



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.58 No.1 2025-1



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。

本誌の名前「SENAC」の由来

昭和 33 年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメ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。

スーパーコンピュータ AOBAS システム一覧

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

サーバとホスト名

フロントエンドサーバ (AOBAS-S 用)	sfront. cc. tohoku. ac. jp
データ転送サーバ (AOBAS-S 用)	sfile. cc. tohoku. ac. jp
ログインサーバ (AOBAS-A, B 用)	login. cc. tohoku. ac. jp
データ転送サーバ (AOBAS-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 AOBAS-S	連 続 運 転
サブシステム AOBAS-A	連 続 運 転
サブシステム AOBAS-B	連 続 運 転
各種サーバ	連 続 運 転
大判プリンタ	平日 9:00～21:00

クラウドサービス AOBAS-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 AOBAS-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 AOBAS-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.58 No.1 2025-1

[巻頭言]			
TOPICとサイバーサイエンスセンター	水木 敬明	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	3	
X線CT装置を用いた誘電体レンズ付きアンテナの 3Dモデル化とFDTD解析法	春日 貴志 新村 奨 林 優一	8	
直交格子積み上げ法を用いた超音速流中での 燃料噴射解析手法の開発	小川奏一郎 佐々木大輔	15	
2次元キャビティが及ぼす後退平板境界層の 乱流遷移過程への影響	新開 壮希 中川 皓介 塚原 隆裕	21	
プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の 性能向上に向けて —第2報—	浅田 健吾・渡部航太郎 藤井 孝蔵・立川 智章	27	
[大学ICT推進協議会 2024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の 運用状況と利用者支援について	木村 優太・森谷 友映 山下 毅・小野 敏 大泉 健治・滝沢 寛之	39	
無線LANローミングにおける個人データ活用と 認証負荷削減のためのオフライン属性共有手法	後藤 英昭 原田 寛之 漆谷 重雄	43	
6GHz帯を利用した次世代キャンパス無線LAN環境の検証と課題	原田 寛之 後藤 英昭 漆谷 重雄	49	
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	原田 寛之 後藤 英昭	57	
[報告]			
SC24出展・参加報告	滝沢 寛之	62	
第38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	64	
[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		66	
執筆要項		67	
スタッフ便り		68	

[巻頭言]

TOPIC とサイバーサイエンスセンター

水木 敬明

東北大学サイバーサイエンスセンター

上のタイトルにあります「TOPIC」は、「東北学術研究インターネットコミュニティ」を意味しています。TOPIC は、東北地区において学術研究・教育活動を支援するコンピュータネットワーク環境の発展に貢献するために活動しており、その事務局が東北大学サイバーサイエンスセンターに置かれています。筆者はこの巻頭言が掲載されている「大規模科学計算システム広報 SENAC」を編集している SENAC 編集部会の委員を長年務めています。今回ついに(?) 巻頭言の執筆がまわってきまして、何をテーマに書くべきか思案した結果、TOPIC についてご紹介することになります。

TOPIC の設立は 1992 年にさかのぼり、東北地方の学術系ネットワークとして長い間、この地域の大学・高専や研究機関を結びつけ、またインターネットにつながる基盤として機能してきました。その後、国立情報学研究所が運用する学術情報ネットワーク SINET が発展するに従って、TOPIC に接続していた東北地方の大学・高専等が直接 SINET に接続するようになり、TOPIC の地域ネットワークとしての役割、あるいはインターネットへの接続点としての役割は次第に無くなっていきました。現在の TOPIC は、TOPIC 参加機関の人と人をつなぐ、あるいは最新の技術・運用情報等にアクセスできる情報共有の場の提供を中心に活動しています。

もう少し具体的には、例えば今年度の事業計画は次の通りとなっています。

1. 東北地方の学術研究分野におけるインターネット利用に関する教育・啓発活動
 - (1) TOPIC セミナー・講演会の開催
 - (2) TOPIC 研修会
 - (3) ネットワーク担当職員研修会
2. 東北地方の学術研究分野に関する情報の収集および提供サービス
 - (1) WWW サーバの運用
3. TOPIC の活動に関する広報活動
4. 学術研究ネットワークの運用に伴う問題に関する検討
5. ネットワークの運用に関する技術的支援
6. ドメイン名に関する手続き・調整
7. インターネットコミュニティの活動への参加
8. インターネットに関する情報の収集および提供サービス
9. TOPIC の業務と運営の見直し
10. 以上を実施するために必要な諸業務

上記の 1 番目の項目について、TOPIC では定期的に講演会や研修会を開催しています。典型的には、毎年、春に開催される TOPIC の総会に合わせて講演会を行い、また秋には東北六県を年毎に巡回しながらネットワーク担当職員研修会を開いています。ちなみにその巡回の順番は、実績ベースで見ますと、宮城県→岩手県→秋田県→福島県→青森県→山形県(→宮城県に戻る)となっています。今年度のネットワーク担当職員研修会は宮城県で開催されましたので、来年度は岩手県での開催が予定されています。この研修会はいわゆる合宿形式となっております。

前述の通り TOPIC の事務局は東北大学サイバーサイエンスセンターに置かれています。講演会や研修会の企画等は幹事会のメンバーで進めています。幹事会は連絡調整部と技術部からなり、現在のメンバーは次の大学・高専に所属しています：東北学院大学、岩手大学、会津大学、弘前大学、八戸工業大学、東北大学、山形大学、秋田大学、仙台高等専門学校、福島大学。すなわち、東北地方の多くの大学・高専の皆様のご協力により TOPIC 幹事会の活動が行われています。

インターネットに関連する資源管理や運用を支えている組織は JPNIC (日本ネットワークイン

フォメーションセンター) ですが、TOPICはその会員 No. 7 の非営利会員です。また、TOPIC 技術部主査の中西貴裕先生(岩手大学)が現在 JPNIC 理事(非営利・地域分野担当)を務めています。

TOPIC の活動を通して多くの方々と知己を得たことは(個人的にもセンターとしても)有難いことです。この巻頭言が掲載される SENAC は大規模科学計算システム(スーパーコンピュータ AOBA 等)の広報誌ですが、それとの関連で言いますと、以前に東北地方のいくつかの大学を訪問してサイバーサイエンスセンターの大規模科学計算システムを紹介したり体験いただいたりする取り組みを行った際、TOPIC でのつながりを活かして相手方の大学の方々とスムーズに企画を進めることができました。当時は内部的に「キャラバン」と呼んでいくつかの大学にお邪魔させていただきました。私は(自称?)キャラバン隊長(副隊長だったかもしれません)として、スパコン関係のセンター教職員の方々といくつかの県を訪れたことが懐かしく思い出されます。

話が少しそれましたが、最後に、現在の TOPIC 参加機関の一覧を掲載して、この巻頭言を閉じたいと思います。

<青森県>

弘前大学、八戸工業高等専門学校、八戸工業大学、八戸学院大学、青森大学、青森職業能力開発短期大学校、青森公立大学、青森中央短期大学、青森県立保健大学、弘前学院大学

<秋田県>

秋田大学、秋田公立美術大学、秋田工業高等専門学校、日本赤十字秋田短期大学、秋田職業能力開発短期大学校

<岩手県>

岩手大学、岩手医科大学、一関工業高等専門学校、岩手県立産業技術短期大学校、富士大学、岩手県立大学、盛岡大学

<山形県>

鶴岡工業高等専門学校、東北文教大学短期大学部、山形県工業技術センター、山形県立米沢女子短期大学、山形県立産業技術短期大学校、山形県立産業技術短期大学校庄内校、東北芸術工科大学、山形大学、山形県立保健医療大学

<宮城県>

宮城教育大学、東北学院大学、東北工業大学、東北文化学園大学、仙台高等専門学校、石巻専修大学、仙台白百合女子大学、宮城学院女子大学、東北大学、東北福祉大学、尚絅学院大学、東北職業能力開発大学校、宮城大学、東北医科薬科大学、東北生活文化大学

<福島県>

会津大学、福島大学、福島県立医科大学、東日本国際大学、いわき短期大学

[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・宇宙ひもの形成と進化 —

北嶋 直弥

東北大学 学際科学フロンティア研究所

— 概要 —

本稿は筆者ら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, 2]のレビューである。これらの研究では、「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・宇宙ひも」といった位相欠陥に焦点を当て、これらの進化の過程における重力波生成や暗黒物質生成について解析し、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の一つとされている。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基づく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、時空の歪みの伝播である**重力波**は、その強度・スペクトルなどに放出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。故に、理論モデルに基づく初期宇宙進化の過程で、重力波がどのようにして放出されるかを高精度で算出することが求められる。

本稿で紹介する我々の研究[1, 2]では、初期宇宙において重力波を放出しうる理論モデルとして、**位相欠陥**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。位相欠陥の代表例である**ドメインウォール**、**宇宙ひも** (図 1, 2) 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となりうる。

膨張宇宙における位相欠陥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。本研究では、対象とする空

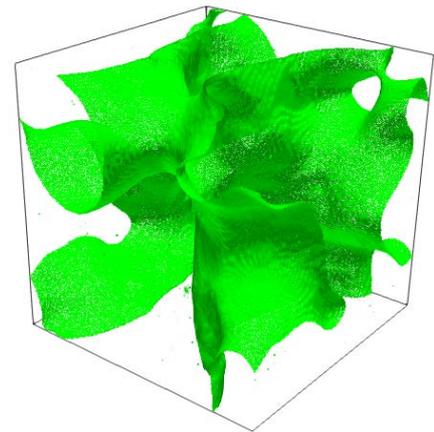


図1 ドメインウォールのネットワーク

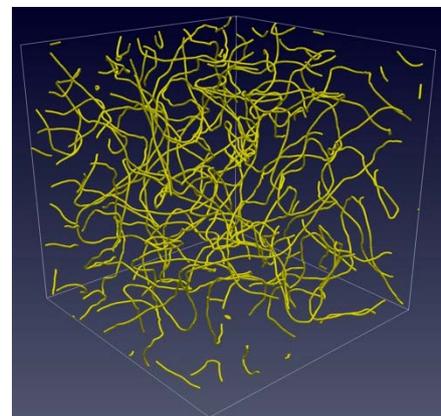


図2 宇宙ひものネットワーク

間を離散格子に分割し、各々の格子点上で各物理量の時間発展を解く方法を採用する。しかし、宇宙膨張の影響により、格子間隔の物理的長さが時間と共に増大する一方で、理論モデルのパラメータで決まるドメインウォール・宇宙ひも特有の物理的スケール（厚さ・幅など）は不変に保たれる。すなわち、シミュレーションの解像度が時間とともに悪化するため、ドメインウォール・宇宙ひもの物理を正確に追うことができる時間は制限される。つまり、十分長い時間、これらのダイナミクスを追うためには高解像度かつ大規模なシミュレーションを必要とする。我々の研究では、最大 4096^3 の格子点数でシミュレーションを行い、ドメインウォール・宇宙ひものダイナミクスを長時間に渡り解析した。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。

1. ドメインウォールの崩壊による重力波生成

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（スケールリング則）。しかし、これらは宇宙における他の構成要素（輻射や物質など）に対して支配的な成分となってしまうため、観測と矛盾する（ドメインウォール問題）。よって、宇宙初期に形成されたドメインウォールのネットワークは、現在までに消失しているか、観測に抵触しない程度の小さなエネルギーを持っていなければならない。我々の研究では前者、つまりドメインウォールのネットワークが宇宙初期に崩壊するシナリオに焦点を当てる。

この場合、ドメインウォールの崩壊過程において、高強度の重力波が生成されることが先行研究により指摘されている [3]。我々の研究 [1] では、ドメインウォールのダイナミクスについて、世界最先端レベルの高解像度シミュレーションを行うことで、その崩壊過程により生成される詳細な重力波スペクトルを算出した。尚、ドメインウォールの崩壊過程を含めて重力波生成を解析したシミュレーションは世界初である。

1.1 方法

本研究はドメインウォール形成を予言する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、スカラー場により放出される重力波の進化を同時に解いた。重力波は、平坦な背景時空（膨張する一様等方宇宙）の上に存在する微小な時空の歪みとして摂動的に扱い、発展方程式はアインシュタイン方程式の一次摂動展開で与えられる。これらの時間発展に関する方程式系を 2 次の Leap-frog 法により解き、最終的に得られる重力波の強度スペクトルを算出する。

1.2 結果

数値計算の結果として得られた重力波スペクトルを図 3 に示す（[1] より抜粋）。QCD アクシオンモデルを想定すると、放出される重力波の周波数は図の横軸が示す通り nano Hz 程度となる。これはパルサータイミング実験で検出が可能な周波数帯である。図中の縦に伸びる帯は NANOGrav グループらによる観測データである。すなわち、本研究により重力波の詳細なスペクトルを算出することに成功し、パルサータイミングの観測データをドメインウォール起源の背景重力波で説明可能であることを示した。

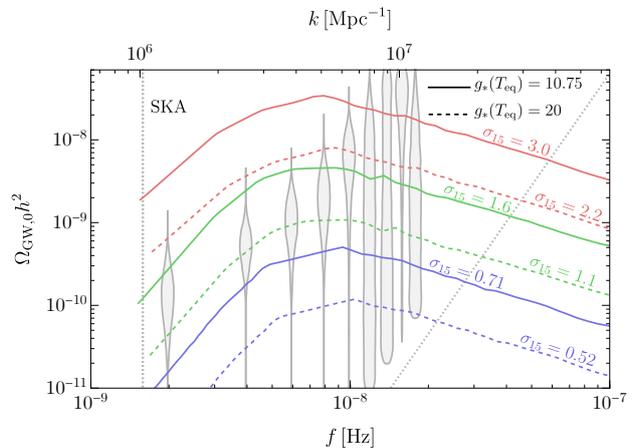


図 3 重力波のスペクトル

2. 宇宙ひもによる暗黒物質生成・重力波生成

宇宙ひもは、U(1)対称性の自発的破れに伴うひも状の位相欠陥（前々頁図2）である。宇宙ひものネットワークに関する進化もドメインウォールの場合と同様、スケーリング則に従うことがこれまでの研究で明らかにされている。すなわち、宇宙における地平線スケールの領域に数本の（無限に長い）宇宙ひもが存在する。宇宙ひもの場合にはドメインウォールの場合と異なり、宇宙論的問題を引き起こすことなく、ネットワークが安定に存在することが許される。

無限に長い宇宙ひもネットワークは、宇宙ひも同士の衝突による「組み替え」という過程により、宇宙ひものループを絶え間なく生成している。宇宙のループは、重力波を生成し、エネルギーを失いながら徐々に収縮し、最終的に崩壊する。放出される重力波の周波数は宇宙ひものループの大きさで決まり、一方で宇宙膨張に伴い、様々な大きさのループが常に生み出されることから、スケール不変なスペクトルを持つ背景重力波が予言される。このような顕著な特徴を持つ宇宙ひも起源の重力波は、次世代重力波観測の主なターゲットの一つと見なされている。

宇宙ひもは暗黒物質の生成に寄与することも知られている。特にアクシオンと呼ばれる暗黒物質の候補が、アクシオンストリングと呼ばれる宇宙ひもから非熱的に生成されることが知られている。我々の研究では、ダークフォトンと呼ばれる暗黒物質の候補に着目し、宇宙ひもからの生成を議論した。この可能性については、先行研究[4]により解析的に議論されていたが、我々の研究[2]では精緻なシミュレーションを行い、暗黒物質生成量、スペクトル、重力波生成の詳細を議論した。尚、宇宙ひもによるダークフォトン生成に関するシミュレーションは本研究が世界初である。

2.1 方法

本研究ではU(1)ゲージ対称性に基づく理論の枠組みにおいて、複素スカラー場とゲージ場の相互作用系を考える (Abelian-Higgs モデル)。ゲージ対称性を離散化された格子上で厳密に課す定式化 (格子ゲージ理論に基づく定式化) を採用し、ドメインウォールの場合と同様に、空間・時間ともに2次精度の差分法を採用する。結果として、宇宙ひもから放出された暗黒物質の存在量、および、密度に関するスペクトルを算出する。今回の宇宙ひもの解析については、数値計算に重力波の発展は含めず、重力波スペクトルの算出には従来の解析式を採用する。

2.2 結果

図4 ([2]より抜粋) はダークフォトンの生成数に関する時間発展を表す。図の青線が示す通り、宇宙ひもによるダークフォトン生成がシミュレーション結果から確認された。また、理論的に期待されるタイミングで生成が止まることも確認された。図5 ([2]より抜粋) は生成されたダークフォトンのスペクトル、すなわち運動量分布を表す。青線が示す通り、後の方に生成された、小さな運動量を持つダークフォトンが支配的となることがわかった。このスペクトルにより、最終的な暗黒物質 (ダークフォトン) の残存量を計算することが可能となり、暗黒物

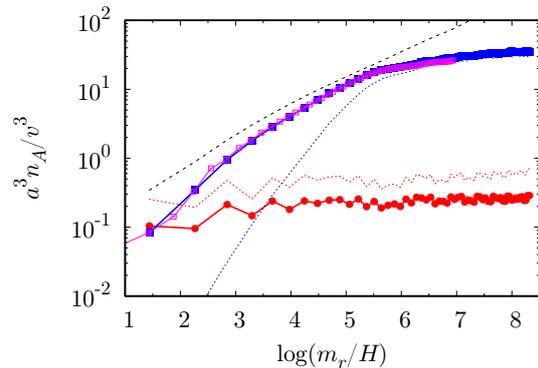


図4 ダークフォトン生成の時間進化

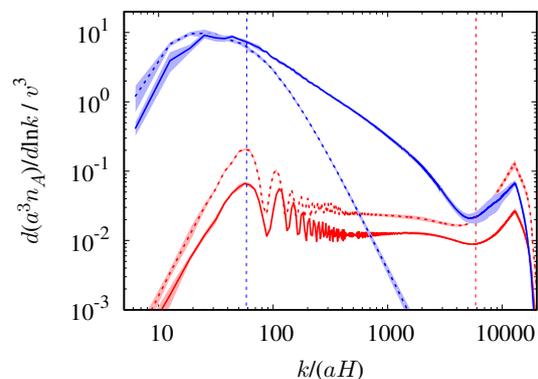


図5 ダークフォトンのスペクトル

質の質量と、対称性の破れのエネルギースケールに関する示唆が得られた。図 6 ([2] より抜粋) はこのシナリオにおいて予言される重力波スペクトルである。算出されたスペクトルは、従来の Abelian-Higgs モデル、およびアクシオンストリングによる予言と質的に異なるものであることを明らかにした。特に、このシナリオは将来の多波長重力波観測（パルサータイミング、宇宙重力波観測、地上重力波観測）により検証可能であることが示された。

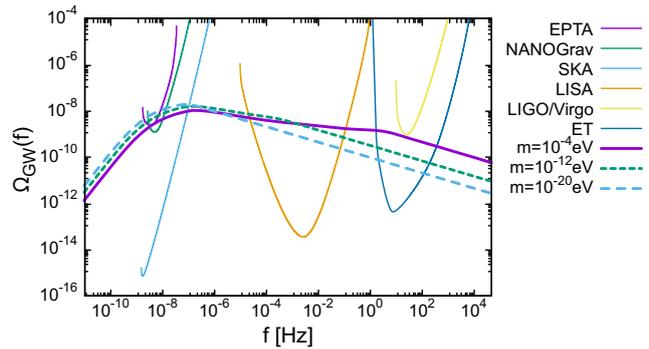


図 6 重力波のスペクトル

3. まとめと展望

本研究では、離散格子空間により、初期の宇宙をコンピュータ上で再現し、宇宙初期における自発的対称性の破れに伴う位相欠陥（ドメインウォール・宇宙ひも）の進化を数値的に解析した。ドメインウォールにおいては、その崩壊過程を詳細に解析し、詳細な重力波スペクトルを算出した。特に、ドメインウォールの起源が QCD アクシオンモデルと呼ばれる理論モデルと関連している場合、nano Hz の周波数帯で背景重力波が存在することが予言され、重力波のパルサータイミング観測によって検証可能であることが示された。宇宙ひもに関しては、ダークフォトンと呼ばれる暗黒物質の候補粒子を放出するシナリオに着目し、その生成過程の詳細をシミュレーションにより算出した。結果は先行研究の理論的解析を裏付けるものであり、シミュレーションにより理論モデルに含まれるパラメータのキャリブレーションを行うことで暗黒物質残存量の詳細を算出することが可能となった。また、従来の宇宙ひもモデル（Abelian-Higgs モデル、アクシオンストリングモデル）とは質的に異なる重力波スペクトルが予言されることも示し、将来の多波長重力波観測における検証可能性も示された。これらの研究は、現時点における世界最大級の規模である格子点数 4096³で行われ、AOBA スーパーコンピュータが世界的な成果を出せるマシンであることを実証した。

本研究で行なったシミュレーションでは、平坦な背景時空を仮定し、その上で、重力波を摂動的に扱った。これは、注目しているエネルギースケールが低く、重力場が弱いという前提に基づいている。しかし、本来、重力波の計算は一般相対論的枠組みで行われる。特に、高いエネルギースケールに着目すると、曲がった時空の影響は顕著になる。そこで現在、筆者は一般相対論に基づくシミュレーション（数値相対論）を開発・実行している。一般相対論的効果を含めると、宇宙初期における**原始ブラックホール形成**に関するシミュレーションが可能となる。また、宇宙ひものループによる重力波生成に関する詳細な数値解析も可能となる。特に、ドメインウォール・宇宙ひもからのブラックホール形成については、理論的な議論がこれまでなされてきているが、シミュレーションによる数値実験は未開拓である。原始ブラックホール探索に関わる観測も盛んに行われているため、シミュレーションによる原始ブラックホール残存量の正確な見積もりは今後の課題であると言える。最終的には、筆者は数値相対論と初期宇宙論の融合を目論んでいる。しかし、数値相対論は、個々の天体の進化に主に適用されてきた経緯を持つ一方で、初期宇宙論は宇宙の大域的な進化に焦点を当てている。故にこの二つの融合は極めて挑戦的であるが、後述の AMR と呼ばれる手法を初期宇宙論のシミュレーション分野において発展させることで、実現可能であると考えている。

今回の我々の研究（および位相欠陥に関する従来のほぼ全ての研究）では一様な格子空間で行われた。しかし図 1, 2 が示す通り、ドメインウォールや宇宙ひもは空間に局在した構造となっており、これらが存在しない領域では高い解像度は必要としない。よって、興味ある対象が存在している小領域でのみ格子間隔を細かく刻む方法である「**適合格子細分化法 (Adaptive mesh**

refinement, AMR)」が有効であることが容易に想像できる。この手法は流体力学の分野で発展を続け、磁気流体力学を必要とする宇宙物理学や、数値相対論におけるブラックホールの進化の解析に欠かせない手法となっている。初期宇宙シミュレーションへの応用としては、アクシオンストリングの解析[5]において最近注目を集めているが、この分野では未開拓であると言える。そこで、筆者は、前述の数値相対論の実装と並行して、初期宇宙シミュレーションにおける AMR の実装を現在行っている。成功すれば、位相欠陥の進化を追う上で、解像度が時間と共に悪化していく問題（前述）に対処することが可能となる。数値相対論と AMR は初期宇宙シミュレーションの新時代を切り拓く強力なツールになると筆者は考えている。

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, 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)
- [2] N. Kitajima, K. Nakayama, “Dark photon dark matter from cosmic strings and gravitational wave background”, *JHEP* 08,068 (2023)
- [3] T. Hiramatsu, M. Kawasaki, K. Saikawa, “On the estimation of gravitational wave spectrum from cosmic domain walls”, *JCAP*, 02, 031 (2013)
- [4] A. J. Long, L. T. Wang, “Dark photon dark matter form a network of cosmic strings”, *Phys. Rev. D* 99, 6, 063529 (2019)
- [5] M. Buschmann, J. W. Foster, A. Hook, A. Peterson, D. E. Wilcox, W. Zhang, B. R. Safdi., “Dark matter from axion strings with adaptive mesh refinement”, *Nat. Commun.* 13, 1. 1049 (2022)

[共同研究成果]

X線CT装置を用いた誘電体レンズ付きアンテナの3Dモデル化と FDTD解析法

春日 貴志¹ 新村 奨¹ 林 優一²¹長野工業高等専門学校²奈良先端科学技術大学院大学

1. はじめに

Society5.0時代の戦略として、自動車の自動運転化が計画されている。自動運転化のために、障害物検知用のレーダが用いられている[1][2]。障害物検知としては、77GHzのミリ波レーダが用いられているが、前方の自動車の材料評価の測定や、アンテナ周辺での電磁干渉抑制のための吸収材料評価[3~5]の測定のため、ホーンアンテナや誘電体レンズ付きアンテナが用いられている。誘電体レンズ付きホーンアンテナは、ビーム照射を絞ることができ、S/N比を向上させることができる。しかしながら、光軸上の焦点距離に幅があるため、材料に照射する電波のスポット系や、反射の様子を可視化することが求められている。

長野高専・高速信号伝送評価センターにはフリースペース法によるSパラメータの測定装置(EMラボ FS-330)があり、電波吸収体やシールド材のSパラメータの実測を行ってきた。一般的なフリースペース法による測定では、対向させたアンテナと試料を同一線上に設置して測定する垂直入射における測定が行われる[6][7]。しかしながら、実際の使用環境下を想定した際、様々な到来方向からの電磁界分布を評価するためには斜入射による特性評価が必要である[6][8]。また、斜入射測定における測定面での照射電波のスポット径や照射角度依存性、電波の干渉の様子を明らかにすることは困難である。そのため実測に加えて電磁波を可視化することができるシミュレータによる検討も必要である。

本研究では電波吸収体評価のための電磁界シミュレータを構築し、ノイズ抑制シートの電波吸収特性を求めることを目標としている。フリースペース法で用いられる誘電体レンズ付きホーンアンテナの3Dモデルを作成し、有限差分時間領域(Finite Difference Time Domain: FDTD)解析に組み込む手法を提案する。誘電体レンズ付きホーンアンテナをFDTD解析に組み込むためには、アンテナ形状や誘電体レンズの曲率を正確にモデル化する必要がある。そこで、フリースペース法の誘電体レンズ付きホーンアンテナをCT-Scan (SHIMADZU・inspeXio™ SMX™-225CT FPD HR Plus)で撮影した。CT-Scanの撮影画像であるボクセルデータをメッシュモデルに変換した後、傾きの補正やモデルの簡略化を行い、自作の変換ソフトを用いてラスタデータに変換した。また、自作の変換ソフトを用いて材料ごとに分離した。本手法を用いて電磁界表示を行い、解析手法の有用性を評価した。また、集光位置における回折パターンの比較によってCT画像を用いた解析モデルの妥当性を考察した。

2. 誘電体レンズ付きホーンアンテナの3Dモデル化とFDTD解析手法

図1に誘電体レンズ付きホーンアンテナをFDTD解析に組み込む手法に関するフロー図を示す。CT-Scanによりホーンアンテナの断層画像を撮影する。VG Studio MAXでは、この断層画像から3次元のボクセルデータに変換する。ボクセルデータとは、立方体のデータであり、座標値を持たないデータである。電磁界解析に組み込む場合は、多角形の頂点や稜線、面を有するポリゴンデータ(メッシュデータ)に変換する必要がある。ポリゴンデータの代表的なファイル形式はSTL形式である。

これまでの研究で、3D-CADで作成したSTL形式を、FDTD解析で組み込み可能なラスタデータに変換するプログラムを自作してきた。本研究では、CT-Scanで撮影されたデータに対し、この変換手法を用いて解析を行えるか検討する。

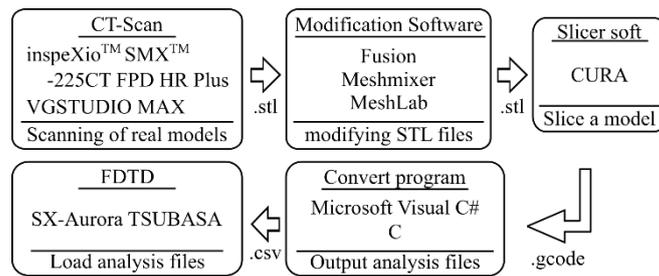


図1 システムフロー図



図2 フリースペース法測定装置

2.1. CT-Scan によるアンテナの撮影

図2に撮影対象である誘電体レンズ付きホーンアンテナを示す。本研究では、誘電体レンズ付きホーンアンテナをCT-Scanで撮影し、解析モデルを作成する。本研究で用いたCT-Scanの撮影原理を説明する。CT-ScanはX線発生装置とX線検出器の間に撮影対象物であるホーンアンテナを置く。X線発生装置から照射されたX線は、撮影対象物を透過し、X線検出パネルで受光する。この際、撮影対象物の材料密度により、X線の透過量が変化する。例えば、空気のように密度の低いものは、X線が透過しやすく、逆に金属は透過しにくい。この変化量はグレースケールで表され、グレースケールの濃淡により材料の判定が行われる。今回用いたCT-Scanは管電圧が225 kVであるため、ホーンアンテナのような金属も透過することができる。レンズと金属管体が一体化しているモデルとなるよう、輝度値を設定して出力した。

3Dモデルを作成する原理について説明する。撮影対象物を360度回転させて撮影を行う。一定時間毎の画像を保存し、VG Studio MAXにより画像を再構成することで3Dモデルを作成できる。

ホーンアンテナの撮影では、CT-Scanの管電圧を225 kVとし、電流を変化させることで鮮明な画像が得られるようにした。誘電体レンズ付きホーンアンテナと導波管アダプタを個別に撮影した。アンテナ全体を1度に測定することが難しいため、高さ方向に2分割して撮影し、後で合成した。導波管アダプタについては拡大率を上げるため、同様に高さ方向に分割して測定した。

2.2. CT-Scan データのモデル最適化

FDTD解析にCT画像データをインポートするためには、FDTD解析で構造データを読み込める直方体のラスタデータに変換する必要がある。本節では、この変換手法につなげるための前段階について詳しく検討する。

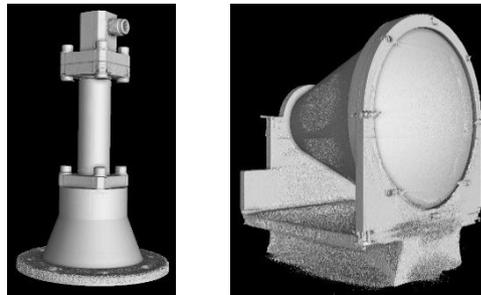
CT-Scanで撮影した断面画像は、VG Studio MAXで3次元データのボクセルデータとして構成される。図3に本研究で用いた誘電体レンズ付きホーンアンテナのボクセルデータ画像を示す。撮影したボクセルデータをCADや有限要素法(FEM)の電磁界解析等で利用するためには、多角形の頂点を有し、頂点同士を近似線で結んだポリゴンデータ(STL形式)に変換して出力される。図4に実際に求めたポリゴンデータの例を示す。ポリゴンデータは、表裏を判別できるように法線ベクトルの情報を有する。しかしながら、データの一部にベクトルの方向が本来の向きと異なる方向に出力しているケースがある。この場合、画像を再構成する際にエラーが発生し、正しくモデル化をすることができない。このため、meshmixerを用いてデータ補正を行った。

次に、ポリゴンデータからラスタデータに変換する過程について説明する。3Dプリンタで使われるCURAは、ポリゴンデータを読み込み、2次元の層データであるガーバデータを出力する。しかしながら、CT-Scanで撮影した3Dモデルは、直線や円弧はCADで描画したモデルに比べて歪んでいる。この場合、ポリゴンデータで近似すると、頂点数が増大するためファイル容量が大きくなる。ここで、ポリゴンデータが大容量の場合には、CURAでガーバデータに変換する際に時間がかかる。実際に、ホーンアンテナのデータ量が245MBである。これをCURAで読み込み変換したところ、途中でエラーが発生して実行できなかった。このため、ポリゴンデータの頂点数を調整できるmeshLABを用いて、頂点数を50,000として、データ量を4.75MBに削減した。

ガーバデータを出力する際に描画する線幅を指定するが、本研究では3次元形状が正確に塗りつぶすことができるように、線幅を0.03mmとした。その後、ガーバデータからラスタデータを描画する自作ソフトにより、ラスタデータに変換した。

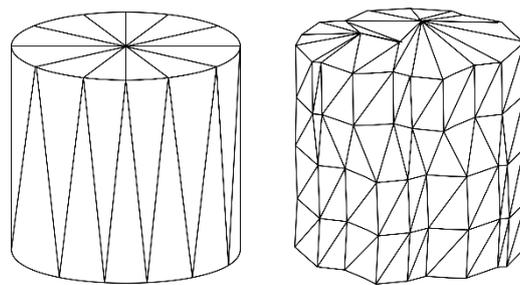
2.3. 誘電体レンズ付きホーンアンテナの材料指定

CURAから出力したラスタデータは、自由空間と金属としてデータが出力される。このため、CT-Scanで作成したモデルは誘電体レンズとホーンアンテナは分離されておらず、一つの3D形状になっている。このため、金属部と誘電体レンズ部ごとに材料を指定する必要がある。図5に作成したレンズ分離のプログラムイメージを示す。



(a) 導波管コネクタ (b) ホーンアンテナ

図3 本研究で用いた誘電体レンズ付きホーンアンテナのボクセルデータ画像



(a) 3D-CAD から STL (b) CT-Scan から STL

図4 各3Dモデルのポリゴンイメージ

ラスタデータのスライス画像を例に変換方法を説明する。金属と誘電体レンズが接触していない場合、画像の中央は誘電体レンズ、周辺のリングが金属である。中央を中心に上方向に走査して、金属データが連続する範囲で誘電体書き換える。自由空間になると変更を停止する。これを、上下左右の順番に繰り返す。誘電体レンズの書き換えが完了する。誘電体レンズと金属が接触している部分のみ手作業で変換した。

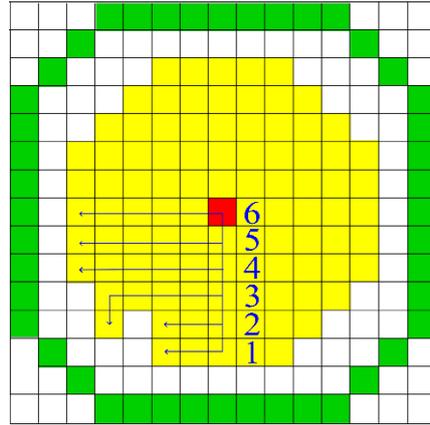


図5 レンズ変換アルゴリズムの走査イメージ

3. 数値解析

3.1. 電磁界分布

本システムで作成した誘電体レンズ付きホーンアンテナのFDTDモデルによりFDTD解析を行う。解析モデルを図6に示す。誘電体レンズの材質として、高密度ポリエチレンを想定し、比誘電率を $\epsilon_r = 2.34$ とした[9]。非球面レンズの厚さの中心点を原点とした。FDTD解析における、解析空間分解能は $\Delta = 0.5 \text{ mm}$ とした。時間ステップ Δt はCourantの安定化条件より $\Delta t = 96.23 \text{ ps}$ とし、時間ステップ数は15,000とした。信号源は導波管と同軸ケーブルの接続部に微小ダイポールとして実装し、18 GHzの正弦波を印加した。解析空間の外側には、20層の吸収境界条件(Perfect Matched Layer: PML)を設けた。SX-Auroraでの解析は大規模になるため、MPIにより高速化する。実際はMPI16で実行し、x方向を4分割、y方向とz方向を2分割した。使用メモリは1509GB、計算時間は352秒である。計算時間はベクトル化と並列化、MPIにより短縮できた。

図7にxy平面の電界分布を示す。信号源より印加された電界は時間変化とともにホーンアンテナ内をx方向に伝搬し、誘電体レンズを通して集光されていることが確認できる。図8に誘電体レンズの光軸上の電界強度分布を示す。誘電体レンズの最大受信点となる集光位置 $x = x_{peak}$ における振幅値で規格化している。 $x = 169.5 \text{ mm}$ の位置で最大振幅が確認できた。これらのことからFDTD法において適切にモデルが解析できていることが確認できた。

3.2. 集光位置における回折パターン

実装された解析モデルの検証を行うために、FDTDで算出される電界強度と理論値における電界強度の比較を行った。理論値には、円形開口に対するフラウンホーファー回折による回折パターンを表す式(1)の値を用いた[9]。

$$P(y) = \left(\frac{\pi D^2}{2}\right)^2 \left[\frac{J_1(R)}{R}\right]^2, R = \frac{\pi D y}{\lambda x_{peak}} \quad (1)$$

ここで x_{peak} はレンズ中心から最大受信点までの距離、 D は開口直径、 J_1 は第一種ベッセル関数、 λ は管内波長を用いた。図9に誘電体レンズ付きホーンアンテナの集光位置 $x = x_{peak}$ におけるyz平面の電界強度 E_z を示す。

y方向の3dB幅をビーム幅 W_y とする。それぞれFDTD解析により得られた $W_y(\text{FDTD})$ は26.5mm、式(1)により得られた $W_y(E_q, 1)$ は23.3mmであった。

FDTD解析で得られたビーム幅は理論値より3.2mm長く算出された。CT-Scanの誘電体レンズ表面において、空気と樹脂の分離がうまく行えなかったためであると考えられる。

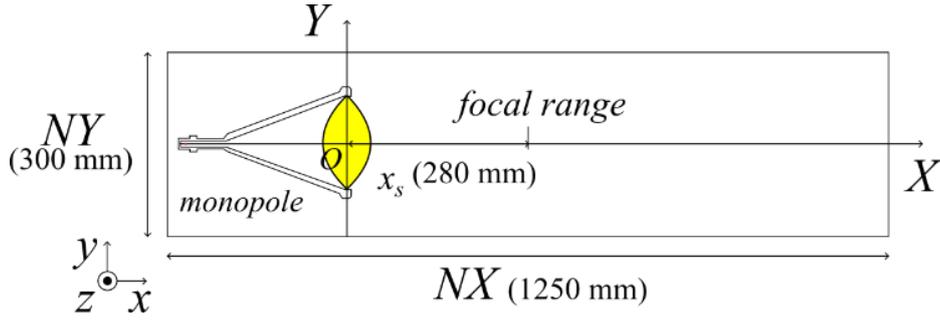


図 6 FDTD 解析範囲

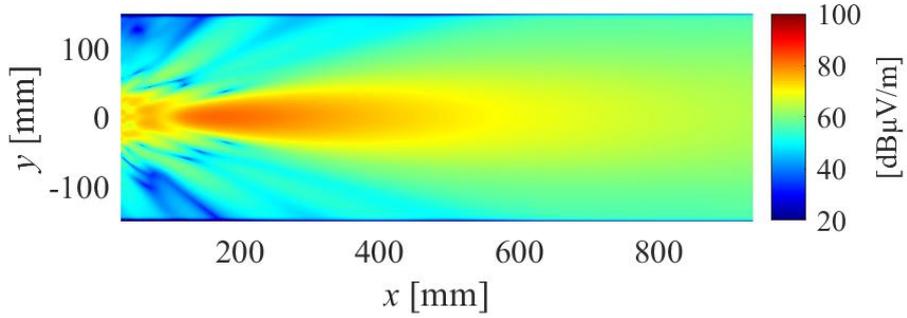


図 7 sin 波を印加した際の xy 平面の電界分布

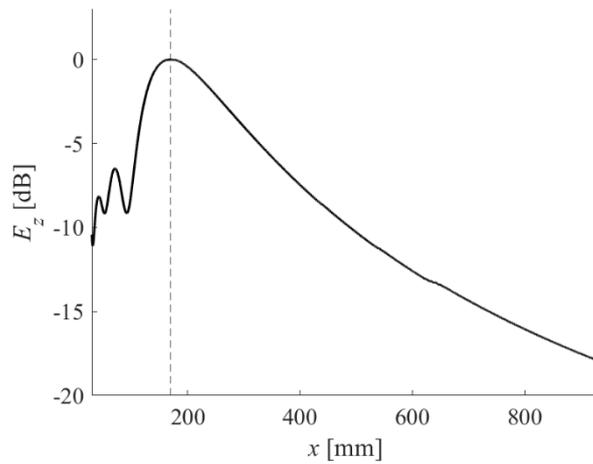


図 8 sin 波を印加した際の光軸上の電界強度分布

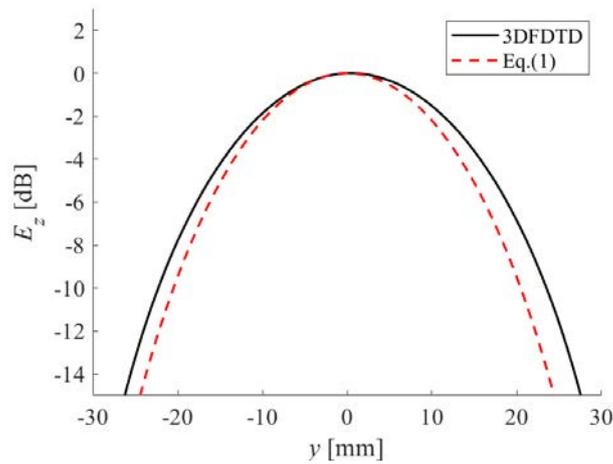


図 9 集光位置 $x = x_{peak}$ における回折パターンの比較

3.3. アンテナ対向モデルにおける FDTD 解析

フリースペース測定時を想定し、送受信アンテナ設置時の FDTD 解析を行う。解析モデルを図 10 に示す。3.1 と同様の条件で解析を行った。解析結果として、図 11 に xy 平面における電界分布を図 12 に光軸上の電界強度分布をそれぞれ示す。

図 11, 12 において、アンテナ間に $\lambda = 8.5 \text{ mm}$ 間隔の干渉縞が観測されたが、この間隔は信号周波数 18 GHz の半波長である。このノイズは受信アンテナによる多重反射であると考えられる。アンテナや試料からの反射は、通常 VNA (Vector Network Analyzer) 内に実装されている、時間領域でのゲーティング処理を行うことで除去可能となる。実測定においては、受信アンテナに最も早く到達した電波のみを使用して計測を行うため影響を及ぼさない [10][11]。

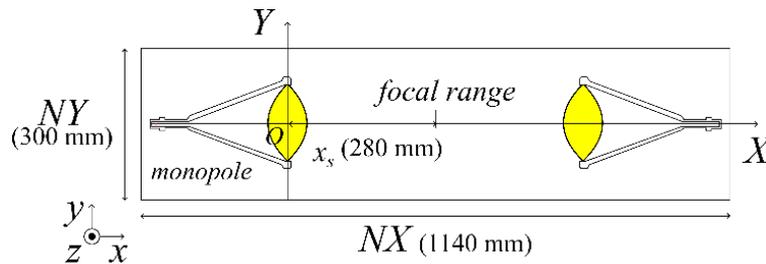


図 10 FDTD 解析範囲

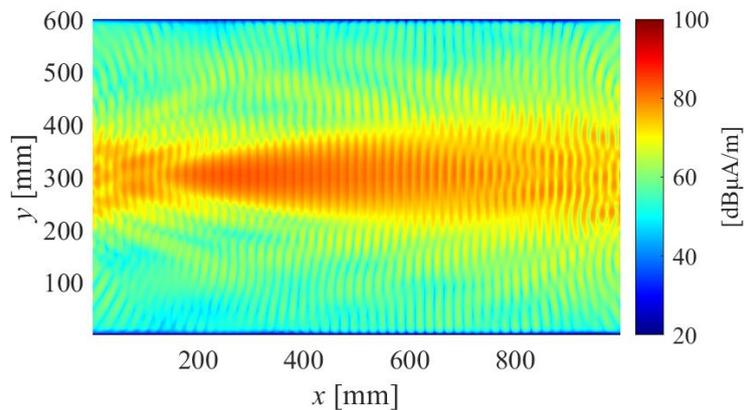


図 11 送受信アンテナ設置時の xy 平面の電界分布

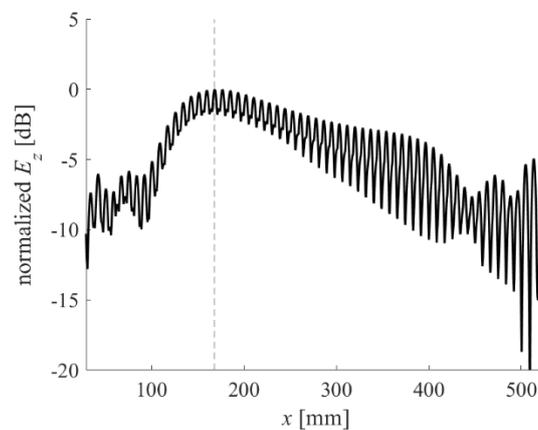


図 12 光軸上の電界分布

まとめ

本研究では、フリースペース法に用いられる誘電体レンズ付きホーンアンテナを FDTD 解析に組み込むために、CT-Scan を用いてアンテナの 3D モデルを作成し、FDTD 解析に組み込んだ。電磁界表示により適切にモデルを解析できていることが確認でき、モデル化が容易ではない湾曲形状を有したモデルの解析が行えることを示せた。また、焦点距離における電界強度を確認すると、メインローブの位置やビーム幅はほとんど一致した。

今後として、画像ノイズによる解析への影響を議論するため、解析モデルの形状比較や電界強度による比較検討を行う必要がある。

謝辞

今回の研究では EM ラボ株式会社様よりアンテナの撮影許可をいただいた。また、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使用して計算を行った。

文 献

- [1] 朝枝仁, 他, “Beyond 5G/6G White Paper 日本語 3.0 版”, 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT), https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v3_0.pdf, 参照 Jun.26,2024
- [2] マイナビ出版編集部, 徹底カラー図解 新世代の自動車のしくみ, 2022.
- [3] 山口正洋, “高速スイッチングインバータ機器による不要電波の広帯域化に対応したノイズ抑制材料実装技術と受信性能評価技術”, 2019 信学ソ大, no. BI-4-4, Sept.2019.
- [4] S. Ajia, H. Asa, S. Mitsuharu, M. Matsuura, N. Tezuka, and S. Sugimoto, “Enhancement of microwave absorption properties using spinodally decomposed Fe–Cr–Co flakes,” *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, vol.564, Dec.2022.
- [5] S. Muroga, S. Kumagai, T. Arakawa, M. Tanaka, S. Yodokawa, S. Yoshida, and Y. Endo, “Transmission Attenuation of Noise Suppression Sheet Composed of Carbonized Rice Husk,” 2024 APEMC Okinawa, no.WedAM2A.2, p.288, Okinawa, Japan, May. 2024.
- [6] KEYSIGHT, “誘電体測定の基礎,” KEYSIGHT, <https://www.keysight.com/jp/ja/assets/7018-01284/application-notes/5989-2589.pdf>, 参照 Jun.26,2024.
- [7] 中村浩人, 橋本修, “多層カーボンナノチューブ含有抵抗シートを用いた電波吸収体に関する研究,” 信学論 (C), vol.J93-C, no.10, pp.371-373, Oct.2010.
- [8] 伊藤盛通, 山本真一郎, 畠山賢一, “人工磁性体における斜入射時の反射係数測定,” 信学技報, Vol.119, No.20, pp.13-18, May.2019.
- [9] 滝本未来, 中田淳, 佐藤弘康, 澤谷邦男, “77GHz 帯ミリ波パッシブイメージング用フレネルレンズの設計,” 信学論 (B), vol.J94-B, no.9, pp.1153-1161, Sept.2011.
- [10] 坪井瑞輝, “フリースペース法測定における VNA の校正とタイムドメインゲート処理の検討,” 京都府中小企業技術センター技報, no.50, pp.28-32, 2022.
- [11] 中嶋宏昌, 野口直也, 阿戸弘人, 瀧川道生, 米田尚史, “周波数選択板の測定手法に関する一検討,” 2018 信学ソ大, no.B-1-51, p.51, Aug.2018.

[共同研究成果]

直交格子積み上げ法を用いた超音速流中での燃料噴射解析手法の開発

小川 秦一郎, 佐々木 大輔

大阪公立大学 大学院工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 航空宇宙工学分野

本研究では、超音速内部流れ場の数値シミュレーションにおける計算コストを削減することを目指し、直交格子積み上げ法 (Building-Cube Method, BCM) を用いてスクラムジェットエンジンの内部流れ場の解析に特化した3次元CFDソルバーを開発した。このソルバーは、格子生成を簡略化しつつ精度を維持するために、埋め込み境界法 (Immersed boundary method, IB法) を採用した。また、粘性壁から新しい燃料噴射モデルを導入し、先行研究の実験結果および解析結果と比較して、本解析ソルバーの検証を行った。この検証では、燃料噴射口近傍の物理現象やキャビティ保炎器側の壁面圧力分布を比較した。その結果、BCMソルバーは、燃料噴射口近傍のbarrel shockやbow shockなどの重要な現象を捉えることができたが、燃料噴射速度を過大評価し、上流側の剥離現象などの一部の物理現象を再現することができていないことが明らかとなった。また、キャビティ保炎器の下流における流れの挙動に関して、壁面圧力の比較では噴射境界 (jet boundary) と主流の相互作用によると考えられる不一致が明らかとなった。これらの結果は、実験結果と整合性を高めるためには、燃料噴射モデルのさらなる改良が必要であることを示唆している。今後の研究では、燃料噴射モデルの改良およびスクラム燃焼器の流れ場を正確にシミュレーションするためのCFDソルバーの解析精度向上に焦点をあてる予定である。

1. はじめに

極超音速機用のエンジンであるスクラムジェット燃焼器の一般的な燃料噴射方法は、壁面からの垂直噴射である。この方法では、燃焼器内に物理的な障害物がないので燃料と主流空気の急速な混合などが期待できる。一方で、境界層を突き破る形で燃料を噴射するため、燃料噴射口近傍で衝撃波が生じてしまうことや渦が生じるなど、噴射口近傍の流れ場が複雑になる。このような複雑な流れ場を解明するには、実験だけでは難しく数値解析が多く用いられてきた[1,2]。例えば、燃料と空気の混合がどのように促進させているのかを明らかにすることを目的とした解析事例では、上流の燃料噴射口から燃料を噴射させることで、より複雑な流れの分離領域が形成され、より強い渦が発生し、下流に燃料噴射口を設置した場合と比べて混合率が0.18から0.26に向上することが明らかとなっている[2]。また、最近の研究では、主流気体の滞留時間を長くし安定した燃焼および保炎を実現するために、燃料噴射口の下流にキャビティ保炎器を取り付けたスクラム燃焼器が多く用いられており、多くの研究者によって数値解析が行われてきている[3,4]。しかし、これまでの数値解析では、構造格子や非構造格子が用いられてきており[3-6]、これらの格子で解析した場合には、空間高次精度化や格子生成や解析後の前後処理に時間がかかるなどの問題がある。さらに、混合プロセスおよびその後の燃焼・保炎を考慮した最適なスクラム燃焼器形状は未だ確立されておらず、最適形状の探索には膨大な計算量が必要となるため、計算コストの低い解析手法を用いてエンジン内部の流れ場を容易に解析できる解析ソルバーが求められている。

そこで、解析格子および解析時間など従来課題となっていた計算コストを削減するために、直交格子積み上げ法 (Building-Cube Method, BCM) [7]を利用した超音速内部流れ場用のCFDソルバーを開発することを目的とし、スクラムジェットエンジンを対象とした内部流れ場の解析が可能な3次元BCM解析ソルバーの開発を目指す。本研究では、キャビティ保炎器を取り付けたスクラム燃焼器モデルを対象に、粘性壁面からの燃料噴射モデルを新たに開発し、検証解析により本解析ソルバーの妥当性を明らかにすることを目的に研究を行った。検証解析には、Cai et al.のキャビティ保炎器の上流に2つの噴射口を有するスクラム燃焼器モデル[8]を対象に、燃料噴射口近傍の物理現象および壁圧分布などとの比較検証を行った。

2. 数値解析手法

本研究では、格子生成および解析時間など従来課題となっていた計算コストを削減するために、直交格子積み上げ法 (Building-Cube Method, BCM) を利用した超音速内部流れ場用の CFD ソルバーを開発することを目標の一つとしている。直交格子法は、他の格子生成法 (構造格子法, 非構造格子法) と比較して、複雑形状に対しても自動かつ高速に格子生成が可能、局所的な細分化を行うことが容易、大規模なデータの後処理が容易などの多くの利点[7]があるが、曲面や傾斜のある物体壁面が階段状に表現されてしまう欠点がある。この問題を解決する方法として、壁面に接する格子を壁面形状に適合させる Cut cell 法[9]や壁面での物理量を周囲の流体の物理量から決定する埋め込み境界法 (Immersed boundary method, IB 法) [10]などの手法が考案されてきた。本研究では、簡便な手法かつ格子生成の容易さを損なわない IB 法を用いた。

数値解析手法は以下の手法を用いた。支配方程式は 3 次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式、離散化手法はセル中心有限体積法、時間積分は LU-SG 陰解法、非粘性流束は 3 次精度 MUSCL 法を用いている。また、乱流モデルは乱流粘性率の輸送方程式を直接扱う 1 次方程式モデルの Spalart-Allmaras (SA) モデルを用いている。

3. 解析条件

Cai et al. [8] のスクラム燃焼器モデルと解析条件を対象に 3 次元数値流体解析を行った。図 1 に本研究で使用したスクラム燃焼器モデルを示す。本燃焼器モデルの長さは 306 mm, 流入口高さは 40 mm, 流路幅は 12 mm である。また、流入口から 95 mm 後方にキャビティ保炎器が取り付けられている。このキャビティ保炎器の深さは 20 mm, 底面の長さは 80 mm, キャビティランプの高さは 8 mm, ランプ角は 45 度である。また、キャビティ保炎器のステップからキャビティ側が 1 度拡大している燃焼器モデルとなっている。燃料噴射口は、流入口から 65 mm と 85 mm の位置に直径 1 mm の噴射口が 2 箇所設置されている。

図 1 の本解析モデルの解析条件より、流入条件は、赤色の領域の燃焼器の流入口 (-X 軸) と底面 (-Y 軸) の燃料噴射口の計 3 箇所に設定している。粘性壁面は、青色の領域の底面 (-Y 軸) の燃料噴射口以外の領域と Z 軸方向の壁面 ($\pm Z$ 軸) に設定している。燃焼器上面 (+Y 軸) は非粘性壁条件としており、燃焼器の流出口 (+X 軸) は流出条件としている。

主流条件は、窒素 N_2 (61.2%), 酸素 O_2 (23.3%), 二酸化炭素 CO_2 (9.6%), 水蒸気 H_2O (5.9%) の混合気体であり、マッハ数 2.92, 全圧 2.6 MPa, 全温 1530 K である。また、燃料噴射条件は燃料噴射口からエチレン C_2H_4 を噴射しており、噴射マッハ数 1.0, 全圧 2.0 MPa, 全温 300 K である。本研究では、前述の条件をもとに主流条件と燃料噴射条件のマッハ数, 静圧, 静温, 気体定数, 比熱比を算出し、流入条件として設定した。

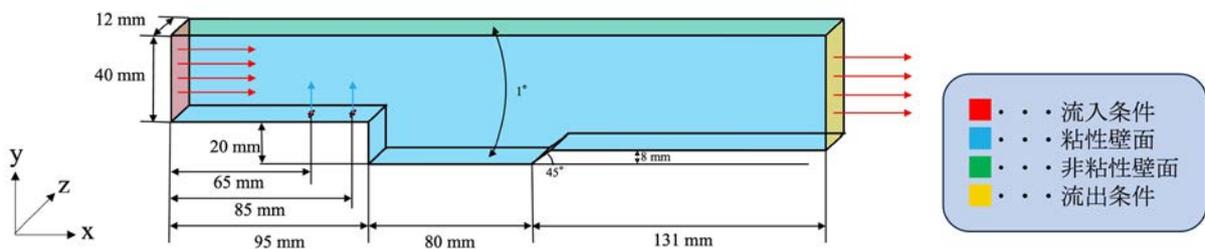


図 1 解析モデル寸法と境界条件

本研究で用いた解析格子を図 2 に示す。噴射口の円筒形状を精度よく再現するために、解析格子の最小 Cell 幅は 0.299 mm とした。本解析格子は、格子の総数を減らし計算負荷を軽減させるために、噴射口の再現が必要ない燃焼器の中央部分については、図 2 に示すように、最小 Cell 幅

の2倍の0.598 mmとした。また、燃焼器の流入口と流出口付近は障害物がなく単純な流れ場を形成すると考えられるため、図2に示すように、最小Cell幅の4倍となる1.195 mmとした。本解析格子の総Cube数は1,600、総Cell数は6,553,600である。

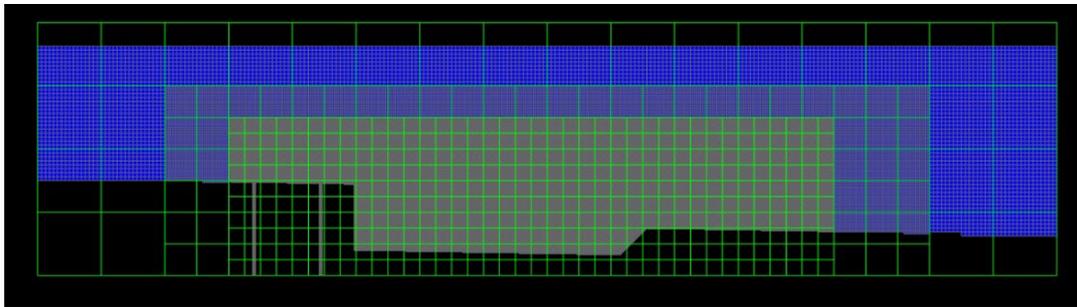


図2 解析格子 (断面図)

4. 解析結果と考察

4.1 燃料噴射口近傍の物理現象

はじめに、燃料噴射口近傍の物理現象について調べ、燃料噴射モデルを用いたCFDソルバーの解析結果の妥当性について判断した。図3に超音速流中での燃料噴射口近傍の物理現象の模式図[11]を示し、図4に3次元BCMソルバーの燃料噴射口近傍の可視化図(マッハ数の等値面)を示す。図3の模式図より、燃料噴射口から燃料を主流中に噴射させた場合、噴出軸と垂直方向には樽型の衝撃波であるbarrel shockが、噴出軸方向には円盤状の衝撃波であるMach diskが、燃料噴射周辺の超音速の主流中にみられる湾曲した弧状の衝撃波であるbow shockが形成される。また、燃料噴射口の上流部には剥離が生じている現象(separated region)も確認できる。本研究の解析結果から燃料噴射口近傍の物理現象を確認した。図4のマッハ数の等値面が密となっている部分を衝撃波による不連続面であると判断すると、燃料噴射口近傍に樽型の衝撃波であるbarrel shockと超音速の主流中に見られる湾曲した弧状の衝撃波であるbow shockが確認できた。しかし、燃料噴射軸方向に円弧上の衝撃波であるMach diskの発生の有無の判断は難しく、さらに、燃料噴射口上流の剥離については再現することはできていない。従って、本解析結果より、超音速流中の燃料噴射口近傍の物理現象については、一部再現することはできているが、すべての現象を網羅できていないわけではない。

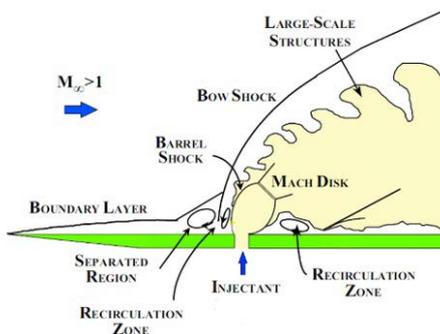


図3 超音速流中での燃料噴射口近傍の物理現象の模式図[11]

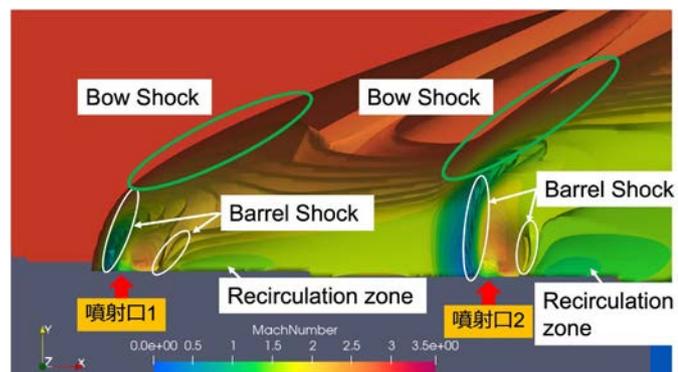


図4 3次元BCMソルバーの燃料噴射口近傍の可視化図(マッハ数の等値面)

4.2 主流流速

図5と6にy軸方向とx軸方向流速のコンター図を示す。はじめに、y軸方向流速のコンター

図を比較すると、燃料噴射口周辺では y 軸方向流速はいずれの結果でも Cai et al.の結果よりも燃料噴射口近傍で噴出速度を過大評価している。そのため、本解析結果では、燃料噴射速度の約 500 m/s の領域が、Cai et al.の解析結果よりもキャビティ保炎器上部において広範囲にわたってプロットされている。また、 x 軸方向流速のコンター図より、Cai et al.の結果よりも 250 から 750 m/s 程度の領域がキャビティ保炎器のせん断層全体に現れており、過大評価した結果となっている。前述のとおり、 y 軸方向の速度が増加していることで、燃料噴射が Cai et al.の結果よりも y 軸方向でより高いところまで到達する結果となっており、主流を遮る範囲が拡大したことにより燃料噴射の後流側で x 軸方向の速度が燃料噴射の影響を大きく受ける結果となった。

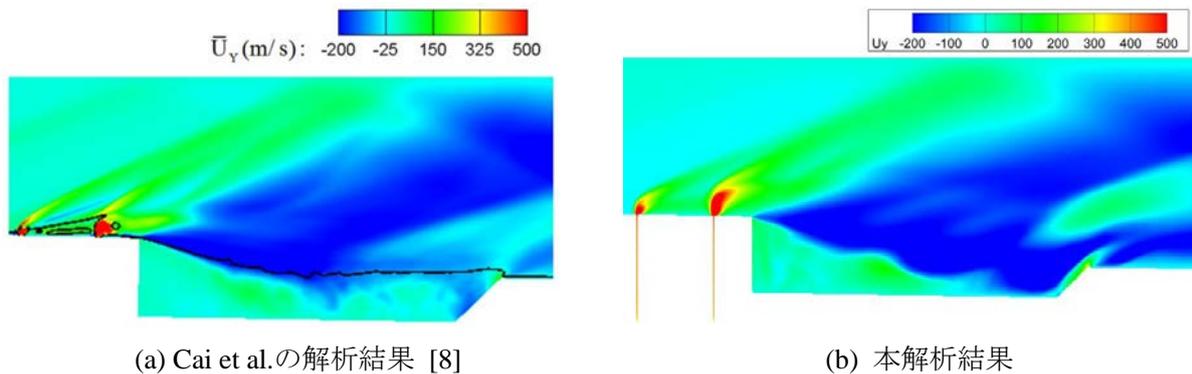


図 5 y 軸方向流速のコンター図

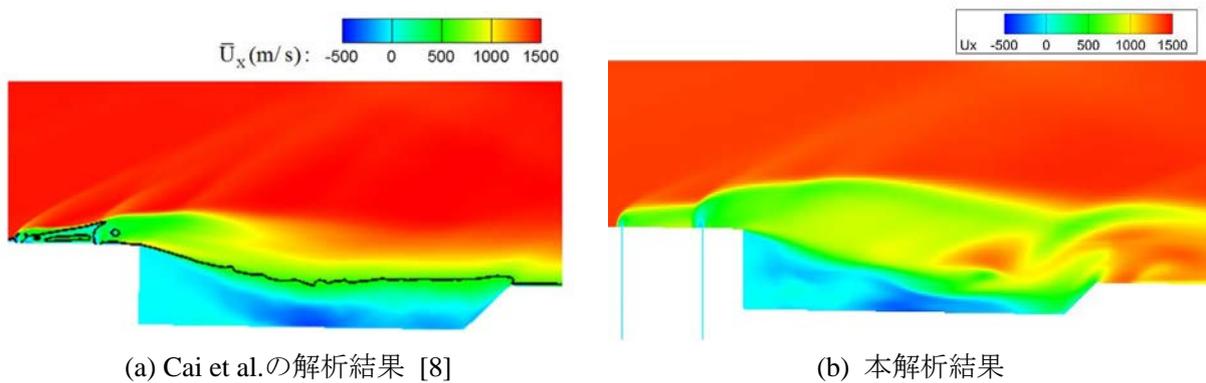


図 6 x 軸方向流速のコンター図

4.3 壁圧分布

キャビティ保炎器側の壁面の静圧分布を図 7 に示す。図 7 の黒線はキャビティ保炎器の外形図であり、黒線上の赤点は燃料噴射位置である。なお、本解析結果の静圧分布は、キャビティ保炎器から下流側 ($x = 95$ mm 以降) の部分については、1000 step 刻みの 11 個のデータを平均した値を用いている。

静圧分布の比較結果より、燃料噴射部分については、1 つ目の燃料噴射口において、Cai et al.の結果では噴射口の上流部分から圧力が上昇しているが、本解析結果ではそのような現象は見られず、燃料噴射口の部分でのみ圧力が上昇している。圧力変動に違いがみられるのは、噴射口近傍の物理現象の一部が正確にとらえられていないからである。本来の燃料噴射口近傍の物理現象 (図 3) では、超音速流中に高圧な気体が燃料噴射口から流入することで、逆圧力勾配が生じて境界層がはがれる剥離の現象が起こり、噴射口の上流側で圧力増加が観測されるべきであるが、本解析結果ではそのような現象は観測されていない。そのため、1 つ目の燃料噴射口の上流側で異なる壁圧分布となっていると推測される。

次いで、キャビティ保炎器のランプ部において、圧力変動が Cai et al.に比べて大きく変化して

いる点について考察する．図3の燃料噴射に生じる噴射境界 (jet boundary) が図5の先行研究ではキャビティ保炎器のステップ前後で消滅しているが，図8に示す73~193 mmまでのx-z平面を10 mm 間隔でプロットした流速コンター図の断面図より，本解析結果を確認すると噴射境界がキャビティ保炎器のランプ部まで及んでいる．この噴射境界が図7でのランプ部の下流側10 mm 付近では主流とキャビティ保炎器内の流体の流速差により生じたせん断層 (shear layer) を突き破る形で発達しており，突き破られた部分に主流が流れ込むことで圧力が低下し，キャビティ保炎器のランプ部では噴射境界が壁面に衝突することで高い圧力分布を示す結果となっている．また，キャビティ保炎器のランプ部の下流側から流出部までの本解析結果の静圧の上昇がCai et al.の結果よりも遅れており，噴射境界がキャビティ保炎器のランプ部の下流側の流れ場にも影響を及ぼしているからであると推測される．

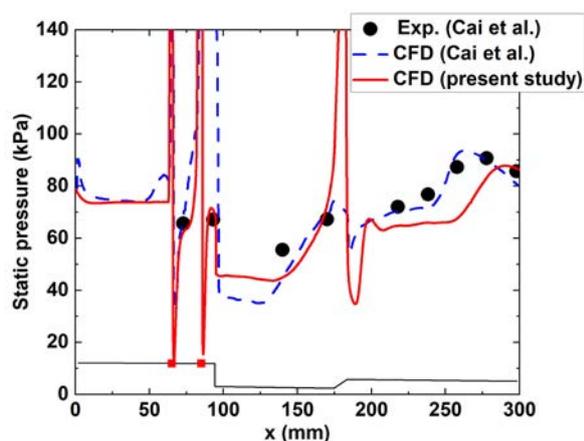


図7 キャビティ保炎器側の壁圧分布

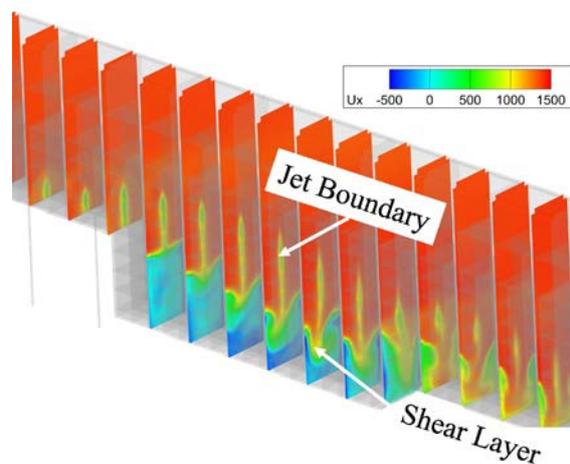


図8 x 軸方向流速の10 mm 間隔の断面図

5. まとめ

本研究では，ランプ角45度のキャビティ保炎器の上流に燃料噴射口を有するスクラム燃焼器を対象に，3次元BCMソルバーを用いた解析結果と先行研究の実験結果と解析結果と比較することで，本研究で開発しているIB法と燃料噴射モデルを適用した解析ソルバーの妥当性を検証した．本解析結果と先行研究の結果との比較より，燃料噴射口近傍の物理現象 (barrel shock など) は捉えられた一方で，燃料噴射口上流での剥離現象を再現することができていないことや，噴射口での燃料のマッハ数が先行研究の値よりも過大評価するなどの問題が確認された．また，キャビティ保炎器側の壁圧分布の比較結果より，噴射境界によりキャビティ保炎器から下流にかけて先行研究とは異なる流れ場となっているため，一部ピーク位置の異なる分布となっている．今後は，本研究で構築した燃料噴射モデルの修正を行いながら，先行研究と同様の燃料噴射口近傍の物理現象の再現及び，キャビティ保炎器から下流の流れ場の再現を目指す．

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] Yicheng Li, M. Barzegar Gerdroodbary, R. Moradi, and Houman Babazadeh, “The influence of the sinusoidal shock generator on the mixing rate of multi hydrogen jets at supersonic flow,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 96, pp. 105579, 2020.

- [2] Fuxu Quan, Juntao Chang, Chen Kong, Chengkun Lv, and Guangwei Wu, “Research on mixing characteristics of scramjet combustor equipped with strut injector,” *Applied Thermal Engineering*, Vol. 236, pp. 121527, 2024.
- [3] Sunwen Du, Abdullah A.A.A. Al-Rashed, M. Barzegar Gerdroodbary, Rasoul Moradi, Amin Shahsavari, and Pouyan Talebizadehsardari, “Effect of fuel jet arrangement on the mixing rate inside trapezoidal cavity flame holder at supersonic flow,” *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 44, No. 39, pp. 22231-22239, 2019.
- [4] Aryadutt Oamjee and Rajesh Sadanandan, “Fuel injection location studies on pylon-cavity aided jet in supersonic crossflow,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 92, pp. 869-880, 2019.
- [5] Tohru Mitani and Toshinori Kouchi, “Flame structures and combustion efficiency computed for a Mach 6 scramjet engine,” *Combustion and Flame*, Vol. 142, No. 3, pp. 187-196, 2005.
- [6] Hironobu Nishiguchi, Masatoshi Kodera, and Sadatake Tomioka, “Unsteady Numerical Analysis of a Dual-Mode Scramjet Combustor with a Cavity,” *Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 66, No. 4, pp. 103-117, 2023.
- [7] Kazuhiro Nakahashi and Lae Kim, “Building-Cube Method for Large-Scale, High Resolution Flow Computations,” *Proceedings of the 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2004-434, 2004.
- [8] Zun Cai, Mingbo Sun, Zhenguo Wang, and Xue-Song Bai, “Effect of cavity geometry on fuel transport and mixing processes in a scramjet combustor,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 80, pp. 309-314, 2018.
- [9] Coirier, William J., and Powell, Kenneth G., “Solution-adaptive Cartesian cell approach for viscous and inviscid flows,” *AIAA Journal*, Vol. 34, No. 5, pp. 938-945, 1996.
- [10] Mittal R., and Iaccarino, G., “Immersed Boundary Method,” *Annual Review Fluid Mechanics*, Vol. 37, pp. 239-260, 2005.
- [11] Erinc Erdem, and Konstantinos Kontis, “Experimental investigation of sonic transverse jets in Mach 5 crossflow,” *Aerospace Science and Technology*, Vol. 110, pp. 106419, 2021.

[共同研究成果]

2次元キャビティが及ぼす後退平板境界層の乱流遷移過程への影響

新開 壮希¹・中川 皓介¹・塚原 隆裕²

1: 東京理科大学大学院 創域理工学研究科 機械航空宇宙工学専攻

2: 東京理科大学 創域理工学部 機械航空宇宙工学科

航空分野では後退翼表面の乱流摩擦抵抗を抑制する層流翼の実用化が長年の課題であり、その鍵となるのは乱流遷移位置の正確な把握と予測である。本研究は後退平板境界層における2次元キャビティの影響を直接数値シミュレーション(DNS)により調査し、乱流遷移の特性解明を目的とする。先行の研究により主流乱れや孤立粗さ要素が遷移過程に与える影響は明らかにされてきたが、BFS(後方段差)とFFS(前方段差)を組み合わせたキャビティに関する詳細な知見は不足している。本研究では、キャビティの深さ、幅、位置による乱流遷移への影響変化を調べ、深いキャビティは即座の乱流誘起を、幅広の浅いキャビティは遷移遅延をもたらすことを見出した。

1. 序論

航空分野の研究開発は今日まで飛躍的な進歩を遂げてきているが、後退翼表面の乱流摩擦抵抗の発生抑制、いわゆる層流翼の実用化は長年の課題であり、現在も多くの研究が続けられている。実用化が実現すれば、航空機の流動抵抗と燃料消費は桁違いに低減されるために、その経済効果は多大なるものと期待できる。そのためにも層流翼設計および風洞実験検証をするうえで、乱流遷移位置の正確な把握と予測が肝要である。本研究は、後退翼前縁を模擬する後退平板境界層を対象に、その遷移過程(後述の横流れ不安定を介した乱流遷移)の特性解明を目的としている。本報では、非滑面の一例として2次元キャビティを取り上げ、その非滑面性(不連続性)が後退平板境界層に与える影響を直接数値シミュレーション(DNS)により調査し、結果を報告する。

当研究は前報^[1]の発展的課題に取り組むものであり、背景および関連研究は前報と共通するところが多い。前報^[1]では、後退平板境界層外の主流が含む乱れに注目しており、その乱れが及ぼす乱流遷移過程および臨界粗さ高さの変化を明らかにした。元来、主流乱れの強度に応じて乱流遷移が変化する事実は報告されていたのだが^[2-4]、さらに主流乱れのピーク波長に対する依存性にも注目したことで曖昧であった臨界条件と遷移過程を、より明確に分析および分類することができた。この主流乱れと孤立円柱粗さに関する研究の詳細は、原著論文^[5,6]を参照されたい。さて、孤立円柱のような孤立粗さ要素を用いることは典型的試験方法の1つであるが、実機表面には様々な粗さ形状が存在することは想像に難くない。いかに表面仕上げを施した翼面であっても、飛行中の塵や虫の付着(それらは孤立粗さで表現し得るものであるが)、着氷、または構造上の繋ぎ目や段差も粗さ要因となる。その不連続な段差は、壁面上の流れを不安定化させて乱流遷移を引き起こす要因にもなり得る。Lanzerstorfer & Kuhlmann^[7]の3次元線形安定性解析によれば、前方段差(FFS: forward-facing step)のリフトアップ効果が、強い剪断流の下で壁面垂直方向に流体を持ち上げ、強い擾乱を生成する。さらに、臨界状態(乱流遷移位置が滑面の場合よりも前進した状態)のFFSでは、リフトアップ効果によりステップ上部に高速・低速ストリーク構造が現れ、同箇所の基本流減速とも複合して不安定化がもたらされ、フィードバック的擾乱維持機構が形成される。これは、2次元境界層(横流れ無し)の場合である。一方で、3次元境界層内においては、Tufts^[8]がFFSと後方段差(BFS: backward-facing step)のそれぞれを調査し、低いBFSでは流れの安定化が報告されている。3次元境界層では、横流れ速度分布の変曲点を起源として、横流れ渦が発生し、それが成長して二次不安定性を伴いつつ乱流状態に崩壊するのであるが、その横流れ渦の振幅をBFSが減少させるのである。高いBFSでは、やはり不安定化をもたらすようで、横流れ渦に似た進行波がスパン方向波数間の非線形相互作用を誘引し二次不安定を誘起する。また、FFS流れでは、ステップに向かって流入する横流れ渦の振幅とFFSの高さの関係が重要である。横流れ

渦の回転方向と、FFS 麓の 2 次渦の流れ方向が一致し、ステップ付近の速度を増加させる条件で不安定性が増幅されると報告されている。Eppink et al.^[9]は実験的に調査し、定常横流れ渦の振幅を増加させると BFS 下流で流れが局所不安定化することを発見した。また、FFS のステップ下流では定常横流れ渦が成長—減衰—再成長を経ることが確認されている^[10]。Rius-Vidales & Kotsonis^[11]も FFS が定常横流れ渦に与える影響を解析し、実験同様に下流で成長—減衰—再成長の挙動が確認された。このとき、横流れ渦は FFS 直前、ステップ近傍、ステップ後方で三度偏向する「Outboard-Inboard-Outboard」の挙動を示す。この挙動は、リフトアップ効果による非モード的成長に起因するものと考えられている。Casacuberta et al.^[12]も、FFS 近傍で基本流流線の偏向を確認し、ステップ高さによって最不安定波長の振幅成長に差が生じることも示された。Reynolds–Orr 方程式を用いたエネルギー交換の解析では、最不安定波長の振幅が FFS 下流で減衰し、流れ場が安定化することが確認されている。しかしながら、FFS は横流れ渦に依存しない局所的な変曲点型の不安定化を引き起こすことも示唆されている。

以上のように、BFS/FFS ステップ流れに関する知見は近年多く得られてきたが、BFS と FFS を組み合わせた 2 次元キャビティについては、その 3 次元境界層（後退平板境界層）に与える影響は未だ解明されていない。境界層内に BFS と FFS が存在すると、それぞれが圧力変動を引き起こすため、2つのステップ間距離によっては各部流れが相互に影響し得るものと予想される。よって本研究では、キャビティ流れの遷移過程が BFS と FFS の 2つのステップ流れの単純な足し合わせとなり得るか、あるいは相互作用を生じるのかを調査する。僅かなキャビティ隙間であれば流れも鈍感ではあるが、そもそも境界層が薄く（後退翼前縁近傍では μm スケールの厚さ）、同オーダーの隙間でも致命的である。よって、DNS による厳密な影響評価が必須である。また先行研究で報告されているように、流れの安定化効果についても流れ制御の観点で興味深い現象であるため、DNS によりその詳細を解明していくことが本研究目的の一つである。

2. 計算手法

本研究の計算対象は、横流れ不安定が支配的となる後退翼前縁付近の流れ場を平板により模擬した、いわゆる後退平板境界層である。その基本流の再現に、Falkner–Skan–Cooke (FSC) 相似解を採用した。計算対象の概略を図 1 に示す。座標系は、コード（翼弦）方向を x 、スパン方向を y 、壁面垂直方向を z としている。計算領域の流入面 ($x=0$) における主流の方向は、 x 軸に対して φ_0 だけ傾いており、境界層外の主流速度コード方向成分 U_∞ が同方向に加速する系 ($U_\infty = U_0 x^m$) となっている。ここで、 $m=0.34207$ と $\varphi_0=55.3^\circ$ は、いずれも先行研究^[13–15]の値と統一させている。スパン方向には、境界層速度 $V_\infty = V_0$ で一定として、周期境界条件を課すことで一様性を仮定している。流入面から十分に下流の位置 x_{BFS} に BFS が、さらに x_{FFS} に FFS があり、したがってスパン方向に一定形状の 2 次元キャビティを設置している。キャビティは、深さ k_z と幅 k_w の矩形（直方体）である。

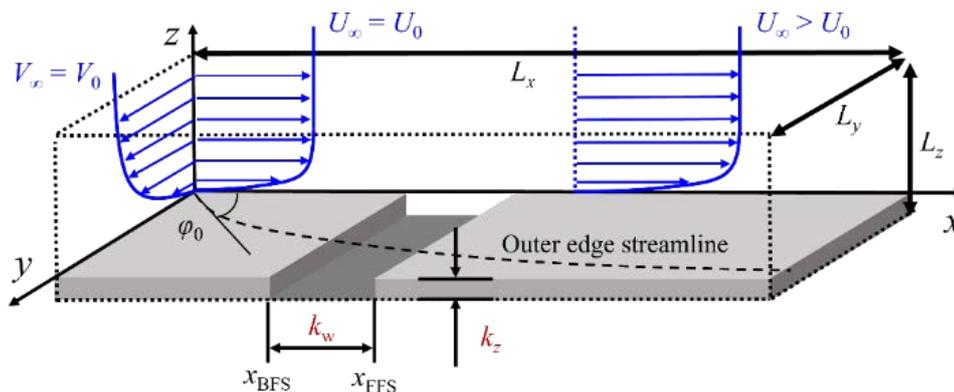


図 1 解析対象と各部寸法.

流体の速度 \mathbf{u} と圧力 p に関する支配方程式は、非圧縮性ニュートン流体の連続の式

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

および Navier-Stokes 方程式

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \frac{1}{\text{Re}_0} \nabla^2 \mathbf{u}. \quad (2)$$

である．式(2)のレイノルズ数 Re_0 は、流入部遠方コード方向速度 U_0 及び流入部排除厚さ δ_0^* で定義され、本研究における全ての計算条件において $\text{Re}_0 = 337.9$ に統一されている．また、 U_0 及び δ_0^* は無次元化にも用いる．

空間的離散化にはコード方向とスパン方向に4次精度中心差分、壁面垂直方向に2次精度中心差分を用いている．時間積分には、粘性項の壁面垂直方向成分に Crank-Nicolson 法を、その他の項については Adams-Bashforth 法を採用している．境界条件は、流入境界に FSC 相似解、流出条件に対流流出、壁面に滑り無し条件、そして壁面垂直方向遠方に FSC 相似解としている．キャビティ部以外の固体壁領域を境界埋込法により表現することで、キャビティを設けている．

数値安定のため、流出境界には速度場を基本流 (FSC 相似解) に漸近させるFRINGE領域を設けている．計算領域 (および格子点数) は、 $402.24\delta_0^* \times 100.56\delta_0^* \times 100\delta_0^*$ ($2048 \times 512 \times (30 \times (k_z/\delta_0^*) + 120)$) または $804.48\delta_0^* \times 25.14\delta_0^* \times 100\delta_0^*$ ($4096 \times 128 \times (30 \times (k_z/\delta_0^*) + 120)$) とした．ここで、スパン方向計算領域サイズを $25.14\delta_0^*$ としたが、これは同条件における線形安定性解析により最不安定波長 (スパン方向波長) と同値である．領域サイズと格子条件は先行研究^[5]と一致させており、壁面近傍の乱流微小渦を十分に捉えることができる解像度である．また、キャビティの深さ方向には、深さ δ_0^* に対して 30 メッシュの等分割格子とした．

本計算の実行には、主に東北大学サイバーサイエンスセンター所有のスーパーコンピュータ群 AOBA を利用した．ベクトル型計算機である SX-Aurora TSUBASA を活用し、1 ノード計算ではあるが、OpenMP 並列とベクトル化を課した自作 Fortran コードにより実行している．当コードは前報^[1]で用いたものとおおよそ同じであり、プログラム性能等はそちらを参考にされたい．

3. 結果

キャビティの深さ k_z/δ_0^* 、幅 k_x/δ_0^* 、位置 (x_{BFS} , x_{FFS}) が定在横流れ渦の遷移過程に及ぼす影響について調べ、その結果を報告する．ここで、定在横流れ渦とは、孤立粗面などをきっかけとして最不安定波長の攪乱が誘起され、横流れ渦に成長するものを指す．当然ながら、粗面粗さ要素は空間的に定在するため、それに起因する横流れ渦も時間的な変化が殆どない (二次不安定から非定常性を呈する)．本計算では、孤立粗面ではなく、仮想的な弱い定在攪乱により、定在横流れ渦を誘起した．

図 2 は、キャビティ深さと幅の影響を調査した結果である．スパン方向 (y 方向) には物理的に一様な条件を課したため、当該方向の任意位置で流れの可視化をしている．図の横方向 (コード方向) の下流に向かって、主流の加速が確認できる．それに伴い、壁面付近では波が徐々に渦を巻くように成長する変動が、周期的に発生している．これが横流れ渦であり、渦自体はコード方向に対して傾いた主流と同方向を向いていることに注意されたい．横流れ渦は、最不安定波長の一定間隔でスパン方向に並ぶため、図 2 の可視化でもコード方向に一定間隔で横流れ渦が定在しているように見られる．滑面の場合でも、同様の結果が確認されている^[15]．図 2(a, b)によれば、 $k_z/\delta_0^* = 1.0$ の浅いキャビティは、境界層および横流れ渦に有意な影響を与えていないことが確認できる．キャビティ内部には再循環領域が発生している．3次元境界層流れにおいて、BFS 下流に生じる再循環領域長さはステップ高さの 10-12 倍である^[8]．この再循環領域の終わりに FFS が存

在していれば **d-type roughness**, 存在しなければ **k-type roughness** と区別できる. 図 2 からは判別し難いが, 実際に図 2(b, d)は **k-type roughness** であったため, **BSF** 下流に生じる再循環領域の長さやキャビティ幅の関係から, キャビティ内部の流れ構造を判断できる. 図 2(b)では, 流れが両ステップで乱されることなく流れ去り, 遷移位置は滑面状態と差がない. 一方で, 図 2(d)の深いキャビティにおいては, 流れが **BFS** ではなく離してキャビティ底部に再付着した後, **FFS** 周辺で乱れが誘起され, 即座に乱流遷移に至っている. **BFS** と **FFS** がそれぞれ単一で流れ場に存在していた場合, 乱流遷移を引き起こす臨界ステップ高さは, **FFS** のほうが小さい傾向^[8]と矛盾しない. 図 2(c)は **d-type roughness** の特徴 (流れはキャビティ内部に入り込むことなく通過) が出ている. しかしながら, 流れがキャビティを越えると非定常変動が増幅し, 横流れ渦の成長と飽和を経ることなく急激に乱流へ遷移する. 以上より, キャビティ内の流れ構造に依らず, ある深さを超えると, キャビティ部から非定常変動が誘起されて急激な乱流遷移を起こすことが明らかとなった.

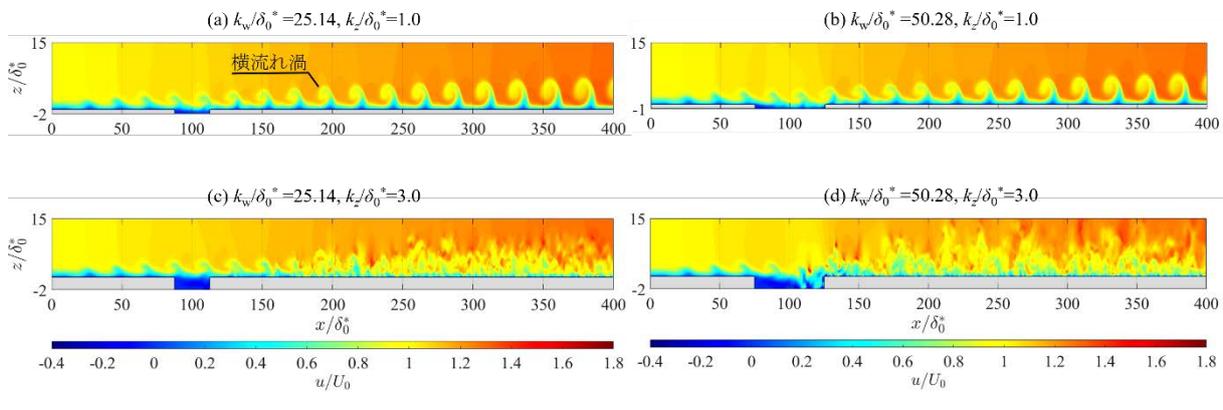


図 2 任意 x - z 面におけるコード方向速度 u/U_0 の瞬時場. 横軸がコード方向座標 (x) で, 縦軸が壁垂直方向座標 (主たる壁面が $z=0$) であり, 流入部排除厚さ δ_0^* で無次元化されている. キャビティ中心は $(x_{\text{BFS}} + x_{\text{FFS}})/2 = 100\delta_0^*$ にあり, キャビティ深さ k_z または幅 k_w が異なる 4 ケースを比較している. 灰色領域は固体壁を表す. フリンジ領域は可視化領域に含まれていない.

次に, キャビティ幅 k_w が遷移過程に及ぼす影響について議論し, 横流れ渦の飽和および乱流遷移位置について報告する. キャビティ部から流れが乱流に遷移しない, 滑面を含む 4 ケースを比較する. これらの結果は, 横流れ渦が崩壊する位置よりも上流においては, 全て定常流れである. 図 3 には 4 ケースの瞬時の流れ場を示している. 滑面の場合には, $x_s/\delta_0^* = 290$ で横流れ渦の成長が止まり, その後に二次不安定を起こして, $x_{\text{tr}}/\delta_0^* = 509$ で乱流へと遷移する (横流れ渦の定在が確認できなくなる). これに対して, キャビティを有する 3 ケースでは, x_s と x_{tr} がともに下流へとシフトしている. つまりは, キャビティの存在により乱流遷移の遅延が起きている. 特に, 図 3(d)における遷移遅延は有意なものと言える. 詳細は割愛するが, 大幅な飽和位置の遅延の原因は, 流れが **FFS** を越える際の流線の偏向により生じる渦構造の変化であると考えられる.

図 3 で示された乱流遷移の遅延について, キャビティ位置に対する依存性を調査した. キャビティ深さと幅は変えずに, キャビティ開始位置 x_{BFS} を $200\delta_0^*$ だけ下流にシフトさせた結果を図 4 に示す. キャビティ付近では滑面と比べて殆ど変化はなく, また横流れ渦の崩壊位置も有意な変化は見られない. 図 3(d)で見られた乱流遷移の遅延は, キャビティ位置によっては損なわれることが分かる. つまりは, 定在横流れ渦のキャビティに対する敏感性は, その成長過程によって変化することが判明した.

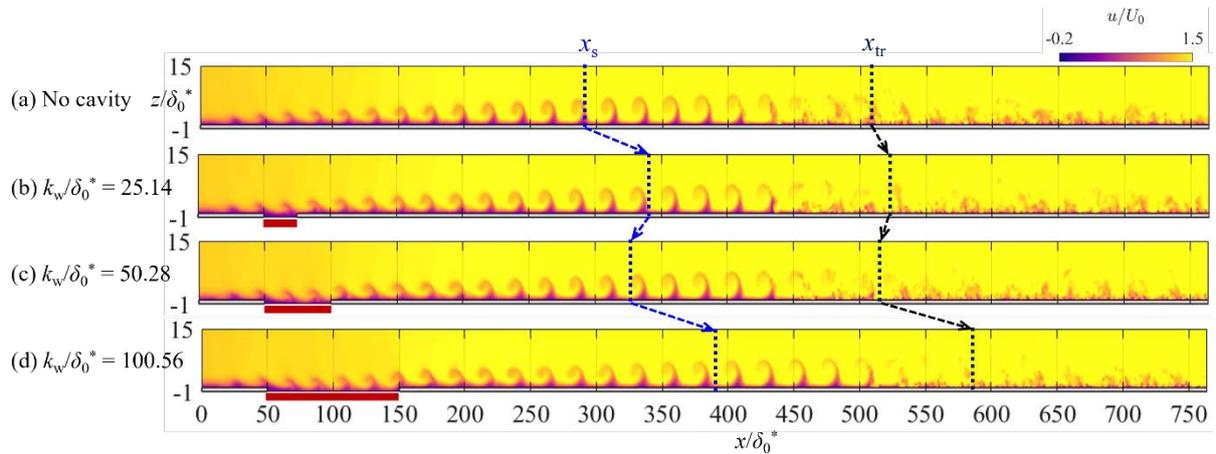


図3 任意 x - z 面におけるコード方向速度 u/U_0 の瞬時場. (a) 滑面の場合. (b-d) $k_z/\delta_0^* = 1.0$ のキャビティ前縁は固定 ($x_{\text{BFS}}/\delta_0^* = 50$) で, キャビティ深さ k_w が異なる3ケースを比較. 見易さのため, キャビティ部分に赤線を, 横流れ渦成長の飽和位置 x_s と乱流遷移位置 x_{tr} を点線で示す.

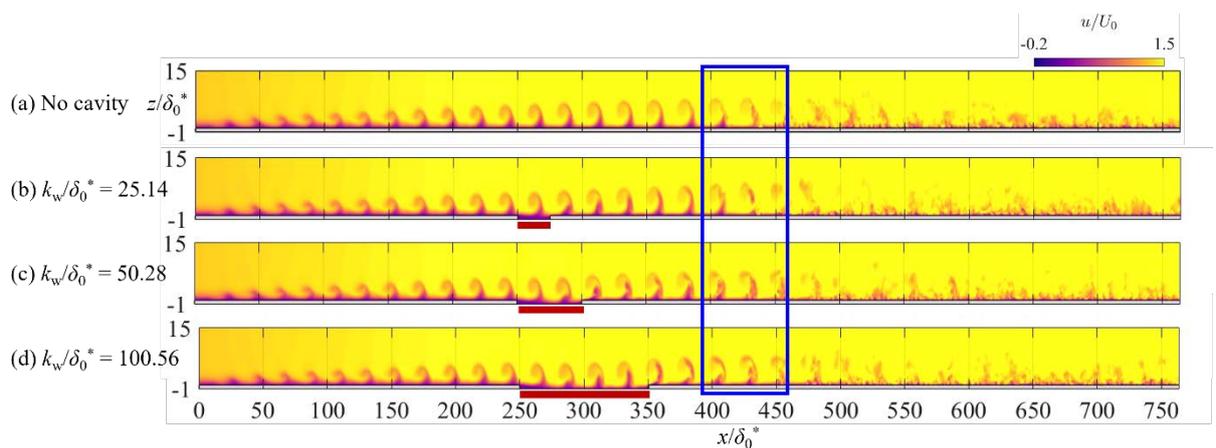


図4 図3と同様. ただし, キャビティ前縁は $x_{\text{BFS}}/\delta_0^* = 250$ に固定.

4. 結論

本研究では, 2次元キャビティを越える後退平板境界層の流れの不安定性, 特に定在横流れ渦の成長と崩壊の遅延について, 直接数値シミュレーション (DNS) により調査した. キャビティの深さ, 幅, 位置に対する影響の依存性を調べ, 深いキャビティは即座の乱流誘起を, 幅広の浅いキャビティは遷移遅延をもたらすことを見出した.

謝辞

本研究は, 東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ AOBA (SX-Aurora Tsubasa) 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. 第二著者 (中川) は JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2151 の支援を受けたものである.

参考文献

- [1] 中川皓介, 塚原隆裕, “後退平板境界層における横流れ渦と主流乱れの相互作用による乱流遷移の直接数値解析”, 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. 4, pp. 64–73 (2023).
- [2] R.S. Downs and E.B. White, “Free-stream turbulence and the development of cross-flow disturbances,” *J. Fluid Mech.* 735, 347–380 (2013).
- [3] J. Serpieri and M. Kotsonis, “Three-dimensional organisation of primary and secondary crossflow instability,” *J. Fluid Mech.* 799, 200–245 (2016).
- [4] L. De Vincentiis, D. Henningson and A. Hanifi, “Transition in an infinite swept-wing boundary layer subject to surface roughness and free-stream turbulence,” *J. Fluid Mech.* 931, A24 (2022).
- [5] K. Nakagawa, T. Ishida, and T. Tsukahara, “Effects of freestream turbulence on the secondary instability of the roughness-induced crossflow vortex in swept flat plate boundary layers,” *Int. J. Heat & Fluid Flow*, 102, 109161 (2023).
- [6] K. Nakagawa, T. Ishida, and T. Tsukahara, “Changes in the transition process of roughness-induced crossflow vortices due to freestream turbulence,” *Flow, Turbulence & Comb.*, in Press (2025).
- [7] D. Lanzerstorfer and H.C. Kuhlmann, “Three-dimensional instability of the flow over a forward-facing step,” *J. Fluid Mech.* 695, 390–404 (2012).
- [8] M.W. Tufts, Computational Investigation of Sensitivity of the Crossflow Instability to Two-Dimensional Surface Imperfections, Ph.D. Thesis, Texas A & M University (2015).
- [9] J.L. Eppink, R.W. Wlezien, R.A. King, and M. Choudhari, “Interaction of a backward-facing step and crossflow instabilities in boundary-layer transition,” *AIAA J.* 56 (2), 497–509 (2018).
- [10] J.L. Eppink, “Mechanisms of stationary cross-flow instability growth and breakdown induced by forward-facing steps,” *J. Fluid Mech.* 897, A15 (2020).
- [11] A.F. Rius-Vidales and M. Kotsonis, “Impact of a forward-facing step on the development of crossflow instability,” *J. Fluid Mech.* 924, A34 (2021).
- [12] J. Casacuberta, S. Hickel, S. Westerbeek, and M. Kotsonis, “Direct numerical simulation of interaction between a stationary crossflow instability and forward-facing steps,” *J. Fluid Mech.* 943, A46 (2022).
- [13] M. Högberg and D.S. Henningson, “Secondary instability of cross-flow vortices in Falkner–Skan–Cooke boundary layers,” *J. Fluid Mech.* 368, 339–357 (1998).
- [14] M. Brynjell–Rahkola, N. Shahriari, P. Schlatter, A. Hanifi and D.S. Henningson, “Stability and sensitivity of a cross-flow-dominated Falkner–Skan–Cooke boundary layer with discrete surface roughness,” *J. Fluid Mech.* 826, 830–850 (2017).
- [15] T. Ishida, T. Tsukahara and N. Tokugawa, “Parameter effects of spanwise-arrayed cylindrical roughness elements on transition in the Falkner–Skan–Cooke boundary layer,” *Trans. Japan Soc. Aeronautical and Space Sciences*, 65(2), 84–94 (2022).

[共同研究成果]

プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の性能向上に向けて

— 第 2 報 —

浅田 健吾：東京理科大学工学部情報工学科
渡部 航太朗：東京理科大学工学部情報工学科
藤井 孝藏：東京理科大学工学部情報工学科
立川 智章：東京理科大学工学部情報工学科

1. はじめに

近年，流体制御デバイスとして誘電バリア放電（Dielectric Barrier Discharge, DBD）を利用した DBD プラズマアクチュエータ（以下 PA）[1, 2]が注目を集め，国内外で多くの研究が行われている．PA は，流れに局所的な流体変動を与えることで周囲の大きな流れを制御するマイクロ流体制御デバイスで，2 枚の電極とそれに挟まれた誘電体からなる単純な構造を持つ（図 1）．電極間に高電圧の交流電圧を印加することでプラズマを生成，非定常な流体変動を誘起する．数百マイクロメートルと非常に薄く，取り付けによる流体機器形状への影響が小さいために既存システムへの導入が容易である．また，印加電圧の ON/OFF に対して瞬時に応答する点，機械的な駆動部を持たない，消費電力が少ないなど多数の利点を有する．

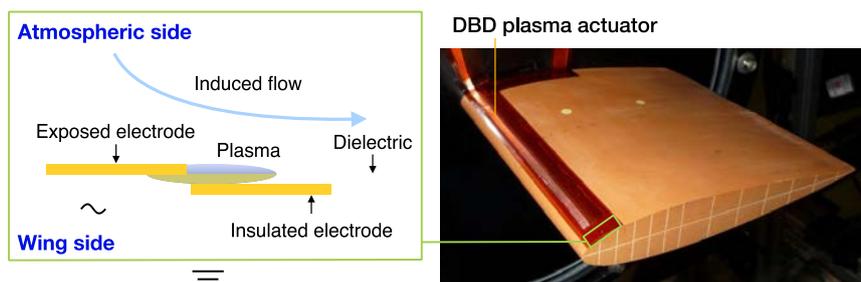


図 1: DBD プラズマアクチュエータの構造と翼型への設置例

これまで PA の研究は航空工学分野を中心に広まってきたことから，主に航空機の翼のような所謂流線型物体周りの流れを対象とするものが多く [3-12]，自動車 [13-15] を対象とした研究もなされているものの，直角な角部で発生する流れの剥離を制御する研究は多くはなかった．そこで筆者らはトンネルの換気に使われるような大型のダクトを想定した曲がり管流れを対象に，角部で大きく剥離する流れの制御を試みた [16]．この研究では PA 単体で剥離流れを制御することが難しかったために PA に加え半円柱形状物体を物体角部に付加する方法を提案し，その有効性を示した [17]．本研究では，ダクトのような内部流れで効果が得られた提案手法の適用範囲を拡大させ，外部流れにおいても有効であるかを検証する．具体的には簡易自動車モデルである Ahmed model [18] 周りの流れに提案手法を適用し，車体周りの剥離抑制および抵抗低減効果を評価する．

2. 問題設定と計算条件

2.1 簡易自動車モデル形状

図2に Ahmed model の形状を示す。Ahmed model は簡略化した自動車モデルであり，これまで多くの実験とシミュレーションが行われている。Ahmed model は丸まった先頭部分，長い胴体部分，斜めに切り落とされたスラント部分，垂直な後端部分からなる。自動車モデルとしては単純な構造であるが，その単純さに反して後流は図3に示されるように，スラント部前縁からの剥離流れ，C-pillar と呼ばれる側面とスラント部の境目から発生する C-pillar 渦，車と床の間から巻き上げる流れが混ざり合う複雑な流れとなることが知られている。

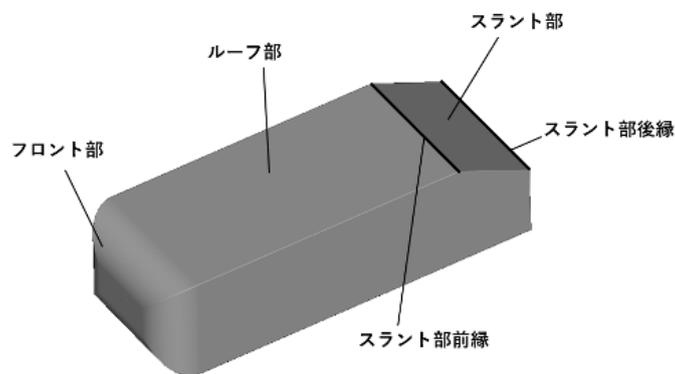


図2: Ahmed model の形状と各部の名称

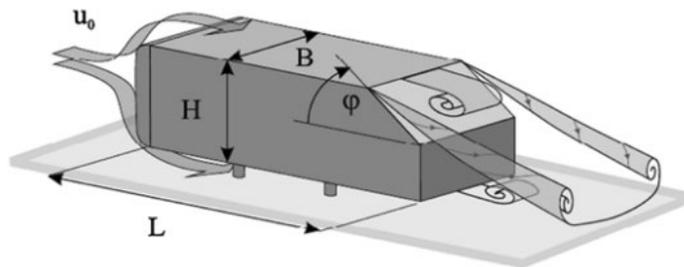


図3: Ahmed model 周りの流れ[18]

Ahmed model の形状と各種パラメータの関係を図4に，形状パラメータを表1に示す。Ahmed model の高さや幅，長さについてのパラメータは，盛んに研究されている形状[19]で使われた値とした。スラント部の角度は35度とする。このスラント角度は，流れがスラント部で再付着することなく剥離する条件である。スラント部の角度が30度より大きい場合，C-pillar 渦は発生せず，大規模な剥離領域が形成される。

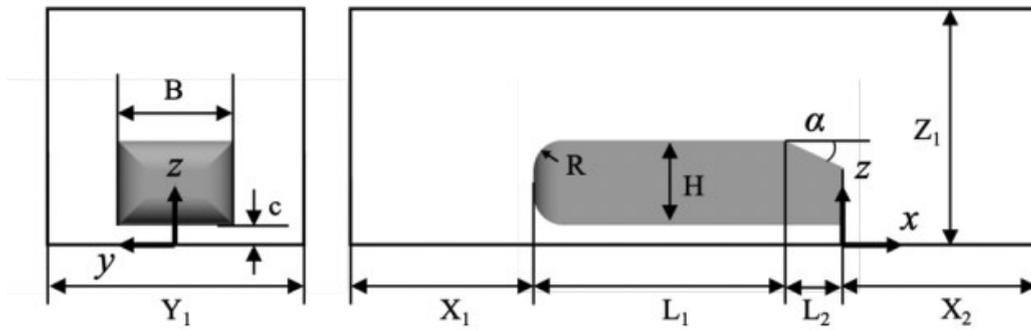


図 4: Ahmed model の形状と各種パラメータ

表 1: Ahmed model の形状パラメータ

H	288[mm]
α	35 度
L_1/H	2.994
L_2/H	0.631
$(L_1 + L_2)/H$	3.625
B/H	1.35
R/H	0.347
c/H	0.174

本研究では PA の制御効果強化を狙い、円柱を切り落とした形状の半円柱物体をスラント部前縁に設置した。設置する前の自動車モデルの形状を図 5 に、半円柱物体を設置後の形状を図 6 に示す。半円柱物体の車に接する斜辺の長さは $0.075H$ とした。



図 5: スラント部形状



図 6: 半円柱物体が設置されたスラント部形状

2.2 計算条件

自動車モデルに半円柱物体を取り付け、更なるその表面に PA を設置した際の位置関係を図 7 に

示す. PA はスラント部前縁($x = 2.994$)からやや下流の位置に設置した. 半円柱物体を設置しないケースでは, PA の設置位置を $x = 3.003$ (“Base+DownstreamPA”)とした. 半円柱物体を設置したケース (“Cylinder”) では剥離点の位置が $x = 3.008$ であることから, その少し上流の位置($x = 3.004$)に PA を設置したケース (“Cylinder+UpstreamPA”) と, 少し下流の位置($x = 3.018$)に PA を設置したケース (“Cylinder+DownstreamPA”)を考えた. PA による誘起流の方向は主流方向とし, 誘起流の強さは, 実験で容易に再現可能な $Dc = 0.035$ と, PA の影響が顕著に現れる強力な $Dc = 0.35$ の2通りとした. 後者の強さは現実の PA よりも強力だが, PA の影響が顕著に現れるケースとして設定した.

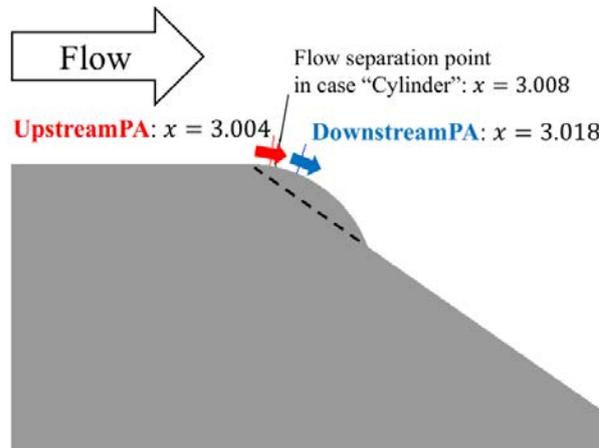


図 7: 簡易自動車モデルに設置された半円柱物体と PA

表 2 に計算ケースを示す. Ahmed model の元形状を”Base”, そこに半円柱物体を設置した形状を”Cylinder”と呼ぶ. PA を設置しないケースの剥離点位置を基準に, PA の設置位置を”Upstream”または”Downstream”とする. ただし, ”Base”と”Cylinder”で剥離点位置がそれぞれ異なるため, ”Base+DownstreamPA”と”Cylinder+DownstreamPA”における PA の設置位置が異なることに注意が必要である. PA の駆動方法は連続駆動とした.

表 2 簡易自動車モデルの計算ケース

Case	半円柱物体の有無	PA の位置	PA の強さ(D_c)
Base	No	-	-
Base+DownstreamPA	No	Downstream ($x = 3.003$)	0.035
Base+DownstreamPA_Strong	No	Downstream ($x = 3.003$)	0.35
Cylinder	Yes	-	-
Cylinder+UpstreamPA	Yes	Upstream ($x = 3.004$)	0.035
Cylinder+UpstreamPA_Strong	Yes	Upstream ($x = 3.004$)	0.35
Cylinder+DownstreamPA	Yes	Downstream ($x = 3.018$)	0.035

2.3 プラズマアクチュエータのモデル化

PA の流体計算への導入は支配方程式に PA を模擬した体積力項を導入することで行う. PA の体積力モデルはいくつか提案されているが, ここでは Suzen と Huang ら[20]の定常体積モデル (以下 Suzen モデル) を非定常に拡張した体積モデルを用いる. モデルの数値計算への導入方法の詳細, その信頼性, および数値計算の妥当性については既出論文を参照されたい[21, 22]. PA の駆動は連続駆動とし, 周波数は代表速度と代表長さを基準とした無次元周波数で 60 である.

2.4 計算手法

3次元圧縮性 Navier-Stokes 方程式を支配方程式とし、空間の離散化には6次精度コンパクト差分法を用いた。フィルター係数は $\alpha_f = 0.48$ とした。時間積分には内部反復を5回行う ADI-SGS 陰解法を用いた。一様流とモデル高さ H 基準のレイノルズ数は文献[23, 24]に合わせ、 $Re_H = 2.0 \times 10^5$ とした。マッハ数は計算効率を考慮し実際よりも高い0.2とした。比熱比は $\gamma = 1.4$ 、プラントル数は $Pr = 0.72$ 、計算に用いた無次元時間刻み幅は 5.0×10^{-4} とした。また、本研究では陽的なサブグリッドスケールモデルを用いない Implicit LES を採用した。

2.5 計算格子と境界条件

図8に計算格子を示す。計算格子は車周りの境界層を解像する Zone1 (黒色)、車と床の間の領域の Zone2 (赤色)、後流を解像する Zone3 (青色)、外部領域の Zone4 (緑色)、半円柱物体近傍の境界層を解像する Zone5 (黄色) の計5ゾーンから構成される総格子点数は約6億点である。計算領域の大きさはMenterら[24]の計算領域を参考とした。物体表面および計算領域の底面は滑りなし壁面条件、計算領域上面は滑り条件とした。計算領域側面はほぼ一様流であるため、格子点数を削減するために周期境界条件とした。初期条件はインパルススタートとした。

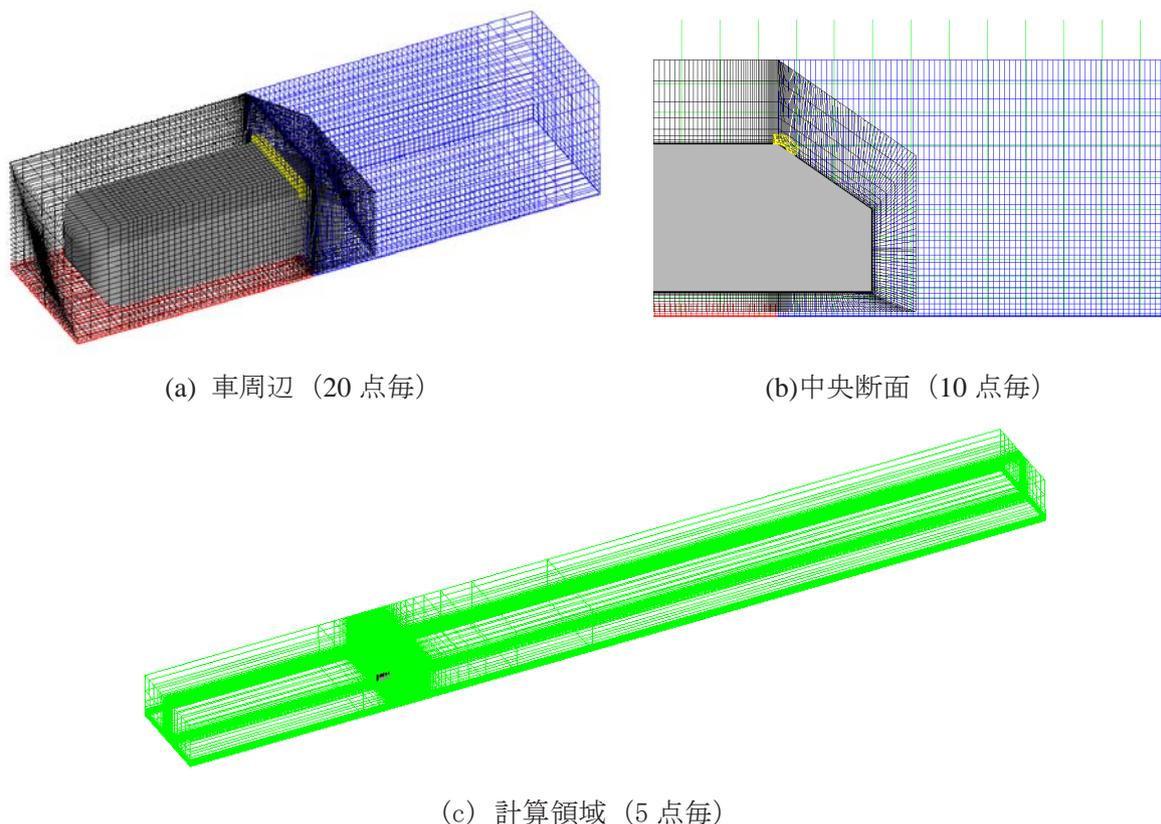


図8: 計算格子

2.6 計算機に関して

計算機として、東北大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 のサブシステム AOBA-S を利用した。AOBA-S の1ノードは1個のベクトルホスト (VH) と8個のベクトルエンジン (VE) で構成されており、本計算では24VEを用いた。計算実施のために計算領域を分割し、各VEに割り当てて並列計算を行った。VE内はスレッド並列 (自動並列) とし、各VE間にはMPI通信を行うハイブリッド並列を用いた。1ケース (12万ステップ) の計算時間は約52時間である。

3. 計算結果

3.1 計算結果の信頼性

計算結果の信頼性を確認するために、時間平均流れ場から求めた抵抗係数値を先行研究[18, 25, 26]の値と比較する。表 3 に結果をまとめた。表の抵抗係数は全てスラント角度が 35 度の結果である。本計算での抵抗係数の評価は流れ場が十分収束したとみなせる 30 万ステップから 42 万ステップまでの区間を用いて行った。本研究の半円柱物体や PA を設置しない Ahmed model 単体のケース (Base ケース) の抵抗係数は 0.307 であった。この値は Guilmineau と Liu らの値の間に収まっており、本研究の計算結果は妥当であると考えられる。

表 3 先行研究の抵抗係数との比較 (スラント角度 35 度)

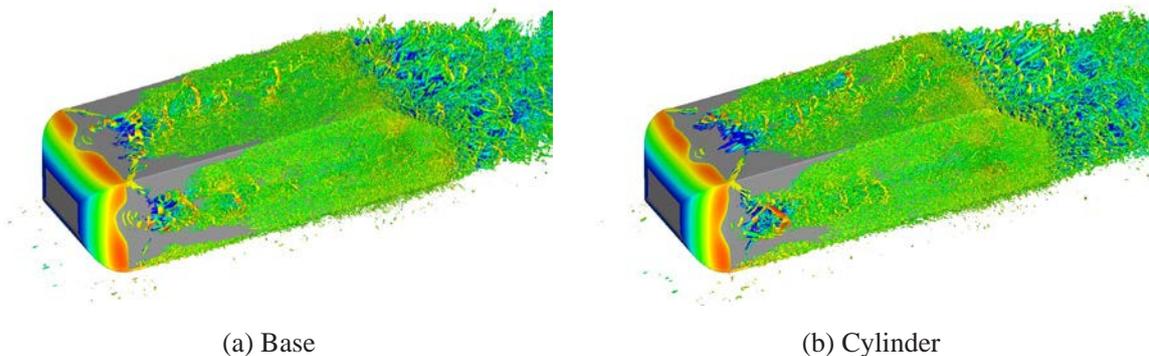
Case	Method	Re_H	C_d
Ahmed et al. [18]	Exp.	1.20×10^6	0.26
Guilmineau [25]	Sim.	7.68×10^5	0.27
Present study (“Base” case)	Sim.	2.00×10^5	0.307
Liu et al. [26]	Exp.	1.44×10^5	0.32

3.2 瞬間流れ場

図 9 に代表的な計算ケースの瞬間場を示す。等値面は速度勾配テンソルの第二不変量で、主流速度成分で色付けしている。何れのケースもフロント部から胴体部までの流れに大きな違いはない。図中左下から流入した流れは、フロント部の丸みが終わる付近で側面・上面共に剥離する。そして、胴体の途中で再付着後乱流へと遷移し、次第に乱流境界層が発達していく。

スラント部より後ろの領域に着目すると、(a)Base, (b)Cylinder, (c)Cylinder+UpstreamPA ではいずれもスラント部前縁で流れが大きく剥離しており、スラント部より後ろの流れ場に大きな違いは見られない。この傾向は Base+DownStreamPA, Cylinder+DownstreamPA でも同様である。

一方、(d)Cylinder+UpstreamPA_Strong は PA の強い誘起流れの影響により、スラント部前縁で流れが加速されており、流れが比較的スラント部に沿って流れるようになっている。剥離領域は縮小し、スラント部後方の流れ場が他のケースと大きく異なっていることがわかる。また、スラント部前縁と側面の間からのびる C-pillar 渦のような縦渦が確認できる。このような現象は、スラント角度 35 度の Ahmed model にシンセティックジェットを適用した Brunn ら[27]でも報告されている。このような流れは Cylinder+DownstreamPA_Strong にも見られた。



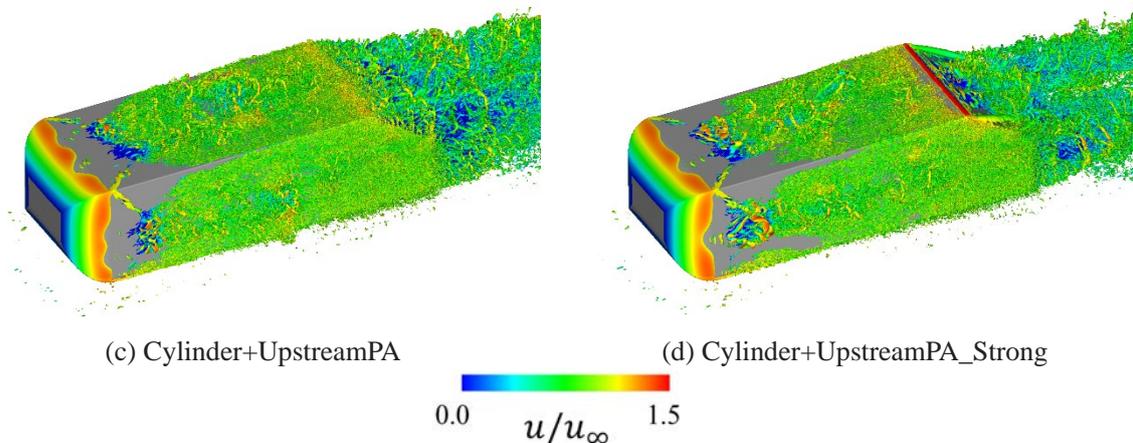


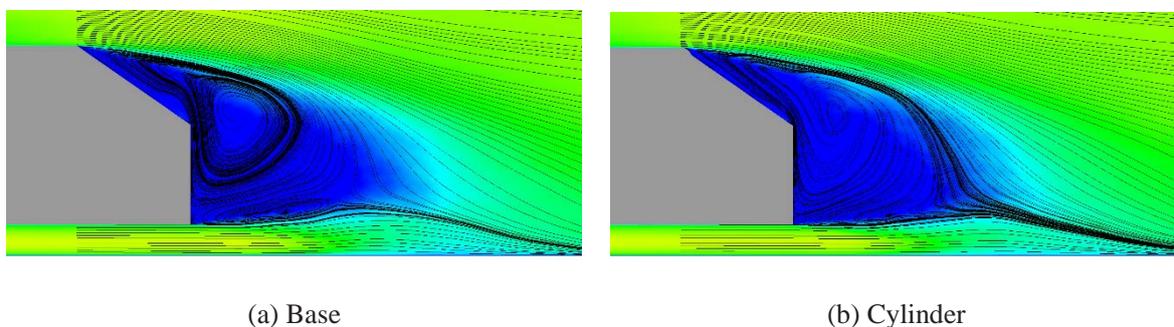
図9 代表的な計算ケースの瞬間場

3.3 平均流れ場

半円柱物体の有無，PA の位置，および強さの効果をより詳細に評価するために，図 10 にスラント部中央断面における平均速度場と流線を示す．(a)Base と(b)Cylinder を比較すると，両ケースともに大きな剥離領域が確認されるが，(b)Cylinder では(a)Base に比べて剥離領域がわずかに小さくなっている．

(c)Cylinder+UpstreamPA，(e)Cylinder+DownstreamPA では，(b)Cylinder に比べて剥離領域がさらに縮小していることがわかる．これは，半円柱物体に加え PA を適用したことで，剥離がさらに遅れたためと考えられる．(c)Cylinder+UpstreamPA と(e)Cylinder+DownstreamPA を比較すると半円柱物体のみのケースにおける剥離点よりやや前方に PA を設置する(c)Cylinder+UpstreamPA の剥離領域の方がわずかに小さくなっているが，いずれのケースでも PA を追加することで剥離抑制に一定の効果が生じていると考えられる．

強い誘起流が生じる(d) Cylinder+UpstreamPA_Strong および(f) Cylinder+DownstreamPA_Strong では，スラント部前縁で流れが加速されるとともに，スラント部の流れが付着し，剥離領域が非常に小さくなっている．両者を比較すると，(d) Cylinder+UpstreamPA_Strong ではスラント部の剥離領域が(f) Cylinder+DownstreamPA_Strong と比較してやや大きくなっている．



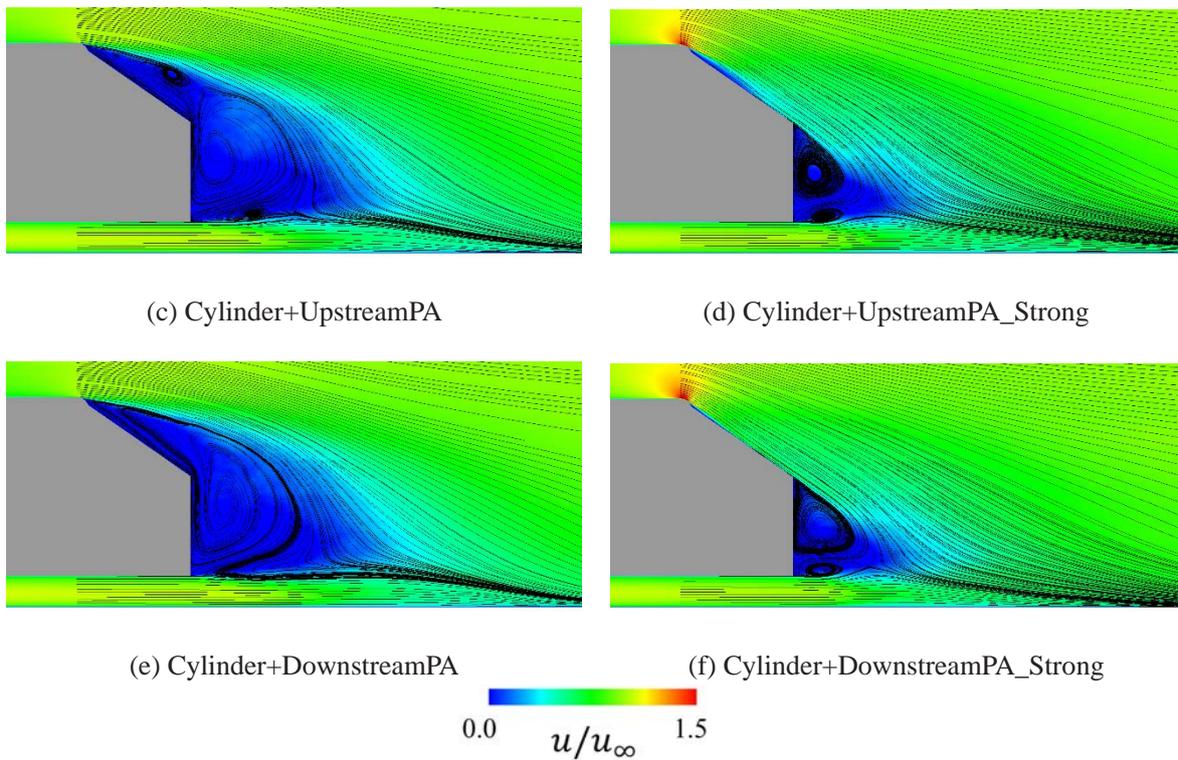
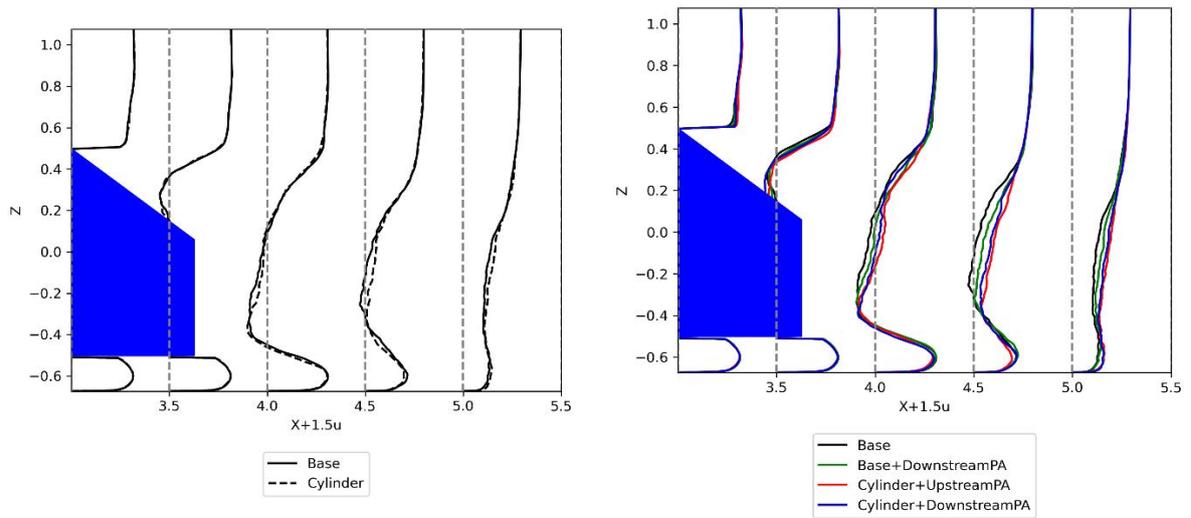


図 10 平均速度場と流線

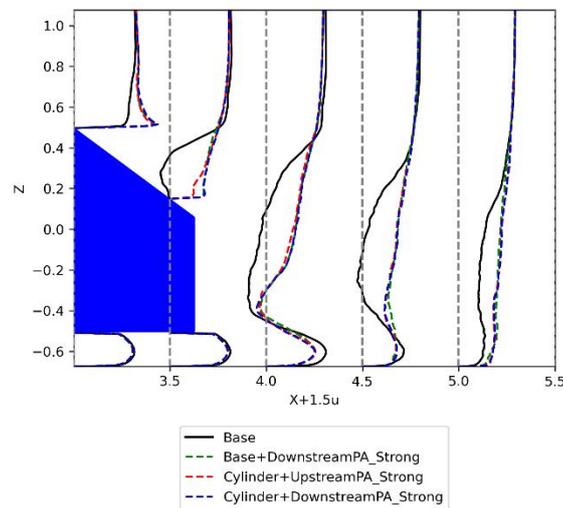
中央断面の各 x 位置における主流方向速度分布を図 11 に示す. 図 11(a)では半円柱物体の設置によりスラント部ではほとんど速度分布の違いは見られないものの, スラント部より後ろの領域において剥離による減速が緩和され, 剥離がわずかに抑制されていることがわかる. 図 11(b)では PA を追加したことにより, 剥離領域は減少し, Base と比べて剥離による減速は緩やかである. また, 半円柱物体なしで PA を追加するだけでも効果が生じていることがわかる. 図 11(c)では PA の誘起流れが大きくなることで剥離による低速領域が減少しているのがわかる.

剥離領域の大きさを, 後流の中で初めて速度が正となる位置を基準として比較する. 各 x 断面で最小の主流方向速度を求め, その値が初めて 0 以上となる x 座標を計測し, モデルの後端からの距離に変換し L_{sep} とする. 結果を表 4 に示す. 半円柱物体のみを設置した場合では剥離領域が 9.59% 減少し, PA のみを設置した場合では 9.97%減少した. 提案手法である半円柱物体と PA の組み合わせでは, 通常の PA で最大 24.9%, 強力な PA で 50.2%剥離領域が減少することが確認された. また, 強力な PA のみでも 55.2%剥離領域が減少していることがわかった.



(a) PA なし

(b) PA あり



(c) PA あり (Strong)

図 11 主流方向速度分布

表 4 剥離領域の後端までの距離

Case	L_{sep}	ΔL_{sep} [%]
Base	0.951	N/A
Base+DownstreamPA	0.860	-9.59
Base+DownstreamPA_Strong	0.426	-55.22
Cylinder	0.856	-9.97
Cylinder+UpstreamPA	0.725	-23.77
Cylinder+UpstreamPA_Strong	0.473	-50.23
Cylinder+DownstreamPA	0.714	-24.92

3.4 抵抗係数の比較

最後に各ケースの時間平均流れから求めた抵抗係数を表 5 に示す。 $|\Delta C_d|$ は Base に対する変化率の絶対値である。表から Base+DownstreamPA_Strong, Cylinder+DownstreamPA_Strong では抵抗係数が減少した一方で、その他のケースでは抵抗係数が増加していることがわかる。一般に、抵抗係数の減少はエネルギー効率の改善を意味し歓迎されるが、本研究では抵抗係数の変化量の大きさに注目する。強力な PA のケースでは、エネルギー投入量が大きくなるものの、より強い誘起流れが生じるため、抵抗係数の変化量も大きくなることが予想される。しかし、最も抵抗係数の変化量が大きかったケースは Cylinder+UpstreamPA となった。その一方で、Cylinder+UpstreamPA_Strong は抵抗係数の変化は 0.03% であり、誘起流れは強さと抵抗係数の値の変化の大きさには単純な相関は見られない。この原因として、スラント部前縁と側面の間から生じている C-pillar 渦が影響していることが考えられる。

表 5 抵抗係数の変化

Case	C_d	$ \Delta C_d [\%]$
Base	0.3073	
Base+DownstreamPA	0.3124	1.65
Base+DownstreamPA_Strong	0.2945	4.18
Cylinder	0.3156	2.68
Cylinder+UpstreamPA	0.3293	7.15
Cylinder+UpstreamPA_Strong	0.3074	0.03
Cylinder+DownstreamPA	0.3192	3.85

4. まとめ

本研究では簡易自動車モデルである Ahmed model に対して、剥離を生じるスラント部前縁に半円柱物体を設置し、PA と併用することで流れの剥離を抑制することを考え、数値計算を用いて剥離制御効果の評価を行った。シミュレーションの結果、半円柱物体を設置しただけでも剥離領域を抑制することができ、PA を併用することでさらに剥離を抑えられることがわかった。特に強力な PA では強い誘起流れが生じることでスラント部の流れが付着し、剥離領域が非常に小さくなることがわかった。各ケースで剥離領域の後端までの距離を計測すると、半円柱物体のみを設置した場合では剥離領域が 9.59% 減少し、PA のみを設置した場合では 9.97% 減少した。半円柱物体と PA の組み合わせでは、通常の PA で最大 24.9%、強力な PA で 50.2% 剥離領域が減少することが確認された。一方、抵抗係数に関しては、抵抗係数の変化量の大きさは必ずしも PA の強さに比例しないことがわかった。

5. 今後の研究計画

本研究では外部流れにおいて半円柱物体と PA の組み合わせで流れ制御が一定の効果があることを簡易自動車モデルである Ahmed model を用いて示したが、抵抗係数の低減という観点では十分な成果を達成できていない。今後は、PA の設置位置や方向、強さを変化させた場合に、それらが抵抗係数の低減効果に与える影響を検証していく予定である。

謝辞

ここに記載させて頂いた成果は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータを利用することで実現することができたものである。また、研究にあたっては同センター関係各位に有益なご指導とご協力を頂いた。センターの皆様はこの場を借りて謝意を示したい。

参考文献

- [1] T. C. Corke, C. L. Enloe, and S. P. Wilkinson, “Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuators for Flow Control,” *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 42, pp. 505–529, 2010.
- [2] T. C. Corke, M. L. Post, and D. M. Orlov, “Single Dielectric Barrier Discharge Plasma Enhanced Aerodynamics: Physics, Modeling and Applications,” *Experiments in Fluids*, Vol. 46, No. 1, pp. 1–26, 2009.
- [3] M. L. Post and T. C. Corke, “Separation Control on High Angle of Attack Airfoil Using Plasma Actuators,” *AIAA Journal*, Vol. 42 No.11,2004.
- [4] N. Benard, J. Jolibois, and E. Moreau, “Lift and Drag Performances of an Axisymmetric Airfoil Controlled by Plasma Actuator,” *Journal of Electrostatics*, Vol. 67, No. 2-3, pp. 133–139, 2009.
- [5] K. Asada, Y. Ninomiya, A. Oyama, and K. Fujii, “Airfoil Flow Experiment on the Duty Cycle of DBD Plasma Actuator,” 47th AIAA Aerospace Sciences Meeting, The New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Orlando, Florida, January 2009.
- [6] K. Fujii, “High-Performance Computing Based Exploration of Flow Control with Micro Devices” *Philosophical Transaction A, The Royal Society*, Vol. 372, Article ID 20130326, 2014.
- [7] M. Sato, H. Aono, A. Yakeno, T. Nonomura, K. Fujii, K. Okada, and K. Asada, “Multifactorial Effects of Operating Conditions of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator on Laminar Separated Flow Control,” *AIAA Journal*, Vol. 53, No. 9, 2015.
- [8] H. Aono, S. Kawai, T. Nonomura, M. Sato, K. Fujii and K. Okada, “Plasma-Actuator Burst-Mode Frequency Effects on Leading-Edge Flow-Separation Control at Reynolds Number 2.6×10^5 ,” *AIAA Journal* Vol. 55, pp. 3789-3806, 2017.
- [9] K. Fujii, “Three Flow Features behind the Flow Control Authority of DBD Plasma Actuator: Result of High-Fidelity Simulations and the Related Experiments,” *Applied Science* 2018, Vol. 8, Issue 4, 2018.
- [10] H. Matsuda, M. Tanaka, S. Goshima, K. Amemori, M. Nomura and T. Osako, “Experimental Study on Plasma Aerodynamic Control for Improving Wind Turbine Performance,” *Asian Congress on Gas Turbines* 2012, Shanghai, P. R. China, August 2012.
- [11] D. Greenblatt, A. B. Harav, and H. M. Vahl, “Dynamic Stall Control on a Vertical Axis Wind Turbine Using Plasma Actuators,” *AIAA Journal*, Vol. 52, No. 2, pp. 456–461, 2014.
- [12] D. P. Rizzetta and M. R. Visbal, “Simulation of Plasma-based Flow Control Strategies for Transitional Highly Loaded Low-Pressure Turbines,” 37th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit, Fluid Dynamics and Co-located Conferences, Miami, Florida, June 2007.
- [13] K. Shimizu, T. Nakajima, S. Sekimoto, K. Fujii, T. Hiraoka, Y. Nakamura, T. Nouzawa, J. Ikeda and M. Tsubokura, “Aerodynamic drag reduction of a simplified vehicle model by promoting flow separation using plasma actuator,” *JSME Mechanical Engineering Letters, Bulletin of the JSME*, Vol.5, No. 19-00354,2019.
- [14] Z. Hui, X. Hu, P. Guo, Z. Wang and J. Wang, “Separation Flow Control of a Generic Ground Vehicle Using an SDBD Plasma Actuator,” *MDPI, Open Access Journal*, vol. 12, issue 20, pp. 1-14, 2019.
- [15] S. Shadmani, S. M. Mousavi Nainiyan, M. Mirzaei, R. Ghasemiasl and S. G. Pouryousefi, “Experimental Investigation of Flow Control over an Ahmed Body using DBD Plasma Actuator,” *Journal of Applied Fluid Mechanics*, Vol. 11, No. 5, pp. 1267-1276, 2018.

- [16] K. Watanabe, K. Asada, S. Sekimoto, and K. Fujii, “One Proposal to Enhance the Flow Control Authority of a Plasma Actuator in a Curved Duct”, *AJK Fluids 2023*, Osaka, Japan, July 2023.
- [17] 浅田健吾, 渡部航太郎, 関本諭志, 藤井孝藏, “プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の性能向上に向けて,” *大規模科学計算システム広報SENAC*, Vol. 57, No. 2, pp.5-14, 2024.
- [18] S. R. Ahmed, G. Ramm, and G. Faltin, “Some Salient Features of the Time -Averaged Ground Vehicle Wake,” *SAE Transactions*, Vol. 93, pp. 473–503, 1984.
- [19] H. Lienhart, and S. Becker, “Flow and Turbulence Structure In the Wake of a Simplified Car Model,” *SAE Transactions*, Vol. 112, pp. 785–796, 2003.
- [20] Y. B. Suzen and P. G. Huang, “Simulations of Flow Separation Control using Plasma Actuators,” 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, Reno, Nevada, January 2006.
- [21] K. Asada, T. Nonomura, H. Aono, M. Sato, K. Okada, and K. Fujii, “LES of Transient Flows Controlled by DBD Plasma Actuator over a Stalled Airfoil,” *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, Vol. 29, 2015.
- [22] H. Aono, S. Sekimoto, M. Sato, A. Yakeno, T. Nonomura, and K. Fujii, “Computational and Experimental Analysis of Flow Structures Induced by a Plasma Actuator with Burst Modulations in Quiescent Air,” *Bulletin of the JSME Mechanical Engineering Journal* Vol. 2, No. 4, 2015.
- [23] S. Krajnović, and L. Davidson, “Flow Around a Simplified Car, Part 1: Large Eddy Simulation,” *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, No. 5, pp. 907–918, May 2005.
- [24] F. R. Menter, A. Hüppe, D. Flad, A. V. Garbaruk, A. A. Matyushenko, and A. S. Stabnikov, “Large Eddy Simulations for the Ahmed Car at 25° Slant Angle at Different Reynolds Numbers,” *Flow, Turbulence and Combustion*, September 2023.
- [25] E. Guilmineau, “Computational study of flow around a simplified car body,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 96, no. 6, pp. 1207–1217, Jun. 2008.
- [26] K. Liu, B. F. Zhang, Y. C. Zhang, and Y. Zhou, “Flow structure around a low-drag Ahmed body,” *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 913, p. A21, April 2021
- [27] A. Brunn, E. Wassen, D. Sperber, W. Nitsche, and F. Thiele, “Active Drag Control for a Generic Car Model,” *Active Flow Control*, R. King, Ed., Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, pp. 247–259.

[大学 ICT 推進協議会 2024 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 の 運用状況と利用者支援について

木村 優太¹⁾, 森谷 友映¹⁾, 山下 毅¹⁾, 小野 敏¹⁾,
大泉 健治¹⁾, 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

Yuta.kimura.e7@tohoku.ac.jp

Operation status and user support of the supercomputer AOBA subsystem AOBA-S

Yuta Kimura¹⁾, Tomoaki Moriya¹⁾, Takeshi Yamashita¹⁾, Satoshi Ono¹⁾,
Kenji Oizumi¹⁾, 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・共同研究拠点の構成拠点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、2023 年 8 月から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 の運用状況と利用者支援について紹介する。

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 月からサブシステム AOBA-S (SX-Aurora TSUBASA、日本電気株式会社製)の運用を行っている。

当初の導入計画では 2022 年にシステム増強を行う予定であったが、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分かり、約 1 年間導入計画を順延した。ただ、計算需要は処理能力を大きく超える状況が続いていたため、2022 年 10 月から 2023 年 7 月までクラウドサービスを用いた計算環境を提供し、計算機システムの混雑緩和を図った。2023 年 8 月からは当初の導入計画であった新しいサブシステムとして、AOBA-S の運用を開始した。

図 1 は本センターの計算機室に設置されたサブシステム AOBA-S の外観写真である。



図 1 AOBA-S の外観写真

2. AOBA-S の構成

サブシステム AOBA-S (以下、AOBA-S) は、ベクトルアーキテクチャを採用し、アプリケーション演算処理を行うベクトルエンジン（以下、VE）部と、主に OS 処理を行うベクトルホスト（以下、VH）部により構成される。PCIe カードに搭載される VE 部はベクトルプロセッサ、および高速メモリから構成され、x86/Linux である VH と PCIe 経由で接続される。

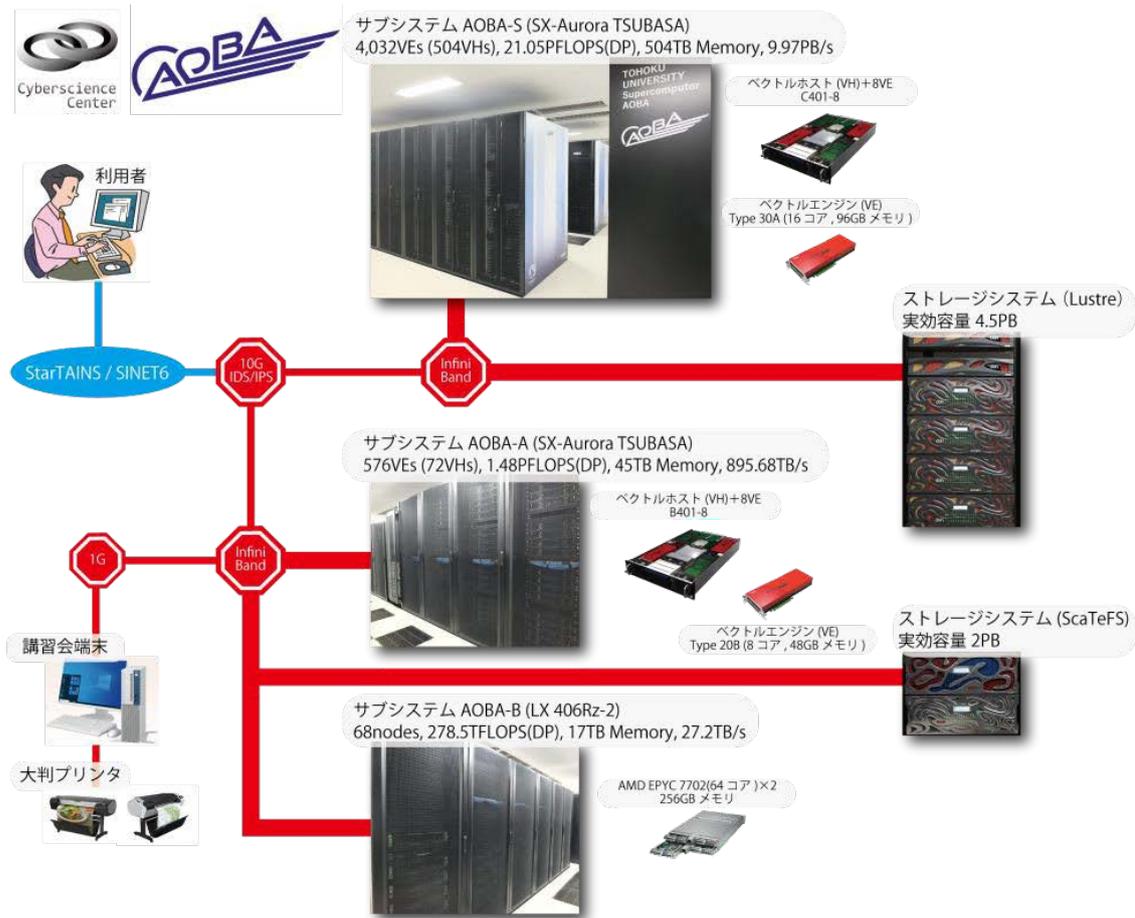


図2 スーパーコンピュータ AOBA のシステム構成図

図2は現在のスーパーコンピュータ AOBA のシステム構成図である。

VE (Type 30A)は、新規に開発された第三世代の VE で、SX-Aurora TSUBASA の心臓部である。理論演算性能 4.91TFLOPS となる 16 コアのベクトルプロセッサを 1 台、主記憶は 96GB の HBM2E メモリを搭載し、2.45TB/s という高メモリバンド幅でプロセッサと接続される。これにより高い演算性能とメモリ性能の両立を実現している。本センターの AOBA-S は、1 台の VH と 8 台の VE が構成単位 (1 ノード) となる C401-8 モデルを採用している。

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。

表 1 AOBA-S の性能

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

504 台の VH は InfiniBand NDR ネットワークで接続され広帯域・低遅延なデータ通信を可能としている。

ストレージシステムは、DDN 社製の Lustre ファイルシステムを採用し、高速アクセスかつ

高密度ストレージである DDN ES400NVX2 (DDN 社製)を導入している。こちらは、AOBA-S 利用者専用のホーム領域として提供し、RAID6 構成で実効容量は 4.5PB である。

3. AOBA-S の利用状況

3.1. 利用形態

本センターでは、AOBA-S のジョブの利用形態として以下の 2 つがある。

- 共有利用：利用する VE またはノード数を指定してジョブ投入した際、利用者間で VE やノードを共有しジョブ実行する。
- 占有利用：VE やノードを占有して確保し、ジョブを投入できる。その際、他の利用者のジョブ終了を待つ必要がない。

AOBA-S では、占有利用、共有利用どちらでも 1 つのジョブを最大 720 時間まで実行することができる。

3.2. 実行件数

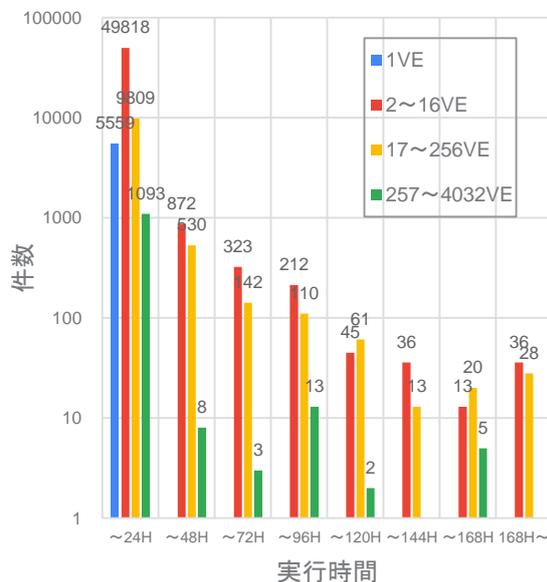


図 3 AOBA-S の実行件数

共有利用を対象に、2023 年 8 月から 2024 年 8 月までの期間における、実行時間ごとのジョブ件数を図 3 に示す。利用 VE 数が「1VE」の

ジョブは全て「24 時間以内」で実行終了されている。また、「24 時間以内」では、利用 VE 数が「1VE」のジョブより、「2~16VE」や「17~256VE」のジョブが多く実行されている。

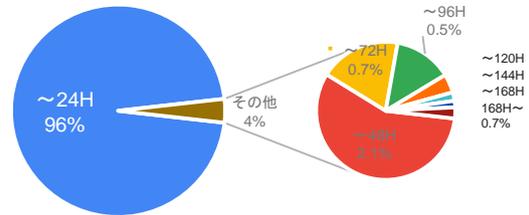


図 4 AOBA-S の実行件数の割合

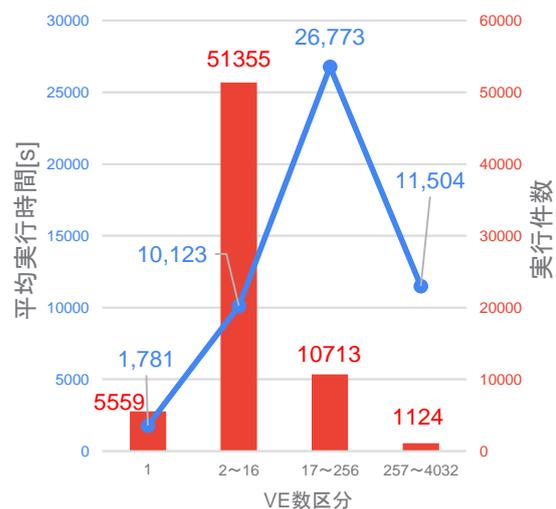


図 5 VE 数区分ごとの平均実行時間と実行件数

図 4 は、図 3 を実行時間で分類し、それぞれの実行時間区分の実行件数を比率で表したものである。この結果から、「24 時間以内」で実行終了したジョブは実行件数が非常に多く、全体において 96%を占めていることが分かる。

しかしながら、利用 VE 数が複数のジョブは「24 時間以上」の区分でも一定数実行されている。VE 数の区分ごとの平均実行時間と実行件数を図 5 に示す。この図から、区分「17~256」や「257~4032」は、「2~16」よりも実行件数が

少ないことが分かる。一方、平均実行時間では「2~16」の方が長いことが分かる。これらの結果から、シミュレーションの大規模化が完了し、ジョブを長時間実行している利用者がすでに一定数いることが分かる。

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けている。相談者は学内外問わず、本センター利用者と利用予定者である。主に、Web フォームまたは事前予約制による面談(オンライン会議も含む)にて利用相談を受け付けている。利用相談対応は主に、技術職員とテクニカルアシスタントが行うが、内容によっては、ベンダーへ協力依頼をする。

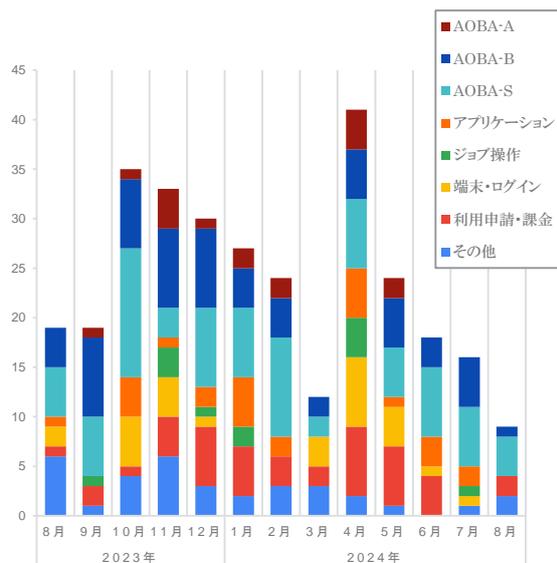


図6 利用相談件数の推移

図6に、2023年8月から2024年8月までの利用相談件数を示す。

2024年4月は集計期間の中で最も多く、41件の利用相談があった。主な利用相談は、ジョブの投入方法、端末・ログイン操作に関するものだった。新学期月による新規利用者が増加したためと考えられる。また、年間を通して、

AOBA-S 関連の利用相談も多くあり、今後も利用相談が多いトピックは、マニュアルやFAQ等へ情報提供していく予定である。

また高速化支援活動の一環として、AOBA-Sの通常運用時には実行できないような最大規模(SX-Aurora TSUBASA, 最大 4,032VE(504VH), 21.05PFLOPS, 504TB メモリ)まで利用できる機会として大規模並列ジョブチャレンジを実施している。直近では2024年3月と9月にそれぞれ実施し、今後も計画予定である。

5. まとめ

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 の構成、AOBA-S の2023年8月から2024年8月までのジョブの実行件数の報告と、利用者支援の取り組みについて紹介した。利用者個人や研究室の環境では実行が困難だった、シミュレーションやプログラムの実行環境としてご利用いただければ幸いである。今後も利用相談やスーパーコンピュータの管理業務を通じて、様々な研究のサポートを行っていきたい。

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] 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 (2022-01)、pp.29-32、2022.
- [3] 小野敏、山下毅、森谷友映、大泉健治、高橋慧智、滝沢寛之 「スーパーコンピュータ AOBA 新サブシステム AOBA-S の紹介」、SENAC Vol.57 No.1 (2024-01)、pp.26-30、2024.

[大学 ICT 推進協議会 2024 年度年次大会論文集より]

無線 LAN ローミングにおける個人データ活用と認証負荷削減のための オフライン属性共有手法

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

Offline Attribute Sharing Method for Personal Data Utilization and Authentication Load Reduction in Wireless LAN Roaming

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

著者らは、教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤 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、2020 年からは OpenRoaming も統合して、全国の商業施設や公共施設、鉄道駅などに展開してきた。近年では東京都や京都市、函館市、姫路市、大阪府などの自治体 Wi-Fi にも採用され、キャンパス外 eduroam サービスの大幅な拡大に寄与している。このようなローミング基盤では、アカウント（利用者 ID）を提供する組織とネットワーク接続サービスを提供する組織が基本的に分かれており、アカウント発行時にデータ利用の許諾や個人の属性を取得できても、ローミング先でこれらを活用することが難しい。従来のフリー Wi-Fi では属性値や行動情報の取得が広く行われてきたが、これが困難になるという理由で、ローミング基盤の導入が難しくなることがある。特に自治体 Wi-Fi の場合は、防災・減災や都市デザインのために行動情報を利用したいというニーズがある。本研究では、ローミング環境においても許諾情報や属性情報を安全に通信事業者間で相互利用できるような枠組みを検討し、基礎となる手法を開発した。この実用化ができれば、セキュア無線 LAN ローミング基盤の普及を通じて、安全な学習・研究環境の整備や、社会全体の ICT 推進に貢献が期待される。

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 (エデュローム) は、執筆時点 (2024 年 9 月) で世界 104 か国 (地域)、国内 439 機関に導入されるに至っている [1]。初等・中等教育機関についても、海外では既にいくつかの国で導入が進んでいる [2]。学生や生徒、教職員の学習・教育・研究環境を改善するために、キャンパスのみならず市街地でも eduroam のサービスを提供したいという要求があり [3, 4]、近年では “off-campus eduroam” のキーワードの下、国内外で展開が活発化している。国内では、eduroam JP の発足から間もない 2010 年から、通信事業者の厚意によって市街地 eduroam のサービスが提供された例がある [5]。しかしながら、長年に渡って各所に働きかけ

たものの、他事業者や全国への波及には至らなかった。

著者らは、教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤 eduroam を含む市民向けのセキュア無線 LAN ローミング基盤 Cityroam [6] を開発し、2020 年からは OpenRoaming [7] も統合して、全国の商業施設や公共施設、鉄道駅などに展開してきた。近年では東京都や京都市、函館市、姫路市、大阪府などの自治体 Wi-Fi にも採用され、キャンパス外 eduroam サービスの大幅な拡大に寄与している。このようなローミング基盤では、アカウントを提供する組織 (IdP, Identity Provider と呼ぶ) とネットワーク接続サービスを提供する組織 (eduroam では SP, Service Provider と呼ぶ。OpenRoaming などでは、ANP, Access Network Provider と呼ぶ) が基本的に分かれている。利用者が無線 LAN に接続する時、利用者認証の要求が、図 1

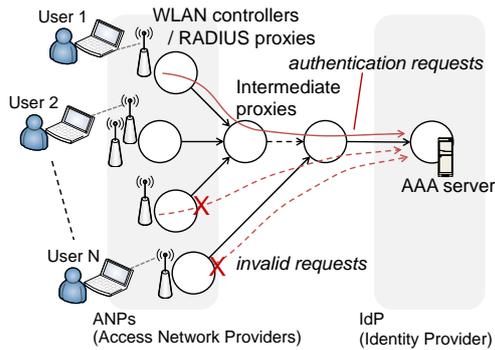


図1 ローミングシステムにおける認証要求の流れ

のようにいくつかのプロキシを介して ANP から IdP に届けられる。アカウント発行時に利用者からデータ利用の許諾や個人の属性情報を取得しても、IdP と ANP の間にデータを安全に交換する仕組みがなければ、ローミング先でこれらを活用することが難しい。従来のフリー Wi-Fi では利用者属性の利用や行動情報の取得が広く行われてきたが、これが困難になることが、ローミング基盤の普及の障壁になっている。特に自治体 Wi-Fi の場合は、防災・減災や都市デザインのために行動情報を利用したいというニーズがあり、データ利用の仕組みの実現が急務である。

以上に加えて、現行のローミングシステムには、多数の不正な認証要求によって、認証サーバや中間プロキシの負荷が高くなるという問題がある。不正な認証要求の中には、卒業生の端末が発する、期限切れアカウントの認証要求が多く含まれる。この問題は、アカウントの有効期限を属性値とみなせば、前述の問題と同じ機構で対処できると考えられる。

本報告では、初めに、認証負荷の削減を取り上げる。続いて、改ざん対策を含む、汎用性の高い属性共有手法を提案する。本研究では、航空機や船舶、被災地のネットワークなど、上流ネットワークが不安定な環境における無線 LAN ローミングの利用も重要視しながら、オフラインでも利用できるような属性共有手法を開発した。この実用化を進めることで、ローミング基盤の導入障壁を下げられる可能性がある。自治体 Wi-Fi などの eduroam 対応の促進も期待される。

2 認証負荷の削減のための有効期限共有

2.1 問題と関連技術

eduroam や OpenRoaming, Cityroam は、いずれも RFC 7953 の eduroam アーキテクチャ [8] に基づいている。これらのローミングシステムでは、無線基地局 (Access Point, AP) が認証連携ネットワー

クを介して IdP 機関の認証サーバ (Authentication, Authorization and Accounting (AAA) サーバ) に接続されている (図 1)。一般に、AP と認証サーバは常時通信可能な状態が想定されている。AP と認証サーバの間には、ANP やハブ事業者の RADIUS (Remote Authentication Dial-In User Service) プロキシが存在し、これらが認証連携ネットワークを構成している。国内の eduroam の場合、eduroam JP のプロキシを運用している国立情報学研究所がハブ事業者に、ANP (SP) と IdP が加入機関に該当する。

eduroam では、大学から大勢の卒業生が出ていくたびに、期限切れのアカウントが多数生じる。卒業生は eduroam の設定を外すように求められているが、それでもなお多くの端末に設定が残っており、期限切れアカウントによる不正な (認証に失敗する) 認証要求が多数、プロキシと認証サーバで観測されている。現状ではまだサーバ類の負荷に余裕があり、差し迫った危機はないものの、失敗した認証要求によってログファイルが肥大化して、不正利用や接続トラブルなどの分析の負担になっている。OpenRoaming は、2020 年に立ち上がった比較的新しいシステムであるが、eduroam と比べて格段に多い市民が対象のため、同様の問題が早晩出てくると予想される。

利用者認証が成功した場合、プロキシや認証サーバには 1, 2 行のログが残る。これに対して、認証が失敗した場合は、端末の再認証機能によって短時間に何度も認証要求が送られてくる。一般に、端末には back-off timer の機能が備わっており、10 回程度の試行でも認証が失敗するようならば、一定時間 (例えば数分間) 再認証を控えるようになっている。しかしながら、しつこく再認証を繰り返す端末も世の中に存在しており、特に、多くの機関から認証要求が集まるハブ事業者のプロキシの負荷上昇が問題になりうる。認証失敗は、必ずしも設定ミスや期限切れアカウントの問題ばかりではなく、攻撃の可能性もある。このため、実際に eduroam JP 事務局から幾つかの大学に調査依頼が出されたことがある。

期限切れアカウントの問題に対処するために、幾つかの機構が用意されている。その一つは、無線 LAN の設定に使うプロファイルに有効期限の情報を持たせておき、期限に到達した時点でプロファイルを無効化する方法である。例えば、Apple の各種 (macOS, iOS, iPadOS) で用いられる .mobileconfig 形式のプロファイルには RemovalDate という項目があり、ここに有効期限を埋め込むことができる。有効期限に

達すると、プロファイルの削除を促すポップアップが利用者に提示される。しかしながら、他の多くのオペレーティングシステム（OS）では有効期限が設定できず、また、利用者が手動で無線 LAN の接続設定を行った場合には問題に対処できない。認証要求に対する応答で認証サーバが期限切れを端末や ANP に通知する仕組みも提案されているが、端末に実装されて広く普及するまで年数がかかると考えられる。

2.2 有効期限情報を用いた認証要求の抑制

認証サーバや認証連携ネットワークの負荷を下げる方策の一つとして、図 1 中に×印で示したように、ANP におけるプロキシで期限切れアカウントの認証要求の転送を止めることを考える。利用者認証のたびに IdP に問い合わせるのでは認証負荷の削減にならないので、あらかじめ認証情報の中に属性値として有効期限を埋め込んでおく必要がある。

無線 LAN ローミングでは、ID・パスワード方式の認証方式が広く使われている。具体的には、EAP-TTLS (Extensible Authentication Protocol - Tunnelled Transport Layer Security) [9] や Microsoft PEAP (Protected Extensible Authentication Protocol) などである。これらの方式では、ユーザ ID とレルム (realm) を連結した “alice@example.com” のような形式の User-Name が用いられる。この例では、“alice” がユーザ ID、“example.com” がレルムである。EAP-TTLS や PEAP には、EAP トンネルの外で使われる outer-identity と、保護されたトンネル内で使われる inner-identity の区別があり、プライバシー保護のため、outer-identity の方は匿名化された “anonymous@example.com” のような User-Name を用いることが強く推奨されている。従って、属性情報を埋め込むのは、レルム部分に限定される。

ANP が構文解析しやすい形で、有効期限をレルムに埋め込むことを考える。例えば、

“alice@vu250331.example.com”

のような User-Name を使うことが考えられる。この例では、2025 年 3 月 31 が有効期限である。ANP や中間プロキシは、この有効期限を越えた認証要求を転送せず、Access-Reject で終端してよい。サブレルムが追加されているが、eduroam や OpenRoaming ではワイルドカードを用いたレルムベースのルーティングが採用されているため、現行の認証連携ネットワークの変更は不要である。ただし、どのような形式で有効期限を埋め込むのかを、すべての ANP と IdP、ハブ事業者の間で標準化しておく必要がある。

ローミングシステムでは、クライアント証明書を用いる認証方式の EAP-TLS [10] も広く用いられている。クライアント証明書には若干の属性値を埋め込むことができるが、必ずしも ANP がこれを読み取ることができないという制約がある。最近では、プライバシー保護のためにクライアント証明書の内容を保護したいという要求が高まっており、対策が進められている。従って、EAP-TLS を使用する場合でも、レルムに属性値を埋め込むのが現実的である。

2.3 認証負荷削減の評価

提案手法による認証負荷の削減効果を、既存のデータを用いて評価した。この評価には、第一著者が開発して、2008 年から全国の大学等にサービス提供してきた「eduroam 代理認証システム」を用いた。当システムは IdP as a Service の形をとり、2024 年度末時点で 134 機関（会議利用分を除く）に利用されていた。多数の機関に利用されていることから、大学ごとの IdP に比べて利用者数が格段に多く、提案手法の効果を見るのに適していると考えられる。また、実際に期限切れアカウントによる負荷上昇が可視化されたシステムでもある。2024 年 3 月末にサービス終了したため、今回は唯一の機会であった。

大学の学期の関係で、毎年 4 月頃と 10 月頃に、大量の期限切れアカウントが発生する。古いデータは利用できないことから、本研究では 2023 年度の統計データのみを用いた。同システムが受け取った認証要求の総数のうち、期限切れが理由で Access-Reject となったものは 9.6% であった。この値は、すべての ANP (SP) 機関が提案手法を導入したときに達成される、削減割合の最大値に相当する。

上記の割合は、ログファイルの見た目から受ける印象よりも小さい。サーバのソフトウェアに FreeRADIUS を用いた場合、認証成功した端末に対しては、inner-identity と outer-identity に相当する 2 行がログに残る。一方、認証失敗の場合は端末が再認証を試みるため、複数回の認証試行が記録される。ログファイル中で “Login incorrect” のメッセージが含まれる行（パスワードの入力ミスも含む）は、全体の 20.4% であった。認証失敗は、“Login incorrect” の下にさらに追加の情報が出力されるため、ログファイルの肥大化の影響が大きい。

なお、代理認証システムは eduroam JP のプロキシから認証要求を受け取っている。一般に、RADIUS プロキシは頻繁に認証に失敗する端末からの要求を一時的に抑制する機能を持っている。このため、eduroam

JPのプロキシや、ANP (SP) 機関のプロキシが、再認証の認証要求の多くを叩き落していた可能性がある。一方で、前段にあるプロキシは、IdP が Access-Reject を返した際に、それが期限切れによるものか他の原因によるものかを、区別できない。このため、同様の分析を AP に近いところで実施することは困難である。

今回は、認証サーバで観測されるログのみを分析に用いたが、前段のプロキシのログを見る権限があれば、より高い精度で削減効果の予測ができる可能性がある。そのような分析は今後の課題であるが、複数機関の協力が必要である。

2.4 有効期限の改ざんの問題

提案手法では、有効期限を平文でレムに埋め込んでいる。有効期限を延ばすなどの目的で、利用者がレムを改ざんする可能性がある。

有効期限が改ざんされて、認証要求が認証サーバまで到達しても、真の有効期限の情報を持っている認証サーバが正しく認証を失敗させることができる。

3 改ざんを防止できる属性共有手法

3.1 属性共有の用途と課題

本章では、様々な属性を扱えるような、汎用的な属性共有の枠組みを示す。ただし、共有する属性値の具体的な定義は取り扱わない。属性共有の実現のためには、ローミング基盤全体での標準化が必要であり、属性値の定義だけでも広い議論が必要になる。

従来型のフリー Wi-Fi では、IdP と ANP の区別がなく、一つの事業者がアカウント発行と基地局の提供を行っている例が多い。例えば、以下のような情報が収集されている。

- 年齢層
- 性別
- 国籍
- 言語 (ブラウザの設定値などから取得)
- 利用環境 (アプリ等の開発に反映)
- 無線 LAN の利用場所、滞在時間
- 移動経路 (ショッピングモール内で立ち寄った店舗や、観光スポットの分析、防災・減災のためのデータ収集など)

取り扱いに注意が必要な個人情報も含まれているが、それらのデータ取得・利用については、アカウント発行時に利用者に許諾を得ておく必要がある。幾つかの情報は利用者から事前に取得しておく属性値であり、利用許諾もフラグとして属性値の一種とみなせる。

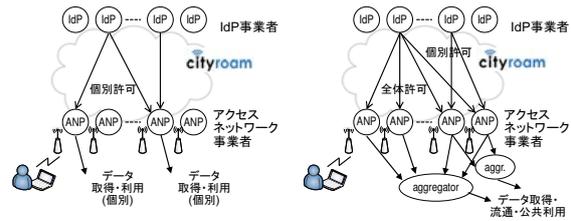


図2 データ取得・利用の個別許可 (左) と全体許可 (右)

ローミング環境においても、図2の左のように、IdP と ANP の間で個別の契約に基づいてデータ取得・利用を許可し、また、属性値を共有することは可能である。しかしながら、1対1の契約では利用範囲が限られてくる。例えば、ある IdP が利用者から取得した利用許諾に基づいて、属性値をどの ANP でも利用できるようにしたいことがある (図2右)。年齢に応じたコンテンツ制限などが該当する。自治体 Wi-Fi では、複数の事業者が取得した行動情報を集約したいというニーズがある。これは、防災・減災を含む都市デザインの観点でも重要である。

eduroam の場合は、詳細な属性値や行動情報の利用は好まれないかもしれない。eduroam における重要な属性利用の例として、コンテンツ制限が挙げられる。自治体 Wi-Fi では、法令等 [11] に基づいて、青少年保護のためのフィルタリングの実装が求められることがある。eduroam は、国内外とも初等・中等教育機関への導入も進められており、セキュア無線 LAN ローミングが生徒にとって有用な学習環境になることが予想される。フィルタリング機能をネットワーク側ではなく端末上の実装することが望ましいと考えられるが、自治体 Wi-Fi ではそれとは別にフィルタ実装の要望がある。一方、公衆無線 LAN において一律にフィルタリングを実施することは、「通信の秘密」との関係があり難しい。利用者の属性や事前の同意によってフィルタリングを制御できるようになれば、このように相反する問題の一部を解消できる可能性がある。

利用者属性の中には、利用者や他者が変更できてはいけないものがある。属性値を保護するために、改ざん防止の仕組みも必要である。

3.2 オフライン処理の有用性

2章で述べた、期限切れアカウントの対策では、オフラインで属性共有する必要があった。利用者認証が成功する場合は、通常は認証サーバまで認証情報が届けられているので、IdP から ANP に対して属性値を送ることができる。これには、RADIUS の VSA (Vendor-Specific Attribute) を使うことが考えられ

る。一方、無線 LAN ローミングの新しい応用先として、上流ネットワークが一時的に不通になるような航空機や船舶などがあり、オフラインでも利用できるような認証手法が考えられている [12]。被災地においても上流ネットワークが寸断されることがあり、このような状況でも地域内のネットワークサービスを安全に利用できるようにするためには、オフライン認証が有効である。

3.3 ローカル認証方式を用いた属性共有

本研究では、ローカル認証方式 [12] を基にして、改ざん防止機能を持つ属性共有手法を実現した。

2 章に示した手法と同様に、属性値を RADIUS User-Name のレム部分に埋め込む。埋め込む属性値の具体的な種類や形式については、今後の研究や標準化の議論に譲る。本稿では、User-Name の最大長が許す範囲内で、任意のデータの埋め込みを想定する。図 3 に、属性情報共有の機能を盛り込んだローカル認証の仕組みを示す。従来手法 [12] では、パスワードと署名の生成にユーザ ID のみを使用していたが、新しい手法ではレム部分も含めた User-Name 全体を用いる。本手法のローカル認証の処理の内容は、以下のとおりである。

アカウント発行時に、IdP は有効期限などを埋め込んだユーザ ID を生成する。これにレムを連結したものを User-Name とする。User-Name に HMAC (Hash Based Message Authentication Code) アルゴリズム [14] と Base64 符号化を適用して、パスワードを生成する。ANP 側にあるプロキシにも同様の処理を実装しておくことで、端末から送出された User-Name を元にして同じパスワードが生成できるので、これを端末が提示したパスワードと比較することで、ANP 側だけでローカルに認証処理が完了する。ハッシュ値を用いてパスワードを生成する方法は、古村らによる先行研究 [13] を参考にした。

[12] の手法では、これに加えて、ECDSA (Elliptic Curve Digital Signature Algorithm) で求めた署名を User-Name に埋め込んでいる。ローカル認証には、機内 Wi-Fi のように、多数のプロキシが HMAC 用の共通鍵を持つような応用がある。HMAC のみを用いる手法では、ANP もアカウントを発行できるが、ローミング基盤の用途によってはこの性質が問題になることがある。正規の IdP から発行されたアカウントのみを有効にできることが望ましい。署名を User-Name に埋め込むことによって、このような制限が実現できる。

属性値はバイナリデータの可能性もあるため、User-

Name で使用可能な文字セットに符号化する。RADIUS プロトコルでは、ユーザ ID 部分は大文字小文字を区別する、すなわち case sensitive として扱うことができる。レム部分は、DNS (Domain Name System) でも用いられることがあり、大文字小文字を区別しない (case insensitive) 符号化が必要である。例えば Base32 符号化が利用できる。属性値のレム部分への埋め込みは、属性部分だと判断しやすいようなマジック文字列と属性値 (符号化後の文字列) を連結する方法が考えられる。

属性値を埋め込んだ後の User-Name は、例えば、
“CYEPBcv7T|MCUCEQC3SwoCbmNfPno3KRvZP7qLahBg+cHJunGEo6CwKPzHeNz7@xattrjeztqpf52n2xxm7vphkeocp5aqbil43.example.com”
のように表される。これだけ長い文字列を手入力するのは困難であるが、近年はウェブサイトから無線 LAN の設定情報を電子的手段で端末に流し込む web-based provisioning が普及してきており、本手法でもこれを用いることを想定している。

3.4 実装と制限事項

提案手法は、FreeRADIUS の Perl モジュールを用いて実装できることを確認している。User-Name の仕様上の最大長は 253 オクテットであり、埋め込むことのできる属性値のビット数は、この値の制約を受ける。従って、詳細な属性をオフラインで共有することは難しい。どのような属性値を優先して埋め込むかは、応用に依存する。プライバシー保護のために属性値の暗号化が必要である。埋め込み可能なビット長の具体的な値について、暗号の強度と併せて議論する必要があり、分析を進めている。

実際にレムに埋め込まれる符号化後の文字列が、利用者ごとにユニークなものになると、ANP による行動分析を制限する目的で業界がランダム化を強化している MAC アドレスの代わりに、行動分析に利用される恐れがある。共通の属性値を持つ利用者が複数存在するように、埋め込む属性値を取捨選択する必要があると考えられる。

3.5 改ざんに関する評価

利用者が属性値を改ざんした場合、HMAC によって求められるパスワードの値が変わることになる。利用者は HMAC の鍵を知らないため、パスワードの偽造は困難であり、利用者認証が失敗する。

悪意のある ANP は、属性値を改ざんすることによって、「許諾情報が含まれていたため利用者の詳細な行動分析を実施した」というような、虚偽の主張 (false

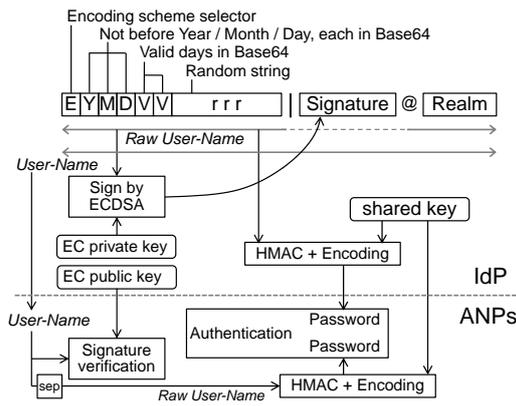


図3 属性情報共有を考慮したローカル認証方式

claims) を試みようとするかもしれない。ANP が偽造したアカウントを根拠として提示しようとしても、IdP による署名を偽造することは ECDSA の強度の範囲で困難である。IdP が提供している署名検証用の公開鍵を用いることで、第三者でも、不正な署名を見ることができ

4 むすび

アカウント発行とネットワーク提供の事業者が分かれている無線 LAN ローミング基盤においても、利用者による明確な許諾が必要な行動解析や属性利用を含め、多くの通信事業者にまたがるデータ利用が可能となるように、安全な属性共有手法を開発した。本研究では特に、今後ローミングの応用が広がると予想される、航空機や船舶、被災地のようにネットワークが途切れる環境も重視した。また、オフラインでアカウントの有効期限を ANP に伝えることで、期限切れアカウントが認証連携システムに及ぼす負荷を軽減できる可能性を示した。

実際のローミング基盤への組み込みや、汎用性の高い属性値の取捨選択、業界における標準化などが、今後の課題である。

本研究の一部は、令和 6 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/> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [2] 後藤英昭, 原田寛之, 漆谷重雄, “キャンパス外 eduroam と大学における OpenRoaming 導入,” 大学 ICT 推進協議会 2021 年度年次大会 論文集 FC1-3, 2021.
 [3] eduroam Everywhere:

<https://www.heanet.ie/services/connectivity/eduroam-everywhere> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [4] Metro eduroam: <https://renu.ac.uk/metro-eduroam/> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [5] INTERNET Watch, “ライブドアと NIL、学術無線 LAN ローミング基盤の共同実験を開始,” <https://internet.watch.impress.co.jp/docs/news/353536.html> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [6] Cityroam: <https://cityroam.jp/> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [7] WBA OpenRoaming: <https://wballiance.com/openroaming/> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [8] K. Wierenga, S. Winter, and T. Wolniewicz, “The eduroam Architecture for Network Roaming,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7593> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [9] P. Funk and S. Blake-Wilson, “Extensible Authentication Protocol Tunneled Transport Layer Security Authenticated Protocol Version 0 (EAP-TTLSv0),” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5281> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [10] D. Simon, B. Aboba, and R. Hurst, “The EAP-TLS Authentication Protocol,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5216> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [11] “青少年が安全に安心してインターネットを利用できる環境の整備等に関する法律,” <https://laws.e-gov.go.jp/law/420AC100000079> (2024 年 9 月 27 日参照)
 [12] H. Goto, “Disruption-tolerant Local Authentication Method for Network Roaming Systems,” *Journal of Information Processing (JIP)*, Vol.32, pp.407–416, 2024.
 [13] 古村隆明, 岡部寿男, 中村素典, “SAML 連携を用いてロケーションプライバシを守る eduroam アカウント利用方式,” *信学技報 SITE2009-57*, pp.153–158, 2010.
 [14] H. Krawczyk, M. Bellare, and R. Canetti, “HMAC: Keyed-Hashing for Message Authentication,” <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc2104> (2024 年 9 月 27 日参照)

[大学 ICT 推進協議会 2024 年度年次大会論文集より]

6GHz 帯を利用した次世代キャンパス無線 LAN 環境の検証と課題

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 of Next Generation Campus Wireless LAN Environment Using 6GHz Band and Issues

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

無線 LAN において、日本国内でも 2022 年より新たに 6GHz 帯の電波を使用する Wi-Fi 6E が、2023 年 12 月に Wi-Fi 7 が利用可能となった。大学の教室のように多人数が同時に無線 LAN を使用する環境下においては、従来の 2.4/5GHz 帯の混雑を避けるため可能な限り 6GHz 帯での利用に誘導したいニーズがある。但し 6GHz 帯での接続には WPA3 が必須となったこともあり、最新の利用者端末と従来の利用者端末が幅広く混在する教育現場においては、その構築に様々な懸念点が存在する。札幌学院大学ではキャンパス無線 LAN 環境の一部更改を控え、欧州など海外での検証報告を参考に Wi-Fi 6E および Wi-Fi 7 で利用可能な eduroam と OpenRoaming 環境の試験的な構築と検証を行ったので報告する。

1 はじめに

無線 LAN における周波数帯としては長らく 2.4GHz 帯と 5GHz 帯が利用されてきた。日本国内でも 2022 年より新たに 6GHz 帯の無線 LAN の利用が認可され、Wi-Fi 6E の製品が登場したことに加え、2023 年 12 月には Wi-Fi 7 が利用できるようになった。2.4GHz 帯は遮蔽物に強くエリアが広く確保できるメリットと、周波数帯域の狭さ（全体で 82MHz 幅・選択可能チャンネル数 3）のため干渉しやすいデメリットがある。一方の 5GHz 帯は周波数帯域の広さ（全体で 400MHz 幅・選択可能なチャンネル数は最大 20）から干渉が少なく安定しているが、現在の接続クライアントはほぼ 5GHz 帯に対応しているため、帯域を利用する通信がひっ迫しつつある。また、利用チャンネルによってはレーダーへの干渉を避けるためレーダー波を検知した場合に自動で 60 秒間電波の発信を停止する機能が搭

載されており（DFS）、多くのチャンネルを組み合わせる大学キャンパスでは置局設計やチャンネル設計に制約が生じる場合がある。

6GHz 帯の無線 LAN での周波数帯域は新たに 480MHz 幅が現在日本国内では割り当てられており、確保できるチャンネル数が増加したことに加え、レーダー干渉がなく DFS による停波の影響がないためより安定した多クライアントの通信が可能である。一方で、6GHz 帯を利用する Wi-Fi 6E の運用においては暗号化方式として WPA3 の利用が必須となっている。

教育・研究機関向けの無線 LAN ローミング基盤である eduroam[1] においては従来よく使われてきた WPA2 Enterprise に対し、WPA3 Enterprise の対応が基地局・接続端末共に必要となる。しかしながら、大学キャンパスにおける接続端末には様々なものがあり、WPA3 Enterprise に対応していないものも存在する。また eduroam はローミング基盤であるため、自

機関の利用者が他機関の eduroam 基地局に接続可能であることと、他機関の eduroam 利用者が自機関の eduroam 基地局に接続可能なことが共に重要である。

そこで本報告では Wi-Fi 6E や Wi-Fi 7 の基地局に実装されている機能を用いて 6GHz 帯を含めて構築した eduroam および市民一般向けに札幌学院大学キャンパス全域で運用している OpenRoaming[2]において、Wi-Fi 6E や Wi-Fi 7 の 6GHz 帯/WPA3 Enterprise による接続をサポートしている最新端末での利用と、同じ基地局での 2.4/5GHz 帯において WPA3 Enterprise をサポートしない古い端末の共存の可能性について、その検証と課題の洗い出しを試みた。

2 WPA3 のモード

6GHz 帯における無線 LAN 構築時に必須となっている WPA3 において、eduroam で必要な 802.1X 認証を使用する WPA3 Enterprise における従来の WPA2 Enterprise との違いは保護された管理フレーム (IEEE 802.11w Protected Management Frames, PMF) のサポート要件が挙げられる。

WPA2 Enterprise において PMF のサポートは任意であるが、WPA3 Enterprise においては必須である。WPA3 Enterprise は PMF を使用する WPA2 Enterprise とも言える。

WPA3 Enterprise においては、以下のモードが存在する[3]。

- WPA3 Only mode
WPA3 非対応のクライアントを接続させず、WPA3 対応クライアントのみを接続させる。
- WPA3 Transition mode
同一 SSID において、WPA3 に対応する端末は WPA3 で、WPA2 までしか対応していない端末は WPA2 で接続を受け入れる。
- WPA3 192-bit mode
CNSA で定められた暗号スイートに対応したクライアントでしか接続できないモードであり、高度な保護が必要なサービスに用いられる。欧州 GÉANT からの 2018 年のアド

バイザリ[4]では、eduroam においては接続の互換性の観点から強く非推奨となっており、2022 年の eduroam での Wi-Fi 6E 展開に関する考慮事項のアナウンス[5]でも変更されていない。

2.1 Wi-Fi 6E / Wi-Fi 7 でのサービス提供における選択肢

上記の 3 つのオプションを比較検討すると、Wi-Fi 6E または Wi-Fi 7 で無線 LAN サービスの構築を行う際に取りうるる選択肢として以下の 4 つが考えられる。

- A) 2.4/5/6GHz 帯の SSID は同一とし、WPA3 Only mode を使用する。WPA2 においては KRACKs[6]と呼ばれる脆弱性が報告されており、理想的にはこの形が望ましいが、WPA3 をサポートしない古い端末が利用できないことを許容する必要がある。
- B) 2.4/5GHz 帯の SSID は WPA2 とし、6GHz 帯は別の SSID で WPA3 にてサービス提供する。利用者へは 6GHz 帯が利用できる端末 (=WPA3 をサポートする端末) では 6GHz 帯の別の SSID に接続するように周知する。利用者の利便性は低下する。
- C) 2.4/5GHz 帯においては WPA2 Enterprise を、6GHz 帯においては WPA3 Enterprise を設定し、両者の SSID は同一に設定する。基地局内部の Wireless LAN (WLAN) 設定についてはそれぞれ独立させる。但しこの構成は多くの無線 LAN 基地局においては設定することができない。また、Mark Houtz の調査と実証実験 [7]によれば、この構成においては 6GHz 帯を利用する端末が 2.4GHz 帯/5GHz 帯に接続変更する際はローミングではなく内部的には別の WLAN への移動となるため、音声通話など一時的な切断も許容できない用途では問題となる。
- D) 2.4GHz 帯/5GHz 帯/6GHz 帯の SSID を同一とし、WPA3 Enterprise Transition Mode を

使用する。6GHz 帯をサポートするすべての端末は WPA3 Enterprise もサポートするため、WPA3 Enterprise での接続に問題は生じない。また 6GHz 帯域をサポートしていないが WPA3 Enterprise Transition Mode をサポートする端末は、2.4 / 5GHz 帯において接続が可能である。WPA3 Enterprise をサポートしていないデバイスは 2.4 / 5GHz 帯にて WPA2 Enterprise での接続が可能である。ただしこの WPA3 Enterprise Transition Mode をサポートする基地局は限られ、Juniper Mist および Aruba (ArubaOS 8.11 以降) で構成が可能であることが示されている [8]。加えて Extreme Networks 製品においては本調査では ExtremeCloud IQ Controller による Centralized-mode を使用する場合は設定が可能であった (後述)。

3 WPA3 をサポートしない端末の調査

3.1 規格の公開時期

WPA3 は、2017 年に公開された KRACKs 脆弱性を受けて Wi-Fi Alliance が 2018 年に新たに公開した規格であり、同アライアンスから「Wi-Fi CERTIFIED 6」の認証を取得する上では対応が必須となっている。このため、2018 年より前に発売され最新規格へのアップデートに対応していない端末については利用できないことが想定される。

3.2 Apple デバイス

Apple のサポートサイト [9] によれば、WPA3 をサポートしているのは以下の世代の製品に限られる。

- iPhone 7 以降
- iPad 第 5 世代以降
- Apple TV 4K 以降
- Apple Watch Series 3 以降
- Mac コンピュータ (Late 2013 以降, 802.11ac 以降に対応)

また、PMF をサポートしているのは以下の世代の製品に限られる。

- iPhone 6 以降
- iPad Air 2 以降
- Apple TV HD 以降
- Apple Watch Series 3 以降
- Mac コンピュータ (Late 2013 以降, 802.11ac 以降に対応)

うち、特に iPhone 等のスマートフォンデバイスやタブレットについては古い機種が長く使われているケースがあり注意が必要である。

3.3 Android デバイス

Android においては 2019 年にリリースされた Android 10 にて WPA3 のサポートが追加された [10]。但し実際のサポート状況は更にデバイスメーカーの OS 実装状況による。

3.4 Windows OS

Microsoft は Windows 10 にて WPA3 をサポートした。但し実際のサポート状況は更にワイヤレス LAN のドライバに依存する [11]。

Windows 8.1 については 2023 年 1 月 10 日にサポートが終了しており、本学でも利用者には端末の更新を行うようアナウンスしている。

4 試験環境の構築

eduroam にて 6GHz 帯を併用する試験環境として、札幌学院大学江別キャンパスの G 館 6 階～8 階に Extreme Networks の Wi-Fi 6E 基地局 AP5010 を 9 基設置した。内訳は各フロアに 3 台ずつとしている。このエリアはキャンパスの他の基地局とは比較的隔離された上層階にあり、試験に適している。試験環境は学生教職員の食堂および多目的利用のエリアとして開放されており、接続検証以外にも常時利用が可能となっている。

設置した AP5010 基地局は、Extreme Cloud IQ Controller (Version 10.10.02) に收容し、単一の WLAN プロファイルで 2.4/5/6GHz 帯全てにおいて SSID : eduroam にて WPA3 Enterprise

Transition Mode で動作するよう設定した。また加えて、同様の設定の他メーカー機種として学内の別のエリアにて Aruba の Wi-Fi 6E 基地局 AP655 を Aruba Controller (ArubaOS 8.12) に收容し同様に 2.4/5/6GHz 帯全てで SSID : eduroam を WPA3 Enterprise Transition Mode で動作するよう設定した。これらはいずれも 2.4 項で述べた設定手法の D に該当する。

キャンパス内の従来のエリアにおいては Aruba Controller (ArubaOS 8.10 および 8.12) に收容した Aruba アクセスポイント、Extreme VX9000 コントローラに收容した Extreme アクセスポイントがそれぞれ配置されており、eduroam は WPA2 Enterprise で PMF を使用可能 (optional) な設定で運用している。加えて、比較検証用に WPA2 Enterprise で PMF を無効 (disabled) にした基地局を Aruba Controller (ArubaOS 8.12) で、WPA3 only で 2.4/5/6GHz 帯を動作させる環境を Cisco Meraki (CW9166I / MR 30.7) で準備した。

5 試験環境における検証

5.1 6GHz 帯をサポートするデバイスによる接続

6GHz 帯を Wi-Fi 6E で利用可能な iPhone 15 Pro Max (iOS 18.0)、および Fujitsu LIFEBOOK U7313/N (Windows 11 Pro 23H2, Intel AX211 23.20.04) において、試験環境内で接続検証を行った。

iOS による接続検証においては、検証端末が 6GHz 帯での eduroam 接続を問題なく行えること、2.4/5GHz 帯も合わせて利用可能な場合でも自動的に 6GHz 帯が選択されることを確認した。また試験環境外の他の基地局にて 2.4/5GHz 帯のみサービス提供されているエリアでも特段の設定変更なく eduroam へ接続可能なことが確認できた。さらに、eduroam への初回の接続が WPA3 Enterprise の 6GHz 帯の環境下であった場合も、WPA2 Enterprise の 2.4/5GHz 帯の場合も、相互に接続可能であることを確認した (図 1)。

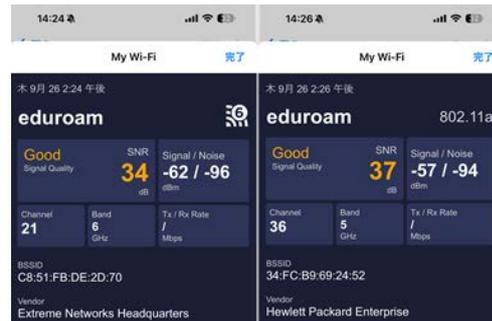


図 1 iPhone 15 Pro Max による 6GHz 帯 eduroam と 5GHz 帯 eduroam への接続

Windows 11 における動作検証においては、6GHz 帯、2.4/5GHz 帯それぞれで接続は行えるものの、WPA3 Enterprise Transition Mode など WPA3 Enterprise が有効なエリアで eduroam への初回接続を実施した場合と、WPA2 Enterprise までしかサポートされていない基地局の配下で初回接続を実施した場合は以下のように挙動が異なることを確認した。

- WPA3 Enterprise をサポートする基地局または WPA2 Enterprise で PMF が使用可能な基地局に対する初回接続を行った場合は authentication が WPA3ENT として保存される (図 2 上)。この WPA3ENT は、WPA3 を必須とするモードである。
- WPA2 Enterprise のみをサポートしかつ PMF が無効な基地局のエリアで初回接続を設定した場合は WPA2 となる (図 2 下)。この WPA2 モードは、WPA2/WPA3 両方を含むという意味である。

このため、当該プロファイルの設定内容が WPA3ENT の場合、周波数帯を問わず基地局が WPA3 Enterprise をサポートしている場合は問題なく接続することができるが、基地局が WPA2 Enterprise かつ PMF が無効と設定されている場合は接続に失敗する (図 3)。

```

▼<security>
  ▼<authEncryption>
    <authentication>WPA3ENT</authentication>
    <encryption>AES</encryption>
    <useOneX>true</useOneX>
  </authEncryption>

▼<security>
  ▼<authEncryption>
    <authentication>WPA2</authentication>
    <encryption>AES</encryption>
    <useOneX>true</useOneX>
  </authEncryption>

```

図 2 Windows で保存された wlan プロファイルの一部（上：WPA3（専用）モード，下：WPA2 モード）

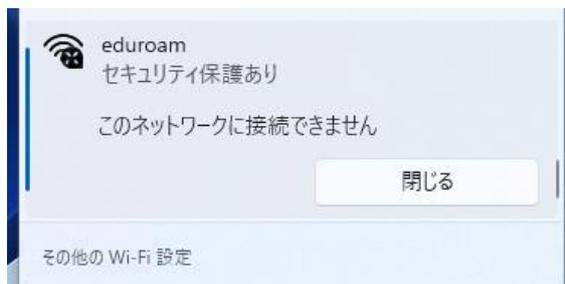


図 3 WPA3ENT で設定されたプロファイルを持つ Windows 11 の WPA2 Enterprise/PMF 無効基地局への接続失敗

		基地局側の設定		
		WPA3 Enterprise	WPA2 Enterprise (PMF有効)	WPA2 Enterprise (PMF無効)
Windowsの wlan プロファイル	WPA3ENT	○	○	× (接続不可)
	WPA2	○	○	○

図 4 Windows の wlan プロファイルの違いによる接続可否

プロファイルが WPA3ENT で設定された場合であっても、WPA2 Enterprise 基地局において PMF が使用可能（または必須）に設定されている場合は接続が可能であるが、世界の eduroam 基地局の全てで PMF が使用可能に設定されているとは限らないため、注意が必要である（図 4）。

実機での検証としては、Fujitsu LIFEBOOK U7313/N (Windows 11 Pro 23H2, Intel AX211 ドライバ 23.20.04) において、まず Aruba

Controller (ArubaOS 8.12) に收容した WPA3 Enterprise Transition Mode の eduroam 基地局 (2.4/5/6GHz) において、SSID をクリックして接続設定を手動で行い、wlan プロファイルが WPA3ENT で保存されることを確認した。またこの状態の検証端末が別の Aruba Controller (ArubaOS 8.10) に收容した PMF が使用可能に設定された WPA2 Enterprise の eduroam 基地局においても接続が行えることを確認した。加えて、この状態の検証端末は WPA2 Enterprise で PMF が無効に設定されている基地局 (Aruba Controller /ArubaOS 8.12 / AP-505H) においては接続に失敗することを確認した。

6GHz 帯を有効に利用してもらうためには WPA3ENT での設定が望ましいが、eduroam においてはその性質上学外の外部機関や事業者の基地局に接続利用することも常であることから、WPA2 Enterprise で PMF を無効にした状態に留めた基地局を運用している機関が存在する場合は利用者の相互利用において問題が発生することが考えられる。現在のところ、WPA3ENT での接続設定が生成される環境を運用する場合は、機関の外部で接続できない場合は一旦接続設定を削除し現地で再接続する（あるいは接続設定を変更する）よう案内が必要となるものと思われる。また、WPA2 Enterprise において PMF を使用可能 (optional) なモードに設定することの弊害は見受けられないため、各 eduroam 加入機関・事業者においても PMF が使用可能な状態で運用されることが望ましいと考えられる。

一方、当該プロファイルの設定内容が WPA2 となっている場合 (WPA2 Enterprise のみをサポートしかつ PMF が無効な基地局のエリアで初回接続を設定) も、デバイスが 6GHz 帯をサポートしており、かつ 6GHz 帯をサービス提供している試験環境エリア内で接続を行った場合には 6GHz 帯での接続が可能であった。この際、端末

SSID:	eduroam
プロトコル:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
セキュリティの種類:	WPA2-エンタープライズ
製造元:	Realtek Semiconductor Corp.
説明:	Realtek 8852CE WiFi 6E PCI-E NIC
ドライバーのバージョン:	6001.16.150.600
サインイン情報の種類:	Microsoft: 保護された EAP (PEAP)
ネットワーク帯域:	6 GHz
ネットワークチャンネル:	69
SSID:	eduroam
プロトコル:	Wi-Fi 6 (802.11ax)
セキュリティの種類:	WPA3 - エンタープライズ
製造元:	Realtek Semiconductor Corp.
説明:	Realtek 8852CE WiFi 6E PCI-E NIC
ドライバーのバージョン:	6001.16.150.600
サインイン情報の種類:	Microsoft: 保護された EAP (PEAP)
ネットワーク帯域:	6 GHz
ネットワークチャンネル:	69

図 5 Windows の wlan プロファイル設定内容の違いによる接続状態の違い（上：WPA3ENT, 下：WPA2）

側の表示は 6GHz 帯への接続時においても“WPA2-エンタープライズ”となり（図 5 上, Aruba Controller おける端末接続表示は WPA3 AES_CCMP_128, ExtremeCloud IQ-Controller 側の端末接続表示は Capabilities : PMF, WPA2）接続プロファイルの設定内容が WPA3ENT である場合（図 5 下）と異なっている。この挙動については、Intel AX211 とは別の無線 LAN チップ（Realtek 8852CE Wi-Fi 6E）を搭載する HP ProBook 410 G10（Windows 11）においても同様であることを確認した。

eduroam への初回接続設定については、SSID をクリックして接続する方式に変えて geteduroam [12] などプロファイル設定用のアプリケーションも用意されている。この場合は現状基地局の状況に関わらず WPA2 でプロファイルが生成されることを確認した。本学では別途 LTE/5G などで通信が行えるスマートフォンにおいては geteduroam アプリでの eduroam 初回接続設定投入を案内するように移行しつつあ

るが、Windows においては別の通信方法が学内に用意されていない（geteduroam アプリでの設定にはインターネット接続が必要）ため、今後も手動での設定を案内することになろうと想定される。

5.2 6GHz 帯をサポートしないデバイスによる接続

6GHz 帯は利用できないが WPA3 Enterprise は利用できる端末として、Windows 11 が動作する ASUS ExpertBook B9450FA（Intel AX201 : ドライバ 23. 20. 04）にて接続検証を行った。

Aruba Controller（ArubaOS 8.12）に収容した WPA3 Enterprise Transition Mode の eduroam 基地局（2.4/5/6GHz）において、2.4/5GHz 帯で WPA2 Enterprise で接続できることを確認した。

また ExtremeCloud IQ Controller 10.10.02 に収容した WPA3 Enterprise Transition Mode の eduroam 基地局（2.4/5/6GHz）において、2.4/5GHz 帯で WPA2 Enterprise で接続できることを確認した。

また、WPA3 Enterprise Transition Mode で動作している基地局のエリアで初回接続した場合、wlan プロファイルの authentication 値は WPA2 として設定が生成されることを確認した。加えて、WPA2 Enterprise で PMF が有になっている基地局のエリアで初回接続した場合は、wlan プロファイルの authentication 値は 6GHz 帯をサポートする Windows 11 での検証とは異なり、常に WPA2 として設定が生成されることを確認した。

5.3 6GHz 帯も WPA3 もサポートしない端末による接続

6GHz 帯も WPA3 もサポートしない端末として、Apple iPad mini（第 1 世代）/ iOS 9.3.5（2016 年 8 月 26 日公開）での接続検証を行った。

Aruba Controller（ArubaOS 8.12）に収容した WPA3 Enterprise Transition Mode の eduroam 基地局（2.4/5GHz）において、2.4/5GHz 帯で WPA2 Enterprise で接続できることを確認した。

また ExtremeCloud IQ Controller 10.10.02 に

収容した WPA3 Enterprise Transition Mode の eduroam 基地局 (2.4/5/6GHz) において、2.4/5GHz 帯で WPA2 Enterprise で接続できることを確認した。WPA3 Enterprise Transition Mode での WPA3 非対応端末の WPA2 Enterprise での利用については、2024 年現在にまだ使われている可能性がある端末を考えると概ね問題ないものと言える。

5.4 OpenRoaming 環境におけるそれぞれの端末の接続

OpenRoaming の利用にあたっては、事業者が発行する接続プロファイルをインストールする方式が使用されている [13]。本学の各基地局は eduroam に加えて OpenRoaming が利用できるような構成されており、各環境下で同様の検証を行った。

Windows 向けに発行されている接続プロファイルにおいては、現状 wlan プロファイルが WPA2 で設定されているため、eduroam と同様にデバイスが 6GHz 帯をサポートしており、かつ 6GHz 帯をサービス提供している試験環境エリア内で接続を行った場合には 6GHz 帯での接続が可能であることを確認した。

6 まとめ

本検証においては、2.4/5/6GHz 帯の SSID を同一とした上で、2.4/5GHz 帯では PMF を使用可能 (optional) とした構成 (WPA3 Enterprise Transition Mode) において、概ね現在本学で利用が想定される学生・教職員・学外者の接続が問題ないことを示した。

しかしながら、6GHz 帯が使用可能な Windows 端末においては、WPA2 Enterprise でかつ PMF が無効となっている eduroam 基地局においては接続できない場合が発生することを確認し、その運用には注意が必要であることを示した。なんらかの理由で eduroam 基地局の設定を WPA2 Enterprise に留めている場合においても PMF を使用可能に設定することの弊害は見受けられな

いことから、eduroam 全体の安定稼働のためには PMF を使用可能な状態に設定するよう各機関に働きかけていくことが必要と考えられる。

なお、さらに Wi-Fi 7 においては Multi-Link Operation (MLO) と呼ばれる複数の周波数帯域の同時利用などの新機能があり、本学においても Wi-Fi 7 が利用可能な AP5020 などの機種にて今回の検証構成を引き継ぐ形での運用に問題がないか検証を進めている。2024 年 10 月現在では Wi-Fi 7 の新機能を国内で動作させることが可能な端末が各 OS 共に十分でなく、今後他機関とも連携して検証を進めていきたい。

本研究の一部は、令和 6 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/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [2] WBA OpenRoaming: <https://wballiance.com/openroaming/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [3] Wi-Fi Alliance, “WPA3™ Specification Version 3.3.” : <https://www.wi-fi.org/file/wpa3-specification/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [4] GÉANT, “eduroam® and Wi-Fi CERTIFIED WPA3™ Security.” : <https://eduroam.org/eduroam-and-wpa3/> (2024 年 10 月 19 日参照)
- [5] GÉANT, “eduroam Deployment Considerations on Wi-Fi Certified 6E.” : <https://eduroam.org/eduroam-deployment-considerations-on-wi-fi-certified-6e/> (2024 年 10 月 19 日参照)
- [6] Key Reinstallation Attacks: <https://www.krackattacks.com/> (2024 年 10 月 19 日参照)
- [7] Mark Houtz, “eduroam + 6Ghz + WPA3 - Enterprise (Part 2).” : <https://markhoutz.com/2023/03/14/eduroam-6ghz-wpa3-enterprise/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [8] Mark Houtz, “eduroam + 6Ghz + Vendors (Part 3).” : <https://markhoutz.com/2023/04/04/eduroam-6ghz-vendors/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [9] Apple inc., “Apple プラットフォームのセ

- セキュリティ.” :
- <https://support.apple.com/ja-jp/guide/security/sec8a67fa93d/web>
(2024年10月17日参照)
- [10] Android オープンソースプロジェクト,
“WPA3 と Wi-Fi Enhanced Open.” :
- <https://source.android.com/docs/core/connect/wifi-wpa3-owe?hl=ja>
(2024年10月17日参照)
- [11] Intel Corporation, “インテル® ワイヤレス・アダプターでの Wi-Fi Protected Access 3 (WPA3) のサポート.” :
- <https://www.intel.co.jp/content/www/jp/ja/support/articles/000054783/wireless.html>
(2024年10月17日参照)
- [12] geteduroam: <https://geteduroam.app/>
(2024年10月17日参照)
- [13] 一般社団法人無線認証連携協会,
“OpenRoaming の使い方” :
- <https://cityroam.jp/usage/usage-or>
(2024年10月17日参照)

[大学 ICT 推進協議会 2024 年度年次大会論文集より]

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

原田 寛之¹⁾, 後藤 英昭²⁾

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

se-harada@e.sgu.ac.jp

Improvement of eduroam access point location data generation and visualization using a community-based Wi-Fi positioning system

Hiroyuki Harada¹⁾, Hideaki Goto²⁾

1) Information Processing Division, Sapporo Gakuin University

2) Cyberscience Center, Tohoku University

概要

国際的なネットワークローミング利用の仕組みである eduroam は、日本においては国立情報学研究所 (NII) が eduroam JP の名称で展開している。現在加入機関は国内 439 機関を数え、eduroam 参加事業者による市街地における eduroam のサービスを提供も増えてきている。しかしながら加入機関・参加事業者からの eduroam 基地局位置情報の提出状況は精緻ではない現状にあり、eduroam 基地局マップにおいても多くの既知の基地局がマッピングされていない。一方、Wireless Broadband Alliance (WBA) による国際的な Wi-Fi 相互接続基盤である OpenRoaming においては、基地局マップの作成・公開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 (Wireless Geographic Logging Engine) で収集されたデータを利用している。この手法を応用し、国内の eduroam 基地局位置情報の可視化を試みたので報告する。

1 はじめに

学術無線 LAN ローミング基盤 eduroam[1] は、国内 439 機関 (2024 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。加入機関および参加事業者には運用する基地局の位置情報を eduroam JP に提出することが義務付けられているが、eduroam JP によればその提出率は 2024 年 8 月現在で 55.2%となっている。このため、公開されている eduroam 基地局マップ[2] についても多くの既知の基地局が示されていない状況にある。

本稿では、第 2 章で現在の eduroam における基地局位置情報マッピングの元となる加入機関からの位置局データ提出の流れと、基地局位置情報の提出作業で支障が発生していると思われた大量の基地局を有する機関・事業者向けに開発したデータ作成を省力化するスクリプトについて紹介する。

第 3 章では、WBA が OpenRoaming [3] において現在行っているコミュニティベースの Wi-Fi ポジショニングシステムからの基地局の位置情報収集及びマッピングについて触れると共に、この手法を応用した国内で運用中の eduroam 基地局位置情報の精緻な可視化の試みについて述べる。第 4 項は本稿のまとめである。

2 eduroam における基地局位置情報提出とマッピング

eduroam JP が取りまとめた 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[4] に沿って各加入機関が提出する基地局位置データを元としている。eduroam database 仕様では XML データでの提出が求められるが、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 (自動出力されるスプレッドシートへ位置情報を



図 1 eduroam 基地局マップの北海道表示 (GÉANT)

入力システムにアップロードすることで、システム上で 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る取り組みが行われている [5]。このスプレッドシートは 2 つのシートに分かれており、1 つ目のシートに加入機関全体の情報を、2 つ目のシート (図 2) に基地局位置情報を記載してシステムにアップロードすることができる。

これは XML フォーマットを直接扱うことに慣れていない大学事務職員などでも最低限求められる基地局位置データを提出できる仕組みであり、また XML の直接作成では生じやすい記述の誤りを防止できるメリットがある。しかし eduroam JP では現在の運用においては場所の粒度について特段規定していない。eduroam JP から公開されている基地局データ作成の手引きにおいてもキャンパス単位で eduroam が利用できる場所としてのデータ作成例が示されているように、本スプレッドシートを使用して大量の基地局の位置情報を登録することはあまり想定されていない。特に eduroam JP の参加事業者が市街地で展開している基地局については、市街地に点在していることもあり個々の位置情報が重要なものとなるが、現在のスプレッドシートでは複数の基地局位置情報を登録する場合、位置情報ごとに表をコピーして作成する必要があるため (図 2)、作成にかなりの時間を要する。

No.	名称	住所	備考
1	札幌大学	札幌市東区南一条 1-16-1	札幌大学
2	北海道立総合研究機構	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構
3	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター
4	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
5	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
6	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
7	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
8	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
9	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
10	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
11	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
12	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
13	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
14	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
15	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
16	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
17	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
18	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
19	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
20	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
21	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
22	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
23	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
24	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
25	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
26	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
27	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
28	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
29	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
30	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
31	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
32	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
33	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
34	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
35	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
36	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
37	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
38	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
39	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター
40	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター	札幌市東区南一条 1-16-1	北海道立総合研究機構 情報科学研究センター 情報科学研究センター

図 2 eduroam JP の基地局マップデータ作成支援用スプレッドシート (位置情報 1 つ分)



図 3 eduroam JP 申請システムへの XML アップロードによる基地局位置データの登録

但し、eduroam JP 申請システムの基地局マップデータ登録画面には説明が記載されていないが、当該システムへは本来の XML フォーマットによる基地局データを直接アップロードすることも可能である。この機能を利用して、別途準備した基地局位置データの CSV ファイルを所定の XML フォーマットに変換するスクリプトを開発して公開した [6]。

eduroam JP 申請システムの基地局マップデータ登録画面にて、本スクリプトで生成した XML ファイルをアップロードすると、そのまま基地局位置情報として登録される (図 3)。これにより大幅なデータ作成の省力化が可能である。

3 OpenRoaming における WiGLE からの 基地局位置情報収集とマッピング

WiGLE [7] は、2001 年に開始されたプロジェクトである。プロジェクトに登録したユーザーが自らの Android スマートフォンに WiGLE アプリケーションをインストールし、アプリケーションを起動したまま地域を移動することでスマートフォンが検出した Wi-Fi の SSID をプロジェクトのデータベースに送信する。WiGLE 上にアップロードされた Wi-Fi 基地局の位置情報は公開されており、これを利用するための API も準備されている。

OpenRoaming 基地局では高度な条件での端末接続を実現するために Passpoint [8] が使われており、Roaming Consortium Organization Identifier (RCOI) と呼ばれる情報が送付されている。RCOI は、認証連携しているローミングフェデレーションを示すための識別子である。WBA は 2023 年 11 月に WiGLE と連携し、WiGLE アプリケーションで Passpoint の RCOI を収集・報告できるようにした [9]。これにより、WiGLE データベースには世界中の OpenRoaming RCOI を発信しているアクセスポイントの位置情報が記録されることとなり、このデータを活用して WBA は OpenRoaming Wi-Fi Coverage Map [10] を公開した (図 4)。

この手法を応用し、国内で現在稼働中の eduroam 基地局の可視化を独自に試みた。

WiGLE において主にデータ収集に使用される Android スマートフォンによる基地局の位置情報は必ずしも正確ではない。このような不正確な報告を補正するため、WiGLE には QoS [11] と呼ばれるスコアリングが 0~7 の範囲で実装されている。基地局が 1 日以上、あるいは 1 名以上のユーザーにて報告された場合、QoS スコアは増加する。複数回発見された基地局は徐々にその位置が QoS の増加と共に補正されることが期待されるが、WiGLE ユーザーが少ない地域においては QoS が低いスコアに留まっても実際に安定運用されている基地局である可能性に留意する必要がある。



図 4 OpenRoaming Wi-Fi Coverage Map による関東圏の OpenRoaming 基地局位置表示

また、WiGLE においては各基地局が最後に報告された日時を取得可能である。これを活用すれば、閾値に用いる日時を最近の日付にすることで過去に一時的に開催されたイベント用の基地局の位置情報など、既に運用が停止されている基地局を除外することができる。例として、WBA の OpenRoaming Map においては、欧州の一部の国で小売事業者が自社店舗の Wi-Fi において OpenRoaming の RCOI を少なくとも 2024 年 6 月までは送付しており、サービス提供していたものと推測されたが、2024 年 10 月に現地調査した際には RCOI の送付が停止していることを複数の店舗で確認できた。WiGLE ユーザーは常に全世界の基地局を報告しているわけではなく、その報告密度はまちまちであるため、QoS 値と同様に地方で利用が少ない基地局の最終報告日時は必ずしも常に最近の日時とはならない。しかしながら最終報告日時にある程度の閾値を設け長期間発見されていない基地局についてはマップから除外するなどの方針はマップの精度を保つためには必要であると考えられる。

さらに、Wi-Fi において SSID は誰もが自由に設定できるため、WiGLE のデータを活用する際は検出される基地局が全て参加機関の正規の eduroam 基地局である保証はないことに留意す

る必要がある。

本稿では、例として札幌市付近のエリアにおいて QoS が 1 以上、SSID が eduroam、暗号化方式が wpa2 として記録された基地局位置データを WiGLE から収集した。QoS が 0 の基地局位置データを含めると総数は 867 であったが、QoS が 1 以上の基地局位置データに絞ると 555 となった。これらの基地局位置データを、国土地理院が公開している地理院タイル[12] を使用してマッピングを行った (図 5 上)。

参加機関による基地局位置を元にした eduroam 基地局マップ (図 6) にて確認できる同エリア内の基地局数は 39 (2024 年 10 月 19 日現在) であることから、より多数の基地局の位置情報を確認できることがわかるが、一方で比較的最近 eduroam に参加した機関の基地局付近では WiGLE による報告がなされておらず検出できていない。また WiGLE データを商用利用のために使用する場合は、追加の商用ライセンスに同意する必要がある [13]。非商用利用の場合は一日に取得できる基地局数に制限があるため広いエリアを対象とした探索には日数を要する。

本稿における eduroam 基地局位置情報の可視化は、従来の参加機関により報告される基地局位置情報を直ちに置き換えるものではないが、より実情に近い基地局位置情報の可視化の点では一定の有用性がある。

4 まとめ

本稿では、現在の eduroam における基地局位置情報マッピングの元となる加入機関からの位置局データ提出の流れにおいて、大量の基地局を有する機関・事業者向けに開発したデータ作成を省力化するスクリプトについて紹介すると共に、OpenRoaming における基地局の位置情報と収集マッピングの試みを eduroam に応用する試みについて述べた。今後 eduroam 参加事業者と協力し、特に大量の基地局を運用する事業者の基地局データ作成と提出状況の改善を進めていきたい。

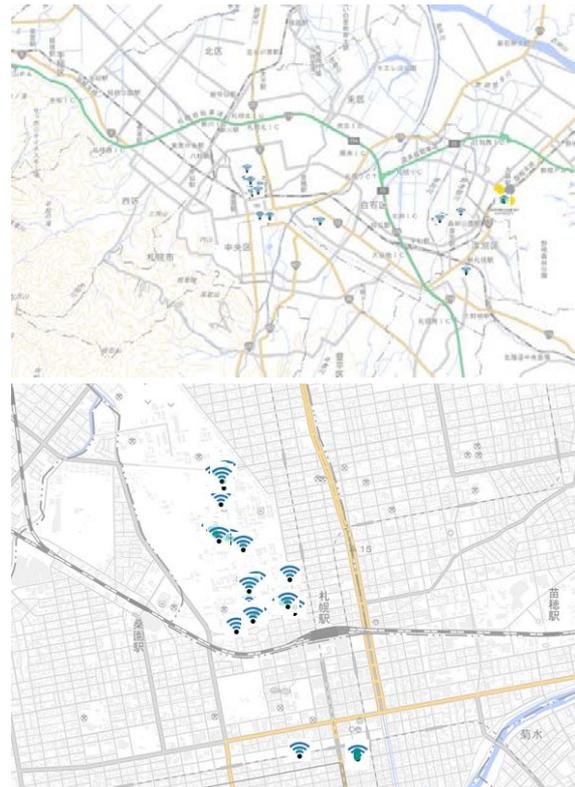


図 5 WiGLE から得た基地局位置データによる札幌市周辺の eduroam 基地局表示 (上) と、札幌駅周辺の拡大表示 (下)

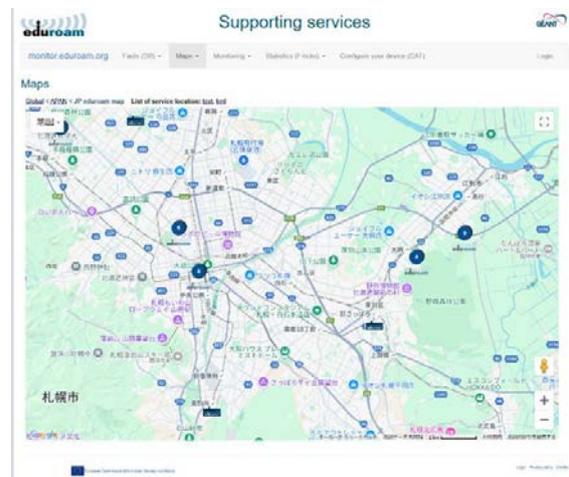


図 6 eduroam 基地局マップ (GÉANT) による札幌市周辺の基地局表示

参考文献

- [1] eduroam JP: <https://www.eduroam.jp/> (2024 年 10 月 17 日参照)
- [2] eduroam Facts&Maps: https://monitor.eduroam.org/map_service_loc.php (2024 年 10 月 17 日参照)
- [3] WBA OpenRoaming:

- <https://wballiance.com/openroaming/>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [4] eduroam database:
https://monitor.eduroam.org/fact_eduroam_db.php
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [5] 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>
(2024 年 10 月 17 日参照)
<https://wballiance.com/an-update-from-wireless-broadband-alliances-openroaming-work-group-the-greatest-standards-evolution-to-date/>
- [6] eduroammap:
<https://github.com/pirosap/eduroammap>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [7] WiGLE: <https://www.wigle.net/>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [8] Wi-Fi Alliance, “Discover Wi-Fi Passpoint.”:
<https://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/passpoint>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [9] Wireless Broadband Alliance, “An update from Wireless Broadband Alliance’s OpenRoaming Work Group – The Greatest Standards Evolution to Date.”:
<https://wballiance.com/an-update-from-wireless-broadband-alliances-openroaming-work-group-the-greatest-standards-evolution-to-date/>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [10] OpenRoaming Wi-Fi Coverage Map:
<https://wballiance.com/openroamingmaps/>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [11] WiGLE Wiki QoS :
<https://wigle.net/wiki/index.cgi?QoS>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [12] 国土地理院タイル:
<https://maps.gsi.go.jp/development/ichiran.html>
(2024 年 10 月 17 日参照)
- [13] WiGLE API:
<https://api.wigle.net/>
(2024 年 10 月 17 日参照)

[報告]

SC24 出展・参加報告

スーパーコンピューティング研究部 滝沢寛之

2024年11月17日から22日にかけて米国ジョージア州アトランタ市のジョージア世界会議センターにおいて、The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage, and Analysis (SC24) 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SC24は約18,000名以上の参加者があり、これまで最多だったSC23の参加者数記録を上回るSC史上最多の参加者数となりました。また、SC24では約500団体もの展示ブースがあり、そのうち今回初めて展示を行った団体が136も含まれていたことから、HPC技術の学术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4名および大学院生2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。



東北大学ブース関係者の集合写真

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。SC24で発表された2024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2位のFrontier（前回1位）を大きく引き離して首位に立ちました。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はAOBA-Sは、昨年11月のリストでは49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76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12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SC25は、2025年11月16日から21日に米国ミズーリ州セントルイス市のアメリカズセンターで開催予定です。

[報告]

第 38 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、2024 年 12 月 12 日 (木)~13 日 (金) に高性能計算に関する国際ワークショップ「第 38 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 38 回 WSSP では技術講演として全部で 23 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 86 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 HLRS における新しい HPC 技術開発に関する講演、DLR 部門長の Sabine Roller 氏によるソフトウェア手法とデータ駆動型手法の組合せに関する講演、ドイツ気候計算センター (DKRZ) センター長の Thomas Ludwig 氏による機械学習に基づく気候予測に関する講演などがありました。

日本からは、文部科学省の栗原潔氏による HPC および AI に関する日本の政策を紹介する講演から始まり、大阪大学の伊達進氏および速水智教氏、理化学研究所の辻美和子氏、東京理科大学の立川智章氏、核融合科学研究所の佐竹真介氏、海洋研究開発機構の真砂啓氏、九州大学の島大史氏、名古屋大学の河合直聡氏に加えて、NEC の技術者が技術講演を行いました。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 の将来展望に関する講演を行いました。

近年の WSSP では、従来の数値シミュレーションに関する話題に加えて、AI・機械学習や量子コンピュータといった話題も当たり前のように言及されるようになってきました。HPC 技術の活用を期待される分野が広がったことを顕著に表しており、その重要性は増す一方です。特に AI・機械学習に関しては、世界中で HPC 計算資源の取り合いになっているといわれています。しかし、数値シミュレーションの重要性が低下したわけではなく、例えば機械学習に用いるデータを生成するために数値シミュレーションのさらなる高性能化が望まれています。今後の WSSP でも、数値シミュレーションをはじめとして機械学習等も含めた HPC アプリケーション全般、およびそれらの効率的連携に関する話題が広く議論されていくものと期待されます。

第 38 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/wssp38/ja/index.html>



[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

2024 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。

2025 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】

2024 年 10 月から 2025 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）

— 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ページを超える場合は共同利用支援係まで前もってご連絡ください。
- (3)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (4)原稿の提出先は次のとおりです。

東北大学サイバーサイエンスセンター内

情報部デジタルサービス支援課スーパーコンピューティングサポートユニット

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

TEL 022-795-3406

スタッフ便り

仙台市の霞目に津波の伝承が残る神社がある。その名は浪分神社である。伝承によると、「昔、大津波が仙台を襲った時、天から白馬にまたがった海神が降臨し、大津波を南北に分断して鎮めた」と言うものである。この神社は海から4km離れていて、なぜこのような伝承が残っているか不思議に思われていたが、2011年の東日本大震災の時にはこの神社の数百m手前まで津波が迫っていた。これにより、この伝承は過去の津波によるものとされ、天保六年（1835年）六月に起きた津波で作られたものとされている。私は、先日、この神社を参拝してきた。当センターは、津波を伴う地震が国内で発生するとAOBA-Aが自動的に津波被害の予測を行い、地震発生後20分程度でその結果を政府と高知県へ送付している。そして、この情報は災害対応計画に役立てられている。私は、この処理がいつも正常に動作し、被害を最小に抑えられるようにとお願いしてきた。(A.M)

ここだけの話ですがアナログなものが好きです。例えば落語。20代の頃から聞いています。落語は噺家が座布団の上に座って扇子と手拭いだけでさまざまな登場人物を演じ分ける1人芸です。代々語り継がれている古典落語とその人が作った新作落語がありますが、同じ噺家が古典落語の同じ演目をやっても毎回少しずつ内容が異なりますし、聞く側も、話を聞いて頭の中に思い浮かべる登場人物は人それぞれ、毎回異なってくるのではないのでしょうか。



数か月前に超初心者向けの生成AIの研修会に参加させていただく機会がありました。講師の方が生成AIに音声データを読み込ませて概要をまとめた文章を作成させることや、入力した指示に応じて絵を描かせることもできると実演で紹介してくれました。研修会が終わり数時間後にふと思ったのが、生成AIに落語の音声を読み込ませて話の中の登場人物の絵を描かせたらどうなるのだろうかということです。名人の上手な落語と前座さんの落語を読み込ませた時では、生成AIの描く絵は変わってくるのだろうか。また、音声ではなく映像を読み込ませたらどうだろう。ベテランの噺家さん(いわゆるおじいさん)が座布団の上で娘さんの登場する噺を演じた映像を読み込ませた場合は、娘さんの絵をどのように表現して描いてくれるのだろうか。おじいさんの容姿には全く引きずられないのだろうか。著作権の関係などもあり実際に実験してみるのには難しいかもしれませんが、多少興味はあります。そんなことを考えていたら年が明けました。本年もどうぞよろしくお願ひします。(K.K)

【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. 1. 1 転出

小松 一彦 特任教授 (グリーンクロステック研究センター教授へ)



SENAC 編集部会

滝沢 寛之 水木 敬明 後藤 英昭 今野義則
佐々木明里 大泉 健治 小野 敏 斉藤くみ子

2025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



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.58 No.1 2025-1



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。

本誌の名前「SENAC」の由来

昭和 33 年に東北地区の最初の電子計算機として、東北大学電気通信研究所において完成されたパラメ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。

スーパーコンピュータ AOBAS システム一覧

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

サーバとホスト名

フロントエンドサーバ (AOBAS-S 用)	sfront. cc. tohoku. ac. jp
データ転送サーバ (AOBAS-S 用)	sfile. cc. tohoku. ac. jp
ログインサーバ (AOBAS-A, B 用)	login. cc. tohoku. ac. jp
データ転送サーバ (AOBAS-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 AOBAS-S	連続運転
サブシステム AOBAS-A	連続運転
サブシステム AOBAS-B	連続運転
各種サーバ	連続運転
大判プリンタ	平日 9:00～21:00

クラウドサービス AOBAS-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 AOBAS-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 AOBAS-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.58 No.1 2025-1

[巻頭言]			
TOPICとサイバーサイエンスセンター	水木 敬明	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	3	
X線CT装置を用いた誘電体レンズ付きアンテナの 3Dモデル化とFDTD解析法	春日 貴志 新村 奨 林 優一	8	
直交格子積み上げ法を用いた超音速流中での 燃料噴射解析手法の開発	小川奏一郎 佐々木大輔	15	
2次元キャビティが及ぼす後退平板境界層の 乱流遷移過程への影響	新開 壮希 中川 皓介 塚原 隆裕	21	
プラズマアクチュエータによる角部剥離流れ制御の 性能向上に向けて —第2報—	浅田 健吾・渡部航太郎 藤井 孝蔵・立川 智章	27	
[大学ICT推進協議会 2024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の 運用状況と利用者支援について	木村 優太・森谷 友映 山下 毅・小野 敏 大泉 健治・滝沢 寛之	39	
無線LANローミングにおける個人データ活用と 認証負荷削減のためのオフライン属性共有手法	後藤 英昭 原田 寛之 漆谷 重雄	43	
6GHz帯を利用した次世代キャンパス無線LAN環境の検証と課題	原田 寛之 後藤 英昭 漆谷 重雄	49	
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	原田 寛之 後藤 英昭	57	
[報告]			
SC24出展・参加報告	滝沢 寛之	62	
第38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	64	
[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		66	
執筆要項		67	
スタッフ便り		68	