

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25282192

研究課題名(和文) ER流体を用いた閉運動連鎖系の下肢トレーニングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a lower limbs training system in closed kinetic chain using the electrorheological fluid

研究代表者

木村 佳記(Kimura, Yoshinori)

大阪大学・医学部附属病院・理学療法士

研究者番号：00571829

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,600,000円

研究成果の概要(和文)：閉運動連鎖系の立位で下肢の移動に多彩な負荷を与えるトレーニング方法の確立に向けて、アクティブ型機構を持つトレーニング装置を開発した。健康人の装置使用による等速度・等負荷の抵抗片脚スクワットの運動計測の結果、これらは負荷なしの片脚スクワットに比べて、膝関節に不要な外反負荷を抑制しながら股関節外転筋や膝関節伸展筋の負荷を増加させることが明らかになった。これらは、膝前十字靭帯(ACL)損傷の予防や、ACL再建術後のリハビリテーションに有用と考えられた。さらに、本装置により片脚スクワットの下肢伸展相の股関節外転筋に遠心性負荷を与える方法を実現し、これも効果的なトレーニング方法になり得ると考えられた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a training device which has an active model mechanism was developed to establish the method of the closed kinetic chain exercises given various load for lower limbs. In the healthy subjects, the resistive single leg squats with isokinetic and constant resistance forces can increase the load on the quadriceps and gluteal muscles while effectively preventing an external knee valgus moment. These findings suggested that these novel exercises would be useful for preventing anterior cruciate ligament(ACL) injury and for rehabilitation after ACL reconstruction. In addition, an exercise method which can give the eccentric load for gluteal muscles during ascent phase of the single leg squat was achieved by using the device. It seemed to be useful for preventing ACL injury and for rehabilitation after ACL reconstruction.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：トレーニング装置 等速度運動 リハビリテーション トレーニング 閉運動連鎖 膝関節 膝前十字靭帯 ER流体

## 1. 研究開始当初の背景

研究代表者らは、これまでに膝前十字靭帯 (anterior cruciate ligament: ACL) 再建術後のリハビリテーションにおいて、足底が接地した荷重状態の立位 (閉運動連鎖系) でのトレーニングを解析し、安全性と効果を検証してきた。先行研究において、片脚スクワット中に遊脚側の下肢を抵抗に抗して後方や側方に移動するレッグリーチ動作は、強化が必要な大腿四頭筋や股関節外転・伸展筋への負荷は高まるが、ACL に有害な前方剪断力や外反力は発生しないことを報告した[1]。しかし、ゴムバンドを負荷とした運動機器は初期抵抗が小さく、運動中に一貫して十分な抵抗を与えることができず、また張力の微調整が困難、発揮した力の計測もできないことから、トレーニング実施者の筋力に応じた適度な負荷が選択できなかった。そこで、平成 21-23 年度 (基盤研究 (C)) において、ER 流体ブレーキを用いたトレーニングシステムを開発した[2]。本装置は、パッシブ制御 (静止摩擦の再現) により、閉運動連鎖系で移動する下肢に対する等負荷および等速度負荷による抵抗運動を実現し、ゴムバンド負荷の運動に比べて高い運動効果が得られることを明らかにした[3]。しかしながら、リハビリテーションからパフォーマンス向上の段階まで幅広く対応するには単なる求心性の抵抗運動だけでなく、トレーニング実施者の動きをサポートする自動介助や、遠心性の抵抗運動などの多彩な運動様式の実現が必要と考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、閉運動連鎖系で下肢の移動に多彩な運動様式を選択して与えることが可能なアクティブ制御機構を持つトレーニング装置・システムを開発することである。

本装置により、求心性・遠心性の抵抗運動、自動介助運動などの幅広い運動様式および所望の負荷 (初動負荷、終動負荷、等負荷、等速度) を与え、日常生活活動動作やスポーツ動作などで要求される多様な下肢運動機能を回復・改善させる新たなトレーニングの確立を目指す。

## 3. 研究の方法

### (1)平成 25 年度

先行研究で製作したトレーニング装置を基に作成した構成案から、位置制御、速度制御、力制御、コンプライアンス制御が可能なアクティブ制御機構を持つトレーニングシステムの製作を開始した。装置の構成部品の納入が、業者側のトラブルで大幅に遅延した。

健常人にて、等負荷の側方抵抗レッグリーチ動作について三次元動作解析装置、床反力計、筋電図を用いて運動計測を行い、本装置による運動の力学的特性を明らかにした。

### (2)平成 26 年度

トレーニング装置のコンピュータ制御ソフトを開発し、機械制御開発用の装置で特性試験を行った。トレーニング方法の設計自由度を増すため、負荷漸減モード、負荷漸増モードを新規開発した。これらを踏まえ、トレーニング手法開発用試作機を製作した。当学の床反力計と購入した動作解析装置との接続および装置のセットアップに予期せぬ多大な遅延が生じ、当学での生体運動計測が開始できず、共同研究機関での計測を進めた。

健常人の等速度制御下の側方抵抗レッグリーチ動作の運動計測を行い、本装置による運動の力学的特性を明らかにした。

### (3)平成 27 年度

トレーニング手法開発用試作機の試用結果を基に、制御パラメータ等を再チューニングし、臨床での生体運動計測の準備を整えた。また、本装置に歩容改善機能を付加するため、目標速度が一定の等速度モードに対し、目標速度が開脚に伴い漸減する歩行速度モードを新規開発した。同年 6 月に動作解析装置に不測の接続エラーが発覚して計測不能となり、原因調査、周辺機器の精度の再評価を行う必要が生じ、平成 28 年へ研究経費の繰り越しを行った。

片脚スクワットにおいて膝関節外反負荷を生じる健康な女性 6 名に対する片脚抵抗レッグリーチ動作の運動計測を行った。膝関節への力学的負荷と下肢筋に対するトレーニングへの有用性を検討した。

### (4)平成 28 年度

これまでのトレーニングモードでの機械制御精度を向上させるため、より正確な装置のモデルを構築することを目的に、新たな特性試験装置を開発した。

等速度と等負荷での側方抵抗レッグリーチの運動計測を行い、それぞれの運動力学的特性を比較した。また膝前十字靭帯損傷予防や再建術後リハビリテーションへの適用を検討した。

## 4. 研究成果

### (1)平成 25 年度

アクティブ制御機構 (位置制御、速度制御、力制御、コンプライアンス制御) が可能なトレーニングシステムの製作を開始し、等負荷と等速度での抵抗モードを実装した。

健常人の等負荷の側方抵抗レッグリーチ動作は、負荷なしに比べて股外転筋負荷が高まり、片脚支持の動的安定化に有効と考えられた[4] (図 1)。

### (2)平成 26 年度

本装置のコンピュータ制御ソフトを開発した。等負荷と等速度に加えて、負荷漸減モード、負荷漸増モードを新規開発した。これらを踏まえ、トレーニング手法開発用試作機を製作した。

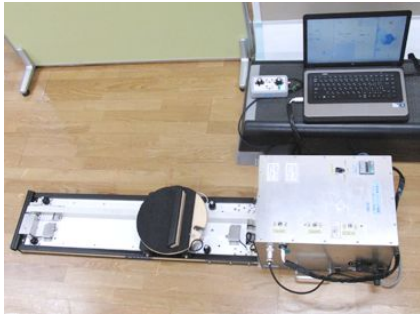


図1 開発したトレーニング装置 (ERIK)

健康人の等速度制御下の側方抵抗レッグリーチ動作の支持脚は、不要な膝外反負荷を抑制し、強化が必要な股外転筋、膝伸展筋の負荷が高まる安全なトレーニングであることが明らかになった[5]。

(3)平成 27 年

本装置に目標速度が一定の等速度モードに対し、目標速度が開脚に伴い漸減する歩行速度モードを新規に開発した。

片脚スクワットで膝外反負荷が生じる6名の女性うち5名において、等速度制御下の側方レッグリーチ動作で膝外反負荷が抑制され、安全に筋力強化が可能であることを示した[6] (図2)。

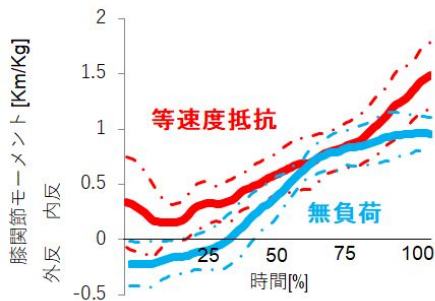


図2 側方抵抗レッグリーチ動作における膝関節外反モーメント (横軸は立位から最大に下降するまでの時間)

無負荷では下降開始時(膝軽度屈曲位)に膝外反モーメントを生じるが、等速度抵抗下では膝外反モーメントが抑制されている。

(4)平成 28 年度

新たな特性試験装置を開発し、これまでのトレーニングモードでの機械制御精度を向上、より正確な装置モデルの構築に寄与した。

健康人の側方抵抗レッグリーチ動作の下肢伸展相で装置のモータ駆動により力を発揮するモードにより、身体の上方移動には補助に働きつつ股外転筋には遠心性負荷を与えることを可能にし、片脚支持力改善に役立つと考えられた。

等速度と等負荷での側方抵抗レッグリー

チの生体運動力学を比較すると、膝屈曲角度が小さい範囲では等負荷抵抗での支持脚股関節外転モーメントが有意に大きく、逆に膝屈曲角度の大きい範囲では等速度抵抗での股関節外転モーメントと下肢筋活動が有意に高かった。このため、等速度抵抗は筋活動の最大化、等負荷抵抗は膝前十字靭帯損傷の受傷機転と関連が深い膝軽度屈曲位での股関節周囲筋強化に適すると考えられた[7] (図3)。

健康人の側方抵抗レッグリーチ動作の下肢伸展相で装置のモータ駆動により力を発揮するモードにより、身体の上方移動には補助に働きつつ股外転筋には遠心性負荷を与えることを可能にし、片脚支持力改善に役立つと考えられた。

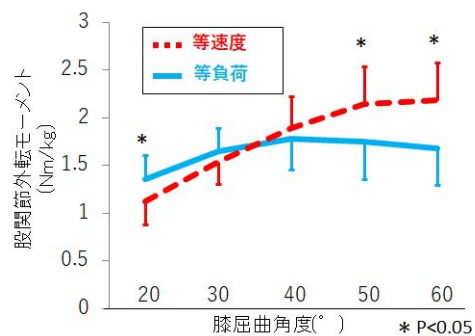


図3 側方抵抗レッグリーチの支持脚における股関節外転モーメント

軽度膝屈曲位では等負荷抵抗、膝屈曲 50 度以降は等速度抵抗において股関節外転モーメントが有意に高値を示した。

<引用文献>

- [1]木村佳記, 小柳磨毅, 他: 側方への抵抗レッグリーチ動作における支持脚の運動解析. 臨床バイオメカニクス 31:445-452, 2010.
- [2] 小柳健一, 木村佳記, 小柳磨毅, 井上昭夫, 他: 立位での下肢の等速運動トレーニング装置: 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2012 講演論文集, GS3-4-3, 2012.
- [3] Y.Kimura, M.Koyanagi, et al.: Motion analysis of a single-limb squat with resistance. Proc. of the in IOC world conference on prevention of injury and illness in sport in BJSM 45: 45, 2011.
- [4]木村佳記, 他: 等抵抗負荷の側方抵抗レッグリーチ動作における支持脚の運動解析. 臨床バイオメカニクス 34: 239-244, 2013.
- [5] Y.Kimura, et al.: Motion analysis of a single-limb squat with isokinetic resistance. Proceedings of the in IOC world conference on prevention of injury and illness in sport in BJSM 48, 620, 2014.
- [6] Y.Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, et al.: Biomechanical Analysis of a Single-Leg Squat with Isokinetic

Resistive Force Using a Novel Exercise Machin. Proceedings of the world congress on Exercise is Medicine® of the American College of Sports Medicine 2016.

[7] Y. Kimura et al.: Biomechanical analysis of single-leg squat with isokinetic and constant resistive force using controllable exercise equipment. Proceedings of the in IOC world conference on prevention of injury and illness in sport in BJSM 51(4), 341-342, 2017.

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計13件)

等抵抗負荷の側方抵抗レッグリーチ動作における支持脚の運動解析: 木村佳記, 小柳磨毅, 向井公一, 田中則子(7番目), 境隆弘(8番目), 他5名, 査読有, 臨床バイオメカニクス34: 239-244, 2013.

Temperature and shear rate characteristics of Electrorheological gel applied to a clutch: K. Koyanagi, 他6名, 査読有, J. of Physics: Conference Series: 412, 012013, 2013.

スポーツ外傷・障害に対する理学療法の効果: 小柳磨毅, 松尾高行, 木村佳記, 中江徳彦, 他6名, 査読無, JMIOS 69, 35-46, 2013.

Verification of Device Modes of a Strength Training Machine Using an Electrorheological Fluid Brake: Y. Yamamoto, K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, 他4名, 査読有, Proc. of the 2014 IEEE/SICE Int ' I Symposium on System Integration, 779-784, 2014.

Development of an isokinetic exercise equipment for the lower limb: ERIK: K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, 他3名, 査読有, Proc. of the 12th Int ' I Conf. on Motion and Vibration Control, 2D13-1-11, 2014.

Research on Shear Stress of Electrorheological Fluid Containing Piezoelectric Powders: K. Koyanagi and T. Karaki, 査読有, Book of Abstracts of the 14<sup>th</sup> Int ' I Conf. on ER Fluids and MR Suspensions, 49, 2014.

Motion analysis of a single-limb squat with isokinetic resistance: Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, N. Nakae, N. Tanaka, T. Sakai, S. Tada, 他4名, 査読有, Proceedings of the in IOC world conference on prevention of injury and illness in sport in BJSM 48, 620, 2014.

ERIK: a controllable exercise equipment for the lower limb: K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, 他4名, 査読有, Proceedings of the 19th Triennial Congress of the

International Ergonomics Association, 2030, 2015.

Effect of material condition for one-sided pattern electrodes applied to ER gel: K. Koyanagi, 他7名, 査読有, Proceedings of the 15th International Conference on ER Fluids and MR Suspensions, P2-01 2016.

Passive Speed Control Using a Functional Clutch Driven Reversely. K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, 他4名, 査読有, Proceedings of the 15th International Conference on New Actuators: 530-533, 2016.

膝関節スポーツ外傷術後における理学療法工夫: 木村佳記, 査読無, 理学療法京都(45): 37-44, 2016.

Biomechanical Analysis of a Single-Leg Squat with Isokinetic Resistive Force Using a Novel Exercise Machine: Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, 他7名, 査読有, Proceedings of the world congress on Exercise is Medicine® of the American College of Sports Medicine 2016.

Biomechanical analysis of single-leg squat with isokinetic and constant resistive force using controllable exercise equipment.: Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, 他7名, 査読有, Proceedings of the in IOC world conference on prevention of injury and illness in sport in BJSM 51(4), 341-342, 2017.

[学会発表](計10件)

Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, N. Nakae, N. Tanaka, T. Sakai, S. Tada, Y. Satoda, S. Kondo, Y. Inoue, A. Inoue: Motion analysis of a single-limb squat with isokinetic resistance. IOC world conference on prevention of injury and illness in sport. April, 10-12, 2014 (Monaco).

K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, T. Motoyoshi, H. Masuta and T. Oshima. Development of an isokinetic exercise equipment for the lower limb: ERIK. The 12th Int ' I Conf. on Motion and Vibration Control, August 3-7, 2014, Hokkaido(Japan).

Y. Yamamoto, K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, T. Motoyoshi, H. Masuta and T. Oshima: Verification of Device Modes of a Strength Training Machine Using an Electrorheological Fluid Brake. The 2014 IEEE/SICE Int ' I Symposium on System Integration 2014(Tokyo, Japan).

K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, T. Motoyoshi, H. Masuta and T. Oshima: ERIK: a controllable exercise

equipment for the lower limb. IEA 2015. The 19th Triennial Congress of the International Ergonomics Association (IEA2015) August, 9-14, 2015, Melbourne (Australia).

小柳磨毅、中江徳彦、木村佳記、椎木孝幸、松尾高行、境隆弘：前十字靭帯再建膝に対する理学療法のエビデンス。第1回日本運動器理学療法学会、シンポジウム、2015-12/13、大田区産業プラザ(東京)。

膝スポーツ外傷術後の理学療法：木村佳記。第28回京都理学療法士学会，教育講演，2016-1/17、京都市呉竹文化センター(京都)。

Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, N. Nakae, N. Tanaka, T. Sakai, S. Tada, Y. Satoda, S. Kondo, A. Inoue: Biomechanical Analysis of a Single-Leg Squat with Isokinetic Resistive Force Using a Novel Exercise Machine. 2016 Annual Meeting, World Congress on Exercise is Medicine® of the American College of Sports Medicine June 3, 2016, Boston, (America).

K. Koyanagi, Y. Kimura, M. Koyanagi, A. Inoue, T. Motoyoshi, H. Masuda, P. Oshima.: Passive speed control using functional clutch driven reversely. Actuator 16, June, 13-15, 2016, Bremen(Germany).

小柳健一、木村佳記、小柳磨毅、井上昭夫、澤井圭、本吉達郎、増田寛之、大島徹：単方向駆動のER流体クラッチを用いたセミパッシブ型速度制御。第34回日本ロボット学会学術講演会(RSJ2016)2016-9/7-9/9山形大学(山形)。

Y. Kimura, M. Koyanagi, K. Koyanagi, K. Mukai, 他7名, Biomechanical analysis of single-leg squat with isokinetic and constant resistive force using controllable exercise equipment. IOC world conference on prevention of injury and illness in sport. March, 16-18, 2017 (Monaco).

〔図書〕(計1件)

ER流体ゲル化エラストマーの開発，ロボット分野への応用の可能性，その技術課題：小柳健一，査読無，パワーアシストロボットに関する材料，電子機器，制御と実用化，その最新技術，技術情報協会，141-154，2015。

〔その他〕

ホームページ等

<http://researchmap.jp/kimu-ra/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

木村 佳記 (KIMURA, Yoshinori)

大阪大学、医学部附属病院、理学療法士

研究者番号：00571829

(2)研究分担者

小柳 磨毅 (KOYANAGI, Maki)

大阪電気通信大学、医療福祉工学部、教授  
研究者番号：20269848

小柳 健一 (KOYANAGI, Kenichi)

富山県立大学、工学部、准教授  
研究者番号：30335377

田中 則子 (TANAKA, Noriko)

大阪電気通信大学、医療福祉工学部、教授  
研究者番号：20290380

向井 公一 (MUKAI, Kouichi)

四條畷学園大学、リハビリテーション学部、  
准教授  
研究者番号：00353011

境 隆弘 (SAKAI, Takahiro)

大阪保健医療大学、保健医療学部、教授  
研究者番号：60353009

(3)研究協力者

中田 研 (NAKATA, Ken)

前 達雄 (MAE, Tatsuo)

武 靖浩 (TAKE, Yasuhiro)

下村 和範 (SHIMOMURA, Kazunori)

井上 昭夫 (INOUE, Akio)

中江 徳彦 (NAKAE, Naruhiko)

多田 周平 (TADA, Shuhei)

里田 由美子 (SATODA, Yumiko)

近藤 さや花 (KONDOU, Sayaka)

福村 亮介 (FUKUMURA, Ryosuke)

大木 啓輔 (OOGI, Keisuke)

山田 大智 (YAMADA, Daichi)

瀬戸 菜津美 (SETO, Natsumi)

海江田 武 (KAIEDA, Takeshi)

小川 卓也 (OGAWA, Takuya)

井上 泰博 (INOUE, Yasuhiro)