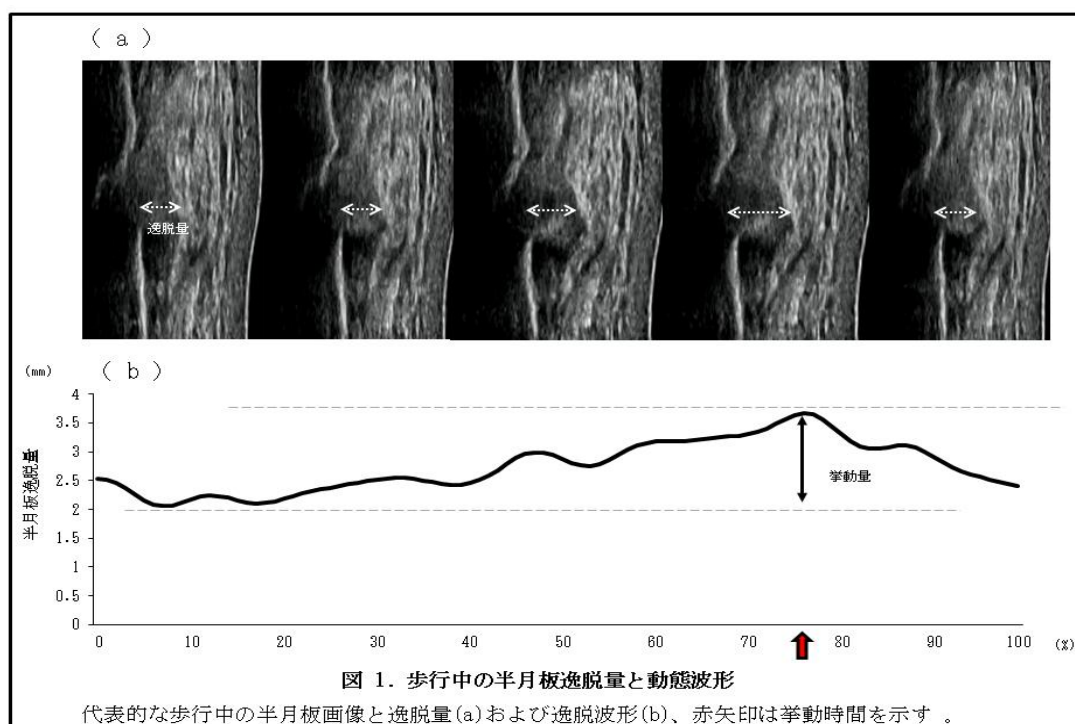
2. 研究の目的

本研究では超音波検査から評価できる歩行中の半月板逸脱動態を三次元動作解析と併用し、動態パターンごとに関連する運動力学的な特徴を抽出する。そして関連する力学因子をウェアラブルセンサー上での可視化に落とし込むことで、半月板動態の特徴に基づいた力学ストレスの簡易検出手法の確立を目的とする。

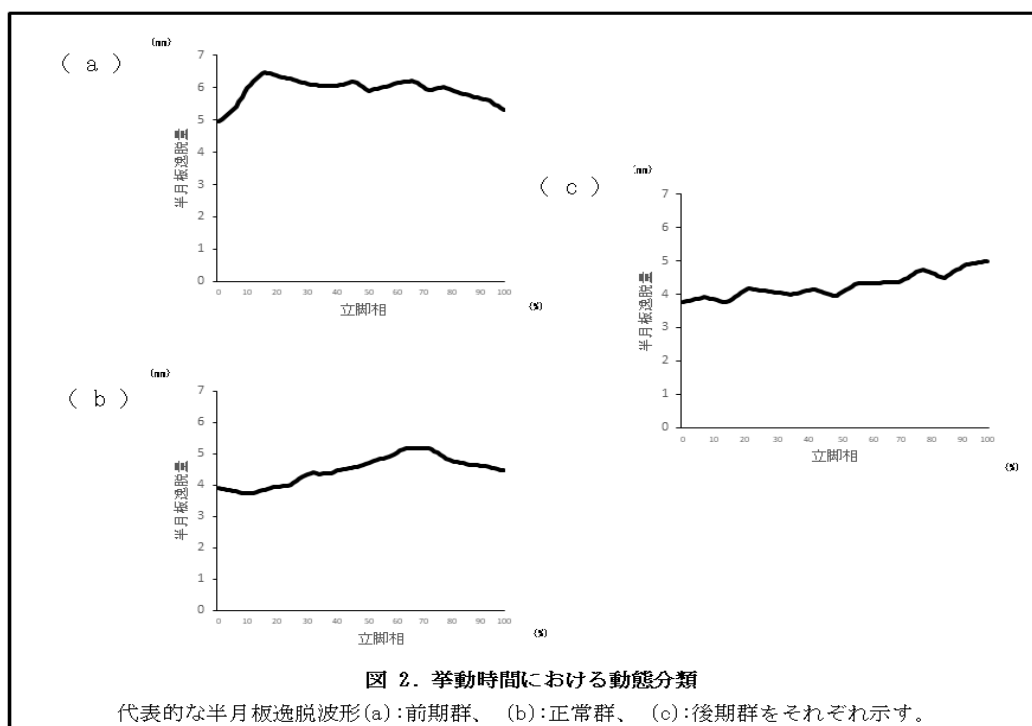
3. 研究の方法

(1) 半月板逸脱動態と関連する力学因子の抽出:

膝 OA および健常高齢者において、三次元動作解析と超音波検査装置を同期させ、快適歩行中の半月板動態と膝関節の力学情報を取得した。解析区間は、1 歩行周期における立脚相を床反力計から同定し、100%時間正規化を行った。半月板の逸脱量は、超音波画像上において脛骨骨皮質の延長線から垂直に半月板の最内縁距離で算出され、連続した逸脱量から逸脱波形を作成した。また波形の最小値と最大値の差を用いて、逸脱の増悪を示す挙動量を算出し、加えてこの発生する時間を挙動時間として解析に用いた(図1)。これらの解析手法から得られた値は、高い信頼性を有することを同時に確認している[1]。



膝 OA 患者は健常高齢者の挙動時間に類似した正常群、早期および遅延している前期群、後期群の 3 群に分類された (図 2)。これらの群において、挙動量と力学的因子の関係性をそれぞれ検討し、逸脱動態に関連する力学因子を抽出した。



(2) ウェアラブルセンサー簡易視覚化：

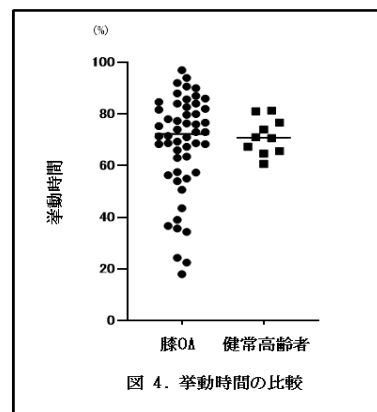
膝 OA 患者を対象に、快適歩行中の三次元動作解析から得られる力学因子、およびウェアラブルセンサー情報を収集した。ウェアラブルセンサーは三軸加速度・角速度計を採用した。対象者の下腿および大腿部の側面中央部にセンサーを貼付し (図 3)、加速度・角速度値を測定した。抽出された力学因子と加速度・角速度のピーク値を用い、逸脱動態ごとの力学負荷が簡易視覚化できるか検証した。



4. 研究成果

(1) 半月板の逸脱動態と関連する力学因子の抽出：

膝 OA 患者 52 名と健常高齢者 10 名において、半月板の挙動量と挙動時間を算出した。健常高齢者と比較し、膝 OA 患者の挙動量は高値を示し (膝 OA: 1.5 ± 0.6 mm, 健常高齢者: 1.0 ± 0.1 mm; $p < 0.01$)、そして多彩な挙動時間を有していた (図 4)。さらに、健常高齢者の挙動時間と類似した正常群 (N=14, 27%)、前期群 (N=23, 44%)、後期群 (N=15, 29%) に膝 OA 患者を振り分けた。挙動量、歩行速度、関節角度、膝関節モーメントは、各群で有意差を認めなかった。しかし歩行中の挙動量は、前期群で 1st 膝関節内反モーメントおよび lateral thrust、正常群では、2st 膝関節内反モーメント、そして後期群で膝関節屈曲モーメントおよびその積分値とそれぞれ相関していた (table 1)。



膝 OA 患者において歩行中の半月板動態は多彩で、抽出された力学因子もそれぞれ異なっていた。これらの力学因子は、既に膝 OA 進行に関与することが示されている。加えて、我々は派生研究

として、抽出された力学因子に対する介入効果も検証し、力学因子の減少に伴う挙動量の抑制も確認している[2]。したがって、歩行中に生じる半月板の逸脱動態は、膝 OA の複雑な力学病態を読み解き、個別的な進行予防に繋がる可能性が示唆された。

Table 1 半月板挙動量と力学因子の関連

	前期	正常	後期
Lateral thrust	0.71*	0.31	-0.23
1 st 膝内反モーメント	0.58*	0.23	-0.03
2 st 膝内反モーメント	0.54	0.44*	-0.18
膝屈曲モーメント	0.24	0.05	0.56*
膝内反モーメント積分値	0.68*	0.07	-0.12
膝屈曲モーメント積分値	0.31	-0.18	0.64*

これらの値は半月板挙動量と運動力学因子の相関係数であり、* は有意相関を示す (p < 0.05)。

(2) ウェアラブルセンサーでの簡易視覚化：

23名の膝 OA 患者において、半月板逸脱に関連する力学因子と下腿・大腿部の加速度・角速度のピーク値をそれぞれ算出した。前期群の挙動量に関連していた 1st 膝関節内反モーメントおよび lateral thrust は、下腿・大腿部の外側加速度と有意な正の相関を認めた(1st 膝関節内反モーメント: $r=0.58$, $p<0.01$, lateral thrust: $r=0.48$, $p<0.01$)。また正常群に関連する 2st 膝関節内反モーメントは、大腿部の前方角速度 ($r=0.45$, $p<0.01$)、そして後期群に関連する膝関節屈曲モーメントは下腿前方加速度と有意な正の相関を示した ($r=0.49$, $p<0.05$)。

三次元動作解析で得られる半月板逸脱動態に関与する力学因子は、ウェアラブルセンサーを用いたデータと関連していた。本研究のようなウェアラブルセンサー評価は、特別な測定環境は必要なく、かつ比較的短時間で遂行できる。さらに派生研究として、ウェアラブルセンサーを用い、半月板逸脱を増悪させる lateral thrust への介入効果の検出にも成功した[3]。したがって、本手法は、初期の膝 OA 患者が来院する地域病態やクリニックで適応でき、早期段階から適切な力学病態の把握および介入効果の検証に繋がるなど、臨床的に有益な知見が示された。

(3) 得られた成果の意義および今後の展望：

半月板の動態分類で個別的な力学ストレスを同定し、ウェアラブルセンサーを用いた簡易可視化は、膝 OA の早期段階から異常な力学病態を検出し、本分野の予防知見に大きく貢献したと考える。また同じ膝 OA 症例内でも半月板逸脱の力学的な進行機序が異なる知見は、膝 OA 進行予防に向けた適切な治療介入に導き、結果として病態悪化に伴う医療・介護費の抑制に繋がるなど、大きな社会的意義があると考えられる。

今後は、逸脱動態と半月板および軟骨損傷状態の関連性や、この動態分類を臨床指標で予測できる因子解明が必要と考える。これらの取り組みを通して、臨床現場の早期段階から、半月板逸脱を標的とした膝 OA 進行予防の手法確立に繋がると考える。

<引用文献>

- [1] Ishii Y, Ishikawa M, Nakashima Y, Takahashi M, Iwamoto Y, Hashizume T, et al. Knee adduction moment is correlated with the increase in medial meniscus extrusion by dynamic ultrasound in knee osteoarthritis. *The Knee* 2022;38:82-90. <https://doi.org/10.1016/j.knee.2022.07.011>.
- [2] Okamoto S, Ishii Y, Ishikawa M, Nakashima Y, Kamei G, Iwamoto Y, et al. The effect of gait modification on the response of medial meniscus extrusion during gait in patients with knee osteoarthritis. *Gait Posture* 2023;102:180-5. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2023.03.017>.
- [3] Ishii Y, Ishikawa M, Kurumadani H, Sunagawa T, Date S, Takahashi M, et al. The Effect of Lateral Wedge Insole on Gait Variability Assessed Using Wearable Sensors in Patients with Medial Compartment Knee Osteoarthritis. *J Healthc Eng*

2023;2023:6172812. <https://doi.org/10.1155/2023/6172812>.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ishii Yosuke, Ishikawa Masakazu, Nakashima Yuko, Takahashi Makoto, Iwamoto Yoshitaka, Hashizume Takato, Okamoto Saeko, Sunagawa Toru, Okada Kaoru, Takagi Kazuya, Adachi Nobuo	4. 巻 38
2. 論文標題 Knee adduction moment is correlated with the increase in medial meniscus extrusion by dynamic ultrasound in knee osteoarthritis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Knee	6. 最初と最後の頁 82～90
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.knee.2022.07.011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Okamoto Saeko, Ishii Yosuke, Ishikawa Masakazu, Nakashima Yuko, Kamei Goki, Iwamoto Yoshitaka, Hashizume Takato, Okada Kaoru, Takagi Kazuya, Takahashi Makoto, Adachi Nobuo	4. 巻 102
2. 論文標題 The effect of gait modification on the response of medial meniscus extrusion during gait in patients with knee osteoarthritis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Gait & Posture	6. 最初と最後の頁 180～185
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.gaitpost.2023.03.017	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Ishii Yosuke, Ishikawa Masakazu, Kurumadani Hiroshi, Sunagawa Toru, Date Shota, Takahashi Makoto, Iwamoto Yoshitaka, Adachi Nobuo	4. 巻 2023
2. 論文標題 The Effect of Lateral Wedge Insole on Gait Variability Assessed Using Wearable Sensors in Patients with Medial Compartment Knee Osteoarthritis	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Healthcare Engineering	6. 最初と最後の頁 1～7
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1155/2023/6172812	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件／うち国際学会 0件）

1. 発表者名 石井陽介
2. 発表標題 内側型変形性膝関節症患者における歩行中の内側半月板逸脱増加は膝関節内反モーメントと関係する
3. 学会等名 第13回日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 石井陽介
2. 発表標題 動態を読み解く、歩行中に生じる半月板逸脱への介入戦略
3. 学会等名 第33回日本整形外科超音波学会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 石井陽介
2. 発表標題 膝関節構造体の”動きを診る” 動態解析から紐解く病態理解と理学療法の治療展開
3. 学会等名 第10回運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関