

# スマートスーツ<sup>®</sup> 採用による「軽労化<sup>®</sup>」の深耕 作業員の身体能力評価と安全意識改革及び労災リスク調査

田中吉史・土谷圭央

軽労化<sup>®</sup>（北海道大学田中教授発案）（以下「軽労化」）の理念に基づいて開発されたスマートスーツ<sup>®</sup>（以下スマートスーツ）の適正使用により，身体にかかる負担や疲労を軽減し，作業による適度な運動負荷が体力の維持・増進に貢献することで腰痛等の疾病（労災）を予防できる。結果として，作業員の労働の持続可能性向上に繋がり，建設業が抱える高齢化の問題や産業全体の労災リスクの低減，作業員の安全意識改革に繋がると考え，建設業に特化した共働研究を行った。

キーワード：労働の持続可能性，職人寿命の延伸，軽労化，ウェアラブルセンサー，作業負荷計測

## 1. はじめに

建設業就業者と新規入職者の減少への対策の一つとして，ゼネコン各社は建設ロボットの開発に鎬を削っている。一品生産が基本である建設業にとってロボットの現場適用は悲願である。しかし，この30年を振り返ってみると，建設ロボットの開発テーマは20世紀末の黎明期のそれと大きく変わっておらず，バブル経済期以降で施工技術の合理化や省人化は進んだが，建設ロボットの分野は革新的な進化を遂げていない。発表されている多くの建設ロボットは「重く，大きく，高価」であり，一定の理想的環境下でしか利用できず，広く建設現場に展開できていない。

換会において，協力業者からアシストスーツに対する強い期待が寄せられた。そこで，複数のアシストスーツを導入し，装着した作業員にアンケートを行って，客観的評価をまとめた（図-1）。その結果，電動式・エア式のアシストスーツ（アクティブタイプ）よりも，ゴム式アシストスーツ（パッシブタイプ）のほうが安価で汎用性が高く，細かく複雑な作業の多い建設作業に向いていることが分かった。また「職種よりも個人との相性が大きい／誰にでも均一な効果があるわけではない／低価格の商品でないと業界で認知されない」ことも分かった。

## 2. 複数のアシストスーツを試行

2019年秋の大成建設内の技術開発に関する意見交

## 3. 「軽労化」の概念との出会い

研究グループは，数あるパッシブタイプアシストスーツの中で，最も建設作業に適している「労働の持続可能性」を目的とする「軽労化」という概念と，論

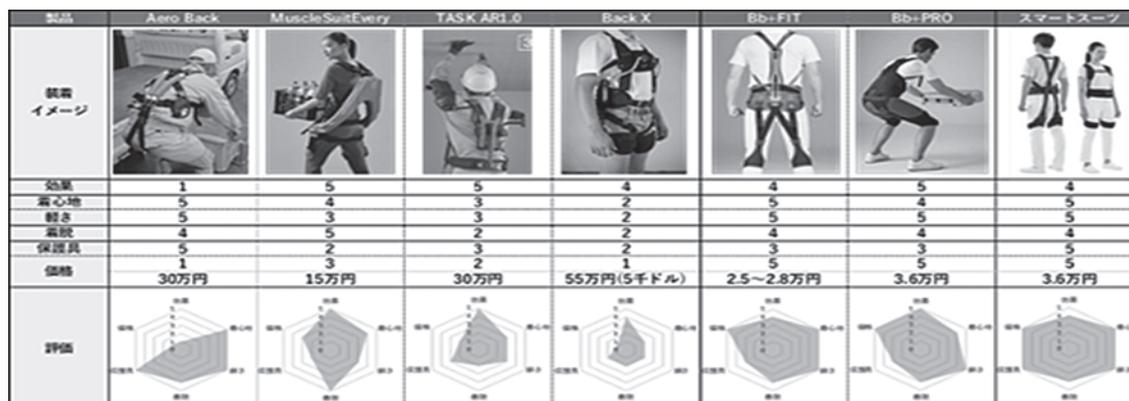


図-1 大成建設で実施したアシストスーツ評価

理的かつ科学的根拠に基づいたスマートスーツに着目した(図-2)。

「軽労化」とは、北海道大学ヒューマンセントリック工学研究室 田中孝之教授が提唱する、健康労働寿命の延伸を目的としたアシスト技術の概念(1)である。アシストとトレーニングの両立による健康労働寿命の延伸を目指し、その思想を具現化した商品が「スマートスーツ」である。ロボット工学の研究者である田中教授はまさに「重く、大きく、高価なロボットは普及しない」という「ロボット普及の壁」に直面していた。

「モーター・センサー・コントローラー」の3つの要素を兼ね備えたものをロボットと称するが、研究中のロボットから最も重たいモーターを含む3要素を取り除くという逆転の発想から、人を大切にする「軽労化」の概念へ辿り着いた。

「軽労化」研究によると、スーツを必要とし、軽労化効果を実感しやすい年齢は45歳以上であるという。この年代は、若い世代と比較して、筋力の衰えは少なく、体力には自信を持っているが、柔軟性やバランス力が低下し、体幹が弱っていることを自覚しにく

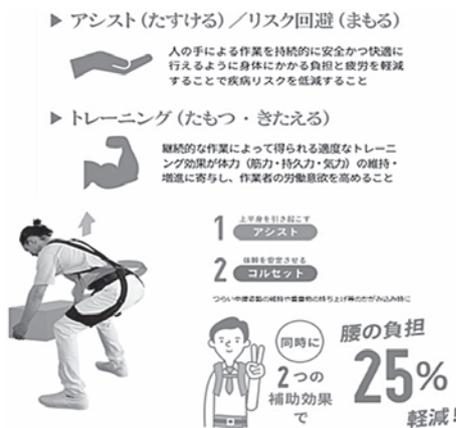


図-2 「軽労化」の概念とスマートスーツ  
スマートサポート社 HP より

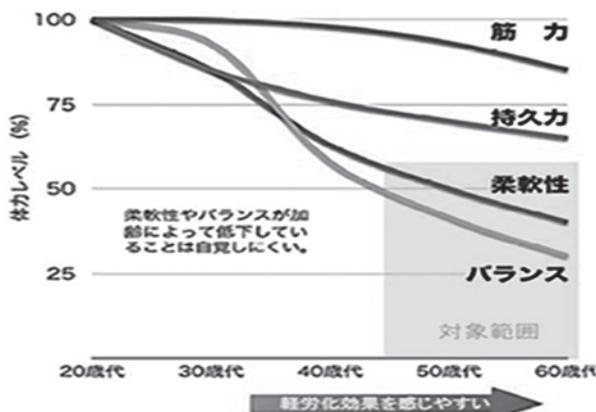


図-3 年齢と体力レベルの相関関係

い。結果として、作業で無理をすることで腰痛症を発生しやすい(図-3)。

スマートスーツの適正使用により、身体にかかる負担や疲労を軽減でき、作業そのものが適度な運動負荷となり、体力が維持・増進され、腰痛等の疾病(労災)を予防できる。結果として、作業員の労働の持続可能性向上に繋がり、建設業が抱える高齢化問題や産業全体の労災リスクの低減、作業員の安全意識改革に繋がる。

#### 4. 本研究の取り組み

研究グループは全国10箇所の作業所で下記の3つのアクションを企画した。

##### ①「軽労化」勉強会とスマートスーツ試着会(図-4)

労働の持続可能性を目指す「軽労化」は今後の建設業にとって必須であることは間違いない。試着会を通し、「多くの人に認知してもらう」ことから着手した。

##### ②建設作業員の身体能力評価(個人の体力測定)

個人の身体能力を測定し、疾病との相関性を分析するため、作業員の体力測定と健康アンケートを行った。学生時代以降、ほとんどの作業員は体力測定を経験していない。現在の自分の体力を知り、数値で自分の衰えを自覚することは、安全意識の改革に繋がる。

##### ③ウェアラブルセンサーを使った作業負荷計測

作業負荷データの収集と手先荷重の有無を判別するため、各作業員の作業現場に立会い、ウェアラブルカメラを用いた動画撮影を行い、作業状況を記録した。



図-4 作業所での勉強会/試着会

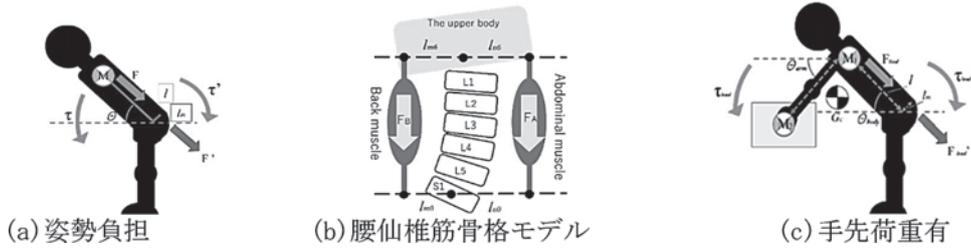
#### 5. データ分析の根拠

図-5(a)に示すように腰部負担  $F_l$  は、上体の重さによる圧迫力  $F$  と腰椎を支える筋肉による圧迫力  $F'$  の2つの圧迫力の合力である。

$$F_l = F + F' \tag{1}$$

まず、上体の重さによる圧迫力  $F$  を計算する。圧迫力  $F$  は式(1)で示される。

$$F = Mg \sin \theta \tag{2}$$



図一5 腰部負担モデル

次に腰椎を支える筋肉による圧迫力  $F$  を計算する。上体の重心距離  $l$  は式 (3) より求められる。

$$l = h \cdot D \tag{3}$$

$h$  は身長,  $D$  は上体重心位置推定係数である。上体重量により発生するトルク  $\tau$  を求める。

$$\tau = Mg \cos \theta \cdot l \tag{4}$$

胸椎を支える筋肉トルク  $\tau'$  を式 (5) に示す。

$$\tau' = F' \cdot l_m \tag{5}$$

トルク  $\tau'$  と  $\tau$  はつり合いが成り立つため、腰椎を支える筋肉による圧迫力  $F'$  は以下の式となる。

$$\tau = \tau' \tag{6}$$

$$F' = \frac{\tau}{l_m} \tag{7}$$

腰椎を支える筋肉は背筋と腹筋の2つに分けられる。上体、腰仙椎、背筋と腹筋から構成される2次元筋骨格力学モデルを図一5 (b) に示す。背筋および腹筋による圧迫力を  $F_B, F_A$  とすると、次の3式の力とモーメントのつり合いが成り立つ。

$$F_B \times l_{m6} + F_A \times l_{n6} + Mg \times l = \tau \tag{8}$$

$$F_B \times l_{m0} + F_A \times l_{n0} = 0 \tag{9}$$

$$F_B + F_A + Mg = F' \tag{10}$$

図一5 (c) に示すような手先荷重を考慮した腰部負担を考える。腰部負担の計算には作業姿勢を撮影した動画を元に手先荷重を推定し、腰部負担を計算する。なお、腕の角度は実験的に腕長さ  $l_{arm}$  上体に対して水平から  $-45$  度として計算を行う。上体重心  $M_1$  と手先荷重の重心  $M_2$  の合成重心  $G_c$  における鉛直方向の重心位置  $G_{cx}$  と垂直方向の重心位置  $G_{cy}$  および重心距離  $l_{Gc}$  について考える。

$$G_{cx} = \frac{M_{1x}M_1 + M_{2x}M_2}{M_1 + M_2} \quad G_{cy} = \frac{M_{1y}M_1 + M_{2y}M_2}{M_1 + M_2} \tag{11}$$

$$l_{Gc} = \sqrt{G_{cx}^2 + G_{cy}^2} - l \tag{12}$$

$M_{1x}$  と  $M_{2x}$  は鉛直方向の重心位置,  $M_{1y}$  と  $M_{2y}$  は垂直方向の重心位置である。合成重量  $M_{Gc}$  は式 (13) として表すことができる。これを用いて再度式 (8, 9, 10) を行うことで手先荷重を考慮した腰部負担値を計算する。

$$M_{Gc} = M_2 \left( \frac{l_{Gc}}{l} \right) + M_1 \tag{13}$$

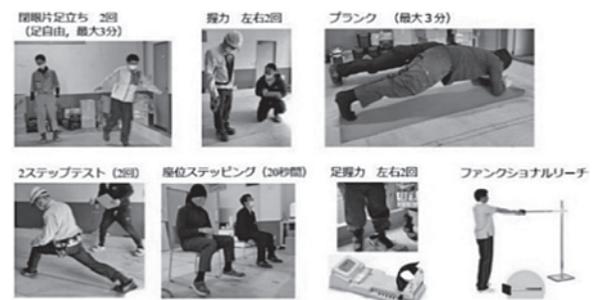
## 6. 建設作業員へのアンケートと体力測定

全国10作業所で実施した建設作業員向けのアンケートでは、身長、体重、年齢、身体的性別、業種、職務期間、1週間の作業時間、主な作業姿勢（直立・下向き・しゃがみ込み・座り）、取扱う最大重量、現在腰痛か、腰痛歴、直近6ヶ月間の腰痛頻度、1週間にどの程度運動するか、運動時間等、個人情報収集した。10段階評価で、現在の腰の痛み、直近6ヶ月間の最もひどい腰の痛み、直近6ヶ月間の平均的な腰の痛み、現在の疲労度、現在の体力の調査を行った。

アンケート合理化を目的に専用Webアプリ（図一6）も開発し、データ集約と分析に活用した。体力測定は、2ステップ、座位ステッピング、ファンクショナルリーチ、閉眼片足立ち、握力、足の握力、プランクの7種目（図一7）を実施した。



図一6 アンケートと体力測定専用アプリ



図一7 作業所で実施した7種の体力測定種目

アンケートと体力測定の結果から得た身体特徴量と計測で得た腰部負担の関係性を解明する。加齢に伴う腰痛リスク増加を考慮しつつ、作業員の腰痛リスクを事前に判断し、注意喚起することを目的として、体力テストの7項目に年齢を加えた8項目から身体能力の評価式(式14)を考えた。

実験的に各項目の満点(表-1)が200点となる係数を設定し身体能力評価指標を構築した。

表-1 体力測定項目における満点

座位ステップ [回]	ファンクショナル リーチ[cm]	手足の握力 [kg]	2ステップ値
50	60	100	2
閉眼片足立ち[s]	プランク[s]	年齢[才]	
180	120	20	

$$\hat{E} = \frac{1}{10} \left\{ \left( \text{座位ステップ} \times \frac{200}{50} \right) + \left( \text{ファンクショナルリーチ} \times \frac{200}{60} \right) + \left( \text{握力} \times \frac{200}{100} \right) \times 4 \text{種} + \left( 2 \text{ステップ} \times \frac{200}{2} \right) + \left( \text{閉眼片足立ち} \times \frac{200}{180} \right) + \left( \text{プランク} \times \frac{200}{120} \right) + \left( \text{年齢} \times \frac{200}{20} \right) \right\} \quad (14)$$

### 7. 体力測定結果の分析

被験者として、型枠大工の23歳の男性、身長162cm、体重55.2kgでのデータを図-8に示す。姿勢変化による腰部負担と比較すると、手先荷重による腰部負担は10.7%増加を確認した。

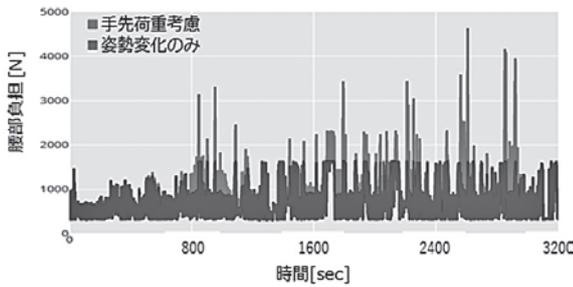


図-8 作業中の腰部負担値

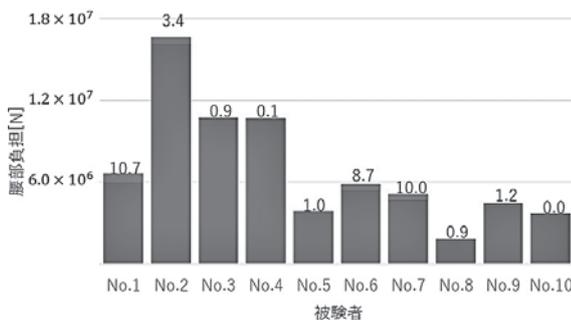


図-9 手先荷重を考慮した腰部負担値

撮影動画をもとに被験者10名の手先荷重を図-9で推定した。平均3.7%の増加となっていた。最も増加量が多かったのは、型枠大工であった。最も増加しなかったのは養生工であった。これは、養生工の計測時においては管理者であったためである。このようなデータを数多く収集することによって、より精度の高い作業負荷を評価することができる。

続いて、加齢における身体能力との関係性について解析をする。被験者は建築作業員320名で身長、体重、性別のばらつきを図-10に示す。

320名のアンケートで取得した腰痛有無と身体能力評価 $\hat{E}$ の関係性について論じる。腰痛のある被験者が111名おり、腰痛有無で群を分け、年齢 $y$ と身体能力評価 $\hat{E}$ を図-11, 12に示す。それぞれに対して、一次近似式を構築した。

$$\hat{E} = \alpha y + \beta \quad (15)$$

腰痛有では $\alpha = -0.504$ ,  $\beta = 110.11$ となり、腰痛無では $\alpha = -0.513$ ,  $\beta = 108.32$ となった。それぞれ

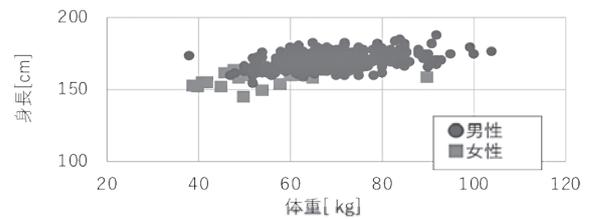


図-10 被験者の身体情報

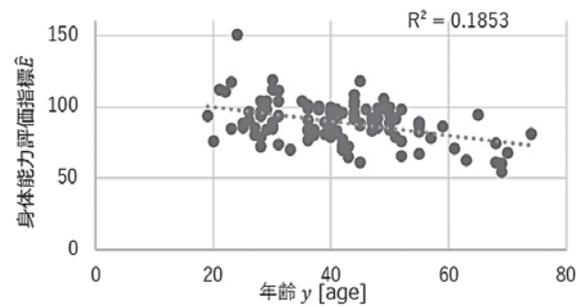


図-11 【腰痛有】年齢と身体能力評価の関係

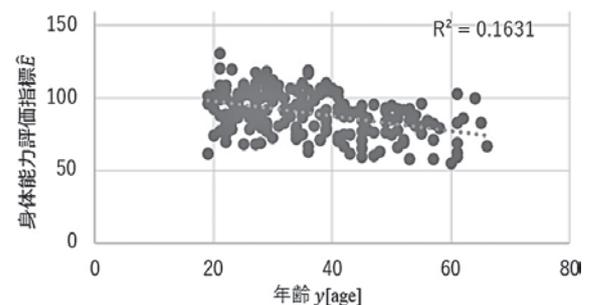


図-12 【腰痛無】年齢と身体能力評価の関係

の群の相関は腰痛有  $R = -0.430$ , 腰痛無  $R = -0.404$  であり, 標準偏差は腰痛有 12.97, 腰痛無 13.62 であった。また, 片側 T 検定の結果,  $p = 0.158$  であり, 身体能力評価に腰痛有無による有意差は確認できなかった。今後は, 腰痛有無だけでなく, 実際の作業負担や経験年数等の影響について解析を進める。

### 8. ウェアラブルセンサーを使った現地での負担計測

研究グループは, 作業負担計測に IMU センサーを複数個利用した腰部負担計測装置を用いた。作業負担データの収集と手先荷重有無の判別を行うため, 作業員 64 名の作業現場に立会い, 実作業空間における腰部負担計測 (30 分~60 分) を行った (図-13)。

腰部負担の計算には, 腰部負担推定方法 (2) を用いた。身長と体重を考慮した作業時間 1 時間当たりの姿勢変化による負担  $\hat{W}_{hour}$  を下記式より求めた。

$$\hat{W}_{hour} = \frac{\text{1時間の作業当たりの腰部負担 } F_{hour}[N]}{\text{身長}h[\text{cm}] \times \text{体重}w[\text{kg}]} \quad (16)$$

作業負担を按分した 1 時間当たりの腰部負担から身長と体重を除いた値の比較を図-14 に示す。

作業員 64 名のうち腰痛歴がある作業員 19 名の平均は 9587.4  $[N/(cm \times kg)]$  であり, 腰痛歴がない 45 名の平均腰部負担 8971.8  $[N/(cm \times kg)]$  に比べ大きくなったことから, 腰痛歴がある被験者グループが大きくなる傾向がある。しかし, 片側 T 検定の結果, P 値は 0.167 であり群としての有意差は確認出来なかった。図-15 に 1 時間当たりの推定負担  $\hat{W}_{hour}$  と年齢の関係を示す。年齢による腰部負担の低傾向はみられないため, 年齢によって作業を制限する必要は少ないと判断できる。

### 9. 身体能力評価指標と腰部負担による腰痛リスク推定

作業員 64 名の身体能力評価指標  $\hat{E}$  と身長と体重を考慮した 1 時間当たりの推定負担  $\hat{W}_{hour}$  の関係を図-16 に示す。腰部負担  $\hat{F}$  平均は 9154.6  $[N/(cm \times kg)]$  である。上位 20% の腰部負担  $\hat{F}$  最低値は 11769.6  $[N/(cm \times kg)]$  であり, 10,000  $[N/(cm \times kg)]$  が作業に対する推定負担  $\hat{W}_{hour}$  の閾値と判断することが出来る。

体力測定結果と 1 時間当たりの腰部負担  $\hat{W}_{hour}$  の相関では, 握力 (右) は弱い正の相関が見られ, ファンクショナルリーチには弱い負の相関が見られた。一般的に握力は全身の筋肉のパロメータと呼ばれており,

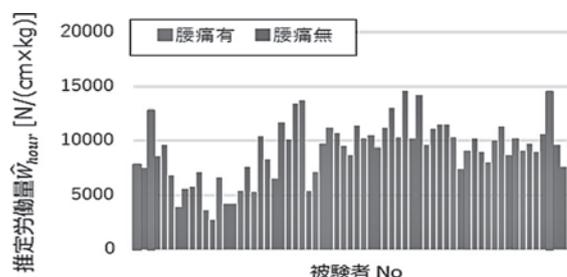


図-14 身長と体重を考慮した 1 時間当たりの推定負担  $\hat{W}_{hour}$

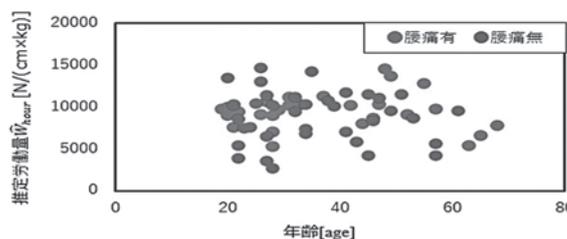


図-15 年齢と推定負担の関係

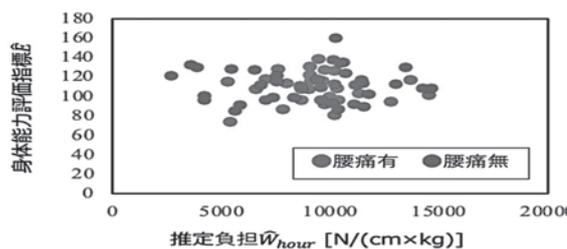
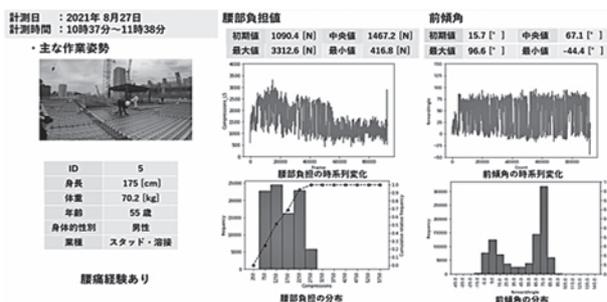


図-16 評価指標と 1 時間当たりの推定負担



図-13 腰部負担計測と作業負担データ



握力が高いほど腰部負担の高い作業に耐えられることが考えられる。同様に、体力測定結果と腰痛有無の相関では、ファンクショナルリーチと閉眼片足立ちにおいて、弱い負の相関がみられた。ファンクショナルリーチは大腿二頭筋付近の柔軟性が高いと記録が高くなり、この部位の柔軟性が低下すると腰痛になりやすいといわれている。加齢による平衡感覚の低下により、異なる作業姿勢で作業を続けることで腰痛を引き起こす可能性が考えられる。

腰痛歴の有無に着目すると、腰痛歴のある作業員は腰痛歴のない作業員に比べ、身体能力評価指標  $\hat{E}$  が低い傾向が見られた。腰痛歴のある作業員の身体的能力が作業に必要な能力よりも不足しているか、肉体的疲労の蓄積によって本来よりも身体能力が低下していると判断できる。この結果から、腰部負担値は年齢に関係なく、腰痛の有無によって測定結果に影響を及ぼすことが確認された。

### 10. スマートスーツ導入の効果

スマートスーツを導入した場合の腰部負担  $\hat{F}_a$  を提示する。スマートスーツは中腰姿勢時の腰部負担を25%軽減するため、直立状態を基準として腰を90°に曲げた際に姿勢変化による腰部負担  $F_l$  を25%軽減すると考え、下記式のように定義する。

$$\hat{F}_a = (1 - 0.159\theta)F_l \tag{17}$$

よって、 $F_l$  から  $\hat{F}_a$  引いた分がスマートスーツの効果結果になる。

図-8に示したNo.1の型枠大工(23歳の男性、身長162cm、体重55.2kg)に対し、スマートスーツを着装させた場合の導入効果を図-17に示す。

スマートスーツを着装することで6.4%の腰部負担を軽減する見込みが見られる。この他、図-9に示した溶接工、鉄筋工、内装、研工など10名における

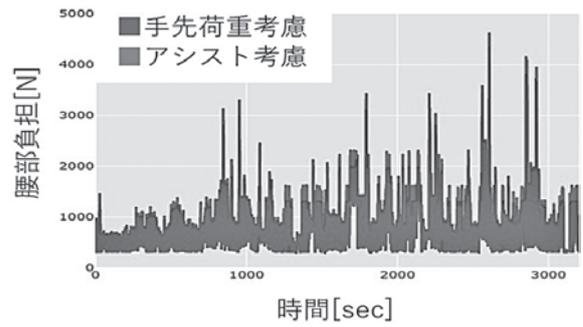


図-17 スマートスーツの評価

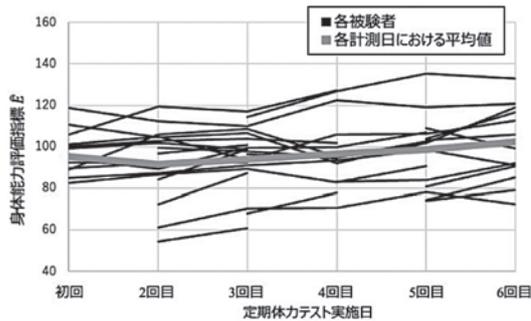
平均軽減率は8.56%であり、作業中における腰部負担を1割程度軽減する見込みがある。また、スマートスーツを着た場合の  $\hat{W}_{hour}$  と  $\hat{E}$  の関係性を見ると、相関値  $R = -0.551$  であった、このため、手先荷重まで考慮した場合は、作業負担が多い作業員が疲労により身体能力評価値が低下する傾向が見られた。

### 11. 体力測定の継続による効果とその意義

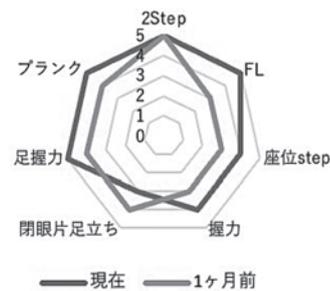
本研究に賛同し、体力測定を月例イベントとして開催し、測定結果をランキング形式で公開、優秀成績者への表彰を行った作業所において、作業員個人の明らかな体力向上が認められた(図-18)。

体力測定結果の自己評価や他者との競争によるモチベーション向上の事例として重要である。労働条件の厳しい作業員にとって健康や体力の維持は自らの「土台」である。継続的な運動による健康や体力の維持が、怪我や腰痛リスクの低減につながるという意識が広まることは意義がある。

例えば、健康診断と共に体力測定を年に1回義務化することができれば、図-19に示すような「作業に必要な体力」を年代や職種ごとに集計できる。結果として、労災リスクが「見える化」され、年齢による一義的な適正配置ではなく、個人の体力による正しい適正配置に繋がるはずだ(図-20)。

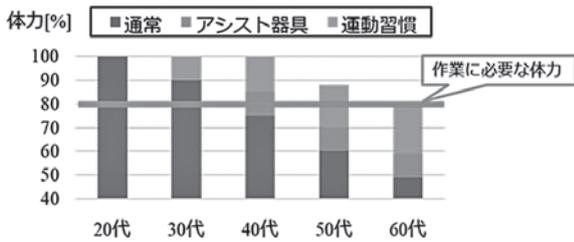


(a) 身体能力評価指数の推移

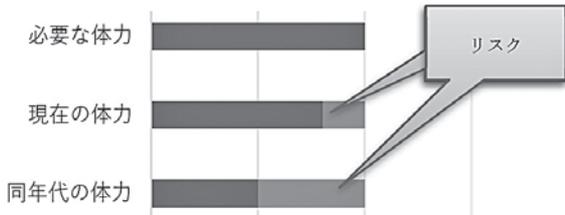


(b) とある 評価指標の移行例

図-18 測定イベントと個人の体力向上



図一 19 年代ごとの作業に必要な体力



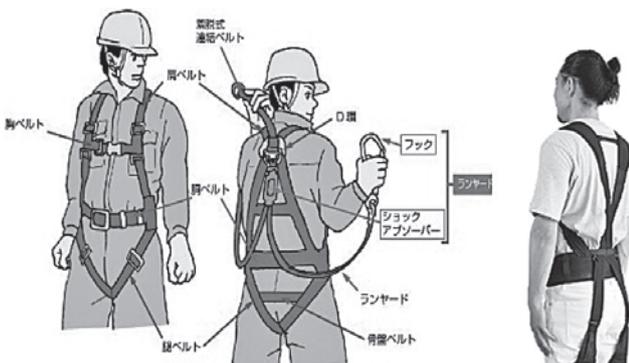
図一 20 体力の偏差値と労災リスク

自分の体力を定期的に計測し、加齢による身体能力の衰えを自覚し、自分の身体能力を相対的かつ客観的に評価することは、建設業の安全意識そのものを改革し、災害リスクの低減、ひいては「労働の持続可能性」の向上につながるだろう。

## 12. 建設業特化型スーツの開発に向けて

労働安全衛生法改正により、2019年2月1日から墜落制止用器具（安全帯）の規格が変更となり、2022年1月以降、建設業では高さ5m以上で作業する場合、フルハーネス安全帯を着用する必要がある。図一21に示すようにスマートスーツはベルトの形状や着装位置がフルハーネス型安全帯の構造とよく似ているため、試着した多くの作業員からフルハーネス型安全帯との一体化に対する要望が数多く寄せられた。

スマートスーツの機能を備えたフルハーネス型安全帯があれば、継続的なトレーニングと腰痛予防に繋がり、自然と作業員を「軽労化」へ導くことができる。



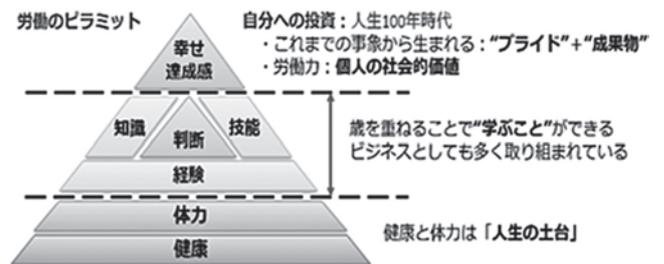
図一 21 フルハーネスとスマートスーツの相似  
厚生労働省及びスマートサポート社 HP より

今後、研究グループは作業員の体力測定と作業負荷計測を継続し、数多くのデータを収集・分析しつつ、フルハーネス型安全帯製造メーカーとの共同開発により、「軽労化」の概念を具現化した建設業特化型スーツの開発を進めていく予定である。

## 13. おわりに

本研究は、作業員の身体能力評価と労災リスク調査という建設業界初の試みであり、実証の中で建設作業員の作業負荷を計測する手法を確立した。その結果、手先荷重による腰部負担増加が大きいと腰痛リスクが大きくなることを客観的に証明することができ、建設作業員に対して継続的な運動による体力維持の重要性を啓蒙するヒントをつかむことができた。

昨今の少子高齢化に伴い、建設業を含む全産業において就業者の高齢化と入職者の減少が顕著となっている。労働力確保や「軽労化」概念の啓蒙と若年者への技術伝承を推進するため、厚生労働省や国土交通省が推進するプロジェクトと連携を図って本研究を継続し、「労働の持続可能性」の向上に寄与したい。昨今では人生100年と言われる時代を迎え、長い人生を人がどう生きていくべきかが問われるようになった。人生の目的である「幸せや達成感」は、経験・知識・技能、そして判断力によって生み出される。これらは、歳を重ねることで「学ぶ」ことができるが、その土台となる「健康と体力」は更に重要度を増す（図一22）。



図一 22 労働のピラミッド

建設業のロボット化が強く求められる中ではあるが、「人に寄り添い、人を大切にする」技術も大きなテーマの一つであるべきだ。我々が進める地道なデータ収集と学術的な裏付け、そして「軽労化」の深耕は、建設業の更なる成長と進化に寄与すると考える。

## 《参考文献》

- 1) 田中孝之：“軽労化：アシストとトレーニングの両立による長期的な身体機能拡張（＜特集＞人間を拡張する機械）”，日本機械学会誌，Vol.123（1219），p.14-17，2020.
- 2) Y. Tsuchiya, et al.：“Estimating Lumbar Load During Motion with an Unknown External Load Based on Back Muscle Activity Measured with a Muscle Stiffness Sensor”，Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.30（5），p.696-705, 2018.

## [筆者紹介]

田中 吉史（たなか よしふみ）  
大成建設㈱  
建築本部



土谷 圭央（つちや よしお）  
苫小牧工業高専  
創造工学科機械系

