身体加速度を用いた作業負担度評価システム

○ 渡辺恵子、上山健司、源野広和（三洋電機㈱）

Workload Evaluation System Using Acceleration of Human Body
Keiko Watanabe, Kenji Ueyama, Hirokazu Genno (Sanyo Electric Co., Ltd.)

1. はじめに

石油プラントメンテナンス作業現場では作業員の高齢化が生じてきており、作業時の安全確保のため作業員の作業負担度を評価することが重要である。

ここでいう作業負担度は作業により消費されるエネルギーで、作業時のエネルギー消費量から安静時の代謝量を差し引いた値を作業負担度 (kcal/min) と定義した。

エネルギー消費量の計測方法は、呼気ガス分析器を用いる^{1) 2)} のが一般的である。しかし、石油プラントメンテナンス作業は狭い空間での作業や上下移動が多いため、鼻と口を覆うマスクなどを体に装着する呼気ガス分析器の使用は作業に支障をきたし不可能である。

そこで、身体加速度を用いて作業に支障をきたすことなくエネルギー消費量を算出し、作業負担度を評価できるシステムを開発した。

本稿では、作業負担度を評価するために開発した「作業負担度評価システム」と、身体加速度を用いて開発した作業負担度推定手法について述べる。

さらに、実際の石油プラントメンテナンス作業時の身体加速度データから作業負担度を推定し、心拍数から推定する場合との比較を行った。

図1 作業負担度評価システムの概要図

2. 作業負担度評価システムの概要

図1に「作業負担度評価システム」の概要図と、図2に身体加速度計測のためのウェアラブルセンサ³⁾と計測された身体加速度及び心電図の波形を示す。

図2のウェアラブルセンサ本体は、軽量 (91g)、小型化 (W63mm × H90mm × D26mm) を達成し、作業時の支障にならないようにした。計測データは無線 (PHS 自営網) 送信が可能であり、連続計測時間はアルカリ単三電池一つで8時間以上 (通信をしない場合は24時間以上) を達成した。計測データは、無線通信を通じて離れた場所でリアルタイム観測できる機能と、ウェアラブルセンサ本体内に蓄積して、メモ리카ード経由でデータ収集する機能の2つを備えた。これにより、作業現場での様々な要求に対応した作業負担度を算出するためのデータ計測を可能にした。計測できるデータは3軸加速度 (サンプリング周波数 25Hz) である。さらに、2チャンネル、サンプリング周波数 150Hz で心電図も計測する。このデータを

図2 ウェアラブルセンサと計測波形

もとに心拍数を算出する。

3. 作業負担度推定手法

作業負担度推定のための手法開発には多数のデータが必要であるが、それらのデータを実際の石油プラントで収集することは非常に困難である。また、実験室実験で石油プラントメンテナンス作業(図3)をそのまま再現することは不可能であること

図3 作業員の動き (一部)

表1 基本作業動作

基本作業動作	
姿勢	動作部位
立位	
立位	下半身(移動)
立位	下半身(上下)
立位	上半身
立位	上半身+下半身(移動)
立位	上半身+下半身(上下)
前屈	
前屈	下半身(移動)
前屈	下半身(上下)
前屈	上半身
前屈	上半身+下半身(移動)
前屈	上半身+下半身(上下)
中腰	
中腰	下半身(移動)
中腰	下半身(上下)
中腰	上半身
中腰	上半身+下半身(移動)
中腰	上半身+下半身(上下)
座位	
座位	上半身

から、下記のようなデータ収集方法を実施した。

(1) メンテナンス作業を撮影したビデオをもとに、作業員の姿勢と四肢の動作部位に着目して基本作業動作を分類(表1)。

(2) 基本作業動作に相当する運動を決定(例えば、姿勢が立位、動作部位が下半身(上下)であれば徒歩、姿勢が立位、動作部位が下半身(上下)であれば屈伸)。

(3) (2)で決定した基本作業動作別運動を実験室実験で実施。各動作の身体加速度、エネルギー消費量、心拍数の計測を実施。実験は20~60歳代の男性66名に対して行った。

身体加速度、心拍数は「身体負担度計測システム」で、エネルギー消費量はMetavine-s⁴⁾(ヴァイン製)で計測を行った。

3. 1 身体加速度からの作業負担度推定

実験室実験の身体加速度データと作業負担度データより作業負担度推定式を作成した(図3式1)。

式作成のための身体加速度データは、重力成分をカットするためにフィルター長125、HPF(カットオフ1Hz)を施した。図3より群が2つに分かれたため、それぞれの推定式を作成した。群①はその場での運動(屈伸、上半身のみの運動等)が中心であり、群②は徒歩など移動を伴った運動の群であった。

身体加速度指標値<12.757 なら

身体加速度からの作業負担度推定値

$$=0.011*身体加速度指標値+0.005\cdots\text{群①}$$

それ以外なら

身体加速度からの作業負担度推定値

$$=0.0028*身体加速度指標値-0.0019\cdots\text{群②}$$

但し、身体加速度指標値

$$=\sqrt{(X^2+Y^2+Z^2)}*サンプリング時間*体重$$

X: X方向身体加速度[G]

Y: Y方向身体加速度[G]

Z: Z方向身体加速度[G]

..... (式1)

身体加速度からの推定式より算出された作業負担度推定値と呼気ガス分析器から計算された作業負担度の誤差平均は±0.0132kcal/min/kgであった。

図3 呼気ガス分析器から算出した作業負担度と身体加速度指標値の関係

3. 2 心拍数からの作業負担度推定

実験室実験の心拍数データと作業負担度データより作業負担度推定式(式2から式6)を作成した。

20 歳代エネルギー消費量

$$=0.0767 \times \text{心拍数} - 3.7753 \dots \dots \text{(式2)}$$

30 歳代エネルギー消費量

$$=0.1034 \times \text{心拍数} - 5.9314 \dots \dots \text{(式3)}$$

40 歳代エネルギー消費量

$$=0.0788 \times \text{心拍数} - 3.6631 \dots \dots \text{(式4)}$$

50 歳代エネルギー消費量

$$=0.1034 \times \text{心拍数} - 6.3603 \dots \dots \text{(式5)}$$

60 歳代エネルギー消費量

$$=0.0928 \times \text{心拍数} - 4.9074 \dots \dots \text{(式6)}$$

さらに、動作時のエネルギー消費量から基礎代謝量を含めた安静時代謝量のエネルギー消費量を引くことを行っていることから、推定されたエネルギー消費量より、安静時代謝量分を差し引き、それを作業負担度の推定値とした。実際の石油プラントメンテナンス作業時のデータに式を当てはめ推定値を算出する時点で作業員の安静時代謝量が不明である場合は、安静時代謝量は基礎代

謝量の1.2倍とされていることから、各作業員の安静時代謝量は、基礎代謝量(体重、身長を用いた厚生労働省の算出方法⁵⁾)を1.2倍して算出することとした。

(式2)から(式6)の推定式より算出された作業負担度推定値と呼気ガス分析器から計測された作業負担度との誤差平均は±0.0137kcal/min/kgであった。

4. 考 察

身体加速度からの作業負担度推定値を検証するため、実際の石油プラントメンテナンス作業時のデータにそれぞれの作業負担度推定式を当てはめ、1日の総作業負担度[kcal]を算出し(図4)、身体加速度と心拍数からの作業負担度推定値の比較を行った。データは作業員6名の17日間で、心電図計測が可能であった場合を対象とした(身体加速度は常に計測できていた)。

その結果、心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値の相関係数は0.64、誤差平均18.3%であった。この誤差の原因は、図4より仕上工4であることがわかる。そこで、仕上工4の心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値の時系列グラフ(図5)にて詳細検討を行った。

仕上工4の心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値(1分毎の平均値 データ数60点)の相関係数は0.60と有意であったが、心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値とのレベルが異なっている。この原因は、仕上工4のミーティング中(図5の8:36:00から8:38:40にあたる 安静に近い立位にあたると思われる)平均心拍数が123回/分、休憩時間を含めた1日の最低心拍数でも

図4 1日の総作業負担度比較

図5 心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値との比較（仕上工4）

図6 心拍数と身体加速度からの作業負担度推定値との比較（蔦工2）

88 回/分であったことから、仕上工4の心拍数が日常的に高いことにあると考えられる。

さらに、誤差が小さい作業員データについても時系列グラフ（図6）にて詳細な検討を行った。その結果、相関係数は0.51であった。相関係数が劣っている原因は、前半の作業負担度がある程度一致しているにも関わらず、中盤以降、心拍数からの身体負担度推定値の方が身体加速度からの推定値よりも高くなっていることで大きな差が生じている。この時の作業内容をビデオで確認してみると「TB 取出」という作業中であつた。この作業はクレーンに指示をしながら熱交換器よりチューブバンドルをゆっくりと拔出するという緊張を伴う作業である。このことから差が生じた原因として、緊張感という精神性の影響を受けたものではないかと考えられる。

身体加速度からの作業負担度推定には、精神性の影響を受けることなく、容易に計測が可能である。しかし、力を入れた場合などの推定精度に課題があると考えられる。

また、心拍数からの推定には、心電図ではなく心拍数もしくは脈拍を用いれば計測は容易である。

しかし、上記に述べたように精神性などの影響がある。

5. まとめ

身体加速度データより作業負担度を推定する手法開発を行い、作業負担度推定値を評価するシステムの構築を行った。

考察の結果、身体加速度からの作業負担度推定値と呼気ガス分析器から計算された作業負担度の誤差平均は心拍数からの作業負担度推定値の誤差平均とほぼ同等の推定精度であると言える。よって、身体加速度を計測する手段は、身体に小型センサを携帯するだけで容易に行うことができることから有効であると思われる。さらに、心拍数では精神性の影響を受けていたが身体負担度を用いることで、その問題を解決できることが示唆されたと思われる。

本開発では、石油プラントメンテナンス現場に特化し、その作業を模擬した動作で実験を実施し、データ収集が行われた。今後は、他の日常生活などへの応用も視野に入れ、更なる検討を行っていく予定である。

尚、本研究は経済産業省・工業技術院の産業技術基盤研究開発プロジェクト「人間行動適合型生活環境創出システム技術」として、新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの委託を受けて、社団法人人間生活工学研究センター（HQL）が実施したものである。

参考文献

- 1) 深代千之 他:「スポーツバイオメカニクス」, 朝倉書店, P123, 2003
- 2) 斉藤慎一 他:「二重標識水法によるエネルギー消費量測定の実験とその応用」, 栄養学雑誌, Vol. 57 No6 p319, 1999
- 3) Kenji Ueyama:「A Wearable sensor for workload evaluation」, SICE, 2003
- 4) <http://www.vine.co.jp/product6.htm>
- 5) 厚生省保健医療局健康増進栄養課 監修:「第5次改定 日本人の栄養所要量」, 第一出版, p46-47, 1994