

正味熱効率50%実現に向けた 乱流燃焼の計算科学的アプローチ 名古屋大学

芳松克則 (研究責任者, エコトピア科学研究所),
石原卓 (工学研究科附属計算科学連携教育研究センター)

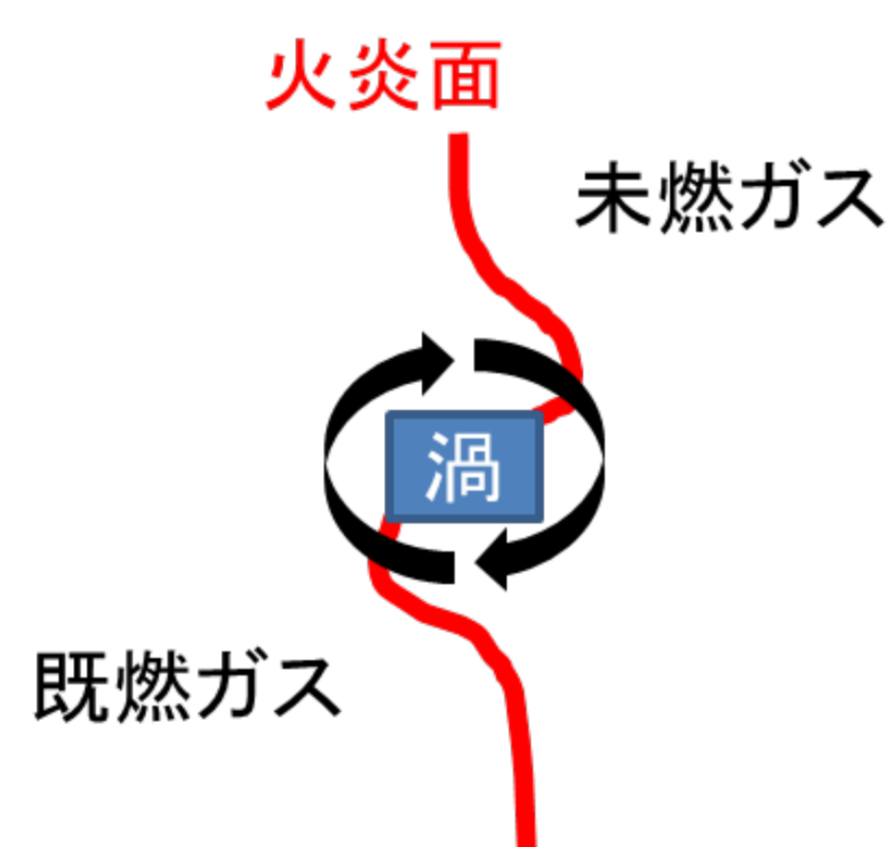
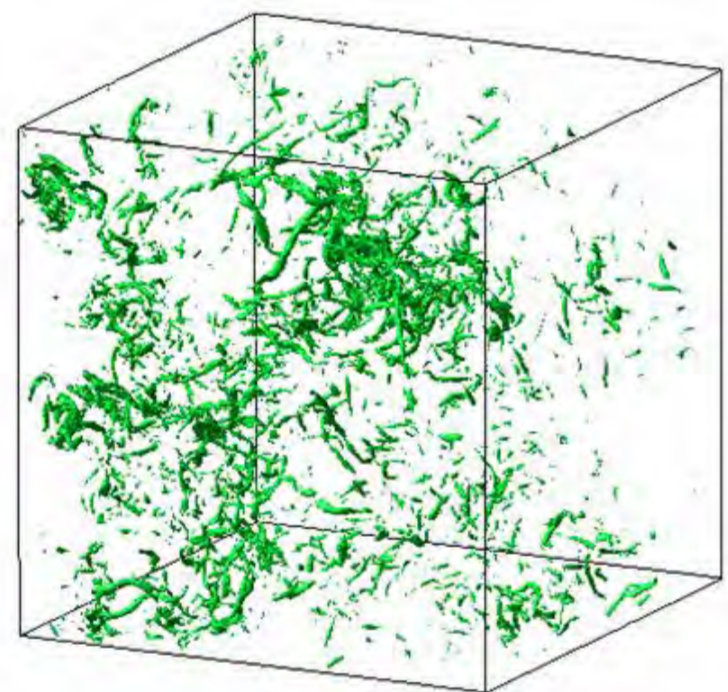
乱流燃焼の物理解明、シミュレーション基盤の形成

- 乱流燃焼の超大規模直接数値計算(DNS) データベースの構築
→ 物理解明、乱流モデルのための知見
- アダプティブシミュレーション手法の開発

乱流燃焼

- 化学反応...乱流の散逸スケールより小さいスケールで起きる
→ 速度場より化学種の濃度場により細かい格子が必要
- 反応が起きる領域・時間...限定的(燃料がなくなると反応終了)

乱流の粘性スケールでの秩序構造



渦チューブ

- 粘性スケールでの強い空間的・時間的間欠性の要因
- 燃焼など、微小スケールの現象に重要な働き
(火炎面の不安定性)

現象の複雑さ(自由度数)

- 反応の複雑さ
水素 < メタン... << (ガソリンの主成分)
nヘプタン, イソオクタン

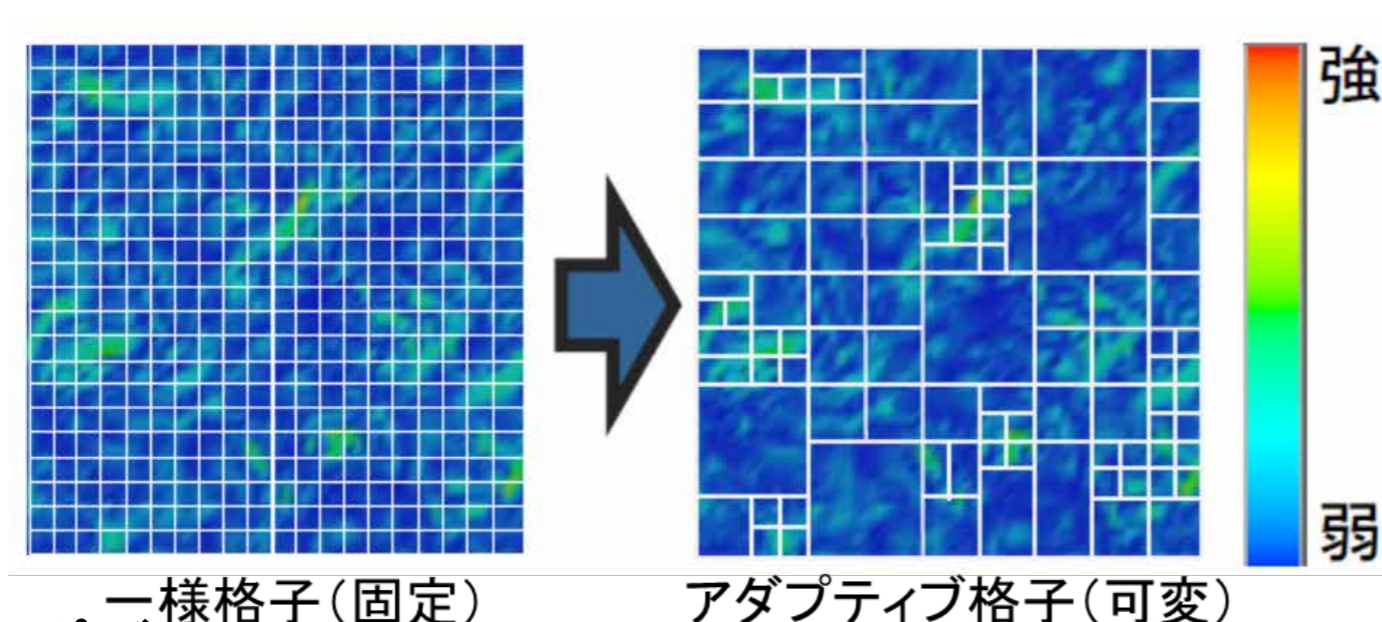
- 空間の次元
1D << 2D << 3D

- 流れの複雑さ
層流 << 乱流

計算量

- 総括反応 << 簡略化化学反応 << 詳細化学反応
- RANS << LES << DNS

→ 超大規模DNS、アダプティブ手法



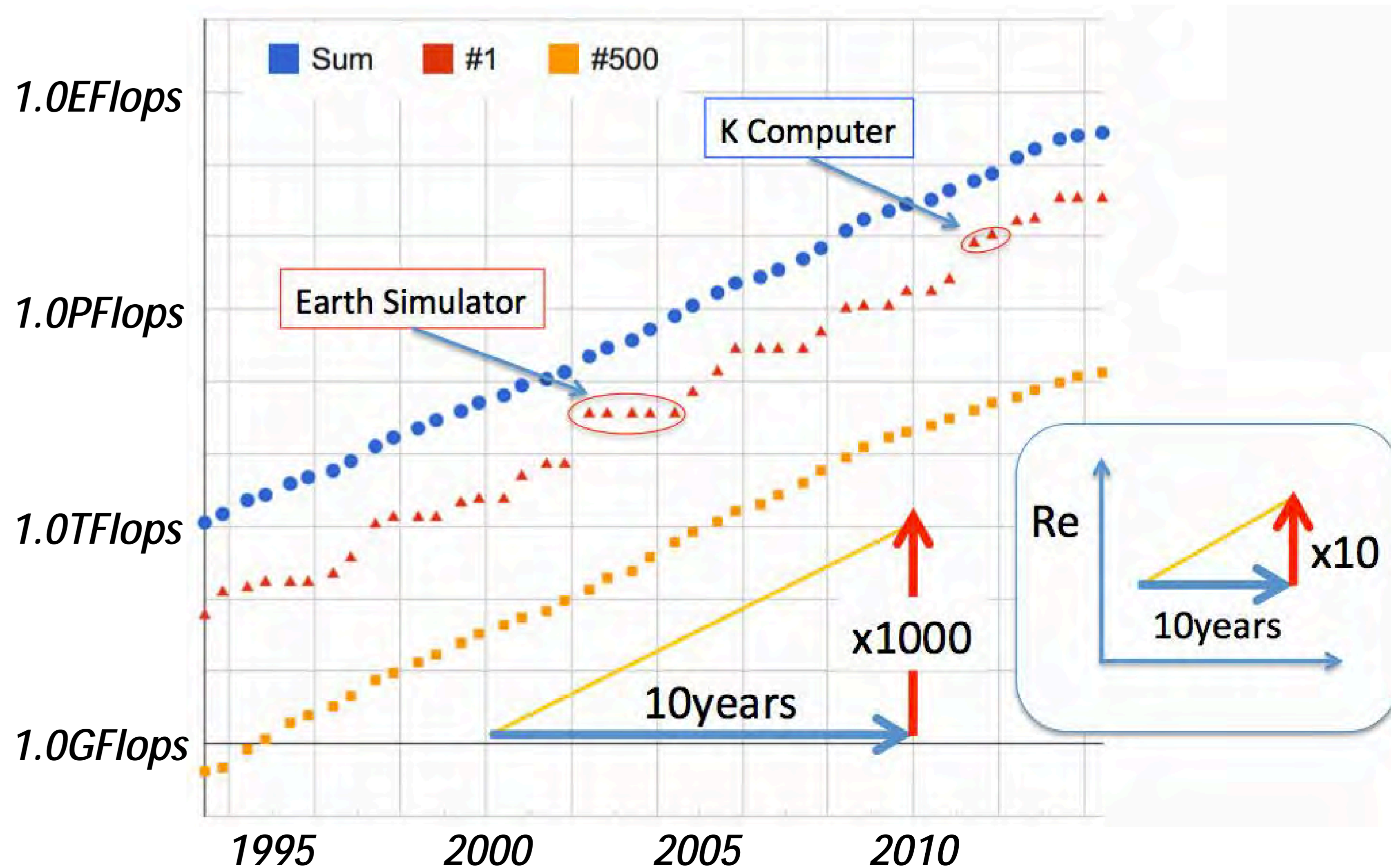
DNS

- 流れの基礎方程式をモデル化せずに計算
(恣意的パラメータを含まない)
- よく制御された条件下でデータを得られる
- 実験での測定が困難な物理量を容易に得られる
- 最小長さスケールを解像 (高精度・高解像度)

- 従来の方法 = 経験的 → 我々の方法 = 非経験的
- 実用的な燃料の様々な条件下
(A/F, 温度, 速度揺らぎ, 壁)の数値実験が可能
- 今後のスーパーコンピュータの発展
→ より大規模, より詳細な解析が可能

乱流物理, 計算科学の豊富な知見
(乱流の世界最大DNSの実績)
数理解物理的根拠のある情報縮約による計算量の低減

スーパーコンピュータの発達



1. 乱流燃焼大規模数値計算実現のための時間積分法の検討

時間発展手法

-4段3次陽的陰的Runge-Kutta法(3次精度ESDIRK法)

Kennedy & Carpenter (2003)

流体部分: 陽的RK法(Δt_f 固定)

化学反応部分: 陰的解法($\Delta t_{ch} = \Delta t_f$)

- α -QSS法(CHEMEQ2)

Mott & Oran (2001), Qureshi & Prosser (2007)

流体部分: 陽的4段4次RK法(Δt_f 固定)

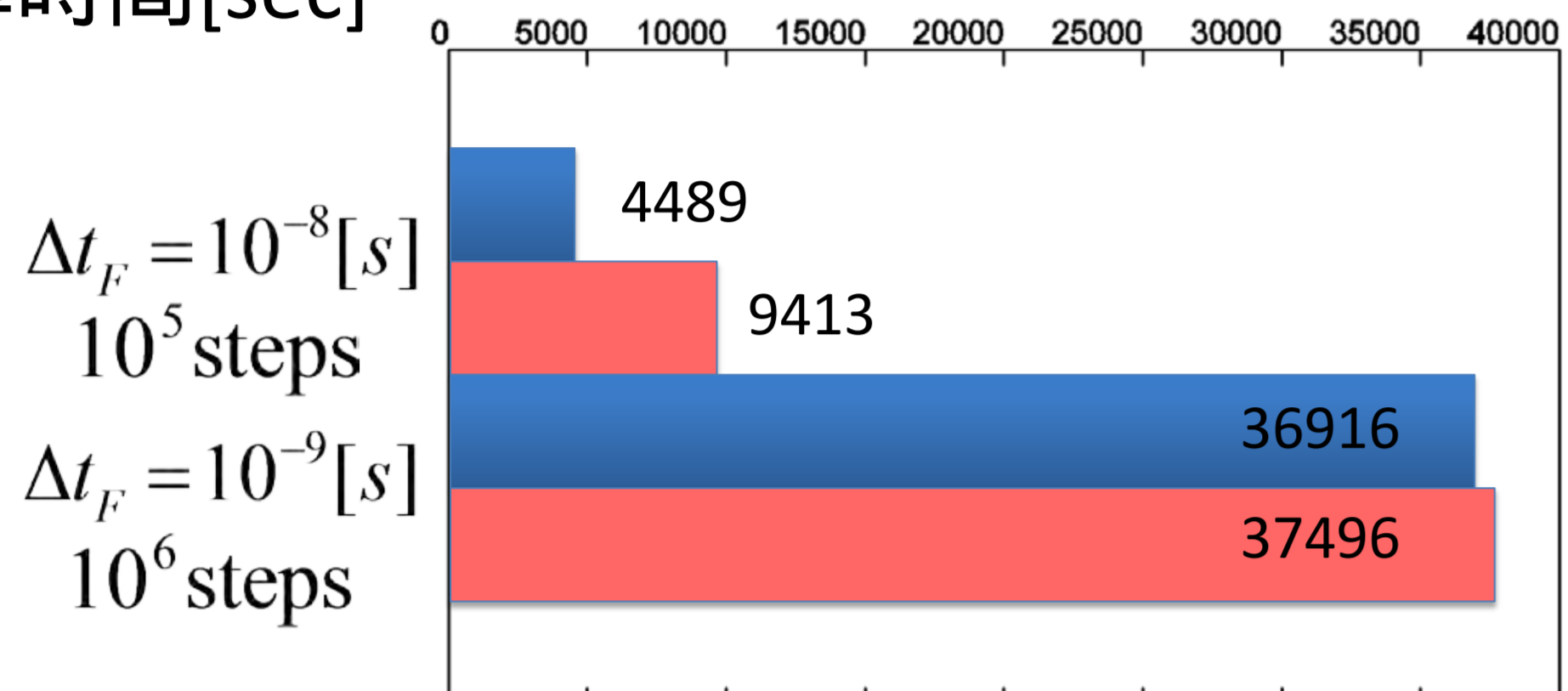
化学反応部: 陽的解法(Δt_{ch} 可変)

runI

runE

nヘプタン自己着火過程2次元DNS(化学種33、素反応38)による比較(格子点数: 256 x 256)

計算時間[sec]



名古屋大学情報基盤センター FX10システム(8ノード、128コア)使用

流体部分の Δt_f 大、化学種数小では、陰的解法の方が高効率

2. 壁あり3次元乱流燃焼DNSコード開発

支配方程式

圧縮性Navier-Stokes方程式+ nヘプタン簡略化学反応(33化学種, 38素反応)

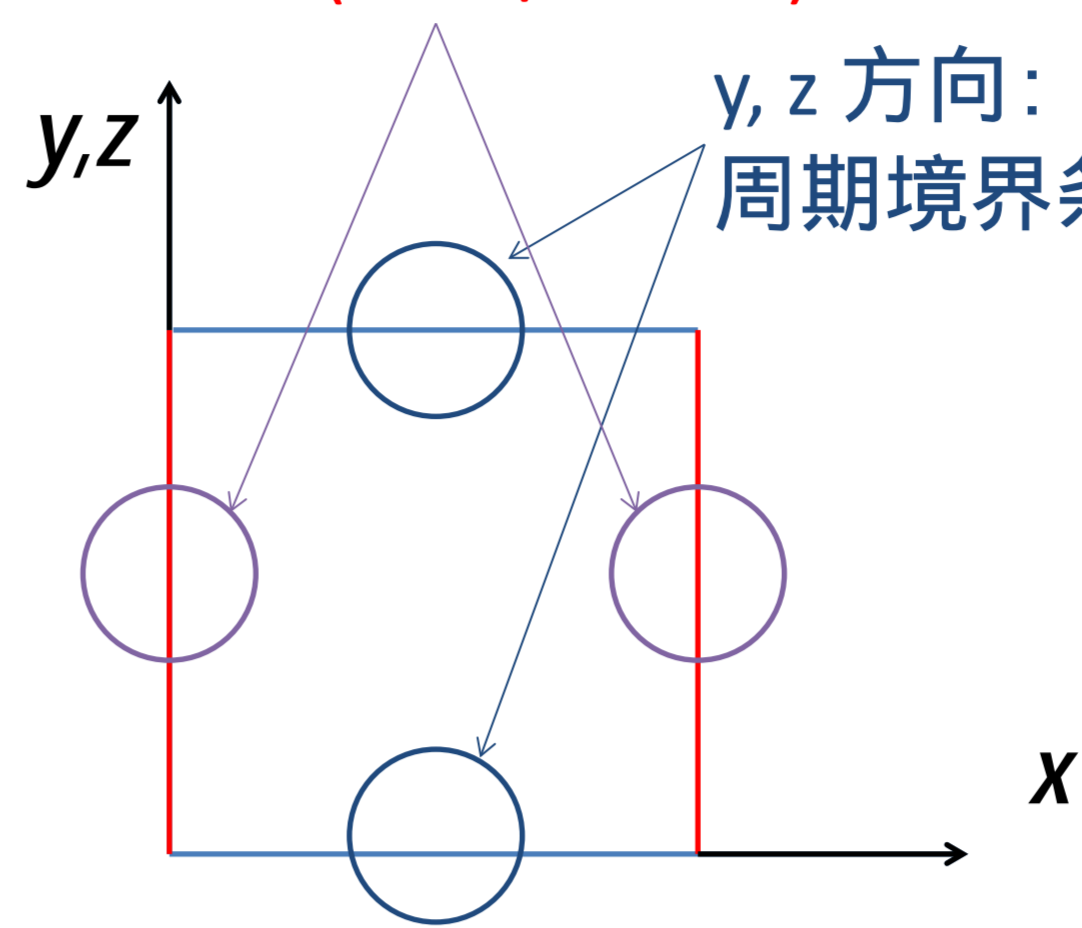
空間微分

x方向: 6次精度コンパクト差分
y方向: 8次精度中心差分

境界条件

x方向: 滑りなし等温壁 (500K/NSCBC)

y, z方向: 周期境界条件



ローパスフィルター

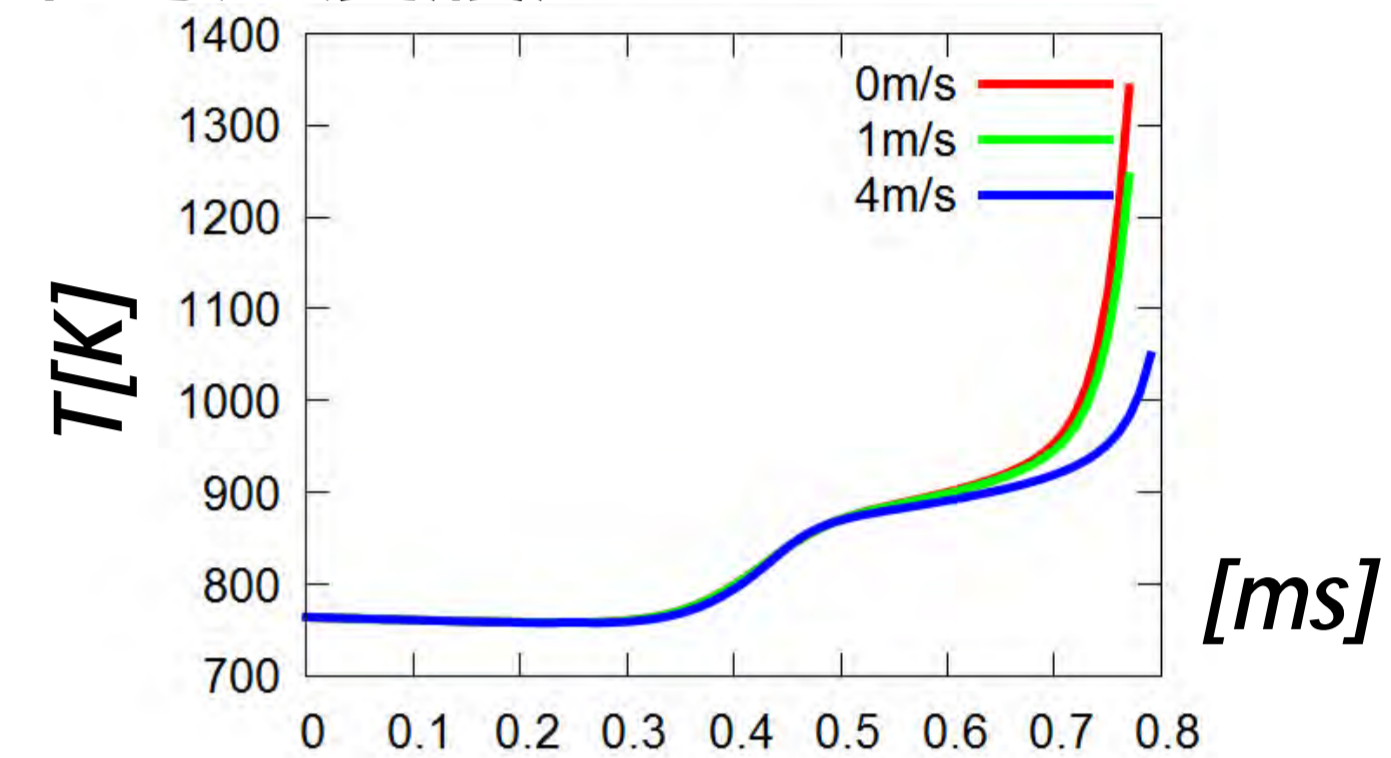
x方向: 8次精度非周期フィルター
y, z方向: 8次精度周期フィルター

時間積分

4段3次精度陽的陰的Runge-Kutta法 (3次精度ESDIRK法)

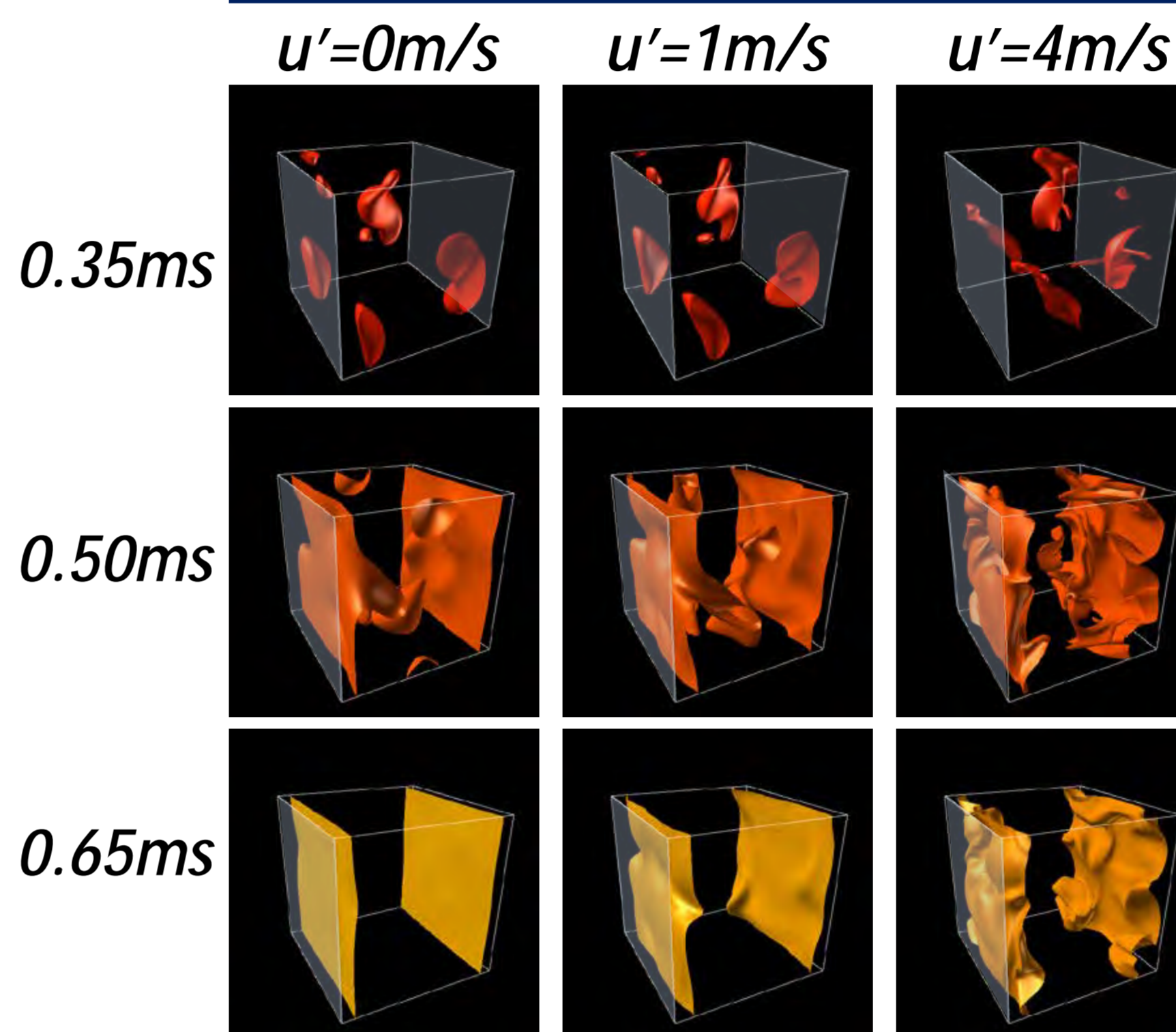
初期圧力	当量比	格子点数	計算領域
40atm	0.5	256 ³	(4mm) ³

平均温度履歴

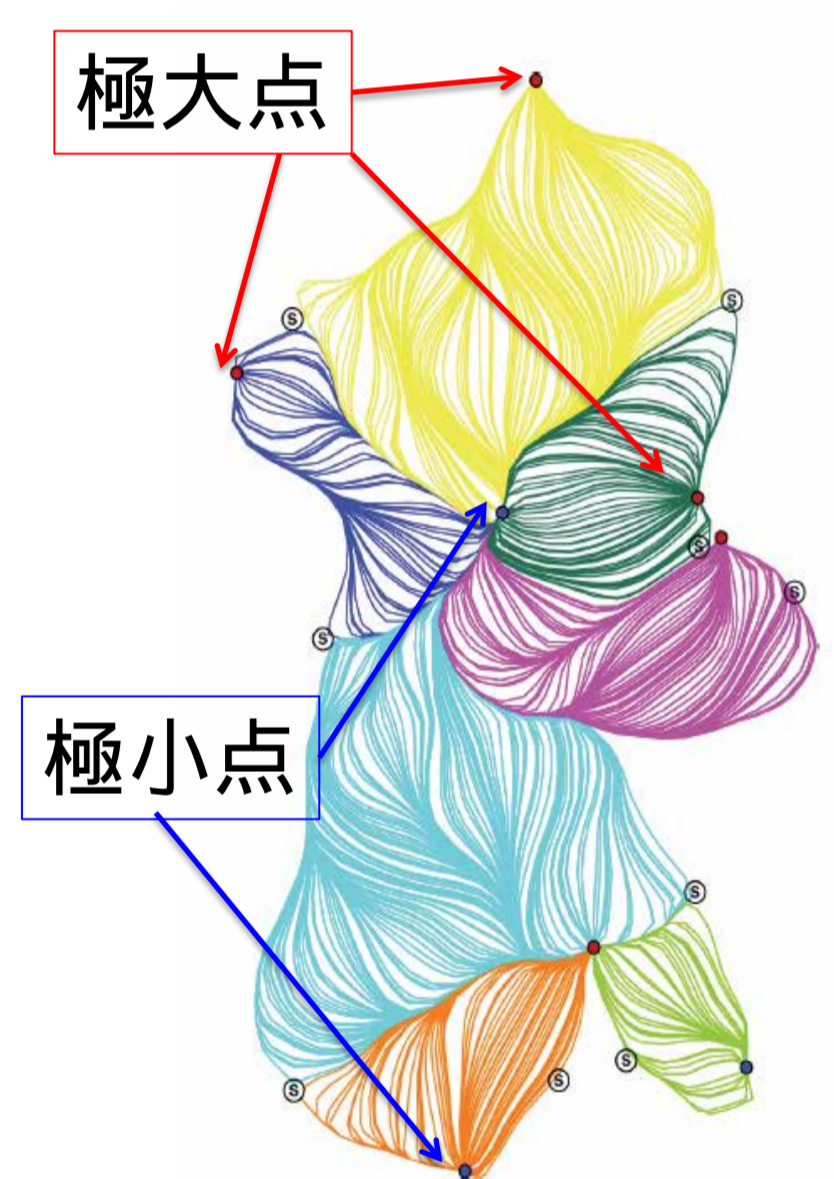


等温壁(低温)の影響

- nヘプタンの着火時期を遅らせる
- 速度揺らぎが強い場合にその影響は強くなる



3. 乱流燃焼DNS結果の散逸要素解析

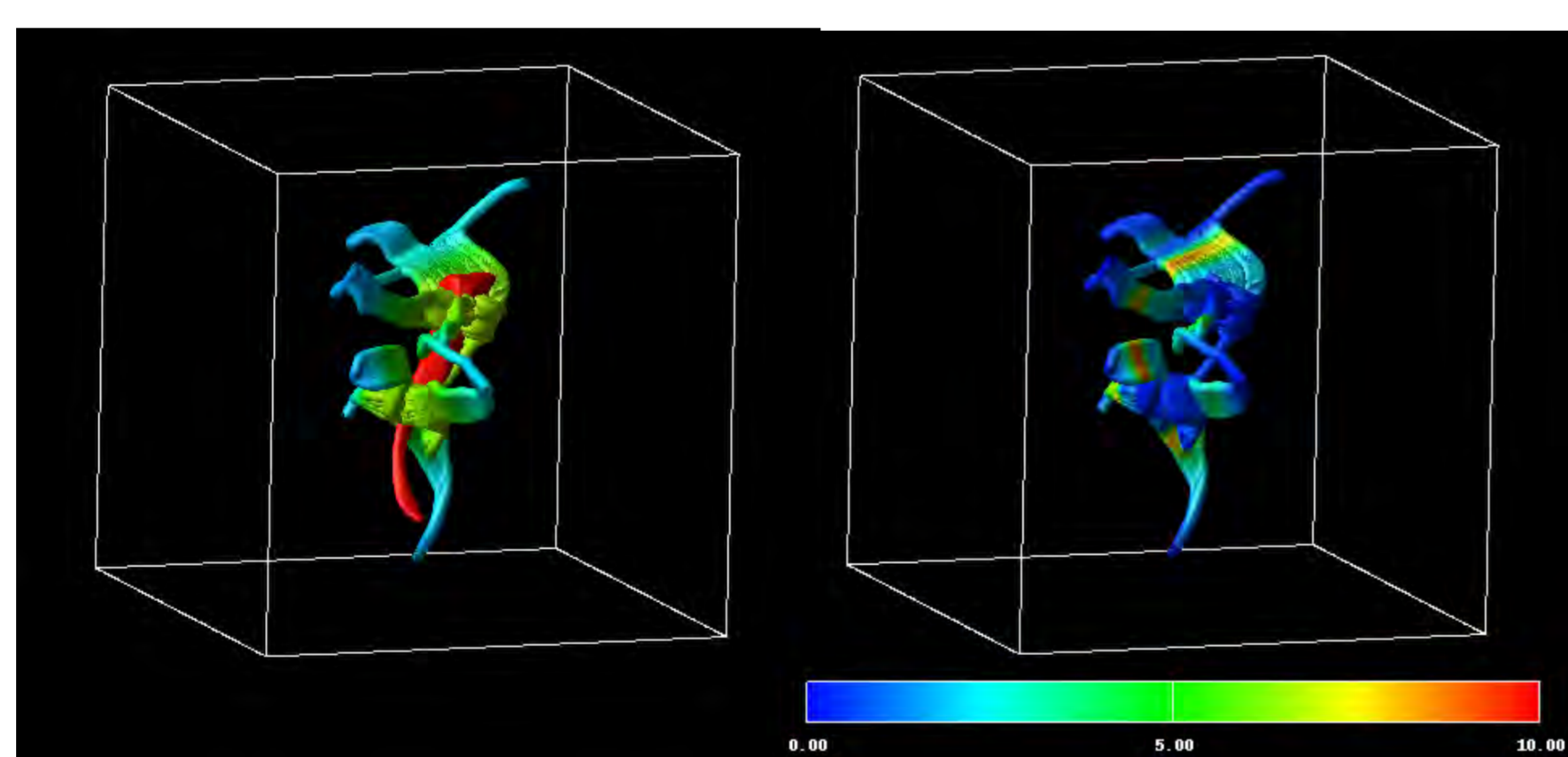


散逸要素: スカラー場中の極大点と極小点のペアを結ぶ勾配線の集合で構成される要素

→ 乱流燃焼場を要素に分けて解析することが可能

乱流燃焼の物理的理解

nヘプタン自己着火過程における、温度場の最大値点を有する散逸要素。温度による色付け(左)と温度勾配による色付け(右)

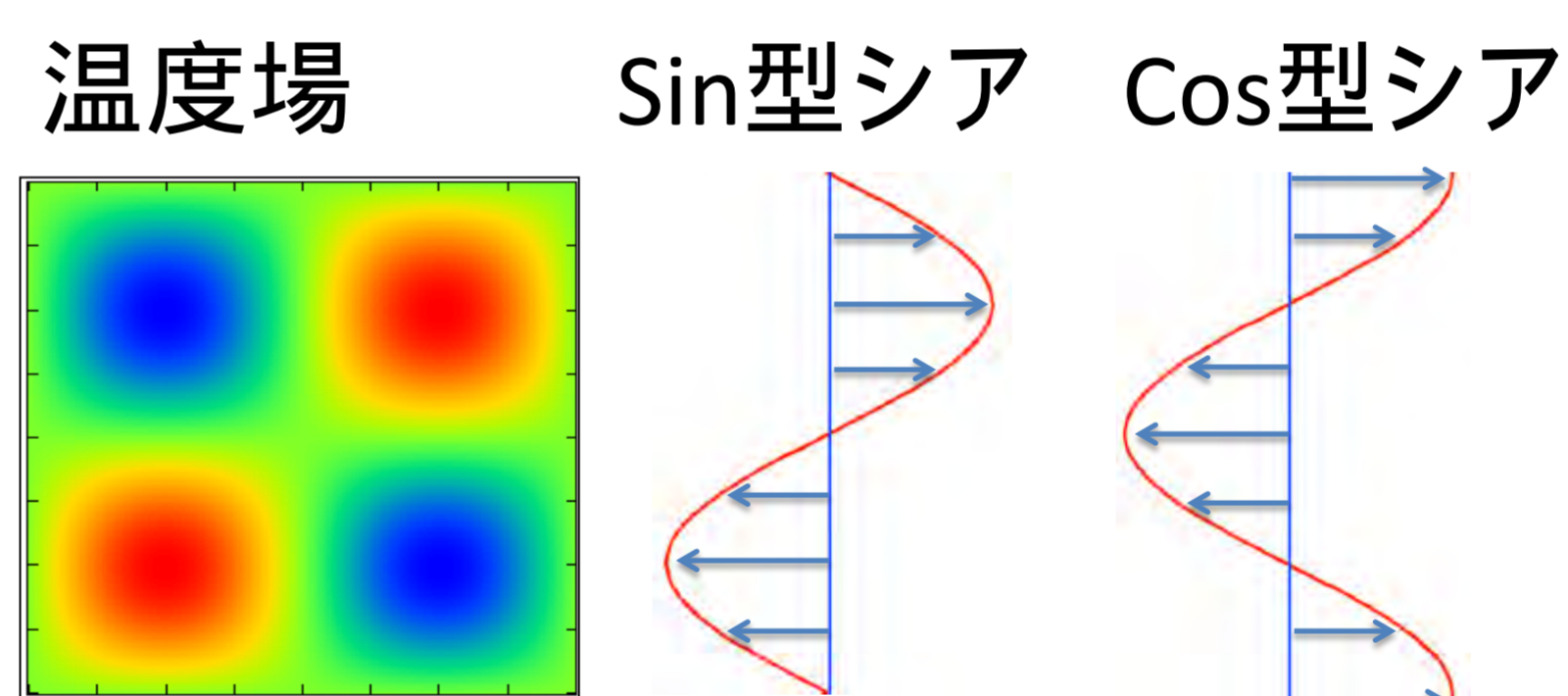


乱流強度が強くなると散逸要素が細く引き伸ばされる

- 細く伸ばされた方向: 温度勾配が小、反応進行速度は大
- それと垂直な方向: 温度勾配が大、反応進行速度は小

4. 乱流燃焼の各種数値実験

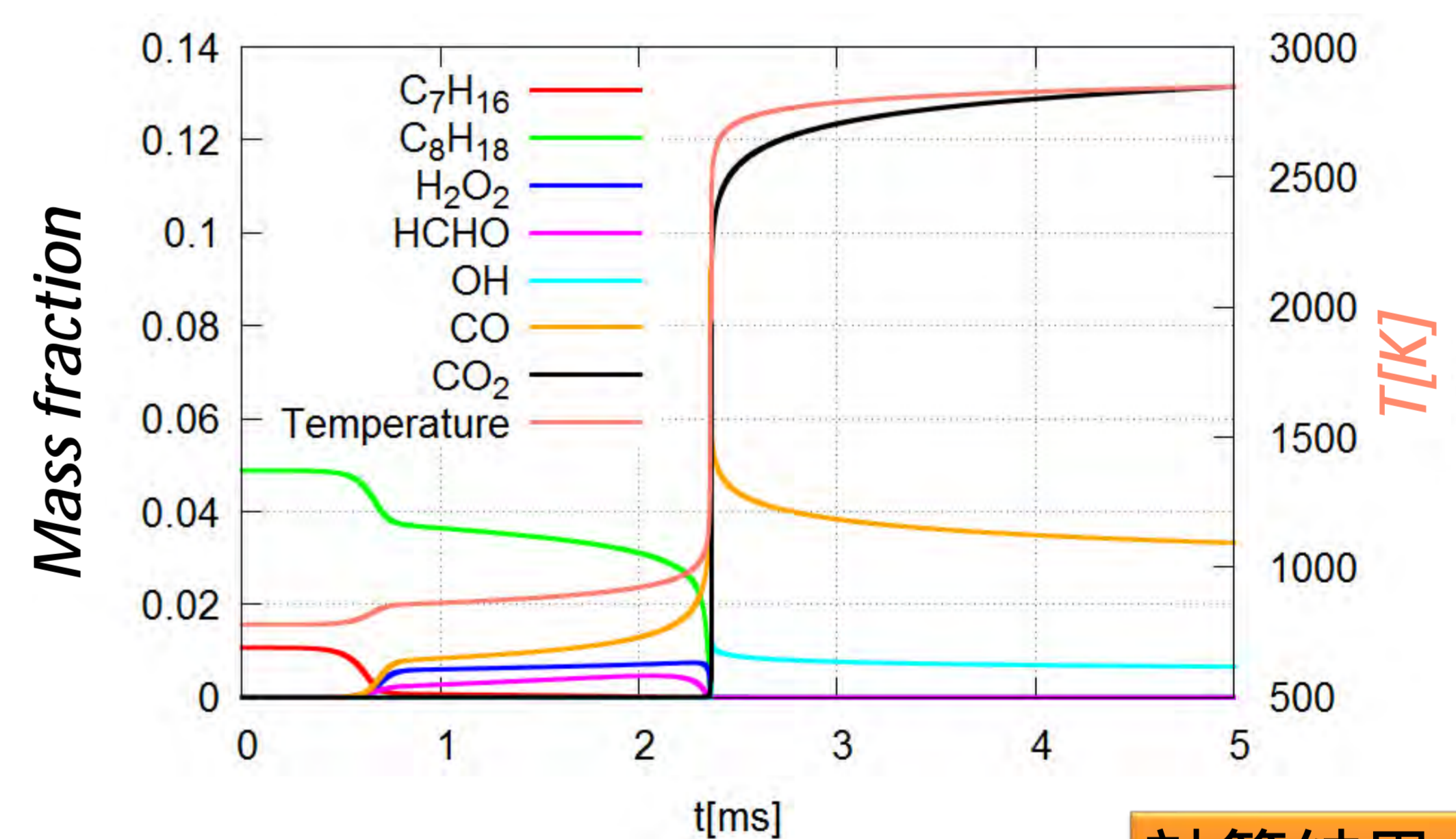
(1) nヘプタンの自己着火制御のための数値実験



平均着火遅れ時刻:

- 速度振幅小 < 速度振幅大
- 同じ振幅では Sin型シア < Cos型シア

(2) イソオクタンとnヘプタン混合気(8:2)の燃焼過程



計算結果の検証中

連携 ガソリン燃焼チーム

(1) 消炎メカニズムの解明

- 希薄燃焼限界の解明
- 乱流強度限界の解明

課題: 火炎伝播のシミュレーション、高Re数、希薄化

→ 計算の高効率化・大規模化

(2) 乱流燃焼における壁の影響の解明

- 燃焼室壁面近傍における乱流予混合火炎の構造
- 壁面とのインターアクション(反応、熱、流動)の影響

→ 火炎から燃焼室壁面への熱伝達量の推計、その支配要因の解明にチャレンジ

課題:

- 燃焼室壁面における化学種の吸着モデル計算の組み込み [宮本先生, 畠山先生(東北大)との連携]