

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：37104

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K17743

研究課題名（和文）筋骨格モデリングシステムを用いた膝半月板損傷患者に対する保存療法の除痛機序の解明

研究課題名（英文）Elucidation of pain relief mechanism of conservative therapy for patients with knee meniscal injuries using musculoskeletal modeling system.

研究代表者

緒方 悠太（Ogata, Yuta）

久留米大学・大学病院・医療技術員

研究者番号：00807951

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,900,000 円

研究成果の概要（和文）：膝半月板損傷患者に対して手術を行わない治療の前後でどのようなメカニズムで痛みが生じているか調査した。治療により膝の痛みや可動域、筋力は改善し、歩いている時の膝の屈伸運動が大きくなることが分かった。介入前に膝の屈伸運動を小さくしているのは、大腿骨と脛骨を圧迫する力を小さくするためであると考えられた。また、股関節の筋、特に中殿筋の力が低下すると膝蓋骨を圧迫する力が大きくなることが分かった。膝半月板損傷患者で膝蓋骨周囲の痛みを有する患者に対しては股関節への介入も有用である可能性がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

どういった特徴を持つ半月板損傷患者が手術を行わずに保存療法で症状が改善するか、手術療法と保存療法の選択基準は明らかになっていない。本研究は膝関節疾患の患者に対して股関節への介入を行う生体力学的なエビデンスを提供した点で学術的な意義がある。また、より具体的な保存療法の方針を示すことで手術療法を行う患者を減らし、将来的な医療費削減の一助となる知見を提供した点で社会的な意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：We investigated the mechanism of pain in patients with knee meniscus injuries before and after non-surgical treatment. We found that treatment improved knee pain, range of motion, and muscle strength, and increased knee motion during walking. The reason for the smaller knee motion before treatment was to reduce the force that compresses the femur and the tibia. It was also found that the force compressing the patella was increased when the strength of the hip muscles, especially the gluteus medius muscles, was decreased. Exercise for hip joint may also be useful for patients with meniscal injuries who have pain around the patella.

研究分野：リハビリテーション科学

キーワード：半月板損傷 理学療法 筋骨格モデリング リハビリテーション 保存療法 動作解析 歩行 痛み

1. 研究開始当初の背景

膝半月板損傷患者に対する理学療法は膝半月板部分切除術と比べて術後 6 ヶ月時点で差が無いことが報告された[1]。膝半月板部分切除は変形性膝関節症へと早期に進行するため、この報告は保存的治療の有効性を示唆している。しかしながら、この報告では理学療法の対象となった患者の 30%は手術療法へ移行している。このことはすべての膝半月板損傷患者に対する理学療法が必ずしも有効ではない、即ち、保存的治療の適応には限界があるということである。

これまで膝半月板損傷患者に関する研究では、保存的治療により疼痛が軽快する機序は明らかとされていない。歩行中の膝関節への圧縮力の二分の一が筋収縮によるものであることが明らかとなっている[2]。膝半月板損傷患者は、筋活動や膝関節運動の異常が多く報告されており、これらの変化が膝関節への力学的負荷を増大させ、疼痛の原因となっている可能性がある。このような患者には、膝半月板の切除術を行わなくても、理学療法介入による膝関節運動の改善で、過度な筋収縮を抑制し、膝半月板損傷の症状を抑えることができる可能性がある。

生体内にセンサーを入れる実験は倫理的な側面から困難であるため、動作時の膝関節の負荷を推定するために、近年筋骨格モデリングが用いられている。しかしながら、健常者の歩行データを用いたシミュレーションは散見されるものの、膝半月板損傷患者の特異的な歩行を反映した研究は乏しい。屍体研究は膝半月板損傷の力学的な影響を見る場合に非常に優れた方法であるが、先述のとおり、歩行等の動作では筋活動が膝関節の負荷へ与える要素が大きいため、生体への適応には限界がある。そこで、本研究では筋骨格モデリングを用いて実際の膝半月板損傷患者の歩容の変化とそれに伴う膝関節へ加わる負荷の変化を調査した。

2. 研究の目的

本研究は、膝半月板損傷患者の保存的治療の前後で疼痛や身体機能がどの様に变化するか疼痛の変化と関連する生体力学的な要因、以上の 2 点を明らかにすることで、治療基準の一助となる知見を提供する事を目的として実施した。

3. 研究の方法

内側半月板後節、または後根損傷を有する直ちに手術適応では無い症例 8 名 (平均身長 161 ± 9.9 cm、平均体重 60.7 ± 10.9 kg、平均年齢 67 ± 15 歳)を対象とした。除外基準は独歩不能、変形性膝関節症、膝関節手術歴、過去 1 年間の下肢の整形外科的既往、その他計測に影響を与え得る既往歴および現病歴を有することとした。初診後に初期評価を行い、3 ヶ月間の保存療法の後に最終評価を行った。なお、全例に対して 3 ヶ月間同一の理学療法士が標準的なリハビリテーションを実施した。

身体機能の評価として日本整形外科学会の基準に基づき膝屈曲角度可動域(膝屈曲 ROM)をゴニオメーターで、伏臥位での踵の高さの違い (Heel Height Difference; HHD) を膝関節伸展制限の指標として測定した。Cybex (Cybex International Inc., New York, USA)を用いた $60^\circ/\text{sec}$ での等速性膝関節伸展筋力を計測した。また、患者立脚型評価である Knee Injury and Osteoarthritis Outcome Score(KOOS)を取得し、症状を評価した。

身体の骨指標に 64 個の赤外線反射マーカを貼付し、快適歩行時の位置データを 3 次元動作解析装置 Vicon MX (Vicon, Oxford, UK)を用いて 200Hz で、床反力データを床反力計 (Advanced Mechanical Technology, MA, USA)を用いて 2000Hz で取得した。膝関節角度の算出は Point cluster 法[3]を用いて行い、接地時から立脚期前半の最大膝屈曲角度までの膝屈曲角度の変化量(初期膝屈曲角)および、立脚期前半の最大屈曲から立脚期後半の最大伸展角度の差(excursion)、接地時から立脚期の最大膝内旋角度の差(脛骨内旋量)を算出した。

筋骨格モデリングソフトウェア Anybody modeling system (ver. 7.1, AnyBody Technology, Aalborg, Denmark)を用いて下肢関節モーメント、筋活動の推定、脛骨大腿関節および膝蓋大腿関節の圧縮力の算出を行った。長さや速度変化による筋の発揮張力の変化を考慮するために、hill model の筋を用い、筋活動の推定は min-max 法で実施した。本研究では中殿筋の筋活動の低下が膝関節へ与える影響を明らかにするために横断面積を 30%減少させ、発揮し得る最大張力が通常の 30%とすることで筋力低下のシミュレーションを行った。

介入前後の差の検定は Wilcoxon signed rank test にて行い、膝伸展筋力と各項目の相関は Spearman の順位相関係数を用いて算出した。なお、有意水準は 5%未満とした。

4．研究成果

半月板損傷患者に対する保存療法前後での身体機能および症状の変化

身体機能および結果を表 1 に示す。膝屈曲 ROM は介入前 123 ± 29 度、介入後 137 ± 18 度で有意に改善した。なお、介入後に有意な患健差は認めなかった。介入前は 8 例中 6 例に膝伸展制限を認め(HHD: 0.9 ± 1.4 cm)、その内 5 例は介入後に改善した。膝関節伸展筋力は介入前 0.43 ± 0.24 Nm/BW、介入後 0.62 ± 0.3 Nm/BW で有意に改善した。KOOS 点数は介入前 44.2 ± 14.1 点、介入後 72.8 ± 15.8 点で介入後有意に改善した。

表 1．身体機能および症状の介入前後の変化

	患側：介入前	患側：介入後	健側
HHD [cm]	0.91 (1.4)*	0.13 (1.0)	-
膝関節屈曲可動域 [°]	123.2 (29.3)*†	137.8 (14.8)†	147.0 (9.0)
膝関節伸展筋力 [Nm/BW]	0.43 (0.24)*†	0.62 (0.3)	0.69 (0.3)
KOOS [点]	44.2 (14.1)*	72.8 (15.8)	-

Mean (SD)

* $p < 0.05$ 介入前後比較 (Wilcoxon signed-rank test)

† $p < 0.05$ 患健差比較 (Wilcoxon signed-rank test)

半月板損傷に対する保存療法の効果はこれまで報告されており、先行研究においても全体として改善傾向であるが、改善の程度にはバラつきがある[1]。本研究の結果も先行研究と同様の傾向であった。本研究では関節可動域および筋力は改善傾向であったが、特に筋力は患健差が残存した。これは関節可動域よりも筋力の回復に時間が必要であることが考えられる。

半月板損傷患者に対する保存療法前後での膝関節運動の変化

膝関節運動の変化を表 2 に示す。初期膝屈曲角は介入前は患側 16.9 ± 4.1 度、健側 27.1 ± 14.4 度で患側が有意に低値を示したが、介入後は患側 23.6 ± 15.3 度、健側 20.6 ± 6.3 度で有意な患健差は認めなかった。Excursion に関しても同様に介入前は患側 6.2 ± 5.1 度、健側 13.2 ± 6.3 度で患側が有意に低値を示したが、介入後は患側 11.4 ± 3.3 度、健側 11.8 ± 7.1 度で有意な患健差は認めなかった。脛骨内旋量は介入前後ともに有意な患健差を認めなかった。膝の屈伸運動低下は膝痛によって生じる事が報告されており、様々な膝関節疾患で実際に観察されている[4]。本研究においても膝痛が屈伸運動を低下させた可能性がある。しかしながら、この屈伸運動の低下が実際に膝の負荷をどの様に変化させているかは明らかでない。そこで、介入前後の歩容の変化が脛骨大腿関節の圧縮力にどのような影響を与えているかを代表的な症例で検討した。

表 2．膝関節運動の介入前後の変化

	患側：介入前	患側：介入後	健側：介入前	健側：介入後
初期膝屈曲角[°]	16.9 (4.1)*†	23.6 (15.3)	27.1 (14.4)	20.6 (6.3)
Excursion [°]	6.2 (5.1)*†	11.4 (3.3)	13.2 (6.3)	11.8 (7.1)
脛骨内旋量 [°]	15.4 (1.7)	16.9 (2.9)	15.5 (4.5)	14.8 (3.0)

Mean (SD)

* $p < 0.05$ 介入前後比較 (Wilcoxon signed-rank test)

† $p < 0.05$ 患健差比較 (Wilcoxon signed-rank test)

保存療法前後での歩容の変化と脛骨大腿関節圧縮力の変化の関係

解析の結果、立脚前期の膝関節屈曲の低下が、立脚前期における外部膝屈曲モーメントを低下させ、四頭筋の発揮張力が低下することで、脛骨大腿関節の圧縮力が低値を示した。つまり、共同収縮による圧縮力の増加という仮説と反して、逃避性の戦略である可能性が考えられた。同様の膝関節運動の変化が膝関節疾患患者で報告されており[4]、膝関節疾患患者が呈する跛行のメカニズムの一部が明らかになったと考えられる。本症例では介入後に立脚後期の患健差は残存したものの、立脚前期の歩容は改善し、立脚初期の脛骨大腿関節の圧縮力も正常に近づいた。しかしながら、介入後も歩行時痛が残存した症例も存在し、他の力学的要因の関与が考えられた。損傷半月板の不安定性や関節内の炎症の残存等も要因として考えられるが、本研究のデータから判断することは困難である。そこで、膝蓋大腿関節周囲の疼痛が生じた症例がいたことから、膝蓋大腿関節に着目して解析を行った。

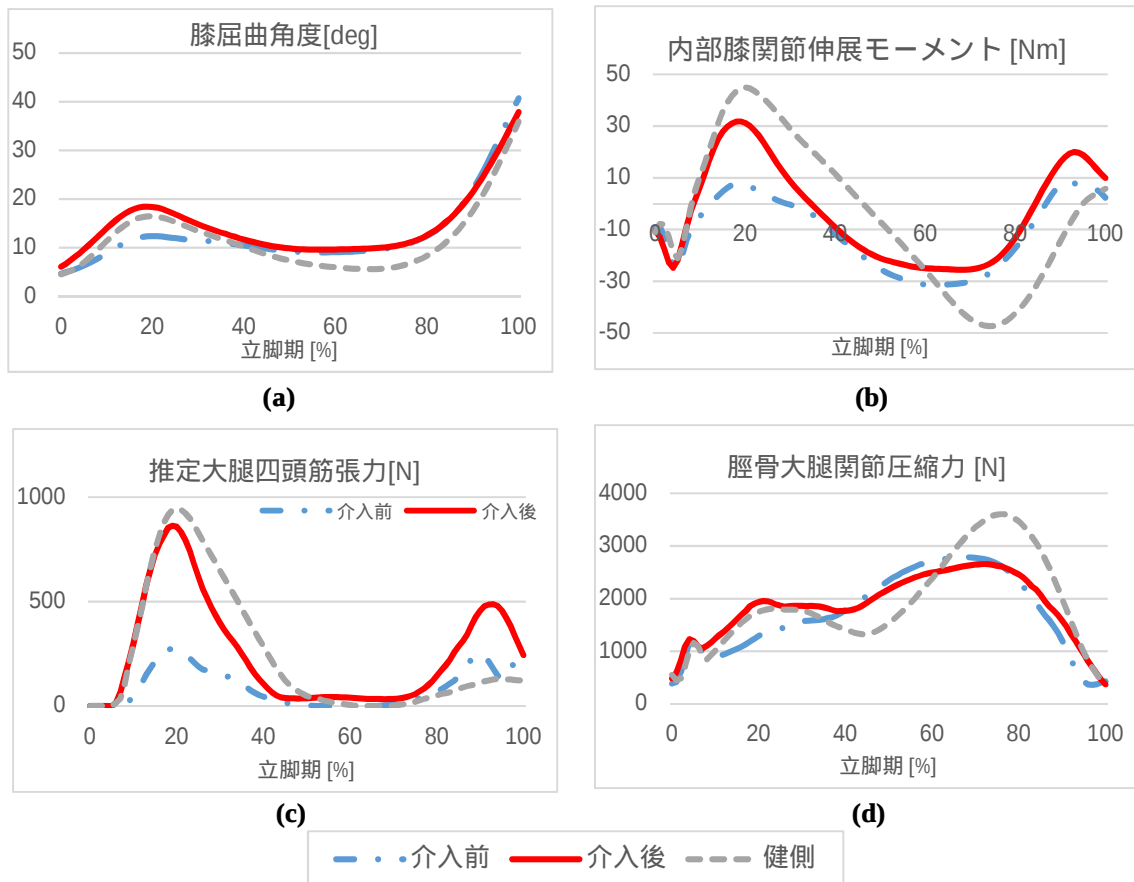


図 1. 介入前後での歩容の変化と脛骨大腿関節圧縮力
(a: 膝屈曲角度、b: 膝伸展モーメント、c: 大腿四頭筋張力、d: 脛骨大腿関節圧縮力)

中殿筋筋力低下が膝蓋大腿関節に与える影響

股関節外転筋力の低下は膝蓋大腿関節痛[5]や変形性膝蓋大腿関節症[6]との関連が報告されており、股関節外転筋力が力学的に膝蓋大腿関節に影響を及ぼしている可能性がある。特に中殿筋の筋力低下が生じると外部股関節内転モーメントの生じる立脚期に二関節筋である大腿筋膜張筋が代償的に活動し、膝蓋大腿関節への負荷が変化することが考えられた。これまで、疼痛と跛行を呈する患者で、このメカニズムを明らかにした論文は渉猟する限り見当たらない。新型コロナウイルスの影響で目標症例数の確保が困難になったため、筋骨格モデリングソフトウェアを用いて中殿筋の筋力低下のシミュレーションを追加して行った。

結果として中殿筋の筋力低下が低下すると膝蓋大腿関節の最大圧縮力が 33%上昇すること (intact モデル:251N,筋力低下モデル:334N)が推定された(図 2)。このメカニズムとして以下の二つが考えられる。大腿筋膜張筋が ilio-patella band[7]を介して膝蓋大腿関節に張力を加えた。中殿筋後部線維の筋力低下により代償的にハムストリングが活動し、四頭筋の収縮が増加した。本研究の結果から膝蓋大腿関節周囲の疼痛を有する患者に対して中殿筋に着目した運動療法を行う生体力学的な根拠の一つが得られたと考えられる。

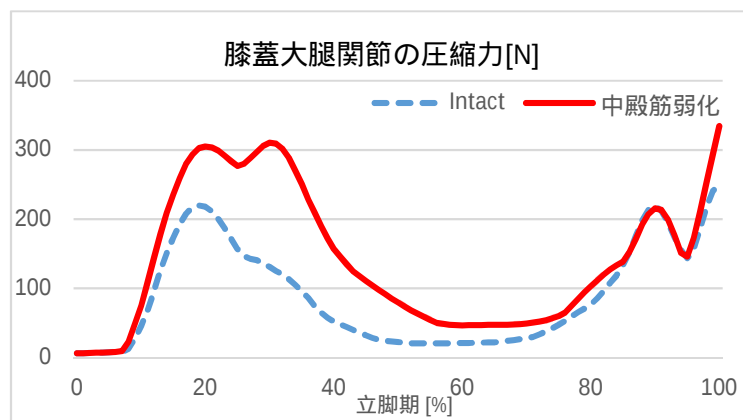


図 2. 中殿筋筋力低下が膝蓋大腿関節の圧縮力へ与える影響

本研究には幾つか考慮すべき限界がある。本研究は逆動力学解析であるため、運動学データは 2 モデル間で同一である。そのため、大腿筋膜張筋の代償的な活動が大腿骨に対して脛骨をより

外旋させ **Q-angle** が変化することによる膝蓋大腿関節への影響は考慮されていない。今後は逆動力学と順道動力学を組み合わせた **force dependent kinematic** 解析を用いて、これらの影響を含めた解析を行っていく予定である。また、今回はあくまで数学的なモデルであるため、中殿筋の筋力低下が膝蓋大腿関節痛を改善するかは介入試験等と照らし合わせながらその効果を検討していく必要がある。

結論

本研究では半月板損傷患者に対する 3 ヶ月間の保存療法前後の身体機能および歩行の生体力学的変化を調査した。結果として、関節可動域や筋力、症状には一定の改善が見られたが、程度にはバラつきがあった。介入前は患側の膝屈伸運動が低下しており、これは脛骨大腿関節の圧縮力を低下させるための逃避性の戦略であることが考えられた。また、中殿筋の筋力低下は膝蓋大腿関節の圧縮力を増加させるため、半月板損傷による疼痛で二次的に筋力低下が生じない様にすることで、膝蓋大腿関節痛の発生を予防出来る可能性がある。今後は症例介入研究を通じて、この効果を明らかにしていく必要がある。

参考文献

1. Katz, J. N., Brophy, R. H., Chaisson, C. E., de Chaves, L., Cole, B. J., Dahm, D. L., Losina, E. Surgery versus Physical Therapy for a Meniscal Tear and Osteoarthritis. *New England Journal of Medicine*, 368(18), 1675–1684, 2013.
2. Damm, P., Kutzner, I., Bergmann, G., Rohlmann, A., & Schmidt, H. Comparison of in vivo measured loads in knee, hip and spinal implants during level walking. *Journal of Biomechanics*, 51, 128–132. 2017.
3. Andriacchi, T. P., Alexander, E. J., Toney, M. K., Dyrby, C., & Sum, J. A point cluster method for in vivo motion analysis: Applied to a study of knee kinematics. *Journal of Biomechanical Engineering*, 120(6), 743–749. 1998.
4. Netravali, N. A., Giori, N. J., & Andriacchi, T. P. Partial medial meniscectomy and rotational differences at the knee during walking. *Journal of Biomechanics*, 43(15), 2948–2953. 2010.
5. Santos, T. R. T., Oliveira, B. A., Ocarino, J. M., Holt, K. G., & da Fonseca, S. T. Effectiveness of hip muscle strengthening in patellofemoral pain syndrome patients: A systematic review. *Brazilian Journal of Physical Therapy*, 19(3), 167–176. 2015.
6. Ackland, D. C., Denton, M., Schache, A. G., Pandey, M. G., & Crossley, K. M. Hip abductor muscle volumes are smaller in individuals affected by patellofemoral joint osteoarthritis. *Osteoarthritis and Cartilage*, 27(2), 266–272. 2019.
7. Godin, J. A., Chahla, J., Moatshe, G., Kruckeberg, B. M., Muckenhirn, K. J., Vap, A. R., LaPrade, R. F. A Comprehensive Reanalysis of the Distal Iliotibial Band: Quantitative Anatomy, Radiographic Markers, and Biomechanical Properties. *American Journal of Sports Medicine*, 45(11), 2595–2603. 2017.

5．主な発表論文等

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

1．著者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、木内 正太郎、田淵 幸祐、前田 朗、志波 直人	4．巻 45
2．論文標題 膝前十字靱帯再建術後の膝関節伸展制限は片脚ホップ時の床反力へ影響を及ぼす	5．発行年 2020年
3．雑誌名 JOSKAS	6．最初と最後の頁 108-109
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 谷口 侑紀、緒方 悠太、山添 貴弘、佐藤 孝二、石橋 千直、久米 慎一郎、大川 孝浩、志波 直人	4．巻 33
2．論文標題 変形性股関節症患者の人工股関節全置換術前後における歩行中の股関節矢状面運動と膝関節痛の関係	5．発行年 2020年
3．雑誌名 理学療法福岡	6．最初と最後の頁 71-79
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	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 緒方 悠太、佐藤 孝二、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人	4．巻 44
2．論文標題 膝前十字靱帯再建術後患者の脛骨前後位置が歩行時の膝関節回旋運動に及ぼす影響	5．発行年 2019年
3．雑誌名 JOSKAS	6．最初と最後の頁 402-403
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 -

〔学会発表〕 計12件（うち招待講演 3件／うち国際学会 0件）

1．発表者名 緒方 悠太	
2．発表標題 膝関節疾患の病態×バイオメカニクス	
3．学会等名 第31回福岡県理学療法士学会（招待講演）	
4．発表年 2022年	

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、谷口 侑紀、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人
2．発表標題 外側円板状半月板に対する形成切除術および縫合術後3ヵ月および6ヵ月時点における歩行時膝関節運動
3．学会等名 第48回日本臨床バイオメカニクス
4．発表年 2021年

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人
2．発表標題 外側円板状半月板縫合術後患者の術後早期における身体機能の変化
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 緒方悠太，谷口侑紀，佐藤孝二，木内正太郎，田淵幸祐，副島崇，前田朗，大川孝浩，志波直人
2．発表標題 変形性膝関節症および変形性股関節症の運動解析とリハビリテーションへの応用
3．学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会（招待講演）
4．発表年 2020年

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、谷口 侑紀、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人
2．発表標題 外側円板状半月板に対する形成切除術および縫合術後3ヶ月時点における歩行時膝関節運動
3．学会等名 第47回日本臨床バイオメカニクス学会
4．発表年 2020年

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、山下明浩、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人
2．発表標題 半月板縫合術後3カ月での膝関節伸展制限は歩行時膝関節運動に影響を及ぼす
3．学会等名 第12回 日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会
4．発表年 2020年

1．発表者名 緒方悠太，田川善彦，松瀬博夫，高野吉郎
2．発表標題 高齢者の転倒予防を目的とした歩行機能改善装置の評価―床反力作用点移動の活性化―
3．学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4．発表年 2020年

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、谷口 侑紀、山下 明浩、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、大川 孝浩、志波 直人
2．発表標題 膝関節運動の三次元マーカとポイントクラスター解析
3．学会等名 第46回日本臨床バイオメカニクス学会（招待講演）
4．発表年 2019年

1．発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、谷口 侑紀、山下 明浩、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、田川 善彦、志波 直人
2．発表標題 半月板縫合術後3ヵ月での歩行時膝関節運動
3．学会等名 第46回臨床バイオメカニクス学会
4．発表年 2019年

1. 発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、木内 正太郎、田淵 幸祐、前田 朗、志波 直人
2. 発表標題 膝前十字靱帯再建術後の膝関節伸展制限は片脚ホップ時の床反力へ影響を及ぼす
3. 学会等名 第11回 日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 緒方 悠太、佐藤 孝二、谷口 侑紀、木内 正太郎、田淵 幸祐、副島 崇、前田 朗、志波 直人
2. 発表標題 膝前十字靱帯再建術後患者の脛骨後傾角度がホップおよび片脚着地動作時の脛骨回旋運動へ及ぼす影響
3. 学会等名 第45回臨床バイオメカニクス学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 緒方悠太、佐藤孝二、木内正太郎、田淵幸祐、副島崇、前田朗、志波直人
2. 発表標題 膝前十字靱帯再建術後の脛骨前後位置が歩行時の膝関節運動へ及ぼす影響
3. 学会等名 第10回 日本関節鏡・膝・スポーツ整形外科学会
4. 発表年 2018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
研究協力者	田淵 幸祐		
	(Tabuchi Kosuke)		

6．研究組織（つづき）

	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
研究協力者	木内 正太郎 (Kinouchi Shotaro)		
研究協力者	佐藤 孝二 (Sato Koji)		
研究協力者	志波 直人 (Shiba Naoto)		
研究協力者	前田 朗 (Maeda Akira)		
研究協力者	田川 善彦 (Tagawa Yoshihiko)		

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
---------	---------