

〈ノート〉

スマートウェアを活用した廃棄物処理施設における安全管理の高度化

岡本 宗一郎¹⁾, 上 鶴 喜 貴²⁾, 橋 口 伸 樹³⁾
児 玉 耕 太⁴⁾, 橋 本 征 二⁵⁾

¹⁾立命館大学大学院 理工学研究科
(〒525-8577 草津市野路東1-1-1 E-mail: rv0058xp@ed.ritsumei.ac.jp)

²⁾立命館大学大学院 理工学研究科
(〒525-8577 草津市野路東1-1-1 E-mail: rv0044hh@ed.ritsumei.ac.jp)

³⁾立命館大学大学院 テクノロジー・マネジメント研究科
(〒567-8570 茨木市岩倉町2-150 E-mail: gr0325kr@ed.ritsumei.ac.jp)

⁴⁾立命館大学大学院 テクノロジー・マネジメント研究科
(〒567-8570 茨木市岩倉町2-150 E-mail: kkodama@fc.ritsumei.ac.jp)

⁵⁾立命館大学 理工学部
(〒525-8577 草津市野路東1-1-1 E-mail: shashimoto@fc.ritsumei.ac.jp)

概 要

近年、情報通信技術を活用することにより、多くの産業において利便性の向上や課題の解決が図られるようになってきている。本研究では、スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するシステムを廃棄物処理施設に導入し、熱中症の危険性や労働強度（身体負荷）の実態を把握した。その結果、熱中症の危険性が高いと判定されるケース、危険な労働強度と判定されるケースが確認された。熱中症の危険性や労働強度を心拍数を用いて常時計測することにより、作業員の身体的な差異や作業内容の差異等を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能になると考えられる。

キーワード：心拍、暑さ指数、熱中症、労働強度、事故

原稿受付 2020.6.5 原稿受理 2020.8.19

EICA: 25(2・3) 1-7

1. はじめに

近年、情報通信技術を活用することにより、多くの産業において利便性の向上や課題の解決が図られるようになってきている。しかしながら、廃棄物処理業においては焼却処理施設を除き具体的な導入事例が未だ少なく、こうした技術の導入促進が課題となっている。こうした中、情報通信技術の導入が期待される分野の一つが安全管理である。

平成30年現在、廃棄物処理業における労働災害の度数率（100万延べ実労働時間当たりの労働災害による死傷者数：災害発生の頻度を表す）は全産業平均の約4倍、強度率（1000延べ実労働時間当たりの延べ労働損失日数：災害の重さの程度を表す）は全産業平均の約3倍と非常に高く、具体的には、「墜落・転落」「挟まれ・巻き込まれ」「転倒」などの事故が多く報告されている¹⁾。また、熱中症の危険性は、地球温暖化による気温上昇に伴い今後も増加すると考えられ²⁾、こうした問題の解決にも情報通信技術の活用は有効と考えられる。

廃棄物処理施設においては、廃棄物の破碎や選別、

圧縮、焼却等の工程が主であり、装置産業的な側面もあるが、労働集約型で危険な作業が多く、製造業や建設業における取組みが参考になる。こうした業界においてはこれまで、工程の無人化や省力化、工程や設備の異常検知や予知、作業員の生体や行動の監視とリスク解析、教育訓練等に情報通信技術を活用し、安全管理の高度化がなされるようになってきており^{3,4)}、廃棄物処理業界においても同様の取り組みが求められる。

本研究では、作業員の生体情報の監視というアプローチのもと、スマートウェアを活用して作業員の生体情報を計測するシステムを廃棄物処理施設に導入し、熱中症の危険性や労働強度（身体負荷）の実態を把握した。また、この結果も踏まえ、廃棄物処理業における情報通信技術の導入による安全管理の高度化の可能性について議論した。

2. 方 法

2.1 計測システムの概要

本研究では橋口ら^{5,6)}が開発した **Fig. 1** に示す計測システムを用いた。本計測システムでは、作業員が着



Fig.1 本研究で用いた計測システム

用するスマートウェア (COCOMI[®]) と計測機器 (WHS-2) にて各種情報を取得し、これを作業者が携帯する補助通信装置 (CC2650-STK) に無線送信する。また、補助通信装置に一時的に蓄積された各種情報は、作業エリアに配置したアクセスポイント (Raspberry Pi Zero W) に転送され、アクセスポイントに転送された各種情報は Wi-Fi アクセスポイントを介して、PC サーバまで無線送信され蓄積される。

本研究では、暑さ指数計 (AD-5696) も作業エリアごとに設置した。暑さ指数 (湿球黒球温度: Wet Bulb Globe Temperature - WBGT)⁷⁾ は、熱中症を予防することを目的として1954年にアメリカで提案された指標であり、人体の熱収支に与える影響の大きい①湿度、②日射・輻射など周辺の熱環境、③気温の3つを取り入れた指標となっている。

各機器の測定項目、通信方法等を **Table 1** に示す。なお、本研究では、心拍数と WBGT 値を使用して、熱中症の危険性や労働強度 (身体負荷) の実態を把握した。

2.2 実態把握

実態把握は、2019年9月3～6日の4日間、京都市内の廃棄物処理施設にて実施した。医療系廃棄物の積み下ろしと混合廃棄物の分別の二つの作業を対象とし、作業者ごとにIDを振り分け、毎日4名、計7名の作業者を被験者とした。**Table 2**に各被験者に振り分け

Table 2 被験者の作業内容と年齢

作業内容	ID No	9月3日	9月4日	9月5日	9月6日
医療系廃棄物の積み下ろし	ID1	24歳	24歳	20歳	24歳
	ID2	63歳	63歳	63歳	63歳
混合廃棄物の分別	ID3	24歳	57歳	24歳	58歳
	ID4	23歳	23歳	23歳	23歳

たIDと被験者の年齢を示す。ID2とID4に関しては、4日間それぞれ同一の作業者を被験者、ID1とID3に関しては、出勤状況に応じてそれぞれ複数人の作業者を被験者とした。具体的には、ID1に関しては、9月3、4、6日と9月5日に分けて2人の作業者、ID3に関しては、9月3、5日と9月4日、9月6日に分けて3人の作業者を被験者とした。なお、医療系廃棄物の積み下ろし作業は、搬入された医療系廃棄物をトラックから下ろし、廃棄物焼却施設の搬入口まで移動させるものであり、混合廃棄物の分別作業は、トラックから下ろされた混合廃棄物のうち重機での選別に適さない比較的小さな廃棄物を手分別するものである。

2.3 心拍数データの取り扱い

本研究で使用した計測システムにおいて、心拍数は0～255の範囲で出力されるが、スマートウェアと体が瞬間的に密着していない場合等において、瞬間の心拍数の値が極端に振れて出力される場合がある。本研究では、0や255で出力される心拍数を取り除いた上で、ある時刻台 (n時m分台) の取得データの平均

Table 1 各機器の測定項目、通信方法等

機器	測定項目	精度	解像度/ サンプリング間隔	データ 記録間隔	通信方法
COCOMI (東洋紡株式会社)	心電図	—	—	—	—
WHS-2 (ユニオンツール株式会社)	心拍	—	1 ms	心拍毎	Bluetooth 4.0 Bluetooth Low Energy
	体表温	—	1 s	心拍毎	
	加速度	—	32 ms	心拍毎	
CC2650-STK (Texas Instruments)		—	1 ms	心拍毎	Bluetooth 4.1 Bluetooth Low Energy
Raspberry Pi Zero W (Raspberry Pi Foundation)		—	—	—	Bluetooth 4.1 Bluetooth Low Energy IEEE802.11 b/g/n
AD-5696 (株式会社エー・アンド・アイ)	気温	±1℃	0.1℃	10 min	—
	相対湿度	±5% Rh	0.1% Rh	10 min	
	WBGT	—	0.1℃	10 min	

値をその時刻 (n 時 m 分) の代表値と定義した。

2.4 熱中症の危険性の判定

本研究では、心拍数と WBGT 値を用いて熱中症の危険性を判定した。具体的には以下の通りである。

(1) 心拍数による判定

国際標準化機構 (ISO9886)⁸⁾ と米国産業衛生専門官会議 (ACGIH)⁹⁾ は、心拍数をもとにした熱中症の危険性について、Table 3 に示すようなガイドラインを提示している。これらを用いて熱中症の危険性を判定した。

(2) WBGT 値による判定

Table 4 に示すように、WBGT 値によって熱中症の危険性は4段階に分類される⁷⁾。これを熱中症の危険性の判定に用いた。

Table 3 心拍数による熱中症の危険性の判定^{8,9)}

報告機関	記載内容
国際標準化機構 (ISO9886)	・作業中の1分間の最大心拍数は(185-0.65×年齢) ・持続心拍数は(180-年齢)をそれぞれ超えてはならない。
米国産業衛生専門官会議 (ACGIH)	・心拍数が数分間継続して(180-年齢)を超える場合 ・作業強度がピークに達した後1分間経過後の心拍数が120以下に戻らない場合 暑熱曝露を中止する。

Table 4 WBGT 値による熱中症の危険性の判定⁷⁾

WBGT 値	注意事項
危険 (31℃以上)	高齢者においては、安静状態でも発生する危険性が高い。外出はなるべく避け、涼しい室内に移動する。
嚴重警戒 (28~31℃)	外出時は炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する。
警戒 (25~28℃)	運動や激しい作業をする際は定期的に十分に休息を取る。
注意 (25℃未満)	一般に危険性は少ないが激しい運動や重労働時には派生する危険性がある。

2.5 労働強度の判定

本研究では、心拍数を用いて労働強度 (%HRR)¹⁰⁾ を算出した。

$$\%HRR = \frac{HR \text{ working} - HR \text{ resting}}{HR \text{ maximum} - HR \text{ resting}} \times 100 \quad (1)$$

$$HR \text{ maximum} = (208 - 0.7 \times \text{年齢}) \quad (2)$$

ここで、%HRR は労働強度 (%), HR working は作業時心拍数 (bpm), HR resting は安静時心拍数 (bpm), HR maximum は年齢によって推定される最大心拍数 (bpm) である。労働強度 (%HRR) すなわち労働者の身体的な負荷は、式(1)の分母に示される最大心拍数 (HR maximum) と安静時心拍数 (HR resting) との差、すなわち、予備心拍数 (HRR : Heart Rate Reserve) に対する作業時心拍数 (HR working) と安静時心拍数 (HR resting) との差の割合で表され、その割合が高ければ高いほど、労働者の身体的な負荷

が高いことを意味する。本研究では、Table 5 を用いて労働強度を判定した¹¹⁾。

Table 5 労働強度の判定¹⁰⁾

労働強度 (%HRR)	判定内容
30%HRR 以下	8時間未満であれば持続可能
30%HRR 以上	身体的な負荷が高い
40%HRR 以上	30~60分間持続する場合は危険

労働強度の算出の際、作業時心拍数と安静時心拍数は被験者ごとに計測される実測値を、年齢によって推定される最大心拍数は式(2)¹¹⁾ から算出される推定値をそれぞれ用いた。なお、安静時心拍数は本来であれば、十分な休息時間をとって計測することが望ましいが、本研究では十分な休息時間をとって計測することができなかったため、被験者ごとに取得した心拍数データのうち、下位5%の値の平均値を各被験者の安静時心拍数として用いた。なお、下位5%の心拍数は、休憩時間等の一定の時間帯に集中している場合が多く、その標準偏差は数拍程度であった。

3. 結果と考察

3.1 取得データ

Table 1 に示すデータを取得したが、機材の不具合により、データが取得できていない時間帯があった。スマートウェアが被験者の肌に密着していなかったこと、計測機器・補助通信装置の電池切れなどの原因が考えられる。

3.2 熱中症の危険性

取得したデータのうち、例として2名の被験者の心拍数と WBGT 値の1日の時間変化を Fig. 2 と Fig. 3 に示す。

Fig. 2 の被験者に関しては、一日を通して WBGT

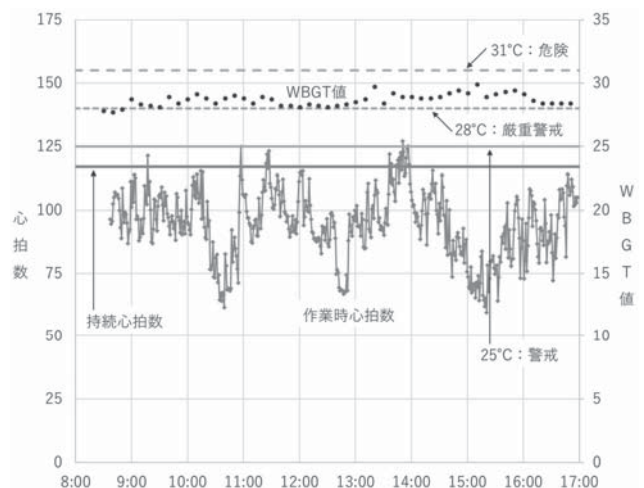


Fig. 2 心拍数と WBGT 値 (ID2, 9月6日, 63歳)

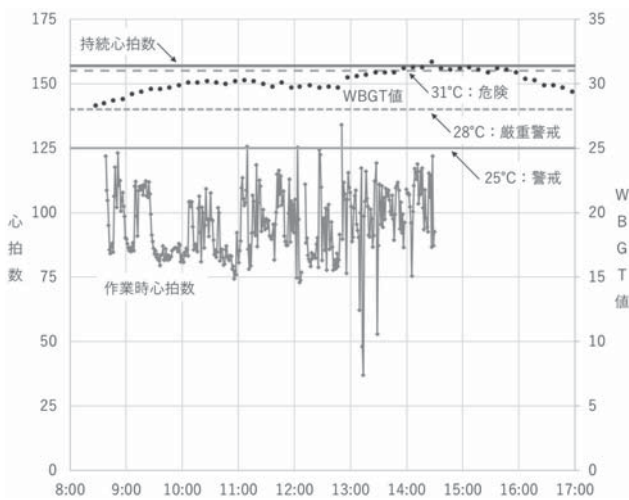


Fig. 3 心拍数と WBGT 値 (ID4, 9月6日, 23歳)

値が熱中症の嚴重警戒ライン (28℃) を超えており、熱中症の危険性が高かったと考えられる。また、心拍数が **Table 3** に示す持続心拍数を超える時間帯がいくつか確認された。特に、13:40 頃から 14:00 頃にかけては約 20 分間継続して心拍数が持続心拍数を超えており、熱中症の危険性が非常に高かったと考えられる。なお、**Table 3** に示す判定基準のうち、持続心拍数以外の基準に該当する心拍数は計測されなかった。

Fig. 3 の被験者に関しては、同じく一日を通して WBGT 値が熱中症の嚴重警戒ライン (28℃) を超えており、特に 14:00~16:00 頃は危険ライン (31℃) も超えていたことから、一日を通して熱中症の危険性があり、時間帯によっては熱中症の危険性が非常に高かったと考えられる。一方で、**Table 3** に示す判定基準に該当する心拍数は計測されなかったため、心拍数からは熱中症の危険性はなかったと考えられる。なお、14:30 以降のデータは計測機器の不具合により取得できていない。

他の被験者を含め、熱中症の危険性に関するデータをまとめて **Table 6** に示す。心拍数が持続心拍数を超える作業時間の割合は、20 歳代の作業者は全員が 0%，63 歳，58 歳の作業者はともに約 4%，57 歳の作業者は 0% であった。被験者数は少ないが、年齢の高い作業者のほうが持続心拍数を超える時間が長く、熱中症の危険性が高まる傾向が見られた。ただし、年齢が高くても問題のない作業者もいた。

熱中症の予防には、WBGT 値を用いた一律的な管

理が一般的であるが、同じ WBGT 値であっても、身体的差異や作業内容によって熱中症の危険性は異なることから、心拍数を用いて熱中症の危険性を確認することにより、個人個人の異なる状況を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告等が可能となると考えられる。

3.3 労働強度

取得したデータのうち、例として 2 名の被験者の労働強度 (%HRR) 値の 1 日の時間変化を **Fig. 4** と **Fig. 5** に示す。

Fig. 4 の被験者に関しては、労働強度は概ね 0~60% の範囲を変動していた。一日の作業時間のう

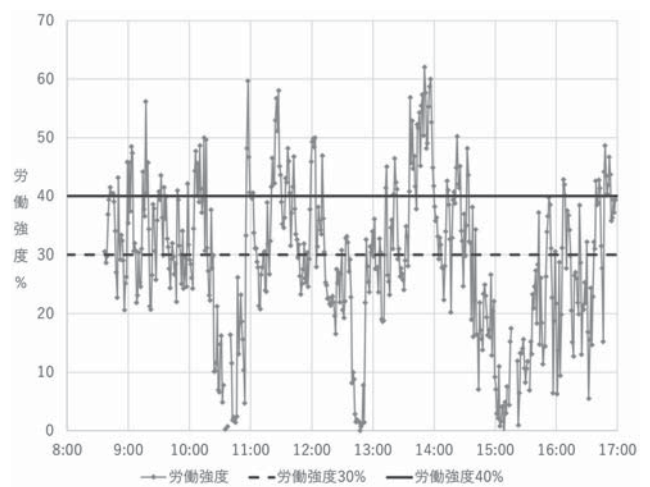


Fig. 4 労働強度 (ID2, 9月6日, 63歳)

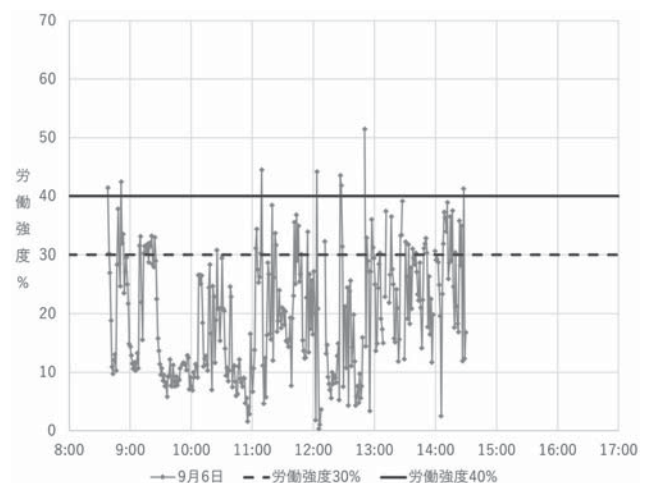


Fig. 5 労働強度 (ID4, 9月6日, 23歳)

Table 6 持続心拍数を超える作業時間とその割合

作業内容	医療系廃棄物の積み下ろし			混合廃棄物の分別			
	ID No	ID1	ID2	ID3	ID4		
年齢	24 歳	20 歳	63 歳	24 歳	57 歳	58 歳	23 歳
データ取得時間	745 分	181 分	1979 分	857 分	482 分	255 分	1592 分
持続心拍数を 超える	時間	0 分	0 分	76 分	0 分	0 分	10 分
	割合	0%	0%	4%	0%	0%	4%

Table 7 労働強度が30%以上、40%以上となる作業時間とその割合

作業内容		医療系廃棄物の積み下ろし			混合廃棄物の分別				
ID No		ID1		ID2	ID3			ID4	
年齢		24歳	20歳	63歳	24歳	57歳	58歳	23歳	
データ取得時間		745分	181分	1979分	857分	482分	255分	1592分	
H R R	30% 以上	時間	50分	6分	989分	147分	55分	820分	189分
		割合	7%	3%	50%	17%	11%	32%	12%
	40% 以上	時間	2分	0分	433分	32分	9分	39分	18分
		割合	0%	0%	22%	4%	2%	15%	1%

ち、半分以上の時間で労働強度が30%を超えており、さらにその中の半分近くの時間で40%を超えていた。このことから、作業時間のほとんどの時間帯で被験者の身体負荷は高かったと考えられ、危険な状態(40%以上が30~60分間持続する場合)も確認された。

Fig. 5の被験者に関しては、労働強度は概ね0~40%の範囲を変動していた。多くの時間帯で労働強度は30%以下の範囲であり、30%以上の労働強度となる時間帯も確認されるが、数十分間以上継続している時間帯がないことから持続可能な労働であったと考えられる。なお、14:30以降のデータは計測機器の不具合により取得できていない。

他の被験者を含め、労働強度に関するデータをまとめてTable 7に示す。労働強度が30%以上の作業時間の割合は、20歳代の作業者は約3~17%、63歳の作業者は約50%、58歳の作業者は約32%、57歳の作業者は約11%であった。労働強度が40%以上の作業時間の割合は、20歳代の作業者は約0~4%、63歳の作業者は約22%、58歳の作業者は約15%、57歳の作業者は約2%であった。特に、63歳の作業者の身体負荷は非常に高かったと考えられる。被験者数は少ないが、年齢が高い作業者のほうが労働強度は高まる(身体負荷が高い)傾向が見られた。ただし、年齢が高くても問題のない作業者もいた。また、Fig. 2とFig. 3は、いずれも9月6日の結果であるが、上述のようにWBGT値は医療系廃棄物の積み下ろし作業(Fig. 2)よりも混合廃棄物の分別作業(Fig. 3)の方が高く、これは別の日においても同じであった。ID1の2人の20歳代の作業者よりID4の20歳代の作業者の方が労働強度が高かった原因の1つと考えられる。

労働強度を心拍数を用いて確認することで、身体的差異や作業内容、暑熱環境等、個人個人の異なる状況を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能となると考えられる。

3.4 情報通信技術の導入による安全管理の高度化の可能性

本研究では、被験者の心拍数と暑熱環境としてのWBGT値を用いて、熱中症の危険性と労働強度について検討したが、廃棄物処理業における情報通信技術

の導入による安全管理の高度化については、以下のようものが考えられる。

(1) 作業者の身体的な差異や作業内容の差異等を踏まえた熱中症の予防と労働強度の管理

熱中症は建設業、製造業で多く報告されているが²⁾、同様の労働環境である廃棄物処理業においても喫緊の課題と考えられる。熱中症の予防には、WBGT値を用いた一律的な管理が一般的であるが、同じ高WBGT値であっても、作業者によって熱中症の危険性は異なることが本研究でも示唆された。また、作業者によって労働強度が非常に高く危険な状態と判定されるケースも確認された。作業者の心拍数を常時計測することにより、作業者がおかれた状況の違いを踏まえた熱中症の予防と労働強度の管理を行うことができるようになる。

(2) 作業者の動きを踏まえた事故の予防

冒頭で触れたように、廃棄物処理業においては「墜落・転落」「挟まれ・巻き込まれ」「転倒」などの事故が多く報告されている¹⁾。本研究で用いた計測システムでは、受診する電波の強度から作業者のおよその位置情報も取得できる。こうした情報を用いて、危険領域への作業者の侵入や作業者と重機の接触を前もって検知することにより、事故を予防することも可能となる。

(3) 作業者の作業内容を踏まえた予防的安全管理

作業者の労働強度と実際の作業内容を照らし合わせることで、労働強度の高い作業が定量的に把握できる。また、作業者の動きと事故の危険性を関係づけることにより、事故が起こりやすい状況を分析できる。労働強度の高い作業を機械で置き換えたり、事故につながる動きを防止することによって、予防的な安全管理を行うこともできるようになる。

4. おわりに

本研究では、スマートウェアを活用して作業者の生体情報を計測するシステムを廃棄物処理施設に導入し、熱中症の危険性や労働強度の実態を把握した。その結果、熱中症の危険性が高いと判定されるケース、危険な労働強度と判定されるケースが確認された。熱中症

の危険性や労働強度を心拍数を用いて常時計測することにより、作業者の身体的な差異や作業内容の差異等を踏まえた上で、第三者からの注意喚起・警告などが可能になると考えられる。また、こうした結果を踏まえ、廃棄物処理業における情報通信技術の導入による安全管理の高度化の可能性について議論した。本研究で行なった心拍数の計測をもとにした熱中症の予防のほか、作業者の位置情報をもとにした事故の予防、得られるデータをもとにした予防的な安全管理等が考えられた。廃棄物処理施設の安全管理の高度化に向けて、情報通信技術の導入は一定の効果が期待できる。

一方、今回の実態把握で取得したデータには一部欠損が生じていた。各種機材の電池切れやスマートウェアが被験者の肌に密着していなかったなどの原因が考えられる。データの欠損を防止するためには、各種機材の性能向上だけでなく、定期的に電池交換を行うなどの体制も求められる。また、本研究では、データを取得したのちに熱中症の危険性等を分析しているが、リアルタイムでデータ取得から分析までを行い、即座に労働中の危険性を知らせるようなシステムとすることが必要である。なお、本研究と前後して、スマートウォッチを用いた心拍の計測も一般的になりつつある。今後の実態把握においては、スマートウェアとスマートウォッチを併用した計測精度の検証等も行いつつ、スマートウォッチを用いたシステムへと検討を進める予定である。

謝 辞

本研究では、実態把握に際し、(株)京都環境保全公社、マージシステム(株)の各位に多大なるご協力をいただいた。また、本研究は、環境研究総合推進費(3-1905)による成果である。ここに記して深謝する。

参 考 文 献

- 1) 全国産業資源循環連合会安全衛生委員会：産業廃棄物処理業における労働災害の発生状況，2020
- 2) 厚生労働省：平成30年職場における熱中症による死傷災害の発生状況（確定値），2019
- 3) 三菱化学テクノロジーサーチ：製造業における労働安全及び設備保全 IoT 導入等に関する調査報告書，2017
- 4) 建設業労働災害防止協会：労働災害防止のための ICT 活用データベース，https://www.kensaibou.or.jp/safe_tech/ict/index.html，2020年6月アクセス
- 5) 橋口伸樹，児玉耕太，石田修一：作業効率化に向けた現場作業者の監視 IoT システム，第61回日本経営システム学会全国研究発表大会講演論文集，pp.86-87，2018
- 6) Hashiguchi, N. et al.: Practical judgment of workload based on physical activity, work conditions, and worker's age in construction site, *Sensors*, Vol. 20, 3786, 2020
- 7) 環境省：熱中症予防情報サイト，https://www.wbgt.env.go.jp/wbgt_data.php，2020年6月アクセス
- 8) ISO: ISO9886; 2004 — Ergonomics — Evaluation of thermal strain by physiological measurements
- 9) ACGIH: Heat Stress and Strain TLV, American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2012
- 10) Borg, G.: Borg's Perceived Exertion and Pain Scales, Human Kinetics, Champaign, IL, 1998
- 11) Tanaka, H. et al.: Age-predicted maximal heart rate revisited, *Journal of the American College of Cardiology*, Vol. 37, No. 1, pp. 153-156, 2001

Advanced Safety Management at a Waste Treatment Facility using Smartwear

Soichiro Okamoto^{1)†}, Yoshiki Kamitsuru²⁾, Nobuki Hashiguchi³⁾, Kota Kodama⁴⁾ and Seiji Hashimoto⁵⁾

- 1) Ritsumeikan University Graduate school of Science and Engineering
- 2) Ritsumeikan University Graduate school of Science and Engineering
- 3) Ritsumeikan University Graduate school of Technology Management
- 4) Ritsumeikan University Graduate school of Technology Management
- 5) Ritsumeikan University College of Science and Engineering

† Correspondence should be addressed to Soichiro Okamoto :
(Ritsumeikan University Graduate school of Science and Engineering
E-mail : rv0058xp@ed.ritsumei.ac.jp)

Abstract

In recent years, information and communication technology has been applied in many industries to improve convenience and to solve problems. In this study, we introduced a system to measure the biological information of workers using smartwear to a waste treatment facility and evaluated the actual situation on the heatstroke risk and the labor intensity. As a result, we confirmed the case of high risk of heatstroke and the case of dangerous labor intensity. Alerting / warning from a third party considering the physical differences of workers and difference in work content would be possible through the continuous measurement of heatstroke risk and labor intensity using heartbeat.

Key words : heartbeat, Wet Bulb Globe Temperature (WBGT), heatstroke, labor intensity, accident