

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：34412

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2021

課題番号：17K18305

研究課題名（和文）頸部体温計測と冷却機能を有した完全ウェアラブル型熱中症予防システム

研究課題名（英文）A Wearable Cervical Cooling System with Vital Monitoring for Prevention of the Heat Stroke

研究代表者

水野 裕志 (Yuji, Mizuno)

大阪電気通信大学・医療健康科学部・准教授

研究者番号：30591234

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、冷却機能を有する完全ウェアラブル型熱中症予防システム開発のための取り組みである。システム開発において、首元で体温、脈波並びに環境温湿度を取得できるセンサを一体化して、無線モジュールによる連続モニタリングシステムを構築した。さらに、熱中症予防の指標である暑さ指数WBGTを、環境温湿度センサー情報だけで地域に関係なく推定できるアルゴリズムを開発した。冷却機能の有効性では、運動負荷後の頸部への冷却有無によるバイタルの安定性について脈拍に着目して検証した。結果として、体温、脈波並びに環境温湿度によるWBGTの推定データから冷却機能を制御することで熱中症予防に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で検討したデバイスシステムは、熱中症の重症度低減という根本的な問題解決につながり、熱中症患者の搬送数を減らすことに役立つ。一部、腕時計型活動モニタリングが実用化されているが、頸部での体温・脈波並びに環境温湿度に暑さ指数WBGT計測に基づく動脈の冷却機能を有するウェアラブル型熱中症予防システムは過去に類をみないシステムである。スマートハウスと連携させることで、高齢者の入浴時の突然死の予防にも期待できる。体温は熱中症だけでなくインフルエンザ、肺炎など多くの疾患の判断指標であり、健康長寿社会の実現に役立つことから社会的意義は大きい。

研究成果の概要（英文）：This research subject is the challenge for developing a wearable heat stroke prevention system with a cooling function. As regards the system development, a continuous monitoring system using a wireless module that can measure / analyze each sensor information by wearing a device on a neck that integrates a body temperature, a pulse wave, and environmental temperature / humidity is proposed. Furthermore, an algorithm is developed that can estimate WBGT, which is an index for a heat stroke prevention, regardless of regions, using only environmental temperature / humidity sensor information. An effectiveness of the proposed device with a cooling function is verified by a stability of vitals by cooling a neck after exercise by focusing on a pulse wave. These results confirmed that it is effective in preventing heat stroke by controlling a cooling function from a body temperature, a pulse wave, and estimated data of WBGT based on environmental temperature / humidity.

研究分野：生体情報学，医療情報システム

キーワード：ウェアラブル 熱中症予防 頸部 体温 脈波 環境情報 WBGT 冷却機能

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱中症累計搬送人数は、新生児から高齢者まで死亡例を含んで年々増加している。熱中症の予防対策として広く知られる暑さ指数 WBGT (Wet Bulb Globe Temperature: 湿球黒球温度) は、運動時や労働時における暑熱環境のリスク評価の指標として有効であることから、多くの生活環境で利用されている。最近では、ウェアラブル端末を用いて現場作業員の健康状態を遠隔から管理して、気象庁が発表する WBGT を活用することで熱中症の危険度を知らせるシステムが実用化されている。このように、情報通信技術 ICT (Information and Communication Technology) を用いたバイタル監視での予防策は提示されるものの、熱中症の重症度低減という根本的な問題は解決されていない。熱中症の予防対策には、WBGT だけでなく、発症程度を表す重症度分類に関与する体温と脈拍、そして環境温度/湿度を関連付けた新たな対策アプローチが必要であり、さらに、熱中症の重症度化を低減させる発病予防システムが切望されている。

このような背景のもと、無意識・無拘束型ウェアラブル型バイタルセンサに環境センサと発病予防システムが一体化したウェアラブル型熱中症予防システムを構築して、WBGT を活用することでこれまで実用化されていない熱中症の発病予防システムが実現できると考え、本研究課題を着想した。

2. 研究の目的

本研究課題の全体構想として、首元で簡単に使用できる完全ウェアラブル型熱中症予防システムを開発することが目的である。環境情報並びにバイタル情報を融合させることで、WBGT に基づく熱中症の重症度を検出し、発病予防として頸動脈を冷却するシステムを構築する。

具体的な研究項目として、(1) 首元に簡単に装着できる、バイタルセンサと環境センサを一体化したウェアラブルデバイスを提案し、日常生活下をモニタリングする。また、長期モニタリングに備え、外部電源を必要としない環境発電機能を備えたシステムを検討する。(2) 熱中症の重症化の検出パターンを分析するために、環境センサだけで高精度で WBGT [°C] を推算するアルゴリズムを開発する。(3) 熱中症の重症度を低減させるための頸動脈の冷却機能の有効性について検証する。

3. 研究の方法

- (1) バイタル・環境センサを一体化させたウェアラブルデバイスを試作し、日常生活下によるデータ変化のパターンを明らかにする。また、モニタリングデータをアンビエントエネルギーとして活用し、外部電源を必要としないシステムを検討する。
- (2) WBGT の計測には、乾球温度、湿球温度に加え輻射・熱・気流を反映させた黒球温度の 3 要素が必要となる。黒球温度は、直径約 15cm の黒く塗色された銅板の球を設備しなければ計測できない。そこで、通常の気温とみなせる乾球温度と、気温および湿度から換算できる湿球温度の 2 要素を用いて精度良く且つ、地域に限定されずに WBGT [°C] を推算できるアルゴリズムを検討して精度評価する。
- (3) ペルチェモジュールを用いて左右の頸動脈を冷却する回路を試作し、冷却機能の有効性について、運動作業中に有意に変動が観察できる脈拍データに着目して検証する。

4. 研究成果

(1) 図 1 (a) および (b) は、試作したバイタル・環境センサー一体型ウェアラブルデバイスの測温部と装着時の写真である。センシングするセンサ情報は、熱中症の重症度分類の指標となる体温、脈波および環境温度/湿度とした。これまでに、体温センサと脈波センサは、右頸部側に配置する方が有意なデータが得られることを明らかにしている。そのため、対象者の身体周辺の環境温度/湿度を測定する環境センサは左頸部側に設置した。なお、体温センサは冷却機能を考慮して左側にも配置する。体温測定について、これまで確立してきた温度校正法により ± 0.1 °C 以内の測定精度を実現し、電子体温計に関する JIS 規格に準拠することを確認した。脈波センサには、反射型光電式容積脈波法を採用して、光源に緑色光 (525 nm) LED、フォトダイオードを受光部とする構成である。環境センサは、気温 0~100 °C の範囲で誤差 ± 0.3 °C、湿度 45~90 % の範囲で誤差 ± 3.0 % の精度であり、想定される使用環境で高精度測定を可能とする。これらのセンサ部を収納する ABS 樹脂製のハウジングを、柔軟なステンレスバンドに固定することで、頸部の形状に関わらず誰でもやさしく装着できる設計とした。

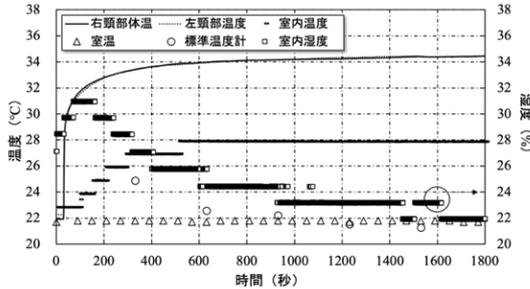
図 1 (c) は、試作したデバイスを用いて測定した安静座位 5 分間の体温および身体周辺の環境温度/湿度の測定結果一例であり、脈波測定は除く。横軸は測定時間 [秒] であり、第 1 軸に温度 [°C] を示し、第 2 軸に湿度 [%] を表す。グラフ内の '△' で示した室温は、熱中症指数計で測定したデータである。'○' で表した標準温度計による温度データは、標準温度計と試作デバイスとの距離を 10 分毎に遠ざけて場合の測定結果であり、身体回りの環境温度の変化を表す。頸部から 10 cm 離れた場所での標準温度計による温度データは、室内温度よりも 14.1 % 高いことがわかり、湿度においては、身体周辺と環境湿度との誤差 0.5 % が観察された。



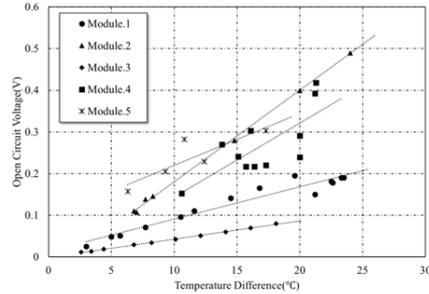
(a) 試作デバイス



(b) 装着時



(c) 体温と身体周りの環境温湿度
(検証結果一例)



(d) 頸部表面温度-環境温度差による
ペルチェモジュールの解放電圧

図1 試作した提案デバイス測定および温度差発電の検証

図1(d)は、ペルチェモジュールの温度差発電を利用し、外部電源を必要としないシステムを検討した結果である。頸部表面温度と環境温度との温度差によって発生するペルチェモジュールの解放電圧である。選択する小型形状のモジュールを比較すると、モジュール2の出力電圧が最も大きく、温度差約7°Cで0.1071V、約24°Cで0.5Vを示した。モジュール4と5を比較すると、温度差約10°Cおよび17°Cでモジュール5が約0.1V高いことがわかる。ペルチェモジュールを電源として使用する場合、最大電力は開放電圧が50%降下した電流値で得られる。一般的な熱中症アラートは、温度32°C、湿度70%が危険なラインとされているが、研究成果から温度が29.3°Cの時点で、身体の周辺温度は危険水準に達していると考えられるため、労働作業時にも無拘束にバイタルおよび環境情報を融合解析できる熱中症予防デバイスは有効であるといえる。また、温度差発電は、提案デバイスを使用する環境温度に依存するが、最大電力の取り出し方法やペルチェモジュールを分散型電源として扱う場合の最適化、蓄電デバイスとの併用で低消費電力のシステムデバイスの電源確保は可能であると示唆された。

(2) 図2は、提案デバイスで測定できる環境情報から推算したWBGT [°C]の精度評価である。グラフ内の「●」は、JIS規格に準拠した精度をもつ熱中症指数計を用いて夏季期間に60分間収集したWBGT [°C]の屋外実測値である。黄色実線は、乾球・湿球温度とWBGTとの回帰モデル(先行研究1)での推算結果であり、青色実線は、気温データとWBGTとの相関による限定した地域でしか利用できない回帰モデル(先行研究2)での推算結果を表す。また、赤点は、黒球温度や湿球温度を必要としない推算方法(先行研究3)による計算結果である。先行研究3のモデルでは、全天日射量や風速などの気象庁データであるため全国どこでも推算できるが、連続的な測定はできない。また、人体の近距離環境のWBGTを表しているとは言えない。そこで、通常気温とみなせる乾球温度と、気温および湿度から換算できる湿球温度の2要素を用いて精度良く且つ、地域に限定されず、提案するデバイスの環境センサだけでWBGTを推算できるアルゴリズムを開発した。

アルゴリズムは、まず、湿球温度はJIS Z 8806:2001にある換算表にもとづいて気温と湿度の三次項モデルとして準備しておく。次に、地域に限定されず計算できる先行研究1のモデルを適応させる。グラフ内の実線橙色が、提案する2要素モデルでの推算結果である。実測データと推算データを平均絶対残差MAD (Mean Absolute Deviation) で比較評価した結果、提案モデルがMAD=0.69°Cで最も高精度であった。

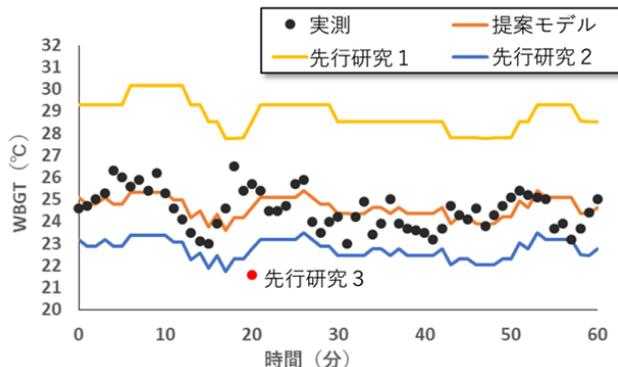


図2 暑さ指数WBGTの推算精度(検証結果一例)

(3) 日本救急医学会では、熱中症の重症度を I から III に分類している。現場での応急処置で対応できる重症度 I は、初期症状として体温上昇の脈拍数の増加が挙げられる。熱中症の発生率が高くなる高温多湿の環境下では、体温が上昇すると放熱のために毛細血管が拡張して血流量が増える。血流量の増加が原因で下肢に血液がたまり、脳への血流が減少する。結果、脳血流の確保のため脈拍数が増加するため重症度が上がる。従って、能動的に前頸部の冷却が有効な治療法の一つとして挙げられている。

そこで、試作したバイタル・環境センサー一体型ウェアラブルデバイスに首元を冷やして熱中症の重症度化を低減する冷却機能を搭載して、発症予防システムを検討する。ペルチェモジュールを用いて左右の頸動脈を冷却する回路を試作し、その有効性について、運動作業中に有意に変動が観察できる脈拍データに着目して検証する。

図 3 (a)および(b)は、提案デバイスを用いて測定した運動前・中・後のバイタルおよび環境センサー情報の測定結果一例である。横軸はモニタリング時間[秒]であり、第 1 軸に頸部体表面温度[°C]を示し、第 2 軸に脈拍[bpm]を表す。脈拍は、30 秒毎の脈拍数平均データである。結果、運動開始後と終了後では、頸部体表面温度と脈拍数 78%の上昇を確認した。

平成 26 年から 30 年における作業現場での熱中症による死傷者の統計によると、建設業においては 708 例中 42 例の死亡者が報告されており、特に、休憩中に熱中症を発症し死亡まで至るケースが多いと報告されている。そこで、左右首元への冷却有無による脈拍の安定性について、作業現場を想定した運動直後の脈拍に着目して比較検証する。計測環境については、最高気温が 25 °C 以上の夏日で、風通しの良い直射日光の当たる屋外で計測を行うものとする。

図 4 (a)は、提案デバイスに冷却機能を追加して測定した運動直後のバイタル情報の測定結果一例である。横軸は運動直後の経過時間[秒]であり、第 1 軸に脈波から換算した心拍数[bpm]を示し、第 2 軸に頸部表面温度[°C]を表す。グラフ内の赤印の '○' は、冷却機能を使用しない場合のデータであり、使用する場合を青印で表している。さらに、得られた結果に二次項の指数関数でフィッティングした結果を図 4 (b)に示す。冷却機能の '無' と '有' による脈拍降下の立ち下がり部分の時定数の差が統計的に有意か確かめるために、有意水準 5% で両側検定の t 検定を行ったところ、 $t(4)=3.44$, $p<0.05$ であり、試作デバイスへの冷却機能搭載の '無' と '有' の差は有意であることがわかった。

本研究課題で検討したウェアラブル型熱中症予防システムでは、体温と環境温との温度差発電による電源確保について課題は残ったものの、体温、脈波並びに WBGT の推定データを含む環境温度/湿度から冷却機能を制御することで熱中症予防に有効であることが示された。これは、熱中症の重症度低減という根本的な問題解決につながり、熱中症患者の搬送数を減らすことが可能であると考えられる。

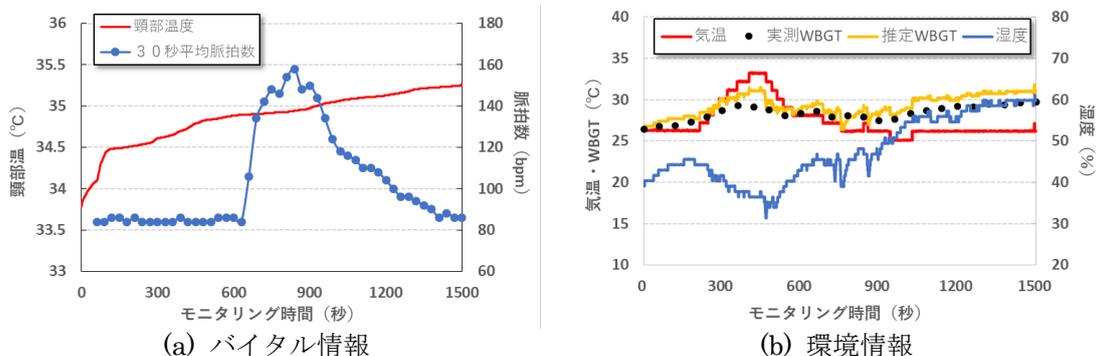


図 3 提案デバイスを用いて測定した運動前・中・後のセンサ情報 (検証結果一例)

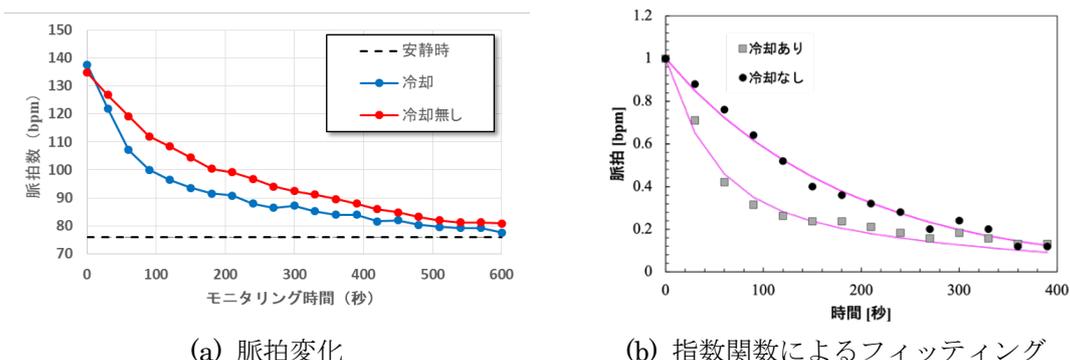


図 4 運動直後の冷却機能有無による脈拍変化の比較 (検証結果一例)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 水野裕志, 兼子晃治, 松村雅史	4. 巻 20
2. 論文標題 ウェアラブル型頸部光電脈波計測デバイスの有効性検証 簡易の血管機能評価法の試みと一考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本福祉工学会誌	6. 最初と最後の頁 26-32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水野裕志, 柿本凌, 山口祐資, 松村雅史	4. 巻 -
2. 論文標題 ウェアラブル型頸部体温計測デバイスの有効性検証 日常生活動作時モニタリングの一考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本福祉工学会誌	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuji Mizuno, Kouji Kaneko and Masafumi Matsumura	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation and Verification of a Wearable System for Photoplethysmography on Cervical Body Surface	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Transaction on Pacific Area Longevity Medical Society (PALMS)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 水野裕志, 山口祐資, 松井信正	4. 巻 -
2. 論文標題 環境およびバイタルエネルギーを電源としたIoTに向けたシステムデザインに関する考察 -移動空間を想定した実証実験の一例から-	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 長崎総合科学大学大学院新技術創成研究所 所報(創見創新)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 谷国門, 水口龍太, 水野裕志, 松村雅史
2. 発表標題 頸部誘導法による脈波伝播時間の計測と最高血圧の推定
3. 学会等名 2021年電子情報通信学会総合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 谷国門, 水口龍太, 水野裕志, 松村雅史
2. 発表標題 頸部誘導型デバイスによる運動時の脈波伝播時間の計測
3. 学会等名 ライフサポート学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水口龍太, 谷国門, 水野裕志, 松村雅史
2. 発表標題 姿勢変化での脈波伝播時間と最高血圧
3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒井優希, 兼子晃治, 水野裕志, 清山浩司
2. 発表標題 ウェアラブル型熱中症予兆検知システムの検討
3. 学会等名 日本福祉工学会九州支部大会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 酒井優希, 水野裕志, 清山浩司
2. 発表標題 バイタル・環境センサー体型ウェアラブルデバイスの有効性検証
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兼子晃治, 水野裕志, 清山浩司, 本村政勝
2. 発表標題 ウェアラブル型血管機能診断デバイスの提案と検証
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 芝颯歩, 水野裕志
2. 発表標題 頸部体温計測に着目した無拘束型熱中症予防システムの検討
3. 学会等名 2019年電気学会産業応用部門大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 兼子晃治, 水野裕志, 松村雅史
2. 発表標題 PWVデータを用いた血圧推定手法の提案
3. 学会等名 日本福祉工学会第22回(平成30年度)学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柿本凌, 山口祐資, 水野裕志
2. 発表標題 ウェアラブル型頸部体温計測デバイスの試作と性能評価
3. 学会等名 日本福祉工学会第2回九州支部大会2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 兼子晃治, 水野裕志
2. 発表標題 ネックバンド型光電脈波計の試作とPTT計測
3. 学会等名 日本福祉工学会第2回九州支部大会2017
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 血圧測定装置及び血圧測定方法	発明者 松村雅史, 檀田毅, 水野裕志	権利者 ニプロ株式会社
産業財産権の種類、番号 特許、2019-215438	出願年 2019年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

大阪電気通信大学 教員情報データベース https://research.osakac.ac.jp/
--

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------