

## OS1-1

## 筋骨格動力学シミュレーターを用いた除雪作業用 UD スコップ使用時の身体的負担評価

## Evaluation of the physical strain in Using UD Shovel for Removing Snow

## by Musculo-Skeletal Dynamics Simulator

○奈良博之 (北大) 田中孝之 (北大) 今村由芽子 (北大)

吉成哲 (道総研) 中島康博 (道総研) 金子俊一 (北大)

Hiroyuki Nara, Hokkaido University  
 Takayuki Tanaka, Hokkaido University  
 Yumeko Imamura, Hokkaido University  
 Satoshi Yoshinari, Hokkaido Research Organization  
 Yasuhiro Nakajima, Hokkaido Research Organization  
 Shun'ichi Kaneko, Hokkaido University

**Abstract:** Our purpose in this study is to achieve an independent life and a social involvement for the elderly using KEIROKA Technology(work load-reduction) which makes it possible to improve the quality of chores and occupations by removing excessive strain and tiredness. Along the way, various assistant technologies for work and task supports have been suggested. However, they are used for evaluation of short-term effects and their design and assessment in a long-term standpoint are not performed. Therefore, final purpose in this research is to examine the possibility to evaluate KEIROKA Technology using Musculo-Skeletal Dynamics Simulator. So, experiments were performed to measure movements of subject using a conventional shovel with straight-line hilt and a UD shovel with flexural hilt by using three-dimensional motion analysis system and analyzed the physical strain caused by differences of shovels using Musculo-Skeletal Dynamics Simulator.

**Key Words:** KEIROKA Technology, Musculo-Skeletal Dynamics Simulator, Universal Design, Assistive Technology

## 1. はじめに

高齢社会である日本においては、若年者が多面的に高齢者を支える基本的な社会システムが必要であるが、現在の人口構成から考えるとそれだけでは社会構造として成立させることはもはや非常に困難な状況である。したがって、高齢者が自らの能力に応じた自立した日常生活を営むことが必要不可欠と考えられる。さらに、高齢者の生活の質の向上を目指すためには、高齢者も生きがいを持ち、日々の生活を送ることが必要である。そのため、高齢社会において高齢者が元気に生活して働くことができるように支援する技術は、労働者人口の減少、社会保障費の増加に加え、高齢者に社会参画を可能な限り延長することに対応することになる。

そこで、我々は、高齢者の過度の負担や疲労を取り除くことで作業や仕事の質を高めることが可能である「軽労化技術」を高齢者に適用することで、自立生活と社会参加を実現することを目指している。そして、人の手による仕事の価値を見直し、安心・安全(Secure)、持続的に(Sustainable)、さりげなく(Subliminal)作業支援する 3S アシスト軽労化技術を提唱している。

この概念は、人の疲労軽減および機能維持を目的とし、過度の作業負担を取り除いて、蓄積疲労に伴う身体機能の衰えを防ぐとともに、かつ現存の筋力などの身体的機能を可能な限り衰えさせることなく、作業支援を可能にするものである。これにより、高齢者でも持続的に社会参画が可能になり、高齢社会を豊かに生活することが可能になると考える。

我々は、これまでに、2 種類の軽労化技術を開発している。1 つは主に農作業などの中腰姿勢や前屈運動を補助する人に優しい装着型筋力補助装置「スマートスーツ」であ

る。もう 1 つは、無理な前屈姿勢を取ることなく除雪作業を行えるようデザインした「ユニバーサルデザイン (UD) ・スコップ」である。前者は装着型軽労化技術、後者は器具改良型軽労化技術と定義している。いずれも、作業負担や疲労を軽減する一定程度の効果を確認している。特に「UD スコップ」に関しては、6 週間に渡る長期使用時における雪かき作業に関する被験者実験を 42 名に対して行い、基礎体力の変化などに関しての調査を実施してきた<sup>(1)</sup>。

また、雪かき作業に関しては前屈姿勢が身体的負担に大きく影響していることが分かっているが、前屈姿勢は身長の違いによる影響が大きいと考えられるため、身長差による身体的負担も調べておく必要があると考えられるが、筋力の違いなどの他の影響を排除した、純粋に身長の違いによる身体的負担への影響の違いを調べるには、比較対象となる被験者の統制が必要となる。

ところで、近年では計算機技術の発達により、様々な分野においても各種シミュレーターを利用した仮想設計技術が利用されている<sup>(2)(3)</sup>。人体メカニズムのモデリングが可能な筋骨格動力学シミュレーターは、個々の筋、関節力、代謝、腱の弾性エネルギー、拮抗筋力、その他動作中の人体における様々な属性に作用する力の値を計算することが可能となるため<sup>(4)(5)</sup>、多数の被験者実験を実施することなしに様々なシミュレーションおよび評価を実施することが可能になる。例えば身長をパラメータとした身体的負担の比較なども容易に実施可能になると考えられる。さらに、高齢者を対象とした機器の開発、設計、評価に関して、被験者の精神的・身体的負担を強いることなしに行うことが可能になるために非常に有益であると考えられる。

そこで本研究においては、筋骨格動力学シミュレーターを用いた軽労化技術評価の可能性について検討することを

最終的な目的として、直線柄である「標準スコップ」と屈曲柄である「UD スコップ」を用いた時の身体運動の動的計測を、3次元動作解析装置を用いて計測した結果を用いて、筋骨格力学シミュレーターによるスコップの違いによる身体的負担の解析を行った。

また、実測データを基にして筋骨格力学シミュレーターにおいて被験者の身長を変更した場合のシミュレーション方法について検討し、身長の違いによって雪かき動作時の身体的負担にどのような違いが見られるかを確かめた。

## 2. 雪かき動作の動的計測

### 2-1 実験装置



Fig. 1 Experimental Equipment

雪かき動作時の身体運動の動的計測には、3次元動作解析装置（Oxford Metrics 社製 VICON610）、CCD カメラ 8 台（60Hz）、床反力計 2 台（AMTI）、テレメータ（日本光電 WEB-5000）を接続したシステムにより赤外線体表マーカーへ照射し反射光を記録し、3次元位置を計測する方法を用いた。また、表面電極を用いて、動作時の上下肢、体幹部の主要筋群の筋活動を、表面筋電計を用いて同時に計測を行った。

使用したスコップは 2 種類であり、1 つは柄が直線状の「標準スコップ」と、もう一つは、無理な前屈姿勢を取ることなく除雪作業を行えるよう屈曲した柄の「ユニバーサルデザイン（UD）・スコップ」である。

### 2-2 実験方法

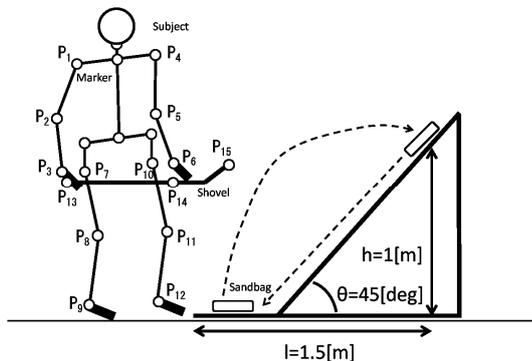


Fig. 2 Experimental Method

実験は、正面に向かって左手方向約 1.5m 先に設置した角度 45 度の傾斜台に向かい、傾斜台の高さ約 1m の位置に砂袋を投げる模擬除雪動作を行った。模擬除雪動作は、砂袋をすくって腰の高さまで持ち上げ、砂袋を投擲する動作を行った。また、実際の雪の代わりに投擲物としては 3kg

の砂袋を用いた。1 回の模擬除雪動作は約 5 秒である。

動的計測を行った被験者は男性、身長 160cm、体重 60kg、利き腕は右利きである。

## 3. 筋骨格力学シミュレーターを用いた解析

### 3-1 筋骨格力学シミュレーターによる被験者情報の変更時の解析

雪かき作業に関しては前屈姿勢が身体的負担に大きく影響していることが分かっているが、前屈姿勢は身長の違いによる影響が大きいと考えられるため、身長差による身体的負担を調べておく必要があると考えられるが、筋力の違いなどの他の影響を排除した、純粋に身長の違いによる身体的負担への影響の違いを調べるには、比較対象となる被験者の統制が必要となる。

しかしながら、筋骨格力学シミュレーターを用いることで身長の違いのみによる身体的負担を比較できるのではないかと考えられる。また、基本的な実測データを基にして被験者の様々なパラメータ（身長、体重、筋力など）を変更して、各種解析および評価を可能にする手法は非常に重要であると考えられる。またこれらの手法が確立できれば、軽労化技術における仮想設計技術として用いることが可能になり、最適設計に有効であると考えられる。

そこで今回は 3次元動作解析装置により計測した動作データをもとにして、被験者の身長を変更した場合に身体的負担（筋発揮力）にどのような変化を生じるかを調べた。

今回用いたシミュレーションを行う被験者の身長を変更する手順については具体的には以下の通りとなる。

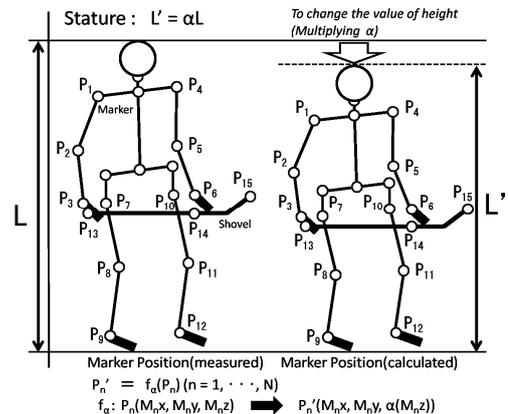


Fig. 3 Changing Subject's Stature

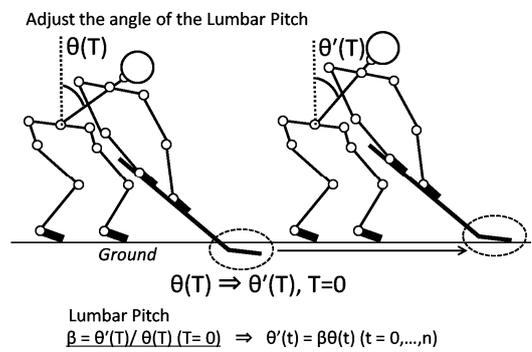


Fig. 4 Adjustment of Lumbar Pitch

1.  $P(n)$ は 3次元動作解析装置によって検出されたマーカーの 3次元位置とする。ここで、 $n$  は、マーカー番号とする(Fig.3)。

$$\therefore P(n) = (M_n x, M_n y, M_n z) (n = 1, \dots, N)$$

ここで、式(1)を定義する。

$$P'(n) = f_a(P(n) = (M_n x, M_n y, \alpha M_n z)) \cdots (1)$$

$\alpha$ は、以下に示す変数とする。

2. 同様の方法で、

$$L' = \alpha L \quad \cdots (2)$$

$L$ は、被験者の身長とする。

3. ここで、腰の角度(Lumbar Pitch)として $\theta$ を定義する (Fig.4)。

$$\beta = \frac{\theta'(T)}{\theta(T)} (T = 0) \quad \cdots (3)$$

$T$ は、時間とする。

4. 動作計測データの腰の角度(Lumbar Pitch)の値に対して式(3)で与えられる $\beta$ を掛ける。

$$\theta'(t) = \beta \theta(t) (t = 0, \dots, N) \quad \cdots (4)$$

$t$ は、時間とする。

5. 上記の処理を行って作成した新たな動作計測データを入力値としてシミュレーションを行う。

筋骨格力学シミュレーターでは人体モデルのスケールリングをする際に、身長だけではなく体重も設定するが、今回は体重も身長と同じように $\alpha$ を掛ける処理を行っている。したがって、今回の場合だと実測した被験者データは、身長 160cm、体重 60kg であるため、 $\alpha = 0.9$ 、1.1 の場合にはそれぞれ身長 154cm、体重 54kg と身長 176cm、体重 66kg となる。

### 3-2 被験者の身長変更後のシミュレーション結果

今回は、実測した被験者の身長(160 cm)に対して、身長および体重の設定値を 90% ( $\alpha = 0.9$ )にした場合と 110% ( $\alpha = 1.1$ )にした場合についてシミュレーションを行って検討することにした。筋骨格力学シミュレーターには、SIMM Version 4.2.2a14(MusculoGraphics 社)を用いた。

2.で述べた実験装置、実験方法に従い計測した動作データに対して、3.で述べた手順に従い動作計測データを変更し、その動作データを基にしてSIMMを用いて身体的負担をシミュレーションした。今回は体幹動作に主に関係している脊柱起立筋群に関する筋活性度(Muscle Activation)を逆力学解析により計算を行った。その結果のグラフを図に示す。

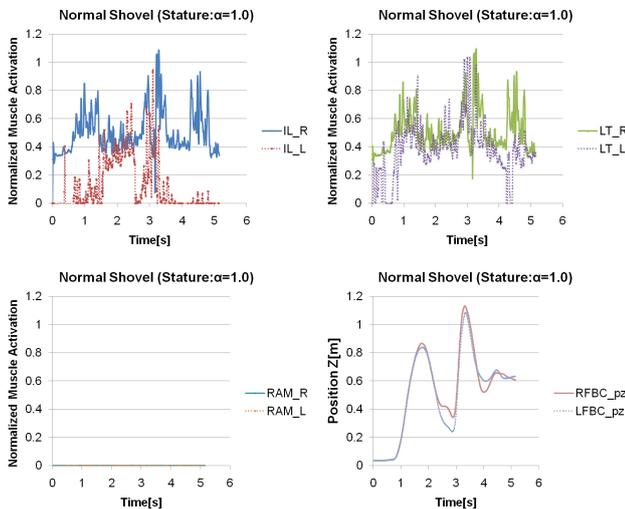


Fig. 5 Muscle Activation: Normal ( $\alpha = 1.0$ )

なお、グラフの各ラベルと筋肉(Right/Left)と対応は以下になる。

- ・腰腸筋筋 Iliocostalis lumborum muscle(R/L): IL\_(R/L)
- ・胸最長筋 Longissimus thoracis muscle(R/L): LT\_(R/L)
- ・腹直筋 Rectus abdominis muscle (R/L) : RAM\_(R/L)

Fig. 5 は、柄が直線の従来型の標準スコープを使用した時の脊柱起立筋群の筋活性度を示したグラフである。横軸は時間[s]、縦軸はそれぞれの筋活性度を計測時間内の最大値で正規化したものである。また、RFBC\_pz、LFBC\_pz はスコープの刃の前方の左右に付けたマーカーの Z 軸座標 [m]になる。

このグラフから RAM は、ほとんど筋活動が見られない状態であった。また、IL と LT についてはいずれも左より右の筋活性度が大きい状態であった。そこで IL と LT の筋活性度の積分値 / 時間を計算した結果のグラフと、それらの値の左右の比を計算した結果のグラフを図に示す。

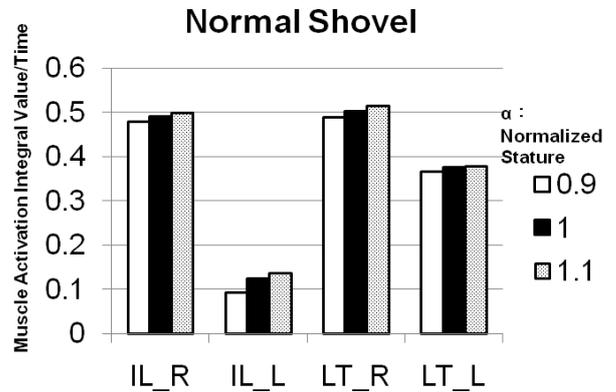


Fig. 6 Muscle Activation Integral Value/Time(Normal)

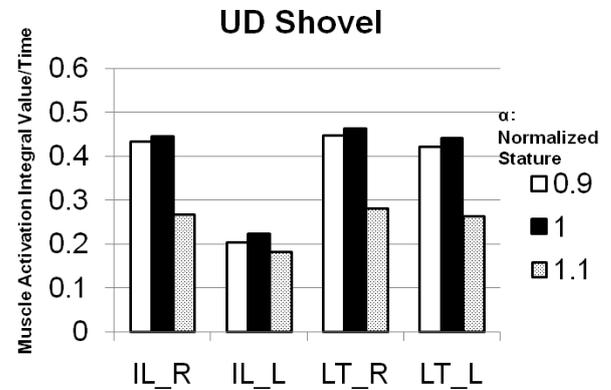


Fig. 7 Muscle Activation Integral Value/Time (UD)

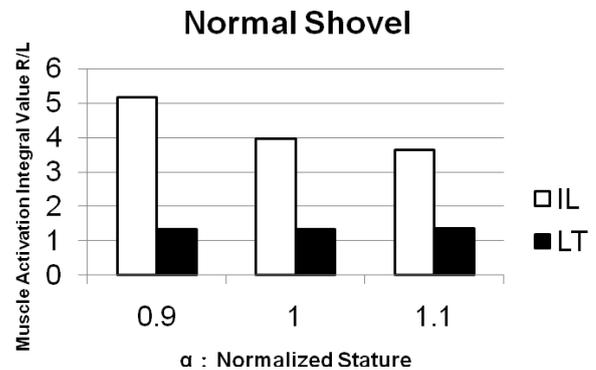


Fig. 8 Muscle Activation Integral Value R/L(Normal)

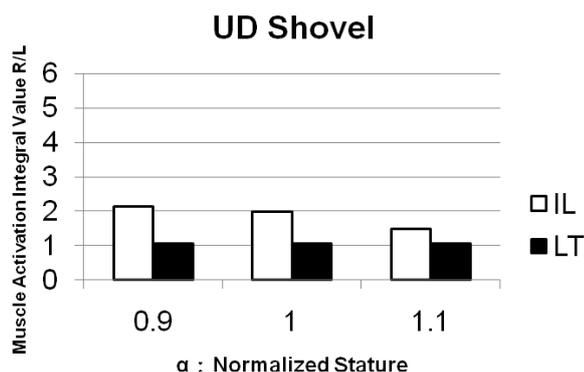


Fig. 9 Muscle Activation Integral Value R/L(UD)

Fig. 6、Fig. 7は、横軸は各筋肉、縦軸は筋活性度の積分値 / 時間のグラフ、Fig. 8、Fig. 9は、横軸は $\alpha$ 、縦軸はFig. 6、Fig. 7の縦軸の値の左右の比のグラフで、Fig. 6、Fig. 8は通常スコップの場合、Fig. 7、Fig. 9はUDスコップの場合のグラフになる。

Fig. 8、Fig. 9のグラフから、通常スコップおよびUDスコップのいずれの場合でも、ILとLTの右/左の値は1より大きなことから右側の筋活性度の値が大きいことが分かる。

また、Fig. 8、Fig. 9の各グラフのILの右/左の値は、いずれもUDスコップの場合より標準スコップの場合の値が大きいことが分かる。

さらに、Fig. 8、Fig. 9の各グラフより、UDスコップの場合および標準スコップの場合のILの右/左の値は、 $\alpha$ の値が小さいほど、つまり身長が低いほど値が大きい結果となった。

#### 4. 考察

過去の実験より体の左側の雪をすくう動作の場合は右側脊柱起立群が疲労するが、屈曲柄のUDスコップを使用することで筋負担に関して左右差が小さくなることが報告されている。また、筋疲労度の一指標である平均パワー周波数(MPF)の低下率は、通常スコップでは右脊柱筋群の低下率が大きく、UDスコップでも同様な低下傾向であったが、標準スコップほど顕著な左右差は無かったと報告されている<sup>(6)(7)</sup>。

今回のシミュレーションの結果の各グラフを見ると、LTの筋活性度の積分値の左右比(右/左)の値は、最大の場合でも1.5以下であることから左右差はあまり見られないが、ILの筋活性度の積分値の左右比(右/左)の値は最大では5以上となり、右側の筋負担が大きいことを示している。また、ILの筋活性度の積分値の左右比(右/左)の値は、いずれもUDスコップの場合より標準スコップの場合の値が大きく、通常スコップでは左右差に顕著な違いが見られる結果となった。

これらの結果は過去の報告と一致していると考え、被験者の身体パラメータである身長(および体重)をシミュレーター内で変更した場合でも実際の実験結果と同様な結果が得られることを示している。

また、身長が小さくなるほど左右差が大きくなる傾向が見られている。過去の実験では雪かき作業負荷(実験での砂袋質量)が大きくなるに従い、脊柱起立筋活動の左右差が大きくなると報告されている。雪かき作業負荷(砂袋質量)が一定の場合には、身長が低い被験者では一般的には

筋力も弱くなると予想され、相対的な雪かき作業負荷(砂袋質量)が大きくなっているとも考えられる。したがって、身長が小さいほど脊柱起立筋活動の左右差が大きくなると予想でき、実験結果と一致していると考えることができる。

#### 5. まとめ

本研究においては、筋骨格力学シミュレーターを使い、直線柄である「標準スコップ」と屈曲柄である「UDスコップ」を用いた時の身体運動の動的計測を3次元動作解析装置により計測し、その結果を用いて身長およびスコップの違いによる身体的負担の解析を行い軽労化技術の評価可能性の検討を行った。

過去の実験よりUDスコップを使用することで筋負担に関して左右差が小さくなる報告と同様に、シミュレーションの結果からも、UDスコップを使用することで筋負担に関して左右差が小さくなることが示され、筋骨格力学シミュレーターによる軽労化技術評価に関する検討の妥当性を示した。

今後は身長が異なる被験者の3次元動作解析データを実際に計測し、その結果と筋骨格力学シミュレーターで身長を変更した場合の結果の整合性について検討していく。また、軽労化技術に関してシミュレーターを利用した仮想化設計技術の構築についても検討したいと考える。

本研究は(独)科学技術振興機構(JST)の研究成果展開事業【戦略的イノベーション創出推進プログラム】(S-イノベ)の支援によって行われた。(研究課題名:「高齢社会での自立生活支援のための軽労化技術の研究開発と評価システムの構築」)

#### 参考文献

- (1) 瀧澤一騎, 吉成哲, 奈良博之, 鈴木善人, 田中孝之, “雪かき運動におけるLT強度測定を目的とした漸増負荷運動プロトコルの作成”, 体力医学会北海道地方会, 2011.
- (2) 藤井勝敏, “福祉機器設計のためのVRシミュレーション提示技術に関する研究(1)”, 岐阜県生産情報技術研究所研究報告(4), pp.57-60, 2002.
- (3) 茅原崇徳, 瀬尾明彦, “筋負担の総合評価に基づく人間工学的設計法に関する基礎的検討”, 日本機械学会論文集C編 77(776), pp.1477-1490, 2011.
- (4) Edmund YS Chao, Robert S Armiger, Hiroaki Yoshida, Jonathan Lim, Naoki Haraguchi, “Virtual interactive musculoskeletal system (VIMS) in orthopaedic research, education and clinical patient care”, Journal of Orthopaedic Surgery and Research, doi:10.1186/1749-799X-2-2,2007.
- (5) E. Pennestri, R. Stefanelli, P.P. Valentini, L. Vita, “Virtual musculo-skeletal model for the biomechanical analysis of the upper limb”, Journal of Biomechanics, Vol.40, Issue 6, pp.1350-1361, 2007.
- (6) 大山陽平, 田中敏明, 吉成哲, 中島康博, 桑野晃希, 藤原健一, 林昌宏, 白銀暁, 前田佑輔, 須田力, “ショベル柄の形状と雪重量の違いが除雪動作時の筋活動に及ぼす影響”, 理学療法基礎系20, pp.256, 2005.
- (7) 吉成哲, 中島康博, 桑野晃希, 畑沢賢一, 中村勝男, 月館司, 林昌宏, 田中敏明, 須田力, 辰巳司, 藤原健一, “運動負担予測技術の開発と製品への応用”, 北海道立工業試験場重点領域特別研究報告書, pp.33-37, 2005.