

ウェアラブルセンサーデータを用いた状態推定に基づく

作業者の熱ストレス度評価システム

A Heat Stress Evaluation System for Workers based on State Estimation using Wearable Sensor Data

吉田 由起子
Yukiko Yoshida竹林 知善
Tomoyoshi Takebayashi

(株) 富士通研究所 知識情報処理研究所 人工知能研究センター

Artificial Intelligence Research Center, Knowledge Information Processing Laboratory, Fujitsu Laboratories, Ltd.

We propose a heat stress evaluation system for workers in hot environments. The system estimates a person's time varying working states of workload, work-rest time allocation and hotness, based on their wearable sensor data measured as METs, temperature and relative humidity, and then evaluates their heat stress accumulation caused by the combination of the working states. For this purpose, we introduce a new measure of heat stress accumulation by applying heat stress-related international standards and guidelines. The system was applied to some wearable sensor datasets collected in workers' daily lives and high-load work experiments in hot environments, and the results showed that the measure of heat stress accumulation has ability to evaluate the intensity and duration of a worker's workload and hotness.

1. はじめに

工事現場等の暑熱環境下で働く作業員たちにとって熱中症のような深刻な熱ストレス症状に陥るのを未然に防ぐことは重要である。しかし、熱ストレス管理を作業員自身に任せていると、自分の熱ストレス状態がどれくらい深刻か気づかない恐れがある。一方、熱ストレスに詳しい専門家に管理を任せられる場合でも、様々な作業を行っている多数の作業員たちの状態を手では把握しきれないという問題がある。この問題へのアプローチとして、作業現場に温度・湿度等の環境センサーを設置したり、各作業員にウェアラブルセンサーを装着させて、それらのセンサーで計測される各種属性に基づいて作業員の熱ストレスの度合いを自動的に評価し、その度合いに応じた適切な対処方法を適切なタイミングで作業員や監督者に働きかけることのできる分析システムが開発されている。たとえば、環境の暑熱要因を熱中症予防の観点で指標化した WBGT 指数を各時点で計測し、所定の基準値 [ISO 7243 1989][日本生気象学会 2013][日本体育協会 2013] と比較する手法がよく利用されている。しかし、作業員の熱ストレスの蓄積度合いは、作業員がこれまでにどのような暑熱環境でどのような強度の作業をどのくらいの時間行ってきたかに依存するため、時点ごとの WBGT を基準値と比較するだけでは不十分である。

そこで、筆者は、熱ストレス関連の国際標準や産業衛生の専門機関の指針を応用し、作業員がこれまでに過ごしてきた暑熱環境・作業強度・負荷作業/非作業パターンの組み合わせによって増減する熱ストレスの蓄積度合いを尺度化し、その計算に必要な諸要素をウェアラブルセンサーの各種計測値から推定・導出する手法を開発した。本稿では、作業員の作業状態推定方法と熱ストレス蓄積度の導出方法について説明し、本手法を実証実験データへ適用した結果と今後の課題について述べる。

2. 熱ストレス関連の指針・指標

本手法で利用した熱ストレス関連の指針・指標についてまとめておく。WBGT (wet bulb globe temperature, 湿球黒球温度) 指数は、暑熱環境下で温度・湿度・風速・放射熱によって人体に及ぼされる熱ストレスを総合的に評価するために考案された指標で、[ISO 7243 1989] では乾球/湿球/黒球温度計による計測方法と WBGT の計算式 (下記) が規定されている:

(屋内) WBGT = 0.7 * 湿球温度 + 0.3 * 黒球温度

(屋外) WBGT = 0.7 * 湿球温度 + 0.2 * 黒球温度 + 0.1 * 湿球温度

ISO 7243 が規定した WBGT 計測方法は大きかりな装置を必要とするため、より簡易的な計測装置や気象庁の通常の気象観測データを用いて WBGT を推定する方法も考案されている。たとえば、[日本生気象学会 2013] によって、室内で日射がない状態での気温と相対湿度から WBGT への換算表が作成されている。

ISO 7243 では、熱ストレスの要因である身体内の熱産出量をエネルギー代謝率で推定できるものとし、代謝率区分 0 (安静) ~4 (極高) のごとに WBGT の許容限度値 (基準値) を提示している (表 1)。

表 1: ISO 7243: 代謝率区分ごとの WBGT 基準値

代謝率区分	皮膚表面 1.8m ² あたりの代謝率 (W) [当該区分の代表値]	WBGT 基準値 (°C)	
		順化あり	順化なし
0 (安静)	M < 117 [117]	33	32
1 (低)	117 ≤ M < 234 [180]	30	29
2 (中)	234 ≤ M < 360 [297]	28	26
3 (高)	360 ≤ M < 468 [414]	25 (26)*1	22 (23)*1
4 (極高)	468 ≤ M [522]	23 (25)*1	18 (20)*1

*1 気流を感じないとき (気流を感じる時) の基準値

表 2: ACGIH 作業者の熱ストレスに関する WBGT 基準値 (TLV)

作業時間率 (%)	作業強度区分 [代謝率の代表値 (W)]			
	低 [180]	中 [300]	高 [415]	極高 [520]
75-100	30.8	28.2	--	--
50-75	31.2	29.0	27.6	--
25-50	31.8	30.1	28.8	27.9
0-25	32.3	31.3	30.5	29.8

ACGIH (米国産業衛生専門家会議) では、ISO 7243 の代謝率区分に相当する作業者の作業強度区分と、作業-休憩の時間配分の組み合わせごとに WBGT の許容限度値 (TLV) を提示している (表 2) [ACGIH TLV-PA 2006]。なお、暑熱度 WBGT や作業強度 M が時間変動する場合は、1~2 時間程度の区間において次式のような時間による加重平均値 (time-weighted average (TWA)) を計算したものをを用いることとしている:

$$TWA[WBGT] = \frac{WBGT_1 * t_1 + \dots + WBGT_n * t_n}{t_1 + \dots + t_n}$$

$$TWA[M] = \frac{M_1 * t_1 + \dots + M_n * t_n}{t_1 + \dots + t_n}$$

3. 提案手法

提案手法は、上記の熱ストレス関連の各種指針を応用して、時間とともに様々に変動する作業者の暑熱環境と作業強度と負荷作業/非作業時間配分の関係性を考慮して熱ストレス蓄積度として尺度化し、その計算に必要な各種要素を作業者のウェアラブルセンサーデータから推定するというものである。

3.1 使用データ

作業者のウェアラブルセンサーによって計測・推定された運動強度 (METs)、歩数、周辺温度、相対湿度の 1 分値時系列データを使用する。

3.2 状態推定

作業者周辺の暑熱度、負荷作業/非作業状態、作業強度を推定する。

(1) 暑熱度

作業者の周辺温度と相対湿度に [日本生気象学会 2013] の WBGT 換算表を適用したものを、作業者周辺の暑熱度として用いる (図 1)。

(2) 負荷作業/非作業状態、作業時間率

作業者の METs と歩数をクラス分類法により高低 2 つの状態に分類する。METs および歩数データが低い値のままで推移している区間は非 (負荷) 作業中、それ以外の区間は (負荷) 作業中であると判定する。単位時間長の滑走窓を用い、その期間内で作業中と判定された時間の割合を作業時間率として算出する (図 2)。

(3) 作業強度区分

今回、ウェアラブルセンサーから取得可能な METs の 1 分値データを用いて、ACGIH の指針を適用できるように作業強度区

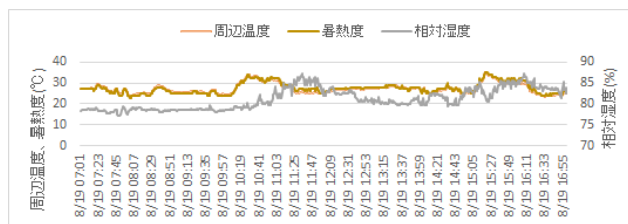


図 1. 暑熱度

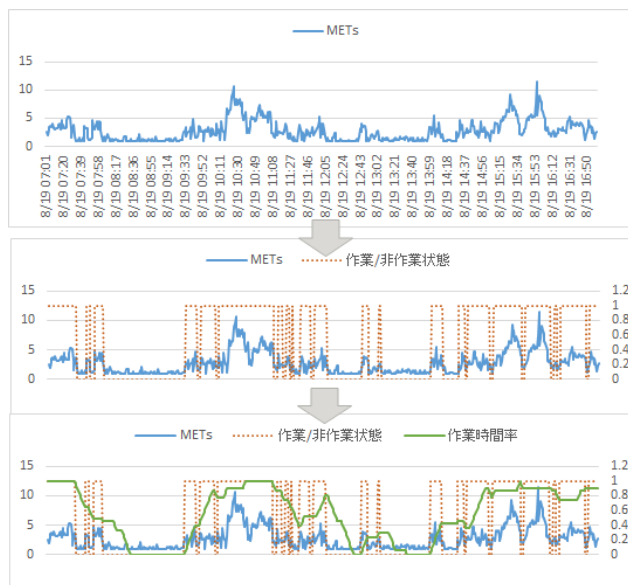


図 2. 作業/非作業状態、作業時間率の推定

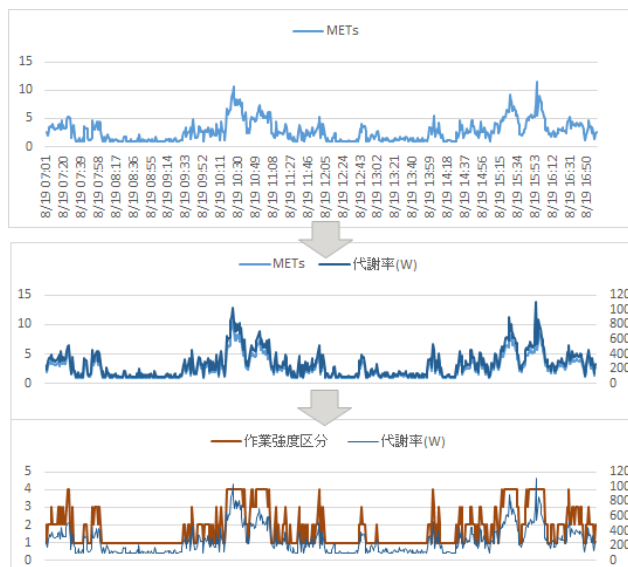


図 3. 作業強度区分の推定

分を推定する。まず、つぎのよく知られた関係式を用いて作業者の体重および METs から代謝率 (W) を計算する:

$$1 \text{ MET} = 1 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} = 1.163 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$$

たとえば、体重 70kg の作業者の場合、1 MET = 81.41 W と換算される。算出された代謝率の値を ISO 7243 の代謝率区分に当てはめ、さらに ACGIH の作業強度区分に当てはめる (図 3)。

3.3 暑熱環境と作業負荷・継続性による熱ストレスの蓄積度合いの尺度化～熱ストレス蓄積度

ACGIH の指針では、低/中/高/極高の作業強度区分と 0-25/25-50/50-75/75-100% の 4 パターンに分けた作業時間率に対して WBGT 基準値が示され、暑熱度 WBGT や代謝率 M が時間変動する場合は、1～2 時間程度の区間における時間による加重平均を求めてそれらを基準値表に当てはめることとされているが、本手法では、作業強度区分/作業時間率/暑熱度の様々な時間間隔での変動に対応できるように評価方法をつぎのようにカスタマイズした。

作業強度区分別の作業時間率に対する暑熱度の基準値には、ACGIH 指針に示された作業時間率のパターン間を滑らかに補間した値を用い(図 4)、作業者の各時点の作業時間率と作業強度区分から暑熱度の基準値を求める(図 5)。現在の暑熱度が基準値を下回っている場合は、現在の作業時間率と作業強度レベルでの作業を行ってとくに問題はないとみなし、暑熱度が基準値を超えている場合は、その超過分が熱ストレスとして蓄積されるものとみなす。熱ストレスが新たに蓄積される分と過去に蓄積された分が時間とともに減衰していく効果を反映させるために、各時点の暑熱度の超過分を指数移動平均で平滑化したものを熱ストレス蓄積度とする(図 6)。

4. 実験

熱ストレス蓄積度の有効性を評価するために、複数の被験者たちによる日常生活と屋外での負荷作業実施時に収集したウェアラブルセンサーデータに本手法を適用した。データは、2016 年夏季に各被験者が連続する数日間にわたり 1 日数時間程度、ウェアラブルセンサーを着用して日常生活(通勤、デスクワーク等)を過ごした際に取得されたものである。また、計測期間中に各被験者は屋外で所定の暑熱負荷作業実験(20 分間負荷作業-数分間休憩-20 分間負荷作業)を複数回実施している。

表 3. 分析対象データ諸元

データ収集期間	2016/08/06～2016/09/02
被験者数	27 人
1 人あたりの収集データ時点数	最長 7695 分, 最短 1827 分, 平均 4073 分
屋外での負荷作業実験	1 セット = 20 分間作業-数分間休憩-20 分間作業 被験者ごとの実施回数: 最大 9 回, 最小 3 回, 平均 6.3 回, 延べ 171 回

図 7 は、ある被験者の日中(朝 7 時～夕方 5 時)のウェアラブルセンサーデータに本手法を適用した結果である。この日、当被験者は朝、自宅から会社に出勤し、日中は主にデスクワークに従事し、午前と午後 2 回、屋外での暑熱負荷作業実験を実施している。グラフの赤い点は、その作業開始-休憩開始-作業再開-作業終了の時点を示している。グラフの 1 段目は元のセンサーデータ(周辺温度、相対湿度、METs)をプロットしたもの、2 段目はそれらのデータに基づいて導出・推定された暑熱度、作業時間率、作業強度レベル、3 段目はそれらから算出された暑熱度の基準値、暑熱度の基準値からの超過量、および熱ストレス蓄積度である。グラフから、この被験者の熱ストレス蓄積度は多くの時間帯では値 0 で推移するが、朝の通勤期間と暑熱負

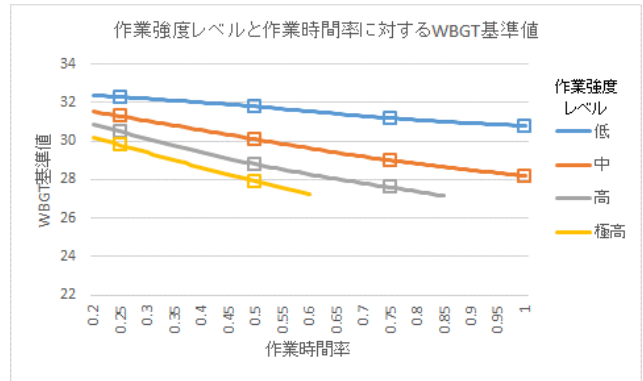


図 4. 作業強度区分と作業時間率に対する暑熱度の基準値

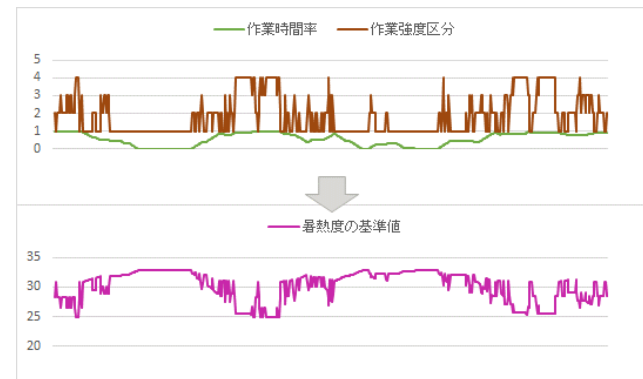


図 5. 作業時間率と作業強度区分に応じて時間変動する暑熱度の基準値

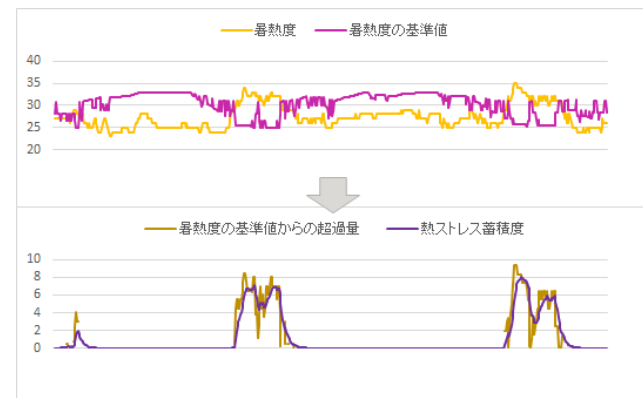


図 6. 暑熱度の基準値からの超過量、熱ストレス蓄積度

荷作業実験期間に正の値に立ち上がっていることが分かる。また、その値は作業の開始-休憩-再開-終了のパターンに連動して変化していることが分かる。熱ストレス蓄積度が所定の閾値を超えたときに熱ストレス蓄積度が高いと検知することとし、27 人分のウェアラブルセンサーデータに本手法を適用したところ、計測データのある 147 回の暑熱負荷作業実験期間のうち 92.5% について熱ストレス蓄積度が高いと検知した。この結果から、熱ストレス蓄積度は、作業者周辺の暑熱度と作業強度と作業継続度による熱ストレスの蓄積度合いを計るために有効な尺度であると言える。

5. まとめと今後の課題

本稿では、暑熱環境下での作業者の熱ストレス対策として、作業者がこれまでに過ごしてきた暑熱環境・作業強度・負荷作業/非作業パターンの要素によって蓄積される熱ストレスの蓄積度合いを熱ストレス関連の国際標準や専門機関の指針を応用して尺度化し、その計算に必要な諸要素をウェアラブルセンサーの各種計測値から推定・導出する手法を提案し、実証実験データへの適用結果について報告した。提案する熱ストレス蓄積度は、作業強度と作業継続度と暑熱度の観点でとくに問題のない期間は値0で推移するが、何らかの問題が生じると正の値となり、その問題から生じる熱ストレスの蓄積度合いによって値が高低に変動する尺度となっている。複数の被験者による日常生活と屋外での負荷作業実験を含むウェアラブルセンサーデータへの本手法の適用では、熱ストレス蓄積度は暑熱負荷作業実験の開始-休憩-再開-終了のパターンに連動して正の値で変動し、計測データのある作業実験期間のうち92.5%について熱ストレス蓄積度が高いと検知し、暑熱環境下での負荷作業時の熱ストレスの蓄積度合いを評価する尺度として有効であることを示した。

今後の課題として、熱ストレス蓄積度の値に応じて熱ストレスへの対処方法を提示したり、作業者の年齢・熟練度・体調・当日の作業計画・天気予報等を評価に加味することを検討している。

謝辞

本研究において、公益財団法人 大原記念労働科学研究所にご協力をいただきましたことをここに感謝申し上げます。

参考文献

- [ISO 7243 1989] ISO 7243:1989 Hot environments -- Estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT-index (wet bulb globe temperature).
- [日本生気象学会 2013] 日本生気象学会: 日常生活における熱中症予防指針, Ver. 3, 2013.
- [日本体育協会 2013] (公財) 日本体育協会: 熱中症予防のための運動指針, 2013.
- [ACGIH TLV-PA 2006] ACGIH: Dedicated to Development of Exposure Guidelines for the Professional - Threshold Limit Values for Physical Agents (TLV-PA) Committee, the American Industrial Hygiene Conference and Exposition (AIHce), 2006.
- [Parsons 2006] Ken Parsons: Heat Stress Standard ISO 7243 and its Global Application, Industrial Health, Vol. 44 No. 3, 2006.
- [Pancarado 2015] Pancarado, P., Acosta, F. D., Hernández-Nolasco, J.A., Wister, A. W., and López-de-Ipiña, D.: Real-Time Personalized Monitoring to Estimate Occupational Heat Stress in Ambient Assisted Working, Sensors 15 (7), 16956-16980, 2015.
- [環境省] 環境省熱中症予防情報サイト http://www.wbgt.env.go.jp/doc_observation.php

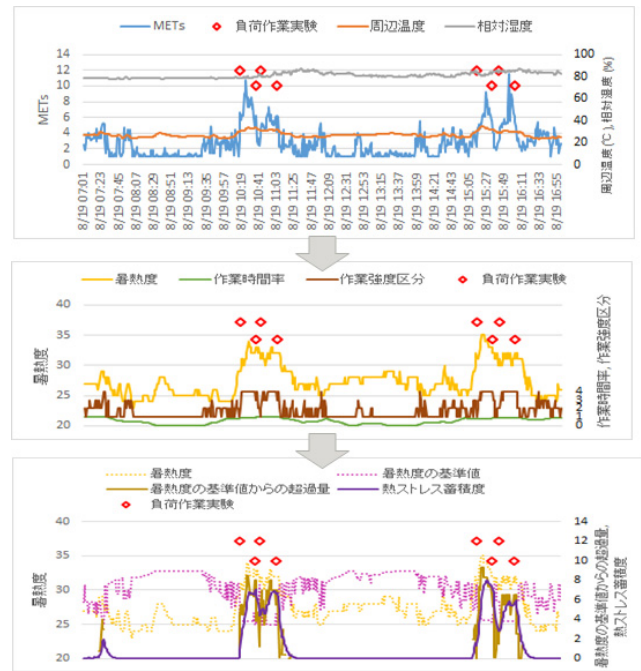


図 7. 日常生活と屋外での暑熱負荷作業実験データに対する熱ストレス蓄積度適用例