

労災疾病臨床研究事業費補助金

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担軽減効果および作業省力化に関する研究

平成30年度 総括研究報告書

研究代表者 安部 哲哉

平成31（2019）年 3月

目 次

I. 総括研究報告

- 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担軽減効果および作業省力化に関する研究 ----- 1
研究代表者 安部哲哉

II. 分担研究報告

1. 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 ----- 14
分担研究者 三浦 紘世、河本 浩明
(資料1)
2. 重量物挙上動作に対するHAL腰タイプ®支援に関する電気生理学的解析の研究 ----- 22
分担研究者 門根 秀樹、久保田 茂希
(資料2)
3. 重量物挙上動作に対するHAL腰タイプ®支援に関する複数筋協調運動の解析の研究 ----- 31
分担研究者 清水 如代、羽田 康司
(資料3)
4. 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 ----- 40
分担研究者 國府田正雄、山崎 正志
(資料4)
5. 重量物取り扱い動作に対する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 ----- 46
分担研究者 丸島愛樹、松村 明
(資料5)

III. 研究成果の刊行に関する一覧表 ----- 53

労災疾病臨床研究事業費補助金

総括研究報告書

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

研究要旨

平成 30 年度は、重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する単群前後比較試験を合計 20 例に実施し、有害事象の発生はなく、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した。また、股関節の最大屈曲角度が HAL®腰タイプ支援下で有意に減少し、伸展および屈曲角速度が疲労により変化するという運動学的特徴を明らかにした（資料 1：分担研究者 三浦紘世，河本浩明）。

重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する電気生理学的解析では、HAL®腰タイプの装着が挙上動作でと降下動作のいずれでも広背筋や脊柱起立筋の活動量を軽減させ、腰部負荷軽減の効果を示すことを明らかにした（資料 2：分担研究者 門根秀樹，久保田茂希）。

さらに重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する複数筋協調運動の解析では、両側大殿筋と脊柱起立筋の同時活動は挙上運動の開始から徐々に活動が高まり、25%程度のタイミングでピークに至った後、挙上運動の終了時には活動が低下し、下降時には活動が停止すること、両側上腕二頭筋は挙上終了から降下に入るタイミングで活動すること、両側広背筋は挙上開始でピークに至り、その後サイクルを通して活動が低く、降下終了時から次のサイクルの挙上開始に移るタイミングで再び活動が高まること が分かった（資料 3：分担研究者 清水如代，羽田 康司）。

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では、約 6kg のペットボトルが梱包された持ち手付きダンボールを重量物とし、体幹・股関節・膝関節を同時に伸展して挙上する Squat 法による 1 分 15 回の一定のペースで 3 分間の重量物挙上動作は、安全に実施可能であった。今後 20 歳から 65 歳未満の運動器不安定症と診断される疾患群に対する本プロトコルの安全性を検証し、さらに HAL®腰タイプ支援による腰部負荷の軽減効果や腰痛の治療効果を明らかにしていくことができると考えた（資料 4：分担研究者 國府田正雄，山崎正志）。

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では、高齢者は、若年者に比べて成人脊柱変形を伴うことが多く、本研究でのシミュレーションでは、健常者では発生しないと考えられる側方への負荷が発生することが明らかとなった。HAL®腰タイプを用いて高齢者の作業支援を行う場合には、若年健常者とは異なる負荷が内部的に発生することが考えられ、被験者実験を行う前の脊椎・椎間板への負荷をシミュレーションとして有用であると考えられた（資料 5：丸島愛樹，松村 明）。

当報告書では、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平成 30 年度の研究実施内容と結果の概要を報告し、その他の詳細は研究分担者の報告書（資料 1－ 5）を参照とする。

A. 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、まず始めに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。

我々は昨年度から現在までに健常ボランティアにおける重量物挙上反復動作課題で、HAL®腰タイプ支援による作業効率の向上や腰部疲労度の軽減といった効果を明らかにした。また、腰部への負荷が非常に大きな雪かき反復動作課題においても、HAL®腰タイプ装着による腰部疲労度の軽減効果と作業効率の向上が得られることを報告してきた。

今年度は重量物の反復挙上動作におけるHAL®腰タイプ支援の有効性を運動学的、電気生理学的に明らかにすることを目標とし、研究を進めたので報告する。

【研究デザイン】

- A. H28 年度：フィージビリティスタディ・安全性検証試験
- B. H29 年度：有効性に関する探索的研究（単群前後比較試験）
- C. H30 年度：有効性に関する検証的研究（並行群間試験）

B. 研究方法

【「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】

重量物挙上反復動作に関する単群前後比較試験（プロトコル B）

対象：

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）を対象とした。

安全性検証の観点から、治療中の循環器呼吸器疾患や脊椎関節手術歴がないこと、筋骨格系に障害のないことを条件とした。

方法：

重量物挙上動作に対する研究では、重量物を男性が 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。一連の作業を合計 20 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（下図）。

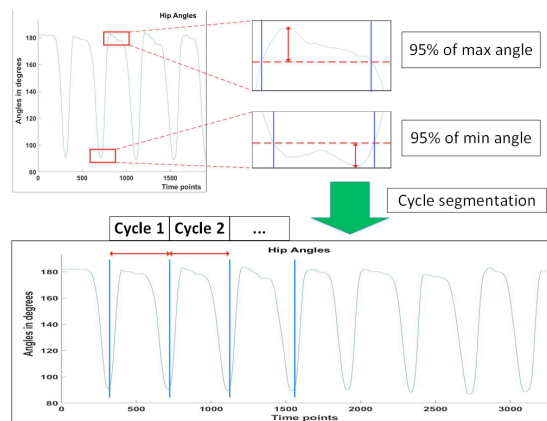


重量物反復挙上動作

一連の動作課題を HAL®腰タイプ非支援下で行ってもらった後に、5 分間の休憩で血圧ならびに脈拍が試験前の状態に回復したことを確認してから、HAL®腰タイプ支援下を実施した。

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。

マーカーは、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）。



反復挙上運動データにおけるサイクルの検出

1. 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

重量物の反復挙上動作において検出されたそれぞれのサイクルにおいて 0-100% で時間を正規化した。また、各サイクル内での股関節最大伸展角度、屈曲角度を計算したのち、サイクル間平均を、疲労無し（開始直後の安定した 3 サイクル）および疲労有り（終了直前の 3 サイクル）で、算出した。開始直後の安定した 3 サイクルの検出

は、開始から全サイクル数の 20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大伸展角速度のピーク値の変動が最小となる連続する 3 サイクルとして求めた。(下式)

$$i_{Non-Fatigue} = \operatorname{argmin}_i (\Theta_i^U + \Theta_i^D + \Omega_i^U + \Omega_i^D) \quad (1)$$

$$\Theta_i^U = |\theta_i^U - \theta_{i+1}^U| + |\theta_i^U - \theta_{i+2}^U| + |\theta_{i+1}^U - \theta_{i+2}^U| \quad (2)$$

$$\Theta_i^D = |\theta_i^D - \theta_{i+1}^D| + |\theta_i^D - \theta_{i+2}^D| + |\theta_{i+1}^D - \theta_{i+2}^D| \quad (3)$$

$$\Omega_i^U = |\omega_i^U - \omega_{i+1}^U| + |\omega_i^U - \omega_{i+2}^U| + |\omega_{i+1}^U - \omega_{i+2}^U| \quad (4)$$

$$\Omega_i^D = |\omega_i^D - \omega_{i+1}^D| + |\omega_i^D - \omega_{i+2}^D| + |\omega_{i+1}^D - \omega_{i+2}^D| \quad (5)$$

反復挙上運動データにおける安定サイクルの検出

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)とした。

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。

2. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する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、大腿四頭筋の筋電図評価とした。導出部位は、アルコール綿で清拭してから、筋の線維方向に電極を貼付した。無線表面筋電図計測システム (Delsys Trigno Lab、Delsys 社 米国、16 チャンネル、2000Hz) を用いてモーションキャプチャーと同期して筋活動を計測した。筋電図は、左右の上腕二頭筋、広背筋、脊柱起立筋、大殿筋から取得した。重量物の反復挙上動作において検出されたそれぞれのサイクルにおいて 0-100%で時間を正規化した。また、各サイクル内での股関節最大伸展角度、屈曲角度、各筋の活動度 (RMS、Room Mean Square) を計算した後、サイクル間平均を疲労無し (開始直後の安定した 3 サイクル) および疲労有り (終了直前の 3 サイクル) で算出した。開始直後の安定した 3 サイクルの検出は、開始から全サイクル数の 20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大伸展角速度のピーク値の変動が最小となる連続する 3 サイクルとして求めた。

副次評価項目は、筋シナジー解析による独立筋シナジーの数とした。計測した 8 個の筋の活動パターンにおける独立筋シナジーの数の算出には、MATLAB (Mathworks 社、アメリカ) を用いて、1 から 5 個の独立筋シナジーを仮定した上で、それぞれについて筋シナジーおよびそれらの活性化

パターンを計算し、それによって復元した筋活動パターンともとのパターンとの類似度を VAF

(Variability Accounted For、下式) によって計算した。VAF75%以上を閾値としてこれを満たすのに必要な筋シナジーの数について検討した。下式において X はもとの筋活動パターン、Y は復元された筋活動パターン、n は計測データ数、m は計測した筋数である。

$$VAF = 100 \cdot \left(\frac{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm} \cdot Y_{nm})^2}{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm}^2) \cdot (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Y_{nm}^2)} \right)$$

3. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する複数筋協調運動の解析の研究

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た。導出部位は、アルコール綿で清拭してから、筋の線維方向に電極を貼付した。無線表面筋電図計測システム (Delsys Trigno Lab、Delsys 社 米国、16 チャンネル、2000Hz) を用いてモーションキャプチャーと同期して筋活動を計測した。筋電図は、左右の上腕二頭筋、広背筋、脊柱起立筋、大殿筋から取得した。各筋の活動度 (RMS、Room Mean Square) を計算したのち、検出されたそれぞれのサイクルにおいて 0-100%で時間を正規化して、疲労無し (開始直後の安定した 3 サイクル) および疲労有り (終了直前の 3 サイクル) で、それぞれで筋シナジーを算出した (MATLAB、Mathworkds 社、米国)。開始直後の安定した 3 サイクルの検出は、開始から全サイクル数の 20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大伸展角速度のピーク値の変動が最小となる連続する 3 サイクルとして求めた。筋シナジー数は下式で定義される VAF>75%となる最小の数とした。

筋シナジー解析では、各筋の活動度のベクトルである筋シナジー (シナジーパターン) と各シナジーの活性度の時系列 (時系列パターン) が計算される。3 つのシナジーパターン全体、それぞれのシナジーパターンと時系列パターンの類似性を比較した。比較は、HAL なし、疲労なしを基準条件とし、これとの類似度を内積で計算した。また、シナジーパターンと時系列パターンの貢献度を評価するため、シナジーパターンを固定して時

系列パターンを再度最適化した場合と、時系列パターンを固定してシナジーパターンを再度最適化した場合で、上記 VAF を計算して比較した。

4. 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

1. 対象

被験者は 60 歳代の成人男性ボランティア 1 例とした。加齢変性による慢性腰痛を呈していた。身長は 160cm、体重は 54kg であった。本研究について、事前に十分な説明を行い、同意を得てから実施した。

2. 検討項目

運動療法は、HAL®腰タイプを着用して平地周囲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背部の疲労度 VAS を計測した。また、日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会が策定したリハビリテーション医療における安全管理・推進のためのガイドラインで示されているリハビリテーションの中止基準を遵守した[6]。

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。

5. 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

1. 対象

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。

2. ソフトウェア

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）を用いた。

3. 方法

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。ここでボリウ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。

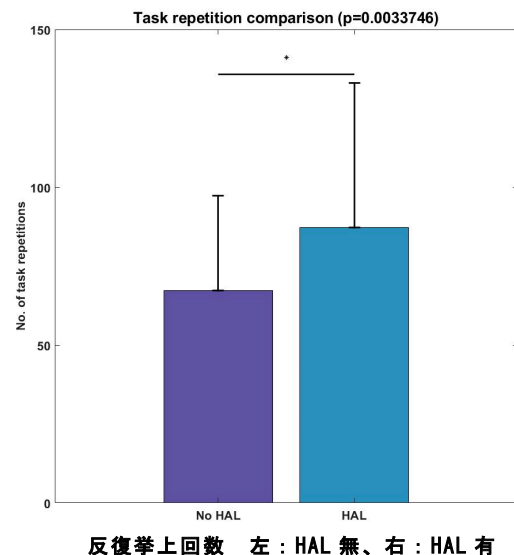
C. 結果

1. 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

全 20 例において有害事象の発生はなく、課題を完遂できた。

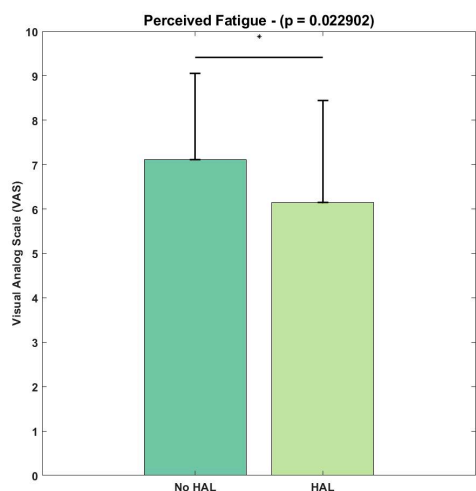
1) 1 分間 15 回ペースでの最大作業回数

HAL®腰タイプ非支援下の最大作業回数は平均 67.3 回であったのに対して、HAL®腰タイプ支援下の最大作業回数は平均 87.2 回で、約 1.3 倍の有意な作業回数の向上を認めた。（ $p < 0.01$ ，下図）



2) 腰部疲労度 VAS

HAL®腰タイプ非支援下の腰部疲労度 VAS は平均 71mm であったのに対して、HAL®腰タイプ支援下の腰部疲労度 VAS は平均 62mm で、腰部負荷は 87% に軽減した。（ $p < 0.05$ ，下図）



腰部疲労度 VAS 左：HAL 無、右：HAL 有

以上の結果から、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。

2. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する電気生理学的解析の研究

HAL®腰タイプ支援なしとありの重量物挙上動作における、疲労なし・ありの組み合わせ計 4 条件での筋電図変化を示す。以下で、

- ①HAL®腰タイプ支援なし疲労なし
 - ②HAL®腰タイプ支援なし疲労あり
 - ③HAL®腰タイプ支援あり疲労なし
 - ④HAL®腰タイプ支援あり疲労あり
- とする。

右広背筋、左広背筋、右脊柱起立筋において、HAL®腰タイプ支援の条件による有意差を認めた。右広背筋は、① 3.5×10^{-2} mV ② 4.0×10^{-2} mV ③ 2.9×10^{-2} mV ④ 2.9×10^{-2} mV であり HAL 装着下で活動量が有意に少なかった ($p < 0.05$ 、下図、右表)。左広背筋は、① 3.3×10^{-2} mV ② 3.6×10^{-2} mV ③ 2.6×10^{-2} mV ④ 3.0×10^{-2} mV であり HAL 装着下で活動量が有意に少なかった ($p < 0.05$ 、下図、右表)。右脊柱起立筋は、① 2.5×10^{-2} mV ② 2.6×10^{-2} mV ③ 2.1×10^{-2} mV ④ 2.1×10^{-2} mV であり、HAL 装着下で活動量が有意に少なかった ($p < 0.05$ 、右表)。

HAL 有無、疲労

Muscles	Condition	HAL	Fatigue	HAL and Fatigue
BB Right		0.6002	0.1947	<u>0.0586</u>
BB Left		0.8117	0.3675	0.3172
LD Right		0.0465	0.2876	0.0477
LD Left		0.0232	0.1121	0.4223
ES Right		0.0353	0.9282	0.7894
ES Left		0.9113	0.7881	0.5426
GM Right		0.1538	0.0140	0.8872
GM Left		<u>0.0528</u>	0.0211	0.8808

有無、混合条件の分散分析による p 値

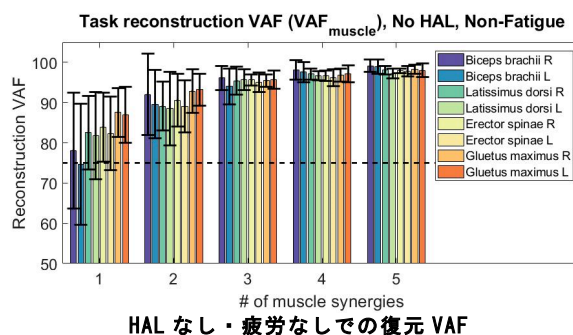
また、右大殿筋および左大殿筋において疲労条件による有意差を認めた。右大殿筋は、① 1.8×10^{-2} mV ② 2.2×10^{-2} mV ③ 1.5×10^{-2} mV ④ 1.9×10^{-2} mV であり疲労下で活動量が有意に多かった

($p < 0.05$ 、左図、上表)。左大殿筋は、① 1.5×10^{-2} mV ② 1.7×10^{-2} mV ③ 1.1×10^{-2} mV ④ 1.3×10^{-2} mV であり疲労下で活動量が有意に多かった ($p < 0.05$ 、左図、上表)。

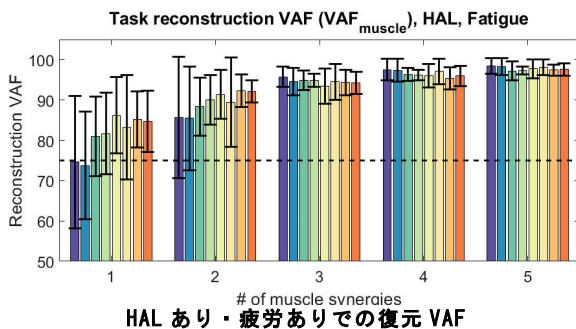
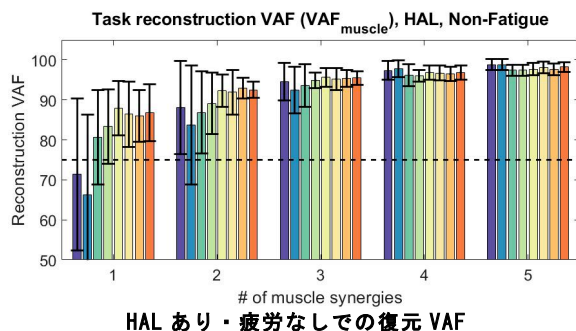
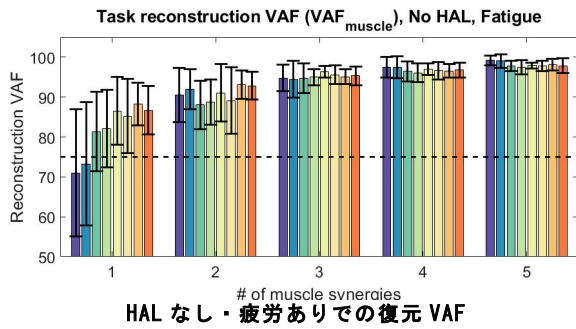
また、右広背筋においては、HAL 条件と疲労条件の相互作用を認めた ($p < 0.05$ 、上表)。

2) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における独立筋シナジー数の評価

筋シナジー数を 1 から 5 と仮定して算出した場合の VAF を下図に示す。シナジー数 1 の場合、HAL®腰タイプ支援の有無・疲労有無の組み合わせ 4 条件のほとんどで、上腕二頭筋の復元 VAF が 75% にいたらなかった。シナジー数 2 の場合、HAL 有りにおいて上腕二頭筋の復元 VAF は平均 75% を上回ったものの、標準偏差の下限においては、75%を下回った。シナジー数 3 の場合、全条件において平均値、標準偏差の下限とも 75%を上回った。



HAL なし・疲労なしでの復元 VAF



2) 有害事象

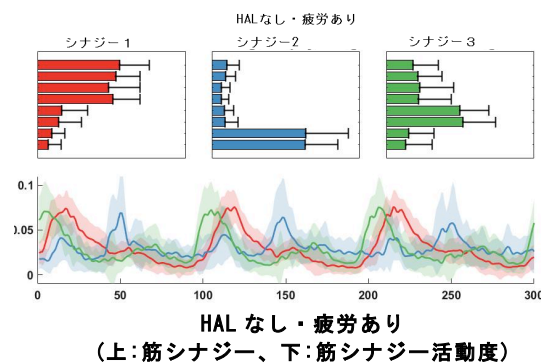
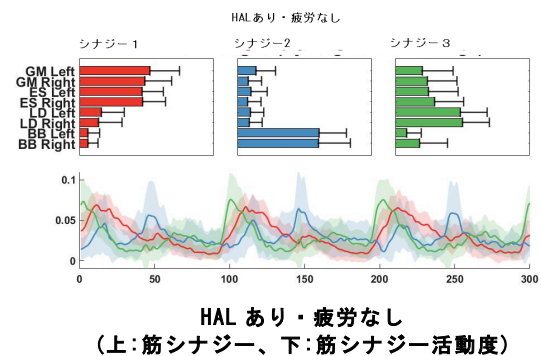
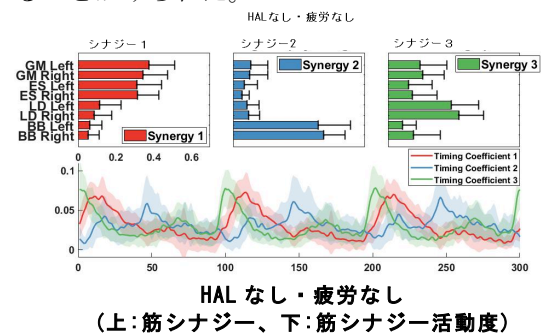
有害事象の発生はなく、全例で課題は完遂できた。

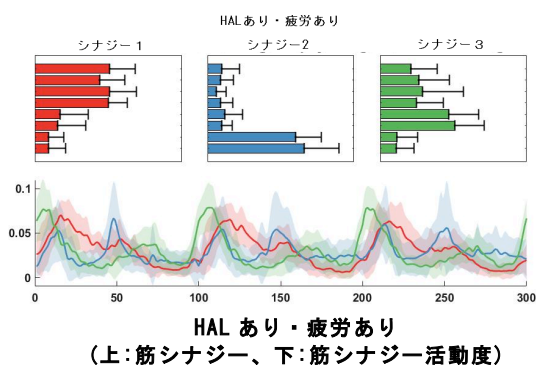
3. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する複数筋協調運動の解析の研究

1) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における筋シナジーと活動パターン

全例 VAF の平均、分散の下限が 75%以上となる最小の筋シナジー数は 3 であった。HAL®腰タイプ支援なしとありおよび、疲労なし・ありの組み合わせ 4 条件での重量物挙上動作における代表症例の筋シナジーを図に示す (右図)。シナジー 1 (赤) は両側大殿筋と脊柱起立筋の同時活動を主として含んでおり、シナジー 2 (青) は両側上腕二頭筋、シナジー 3 (緑) は両側広背筋の活動を主として含んでいた。この傾向は 4 つの条件に共通して観測された。また時系列パターン 1 (赤) は、挙上運動の開始から徐々に活動が高まって、

25%程度のタイミングでピークに至ったのち、挙上運動の終了時には活動が低下し、下降時には活動がみられなかった。時系列パターン 2 (青) は、サイクルの 50%前後のタイミングで活動がみられた。すなわち、挙上終了から降下に入るタイミングで活動がみられた。時系列パターン 3 (緑) は、挙上開始でピークに至り、その後サイクルを通して活動が低く、降下終了時から次のサイクルの挙上開始に移るタイミングで再度活動が高まることがみられた。

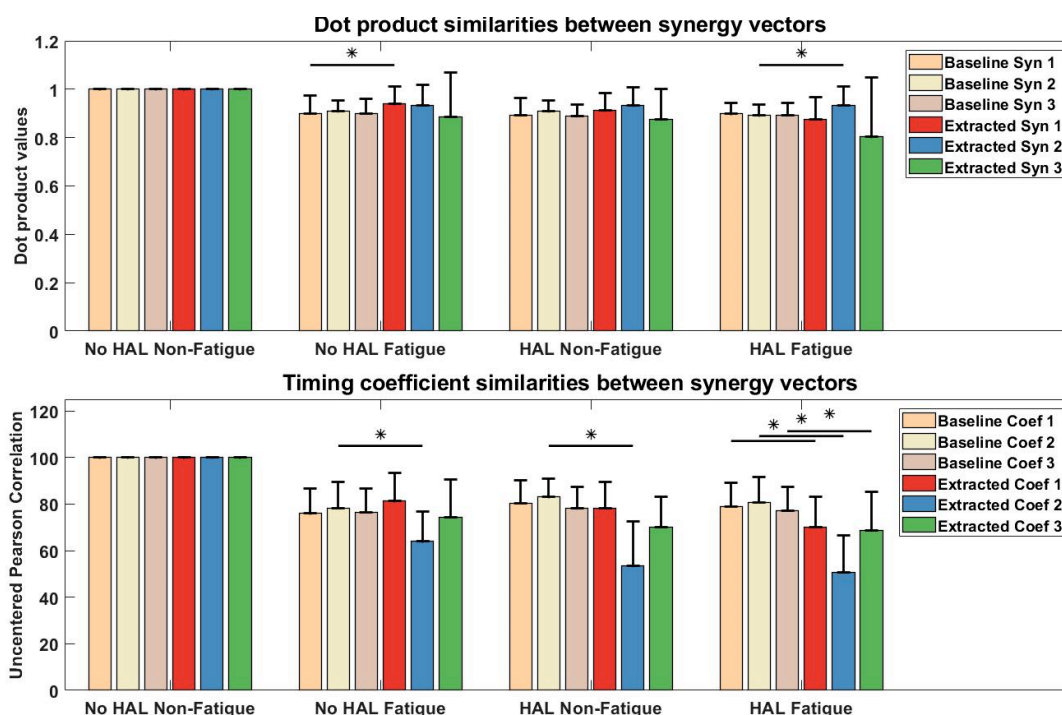




のシナジー 2 でランダムに入れ替えたパターンよりも基準パターンとの類似度が高かった (下図)。一方、個別の時系列パターンにおいては、HAL なし・疲労ありのシナジー 2、HAL あり・疲労なしのシナジー 2、HAL あり・疲労ありの全 3 シナジーにおいて、ランダムに入れ替えたパターンよりも基準パターンとの類似度が有意に低かった ($p < 0.05$)。

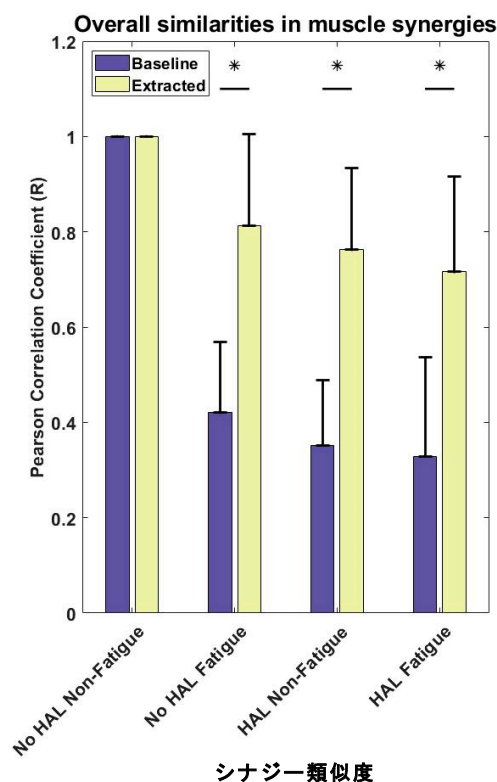
2) HAL*腰タイプ支援による重量物挙上動作における筋シナジーの類似度評価

HAL なし・疲労なしを基準 (Baseline) として、基準パターンと HAL なし・疲労あり、HAL あり・疲労なし、HAL あり・疲労ありの 3 条件でのシナジーパターンとの類似度を示す (右図)。基準パターンとの類似度は、HAL なし・疲労ありが最も高く、HAL あり・疲労ありが最も低かった。HAL により類似度は低下し、疲労によっても低下した。一方で、基準パターンをランダムに入れ替えて生成されたシナジーパターンよりは全 3 条件で、基準パターンとの類似度が有意に高いことも



認められ ($p < 0.05$)、上記の差異は基準パターンからの微小な変化として生じていた。

また、個別のシナジーパターンにおいては、HAL なし・疲労ありのシナジー 1、HAL あり・疲労あり



3) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作におけるシナジーパターンおよび時系列パターンの寄与度評価

下図に、シナジーパターンを固定して時系列パターンを再度最適化した場合 (Fixed Weights 緑) と、時系列パターンを固定してシナジーパターンを再度最適化した場合 (Fixed Timings、薄緑) で、上記 VAF を計算して比較した。評価対象としたすべての筋において、シナジーパターンを固定した場合の方が、復元後の VAF が有意に高かった ($p < 0.05$)。

4) 有害事象

有害事象の発生はなく、全例で課題は完遂できた。

4. 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

1) 安全性の検証

本被験者において、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。

2) 有害事象

本プロトコルで定めた運動療法を 12 セッション遂行可能であった。有害事象を認めなかった。

3) 腰痛 VAS

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。HAL®腰タイプ支援下で腰痛軽減が生じたことから、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。

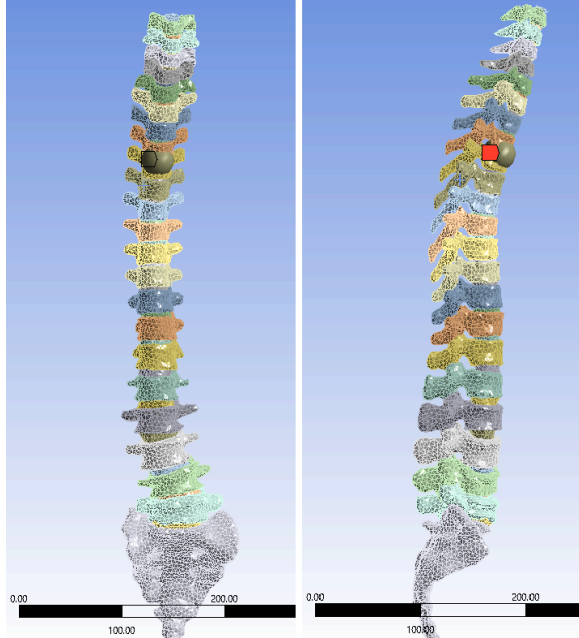
表 1 各セッション前後での血圧と脈拍

	収縮期血圧		拡張期血圧		脈拍	
	pre	post	pre	post	pre	post
1	150	148	80	78	70	68
2	144	144	64	66	80	82
3	134	138	77	70	68	72
4	144	150	78	70	72	66
5	146	148	64	66	64	70
6	140	144	70	72	68	70
7	140	142	64	66	60	64
8	140	138	78	70	62	64
9	134	138	60	68	64	70
10	138	136	66	64	80	68
11	140	142	68	68	64	68
12	134	132	70	70	70	68

表 2 各セッション前後での腰部と四肢関節疲労度 VAS

	腰部疲労 VAS		四肢疲労 VAS	
	pre	post	pre	post
1	9	16	38	48
2	6	4	40	42
3	9	15	31	38
4	7	9	37	42
5	9	12	33	36
6	5	5	33	32
7	7	6	25	35
8	5	4	29	34
9	5	7	20	25
10	8	3	17	17
11	2	3	12	12
12	3	2	7	4

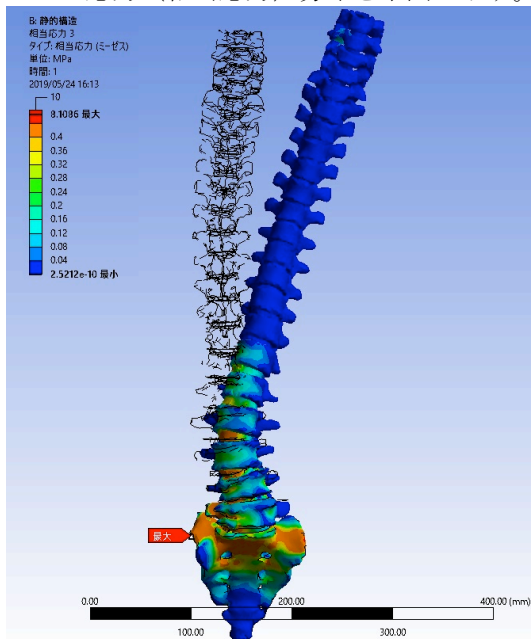
5. 重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する有限要素シミュレーションを用いた脊椎負荷の研究



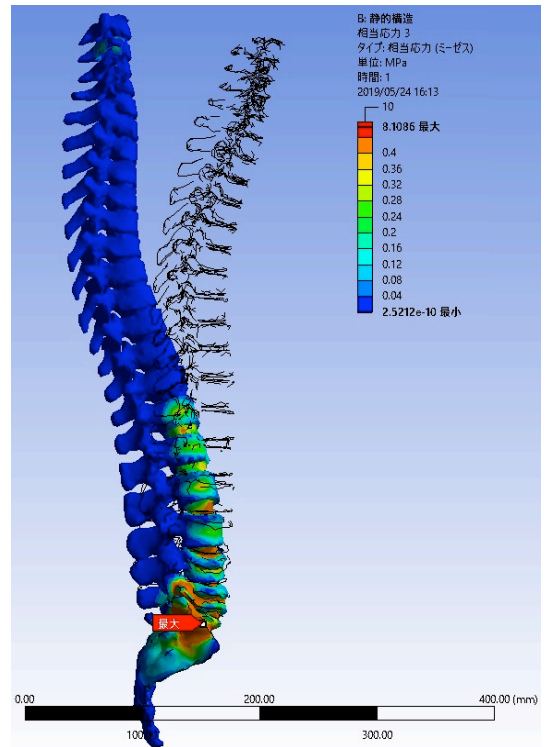
全脊椎有限要素解析モデル 左：冠状面、右：矢状面

作成した全脊椎の有限要素解析モデルを上図に示す。

仙椎部を固定端として、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 の並進力を負荷した場合のミーゼス応力 (相当応力) 分布を下図に示す。

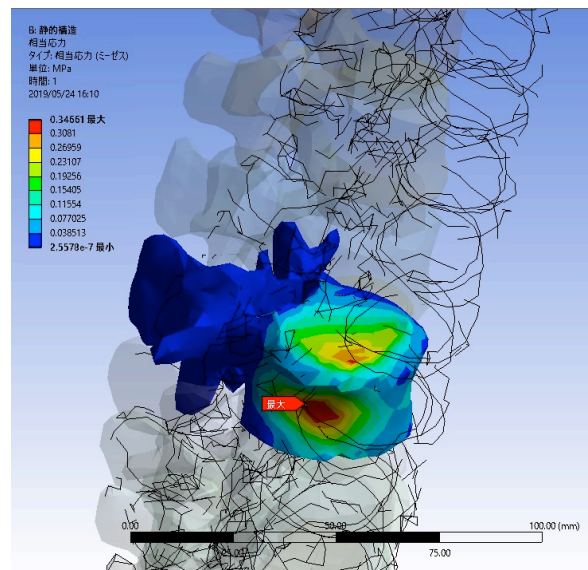


外力負荷時のミーゼス応力分布：冠状面



外力負荷時のミーゼス応力分布：矢状面

本条件においては、仙椎翼で最大応力が発生した。冠状面、矢状面の両方で変形が発生した。また、同様の境界条件における椎骨ごとの応力解析の例として、L2 のみを表示した図を下に示す。椎骨単位では、椎体の中央部で最大応力が発生した。



外力負荷時のミーゼス応力分布：L2

D. 考察

重量物挙上動作における実験の安全性検証および探索的研究の結果からは、装着型ロボットHAL®腰タイプ支援による運動学的特徴を評価し、作業省力化や腰部負荷軽減効果を電気生理学的に評価することができた。さらに、疾患群に適応できるプロトコル案を作成し、その安全性を検証することができた。また、脊柱変形を伴うことが少なくない高齢者の実験やHAL®腰タイプ支援を行う前に、脊椎・椎間板への負荷を検討するために有限要素シミュレーションが有用であることが明らかとなった。

特異的・非特異的腰痛患者などの疾患群にHAL®腰タイプを用いた運動療法を適応する前に有限要素解析や本研究のプロトコルによる安全性を確認した後に、さらにHAL®腰タイプを用いた運動療法を真の効果や有効性を明らかにすることを目標とし、研究を進めて行きたい。

E. 結論

重量物挙上動作におけるHAL®腰タイプの安全性検証および探索的研究の結果から、HAL®腰タイプ支援による作業省力化や腰部負荷軽減効果を運動学的、電気生理学的に評価した。また、疾患群に対するHAL®腰タイプ支援の安全と有効性を検証するためのプロトコルが確立できた。

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
2. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J Spinal Cord Med*. 2018 Oct 18:1-9. doi:

10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]

3. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS One*. 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Matak Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial

- case report indicating its safety and feasibility. *J Clin Neurosci*. 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. *Front Neurosci*. 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
 9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. *J Spinal Cord Med*. 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. *整形外科* 2018, 69:628-634.
 11. 小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. *関東整災誌* 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®)法の開発. *関節外科* 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太郎, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用. *関節外科* 2018, 37:90-93.
 1. ボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019. シンポジウム
 2. 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的变化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019.
 3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的评价. 三浦紘世, 門根秀樹, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 53 回日本脊髄障害医学会 (愛知), 11 月, 2018.
 4. 腰部支援用 HAL を用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的评价. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 國府田 正雄, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストラメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的评价. 三

- 浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Mataka K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hirosaki, Japan, Aug 2018.
 12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.
 15. 久保田茂希, 安部哲哉, 清水如代, 門根秀樹, 船山徹, 國府田正雄, 羽田康司, 菅谷 久, 吉岡友和, 山海嘉之, 山崎正志. 重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療. 第 91 回日本整形外科学会学術総会 (神戸)), 5 月, 2018.
 16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行. 清水如代, 門根秀樹, 久保田茂希, 安部哲哉, 上野友之, 羽田康司, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 21. 頸椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太朗, 清水如代, 羽田康治, 野口裕史, 船山 徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井 賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

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

研究分担者

三浦 紘世 筑波大学附属病院 整形外科 病院講師
河本 浩明 筑波大学システム情報工系 サイバニクス研究センター 准教授

研究要旨

本年度は、健常ボランティア男女 20 名（男：女＝13：7、平均年齢 31.5 歳）を対象として装着型ロボット HAL[®]腰タイプを用いた重量物の反復挙上動作に対する前後比較試験の運動学的研究を進めた。

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) とした。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。

HAL[®]腰タイプ非支援下の最大作業回数は平均 67.3 回、腰部疲労度 VAS は平均 71mm であったのに対して、HAL[®]腰タイプ支援下はそれぞれ平均 87.2 回、平均 62mm であった。

股関節角速度のプロファイルは、挙上時はほぼ中間時点において最大角速度に至る加速・減速がほぼ対称なパターンを示したのに対し、下降時は 50%以下の時点において最大角速度に至りその後緩やかに減速しており、挙上時と下降時で異なる加減速パターンを示した。最大伸展角度は、HAL 無/疲労無、HAL 無/疲労有、HAL 有/疲労無、HAL 有/疲労有の各条件で、平均 171.4°、171.2°、170.5°、168°であり、有意差を認めなかったが、最大屈曲角度はそれぞれ平均 102.6°、101.9°、96.7°、95.6°であり、HAL[®]腰タイプ支援下で有意な屈曲角度の減少を認めた。股関節の平均伸展角速度はそれぞれ平均 91.5°/秒、84.7°/秒、100°/秒、89.2°/秒で、平均屈曲角速度はそれぞれ平均 80.6°/秒、74.8°/秒、80.8°/秒、74.6°/秒であり、疲労による有意な伸展角および屈曲角速度の低下を認めた。

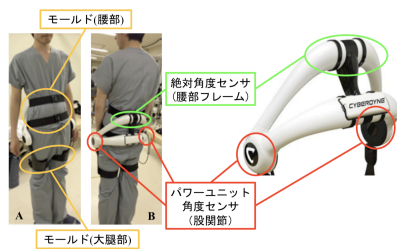
本研究の結果より HAL[®]腰タイプ支援下で腰部負荷は 13%軽減し、作業回数や作業時間はそれぞれ 130%向上することで、作業の省力化が実現できること、股関節の最大屈曲角度が HAL[®]腰タイプ支援下で有意に減少し、伸展および屈曲角速度が疲労により変化するという運動学的特徴を明らかにした。

A. 研究目的

腰痛を有する患者はきわめて多く、厚生労働省による平成25年国民生活基礎調査では、有訴率は男性9.2%、女性11%となっており、男性では最も多い症状、女性では肩こりに次いで多い症状である[1]。腰痛自体の治療にかかる理学療法、投薬などの医療経費による直接的な経済損失と、腰痛による作業効率の低下ならびに休業による間接的な経済損失を合わせると社会に与える影響は非常に大きい。Itohらは、日本国内における職業性腰痛の直接医療費を算出し、年々増加傾向にあり、2011年度には821億円に至ったと報告している[2]。

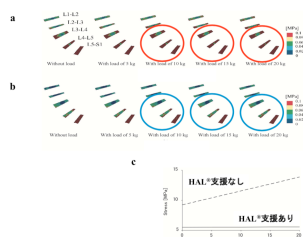
現在、業務上の腰部負荷を軽減する目的に、様々な外骨格型のアシストスーツが開発研究されており、市場に流通している。我々はその中で

HAL[®]腰タイプに着目した。HAL[®]腰タイプは、CYBERDYNE社が開発した腰部負荷を軽減する外骨格型ロボットスーツである。2014年11月に生活支援ロボットの国際安全規格ISO12342を取得し、重量物挙上業務、介護業務ですでに市場に流通している。HAL[®]腰タイプは、腰部と大腿部に取り付けられたモールドと呼ばれる固定具により装着し、股関節部に有するパワーユニットが、体幹屈曲・伸展と股関節屈曲・伸展の動作をアシストする動作機序である。装着者の脊柱起立筋の生体電位信号で駆動トルクが発生し(Cybernetic voluntary control)、両モールドを介して体幹及び下肢に伝達される。また、絶対角度センサと角度センサから算出される装着者の上半身の体重に対する重力補償をCybernetic autonomous controlで実現し、ハイブリッド制御する（下図）。



HAL腰タイプの構造

3次元骨格系モデルを用いた有限要素法による応力シミュレーション解析による基礎実験では、体幹前屈角度が大きい静止姿勢の重量物挙上動作における腰椎椎間板圧迫力が、鉛直下向き方向に荷重をかけた状態では、腰部負荷がHAL®腰タイプ支援下では支援がないときに比べ減少することを明らかにした[3]。



有限要素法を用いたHAL®腰タイプの腰部負荷の応力解析

我々は重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援は腰部負荷を軽減すると仮説を立て、H28年度に重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援の安全性試験を行った。本年は引き続き単群前後比較試験の運動学的研究を進め、HAL®腰タイプ支援の効果に関する評価を行ったので報告する。

B. 研究方法

【実験1】HAL®腰タイプの単群前後比較試験

1. 対象

安全性試験と同様、現在治療中の循環器・呼吸器疾患や脊椎関節手術歴がなく、筋骨格系に障害のない25歳から45歳までの健康成人ボランティア20例を対象とし、筑波大学未来医工融合研究センター内で行った。健康ボランティア20例は男：女が13：7で、平均年齢31.5歳であった。

2. 検討項目

重量物挙上動作は、準備動作で膝関節を屈曲させず、体幹のみ伸展して挙上するStoop lifting法とし、重量物は約12kg（男性）または約6kg（女性）のペットボトルが梱包された持ち手付きダンボールとした。尚、重量物の設定については、厚生労働省が定める重量物取り扱い[4]に準じ、体重の15-30%となるように設定した。また、日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン

委員会が策定したリハビリテーション医療における安全管理・推進のためのガイドラインで示されているリハビリテーションの中止基準を遵守した[5]。

メトロノームを使用し、1分15回の一定のペースで、床に置かれた重量物を立位姿勢から肘関節は完全伸展でStoop lifting法の挙上を開始してもらい、体幹が完全伸展となるまで挙上を行った後、床に置く動作までを一連とする挙上動作を、自覚的疲労度の限界まで実施してもらうことを課題とした（下図）。

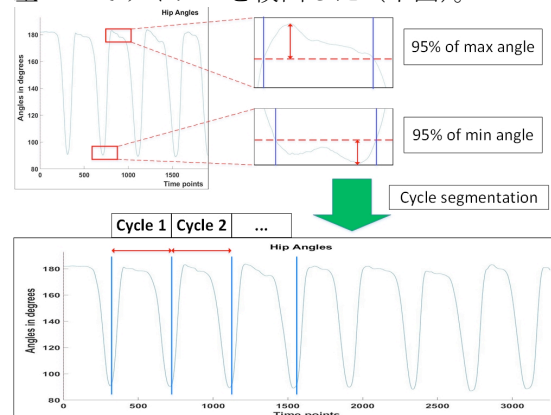


重量物反復挙上動作

一連の動作課題をHAL®腰タイプ非支援下で行ってもらった後に、5分間の休憩で血圧ならびに脈拍が試験前の状態に回復したことを確認してから、HAL®腰タイプ支援下に実施した。

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。

マーカータは、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）。



反復挙上運動データにおけるサイクルの検出

重量物の反復挙上動作において検出されたそれぞれのサイクルにおいて0-100%で時間を正規

化した。また、各サイクル内での股関節最大伸展角度、屈曲角度を計算したのち、サイクル間平均を、疲労無し（開始直後の安定した3サイクル）および疲労有り（終了直前の3サイクル）で、算出した。開始直後の安定した3サイクルの検出は、開始から全サイクル数の20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大屈曲角速度のピーク値の変動が最小となる連続する3サイクルとして求めた。（下式）

$$i_{Non-Fatigue} = \operatorname{argmin}_i (\Theta_i^U + \Theta_i^D + \Omega_i^U + \Omega_i^D) \quad (1)$$

$$\Theta_i^U = |\theta_i^U - \theta_{i+1}^U| + |\theta_i^U - \theta_{i+2}^U| + |\theta_{i+1}^U - \theta_{i+2}^U| \quad (2)$$

$$\Theta_i^D = |\theta_i^D - \theta_{i+1}^D| + |\theta_i^D - \theta_{i+2}^D| + |\theta_{i+1}^D - \theta_{i+2}^D| \quad (3)$$

$$\Omega_i^U = |\omega_i^U - \omega_{i+1}^U| + |\omega_i^U - \omega_{i+2}^U| + |\omega_{i+1}^U - \omega_{i+2}^U| \quad (4)$$

$$\Omega_i^D = |\omega_i^D - \omega_{i+1}^D| + |\omega_i^D - \omega_{i+2}^D| + |\omega_{i+1}^D - \omega_{i+2}^D| \quad (5)$$

反復挙上運動データにおける安定サイクルの検出

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)とした。

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。

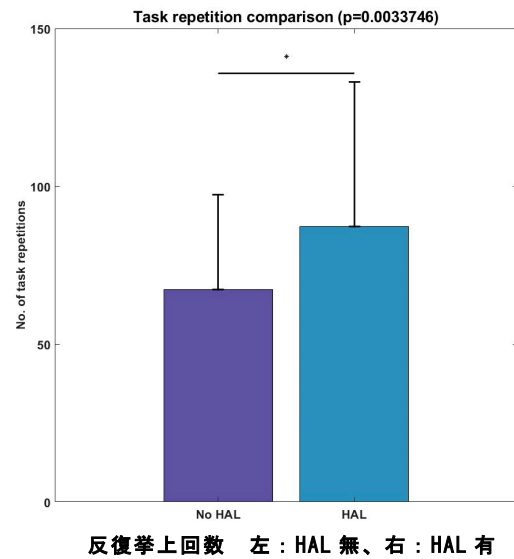
C. 研究結果

【実験1】HAL®腰タイプの単群前後比較試験

全20例において有害事象の発生はなく、課題を完遂できた。

1) 1分間15回ペースでの最大作業回数

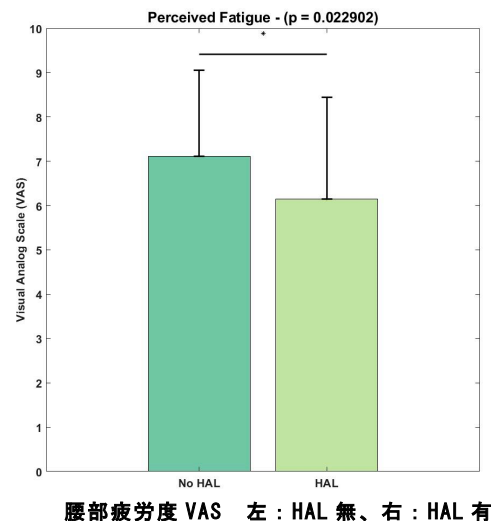
HAL®腰タイプ非支援下の最大作業回数は平均67.3回であったのに対して、HAL®腰タイプ支援下の最大作業回数は平均87.2回で、約1.3倍の有意な作業回数の向上を認めた。(p<0.01, 右図)



2) 腰部疲労度 VAS

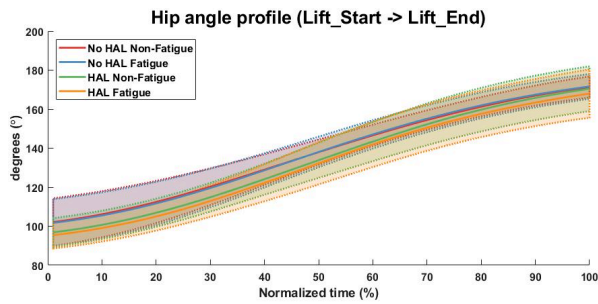
HAL®腰タイプ非支援下の腰部疲労度VASは平均71mmであったのに対して、HAL®腰タイプ支援下の腰部疲労度VASは平均62mmで、腰部負荷は87%に軽減した。(p<0.05, 下図)

以上の結果から、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。

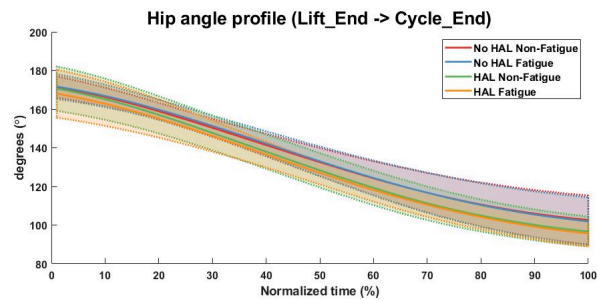


3) 股関節角度・角速度プロファイル

股関節角度のプロファイルは、右中図の通りであった。股関節は、挙上時に最大伸展し、降下時に最大屈曲する。

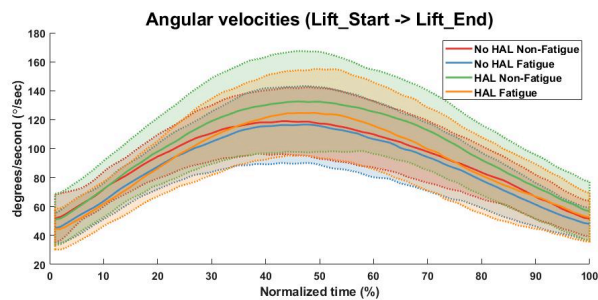


股関節角度プロフィール（挙上開始→終了）

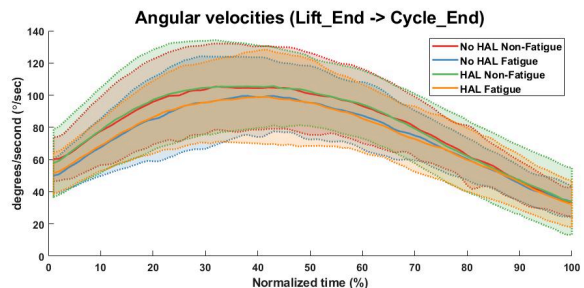


股関節角度プロフィール（下降開始→終了）

股関節角速度のプロファイルは、上図の通りであった。挙上時はほぼ中間時点において最大角速度に至る加速・減速がほぼ対称なパターンを示したのに対し、下降時は50%以下の時点において最大角速度に至りその後緩やかに減速しており、挙上時と下降時で異なる加減速パターンを示した。



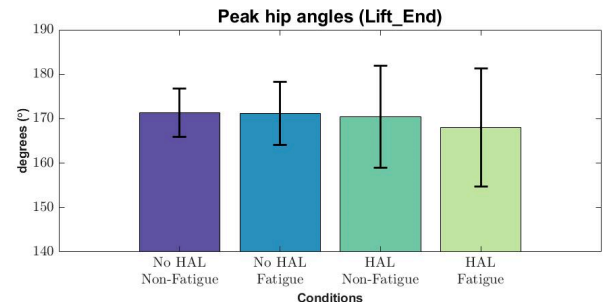
股関節角速度プロフィール（挙上開始→終了）



股関節角速度プロフィール（下降開始→終了）

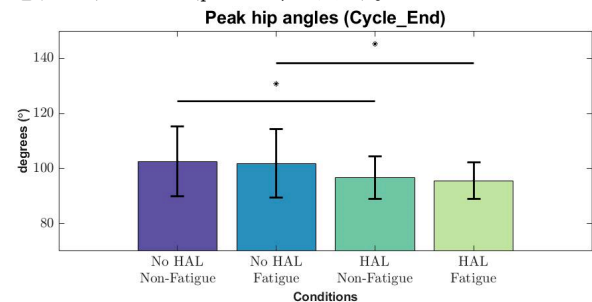
4) 股関節最大伸展・屈曲角度

最大伸展角度は、HAL 無/疲労無、HAL 無/疲労有、HAL 有/疲労無、HAL 有/疲労有の各条件で、平均 171.4°、171.2°、170.5°、168° であり、有意差を認めなかった（下図）。



股関節最大伸展角度 左から右へ：HAL 無/疲労無、HAL 無/疲労有、HAL 有/疲労無、HAL 有/疲労有

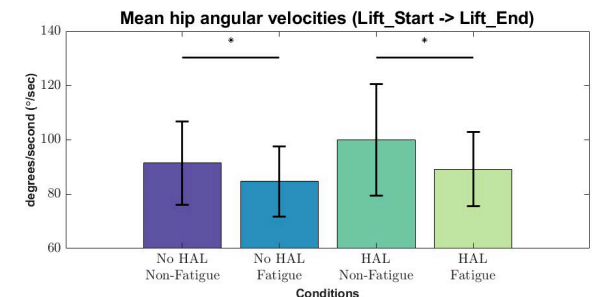
最大屈曲角度は、上記各条件で、平均 102.6°、101.9°、96.7°、95.6° であり、疲労無での HAL 有無、疲労有での HAL*腰タイプ支援下の有無で有意差を認めた ($p < 0.05$, 下図)。



股関節最大屈曲角度

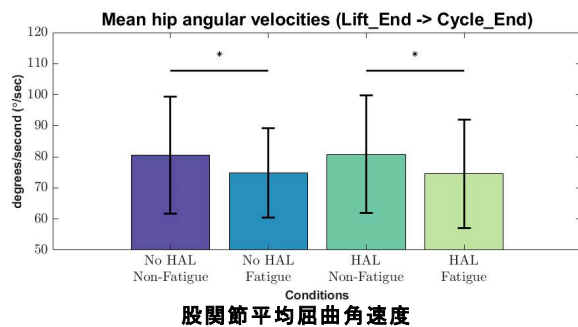
5) 股関節平均伸展・屈曲角速度

股関節平均伸展角速度は、HAL 無/疲労無、HAL 無/疲労有、HAL 有/疲労無、HAL 有/疲労有の各条件で、平均 91.5°/秒、84.7°/秒、100°/秒、89.2°/秒であり、HAL*腰タイプ支援下無における疲労の有無、および HAL*腰タイプ支援下有における疲労の有無で、有意差を認めた ($p < 0.05$, 下図)。



股関節平均伸展角速度

股関節平均屈曲角速度は、HAL 無/疲労無、HAL 無/疲労有、HAL 有/疲労無、HAL 有/疲労有の各条件で、平均 80.6° /秒、74.8° /秒、80.8° /秒、74.6° /秒であり、HAL®腰タイプ支援無における疲労の有無、および HAL®腰タイプ支援下有における疲労の有無で、有意差を認めた ($p < 0.05$, 下図)。



D. 考察

本研究では、腰痛のない健常ボランティア男性および女性で重量物の反復挙上動作を行い、HAL®腰タイプ支援による統計学的に有意な腰部疲労度 VAS の軽減と作業回数や作業時間の増加効果があることが明らかとなった。腰部疲労度 VAS は 13%軽減し、作業回数や作業時間はそれぞれ 130%に増加し、HAL®腰タイプ支援下では腰部負荷を軽減しながら作業の省力化が図ることができた。

一方で、体重の 15%以上の重量物の挙上動作では、傍脊柱筋の筋活動量の有意な上昇が見られると言われ[6]、今回設定した重量物約 12kg も背筋力や脊椎、下肢関節の柔軟性との関連がある可能性がある。また、重量物の反復挙上動作で作業の省力化が実現できるということは、HAL®腰タイプ支援により装着者に更なる労働を課すことにも繋がる可能性があるため、その利用方法についても考慮する必要があると考えられた。

E. 結論

健常ボランティア 20 名に体重の約 15%に設定した重量物の反復挙上動作における HAL®腰タイプ支援は、腰部疲労度 VAS は 13%軽減し、作業回数や作業時間はそれぞれ 130%に増加した。

また、股関節の最大屈曲角度が HAL®腰タイプ支援下で有意に減少し、伸展および屈曲角速度が疲労により変化するという運動学的特徴を明らかにした。

参考文献

- 厚生労働省：国民生活基礎調査. 2013.
- Itoh H, Kitamura F, Yokohama K. Estimates

of annual medical costs of work-related low back pain in Japan. *Industrial Health*. 51: 524-529, 2013

- 原大雅, 山海嘉之. 3次元骨格系モデルによる腰部支援用 HAL の動作支援評価. *生体医工学*. 50: 111-116, 2012
- 労働省基発 547 号. 職場における腰痛予防対策指針. 1994.
- 日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会：リハビリテーションにおける安全管理・推進のためのガイドライン. 医歯薬出版. 2006.
- 波之平晃一郎, 藤村昌彦. Lifting 動作の筋電図学および運動学的研究-重量物の質量が動作方法におよぼす影響. *日本職業・災害医学会会誌*. 58: 234-239, 2010

G. 研究発表

1. 論文発表

- Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
- Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J Spinal Cord Med*. 2018 Oct 18:1-9. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]
- Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci*. 2018

- Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
 5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
 6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS One*. 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
 7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Mataka Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report indicating its safety and feasibility. *J Clin Neurosci*. 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
 8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. *Front Neurosci*. 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
 9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. *J Spinal Cord Med*. 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. *整形外科* 2018, 69:628-634.
 11. 小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. *関東整災誌* 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®) 法の開発. *関節外科* 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太朗, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用. *関節外科* 2018, 37:90-93.
2. 学会発表
 1. ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019. シンポジウム
 2. 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的变化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲

- 哉，國府田正雄，山崎正志．第9回日本成人脊柱変形学会（東京），3月，2019．
3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価．三浦紘世，門根秀樹，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第53回日本脊髄障害医学会（愛知），11月，2018．
 4. 腰部支援用HALを用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果．三浦紘世，門根秀樹，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第33回日本整形外科学会基礎学術集会（奈良），10月，2018．
 5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価．三浦紘世，門根秀樹，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第33回日本整形外科学会基礎学術集会（奈良），10月，2018．
 6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価．三浦紘世，門根秀樹，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第33回日本整形外科学会基礎学術集会（奈良），10月，2018．
 7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発．清水 如代，門根 秀樹，久保田 茂希，安部 哲哉，國府田 正雄，上野 友之，羽田 康司，山崎 正志．第33回日本整形外科学会基礎学術集会（奈良），10月，2018．
 8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価．三浦紘世，門根秀樹，柴尾洋介，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，藤井賢吾，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会（東京），9月，2018．
 9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価．三浦紘世，門根秀樹，柴尾洋介，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，藤井賢吾，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会（東京），9月，2018．
 10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価．三浦紘世，門根秀樹，柴尾洋介，熊谷洋，長島克弥，俣木健太朗，藤井賢吾，野口裕史，船山徹，安部哲哉，國府田正雄，山崎正志．第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会（東京），9月，2018．
 11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Mataka K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hirosaki, Japan, Aug 2018.
 12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.
 15. 久保田茂希，安部哲哉，清水如代，門根秀樹，船山徹，國府田正雄，羽田康司，菅谷 久，吉岡友和，山海嘉之，山崎正志．重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療．第91回日本整形外科学会学術総会（神戸），5月，2018．
 16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行．清水如代，門根秀樹，久保田茂希，安部哲哉，上野友之，羽田康司，山崎正志．第91回日本整

形外科学会（神戸），5月，2018.

17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第91回日本整形外科学会（神戸），5月，2018.
18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第91回日本整形外科学会（神戸），5月，2018.
19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第47回日本脊椎脊髓病学会（神戸），4月，2018.
20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第47回日本脊椎脊髓病学会（神戸），4月，2018.
21. 頰椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷洋, 俣木健太郎, 清水如代, 羽田康治, 野口裕史, 船山徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第47回日本脊椎脊髓病学会（神戸），4月，2018.
22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷洋, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第47回日本脊椎脊髓病学会（神戸），4月，2018.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する
電気生理学的解析の研究

分担研究

門根 秀樹 筑波大学未来医工融合研究センター 助教
久保田 茂希 筑波大学医学医療系 整形外科 運動器再生医療学講座 助教

研究要旨

本年度は、25 歳から 45 歳までの健康成人ボランティア 20 例（男：女＝13:7、平均年齢 31.5 歳）を対象とし、重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する電気生理学的解析を進めた。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、大腿四頭筋の筋電図評価とした。重量物の反復挙動動作中に検出されたそれぞれのサイクルにおいて 0-100%で時間を正規化し、各サイクル内での股関節最大伸展角度、屈曲角度、各筋の活動度（RMS、Room Mean Square）を計算した後、サイクル間平均を疲労無し（開始直後の安定した 3 サイクル）および疲労有り（終了直前の 3 サイクル）で算出した。

副次評価項目は、筋シナジー解析による独立筋シナジーの数とし、計測した 8 個の筋の活動パターンにおける独立筋シナジーの数の算出には、MATLAB（Mathworks 社、アメリカ）を用いて、1 から 5 個の独立筋シナジーを仮定した上で、それぞれについて筋シナジーおよびそれらの活性化パターンを計算し、それによって復元した筋活動パターンもとのパターンとの類似度を VAF（Variability Accounted For）によって計算した。VAF75%以上を閾値としてこれを満たすのに必要な筋シナジーの数について検討した。

右広背筋、左広背筋および右脊柱起立筋は、HAL®腰タイプ支援下で活動量が有意に少なかった。HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における独立筋シナジー数の評価では、シナジー数 1 の場合は上腕二頭筋の復元 VAF が 75%に至らず。シナジー数 3 の場合は HAL®腰タイプ支援において上腕二頭筋の復元 VAF は平均 75%を上回った。

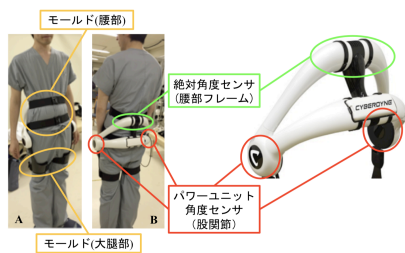
今回の研究の結果から、重量物の反復挙上動作において、HAL®腰タイプの装着は挙上動作と降下動作のいずれでも腰部負荷軽減の効果を示すことが電気生理学的評価で明らかとなった。

A. 研究目的

腰痛を有する患者はきわめて多く、厚生労働省による平成25年国民生活基礎調査では、有訴率は男性9.2%、女性11%となっており、男性では最も多い症状、女性では肩こりに次いで多い症状である[1]。腰痛自体の治療にかかる理学療法、投薬などの医療経費による直接的な経済損失と、腰痛による作業効率の低下ならびに休業による間接的な経済損失を合わせると社会に与える影響は非常に大きい。Itohらは、日本国内における職業性腰痛の直接医療費を算出し、年々増加傾向にあり、2011年度には821億円に至ったと報告している[2]。

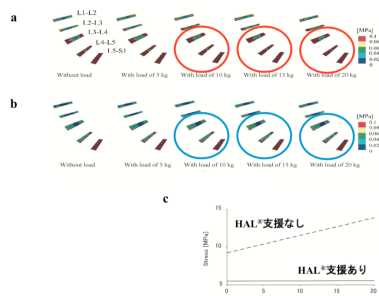
現在、業務上の腰部負荷を軽減する目的に、様々な外骨格型のアシストスーツが開発研究されており、市場に流通している。我々はその中で HAL®腰タイプに着目した。HAL®腰タイプは、CYBERDYNE社が開発した腰部負荷を軽減する外骨格型

ロボットスーツである。2014年11月に生活支援ロボットの国際安全規格ISO12342を取得し、重量物挙上業務、介護業務ですでに市場に流通している。HAL®腰タイプは、腰部と大腿部に取り付けられたモールドと呼ばれる固定具により装着し、股関節部に有するパワーユニットが、体幹屈曲・伸展と股関節屈曲・伸展の動作をアシストする動作機序である。装着者の脊柱起立筋の生体電位信号で駆動トルクが発生し(Cybernetic voluntary control)、両モールドを介して体幹及び下肢に伝達される。また、絶対角度センサと角度センサから算出される装着者の上半身の体重に対する重力補償をCybernetic autonomous controlで実現し、ハイブリッド制御する（下図）。



HAL腰タイプの構造

3次元骨格系モデルを用いた有限要素法による応力シミュレーション解析による基礎実験では、体幹前屈角度が大きい静止姿勢の重量物挙上動作における腰椎椎間板圧迫力が、鉛直下向き方向に荷重をかけた状態では、腰部負荷がHAL®腰タイプ支援下では支援がないときに比べ減少することを明らかにした[3]。



有限要素法を用いたHAL®腰タイプの腰部負荷の応力解析

我々は重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援は腰部負荷を軽減すると仮説を立て、本年は昨年を引き続き、HAL®腰タイプ支援と非支援における上肢、体幹および下肢の筋電位による生理学的評価を行ったので報告する。

B. 研究方法

【実験1】HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作の生理学的評価

1. 対象

昨年と同様、現在治療中の循環器・呼吸器疾患や脊椎関節手術歴がなく、筋骨格系に障害のない25歳から45歳までの健康成人ボランティア20例を対象とし、筑波大学未来医工融合研究センター内で行った。

2. 検討項目

重量物挙上動作は、準備動作で膝関節を屈曲させず、体幹のみ伸展して挙上する stoop lifting 法とし、重量物は約12kgのペットボトルが梱包された持ち手付きダンボールとした。

尚、重量物の設定については、厚生労働省が定める重量物取り扱い[5]に準じ、体重の15-30%となるように設定した。

メトロノームを使用し、1分15回の一定のペ

ースで、床に置かれた重量物を立位姿勢から肘関節は完全伸展で Stoop lifting 法（下図）の挙上を開始してもらい、体幹が完全伸展となるまで挙上を行った後、床に置く動作までを一連とする挙上動作を、自覚的疲労度の限界まで実施してもらうことを課題とした。



Stoop lifting法:

体幹伸展のみで重量物を挙上する方法

Squat法:

体幹・股関節・膝関節を同時に伸展させ重量物を挙上する方法

Stoop lifting 法

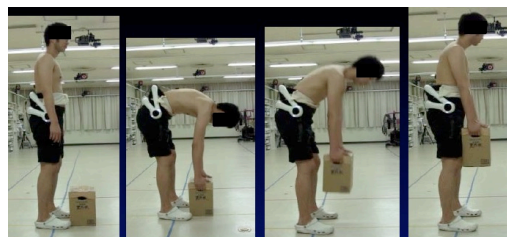
一連の動作課題を HAL®腰タイプ非支援下で行ってもらった後に、5分間の休憩で血圧ならびに脈拍が試験前の状態に回復したことを確認してから、HAL®腰タイプ支援下を実施した（下図）。

健常ボランティア20例は男：女が13：7で、平均年齢31.5歳であった。

尚、日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会が策定したリハビリテーション医療における安全管理・推進のためのガイドラインで示されているリハビリテーションの中止基準を遵守した[4]。

腰 HAL を用いた重量物挙上実験

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、大腿四頭筋の筋電図評



価とした。導出部位は、アルコール綿で清拭してから、筋の線維方向に電極を貼付した。無線表面筋電図計測システム（Delsys Trigno Lab、Delsys社 米国、16チャンネル、2000Hz）を用いてモーションキャプチャーと同期して筋活動を計測した。筋電図は、左右の上腕二頭筋、広背筋、脊柱起立筋、大殿筋から取得した。重量物の反復挙上動作において検出されたそれぞれのサイクルにおいて0-100%で時間を正規化した。また、各サ

イクル内での股関節最大伸展角度、屈曲角度、各筋の活動度（RMS、Room Mean Square）を計算した後、サイクル間平均を疲労無し（開始直後の安定した3サイクル）および疲労有り（終了直前の3サイクル）で算出した。開始直後の安定した3サイクルの検出は、開始から全サイクル数の20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大屈曲角速度のピーク値の変動が最小となる連続する3サイクルとして求めた。

副次評価項目は、筋シナジー解析による独立筋シナジーの数とした。計測した8個の筋の活動パターンにおける独立筋シナジーの数の算出には、MATLAB（Mathworks 社、アメリカ）を用いて、1から5個の独立筋シナジーを仮定した上で、それぞれについて筋シナジーおよびそれらの活性化パターンを計算し、それによって復元した筋活動パターンともとのパターンとの類似度を VAF

（Variability Accounted For、下式）によって計算した。VAF75%以上を閾値としてこれを満たすのに必要な筋シナジーの数について検討した。下式において X はもとの筋活動パターン、Y は復元された筋活動パターン、n は計測データ数、m は計測した筋数である。

$$VAF = 100 \cdot \left(\frac{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm} \cdot Y_{nm})^2}{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm}^2) \cdot (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Y_{nm}^2)} \right)$$

C. 研究結果

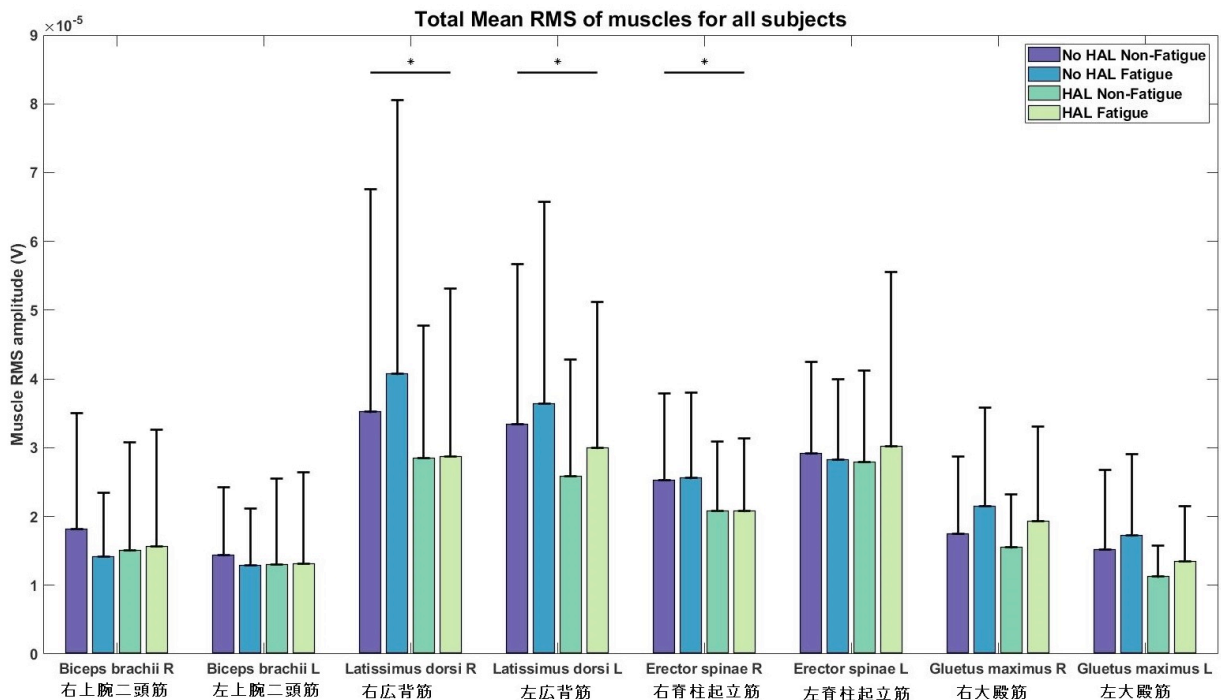
【実験1】

1) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作の生理学的評価

HAL®腰タイプ支援なしとありの重量物挙上動作における、疲労なし・ありの組み合わせ計4条件での筋電図変化を示す。以下で、

- ①HAL®腰タイプ支援なし疲労なし
 - ②HAL®腰タイプ支援なし疲労あり
 - ③HAL®腰タイプ支援あり疲労なし
 - ④HAL®腰タイプ支援あり疲労あり
- とする。

右広背筋、左広背筋、右脊柱起立筋において、HAL®腰タイプ支援の条件による有意差を認めた。右広背筋は、① 3.5×10^{-2} mV ② 4.0×10^{-2} mV ③ 2.9×10^{-2} mV ④ 2.9×10^{-2} mV であり HAL 装着下で活動量が有意に少なかった（ $p < 0.05$ 、下図、右表）。左広背筋は、① 3.3×10^{-2} mV ② 3.6×10^{-2} mV ③ 2.6×10^{-2} mV ④ 3.0×10^{-2} mV であり HAL 装着下で活動量が有意に少なかった（ $p < 0.05$ 、下図、右表）。右脊柱起立筋は、① 2.5×10^{-2} mV ② 2.6×10^{-2} mV ③ 2.1×10^{-2} mV ④ 2.1×10^{-2} mV であり、HAL 装着下で



活動量が有意に少なかった ($p < 0.05$ 、上図、下表)。

HAL 有無、疲労				
Muscles	Condition	HAL	Fatigue	HAL and Fatigue
BB Right		0.6002	0.1947	0.0586
BB Left		0.8117	0.3675	0.3172
LD Right		0.0465	0.2876	0.0477
LD Left		0.0232	0.1121	0.4223
ES Right		0.0353	0.9282	0.7894
ES Left		0.9113	0.7881	0.5426
GM Right		0.1538	0.0140	0.8872
GM Left		<u>0.0528</u>	0.0211	0.8808

有無、混合条件の分散分析による p 値

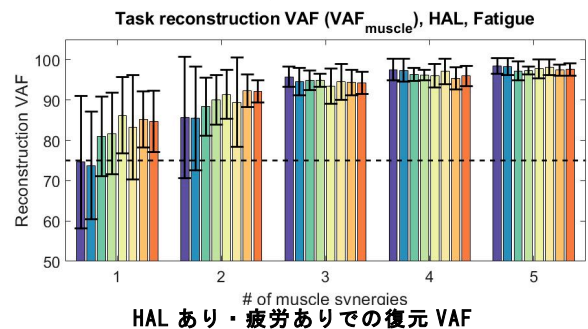
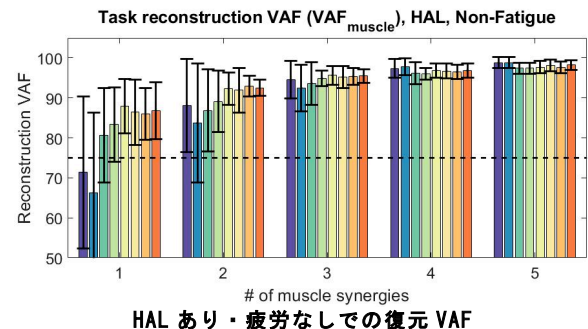
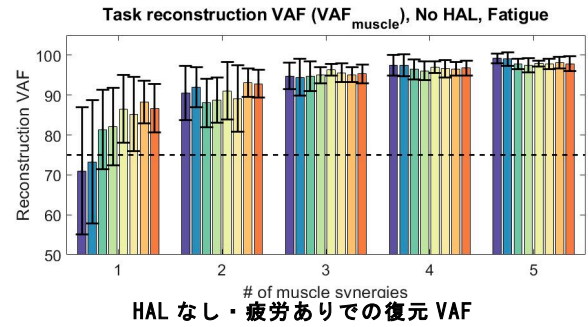
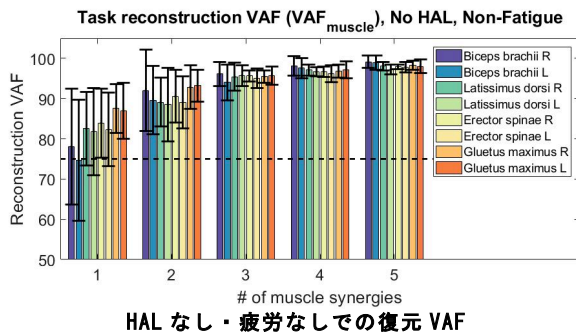
また、右大殿筋および左大殿筋において疲労条件による有意差を認めた。右大殿筋は、① $1.8 \times 10^{-2} \text{mV}$ ② $2.2 \times 10^{-2} \text{mV}$ ③ $1.5 \times 10^{-2} \text{mV}$ ④ $1.9 \times 10^{-2} \text{mV}$ であり疲労下で活動量が有意に多かった

($p < 0.05$ 、左図、上表)。左大殿筋は、① $1.5 \times 10^{-2} \text{mV}$ ② $1.7 \times 10^{-2} \text{mV}$ ③ $1.1 \times 10^{-2} \text{mV}$ ④ $1.3 \times 10^{-2} \text{mV}$ であり疲労下で活動量が有意に多かった ($p < 0.05$ 、左図、上表)。

また、右広背筋においては、HAL 条件と疲労条件の相互作用を認めた ($p < 0.05$ 、上表)。

2) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における独立筋シナジー数の評価

筋シナジー数を 1 から 5 と仮定して算出した場合の VAF を下図に示す。シナジー数 1 の場合、HAL®腰タイプ支援の有無・疲労有無の組み合わせ 4 条件のほとんどで、上腕二頭筋の復元 VAF が 75% にいたらなかった。シナジー数 2 の場合、HAL 有りにおいて上腕二頭筋の復元 VAF は平均 75% を上回ったものの、標準偏差の下限においては、75% を下回った。シナジー数 3 の場合、全条件において平均値、標準偏差の下限とも 75% を上回った。



一方、降下動作では、HAL®腰タイプ支援ありで体幹筋（広背筋、脊柱起立筋）の筋活動量が、疲労前、疲労後とも HAL®腰タイプ支援なしよりも低下した。これは HAL®腰タイプの腰部支援の効果であると考えられる。疲労前後の比較では、HAL®腰タイプ支援の有無に関わらず体幹筋の活動量が疲労後に増加していた。この増加量は HAL®腰タイプ支援ありにおいて支援なしよりも小さいため、HAL®腰タイプ支援により装着者の腰部疲労の蓄積が抑制された結果と考える。

このことから、重量物反復挙上動作における HAL®腰タイプの支援は、装着者の体幹筋の筋活動量を軽減することで腰部疲労の蓄積を抑制し、最大作業回数や時間を増加させる効果があることが分かった。

2) 有害事象

有害事象の発生はなく、全例で課題は完遂できた。

D. 考察

HAL®腰タイプは腰部負荷を軽減する外骨格型ロボットスーツであるが、装着者の脊柱起立筋の随意的生体電位信号で駆動トルクが発生することが、他の腰部負荷軽減を目的として開発された外骨格型ロボットと決定的に異なる点である。今回の研究の結果から、重量物の反復挙上動作において、HAL®腰タイプの装着は挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果を示すことが電気生理学的に明らかとなった。

職業性腰痛の社会的問題に対応すべく、HAL®腰タイプ以外にも腰部装着型の外骨格型ロボットが開発されている。日本国内において、東京理科大学のグループが開発したマッスルスーツは、空気圧で伸縮するゴム人工筋肉が呼吸スイッチにより作動して、重量物挙上時の腰部負荷を軽減するメカニズムを有する。佐藤らは、重量物挙上時の脊柱起立筋の表面筋電図から積分筋電値を測定して、10kgの重量物挙上がマッスルスーツにより少なくとも30%以上積分筋電値を減少させると報告している[6]。

和歌山大学のグループが開発したパワーアシストスーツは、手袋のタッチスイッチの入力信号に基づいた動作意図推定のメカニズムを有し、重量物挙上時に股関節部の電動モーターが抗重力方向のアシストを行う。八木らは、重量物挙上動作における呼吸ガス分析を用いた酸素消費率とエネルギー消費量を算出し、13kgの重量物挙上では、パワーアシストスーツを装着することで、酸素消費率とエネルギー消費量はそれぞれ平均3.7%、12.6%の減少率を示した。また、23kgの重量物挙上ではそれぞれ平均20.6%、34.8%の減少率を示したと報告している[7]。

北海道大学のグループが開発したスマートスーツ・ライトは、補助対象動作の3次元動作解析による動作と身体負担の関係を定量化する手法と、スキーンセグメントモデルによる弾性材配置と特性の最適設計を行うMotion Based Assist技術が用いられた。胸部パッドから腰部の動滑車を介して脚部まで後背部に配置した弾性材による弾性力を補助力源とし、筋力補助効果と体幹安定化効果とを併せ持つパッシブ型パワーアシストスーツである。筋電図解析では、擬似的な移乗介助動作において後背部筋群の積分筋電位が24.4%軽減することを示した。また、ヒューマロイドロボットHRP-4Cにスマートスーツ・ライトを装着し、前屈運動を行い、腰の関節トルクが非装着時に比べて25.8%軽減したことを報告している。また、札幌市内の病院や介護施設で臨床試験を実施しており、病院勤務する介護職20名を対象とした

臨床試験では、介護勤務において被験者が85%の自覚的な腰部負担の軽減効果を実感し、介護施設における介護職30名を対象とした臨床試験では、非装着時に比べて、疲労感の増加量が全身で12.2%、腰部で13.6%減少したと報告している[8]。

一方、カナダでは重量物挙上支援のデバイスとして、on-body personal lift augmentation device (PLAD)が開発されている。筋力訓練で用いられるセラバンドの弾性を利用し、体幹背側のセラバンドが体幹前屈時に伸張され、体幹を伸展して重量物を挙上する際に、セラバンドが元に戻ろうとする力を利用するメカニズムである。

Abdoli-Eらは、重量物挙上における表面筋電図を計測して、PLAD利用により腰部傍脊柱筋と胸部傍脊柱筋で、それぞれ14%と27%の筋活動の低減が認められたと報告している[9-10]。

HAL®腰タイプは、装着者の脊柱起立筋の随意的生体電位信号で駆動トルクが発生することが極めて特徴的であり、随意筋活動でロボットと連動して動くという感覚が、装着者の精神的なモチベーションも向上させる効果もあることが明らかになってきている[11]。今回の研究の結果から、外骨格型ロボットスーツHAL®腰タイプの着用は、重量物の挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷を軽減する効果があることが電気生理学的評価で明らかとなった。

E. 結論

HAL®腰タイプの装着は、重量物の反復挙上動作において挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果があることが電気生理学的評価で明らかとなった。

参考文献

1. 厚生労働省：国民生活基礎調査. 2013.
2. Itoh H, Kitamura F, Yokohama K. Estimates of annual medical costs of work-related low back pain in Japan. *Industrial Health*. 51: 524-529, 2013
3. 原大雅, 山海嘉之. 3次元骨格系モデルによる腰部支援用HALの動作支援評価. *生体医工学*. 50: 111-116, 2012
4. 日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会：リハビリテーションにおける安全管理・推進のためのガイドライン. 医歯薬出版. 2006.
5. 労働省基発547号. 職場における腰痛予防対策指針. 1994.
6. 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 他. 腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価. 日本機

- 械学会論文集. 2012;268-280.
7. 八木栄一, 佐藤元伸, 佐藤和男, 他. 歩行と持ち上げ動作を支援するための電動パワーアシストスーツの検証実験. 日本機械学会論文集. 2015;81:830.
 8. 田中孝之. Assisted Products- スマートスーツ・ライト- . J Clin Rehabilitation. 2016;22:893-899.
 9. Abdoli-E M, Agnew MJ, Stevenson JM. An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. Clin Biomech. 2006;21:456-465.
 10. Abdoli-E M, Stevenson JM. The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. Clin Biomech. 2008;23:372-380.
 11. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, et al. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. PLoS one 2018;13(30):e0194214.
- G. 研究発表**
1. 論文発表
 1. Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. J Orthop Surg (Hong Kong). 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
 2. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. J Spinal Cord Med. 2018 Oct 18:1-9. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]
 3. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. J Clin Neurosci. 2018 Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
 4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. J Clin Neurosci. 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
 5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. J Clin Neurosci. 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
 6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. PLoS One. 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
 7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Matak Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report

- indicating its safety and feasibility. J Clin Neurosci. 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Front Neurosci. 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
 9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. J Spinal Cord Med. 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. 整形外科 2018, 69:628-634.
 11. 小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. 関東整災誌 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®)法の開発. 関節外科 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太郎, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用. 関節外科 2018, 37:90-93.
2. 学会発表
1. ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第9回日本成人脊柱変形学会(東京), 3月, 2019. シンポジウム
 2. 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的变化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第9回日本成人脊柱変形学会(東京), 3月, 2019.
 3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第53回日本脊髄障害医学会(愛知), 11月, 2018.
 4. 腰部支援用 HAL を用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会(奈良), 10月, 2018.
 5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会(奈良), 10月, 2018.
 6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会(奈良), 10月, 2018.
 7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 國府田 正雄, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会(奈良), 10月, 2018.
 8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会(東京), 9月, 2018.
 9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評

- 価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Mataka K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hirosaki, Japan, Aug 2018.
12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.
15. 久保田茂希, 安部哲哉, 清水如代, 門根秀樹, 船山徹, 國府田正雄, 羽田康司, 菅谷 久, 吉岡友和, 山海嘉之, 山崎正志. 重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療. 第 91 回日本整形外科学会学術総会 (神戸), 5 月, 2018.
16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行. 清水如代, 門根秀樹, 久保田茂希, 安部哲哉, 上野友之, 羽田康司, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
21. 頸椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 清水如代, 羽田康治, 野口裕史, 船山 徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井 賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第 47 回日

本脊椎脊髓病学会（神戸），４月，2018.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する
複数筋協調運動の解析の研究

分担研究

清水 如代 筑波大学附属病院 リハビリテーション部 病院講師
羽田 康司 筑波大学医学医療系 整形外科 リハビリテーション部 教授

研究要旨

本年度は、25 歳から 45 歳までの健康成人ボランティア 20 例を対象とし、重量物挙上動作に対する HAL®腰タイプ支援に関する複数筋協調運動の解析を行った。男：女は 13：7 で、平均年齢 31.5 歳であった。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た。筋シナジー解析では、各筋の活動度のベクトルである筋シナジー（シナジーパターン）と各シナジーの活性度の時系列（時系列パターン）が計算される。3 つのシナジーパターン全体、それぞれのシナジーパターンと時系列パターンの類似性を比較した。比較は、HAL なし、疲労なしを基準条件とし、これとの類似度を内積で計算した。また、シナジーパターンと時系列パターンの貢献度を評価するため、シナジーパターンを固定して時系列パターンを再度最適化した場合と、時系列パターンを固定してシナジーパターンを再度最適化した場合で、上記 VAF を計算して比較した。

全例 VAF の平均、分散の下限が 75%以上となる最小の筋シナジー数は 3 であった。両側大殿筋と脊柱起立筋の同時活動は挙上運動の開始から徐々に活動が高まり、25%程度のタイミングでピークに至った後、挙上運動の終了時には活動が低下し、下降時には活動が停止した。両側上腕二頭筋は挙上終了から降下に入るタイミングで活動した。両側広背筋は挙上開始でピークに至り、その後サイクルを通して活動が低く、降下終了時から次のサイクルの挙上開始に移るタイミングで再び活動が高まることわかった。

今回の研究の結果から、HAL®腰タイプの装着は、重量物の反復挙上動作において挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果を示すことが複数筋協調運動の解析で明らかとなった。

A. 研究目的

腰痛を有する患者はきわめて多く、厚生労働省による平成25年国民生活基礎調査では、有訴率は男性9.2%、女性11%となっており、男性では最も多い症状、女性では肩こりに次いで多い症状である[1]。腰痛自体の治療にかかる理学療法、投薬などの医療経費による直接的な経済損失と、腰痛による作業効率の低下ならびに休業による間接的な経済損失を合わせると社会に与える影響は非常に大きい。Itohらは、日本国内における職業性腰痛の直接医療費を算出し、年々増加傾向にあり、2011年度には821億円に至ったと報告している[2]。

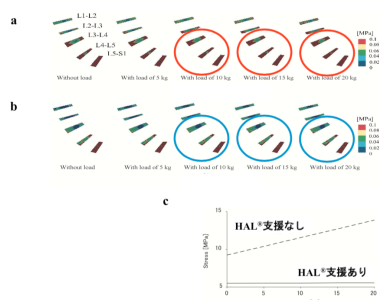
現在、業務上の腰部負荷を軽減する目的に、様々な外骨格型のアシストスーツが開発研究されており、市場に流通している。我々はその中で HAL®腰タイプに着目した。HAL®腰タイプは、CYBERDYNE社が開発した腰部負荷を軽減する外骨格型ロボットスーツである。2014年11月に生活支援ロ

ボットの国際安全規格ISO12342を取得し、重量物挙上業務、介護業務ですでに市場に流通している。HAL®腰タイプは、腰部と大腿部に取り付けられたモールドと呼ばれる固定具により装着し、股関節部に有するパワーユニットが、体幹屈曲・伸展と股関節屈曲・伸展の動作をアシストする動作機序である。装着者の脊柱起立筋の生体電位信号で駆動トルクが発生し(Cybernetic voluntary control)、両モールドを介して体幹及び下肢に伝達される。また、絶対角度センサと角度センサから算出される装着者の上半身の体重に対する重力補償をCybernetic autonomous controlで実現し、ハイブリッド制御する（下図）。



HAL腰タイプの構造

3次元骨格系モデルを用いた有限要素法による応力シミュレーション解析による基礎実験では、体幹前屈角度が大きい静止姿勢の重量物挙上動作における腰椎椎間板圧迫力が、鉛直下向き方向に荷重をかけた状態では、腰部負荷がHAL®腰タイプ支援下では支援がないときに比べ減少することを明らかにした[3]。



有限要素法を用いたHAL®腰タイプの腰部負荷の応力解析

我々は重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援は腰部負荷を軽減すると仮説を立て、昨年に引き続き、HAL®腰タイプ支援と非支援における上肢、体幹および下肢の複合筋活動電位による生理学的評価を行ったので報告する。

B. 研究方法

【実験1】HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作の生理学的評価

1. 対象

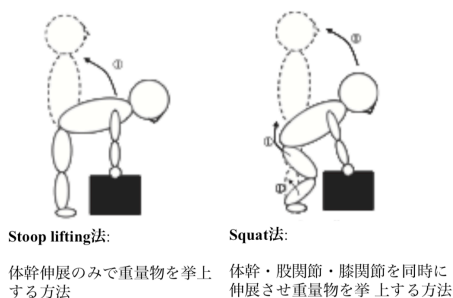
昨年と同様、現在治療中の循環器・呼吸器疾患や脊椎関節手術歴がなく、筋骨格系に障害のない25歳から45歳までの健康成人ボランティア20例（男：女＝13：7、平均年齢31.5歳）を対象とし、筑波大学未来医工融合研究センター内で行った。

2. 検討項目

重量物挙上動作は、準備動作で膝関節を屈曲させず、体幹のみ伸展して挙上する stoop lifting法とし、重量物は約12kgのペットボトルが梱包された持ち手付きダンボールとした。

尚、重量物の設定については、厚生労働省が定める重量物取り扱い[5]に準じ、体重の15-30%となるように設定した。

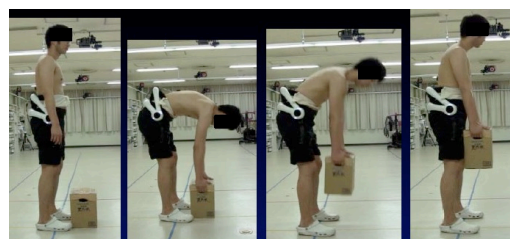
メトロノームを使用し、1分15回の一定のペースで、床に置かれた重量物を立位姿勢から肘関節は完全伸展でStoop lifting法の挙上を開始してもらい、体幹が完全伸展となるまで挙上を行った後、床に置く動作までを一連とする挙上動作を、自覚的疲労度の限界まで実施してもらうことを課題とした（下左図）。



一連の動作課題をHAL®腰タイプ非支援下で行ってもらった後に、5分間の休憩で血圧ならびに脈拍が試験前の状態に回復したことを確認してから、HAL®腰タイプ支援下に実施した。

尚、日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会が策定したリハビリテーション医療における安全管理・推進のためのガイドラインで示されているリハビリテーションの中止基準を遵守した[4]。

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た。導出部位は、アルコール綿で清拭してから、筋の線維方向に電極を貼付した。無線表面筋電図計測システム（Delsys Trigno Lab、Delsys社 米国、16チャンネル、2000Hz）を用いてモーションキャプチャーと同期して筋活動を計測した。筋電図は、左右の上腕二頭筋、広背筋、脊柱起立筋、大殿筋から取得した。各筋の活動度（RMS、Room Mean Square）を計算したのち、検出されたそれぞれのサイクルにおいて0-100%で時間を正規化して、疲労無し（開始直後の安定した3サイクル）および疲労有り（終了直前の3サイクル）で、それぞれで筋シナジーを算出した（MATLAB、Mathworkds社、米国）。開始直後の安定した3サイクルの検出は、開始から全サイクル数の20%以内において、股関節最大伸展角度、最大屈曲角度、最大伸展角速度、最大伸展角速度のピーク値の変動が最小となる連続する3サイクルとして求めた。筋シナジー数は下式で定義される VAF>75%となる最小の数とした。

$$VAF = 100 \cdot \left(\frac{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm} \cdot Y_{nm})^2}{(\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n X_{nm}^2) \cdot (\sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n Y_{nm}^2)} \right)$$

筋シナジー解析では、各筋の活動度のベクトルである筋シナジー（シナジーパターン）と各シナジーの活性度の時系列（時系列パターン）が計算される。3つのシナジーパターン全体、それぞれのシナジーパターンと時系列パターンの類似性を比較した。比較は、HAL なし、疲労なしを基準条件とし、これとの類似度を内積で計算した。また、シナジーパターンと時系列パターンの貢献度を評価するため、シナジーパターンを固定して時系列パターンを再度最適化した場合と、時系列パターンを固定してシナジーパターンを再度最適化した場合で、上記 VAF を計算して比較した。

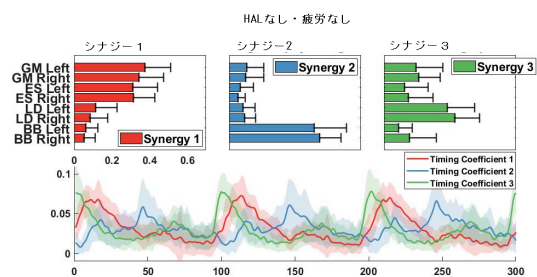
C. 研究結果

【実験 1】

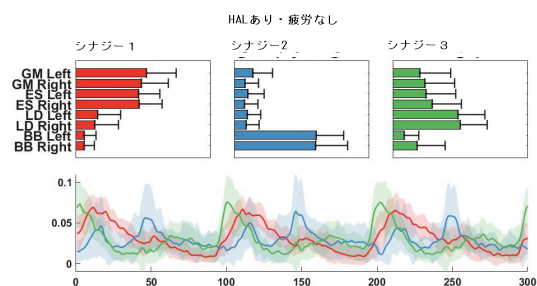
1) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における筋シナジーと活動パターン

全例 VAF の平均、分散の下限が 75%以上となる最小の筋シナジー数は 3 であった。HAL®腰タイプ支援なしとありおよび、疲労なし・ありの組み合わせ 4 条件での重量物挙上動作における代表症例の筋シナジーを図に示す（右図）。シナジー 1

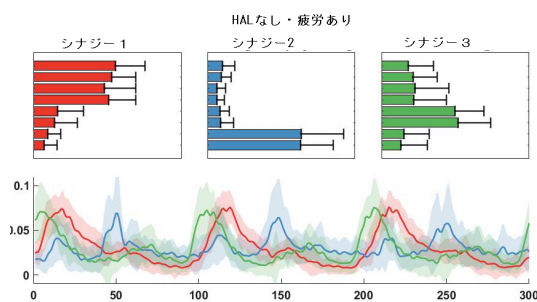
（赤）は両側大殿筋と脊柱起立筋の同時活動を主として含んでおり、シナジー 2（青）は両側上腕二頭筋、シナジー 3（緑）は両側広背筋の活動を主として含んでいた。この傾向は 4 つの条件に共通して観測された。また時系列パターン 1（赤）は、挙上運動の開始から徐々に活動が高まって、25%程度のタイミングでピークに至ったのち、挙上運動の終了時には活動が低下し、下降時には活動がみられなかった。時系列パターン 2（青）は、サイクルの 50%前後のタイミングで活動がみられた。すなわち、挙上終了から降下に入るタイミングで活動がみられた。時系列パターン 3（緑）は、挙上開始でピークに至り、その後サイクルを通して活動が低く、降下終了時から次のサイクルの挙上開始に移るタイミングで再度活動が高まることがみられた。



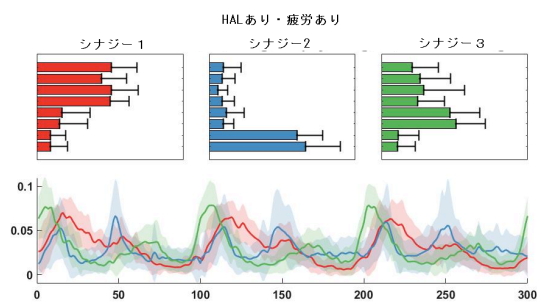
HAL なし・疲労なし
(上:筋シナジー、下:筋シナジー活動度)



HAL あり・疲労なし
(上:筋シナジー、下:筋シナジー活動度)



HAL なし・疲労あり
(上:筋シナジー、下:筋シナジー活動度)



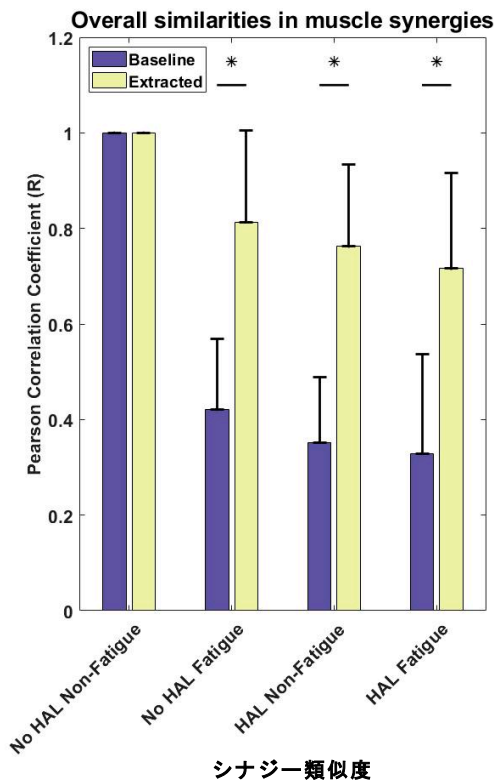
HAL あり・疲労あり
(上:筋シナジー、下:筋シナジー活動度)

2) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作における筋シナジーの類似度評価

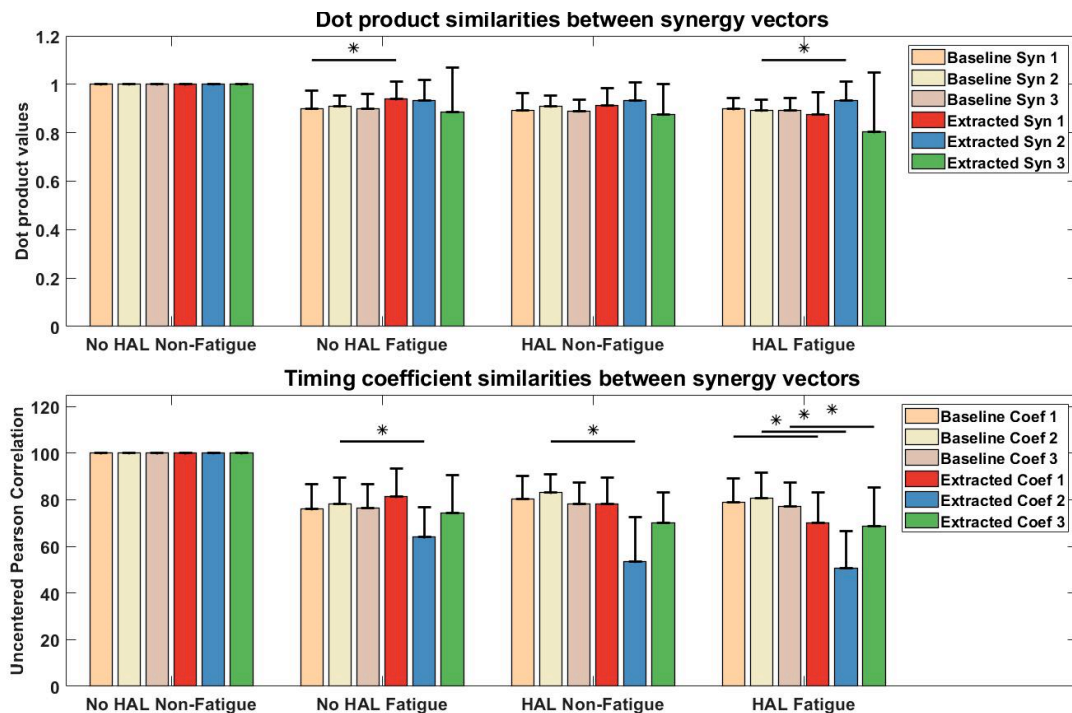
HAL なし・疲労なしを基準 (Baseline) として、基準パターンと HAL なし・疲労あり、HAL あり・疲労なし、HAL あり・疲労ありの 3 条件でのシナジーパターンとの類似度を示す（右図）。基準パ

ターンとの類似度は、HAL なし・疲労ありが最も高く、HAL あり・疲労ありが最も低かった。HAL により類似度は低下し、疲労によっても低下した。一方で、基準パターンをランダムに入れ替えて生成されたシナジーパターンよりは全3条件で、基準パターンとの類似度が有意に高いことも認められ ($p < 0.05$)、上記の差異は基準パターンからの微小な変化として生じていた。

また、個別のシナジーパターンにおいては、HAL なし・疲労ありのシナジー 1、HAL あり疲労ありのシナジー 2 でランダムに入れ替えたパターンよりも基準パターンとの類似度が高かった (下図)。一方、個別の時系列パターンにおいては、HAL なし・疲労ありのシナジー 2、HAL あり・疲労なしのシナジー 2、HAL あり・疲労ありの全3シナジーにおいて、ランダムに入れ替えたパターンよりも基準パターンとの類似度が有意に低かった ($p < 0.05$)。



34



3) HAL®腰タイプ支援による重量物挙上動作にお

けるシナジーパターンおよび時系列パターンの寄与度評価

下図に、シナジーパターンを固定して時系列パターンを再度最適化した場合 (Fixed Weights 緑) と、時系列パターンを固定してシナジーパターンを再度最適化した場合 (Fixed Timings、薄緑) で、上記 VAF を計算して比較した。評価対象としたすべての筋において、シナジーパターンを固定した場合の方が、復元後の VAF が有意に高かった ($p < 0.05$)。

4) 有害事象

有害事象の発生はなく、全例で課題は完遂できた。

D. 考察

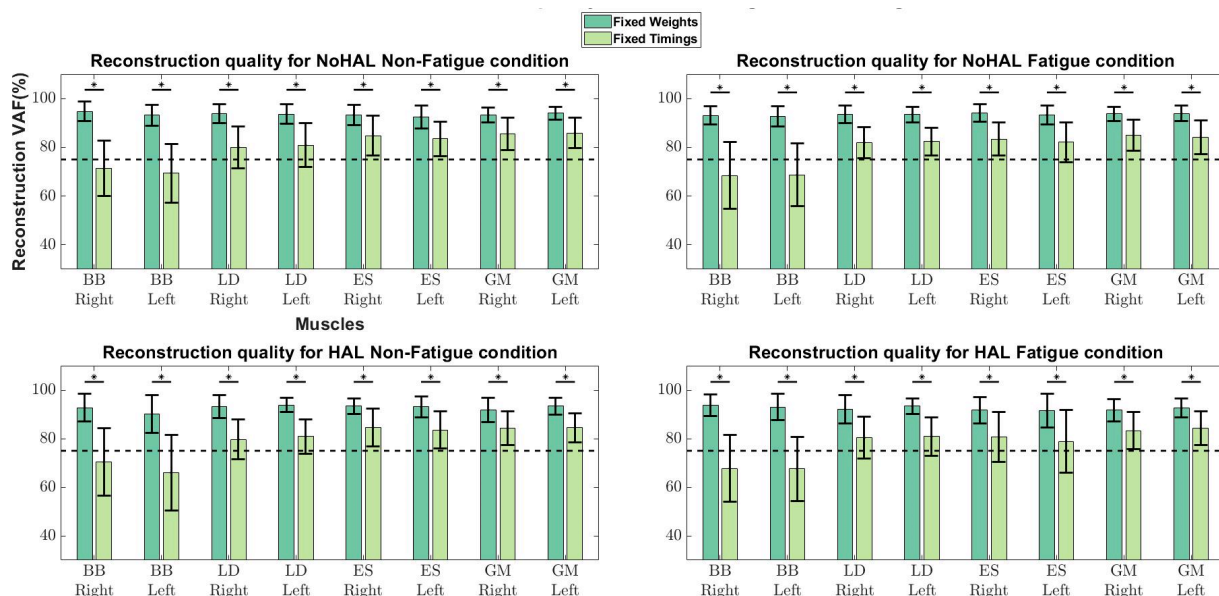
HAL®腰タイプは腰部負荷を軽減する外骨格型ロボットスーツであるが、装着者の脊柱起立筋の随意的生体電位信号で駆動トルクが発生することが、他の腰部負荷軽減を目的として開発された外骨格型ロボットと決定的に異なる点である。今回の研究の結果から、重量物の反復挙上動作において、HAL®腰タイプの装着は挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果を示すことが電気生理学的に明らかとなった。

35 職業性腰痛の社会的問題に対応すべく、HAL®腰タイプ以外にも腰部装着型の外骨格型ロボットが開発されている。日本国内において、東京理科大学のグループが開発したマッスルスーツは、空気圧で伸縮するゴム人工筋肉が呼吸スイッチにより作動して、重量物挙上時の腰部負荷を

軽減するメカニズムを有する。佐藤らは、重量物挙上時の脊柱起立筋の表面筋電図から積分筋電値を測定して、10kg の重量物挙上がマッスルスーツにより少なくとも 30%以上積分筋電値を減少させると報告している [6]。

和歌山大学のグループが開発したパワーアシストスーツは、手袋のタッチスイッチの入力信号に基づいた動作意図推定のメカニズムを有し、重量物挙上時に股関節部の電動モーターが抗重力方向のアシストを行う。八木らは、重量物挙上動作における呼吸ガス分析を用いた酸素消費率とエネルギー消費量を算出し、13kg の重量物挙上では、パワーアシストスーツを装着することで、酸素消費率とエネルギー消費量はそれぞれ平均 3.7%、12.6%の減少率を示した。また、23kg の重量物挙上ではそれぞれ平均 20.6%、34.8%の減少率を示したと報告している [7]。

北海道大学のグループが開発したスマートスーツ・ライトは、補助対象動作の 3 次元動作解析による動作と身体負担の関係を定量化する手法と、スキンセグメントモデルによる弾性材配置と特性の最適設計を行う Motion Based Assist 技術が用いられた。胸部パッドから腰部の動滑車を介して脚部まで後背部に配置した弾性材による弾性力を補助力源とし、筋力補助効果と体幹安定化効果とを併せ持つパッシブ型パワーアシストスーツである。筋電図解析では、擬似的な移乗介助動作において後背部筋群の積分筋電位が 24.4%軽減することを示した。また、ヒューマロイドロボット HRP-4C にスマートスーツ・ライトを装着し、前屈運動を行い、腰の関節トルクが非装着時に比



べて 25.8%軽減したことを報告している。また、札幌市内の病院や介護施設で臨床試験を実施しており、病院勤務する介護職 20 名を対象とした臨床試験では、介護勤務において被験者が 85%の自覚的な腰部負担の軽減効果を実感し、介護施設における介護職 30 名を対象とした臨床試験では、非装着時に比べて、疲労感の増加量が全身で 12.2%、腰部で 13.6%減少したと報告している[8]。

一方、カナダでは重量物挙上支援のデバイスとして、on-body personal lift augmentation device (PLAD)が開発されている。筋力訓練で用いられるセラバンドの弾性を利用し、体幹背側のセラバンドが体幹前屈時に伸張され、体幹を伸展して重量物を挙上する際に、セラバンドが元に戻ろうとする力を利用するメカニズムである。Abdoli-E らは、重量物挙上における表面筋電図を計測して、PLAD 利用により腰部傍脊柱筋と胸部傍脊柱筋で、それぞれ 14%と 27%の筋活動の低減が認められたと報告している[9-10]。

HAL®腰タイプは、装着者の脊柱起立筋の随意の生体電位信号で駆動トルクが発生することが極めて特徴的であり、随意筋活動でロボットと連動して動くという感覚が、装着者の精神的なモチベーションも向上させる効果もあることが明らかになってきている[11]。今回の研究結果から、外骨格型ロボットスーツ HAL®腰タイプの装着は、重量物の反復挙上動作において挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果を示すことが、上肢、体幹および下肢の複合筋協調運動の解析で明らかとなった。

E. 結論

HAL®腰タイプの装着は、重量物の反復挙上動作において、挙上動作と降下動作のいずれにも腰部負荷軽減の効果を示すことが上肢、体幹および下肢の複合筋協調運動の解析で明らかとなった。

参考文献

1. 厚生労働省：国民生活基礎調査. 2013.
2. Itoh H, Kitamura F, Yokohama K. Estimates of annual medical costs of work-related low back pain in Japan. *Industrial Health*. 51: 524-529, 2013
3. 原大雅, 山海嘉之. 3次元骨格系モデルによる腰部支援用 HAL の動作支援評価. *生体医工学*. 50: 111-116, 2012
4. 日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会：リハビリテーションにおける安全管理・推進のためのガイドライン. 医歯薬出版. 2006.

5. 労働省基発 547 号. 職場における腰痛予防対策指針. 1994.
6. 佐藤裕, 何佳欧, 小林寛征, 他. 腰補助用マッスルスーツの開発と定量的評価. *日本機械学会論文集*. 2012:268-280.
7. 八木栄一, 佐藤元伸, 佐藤和男, 他. 歩行と持ち上げ動作を支援するための電動パワーアシストスーツの検証実験. *日本機械学会論文集*. 2015;81:830.
8. 田中孝之. Assisted Products- スマートスーツ・ライト-. *J Clin Rehabilitation*. 2016;22:893-899.
9. Abdoli-E M, Agnew MJ, Stevenson JM. An on-body personal lift augmentation device (PLAD) reduces EMG amplitude of erector spinae during lifting tasks. *Clin Biomech*. 2006;21:456-465.
10. Abdoli-E M, Stevenson JM. The effect of on-body lift assistive device on the lumbar 3D dynamic moments and EMG during asymmetric freestyle lifting. *Clin Biomech*. 2008;23:372-380.
11. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, et al. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS one* 2018;13(30):e0194214.

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
2. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior

- longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J Spinal Cord Med.* 2018 Oct 18:1-9. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]
3. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci.* 2018 Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
 4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. *J Clin Neurosci.* 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
 5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. *J Clin Neurosci.* 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
 6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS One.* 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
 7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Mataka Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report indicating its safety and feasibility. *J Clin Neurosci.* 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
 8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. *Front Neurosci.* 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
 9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. *J Spinal Cord Med.* 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. *整形外科* 2018, 69:628-634.
 11. 小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. *関東整災誌* 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®)法の開発. *関節外科* 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太朗, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーショ

ンの応用. 関節外科 2018, 37:90-93.

2. 学会発表

1. ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第9回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3月, 2019. シンポジウム
2. 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的变化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第9回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3月, 2019.
3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第53回日本脊髄障害医学会 (愛知), 11月, 2018.
4. 腰部支援用 HAL を用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10月, 2018.
5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10月, 2018.
6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10月, 2018.
7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 國府田 正雄, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 第33回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10月, 2018.
8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9月, 2018.
9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9月, 2018.
10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第27回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9月, 2018.
11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Matakai K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hiroasaki, Japan, Aug 2018.
12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada

Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.

15. 久保田茂希, 安部哲哉, 清水如代, 門根秀樹, 船山徹, 國府田正雄, 羽田康司, 菅谷 久, 吉岡友和, 山海嘉之, 山崎正志. 重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療. 第 91 回日本整形外科学会学術総会 (神戸), 5 月, 2018.
16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行. 清水如代, 門根秀樹, 久保田茂希, 安部哲哉, 上野友之, 羽田康司, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
21. 頸椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 清水如代, 羽田康治, 野口裕史, 船山 徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲

哉, 久保田茂希, 藤井 賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書
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

分担研究

國府田 正雄 筑波大学医学医療系 整形外科 准教授
山崎 正志 筑波大学医学医療系 整形外科 教授

儀

研究要旨

本年度は、疾患群に対する HAL®腰タイプを用いた運動療法のプロトコルを確立し、その有効性を明らかにすることを目標とした。その第一歩として慢性腰痛症患者に対する HAL®腰タイプ支援の評価を行うためのプロトコル作成とその安全性試験を行った。

運動療法は、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背部の疲労度 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。

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。本プロトコルは安全に実施可能であり、HAL®腰タイプ支援下で腰痛軽減が生じたことから、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。

今後は非特異的腰痛と診断された疾患群に対する安全性をさらに検証し、HAL®腰タイプ支援による腰部負荷の軽減効果や腰痛の治療効果を明らかにしていく。

A. 研究目的

全国民のうち腰痛を有する者はきわめて多く[1]、腰痛の治療にかかる医療経費による直接的な経済損失と、腰痛のため作業効率の低下ならびに休業による間接的な経済損失を合わせると社会に与える影響は非常に大きい[2]。腰痛は原因疾患を特定しうる特異的腰痛と、現在の医療では原因を特定しきれない非特異的腰痛に大別される。腰痛全体に占める非特異的腰痛の割合は実に70%にも上るとする報告がある。非特異的腰痛は慢性化し患者さんの社会的・心理的問題をも引き起こし難治性となることが少なくないので、治療上の大きな問題である。腰痛診療ガイドラインによれば、非特異的腰痛に対して推奨しうる治療法は、投薬及び運動療法である。このうち投薬に関しては NSAIDs やアセトアミノフェン等が第一選択として高いエビデンスレベルをもって推奨されており[3]、日常診療でも頻用されている。一方、運動療法については推奨されているものの[4]、運動強度・方法などが確立されておらず、各々の医師・理学療法士の経験に委ねられているのが現状である。

特異的・非特異的腰痛に対する運動療法の標準化を図り、特異的・非特異的腰痛の治療アウトカム向上が得られれば、その対象患者数の多さから

して、受益者数は非常に多数となりうる。また特異的・非特異的腰痛に関連する直接的、間接的な経済損失の軽減も無視できない利点となりうる。

我々は現在までに健常ボランティアにおける重量物挙上動作反復課題で、HAL®腰タイプ支援による動作効率の向上や腰部疲労度の軽減といった効果を明らかにした。また、腰部への負荷が非常に大きな雪かき動作反復課題においても HAL®腰タイプ装着によって腰部疲労度の軽減とび作業効率向上が得られることを報告した。

これらの先行研究より、健常者においては大きな腰部負荷において HAL®腰タイプ装着下でも腰部疲労感の増大や腰痛の誘発などなく、安全に重量物挙上の負荷を与えることが可能であることが判明した。従って特異的・非特異的腰痛患者においても HAL®腰タイプを用いた運動療法による腰部損傷・腰痛増悪などの危険性は非常に低いものと想定される。特異的・非特異的腰痛患者に対して HAL®腰タイプを用いた運動療法を行えば、現在のところ医師・理学療法士の経験に任せている運動療法のプロトコルを均一化・可視化することが可能となる。このことは、特異的・非特異的腰痛に対する運動療法の真の効果を明らかにするためにも、大変重要で必要なものである。

本研究では、最終的に特異的・非特異的腰痛に対する HAL®腰タイプを用いた運動療法のプロトコルを確立し、その有効性を明らかにすることを目標とし、その第一歩として、特異的・非特異的腰

痛患者に対するHAL®腰タイプ支援の評価を行うプロトコルの安全性試験を行ったので報告する。

B. 研究方法

【実験1】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

1. 対象

被験者は60歳代の成人男性ボランティア1例とした。加齢変性による慢性腰痛を呈していた。身長は160cm、体重は54kgであった。本研究について、事前に十分な説明を行い、同意を得てから実施した。

2. 検討項目

運動療法は、HAL®腰タイプを着用して平地周囲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背部の疲労度VASを計測した。また、日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会が策定したリハビリテーション医療における安全管理・推進のためのガイドラインで示されているリハビリテーションの中止基準を遵守した[6]。

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. 研究結果

【実験1】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

1) 安全性の検証

本被験者において、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。

2) 有害事象

本プロトコルで定めた運動療法を12セッション遂行可能であった。有害事象を認めなかった。

3) 腰痛 VAS

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。HAL®腰タイプ支援下で腰痛軽減が生じたことから、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。

表1 各セッション前後での血圧と脈拍

	収縮期血圧		拡張期血圧		脈拍	
	pre	post	pre	post	pre	post
1	150	148	80	78	70	68
2	144	144	64	66	80	82
3	134	138	77	70	68	72
4	144	150	78	70	72	66
5	146	148	64	66	64	70
6	140	144	70	72	68	70
7	140	142	64	66	60	64
8	140	138	78	70	62	64
9	134	138	60	68	64	70
10	138	136	66	64	80	68
11	140	142	68	68	64	68
12	134	132	70	70	70	68

表2 各セッション前後での腰部と四肢関節疲労度VAS

	腰部疲労 VAS		四肢疲労 VAS	
	pre	post	pre	post
1	9	16	38	48
2	6	4	40	42
3	9	15	31	38
4	7	9	37	42
5	9	12	33	36
6	5	5	33	32
7	7	6	25	35
8	5	4	29	34
9	5	7	20	25
10	8	3	17	17
11	2	3	12	12
12	3	2	7	4

D. 考察

運動療法は、急性期(発症早期)以外の全ての特異的・非特異的腰痛に対して適応がある。特に、慢性腰痛症に対しては主体となる治療法であると考えられている[7]。具体的な推奨プログラムは(1)ストレッチング、(2)筋力増強訓練、(3)体力の向上、(4)動的訓練(神経・筋協調運動の改善)、(5)腰部安定化運動(深部筋群の選択的強化)などと言われる。白土らによる20歳以上65歳未満の患者を対象とした国内の多施設前向き無作為群間比較試験(Japan LET Study)によれば、

週 1 回の外来通院による体幹筋訓練とストレッチングを 10 回 1 セット、1 日 2 セット以上を行う運動療養は、8 週間の NSAIDs 内服より効果が優れることを明らかにした。

装着者の随意的生体電位信号で駆動する HAL[®] 腰タイプ支援下の運動療養は、体幹や下肢のストレッチングおよび動的訓練の要素を含み、同時に下位腰椎椎間板にかかる圧力を軽減するため、慢性腰痛症に対する新たな治療法になる可能性があると考えられる。特に、昨年度に報告した重量物挙上動作による運動でも腰痛は軽減されるが、腰部負荷が大きすぎることによって一部の高齢者や女性では腰痛の悪化が懸念される。そこで、今回 HAL[®] 腰タイプ支援を装着して連続歩行動作や座位からの立ち上がり運動を計画した。本被験者では軽度の腰部、四肢関節疲労や血圧・脈拍の変動であり少ない負荷で、腰痛が軽減された。

重量物を挙上する動作は腰部に対する負荷は大きく、腰痛の増悪を惹起する可能性がある。本研究では慢性腰痛を有する成人男性に対して、より腰部負荷の低いプロトコルを立案し、安全性を評価した。

今後は 65 歳以上の高齢者の腰痛疾患群に対する本プロトコルの安全性を検証し、さらに HAL[®] 腰タイプ支援による腰部負荷の軽減効果や腰痛の治療効果を明らかにしていく。

E. 結論

HAL[®]腰タイプを用いた連続歩行や座位からの立ち上がりによる運動療養は、比較的高齢者であっても安全に実施可能であった。

参考文献

1. 厚生労働省：国民生活基礎調査. 2013.
2. Itoh H, Kitamura F, Yokohama K. Estimates of annual medical costs of work-related low back pain in Japan. *Industrial Health*. 2013;51:524-529.
3. 松平 浩, 川口 哲. 腰痛の薬物治療の実際. *Clin Calcium* 2005; 15:429-436.
4. Airaksinen O, Brox JI, Cedraschi C, et al. European guidelines for the management of chronic nonspecific low back pain. *Eur Spine* 2004;15 Suppl 2:S192-300.
5. 労働省基発 547 号. 職場における腰痛予防対策指針. 1994.
6. 日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会：リハビリテーションにおける安全管理・推進のためのガイドライン. 医歯薬出版. 2006.

7. Shirado O, Ito T, Kikumoto T, et al. A novel back school using a multidisciplinary team approach featuring quantitative functional evaluation and therapeutic exercises for patients with chronic low-back pain; The Japanese experience in general setting. *Spine* 2005;30:1219-1225.

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
2. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J Spinal Cord Med*. 2018 Oct 18:1-9. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]
3. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional

- gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. *J Clin Neurosci.* 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. *J Clin Neurosci.* 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
 6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS One.* 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
 7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Mataka Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report indicating its safety and feasibility. *J Clin Neurosci.* 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
 8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. *Front Neurosci.* 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
 9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. *J Spinal Cord Med.* 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. *整形外科* 2018, 69:628-634.
 11. 小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. *関東整災誌* 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®) 法の開発. *関節外科* 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太郎, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用. *関節外科* 2018, 37:90-93.
- ## 2. 学会発表
1. ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019. シンポジウム
 2. 5 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的变化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019.
 3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的评价. 三浦紘世, 門根秀樹, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 53 回日本脊髄障害医学会 (愛知), 11 月, 2018.
 4. 腰部支援用 HAL を用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果. 三浦紘世, 門根

- 秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 國府田 正雄, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Mataka K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hiroasaki, Japan, Aug 2018.
 12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.
 15. 久保田茂希, 安部哲哉, 清水如代, 門根秀樹, 船山徹, 國府田正雄, 羽田康司, 菅谷 久, 吉岡友和, 山海嘉之, 山崎正志. 重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療. 第 91 回日本整形外科学会学術総会 (神戸)), 5 月, 2018.
 16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行. 清水如代, 門根秀樹, 久保田茂希, 安部哲哉, 上野友之, 羽田康司, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷

- 洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太郎, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
21. 頸椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 清水如代, 羽田康治, 野口裕史, 船山 徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井 賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太郎, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.

H. 知的財産権の出願・登録状況

1. 特許取得
該当なし
2. 実用新案登録
該当なし
3. その他
該当なし

労災疾病臨床研究事業費補助金
分担研究報告書

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

研究分担研究

丸島 愛樹 筑波大学医学医療系 救急・集中治療部 脳神経外科 講師
松村 明 筑波大学医学医療系 脳神経外科 教授

□

研究要旨

本年度は、70 歳代の高齢者女性を対象として術前の C T 画像を用いて、有限要素解析モデルを作成した。C T 画像の読み込みおよび S T L 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) を用いた。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。ここでボリウ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。

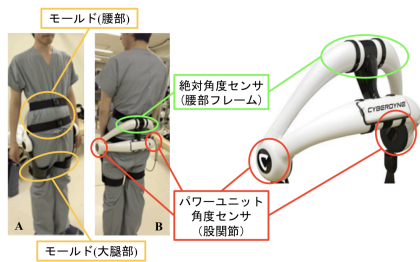
脊柱変形により後弯および側弯症を呈した高齢者の CT 画像を用いた全脊椎有限要素解析モデルでは、側弯のない健常者では発生しないと考えられる側方への負荷が発生し、冠状面での脊柱変形が観測され、高齢者の作業支援を行う場合には、若年健常者とは異なる負荷が内部的に発生することが考えられるため、被験者実験を行う前に、シミュレーションにより脊椎・椎間板への負荷を検討することは有用である。

A. 研究目的

腰痛を有する患者はきわめて多く、厚生労働省による平成25年国民生活基礎調査では、有訴率は男性9.2%、女性11%となっており、男性では最も多い症状、女性では肩こりに次いで多い症状である[1]。腰痛自体の治療にかかる理学療法、投薬などの医療経費による直接的な経済損失と、腰痛による作業効率の低下ならびに休業による間接的な経済損失を合わせると社会に与える影響は非常に大きい。Itohらは、日本国内における職業性腰痛の直接医療費を算出し、年々増加傾向にあり、2011年度には821億円に至ったと報告している[2]。

現在、業務上の腰部負荷を軽減する目的に、様々な外骨格型のアシストスーツが開発研究されており、市場に流通している。我々はその中で HAL[®]腰タイプに着目した。HAL[®]腰タイプは、CYBERDYNE社が開発した腰部負荷を軽減する外骨格型

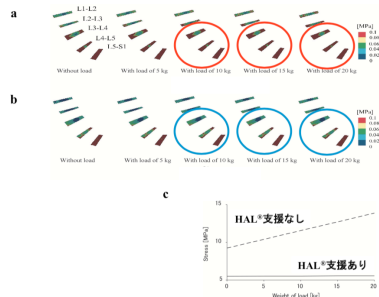
ロボットスーツである。2014年11月に生活支援ロボットの国際安全規格ISO12342を取得し、重量物挙上業務、介護業務ですでに市場に流通している。HAL[®]腰タイプは、腰部と大腿部に取り付けられたモールドと呼ばれる固定具により装着し、股関節部に有するパワーユニットが、体幹屈曲・伸展と股関節屈曲・伸展の動作をアシストする動作機序である。装着者の脊柱起立筋の生体電位信号で駆動トルクが発生し (Cybernetic voluntary control)、両モールドを介して体幹及び下肢に伝達される。また、絶対角度センサと角度センサから算出される装着者の上半身の体重に対する重力補償をCybernetic autonomous controlで実現し、ハイブリッド制御する (下図)。



HAL腰タイプの構造

3次元骨格系モデルを用いた有限要素法による応力シミュレーション解析による基礎実験では、体幹前屈角度が大きい静止姿勢の重量物挙上動作における腰椎椎間板圧迫力が、鉛直下向き方向に荷重をかけた状態では、腰部負荷がHAL®腰タイプ支援下では支援がないときに比べ減少することを明らかにした[3]。

□



有限要素法を用いたHAL®腰タイプの腰部負荷の応力解析

我々は重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援は腰部負荷を軽減すると仮説を立て、H28年度に重量物挙上動作に対するHAL®腰タイプ支援の安全性試験を行った。本年は昨年に引き続き単群前後比較試験を行い、HAL®腰タイプ支援の効果に関する評価を行ったので報告する。

B. 研究方法

【実験1】脊椎変性患者においてHAL®腰タイプを使用した重量物挙上を行った場合の脊椎負荷シミュレーション

1. 対象

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。

2. ソフトウェア

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) を用いた。

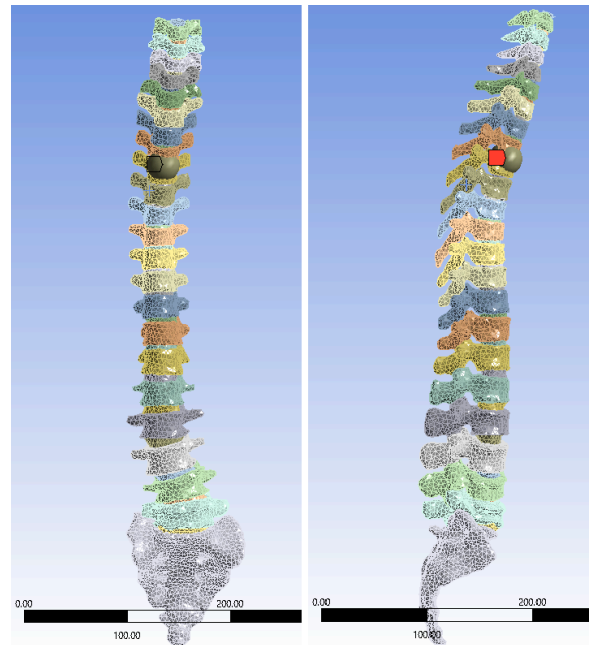
3. 方法

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。

C. 研究結果

【実験1】脊椎変性患者においてHAL®腰タイプを使用した重量物挙上を行った場合の脊椎負荷シミュレーション

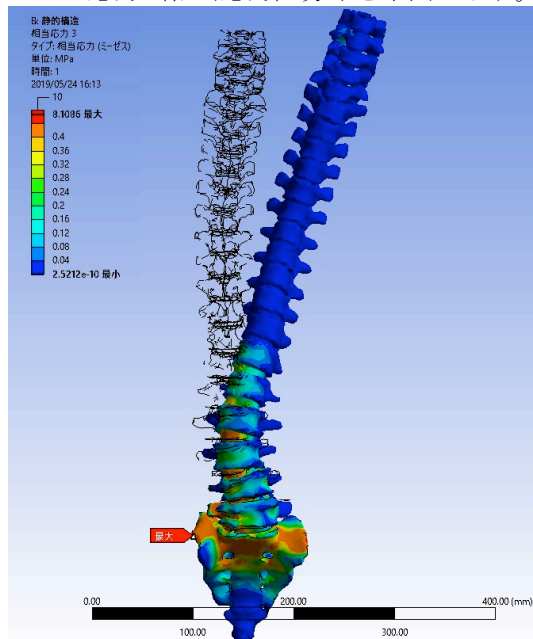


全脊椎有限要素解析モデル 左：冠状面、右：矢状面

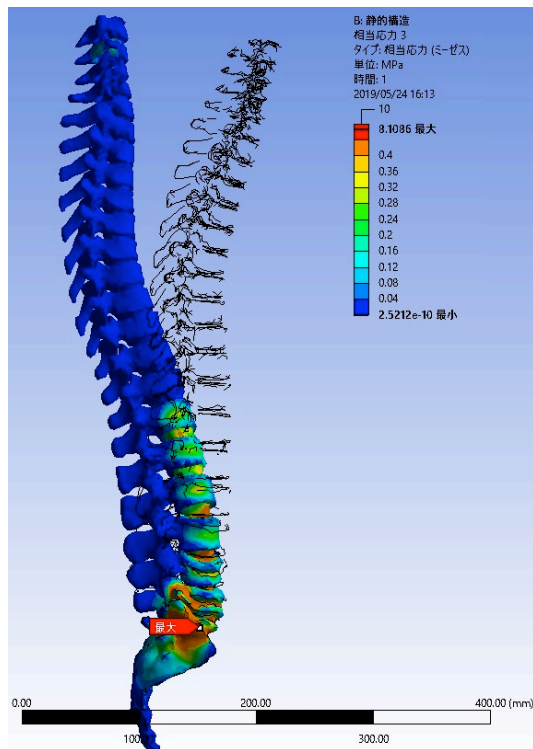
作成した全脊椎の有限要素解析モデルを上図に示す。

仙椎部を固定端として、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 の並進力を負荷した場合のミーゼス応力 (相当応力) 分布を下图に示す。



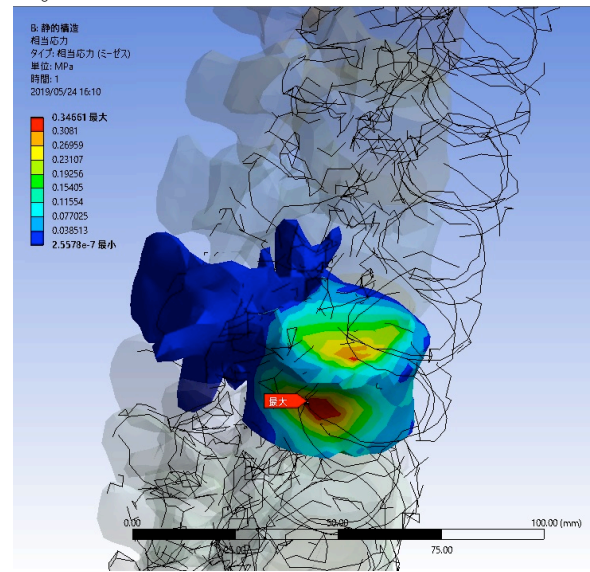
外力負荷時のミーゼス応力分布：冠状面



外力負荷時のミーゼス応力分布：矢状面

本条件においては、仙椎翼で最大応力が発生した。冠状面、矢状面の両方で変形が発生した。また、同様の境界条件における椎骨ごとの応力解析の例として、L2 のみを表示した図を下に示す。椎骨単位では、椎体の中央部で最大応力が発生し

た。



外力負荷時のミーゼス応力分布：L2

D. 考察

本研究では、脊柱変形により後弯および側弯症を呈した高齢者の CT 画像を用いて全脊椎有限要素解析モデルを作成し、外力負荷時の応力分布について検討した。

高齢者は、農村部での農業や除雪作業など、腰部負荷にさらされることが多く、我々はこれまでの研究において、HAL®腰タイプを用いた除雪作業の支援で腰部疲労度の軽減及び作業効率化に寄与することができることを示してきた。

今回の外力負荷条件は、健常者においては影響が矢状面内にとどまるものと考えられるが、本症例においては側弯により冠状面での変形も発生した。高齢者は、若年者に比べて、本研究の解析対象でみられたような成人脊柱変形を伴うことが多い。本研究でのシミュレーションでは、矢状面内のタスクであり側弯のない健常者では発生しないと考えられる側方への負荷が発生し、冠状面での脊柱変形が観測された。このように、HAL®腰タイプを用いて高齢者の作業支援を行う場合には、若年健常者とは異なる負荷が内部的に発生することが考えられるため、被験者実験を行う前に、シミュレーションにより脊椎・椎間板への負荷を検討することは有用であると考えられた。

E. 結論

脊柱変形により後弯および側弯症を呈した高齢者の CT 画像を用いた全脊椎有限要素解析モデルでは、側弯のない健常者では発生しないと考えられる側方への負荷が発生し、冠状面での脊柱変

形が観測された。

参考文献

1. 厚生労働省：国民生活基礎調査. 2013.
2. Itoh H, Kitamura F, Yokohama K. Estimates of annual medical costs of work-related low back pain in Japan. *Industrial Health*. 51: 524-529, 2013
3. 原大雅, 山海嘉之. 3次元骨格系モデルによる腰部支援用 HAL の動作支援評価. *生体医工学*. 50: 111-116, 2012
4. 労働省基発 547 号. 職場における腰痛予防対策指針. 1994.
5. 日本リハビリテーション医学会診療ガイドライン委員会：リハビリテーションにおける安全管理・推進のためのガイドライン. 医歯薬出版. 2006.
6. 波之平晃一郎, 藤村昌彦. Lifting 動作の筋電図学および運動学的研究-重量物の質量が動作方法におよぼす影響. *日本職業・災害医学学会誌*. 58: 234-239, 2010

G. 研究発表

1. 論文発表

1. Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M. Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system. *J Orthop Surg (Hong Kong)*. 2018 May-Aug;26(3):2309499018806688. doi: 10.1177/2309499018806688.
2. Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial. *J Spinal Cord Med*. 2018 Oct 18:1-9. doi: 10.1080/10790268.2018.1525975. [Epub ahead of print]
3. Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi

- H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M. The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul;53:276-279. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.057. Epub 2018 May 3.
4. Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M. Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jul 53:241-243. doi: 10.1016/j.jocn.2018.04.051. Epub 2018 May 3.
5. Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Matak K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M. Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report. *J Clin Neurosci*. 2018 Jun 52:141-144. doi: 10.1016/j.jocn.2018.03.010. Epub 2018 Mar 31.
6. Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K. Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenal questionnaire study on shaping and compensation of forward gait. *PLoS One*. 2018; 13(3): e0194214. Published online 2018 Mar 12. doi: 10.1371/journal.pone.0194214
7. Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Matak Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M. Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report indicating its safety and feasibility. *J Clin Neurosci*. 2018 Apr 50:268-271. doi: 10.1016/j.jocn.2018.01.038.
8. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T,

- Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. *Front Neurosci*. 2018 Mar 2;12:99. doi: 10.3389/fnins.2018.00099. eCollection 2018.
9. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M. Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report. *J Spinal Cord Med*. 2018 Jan 19:1-9. doi: 10.1080/10790268.2017.1423267. [Epub ahead of print]
 10. 山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄. 脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療. *整形外科* 2018, 69:628-634.
 11. 小林 高弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志. 重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツ HAL®を用いてリハビリテーションを行った 1 例. *関東整災誌* 2018, 4:106-111.
 12. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツ HAL®を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL®(T-HAL®) 法の開発. *関節外科* 2018, 37:60-72.
 13. 國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太朗, 柴尾 洋介, 山崎 正志. 腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用. *関節外科* 2018, 37:90-93.
2. 学会発表
1. ロボットスーツ HAL を用いた歩行訓練による首下がり症候群の改善. 三浦紘世, 久保田茂希, 松井彩乃, 安部哲哉, 門根秀樹, 清水如代, 野口裕史, 船山徹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019. シンポジウム
 2. 三次元動作解析による首下がり症候群における脊柱アライメントの連続歩行時の動的変化. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 9 回日本成人脊柱変形学会 (東京), 3 月, 2019.
 3. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 53 回日本脊髄障害医学会 (愛知), 11 月, 2018.
 4. 腰部支援用 HAL を用いた重量物挙上反復動作における腰部負荷軽減効果. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 5. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 6. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 7. 慢性期脊髄損傷に伴う四肢・両下肢完全麻痺症例における heterotopic triggered HAL (T-HAL) 法の開発. 清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 國府田 正雄, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志. 第 33 回日本整形外科学会基礎学術集会 (奈良), 10 月, 2018.
 8. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 9. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.

10. 首下がりに対する三次元歩行動作解析を用いたアライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 柴尾洋介, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 山崎正志. 第 27 回日本脊椎インストゥルメンテーション学会 (東京), 9 月, 2018.
 11. Efficacy of gait training using HAL® after surgery for severe myelopathy due to thoracic ossification of the posterior longitudinal ligament. Abe T, Miura K, Funayama T, Fujii K, Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Nagashima K, Shibao Y, Mataka K, Kumagai H, Noguchi H, Koda M, Sankai Y, Yamazaki M. The 20th German-Japanese Society for Orthopaedics and Trauma, Hiroasaki, Japan, Aug 2018.
 12. Heterotopic triggered HAL method for patients with complete quadriplegia. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M. The 12th World Congress of the International Society of Physical and Rehabilitation Medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 13. Kubota S, Shimizu Y, Kadone H, Abe T, Mutsuzaki H, Hada Y, Yamazaki M. Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy caused by ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in postoperative acute phase. The 12th International society of physical and rehabilitation medicine (ISPRM), Paris, France, July 2018.
 14. Feasibility and Efficacy of Heterotopic Triggered HAL method for patients with complete Quadriplegia or Paraplegia due to chronic spinal cord injury. Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Abe T, Ueno T, Ishimoto R, Hada Y, Yamazaki M. The 55th Annual Meeting of the Japanese Association of Rehabilitation Medicine, Fukuoka, Japan, Jun 2018.
 15. 久保田茂希, 安部哲哉, 清水如代, 門根秀樹, 船山徹, 國府田正雄, 羽田康司, 菅谷 久, 吉岡友和, 山海嘉之, 山崎正志. 重度歩行障害を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後急性期におけるロボットスーツ HAL を用いた治療. 第 91 回日本整形外科学会学術総会 (神戸), 5 月, 2018.
 16. 四肢・両下肢完全麻痺症例における対側上肢筋活動を利用した随意的 HAL 歩行. 清水如代, 門根秀樹, 久保田茂希, 安部哲哉, 上野友之, 羽田康司, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 17. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 18. 成人脊柱変形に対する歩行動作解析を用いた上肢運動評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 91 回日本整形外科学会 (神戸), 5 月, 2018.
 19. 成人脊柱変形に対する三次元歩行動作解析を用いた全脊柱アライメントの動的評価. 三浦紘世, 門根秀樹, 熊谷洋, 長島克弥, 俣木健太朗, 藤井賢吾, 野口裕史, 船山徹, 安部哲哉, 國府田正雄, 鈴木健嗣, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 20. Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery. Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 21. 頸椎 OPLL 術後の脊髄萎縮に伴う慢性増悪に対するロボットリハビリテーション. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太朗, 清水如代, 羽田康司, 野口裕史, 船山 徹, 門根秀樹, 國府田正雄, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
 22. 重度脊髄障害を呈した胸椎後縦靱帯骨化症に対する術後 HAL 訓練の効果. 安部哲哉, 久保田茂希, 藤井 賢吾, 三浦紘世, 長島克弥, 熊谷 洋, 俣木健太朗, 野口裕史, 船山徹, 清水如代, 羽田康司, 門根秀樹, 國府田正雄, 山海嘉之, 山崎正志. 第 47 回日本脊椎脊髄病学会 (神戸), 4 月, 2018.
- H. 知的財産権の出願・登録状況**
1. 特許取得
該当なし
 2. 実用新案登録

該当なし
3. その他
該当なし

研究成果の刊行に関する一覧表

書籍

著者氏名	論文タイトル名	書籍全体の編集者名	書 籍 名	出版社名	出版地	出版年	ページ

雑誌

発表者氏名	論文タイトル名	発表誌名	巻号	ページ	出版年
Miura K, Kadone H, Koda M, Nakayama K, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Suzuki K, Yamazaki M	Visualization of walking speed variation-induced synchronized dynamic changes in lower limb joint angles and activity of trunk and lower limb muscles with a newly developed gait analysis system.	J Orthop Surg (Hong Kong)	26	<i>in Press</i>	2018
Kubota S, Abe T, Kadone H, Shimizu Y, Funayama T, Watanabe H, Marushima A, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M	Hybrid assistive limb (HAL) treatment for patients with severe thoracic myelopathy due to ossification of the posterior longitudinal ligament (OPLL) in the postoperative acute/subacute phase: A clinical trial.	J Spinal Cord Med.	18	1-9	2018
Miura K, Kadone H, Koda M, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Kawamoto H, Sankai Y, Yamazaki M	The hybrid assistive limb (HAL) for Care Support successfully reduced lumbar load in repetitive lifting movements.	J Clin Neurosci	53	276-279	2018
Miura K, Koda M, Kadone H, Abe T, Kumagai H, Nagashima K, Matakaki K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Suzuki K, Yamazaki M	Successful detection of postoperative improvement of dynamic sagittal balance with a newly developed three-dimensional gait motion analysis system in a patient with iatrogenic flatback syndrome: A case report.	J Clin Neurosci	53	241-243	2018

Miura K, Koda M, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Kumagai H, Nagashima K, Mataka K, Fujii K, Noguchi H, Funayama T, Abe T, Sankai Y, Yamazaki M	Gait training using a hybrid assistive limb (HAL) attenuates head drop: A case report.	J Clin Neurosci	52	141-144	2018
Gruneberg P, Kadone H, Kuramoto N, Ueno T, Hada Y, Yamazaki M, Sankai Y, Suzuki K	Robot-assisted voluntary initiation reduces control-related difficulties of initiating joint movement: A phenomenological questionnaire study on shaping and compensation of forward gait.	PLoS One	13	1-9	2018
Kubota S, Abe T, Koda M, Kadone H, Shimizu Y, Mataka Y, Noguchi H, Fujii K, Marushima A, Funayama T, Kawamoto H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M	Application of a newly developed upper limb single-joint hybrid assistive limb for postoperative C5 paralysis: An initial case report indicating its safety and feasibility.	J Clin Neurosci	50	268-271	2018
Puentes S, Kadone H, Kubota S, Abe T, Shimizu Y, Marushima A, Sankai Y, Yamazaki M, Suzuki K	Reshaping of Gait Coordination by Robotic Intervention in Myelopathy Patients After Surgery	Front Neurosci	2	12:99	2017
Shimizu Y, Kadone H, Kubota S, Suzuki K, Saotome K, Ueno T, Abe T, Marushima A, Watanabe H, Endo A, Tsurumi K, Ishimoto R, Matsushita A, Koda M, Matsumura A, Sankai Y, Hada Y, Yamazaki M	Voluntary ambulation using voluntary upper limb muscle activity and Hybrid Assistive Limb® (HAL®) in a patient with complete paraplegia due to chronic spinal cord injury: A case report.	J Spinal Cord Med	19	1-9	2018
山崎 正志, 久保田 茂希, 門根 秀樹, 清水 如代, 安部 哲哉, 國府田 正雄	脊柱靱帯骨化症に伴う急性および慢性脊髄障害に対するロボットスーツを用いた機能回復治療.	整形外科	69	628-634	2018

小林 嵩弘, 野口 裕史, 安部 哲哉, 船山 徹, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 熊谷 洋, 長島 克弥, 三浦 紘世, 國府田 正雄, 山崎 正志	重度脊髄症を呈する頸・胸椎後縦靱帯骨化症術後にロボットスーツHAL [®] を用いてリハビリテーションを行った1例.	関東整災誌	4	106-111	2018
清水 如代, 門根 秀樹, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 上野 友之, 羽田 康司, 山崎 正志	慢性期脊髄損傷に対するロボットスーツHAL [®] を用いた麻痺肢運動-Heterotopic Triggered HAL [®] (T-HAL [®])法の開発.	関節外科	37	60-72	2018
國府田 正雄, 久保田 茂希, 安部 哲哉, 船山 徹, 野口 裕史, 三浦 紘世, 長島 克弥, 熊谷 洋, 俣木 健太朗, 柴尾 洋介, 山崎 正志	腰痛に対するロボットリハビリテーションの応用.	関節外科	37	90-93	2018