

青 山 学 院 大 学
理 工 学 研 究 科

理工学専攻 知能情報 コース

修 士 論 文

学 生 番 号 35623244

氏 名 本多 一騎

研究指導教員 Guillaume Lopez

多様な環境における熱中症リスク評価と予防策の検討

本多 一騎

2025/01/31

目次

第1章 序論	3
1.1 研究背景	3
1.1.1 熱中症による被害	3
1.1.2 熱中症のメカニズム	4
1.1.3 地表気温変化と影響	5
1.1.4 現在の熱的快適性提供技術の問題点	5
1.1.5 热的快適性の役割と影響	6
1.1.6 ウェアラブルデバイスの普及	6
1.2 研究目的	7
1.3 本論文の構成	8
第2章 関連研究	9
2.1 心拍変動指標に基づく生理的評価	9
2.1.1 心拍変動指標の健康および運動指導への応用	9
2.1.2 ウェアラブル端末を用いたストレス推定	10
2.1.3 気温の変化による心拍変動指標への影響	10
2.1.4 自律神経機能の低下と熱中症のリスク	11
2.2 ウェアラブルセンサ技術を用いた熱中症リスク推定	12
2.2.1 ウェアラブルセンサによる深部体温の推定	12
2.2.2 発汗と熱中症リスクの関係	13
2.3 熱中症予防対策に関する研究	15
2.3.1 水冷服および空調服による熱中症予防	15
2.3.2 水分補給による熱中症予防	15
2.3.3 頸部冷却による熱中症予防	16
第3章 データ収集	17
3.1 热的快適性モデル	17
3.2 実験に使用されたデバイス	17
3.3 热的快適性予測のための特徴量とデータ前処理	19
3.3.1 時間領域解析	19
3.3.2 周波数領域解析	19
3.4 多様な環境での実験	22
3.4.1 実験室における実験	22
3.4.2 現場における実験	24
3.4.3 熱中症経験者のいる現場での実験	26

第4章 热的快適性の予測	29
4.1 実験室から得られたデータの検証	29
4.1.1 元データを活用した分類性能の検証	29
4.1.2 オーバーサンプリング適用後の分類性能の検証	30
4.2 現場から得られたデータの検証	33
4.2.1 元データを活用した分類性能の検証	33
4.2.2 オーバーサンプリング適用後の分類性能の検証	34
4.3 热中症経験者のいる現場から得られたデータの検証	36
第5章 自律型リアルタイム推定システムの検討	39
5.1 E4 リストバンドとスマートウォッチから得られるデータの比較	39
5.1.1 使用するスマートウォッチ	39
5.1.2 使用するデータ	40
5.1.3 フィルターの効果検証	41
5.2 Polar M600 スマートウォッチでの推定	43
5.2.1 Polar M600 スマートウォッチでの推定に用いる特徴量	43
5.2.2 6つの特徴量のみを使用した場合の推定精度	44
5.2.3 リアルタイム推定システムと画面出力	45
第6章 結論	47
6.1 まとめ	47
6.2 今後の展望	47
謝辞	48
参考文献	49

第1章 序論

本章では、本研究における背景および研究目的、本論文の構成について述べる。

1.1 研究背景

1.1.1 热中症による被害

厚生労働省によると、熱中症による死者数は年々増加傾向にあり、2023年は1600を超える人が熱中症で命を落としている[1]。図1.1より、熱中症の死者数の中でも特に高齢者の割合が大きく、2010年以降熱中症による死者数の約80%が高齢者であった[1]。

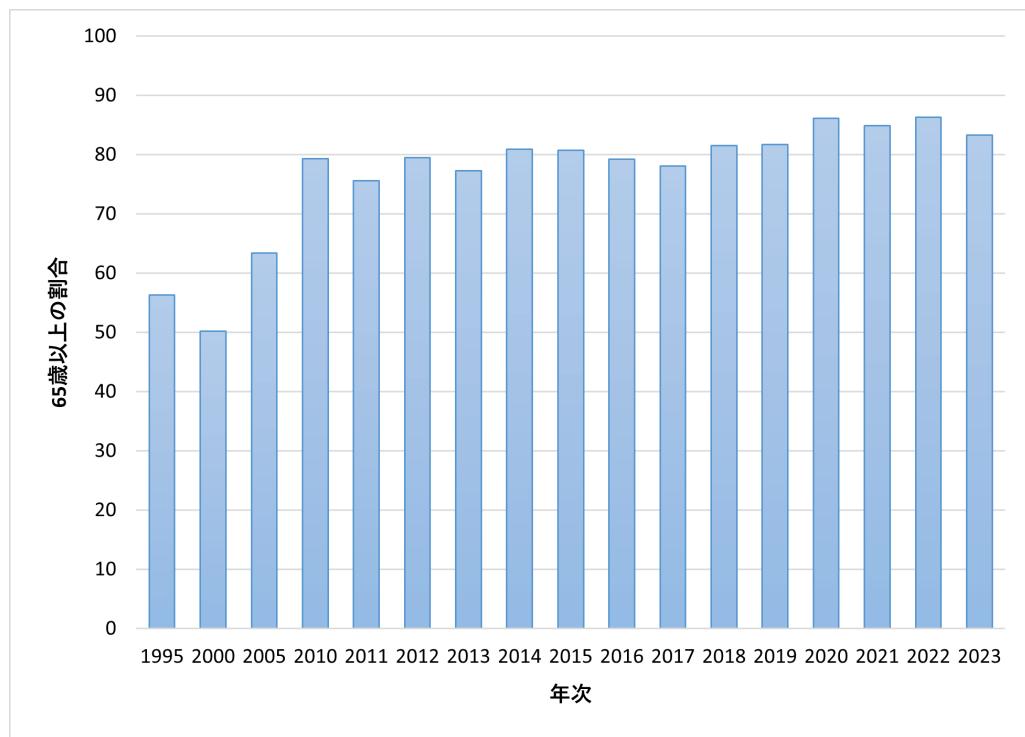


図1.1: 热中症死者のうち高齢者の割合 ([1] より作成)

熱中症は、環境条件や活動状況によってさまざまなレベルで発生する。環境省の指針によれば、熱中症の危険性は気温や湿度などの環境条件に基づいて分類され、危険レベルが高いほど重篤な症状が引き起こされるリスクが増加する[2]。特に高齢者や子供は熱中症の影響を受けやすい。注意すべき点として、暑さ指数(WBGT: Wet Bulb Globe Temperature)に基づく警戒レベルがあり、この指数が 28°C を超えると、熱中症の発生リスクが急激に高まる[2]。

1.1.2 熱中症のメカニズム

人間は、外気温が高くなると体温が上昇し、体温調節機能が働く。体温が 37°C 程度に保たれるように、皮膚の血流が増加し、発汗によって体熱を放散しようとする。しかし、過度の暑さや脱水が進むと、血流の変化や発汗の低下により、体温がさらに上昇し、熱中症のリスクが増す。特に、環境温度が高いと、発汗による体熱放散が妨げられ、体温が急激に上昇する可能性がある。例えば、体重 70kg の人間は発汗により体温を 10°C 低下させることが可能であるが、大量の汗をかいたとき、水分補給が不十分だと体温調節が困難になる。これにより、体内の水分バランスが崩れ、最終的に熱中症を引き起こす [3]。

熱中症はその症状に応じて「熱失神（熱虚脱）」「熱痙攣」「熱疲労（熱疲弊）」「熱射病」の4つに分類される。

熱失神は、暑熱環境下で脳への血流が一時的に減少し、立ちくらみや倦怠感が生じる状態である。血圧の低下も見られるが、体温上昇はほとんどない。熱痙攣は、大量の発汗で塩分が不足し、筋肉が痙攣することである。熱疲労は、脱水による全身のだるさや吐き気、頭痛などの症状を特徴とし、頻脈や体温の上昇を伴うこともある。熱射病は、体温が急激に上昇し、意識障害や全身の痙攣が生じる重篤な状態であり、緊急の治療が必要である。

これらの状態は、重症度に基づいてI度からIII度に分類され、III度は最も危険な状態を示す。

図1.2は、熱中症の発生メカニズムおよび症状の重症度を示している。

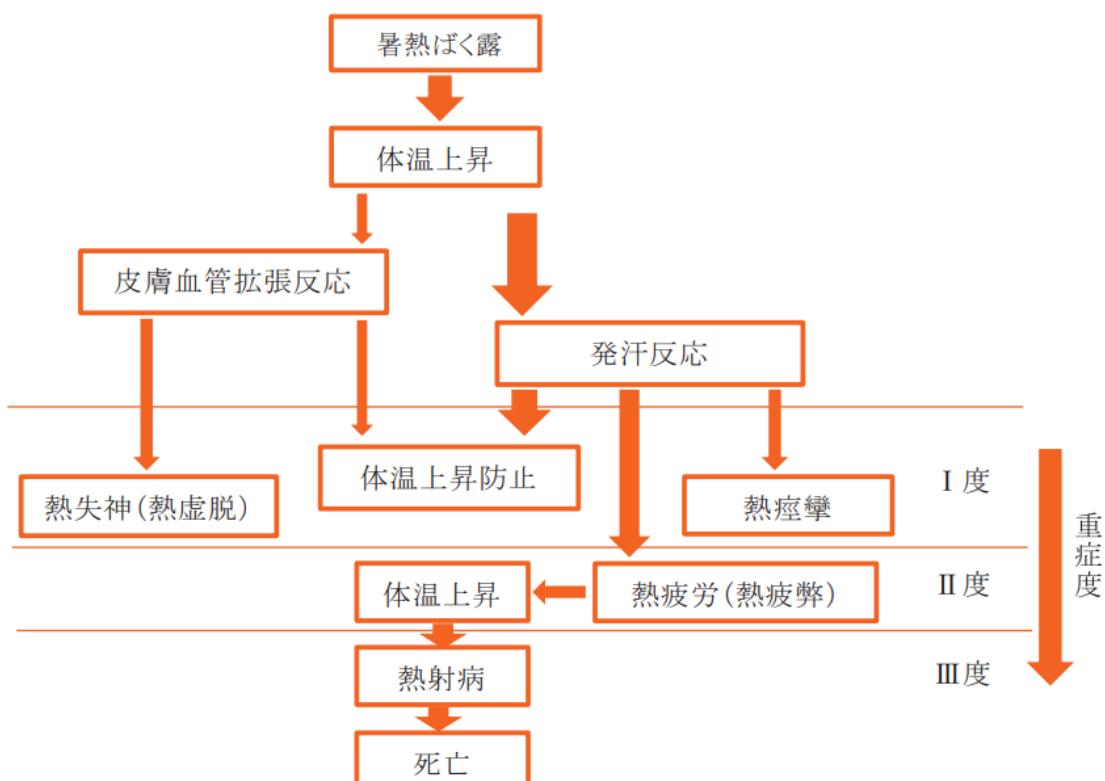


図 1.2: 暑熱ばく露時の体温調節反応と熱中症の発生メカニズム ([3] より引用)

1.1.3 地表気温変化と影響

図 1.3 は、産業革命前（1850 年～1900 年）を基準とした地表気温の変化を示している。これまでの気温上昇は主に人間活動による温室効果ガスの排出が原因であることが分かっている。気温変化の将来的な予測は、採用される社会経済パスウェイ（SSP）によって大きく異なり、2100 年までの予測気温上昇は約 1°C から 5°C の範囲にわたる。

SSP5-8.5 は、温室効果ガスの排出が最も多いシナリオであり、2100 年までに地表気温が最大 5°C 上昇する可能性がある。一方、SSP1-1.9 や SSP1-2.6 のシナリオは、より積極的な排出削減を前提としており、気温上昇を 1°C から 2°C 程度に抑えることができると予測されている。これらの予測は、気温上昇を抑制するために迅速かつ持続的な対策が必要であることを示している。

最大約 5°C 気温の上昇は、熱波の頻発や強度の増加、生態系への悪影響、さらには人間の健康への重大なリスクをもたらす。

(a) Global surface temperature change relative to 1850–1900

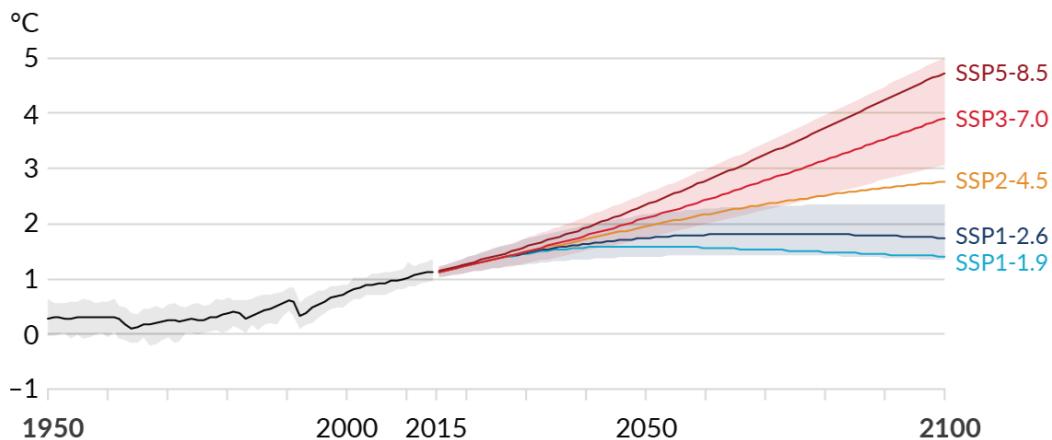


図 1.3: 1850 年～1900 年を基準とした各 SSP の地表気温の変化 ([4] より引用)

1.1.4 現在の熱的快適性提供技術の問題点

現在、ほとんどの建物や機器は、多くの人が許容できる温熱環境条件の範囲を明確にした規格に基づいて作られている。しかし、環境条件の変化や室内での活動により、身体の温熱感覚や快適性は大きく変化することが頻繁にある。

最近の研究では、ASHRAE 55[5] や ISO 7730[6] といった熱的快適性の基準は、室内環境における不満を持つ人数を過小評価していることが示されている [7]。

また、快適に感じる温度は人によって異なることが知られている。しかし、ほとんどの熱的快適性を提供する技術（空調装置など）は、建物内の全員に中立的な熱環境を設定するよう設計されている。

この熱的快適性の設定方法は、エネルギーを大量に消費し [8]、人体の中で熱的快適性に最も影響を与える部位（手首、足、頭など）を冷却または加熱することができない。さらに、室内温度を常に中立的に保つのではなく、人が熱的に不快と感じたときにだけ調整することで、熱的快適性に必要なエネルギーを大幅に削減できる可能性がある。

このような観点から、快適で健康的な室内環境を実現するためには、熱的快適性を評価することが重要であると考えられる。

1.1.5 热的快適性の役割と影響

热的快適性は、人間の健康と心理的な快適さに大きな影響を与える。適切な温熱環境は、身体的な健康だけでなく、心理的な満足感や生産性にも寄与する。特に、热的快適性が損なわれた環境では、居住者の士気や作業意欲が低下し、長期的には健康被害を引き起こす可能性がある [9]。

热的快適性を評価するために使用される PMV（予測平均温冷感）指数は、特にオフィス環境において、快適性とエネルギー節約の両面で効果的であることが示されている [10]。しかし、PMV 指数は個々の感覚に基づくものではないため、個人差を考慮する必要があり、Kramer らの研究では PMV 指数と個別の快適性の間に大きな差が見られることが報告されている [11]。この報告から、より個別化された熱的快適性の管理が推奨されるようになっている。

また、個別の快適性システム（PCS）は、局所的な温熱不快感を緩和しながら、热的快適性を向上させ、健康にも好影響を与える可能性がある。これにより、特にオフィス環境において、作業効率と健康状態の改善が期待できる [12]。

図 1.4 は、Luo らが提案している頭、手、足をターゲットとする PCS である。

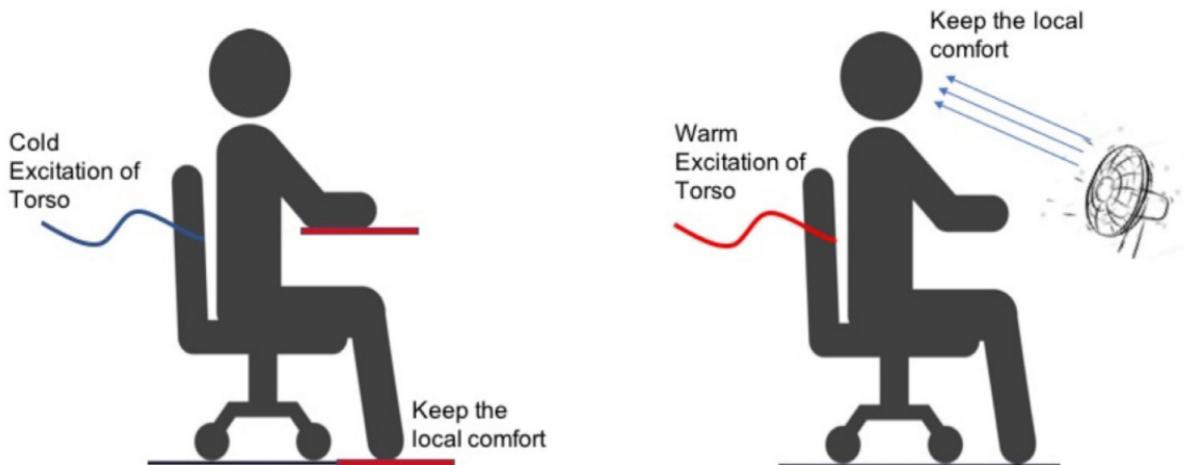


図 1.4: 局所的な不快感を取り除くための提案されている PCS ([12] より引用)

1.1.6 ウェアラブルデバイスの普及

近年、Apple Watch をはじめとしたウェアラブルデバイスが急速に普及し、健康管理、スポーツ、医療分野における重要なツールとしての地位を確立している。ウェアラブルデバイスは、心拍数や活動量、睡眠データのモニタリングを通じて、個人の健康状態を常に監視することが可能であり、これにより健康管理や病気予防の新たなアプローチが生まれている。

医療分野において、ウェアラブルデバイスは、患者の生理データをリアルタイムで監視し、疾病の早期発見や治療に役立てられている [13]。特に、高齢者や慢性疾患を抱える患

者にとって、ウェアラブルデバイスは医療費の削減や医療の質向上に貢献する可能性が高い。

また、これらのデバイスは遠隔医療の普及にも寄与しており、患者が病院を訪れることなく、日常的な健康データを医師と共有することができる [14].

スポーツ分野においては、ウェアラブルデバイスを用いて、アスリートのパフォーマンス向上やリスク管理が行われている [15]. デバイスによる生体データのモニタリングは、トレーニングの効率を最適化し、ケガの予防に役立つとともに、競技中の健康状態を監視するための手段としても有効である。

ウェアラブルデバイスは、ユーザーの健康状態や行動に関する多くのデータを収集し、リアルタイムでの分析を可能にする。しかし、このようなデバイスが収集するデータは非常にセンシティブであり、セキュリティやプライバシーに関する問題が懸念される。

まず、ウェアラブルデバイスから得られるデータは、個人の健康情報や位置情報を含むことが多く、これらの情報が不正にアクセスされると、個人のプライバシーが侵害される可能性がある。特に、悪意のある攻撃者によってデータが盗まれると、個人情報が悪用されるリスクが高まる [16]. このような観点から、ウェアラブルデバイスの利用においては、セキュリティとプライバシーの保護が不可欠である。それでも、これらの技術は今後さらに進化し、健康管理、スポーツ、医療分野において重要な役割を担い、普及していくと考えられる。

図 1.4 は、北米におけるウェアラブル技術の市場規模拡大を予測したものである [17].

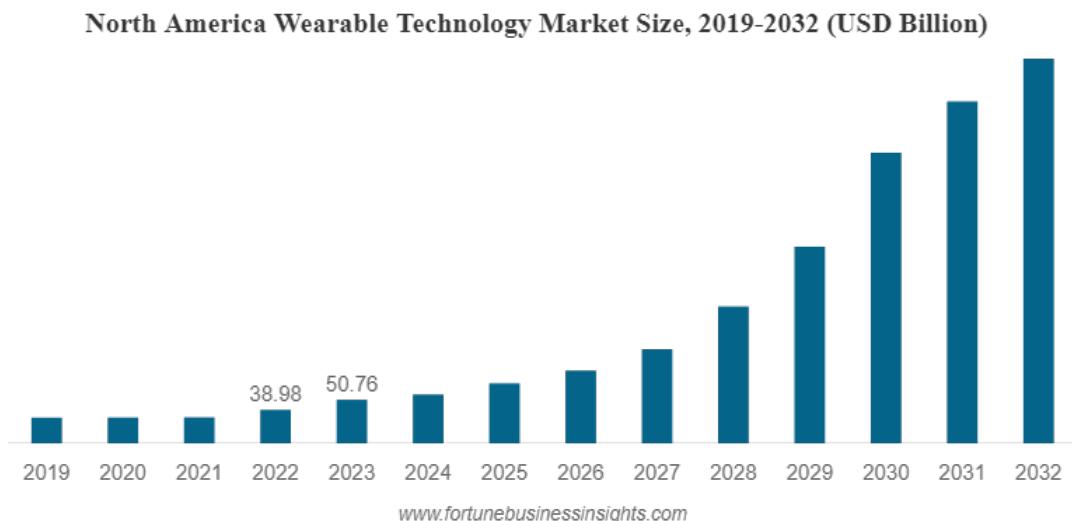


図 1.5: 北米におけるウェアラブル技術の市場規模予測（単位：10 億米ドル）([17] より引用）

1.2 研究目的

1.1.1 項で述べたように、近年、熱中症による死者数は増加傾向にあり、近年の死者数のうち高齢者の割合が 80% を超えてきている。

そこで本研究の目的は、細かい粒度で熱中症のリスクを評価するとともに、普及しつつあるウェアラブル技術を活用して、一人暮らしなども増えている高齢者の安心と安全およ

び、労働者の健康と安全を守る仕組みの開発である。そのため、熱中症の発生する可能性のある作業現場において、スマートウォッチを用いて計測できる脈拍を始めとした生理指標などから、熱的快適性の推定手法や頸部冷却効果の検証、またリアルタイム推定システムの開発を目標とする。

1.3 本論文の構成

第1章：本論文の研究背景、研究目的および論文の構成について述べる。

第2章：関連研究について述べる。

第3章：本研究のデータ収集について述べる。

第4章：解析結果を述べるとともに、その結果について考察を述べる。

第5章：自律型リアルタイム推定システムの開発について述べる。

第6章：本論文のまとめと今後の展望について述べる。

第2章 関連研究

2.1 心拍変動指標に基づく生理的評価

2.1.1 心拍変動指標の健康および運動指導への応用

心拍変動（HRV）は、従来から心血管系の健康指標として使用されてきたが、Singhらは、モバイルヘルス（mHealth）技術の普及に伴い、心拍変動が健康状態の評価や運動トレーニングの指導において重要な役割を果たすことを示している[18]。この研究では、心拍変動がリスク層別化や運動プログラムの最適化に利用できることが述べられており、モバイルデバイスを通じた日常的なフィードバックの可能性が強調されている。

伊倉らは、心血管疾患患者において有酸素運動中にリアルタイムで心拍変動を解析する手法を提案している。この研究では、心拍変動を使用して換気閾値での運動強度を連続的かつ非侵襲的に測定することにより、より安全かつ効果的な運動戦略を提供できることが示されている[19]。この手法は、心拍変動のリアルタイム分析が運動中の健康管理に役立つことが明らかにされている。

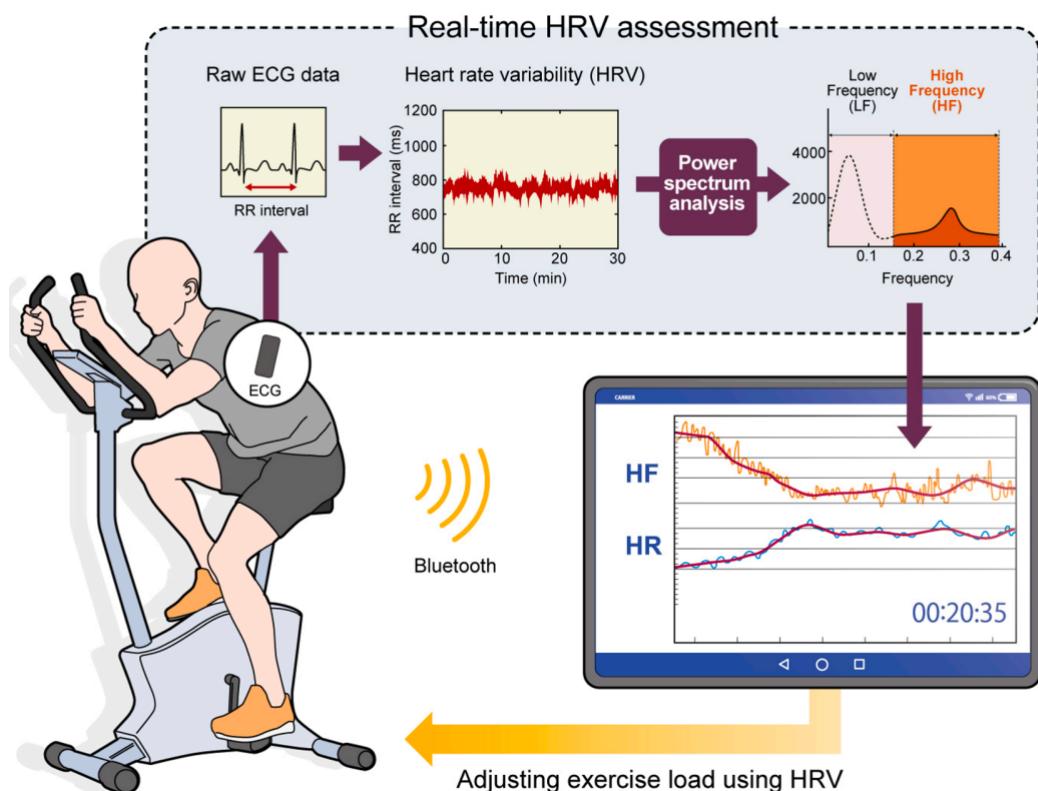


図 2.1: 実験手順 心拍変動は継続的に記録され、運動負荷は運動中の高周波（HF）成分に基づいて調整される ([19] より引用)

2.1.2 ウェアラブル端末を用いたストレス推定

鈴木らの研究では、スマートウォッチによって取得された心拍数から導出される複数の評価指標を用いて、ストレス検出の精度が評価されている。心拍数は、利き手でない手に装着されたAndroid Wear OS搭載端末から取得された。正規化されたサポートベクターマシン(SVM)を用いた場合、検出精度は73.24%，適合率は77.57%，再現率は74.92%，特異率は72.72%という結果が得られた。

また、SDNNはリラックス状態において高く、ストレス負荷状態では低くなる傾向が示されており、RMSSDについても同様に、リラックス時には高く、ストレス負荷時には低い値を示す傾向が確認された[20]。



図 2.2: 実験参加者につけられたウェアラブル端末 ([20] より引用)

2.1.3 気温の変化による心拍変動指標への影響

熱的快適性は主観的な心理的感覚であるため、人の生理的信号の変化をもとに熱的快適性を提供することは、非常に効果的であると考えられる。Nkurikiyeyezuらの研究によれば、心拍変動は自律神経系のバランスおよびその機能を評価する指標となり、気温の変化が心拍変動に測定可能な変化をもたらすことが示されている[21]。例えば、図2.3に示すように、Mean RR, VLF, サンプルエントロピーなどの指標は寒冷な環境で最も高く、暑熱環境では最も低い値を示すことが分かっている。

また、Mean RR, RMSSD, SDSD, pNN25, VLF, およびサンプルエントロピーの6つの心拍変動指標を用いた機械学習モデルを構築することで、人々の熱的快適性(暑さによる不快感、寒さによる不快感、快適さ)を最大93.7%の精度で予測可能であることが明らかとなった[21]。このことから、暑さによる不快感の度合いを推定できることで、熱中症

のリスクが高まっているかどうかを把握し、早期に適切な対策を講じることが可能であると考えられる。

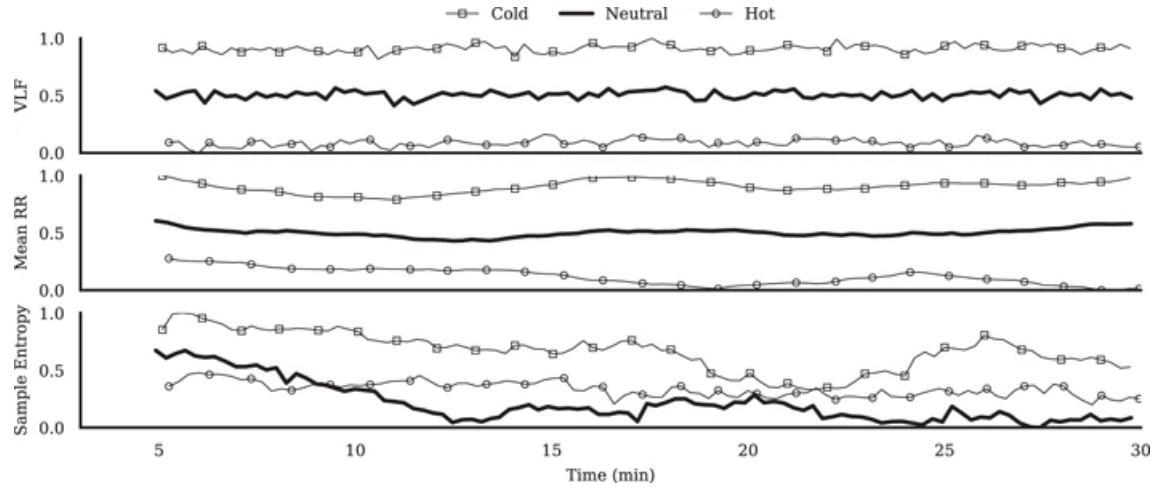


図 2.3: 各環境における心拍変動指標の正規化された平均 ([21] より引用)

2.1.4 自律神経機能の低下と熱中症のリスク

一般的に、心拍変動は自律神経機能を評価する重要な指標として広く採用されている。自律神経系は交感神経と副交感神経から構成され、これらのバランスが心拍変動に反映される [22]。高い心拍変動は副交感神経の優位を示し、ストレスが少なくリラックスした状態であることを意味する。一方、低い心拍変動は交感神経が優位で、ストレスや身体的負荷がかかっていることを示す。

図 2.4a は健康な青年男子の呼吸性心拍変動 (RSA) と心拍数の関係を示し、薬物投与前後での変化を比較している。心拍数が副交感神経のみで制御されるとき、RSA の CCV 値は心拍数と直線的な関係にある。

図 2.4b は Mayer 波に関連した心拍変動と、動脈血圧の収縮期血圧における Mayer 波の大きさ (CCV 値) の関係を示している。

自律神経機能が低下すると、体温調節などの生理的な調整機能が劣化し、熱中症の発症リスクが高まることが示されている。Canini らの研究では、自律神経機能の低下が、ストレスに対する保護メカニズムの不全を引き起こし、熱中症に対する感受性を増加させる可能性が指摘されている [23]。

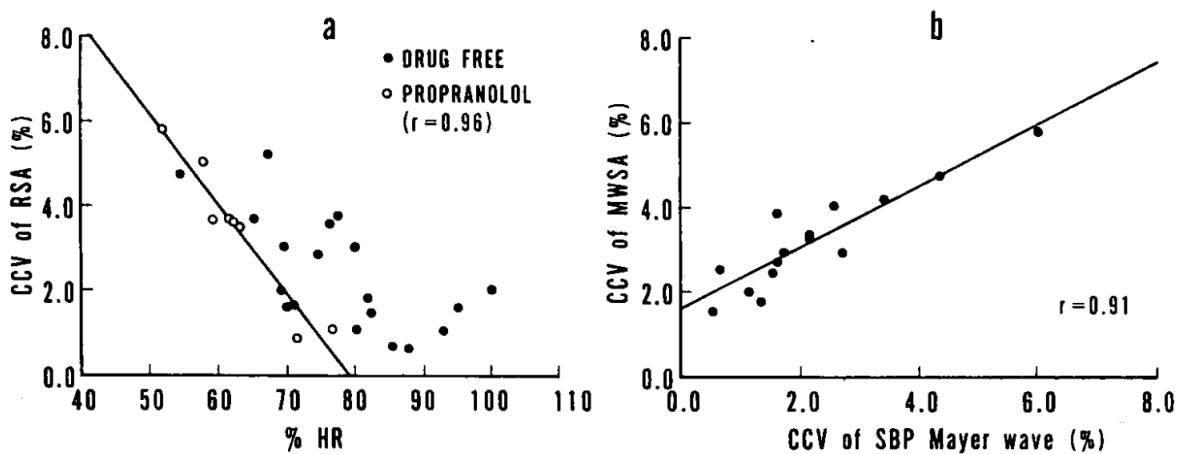


図 2.4: (a) 健康な青年男子の呼吸性心拍変動 (RSA) と心拍数の関係. (b) 心拍変動と, 動脈血圧の収縮期血圧における Mayer 波の大きさ (CCV 値) の関係 ([22] より引用)

2.2 ウェアラブルセンサ技術を用いた熱中症リスク推定

2.2.1 ウェアラブルセンサによる深部体温の推定

釜谷らは, ウェアラブルセンサとヒト熱モデルを用いて深部体温を推定する手法を提案している. この研究では, 二重ノードのヒト熱モデルを利用し, 歩行活動中に 0.07°C の誤差で深部体温を推定することに成功している [24]. これにより, 熱中症予防における深部体温の連続的なモニタリングが可能となり, 特に高温環境下での熱ストレス管理に有効であることが示されている.

時澤らは, 熱ストレス条件下における運動中に体幹温度をリアルタイムでモニタリングするためのウェアラブルパッチ型センサシステムを提案している. この研究では, 胸部からの熱フラックスデータを利用し, 体幹温度の予測精度が高いことが示されている [25]. 予測された体幹温度は実測値とよく一致しており, このシステムは熱中症予防や高温環境下での健康管理に有効であることが確認されている.

しかし, 深部体温は熱中症と密接に関連しているものの, 深部体温の予測自体が熱中症の予防に直接結びつくとは限らない.

図 2.5 が示すように, 通常, 発汗や血液の皮膚表面への移動を通じて体温を調整するが, 高温環境下では熱放散が困難になり, 体内に熱が蓄積される. この状態が進行すると体内の血液の流れが低下し, 体に熱がたまり, 深部体温が上昇する. この時点では既に「異常時」となり, 熱中症発症が近づき手遅れとなる可能性がある [26][27][28]. したがって, 深部体温の上昇を検知する前に予防的なアラートを出すことが肝要である [29]. 具体的には, 環境条件 (気温や湿度) や個人の活動レベルに基づき, 早期に頸部冷却や水分補給を促す予防策が効果的であると考えられる.

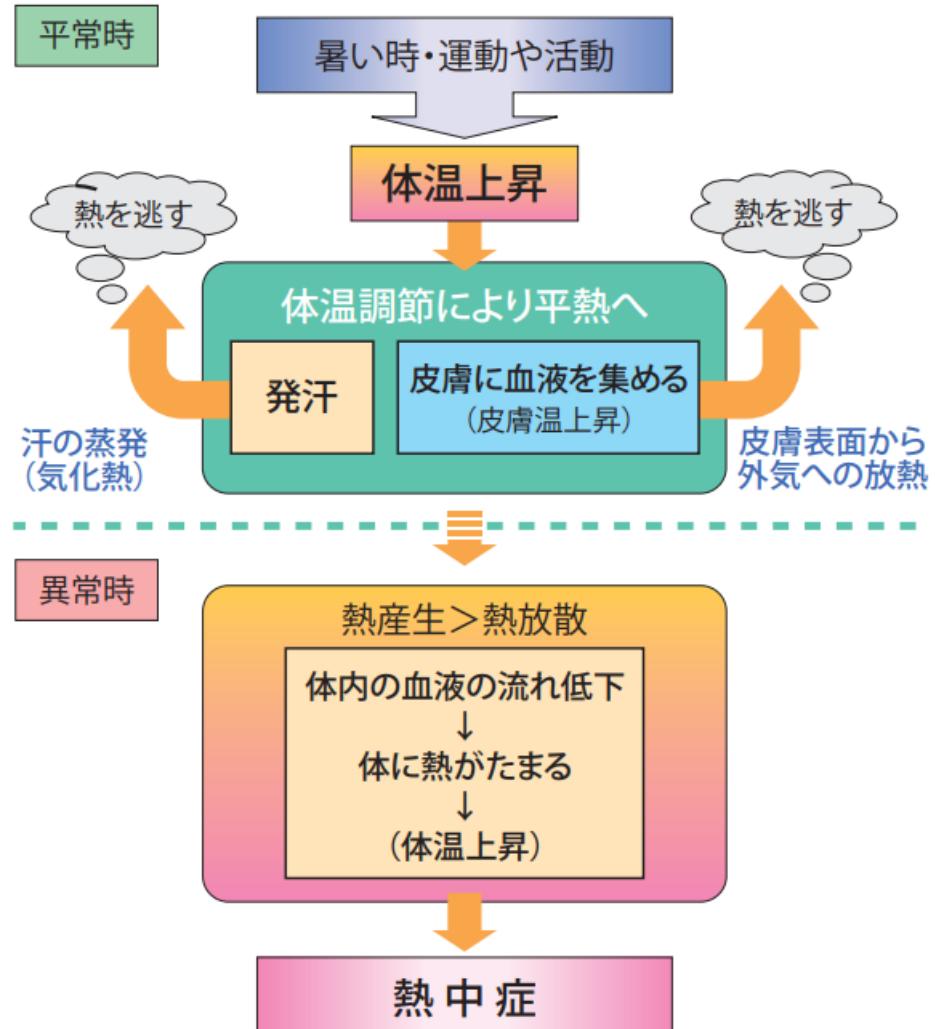


図 2.5: 热中症の起こり方 ([28] より引用)

2.2.2 発汗と熱中症リスクの関係

Sim らの研究では、異なる熱環境下での人間の熱的快適性のモニタリングを目的としたウェアラブル発汗速度センサの使用が提案されている。このセンサは発汗量を測定感度の変化を 10%未満で測定可能であった。「快適」、「やや暖かい」、「暖かい」、「暑い」の 4 段階の温熱状態の範囲において、各温熱状態における発汗量の差は平均 $(32.06 \pm 27.19) \text{ g/m}^2\text{h}$ であった。この機能により、身体の過剰な熱ストレスを迅速に検出し、熱中症リスクを軽減するための迅速な対応が可能である。発汗のパターンや発汗速度の変動をリアルタイムで把握することで、熱中症の予防や早期対応に役立つ可能性が示唆されている [30]。

Fan らの研究では、発汗がアクティブなスポーツ時の熱的快適感に与える影響に着目している。特に、衣服内の水分抵抗と湿気の蓄積が発汗に直接関係し、熱的快適性に大きな影響を与えることが示されている。発汗は体内の余分な熱を放散する役割を持っており、衣服の熱特性（通気性、吸湿性）が十分でない場合、発汗による冷却効果が減少し、熱的快適性が損なわれるとされている。したがって、適切な衣服の選択により、発汗を促進し、熱中症のリスクを軽減することが重要であると結論づけている [31]。

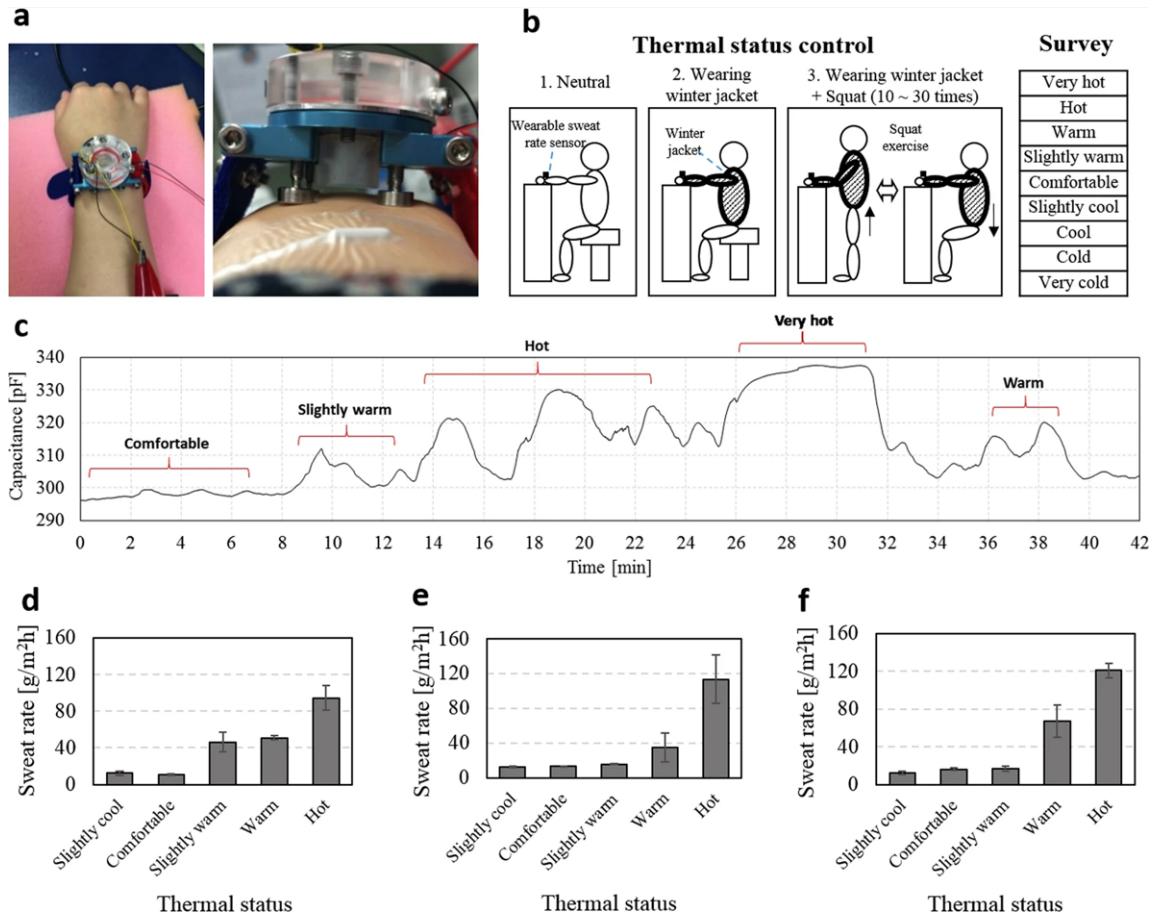


図 2.6: (a) 手首に装着する発汗率センサー. (b)3 つの異なる条件を用いた温度状態評価に使用されたアンケート. (c) 温度状態制御中に被験者 1 から得られた湿度センサーによる容量の時間変化. (d-f)3 名の被験者における温度状態による発汗率 ([30] より引用)

藤井らの研究では、プロテアーゼ活性化受容体 2 (PAR2) の外因性活性化が、高齢者における皮膚血管拡張および発汗の低下を引き起こすことが示されている。この研究は、高齢男性を対象に運動による熱ストレス時の発汗と血管反応を調査しており、特に高齢者では PAR2 の活性化が発汗機能を抑制することが明らかとなった。この発見は、高齢者における自律神経機能の低下が、発汗による熱放散メカニズムに影響を与える可能性を示唆している [32]。

Tan らの研究では、高齢者の発汗応答の低下が発汗腺のコリン作動性受容体の感受性の低下およびシグナル伝達の変化に起因することが指摘されている。これにより、高齢者は熱関連の障害に対して脆弱性が増し、発汗による体温調節が困難になることが報告されている。さらに、熱ストレス時に高齢者が熱的負荷に対してどのように対応するかに関する実践的な戦略も提案されている [33]。

このように、高齢者は加齢に伴う自律神経機能などの衰えにより、発汗機能の低下が顕著であることが報告されている。つまり、発汗センサによる熱中症予防対策は、若年層や十分な発汗が期待できる人々に対しては有効であるが、本研究の目的である高齢者も含めた熱中症予防において、発汗だけでは熱中症リスクを十分に評価できない可能性がある。

2.3 热中症予防対策に関する研究

2.3.1 水冷服および空調服による熱中症予防

水冷服や空調服は、熱中症の予防や熱ストレスの軽減に効果的であることが多くの研究で示されている。Son の研究では、水冷服や空調服を使用することで熱ストレスが軽減され、運動能力の向上が期待できることが報告されている [34]。特に、皮膚の露出や衣服の通気性が重要な要素であり、適切な設計により熱中症のリスクを効果的に低減できることが示されている。

Li らの研究では、空調服が高温環境下での熱ストレスを効果的に軽減することが明らかにされている [35]。この研究では、空調服が運動強度に応じた性能を発揮し、熱を効率的に放散できることが確認された。特に、高温環境で働く人々にとって、このような空調服が快適さと安全性を提供する新しい手段として期待されている。

さらに、Wang らは、液体と空気を利用したハイブリッド冷却服が局所的な熱ストレスの軽減に効果的であることを示している [36]。この研究では、コンベクションと熱伝導のメカニズムを組み合わせた冷却が、体表温度を効果的に下げることが確認されている。

これらの研究は、水冷服や空調服が熱中症予防および熱ストレス軽減に重要な役割を果たすことを示しており、今後の研究や実用化に向けた重要な基盤となっている。

しかし、空調服や水冷服にはいくつかのデメリットが存在する。Leyk によると、服の断熱性が原因で、汗の蒸発が妨げられ、体温を効果的に下げる蒸発冷却の作用が減少することが指摘されている [37]。これは特に湿度の高い環境で顕著であり、体温調節が困難になり、結果として熱ストレスが増加する危険性がある。

また、装置が故障した場合には、冷却効果が失われるだけでなく、逆に断熱効果が体温を保持し、熱ストレスを悪化させるリスクがある。

このように、空調服や水冷服はその利便性に優れている一方で、使用環境や使用方法によっては逆効果をもたらす可能性がある。特に、高温多湿な環境や長時間の使用では、これらのデメリットを十分に考慮し、適切な対策を講じる必要がある。

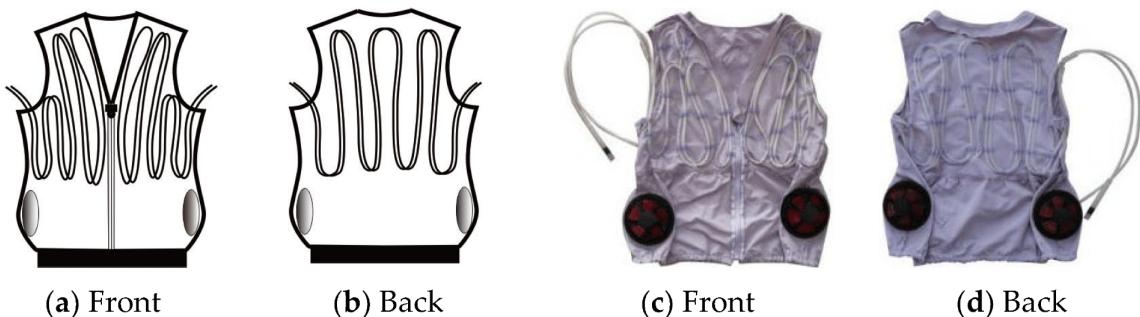


図 2.7: シリコンチューブ付き液空冷却衣服 ([36] より引用)

2.3.2 水分補給による熱中症予防

脱水症状は熱中症のリスク要因として重要な役割を果たしている。Garcia らの研究では、労作性熱中症の病態生理学において、脱水症がリスクを高めることが示されている [38]。特に、脱水により体温調節機能が低下し、熱中症の発症リスクが高まる可能性がある。

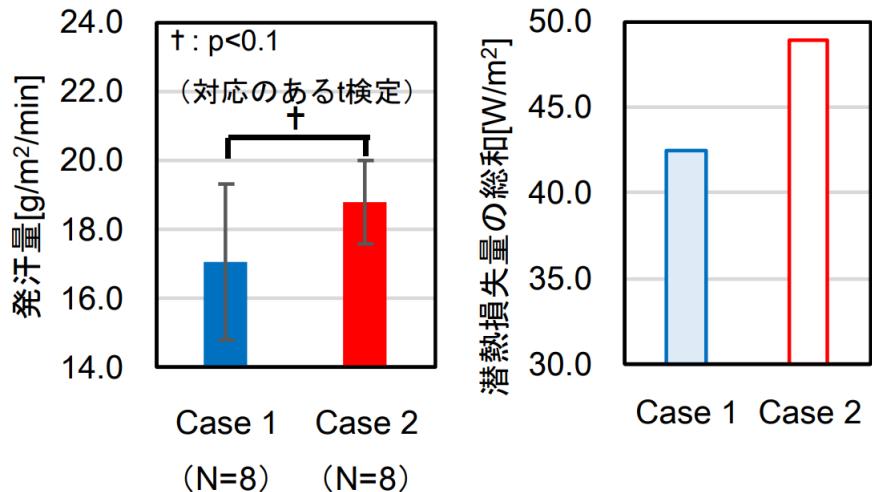


図 2.8: 発汗量の実験値と潜熱損失量の総和の計算値 ([40] より引用)

また, Costrini らによると, 热中症患者は熱疲労患者に比べて初期の脱水がより進行しており, 血糖値が有意に低いことが確認されている [39]. さらに, 热中症患者は血清カリウム濃度の低下も見られ, これが代謝反応の変化を引き起こしていることが示唆されている.

Garcia らの研究では, 脱水症による体温調節障害が热中症の重症度を増すことが強調されており, 運動時の適切な水分補給の重要性が示されている. 一方, Costrini らの研究では, 脱水による代謝的な影響が热中症の進行を助長することが明らかにされている. したがって, 脱水症は热中症の予防および治療において, 最も重要な要因の一つであると言える.

2.3.3 頸部冷却による熱中症予防

千葉らの研究では, 暑熱環境下における頸部冷却の生理的反応に関する実験が行われ, その結果が詳細に報告されている. 実験では, 温度 32°C, 湿度 60% の条件で, 8 名の健康な男性を対象にデスクワークを行わせ, ネッククーラーを使用した条件 (Case 1) と, 使用しない条件 (Case 2) を比較した.

まず, 頸部皮膚温度は, ネッククーラーを装着した Case 1 では約 30.8°C に低下し, 装着しなかった Case 2 では約 34.7°C であったことが確認された [40]. これにより, 頸部冷却による皮膚温の顕著な低下が生じ, 発汗量が減少する傾向が見られた. 図 2.8 が示すように, 発汗量の実験結果では, Case 1 では発汗量が少なく, 発汗による潜熱損失量も Case 2 と比較して少ないことが確認されている. これにより, 局所冷却が身体の熱的負荷を軽減する効果が示唆される.

さらに, 血圧に関する測定では, 頸部冷却を行った Case 1 の方が, 最高血圧が有意に高くなかった. これは, 頸部冷却によって血管拡張が抑制され, 血管抵抗が増加したためであると考えられる [40]. 結果として, 暑熱環境下における循環系の負担軽減や熱中症リスクの低減が期待される.

第3章 データ収集

3.1 热的快適性モデル

PMV (Predicted Mean Vote) モデルは、様々な温度条件下で長時間にわたる大規模な実験室実験に基づき、熱的快適性を予測するために開発された [41]. このモデルは、その公平性と精度が認められ、ISO 7730 や ASHRAE 55などの国際規格に採用されている [42]. PMV を算出する際には、周囲の空気温度、平均放射温度、気流速度、相対湿度、代謝率、衣服の断熱性といった 6 つの要因を考慮する必要がある [41].

PMV による評価は、「寒い」、「涼しい」、「少し涼しい」、「普通」、「少し暖かい」、「暖かい」、「暑い」の 7 段階に分類される.

本研究では、通常 PMV の値が 2.5 を超えると「暑い (hot)」と分類されるが、その中でも 3.5 を超えるものを図 3.1 に示すように「とても暑い (very hot)」としてラベルの拡張を行った.

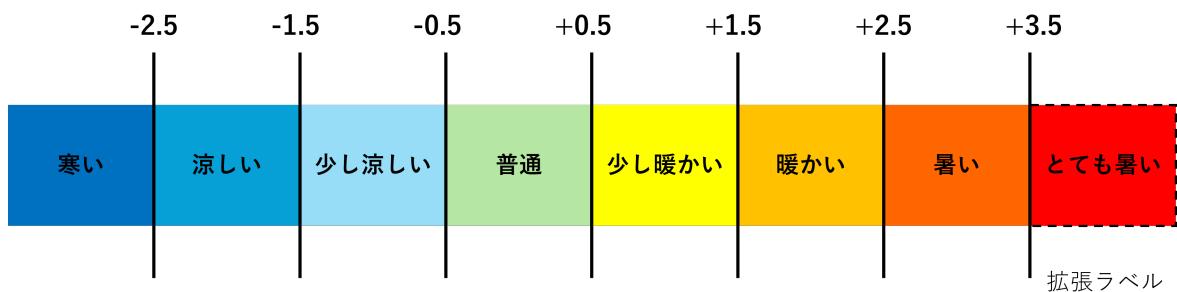


図 3.1: 拡張された PMV の 8 段階評価指標

3.2 実験に使用されたデバイス

被験者には図 3.2 に示す E4 リストバンドを装着させた. E4 リストバンドは、腕時計型のウェアラブルデバイスであり、皮膚電気活動 (Electrodermal Activity, EDA) センサ、光電式容積脈波 (Photoplethysmography, PPG) センサ、3 軸加速度計、光温度計など、多数のセンサを搭載している [43]. EDA は 4Hz のサンプリングレートで皮膚の電気的特性の変動を捉え、発汗量の増加に伴い皮膚の電気伝導度も上昇することが知られている.

特に、PPG センサは 64Hz で容積脈波 (Blood Volume Pulse, BVP) を計測し、これに基づいて心拍間隔 (Interbeat Interval, IBI) および心拍変動 (Heart Rate Variability, HRV) を算出することが可能である. 近年の研究では、E4 リストバンドが座位安静時や一定のペースでの呼吸条件下において、心拍変動を高精度に記録できることが報告されている [44]. このように、E4 リストバンドは、高品質なデータ収集を目的とした精度の高いセンサを備えている.

図 3.3 に示す Cómodo gear i3 は、富士通ゼネラルが開発したウェアラブル冷却装置である [45]. このデバイスは、主に工場などの暑熱環境下での使用を目的としており、首に装着して皮膚表面を冷却することで体感温度を低下させる。軽量かつコードレス設計で、作業の妨げにならないように工夫されている。また、バッテリー駆動により、持続的に冷却が可能であり、長時間の使用に適している。



図 3.2: Empatica E4 リストバンド ([43] より引用)



図 3.3: Cómodo gear i3 ([45] より引用)

3.3 熱的快適性予測のための特徴量とデータ前処理

各実験終了後、図 3.4 に示すように示すように、E4 リストバンドからスマートフォンに同期された生体情報は、E4 コネクトというクラウドに CSV 形式でアップロードされた。その後、PPG センサのノイズを除去したのち、52 個の特徴量を抽出した。

本研究では、熱的快適性予測のための特徴量として、心拍変動指標の時間領域解析と周波数領域解析を選択した。また、心拍変動指標は全て 300 秒の窓サイズのセグメント、30 秒のシフトサイズで計算された。

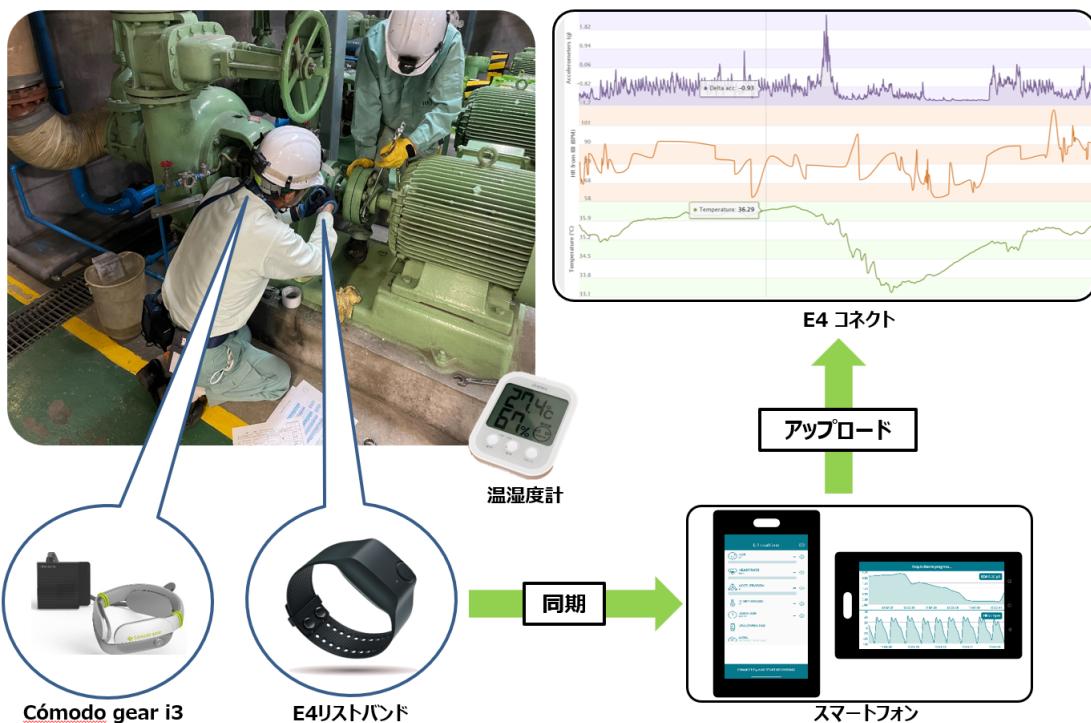


図 3.4: 実験における生体情報の処理

3.3.1 時間領域解析

時間領域の心拍変動指標は、心拍間の時間（心拍間隔）を元に算出されるものであり、計算も理解も容易である。具体的には、平均心拍間隔（Mean R-R interval）、標準偏差（Standard Deviation of NN intervals, SDNN）、および隣接する心拍間隔の差の二乗平均平方根（Root Mean Square of Successive Differences, RMSSD）などが代表的な指標である。これらの指標は心拍間隔の変動を直接表しており、特に SDNN は全体的な変動の大きさを、RMSSD は短期的な変動の大きさを示す。時間領域解析はシンプルでありながら、交感神経と副交感神経の活動バランスを推測する上で有用である。

本研究で使用した時間領域の心拍変動指標の一覧の一部を表 3.1 に示す。

3.3.2 周波数領域解析

周波数領域解析は、心拍間隔の変動を周波数成分に分解して解析する手法である。R-R 間隔の時系列データに対して高速フーリエ変換（FFT）、自己回帰（AR）モデリングによる

アプローチが広く採用されており [46], 低周波成分 (Low Frequency, LF: 0.04~0.15 Hz) や高周波成分 (High Frequency, HF: 0.15~0.40 Hz) を解析するものである。LF成分は交感神経と副交感神経の両方に関連するとされ, HF成分は主に副交感神経の活動に関連すると考えられている。また, LF/HF比は自律神経のバランスを示す指標として用いられることが多い。周波数領域解析により, 時間領域では捉えきれない自律神経の周期的な活動をより詳細に分析することができる。

本研究で使用した周波数領域の心拍変動指標の一覧の一部を表3.2に示す。

表 3.1: 選択した時間領域の特徴の説明

時間領域の指標	説明
NUM_IBIS	NNI の合計値
HRV_MEAN_NNI	全 NNI の平均値
HRV_MEDIAN_NNI	全 NNI の中央値
RANGE_NNI	NNI の最大値と最小値の差
SDSD	隣接する心拍間隔の差の標準偏差
RMSSD	隣接する心拍間隔の差の 2 乗の平均値の平方根
HRV_NNI_50	50 ミリ秒以上離れた NNI の数
HRV_NNI_20	20 ミリ秒以上離れた NNI の数
HRV_pNNI_50	50 ミリ秒以上離れた NNI の割合
HRV_pNNI_20	20 ミリ秒以上離れた NNI の割合
SDNN	各心拍間隔の標準偏差
HRV_SD1	プロット散布図における縦軸方向の標準偏差
HRV_SD2	プロット散布図における横軸方向の標準偏差
HR_MEAN	平均心拍数（1 分間の心拍数で測定）
HR_MIN	心拍数の最小値（1 分間の心拍数で測定）
HR_MAX	心拍数の最大値（1 分間の心拍数で測定）
HR_STD	心拍数の標準偏差
HRV_MEAN	IBI の平均値
HRV_STD	IBI の標準偏差
HRV_MIN	IBI の最小値
HRV_MAX	IBI の最大値
HRV_SKEWNESS	全 IBI の歪度
HRV_KURTOSIS	全 IBI の尖度
HRV_PEAKS	IBI のピーク値
HRV_Energy	IBI から算出されるエネルギー
HRV_CVSD	連続した心拍間隔の差の変動係数
HRV_n_Above_Mean	平均値以上の IBI の数
HRV_n_Below_Mean	平均値以下の IBI の数
HRV_IQR	IBI の 25% から 75% までの四分位範囲
HRV_Entropy	IBI のエントロピー
HRV_RMS	隣接する NNI の差の 2 乗和の平均の平方根

表 3.2: 選択した周波数領域の特徴の説明

周波数領域の指標	説明
HRV_VLF	0.0033~0.04Hz の周波数帯のパワースペクトル
HRV_LF	0.04~0.15Hz の周波数帯のパワースペクトル
HRV_HF	0.15~0.4Hz の周波数帯のパワースペクトル
HRV_LF_HF_RATIO	LF (低周波) と HF (高周波) のパワーの比率
TP	周波数 0~0.4Hz のパワースペクトルのトータルパワー
HRV_LFn	低周波数領域 (LF) の HRV の正規化
HRV_HFn	高周波数領域 (HF) の HRV 正規化

3.4 多様な環境での実験

本研究では、3つの異なる実験環境において段階的に実験を行った。これらの実験は、「実験室における実験」から「現場における実験」、さらに「熱中症経験者のいる現場での実験」へと進展し、各実験環境における熱的快適性の評価を行った。以下に、各実験環境における具体的な内容について詳述する。

本研究で収集したデータは、川崎市環境局環境対策部 地域環境共創課および（株）富士通ゼネラルの立会いの下入手した。また、実験担当者は、臨床研究に携わる人のeラーニングサイト「ICR 臨床研究入門」にて、「研究倫理と被験者保護」および「人を対象とする医学系研究に関する倫理指針」を履修している。また、本実験は、青山学院大学理工学部ライフサイエンス委員会の「人に係る研究」に関する審査・承認を受け実施され（承認番号 H21-009-1），被験者は実験説明を受け、実験に対する同意書による同意をもって、実験に参加頂いている。

3.4.1 実験室における実験

実験室内での実験では、温度や湿度といった環境因子を制御できる実験室を用い、熱的快適性に関する基礎データを収集した。実験条件は、読書、転写、ラジオ体操という3つの活動に基づき、主に高温環境に焦点を当てたさまざまな条件を設定した。例えば、ラジオ体操では、高温状態（温度 32°C, 湿度 80%）および温暖状態（温度 25°C, 湿度 60%）の条件でデータを収集した。各条件は、図 3.1 に示す温熱感覚の尺度「普通(neutral)」「少し暖かい(slightly warm)」「暖かい(warm)」「暑い(hot)」に従って調整された。

各活動は、日常生活と関連付けて設定されたものである。例えば、読書やテレビ鑑賞は読書活動に、仕事におけるデスクワークや座学は転写活動に、工場や屋外での力作業はラジオ体操活動にそれぞれ対応している。実験一例としてラジオ体操の様子を図 3.5 に示す。

また、各実験条件の詳細を表 3.3 に示す。



図 3.5: 実験室における実験の様子（ラジオ体操）

表 3.3: データ収集条件

実験番号	活動	温度	湿度	期間
1	ラジオ体操	32°C	80%	10 分
2	ラジオ体操	25°C	60%	10 分
3	読書	25°C	60%	15 分
4	読書	32°C	80%	15 分
5	読書	27°C	60%	15 分
6	読書	32°C	80%	15 分
7	転写	32°C	80%	15 分
8	転写	27°C	60%	15 分

実験は午前と午後にそれぞれ 1 日 2 グループに対して実施し、1 回の実験でのデータ収集は最大 3 名までとした。図 3.6 に年齢と性別の分布を示す成人男女 44 名を対象に、4 つの温湿度環境および 3 つの作業条件下で、E4 リストバンド [43] を装着させ、連続的な脈拍間隔を測定した。

図 3.7 は、データセットに含まれる 4 つの温度状態を示しており、「warm」および「slightly warm」における記録数が他の温度状態と比較して非常に多かった。

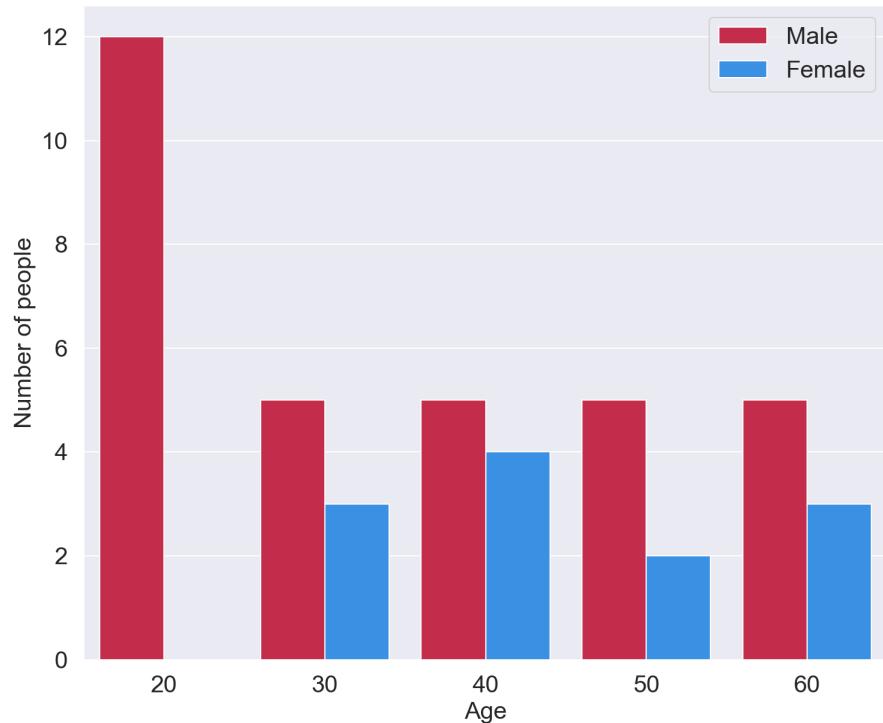


図 3.6: 被験者の年齢と性別の分布

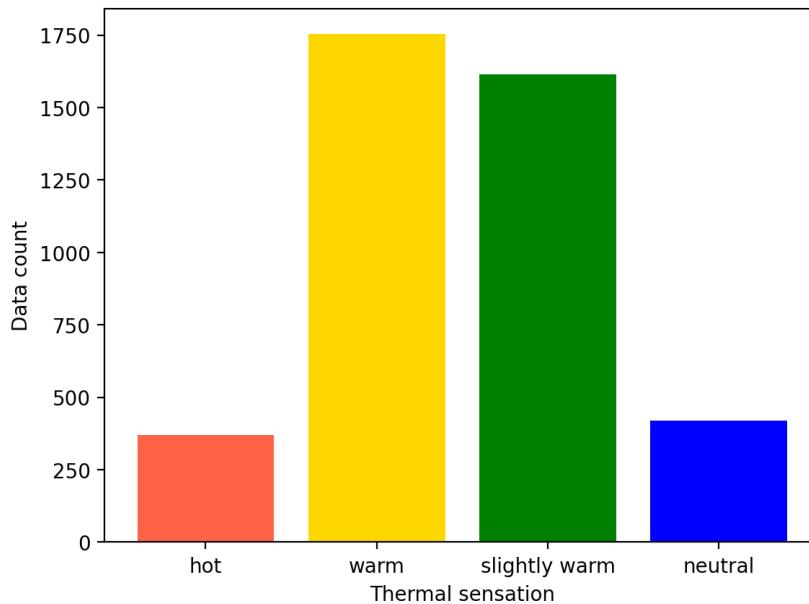


図 3.7: 実験室実験における PMV を用いた温熱感覚のデータセットの量

3.4.2 現場における実験

3.4.1 項の結果は統制された環境で得られたものであり、そのまま実際の現場環境に適用するには限界があるため、実験室を離れた実運用下での分類精度の妥当性と実用性を評価する必要がある。作業現場では、実験室のように環境因子を厳密に制御することが困難であるが、より現実的な条件下でデータを取得することが可能である。作業現場での実験

では、製造工場や建設現場など温熱環境が異なる8つの作業現場を選定しデータを収集した。実験一例として入江崎クリーンセンターにおける様子を図3.8に示す。

また、各現場の詳細を表3.4に示す。



図3.8: 入江崎クリーンセンターにおける実験の様子（作業場点検）

表3.4: 各実験場所の詳細

実験場所	作業内容	平均温度	平均湿度	実験時間
入江崎クリーンセンター	屋内・外での作業場点検	34.9°C	44.7%	3時間
川崎市環境総合研究所 多摩川イベント	屋外での誘導および受付	36.9°C	47.5%	6時間
セントラル硝子（株）	屋内での粉溶解および充填作業	29.4°C	64.2%	3時間
（株）レゾナック	屋内での清掃	33.7°C	69.7%	3時間
富士通ゼネラルサマーフェスティバル	屋外での会場設営および誘導	30.4°C	72.8%	6時間
浮島処理センター資源化処理施設	屋内での機器点検	33.8°C	57.7%	3時間
久地小学校給食調理場	屋内での清掃	33.1°C	56.6%	3時間
入江崎クリーンセンター	屋外での草刈りおよび清掃	31.0°C	68.2%	3時間

作業者には、日常的な作業を実施してもらい、その際に脈拍間隔と熱的快適性の評価を行った。実験はフィードバック手法の検討として頸部冷却ありの状態と頸部冷却なしの状態でそれぞれ同じ作業を実施した。図3.9は、入江崎クリーンセンターにおける実験手順のタイムテーブルである。

8:30	9:00	9:30	10:15	10:30	11:15	11:45
入江崎様 到着	実験説明・準備	現場実験①	15分休憩	現場実験②	実験終了	終了
入口→控室	会議室	作業現場	作業現場	作業現場	会議室	—
・施設内点検 ・朝礼	朝礼終了後、 実験機器装着	・現場作業	・休憩 ・コモドギア入替	・現場作業	全機器外し 終了	・出口へ移動 解散

図 3.9: 入江崎クリーンセンターにおける実験手順のタイムテーブル例

被験者は 20 代から 60 代までの幅広い年齢層から選定し、合計 51 名（男性 48 名、女性 3 名）で構成された。図 3.10 は、データセットに含まれる 3 つの温度状態を示しており、「warm」における記録数が他の温度状態と比較して非常に多かった。

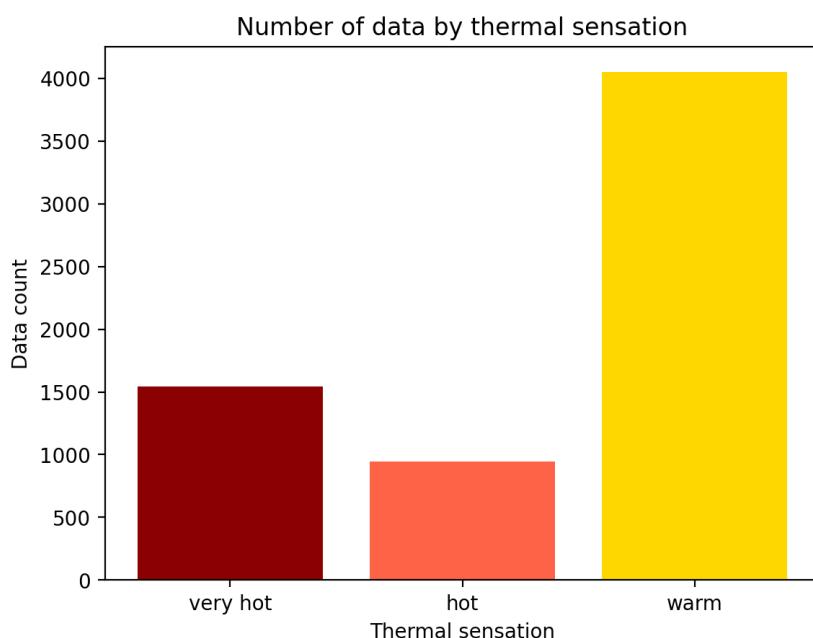


図 3.10: 現場実験における拡張した PMV を用いた温熱感覚のデータセットの量

3.4.3 熱中症経験者のいる現場での実験

過去に熱中症経験者が発生した作業現場を対象に、さらに実用的な実験を実施した。この実験では、特に PMV の値が 2.5 を超え、多くの状態が「very hot」や「hot」と評価される厳しい温熱環境下での作業を対象とした。

熱中症経験者のいる現場での実験では、野口工業（株）において 3 つの異なる作業に対してデータを収集した。実験一例として、プレス加工を行っている様子を図 3.11 に示す。

また、各作業の詳細を表 3.5 に示す。



図 3.11: プレス加工を行っている様子

表 3.5: 各作業の詳細

作業内容	平均温度	平均湿度	実験時間
プレス加工	32.6°C	63.4%	6 時間
溶接	35.3°C	55.2%	6 時間
フォークリフト	34.7°C	59.1%	6 時間

作業者には、日常的な作業を実施してもらい、その際に脈拍間隔と熱的快適性の評価を行った。対象とした野口工業（株）の現場は、暑い環境での作業が常態化している。このため、頸部冷却を実施しないデータを取得することは安全性の観点から危険であると判断し、実験は頸部冷却を実施した状態でのみ実施した。図 3.12 は、野口工業（株）における実験手順のタイムテーブルである。

AM9:30 到着	AM10:00-10:10 センサー装着	AM10:10-12:00 データ取得①	PM12:00-12:40 休憩	PM13:00-15:00 データ取得②	PM15:00-15:10 休憩	PM15:10-17:00 データ取得③	PM17:00-17:15 終了
-	センサー装着 主観評価回答	通常業務	主観評価回答	通常業務	休憩 主観評価回答	通常業務	センサー返却 主観評価回答
現地到着 休憩室へ移動 準備	説明 装着サポート 温湿度計設置	休憩室で待機 現場の確認	(スマホ回収・充電・ 返却) 主観評価取得 データ送付	休憩室で待機 現場の確認	主観評価取得	休憩室で待機 現場の確認	センサー回収 主観評価取得

図 3.12: 野口工業（株）における実験手順のタイムテーブル

被験者は 30 代から 50 代の男性 5 名の被験者を対象に構成された。被験者のうち 3 名は

過去に熱中症を経験しており、このことからも本実験が行われた環境が特に暑い環境であることが示唆される。

また、収集したデータのラベルにおいては、図 3.13 に示すように「very hot」と「hot」と評価されるデータのみであり、この環境の特性を反映したものとなっている。

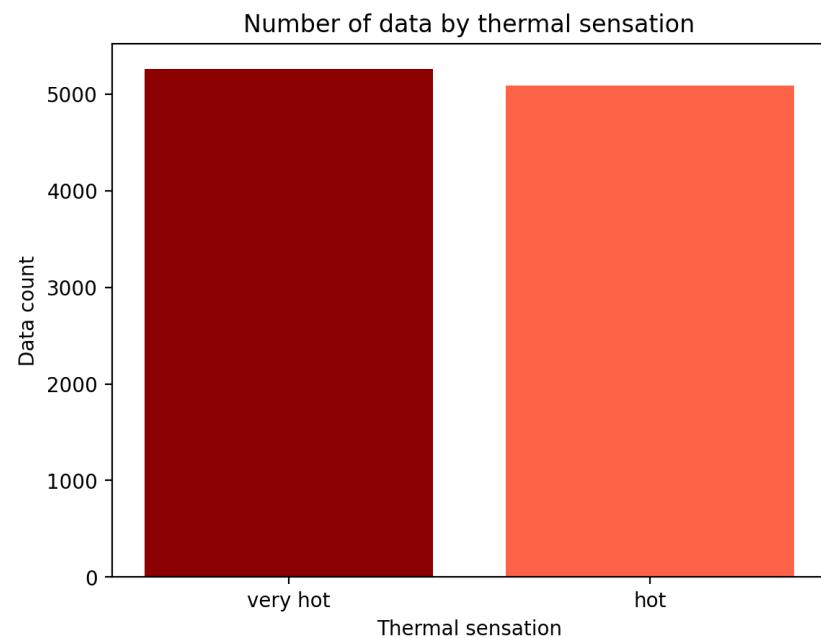


図 3.13: 热中症経験者のいる現場実験における拡張した PMV を用いた温熱感覚のデータセットの量

第4章 热的快適性の予測

4.1 実験室から得られたデータの検証

4.1.1 元データを活用した分類性能の検証

表4.1に、実験室におけるデータセット（サンプル数6623）を用いたExtra Tree, Random Forest, およびGradient Boostingの評価結果を示す。

機械学習において、汎化性能を評価するための方法として、グループ5分割交差検証を用いた。5分割交差検証とは、データセットを5個に分割して、そのうち1つをテストデータに、残りを学習データとして評価を行うものである。最後に分割した回数で割ることで、平均を算出する。さらに、今回は訓練データとテストデータの両方に同じ被験者のデータが含まれることを避けている。

表 4.1: 実験室における分類モデルの比較

Model	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
Extra Tree	47.24	41.36	39.56
Random Forest	47.68	41.74	40.20
Gradient Boosting	47.12	41.64	40.99

学習機としてExtra Tree, Random Forest, Gradient Boostingで推定したうち、最もF1値の精度が高かったGradient Boostingでの各温熱感覚の評価指標を表4.2に示す。

また、実験室において収集されたデータをもとに、Gradient Boostingを用いて熱的快適性を予測した結果の混同行列を図4.1に示す。

表 4.2: 実験室におけるGradient Boostingによる各温熱感覚の評価指標

Thermal Sensation	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
neutral	5.91	18.52	8.96
Slightly warm	17.29	34.78	23.10
warm	79.60	50.89	62.09
hot	16.50	42.80	23.81

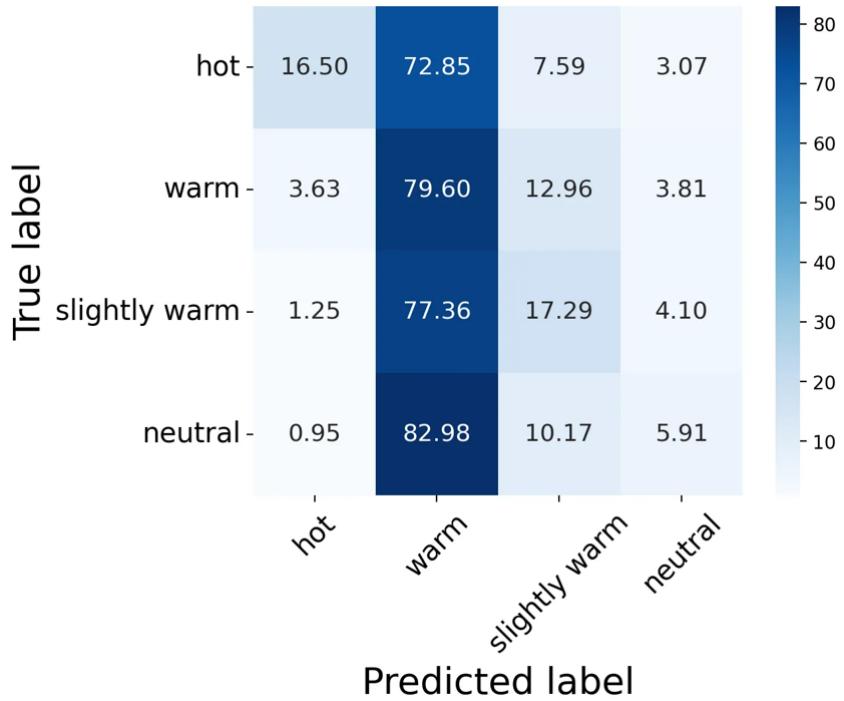


図 4.1: 実験室における Gradient Boosting による熱的快適性の予測（単位：%）

これらの結果から、図 3.7 に示したデータセットのラベル分布における不均衡がモデルの性能に影響を与えていていると考えられる。特に、温熱感覚の「warm」のサンプル数が他のラベルに比べて非常に多いことが、表 4.2 で示されるように、このラベルに対する Recall や Precision および F1 値が他のラベルよりも高くなる原因と考えられる。一方で、「neutral」や「hot」のようにサンプル数が少ないラベルでは、これらの指標が低い結果となっている。

図 4.1 の混同行列を見ると、モデルは「warm」ラベルを他のラベルと比較して高い割合で予測しており、逆に「neutral」や「hot」ラベルのサンプルは「warm」に誤分類される傾向が確認できる。これは、ラベル数の不均衡がモデルの学習バイアスを引き起こし、多数派クラスに対して高い予測精度を示す一方、少数派クラスに対しては性能が低下することを示している。

4.1.2 オーバーサンプリング適用後の分類性能の検証

ラベル分布の不均衡を対処するために、データセットに含まれるラベル数の不均衡を解消するオーバーサンプリング手法の 1 つである BorderlineSMOTE を使用し 4 種類のラベル数を等しくした。

表 4.3 には、実験室において収集されたデータに対し、オーバーサンプリングを適用したデータセット（サンプル数 13336）を用いた Extra Tree, Random Forest, および Gradient Boosting の評価結果を示す。

表 4.3: 実験室における分類モデル性能の比較（オーバーサンプリングの適用後）

Model	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
Extra Tree	67.05	65.20	64.63
Random Forest	66.02	64.15	63.90
Gradient Boosting	57.32	56.14	56.05

表 4.3 より、オーバーサンプリング適用後、Recall, Precision, F1 値が全体的に向上している。特に、Extra Tree では F1 値が約 25% 上昇し、Random Forest や Gradient Boosting においても同様の傾向が見られる。

学習機として Extra Tree, Random Forest, Gradient Boosting で推定したうち、最も F1 値の精度が高かった Extra Tree での各温熱感覚の評価指標を表 4.4 に示す。

また、実験室においてオーバーサンプリングを実施したデータをもとに、Extra Tree を用いて熱的快適性を予測した結果の混同行列を図 4.2 に示す。

表 4.4: 実験室における Extra Tree による各温熱感覚の評価指標（オーバーサンプリングの適用後）

Thermal Sensation	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
neutral	82.39	69.72	75.53
Slightly warm	67.13	61.59	64.24
warm	27.89	55.29	37.08
hot	90.79	74.19	81.66

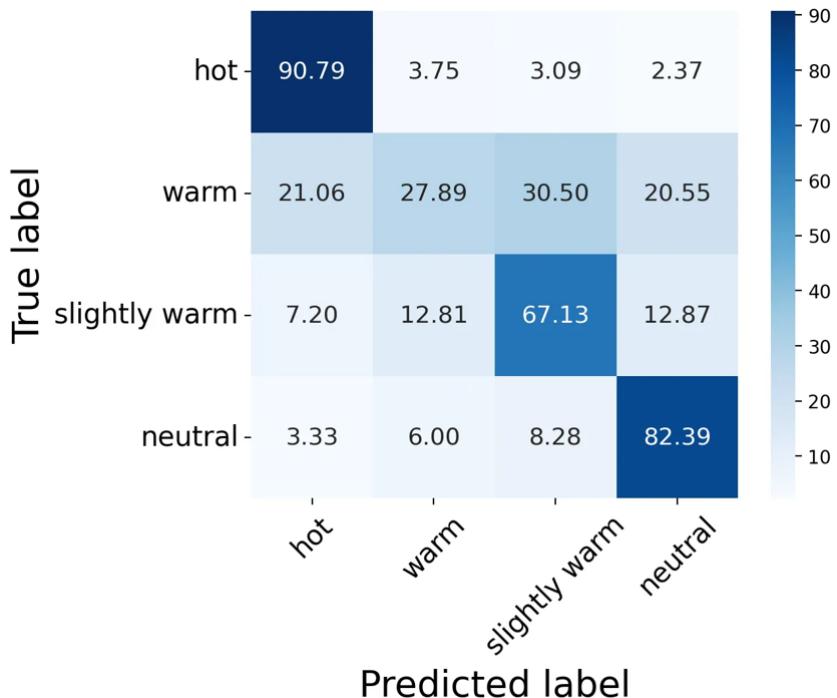


図 4.2: 実験室における Extra Tree による熱的快適性の予測（オーバーサンプリングの適用後, 単位: %)

表4.4をオーバーサンプリング適用前（表4.2）と比較すると, F1 値に以下のような変化が見られた。

まず, 「neutral」 クラスにおいては, 適用前の F1 値が 8.96% であったのに対し, 適用後は 75.53% へと大幅に改善している。同様に, 「slightly warm」 クラスの F1 値も, 適用前の 23.10% から 64.24% へと大きく向上した。また, 「hot」 クラスに関しても, 適用前の F1 値 23.81% から適用後は 81.66% へと著しい改善が確認された。

一方, 「warm」 クラスに関しては, 適用前の F1 値 62.09% から適用後は 37.08% へと減少している。これは, 少数派クラスである他の温熱感覚を区別する性能が向上する一方で, 多数派クラスである「warm」 の優位性が相対的に低下した結果と考えられる。

このことから, オーバーサンプリングの適用により, 少数派クラス (neutral, slightly warm, hot) の予測性能が大幅に向上し, データセット全体のクラス間バランスが改善されたことが示された。

図 4.2 の混同行列から, 「hot」 および「neutral」 のクラスにおいては, 真のラベルと予測ラベルが一致する割合がそれぞれ 90.79% および 82.39% と高く, 極端な温熱状態の分類精度が優れていることが確認された。特に, 热中症の予防に最も重要である「hot」 の分類精度が 90.79% と非常に高い点は, 本研究で構築したモデルが热的危険状態を適切に検出できる可能性を示している。一方, 「warm」 と 「slightly warm」 のクラスでは, 誤分類の割合が相対的に高く, 特に「warm」 の 30.50% が 「slightly warm」 と混同されるなど, 中間的な温熱感覚の区別が困難であることが示唆された。

4.2 現場から得られたデータの検証

4.2.1 元データを活用した分類性能の検証

表 4.5 に、現場におけるデータセット（サンプル数 3171）を用いた Extra Tree, Random Forest, および Gradient Boosting の評価結果を示す。

表 4.5: 現場における分類モデルの比較

Model	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
Extra Tree	47.59	39.01	42.72
Random Forest	50.65	40.46	44.47
Gradient Boosting	39.55	39.72	39.63

学習機として Extra Tree, Random Forest, Gradient Boosting で推定したうち、最も F1 値の精度が高かった Random Forest での各温熱感覚の評価指標を表 4.6 に示す。

また、現場において収集されたデータをもとに、Random Forest を用いて熱的快適性を予測した結果の混同行列を図 4.3 に示す。

表 4.6: 現場における Random Forest による各温熱感覚の評価指標

Thermal Sensation	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
warm	79.91	60.67	68.97
hot	0.47	0.96	0.63
very hot	6.13	12.28	8.17

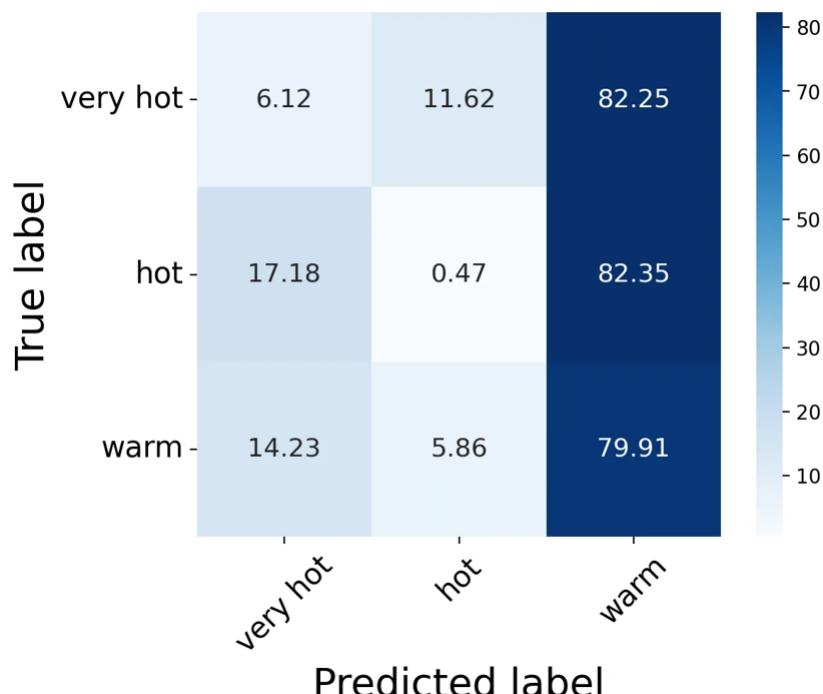


図 4.3: 現場における Random Forest による熱的快適性の予測（単位：%）

これらの結果から、図 3.10 に示したデータセットのラベル分布における不均衡がモデルの性能に影響を与えていていると考えられる。4.1.1 項と同様に、温熱感覚の「warm」のサンプル数が他のラベルに比べて非常に多いことが、表 4.6 で示されるように、このラベルに対する Recall や Precision および F1 値が他のラベルよりも高くなる原因と考えられる。一方で、「hot」や「very hot」のようにサンプル数が少ないラベルでは、これらの指標が低い結果となっている。

また、図 4.3 の混同行列を見ると、モデルは「warm」ラベルを他のラベルと比較して高い割合で予測しており、逆に「hot」や「very hot」ラベルのサンプルは「warm」に誤分類される傾向が確認できる。

4.2.2 オーバーサンプリング適用後の分類性能の検証

表 4.7 には、現場において収集されたデータに対し、オーバーサンプリングを適用したデータセット（サンプル数 5838）を用いた Extra Tree, Random Forest, および Gradient Boosting の評価結果を示す。

表 4.7: 現場における分類モデル性能の比較（オーバーサンプリングの適用後）

Model	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
Extra Tree	68.60	68.96	67.87
Random Forest	67.39	67.70	66.93
Gradient Boosting	60.95	61.58	60.91

表 4.7 より、オーバーサンプリング適用後、Recall, Precision, F1 値が全体的に向上している。特に、Extra Tree では F1 値が約 25% 上昇し、Random Forest や Gradient Boosting においても同様の傾向が見られる。

学習機として Extra Tree, Random Forest, Gradient Boosting で推定したうち、最も F1 値の精度が高かった Extra Tree での各温熱感覚の評価指標を表 4.8 に示す。

また、現場においてオーバーサンプリングを実施したデータをもとに、Extra Tree を用いて熱的快適性を予測した結果の混同行列を図 4.4 に示す。

表 4.8: 現場における Extra Tree による各温熱感覚の評価指標（オーバーサンプリングの適用後）

Thermal Sensation	Recall[%]	Precision[%]	F1[%]
warm	48.46	68.63	56.81
hot	76.62	74.33	75.46
very hot	80.73	63.91	71.34

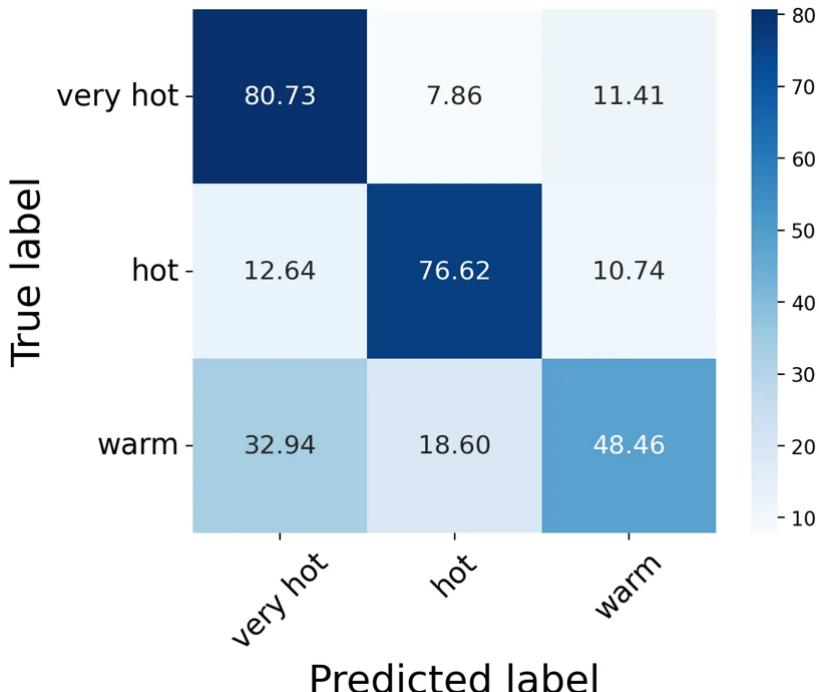


図 4.4: 現場における Extra Tree による熱的快適性の予測（オーバーサンプリングの適用後, 単位 : %)

表4.8をオーバーサンプリング適用前（表4.6）と比較すると, F1 値に以下のような変化が見られた。

まず, 「hot」 クラスにおいては, 適用前の F1 値が 0.63% であったのに対し, 適用後は 75.46% へと大幅に改善している。同様に, 「very hot」 クラスの F1 値も, 適用前の 8.17% から 71.34% へと大きく向上した。

一方, 「warm」 クラスに関しては, 適用前の F1 値 68.97% から適用後は 56.81% へと減少している。これは, 少数派クラスである他の温熱感覚を区別する性能が向上する一方で, 多数派クラスである「warm」 の優位性が相対的に低下した結果と考えられる。

このことから, オーバーサンプリングの適用により, 少数派クラス (hot, very hot) の予測性能が大幅に向上し, データセット全体のクラス間バランスが改善されたことが示された。

図 4.4 の混同行列から, 「very hot」 および「hot」 のクラスにおいては, 真のラベルと予測ラベルが一致する割合がそれぞれ 80.73% および 76.62% と高く, 極端な温熱状態の分類精度が優れていることが確認された。一方, 「warm」 の 32.94% が「very hot」として分類されるなど, 中間的な温熱感覚における誤分類が目立つ結果となった。現場では環境因子の統制が難しいことにより, 実験室と比較してデータのばらつきが大きくなり, 特に中間的な温熱状態（「warm」）の分類に影響を及ぼしている可能性が考えられる。それにもかかわらず, 「very hot」 および「hot」 の分類精度が高い点は, 热中症のリスクが高い状態を適切に検出できる可能性を示しており, 本モデルの実用性を支持する結果といえる。

現場実験で収集したデータのうち, 頸部冷却を行わない条件下で得られたデータに対してオーバーサンプリングを適用し, これを Extra Tree モデルの学習に使用した。その結果, 頸部冷却を実施した条件下における熱的快適性を予測した結果を図 4.5 に示す。

混同行列は図 4.5 に示すように全体的に右寄りの傾向を示した。具体的には、本来「very hot」や「hot」に分類されるデータが、機械学習を用いて「warm」と分類される割合が増加している。この右寄りの傾向は、頸部冷却により生体反応の熱的リスクが低下した可能性を示している。

また、頸部冷却を行わないデータで学習したモデルは、その条件下で高い分類精度を示していることから、今回の混同行列に示される右寄りの分類結果の信頼性は高いと考えられる。すなわち、頸部冷却により被験者の生体反応が「very hot」や「hot」から「warm」へと軽減される傾向が明確に示されており、熱中症リスクの低減に寄与する可能性が強く示唆される。

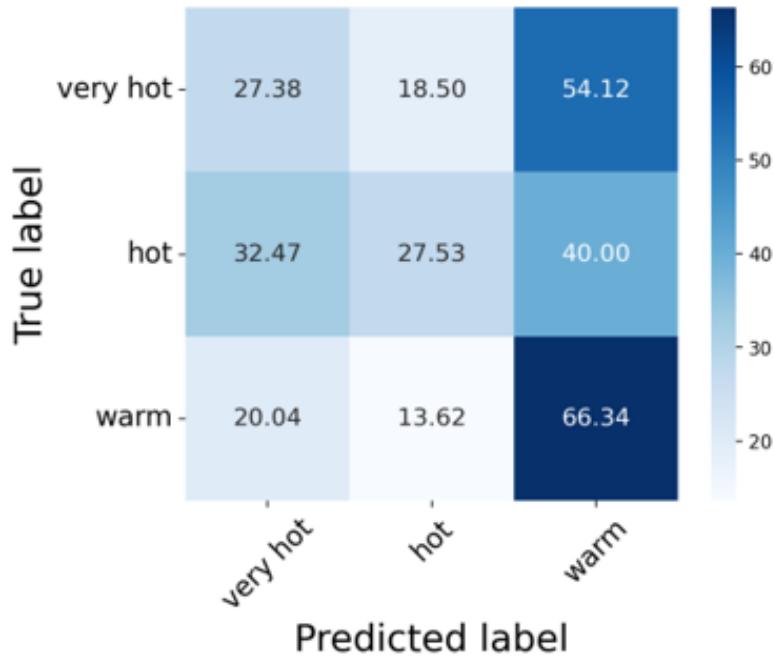


図 4.5: 現場における頸部冷却ありの熱的快適性の予測（単位：%）

4.3 熱中症経験者のいる現場から得られたデータの検証

現場実験で収集したデータのうち、頸部冷却を行わない条件下で得られたデータと実験室で収集したデータに対してオーバーサンプリングを適用し、これを Extra Tree モデルの学習に使用した。その結果、熱中症経験者のいる現場実験において収集された頸部冷却を実施した条件下における熱的快適性を予測した結果を図 4.6 に示す。

混同行列は全体的に右寄りの傾向を示しており、具体的には、真値が「very hot」や「hot」であるデータの一部が「warm」や「slightly warm」と予測される割合が増加している。この右寄りの傾向は、頸部冷却によって被験者の生理的負担が軽減し、熱中症リスクが低下した可能性を示唆している。

一方で、真値が「hot」であるにもかかわらず「very hot」と予測されるケースも一部観察された。この結果は、モデルが頸部冷却の影響を十分に反映できていないことや、個体差やデータのばらつきが影響している可能性が考えられる。

また、頸部冷却が十分に効果を発揮しない状況や外部環境の要因も誤分類の原因として挙げられる。

それにもかかわらず、今回の結果は頸部冷却が「very hot」や「hot」といった極端な熱的状態を軽減し、「warm」や「slightly warm」へと熱的快適性を改善する傾向を示しており、熱中症リスクの低減に寄与する可能性を示唆するものといえる。

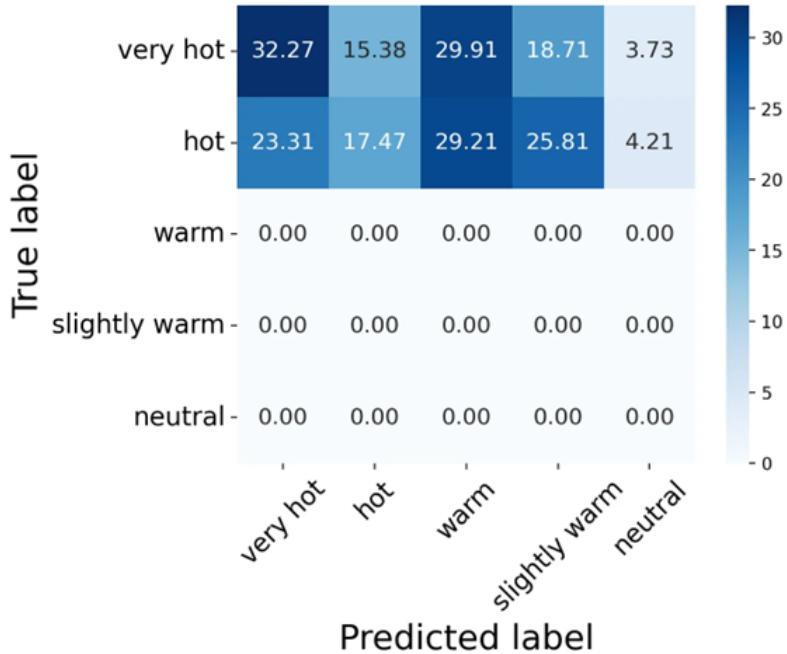


図 4.6: 热中症経験者のいる現場における熱的快適性の予測（単位：%）

また、データセットを熱中症経験者と非経験者に分け、それぞれ評価に用いた混同行列を図 4.7 および図 4.8 に示す。混同行列を見ると、全体的な分類の傾向として、熱中症経験者においては、真値が「very hot」や「hot」であるデータが「warm」や「slightly warm」、さらには「neutral」へと右側に分類される割合が一定数確認された。一方、非経験者の場合、「very hot」や「hot」と分類される割合が経験者より高く、「warm」への移動が特に顕著であった。しかし、それより右側である「slightly warm」や「neutral」への移動は少なく、右寄りの分類傾向は限定的であった。

具体的には、図 4.7（熱中症経験者）においては、真値が「very hot」の場合に「slightly warm」への分類割合が 23.10%，「neutral」への分類割合が 4.84% と、非経験者（図 4.8）における「slightly warm」への分類割合が 9.02%，「neutral」への分類割合が 1.28% と比べ、高い結果が得られた。

また、真値が「hot」の場合も、経験者では「slightly warm」や「neutral」への分類が見られたが、非経験者では「warm」への分類が集中していた。

これらの結果から、頸部冷却による全体的な右寄りの分類傾向は熱中症経験者のほうが強く示されていることが分かる。これは、熱中症経験者が過去の経験により生理的適応が異なるため、頸部冷却の効果がより顕著に現れる可能性を示唆している。

また、非経験者の場合は「warm」への分類が集中しており、冷却効果は一定程度確認できるものの、分類が「slightly warm」や「neutral」に至る割合は低いことが示された。

以上の結果より、頸部冷却は特に熱中症経験者に対して顕著な効果を発揮し、生体反応の熱的負荷を低減させる可能性が高いことが示唆される。

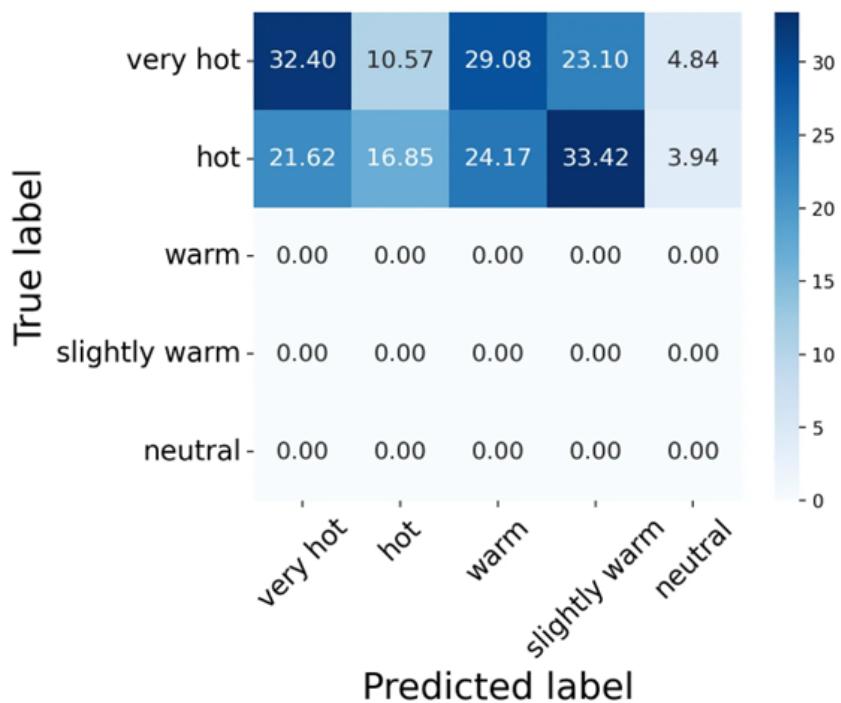


図 4.7: 热中症経験者における熱的快適性の予測（単位：%）

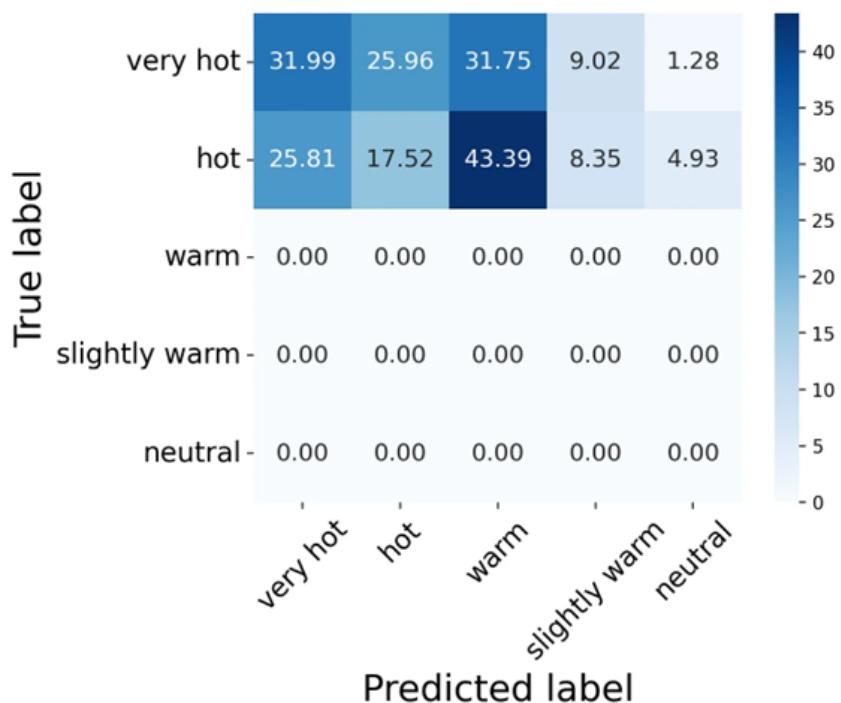


図 4.8: 热中症非経験者における熱的快適性の予測（単位：%）

第5章 自律型リアルタイム推定システムの検討

本章では、スマートウォッチを用いた自律型リアルタイム推定システムの開発を行う。このシステムは、取得したデータをクラウドサーバに送信し、クラウド側で推定を行った結果を受信する方式ではなく、デバイス単体で完結するリアルタイムなデータ処理およびフィードバックを実現するものである。現場においては、インターネット環境が整っていない場合が多く、クラウドサーバを利用したデータ処理が困難であるという課題が存在する。

また、Empatica 社製 E4 リストバンドは、スマートフォンを携帯しながら作業を行う必要があるが、携帯電話の持ち運びが難しい環境や作業の妨げとなる状況が想定される。これらの課題を解決するために、スマートウォッチを用いた自律型システムの構築は現場実用性の向上に寄与すると考えられる。特に、リアルタイムなフィードバックが可能となることで、使用者が即時に対応を取ることができ、安全性や作業効率の向上が期待される。

5.1 E4 リストバンドとスマートウォッチから得られるデータの比較

Empatica E4 リストバンドとスマートウォッチの心拍間隔データを比較することは、推定精度を確保する上で重要である。特に、スマートウォッチから取得できる心拍間隔の情報を、Empatica E4 リストバンドから得られる心拍間隔データに可能な限り近づけることが必要不可欠である。これは、両デバイスから得られるデータが近づけば、心拍間隔に関連した特徴量として用いる推定モデルの性能を維持し、正確なリアルタイム推定を可能にするためである。

5.1.1 使用するスマートウォッチ

推定するために使用したスマートウォッチは、図 5.1 に示す Polar 社製の「M600」(Wear OS by Google) である [47]。このスマートウォッチは、フィットネスおよびスポーツ用途を主目的として設計されており、音楽再生、健康管理、ライフスタイルの追跡、コミュニケーション機能など、多様なニーズに対応可能な機能を有する。搭載センサは、心拍センサ、加速度センサ、周辺光センサ、ジャイロスコープ、バイブルーションモータ、およびマイクで構成されている。特に心拍センサには光学式心拍測定技術が採用されており、精度の高い測定が可能である。

Polar M600 スマートウォッチでは、心拍に関連したデータを取得することが可能であり、これをもとに心拍間隔を算出することで、Empatica E4 リストバンドを用いた際に推定された指標と同等のデータを得ることができる。



図 5.1: Polar 社製 M600 Wear OS by Google

5.1.2 使用するデータ

本比較においては、平均温度約 28°C、平均湿度約 60% の室内環境で 1 時間タイピングを行った際のデータを用いた。Empatica E4 リストバンドにより取得された心拍間隔 (RRI) と、Polar M600 スマートウォッチから取得された心拍情報をもとに計算された心拍間隔の分布を図 5.2 および図 5.3 に示す。E4 リストバンドのデータ（図 5.2）は、平均が約 800 ms 付近で正規分布に近い形状を示しており、全体的に分布が滑らかである。一方、Polar M600 のデータ（図 5.3）は、800 ms 付近では E4 リストバンドと同様にピークが見られるものの、1000 ms から 1500 ms 付近にかけてもう一つのピークが観測されており、心拍間隔の分布に明らかな特徴の違いがある。特に、1500 ms 付近の突出は異常値が含まれている可能性を示唆している。

また、それぞれの心拍情報に基づき 6 つの特徴量を算出し、これを用いて熱的快適性を予測した結果を図 5.4 および図 5.5 に示す。

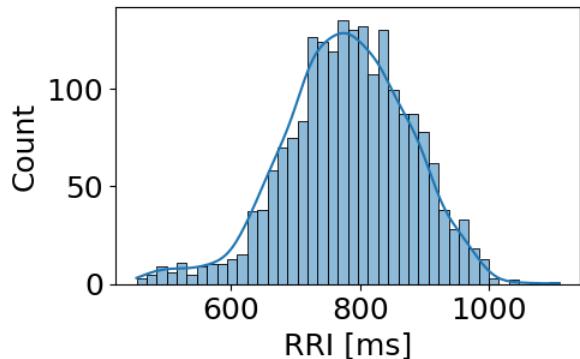


図 5.2: E4 リストバンドによる心拍間隔の分布

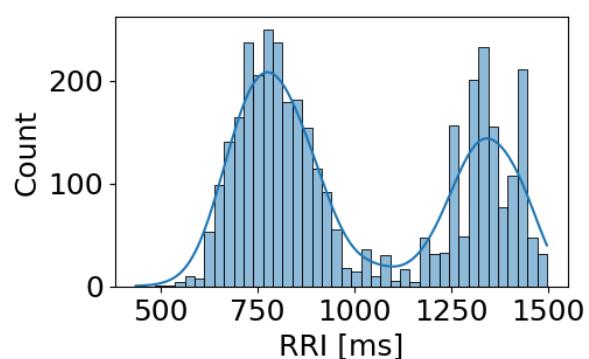


図 5.3: Polar M600 スマートウォッチによる心拍間隔の分布

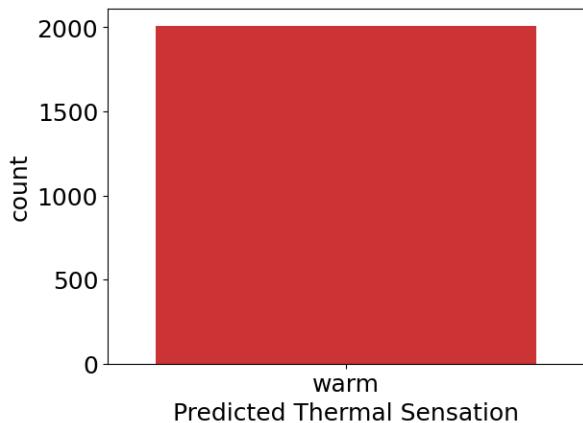


図 5.4: E4 リストバンドによるデータに基づく推定結果

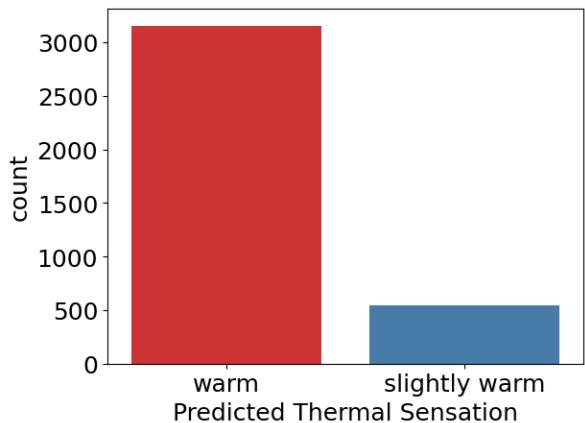


図 5.5: Polar M600 スマートウォッチによるデータに基づく推定結果

5.1.3 フィルターの効果検証

心拍変動指標を用いた解析においては、データの正確性を確保するために異常値を適切に除去するフィルタリング処理が不可欠である。本検証では、2種類のフィルタリング手法を用いて効果を検証した。

まず、1つ目の手法として心拍間隔の値が 250 ms 以上 1200 ms 以下の範囲に収まるデータのみを選別する。この範囲は、通常の人間の心拍数（約 50～240 拍/分）に対応しており、生理学的に異常とされるデータを除外する基準として用いられる。具体的には、250 ms 未満の心拍間隔は頻脈や測定誤差を示す可能性があり、1200 ms を超える心拍間隔は徐脈やノイズによる異常を含む可能性がある。この基準を適用することで、測定データの妥当性を担保することができる。

次に、2つ目の手法として心拍間隔データの分布特性に基づき、平均値 $\pm 3\sigma$ の範囲内に収まるデータのみを選別する。ここで、 σ は標準偏差を表し、データ分布の広がりを示す指標である。心拍間隔データが正規分布に近いと仮定した場合、この範囲には約 99.7% のデータが収まるため、平均値から 3σ を超えるデータは測定誤差や異常値である可能性が高い。これを除外することで、データの品質向上を図ることができる。

以上の2手法は、異なる基準に基づいてデータをフィルタリングするものである。統計的基準に基づく手法は、データ分布の特性を活用して異常値を排除することを目的としており、一方で生理学的基準に基づく手法は、心拍数に基づいて異常なデータを排除することを目的としている。これらの2手法を併せて適用することでフィルタリングを行い、得られたデータをもとにその効果を検証する。

図 5.6 は、フィルタリング後の Polar M600 スマートウォッチによる心拍間隔の分布を示している。

また、図 5.7 は、フィルタリング後の Polar M600 スマートウォッチのデータを用いて推定された熱的快適性の分布を示している。

図 5.6 では、フィルタリングを適用した結果、Polar M600 スマートウォッチの心拍間隔の分布における 1500 ms 付近の突出が排除され、800 ms 付近を中心とした分布形状が E4 リストバンドのデータ（図 5.2）に近づいていることが確認できる。このことは、統計的

および生理学的基準に基づくフィルタリング手法が、データ分布の補正に有効であったことを示している。

さらに、図 5.7 では、フィルタリング後の Polar M600 スマートウォッチのデータを用いた推定結果が、「warm」のみを示す E4 リストバンドの推定結果（図 5.4）により近づいていることが示された。これにより、フィルタリングを施すことで心拍間隔分布のみならず熱的快適性の推定結果においても、E4 リストバンドと一貫性のある結果が得られることが確認された。

これらの結果は、フィルタリング手法の適用によって、Polar M600 スマートウォッチのデータのばらつきや異常値を効果的に補正し、E4 リストバンドとのデータ一致性を向上させることができることを示している。

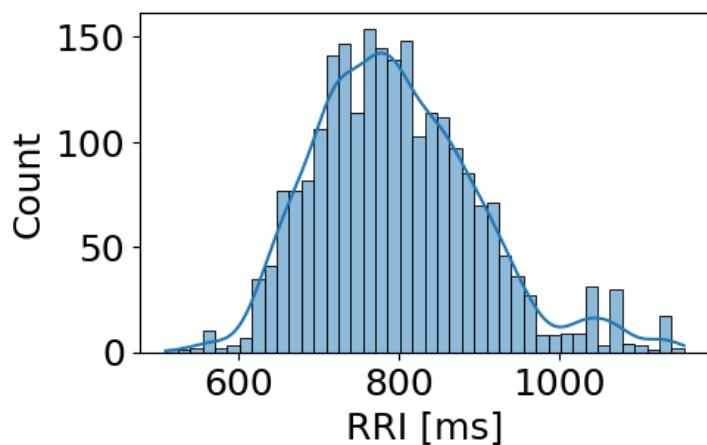


図 5.6: フィルタリング後の Polar M600 スマートウォッチによる心拍間隔の分布

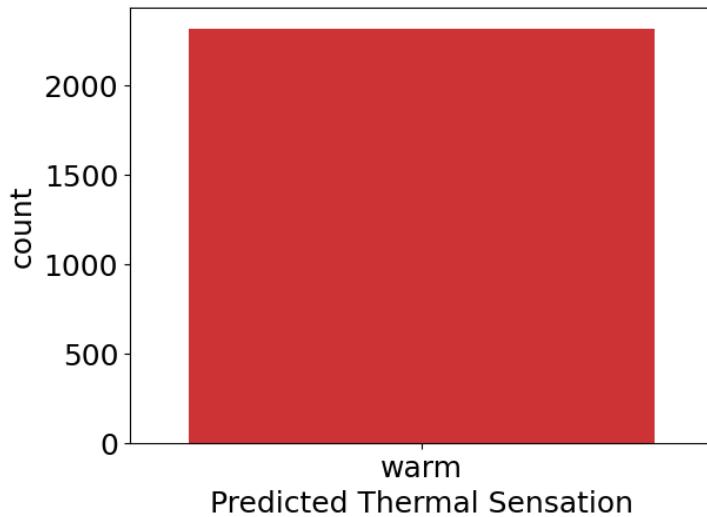


図 5.7: フィルタリング後の Polar M600 スマートウォッチによるデータに基づく推定結果

5.2 Polar M600 スマートウォッチでの推定

5.2.1 Polar M600 スマートウォッチでの推定に用いる特徴量

Polar M600 スマートウォッチを用いたリアルタイム推定に使用する特徴として、6つを選定した。6つの特徴量は、4.2節で使用した Extra Tree を用いた推定結果際の特徴量のうち、5分割交差検証における5通りの重要度で1度でも上位5つに含まれていたものであった。表5.1に、選定された特徴量6つと5分割交差検証における重要度の上位5つに出現した回数を示す。

また、図5.8に、5分割交差検証における1つの分割結果の特徴量重要度を示す。

表 5.1: 各作業の詳細

特徴量	出現回数
HRV_MEDIAN_NNI	5回
HRV_MEAN_hr	5回
HRV_PCT_5	5回
HRV_STD_HR	5回
HRV_MEAN	3回
HRV_MEAN_NNI	2回

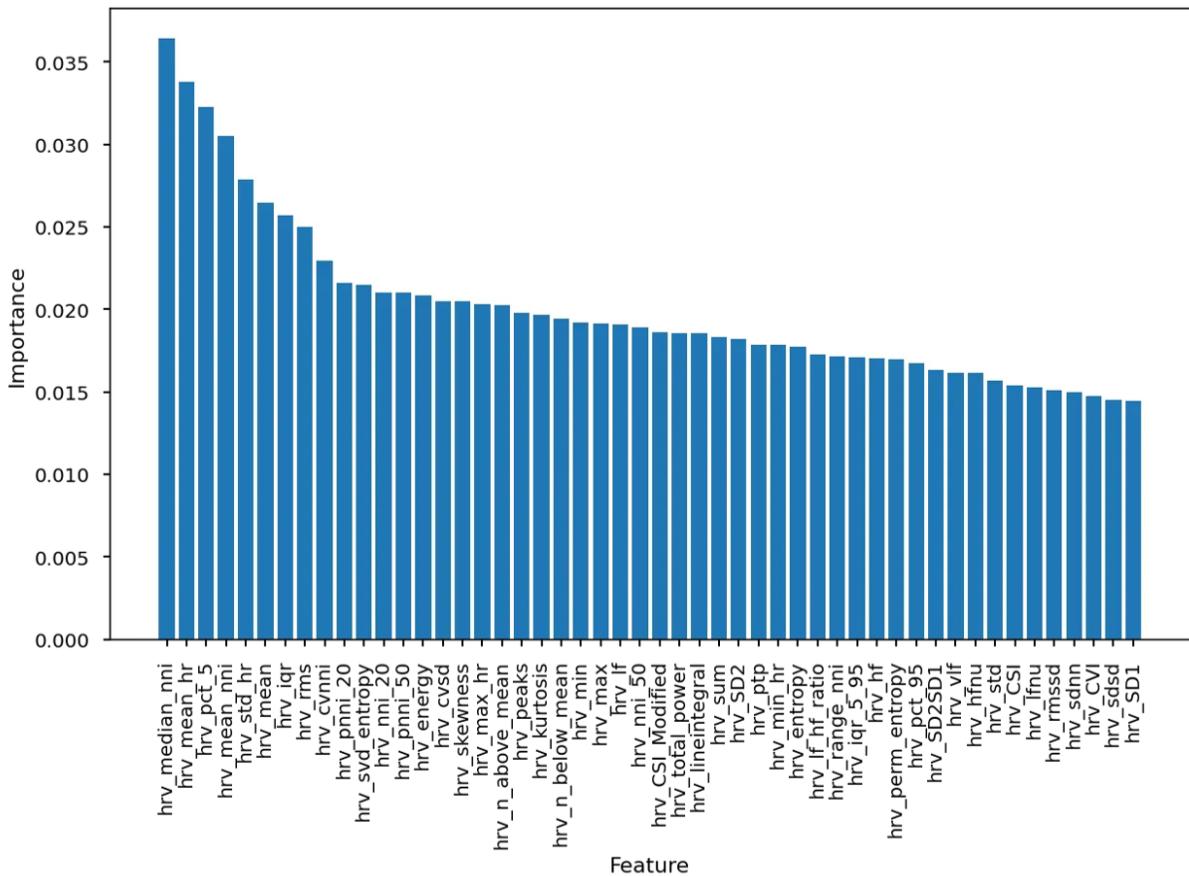


図 5.8: 5分割交差検証における特徴量重要度（分割 1 の結果）

5.2.2 6つの特徴量のみを使用した場合の推定精度

特徴量を選定した6つを使用し、現場実験において収集された頸部冷却なしのデータに基づく機械学習をした熱的快適性予測の結果を図5.9に示す。まず、真値が「very hot」の場合、再現率は56.37%に留まっており、全体の約30.94%が「warm」に誤分類されている。この結果は、「very hot」と「warm」が特徴量の削減により識別が困難になったことを示している。一方で、「hot」との誤分類(12.69%)は相対的に少なく、特定の中間状態における誤分類が抑えられている可能性が考えられる。

次に、真値が「hot」の場合、再現率は 59.87% であり、特徴量を 52 個使用した場合 (76.62%) と比較すると大幅な精度低下が確認できる。

また、「very hot」(19.53%) および「warm」(20.61%) への誤分類が均等に発生しており、「hot」を特徴付ける要素が十分に抽出されていないことが示唆される。

さらに、真値が「warm」の場合、再現率は55.81%であり、30.01%が「very hot」、14.18%が「hot」に誤分類されている。この結果から、「warm」は他の状態と比較して最も広範囲な誤分類を受けており、6つの特徴量では「warm」の特性を十分に表現できていない可能性が高い。

全体として、特微量を6つに限定した場合には、分類性能が全体的に低下し、特に「very hot」と「warm」の識別が困難であることが示された。一方で、リアルタイム処理を想定したモデル軽量化の観点からは、許容可能な範囲での性能維持が確認されたといえる。こ

の結果は、推定モデルにおける特徴量選択の重要性を示唆しており、精度と効率のバランスを考慮した最適な特徴量数の選定が求められる。

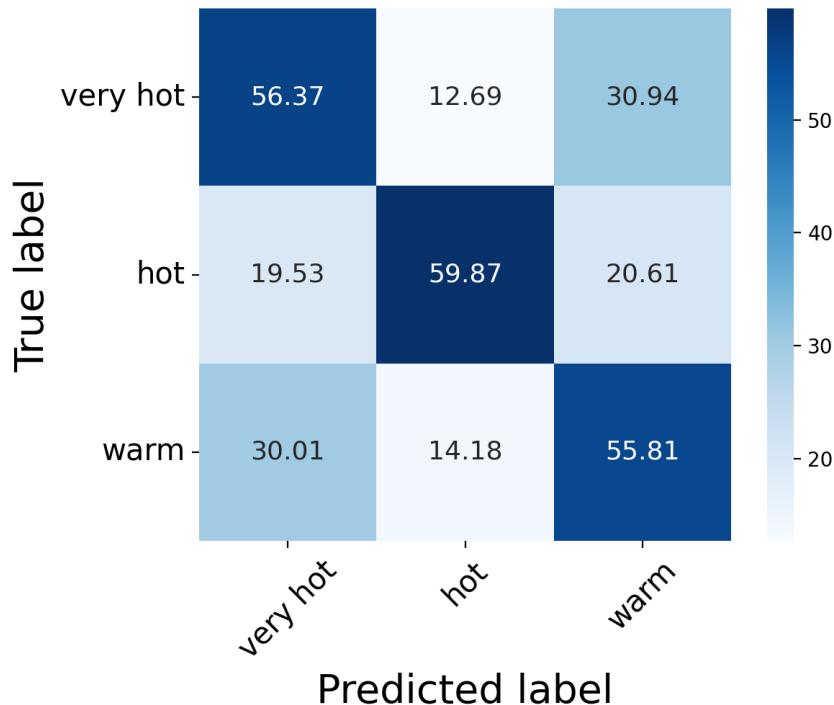


図 5.9: 6つの特徴量を使用した現場における熱的快適性の予測（単位：%）

5.2.3 リアルタイム推定システムと画面出力

分類モデルの構築には、ニュージーランドのワイカト大学により開発された、Java 言語を基盤としたオープンソースのデータマイニングツールである WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis) [48] を使用した。WEKA は、無料で利用可能なソフトウェアであり、各種の機械学習アルゴリズムやデータ前処理機能を備え、データ分析やモデル構築を効率的に行うための環境を提供する。

本開発では、WEKA を用いて Polar M600 スマートウォッチ内でリアルタイムに熱的快適性を推定するシステムを構築した。推定はその時点での結果に加え、直前の 4 つの推定結果を用いた多数決によって行われ、これにより安定した推定結果を得ることを目的とした。

推定された熱的快適性に応じて、Polar M600 スマートウォッチの画面に適切な画像を表示し、作業者が現在の温熱状態を直感的に把握できるようにする。具体的には、熱的快適性が「neutral」と推定された場合は通常の状態を示す画像が表示され、作業者に特別な注意を促す必要がないことを示す。一方で、「slightly warm」と推定された場合には注意が必要な状態を表す画像が表示され、作業者に対して周囲の環境に意識を向けるよう促す。さらに、「warm」と推定された場合には警戒が必要であることを伝える画像が表示され、作業者に対してさらなる注意を喚起する。

これが「hot」と推定された場合には、厳重な警戒が求められる状態であることを示す画像が表示され、作業者に対して速やかな対応を促す。最も危険な状態である「very hot」

と推定された場合には、危険を知らせる画像が表示されるとともに、Polar M600 スマートウォッチが振動して作業者に強い注意を喚起する。

図 5.10 に、Polar M600 スマートウォッチの画面に出力を示す。



図 5.10: 推定結果に対応する画像の種類

第6章 結論

6.1 まとめ

本研究では、熱中症リスクを評価するために、実験室環境および実運用環境における熱的快適性の推定モデルを構築し評価した。結果として、データ収集環境や頸部冷却の有無による影響を詳細に検討し、モデルの有効性と課題を明らかにした。

実験室環境では温度や湿度を制御し、データを収集し分析した結果、「hot」と「neutral」の分類精度が高く、特に「hot」の分類精度の高さは熱中症リスク検出の信頼性を示した。

一方、現場環境では日常的作業を行う被験者からデータを収集し、頸部冷却の有無を比較した。頸部冷却を実施しない場合、「very hot」と「hot」の分類精度は比較的良好であったが、「warm」クラスの分類精度は低下し、データのばらつきが影響している可能性が示唆された。頸部冷却を実施した場合、「very hot」や「hot」の状態が「warm」や「slightly warm」と分類される傾向が見られ、頸部冷却が熱的快適性の向上と熱中症リスク軽減に寄与することが確認された。

さらに、過去に熱中症経験者が発生した現場においてデータを収集し分析した結果においても、頸部冷却により被験者の生理的負担が軽減されることが確認された。特に、熱中症経験者は非経験者に比べ、頸部冷却による熱中症リスク低減効果がより顕著であった。一方、個体差や外部要因により頸部冷却の効果が発揮されない状況が一部観察された。

さらに、自律型リアルタイム推定システムの開発を行い、特微量を6つに削減したモデルをPolar M600スマートウォッチに搭載して実装した。このシステムではインターネット接続を必要とせず、推定された温熱状態をデバイス画面に表示し、最も危険な状態になると振動で警告を発する機能を備えている。推定精度は特微量52個を使用したモデルに劣るもの、検出精度は他の温熱状態と比べ高い結果を示した。

これら成果は、熱中症予防技術の基盤を提供し、労働環境や高齢者支援の改善に寄与するものである。

6.2 今後の展望

今後の展望として、Polar M600スマートウォッチで推定された温熱快適性に基づき、頸部冷却を自動的に実施するなどのフィードバック手法を検討する。

また、リアルタイム推定の精度向上を目指し、モデルの軽量化と使用する特微量の増加に取り組む。さらに、Polar M600スマートウォッチ単体での振動フィードバックのタイミングや手法を改善し、より効果的なアラートシステムの構築を目指す。

謝辞

本研究はセコム科学技術振興財団研究助成金の支援を受けて実施した。本研究を進めにあたり、御指導を賜りました青山学院大学理工学部情報テクノロジー学科 Guillaume Lopez 教授に心より感謝申し上げます。また、研究を進めるにあたり、多大なるご協力をいただきました株式会社富士通ゼネラルの皆様に深く感謝申し上げます。さらに、3年間にわたり実験を支えてくださった大熊研究補佐員に厚く御礼申し上げます。加えて、実験をともに実施してくださった佐藤さん、段さん、タヘラさん、川崎さん、安藤さんに感謝の意を表します。また、研究会や日々の生活を通して多くの助言をいただいたロペズ研究室の同期や後輩、OBOG の皆様にも深く感謝いたします。最後に、本研究を支えてくださったすべての方々に心より感謝申し上げます。

2025年1月31日
本多 一騎

参考文献

- [1] 厚生労働省. 年齢(5歳階級)別にみた熱中症による死亡数の年次推移(平成7年～令和5年)～人口動態統計(確定数)より. <https://www.mhlw.go.jp/toukei/saikin/hw/jinkou/tokusyu/necchusho23/dl/nenrei.pdf>, 9 2024. (参照日 2024/9/24).
- [2] 環境省. 環境省熱中症予防情報サイト: 環境省マニュアル 2-1. (参照日 2024/09/25).
- [3] 労働安全衛生総合研究所. 热中症予防のための暑熱環境と作業負荷の総合評価. (参照日 2024/10/4).
- [4] IPCC. 図 spm.8 - 各sspシナリオにおける1850年～1900年基準の地表気温変化. (参照日 2024/09/24).
- [5] ASHRAE 55-2020: *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. ANSI Approved. 2021.
- [6] ISO 7730:2005(E): *Ergonomics of the Thermal Environment-Assessment of the Influence of the Thermal Environment Using Subjective Judgment Scales*. 2005.
- [7] Stefano Cognati, Marco Filippi, and Sara Viazzi. Perception of the thermal environment in high school and university classrooms: Subjective preferences and thermal comfort. *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, Vol. 42, pp. 951–959, 02 2007.
- [8] Edward Arens, Michael Humphreys, Richard de Dear, and Hui Zhang. Are ‘class a’ temperature requirements realistic or desirable? *Building and Environment - BLDG ENVIRON*, Vol. 45, pp. 4–10, 01 2010.
- [9] Muhammad Khairil, A. Senin, and Azree Othuman Mydin. Significance of thermal comfort in buildings and its relation to the building occupants. *European Journal of Sustainable Development*, 2013.
- [10] N. Seong and D. Yoon. An approach of indoor thermal environment control and energy saving using the pmv index. *LHI Journal*, 2010.
- [11] T. Kramer, V. Garcia-Hansen, S. Omrani, J. Zhou, and D. Chen. Personal differences in thermal comfort perception: Observations from a field study in brisbane, australia. *Building and Environment*, 2023.
- [12] Wei Luo, R. Kramer, Y. D. de Kort, and W. D. van Marken Lichtenbelt. Effectiveness of personal comfort systems on whole-body thermal comfort – a systematic review on which body segments to target. *Energy and Buildings*, 2021.

- [13] Lin Lu, Jiayao Zhang, Yi Xie, F. Gao, Song Xu, Xinghuo Wu, and Z. Ye. Wearable health devices in health care: Narrative systematic review. *JMIR mHealth and uHealth*, 2020.
- [14] M. Bez and F. Simini. Wearable devices and medical monitoring robot software to reduce costs and increase quality of care. *IEEE Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics*, 2018.
- [15] Sam McDevitt, Haley Hernandez, Jamison S Hicks, Russell Lowell, Hamza Bentahaikt, Reuben F. Burch, J. Ball, H. Chander, Charles E. Freeman, Courtney Taylor, and Brock Anderson. Wearables for biomechanical performance optimization and risk assessment in industrial and sports applications. *Bioengineering*, 2022.
- [16] キヤノンITソリューションズ. ウェアラブルデバイスのセキュリティとプライバシーの問題, 2020. (参照日 2024/09/25).
- [17] Fortune Business Insights. Wearable technology market size, share, value — growth, 2032. <https://www.fortunebusinessinsights.com/wearable-technology-market-106000>, 2024. (参照日 2024/09/25).
- [18] Nikhil Singh, K. Moneghetti, J. Christle, D. Hadley, V. Froelicher, and D. Plews. Heart rate variability: An old metric with new meaning in the era of using mhealth technologies for health and exercise training guidance. *Arrhythmia I& Electrophysiology Review*, 2018.
- [19] Hidehiko Ikura, Yoshinori Katsumata, Y. Seki, Toshinobu Ryuzaki, Y. Shiraishi, Kotaro Miura, Kazuki Sato, and K. Fukuda. Real-time analysis of heart rate variability during aerobic exercise in patients with cardiovascular disease. *International Journal of Cardiology Heart I& Vasculature*, 2022.
- [20] 鈴木伊織, 佐藤文明ほか. ウェアラブル端末により検知した心拍変動に基づくストレス推定. 研究報告コンピュータセキュリティ (CSEC), Vol. 2020, No. 30, pp. 1–7, 2020.
- [21] Kizito Nkurikiyeyezu, Yuta Suzuki, and Guillaume Lopez. Heart rate variability as a predictive biomarker of thermal comfort. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, Vol. 9, , 10 2018.
- [22] 早野順一郎, 山田眞己, 藤浪隆夫, 横山清子, 渡辺與作, 高田和之. 心拍変動と自律神経機能. 生物物理, Vol. 28, No. 4, pp. 198–202, 1988.
- [23] F. Canini, E. Sagui, and F. Zagnoli. Système nerveux, stress et coup de chaleur. *EAC Revue*, Vol. 36, No. 2, pp. 102–108, 2012.
- [24] Takashi Hamatani, A. Uchiyama, and T. Higashino. Estimating core body temperature based on human thermal model using wearable sensors. *Proceedings of the ACM Conference*, 2015.
- [25] K. Tokizawa, Toru Shimuta, and Hirofumi Tsuchimoto. Wearable technologies for real-time monitoring of body core temperature under heat stress conditions. *Medicine I& Science in Sports I& Exercise*, 2020.

- [26] 日本気象協会. 学びの部屋「熱中症予防の基礎知識」. <https://www.netsuzero.jp/learning/le17>. (参照日 2024/10/02).
- [27] Mayo Clinic Health System. When temps rise, remember these heat-stroke prevention tips. <https://www.mayoclinichealthsystem.org/hometown-health/speaking-of-health/when-temps-rise-remember-these-heatstroke-prevention-tips>, 2023. (参照日 2024/10/02).
- [28] 環境省. 熱中症環境保健マニュアル, 2022. (参照日 2024/10/02).
- [29] Cleveland Clinic. Hyperthermia (heat-related illnesses). <https://my.clevelandclinic.org/health/diseases/22111-hyperthermia>. (参照日 2024/10/02).
- [30] Jai Kyoung Sim, S. Yoon, and Young-Ho Cho. Wearable sweat rate sensors for human thermal comfort monitoring. *Scientific Reports*, Vol. 8, pp. 1–10, 2018.
- [31] Jintu Fan and Humble W. K. Tsang. Effect of clothing thermal properties on the thermal comfort sensation during active sports. *Journal of Industrial Textiles*, Vol. 37, No. 4, pp. 319–335, 2008.
- [32] Naoto Fujii, Kion Hatam, G. McGarr, R. Meade, P. Boulay, T. Nishiyasu, and G. Kenny. Exogenous activation of protease-activated receptor 2 attenuates cutaneous vasodilatation and sweating in older men exercising in the heat. *Acta Physiologica*, Vol. 226, No. 4, p. e13369, 2019.
- [33] Chee Chong Shawn Tan, Li Chin, and I. C. C. Low. Thermoregulation in the aging population and practical strategies to overcome a warmer tomorrow. *Proteomics Clinical Applications*, Vol. 14, No. 3, p. 1800468, 2020.
- [34] Su-Young Son. Research trends on prevention of heat stroke using clothing: Focusing on practical research in Japan. *Fashion and Ergonomics Research*, Vol. 56, pp. 473–484, 2018.
- [35] Zijun Li, Mengsheng Zhang, Tian Yuan, Qiaoli Wang, Pengyu Hu, and Yu Xu. New wearable thermoelectric cooling garment for relieving the thermal stress of body in high temperature environments. *Energy and Buildings*, Vol. 112, pp. 1–10, 2022.
- [36] Wanwan Wang and Mengmeng Zhao. Design of liquid-air hybrid cooling garment and its effect on local thermal comfort. *Applied Sciences*, Vol. 13, p. 9414, 2023.
- [37] D. Leyk, J. Hoitz, C. Becker, K. Glitz, Kai Nestler, and C. Piekarski. Health risks and interventions in exertional heat stress. *Arzteblatt International*, Vol. 116, pp. 537–544, 2019.
- [38] Christian K. Garcia, Liliana I. Rentería, Gabriel Leite-Santos, Lisa R. Leon, and O. Laitano. Exertional heat stroke: pathophysiology and risk factors. *BMJ Medicine*, Oct 2022.

- [39] A. Costrini, H. Pitt, A. Gustafson, and D. E. Uddin. Cardiovascular and metabolic manifestations of heat stroke and severe heat exhaustion. *American Journal of Medicine*, Feb 1979.
- [40] 千葉友樹, 高橋幹雄, 黒木友裕, 和田一樹, 天野健太郎, 桑山絹子. 局所冷却行為による暑熱ストレス低減効果の予測手法に関する研究(その1)頸部冷却時の生理反応の検討. 空気調和・衛生工学会大会 学術講演論文集 令和元年度大会(札幌) 学術講演論文集 第6巻 暑熱環境評価編, pp. 37–40. 公益社団法人 空気調和・衛生工学会, 2019.
- [41] Povl Ole Fanger. Assessment of man's thermal comfort in practice. *British Journal of Industrial Medicine*, Vol. 30, pp. 313 – 324, 1973.
- [42] E. Halawa and J. van Hoof. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *Energy and Buildings*, Vol. 51, pp. 101–110, 2012.
- [43] ematica. E4 wristband — real-time physiological signals — wearable ppg, eda, temperature, motion sensors. <https://www.empatica.com/research/e4/>. (参照日 2024/10/15).
- [44] Luca Menghini, Evelyn Gianfranchi, Nicola Cellini, Elisabetta Patron, Mariaelena Tagliabue, and Michela Sarlo. Stressing the accuracy: Wrist-worn wearable sensor validation over different conditions. *Psychophysiology*, Vol. 56, , 07 2019.
- [45] 工場向け暑さ対策 — コモドギア - 富士通ゼネラル. (参照日 2024/10/15).
- [46] Fred Shaffer and J. P. Ginsberg. An overview of heart rate variability metrics and norms. *Frontiers in Public Health*, Vol. 5, , 2017.
- [47] M600 ユーザーマニュアル — polar m600 ユーザーマニュアル. https://support.polar.com/e_manuals/M600/wear-os/polar-m600-user-manual-japanese/Content/introduction.htm. (参照日 2025/01/12).
- [48] Machine learning project at the university of waikato in new zealand. <https://ml.cms.waikato.ac.nz/index.html>. (参照日 2025/01/12).

質疑応答

工藤 聖人 情報テクノロジー学科 助手

Q	研究背景に高齢者の熱中症死亡者数増加傾向を挙げられていましたが、実験では現場などの高齢者とは言えない年齢層だったのはなぜでしょうか。
A	ご質問ありがとうございます。研究背景での言及は、運動や労働などによる若年層や中年層の熱中症だけでなく、高齢者の屋内での熱中症なども多くあり、全年代に対して熱中症の危機感を持つべきだという意図のもと高齢者の熱中症死亡者数増加傾向を挙げさせていただきました。また、高温多湿な環境において高齢者のデータを収集することは健康面に対して非常に配慮して行う必要があるため、今回は現場で働いている方のデータ収集や、高齢者の方には制御された実験室のもと涼しい格好でデータを収集させていただきました。

大原 剛三 情報テクノロジー学科 教授

Q	コメントになりますが、高齢者と若年層では感じ方など異なると思います。
A	コメントありがとうございます。先行研究でも年齢差で熱に対する快適性や熱中症の重症度などの違いには言及されており、本実験で収集されたデータにおいても、学習用データセットを50歳以上と50歳未満で分けた際に精度の向上がみられました。高齢者の健康に配慮してより多くのデータを収集し、高齢者専用の熱的快適性モデルを作成することも視野に入れたいと思います。

浦垣 啓志郎 情報テクノロジー学科 助手

Q	暑さを測る指標であるPMVは連続値で出ていると思うのですが、分類問題にした理由はなぜでしょうか。
A	ご質問ありがとうございます。PMVの値は連続値で取得できますが、基礎実験である実験室での実験は、温度や湿度が一定に制御された環境でのデータ収集であったため、算出されるPMVの値も離散的な傾向がありました。そのため、このデータを訓練データとして用いて熱中症経験者のいる現場で得たデータなどの評価するために、今回は分類問題とさせていただきました。今後は、制御されていない環境でのデータ収集を増やし、より多様な条件下でPMVの値を取得することで、回帰分析を用いた細かい粒度での熱中症リスク評価を目指していきたいと考えています。