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.54 No.4 2021-10





Cyberscience Center

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

### 大規模科学計算システム関連案内

# <大規模科学計算システム関連業務は、サイバーサイエンスセンター本館内の情報部情報基盤課が担当しています。> https://www.ss.cc.tohoku.ac.jp/

階	係·室名	電話番号(内線)*	主なサービス内容	サービス時間
		e-mail		平日
		022-795-6153(6153)	計算機利用全般に関する相談	8:30~17:15
	利用相談室	相談員不在時	大判プリンタ、利用者端末等の	8:30~21:00
_		022-795-3406 (3406)	利用	
階	利用者談話室	(3444)	自販機	8:30~21:00
	展示室*(分散 コンピュータ博物館)*	*見学希望の方は共同利用支援係までご 連絡ください。	歴代の大型計算機等の展示	9:00~17:00
	総務係	022-795-3407(3407) cc-som@grp.tohoku.ac.jp	総務に関すること	8:30~17:15
	会計係	022-795-3405(3405) cc-kaikei@grp.tohoku.ac.jp	会計に関すること、負担金の 請求に関すること	8:30~17:15
三階	共同利用支援係 (受付)	022-795-3406(3406) 022-795-6251(6251) uketuke@cc.tohoku.ac.jp	利用手続き、利用相談、講習 会、ライブラリ、見学、アプリケ ーションに関すること	8:30~17:15
	共同研究支援係	022-795-6252(6252) rs-sec@cc.tohoku.ac.jp	共同研究、計算機システムに 関すること	8:30~17:15
	ネットワーク係	022-795-6253(6253) i-network@grp.tohoku.ac.jp	ネットワークに関すること	8:30~17:15
四 階	研究開発部	022-795-6095 (6095)		
五 階	端末機室	(3445)	PC 端末機(X 端末)	8:30~17:15

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

本誌の名前「SENAC」の由来

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

#### [共同研究成果]

### 津波浸水被害推計シミュレーションの

-1 -

### ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の評価

撫佐昭裕<sup>1,4,5)</sup>,阿部孝志<sup>3)</sup>,佐藤雅之<sup>2)</sup>,小松一彦<sup>1)</sup>,小林広明<sup>1),2),5)</sup>,越村俊一<sup>3),5)</sup>
 1)東北大学サイバーサイエンスセンター
 2)東北大学大学院情報科学研究科

- 3) 東北大学災害科学国際研究所
  - 4) 日本電気株式会社
  - 5) 株式会社 RTi-cast

津波浸水被害推計シミュレーションは、スーパーコンピュータ SX-ACE や SX-Aurora TSUBASA を 用いて津波発生から 20 分以内に浸水範囲やその被害状況を推計することを目的に開発されたもの である.本稿では、本シミュレーションプログラムにおいて SX-Aurora TSUBASA で新たにサポート されたベクトル・スカラーハイブリッド MPI (x86 プロセッサとベクトルエンジン間の MPI 通信を 可能にしたもの)による性能評価を報告する.評価結果として、ベクトル・スカラーハイブリッド MPI を使用することによって、津波浸水被害推計シミュレーションの実行時間が約半分に短縮され たことを示す.また、今まで大規模システムとして開発してきたリアルタイム津波浸水被害推計シ ステムの小型化についても言及する.

#### 1. はじめに

著者らの研究グループは,2011年3月11日に発生した東日本大震災での津波災害を教訓として, 発災直後に津波被害の全貌を短時間で把握可能とするため,コンピュータシミュレーションを活用 したリアルタイム津波浸水被害推計システムの研究開発を行っている[1].本研究開発では津波の 伝播,遡上,被害推計のシミュレーションにおける高速化が一つの研究テーマであり,東北大学サ イバーサイエンスセンターと共同研究を継続的に実施している.津波のような広域災害では高精度 で広範囲の被害推計を短時間で行うことが求められており,本共同研究ではスーパーコンピュータ AOBAを用いた大規模シミュレーションにおいて高速化を実現し,国内の太平洋全沿岸を10mの精度 で5分以内にシミュレーションを行うことを可能にしている[2].また,本システムは2017年より 内閣府総合防災システムの一機能として採用され[3],東北大学 AOBA-A と大阪大学 SQUID のスーパ ーコンピュータシステムで稼働している.一方,自治体や企業からは担当地域の狭い範囲の津波浸 水被害推計を行うことを望む声もあり,リアルタイム津波浸水被害推計システムのダウンサイジン グ化に向けた検討も行っている.

サイバーサイエンスセンターAOBA-A システムとして昨年度導入された SX-Aurora TSUBASA には, ダウンサイジングしたモデルとしてエッジモデルとオンサイトモデルがあり,大学の研究室や企業 のサーバとして導入されている[4]. これらモデルでは特別な施設を設けることなく,一般的なサ ーバとして導入することができ,AOBA-A で開発したプログラムをそのまま実行することができる. また,現在,SX-Aurora TSUBASA の MPI ライブラリは,x86 系のプロセッサとベクトルエンジンと の MPI 通信をサポートしており,x86 系プロセッサとベクトルエンジンの両方を用いた MPI 並列(以 下,ベクトル・スカラーハイブリッド MPI)が可能となっている.本稿では,津波浸水被害推計シ ミュレーションを SX-Aurora TSUBASA のオンサイトモデル上でベクトル・スカラーハイブリッド MPIを用いて実行した場合の性能について報告を行う.尚,本報告は昨年度 SC2020 で発表を行った ものをベースにしている[5].

#### 2. 評価環境

#### (1) 評価システム

SX-Aurora TSUBASA はベクトルホストとベクトルエンジンから構成され,本評価に使用したシス テムはベクトルホストに Intel Xeon プロセッサ2式とベクトルエンジン1式を搭載したものであ る.図1にシステムイメージ,表1にシステム諸元を示す.本シミュレーションプログラムはFortran で開発されたものであり, Xeon プロセッサ用のモジュール作成には Intel 製 Fortran コンパイラを 使用した.また,ベクトル・スカラーハイブリッド MPI を実行するため, NEC MPI/Scalar-Vector Hybrid パッケージを使用した.



図1 評価に利用した SX-Aurora TSUBASA の構成イメージ

	ベクトルホスト	ベクトルエンジン
型名	Intel Xeon Gold 6148	Type 20B
CPU 数(カード数)	2	1
全コア数	$20 \times 2$	8
総理論性能	1.4 $\times$ 2 Tflop/s	2.4 Tflop/s
メモリ容量	192 GB	48 GB
コンパイラ	Intel ifort 19.0.4.243	NEC nfort 2.1.28
MPI ライブラリ	NEC MPI/Scalar-Vector Hy	brid (MPI Version 2.6.0)

表1 性能評価を行ったシステムの諸元

### (2) シミュレーションモデル

津波浸水被害推計シミュレーションは、非線形長波理論式を Staggered Leap-frog 法と移流項の 風上差分を用いて差分化し、津波波源を求める Okada の式と建屋等の被害推計を行うモデルを組み 込んでいる[6,7]. 表 2 が本評価に用いたシミュレーションの条件であり、本シミュレーションは 高知県沿岸(海岸線総距離 712km)を 30m の格子間隔でシミュレーションを行うものである. 図 2 がシミュレーションに用いた階層型格子の形状である. 階層型格子では格子サイズ 810m の Domain 1 から 30m の Domain 4 までの 4 階層の格子からなり、多角形格子を採用している[8]. また、本シ ミュレーションでは図 2 の各 Domain を領域分割法で分割し並列化を行っている.

-2 -

項目	内容
対象地域	高知県
範囲	1,288km × 1,025km
座標系	直角座標系
格子構造	多角形格子
格子サイズ	810m, 270m, 90m, 30m
総格子数	$1.0 \times 10^{7}$
$\Delta$ t	0.5 秒
再現時間	6 時間

表2 シミュレーションの条件



図2 シミュレーションの格子構造

### 3. ベクトル・スカラーハイブリッド MPI 用プログラムの構築

### (1) プログラム修正

ベクトル・スカラーハイブリッド MPI は、一つのプログラムをベクトルエンジンと Xeon プロセッサで実行するため、ベクトルエンジンと Xeon プロセッサ用の実行モジュールが必要になる. そのため、ベクトルエンジン向けに開発した本シミュレーションプログラムを Xeon プロセッサ向けに修正したプログラムを用意した. 修正を行ったのは図 3 に示したファイル入出力の OPEN 文と図 4 に示した Intel コンパイラがサポートしていない組み込み関数 CBRT である.

SX用: OPEN (N, FILE=NAME, FORM='UNFORMATTED', ACCESS='STREAM', STATUS='OLD') Intel用: OPEN (N, FILE=NAME, FORM='BINARY', STATUS='OLD')

図3 プログラムの修正内容



図4 組み込み関数の修正内容

### (2) コンパイル

本シミュレーションプログラムは図5に示した2重のD0ループ構造になっており,内側D0ルー プをベクトル実行,外側D0ループをMPI並列で実行するようになっている. Xeon プロセッサでも 同様に内側D0ループをAVX512命令によるベクトル実行,外側D0ループをMPIによる並列実行と した.表3が使用したコンパイルコマンドとオプションである.ここで,Xeon プロセッサのコンパ イルでは環境変数 NMPI\_FC\_Hを指定している.これはベクトルエンジン向けのコンパイルコマンド mpinfort から Intel コンパイラ ifort を呼び出すためである.そして,コンパイルオプションで は、-vh がベクトル・スカラーハイブリッド MPI ライブラリをリンクすることを,-03 が最適化レ ベル、-finline-functions と-ipo が D0 ループ内のサブルーチンをインライン展開することを示し ている.-vec-threshold0 は D0 ループのベクトル化においてスカラー実行とベクトル実行のコス ト推定を用いてベクトル化の可否を判断しないことを指定している.この指定によりベクトル化で きるループをすべてベクトル化した方が速いにもかかわらず、ベクトル化をしないケースが多く あるからである.また、-xCORE-AVX512 は AVX512命令を使用することを示している.

subroutine nlmnt2		
do j=jsta,jend do i=ista,iend call xmmt end do end do	! ! !	Parallelized Vectorized Inlined
end subroutine nlmnt	:2	

図5 主なプログラム構造

表3 コンパイル環境

プロセッサ	コマンド	コンパイルオプション
ベクトルエンジン	mpinfort	-03 -finline-functions
Xeon プロセッサ	export NMPI_FC_H=ifort	
	mpinfort	-vh -O3 -ipo -vec-threshold0 -xCORE-AVX512

### (3) ロードバランスの調整

並列実行を行うときにはベクトルエンジンと Xeon プロセッサの各コアでの実行時間が均一になっていることが望ましい. そこで、ベクトルエンジンと Xeon プロセッサで本シミュレーションプログラムの実行時間を計測し、その結果から各コアに割り当てる演算量がなるべく均一になるように図2の Domain を分割した. 図6 がベクトルエンジンと Xeon プロセッサで本シミュレーションプ

ログラムを実行した時の実行時間である.ここで VE はベクトルエンジンを示している.測定は, それぞれ1コアで実行した場合と,すべてのコアを使用した場合で行った.1コアで実行した結果 からベクトルエンジンと Xeon プロセッサのコア実行性能は,ベクトルエンジンの方が約4倍高い ことがわかる.また,すべてのコアを利用した場合には,Xeon プロセッサ40コアの実行時間がベ クトルエンジン8コアの約1.2倍であることから,その時のベクトルエンジン1コアの実行性能は Xeon プロセッサ1コアの約6倍であることがわかる.以上より,ベクトルエンジンのコアに割り当 てる演算量はXeon プロセッサのコアの4倍から6倍となる.この結果をもとに図2のDomain分割 を5倍を基準に前後複数パターンを作成し,演算時間のもっとも短時間なものを測定値とした.



図6 各コア数での実行時間

#### 4. ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の測定結果

#### (1) MPI 通信

ベクトル・スカラーハイブリッド MPI では図7 で示した MPI 通信が発生する. ①はベクトルエン ジン内のコア間通信 (VE内), ②は Xeon プロセッサ内のコア間通信 (Xeon 内), ③は2 式の Xeon プ ロセッサ間の通信 (Xeon 間), ④がベクトルエンジンと Xeon プロセッサ間の通信 (VE・Xeon 間) で ある. それぞれの通信パターンにおける経路の通信バンド幅を表4に示す. ただし, ②については 公表された数値はない. この通信について PingPong ベンチマークプログラムを用いて 8 バイトか ら 2M バイトまでの転送時間を測定した.



表4 各通信経路の通信バンド幅					
通信パターン ①VE 内 ②Xeon 内 ③Xeon 間 ④VE・Xeon 間					
通信バンド幅(GB/s)	409.6	N/A	20.8	12.5	

図 8 が測定結果である.転送データの大きさが 32k バイトで③Xeon 間の転送時間が伸び始め, 64k バイト以降で②Xeon 間と④VE・Xeon 間の時間がそれぞれ長くなっている.一方,①VE 内の通信 時間はほとんど一定している.この①VE 内の結果は表4に示した通信バンド幅 409.8GB/sの大きさ によるものである.また,表4の③Xeon間の通信バンド幅20.8GB/sはXeon相互を接続している UPIのバンド幅を示しているが,本測定の2Mバイトのデータ転送が5.6GB/sであったことから, MPIの1対1通信ではUPIの帯域を十分に使い切れていないことを示している.しかしながら,本 シミュレーションプログラムにおける最大データ転送量は64kバイトであり,③Xeon間の転送でも 一回当たり1.3×10<sup>5</sup>秒であることから,MPI通信がボトルネックにならないことが判明した.



図8 通信時間

#### (2) 実行時間

本シミュレーションプログラムのベクトル・スカラーハイブリッドMPIの評価として、ベクトル エンジン8コアに対し Xeon プロセッサ10コア、20コア、30コア、40コアの4ケースの実行を行 った. ここでプログラムを実行するコマンドを図9に示した. -vh -np 40は Xeon プロセッサ40コ アで実行することを指定し、tsunami\_vh. exe が Xeon プロセッサで実行するモジュールである. -ve 0 -np 8はベクトルエンジン8コアで実行することを指定し、tsunami\_ve. exe がベクトルエンジン で実行するモジュールである.

mpirun -vh -np 40 tsunami vh.exe -ve 0 -np 8 tsunami ve.exe

図9 ベクトル・スカラーハイブリッドモデルの実行コマンド

図 10 が測定結果である. ここでベクトルエンジン 8 コアと Xeon プロセッサ 40 コアで実行した 結果もプロットした. Xeon プロセッサのコア数を増加させると徐々に実行時間の短縮される割合が 減少してきているが、ベクトルエンジンと Xeon のすべてのコアを使った 48 プロセスでのシミュレ ーション時間は、ベクトルエンジンまたは Xeon プロセッサだけで実行した場合に比べて、約半分 の実行時間でシミュレーションが行えていることがわかる. これは、SX-Aurora TSUBASA において ベクトルエンジンだけでなく、ベクトルホストに搭載している汎用プロセッサを利用することによ ってシミュレーション時間が短縮できることを示している. そして、海岸線総距離 712km の津波現 象を 30m の精度で 6 時間分の再現を 4.5 分で完了していることから、SX-Aurora TSUBASA のオンサ イトモデルにおいて自治体レベルのリアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションが可能であ ることも示している.



図 10 ベクトル・スカラーハイブリッド MPI の実行時間

#### 5. システムのダウンサイジング

リアルタイム津波浸水被害推計システムは、津波浸水被害推計シミュレーション以外に以下の処 理を行っている.

① 断層処理(地震情報等の受信,津波発生の判断,断層の推定)

② 可視化処理(シミュレーション結果の可視化,可視化結果の配信)

全国規模の被害推計をリアルタイムに行う場合には②の可視化処理のために複数台の汎用サーバ とシミュレーションに AOBA-A クラスのスーパーコンピュータが必要になる.しかし,自治体クラ スの被害推計では本評価で使用した SX-Aurora TSUBASA オンサイトモデル(ベクトルエンジン1式, Xeon プロセッサ2式)でシミュレーションができることが明らかになり,また,可視化範囲も狭い ことから,図11に示したように①断層処理と②可視化処理を SX-Aurora TSUBASA のベクトルホス トで処理を行えば,SX-Aurora TSUBASA オンサイトモデル1台でリアルタイム津波浸水被害推計を 実施できることになる.これにより,自治体や企業において本システムを活用した独自の津波被害 の推定が可能となるのである.



図11 ダウンサイジングシステムのイメージ

— 7 —

#### 6. まとめ

本稿では、リアルタイム津波浸水被害推計システムに実装されているシミュレーションプログラ ムを用いて、SX-Aurora TSUBASA のベクトル・スカラーハイブリッド MPI での性能評価を行った. ここで、ベクトル・スカラーハイブリッド MPI はベクトルエンジンと x86 プロセッサ間の MPI 通信 を可能にするものである.本評価では、ベクトルエンジンで実行していた津波浸水被害推計シミュ レーションがベクトル・スカラーハイブリッド MPI を利用することで、実行時間が約半分に短縮で きることを示した.また、従来、リアルタイム津波浸水被害推計システムは大規模なシステム構成 になっていたが、自治体や企業向けにダウンサイジングしたシステムが構築できることも示した.

今後は、本評価で得られた知見を用いて、ダウンサイジングしたシステムの設計開発を行ってい く予定である.

#### 謝辞

研究にあたってサイバーサイエンスセンターの関係各位にご指導とご協力を頂いたことに感謝 いたします.また、本研究の一部は、科研費(17H06108, 18K11322, 21H05001),文部科学省「次 世代領域研究開発」(高性能汎用計算機高度利用事業費補助金)の助成のもとに行われた.

#### 参考文献

- [1] 越村俊一,阿部孝志,撫佐昭裕,村嶋陽一,鈴木崇之,井上拓也,太田雄策,日野亮太,佐藤 佳彦,加地正明,小林広明,スーパーコンピュータによるリアルタイム津波浸水被害予測,SENAC Vol. 51, No. 1、2018.
- [2] 撫佐昭裕,岸谷拓海,阿部孝志,佐藤佳彦,田野邊睦,鈴木崇之,村嶋陽一,佐藤雅之,小松 一彦,伊達進,越村俊一,小林広明,リアルタイム津波浸水被害推計シミュレーションの性能 評価, SENAC, Vol. 53, No. 2, 2020.
- [3] 東北大学,大阪大学,日本電気株式会社,国際航業株式会社,株式会社エイツー,"東北大・大阪大・NEC・国際航業・エイツー 世界初,地震発生から30分以内にスーパーコンピュータを用いて津波浸水被害を推計するシステムが内閣府「津波浸水被害推定システム」として採用,2017(広報).
- [4] NEC SX-Aurora TSUBASA WEB サイト. https://jpn.nec.com/hpc/sxauroratsubasa/index.html
- [5] A. Musa, T. Soga, T. Abe, M. Sato, K. Komatsu, S. Koshimura, H. Kobayashi, "Evaluation of Tsunami Inundation Simulation using Vector-Scalar Hybrid MPI on SX-Aurora TSUBASA," The poster presentation at The International Conference for High Performance Computing, Networking, Storage and Analysis (SC20), November 2020.
- [6] Koshimura, S., Oie, T., Yanagisawa, H., Imamura, F., "Developing fragility functions for tsunami damage estimation using numerical model and post-tsunami data from Banda Ache, Indonesia," Coastal Engineering Journal, JSCE, 51(3), 243-273, 2009.
- [7] Y. Okada, "Internal Deformation due to Shear and Tensile Faults in a Half-Space," Bulletin of the Seismological Society of America, 82(2), 1018-1040, 1992.
- [8] Inoue, T., T. Abe, S. Koshimura, A. Musa, Y. Murashima, H. Kobayashi, "Development and Validation of a Tsunami Numerical Model with the Polygonally Nested Grid System and its MPI-Parallelization for Real-Time Tsunami Inundation Forecast on a Regional Scale", Journal of Disaster Research, Vol. 14, No. 3, pp. 416-434, 2019. doi: 10.20965/jdr.2019.p0416

— 8 —

#### [共同研究成果]

### ゲージ場の異常性に起因するモノポールによるQCDの

### クォーク閉じ込め機構のモンテカルロ法による研究

#### 鈴木恒雄 大阪大学核物理学研究センター

### 協力研究員(石黒克也 高知大学理工学部門) 協力研究員(平口敦基 NYCU,台湾)

#### 1. 背景

陽子、中性子などの強い相互作用をするハドロンと呼ばれる素粒子は、クォークと呼ばれる粒 子から構成されていることがわかっている。このクォークと呼ばれる粒子模型は、1963年に Gell-Mann や Zweig 達によって提唱されたが、3 分の2とかマイナス3 分の1とかいう半端な電荷をも っている。それまでは、整数荷電の粒子しか知られていなかった。このような分数電荷をもつ粒 子は、もしあれば、実験で極めて容易に発見できるはずである。しかし、模型の提唱以降、60年 近くたつが、実験では、未発見である。模型提唱後、まもなく、クォークは、電荷以外にカラーの 自由度を持っており、SU(3)という非可換ゲージ理論で記述され、クォークは、8 個のカラーをも つグルオンという粒子で相互作用が媒介されているという QCD (量子色力学)が提唱された。グル オンは、質量がゼロのスピン1の粒子で、これまでの摂動論的な場の量子論の枠組みでは、非常 に深刻な赤外発散が予想され、理論的には、かなり大胆な理論であった。しかし、この深刻な赤 外領域での発散は、むしろ、長距離でクォーク間の相互作用が強くなり、カラーを持ったクォー クは、ハドロンの中だけで存在し、外部に出てこないのではという予想が出された。しかし、QCD を記述する非可換ゲージ理論は、グルオン自身が複雑な自己相互作用をするゲージ場となってお り、数学的にも極めて難解な理論である。

その後、現実の世界である無限大の 3+1 次元ミンコフスキー空間の理論をユークリッド4 次元 空間に持っていき、しかも空間自体を、有限の大きさ V、連続点でなく格子点でのみ自由度を持つ ような 4 次元の格子上の理論(格子間間隔 a) に制限し、その上で QCD を記述し、有限自由度の量 子力学系とし、計算機を利用して、モンテカルロ法で様々な物理量を計算し、最後に格子空間サ イズ Vを無限大、格子間隔 aをゼロにとる極限をとって、連続での QCD を調べる手法[1]が導入さ れ、摂動計算によらない厳密な非摂動的な QCD 研究が発展してきている。これまでの、モンテカ ルロ法での研究で、たしかにクォークー反クォーク間には、距離に比例する線形のポテンシャル が、働いており、離せば離すほど相互作用が強まり、切り離すことができない、つまり閉じ込め が起こっていることが示された[2]。しかし、なぜそのようなことが生じているのかは、解明され ていない。

#### 2. クォークの閉じ込め機構の研究

QCD の提唱直後から、分数荷電粒子が未発見であることから、クォークのカラー自由度を閉じ込める機構が、QCD にあるのではないかという考えが提唱された。もっとも有力なのは、1974 年にtHooft {3}と Mandelstam[4]が独立に提唱した描像で、金属などで知られている超電導現象を説明

するマイスナー効果と類似で電場一磁場を入れ替えたような双対マイスナー効果が起こっている のではないかという考えである。超電導状態では、外から磁場をかけたとき、磁場を強くすると、 超電導体中に外部磁場が線形に絞られて浸透するという現象が知られている。この現象を説明す るのが、マイスナー効果とよばれ、超低温になると電子間に働く格子との引力が、クーロン斥力 より大きくなることで、クーパー対というボーズ統計に従う結合状態を構成して、基底状態に凝 縮することで、生じる電荷マイナス2の超電動電流によっておこることがわかっている。この現 象の電場と磁場を入れ替えた描像、つまり、QCDの中に、なにかカラー磁気的なモノポールが含ま れていて、それが真空に凝縮して、カラー電場を閉じ込めるという考えである。しかし、普通の 超電導での世界は U(1)の可換理論で取り扱いは容易であるが、QCD は SU(3)という非可換ゲージ 理論であり、何が磁気的なカラーモノポールであるかということは、まったく不明であった。1981 年に、tHooft[5]が、SU(3)理論を本来不必要な追加の部分的なゲージ固定をおこない、SU(3)の最 大可換部分群である U(1)XU(1)のみを残すようにすると、ゲージ固定後でも残っている U(1)xU(1) 理論でのゲージ場が、可換な光子場とみなせ、さらにゲージ固定のための関数が singular となり、 その singularity を出す時空点に磁気的カラーモノポールが出てくるということを見つけた。そ れらのカラーモノポールが、真空に凝縮すれば、対応する可換なゲージ場にあたる電場が絞られ て閉じ込めを示せるという考えである。この考えは、格子上での QCD で調べられ、特に特別な部 分ゲージ固定、最大可換ゲージでは、多くの重要な結果が示された。しかし、tHooft のこの考え 方は、詳細は省くが、多くの深刻な問題があって、一般的には受けいられていない。そもそも本 来不必要なゲージ固定に依存する考えで、不自然である。

#### 3. 新しいカラーモノポールの提唱

2014年に筆者は QCD における新しいカラーモノポールのアイデアに気が付いた[6]。QCD は、ク オークとグルオンから構成される理論であるが、閉じ込めを引き起こす機構は、グルオンの自己 相互作用にあると考えられている。グルオンは別のカラー電荷をもって 8 個存在するが、お互い に複雑な相互作用をしている。質量はゼロで、相互作用定数は、質量次元を持っていない。まっ たく質量次元の定数を含んでいない理論から閉じ込め機構が働いて、弦定数などの質量を説明し なければならない。tHooft のような人為的な仮定を持ち込まずに、カラー磁気的なモノポールを 発見することが、極めて大切なことである。筆者は 2014 年にイタリアのピサのグループの仕事を 読んで、重要な事実を発見した。それは、ゲージ場そのものが、半無限の線上の異常を持ってい て、微分が可換とならないとすると、つまり通常は、成立する非可換ビアンキ恒等式が破れるこ と、そしてその破れが、カラー磁気的モノポールの存在につながる可換なビアンキ恒等式の破れ と等価であるという関係式である。

ゲージ場を $A_{\mu}(x)$ と書く。もしも  $[\partial_{\mu},\partial_{\nu}]A_{\alpha}(x) \neq 0$  とすると、電場、磁場にあたる反対称2階テン

ソル場  $f_{\mu\nu}(x) = \partial_{\mu}A_{\nu}(x) - \partial_{\nu}A_{\mu}(x)$  の dual テンソル場つまり  $f_{\mu\nu}(x) = 1/2\epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}f_{\alpha\beta}(x)$  が、

 $\partial_{\mu} f_{\mu\nu}(\mathbf{x}) \neq 0$  となって可換な磁気的なモノポールを生じる。

この関係式は、極めて単純なものであるが、これまでは、場の演算子はそのような微分交換不可能な異常性は持っていないということが、暗黙裡に仮定されていたし、通常の公理論的な場の 量子論では、前提となっていた。しかしそのような証明や根拠は存在していない。実際、1931年 にDirac[7]が通常の電磁気学の量子力学の中で、磁気的なモノポールが存在できるかということ を考察した。その際、わかったことは、電磁場を記述するゲージ場が、微分交換不能な半無限の 線形異常性を持っておれば、量子力学を矛盾なく定式ができるということを示した。しかし電磁 気学では、実験的には電荷をもった粒子のみで、磁気的なモノポールは発見されていないため、 このようなゲージ場の異常性については、未発見である。

#### 4. 新モノポールの重要性の検証

#### 4.1 閉じ込めが8個の可換ゲージ場ごとに可換な現象として、成立していること

閉じ込め機構が生じていることは、非可換ゲージ場でできる Wilson loop と呼ばれる物理量の 測定値が、面積側を示すこと、つまりクォークー反クォーク間に線形のポテンシャル V(r) = or が生じて、クォーク間を引き離そうとすることができないことから示される。グルオンの 電場は、実際は 8 個のカラー成分からできているので、この結果は、いわばカラーに関する平均 操作された結果といえる。われわれは、Multilevel 法と呼ばれる非常に有力な方法を適用して、 カラー1 種類の可換ゲージ場のみの電場を測定することで、まったく同じ線形ポテンシャルと弦 定数が得られることを示した。この計算は膨大な計算量が必要で、必要となる internal update としては、格子サイズによるが、16<sup>3</sup>×16 という場合でも 1000 万回という膨大な計算が必要であ った。得られた結果の典型例を示す。

$\beta = 5.6, 16^4$	$\sigma a^2$	С	μα
$V_{ m NA}$	0.239(2)	-0.39(4)	0.79(2)
$V_{ m A}$	0.25(2)	-0.3(1)	2.6(1)

上記の表で V<sub>M</sub> は、カラー平均化された非可換ポテンシャルで V<sub>A</sub> が一つのカラー成分に限定した 値である。赤字の部分が、弦定数を示している。両者が、誤差の範囲で一致していることがわか る。

#### 4.2 モノポールのみが線形ポテンシャルを説明すること

次に、この絞られた可換なカラー電場の振る舞いが、モノポールによるソレノイド型のカラー 磁流によって生じていることが双対マイスナー効果の予言である。

このことは、可換なゲージ場が、モノポールの寄与とそれ以外の寄与に分離でき、モノポ ールの寄与の部分のみが、線形ポテンシャルに寄与しているということから示される。この 計算は、モノポールの寄与が非局所演算子を含むので、Multilevel 法は利用できない。そこ で、ただひたすらに膨大な真空配位を用いて、モンテカルロ計算による平均操作が必要であ った。もっともきれいに得られた計算結果を示す。この場合では、なんと 24 億個の真空配位 が必要であった。

<i>SU</i> (3)	$\sigma a^2$	С	μα	FR( <i>R</i> / <i>a</i> )	<b>χ</b> 2/ <b>N</b> df
VNA	0.193(4)	0.422(3)	1.146(20)	1 - 10	0.99
$V_{\rm A}$	0.184(15)	0.458(97)	2.912(80)	1 - 9	1.10
Vmon	0.188(16)	0.453(99)	2.906(82)	1 - 8	0.97

$V_{ m ph}$	0.0014(2)	0.073(5)	1.521(3)	1 - 11	1.00
-------------	-----------	----------	----------	--------	------

上記の表で、*V<sub>mon</sub>*がモノポールの寄与である。赤字の部分が弦定数である。非可換部分、可換部分、モノポールの寄与の弦定数が、きれいに一致していることが示されている。



Sum of (a) solenoidal and (b) Coulombic electric fields creates (c) a flux tube.

#### 4.3 双対マイスナー効果の証明

直接に可換なゲージ場が絞られ、浸透長が非可換部分と同様になること、ソレノイド型の モノポール磁流のみがその周りをまわっていること、さらに磁場の相関距離と呼ばれる量を、 SU(3) QCD でも測定した。まだ、preliminary な結果ではあるが、真空のタイプを決める Ginzburg-Landau 係数(浸透長と相関距離の比)を測定すると、タイプ1の真空かタイプ1, 2境界領域であるという暫定的な結果も得ている。

#### 5. 新モノポールの連続極限の存在に関する証明

#### 5.1 モノポール密度の連続極限

上記の結果は、格子上で得られた。格子間隔がゼロの連続の時空点、および無限大の空間の現 実の世界で、モノポールが、実際に存在し、クォークの閉じ込めを起こしているかどうかを示す 必要がある。そのために、まずは、上記のモノポールの密度という物理量を測定し、連続極限を 調べた。モノポール密度は、正定値をとる量であるので、格子上で定式化するとどうしても避け られない人為的な連続極限では存在しないモノポールが、真空配位に無数に表れるが、これがす べてモノポール密度に寄与する。そこで、まずは、真空配位をそういう人為的なモノポールが鳴 るだけ生じないような滑らかな真空配位を発生させるようにしなければならない。そのために、 3つの方法を導入した。最初の方法は、連続極限が調べやすい改良されたゲージ作用を採択した。 2番目は、これまで滑らかな真空配位を生成するとして知られている4種類の異なる追加的なゲ ージ変換を行った。最大センターゲージ(MCG)、Direct Laplacian センターゲージ(DLCG),最大可 換Wilson-loop ゲージ(MAWL),最大可換ゲージ(MAG)の4種類である。3番目は、もっとも重要な 手法で、モノポールのブロックスピン変換の導入とブロックスピン繰り込み群による考察である。 ブロックスピン変換の模式図は以下のようである。



ex. n=3

ブロックされた格子上(格子間隔b = naでのモノポール(左辺)ともとの格子(格子間隔 a) モノポール(右辺)

$$k_{\mu}^{(n)}(s_n) = \sum_{i,j,l=0}^{n-1} k_{\mu}(ns_n + (n-1)\hat{\mu} + i\hat{\nu} + j\hat{\rho} + l\hat{\sigma})$$

n = 1, 2, 3, 4, 6, 8, 12 blockings are adopted on  $48^4$  lattice.

$$\boldsymbol{\rho}(a(\beta), n) = \frac{\sum_{\mu, s_n} \sqrt{\sum_a (k_\mu^{(n)a}(s_n))^2}}{4\sqrt{3}V_n b^3}$$

上記の左辺がモノポール密度の定義であるが、もともとは格子間隔 a とブロッキングの回数 n の 2 点関数である。しかし、このモノポール密度を、ブロックされた格子間隔、b=na でプロットす ると、下に添付する図のように、モノポール密度は、b=na(β)のみの関数として、きれいな一様 の関数で記述されることが分かった。この事実は、まさにこのモノポールが連続極限を持ってい ることを示している。なぜなら、bの固定した点で、ブロックスピンの回数を無限大にすると格子 間隔 a はゼロとなるからである。これは、連続極限である。



I: Comparison of the VNABI (Abelian-like monopoles) densities versus  $b = na(\beta)$  in MCG, AWL, DLCG and MAU1 cases. A uniform curve is obtained for all gauges.

#### まとめ

筆者の一人、鈴木が 2014 年に発見した事実、つまり昔 Dirac が電磁場でのモノポールの 量子力学でみつけたような、ゲージ場に半無限の微分の非可換性を許す異常性の存在を許す と、不自然な仮定をせずとも、QCD に可換なモノポールが導入できるという発見を、極めて 大規模な長時間のモンテ・カルロ法を用いた格子上での QCD の計算で、確かめる研究を行っ た。予想通りのことが、生じていることが見つかった。まだ完全な連続極限を示すには、追 加の計算が必要であるが、現時点までの結果を報告した。

#### 謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンター、大阪大学サイバーメディアセンターおよび高エネルギー研究所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。 非常に多くのデータを必要とし、予想以上に極めて難解な計算であったため、SX-Auroraで全体として4万NH以上の計算を必要とした。また、研究にあたっては上記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] K.G. Wilson, Physical Review D 10 (1974) 2445

- [2] M. Creutz, Physical Review D21 (1980) 2308.
- [3] G. 't Hooft, Proceedings of the EPS International (1976) 125.
- [4] S. Mandelstam, Phys. Rept. 23 (1976) 245.
- [5] G. 't Hooft,, Nucl. Phys. B190 (1981) 455.
- [6] T. Suzuki, HEP arXiv:1402.1294 (2014)
- [7] P. A.M. Dirac, Proc. Roy. Soc. (London) A 133 (1931) 60.
- [8] T.Suzuki, K.Ishiguro, V.Bornyakov, Phys. Rev. D 97 (2018) 034501.
- [9] T. Suzuki, Phys. Rev. D 97 (2018) 034509
- [10] T. Suzuki, A. Hiraguchi and K. Ishiguro, Report in APLAT 2020

[11] T. Suzuki, Proceeding of Lattice 2021., July, 2021[12] A. Hiraguchi, Proceeding of Lattice 2021, July, 2021

### 複数領域時間領域差分法(MR-FDTD)法を用いた Frequency Modulated

### Interrupted Continuous Wave(FMICW)レーダの

### 電磁界シミュレーション手法の開発

有馬 卓司, 宇野 亨 東京農工大学 大学院 先端電気電子部門

レーダとは電磁波を対象物に照射しその散乱波から情報を得るものであるが、様々な分野で活 用されている.海流などを監視する海洋監視には、古くからレーダが用いられてきた.また現在 は、一般的な乗用車にもレーダが装備されつつある.海洋監視レーダでは海洋上の海流の速度と 方向だけでなく漂流物の位置を検出することもできる.また、乗用車に用いられているレーダで は、前車との間隔や速度差を検出できる.これらのレーダは FMICW (Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave) 方式が用いられている. 今後 FMICW レーダの高性能化のために、 電磁界シミュレーションを用いた解析が重要である.本報告では、FMICW レーダの電磁界シミュレ ーション手法について述べる.シミュレーションには、複数領域 FDTD (Multi-Region Finite Difference Time Domain) 法を用いた.

#### 1. FMICW レーダ

本節では FMICW レーダについて簡単に述べる. 図1に海上監視に用いられる FMICW レーダ[1]の 配置図を示す.海上監視用 FMICW レーダにおいては,一般的に電波を送受信するアンテナは地上 に設置され,アンテナから海面に向けて電波を放射する.電波は海面に当たりその一部は散乱し, 地上に設置された受信アンテナによって受信される. もし,海流があると散乱波はドップラーシ フトにより送信した周波数とは異なる周波数となる. ドップラーシフトによる周波数の変化Δ*f* は 送信周波数を*f* とすると

$$\Delta f = \frac{2V}{c_0} f_r \tag{1}$$

と計算できる.ここで、Vは海流の速度、C<sub>0</sub>は電波の速度である.FMICW レーダにおいてはドップ ラーシフトしている海面からの散乱波と送信波をかけ合わせる.この掛け合わせた信号は異なる



図1 海上監視用 FMICW レーダの配置

周波数の信号をこの掛け合わせていることからビート信号と呼ばれる.そして、このビート信号 にはドップラーシフトによる周波数シフト $\Delta f$ の成分が多く含まれるので、ビート信号をフーリエ 変換することで $\Delta f$ を求めることが出来る. $\Delta f$ が求まれば、(1)式より海流の速度を求めること が出来る.さらに、FMICW レーダにおいては、送信しながら周波数を変えている.これは周波数掃 引と呼ばれる.よって、受信する散乱波は時間によって周波数が異なる.送信時間が分かってい れば、散乱波の周波数より距離が分かるので、FMICW レーダでは広範囲の海上を高速に監視するこ とが出来る.海上監視用のFMICW レーダではこのようにして、海流を検出している.

#### 2. FMICW レーダの電磁界シミュレーション

本研究では、解析対象が複雑なモデルでも比較的容易に解析できる FDTD 法[2]を用いて FMICW レーダのシミュレーションを行う.この手法は、電磁界を支配するマクスウエルの方程式を直接 差分し、電界および磁界を求める手法である.差分法は一般的に計算量が多くなることが知られ ており、FDTD 法も多くの計算機資源が必要となる.FDTD 法の計算量を削減する手法がいくつか提 案されている.計算削減手法の一つに複数領域 FDTD 法[3]が提案されている.この手法の概念を 図 2 に示す.



図2 複数領域 FDTD 法の概念

図2は、左側の領域に波源(アンテナ)があり、少し離れた領域に散乱体が存在する領域がある. この図に示すように、複数領域 FDTD 法においては、解析空間中で波源や散乱体のない自由空間 (図2中では左右の領域の間の空間)の計算を FDTD 法では行わず、数学的にその結合を評価する 手法である.この手法は、FDTD 法自体の計算領域を大幅に減らせる事から計算量の削減が期待で きる.一方、複数領域同士を結合するには複雑な積分計算が必要になる.領域2における電磁界 を、領域1の電磁界から数学的手法で求める方法を説明する.まず、図2の左の領域内に仮想的 に設置された青枠で示される閉曲面上の電界および磁界より、等価電流Jおよび等価磁流 M を求 める.そして求まった等価電磁流および自由空間のグリーン関数 G を用いて、右の領域における 電界は(2)式のように求められる.

$$\mathbf{E}_{2}(\mathbf{r}_{2},\omega) = \int_{S_{1}} \left[ -j\omega\mu \mathbf{J}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega)G(\mathbf{R}) - \mathbf{M}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega) \times \nabla_{1}G(\mathbf{R}) + \left\{ \hat{\mathbf{n}}_{1} \cdot \mathbf{E}_{1}(\mathbf{r}_{1},\omega) \right\} \nabla_{1}G(\mathbf{R}) \right] \mathrm{d}S_{1}$$
(2)

(2)式中で、R は左の領域から右の領域に向かうベクトルである.また、 $\hat{\mathbf{n}}_1$ は左の領域に設定した 仮想閉曲面の法線ベクトルである.この面積分を行えば、左の領域で生じた電磁界を基に右の領 域において正しい電界を再構成できることを示している.この面積分によって電界を再構成する 原理は等価定理と呼ばれている.磁界についても同様に再構成できる.一方,(2)式の計算は、右 の領域の点の電界を求めるために、左の領域に設置した仮想閉曲面全体にわたり積分を実施する 必要がある.すなわち、図 2 の右の領域に示す赤枠の仮想的な閉曲面上のすべての電磁界を再構 成するには膨大な計算量となることが分かる.また、この手法を高速度化する方法も提案されて いる[4][5].この手法は、四分木モデル[6][7]を用いている. 次に、FDTD 法においてた FMICW レーダの解析手法を説明する. FDTD 法は時間領域の解析手法で あり、FDTD 法内での解析時間は、数n(ナノ:10<sup>-9</sup>) 秒程度と大変短い時間である.海流による海 面の移動速度は数十 km/h 程度であり、数n 秒の間にはほぼ移動しないので通常の FDTD 法を用い てこの FMICW レーダの解析を行うのは難しい.理論的に FDTD 法における計算時間を数十秒程度ま で延ばせば海面の移動によりドップラーシフトが観測できるかもしれないが、これは数 n 秒の解 析に数分以上の解析時間が必要な現状から考えると、現在の計算機の性能では非常に難しいとい える.そこで、本研究では次の方法を用いて解析を行う.解析の概念を図 3 に示す.まず、海面 の波を再現し、海流を止めた状態で FMICW の送信波を送信し、散乱波を観測する.FMICW の送信波 図 3 の上段に示されているように、時間とともに周波数を変化させている.このことを周波数掃 引という.そして観測した散乱波の FFT(高速フーリエ変換)を行う.この結果



図3 FDTD 法における FMICW レーダの解析

は上述したように, 海面を静止した状態でのアンテナからの距離に相当する. そして, ある時間 が経過したとして, 海面を経過時間に相当する距離分だけ移動させる. 例えば, 解析ごとの経過 時間を1秒とすると, 海流の速度が時速 30km/h では, 経過時間ごとに 8.33m 移動するので, 海面 をこの距離だけ移動させ再度 FDTD 法を用いて散乱波をシミュレーションする. このように経過時 間ごとに海面を移動させて FFT を行う. この FFT を1回目の FFT と呼ぶ. そして, 1回目の FFT 波 形のスペクトルは距離に対応しているので, ある距離のデータをならべて再度 FFT を行うと, 海 面の移動によるドップラースペクトルが観測できる. このようにシミュレーションを行うと距離 ごとの海流の速度を解析できる.

#### 3. FMICW レーダの電磁界シミュレーション結果

実際に複数領域 FDTD (MR-FDTD) 法を用いて,海上監視を目的とした FMICW レーダの解析を行った.解析モデルを図4に示す.解析モデルでは,アンテナを含む領域を Region1とし,1km 離れた幅 248mの海面および散乱体を含む領域を Region2として,MR-FDTD 法で解析している. Region 1には送信アンテナとして垂直偏波のダイポールアンテナを設置した. Region2 には海面上に波を設定している.なお海水は金属としてモデル化した.FMICW レーダの中心周波数は 24.5MHz,掃引周波数は 3MHz とした.FDTD 法のセルサイズは 40cm としている.

まず基礎検討として、散乱体の無い海面のみのモデルを用いてシミュレーションを行った. 解 析においては、海面を止めた状態で解析し、解析間隔を 0.5 秒とし、次の解析においては、0.5 秒 で海面が移動したとして、導体の海面の位置をずらして解析する. この解析を 256 回行った. 解 析結果を図5に示す. このように、想定通りの-0.5Hz に強いスペクトルが観測されている. 複数領域時間領域差分法(MR-FDTD)法を用いた Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave(FMICW)レーダの電磁界シミュレーション手法の開発



図4 シミュレーションモデル



次に,海上の漂流物のFMICW レーダによる検出をシミュレーションした.まずは海面を考えず, 漂流物のみの解析を行った.漂流物が+x方向に1.5 m/s で移動するモデルをシミュレーションし た.配置した漂流物は,大きさが 5m×5m×4m の完全導体とした.解析においては,海面の移動速 度のシミュレーションと同じく導体を止めた状態で解析し,解析間隔を 0.5 秒とし,次の解析に おいては,0.5 秒で導体が移動したとして,導体の位置をずらして解析する.この解析を 256 回行 ったので,導体は解析の間に 191.25m ほど移動している.解析結果を図 6 に示す.スペクトルよ り散乱体が移動していることが確認できた.観測されている位置は帯を引いているがこれは散乱 体がある程度の体積を持っているため,多重反射が起きていると考えられる.

-19 -



また,散乱体が比較的小さかったためスペクトルが小さく比較的スペクトルの範囲が広がった可能がある.次に実際に,海面上に漂流物がある際のシミュレーションを行った.海面上の波はサイン波でモデル化している.導体は先ほどと同じく,アンテナから遠ざかる方向に 1.5 m/s で移動するよう設定した.解析結果を図7に示す. 図7においては,±0.5 Hz に海面の波の位相速度による強いドップラースペクトルが現れていることが確認できる.また,図6のときと同じく,-0.25の部分に弱いが,スペクトルが現れていることが確認できた.このスペクトルは漂流物を配置することによって現れたスペクトルである.この結果より,海面上の移動する漂流物のスペクトルを解析できた.



#### 4. まとめ

本研究では、海上監視用 FMICW レーダの解析を目的に、FDTD 法で解析を行った.解析には遠方の解析になるために、MR-FDTD 法を用いた.海面および散乱体は FDTD 法の解析中は動かないものとし、ある時間間隔で動いたとし、位置をずらして解析を行った.解析結果より、適当な位置にスペクトルが現れており妥当な解析が行えていることが分かった.

#### 謝辞

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

-20 -

#### 参考文献

- [1] 土木学会,海岸工学委員会 "陸上設置型レーダによる沿岸海洋観測"(土木学会, 2001)
- [2] 宇野亨,何一偉,有馬卓司,数値電磁界解析のためのFDTD法,コロナ社,2016
- [3] J. M. Johnson, Y. Rahmat-Samii, MR/FDTD: A Multiple-Region Finite-Difference Time-Domain Method, Microwave and Optical Technology Letters, vol. 14, no.2, pp.101-105, February 1997
- [4] 有馬 卓司, 宇野 亨, "複数領域 FDTD (時間領域差分) 法の高速化", SENAC Vol.53, No.4, 2020.10
- [5] K. Asahi, T. Arima, A. Uematsu, T. Nishibori and T. Uno, "Space-Time Adaptive Processing Concept for Calculation Speed Improvement in Multi-Region/FDTD Method," in IEEE Journal on Multiscale and Multiphysics Computational Techniques, vol. 6, pp. 92-99, 2021, doi: 10.1109/JMMCT.2021.3101493.
- [6] R. A. Finkel and J. L. Bentley, Quad trees a data structure for retrieval on composite keys," Acta Informatica, vol. 4, pp. 1-9, 1974/03/01 1974
- [7] G. J. Sullivan and R. L. Baker, Efficient quadtree coding of images and video, IEEE Transactions on Image Processing, vol. 3, no. 3, pp. 327-331, May 1994

-21 -

-22 -

### 乱流パフの時空間欠性と DP 普遍性に関する一考察:

### 環状クエット・ポアズイユ流の直接数値シミュレーション

竹田 一貴†・森松 浩隆†・塚原 隆裕‡

\* 東京理科大学大学院 理工学研究科 機械工学専攻 \* 東京理科大学 理工学部 機械工学科

乱流の発生・維持に関する根本的な問いの一つとして,壁乱流の亜臨界乱流遷移問題がある. 古くは19世紀より,パイプ流の乱流遷移が実験的に研究されてきたが,そのメカニズムは難解で, 流体運動の非線形性ゆえに遷移の普遍則における境界条件依存性については理論的アプローチに よる解釈も難しい.近年,大規模なベクトル型計算機の並列計算の高効率化が実現し, Navier-Stoke 式を直接解く直接数値シミュレーション (DNS)で,巨大流路実験をもってしても観測困難なほ どの長時間にわたる乱流を追跡した観測が可能となった.

本研究では、パイプ流を模擬するような同軸二重円筒間で駆動方法が複合的なせん断流である 環状クエット・ポアズイユ流を対象として、乱流-層流共存の間欠パターン形成に関する内外円 筒の半径比依存性やパターンの時空間欠性に関する普遍性を調査した.本解析では大規模領域を 対象としており、局在乱流(乱流パフ)の確率的挙動を捉え、パイプ流における典型的な乱流パ フとの比較、有向浸透現象(directed percolation, DP)の普遍性との特徴量を評価した.

#### 1. 序論

流れには異なる性質を持つ「層流」と「乱流」があり、これらは流動の複雑具合によってエネ ルギ散逸率が大きく異なる.流動していても渦の生成に乏しく定常的な流れとなる「層流」は流 れの自由度が低く、制御が比較的容易であるが、エネルギ散逸率が低い、一方で、大小様々な渦 が混在し絶え間なく新たな渦を生成する「乱流」状態はエネルギ散逸率が高い. さらに、物質の 高い拡散性や活発な運動量・熱輸送が特徴である。この乱流状態は、工学的側面として原料を十 分均一に混ぜ込む必要のある化学薬品生成、薬剤をはじめ化粧品や食品の攪拌、また高い伝熱特 性を要求する熱交換器で利用されている.こういった利点の反面,乱流は強非線形・非定常で流 動を予測しにくい.また,航空機の翼面で発生する摩擦抵抗を低減し省エネルギ化を目指すうえ で, 翼面上の流れを層流に保ち乱流化を防ぐ技術開発などは工学的に重要である. 他にも, 自然, 社会, 産業においても流体の流動現象は切っても切れない関係にあり, 気象予報, 自然災害軽減, 感染症拡大、製品性能向上において、流れの再現と予測が鍵となっている。近年、それらの解析 では数値流体力学(CFD)シミュレーションが大きな役割を果たしており、身の回りに溢れる空 気や水など様々な流体の流れについて我々は須らく CFD の恩恵を受けて生活している. この層流 と乱流の切替わり、いわゆる乱流遷移に関する研究の歴史は古く、15世紀の Leonardo da Vinci に よる渦のスケッチ(流路から流れ出た層流が池に流入し無数の渦を生成する様子),19世紀の Osborne Reynolds によるパイプ流乱流遷移の実験的観測と定量評価を本格的な研究の始まりとし ている.本研究は、乱流遷移の一つである亜臨界乱流遷移に着目したものである.

壁面せん断流の亜臨界乱流遷移では、レイノルズ数 *Re*(e.g., *Re*bulk = 管内平均流速 × 管直径 ÷ 作動流体動粘度)が、自発的な層流の乱流化を考える線形安定性理論から求まる臨界値 *Re*L より もはるかに低いにもかかわらず、乱流維持することが知られている. さらに、この亜臨界遷移域 において、特に完全な層流化を引き起こす直前のレイノルズ数で、特徴的な層流と乱流の共存構 造(いわゆる大規模な乱流間欠構造)を形成することが分かっている. この共存構造の形成は低

いレイノルズ数において起こるにも関わらず、層流状態に比べ高い伝熱特性・物質拡散性を有し ており、亜臨界遷移状態の積極的な利用が期待されている。例えば、前述の馴染みあるパイプ流 では,流れの駆動方向に層流と乱流が間欠的に分布する1次元間欠性として,「乱流パフ」が形成 される[1]. しかし、これら局在乱流は時空間的に大規模なスケールで現れるため、その形成メカ ニズム、時空間欠性や遷移の普遍性については、理論的なアプローチが難しく未解明問題の一つ であった.近年では,並列計算技術や大型ベクトル並列計算機の利用によって,乱流モデルを一 切用いない直接数値シミュレーション(direct numerical simulation, DNS)を超大規模スケールで行 うことが可能になり、Hof グループを中心に大規模な実験と DNS が行われ、乱流パフの分裂と減 衰に要する時間のレイノルズ数依存性を発見し、その大域安定性から永久的に乱流維持可能な下 限値の下臨界値 Reg (= 2040) を見出した[2,3]. また,チャネル流(平行平板間流) でも Reg 近傍 では、チャネル幅の数百倍のスケールを有した帯状の局在乱流、それらが複数整列したストライ プ構造が形成される[4,5]. 他のせん断流でも, それぞれ特徴的な局在乱流構造が確認され始めた [6-8]. さらに、これらの局在乱流はいずれも、決定論的な支配方程式に従いながらも確率的な分 裂減衰挙動を呈し、一度完全に層流化すると自発的に乱流化することはないという吸収状態転移 の観点から,有効浸透現象(directed percolation, DP)との関連性が活発に議論されている.いく つかのせん断流では、それぞれ特徴的な局在乱流構造が確認されると共に時空間欠性の統計量評 価がなされており, Pomeau [9]が予言した DP 普遍クラスとの関連性が実証されつつある[10-16]. 具体的には、乱流パフの様に間欠構造が空間1次元的に広がりを持つ(1+1)-DDP,または空間2次 元的な(2+1)-D DP の特徴が報告されているが、2 つの DP 普遍クラスを決定する境界条件依存性 などはいまだ不明である.

同軸二重円筒間の環状流路において, 亜臨界遷移で形成される局在乱流構造の流路形状依存性, 流れの駆動方法(クエット/ポアズイユ)依存性は興味深く,流路形状を決定する幾何パラメー タの円筒比  $\eta = r_{in}/r_{out}$ [0:1]によって間欠構造は次のように整理される.低円筒比( $\eta \leq 0.3$ )の流 路では乱流パフに準ずる1次元間欠構造が,高円筒比( $\eta \geq 0.5$ )ではストライプ構造に準ずる空 間2方向に間欠性を持つ螺旋構造が形成される[14,16–20].つまり,円筒比に応じてパイプ流も しくはチャネル流における亜臨界遷移の特徴が,この環状流路において表出する.この系を研究 対象とすることで,チャネル流〜パイプ流の繋がり(もしくは不連続性)が調査できる.しかし, 環状クエット流と環状ポアズイユ流のいずれも,円筒比 $\eta \rightarrow 0$ で厳密にパイプ流とは一致せず, チャネル流〜パイプ流を滑らかに接続して考えることは不可能であった.そこで,本研究対象と して,パイプ流の基本流を模擬するべく,環状クエット・ポアズイユ流に設定した.

本研究では、環状クエット・ポアズイユ流の亜臨界遷移域の下臨界値(大局的臨界値 Reg)近傍 において、クエット成分・ポアズイユ成分の強さを調整することでパイプ流の流速分布を模擬し たうえで、局在乱流(乱流パフなど)の形状、挙動に関する流路円筒比依存性を調査した.また、 大規模計算機を活用することで、数値計算特有の周期境界条件の影響を極力排除すべく、可能な 限り巨大な主流方向領域を設定し、乱流パフの時空間欠性について、より大域的に起こる局在乱 流の広がりと維持に関する本質と DP 普遍性の関連性に迫った.



図1 環状クエット・ポアズイユ流の模式図と座標系.本研究では2つの駆動方向は一致する.

#### 2. 計算対象と方法

非圧縮性ニュートン流体の環状クエット・ポアズイユ流(図1)が解析対象であり,軸方向(x) には周期境界を課して無限の管路を表現している.ただし,計算領域は有限長であり  $L_x = 409.6h$ または 1500h とした.本解析系は同軸二重円筒系で,軸方向への内円筒のスライドと圧力勾配に よって駆動する複合的な壁面せん断流である.また,流路形状を決定する幾何パラメータである 円筒比 $\eta$  (= $r_{in}/r_{out}$ )について,1の極限をとると無限に広いチャネル流,0の極限をとると太さ 無限小の内円筒を外円筒の中心に持つパイプ形状流路となる.前報[21]では内円筒のスライド駆 動のみであったため, $\eta \rightarrow 0$ でも流速分布はパイプ流のそれには漸近しない.しかし,環状クエッ ト・ポアズイユ流では,流れの駆動方法のクエット成分とポアズイユ成分(圧力勾配)の強さを 調整することでパイプ流と同等の流れを解析することができる.本報告では,パイプ形状に近い 低円筒比 $\eta = 0.1$ , 0.3の流路における結果を紹介する.

流体の速度  $\mathbf{u} = (u_x, u_r, u_\theta)$  と圧力 p に関する支配方程式は、円筒座標系の連続の式及び Navier-Stokes 方程式である.式 (2) の最終項はポアズイユ成分、つまり圧力勾配駆動を表す外力項であり、 $F_p$ に関する圧力 P は場に依存しない定数である.また、式 (1)-(3) の上添え字 \* は代表速度の内円筒スライド速度  $U_w$ 、内外円筒の半径差(ギャップ幅) $h = r_{out} - r_{in}$  による無次元化を表す.

$$\nabla^* \cdot \mathbf{u}^* = \mathbf{0},\tag{1}$$

$$\partial_{t^*} \mathbf{u}^* + (\mathbf{u}^* \cdot \nabla^*) \mathbf{u}^* = -\nabla^* p^* + \frac{1}{Re_w} \Delta^* \mathbf{u}^* + \frac{F_p}{Re_w} \mathbf{e}_{\mathbf{x}},$$
(2)

$$F_p \equiv -\frac{\mathrm{d}P^*}{\mathrm{d}x^*} \cdot Re_w = -\frac{h^2}{\mu U_w} \frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}x}.$$
(3)

ここで, *t* は時間,  $\mu$  は粘度である. レイノルズ数は, 動粘度 *v* を用いて  $Re_w = U_w h / v$  と定義した. これは, 平面クエット流での一般的な定義の 4 倍の値となる[22].

基本流について、クエット成分とポアズイユ成分の調整は $F_p$ で制御する.例えば、基本流である層流状態の流速分布に限って図2に紹介する.このとき、層流流速分布が Hagen-Poiseuille flow (HPf) と一致する(内円筒壁面で速度勾配がゼロとなる)には、 $F_p$ が次式を満たす必要がある.

$$F_{p \text{ HPf}}(\eta) = -4 \frac{(1-\eta)^2}{\eta^2 (1-2\ln\eta) - 1}$$
(4)

円筒比を問わず,その層流解が図 2 (a,b)の黒破線のような HPf の流速分布として得られている. 図 2 の環状クエット・ポアズイユ流 (aCPf)の層流状態における主流方向流速分布は、クエット 成分 (紫色)とポアズイユ成分 (緑色)の線形和で表現される.しかし、本研究では乱流を対象と しているため、その非線形性から亜臨界遷移で見られる乱流一層流共存構造についても、単純に 環状クエット流 (aCf)と環状ポアズイユ流 (aPf)の要素の線形和として理解することはできない. また、亜臨界遷移下での流れは層流と乱流が共存しているため、 $F_p$ の値は図 2 (d 実線)よりも高 く設定してある.例えば、 $Re_w$ =1600の場合、 $F_p$ =6.5を採用しており、内円筒壁面で摩擦抗力係 数は  $C_{fin}$ =0の要件を厳密には満たしていない.ただし、内円筒近傍での乱流生成が支配的でない 観点からすると、ナイーブな問題にはならない.

本解析は一切の乱流モデルを用いない直接数値解析(direct numerical simulation, DNS)を採用した.境界条件は円筒壁面で滑り無し条件,軸・周方向には周期境界条件を課した.本 DNS では,スタガード格子を採用し,周方向に256分割の格子数,主流方向の格子数は4096もしくは16384, r方向には不等分割格子にて64分割とした.時間刻み Δt は CFL 条件を満たす可能な限り大きな値を用いている.式(1),(2)のカップリングには Fractional-step 法を用いた.時間進行は粘性項 半径方向成分について2次精度 Crank–Nikolson 法を,その他の項に2次精度 Adams–Bashforth 法を用いた.空間的離散化には有限差分法を用い,主流及び周方向に4次精度中心差分を,半径方向に不等分割格子の2次精度中心差分をそれぞれ適用した.非圧縮性流体における圧力ポアソ



図2 環状クエット流 (aCf) と環状ポアズイユ流 (aPf) の層流流速分布の線形和で表される環 状クエット・ポアズイユ流 (aCPf) の流速分布. (a) 低円筒比流路  $\eta = 0.1$ , (b) 高円筒比流路  $\eta$ = 0.9 では圧力勾配関数  $F_p$ の適切な設定により,円管内流れの層流流速分布 (Hagen-Poiseuille flow, HPf) を忠実に再現している.HPfの模擬だけでなく,例えば,低円筒比流路  $\eta = 0.1$  で $F_p$ = -2 とすると, (c) の様に外円筒側 ( $y^* > 0.5$ ) で逆流するような基本流を得ることもできる. (d) は環状流路において HPf を模擬する  $F_{p HPf}$ の円筒比依存性 (式 (4)) と純粋なクエット流 ( $F_p$ = 0) を表している.

ン方程式には、高速フーリエ変換で波数空間にて解く解法を採用しているが、MPI 並列計算にお ける計算速度のボトルネックとなりやすい箇所である. MPI, OpenMP ハイブリッド並列計算の並 列数増加に伴う損失については第4章で報告する.

本解析対象における線形安定の臨界値  $Re_L$ は、低円筒比 ( $\eta \le 0.1$ ) においても流れ場が HPf と一 致する場合は任意のレイノルズ数に対し線形安定 ( $Re_L \rightarrow \infty$ ) である. さらに、流れ場が HPf と一 致しない場合でも、本解析で扱うレイノルズ数  $Re_w = O(10^3)$  と比較して  $Re_L$ は極めて高い[23]. よ って、いずれの流路系に対しても  $Re_w \ll Re_L$ の、まさに亜臨界レイノルズ数領域の調査であるた め、自発的に層流から乱流へ遷移することはない吸収状態転移を考えることになる. よって、一 連の DNS 解析にて、最初に比較的高い  $Re_w$ および初期擾乱を与えた場のシミュレーションを実施 し、十分発達した乱流場を初期条件として準静的に  $Re_w$ および  $F_p$  を下げていき、大域的層流化に 至るまでを調査した. また、亜臨界特有の乱流一層流共存場から成る時空間欠性の統計的な特徴 を得るためにレイノルズ数の減少後には十分時間をかけ、主に統計的定常状態を議論する. ただ し、臨界値近傍での局在乱流の動的挙動に関する議論についてはこの限りではなく、レイノルズ 数を急減させた際の乱流の減衰、いわゆる臨界クエンチングを行った結果について議論する.

— 25 —



図3 環状クエット・ポアズイユ流における乱流間欠構造.同軸二重円筒の,ある(x-r)断面上半 分を半径方向速度変動で可視化してあり,黒が乱流,白が層流を示す. Rew=1600, Fp=6.5 でパ イプ流の流速分布を模擬した低円筒比(η=0.1)において,典型的な軸方向に延びた赤破線で示 す釣り鐘型の乱流パフを形成する.ただし,見やすさのため半径,主流方向長さは縮尺が異な る.時間経過で乱流パフは移流すると共に,減衰(青矢印)と維持(赤矢印),分裂を繰返す.

#### 3. 結果と考察

本章では、大規模 DNS で得られた結果として、環状クエット・ポアズイユ流で形成される大規 模間欠構造を紹介する.特に、低円筒比流路で形成される1次元間欠性に対して、過渡的・統計 的な時空間欠性に関するいくつかの最も基本的な冪的スケーリングの観点から DP 普遍性との関 連を議論する.ただし、以降に示す本結果から、すべての壁乱流の遷移現象について DP 普遍性の 有無を議論するものではなく、固有の特徴に関する境界条件依存性を抽出しているものといえる.

### 3.1 環状クエット・ポアズイユ流で形成される大規模間欠構造

過去の筆者らの研究で、環状クエット・ポアズイユ流においても、環状クエット流と環状ポア ズイユ流で形成される大規模な層流-乱流共存構造の円筒比依存性と同等の流路形状依存性を持 っことが確認された[14,16-20]. 例えば、円筒比 $\eta$ =0.8の高円筒比流路では、内円筒に巻き付く螺 旋状の局在乱流、いわば、チャネル流におけるストライプ構造に準ずる大規模間欠構造を形成し た.螺旋やストライプ構造は、主流方向と周(スパン)方向に対し間欠的で、2次元パターンを呈 する[5]. 一方、低円筒比流路( $\eta \le 0.3$ )では、図3に示すような複数の局在乱流(乱流パフ)を 形成する. この局在乱流は周方向に間欠性がコヒーレントであり、層流・乱流共存の繰り返しは 主流方向のみに限られた1次元間欠性をもつ. したがって、この局在乱流構造はまさにパイプ流 における1次元間欠構造を構成する乱流パフの定性的特徴[2,3]と一致している.

環状クエット・ポアズイユ流における乱流パフの主流方向の長さは、 $\eta \le 0.3$ では円筒比に依ら ず、いずれの流路系においても大きさは  $L_x = 30h$ で概ね同じある.これは、同様な流路系である 環状クエット流では円筒比が小さくなるにつれて、乱流パフの長さが短くなる結果と一致しない [14,16–20].さらに、乱流パフの分裂・消滅の挙動についても流れの駆動方法に大きく依存する. 図 3 は、 $\eta = 0.1$ の環状クエット・ポアズイユ流内の乱流パフの時間発展を示す.アンサンブル平 均した内円筒壁面での摩擦抗力係数は< $C_{fin} \ge 0$ を満たすように、コントロールパラメータを  $Re_w$ = 1600,  $F_p = 6.5$ と設定しパイプ流の流速分布を模している. 乱流パフは主流方向に概ねバルク速 度と一致した移流速度  $U_f$ で移動しながら、分裂・減衰を大域的に繰り返す.この際、臨界値  $Re_g$ 以上であり半永久的に間欠性のある乱流を維持する.

本研究では、環状流路で形成される乱流パフの特徴を定量的に調査する趣旨のもと、以降 η = 0.1, 0.3 の結果に着目して、その時空間欠性に関する議論を進める.

-26 -



図4 臨界値近傍( $Re_w \approx Re_g$ )の環状クエット流(aCf)と環状クエット・ポアズイユ流(aCPf) で形成される局在乱流(乱流パフ:黒色)の時空間ダイアグラム.円筒比は,(a,b) $\eta$ =0.1,(c,d)  $\eta$ =0.3.いずれも横軸は主流方向の空間を表しており,乱流パフと一緒に移動するような座標 系である.乱流パフの移動速度  $U_f$ は概ねバルク速度と一致している.また,縦軸は時間経過を 示しており,乱流パフの挙動を追跡している.(a)の赤矢印は,時空間欠性の指標となる層流間 隔(乱流パフ間距離) $\Delta T$ ,  $\Delta L_x$ を示す.

#### 3.2 乱流パフの時空間欠性の統計量解析

本節では、低円筒比の環状クエット流と環状クエット・ポアズイユ流で形成される乱流パフの時空間欠性について定性的、定量的に議論を行う.時空間欠性については、図4に示す乱流パフの時空間ダイアグラムを用いて説明する.時空間ダイアグラムは、主流方向空間と時間の2軸を持つ.ただし、乱流パフの移流を考え、空間軸は乱流パフと共に動く移動座標である.つまり、主流方向に間欠的に配列される乱流パフの分裂・合体・減衰の時間進展を観測することになる. このとき、乱流パフの主流方向への移流速度 Ufは、概ね式(5)に示すバルク速度 ubulk と一致している.図4の描写に関する詳細な定義は既報[13]を参照されたい.

$$u_{\text{bulk}} = \frac{1}{\Delta T L_x h 2\pi} \int_t^{t+\Delta T} \int_0^{L_x} \int_{r_{\text{in}}}^{r_{\text{out}}} \int_0^{2\pi} u_x(x, r, \theta, t) \mathrm{d}x \mathrm{d}r \mathrm{d}\theta \mathrm{d}t$$
(5)

まず、図4を用いて、それぞれの流れで起こる分裂・合体・消滅の特徴を定性的に比較する. 環状クエット流では円筒比の低下により乱流パフの空間長さが短く、より明確に分裂の頻度が増 えており、さながら(1+1)-D DP の時空間欠性に酷似してくる[16].また、図には掲載していない が、円筒比  $\eta = 0.1$  の環状クエット流では、その確率的挙動のレイノルズ数依存性が Lemoult *et al.*[10]のクエット流における 1 次元間欠性のものと酷似する.一方、環状クエット・ポアズイユ流 では、乱流パフの空間長さは円筒比依存性をあまり持たないものの、分裂挙動については、 $\eta=0.1$ に比べ $\eta=0.3$  の流路におけるパフの方が活発な分裂がより確率性を呈していると言える.パイプ 流では分裂と減衰の頻度は、臨界点から遠ざかるにつれて二重指数関数的に増加すると言われて いる[2].図4に示す各流れの臨界値はそれぞれ異なり、環状クエット流では円筒比が小さい順に *Reg* = 1628、1555 [16]、環状クエット・ポアズイユ流では*Reg* = 1540、1465 付近である[24].この 点で、図4の各間欠性を形成したレイノルズ数と臨界値との距離( $|Re_w - Re_g|/Re_g$ )がそれぞれ 異なるため分裂減衰頻度が異なることは自明であるが、特に $\eta=0.1$ の環状クエット・ポアズイユ 流における臨界値近傍での乱流パフは長時間分裂することがなく、非(1+1)-D DP 的な現象といえ る.定量的な比較評価は環状クエット・ポアズイユ流のもの(図4(b,d))に限り図5 で議論する.



図5 環状クエット・ポアズイユ流における乱流パフの時空間欠性に関する有効浸透現象 (DP) との関連性の可否: (a, b) 円筒比  $\eta$  = 0.1, (c, d)  $\eta$  = 0.3. 統計的定常状態において,図4 (a)の赤 矢印で定義される層流間距離  $\Delta T$ ,  $\Delta L_x$  の確率密度について時空間平均をとった分布である. レ イノルズ数は低くなるにつれて  $Re_g$  に近づく. 黒破線はまさに臨界点における(1+1)-D DP モデ ルによる理論的な空間・時間間欠性の確率密度分布で,いずれも冪則に従う. だだし,空間・ 時間のスケーリング指数はそれぞれ, $\mu$ LD = 1.748,  $\mu$ LD = 1.84 である.

図 4 で時空間欠性が観測されたケースについて、代表速度をバルク流速  $u_{bulk}$ 、代表長さを水力 等価直径(=2h)とするバルクレイノルズ数  $Re_{bulk}$ に換算すると、パイプ流でのレイノルズ数とよ く比較できる.環状クエット・ポアズイユ流において $\eta$ =0.3 では、臨界値近傍( $Re_w \approx Re_g$ )の値 が  $Re_{bulk}$  = 2145–2300 程度となり、 $\eta$  = 0.1 では  $Re_{bulk}$  = 2045–2190 程度となる.円筒比を低下させ ると、パイプ流で乱流パフが形成されるレイノルズ数、臨界レイノルズ数( $Re_{g,bulk}$ =2040)と概ね 一致するようになる.また、円筒比 $\eta$ =0.1 に対し環状クエット流で $Re_{g,bulk} \approx$ 1000、環状ポアズイ ユ流で $Re_{g,bulk} \approx$ 3000 となることが知られており[16,24]、この観点からも低円筒比の環状クエット・ ポアズイユ流によるパイプ流模擬の妥当性が示された.

次に、時空間欠性については乱流パフ同士の距離もしくは時間(層流間隔)について、それぞれ長い/短い層流間隔の含まれる存在割合、いわば確率密度分布を議論する.層流間隔は臨界値以上( $Re_w > Re_g$ )のケースに限り、図 4(a)の間欠構造内にある赤矢印  $\Delta T$ ,  $\Delta L_x$  で定義されており、確率密度について統計的定常状態において約  $T^* = O(10^4)$ の長時間平均を行った.層流間隔は臨界値以上で  $\Delta L \sim \exp(-\Delta L/\zeta)$  に従うことが古くから知られている.さらに、DP 普遍性に従う時空間欠性の場合、臨界値に近づくにつれ  $\xi \to \infty$ となるように、図 5 の黒破線で示すような冪則でスケーリングされるようになることが理論的解析で分かっている.また、時定数  $\xi$  は相関長と呼ばれ、 $\xi \sim |Re_w - Re_g|/Re_g$  でスケーリングされることも知られているが、今回は取り扱わない.層流距離の確率密度分布について、 $\eta = 0.1$ の空間間欠性は図 5 (a)のように  $Re_g$  近傍でも DP に従わず、黒



図 6 円筒比  $\eta = 0.1$  の環状クエット・ポアズイユ流で、レイノルズ数を  $Re_g$  近傍に急減させた際の局在乱流の減衰過程、いわゆる臨界クエンチング、初期状態はいずれも同じ間欠的な乱流状態である。臨界値以上では乱流維持し、乱流間欠率 Ft は統計的定常値を示す。一方、 $Re_g$  以下では、指数関数的に減衰し有限時間内に層流化する。黒破線は(1+1)-D DP モデルによる理論的な Ftの減衰線であり、まさに  $Re_w = Re_g$  では時間の冪乗則 ( $Ft \sim t^{-\alpha}$ ) に従う、指数  $\alpha$  の値は(1+1)-D DP 固有の値  $\alpha_{1D} = 0.159$  を用いており、乱流パフの挙動が(1+1)-D DP 的であることを示唆している。また、領域サイズが大きい(b)では Ft のゆらぎが小さくなる。

矢印で示すような特定の長距離間隔 ( $\Delta L_x^* \approx 100, 160$ ) を顕著に多く含む. 乱流パフが特定の間隔 で配列する原因として主流方向領域の不足の可能性も排除できないが, 非 DP 的な時空間欠性は 特出すべき点である,ただし,無限長さを持つパイプ流の実験においては,非 DP 的でありながら も特定の長距離間隔を持つことはなく,指数則に従うことが分かっている[3]. 一方,  $\eta = 0.3$  では  $Re_g$ に近づくにつれ,長距離の層流間隔についても DP に従うようになる典型的な空間間欠性であ る (図 5 (c)).時間間欠性は,どちらの円筒比,いずれのレイノルズ数においても,短-長時間の 層流間隔に対して DP に従う傾向が一致している (図 5 (b,d)). しかし,明確なレイノルズ数依存 性が見えていないことから,領域を拡大した系を対象に,さらに長時間の観測が必要であること も示唆されたところである.

#### 3.3 乱流パフの動的臨界特徴について - 臨界クエンチングの観点から

本節では、局在乱流の減衰過程について調査することで、臨界値近傍での動的特徴を議論する. 臨界現象を測る基本的な手法である臨界クエンチングを行った. 臨界クエンチングはある乱流場 から臨界値近傍にめがけてレイノルズ数を急減させた際の過渡的な乱流減衰を議論するものであ る. 今回は領域内に占める乱流の割合,いわゆる乱流間欠率の時間変化を測定した.

図6は円筒比  $\eta$ =0.1 の環状クエット・ポアズイユ流での臨界クエンチングによる過渡減衰のレ イノルズ数依存性を乱流間欠率 *Ft* の時間変化として示しており,(a,b) は主流方向の計算領域が 約4倍異なる.また,両対数表示しているので,横軸は右に進むにつれて指数的に長時間化して おり,時間が経つにつれ,*Ft* の変化に要する時間は指数的に増加する.初期状態はいずれも流路 一面に乱流パフが広がった同じ状態であり,そこから減衰し臨界値以上では*Ft* が統計的定常状態 に収束し,臨界値以下では指数的に減衰し層流に至る.また,まさに臨界値では,*Ft* の減衰が時 間の冪乗 (*Ft*~*t*<sup>a</sup>) に従っており,指数 a の値は(1+1)-D DP 固有の値  $a_{1D}$ =0.159 であった.した がって,非 DP 的な空間間欠性を持ちながらも DP 的な減衰を起こすことが示唆された.また,図 6(a) では *Reg* 近傍の *Rew* = 1525–1550 でゆらぎが顕著に大きいが,図6(b) ではより多くの乱流 パフを捉えることができるため,統計的により良い *Ft* の減衰を捉えている.ただし,計算領域の 増大は計算負荷の増大に直結するため長時間の解析が困難になる.本解析では SX-Aurora 8VE を 用いた MPI, OpenMP ハイブリッド並列計算により実現できた.

-29 -

以上の観点から,低円筒比の環状クエット・ポアズイユ流における乱流パフを伴った亜臨界遷 移について,その時空間欠性から部分的に DP 普遍性に従う特徴を抽出することができた.しか し,DP モデルの間欠性が持つ確率的な分裂・減衰挙動から乖離した時空間欠性からも DP 的な冪 則が現れており,さながら擬 DP 的な要素も抽出されたといえる.この点で,DP 普遍クラスとの 部分的な一致については,環状流,ひいては壁面せん断流固有の特徴が抽出されたともいえる. 時空間欠構造の普遍性に関する特徴のより包括的な理解においては,流れの境界条件を変えた解 析を実施する必要がある.また,厳密な DP 普遍クラスとの評価には,さらにいくつかの時空間ス ケーリングが必須になるため,本解析に比べ大領域・長時間の DNS が必要になってくる.

#### 4. 計算性能

本研究では、MPI, OpenMP による並列化プログラミングを施した自作の Fortran コードを用い て高負荷の DNS を実施している.また、チューニングによってベクトル化効率を向上させてある (表 1).よって、SX シリーズなどのベクトル型計算機でその実行効率は発揮されるが、以下に新 たに導入された SX-Aurora TSUBASA を用いた計算性能を記す.また、旧機 SX-ACE で実施した 同等の負荷となる数値解析との比較も行う.

本研究の解析条件の一つとして格子数  $N_x \times N_r \times N_\theta = 16,384 \times 64 \times 128$  で 100,000 ステップ分の プログラム性能を抜粋して表 1 に示す. このとき,東北大学サイバーサイエンスセンターの SX-Aurora にて実行し,ノード内 8 コア OpenMP 並列化および 8 ベクトルエンジン (VE,いわゆる ノード)間 MPI 並列化を施したコードでの検証結果である.また,前述の計算条件とは異なるが, 同一コードによる DNS を東北大学サイバーサイエンスセンターSX-ACE, SX-Aurora を用いた同 計算で比較検証した.ただし,本研究で使用した MPI 化 DNS コードでは, *x-z* 面において FFT を 行う都合上, *y* 方向に要素を各ノードに対して割り振っている.そのため,最大並列ノード数は *y* 方向格子数に依存しており,本解析では  $N_y = 64$  であるため,最大並列は 64VE である.まず,並 列運用時の性能として特筆すべき点は表 2,図 7 に示すように,本解析で最大規模の解析 (8,192 × 64 × 4,096) に対して, MPI による使用メモリの増大は顕著であるものの,計算性能については MPI による顕著な時間ロスは発生していない点である.さらに,SX-Aurora と SX-ACE を比較し て,3 倍以上の高速化が成し遂げられた.

SX-Aurora TSUBASA 1VE 内の OpenMP 性能については既報[21]を参照されたい.



図 7 MPI, OpenMP ハイブリッド並列計算性能. 並列 VE 数を 1-64 ノードにした際の, 1,000 ステップにかかる時間. 縦軸の実計算時間は, 解析対象の総格子数を計算規模として規格化してある. 4VE 以上ではいずれの計算ケースでも, 概ね同じ並列計算性能が発揮されている.

-30 -

表1 プログラム性能 (SX-Aurora TSUBASA). 100,000 ステップ分の計算結果.

実行時間 [hh:mm:ss]	11:14:01	平均ベクトル長	212.2
CPU 時間 [hh:mm:ss]	89:37:09	ベクトル演算率	94.7%
総 Flops 値(real)	$36.2 \times 10^{9}$	MOPS (real)	60,173

表 2 主要な MPI, OpenMP ハイブリッド計算のプログラム性能. 1,000 ステップ分の計算結果.

使用機	格子数	VE 数	コア数/VE 数	総メモリ	実行時間
		1		16GB	240 sec
		2		19GB	210 sec
	$1024 \times 64 \times 1024$	4	0	24GB	215 sec
	1024 × 04 × 1024	8	8	34GB	150 sec
		16		54GB	120 sec
		32		98GB	100 sec
		2		70GB	1,360 sec
CV Aurora	2048 × 64 × 2048	4	8	80GB	1,280 sec
SA-Autora		8		100GB	570 sec
		16		145GB	415 sec
		32		236GB	290 sec
	4096 × 64 × 4096	8	8	369GB	2,870 sec
		16		511GB	2,110 sec
		32		790GB	960 sec
	910 <b>2</b> × 64 × 4006	32	8	1232GB	2,500 sec
	8192 × 04 × 4090	64		2630GB	1,333 sec
SV ACE	$4096 \times 64 \times 4096$	32	4	667GB	2,075 sec
SX-ACE	$8192 \times 64 \times 4096$	32	4	1311GB	3,900 sec

#### 5. 結論

パイプ流を模擬した低円筒比の環状クエット・ポアズイユ流の亜臨界遷移において,円筒比の 異なる流路を対象にDNS を実施した.複数の乱流パフからなる大規模間欠構造のレイノルズ数, 圧力勾配関数依存性を調査し,パイプ流で形成される典型的な乱流パフの性質,有向浸透現象(DP) の特徴と評価することで,模擬パイプ流の乱流遷移に潜む普遍性の有無を探った.

本解析では低円筒比流路 ( $\eta$ =0.1,0.3) において,パイプ流や環状流で観測されている乱流パフ と概ねサイズや形状の一致した局在乱流構造が形成されることを発見した.各流路で形成される 乱流パフはそれぞれ異なる分裂・衝突・減衰挙動を示し,時空間欠性に関する統計量からも差異 が抽出された.ただし,いずれも臨界点である層流化の直前では,(1+1)-D DP 普遍性に従うよう な特徴の一部が得られた.しかし, $\eta$ =0.1の流路における乱流パフは DP のような分裂は起きて おらず,得られた DP 普遍性の一部は擬 DP 普遍性の特徴ともいえる.また,下臨界値は両流路で いずれも *Re*<sub>bulk</sub>=2000–2300 前後であり,パイプ流の下臨界値 *Reg*=2040 と非常に近い値となった.

本研究結果を含め、壁面せん断流では亜臨界遷移において乱流パフに限らず多様な間欠パターンを形成し、それぞれが特有の分裂挙動を呈すことが分かってきている.現在、主にパイプ流や 環状流における局在乱流の挙動について、低次元モデルが提案され[25]、筆者らも DP モデルを基 にした確率モデルを検討している.確率モデルの設計には膨大な現象観察が重要で、引続き大規 模高負荷な3次元 DNS を長時間実施する必要があるため、SX-Aurora TSUBASA のように高性能 スーパーコンピュータ利用が不可欠である.将来的に、開発中の確率モデルを CFD に組み込むこ とで、工学的応用に向けた亜臨界遷移下での乱流の活用を模索できると期待する.

本研究結果の詳細については既報[26,27]を参照されたい.

#### 謝辞

本研究は、東北大学サイバーサイエンスセンターのスーパーコンピュータ SX-ACE, SX-Aurora を利用することで実現することができた.また、MPI 並列計算にあたっては同センター関係各位 に有益なご指導とご協力をいただいた.本研究は、JSPS 科研費(基盤研究 (B) JP19H02071)の助 成を受けて行われたものである.また、筆頭著者は、東京理科大学マテリアル人材フェローシップ制度(MEXT 事業)の支援を受けた.ここに記し、感謝の意を表する.

#### 参考文献

- [1] Wygnanski, J. and Champagne, F. H., "On transition in a pipe. Part 1. The origin of puffs and slugs and the flow in a turbulent slug," *J. Fluid Mech.*, **59** (1973), pp. 281–335.
- [2] Avila, K., Moxey, D., Lozar, A. de, Avila, M., Barkley, D. and Hof, B., "The onset of turbulence in pipe flow," *Science*, 333 (2011), pp. 192–196.
- [3] Mukund, V. and Hof, B., "The critical point of the transition to turbulence in pipe flow," *J. Fluid Mech.*, 839 (2018), pp. 76–94, 2018.
- [4] 塚原隆裕,石田貴大,"平面ポアズイユ流の亜臨界遷移における下臨界レイノルズ数",ながれ: 日本流体力学会誌, 34.6 (2015), pp. 383–386.
- [5] Tsukahara, T., Seki, Y., Kawamura, H. and Tochio D., "DNS of turbulent channel flow at very low Reynolds numbers," In: *Proc. 4th Int. Symp. on Turbulence and Shear Flows Phenomena* (2005), pp. 935–940.
- [6] Andereck, C. D., Liu, S. S. and Swinney, H. L., "Flow regimes in a circular Couette system with independently rotating cylinders", *J. Fluid Mech.*, **164**, pp. 155–183, 1986.
- [7] Cros, A. and Le Gal, P., "Spatiotemporal intermittency in the torsional Couette flow between a rotating and a stationary disk," *Phys. Fluids*, **14**, 3755, 2002.
- [8] Prigent, A., Grégoire, G., Chaté, H., Dauchot, O. and van Saarloos, W., Large-scale finite-wavelength modulation within turbulent shear flows, *Phy. Rev. Lett.*, 89 (2002), 014501.
- [9] Pomeau, Y., "Front motion, metastability and subcritical bifurcations in hydrodynamics," *Physica D: Nonlinear Phenomena*, **23** (1986), pp. 3–11.
- [10] Lemoult, G., Shi, L., Avila, K., Jalikop, S. V., Avila, M. and Hof, B., "Directed percolation phase transition to sustained turbulence in Couette flow," *Nature Phys.*, 12 (2016), pp. 254–258.
- [11] Sano, M. and Tamai, K., "A universal transition to turbulence in channel flow," *Nature Phys.*, **12** (2016), pp. 249–253.
- [12] Shimizu, M. and Manneville, P., "Bifurcations to turbulence in transitional channel flow," *Phys. Rev. Fluids*, 4 (2019), 113903.
- [13] Chantry, M., Tuckerman, L. S. and Barkley, D., "Universal continuous transition to turbulence in a planar shear flow," J. Fluid Mech., 824 (2017), R1.
- [14] Kunii, K., Duguet, Y. and Tsukahara T., "Laminar-turbulent coexistence in annular Couette flow," J. Fluid Mech., 879 (2019), pp. 579–603.
- [15] Hiruta, Y. and Toh, S., "Subcritical laminar-turbulent transition as nonequilibrium phase transition in two-dimensional Kolmogorov flow," J. Phys. Soc. Japan, 89 (2020), 044402.
- [16] Takeda, K., Duguet, Y. and Tsukahara T., "Intermittency and critical scaling in annular Couette flow," *Entropy*, 22 (2020), 988.
- [17] T. Ishida, Y. Duguet, and T. Tsukahara, Transitional structures in annular Poiseuille flow depending on radius ratio, *J. Fluid Mech.*, **794** (2016), R2.
- [18] Ishida, T., Duguet, Y. and Tsukahara T., "Turbulent bifurcations in intermittent shear flows: from puffs to oblique stripes," *Phys. Rev. Fluids*, 2 (2017), 073902.
- [19] 塚原隆裕,石田貴大,"直接数値解析による環状流路ポアズイユ流の亜臨界遷移の研究",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, 52(2) (2019), pp. 9–17.

- [20] 竹田一貴,塚原隆裕, "環状クエット流の亜臨界遷移における局在乱流構造と DP 普遍性の円 筒比依存性",日本流体力学会年会 2020 講演論文集,(2020).
- [21] 塚原隆裕,竹田一貴,"直接数値解析を用いた仮想拡張した環状流路における亜臨界遷移の研究",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, 53(4) (2020), pp. 90–98.
- [22] Duguet, Y., Schlatter, P. and Henningson, D. S., "Formation of turbulent patterns near the onset of transition in plane Couette flow," J. Fluid Mech., 650 (2010), pp. 119–129.
- [23] Gittler, P. "Stability of axial Poiseuille-Couette flow between concentric cylinders," Acta Mech., 101 (1993), pp. 1–13.
- [24] 森松浩隆,"低円筒比環状流路の亜臨界遷移域において生じる一次元間欠性に関する研究", 東京理科大学大学院修士論文,(2021).
- [25] Barkley, D., "Theoretical perspective on the route to turbulence in a pipe," J. Fluid Mech., 803 (2016), P1.
- [26] 森松 浩隆, 塚原隆裕, "低円筒比環状流路の亜臨界遷移に生じる間欠構造に関する調査", 第 34 回数値流体力学シンポジウム 講演論文集, A05-1 (2020).
- [27] Morimatsu, H. and Tsukahara T., "Laminar-turbulent intermittency in annular Couette-Poiseuille flow: Whether a puff splits or not," *Entropy*, **22** (2020), 1353.

### [報告]

## Tokyo2021 OpenRoaming / Passpoint Trial 実施報告

#### 後藤英昭

#### 東北大学サイバーサイエンスセンター クラウドサービス基盤研究室

2021 年 7 月から 9 月 15 日の期間,セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤「Cityroam<sup>™</sup>」の全 国の基地局で "Tokyo2021 OpenRoaming / Passpoint Trial"を開催しました.背景を含めて,実 施内容を報告します.

### 1 Cityroam と Tokyo2021 OpenRoaming / Passpoint Trial について

クラウドサービス基盤研究室 (CSI 研究室) では、安全で利便性の高い公衆無線 LAN を実現する ために、国内の複数の通信事業者と協働して、2018 年 6 月より"Cityroam"と呼ぶ次世代フリー Wi-Fi の整備を推進してきました [1]. Cityroam は、IEEE 802.1X や Passpoint [2] の技術を利用 しており、自動接続によるセキュアな無線 LAN 利用環境を実現しています. 2020 年には、Wireless Broadband Alliance (WBA)の主導で始まった OpenRoaming [3] に初期メンバーとして参加し、 国際的にも先進事例となる無線 LAN ローミングサービスを提供しています.

"Tokyo2021 OpenRoaming / Passpoint Trial"は、この Cityroam の基盤を利用したトライア ルです. 2021 年 7 月から 9 月 15 日の期間、Cityroam に参加している通信事業者に加えて、まだ OpenRoaming に参加していない、または、OpenRoaming のネットワークに接続完了していない通 信事業者などを集めて、そのローミングサービスを市民が試すことのできる環境を提供しました.

### 2 トライアルの実施内容と背景

Cityroam では、学術系のローミング基盤である eduroam [4] を統合した認証連携ネットワークを 採用しています.通常は、eduroam に加えて、Cityroam 参加事業者や、OpenRoaming 参加事業者 により発行されたアカウントを用いて、無線 LAN ローミングの利用が可能です.

トライアルの実施のために、6月に WBA メンバーの通信事業者等に参加を呼び掛けました.若 干数の事業者より参加希望があり、6月末から7月にかけて、準備が整った事業者から順次、以下の サービスを開始しました.

- AT&T (SIM による EAP-AKA 認証, WPA2 Enterprise または Passpoint による接続)
- Boingo Passpoint Secure
- GlobalReach Connect (同社のアプリのデモ)

AT&T は、WBA における Passpoint やローミング基盤の開発でも中心的な役割を持つキャリア の一つですが、OpenRoaming のサービスはまだ提供していません (本稿執筆時点). 一方で、自社 では米国内で Passpoint 対応の基地局を運用しており、Passpoint プロファイルがプリインストール された端末を販売しています. WPA2 Enterprise の無線 LAN 基地局では、日本国内でも日常的に、 AT&T のレルムを持つ認証要求をログの中に見ることができます. Passpoint に対応していない基 地局や、SSID の異なる基地局でも認証要求の記録が見えるのは、任意の SSID に接続を試行する端

-34 -

#### 末が存在するからです.

今回のトライアルでは、AT&T の認証サーバ (RADIUS サーバ) をハブ事業者経由で Cityroam に一時的に接続することによって、SIM 認証が通るようにしました.また、Cityroam の参加事業者 に協力を依頼し、AT&T 向けの Passpoint の設定を基地局に追加してもらうことで、Passpoint に よる接続にも対応しました.これにより、AT&T の SIM が有効な端末は、利用者が特に追加設定を 行わなくても、無線 LAN に自動接続されます.

Boingo も WBA において Passpoint を強力に推進している事業者ですが,執筆時点で Open-Roaming のサービスはまだ開始されていません. トライアルでは, Boingo の RADIUS サーバをハ ブ事業者経由で Cityroam に接続し, Boingo 向けの Passpoint の設定を基地局に追加することで, ローミングを実現しました.

GlobalReach Technology は, Passpoint 関係の様々なソリューションを提供している会社です. 同社が提供するアプリ GlobalReach Connect について,事業者向けのデモンストレーションを行い たい旨の申し出があり,イベントコードの提供を受けて,トライアルに組み入れました.

国際的な無線 LAN ローミングが効果的なのは,特に観光においてでしょう.WBA では, Passpoint を用いた次世代ホットスポット (NGH) の普及促進と,国際ローミング基盤の開発のため に,2016 年から 2018 年の間,各年数か月に渡って,"City Wi-Fi Roaming trial"を実施していま した.CSI 研究室では,2017 年と 2018 年に同トライアルに参加して,海外の通信事業者と実証実 験を行いました.WBA における開発は OpenRoaming として結実したのですが,2019 年と 2020 年にはトライアルが実施されませんでした.また,OpenRoaming の立ち上げから1 年以上経過し ていますが,正式にサービスを開始したキャリアはありません.元々,キャリアによる SIM 認証 は,観光地におけるフリー Wi-Fi の目玉の一つとして期待されていたものです.新型コロナウイル スの影響もありますが,SIM 認証のように容易に利用できるプロファイルを早期に増やすことは, OpenRoaming の基地局側の整備事業にとっても重要な課題です.このため,2021 年も過去のトラ イアルに似た枠組みで,容易に参加できる環境を提供することにより,通信事業者の OpenRoaming 参加を促せないだろうかと考えました.

7~8 月は夏期の観光シーズンでもあり,例年ならば数多くのインバウンド観光客が期待できます. 2021 年はまだコロナ禍を引きずっており,通常の観光需要は見込めませんが,オリンピック・パラ リンピックの関係者の来日があり,もしかすると少しは貢献があるのではないかという期待がありま した.後に述べるように残念ながらこの期待は外れるのですが,何しろ色々なことが二転三転してい た時期なので仕方ありません.ゲームとの関連性を前面に出さないようにして,控えめの広報により トライアルを実施することにしました.

まだ全国的にも Cityroam のサービスエリアが少ないことや,特に東京には数か所しかないことか ら,利用者に積極的に使ってもらうというよりは,「対応端末を持った利用者がたまたま通りかかっ て,利用できれば十分」という扱いにしました.これは以前の WBA のトライアルでも同様です.国 内の事業者の参加がなく,日本人の利用があまり望めないことから,図1のように,英語版の広報の みをウェブサイトに用意しました.主に WBA 及びその参加事業者に向けた,記録文書としての意 味もあります.

国内で Passpoint や OpenRoaming に興味を持ってくれそうな事業者や技術者に向けて, 個人の Twitter と Blog でも情報発信を行いました.



図1 Cityroam ウェブサイトにおけるトライアルの告知 (2021 年 7 月)

### 3 トライアルの実施結果と得られた知見

#### 3.1 準備段階

無線 LAN ローミングの実現のために、トライアルに参加する事業者の RADIUS サーバを Cityroam に接続する必要があります. 今回, 幸いにもすべての事業者が以前の WBA のトライアル に参加実績があり,セキュアな RADIUS 接続に必要な RadSec に対応したハブ事業者にサーバが接 続済みだったことから, Cityroam の RadSec プロキシをハブ事業者のプロキシに接続するだけで済 みました. OpenRoaming 以前の接続方法では, RADIUS と IPsec の接続のために, IP アドレスと 鍵を事業者間で交換する必要がありました. つまり, RADIUS 接続の手間が多かったのですが,今 回, この部分が大幅に簡略化されました.

トライアルの事業者はまだエンドユーザ向けに OpenRoaming のプロファイルを配布していません. ローミングを実現するために, Cityroam の基地局に各社の独自設定を追加する必要がありました. トライアルの準備期間が短かったことから,複数の Cityroam 参加機関で一斉に設定を入れることはできず,各社の準備ができ次第,設定を投入していくことになりました. 各社の協力により,7



図2 Cityroam サービスエリアの例 (新宿中央公園, 東京都庁)

月第3週までに大部分の基地局の設定が完了しました.

Cityroam では、東京都内で利用者が集まりやすい所に基地局がないという問題がありました.この対策として、市ヶ谷駅前に一か所、急きょ基地局を設置しました.また、東京都の西新宿スマート ポール事業 [5] において eduroam, Cityroam の導入計画があり、令和3年度の事業開始に先立って、 一部のスマートポールに設定を追加することができました.

図2に、トライアルを実施した、Cityroam サービスエリアの例を示します.

#### 3.2 利用状況

トライアル期間中の利用状況について,認証要求の総数や,そのうち認証に成功した回数などの統計情報のみを取得し,分析しました.参加事業者の意向により,実際のアクセス数や他社との順位関係の公表ができないため,大まかな傾向のみ以下に示します.

- 1. eduroam の利用が全体の 8~9 割を占める.
- 2. AT&T に限らず、国内外キャリアの SIM による認証は、年間を通じて多数検出される.
- 3. トライアル期間中, イベントに関係すると考えられる明確な増減は観測できない.
- eduroam を除けば、SIM 認証や、携帯端末にプリインストールされた Online Sign-Up (OSU) 機能による接続の割合が高い.
- 5. OpenRoaming アプリの利用もそれなりに多い.

総じて, eduroam や SIM 認証などの, 既に端末上にあるプロファイルが効果的に利用されて いることが読み取れました.このことから, キャリアに対して早期の参加を呼びかけることが, OpenRoaming の普及促進のために有効と考えられます.

利用者が明示的にサインアップする必要のあるプロファイルは,有効性の観点では一歩譲ることも 分かります.しかしながら,わざわざ手動で設定して接続する利用者がいたということは,セキュア 公衆無線 LAN への関心の高さを覗わせるものかもしれません.

イベントの影響が見られなかったことは、少し予想外ではありました.訪日客の観光が制限された ことを考えると、それがよく機能したのかもしれません.ただし、有意と結論付けられるほどのデー タは得られませんでした. トライアル期間中に、利用者から幾つかのフィードバックを得ました.中には、OpenRoamingや Passpoint の利用を妨げるような、端末や基地局の未知の技術的問題もありました.回避策が見つ かったものについては、より多くの端末が正常に接続できるように、基地局の設定を変更して対処し ました.同時に、端末や基地局のメーカーにも障害報告を行い、対策を依頼しました.このようなト ラブルシューティングができたことも、トライアルの大きな成果と言えます.

#### 3.3 今後の課題

今回,準備期間が短かったことから,あまり参加事業者を集められませんでした.前章に示した参加事業者の他に,国内キャリアを含む幾つかのキャリアからも打診がありましたが,残念ながら,トライアル期間内に認証連携の実施まで至りませんでした.トライアルの「気軽に試せる」点は事業者にとっても有意義と考えられ,ローミングシステムの普及促進のためにも,地道に,できるだけ参加の障害を取り除いていくことが重要と思われます.

コロナ禍による観光の低迷が続いていますが、今後観光が持ち直してきた時にフリー Wi-Fi の利 用状況がどのように変化するのか、特に、ローミングの需要の分析は重要です。トライアルは終了し ましたが、今後、Cityroam や OpenRoaming の参加機関が徐々に増えて、利用できるアカウントも 増えていくでしょう。長期に利用統計の分析を継続して、ローミング環境の普及に役立てていく予定 です。

### 謝辞

トライアルの参加事業者 (AT&T, Boingo, GlobalReach Technology, 及びハブ事業者 Single Digits),短い準備期間にも関わらず基地局に設定を追加していただいた Cityroam 事業者,及び,新宿スマートポールに eduroam/Cityroam を先行導入していただいた東京都デジタルサービス局とシスコシステムズ合同会社の皆様に感謝します. 接続報告を送っていただいた利用者の皆様に感謝します.

### 参考文献

- 後藤英昭, "セキュア公衆無線 LAN ローミング基盤 Cityroam と WBA OpenRoaming への 参加について,"東北大学サイバーサイエンスセンター 大規模科学計算システム広報 SENAC Vol.53, No.3, pp.23–26, 2020.
- [2] Wi-Fi Alliance, "Passpoint Wi-Fi ホットスポットネットワークへのシームレスでセキュア な接続を実現," https://www.wi-fi.org/ja/discover-wi-fi/passpoint/
- [3] WBA OpenRoaming, https://wballiance.com/openroaming/
- [4] eduroam JP, https://www.eduroam.jp/
- [5] 東京都, "西新宿エリアにおけるスマートポールの設置," https://www.digitalservice.
   metro.tokyo.lg.jp/tokyodatahighway/smart\_pole.html

-38 -

「報 告]計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供制度

# グループスタディー・

### 計算機アーキテクチャ・高性能計算特論報告

#### 江川 隆輔

東京電機大学工学部・東北大学スーパーコンピューティング研究部

2021 年 6 月から 8 月にかけて,東京電機大学工学部情報通信工学科の学部生を対象とした「グループスタディ I:高性能計算入門」,及び同学大学院工学研究科における「計算機 アーキテクチャ・高性能計算特論」において,サイバーサイエンスセンターが平成 20 年から行っている計算科学・計算機科学分野における人材育成を目的としたスーパーコンピュ ータ無償利用プログラムを利用させていただきました.

「グループスタディ I: 高性能計算入門」では、計算機・スーパコンピュータに興味を持 つ学部生 12 名が参加し、高性能計算に関する入門書の輪講を通して、計算機の基礎と並列 プログラミングの基礎を学んだ後、講義後半では、代表的な高性能計算のためのベンチマー クプログラムによるシステムの性能評価に取り組みました. これらを通して、学生自身が有 するパーソナルコンピュータとの性能の違いや、並列処理の効果・重要性を学ぶことができ 学生も興味深く取り組むことができたようです.

大学院生を対象として「計算機アーキテクチャ・高性能計算特論」においては、12 名の 受講者を迎え、コンピュータの基本原理、命令レベル並列処理、ベクトル処理、並列計算シ ステムの制御機構について学んだ後、本制度により使用させていただいた、スーパーコンピ ュータ AOBA を用いて、並列処理の重要性、並列処理システムのハードウェア構成方式、並 列アルゴリズム・プログラム設計について学びました.講義の後半では、多体問題を扱うプ ログラムの高速化・最適化に取り組みました. AOB-A を用いることで並列プログラミングの 重要性を体験できたばかりでなく、AOBA-A、AOBA-B と異なるシステムを利用することで、 アーキテクチャの違いによって最適化の指針や、システムによって得意とするアプリケー ションが異なることを学ぶことができたようです.参加した学生らは AOBA の圧倒的な計算 力に驚きながらも、「単純に並列数を増やしただけでは、計算時間が短くならないことに面 自さを感じた」とアンケートに答えるなど、アプリケーション開発、システム開発分野にお ける本質的な課題に触れる良い機会になったようです.

このような場を提供していただいた本制度,並びに利用に関して多々サポートをしてく ださった関係各位に厚く感謝いたします.

-39 -

### [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/

### シミュレーテッドアニーリングソフトウェアの利用について

サイバーサイエンスセンターと日本電気株式会社は量子コンピュータの実現方式の一つである、量 子アニーリングの研究推進に向けた取り組みを強化しています。その一環として、NEC が研究・開発 を進めているシミュレーテッドアニーリングソフトウェアをスーパーコンピュータ AOBA と組み合わ せて利用するサービスを開始いたしました。希望者は使用条件を確認のうえ申請書に必要事項を記入 し、お申込みください。

シミュレーテッドアニーリングソフトウェア使用条件 シミュレーテッドアニーリングソフトウェア利用申込書

問い合わせ先 共同利用支援係 E-mail: sys-sec[at]cc.tohoku.ac.jp

(共同利用支援係,共同研究支援係)

### コンパイラのバージョンアップについて

			-	, , , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	
システム	コンパイラ名	旧バージョン	新バージョン	ドキュメント	
AOBA-A	Fortran Compiler	3. 2. 0	3. 3. 0	<u>Fortran_Cリリースメモ</u> MPIリリースメモ SX-ATマニュアル	
	C/C++ Compiler	3. 2. 0	3. 3. 0		
	MPI	2.15.0	2. 18. 0		
AOBA-B	AOCC Compiler	3.0	3. 1	リリースノート&マニュアル	
	Intel Compiler※	oneAPI 2021.1	oneAPI 2021.3	<u>oneAPIマニュアル関連oneAPI</u> 2021.3.0リリースノート	

※Intel oneAPI 2021 の環境変数設定ファイルは、bash 向けのみの提供

(共同利用支援係, 共同研究支援係)

### 商用アプリケーションのバージョンアップについて

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

#### Mathematica

- ・バージョン:12.3
- ・バージョンアップ日:2021年9月2日
- ・サービスホスト:フロントエンドサーバ
- ・起動コマンド: (GUI版) mathematica (テキスト版) math
- ・開発元 Web サイト: https://www.wolfram.com/mathematica/new-in-12/

(共同利用支援係)

### 学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度について

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

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

1. 応募期間

・<u>第一回 令和3年10月1日(金)~令和3年10月21日(木)</u>

・第二回 令和3年12月1日(水)~令和3年12月21日(火)

2.利用期間

採択日~令和4年3月31日(木)

3. 応募詳細

・研究成果を学術論文誌等において発表する場合は、謝辞等で本センターの貢献を明記してください。
 ・年度末に成果報告書を提出して頂きます。

- ・申し込みには指導教員の承認が必要となります。
- 高等専門学校生については本科5年生および専攻科生を対象といたします。
- ・指導教員1人につき最大2件までの応募となります。

• 拍导教員1人につき取入2件までの応募となりま

4. 応募方法

応募される方は、以下の「学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度申請書」をダウン ロードし、必要事項を記入して電子メールでお申し込みください。

学部学生のためのスーパーコンピュータ無償提供制度申請書

(送り先)E-mail:edu-prog[at]cc.tohoku.ac.jp

5.問い合わせ先 共同利用支援係 TEL:(022)795-6251 E-mail:uketuke[at]cc.tohoku.ac.jp

(共同利用支援係)

### — SENAC 執筆要項 —

#### 1. お寄せいただきたい投稿内容

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

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

#### 2. 執筆にあたってご注意いただく事項

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

#### 3. 原稿の提出方法

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

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

#### 4. その他

- (1)一般投稿を頂いた方には謝礼として、負担金の一部を免除いたします。免除額は概ね1ページ 1万円を目安とします。詳細は共同利用支援係までお問い合わせください。
- (2) 投稿予定の原稿が15ページを超す場合は共同利用支援係まで前もってご連絡ください。
- (3)初回の校正は、執筆者が行って、誤植の防止をはかるものとします。
- (4) 原稿の提出先は次のとおりです。
  - 東北大学サイバーサイエンスセンター内 情報部情報基盤課共同利用支援係
  - e-mail uketuke@cc.tohoku.ac.jp
  - TEL 022-795-3406

### スタッフ便り

生活スタイルの変化に伴い、ここ数年自分の趣味も多様化の一途をたどっています。これまで も好きだった自動車に加え、ジョギングやトレッキング、自転車など、子ども達と一緒にできる アウトドア系が増えてきました。昨年から、自転車にどっぷりはまり、自分の手で部品から組み 上げたロードバイクで山を登ります。汗もびっしょり、息も苦しく、限界も限界でもう止めたく なるのですが、登頂した時のアドレナリンたっぷりの達成感に魅せられてしまいました。運動不 足解消の効果もあり健康に良さそうなので、日々のジョギングで鍛えつつ、苦行のサイクリング を楽しんでいます(笑)。

最近熱が入っているのは洗車です。朝日が昇るとともに始めて朝食前に終わるような日頃のメ ンテナンス的な洗車から、数日掛けてじっくり取り組む本格的なディテイリングまで、クルマが 綺麗になるのを楽しんでいます。テロンテロンに輝くクルマを眺めながら、洗車前と後でクルマ周 りの空気の流れに違いがあるのか気になってしまうのは、高性能計算に関連する仕事のおかげだ と思っています(笑)。(K.K)

去る8月28日、小学1年生と年中の娘のピアノの発表会が予定されていました。昨年は、コ ロナ禍で開催が見送られたため、娘たちにとって初めての発表会。2か月前に演奏曲が決まり、練 習の毎日が始まりました。うまく弾くことができず、泣いたり、癇癪を起したり、ピアノをやめ ると言ったり…、うまくなだめて練習させるのに一苦労です。それでも、コツコツ頑張った甲斐 あって、なんとか形になってきたところ、前日の8月27日から緊急事態宣言期間に入り、会場 施設が閉鎖され、発表会はあえなく中止となりました。娘たちもがっかりしていましたが、ここ まで練習に付き合い、当日のドレスを用意した親としても、とても残念です。ですが、一つのこ とを一生懸命頑張った毎日は、娘たちを成長させてくれたかな、と前向きに考えることにします。 来年こそは、発表会が無事に開催されますように。(A.S)



SENAC 編集 滝沢寛之 早坂和勝	部会 水木敬明 大泉健治	後藤英昭 小野 敏	伊藤昭彦 斉藤くみ子
編集・発行	令和 3 年 東北大学 サイバー	Ĕ 10 月発行 岸 −サイエンス	スセンター
PDF 作成	仙台市青 郵便番号 株式会社	f葉区荒巻≘ 号 980-857 上 東誠社	字青葉 6-3 <sup>8</sup>

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

スーパーコンピュータ AOBA システム一覧

サーバとホスト名

ログインサーバ	login.cc.tohoku.ac.jp
データ転送サーバ	file.cc.tohoku.ac.jp

サービス時間

利用システム名等	利用時間帯			
サブシステム AOBA-A	連続運転			
サブシステム AOBA-B	連続運転			
サーバ	連続運転			
館内利用	平日 8:30~21:00			

### サブシステム AOBA-A の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	VE 数※	実行形態	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
無料	sxf	1	1VE	1 時間/1 時間	48GB×VE 数
	SX	1	1VE		
-11. <del>/ ·</del>		2~256	8VE 単位で確保	72 時間/720 時間	
天有			(VH を共用しない)		
	sxmix	2~8	1VE 単位で確保 (VH を共用する)		
占有			個別設定		

※2VE以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用

### サブシステム AOBA-B の利用形態と制限値

利用形態	キュー名	ノード数※	最大経過時間 既定値/最大値	メモリサイズ
共有	lx	1~16	72 時間/720 時間	
占有	個別設定			20000ヘノート数

※2ノード以上を利用した並列実行にはMPIの利用が必用



[共同研究成果]

[云南朝九风木]		
津波浸水被害推計シミュレーションのベクトル・スカラーハイブリッド MPI の 	評昭孝雅一広俊価裕志之彦明一	1
ゲージ場の異常性に起因するモノポールによる		
QCD のクォーク閉じ込め機構のモンテカルロ法による研究		
	恒雄	9
石黒	克也	
平口	敦基	
複数領域時間領域差分法(MR-FDTD)法を用いた		
Frequency Modulated Interrupted Continuous Wave (FMICW) $\mathcal{V} - \mathcal{F}\mathcal{O}$		
電磁界シミュレーション手法の開発有馬	卓司	16
字野	亨	
乱流パフの時空間欠性と DP 普遍性に関する一考察:		
環状クエット・ポアズイユ流の直接数値シミュレーション		
••••••竹田	一貴	22
森松	浩隆	
塚原	隆裕	
[報 告]		
Tokyo2021 OpenRoaming / Passpoint Trial 実施報告後藤	英昭	34
<計算科学・計算機科学人材育成のためのスーパーコンピュータ無償提供利用制	<b>訓度&gt;</b>	
グループスタディI・計算機アーキテクチャ・高性能計算特論報告	• / •	
	隆輔	39
$\begin{bmatrix} \mathbf{z} & \mathbf{y}^{*} & \mathbf{z} & \mathbf{y}^{*} \end{bmatrix}$		
[スーハーコンヒュータ AOBA のわ知らセより]		40
シミュレーチットアニーリングノフトウェアの利用について		40
		40
岡田 / ノリクーションのハーション / ツノについし		41
子 部子生のためのスーハーコンヒュータ 悪債 従供 利度 について		41
執筆要項		42
スタッフ便り	•••••	43

