

11-NA21

超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学

石原 卓 (名古屋大学大学院工学研究科)

概要 流れ, 物理, 計算科学, 情報科学分野の研究者の学際的な共同研究により, 超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学を展開した. 特に, カノニカルな乱流場, 乱流燃焼, 乱流中の粒子追跡に関する直接数値計算 (DNS) 手法の開発を実施し, 以下の成果を得た. (1) カノニカルな乱流場の世界最大規模 DNS の実現に向け, 京コンピュータ用いた一様等方性乱流の大規模 DNS の高効率化の基本方針および高レイノルズ数の平行平板間乱流 DNS を実現するのに必要な解像度を明らかにした. (2) n-ヘプタンの簡略化学反応メカニズムを用いた 3 次元乱流燃焼用コードを開発・検証し, 3 次元乱流中の自己着火過程の解析を可能にした. (3) 3 次スプライン補間の並列化および乱流混合層中の慣性粒子追跡の予備的数値実験を実施し, 高レイノルズ数乱流中の粒子運動を解析するための準備を進めた. また, 大規模データの可視化解析をシームレスに行う環境を整備し, 流れの可視化手法の高度化と格子点数 4096^3 のデータの対話的可視化を実施した.

1. 研究の目的と意義

目的: 燃焼, 雲の発生・成長過程, 火山灰や汚染物質の拡散, 高速移動物体周りの流れなどの複雑流動現象において, 乱流の果たす役割の定性的および定量的理解が必要となってきた. 複雑流動現象解明のためには, スーパーコンピュータを駆使した大規模な直接的数値シミュレーション (DNS) の実施とそれによって得られたデータの対話的な可視化・解析が非常に有効である. 特に, 近年, 大規模 DNS を実施することにより, 巨大自由度を有する高レイノルズ数 (Re) 乱流場のデータが得られるようになったため, その詳細なデータ解析による知見が, 現実的で具体的な応用問題に有効活用できるようになってきたと考えられる.

本研究では, 流れ, 物理, 計算科学, 情報科学の分野の研究者の学際的な共同により, 超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学的研究を展開する. 具体的には, 乱流のカノニカルな問題 (周期境界条件下の一様等方性乱流, 平行平板間乱流など) のさらなる大規模 DNS を目指したコード開発, 大規模 DNS によるデータベース構築, 大規模データの可視化解析および情報縮約手法の開発を行うとともに, 乱流の DNS における手法を発展させ, 燃焼, 雲の生成・発達過程などの応用問題における大規模計算を実現するた

めのコード開発を実施し, 現象の解明を目指す. 具体的に関係するコードは, 京コンピュータの使用を想定した以下のものである.

- (A) 乱流のカノニカルな問題 (周期境界条件下の Box 乱流, 平行平板間乱流) の DNS コード
- (B) 詳細化学反応および簡略化学反応メカニズムを用いた 3 次元乱流燃焼用コード
- (C) 雲物理などへの応用を考慮した, 乱流中の高効率粒子追跡コード

また, 京コンピュータによるプロダクトラン, 名大の情報基盤センター等のスーパーコンピュータを用いたデータ解析と可視化, 研究室レベルのワークステーションによるシームレスな詳細可視化解析を可能にする環境を整備し, 超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学的研究拠点の構築を目指す.

意義: 高 Re 乱流は巨大な自由度を有するため, 台風や積乱雲など現実的な高 Re 乱流の DNS は一般に不可能である. しかし, 近年のスーパーコンピュータを駆使した, 乱流の大規模 DNS により, 比較的高 Re の乱流場の直接的な解析が可能になりつつある. 近年, 日本が世界をリードしてきた乱流の計算科学的研究のノウハウをさらに進化・応用させることにより, より大規模な問題やより新しく実用上重要な問題にチャレンジすることは, 学問的に重要であるのみなら

ず、基礎的研究成果を社会／環境に還元し、役立てるといふ点からも重要であると考えられる。特に本研究で開発するコードについては以下のような意義があると考えられる。

(A) 乱流のカノニカルな問題(周期境界条件下の Box 乱流, 平行平板間乱流)の DNS コード

簡単な境界条件の下、高レイノルズ数を目指した大規模 DNS の主たる目的は乱流の普遍的な統計法則を理解することにあつたが、得られた乱流場は高レイノルズ数特有の渦構造を呈しており、その渦構造の理解が様々な高レイノルズ数の複雑流動現象の解明につながる可能性が強いことが示唆されている。そのため、カノニカルな乱流場の、より大規模な DNS によって得られる高レイノルズ数の乱流場のデータ解析は、雲生成過程など様々な応用問題の理解・予測を考える上で重要な知見を与える。

(B) 詳細化学反応および簡略化学反応メカニズムを用いた 3次元乱流燃焼用コード開発

乱流燃焼は多くの化学種の反応と乱流が相互作用する時間空間的に様々なスケールの混在する複雑な現象であり、従来は実験による研究が主であった。しかしながら、近年のスーパーコンピュータの発達により、直接数値計算が可能になりつつあり、計算科学的な解明が期待されている。本研究で開発する高効率な乱流燃焼直接数値計算コードは、様々な化学種の乱流燃焼メカニズムを詳細に解析・可視化可能にするものであり、燃焼の制御や高効率な燃焼の実現につながる。

(C) 雲物理, 汚染物質の拡散等への応用を考慮した, 乱流中の高効率粒子追跡コード

雲物理や汚染物質の拡散における現象解明のためには、乱流中の流体粒子および質量や慣性をもった粒子の振る舞いと流れ構造との関係の理解が必要である。本研究で開発する粒子追跡コードは大規模な直接数値計算によって得られる高レイノルズ数乱流中の粒子の軌道およびその統計的性質について、貴重なデータの提供を可能とするものである。

本研究で得られるデータは、高レイノルズ数のナビエ・ストークス方程式を高精度・高解像度に解くことによって得られる大規模データであり、乱流の基礎研究および応用研究に用いることのできる貴重なものである。そのため、乱流大規模データベースを必要とするコミュニティで拠点を形成し、データを共有して、有効に活用するための基盤技術を開拓することは非常に有意義であると考えられる。特に、大規模データを対話的に可視化・解析する技術の開拓とそれを可能にする環境(データ構造やストレージ)の整備は今後ますます重要になると考えられる。本研究では、実際に乱流の大規模データベースやそれを作成するための並列化プログラムを共有し、上記の可視化技術の開拓と環境の整備を実践的に実施していくところが新しく、今後の HPC の基盤技術の開発のためにも重要であると思われる。

2. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

- (1) (i) 共同研究を実施した大学名
名古屋大学, 名古屋工業大学, 筑波大学
(ii) 研究体制

【代表】総括・大規模 DNS コード開発
石原卓 (名古屋大学大学院工学研究科)

【副代表】大規模 DNS データの可視化
森健策 (名古屋大学情報連携統括本部)

【共同研究者】

- ・大規模 DNS データ解析
金田行雄 (名古屋大学大学院工学研究科)
- 有光敏彦 (筑波大学大学院数理物質科学研究科)
- 吉田恭 (筑波大学大学院数理物質科学研究科)
- ・大規模 DNS データ解析・情報縮約法の開発
芳松克則 (名古屋大学大学院工学研究科)
- 岡本直也 (名古屋大学大学院工学研究科)
- ・並列計算手法の開発
石井克哉 (名古屋大学情報基盤センター)
- ・大規模 DNS コード開発
後藤俊幸 (名古屋工業大学創成シミュレーション工学専攻)

・大規模 DNS コード開発・DNS の実施
森下浩二（名古屋大学大学院工学研究科）

(2) 共同研究分野

超大規模数値計算系応用分野

(3) 当公募型共同研究ならではの事項など

・流れ，物理，計算科学，情報科学の分野の研究者の学際的な共同を実施することにより，スーパーコンピュータを用いて作成した乱流データベースが様々な視点から有効利用され，結果として乱流の理解が深まり，当該分野の活性化につながっている。

・並列化手法に関係した情報の共有により，今回，3次元乱流燃焼直接数値計算のコードの開発とその並列化および最適化が当初の予想以上に進展し，短期間で物理的に意味のある結果が得られた。

・流れ，物理，計算科学分野と情報科学分野の共同研究により，乱流中の流れ構造の抽出に必要な可視化手法の著しい高度化が実現した。

・乱流の大規模 DNS データの整備および対話的可視化により高レイノルズ数乱流中の渦度場の詳細な3次元構造の把握が可能になった。

3. 研究成果の詳細と当初計画の達成状況

(1) 研究成果の詳細について

(A) 乱流のカノニカルな問題(周期境界条件下の Box 乱流, 平行平板間乱流)の DNS コード

平行平板間乱流について，統計的に一様な流れ方向，スパン方向，および非一様な壁垂直方向の格子の細かさと壁からの距離に依存するコルモゴロフ長 η （乱流中の微細な渦管構造はその直径が 10η 程度であることが知られている）との関係を詳細に解析することにより，フーリエ・チェビシェフ法を用いた場合の必要最小限な解像度を検討した。従来の解像度決定方法では，流れ方向の解像度が不足気味であるが壁垂直方向は十分であることを見いだした。これにより，特に流れ方向に十分な格子点数を確

保すれば，例えば，格子点数 $2048 \times 1536 \times 2048$ においても世界最大レイノルズ数 $Re\tau=5120$ の平行平板間乱流 DNS に挑戦できることが分かった。現在，地球シミュレータを用いた別のプロジェクトで格子点数 $2048 \times 1536 \times 2048$ ，壁摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re\tau=5120$ （世界最大レイノルズ数）のデータベースを構築中である。

本研究では，格子点数 $2048 \times 1536 \times 2048$ ，壁摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re\tau=2560$ の瞬時場の渦度ベクトル場および速度ベクトル場のデータを様々な手法により可視化解析する環境を整備すると同時に，市販ソフト (AVS) を駆使した，高度な可視化手法を導入し，壁近傍の詳細な渦線構造の解析を行った。その他，平行平板間乱流 ($Re\tau=640$) の時系列データの試験的な可視化（動画作成）を実施した（図 1）。

平行平板間乱流の $Re\tau=2560$ までのデータを用いて壁近傍の渦度場の解析・可視化した結果，以下のことが分かった。

(i) ヘアピン渦と呼ばれる壁乱流の壁近傍の特徴的な渦構造は流れ方向に平行で緩和層に配置した直線上の点を通る渦線のバンドルにより非常に良く表現される。（図 2）

(ii) 渦度の各成分の分散のレイノルズ数および壁からの距離への依存性は先行研究のデータと矛盾がなく，特に，壁近傍 ($y^+=1$ 程度) の渦度の流れ方向成分とスパン方向成分の分散が $Re\tau$ のあるべきで大きくなる。また，対数領域では簡単な理論解析で予想される y^+ 依存性に $Re\tau$ の増加とともに漸近していく。

(iii) 渦度の成分の確率密度関数の歪み度は $y^+=1$ 近傍では渦度の壁垂直成分， $y^+=10$ 近傍では渦度の流れ方向成分， $y^+=100$ 近傍では渦度のスパン方向成分が他の成分と比べ大きい，また，壁からの距離に応じて変化する，最も歪み度の大きい渦度成分は各々ヘアピン渦のベース部分，足部分，頭部分と密接に関係している（図 2）。

今後，高レイノルズ数壁乱流の壁近傍における渦構造の組織的な解析を行い，高レイノルズ数壁乱流の特徴を明らかにしていく予定である。

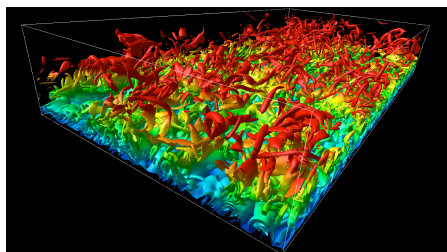
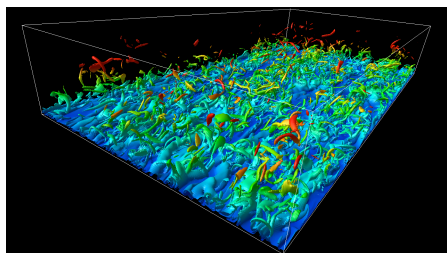
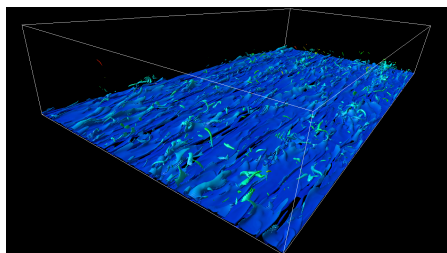


図 1: 平行平板間乱流 (格子点数 512x384x512, 壁摩擦速度に基づくレイノルズ数 $Re\tau=640$) の DNS によって得られた壁近傍の渦度等値面の時系列の可視化における初期画像. 3 つの図は閾値の違いによるもの, 色は壁からの距離を表す.

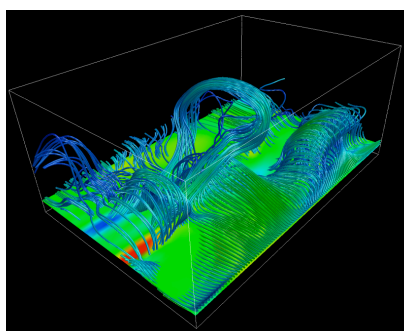


図 2: 平行平板間乱流 ($Re\tau=2560$) の壁近傍 (図 1 の白枠領域) の渦線と $y+=10$ における渦度の x 成分のカラーコンターの可視化. ヘアピン渦の脚の部分で渦度の x 成分の絶対値が大きいことが分かる.

(B) 詳細化学反応および簡略化学反応メカニズムを用いた 3 次元乱流燃焼用コード

簡略化学反応メカニズムを用いた 2 次元乱流

燃焼コードを基にして, 3 次元乱流燃焼コードを作成し, そのコードの検証を行った. 具体的に行った検証は以下の通りである.

- (i) 流れ場の速度成分と温度場の揺らぎ成分をゼロにした場合の結果と市販ソフト (Chemkin) による 0 次元計算との比較,
- (ii) 化学反応をオフにした場合 (圧縮性乱流) の結果の検証,
- (iii) 化学反応をオンにした場合の 2 次元計算と 3 次元計算の結果の比較, および 3 次元計算の結果の妥当性の検討.

(i) では我々の作成したコードの結果と Chemkin による 0 次元計算結果との間に定量的な一致が得られ, 複雑な詳細化学反応のプログラミング (各詳細化学反応の反応速度の温度依存性等を与える, Chemkin 入力ファイルからスクリプト言語を用いてコードを自動生成する部分) が正しく機能することを確認した. (ii) では作成したプログラムを化学反応のない圧縮性乱流のコードとして使用して得られる結果を先行研究と計算条件を合わせて比較し, その妥当性を確認した. (iii) では 2 次元乱流と 3 次元乱流の特徴に着目しつつ, 流れと反応の相互作用が物理的に妥当か様々な視点から検討した. その結果, 乱流強度に則した十分な解像度があれば, 物理的に妥当な結果が得られることが分かった.

以上を踏まえ, n ヘプタンの簡略化学反応メカニズムを用いた自己着火過程の 3 次元 DNS データを解析した結果, 以下のことが分かった.

- (i) 平均温度上昇と温度標準偏差に, 2 次元・3 次元で大きな違いは見られなかったが温度場の構造・反応の伝播は異なる.
- (ii) 時間発展に伴い, 3 次元場温度場の方が, 2 次元温度場よりも高波数に大きな値を持つ.
- (iii) 2 次元では, 熱発生が活発な部分は細い線状の構造をとり, 3 次元では薄い紐状の構造と膜上の構造が形成される (図 3).
- (v) 渦が反応の盛んな領域を巻き込む事がある.

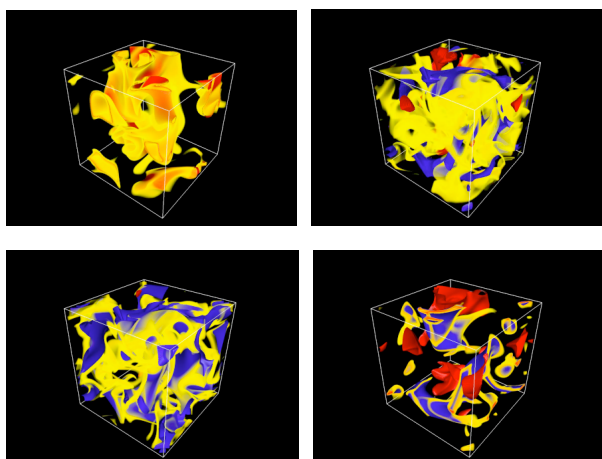


図 3: n-ヘプタンの自己着火過程の直接数値シミュレーションによって得られた、低温酸化反応進行の時系列。時間が経過するにつれ、高温部(赤)から低温部(青)に向かって、急激な熱発生を伴う反応領域(黄)が薄い膜状になって伝播する様子が分かる。

開発した 3 次元乱流燃焼並列計算コードを最適化した結果、名古屋大学のスーパーコンピュータ FX において、格子点数 256 の 3 乗、化学種数 33 (従属変数の数 37) のフラット MPI による並列計算がピーク性能 (256node, 1024core, 10.24TFlops) の約 5.4% の 0.522 TFlops で実行できることが分かった。

京コンピュータ上で MPI と自動並列のハイブリッド計算の試験的な性能計測を実施したところ、通信部分は全体の 6%程度であり、更なる高速化は SIMD の活用、高速科学計算ライブラリの活用がポイントであることが分かった。平成 24 年度はその方針で最適化を実施する。

(C) 雲物理への応用を考慮した、乱流中の高効率粒子追跡コード

高レイノルズ数乱流中の微粒子の挙動を理解するため、乱流の大規模 DNS によって得られる速度場中の高効率な粒子追跡コードが必要であるが、平成 23 年度は、そのための予備的なコード開発として、3 次スプライン補間の並列化を実施した。また、乱流混合層中の粒子追跡を可能にするコードを開発し、慣性粒子の運動が流体粒子と異なり、渦あり領域と渦無し領域の際

に集まる傾向があるという結果を得た。より高レイノルズ数乱流における知見を得るため、平成 24 年度以降に粒子追跡コードの並列化と高速化を実施する予定である。

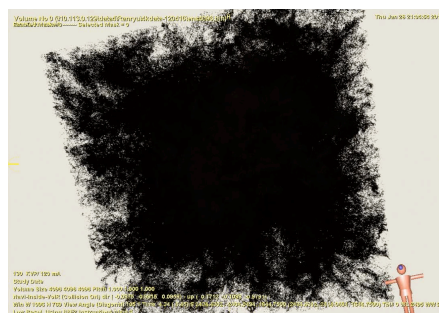


図 4: ソフトウェアによる高速ボリュームレンダリング手法(森)を用いた、格子点数 4096³ の乱流中の高渦度領域の対話的可視化。全域(上)と没入時(下)の画像。

超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学的研究拠点の構築

本研究で扱う大規模乱流データベースと乱流の直接数値計算コードを共有して、乱流研究を推進することにより、現在、以下のようなテーマで研究成果が得られている。

- ・ 高レイノルズ数一様等方性乱流中の強い剪断層の構造とエネルギー散逸およびエネルギー輸送の統計について
- ・ マルティフラクタル確率密度関数理論を用いた乱流解析
- ・ ウェーブレット変換を活用した乱流情報縮約技術に基づく、新しいシミュレーション手法の開発
- ・ MHD 乱流の直接数値計算を用いた微細構造のウェーブレット解析
- ・ 大規模データの対話的可視化(図 4)

(2) 当初計画の達成状況について

(A) Box 乱流および平行平板間乱流の京コンピュータ用の新しいコード開発という点では、プログラムはまだ完成していないが基本的な開発方針と具体的な問題設定ができたため、達成度は 75% である。また、乱流データベース生成という点では、世界最大レイノルズ数 ($Re_\tau=5120$) の平行平板間乱流データ生成の目処が立ち、現在データ生成中であるという点で 100% である。

(B) 乱流燃焼用 3 次元コードが完成し、結果検証も実施できたので計画に対する達成度は 100% である。更なる高速化は次年度の課題である。

(C) 基本コードのテストといくつかの予備数値実験は実施できたが、当初計画の並列計算による効率的な粒子追跡については今後の課題となった。したがって、達成度は 60% である。

超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学的研究拠点の構築については、可視化手法技術の向上、プログラムやデータの共有による乱流の計算科学的研究が加速しており、国際/国内共同研究へとつながっている。以上から、十分に当初の目標を達成していると考えられる。(達成度 90%)

4. 今後の展望

本共同研究で取り組んだ 3 つのコード開発を中心に、以下に各々今後の展望を述べる。

(A) 「乱流のカノニカルな問題(周期境界条件下の Box 乱流, 平行平板間乱流)の DNS コード」

最近、HPC に公表された京コンピュータにおける 3 次元 FFT の性能評価結果 (ピーク性能比 2% 未満) から、スペクトル法を用いた Box 乱流や平行平板間乱流の 3 次元 DNS で十分な実行性能を得ることは困難であると予想される。しかし、単純に汎用的な 3 次元 FFT を用いるのではなく、乱流の DNS に特化したデータ構造および演算を最適化することにより、スペクトル法における通信の隠蔽と SIMD の活用が可能になり、京コンピュータにおいても高効率演算が実現できる可能性が残されている。京コンピュータ上

で、格子点数 8192^3 を超える、スペクトル法による乱流 DNS がピーク性能比 4% 以上で実現できる可能性を見極めるのは、乱流の計算科学として非常にチャレンジングな課題であり、是非挑戦したい。また、平行平板間乱流の DNS においては、壁垂直方向に高精度差分を用いることにより、Box 乱流と比較してデータ通信量を減らすことが可能なため、効率的な計算が実現できる可能性が高いと考えられる。京コンピュータ上で $Re_\tau=10240$ を超える平行平板間乱流の大規模 DNS が実現できる可能性を見極めるのも計算科学的にチャレンジングな課題であり、是非とも取り組みたい。

(B) 「詳細化学反応および簡略化学反応メカニズムを用いた 3 次元乱流燃焼用コード」

前節で記述した通り、並列プログラムが完成し、結果検証がほぼ完了し、3 次元 DNS (格子点数 256^3 , 化学種の数:33) により、自己着火過程の物理的な考察が可能な結果が得られるようになった。

また、名古屋大学のスーパーコンピュータシステム FX1 上でのフラット MPI における性能評価 (ピーク性能比 5.4%) は十分な結果とは言えないが、京コンピュータにおいては通信 (全体の 6% 程度) がボトルネックとなっておらず、今後 SIMD を最大限に活用した最適化を実施することにより、高速化が期待できる。今後、京コンピュータ上で格子点数 2048^3 の DNS 実現を目指すことが具体的なターゲットになると考えられる。

(C) 「雲物理への応用を考慮した、乱流中の高効率粒子追跡コード」

平成 23 年度に実施した、予備的コード開発 (3 次スプライン補間の並列計算) と予備的な数値実験結果 (乱流混合層における慣性粒子の追跡) を踏まえると、乱流の大規模 DNS において、高効率な粒子追跡を並列計算によって実現することが次なる具体的な課題である。

5. 研究成果リスト

(1) 学術論文

- ・ ノルマルヘプタン均質予混合場における中間

生成物拡散が低温酸化反応過程に与える影響の
数値解析, 寺地淳, 森川貴弘, 石原卓, 金田行雄,
機械学会論文集 B 編, 77 巻 779 号
(pp.1592-1600), 2011 年

• Coherent Vorticity Simulation of Three-
Dimensional Forced Homogeneous Isotropic
Turbulence, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K.
Schneider, M. Farge, Y. Kaneda, Multiscale
Modeling & Simulation, 9(3), pp.1144-1161,
2011

• Towards a separation of the elements in
turbulence via the analyses within MPDFT
T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. Takechi, Y.
Kaneda T. Ishihara, 2011 (投稿中)

• Intermittency and geometrical statistics of
three-dimensional homogeneous magneto-
hydrodynamic turbulence: a wavelet viewpoint,
K. Yoshimatsu, K. Schneider, N. Okamoto, Y.
Kawahara, and M. Farge, Phys. Plasmas, 18,
092304, 2011

(2) 国際会議プロシーディングス

• Small-scale statistics in direct numerical
simulation of turbulent channel flow at high-
Reynolds number, K. Morishita, T. Ishihara,
Y. Kaneda, Journal of Physics: Conference
series, Vol 318, 022016, 2011

• Conditional analysis near strong shear
layers in DNS of isotropic turbulence at high
Reynolds number, T. Ishihara, J.C.R. Hunt, Y.
Kaneda, Journal of Physics: Conference
series, Vol 318, 042004, 2011

• Intermittency of quasi-static magneto
hydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint,
N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider and
M. Farge, Journal of Physics: Conference
series. Vol 318, 072035, 2011

• Directional and scale-dependent statistics
of quasi-static magneto hydrodynamic
turbulence, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K.

Schneider, M. Farge, ESAIM: PROCEEDINGS, 32,
pp. 95-102, 2011

(3) 国際会議発表

• Strong thin shear layers in high Reynolds
number turbulence, T. Ishihara, J.C.R. Hunt,
Y. Kaneda, 64th annual meeting of the APS
division of fluid dynamics, 2011.11.21

• The structure of the vorticity field in the
near-wall region of turbulent channel flow at
high-Reynolds number, K. Morishita, T.
Ishihara, Y. Kaneda, 64th annual meeting of
the APS division of fluid dynamics,
2011.11.21

• Strong shear layers in high Reynolds number
homogeneous turbulence, T. Ishihara, CCS
Symposium Autumn 2011, Nagoya Univ.,
2011.11.1

• DNS study of the small-scale statistics in
turbulent channel flow at high-Reynolds
numbers, K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda,
CCS Symposium Autumn 2011, 2011.11.1
(poster)

• Intermittency of quasi-static magneto
hydrodynamic turbulence: A wavelet viewpoint,
N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K. Schneider and
M. Farge, Turbulence Colloquium Marseille
2011, 9.29

• Intermittency of quasi-static magneto
hydrodynamic turbulence: A wavelet
viewpoint, N. Okamoto, K. Yoshimatsu, K.
Schneider and M. Farge, 13th ETC, Warsaw,
Poland, 2011.9.15

• Conditional analysis near strong shear
layers in DNS of isotropic turbulence at high
Reynolds number, T. Ishihara, J.C.R. Hunt, Y.
Kaneda, 13th ETC, 2011.9.14

• Small-scale statistics in direct numerical
simulation of turbulent channel flow at
high-Reynolds number, K. Morishita, T.

Ishihara, Y. Kaneda, 13th ETC, 2011.9.14

- 2D direct numerical simulation of intermediate Species Diffusion in Low Temperature Oxidation Process, A. Teraji, T. Morikawa, T. Ishihara, Y. Kaneda, ICDERS, 2011
- On a new interpretation of turbulence via the scaling relation of A & A model within MPDFT. T. Arimitsu, N. Arimitsu, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011), July 2011, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus.
- Verification of the scaling relation within Multifractal Probability Density Function Theory by analyzing PDFs from experiment and DNS, T. Arimitsu, N. Arimitsu, International Conference on Statistical Mechanics (Sigma Phi 2011) July 2011, Golden Bay Beach Hotel, Larnaka, Cyprus.
- Multifractal Probability Density Function Theory and Its Application to Fully Developed Turbulence, T. Arimitsu, N. Arimitsu, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, July 2011, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Multifractal Probability Density Function Theory and Its Application to Fully Developed Turbulence --- A Detailed Study of PDFs from Experiment and DNS ---, N. Arimitsu and T. Arimitsu, Fourth International Symposium: Bifurcations and Instabilities in Fluid Dynamics, July 2011, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain.
- Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of high Reynolds number turbulence , T. Ishihara, Seminar at the University of Hong Kong, 2011.6.16
- Conditional Statistics Near Strong Thin Shear Layers in DNS of High Re Turbulence ,

T. Ishihara, KITP Program: The Nature of Turbulence, 2011.4.20

- Conditional statistics near strong thin shear layers in DNS of isotropic turbulence at high Reynolds number, T. Ishihara, J.C.R. Hunt, Y. Kaneda, The School of Mathematical & Statistical Sciences Seminar, 2011.4.13
- Local-isotropy in Direct Numerical Simulation of Turbulent Channel Flow at High-Reynolds Number, K. Morishita, T. Ishihara, Y. Kaneda, SIAM Conference on Computational Science and Engineering, February 28 - March 4 2011

(4) 国内会議発表

- n へプタンの簡略反応モデルを用いた乱流中の自己着火現象の直接数値計算 , 生田博也, 石原 卓, 寺地淳 , 平成 23 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011.11.12
- 高レイノルズ数平行平板間乱流 DNS における小スケール統計, 森下浩二, 石原卓, 金田行雄, 平成 23 年度共同利用研究集会「乱流現象及び非平衡系の多様性と普遍性」, 2011.11.11
- 超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学, 石原卓, 学際大規模情報基盤共同利用・共同研究拠点第 3 回シンポジウム, 2011.7.14
- 4096³DNS 乱流のマルチフラクタル確率密度関数理論による解析, 有光直子, 武智公平, 有光敏彦, 金田行雄, 石原卓, 日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011 年
- ウェーブレット解析を用いた乱流の情報縮約手法の開発, 芳松克則, 平成 23 年度数学・数理論理学と諸数学・産業との連携ワークショップ「乱流と流体方程式の解の特異性」2012.1.27

(5) その他 (特許, プレス発表, 著書等)

なし