

jh220043

熱中症リスク評価シミュレータの開発と応用

平田 晃正（名古屋工業大学大学院）

概要

一般に、外部の物理的熱負荷（外気温、太陽光）に対し、ヒトの体内温度が上昇し、それに伴い生体の血流の増加や発汗といった温熱調整反応が生じる。熱中症を発症する際には、体内において過度の体温上昇あるいは発汗が生じた状況になっているはずである。このことから、複合物理およびシステムバイオロジーを連成させた解析を開発、様々な条件において成人（若者）と高リスク群における相違を解明し、普及啓発活動への応用が期待できる。特に、熱中症の発症する要因として、外気温などの周辺環境のみならず、服装、労働あるいはスポーツ環境、年代など個人差が大きいものが多く、かつ周辺環境が時々刻々と変化する場合もある。これら個々人の影響を考慮し、生体内における各種パラメータ変化を時間的に追跡、普及啓発活動に用いるようデータ取得を目的とする。さらに、スーパーコンピュータによる解析結果の応用展開として、解析結果と実測データを組み合わせた統計的処理により、熱中症搬送者予測技術や白内障発症メカニズムの解明など、種々の問題解決に展開する。

1. 共同研究に関する情報

(1) 共同利用・共同研究を実施している拠点名

東北大学 サイバーサイエンスセンター

(2) 課題分野

大規模計算科学課題分野

(3) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(4) 参加研究者の役割分担

（代表）平田 晃正 名古屋工業大学
熱中症シミュレーション・ソースコードの改良と研究統括

（副）江川 隆輔 東京電機大学工学部 情報通信工学科，東北大学サイバーサイエンスセンター

ソースコードの最適化、チューニング担当

○滝沢 寛之 東北大学サイバーサイエンス

センター

ソースコードの最適化

○堀江 祐圭 日本気象協会
気象データの取得

○木幡 咲英理 日本気象協会
気象データの取得

○小寺 紗千子 名古屋工業大学
計算コードの並列化

○高田 旭登 名古屋工業大学
熱ばく露解析の実施とデータ処理

○植田 晴大 名古屋工業大学
熱ばく露解析の実施とデータ処理

○木下 晃太郎 名古屋工業大学
熱ばく露解析の実施とデータ処理

2. 研究の目的と意義

近年、熱中症による搬送者数が増加傾向にあり、熱中症予防への取り組みが社会的関心事となっている。また、熱中症患者の

中でも、特に、高リスク群である小児および高齢者に対して関心が持たれている。外部の物理的熱負荷（外気温、太陽光）が存在すると、ヒトの体内温度が上昇し、それに伴い生体の熱調整反応が生じる。熱中症を発症する際には、体内において過度の体温上昇、または発汗が生じた状況になっている。このことから、複合物理およびシステムバイオロジーを連成させた解析を開発すれば、様々な条件において成人（若者）と高リスク群（小児・高齢者）における相違を解明し、普及啓発活動への応用が期待できる。特に、熱中症の発症する周辺環境は、高温多湿などの共通のパラメータもあるものの、服装、労働あるいはスポーツ環境など個人差が大きく、かつ周辺環境は時々刻々と変化する。

本研究では、これらの要因を考慮し、生体内における各種パラメータ変化を時間的に追跡、普及啓発活動に有意な資料、データの取得を目的とする。

本研究では、マルチノード利用によるペタフロップス級計算を可能とする電磁界ソルバー、熱ソルバーのアルゴリズム開発と、大規模ベクトル計算基板における高効率計算を可能にする超並列化およびベクトル化技術の研究開発に取り組み、実用的な大規模解析手法の構築を目指す。

3. 当拠点の公募型研究として実施した意義

本申請は、2015 年度より取り組んできた継続課題であり、独自で開発した熱中症リスク評価技術をスーパーコンピュータに導入、計算コードの並列化およびベクトル化による高速化による準リアルタイムでのリスク評価技術に発展、さまざまな人体モデルに対する基礎データの取得（データベース化）、気象データ（日本気象協会と協力）との連携による個人々人に対応した熱中症予防啓発 Web コンテンツの開発などに取り組

んできた。その基盤技術は、時間領域差分法による生体に関わる電磁界および熱シミュレーションコードから成り立つ。計算に用いる解剖学的人体モデルは、情報通信研究機構が開発したものであり、組織数 51 種類、解像度は 1-2 mm を有する。熱シミュレーションコードは、最大 9000 万点における物理計算を、2 秒間隔の時間サンプリングによる逐次計算から成り立つ。電磁界コードは、その波長によってさらに高分解能計算が必要となる。特に、熱負荷に対する体温変化の解析では、皮膚あるいは体内深部に存在する温度センサーにより、温度上昇を軽減する作用、いわゆる体温調整機能（血流および発汗）を考慮した精緻な計算が必要となる。

生体を用いた実験が倫理的側面から限定される本課題に関し、社会的ニーズとして熱中症データの蓄積に加え、準リアルタイムシミュレータを構築できれば、特殊環境における、リスク評価も実施できる。市販のワークステーションで解析を行った場合では、30 分の暑熱ばく露解析において、8 時間程度の解析時間を要する。一方、共同研究者（東北大学サイバーサイエンスセンター）とスーパーコンピュータシステムへの移植を実施 160 プロセスで約 102 倍の加速率を実現している。このコードの特徴は、ミリメートル、さらにはサブミリメートル程度の分解能を考慮した電磁界・熱の物理計算(4500 万格子点)に加え、(ベクトル化、並列化に工夫を要する)ヒトのシステムバイオロジーを定式化し、高速に複合解析を実施する必要がある。これまでの検討により、準リアルタイム熱中症リスク評価に加えて、より現実的な解析を実施するための、ヒトの暑さなれなど、長時間解析での知見の蓄積が必要であり、更なる高速化に向けて申請代表者が有していない専門的知識が必要となる。

4. 前年度までに得られた研究成果の概要

4.1 解析の手順

はじめに温熱中間体（外気温 28 °C）における熱定常状態温度分布を初期値として読み込む。次に、人体モデルや発汗モデルの設定、また外気温などの環境設定を入力する。最後に、生体熱輸送方程式による温度上昇を計算、またその計算を行う際、発汗率の変化や血流量の変化など、熱調整機能を組み込んだ計算を行う。特に、物理計算と異なり、温熱生理（システムバイオロジー）の部分は条件文などを含み、高速化には適していないアルゴリズムである。そのようなアルゴリズムに対して、**mask** などを生成させることにより、できるだけベクトル化および並列化に適した形に変更を加えた。以下の節では、その概略を述べる。

4.2 ベクトル化

東北大学が有するスーパーコンピュータはベクトル処理を活用すると、高い性能を得ることができるため、ベクトル計算に適した計算コードを作成した。言語は **fortran90** にて記載している。最内側のループ長を最長にすることで、ノード当たりの計算要素数を増加させるなど、さまざまなループレベル最適化を施し、ベクトル化率とノードあたりの性能を向上させた。また、作業配列の導入によるベクトル化の促進、明示的インライン展開によるサブルーチン呼び出しオーバーヘッドの削減、データサイズの大きいインプットデータおよびアウトプットデータをバイナリ化することによるファイル I/O の最適化を施すことで、コアあたりの実効性能を向上させた。

4.3 並列化

電磁界および熱シミュレーションコードの両者に対して、MPI(Message Passing Interface)を用いた並列化を行っている。2017 年度まで

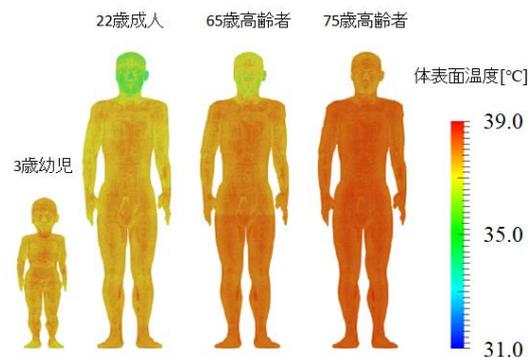


図 1. 体表面温度の分布

は、主に温度上昇解析を対象に、2019 年度採択課題からは、電磁界解析コードに対しても、MPI (Message Passing Interface) を用いて解析コードの並列化を行い、ロードインバランスを解消した。特に、条件分岐の多い、温熱調整反応計算コードの最適化に注力した。特に、条件分岐 (IF 文) がコードの計算ループ内に存在する温熱調整反応計算については、条件分岐に代わるマスク配列を導入、部位に依存する発汗率を解析に組み込み、全身の総発汗量を部位ごとに分布化させ、プロセスごとの計算量のインバランスを解消した。

計算量のインバランス改善により、熱シミュレーションコードでは、従来プロセス数 160 で加速率 48 倍、並列化率 30%であった計算コードを、加速率 102 倍、並列化率 64%と大幅に改善、電磁界解析コードに対しても、1 プロセスの計算時間を基準として 160 プロセスで約 102 倍の加速率を実現し、さらに、2020 年度の新システム移行後は、解像度 1mm モデルにおける 3 時間の暑熱ばく露解析を 5.8 分で解析可能としている。

解析結果の一例 (外気温 : 35°C, 湿度 50%) を図 1 に示す。図より、75 歳男性の温度上昇が最も大きく、次に 3 歳幼児の温度上昇が大きくなることが確認できる。75 歳男性については、発汗機能の相違によるで、高齢者は若年者よりも発汗量が少なく、発汗の開始が遅れたためである。また、3 歳幼児については、

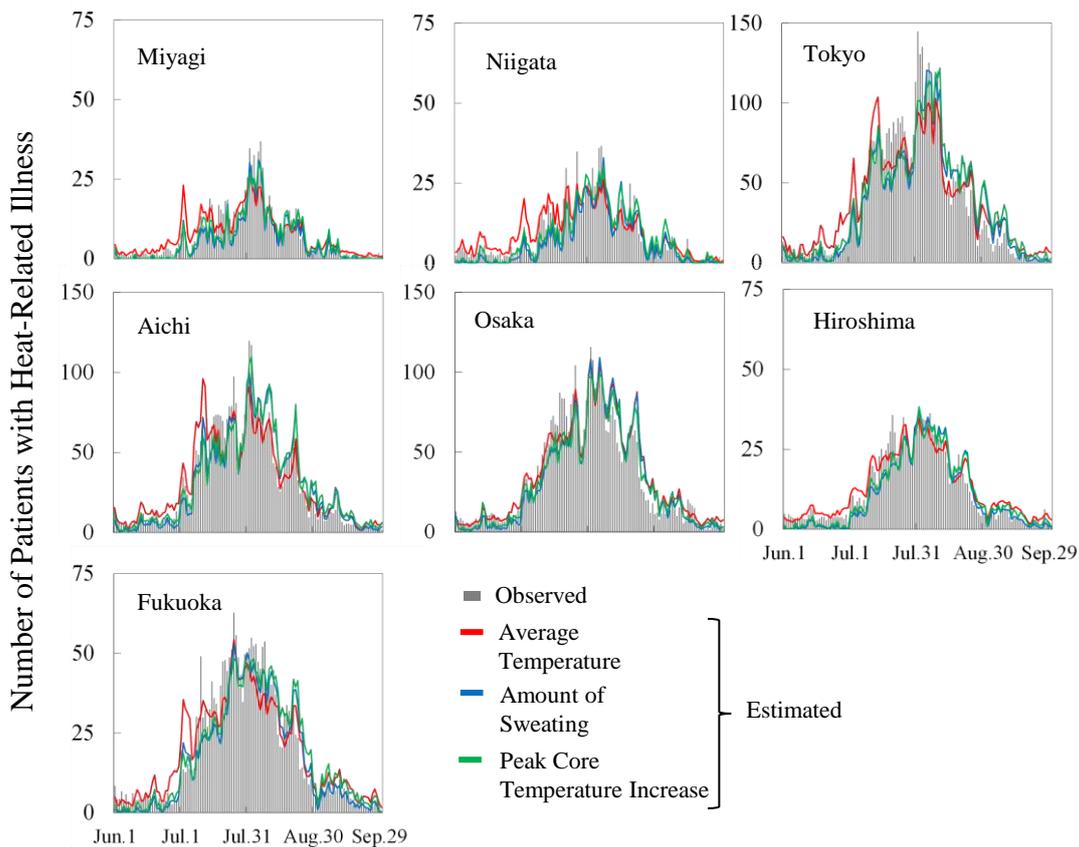


図 2.8 都道府県における搬送人員数予測(2013-2019 年平均)

体積が他のモデルよりも小さく、全身に熱が循環しやすいためと考える。

5. 今年度の研究成果の詳細

5.1 プログラムチューニングおよび試算（通年）

副代表者の江川、共同研究者の滝沢を中心に、2020 年度 11 月より導入されたスーパーコンピュータシステム SX-Aurora TSUBASA(AOBA-A)に対する最適化に中心に取り組み、シミュレーション時間の大幅な短縮に取り組んできた。その結果、これまでに 24 時間の暑熱ばく露を SX-Aurora TSUBASA 40VE ノードを用いて 95 秒間で解析可能とした。今年度は、あらたに暑さ慣れなど長期的な生理現象を新たに考慮するため定式化を改良、親和性の向上を計った。これらコードに対して、FMA 命令の効率利用、キャッシュメモリ向け最適化による実効メモリバンド幅の改善による高速化を進めた。さらに、2023 年から東北大学サイバーサイエンスセンターにあらたに運用が開始される新システ

表 1. 決定係数 (2013-2019 年平均)

	Average Temperature	Amount of Perspiration	Body Temperature Elevation
Hokkaido	0.68	0.61	0.68
Miyagi	0.78	0.73	0.73
Nigata	0.75	0.76	0.75
Tokyo	0.85	0.87	0.85
Aichi	0.85	0.84	0.86
Osaka	0.86	0.85	0.85
Hiroshima	0.80	0.80	0.78
Fukuoka	0.72	0.74	0.75

ムを考慮して、当該システムにおける最適化の初期検討に着手した。

5.2 熱中症搬送者数をはじめとする統計データと解析結果との連携

これまで対象を 3 都府県（東京、大阪、愛知）としていた熱中症搬送人員数予測式を、気候の異なる 8 都府県（北海道、宮城、新潟、東京、大阪、愛知、広島、福岡）とし、各都市における実際の気温、湿度を入力とした深部温度、発

汗量の変化を取得する。解析期間は 2018–2020 年の 6–9 月とする。また、新型コロナウイルスの影響による搬送者数の増減をより詳細に分析した。

熱中症搬送人員数予測式を下記に示す。

$$y(x) = y_{indoor}(x) + y_{outdoor}(x)$$

$$y_{indoor}(x) = a_{in} \cdot \left[e^{k_{in} \cdot (0.6x_0 + 0.2x_1 + 0.2x_2)} + l_{in} \right] \cdot \sum_n \{ P(n) \cdot (be^{cn} + d) \}$$

$$y_{outdoor}(x) = a_{out} \cdot \left[e^{k_{out} \cdot x_0} + l_{out} \right] \cdot \sum_n \{ P(n) \cdot (be^{cn} + d) \}$$

$$k_{in,out} = f_{in,out} \cdot \left(\sum_{r=1}^l w_r \cdot x_r \right) + g_{in,out}$$

ここで、 y_{indoor} 、 $y_{outdoor}$ はそれぞれ屋内、屋外から搬送された 1 日ごとの熱中症による搬送者数であり、各都道府県の熱中症搬送者数は消防局公開のデータを用いた。また、 x_i は i 日前の入力変数であり、本研究では日平均気温、日最大体温上昇値、日総発汗量を用いた。屋内で発症する熱中症患者は、連続する 3 日間の気象条件の影響を受けるとみなせるため、 x_0 、 x_1 、 x_2 の寄与率はそれぞれ、60%、20%、20% であるとした。一方、屋外で発症する熱中症患者は主に当日の気象条件に起因すると仮定し、 x_0 の寄与率は 100% とした。 n ($n = 1$ (20–24 歳), ..., 14 (85 歳–)) は 20 歳から 85 歳以上までの 5 歳ごとの年齢階級、 $P(n)$ は対象地域の 20 歳から 85 歳以上までの 5 歳階級別人口分布、 $be^{cn} + d$ は 2015 年の 5 歳階級別全国熱中症搬送分布の近似曲線を表している)。これにより、高齢化に伴うリスクの増加を模擬した。入力変数の x_i の係数である k は短期暑熱順化による熱中症リスクの変化を示し、重みづけ平均値の増加に伴って、線形的に減少すると仮定した[25]。 w は線形重みである。 a 、 l 、 f 、 g は各都市の搬送者数を特徴づけるパラメータであり、屋内、屋外で別々に決定した。パラメータは、Cross-Validation 法に基づいて抽出しており、予測する年度以外のデータセットを用いて、予測年度のパラメータを以下に述べる最小二乗法によって求めた (図 2.5)。最後

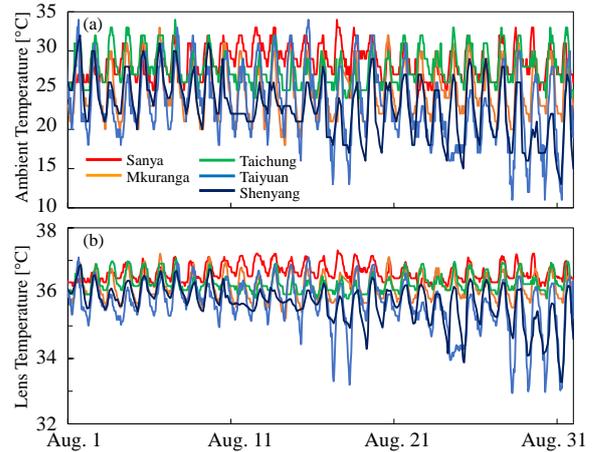


図 2. (a) 外気温 (b) 水晶体温度の時間変化 (2019 年 8 月)

に解析対象の年数で平均値を算出することで決定した。また、熱負荷が低い日において発汗量は 0 を取りうるため、搬送者数が 0 に収束するよう、発汗量の入力時は、 $l = -1$ とした。

解析例として、図 2 に各都道府県において、1 日の平均気温、総発汗量、最大体温上昇値を入力としたときの熱中症搬送者数予測結果を示す。また、表 1 にそれぞれの決定係数の 7 年平均値を示す。表より、北海道を除き決定係数が 0.7 を超え、特に搬送者数の多い東京都、愛知県、大阪府において高い精度を示した。また、気温が低いため生理応答が生じる条件に達することが少ない北海道や宮城を除き、総発汗量や最大体温上昇値を入力とした予測の精度が高い傾向にあった。このことから熱中症リスク評価指標として、生理応答を考慮した解析値を用いることの有効性を確認した。また図より、各都道府県において、梅雨明け日 (平年 7 月 21 日ごろ) 直後に予測値が実測値を下回る傾向となることから、梅雨明け直後は特に熱中症リスクが高まることが示唆された。(項目 7 (1)a)

また、申請書に記載したように、5–9 月にかけてマスメディアによる取材対応を行い、暑熱日やコロナ禍における熱中症など、ニュースを抽出し、ピンポイントな解析を行うことで、普及啓発に役立てた。

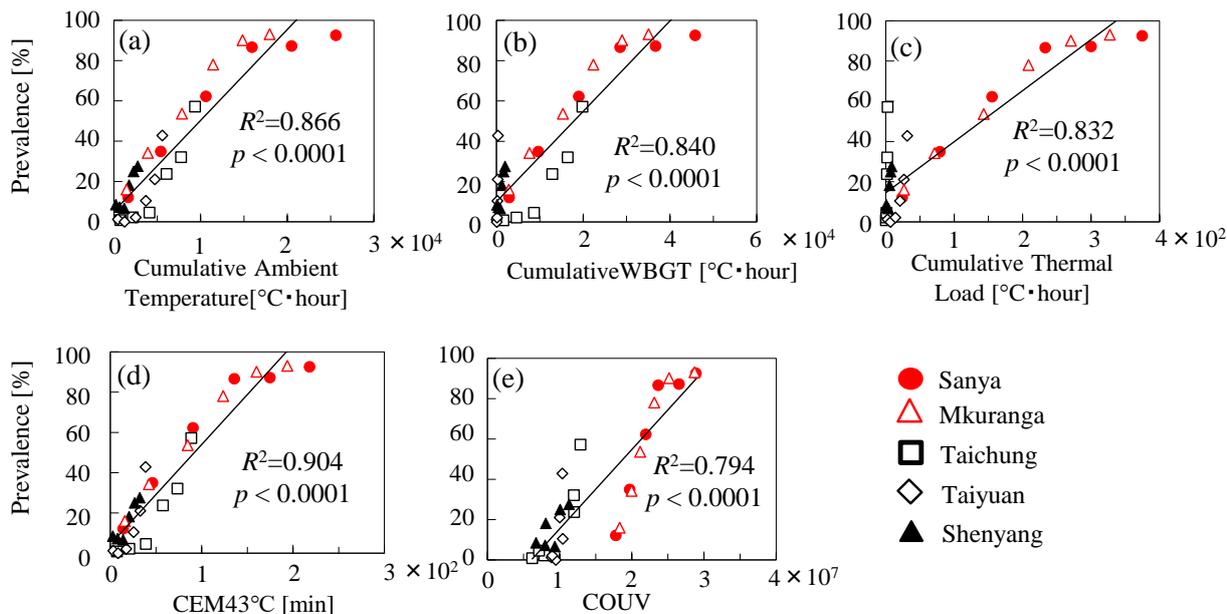


図 3. 各指標と有病率に対する相関関係

(a) 累積外気温 (b) 累積 WBGT (c) 水晶体累積熱負荷 (d) CEM43°C (e) COUV

5.3 核白内障メカニズム解明のための眼球内熱負荷評価

スーパーコンピュータによる解析の新たな応用展開として、これまで紫外線や外気温との関連性があるとされてきた白内障発症のメカニズムについて、複合物理解析に基づき、その発生要因を考察した。

核白内障は、水晶体の中央部分が白濁して視力が低下する目の病気である。これは、主に紫外線負荷の影響が大きいとされてきたが、高齢者の核白内障有病率は、熱帯地域、亜熱帯地域で高いことが報告されていることから、新たに熱が環境要因として考えられるようになった。

今年度では、眼球部分を詳細に模擬した人体モデルを構築し、年齢や出生地による生理応答の相違を考慮した大規模熱解析を用いて眼球内温度を推定した。また、核白内障有病率に対する気象情報や眼球内温度から算出される指標との相関を調査することで、熱や紫外線が核白内障発症に寄与する影響について考察した。5 都市（熱帯 2 都市、温帯 3 都市）疫学データに基づき、2019 年 1 年間の気象データを入力とし、65 歳の高齢者を対象として解析を行っ

た。一例として、8 月の各都市の環境下における水晶体温度の時間変化を図 2 に示す。8 月 9 日 13–17 時において、熱帯のムクランガ（タンザニア）、温帯の台中（中国）の外気温が等しいが、水晶体温度はムクランガの方が高い。これより、熱帯と温帯で類似した気象条件が続く場合、水晶体温度は熱帯地域の方が高くなる可能性が示唆された。

図 3 に、核白内障有病率に対する各指標の相関を示す。図より、全ての指標で決定係数 R^2 が 0.79 を超え、有意性が認められた ($p < 0.0001$)。このことから、核白内障は熱や紫外線の累積熱負荷により発症する可能性が示唆された。また、解析結果から算出された CEM43°C で最も強い相関を示したことから、生理応答を考慮して推定した水晶体温度を用いた指標の有効性を示した。（項目 7 (3)b, c）

6. 進捗状況の自己評価と今後の展望

本課題では、熱ソルバーのアルゴリズム開発と、大規模ベクトル計算基盤における高効率計算を可能にする超並列化およびベクトル化技術の研究開発に取り組み、実用的な大規模解析

手法の構築を目指した。現在、新たに導入された SX-Aurora TSUBASA への最適化を主体に取り組み、ヒトの生理学的モデル化に関わるコードのベクトル化およびその評価を行い、副代表である江川との協力により解決を目指している。

今年度の研究計画として、

- ①プログラムチューニングおよび試算（通年）、
- ②熱中症搬送者数をはじめとする統計データと解析結果との連携(2022 年 4 月～2022 年 10 月)
- ③白内障発症メカニズム解明のための解析コードの改良と統計的考察(2021 年 10 月～2022 年 3 月)

以上、上記の 3 点を挙げ、研究を実施してきた。各項目の詳細な内容については、項目 5 に示した通りであり、計画通りに実施したものとなる。特に、項目②については、一連の成果をまとめ、東北大学サイバーサイエンスセンターの共同研究者と共著で論文を執筆、ジャーナル論文 (Frontiers in Public Health, IF= 6.461) に掲載されている。また、研究計画にも含めていた、4-8 月において、熱中症リスク評価知見に基づくマスメディアへの情報発信、普及啓発についても行った (項目 7(4))。

今後の展望については、現在、白内障の発生メカニズムに関する研究を進めており、今後は、水晶体の修復機能の低下を考慮した指標について継続して調査を行っており、核白内障有病率を高精度に予測可能なモデルを構築していく予定としている。

7. 研究業績

(1) 学術論文

a) A. Takada, S. Kodera, M. Shimizu, H. Niwa, T. Ishikura, H. Tanaka, A. Hirata, “Computed and measured core temperature of patients with heatstroke transported from their homes via ambulance,” IEEE Access, vol.10, pp.41839–41851, 2022.

b) A. Takada, S. Kodera, K. Suzuki, M. Nemoto, R. Egawa, H. Takizawa, and A. Hirata, “Estimation of the Number of Heat Illness Patients in Eight Metropolitan Prefectures of Japan: Correlation with Ambient Temperature and Computed Thermophysiological Responses,” Frontiers in Public Health, vol.11, pii:1061135, 11 pages, 2023.

(2) 国際会議プロシーディングス (査読あり)

a) A. Takada, S. Kodera, R. Egawa, H. Takizawa, A. Hirata, “Estimation of Number of Heat-Related Illness Patients Transported in Eight Prefectures,” BioEM 2022, Jun. 19-24, 2022.

(3) 学会発表

a) 高田旭登, 江川隆輔, 滝沢寛之, 平田晃正, “8 都道府県における熱中症搬送人員数予測”, 2022 年電子情報通信学会総合大会, 2022 年 3 月.

b) 木下晃太郎, 小寺紗千子, 初坂奈津子, 江川 隆輔, 滝沢寛之, 久保江理, 佐々木洋, 平田 晃正,”核白内障発生機序解明のための複合物理熱解析に基づく眼球内温度評価”, 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会, 2022 年 7 月.

c) 木下晃太郎, 小寺紗千子, 初坂奈津子, 江川 隆輔, 滝沢寛之, 久保江理, 佐々木洋, 平田 晃正,”物理解析に基づく眼球内熱負荷と核白内障有病率の関係性評価”, 電子情報通信学会ソサイエティ大会, 2022 年 7 月.

d) 高田旭登, 平田 晃正,”8 都道府県における熱中症搬送者数予測,”日本生気象学会, 2022 年 11 月.

(4) プレス発表

A) NHK, 中日新聞, 新型コロナ マスクの着用どうすれば?熱中症対策は…?, 2022 年 5 月 19 日 (Web)

B) NHK, 新型コロナ マスクの着用どうすれば?熱中症対策は…? 2022 年 5 月 30 日(Web)

C) 産経新聞, 熱中症への啓発から、マスクをしている影響があるのか、マスクと熱中症「関連薄い」見方も, 2022 年 6 月 6 日(Web)

- D) テレビ朝日(スーパーJ チャンネル) マスク着用が日常となったことで熱中症が心配される 2022 年 6 月 7 日(全国)
- E) 産経新聞, 行動制限なき夏 熱中症警戒 コロナ禍 3 年ぶり 搬送急増 梅雨でもリスク 水分補給で予防を, 2022 年 6 月 7 日, 朝刊 23 面
- F) 中日新聞, 熱中症での救急搬送予測データで効率化, 2022 年 6 月 22 日, 朝刊 18 面
- G) テレビ朝日(グッドモーニング) 梅雨時の熱中症(コロナ第 7 波突入の可能性), 2022 年 6 月 22 日(全国)
- H) TBS(チャント!), tenki.jp, 熱中症の専門家が予測 「ことは今までになくリスク高まる」 水分を補給し無理のない行動を , 2022 年 6 月 27 日
- I) 中日新聞, 球児の熱戦、熱中症対策 迫る開幕、各県高野連が苦心, 2022 年 6 月 30 日, 朝刊 26 面
- J) NHK 関西, 富田林 2 歳児 熱中症で死亡 男の容疑者“ストレスで外出”, 2022 年 7 月 1 日(関西地区)
- K) 産経新聞, 参院選 2022 炎天下の選挙戦 敵は酷暑 コロナ対策や有権者にも配慮, 2022 年 7 月 1 日, 朝刊 26 面
- L) 産経新聞, 2 歳児の体温上がりやすさ大人の 2 倍 冷房ありでも熱中症に注意, 2022 年 7 月 1 日(Web)
- M) 産経新聞, 幼児柵に板張り細工 通気性悪く 熱中症誘発か 体温上昇・脱水 冷房でもリスク, 2022 年 7 月 2 日, 朝刊 30 面
- N) 読売新聞, 熱中症予測 救急車確保へ 名古屋市消防局 データで搬送数推定, 2022 年 7 月 14 日, 朝刊 25 面
- O) 読売新聞, 熱中症予測 救急車確保へ 名古屋市消防局 データで搬送数推定, 2022 年 7 月 14 日, 朝刊 25 面
- P) 中日新聞, 牧之原 園児死亡 通園バスまた悲劇 運転手休暇 理事長が代行 「なぜ気付かなかったのか, 2022 年 9 月 6 日」, 静岡朝刊 27 面
他 11 件