ISSN 2436-0066



東 北 大 学 サイバーサイエンスセンター

大規模科学計算システム広報 SENAC

Vol.57 No.4 2024-10





Cyberscience Center

Supercomputing System Tohoku University www.ss.cc.tohoku.ac.jp

大規模科学計算システム関連案内

<大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内のデジタルサービス支援課が担当しています。> https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/

and to		雷話番号(内線)*		サービス時間
階	係·室名	e-mail	主なサービス内容	平日
		022-795-6153 (6153)	計算機利用全般に関する相談	8:30~17:15
	利用相談室	相談員不在時 022-795-3406(3406)	大判プリンタ、利用者端末等の 利用	9:00~21:00
階	利用者談話室	(3444)	自販機	8:30~21:00
	展示室(分散 コンピュータ博物館)*	*見学希望の方は受付までご連絡くだ さい。	歴代の大型計算機等の展示	9:00~16:00
	総務係	022-795-3407(3407) cc-som@grp.tohoku.ac.jp	総務に関すること	8:30~17:15
	会計係	022-795-3405(3405) cc-kaikei@grp.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の 請求に関すること	8:30~17:15
三階	スーパーコンピュー ティングサポート	[受付] 022-795-3406(3406) cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp	利用手続き、利用相談、講習 会、ライブラリ、見学、アプリケ ーションに関すること	8:30~17:15
		022-795-6252(6252) cc-sys@grp.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに 関すること	8:30~17:15
	デジタルプラット フォームユニット	022-795-6253(6253) i-network@grp.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30~17:15
四階	研究開発部	022-795-6095 (6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC 端末機(X 端末)	

*()内は東北大学内のみの内線電話番号です。青葉山・川内地区以外からは頭に92を加えます。

本誌の名前「SENAC」の由来 –

昭和33年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメトロン式計算機の名前でSENAC-1(SENdai Automatic Computer-1)からとって命名された。

[共同研究成果]

日本領域長期再解析(RRJ-Conv)の長期データ整備と関連する研究開発: 梅雨前線低気圧の統計解析

伊藤純至、米井潤風、山崎剛(東北大学理学研究科) 福井真(気象研究所)

本研究グループでは日本領域再解析 RRJ-Conv の計算を進めており、2021 年から遡り過去 50 年間のデータセットを整備した。そのうち過去 30 年分のデータセットより、梅雨前線上に生じる低気圧を抽出し、経年変化や低気圧の構造の特徴を解析した。

1. はじめに

東北大学と気象研究所の共同研究により、日本域を水平格子間隔 5km で計算する領域再 解析のデータセット(RRJ-Conv) [1]が作成された。 RRJ-Conv は従来型データのみを同化す ることによって長期間の一貫性を維持しつつ、全球再解析では解像できない梅雨前線上の生 じる低気圧(Baiu Frontal Depressions; BFD)のようなメソスケールの極端気象の再現が期 待される。そのための経年変化の検証等に有用と考えられる。

日本領域再解析(RRJ-Conv)の30年間のデータセットに対し、渦および前線の客観抽出 手法を適用し、梅雨前線低気圧(BFD)を網羅的に抽出した。多数の抽出された梅雨前線低気 圧を最大時間雨量や半径によって分類しながら、分布や構造に着目しながら統計的な特徴を 明らかにした。

2. 使用データ・手法

RRJ-Convのグリッド値(水平格子間隔 5km・6時間毎の解析値とその間は1時間毎の予報値)を用いる。対象期間は1991年から2020年の30年間のうち、各年の6・7月である。梅雨前線低気圧を抽出するために、寒冷渦の客観的な抽出手法[2]を適用し、孤立渦の同定と それぞれの半径を決定した。さらに、相当温位の勾配に着目して梅雨前線帯を客観的に決定した。梅雨前線帯に位置する孤立渦を梅雨前線低気圧(BFD)と定義した。

3. 結果

3.1 RRJ-Conv の線状降水帯の再現の確認

梅雨前線低気圧の分布と発生数について図1に示す。BFDは日本の海上に広く分布し、特に日本の西側に多く発生している。また東北地方や東側の太平洋にも相当数分布している。 各 BFD を時間連続性によりトラックしたところ、年間では数10から100個程度 BFD の発生 数となった(図2)。そのうち、西日本で発生するものは6割以上が大雨(最適半径の内側 で最大1時間雨量 30mm 以上)を伴っている。

3.2 線状降水帯出現頻度の経年変化

様々な半径の BFD が経度に関わらず発生している(図1)。BFD を渦半径ごとに分類したコン ポジット解析を実施した。その結果、小さい半径(80-150km)の BFD は暖気核構造を持ち、一方 で大きな半径(350-450km)の BFD は温帯低気圧と似た傾圧構造をもつ。半径の小さい BFD ほど 大雨をもたらす割合が高くなっていた。



図1 RRJ-Conv より抽出した BFD の分布(各点の色の違いは BFD の半径を示す)



図2 各年のBFDの発生数(黄色)と、大雨をもたらすBDFの発生数(青色)。緑線は大雨を もたらす割合。上から図1のWest, Center, East に対応する経度の範囲

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用すること で実現することができた。また、研究にあたっては、共同研究 C-5「日本領域長期再解析 (RRJ-Conv.)の長期データ整備と関連する研究開発」を通じて同センター関係各位に有益な ご指導とご協力をいただいた。本研究は、東北大学と気象庁気象研究所の共同研究の一環と して行った。また、本研究は JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2013 および科研費 22H01295 の支援を受けた。

-2 -

参考文献

Fukui, S., T. Iwasaki, K. Saito, H. Seko, and M. Kunii, A feasibility study on the high-resolution regional reanalysis over Japan assimilating only conventional observations as an alternative to the dynamical downscaling. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 565–585, 2018.
Kasuga, S., M. Honda, J. Ukita, S. Yamane, H. Kawase, and A. Yamazaki, Seamless Detection of Cutoff Lows and Preexisting Troughs. *Mon. Wea. Rev.*, **149**, 3119–3134, 2021.

— 4 —

3次元フェーズフィールド法によるがんオルガノイドの形態形成

千葉 紀風 川村 洸太郎 今井 正幸

東北大学大学院理学研究科

概要:本研究では、がん細胞の遺伝子変異が腫瘍の形態に与える力学的影響を解明するために、 3次元フェーズフィールド法を用いて腫瘍の形態形成モデルを構築した。がんオルガノイドを対象に、細胞間の接着力や細胞分裂の周期・方向、内腔圧力といったパラメータを変化させることで、細胞集合体の形態変化を数値シミュレーションにより再現した。これにより、原発巣と転移 巣のがん特性を力学的観点から判別できることが示された。

序論

がんにおかされた細胞組織である腫瘍は特有の形態を示し、その形態はがんの予後を予測す る上で重要な情報を与える [1]。現在の病理診断はがん細胞の遺伝子変異と腫瘍の形態に基づ いているが、その遺伝子変異がタンパク質を介してどのような力学作用を細胞に与えて腫瘍の 形態を決定しているかを明らかにできれば、がんの病理診断の信頼性は非常に高まることが期 待できる (図1)。この課題を解決する第一歩として、我々は腫瘍の形態形成を支配する力学モ デルの構築を実験と数値シミュレーションの両面から取り組んでいる。本共同研究では数値シ ミュレーションとして、細胞集合体の3次元フェーズフィールド法を開発することにより、が ん細胞の集合体である腫瘍の形態を決定する力学因子を抽出した。



図1 本研究の概要.病理診断においてがん細胞の遺伝子変異と腫瘍の形態変化を用いて判別するのに対して、力学モデルは両者の情報を結びつけることで、既存の病理診断スキームを裏付けることができると考えられる。

方法

がんオルガノイドは腫瘍から抽出した細胞を培養して形成される細胞集合体であり、生体内の 腫瘍が示す遺伝子変異を保持する。がん細胞の遺伝子変異はがんオルガノイドの形態にも反映さ れ、その基本的な構造は細胞集合体である細胞組織と水を主成分とする内腔からなる管腔である。 このような管腔構造に対して、フェーズフィールド法では細胞や内腔の形状を相の拡散界面とし て扱う[2,3]。相は空間の位置 r = (x, y, z)、時間 t で表されるフェーズフィールド変数 u(r, t)を用いて表される。後述する理由により、フェーズフィールドが非保存場であることを仮定する と、時間発展は系の自由エネルギーの汎函数微分 $\tau \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\delta E}{\delta u}$ に従う。管腔構造の場合、個々の 細胞のフェーズフィールド $u_m(\mathbf{r},t)$ と内腔のフェーズフィールド $s(\mathbf{r},t)$ について自由エネルギー を定義する。まず、**m**番目の細胞の自由エネルギーを以下のように表す,

$$\begin{split} E[u_m] &= \int_{\Omega} \left[\frac{D_u}{2} |\nabla u_m|^2 + \frac{1}{4} u_m^2 (1 - u_m)^2 \right] d\mathbf{r} \\ &+ \frac{\alpha}{12} \Big(V_{m,0} - V(u_m) \Big)^2 + \sum_{n \neq m}^{N_c} \frac{\beta}{12} \int_{\Omega} h(u_m) h(u_n) \, d\mathbf{r} + \frac{\beta}{12} \int_{\Omega} h(u_m) h(s) \, d\mathbf{r} \\ &+ \sum_{n \neq m}^{N_c} \frac{\eta}{6} \int_{\Omega} \nabla h(u_m) \nabla h(u_n) \, d\mathbf{r} + \gamma \int_{\Omega} |\nabla h(u_m)|^2 \, d\mathbf{r} \end{split}$$

ここで、第1項は勾配自由エネルギーとダブルウェルエネルギーを表す。係数 D_u は勾配の幅と 界面張力の大きさを決める。第2項は細胞の体積を $V_{m,0}$ に拘束するペナルティ項を表す。係数 α は十分大きい値を指定する。また、細胞 *m* の体積を $V(u_m) = \int_{\Omega} h(u_m) dr$ で表す。ここで Ω は空間での有限の領域を表す。第3項と第4項はそれぞれ細胞間、細胞と内腔間の排除体積を表 す項であり、係数 β , β_s はペナルティの強さを表す。また、関数 $h(u) = u^2(3 - 2u)$ は数値計算 の安定性のために導入する。第5項は細胞間の接着エネルギーである。係数 η は細胞間の接着 力である。最後に、第6項は界面が無限に拡がることを拘束するペナルティ項を表す。係数 γ は 接着力 η よりも大きい値に指定する。

次に内腔の自由エネルギーを以下のように表す,

$$E[s] = \int_{\Omega} \left[\frac{D_s}{2} |\nabla s|^2 + \frac{1}{4} s^2 (1-s)^2 \right] dr$$
$$+ \sum_{n \neq s}^{N_c} \frac{\beta_s}{12} \int_{\Omega} h(s) h(u_n) dr - \frac{\xi}{6} \int_{\Omega} h(s) dr$$

上記の細胞と同じように、第1項は勾配自由エネルギーとダブルウェルエネルギーであり、係数 D_s は勾配の幅と界面張力の大きさを決める。第2項は細胞と内腔間の排除体積を表すペナルティ項である。第3項は内腔の圧力によるエネルギーである。係数 ξ は細胞組織を隔てた内腔の 圧力差を表す。

本研究の系では細胞分裂により新たな細胞のフェーズフィールドが生成される。また、内腔の

フェーズフィールドは圧力差によって生成および消滅する。したがって細胞相・内腔相は非保存 場と仮定して、時間発展方程式をフェーズフィールドの汎関数微分で以下のように表す,

$$\tau \frac{\partial u_m}{\partial t} = D_u \nabla^2 u_m + u_m (1 - u_m) \left(u_m - \frac{1}{2} + f_u(u_m, \psi) \right).$$
$$f_u(u_m, \psi) = \alpha \left(V_m - V(u_m) \right) - \beta \left(\psi - h(u_m) \right) + \eta \nabla^2 \left(\psi - h(u_m) \right) + \gamma \nabla^2 h(u_m)$$

および、内腔の時間発展方程式,

$$\tau \frac{\partial s}{\partial t} = D_s \nabla^2 s + s(1-s) \left(s - \frac{1}{2} + f_s(s,\psi) \right).$$
$$f_s(s,\psi) = -\beta_s \psi + \xi$$

ここで、係数 τ は単位時間を表す正の定数である。変数 $\psi(r,t) = \sum_{m}^{M} h(u_m(r,t))$ はある位置に おける細胞のフェーズフィールドの和を表す。以上の時間発展方程式について3次元空間で単位 時間ステップごとにオイラー法で更新する。なお、本研究で使用したパラメーターは表1に記載 した。シミュレーションのプログラムはFortran,ノード内の並列処理はOpenMPで実装した。ま た、計算機はAOBA-Sを用いて1VE あたり16コアの並列処理で計算を実行した。

表1 フェーズフィールド法のパラメーター

α	eta , eta_s	η	γ	D_u , D_s	τ
1	1	0.008	0.01	0.001	1

結果と考察

がんオルガノイドの管腔構造を制御する力学的な因子を明らかにするために、フェーズフィー ルドモデルを用いて細胞集合体の形態変化の再現を試みた。モデルパラメータとして細胞間の接 着力、細胞の分裂周期、内腔圧力、分裂方向の4つを変化させて、1から100細胞期までの形態 変化を計算した(図2)。その結果、基本的には内腔の体積増加は内腔圧力に比例するのに対し て、細胞間の接着力を弱くすると、内腔の体積増加率は上昇した。また、分裂周期を長くすると 細胞組織の外形が滑らかな球形に変化した。最後に、細胞分裂の方向を細胞組織面に対して垂直 にすると、細胞組織が多層化して内腔の体積は減少した。

以上の結果から、原発巣では接着力が低下もしくは内腔圧力が増加することで内腔の占有率が 大きい形態が形成されるのに対して(図3)[4]、転移巣では内腔の占有率が小さいため内腔圧力

— 6 —



図2 3次元フェーズフィールド法による細胞増殖の時間発展とモデルパラメータごとの形態変化.計算過程では細胞は細胞周期に沿って100細胞まで分裂する.モデルパラメータを変化させると細胞集合体は異なる自己組織化パターンを示す;基準となるパラメータセットに対して、内腔 圧力差を増減、細胞間の接着力の減少,細胞周期の延長、分裂方向を変化させた時の3次元フェー ズフィールド. Control のパラメーターは $\xi = 0.30$, $\eta = 0.008$, $\tau_d = 10 \tau$.



図3 実験データとモデルのフィッティング. 細胞数に対してがんオルガノイド全体に対する内腔 の体積分率を示す.シンボルは実験データ、曲線はモデルの結果を表す.

が減少しており、また少数細胞期に内腔が形成されないことから原発巣とは異なる分裂方向を示 すことが明らかになった。すなわち、がんオルガノイドの形態形成から原発巣と転移巣のがんの 特性を判別できることが示され、この手法はがんの分類(腺がんや扁平上皮がんなど)、患者ごと の特性の違いにも適用できる可能性がある[5]。

結論

シミュレーションの結果、原発巣においては接着力の低下や内腔圧力の増加が内腔の体積占 有率に影響を与え、特徴的な形態変化が確認された。一方、転移巣では内腔形成が遅く、分裂 方向が異なるため、原発巣とは異なる形態を示すことが明らかになった。この手法は、がんの 分類や患者ごとの特性の違いに適用でき、がんの診断精度向上に寄与することが期待される。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用すること で実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご 協力をいただいた。

参考文献

[1] Fiore, V. F. *et al.* Mechanics of a multilayer epithelium instruct tumour architecture and function. *Nature* **585**, 433–439 (2020).

[2] Nonomura, M. Study on multicellular systems using a phase field model. PLoS One 7, e33501 (2012).

[3] Akiyama, M., Nonomura, M., Tero, A. & Kobayashi, R. Numerical study on spindle positioning using phase field method. *Phys. Biol.* **16**, 016005 (2018).

[4] Chiba, T., Morphology of multicellular system revealed by vesicle aggregates and cancer organoids, PhD thesis., Tohoku University, (2024).

[5] Kopper, O. *et al.* An organoid platform for ovarian cancer captures intra- and interpatient heterogeneity. *Nat. Med.* **25**, 838–849 (2019).

[共同研究成果]

熱分解反応場における温度の変動が化学反応速度に及ぼす影響の解明

松川 嘉也:東北大学大学院工学研究科 青木 秀之:東北大学大学院工学研究科

本研究では、化学反応を考慮した熱・物質移動を伴う流体計算(CFD)を実施し、壁からの対流伝 熱に伴う温度の変動が化学反応速度に及ぼす影響を検討した。

1. はじめに

熱分解反応は、さまざまな化学工業プロセスにおいて、目的の反応あるいは不本意な副反応と して起こっている。プロセスを最適化するために、CFD と化学反応を連成させた解析が多く行わ れている。化学工業プロセスの多くは乱流場であり、産業界では乱流を表現するモデルとして計 算コストの兼ね合いから Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS)や Large Eddy Simulation (LES)に よる解析が多く行われている。RANS から得られる温度場は時空間的に平均化されたものであり、 LES から得られる温度場はフィルター操作が施された速度場によるものである。化学反応速度は Arrhenius の式に代表されるように、温度の上昇に伴い指数関数的に増加するため、温度に変動が ある場合に平均温度を絶対反応速度の算出に用いてしまうと実際の化学反応速度とかい離する可 能性がある。前々報[1]では、RANS によりどの程度のかい離があるのかを検討した。また、熱分 解において平均温度に対する 1%程度の変動であれば、影響が小さいことを明らかにした。本報で は、壁面からの伝熱を伴う LES シミュレーションを行い、RANS より高い精度で温度の変動が比較的 大きいことが明らかになった。本研究では LES シミュレーションから得られた温度が熱分解反応 速度に及ぼす影響を検討した。

2. シミュレーションに用いるソフトウエア構成の検討

本研究では FORTRAN で記述された in-house コードにより流体計算を実施した。ライブラリとして、表 1 に示す行列計算ライブラリを用いた。Open MPI は AOBA-B にインストールされているものを用いた。OpenBLAS および ScaLAPACK について、本研究を開始した 2020 年 11 月当初において、GCC 環境用のライブラリが提供されていなかったか、著者の力不足により使用できなかったため、GCC 環境においてはソースコードからコンパイルしたライブラリを用いた。それ以外のライブラリはソースコードからコンパイルしたものを用いた。

スⅠ シミュレーション(C/IIV/C//1/ノノノ					
	ライブラリ名	バージョン			
Message Passing Interface	Open MPI	4.0			
線形代数演算	OpenBLAS	0.3.10			
並列行列計算	ScaLAPACK	2.1.0			
疎行列直接解法	MUMPS	5.3.5			
メッシュ分割	ParMETIS	4.0.3			
疎行列反復解法ソルバー	AMGS 並列版[3]	1.10			
	AGMG [4-6]	3.3.5			

表1 シミュレーションに用いたライブラリ

3. 解析手法·解析对象

熱移動を考慮した Large Eddy Simulation (LES)によって非定常乱流場の急拡大流れを解析するこ とで実施した。解析対象を図1に示す。支配方程式にはフィルター操作を施した非圧縮性 Navier-Stokes 方程式を用いた。有限体積法に基づき離散化した。運動量に関する対流項および拡散項の 離散化スキームには二次中心差分法を用いた。時間項の離散化スキームには3次の Adams-Bashforth 法を用いた。圧力と速度のカップリングには SMAC 法[7]を適用し、圧力補正値に関する 行列方程式の解法には AMGS [3]を用いた。収束判定条件には流入質量流量で規格化した離散化し た連続の式の誤差の絶対値の総和を用い、10⁻⁶以下となった時点で収束解が得られたものとした。

乱流による温度の変動について、LES のグリッドスケールで解像したもののみを考慮した場合 とエンタルピーの分散の輸送方程式を解いた場合および温度の分散の輸送方程式を解いた場合の 3ケースを比較した。

エンタルピーの分散の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\bar{\rho} \tilde{h}^{\tilde{n}_{2}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left(\bar{\rho} \tilde{u}_{j} \tilde{h}^{\tilde{n}_{2}} \right) = \frac{\partial}{\partial x_{j}} \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_{h}} + \frac{\mu_{t}}{\sigma_{ht}} \right) \frac{\partial \tilde{h}^{\tilde{n}_{2}}}{\partial x_{j}} \right\} + 2 \frac{\mu_{t}}{\sigma_{ht}} \left(\frac{\partial \tilde{h}}{\partial x_{j}} \right)^{2} - C_{h} \bar{\rho} \tilde{h}^{\tilde{n}_{2}} \omega \qquad (1)$$

温度の分散の輸送方程式

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\bar{\rho} \widetilde{T^{*}} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\bar{\rho} \widetilde{u}_j \widetilde{T^{*}} \right) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_{ht}} \right) \frac{\partial \widetilde{T^{*}}}{\partial x_j} \right\} + 2 \frac{\mu_t}{\sigma_{ht}} \left(\frac{\partial \widetilde{T}}{\partial x_j} \right)^2 - C_h \bar{\rho} \widetilde{T^{*}} \omega + \frac{2}{\widetilde{C_p}} T^* \sum_i S_i h_{fi}$$
(2)



図1 LES の解析対象

管の内壁面温度を 1173 K とした。原料を *n*-heptane として熱分解を行った。詳細化学反応機構 には KM2 [8]を用いた。

4. 結果と考察

図2に時間平均した転化率の管長方向分布を示す。サブグリッドスケールの温度変動を考慮した場合もしない場合もほとんど原料濃度は変化しなかった(図2(a))。これは、本検討では、管径方向の温度勾配が小さかったため、サブグリッドスケールの温度変動が非常に小さかったためである。図2(b)-(d)のとおり、主要生成物の濃度についてもサブグリッドスケールの温度変動の影響が極めて小さいことがわかる。ここでプロピレンおよびアセチレンは出口付近では、管長方向の距離に対する濃度の変化が小さくなっており、平衡に近い状態である。この出口付近において、サブグリッドスケールの温度変動の影響がより小さくなったことから、平衡状態に近い化学種の濃度はサブグリッドスケールの温度変動の影響をほとんど受けないことが分かった。原料および生成物のいずれも、前報[2]のように急激な温度変化が起こるような加熱条件では異なる結果になる可能性があることに注意が必要である。



図2 管長方向の時間平均濃度

5. 結論

本研究のLESシミュレーションでは、LESにおいてサブグリッドスケールの温度の変動が熱分 解挙動に与える影響が小さいことが明らかになった。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実 現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力をい ただいた。ここに謝意を示す。

参考文献

[1] 松川嘉也, 松下洋介, 青木秀之, 熱分解反応シミュレーションにおける温度の変動, SENAC 56 (2023) 6-12.

[2] 松川嘉也, 青木秀之, 温度の変動の大きさを明らかにするための LES シミュレーション, SENAC 57 (2024) 3-7.

[3] A. Fujii, T. Tanaka, H. P. C. Laboratory, AMGS library, 2010.

[4] Y. Notay, An aggregation-based algebraic multigrid method, Electronic Transactions on Numerical Analysis 37 (2010) 123-146.

[5] A. Napov, Y. Notay, An Algebraic Multigrid Method with Guaranteed Convergence Rate, SIAM Journal on Scientific Computing 34 (2012) A1079-A1109.

[6] Y. Notay, Aggregation-Based Algebraic Multigrid for Convection-Diffusion Equations, SIAM Journal on Scientific Computing 34 (2012) A2288-A2316.

[7] A.A. Amsden, F.H. Harlow, A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, J. Comput. Phys. 6 (1970) 322-325.

[8] Y. Wang, A. Raj, S.H. Chung, A PAH growth mechanism and synergistic effect on PAH formation in counterflow diffusion flames, Combust. Flame 160 (2013) 1667-1676.

大型計算機を用いた電磁波に対して一つの構造で反射/吸収/透過

を実現するメタサーフェスの開発

有馬 卓司

東京農工大学 大学院 工学研究院 先端電気電子部門

筆者は電磁波に対して有効な多機能メタサーフェスを開発したので報告する.メタサーフェス とは自然界に存在しない電気特性を示す人工的な板状構造の総称である.開発した多機能メタサ ーフェスは、周波数によって電磁波を反射、吸収もしくは透過を一つの構造で実現する.この構 造を部屋の窓などに設置すれば、外部から携帯電話の電波は入射するが、無線 LAN などの内部の 電磁波は外に出さないようにするなど、利便性を保ったまま情報セキュリティの向上が可能とな る.開発には大型計算機による電磁界シミュレーションを用いて行った.

1. はじめに

現在、情報セキュリティに関するインシデントが多く報告されている。電磁波は携帯電話や無 線 LAN などで活用されており、生活に無くてはならないものとなっているが、その通信の秘匿性 について完全ではない.特に無線 LAN は会社がある建物内などクローズな使用を想定しているが, 電磁波の特性上その一部は、建物外に漏洩する. 無線 LAN の暗号化を高度化していない環境は多 くあり、情報漏洩が心配されている.一方,2000年頃より電磁波の分野でメタサーフェス[1]と 呼ばれる自然界に存在しない電気特性を示す人工的な板状構造が開発されている。この構造を用 いることで、電磁波を吸収したり特定の方向に反射させることが可能となり、電磁波の環境改善 に広く用いられている.これまで開発されてる電磁波に対するメタサーフェスは、その機能が反 射や吸収など役割が一つであった.一方、上述したような利便性を保ったまま情報セキュリティ の向上を考えると、ある周波数は透過させ、ある周波数は吸収させるなどメタサーフェスの多機 能化が必要である. 文献[2.3.4]では, 一つの構造でありながら特定の周波数の電磁波を反射させ, 別の特定の周波数は吸収させる構造が報告されている.この構造は Rasorber (ラゾーバー)と名 付けられた.本報告でもこの構造を Rasorber と呼ぶ.文献[2]で開発された構造は電磁波の入射 角度により、吸収する周波数が変わってしまい、実用化は難しい構造であった、本報告では、入 射角度が変わっても周波数特性の変化が少ない構造の開発を行った. Rasorber の開発手法は確立 されていないので、シミュレーションを活用し構造を開発する事が必要になる、本報告では、東 北大学サイバーサイエンスセンターの大型計算機を用いた電磁界シミュレーションを実施して行 った.

2. 角度入射に対して周波数特性変化の少ない Rasorber の開発法

2.1 FDTD 法

本報告では電磁界シミュレーション手法として, FDTD 法[5]を用いた. FDTD 法は解析領域を微 小セルと呼ばれる単位格子でモデル化する. その単位格子を示す. FDTD 法では,解析領域の大き さを定義し,その解析領域内を構成する各方向の長さをΔx,Δy,Δz で構成される微小立方体(微 小セル)に分けて解析を行う. このセル内に図1の右側の図に示すように電界,磁界の各成分を 互い違いに配置する. このように FDTD 法において,電界および磁界成分は同じ場所には配置され ることは無い. そして,これら電界および磁界に対してマクスウェルの方程式のうち下記に示す ファラデーの法則およびアンペアの法則を



図1 FDTD 法における解析領域(左)と解析領域を構成する単位電磁界配置(右)

$$\nabla \times \boldsymbol{E}(\boldsymbol{r},t) = -\frac{\partial \boldsymbol{B}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t}$$
$$\nabla \times \boldsymbol{H}(\boldsymbol{r},t) = \frac{\partial \boldsymbol{D}(\boldsymbol{r},t)}{\partial t} + \boldsymbol{J}(\boldsymbol{r},t)$$

適応する.ここで, E, H, B, D, J, r, t はそれぞれ電界,磁界,磁束密度,電束密度,電流密度, 位置ベクトルおよび時間である. FDTD 法は時間領域の手法であり, FDTD 法においては電界と磁界 は異なる時間で計算を行う.そのため、ある時間の電界を求めて、その値を元に次の時間の磁界 を求めるという手法である、そして、その計算を逐次繰り返して、電磁界の時間を進めて時間応 答を求める事が出来る.また,周波数領域の値が必要な時は,時間領域の結果をフーリエ変換す ることにより求める事が出来る.次に FDTD 法の計算に必ず必要となる吸収境界条件について述べ る. FDTD 法においては,計算領域はいわゆる閉領域の解析であり,非常に大きな空間中に置かれ た放射源や散乱体の解析を行うには、計算領域を反射がないとる境界で閉じておく必要がある. この境界を吸収境界(Absorbing Boundary Condition : ABC)という. この条件が完全でないと, 解散領域の境界で反射が起こり、解析結果に誤差が生じる. FDTD 法においては、吸収境界条件は 解析精度に影響を与えることから、様々な手法が提案されてきた.本稿では、その中でも最も有 効であるとされる Berenger の PML (Perfectly Matched Layer)を用いている. Berenger の PML 吸収境界条件は、必要とされる計算機資源が増加するが、最も有効な吸収境界条件である. PML の基本概念は解析空間のインピーダンスと整合の取れた仮想的な損失媒質を考える. するとこの 仮想媒質に入射した電磁波は反射することなく、さらに仮想媒質中を進むにつれて減衰する.よ って解析空間から見ると電磁波が吸収され、吸収境界が実現できる、吸収境界を含む FDTD 法の詳 細は、文献[5]に記載されているので参照していただきたい.





図2全体的な構造(左) 上面の構造(中)下面の構造(右) 図2に開発した Rasorber の構造を示す.図2では黄色が金属,青は誘電体を示す.Rasorber は上面に誘電体の上に金属板を配置し、その裏面には、金属板にスリットと呼ばれる隙間を配置 して実現される. 簡単に Rasorber の動作原理を説明する. 上面の金属と下面のスリットは補対の 関係になっている. 上面の金属構造に共振する周波数では、共振した電磁波が裏面のスリットを 通して裏面に放射されるので、電磁波を透過させる. また、上面の構造と裏面の基板の間で起き る共振では、電磁波は基板内に閉じ込められ、基板の導電損失により電磁波は吸収される. これ 以外の周波数では、裏面の基板により電磁波は反射される. 本報告では、透過させる周波数を 6.5[GHz]、吸収させる周波数を 8.5[GHz]と設定した. そして、その構造について東北大学サイバ ーサイエンスセンターの大型計算機を用いて繰り返し電磁界シミュレーションを実施し、構造の パラメータを模索した. 最終的な構造のパラメータを表1に示す.

g	W	1	W	L	W_1	W_2	l_1	l_2
1.20	1.20	7.20	1.20	5.60	0.40	0.40	3.20	4.00

表1 構造のパラメータ(単位:ミリ)

2.3 結果



図 3 Rasorber の透過と吸収の結果

図4 Rasorber 上面の電流分布(6.5GHz)

開発した構造の反射および透過特性を図3に示す.赤い線はRasorberからの反射量を示し,緑の線は透過量を示している.図中に示すように、6.5[GHz]では、反射量が減り逆に透過量が増えている.これは、この周波数で電波が透過していることを示す.また、8.5[GHz]では反射量および透過量ともに減少している.これは電磁波がRasorberに吸収されていることを示している.図中には赤系統の線および緑系統の線がそれぞれ2本ある.これは入射角度の違いであり、1本は垂直入射、もう1本は75度の角度で入射した結果である.それぞれの色の2本の線はほぼ重なっており、入射角度によって周波数特性が変わらないことが分かる.図4に構造表面の電流分布を示す.このように強い電流が生じており6.5[GHz]で共振していることが分かる.次に入射角に対して周波数がどれくらい変化するかを、文献[3]の構造と比較し開発した構造の優位性を示す.周波数の変化を

$$D[\%] = \frac{f_0 - f_{75}}{f_0} \times 100$$

で定義する.ここで,foは垂直入射での共振周波数,f75は75度から電波が入射した際の共振周波数である.文献[3]の構造では,吸収する周波数および透過する周波数は3.0%および3.2%ずれるのに対し,開発した構造ではそれぞれ0.46%および0.45%のずれにとどまっており優位性が分かる.

2.4 周波数の調整

最後に, Rasorber の透過および吸収の周波数を現在使われている周波数に調整した特性を示す. Rasorber を窓や壁に貼り,携帯電話で現在広く使われている 3.4~4.1[GHz]の電磁波は透過させ, 社内で使う周波数 5.2[GHz]の無線 LAN は漏洩させないように吸収させる構造の開発を,大型計算 機によるシミュレーションにより行った.結果を図 5 に示す.このように開発した構造はパラメ ータを調整する事により比較的容易にターゲット周波数を調整することが出来る.



図 5 周波数を調整した Rasorber

3. まとめ

本報告では、周波数によって電磁波を反射、吸収もしくは透過を一つの構造で実現する Rasorberに対し、高角度入射してもその特性が変わらない構造を開発した.従来の構造と周波数 のずれを定量的に評価したが、大幅にその角度依存性を低減できた.開発においては、大型計算 機を用いた電磁界シミュレーションにより行い、効率的に開発が出来た.また、その周波数はパ ラメータを調整する事により適宜調整できることを示した.

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターに設置されている大型計算機を活用する ことで実現することができた.また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導 とご協力をいただいた.

参考文献

[1] 宇野, 道下, "メタマテリアルアンテナの基礎"コロナ社, 2021

- [2]Mehran Manzoor Zargar, Archana Rajput, Kushmanda Saurav, Shiban Kishen Koul 'Polarisation-insensitive dual-band transmissive rasorber designed on a single layer substrate' IET Journals, 2020
- [3]Minhua Li a, Congying Huang b, Chengye Huang a, Youting Song a, Hanru Shao a, Jianfeng Dong a"Graphene integrated rasorber at terahertz frequencies with functionalities of both absorption and transmission" Results in Physics Volume 41, October 2022
- [4]X. Q. Jia, Q. Chen, Q. An, Y. J. Zheng, Y. Q. Fu "Low-pass spatial filter based on 3D metamaterial rasorber with wideband absorption at high frequency" RESEARCH ARTICLE, MAY, 18, 2020

[5] 宇野,何,有馬,"数値電磁界解析のための FDTD 法-基礎と実践-",コロナ社, 2016

[共同研究成果]

環境因子を考慮したミリ波ばく露における安全性評価に向けて

小寺 紗千子:名古屋工業大学大学院 電気·機械工学専攻 平田 晃正:名古屋工業大学大学院 電気·機械工学専攻

今後利用が拡大するミリ波帯電波に対する人体安全性について関心が高まっている。電波の人体に与える影響は、100kHz以下では刺激作用、100kHz以上では熱作用が支配的となることから、 国際ガイドラインでは、全身ばく露に対する安全性の指標として、深部体温上昇と相関のよい全 身平均 SAR (Specific Absorption Rate [W/kg])が用いられている。近年改訂された国際ガイドライ ンでは、全身平均 SAR の適用上限周波数が 10 GHz から 300 GHz に拡大された。しかしながら、 6 GHz 以上における科学的根拠の不足から、安全側のアプローチがとられている。6GHz 以上の 全身ばく露評価は、大規模解析が必須となるため、電磁界ばく露ドシメトリ評価のみでもほとん ど報告がなされておらず、その直接的な生体応答である深部体温上昇までを評価した例はない。 本研究では、6GHz 超全身ばく露に対して、大規模解析により様々な体型・年齢・外気温などの 因子を包括的に考慮した体温上昇評価を目的としている。本稿では、2023 年度に実施した共同研 究内容を中心に報告する。

1. はじめに

現在、一部運用が開始された第5世代移動通信システム(5G)の利用周波数帯は、従来の無線周 波数帯と同程度の4GHzからミリ波帯(特に28~80GHz)までと多岐にわたり、特に、今後利用が 拡大するミリ波帯電波に対する人体安全性について関心が高まっている。

電波の人体に与える影響は、100kHz以下では刺激作用、100kHz以上では熱作用が支配的とな る。世界保健機関(WHO)が認める電波防護に関する国際ガイドラインとして、ICNIRP ガイド ライン[1]、IEEE 規格[2]が挙げられる。これらガイドラインでは、特に熱作用が支配的となる周 波数帯では、全身ばく露と局所ばく露に対して、それぞれに対応する指標が定められている。具 体的には、全身ばく露では、過度な深部温度上昇からの防護を目的とし、深部温度上昇と相関が 良い全身平均 SAR (Specific absorption rate [W/kg])が、局所ばく露では、局所的な温度上昇と相関 が良いという理由で、6 GHz 以下では局所 10g 平均 SAR、6 GHz 以上では、吸収電力密度(APD: Absorbed power density [W/m²])が評価指標として用いられている。両ガイドラインは、2019、2020 年に改定されたが、特に全身ばく露に関しては、未だ 6GHz 超における科学的根拠が不足してい ることから、安全側の評価指標が定められており、さらなる知見の取得が提言されている。特に、 6 GHz から 300 GHz における安全性に関する科学的根拠は不足しており、現在の制限値は、科学 的根拠が不足していることから、現在の制限値は、簡易モデルを用いた計算に基づき概算した、 安全側の設定となっている。また、個々人や環境因子によるばらつきは明らかになっていない等 の課題が残る。特に、大規模解析が必須となる全身ばく露におけるドシメトリ評価に対しては、 6GHz 以上では、電磁界ばく露ドシメトリ評価のみでも、ほとんど報告がなされておらず、その 深部体温上昇、また対応する局所ばく露指標や局所温度上昇まで含めた検討は、未だ報告されて いない。

本研究グループでは、これまでに電磁界・熱の複合物理と血流増加や発汗といった生体温熱応 答を組み合わせた混成解析手法を開発してきた[3]-[5]。この手法を用いた大規模解析により、様々 な体型・年齢・外気温など環境因子などを包括的に考慮した、準ミリ波帯・ミリ波帯ばく露によ る体温上昇評価を行うことを本研究の目的とする。本稿では、2023年度に実施した共同研究内容 を中心に報告する。

2 解析手法

図 1(a)に解析モデルを示す。解析モデルは、情報通信研究機構で開発された日本人成人男性モ デル(TARO)[6]をベースに、ポリゴンモデルを介することでスムージング、高分解能化したものを 用いた[7]。TAROモデルは51 種類の組織によって構成されており、一辺が2mmの立方体でセグ メントされたボクセルモデルである。このモデルをベースに、分解能 0.1 mm まで高分解能化を 行った。なお、6GHz 以上の周波数帯ドシメトリ評価の問題点のひとつに、人体モデリングの信 頼性が挙げられる。電波の浸透深さがミリメートル程度になり、電波はほぼ皮膚組織に吸収され るため、皮膚の厚さのモデル化が重要となる。一方、今回ベースとした人体モデルのように、従 来用いられてきた人体ボクセルモデルは、数ミリの解像度で組織のセグメンテーションを行った ものが多い。そのため、皮膚厚みは、その整数倍に依存し、実際の人体における皮膚の厚みとは、 かけ離れたものとなってしまう[8]-[10]。この問題を解消するため、本研究では、上記のようにポ リゴンモデルを介することにより皮膚厚みを調整し、より現実に近い皮膚厚みを再現している [11], [12]。

電磁界解析には、FDTD 法(Finite-Difference Time-Domain method) [13]を用い、解析領域を終端する吸収境界として、CPML(Convolutional Perfectly Matched Layer)[14]を使用した。また、平面波計算には、全電磁界・散乱界領域分割法(Total-Field Scattered-Field Formulation: TF/SF) [15]を用いた。

電磁界解析で得られた電力吸収分布を熱源とし、電波ばく露時の温度変化を求める。温度上昇 解析には、式(1)に示す生体熱輸送方程式[16]を用いた。外気と接する組織には、式(2)で表される 境界条件を適用した。

$$C(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial t} = \nabla \left(K(\mathbf{r})\nabla T(\mathbf{r},t) \right) + A(\mathbf{r},t) + \rho(\mathbf{r})SAR(\mathbf{r}) - B(\mathbf{r},t)\left(T(\mathbf{r},t) - T_B(t)\right),\tag{1}$$

$$-K(\mathbf{r})\frac{\partial T(\mathbf{r},t)}{\partial n} = H(\mathbf{r})\left(T(\mathbf{r},t) - T_a\right) - EV(\mathbf{r},t),\tag{2}$$

ここで、r は位置ベクトル、t は時間、C [J/(kg°C)]は比熱、T は温度、K [W/(m°C)]は熱伝導率、A [W/m³]は代謝熱、B [W/(m³°C)]は血流定数、T_Bは血液温度、H [W/(m°C)]は熱伝達率、T_aは外気温 [°C]、EV [W/m²]は蒸発による熱損失、n は境界面の法線方向の座標である。また、外気温は 30 °C、肺内の温度は外気温と血液温度の平均値で近似した。また、各組織における熱定数は、文献[17], [18]の値を用いた。また、本研究では、深部体温を血液温度と同等であるとみなし、血液温度は、 図 1(b)に示した部位分割モデルを用いることにより、各部位での温度の時間変化を考慮した[5]。 さらに、温度上昇に伴う温熱調整機能についても考慮した。温熱調整機能とは、生体の温度を一定に保つ作用であり、外部から熱刺激が加わり体温が上昇すると、熱を放出しようと血管の弛緩 によって血流を増加させたり、また人体では汗腺の活発化によって発汗を促したりといった生体 特有の反応である。温熱調整機能の定式化については、文献[5]と同様とした。

なお、上記の混成解析は、東北大学サイバーサイエンスセンターの利用支援により構築した解 析実行環境のもと、解析を行っている。具体的には、2023 年度 8 月より新たに導入されたサブシ ステム AOBA-S(SX-Aurora TSUBASA)上での実行環境下で、最適化および MPI 並列化、大容量の ファイル入出力が行えるよう並列分散 IO を用いた。出力は、各 MPI プロセスが各データのファ イル出力を行い、ポスト処理プログラムを用いて最終結果を出力する形に改良した。また、既存 のサブシステム AOBA-A に最適化された温熱解析プログラムを、AOBA-S へ移行することで解析 環境を構築した。

解析条件として、人体モデルを自由空間に配置し、モデル正面から平面波を照射した際の全身平

均 SAR および温度上昇を計算した。平面波は、入射電力密度 10 W/m²の垂直偏波とし、周波数は 1 GHz、3 GHz、10 GHz、25 GHz、入射電力密度は 10 W/m²、外気温は温熱中間体である 28 ℃と した。



図1 (a) 解剖学的人体数値モデル, (b) 血液温度部位分割モデル

3. 解析結果

以下に、新たに構築した大規模解析環境を用いて得られた解析結果の一例を示す。図2に従来 周波数帯から準ミリ波帯全身ばく露における電力吸収分布を、図3に表面温度上昇分布を示す。 また、図中の印は、各条件における局所ばく露指針値および局所温度上昇の最大値観測点を示す。 図2より、周波数が高くなるにつれて、電波の浸透深さも浅くなり、低い周波数では、電波の集 中しやすい四肢に最大値が観測された。一方、10 GHz 以上では、電波の浸透は皮膚組織のみに限 定され、体表面全体で高くなる傾向が得られた。図3より、体表面温度上昇は、低い周波数では 電力吸収の最大点と皮膚最大温度上昇点は一致する傾向となったが、高い周波数帯では、いずれ も最大温度上昇は四肢で観測され、電力吸収最大点とは異なる位置で観測された。これは、初期 温度上昇分布が四肢において低いこと、血流による温度拡散の影響であると考えられる。



図2 全身ばく露における電力吸収分布 (入射電力密度:10 W/m²)



図3 全身ばく露における体表面温度上昇分布 (入射電力密度: 10 W/m²)

4. まとめ

本稿では、6GHz以上の周波数帯における全身平均 SAR 導入の根拠、また対応する許容電力密 度の設定を目的に、数値ドシメトリ評価のための数値人体モデルの改良を行い、従来周波数帯か ら準ミリ波帯までを対象とした全身ばく露計算を行い、対応する全身平均 SAR、局所吸収指針値、 および温度上昇分を求めた。結果に基づき、引き続きさらに高い周波数における全身ばく露電磁 界解析および温度上昇解析を行い、さらなる知見を蓄積するとともに、外気温を変化させた場合 の全身ばく露における深部体温上昇への影響についても検討を進める予定である。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用すること で実現することができた。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご 協力をいただいた。

参考文献

- ICNIRP, "Guidelines for limiting exposure to electromagnetic fields (100 kHz to 300 GHz)," *Health Phys.*, vol. 118, no. 5, pp. 483–524, May 2020.
- [2] IEEE C95.1, "IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to electric, magnetic and electromagnetic fields, 0 Hz to 300 GHz," *IEEE Std*, 2019.
- [3] A. Hirata, T. Nomura, and I. Laakso, "Computational estimation of decline in sweating in the elderly from measured body temperatures and sweating for passive heat exposure," *Physiol. Meas.*, vol. 33, no. 8, 2012.
- [4] K. Kojima, A. Hirata, K. Hasegawa, S. Kodera, I. Laakso, D. Sasaki, T. Yamashita, R. Egawa, Y. Horie, N. Yazaki, S. Kowata, K. Taguchi, and T. Kashiwa, "Risk management of heatstroke based on fast computation of temperature and water loss using weather data for exposure to ambient heat and solar radiation," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3774–3785, 2018.
- [5] T. Kamiya, S. Kodera, K. Hasegawa, R. Egawa, H. Sasaki, and A. Hirata, "Different thermoregulatory responses of people from tropical and temperate zones: A computational study," *Build. Environ.*, vol. 159, no. March, p. 106152 (7 pages), 2019.
- [6] T. Nagaoka, S. Watanabe, K. Sakurai, E. Kunieda, S. Watanabe, M. Taki, and Y. Yamanaka, "Development of realistic high-resolution whole-body voxel models of Japanese

adult males and females of average height and weight, and application of models to radio-frequency electromagnetic-field dosimetry," *Phys. Med. Biol.*, vol. 49, no. 1, pp. 1–15, 2004.

- K. Taguchi, T. Kashiwa, and A. Hirata, "Development on high resolution human voxel model for high frequency exposure analysis," *Prog. Electromagn. Res. Symp. Abstr.*, p. 220, 2018.
- [8] T. Nagaoka and S. Watanabe, "Technique using implicit fairing and specific absorption rates to improve spatial resolution of whole-body human voxel models exposed to plane waves in GHz bands," URSI Gen. Assem. Chicago, IL, August 7–16, 2008., vol. d, no. Id, pp. 7–10, 2008.
- [9] J. F. Bakker, M. M. Paulides, A. Christ, N. Kuster, and G. C. Van Rhoon, "Assessment of induced SAR in children exposed to electromagnetic plane waves between 10 MHz and 5.6 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 55, no. 9, pp. 3115–3130, 2010.
- [10] A. Hirata, I. Laakso, T. Oizumi, R. Hanatani, K. H. Chan, and J. Wiart, "The relationship between specific absorption rate and temperature elevation in anatomically based human body models for plane wave exposure from 30 MHz to 6 GHz," *Phys. Med. Biol.*, vol. 58, no. 4, pp. 903–921, 2013.
- [11] K. Taguchi, S. Kodera, A. Hirata, and T. Kashiwa, "Computation of absorbed power densities in high-resolution head models by considering skin thickness in quasi-millimeter and millimeter wave bands," *IEEE J. Electromagn. RF Microwaves Med. Biol.*, vol. 6, no. 4, pp. 516–523, 2022.
- [12] S. Kodera, K. Taguchi, Y. Diao, T. Kashiwa, and A. Hirata, "Computation of whole-body average SAR in realistic human models from 1 to 100 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 72, no. 1, pp. 91–100, 2023.
- [13] A. Taflove and S. C. Hagness, *Computational electrodynamics: the finite-difference time-domain method*, 3rd edn. Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [14] J. A. Roden and S. D. Gedney, "Convolution PML (CPML): An efficient FDTD implementation of the CFS-PML for arbitrary media," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 27, no. 5, pp. 334–339, 2000.
- [15] M. Sato, "Application of the finite-difference time-domain method and total-field/scattered field formulation to scattering phenomena in solids," *Acoust. Sci. Technol.*, vol. 28, no. 4, pp. 260–270, 2007.
- [16] H. H. Pennes, "Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm.," J. Appl. Physiol., vol. 1, no. 2, pp. 93–122, 1948.
- [17] R. L. McIntosh and V. Anderson, "Erratum: a comprehensive tissue properties database provided for the thermal assessment of a human at rest," *Biophys. Rev. Lett.*, vol. 05, no. 03, pp. 129–151, 2010.
- [18] A. Hirata, M. Fujimoto, T. Asano, J. Wang, O. Fujiwara, and T. Shiozawa, "Correlation between maximum temperature increase and peak SAR with different average schemes and masses," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 48, no. 3, pp. 569–577, 2006.
- [19] D. Fiala, G. Havenith, P. Bröde, B. Kampmann, and G. Jendritzky, "UTCI-Fiala multi-node model of human heat transfer and temperature regulation," *Int. J. Biometeorol.*, vol. 56, no. 3, pp. 429–441, 2012.

[報告]

オープンキャンパス 2024 報告

情報セキュリティ研究部 水木敬明

2024 年 7 月 30 日と 31 日の 2 日間,東北大学オープンキャンパス 2024 が開催されました.昨 年度に引き続き来場制限を行わない通常開催のオープンキャンパスとなり,2 日間で約 60,000 人 が本学に来場されたとのことです.

サイバーサイエンスセンターにおきましても昨年度に引き続き対面での一般公開となりました. 具体的には次のような要領で当センターのオープンキャンパスを実施しました.

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、7月30日、31日両日にかけてオープン キャンパスを開催致します.スーパーコンピュータ AOBA や研究部の最新の研究成果に 関する展示をご覧いただけます.東北大学オープンキャンパスにお越しになる際は、 是非、サイバーサイエンスセンターにお立ち寄りください.

【開催日時】2024年7月30日(火)10:30~15:30 2024年7月31日(水)10:30~15:30

【内容】 スーパーコンピュータ AOBA の見学 研究部による研究紹介 未踏スケールデータアナリティクスセンター(UDAC)の紹介

昨年度に引き続き、2019年度以前より開催時間や場所に関して規模を縮小しつつ、本センターに ご興味を持つ方々にじっくりご見学いただくことができたと考えております.分散コンピュータ 博物館もご覧いただきました.ご来場いただきました皆様に感謝申し上げるとともに、来年度の 参加をお待ちしております.



[スーパーコンピュータ AOBA のお知らせより]

東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムウェブサイトに掲載されたお知らせの一部を転載しています。 https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/information/

コンパイラのバージョンアップについて

2024 年 8 月 29 日に AOBA-A・AOBA-B、2024 年 9 月 3 日に AOBA-S のコンパイラをバージョンアップ いたします。

システム	コンパイラ名	旧バージョン	新バージョン	ドキュメント
	Fortran Compiler	5.2.0	5. 2. 1	
AOBA-S	C/C++ Compiler	5.2.0	5. 2. 1	<u>マニュアル&リリース</u> ノート
AOBA-A	MPI <mark>※</mark> 1	3.6.0	3. 7. 0	
	Intel Compiler (VH 用プログラム) ※2	oneAPI	oneAPI	ano ADI マニュアル間油
AOBA-B	Intel Compiler ※2	2024. 0. 1	2024. 2	onear1マーユノル関連

※1 MPI を利用するプログラムは再コンパイルが必要

※2 Intel oneAPI 2024.2 の環境変数設定ファイルは、bash 向けのみの提供

(情報部デジタルサービス支援課)

商用アプリケーションのバージョンアップについて

数式処理システム「Mathematica」のバージョンアップを行いましたのでお知らせいたします。 新機能の概要、機能の詳細については開発元 Web サイトをご参照ください。

Mathematica

- バージョン:14.1
- バージョンアップ日:2024年8月29日
- サービスホスト:フロントエンドサーバ
- 起動コマンド: (GUI版) mathematica (コマンドライン版) math
- 開発元 Web サイト: <u>https://www.wolfram.com/mathematica/new-in-14/</u>

(情報部デジタルサービス支援課)

学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度について

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、学部学生(3年生、4年生)が、卒業論文等作成の ために大規模科学計算システムを無料利用できる制度を実施いたします。希望者は以下を確認頂 き申請書に必要事項を記入の上、お申し込みください。

本センター教員が内容を審査の上、採択となった研究課題については、以下の期間大規模科学 計算システムを無料で利用する(利用ノード時間に上限あり)ことができます。

1. 応募期間

・<u>第一回 2024年10月1日(火)~2024年10月21日(月)</u>

- ・第二回 2024年12月1日(日)~2024年12月21日(土)
- 2. 利用期間

採択日~2025年3月下旬

- 3. 応募詳細
- ・研究成果を学術論文誌等において発表する場合は、謝辞等で本センターの貢献を明記してくだ さい。
- ・年度末に成果報告書を提出して頂きます。
- ・申し込みには指導教員の承認が必要となります。
- ・高等専門学校生については本科5年生および専攻科生を対象といたします。
- ・指導教員1人につき最大2件までの応募となります。
- 4. 応募方法

応募される方は、本センターのウェブサイト(https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/)の「各種申 請用紙」から「学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度申請書」を<u>ダウンロード</u> し、必要事項を記入して電子メールでお申し込みください。

(送り先)E-mail:edu-prog@cc.tohoku.ac.jp

5. 論文等への利用の明記について

研究成果を論文等で発表する場合には、本センターを利用した旨を明記くださるようお願いいた します。

- 記入例 -

「本研究の実験結果の一部は、東北大学サイバーサイエンスセンター大規模科学計算システムを利用して得られた。」

Part of the experimental results in this research were obtained using

supercomputing resources at Cyberscience Center, Tohoku University.

6. 問い合わせ先

情報部デジタルサービス支援課

TEL: (022)795-6251

E-mail:cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp

(情報部デジタルサービス支援課)

1. お寄せいただきたい投稿内容

サイバーサイエンスセンターでは、研究者・技術者・学生等の方々からの原稿を募集しております。 以下の内容で募集しておりますので、皆さまのご投稿をお待ちしております。なお、一般投稿いただ いた方には、謝礼として負担金の一部を免除いたします。

- 一般利用者の方々が関心をもたれる事項に関する論説
- ・センターの計算機を利用して行った研究論文の概要
- ・プログラミングの実例と解説
- ・センターに対する意見、要望
- ・利用者相互の情報交換

2. 執筆にあたってご注意いただく事項

- (1) 原稿は横書きです。
- (2)術語以外は、「常用漢字」を用い、かなは「現代かなづかい」を用いるものとします。
- (3)学術あるいは技術に関する原稿の場合、200字~400字程度のアブストラクトをつけてください。
- (4)参考文献は通し番号を付し末尾に一括記載し、本文中の該当箇所に引用番号を記入ください。
 - ・雑誌:著者,タイトル,雑誌名,巻,号,ページ,発行年
 - ・書籍:著者,書名,ページ,発行所,発行年

3. 原稿の提出方法

原稿のファイル形式はWordを標準としますが、PDFでの提出も可能です。サイズ*は以下を参照してください。ファイルは電子メールで提出してください。

- 用紙サイズ・文字サイズ等の目安-

- ・<u>サイズ:A4</u>
- ・余白:上=30mm 下=25mm 左右=25mm 綴じ代=0
- ・標準の文字数(45 文字 47 行)
- ・表題=ゴシック体 14pt 中央 ・副題=明朝体 12pt 中央
- ・氏名=明朝体 10.5pt 中央
- ・所属=明朝体 10.5pt 中央
- ・本文=明朝体 10.5pt
- ・章・見出し番号=ゴシック体 11pt~12pt *余白サイズ、文字数、文字サイズは目安とお考えください。

4. その他

- (1)一般投稿を頂いた方には謝礼として、負担金の一部を免除いたします。免除額は概ね1ページ 1万円を目安とします。詳細は共同利用支援係までお問い合わせください。
- (2) 投稿予定の原稿が 15 ページを超す場合は共同利用支援係まで前もってご連絡ください。
- (3) 初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (4) 原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内

情報部デジタルサービス支援課スーパーコンピューティングサポートユニット

- e-mail cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp
- TEL 022-795-3406

-25 -

スタッフ便り

従来の市中のフリーWi-Fiや、宿泊施設の無線LANには、セキュリティ上の問題が多数指摘され、実際に犯罪も起きていたのに、長年に渡って改善がほとんど見られませんでした。大学等では約20年に渡って、安全性の高いeduroamが浸透してきました。市民一般向けにも同様の無線LANローミングシステムが欲しいという話が初期の頃からあり、それがやっと結実したのが2020年、Wireless Broadband Alliance (WBA)によるOpenRoamingです。国内では、2017年よりローミング基盤の導入で先行していた京都市、長野市などに続いて、OpenRoamingが始まってからは、東京都や函館市、姫路市、神戸市、北海道小清水町、大阪府などの自治体Wi-Fiや、全国の宿泊施設、商業施設などにも導入されて、広域での社会実装が始まったところです。全国どこでもとはまだ言えない規模ですが、世界的には北米に次ぐ規模の先行事例になりました。5G/6Gや衛星通信みたいに華々しいものではありませんが、公衆無線LANは、インターネットへの出入口になる身近で重要なインフラです。より多くの自治体や店舗オーナー、事業者が協働し、社会実装が進むことを願っています。(後藤英昭)

先日、宝くじのCMを目にし、以前に、購入した宝くじを自宅の神棚に保管したまま忘れてし まい、気付いたときには換金期限を経過していたため、残念ながら一等の高額当選金を手にする チャンスを逃してしまった方とお話しする機会があったことを思い出しました。

驚きと好奇心にあふれて色々と伺った中で、特に印象に残ったのは、宝くじが期限切れになっていたことを報告した際、「神棚に置いていた結果であれば、私達が手にすべきお金ではないということだから、これで良かったのだ」と穏やかに微笑まれたという奥様のエピソードでした。

果たして私は、家族の同様の失態に対して、かの奥様のように寛大な言葉をかけて達観した対応ができるだろうかと自問してみたところ、身内であっても、購入した人だけの物である宝くじにも関わらず、自分も所有者であるかのように「失態」や「寛大」という言葉を使っている時点で、その境地には達していないなという結論に至りましたが、皆様はいかがでしょうか。(R.S)

【サイバーサイエンスセンタースタッフ異動のお知らせ】

2024.10.1 転出

髙橋 慧智 助教(大阪大学D3センター准教授へ)



5階ベランダから青葉山グラウンド方向

SENAC 編集部 滝沢 寛之 佐々木明里	会 水木 敬明 後藤 英昭 今野義則 大泉 健治 小野 敏 斉藤くみ子
編集・発行	令和 6 年 10 月発行 東北大学 サイバーサイエンスセンター
PDF 作成	仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3 郵便番号 980-8578 株式会社 東誠社

計算機システム	機 種
サブシステム AOBA-S	SX-Aurora TSUBASA Type 30A
サブシステム AOBA-A	SX-Aurora TSUBASA Type 20B
サブシステム AOBA-B	LX 406Rz-2

スーパーコンピュータ AOBA システム一覧

サーバとホスト名

フロントエンドサーバ(AOBA-S 用)	sfront.cc.tohoku.ac.jp
データ転送サーバ(AOBA-S 用)	sfile.cc.tohoku.ac.jp
ログインサーバ(AOBA-A, B 用)	login.cc.tohoku.ac.jp
データ転送サーバ(AOBA-A,B用)	file.cc.tohoku.ac.jp

サービス時間

利用システム名等	利用時間帯
サブシステム AOBA-S	連続運転
サブシステム AOBA-A	連続運転
サブシステム AOBA-B	連続運転
各種サ ー バ	連続運転
大判プリンタ	平日 9:00~21:00

クラウドサービス AOBA-S の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	VE 数※	実行形態	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	sxsf	1	1VE	1 時間/1 時間	96GB
11		1	1VE		
共有	SXS	1~2048	8VE 単位で確保	72 時間/720 時間	96GB×VE 数
占有					

※2VE以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

サブシステム AOBA-A の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	VE 数※	実行形態	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	sxf	1	1VE	1 時間/1 時間	48GB
	_		1VE		
共有	SX	2~256	8VE 単位で確保	72 時間/720 時間	48GB×VE 数
占有	占有				

※2VE以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

サブシステム AOBA-B の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	ノード数※	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
共有	lx	1~16	72 時間/720 時間	
占有		個別設定	25066人/一下氨	

※2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用



[共同研究成果]	
日本領域長期再解析(RRJ-Conv)の長期データ整備と関連する研究開発:	
梅雨前線低気圧の統計解析 伊藤 純至	1
米井 潤風	
山崎 剛	
福井 真	
3次元フェーズフィールド法によるがんオルガノイドの形態形成 … 千葉 紀風	4
川村洸太郎	
今井 正幸	
熱分解反応場における温度の変動が化学反応速度に及ぼす影響の解明	
松川 嘉也	9
青木 秀之	
大型計算機を用いた電磁波に対して一つの構造で反射/吸収/透過	
を実現するメタサーフェスの開発 有馬 卓司	13
環境因子を考慮したミリ波ばく露における安全性評価に向けて	
小寺紗千子	17
平田 晃正	
[報 告]	
オープンキャンパス2024報告 水木 敬明	22
[スーパーコンピュータAOBAのお知らせより]	
コンパイラのバージョンアップについて	23
商用アプリケーションのバージョンアップについて	23
学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度について	24
執筆要項	25
スタッフ便り	26