

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2023

課題番号：20K11185

研究課題名(和文) 関節に作用する圧縮力や骨内に生じる応力からみた変形性膝関節症の進行要因の解明

研究課題名(英文) Factors in the progression of knee osteoarthritis in terms of compressive forces acting on the joint and stresses occurring in the bone

研究代表者

阿南 雅也 (Anan, Masaya)

大分大学・福祉健康科学部・准教授

研究者番号：10517080

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：研究1では、健常高齢者に対し、歩行立脚初期の膝関節屈曲角度増加させることで膝関節への力学的負荷がどのように変化するか比較し、検討を行った。その結果、健常高齢者において歩行立脚初期の膝関節屈曲角度増加させた歩行は、膝関節圧縮力を減少させる可能性が示唆された。研究2では、変形性膝関節症のメカニズム解明を目指した膝関節周囲における個別別の筋活動度・膝関節反力・膝関節角度の推定とそれらを反映した骨の応力解析手法の確立を目的とした。その結果、本手法が変形性膝関節症の個別別筋力推定に有用である可能性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

変形性膝関節症の発症予防において、本研究で示した歩行立脚初期に膝関節角度を増大した口頭指示は、膝関節にかかる負担を軽減できる可能性が示唆され、臨床においても簡易的に行うことが可能である。よって、高齢者に立脚初期の膝関節屈曲角度を十分に確保することは膝OAの発症予防として有効な指導方法である可能性が示唆された。また、変形性膝関節症患者の膝周囲における特異的負荷を評価する筋骨格力学解析手法を確立でき、本手法が変形性膝関節症の個別別筋力推定に有用である可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In Study 1, we investigated and compared how increasing the knee flexion angle at the loading response of gait affects the mechanical load on the knee joint in healthy older adults. The results suggest that walking with an increased knee flexion angle at the loading response phase may reduce knee contact forces in this population. In Study 2, we aimed to elucidate the mechanisms of osteoarthritis by estimating individual muscle activity, knee joint reaction forces, and knee joint angles. Additionally, we established a bone stress analysis method reflecting these estimates. The results indicate that this method might be useful for estimating individual muscle strength in cases of osteoarthritis.

研究分野：運動器理学療法

キーワード：変形性膝関節症 外部膝関節内転モーメント 三次元動作解析 筋骨格モデル 圧縮主ひずみ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

変形性膝関節症(以下,膝OA)は異常なメカニカルストレスの蓄積が関節軟骨の欠損や骨棘形成などの病理学的変化を惹起し,膝OAを進行させる.異常なメカニカルストレスを生じさせる要因を明らかにすることは,膝OAの発症および進行予防にとって重要である.しかしながら,膝OAの発症および進行の予防に有効な運動療法は未だ確立されていない.

これまでにメカニカルストレスの指標として外部膝関節内転モーメントが,膝OAの発症と進行に関連することが明らかになっている(Andriacchi, 1996).また,軽度膝OAの段階では外部膝関節内転モーメントよりも外部膝関節屈曲モーメントの影響が大きいことが示されている(Erhart-Hledik, 2015).さらに,関節モーメントは筋が関節を圧縮する要素を含んでおらず,関節モーメントだけで関節負荷を論じることには限界がある(Ogaya, 2014).

筋は多様な力を協調させながら関節運動を制御しており,タイミングよく力を発揮することが要求される.しかし,筋力という生理的予備能が十分にあるとも,タイミングのずれや過剰な同時収縮が生じるようでは各関節の協調運動は望めない.また,膝OA患者は歩行時の膝関節周囲筋の同時収縮が増大するとの報告があり(Schmitt, 2007),歩行時に同時収縮によって膝関節安定性を高めている一方で,正常な関節運動が阻害され,膝関節へのメカニカルストレスを増大させている可能性もある.

我々は先行研究において,軽度膝OA患者では身体重心を制御するための各関節の協調した動作は可能であるが,下肢の関節運動の変動を減じた動作を行なっていることを明らかにした(科研費1).つまり,下肢の関節運動を変動した戦略により,適切な筋活動のコントロールが困難となり,その結果が関節に作用する圧縮力だけでなく,骨内に生じる応力を軽度膝OAの段階から生じている可能性がある.したがって,膝OAの発症と進行のメカニズムの解明には,前額面の関節に作用する圧縮力だけでなく,筋による収縮力が関節に作用する圧縮力,さらには筋によって骨内に生じる応力まで詳細に評価する必要がある.さらに新たな治療戦略確立のためには,力学的根拠のあるメカニズム解明が必要である.

本研究の「問い」は,「膝関節周囲筋による関節に作用する圧縮力や骨内に生じる応力が,膝OAの発症と進行に密接に関連しているか?」である.

2. 研究の目的

研究1では健常高齢者を対象に行い,膝関節の矢状面上の変化により膝関節負荷や膝関節周囲筋の筋活動,歩行戦略が変化するかを明らかにすることを目的とした.

研究2では,膝OAのメカニズム解明を目指した膝関節周囲における個体別の筋活動度・膝関節反力・膝関節角度の推定とそれらを反映した骨の応力解析手法の確立を目的として,詳細な膝の筋骨格モデルを用いて筋力推定を行い,筋活動度・膝関節反力・膝関節角度を評価した.また,大腿骨と脛骨の有限要素モデルに,推定した筋力と関節反力を荷重条件として与え,圧縮主ひずみ分布を評価した.

3. 研究の方法

研究1

実験参加者は60歳以上の健常高齢者20人(平均年齢 69.3 ± 4.0 [歳],身長 1.52 ± 0.1 [m],体重 50.7 ± 5.0 [kg],BMI 22.0 ± 2.2 [kg/m²])であった.参加者は,床反力計上にて快適な歩行(以下,Normal条件)5mを5試行行った.そして,Normal条件の5試行から平均歩行速度 ± 2 標準偏差(以下,SD)と立脚初期時の膝関節最大屈曲角度の平均値を算出した.その後,

Normal 条件の立脚初期時の膝関節最大屈曲角度の平均値から 10 度増加させた歩行 (More Flexion 歩行: 以下, MF 条件) を乱数メーカーで 2 条件の順番を決定し実施した。

運動学データは赤外線カメラ 10 台と赤外線反射マーカを用いた 3 次元動作解析システム Vicon MX (Vicon 社製) を使用してサンプリングレート 100 Hz で取得した。運動学的データは 8 基の床反力計 (AMTI 社製) を使用してサンプリングレート 1,000 Hz で取得した。全身の解剖学的ランドマークに 49 個の赤外線反射マーカを貼付した。筋活動データ (electromyography: 以下, EMG) は, 6 個電極からなる表面筋電図 (Delsys 社製) によりサンプリング周波数 1,000 Hz で取得した。貼付部位は, 外側ハムストリング (Lateralis Hamstring: 以下, LH), 内側ハムストリング (Medial Hamstring: 以下, MH), 外側腓腹筋 (Lateralis Gastrocnemius: 以下, LG), 内側腓腹筋 (Medial Gastrocnemius: 以下, MG), 外側広筋 (Vastus Lateralis: 以下, VL), 内側広筋 (Vastus Medialis: 以下, VM) とした。

解析区間は右立脚期とした。解析区間である立脚期を 100% に正規化し, 立脚初期膝関節屈曲角度ピーク値, 外部膝関節内転モーメント第 1 ピーク値 (以下, $fpKAM$), 第 2 ピーク値 (以下, $spKAM$), 立脚期初期の外部膝関節屈曲モーメントピーク値 ($pKFM$), 立脚期の KAM 積分値・KFM 積分値, 前額面上と矢状面上のレバーアームピーク値, fp 床反力鉛直成分 (Vertical Ground Reaction Force: 以下, $VGRF$), $spVGRF$, 立脚初期における膝関節運動変化量 (Knee Flexion Excursion: 以下, KFE), 足部進行角度, 体幹側方傾斜角度, 歩行パラメータ, 共同収縮指数 (Co-contraction Index: 以下, CCI) を解析項目として算出した。各条件の 5 回の試行によって得られたデータのピーク値の平均を代表値とした。

研究 2

疾患歴なしの参加者 1 名 (身長 1.75 m, 体重 68.0 kg) と患者 A (身長 1.56 m, 体重 49.0 kg), B (身長 1.54 m, 体重 53.0 kg), C (身長 1.50 m, 体重 58.0 kg) の歩行動作を三次元動作解析システムにより取得し, 運動学および運動力学データを計測した。次に, 筋骨格解析システム AnyBody Modeling System (AMS) を用い, 筋骨格モデルを参加者の身長, 体重を基にスケールリングし, 膝関節部に 1 自由度のヒンジモデルを用いたモデルと, 3 自由度の内外側部反力モデルを用い, 筋活動度と膝関節反力と膝関節角度の推定を行った。また, 各筋力 f_i の算出のため, 以下の最適化問題の定式化を行った。

$$\text{目的関数: } G = \sum_{i=1}^n \left(\frac{f_i}{N_i}\right)^3 \rightarrow \min. \quad (1)$$

$$\text{制約条件: } \mathbf{M} = \mathbf{r}\mathbf{f}, f_i \geq 0 \quad i \in \{1, \dots, n\} \quad (2)$$

$N_i, f_i, n, \mathbf{M}, \mathbf{r}, \mathbf{f}$ は, i 番目の筋の筋強度, 筋力, モデル内の筋の総数, 関節モーメント, 筋のモーメントアーム, 筋力のベクトルをそれぞれ示す。

AMS から大腿骨と脛骨の骨形状を抽出し, 骨解析システム Mechanical Finder を用いて有限要素モデルを作成し, 膝関節反力が最も大きい時点における大腿骨・脛骨周りの筋力・関節反力ベクトルを抽出した。また, これらのベクトルの作用点に最も近い節点位置を有限要素モデル上で探索し, 荷重条件として反映した。

4. 研究成果

研究 1

立脚初期膝関節角度ピーク値は MF 条件において有意に増加した ($p < .001$)。また, KFE も MF 条件において有意に増加した ($p < .001$)。MF 条件において $fpKAM$ ($p < .001$), $spKAM$ ($p = .002$), KAM 積分値 ($p < .001$), 前額面上のレバーアーム ($p = .011$) は有意に減少し, $pKFM$

($p < .001$), KFM 積分値 ($p < .001$), 矢状面上のレバーアーム ($p < .001$) は有意に増大した。
fpVGRF, *spVGRF* においては条件間に有意差は認められなかった。

MF 条件においてケイデンス ($p < .001$), 歩行速度 ($p < .001$) は有意に減少し, 歩隔 ($p = .001$) は有意に増大した。FPA, 体幹傾斜角度, 歩幅においては条件間に有意差は認められなかった。

LH-VL のペアは 41~47% 65~67% において有意に増大した LG-VL のペアは 38~52% 60~62% において有意に減少した。MH-VM のペアは 0~2% において有意に減少した。VL-VM のペアは, 0~1% において有意に減少した。

研究 1 では, 健常高齢者に対し, 歩行立脚初期の膝関節屈曲角度増加させることで膝関節への力学的負荷がどのように変化するか比較し, 検討を行った。その結果, KFE を増大させると矢状面上の膝関節負荷は有意に増加したが, 前額面上の膝関節負荷は有意に減少した。

KAM を減らすために採用された歩行修正は, KFE の増加を伴うため, KFM の増加を伴う傾向があり (Fregly, 2007; Simic, 2011), 先行研究と同様の結果が得られた。これまでの歩行修正は前額面の修正が多く, 研究 1 は矢状面での歩行修正を行った初めての研究である。KCF が KAM と KFM の両方に関連していることは実証されている (Trepczynski, 2014; Walter, 2010)。先行研究では, 2 年以上にわたる構造 OA 進行の危険因子として, KAM (ピーク値と積分値) と KFM (ピーク値) の両方を評価し, KFM は病気の進行を予測することは示されなかった (Chang, 2015)。さらに, Zongpan (2023) は歩行立脚相におけるピーク KFM が大きいと 24 ヶ月後の膝関節痛の発生率が低く, ピーク KAM が大きいほど 24 ヶ月後の膝関節痛の発生率が高いと報告していることから, KFM が増大し KAM が減少した研究 1 の MF 歩行は膝関節痛の発生率は低く膝 OA の進行予防となる可能性がある。また, 膝 OA が進行すると, KFM は減少することが報告されており, 荷重反応期の膝屈曲運動の減少は膝関節周囲筋の共同収縮を増加させ, その結果 KCF を増加させる可能性がある。さらに, 膝 OA 患者は, 立脚期の膝関節屈曲角度が減少し KAM が増大すると報告されていることから (Zeni, 2009), 膝 OA 患者に対し立脚初期の膝関節屈曲角度を増大させる歩行再教育を行うことで, KCF を減少できる可能性がある。また, CCI は LG-VL・MH-VM・VL-VM にて減少し, その他のペアでは有意な変化がなかったことから, MF 条件において CCI による KCF の増大はないと考えられる。

以上のことから, 健常高齢者において MF 歩行は, KCF を減少させる可能性がある。また, 口頭指示のみで患者に歩行修正を行うことができ, 臨床においても簡易的に行うことが可能である。よって, 高齢者に立脚初期の膝関節屈曲角度を十分に確保することは膝 OA の発症予防として有効な指導方法である可能性が示唆された。

研究 2

内外側部反力モデルを用いたモデルの歩行一周期中における膝関節反力の推移の比較を図 1 に, モデルの膝関節反力が最大になる時点における大腿骨脛骨の圧縮主ひずみ分布の比較を図 2 に示す。患者の膝関節反力は疾患歴のない参加者よりも小さく, ひずみは内側かつ, 外縁に集中した。実際に, 患者の疼痛を避ける歩行が結果的に関節負荷を減少させることから (Mary, 2009), 図 2 の結果は膝 OA の特徴を捉えていると考えられる。また, 患者の関節は病態が進行すると, 関節の間隔が狭くなり変形することから (JPTA, 2011), 図 2 の患者の内側に偏ったひずみは膝 OA の症状と一致していると考えられる。以上から, 本手法が膝 OA の個別別筋力推定に有用であることが示唆された。

筋骨格解析による筋力推定と骨の有限要素モデルによる応力解析から, 膝 OA の特徴と一致した結果が示され, 膝 OA 患者の膝周囲における特異的負荷を評価する筋骨格力学解析手法が

確立された。また、本手法が膝 OA の個別別筋力推定に有用である可能性が示された。

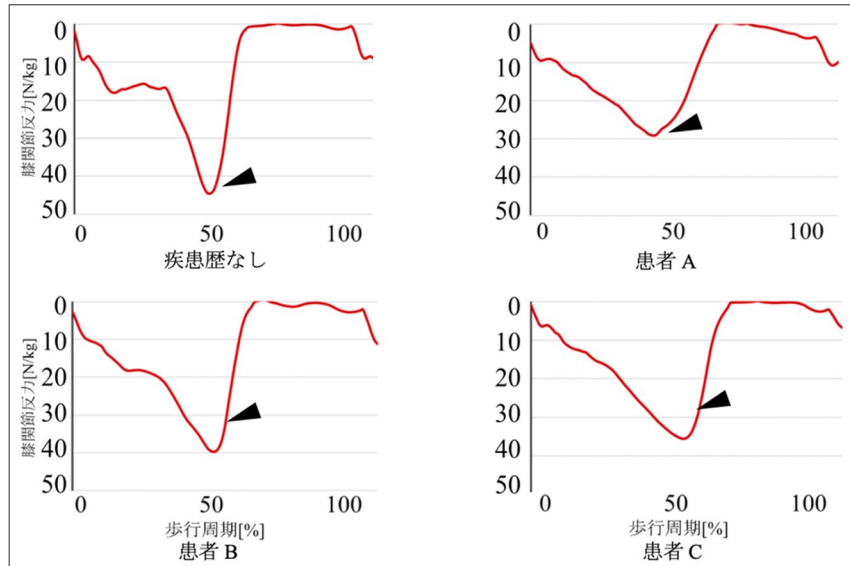


図1 1歩行周期の膝関節反力

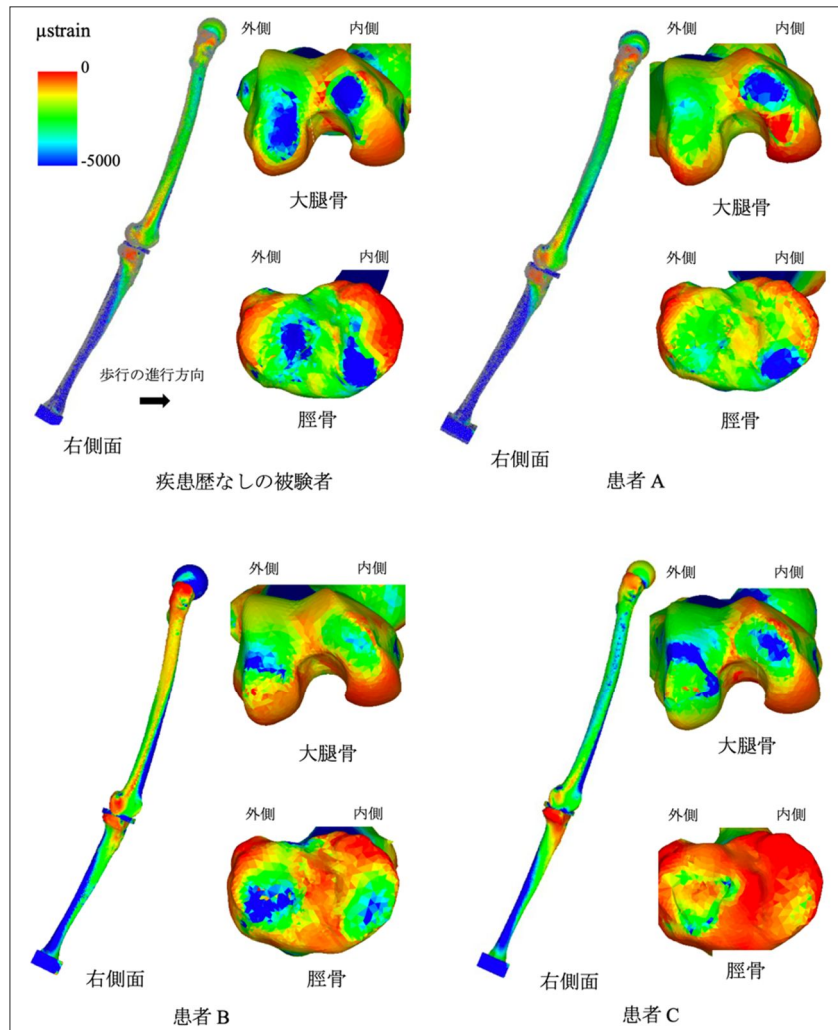


図2 大腿骨脛骨の右側面、大腿骨、脛骨の最小主ひずみ分布

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2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 Anan Masaya, Tokuda Kazuki, Tanimoto Kenji, Sawada Tomonori	4. 巻 112
2. 論文標題 The relationship between knee flexion excursion and mechanical stress during gait in medial knee osteoarthritis	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Clinical Biomechanics	6. 最初と最後の頁 106180 ~ 106180
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.clinbiomech.2024.106180	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 Ibara Takuya, Hada Kiyotaka, Karashima Ryosuke, Kawashima Mahito, Anan Masaya	4. 巻 24
2. 論文標題 Correlation between rotational moments of the knee and other joints during gait, including the free moment of patients with a medial meniscus tear	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta of Bioengineering and Biomechanics	6. 最初と最後の頁 119-126
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.37190/ABB-02199-2023-02	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 徳田一貫, 谷本研二, 吉田研吾, 阿南雅也	4. 巻 56
2. 論文標題 【動作分析と臨床のマッチング】変形性膝関節症患者の動作分析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 理学療法ジャーナル	6. 最初と最後の頁 542-547
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16件（うち招待講演 5件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 羽田清貴, 井原拓哉, 本山達男, 川島真人, 阿南雅也
2. 発表標題 初期変形性膝関節症患者における半月板の形状変化と下肢関節モーメントの関連性について
3. 学会等名 第1回日本膝関節学会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 居倉怜央, 中村純, 阿南雅也
2. 発表標題 高齢者における歩行立脚初期の膝関節角度増大が膝関節負荷に及ぼす影響
3. 学会等名 第28回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Gempei T, Tawara D, Anan M
2. 発表標題 Musculoskeletal simulation to estimate muscle activity and reaction forces of knee osteoarthritis patients while walking
3. 学会等名 The 12th Asian-Pacific Conference on Biomechanics (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村純, 居倉怜央, 阿南雅也
2. 発表標題 高齢者の速度を低下させた降段動作は動作の安定性に寄与するか?
3. 学会等名 第11回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿南雅也
2. 発表標題 メカニカルストレスの軽減を目指した運動器理学療法を目指してー今後行っていくべき動作解析研究ー
3. 学会等名 第11回日本運動器理学療法学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Nakamura J, Igura R, Anan M
2. 発表標題 Kinematic synergy of speed reduction during stair descending
3. 学会等名 ISPGR (The International Society for Posture and Gait Research) World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Anan M, Tokuda K, Sawada T, Tanimoto K
2. 発表標題 What effect does reduced knee flexion movement during gait have on patients with knee osteoarthritis?
3. 学会等名 ISPGR (The International Society for Posture and Gait Research) World Congress 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 阿南雅也
2. 発表標題 運動器理学療法の最前線ーキャリアアップのコツー
3. 学会等名 第104回福岡県理学療法士会学術研修大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 中村純, 居倉怜央, 阿南雅也
2. 発表標題 降段動作の速度低下が身体重心及び遊脚足部の制御に及ぼす影響
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 居倉怜央, 中村純, 阿南雅也
2. 発表標題 立脚期の膝関節角度変化が筋活動や膝関節負荷に及ぼす影響
3. 学会等名 第27回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 阿南雅也
2. 発表標題 運動器疾患に対する理学療法の変化
3. 学会等名 第24回大分県理学療法士学会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 阿南雅也
2. 発表標題 変形性膝関節症の関節機能障害 理学療法の標準化に向けて
3. 学会等名 第9回日本運動器理学療法学会学術大会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Anan M, Ibara T, Hada K
2. 発表標題 Does the joint movement coordination structure for older people change with visual feedback of the center of gravity?
3. 学会等名 World Physiotherapy Congress 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽田清貴, 阿南雅也, 本山達男, 川島真人
2. 発表標題 初期変形性膝関節症患者の歩行時の外部膝関節モーメントと下肢力学的エネルギーの関連性
3. 学会等名 JOSKAS-JOSSM 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井原拓哉, 羽田清貴, 辛嶋良介, 高橋真, 川島眞之, 阿南雅也
2. 発表標題 半月板損傷患者の歩行時の回旋モーメント~フリーモーメントに着目して~
3. 学会等名 第25回日本基礎理学療法学会学術大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 阿南雅也
2. 発表標題 変形性膝関節症患者の関節機能改善にむけた運動療法
3. 学会等名 第57回日本リハビリテーション医学会学術集会(招待講演)
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 阿南雅也	4. 発行年 2023年
2. 出版社 文光堂	5. 総ページ数 240
3. 書名 こだわり抜く筋力増強運動	

〔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 分 担 者	田原 大輔 (Tawara Daisuke) (20447907)	龍谷大学・先端理工学部・教授 (34316)	

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