

jh150026-NA16

## 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を連成させた解析を用い、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理解する必要がある。そこで、シミュレータの高速化を行うとともに、様々な人体モデルに対する基礎データを取得、データベース化する。

### 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
- 超大規模データ処理系応用分野
- 超大容量ネットワーク技術分野
- 超大規模情報システム関連研究分野

#### (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

(副) 田中 悟志 浜松医科大学医学部  
生理学的モデル化

○浅野 陽平 名古屋工業大学  
太陽光ばく露解析の実施とデータ処理

○西尾 渉 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

#### 2.1.目的

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。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、普及啓発活動に用いるデータの取得を目的とする。特に、シミュレータの高速化および様々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）を行うものとする。

#### 2.2.意義

地球温暖化に加え、2011年の大震災以降、節電が叫ばれる中、「熱中症」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による死者数が増加傾向にある。熱中症患者の中でも、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。子供については車内放置が社会問題となっており、2011年7月、警察庁はパチンコホール団体へ再発防止対策の徹底を要請している。一方、熱中症で救急搬送された患者の40%が高齢者であり、啓発活動が行われているものの高い水準に変化はない。これらのハイリスク群の人々が熱中症にかかる要因として、熱中症に関する知見は生理学の考察あるいは救急医療に

基づく対症療法がほとんどである。換言すれば、年齢による体温上昇、発汗の相違など工学・物理見地からのリスク評価を行い、かつその成果に基づき普及啓発が十分ではなかったことが挙げられる。本研究は、高精度かつ視覚化したリスク評価データに基づき、普及啓発に有意な資料を提供するものである。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、体温、生理反応は異なり、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（2020 年 7 月～8 月東京オリンピックなど）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。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

当研究グループでは、これまで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の開発を行ってきた。計算解剖人体モデルは、情報通信研究機構が開発したものであり、組織数 51 を考慮し、解像度は 2mm、4500 万点において物理計算を行う。その際、人体を構成するそれぞれの組織に、太陽光ばく露に対しては電気定数を、外気温に伴う温度上昇には熱定数を割り当てて解析する。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（血流および発汗率）が変化する。また、湿度、あるいは発汗量により、体表面の状況は時々刻々と変化し、冷却効果などを含めた精緻な計算がある。この解析手法は、サウ

ナにいた状態の体温変化を概ね模擬できることを確認している。

生体を用いた実験が倫理的側面から限定される本問題に関し、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は、16 時間程度の解析時間を要するため、本研究目的である①高速化、②データの蓄積、ともに不適である。そこで、現在、共同研究者（東北大学サイバーサイエンスセンター）と SX-9 における動作確認、さらには新たに導入されるスーパーコンピュータシステム [SX-ACE] への移植について検討を行っている。このコードの特徴は、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ことを目指す。しかし、高速化を行う上でベクトル化効率の向上が必要不可欠となるため、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

本年度が JHPCN 制度を使った初年度である。なお、前年度までの制度を利用しない条件で得られた成果は以下のとおりである。

[1] 75 歳以上（後期高齢者）における熱中症リスクが高まる理由が、体内深部温度センサーの劣化によるものであることを立証。得られた知見に基づき、我が国の猛暑日の環境下における若者との相違を提示した。

[2] 妊娠女性における熱中症リスクが高まる理由が、胎児の高い代謝量によるものであることを解明。

[3] 65-75 歳（前期高齢者）における熱中症リスクが高まる理由が、体表面（皮膚に存在）温度センサーの劣化によるものであることを立証。

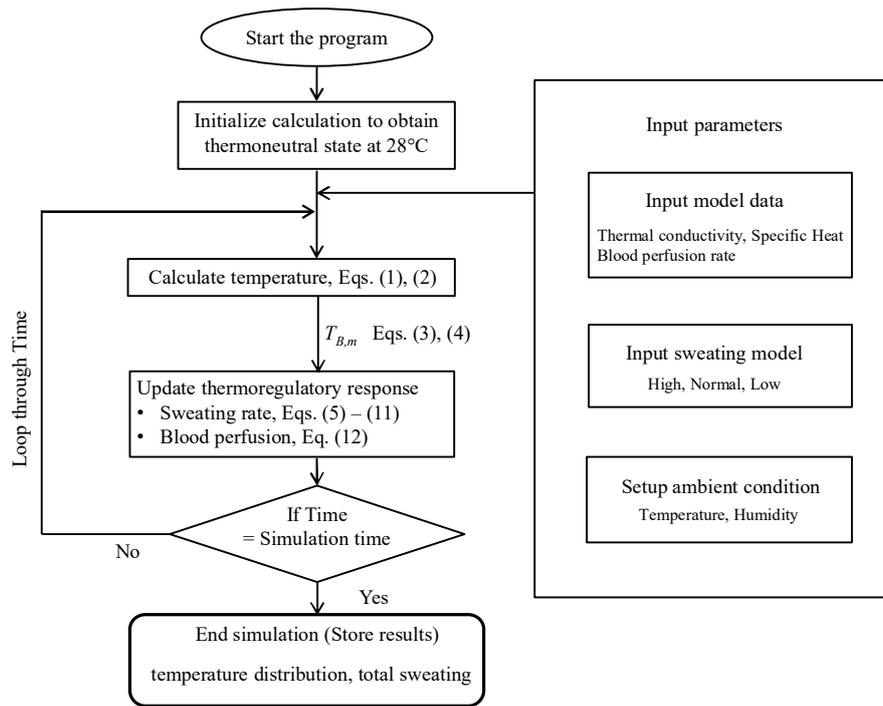


図 1. 体温上昇解析のフローチャート

[4] 小児と成人の生理学的相違は大きくないことを示す。太陽光および暑熱の同時ばく露により、子供のリスクが高まる理由は、体形差のみで説明できること、また脱水症状になりやすい理由を説明した。

上記の成果を、マスメディアなどを通じて広く普及啓発活動を行ってきた。5 度の報道発表に対し、国内主要新聞一般紙すべてを含む延べ 150 紙以上、人民日報、新華社通信など中国における数百紙に掲載されるとともに、国内テレビ出演 50 件以上（おはよう日本、報道ステーションなど）、企画協力（世界一受けたい授業など）を行った。また、遊戯事業および小売業における業界誌あるいは社員教育用資料などの協力を行った。なお、2014 年に実施した後期高齢者に関する熱中症リスク上昇解明の報道発表では、東北大学のスーパーコンピューターを利用した成果を含んでいたが、その成果は、中日新聞／東京新聞では夕刊 1 面に、また共同通信が発信した情報をもとに 20 社以上、中国紙（人民日報など）100 以上が「スーパーコンピューター」の利用であることを明記し、スーパーコンピュータシステムによる解析の重要性を国民

に知らせた。

定量化がしやすい子供の車内放置による死者数は、2000 年から 2010 年まで約 0.4 名／月（5－10 月期）であったのに対し、2011 年 8 月の報道発表以降は 0.11 名／月と大幅に減少したことは啓発活動の有効性を示すものである。

## 5. 今年度の研究成果の詳細

### 5.1. 解析の手順

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、始めに 28 °C 環境下における熱定常状態の初期温度分布を読み込む。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。それから、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。このフローチャートに従って、解析を行う。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

```

MODELX=160      MODELX=866
MODELJ=320      MODELJ=320
MODELZ=866      MODELZ=160

DO K = 1,MODELZ  DO I = 1,MODELZ
DO J = 1, MODELJ  DO J = 1, MODELJ
DO I = 1, MODELX  DO K = 1, MODELX
TEMP(I,J,K)      TEMP(K,J,I)
END DO           END DO
END DO           END DO
END DO           END DO
    
```

図 2. ベクトル化に適したループ

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。

### 5.2. ベクトル化

東北大学が有するスーパーコンピューター SX-ACE 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。このことから、ベクトル計算に適したコードを作成する必要がある。ベクトル計算に適したループの例を図 2 に示す。言語は fortran90 にて記載する。図より、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ことが可能となる。このように、さまざまなループレベル最適化[12]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。

### 5.3. 並列化

コードを並列化する際、MPI(Message Passing Interface)を用いて並列化を行った。MPI とは、分散メモリ間のデータ処理分割やデータ転送を担うメッセージパッシングの標準規格であり、コードから呼び出すサブプログラムのライブラリである。MPI を用いて並列化を行った理由として、並列化手法には、タスク並列用の自動並列化や OpenMP (Open Multi-Processing)、データ並列用の MPI などがある。今回、解析コードを並列化する上で、タスク並列と MPI を併用したハイブリッド MPI、MPI のみを用いたフラット MPI をそれぞれ実装して、実行時間を比較した。その結果、フラット MPI の方が効率よく計算を高速化できたため、フラット MPI を用いた。

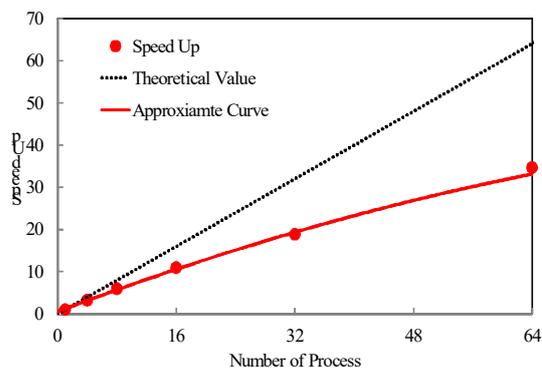


図 3. 並列プロセス数の増加に対する計算時間の加速率

具体的に行った並列化処理としては、人体モデルを Z 軸方向各平面に分割し、それぞれの 1 平面を 1 プロセスとして割り当てた。

異なる並列プロセス数に対し、プロセス数の増加に対する計算時間の加速率を図 3 に示す。図より、並列プロセス数の増加に伴って並列処理効率が顕著に低下することはない、加速率は上昇している。しかしながら、理論値 64 倍に対して、並列プロセス数が 64 の場合に得られた加速率は、34.6 倍となった。これは主に演算量のインバランスによる並列化率の低下や、ノード間通信時のデータ転送量が増加する際に発生する遅延によるものと考えられる。特に、インバランスの原因が温熱調整系のコード化にあると考え、その並列化に取り掛かっている。具体的には、逐次計算部分である条件文(IF)を配列化し、ベクトル化率とノードあたりの性能を向上させた。これにより、並列化率を阻害していたインバランスを解消しているところである。

ベクトル化、並列化を行ったコードを SX-ACE に実装し、暑熱ばく露における体温上昇を解析した例を図 4 に示す。図は 3 時間の暑熱ばく露(37 °C)を行った際の体表面温度を表している。左から 3 歳児、22 歳相当の成人男性、65 歳相当の成人男性、75 歳相当の成人男性、成人女性となっている。

図より、他のモデルに比べて、75 歳相当の成人男性の体表面温度が最も大きく上昇していることが確認できる。これは、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

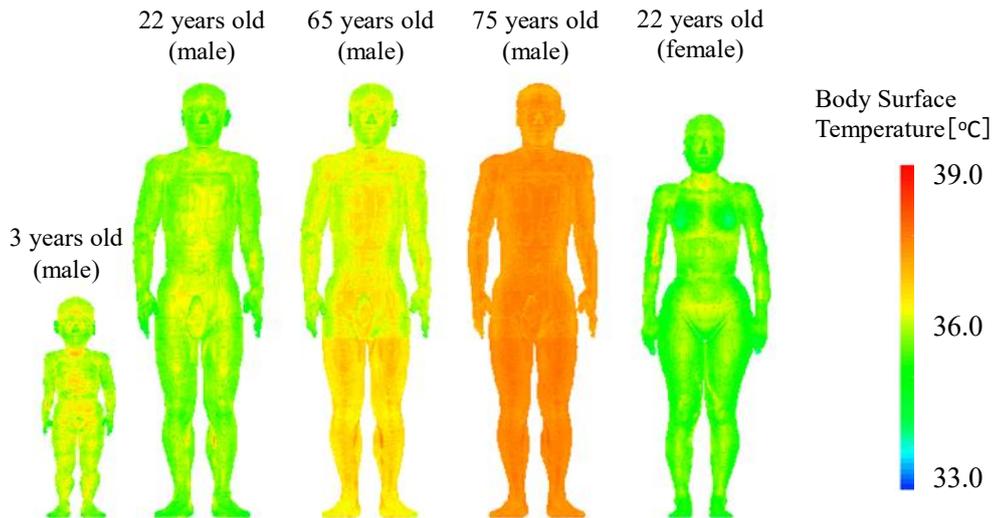
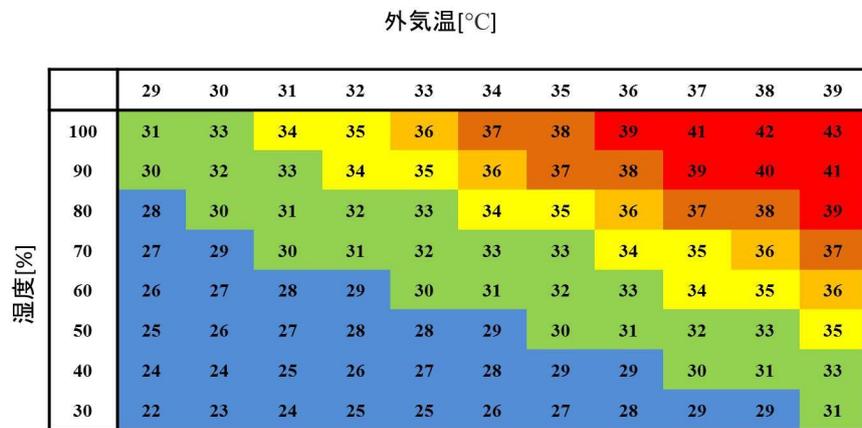


図 4. 暑熱ばく露における表面温度上昇の解析結果



(a)



(b)

図 5. 気温および湿度を変化させた場合の WBGT 値および日本人成人男性モデル内深部温度上昇

汗の開始が遅れるためである。

#### 5.4. データベース化

現在、様々な暑熱環境下において体温変化の計算を行っている。本年度は、我が国でも頻用される

暑さ指数である WBGT と体内深部温度上昇の相関に関する基礎検討を行った。対象としては成人男性モデルで平均的な発汗量を有するものの結果を紹介する。図 5(a)、(b)に、それぞれ、気温および湿度を変化させた場合の WBGT 値および体内深

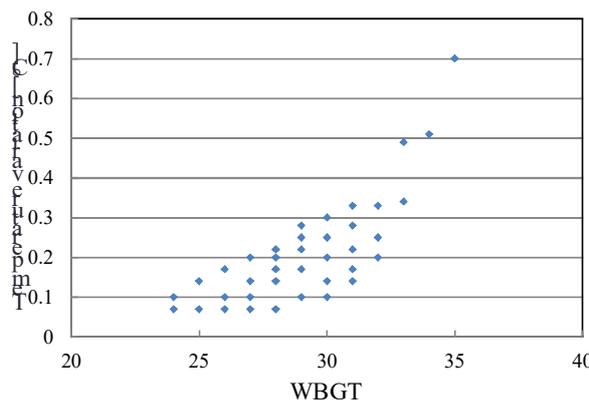


図 6 WBGT 値と体内温度上昇の関係

部温度上昇を示す。また、図 6 に両者の関係をプロットしたものを示す。図 5 より、WBGT と体内深部温度上昇は同様の傾向にあるものの、異なる傾向もある。図 6 より、その関係は確認でき、WBGT 値が同じでも、最大で 3 倍程度のばらつきがあることが確認できた。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

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、直交格子の課題である体表面の解像度を補うアルゴリズムの改良、また、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、副代表である東北大学サイバーサイエンスセンター・江川との協力により解決を目指した。

### ①SX-Ace への実装のためのプログラムチューニングおよび試験計算 (2015 年 4 月～継続中)

年度最終目標であるデータベースの構築に加え、気象データとの連携を視野に、準リアルタイム熱中症リスクを目指し、可能な限り的高速化を行う。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。同時に、平田と田中で生理現象の定式化を改良する。項目①以降も、随時、チューニングを行う。成人男性を 2mm の解像度で実施した場合、1 条件に対し、約 1 分で解

析が可能となった。一概には比較できないものの、一般的なワークステーション (CPU : Intel® Xeon® W5590 @3.33GHz , 4 コア×2) において、7～16 時間程度 (状況、生理反応のモデル化による) 必要であったことを付記する。

### ②成人男性モデルを用いた熱定数、熱生理機能の個体差の体温変化に与える影響の試算 (2015 年 7 月～9 月)

10 月以降に実施する様々な状況下における解析のパラメータを確認し、これまで報告されている実測例と比較、項目①の有効性を確認する。特に、発汗能力の差 (5 パターン程度) の影響について検討する。

### ③計算結果の蓄積とインバランスの解消 (2015 年 10 月～3 月)

10 月以降に実施する様々な状況下における解析のパラメータを確認し、これまで報告されている実測例と比較、項目①の有効性を確認する。特に、発汗能力の差 (5 パターン程度) の影響について検討した。また、熱調整系のモデル化に伴うインバランスの問題を徐々に解決しているところである。

今後の課題として、ベクトル化効率向上のためにロードインバランス等を解消し、それによる並列化効率向上が必要である。そのため申請代表者が有していない専門的知識が重要であり、共同研究体制の構築が求められる。特に中間報告の審査員でも指摘され、今年度も取り掛かっていた。このさらなる改善によって、気象データとの連携による準リアルタイムでのリスク評価技術を構築、さらには今後の地球温暖化を見据えた新規シミュレーション基盤技術の開発を目指していきたい。

## 7. 研究成果リスト

- (1) 学術論文
  - a) 平田晃正, “複合物理で考える熱中症リスク,” 電子情報通信学会誌, vol. 98, no. 7, pp. 604-606, 2015.
- (2) 国際会議プロシーディングス

該当なし

(3) 国際会議発表

a) A. Hirata, W. Nishio, D. Sasaki, T. Yamashita, R. Egawa, H. Kobayashi, “Computation of Temperature Elevation in the Human Body for Ambient Heat Using Vector Supercomputer SX-ACE,” The 23rd Workshop on Sustained Simulation Performance, Mar. 2016.

(4) 国内会議発表

a) 西尾渉, 浅野陽平, 佐々木大輔, 山下毅, 平田晃正, 江川隆輔, “ベクトルスーパーコンピュータ SX-ACE による暑熱環境下体温上昇の高速解析,” 信学技報, EST2015-61, Sep. 2015.

b) 西尾渉, 浅野陽平, 佐々木大輔, 山下毅, 平田晃正, 江川隆輔, “ベクトルスーパーコンピュータ SX-ACE による体温解析の高速化,” 信学ソ大, C-15-12, Sep. 2015.

(5) その他（特許，プレス発表，著書等）

a) 中日新聞，2015 年 7 月 23 日，朝 1 面，熱中症リスク 短時間で算出

b) 日刊工業新聞，2015 年 7 月 23 日，9 面，3 時間後の熱中症発症 10 分でリスク評価

c) 化学工業日報，2015 年 7 月 24 日，4 面，熱中症リスク 10 分で評価

d) 日経産業新聞，2015 年 8 月 7 日，8 面，熱中症リスク、解析 10 分、人体モデル、3 時間予測、東北大など。

e) テレビ朝日（報道ステーション SUNDAY）2015 年 7 月 12 日（全国）

f) テレビ朝日（報道ステーション）2015 年 7 月 13 日（全国）当日の熱中症患者の状況を気象データと連携し、解析データを番組で考察した初の試み（トップニュース）

g) テレビ朝日（ワイド！スクランブル）2015 年 7 月 14 日（全国）

h) CBC（イッポウ）高齢者宅における環境と熱中症リスク（特集），2015 年 8 月 7 日（東海地区）