

研究結果の概要（平成 28～30 年度）

研究課題名：腰痛予防対策指針策定に向けた重量物取り扱い、
介護・看護作業における装着型ロボットの腰部負荷軽減効果および
作業省力化に関する研究

研究代表者

安部 哲哉

筑波大学医学医療系 整形外科 講師

【研究目的】

本研究では、労災に伴う腰痛による社会的損失を防ぐ更なる一手として、腰痛予防対策指針に「装着型ロボットの利用」という新項目を加えることを目標とし、装着型ロボットの腰部負担軽減効果を客観的に評価できる手法で検証することを目的とした。

【研究方法】

本研究では、「重量物取り扱い作業」及び「介護・看護作業」に対して、安全性検証としてロボット装着中と装着直後の効果と安全性に対する評価、探索的研究として使用前後に対する腰痛予防効果の定量的評価手法の検討、検証的研究として、ロボット装着群と非装着群に別けた比較試験による評価を実施していくことを計画した。

A. フィジビリティスタディ・安全性検証試験

B. 有効性に関する探索的研究（単群前後比較試験）

C. 有効性に関する検証的研究（並行群間試験）今年度は重量物の反復挙上動作

【「重量物取り扱い、看護・介護作業」に関するフィジビリティスタディ・安全性検証試験】（プロトコル A-1, A-2, A-3）

1. 重量物反復挙上動作

重量物は 12kg のペットボトルを梱包した持ち手付き段ボールとし、床から体幹伸展位となるまで挙上して、床に置くことを一定の速度で繰り返す作業の実験を行った（下左図）。挙上動作には stoop lifting 法を用い、動作中肘関節は伸展位を保持した。

9 症例に対して HAL 腰タイプ非装着下で行った後、5 分間の休憩後に装着下で行った。



2. ショベリング除雪反復動作

ショベルで雪を身長の 50%の高さを超える投擲動作を繰り返し行うことを運動課題とする除雪動作の実験を行った（上右図）。

3. 患者移乗介護動作

ベッド上で仰臥位となった模擬患者（60kg のダミー人形）を乗せたトランスファーマットレスを介護者 2 人で挙上することを運動課題とし、HAL®腰タイプ装着による効果を検証しようと試みたが、体幹の十分な屈曲から伸展動作のない本課題では HAL®腰タイプが有効に作用しないことが明らかとなったため（左下図）、約 60kg の人形を完全頸椎損傷患者のモデルとして、介助者 1 名がベッド上で坐位の患者を抱え上げる動作を運動課題に変更した（右下図）。



【「重量物取り扱い，看護・介護作業」に関する有効性に関する探索的研究】

単群前後比較試験

1. 重量物挙上反復動作（プロトコル B-1）

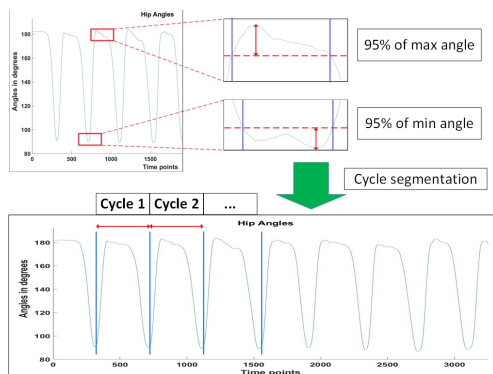
腰痛のない 25 歳から 45 歳までの健康成人ボランティア 20 名（男：女=13：7、平均年齢 31.5 歳）を対象とし、男性が 12kg、女性が 6kg のペットボトルを梱包した持ち手付き段ボールを重量物とし、床から体幹伸展位となるまで挙上して、床に置くことを一定の速度で繰り返す作業の実験を行った。挙上動作には Stoop lifting 法を用い、動作中肘関節は伸展位を保持した。

挙上動作反復時は、光学式モーションキャプチャーによる三次元動作解析装置（VICON MX、VICON 社 英国、T20s カメラ 16 台、100Hz）を用いて、股関節の角度を計測した。

マーカは、左右の肩峰、股関節回転中心、足関節外顆に貼付した。運動データは、股関節角度に基づいてサイクルを検出した（下図）。

a. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する運動学的研究

主評価項目は、最大作業回、最大作業時間及び腰部疲労度 VAS(Visual analogue scale) とし、副次評価項目は、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、平均伸展角速度、平均屈曲角速度、角度・角速度プロファイルとした。



反復挙上運動データにおけるサイクルの検出



重量物反復挙上動作

主評価項目は、最大作業回、最大作業時間及び腰部疲労度 VAS (Visual analogue scale)、副次評価項目は、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、平均伸展角速度、平均屈曲角速度、角度・角速度プロファイルとし、運動学的解析を行った。

a. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する運動学的研究と電気生理学的解析の研究

主評価項目は、重量物挙上において主要な役割を果たすと考えられる両側上腕二頭筋、広背筋、腰部脊柱起立筋、大殿筋、大腿四頭筋の筋シナジー評価とし、電気生理学的解析を行った。これらの主要な筋群の協調運動を 3 つのシナジーパターンで HAL®腰タイプ支援なしとあり、疲労なしとありの組み合わせ条件で解析した。

b. 疾患群に対する HAL®腰タイプ支援の評価に向けた新たなプロトコルに関する研究

加齢変性による慢性腰痛を呈した 60 歳代の成人男性ボランティア 1 例を対象とし、HAL®腰タイプを着用して平地周回の連続歩行運動を行った (1 回約 5 分)、次に HAL®腰タイプを着用して座位からの立ち上がり運動を行った (1 回約 5 分)。それを計 12 セッション行った。各運動前後で血圧・脈拍の測定を行い、運動後に自覚的四肢関節と腰部の疲労度 VAS を計測した。

主評価項目は、腰痛と四肢関節痛の VAS (Visual analogue scale) と、有害事象とした。

c. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する有限要素シミュレーションを用いた脊椎負荷の研究

70 歳代の高齢者女性を対象として術前の CT 画像を用いて、有限要素解析モデルを作成した。CT 画像の読み込みおよび STL ファイルの作成には Mimics (マテリアライズ社、ベルギー) と 3-matic (マテリアライズ社、ベルギー) を用いた。有限要素解析のソルバーは ANSYS (ANSYS 社、米国) を用い、全脊椎 CT から得られた DICOM データを Mimics で読み込み、頸椎、胸椎、腰椎、仙椎の各椎骨をセグメンテーションし、各々を 3 次元的な物体とするための穴埋め、およびスムージング処理を行った。次に、3-matic で STL 生成時に発生したスパイクノイズを除去し、上下椎体の面取り、椎間板を作成した。上下椎体と椎間板は、接面を共有した。ここでボリュームメッシュを作成した。ここまで作成したモデルを ANSYS で読み込み、椎体と椎間板の材料特性は椎体：密度 0.5g/cm³、ヤング率 3051MPa、ポアソン比 0.3、椎間板：密度 0.03g/cm³、ヤング率

10.35MPa、ポアソン比 0.4 とした。胸椎 T1～T10 は胸郭部分となり椎骨・椎間板のみからなるその他の部分より剛性が高いと考えられることから本モデル上では一体とみなした。外力は、T5 を作用点として斜め下前方（C7 椎間板平面に垂直な線から 24 度前方）へ向かう 120N の並進力として、線形モデルに基づくシミュレーションを行った。応力分布を表示して、高い負荷を受ける椎体および椎間板の部分について検討した。

2. ショベリング除雪反復動作(プロトコル B-2)

ショベリング除雪反復動作は 9 症例に対して雪上での評価を実施した。

【研究成果】

【フィジビリティスタディ・安全性検証試験】

(プロトコル A-1) : 重量物反復挙上動作

全例でプロトコルの実行は可能で、運動負荷時も血圧や脈拍は有意な上昇（収縮期血圧 40mmHg, 拡張期血圧 20mmHg 以上、脈拍 140/分）を認めず、有害事象の発生はなかった。

(プロトコル A-2) : ショベリング除雪反復動作

4 症例に対して HAL 腰タイプ非装着下で行った後、5 分間の休憩後に装着下で行ったが、全例でプロトコルの実行は可能で、運動負荷時も血圧と脈拍の有意な上昇は認めず、有害事象の発生はなかった。

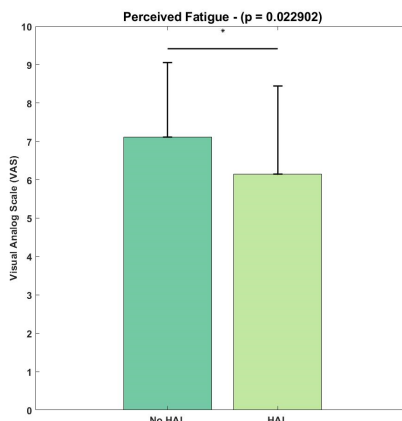
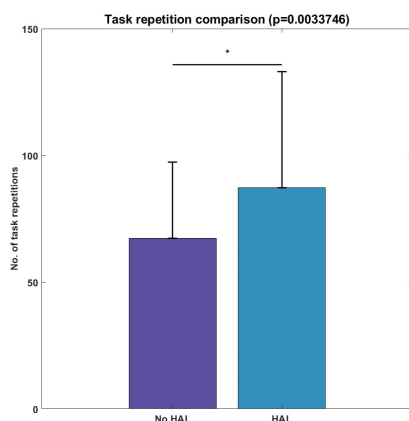
(プロトコル A-3) : 患者移乗介護動作

5 例の検証結果で、血圧収縮期血圧は HAL®腰タイプ支援の有無に関わらず作業前後に 40mmHg 以上の上昇はなく、拡張期血圧も 20mmHg 以上の上昇を認めなかった。挙上作業前後の脈拍は全例で 140/分を超えることはなく、有害事象は全例で認めなかった。また、健康成人ボランティア男女 19 例（男 16 : 女 3）のうち男性 14 例においては、HAL®腰タイプ支援の有無に関わらず課題を実施できた。4 例（男 3 : 女 1）においては、HAL®腰タイプ非支援下にはダミー人形を抱え上げることができなかったが、HAL®腰タイプ支援下には抱え上げることができた。女性 1 例でのみ HAL®腰タイプ支援の有無に関わらず課題が実施できなかった。

【「重量物取り扱い、看護・介護作業」に関する有効性に関する探索的研究】

単群前後比較試験

1. 重量物挙上反復動作 (プロトコル B-1)



反復挙上回数 左：HAL 無、右：HAL

有腰部疲労度 VAS 左：HAL 無、右：HAL 有

重量物反復挙上動作における HAL®腰タイプ支援で 13%の腰部負荷軽減と 130%の作業能力の向上効果が得られること明らかとなった。

a. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する運動学的研究と電気生理学的解析の研究

HAL®腰タイプ支援により、股関節の最大屈曲角度が有意に大きくなり、両側上腕二頭筋、広背筋・腰部脊柱起立筋、大殿筋の複数筋協調運動（シナジーパターン）は HAL®腰タイプ支援なしとありで異なること、HAL®腰タイプ支援ありでは疲労してもシナジーパターンが変化しにくいことが明らかとなった。

b. 疾患群に対する HAL®腰タイプ支援の評価に向けた新たなプロトコルに関する研究

本研究において、HAL®腰タイプを用いた運動療法によって、課題後の収縮期血圧が 40mmHg 以上の上昇や拡張期血圧 20mmHg 以上の上昇は認めず、脈拍数も 140/分を超えることはなかった。また、HAL®腰タイプ装着による腰痛の出現はなかった。運動療法後の四肢関節、腰部の疲労度は開始前に比べ各セッションでわずかな増加にとどまった。本プロトコルの 12 セッションは遂行可能で、有害事象を認めなかった。腰痛 VAS は運動療法開始前 46mm、終了時は 5mm であった。四肢関節痛 VAS は開始前 4mm で、終了時 3mm であった。以上の結果から、HAL®腰タイプ支援の効果を評価できるプロトコルであると考えた。

c. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する有限要素シミュレーションを用いた脊椎負荷の研究

矢状面の脊柱変形を有する高齢者においては、仙椎翼で最大応力が発生し、冠状面、矢状面の両方で変形が発生することが明らかとなった。

2. ショベリング除雪反復動作

HAL 支援なしで回数が平均 50 回、時間が平均 145 秒、距離が平均 9.6m であったのに対して、HAL 支援ありでは回数が平均 144 回、時間が平均 366 秒、距離が平均 35.4m と、それぞれ 2.9 倍、2.5 倍、3.7 倍の向上を認めた（グラフ 1）。また、1 分間あたりの回数は、HAL 支援なしが 21.4 回、HAL 支援ありで 24.1 回と 1.1 倍に向上した。腰痛疲労度 VAS は、HAL 支援なしが平均 75mm であったのに対して、HAL 支援ありでは平均 39mm と半分に軽減された（グラフ 2）。

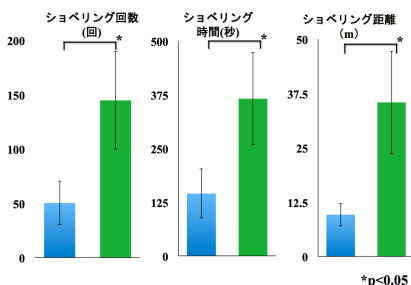
以上の結果から、腰部負荷のかかる重量物挙上動作やショベリング除雪反復動作におい

て、装着型ロボット HAL 腰タイプ支援による腰部負荷軽減効果とともに作業回数、作業量の向上が得られることが明らかとなった。

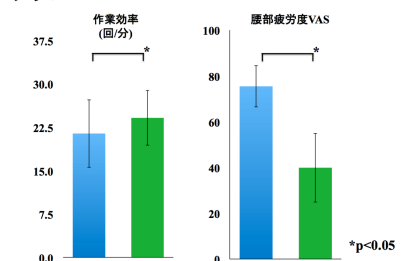


岩手医科大学倫理委員会承認

グラフ1



グラフ2



【結論】

平成28から30年度の研究で、重量物の反復挙上動作における HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作プロトコルの実行可能性と安全性評価から腰部負荷軽減効果や作業省力化の効果を検証するための有用なプロトコルを確立できた。また単群前後比較試験を実施し、運動学的および電気生理学的解析を進めた結果、装着型ロボット (HAL®腰タイプ) 支援による股関節屈曲角度や両側上腕二頭筋、広背筋・腰部脊柱起立筋、大殿筋、大腿四頭筋の筋シナジー (複合筋協調運動) 変化や疲労性変化の特徴を捉えることができた。

重量物の反復挙上動作や除雪動作は、HAL®腰タイプ支援により最大作業量は130%に増加し、作業の省力化に寄与するとともに、13%の腰部負荷の軽減効果を認めた。バイオマーカーや有限要素シミュレーションの結果から、装着型ロボット支援を若年から高齢者へ幅広く適応する際に、個々の症例における有用な事前評価法となる可能性があることが分かった。

研究分担者：

- ・ 筑波大学医学医療系、筑波大学附属病院
 - 山崎正志 (整形外科 教授)
 - 國府田正雄 (整形外科 准教授)
 - 三浦紘世 (整形外科 病院講師)
 - 丸島愛樹 (救急・集中治療部、脳神経外科 講師)
 - 松村明 (脳神経外科 教授)
 - 羽田康司 (整形外科、リハビリテーション部 教授)
 - 清水如代 (リハビリテーション部 病院講師)
 - 久保田茂希 (運動器再生医療学講座 助教)
 - 門根秀樹 (未来医工融合センター 助教)
- ・ 筑波大学サイバニクス研究センター
 - 河本浩明 (助教)