

生体情報を用いた作業負担感の推定

宮島 沙織^{1,a)} 田中 孝之¹ 泉 博之² 宮田 なつき³

概要：労働寿命を延伸し、高齢になっても健康に働くためには、作業によって生じる負担を認識し、過剰にならないよう作業方法や作業量を調整する必要がある。作業が身体に与える負荷は、作業中の動作情報や生体情報の計測値から推定が可能である。しかし、作業者の主観的な負担（負担感）は、作業量が同じでも作業者の年齢や体力等により異なると考えられる。本報では作業中に計測した筋活動と心拍数、負担感の調査を用いて、生体情報から作業負担感の推定を行った。

Estimation of Fatigue in Works Using Biological Information

1. はじめに

近年の少子高齢社会における労働者不足を解消するためには、労働寿命の延伸と、幅広い年齢の作業者が自分の体力に合わせて健康に働けるよう、作業によって生じる負担を認識し、過剰にならないよう作業方法や作業量を調整する必要がある。作業負担を管理するには、客観、主観の両方の観点から評価することが望ましい。作業が身体に与える客観的な負荷は、作業中の動作情報や生体情報の計測値から評価可能である。代表的な評価手法には OWAS 法がある [1]。我々は加速度センサと角速度センサを用いた動作計測に基づき、負担推定の自動化を目指している [2]。しかし、作業者の主観的な負担は、作業量が同じでも作業者の年齢や体力等により異なると考えられる。

作業の主観的な負担を、本研究では負担感とする。負担感とは「負担を感じた部位」、「感じた負担の大きさ」の2つの情報から構成されると仮定する。トレーニングなどで体の一部のみを動かしている場合、負担を感じる部位は明らかであるため、負担を感じた部位の調査は省略可能である。また、複数の部位を動かしている場合でも、特定の筋肉を意識して運動を行っているときは、筋肉の名称で部位を表現することも可能である。一方、作業動作はトレーニング

とは異なり、単一ではなく複数の業務を行う上、業務内容によって負荷がかかる場所は異なると予想される。したがって、どこに負担を感じるかは重要な情報である。また、負担感の大きさは、主観的運動強度（Ratings of Perceived Exertion : RPE）を用いて表現可能である。これは運動の強度を尺度を用いて定量化したものであり、調査に特別な機器を使用しないため、実践的な方法とされる。代表的な尺度には Borg らが考案した Borg-RPE があり、6 から 20 までの 15 段階の数字尺度と “Very very light” から “Very very hard” までの 7 段階の言語で強度を表す [3]。この尺度では、心拍数と主観的運動強度の関係を利用し、数値が各強度で運動中の心拍数/10 に対応している。小野寺らはこの尺度の日本語版を提案している [4]。また、Robertson らは 0 から 10 までの 11 段階で強度を表す Omnibus Resistance Exercise Scale(OMNI-RES) を考案した [5]。これらの尺度は主にトレーニングを対象としており、様々な運動が組み合わされた「作業」の評価に用いることを目的としていない。また、トレーニングと異なり、作業負担の評価においては負担を正しく把握し、軽減することが主な目的である。

作業中の負担感の調査にはアンケート調査、聞き取り調査などが用いられている。しかし、どちらも作業後に調査を行うため、作業全体を集約した負担感しか得ることができず、作業者の記憶のあいまいさを含んでいる。

我々は以前、筋活動を用いた負担感モデルを試作した [6]。負担感の一部については推定できたが、作成したモデルにそぐわない場合も多くみられ、完全な推定はできなかった。本報では OA フロア設置作業を用いて、作業中に被験者に

¹ 北海道大学
Hokkaido University

² 産業医科大学
University of Occupational and Environmental Health

³ 産業技術総合研究所
National Institute of Advanced Industrial Science and Technology

a) miyajima@hce.ist.hokudai.ac.jp

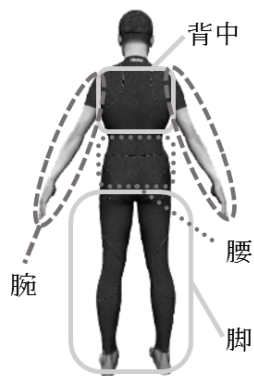


図 1 負担感発声内容と対応部位

Fig. 1 Sounded words and each described body parts.

負担を感じる部位名を発声させ、作業動作、筋活動、心拍数と同時に負担感を計測した。実験で計測した負担感と心拍数、筋活動を用いて、生体情報、主に心拍数の変動と負担感の関連を調査した。

2. 作業中の負担感計測手法

作業中に計測を行うには、作業を中断することなく、負担感を伝えさせる必要があるため、アンケートなど手を使用する方法は採用できない。そこで、作業中に口頭で負担感を伝えさせる手法をとる。負担感の強さを Borg-RPE や OMNI-RES などの数値で表現するには、回答時に数値と強度の対応を参照できるよう、表などを見える場所に設置することが理想的である。小野寺らの実験ではトレッドミル走中、常に正面にある対応表を見ながら運動していたが [4]、今回対象とする作業では、作業中の向きは常に変化するため、表などを参照しながら作業することは難しい。その反面、負担を感じた部位を伝える場合は、直観的に発生する内容を判断しやすい。以上の理由により、今回は負担を感じた部位の名称を述べさせた。

負担感を伝えている間も作業は続くため、作業を妨げないためにも口答表現は短い言葉であることが望ましい。部位の名称は、発声しやすいよう「腕（うで）」「背中（せなか）」「腰（こし）」「脚（あし）」と 3 文字以下で設定した。各名称と対応する部位を図 1 に示す。

3. OA フロア設置作業中の負担感計測実験

3.1 実験概要

OA フロアの設置作業における、作業動作と負担感の計測を行った。被験者は A, B の 2 名である。被験者 A は 40 代男性、OA フロア設置作業は今回の実験までに 10 数回の経験があり、腰痛の経験がある。被験者 B は 20 代男性、OA フロア設置作業の経験、腰痛経験ともにない。

OA フロアとは OA 機器の配線を床下に配置するために二重にした床のことである。パネルを取り付け中は長時間中腰姿勢が続くうえ、パネルは 1 枚 10kg 程の重さがある

ため、腰への負担が大きい作業である。今回は実験室の計測スペース内に 0.5m × 0.5m、重さ 10kg のパネルを 24 枚設置する作業を計測した。作業は支柱配置作業、パネル配置作業の 2 段階からなり、さらに各作業を次の 6 種類の工程に分類できる。

工程 1 移動

工程 2 支柱を設置場所に運ぶ

工程 3 支柱を設置場所に置く

工程 4 パネル 1~4 枚を設置場所に運ぶ

工程 5 パネルを支柱の上に設置する

支柱配置作業は工程 1, 2, 3 からなり、パネル配置作業は工程 1→4→5→1 の繰り返し作業である。

実験では、作業中の筋活動、心拍数、負担感を計測した。筋活動の計測には表面筋電位計 (S&M Company, DL-5000) を用いた。計測部位は脊柱起立筋 (骨盤から上に左右 4 箇所)、大腿二頭筋、大腿四頭筋である。心拍数は心拍計 (Polar V800) を用いて計測した。負担感の発声内容記録にはボイスレコーダーとマイクつきヘッドセットを使用した。ボイスレコーダーはウェストポーチに収納し、被験者に装着した。負担感の計測では、負担・つらさを感じるたび、その部位を指定した名称で発声するよう被験者に指示した。発声の頻度などは指定せず、被験者の主観的評価に委ねた。また、確認のためにビデオカメラで作業の様子を撮影した。

計測回数は各被験者 1 回ずつである。作業空間の床面に支柱設置場所の印をつけ、支柱とパネルを 1 か所にまとめた状態から開始し、すべてのパネルの設置を完了したところで作業終了とした。

3.2 実験結果

各工程で見られた被験者 B の作業姿勢を図 2 に示す。被験者 A の総作業時間は 6 分 28 秒、被験者 B の総作業時間は 7 分 22 秒で、両被験者とも工程 5 (パネル設置) に総作業時間の 45%, 65% と、一番時間を費やしていた。また、負担感の発声は被験者 A が「腰」27 回・「背中」4 回の計 31 回で、工程 3, 4, 5 内であった。被験者 B の発声内容は「腰」のみで、工程 2, 4, 5 内で 10 回発声していた。両被験者とも負担を感じたのは背部のみであったため、脊柱起立筋の筋活動計測結果について見ていく。各工程の作業時間と負担感の発声内容、心拍数平均値を表 1 に示す。また、工程別の脊柱起立筋 (腰部) の平均値を図 3 に示す。被験者 A は工程間の筋電位平均値の差が少なく、発声回数が最多である工程 5 の筋電位平均値は全工程中最小であった。また、発声回数が多いパネル配置作業の方が、支柱配置作業よりも心拍数の平均値が高かった。被験者 B は作業間の筋電位平均値の差が大きく、筋電位の平均値が最大である工程 4 中の発声回数が最も多かった。また、工程 4 の心拍数平均値が他の工程よりも高くなっていた。

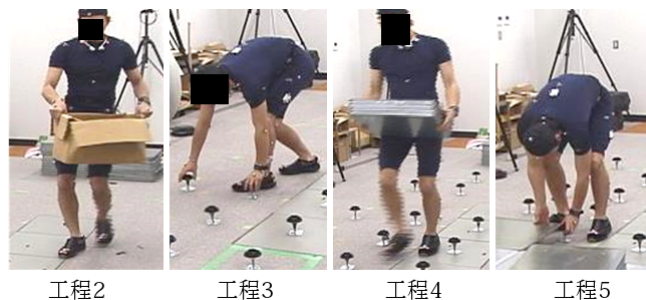


図 2 各工程の作業姿勢

Fig. 2 Postures in each work process.

表 1 工程別の作業時間と負担感発声回数, 心拍数平均値

Table 1 Working hours, the number of sounding and the average value of the heart rate in each process.

	工程 1	工程 2	工程 3	工程 4	工程 5
作業時間 [s]	43	12	66	88	177
発声回数	0	0	4	7	20
心拍数 [bpm]	98	84	88	103	104
作業時間 [s]	39	10	48	59	284
発声回数	0	1	0	7	2
心拍数 [bpm]	116	90	115	121	117

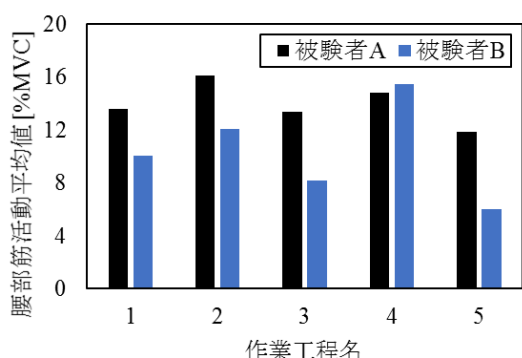


図 3 各工程の腰部筋電位平均値 [%MVC]

Fig. 3 The average value of the muscle potential in each process.

4. 負担感の推定

4.1 心拍数と負担感

作業中の心拍数の変化と負担感発声の関係について考察する。図 4 に被験者 A, 図 5 に被験者 B の心拍数変化と負担感発声のタイミングを示す。被験者 A について作業中の心拍数の変動と発声タイミングの関係を見ると, 作業前半の計測時間 0s~200s では, 工程 4 のパネル持ち上げ動作の前後で心拍数が 20bpm 程度増減していたが, 作業後半の 200s~400s では同じ工程でも心拍数はほとんど変動せず, 心拍数 100bpm, 計測開始時の心拍数から 30bpm 程度増加した状態でほぼ一定となっている。加えて, 心拍数が

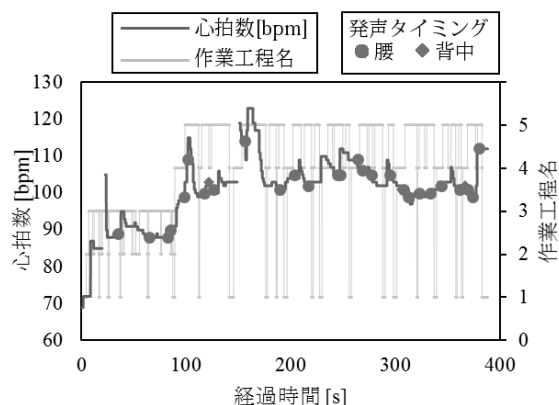


図 4 被験者 A の心拍数の変化と発声タイミング

Fig. 4 Change of heart rate and the time of sounding of participant A.

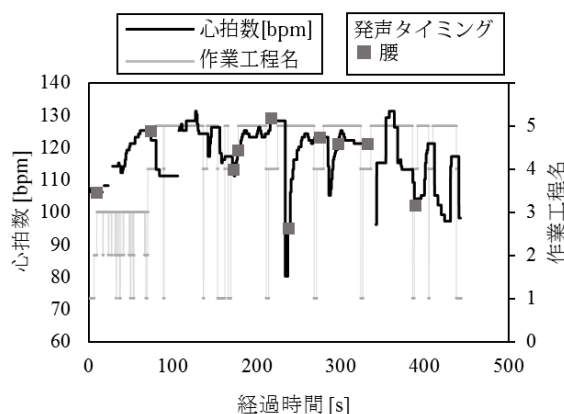


図 5 被験者 B の心拍数の変化と発声タイミング

Fig. 5 Change of heart rate and the time of sounding of participant B.

収束してから発声の頻度が上がっていた。この結果から, 疲労が蓄積すると心拍数の変動が少なくなるのではないかと予想される。

次に, 被験者 B について見ると, 一部不自然かつ急激に心拍数が変化している部分があるが, これは計測ミスであると考えられる。それを除くと, 作業開始から徐々に心拍数が増加し, パネル配置作業に入る 70s 付近で 120bpm を超え, 250s 付近から徐々に減少している。被験者 A は終了時の心拍数が作業開始時より高いままであるのに対し, 被験者 B の心拍数は, 終了時には実験開始時と同程度の 100bpm まで下がっている。被験者 B が A に比べて負担感の発声回数が少ないことから, 被験者 B は疲労があまり蓄積していないと予想される。

4.2 筋活動と負担感

次に, 計測した腰部筋電位の時間変化と発声タイミングの関係を見る。被験者 A, B について, 負担感の発声タイミングと 0.5Hz で平滑化した腰部の筋電位, 作業工程名を図 6, 図 7 に示す。グラフより, 両被験者ともに筋電位が

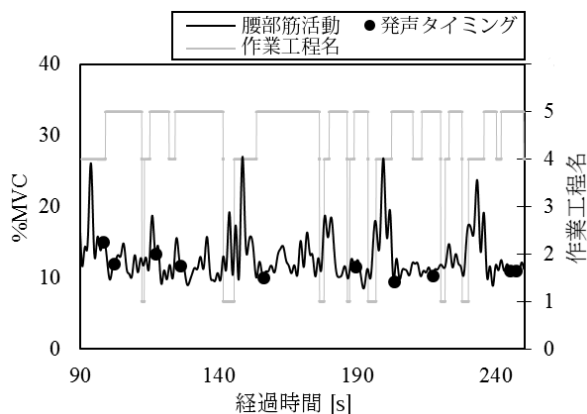


図 6 被験者 A の腰部筋活動の変化と発声タイミング
Fig. 6 Change of the muscle potential and the time of sounding of participant A.

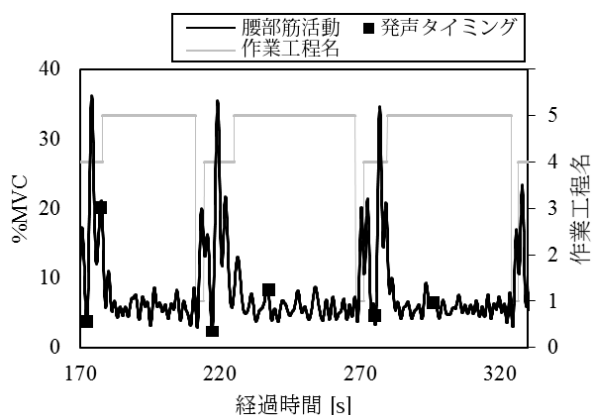


図 7 被験者 B の腰部筋活動の変化と発声タイミング
Fig. 7 Change of the muscle potential and the time of sounding of participant B.

極大値（被験者 A：約 25%MVC，被験者 B：約 35%MVC）となる前後で発声する傾向がみられる。撮影した動画より、筋電位が極大値をとるのは工程 4 においてパネルを持ち上げた瞬間であった。被験者 A はパネルを運び終わった後、被験者 B はパネルを持ち上げた直後に発声していた。このように、両被験者とも筋活動が工程 4 で極大となる傾向を持つが、負担を感じるタイミング、負担を感じてから発声するまでの間隔は個人によって異なっていた。

4.3 負担感の推定における課題点

心拍数を用いた負担感の推定について考察する。両被験者の心拍数を Borg-RPE(表 2) と照らし合わせると、被験者 A は心拍数が最大の時でも 120bpm 程度であり、Borg-RPE の運動強度で表すと「ややきつい」と「楽である」の間となり、心拍数のみから見た運動強度はあまり高くないことになる。被験者 B についても心拍数が 140bpm を超えることはなく、工程 5 の一部で「ややきつい」となる程度である。このように、作業 1 試行分の心拍数のみでは、実際に計測した負担感と大きく異なる推定結果となった。原因と

表 2 Borg-RPE と小野寺らによる日本語表記

Table 2 Borg-RPE

Scale	Borg-RPE	日本語表記
20	Very very hard	非常にきつい
19		
18		
17	Very hard	かなりきつい
16	Hard	きつい
15		
14	Somewhat hard	ややきつい
13		
12	Fairly light	楽である
11		
10	Very light	かなり楽である
9		
8	Very very light	非常に楽である
7		
6		

して、この尺度が今までトレーニングのような単純動作に対して用いられていたのに対し、今回の作業が多様なものであることが考えられる。

目標値として使用するべき負担感の計測結果側にも、今回は負担感とその程度で発声するかを被験者の主観にゆだねたため、どの程度の負担を表しているのかがあいまいであるという問題がある。負担感発声の尺度を明確にすることで、その頻度などからどの程度の負担を感じたかの評価も可能になると予想される。さらに、被験者 A は腰痛経験があるため、運動強度が高くなくとも、負担感は大きくなると考えられる。徳田ら [7] は高齢者の最高心拍数低下に合わせ、RPE をスケールし直したが、このように作業者の状態に合わせ、負担の感じやすさの尺度を補正することが有効と考えられる。

今回は被験者数・試行回数ともに少ないため、以上で述べた心拍数や筋活動と負担感の関係性について結論付けるには、より被験者数を増やして検証する必要がある。

5. 結論

OA フロア設置作業における負担感と生体情報との関係を調査した。作業後ではなく、作業中の負担感を即座に計測するため、作業者に負担を感じた部位の名称を口頭で述べさせた。記録した作業者の負担感と、計測した作業中の心拍数、脊柱起立筋の筋活動を照らし合わせ、その関係性を調査した。また、心拍数を用いた負担感の推定について、心拍数との関係が明らかになっている既存の主観的運動強度スケール (RPE) と比較し、考察した。今回計測したデータは負担感の推定には不十分であったが、被験者の年齢などに加え、腰部の負担感であれば腰痛経験なども負担感の推定に使用することが有用であると示唆された。

今回の負担感計測実験では負担感発声の基準を被験者に

ゆだねたため、発声が表す負担の大きさがあいまいであった。今後被験者数を増やす場合は、同じ条件で計測できるよう、Visual Analog Scaleなどの手法と組み合わせ、発声の基準を示す必要があると考える。また、負担の程度についても、作業レイアウトを工夫するなどして、Borg-RPE等の尺度を利用し、作業中の負担感の変動についても調査していきたい。

謝辞 本研究はJSPS 科研費 18J10703 の助成を受けたものである。

参考文献

- [1] Karhu, O., Kansil, P., Kuorinka, I.: Correcting working postures in industry: A practical method for analysis, *Applied Ergonomics*, 8(4), pp199–201 (1977).
- [2] Miyajima, S., Tanaka, T., Imamura, Y. and Kusaka, T.: Lumbar Joint Torque Estimation Based on Simplified Motion Measurement Using Multiple Inertial Sensors, in *Proc. IEEE EMBC 2015*, pp6716–6719 (2015).
- [3] Borg, G. and Linderholm, H.: Perceived Exertion and Pulse Rate during Graded Exercise in Various Age Groups, *Acta Med. Scand.*, 472, pp194–206 (1967).
- [4] 小野寺孝一, 宮下充正: 全身持久性運動における主観的強度と客観的強度の対応性, *体育学研究*, 21(4), pp191–203 (1976).
- [5] Robertson, R.J., Goss, F.L., Rutkowski, J., Lenz, B., Dixon, C., Timmer, J., Frazee, K., Dube, J. and Andreacci, J.: Concurrent validation of the OMNI perceived exertion scale for resistance exercise, *Med. Sci. Sports Exerc.*, 35(2), pp333–341 (2003).
- [6] 宮島沙織, 田中孝之, 泉博之, 宮田なつき, 多田充徳, 持丸正明: 作業中における負担感と作業動作の同時計測, *産業保健人間工学会第22回大会*, 19(特別号), pp39–42 (2017).
- [7] 徳田 哲男, 丸山 仁司, 秋山 紀和, 中山 彰博, 池谷 義道, 高島 耕: 老年男性における主観的作業強度と生理学的作業強度の対応について, *人間工学*, 18(5), pp277–280 (1982).