



TOHOKU
UNIVERSITY

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.56 No.1 2023—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	電話番号(内線)* e-mail	主なサービス内容	サービス時間
				平 日
一階	利用相談室	022-795-6153 (6153) cc-sodan@grp.tohoku.ac.jp 相談員不在時 022-795-3406 (3406)	計算機利用全般に関する相談 大判プリンタ、利用者端末等の利用	8:30～17:15 9:00～21:00
	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	9:00～16:00
三階	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-kaikai@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) 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
	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
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。

本誌の名称「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]

6G 時代における高速コンピューティングの役割

情報科学研究科研究科長 加藤 寧

サイバーサイエンスセンターは学内の情報ネットワーク基盤の整備と維持をはじめ、スパコンを有する国内有数の共同利用施設として大規模な計算資源を提供すると共に情報科学研究科の協力講座として先端的な高性能計算技術や次世代情報通信基盤技術などの教育研究において貢献を頂いております。研究科では機関（部局）単位で利用負担金制度を支払う制度を活用して現在 85 名の利用者登録をしており、物理化学現象を支配する数値モデルの構築、熱流動を数値計算する超臨界流体シミュレータの開発、マルチスケール先端混相流体解析、AI 技術を駆使したデータ解析など、スーパーコンピューティングに係る様々な研究開発を行い、世界に誇れる数々の研究成果を発表してきております。

私自身は無線ネットワークの研究をしている研究者の一人としてスーパーコンピュータの利用経験はありませんが、しかし、高速コンピューティングの恩恵を身をもって体験しています。平成 3 年に東北大学の教員として初めて勤務したのは当時の大型計算機センターで、後に一連の改組を経て、平成 20 年に現在のサイバーサイエンスセンターとなりました。平成 3 年当時は手書き文字認識の研究をしており、現在のデスクトップパソコンよりも遅い計算速度を持つミニコンピューターでさえ数千万円の値段をする時代でした。3 ギガバイトのハードディスクを買うのに 120 万円がかかったことを今でも鮮明に覚えております。C 言語が使える UNIX オペレーティングシステムは当時世の中に出たばかりで、大変便利でしたが、バッファサイズが小さく、大きなデータサイズを扱う計算は容易ではありませんでした。このような状況を一変させたのは Sun SPARCstation 20（俗称 SS2）ワークステーションの出現でした。安価で計算速度の速いこの SS2 の誕生により研究のスピードが一気に上がりました。ありがたいことにこの SS2 ワークステーションを数台並べ、昼夜を問わず計算をまわした結果、当時世界最大規模の手書き文字データベース ETL9B を対象に行った手書き文字の認識実験では世界最高性能の 99% という認識精度を達成しました。当時考案した手法は 1 つの手書きパターンを数学関数で変形させ複数のパターンを生成するもので、言ってみれば、一つサンプルから複数のサンプルを疑似的に生成する一種の「計算パワー依存」的な方法でした。このことが功を奏してあたかも ETL9B より数百倍巨大なデータベースを生成したこととなり、後に自分自身の最初の IEEE 論文の発表にも繋がりました。

このように高速コンピューティングはその優れた計算性能により色々なアイデアを試す環境を我々利用者に提供してくれます。それが原動力となって新しい発見が生まれます。生命科学や材料科学の世界ではまさにこのようなことが起きていると伺っております。

さて、私自身の現在の研究分野に話題を戻しますが、2030 年に 6G の時代がやってくると言われています。その頃には宇宙から地球の隅々まで高速なネットワークで繋がれ、末端ユーザーは殆ど遅延のないギガビット級の通信速度を保有することになります。このような無線ネットワーク環境の実現により通信と計算が一段と融合し、ローカルな計算環境では実現不可能な情景認識や状況判断などは 6G ネットワークの力を借り、タスクとしてクラウド上にあるスーパーコンピュータに転送し、計算結果を瞬時に返してもらうことが可能となります。このような研究が進展しますと、例えば車の自動運転や AI によるドローン、ロボットの制御、移動中の遠隔手術などのアプリケーションは今までより格段に使いやすくなり我々の生活が更に豊かになっていきます。

このように無線や有線ネットワークの更なる発達により、バックエンドとしての高速コンピューティングの役割は益々増大するものと考えられます。私がセンターに就職した頃は丁度学内最初のネットワーク TAINS の黎明期で、ネットで電子メールが行き交うことは人々に大きな喜びを与えました。2030 年を展望しますと、センターにあるスーパーコンピュータは電子メールと同じように人々の生活を支える更なる重要な社会インフラとなりえることは決して不思議なことではありません。巨大な計算パワーと超高速なネットワークを併せ持つ優位性を遺憾なく発揮され、これからも躍進をし続けることを期待しております。

[共同研究成果]

長期（2001-2020 年）日本域を対象とした領域大気再解析の再現性検証

福井真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗,
白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎剛(東北大学大学院理学研究科),
斉藤和雄(気象業務支援センター/東京大学大気海洋研究所/気象研究所), 瀬古弘(気象研究所)

令和 2 年度にベクトル型の計算機 AOBA-A へ移植した日本域を対象とした水平格子間隔 5km の領域再解析システムを用いて、日本域を対象に 2001 年 7 月から 2021 年 6 月の 20 年分の領域大気再解析を行った。実験期間を通じて概ね安定した動作を確認できた。また、月降水量について、台風の影響を反映した 9 月において西日本の東斜面で多い傾向を既存の再解析よりもよく再現していることを確認できた。なお、本稿は 2022 年度気象学会春季大会予稿[1]を基に作成した。

1. はじめに

我々は、日本域を対象として水平格子間隔 5 km で過去の大気場を三次元的に再現する長期領域再解析を実施している。領域再解析を通じて、気候変動の影響把握や、過去のメソスケール極端気象の解析、気象情報の利活用促進、数値モデル改善などへの貢献を目指している。

既に、長期再解析における一貫性を重視して同化観測を地上気圧及びラジオゾンデ観測に限定した領域再解析のフィジビリティを確認した[2]。そして、令和 2 年度、東北大学サイバーサイエンスセンターの新しいベクトル計算機 AOBA-A へ移植し動作確認を行い、1 年で 20 年程度分の再解析が可能な環境を構築した[3]。現在は、過去約 60 年を対象とした長期領域再解析を実行する段階に入り、2001 年 7 月から 2021 年 6 月の 20 年分の計算を令和 3 年度に実行した。本報告では、計算が完了した期間の領域再解析の再現性を、気象庁 55 年長期再解析(JRA-55)[4]と比較しながら評価した結果を紹介する。

2. 領域再解析システム

領域再解析システムは、JRA-55 を境界として東アジア域を水平格子間隔 25 km で再解析した上で更に日本域を水平格子間隔 5 km で再解析を行うように構築されている[2]。大気場の時間発展を気象庁非静力学モデル[5]で解き、観測の同化を局所アンサンブル変換カルマンフィルタ[6]で行う構成になっている。同化するデータとしては、地上気圧及びラジオゾンデの観測に加え、海上のみで台風中心位置を利用した。解析において、第一推定値には解析中心からの予報を用い、予報誤差共分散は 30 メンバーの摂動ランからを評価した。対象期間は 2001 年 7 月から 2021 年 6 月までの 20 年間とした。計算は 1 年分を 1 ストリームとなるように分割した。各ストリームは、開始時刻を 25km 格子の再解析では 6 月 20 日 12UTC、5km 格子の領域再解析は 6 月 29 日 12UTC とし、スピンアップ期間を除いた同年 7 月から翌年 6 月までを用いた。

3. 結果

期間を通じて概ね安定した再解析ができることを確認できた。同化された観測数は、ラジオゾンデによる斉時観測のある 00/12UTC とそうではない 06/18UTC で異なることを除くと、概ね一貫しており、第一推定値が観測から離れすぎ、同化する観測数が極端に少なくなることはなかった。海面更正気圧における JRA-55 に対する根平均二乗差(RMSD)は、夏季(6-7 月)は平均 0.66 ± 0.14 hPa で、冬季(12-2 月)は平均 0.87 ± 0.22 hPa で推移した。冬季は、観測の少ない日本の南海上を低気圧が発達・通過することが多いため、夏季に比べ RMSD が大きくなった。

台風の中心位置の平均誤差は 60km で、台風ボーガスと同化している JRA-55 と同程度となっ

た。中心気圧については、台風の強度情報は直接同化していないものの、中心気圧の誤差は平均で、16hPa から 13hPa まで減少し、台風ベストトラックとの対応が JRA-55 に比べて改善した。側面境界付近では JRA-55 と同じくバイアスが大きかったが、日本の南岸を中心に改善した(図略)。側面境界付近では台風のスピニアップの問題があるものの、側面から離れると、台風の内部コアをある程度解像できる高解像度モデルを用いた再解析の有効性が表れることを示唆する。

日本列島上で平均した降水量の季節進行について、気象庁の AMeDAS を含む地上の気象観測地点での観測値から求めたものと、領域再解析及び JRA-55 の観測地点へ内挿値から求めたものとで比較する。領域再解析では観測と同様に 7 月及び 9 月に極大をとったが、JRA-55 では 9 月は極大とはならなかった。9 月は、九州、四国、紀伊半島の東斜面で降水量の多い地域が観測される(図 1 上段)。領域再解析ではその特徴をよく再現できていた(図 1 下段右)が、JRA-55 では不十分であった(図 1 下段左)。高解像度化に伴い、地形の影響を反映できるようになったこと、台風強度の日本付近での再現性が改善したことが要因と考えられる。

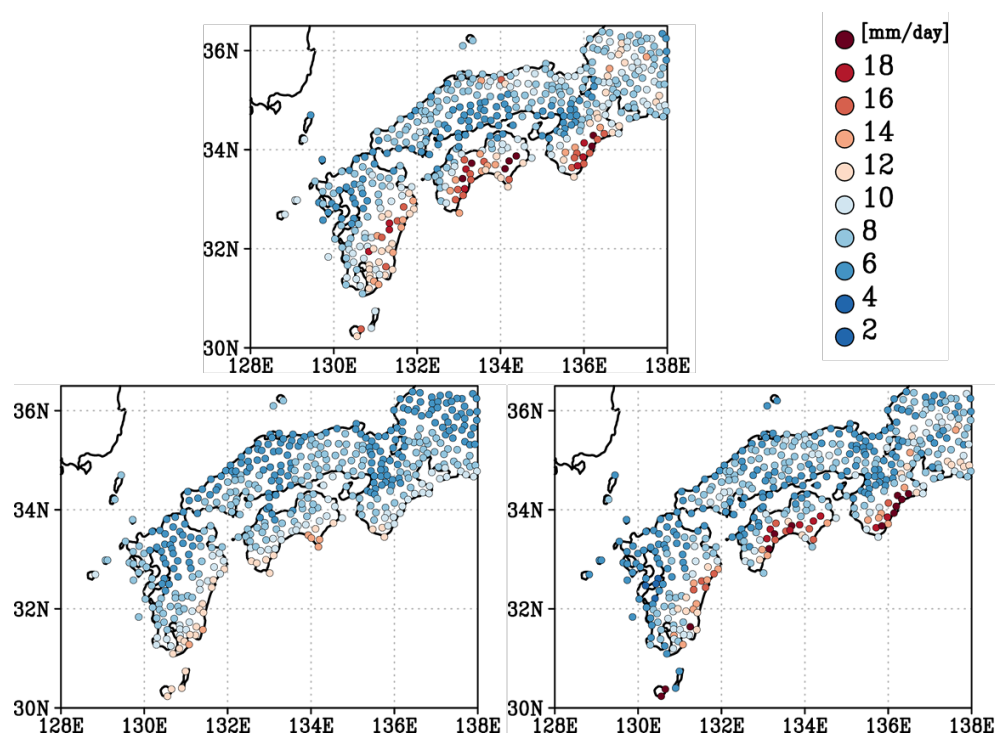


図 1 9 月の平均降水量[mm/day]。上段が AMeDAS 観測値、下段左が JRA-55、下段右が領域再解析。

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。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。東北大学(指定国立大学)における災害科学世界トップレベル研究拠点により実施した。また、本研究は JST 共創の場形成支援プログラム JPMJPF2013 の支援を受けた。

参考文献

- [1] 福井真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎剛, 斉藤和雄, 瀬古弘, 長期 (2001-2020) 日本領域再解析の再現性の検証. 日本気象学会 2022 年度春季大会講演予稿集, 121, 208, 2022.
- [2] 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*,

observations as an alternative to the dynamical downscaling. *J. Meteor. Soc. Japan*, **96**, 565–585, 2018.

[3] 福井真, 曾我大輝, 小原涼太, 臼井健, 瀧口海人, 小野佳祐, 廣瀬大河, 松島沙苗, 白川栄一, 伊藤純至, 岩崎俊樹, 山崎剛, 斉藤和雄, 瀬古弘, 2022: 更新されたベクトル機での日本域を対象とした長期領域再解析の実行. *SENAC*, **55(2)**, 1–4, 2022.

[4] Kobayashi, S., Y. Ota, Y. Harada, A. Ebita, M. Moriya, H. Onoda, K. Onogi, H. Kamahori, C. Kobayashi, H. Endo, K. Miyaoka, and K. Takahashi, The JRA-55 Reanalysis: General specifications and basic characteristics. *J. Meteor. Soc. Japan*, **93**, 5–48, 2015.

[5] Saito, K., J. Ishida, K. Aranami, T. Hara, T. Segawa, M. Narita, and Y. Honda, Nonhydrostatic atmospheric models and operational development at JMA. *J. Meteor. Soc. Japan*, **85B**, 271–304, 2007.

[6] Hunt, B. R., E. J. Kostelich, and I. Szunyogh, Efficient data assimilation for spatiotemporal chaos: A local ensemble transform Kalman filter. *Physica D*, **230**, 112–126, 2007.

[共同研究成果]

熱分解反応シミュレーションにおける温度の変動

松川 嘉也：東北大学大学院工学研究科

松下 洋介：弘前大学大学院理工学研究科

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、壁からの対流伝熱および反応熱に伴う温度の変動の大きさを検討した。また、温度の変動が化学反応に及ぼす影響を検討した。加熱壁近傍の温度勾配が大きい部分で、温度の変動の絶対値が大きくなったものの、その値は小さいことが明らかになった。平均温度に対する 1 %程度の時間変動は、熱分解反応速度にさほど影響を及ぼさないことが示され、これは反応熱が温度の変動を抑制する方向に働くためであると示唆された。

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)による解析が多く行われているが、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。本報では、熱分解シミュレーションを実施し、温度の変動の大きさを見積もった。

2. シミュレーションに用いるソフトウェア構成の検討

2.1 シミュレーションに用いたライブラリ・コンパイラ

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。AOCL、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を用いた。

表 1 シミュレーションに用いたライブラリ

	ライブラリ名	バージョン
Message Passing Interface	Open MPI	4.0
線形代数演算	AOCL	2.2
	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[1]	1.10
	AGMG [2-4]	3.3.5

研究開始当初において、コンパイラとして AOCC 2.2、GCC 10 および Intel Compiler が利用可能

であった。表 1 のライブラリを本研究の in-house コードにて使用する場合、Intel Compiler では計算速度が GCC と比較して著しく遅いことを確認済みであった。そこで熱分解反応シミュレーションに先立ち、AOCC 2.2 と GCC 10 との速度比較を実施した。逐次計算で長時間 AOBA-B の計算リソースを使用するのを避けるため、比較的小さな 84 万格子からなる計算対象とした。

2.2 ベンチマーク解析手法・解析対象

コンパイラのベンチマークを、化学反応と熱・物質移動を考慮しない、Large Eddy Simulation (LES)によって比較的レイノルズ数が小さい非定常乱流場の急拡大流れを解析することで実施した。急拡大流れ[5]を模擬した解析対象を図 1 に示す。解析領域を約 84 万分割した。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。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[6]を適用し、圧力補正值に関する行列方程式の解法には AMGS [1]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。

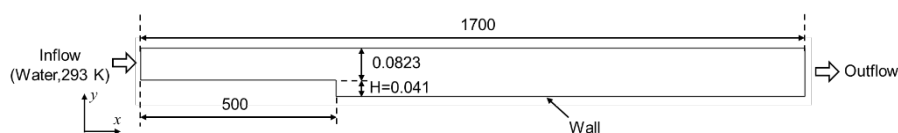


図 1 ベンチマークの解析対象

2.3 ベンチマーク結果

並列数ごとの AOCC 2.2 と GCC 10 の実行速度を図 2 に示す。並列数 20 以上で並列化効率が悪化しているのは、計算対象が 84 万格子と小さいためである。並列数 2 の時には AOCC 2.2 の方が高速であったが、並列数 3 以上では GCC 10 が上回り、並列数の増加とともに計算速度差が広がっていることがわかる。AOCC 2.2 を本ソフトウェア構成において利用した場合にはメモリアクセスが非効率であることが示唆される。並列数を 128 とした場合には、84 万格子と小さな計算対象ではコア間の通信が律速になるためか AOCC 2.2 と GCC 10 との速度差が小さくなった。in-house コードが FORTRAN で記述されているため、C 言語や C++ で記述されたコードにおいても同様となるかは不明であり、また、AOCC のバージョンアップによって状況が改善している可能性もある。線形代数演算ライブラリおよび疎行列反復解法ソルバーについても同様に速度比較を実施してそれぞれ OpenBLAS および AMGS 並列版を用いることとした。

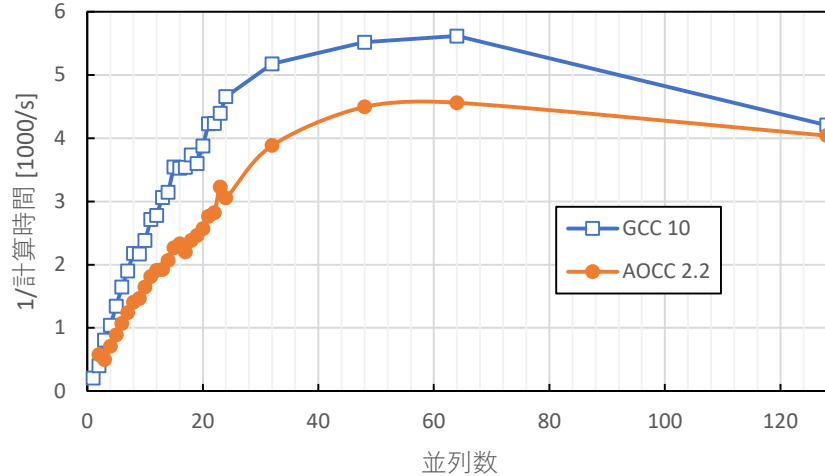


図2 AOCC 2.2 および GCC 10 の実行速度比較

3. 熱分解シミュレーション

熱分解反応中における温度の変動の大きさを検討するために、in-house コードによりシミュレーションを実施した。

3.1 熱分解反応モデル

本研究において化学反応モデルに要求されることは化学反応に伴う吸熱を表現することである。そのため、反応の予測精度の議論は行わず、Appel et al.による 99 化学種からなる詳細化学反応機構[7]に対し、反応熱の予測精度が低下を最小限にとどめるように簡略化を施した 20 化学種からなる簡略化反応機構を用いた。反応速度の時間積分には VODE [8]を用いた。

3.2 熱分解シミュレーションの解析手法

簡略化反応機構であっても計算負荷は大きく、LES 計算には多大な計算コストを要するため、研究の第一段階として、RANS による定常計算を行った。流体に関する支配方程式として、Reynolds 平均および Favre 平均を施した Navier-Stokes 方程式、乱流エネルギー k の輸送方程式、比消散率 ω の輸送方程式および化学種の保存式に加えて、温度および温度の分散を考慮するための式を用いた。温度を考慮するための式をエンタルピーの輸送方程式あるいは温度を変数としたエネルギー保存式とした。温度の分散を考慮するための式を、式(1)に示すエンタルピーの分散 $\tilde{h}''^2$ の輸送方程式あるいは式(2)に示す温度の分散 $\tilde{T}''^2$ の輸送方程式とした。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{h}''^2) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{h}''^2) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_{ht}}\right)\frac{\partial\tilde{h}''^2}{\partial x_j}\right\} + 2\frac{\mu_t}{\sigma_{ht}}\left(\frac{\partial\tilde{h}}{\partial x_j}\right)^2 - c_h\bar{\rho}\tilde{h}''^2\omega \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho}\tilde{T}''^2) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\bar{\rho}\tilde{u}_j\tilde{T}''^2) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left\{\left(\frac{\mu}{\sigma_h} + \frac{\mu_t}{\sigma_{ht}}\right)\frac{\partial\tilde{T}''^2}{\partial x_j}\right\} + 2\frac{\mu_t}{\sigma_{ht}}\left(\frac{\partial\tilde{T}}{\partial x_j}\right)^2 - c_h\bar{\rho}\tilde{T}''^2\omega + \frac{2}{\bar{c}_p}\overline{T''\sum_i S_i h_{f,i}} \quad (2)$$

温度の分散の輸送方程式において最終項の寄与は小さく、かつ、温度の変動 T'' を見積もることが困難なため、これを無視した。

対流項の離散化スキームに min-mod の流束制限関数[9]に基づく TVD scheme を用い、拡散項の離散化に二次中心差分法を用いた。運動量保存式の時間積分を対流項と拡散項に分離し、対流項に 3 次の Adams-Bashforth 法を、拡散項に Crank-Nicolson 法を用いた。圧力速度結合解法に

SMAC 法 [6]を適用し、圧力補正式を AMGS [1]により解いた。全計算格子の温度の変化が 1 K/s を下回った時点で定常状態に達したと判断し、そこからさらに 0.1 s 経過するまで計算を実施した。離散化した保存式の行列方程式の解法に多項式前処理付き安定化双共役勾配法 (Bi-Conjugate Gradient Stabilized Method with polynomial preconditioning, Bi-CGSTAB) [10]を用いた。連続の式の残差を流入量で規格化し、それ以外の支配方程式の残差を左辺の絶対値の総和で規格化した。連続の式の規格化した残差が 10^{-6} 、それ以外の支配方程式の残差が 10^{-4} を下回った時点で収束解が得られたものとした。本研究の流体シミュレーションにおいては温度の変動が反応速度に及ぼす影響を無視できると仮定し、平均温度から反応速度を算出した。本来であれば、平均温度を Arrhenius 式に基づく反応速度式に代入するのは不適切である。吸熱反応である熱分解においては、のちに議論するように温度の変動が化学反応速度に及ぼす影響を無視することは、温度変動の大きさをわずかに過小評価する。本検討の目的は、変動の大きさが取りうる最大値を把握することであり、この仮定は大きな問題にならないと考える。

3.3 熱分解シミュレーションの解析対象・解析条件

図 3 に示す解析対象を、約 9 万の計算格子数に分割した。あらかじめ入口流速を 40 m/s とし、Reynolds 平均および Favre 平均を施した Navier-Stokes 方程式、 k の輸送方程式および ω の輸送方程式のみを考慮した定常計算を実施し、十分に発達させた流れ場の結果から主流方向の速度、 k および ω の分布を得て流入境界として与えた。入口温度を 600℃とし、反応管の内壁面の温度を 900℃で一定とした。入口組成として窒素のモル分率を 0.8 およびエタンのモル分率を 0.2 と与えた。



図 3 熱分解シミュレーションの解析対象

3.4 熱分解シミュレーションの結果と考察

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を比較した。エンタルピーの分散を解いた場合に、確率密度関数から分散を求める式である式(3)により温度の分散を算出した。

$$\widehat{T^2} = \int_{T_{min}}^{T_{max}} (T - \bar{T})^2 \tilde{P}(T) dT \quad (3)$$

図 4 に入口から主流方向に 10 m の位置における温度の分散の半径方向分布を示す。エンタルピーの分散を解いた場合と温度の分散を解いた場合で、温度の分散の値の範囲は概ね等しかったものの分布の形状が異なった。これは、温度の分散を解く場合は最終項の温度の変動項の寄与を 0 と考え、エンタルピーの分散を解く場合には化学種の分散がエンタルピーの分散に従うとしたためであると考えられる。分散の最大値が 140 K² だったことから、変動の大きさは最大で 12 K、すなわち最大温度の 1 %程度と見積もられる。

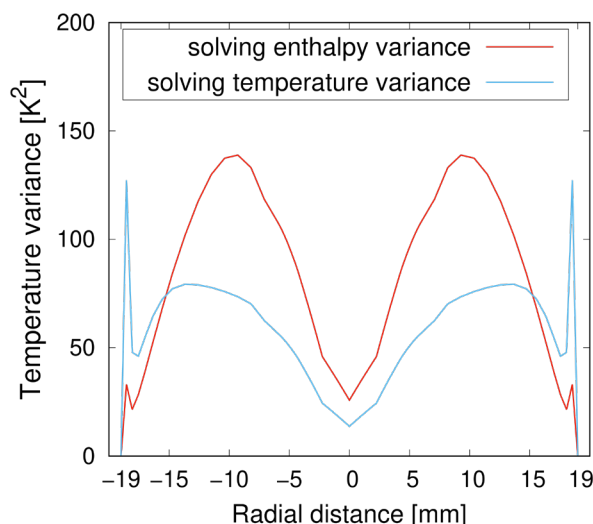


図4 入口から 10 m の位置における温度の分散の半径方向分布

熱分解反応中での温度の変動の大きさを推算できたので、温度の変動が熱分解反応に及ぼす影響を検討する。温度の変動には時間的な変動と空間的な変動があるが、本研究では時間的な変動を考える。詳細化学反応機構に基づく 0 次元の反応動力学計算により簡易な検討を実施した。温度変動を模した熱流束 q を式(4)に基づいて与え、温度を変動させた。

$$q = A_q \cos(\omega_q t) \quad (4)$$

ここで、 A_q は振幅、 ω_q は角速度である。反応による発熱・吸熱がなければ、この熱流束は、温度に対して A_q に比例した変動を与える。本研究では、反応による発熱・吸熱がない場合に初期温度に対して 変動の大きさが 1 % または 5 % となるような熱流束を与えた。

図 5 に示すように、熱流束の振動が温度に与える影響は、100 Hz の振動を与えた場合にはかなり限定される。一方、10 Hz と 50 Hz の場合では温度の変動が見られるようになった。これは、熱分解反応のような吸熱反応では熱流束の短周期振動が減衰することを示す。図 6 に、熱流束の振動が原料のエタン C_2H_6 と主要な生成物であるエチレン C_2H_4 の質量分率に与える影響を示す。100 Hz の振動を与えた場合の消費量/生産量は、変動がない場合とほぼ同じであった。これは、これらのケースで温度変動が見られなかったことと一致する。また、10 Hz と 50 Hz で 1 % 振動させた場合の質量分率は、温度のばらつきがあるにもかかわらず、ばらつきのない場合と差が小さかった。このことは、温度のばらつきが小さい場合には反応にあまり影響を与えないことを示唆している。10 Hz と 50 Hz の振動を 5 % 加えたケースでは、熱流束の振動が反応に影響を及ぼしていることがわかる。長周期の温度変動は LES で解像することができるため、LES ではアレニウス式から反応速度を直接利用できる可能性が高い。一方、RANS モデルは原理的に時間変動を解像することができない。したがって、長周期の温度変動が存在する場合、RANS モデルで得た平均温度を Arrhenius 式に基づく反応速度に適用すると誤差を生じることが懸念される。

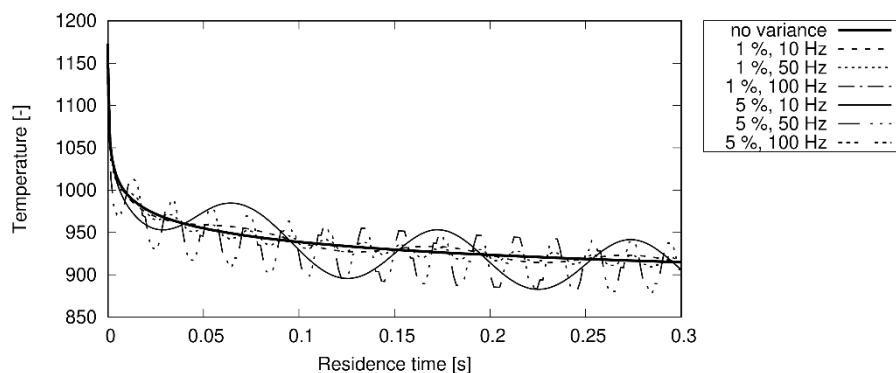
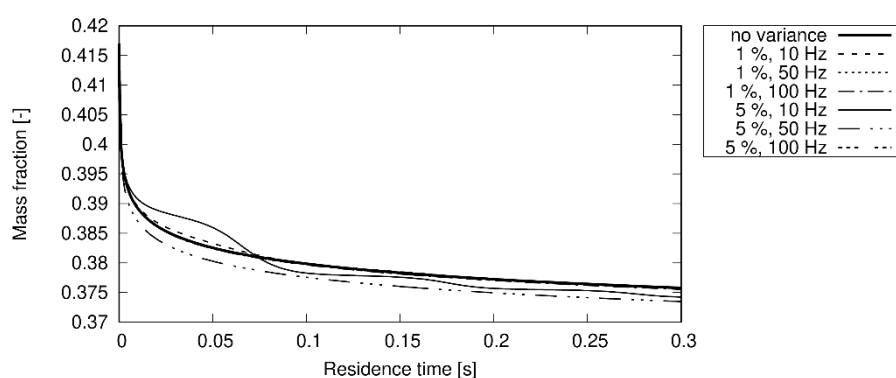
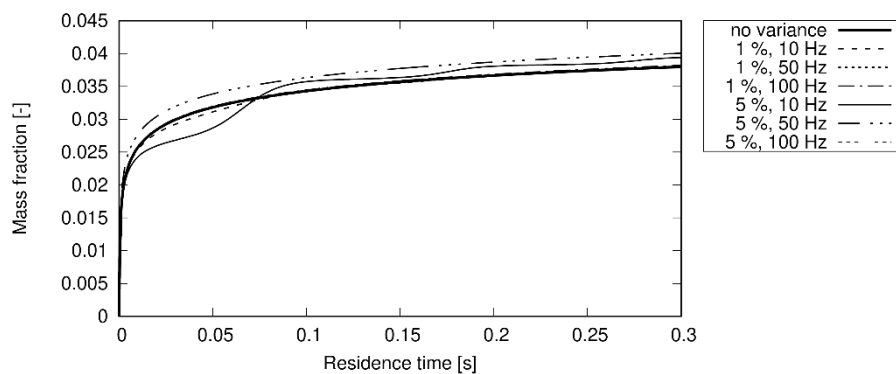


図5 熱流束の振動が温度に及ぼす影響



(a) エタン



(b) エチレン

図6 熱流束の振動が(a)エタンおよび、(b)エチレン質量分率に及ぼす影響

4. 結論

本研究の RANS に基づく熱分解シミュレーションにより熱分解反応中における温度の変動の大きさが小さいことが示唆された。また、温度の変動の大きさが熱分解反応に及ぼす影響を検討し、1%未満の温度の変動が熱分解反応に及ぼす影響が極めて小さいことを明らかにした。さらなる詳細な検討として LES に基づく非定常解析が必要であり、次報にて報告する予定である。

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。ここに謝意を示す。

参考文献

- [1] A. Fujii, T. Tanaka, H. P. C. Laboratory, AMGS library, 2010.
- [2] Y. Notay, An aggregation-based algebraic multigrid method, *Electronic Transactions on Numerical Analysis* 37 (2010) 123-146.
- [3] A. Napov, Y. Notay, An Algebraic Multigrid Method with Guaranteed Convergence Rate, *SIAM Journal on Scientific Computing* 34 (2012) A1079-A1109.
- [4] Y. Notay, Aggregation-Based Algebraic Multigrid for Convection-Diffusion Equations, *SIAM Journal on Scientific Computing* 34 (2012) A2288-A2316.
- [5] N. Kasagi, A. Matsunaga, Three-dimensional particle-tracking velocimetry measurement of turbulence statistics and energy budget in a backward-facing step flow, *International Journal of Heat and Fluid Flow* 16 (1995) 477-485.
- [6] A.A. Amsden, F.H. Harlow, A simplified MAC technique for incompressible fluid flow calculations, *Journal of Computational Physics* 6 (1970) 322-325.
- [7] J. Appel, H. Bockhorn, M. Frenklach, Kinetic modeling of soot formation with detailed chemistry and physics: laminar premixed flames of C2 hydrocarbons, *Combust. Flame* 121 (2000) 122-136.
- [8] P. Brown, G. Byrne, A. Hindmarsh, VODE: A Variable-Coefficient ODE Solver, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 10 (1989) 1038-1051.
- [9] D.B. Spalding, A novel finite difference formulation for differential expressions involving both first and second derivatives, *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 4 (1972) 551-559.
- [10] H.A.v.d. Vorst, Bi-CGSTAB: A Fast and Smoothly Converging Variant of Bi-CG for the Solution of Nonsymmetric Linear Systems, *SIAM Journal on Scientific and Statistical Computing* 13 (1992) 631-644.

[共同研究成果]

近傍界領域におけるリフレクトアレーの設計法

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

次世代無線通信システムにおいて、ミリ波帯のような高周波帯の利用が想定されている。このような高周波帯を利用すると、高速、大容量、低遅延の無線通信システムが実現できるという利点がある。高周波帯を用いた無線通信システムの実現のため、様々なアンテナの研究がなされている。

リフレクトアレーは、このような高周波帯における無線通信実現のための重要な技術の1つである [1]-[3]。リフレクトアレーは、無数の反射素子から成る散乱体であり、一次放射器から放射される電磁波により空間的に給電される。各反射素子は、一次放射器から入射した電磁波の位相を回転させ、全ての素子の散乱電界の位相が所望の方向で同相になるように設計される。一般に、散乱体の主ビーム方向は Snell の法則にしたがうので、入射波の入射角によって自動的に決まる。その一方で、リフレクトアレーの主ビーム方向は入射波の方向と独立して設計することが可能であるという利点がある。

このようなリフレクトアレーを用いると、電磁波の届かない不感地帯あるいはカバレッジホールにある端末に電磁波を向けることができる。例えば、リフレクトアレーを用いて市街地の電波環境を改善できることが明らかにされている [4]-[6]。また、周波数選択板を導入することで、複数の周波数帯域で動作するリフレクトアレーの設計が可能であることも明らかにされている [7]。これらの研究では、端末はリフレクトアレーの遠方に位置し、所望の方向で各素子の遠方界が同相になるようにリフレクトアレーが設計されている。その一方で、次世代無線通信システムで利用される高周波では、高い伝搬損失を補うため、大型で高利得なリフレクトアレーが利用される。リフレクトアレーが大型のとき、端末は必ずしもリフレクトアレーの遠方ではなく、リアクティブな近傍界領域やフレネル領域に位置することがある。したがって、高周波での大型のリフレクトアレーの設計は、従来のような遠方界の設計法では不十分である。

そこで本研究では、近傍界領域におけるリフレクトアレーの設計法を提案する。提案設計法は、近傍界領域にある焦点で電界を同相にする方法であり、一次放射器とリフレクトアレー素子、リフレクトアレー素子と焦点間の位相を厳密に考慮した設計法である。提案設計法を用いてリフレクトアレーを設計し、従来の遠方界を用いた設計法との比較を行い、その有効性を明らかにする。

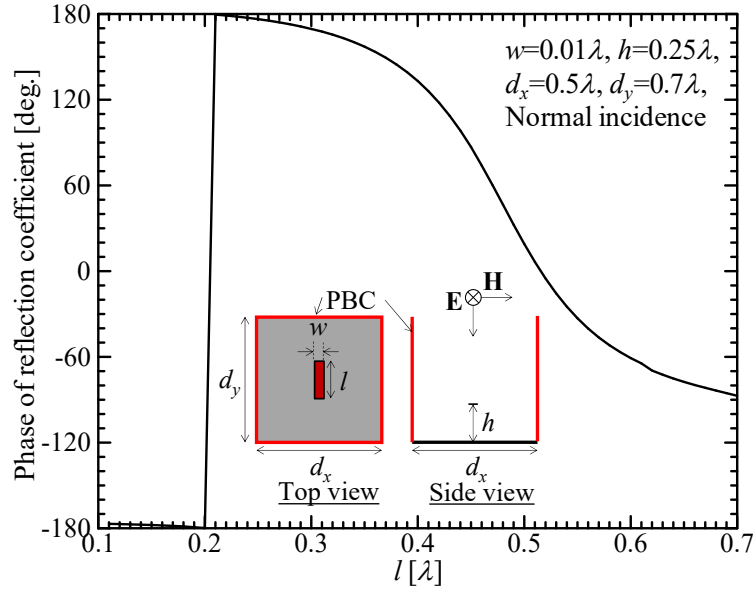


図 1: 反射板付き面状ダイポールアンテナの反射係数.

2 リフレクタレーの設計法

まず、リフレクタレーの設計の前に、リフレクタレー素子の反射係数を求める。リフレクタレー素子は無限大の反射板に裏打ちされた面状ダイポール阻止である。リフレクタレー素子の反射係数は、周期グリーン関数を用いたモーメント法によって無限周期構造を数値解析することで求める [8, 9]。周期グリーン関数の収束性の悪さは、Ewald 変換を用いて改善する [10]-[12]。波源と観測点が一致する点における特異性は、ロピタルの定理を用いて緩和する [13, 14]。基底関数と試行関数には、いずれも Rao-Wilton-Glisson (RWG) 基底関数を用いる [15]。

無限大の反射板に裏打ちされた面状ダイポール素子の反射係数の位相の数値シミュレーション結果は図 1 に示す。面状ダイポール素子の長さが変わるにつれて、反射係数の位相が変化していることが分かる。位相の変化量は約 280° ほどであった。

数値シミュレーションによって得られたリフレクタレー素子の反射係数を用いて、近傍界領域に焦点を有するリフレクタレーを設計する。従来および提案するリフレクタレー設計法は図 2 に示す。遠方界に焦点があるリフレクタレーは、ある特定の角度でリフレクタレー素子の散乱界が同相になるように設計されている。リフレクタレーの散乱界が遠方界領域にある焦点に向いているので、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにアレーファクタが適用できる。その一方で、近傍界に焦点があるリフレクタレーは、ある焦点でリフレクタレー素子の散乱界が同相になるように設計されている。リフレクタレーの散乱界が近傍界領域にある焦点に向いているので、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにアレーファクタは適用できない。したがって、提案法では、リフレクタレー素子間の空間位相遅延差を表現するのにリフレクタレー素子間の厳密な距離が用いられる。図 1 に示す反射係数の位相を用いて、リフレクト

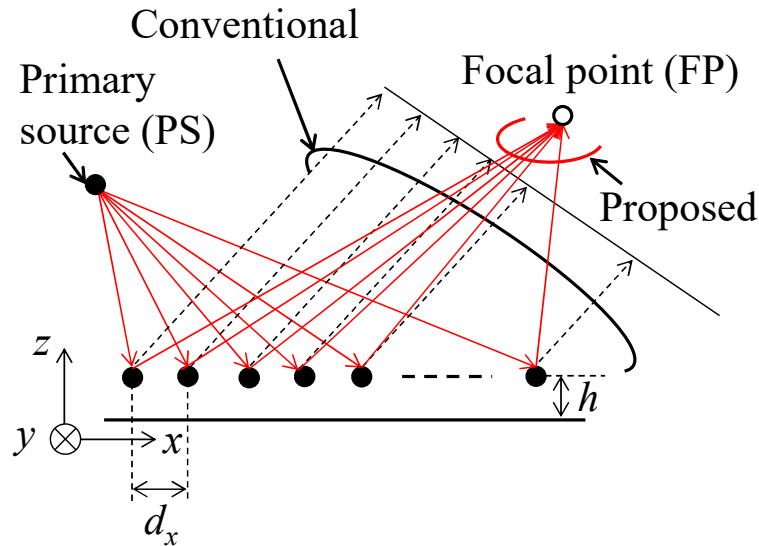


図 2: 従来および提案するリフレクタレーの設計法.

アレー素子の電界が焦点で同相になるように面状ダイポール素子の長さが決められる.

3 リフレクタレーの散乱特性

提案法を用いて, 21×21 のリフレクタレーを設計し, その散乱特性を数値的に明らかにした. 無限大の反射板を効率的にモデリングするために, 設計したリフレクタレーの数値解析は, 多層媒質のグリーン関数を用いたモーメント法を用いて行われた [16]. 多層媒質のグリーン関数の収束性を改善するため, 波源からの直接波の成分は Sommerfeld 積分から取り除かれ, スペクトル領域でなく空間領域で評価される [17, 18]. Sommerfeld 積分は数値シミュレーションの前に予め求めておき, テイラー展開を用いて補間することで必要な値を得る [19, 20]. Sommerfeld 積分の数値計算コストを減らすために, ベッセル関数の漸近展開が用いられる. 基底関数と試行関数には RWG 関数が用いられ, 波源と観測点が一致する点での特異性は座標変換と解析積分を用いた方法によって緩和される [15, 21, 22].

リフレクタレーの近傍界の数値シミュレーション結果は図 3 に示す通りである. 提案法によって設計されたリフレクタレーは, 焦点での電界強度が強くなっている一方で, 従来の方法で設計されたリフレクタレーは, 単に遠方界領域におけるブロードサイド方向へビームが向いているだけである. 以上のように, 提案法を用いると, 近傍界領域にある特定の焦点で電界強度の強いリフレクタレーを設計することができる.

4 まとめ

本報告では, 近傍界領域に焦点を有するリフレクタレーを設計するための手法を提案し, 設計したリフレクタレーの散乱特性をモーメント法によって数値的に明らかにし

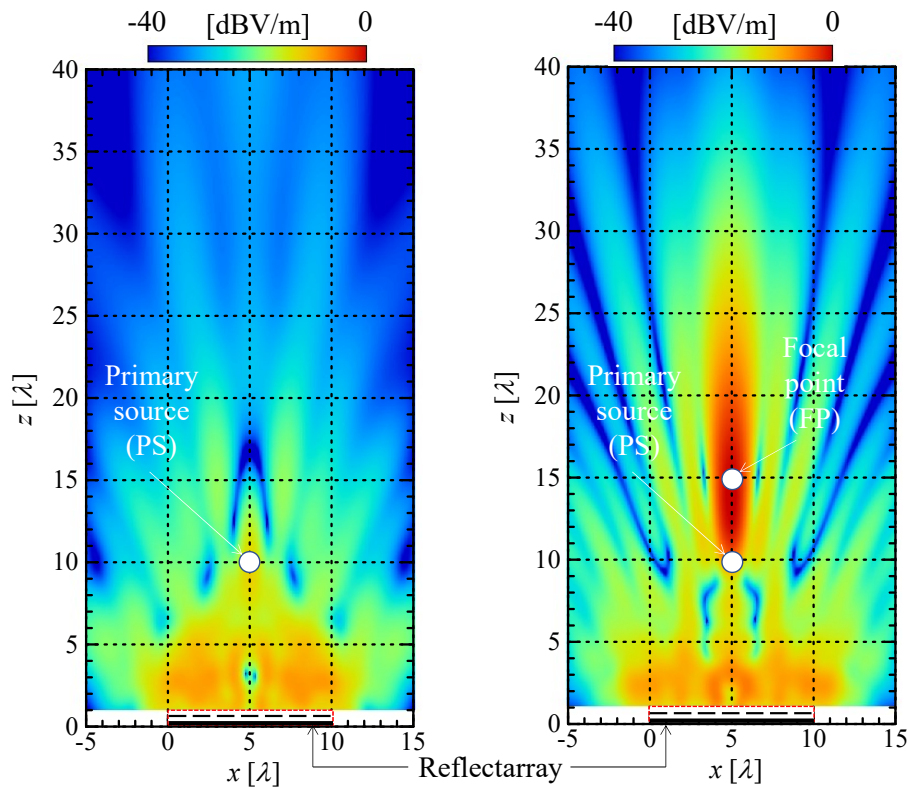


図 3: 設計したリフレクトアレーの近傍界分布 (左: 遠方界領域においてブロードサイド方向にビームを向けているリフレクトアレー, 右: ある焦点で電界を同相にしているリフレクトアレー, $y = 7\lambda$, E_y 成分).

た. 数値シミュレーションの結果から, 従来法で設計したリフレクトアレーと比較して, 提案法で設計したリフレクトアレーの方が, 近傍界領域にある焦点において強い電界強度を実現できることが分かった. 今後は, 提案手法を更に拡張した高機能なリフレクトアレーの設計法の研究や, スーパーコンピュータを活用した大規模リフレクトアレーの数値解析法の研究などを行っていく予定である.

謝辞

本研究を遂行するのに用いたプログラムの一部は, 東北大学サイバーサイエンスセンターのサポートを受けて作成したものである. 東北大学サイバーサイエンスセンターのスタッフをはじめ, 関係各位に深謝する.

参考文献

- [1] D.G. Berry, R.G. Malech, and W.A. Kennedy, “The Reflectarray Antenna,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol.11, no.6, pp.645-651, Nov. 1963.

- [2] J. Huang, "Analysis of a microstrip reflectarray antenna for microspacecraft applications," TDA Progress Report 42-120, Feb. 1995, pp. 153-173.
- [3] J. Huang and J.A. Encinar, *Reflectarray Antennas*, John Wiley and Sons, 2008.
- [4] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Novel broadband planar reflectarray with parasitic dipoles for wireless communication applications," *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 8, pp. 881-885, 2009.
- [5] Q. Chen, "Reflectarray development for improving NLOS radio channel," in *Proc. Asia-Pacific Microwave Conference 2013 (APMC2013)*, pp. 654-656, 2013.
- [6] Q. Chen, "Experimental study of improving wireless propagation channel by using reflectarray," in *Proc. International Workshop on Electromagnetics 2014 (iWEM2014)*, pp. 102-103, 2014.
- [7] L. Li, Q. Chen, Q. Yuan, K. Sawaya, T. Maruyama, T. Furuno, and S. Uebayashi, "Frequency selective reflectarray using crossed-dipole elements with square loops for wireless communication applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 59, no. 1, pp. 89-99, Jan. 2011.
- [8] M. G. Floquet, "Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques," *Annale École Normale Supérieure*, pp. 47-88, 1883.
- [9] B. A. Munk, *Frequency Selective Surfaces: Theory and Design*, New York, NY, USA: Wiley, 2000.
- [10] P. P. Ewald, "Dispersion und Doppelbrechung von Elektronengittern (Kristallen)," *Dissertation*, München, 1912, also *Ann. Phys.* 49, p. 1, 1916.
- [11] P. P. Ewald, "Die Berechnung optischer und elektrostatischer Gitterpotentiale," *Ann. Phys.* 64, pp. 253-287, 1921.
- [12] K. E. Jordan, G. R. Richter, and P. Sheng, "An efficient numerical evaluation of the Green's function for the Helmholtz operator on periodic structures," *J. Comp. Phys.*, vol. 63, pp. 222-235, 1986.
- [13] I. Stevanović and J. R. Mosig, "Periodic Green's function for skewed 3-D lattices using the Ewald transformation," *Microw. Opt. Tech. Lett.*, vol. 49, no. 6, pp. 1353-1357, Jun. 2007.

- [14] J. Su, X.-W. Xu, M. He, and K. Zhang, “Integral-equation analysis of frequency selective surfaces using Ewald transformation and lattice symmetry” *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 121, pp. 249-269, 2011.
- [15] S. M. Rao, D. R. Wilton, and A. W. Glisson, “Electromagnetic scattering by surfaces of arbitrary shape,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-30, no. 3, pp. 409-418, May 1982.
- [16] W. C. Chew, *Waves and Fields in Inhomogeneous Media*, IEEE Press, NY 1995.
- [17] W. C. Chew, J. L. Xiong, and M. A. Saville, “A matrix-friendly formulation of layered medium Green’s function,” *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.*, vol. 5, pp. 490-494, 2006.
- [18] Y. P. Chen, W. C. Chew, and L. Jiang, “A new Green’s function formulation for modeling homogeneous objects in layered medium,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 10, pp. 4766-4776, Oct. 2012.
- [19] K. Konno, Q. Chen and R.J. Burkholder, “Fast Computation of Layered Media Green’s Function via Recursive Taylor Expansion,” *IEEE Antennas and Wireless Propag. Lett.*, vol. 16, pp.1048-1051, 2017.
- [20] C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd ed., John Willey & Sons, pp. 967-979.
- [21] R. D. Graglia, “On the numerical integration of the linear shape functions times the 3-D Green’s function or its gradient on a plane triangle,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 41, no. 10, pp. 1448-1455, Oct. 1993.
- [22] D. R. Wilton, S. M. Rao, A. W. Glisson, D. H. Schaubert, O. M. Al-Bundak, and C. M. Butler, “Potential integrals for uniform and linear source distributions on polygonal and polyhedral domains,” *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 32, no. 3, pp. 276-281, March 1984.

[共同研究成果]

複数領域 FDTD 法を用いた大規模モデル電磁界散乱特性の解析

有馬 卓司, 宇野 亨

東京農工大学 大学院工学研究院 先端電気電子部門

現在, 様々な電子機器において電磁波の利用が広がっている. この電磁波を効率よく利用するには, 電磁界解析を用いて電磁波の放射・伝搬などを精度よくシミュレーションし, 常に安定して電磁波を送受信できるように設計することが重要である. 主要な電磁界解析手法の一つに FDTD (Finite Difference Time Domain) 法があるが, この手法は一般的に解析対象が大きくなると莫大な計算時間が必要となる. 特に電磁波の放射源と散乱体が離れている時の電磁界解析には莫大な計算時間が必要となる. 本稿では, FDTD 法における解析領域を複数に分ける複数領域 FDTD 法を用いて大規模モデルの解析を行いその有効性を示している.

1. はじめに

電磁波の応用範囲はますます広がっている. これまで電磁波の応用は情報通信が主であったが, 近年電力を電磁波で伝送する無線電力伝送技術や, 飛行機などの飛翔体を安全に運行するためのレーダ技術など, 情報通信以外にも広く使用されている. 特に自動車に対するレーダの普及は急速に広がっており, 限定的ながら自動運転が可能な市販車が登場している. また, 軽自動車などにもレーダは普及しつつあり, 安全性の観点より全車に装備する事が義務化される日も遠くないと考える. 一方, これら電磁波を用いた機器において, 効率よく電磁波を利用するには精密な設計が必要となる. 設計方法としては, 実験的手法と電磁界解析を用いたシミュレーションによる手法があるが, 時間とコストの観点よりシミュレーションによる手法の方が有効である. 電磁界解析手法は, モーメント法[1], 有限要素法[2], FDTD 法 (Finite Difference Time Domain method) [3, 4]などがある. これら手法はそれぞれが長所と短所を有するが, なかでも FDTD 法は容易に複雑なモデルを比較的容易に解析できる手法である. さらに FDTD 法は時間領域の解析手法であるために, 刻々と変化する電磁波の放射・伝搬現象について時間を追って調べることができる. また, FDTD 法はマクスウェルの方程式と呼ばれる電磁界を支配する方程式のうち, アンペアの法則とファラデーの法則の2つを時間領域で, 空間と時間について直接差分する差分法である. このために多くの計算時間・計算メモリが必要となることが知られている. さらに電磁波はベクトル場であり, 電界ベクトルと磁界ベクトルによって構成される. 3次元空間では電界磁界がそれぞれ3成分を持つことになりこれは多くのメモリを必要とすることを意味する. 本稿ではレーダなどの電磁波を放射する波源と, レーダで検出する対象である散乱体が離れているモデルの解析を目的としている. これは大規模モデルとなり, FDTD 法での解析は非常に大きな計算時間が必要となる. FDTD 法はモーメント法と異なり, 解析空間全体を解析する手法であり, 空気など媒質が何もない空間も計算が必要である. しかし, 空気中での電磁波の伝搬についてはその特性が良く分かっているので数学的にその伝搬を解析し, 散乱体の近傍で電磁波の振る舞いを再構成することも可能である. この手法は解析領域を放射源と散乱体の領域に分けることから複数領域 FDTD 法[5, 6]と呼ばれる. 本稿ではこの手法について検討している. FDTD 法のアルゴリズムおよびプログラムは本手法を用いても大規模モデルとなることから, 高速計算技術は必要不可欠である. そこで, FDTD 法のプログラミング技術による高速化について, 東北大学サイバーサイエンスセンターの多大な協力を得た.

2. 複数領域 FDTD 法

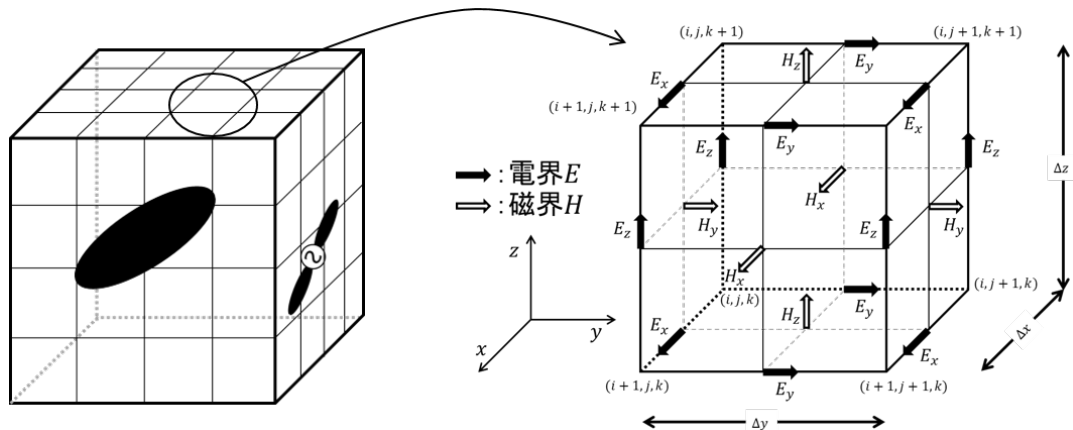


図 1 FDTD 法における解析領域（左）と解析領域を構成する単位電磁界配置（右）

2.1 FDTD 法

図 1 に FDTD 法の解析領域と解析領域を構成する単位電磁界配置を示す．FDTD 法においては、まず解析領域を決め、その解析領域内を各方向の長さ Δx , Δy , Δz で構成される微小立方体に分ける．この微小立方体は FDTD 法においてセルと呼ばれる．そしてこのセル内に図 1 右図に示すように電界ベクトル、磁界ベクトルの各成分を配置する．このように FDTD 法において、各電磁界成分は同じ場所には配置されていない．そしてこれら電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と、アンペアの法則を差分し適用する．

$$\nabla \times \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{\partial \mathbf{B}(\mathbf{r}, t)}{\partial t}$$

$$\nabla \times \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \frac{\partial \mathbf{D}(\mathbf{r}, t)}{\partial t} + \mathbf{J}(\mathbf{r}, t)$$

ここで、 $\mathbf{E}$, $\mathbf{H}$, $\mathbf{B}$, $\mathbf{D}$, $\mathbf{J}$, $\mathbf{r}$, t はそれぞれ電界ベクトル、磁界ベクトル、磁束密度、電束密度、電流密度、位置ベクトル、時間である．FDTD 法は前述したように時間領域の手法であるが、FDTD 法においては電界と磁界は計算する時間をずらしている．そのため、ある時間の電界を求めその値を元に次の時間の磁界を求めるといった計算をしている．そしてその計算を繰り返すことにより順次電磁界の時間変化を求める事が出来る．また、周波数領域の値が必要な時はフーリエ変換することにより容易に求める事が出来る．次に FDTD 法の計算に必須の吸収境界条件について述べる．FDTD 法においては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、解析領域を反射がない仮想的な境界で閉じておく必要がある．この仮想的な境界を吸収境界 (Absorbing Boundary Condition : ABC) という．この条件が不完全であると、境界で反射が起こり、解析結果に顕著な誤差を生じる．FDTD 法において、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[4, 5]に記載されているので参照していただきたい．

2.2 複数領域 FDTD 法

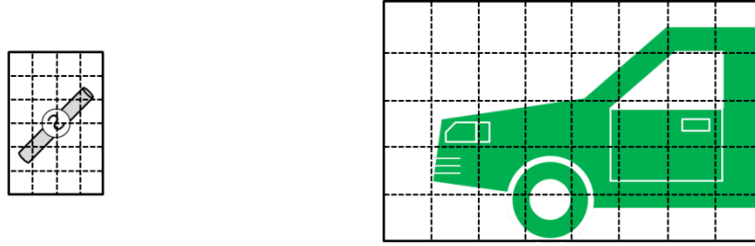


図2 複数領域 FDTD 法 の概念. 解析領域を散乱体(左)と自動車(右)に分ける. それぞれの領域は数学的に結合させるため, 領域同士の間の空間は FDTD 法では計算をしていない.

複数領域 FDTD 法とは, 図2に示すように異なる解析領域を設け, 各領域の電磁界を等価定理によって接続し, 空間的に離れた領域を解析する手法である. ただし, 等価面の外部は散乱界計算領域となっている. 解析領域を分けることで解析対象が存在しない空間における計算を省くことができ, 計算機資源を削減することができる. 各領域で行う解析は FDTD 法と同様であるから, 各領域を接続する際に行う計算手法のみを示す. 複数領域 FDTD 法においては図3に示すようにそれぞれの解析領域で等価面および積分面と呼ばれる仮想的な閉曲面を考える. 積分面を S' とすると, 等価面 S 上の電磁界は次式で計算できる.

$$\begin{aligned} E(\mathbf{r}, \omega) = \int_{S'} [-j\omega\mu \{ \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \} G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') - \{ \mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \times \hat{\mathbf{n}}' \} \times \nabla' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \\ + \{ \hat{\mathbf{n}}' \cdot \mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \} \nabla' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')] dS' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H(\mathbf{r}, \omega) = \int_{S'} [-j\omega\varepsilon \{ \mathbf{E}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \times \hat{\mathbf{n}}' \} G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') + \{ \hat{\mathbf{n}}' \times \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \} \times \nabla' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}') \\ + \{ \hat{\mathbf{n}}' \cdot \mathbf{H}'_{S'}(\mathbf{r}', \omega) \} \nabla' G(\mathbf{r} - \mathbf{r}')] dS' \end{aligned}$$

ここで, G はグリーン関数と呼ばれる既知の関数である. このように数学的手法により離れたところでの電磁界を計算する事が出来る. この考え方を元に, FDTD 法で計算した片方の計算領域の電磁界を基に等価面上の電磁流を算出し, それを他方の解析領域の波源とすることで異なる領域からの放射界を考慮する事が出来る. 同様の手順より, 図3に示すように解析領域 R から解析領域 R' への放射界を算出することで, 解析領域間の相互影響を考慮することができる. FDTD 法での面積分は, 単位セルの面の値を足し合わせることで行われることから, 1 タイムステップあたりの計算は積分面と等価面上のセル数に依存する. したがって, 解析対象が大きい場合, 計算機資源が膨大となる.

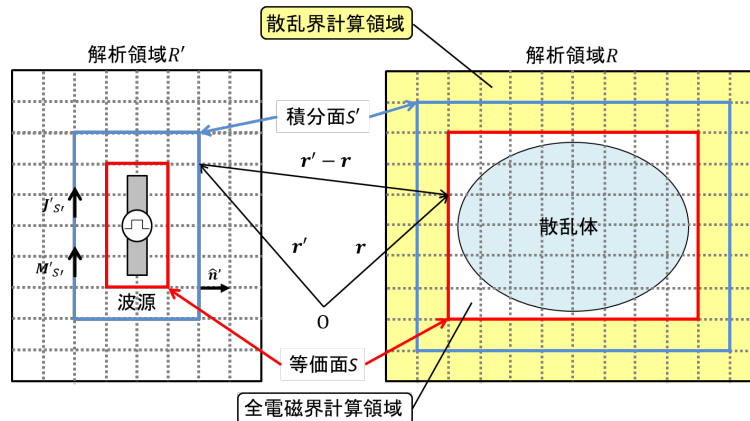


図3 複数領域 FDTD 法におけるそれぞれの解析領域と結合方法

3. 解析結果

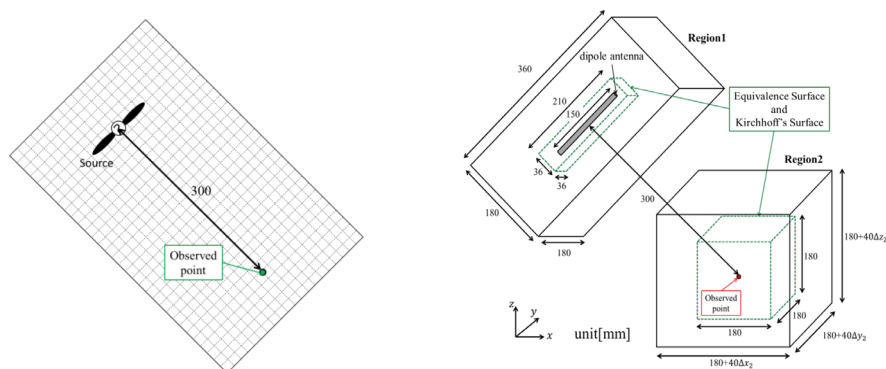


図4 解析モデル：通常の解析モデル（左） 複数領域 FDTD 法でのモデル（右）

図4に示すモデルを解析した結果を示す．このモデルは解析空間に対し斜めにアンテナが配置されており，そこから離れた点での電界を計算するモデルである．図4左図に示す通常の FDTD 法モデルに対し，右図では解析領域を二つに分けている．アンテナから連続波を励振し図4中に示す点での電界の時間変化を解析した．アンテナからは 1GHz の正弦波を入力している．解析領域 1（Region1）と解析領域 2（Region2）それぞれの中心間の距離を 0.3m としている．2 節で述べたように吸収境界はそれぞれの領域で PML を用いている．Region1 の領域においてはセルの 1 辺を 3mm とし，Region2 のセルの 1 辺を 3mm, 6mm, 9mm と変化させた．複数領域 FDTD 法では，このように領域ごとで異なるセルサイズを用いる事が出来る．このモデルでの Region2 の電界分布を図5に示す．図5においては，左図に Region2 において等価面により Region1 から電磁界が生成される様子，右図に Region2 における電界の時間変化を示す．右図では通常の FDTD 法による解析結果を赤色の実線，複数領域 FDTD 法で，解析空間ごとのセルサイズ比が 1:1 の解析結果を青色の破線，セルサイズ比が 1:2 の解析結果を緑色のバツ，セルサイズ比が 1:3 の解析結果を紫色の四角で示した．図5で示す電界は電界ベクトルの各成分の絶対値としている．このように複数領域 FDTD 法を用いても計算精度は，通常の FDTD 法と変わらないことが分かる．また，領域ごとのセルサイズを変えても計算精度は変化しない．

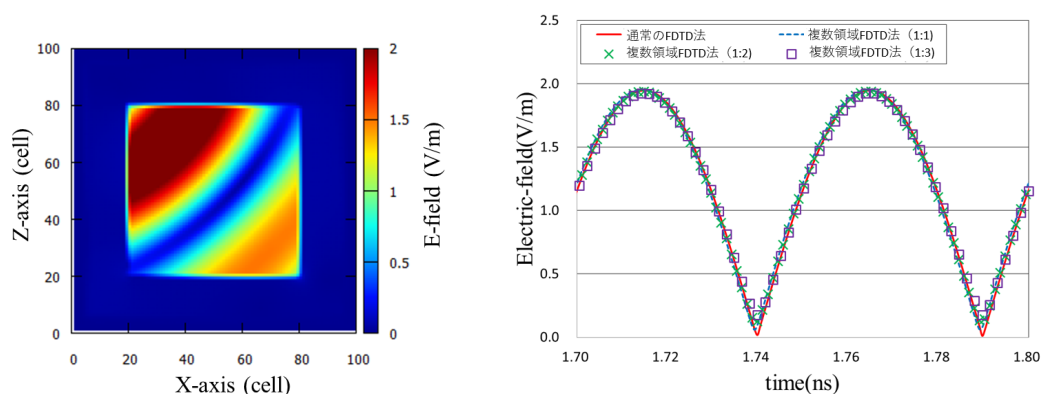


図5 複数領域 FDTD 法による解析結果

4. まとめ

本稿においては、アンテナなどの放射源と散乱体が離れている大規模モデルを効率よく解析する手法について述べた。この手法は複数領域 FDTD 法と呼ばれ、解析領域を分けそれぞれの領域を数学的に結合する手法であった。解析結果は通常の FDTD 法による結果とよく一致していた。以上より本手法は大規模モデルの解析に有効と考える。

謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターの協力を頂き実施した。特に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効率的に研究を行うことができた。また、FDTD 法のプログラムの高速化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] J.R.F. Harrington: Field Computation by Moment Methods, Macmillan, 1968
- [2] M. V. K. Chari and P. P. Silvester, “Finite Elements in Electrical and Magnetic Field Problems,” John Wiley & Sons, 1980. S. Tretyakov, “Analytical Modelling in Applied Electromagnetics.” Artech House Inc, 2003.
- [3] 宇野亨, FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 1998.
- [4] 宇野亨, 何一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のための FDTD 法, コロナ社, 2016.
- [5] P. Bernardi, M. Ca “2002 FDTD, multiple-region FDTD, ray-tracing FDTD a comparison on their applicability for human exposure evaluation” International Journal of Numerical Modelling 2002; 15:579-593.
- [6] J. Michael Johnson and Yahya Rahmat-Samii, “MR/FDTD: A multiple-region finite-difference-time-domain method,” Microwave and Optical Technology Letters, vol. 14, No. 2, pp. 101-105, February 1997.

[共同研究成果]

リカレント型ビット演算による多様な縦渦挙動の創発

—— 縦渦挙動を支配する本質的なパラメータは何か？

松岡 浩

技術士事務所 AI コンピューティングラボ

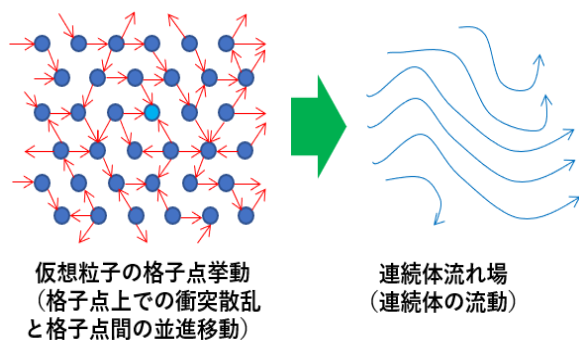
筆者は、東北大学サイバーサイエンスセンターの共同研究公募制度により、令和 3 年度からの 3 年計画で「リカレント型ビット演算による縦渦挙動のマルチスケール創発解析」を実施している。本稿では、本研究の趣旨とこれまでに得られた知見を概説する。

1. 本研究の趣旨

風力発電ファーム、航空機、船舶などの流体工学設計において、流下方向に回転軸をもつ縦渦の発生挙動の予測とその制御は、重要な検討課題のひとつである。

本研究では、「流れの中に置かれた物体境界やその直後におけるせん断流の“局所スケール領域”」から、「物体から相当離れた後流までの“大規模スケール領域”」までの縦渦挙動を、“格子ガス法[1, 2]” (cf. 図 1) の各格子点における仮想粒子挙動の簡単な計算規則から自己組織化的に再現(創発)できることを示し、この原理を高解像度な流体工学設計の実現に役立てる方法を追求する。

なお、ここで用いる“格子ガス法”は、C. M. Teixeira が考案した「3 速さ 54 速度モデル[3]」である。このモデルは、各格子点に存在しうる最大の仮想粒子数を 54 個に制限している。その内訳は、“6 個の静止粒子”と“速度の向きが異なるが速さが小さい 24 個の遅い粒子”と“速度の向きが異なるが速さが大きい 24 個の速い粒子”である。なお、本モデルから導かれる応力テンソルの等方性を確保するため、4 次元面心超立方格子 (FCHC) を用いている。なお、本モデルについては、これまで本誌への投稿で何回か述べてきたので、詳細はそちらを参照願いたい[4-8]。



格子ガス法流体解析では、流体が存在する空間中に規則正しく格子点を配置し、特定の質量と運動量を担う多数の仮想粒子が、
①格子点上での「質量と運動量を保存する等方確率的な衝突散乱」
②格子点間での「衝突散乱後の各運動量の向きへの並進移動」
を繰り返しながら移動していく様子を疎視化(平均)して、マクロな流体物理量(密度、運動量、速度等)の時間発展挙動を得る。

図 1. 格子ガス法流体解析のイメージ

2. Teixeira による格子ガス法流体解析モデルへの“連行同期過程”の追加

格子ガス法流体解析の一般的な特徴は、仮想粒子の“衝突散乱”及び“並進移動”の計算を「ビット演算」で実行できるので、時間発展計算の過程で誤差の蓄積がなく、また、1 格子点に関する

演算を1ビット幅で実行できるため、超並列格子点演算が可能なことである。このため、どんなに激しい流れに対しても、安定的かつ効率的に結果を得ることができ、乱流解析に適していると考えられる。

さらに、Teixeiraによる「3速さ54速度モデル[3]」では、本手法による解析結果を、ナビエ・ストークス方程式を解く標準的な数値流体力学(非圧縮性流体)の結果と比較した場合、マッハ数に関する3次の精度まで一致することがTeixeiraの論文において示されている。また、もっとも重要な特徴は、当該格子ガス法の時間発展計算式は“線型(multi linear)”であり、計算された運動量のノイズが大きくどんなに変動しても、その平均値は常に正しい結果に収束する(“Shot Noise Theorem”)ことが同論文において証明されている[3の第6章]。

本研究では、格子ガス法における“並進移動”及び“衝突散乱”の過程に加えて、「連行同期過程」と呼ぶ過程を追加する。(cf. 図2)

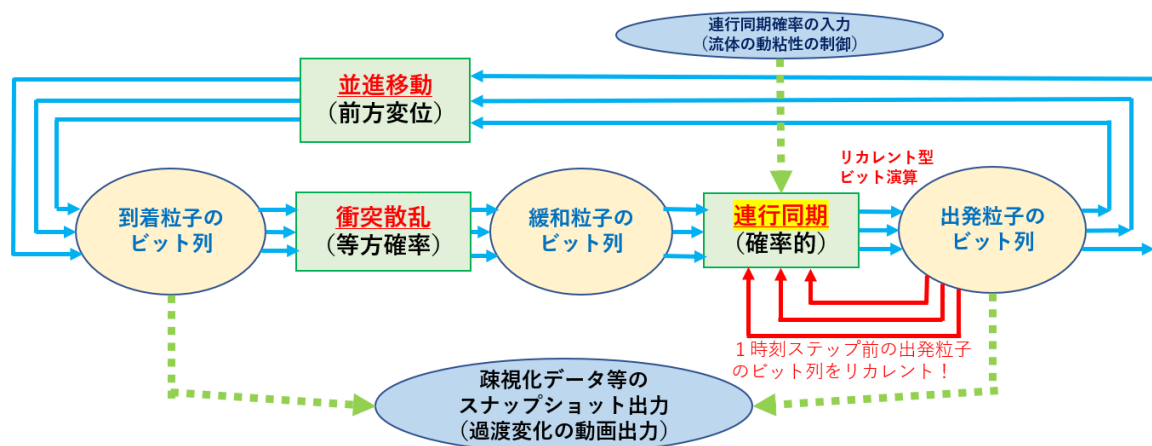


図2. 格子ガス法流体解析の時間発展計算への「連行同期過程」の追加

格子ガス法による時間発展計算をビット演算によって実行する場合、一般的には、仮想粒子が存在する場合を「1」、存在しない場合を「0」に対応させている。しかし、ひとつの仮想粒子が模擬するスケールは、実際は、多数の分子集団(粒子群)が存在するスケールであり、非圧縮性流体で近似できる流体挙動を模擬する場合は、「0」に対して“粒子が存在しない空間”というイメージを対応させることは適切ではないと考えられる。そこで、ここでは、粒子群が“快走”している状態を「1」、粒子群が“渋滞”している状態を「0」に対応するイメージだと理解することにする。これは、「1」or「0」を、粒子群の質量の存否ではなく、運動量の存否として解釈したことを意味する。そして、仮想粒子の挙動を疎視化してマクロな流体物理量の時間発展挙動を得る場合も、“運動量”と“エネルギー”に注目することとする。Teixeiraによる「3速さ54速度モデル」の場合、すべての仮想粒子は同じ質量をもつと仮定されているので、疎視化によって得られた“運動量”の挙動は、“流体速度”の挙動に比例するので、特に解析上の不都合は生じない。

“連行同期”の過程は、図2に示すとおり、“衝突散乱”の過程の次に追加する。“衝突散乱”の結果、各格子点にいろいろな向きからやってきた「到着粒子群」の運動量分布が変化する。このとき、合計の“運動量”と“エネルギー”が保存されるいくつかの衝突散乱規則が等方確率的に適用される。この結果、当該格子点からいろいろな向きに飛び去っていく「出発粒子群」の運動量分布が計算される。計算の結果が「1」であった向きに出発する粒子群は、その前方にある格子点まで“快走”することができ、計算結果が「0」であった向きに出発する粒子群は“渋滞”して前方にある格子点に到達できない。このような状態をイメージしたとき、その次の時刻ステップの“衝突散乱”で生成した「出発粒子群」は、前回の“衝突散乱”で“渋滞”が生じた向きに

は前進しにくく、前回“快走”することができた向きに連れていかれる(連行される)効果が生じると想像できる。この効果は、前回の“衝突散乱”によって“快走”の向きが発生するタイミングに“同期”して生じる。すなわち、“衝突散乱”によって等方確率的に決定された「出発粒子群」の向きの分布を、1時刻ステップ前の「出発粒子群」の向きの分布情報をもとに修正するのが、“連行同期”の過程である。

なお、“連行同期”の過程を導入しても、“運動量保存則”や“エネルギー保存則”を満足する必要がある。しかし、格子ガス法では疎視化を行うので、この保存則は、疎視化する時空間スケールの範囲で、平均的に満足されていれば良いと考えられる。これを実現する簡易な方法として、本研究では、以下の操作を行うこととした。

「1時刻ステップ前における出発粒子群のある向きの状態が“1(快走)”であるにもかかわらず、現在の時刻ステップにおける出発粒子群のその向きの状態が“0(渋滞)”である場合、その状態が出現するタイミングに同期させて、ある確率で状態“0”を強制的に“1”に変える。また、1時刻ステップ前における出発粒子群のある向きの状態が“0(渋滞)”であるにもかかわらず、現在の時刻ステップにおける出発粒子のその向きの状態が“1”である場合、その状態が出現するタイミングに同期させて、前述の確率と同じ確率で状態“1”を強制的に“0”に変える。この2つの操作を、同じ方向の反対向きの出発粒子群に対して交互に適用する。」

仮想粒子の状態“0”を強制的に“1”に変える操作は、その向きへ移動する粒子群の運動量とエネルギーを増加させることを意味している。また、仮想粒子の状態“1”を強制的に“0”に変える操作は、その向きへ移動する粒子群の運動量とエネルギーを減少させることを意味している。この操作を、いろいろな方向ごとに、互いに反対向きに交互に適用することによって、疎視化する時間スケールでの“運動保存則”と“エネルギー保存則”を同時に満足させることができる。

なお、以下、上記の操作を“連行同期操作”と呼び、それを行う確率を“連行同期確率”と呼ぶことにする。

3. 円柱後流における流体挙動の計算条件

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 AOBA-A(SX-Aurora TSUBASA)を利用して円柱後流における流体挙動を計算した。約 7.55 億格子点の3次元体系を76800 時刻ステップ計算するのに、8 コア×16CPU(128 並列)で約8時間40分を要した。256 時刻ステップごとに合計 300 枚のスナップショットを取得し、ParaView により流体運動量分布の時間変化を動画として観察した。計算体系は、図3に示すとおりであり、“連行同期確率”は、0、1、2、3、4%の5ケースを調べた。

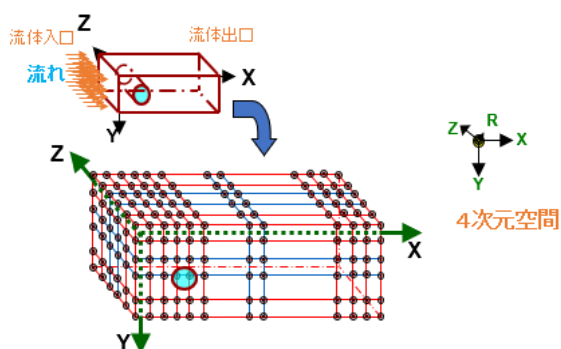


図3. 格子点配置(4次元面心超立方体格子の3次元空間への投影)

3次元空間中で多数の格子点を直交座標系(X, Y, Z)の各軸方向に並べ、直方体形状の格子点配列を作る。各格子点は、その内部に4次元目の座標としてR=0、1、2、3の位置を識別できる自由度をもつとする。これが、4次元面心超立方体格子を3次元空間へ投影した姿である。今回の数値シミュレーションでは、3次元縮退格子として、X方向に1280個、Y方向に768個、Z方向に768個の格子点を配置した。

〔過渡変化シミュレーションの条件〕

シミュレーション計算を開始する最初の時刻ステップ0の時点で、各格子点には、そこに存在できる仮想粒子の最大数の20%の数の仮想粒子をランダムな向きに配置する。この結果、疎視化して得られるマクロな運動量はゼロであり、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向きの運動量をもつ仮想粒子を $X=0$ 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向きのマクロな運動量をもつようになる。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格子点上の仮想粒子配置を、出口直後に存在する格子点の仮想粒子配置にコピーして、出口におけるマクロな運動量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、 $\pm Y$ 方向と $\pm Z$ 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。

4. 連行同期確率を変化させた場合の円柱後流における縦渦発生挙動の動画観察

3章で述べた円柱後流の過渡変化について、“連行同期確率”を0、1、2、3、4%の5ケースに分けて、ParaViewによって可視化した動画を観察した。以下、その結果を述べる。

(1) 連行同期確率0%ではカルマン渦列も縦渦も発生しない状態で安定定常的な双子渦

図4は、水平に置いた円柱の中央を通り、円柱軸(Z軸方向)に垂直なXY平面上における流体の運動量分布を示している。図中の各所に示された小さい黄色矢印が運動量の向きを表し、青色から赤色までの着色が運動量の大きさを表している。

“連行同期確率”が0%の状態では、カルマン渦列は発生せず、300ステップある過渡変化の後半では、図4のように定常状態を保持している。

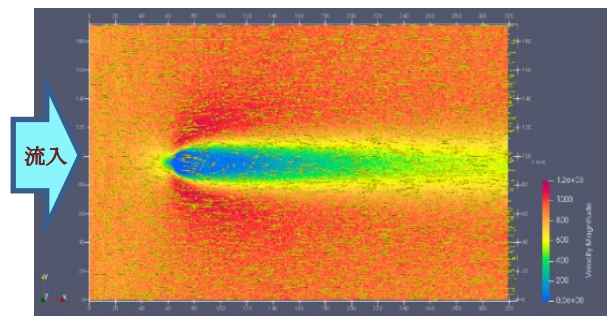


図4. 円柱軸に垂直な断面上の流体運動量（連行同期確率0%）

図5は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面XZ上における流体運動量の流下向き成分(+X向き)の分布を示している。左側から流入した流体は、はじめ流下向きに大きな運動量(赤色領域)をもつが、円柱背後では、逆流する運動量をもつ青色領域が現れている。過渡変化の後半では、図5のように定常状態を保持している。

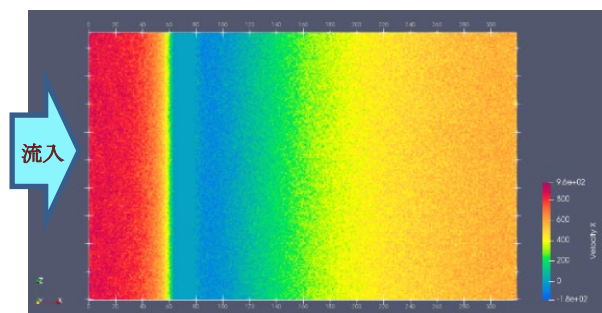


図5. 円柱軸を含む水平面上の流下向き運動量（連行同期確率0%）

図6左は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面XZ上における流体運動量の鉛直下向き成分(+Y向き)の分布を示している。また、図6右は、同じ水平面XZ上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z向き)の分布を示している。ただし、ここで用いた着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。いずれも、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域は見当たらない。

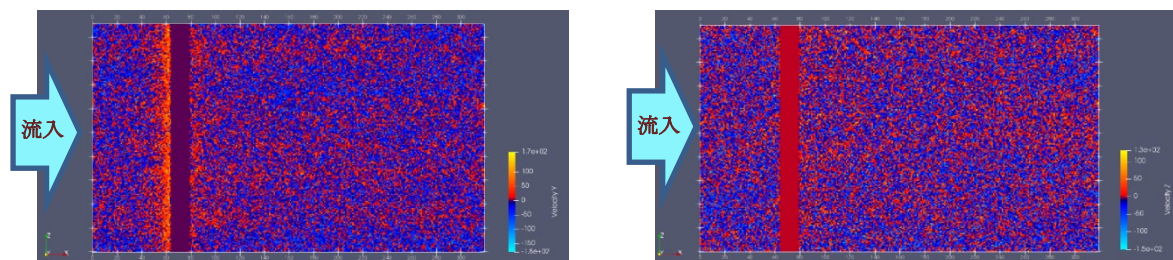


図6. 円柱軸を含む水平面上の鉛直方向運動量(左)と円柱軸方向運動量(右) (連行同期確率0%)

図7左は、計算体系の中心部(流入側と流出側の中間位置)をとおり、流下方向に垂直な鉛直面YZ上における流体運動量の鉛直下向き成分(+Y向き)の分布を示している。また、図7右は、同じ鉛直面YZ上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z向き)の分布を示している。ここでも、着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。図7左に示した流体運動量の鉛直下向き成分(+Y向き)の分布については、水平円柱の後流における双子渦の下降流(赤色領域)と上昇流(青色領域)が現れている。また、図7右に示した流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z向き)については、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域は見当たらない。

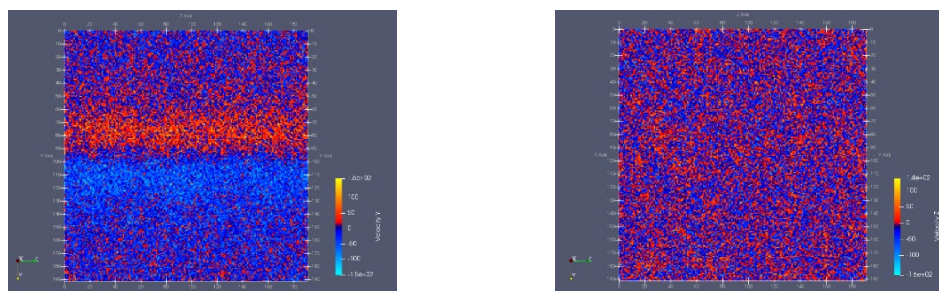


図7. 流下方向に垂直な面上の鉛直方向運動量(左)と円柱軸方向運動量(右) (連行同期確率0%)

(2) 連行同期確率1%ではカルマン渦列が発生するが縦渦は発生せずきれいなカルマン渦

“連行同期確率”を1、2、3、4%にした4ケースでは、静止した流体中に円柱を配置し左側から流体を注入した後、全ケースで円柱後流にカルマン渦列が発生した。その挙動は、150番スナップショット以降ほぼ同様な変化の繰り返しとなった。このため、以後、297番から300番までのスナップショットを示す。

図8は、“連行同期確率”が1%の場合について、水平に置いた円柱の中央を通り、円柱軸(Z軸方向)に垂直なXY平面上における流体の運動量分布を示している。図中の各所に示された小さな黄色矢印が運動量の向きを表し、青色から赤色までの着色が運動量の大きさを表している。同図からカルマン渦列の発生を確認できるが、4つの連続したスナップショットの時間範囲では、その流下向きへの移動はわずかである。

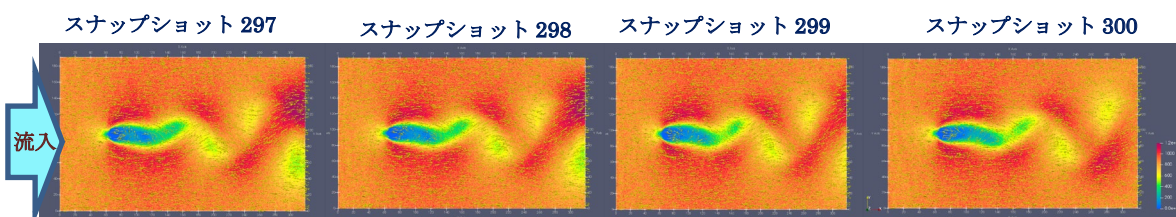


図8. 円柱軸に垂直な断面上の流体運動量 (連行同期確率1%)

図 9 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の鉛直下向き成分(+Y 向き)の分布を示している。ただし、ここで用いた着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。縦縞の模様に乱れがないことから、円柱後流の横渦として、きれいなカルマン渦列が生じていることがわかる。

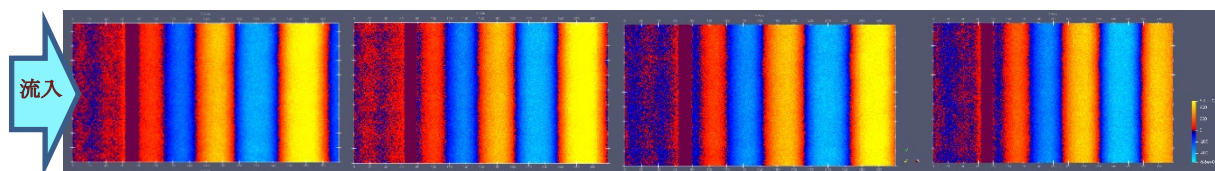


図 9. 円柱軸を含む水平面上の鉛直方向運動量（連行同期確率 1 %）

図 10 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布を示している。ここでも、着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が見当たらないことから、縦渦が発生していないことがわかる。

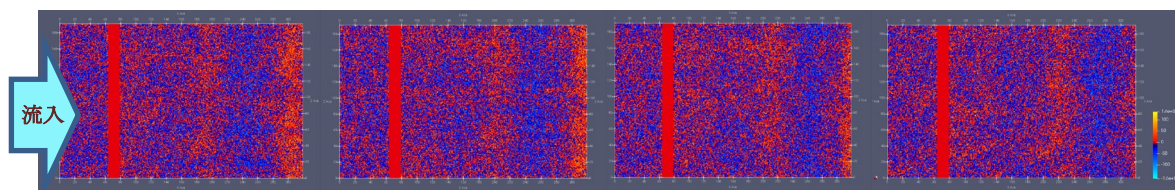


図 10. 円柱軸を含む水平面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 1 %）

図 11 は、計算体系の中心部をとおり、流下方向に垂直な鉛直面 YZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布を示している。ここでも、着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域は見当たらない。

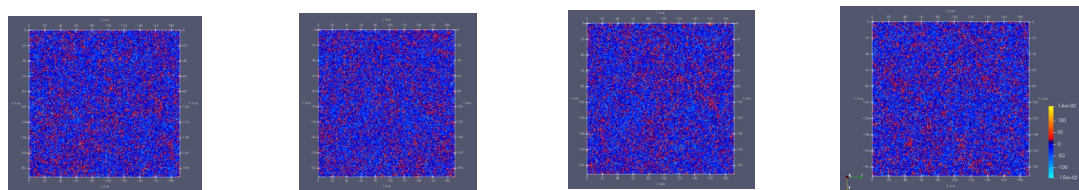


図 11. 流下方向に垂直な面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 1 %）

（3）連行同期確率 2 % ではカルマン渦列に弱い縦渦発生が重なるがほぼきれいなカルマン渦

図 12 は、“連行同期確率”が 2 % の場合について、水平に置いた円柱の中央を通り、円柱軸(Z 軸方向)に垂直な XY 平面上における流体の運動量分布を示している。連行同期確率が 1 % の場合と同様に、カルマン渦列の発生を確認できる。また、4 つの連続したスナップショットの時間範囲内では、その流下向きへの移動はわずかである。

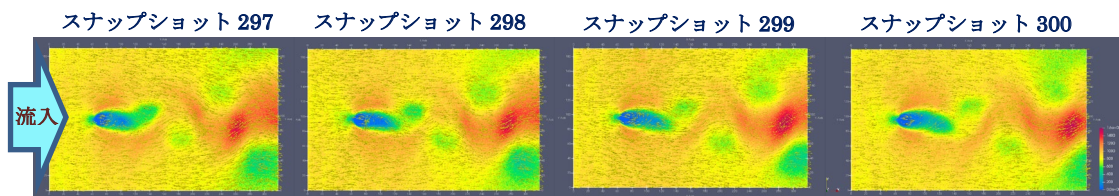


図 12. 円柱軸に垂直な断面上の流体運動量（連行同期確率 2 %）

図 13 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の鉛直下向き成分（+Y 向き）の分布を示している。縦縞の模様の乱れはほんのわずかであり、円柱後流の横渦としては、連行同期確率が 1 % の場合と同様であり、ほぼきれいなカルマン渦列が生じている。

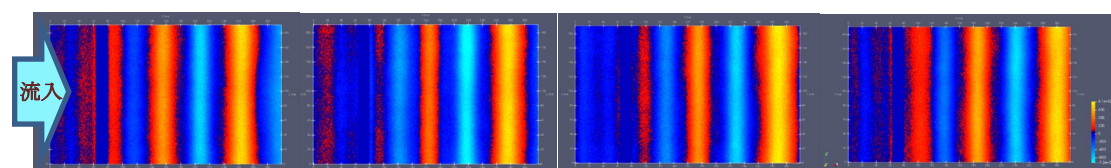


図 13. 円柱軸を含む水平面上の鉛直方向運動量（連行同期確率 2 %）

図 14 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分（+Z 向き）の分布を示している。ここでも、着色は、少しでもプラス側の値であれば赤色、少しでもマイナス側の値になれば青色になるスケールを用いている。ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が帯状に現れ、その境界線が流下方向（+X 向き）に伸びていることから、縦渦が発生していることがわかる。ただし、着色スケールを見ると、Z 向き運動量のゼロを中心にした変化幅は小さく、縦渦の強度は弱いと推測できる。

また、カルマン渦列がわずかしき流下方向に移動しない間に、縦渦の位置が、円柱軸方向に激しく揺動していることがわかる。

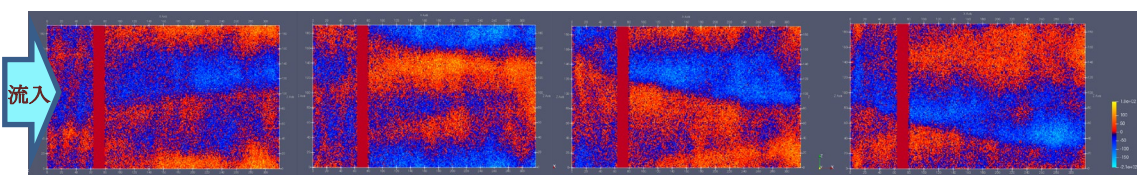


図 14. 円柱軸を含む水平面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 2 %）

図 15 は、計算体系の中心部をとおり、流下方向に垂直な鉛直面 YZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分（+Z 向き）の分布を示している。ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が現れている。そして、上記と同様に、カルマン渦列がわずかしき流下方向に移動しない間に、縦渦の位置が、円柱軸方向に激しく揺動していることがわかる。

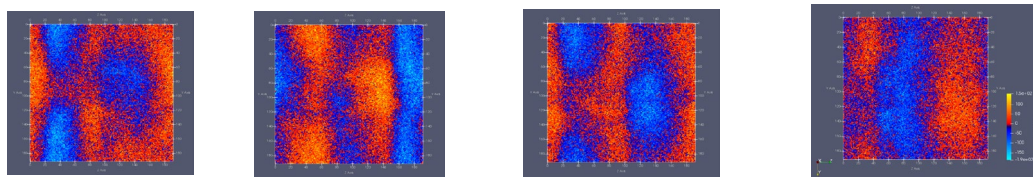


図 15. 流下方向に垂直な面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 2 %）

（４）連行同期確率 3 %ではカルマン渦列に中強度の縦渦発生が重なり相互に乱しあった乱流

図 16 は、“連行同期確率”が 3 % の場合について、水平に置いた円柱の中央を通り、円柱軸 (Z 軸方向) に垂直な XY 平面上における流体の運動量分布を示している。連行同期確率が 2 % の場合と同様にカルマン渦列の発生を確認できるが、その流体挙動が乱れていることがわかる。

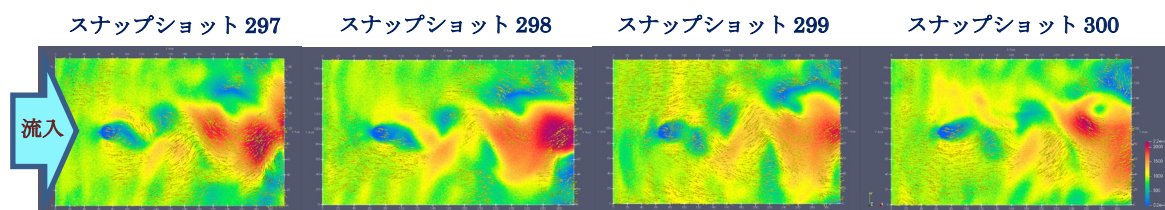


図 16. 円柱軸に垂直な断面上の流体運動量（連行同期確率 3 %）

図 17 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の流下向き成分 (+X 向き) の分布を示している。縦縞の模様に乱れが生じており、円柱後流の横渦としては、連行同期確率が 2 % の場合に比べて、乱れたカルマン渦列が生じていることがわかる。

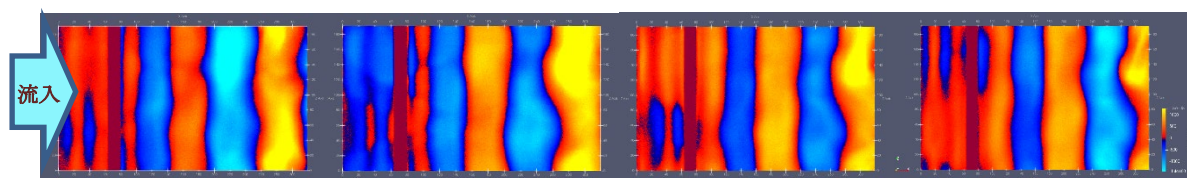


図 17. 円柱軸を含む水平面上の鉛直方向運動量（連行同期確率 3 %）

図 18 は、水平に置いた円柱の円柱軸を含む水平面 XZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分 (+Z 向き) の分布を示している。連行同期確率が 2 % の場合と同様に、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が帯状に現れ、その境界線が流下方向 (+X 向き) に伸びていることから、縦渦が発生していることがわかるが、その帯状形状はかなり乱れている。また、着色スケールを見ると、Z 向き運動量のゼロを中心にした変化幅は、連行同期確率が 2 % の場合と比べて大きく、縦渦の強度が比較的強いことがわかる。さらに、カルマン渦列がわずかしき流下方向に移動しない間に、縦渦の位置が、より複雑に揺動していることがわかる。

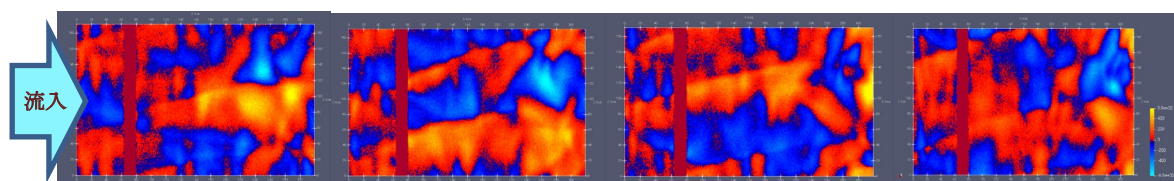


図 18. 円柱軸を含む水平面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 3 %）

図 19 は、計算体系の中心部をとおり、流下方向に垂直な鉛直面 YZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布を示している。連行同期確率が 2 %の場合と同様に、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が現れている。そして、上記と同様に、カルマン渦列がわずかしき流下方向に移動しない間に、縦渦の位置が、複雑に揺動していることがわかる。

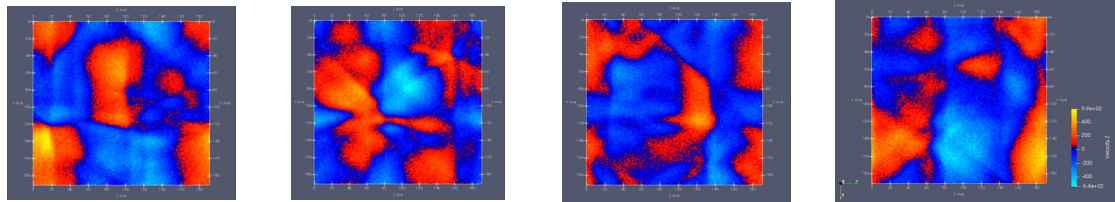


図 19. 流下方向に垂直な面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 3 %）

（5）連行同期確率 4 %ではカルマン渦列に強い縦渦発生が重なり複雑に激しく変動する乱流

図 20 は、“連行同期確率”が 4 %の場合について、水平に置いた円柱の中央を通り、円柱軸(Z 軸方向)に垂直な XY 平面上における流体の運動量分布を示している。連行同期確率が 3 %の場合と同様にカルマン渦列の発生を確認できるが、流体挙動がより一層複雑化していることがわかる。

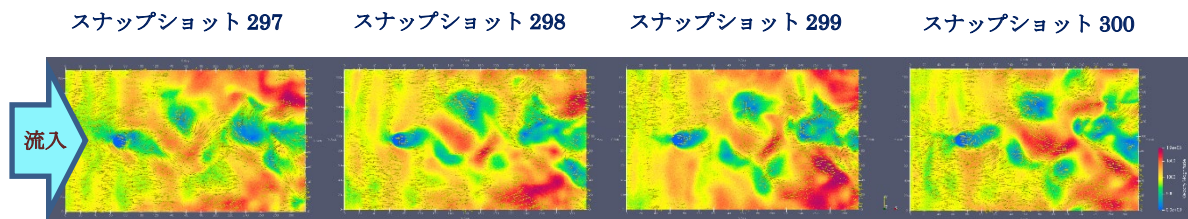


図 20. 円柱軸に垂直な断面上の流体運動量（連行同期確率 4 %）

図 21 は、これまでと同様に水平面 XZ 上における流体運動量の鉛直下向き成分(+Y 向き)の分布である。連行同期確率が 3 %の場合より一層乱れたカルマン渦列が生じていることがわかる。

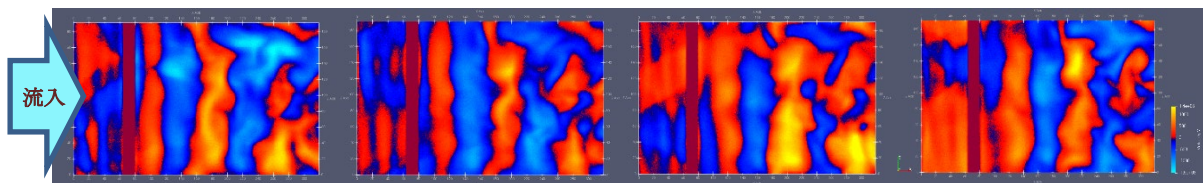


図 21. 円柱軸を含む水平面上の鉛直方向運動量（連行同期確率 4 %）

図 22 は、これまでと同様に水平面 XZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布を示している。連行同期確率が 3 %の場合と同様に、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が帯状に現れ、その境界線が流下方向(+X 向き)に伸びていることから、縦渦が発生していることがわかるが、その帯状形状は一層乱れている。また、着色スケールを見ると、Z 向き運動量のゼロを中心にした変化幅は、赤色青色領域の幅から黄色空色領域の幅まで広がっており、連行同期確率が 3 %の場合と比べて縦渦の強度が一層強いことがわかる。

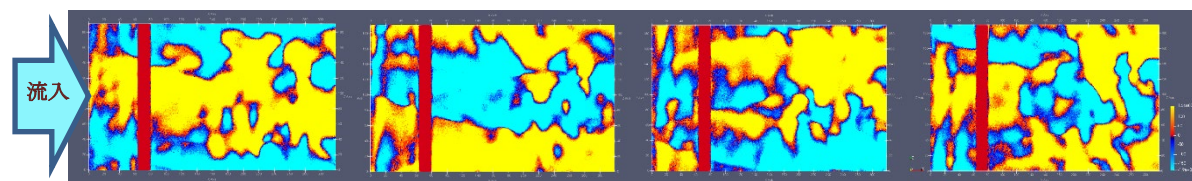


図 22. 円柱軸を含む水平面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 4 %）

図 23 は、計算体系の中心部をとおり、流下方向に垂直な鉛直面 YZ 上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布を示している。連行同期確率が 3 % の場合と同様に、ゼロ付近を中心にして、プラス側やマイナス側に偏る構造的な領域が現れている。そして、上記と同様に、着色スケールを見ると、Z 向き運動量のゼロを中心にした変化幅は、赤色青色領域の幅から黄色空色領域の幅まで広がっており、連行同期確率が 3 % の場合と比べて縦渦の強度が一層強いことがわかる。

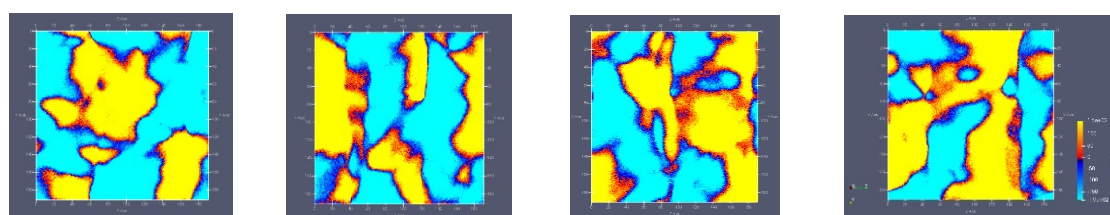


図 23. 流下方向に垂直な面上の円柱軸方向運動量（連行同期確率 4 %）

図 24 は、上記と同じく、流下方向に垂直な鉛直面 YZ 上における流体運動量に関する分布であるが、円柱軸方向の成分(+Z 向き)の分布ではなく、運動量の大きさの分布を示している。図中の各所に示された小さな黄色矢印が運動量の向きを表し、暗赤色から明黄色までの着色が運動量の大きさを表している。複雑な渦構造をしていることがわかる。

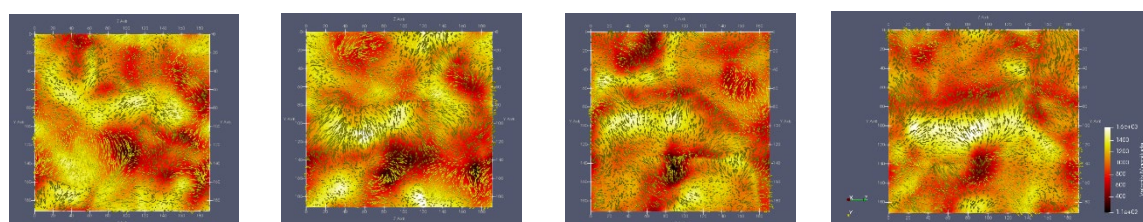


図 24. 流下方向に垂直な面上の流体運動量（連行同期確率 4 %）

5. 観察結果のまとめと考察

(1) 4 章に述べた「各連行同期確率を与えた場合の円柱後流の挙動変化」の観察結果は、その節のサブタイトルにも記載したとおりであり、以下のように要約できる。

連行同期確率 = 0 % : カルマン渦列も縦渦も発生しない状態で安定定常的な双子渦。

連行同期確率 = 1 % : カルマン渦列が発生するが縦渦は発生せずきれいなカルマン渦。

連行同期確率 = 2 % : カルマン渦列に弱い縦渦発生が重なるがほぼきれいなカルマン渦。

連行同期確率 = 3 % : カルマン渦列に中強度の縦渦発生が重なり相互に乱しあった乱流。

連行同期確率 = 4 % : カルマン渦列に強い縦渦発生が重なり複雑に激しく変動する乱流。

(2) 流体を“粒子群”というイメージではなく、“連続体”というイメージでとらえる通常の流体力学では、物体境界近傍や隣り合うカルマン渦の間などのせん断流が発生する領域において流管の伸長領域が存在し、この伸長軸に垂直な面内に多少の流れがあれば、その流れが強調されて縦渦が発生する（注：詳しくは、AモードとBモードの2種類の縦渦発生機構があり、両者はせん断流発生の源が異なる。）という趣旨の説明がなされている[9]。また、先行研究[10]によれば、レイノルズ数が $50 < Re < 90$ の範囲でカルマン渦は2次元的で縦渦は発生せず、レイノルズ数が 190 を超えるあたりから、後流が乱流になり縦渦が発生することが知られている。従って、「連行同期確率 = 1 %」の場合の流体挙動は、 $50 < Re < 90$ の領域に対応するものと考えられる。

(3) 「連行同期確率 = 2、3、4 %」の場合、カルマン渦が強くなるほど、発生する縦渦の強度が強くなっている。これは、カルマン渦が激しくなるほど、「局所的なせん断流における速度勾配が大きくなり、上記の流管の伸長が大きくなって、角運動量保存則により縦渦の強度の増加が顕著になる」という通常の流体力学の説明に整合している。また、連行同期確率がある程度以上大きくなると、発生する縦渦の強度が、カルマン渦列の大きな振幅を乱すほどまでの大きさになる。この2つの渦(カルマン渦列と縦渦)の相互干渉が複雑な流動を生みだしていると解釈できる。

(4) 「連行同期確率 = 2、3、4 %」の場合、円柱後流において発生している縦渦の様子を動画で観察すると、縦渦の発生場所は、円柱の背後において、円柱軸方向に激しく位置を変えて振動しているのがわかる。この揺動は、円柱後流におけるカルマン渦自体の振動に比べて桁違いに速い。このような「縦渦位置の激しい揺動を生じさせるメカニズム」を調査するため、連行同期確率が3%の場合の、298番及び299番スナップショットをより詳細に分析した。

図25(a)(b)は、連行同期確率が3%の場合に前掲した「円柱軸を含む水平面XZ上における流体運動量の円柱軸方向の成分(+Z向き)の分布」を再び示しているが、各所における運動量の向きを示す小さな緑色矢印を重ねて表示したものである。円柱の位置は、左側からほぼ1/4の位置にある縦に細長い紺色長方形で示している。これらを観察すると、「円柱背後の運動量ベクトルの発散位置が1点から広がるように見える位置」と「円柱背後における2つの逆回転している縦渦が接する位置(上側に赤色帯状領域、下側に青色帯状領域が存在する境界の位置)」が一致しながら、円柱軸方向に揺動していることがわかる。図では、この位置を黄色破線の円周で示している。

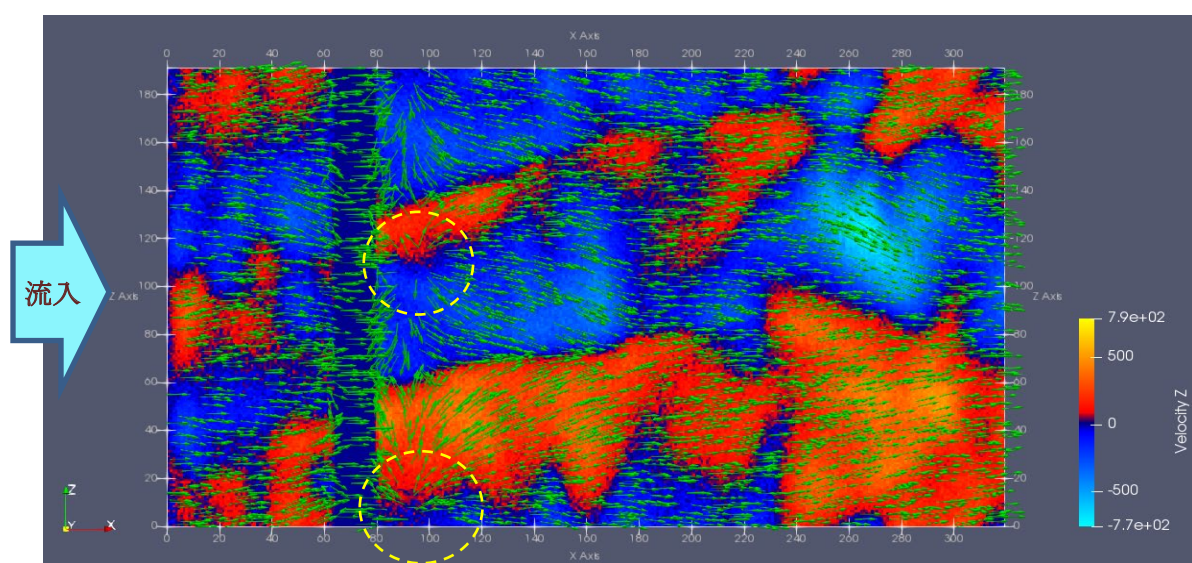


図 25(a). 連行同期確率が3%のときの円柱背後における流れの発散（スナップショット 298）

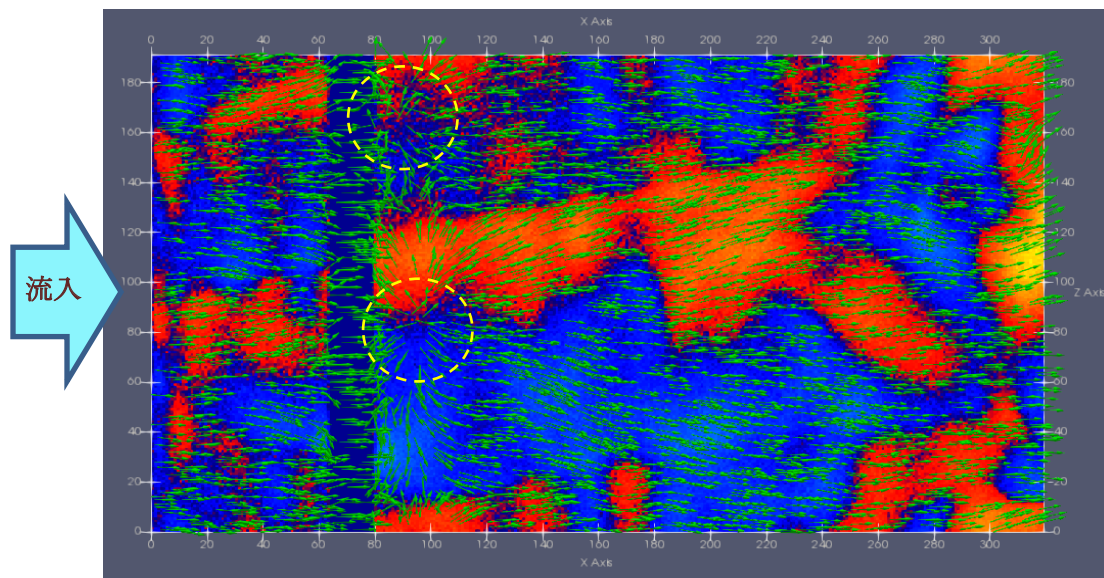


図 25(b)．連行同期確率が 3 % のときの円柱背後における流れの発散（スナップショット 299）

以上のことから、円柱背面における剥離泡の崩壊によって生じる微小領域内の流れのうち円柱軸方向(Z 軸方向)の成分をもつ流れが、せん断流によって伸長する流管の中で強調され縦渦発生の源になっていると想像できる。なお、剥離泡の崩壊位置が円柱軸方向に激しく揺動することは、先行研究の LES 解析[11]によっても知られている。ただし、図 25(a) (b)からもわかるように、縦渦の発生領域は、粘性の効果によって円柱の上流側にも及んでいる。従って、“剥離泡の円柱軸方向の揺動”と“縦渦の円柱軸方向の揺動”は、前者が後者の要因になっているという単純なものではなく、両者の相互作用によるものであろう。なお、この揺動は、対になって発生する 2 つの縦渦の強度の時間変動に起因するとの説明[12]もある。

(5) 本研究の観察結果全体から、流体挙動を粒子群のイメージでとらえる場合、縦渦挙動を支配する本質的なパラメータとして“連行同期確率”が有力候補になると考える。また、“連行同期確率”は、流体を連続体としてとられる場合の“動粘性係数”に似たパラメータである。従って、格子ガス法によって流体シミュレーションを行う場合、“連行同期確率”の値を調整することによって、流体挙動を支配するレイノルズ数を、格子点数を増加させることなく自由に変化させられるというメリットを期待できる。

本研究では、格子ガス法に“連行同期過程”を導入することによって、各格子点における仮想粒子挙動の簡単な計算規則から自己組織化的に多様な縦渦挙動を再現(創発)できる可能性を示した。今後とも、この原理を高解像度な流体力学設計の実現に役立てる具体的な方法を追求していくこととしたい。

謝辞

本研究で実行したシミュレーション計算には、本文にも述べたとおり、すべて、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 AOB-A(SX-Aurora TSUBASA)の「8 コア×16CPU」を利用した。8 コアという比較的小規模な計算機利用であっても、約 7.55 億格子点規模の 3 次元体系で 76800 時刻ステップの時間発展計算を実行し、256 時刻ステップごとに 300 枚のスナップショットを得ることによって過渡変化挙動を十分観察できる動画ファイルを約 8 時

間 40 分で作成することができた。また、利用にあたって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、このような使い勝手のよいベクトル型スーパーコンピュータのさらなる開発導入と同センターの有意義な活動の継続を期待している。

参考文献

- [1] Brosl. Haaslacher, U. Frisch, Yves. Pomeau, “Lattice Gas Automata for the Navier-Stokes Equation”, Physical Review Letters Vol.56, No.14, pp.1505-1508, 1986
- [2] 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
- [3] Christopher M. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, Ph. D. Thesis, MIT, 1993
- [4] 松岡, 菊池, “多速格子ガス法実用化展開への手がかかり”, SENAC Vol.49 No. 4, pp. 1-15, 2016
- [5] 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 No.2, pp. 1-10, 2018
- [6] 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 No.2, pp. 18-27, 2019
- [7] 松岡, 菊池, “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”, SENAC Vol.53 No. 1, pp. 25-33, 2020
- [8] 松岡, “格子ガス法流体解析モデルとニューラルネットワークの融合”, SENAC Vol.54 No. 1, pp. 39-49, 2021
- [9] 日野, “乱流の科学”, pp617-624, 2020, 朝倉書店 (ISBN 978-4-254-20161-1)
- [10] C. H. K. Williamson, “Three-dimensional wake transition”, 1996a, Journal of Fluid Mechanics, Vol.328, pp345-407
- [11] 小野, 田村, “超臨界域における円柱まわりの流れに関する LES 解析”, 第 20 回風工学シンポジウム論文集, 2008
- [12] 松田, 佐賀, “一様流中における円柱後流の 3 次元構造”, 徳山工業高等専門学校紀要, No. 27, pp. 67-76, 2003

[大学 ICT 推進協議会 2022 年度年次大会論文集より]

クラウドサービス AOBA-C の紹介

大泉 健治¹⁾, 森谷 友映¹⁾, 佐々木 大輔¹⁾, 齋藤 敦子¹⁾,
山下 毅¹⁾, 小野 敏¹⁾, 滝沢 寛之²⁾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

oizumi@cc.tohoku.ac.jp

Introduction of Cloud Services “AOBA-C”

OIZUMI Kenji¹⁾, MORIYA Tomoaki¹⁾, SASAKI Daisuke¹⁾, SAITO Atsuko¹⁾,YAMASHITA Takeshi¹⁾, ONO Satoshi¹⁾, TAKIZAWA Hiroyuki²⁾

1) Information Infrastructure Division of Information Department, Tohoku Univ.

2) Cyberscience Center, Tohoku Univ.

概要

東北大学サイバーサイエンスセンターは、全国共同利用設備として大規模科学計算システムの整備と、HPCI の資源提供機関としての役割を担っている。本稿では 2022 年 10 月から運用を開始したスーパーコンピュータ AOBA におけるクラウドサービス AOBA-C について紹介する。

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、スーパーコンピュータ AOBA の運用を 2020 年 10 月から行っている[1]。このシステムを総称して AOBA-1.0 と呼ぶ (以下、AOBA-1.0/既存システム)。AOBA-1.0 は、サブシステム AOBA-A(SX-Aurora TSUBASA, 日本電気株式会社製), サブシステム AOBA-B(LX 406Rz-2, 日本電気株式会社製) の 2 種類の計算機システムで構成される。図 1 にシステム構成図を示す。

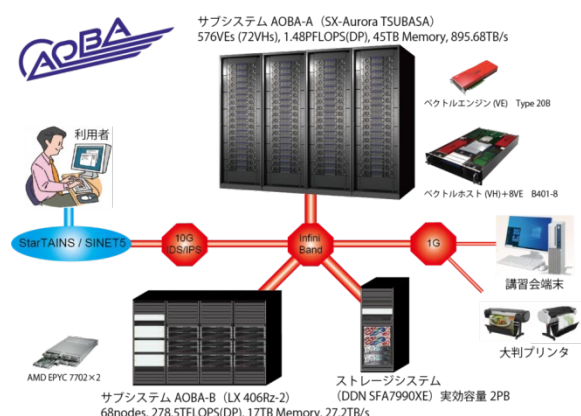


図 1 システム構成 AOBA-1.0

当初の導入計画では、2020 年に AOBA-1.0 を導

入した後、2 年後の 2022 年にシステム増強を行い、AOBA-1.5 として次世代 AOBA の運用を開始する予定であった。

AOBA-1.5 は導入計画どおりに政府調達による導入を進めていたが、スケジュールを延期せざるを得ない状況となった。資料招請および意見招請による市場調査の過程で、半導体製造に関する世界的な需給状況により必要な設備の調達が困難であることが分かったためである。AOBA-1.5 の調達においても例外なく影響を受け、約 1 年間順延する導入計画に変更することになった。

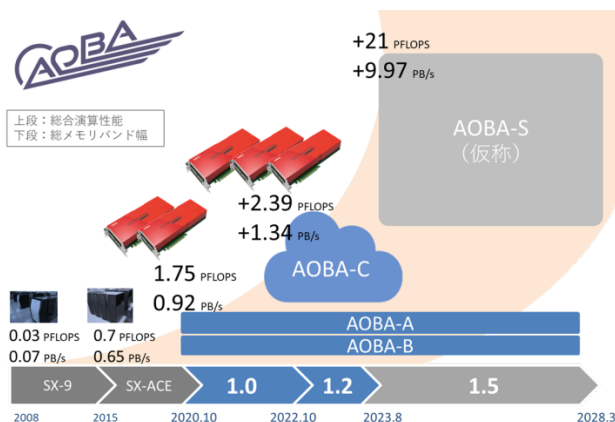


図 2 システム導入計画

また、AOBA-1.0 の運用を開始して 2 年目から、計算需要は処理能力を大きく超える状況が続いて

いる[2]。

図3に、サブシステム AOBA-A の利用 VE 時間、稼働 VE 利用率を 2020 年 11 月から 2022 年 8 月まで月単位に示す。4 月および 8 月は、いずれの年もシステム定期保守や本学キャンパスの計画停電の実施時期のため、運用日数が比較的少ない。そのため利用 VE 時間および稼働 VE 利用率は低い傾向にある。しかし、それら以外の月における稼働 VE 利用率は常に 80% を超え、繁忙期の年度末には 90% を超える状況が続いている。

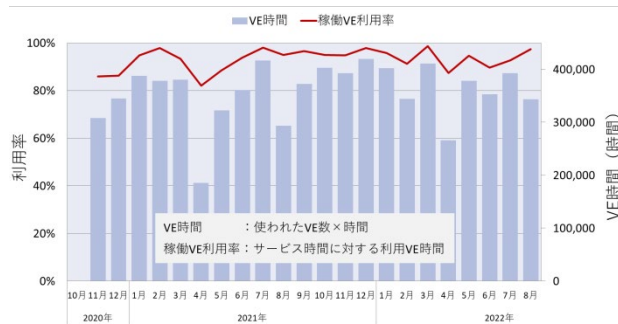


図 3 利用 VE 時間、稼働 VE 利用率
AOBA-A

図4に、サブシステム AOBA-B の利用ノード時間、稼働ノード利用率を 2020 年 11 月から 2022 年 8 月まで月単位に示す。運用を開始した 1 年目から稼働ノード利用率は 80% を超え、2022 年以降は 90% を超える状況が続いている。4 月および 8 月の利用ノード時間および稼働ノード利用率が低いのは AOBA-A と同様の理由である。

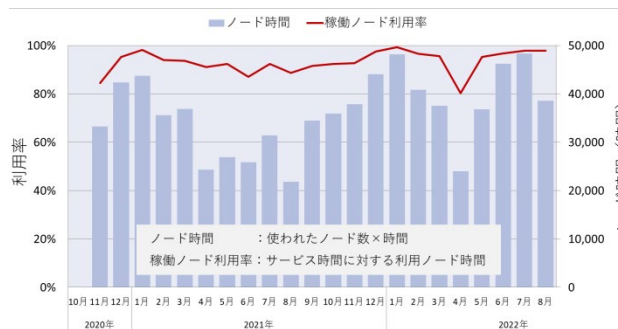


図 4 利用ノード時間、稼働ノード利用率
AOBA-B

AOBA-1.0 の利用率が想定以上に高いことから、リクエストの混雑解消を図るため、また更なる大規模並列化プログラムの実行を要望する利用者に対応するため、計算資源の増強は急務となっている。検討の結果、次期システム AOBA-1.5 のサービス開始までの延長期間を埋め合わせする、計算資源の一時的な増強を行う事になった。増設する

システムは日本電気株式会社が提供するクラウドサービス[3]を活用し、2022 年 10 月から 2023 年 7 月までクラウドサービス AOBA-C として提供を行う。AOBA-C を加えたシステム総称を AOBA-1.2 と呼ぶ。

2 AOBA-C の構成

クラウドサービス AOBA-C¹は、演算サーバ群によるハードウェア、プログラミング環境、利用者管理および課金統計管理によるソフトウェア並びに AOBA-1.0 と接続するためのネットワークで構成される。

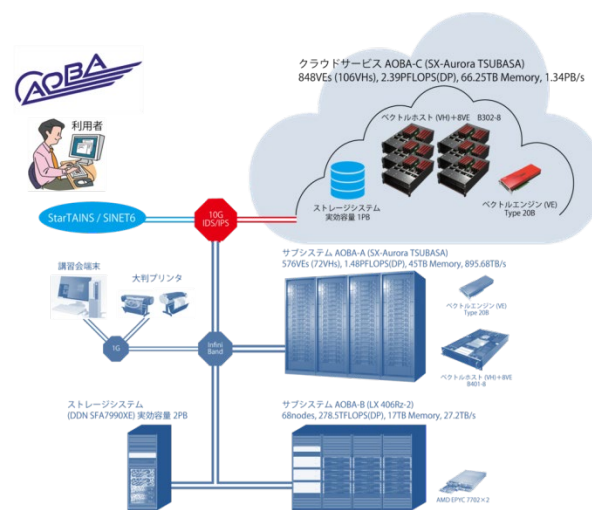


図 5 システム構成 AOBA-1.2

2.1. ハードウェア構成

演算サーバは、SX-Aurora TSUBASA（日本電気株式会社製）106 台で構成される。システム全体の演算性能は、2.39PFLOPS（倍精度）、主記憶容量は 66.25TB、総メモリバンド幅 1.34PB/s となる。AOBA-A と同一性能のベクトルエンジン（以下、VE）Type20B を搭載している。導入台数は AOBA-A の約 1.5 倍であり、クラウドサービス AOBA-C と合わせると総数 178 台になり、AOBA-1.2 では 2 倍以上のベクトル演算リソースを提供することが可能になる。

ストレージシステムは、大容量のデータに高速アクセス可能な分散並列ファイルシステム ScaTeFS（日本電気株式会社）で構築され、実効容量は 1PB である。

2.2. ソフトウェア構成

プログラミング言語は、AOBA-A と同様に自動ベクトル化・自動並列化機能を備えた Fortran/C/C++コンパイラを利用できる。自動並列化機能および OpenMP による共有メモリ並列実行と、システム構成に最適化された MPI ライブラリによる、分散メモリ並列実行が可能である。また科学技術計算ライブラリとして、VE に最適化された数学ライブラリのコレクション NEC Numeric Library Collection(NLC)を利用できる。

アプリケーションソフトウェアの提供は行わず、基本的には大規模並列プログラミング環境として提供する。これまでの AOBA-1.0 では実現不可能だった大規模プログラムの実行を想定している。

2.3. ネットワーク構成

これらのクラウドサービスは、NEC 神奈川データセンターに設置した SX-Aurora TSUBASA を、国立情報学研究所の学術情報ネットワーク SINET6 を経由して提供する。本センターAOBAを構成する一つのサブシステムとして、SSH によるリモート接続により利用する。

表 1 提供するハードウェア、ソフトウェア

クラウドサービスAOBA-Cの仕様	
SX-Aurora TSUBASA (日本電気株式会社)	
システム構成	106ベクトルホスト (VH) + 848ベクトルエンジン (VE)
総合演算性能	2.39 PFLOPS (倍精度)
総主記憶容量	66.25 TB
総メモリバンド幅	1.34 PB/s
ノード性能	
モデル名称	B302-8 (1VH+8VE)
演算性能	2.96 TFLOPS + 19.6 TFLOPS (倍精度)
主記憶容量	256 GB + 384 GB
ノード間接続	InfiniBand(HDR 200Gbps × 2)
プログラム開発環境	NEC Software Development Kit for Vector Engine (Fortran, C/C++ Numeric Library Collection, PROGINF/FTRACE), NEC MPI
ストレージシステム	実効容量1PB, ファイルシステムScaTeFS

3 クラウドサービスの概要

3.1. 概略、提供期間

既存システムの AOBA-A および AOBA-B の使い方に変更はなく、クラウドサービス AOBA-C を追加する形で既存サービスと連携する。既存システムの利用者番号を保有しているユーザは、AOBA-C も含めたすべてのサービスを利用可能であるので、クラウドサービス AOBA-C を利用するための特別な利用手続きは不要である。

利用可能な資源量は、1 ジョブあたり最大 64VH (512VE) とする。AOBA-A では提供できなかった 32VH (256VE) より大きい資源を必要とする大規模並列プログラムを、常時実行することが可能となった。

ジョブの実行は、既存システムと同じく、バッチリクエストをジョブ管理システム Network Queuing System V (NQS-V、日本電気株式会社) に投入して行う。計算資源を共有して利用する「共有利用」を通常利用とするが、個人またはグループで一定量の計算資源を占有して利用できる「占有利用」も提供する。

クラウドサービス AOBA-C の提供期間は、2022 年 10 月から 2023 年 7 月までとし、HPCI 課題利用については 2023 年 6 月末日までとする。

3.2. 利用者環境

フロントエンドサーバでプログラムをコンパイルし、演算サーバへバッチリクエストとして投入しプログラムを実行する形態は、既存システムと同じである。ただし、フロントエンドサーバはクラウドサービス AOBA-C 用のサーバ cfront を利用する。

また、利用者のファイルを置くストレージもクラウドサービス AOBA-C のストレージシステムを利用する。AOBA-C でプログラミングの際は、あらかじめプログラムファイルやデータファイルをクラウド用のストレージシステムへ転送しておく必要がある。

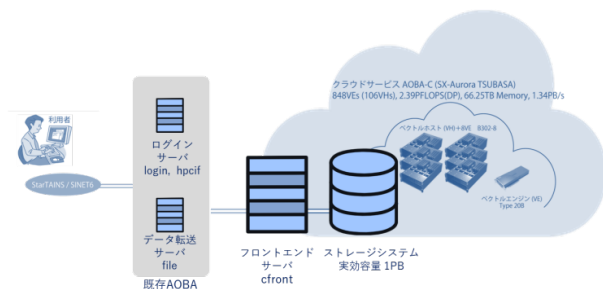


図 6 AOBA-C 用フロントエンドサーバ、ストレージシステム

3.3. ログイン認証

AOBA-C においてもシステムのセキュリティを考慮し、ログインサーバとフロントエンドサーバの 2 段構成とする。AOBA-C 用のフロントエンドサーバ cfront は、既存のログインサーバ login ま

たはHPCI用ログインノードhpcifからのみアクセス可能とし、利用者はcfront上でソースコードのコンパイルやバッチリクエストの投入を行なう。利用者の公開鍵は既存システムで利用していたものと同一としているので、ローカルPCに保存済みの秘密鍵とパスフレーズによるログインが可能である。既存システムの利用者は改めて鍵の作成をする必要はない。新規利用者は、本センターウェブサイト上に提供される利用者ポータル「SSH 公開鍵登録」機能を用いて、ログインのための秘密鍵を作成する。

3.4. ファイル転送

AOBA-Cのストレージシステムは既存システムとは別システムとなる。そのためAOBA-Cで実行するプログラムファイルやデータファイルは、AOBA-Cのストレージシステムにあらかじめ転送しておく必要がある。

転送サーバは、既存のデータ転送サーバfileとフロントエンドサーバcfrontの2段構成とし、fileを経由してscp(Secure Copy)またはSFTP(SSH File Transfer Protocol)にてファイル転送を行う。fileおよびcfrontへの接続は、3.3.ログイン認証で設定した公開鍵と秘密鍵のペアを用いる。

転送方法として、Windows, Mac OSのターミナルアプリケーションおよびlinux上でのコマンドによる操作と、scpやSFTPに対応したFTPクライアントアプリケーションを用いる2つの方法がある。具体的な操作手順は、センターウェブサイト¹に掲載しているマニュアルを参照いただきたい。マニュアルでは、ファイル転送に必要な操作コマンドやWindowsアプリケーションWinSCPでの設定方法を、AOBA-C向けに解説している。

3.5. バッチリクエストの投入

プログラムの実行は、バッチリクエストの投入により演算サーバで行われる。AOBA-Cのバッチリクエストの投入は、フロントエンドサーバcfrontで行う。既存システムからは投入できない。バッチリクエストの基本的な操作手順については、既存システムと同じである。ジョブスクリプトに、投入キュー名、利用VE数、最大経過時間を指定する。利用可能なVE数は、AOBA-Aの2倍となる512VEまで利用可能となっている。表2に、AOBA-Cのキュー構成を示す。

既存システムと同様に、フロントエンドサーバ

上でプログラムの実行は禁止とする。フロントエンドサーバは、リクエストの操作やコンパイル等の作業用サーバとしているためである。

表 2 AOBA-Cのキュー構成

利用形態	キュー名	VE数	実行形態	最大経過時間 規定値/最大値	メモリサイズ
共有	SXC	1	1VE (VHを共用する)	72時間/720時間	48GB×VE数
		2～512	8VE単位で確保 (VHを共用しない)		
占有	個別設定				

VH:ベクトルホスト、VE:ベクトルエンジン

3.6. 利用負担金

共有利用の利用負担額単価は、課金対象時間あたり125円とし、後払いの従量制としている。既存システムAOBA-Aの共有利用(従量)単価と同じである。また、占有利用の利用負担額単価は利用VE数8あたり利用期間3ヶ月につき216,000円とし、AOBA-Aに比べ2割抑えた設定にしている。他の研究グループのジョブによる実行待ちの影響を受けないため、占有利用を検討の方はご活用いただきたい。

表 3 基本利用負担金【大学・学術利用】

表 1 基本利用負担金【大学・学術利用】

区分	項目	利用形態	負担額及び課金対象時間
演算 負担経費	AOBA-A	共有 (無料)	利用VE数1(実行数、実行時間の制限有) 無料
		共有 (従量)	課金対象時間 = (利用VE数÷8を切り上げた数)×経過時間(秒) 課金対象時間1時間につき 125円
		共有 (定額)	負担額10万円につき課金対象時間800時間分使用可能
		占有	利用VE数8 利用期間3ヶ月につき 270,000円
	AOBA-B	共有	課金対象時間=利用ノード数×経過時間(秒)
		(従量)	課金対象時間1時間につき 22円
		共有 (定額)	負担額10万円につき課金対象時間4,600時間分使用可能
	AOBA-C	占有	利用ノード数1 利用期間3ヶ月につき 47,000円
		共有 (従量)	課金対象時間 = (利用VE数÷8を切り上げた数)×経過時間(秒) 課金対象時間1時間につき 125円
ファイル 負担経費	出力	共有	利用VE数8 利用期間3ヶ月につき 216,000円
		占有	5TBまで無料、追加容量1TBにつき年額 3,000円
	大判プリンタによる カラープリント		10TBまで無料、追加容量1TBにつき年額 3,000円
出力 負担経費	大判プリンタによる カラープリント		フォト光沢用紙1枚につき 600円
			クロス紙1枚につき 1,200円

4 おわりに

本稿では、2022 年 10 月に運用を開始したクラウドサービス AOBA-C について紹介した。具体的な設定例や実行コマンド等の利用方法の詳細については、本センターのウェブサイト¹に操作マニュアルを用意しているので参照いただきたい。他にも、本センターからのお知らせ、利用講習会や利用相談について最新情報を発信しているのでご活用いただきたい。

また、順延していたスーパーコンピュータ AOBA-1.5 は、2023 年の導入が決定した。総演算性能 21PFLOPS を超える次世代 SX-Aurora TSUBASA（日本電気株式会社）を、2023 年 8 月のサービス開始に向けて準備を進めている。既存システム AOBA-A の総合演算性能を 14 倍以上に高速化・大規模化した SX-Aurora TSUBASA の次世代機を、世界最大クラスの規模で提供する。既存の SX-Aurora TSUBASA 向けプログラム資産はそのまま、高速化・大規模化の実現が期待される。AOBA-1.5 によるシミュレーション研究やプログラム開発も見据えて、スーパーコンピュータ AOBA をご活用いただければ幸いである。

参考文献

- [1] 山下毅，森谷友映，佐々木大輔，齋藤敦子，小野敏，大泉健治，滝沢寛之，「スーパーコンピュータ AOBA の紹介」，SENAC Vol.54 No.1（2021-1），pp.50-55，2021
- [2] 森谷友映，佐々木大輔，齋藤敦子，山下毅，小野敏，大泉健治，滝沢寛之，「スーパーコンピュータ AOBA の運用状況と利用者支援について」，SENAC Vol.55 No.1（2022-1），pp.29-32，2022
- [3] https://jpn.nec.com/press/202204/20220425_01.html

¹ <https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/aoba-c/>

[大学 ICT 推進協議会 2022 年度年次大会論文集より]

Wi-Fi プロファイルを用いた eduroam/OpenRoaming のパスワードレス設定

後藤英昭¹⁾, 原田寛之²⁾, 漆谷重雄³⁾

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) 国立情報学研究所

Passwordless Configuration of eduroam/OpenRoaming Using Wi-Fi Profile

Hideaki Goto¹⁾, Hiroyuki Harada²⁾, Shigeo Urushidani³⁾

1) Cyberscience Center, Tohoku University

2) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

3) 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、これまで多くの機関で、ID・パスワードを使う形で運用されてきた。利用者が ID・パスワードを記憶または記録しておく必要性があり、手作業での入力負担が大きかった。また、打ち間違いによる接続不良も、利便性を損ねていた。一方、市民一般向けのローミング基盤である OpenRoaming の開発と並行して、OS ベンダ各社は近年、Wi-Fi プロファイルを用いたウェブベースのプロビジョニング（準備，設定投入）の仕組みを提供するようになった。プロファイルは、無線 LAN の設定に必要なパラメータや証明書などを埋め込んだファイルである。これにより、WPA2 Enterprise の無線 LAN であっても、利用者が複雑な手順を踏まずに設定できるようになった。本研究では、主要な OS の対応状況を調査した。また、機関の情報システムに組み込んで Wi-Fi プロファイルを発行できるようにするためのツールキットを開発し、GitHub で公開した。これを用いると、組織のアカウントなどを用いてログイン済みのウェブサイトから、プロファイルを電子的手段で端末に流し込み、ID・パスワードレスな eduroam/OpenRoaming 設定を実現できる。利用者による入力ミス・設定ミスの可能性を極力排除することで、サービスの利便性と安定性の向上が期待される。

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 [1] は、これまで多くの機関で、ID・パスワードを使う形で運用されてきた。利用者が ID・パスワードを記憶または記録しておく必要性があり、手作業での入力負担が大きかった。また、打ち間違いによる接続不良も、利便性を損ねていた。一方、市民一般向けのローミング基盤である OpenRoaming [2] の開発と並行して、OS (Operating System) ベンダ各社は近年、Wi-Fi プロファイルを用いたウェブベースのプロビジョニング（準備，設定投入）の仕組みを提供するようになった。これにより、WPA2 Enterprise の無線 LAN であっても、利用者が複雑な手順を踏まずに設定できるようになった。

本報告では、主要な OS のウェブベース Wi-Fi プロビジョニングの対応状況を解説する。また、機関の情報システムに組み込んで Wi-Fi プロファイルを発行できるようにするためのツールキットを開発したので、紹介する。これを用いると、組織のアカウントなどを用いてログイン済みのウェブサイトから、プロファイルを電子的手段で端末に流し込み、ID・パスワードレスな eduroam/OpenRoaming 設定を実現できる。利用者による入力ミス・設定ミスの可能性を極力排除することで、サービスの利便性と安定性の向上が期待される。

本稿では、初めに、eduroam の接続設定の現状と課題を説明する。続いて、最近の各種 OS におけるウェブベース Wi-Fi プロビジョニングの動向と技術を説明する。最後に、ID・パスワードレス設定を実現するた

めのツールキットを紹介する。

2 eduroam CAT と geteduroam による eduroam 設定の容易化

2.1 eduroam の手動設定の課題

eduroam は WPA2 Enterprise (IEEE 802.1X) による安全な利用者認証と接続方法に基づくシステムである [1]。eduroam では幾つかの認証方式が利用できるが、ID とパスワードを使う EAP-TTLS (Extensible Authentication Protocol-Tunneled Transport Layer Security) と PEAP (Protected Extensible Authentication Protocol) が広く利用されている。この他、電子証明書を用いる EAP-TLS (Transport Layer Security) を採用している機関もある。

EAP-TLS の場合は、電子証明書を端末にロードする必要があるため、機関内のウェブサイトなどを通じて端末の設定を行う必要がある。一方、ID・パスワード方式は、他にネットワーク接続手段のない場所でも、手動設定のみで無線 LAN に接続できるという利点がある。例えば、自分の所属機関が eduroam に参加していないが、参加した国際会議でビジター用の eduroam アカウントが配布されているようなケースが、これに該当する。しかしながら、eduroam を十分に安全に利用できるようにするためには、本来はサーバ認証の設定も必要で、手作業での接続設定は煩雑である。

EAP-TTLS と PEAP では、利用者認証に先立って、これから接続しようとする基地局とネットワークが偽物ではないことを確認するための、サーバ認証が行われる。PEAP ではサーバ認証の省略もできるが、利用者認証に用いられる MS-CHAPv2 のセキュリティが十分ではないため、巧妙に細工された偽基地局に誘導されるとパスワードが解析・窃取される恐れがある。このため、サーバ認証の有効化が強く推奨されている。

さらに、プライバシー保護のために、実際に利用者認証に使われる Inner Identity とは別に、Outer Identity に匿名 ID を設定することが望ましい。機関のポリシーによって、匿名 ID を設定しない運用も可能である。

以上をまとめると、認証方式の選択の後、ID・パスワードに加えて、サーバ認証のための情報（サーバ証明書の検証に使う CA (Certificate Authority) 証明書の名前と、サーバ証明書の SAN (Subject Alternative Name) など）、および、Outer Identity の入力が必要であり、これを利用者が手作業で行うことは難しい。

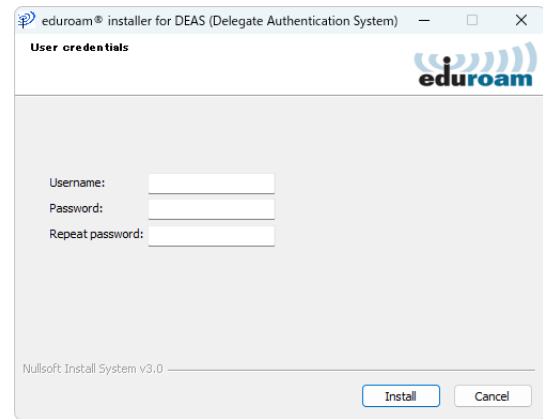


図 1 eduroam installer (CAT) による接続設定。

ID とパスワードの入力においても、画面に表示されたり紙に書かれたものを端末に入力する際に、1 (イチ) と l (エル) のように似た文字を間違えたり、末尾に余計なスペースを入れてしまう、ハイフン (-) とよく似た他の記号を入れてしまうなど、入力ミスによる認証失敗に多くの利用者と管理者が悩まされている。類似した文字を排除するなど、システム設計の工夫もあるが、手動設定の負担と誤入力の問題は残る。

2.2 eduroam CAT

eduroam の接続設定を容易にするために、eduroam CAT (Configuration Assistant Tool) [3] が運用されている。eduroam の IdP (Identity Provider) となる機関の管理者が、ID・パスワードを除く設定情報を仕込んだプロファイルを、予め eduroam CAT のサーバに登録しておく。利用者は、eduroam CAT からこのプロファイルをダウンロードして、eduroam installer に読み込ませる。これにより、図 1 のように ID・パスワードを入力するだけで、安全な eduroam 接続設定が可能である。

eduroam CAT は幅広い OS に対応している。Apple の iOS, iPadOS, macOS では、MDM (Mobile Device Management) 向けの共通のプロファイル形式 (.mobileconfig) が利用でき、端末に特別なアプリを導入しなくても無線 LAN 設定が可能である。一方、Android と Windows については、eduroam CAT 独自の .eap-config 形式のプロファイルが発行され、利用者がこれをダウンロードして eduroam installer に読み込ませることで、端末の無線 LAN 設定が行われる。

執筆時点で、eduroam CAT のサーバ周りのシステムは運用継続されているが、アプリのメンテナンスが行われておらず、後述する geteduroam [4] への移行が進められている。

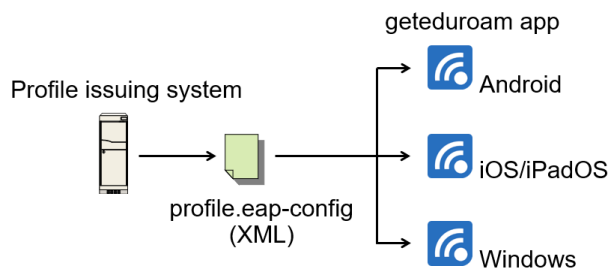


図2 .eap-config と geteduroam app による無線 LAN 設定.

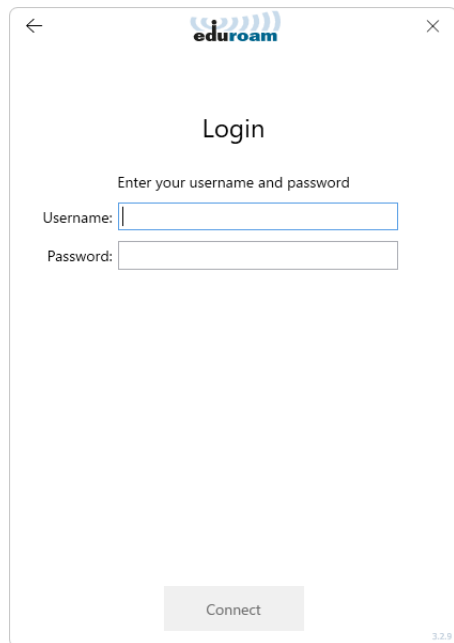


図3 geteduroam による接続設定.

2.3 geteduroam

eduroam の接続設定をさらに容易にするために、geteduroam という名前のアプリが開発されている [4]。geteduroam では、eduroam CAT と同じ .eap-config 形式のプロファイルが利用できる。

執筆時点で、geteduroam の基本機能は eduroam CAT のアプリと同様であるが、インタフェースの洗練が進められている。対応 OS は、Android、Windows、iOS/iPadOS である (図 2)。iOS/iPadOS と macOS については、eduroam CAT のウェブサイトが発行されるプロファイルのみを用いて設定が可能のため、実質的には Android と Windows で特に有用なアプリとなっている。

geteduroam は基本的に eduroam CAT のシステムをバックエンドに利用しており、ID とパスワードの入力はあいかわらず必要である (図 3)。また、eduroam の接続設定の際に、eduroam CAT のウェブサイト

アクセスするためのネットワーク接続が別途必要である。Apple 以外の端末では、予めアプリを導入しておく必要もある。

3 ウェブベース Wi-Fi プロビジョニングの最新動向

3.1 プロファイルを用いた無線 LAN 設定

教育・研究機関向けの eduroam に加えて、市民一般向けのセキュアな無線 LAN ローミング基盤の実現が望まれるようになり、国内では著者らによる Cityroam [5] が 2018 年に、世界では Wireless Broadband Alliance (WBA) による OpenRoaming [2] が 2020 年に運用開始された。OpenRoaming では Passpoint [6] と呼ばれる仕組みが導入されているが、これは eduroam における WPA2 Enterprise と同様の設定に加えて、さらに細かいパラメータを端末に設定する必要がある。このため、手作業による設定は困難であり、設定に必要な情報をまとめたプロファイルを端末に電子的に流し込む、プロビジョニングの仕組みが開発されるようになった。ウェブベースの Wi-Fi プロビジョニングの機能を使うことで、利用者はオンラインサインアップ (OSU, Online Sign-Up) の機能を用いて、煩雑な手順を踏まずにセキュアな無線 LAN に接続できるようになった。Passpoint に対応したプロファイルは、特に、Passpoint プロファイルと呼ばれている。

一部のプロファイルには有効期限を設定する項目もあり、期限切れのアカウントによる大量の認証要求の発生を抑制することも可能である。eduroam では大勢の卒業生の端末に設定が残っていることがローミング基盤の負担になっており、有効期限が設定できることは負荷軽減に貢献すると考えられる。

次節より、代表的な OS のウェブベース Wi-Fi プロビジョニングの対応状況と仕組みを説明する。

3.2 Android (PPS MO)

Android では、Passpoint [6] で定義された PPS MO (Per-Provider Subscription Management Object) と呼ばれる形式のプロファイルが利用される。このプロファイルは XML (eXtensible Markup Language) 形式で記述されている。利用者がウェブサイトで Passpoint 設定などのボタンをタップすると、Passpoint プロファイルが端末にダウンロードされて、自動的に無線 LAN 設定のメニューに遷移する (図 4)。利用者が入力しなければならないようなパラメータは一切なく、数タップの操作のみで設定が完了する。

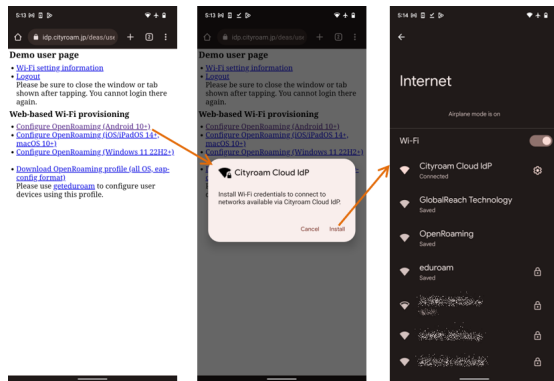


図4 PPS MO による Android の Passpoint 設定.

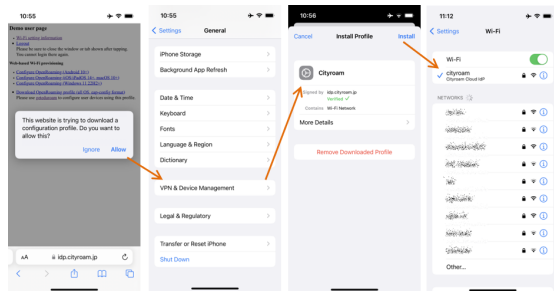


図5 .mobileconfig による iOS の Wi-Fi 設定.

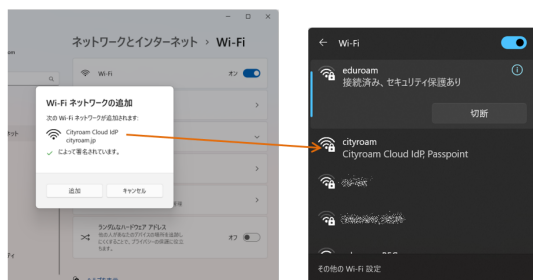


図6 ms-settings: URI スキームによる Windows 11 の Wi-Fi 設定.

Android のリファレンス実装では、EAP-TTLS, EAP-TLS, EAP-SIM, EAP-AKA, EAP-AKA' の形式がサポートされている。PPS MO 形式は、Passpoint の機能を伴わない従来の WPA2 Enterprise のみの設定には対応していない。すなわち、eduroam の設定には利用できないという問題がある。

Android の Passpoint 周りの実装は、ほぼ実用的と言えるレベルに達したのが Android 10 であり、調査した限りにおいて、安定な動作には 11 以降が必要である。プロファイルには有効期限を示す `ExpirationDate` の定義も含まれているが、Android 12 以前では機能しないようである。

3.3 iOS/iPadOS/macOS (.mobileconfig)

Apple の iOS, iPadOS, macOS の各 OS では、MDM 向けの .mobileconfig 形式のプロファイルが共通のプロファイル形式 (.mobileconfig) が利用される。この形式では、無線 LAN の一通りの設定が網羅されており、WPA2 Enterprise だけでも、Passpoint を組み合わせても、いずれでも利用できる。

利用者がウェブサイトで Passpoint 設定などのボタンをタップすると、プロファイルが端末にダウンロードされる。続いて、プロファイルをインストールする操作が必要である (図 5)。利用者が入力しなければならないようなパラメータは一切なく、数タップの操作のみで設定が完了する。

プロファイルには有効期限の埋め込みも可能であり、期限切れのプロファイルを削除するように、利用者に操作を促すことができる。

.mobileconfig 形式のプロファイルは、XML 形式で記述されており、S/MIME (Secure / Multipurpose Internet Mail Extensions) による署名に対応している。署名付き・署名なしのいずれでも利用できるが、署名なしの場合はプロファイルのインストールの際に赤字で警告が表示される。署名に用いる証明書は、OS が標準対応しているパブリック CA から発行されたものが必要である。制約条件は厳しくないため、利用者に無用な心配をさせないためにも、署名付きのプロファイルを発行することが望ましい。

3.4 Windows (ms-settings: URI スキーム)

Windows 10 および Windows 11 では、ms-settings: URI スキームを用いて、プロファイルによる無線 LAN の設定が可能になっている。XML で記述されたプロファイルをウェブサイトからダウンロードする際に、URL の前に `ms-settings:wifi-provisioning?uri=` を付けることで、Windows の「ネットワークとインターネット > Wi-Fi」メニューが自動的に立ち上がり、プロファイルを取り込む仕組みになっている。図 6 のように、利用者が Wi-Fi ネットワークの追加を承認するだけで、接続設定が完了する。

このプロファイルは、WPA2 Enterprise のみでも、Passpoint との併用でも利用できる。EAP-TTLS や EAP-AKA などに対応しているが、実機で検証したところ、PEAP は利用できなかった。EAP-TLS にも対応していない。Passpoint の場合でも SSID の設定が省略できないなど、まだ仕様が十分に固まっていないように見える。

プロファイルには XML 署名が必須で、省略はでき

ない。また、この署名には EV (Extended Validation) 対応のコード署名用証明書が必要であり、非 EV の署名では赤字で「署名が無効です。」というエラーが表示されて、ネットワークが追加できない。Windows 11 22H2 アップデートでは、この制約が緩和されて、非 EV の署名も受け付けられるようになった。

現在は Windows 10 の端末も数多く使われているため、当面の間、EV 証明書を用いた運用が望まれる。

Windows 用のプロファイルには、有効期限を設定する項目が見当たらなかった。

3.5 .eap-config の利用

OS の仕組みではないが、代用品として優れた性質を持っているので、2.2 で説明した .eap-config についてここで補足説明しておく。

.eap-config は eduroam CAT や geteduroam で用いられているプロファイル形式であり、XML で記述される。この形式は、WPA2 Enterprise の EAP-TTLS, EAP-TLS, PEAP に対応しており、Passpoint にも限定的ながら対応している。標準的な eduroam では世界で統一された SSID “eduroam” が用いられるが、Passpoint による接続も規定されており、後者では RCOI (Roaming Consortium Organization Identifier) によって接続先の基地局が選ばれる。OpenRoaming でも RCOI が使われていることから、この .eap-config 形式は OpenRoaming にも応用できる。しかしながら、SIM 認証に対応していないという制約がある。

2 で述べたように、現在の eduroam CAT や geteduroam の運用では、ID・パスワードを手作業で入力しないしコピー・ペーストすることが多い。.eap-config 形式には Username, Password の項目も定義されており、予めこれらを埋め込んでおけば、手作業が不要な、ID・パスワードレスな接続設定が実現できる。これを実現するには、無線 LAN のアカウントを保有している各機関、すなわち IdP が、自前で Username, Password を埋め込んだプロファイルを生成・発行する必要がある。

.eap-config 形式には ValidUntil の項目があり、有効期限の埋め込みも可能である。

4 Provisioning Tools を用いた ID・パスワードレスな無線 LAN 設定

無線 LAN 設定に用いるプロファイルの形式が OS ごとに異なる上に、形式や署名方法に関する公開情報が十分ではなく、正しく動作する条件や環境が見出

しにくいという問題があった。無線 LAN 業界でも、プロファイルの生成に各社が苦勞している状況であった。そこで、十分に洗練されていなくても、まずは正常に動作する基本的なものが必要と考え、プロファイルの生成を用意にするツールキットを開発して、GitHub でオープンソースソフトウェアとして公開した。初めに、OpenRoaming 用のシステムを開発する事業者のために、Passpoint/OpenRoaming 向けのツールキットを Passpoint Provisioning Tools の名称で開発、公開した [7]。続いて、同じコードをベースにしながら、学校・大学でも利用しやすいように、eduroam 専用パッケージ化した eduroam Provisioning Tools を開発、公開した [8]。

Provisioning Tools は、IdP となる機関で自前のプロファイル発行システムを開発しやすいように、CGI (Common Gateway Interface) Perl スクリプトとして開発した。Perl スクリプトなので、CGI 以外の組み込みの用途でも、適応のための書き換えは難しい。生成されるプロファイルの形式は OS ごとに異なるが、埋め込むパラメータは共通のものが多いため、共通の設定ファイルにまとめた。このツールキットを利用するには、ウェブサーバ上にコードを置き、設定ファイルを自機関向けにカスタマイズし、無線 LAN のアカウントをデータベースから読み出すための自前のコードを追加する。

プロファイルを生成するスクリプトは、ウェブサイト上の利用者用ポータルなど、何らかの利用者認証によってアクセス制御されている場所に設置する。これにより、ウェブサイトログイン中の利用者を判別して、その利用者の無線 LAN アカウントをプロファイルに埋め込むようにする。ウェブサイトのログインには、ウェブアクセス用の認証方式を利用することを想定しており、SSO (Single Sign On) や、最近普及してきた FIDO2 [9] などのパスワードレス認証も利用できるだろう。EAP-TTLS では、もちろん内部的に ID・パスワードが利用されるが、これらは利用者の目に触れることはなく、無線 LAN 認証用のトークンとみなすことができる。つまり、この意味で、「無線 LAN の ID・パスワードレス設定」が実現できる。

Passpoint Provisioning Tools は、ほぼそのままの形でフリー Wi-Fi 向けの OpenRoaming (settlement-free model) に利用できるように設計した。対応 OS は、Android 10 以上 (11 以上を推奨)、iOS/iPadOS 14 以上、macOS 10 以上、Windows 10 以上である。

eduroam Provisioning Tools は、ほぼそのままの形

で eduroam に利用できるように設計した。対応 OS は、iOS/iPadOS 14 以上、macOS 10 以上、Windows 10 以上であり、geteduroam で使える.eap-config 形式のプロファイルも生成できるようにした。先に説明したように、PPS MO 形式が Passpoint 専用のため、Android では OS 単体でウェブベースの eduroam 設定ができない。geteduroam などの外部プログラムに頼る必要がある。

図 4, 5, 6 はいずれも、Provisioning Tools で生成したプロファイルを用いて、実際の端末画面をキャプチャしたものである。

ウェブベースの無線 LAN 設定には、他にネットワーク利用手段のない場所では使えないという不利な点がある。しかしながら、現在はネットワークの常時利用が一般化しており、短時間ならば他の接続手段が利用できることもある。最近の学生ならば、キャンパス無線 LAN に接続する前に、自宅のネット回線や携帯電話のテザリングを利用できるのが普通だろう。無線 LAN ローミングが社会に普及するにつれて、オンサイトでの接続設定が必要な機会は減ってくるものと考えられる。

5 むすび

本研究では、最近の主要な OS に組み込まれている、ウェブベースの無線 LAN 設定機能について、技術と対応状況を調査した。また、機関の情報システムに組み込んで Wi-Fi プロファイルを発行できるようにするためのツールキットを開発した。組織のアカウントなどを用いてログイン済みの情報システムから、プロファイルを電子的手段で端末に流し込み、ID・パスワードレスな eduroam/OpenRoaming 設定を実現できる。利用者による入力ミス・設定ミスの可能性を極力排除することで、サービスの利便性と安定性の向上が期待される。

現時点では、OS や利用者端末の仕様や実装にまだ流動的なところが多く、現場で欲しい機能が十分に実装されているわけではない。今後も引き続き、実際のニーズに即した技術仕様の検討を進めて、OS ベンダや無線 LAN 業界に改良を働きかけていく予定である。

本研究の一部は、令和 4 年度国立情報学研究所公募型共同研究の助成を受けた。Passpoint および OpenRoaming に関する調査と開発は、国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 Beyond 5G 国際協働研究型プログラムにより実施した。

参考文献

- [1] eduroam JP: <https://www.eduroam.jp/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [2] WBA OpenRoaming:
<https://wballiance.com/openroaming/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [3] eduroam CAT: <https://cat.eduroam.org/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [4] geteduroam: <https://www.geteduroam.app/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [5] Cityroam: <https://cityroam.jp/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [6] Wi-Fi Alliance, “Passpoint – Wi-Fi ホットスポットネットワークへのシームレスでセキュアな接続を実現.” <https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/passpoint/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [7] Passpoint Provisioning Tools:
<https://github.com/hgot07/PasspointProvisioningTools/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [8] eduroam Provisioning Tools:
<https://github.com/hgot07/eduroamProvisioningTools/>
(2022 年 9 月 30 日参照)
- [9] FIDO Alliance:
<https://fidoalliance.org/>
(2022 年 9 月 30 日参照)

[大学 ICT 推進協議会 2022 年度年次大会論文集より]

学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam における IoT デバイス・周辺機器の接続手法の調査検討

原田 寛之¹⁾, 後藤 英昭²⁾, 漆谷 重雄³⁾

1) 札幌学院大学 情報処理課

2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター

3) 国立情報学研究所

se-harada@e.sgu.ac.jp

Survey and investigation of connection methods for IoT devices and peripherals in eduroam, an academic wireless LAN roaming infrastructure

Hiroyuki Harada¹⁾, Hideaki Goto²⁾, Shigeo Urushidani³⁾

1) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

2) Cyberscience Center, Tohoku University

3) National Institute of Informatics

概要

キャンパス無線 LAN 環境においては、WPA2 Enterprise を使用する方式が多く使われており、認証基盤を相互接続して利用者がキャンパス無線 LAN をローミング利用できる eduroam への加入機関も年々増加の傾向にある。一方、WPA2 Enterprise を利用できないクライアントへの対応のため、WPA2 Personal とキャプティブポータルによる Web 認証を用いた独自 SSID によるキャンパス無線 LAN 環境を並行運用している機関も少なくない。WPA2 Personal によるサービス提供については安全性の懸念点があることに加え、2022 年現在においては利用者の PC やスマートフォンについてはほぼ全てが WPA2 Enterprise に対応していることから、札幌学院大学ではキャンパス無線 LAN を eduroam および市民向けの Cityroam のみの運用とし、WPA2 Personal による独自 SSID の廃止に踏み切った。しかしながら、キャンパス内には IoT デバイスや周辺機器などをキャンパス無線 LAN に接続したいというニーズが一定数存在する。本研究では、このような機器を eduroam にローミング接続されたキャンパス無線 LAN に接続するにあたり、ネットワークポリシーやアカウント管理における課題を明らかにすると共に、クライアント側に必要となる WPA2 Enterprise 実装状況を調査した。また加えて個人所有の機器以外で eduroam に接続されているキャンパス無線 LAN への接続を実現した事例を挙げる。

1 はじめに

学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam[1]は、国内 348 機関（2022 年 8 月現在）、世界 106 か国（地域）が参加する基盤へと成長し、参加機関の構成員は相互にキャンパス無線 LAN を利用可能な仕組みが広く運用されている。クライアントが eduroam に接続する際に用いられるのは WPA2 Enterprise (IEEE 802.1X) である。キャプティブポータル認証（Web 認証）については、国立情報学研究所 eduroam JP サービス技術基準・運用基準[2]において安全性の問題から明示的に禁止されている。eduroam JP が 2006 年にサービス開

始してから 2017 年頃までの間は、利用者が持ち込む一部のメーカーのスマートフォンの独自実装によって、WPA2 Enterprise による無線 LAN 接続設定に特別な手順が必要であるなどの問題があり、キャンパス無線 LAN においても独自 SSID にて WPA2 Personal（事前共有キー）によるキャプティブポータル認証方式を併設している例が見られた。しかしながら 2022 年現在では利用者が持ち込む PC やスマートフォンのうち OS ベンダーによるサポートが継続しているものはほぼ全てが WPA2 Enterprise に標準的な手法で接続できるようになっており、持ち込み端末のためのサービス提供の観点からは独自 SSID による WPA2

Personal の接続サービスは廃止できる状況にある。

一方、キャンパス内には WPA2 Enterprise に対応していない IoT デバイスや周辺機器などで、キャンパス無線 LAN に接続したいというニーズが存在する。これらは、大学が全体のサービス提供のために設置するものと、利用者が自己の利用のために持ち込むものに分けられるが、キャンパス無線 LAN の安全性の確保の面からは、WPA2 Personal やキャプティブポータルといった安全性に問題があるサービス提供を永続的に続けていくことは避けるべきである。

本稿では、第 2 章で実際に WPA2 Personal による独自 SSID の廃止に踏み切った札幌学院大学のキャンパス無線 LAN の構成と運用について述べる。第 3 章では、キャンパス内の IoT デバイスや周辺機器のキャンパス無線 LAN 接続にあたり検討すべき課題を明らかにし、実際の各機器の WPA2 Enterprise 対応状況や、個人所有の機器以外で eduroam に接続されているキャンパス無線 LAN への接続を実現した事例について述べる。第 4 章は本稿のまとめである。

2 札幌学院大学のキャンパス無線 LAN の構成と運用

2.1 札幌学院大学におけるキャンパス無線 LAN の構成

札幌学院大学では 2011 年にキャンパス内に導入学部の違いなどから複数存在していた無線 LAN を統合すると共に、利用可能エリアをキャンパス内全域に拡張し、学生及び教職員がキャンパス内でどこでも無線 LAN 接続にできる環境を整備した。更に 2012 年に eduroam に参加し、本学構成員のみならず eduroam アカウントを持つ学外者がキャンパス無線 LAN の全てのアクセスポイントを利用できる環境を整備した。また本学では図書館やホール、産学連携拠点といった設備を市民が利用することが想定されており、キャンパ

ス無線 LAN の市民への開放に対応するため、セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会 [3] が 2017 年に次世代ホットスポット (NGH) 基盤として整備した Cityroam [4] に 2018 年より接続し、市民へのキャンパス無線 LAN 開放を行っている。

2021 年度までは WPA2 Enterprise に対応していないデバイスの接続のため、接続方式を WPA2 Personal としキャプティブポータル認証や MAC アドレスの事前登録を経て利用できる独自の SSID と、WPA2 Enterprise による独自の SSID も併用してサービス提供してきた。しかし、利用者の持込クライアントについてはほぼ WPA2 Enterprise に対応した状況にあることに加え、インターネット上の Web サイトの常時 SSL 化が進み利用者が接続時にトラブルを抱えやすくなったこと、WPA2 Personal では偽基地局の判別が行なえず安全性に問題があるといった懸念点を排除するため、従来の独自 SSID の廃止に踏み切った。現在、運用中のキャンパス無線 LAN 環境は eduroam/Cityroam のみとなっている。

2.2 独自 SSID の廃止に至る経緯

無線 LAN 環境においては、アクセスポイントが SSID ごとに一定時間毎にビーコンを送信している。クライアントはプローブリクエストを周辺に向け一斉に送信し、これを受けたアクセスポイントは SSID ごとにプローブレスポンスをクライアントに応答している。このような仕組みにより、キャンパス内で多数の SSID を運用している環境下においては、ビーコンやプローブのような管理制御用の通信でチャンネルが占有されてしまう。これは、利用できるチャンネル数が少ない 2.4GHz 帯の無線 LAN 環境において顕著である。このような観点から、大学キャンパスのように限られた空間に多数のアクセスポイントを高密度で設置する場合、発信する SSID はなるべく少なくすることが望ましい。本学キャンパスにおいては、各アクセスポイントが eduroam/Cityroam の SSID に加え、独自の SSID 2 つの計 4 つの SSID を送出し

ている状況であった。2021年4月に新たに開設した本学新札幌キャンパスにおいては、6階建ての建屋1つに無線 LAN コントローラで管理されるアクセスポイントを205基設置しており、パソコンやプロンプによるチャンネルの占有を抑えることが利用者のキャンパス無線 LAN へのつながりやすさに寄与すると考えられた。

また本学の構成員は、本学キャンパスでは独自の SSID に接続し、他機関訪問時にのみ eduroam に接続する利用形態を取るものが多かったが、他機関訪問時に初めて eduroam への接続トラブル (ID やパスワードの誤りなど) に気づくケースがあり、他機関での無線 LAN のスムーズな利用の面で課題があった。これは、自機関においても eduroam を常用することで未然に抑制することが可能であるため、本学キャンパス内で本学構成員が利用するキャンパス無線 LAN を eduroam とする方針とした。

この実現のためには、eduroam を利用する学外者用のネットワークと、本学構成員が利用するネットワークを分離する必要がある。具体的には、学内限定公開しているサーバ等へのアクセス制限の必要性の他に、図書館で契約している電子ジャーナルは契約の関係上ゲスト利用が許可されていないためである。このため、キャンパス無線 LAN において認証 VLAN の仕組みを構築し、自機関のレムによる認証は学内者向け VLAN に、自機関以外のレムによる認証はゲスト用 VLAN にクライアントを収容する構成とした。ゲスト用 VLAN の上流には、国立情報学研究所が提供している eduroam アクセスネットワーク収容サービスを利用することで、ゲストがインターネットにアクセスする際の接続元 IP アドレスについても学内者のものとは別になっている (図 1)。

また、自キャンパス内の eduroam においては、本学が発行したアカウントについてはレムを付与して設定するよう案内していたものの、実際にはレム無しでの認証も可能としていた。利用者にとっての接続トラブルを減らすことを目的とし

ていたが、レム無しでの設定では他機関訪問時には接続できない問題があった。これについては学内に周知広報したうえで、RADIUS Proxy 側でレム無しでの認証要求については拒絶するよう設定を変更した。

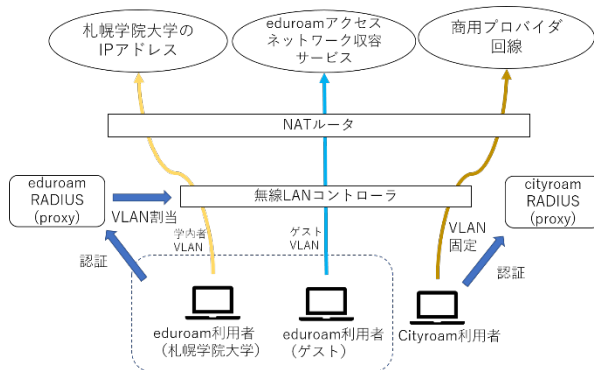


図 1 札幌学院大学におけるキャンパス無線 LAN の VLAN とアクセスネットワーク。

このような経緯を経て 2022 年度に独自 SSID を廃止し、本学の構成員が本学キャンパスで利用するキャンパス無線 LAN は eduroam に統一した。

これにより、本学構成員は学内・他機関訪問時を問わず常時 eduroam を使用することとなり、学会等で他機関を訪れた際に eduroam が利用できなかったとの相談（多くは当日に解決できず事後に相談に来られる状況であった）は減少した。また学生の留学先など本学のスタッフのサポートが受けられない環境においても、本学が発行した eduroam アカウントの利用が増加している（外部から本学への認証要求件数による）。

2.3 独自 SSID の廃止で生じた課題

独自 SSID においては、利用者の持込クライアントだけではなく、プロジェクター等の周辺機器など、WPA2 Enterprise に対応していない機器が一部収容されていた。独自 SSID の廃止に伴い、現状これらの機器については学内 LAN から切断し、それぞれの機器に対してアドホックでクライアントが接続して利用する方式としている。しかしながら例えばプロジェクターにおいては、クライアントから投影しながら学内 LAN に接続したいといったニーズには対応することができない。この解決

のためには、プロジェクター等の周辺機器を eduroam によるキャンパス無線 LAN に收容することが必要となる。このような機器の接続にあたってどのような点に留意すべきか、現状を調査して整理し実現可能性を検討することとした。

3 eduroam へのキャンパス内 IoT デバイスや周辺機器の接続

3.1 前提条件と検討すべき課題

IoT デバイスや周辺機器が eduroam に接続するためには、まず機器側が WPA2 Enterprise による接続をサポートしている必要がある。機器自身がこれをサポートしていない場合は、何らかの中継装置を用いて eduroam と機器を相互接続することも考えられるが、この場合は当該機器の利用にあたりどのようなネットワークにおける接続性（リーチャビリティ）が必要なのかも合わせて検討する必要がある。例えば、測定値をクラウドに送信するセンサーのような IoT デバイスは単にインターネットへのアクセスがあればよいが、プロジェクターやプリンターのように利用者の持込クライアントと双方向に通信して動作するものは、当該機器が学内 LAN 側から検出できることや、学内 LAN 上の他のクライアントとの相互通信が必要となる。札幌学院大学においては、キャンパス無線 LAN クライアント間の通信については無線 LAN コントローラ側で遮断するクライアントアイソレーションの構成にて運用しているため、このような機器の運用についてはネットワークのポリシーに手を加える必要がある。

また、IoT デバイスや周辺機器は不特定多数がキャンパス施設内に無人で設置されることがあるため、機器の盗難や設定情報へのアクセスにより認証情報が漏洩することは避けなくてはならない。設定情報へのアクセスは管理者パスワード等で防止できる機器もあるが、平文で EAP-TTLS の認証情報を格納するような機器については注意しなければならない。

さらに、eduroam JP サービス運用基準におい

ては、eduroam IdP におけるアカウント管理として“全てのアカウントは、当該の機関が管理する有効な利用者情報に基づかなければならない”と規定されている。このため、IoT デバイスや周辺機器などを大学側がキャンパス無線 LAN に接続するにあたっては、接続に用いるアカウントは eduroam アカウントではなく、あくまで自機関のキャンパス無線 LAN に WPA2 Enterprise で接続するためのアカウントとして発行する必要がある。本学においては、仮に当該機器が他機関に持ち出されたとしても他機関のキャンパス無線 LAN を eduroam クライアントとして利用することがないよう、認証情報のレム等自機関でのみ有効なものとしている。

3.2 2022 年現在の周辺機器等のサポート状況

そこでまず、キャンパス内で主に利用されているネットワーク接続が必要な周辺機器を洗い出し、その WPA2 Enterprise による無線 LAN 接続のサポート状況を確認することとした。

3.2.1 プロジェクター（セットトップボックス）

キャンパス内に設置されているプロジェクターの一部には、セットトップボックス（STB）と呼ばれる持込クライアントからの入力映像や、各種ストリーミングサービス等の受信映像をプロジェクターに投影できるものがある。代表的な STB としては、Apple の Apple TV、Google の Chromecast、Amazon の Amazon Fire TV、また汎用的な機器として内田洋行の Wivia [5] がよく利用されている。Apple TV は管理者がプロファイルを適用することで WPA2 Enterprise による無線 LAN に接続可能である。一方、Chromecast や Amazon Fire TV は WPA2 Enterprise に対応していない。Wivia についても従来対応していなかったが、最新の Wivia R+（2021 年 12 月～）については標準で WPA2 Enterprise (PEAP/MSCHAPV2 または EAP-TTLS/MSCHAPv2) に対応している。但し、キャンパス無線 LAN 上で PC 等と Wivia が相

互通信することとなるため、無線 LAN クライアント間の通信を遮断するポリシーで運用している場合は注意が必要となる。Wivia については有線 LAN も搭載されているため、本学では有線 LAN で学内 LAN に接続することを原則としている。

3.2.2 プリンター

キャンパス内には、利用者が共同で利用できるプリンターが設置されており、現状は全て有線 LAN による。しかしながら教員からはまれに研究室内での無線 LAN によるプリンター接続について相談があることから、合わせて調査した。2022 年 8 月の大学生協カタログに掲載されているプリンターメーカーは、ブラザー、エプソン、NEC、OKI、キャノン、リコーであった。各社共に WPA2 Enterprise による無線 LAN 接続に対応している機種が販売されている。ただし安価な機種においては WPA2 Enterprise 非対応のものが多いため注意が必要である。また、プロジェクターと同様に無線 LAN クライアント間の通信となるため、現在の本学のネットワークポリシーでは利用に問題が生じる。

3.2.3 サイネージ

キャンパス内には、複数個所に従来の掲示板を置き換える目的でサイネージが設置されている。学内 LAN とは接続されておらずローカルで運用されているものがあるが、一部はコンテンツ配信サーバがクラウド上にあり、コンテンツ更新のためにインターネットへのアクセスが必要である。本学で運用中のサイネージについては、全て制御部に Windows が使用されており、WPA2 Enterprise によるキャンパス無線 LAN への接続は容易である。但し、EAP-TLS による接続については、設置個所によっては証明書の定期的な更新作業の負荷に注意する必要がある。また、コンテンツの更新のために学内 LAN 上の他のクライアントと相互通信が必要な場合は、ネットワークポリシーにより利用できないため、

サイネージ導入担当部署と事前にコンテンツ更新方法について調整しておくことが重要となる。

3.2.4 サーマルカメラ・防犯カメラ

コロナ禍の対策の 1 つとして、キャンパス建屋の入館時に検温を行うサーマルカメラが設置されている。本学ではスリーアールソリューションの 3R-TMC03 を採用しているが、利用者への検温と音声による注意喚起のみの運用で設置している。当該機器は有線/無線のネットワークインターフェースを搭載していない。また、導入時に他に提案があった機器として HIKVISION の製品があるが、こちらは有線 LAN インターフェースを有している。サーマルカメラにおいて無線 LAN 接続が必要なものは確認できなかった。

キャンパス各所に設置している防犯カメラについては、学内 LAN に接続せずローカルで運用しているものと、学内 LAN に接続しレコーダー等に映像送信しているものがある。いずれも設置にあたっては施設に工事を伴って設置することがほとんどであり、今後もあまり無線 LAN への接続のニーズは本学ではないと考えられる。

一方で、研究室等では小型の Wi-Fi 接続できるカメラを研究等の目的で設置することがある。アトムテックの ATOM Cam 2 は非常に安価でありよく利用されているが、実装されている無線 LAN への接続方式は WPA2 Personal に留まっている。

3.2.5 施設設備管理系

キャンパス内の空調機器等、施設設備管理装置等の一部には、ネットワーク接続により集中管理を行っているものがある。本学においては学内 LAN に専用の VLAN を設定し、全て有線 LAN での接続を行っているため、無線 LAN 接続の要望はいまのところない。また機械室等はキャンパス無線 LAN のエリア外であることが多く、そのような点からも有線 LAN での接続が多いものと考えられる。

また一部の部屋の入退室・施錠解錠に IC カードリーダーを使用している。これは現状、キ

キャンパス内に物理的に独立した LAN を構築しており、キャンパス LAN とは接続されていない。

3.2.6 その他の IoT デバイス

本学では設置事例がないが、IoT 機器においては内部に Wi-Fi を内蔵するマイクロコントローラがよく利用されている。特に、ESP32 チップ[6]は低コスト、低消費電力であり、これを搭載する ESP32 モジュールは多く利用されている。これを利用して小山高専学内無線 LAN の WPA2 Enterprise への接続が可能な IoT デバイスの試作が行われている[7]。認証情報は Arduino IDE のスケッチファイルに平文で記述する実装[8]を元に行っているため、EEPROM の吸い出しによる認証情報の漏洩等に注意する必要がある。

また ESP32 においては、WPA2 Personal であればスマートフォンからアプリ経由で設定が行える ESP-TOUCH プロトコル[9]と SDK が提供されている。この仕組みを利用するなどして、将来的には ESP32 を利用する組み込み機器のようなヘッドレスデバイスにおいても、WPA2 Enterprise による接続時のアカウントの登録や確実な失効を行う手法の開発に繋がられる可能性がある。

3.3 個人所有の機器以外で、eduroam への接続を実現した例

2021 年度に開設した新札幌キャンパスでは、学生が学生証を用いて無人の貸出ロッカー（図 2）より自動で貸出を受けられるノート PC を 80 台配置した。貸出 PC は貸出ロッカーへの格納中に充電とディスクイメージ配信サーバからのイメージ受信・復元を兼ねて USB Type-C ケーブルで有線 LAN により学内 LAN に接続されている。学生により貸出手続きが行われると貸出ロッカーの 1 つが自動で開錠され利用可能な状態となり、貸出 PC は USB Type-C ケーブルの抜き以降は全てキャンパス無線 LAN に接続された状態で動作する。



図 2 PC 自動貸出ロッカー

貸出 PC は全て学内の Active Directory にコンピュータとして登録されており、学生は貸出 PC 起動後に自分の Active Directory アカウントにてログインして利用を開始する。この際、AD アカウントでの認証にはネットワーク接続が必要であることから、貸出 PC はログイン前の時点でキャンパス無線 LAN に接続されている必要がある。これは、Active Directory のグループポリシーにおいて、ユーザーログオン前にコンピュータの認証としてワイヤレスネットワーク接続を行うよう設定することで実現している（図 3）。当該ポリシーにより、ユーザーがログインする際に AD アカウントによるキャンパス無線 LAN への認証が再度行われる。

コンピュータの構成/ポリシー/Windowsの設定 セキュリティの設定/ワイヤレスネットワーク IEEE 802.1 ポリシー	
ネットワーク名 (SSID)	eduroam
このネットワークが接続範囲内に入ると自動的に接続する	有効
セキュリティメソッド	WPA2-エンタープライズ・AES-CCMP
ネットワークの認証方法	Microsoft: 保護されたEAP (PEAP)
認証モード	ユーザまたはコンピュータの認証
シングルサインオン	このネットワークに対するシングルサインオンを有効にする（ユーザーログオンの直前に実行する）

図 3 貸出 PC に適用したグループポリシー

この一連の動作において WPA2 Enterprise の PEAP 認証に用いられるユーザー名は下記の通りとなる。

1) 起動直後 (コンピュータの認証)

host/コンピュータの FQDN 名

2) ユーザーのログイン時 (ユーザの認証)

AD ドメイン名¥ユーザー名

キャンパス内の無線 LAN アクセスポイントからの認証要求を処理する RADIUS Proxy においては、通常想定されている eduroam アカウント以外の上記の認証要求についても、自機関の上位サーバに転送するようルールを記述している。具体的には、FreeRADIUS で構築した RADIUS Proxy の sites-available/default において、Stripped-User-Name が上記 1) または 2) に合致する場合は自機関の上位サーバに転送するようにしている。

いずれも、eduroam JP ではルーティングされないレムであり、また Active Directory は学外からは直接参照できないため、本学キャンパス内での利用に限定される、という仕組みを実現している。

4 まとめ

本稿では、札幌学院大学における WPA2 Enterprise による eduroam/Cityroam でのキャンパス無線 LAN 統合と WPA2 Personal による独自 SSID の廃止により生じた IoT デバイス・周辺機器のキャンパス無線 LAN への接続における課題について調査した。また、通常の個人の持込端末と異なり、不特定多数の学生が貸出利用する貸出 PC においても、利用者を紐づけてキャンパス無線 LAN 配下で運用できることを示した。今後、さらに無人で運用される人が介在しない機器の接続についても検討を進めていきたい。本研究の一部は、令和 4 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

- [1] eduroam JP: <https://www.eduroam.jp/> (2022 年 9 月 28 日参照)
- [2] 国立情報学研究所, “国立情報学研究所 eduroam JP サービス技術基準・運用基準.” : <https://www.eduroam.jp/document/81/> (2022 年 10 月 11 日参照)
- [3] セキュア公衆無線 LAN ローミング研究会 (NGHSIG) : <https://nghsig.jp/> (2022 年 9 月 28 日参照)
- [4] Cityroam: <https://cityroam.jp/> (2022 年 9 月 28 日参照)
- [5] 株式会社内田洋行, ワイヤレス画面転送装置 Wivia[ワイビア] : <https://www.uchida.co.jp/wivia/> (2022 年 9 月 28 日参照)
- [6] Espressif Systems, ESP32.: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp32/> (2022 年 10 月 11 日参照)
- [7] 加藤康弘, “ESP32 モジュールの開発環境構築と IoT 機器の試作.”, 第 24 回高専シンポジウム 講演要旨集 PI-33: https://www.oyama-ct.ac.jp/24sympo_bk/contents/24sympo-youshi.html (2022 年 10 月 11 日参照)
- [8] JeroenBeemster/ESP32-WPA2-Enterprise: <https://github.com/JeroenBeemster/ESP32-WPA2-enterprise/> (2022 年 10 月 11 日参照)
- [9] Espressif Systems, ESP-Touch Overview: <https://www.espressif.com/en/products/software/esp-touch/overview/> (2022 年 10 月 16 日参照)

[報 告]

第 34 回高性能シミュレーションに関するワークショップ(WSSP)を開催しました

スーパーコンピューティング研究部 滝沢寛之

東北大学サイバーサイエンスセンターは、ドイツのシュトゥットガルト大学高性能計算センター(HLRS)、学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点(JHPCN)、HPCI コンソーシアムおよび NEC のご協力を得て、2022 年 10 月 24 日(月)～25 日(火)に高性能計算に関する国際ワークショップ「第 34 回 Workshop on Sustained Simulation Performance (WSSP)」を開催しました。本ワークショップは、国際的に活躍している計算科学の研究者及びスーパーコンピュータ設計者を招いて、高性能・高効率大規模科学計算に関する最新の研究成果の情報交換を行うとともに、今後のスーパーコンピュータの研究開発のあり方を議論することを目的としています。

第 34 回 WSSP では技術講演として全部で 22 件の発表があり、日本、ドイツ、サウジアラビアの研究者により、HPC 技術動向、HPC システム評価、アプリケーション開発の幅広い分野のトピックの講演がありました。151 名もの参加登録があり、すべてのセッションで多くの方々にご参加いただきました。

海外からは、HLRS センター長の Michael Resch 氏によるドイツにおける HPC 技術開発と将来展望に関する講演、ドイツ気候計算センター(DKRZ)センター長の Thomas Ludwig 氏による同センター新 HPC システムに関する講演、キング・アブドゥッラー科学技術大学(KAUST)の Hatem Ltaief 氏による行列ベクトル積実装と様々なシステム上での性能評価に関する講演などがありました。

日本からは、神戸大学/理学研究所の坪倉誠氏、京都大学の深沢圭一郎氏、東京大学の加藤千幸氏、大阪大学の伊達進氏、核融合科学研究所の沼波政倫氏、神戸大学の横川三津夫氏に加えて、多数の NEC の技術者が講演を行いました。さらに、主催である東北大学サイバーサイエンスセンターからも、スーパーコンピュータ AOBA の将来展望など合計 3 件の講演を行いました。

今回の WSSP は、新型コロナウイルス感染対策のために聴講者はオンライン参加のみに限定し、講演者と関係者のみが仙台会場で現地参加するというハイブリッド形式での開催となりました。新型コロナ流行後、海外の講演者も含めて仙台会場に集まるのは 2019 年 3 月の第 29 回 WSSP 以来、3 年半ぶりです。今冬も新型コロナ流行の波が来るのは避けられそうにありませんが、次回は以前のように聴講者も含めて現地参加できることを願っています。

第 34 回 WSSP に関するその他の詳細は、以下のページをご覧ください。

<https://www.sc.cc.tohoku.ac.jp/wssp34/ja/index.html>



[報 告]

シュトゥットガルト大学高性能計算センターとの研究協定を締結しました

東北大学サイバーサイエンスセンターとドイツシュトゥットガルト大学高性能計算センター（Hochleistungsrechenzentrum Stuttgart, HLRS）（以下「HLRS」という。）は、これまでの高性能計算に関する協力関係をより一層強化発展させるために、連携・協力に関する協定を締結しました。HLRS と当センターは、高性能計算に関するワークショップ(Workshop on Sustained Simulation Performance, WSSP)を年 2 回のペースで開くなど、最新の研究成果に関する情報交換や連携を継続的に続けてきました。また、これまでに研究者の受入など、相互の人材交流も行ってきました。

本協定の締結に基づいてこれまでの取り組みを今後も継続し、さらには新しい連携の可能性も模索して、連携関係をさらに発展させていきます。

協定締結期間：2023 年 4 月 1 日～2028 年 3 月 31 日



（写真左から）

サイバーサイエンスセンター 滝沢副センター長

シュトゥットガルト大学高性能計算センター（HLRS）レッシュセンター長

サイバーサイエンスセンター 小林センター長特別補佐

HLRS のご紹介

シュトゥットガルト大学高性能計算センター（Hochleistungsrechenzentrum Stuttgart, HLRS）は、ドイツ初の国立高性能計算センターとして 1996 年に設立されました。ヨーロッパ有数の大規模高性能計算システムを運用し、ドイツ国内のみならずヨーロッパ全体の様々な科学技術計算分野を支えています。

[HLRS ウェブサイト](#)

[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/>

AOBA-A, AOBA-C 向けマニュアル「プログラム開発・実行環境利用手順書」の修正について

AOBA-A および AOBA-C での MPI プログラムを実行するジョブスクリプトの記述方法について、マニュアルの修正を行いました。記述を見直すことでプログラムの実行性能が改善するなどの効果が得られる場合があります。

修正点：mpirun のコマンドオプションに `-venode` を指定する（必須）

修正前コマンドイメージ： `mpirun -np32 ./a.out`

修正後コマンドイメージ： `mpirun -venode -np32 ./a.out`

[AOBA-Aプログラム開発・実行環境利用手順書](#) [ダウンロード](#)

(共同利用支援係)

計算機利用負担金の請求について

2022 年度の計算機利用負担金の請求（請求書の送付または学内振替請求）も、10 月上旬（4～9 月利用分）と 4 月上旬（10～3 月利用分）の年 2 回となります。4 月上旬の利用負担金請求は、次のように実施いたします。

1. 通常の請求【連絡の必要なし】

2022 年 10 月から 2023 年 3 月末までの利用実績に基づき、4 月上旬に請求を行います。（4～9 月利用額が 5,000 円未満であった場合は、4 月上旬の請求に加算します。）

2. 4 月上旬より前に請求が必要な場合【連絡の必要あり】

請求書到着期日の 10 日前までに利用金額を確定し、請求を行います。

共同利用支援係 (cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp) まで早めに、請求書の到着期日をお知らせください。請求金額確定日以降の利用分は、4 月上旬に請求を行います。現在の利用負担金については、[利用者ポータル](#)で確認ができます。（課金システムの日次処理により、表示される請求予定額と実際の請求金額が異なることがあります。）

ログインページ → PJ 課金明細 「今期請求予定額」

(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。

— 用紙サイズ・文字サイズ等の目安 —

- ・ サイズ : A4
- ・ 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 情報部情報基盤課共同利用支援係

e-mail cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp

TEL 022-795-3406

スタッフ便り

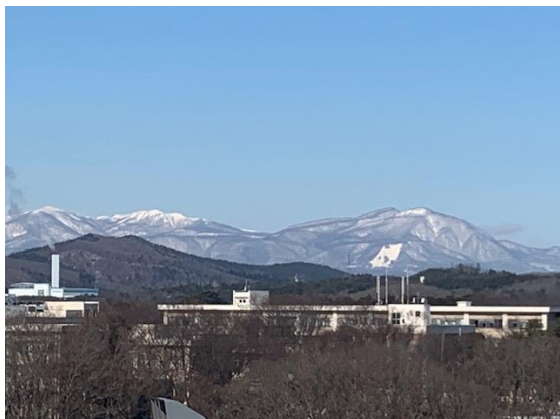
研究室を片平から青葉山に移して、1 年が経過しました。1 サイクル、それぞれのシーズンを過ごしてみ、改めて青葉山の自然の美しさを再認識しています。

周りがそもそも青葉山の大自然に囲まれているので(笑)、それほど目立たないためか、あまり言及する人がいませんが、実は本センターは、植栽がとても充実しています。見えるところでも、春紅葉、躑躅、椿、銀杏、レッドロビン、ハナミズキ、ソメイヨシノ、などなど。裏庭もあって、そちらにも何種類か植わっています。今年は、とある理由により夏の終わりに強剪定を実施したため、残念ながら銀杏の紅葉は見られませんでした。それぞれの季節でこれらの木々の成長や変化が楽しめます。周囲の新しい建物ではなかなかこれほどの充実ぶりはなく、このエリアでは本センターが異彩を放っていると言っても過言ではないでしょう。昔ながらの国立大学のセンターっぽさを残しています。

また、センター本館の入口から入ると、玄関の真ん中に、職員がメンテナンスしてくれている生け花が置かれていて、来訪者の心を和ませてくれています。私自身も毎日、外の植栽や、この生け花を眺めて、日々、心穏やかにセンター業務に取り掛かれています。

そんな、自然を愛する(?)、昔ながらの当センターですが、中身については日々成長・変化を続けています。昨年 1 月の改組で 2 研究部が新設され、10 月には新研究部に外部から新教授を迎え入れるなど、組織に新しい風が吹き込んでいます。また、センターの中核であるスパコンは、今年 8 月に大幅増強が予定されていて、それに向けた作業が進行中。さらに、キャンパスネットワーク TAINS も、SINET 接続が強化されるとともに、学内のコアネットワークも今年更新を行って、高速化される予定です。これらの基盤整備によって、センター利用者の皆様には、これまで以上に充実したサービスを提供することが可能となると思いますので、ぜひご活用いただければと思います。(菅沼)

令和もあっという間に 5 年。3 年振りに行動制限のないお正月でしたが、皆様どう過ごされたでしょうか。私は元旦に近場の神社に初詣に行ったのですが、駐車場への待機車列から始まり、いつもそれほど混んでいない境内にも参拝者の列、おみくじの代金箱から溢れている小銭、と驚きの光景を目の当たりにしました。「こんなに人が多いのは初めてみた」と並んでいる方々も驚いていました。ちなみに、おみくじは末吉で「物事は時間が解決してくれるのを待ちましょう」とのことでした…。そして仙台と言えば初売りですが、今年は人出も大分戻ってきたようで、某百貨店では 1 月 2 日の開店前には 5,000 人の列が出来ていたそうです(それでもコロナ前の 6 割というから驚きですが)。With コロナ時代、引き続き感染対策には気を付けつつ過ごしていきたいと思います。本年もよろしくお願いいたします。(K.N)



SENAC 編集部会

滝沢寛之 水木敬明 後藤英昭 高橋慧智
今野義則 早坂和勝 大泉健治 小野 敏
斉藤くみ子

令和 5 年 1 月発行
編集・発行 東北大学
サイバーサイエンスセンター
仙台市青葉区荒巻字青葉 6-3
郵便番号 980-8578
PDF 作成 株式会社 東誠社

スーパーコンピュータ A0BA システム一覧

計算機システム	機 種
サブシステム A0BA-A	SX-Aurora TSUBASA
サブシステム A0BA-B	LX 406Rz-2
クラウドサービス A0BA-C	SX-Aurora TSUBASA

サーバとホスト名

ログインサーバ	login.cc.tohoku.ac.jp
データ転送サーバ	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 A0BA-A	連 続 運 転
サブシステム A0BA-B	連 続 運 転
クラウドサービス A0BA-C	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

サブシステム A0BA-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 (VH を共用する)	1 時間/1 時間	48GB×VE 数
共有	sx	1	1VE (VH を共用する)	72 時間/720 時間	
		2～256	8VE 単位で確保 (VH を共用しない)		
	sxmix	2～8	1VE 単位で確保 (VH を共用する)		
占有	個別設定				

※ 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 A0BA-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	256GB×ノード数
占有	個別設定			

※ 2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

クラウドサービス A0BA-C 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
共有	sxc	1	1VE (VH を共用する)	72 時間/720 時間	48GB×VE 数
		2～512	8VE 単位で確保 (VH を共用しない)		
占有	個別設定				

※ 2VE以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

目次

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 Vol.56 No.1 2023—1

[巻頭言]

6G時代における高速コンピューティングの役割 加藤 寧 1

[共同研究成果]

長期（2001-2020年）日本域を対象とした

領域大気再解析の再現性検証 福井 真・曾我 大輝・小原 涼太 3
臼井 健・瀧口 海人・小野 佳祐
廣瀬 大河・松島 沙苗・白川 栄一
伊藤 純至・岩崎 俊樹・山崎 剛
斉藤 和雄・瀬古 弘

熱分解反応シミュレーションにおける

温度の変動 松川 嘉也・松下 洋介・青木 秀之 6

近傍界領域におけるリフレクトアレーの設計法 今野 佳祐・陳 強 13

複数領域FDTD法を用いた

大規模モデル電磁界散乱特性の解析 有馬 卓司・宇野 亨 19

リカレント型ビット演算による多様な縦渦挙動の創発

— 縦渦挙動を支配する本質的なパラメータは何か？ 松岡 浩 24

[大学ICT推進協議会 2022年度年次大会論文集より]

クラウドサービスAOBA-Cの紹介 大泉 健治・森谷 友映・佐々木大輔 37
齋藤 敦子・山下 毅・小野 敏
滝沢 寛之

Wi-Fiプロファイルを用いたeduroam/OpenRoamingの

パスワードレス設定 後藤 英昭・原田 寛之・漆谷 重雄 42

学術無線 LAN ローミング基盤eduroamにおける

IoTデバイス・周辺機器の接続手法の調査検討..... 原田 寛之・後藤 英昭・漆谷 重雄 48

[報告]

第34回高性能シミュレーションに関する

ワークショップ(WSSP)を開催しました 滝沢 寛之 55

シュトゥットガルト大学高性能計算センターとの研究協定を締結しました 57

[スーパーコンピュータAOBAのお知らせより]

AOBA-A, AOBA-C向けマニュアル「プログラム開発・実行環境利用手順書」の
修正について 58

計算機利用負担金の請求について 58

執筆要項 59

スタッフ便り 60