

デジタルヒューマンシミュレーションによる身体負荷予測法

Physical Load Prediction Method Based on Digital Human Simulation

齋藤 あかね* ・ 木村 猛* ・ ハリーシュP. V.** ・ 柴野 伸之***
Akane Saito Takeshi Kimura Hareesh P. V. Nobuyuki Shibano

住宅設備機器の使用性評価において、デジタルヒューマンシミュレーションによる身体負荷予測を行うため、無理のない力を日常発揮力と定義するとともに、最大発揮力および日常発揮力の測定から、性差、年代差に関係なく適用できる日常発揮力比率を導出した。さらに、日本人約 1000 人分の最大発揮力データベースから定義した最大発揮力予測式に、日常発揮力比率を適用して日常発揮力を算出し、この値を基準に身体負荷の度合を予測する方法を考案した。

この身体負荷予測法を組み込んだデジタルヒューマンシミュレーションを用いることにより、性別、年齢、体型等の人間の特性を考慮した住宅設備機器の使用性評価が短期間で実現でき、開発初期段階から想定ユーザに対して適合性の高い仕様設定が可能となる。

In usability evaluation of residential equipment, the concept of affordable voluntary contraction is defined to predict the physical load based on digital human simulation, and the rate of affordable voluntary contraction for any gender and age has been derived from measurement of the maximum and the affordable voluntary contraction data. In addition, affordable voluntary contraction was calculated by applying the rate of affordable voluntary contraction to the prediction formula of the maximum voluntary contraction defined from a database of approximately 1000 people in Japan, and a method of predicting the level of physical load was devised based on the calculated affordable voluntary contraction.

Application of digital human simulation incorporating the physical load prediction method enables usability evaluation of residential equipment considering human characteristics such as gender, age, body shape, etc. in a shorter term, and enables optimal design for the intended user group at the early development stage.

1. ま え が き

近年、高齢化はますます進行しており、総務省統計局によると、2010年6月1日現在の日本の総人口に占める65歳以上の割合は、前年同月比1.84%増の23.2%に達している¹⁾。このため、製品の使いやすさはますます重要な要素となりつつあり、筆者らは身体的負担の少ない姿勢や動作の実現を目標に住宅設備機器の開発を進めている。そのためには、製品使用時の姿勢や動作に伴う身体負荷を定量化するとともに主観評価との関係を明らかにし、設計仕様にフィードバックすることが必要と考える。このように、製品の使用感や快適感を定量化することの重要性は増し、当社においても家事作業における身体負担感の定量化

を始めとして、さまざまな研究を行っている^{2)~5)}。

しかし、被験者による主観評価や客観評価は、現状では限られた一部の層を対象にしていることが多いため、性別や年齢、体型などをすべて網羅することは困難である。また、人間による評価であるため、個人差によるばらつきが大きい。これらの問題を解決するには、被験者数を増やしながら効率良く評価できる仕組みの構築が必要となる。

そのため筆者らは、被験者の代替となる人体シミュレーション技術に着目した。人体シミュレーションは、すでにソフトウェアとしてアメリカSIEMENS PLM社の「JACK」やドイツHuman Solutions社の「RAMSIS」などが販売されており、主に自動車業界を中心として活用されている。しかし、これらのソフトウェアでは基本データ

* 住建事業本部 住建総合技術・商品開発センター General Technology & Products Development Center, Building Products Manufacturing Business Unit

** R & D企画室 Corporate R & D Planning Office

*** 先行技術開発研究所 Advanced Technologies Development Laboratory

が欧米人の体型であり、また年齢も考慮されていない、操作が複雑で対話的な動作設定が難しい、関節トルクによる負荷の定量評価は可能であるものの使用者がどの程度負担を感じているのか主観評価との対応が明らかでない等の問題がある。そのため、住宅設備機器における使用性評価ツールとして用いるには不十分である。そこで筆者らは、次章に述べる特徴を有するデジタルヒューマンシミュレーション（以下、DHと記す）の開発を行ってきた。

2. DH開発の経緯と課題

筆者らは、「(社)人間生活工学研究センター」が1996～2006年にかけて蓄積した日本人約4万人分の体型データベース⁶⁾を基に、性別・年代別にデータベースの再構築を行い、性別・年齢・身長・胴囲のデータを入力することでその他項目の値も抽出され、骨格と皮膚形状を生成できる機能を開発した⁷⁾(図1(a))。

また、スイス連邦工科大学との共同研究により、逆運動学を用いて人体モデルの姿勢をリアルタイムに生成できる技術を開発した⁸⁾。これにより、たとえば図1(b)に示すように、人体モデルの手を動かすと肘や上腕が階層構造に基づいて順次連動するなど、さまざまな姿勢をリアルタイムかつ容易に設定できるようになった。

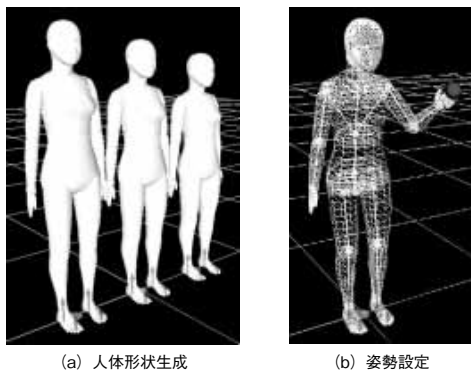


図1 DHシステムの特徴

さらに、ある姿勢や動作時のトルク負荷を導出するため、17関節に分けた人体モデルの各部位の重さと姿勢から、各関節の負荷をトルク値として算出する機能を開発した。くわえて、DHにより導出された関節トルクと生体計測との関係を検証するため、被験者の筋電位測定を行い、その妥当性を確認した⁷⁾。

筆者らは、これらの機能に加え、DHにより算出されたトルクから身体負荷の度を予測するため、独立行政法人製品評価技術基盤機構（以下、NITEと記す）が2001～2002年にかけて蓄積した日本人約1000人分の最大発揮力（Maximum Voluntary Contraction：以下、MVCと記す）のデータベース⁹⁾を利用し、性別、年代別に各関節のMVC予測式を定義した⁷⁾。そして、この予測式をDHに

組み込み、動作に基づいたMVCをリアルタイムに計算して出力する機能を開発した。

しかしこれらは、算出されたトルクが各関節のMVCに達しているかどうかの予測だけに留まり、その動作が楽であるか負担であるかまでの評価はできない。したがってDHを住宅設備機器の使用性評価ツールとして用いるためには、使用者の負担感と対応させる機能が必要である。

3. 身体負荷予測機能の開発

筆者らは、動作に応じた身体負荷の度を予測するため、新たな概念である無理のない力を日常発揮力（Affordable Voluntary Contraction：以下、AVCと記す）としてNITEと共同で定義し、MVCに対するAVCの割合を導出してその特性を明らかにするとともに、MVCとAVCから身体負荷予測を行う方法を提案する。また、これを組み込んだDHを用いて製品開発に応用し、身体負荷予測の結果と主観評価結果との比較を行ったので、併せて述べる。

3.1 MVCに対するAVCの割合の導出

3.1.1 発揮力の測定

被験者は30～48歳の壮齢者32名および65～70歳の高齢者16名とし、男女比はいずれも1:1とする。発揮力の測定はNITEと同様の方法⁹⁾で実施し、被験者の安全を

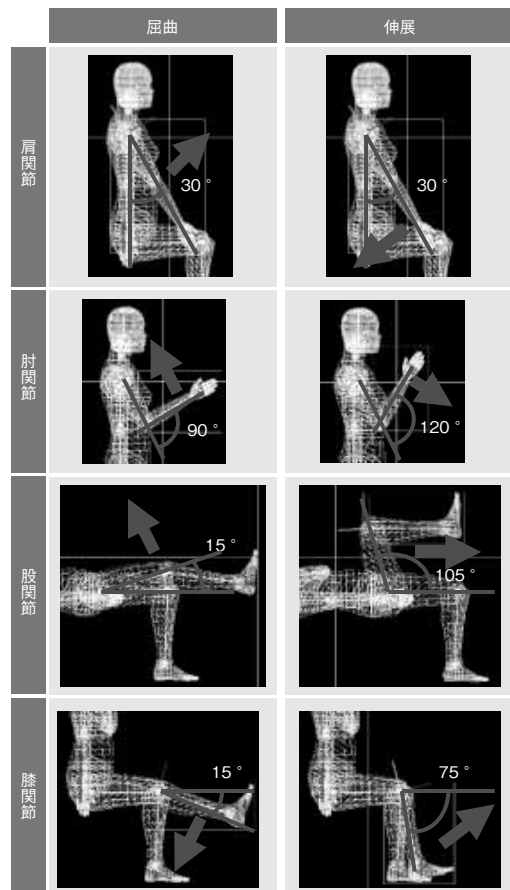


図2 測定関節箇所

考慮して看護師立会いのもとで行う。また、測定は図2に示す肩、肘、股、膝の4関節において、屈曲と伸展の両方向について行う。

図3に発揮力測定の様子を示す。なお、解析にはNITEにおいて測定した60～72歳の高齢者56名分（男女比1：1）の結果も用いることとする。



図3 発揮力測定の様子

3.1.2 MVCに対するAVCの割合

図4は、壮齢者の肩関節のMVCに対するAVCの割合（以下、AVC比率と記す）を例として男女別に示した結果である。本図から、男女のAVC比率は統計的有意差がないことがわかる。また、肘関節、股関節、膝関節についても同様に有意差がないことが確認されたため、AVC比率には男女の差がないといえる。

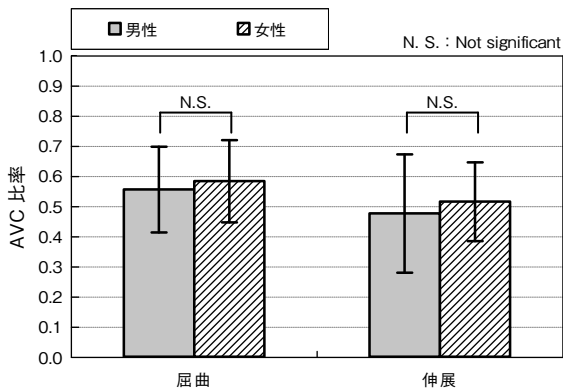
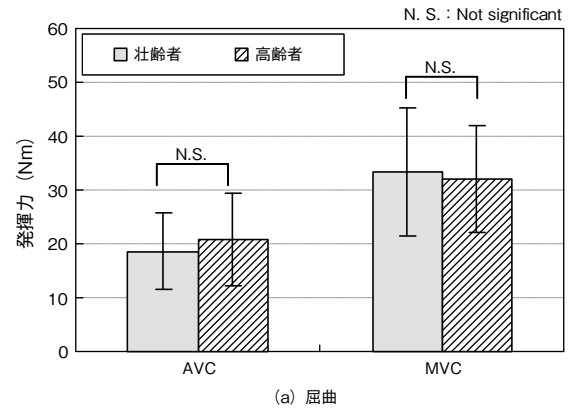
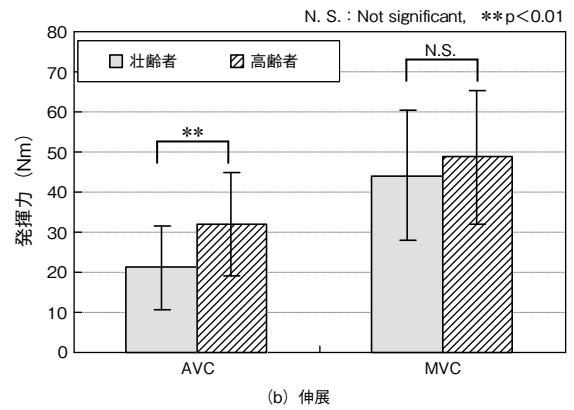


図4 肩関節のAVC比率(性差)

次に、AVC比率の年齢層差について検討する。図5に壮齢者および高齢者の肩関節MVCおよびAVCの測定結果、図6にそのAVC比率をそれぞれ示す。図6から、肩関節の屈曲、伸展のAVC比率は高齢者のほうが大きいことがわかる。これは、図5に示したように高齢者のAVCが壮齢者に比べて大きいためであり、この傾向は肘関節、股関節、膝関節でも確認される。



(a) 屈曲



(b) 伸展

図5 肩関節の発揮力(年齢層差)

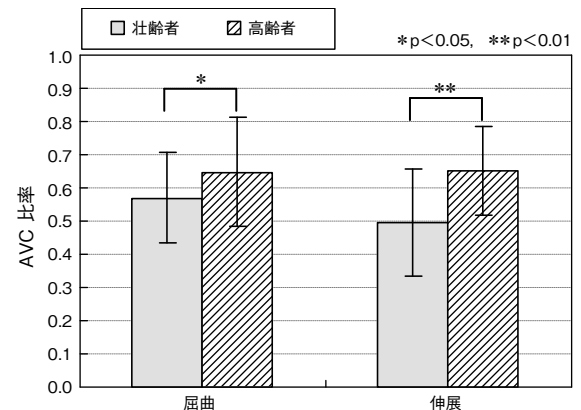


図6 肩関節のAVC比率(年齢層差)

しかし、高齢者のAVC比率が壮齢者のそれより大きい結果をそのまま適用すると、以下に述べる問題が生じる。

図7は、30歳代から70歳代男性の肩関節屈曲時の発揮力予測値を示している。図7(a)は2章で述べたMVC予測値を用いて算出したMVC予測値、図7(b)はこれに図6で算出したAVC比率を掛けて求めたAVC予測値である。本図から、MVC予測値は加齢とともに小さくなっているが、AVC予測値は40代と60代の値がほぼ等しく、加齢との対応がなくなっていることがわかる。

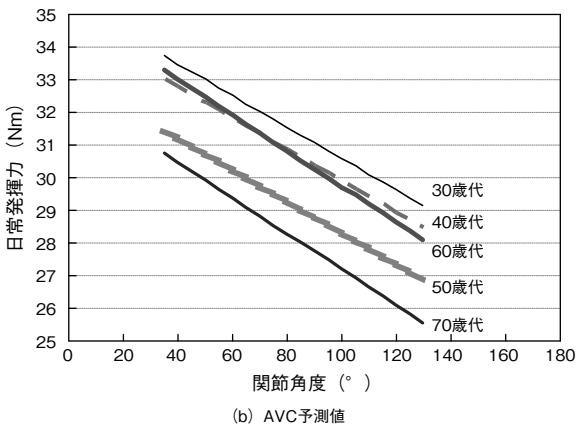
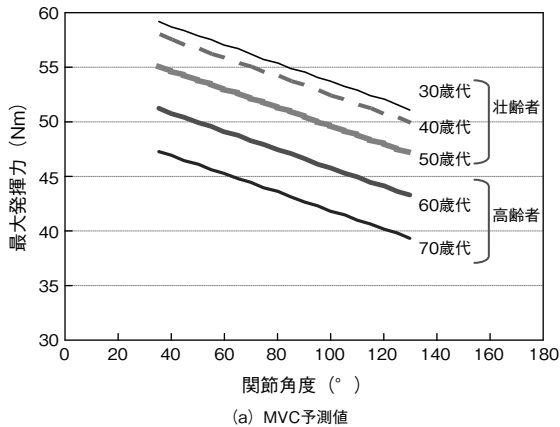


図7 男性の肩関節屈曲時の発揮力予測値

一般に、筋力は20歳代をピークに加齢に伴って低下する傾向にあり、60歳以降にその傾向が顕著になるといわれている¹⁰⁾。本研究においても、MVC予測値にはその傾向がみられる。しかし、それぞれのAVC比率から算出したAVC予測値には、その傾向がなくなっている。そのため、この値を身体負荷予測に用いると、高齢者よりも壮齢者の負担が大きいと判定される等、年齢の高低と身体負荷の度合にも対応がなくなることが予想される。

以上のことから、AVC予測値の算出にはどちらか一方のAVC比率を適用するほうが望ましいと考え、本研究では壮齢者のAVC比率を適用する。その理由は、壮齢者のAVC比率を用いると高齢者のAVCを小さく見積もる可能性はあるが、その差異は高齢者の負担がより軽減される推定であり、製品仕様策定に際しては好ましいと考えられるためである。なお、高齢者のより正確なAVCの評価は今後検討する予定である。

表1に本研究から得られた壮齢者の肩関節のAVC比率を示す。肩関節のAVC比率は屈曲時が $57 \pm 14\%$ 、伸展時が $50 \pm 16\%$ である。身体負荷予測には、このAVC比率を性別、年代の区別なく適用する。

表1 壮齢者の肩関節のAVC比率と標準偏差

	AVC比率	標準偏差
屈曲	57%	14%
伸展	50%	16%

3.2 身体負荷予測

図8に身体負荷判定の仕組みを示す。図中のMVCはMVC予測式によるもので、この式に3.1.2項で得たAVC比率を掛けてAVC予測値を算出する。そして、算出されたAVC予測値を基準としたとき、関節発揮トルクが $AVC - \sigma$ (標準偏差) 以下であればeasy, $AVC - \sigma$ を超え $AVC + \sigma$ 以下の範囲内であればdifficult, $AVC + \sigma$ を超えればvery difficultと判定する。

また、関節可動域 (Range of Motion: 以下、ROMと記す) 限界付近では関節受動抵抗 (Joint Passive Resistance: 以下、JPRと記す) による身体負荷予測に切り替えて負担度合の判定を行う。これは、ROM限界付近ではMVCやAVCが低下してJPRが増加するためである。

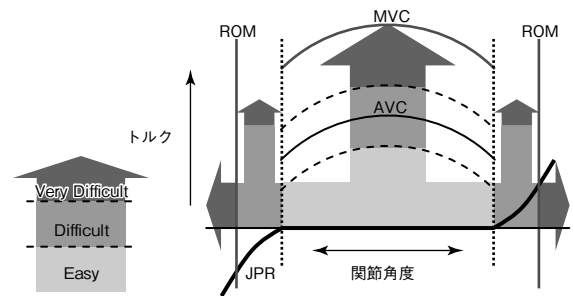


図8 身体負荷判定の仕組み

以上のように定義した身体負荷予測をDHシステムに組み込み、これを製品企画設計段階における住宅設備機器使用性評価ツールとする。

4. 手動昇降収納棚への応用事例

4.1 評価方法

身体負荷予測機能と主観評価との対応を確認するため、製品への応用を試みる。評価に用いるのは図9に示すキッチンの手動昇降収納棚で、これを操作するとき許容できる負荷 (以下、許容操作力と記す) を導出する。

許容操作力の導出には、昇降動作時に身体負荷がもっとも変化する肩関節および肘関節の結果を用いる。また判定は、図8に示すeasy, difficult, very difficultのうち $AVC \pm \sigma$ であるdifficult以下を許容範囲とする。

評価対象者は、キッチンの代表的な使用者である30歳代から60歳代の女性とする。女性を対象とするのは、一般的に女性はMVCが男性より小さいため、許容操作力が小さくなると容易に推定できるからである。身長は前述の年齢の5% Tから95% Tが含まれるように145 cmを下

限, 170 cm を上限とする。体重は, 各身長標準体重を BMI 標準値から算出する。なお, 腕の長さ等, 身長や体重以外の身体各部位については, DH 内で自動生成される。

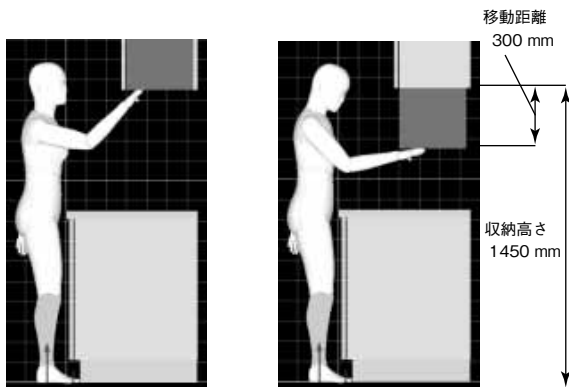


図9 手動昇降収納棚の操作

4.2 許容操作力の導出

評価対象者の身長や年代を網羅した許容操作力を導出するため, 横軸に年齢, 縦軸に身長をとり, 身体負荷の最大値をプロットした結果を図 10 に示す。

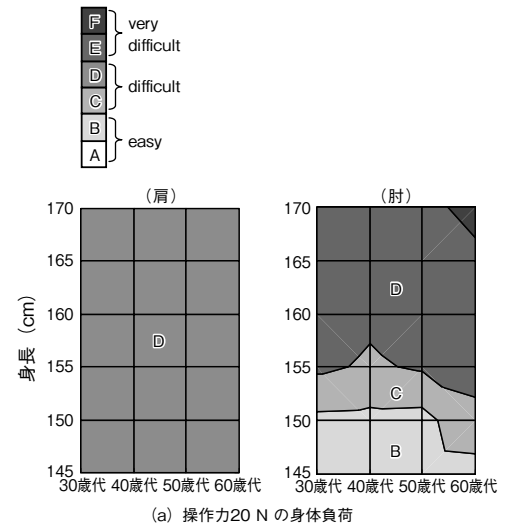
図 10 (a) から, 操作力 20 N では肩の負担は想定ユーザ全体が difficult であり, 許容できる範囲であることがわかる。また, 肘の負担は身長が高くなるほど大きくなる傾向にあり, 60 歳代になるとその傾向が強まることがわかる。しかし, 全体では difficult を超えていないため, 許容できる操作力であるといえる。

一方, 図 10 (b) から, 操作力 30 N では肩の負担は想定ユーザ全体が very difficult であり, 許容できる範囲ではないことがわかる。また, 肘の負担は身長 155 cm 未満では difficult だが, 155 cm 以上になると very difficult となることがわかり, 想定ユーザ全体では許容できないことがわかる。

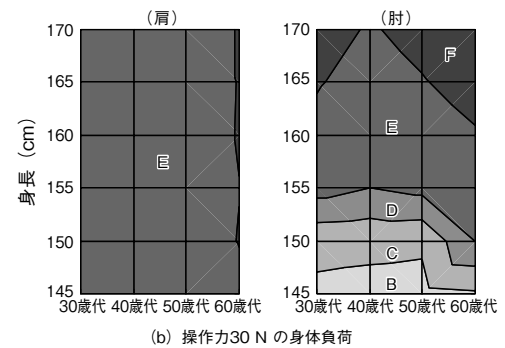
以上から, 昇降収納棚引下げ時の許容操作力は 20 N 以下となる。また, これと同様に収納棚引上げ時の身体負荷予測図を作成し, 許容操作力は 20 N 以下が良いとの結果を得ている。

次に, DH により導出した結果と被験者による主観評価の結果との対応を確認する。図 11 は導出した許容操作力を検証するために, 女性 8 名 (平均年齢 36.0 歳, 平均身長 161.5 cm) に対して実施した昇降収納棚引下げ時の主観評価結果を示している。本図から, 引下げ時の許容操作力は 20 N 以下が望ましいことがわかる。これらのことから, DH の結果と主観評価の対応が確認でき, 手動昇降収納棚の操作力の開発目標値は 20 N と設定できる。

なお, 身体負荷予測機能の向上および効果の検証については今後も継続して実施する。



(a) 操作力20 N の身体負荷



(b) 操作力30 N の身体負荷

図 10 身体負荷予測図

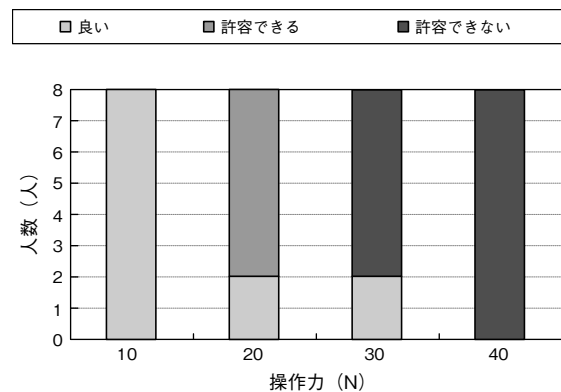


図 11 昇降収納引下げ時の許容操作力

5. あとがき

住宅設備機器の使用性評価において, DH による身体負荷予測を行うため, 無理のない力を日常発揮力と定義するとともに, 最大発揮力 (MVC) および日常発揮力 (AVC) の測定から, 性差, 年代差に関係なく適用できる AVC 比率を導出した。さらに, 日本人約 1000 人分の MVC データベースから定義した MVC 予測式に, AVC 比率を適用して AVC を算出し, この値を基準に身体負荷の度合を予測する方法を考案した。

この身体負荷予測法を組み込んだ DH を用いることによ

り、性別、年齢、体型等の人間の特性を考慮した住宅設備機器の使用性評価が短期間で実現でき、開発初期段階から想定ユーザに対して適合性の高い仕様設定が可能となった。

最後に、共同研究者であるスイス連邦工科大学のD. Thalmann教授、被験者測定を推進していただいた独立行政法人製品評価技術基盤機構の久本 誠一氏、樋口 雅俊氏に謝意を表します。

*参考文献

- 1) 人口推計, 総務省統計局, 〈<http://www.stat.go.jp/data/jinsui/pdf/201011.pdf>〉
- 2) 横井 孝志, 小木 元, 高橋 昭彦, 木塚 朝博, 村岡 誠: 動作特性にもとづく階段寸法評価指標の検討, 人間工学, Vol. 35, 特別号 2, p. 368-369 (1999)
- 3) 西岡 基夫, 岡田 明, 宮野 道雄, 山下 久仁子: 引き操作における身体負担の評価方法に関する研究, 日本生理人類学会誌, Vol. 7, No. 1, p. 49-52 (2002)
- 4) 阿部 圭子, 小川 哲史, 木村 猛, 吉田 正樹: 家事作業における身体負担感の定量化法, パナソニック電工技報, Vol. 58, No. 1, p. 74-79 (2010)
- 5) 川口 亜紀, 山本 松樹: 立ち上がり動作補助用縦型手すりの使用性に関する生体力学解析, 松下電工技報, No. 76, p. 52-57 (2001)
- 6) 人間特性データベース, 社団法人人間生活工学研究センター, 〈<http://www.hql.jp/database/index.html>〉
- 7) P. V. Hareesh, T. Kimura, K. Sawada, D. Thalmann: Aging Algorithm for Anthropometric Digital Humans: Quantitative Estimation for Ergonomic Applications, Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2010, Industrial Engineering Special session: Human Factors and Ergonomics, HongKong March 2010
- 8) P. V. Hareesh, R. Boulic, S. Arun, B. Le Callennec, K. Sawada, D. Thalmann: An Intuitive IK Postural Control System for Anthropometric Digital Human Models, VSMM 2005 Belgium (2005)
- 9) 人間特性データベース, 独立行政法人製品評価技術基盤機構, 〈<http://www.tech.nite.go.jp/human/jp/contents/cindex/database.html>〉
- 10) 出村 慎一, 佐藤 進: 高齢者の筋機能特性, 日本生理人類学会誌, Vol. 5, No. 2, p. 5-10 (2000)

◆執筆者紹介



齋藤 あかね

住建総合技術・商品開発センター



木村 猛

住建総合技術・商品開発センター
一級建築士



ハリーシュ P. V.

R & D 企画室



柴野 伸之

先行技術開発研究所
工学博士