

# 遠心性収縮を伴う動作の支援手法 - 下山時の立脚期膝屈曲動作を対象とした制動機構の開発 -

江坂 望<sup>\*1</sup> 新川 佳祐<sup>\*1</sup> 上杉 繁<sup>\*2</sup>

## Assistance for Moving with Eccentric Contraction -Development of Braking Mechanism for Knee Flexion in Stance Phase on Descending a Mountain-

Nozomi Esaka<sup>\*1</sup>, Keisuke Shinkawa<sup>\*1</sup> and Shigeru Wesugi<sup>\*2</sup>

**Abstract** - In recent years, devices to support high-load physical work is becoming the topic of a growing number of studies. Those researches are intended to support not only moving against gravity and lifting heavy things but also stepping down staircases and unloading things. In the latter muscle contraction, the muscle is lengthened though it contracts. This kind of contraction is called as eccentric contraction, which often causes muscle damage. In particular, as mountaineering is becoming more popular in recent years, falling accidents also increase when descending a mountain. Reportedly one of the main reason for the falling accidents is muscle fatigue caused by eccentric contraction. Therefore, in this research, in order to secure the safety in mountaineering, a method is proposed to assist high-load knee flexion in stance phase when descending a mountain. The novel device is devised for user to bend knee with less muscular power by fastening knee joint with use of hydraulic brake when the user puts a foot on the ground. Finally authors investigated whether the device works in mountaineering.

**Keywords:** eccentric contraction, braking mechanism, stance phase, knee flexion, assistive device

### 1. 緒言

近年、重量物を持ち上げたり、屈んで長時間作業したりなどの高負荷な身体動作を支援する装置に関する研究が多く行われている。こうした支援装置は外部動力を必要とするツール<sup>[1][2]</sup>と外部動力が不要なツール<sup>[3]</sup>とに大きく分けられる。前者は電動アクチュエータを使用しているため、大きな出力が得られるものが多い。ただし、屋外での使用時間はバッテリーに依存するという側面も持つ。後者はアクチュエータを使わずに、機械的な仕掛けによって動作支援を行うため、長時間使用し続けられるという特徴がある。こうした支援の対象となる動作には、重力に逆らって身体を移動したり、物を持ち上げたりする動作のみならず、逆に階段降下や荷下ろし等の動作も含まれる。これらの動作における筋活動の中には、収縮とは逆方向に伸張されながら筋活動する収縮様式が含まれる。物を持ち上げるような筋収縮は、筋収縮と同時に筋が短くなる求心性収縮と呼ばれる収縮様式であるが、階段降下時の立脚期の膝屈曲時における大腿四頭筋に見られるような収縮様式は遠心性収縮と呼ばれ、筋損傷を引き起こす要因となる<sup>[4]</sup>。

特に近年流行の登山において、登りの場合心肺系への

負担は大きいですが、筋損傷は少なく、逆に下りでは心肺系への負担が小さく、筋損傷が激しいことがわかっている。そのため、筋疲労による転倒事故は特に下山時に多いとされている<sup>[4]</sup>。中高年登山者の抱える問題は、この遠心性収縮による筋疲労をきっかけに起こることが多い。

そこで本研究では安全な山行のために、下山時における、遠心性収縮による筋負荷に着目し、負荷を補助する方法とそのツールについて検討することにした。

### 2. 研究方法

#### 2.1 これまでの研究

著者らの研究グループでは、これまでに長時間の不整地歩行をターゲットにした下肢の動作補助機構に関する研究を行ってきた。特に、アクチュエータを利用することにより、本来は重くて持てないような物を持てるようにするといった身体能力の拡張ではなく、30分しか持続しないのであれば、5分なり10分なりでも動作が持続できるような、身体能力を補助することに主眼を置くことにした。そして、支援動作を限定することで、外部動力によるアクチュエータを使用せずに高い支援効果の得られる装置開発について研究を進めてきた。

崖などの移動が得意な鹿や馬などといった有蹄類に存在する第三腓骨筋の配置や、力の調節・伝達機能を参考に、大腿の前面から膝、脛を通り足先にまで達する部分に装着する装置を構想し、傾斜や階段、足場の悪い悪路などの不整地における歩行支援を目指した装置を試作し

\*1: 早稲田大学大学院 創造理工学研究所

\*2: 早稲田大学 理工学術院

\*1: Graduate School of Creative Science and Engineering, Waseda University

\*2: Faculty of Science and Engineering, Waseda University.

た (図 1)．シャフトをスライドするリニアブッシュの上下に自転車用のブレーキを配置し，上部のブレーキでステンレスシャフトを把持し，足・膝関節の固定することで姿勢維持の補助を行う．下部のブレーキはシャフトに通したコイルばねを把持し，足を踏み込んだ際のばねの押す方向への復元力による蹴り上げの支援を行い，足を上げて前進させる際のつま先の背屈の補助を行う．これらを塩ビパイプに取り付けたブレーキレバーにより操作し，蹴上・背屈・姿勢維持の支援を行う．

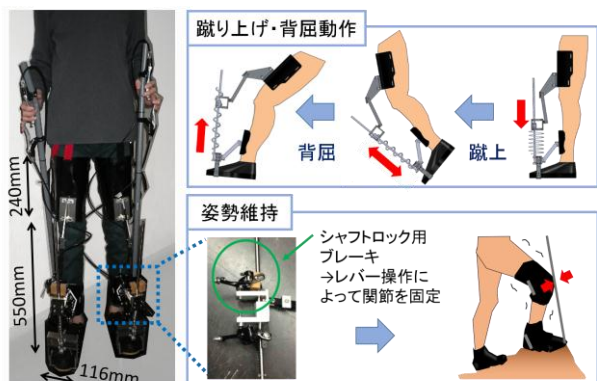


図 1 蹴上・背屈・姿勢維持補助を目指した動作支援

Fig. 1 Assistance for kicking up, dorsiflexion and postural maintenance

著者らはこの装置を装着し，自らで表面筋電計による計測を行ったところ，足関節の背屈に貢献する前脛骨筋や，脚の前方振り出しにブレーキをかける半膜様筋などでは筋電位の減少が見られ，シャフトをブレーキによって把持することで関節の固定・制動を強力に行うことができ，支援効果を実感することができた．

その一方で，バネの固定・解放を片手で二つのレバーを操作する必要があるが，歩行に合わせて操作するには十分に練習する必要があった．こうした試作機を踏まえ，使用者における操作の認知的な負荷を軽減すること，機能を限定することにより，可能な限り軽量化へつながる設計を検討することにした．

## 2.2 支援手法の検討

下山時の下肢動作の中でも，膝屈曲動作時の主働筋となる大腿四頭筋には負担がかかりやすい．特に，立脚期の膝屈曲動作においては，大腿四頭筋は重力に逆らいながら屈曲を制御し，膝伸展方向に力を発揮するため遠心性収縮する．そこで，膝の伸展方向の力を支援することで，筋の収縮方向に対する補助を行うことにした．また，今回は装置の軽量化と支援効果の向上のため，支援動作を立脚期における膝屈曲動作に限定することとした．

モックアップを製作することで具体的な支援方法の検討を行った．図 2 に示すようにトーションスプリングを膝関節に配置し，ばねの反発力を利用して屈曲動作時に，膝伸展方向へ力を補助する方法を試みた．このモックアップを体験した結果，膝屈曲時に伸展方向へ作用する力

は感じられたが，立脚期だけでなく遊脚期にも屈曲と同時に力が作用してしまうため，ばねの反発力がかえって負荷になってしまうことがあった．

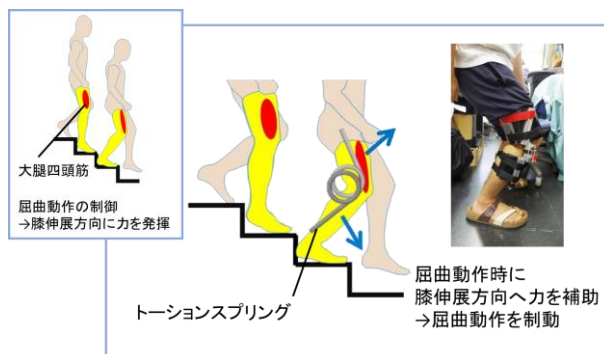


図 2 トーションスプリングを用いた支援手法の検討

Fig. 2 Consideration of assistance by torsion spring

以上を踏まえた上で，さらに身体を降下させる際に人間は脚に制動をかけるという点から，ブレーキユニットを膝関節に配置することで，膝屈曲方向に対する制動を支援し，筋負荷を軽減するツールを開発することにした．その際，大きさと重量を考慮し，機械要素として自転車のブレーキを採用することとした．また，試作機で使用していた金属シャフトではなく，体の動きを阻害せず，かつ軽量に作ることを考え，ワイヤを膝の前面に配置し，それを把持することでワイヤに身体を委ねるという支援方法を考案した (図 3) ．

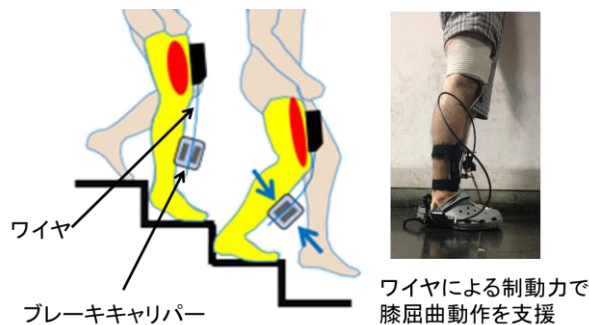


図 3 膝屈曲動作の制動による支援

Fig. 3 Assistance for knee flexion by braking

## 3. 装置開発

### 3.1 制動機構

制動機構の設計にあたり，その要となるブレーキユニットには，一般的に小さな握力で大きな把持力を得られるとされる油圧式のブレーキユニット (SHIMANO 製) の使用を考えた．しかし，ワイヤを把持させるキャリパーは本来ディスクを挟み込んで使用するため，ワイヤを挟んだ場合の把持力に関しては不明である．そこで，著者らはキャリパーの間にワイヤを通し，ブレーキレバーを握った状態でワイヤの先におもりを吊るしていき，キャリパーの把持力に関して検証を行うことにした．この

試験を機械式と油圧式のブレーキで行ったところ、機械式のブレーキに比べ出力の性能に4倍以上の差が見られたため、少ない把持力で大きな出力が得られる油圧式のブレーキを採用することにした(図4)。また、30[kgf]以上の把持力は得ることができるため、関節中心の70[mm]の位置から把持した場合、膝関節周りにはおよそ21[Nm]の支援が可能であると考えた。複数の文献から、体重60[kg]の人間が蹴り上げ高さ20[cm]の階段を降下するとき、膝関節にかかるモーメントが、およそ60[Nm]<sup>[5][6]</sup>になることが知られているので、これを考慮すると、本装置により膝屈曲動作を制動することで、膝関節周りにおいて1/3程度の負荷軽減が見込めると考えた。

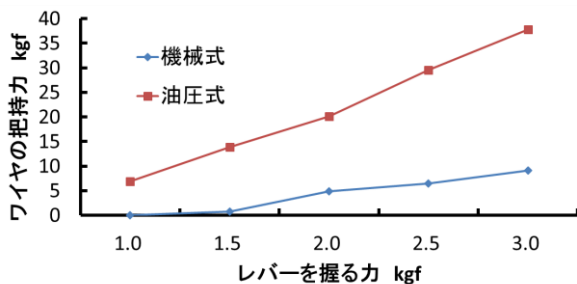


図4 ブレーキ方式の違いによる入出力特性  
Fig. 4 Difference of input-output characteristics between two braking methods

以上を基に、開発した装置を図5に示す。本装置の制動機構はブレーキの把持力を利用し、ワイヤの張力により膝屈曲動作を制動する。膝関節中心の上部(約140[mm])から下腿にかけてワイヤ(φ1.6[mm])が脚を這うようにし、ブレーキレバーを引くことで、膝関節中心から約70[mm]下部に配置したキャリパーの間を通るワイヤが把持され、張力がかかる。これにより、大腿部、膝、下腿部のプレートを介し、膝屈曲動作の制動を行う。

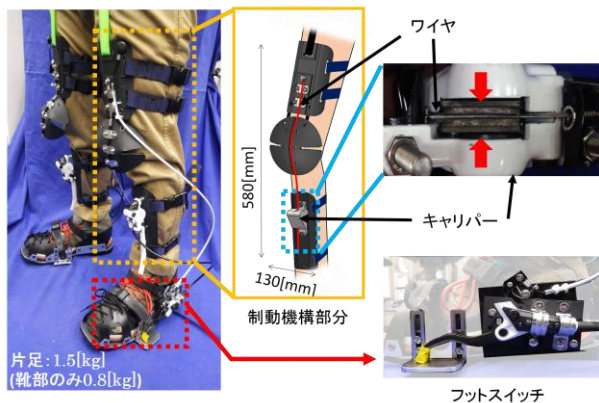


図5 立脚動作支援装置

Fig. 5 Assistive device for moving in stance phase

実際に制動機構を機能させた場合とさせなかった場合の様子を図6に示す。機能をさせた場合には、ブレーキレバーを握ることにより、キャリパーがワイヤを把持しているため、屈曲しても膝プレートとキャリパー間の距離は図の赤線で示すようにほとんど変化せず、屈曲を制

動している様子が確認できる。一方、機能をさせなかった場合には、レバーを握っていないため膝の屈伸に合わせてワイヤもスムーズに動く。そのため、膝周辺の様子を見ると、屈曲に合わせて膝プレートとキャリパー間の距離が変化していることが確認できる。



図6 制動機能の有無による屈曲動作の違い

Fig. 6 Difference in knee flexion with or without braking function

### 3.2 登山への適用

制動機構を登山で利用する際、歩行に合わせてブレーキレバーを手で操作するのは、ブレーキのタイミングの問題や認知的な負荷がかかってしまう。そのためブレーキレバーは靴部分に固定し、立脚期の膝屈曲時にだけブレーキレバーが押されるような機能を考案した(図5)。

また、下山の場合であっても実際の登山道は常に下りという場面は少なく、途中に登り返しや平地を挟むことが多い。その場合、本装置の制動機能はかえって負荷になってしまう。したがって、制動機能の解除を任意に行える必要があり、以下のような解除方法を考案した。

ブレーキレバー部の基部の形にくりぬいたプラスチックによりブレーキレバーのマウントを作成し、そのマウントごと固定・解除を行えるようにした(図7)。すなわち、そのマウントに切欠きを設け、そこに引っ掛かる爪を作成し、爪が下がっているときはブレーキレバーが押され、爪が上がっているときはブレーキレバーのマウント自体が押されることにより、ブレーキレバーは押されない仕組みとなっている。

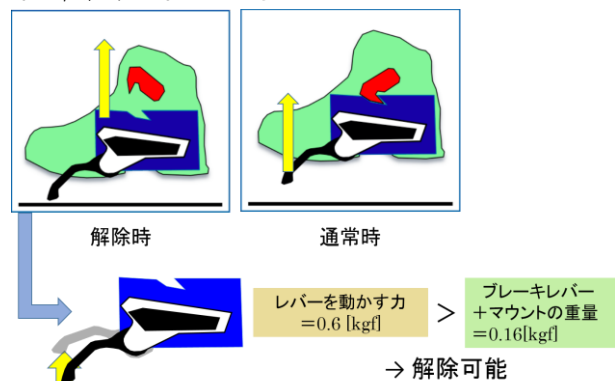


図7 制動機能の解除方法

Fig. 7 Method of canceling braking function

今回の装置は、山頂までは登山用ザックに括りつけた



形で携帯し、下山の際に装着して使用するというコンセプトのもと、携帯しやすいように製作した。制動機構部分を靴部にすべて収納させてしまうことで、靴部のラチェットベルトにザックのベルトなどを通し、括り付けた形での携帯が可能となる。図 8 が実際にザックに括り付け携帯したときの様子である。また、今回の装置を製作するにあたり、特定の人に向けたデザインではなく多くの人が装着できるように製作を行った。装着の際は、装置に付けたベルトを使用し、バックルによる固定とコキカンによる調整を行えるようにすることで、大腿部や脛の太さに幅広く対応させた。さらに、脚全体でなく、大腿部から脛へと装着し、靴部とは一体にしないことで身長差にも幅広く対応できるようにした。靴部に関しても 25~28[cm]まで対応させたため、総合的に幅広い体格、身長への装着を可能にした。

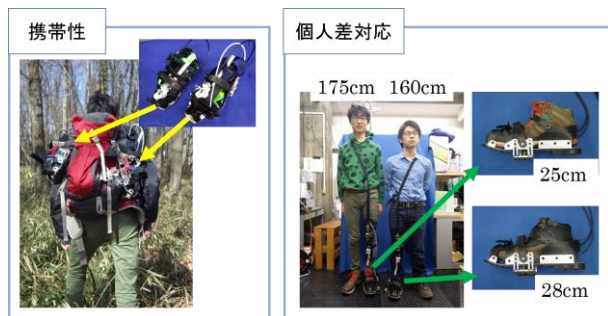


図 8 携帯性と個人差への対応

Fig. 8 Portability and dealing with personal differences

#### 4. 装置体験

本装置は山岳地利用を想定しているため、今回提案した機構が実地において動き、機能するかを検証するため、著者らは本大学本庄キャンパス敷地内の大久保山において動作検証を行った。敷地内は起伏のある地形になっており、耕作地である柔らかい土の地面や落ち葉や枝、植物が生えた斜面や砂利道、岩の段など様々な路面状況での動作検証を行った。まず、落ち葉のある斜面や、ゆるやかな土の斜面などでの歩行を 30 分ほど行い、休憩をはさみ、1 時間 30 分ほど加えて歩行を行った。図 9 に実地体験時の様子を示す。また、これとは別に行った雪中歩行時の様子も同時に示す。

実地体験の結果、着地時に靴部のブレーキレバーが押され、ワイヤが把持されることで、膝の屈曲が制動される様子が確認できた。実地体験後の著者らの装置使用に関する印象として、以下のことが挙げた。

- ・急斜面では効果があり、緩斜面では効果が薄い
- ・装置の破損などはない
- ・土がフットスイッチに挟まり、機能しないことがある



急斜面での歩行 緩斜面での歩行



砂利道での歩行 土での歩行 雪中歩行

図 9 実地体験の様子

Fig. 9 Scenes of using the assistive device outdoors

そして、装置による制動機能により膝屈曲動作の支援効果を実感できたため、今後被験者実験を行い、支援効果の調査を行っていく予定である。

#### 5. まとめ

本研究では、遠心性収縮を伴う動作において大きな筋負荷がかかることに注目し、ワイヤと自転車のブレーキを用いた制動機構により、その動作を支援する機構の開発を行った。実際に下山を想定した装置の実地体験では、急斜面においては膝屈曲動作の支援された印象を受けたが、緩斜面ではあまり感じられなかった。今後、被験者実験を実施し、本装置を装着することによる効果や影響の検証に取り組む。

#### 参考文献

- [1] 山海：ロボットスーツ HAL  
<[http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/?page\\_id=51](http://sanlab.kz.tsukuba.ac.jp/?page_id=51)>  
(accessed 2015-7-17).
- [2] 本田技研工業：リズム歩行アシスト  
<<http://www.honda.co.jp/robotics/rhythm/>>  
(accessed 2015-7-17).
- [3] 佐野：無動力歩行支援機 ACSIVE  
<<http://www.imasengiken.co.jp/s/s-walker.html>>  
(accessed 2015-7-17).
- [4] 山本：登山の運動生理学百科，東京新聞出版局（2000）。
- [5] 黒後，飛松，他：関節モーメントによる健康者の段昇降分析；リハビリテーション医学，VOL.37，NO.6，pp.389-397（2000）。
- [6] 江原，山本：関節モーメントによる歩行分析，医歯薬出版株式会社（1997）。