



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.59 No.1 2026-1



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デジタルサービス支援課が担当しています。>

<https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/>

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)	計算機利用全般に関する相談	8:30～17:15
		相談員不在時 022-795-3406 (3406)	大判プリンタ、利用者端末等の利用	9:00～21:00
	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)*	*見学希望の方はスーパーコンピューティングサポートユニット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-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
	スーパーコンピューティングサポートユニット	022-795-3406 (3406) cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp	利用手続き、利用相談、講習会、ライブラリ、見学、アプリケーションに関すること	8:30～17:15
		022-795-6252 (6252) cc-sys@grp.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに関すること	8:30～17:15
	デジタルプラットフォームユニット	022-795-6253 (6253) i-network@grp.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30～17:15
四階	研究開発部	022-795-6095 (6095)		
五階	端末機室	(3445)	PC 端末機(X 端末)	

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

本誌の名称「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]

『普通の人のためのスーパーコンピュータセンターを目指して』

から 10 年を経て

情報科学研究科 教授 小林 広明

10 年前、私はセンター長として、この巻頭言に「普通の人のためのスーパーコンピュータセンターを目指して」という題を掲げ、サイバーサイエンスセンターが進むべき方向性、すなわち三つの柱とその準備状況について述べました。その後、センター長を退任すると同時にセンターを離れ、外からその活動に加わる立場となりました。そして本年 3 月、定年を迎えることとなります。こうした節目にあたり、あらためてこれまでの歩みを振り返ってみたいと思います。

まず一つ目の柱は、『京』および『ポスト京（すなわち富岳）』を補完する世界最先端の高性能計算基盤の整備・運用」です。東北大学と NEC との共同研究の成果を数多く取り入れて開発・製品化された SX-Aurora TSUBASA を 2020 年に導入し、さらに 2023 年には第 3 世代への更新によってシステムを強化しました。その結果、計算性能 21 PFlop/s、メモリ容量 504 TB、メモリ帯域幅 10 PB/s という、世界最大規模のベクトル型スーパーコンピュータの整備・運用を実現するに至っています。

私たちは長年、「アプリケーションの実効性能は、ベクトル計算能力に見合ったメモリ性能から引き出される」という考えのもと、コアあたりの高いベクトル性能と、それに釣り合ったメモリ性能を重視したシステム設計に取り組んできました。近年、各所でメモリ重視のシステム設計が声高に語られるようになり、振り返ってみると、この考え方は間違っていなかったのだと、少し安堵する思いがあります。

もちろん、優れた性能のスーパーコンピュータを用意すれば良いというものではありません。HPC の利用の裾野を広げるためには、特殊なアーキテクチャに特化した特別なチューニング技術に常に頼ることなく、普通のユーザでも標準的なプログラミングでシステムの性能をある程度引き出せることはもちろんのこと、利用者プログラムのさらなる大規模化・高速化に対しては、センターの技術系職員が中心となりベンダの技術者と協力して丁寧な利用者支援も必要不可欠です。実際、そこで得られた知見は、例えば、長年に渡って定期的に高速化支援報告書としてとりまとめて関係コミュニティへ還元するとともに、次のシステムの基本設計へと生かしてまいりました。

二つ目の柱は、「高性能計算に関する研究機能の強化と、実践的かつ学際的な人材の育成」です。2014年には、HPC分野における産学連携研究拠点として、サイバーサイエンスセンター内に「高性能計算技術開発（NEC）共同研究部門」を設置しました。センター内外の教員や技術系職員、NECの技術者・研究者が日常的に議論を交わしながら、学内外の研究者と計算機科学・計算科学に関する共同研究を進めてきました。

その成果は、リアルタイム津波被害推計システムの社会実装をはじめ、ソフトマテリアル研究センターの設立への貢献、グリーンクロステック研究センターとの連携によって実現したソフトマテリアル設計・開発デジタルツインの構築など、さまざまな形で結実しています。また、次世代高性能計算基盤のあり方を模索する中で、従来のHPCに量子技術を融合し、シミュレーションとデータ科学・AIを統合して量子技術で加速する「量子ソリューション拠点」の形成にも関わってきました。各プロジェクトに学生や若手研究者を参画させることで、幅広い分野を横断できる人材育成にも、ささやかながら貢献できたのではないかと考えています。

三つ目の柱は、「HPCを通じた産業および社会への貢献」です。長年支援に携わってきた国産近距離航空機MRJ（後のスペースジェット）は、残念ながら米国での形式認証を得ることができず、商用機として空を飛ぶことはありませんでした。個人的には、せめて国内路線、例えば仙台ー成田間だけでも飛ぶ姿を見てみたかった、という思いが今も残っています。

一方で、リアルタイム津波浸水推計システムは、国の支援のもと、現在では日本沿岸全域を対象に24時間365日稼働し、我が国の安全・安心を支える基盤の一つとなっています。2024年1月の能登半島地震や、2025年末から続く青森県東方沖地震においても、地震発生直後にサイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータが稼働し、津波推計情報を政府に提供することで、防災対応に役立てられました。

さらに、こうした取り組みを一段と高度化するため、SIP第3期事業として「津波災害デジタルツイン」の研究開発にも参画しています。そこでは、より高精度な情報をより迅速に届けることを目指すと同時に、「量子ソリューション拠点」の活動の一環として、量子技術を活用した最適避難経路の導出や、救援物資の最適分配といった新たな技術にも挑戦しています。

ここまで振り返ってみると、「普通の人のためのスーパーコンピュータセンターを目指して」という当初の問いに対し、「HPCに関わる人のためのスーパーコンピュータセンター」という意味では、一定の成果を上げてきたのではないかと感じます。しかし一方で、「HPCに必

ずしも馴染みのない普通の人」にまで利用の裾野を広げるという点では、まだ道半ばであることも事実です。

近年の AI 技術の急速な進展と応用分野の広がり、HPC と直接関係のなかった多くの研究者や技術者にも、高性能計算基盤へのアクセスを求めています。生成 AI がプログラムを書く時代を迎えつつある今、プログラムのチューニングはユーザ側ではなく、システム側が担うべきものになっていくのかもしれませんが、また、誰もが使える AI 環境を実現するには、AI コミュニティに認められたデファクトスタンダードな OSS (Open Source Software) を基盤とした統一的な利用環境、ハードウェアを意識せずに利用できる仮想環境が重要になるでしょう。

そうした世界では、ユーザは統一的なインタフェースを通じてサービスを受け、個々のセンターがそれぞれ独自にハードウェアを保有する必然性は薄れていく可能性があります。電力事業における発電とサービスの分離になぞらえれば、スーパーコンピュータの整備・運用と、その上で提供されるサービスも分離され、例えば、将来的には東西に配置されたナショナルフラグシップ級センターが高性能計算基盤の整備・運用を担い、地域の情報基盤センターは HPC・AI の利用支援や応用支援に特化していく、そんな将来像も思い描かれます。

そのような変化に備えるためには、サービスに特化した専門人材の育成が欠かせません。もちろん、人間が取得可能な技術や知識には限界がありますので、常にアップデートされた AI を活用して個々の能力を無限に広げることも可能になるかもしれません。教員が片手間でシステム整備や利用支援を行う旧石器時代から、HPC に限らずあらゆるレベルの幅広い分野のユーザに対して利用支援・応用支援を AI-Accelerated/Enhanced なスペシャリスト集団として対応する新世代センターを再設計することがそろそろ必要ではないか——そんなことを、正月の少しほろ酔い気分の中で、初夢のように考えているところです。

[共同研究成果]

宇宙初期における位相欠陥の格子シミュレーション

— ドメインウォールによる原始ブラックホール形成 —

北嶋 直弥

東北大学 学際科学フロンティア研究所

— 概要 —

本稿は筆者が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 AOBa を用いて行なった研究[1]のレビューである。本研究では、「宇宙創生の謎の解明」という自然科学における究極の目的に迫るため、素粒子物理学の理論モデルから予言される初期宇宙進化のシナリオに焦点を当てる。特に、宇宙初期における自発的対称性の破れに伴い形成される「位相欠陥」という特異な構造に着目し、その進化の過程について、スーパーコンピュータ AOBa による大規模シミュレーションを用いて解析する。特に、「ドメインウォール」という構造に焦点を当て、その崩壊過程におけるブラックホール形成に着目し、初期宇宙の理論モデルが観測により検証可能かどうかを議論する。

宇宙創生の謎と物質の起源を解明することは自然科学における究極の目的に挙げられる。特に、我々の宇宙は「**暗黒物質**」と呼ばれる正体不明の物質で満たされていることが観測によって明らかにされており、その正体を解き明かすことは、初期宇宙の進化の歴史を紐解き、素粒子物理学の究極理論を完成させるために必要不可欠である。

この謎の解明に繋がりうる素粒子物理学の理論モデルや、それに基づく初期宇宙進化の理論モデルがこれまで多く提案されてきたが、正しい理論モデルの選別には、実験や観測による検証が不可欠である。加速器実験に代表される素粒子実験による直接的検証は有力な手段であるが、地上実験では到達が難しい、極めて高いエネルギースケールでの理論モデルの検証においては、初期宇宙における進化の痕跡を精密宇宙観測によって捉える間接的検証が有効である。

特に、初期宇宙の進化の過程で形成される**原始ブラックホール**は、その質量・残存量などに形成時の情報が刻まれていることから、初期宇宙観測の有力なターゲットとなりうる。また、原始ブラックホール自体が暗黒物質の一つの候補となっている。故に、理論モデルに基づく初期宇宙進化の過程で、原始ブラックホールがどのようにして形成されるかを定量的に算出することが求められる。

本稿で紹介する研究[1]では、初期宇宙において原始ブラックホールを形成しうる理論モデルとして、**ドメインウォール**と呼ばれる特異な構造が形成されるシナリオに着目した(図1)。ドメインウォールは、その進化の過程で高強度の重力波を放出することが指摘されており、重力波観測の主要なターゲットにもなっている[2]。

初期宇宙におけるドメインウォールの進化は一般に非線形かつ非平衡過程であるため、そのダイナミクスの解析には数値シミュレーションが必要不可欠である。さらに本研究ではブラックホール形成を議論するため、局所的な時空の歪みの効果、すなわち一般相対論的な効果を取り入れることが不可欠である。そこで、本研究では、対象とする空間を離散格子に分割し、各々の格子点上で物質場、及び時空の幾何学量の時間発展を解く方法、すなわち**数値相対論的手法**を採用す

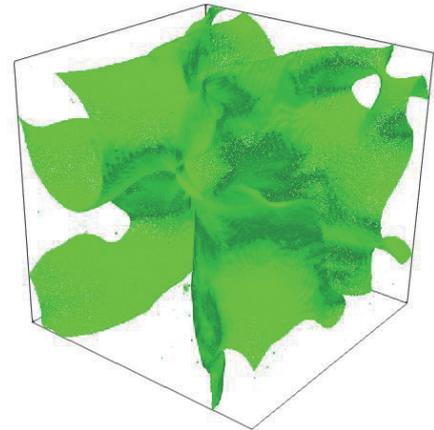


図1 ドメインウォールのネットワーク

る。

さらに、ブラックホール近傍は重力が極めて強くなっており、非常に高いエネルギーの局在が生じるため、そこでは高い分解能を必要とする。よって、本研究では各格子点における重力場の強さや物質場のエネルギー密度に依存して、格子間隔を細かく刻む**適合格子細分化法 (Adaptive Mesh Refinement 法、AMR 法)**を採用する (例えば[3]参照)。本研究では、格子点数 16^3 のブロックを基本単位とし、最大 9 レベルのメッシュ細分化を行った。各物理量の時間発展については 4 次の Runge-Kutta 法を採用し、空間微分は 4 次精度の差分法で近似した。メモリ容量に関する要請からシミュレーションには 256-512 の Vector Engine (VE) を用いた。以下、具体的な研究内容を記す。

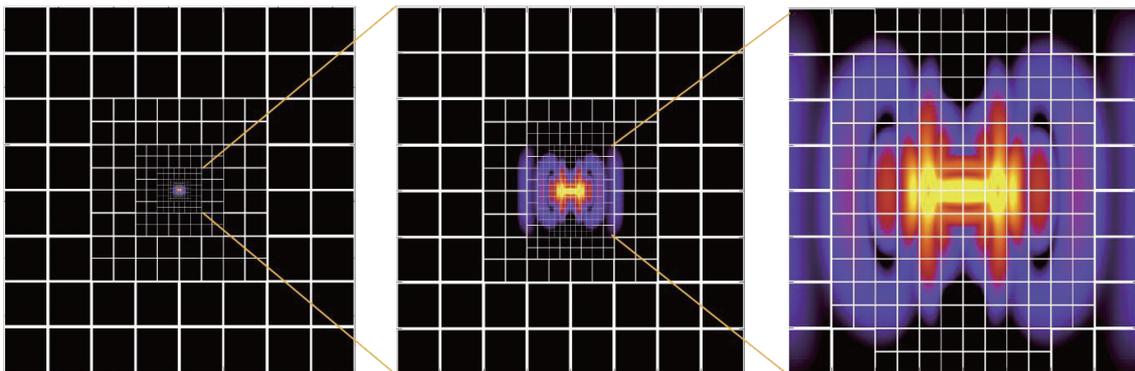


図 2 適合格子細分化法におけるメッシュ階層構造

1. ドメインウォールの崩壊によるブラックホール形成

ドメインウォールは、離散的対称性の破れに伴う面状の位相欠陥である (前頁図 1)。特に暗黒物質の候補である「アクシオン」の理論モデルなどから、宇宙初期におけるドメインウォール形成は自然に予言される。ドメインウォールのネットワークが宇宙初期に一旦形成されると、宇宙における地平線スケールの領域に 1 枚程度の (無限に長い) ウォールが常に存在するように発展する (スケーリング則)。しかし、稀に空間的に閉じた構造を持つドメインウォールが形成される。このようなウォールは自身の表面張力により収縮し、最終的に崩壊する。この閉じたウォールが初期値として十分大きなエネルギーを持ち、球対称に近い状況が実現されると、崩壊の最終段階でブラックホールが形成される。このようなシナリオはこれまで解析的、数値的に議論されてきたが、理論を明確に裏付ける数値解析や、球対称からの逸脱がある場合のシミュレーションは詳細に行われていなかった。本研究では、非球対称崩壊の場合も含めて、理論的、あるいは平坦時空中におけるシミュレーションによって示されたブラックホール形成条件を曲がった時空中におけるシミュレーションによって検証した。

1.1 方法

本研究はドメインウォール形成を実現する素粒子の理論モデルとして実スカラー場の Z_2 対称モデルに焦点を当てる。スカラー場の時間発展を記述する Klein-Gordon 方程式に加え、時空の幾何学量の発展を支配する Einstein 方程式を同時に解く数値相対論的手法を採用し、AMR 法におけるメッシュ細分化の基準はスカラー場のエネルギー密度および空間的超曲面上における計量の conformal factor に選ぶ。conformal factor および lapse function が極端に小さくなる場所でブラックホール形成が起こると推測し、ブラックホール形成の有無は Apparent horizon finder という手法で確認する。このような計算を、球対称に閉じたドメインウォールにおいて、様々なドメインウォール張力および初期半径で行い、これらのパラメータに対しブラックホール形成条件を明らかにする。また、非球対称の初期条件での計算も行い、球対称からずれた場合でもブラックホール形成が実現されるかどうかを明らかにする。

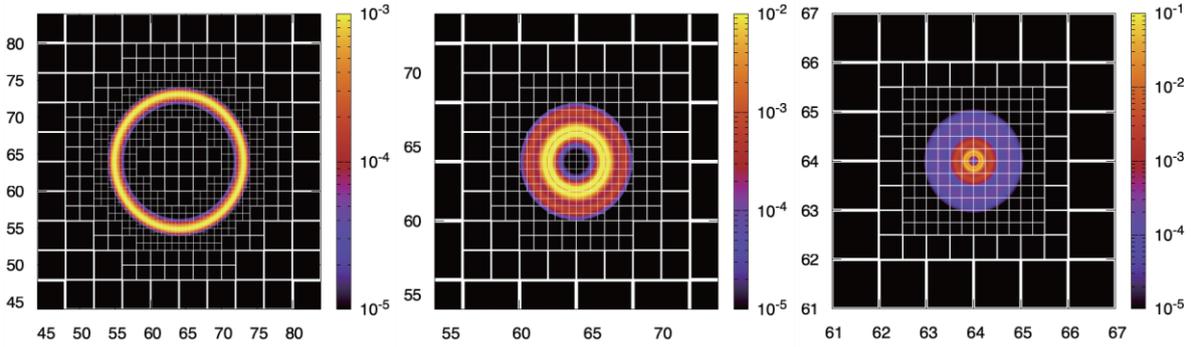


図3 球対称ドメインウォール崩壊（左から右へ時間発展）

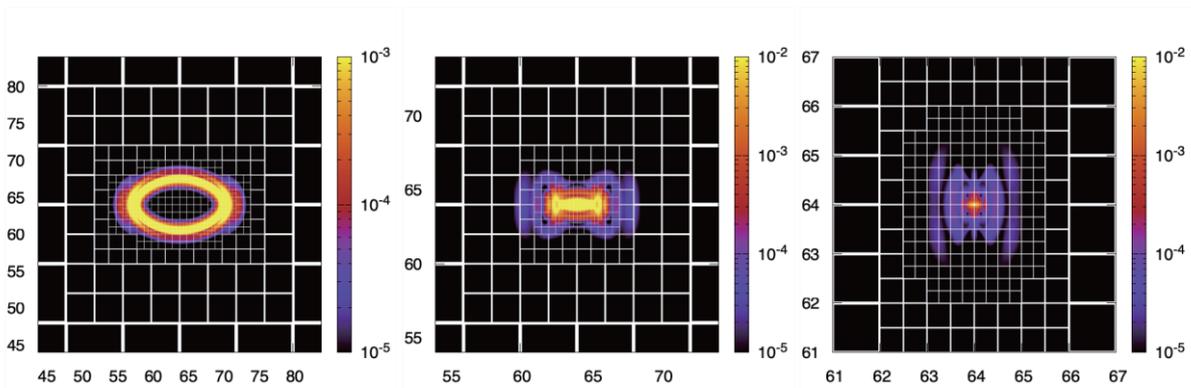


図4 非球対称ドメインウォール崩壊（左から右へ時間発展）

1.2 結果

球対称ドメインウォール崩壊に関する数値計算の結果として得られたスナップショット（3次元空間における2次元断面）を図3に示す（[1]より抜粋）。最終時刻（右図）において、中心にブラックホールが形成されていることが Apparent horizon finder から確認されている。さらに、非球対称の初期条件から始めたシミュレーションの結果を図4に示す（[1]より抜粋）。図のように極端に球対称からずれている場合でもブラックホールが形成されることを明らかにした。

図5は様々な理論のパラメータ（縦軸：ドメインウォール張力、横軸：ドメインウォール初期半径）で計算した結果としてのブラックホール形成の有無（青丸：形成、マゼンタ星印：非形成）を示す（[1]より抜粋）。図の赤線は先行研究における解析的議論[4]から導かれた曲線である。本研究における詳細な数値解析により、解析的に導出されたブラックホール形成条件を検証することに成功した。また、初期エネルギーの80%以上がブラックホールの質量に転換されることを明らかにした。

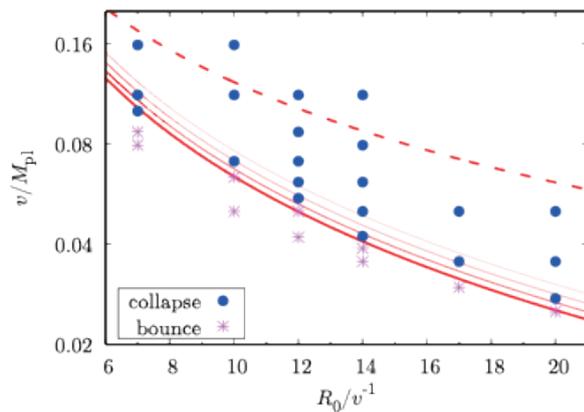


図5 ブラックホール形成の有無。青丸は形成、マゼンタ星印は非形成、赤線は理論予言

2. まとめと展望

本研究では、数値相対論の手法を用いて、宇宙初期に形成されるドメインウォールと呼ばれる構造がブラックホールに崩壊することを明らかにした。特に、閉じたドメインウォールを想定し、球対称および非球対称な初期条件でシミュレーションを行い、様々なパラメータでブラックホール形成の有無を調べた。結果として、先行研究で解析的に示された理論予言を検証することに成功し、ブラックホール形成条件を明らかにした。さらに、非球対称な初期条件におけるドメインウォールの場合もブラックホールが形成されることも明らかにした。

本研究では、簡単のため、物質場としてドメインウォールを構成するスカラー場のみでとした。これはあまり現実的ではなく、実際は宇宙膨張を支配する輻射あるいは物質（ダスト）が背景に存在している。よって、より現実的なセットアップでシミュレーションを行うためには、スカラー場と輻射（あるいは物質）流体の2成分を考える必要がある。このような現実的なセットアップで計算することで、原始ブラックホール残存量の詳細な算出が可能となる。今後は、より現実的なセットアップで閉じたドメインウォールの形成確率と、ドメインウォール崩壊によって形成される原始ブラックホールの質量・スピンを正確に計算し、自発的対称性の破れの結果としてドメインウォール形成を伴う初期宇宙シナリオが原始ブラックホール探索により検証されるかを明らかにする。また、本研究では、個々の閉じたウォールにのみ着目していたが、図1が示すようなドメインウォールのネットワークからブラックホールが形成される可能性を追求することも重要である。この場合、計算量がかなり増えるが、AOBAの性能を最大限引き出すようなチューニングを行うことで可能になると考えている。

さらに本研究では位相欠陥としてドメインウォールのみを考えたが、宇宙ひもの崩壊によるブラックホール形成も非常に興味深いテーマである。宇宙ひものはドメインウォールのような宇宙論的問題を引き起こすことなく宇宙に安定に存在できる位相欠陥である。宇宙ひものループは絶えずネットワークから生成されていて重力波を放射することが示されている。宇宙ひものは重力波観測の主なターゲットとなっていることから、数値相対論を駆使して、宇宙ひものループの崩壊によるブラックホール形成や重力波生成を解析することは非常に重要であると考えている。数値相対論を用いて初期宇宙をシミュレートする研究はまだ発展途上であり、開拓の余地がかなり多く残されている。ここで紹介した研究を足掛かりにして、今後もAOBAを用いて継続的に成果を出したいと考えている。

謝辞

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

参考文献

- [1] N. Kitajima, “PBH formation from collapsing domain wall”, arXiv:2510.22759
- [2] N. Kitajima, J. Lee, K. Murai, F. Takahashi, W. Yin, “Gravitational waves from domain wall collapse, and application to nanohertz signals with QCD-coupled axions”, Phys. Lett. B 851, 138586 (2023)
- [3] J. M. Stone, K. Tomida, C. J. White, K. G. Felker. “The Athena++ Adaptive Mesh Refinement Framework: Design and Magnetohydrodynamic Solvers”, The Astrophysical Journal Supplement Series, 249, 1, 4 (2020)
- [4] D. I. Dunskey, M. Kongsore, “Primordial black holes from axion domain wall collapse”, JHEP 06 (2024) 198

[共同研究成果]

重力によって生じる気液界面挙動のビット演算による簡易解析の検討**—— 気液界面の挙動解析はどこまで簡易なモデル化が可能か？**

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6年度から「リカレント型ビット演算による流体・構造体統一解析手法の開発」を実施している。

これは、テシャラ(Dr. Teixeira)による“格子ガス法(面心超立方体格子モデル)[1]”をベースにして「ビット演算」により、“流体と構造体の間に相互作用(FSI)が存在する場合のマルチスケールな流体解析”を高効率に実現しようとする試みである。「ビット演算」には、“高効率な並列計算”と“計算誤差の蓄積がない安定な時間発展乱流計算”を同時に実現できるという優れた特徴がある。

流体と構造体の間の相互作用で一番簡単な例は、流体中に“固定された変形しない構造体”が存在する場合である。通常は、「格子ガス法において流体を構成する多数の“仮想粒子”が、構造体の表面では“逆進(バウンスバック)”するという衝突散乱モデル」が用いられる。これによって、小さな時空間で仮想粒子の動きを平均(疎視化)すると、通常の数値流体力学(CFD)でいう“粘着条件”を実現できる。

このような場合の解析事例のひとつとして、筆者は、以前「流体の流れに対して直交するように四角柱を配置し、四角柱の幅の100倍以上遠方下流領域までの後流の挙動計算」を実施した。その結果、先行研究の実験等で観察される“カルマン渦列の崩壊と再配列”を再現できた[2]。定性的な比較ではあったが、本手法の“仮想的な機構論的モデル”、すなわち、「格子点上を動く仮想粒子の①衝突散乱⇒②力学操作(同期連行)⇒③並進移動 の繰り返し」という一連の“仮想的な物理機構”によって時間発展する仮想粒子群の状態を疎視化することによって、いろいろなレイノルズ数条件に対応したマルチスケールな乱流挙動の特徴を再現できる可能性を確認できた。

令和6年度に開始した現在の研究テーマ「リカレント型ビット演算による流体・構造体統一解析手法の開発」は3年計画を想定しており、最終目標は、構造体が移動したり変形したりする場合のFSIについて、“仮想粒子による物理的な機構論的モデル”を構築することである。しかし、本稿は、その途中経過の研究報告であり、今回は「“重力によって分離された気液2相流”と“固定された変形しない構造体”のFSIに関する基本的な試計算」をもとに、極力簡易な方法でその特徴を再現できるか否かを検討したので、これを報告する。イメージとしては、“海底に固定され海上まで鉛直上向きに突き出た剛体円柱構造物”と“海流”の相互作用によって生じる海面挙動の模擬ということになる。

1. 「重力によって生じる気液2相流」を簡易解析の対象として選定した理由

格子ガス法で2相流を解析する場合、通常は、それぞれの相に対応して2種類の仮想粒子を想定する。しばしば、それらは“色”という特性をもつと仮定して、例えば、“赤色粒子”と“青色粒子”というラベルを個々の仮想粒子に付けて区別する。次に「同じ色の仮想粒子間には引力が作用して互いに引き合い、異なる色の仮想粒子間には斥力が作用して互いに反発する」と仮定して、各粒子の“衝突散乱”と“並進移動”の繰り返しを計算する。この時間発展計算が進む過程で、“赤色粒子”と“青色粒子”は混在しながら自己組織化的にある空間分布が生成されていく。そして、この空間分布の時間的変化から、2つの相が接する“界面”の位置の変化を評価して、

2相界面の挙動解析を行うことができる。

今回の研究では、2相界面の特徴的な挙動を“極力簡易な方法”で再現する可能性を検討した。このため、仮想粒子の種類を2種類ではなく、1種類に限定してみる。すなわち、「2相」と言っても、異なる種類の仮想粒子が生成する2相ではなく、1種類の仮想粒子が生成する2相を扱うことにした。イメージとしては、“水”と“水蒸気”の気液2相になる。ただし、今回の簡易解析では、粒子間の“引力”も模擬しない簡易なモデルで試算を行った。従って、“蒸発”や“凝縮”の模擬を目的にはしない。ただし、粒子間の“斥力”については、ゼロでない同じ速度をもつ“仮想粒子”は、同一の格子点に2個以上存在できないモデルであるため、この効果に基づく“斥力”は発現されることになる。また、1種類の“仮想粒子”では、2相の識別に“色”を使うことができない。ここでは、“粒子数密度”の大小によって、気相と液相を区別できそうな事例を考える。

以上のような考察から、単一種類の仮想粒子を用いて、粒子数密度の差によって2相が生成される例として、「重力によって生じる気液2相流」の簡易解析を検討することとした。

2. 今回採用した格子ガス法の実速度モデル（4次元面心超立方体格子3速さ50速度モデル）

今回採用した格子ガス法モデルは、「4次元面心超立方体格子3速さ50速度モデル」である。

まず、4次元空間(x, y, z, r)を考え、その中に各辺が座標軸に平行な4次元直方体形状の直交格子を設定する。

仮想粒子は、4次元格子点の間を飛び移って移動していくが、1時刻ステップで移動できる変位ベクトルは、仮想粒子がもつ4次元速度によって異なり、表1に示す変位が可能であると考えられる。

マクロな流体運動の物理量は、4次元空間を3次元空間に投影して得られる3次元空間を多数のセルに分割し、そのセル内に存在する仮想粒子がもつ質量、運動量、運動エネルギーを合計して得ることができる。

表1の数値は、格子点間の最短距離、仮想粒子の質量、時間発展計算を行う時刻ステップの時間幅をすべて「1」にした

表1. 今回採用したFCHC50速度モデルの仮想粒子速度

エネルギー1をもつ仮想粒子の速度		エネルギー2をもつ仮想粒子の速度		エネルギー0をもつ仮想粒子の速度	
ID	($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta r$)	ID	($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta r$)	ID	($\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta r$)
1	(0,0,-1,-1)	25	(-1,-1,-1,-1)	49	(0,0,0,0)
2	(0,0,-1,+1)	26	(-1,-1,-1,+1)	50	(0,0,0,0)
3	(0,-1,0,-1)	27	(-1,-1,+1,-1)	【注】テシヤラの論文において、3速さモデルの場合は、エネルギー0の仮想粒子数を6個にする54速度モデルが推定されている。今回の試算では、極力簡易なモデルを追求する観点からエネルギー0の仮想粒子数を2個とした50速度モデルを採用した。	
4	(0,-1,0,+1)	28	(-1,-1,+1,+1)		
5	(0,-1,-1,0)	29	(-1,+1,-1,-1)		
6	(0,-1,+1,0)	30	(-1,+1,-1,+1)		
7	(-1,0,0,-1)	31	(-1,+1,+1,-1)		
8	(-1,0,0,+1)	32	(-1,+1,+1,+1)		
9	(-1,0,-1,0)	33	(+1,-1,-1,-1)		
10	(-1,0,+1,0)	34	(+1,-1,-1,+1)		
11	(-1,-1,0,0)	35	(+1,-1,+1,-1)		
12	(-1,+1,0,0)	36	(+1,-1,+1,+1)		
13	(+1,-1,0,0)	37	(+1,+1,-1,-1)		
14	(+1,+1,0,0)	38	(+1,+1,-1,+1)		
15	(+1,0,-1,0)	39	(+1,+1,+1,-1)		
16	(+1,0,+1,0)	40	(+1,+1,+1,+1)		
17	(+1,0,0,-1)	41	(+2,0,0,0)		
18	(+1,0,0,+1)	42	(0,+2,0,0)		
19	(0,+1,-1,0)	43	(0,0,+2,0)		
20	(0,+1,+1,0)	44	(0,0,0,+2)		
21	(0,+1,0,-1)	45	(-2,0,0,0)		
22	(0,+1,0,+1)	46	(0,-2,0,0)		
23	(0,0,+1,-1)	47	(0,0,-2,0)		
24	(0,0,+1,+1)	48	(0,0,0,-2)		

場合の数値である。このモデルの場合、仮想粒子がもつエネルギー(運動エネルギー)は、0, 1, 2の3種類に限定される。実際、ID1 から ID24 までの速度をもつ仮想粒子の運動エネルギーは、 $(\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta r)$ の各成分の2乗の和に(1/2)と質量(=1)を乗じて、運動エネルギーが「1」と求まる。また同様に、ID25 から ID48 までの速度をもつ仮想粒子の運動エネルギーは「2」になる。ID49 と ID50 の速度をもつ仮想粒子は静止しており、運動エネルギーは「0」である。

3. 今回の簡易解析の趣旨と採用した格子点体系

今回の簡易解析では、直方体の箱の中に閉じ込められた多数の仮想粒子を想定し、これに“重力”を作用させる。重力の働く向きを+Yとすれば、仮想粒子は+Y向きに押しやられて直方体の箱の中の底面に衝突する。しかし、各格子点には、最大でも表1に示した50種類の速度をもつ仮想粒子を1個ずつしか収容できない。従って、すべての仮想粒子が箱の底面に密着して集結することはない。他方、箱の底面に衝突した仮想粒子は、箱の底面が「固定された変形しない構造体」であるため、底面上で仮想粒子の“逆進(バウンスバック)”が生じる。このため、仮想粒子は、-Y向きの運動量を得るので、上昇を開始し、重力によって+Y向きの下降成分速度をもつ仮想粒子とある確率で衝突散乱することになる。この状況は、ある時間経過の後に平衡状態に達すると考えられる。このときに生じた仮想粒子の密度分布を観察し、密度の高い領域を「液相」、密度の低い領域を「気相」とみなして、両者の間に生成する界面位置を評価する。

次に、この安定した“気液2相”に対して+X 向きの水平外力を加え、直方体の箱内部の右壁に衝突させる。そして、その後の“気液界面”の挙動を観察する。さらに、直方体の箱の中央部に「鉛直方向を向く固定された変形しない円柱」を設置した場合について、同様の観察を行う。

以上の計算を行う際の格子点体系を図1に示す。3次元空間に投影された格子点数は、 $1024 \times 256 \times 256 = \text{約 } 6710 \text{ 万個}$ であり、128時刻ステップごとに $8 \times 8 \times 8$ 個の格子点からなる立方体のセル内で仮想粒子の数を合計し、粒子数密度の数値分布を“スナップショット”として出力する。

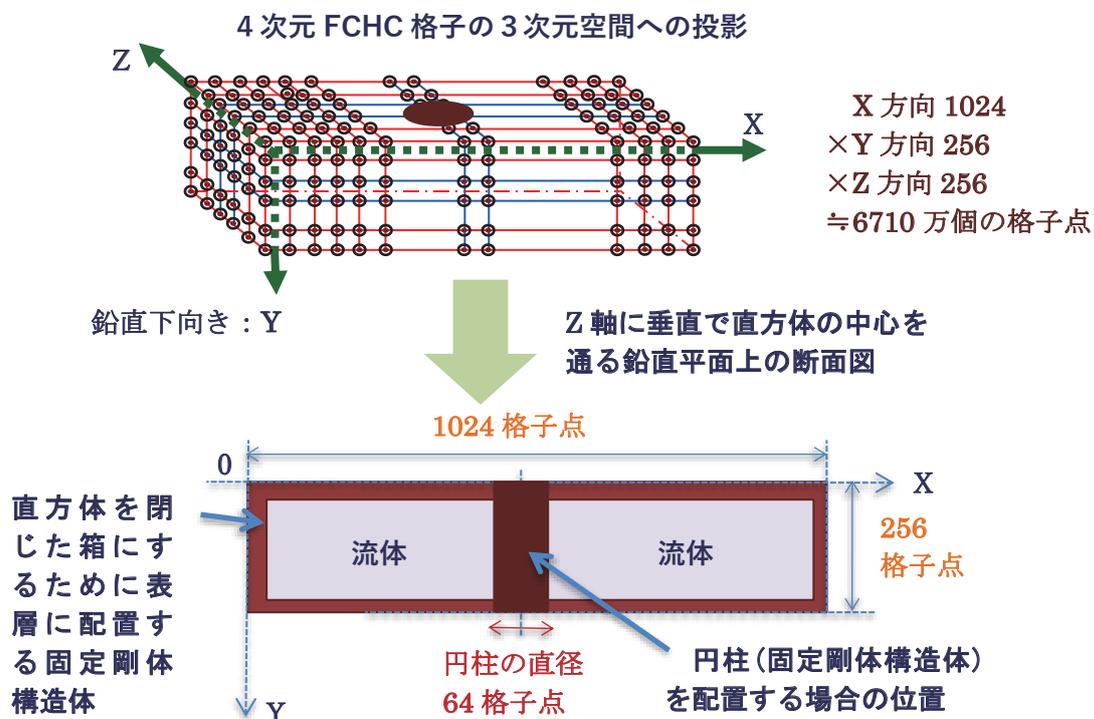


図1. 直方体の箱内部における気液界面の挙動解析を行うための格子点体系

4. 今回の簡易解析における計算手順と仮想粒子に対する3つの力学操作の導入

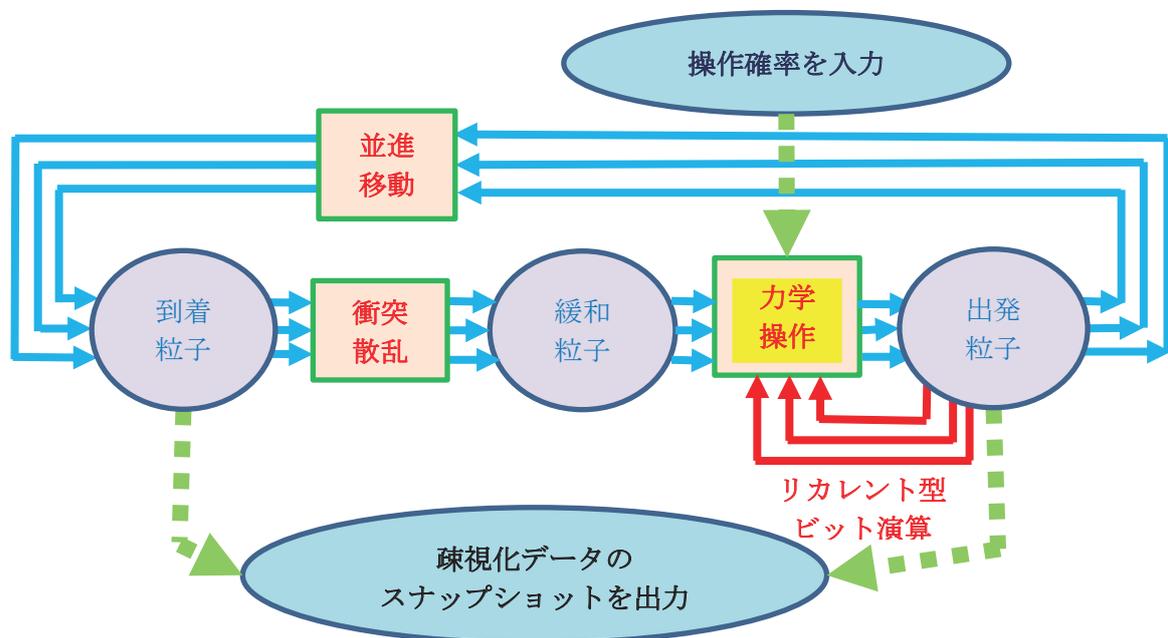
一般的な格子ガス法における計算過程では、いろいろな向きから格子点に到着した“仮想粒子”が、他の向きからその格子点に飛来した“仮想粒子”やその格子点に静止していた“仮想粒子”と衝突して散乱する。「衝突散乱」の前後で、粒子数と運動量と運動エネルギーの保存則が満たされる限り様々な散乱が確率的に生じうる。

一般に、衝突散乱直後の仮想粒子群がもつ速度分布は、衝突直前の到着粒子の速度分布に比べて異方性が緩和された分布になっている。実際、到着粒子がある特定の1方向(向かい合う2つの向き)からのみ飛来するような場合でも、正面衝突を起こした散乱直後の仮想粒子ペアがもつ速度は、特定の1方向に限らず様々な方向に互いに逆向きで分布可能である。すなわち、仮想粒子がもつ速度分布の異方性が緩和されることになる。

これらの「緩和粒子」は、もっとも簡単な格子ガス法モデルの場合、そのまま格子点から出発させて「出発粒子」と一致する。しかし、今回の簡易解析では、「緩和粒子」が「出発粒子」になる過程の間に、“仮想粒子”に対して次の3つの“力学速操作”(連行操作、逆進操作、加速操作)を行う過程を追加することにする。

“連行操作”は模擬する流体の粘性を低く維持し、大きなRe数条件で模擬することを可能にする。具体的には、今回の衝突散乱後の出発粒子が前回の出発粒子と同じ向きに出発する確率を増やす操作を行う。“逆進操作”は、「流体」と「固定された変形しない構造体」の間の相互作用において“粘着条件”を実現する。“加速操作”は、流体粒子の運動量を意図的に直接変化させることで、任意の向きへの加速を生じさせる“体積力”を実現する。

以上の“力学操作”を組み込んだ今回の格子ガス法の計算手順を図2に示す。



【力学操作】

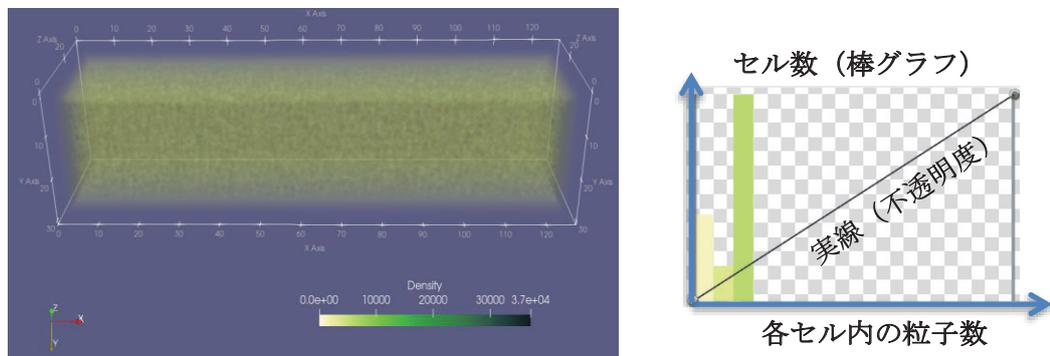
- ①連行操作：流体粘性を低下させるために行う同じ向きへの粒子の連続出発確率の増加操作
- ②逆進操作：固定剛体構造体の表面で流体粒子をバウンスバックさせる粒子速度の反転操作
- ③加速操作：重力や人為的なある向きへの力を模擬するため行う粒子速度の強制的変更操作

図2. “力学操作”の過程を組み込んだ今回の格子ガス法の計算手順

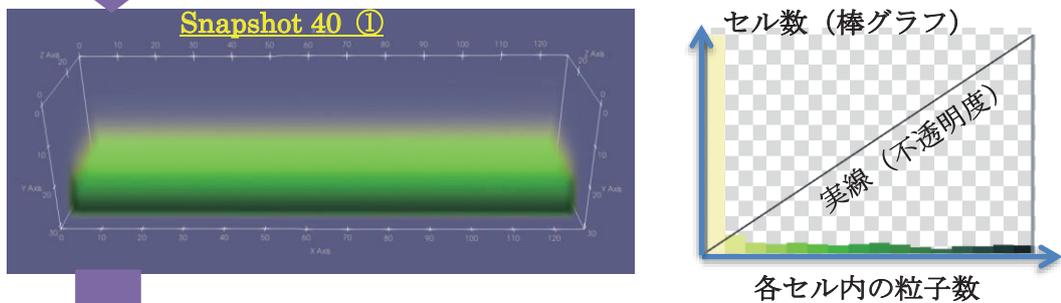
5. 重力によって気液界面を生成させる試計算と ParaView による可視化

直方体形状の箱の中に仮想粒子を満ちし重力を作用させて気液界面を生成する計算を行った。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速度分布で配置した。この結果、疎視化して得られるマクロナ運動量は平均でゼロであり、流体は、直方体形状の箱の中で静止している。図 3 のスナップショット 0 の画像において、直方体の上下左右前後の透明な部分は、箱の壁の厚みの部分に対応している。そこには仮想粒子が存在しないため透明になっている。次に、スナップショット 1 の時点から 39 の時点までの間、+Y 向き (鉛直下向き) に仮想粒子を加速する。その結果、仮想粒子の数密度が高い領域が下層に、数密度が低い領域が上層にできる。

Snapshot 0: 直方体の閉じた箱内部のすべての格子点にランダムな向きの速度をもつ仮想粒子を密度 20% で配置



Snapshot 1~39: “重力”を模擬して鉛直下向きに“加速操作”を行うと、Snapshot 40 よりかなり以前に気相液相の平衡状態に到達



Snapshot 40 ②: 粒子数密度が低い領域を気相とみなし透明にして気液界面を直視

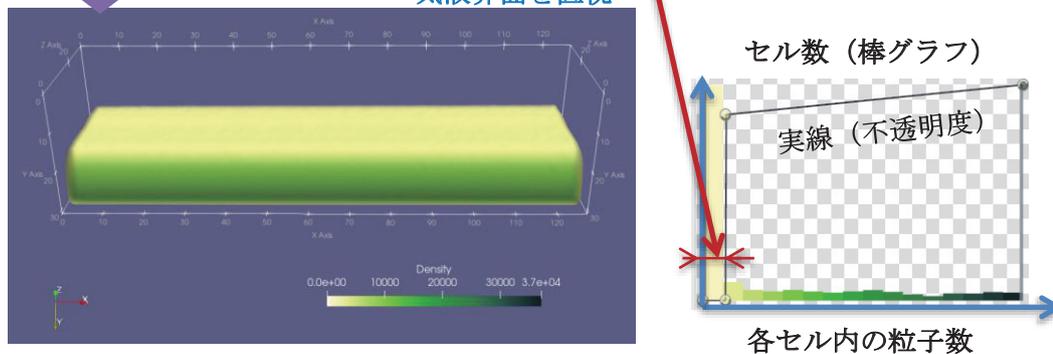


図 3. 重力によって生じた気液界面の可視化方法 (ParaView)

このとき、数密度が高い領域を“液相”、低い部分を“気相”と解釈すれば、両者の間に“気液界面”が生成することになる。図3の下2つの画像は、どちらもスナップショット40における仮想粒子の各セルにおける数密度分布を表しているが、可視化の方法が異なっている。前述のとおり、3次元空間に投影された直方体体系は $1024 \times 256 \times 256$ 個の格子点からなり、これを $8 \times 8 \times 8$ 個の格子点からなる“セル”で疎視化しているため、セルの数は、合計131072個である。図3の右側のグラフでは、ひとつのセル内に収容される仮想粒子の数を16個のビンに分割して横軸に示す。グラフ中の「棒グラフ」は「セル内の粒子数が該当する範囲にあるセルの数」を表す。また、グラフ中の「実線」は、セル内に収容されている粒子数に応じて、そのセルの空間位置を「不透明度を変えた緑色」で着色して画像表示するときの“不透明度”を示している。

図3において、スナップショット0からスナップショット40への棒グラフの変化を見ると、スナップショット40における「数密度が小さい位置で棒グラフの高度が高い部分」が「気相」の領域に対応し、「棒グラフの高度が低く数密度が高い側に平坦に分布している部分」が「液相」の領域に対応していると解釈できることがわかる。

気液界面の可視化には、PraViewを用いた。粒子数密度が低い“気相”と解釈できる領域の“不透明度”をゼロにして見えなくすると、“液相”と解釈した領域の表面を直視することができる。これが図3の一番下の画像であり、“気液界面”と解釈した部分を明瞭に観察できる。

6. 気液2相に水平力を作用させ箱の側面に衝突させる試計算

スナップショット40は、十分安定した気液界面が生成された状態である。ここで、スナップショット41から44に至る間、+X向きにすべての仮想粒子を強制加速してみる。

その後のスナップショット45以降では、強制加速をやめて、重力だけの影響下で気液界面がどのように変化するかを観察した。

強制加速時における気液界面の計算結果を図4に、その後の変化を図5に示す。

図4を見ると、+X向きの加速によって、仮想粒子が直方体の箱の右壁に衝突して、気液界面の高度が鉛直上向きに上昇している様子が見てとれる。

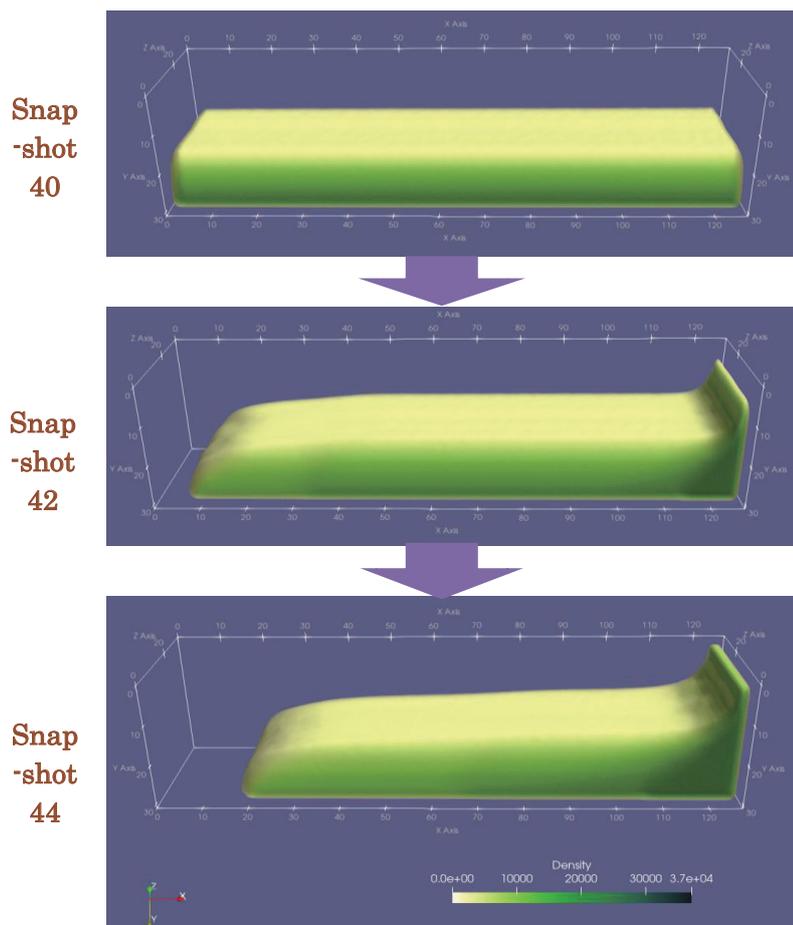


図4. Snapshot 41~44において、直方体の箱内部のすべての仮想粒子に対して右向きの“加速操作”を行った場合の気液界面の過渡変化

図5のスナップショット 45 を見ると、仮想粒子が右壁に衝突することで生じた図4のスナップショット 44 における気液界面の山が、右壁に反射した後、左向きに進行しはじめたことがわかる。この左向き進行は、スナップショット 48, 51 と続き、スナップショット 54 では、左壁で反射した後で右向きに進行する山が観察できる。その後のスナップショット画像から、気液界面の山は、両側の壁の間を往復しながら減衰していく様子を確認できる。スナップショット 75 の時点あたりでは、山はほとんど消えて、気液界面は、ほぼ安定した状態にもどっている。

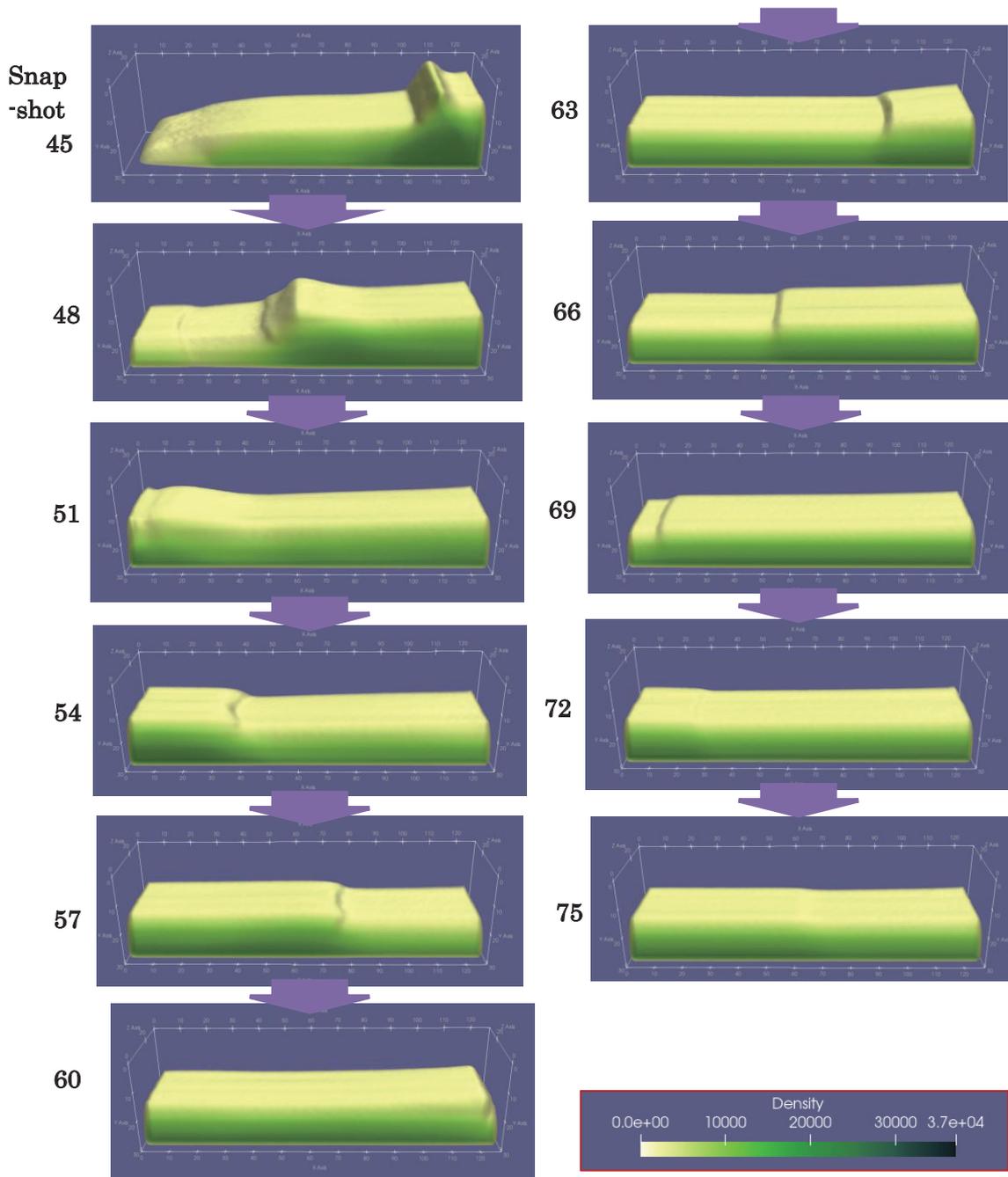


図5. 右壁で反射した後の気液界面の過渡変化 (Snapshot 45~75)

7. 箱の側面間を往復する気液 2 相流の中央に鉛直円柱を設置した場合の試計算

箱の側面間を往復する気液 2 相流の中央に「鉛直方向に固定された変形しない円柱」を設置して、気液 2 相流と剛体構造体との相互作用による気液界面の変化をみる計算を行った。スナップショット 41 から 44 までの間、右壁向きにすべての仮想粒子を強制加速する。その後のスナップショットでは、強制加速をやめて重力だけの影響下で気液界面の変化を観察した。強制加速時における気液界面の計算結果を図 6 に、その後の変化を図 7 に示す。

スナップショット 40 は、十分安定した気液界面が生成された状態である。中央の鉛直円柱領域は、仮想粒子が存在しないので、粒子数密度分布の可視化では透明になって見えない。

ここで、スナップショット 41 から 44 に至る間、+X 向き（水平右向き）にすべての仮想粒子を強制加速してみる。

このときの気液界面の変化を図 6 に示す。+X 向きの加速によって、仮想粒子が直方体の箱の右壁に衝突して、気液界面の高さが鉛直上向きに上昇している様子は円柱がない場合と同様である。

特徴は、気液界面が、円柱の左側面で上昇し右側面で下降している。この円柱側面における気液界面の特徴的な形状は、よく知られている「円柱側面に生じる流体から圧力分布」の特徴が高さ方向に反映されたものと解釈できるであろう。

強制加速をやめて、「重力」と「円柱の存在」だけの影響を受けるスナップショット 45 以降における気液界面の変化を図 7 に示す。

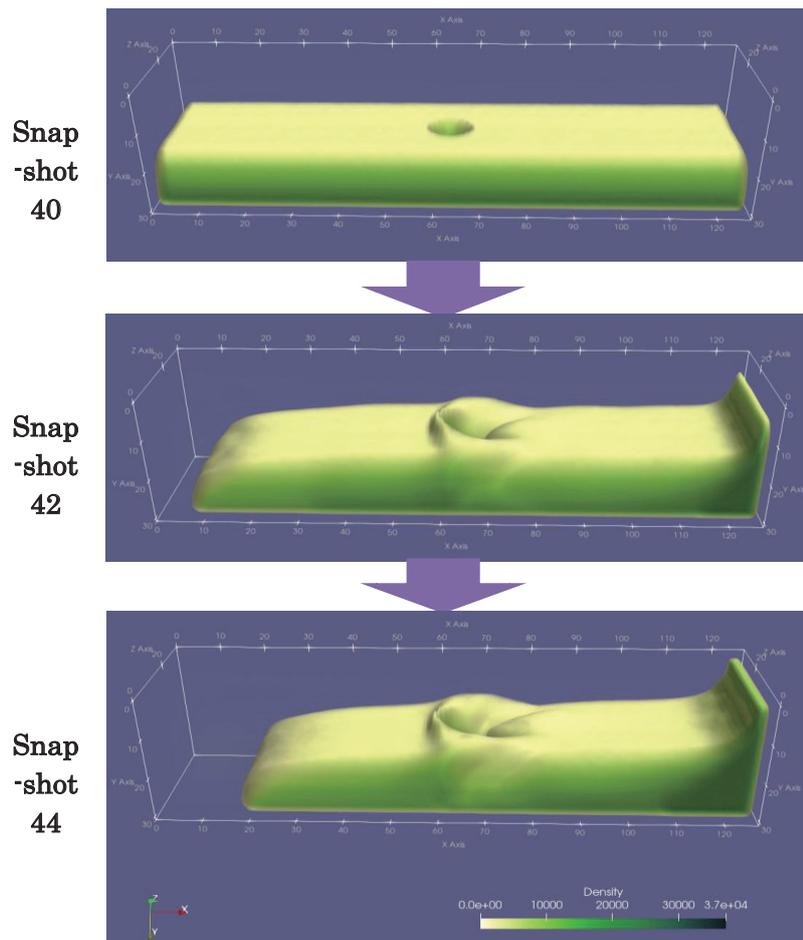


図 6. Snapshot 41~44 において、円柱を除く直方体の箱内部のすべての仮想粒子に対して 右向きの“加速操作”を行った場合の気液界面の過渡変化

図7のスナップショット45を見ると、仮想粒子が右壁に衝突することで生じた図6のスナップショット44における気液界面の山が、右壁に反射した後、左向きに進行しはじめたことがわかる。この左向き進行は、スナップショット48, 51と続き、スナップショット54では、左壁で反射した後で右向きに進行する山が観察できる。その後のスナップショット画像から、気液界面の山は、両側の壁の間を往復しながら減衰していく様子を確認できる。スナップショット75の時点あたりでは、山はほとんど消えて、気液界面は、ほぼ安定した状態にもどっている。これらの特徴は、円柱が存在しない場合と共通である。円柱が存在する場合の特徴は、図7のスナップ48に現れている。常識的には当然の結果であるが、2相流が左向きに進行する場合、気液界面が、円柱の右側面で上昇し左側面で下降している。

以上、常識的な流体挙動から推測できる特徴を反映した、一見、違和感のない結果が得られた。しかし、総合考察で、問題点を述べる。

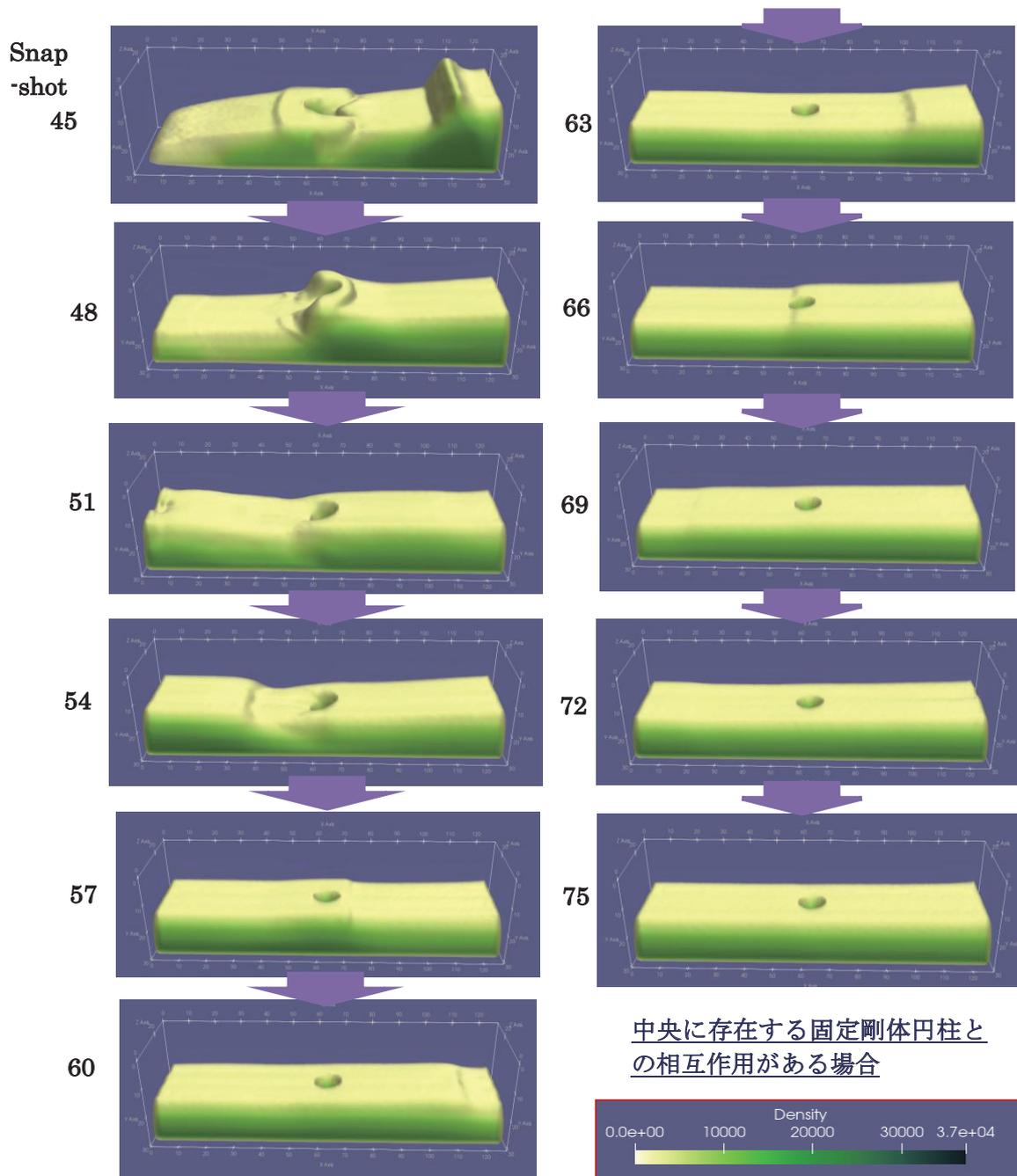


図7. 右壁で反射した後の気液界面の過渡変化 (Snapshot 45~75)

8. 総合考察

(1) 計算性能

本研究では、重力によって生じる気液界面の特徴的な挙動を、極力簡易な方法で再現する可能性を検討した。このために、“高効率な並列計算”と“計算誤差の蓄積がない安定な時間発展乱流計算”を同時に実現できるという優れた特徴がある「格子ガス法のビット演算」を利用した。

具体的には、本稿で述べたすべての計算には、東北大学サイバーサイエンスセンターのAOBA-Sを使用し、1ケース（6710万個の3次元格子点について仮想粒子挙動の時間発展計算を128時刻ステップ×100スナップショット行う計算）を、「16コア/CPU×8CPU」のベクトルプロセッサによる128MPI並列で行い、計算時間は約26分であった。（ベクトル化率：約97.2%、ベクトル長：約217）特別なチューニングは行っていないプログラムではあるが、それなりの計算性能を発揮できたと考えている。

(2) 特徴的な流体挙動の再現

本件研究では、格子ガス法の基本的な計算手順に、個別仮想粒子への“力学操作”として3種類の操作（“連行操作”、“逆進操作”、“加速操作”）を追加している。“連行操作”では、粘性を制御するパラメータである「連行確率」の設定が必要であり、“加速操作”では仮想粒子の「駆動確率」の設定が必要である。“逆進操作”は、「固定された変形しない構造体」との境界条件に対してのみ適用できる方法である。また、仮想粒子の「初期存在確率」の設定も必要である。

本研究では、これらの条件の妥当性の検討は行わずに、試行的な値として、連行確率(0.4%)、駆動確率(重力5%、水平外力80%)、初期存在確率(20%)の場合を解析している。

さらに、表面張力の発現原因である「粒子間引力」もモデル化していない簡易なものであることに注意が必要である。

今回の簡易解析は、以上のような状況を前提にして、「気液界面と解釈できる面」の挙動を再現し、可視化画像の時間変化の定性的な考察を行った。この意味で、非常に乱暴な考察ではあるが、今後の研究に向けての示唆として、以下の知見を得たと考える。

○「重力によって生じる気液界面」の挙動については、気液2相が大きな変動をしない限りは、上記3種類の力学操作を導入した格子ガス法で、その特徴を定性的に再現できる可能性が高い。

ただし、より多様な条件範囲での気液界面の簡易挙動解析を行う場合は、原理的に“粒子間引力”を「力学操作」に追加する必要があるだろう。

(3) ParaViewによる可視化における「気液相を分ける粒子密度のしきい値」

気液界面の可視化画像は、「気液相を分ける粒子密度のしきい値」の設定に大きく依存する。

図8に「箱の側面間を往復する気液2相流の中央に鉛直円柱を設置した場合の試計算」のスナップショット44から51について、「気液相を分ける粒子密度のしきい値」を3通りに変えた場合の可視化画像を示す。

図8の一番左側の列に示した可視化画像は、粒子密度が非常に低いセルのみを透明にした場合の可視化である。図7と比較すると、粒子密度がかなり低い値の“等密度面”の画像が表示されている。特に、スナップショット48の印象は、同じデータであるにもかかわらず、大きく印象が異なる。

図8の中央および右側の列に示した可視化画像は、図7の場合よりも粒子密度が高いセルまで透明にした場合である。すなわち、粒子密度がかなり高い値の“等密度面”の画像が表示されている。これら2列の可視化画像にほとんど違いが見られないのは、図8の上部に示した棒グラフから明らかなように、液相とみなして不透明化されているセルの数が、しきい値が変化してもほとんど変わらないからである。

(4) 仮想粒子密度が低い領域において非物理的な挙動が発現する可能性

図8の一番左側の列に示した可視化画像のスナップショット46から50を見ると、左側に進む気液2相流が円柱に衝突して流路が前後に2分されて進み、箱の左壁に衝突している様子が見てとれる。気相部分にこのような流れが生じる可能性もあるが、違和感がある。この流れが見える領域の粒子密度は、図8左上の棒グラフとしきい値が変わる位置の粒子密度でありかなり低い。この問題は、2種類の粒子モデルで回避できるので深い考察は行わないが、次の教訓を得た。○粒子密度がかなり低い領域では、仮想粒子の衝突散乱が十分行われなくなり、格子ガス法による計算結果が流体挙動を模擬できなくなっている可能性があるため注意が必要である。

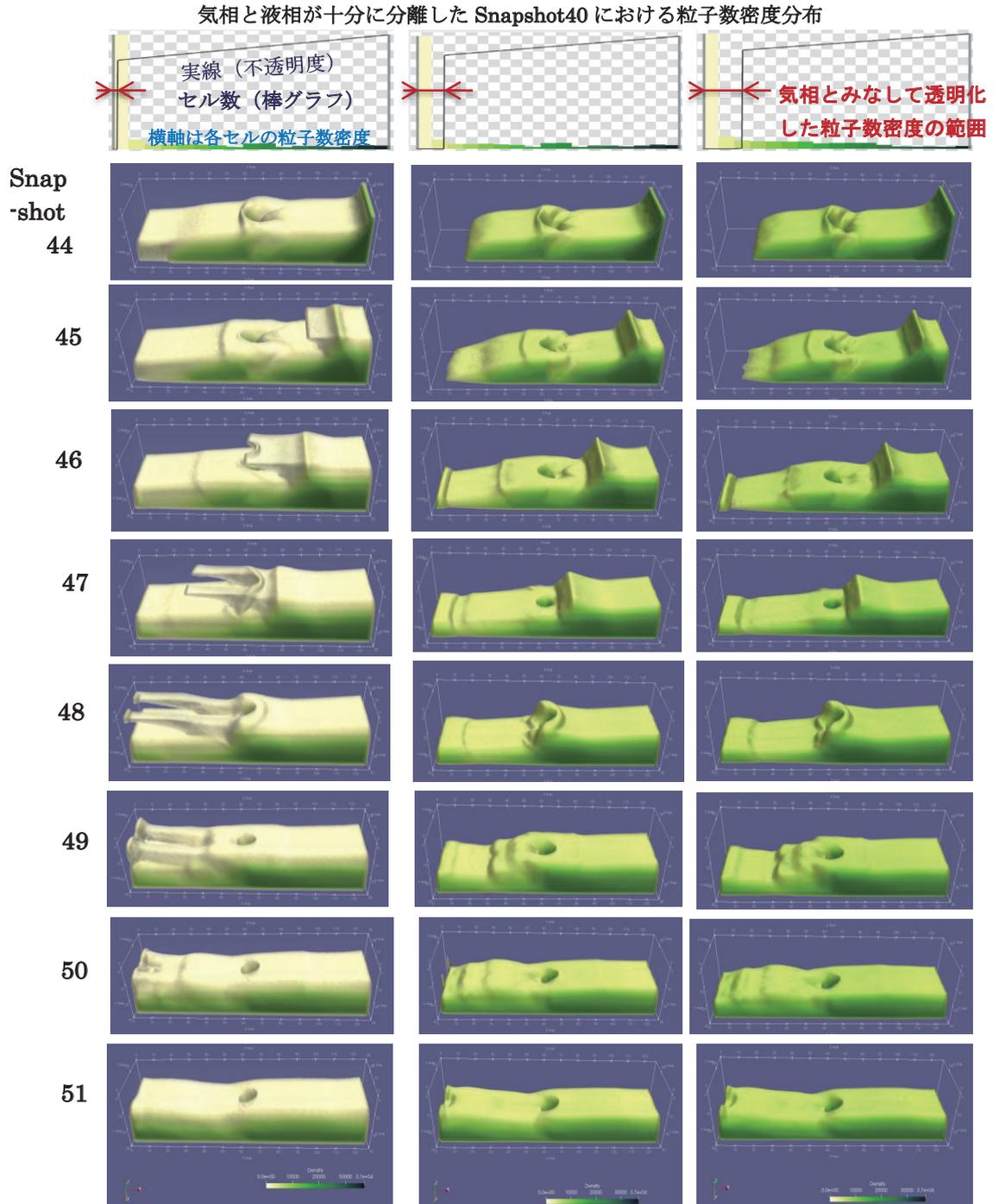


図8. 気相とみなして透明化する粒子数密度の範囲を変えた場合の「可視化された気液界面」の過渡変化の違い

(5) 今後の展望との関係

冒頭に述べたとおり、本研究の最終目標は、構造体が移動したり変形したりする場合の FSI について、“仮想粒子による物理的な機構論的モデル”を構築することである。

構造体が移動したり変形したりする場合は、流体と構造体の相互作用によって、流体から構造体側に送られた運動量によって構造体の運動や形状が変化し、また、構造体の運動に伴う運動量が流体に伝達される。この状況を模擬するため、「流体粒子の格子ガス法モデル」と「構造体粒子の格子ガス法モデル」を統合する必要がある。いったん、この格子ガス法による FSI 解析統合モデルが完成すれば、すべての時間発展計算をビット演算で高速かつ低コストで実行することができる。また、格子ガス法モデルに基づく物理的過程は、比較的単純な階層型ニューラルネットワークの計算構造に置き換えることができる。この結果、ニューラルネットワークで表現された“FSI 解析サロゲートモデル”を構築することができる。

あとは、実験データや計測データ、あるいはナビエ・ストークス方程式の高精度計算の入出力データを教師データとして学習させて、上記 8 (2) に述べたパラメータを学習させる。この場合、学習結果は、格子ガス法による仮想粒子の物理的挙動のパラメータを決定するので、物理的解釈が可能な AI 学習を実現できるであろう。また、格子ガス法に基づくビット演算は、本質的に確率的な期待値計算であり、ゲート型量子コンピュータの直接的な適用分野に成り得る。

以上、かなり長い道のりであるが、一步一步進めてまいりたい。

謝辞

筆者は、長年にわたり、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を利用して頂いてきた。現在の AOBA-S(SX-Aurora TSUBASA)までのベクトル型スーパーコンピュータの開発と新機種への絶え間ない更新の歴史を振り返ると、その性能向上は驚くべき科学技術の成果であったと思う。今日、“量子コンピュータ”の実用化もはじまりつつあり、さらに進化した使い勝手のよいスーパーコンピュータの開発導入と円滑な運用、そして、きめ細かいユーザー支援活動に対するニーズはますます重要になると思われる。関係者のこれまでのご努力に心から感謝するとともに、今後の活動継続に大きな期待をよせる次第である。

参考文献

- [1] Christopher M. Teixeira, “Continuum Limit of Lattice Gas Fluid Dynamics”, Ph.D. Thesis, MIT, 1993
- [2] 松岡, “仮想光子場揺動モデルによる格子ガス法流体解析の可能性”, SENAC Vol. 58 No. 2, pp. 16-26, 2025

[共同研究成果]

小惑星内部構造レーダ探査模擬 FDTD シミュレーションコードの開発

— 小惑星 Dimorphos の VHF レーダ探査 —

小林 敬生

韓国地質資源研究院

2重小惑星系 Didymos-Dimorphos を調査する ESA の小惑星探査機 HeRa に搭載された VHF レーダ Juventas Radar (JuRa) による Dimorphos 内部構造探査模擬を目的とするシミュレーションコードの開発について紹介する。JuRa は Dimorphos 到着後、まず周回軌道から 10^3 m ほどの距離において全体観測をしたのち距離を縮めて近接観測を行ない最終的に表面着陸までの観測を計画している。開発中のシミュレーションコードは遠距離観測モードと近距離観測モードの 2 つのシミュレーションモードから構成される。本稿は、そのうち近距離観測モードについて報告をするものである。

1. はじめに

前世紀の終盤、大型光学望遠鏡の新設と光学センサーの高感度化が相まって、暗く小さな微小天体の発見数が急激に増加した。1990 年代に入り地球とこれら小天体との衝突が引き起こす災害の最小化を目的とするスペースガード活動がはじまり、今世紀に入りそれが planetary defense つまり、惑星防衛という概念/活動に昇華した。2021 年にはそれを具体化した行動として人工物を小惑星に衝突させることによりその軌道運動に人為的に変化を引き起こす実証実験 Dart (Double Asteroid Redirection Test) が母小惑星 Didymos を公転する衛星 Dimorphos を対象に行われ、その公転軌道に変化を引き起こすことに成功した。Didymos はサイズが 700m であり Dimorphos は 170m ほどである。

この Dart による衝突実験が Dimorphos に与えた影響の評価を行なうことを主目的とする探査プロジェクト Hera が一昨年 (2024 年) 10 月に打ち上げられた。Didymos-Dimorphos 系への到着は今年 (2026 年) 12 月である。Hera は種々の光学観測機器とともに 2 機の 6U キューブサット、Juventas と Milani を搭載している。これらは Didymos-Dimorphos 系到着後に HeRa から分離されそれぞれのミッションを遂行する。JuRa は Juventas に搭載されているレーダである。

JuRa は観測中心周波数 60 MHz (波長 5 m) の VHF レーダであり、フルポラリメトリック観測ができるよう直交 1 対のダイポールアンテナを送受信アンテナとしている。アンテナエレメントの長さは 1.5m で、Dimorphos 到着後に展開する。JuRa のバンド幅は 20 MHz であり、計算上の真空中のレンジ分解能は 7.5m である。小電力による劣悪な S/N 条件をカバーするため、レーダ方式は疑似ランダムパルス変調方式をとっている。JuRa の探査目標は Dimorphos の内部構造を明らかにすることである。内部構造の解明をするためには、JuRa のデータをもとにトモグラフィ逆問題を解く方法とフルポラリメトリック観測データの偏波解析により内部構造の偏波特性を決定する方法がある。前者はマクロな構造を決定する方法であり、後者は波長スケール程度の相対マイクロな構造を決定する方法である。解を得たのちそれを惑星科学の文脈で解釈するのだが、その前に解の正しさを確認する必要がある。しかし、そのための追試の手段が地球上にはない。波長 5 m のレーダに対応できる実験施設がないからである。そこで登場するのがシミュレーションである。シミュレーションが要求される実験を代替するのである。

本稿著者は、電磁波の伝搬・散乱問題を扱うのに広く使われている FD-TD (Finite Difference - Time Domain) 法[1]を使って、JuRa の送受信アンテナを含めたフルスケールモデルのシミュレーションコードの開発を進めている。

2. 近接レンジ観測モデル

2.1 FD-TD モデル

FD-TD 法では、数値分散の影響を実用程度まで無視できるようにするため、格子点間隔の大きさを代表波長の 20 分の 1 以下とすることが推奨されている[1]。本研究でもこの目安に従い格子点間隔を定めるが、本研究では観測中心周波数 60MHz のレーダによる小惑星の内部構造の探査が主題なので、小惑星内部媒質を伝搬するときの波長を基準として考えなければいけない。Dimorphos のように大きさが 10^2 m 程度の小さな小惑星は、本体が稠密なひとつの岩塊ではなく、さまざまな大きさの小さな岩層が集まって出来ており、従って全体として空隙率も高いと考えられている。現在のところ、JuRa の波長スケールで見た時の Dimorphos 内部の比誘電率は 3 程度であると考えられている。その場合、Dimorphos 内部を伝搬する JuRa パルスの平均波長 λ は

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon}} \sim 2.9 \text{ m}$$

と見積もられる。ここで λ_0 は真空中の JuRa 中心周波数での波長で ϵ は Dimorphos 内部の平均比誘電率である。本研究では格子点間隔 Δs を 15 cm とした。

本稿で紹介するのは、プロトタイプコードの結果である。このプロトタイプのシミュレーション空間の大きさはグリッド数にして $700 \times 700 \times 700$ であり、実空間の大きさにすると約 $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ となる。このシミュレーション空間全体は厚さ 10 格子点の吸収境界で包まれている[2]。

アンテナはいわゆる細線モデル (thin wire model) [3, 4] によってモデル化したダイポールアンテナで同一直線上に並ぶ格子点を使ってアンテナエレメントを模擬する。JuRa のアンテナエレメント長は 1.5 m なので、10 個の格子点を使ってアンテナエレメントを模擬した。2 本のアンテナエレメントは給電点を挟んで両側に位置する。モデルの安定性を確保するためにアンテナエレメントの直径は 9 cm とした。これは、実物のアンテナエレメントの直径 1.2 cm と比較すると現実離れた値である。これについては章を改めて後述する。

給電点にアンテナ励起信号を送り、且つ、アンテナが受信するレーダエコー信号を本体側に送る給電線は 3 次元のシミュレーション空間とは別個に 1 次元の給電線モデル[5]として並行して

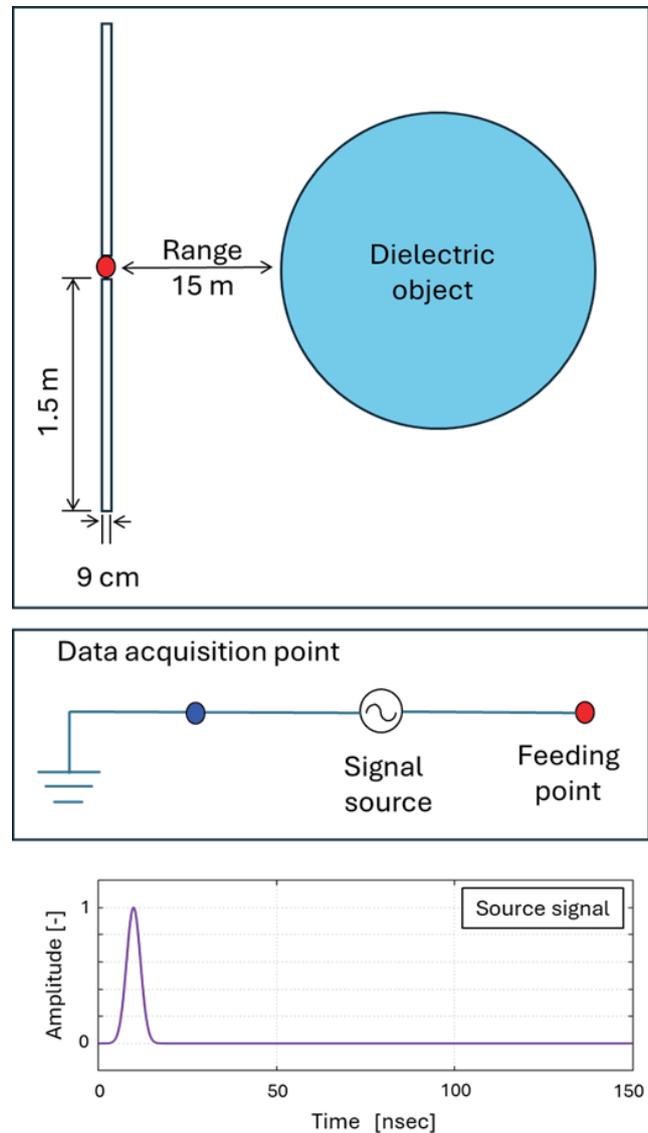


図 1. FD-TD シミュレーションモデル概念図 (上) 及び、アンテナ給電線モデル概念図 (中)、アンテナ励起信号 (下)。

シミュレーションを行なう。1次元給電線モデルは一方の端が3次元FDTDモデル内の給電点と共有され、もう一方の端は吸収境界となっている。給電線モデルの適当なところに給電信号源を設け、そこからみて吸収境界側の適当なところにデータ取得点を設けてその電圧値を観測データと定義する。アンテナ励振信号はガウシアンパルスである。

今回はテストとして、2種類の誘電体球（モデル1とモデル2）を探索目標小惑星とみなしてシミュレーションを行なった。モデル1は、内部が均一な直径60mの誘電体球で、内部媒質の比誘電率は2である。モデル2はモデル1と同じ大きさであるが、内部の直径48mの同心球部分を比誘電率4の媒質が占めている。それ以外の部分（マントル部分）はモデル1と同じ比誘電率2の媒質からなる。両モデルとも、今回のテストシミュレーションでは導電率を考慮しなかった。

JuRaアンテナの位置は給電点位置で代表させる。本稿では、給電点位置を誘電体球表面から15mとし、アンテナの軸方向は誘電体球の接線方向に合わせた。

2.2 モデル1：均一媒質誘電体球（直径60m）

モデル1によるシミュレーションは図1に示すアンテナ/ターゲット配置で行なった。アンテナ給電点からターゲット誘電体球の表面までのレンジは15mである。

近接レンジ観測で注意すべきことはアンテナの内部反射である。アンテナに給電する励振パルスのエネルギーはそのすべてがアンテナから電磁波として放射されるわけではない。相当程度がアンテナエレメントの端で反射されて給電線にまで戻ってくる。一部はアンテナと共振してアンテナエレメントに残留し、放射を続けながらも引き続き給電線へ還流し続ける。この還流成分は近接レンジ観測の障害となりうる。

図2（上）はターゲットのない自由空間における“受信”信号のプロットである。自由空間なので反射体は存在しない。ここで“受信”された信号の正体はアンテナの内部反射波である。図2（中）は探索目標の誘電体球の表面から15mの地点で観測した結果である。一見図2（上）と見分けがつかないのは、内部反射と比してターゲットからの反射信号が弱すぎるためである。図を十分に拡大すると、内部反射のすぐ後に非常に小さい振幅のターゲット反射波が認められる。この図2（中）のデータから図2（上）のデータを差し引いたものが図2（下）である。この図では、ターゲットの表面反射がはっきりと認められる。この表面反射はアンテナ内部反射の記録から約100nsec遅れて記録されているが、これは真空中で15mの距離を往復する電波の伝搬時間100nsecと整合的である。この後、800nsecを過ぎてから現れる信号はアンテナから見てターゲット裏面からの反射波である。裏面からの反射波は球体の中心を通る最短経路で伝搬してくるだけでなく、球体の表面に沿って伝搬する成分も混在しており表面反射

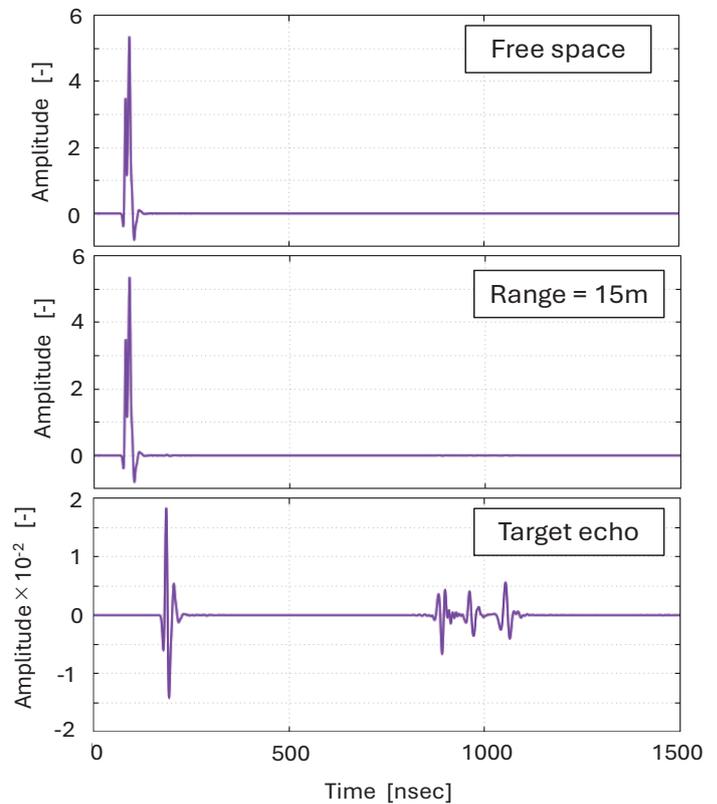


図2 アンテナ内部反射成分（上）および、誘電体球観測データ（中）、誘電体球反射信号（下）。

波の波形に比べると複雑な様相を呈している。今回のシミュレーションでは媒質の導電率を無視しているために裏面反射波の振幅は伝搬減衰を受けることなくその大きさが維持されている。この先、媒質の導電率を考慮したシミュレーションでは、裏面反射は伝搬中の減衰のため見えなくなることが予想される。

2.3 モデル2：同心2媒質誘電体球（外直径60m、内直径48m）

モデル2はモデル1と同じく外直径60mの大きさを持つが内部は均質ではなく構造を持つ。直径48mの誘電体球（比誘電率4）を厚さ6mの誘電体層（比誘電率2）が覆っているのである。モデルの断面図を図3に示す。誘電体中のレンジ分解能は媒質の比誘電率の平方根の逆数に比例するので、モデル2の誘電体層中で JuRa のレンジ分解能は5.3mとなる。

図4はこのモデル2の観測のシミュレーションの結果である。モデル1の場合と同じく、受信データからアンテナ内部反射成分を差し引いた結果である。観測点位置はモデル1と同じくターゲット表面から15mの地点なので、モデル1のシミュレーションと同じタイミングで表面反射波が観測されている。その直後に内部境界面からの反射波が受信されている。厚さ $d=6\text{m}$ で比誘電率 $\epsilon=2$ の誘電体層をレーダパルスが往復する時間 τ は光速を c として

$$\tau = 2 \frac{\sqrt{\epsilon} d}{c}$$

と計算されるが、それは56.6nsecである。図4では表面反射波と内部境界面反射波この計算通りの振る舞いをしていることが確認される。

3. アンテナモデルの適合性

上述したように本稿のシミュレーションではアンテナエレメントの形状（断面直径9cm、稠密）が実際のアンテナエレメントの形状（断面直径1.2cm、中空）からかけ離れたものとなっている。これがどのような影響をシミュレーションに及ぼすのか検討する。

そのためにまず実際のアンテナエレメントと同じ長さ・断面直径のモデルでアンテナのシミュレーションを行なう。計算の不安定化を避けるためにグリッドサイズは20mmとして、アンテナ長さ150cm、断面直径1.2cmとした。

アンテナを扱う研究では、着目する周波数の電波の波長を基準としてアンテナからの距離が1

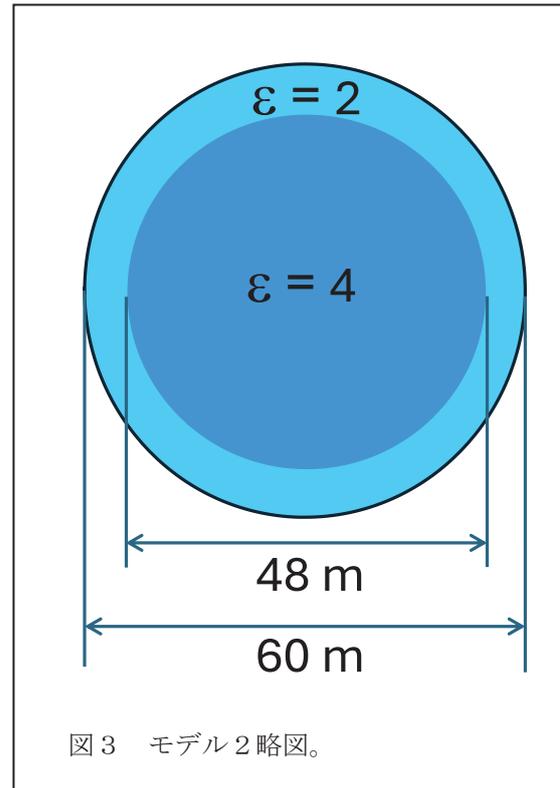


図3 モデル2略図。

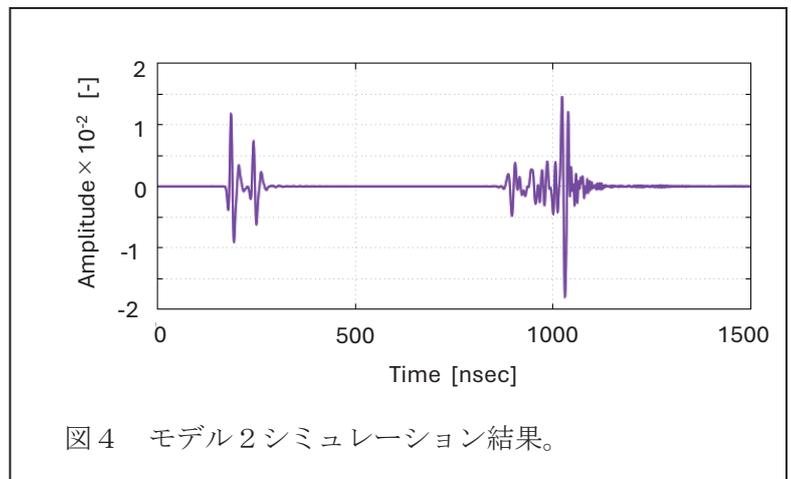


図4 モデル2シミュレーション結果。

波長程度以下のアンテナ近傍における電磁場を近接場と呼ぶ。アンテナから 10 波長も離れれば一般には遠方場とみなす。JuRa の中心周波数 60MHz の電磁波の波長は 5m なので、アンテナから 50m 離れた地点で観測される JuRa のレーダパルスは遠方場とみなせる。図 5 は格子点間隔 15 cm のシミュレーションにおけるアンテナモデルと格子点間隔 20 mm の実サイズアンテナモデルのアンテナ給電点から 50m の地点における送信パルス波形を比較したものである。波形に多少の差異はあるが、深刻な問題を引き起こすほどの違いではないと判断できる。

次に、アンテナのインピーダンスを調べた。FDTD シミュレーションでは、アンテナ給電線モデルの最後端グリッドの電圧値と電流値のデータからアンテナインピーダンスを計算することができる。図 6 はそうして得られたふたつのモデルのアンテナインピーダンスを比較したものである。一見して明らかに両者のインピーダンスの周波数の関数としての振る舞い方に大きな違いがあることがわかる。ただし、JuRa の公式バンド幅 60 ± 10 MHz 近傍では当たらずとも遠からず程度の差異とみなすこともできそうである。これが、遠方場でパルス波形が大きく違わなかった理由である。近接レンジとは言え、ターゲットから数波長も離ればそこはほぼ遠方場なので、現在のアンテナモデルでシミュレーションを続けても問題はなさそうだ、と判断した。

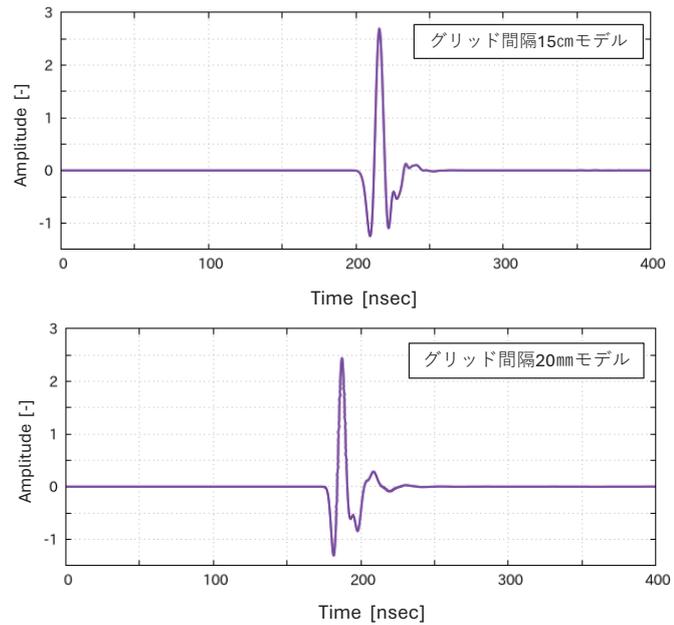


図 5 グリッド間隔の違いによる遠方場レーダパルス波形の比較。(上)グリッド間隔 15 cm (下)同 20 mm。

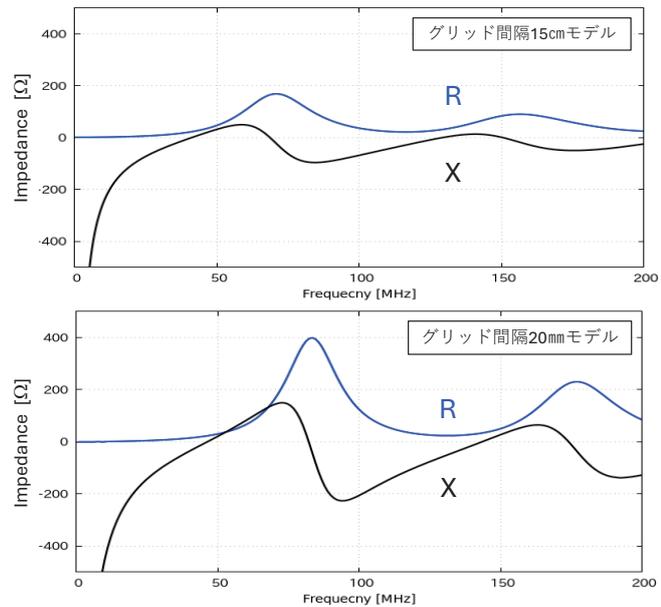


図 6 グリッド間隔の違いによるアンテナインピーダンスの比較。(上)グリッド間隔 15 cm (下)同 20 mm。

4. シミュレーションコードの MPI 化と計算時間

今回のプロトタイプコードによるシミュレーションでは探査対象天体モデルのサイズが実際の探査対象天体のその約 3 分の 1 であった。JuRa 観測シミュレーションの本計算では、シミュレーション空間の大きさが $1400 \times 1400 \times 1400$ 以上の大きさが必要となり、コードの MPI 化が必須となる。MPI 化に際してシミュレーション空間の分割数、すなわちプロセス数と実計算時間

(より卑近な言葉では計算が始まってから終わるまでの実際の待ち時間) との間にはどのような関係があるのかを、本稿のシミュレーションコードを元に作ったテストコードを使って調べてみた。

4.1 テストモデル

テストシミュレーションは真空を想定した空間の中心に点電流源を置いた FDTD シミュレーションである。この点電流源を JuRa のアンテナ同様ガウシアンパルスで励振し、放射された電磁波が吸収境界で吸収されて消えるまでを計算する。本項は MPI 化の効果による計算時間の変化が主題なので、電磁波の伝搬の様子等シミュレーション結果の詳細は省略する。

シミュレーション空間は大きさが $N \times N \times N$ ($N=1280$) の 3 次元 (i, j, k) 空間であり、これが厚さ 10 の吸収境界層に包まれている。本テストでは、 k 方向に垂直な平面でシミュレーション空間と吸収境界層を等間隔でスライスするように分割して MPI 並列プロセスの計算領域を定義した (図 7)。

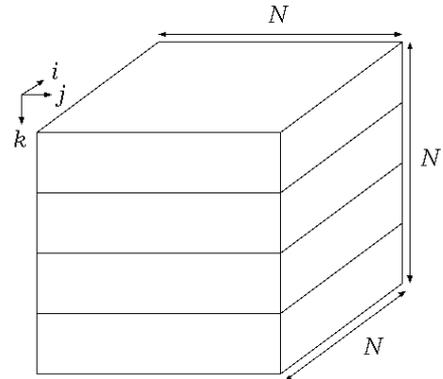


図 7 シミュレーション空間分割の概念図 (プロセス数 4 の場合)。

4.2 プロセス数と実計算時間

このテストではプロセス数が 8、16、24、36、48、64 の場合について同じシミュレーションを実行して、シミュレーションの実計算時間を調べた。図 8 はその結果をまとめたものである。プロセス数を増やせば単純に計算時間を短縮できるものと期待して行なったテストであったが、期待とは裏腹に計算時間の極小はプロセス数 16 で実現され、それ以上のプロセス数ではプロセス数に比例するように計算時間が伸びていった。

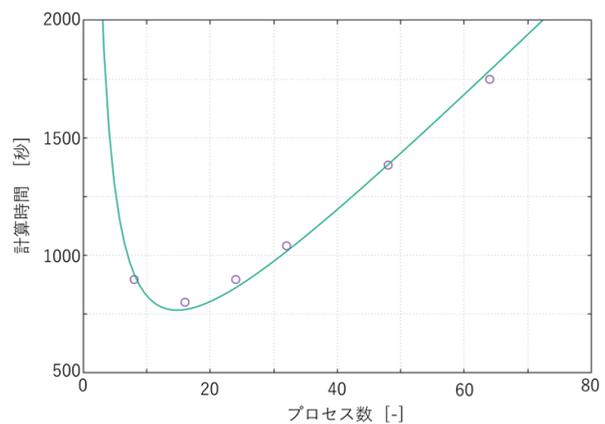


図 8 プロセス数と計算時間。
(丸：実計算時間、実線：本文式 (1) の曲線)

計算時間をプロセス数 n の関数と見なして、試しに

$$t(n) = \frac{T_0}{n} + T_{\text{com}}(n - 1) \quad (1)$$

なる式を適用し、 $T_0=5850$, $T_{\text{com}}=26.9$ とすると図 8 に示すように大変よくあてはまる。式 (1) の右辺第 1 項はシミュレーション空間を n 個の領域に分割して MPI 並列化コードによって計算すると計算時間が $1/n$ 倍になることを示している。ひとつの計算領域を構成するグリッド数は N^3/n 個である。 T_0 は MPI 化していないコードによる計算時間である。右辺第 2 項は MPI 領域分割したシミュレーション空間の各計算領域間の境界越しのデータの通信に要する時間を表す。 T_{com} はひとつの境界越しのデータ通信にかかる時間である。境界を構成するグリッド数は N^2 個である。この右辺第 2 項が意味するところは、領域間の境界越しデータ通信が多数の領域境界で同時並列的に行われるのではなく、境界単位で逐次的に行われ、そのためデータ通信時間が境界数 $(n-1)$ に比例して増大するということである。第 1 項は n に反比例して小さくなる。そのため、 n が大き

くなるとあるところから第1項の寄与が第2項の寄与に比べて相対的に無視できるほど小さくなる。そして第2項の寄与が支配的となり実計算時間が n に比例して増大するようになるのである。実計算時間の立場からMPI並列化を考えると、プロセス数 n (領域分割数) には最適値があると結論できる。式

(1) が示す最適値は $n=15$ で、その場合の実計算時間は 766.6 秒である。

4.3 多方向領域分割

次に領域分割の仕方を工夫して実計算時間をどの程度短縮できるかを見積もってみる。実計算時間の見積もりで考慮すべき制約条件は以下の3条件である。

1. 各領域の計算時間は領域を構成するグリッド総数に比例する。
2. 各境界でのデータ通信にかかる時間は境界を構成するグリッド総数に比例する。
3. 境界越しのデータ通信は境界単位で逐次的に行われる。

上のテストではMPI領域分割をする際、図7に示すように、 $i-j$ 面に平行な面での分割 (k 方向の分割) だけを試みた。ここでは、領域分割を $i-k$ 面に平行な境界によっても行なうこと (j 方向の分割) を考える (図9)。 k 方向の分割数を n 個、 j 方向の分割数を m 個とする。領域分割は各方向それぞれ m 等分割、 n 等分割なので、分割後の計算領域の大きさはすべて同じで、各計算領域に含まれるグリッド数は N^3/mn である。したがって、各領域の計算時間は T_0/mn となることが予想される。

一方、領域境界の数は、 $i-j$ 面に平行な境界の数は全部で $m(n-1)$ 、また、 $i-k$ 面に平行な境界の数は全部で $n(m-1)$ となる。領域境界の大きさは方向によって異なる。境界の大きさを、境界を構成するグリッドの数で表すと k 方向の分割境界の大きさは N^2/m であり、 j 方向の分割境界の大きさは N^2/n となる。先の T_{com} が N^2 個のグリッドデータの通信時間であったことを思い出すと、今の k 方向の分割境界越しデータ通信の時間は T_{com}/m となることがわかる。 k 方向の分割境界数が $m(n-1)$ であることと境界越しデータ通信は境界単位で逐次的に行われることを勘案すると k 方向の境界越しデータ通信にかかる時間は結局 $T_{com}(n-1)$ となることがわかる。同様に j 方向の分割境界越しデータ通信の時間は $T_{com}(m-1)$ となる。

以上から、実計算時間は

$$t(m, n) = \frac{T_0}{mn} + T_{com}(m + n - 2) \tag{2}$$

となることが予想される。上の T_0 、 T_{com} の値をそのまま用いると、 $m = n = 6$ で計算時間が 431.5 秒となることが簡単な数値計算で示される。さらに同様な考察から、 i 方向の分割も取り入れてシミュレーション空間を賽の目に切るように分割すると期待される計算時間は

$$t(l, m, n) = \frac{T_0}{lmn} + T_{com}(l + m + n - 3) \tag{3}$$

となる。ここで l は i 方向の分割数である。そして、この場合 $l = m = n = 4$ で計算時間が 333.5 秒となることが数値計算で示される。

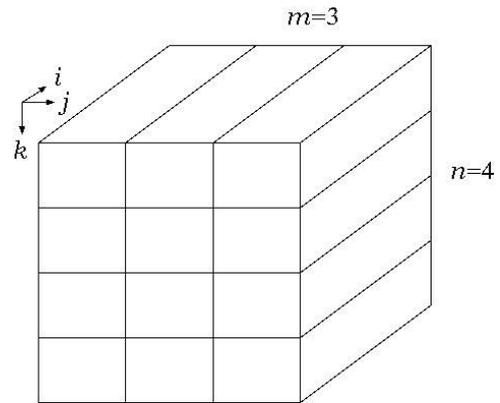


図9 シミュレーション空間分割の概念図 (領域分割 $m=2$ 、 $n=4$ の場合)。

5. おわりに

JuRa の観測計画の最後では可能な限り Dimorphos の着陸観測を目指すことになっている。首尾よく着陸観測が成功すれば、データの解析・解釈では本稿の FDTD シミュレーションが活用されることになる。近接場の中に物体があればアンテナはその物体と電氣的に強く結合（カップリング）し、単独のアンテナではなく物体と電氣的に結合してできた新たなアンテナとしてふるまうようになる。この場合も現行のアンテナモデルでよいのかは、確認する必要があると考えられる。

今後は、本稿の $700 \times 700 \times 700$ グリッドモデル（ $100 \text{ m} \times 100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$ モデル）をそれぞれの方向に 2 倍以上拡張して差し渡し 170m の大きさの Dimorphos が余裕をもって入れるようにしたのち、JuRa サイエンスグループと連携しながら内部構造モデルを導入し、さらにコードの MPI 化を進めて本格的なシミュレーションを進める計画である。MPI 化されたコードでは上で見積ったように実計算時間の短縮を目指して多方向領域分割を導入したい。

以上、本稿では、近距離観測モードの JuRa シミュレーションについて報告した。遠距離観測モードのシミュレーションについては場を改めて報告したい。

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、コード作成にあたっては度々同センタープログラム相談室から迅速で的確な助言を頂き研究を順調に進めることができた。

参考文献

- [1] Taflove, A., and Susan C. Hagness, *Computational Electrodynamics Third Edition*, Artech House, 2005
- [2] Berenger, J. P., Three-dimensional perfectly matched layer for the absorption of electromagnetic waves, *J. Computational Physics*, Vol. 127 363 – 379, 1996
- [2] Umshankar, K. R., A. Taflove, and B. Beker, Calculation and experimental validation of induced currents on coupled wires in an arbitrary shaped cavity *Ieee Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 35, 1248 – 1257, 1987
- [3] Mäkinen, R. M., J. S. Juntunen and M. A. Kivikoski, An improved thin-wire model for FDTD, *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, Vol. 50, 1245 – 1255, 2002
- [4] Maloney, J.G., K. L. Shlager, and G.S. Smith, A simple FDTD model for transient excitation of antennas by transmission lines, *IEEE Trans. Antennas Propagat.*, Vol. 42, 289 - 292, 1994

[大学 ICT 推進協議会 2025 年度年次大会論文集より]

スーパーコンピュータ AOBA サブシステム AOBA-S における運用実績と 利用者支援, および NanoTerasu との連携について

森谷 友映¹⁾, 藤村 瑠菜¹⁾, 齋藤 敦子¹⁾, 小野 敏¹⁾, 大泉 健治¹⁾,
河合 直聡²⁾, 滝沢 寛之²⁾

1) 東北大学 情報部デジタルサービス支援課

2) 東北大学 サイバーサイエンスセンター

t-moriya@tohoku.ac.jp

Operation Report of the Supercomputer AOBA Subsystem AOBA-S: A Focus on Performance, User Support, and Collaboration with NanoTerasu

Tomoaki Moriya¹⁾, Runa Fujimura¹⁾, Atsuko Saito¹⁾, Satoshi Ono¹⁾, Kenji Oizumi¹⁾,
Masatoshi Kawai²⁾, Hiroyuki Takizawa²⁾

1) Digital Services Support 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、ネットワーク型共同利用・共同研究拠点として、大規模科学計算システムを提供し、HPCI の資源提供機関としての役割を担っている。本稿では、2023 年 8 月に運用を開始したスーパーコンピュータ AOBA のサブシステム、AOBA-S の運用状況を報告する。2024 年度 (2024 年 9 月~2025 年 8 月) のジョブ実行状況の分析結果や利用者支援の取り組み、そして 3GeV 高輝度放射光施設ナノテラスとの連携状況についても紹介する。

1 AOBA-S の概要

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、2023 年 8 月から、新たなサブシステムとして AOBA-S (SX-Aurora TSUBASA, 日本電気株式会社製) の運用を開始した。サブシステム AOBA-S (以下、AOBA-S) は、運用開始から 2 年が経過し、その稼働状況や利用動向に関するデータが蓄積されつつある。

AOBA-S は、大規模な科学技術計算を効率的に遂行するための重要な基盤として機能している。システムの利便性向上に向けた取り組みとして、本センターでは 2024 年 9 月に、NEC MPI が NVIDIA 社提供の HPC-X の SHARP 機能をサポートし、集団通信を InfiniBand ネットワークにオフロードする機能を追加した。

また、ストレージサービスの拡充も進めている。2024 年 4 月からは S3 ストレージサービスの試験運用を開始し、AOBA-S のストレージシステムの一部に

DDN S3 Data Service (S3DS) API を介したアクセス環境を提供している。さらに、2024 年 12 月からは NextCloud を使用した Web ストレージサービスも運用を開始し、2025 年 4 月にはストレージ容量を 1PB 増強することで、利用者へのデータ共有・管理機能の拡充を図っている。図 1 は本センターの AOBA システム (以下、本システム) の構成図である。

2 AOBA-S の構成

AOBA-S は、アプリケーションの演算処理を担うベクトルエンジン (VE) と、主に OS 処理を行うベクトルホスト (VH) で構成されるベクトルアーキテクチャを採用している。

PCIe カードに搭載された VE は、ベクトルプロセッサと高速メモリからなり、x86/Linux ベースの VH と PCIe 経由で接続される。AOBA-S の中核となる VE (Type 30A) は、第三世代のベクトルプロセッサであり、16 コアで理論演算性能は 4.91TFLOPS を実現している。さらに、96GB の HBM2E メモリを搭

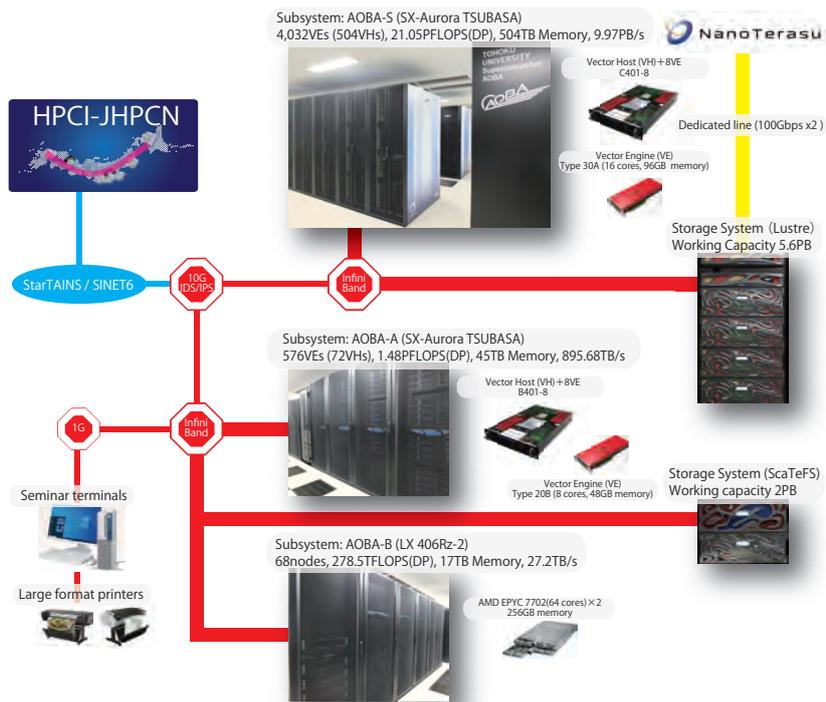


図 1: システム構成図

表 1: システム性能要件

項目	理論演算性能	主記憶容量	メモリバンド幅
1VE (Type 30A)	4.91 TFLOPS	96 GB	2.45 TB/s
1 ノード (1VH+8VE)	41.78 TFLOPS	1 TB	20.26 TB/s
システム全体 (504VH+4,032VE)	21.05 PFLOPS	504 TB	9.97 PB/s

載し、2.45TB/s という高いメモリバンド幅を実現することで、高い演算性能とメモリ性能の両立を可能にしている。

本センターの AOBA-S は、1 台の VH に対して 8 台の VE が接続される C401-8 モデルを構成単位 (1 ノード) として採用している。VE と VH を合わせたシステム全体の理論演算性能を含めた AOBA-S の性能を表 1 に示す。504 台の VH は、InfiniBand NDR ネットワークで接続しており、広帯域かつ低遅延なデータ通信を実現している。ストレージシステムには、DDN 社製の Lustre ファイルシステムを採用し、高速アクセスと高密度ストレージを両立する DDN ES400NVX2 を導入している。これは、AOBA-S 利用者専用領域のホーム領域として提供している。RAID6 構成で実効容量は、2025 年 4 月から 4.5PB から 5.6PB へと増強した。

3 AOBA-S の利用状況

3.1 利用形態

本センターでは、AOBA-S の計算資源を効率的に活用するため、ジョブの利用形態として以下の 2 つの方法を提供している。

共有利用：利用者が指定した VE (ベクトルエンジン) またはノード数を、他の利用者と共に共有してジョブを実行する。資源の空き状況に応じて柔軟に計算リソースを利用できる。経過時間はデフォルトで 72 時間 (3 日間) に設定している。

占有利用：指定した VE またはノードを排他的に確保し、他の利用者のジョブに影響されることなく計算を実行する。安定した計算環境を必要とする場合に特に有用であり、他のジョブの終了を待つ必要がないため、実行時間を予測しやすいという利点がある。

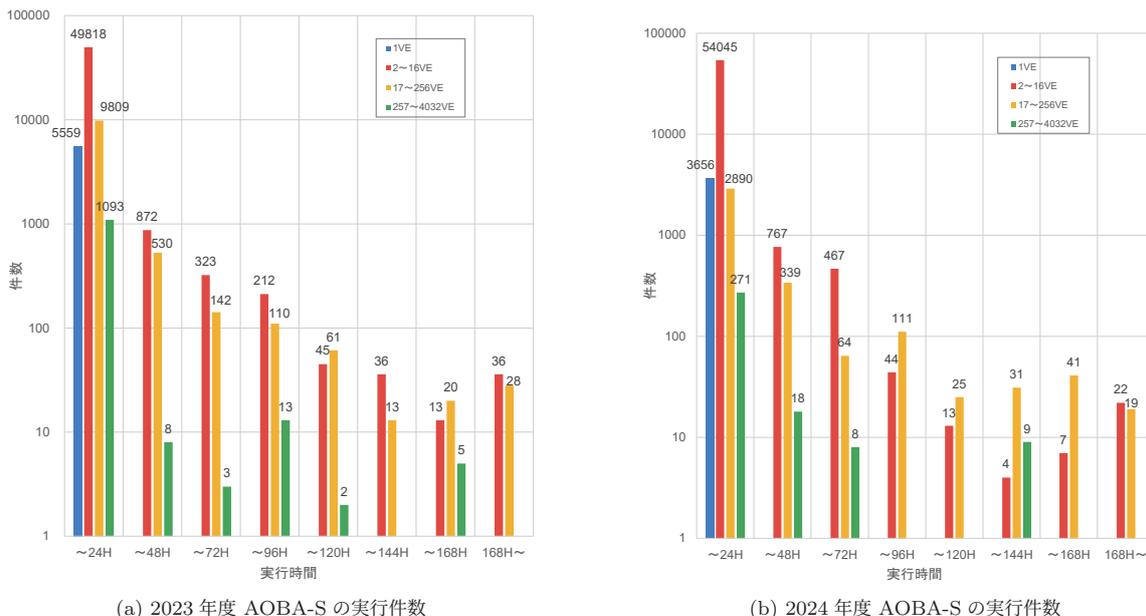


図 2: AOBA-S におけるジョブの実行件数

なお、いずれの利用形態においても、一つのジョブを最大 720 時間（30 日間）まで連続して実行可能である。これにより、長時間の計算を必要とする利用者にも対応している。

3.2 ジョブの規模別実行件数

AOBA-S におけるジョブの利用状況を分析するため、2023 年度（2023 年 8 月～2024 年 8 月）と 2024 年度（2024 年 9 月～2025 年 8 月）のジョブ実行状況を比較した。各年度のジョブ件数を、実行時間とジョブの規模（利用 VE 数）別に分類した積み上げ棒グラフを、2023 年度の結果は図 2(a) に、2024 年度の結果は図 2(b) に示す。

24 時間未満にジョブが終了した：「～24H」区分のジョブ件数は、2023 年度の約 5 万件に対し、2024 年度は約 5.4 万件に増加している。この増加は、システムの運用が安定し、新規利用者や既存利用者の計算需要が拡大していることを示唆している。

両グラフともに、実行時間「～24H」の区分において、2～16VE のジョブが最も多く、全体の件数を大きく牽引している。この傾向は、ノード内で処理が完結するアプリケーションの利用や小規模な計算実験に利用されていると推測する。

一方、実行時間が長い区分（144 時間以上から 168 時間未満に終了したジョブ：「～168H」や 168 時間以上実行したジョブ「168H～」）を分析すると、ジョブ規模の分布に変化が確認された。2023 年度は、これ

らの長時間区分において、2～16VE を使用するジョブが 17～256VE を使用するジョブよりも多数を占めていた。しかし、2024 年度はこの傾向が逆転し、17～256VE 区分のジョブ数が微増している。これらから、短時間での小規模～中規模ジョブの利用が継続しつつ、大規模・長時間計算のニーズも一定数あることが示唆される。

3.3 稼働利用率

前項では、AOBA-S におけるジョブの利用動向を分析した。本項では、システム全体の稼働状況に焦点を当て、計算資源がどの程度効率的に利用されたかを報告する。2024 年 9 月から 2025 年 8 月までの 12 か月間における月ごとの稼働 VE 利用率を図 3 に示す。

稼働 VE 利用率とは、サービスとして提供可能だった計算資源（総 VE 時間）に対し、実際に利用された総 VE 時間の比率として定義する。

図 3 から、利用率は年間を通して高い水準を維持し、多くの月で 90% 前後の高い値を示している。特に 2024 年 12 月から 2025 年 2 月にかけては、90% を超える高い利用率を記録した。2025 年 3 月には、年度末保守作業により利用率が一時的に約 80% まで低下した。この一時的な低下を除けば、全体として安定した高い利用率が確認でき、提供される計算資源が利用者の需要に対応していることが示される。

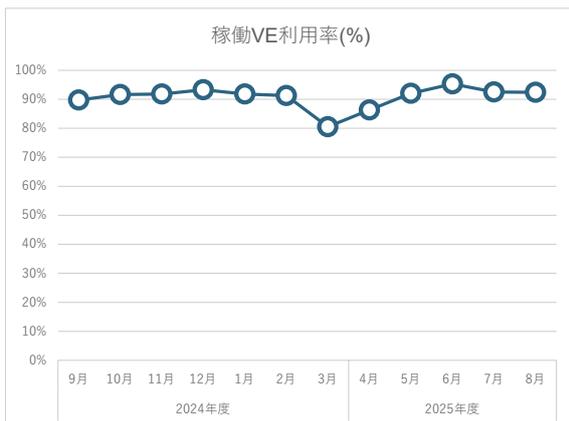


図 3: AOBA-S 月別稼働 VE 利用率 (2024 年 9 月～2025 年 8 月)

4 利用者支援活動

本センターでは、計算機利用に関する利用相談窓口を設置している。学内外の利用者および利用予定者を対象に、Web フォームまたは事前予約制の面談（オンライン会議を含む）で問い合わせに対応している。相談対応は主に情報系職員とテクニカルアシスタントが行うが、内容に応じてベンダーへ支援協力を依頼している。

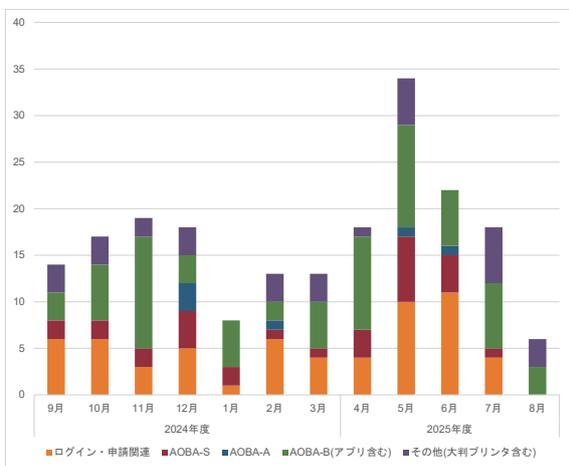


図 4: 利用相談件数

図 4 に、2024 年 9 月から 2025 年 8 月までの利用相談件数を示す。利用相談件数が年間を通じて変動していることが分かる。相談内容の内訳を見ると、ログイン・申請関連の問い合わせはほぼ毎月寄せられており、特に 2025 年 5 月と 6 月に件数が増加している。これは、新年度になり、新規利用者の利用開始が活発になったことを反映していると考えられる。

AOBA-S に関する問い合わせでは、コード移植やコンパイル方法に関する相談が多い。また、AOBA-B の問い合わせも多く寄せられているが、特に OpenFOAM や VASP などのアプリケーションソフトウェアに関する相談が増加している。

今後は、件数だけでなく、相談内容を詳細に分析することで、利用者が直面する具体的な課題を特定し、より効果的なサポート体制を構築していく必要がある。

さらに、AOBA システムを利用した研究成果の一部は、「AOBA の杜」[3] において動画で紹介されており、新規利用者の獲得や既存利用者の活用促進に貢献している。

5 3GeV 高輝度放射光施設ナノテラスとの連携状況

3GeV 高輝度放射光施設ナノテラス（以下、NanoTerasu）と AOBA システム間には、直結の 100Gbps ネットワーク回線を敷設している。この高速回線の実装により、NanoTerasu において生成される大容量の計測データを AOBA システムのストレージへ転送することが可能となった。NanoTerasu で取得された計測データは、AOBA システム上で解析することができる。データ解析環境については、多様なアプリケーションソフトウェアを整備し、放射光データの高度な解析処理を効率的に実行できる環境を提供している。これにより、研究者は複雑なデータ処理を短時間で完了させ、実験結果の迅速な評価が可能となった。

さらに、研究者間のデータ共有と協働を促進するため、S3DS および NextCloud を基盤としたデータ共有プラットフォームを構築した。この環境では、きめ細かなアクセス制御機能によりデータのセキュリティを確保しつつ、必要に応じて外部の研究者とのデータ共有を実現した。これにより、複数機関を跨いだ共同研究の活性化と研究成果の迅速な展開を支援する体制を構築した。

6 まとめ

本稿では、スーパーコンピュータ AOBA のサブシステムである AOBA-S のシステム構成について紹介した。また、2024 年 9 月から 2025 年 8 月までの 1 年間のジョブ実行件数を示すとともに、その運用実績を報告した。利用者支援においては、相談件数から傾向について分析した。NanoTerasu との連携については、高速ネットワーク回線を活用した大容量データ解析の実現に向けた取り組みを紹介した。

今後も、本システムの安定的な運用と利用者支援の向上に努め、利用者の研究活動を支援していきたい。

参考文献

- [1] 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,
<https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/>
- [2] 木村 優太, 森谷 友映, 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 サブシステム AOBA-S の運用状況と利用者支援について, 大学 ICT 推進協議会, 2024 年度次大会 論文集, pp.150-153, 2024.
- [3] AOBA の杜,
<https://www.cc.tohoku.ac.jp/service/supercomputer/aoba/>

[大学 ICT 推進協議会 2025 年度年次大会論文集より]

eduroam/Cityroam 基地局マップデータの簡素化と 共通フォーマットの開発

後藤英昭¹⁾, 原田寛之²⁾, 坂根栄作³⁾, 廣瀬丈矩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) 国立情報学研究所

4) 株式会社 Local24

Simplification of the eduroam/Cityroam Access Point Map Data and the Development of a Common Format

Hideaki Goto¹⁾, Hiroyuki Harada²⁾, Eisaku Sakane³⁾, Takenori Hirose⁴⁾

1) Cyberscience Center, Tohoku University

2) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

3) National Institute of Informatics

4) Local24, Inc.

概要

教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤 eduroam において、基地局マップは有用なサービスであり、eduroam の参加機関には基地局マップデータの提出が義務付けられている。しかしながら、国内の大学等における提出率が約半数と低迷している問題がある。一方、著者らは eduroam を含む市民向けのセキュア無線 LAN ローミング基盤 Cityroam を開発して、世界規模のローミング基盤 OpenRoaming と組み合わせて、全国の自治体 Wi-Fi や商業施設、鉄道駅などに展開してきた。東京や大阪のような大都市では、数千規模の基地局の設置が見込まれるが、通信事業者にとっても eduroam JP 向けにデータを整形して提出することは負担が大きい。基地局マップのデータ入力の手間を減らすために、OpenRoaming では WiGLE などのクラウドソーシングによる半自動のマップ生成が利用されている。eduroam でも同様の検討が行われるようになったものの、手動入力による信頼性の高いデータが必要な用途もあり、いかに手間を抑制し、どのようにデータを融合するのかについては、まだ検討段階にある。本研究では、基地局マップデータの作成を容易にするために、データの簡素化・汎用化を検討し、共通フォーマットを開発した。また、eduroam JP 向けや Google maps 向けのデータに自動変換する仕組みも試作した。本研究の成果は、基地局マップデータの充実を通じて教育・研究のためのネットワーク利用環境の改善に貢献するとともに、位置情報を利用した付加サービスの実現にも寄与する。

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 (エデュローム) は、執筆時点 (2025 年 9 月) で世界 100 か国 (地域) 以上、国内 464 機関に導入されている [1]。eduroam において基地局マップは有用なサービスであり、利用者は英 Jisc で開発された eduroam Companion [2] や、各地のウェブサイトで提供される地図を用いて、最寄りの eduroam サービスエリアを探することができる。世界の eduroam 参加機関には基地局マップデータの提出が義務付けられている。しかしながら、国内の大学等における提出率が

約半数と低迷している問題がある。本報告では、参加機関がデータを提出しやすくなることを目指して、基地局マップデータを簡素化し、入力の手間を削減する方策について述べる。

著者らは eduroam を含む市民向けのセキュア無線 LAN ローミング基盤 Cityroam [3] を開発して、世界規模のローミング基盤 OpenRoaming [4] と組み合わせて、全国の自治体 Wi-Fi や商業施設、鉄道駅などに展開してきた。東京や大阪のような大都市では、数千規模の基地局の設置が見込まれるが、通信事業者にとっても eduroam JP 向けにデータを整形して提出することは負担が大きい。基地局マップのデータ入力

時間を減らすために、OpenRoaming では WiGLE などのクラウドソーシングによる半自動のマップ生成が利用されている [5, 6]. eduroam でも同様の検討が行われるようになり、筆者らによる [7] のほか、Jisc でも開発が進められている。一方で、手動入力による信頼性の高いデータが必要な用途もある。いかにデータ作成の手間を抑制し、どのようにデータを融合するのかについては、まだ検討段階にある。

本研究では、基地局マップデータの作成を容易にするために、データの簡素化・汎用化を検討し、共通フォーマットを開発した。以下、第 2 章では、基地局マップデータの現状と課題について説明する。第 3 章では、開発した共通フォーマットについて述べる。また、eduroam JP 向けや Google maps 向けのデータに自動変換するツールを試作したので、第 4 章で紹介する。本研究の成果は、基地局マップデータの充実を通じて教育・研究のためのネットワーク利用環境の改善に貢献するとともに、位置情報を利用した付加サービスの実現にも貢献が期待される。

2 基地局マップデータの簡素化と自動生成

基地局に関して、信頼できる詳しい情報が提供されれば、一般に、基地局マップなどのサービスの内容が充実する。しかしながら、詳細なデータをデータベースに登録するためには、相応の労力が必要となる。このように、サービスの内容とデータの細かさにはトレードオフがある。

eduroam JP では、参加機関から基地局マップデータの提出を受けて、データを統合した上で、eduroam database のシステム [8] に提出している。eduroam database は、定期的に各国 (地域) の eduroam RO (Roaming Operator) のウェブサイトからこのデータをダウンロードして、統合した上で、eduroam Companion などのアプリケーションで利用できるように公開している。RO から eduroam database に提出されるデータの形式として、XML (Extensible Markup Language) と JSON (JavaScript Object Notation) が規定されている。eduroam JP では、当初は XML 形式で参加機関からデータを収集していたが、技術系の職員が注意深く編集してもミスが多いという問題があった。現在は、作業ミスを減らせるように、Excel 形式のファイルも受け付けられるようなシステムになっている。

eduroam JP 事務局が各機関に提出を求めている基地局マップの情報を、図 1 に示す。必須の項目には、

項目名	必須値	入力例	説明
基地局名称(英語)	*	National Institute Informatics	基地局の英語名称を入力してください (略称や略称名など)
基地局名称(日本語)	*	国立情報学研究所	基地局の日本語名称を入力してください (略称や略称名など)
基地局経緯度	*	35.692712,139.767958	基地局の座標を緯度 経度 高度の形式で入力してください。高度は省略可
基地局運用水準	*	本格運用	以下のリストから選択してください。 「試験段階」 本格運用
基地局種別	*	シングルスポット	以下のリストから選択してください。 「シングルスポット」 エリア モバイル
基地局所在地(都道府県市区町村(英語))	*	Chiyoda-ku, Tokyo	基地局所在地 (都道府県市区町村)。英語で入力してください
基地局所在地(町名番地(英語))	*	2-1-2 Mitosubashi	基地局所在地 (町名番地(英語)) を英語で入力してください
基地局所在地(都道府県市区町村(日本語))	*	東京都千代田区	基地局所在地 (都道府県市区町村)。日本語で入力してください
基地局所在地(町名番地(日本語))	*	一ツ橋2-1-2	基地局所在地 (町名番地(日本語)) を日本語で入力してください
連絡先: 氏名		鈴木一郎	基地局の連絡先
連絡先: Email		suzuki.ichiro@example.com	Emailを入力してください
連絡先: 電話番号		03-1234-5678	基地局の連絡先
連絡先: 種別		個人	電話番地を入力してください 基地局の連絡先の種別を以下のリストから選択してください。 個人 部署
連絡先: 公開(非公開)		公開	基地局の連絡先の種別(公開/非公開)を選択してください
連絡先: 氏名		山田花子	基地局の連絡先
連絡先: Email		yamada.hanako@example.com	Emailを入力してください
連絡先: 電話番号		03-1234-5678	基地局の連絡先
連絡先: 種別		個人	電話番地を入力してください 基地局の連絡先の種別を以下のリストから選択してください。 個人 部署
連絡先: 公開(非公開)		非公開	基地局の連絡先の種別(公開/非公開)を選択してください
SSID	*	eduroam	基地局のSSIDを入力してください
標準化方式		WPA2/AES	基地局のWi-Fiネットワークの標準化方式を入力してください
IPアドレス		50	基地局のIPアドレスを入力してください
無線LANノックアウト		0	基地局の無線LANノックアウトを入力してください
特記事項1		ポート制限有	ポート制限の有無を選択してください
特記事項2		transp_proxy	transp_proxyの有無を選択してください
特記事項3		IPv6対応	IPv6対応の有無を選択してください IPv6の対応は必須とさせていただきます
特記事項4		NAT有	NATの有無を選択してください IPv6の対応は必須とさせていただきます
特記事項5		HotSpot2.0対応	HotSpot2.0対応の有無を選択してください IPv6の対応は必須とさせていただきます
利用制限		あり	利用制限の有無を選択してください
利用時間帯情報		none	基地局の利用時間帯制限がある場合、その内容を入力してください
基地局情報URL(英語)		http://www.nii.ac.jp/en/	基地局情報(英語)ページ英語版のURLを入力してください
基地局情報URL(日本語)		http://www.nii.ac.jp/	基地局情報(日本語)日本語版のURLを入力してください

図 1 eduroam JP の基地局マップデータ (Excel シート)

基地局の座標値 (緯度・経度) に加えて、名称、所在地 (住所) などが含まれる。名称と所在地については、海外の利用者も読めるように、英字表記も必須となっている。基地局マップデータの作成において、これらの項目の入力の手間が特に大きいと考えられる。座標値の入力にも相応の手間が必要で、一般に各機関では、ウェブ上の地図サービスを利用して緯度・経度を取得しているものと考えられる。

データ入力の手間を削減するために、基地局マップデータの簡素化を検討した。まず、基地局の名称と所在地を割愛することを考える。eduroam database の位置情報定義を、図 2 に示す。eduroam JP のデータ形式は、これにならったものである。大元の仕様で必須となっている項目は、locationid, coordinates, stage, type, SSID であり、名称と所在地はオプション (省略可能) になっている。幾つかの国の例を見ると、名称はよく登録されているが、所在地については登録されていない例も多かった。eduroam Companion で見たイギリスの例を図 3 に、台湾の例を図 4 に示す。イギリスでは軒並み所在地が登録されているが、省略されている機関もあった。台湾では軒並み所在地が登

dataset: service_loc

Contains information about the eduroam service locations operated by an institution listed in the table institution.

XML URL: <http://www.eduroam.<tid>/general/institution.xml>
 JSON URL: <http://www.eduroam.<tid>/general/institution.json>

field name	field description
instid	Unique identifier provided by the NRO
ROid	Unique identifier provided by the database operator during the RO registration process
locationid	Unique identifier provided by the NRO
coordinates	longitude, latitude, altitude (altitude may be omitted; to define a larger (polygonal) area multiple triples/value pairs of coordinates must be provided (in order that allows to form one cohesive area))
stage	0=preproduction/test, 1=active (default value =1)
type	0=single spot; 1=area; 2=mobile (default value =0)
loc_name*	location's name
address_street*	location's address (if applicable)
address_city*	location's address: city
location_type	IEEE 802.11-2012, clause 8.4.1.34 Venue Info (note: this is a pair of numbers separated with comma (,))
contact_name**	on site contact: name
contact_email**	on site contact: e-mail
contact_phone**	on site contact: phone no.
contact_type**	0=person (default), 1=service/department
contact_privacy**	0=private (default), 1=public
SSID	SSID used
operator_name	Operator name (OperatorName attribute value, including "1")
enc_level	list of supported encryption levels separated with comma (,)
AP_no	number of APs ; put <blank> for unknown number;
wired_no	number of enabled sockets for wired access; put <blank> for unknown number
tag	specific characteristic(s); provide allowed values separated with comma (,) if a feature is enabled; allowed value(s): port_restrict, transp_proxy, IPv6, NAT, HS2.0
availability	0=default (no restrictions), 1=physical access restrictions
operation_hours	Provide info (in free text) if service is not available 24 hours per day by specifying operation hours (local time)

図2 eduroam database の位置情報定義 (Specification eduroam-database-ver30112021)

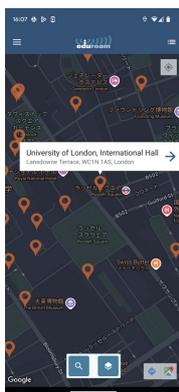


図3 eduroam Companion の表示例 (UK)

録されていない。

eduroam Companion のように、利用者が地図上で基地局の位置を確認する用途を考えると、所在地の情報はそれほど重要ではないと考えられる。基地局の名称は、検索によって場所を探そうとする場合に役立つものの、重要度はそれほど高くないと考えられる。多くの用途では、機関名で代用しても十分と考えられる。基地局の名称と所在地を必須項目から外すことによって、英字表記を考える負担もなくなる。もし詳細な情報を提供したいという機関があれば、基地局のある階や部屋などを含めて、オプションとして登録す



図4 eduroam Companion の表示例 (台湾)

ばよい。

座標値の取得には、GPS (Global Positioning System) を利用する方法や、GPS とクラウドソーシングを組み合わせる方法などがある。基地局マップデータの形式を工夫して、このような方法によるデータも統合できるようにすることで、データ作成の手間の削減が可能になる。

基地局種別は、個別の基地局を表す「シングルスポット」、複数の基地局をまとめて表す「エリア」、移動基地局を表す「モバイル」がある。これらは eduroam database の仕様に沿ったものであるが、eduroam database においても執筆時点で十分な実装が行われておらず、「シングルスポット」のみが有効である。将来的には、エリアのデータを自動生成したり、移動基地局を自動識別するための技術を開発することで、データ作成の大部分を自動化することが望ましい。

3 共通フォーマット

2章の分析に従って、基地局データの管理のための共通フォーマットを開発した。この共通フォーマットに従った Excel 形式のファイルを、テンプレートとして GitHub でも配布している [9]。このフォーマットは、通信事業者や eduroam 参加機関が組織内で基地局の管理をするのにも使えるように設計した。すなわち、大元の基地局管理シートの役割を果たせるようにした。基地局の位置情報の用途として、基地局マップばかりではなく、一般に LBS (Location-Based Services) と呼ばれる様々な応用も考えられる。それぞれの用途で、必要な情報が少しずつ異なるが、なるべく汎用性の高い形式を定義することによって、データの自動的な処理を可能にすることを目指している。省力化の基本的な考え方として、できるだけ初期の段

階で汎用性の高い電子データを生成・入力しておくことで、用途ごとの新規入力を避けるように配慮した。

なお、設計にあたっては、幾つかの通信事業者で利用されていた形式を参考に、基本的に1基地局ないし1エリアが1行で表されるようなスプレッドシート形式を踏襲した。様々な無線LANローミング基盤に共通する情報を汎用的に取り扱えるように工夫したが、現時点ではeduroamとCityroam, OpenRoamingのみを想定している。

執筆時点で、eduroam JPのシステムでは、1基地局の情報が縦に並ぶ表形式のExcelファイルを読み込むようになってきている。これは、eduroam databaseの仕様書の書き方になったものである。基地局ごとに複数行からなる2次元的なブロックが存在し、基地局が増えるごとに同様のブロックを繰り返して記述する必要がある。既存の基地局の情報を元にして新しい基地局を追加したり、多くの基地局に共通する変更を加えたりするときに、スプレッドシートの操作が煩雑であった。この問題を避けるため、共通フォーマットでは前述のような1基地局1行の形式を採用した。スプレッドシートの一部を、図5に例示する。

基地局の情報に加えて、カラムの名称や説明文などの行が含まれる。これらは、1カラム目が特定の値ではないことをもって、コメント行とみなすことができる。1カラム目の値がvisibilityの行は、ラベル行である。このようなラベル行を付加することにより、後でカラムが挿入されるような改訂があった場合でも、変換ツールの変更箇所が少なく済む。具体的には、「何カラム目」という決め打ちではなく、「ラベルが何々のカラム」という指定によって、正しいカラムの値を取得できるようになる。

ローミングシステムごとに、必要となる値が異なることから、R: 必須、O: 推奨オプション (オプションだが記載を推奨するもの)、無印: オプション (記載しなくてよいもの) のフラグをコメント行として追加した。例えば、eduroamのみを取り扱う学校などでは、eduroamの行を見て、記載の必要性を判断すればよい。2節で示したように、現行のeduroam JPでは基地局の名称と所在地も求められているため、これらはRとなっている。

基地局の管理の観点では、撤去された基地局の情報も残しておきたいことがある。これに対応するため、エリア掲載可否で「非公開」を選べるようにして、さらに、廃止年月日を記録できるようにした。

座標値は、従来は緯度と経度がカンマ区切りで1つ

のカラムに記入されていたが、データ処理が容易になるように、別々のカラムに記入するようにした。座標値の高度については、海拔高度 (altitude) を使う必要性は乏しいと判断して、階数を記入するようにした。

基地局の所在地は、位置情報の細かさを反映できるように、RFC 4776 [10] で定義される Civic Address A1-A6 に従って記入するようにした。無線LANローミングでは、位置情報をRFC 5580 [11] に従って交換するのが一般的である。RFC 5580において、位置情報の定義としてRFC 4776が参照されている。開発した共通フォーマットでは、日本の住所体系で扱いやすいものを拾い、A2, A5を割愛した。従来は住所を1つのカラムに記入しており、分割によって、データ入力の労力が若干増えることになる。一方で、住所の分割表記は、利用者の位置情報を利用する様々な位置情報サービス (LBS) で利用することを想定したものである。大元のデータで詳細な値を記録しておくことによって、様々なアプリケーションで新規にデータを入力する手間を省き、全体的な省力化を目指した。

もし郵便番号が分かっている場合は、日本郵便などが提供する変換表を用いて、住所入力の省力化が図れる可能性がある。将来的な自動化を想定して、郵便番号のカラムをオプションとして設けた。

4 フォーマット変換ツール

共通フォーマットから、他の形式のファイルを生成しやすくなるように、フォーマット変換ツールを開発した。また、このツール1式を、Access Point map database support tools の名称でGitHubにて公開した [9]。

apmap-eduroam.JP.pl はPerlスクリプトとして作られており、共通フォーマットのExcelファイルを読み込み、eduroam JP向けのCSV (Comma Separated Values) 形式のファイルを出力する。大学等の管理者は、最初に、eduroam JP申請システムからダウンロードしたExcelファイルのinstitutionシートに自機関の情報を入力しておく。次に、locationシートに記入されている初期データをすべて削除して、変換ツールが出力したCSVファイルを読み込む。このExcelファイルを保存すると、eduroam JP申請システムに基地局マップデータとしてアップロードできる。

apmap-kml.pl は、共通フォーマットのExcelファイルを読み込み、Google MapsのKML (Keyhole Markup Language) 形式のファイルに埋め込むための、Placemarkブロックを出力する。出力データは

	A	B	C	D	E	F	G
1	version	20250804					
2	凡例/備考	R: 必須 O: 推奨オプション 無印: オプション	eduroam, CityroamいずれかがRの項目は入力が必要です。				
3	eduroam	R					R
4	Cityroam	R	R	R	O	R	R
5	visibility	status	reg_date	remove_date	svc_name	op_short	loc_name
6	エリア掲載可否 (フルタウン)	運用状況 (フルタウン)	登録/更新年月日	廃止年月日 (廃止時のみ記入)	サービス名	事業者略称	設置場所名
7	非公開	本格運用	2025/4/1		Local24 Free Wi-Fi	Local24	〇〇〇駅コンコース
8	公開	本格運用					

	I	J	K	L	M	N	O	P
1								
2	世界測地系 (WGS84)		0: 未指定/G n: n階	自動処理作業 用 (記入不要)	RFC 4776 A1	RFC 4776 A3 (A2)	RFC 4776 A4	RFC 4776 A6 (A5)
3	R	R	O					
4	R	R	O					
5	latitude	longitude	floor	zip	CA1	CA3	CA4	CA6
6	緯度	経度	階	郵便番号	都道府県	市区町村	町(市内)	通・丁目番地
7	35.0070760	135.7648030	3		京都府	京都市中京区		
8								

図5 共通フォーマット (テンプレート) の一部

XML 形式の一部であり、これに Google Maps であらかじめ作成しておいた KML ファイルの先頭と末尾を付け加えることで、基地局の情報が含まれた KML ファイルを作ることができる。GitHub で公開されているコードは、Cityroam の基地局マップを作成するために開発したものである。他のマップで使う場合は、Perl スクリプトの一部をカスタマイズする必要がある。

5 むすび

本報告では、基地局マップデータの作成を容易にするために、データの簡素化・汎用化を検討し、共通フォーマットを開発、提案した。通信事業者や大学などが、この共通フォーマットを用いて基地局の一次情報を管理することにより、基地局マップデータに限定せず、位置情報を利用する様々なサービスにおいて位置情報の再入力の手間を省くことができる。また、実用的な応用例として、eduroam JP 向けや Google maps 向けのデータに自動変換する仕組みも開発した。WiGLE などのクラウドソーシングによるデータと組み合わせることで、データ入力自体の省力化を図ることも検討したが、具体的なデータ融合の調整は今後の課題である。

本研究の一部は、令和7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/>
(2025年9月12日参照)
- [2] eduroam Companion: <https://eduroam.org/eduroam-companion-app/>
(2025年9月12日参照)
- [3] Cityroam: <https://cityroam.jp/>
(2025年9月12日参照)
- [4] WBA OpenRoaming: <https://wballiance.com/openroaming/>
(2025年9月12日参照)
- [5] OpenRoaming Wi-Fi Coverage Map: <https://wballiance.com/openroamingmaps/?long=139.5&lat=37&zoom=5>
(2025年9月12日参照)
- [6] WiGLE: <https://wigle.net/>
(2025年9月12日参照)
- [7] 原田寛之, 後藤英昭, 坂根栄作, “eduroam 基地局位置情報の信頼性評価：公式データと実体分布の比較,” 大学 ICT 推進協議会 2025 年度年次大会 論文集, 2025.
- [8] eduroam Supporting services: https://monitor.eduroam.org/fact_eduroam_db.php
(2025年9月12日参照)

- [9] Access Point map database support tools:
<https://github.com/hgot07/apmapdb/>
(2025 年 9 月 12 日参照)
- [10] H. Schulzrinne, “Dynamic Host Configuration Protocol (DHCPv4 and DHCPv6) Option for Civic Addresses Configuration Information,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc4776>
(2025 年 9 月 12 日参照)
- [11] H. Tschofenig, F. Adrangi, M. Jones, A. Lior, and B. Aboba, “Carrying Location Objects in RADIUS and Diameter,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5580>
(2025 年 9 月 12 日参照)

[大学 ICT 推進協議会 2025 年度年次大会論文集より]

eduroam 基地局位置情報の信頼性評価：公式データと実態分布の比較

原田 寛之¹⁾, 後藤 英昭²⁾, 坂根 栄作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

Evaluating the Reliability of eduroam Access Point Location Data: A Comparison of Official Records and Real-World DistributionHiroyuki Harada¹⁾, Hideaki Goto²⁾, Eisaku Sakane³⁾

1) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

2) Cyberscience Center, Tohoku University

3) National Institute of Informatics

概要

学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam は、国内外の多くの教育・研究機関に普及し、機関の構成員が相互に無線 LAN を利用できる重要なインフラである。しかし、その利便性を支えるべき公式の基地局位置情報マップは、データ提出率が半数程度に留まっており、多くの基地局が地図上に登録されていないという深刻な問題を抱えている。これにより、利用者は近隣の基地局を把握できず、eduroam が持つ本来の利便性を享受できない状況が生まれている。本稿では、まずこの課題に対し公開データと大学の所在地情報を地理情報システム (GIS) で可視化して、マップデータの欠落状況を明らかにする。さらに、代替データソースとして期待されるコミュニティベースの Wi-Fi データベース「WiGLE」に着目し、その網羅性と位置情報の精度について、都市部での実地調査を交えて検証する。これらの分析を通じて、eduroam 基地局マップの現状と課題を浮き彫りにし、正確な情報共有の重要性について述べる。

1 はじめに

学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam [1]は、2003 年に 6 か国で運用が始まった。日本は 2006 年に加盟し、国立情報学研究所が eduroam JP [2] の名称で展開している。eduroam は、国内 464 機関 (2025 年 9 月現在)、世界の 100 を超える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。

eduroam のガバナンスは、アフリカ、アジア太平洋、ラテンアメリカ、北米、ヨーロッパの各ローミング事業者から推薦された代表者を、欧州 GÉANT が任命することで構成される Global eduroam Governance Committee (GeGC) によって管理されている[3]。そのガバナンスは、憲章と遵守声明 (eduroam Compliance Statement) [4]によって確立されており、この声明では、各ローミング事業者が、GeGC により定義された適切な方法で、

担当する国や経済圏において利用可能な eduroam サービスプロバイダ (eduroam SP) の位置情報を公開すべきだと規定されている。これに基づき、eduroam JP は eduroam JP サービス運用基準[5]を定め、加入機関および参加事業者に運用する基地局の位置情報を eduroam JP に提出することを義務付けている。しかしながら、eduroam JP によればその提出率は 2024 年 8 月現在で 55.2%、2025 年 4 月現在で 54.8%となっており、依然低い提出率に留まっている。その結果、公開されている eduroam 基地局マップ[6]についても多くの基地局が示されておらず、利用者が eduroam サービスを利用できるロケーションを十分に正しく把握できていないといった課題が生じており、その利便性にも影響を与えている。

本報告では、初めに、eduroam JP への基地局マップデータ提出率の向上に向けた技術的支援策や取り組みについて述べる。続く第 3 章では、日本国内の eduroam JP 加入機関の所在地情報を地理情報システム (GIS) 上で可視化し、提出された基地

局マップデータとの対応状況を分析する。第4章では、コミュニティベースの Wi-Fi データベース WiGLE [7]によって収集された基地局位置情報の精度を、都市部での実地調査を通じて検証する。第5章では、eduroam 基地局の公式データと WiGLE による実態分布を比較し、両者の差異とその要因について考察する。第6章では、これまでの分析結果を総括し、今後の課題と改善の方向性について述べる。

2 eduroam における基地局マップデータ提出の改善に向けた取り組み

eduroam JP が取りまとめて GÉANT で現在公開されている世界の eduroam 基地局マップ (図1) は、eduroam.org の定める eduroam database の形式 [8] に沿って各加入機関が提出する基地局マップデータを元としている。eduroam JP では eduroam JP 申請システムにおいて、基地局マップデータの作成を支援する機能 (スプレッドシートへ位置情報を入力しシステムにアップロードすることで XML に変換される) を実装するなど、加入機関・参加事業者の負荷軽減を図っている [9]。

しかしながら、同システムで用意されている作成支援用スプレッドシートは市街地で eduroam 基地局を大量に展開する事業者にとって作成の負担が大きいと考えられたことから、基地局の位置情報をリスト化した CSV ファイルを元に eduroam JP システムの基地局マップデータ登録画面にアップロード可能な XML を生成するスクリプトを 2024 年 10 月に作成・公開し、2024 年度大学 ICT 推進協議会年次大会で発表 [10]を行った。

また、2018 年 6 月より市民向けローミング基盤 Cityroam (eduroam と世界規模のローミング基盤 OpenRoaming [11]を併設して展開)を展開していたセキュア公衆無線 LAN ローミング研究会から一般社団法人無線認証連携協会[12] (以下、Cityroam 協会) が 2024 年に独立して法人化された。その後 Cityroam 協会が eduroam JP に eduroam SP として加入したことを受け、両組織間で協議のうえ体制の整理と事務手続きの簡素化が進められた。具体的には、従来 Cityroam 協会に加入してサービスを提供する事業者については eduroam JP に事前加入することを求めていたが、この条件を廃止し、Cityroam 協会加入事業者は Cityroam 協会の許可と監視の下で eduroam サービスを併設した

OpenRoaming 基地局を提供できるように Cityroam 協会のサービス実施要領を改訂した (独立した eduroam サービスのみの提供はできない)。



図1 eduroam 基地局マップの北海道表示 (GÉANT)

この体制のもと、Cityroam 協会では、2025 年 8 月に加入事業者向けに基地局マップデータの提出を求める体制を構築した。提出形式として独自に開発したスプレッドシートを採用しており、事業者によるデータ作成の容易性が考慮されている。またこのシートからマップ用のデータを作成する支援ツールも合わせて開発・公開され[13]。これらは文献[14]にて詳細が報告されている。このツールでは Cityroam 協会が独自に Cityroam 基地局マップとして公開している Google maps 用の KML (Keyhole Markup Language) フォーマットのファイルを生成することも可能である。KML は後述する GIS ツールでの利用にも親和性が高く、汎用性がある。これを元に、Cityroam 協会は協会加入事業者から提出された基地局マップデータを取りまとめて eduroam JP に提出することとなる。

なお、Cityroam 協会に加入していない事業者が eduroam SP としてサービス提供する場合の取り扱いに変更はない (事業者が直接 eduroam JP に基地局マップデータを提出する) が、このような eduroam SP 事業者や従来の eduroam SP に加入している学術機関も Cityroam 形式のスプレッドシートを使用してツールで変換することで、より粒度を上げた eduroam JP 申請システム用の基地局マップデータの生成が可能となっている。

これらのように、基地局マップデータの提出率改善に向けた取り組みが各所で行われており、今後の単なる提出率の向上だけではなく、その精緻化にも寄与すると考えている。

3 日本国内における eduroam 加入機関と基地局マップデータの可視化

前章の取り組みと並行して、現在の eduroam JP 加入機関による基地局設置状況を把握するため、eduroam JP の Web サイト上で公開されている加入機関のリストを元に、うち高等教育機関に分類される 403 の大学・高等専門学校について文部科学省が公開している学校コードのリスト[15]と照合し学校所在地の住所を得た。

この住所を元に、Google Maps Platform[16]の API を用いて緯度・経度を取得し、QGIS[17]にて OpenStreetMap[18]の地図上にマッピングした(図 2 および図 3, 赤線の円に赤十字). 但し、学校コードのリストに記載されている住所はいわゆる学校本部の住所であるのに対し、eduroam JP 加入機関の基地局は機関の複数のキャンパスにおいて設置される場合があることに留意する必要がある。

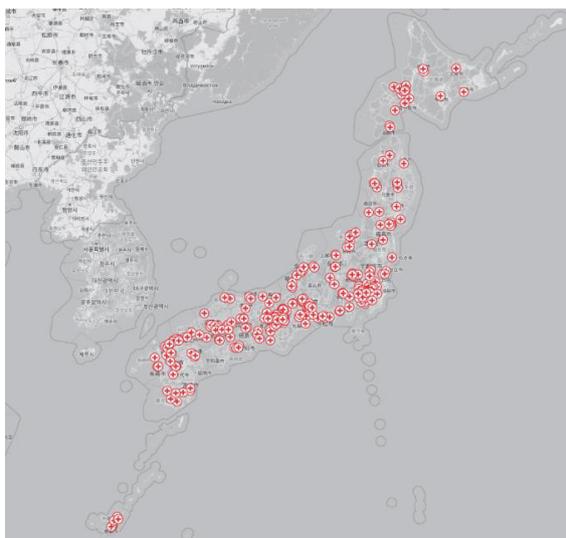


図 2 eduroam JP 加入機関(大学・高等専門学校)の所在地

機関によって敷地面積はまちまちであるが、本学江別キャンパスの面積を標準として各加入機関の所在地を中心に QGIS にて半径 350m の円を描き、加入機関の基地局設置位置の基準とした。なおこの際、QGIS の参照座標系設定にて地理座標系を使用している状態では正しい円を描くことができないため、加入機関所在地を局地的な投影座標系に再投影する必要がある。ここではあまり精度は必要ないため、日本測地系 2011 (JGD2011/Japan Plane Rectangular CSV, 関東・中部地方の一部で歪みが最小限に抑えられる座標系) を用いた。



図 3 eduroam JP 加入機関(大学・高等専門学校:札幌近郊)の所在地

本学が所在する江別市には 4 大学が設置されており、すべて eduroam JP 加入機関である。これを図 4 の地図上で A, B, C, D とした。

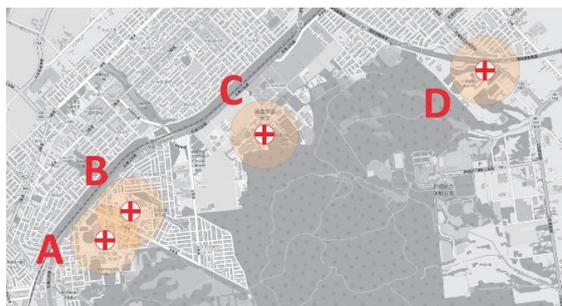


図 4 eduroam JP 加入機関エリアの目安(江別市 4 大学)

eduroam JP 加入機関が提出する基地局の位置データは、eduroam JP が取りまとめて GÉANT が公開しており、サイト上で KML ファイルとしても公開されている[19]. 2025 年 9 月の時点では 1969 件の基地局マップデータが登録・公開されており、この KML ファイルを QGIS に読み込んで地図上に重ね合わせた(図 5, 赤の点)。

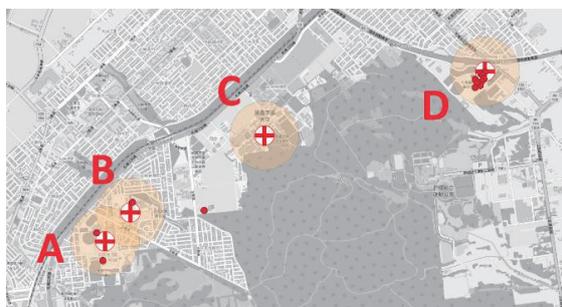


図 5 eduroam JP 加入機関が提出した eduroam 基地局マップデータの重ね合わせ

図5において、江別市内の4大学ではAとBの2大学がキャンパスでまとめて1つの基地局として公開しているのに対し、Dではキャンパス内の建物に留意した粒度で位置情報を提出していることがわかる。またBがメインキャンパス以外にも基地局を設置しているが、これは学校コードから抽出した位置情報とは異なるため、加入機関エリアの目安円に位置していない場所にある。また、他に大学以外の研究機関が提出した基地局が確認できるが、今回の加入機関の所在地を学校コードから取得した都合上、この研究機関も所在地の目安円が描かれていない。Cの近傍には公開されている基地局が見当たらない状況である。

但し、前提としているeduroam JP参加機関のリストには「参加申請のあった機関を掲載しており、システム構築中も含まれる」旨が注意書きとして書かれているため、Cは基地局が設置される前の状況である可能性も考えられる。そこで、さらにQGISにコミュニティベースのWi-FiポジショニングシステムであるWiGLEから取得したeduroam基地局の位置データを読み込み、地図上に重ね合わせた(図6、青の点)。



図6 WiGLEから取得したeduroam基地局位置情報の重ね合わせ

しかしながら、このエリアのWiGLEユーザーによるデータ収集は活動的とは言えず、Bの構内では実際の基地局とよく一致すると思われる位置が示されたものの、Dにおいてはキャンパス外を通る幹線道路上での位置のみが示される結果となった。また、A、Cの近傍では、WiGLEによるeduroam基地局の検出は見られなかった。

WiGLEはコミュニティユーザーの活動によりデータを収集しており、より人の往来が少ない地域においてはさらに収集されているデータが少ないことが懸念される。このため、WiGLEで収集された基地局位置データのみを使用してeduroam基地局のマップを作成することは困難であり、加

入機関による基地局マップデータの提出が重要であることがわかる。少なくとも今回のデータ上では、C大学内でeduroamサービスを利用できる根拠が得られない結果となった。このような状況についての改善方法については引き続き検討していく必要がある。

一方、WiGLEのデータが有効に活用できる例として、WiGLEユーザーがある程度活発な活動を行っている都心部においては、eduroam JPへの基地局位置データの提出が確認できない加入機関においてもeduroamサービスが稼働している状況を把握することができた。以下は東京都内の加入機関のマップデータの例である(図7)。

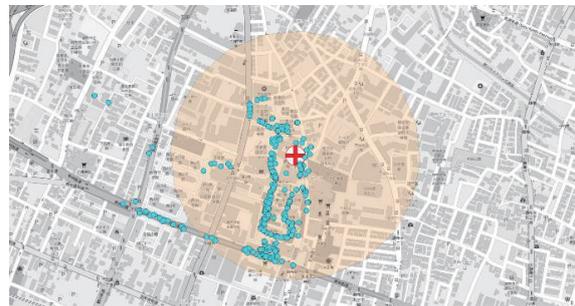


図7 eduroam基地局データが確認できないが、WiGLEにより稼働状況が推測される加入機関

このような加入機関は本報告で生成したマップにおいて全て可視化できており、該当する機関にはeduroam JPサービス運用基準に従って位置情報の提出を促していくことが可能と思われる。

4 WiGLEが収集する基地局位置データの精度の検証

首都圏や京阪神ではWiGLEユーザーの活動もある程度活発であり、またCityroam協会加入事業者による市街地でのeduroamを併設したOpenRoaming基地局の設置も急速に進んでいる。そこで、東京都港区の新橋駅東口周辺において実地調査を行った。

2025年9月の時点では、当該エリアの基地局の位置情報はCityroam基地局としてCityroam協会に提出されており、Cityroam協会のWebサイトでマップを公開している。位置データについてもKMLフォーマットでエクスポート可能であり、これを取得してQGISに読み込んだ(図8、赤い点)。Cityroam協会が公開している基地局位置データは2025年9月現在で2161件であった。



図 8 Cityroom Map による新橋駅東口の eduroam 基地局位置

これは本来全て eduroam JP にも提出されているべきものであるが、本稿執筆時点では差異が見られたため、重複する基地局がある前提で使用した。

続いて、WiGLE ユーザーが十分にエリア内でデータを収集したことを確実にするため、実際に Android スマートフォンに WiGLE をインストールした上で、地図上の基地局設置エリアを歩行しながらデータを収集し（図 9）、自ら WiGLE にアップロードした。この際、WiGLE ではスマートフォンの GPS 情報を用いることから、高層ビルが多い新橋駅周辺エリアでも極力正確な測位が行えるよう準天頂衛星システム QZSS を含む 5 種の衛星を L1, L5 で受信可能なスマートフォン（Pixel 9 Pro Fold）を用いた。またデータ収集中、屋外に設置されている基地局を目視し、Cityroom Map の位置情報に誤りがないことを確認した（図 10）。



図 9 WiGLE にてデータを収集した歩行経路（黄色・緑色）

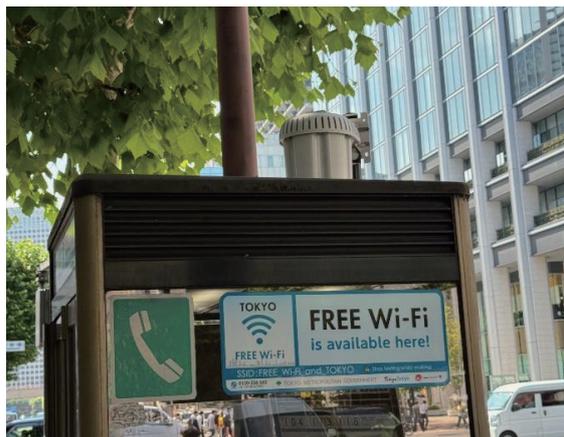


図 10 目視した基地局（西新橋交差点付近、2025年6月20日）

データ収集後、自らアップロードしたデータを含む WiGLE データを WiGLE API により取得し、得られた eduroam 基地局の位置情報を QGIS にて eduroam 基地局位置に合わせて読み込んだ。



図 11 WiGLE から取得した eduroam 基地局位置情報の重ね合わせ

このようにデータ収集を丁寧に行ったにもかかわらず、WiGLE で収集された eduroam 基地局の位置情報と実際の基地局位置にはずれが生じることが確認できた。ずれ量を確認するため、基地局位置を中心とした円を QGIS 上に描く方法で推定したところ、おおよそ半径 75m の円ではほとんどの WiGLE による検出位置を収めることができた（図 12）。



図 12 eduroam 基地局位置と WiGLE での検出位置のずれ

WiGLE についてはこの程度のずれが生じる精度のデータ収集であることに留意して活用する必要があると言える。

また、日本国内での eduroam 基地局の特徴的な例として、大阪府の Osaka Free Wi-Fi OpenRoaming (eduroam を併設) がある。主に空港及び鉄道駅を中心とした整備が進められているが、加えて関西国際空港・伊丹空港アクセスバスにも基地局が搭載されており、バス乗車中の利用が可能となっている。このため、このエリアにおいては WiGLE による eduroam 基地局位置の多くがバスの走行経路上などに分散しており、そのままでは基地局位置のマッピングへの利用には適さない状況にある。加えて、eduroam 基地局を海上で誤検出したデータも多く収集されていることが確認できる(図 13)。

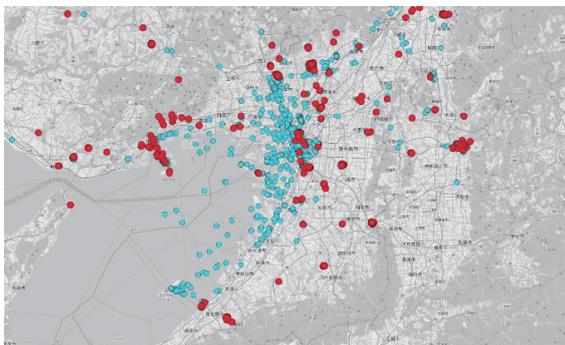


図 13 大阪府エリアの eduroam 基地局位置 (赤色) と WiGLE で収集された eduroam 基地局位置 (青色)

5 eduroam 基地局位置公式データと実態分布の比較

本報告にて収集したデータ件数は次の通りとなった。

表 1 収集したデータ件数

項目	件数
eduroam JP 加入機関のうち 大学・高等専門学校	403 機関
eduroam JP 加入機関が提出した 基地局位置データ	1969 地点
Cityroam 加入事業者が提出した 基地局位置データ	2161 地点
WiGLE で収集された 日本国内の eduroam 基地局数	44133 基

これらのデータについての注意点として、まず加入機関の位置情報については第 3 章で述べた通り、機関の本部所在地のみを抽出しているため、複数キャンパスにわたって eduroam 基地局を設置している機関の全ての位置が含まれてはいないことに留意する必要がある。

また、eduroam JP 加入機関が提出する基地局位置データについては、その粒度は定められておらず、多くの加入機関はキャンパス単位、あるいは建物単位でまとめて 1 件としてデータを提出しているため、個々の基地局位置を収集する WiGLE の収集件数とは大きな開きが出ている。

さらに、WiGLE においては各基地局データのうち、最後の WiGLE ユーザーからの報告があった日時の最も古いものは 2014 年の検出であった。現在までに加入機関の基地局更改などにより既に稼働していないものも件数としては含まれると推測され、2025 年現在に実稼働している eduroam 基地局数とは異なる。

これらの前提のもと、日本全国の eduroam 基地局公式データと実態分布を収集したデータを QGIS にてマッピングし、日本国内におけるより実態に近い eduroam マップを得ることができた(図 14)。

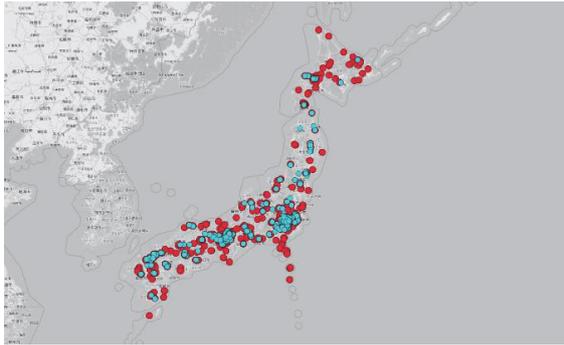


図 14 日本国内における eduroam 基地局の実態分布

6 まとめ

本稿では、普及が進む学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam において、利便性の根幹をなす基地局マップのデータが不完全であるという課題について、多角的な分析を行った。

はじめに、公式に提出された基地局位置データと加入機関の所在地情報を GIS 上で可視化し、多くの機関でデータが未提出である現状を示した。次に、その代替となりうるコミュニティベースの Wi-Fi データベース WiGLE に着目し、その有効性と限界を検証した。その結果、郊外ではデータが極めて少ない場合があり網羅性に問題があること、また東京都心部での実施調査により WiGLE の位置情報には半径 75m 程度の無視できない誤差が含まれることを明らかにした。さらに、大阪の空港アクセスパスの事例からは、移動体に設置された基地局の情報を WiGLE から正確に把握することは困難であることも確認した。

以上の分析から、WiGLE は基地局の存在を大まかに把握する参考にはなりうるものの、その網羅性と制度の限界から、公式マップを代替・補完する決定的な解決策にはならないと結論付けられる。利用者が確実な接続性を得るためには、やはり eduroam 加入機関自身による正確な基地局位置情報の提出が不可欠である。

今後の課題として、データ提出のインセンティブ設計や、提出作業のさらなる負担軽減策の検討が挙げられる。eduroam の利便性を最大限に発揮させるためにも、コミュニティ全体での継続的なデータ整備が強く求められる。

本報告の一部は、令和 7 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:
<https://eduroam.org/>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [2] eduroam JP:
<https://www.eduroam.jp/>
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [3] eduroam Governance:
<https://eduroam.org/about/>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [4] eduroam Compliance Statement:
https://eduroam.org/wp-content/uploads/2025/07/eduroam_Compliance_Statement_v2-FINAL.pdf
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [5] 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/>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [6] eduroam Facts&Maps:
https://monitor.eduroam.org/map_service_loc.php
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [7] WiGLE: <https://www.wigle.net/>
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [8] eduroam database:
https://monitor.eduroam.org/fact_eduroam_db.php
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [9] 国立情報学研究所, “eduroam JP 機関情報・基地局データについて.” :
<https://meatwiki.nii.ac.jp/confluence/pages/viewpage.action?pageId=49348611>
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [10] 原田寛之, 後藤英昭, “コミュニティベースの Wi-Fi ポジショニングシステムを活用した eduroam 基地局の位置情報データ生成と可視化の改善,” 大学 ICT 推進協議会 2024 年度年次大会論文集 12PM1C-4, 2024.
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [11] OpenRoaming:
<https://wballiance.com/openroaming/>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [12] 一般社団法人無線認証連携協会:
<https://cityroam.jp/>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [13] Access Point map database support tools:
<https://github.com/hgot07/apmapdb/>
(2025 年 9 月 9 日参照)

- [14] 後藤英昭, 原田寛之, 坂根栄作, “eduroam /Cityroam 基地局マップデータの簡素化と共通フォーマットの開発,” 大学 ICT 推進協議会 2025 年度年次大会論文集, 2025.
- [15] 文部科学省 学校コード:
https://www.mext.go.jp/b_menu/toukei/mext_01087.html
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [16] Google Maps Platform:
<https://developers.google.com/maps/?hl=ja>
(2025 年 9 月 22 日参照)
- [17] QGIS: <https://qgis.org/>
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [18] OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/>
(2025 年 9 月 9 日参照)
- [19] JP eduroam map List of service location:
<https://monitor.eduroam.org/kml/jp.kml>
(2025 年 9 月 22 日参照)

[報 告]

オープンキャンパス 2025 報告

情報セキュリティ研究部 水木敬明

2025年7月30日と31日の2日間、東北大学オープンキャンパス2025が開催されました。一昨年度、昨年度に引き続き来場制限を行わない通常開催のオープンキャンパスとなり、2日間で約58,000人が本学に来場されたとのことです。

サイバーサイエンスセンターにおきましても一昨年度、昨年度に引き続き対面での一般公開となりました。具体的には次のような要領で当センターのオープンキャンパスを実施しました。

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

【開催日時】 2025年7月30日（水）10:30～15:30

2025年7月31日（木）10:30～15:30

【内容】 スーパーコンピュータ AOBA の見学

研究部による研究紹介

分散コンピュータ博物館の見学

未踏スケールデータアナリティクスセンター（UDAC）の紹介

一昨年度、昨年度に引き続き、2019年度以前より開催時間や場所に関して規模を縮小しつつ、本センターにご興味を持つ方々にじっくりご見学いただくことができたと考えております。分散コンピュータ博物館もご覧いただきました。ご来場いただきました皆様に感謝申し上げるとともに、来年度の参加をお待ちしております。

TOHOKU UNIVERSITY Cyber Science Center

- ・スーパーコンピュータ AOBA の見学
- ・研究部による研究紹介
- ・分散コンピュータ博物館の見学

7月30日（水）～31日（木）
10:30～15:30（両日）

TOHOKU UNIVERSITY Supercomputer AOBA

東北大学サイバーサイエンスセンター
オープンキャンパス 2025

スパコンを見に行こう！

サイバーサイエンスセンター
受付は2号館1Fです

東北大学オープンキャンパス HP
青葉山キャンパス G08

お問い合わせ先（センター総務係）
email: cc-som@grp.tohoku.ac.jp
TEL: 022-795-3407

[報 告]

SC25 出展・参加報告

スーパーコンピューティング研究部 河合直聡

2025年11月16日から21日にかけて米国ミズーリー州セントルイス市のAmerica's Center Convention Complexにおいて、The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC25)が開催されました。SCは高性能分野における最大規模の国際会議・展示会です。今年のSC25は16,500名以上の参加者があり、過去2番目に多い参加者数(最多はSC24年)となりました。企業展示に関しては約560団体と、こちらはSC24のおおよそ500団体からさらに増加しており、また、AI技術に関する出展、発表も多かったことから、HPC-AI連携の重要性やそれに伴ったHPCの学界および産業界でのさらなる広がりを実感するSCとなりました。

当センターでは、本学の流体科学研究所、金属材料研究所、東北メディカル・メガバンク機構と共同で展示ブースを設置・運営しました。当センターからは教員2名、大学院生3名および技術職員1名が参加し、展示ブースにおいてスーパーコンピュータ「AOBA」のシステム構成や利用状況のほか、スーパーコンピューティング研究部および高性能計算技術開発(NEC)共同研究部門の研究成果をポスターと動画を用いて紹介しました。特に、本年度の研究成果としては直前にプレスリリースを行った災害発生時のマルチサイト緊急ジョブ実行に関する成果を展示しており、大きな反響がありました。



東北大学ブースの様子

SCは毎年ドイツで開催されるISC High Performanceと並び、スーパーコンピュータの世界ランキングであるTop500リストが発表される場です。SC25で発表された2025年11月Top500リストでは、米国ローレンスリバモア国立研究所のエクサスケールマシンEl Capitanが前回に続き1位となりました。また、ドイツのユーリッヒ研究センターで新たに稼働したJUPITER Boosterがヨーロッパ初のExascale 越え性能のシステムとして4位にランクインし、大きな関心を集めました。

2023年8月からサービス提供を開始した当センターの新スーパーコンピュータAOBA-Sは、昨年11月のリストでは76位でしたが、1年間で数多くのシステムが新たに登場したために今回は107位になりました。しかし、Top500リストで性能測定に用いられるHigh Performance Linpack (HPL) ベンチマークより実アプリケーションの特徴に近いとされているHigh Performance Conjugate Gradient (HPCG) ベンチマークを用いたHPCGリストでは、前述のように多くシステムが1年間で新たに登場したにも関わらず18位(2023年11月時点で10位)を維持しています。このことから、実行性能がメモリ性能の影響を強く受ける実アプリケーションにおいては、AOBA-Sが依然として世界でも有数の性能を期待できるシステムであることが分かります。

次回のSC26は、2026年11月15日から20日に米国イリノイ州シカゴ市のMcCORMICK PLACEで開催予定です。

[報 告]

第 40 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、2025 年 10 月 14 日(火)～15 日(水)に高性能計算に関する国際ワークショップ「第 40 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 40 回 WSSP では技術講演として全部で 24 件の発表があり、日本とドイツの研究者により、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。のべ 74 名もの現地参加があり、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「欧州の AI ギガファクトリー計画とそれが HPC に与える影響」に関する講演、DLR 部門長の Sabine Roller 氏による「HPC と AI の融合」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「LLM が意識を持つかという議論」に関する講演、アーヘン工科大学の Mattias Meike 氏による「有限体積ソルバーの GPU/APU 移植」に関する講演などがありました。

日本からは、まず文部科学省の栗原潔氏に「富岳 NEXT や AI for Science を推進するための次世代 HPCI に関する政策」を紹介いただきました。海洋研究開発機構の真砂啓氏、理化学研究所の佐野健太郎氏、大阪大学の伊達進氏に加えて NEC の技術者に講演をいただきました。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 の将来展望に関する講演や乱流計算のベクトルスーパーコンピュータ実装に関する講演を行いました。これらの講演に加えて、今回は第 40 回開催の節目を記念し、これまでの 20 年を振り返り、これからの 20 年への期待をお話いただく特別セッションも企画しました。本ワークショップ創始者のひとりである東北大学の小林広明氏に加えて、順天堂大学の姫野龍太郎氏および青森大学の下條真司氏にそれぞれの立場からお話いただきました。

Teraflop Workshop という名称で本ワークショップが初めて開催されたのは、2004 年 5 月のことだったそうです。第 1 回から第 2 回の開催場所はシュトゥットガルトで、第 3 回は東京、第 4 回は再びシュトゥットガルトで開催されたそうです。第 5 回は仙台で 2006 年 11 月に開催され、東北大学情報シナジーセンター(サイバーサイエンスセンターの前身)が主催でした。私自身、そのときから若手教員の一人としてお手伝いをさせていただき、本当にいろいろな貴重な経験をすることができました。それ以降、本ワークショップはほぼ年 2 回のペースで、シュトゥットガルトと仙台とで交互に開催されてきました。2012 年 12 月の第 16 回から、ワークショップの理念をそのままにして名称のみを Workshop on Sustained Simulation Performance に変更し、今日まで続いています。これまでご支援、ご助力、ご貢献いただいた方々に心より感謝しつつ、今後さらに充実した情報交換の場となるように努めてまいります。

第 40 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/wssp40/ja/index.html>



本ワークショップの歴史

[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/>

計算機利用負担金の請求について

2025年度の計算機利用負担金の請求（請求書の送付または振替請求）は、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。

上記の期間以外で請求の必要がある場合は、情報部デジタルサービス支援課（受付）までお問合せください。

2026年4月上旬（10～3月利用分）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】

2025年10月から2026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。加算した請求額が5,000円未満の場合は請求はありません。）

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、請求処理を行います。

請求書の到着期日を情報部デジタルサービス支援課（受付）までお早めにお知らせください。請求金額確定日以降の利用分は、4月上旬に再度請求を行います。

現在の請求予定額については、[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。）

[【鍵ペア作成・LDAPパスワード変更・AOBA-S 利用状況確認】](#)

[【AOBA-A, B 利用状況確認】](#)

User login -> PJ 課金明細 「今期請求予定額」

問合せ先 情報部デジタルサービス支援課（受付）

Email [cc-uketuke\[at\]grp.tohoku.ac.jp](mailto:cc-uketuke@grp.tohoku.ac.jp)（[at]を@に変えてください）

（情報部デジタルサービス支援課）

執筆要項

— 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。詳細はデジタルサービス支援課（受付）までお問い合わせください。
- (2)投稿予定の原稿が15ページを越す場合はデジタルサービス支援課（受付）まで前もってご連絡ください。
- (3)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (4)原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内 情報部デジタルサービス支援課（受付）

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

TEL 022-795-3406

スタッフ便り

私は中国西北部の内陸にある小さな街——天水の出身です。そこでは山から吹く風が乾いていて、黄土と麦畑の色はとても純粋で、まるで幼少期に素朴で確かな下地を敷いてくれたようでした。幼い頃から遠い場所に憧れ、未知を探ってみることが好きでした。幸いにも家族の支えと励ましを得て、1,350kmを越え、上海・黄浦江のほとりで学部時代を過ごしました。その後もまた幸運に恵まれ、日本へ渡り、富山では立山連峰の麓で大学院教育の洗礼を受けました。そして今、仙台が私の新たな座標となりました。

ここには「杜の都」のやわらかさがあり、同時に研究都市としての張りもあります。商店街の人声の中を歩いても、角を曲がれば静かなキャンパスに出会える。広瀬川沿いを少し歩くだけで、心が自然とほだけていきます。最近、同僚の皆様からセンターの大規模計算や防災・減災に関わる取り組みについて伺う中で、とりわけ実感したのは——「計算」は論文の指標にとどまらず、いざという時に社会を支える底力になり得る、ということでした。この実感は、今後の研究への確信も強めてくれました。私は人工知能(AI)を中心に研究しており、大規模計算基盤を活用しながら、AIをより堅牢で信頼できるものへと磨き上げ、現実の科学的課題や社会的ニーズにより近い形で貢献していきたいと考えています。

趣味は幅広く、スポーツ、歌、写真、旅行、そしてコンピュータゲームです。私にとって、これらの体験は脳にさまざまな「特徴量の次元」を増やすようなものです。見た風景、出会った人、負けた一局、走り切った一つの区間——それらがある瞬間、そっと新しいアイデアへと変わることがあります。仙台でも、こうした方法で街を知っていきたくと思っています。レンズで季節を記録し、自分の足で街を歩いて確かめ、そして少しだけ芸術的な感性を添えて、研究の成果に温度と美しさを加えられたらと思います。

私は富山大学から参りました、令和7年10月1日付けで着任した陶思晨と申します。着任以来、皆様からさまざまなご配慮をいただき、心より感謝しております。できるだけ早く成長し、着実に歩みを進め、皆様のお力になれるよう努めるとともに、研究を通じて社会に貢献してまいります。今後ともどうぞよろしく願いいたします(陶思晨)。

年末に九州地方(福岡・長崎・熊本)へ旅行に行ってきました。福岡県以外の2県を訪れるのは初めてでしたが、どこも再訪したいと感じるほど素敵な場所でした。長崎県へは熊本港からフェリーで向かい、島原港に約60分で到着しました。天候に恵まれたこともあり、フェリー前方の窓越しに望む雲仙普賢岳は絶景でした。夜はホテル近くの居酒屋に行きましたが、そこでいただいた「ハトシ」がとても美味しかったです。店員さんに聞いたところ、ハトシとはエビのすり身を食パンで挟み、油で揚げた長崎県の郷土料理とのことでした。

中国語(広東語)が語源で、蝦(ハー):エビ+多士(トシー):トーストで、「ハトシ(蝦多士)」と呼ばれるそうです。

最終日は熊本県の阿蘇へ向かい、阿蘇全体を周遊するコースを楽しみました。

大観峰から望む朝日、草千里ヶ原でのハイキング、そしてヘリコプターから見下ろす阿蘇中岳火口などどれも圧倒されるほどの迫力でした。

今回、北の東北から南の九州へ移動しましたが、九州は雪もなく秋のような暖かさで、非常に過ごし

やすかったです（東北住まいとしては羨ましい限りです）。

皆さんもぜひ訪れてみてください。本年もどうぞよろしく願いいたします。（R.F）

【サイバーサイエンスセンタースタッフ異動のお知らせ】

2025. 10. 1 付け

[着任]

陶 思晨 スーパーコンピューティング研究部 特任助教



SENAC 編集部会

滝沢寛之 水木敬明 後藤英昭 河合直聡
今野義則 佐々木明里 大泉健治 小野 敏
斉藤くみ子

2026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 AOBA システム一覧

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

サーバとホスト名

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

サービス時間

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

サブシステム AOBA-S の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	VE 数※	実行形態	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	sxsf	1	1VE	1 時間/1 時間	96GB
共有	sxs	1	1VE	72 時間/720 時間	96GB×VE 数
		1～2048	8VE 単位で確保		
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 AOBA-A の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	VE 数※	実行形態	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	sxf	1	1VE	1 時間/1 時間	48GB
共有	sx	1	1VE	72 時間/720 時間	48GB×VE 数
		2～256	8VE 単位で確保		
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 AOBA-B の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	ノード数※	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
共有	lx	1～16	72 時間/720 時間	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

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.59 No.1 2026-1

[巻頭言]

『普通の人のためのスーパーコンピュータセンターを目指して』から 10年を経て……………	小林 広明	1
--	-------	---

[共同研究成果]

宇宙初期における位相欠陥の格子シミュレーション……………	北嶋 直弥	4
重力によって生じる気液界面挙動のビット演算による簡易解析の検討…	松岡 浩	8
小惑星内部構造レーダ探査模擬FDTDシミュレーションコードの開発…	小林 敬生	20

[大学ICT推進協議会 2025年度年次大会論文集より]

スーパーコンピュータAOBA サブシステムAOBA-Sにおける運用実績と利用者支援, およびNanoTerasu との連携について……………	森谷 友映 藤村 瑠菜 齋藤 敦子 小野 敏 大泉 健治 河合 直総 滝沢 寛之	28
---	--	----

eduroam/Cityroam 基地局マップデータの簡素化と 共通フォーマットの開発……………	後藤 英昭 原田 寛之 坂根 栄作 廣瀬 丈矩	33
---	----------------------------------	----

eduroam基地局位置情報の信頼性評価：公式データと実態分布の比較…	原田 寛之 後藤 英昭 坂根 栄作	39
-------------------------------------	-------------------------	----

[報告]

オープンキャンパス2025報告……………	水木 敬明	47
SC25出展・参加報告……………	河合 直総	48
第40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	50

[スーパーコンピュータAOBAのお知らせより]

計算機利用負担金の請求について……………		52
----------------------	--	----

執筆要項……………		53
-----------	--	----

スタッフ便り……………		54
-------------	--	----