

環境センシングとバイタルデータ分析による熱中症リスク推定

近藤綾香^{†1}
慶應義塾大学

柄澤匠^{†2}
慶應義塾大学

張嘉宝^{†3}
慶應義塾大学

丸井朱里^{†4}
慶應義塾大学

栢植晃^{†5}
慶應義塾大学

大越匡^{†6}
慶應義塾大学

概要

国内の熱中症による死亡者数は増加傾向にあり、熱中症を回避するためのアラートシステムの開発は多く取り組まれている。一方で、現行の熱中症警戒アラートは、環境情報に基づく外的要因のみを反映しており、個々人の内的要因は考慮に含まれていないという課題が挙げられる。本研究の目的は、環境センシングおよびバイタルデータ分析を組み合わせ、分析を行うことにより、双方の要因を組み合わせた熱中症リスク推定システムを構築することである。しかし、WBGT センサや気温、湿度といった環境センサデータと体温や活動量といったバイタルデータを網羅的に収集する取り組みはいまだに行われていない。そこで、本研究においては、2023 年 8 月 15 日から 9 月 17 日の計 28 日間、屋外労働者 26 名を対象に、環境情報及びバイタルデータを網羅的に計測する実験を行い、データ分析および熱中症リスク推定に関する調査及び分析を行った。分析として、労働者の主観的感覚の全アンケートデータと就業日の WBGT センサ値の相関性を分析した結果、「温冷感」「蒸れ感」「快適感」にわずかながら正の相関が存在することが明らかになった。また、特定の被験者の鼓膜温データと WBGT 値の関連にも、わずかながら正の相関が認められ、外的要因と内的要因を組み合わせた熱中症リスク推定の可能性が示唆された。

1. はじめに

1.1. 熱中症の現状

近年、世界的な気温上昇に伴い、夏場の熱中症が重大な社会問題となっている。消防庁が行った全国の熱中症搬送状

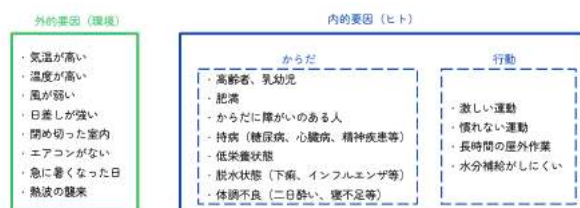


図1 熱中症を引き起こす条件である外的要因と内的要因の各要素 [2]

況の調査によると、今年の5月から9月にかけて、累計で9万人を超える人々が熱中症により救急搬送された [1]。これは調査開始以降、過去2番目に多い搬送人数 [1] となり、社会全体で熱中症を予防する対策の必要性が高まっている。

1.2. 熱中症の発生要因

熱中症の発生要因は、図1に示されるように、環境に依る外的要因とヒトに依る内的要因に大別される。このうち、内的要因は年齢や体型、既往症などの身体的な情報である静的要因と、スポーツや労働などにおける運動量、水分摂取量などの1日の活動状況である動的要因にさらに分類される。また一般的に、熱中症の発生リスクは、これら複数の要因が組み合わせられることで増大すると考えられている。

1.3. 熱中症警戒アラート

熱中症の危険度を表す指標として、WBGT 値（暑さ指数）がある。WBGT 値とは、気温、湿度、太陽放射、風の影響を総合的に考慮した熱中症リスクの指標であり、WBGT 値に基づく熱中症の危険度は以下の通りである [2]。

- 31° C 以上は「危険」とされ、外出を避け涼しい屋内への移動が推奨される。
- 28-31° C は「厳重警戒」であり、外出時に炎天下を避け、室内では室温の上昇に注意する必要がある。
- 25-28° C は「警戒」レベルで、運動や激しい作業時には定期的な休息が求められる。
- 21-25° C は「注意」が必要で、一般的には危険性は少

ないが、激しい運動や重労働時にはリスクが存在する。

政府や自治体は、熱中症の危険性が高くなると予想された際に、この WBGT 値に基づいた「熱中症警戒アラート」を行い、熱中症予防行動の実施を促している [3]。しかし、WBGT 値は気温や湿度といった外的要因の一部に基づく指標であるため、個々の内的要因、すなわち個人差は全く考慮されていない。暑熱環境下において、どのような人がどの程度活動しているのかという内的要因によって、個人の熱中症リスクは異なると考えられ、WBGT 値自体も、日陰や日向などの環境要因に依る。そのため、現状の WBGT 値のみに基づく取り組みは、熱中症予防の観点で改善の余地があると考えられる。

1.4. 先行研究

情報技術を用いた熱中症予防に関する研究は、これまでも多数行われてきている。たとえば、Yatsuda らによる、室内環境の温度や湿度などからリアルタイムに WBGT 値を計算し、危険な状態を検知すると警告を行う高齢者向けのアラートシステムに関する研究 [4] や、Mimi らによる、心拍数や体温などのバイタルデータから個人の熱的快適性を推定する機械学習モデルの研究 [5] が挙げられる。一方で、外的要因および内的要因をそれぞれ推定する取り組みは多数行われているものの、それぞれを網羅的に用いた熱中症リスク推定の取り組みは散見されない。

そこで、本研究では、熱中症の危険性の高い屋外労働者を対象に、WBGT センサや気温、湿度といった環境センサデータと体温や活動量といったバイタルデータを網羅的に計測し、分析を行うことにより、双方の要因を組み合わせた熱中症リスク推定システムを構築することを目指す。

2. データ収集実験

1.4 に示す通り、熱中症推定に対する取り組みは多く行われている一方で、環境情報および生体情報を網羅的に収集した取り組みは、今までに行われていない。そこで、網羅的な熱中症リスク推定の分析および推定システムを作成するために、データ収集実験を行い、データセットを作成した。実験は、2023 年 8 月 15 日から 9 月 17 日の計 28 日間、神奈川県横須賀市にある長井海の手公園ソレイユの丘 [6] にて、屋外で就業する成人男女 26 名を対象に行った。

2.1. 実験設定

本実験は実験期間を 3 クールに分けて行われた。第 1 クールは 8 月 15 日から 8 月 24 日までの 10 日間、第 2 クールは 8 月 28 日から 9 月 5 日までの 9 日間、そして第 3 クールは 9 月 9 日から 9 月 17 日までの 9 日間である。各ク

ールにおける被験者の数は、順に 6 名、10 名、10 名であり、各被験者は 1 クール内で最低 5 日間、最長で 7 日間実験に参加した。

本実験で収集した、環境データおよびバイタルデータのデータ項目を図 2 に示す。

データ収集実験期間において就業中の被験者が装着していた機器は以下の通りである。

- 耳内温度を計測するセンサデバイス「Vitarate」[7]
- スマートフォン (iPhone) 用センサ情報取得アプリケーション「AWARE client v2」[8]
- 温湿度測定デバイス「ハイグロクロン」[9]
- 心拍数や睡眠状況などの測定機能を備えたスマートウォッチ「Fitbit Sense2」[10]

加えて、始業前には、被験者がこれらの実験機材を装着した状態の写真撮影を行い、就業中の服装に関するデータを収集した。

被験者には、実験参加前に一度、年齢、性別、既往症などの背景情報に関する事前アンケートを行い、さらに参加日ごとに始業前、休憩時間中、終業後の各時点で、主観的感覚や脱水状況などに関するアンケートに回答した。

また、環境センサとして、園内に 1 台の気象センサと 5 台の WBGT センサを設置し、気温や湿度、天気情報や WBGT 値の収集を行った。

2.2. 収集したデータ

計 28 日間のデータ収集実験を通し、環境情報およびバイタルデータ併せて約 2 億 6537 万 6962 レコードを収集した。

これらのデータは、iPhone 搭載センサのデータが約 2 億 6215 万 6919 レコード、Fitbit のデータが約 276 万 6470 レコード、気象センサのデータが約 2 万 8094 レコード、WBGT センサのデータが約 24 万 5572 レコード、アンケートの回答データが約 746 レコード、耳道温度計のデータが約 14 万 3573 レコード、温湿度ロガーのデータが約 3 万 5588 レコードに分類される。

3. アプローチ

本研究は、熱中症の危険性の高い屋外労働者を対象として、外的要因と内的要因の双方を組み合わせた熱中症リスク推定システムの構築を目指す。具体的には、WBGT センサ、気温、湿度などの環境センサデータと、鼓膜温、心拍数、活動量などのバイタルデータを網羅的に計測し、これらのデータを分析する。このアプローチにより、双方の要因の相互作用を考慮した、より精度の高い熱中症リスク評価が可能となることが期待される。

データの種類	データを取得する手段	データを取得するタイミング	評価項目の内容
生体データ	耳道温度計	始業15分前～終業5分後まで、1分毎に連続計測	耳内温度（鼓膜温）
	Fitbit, iPhone搭載センサ	Fitbit：実験期間中、可能な範囲で装着いただき測定（睡眠中含む）	加速度、歩数、行動認識（活動量、活動の種類）
		iPhone搭載センサ：始業15分前～終業5分後まで連続計測	
	Fitbit	実験期間中、可能な範囲で装着いただき測定（睡眠中含む）	心拍数、皮膚コンダクタンス（無自覚的なストレスレベル）
主観的感覚	アンケート	始業前、毎休憩時、終業後	温冷感、蒸れ感、快適感、疲労感、口渇感、感情、その他感覚
脱水状態		始業前、毎休憩時、終業後	水分量、水分摂取内容、脱水状態
ストレス状態		始業前のみ	自覚的なストレスレベル
背景情報		事前のみ	年齢、性別、身長、職種、治療・服薬の有無、飲酒・喫煙状況、カフェイン摂取状況、睡眠状況、過去1ヶ月の歩数、運動習慣、性格、就業年数、暑さへの耐性、健康関心度
毎日の行動情報		始業前のみ	前日の飲酒・喫煙・カフェイン摂取状況、服薬状況、前日～当日朝までの体調不良（例：下痢）、朝食の有無
服装	就業中の服装の撮影	始業前のみ	服装、帽子の有無
環境情報	Fitbit, iPhone搭載センサ, 温湿度ロガー, WBGTセンサ	始業15分前～終業5分後まで連続計測	周辺の温湿度、屋外滞在時間・時刻、気圧、WBGT値
		WBGT計は測定期間中、連続計測	

図2 ソレイユの丘従業員を対象としたデータ収集実験における収集データ項目

3.1. 今回取り組んだ分析

熱中症に関連する要因の分析に向け、収集したデータの傾向を調査した。はじめに、全実験期間における WBGT 値と、それに対する主観的感覚の変化を調査した。次に、数日間における WBGT 値と、それに対する同一被験者の鼓膜温度および主観的感覚の変化の調査を行った。ここでの主観的感覚とは、被験者に参加日の始業前、休憩時間中、終業後に回答された「温冷感（Thermal Sensation）」「蒸れ感（Humid Sensation）」「快適感（Comfort Sensation）」「疲労感（Fatigue Sensation）」の4つの調査項目であり、各回答項目を数値化して分析を行った。数値化にはリッカート尺度を採用し、温冷感は「非常に寒い」を0として「非常に暑い」を6とする7点スケール、蒸れ感は「非常に乾いている」を0として「非常に蒸れている」を6とする7点スケール、快適感は「非常に不快」を0とし、「非常に快適」を6とする7点スケール、疲労感は「全く疲れていない」を0とし、「非常に疲れている」を4とする5点スケールでそれぞれ評価した。

また、これらの分析で用いた WBGT 値は、園内に設置された5箇所の WBGT センサの中で、従業員の待機場所に最も近いセンサの値を用いた。実験期間中、最も高い WBGT 値は2023年8月22日14時51分から14時55分に観測された33.3℃であったが、1クール目の被験者の鼓膜温データが欠損していた、そのため、2番目に高い32.6℃の WBGT 値が観測されたのが、2023年9月15日13時19分から13時21分であったことから、当該日から9月17日

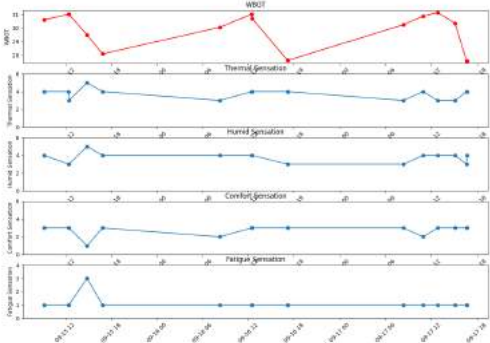


図3 被験者1名の WBGT 値と主観的感覚の時系列分析

にかけて、3日間連続で実験に参加した被験者のデータ分析を行った。なお、日毎の平均値は、9月15日が28.4℃、9月16日が28.2℃、9月17日が28.2℃であった。1.3に示したとおり、WBGT 値が31℃を超える場合は「危険」とされ、28-31℃は「厳重警戒」とされる[2]ため、当該期間は熱中症の発生リスクが非常に高い状況であったといえる。

3.2. 結果

まず、実験全期間における、WBGT 値と主観的感覚の相関係数では、「温冷感」は約0.274、「蒸れ感」は約0.171と、WBGT 値とわずかに正の相関を示し、「快適感」も約-0.194とわずかに負の相関を示した。一方、「疲労感」は約-0.031

と、WBGT 値との相関が極めて低かった。ピアソン相関検定の結果、p 値は「温冷感」は約 3.15×10^{-10} 、「蒸れ感」は約 0.000104 、「快適感」は約 1.11×10^{-5} を示し、統計的に有意な相関が確認され、「疲労感」については約 0.491 と有意な相関が認められなかった。

また、WBGT 値の高かった 9 月 15 日から 9 月 17 日にかけての、同一被験者における WBGT 値と主観的感覚の時系列分析は、図 3 に示すとおり、WBGT 値によって、主観的感覚の 4 つの指標が大きく変化することはなかった。相関分析では、「蒸れ感」は約 0.413 、「疲労感」は約 0.2778 と、WBGT 値と正の相関を示し、「温冷感」は約 -0.1156 、「快適感」は約 -0.2016 と、わずかに負の相関を示した。一方、ピアソン相関検定の結果によれば、p 値は「温冷感」は約 0.67 、「蒸れ感」は約 0.11 、「快適感」は約 0.45 、「疲労感」は約 0.3 と、この関係が統計的に有意でないことが確認された。

さらに、当該期間における、同一被験者の鼓膜温と WBGT 値の相関分析の結果、鼓膜温と暑さ指数の間の相関係数は約 0.119 であり、わずかに有意な正の相関が存在した。また、この相関関係の p 値は約 8.53×10^{-12} であり、統計的に有意な正の相関が確認された。

このことより、実験全期間での WBGT 値と主観的感覚と、個人間の鼓膜温と WBGT 値の 2 変数間にはわずかな正の相関がある一方で、相関係数が比較的低いことから、関連性は弱いことが示された。

4. 今後の展望

今回の分析の結果として、全実験期間における WBGT 値と主観的感覚の相関分析を行ったところ、全実験期間における WBGT 値と主観的感覚の値には、わずかながら「温冷感」「蒸れ感」「快適感」には、WBGT 値との有意な正の相関が認められ、「疲労感」には相関がないことがわかった。また、WBGT 値が特に高かった期間における、同一被験者の鼓膜温と WBGT 値にも、わずかな正の相関が認められた。この結果は、WBGT 値が屋外労働者の主観的感覚や鼓膜温に及ぼす影響を明らかにしている。しかし、これらの結果は熱中症リスクと直接因果関係を示すものではなく、今後の研究では更なる詳細な分析が必要となる。

特に、屋外労働者の主観的感覚や鼓膜温と、WBGT 値との相関係数が低いということから、熱中症のリスクを推定するためには、WBGT 値という単一の環境指標よりも、個人のバイタルデータや主観的感覚を含む複合的なアプローチが必要であることを示唆しているものと考えられる。

また、今回の分析は収集した環境情報およびバイタルデータのうち、鼓膜温と WBGT 値や、主観的感覚のアンケート結果と WBGT 値の関連性を調査したに留まっている。今

後の取り組みとして、収集した心拍数や睡眠時間などの他センサデータを活用し、WBGT 値や鼓膜温、労働場所や服装など、さまざまな変数との相関を分析することで、熱中症リスクに関連の強いデータ項目を明らかにする。さらに、上記の分析を通して有効なデータを確認した上で、それらのデータを複合的に用いて熱中症リスクを推定する機械学習モデルを構築し、熱中症リスクを推定するシステムの構築を目指す。

謝辞 本研究成果は、国立研究開発法人情報通信研究機構の委託研究 (JPJ012368C05401) により得られたものです。

参考文献

- [1] 総務省令和 5 年 (5 月から 9 月) の熱中症による緊急搬送状況. https://www.fdma.go.jp/disaster/heatstroke/items/r5/heatstroke_nenpou_r5.pdf (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [2] 環境省熱中症環境保健マニュアル 2022. https://www.wbgt.env.go.jp/heatillness_manual.php (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [3] 気象庁令和 4 年度第 1 回「熱中症予防対策に資する効果的な情報発信に関する検討会」. https://www.jma.go.jp/jma/kishou/shingikai/kentoukai/nettyusyou/r4part1/r4part1_shiryoi-3.pdf (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [4] Yatsuda, A., Haramaki, T. and Nishino, H.: An unsolicited heat stroke alert system for the elderly, *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW)*, pp. 345–346 (online), 10.1109/ICCE-China.2017.7991137 (2017).
- [5] Afsana Mimi, Md. Golam Rasul, T. A. S. L. N. L.: Personal Thermal Assessment using Feature Reduction and Machine Learning Techniques. https://drive.google.com/file/d/1I9jIBcd_j0e84wJnzjMDtMuYrULXmVsL/view (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [6] 長井海の手公園ソレイユの丘 [公式] 長井海の手公園 ソレイユの丘. <https://soleil-park.jp/> (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [7] バイタレート株式会社耳内温度連続計測サービス. <https://vitarate.co.jp/temperature/> (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [8] AWARE: Open-source context instrumentation framework for everyone. . <https://awareframework.com/> (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [9] KNラボラトリーズボタン型温湿度データロガー (ハイグロクロン). <https://www.kn-labs.com/hygrochron.htm> (最終閲覧日: 2023/12/8).
- [10] Fitbit: 先進の健康管理スマートウォッチ — Fitbit Sense 2 を購入. <https://www.fitbit.com/global/jp/products/smartwatches/sense2> (最終閲覧日: 2023/12/8).