

熱中症対策ヘルメットデバイスの開発 - 頭部発汗量から全身発汗量の推定 -

皆内 佳奈子

概 要

建設現場で着用義務のあるヘルメットに着目し、熱中症対策として熱中症の危険性を検知するウェアラブルデバイスを開発した。熱中症の危険性を早期に発見するために、暑熱下で作業する作業者の発汗量を計測する。本デバイスは、作業者の頭部発汗量をリアルタイムに計測し、そこから全身発汗量を推定する。暑熱環境下において開発したウェアラブルデバイスを装着しながら歩行実験を行い、頭部発汗量を計測した。その結果、頭部発汗量と全身発汗量の相関が強いことを確認した。また、本デバイスで推定される全身発汗量は、熱中症疾患の判断に有効な指標である深部体温上昇よりも、早い段階で熱中症の危険性を推定できる指標として使用できる可能性も確認できた。

Development of Helmet Devices to Combat Heat Stroke - Estimation of total body sweat from the amount of head sweat -

Abstract

Focusing on helmets that are obligatory to wear at construction sites, we have developed a wearable device that detects the risk of heat stroke as a preventive countermeasure. To detect the risk of heat stroke at an early stage, the amount of sweat of workers working in the heat is measured. Our device measures the amount of head sweat of the worker in real time and estimates the amount of total body sweat from there. A walking experiment was conducted while wearing a wearable device developed in a hot environment, and the amount of head sweat was measured. As a result, it was confirmed that the correlation between the amount of head sweat and the amount of total body sweat was strong. In addition, it was confirmed that the amount of total body sweat estimated by this device can be used as an index that can estimate the risk of heat stroke at an early stage rather than the increase in core body temperature, and total body sweat amount is an effective index for determining heat stroke condition.

キーワード: 熱中症対策、ヘルメット
発汗量、センシング

§1. はじめに

1.1 背景

年々、熱中症対策に関する意識は高くなっており、様々な対策が講じられているにも拘らず、未だに熱中症を原因とする死者及び休業4日以上の被災者は絶えることがない。2021年は過去3年の状況と比較すると死傷者数、死亡者数ともに下回った¹⁾が、2022年は梅雨明けが早く、身体が暑熱に順応していない状態で猛暑となったこともあり、厚生労働省の速報値によると7月の時点で死傷者数、死亡者ともに過去5年間の最多を記録した²⁾。

熱中症予防の為、アメリカ産業衛生専門家会議(ACGIH)は、暑熱な作業に従事する労働者の体調を観察し、体重が1.5%以上減少した場合には作業を中止しなければならないとしている³⁾。またこの知見に基づいて、厚生労働省も同様に、作業開始前より1.5%を超えて体重が減少した場合、暑熱な作業を中止させ作業前の状態に戻るまで休憩を取らせる必要がある、と指導している⁴⁾。

作業中に体重が減少する主な要素は発汗であり、本研究では、熱中症を予防するための指標として発汗量に着目した。作業員の発汗量をリアルタイムに計測して体重減少量を把握することができれば、熱中症の危険性を一早く検知して適切な休憩、塩分補給が可能となり、熱中症疾患を未然に防ぐことができると考える。近年、バイタルセンシング可能なデバイスの形状として、リストバンド型やウェア型などが様々な形状があるが、作業の邪魔にならないように、我々は、建設現場で着用義務のあるヘルメットでセンシング可能なデバイスを開発した。

1.2 熱中症と発汗量について

人は身体を動かすと、体内で熱が作られて体温が上昇する。また、身体を動かしていない場合においても暑熱下や日差し、地面からの照り返しによって体温が上昇することがある。体温が上昇した場合、汗をかいたり、体の表面に流れる血液の量が増えたりして、体内の熱を体の外に逃がしやすくすることで、体温を調整する。しかし、高温、高湿度の環境下で運動や作業を長時間継続すると、体内の熱の上昇が止まらず、発汗により体内の水分が減り、血液の流れも悪くなる。そのため、体の表面から熱を逃がすことができなくなり、熱中症を発症する。

このことから、熱中症の機序として、発汗量の増加、心拍の上昇、深部体温の上昇が考えられるので、我々は、熱中症の初期症状を一早く発見するために発汗量に着目し、これを計測することにした。

§2. 発汗量計測について

2.1 頭部発汗量計測の原理

先行研究において、発汗量の計測方法として、局所を計測する換気カプセル法を拡張し、より広域の頭部全体を対象に計測可能な手法が構築された⁵⁾。これによると、図1のように風量 $F(\text{m}^3/\text{sec})$ による空気の流入、流出を伴う空間系を考え、 X_1 を系に流入する水分量、 X_2 を系から流出する水分量とし、系内で発生する単位時間当たりの水分量 $Y(\text{g}/\text{sec})$ を系のMass Balanceより式(1)で表す。

$$Y(\text{g}/\text{sec}) = F \times (X_2 - X_1) \quad (1)$$

この時、 $e(\text{hPa})$ はTemesの式⁷⁾よりある温度 $t(^\circ\text{C})$ における飽和水蒸気圧を近似し(式(2))、相対湿度 $RH(\%)$ から単位体積当たりの空気中水分量は X として式(3)で求める。

$$X_{1,2}(\text{g}/\text{m}^3) = \frac{217 \times e_{1,2}}{273.15 + t_{1,2}} \times \frac{RH_{1,2}}{100} \quad (2)$$

$$e_{1,2}(\text{hPa}) = 6.11 \times 10^{(7.5t_{1,2}/(t_{1,2}+237.3))} \quad (3)$$

風量 $F(\text{m}^3/\text{sec})$ が既知である場合、系に流入および流出する空気の温度及び相対湿度を温湿度センサで計測することで、単位体積当たりの空気中の水分量 X_1 、 X_2 を求め式(1)に代入すれば、この空間系内で発生する単位時間当たりの発汗相当量 Y を計算で求めることができる。すなわち、頭部発汗量が計測できることになる。

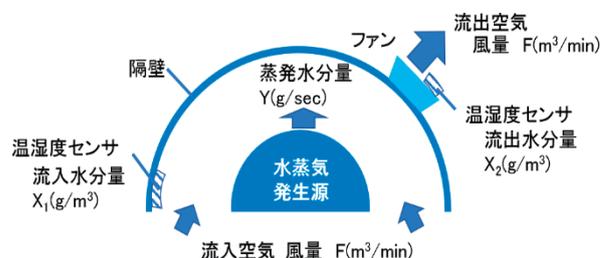


図1 頭部発汗量計測の原理

2.2 ヘルメットデバイスによる発汗量計測の原理検証実験

先行研究において、ファン付きヘルメットの空気流入と流出部にそれぞれ温湿度センサを取り付けたウェアラブルデバイスを作成した図2⁵⁾。作成したウェアラブルデバイスの仕様について表1に示す。2か所に設置した温湿度センサは、それぞれ小型PCのRaspberry Pi zero Wに接続され、データが蓄積される。また、計測データを外部PCに伝送するために、小型の無線伝送モジュールを設置している。

このヘルメットデバイスを用いて、頭部発汗量計測の原理を検証するための実験を行った結果、ヘルメットデバイスで頭部発汗相当量の水分量が計測できることを確認し、先述した原理が実証された⁵⁾。

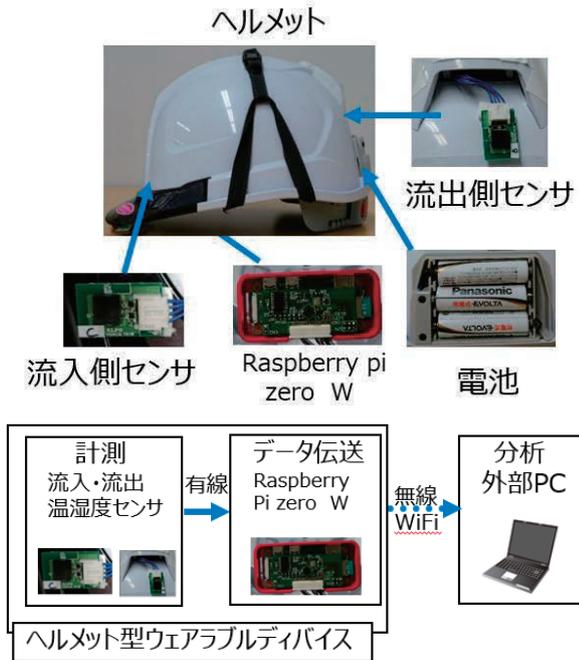


図2 頭部発汗量計測ヘルメットデバイス構成図

表1 開発したヘルメットデバイスの仕様

	型番・特徴・仕様
ヘルメット	メーカー：(株)トーヨーセフティー 型番：394F Windy Helmet 重量：567g 送風機内蔵ヘルメット (ファンモーター採用)
流入・流出 温湿度 センサ	メーカー：アルプスアルパイン(株) 型番：HSHCAL 101B ・静電容量式デジタル温湿度センサ ・センサ出力の揃ったペアセンサを採用 ・最も再現性の得られる場所にセンサを配置 ・センサ出力方式はノイズに強いI ² Cバス出力方式を選択
高精度 電子台秤	メーカー:新光電子(株) 型番：FJ-150K 最小表示：1g
PC	機器：Raspberry Pi zero W 重量：16g 無線方式：Wi-Fi
電源	単三電池3本 (ヘルメットのファン電源と共用)

2.3 安静時ヒト検証実験による全身発汗量の推定

(1) 検証実験概要

前述より原理検証ができたヘルメットデバイスを用いて、安静時のヒトに対し、頭部発汗量から全身発汗量が推定できるかどうかの実験を行った⁵⁾⁶⁾。

被験者は、のべ18名(N=10)、男性20～22歳、頭髪は坊主刈りから長髪の者まで含む。被験者には30±1℃の実験環境において30分間体を環境に適応後、ヘルメットデバイスを装着して30分間計測する。体重減少量は、精密電子台秤で5分毎に計測した。計測誤差の大きな要因と考えられる体表面の無効発汗の影響を最小限にするために、被験者は実験用シャツとズボンには木綿性を着用し、体重測定時にはそれらを脱ぎ、体表面の汗をぬぐってから体重を計測した。ヘルメットデバイスで計測される頭部発汗量相当量は1分毎にWi-Fiを経由して、外部PCにデータを記録する。安静時ヒト検証実験の実験フローを図3に示す。なお、WBGTは、Wet Bulb Globe Temperature (暑さ指数)である。

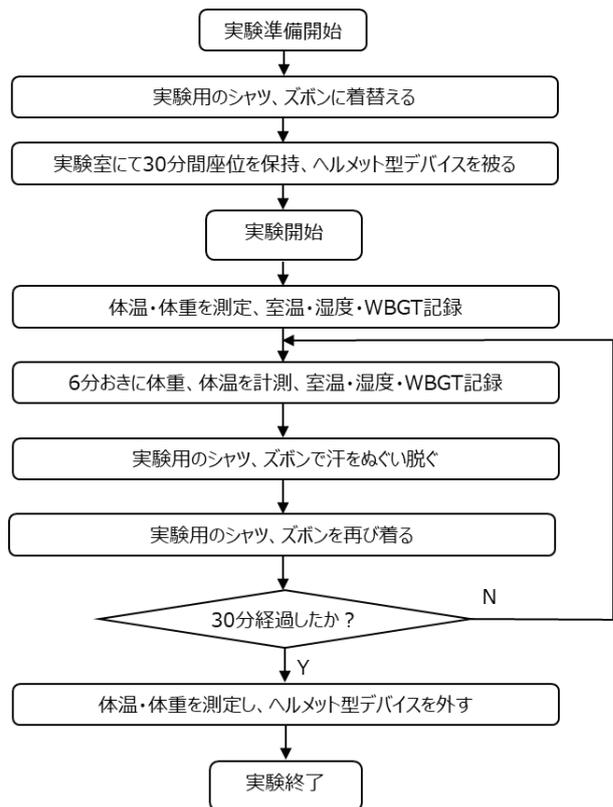


図3 安静時ヒト発汗量計測実験フロー

(2) 安静時ヒト検証実験結果

一例として、1名の積算体重減少量とヘルメットデバイスによる頭部発汗積算相当量の計測結果の時間変化を図4に示す。図4に示すように、積算体重減少量とヘルメットデバイスによる頭部発汗積算相当量は、時間とともに徐々に増加する結果が得られた。他の被験者も同じ上昇傾向にあ

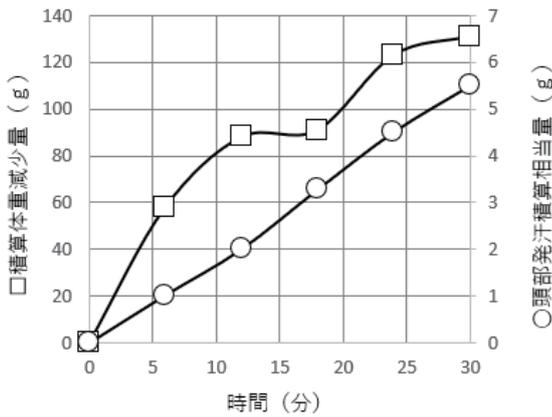


図4 安静時ヒト発汗実験における時間経過に伴う体重減少量と頭部発汗量

った。

この実験結果をもとに、積算体重減少量と頭部発汗積算相当量について、全データにおいて、回帰分析を行い、その結果を図5に示す。

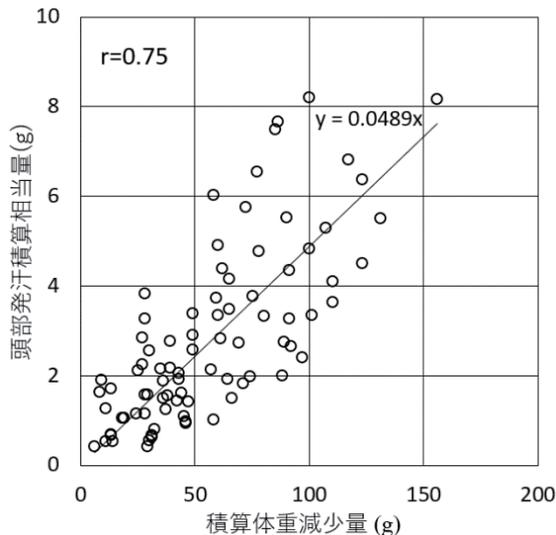


図5 安静時ヒト発汗実験における積算体重減少量と頭部発汗積算相当量

積算体重減少量は全身発汗量に相当すると考えるので、図5のグラフの傾きより、本実験の環境下において、全身発汗量 $P(g)$ は頭部発汗相当量 $Q(g)$ と式(4)の関係があることが分かった。

$$P(g) = 20.4 \times Q \quad (4)$$

この場合の相関係数 r は、 $r=0.75$ であり、両者において十分な相関関係が認められた。

以上の結果から、ヒトの全身発汗量を頭部発汗量から推定できることが分かったので、次に実作業環境かつ行動下で同様の結果が得られるかどうか実験を行った。

§3. 実環境下での全身発汗量の推定実験

3.1 実環境での歩行実験

実験場所は、フジタ技術センターの実験ヤードで実施した。ヤード上部及び側面からは、部分的に日光が入り、窓が解放されているので、温湿度環境は概ね室外の環境と同じである。実験は8月に実施し、実験時の環境温度は、 $30 \sim 34^{\circ}\text{C}$ 、WBGTは $27 \sim 29^{\circ}\text{C}$ 、湿度 $53 \sim 73\%$ で、無風だった。

被験者は、のべ15名($N=9$)、男性 $26 \sim 65$ 歳、頭髪は坊主刈りから短髪のものを含み、作業着と開発したヘルメットデバイスを着用し、30分間実験場の周回コースを歩行する。歩行速度は、通常歩行に相当する $1.43 \pm 0.1\text{m/s}$ (2.8METs に相当)になるようにした。ヘルメットデバイスで計測される頭部発汗相当量は、1分毎にWi-Fi経由で外部PCに記録される。また、歩行開始前と歩行開始から10分毎に、高精度電子台秤で被験者の体重を計測して体重減少量を把握した。体重計測時は、作業着は着脱し、頭部以外の汗をタオルで拭いて、無効発汗の影響を最小とした上で、下着とヘルメットデバイスだけの状態で計測した。実験の様子を図6に、実験フローを図7に示す。



図6 実環境での歩行実験の様子

3.2 実験結果

図8に被験者の積算体重減少量とヘルメットデバイスによる頭部発汗積算相当量の関係を示す。グラフの傾きより、全身発汗量 $P(g)$ は頭部発汗相当量 $Q(g)$ と式(5)の関係で表されることが分かった。この時の相関係数 r は $r=0.87$ であり、十分な相関関係が得られた。

$$P(g) = 23.1 \times Q \quad (5)$$

安静時の実験から求めた全身発汗量と頭部発汗相当量の関係式(4)と行動下の実験から求めた関係式(5)の係数を比べると、行動下の実験の方が大きかった。これは、暑熱下での歩行による運動で、発汗が安定し、また呼吸量が増加

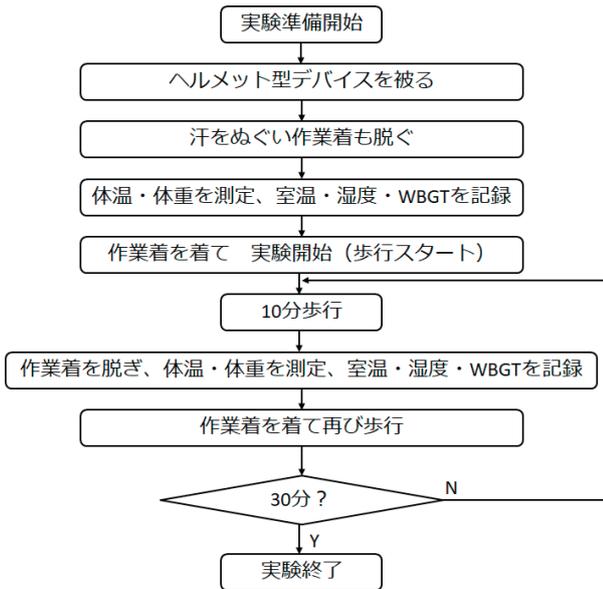


図7 実環境でのヒト発汗量計測実験フロー

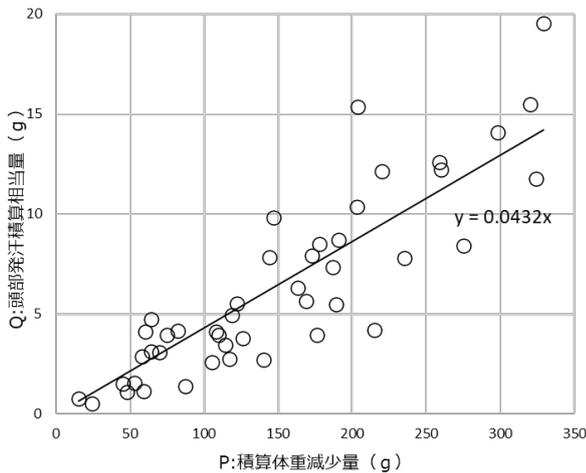


図8 行動下における積算体重減少量と頭部発汗積算相当量

することで、呼吸水分放出量が増加したことが要因の一つとして考えられる。また、安静時に対し、積算体重減少量と頭部発汗積算相当量がそれぞれ倍以上に増加しており、これについても安定した発汗継続により、歩行時の相関係数の方が高くなったものとする。

さらに、積算体重減少量に強く影響する要因を分析するために、積算体重減少量に対する各種要因の重回帰分析を行った。想定し得る各種要因と分析結果を表2に示す。分析結果から、有意Fが0.05以下であり、重回帰式によって求まる積算体重減少量推定値は統計的にも説明できると検定された。さらに、積算体重減少量は頭部発汗積算相当量以外に、経過時間、温度が強く影響していると判定された。このことは、先行研究によって行動時経過時間が発汗量に影

表2 重回帰分析結果

回帰統計					
重相関 R	0.971356				
標準誤差	23.30163				
観測数	45				
分散分析表(P<0.05)					
	自由度	変動	分散	分散比	有意 F
回帰	11	299393.1	27217.55	50.12755	2.26E-17
残差	33	17917.88	542.966		
合計	44	317311			
重回帰式 (目的変数は積算体重減少量)					
	係数	標準誤差	t	P-値	
切片	-1900.51	907.5903	-2.09402	0.044019	
頭部発汗積算相当量	9.540059	1.745768	5.464676	4.68E-06	
体温	19.34551	18.32588	1.055639	0.298801	
年齢	-0.23713	0.515804	-0.45972	0.64873	
身長	0.168317	1.829286	0.092012	0.927245	
体重	0.759843	1.104022	0.68825	0.496105	
頭囲	2.557906	3.397434	0.752893	0.456852	
髪	13.18963	11.13437	1.184587	0.244642	
運動習慣	-0.09527	7.045471	-0.01352	0.989292	
経過時間	4.886217	0.751547	6.501542	2.22E-07	
温度	27.11123	12.98518	2.08786	0.044608	
湿度	0.869125	2.097165	0.414428	0.681242	

響すること⁸⁾や温度が発汗量に影響している⁹⁾ことが知られており、それを裏付ける結果となった。

重回帰式から予測される推定積算体重減少量と実際の積算体重減少量との相関係数rは、r=0.97であり、この結果からもより高精度で頭部発汗相当量から全身発汗量に相当する積算体重減少量を推定できる事が分かった(図9)。

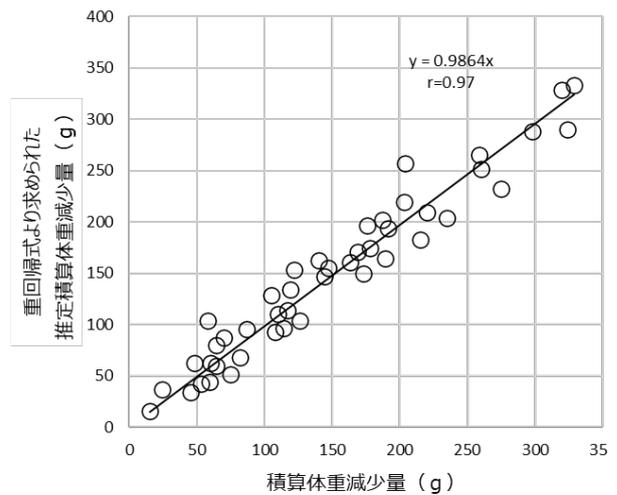


図9 重回帰式による積算体重減少量推定結果

§4. 発汗量変化と深部体温変化についての考察

4.1 発汗量変化と深部体温変化の関係

熱中症指標の重要な指標と言われている深部体温変化と発汗量変化の関係を調べるために、前述の実環境での歩行実験時に8名について深部体温も同時に計測した。深部体温の計測には、アフォードセンス社のVitalgram®CT2を推奨装着部である肋骨下の左わき腹に装着して計測した。行動経過時間と計測した積算体重減少量、深部体温の経時変化を図10に示す。

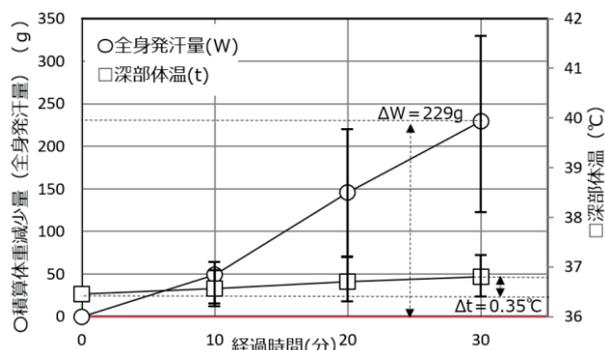


図10 積算体重減少量と深部体温の経時変化結果

先行研究によると、発汗量は運動と同時に増加しているのに対し、皮膚温や深部体温は10分程度上昇がみられず、運動開始時は深部体温や皮膚温の上昇に先立ち、発汗活動は極めて短い潜時で増加することが報告⁹⁾されている。本実験における30分の計測結果においても、頭部発汗量が運動開始直後から増加しているのに対し、深部体温は歩行開始時10分ほど増加が見られず、それ以降徐々に上昇していき、先行研究と同様の傾向を確認することができた。

従来、熱中症の疾患指標として、重度の熱中症発症時には深部体温の著しい上昇が報告¹⁰⁾されているが、今回の実験結果より、発汗量の増加が深部体温の上昇より早く計測できることができたので、熱中症を早期に予測する指標として有効な指標となり得る可能性があると考えられる。

§5. まとめ

暑熱下で作業する作業者の熱中症対策として、頭部発汗量をリアルタイムに計測するヘルメットデバイスを開発した。安静時、行動下における発汗量計測実験を行い、頭部発汗量と体重減少量の相関が強いことが分かり、頭部発汗量から体重減少量すなわち全身発汗量を推定する式を導き出した。

また、深部体温を同時に計測したところ、深部体温が歩行開始後10分程度は上昇せず、その後徐々に上昇傾向を

見せる一方、発汗量の増加は歩行開始直後から増加していた。このことから、熱中症の症状を早期発見する指標として、発汗量を計測することは有効であると考えられる。

その後、建設現場において実作業者にヘルメットデバイスを装着して1時間通常作業をしてもらい、今回の実験同様に頭部発汗量と体重減少量の計測実験を行った。その結果、立ち止まってしまう作業が多い場合、現行の温度・湿度センサの位置について、課題が出た。現在、これについては解決済みなので、次回報告する。

また、今後は現場での実運用を考慮した小型化および軽量化、静音化を実現させ、使い勝手の良いセンシングデバイスの開発を目指していく。

謝辞 本開発は、公立諏訪東京理科大学および株式会社高環境エンジニアリングとの共同研究によって実施された。また、本実験は、公立諏訪東京理科大学倫理審査委員会の承認(承認番号 No16,18)を受けて実施した。

参考文献

- 1) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課: “令和3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)”, 2022年5月31日公表
- 2) 日刊建設工業新聞, 2面, 2022.8.22
- 3) 堀江正知: “熱中症を防ごう”, 中央労働災害防止協会, 2017
- 4) 厚生労働省労働基準局安全衛生部労働衛生課: “職場における熱中症予防対策マニュアル”, 2021年4月改定
- 5) Tukasa Kosuda, Yoshiaki Nakajo, Konosuke Sasagawa, Yuto Nishikai, Shunji Shimizu, Yoshinori Kumita, Toshihiko Kondo, Nobuaki Hashimoto: “Development of helmet-type wearable device capable of measuring perspiration during various activities”, ICEP 2019 Proceedings, TB3-3.
- 6) Tukasa Kosuda, Konosuke Sasagawa, Kanako Minauchi, Nobuaki Hashimoto: “Estimation of whole-body perspiration using a perspiration measurement helmet”, Transactions of The Japan Institute of Electronics Packaging Vol.13, E20-002-1-E20-002-4, 2020
- 7) O. Tetens: “Über einige meteorologische begriffe”, Zeitschrift für Geophysik, Vol. 6, pp.297-309, 1930
- 8) 小川徳雄: “運動と発汗”, 体力科学, Vol.45, pp.387-394, 1996
- 9) 張静風, 田村照子: “環境温度が人体に与える暑熱ストレスに関する基礎研究”, 織消誌 Vol.55, No.10, pp.756-765, 2014
- 10) 山越 健弘, 松村 健太, 山越 康弘, 廣瀬 元, 高橋 規一, Peter ROLFE: “高温熱ストレス環境下におけるレーシングドライバー深部体温の連続計測と解析”, 生体医工学, Vol.48, No.3, pp.269-280, 2010

ひとこと

現場で働く方が、安全で快適にかつ効率的に作業できるようなシステムを開発していきたい。



皆内 佳奈子