

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：13901

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H04501

研究課題名（和文）ウェアラブルデバイスによる熱中症発症予防のための熱中症アラームシステム

研究課題名（英文）Development of Heat Stroke Alert System by Wearable Device

研究代表者

藤原 幸一（Fujiwara, Koichi）

名古屋大学・工学研究科・准教授

研究者番号：10642514

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：熱中症は、脳を含む長期的な多臓器障害につながり、本邦では年間200人以上の死者が出ている。熱ストレスは、心電図（ECG）上のR-R間隔（RRI）の変動である心拍変動（HRV）に影響を与えることが報告されている。そこで、本研究ではHRVの解析から熱中症の症状を検出し、熱中症の悪化を予防する手法を提案した。提案手法では、熱ストレスによって生じるHRVの異常な変化を機械学習（ML）モデルによってモニタリングする。提案手法を検証するため、熱中症発症のリスクを持つ健康な参加者103名を募集した。提案手法を適用した結果、感度75%（28件中21件）、偽陽性率1.02回/hであった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究提案した熱中症検知手法は、ウェアラブルセンサーでRRIデータを簡単に測定できるため、日常生活で活用できるものと考えられる。そのため、提案手法を活用することで、熱中症が悪化する前に適切な治療を受けられることに寄与し、人々の健康の増進と維持に貢献できる。

研究成果の概要（英文）：Preventing severe heat illness, called heatstroke, is crucial because it can lead to long-term multiple organ damage, including the brain, and results in more than 600 deaths per year in the United States. It has been reported that heat stress affects heart rate variability (HRV), which is the fluctuations of the R-R interval (RRI) on an electrocardiogram (ECG). We propose a method for detecting symptoms of heat illness based on HRV analysis in order to prevent exacerbation of heat illness. In the proposed method, monitoring abnormal changes in HRV caused by heat stress is monitored. To validate the proposed method, we recruited 103 healthy volunteers with risks of heat illness development. The result of applying the proposed method showed that a sensitivity of 75% (21 out of 28 cases) and a false-positive rate of 1.02 times per hour were achieved.

研究分野：医療AI

キーワード：熱中症 機械学習 心拍変動解析 ウェアラブルセンサ 異常検知

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

熱中症とは、暑熱環境で発生する頭痛、めまい、吐き気、異常な発汗などの障害の総称である。高体温は、意識障害や脳・多臓器機能障害を引き起こし、最悪の場合死に至ることもありうる。地球温暖化の進行に伴い、過去数十年の間に熱中症の発生率は劇的に増加し、Hess らの報告によると、熱中症の発生率は年間の気温異常と高い相関がある。熱中症によって、本邦では年間 200 人、米国では年間 600 人以上が死亡し、多くの国で深刻な公衆衛生問題となっている。

熱中症による重い障害や死亡は、水分摂取、涼しい場所での休息、軽い症状の発生後すぐに体を冷やすなどの適切かつ迅速な処置によって回避することができる。そのため、熱中症の初期段階でアラームによる警告が可能となれば、熱中症の重症化を防ぐことができる。しかし、暑熱環境下、特に激しい運動や作業中であると、体調の変化に気づくことは困難な場合がある。そのため、熱中症検知システムが求められていた。

熱中症の環境リスク評価には湿球温度 (WGBT) が広く用いられているが、個人のリスク評価には適していない。熱中症は深部体温をモニタリングすることで発見できる可能性があるが、深部体温は測定方法が侵襲的であるため、日常生活でこれを測定することは困難といえる。

心拍変動 (HRV) は、自律神経系 (ANS) を反映した生理現象として知られており、心電図 (ECG) 上の R-R 間隔 (RRI) の変動として定義される。HRV は、心血管疾患だけでなく、様々な身体状況の変化と関連していることが報告されており、現在、HRV 解析は様々なヘルスマニタリングシステムに活用されている。

HRV は熱中症とも関連性がある。Flouris らは、運動による労作性熱ストレスが複数の HRV の特徴に有意な影響を与えることを報告している。Yamamoto らは、実験室で 30 分間暑い環境にさらされると、HF が有意に減少し、LF/HF が有意に増加し、自覚症状 (熱っぽさ、発汗、気分、顔の紅潮) が有意に増加することから、周波数領域の特徴である LF と LF/HF が熱ストレスのバイオマーカーとなる可能性を示唆している。このように、HRV を連続的にモニタリングすることで、熱中症の症状を検出できると期待される。

2. 研究の目的

本研究の目的は、HRV データから熱中症の症状を検出する機械学習 (ML) モデルを開発することである。熱中症の症状を検出するための新しい HRV ベースの手法を開発し、暑熱環境による HRV の異常な変化を検出できるかどうかを検証した。

3. 研究の方法

熱中症検出は、データの大部分が正常である場合に、少数の異常なサンプルを検出する異常検出問題として定式化できる。すなわち、熱中症は健康な状態に比べて発生することが少ないため、熱中症検出には異常検出問題が適しており、熱中症発生前後の身体状況の異常を HRV データから検出することができる。本研究では、異常検出アルゴリズムとして多変量統計的プロセス管理 (MSPC) を採用し、ML モデルを学習させた。MSPC では異常度の指標として T^2 統計量と Q 統計量を採用し、いずれかが管理限界を超過すると異常が発生したとみなす。

ところで、熱中症の症状を検出する ML モデルを構築するためには、健常時および熱中症発症前後に十分な HRV データを収集する必要がある。しかし、いつどこで熱中症が発生するか事前に分からないため、熱中症発生時の HRV データを収集することは困難である。実験室で人為的

に熱中症状態や熱中症に近い状態を作り出す実験は、研究倫理の観点からも避けるべきである。このように熱中症検出モデルを開発する際には、このような実データ収集に関する倫理的問題を回避する必要がある。

そこで本研究では、暑熱環境下での作業やトレーニングが多い労作性熱ストレスによる熱中症リスクの高い健康人を対象として、ウェアラブル心拍センサーとスマートフォンアプリからなる独自開発の HRV 測定システムを用いて HRV データを収集した。

2018 年から 2020 年にかけて、暑熱環境での作業やトレーニングが多い健康者の HRV データを収集した。対象とした参加者は、製鉄所高炉で働く作業員（男性 70 名、 27.4 ± 8.71 歳）、アマチュアマラソンランナー（男性 14 名、女性 4 名、 54.2 ± 11.8 歳）、体育大学の学生（男性 19 名、女性 2 名、 16.2 ± 0.9 歳）である。本研究に参加する前に、健康状態、服薬状況、睡眠習慣を質問紙により確認した。質問紙では、年齢、性別、体重、身長、職業、病歴（高血圧、糖尿病、心血管疾患、てんかんなど）、服薬、朝食、運動、睡眠、カフェイン、喫煙に関する習慣について情報を収集した。その結果、参加者全員が健康であり、不合格となった参加者はいなかった。データの収集と分析は、熊本大学倫理委員会の承認を得て実施した。さらに、各参加者から書面によるインフォームドコンセントを得ている。

参加者に、暑熱環境での作業やランニングの際に、ウェアラブル心拍センサを装着してもらい、Android スマートフォンアプリを使用して RRI データを記録した。ウェアラブルセンサは、ディスプレイ電極で 1,000Hz の ECG 波形を計測し、計測した ECG 波形から RRI を算出し、Bluetooth Low Energy (BLE) でスマートフォン等に送信する。ウェアラブル心拍センサから送られてきた RRI データを、アプリ内にて CSV ファイル形式で記録した。

深部体温は熱中症のバイオマーカーであるため、症状報告に加え、深部体温の測定が望まれる。しかし、直腸温の測定など侵入的なセンシングが必要なため、日常生活で体温を測定することは困難である。そこで本研究では、研究倫理に配慮し、深部体温測定は採用しなかった。参加者には、記録中は普段通りの行動をとるように指示し、理由の如何を問わず、いつでも記録を中止するように指示した。

熱中症の臨床ガイドラインに基づき、患者の自己申告による熱中症発症の確認を行った。なお、熱中症発症の判断は、病院外での応急処置のための自己申告に基づくことが推奨されている。RRI の記録に加えて、スマートフォンアプリ上の頭痛、吐き気、めまい、発汗異常などのアイコンをタップして、熱ストレスに起因すると思われる体調や症状の変化を報告してもらった。図 1, 2 にデータ収集に使用したウェアラブルセンサとアプリのスクリーンショットを示す。



図 1:ウェアラブル心拍センサ

なお、参加者が症状を感じた瞬間とアプリで症状を報告するタイミングに遅れがあるため、報告された症状のタイミングが必ずしも正確ではないことは、本研究の限界である。

目視で RRI データを確認し、著しいアーチファクトを含む不良データを除去した後、アプリに記録された自己申告に基づき、参加者を記録中の熱中症症状の有無に分類した。前者の参加者のデータは MSPC モデルの学習に使用し（41 名より 1,787 時間）、後者の

参加者のデータはパラメータチューニングに使用する検証データ（4名より88時間）と性能評価に使用するテストデータ（13名から413時間）にランダムに分割した。

MSPCによる熱中症検出MLモデルの学習前に、モデルの入力となるHRV特徴量を選択した。熱中症による体調の変化と関係のないHRV特徴を使用した場合、HRVアーチファクトの混入により熱中症検出性能が低下する可能性があるため、熱中症検出モデルには、熱中症による体調の変化と関係のないHRV特徴を使用することが望ましい。健康な状態でも大きく変動するHRV特徴を視覚で特定し、熱中症検出モデルの入力から除外した。本研究で採用した入力HRV特徴は、SDNN、RMSSD、pNN50、TP、LFnu、Hfnu、SD1、SD2、Sである。

最終的に選択されたHRV特徴量を用いて学習用データを用いて、熱中症検出モデルの学習を行った。構築したMSPCベースの熱中症検出モデルを、MSPCモデルのトレーニングやパラメータのチューニングに使用しなかった参加者のテストデータセットに適用し、構築した熱中症検出モデルの性能を評価した。

4. 研究成果

ある参加者の健常時と熱中症症状周辺期のRRIデータを図3に示す。図中の縦線は、症状報告のタイミングを表している。これらの図から、RRIのデータは症状報告の前後で大きく変化していることがわかる。

Gonzalez-Alonsoらは、暑熱環境では25分以内に深部体温が39°Cに達し、熱中症のリスクを著しく高める可能性があるとして報告している。また、熱中症の重症化を防ぐための処置は、症状が出てから10分以内であることが望ましいとされている。そこで本研究では、参加者が熱中症の症状を訴える20分前から10分後までの間に、症状を検出できることを熱中症検出成功と定義した。

その結果、開発した熱中症検出モデルの平均的性能は、感度75.0%（21/28）、偽陽性（FP）率平均1.02回/h、AUC 0.92であった。図3の参加者の熱中症検出結果を図4に示す。これらの図において、横の破線は Q 統計量の管理限界、縦の線は症状報告のタイミングを示す。縦破線で囲まれた領域は、熱中症症状申告の20分前から10分後までの検出成功期間を示している。色のついた帯は、提案するモデルによる熱中症検知時間である。これらの図から、熱中症の症状が適切に検出できたことがわかる。

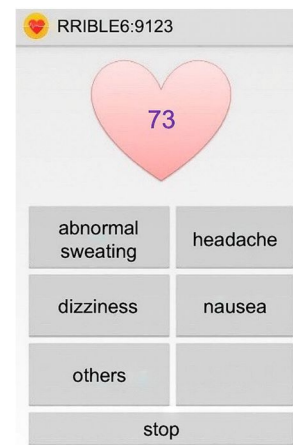


図2:アプリのスクリーンショット

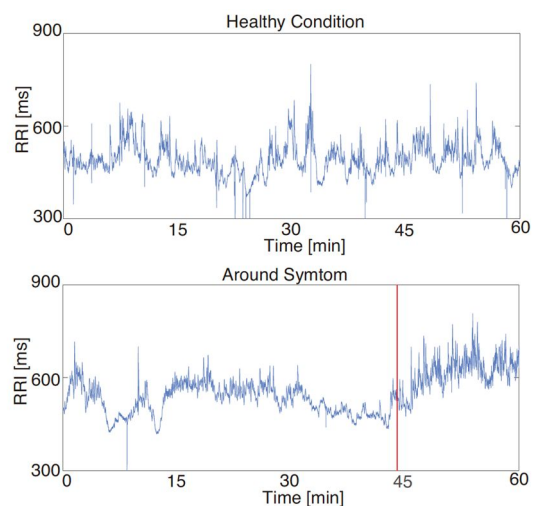


図3:取得したRRIデータの例

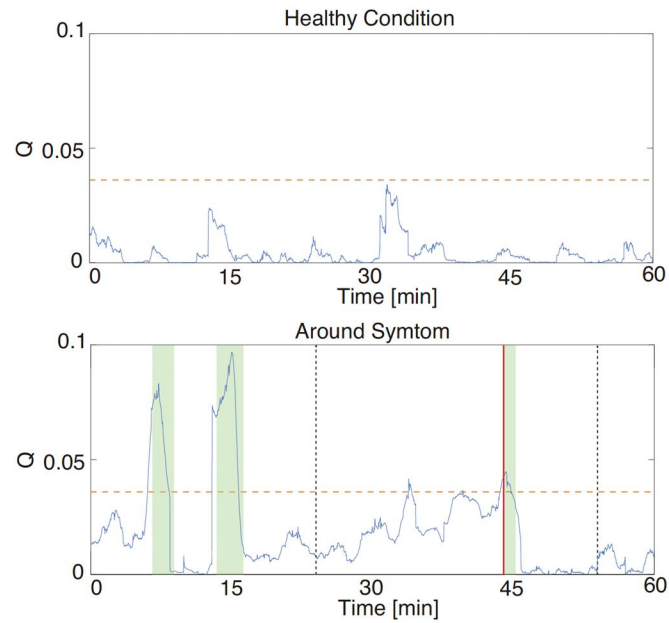


図 4: 熱中症検知結果

FP 率と AUC の分布を確認したところ、3 名は FP 率が 2.0 回/h 以上であったが、9 名の FP 率は 0.75 倍/h 以下であり、開発した熱中症検出モデルがほとんど参加者で想定通り機能していることを確認した。

将来的に、提案した熱中症検知手法は、熱中症の重症化防止や熱中症による死亡者数の減少に貢献すると考えられる。今後は、熱中症検知手法の性能を向上させるために、さらにデータを収集し、実環境での検証を行う予定である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Nagata Shoya, Fujiwara Koichi, Kuga Kazuhiro, Ozaki Harushige	4. 巻 112
2. 論文標題 Prediction of GABA receptor antagonist-induced convulsion in cynomolgus monkeys by combining machine learning and heart rate variability analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Pharmacological and Toxicological Methods	6. 最初と最後の頁 107127 ~ 107127
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.vascn.2021.107127	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Fujiwara Koichi, Miyatani Shota, Goda Asuka, Miyajima Miho, Sasano Tetsuo, Kano Manabu	4. 巻 21
2. 論文標題 Autoencoder-Based Extrasystole Detection and Modification of RRI Data for Precise Heart Rate Variability Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3235 ~ 3235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s21093235	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hamasaki Tadashi, Yamakawa Toshitaka, Fujiwara Koichi, Harashima Haruki, Nakamura Kota, Ikuta Yoshihiro, Yamamoto Tatsuo, Hasegawa Yu, Takezaki Tatsuya, Mukasa Akitake	4. 巻 132
2. 論文標題 Sympathetic hyperactivity, hypertension, and tachycardia induced by stimulation of the pontomedullary junction in humans	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Clinical Neurophysiology	6. 最初と最後の頁 1264 ~ 1273
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.clinph.2021.03.006	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 Goto Yuki, Fujiwara Koichi, Sumi Yuki-yoshi, Matsuo Masahiro, Kano Manabu, Kadotani Hiroshi	4. 巻 9
2. 論文標題 Work Habit-Related Sleep Debt; Insights From Factor Identification Analysis of Actigraphy Data	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Frontiers in Public Health	6. 最初と最後の頁 630640
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fpubh.2021.630640	査読の有無 無
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 Iwasaki Ayako, Nakayama Chikao, Fujiwara Koichi, Sumi Yukiyoishi, Matsuo Masahiro, Kano Manabu, Kadotani Hiroshi	4. 巻 In Press
2. 論文標題 Screening of sleep apnea based on heart rate variability and long short-term memory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sleep and Breathing	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11325-020-02249-0	査読の有無 無
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 Sumi Yukiyoishi, Nakayama Chikao, Kadotani Hiroshi, Matsuo Masahiro, Ozeki Yuji, Kinoshita Takafumi, Goto Yuki, Kano Manabu, Yamakawa Toshitaka, Hasegawa-Ohira Masako, Ogawa Keiko, Fujiwara Koichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Resting Heart Rate Variability Is Associated With Subsequent Orthostatic Hypotension: Comparison Between Healthy Older People and Patients With Rapid Eye Movement Sleep Behavior Disorder	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Neurology	6. 最初と最後の頁 567984
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fneur.2020.567984	査読の有無 無
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 Ibe Tatsuro, Fujiwara Koichi, Hiraoka Toshihiro, Abe Erika, Yamakawa Toshitaka	4. 巻 In Press
2. 論文標題 Development of Game-like System using Active Behavior Input for Wakefulness Keeping Support in Driving	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Intelligent Vehicles	6. 最初と最後の頁 1~1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIV.2020.3029260	査読の有無 無
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 Yamakawa Toshitaka, Miyajima Miho, Fujiwara Koichi, Kano Manabu, Suzuki Yoko, Watanabe Yutaka, Watanabe Satsuki, Hoshida Tooru, Inaji Motoki, Maehara Taketoshi	4. 巻 20
2. 論文標題 Wearable Epileptic Seizure Prediction System with Machine-Learning-Based Anomaly Detection of Heart Rate Variability	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3987~3987
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20143987	査読の有無 無
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2件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 K. Ota, K. Fujiwara, T. Yamakawa, T. Kubo
2. 発表標題 Development of Time Series-Considered Heart Rate Variability Measurement-using Heat Illness Prevention Model with Multivariate Statistical Process Control
3. 学会等名 SICE Life Engineering 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 太田鴻志, 藤原幸一, 稲津尚, 山川俊貴, 久保孝富
2. 発表標題 心拍変動解析と多変量統計のプロセス管理による熱中症検知モデルの開発
3. 学会等名 人工知能学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 熱中症発症検知装置	発明者 藤原幸一, 太田鴻志, 山川俊貴, 久保孝富	権利者 国立大学法人東海国立大学機構
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-097152	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔その他〕

-

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
研究分担者	久保 孝富 (Kubo Takatomi) (20631550)	奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・准教授 (14603)	
研究分担者	丸野 由希 (Maruno Yuki) (20757760)	京都女子大学・現代社会学部・准教授 (34305)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究分担者	加納 学 (Kano Manabu) (30263114)	京都大学・情報学研究科・教授 (14301)	
研究分担者	山川 俊貴 (Yamakawa Toshitaka) (60510419)	熊本大学・大学院先端科学研究部(工)・准教授 (17401)	
研究分担者	佐藤 大典 (Sato Daisuke) (40846812)	大阪体育大学・スポーツ科学センター・研究員 (34411)	
研究分担者	北野 友梧 (Kitano Yugo) (90914101)	大阪体育大学・スポーツ科学センター・研究員 (34411)	追加：2021年9月9日
研究分担者	坂内 悠 (Sakauchi Yu) (90881491)	大阪体育大学・スポーツ局・アスレティックトレーナー (34411)	追加：2020年9月10日

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