

# 空気圧ゴム人工筋肉を用いた農業用内骨格型アシストスーツの補助効果試験

## Assist Effectiveness Evaluation Test of Endoskeletal-Type Agricultural Assist Suit with Pneumatic Rubber Artificial Muscle

○三土手志苑\*, 戸森央貴\*, 伊藤拓未\*

○Sion Mitode\*, Hiroki Tomori\*, Takumi Ito\*

\* 山形大学

\*Yamagata University

**キーワード** : スマート農業 (smart agriculture) 内骨格型アシストスーツ (endoskeleton assist suit) McKibben 型人工筋肉 (McKibben type artificial muscle) 筋電位計測 (myoelectric potential measurement)

**連絡先** : 〒 992-8510 山形県米沢市城南 4-3-16 山形大学 工学部 機械システム工学科 戸森研究室  
戸森央貴, Tel.: (0238)26-3217, E-mail: tomori@yz.yamagata-u.ac.jp

### 1. 緒言

現在, 日本の農業では基幹的従事者の減少と高齢化が加速し, 問題となっている. 基幹的農業従事者数は平成 15 年度では 225.6 万人, 令和 2 年度では 136.3 万人と 60 % まで減少しており<sup>1)</sup>, 高齢化率も平成 15 年では 53.9%, 令和 2 年度では 69.6% と上昇している. 体力的に厳しくなり離農することが一番に挙げられたり<sup>2)</sup>, 新規就農者の第一の悩みも「労働がきついこと」である<sup>3)</sup>, これらの問題はおもに身体の負担が原因であり, 実際に農業を営む従事者は, 具体的に「膝」, 「腰」, 「腕」, 「背中」に負担を感じている<sup>4)</sup>, この現状を受けて, 我々は農業従事者を補助し, 農作業による特定箇所の負担を軽減することで, 従事者減少問題を改善したいと考えた. 現在の 1 経営体当たりの農地面積は 1.8[ha] であり日本の農地が小さいこと<sup>5)</sup>, . 新規就農者

の 84% が施設園芸に関わっていること<sup>6)</sup>, 実際には農地分散化が課題に挙げられており, 1 経営者が多くの飛び地を所有している場合があること<sup>7)</sup>などの理由から大型の農業機械やロボットの導入は困難である. そのため身体に装着してサポートできる方が適していると考え, 我々は直接農業従事者を補助する農業用アシストスーツの開発を進めている. また, このアシストスーツにアクチュエータを配置する際, 内骨格型と外骨格型の配置がある. 内骨格型アシストスーツは装具を比較的安価かつ軽量, 小型にすることができ, 回転軸や配置ルートを人体と共有するため, 付け心地がよいといった特徴もある. また, 高剛性材料を必要としないためアシストは配置のずれ等で人体の動きを阻害することがない. 対して外骨格型アシストスーツは高剛性材料に直接アクチュエータのパワーを伝達させるため, 高効率で大きな出力を期待出来る.

しかし、内骨格型と対局に装具が大型化、高重量となってしまう点や新たに回転軸や配置ルートを設定したことによって、人体の動きを阻害してしまうといった欠点が存在する<sup>8)</sup>。実際のアシストスーツでは着脱や、電源 OFF の時に移動が困難であったり<sup>9)</sup>、膝か腰のどちらかしかサポートしなかったり<sup>10)</sup>、そもそも動力がなく、素材の特性をアシストに利用したりしている<sup>11)</sup>。これらは農業の作業内容と相性がよくなかったり、実際に農業従事者からアシストスーツに対して Table.1 のような要望な不満がある<sup>4)</sup>。この現状、要望や不満を踏まえて、この理想に近い内骨格型のアシストスーツを採用した。我々は身体に装着してサポートするに当たって、農作業の邪魔をせず安全であり、ある程度環境に耐えられる軽量で高出力なアクチュエータが必要となる。軽量で高出力密度、バックドライバビリティや防水、防塵能力が優れ、摺動部が無く直接身体に配置ができる空気圧ゴム人工筋肉を選択した。

また、今回我々は実証試験の前に筋電位を測定する筋肉の再検討と姿勢の詳細な決定、筋電位計測システムの改良を行っている。その結果、筋電位測定システムの無線化と複数チャンネルでの計測に成功した。また筋電位データ処理の操作性、利便性が向上し、試験の試行回数を増やせるとともに解析が効率が上昇した。現在我々は筋電位計測によって、製作したアシストスーツの補助効果を確認するための実証試験を行っている。本報告においては、被験者7人のうち4人まで試験が完了しており、そのうち1人の中腰動作を解析している。

本実験は山形大学工学部倫理審査委員会の倫理審査を受けている。

Table 1: ユーザーとなる農業従事者からのアシストスーツに対する要望や不満. Requests and dissatisfaction regarding assist suits from agricultural workers who are users

体の動きとの一体感
着る/脱ぐのが簡単
もっと軽く
服のような着心地
防水性
装着姿が恥ずかしい
管理が面倒
収納が簡単であること
作業に合わない

## 2. 農業用内骨格型人工筋肉アシストスーツ

### 2.1 採用した人工筋肉

農業用アシストスーツを開発するにあたって、アクチュエータとして人工筋肉を採用した。

人工筋肉は生体に存在する筋肉を模したソフトアクチュエータであり、様々な電気で人工筋肉を動かす電気駆動高分子アクチュエータや<sup>12)</sup>、形状記憶合金を用いた人工筋肉アクチュエータ<sup>13)</sup>等がある。私たちはそのなかでも McKibben 型空気圧ゴム人工筋肉を採用した。この人工筋肉は Fig.1 のようにゴムチューブに編み込み繊維を被せ両端を固定することによって、収縮方向を制御するという性質を持っている。同じ空気圧ゴム人工筋肉であるワルシャワ型と比較と比較して収縮量は劣ってしまうが、径の膨張が小さく、比較的簡単に身体に直接張り巡らせることが出来、製作難易度も低い。我々はこの McKibben 型人工筋肉の編み込み繊維の全長を増やした状態遷移式 McKibben 型空気圧ゴム人工筋肉を開発した。Fig.2 のように圧縮空気を印加していないときは弾性力によってサポートし、圧縮空気を印加した際は空気によってアクティブに補助を行う。この人工筋肉は軽量で高出力であること、高いバックドライバビリティを備えている

こと、高い柔軟性や防水、防塵性能を有していること、機能を停止しても難なく動くことが出来ることなど多くの利点を持っている。

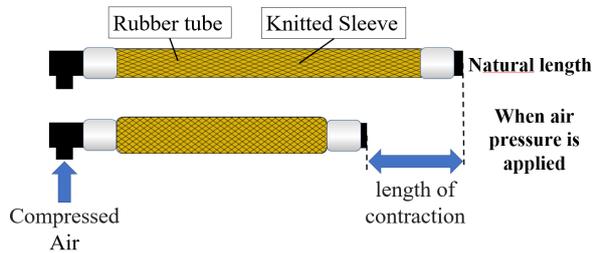


Fig. 1 McKibben 型人工筋肉の動作. Operation of McKibben type artificial muscle

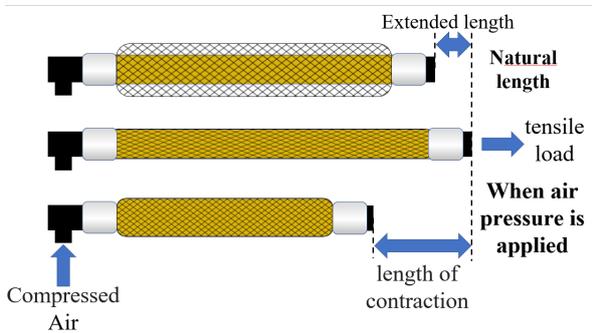


Fig. 2 状態遷移式 McKibben 型人工筋肉の動作. Operation of Mode-sift McKibben type artificial muscle

## 2.2 農業用内骨格型人工筋肉アシストスーツの構成・外観

我々は農作業として収穫物の運搬や低木の作物や水平棚に対する作業など、人間の立ち上がりや中腰の姿勢維持などを補助するために、人工筋肉の貼り方は人間の立ち上がりで使用する筋肉の↑に配置することで姿勢を補助する。上半身は姿勢維持を行う脊柱起立筋をモデルに設計した。下半身はスクワットで用いる筋肉を経由する筋構造である Fig.3 のような身体に人工筋肉を張り巡らせる身体周りに沿う 2 関節筋構造を新たに開発した。この筋構造をつなぎに装着し、高剛性な材料を極力排除している。この構造でアシストスーツ使用者の腰と膝をサポートする。また、この人工筋肉を配置するに当たって、つなぎにバンドで縫い付け固定した。



Fig. 3 製作したアシストスーツの外観. Appearance of the assist suit

## 3. アシストスーツ補助効果評価試験概要

### 3.1 筋電位計測概要

我々は農業用内骨格型人工筋肉アシストスーツの補助効果を確認するため補助効果評価試験を行った。この評価試験では補助効果を確認するために筋電位を計測する。筋肉の使用がどれだけ減少したかを見ることによって、アシスト効果を測る。また、被験者は 7 人であり、装具のサイズの関係で身長は 160[cm] から 175[cm]、平均年齢は 22.4 歳である。

筋電位を計測する際の動作は実際の農作業の動作を想定している。1 つ目の動作は直立姿勢を 30 秒維持するものである。2 つ目の動作は直立状態で体重の 20% の錘を持ってもらい、30 秒間維持するものである。3 つ目の動作は錘を床から持ち上げ、直後に降ろす作業である。4 つ目の動作は中腰動作で簡単なゲームを 60 秒間してもらうものである。これらの動作はアシストスーツを着てもらいアシストするパターン、アシストスーツを着てもらいそのまま作業をするパターンの 3 パターンで各動作を 2 回ずつ行った。この動作を行う間、筋電位や動作を記録する。

Fig.3, Fig.4 は筋電位計測試験の構成である。SENIAM(Surface EMG for Non-Invasive Assessment of Muscle) の推奨する通りに各筋肉に電極を貼り、筋電位センサーである Advancer

Technologies 製 MyoWare Muscle Sensor (AT-04-001) に接続する。Muscle Sensor には同社の Cable Shield, Sensor Cable を取り付けている。Muscle sensor の出力ケーブルを株式会社スポーツセンシング製 DSP ワイヤレスアナログ電圧データロガー (SS-8L-SM0050) に接続する。データロガーの情報を PC に送受信する必要があるため、データ送受信装置は同社製データ送受信装置 (SS-WSD015-0A) を使用している。さらに、動作を記録するため OptiTrack V120 Trio を PC に接続し、MOTIVE を用いて株式会社スポーツセンシング製計測アプリケーション (SS-WSD115-0A) と同期させ、被験者の運動動作記録と筋電位測定を同時に開始できるように設定した。

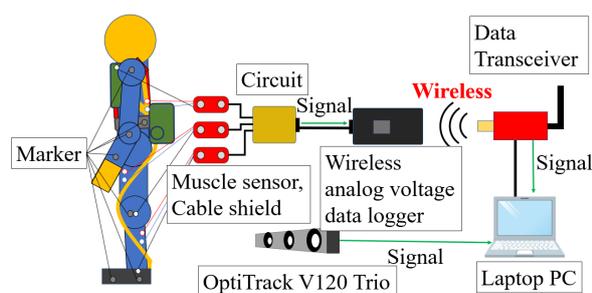


Fig. 4 筋電位計測試験の構成. Configuration of myoelectric potential measurement examination

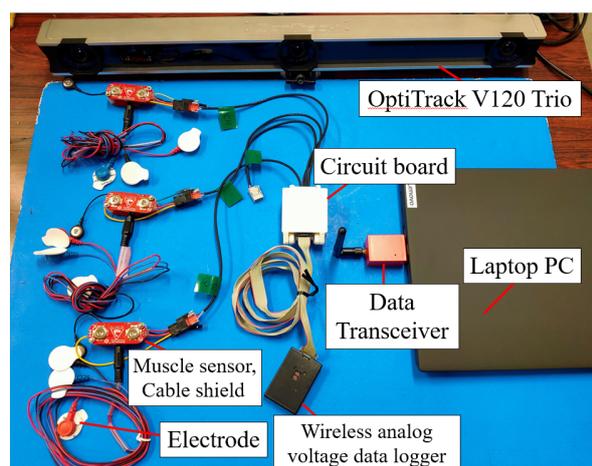


Fig. 5 筋電位計測試験の構成の写真. Configuration photograph of myoelectric potential measurement examination

### 3.2 計測する筋肉について

当アシストスーツは農作業中の床から物を持ち上げる動作を補助する。この動作はスクワットのしゃがみから立ち上がる動作と同じである。スクワットに用いる筋肉は、大殿筋、半模様筋、半腱様筋、大腿二頭筋、大腿四頭筋、腓腹筋、ヒラメ筋と腰を支える脊柱起立筋である<sup>14)</sup>。大腿二頭筋を計測した際にクロストークが発生しており、正確に測ることが出来なかったため、その原因の周辺の筋肉である半模様筋、半腱様筋は除外している<sup>15)</sup>。さらに、筋電位センサーの電極を体表に貼り付ける都合上、身体深部に存在する筋肉は、計測が難しいため、表層の筋肉である大腿四頭筋、腓腹筋、脊柱起立筋を選択した。この3本の筋肉はさらに細かい筋肉に分かれているので詳細を検討する。

大腿四頭筋はそれぞれ大腿直筋、外側広筋、中間広筋、内側広筋の4本に分かれる。先述の通り、表層の筋肉を選ぶため中間広筋は除外する。この研究の前に当研究室で研究していた内山らによれば、外側広筋、内側広筋より大腿直筋の方がデータが明確に取れたので大腿直筋を選択する<sup>15)</sup>。

腓腹筋はそれぞれ腓腹筋外側頭と腓腹筋内側頭に分かれる。外側頭より内側頭のほうが筋厚が有意に厚く、筋厚は生理的断面積に比例することから、筋力は内側頭の方が大きい<sup>16)</sup>。また、股関節回旋角度によって筋活動の大小が変わる<sup>17)</sup>。股関節内旋位では外側頭が有利であり、外旋位では内側頭が有利である。我々が実施する持ち上げ動作は股関節外旋位であるため、以上から腓腹筋内側頭を選択した。

脊柱起立筋はそれぞれ腸筋、最長筋、棘筋の3つに分かれている。これら3本は傍脊柱筋として紹介されており<sup>18)</sup>、SENIAMの示す筋電位電極設置位置も同一のものであった。さらに、運動機能も同一であったため、特別に分けず、脊柱起立筋として扱い選択する。

よって、最終的に選択した筋肉は大腿直筋、腓

腹筋内側頭, 脊柱起立筋である. これらの筋肉の測定は全て右足で行う.

### 3.3 筋電位計測システムについて

筋電位のデータは計測された原形波をデータ処理して, 随意最大筋肉の電位からどれくらい筋肉を使っているかを示す%MVCを出力する必要がある. 今回製作した筋電位測定システムを Fig.6 に示す. 株式会社スポーツセンシング製計測アプリケーション (SS-WSD115-0A) で計測を行い, EXCEL を介して株式会社スポーツセンシング製ワイヤレス筋電センサー Viewer でフィルタリング, RMS 処理, %MVC 出力まで行っている. 従来のシステムでは途中で EXCEL 出力を 4 回行う必要があるが, 今回のシステムは EXCEL 出力 1 回のみで %MVC まで出力できる上に, ソフトの UI の設定とボタンで自動で処理を行うため, 操作が簡単になった.

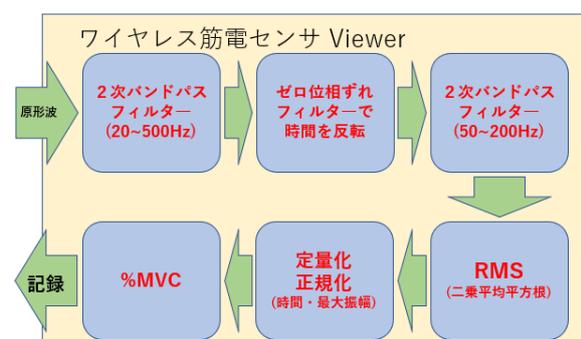


Fig. 6 現在の筋電位計測システム. Current myopotential measurement system

### 3.4 結果

現在被験者 7 人中, 5 人試験が完了しており, また解析の途中であるため, 今回は解析の終了している被験者 1 人の中腰姿勢のみの報告する. この中腰姿勢で得られた EMG を 50[Hz] から 200[Hz] までの 1 次バンドパスフィルターにかけ, RMS 処理を行ったグラフを出力する. それぞれ脊柱起立筋のグラフを Fig.7, 大腿直筋のグラフを Fig.8, 腓腹筋内側頭のグラフを Fig.9 に

示す. 脊柱起立筋, 大腿直筋, 腓腹筋内側頭の全において特に筋電位に変化は見られなかった.

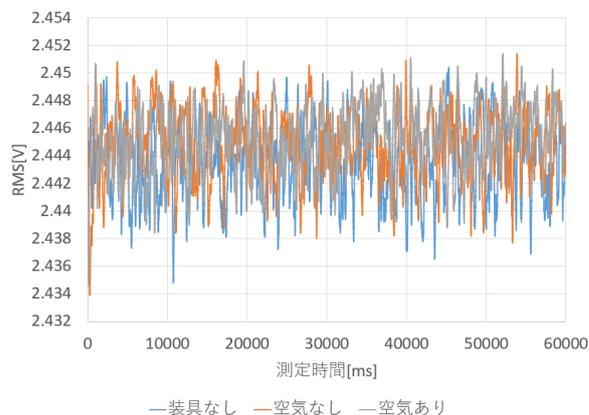


Fig. 7 中腰姿勢での脊柱起立筋の筋電位. Myoelectric potential of erector spinae muscle in mid-hip posture

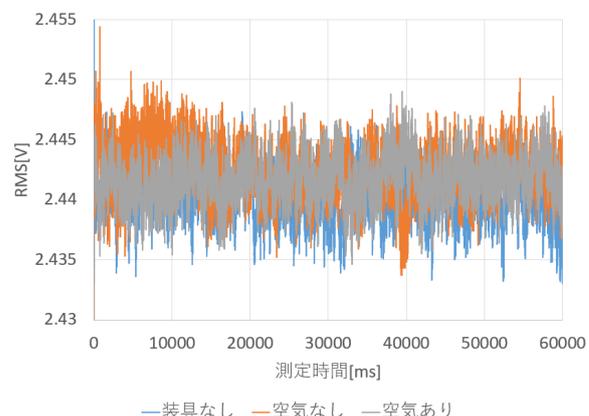


Fig. 8 中腰姿勢での大腿直筋の筋電位. Myoelectric potential of the rectus femoris muscle in mid-hip posture

### 3.5 考察

全ての筋肉の筋電位グラフでは筋電位に違いは出ていないことから, 中腰姿勢ではこれらの筋肉の使用に明確な差が出ていなかったと考えられる.

中腰姿勢で筋肉の使用に差が出ていない理由としていくつかの原因が挙げられる. 一つ目は身長・空気の印加圧力の変化になどによってアシスト力の低下を招いた恐れがあることである. 今回つなぎに配置ルートに沿うように人工筋肉アシストスーツをバンドで固定していたので, 身

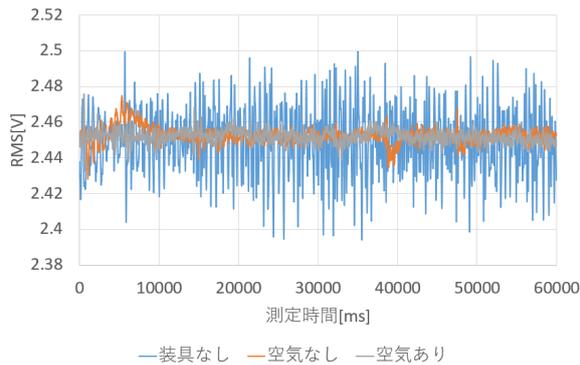


Fig. 9 中腰姿勢での腓腹筋内側頭の筋電位. Myoelectric potential of the medial head of the gastrocnemius muscle in mid-hip posture

長によってバンドの位置がずれ、配置ルートが変化していることが多々見られた。さらに試験の動作を行う前に空気を印加した時に圧迫によって痛くないように空気圧を調整しているため、アシスト力に個人差があることがある。二つ目は製作したアシストスーツが中腰姿勢ではあまり効果を発揮しない恐れがあることである。三つ目は内骨格型アシストスーツに対して筋電位計測は補助効果評価試験として適してない恐れがあることである。外骨格型アシストスーツでは完全に身体をアシストスーツにゆだね、短時間に大きいアシスト力を発揮するため筋電位に差が出やすいが、内骨格型アシストスーツでは通常通り身体を動かした際にサポートするという面が強く、長時間アシストすることで疲労、負担を軽減するという運用をしているため、筋電位に違いが出にくいと考えている。

#### 4. 結言

今回は改良した農業用内骨格型アシストスーツの効果を確かめるために、筋電位計測を用いて補助効果評価試験を行った。その際、筋電位計測システムやデータ処理を改良し、さらに測定する筋肉を定めた。その結果では筋電位のグラフにあまり差は見られなかった。

この試験が終わり次第、試験やその手法の見直しや圧縮空気の印加方法や検定手法を模索し

たい。その後はアシストスーツの開発要件を再整理して材料選定等行っていきたい。

#### 参考文献

- 1) 農林水産省: 農業を担う人材の育成・確保に向けて (2021)
- 2) 農林水産省: 食料・農林水産業・農山漁村に関する意向調査 (2003)
- 3) 農林水産省: 食料・農業・農村の動向 特集 2 輝きを増す女性農業者 (1991)
- 4) 田中正浩, 原田泰弘, 梅野覚, 菊池豊: アシストスーツの農業利用に関するアンケート調査, 農作業研究, **57-1**, 21/29 (2002)
- 5) 農林水産省: 農業構造動態調査 確報 令和3年 農業構造動態調査結果 (2021)
- 6) 農林水産省: 施設園芸をめぐる情勢 (2016)
- 7) 農林水産省: 担い手への農地の利用集積の現状と課題 (2007)
- 8) K. Uchiyama, T. Ito, H. Tomori: Development of Endoskeleton Type Knee Joint Assist Orthosis Using McKibben Type Artificial Muscle, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **34-2**, 390/401 (2022)
- 9) Guardian XO, <https://www.sarcos.com/products/guardian-xo-powered-exoskeleton/>, (Accessed on November, 2023)
- 10) ダイヤ工業株式会社, <https://www.daiyak.co.jp/product/detail/?id=889>, (Accessed on June, 2023)
- 11) アルケリス株式会社, 工場向けアルケリス, <https://www.archelis.com/product-industrial/>, (Accessed on November, 2023)
- 12) 安積 欣志: 人工筋肉へのソフトマテリアルの応用, *日本ロボット学会誌*, **31-5**, 448/451, (2013)
- 13) H. Izawa, Y. Sekiguchi, Y. Shiota: The artificial muscle from shape memory alloy, *Journal of Life Support Engineering*, **17**, 124 (2005)
- 14) Clem W. Thompson, R. T. Floyd, 翻訳者 中村千秋, 竹内真希: 身体運動の機能解剖 改訂版, 155/233 株式会社医道の日本社出版 (1997)
- 15) K. Uchiyama, T. Ito, H. Tomori: Development of Endoskeleton Type Knee Joint Assist Orthosis Using McKibben Type Artificial Muscle, *Journal of Robotics and Mechatronics*, **34-2**, 390/401 (2022)

- 16) 吉村孝之, 種田智成, 西沢喬, 尾崎康二, 山田勝也, 池戸康代, 植木努, 曾田直樹: 腓腹筋内側頭と外側頭の形態学的特性と機能的特性の違いについて, 第 28 回東海北陸理学療法学会大会, 63 (2012)
- 17) 額賀翔太, 宮川良博, 杉岡辰哉, 森拓也, 井上純爾, 川原勲: 股関節回旋角度の違いが腓腹筋内側・外側頭における筋活動に与える影響, 近畿理学療法学会大会, 35 (2016)
- 18) 勝平純司, 田中惣治, 井川達也, 中谷知生, 加藤浩: 臨床にいかす表面筋電図, 第 1 版 24/31 株式会社医学書院出版 (2020)
- 19) M. Yoshizaki, H. Takeshita, M. Ohsawa and Y. Saki: A frequency domain hypothesis for human postural control characteristics, IEEE Eng. in Med. and Biol. Magazine, 11-4, 60/63 (1992)
- 20) 笠間 健, 朝比奈 敏之, 吉田 崇, 辻岡 三郎: 脳波を用いた 3 次元運動計測システム, 計測自動制御学会論文集, 19-12, 997/1003 (1983)