

空気圧ゴム人工筋肉を用いた農業用アシストスーツの腹腔内圧補助機構の開発

Development of an intra-abdominal pressure support mechanism for an agricultural assist suit using pneumatic rubber artificial muscles.

○小林滯*, 三土手志苑*, 戸森央貴*

○ Rei Kobayashi*, Jirou Aomori*, Saburou Yamagata*

*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-type assist suit), McKibben 型人工筋肉 (McKibben-type artificial muscle), 腹腔内圧 (intra-abdominal pressure)

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, 日本の農業は基幹的農業従事者数の減少と高齢化が問題となっている. 基幹的農業従事者数は平成 27 年度では 175.7 万人, 令和 5 年度では 116.4 万人とここ数年で約 60 万人, 割合にして 66 %まで減少している. また, 基幹的農業従事者のうち 65 歳以上の割合は平成 27 年度では 65 %であったのに対し, 令和 5 年度では 70 %まで上昇している¹⁾. 農業従事者数の減少と高齢化の原因として, 高齢者は高齢化や病気により体力的に厳しくなったこと²⁾を, 新規就農者は健康上の不安 (労働がきついこと)³⁾を挙げている. これらは主に腰や膝, 背中, 腕の身体的負担によるものである⁴⁾.

こういった現状の解決策として, 農業におけるロボット技術や ICT を導入したスマート農業がある. スマート農業の中には大型の農業機械や農業用アシストスーツなど様々なものが存在するが, 日本の農業は 1 農業経営体当たりが所有する耕地面積が 3.6[ha]

と小さい⁵⁾ うえ, 農地が分散している⁶⁾ ため大型の農業機械よりも農業用アシストスーツの方が適している. また, 比較的導入しやすく収穫物持ち上げの際の負担軽減や持ち上げ運搬作業軽労化による高齢者や女性等の就労を支援するといったメリットがある⁷⁾.

アシストスーツは, 主に内骨格型と外骨格型の二つに分けられ, 更にモーターや空気圧ゴム人工筋肉などの動力ありと素材の弾性力等を活かす動力なしに細かく分類できる. 内骨格型アシストスーツは比較的安価かつ軽量で小型化が可能であり, 高剛性材料や回転軸が存在しないため, 人体の動きを阻害しにくい. 一方, 外骨格型アシストスーツは高剛性材料や回転軸が存在し, アクチュエータの力を直接伝達させるため, 大きな補助力が期待できる. しかし, 内骨格型と比べ高価で大型, 高重量になってしまうことや回転軸や取り付け位置によって人体の動きを阻害してしまうといったデメリットがある⁸⁾. また, 農業従事者はアシストスーツに対して, Table.1 のような要望や不満を抱えているため⁴⁾, これらを踏まえ, 摺動部がな

Table 1 アシストスーツに期待する効果や取扱性.
Expected effects and handling of assist suits

腰/膝/肩 痛の予防
つらい作業が楽になる
作業の能率が上がる
もっと重いものが持てる
体の動きとの一体感
もっと着る/脱ぐのが簡単
もっと軽く
服のような着心地

く耐水・耐粉塵性に優れ、高出力かつ柔軟性があり人体との親和性が高い空気圧ゴム人工筋肉をアクチュエータとして搭載した内骨格型アシストスーツを開発する。さらに、本アシストスーツの補助効果検証のため、被験者による実証実験も実施する。本実験は山形大学工学部倫理審査委員会による承認を受け実施している(承認番号 R06-16)。

2. 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概要

2.1 採用した人工筋肉

農業用アシストスーツに使用するアクチュエータは空気圧ゴム人工筋肉を採用した。使用する人工筋肉は主に McKibben 型空気圧ゴム人工筋肉と状態遷移式人工筋肉である。McKibben 型人工筋肉の構造と動作メカニズムは、Fig.1 に示すようにナイロン製の繊維コードを格子状に編んだスリーブでゴムチューブを覆い、スリーブの両端を固定する。チューブ内の圧力を上げるとチューブは半径方向に膨張し、この時生じる円周方向の張力が繊維コードにより軸方向の強力な収縮力に変換される⁹⁾ というものである。また、状態遷移式人工筋肉は McKibben 型人工筋肉を基に改良を施した物である。McKibben 型人工筋肉は Fig.1 に示すようにその構造により長さが固定されているため伸ばすことができないが、状態遷移式人工筋肉は内部のゴムチューブよりそれを覆っているスリーブを長くすることで、ゴムチューブとスリーブの長さの差分だけ伸ばすことができる構造となっている (Fig.2)。

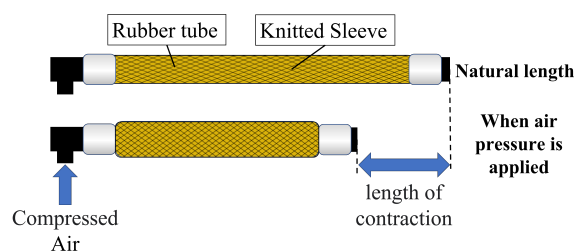


Fig. 1 McKibben 型人工筋肉の構造と動作.
Structure and operation of McKibben-type Pneumatic artificial muscle.

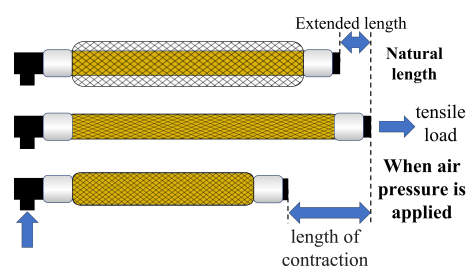


Fig. 2 状態遷移式 McKibben 型人工筋肉の構造と動作.
Structure and operation of Mode-Shift-type Pneumatic artificial muscle.

2.2 腹腔内圧

農作業における重量物持ち上げは、腰への負担が大きく、腰部障害の原因になることがある。腰部障害予防には腹腔内圧が関係しており、腹腔内圧は、腹腔構成筋群の同時収縮で増加し、支持性や強制呼気、排尿や排便に貢献するとされている。腹腔内圧の上昇には、横隔膜、腹横筋、骨盤底筋などが重要となり、支持性向上のための運動療法が積極的に行われている。この腹腔内圧は、脊柱に強い伸展モーメントが加わる際に不随意で上昇するとされており、スポーツなどの素早い動作や日常生活動作で腰部障害予防の観点から重要な因子といえる¹⁰⁾。とされている。

以上を踏まえ、開発するアシストスーツには腹腔内圧上昇を補助する機構を搭載する。

2.3 農業用内骨格型アシストスーツと腹腔内圧補助機構

Fig.3 と Fig.4 に農業用内骨格型アシストスーツの外観を、Fig.5 と Fig.6 に腹腔内圧補助機構の概略図を示す。

前述の通り、腹腔内圧の上昇には横隔膜や腹筋群、骨盤底筋などが重要であるが、横隔膜や骨盤底筋は深層筋であり、身体の表面付近にないため、人工筋肉で直接補助するのが難しい。そのため、この腹腔内圧補助機構は腹筋群の補助を主としている¹¹⁾。6本全ての人工筋肉が腰ベルトを起始としていて、 A_1 、 A_2 の2本の人工筋肉は脊柱起立筋上を経由し最終的に大胸筋の上あたりで停止し。 B_1 、 B_2 の2本の人工筋肉は、脊柱起立筋上を経由し脇の下のガイドベルトを通った後、外腹斜筋と腹横筋上を経由し、最終的に広背筋の下部当たりで停止する。また、 C_1 、 C_2 の2本の人工筋肉は腹横筋上を経由し腹直筋の下部で停止する構造となっている。これにより、腹腔内圧上昇や姿勢維持作用が期待できる。



Fig. 3 農業用内骨格型アシストスーツの外観 (正面). Front view of an endoskeleton-type assist suit for agriculture.

3. アシストスーツの性能評価試験

3.1 測定方法

アシストスーツの性能を評価するために評価試験を実施する。今回の評価試験では5人程度の被験者に中腰姿勢、平棚姿勢、運搬姿勢の三種類の作業姿勢を行ってもらい。作業はそれぞれ腰や膝に負荷がかかるような姿勢や動作になっており、「装具あり (駆動)」, 「装具あり (非駆動)」, 「装具なし」の3パターンを各3回ずつ実施する。作業の間には次の作業に



Fig. 4 農業用内骨格型アシストスーツの外観 (背面). Back view of an endoskeleton-type assist suit for agriculture.

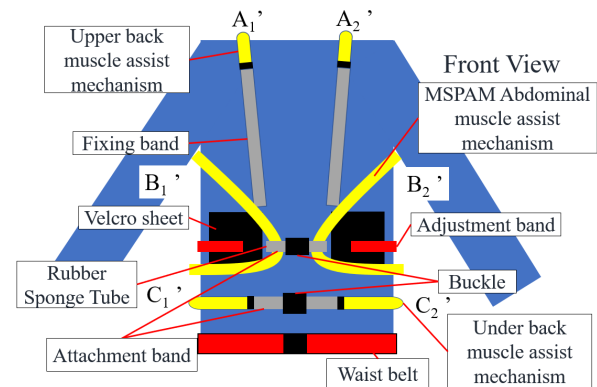


Fig. 5 腹腔内圧補助機構の概略図 (正面). Schematic view of the front of the intra-abdominal pressure support mechanism.

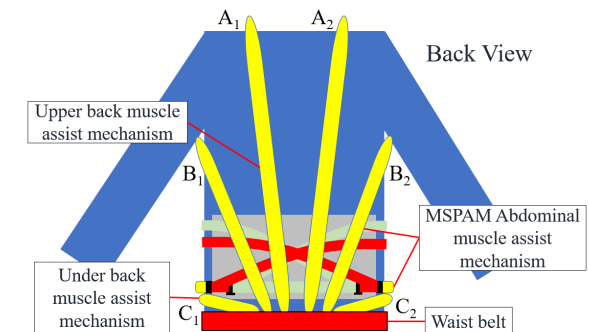


Fig. 6 腹腔内圧補助機構の概略図 (背面). Schematic view of the back of the intra-abdominal pressure support mechanism.

影響がないよう十分な休憩時間を設ける．作業終了後，心拍数，重心動揺距離，腹腔内圧値の3種類の値を測定し，アシストスーツの性能を評価する．各姿勢と作業の具体的な内容は Table.2，各値の測定方法については Table.3 に示す．

測定して得た各値をもとにそれぞれ，最小値，最大値，平均値，中央値，標準偏差を算出し，各パターンと比較，評価する．心拍数と重心動揺距離は装具を着用している場合は着用していない場合と比べ，どの程度心拍数と重心動揺距離が増加しているかを比較する．

腹腔内圧に関しては市販の腰椎コルセット着用時の腹腔内圧を測定しその値を基準値とする．そして「装具あり (非駆動)」と「装具あり (駆動)」がどの程度腰椎コルセット着用時の基準値に達しているかで評価する．

Table 2 各姿勢と作業内容. Each posture and work content.

作業姿勢	作業内容
中腰姿勢	被験者はテーブル上にある小さな対象物を皿から皿へと箸で移動させるいわゆる豆つかみを二分間行う．この際，被験者は膝を曲げないようにしながらアルミフレームにねじ止めを2分間行う．
平棚姿勢	被験者の目線の高さの位置にテープを張り，その高さから頭部が出ないようにしながらアルミフレームにねじ止めを2分間行う．
運搬姿勢	被験者の体重の約20%の重量物を床から持ち上げ5m先の机まで運ぶ．続いてスタート地点まで戻り，荷物を床に置く．これを5往復する．

Table 3 各値の測定方法. Method of measuring each value.

作業姿勢	作業内容
心拍数	パルスオキシメーターを人差し指に取り付け，そ15秒後に表示される心拍数を記録する．試験開始前に1回と各姿勢での試験の直後に測定する．
重心動揺距離	測定ボードの上に乗目目を閉じたまま30秒間直立し，この間の重心動揺距離を測定する．試験開始前に1回と各姿勢での試験の直後に測定する．
腹腔内圧	製作した腹腔内圧測定装置を腹部に取り付け，腰椎コルセット着用時，直立姿勢，中腰姿勢，平棚姿勢，運搬姿勢を再現してもらい測定する．

3.2 腹腔内圧測定装置

腹腔内圧を測定するにあたり，腹腔内圧測定装置を製作した．Fig.7 にその外観を，Fig.8 にシステムを示す．

腹腔内圧の測定には様々な方法が存在するが，侵襲性があり測定が困難なため，今回は腹部に設置したエアバッグを圧迫し，その圧力を腹腔内圧と定義する方式とした．

マイコンは Arduino Nano，センサは SparkFun 製

Qwiic-小型圧力センサを使用し I²C で通信する．エアバッグを圧力センサに接続し，圧力センサからの値をマイコンで読み取る．このシステムはセンサが最大 172.37kPa まで測定が可能であり，マイコンの分解能は 10bit であるため，0.17kPa の精度で測定可能である．



Fig. 7 腹腔内圧測定装置. Intra-abdominal pressure measuring device.

4. 結言

今回は腹腔内圧機構の従来のアシストスーツに腹腔内圧補助機構を追加し改良を行った．現在，評価試験を実施中であるため，評価試験で得た結果をもとに今後更に改良を行っていききたい．

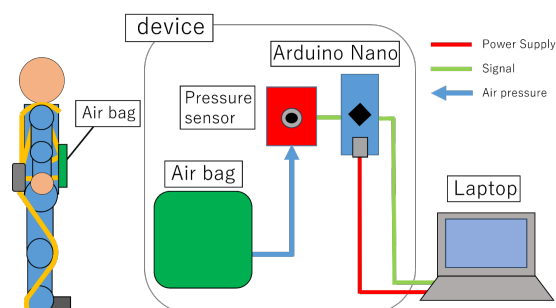


Fig. 8 腹腔内圧測定装置のシステム. System diagram of intra-abdominal pressure measuring device.

参考文献

- 1) 農林水産省: 農業労働力に関する統計 (2004)
- 2) 農林水産省大臣官房情報化: 食料・農林水産業・農産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 (3 もっと輝くために ～女性農業者を取り巻く課題と方策～ ア 女性が働きやすく、暮らしやすい農業・農村の環境整備 (2019)
- 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 (2022)
- 5) 農林水産省: 令和6年農業構造動態調査結果 (2024)
- 6) 農林水産省: 担い手への農地の利用集積の現状と課題 (2007)
- 7) 農林水産省: スマート農業をめぐる情勢について (2024)
- 8) K. Uchiyama, T. Ito and 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) 小林 宏: 人間を支援するロボット技術, 日本ゴム協会誌, **80-9**, 344/349 (2007)
- 10) 畠山和利, 松永俊樹, 巖見武裕, 大高稿兵, 佐々木研, 佐藤 峰善, 渡邊基起, 高橋祐介, 島田洋一: 腹腔内圧が体幹安定性に及ぼす影響次元体幹筋骨格モデルによるシミュレーション解析, 第50回日本理学療法学会大会(東京) (2015)
- 11) 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, 株式会社医道の日本社出版 (2002)