

令和 2 年 7 月 4 日現在

機関番号：37407

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K01549

研究課題名(和文) 情報エントロピーによる股関節疾患患者の動きの「滑らかさ」のメカニズムに関する研究

研究課題名(英文) Mechanism of "smoothness" of motion of patients with hip disease by entropy

研究代表者

加藤 浩 (Kato, Hiroshi)

九州看護福祉大学・看護福祉学部・教授

研究者番号：90368712

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：健常者とOA患者を対象に、歩行動作における動きの「滑らかさ」と下肢の力学的エネルギー特性の関連性について検討した。結果、OA患者のエントロピーは、健常者に比べ3軸方向全てにおいて高値を示した。さらに、立脚相において、OA患者は健常者に比べ、大腿セグメント遠位、下腿セグメント近位のセグメントモーメントパワーの極性が頻繁に切り替わる波形を示した。以上の事から、エントロピーの高値は、このエネルギーフローの効率不良を反映したものである可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

エネルギーには「質の良いエネルギー」と「質の悪いエネルギー」がある。質の良いエネルギーとは、より多くの仕事ができるエネルギーである。つまり、小さな筋力で効率よく重心の移動が行えれば、質の良いエネルギーと言える。人は動作の特性に合わせ、筋力を発揮する際に隣接するセグメント間でエネルギーの移動を行い効率的な仕事をしている。そして、本研究結果から、効率の良いエネルギーの移動では、動作そのものが滑らかであることが示された。今後の理学療法においては、小さな力でも多くの仕事ができる質の高いエネルギーの獲得を目指した新たな視点での筋のトレーニング法の確立が求められる。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the relationship between the "smoothness" of movements during walking and the mechanical energy characteristics of the lower limbs in healthy subject and patient with OA. As a result, the entropy of patient with OA was higher than that of healthy subject in all three axial directions. Furthermore, in the stance phase, the patient with OA showed a waveform in which the polarity of the segment moment power at the distal thigh segment and the proximal shank segment was switched more frequently than that in the healthy subject. From the above, it was suggested that the high value of entropy may reflect the inefficiency of this energy flow.

研究分野：理学療法

キーワード：動きの滑らかさ entropy 力学的エネルギー 歩行 変形性股関節症

1. 研究開始当初の背景

従来から下肢運動器疾患の廃用性筋萎縮に対する筋力強化訓練法として、主に重錘負荷等によるトレーニングのみを実施している医療関連施設は少なくない。しかしこれら訓練により、ある程度筋力の回復が得られても、実際の動作、例えば股関節疾患患者であれば、歩行動作の異常の一つとして中殿筋跛行や荷重時の関節・体幹の不安定性が残存し、動作障害が十分改善されていない症例をしばしば経験する。このことは単純に“筋力の回復”＝“有効に活用しうる筋力の向上(筋の質的向上)”にはならないことを意味している。そこで今リハビリテーションに必要なものは従来の量的な筋力増強訓練に加え、別の質的な筋力向上を図る訓練プログラムを作成することであり、その筋の質的評価法の確立である。しかし、現状では動的な質的筋活動能力を客観的に計測する評価方法がない。そこで、近年我々は世界に先駆けて wavelet 変換(以下、WT)と呼ばれる新しい工学技術を表面筋電図(以下、EMG)周波数解析に応用し、股関節疾患患者を対象に歩行時立脚期の時々刻々と変化する中殿筋の動的 EMG 周波数特性の評価(筋の質的評価)を行った。その結果、跛行の顕著な患者ほど、立脚期初期(踵接地時)の平均周波数(MPF)の上昇が認められず、その原因として主に type II 線維を支配する運動単位の動員数と発火頻度の減少が示唆された。さらに本研究結果を検証するため手術中に筋生検を行い組織形態学的分析から同特性の意義について検討した結果、動的 EMG 周波数特性は type II 線維の線維径と深く関連しており、WT 周波数解析は type II 線維の非侵襲的廃用性筋萎縮評価に有効である結論を得た。そして、これまでの研究において、股関節疾患患者の筋の質的機能向上には、①単関節運動よりも多関節運動、②直線的運動よりも回旋運動、③抵抗の大きさではなく、床反力ベクトル(擬似的抵抗)の方向を考慮した筋力トレーニングの重要性、さらには、④遠心性収縮から求心性収縮への切り返し(stretch shortening cycle)機能の獲得が重要であることが示された。

2. 研究の目的

そこで、本研究の目的は、筋の質的機能向上と歩行動作の「滑らかさ」の関係に着目し、歩行動作における「滑らかさ」の客観的評価方法の検討と「滑らか」を規定する因子について、下肢の力学的エネルギー特性から検討し、歩行動作の「滑らかさ」のメカニズムについて解明することである。

3. 研究の方法

3-1. 力学的エネルギーの計測(図1)

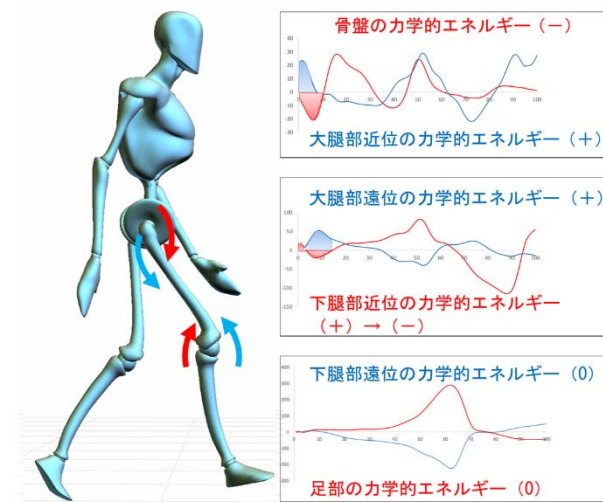


図1 歩行時立脚初期の下肢力学的エネルギーの流れ

エネルギー(-)は、隣接セグメントへのエネルギーの放出を意味する。逆にエネルギー(+)は、流入を意味する。股関節で言えば、骨盤から大腿部へ向けてのエネルギー流れが生じている事を意味する。

計測システムは赤外線カメラ 10 台を用いた三次元動作解析装置 Vicon MX (Vicon Motion Systems 社製) と 6 枚の床反力計 (AMTI 社製) を用いる。マーカは直径 9mm の赤外線反射マーカを使用し、左右の肩峰、上腕骨外側上顆、尺骨茎状突起、腸骨稜最上部、上前腸骨棘、上後腸骨棘、股関節(大転子中央と上前腸骨棘を結ぶ線上で大転子から 1/3 の点)、膝関節外側と内側(膝関節裂隙の高さで膝蓋骨を除く前後径の中点)、足関節外果と内果、第 1、5 中足骨頭、踵の 28 カ所に貼付。また、左右を区別するため右肩甲骨、腓骨(右は膝関節近位部、左は外果近位部)、大腿骨(右は大転子近位部、左は膝関節近位部)の 5 カ所に貼付し合計 33 カ所の予定。得られたマーカ座標から 8 剛体リンクモデルを作成し、各セグメント間の連結部を関節中心点と定義する。これから、逆動力学計算により、関節中心座標・速度、セグメント角度・角速度、関節モーメント、セグメント

モーメントパワーを算出する。力学的エネルギーは上記のセグメントモーメントパワーと定義し、各関節を構成しているセグメント間の合成パワーを歩行時のエネルギー連鎖の指標とする。

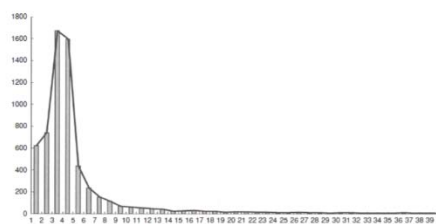
3-2. 動きの滑らかさの計測(図2, 3)

動きの滑らかさの計測には、情報数学や情報理論の分野でよく使われるエントロピー(entropy)を用いる。エントロピーとは、情報の無秩序や不確実の程度を表す尺度を意味し、その確率分布に従って 1 つのデータをサンプリングする時に得られる情報量の期待値であり、平均情報量とも言う。小島²⁾は動作中の時系列加速度データを周波数解析し、その結果を確率曲線に見立て、パワースペクトルの合計値を正規化しエントロピーを算出することで、動作の滑ら

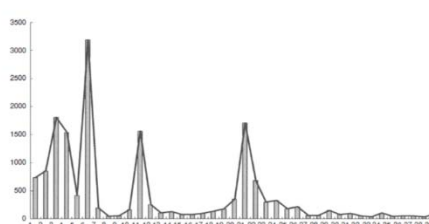
かさを客観的に評価できることを提案している。つまり、歩行時の加速度データの周波数分布に着目したとき、一定の周波数帯域にパワー分布が集中する場合に比べ、より広範囲の周波数帯域にパワー分布が分散する方が、不確実性が高くなるため（予測が困難になるため）エントロピーは大きくなる。

$$H = -\sum (P_i \times \log_2 P_i) \quad H: \text{平均情報量 (エントロピー)} \quad P: \text{ある事象が起こる確率}$$

算出条件: 1) 事象の数が同一 2) $\sum P_i = 1$



H = 4.65



H = 12.0

図2 エントロピーを用いた動作時の滑らかさの評価（文献1より引用）

変化平均情報量は、ある事象 i が生じる確率 P_i が 0.5 の時、その事象が実際に生じた事を知らせる情報量を 1 ビット (bit) とし、その情報量が起こりうる全ての事象について得られる期待値として定義される。

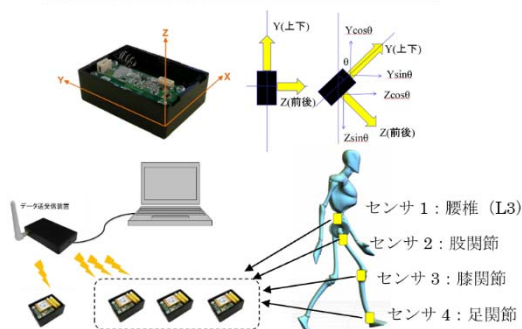
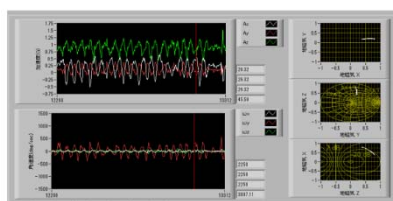


図3 9軸加速度センサの計測とセンサ傾斜補正

加速度センサは腰部、股関節、膝関節、足部の4カ所に貼付し、各セグメントの情報エントロピー量を算出する。また、絶対重力を利用し、加速度センサの傾斜による影響を補正する。

具体的方法は、3軸加速度センサを腰椎 (L3)、股関節、膝関節、足関節部に貼付し、各関節部における3軸方向の加速度波形を算出する。得られたデータは高速フーリエ変換 (fast Fourier transform: FFT) を用いて歩行時の身体各部のエントロピー量を算出する。サンプリング周波数は 100Hz とし、得られた加速度は 20Hz の高域遮断フィルターを用いて処理する。また、加速度センサ本体の動作に伴う傾斜誤差を補正し、より正確に3軸方向の加速度を定量化できるようにプログラムを作成する。

3-3. 対象

対象は健康成人1名 (女性, 年齢: 50歳, 身長: 165cm, 体重: 56kg) 及び両側変形性股関節症 (以下, OA) 患者1名 (女性, 年齢: 65歳, 身長: 158cm, 54kg)。日整会点数は、疼痛0点、可動域 (屈曲9点, 外転2点)、歩行能力5点、日常生活動作10点であった。病期分類は左進行期, 右末期レベルであった。計測肢は右側とした。

4. 研究成果

4-1. 動きの滑らかさの特性 (図4)

本研究成果では、特徴的な値を示した腰椎 (L3) レベルにおける加速度エントロピー (以下, エントロピー) の結果を提示する。1歩行周期あたりのY軸 (上下) 方向におけるエントロピーは、健康者で 6.97 bit, OA患者で 7.35 bit, 両者の差は 0.38 bit であった。Z軸 (前後) 方向におけるエントロピーは、健康者で 6.48 bit, OA患者で 8.16 bit, 両者の差は 1.68 bit であった。X軸 (左右) 方向におけるエントロピーは、健康者で 6.83 bit, OA患者で 7.66 bit, 両者の差は 0.83 bit であった。本研究の結果, OA患者のエントロピーは、健康者に比べ3軸方向全てにおいて高値を示した。また、エントロピーの差が最も大きかったのは、Z軸 (前後) 方向であった。エントロピーは滑らかさが低下するほど、その値が大きくなる指標であることから、OA患者の歩行は、健康者に比べ動作の滑らかさは低下しており、かつ、前後方向においてその特徴が顕著であることが示された。

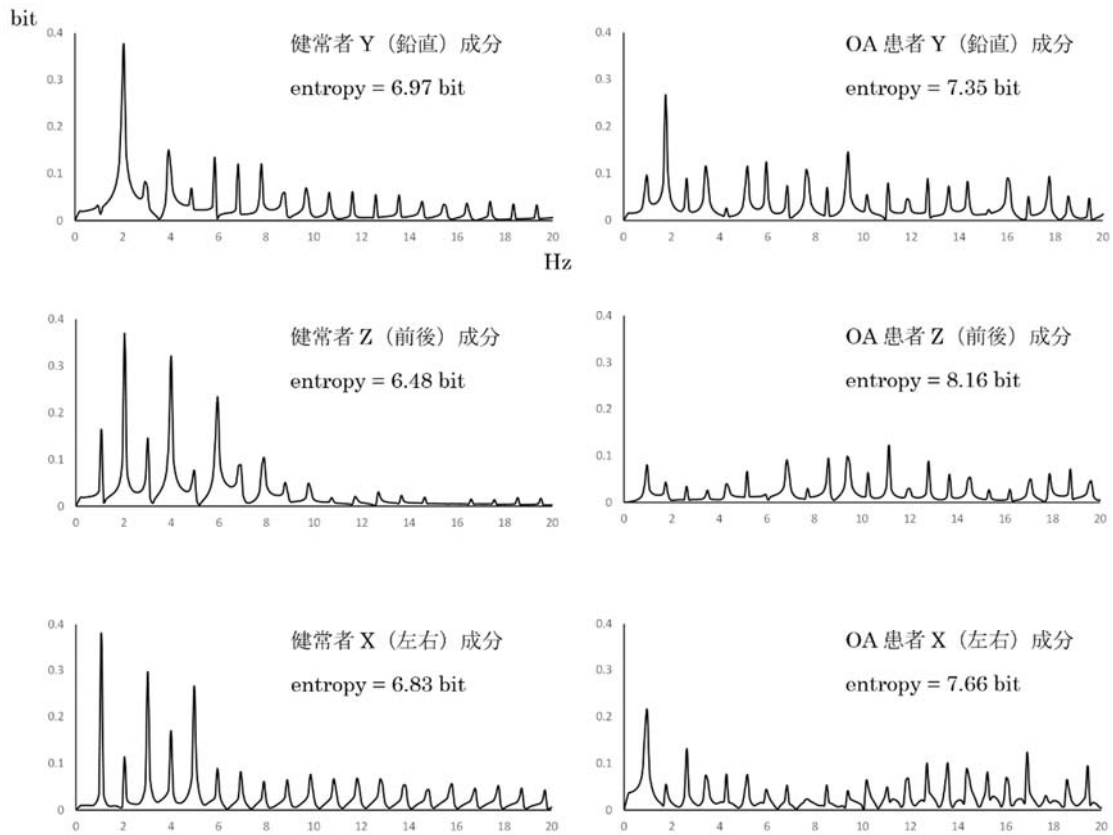


図 4 歩行動作時のエントロピー値の比較

4-2. 歩行動作時の力学的エネルギーの流れの特性 (図 5)

図 5 は健常者と OA 患者の 1 歩行周期における各セグメントのセグメントモーメントパワーの結果を示す。横軸は歩行周期 (%) 示し、縦軸は体重 1kg 当たりのセグメントモーメントパワー (w/kg) を示す。黒線 (実線) は健常者、赤線 (破線) は OA 患者のデータを示す。1 歩行周期全体の波形パターンの特徴としては、全てのセグメントにおいて、OA 患者は健常者に比べ力学的エネルギーが低値を示した。また、立脚相に着目すると、OA 患者は健常者に比べ、大腿セグメント遠位、下腿セグメント近位のセグメントモーメントパワーの極性が頻繁に切り替わる波形を示した。力学的エネルギーであるセグメントモーメントパワーは、セグメントモーメントのエネルギー変化率、即ち、仕事率 (W) に相当する。つまり、セグメントモーメントパワーは筋の瞬間的な仕事を推定する指標になりうる。セグメントモーメントパワーの解釈としては、パワーが正值であれば、セグメントモーメントを発揮している筋は求心性収縮であることを示し、逆にパワーが負値であれば、遠心性収縮であることを示している²⁾。このことから、歩行周期における極性が頻繁に切り替わると言うことは、OA 患者の場合、立脚相における膝関節周りの運動制御が上手く機能していないことが考えられる。

以上の事から、前項で示したエントロピーの高値は、このエネルギーフローの効率不良を反映したものである可能性が示唆された。

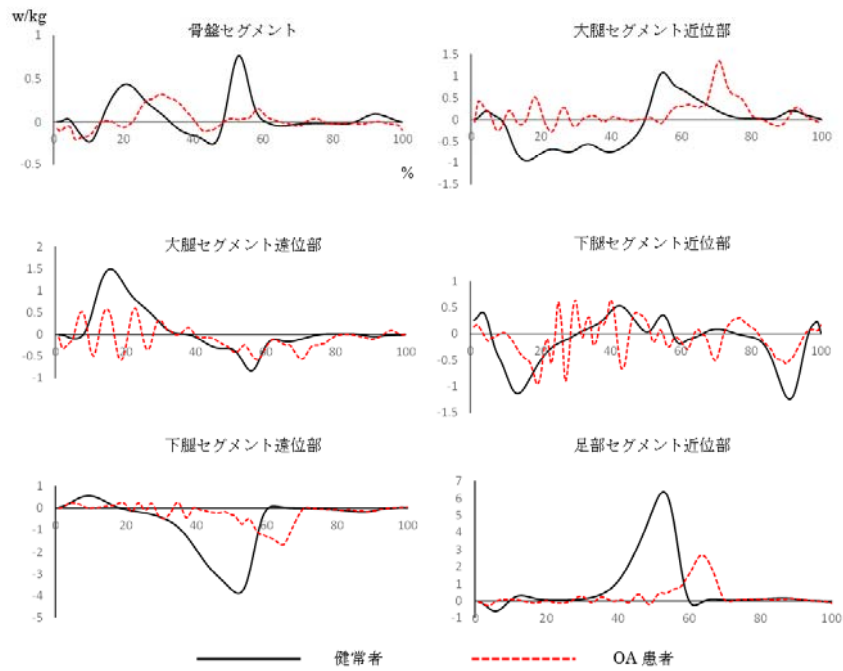
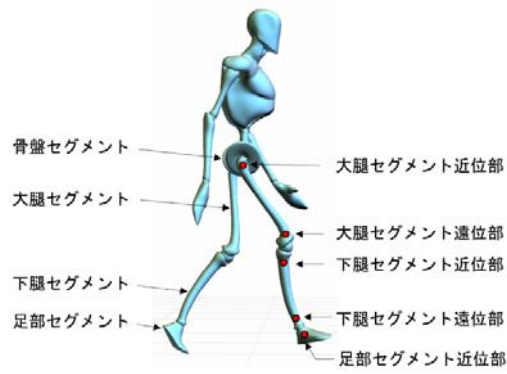


図5 歩行動作時のエネルギーフローの比較

文献

1. 小島基永：加速度計を用いた高齢者歩行の安定性評価（動作の円滑さという視点から）. バイオメカニズム学会誌 30: 138-142, 2006.
2. Czerniecki JM et al.: Joint moment and muscle power output characteristics of below knee amputees during running: the influence of energy storing prosthetic feet. J Biomech 24: 63-75, 1991.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11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 3件）

1. 著者名 T Morikawa, H Katoh	4. 巻 32
2. 論文標題 Spinal kyphotic alignment changes spinal movement strategy upon lateral reaching motion in a sitting position	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 J Phys Ther Sci	6. 最初と最後の頁 48-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1589/jpts.32.48	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 -
1. 著者名 K Okazawa, H Katoh	4. 巻 -
2. 論文標題 Characteristics of internal oblique muscle activity during walking in healthy person and patients with hip osteoarthritis	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Phys Thera Rehabil	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.7243/2055-2386-6-13	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 -
1. 著者名 H Katoh	4. 巻 31
2. 論文標題 Effect of lateral-wedge insole on the center of foot pressure and lower extremity muscle activity at gait initiation in patients with medial knee osteoarthritis.	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 J Phys Ther Sci	6. 最初と最後の頁 776-779
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1589/jpts.31.776	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 -
1. 著者名 加藤浩・他	4. 巻 52
2. 論文標題 大腿骨頸部 / 転子部骨折	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 PTジャーナル	6. 最初と最後の頁 561-573
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.11477/mf.1551201228	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 加藤浩・他	4. 巻 35
2. 論文標題 変形性股関節症の筋機能障害に対する理学療法アプローチ	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 1060-1069
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 加藤浩・他	4. 巻 53
2. 論文標題 歩行時における股関節疾患患者の下肢力学的エネルギー連鎖	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 PTジャーナル	6. 最初と最後の頁 145-155
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.11477/mf.1551201452	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 加藤浩・他	4. 巻 35
2. 論文標題 理学療法の臨床場面における定量的歩行分析の進め方	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 理学療法	6. 最初と最後の頁 135-146
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 加藤浩	4. 巻 41
2. 論文標題 動作筋電計装置の活用法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 医療と検査機器・試薬	6. 最初と最後の頁 89-96
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 加藤浩	4. 巻 47
2. 論文標題 極める股・膝関節機能障害の理学療法	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 理学療法京都	6. 最初と最後の頁 11-15
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 加藤浩	4. 巻 31
2. 論文標題 筋の質的機能特性からみた変形性股関節症に対する理学療法 - 筋力トレーニングのあり方を見直す -	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 理学療法えひめ	6. 最初と最後の頁 9-13
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 加藤浩	4. 巻 30
2. 論文標題 股関節疾患患者の筋機能特性と治療戦略	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 理学療法福岡	6. 最初と最後の頁 34-39
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15件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 歩行時における股関節疾患患者の下肢力学的エネルギー連鎖
3. 学会等名 第33回鹿児島県理学療法学会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 極める股関節機能障害の理学療法
3. 学会等名 第24回宮崎県理学療法士学会（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 共同 加藤浩(2番目)
2. 発表標題 人工股関節全置換術を施行した股関節疾患患者の身体活動の推移
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 共同 加藤浩(4番目)
2. 発表標題 初期変形性膝関節症患者の歩行時における膝関節の運動力学的特性について
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 共同 加藤浩(2番目)
2. 発表標題 歩行時の足角角度変化が足圧中心軌跡と骨盤・下肢アライメントに及ぼす影響
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 共同 加藤浩(2番目)
2. 発表標題 座位側方リーチ動作時の胸腰部脊柱セグメント回旋運動の特徴
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 共同 加藤浩(6番目)
2. 発表標題 胸椎後弯姿勢が歩行動作停止直後のバランスに及ぼす影響 フラクタル解析を用いた姿勢制御特性
3. 学会等名 第6回日本運動器理学療法学会学術大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 加藤浩(筆頭)
2. 発表標題 歩行時における下肢力学的エネルギーの流れと絶対座標軸からみた大腿骨の運動学的特性
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩(9番目)
2. 発表標題 人工股関節全置換術3カ月の歩数・身体活動レベルに関する因子の調査
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会学術大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩(3番目)
2. 発表標題 変形性膝関節症患者の歩き始めにおける床反力入射角度は床反力前後成分力積値に影響を及ぼすか？
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩(2番目)
2. 発表標題 変形性膝関節症患者の歩き始め動作立脚期における下肢力学的エネルギー特性
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 運動器理学療法におけるエビデンスの構築にむけて 小規模多施設間共同研究構築に向けた取り組み
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 理学療法の様々な領域に支援工学的視点をどう活かすか
3. 学会等名 第52回日本理学療法学会(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 運動器障害に対する理学療法の評価・アプローチ
3. 学会等名 第5回日本運動器理学療法学会（招待講演）
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 加藤浩
2. 発表標題 2025年に向けて 運動器理学療法を極める・究める
3. 学会等名 第23回岡山県理学療法士学会（招待講演）
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計4件

1. 著者名 室伏祐介, 加藤浩 (対馬 栄輝, 永井 聡 編)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 メジカルビュー社	5. 総ページ数 357
3. 書名 股関節理学療法マネジメント	

1. 著者名 加藤浩 (常任編集)	4. 発行年 2018年
2. 出版社 文光堂	5. 総ページ数 271
3. 書名 極める脳卒中理学療法	

1. 著者名 加藤浩（常任編集）	4. 発行年 2017年
2. 出版社 文光堂	5. 総ページ数 280
3. 書名 極める膝・下腿骨骨折の理学療法 全身的・局所的視点からみた新たな理学療法の本質	

1. 著者名 加藤浩（常任編集）	4. 発行年 2017年
2. 出版社 文光堂	5. 総ページ数 269
3. 書名 極める大腿骨骨折の理学療法 術式別アプローチ	

〔産業財産権〕

〔その他〕

加藤研究室 http://plaza.umin.ac.jp/~hkato/index.html
--

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