

jh210041-NAH

## 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）

概要 外部の物理的熱負荷（外気温、太陽光）に対し、ヒトの体温は上昇し、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に基づく生理応答を連成させた解析を用い、様々な条件における相違を理解する必要がある。シミュレータの高速化を行うとともに、ミリ波ばく露解析にむけた人体モデルの改良、および、これまでに作成したモデルを用いた有用性の検討を行った。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東北大学

#### (2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 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・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、チューニング担当
- 堀江 祐圭 日本気象協会  
気象データの提供と解析結果の考察
- 木幡 咲英理 日本気象協会  
気象データの提供と解析結果の考察
- 小寺 紗千子 名古屋工業大学  
計算コードの並列化
- 上松 涼太 名古屋工業大学  
熱ばく露解析の実施とデータ処理
- 三浦 郁亮 名古屋工業大学  
熱ばく露解析の実施とデータ処理
- 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

### 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、欧米でも熱波による熱中症死者数が増加傾向にある。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しており、例えば、以下のような意義が挙げられる。

(1) 高齢化社会の到来に伴って肉体労働者が高齢化しており、職業環境（プラント、建設現場など）における熱中症対策が急務である。例えば、同じ職場においても、日時によって熱負荷は異なり、年齢によっても体温変化や生理反応は異なる。それを事前に視覚的に示すことは対策につながる。

(2) 職業環境下、あるいは猛暑環境におけるスポーツの実施および観戦においてリスク情報を提供でき、対策を促すことが期待できる。

(3) 熱中症に関する教育は、現在、中学生を対象とした技術家庭の時間で実施されており、一部の教科書では申請代表者らの成果を採用、今後、更なる高信頼性化による若年者を中心とした国民教育へ一層の貢献ができる。

(4) 計算により得られた情報をデータベース化し、気象データと連携、提供することができれば、熱中症リスクに対する新たな対策指標として期待できる。

本課題では、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す。

### 3. 当拠点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。現在代表者が開発したコードを市販のワークステーションで解析した場合には、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、さらにループ融合等による手動チューニングを施し、キャッシュ効率を向上させることで、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た。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

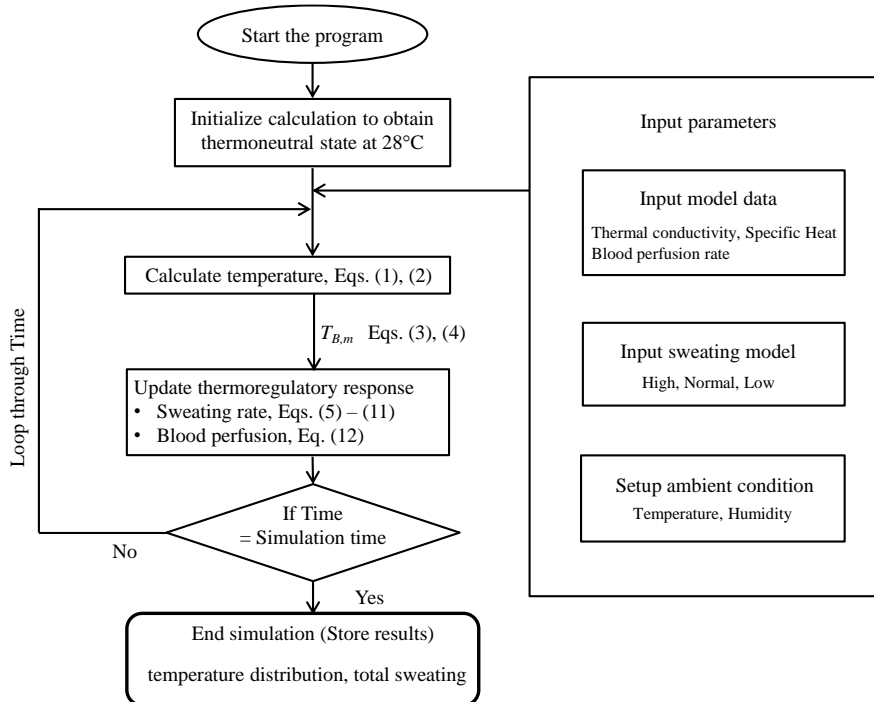


図 1. 体温上昇解析のフローチャート

体温上昇解析のフローチャートを図 1 に示す。図より、解析を実行すると、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。なお、太陽光による体内吸収電力もあらかじめ解析しておき、入力データと考える。熱の時定数は浅部で数分、深部で 30 分程度であるのに対し、電磁波解析において定常に達するのは瞬時であるため、一度の計算を実施するだけでよい近似となる。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する必要がある。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すことで、ベクトル化率とノードあたりの性能を向上させた (図 2 参照)。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とも、MPI(Message Passing Interface)を用いて並列化を行っている。2017 年度までは、主に温度上昇解析を対象に、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。温熱調整反応計算のひとつである発汗計算は、皮膚組織のみで行っているため、他組織と判別を行う条件分岐 (IF 文) がコードの計算ループ内に存在する。この条件分岐に伴う逐次計算がベクトル化率を低下させる要因となる。さらに各平面における皮膚組織の有無により各プロセスの計算量に差が生じ、これがノード間における計算量のインバランスを引き起こしていた。そこで、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むことを提案および実装することで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、さらに温度推定手法の高精度化に成功した。

計算量のインバランス改善により、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% と大幅に改善出来た。

2019 年度採択課題からは、温度解析コードに加え、電磁界解析コードに対しても、スーパーコンピュータシステム SX-ACE への移植およびフラット MPI を用いた並列化、ループ融合等による手動チューニングなどを施し、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ている。

並列化、ベクトル化を行ったコードを用い、3 時間暑熱ばく露における体表面温度上昇を解析した。解析結果の一例 (外気温: 35°C, 湿度 50%) を図 2 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を確認できる。75 歳男性については、発汗機能の相違によるもの

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、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。さらに、2020 年度の新システム SX-Aurora 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。

#### 4.4. 動脈血・静脈血温度のモデル化

従来研究では、血液温度の計算において動脈および静脈温度を近似的に同一として扱っ

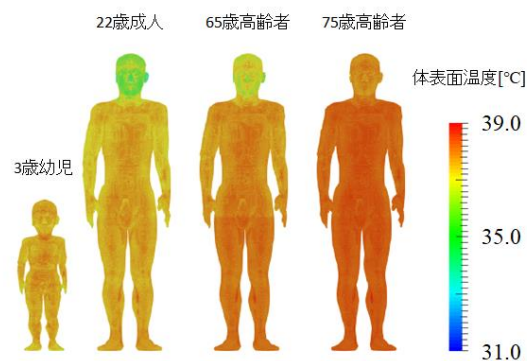


図 2. 体表面温度の分布

てきた。しかしながら、人体の動脈温度と静脈温度は最大で 3.6 °C の差があることが報告されている。この血液温度計算の高精度化を実装できれば、太陽光ばく露などにおける温度上昇推定の更なる高精度化につながるはずである。よって、血液温度計算の高精度化のため、動脈温度および静脈温度を考慮した血液モデルを実装することで、全身の血液温度の細分化を行い、血液温度細分化コード部分について、ベクトル化、並列化を行った。

新たに組み込んだ手法によって温帯生育者の体温分布を再現するために、Dufour らの実験条件を模擬した場合の体温上昇解析を行い、実測値と比較を行った。なお、従来の計算手法では、血液温度を全身で 5 分割して模擬してしたが、提案手法では全身を 14 分割し、より詳細な部位間熱輸送を模擬することが可能

である。これは、従来、コンパートメントモデルと呼ばれる簡易計算法の概念を詳細な人体モデルに導入、複合的な解析手法を提案するものである。また、14 分割モデルでは向流係数  $h_x$  [W/°C] を用いた。血液温度計算法の変更に伴い、舌下温度の上昇値の精度が 14.1% 向上した。

また、四肢の温度分布についても同様に検討するため、Hardy ら (1938) の暑熱ばく露実験を模擬し、各暑熱環境下での手・足における皮膚温度を実測値と比較する。その結果、変更前に比べて足の皮膚温度の精度が 2.7% 向上した。

#### 4.5. 太陽光・暑熱の複合ばく露の体温変化に与える影響

これまでに、全身において等価な皮膚厚みを持つスージングモデルを開発、その皮膚厚みが太陽光吸収に影響を及ぼすことを明らかにした。昨年度は、さらにボクセルスージングアルゴリズムを改良することで、測定値に基づいた部位ごとに異なる皮膚厚みをもつボクセルモデルを作成した。皮膚厚みは、従来の人体数値モデルから皮膚組織を取り除いたボクセルモデルを作成、そのボクセルモデルから、表面ポリゴンモデルを生成した。この表面ポリゴンモデルを基準として、(1)表面法線方向へ任意の皮膚厚みだけ移動させた皮膚表面（外側）ポリゴンモデル、(2)表面ポリゴンモデルを裏返した皮膚裏面（内側）ポリゴンモデルを生成、最後に、(1)と(2)を合成することで、皮膚ボクセルモデルを生成した。また、電磁界解析においては、Courant 条件を満たす分解能が求められるが、温度上昇解析においては、分解能に応じてより小さいタイムステップが求められるため、計算時間が増大する。そこで、電磁界解析で得られた電力吸収分布の低分解能化に伴う適切な平均化処理の検討が重要となる。昨年度では、単純平均、スージングを介した平均によりその基

礎検討を行った。その結果、単純平均低分解能化を用いた場合、分解能を 4 倍にした場合でも深部体温における影響は 1% 以下となることを確認した。

#### 4.6. 長期間暑熱ばく露解析

スーパーコンピュータによる解析の応用展開として、熱中症搬送者数などの統計データ、気温や湿度、暑さ指数 WBGT などの気象データ、解析で得られた深部体温上昇、発汗量などの各種パラメータとの関連性について調査している。これまでの基礎検討で、熱中症発症には発汗量と関連性が高く、連続した過去数日間の暑熱ばく露の影響が大きいことを明らかにした。昨年度では、大規模解析結果と統計データを連携することで、熱中症搬送者数予測技術を構築した。また、東京都・大阪府・愛知県において、解析結果を利用した熱中症の搬送者数予測を行ない、その汎用性を確認した。

### 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

副代表者の江川を中心に、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 への温度解析コードおよび電磁界解析コードに対し、移植を行った。前年度システム導入直後は、旧システムからの移行とモデル読み込み部分改良により、2 倍程度計算効率が向上したが、今年度は、さらに新システムへの最適化を進めている。その結果、前機種である SX-ACE において 40 ノード・160 コアを用いた 160MPI 並列実行時の性能と比較して、SX-Aurora の 20 ノード(VE)・160 コアを用いた実行では、約 6 倍の性能向上を確認することができた。さらに、キャッシュの最適化と FMA 命令の効率的利用による高速化を進めている。

## 5.2. 熱中症による救急搬送データと解析結果の連携による高齢者熱中症発生メカニズムの解明

前年度までの基礎検討で、熱中症発症には体内温度上昇や発汗量と関連性が高く、連続した過去数日間の暑熱ばく露の影響が大きいことを明らかにした。特に、高齢者は発汗などの体温調節機能が低下していることから、熱中症の発症リスクが高い。また、高齢者の熱中症発症の特徴として、屋内での発症が大半を占めることが挙げられるものの、その発生機序については不明な点が多い。

本年度では、大規模解析結果と名古屋市消防局提供の救急搬送データを連携することで、高齢者の熱中症発生機序について考察した。2019年(5/1-9/30)、2020年(5/1-8/31)の名古屋市における熱中症搬送者の救急搬送データ(体温、搬送場所、時刻)に基づき、自宅から搬送された65歳以上の高齢者を対象に解析を行った( $n=703$ )。一例として、健康な成人と、2種類の高齢者モデル(65歳、75歳モデル)を対象に、2020年8月の体内深部温度を解析した結果を図3に示す。図より、通常の温熱調整機能を想定した高齢者モデルでは、真夏においても、深部体温は $38^{\circ}\text{C}$ を超えるケースは少ないのに対し、実際の熱中症搬送時には体温が $38^{\circ}\text{C}$ 以上の搬送者が約45%を占めていた。

次に、搬送当日の朝から搬送時刻までの気象状況を模擬し、一般的な高齢者の体温調節

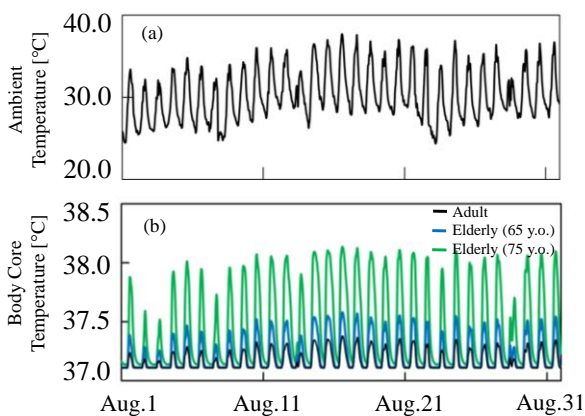


図3 外気温と推定深部温度の時間変化  
(2020年8月)

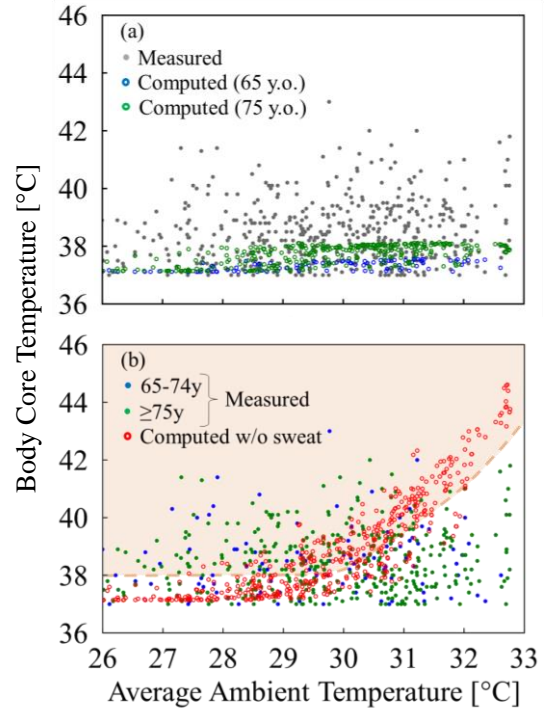


図4 搬送時体温の測定値と解析結果  
(a) 標準的な高齢者の発汗  
(b) 発汗を全くしていないと仮定

機能を模擬したモデル(65歳、75歳モデル)と、発汗を全くしていないと仮定したモデルの深部体温を推定した。搬送時に測定された体温との比較結果を図4に示す。標準的な発汗を模擬した場合(a)と比較し、発汗がない場合(b)で高体温の搬送者とよく一致し、暑さの知覚を含む体温調節機能が著しく低下している可能性が示唆された。また、搬送時の体温が $38.5^{\circ}\text{C}$ 以上の患者を対象に搬送当日の発汗量を推定した結果、89%の患者の発汗量は体重の1%未満(体重が $60\text{kg}$ と仮定した場合 $600\text{g}$ )であった。一般的な脱水症状の水分損失率が2.3%であることから、脱水症は数日間の熱負荷の蓄積により引き起こされることが示唆された。

今後は、得られた知見を活かして熱中症リスク低減に向けた啓発活動を行っていく。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

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んでおり、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。今年度は、長期間解析を用いた高齢者の深部体温推定、統計データとの連携により、高齢者熱中症発生メカニズムの解明などに取り組み、複数のマスメディアに取り上げられ、熱中症予防への普及・啓発に貢献した。研究面での具体的実施内容は以下の通りである。

① プログラムチューニングおよび試験計算 (通年)

準リアルタイム熱中症リスク評価をめざし、可能な限りの高速化を行っている。主担当は、副代表者の江川を中心に、代表者・平田および大学院生が補佐する。2020 年 11 月より導入されたスーパーコンピュータ AOBA への最適化を中心にチューニングを行っている。現在、引き続き、キャッシュの最適化と新システムより採用された FMA 命令の効率的利用によるさらなる高速化に取り組んでいる。

② 高齢者における太陽光・暑熱の複合ばく露時の体温変化

③ 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

②の内容として、前年度までに改良した太陽光と暑熱の複合ばく露解析コードを用いて、2種類の高齢者モデル(65歳モデル, 75歳モデル)を用いて夏場の長期間解析を行い、体温変化、発汗量変化の推定を行った。

さらに、③の内容として、名古屋市消防局から提供いただいた熱中症搬送時の体温データと比較、高齢者熱中症発生メカニズムについて考察を行った。一連の成果をまとめ、論文発表(項目 7(1))、およびプレスリリースを

行った。(項目 7(6))

7. 研究業績一覧(発表予定も含む。投稿中・投稿予定は含まない)

(1) 学術論文 (査読あり)

a) A. Takada, S. Kodera, H. Togo, M. Shimizu, H. Niwa, T. Ishikura, H. Tanaka, T. Kawahara, 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.

(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

(3) 国際会議発表 (査読なし)

なし

(4) 国内会議発表 (査読なし)

a) 高田旭登, 小寺紗千子, 平田晃正, “複合物理解析と救急搬送データに基づく高齢者熱中症リスク評価,” 信学技報, EST2021-20, 2021年7月.

(5) 公開したライブラリなど

なし

(6) その他(特許, プレスリリース, 著書等)

<プレスリリース>

A) NHK (WEB ニュース) 2021年6月22日, マスクで熱中症のリスクは上がるの?

B) 中日新聞 2021年7月14日, 26面, 屋内で熱中症の高齢者3割体温調節機能低下

C) 日経新聞 2021年8月3日, 子どもの熱中症について

D) 共同通信社 2021年8月11日, 熱中症、自粛生活でお盆に増 昨年の東京, 名工大分析

E) 日経新聞 2021年8月12日, 9面, お盆の熱中症に注意 名工大、昨夏の東京を

- 分析 自粛生活で体力低下懸念
- F) 東京新聞 2021 年 8 月 13 日, 6 面, 自粛生活熱中症注意 昨年お盆前後に増加名工大分析
- G) 朝日新聞 12 月 7 日, 26 面, コロナ渦熱中症搬送は減少
- H) メーテレ (ドデスカ) 季節外れの急激な暑さの中で「熱中症への注意喚起」, 2021 年 4 月 22 日 (東海)
- I) TBS (朝チャン) 夏場のマスクと熱中症について, 2021 年 5 月 7 日 (全国)
- J) CBC (チャント) 今年初の気温 30 度ごえ! ? マスク脱水に要注意 対策は?, 2021 年 5 月 14 日 (東海)
- K) NHK (ニュース) 熱中症リスクについて, 2021 年 5 月 14 日 (東海)
- L) CBC (チャント) マスクと熱中症のテーマについて, 2021 年 5 月 14 日 (東海)
- M) メーテレ (ドデスカ) 熱中症リスクについて, 2021 年 6 月 4 日 (東海)
- N) 東海テレビ (ニュース One) リスクは「暑さに不慣れ」だけじゃない, 2021 年 6 月 8 日 (東海)
- O) CBC (チャント) マスクと熱中症のテーマについて, 2021 年 6 月 9 日 (東海)
- P) NHK (ニュース) 検証! マスクで熱中症リスクはあがる?, 2021 年 7 月 1 日
- Q) CBC (チャント) 熱中症の搬送者予測について, 2021 年 7 月 19 日 (東海)
- R) メーテレ (ドデスカ) 熱中症の搬送者数予測について, 2021 年 7 月 19 日 (東海)
- S) テレビ朝日 (報道ステーション) 東京の熱中症救急搬送者数 「熱中症による救急搬送者が急増するおそれがある」と警鐘, 2021 年 8 月 25 日 (全国)
- T) メーテレ (アップ!) 熱中症搬送者予測について, 2021 年 8 月 25 日 (東海)
- U) CBC (チャント) 急激な温度上昇の真夏日で 今週の熱中症搬送者数について, 2021 年 8 月 27 日 (東海)
- V) NHK ワールド (WEB ニュース) 熱中症の研究について, 2021 年 8 月 28 日 (全国) 他 30 件