

氏名(本籍)	こすだ つかさ ながのけん 小須田 司 (長野県)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	甲第9号
学位授与の日付	令和3年3月18日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案とその有効性に関する研究
論文審査委員	(主査) 教授 橋元 伸晃 教授 松江 英明 教授 大島 政英 教授 平田 幸広 教授 三代沢 正 教授 堀江 正知 (産業医科大学 産業生態科学研究所)

### 論文内容の要旨

今般地球温暖化が加速しており、日本においても年平均気温が年々上昇している。このような気温の変化により熱中症罹患のリスクが年々増加していると考えられており、熱中症による死傷者数増は、は今後大きな社会問題になることが予想される。職場においても熱中症の死傷者数は、ここ10年増加傾向にあり、業種別に熱中症死傷者数を見ると、建設業が最も多く、建設現場における熱中症リスク管理は特に重要な問題である。

1954年にアメリカでは、熱中症を予防する事を目的に「WBGT」という指標が考案された。単位は気温と同じ摂氏度(°C)で示されるが、値は気温とは異なり、人体の熱収支に与える影響の大きい①気温②湿度③周辺の熱環境の3つを取り入れた指標である。

しかしWBGTには「作業強度、服装、個人差」と言った実際にその人のその場における熱中症リスクまでは考慮されておらず万能な指標ではない。また熱中症は重症化すると危険なため、症状が軽い段階で予防を行うことが大切であり、厚労省は、作業開始前より1.5%を超えて体重が減少した場合、すなわち発汗量が多かった場合、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。

それには熱中症に罹患する前の段階で、発汗量をリアルタイムで把握し、水分補助を助言できるアドバイス等が出来れば、熱中症予防として有効であると考えられる。だが、現在は局所的部位の発汗量計測機器や大がかりな発汗計測方法は存在するが、各個人の全身発汗量をリアルタイムで計測できるデバイスは存在しない。

このため本研究では、まず、そのようなデバイス(機器)を開発することを目的とした。

建設現場で着用義務のあるヘルメットを用いて頭部発汗量を計測する原理を考案し、考案したヘルメット型発汗計測デバイスを用いて、まず計測原理が成り立つかを人によらない実験で原理検証を行った。検証の結果、我々が考案した方式で頭部発汗量が十分な精度で計測できる事が判った。

そのうえで、安静時のヒト検証実験を行った結果、実測した全身発汗量に対し、頭部発汗量との関係は、相関係数0.75であり、頭部発汗量から全身発汗量が予測可能であることを示すことができた。

次に行動時におけるヒト検証実験を実施した結果、実測した全身発汗量に対し、頭部発汗量との関係は、相関係数0.87と安静時より高い相関関係が確認でき、行動時においても頭部発汗量から全身発汗量が予測可能であることを示すことができた。また 頭部発汗量以外に、計測時の環境情報（温度、湿度）や被検者の個人情報（身長、体重、頭囲等）を含め、全身発汗量との間で重回帰分析を行った結果、重相関係数0.97と高い相関関係が確認でき、高い精度で全身発汗量を推定できる事が判った。全身発汗量がリアルタイムに高い精度で推定できる事で、熱中症予防に大いに貢献できるものと考察する。

熱中症に罹患すると深部体温が昇ると言われており、熱中症罹患の判断には深部体温が欠かせないと言われている。このため行動時に発汗量と深部体温の同時計測を行い、考察を行った。その結果運動初期の段階では、発汗量が比較的にニアに上昇するのに対し、深部体温は運動はじめの10分程度は、上昇がみられなかった。これは人間の体温調整の機序によるものと考えられ、環境温度の上昇に対し、人は汗をかいて体表を濡らし温度上昇を防ごうとするためしばらく深部体温は上昇しないが、発汗による体温上昇の低減効果も長期間は続かず、その後深部体温は上昇するものと考えられ、過去の研究と同様の結果を得る事ができた。以上の事からも、熱中症の早期罹患予測指標としては、深部体温より発汗計測の方が適している可能性があると考えられる。

以上述べてきたように、発汗量計測は熱中症の早期罹患予測指標として有効であるが、開発したヘルメット型発汗量計測デバイスを実用で使用した場合、問題になりそうな点がいくつか存在するため拾い上げを行い、対応策を検討した。具体的には、風と直射日光の影響により発汗計測精度の低減が予想され、その影響を実験で把握し、センサ取り付け位置を工夫し、遮熱方法を検討し対応策の提案を行った。

また発汗計測をベースとしながらも、深部体温やHRVも同時計測する事で、熱中症予防デバイスシステムとして、より確かなシステムが構築できないか考察を行い、その有効性についても研究を行っている最中であり、その内容も報告する予定である。

最後に開発したヘルメットデバイスを用い、建設業のみならず、屋外作業における安全労働管理用途での具体的活用方法について提案を行い、まとめとする。

## 論文審査結果の要旨

本論文は、熱中症発症機序の考察からその予防には体内の水分量を維持する事が必要であり、そのためには全身発汗量を把握する事が重要であることを示した上で、建設現場で着用義務のあるヘルメットに着目し、各個人の行動下における発汗量計測機能を有するヘルメット型ウェアラブルデバイスの開発を行い、2つの温湿度センサの計測による頭部発汗相当量計測原理を導出し、そこから全身発汗量の推定可能性を示したものである。従来、熱中症機序から検討していないウェアラブルデバイスや、局部発汗量しか計測できないデバイスは知られていたが、本論文の研究では、頭部発汗相当量から全身発汗量を高精度に類推できる手法を見だし、それを計測可能とするデバイスを開発し、実際の建設現場でも全身発汗量を推測できることまでを実証した点に特徴がある。さらに、他のセンサと組み合わせた統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案や他の産業分野への提言も行っている。

本論文は、8つの章から構成されている。

第1章の序論では、研究背景と目的が記述され、本研究の位置づけを述べている。その中で、近年の温暖化の増加に伴い、熱中症罹患患者数の増加、特に建設現場での発症が大きな社会問題化していることや、従来指標であった WBGT 指標の問題点、水分摂取の重要性を述べたのち、その問題解決に強い社会的な要請があることを明らかにし、その解決のためには、熱中症罹患前に、全身発汗量をリアルタイムで把握し、水分補助を助言できれば、熱中症発症の予防に有効であることを述べている。本研究では、まず、そのようなデバイスを開発することを目的とし、建設現場で着用義務のあるヘルメットで頭部発汗量を計測できる原理を考案し、それをシステム化し、実際の作業現場で、計測した頭部発汗量から全身発汗量を推定し、それを熱中症罹患早期推定指標にすることを目的とした。さらに、他のセンシング情報も付加することで、より高精度な熱中症予防システムが構築できないか考察を行い、他の産業分野等における熱中症予防システムの応用提案についてまで考察を行い提案することを目的としたことが述べられている。

第2章では、既存の熱中症予防システムと発汗量計測の既存研究に関して調査した内容をまとめ、その課題を明らかにした。まず、熱中症の発症機序を整理し、次に、現状の熱中症予防システムを調査し、その課題を明らかにした。従来のウェアラブルな熱中症警告器機は、心拍数（脈拍数）と加速度及び温度を計測しているものが多く、加速度に応じた脈拍数と温度でリスク判定しており、熱中症の発症機序に沿った判定器機は存在しないことを明らかにした。熱中症の発症機序から行動下でも連続的・定量的に計測できそうな生体反応量は発汗量であることを導いたが、この機序に基づいた計測方式は存在しないことを明らかにした。

第3章では、この機序に基づいて開発したファン付きヘルメット型発汗量計測デバイス構造により、空気出入口2つの温湿度センサの計測値は、その物質収支から導かれる計測原理式で求めた蒸発水分量（頭部発汗量に相当）に換算されることを示し、この値と電子秤による水分減少量との相関係数  $r$  が、 $r=0.99$  という極めて強い相関を示し、提案した計測原理式が成立することを明らかにした。

第4章では、開発したデバイスにより、安静時のヒトで発汗量が計測可能か検証を行った。前章の計測原理式が成立することを実証した。次に、それをのべ18名の被験者に30°Cの環境で装着して実験を行った。この安静時のヒト検証実験の結果より、本実験環境下では、全身発汗量に相当する積算体重減少量は、開発したデバイスによる頭部発汗積算相当量の20.4倍になることを見だし、この時の相関係数 $r$ は、 $r=0.75$ と十分な相関があることを見だした。また計測時環境（温度、湿度）や個人情報（身長、体重、年齢）を加え重回帰分析することにより、重相関係数 $R$ は、 $R=0.87$ とさらに高い相関関係を得られることを見だした。これらは、新しい知見である

第5章では、開発したデバイスで実労働環境に近い歩行下のヒトでの発汗量計測実験を行い、その結果、全身発汗量は頭部発汗積算相当量の23.1倍で、相関係数 $r$ は、 $r=0.87$ で安静時より十分な相関関係があることを見だした。さらに重回帰分析の結果、積算体重減少量には頭部発汗積算相当量の他に、行動時間と温度が強く影響していることが判り、重回帰式での推定値との重相関係数 $R$ は、 $R=0.97$ で、全身発汗量をより高精度に推定できることを見だした。これらも、新しい知見である。

第6章では、開発したデバイスに新たなセンサを搭載して、より高精度な熱中症早期罹患指標を得るための検討を行い、深部体温や心拍変動・塩分に関しても、ウェアラブルで計測可能な熱中症の生体指標として有益であることを見だし、統合型ウェアラブル熱中症予防デバイスシステムの提案を行っている。

第7章では、建設業のみならず、開発したデバイスが、熱中症予防に貢献できる産業分野を明らかにし、熱中症予防はもちろん、他のセンサを付加することで、熱中症以外の労働健康障害を予防できるヘルメット型デバイスによる統合的な産業衛生管理システムを提案し、さらに学校等他の分野にも貢献できることを示した。

第8章では、本論文全体を要約して主たる結論をまとめている。

以上のように、本論文は、熱中症発症機序に沿った頭部発汗相当量から全身発汗量を高精度に推測できる手法を見だし、それをういた計測可能なデバイスを開発し、建設現場で計測できることまでを実証し、熱中症罹患早期推定指標にできそうなことを述べている。さらに高精度計測や他産業分野への適用可能性にも言及し、熱中症罹患予防のみならず、他の産業分野における安全労働管理の課題解決に貢献するところが大きいと高く評価できる。

よって本論文は、博士（工学）の論文として、十分価値あるものと認められる。