

# In-situ 可視化ライブラリ“VISMO”を用いた一様等方性乱流の構造解析

## Analysis of structures in homogeneous turbulence by the use of in-situ visualization library “VISMO”

- 三浦英昭, 核融合研, 岐阜県土岐市下石町 322-6, E-mail: miura.hideaki@nifs.ac.jp  
大野暢亮, 兵庫県大, 兵庫県神戸市中央区港島南町 7-1-28, E-mail: ohno@sim.u-hyogo.ac.jp  
大谷寛明, 核融合研, 岐阜県土岐市下石町 322-6, E-mail: ohtani.hiroaki@nifs.ac.jp  
Hideaki Miura, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-Cho, Toki, Gifu 509-5292  
Nobuaki Ohno, University of Hyogo, 7-1-28 Minatojima-minamimachi, Chuo-ku, Kobe, Hyogo 650-0047  
Hiroaki Ohtani, National Institute for Fusion Science, 322-6 Oroshi-Cho, Toki, Gifu 509-5292

In-situ visualization library “VISMO” has been developed for the purpose of visualizing numerical data of plasma particle simulations. VISMO library consists of many functions which are described mainly by FORTRAN language. We apply VISMO library for analysis of turbulence structures in direct numerical simulations of homogeneous and isotropic turbulence. Turbulent coherent structures are studied with the help of the VISMO library. It is shown that VISMO is suitable for visualization of a large-scale numerical simulation.

### 1. はじめに

高レイノルズ数乱流の直接数値シミュレーションは、中性流体のシミュレーション、電磁流体力学(MHD)シミュレーションともに大規模化が進んでいる。大規模シミュレーションでは、数千から数万プロセスによる並列計算も日常的に行われるようになり、これに伴い、数値シミュレーションの結果を確認するための可視化についての負担が増している。数千、数万プロセスに分かれたシミュレーションデータを統合し、手元のワークステーションにダウンロードすることは、可視化に要する労力の面からも、スーパーコンピュータ上に確保するストレージの容量からも困難である。ましてや、時間発展データの膨大なデータ量についてこれを行うことは現実的ではなくなっているとの認識が広がり、その解決策として in-situ 可視化が謳われるようになってから久しい。

In-situ 可視化ライブラリ“VISMO”は、プラズマの粒子シミュレーションをはじめとする数値シミュレーションに容易に組み込んで使用できるライブラリとして、大野、大谷によって開発された<sup>①</sup>。VISMO の特長は、Fortran で記述されているために、日ごろ数値シミュレーションに Fortran を使用しているユーザにとって可読性が高いことである。また、特殊なライブラリは使用しておらず(画像出力のために png ライブラリを使用するが、必須ではない)、VISMO ライブラリのみで完結してライブラリを構築可能であるために、ポータビリティが高いことも大きな長所として挙げられる。

我々は、この in-situ 可視化ライブラリ VISMO を擬スペクトルシミュレーションコードに組み込み、Hall MHD、拡張 MHD 乱流や<sup>②</sup>、圧縮性乱流<sup>③</sup>の可視化に使用してきた。本稿では、in-situ 可視化ライブラリ“VISMO”を用いて、一様等方性 Hall MHD 乱流の大規模直接数値シミュレーションの in-situ 可視化解析を行った結果について報告する。

### 2. 擬スペクトル法シミュレーションコードへの VISMO 実装

本稿で用いるシミュレーションコードは、非圧縮性 Hall MHD 方程式 (これは MHD 方程式系にイオン・電子 2 流体効果を一部導入した方程式である)を擬スペクトル法と Runge-Kutta-Gill 法で解くためのシミュレーションコード“MUTSU-T3/iHallMHD”である。モジュールを入れ替えることで、非圧縮性 Hall MHD(iHallMHD3D) の代わりに非圧縮性 Navier-Stokes(iNS3D)、圧

縮性 Navier-Stokes (cNS3D)方程式を解くこともできるようになっており、これに合わせて名前も MUTSU-T3/iNS3D、MUTSU-T3/cNS3D と変えるようにしている。

このシミュレーションコードに VISMO の機能を実装した。プログラムの冒頭で VISMO に関わる初期化を行い、可視化に使用する配列(たとえば scalar1, scalar2, ...)を登録する。その後、シミュレーションの可視化パートにおいて、scalar1, scalar2 などの配列にデータを渡し、可視化開始の関数をコールすることで、可視化プロセスを開始する。可視化の際に必要な袖通信などはすべて VISMO ライブラリの中で行われるため、ユーザは関知する必要がない。(後述するように、MUTSU-T3/iHallMHD3D コードは袖領域がないため、袖領域のある配列へのコピーだけは必要になった。)

VISMO は等値面、流線、矢印、等高線 (2 次元断面のスライス) などの可視化機能をサポートしている。これらの可視化処理を具体的に指定するには、VISMO\_config.vsm と名付けられた (デフォルトファイル名はライブラリビルドの際に変更可能) コンフィグファイルに記述することができる。このコンフィグファイルと、VISMO 初期化の際に登録した変数セット(scalar1, scalar2, ...)の組み合わせに従って、VISMO が可視化処理を行う。

VISMO のコンフィグファイルでは、可視化手法だけではなく、カメラの位置や光線、出力画像解像度などを指定できる。本稿で紹介する DNS では、3 点にカメラを設置し、(x, y, z)方向から 2 つのスカラーの等値面を 3 枚(scalar1, scalar2, scalar1 および scalar2 の重畳)出力する。また、画像解像度もコンフィグファイルで指定することができる。本稿では 2048×2048 である。

### 3. 一様等方非圧縮性 Hall MHD 乱流

この節では、一様等方非圧縮性 Hall MHD 乱流の直接数値シミュレーション(DNS)を、核融合科学研究所のプラズマシミュレータ(富士通 PRIMEHPC FX100)で実行した結果について述べる。この計算では、格子点数が  $N^3=2048^3$ 、ノード数 256、プロセス数 512 (16 スレッド並列)で実行した。Hall MHD 乱流において重要なパラメータである Hall パラメータ (イオン表皮長のシステム長に対する比率; イオン表皮長より長いスケールが MHD スケール、短いスケールは微視的スケールと呼ばれる)は 0.025 である。

Fig. 1 は、Hall MHD 乱流の DNS を行った際の可視化結果である。

Fig. 1(a)はエンストロフィー密度、(b)は2乗電流密度、(c)はその両者を合わせて可視化した。カメラは3点に設置されているため、(a)-(c)のような画像が3組出力されるが、ここでは1組のみ表示する。また、VISMOの画像出力は2048×2048であるが、ここでは紙面の幅も考慮して、1536×865ピクセル相当の領域を表示する。

Fig.1(a)では、エンストロフィー密度に多数の管状構造が存在することがわかる。一般にMHD乱流の特徴的な構造としては、渦層と電流層が良く知られている<sup>(4)</sup>が、Hall MHD乱流では、速度場と磁場(渦度場と電流密度場)の凍り付き関係がHall項の導入によって変化し、渦層から管状渦構造への遷移が発生することがわかっている<sup>(6)</sup>。この遷移はイオン表皮長よりも微細なスケールで発生するが、構造形成の過程で、より長波長の成分まで及ぶこともわかっている。Fig.1(b)の電流密度は、電流層がフィラメント化した状況を表している。Fig.1(c)では、エンストロフィー密度場と電流密度場が、必ずしも重なり合わず、かといって完全に分離することもなく存在することを示している。

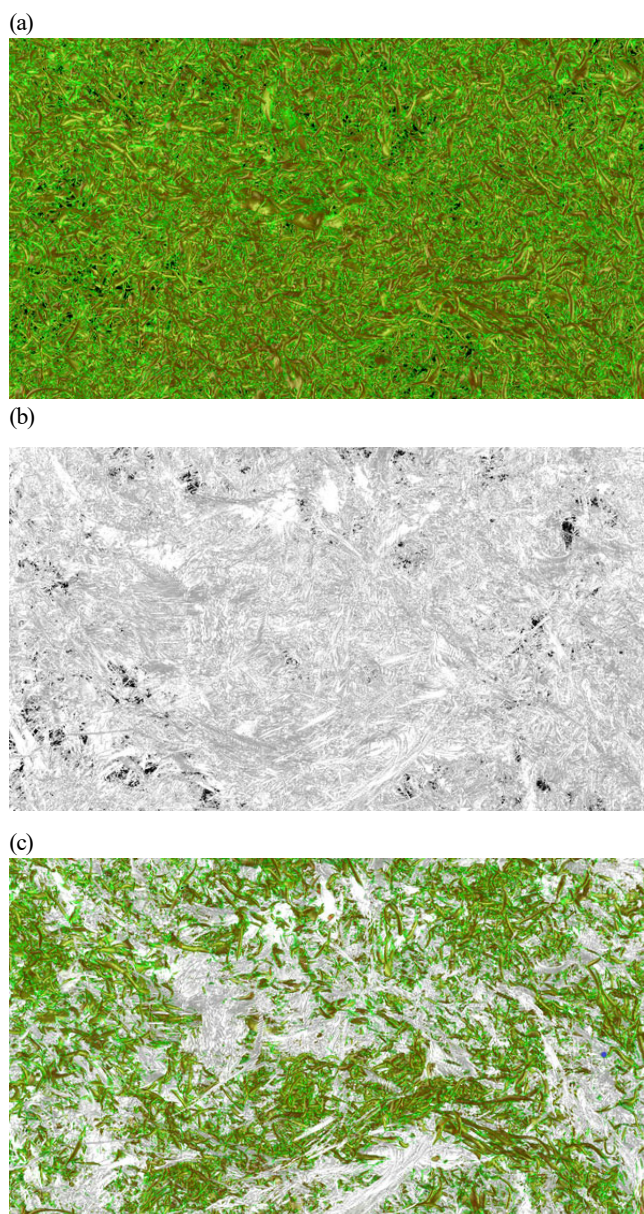


Fig. 1 Isosurfaces in DNS of Hall MHD turbulence. (a) Enstrophy density, (b) current density, and (c) both enstrophy density and current density.

Fig.2 は、シミュレーションに要する各サブルーチンの計算コス

トの出力(抜粋)である。1本のジョブの中で、時間発展のためのサブルーチン“march”が530回コールされている。これは、擬スペクトル法で非圧縮性 Hall MHD 方程式の右辺項を評価し、Runge-Kutta-Gill法で解く、DNSの基本となる部分である。図1からわかるように、marchが530回コールされ、実時間(elapse time)で15908秒を要しているのに対し、可視化処理の全体を表すサブルーチンmomentは2回コールされて248.4秒、VISMOの機能を使用して可視化に要する時間(VISMOIF\_visualization)は2回のコールで128秒程度である。(marchのコール回数に比べて可視化の回数が少ないのは、Hall項に起因する分散性波動のため、CFL条件が厳しく、 $\Delta t$ が極めて小さいためである。)

主要なサブルーチンmarchのコストが1回あたり30秒なので、一見してVISMOのコストは高いように見える。しかし、このほとんどは、シミュレーション用に用意された配列から、VISMOの可視化処理用に用意された配列にコピーする、VISMOIF\_copyのコスト(2変数×2回, 115.7秒)が占めている。VISMOは、袖領域のある差分コードについては、配列コピーなしで可視化ができるように配慮されている。したがって、本来この部分は不要である。しかし、今回使用した擬スペクトル法のコードは、VISMOとは独立に開発され、配列に袖領域を持たない構造となっている。このため、本来不要のはずであった配列コピーを行うことになり、計算時間の損失を招いている。(この点は、シミュレーションコード側で近々に対応予定である。)この意味において、VISMOに要するコストは、2変数9枚の2048×2048画像の出力に対して、1回あたり6.1秒程度である。サブルーチンmarchのコール回数とVISMOによる可視化処理回数の違いを考慮すると、VISMOの可視化処理コストは無視できると考えられる。

ID	REGION	TIME[s]	SCOUNT
	TOTAL TIME	16211.066	
1	timesteploop	16072.262	1
10	march	15908.446	530
(中略)			
140	moment	248.401	2
200	VISMOIF_visualization	127.956	2
201	VISMOIF_copy	115.725	4

Fig. 2 Computational cost in a direct numerical simulation of homogeneous and isotropic Hall MHD turbulence. ID indicates the identification number of main subroutines in the simulation code. REGION indicates a name of subroutines or prescribed partition of a subroutine. SCOUNT indicates the number of subroutine calls..

#### 4. 乱流渦・電流構造のスケール依存性解析

VISMOの可視化処理の低コストを活かし、DNSの過程で乱流中の空間構造のスケール依存性についての可視化解析を行った。Fig.3(a)-(c)は、Fig.1(c)と同じデータについて、カットオフ波数が(a)  $k_{max}/2$ 、(b)  $k_{max}/8$ 、(c)  $k_{max}/16$ のローパスフィルターを渦度場、電流密度場に作用させ、その後にエンストロフィー密度、2乗電流密度場を計算し、VISMOで可視化処理したものである。ここで、 $k_{max}$ は擬スペクトル法の最高波数(aliasing誤差除去に2/3則を使用している)である。本稿では計算解像度が $2048^3$ なので、 $k_{max}=682$ である。

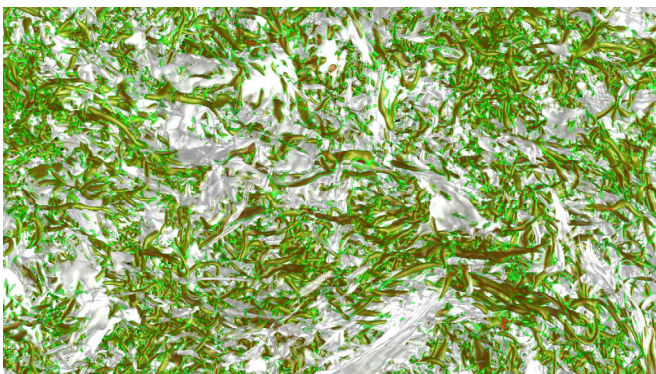
Fig.3(a)-(c)で2乗電流密度場を比較すると、フィルターのカット

オフ波数に関わらず、ほぼ同じ領域に等値面があることがわかる。これは、空間のスケールによらず、ほぼ同じ位置に強い電流密度（電流層）が存在することを示している。これに対し、渦構造（エンストロフィー密度）の場合、Fig.3(a)と Fig.3(b)で渦構造は異なる場所に現れる。さらに、Fig.3(c)では管状渦構造が不明瞭になりつつ、やはり(b)とは異なる位置に現れる。このように、電流密度場と渦度場では、空間スケールに対する依存性が全く異なることがわかる。

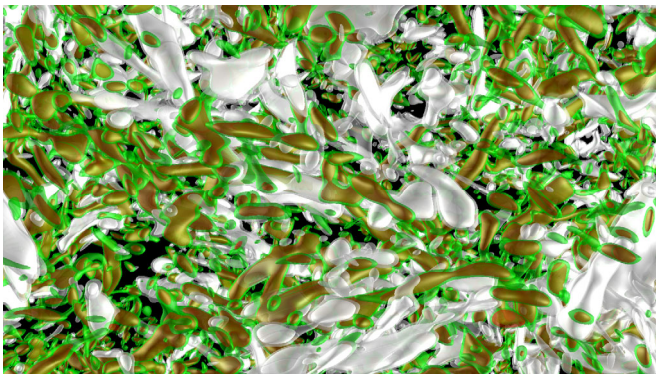
## 5. まとめ

本稿では、Hall MHD 乱流についての in-situ 可視化ライブラリ VISMO による可視化解析を試みた。VISMO による可視化は、DNS においてシミュレーション時間を大きく失うことなく、大規模データの高解像度出力が可能であり、利便性が極めて高いことがわかる。講演では、VISMO により出力された画像からの動画

(a)



(b)



(c)

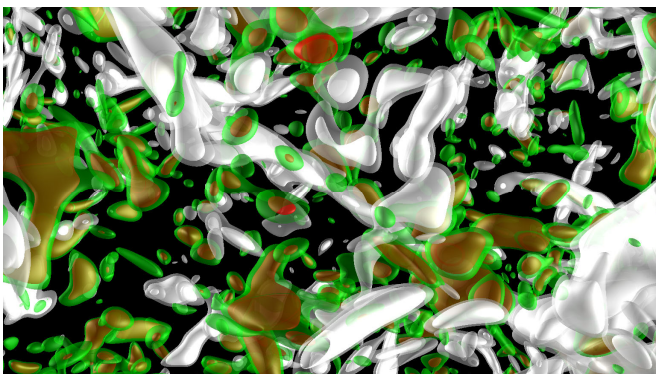


Fig. 3 Isosurfaces of enstrophy density (green and red) and current density squared (gray) constructed by operating the low-pass filter (a)  $k_{\max}/2$ , (b)  $k_{\max}/8$ , and (c)  $k_{\max}/16$  to the vorticity and the current density fields.

構成や、複数のカメラによる多方向からの解析、ローパスフィルターによるエネルギー伝達関数の特徴変化の調査などの乱流渦構造解析なども合わせて紹介する予定である。

## 参考文献

- (1) Ohno, N., and Ohtani, H., "Development of In-Situ Visualization Tool for PIC Simulation," *Plasma Fusion Res.* 9 (2014), 3401071.
- (2) Miura, H. "Extended Magnetohydrodynamic Simulations of Decaying, Homogeneous, Approximately-Isotropic and Incompressible Turbulence", *fluids*, 4 (2019), 3401030.
- (3) 三浦英昭, "弱圧縮性一様等方性乱流におけるパッシブスカラーの構造形成", 日本流体力学学会年会 2018(2018 年 9 月 3 日-6 日、大阪大学豊中キャンパス、大阪市).
- (4) Biskamp, D., *Magnetohydrodynamic turbulence*, Cambridge University Press (2003).
- (5) Miura, H., and Araki, K., "Structure transitions induced by the Hall term in homogeneous and isotropic magnetohydrodynamic turbulence", *Physics of Plasmas*, 21 (2014) 072313.