

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.53 No.1 2020-1





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情報部情報基盤課が担当しています。> https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/

階	係·室名 e-mail		主なサービス内容	サービス時間 亚 日
	 	022-795-6153 (6153)	計算機利用全般に関する相談	тн 8:30~17:15
	利用相談室	sodan@cc. tohoku. ac. jp 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	8:30~21:00
 階	利用者談話室	(3444)	各センター広報の閲覧 自販機	8:30~21:00
	展 示 室 (分散 コンピュータ博物館)*	*見学をご希望の方は共同利用 支援係までご連絡ください。	歴代の大型計算機等の展示	9:00~17:00
	可視化機器室	(3428)	三次元可視化システムの利用	9:00~21:00
	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
1	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
	共同利用支援係 (受 付)	022-795-3406(3406) 022-795-6251(6251) uketuke@cc.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
階	共同研究支援係	022-795-6252(6252) rs-sec@cc.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに 関すること	8:30~17:15
	ネットワーク係	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
	情報セキュリティ 係	022-795-3410(3410) i-security@grp.tohoku.ac.jp	情報セキュリティに関すること	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)	8:30~17:15

*()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。

[巻頭言]

血行状態モニタリング装置「魔法の鏡」のクラウド化

サイバーサイエンスセンター 教授 吉澤 誠

健康状態のチェックを行う目的で、時計型のセンサなどで身体の状況を記録するような装置が市販 されています。しかし、特別なセンサを新たに購入して常時身に付けることは、それほど容易ではあ りません。これに対して、ほとんどの皆さんが持っている普通のスマートフォンだけで、健康状態の チェックができるようになれば理想的でしょう。

これまで、著者と工学研究科技術社会システム専攻の杉田典大准教授らのグループは、ビデオカメ ラとコンピュータを内蔵した鏡型ディスプレイの前に立つだけで、何のセンサも身に着けず遠隔・非 接触的に脈波信号を計測し、これを解析することで、自律神経系に関する指標や血圧相関情報を与え てくれる、いわば「魔法の鏡」のような健康管理装置の開発を進めてきました。

この研究は、文部科学省・(独)科学技術振興機構 革新的イノベーション創出プログラム(COI)の 一環で、「魔法の鏡」プロジェクトと称しています。このプロジェクトでは、「鏡」という形態にとど まらず、パソコンやスマートフォンのカメラでいつでもどこでも健康状態をチェックしたり、自動車 内のカメラで運転者の体調を監視することで交通事故防止に役立てるようなことも目指しています。 開発中のシステムは次のような原理に基づいています。

すなわち、血液の中のヘモグロビンが緑色の可視光をよく吸収するという性質を使うと、顔や掌な どの映像信号の緑色輝度成分を平均した値の時系列として、脈波信号(映像脈波)が抽出できます。 映像脈波からは、平均心拍数が計算できるばかりでなく、拍毎の心拍間隔時系列(心拍数変動)が得 られます。心拍数変動からは伝統的な方法で自律神経系指標が求められ、ストレスの評価などができ るとされています。また、心臓から近い顔の映像脈波と心臓から遠い掌の映像脈波の位相差、あるい は映像脈波の歪みに関する値から血圧と相関する情報も得ることができます。

一方、可視光ではなく赤外光を皮膚に照射すれば、その反射光から心拍同期成分を抽出することができます。これは、ヘモグロビンの吸収特性ではなく、皮下に侵入した赤外光が心拍に同期した組織の動的な歪みによって散乱し、変調を受けたものを映像信号の強弱として捉えたものと考えられています。この方法によれば、暗い中でも動作し、周辺の可視光の影響も受けにくくなります。



図1 スマートフォン版「魔法の鏡」と、顔の映像脈波(頬:緑線、額:青線)の例

図1は、現在開発中のスマートフォン版「魔法の鏡」のスタート画面と、パソコン内蔵のフロント カメラで著者自身の顔を撮影した動画から映像脈波を抽出した例です。本システムは Visual C++, OpenCV, php などを用いて構築しています。 映像脈波は身体の中でも顔や掌から最もよく抽出できるので、顔検出アルゴリズムなどにより、それらの部分だけを対象領域として自動的に設定しています。また、血圧情報を得る方法の1つとして、1つの映像から顔や掌の2か所を自動分離することもできます。

自律神経指標を算出するには、拍毎の心拍間隔を正確に求める必要があります。これには拡張期から収縮期に移行する境界、すなわち脈波の谷(極小値)の時刻を求めることが必要です。通常のパソコンやスマートフォンのように、カメラのフレーム周波数が 30fps の場合、フレーム周期である 33msの時間分解能しかありません。そこで、その時刻が波形の微分値が0となる時刻に等しいことを利用した補間法を採用して、精度を向上させています。

映像脈波解析における最大の問題は、これが体動や照度変化に非常に敏感であるという点です。体動を除去するためには、Lucas-Kanade 法などで対象領域の並進運動や歪みを補正することによってある程度補償できます。また、照度変化については、色差信号を利用して同相成分を抑制するか、心 拍周波数近傍を通過帯域とする帯域通過フィルタである程度補正できますが、その場合、通過帯域幅を狭くしすぎると、波形が一定の周波数の正弦波に近づくため、心拍間隔を推定するときに重要な位相情報が失われてしまうという難点があります。



図2 スマートフォン版「魔法の鏡」による健康モニタリングのクラウド化

図2は、スマートフォン版「魔法の鏡」による健康モニタリングのクラウド化の概念図です。利用 者は、パソコンやスマートフォンのWebブラウザでクラウドサーバーにアクセスします。自分の動 画ファイル(圧縮率が低いものに限られます)に加えて、始めのうちは、生活習慣やその日のストレ ス、あるいは「脳トレ」のようなゲームの成績に関するアンケートをアップロードすると、クラウド サーバーから映像脈波の解析結果が自動的に返されます。世界中の人々がこれを実行していくにつれ て、映像脈波の解析結果とアンケートの間の相関関係が推定されるようになり、ゆくゆくは、動画を アップロードするだけで、その時の体調も推定できるようになる可能性があります。これを、世界地 図に表示すると、世界中の人々の生理的な循環状態がどうなっているかを知ることができるかもしれ ません。現在、このシステムの骨格が出来上がりつつあります。

しかし、映像脈波の解析結果を返すだけでは、利用者がこのような作業を継続的に行ってくれるか どうか疑問です。健康指導や健康ポイント還元などの何らかのインセンティブを導入する必要がある でしょう。もしかすると、知らず知らずのうちに動画を取得するような、カメラ付きスマート・スピ ーカーでの実現の方が早いかもしれません。

-2 -

[共同研究成果]

八木-宇田アレーアンテナから成る 忍者アレーアンテナの実験的検討

— 3 —

今野 佳祐[†], 陳 強[†] 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻[†]

1 まえがき

フェーズドアレーアンテナは、レーダーや無線通信、マイクロ波イメージングなどの様々な用途で用いられてきた [1].フェーズドアレーアンテナは、しばしば同一素子から成る周期構造として設計され、その後方散乱波の振幅は大きくなる.大きな後方散乱波は、他の電子機器への干渉問題を引き起こしかねないので、可能な限り抑圧すべきである.

フェーズドアレーアンテナの後方散乱波を低減するために様々な手法が提案されてきた.最も 効果的な手法の1つは,散乱体を用いてアレーアンテナを囲う,あるいは覆うことである.この ような手法の一種として,いわゆるメタサーフェスがフェーズドアレーアンテナのレーダー散乱 断面積 (Radar cross section, RCS) を低減するのに応用されてきた.メタサーフェスを装荷した 低 RCS のフェーズドアレーアンテナがいくつも提案され,その散乱/放射特性が数値的・実験的 に明らかにされてきた [2]-[4].これらのメタサーフェスは、いずれもそれらの散乱波がフェーズド アレーアンテナおよび反射板のそれと打ち消し合うように設計されている.メタサーフェスを装 荷したフェーズドアレーアンテナに関する過去の研究では、フェーズドアレーアンテナの RCS 低 減に注目したものが多いが、その放射特性、とりわけビーム走査特性に注目したものはなかった. このようなメタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナの欠点の1つは、フェーズドア レーにメタサーフェスという余計な散乱体を装荷することによる構造の複雑さである.

近年,我々のグループは新しい低後方散乱のフェーズドアレーアンテナを提案し,そのアレーア ンテナを日本古来の諜報員になぞらえて忍者アレーアンテナと名付けた [5]-[7].忍者アレーアンテ ナは,非同一素子からなる低後方散乱フェーズドアレーアンテナである.非同一素子の寸法を調 整することで,忍者アレーアンテナの散乱波を鏡面反射方向(つまり,入射波が到来する方向)か らずらすことができる.その結果,忍者アレーアンテナの後方散乱波の振幅は,その動作周波数 帯域に亘って小さくなる.メタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナと比較して,忍者 アレーアンテナの大きな利点の1つは,余計な散乱体の装荷がないことによる構造の単純さであ る.また,メタサーフェスを装荷したフェーズドアレーアンテナは後方散乱が小さくなるように 設計されるのに対して,忍者アレーアンテナは散乱パターンの設計に自由度があり,アレーエレメ ントパターンを用いた非同一素子の励振方法も明らかにされている.これまでの研究では,忍者 アレーアンテナの散乱パターンとビーム走査性能が数値シミュレーションに示された一方で,実 験的にその特性は明らかにされていない.

本報告では、前年度の報告で述べた忍者アレーアンテナの低後方散乱性能を実験的に明らかに



(a) 有限の反射板を有する八木-宇田モノポールアンテナ素子の構造.



(b) 試作した 8 つの八木-宇田モノポール素子から成る 1 次元忍 者アレーアンテナ.

図 1: 八木-宇田アンテナ素子と試作した忍者アレーアンテナ.

する [8]. モーメント法によって設計された非同一の八木-宇田モノポールアンテナから成る1次元 忍者アレーアンテナを設計・試作した.試作した忍者アレーアンテナの散乱/放射パターンが測定 され,試作した忍者アレーアンテナがビーム走査性能を損なうことなく低後方散乱性能を示すこ とが明らかにされる.

2 忍者アレーアンテナの設計

八木-宇田アンテナ素子から成る忍者アレーアンテナの散乱/放射特性が過去の研究で明らかに されているのに倣い,本報告では忍者アレーアンテナ素子として八木-宇田アンテナ素子を用いた [5].測定の際に平衡-不平衡変換器が不要なことから,文献[5]で用いられた八木-宇田ダイポール 素子の代わりに,本報告では有限の反射板を有する八木-宇田モノポール素子が用いられる.

有限の反射板を有する八木-宇田モノポール素子の構造は図 1(a) に示す. 忍者アレーアンテナは パッシブな散乱体ではなくフェーズドアレーアンテナであるので,数値シミュレーションの際に 素子の給電ポートは 50 Ω抵抗で終端する. 動作周波数は f = 4 GHz であり,忍者アレーアンテ ナは散乱波の主ビーム方向が $(\theta, \phi) = (\theta_s, \phi_s)$ に向くように設計される. 本報告では一例として, $(\theta_s, \phi_s) = (20^\circ, 0)$ として忍者アレーアンテナを設計した. 導波器長 $(= l_3)$ を除く八木-宇田モノ ポール素子の寸法は数値シミュレーションの前に予め設計されており, $l_1 = 23$ mm, $l_2 = 19$ mm, a = 0.5 mm, H = 0.3 mm, $d_1 = 10$ mm, $d_2 = 5$ mm, $d_3 = 15$ mm, $d_4 = 19$ mm, $d_x = 38$ mm, and D = 45 mm とした. 八木-宇田モノポール素子は垂直入射の平面波で励振され, (θ_s, ϕ_s) 方向への散乱波の位相が l_3 の関数として求められる. 数値シミュレーションの結果, $l_3 \approx 5$ mm から 19 mm に変化させると 250° に亘る線形な位相変化が得られることが分かった.

散乱波の位相の数値シミュレーション結果に基づき,8素子の八木-宇田素子から成る1次元忍 者アレーアンテナが設計/試作された.試作された忍者アレーアンテナは図1(b)に示す.各素子の 散乱波の位相が(θ_s , ϕ_s)で同相となるように設計されているため,各アレー素子における導波器長 (= l_3)が非同一であることに注意されたい.ここでは1例として,図1(b)の左端にあるアンテナ 素子の導波器長が5 mm として忍者アレーアンテナを設計した.図1(b)の左端から見て,他のア ンテナ素子の導波器長 l_e はそれぞれ5,10,14,16,19,5,7,10 mm である.アレー素子間隔 は $d_x = 38$ mm (= 0.507 λ @4 GHz)であり,反射板のサイズは $W \times D = 304 \times 45$ mm²である. なお,忍者アレーアンテナの設計の詳細については文献を参考にされたい[5],[8].

3 測定結果

3.1 散乱特性

試作した1次元忍者アレーアンテナのバイスタティックレーダー散乱断面積 (Bistatic radar cross section, BRCS) は電波無響室で測定した.送受信アンテナとしてダブルリッジドホーンアンテナ (Schwarzbeck BBHA9120D)を用いた.送信アンテナと被測定アンテナとの間隔は 0.7 m,受信ア ンテナと被測定アンテナとの間隔は 2.4 m とした.これらのアンテナ間隔は,この測定環境で得 られる最大のものであるが,被測定アンテナは送受信アンテナから見て遠方界の距離にない (つま り,測定した遠方界に近傍界が含まれる)ことに注意されたい.測定の間,忍者アレーアンテナの 給電素子は 50Ω で終端されている.

試作した忍者アレーアンテナの BRCS パターンは図 2(a) に示す.参考までに、同一素子 ($l_3 = 15 \text{ mm}$ で、その他の寸法は忍者アレーアンテナのそれと同じ) から成る八木-宇田アレーアンテナ の BRCS パターンのシミュレーション/測定結果が示されている.BRCS の測定結果およびシミュ レーション結果はよく一致していることが分かる.設計された忍者アレーアンテナの主ビームは (θ, ϕ) = (θ_s, ϕ_s) に向いており、鏡面反射方向には向いていない.その結果、試作した忍者アレー アンテナの後方散乱波の振幅は、同一素子から成る八木-宇田アレーアンテナのそれと比較して 7.3 dB 低くなっている.その一方で、測定した後方散乱断面積 (Backscattering cross section, BSCS) の周波数特性は図 2(b) に示す.ここで、BSCS の 3 dB 帯域は以下の式で定義される.

$$3 \,\mathrm{dB} \,\mathrm{bandwidth} = \frac{f_2 - f_1}{f_2 + f_1} \times 200 \quad [\%]. \tag{1}$$

 $f_1 \ge f_2$ は、試作した忍者アレーアンテナのBSCSが、試作した八木-宇田アレーアンテナのそれ と比較して3dB低くなる周波数の下限と上限である。 $f_1 = 3.7$ GHz、 $f_2 > 7$ GHz であることか ら、試作した忍者アレーアンテナのBSCSの3dB帯域は、61%以上であることが分かる。これら

— 5 —



(a) BRCS パターン.



(b) BSCS の周波数特性.



(c) アンテナ利得パターン (主ビーム方向は $\theta = \theta_r$.).

図 2: 設計/試作した八木-宇田モノポールアンテナ素子から成る忍者アレーアンテナの性能の数値 計算/実験結果 (図中の MoM および Simulation はモーメント法による数値計算結果.).

— 6 —

の測定結果から,設計した忍者アレーアンテナの低後方散乱性能が実験的に示されたと言える.測 定結果とシミュレーション結果との間の違いは,試作誤差や測定誤差,および近傍界の影響によ るものと考えられる.

3.2 放射特性

xz 面でのアレーエレメントパターンの測定結果から,試作した忍者アレーアンテナの放射特性 を求めた.忍者アレーアンテナのアンテナ利得パターンは,アレーエレメントパターンの重み付き 和として求めた.過去の研究では,アレーエレメントパターンを用いて重みを求め,忍者アレー アンテナのビーム走査を可能にする手法を提案したが,ここでは簡単のため,近似的にアレーファ クタを用いて重みを与える [5].

試作した忍者アレーアンテナのアンテナ利得パターンは図 2(c) に示す.アンテナ利得パターン の実験結果は、アレーエレメントパターンの重み付き和として求めたのに対し、数値シミュレー ション結果は同じ重みを与えたアレーアンテナの Full-wave 解析から得た.数値シミュレーション 結果と実験結果がよく一致していることが分かる.測定結果とシミュレーション結果との間の違 いは、試作誤差や測定誤差、および近傍界の影響によるものと考えられる.

4 まとめ

本報告では、忍者アレーアンテナの散乱/放射特性が実験的に明らかにされた。忍者アレーアン テナは、非同一の八木-宇田モノポールアンテナから成る。8素子の八木-宇田モノポール素子から 成る1次元の忍者アレーアンテナが試作され、その低後方散乱性能とビーム走査性能が実験的に 明らかにされた。

謝辞

本研究成果は, 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 SX-ACE を用い て得られた成果 [5] および [6] を発展させたものであり, その内容は学術論文 [7] として採録された. スタッフをはじめ, 関係各位に深く感謝する.

参考文献

- [1] R.C. Hansen, Phased Array Antennas, John Wiley & Sons, 1998.
- [2] Y. Zhao, X. Cao, J. Gao, L. Xu, X. Liu, and L. Cong, "Broadband Low-RCS Circularly Polarized Array Using Metasurface-Based Element," IEEE Antennas Wireless Propag. Lett., vol. 16, pp. 1836-1839, 2017.

- [3] L. Cong , X. Cao, J. Gao, and T. Song, "Ultra-Wideband Low-RCS Circularly-Polarized Metasurface-Based Array Antenna Using Tightly-Coupled Anisotropic Element," IEEE Access, vol. 6, pp.41738-41744, 2018.
- [4] Y. Zhao, J. Gao, X. Cao, T. Liu, L. Xu, X. Liu, and L. Cong, "In-Band RCS Reduction of Waveguide Slot Array Using Metasurface Bars," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 65, no. 2, pp.943-947, Feb. 2017.
- [5] K. Konno, Q. Yuan, and Q. Chen, "Ninja Array Antenna: Novel Approach for Low Backscattering Phased Array Antenna," IET Microw. Antennas Propag., vol.12, no.3, pp.346-353, 2018.
- [6] K. Konno, Q. Chen and Q. Yuan, "Scattering and Radiation Performance of Ninja Array Antennas," Proc. APMC2018, FR3-IF-30, pp.1-3, Nov. 2018.
- [7] K. Konno, K. Morita, Q. Chen, and Q. Yuan, "Experimental Study of Ninja Array Antenna Composed of Yagi-Uda Antennas," IEICE Commun. Express, vol. 8, no.12, pp.554-559, Dec. 2019.
- [8] 今野 佳祐, 陳 強, "忍者アレーアンテナ -後方散乱の小さいフェーズドアレーアンテナ-," 東北大学サイバーサイエンスセンター広報誌 SENAC, vol. 51, no. 4, pp.1-9, 2018 年 10 月.

[共同研究成果]

Simulation of Nanopowder Growth-Transport in Turbulent Thermal Plasma Flow Field

Masaya Shigeta Joining and Welding Research Institute

This paper discusses the theoretical models and numerical methods to simulate a turbulent thermal plasma flow transporting nanopowder growing collectively. Turbulence models should be capable of expressing not only turbulent but also laminar states because both states co-exist in and around thermal plasmas that have large variations of density as well as transport properties. Demonstrative simulations clearly present that an advanced numerical method with high-order accuracy should be used for long and robust computation capturing steep gradients of nanopowder concentration and plasma temperature and 3D dynamic motions of multi-scale vortices which are turbulent features of thermal plasma flows with low Mach numbers.

1.Introduction

Thermal plasma offers a unique flow with high temperatures of not only electrons but also heavy species, high chemical reactivity, intensive light emission, and variable properties. Because it is also electrically conductive fluid, it responds to an electromagnetic field. Therefore, its plasma state can be sustained by Joule heating and controlled by Lorentz force [1-5]. Thermal plasma is anticipated as a promising device for nanopowder fabrication with remarkably high rates [6].

However, the precise process control is still difficult because the nanopowder's growth and transport must be controlled simultaneously. The process involving collective growth by nucleation, condensation, and coagulation and transport by convection, diffusion, and thermophoresis in/around a plasma is a complicated mass transfer problem in the microsecond to millisecond time scales. At present, it seems impossible to observe or measure such a spatially and temporally multi-scale process. Meanwhile, theoretical and numerical studies are potent approaches to tackle this problem, although they are arduous as well.

Turbulence of thermal plasma flows has been recognized as an important matter. Turbulence offers strong mixing effects on momentum, energy, and material molecules and particles because of multi-scale vortices. Pfender *et al.* [7] proved that a thermal plasma jet forms vortices entraining ambient cold gas at its fringe. These vortices break into smaller ones. Eventually, the plasma jet transits to a turbulent state with 3D and multi-scale vortices. For nanopowder fabrication, nanoparticles are generated not in a high-temperature plasma core but in interfacial regions between plasma and cold gas at low to intermediate temperatures [8]. Lower-temperature regions tend to be more turbulent with multi-scale vortices [9, 10]. The vortices strongly affect the transport processes of nanopowder. The fundamental mechanisms of turbulence transition of thermal plasma flows should also be clarified.



Fig. 1. A thermal plasma flow for nanopowder fabrication.

This paper discusses theoretical models and numerical methods to simulate especially a turbulent thermal plasma jet transporting nanopowder. Demonstrative simulations are performed to highlight the importance of numerical methods for long and robust computation capturing steep gradients of nanopowder concentration and plasma temperature and 3D dynamic motions of turbulent multi-scale vortices in/around a thermal plasma jet.

2. Model description

Thermal plasma is described by the thermofluid approximation with several typical assumptions: (i) the entire fluid region including plasma and non-ionized gas is in a local thermodynamic equilibrium state, (ii) the plasma is optically thin, and (iii) buoyancy due to density variation is negligible. The governing equations are given as the conservations of mass, momentum, and energy:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \left(\rho \boldsymbol{u} \right) = 0, \qquad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \boldsymbol{u}) + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u} \boldsymbol{u}) + \nabla P - \nabla \cdot \left\{ \eta \left[2\boldsymbol{S} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \boldsymbol{u}) \boldsymbol{I} \right] \right\} = 0, \qquad (2)$$

and

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho u h) - \nabla \cdot \left(\frac{\lambda}{C_P} \nabla h\right) - \frac{\partial P}{\partial t} - u \cdot \nabla P + Q_{rad} - Q_{con} - \Phi = 0, \qquad (3)$$

where ρ stands for the density of fluid, *t* represents the time, *u* is the velocity vector, *P* denotes the pressure, η signifies the viscosity, *I* is the unit matrix, *h* is the enthalpy, λ is the thermal conductivity, C_P is the specific heat at constant pressure, Q_{rad} represents the radiation loss, Q_{con} denotes the heat generation attributable to condensation, and Φ denotes the viscous dissipation. Furthermore, *S* is the velocity strain tensor defined as

$$\boldsymbol{S} = \frac{1}{2} \left[(\nabla \boldsymbol{u}) + (\nabla \boldsymbol{u})^{tr} \right]$$
(4)

where superscript tr denotes the transposition.

In engineering time- and spatial-scales, the aerosol dynamics approach effectively describes the growth and transport processes of nanopowder produced by thermal plasma with several assumptions: (i) nanopowder consists of spherical nanoparticles, (ii) electric charge effects are neglected, (iii) nanoparticle temperature is identical to the fluid temperature, and (iv) material vapour is treated as an ideal gas. Extending the previous model [11] for nanopowder growth through homogeneous nucleation, heterogeneous condensation and coagulation between nanoparticles, the governing equations that also express the nanopowder's transport by convection, diffusion, and thermophoresis are written as [5, 8]

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{n_p}{\rho} \right) + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{n_p}{\rho} \right) - \nabla \cdot \left[\rho D_p \nabla \left(\frac{n_p}{\rho} \right) \right] - J + 2\sqrt{2} \beta_0 n_p^{11/6} f^{1/6} - \nabla \cdot \left(K_{th} \eta \frac{n_p}{\rho} \nabla \ln T \right) = 0, \quad (5)$$

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{f}{\rho} \right) + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \left(\frac{f}{\rho} \right) - \nabla \cdot \left[\rho D_p \nabla \left(\frac{f}{\rho} \right) \right] - Jg_c - \beta_0 (n_v - n_s) n_p^{1/3} f^{2/3} - \nabla \cdot \left(K_{th} \eta \frac{f}{\rho} \nabla \ln T \right) = 0, \quad (6)$$

and

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{n_{\nu}}{\rho} \right) + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \left(\frac{n_{\nu}}{\rho} \right) - \nabla \cdot \left[\rho D_{\nu} \nabla \left(\frac{n_{\nu}}{\rho} \right) \right] + J g_{c} + \beta_{0} (n_{\nu} - n_{s}) n_{p}^{1/3} f^{2/3}.$$
(7)

where *n* is the number density, *D* is the diffusion coefficient, and *T* is the temperature. The subscripts *p*, *v*, and *s* denote particle, vapour, and saturated state, respectively. The variable *f* is defined as $f = n_p g$, where *g* is the average monomer number in a nanoparticle. β_0 is the parameter related to collision frequency [11]. *J* is the homogeneous nucleation rate and g_c is the number of monomers composing a nanoparticle in a critical state [12]. *K*_{th} is the thermophoresis coefficient [13].

3. To express turbulent effects

A turbulent flow is composed of multi-scale vortices. A high-temperature argon thermal plasma flow cannot have sub-millimetre vortices, while a low-temperature argon flow can have vortices larger than sub-millimetres [9, 10]. Simulation of a turbulent flow of thermal plasma interacting with non-ionized cold gas requires a theoretical model and a numerical method that can express such a field.

This study adopts a Large Eddy Simulation (LES) approach with Coherent Structure (CS) model [14, 15] to deal with laminar (non-turbulent) regions and turbulent regions in and around plasma at the same time. The detailed discussion for the mathematical expression with the transformed equations is found in Refs. [8, 10].

The widely ranging temperature causes large variations of the transport properties and density with several orders of magnitude. Meanwhile, the Mach number is on the order of $10^{-3} \sim 10^{-1}$. Therefore, to obtain the solution in a practically sufficient time-scale, a thermal plasma flow is calculated as an incompressible flow with temperature- dependent density. Therefore, the following requirements should be satisfied on numerical methods.

(i) Small vortices are resolved with a large grid element size to reduce computational costs.

(ii) Steep gradients of variables are also captured by the computational grid element width.

(iii) The discretization errors are small even with the large grid element width.

(iv) The time-integration errors are small even with a large time increment.

Algorithm	SIMPLE [16]		
Convection terms	Upwind differencing with 1st-order accuracy		
Transient terms	Backward Euler scheme with 1st-order accuracy		
Diffusion terms	Central differencing with 2nd-order accuracy		
Source terms	Central differencing with 2nd-order accuracy		

Table 1. Conventional method (Method-I in Ref. [10]).

Table 2. Advanced method (Method-III in Ref. [10]).

Algorithm	IPISO [17]
Convection terms	Hybrid-upwind K-K differencing with mainly 3rd-order accuracy [18]
Transient terms	Adams-Bashforth-Moulton scheme with 3rd-order accuracy
Diffusion terms	Central differencing with 2nd-order accuracy
Source terms	Central differencing with 2nd-order accuracy



Fig. 2. Instantaneous thermal flow fields in/around a thermal plasma jet obtained by the conventional method.



Fig. 3. Instantaneous thermal flow fields in/around a thermal plasma jet obtained by the advanced method.

(v) A solution algorithm for incompressible flows is preferable even with large density variation.

(vi) Computation is robust even with large variations of density and transport properties of plasma and extremely large values of the source terms by nanopowder formation.

Tables 1 and 2 introduce two numerical methods for the demonstrative simulations. The conventional method (Method-I [10]) has often been used for thermal plasma flow simulations because it obtains a numerical solution relatively easily. Meanwhile, the advanced method (Method-III [10]) is expected not only to express turbulent features but also to perform numerically stable computation even with a large increment of time steps. More discussion about the differencing schemes and solution algorithms is found in Refs. [8, 10].

4. Results and discussion

Figure 1 shows a schematic illustration of the computation domain. A non-transferred argon thermal plasma jet is ejected from a circular nozzle with the diameter of 8.0 mm. At the nozzle exit, the plasma jet has steady profiles of temperature with the maximum 12000 K and velocity with the maximum 400 m/s. These conditions are obtained from the approximated curves [10] with the experiment data [7]. Silicon vapour is supplied at 0.1 g/min with the plasma jet. The geometries of the domain are $(x, y, z) = (0.0 \sim 255.8 \text{ mm}, -51.2 \sim 51.1 \text{ mm}, -51.2 \sim 51.1 \text{ mm})$. Computations are performed using a Cartesian staggered grid system with the uniform spatial interval of $\Delta x = \Delta y = \Delta z = 0.1 \text{ mm}$ and the time increment of $\Delta t = 0.1 \text{ ms}$ on a supercomputer SX-ACE (NEC) at Tohoku University, Japan. The thermodynamic and transport properties of argon thermal plasma and the material properties of silicon are obtained from Refs. [19] and [20], respectively.

Figures 2 and 3 show the snapshots of the instantaneous temperature and velocity fields and vortex structures obtained by the conventional and advanced methods, respectively. It is noted that the region near the jet nozzle $(x, y, z) = (0.0 \sim 125.0 \text{ mm}, -31.5 \sim 31.5 \text{ mm})$ is presented here. It is apparent that the advanced method simulates a complex flow field with widely spreading multi-scale vortices. To visualize the vortices, the coherent structures of vortices were extracted from the velocity data by"*Q*-*criterion*" [21]. Here, the vortices are presented by the isosurfaces of the second invariant of the velocity gradient tensor of the value 0.25 which was normalized by the mean velocity of 160 m/s and the



Fig. 4. Instantaneous distributions of nanopowder obtained by the conventional method.



Fig. 5. Instantaneous distributions of nanopowder obtained by the advanced method.

diameter of 8.0 mm at the nozzle exit. Many vortices are generated even far from the plasma jet cores. These visualized vortex structures are similar to the Schlieren photograph by Pfender *et al.* [7].

Large vortices have higher temperatures whereas small vortices have lower temperatures as predicted on the basis of Kolmogorov theory [9, 10]. The magnified snapshot Fig. 3(d) clearly shows a double-layer structure of high-temperature thicker vortex rings surrounded by low-temperature thinner vortex rings in the upstream region. As they flow downstream, the high-temperature thicker vortex rings deform largely whereas the low-temperature thinner vortex rings break up into smaller vortices.

Compared with the advanced method, the conventional method does not simulate the features of a thermal plasma jet as shown in Fig. 2. Although vortices are generated in the upstream region, they disappear in the downstream region because the upwind differencing scheme with the first-order accuracy for the convection terms inherently includes a large discretization error that unphysically flattens the spatial gradients of variables. Therefore, the temperature and velocity fields are calm and the vortices attenuate by the non-physical diffusional effects.

Figures 4 and 5 show the snapshots of the instantaneous number density and mean diameter distributions of silicon nanopowders obtained by the conventional and advanced methods, respectively. The silicon vapour in the plasma jet is transported by convection and diffusion. At the plasma fringe with lower temperature, the silicon vapour becomes supersaturated and changes its phase into nanopowder by homogeneous nucleation and heterogeneous condensation. Because nanopowder collectively grows up and diffuses outside the plasma region, nanopowder distributes widely in the field. The larger size regions coincide with smaller number density regions. This result indicates that simultaneous coagulation decreasing particle number plays an important role for nanopowder growth as well.

It is also obvious that the conventional method and the advanced method obtain very different results although the governing equations, the boundary conditions, and the given parameters are the same. As discussed above, the conventional method blurs gradients of variables. As a result, the vapour and the nanopowder experience unphysically large diffusions. Note, those methods obtains the very different temperature and velocity fields, which also cause the differences of the vapour and nanopowder distributions. The more detailed discussion is found in Ref. [22].

Using the advanced method, a numerical study has also presented that the turbulence of thermal plasma and the growth of nanopowder can be controlled by an external magnetic field [5].

5.Acknowledgements

This work was partially supported by JSPS KAKENHI (Grant No. 16K13737). The numerical results were obtained using supercomputing resources at Cyberscience Center, Tohoku University.

6.References

- [1] T. Sato et al., Int. J. Thermal Sciences, 40, 273 (2001).
- [2] M. Shigeta et al., Int. J. Heat Mass Transfer, 47, 707 (2004).
- [3] M. Shigeta and H. Nishiyama, Transactions of ASME, Journal of Heat Transfer, 127, 1222 (2005).
- [4] Y. Tanaka et al., Applied Physics Letters, 89, 031501 (2006).
- [5] M. Shigeta, Journal of Flow Control, Measurement & Visualization, 6, 107 (2018).
- [6] M. Shigeta and A.B. Murphy, Journal of Physics D: Applied Physics, 44, 174025 (2011).
- [7] E. Pfender et al., Plasma Chemistry and Plasma Processing, 11, 529 (1991).
- [8] M. Shigeta, IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 14, 16 (2019).
- [9] M. Shigeta, Plasma Sources Science and Technology, 21, 055029 (2012).
- [10] M. Shigeta, Journal of Physics D: Applied Physics, 49, 493001 (2016).
- [11] V.A. Nemchinsky and M. Shigeta, Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 20, 045017 (2012).
- [12] S.L. Girshick et al., Aerosol Science and Technology, 13, 465 (1990).
- [13] L. Talbot et al., Journal of Fluid Mechanics, 101, 737 (1980).
- [14] H. Kobayashi, Physics of Fluids, 17, 045104 (2005).
- [15] H. Kobayashi, Physics of Fluids, 18, 045107 (2006).
- [16] S. V. Patanker and D.B. Spalding, Int. J. Heat Mass Transfer, 15, 1787 (1972).
- [17] P.J. Oliveira and R.I. Issa, Numerical Heat Transfer B, 40, 473 (2001).
- [18] S. Komurasaki, Proceedings of 7th Int. Conf. on Computational Fluid Dynamics, ICCFD7–3001, Kohala Coast, USA (2012).
- [19] M.I. Boulos et al., Thermal Plasmas Fundamentals and Applications, 1, Plenum Press, New York (1994).
- [20] Japan Institute of Metals, Metal Data Book, Maruzen, Tokyo (1993). (in Japanese)
- [21] J.C.R. Hunt et al., Center for Turbulence Research Proceedings of the Summer Program, 193 (1988).
- [22] M. Shigeta, Plasma Chemistry and Plasma Processing, (2020),
 - (Available online https://doi.org/10.1007/s11090-020-10060-8).

[共同研究成果]

DBD プラズマアクチュエータを用いた

自動車後流制御による抵抗低減

― HPC 利用による高解像度シミュレーションに基づいて ―

藤井 孝藏:東京理科大学工学部情報工学科 浅田 健吾:東京理科大学工学部情報工学科

1. はじめに

現代社会において自動車は生活に欠かすことのできない移動手段の一つとなっている.19世紀 後半から開発されてきた自動車は各種要素技術の発展とともに性能は向上し,近年発売される自 動車の燃費は20km/L以上にも達している.しかしながら,昨今環境問題への意識が高まる中,さ らなる燃費向上は依然として工学分野として取り組むべき課題である.自動車の燃費向上には空 気抵抗の低減が不可欠であり,これまで形状を工夫することによって抵抗低減を実現してきた. 近年航空機のように滑らかな形状をした自動車が増加しているのはこのためである.一方で,自 動車開発において,燃費以上にデザイン性,すなわち"見た目"は販売台数を左右する重要な要 素である.ここで問題となるのは空力的に優れた形状が必ずしもデザインとして優れているとは 限らないことである.このため,デザインの自由度を保ちながら抵抗低減を実現するには形状工 夫によらない手段が必要である.

そんな中,近年航空工学分野において,新たにDBD(Dielectric Barrier Discharge:誘電バリア放電)プラズマアクチュエータ(以下PA)と呼ばれる流体制御デバイス[1]を用いた抵抗低減手法が注目されている.PAは、対象とする流れ場に局所的な変動を与えることで大きな流れを制御するマイクロ流体制御デバイスで、2枚の電極とそれに挟まれた誘電体からなる単純な構造を持つ(図1).全体の薄さは数百マイクロメートルと非常に薄く軽量であるため、取り付けることによる形状変化が極めて小さいのが特徴である.PAを駆動するには電極間に高周波・高電圧の交流電圧を印加する.電圧印加によって露出電極表面にプラズマが発生し、露出電極周辺に非定常な流体変動が誘起され、その変動が全体の流れ場に作用することで流体機器の性能を向上させる[2].PAは、単純な構造、少ない消費電力、既存のシステムに対して導入が簡単であるという特徴を持つため、航空機の翼[3-10]、風力発電タービンにおける剥離流れの制御[11,12]や、ガスタービンエンジンの漏れ流れ抑制[13]など、様々な分野において実用化にむけた基盤研究が進められている.図2に、PAを用いた翼周り流れの剥離制御効果を示す.翼前縁に設置されたPAを駆動させることで、翼面から大きく剥離した流れが翼面に付着し、翼性能が向上する.



図 1: DBD プラズマアクチュエータの構造と翼型への設置例.





図 2: DBD プラズマアクチュエータを用いた NACA0015 翼周り流れの剥離制御 (制御/非制御) [4].

以上のように PA は対象物の形状変更を必要としないにもかかわらず多くの利点を有するため に自動車メーカを含めた研究者が試行的な実験を開始している[14-16].しかしながら,基本的な 流れ制御の方針自体が不明確なままであり,翼型以外への適用は未だ手探りの状況にある.そこ で,本課題では,高解像度シミュレーションを行うことで自動車周り流れの特性を理解し,PA に よる流れ制御の指針を示すことを目指す.特に本研究では Ahmed model [17,18]と呼ばれる簡易自 動車モデル周り流れを対象とし,Large-eddy simulation (LES)を行うことで,剥離流れ制御にお いて効果的な PA 位置を明らかにする. Ahmed model 周り流れの PA 取り付け位置に関する議論は 文献[17]において実験を用いてなされているが,本研究では高解像度シミュレーションを行うこ とでより詳細に PA による空気抵抗低減と流れ場との関係を明らかにする.

2. 問題設定

2.1 簡略化自動車モデル

図3に対象とするAhmed modelの概略図を示す。Ahmed model は簡略化した自動車モデルで、 過去に多くの実験、シミュレーションが行われている。前方はRをもった鈍頭形状(フロント部) で、後方は自動車のリアガラスを模擬した角柱を切り落としたような形状(スラント部)になっ ている。図4に示す計算領域を含む各寸法はモデル高さHで無次元化されており、それぞれ、 L₁/H=2.928、L₂/H=0.697、B/H=1.35、R/H=0.347、c/H=0.174、X₁=7.3、X₂=21、Y₁=6.493、Z₁=4.861 である。形状パラメータであるスラント部の角度αは25度とした。また、位置座標(x, y, z) はスラント部後縁を x=0、モデル中央を y=0、計算領域底面を z=0 とする。

図5にAhmed model 周り流れの概略を示す.前方から衝突した流れが逆圧力勾配でわずかに剥離後,乱流遷移し,後方で大きく流れが剥離する.後方の上面からはスパン方向に軸をもつ大規模な渦が,物体側面と上面の角からは流れ方向に軸をもった大規模な渦が生成される.これらの大規模渦が低圧領域を形成し,本物体流れの空力抵抗を増加させている.本課題ではこれらの大規模渦をプラズマアクチュエータで制御することで空力抵抗低減を目指している.



図3: 簡略化自動車モデル (Ahmed model).



図4:Ahmed model と計算領域.



図 5: Ahmed model 周り流れ[18].

3. 計算条件

3.1 計算条件および計算手法

ー様流とモデル高さH基準のレイノルズ数は文献[19]に合わせ、Re_H = 2.0 x 10⁻⁵とし、マッ ハ数は計算効率を考慮し、実際よりも高い 0.2 とした.比熱比は空気の γ =1.4、プラントル数は Pr=0.72 とする.

表1に本研究で用いる計算手法を示す. 3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として空間差分に高解像度スキームである6次精度 compact 差分法[20]を10次精度3重対角フィルタとともに用いた.時間積分には ADI-SGS[21]を使用し,音速基準の無次元時間刻みを5x10⁻⁴(クーラン数は約11)とした.

PAによる流れ場への運動量供給は、支配方程式に体積力項を導入することで模擬する.体積力のモデル化によるプラズマ効果と流体支配方程式のカップリングには、幾つかの種類が存在するが、本研究では比較的単純なモデルである Suzen と Huzngら[22]の定常体積モデル(以下 Suzen モデル)を非定常に拡張した体積モデルを用いる.この修正モデルの数値計算への導入方法やその信頼性に関する詳細の記述、および数値計算の妥当性については既出論文を参照されたい[23,24].アクチュエータの出力を決めるパラメータ Dc を 0.4 とした.この値はこれまで行ってきた翼流れ制御[8]において一様流 U_∞とアクチュエータの誘起流速 U_{DBD}の比が U_{DBD}/U_∞-1 となる現実的な値である.また、PA は連続駆動を用い、周波数は一様流と代表長さを基準とした無次元周波数で 60 である.

支配方程式	3次元圧縮性ナビエ・ストークス方程式
空間差分	6 次精度コンパクト中心差分 +3 重対角フィルター (α _f =0.40)
時間積分	2 次精度 ADI-SGS 陰解法 + 内部反復 5 回
乱流モデル	Implicit LES

表 1: 計算手法.

3.2 計算格子

図6に示すように格子はモデル近傍の境界層を解像する格子(Zone 1:赤),外部領域(Zone 2: 青)の計2ゾーンからなっている.計算領域は参照実験[25]の風洞と同等の領域とし,流入領域 から総格子点数は約4400万点(表2)である.物体表面および計算領域の低面のみ境界層の発達 を解像するために滑りなし条件とし,その他,計算領域側面および上面は格子点数を削減するた めに滑り条件としている.



図 6:計算格子.

表 2:計算格子点数.

	jmax x kmax x lmax	Number of grid points
Zone 1	511 x 510 x 101	26, 321, 610
Zone 2	619 x 201 x 141	17, 543, 079
Total	N/A	43, 864, 689

3.3 計算ケース

表3に本研究の計算ケースを示す.本研究ではルーフ部側にPAを設置した場合とスラント部側 にPAを設置した場合についてどちらに配置する方がスラント部の剥離領域抑制に効果的である か議論を行う.翼流れの剥離制御において,これまでPA位置に関しての議論はおこなわれており, 剥離点付近にPAを設置することが効果的であることがわかっている[8].しかしながら翼型では 剥離点付近で形状は滑らかに変化するのに対して、今回対象としている Ahmed モデルでは剥離点 付近(スラント部前縁付近)で形状が急激に変化する.そのため、剥離点の上流に PA を設置する 場合と下流に設置する場合とで制御効果に違いがみられると予測される.そこで本研究では図7 に示すようにスラント部前縁の上流と下流に PA を設置したケースの LES を行い、どちらが剥離制 御に効果的であるか議論を行う.表3にそれぞれの計算ケースにおける PA の露出電極端の位置(下 流側)を示す.



衣 3. 計算ケース.					
計算ケース	Baseline	PA location 1	PA location 2		
PA 設置位置(x/H)	N/A	-0.705	-0.692		

3.4 計算機に関して

計算機には,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 SX-ACE を利用した. 実際の計算では,計算領域を分割して各ノードに割り当てて計算を行う.利用ノード数は 8ノー ドである.ノード内はスレッド並列(自動並列,一部 Open MP を利用),ノード間は MPI によるハ イブリッド並列を用いた.1ケースの計算時間はおよそ 70 時間である.

4. 計算結果

4.1 基本流れ

今回行った計算の検証として、Ahmed model スラント部分の圧力係数(Cp)分布を Lienhart と Becker の風洞試験データ[25]と比較する.図8にスパン中央部(y/H=0),中間部(y/H=0.35), スパン角部付近(y/H=0.63)の Cp分布を示す.いずれの場所においても x/H=-0.7付近に大きな 負圧部分が見られるが、これはスラント部が始まる位置であり、流れが曲げられ加速されるため である.各位置において実験値とのわずかな差異はみられるが圧力分布のおおよその傾向は予測 できており、得られた結果は妥当であると考えられる.

図9にBaseline ケースの瞬間流れ場を速度勾配テンソルの第二不変量による渦構造を示す.流

れは図中左下から流入し、フロントR部が終わる付近で側面、上面ともに剥離する.下流で再付 着後乱流へと遷移し、下流へ行くにしたがい乱流境界層は発達していく.スラント部にさしかか ると上面で流れは再度剥離し、角部からは長手方向に軸をもつ大規模な渦が生成される.これら の特徴はAhmed ら[18] によって報告されている内容と一致する.

次節からはこの流れを基準とし, PA による流れ制御を行い, PA 設置位置が流れ制御効果に与える影響を議論する.



図 8: スラント部圧力係数分布 (Baseline).



図 9: 瞬間流れ場 (baseline).

4.2 PAの設置位置と剥離制御効果

表4に各ケースにおける抵抗係数を示す.基準となる制御なし流れ(Baseline)の抵抗係数に 対して, PAをスラント部前縁上流に配置したケース(PA location 1)は10.8%抵抗係数が減少して いる.一方で,スラント部前縁より下流にPAを配置したケースでは効力係数は13.1%減少してお り,スラント角部より下流にPAを配置したほうが抵抗低減には効果的であることがわかる.

文献[15]において本研究と同様にスラント部前縁前後に PA を配置した場合の抵抗低減効果に 関する議論がなされているが、スラント部前縁の上流に PA を配置したほうが効果的であると今回 とは異なる結果が報告されている.考えられる原因のひとつは PA 取り付け位置の微妙な違いであ る.今回行ったシミュレーションではスラント部前縁の上流に PA を配置したケース (PA location 1)の露出電極の下流端はスラント部前縁とは一致しておらず、体積力の最も強く発生する被覆電 極の一部はルーフ部に存在する.そのため、PA によって誘起される体積力の方向は主にルーフ部 の接線方向である.一方で、文献[15]では、露出電極の下流端はほぼスラント部前縁に一致して おり、被覆電極は完全にスラント部に沿って配置されている.そのため、体積力は主にスラント 部の接線方向に誘起されており、今回の PA location 1 のケースよりもむしろ PA location 2 の ケースに近い体積力が誘起されているのではないかと推測される.このような誘起体積力の微妙 な方向の違いが文献[15]と異なる結果を示した原因なのではないかと考えられる.

Baseline PA location 1 PA location				
抵抗係数(C _D)	0.3824	0.3412	0. 3323	
ΔC_{D} [%]	N/A	-10.8	-13.1	

表 4: 抵抗係数.

図 10 に各ケースのスラント部圧力係数分布を示す. PA による制御ありのケースはいずれも x/H=-0.7 から x/H=0 にかけて Baseline ケースよりも負圧の値が抑えられているのがわかる. こ のように PA によって剥離領域が抑制されることでスラント部の負圧が抑えられ,その結果表4 で抗力が減少したと考えられる. また, PA ありの2ケースを比較した場合, PA をスラント角部よ り下流に設置した方 (PA location 2) が負圧の値を抑えられているのがわかる.

図 11 にスラント部の摩擦係数分布を示す. 摩擦係数は壁面垂直方向の速度によって正負が変わるために正であれば流れは付着しており、ゼロまたは負である場合、流れは剥離していると判断できる. Baseline ケースでは x/H = -0.65 から x/H = -0.2 付近まで負の値をとり、流れが剥離しているのがわかる. また、PA をスラント角部上流に配置したケース (PA location 1)の剥離位置は x/H = -0.65 付近で Baseline ケースと同等であるが、再付着点は x/H = -0.35 付近と剥離領域が縮小しているのがわかる. 一方で PA を下流に設置した PA location 2 のケースでは剥離位置は x/H = -0.6 付近に後退し、再付着点も x/H = -0.45 付近へと上流側に移動し、剥離領域が最も小さくなっているのがわかる.



図 10: スラント部圧力係数分布(y/H=0). 図 11: スラント部摩擦係数分布(y/H=0).

図 12 にスラント部を側面から見た時間平均流れ場を示す.長手方向(x)速度 u で面塗りし、 流線とともに示している. 図中, 青で示される部分は剥離領域である. 図 11 で議論したように Baseline ケースではスラント角部から剥離した流れがスラント後縁付近まで再付着せず、大きな 剥離領域が形成されているのがわかる.これに対して PA を用いた場合,剥離領域は縮小しており, 特にスラント角部より下流に PA をつけた場合に青色で示される剥離領域はほとんどなくなって いるのがわかる.



図 12 時間平均流れ場 (y/H=0).

4.3 今後の研究計画

本研究では PA の駆動方法として連続駆動のみに着目し,効果的な PA 設置位置に関して議論を 行なった. 翼流れをはじめいくつかの流れ場の制御に関しては、デューティサイクルにより電圧 印加のオンオフを繰り返すバースト駆動がより効果的であることが示されている. 今回の応用に 関して、バースト駆動を行なった場合に今回の知見が有効であるかどうかは今後の検討による. また, Ahmed モデルの後流は3次元的に複雑な流れであるのに対し,本研究では PA の設置方法は スパン方向に一様な単純な設置方法であり、最適な設置位置に関しても検討の余地がある. 今後 は後流制御に対してより有効な PA の駆動方法と設置位置との組み合わせを検討していく予定で ある.

まとめ 5.

高解像度スキームを用いた自動車モデル流れのLESを実施し,DBDプラズマアクチュエータ(PA)

による後流制御において効果的な設置位置の検討を行なった.

まず,基準となる制御なし流れのシミュレーションで得られたスラント部の圧力係数を実験値 と比較し,妥当な結果が得られていることを確認した.また,乱流遷移や長手方向に軸をもつ大 規模な渦等,特徴的な流れ場を予測できていることを示した.設置位置のことなる PA を用いた流 れ制御を行なった2ケースは両者とも制御なしのケースよりも抵抗係数を10%以上低減できたが, 今回用いた PA の配置に関しては PA をスラント角部より上流に配置したものよりも下流に配置し たものの方が剥離を抑制し,抵抗を低減できることがわかった.

今後は PA の設置位置や駆動条件をより広く調査し,同デバイスのより効果的な利用方法を提案 していく.

謝辞

ここに記載させて頂いた成果は,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ものである.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頂いた.センターの皆様にこの場を借りて謝意を示したい.

参考文献

 T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson, "Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control," Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 42, pp. 505–529, 2010.
 T. C. Corke, M. L. Post, and D. M. Orlov, "Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications," Experiments in Fluids, Vol. 46, No. 1, pp. 1–26, 2009.

[3] M. L. Post and T. C. Corke, "Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators," AIAA Journal, Vol. 42 No.11,2004.

[4] N. Benard, J. Jolibois, and E. Moreau, "Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator," Journal of Electrostatics, Vol. 67, No. 2-3, pp. 133–139, 2009.

[5] 二宮由光, 藤井孝藏, "プラズマアクチュエータを用いた失速制御における周波数の影響,"第 45 回飛行機シンポジウム講演集, 1F1, October 2007.

[6] K. Asada, Y. Ninomiya, A. Oyama, and K. Fujii, "Airfoil Flow Experiment on the Duty Cycle of DBD Plasma Actuator," 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, January 2009.

[7] K. Fujii "High-Performance Computing Based Exploration of Flow Control with Micro Devices" Philosophical Transaction A, The Royal Society, Vol. 372, Article ID 20130326, 2014.
[8] M. Sato, H. Aono, A. Yakeno, T. Nonomura, K. Fujii, K. Okada, and K. Asada,

"Multifactorial Effects of Operating Conditions of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on Laminar Separated Flow Control," AIAA Journal, Vol. 53, No. 9, 2015.

[9] H. Aono, S. Kawai, T. Nonomura, M. Sato, K. Fujii and K. Okada, "Plasma-Actuator Burst-Mode Frequency Effects on Leading-Edge Flow-Separation Control at Reynolds Number 2.6 105," AIAA Journal Vol. 55, pp. 3789-3806, 2017.

[10] K. Fujii, "Three Flow Features behind the Flow Control Authority of DBD Plasma Actuator: Result of High-Fidelity Simulations and the Related Experiments," Applied Science 2018, Vol. 8, Issue 4, 2018.

[11] H. Matsuda, M. Tanaka, S. Goshima, K. Amemori, M. Nomura and T. Osako,"Experimental Study on Plasma Aerodynamic Control for Improving Wind Turbine Performance," Asian Congress on Gas Turbins 2012, Shanghai, P. R. China, August 2012. [12] D. Greenblatt, A. B. Harav, and H. M. Vahl, "Dynamic Stall Control on a Vertical Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators," AIAA Journal, Vol. 52, No. 2, pp. 456–461, 2014.
[13] D. P. Rizzetta and M. R. Visbal, "Simulation of Plasma-based Flow Control Strategies for Transitional Highly Loaded Low- Pressure Turbines," 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Miami, Florida, June 2007.

[14] K. Shimizu, T. Nakajima, S. Sekimoto, K. Fujii, T. Hiraoka, Y. Nakamura, T. Nouzawa, J. Ikeda and M. Tsubokura, "Aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle model by promoting flsw separation using plasma actuator, JSME Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME, Vol.5, No. 19-00354,2019.

[15] Z. Hui, X. Hu, P. Guo, Z. Wang and J. Wang, "Separation Flow Control of a Generic Ground Vehicle Using an SDBD Plasma Actuator," MDPI, Open Access Journal, vol. 12, issue 20, pp. 1-14, 2019.

[16] S. Shadmani, S. M. Mousavi Nainiyan, M. Mirzaei, R. Ghasemiasl and S. G. Pouryoussefi,
"Experimental Investigation of Flow Control over an Ahmed Body using DBD Plasma Actuator," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 11, No. 5, pp. 1267-1276, 2018.

[17] C. Hinterberger, M. García-Villalba, W. Rodi, Large Eddy Simulation of flow around the Ahmed body. In "Lecture Notes in Applied and Computational Mechanics / The

Aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses, and Trains", R. McCallen, F. Browand, J. Ross (Eds.), Springer Verlag, ISBN: 3-540-22088-7, 2004.

[18] S. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, "Some Salient Features of The Time-Averaged Ground Vehicle Wake," SAE Technical Paper 840300, 1984.

[19] S. Krajnović, L. Davidson, "Flow Around a Simplified Car, Part 1: Large Eddy Simulation." ASME. J. Fluids Eng., Vol. 127, Issue 5, pp. 907-918, 2005.

[20] S. K. Lele, "Compact finite difference schemes with spectral-like resolution," J. Comput. Phys., Vol. 103, pp. 16–42, 1992.

[21] K. Fujii, "Simple Ideas for the Accuracy and Efficiency Improvement of the Compressible FlowSimulationMethods." Paper presented at International CFD Workshop for Super-Sonic Transport Design, Tokyo, March, 1998.

[22] Y. B. Suzen and P. G. Huang, "Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators," 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, Reno, Nevada, January 2006.

[23] K. Asada, T. Nonomura, H. Aono, M. Sato, K. Okada, K. Fujii, "LES of Transient Flows Controlled by DBD Plasma Actuator over a Stalled Airfoil," International Journal of Computational Fluid Dynamics, Vol. 29, 2015.

[24] H. Aono, S. Sekimoto, M. Sato, A. Yakeno, T. Nonomura, and K. Fujii, "Computational and Experimental Analysis of Flow Structures Induced by a Plasma Actuator with Burst Modulations in Quiescent Air" Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal Vol. 2, No. 4, 2015.

[25] H. Lienhart, and S. Becker, "Flow and Turbulent Structure in the Wake of a Simplified Car Model," SAE paper no. 2003-01-0656, 2003.

[共同研究成果]

リカレントニューラルネットワークによる

実世界流れ場解析用時間発展計算モデルの探求

松岡 浩・菊池 範子

技術士事務所AIコンピューティングラボ

筆者らは、東北大学サイバーサイエンスセンターの共同研究公募制度により、平成30年度から 「リカレントニューラルネットワークによる高解像度流体解析コードの開発」を行っている。本 研究の最終目標は、①現実世界の不完全な計測情報でも実時間でシミュレーションに反映できる データ同化、②高解像度な流体場の時間発展計算も1格子点1ビット幅で実行する超並列ビット 演算、③ミニマルファブでも製造可能なLSIを利用した低消費電力エッジコンピューティング、 という3つの機能をもった高解像度な流体解析コードの開発にある。本稿では、平成30年度以降 に行った研究のうち、上記①の機能を実現するための前提になる"実世界流れ場の時間発展計算 モデル"の試案を示すとともに、粒子間力を考慮した試計算を行い、粘性制御の可能性を示した。

1. はじめに

(1) 高解像度な物理シミュレーションによる社会貢献

近年におけるコンピュータ性能の著しい向上は、ますます高解像度な物理シミュレーションの 実現を可能した。この結果、数値シミュレーションの予測精度が向上し、今では、安全・安心な 未来社会の構築、産業競争力の強化など極めて重要な分野での社会貢献が期待されている。

以下に、流体シミュレーション分野における社会貢献の例をいくつか示す。 ①地球温暖化、異常気象、自然災害などを事前予測し身を守る。(災害に強い都市・港湾計画等) ②火力、原子力などのエネルギーシステムを長期安定に動かす。(タービンの中の熱流動設計等) ③航空機、自動車などの輸送手段に対し高い安全性を確保する。(非定常進行時等の空力解析等) ④船舶輸送、風力発電システムなどの経済性・耐環境性を高める。(プロペラの強度・騒音評価等) ⑤循環器系などの手術でより信頼性の高い医療技術を確立する。(動脈瘤手術の血流解析評価等)

一般に、コンピュータによる物理シミュレーションでは、解析したい現象の時間変化を支配する物理場の方程式を設定し、これを離散化して数値計算によって近似解を求める。注目している現象に影響を与える支配方程式をもれなく考慮するほど、また、離散化を細かく行うほど、シミュレーションの信頼性は向上する。この"マルチフィジクス化"及び"マルチスケール化"を可能にする一番の原動力が、大容量で超高速な計算を実行できるスーパーコンピュータの開発とその利用である。実際、これまでこの歴史が繰り返され、多大な成果を挙げてきた。

(2) リアルワールド問題への対応

高解像度な物理シミュレーションは、上述のとおり人類社会に重要な貢献を成しうるものであ るが、その恩恵を現実世界に展開しようとするとき、コンピュータの性能向上だけでは解決でき ない問題がある。いわゆる"リアルワールド問題"である。通常の高解像度な物理シミュレーシ ョンでは、支配方程式を解いて時間発展計算を行う過程において未来の境界条件等の知識が必要 になる。しかし、現実世界における境界条件等には、予期せぬ変動が頻繁に発生するため、その 値を前もって知ることができない。従って、我々にできることと言えば、「現実世界の複雑で時々 刻々変化する状況に対応して、適切な頻度で現実世界の計測を繰り返し、その計測データに基づ いて、時間発展計算値を得る数値シミュレーションの仕組みを迅速に補正し続けること」であろ う。また、この"補正操作の繰り返し"(← "実時間計測融合"あるいは"実時間データ同化"と いう言葉で表現しても良い。)に当たっては、「現実世界から得られる計測情報は、計測システム 設置上の制約や故障の発生などにより、すべての境界における完全なデータ取得は通常不可能で あり、かつ、誤ったデータを含みうること」に注意を払う必要がある。そして、この"補正操作 を含む時間発展計算"は、高解像度で多数の格子点を扱う場合ほど極めて超高速に実行する必要 があり、最終的には、計測現場でのエッジコンピューティングによるコンパクトな実現が望まれ ることになるであろう。

(3) 本研究の最終目標

以上の考察から、筆者らは、本研究の最終目標を、次の3機能を実現できる高解像度な流体シ ミュレーションコードの開発であるとした。

①現実世界の不完全な計測情報でも実時間でシミュレーションに反映できるデータ同化
 ②高解像度な流れ場の時間発展計算も1格子点1ビット幅で実行する超並列ビット演算
 ③ミニマルファブでも製造可能なLSIを利用した低消費電力エッジコンピューティング

上記②の機能:「1格子点1ビット幅の時間発展計算」は、格子点演算に関する究極の超並列演 算を実現するものである。例えば、ベクトル型スーパーコンピュータSX-ACEを用いてベクトル長 が 256words (1word=64bits) になる計算をする場合、1個のベクトルプロセッサコアあたり、 1回のベクトル命令で、64×256=16384 個の格子点に係る演算を並列実行できることになる。

上記③の機能:「ミニマルファブ製造可能なLSIによるエッジコンピューティング」については、 ②の要請の結果、各格子点に関する状態量を1ビット幅で表現できるので、その時間発展計算は、 ビット演算(and, or, not, shift 等)のみで実行できることになる。従って、プロセッサコア の演算回路には、ビット演算回路に比べて桁違いに多数のトランジスタ数が必要になる乗除演算 回路等を使用しなくて済む。"計測データに基づく補正操作を含む時間発展計算"だけを計測現場 に近いエッジコンピューティングで行うことにすれば、その部分のプロセッサは、集積度の高い LSI 生産には向いていないミニマルファブでも製造可能になる。今後の IoT(Internet of Things) が普及した未来社会の姿を考える時、少量多品種の国内生産が可能なミニマルファブ製造を利用 できることのメリットは大きい。なお、演算回路におけるトランジスタ数や消費電力の削減につ いては、東北大学電気通信研究所等で従来から研究開発が進められている不揮発性演算回路等の 実用化で飛躍的に進むと予想される。

上記①の機能:「不完全な計測情報による実時間データ同化」が、本研究の当面の中心課題であ る。この機能を実現するには、ニューラルネットワークの計算原理がヒントになる。ニューラル ネットワークは、入力信号の一部が欠落したり、間違っていたりしても、それなりに適切な答え を出力することができる。この特徴は、「計測システムを設置できない場所の物理場情報の欠落や、 計測システムの故障等による間違った物理場情報の混在が一部にあったとしても、それなりに適 切なシミュレーション結果を出力し続けることができる」という可能性に繋がる。

このため、本稿では、本研究の初年度である平成 30 年度以降に行った研究のうち、上記①の機 能を実現するための前提になる「"実世界流れ場のための時間発展計算モデル"のニューラルネッ トワークによる記述」について述べる。なお、本稿の本文は松岡が執筆し、掲載した数値シミュ レーション事例に関する計算及び可視化は菊池が分担した。

2. ニューラルネットワーク内蔵格子による流れ場の理解

ここでは、ニューラルネットワークとして代表的な"多層パーセプトロン"をとりあげ、物理 空間中に規則正しく配置された格子点位置において、各格子点が"多層パーセプトロン"を内蔵 していると考える。

各格子点には、いろいろな近傍格子点から"仮想粒子"が到着する可能性があり、その存否情報(←例えば、到着粒子が存在する場合「1」、存在しない場合「-1」、不明の場合「0」とする。)が"多層パーセプトロン"の入力層に入力される。そして、ニューラルネットによって計算された出力層における存否情報に従って、その格子点からいくつかの"仮想粒子"がそれぞれの行き

-26 -

先の格子点に向かって出発する。"仮想粒子"は、一定の質量・運動量・エネルギーをもっている。 空間中のある場所で観測されるべきマクロな物理量は、その場所を中心とした適当な近傍に存在 する仮想粒子がもつ質量・運動量・エネルギーの総和から導出する。従って、現実世界のいくつ かの空間位置で計測データが得られれば、対応するそれぞれの位置の近傍格子点に内蔵された"多 層パーセプトロン"を誤差逆伝播法により学習させて、当該計測データを出力するように調整す ることができる。ただし、多層パーセプトロンの入力データに対する重みの値は、例えば「1」「-1」 「0」のいずれかの値を適用するものとし、学習によって調整するものは、それらの重みの適用頻 度(適用確率)である。このようにして、計測データが、断片的な時空間位置に関するものしか得 られないような現実世界の環境下でも、シミュレーション計算の出力が統計平均的に計測データ に整合するよう自動調整することができる。

以上のように、1格子点における時間発展計算は、データ同化の計算も含めて"多層パーセプトロン内蔵格子"の計算で実行できると考えられる。従って、仮想粒子が移動する可能性のある 格子点どうしを全て結べば、"流れ場全体"もニューラルネットワークで表現でき、その時間発展 計算を実行できる。すなわち、"流れ場"の変化は、"ニューラルネットワーク(多層パーセプトロン)を内蔵した空間格子"とその格子点(ニューロン)間を移動する"仮想粒子"の集団挙動として 理解できる。この階層構造をマクロな側から要素分割していくイメージで図1~図4に示す。



図4 "多層パーセプトロン"を内蔵した格子点

3. リカレントニューラルネットワークによる実世界流れ場の時間発展計算モデル

第2章で述べたように、流れ場全体の時間変化は、"ニューラルネットワーク(多層パーセプト ロン)を内蔵した空間格子"とその格子点(ニューロン)間を移動する"仮想粒子"の集団挙動とし て理解できる。ここでは、具体的な"実世界流れ場の時間発展計算モデル"の1例として、図5 に示すような「複数の多層パーセプトロン(階層型 NN)による計算構造の組合せ」を提案する。



図5 リカレントニューラルネットワークによる実世界流れ場の時間発展計算モデル

各格子点に到着した仮想粒子群は、「衝突散乱層」において質量・運動量・エネルギーが保存される等方性の衝突散乱計算がなされる。その結果、到着粒子の速度分布がもっていた異方性が緩和された速度分布("緩和分布")をもつ仮想粒子群が得られる。これらの仮想粒子群は、現実世界の計測情報と整合性をとらせるための"データ同化操作"を適用する「データ同化操作適用層」に入力される。この層では、今入力された現在の時刻ステップの緩和分布に対して、①「計測データ等入力層」から得られる計測情報、②1時刻ステップ前の到着分布情報、③1時刻前の出発分布情報の3つの情報をもとにして、"データ同化操作"を確率的に適用する。その後、これらの仮想粒子群は、当該格子点の近傍から、それぞれの仮想粒子が行きつくべき格子点に向けて移動する。この移動にともなう仮想粒子の存否情報の書き換え操作を行うのが「揺動並進層」である。この層の操作によって、各仮想粒子は、それぞれの行き先格子点に到着し、1回の計算サイクルを完了する。この計算サイクルを、シミュレーションの時刻ステップの進行に合わせて多数回繰り返すことによって時間発展計算が継続することになる(図5の青矢印の部分)。

また、外部に対する可視化等のスナップショット出力については、時刻ステップ数がある一定 の数だけ進むたびに、「疎視化データ等出力層」において仮想粒子の到着分布と出発分布の平均分 布を個々の疎視化領域の範囲内で求めて出力する(図5の空色矢印の部分)。 上述のとおり、1回の計算サイクルの過程の中で、「1時刻ステップ前の到着分布情報と出発分 布情報」を記憶しておき、現在の時刻ステップにおける"データ同化操作の適用確率"の導出計 算にフィードバックをかける仕組みにしている(図5の緑色矢印の部分)。従って、ニューラル ネットワークの種類としては、"リカレントニューラルネットワーク"による計算モデルというこ とになる。

4. 仮想粒子の格子点間移動における"揺動並進"の仮定

ある格子点から出発した速度 \vec{v} をもつ仮想粒子は、時刻ステップ間隔 $\Delta \tau$ の時間が経過した後には、 $\vec{v} \Delta \tau$ だけ離れた位置にある格子点に移動すると考えるのがふつうである。しかし、ここでは、粒子間力の影響も考慮できるように、「速度 \vec{v} をもってある格子点を出発した仮想粒子は、速度 \vec{v} の向きに直線的に前進するのではなく、速度 \vec{v} と垂直な方向に揺動しつつ、速度 \vec{v} の延長線上にはない左右の格子点をジグザグ型に寄り道しながら、平均的には速度 \vec{v} で前進する」と仮定した。図6に、2次元平面上を揺動並進する仮想粒子のイメージを示した。

図6において、各格子点(例えば、黄色格 子点)には、速度Vをもつ仮想粒子が、左後方 の格子点と右後方の格子点から到着する。 図6の黄色格子点には、左後方から緑色の速 度ベクトルをもつ仮想粒子が到着し、右後方 から茶色の速度ベクトルをもつ仮想粒子が到 着している。到着したそれぞれの仮想粒子は、 当該格子点上で、他の速度をもつ仮想粒子と 衝突散乱を起こし、速度の向きを変える。 この衝突散乱後に、たまたま速度Vをもつこと になった仮想粒子が、左前方の格子点と右前 方の格子点に向かって出発することになる。

この状況を古典力学的に解釈すれば、

「速度**v**をもつ仮想粒子に対して、速度**v**に垂 直な方向に同じ大きさで逆向きの揺動力ペア が時間差をもって作用したため、仮想粒子が 速度を変えずに"斜め移動"した。」 ということになる。そして、この"斜め移動" が左右等確率で繰り返された場合にジグザグ 型の移動パスが実現すると考える。

このモデルを仮定することにより、本来は、 お互いに平行で左右に少し離れたそれぞれの 直進パスを進行するはずであった速度**v**をもつ 仮想粒子が、ジグザグパスを進行することによ って、ときどき、ある格子点上で非常に接近す ることになる。



図6 上向き太矢印で示す速度Vをもつ 仮想粒子群が揺動並進する様子

このとき、仮想粒子間に分子間力を模擬した引力が働くと仮定する。左後方から到着する仮想 粒子と左前方に出発する仮想粒子は、当該格子点近傍において、正味左向きの揺動力を発生する であろう。同様に、右後方から到着する仮想粒子と右前方に出発する仮想粒子は、当該格子点近 傍において正味右向きの揺動力を発生するであろう。従って、後方から到着し前方に出発する仮 想粒子の数について左右のバランスが崩れている場合は、当該格子点における仮想粒子の揺動は 左右等確率にはならないと思われる。このわずかな確率の差が、結果として、自己組織化される 流体のマクロな挙動に大きな変化をもたらす可能性は十分ありうると考えられる。ただし、これ は、モデルの仮定の意味を極めて簡単に説明したに過ぎず、実際はもっと複雑である[1]。

-29 -

5. 粒子間力を考慮した流体シミュレーションに関する考察

(1)粒子間力を考慮した仮想粒子に対する個別操作で負粘性を発現できる可能性
 第3章に述べた"リカレントニューラルネットワークによる実世界流れ場の時間発展計算モデル"を利用して、第4章に述べた"揺動並進"の仮定を行い、粒子間力を考慮するシミュレーション計算を試みた。具体的には、次の操作によって"粒子間力"を考慮する。

操作A:

前回の時刻ステップにおける仮想粒子の衝突散乱において「"左後方から到着した粒子数と左前 方に出発した粒子数の和"が"右後方から到着した粒子数と右前方に出発した粒子数の和"より も大きい場合」で、かつ、今回の時刻ステップにおける仮想粒子の衝突散乱において「左後方か ら到着した粒子が存在し、右後方から到着した粒子が存在しないで、右前方のみに粒子が出発し ようとしていた場合」は、右前方に出発しようとしていた粒子を左前方に出発させる。

操作B:

上記操作Aの文章で、「左」と「右」を入れ替えた操作を行う。

ここで2つの仮定をする。

- [仮定1]時刻刻みが1時刻ステップ間隔だけ進む間に、それぞれの仮想粒子が"斜め移動"す るとしても、疎視化して得られるマクロな流体挙動はほとんど変化しない。
- [仮定2] マクロな流速が速い場所では、マクロな流速と同じ向きに進む仮想粒子の存在確率が 高くなり、マクロな流速と逆向きに進む仮想粒子の存在確率は低くなる。

すると、1時刻ステップ前において「"左後方から到着した粒子数と左前方に出発した粒子数の 和"が"右後方から到着した粒子数と右前方に出発した粒子数の和"よりも大きい場合」という 事実は、「現在においても、その格子点を境にして、左側を前方に進むマクロな流速が、右側を前 方に進むマクロな流速よりも大きいであろう。」という推測を可能にする。そして、このとき、格 子点近傍における正味の粒子間力が左側を向くことから上記の操作Aが発動されれば、左側を前 方に進むマクロな流速は、右側を前方に進むマクロな流速に対してさらに加速され、速度勾配が 急になるであろう。「左」と「右」を入れ替えた場合には、上記の操作Bが発動されることにな り、はじめの速度勾配はやはり急になる。従って、操作Aと操作Bは、ある場所にマクロな速度 勾配が存在したとき、その勾配を急にする効果があり、"負の粘性を発現させる操作"であると考 えることができる。何の操作も適用しない場合に流体は正の粘性を発現するので、この操作をあ る適当な頻度(確率)で適用すると、正ではあるがその値がゼロに非常に近い流体粘性を発現でき ると思われる。これによって高レイノルズ数の流体シミュレーションを容易に実行できる道が開 ける。

(2) 負粘性発現操作がマクロな流体挙動に及ぼす影響の定性的な確認

個々の仮想粒子に対する個別操作である上記の操作Aと操作Bが、疎視化したマクロな流体ス ケールにおいて、負粘性の効果を発現させ、その結果、高レイノルズ数領域で出現するであろう 流体挙動が得られることを確認する。

このため、筆者らの経験が深い円柱後流のシミュレーション[2,3,4]を実行し、その効果を確認 した。具体的には、3次元空間が静止流体で満たされ、その中に無限の長さをもつ円柱が存在し ていたとする。時刻ステップゼロにおいて、円柱軸に垂直な方向に流体が動きはじめた場合、円 柱の後流がどのような挙動を示すかを調べる。より具体的には、円柱軸と平行にZ軸をとり、流 体が動き出す向きに+X軸をとる。Y軸は、X軸にもZ軸にも垂直であるから、結果的に円柱断 面のある直径と平行な方向になる。また、ここでは、"4次元面心超立方体格子(FCHC)モデル" [5,6,7]を用いるので、その位置を特定するには、通常の3次元位置座標(X,Y,Z)に加えて第4 次元目の位置座標(R)が必要になる。3次元位置座標(X,Y,Z)が変化する範囲は、現実に流体 が存在する3次元空間中の位置に対応して定まるが、R 座標については複数の位置座標値をもて ばよく、現実に流体が存在する位置の広がりからは何の制約も受けない。このため、ここでは最 も簡単に、R の位置座標値は2個の値(± $\ell/2$)のみをとるものとする。ここで、 ℓ (>0)は、シミ ュレーションの時間発展計算において時刻ステップがひとつ刻まれる時間を $\Delta \tau$ とすれば、 $\ell = c$ $\Delta \tau$ で与えられる。ここで、c は、仮想粒子の1座標軸方向の速さである。

また、今回おこなったシミュレーション計算における格子点配列は、X方向に768個、Y方向 に512個、Z方向に256個で約1億個の規模に対応している。疎視化については、スナップショ ットをとるべき時刻ステップがやってくるたびに、XYZ方向に8×8×8個並ぶ512個の格子点 をひと塊にしてその中に存在する仮想粒子の運動量の合計を求め、96×64×32個の流速ベクトル を導出した。ただし、3次元ベクトルは紙面上で表現しにくいため、後述するシミュレーション 結果は、Z軸に垂直なある平断面上における流速ベクトル分布の時間変化を示すこととした。

なお、今回のシミュレーション計算では、マクロな流体挙動の変化をおおざっぱに確認するこ とが目的であり、定量的な厳密性は追求しない。このため、仮想粒子がもちうる速度としては、 もっとも単純なFCHCモデルである"単速さ 24 速度モデル"を採用した。このモデルでは、 仮想粒子は次の 24 種類の4次元速度をもつことができる。

(±c, ±c, 0, 0)、(±c, 0, ±c, 0)、(±c, 0, 0, ±c)、(0, ±c, ±c, 0)、(0, ±c, 0, ±c)、(0, 0, ±c, ±c) 仮想粒子は4次元空間内を動くのでその速度成分は4つあり、仮想粒子の速さは、すべて同じ

で大きさで、 $\sqrt{(\pm c)^2 + (\pm c)^2 + 0^2 + 0^2} = \sqrt{2} c$ である。(c: 基準となる仮想粒子の速さ)

時間発展計算を開始する時刻ステップ0の時点で、各サイトには、そこに存在できる仮想粒子 の最大数の20%の数の仮想粒子がランダムな向きに配置されていると仮定した。この結果、疎視 化して得られるマクロな流速はゼロであり、流体は、直方体形状の中で静止している。次に、時 刻ステップ1の時点から、+X向きの速度をもつ仮想粒子をX=0の位置から注入していく。す ると、時刻ステップが進むにつれて、流体全体が+X向きのマクロな速度をもつようになる。こ のとき、+X側の先にある直方体出口においては、出口直前に存在するサイト上の仮想粒子配置 を、出口直後に存在するサイトの仮想粒子配置にコピーして、出口におけるマクロな流速の勾配 がゼロになるという境界条件を近似的に実現した。また、±Y方向と±Z方向には、周期的境界 条件を適用した。そして、この流れの中の入り口に近い位置に、"Z方向の中心軸をもつ無限大の 長さの円柱"を置き、その後流に生じる流体挙動を計算した。なお、これらの計算は、東北大学 サイバーサイエンスセンターのSX-ACE32 ノード(128 ベクトルコア)を利用して行い、どのケース も約 39000時刻ステップの計算を約 40 分で実行している。

(3)シミュレーション結果の考察

図7及び8に前述の操作A及びBの適用確率を0、1/300、1/200、1/180の4ケース変えた場合のシミュレーション結果を示す。スナップショットは、3次元的に生じている円柱後流の流速変化のうち、Z軸に垂直なある平断面上における流速ベクトルの時間変化を示している。はじめ静止していた流体中におかれた円柱の後流には、流体の速度が増すにつれていろいろな変化が生じる。ここでは、紙面の都合から、こうした変化が十分に成熟した段階の同じタイミングにおけるスナップショットの比較だけを示す。なお、スナップショットの流速ベクトルの色は、赤色なら高速、黄色なら中速、緑色なら低速、青色なら静止〜超低速であることを表している。

"操作A及びBの適用確率"をゼロから上げていくと、1/300 まではゼロの場合とほとんど差 異はなくその後の変化もない。1/200 の場合は、双子渦からカルマン渦への過渡変化が生じてい る。1/180 の場合になると、早期に多様な過渡変化が発生する。このように、非常に小さな適用 確率の変化であっても、円柱後流の挙動に大きな影響を与え、流体粘性を変化させているように 見える。今後、さらにいろいろな操作を考案し、定量的かつ理論的な検討を進めていきたい。



図7 粒子間力を考慮した円柱後流のシミュレーション結果(適用確率=左0,右1/300) (上段が 34816 時刻ステップ、下段が 36864 時刻ステップにおけるスナップショット)



図8 粒子間力を考慮した円柱後流のシミュレーション結果(適用確率=左1/200,右1/180) (上段が 34816 時刻ステップ、下段が 36864 時刻ステップにおけるスナップショット)

謝辞

本稿で述べた共同研究課題は、「高解像度流体シミュレーションにAI計算原理のひとつである ニューラルネットワークの計算手法を取り入れ、境界条件等を漏れなく知ることができない環境 下であっても部分的に得られた計測データを活用してそれなりに適切なシミュレーション計算を 実行できることを示し、高解像度シミュレーションの実世界への適用性を拡大する」ことを目指 している。初年度は、新しい計算モデルに関するいろいろなアイデアを試す初期段階であった。 この時期に、個々の計算モデルを試すたびに計算コードのチューニングに多くの時間をさくこと は非効率的で悩ましい。この点、東北大学サイバーサイエンスセンターのベクトル型スーパーコ ンピュータ SX-ACE は、特別なチューニングをしないでも十分な計算速度を確保することができ、 非常に助かった。また、利用にあたっては同センター関係各位のご親切なご指導とご協力をいた だき、心から感謝する次第である。今後とも同センターの有意義な活動を継続的に発展させられ ることを期待する。

参考文献

[1]小原,"-伝熱の常識と非常識-「拡散項3兄弟」を考える", 伝熱 2001年1月, pp. 38-43, 2001 [2]松岡,菊池,"仮想粒子の並進移動過程に干渉効果を加味した流体解析の可能性", SENAC Vol. 52 No2, pp. 18-27, 2019

[3] 松岡, 菊池, "コンパクトな計算機によるリアルタイム流体解析の実現に向けて", SENAC Vol. 51 No2, pp. 1-10, 2018

[4]松岡,菊池, "多速さ格子ガス法実用化展開への手がかり", SENAC Vol. 49 No. 4, pp. 1-15, 2016 [5] Uriel Frisch, Dominique d'Humières, Brosl Hasslacher, Pierre Lallemand, Yves Pomeau, Jean-Pierre Rivet, "Lattice Gas Hydrodynamics in Two and Three Dimensions", Complex Systems, 1 (1987), pp. 649-707, 1987

[6] Chistopher M. Teixeira, "Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics", MIT, 1993 [7]松岡,"ビット演算による CFD と等価な高精度流体解析手法", RIST News No. 64, pp. 17-28, 2018 [大学 ICT 推進協議会 2019 年度年次大会論文集より]

三次元可視化システムと可視化事例の紹介

齋藤 敦子¹⁾, 山下 毅¹⁾, 小野 敏¹⁾, 大泉 健治¹⁾, 江川 隆輔^{2),3)}, 滝沢 寛之^{2),3)}

1) 東北大学 情報部情報基盤課
 2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター
 3) 東北大学 情報科学研究科

a-saito@cc.tohoku.ac.jp

Introduction of 3D visualization system and visualization examples

Atsuko Saito¹⁾, Takeshi Yamashita¹⁾, Satoshi Ono¹⁾, Kenji Oizumi¹⁾, Ryusuke Egawa^{2),3)}, Hiroyuki Takizawa^{2),3)}

Information Infrastructure Division of Information Department, Tohoku Univ.
 Cyberscience Center, Tohoku Univ.
 Graduate School of Information Sciences, Tohoku Univ.

概要

東北大学サイバーサイエンスセンターでは、大規模科学計算システムを利用して得られ た結果を可視化する環境として「三次元可視化システム」を提供している。また、利用者 支援活動の一環として、従来行っていた高速化支援に加え、本センターの技術職員による 可視化支援の取り組みも行っている。本稿では、三次元可視化システムの概要と可視化事 例を紹介する。

1 はじめに

東北大学サイバーサイエンスセンター(以下、 本センター)では、全国共同利用施設として先端 的大規模科学計算環境を提供するため、常に最新 鋭・高性能コンピュータシステムを導入し、先端 分野の研究を強力に支援している。2015年2月か ら主力計算機としてベクトル型スーパーコンピュ ータシステムSX-ACE、2014年4月からスカラ型 並列コンピュータシステムLX 406Re-2、そして、 これらの大規模科学計算システムを利用して得ら れたシミュレーション結果を可視化する環境とし て、三次元可視化システムを提供している。三次 元可視化システムの導入により、本センター内で 大規模科学計算からその結果の可視化までが可能 となり、より幅広いサービスの提供および利用者 支援を行うことができるようになった。

本稿では、三次元可視化システムの概要と、こ れまでに本センターで支援を行った可視化事例を 紹介する。

2 三次元可視化システムの概要

三次元可視化システムは、三次元立体視対応の

大画面ディスプレイと、演算結果の可視化処理お よびディスプレイへの描画を行う可視化サーバ 4 ノードで構成されている。大画面ディスプレイは フル HD (1,920×1,080 画素) 50 インチ LED モニ タを12面(縦3面×横4面)配置し、最大7,680 ×3,240 画素の高精細表示が可能である。可視化サ ーバは、各ノードにインテル Xeon プロセッサ E5-2670 を 2 基、DDR3L メモリを 64GB、グラフ ィックボード NVIDIA Quadro K5000 を1 基搭載し ている。可視化サーバから本センターの大規模科 学計算システムのファイルサーバに直接アクセス できるようになっており、本センターの計算機で 得られたデータを別環境にコピーすることなく三 次元可視化システムで利用することができる。な お、研究室等で計算したデータを持ち込んで利用 することも可能である。可視化ソフトウェアは Advanced Visual Systems 社の AVS/Express MPE を 採用しており、可視化コンテンツを大画面ディス プレイ全面に表示することができる。大画面ディ スプレイと連動した液晶シャッターメガネを通し て見ることで三次元立体視が可能となる。表示さ れた可視化コンテンツは、マウス操作で自由自在 に回転・拡大・移動することができ、高精細な大



図1 三次元可視化システム

3 AVS/Express による可視化コンテンツ 作成

可視化ソフトウェア AVS/Express を用いた可視 化コンテンツの作成方法について概要を述べる。 AVS/Express は、図 2 のように GUI 画面上で、モ ジュールと呼ばれる四角い箱の形をした様々な可 視化機能をつなぎあわせて可視化ネットワークを 作ることで、可視化コンテンツを作成する。利用 可能なモジュールはおよそ 1,000 個もあり、それ らを任意に組み合わせることで多様な可視化処理 を行うことができる。なお、スクリプトで可視化 処理を自動化し実行することも可能である。

入力データは、テキスト形式/バイナリ形式の どちらにも対応している。データ読込速度はバイ ナリ形式の方が速いため、大規模データの場合は バイナリ形式でデータを用意することを推奨して いる。また、大規模なデータは、読込だけでなく、 可視化処理(加工/描画/出力)にも非常に時間 がかかる。そこで、可視化処理では一般的にデー タの間引きを行う。AVS/Express にはデータを間引 くためのモジュールも備わっており、あらかじめ 間引いた入力データを用意しなくとも、 AVS/Express 上で可視化した画像を見ながらデー タの間引き度合いを調整することが可能である。 入力データが構造格子型、離散データ、非構造格 子型の場合は、データのフォーマット情報を記述 したヘッダファイル (AVS 共通書式) を介してデ ータを読み込む。よって、可視化用にフォーマッ トを整えた入力データを別に用意するのではなく、 シミュレーション結果をそのまま入力データとし

て読み込むことができる。ただしデータのフォー マットによっては整形が必要な場合もある。その 他、plot3D や STL など多数のフォーマットに対応 している。

出来上がった可視化コンテンツは、画像や動画 として保存して持ち出すことができる。汎用的な 画像・動画の形式での保存も可能だが、 AVS/Express 独自の 3D アニメーションファイル 「GFA 形式」での保存を推奨している。GFA 形式 のファイルは、AVS/Express をインストールしてい ないパソコンでも、サイバネットシステム株式会 社から提供されているフリービューワ「3D AVS Player」を用いて再生することができる。 AVS/Express 上で再生するのと同様に、三次元動画 として再生しながら自在に視点変更することがで き、プレゼンテーション等でも利用することがで きる。



図2 可視化ネットワークの例

4 可視化事例

本センターの技術職員が作成または作成支援 した可視化の事例を紹介する。作成した可視化コ ンテンツは、本センターの見学コースのひとつと して、センター来訪者にも公開している。スーパ ーコンピュータや並列コンピュータで得られたシ ミュレーション結果を分かりやすい形で伝えられ るため、センターの活動や利用者の研究内容を紹 介する広報としても役立っている。

4.1 フラーレンの爆発解離シミュレーション

東北大学大学院理学研究科 河野研究室 山崎 馨氏が研究された、X 線照射によりフラーレンが 爆発解離する様子のシミュレーション[1] を三次 元動画として可視化した(図 3)。出来上がった 可視化コンテンツのファイルサイズは 94MB

(GFA 形式)、201 フレームからなる。粒子の色 は、電荷の違いにより色づけした。作成した可視 化コンテンツを、河野先生、山崎氏に三次元立体 視で体感してもらったところ、奥行き情報の視覚 的な認知が可能となり、二次元画像よりも時間経 過による構造の変化を詳細に観測できるので、よ り深く理解することができる、構造の妥当性の直 観的な検証が可能になると期待される、との感想 が得られ、三次元立体視による有意性を感じても らうことができた。



図3 フラーレンの爆発解離シミュレーション

4.2 DNA 二重らせんの切断シミュレーション

東北大学大学院理学研究科 河野研究室 菱沼 直樹氏が研究された、放射線による DNA らせん構 造の切断シミュレーション[2] を、本センターの技 術職員の支援のもと、河野研究室で三次元動画と して作成した(図4)。三次元可視化システムによ り、紙面ではなかなかわかりにくい DNA のらせん 構造を立体的に確認することができた。



図4 DNA 二重らせんの切断シミュレーション

4.3 プラズマ熱流動場のシミュレーション

大阪大学接合科学研究所 茂田正哉先生が開発 された、プラズマ熱流動場のシミュレーション[3] を三次元動画として可視化した(図5)。プラズマ トーチ、RF 誘導コイル、トーチ内の温度変化、流 れ場を可視化した。出来上がった可視化コンテン ツのファイルサイズは 536MB (GFA 形式)、400 フレームからなる。入力データは267万点の格子 点を持つ大規模なデータであったため、可視化す るにあたり、バイナリ形式に変換およびデータの 間引きを行った。トーチ内の全体の色およびトー チ中心断面の色は、プラズマの温度変化を示して いる。流れ場は擬似的に流れに粒子を乗せて可視 化している。粒子の色は流速で色付けをした。三 次元立体視により、トーチ内部でらせん形状を描 いて複雑に動く流れ場の様子を直感的に確認する ことができた。



図5 プラズマ熱流動場のシミュレーション

4.4 航空機エンジン騒音の音圧伝搬シミュレー ション

金沢工業大学 佐々木大輔先生、東北大学大学 院工学研究科 福島裕馬氏が研究された、航空機 エンジン騒音の音圧伝搬シミュレーション[4] を 三次元動画として可視化した(図 6)。ある時刻 の音圧分布を様々な断面で三次元静止画にしたも のをまとめて動画にしており、出来上がった可視 化コンテンツのファイルサイズは 107MB(GFA 形式)、25フレームになった。赤い部分が最も音 圧の高い部分を示しており、エンジン回りやエン ジンに近い機体部分で圧力の高い分布になってい ることが可視化した画像から見て取れる。



図6 航空機エンジン騒音の音圧伝搬シミュレーション

4.5 津波浸水被害の再現シミュレーション

東北大学災害科学国際研究所 越村俊一先生が 研究された、東日本大震災での宮城県女川町の津 波浸水被害の再現シミュレーション[5]を三次元 動画として可視化した(図7)。500m×320mの 区域を33cmメッシュで分割して計算された大規 模なデータのため、データの間引きを行い可視化 した。出来上がった可視化コンテンツのファイル サイズは776MB(GFA形式)、1401フレームか らなる。津波の色は波高により色づけをしている。 町の地形や構造物は震災前の地形データと航空写 真から再現している。津波がどのように押し寄せ、 町を覆っていったのかが、可視化した動画から確 認することができた。



図7 津波浸水被害の再現シミュレーション

5 VR 技術の活用

三次元可視化システムをより手軽に体験する 方法として、近年急速に普及してきた VR (Virtual Reality)機器を活用する方法を検討している。VR 機器は比較的安価に入手可能であり、その有効活 用の可能性を探ることで三次元可視化システムの 将来計画に関する重要な知見が得られることが期 待できる。

まず、AVS/Express とスタンドアローン型 VR ゴーグル「Oculus Go」(図 8)を用いて、可視化 能力の検証を行った。Oculus Go は AVS/Express の 3D アニメーションファイル GFA 形式の再生に 対応していないため、汎用的な 360 度動画の形式 に変換することにした。360 度動画への変換は AVS/Express のライブラリを利用して比較的容易 に行うことができた。作成した 360 度動画を Oculus Go で再生してみたところ、三次元可視化 システムと同じような没入感を体験することがで きた。しかし、三次元可視化システムは立体視か つ6自由度(回転・拡大・移動が可能)であるの に対し、360度動画は平面視であり、また、Oculus Goは3自由度(装着者の顔の向きにのみ追従)で あることから、従来の三次元立体視を完全に再現 することはできなかった。今回の課題を踏まえ、 また別のアプローチで VR 技術の活用方法を探っ ていきたいと考えている。



図8 スタンドアローン型 VR ゴーグル「Oculus Go」

6 おわりに

本センターの三次元可視化システムおよび可 視化事例を紹介した。シミュレーション結果を理 解して科学技術の進展につなげるためには、研究 者による結果の正しい解釈とそれに基づく深い考 察が不可欠である。可視化はそのための有効な手 段であり、本センターでも重要なサービスのひと つと位置づけている。今回紹介した可視化事例か らも、シミュレーション結果をより正確に深く理 解するために三次元可視化が非常に有益であるこ とが確認できた。その一方で、可視化装置の維持 や管理には多大なコストを要する。今後は民生品 で安価に入手可能な機器の活用も視野に入れ、今 後のサービス提供のあり方を引き続き検討してい く予定である。

謝辞

本稿を執筆するにあたり、可視化データを提 供してくださった、東北大学大学院理学研究科 河野研究室 河野裕彦先生、山崎馨氏、菱沼直樹 氏、大阪大学接合科学研究所 茂田正哉先生、金 沢工業大学 佐々木大輔先生、東北大学大学院工 学研究科 福島裕馬氏、東北大学災害科学国際研 究所 越村俊一先生をはじめ、多くの方々にご協 力ご支援をいただきました。心より感謝申し上げ ます。

参考文献

- [1] 山崎馨、上田潔、河野裕彦、「X線自由電子レ ーザーパルスによるフラーレン超多価カチオ ン C60q+の爆発解離の動力学シミュレーショ ン」、SENAC Vol.48 No.3 (2015-7), pp.1-6, 2015
- [2] 及川啓太,菱沼直樹,菅野学,木野康志,秋山 公男,河野裕彦,短鎖モデルDNAの鎖切断過 程:化学反応動力学による解析,日本化学会 第96春季年会(2016),2016年3月24日,同志 社大学 京田辺キャンパス,京都,2016
- [3] 茂田正哉、「DC-RF ハイブリッド熱プラズマ 流の非定常 3 次元数値シミュレーション」、
 SENAC Vol.46 No.3 (2013-7), pp.13-17, 2013
- [4] 福島裕馬,大林茂,佐々木大輔,中橋和博, 「Building-Cube Method を用いたエンジンナ セルインレットからの騒音伝播解析」, SENAC Vol.47 No.1 (2014-1), pp.35-45, 2014
- [5] S. Koshimura et al., [The impact of the 2011 Tohoku earthquake tsunami disaster and implications to the reconstruction], Soils and Foundations 54 (2014), pp.560-572, 2014

[大学 ICT 推進協議会 2019 年度年次大会論文集より]

キャンパス無線 eduroam と次世代ホットスポットの最新動向

後藤英昭¹⁾, 原田寛之²⁾, 中村素典^{3,4)}

1) 東北大学 サイバーサイエンスセンター
 2) 札幌学院大学 情報処理課
 3) 京都大学 情報環境機構
 4) 国立情報学研究所

Updates on eduroam and the Next Generation Hotspot

Hideaki Goto¹⁾, Hiroyuki Harada²⁾, Motonori Nakamura^{3,4)}

1) Cyberscience Center, Tohoku University

2) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

3) Institute for Information Management and Communication, Kyoto University

4) National Institute of Informatics

概要

教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤である eduroam は,2019 年 9 月時点で世界 101 か国(地域), 国内 263 機関に導入されるに至っている。学生の学習・研究環境の充実のために,国内外ともに,カフェや博物館, 空港・鉄道駅などの市街地・公共施設への eduroam 導入も進められている。国内では,2010 年に関東地域の貸し 会議施設やカフェなどで市街地 eduroam サービスの実証実験が行なわれ,近年では一般市民向けの次世代ホットス ポット (NGH) と融合する形で, eduroam 対応基地局の設置が各地で進められている。現在,世界では NGH によ るフリー Wi-Fi の国際ローミング基盤の立ち上げが進められており,筆者らもプロジェクトに参画している。その 準備として開催されてきた City Wi-Fi Roaming トライアルに,2018 年も参加することで,eduroam サービスの 連携技術を確立するとともに,連携の有効性を確認した。

1 はじめに

教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤で ある eduroam (エデュローム)は、2019年9月時点 で世界 101 か国 (地域),国内 263 機関に導入されるに 至っている [1].2017年度年次大会 [2] で既報のとお り、学生の学習・研究環境の充実のために、国内外と もに、カフェや博物館、空港・鉄道駅などの市街地・公 共施設への eduroam 導入も進められている.国内で は、2010年に関東地域の貸し会議施設やカフェなどで 市街地 eduroam サービスの実証実験が行なわれ [3], 企業の社会貢献の一環として現在でもその一部が継 続し、利用者から好評を博している.近年では一般市 民向けの次世代ホットスポット (NGH) と融合する形 で、eduroam 対応基地局の設置が各地で進められてい る [2].

筆者らは,2017 年に Wireless Broadband Alliance (WBA) による City Wi-Fi Roaming トライアル [4] に参加することで,世界で初めて eduroam を NGH と接続し、公衆無線 LAN に eduroam サービスを容易 に乗せられるような枠組みとその有効性を示した.ま た、2018 年度年次大会 [5] で一部報告したが、2018 年 のトライアルにも参加して、NGH における eduroam の実用化を推進した.

本稿では、2018 年から 2019 年にかけての次世代ホ ットスポットの最新動向を紹介する.また、eduroam の市街地サービスが、大学におけるサービスと同様の セキュリティを有していることを解説する.

2 セキュア無線 LAN ローミング基盤 Cityroam

公衆無線 LAN で広く用いられているオープン Wi-Fi やキャプティブポータルには、セキュリティ上の 重大な問題が多数あることから、海外ではフリー Wi-Fi であっても IEEE 802.1X (以下,1X 認証)や Passpoint によるセキュア接続オプションを併設する 例が見られる. Passpoint にローミングを組み合わせ た全体的なコンセプト仕様が、次世代ホットスポット



図1 Cityroam 基地局マップ (2019 年 9 月)

(Next Generation Hotspot, NGH)) と呼ばれる.

国内の公衆無線 LAN のセキュア化と NGH 導入 を推進する目的で,第一著者が発起人となり,2017 年1月に「セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会 (NGHSIG)」が発足した [6].2018 年度,当研究会で は、参加企業や開発者を増やしながら複数の通信事業 者と協働で国内各地に次世代フリー Wi-Fi の整備を進 めた.このローミング基盤を Cityroam と命名し,国 内外で広報及び技術紹介を行った.Cityroam の基地 局マップを図1に示す.Cityroam の認証連携基盤は eduroam にも接続されており、いずれの基地局におい ても eduroamの SSID を吹くことを標準仕様として いる.これにより、大規模ショッピングモールやホテ ル,北九州モノレールの各駅、スキーリゾートなどで、 eduroam 及び Cityroam の両サービスが実現した.

3 City Wi-Fi Roaming trial 2018

現在,世界では NGH によるフリー Wi-Fi の国際 ローミング基盤の立ち上げが進められており,WBA によるものや,Cisco OpenRoaming [7] などがある. 筆者らはこれまで,WBA のプロジェクトに参画し てきた.WBA で NGH ベースのローミング基盤の準 備として開催されてきた City Wi-Fi Roaming トラ イアルに,2018 年も NGHSIG 名義で参加すること で,eduroam サービスの連携技術を確立するととも に,連携の有効性を確認した.また,世界の通信事業 者及び都市と協働で,NGH 基盤の構築に貢献した. 同トライアルへの参加は,GÉANT とWBA の間の MoU (Memorandum of Understanding)を利用した ものであり,eduroam を Passpoint/NGH に対応さ せ,世界のフリー Wi-Fi に乗せるための技術・運用開 発を,世界の eduroam コミュニティをリードする形



☑ 2 WBA City Wi-Fi Roaming 2018 (©Wireless Broadband Alliance)

で NGHSIG が実施したものである.前年度のトライ アルの実績に基づいて,2018年には他国にも参加を 呼びかけ,ノルウェーとオランダ,米国の参加が実現 した.

同トライアルの参加都市のマップを図2に示す.前 年には国内に実験的な基地局を数か所しか用意できな かったが,2018年にはCityroamの基地局も充実して きており,世界的に見ても最先端のサービスを多数の サービスエリアで提供することができた.

Cityroam の基地局では、常設している eduroam と 国内ローミングに加えて、同トライアルの期間内には AT&T, T-Mobile US などの SIM 認証,及び,Boingo のローミングが利用可能であった.

現在, 永続的な NGH 対応国際ローミングのフェデ レーションが WBA において準備中であり, 2019 年 内に立ち上がる見込みである. この準備に位置付けら れていた City Wi-Fi Roaming トライアルは, 第3回 となる 2018 年をもって終了することとなった.

4 Cityroam を利用した会議用無線 LAN と 可搬型基地局

Cityroam の認証連携基盤は eduroam を統合する形 で開発されている。同基盤に無線 LAN 基地局を接続 することで, eduroam を含む NGH の各種ローミング サービスを,利用者に容易に提供できる。この仕組み を利用して,大学 ICT 推進協議会年次大会 (AXIES)



図3 左:OpenVPN 方式可搬型基地局 (2019 年版) と右:EtherIP 方式可搬型基地局 (2008 年版) ([9] より)

や Internet Week 2018 などの会議を支援した. これ により,一時的に設置する基地局でも様々な通信事業 者のアカウントを受け入れられるローミング環境を 容易に実現できる枠組みを実現し,その有用性を確認 した.

eduroam 対応基地局のない会議施設や、未参加の大 学,未導入部局での一時的利用,試用,デモなどのた めに、可搬型の eduroam 対応基地局があると便利だ と考えられる. しかし, eduroam では利用者認証が必 須のため, アクセスポイント (AP) から最寄りの参加 機関の認証サーバ(プロキシ)に RADIUS (Remote Authentication Dial In User Service) 連携のための 接続が必要であり,基地局の暫定設置には専門知識と ネットワーク管理権限が必要になる。このような問題 に対処するために、筆者らは 2008 年にセンター管理 型キャンパス無線 LAN システムを開発し,図3(右) のような可搬型の eduroam 基地局を実現した [8]. こ の基地局は, DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) とインターネット接続が可能な回線があれ ば、イーサネットと電源のケーブルを接続するだけで、 現地での設定なしに eduroam サービスを提供できる.

しかしながら,使用機材の老朽化による故障が目 立ってきたことや,Passpoint/NGH などの最新技術 に対応できないこと,現場のネットワークの制約に よって IPsec の通信がブロックされやすいといった問 題があった.そこで,現代的な技術への対応と可用性 の向上,小型化を目指して,後継の可搬型基地局シス テムを開発した [9].図3に,新旧の可搬型基地局の様 子を示す.新型では MikroTik 製の小型ルータ hAP ac を使用しており,本体 (114×137×29mm)・AC アダプタともに小さく,軽量で,旧型より携帯性が大 幅に向上した.

新しいシステムは、Cityroamの認証連携基盤を利 用することで、一般市民も利用できるようになり、携 帯電話会社(キャリア)や無線インターネットサー ビスプロバイダ(ISP)とのローミングにも対応して いる.通信内容の保護とセンターへの収容には、従来 のEtherIP/IPsecに代わり、現地のネットワークで ブロックされにくい OpenVPNを採用した。ただし、 OpenVPNとハードウェアの性能がボトルネックとな り、通信速度は実測値で下り20~28Mbps 程度であっ た。10 台程度の端末数ならば実用になると思われる が、大人数での利用には別方式も検討が必要である。

Cityroam の認証連携基盤の枠組みは、会議等のイ ベントに限らず、災害時の避難所等の一時的な無線 LAN サービスの構築にも応用できると考えられる.

5 市街地 eduroam サービスのセキュリティ

国内外に限らず,大学キャンパス外の市街地・店舗 などで eduroam が利用できることに気づいた利用者 が,大学でもない所にあるのは正規の基地局だろうか との不安を twitter などに書き込んでいることがある. 盗聴や中間者攻撃などのセキュリティ問題を気にかけ ているなら,このような疑問が生じることは自然であ ろう.

結論から述べると、教育・研究機関のキャンパス内 とその外で, eduroam サービスのセキュリティに大差 はない. eduroam や Cityroam では、1X 認証の EAP (Extensible Authentication Protocol) [10] が用いら れており、認証の安全性はこれに基づいている.これ らのサービスでは、利用者認証の実現のために、基地 局が認証連携ネットワークに接続されている必要があ る.この接続は誰でもできるようなものではなく、基 地局の運用者が eduroam や Cityroam の運営者に対 してまずローミング基盤への参加申請を行い、それが 認められた上で、共通鍵ないし電子証明書を用いて基 地局を認証連携ネットワークに接続する必要がある. 大学であれば、大学の情報部門やそこから委託された 業者が基地局の運用を行う.キャンパス外のサービス の場合は、通信事業者がこの役割を担っており、事業 者ではない個人がローミング基盤に参加することは認 められていない. すなわち, 正規の運用者でなければ, 正しく動作する eduroam 基地局を設置することはで きない.

偽の基地局について,市街地の方が設置が容易と考 えられるが,大学キャンパスであっても,立ち入りが 可能な場所であればそれほど難しいことではないと言 える. もし利用者端末が偽基地局に接続させられるよ うなことがあれば,中間者攻撃などが可能となる. 1X 認証では,利用者認証に先立ってサーバ証明書の検証 が可能であり,この機能によって偽基地局を見破るこ とができ,端末を保護できる. 偽基地局は,正規の認 証連携ネットワークに接続されていないため,利用者 の所属する機関の認証サーバに認証要求を送ることが できず,端末にサーバ証明書の検証を成功させること ができない.

ただし,現在の eduroam の運用では,端末の設定 でサーバ証明書の検証を有効にしない利用方法も広く 用いられている.iOS のように,明示的に有効にしな くても,ある種の保護機能が働く環境もある.クライ アント証明書を用いる EAP-TLS 方式では,攻撃者が 正規利用者の認証情報を奪取することは困難である. 一方,PEAP 方式には脆弱性が見つかっており,巧妙 に細工された偽基地局によってパスワードが攻撃者に 漏洩する恐れがある.従って,キャンパス内外を問わ ず,安全性の向上のために,サーバ証明書の検証を有 効にすることが推奨される.

上記の脆弱性の影響範囲や,具体的な対策について は,本稿のテーマを超えることから,eduroam JP 事務 局から発行される情報などを参照していただきたい.

6 むすび

本稿では、eduroam を中心とした次世代ホットス ポットの最新動向を紹介した.教育・研究関係以外 の一般市民でも利用できるセキュアな無線 LAN ロー ミング基盤 Cityroam の展開が国内で進められてお り、これには eduroam も統合されていることから、 eduroam の市街地サービスが充実してきている.

大学ではこれまで eduroam の導入が進められてき たが,eduroam のアカウントは教育・研究機関でしか 発行できないことから,学術的な活動であるにも関わ らず,企業の研究者や個人の学会員などが利用できな いという問題があった.市民に開かれた大学として, 生涯教育の環境改善を進めるという視点で,大学の キャンパス無線 LAN システムであっても,教育・研 究機関以外の一般市民に利用を開放するという方向性 も今後検討していく必要があると考えられる.

本研究の一部は,平成 30 年度,平成 31 年度国立情 報学研究所公募型共同研究の助成を受けた.

参考文献

- eduroam JP: https://www.eduroam.jp/ (2019年9月19日参照)
- [2] 後藤英昭, 中村素典, 曽根秀昭, "デジタル時代の 教育・研究を支える基盤としての eduroam と次 世代ホットスポット,"大学 ICT 推進協議会 2017 年度年次大会 論文集 TC2-5, 2017.
- [3] "ライブドアと NII、学術無線 LAN ローミング 基盤の共同実験を開始," INTERNET Watch, 2010.3.9.
 https://internet.watch.impress.co.jp/ docs/news/353536.html (2019年9月19日参照)
- [4] City Wi-Fi Roaming: http://worldwifiday. com/city-wi-fi-roaming/ (2019年9月19日参照)
- [5] 原田寛之,後藤英昭,"学術無線 LAN ローミン グ基盤 eduroam と次世代ホットスポット基盤 Cityroam のキャンパスへの展開,"大学 ICT 推進 協議会 2018 年度年次大会 論文集 MA1-5, 2018.
- [6] セキュア公衆無線LANローミング研究会 (NGH-SIG): https://nghsig.jp/
 (2019 年 9 月 19 日参照)
- [7] Cisco OpenRoaming: https://openroaming. org/

(2019年9月19日参照)

- [8] 大和純一,若山永哉,後藤英昭,曽根秀昭, "EtherIP を用いたセンター管理型キャンパス無線 LAN,"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.42, No.1, pp.137–144, 2009.
- [9] 後藤英昭, "OpenVPN を用いた eduroam/Cityroam/Passpoint 対応可搬型 基地局の開発,"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.52, No.4, 2019.
- [10] B. Aboba, et al., "RFC3748: Extensible Authentication Protocol (EAP)." https:// tools.ietf.org/html/rfc3748 (2019年9月19日参照)

[報告]計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告

農学部植物生命科学コースでの大量 DNA 塩基配列解析演習

一 学部3年生「学生実験II」における次世代シーケンスデータ解析演習 ―

東北大学農学部植物科学コースでは、学部3年生の演習「学生実験II」(必修)の一部として、サイバーサ イエンスセンターの「計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供」制度を利用 した大量 DNA 塩基配列解析演習を行った。この解析演習は、近年農学研究において一般的な手法となっ てきた「次世代シーケンス」で得られる大量データを解析するための初歩を学生が体験することを目的とした もので、具体的な解析そのものよりは、CUIでのスパコンとのやり取り、データ形式やそれぞれの解析手法の 軸となる考え方、実験手順とデータの実際的な関係性を、演習を通して理解することに主眼を置いた。今年 度初めて行う演習であったが、サイバーサイエンスセンター関係各位のご協力により演習の目的を達成する ことができた。まず御礼申し上げたい。

生物は DNA を遺伝情報の担体とする。 DNA は 4 種類のヌクレオチドが連なったものであり、それぞれがも つ塩基(アデニン、シトシン、グアニン、チミン)の並びである「塩基配列」を調べることは、遺伝情報を知り、 ひいてはその生物を知ることにつながる。例えばヒトは約 30 億塩基対の DNA をゲノム(遺伝情報の総体)と する。2003 年に完了したヒトゲノムプロジェクトでは、この 30 億塩基対の配列を従来法で数百塩基ずつ決定 したため、膨大な時間と労力、コストを要した。しかし 2005 年頃に「次世代シーケンサ」が実用化して以来、 状況は一変した。次世代シーケンスでは大量の DNA 断片の塩基配列を並列的に決定する工夫がなされて おり、例えば illumina 社で最も大量の塩基配列を決定できる NovaSeq システムでは、44 時間で 3 兆塩基も の配列を決定できる(2019 年時点)。また従来法に比べて塩基当たりの配列決定コストが非常に低いことか ら、ヒトやシロイヌナズナといったモデル生物以外の生物のゲノム塩基配列も続々と決定されているほか、 mRNA (DNAの情報が一時的・部分的に写し取られたもの)を逆転写して DNA に変換後に大量解析するこ とで、mRNA の定量解析も可能となっている。これにより例えば、異なる生育条件での植物の遺伝子発現量 の網羅的な比較を行うことなどが可能であり、そのような研究例は実際に増えてきている。次世代シーケン サを用いることは、生命科学研究・農学研究において近年では日常的になりつつあるといえる。

大量の塩基配列データが得られるようになったことで、それに対応する解析が必要となった。次世代シー ケンサが実用化した当初、そのような解析は主にデータ解析の専門家が行うものであったが、近年では一 般的な解析については GUI で簡単に行うシステムも存在し(ただし高額な料金をとられる)、多くの研究者が そのようなシステムを利用している。しかし解析の仕組みを全く理解せずにシステムに生データを投入して 「結果」を得ることは、間違った解釈をもたらす可能性があって非常に危険である。同様に、解析ができる共 同研究者にデータを「丸投げ」して結果を得る場合もミスコミュニケーションを生じることが多く、問題が多い。 一方で解析の仕組みを知っていれば、適切な実験計画を立てて過不足ない量のデータで効率的に研究を 進められるほか、お仕着せではないオリジナルの実験・解析系の開発が可能となりうる。共同研究者とのコミ ュニケーションも良好になり、新しい発見につながるかもしれない。しかし多くの生物学系・農学系研究者に とって CUI での解析は心理的ハードルが高い。そこで本演習では、研究の実戦経験のない3年生のうちか らそのような解析を体験し、雰囲気に慣れる機会を提供することで、将来先入観なく実験と解析の両方に取 り組める人材の育成につなげることを目指した。

宮下脩平 東北大学大学院農学研究科応用生命科学専攻植物病理学分野

演習は2019年11月13日、14日の2日間、計4講時にわたって以下のスケジュールで行われた。

- ・1講時目:公開鍵暗号方式によるスパコンとの通信および Linux の基本的な操作の習得
- ・2講時目: 次世代シーケンスデータ形式の理解と簡単な分析
- ・ 3 講時目: DNA 断片配列の Trinity による de novo アセンブル
- ・4講時目: blastn による類似配列検索

なお演習にあたっては各学生・TA および教職員用に教育用アカウントを発行していただいたほか、解析に 用いるソフトウェアのインストール場所、解析に用いるデータの置き場所としてのアカウントも発行いただい た。

演習に用いたデータは、東北大学植物園や農学研究科実験圃場の植物から抽出した二本鎖 RNA を逆転写し、増幅して得られた DNA の塩基配列を次世代シーケンサ(illumina 社 MiSeq)で網羅的に決定したものである。二本鎖 RNA は RNA ウイルスに特徴的であることから、得られた DNA 配列をつなぎ合わせ(de novo assemble:参考になる配列なしにつなぎ合わせを行うこと)、それと似た配列を既知のウイルス配列データベースから探索することで、上述の植物に感染している RNA ウイルスを検出し、同時に配列決定できることが期待される。実際に演習参加学生は、上述の解析を通して植物園のシロツメクサおよび実験圃場のアカツメクサから複数のウイルスが検出できることを体験した。慣れない解析にもかかわらず全員が意欲的に取り組み、想定時間内に演習を終えられたほか、特に意欲の高い学生が追加の演習課題に取り組む様子も見られた。また演習の合間には、私共の研究室からTAとして参加した佐々木稜太氏(修士1年)と武田萌氏(学部 4 年)が次世代シーケンスを利用して得た成果を含む自らの研究の紹介をそれぞれ行った。実際に身近で行われている研究を知ることで、演習参加学生の理解が深まったものと期待している。

謝辞

上述のように、本演習を行うにあたってサイバーサイエンスセンターの皆様には多くのご協力をいただきま した。御礼申し上げます。また、東北大学植物園でのサンプリングでは技術職員の津久井孝博氏をはじめと する皆様にお世話になっております。この場を借りて御礼申し上げます。





左 演習の様子 下左 佐々木稜太氏による研究紹介 下右 武田萌氏による研究紹介



SC19 報告

東北大学サイバーサイエンスセンター・スーパーコンピューティング研究部 江川隆輔

2019年11月17日~22日に米国コロラド州デンバー市のコロラドコンベンションセンターにおいて, International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC19)が開催されました. SC19は約400の企業や大学,研究所などが展示ブースを構える高性能計算分野における最大規模のトップカンファレンスで,今年度で31回目の開催となります.今年度は世界各国から13,750人の研究者,システム開発者が集い,当該分野における最新の成果発表や技術紹介があり,将来のシステムとアプリケーション開発に関して活発な議論がされました.

サイバーサイエンスセンターでは、本学の高性能計算に関する研究成果の発信を目的 に、流体科学研究所、金属材料研究所、メディカルメガバンクと連携して展示ブースを 構えました.展示ブースでは、本センターのシステム紹介、将来の高性能システムのた めの研究開発に関する展示・成果発表を行いました.展示ブースに多くの訪問者を迎え、 広く当センターの活動をアピールできただけでなく、大変有意義な議論と情報交換を行 う事ができました.次回の SC20 は米国アトランタで開催予定です.高性能計算分野に ご興味のある方は是非参加を検討してみてはいかがでしょうか?



東北大学展示ブースの様子

2019 年度 AXIES 年次大会報告

東北大学情報部情報基盤課共同研究支援係

2019年12月12日~14日に福岡国際会議場で、大学 ICT 推進協議会(AXIES) 2019年度年次 大会が開催されました。

AXIES (大学 ICT 推進協議会) とは、「Academic eXchange for Information Environment and Strategy」の略で、高等教育や学術研究機関における ICT を利用した教育・研究・経営の高度 化を図ること、また日本の教育・学術研究・文化ならびに産業に寄与することを目的としてい る協議会です。

AXIES 年次大会は、国内の教育や研究に ICT (情報通信技術)を活用して高度化を図るため、高 等教育機関や学術研究機関間の相互の情報交換を目的としたイベントです。今年も全国から 延1,300 名を超す研究者、技術者等が集いました。当該分野における最新の成果発表や技術紹 介が、口頭発表、ポスター発表、企画セッションで行われ、それぞれのセッションで活発な議 論がなされました。

東北大学サイバーサイエンスセンター関係では、研究開発部の後藤英昭准教授が「キャンパ ス無線 eduroam と次世代ホットスポットの最新動」(セッション名:ICT 活用・教育実践 1)、情 報部情報基盤課の齋藤敦子技術職員が「三次元可視化システムと可視化事例の紹介」(セッショ ン名:HPC テクノロジー1)のロ頭発表を行いました。

2020 年度の AXIES 年次大会は、本年 12 月 9 日(水)~11 日(金)に大阪コングレコンベンショ ンセンターで開催予定です。









受講 No. 名 称 開催月日 講 師 内 容 者数 ・Linux システムの基本的な使い方 5月27日(月) はじめてのLinux 22 山下 毅 1 ・エディタの使い方 ・スーパーコンピュータの紹介と 5月28日(火) 2 はじめてのスパコン 21 小野 敏 利用法入門(見学あり) Fortranの入門編 3 はじめてのFortran 5月29日(水) 11 江川 隆輔 ・並列プログラミングの概要 5月30日(木) 4 はじめての並列化 小松 一彦 21 スーパーコンピュータの高速化に 5 はじめての高速化 5月31日(金) 江川 隆輔 11 ついて MATLABの基本的な使い方 陳 国躍 6月21日(金) 7 6 MATLAB入門 (秋田県立大学) ・ネットワークの基本的な仕組み ネットワークとセキュ 7 8月2日(金) 16 水木 敬明 ・ネットワークの危険性と安全対策 リティ入門 8月8日(木) ・Fortran の初歩から応用まで 田口 俊弘 8 Fortran入門 14 (摂南大学) 8月9日(金) Gaussianの基本的な使い方 岸本 直樹 Gaussian入門 8月21日(水) 9 33 (理学研究科) Mathematicaの基本的な使い方 Mathematica 横井 涉央 10 9月13日(木) 6 入門 (尚絅学院大学) ・Linux システムの基本的な使い方 9月9日(月) 佐々木大輔 11はじめてのLinux 11 ・エディタの使い方 ・スーパーコンピュータの紹介と はじめてのスパコン 9月10日(火) 大泉 健治 128 利用法入門(見学あり) SX-ACEの性能分析・ ・スーパーコンピュータでの性能 江川 13 9月11日(水) 隆輔 1 高速化 解析から最適化まで ・OpenMP による並列プログラミング 並列プログラミング 148月9日(木) 小松 一彦 の基礎 4 入門 I (OpenMP) ·利用法 ・並列プログラミングの概要 並列プログラミング ・OpenMP による並列プログラミング 8月10日(金) 小松 一彦 152 入門Ⅱ (MPI) の基礎 ·利用法 受講者数計(阪大・岩大からの配信による受講 188 者を含む)

令和元年度サイバーサイエンスセンター講習会報告

令和元年度全国共同利用情報基盤センター顕彰について

第33回全国共同利用情報基盤センター長会議において、東北大学情報部情報基盤課小野敏共同 利用支援係長及び森倫子ネットワーク係長に、令和元年度全国共同利用情報基盤センター顕彰「功 績賞」を授与することが決定されました。本賞は、全国共同利用情報基盤センター及び国立情報 学研究所の運用に顕著な貢献があった者に授与されるものです。

小野氏は平成9年に東北大学大型計算機センター(現・サイバーサイエンスセンター)に採用 となり、その後22年余の永きにわたり、高性能計算に関する全国共同利用・共同研究拠点活動に 係る利用支援、高性能計算基盤を活用した社会貢献活動に多大な貢献をされてきました。また、 同氏は、日々の利用相談、定期的に開催される利用者講習会を企画し、センターの計算機サービ スの質の向上に寄与しているほか、本学情報科学研究科、岩手大学によるグループ利用の環境構 築、利用方法紹介、利用状況管理も担当し、利用率の向上に大きな成果をあげています。

森氏は平成4年に東北大学金属材料研究所に採用となり、その後、平成8年に同大型計算機センター(現・サイバーサイエンスセンター)に配置換となりました。配置換後は、全学的な基幹ネットワークの業務を担当し、現在も情報シナジー機構のもと、全学的な情報化推進事業やセキュリティ検知・防御システムの仕様検討等にも中心的な立場として従事しています。また、同氏は、ホスティングサービス利用の増加に伴い、設備の増強に深く関わるなど、多岐に渡る業務を 積極的に遂行し、本学の情報化推進に寄与しています。

以上のように、小野氏は全国共同利用の推進に、森氏はネットワーク関連業務の推進にそれぞ れ永年にわたって尽力し、サイバーサイエンスセンターの円滑な運営に多大なる貢献を果たして いることが今回の受賞に至った理由となっています。

授賞式は、昨年11月6日(水)に開催された第34回全国共同利用情報基盤センター長会議・ 第30回学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点運営委員会合同懇親会の冒頭で行われ、両氏 の他、3名の受賞者に表彰状と副賞(楯)が手渡されました。



『受賞者のコメント』

東北大学情報部情報基盤課(サイバーサイエンスセンター) 小野 敏

この度は全国共同利用情報基盤センター顕彰「功績賞」をいただきありがとうございます。今回の 受賞は、計算機システムの運用に関わる教職員みなさまのご指導とご支援によるものと、心より感謝 しております。引き続き、システム利用者のみなさまに質の良いサービスを提供し、研究成果創出の 一助となるように努めていきたいと思いますので、どうぞよろしくお願いいたします。どうもありが とうございました。

東北大学情報部情報基盤課(サイバーサイエンスセンター) 森 倫子

この度は栄誉ある賞をいただき大変光栄に存じます。私がここまでやってこれたのも、ネット ワーク係をはじめ情報基盤課、情報シナジー機構のみなさま、TAINS を支えてくださっている部 局のみなさまのおかげで、大変感謝しております。この受賞を励みに今後とも TAINS の発展に貢 献したい所存でございます。どうもありがとうございました。

[Web 版大規模科学計算システムニュースより]

大規模科学計算システムニュースに掲載された記事の一部を転載しています。 https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/tayori/

利用者番号(アカウント)管理の徹底について (No.287)

当センターの大規模科学計算システムでは、利用に関する内規に記載された利用資格に該当し、 利用を承認された本人のみが、利用者番号(アカウント)を利用できます。利用者番号を他者へ 貸与することは厳しく禁止されておりますので、改めてご注意をお願いいたします。

利用者番号を登録しても、利用しなければ負担金は発生しませんので、実際に計算機システム を利用する方全員の利用申請を行ってください。また、不正アクセスの危険性が高まりますので、 以下のことを行わないよう秘密鍵の管理の徹底もお願いいたします。

- パスフレーズなしの秘密鍵の使用
- ・秘密鍵、パスフレーズの使い回し
- ・秘密鍵のメール添付、USBメモリやホームディレクトリに保存
- ・第三者との SSH 鍵の共有

なお、センター側で定期的に設定・利用状況を確認し、不正利用の疑いがある場合には利用 停止の措置をとる場合があります。情報セキュリティ対策の強化のため、皆様のご理解とご協力 をお願いいたします。

(共同利用支援係)

大判カラープリンタのご紹介(No. 287)

本センターでは、大判カラープリンタ(ヒューレットパッカード社, DesignJetT795, DesignJetZ5400ps)を1階利用相談室(平日8:30~21:00)に設置しており、A0サイズまでのポスタ ーなどを光沢紙または、ソフトクロス紙に出力することができます。

・光沢紙用プリンタ:(1枚600円)
 ・ソフトクロス紙用プリンタ:(1枚1200円)
 特徴:折り目がつきにくく、持ち運びが容易

利用法は以下をご参照ください。 http://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/service/printer.html 研究の発表等の際にご活用いただければ幸いです。

(共同研究支援係,共同利用支援係)

— SENAC 執筆要項 —

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。

- -Word の場合-
 - ・<u>用紙サイズ: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)
- <文字サイズ等の目安>
 - ・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)執筆者には、希望により本誌(10部以内の希望部数)と本誌 PDF版を進呈します。

- (2) 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。
- (3) 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。
- (4) 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。
- (5) 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 情報部情報基盤課共同利用支援係

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

スタッフ便り

この冬は雪が少ないと話題になっています(2020年1月20日現在)。サイバーサイエンスセン ターがある青葉山でも、雪に覆われた景色が見えたのはほんの2,3回、それも半日くらいで消 えたように思います。サイバーサイエンスセンターのずっと前身の大型計算機センターがここに 移転したのは平成の初めころで、四半世紀が過ぎていたようです。当時は、青葉山の東北大学キ ャンパスの西のはずれにあったので、冬になると蔵王からの雪まじりの風が強くあたったり、冷 え込みが片平とは大違いだった覚えがあります。周囲を含めてかなりの積雪になって雪かきが必 要になることも度々ありましたが、暖冬化のためか、積雪をあまり見なくなりました。もとゴル フ場だった丘にできた新キャンパスの多くの建物が建ってくれたせいか、風当たりもきびしくな いような気がします。(H.S)

小学校でプログラミング教育が必修化されるそうです。論理的な思考力を小学生から身につけ るということでしょうか。プログラミング言語を体験する小学生が増えていく一方で、本来の言 語、日本語の読み書きはどうなのだろう……心配になりました。メールや報告書の作成等々、作 文の機会が減ることはないですし、書いては消しての繰り返し作業に少なからず時間を費やされ る毎日。こっちの高級言語こそ身につけておきたかったよなぁ、バグだらけの文章を前にして今 日も悩む 2020 年年頭です。本年もよろしくお願い申し上げます。(K. 0)



開発中の青葉山キャンパス

SENAC 編集部会 滝沢寛之 水木敬明 後藤英昭 江川隆輔 伊藤昭彦 吉田貴子 大泉健治 小野 敏 斉藤くみ子

編集・発行	令和2年1月発行 東北大学 サイバーサイエンスセンター
印刷	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

SENAC Vol. 52 (No. 1~No. 4)

2019. 1~2019. 10

	17			1 201	0.10
項 日	No.	р.	垻 日	No.	р.
米 皕圭			報告		
<u>で現日</u> サイバーサイエンフロンタート甘淋科学ししての	1	1	<u>+K口</u> CC17 却生。	1	EO
リイバーリイエンスセンターと基礎科子としての	1	1		T	55
コンピュータサイエンス 河野 裕彦			平成30年度サイバーサイエンスセンター講習	1	54
センター長に就任して 菅沼 拓夫	2	1	会報告		
土同研究成果			滝沢・江川研究室の研究グループが最優秀論	1	55
<u>バロリルタイ</u> 指揮ズに右おん北に執八フ乱も兴乱なけの明惑し八	- 1	0	古世た 二世 に し と	1	00
後年代に有効な非例が万丁動力子計算伝の開発と万	1	3	又貝を交貝しよした		
チモーター光異性化反応への適用			〈平成 30 年度東北大学サイバーサイエンスセ		
乱流の生成とその維持機構に関する研究	1	14	ンター顕彰報告>		
伊澤精一郎 他			平成30年度東北大学サイバーサイエンスセン	2	52
レートの回転	1	10	ター頭形について	-	02
A「熱ノノスマンエットを用いたSI」ノ 私士人里	1	18			
創製プロセスにおける軸方向磁場の効果			受賞者のコメント 安達 淳	2	53
茂田 正哉			河野 裕彦	2	53
			鈴木 陽一	2	54
川アルタイト海冲温水加定予測の今日展開に向けた	2	9	第90回真性能シミュレーションに関するワー	- 2	55
リアルタイム律仮夜小阪音子側の主国成開に同けた	2	2		2	55
検討			クショッフ (WSSP29) 開催報告 江川 隆輔他		
直接数値解析による環状流路ポアズイユ流の亜臨界	2	9	第1回日本オープンイノベーション大賞にお	2	56
遷移の研究 塚原隆裕 他			いて、本センター・撫佐昭裕客員教授らの		
に相約了の光准役動温程に工連効用な加比した法体	0	10			
収湿松丁の亚連移動過性に丁砂効木を加味した加快	2	10	切九クルークが応防人臣員を支員しました 二下下の 日本 リー・ シー・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・ ・		
解析の可能性 松岡 浩他			平成30年度サイバーサイエンスセンターセミ	2	57
Flamelet approachに基づくガス燃料を対象とした	3	1	ナー報告		
伏懐シミュレーション 赤尾津翔大 他			平成31年度科学技術分野の文部科学大臣表彰	3	28
	0	0	「秋日」「文目」「文目」「八日公平」	Ŭ	20
氏间肌空機開発にわりる入規模UFD 脾竹の適用	3	8	にわいて奥昭准教技が科学技術員(開発部門)		
(その3) 前田 一郎			を受賞		
複数領域FDTD法を用いた大規模モデル電磁界散乱特	4	1	一般社団法人・電気学会第 107 回通常総会に	3	29
性の解析 右尾自己的 有尾自己的	-	-	おいて江川路輔准教授が第75回雲気受術振興	Ũ	-
			おいて江川産業性教技が第13回电X1手術派典		
目動車エンシン用ビストンリングまわりの気液一相	4	6	貫(進歩貫)を受賞		
流解析			大型計算機センター法制化50周年記念シンポ	3	30
大規模科学計算システム			ジウム報告 滝沢寛之		
	0	20	FMC Comments 化 ADEMC 2010 却生 小野 始	9	
SSRノクセス認証鍵生成リーバの利用力伝	2	- 30	EMC Sapporo & APEMC 2019 報告 小野 戦	3	33
アプリケーションサービスの紹介	2	37	オープンキャンバス 2019 報告 江川 隆輔	4	22
解説			<計算科学・計算機科学人材育成のためのス		
 OpenVPNを用いた eduroam/Cityroam/Passpoint 対	4	14	ーパーコンピュータ無償提供利用報告>		
で可拠刑す地民の関系	1	**	田学如小学科での計算小学注羽 本田 明引	4	94
心可嚴望基地同(2)開発			理子部化子科での計算化子便省 麻田 明弘	4	24
			東北大学数理科学連携研究センター主催	4	26
大学 ICT 推進協議会 2018 年度 年次大会論文集より			g-RIPS R (graduate-level Research in		
			Industrial Projects for Students)-Sendai		
<u>市地</u> 市业上学业ノバールノテンフセンターにわけて古	- 1	05			
東北人子サイバーサイエンスセンターにわける局	1	25	ノログラムにわける重于コンヒューターに		
速化推進研究活動の取り組みについて			関するプログラミング実習 水滕 寛		
小野 敏 他			工学部電気情報物理工学科 「学生実験 D」 講義	4	28
『全国洲水氾避被宝類堆定のための? 次元氾避計	1	30	ムハマド アルフィアン アムリザル 仲		
	1	00			17
鼻』コードのSX-ACE 同け最適化およいMPI 业列化			利用相談至便り	3	17
山下 毅 他			2019 度度の利用相談について		
東北大学における教職員を対象とした情報セキュ	1	36	紹 介		
リティ 教育 小野崎伯久 仲			サイバーサイエンスセンター展示室の紹介	3	34
ノノイ教育 「「判뻐伊久」に まれ上端にありたい。」	-	10		J	ы
東北大学における標的型攻撃メール対応訓練	1	40	「Web 版大規模科学計算ンステムニュース」より		
小野﨑伸久 他			MSC.Marc / Mentat のサービス終了について	1	56
学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam と次世代ホ	1	45	(No. 269)		
ットスポット其般 Cituroam のキャンパスへの展開			利田老釆号(アカウント)管理の御底について	1	56
				T	50
「「「「」」「「」」「」」「」」「」」「「」」「」」「」」「」」「」」「」」「			(No. 269)		
<u>お知らせ</u>			ホームディレクトリの無料ストレージ増量およ	2	60
2019年度サイバーサイエンスセンター講習会のご	2	28	び 2019 年度の利用負担金について(No. 275)		
安内			科学技術計質言語MATI ABのバージョンアップに	2	61
ホロールノテンフロンター港羽人/百世 心地明		1 -	$(1) \mathcal{I}_{\mathcal{I}}}}}}}}}}$	4	01
リイハーリイエンスセンター講習会(夏期・朳期開	3	15	-)(* ((No. 275)		
催分)のご案内			半成 31 年度共同研究について(No. 276)	2	62
令和2年度 学際大規模情報基盤共同利用・共同研	4	20	計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパ		
空圳占小莫刑土同研空理 顕直生のご安内	-	_ ~	ーコンピュータ無信提供制度について(No 976)	2	63
	4	01	$- \cdot \cdot$	4	00
子前子生のためのスーハーコンヒューダ無償提供	4	21	氏间企業利用リーヒスについ((No.276)	Z	63
制度について			大規模科学計算システムの機関(部局)単位で	2	64
_THPCN シンポジウム			の利用について(No. 276)		
THPCN 学際大規模情報其般土同利田 · 土同研空圳	3	19			
		1.5			
□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□□					

利用負担金額の表示コマンドについて (No. 278) 利用者番号 (アカウント) 管理の徹底について (No. 278) Gaussian16 のバージョンアップについて (No. 282) 科学技術計算言語 MATLAB のバージョンアップに ついて (No. 282) 数式処理プログラム Mathematica のバージョンア ップについて (No. 282)	3 3 4 4 4	36 36 29 29 30		

システム一覧

計算機システム	機種
スーパーコンピュータ	SX-ACE
並列コンピュータ	LX 406Re-2

サーバとホスト名

フロントエンドサーバ	front.cc.tohoku.ac.jp
SSH アクセス認証鍵生成サーバ	key.cc.tohoku.ac.jp

サービス時間

利用システム名等	利用時間帯				
スーパーコンピュータ	連続運転				
並列コンピュータ	連続運転				
サーバ	連続運転				
可視化機器室	平日 9:00~21:00				
館内利用	平日 8:30~21:00				

スーパーコンピュータ (SX-ACE) の利用形態と制限値

利用形態	利用ノード数 ※	実行時間制限 (経過時間)	メモリサイズ制限	-q オプション	-b オプション
通常	1~1,024	規定値:1週間 最大値:1ヶ月	60GB×ノード数	SX	利用ノード数
無料	1	1時間	60GB		f
デバッグ・	1~16	2 時間	60GB×ノード数	debug	利田ノード粉
	17~32	24 時間			

※2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

並列コンピュータ(LX 406Re-2)の利用形態と制限値

利用形態	利用ノード数 ※	実行時間制限 (経過時間)	メモリサイズ制限	-q オプション	-b オプション
通常	1~24	規定値 : 1 週間 最大値 : 1 ヶ月	128GB×ノード数	1.	利用ノード数
アプリ ケーション	1	なし	128GB		а
会話型	1(6コアまで)	1 時間 (CPU 時間合計)	8GB	_	_

※2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

東北大学サイバーサイエンスセンター 人人 大規模科学計算システム広報 Vol.53 No.1 2020-1

[巻頭言] 血行状態モニタリング装置「魔法の鏡」のクラウド化吉澤 誠	1
[共同研究成果] 八木 - 宇田アレーアンテナから成る忍者アレーアンテナの実験的検討 	3
Simulation of Nanopowder Growth-Transport in Turbulent Thermal Plasma Flow Field Masaya Shigeta	9
DBD プラズマアクチュエータを用いた自動車後流制御による抵抗低減 藤井 孝藏・浅田 健吾	15
リカレントニューラルネットワークによる 実世界流れ場解析用時間発展計算モデルの探求松岡 浩・菊地 範子	25
[大学 ICT 推進協議会 2019 年度年次大会論文集より] 三次元可視化システムと可視化事例の紹介	34
キャンパス無線 eduroam と次世代ホットスポットの最新動向 後藤 英昭・原田 寛之・中村 素典	39
[報 告] 〈計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用報告〉 農学部植物生命科学コースでの大量 DNA 塩基配列解析演習 一学部3年生「学生実験 II」における次世代シーケンスデータ解析演習一 	43
SC19 報告	45
2019 年度 AXIES 年次大会報告	46
令和元年度サイバーサイエンスセンター講習会報告	47
令和元年度全国共同利用情報基盤センター顕彰について	48
[Web 版大規模科学計算システムニュースより] 利用者番号(アカウント)管理の徹底について(No.287)	50
大判カラープリンタのご紹介(No.287)	50
執筆要項	51
スタッフ便り	52

