

12-NA10

石原 卓 (名古屋大学)

超多自由度複雑流動現象解明のための計算科学



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

1. 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)の大規模DNS
2. 雲物理への応用を考慮した, 乱流中の高効率粒子追跡
3. 簡略化学反応メカニズムを用いた3次元乱流燃焼DNS

1. 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)の大規模DNS

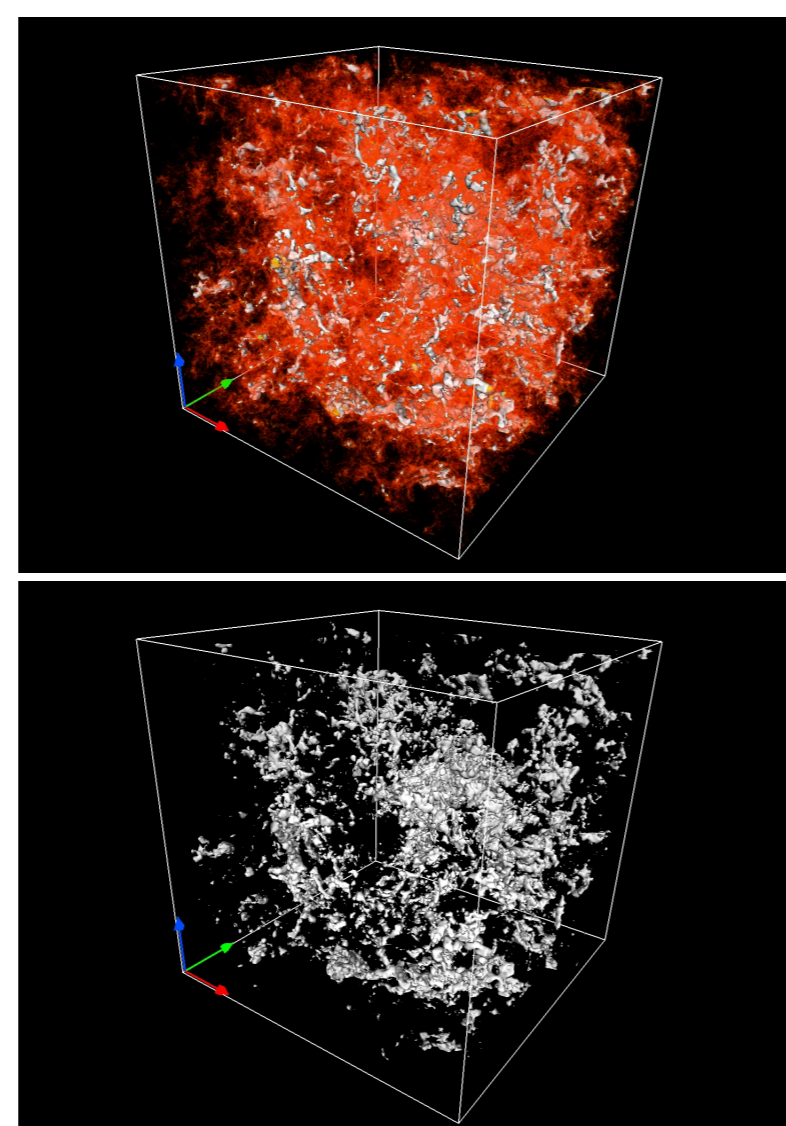
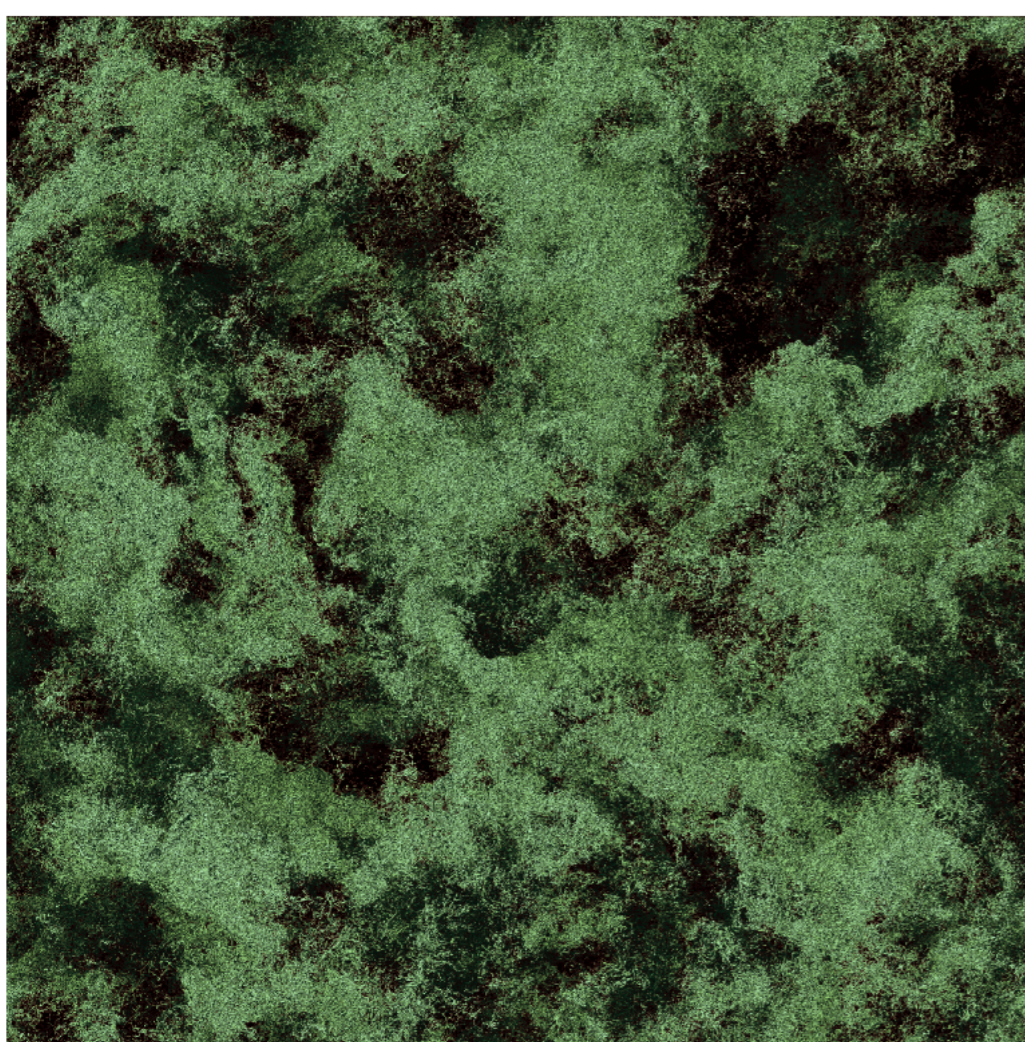
目的: 高レイノルズ数乱流の普遍的統計法則の追求と高レイノルズ数乱流特有の渦構造の解明, およびそのためのデータベースの構築と可視化

Box乱流

空間微分: フーリエ・スペクトル法

時間発展: 4次精度Runge-Kutta法

最大格子点数(現状): 4096^3 , 最大レイノルズ数: $R_\lambda=1131$



高レイノルズ数一様等方性乱流場 ($R_\lambda=1131$) の強渦度領域 (左)
テイラー長スケールの粗視化による高エンストロフィークラスターの抽出 (右)



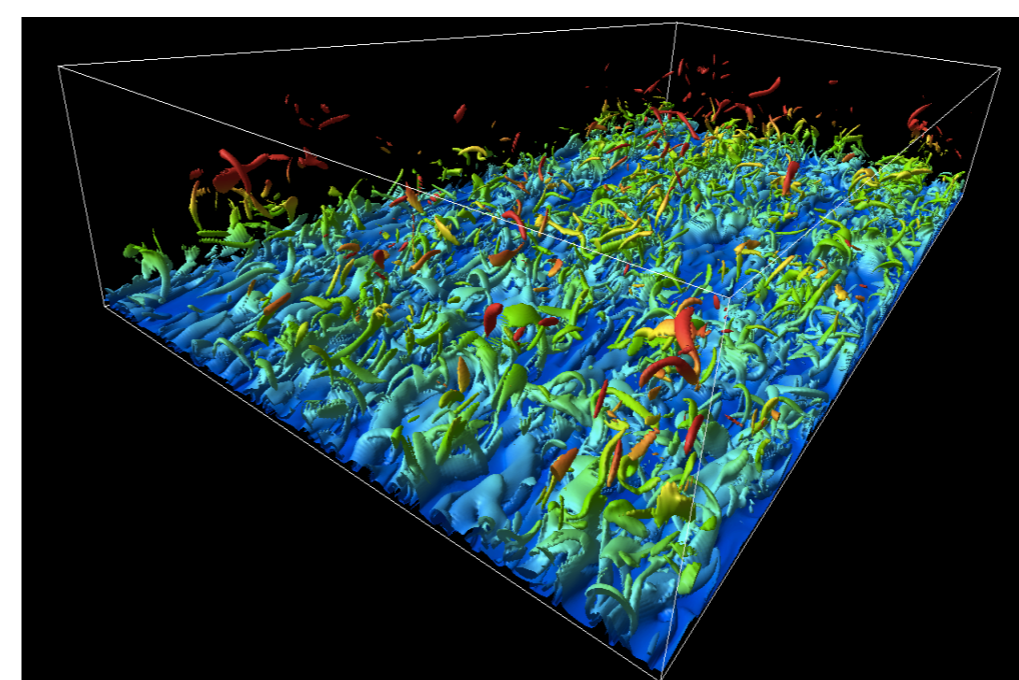
高速ボリュームレンダリング(森)を用いた格子点数4096の3乗の乱流場の対話的可視化

平行平板間乱流

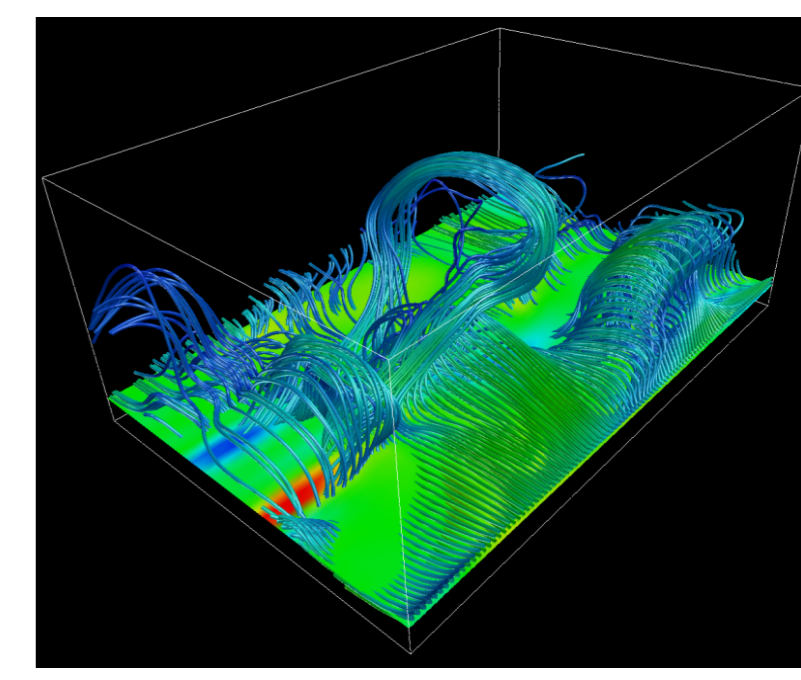
空間微分: フーリエ・チェビシェフタウ法

時間発展: 3段Runge-Kutta法 (非線形項) 1次精度陰的Euler法 (粘性項)

格子点数(現状) $2048 \times 1536 \times 2048$, 最大レイノルズ数: $R_\tau=2560$ (& 5120)



平行平板間乱流 ($R_\tau=640$) の壁近傍の強渦度領域の時系列の可視化(動画)



平行平板間乱流 ($R_\tau=2560$) の壁近傍の渦線の可視化

特徴

▶Box乱流

- ・高レイノルズ数ほど強い間欠性
- ・管状渦の集合体が形成するシャープな境界をもつ層状シア領域

▶平行平板間乱流

- ・対数領域における $k^{-5/3}$ エネルギースペクトル, 渦構造の間欠性

課題

- * より大規模なDNSを実現するためのコードの開発
- * 時系列を含めた乱流データベースの構築
- * 時系列を含めた大規模データの詳細な可視化解析をシームレスに実施するための環境の整備

2. 雲物理への応用を考慮した, 乱流中の高効率粒子追跡(コードの並列化 & 高効率化)

目的: 高レイノルズ数乱流場中の粒子の運動解析

空間微分: フーリエ・スペクトル法

時間発展: 4次精度RungeKutta法

粒子追跡: 3次スプライン補間+4次精度RungeKutta法

$St \neq 0$ のとき

粒子の運動方程式

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{V}$$

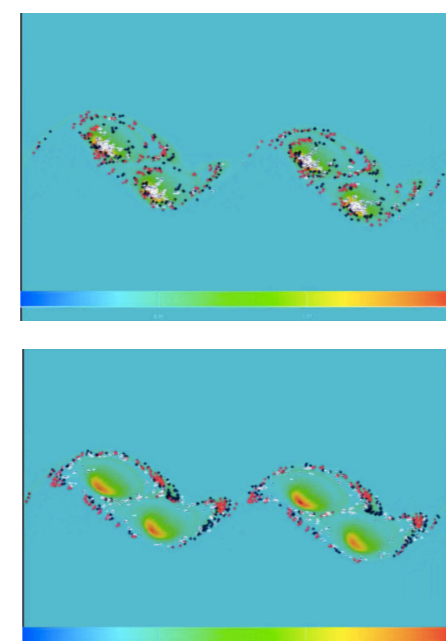
$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} = \frac{1}{St}(\mathbf{V}_T + \mathbf{u} - \mathbf{V})$$

$St = 0$ のとき

$$\mathbf{V}_T + \mathbf{u} - \mathbf{V} = 0$$

粒子の運動方程式は下の式になる

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{u} + \mathbf{V}_T$$



乱流混合層中の粒子

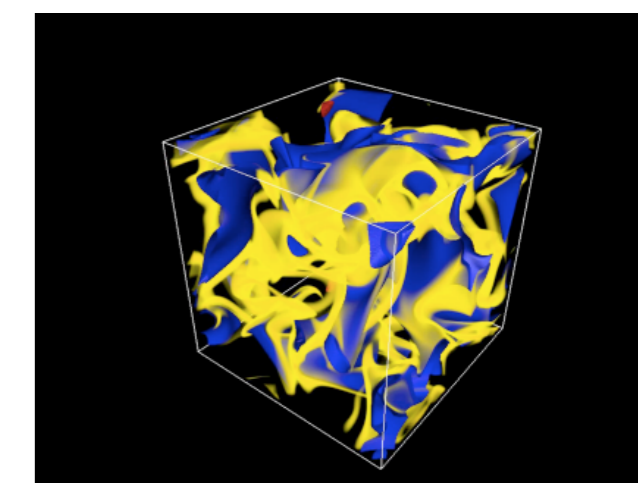
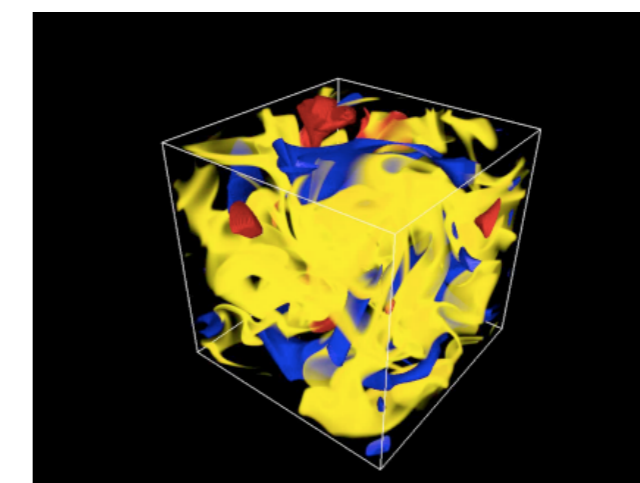
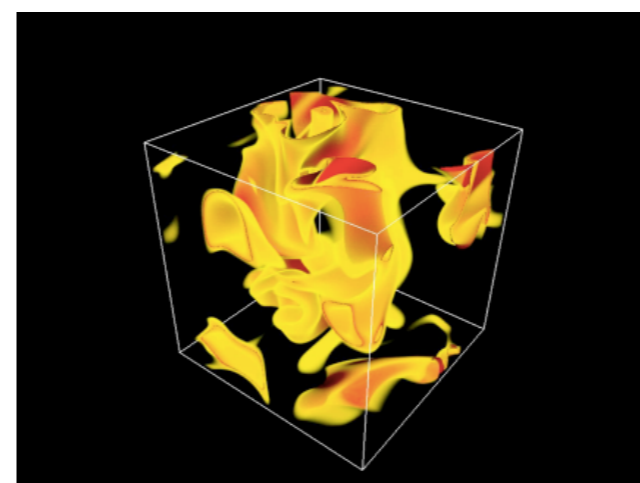
課題 * 粒子追跡の並列計算の高効率化

3. 簡略化学反応メカニズムを用いた3次元乱流燃焼DNS(コードの高効率化)

目的: 乱流燃焼の大規模DNSを実現し, 燃焼における乱流の役割を理解する

空間微分: 8次精度中心差分法, 8次精度ローパスフィルタ

時間発展: 4次精度RungeKutta法 (or 3次精度ESDIRK法)



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 (256^3) によって得られた低温酸化反応進行時において高温部(赤)から低温部(青)に進行する反応帯(黄)

課題 * 3次元乱流燃焼DNSコードの高効率化