

東京大学-JAXA社会連携講座  
ロケット・宇宙機モデリングラボラトリーシンポジウム  
2016年2月23日@JAXAつくば

## ロケット・宇宙機エンジンの燃焼解明と 高精度性能評価を目指した反応熱流体解析技術 ～内燃機関燃焼解析技術のブレークスルー～

井上 智博(東大)・寺島 洋史(北海道大・元東大)  
谷 洋海・森井雄飛・大門 優(JAXA)

1

## モデリングとは?

### モデリングとは?

複雑な現象から、キーとなる要素を抽出して再構成する作業をモデル化という。(p.66)

### なぜモデリングが必要か?

(巨大システムの一例として地球環境を例に)

・・・など、複雑な要素が多くある。これらのうちから、重要なものを選んで定式化すること、つまりモデル化すること・・・すべてが分からなければならいけなしたたら、地球環境の問題は永久に分からないことになるだろう。(p.41)

『速度論』 小宮山宏 著

2

# ロケット・宇宙機モデングラボラトリーの研究の位置づけ

安全性・高信頼性・競争力を備えたロケット・宇宙機の開発

**次期JAXAミッション** ~解析技術活用によるブレークスルーの実現~

次世代宇宙機化学推進系    ロケット上段推進系・軌道間輸送機    大型展開構造物    有人ロケット

**ロケット・宇宙機設計解析技術** ~次期JAXAミッションを支える設計解析技術の構築~

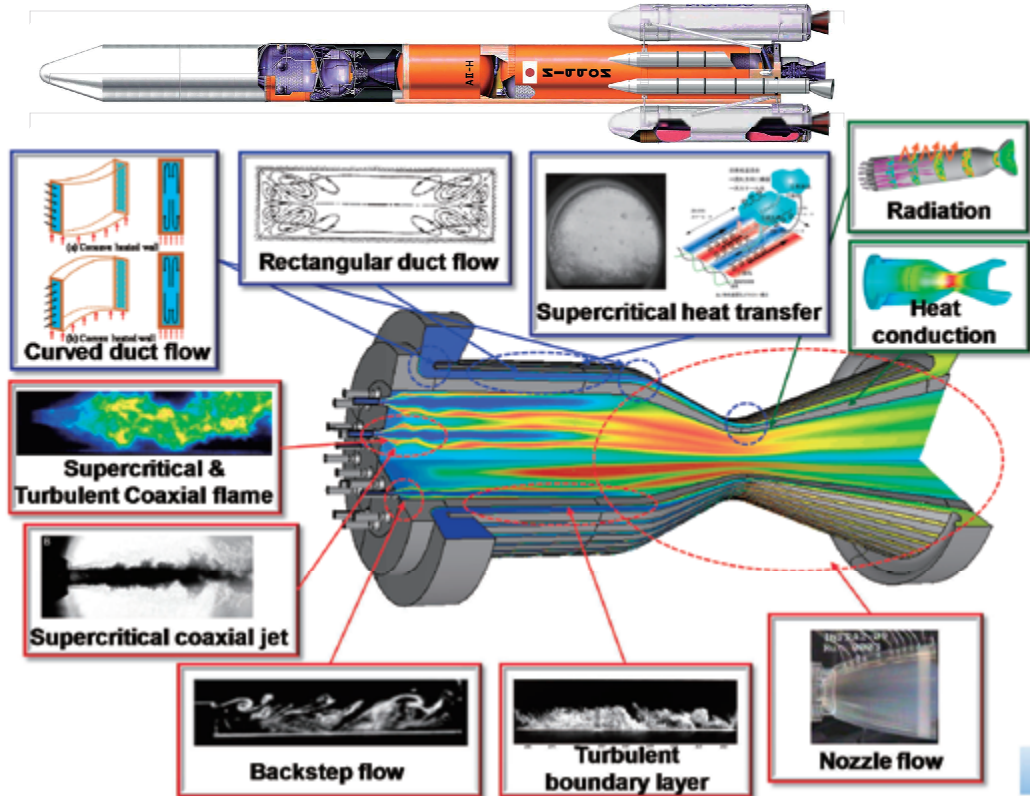
ロケットエンジン・宇宙機スラスト性能解析技術    推進薬管理解析技術    人工衛星構造・機構    有人安全

非揚載

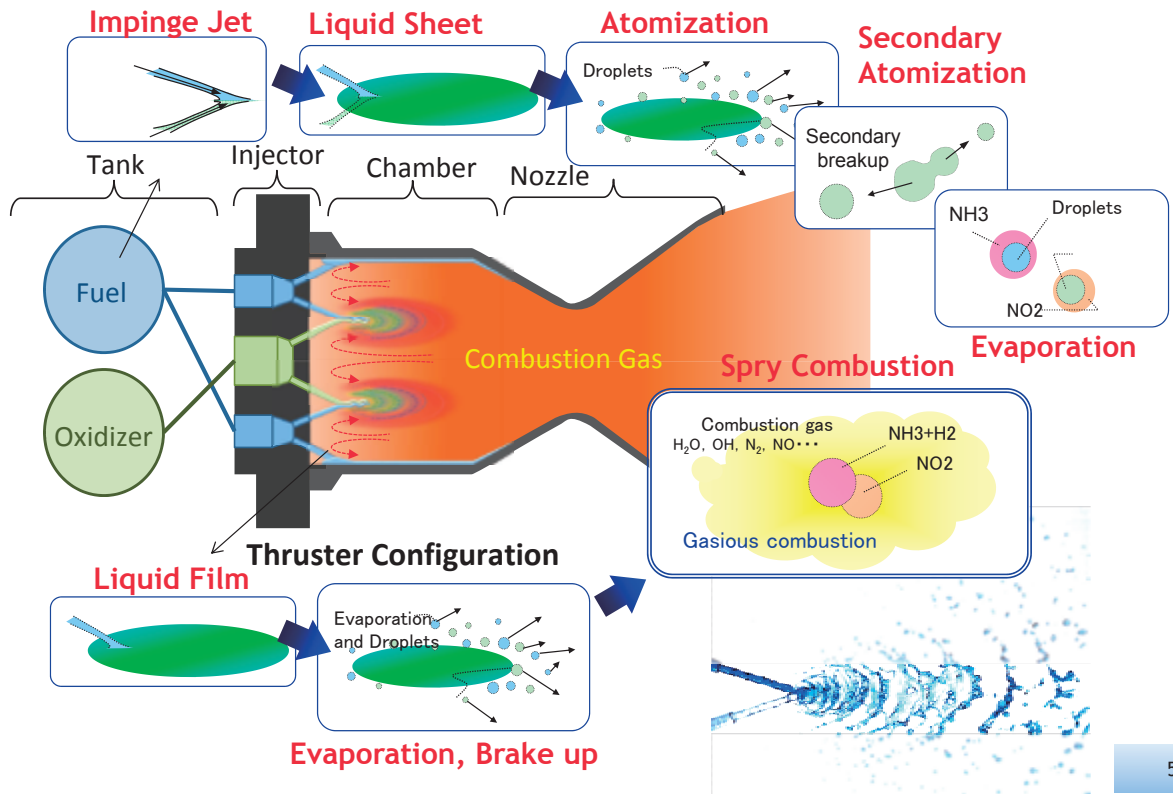
**ロケット・宇宙機物理数学モデル** ~設計解析技術開発に繋がる物理数学モデル構築~

反応性熱流動    推進薬熱流動    接触・摩擦    安全性評価

# ロケット推力室における現象マップ



## 宇宙機推力室における現象マップ



5

## ロケット・宇宙機エンジン開発の問題点

- 要素試験から実機性能を予測することは難しい
- 開発後期の出戻りによるコスト増
  - ✓ 温度予測が困難
  - ✓ 非定常挙動予測が困難
  - ✓ 様々な現象が包含されている

• 他現象(冷却、音響、入口条件)との連成について理解不足

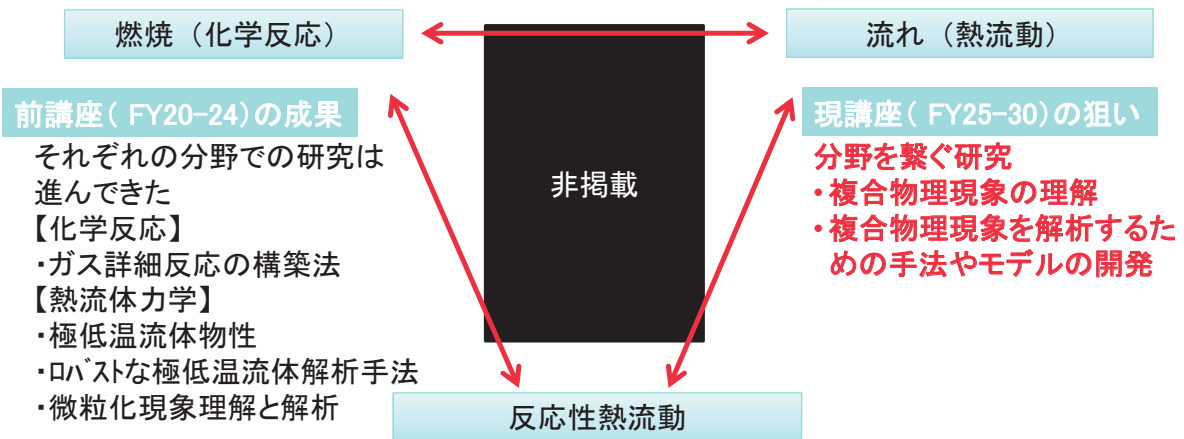
←→  
 同じ現象認識のもと繋ぎたい

非掲載

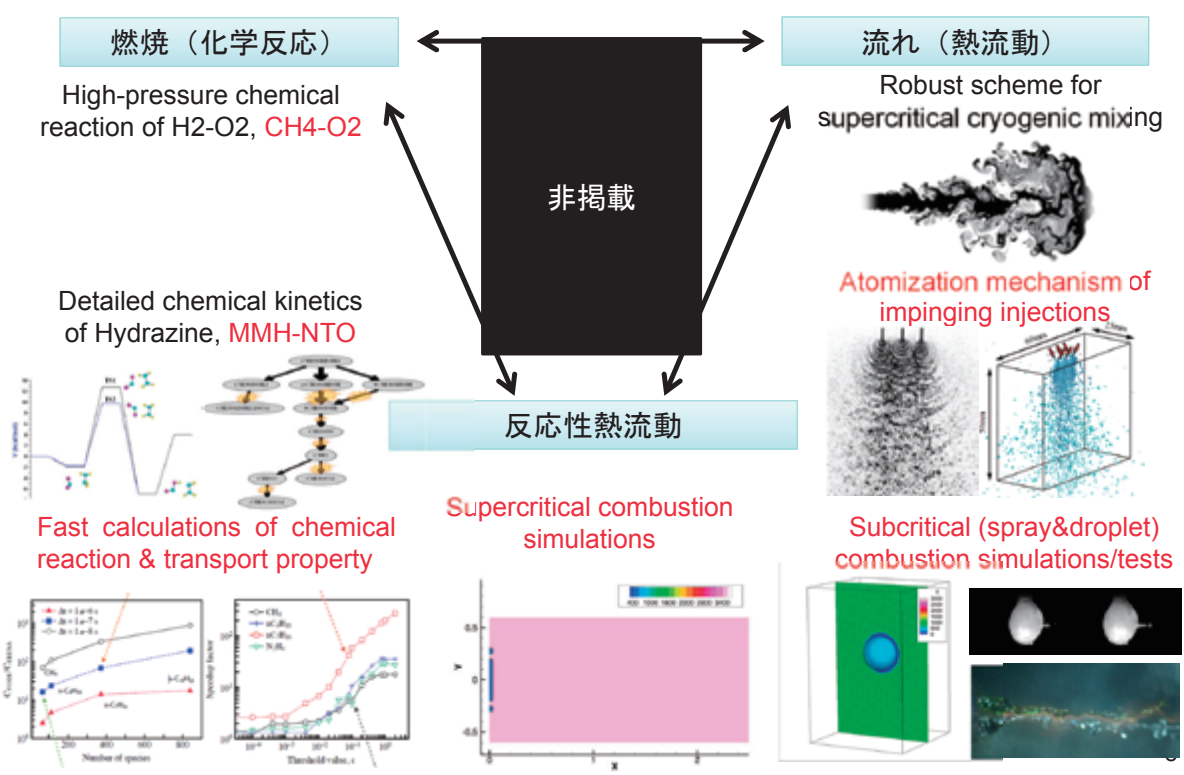
• 非定常挙動の把握が不十分  
 • 現象が理解できていない

# 反応性熱流動モデルの研究の意義価値・目指す世界

- 講座の活動における2つの狙い**
- ◆ **支配的物理現象の特定:** 現象の本質を理解し支配的物理現象を抽出  
 → 正しい定性的評価を実現することで生まれる新しい設計コンセプト(新形状、燃料種など)の提案!
  - ◆ **全体像の理解:** 燃焼試験を実施するまで不明であった現象トレードオフの理解  
 → 正しい物理現象の理解に基づいた定量的設計評価手法の提案!



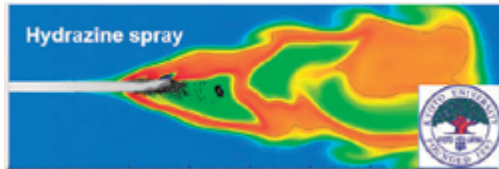
# 研究活動のoverview



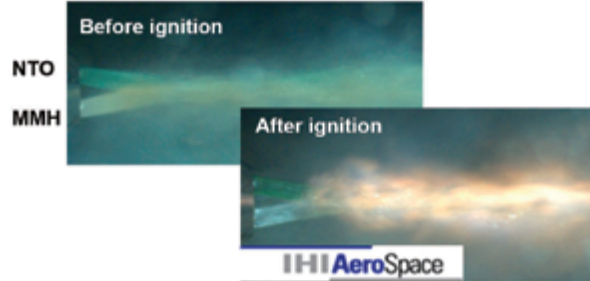


## スラスター内部反応性熱流動現象 (要素抽出)

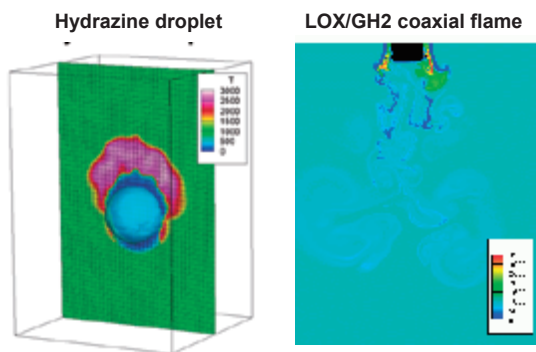
### Lagrangian simulations of hypergolic spray combustion



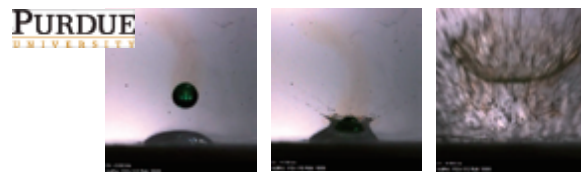
### Auto-ignition and flame folding of hypergolic propellants



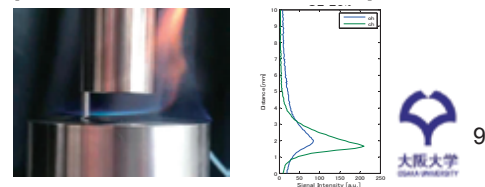
### Interface-tracking simulations of hypergolic/cryogenic combustions



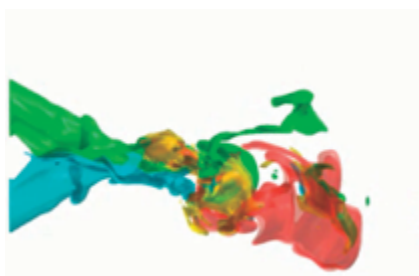
### Liquid phase reactions



### Vaporization and flame near liquid surface



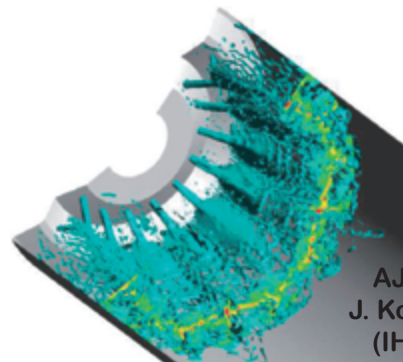
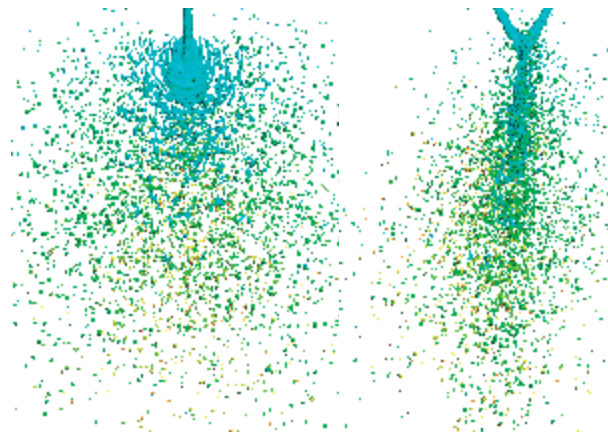
## スラスター内部反応性熱流動現象 (再構築へ)



流れの時間 < 化学反応の時間



流れの時間 > 化学反応の時間



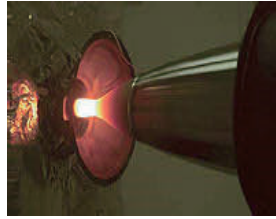
AJCPP2016-150,  
 J. Kouwa (IHI) et al.  
 (IHI-東大共同研究)

# 現象理解に基づいたスラスタ設計開発ループ

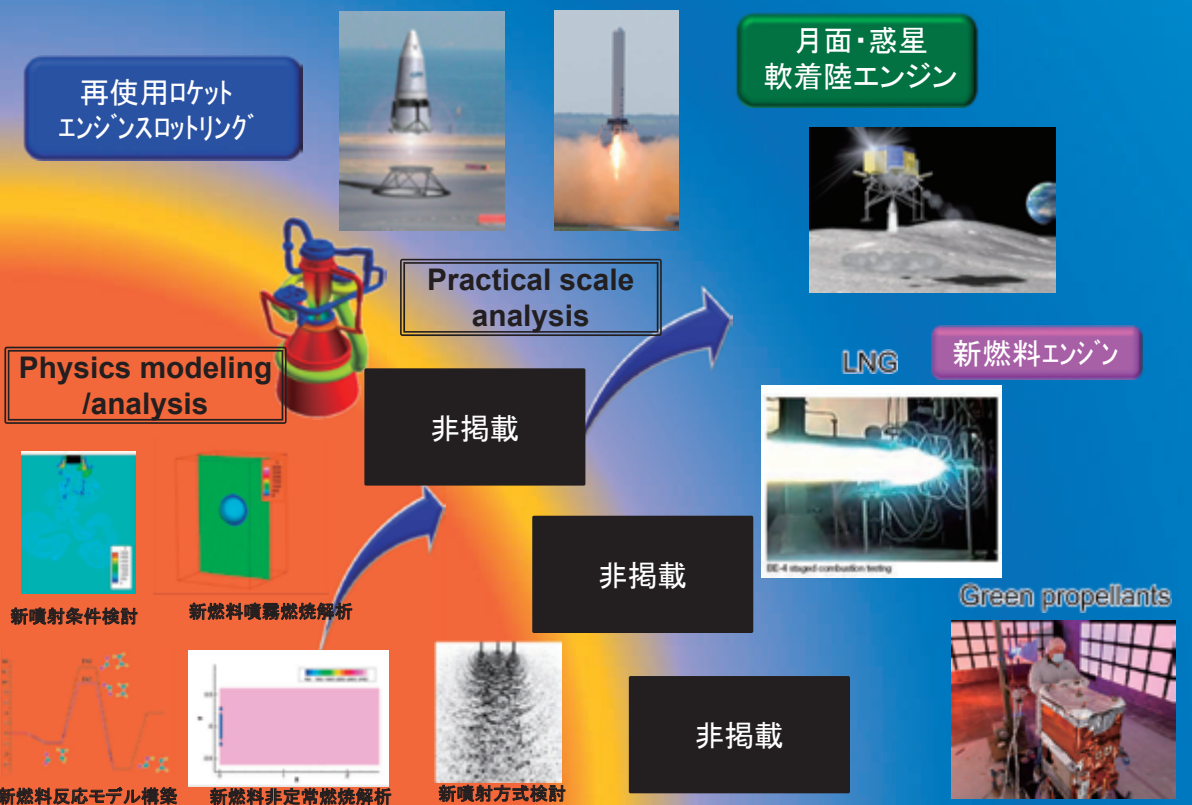
◆本試験前の水流し試験・数値解析の活用: 高速度カメラによるデータ取得・数値解析により設計パラメータと物理を理解

→ 設計パラメータの感度確認と、燃焼試験結果の理解促進に貢献。

◆試験中・後の計測技術高精度化・数値解析: 温度計測解像度の改善・詳細な現象理解 → 従来計測できなかった燃焼室壁面周方向温度分布計測に成功。



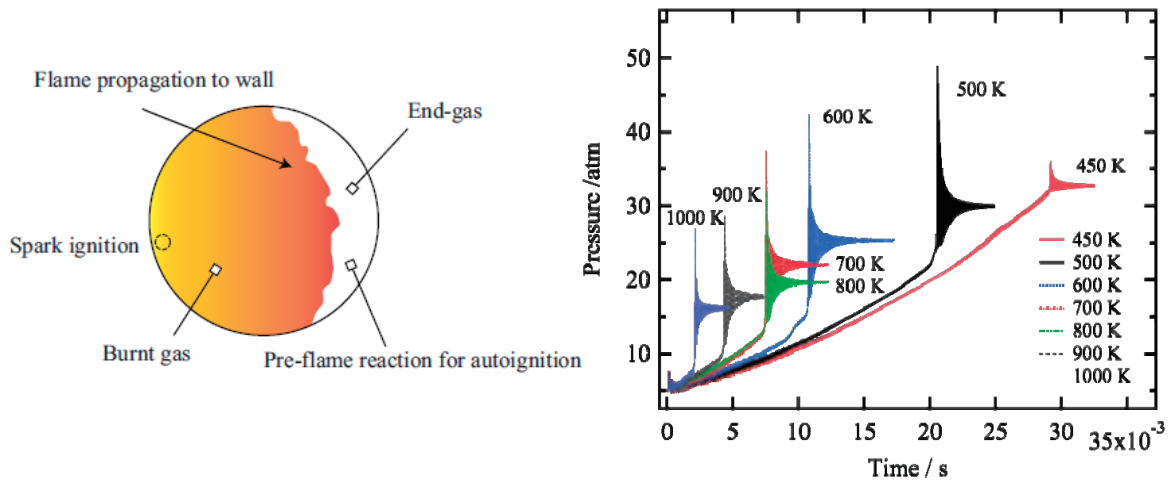
# 燃焼現象モデリングの目指す先



## 他分野への展開

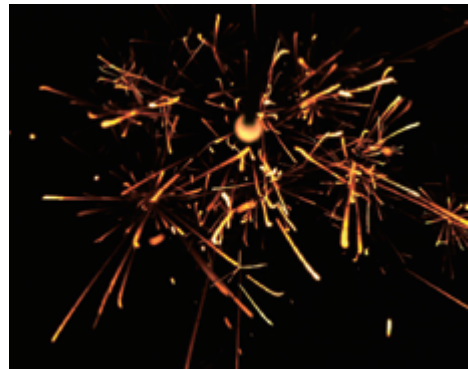
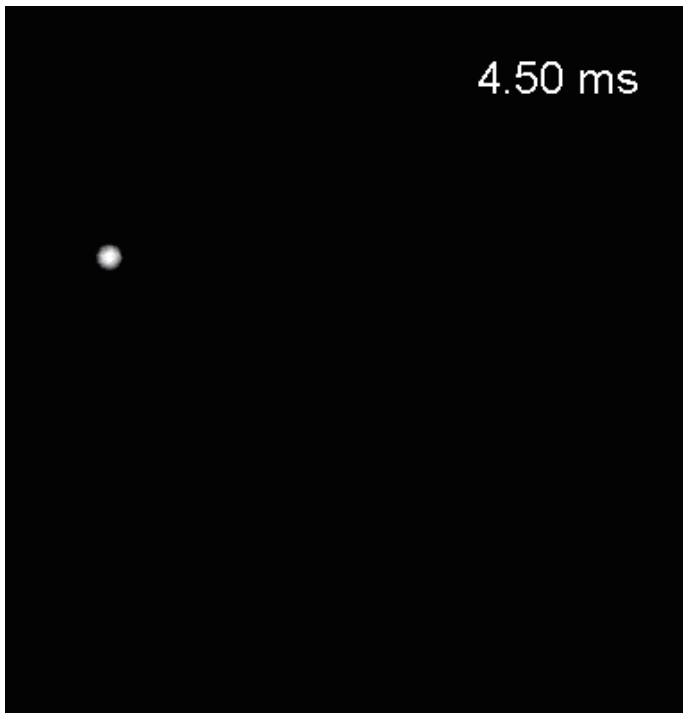
### 自動車会社への展開：ノッキングメカニズムの解明

n-C<sub>7</sub>H<sub>16</sub> (373 species, 1071 reactions) and n-C<sub>4</sub>H<sub>10</sub> (113 species, 426 reactions) reaction mechanisms are directly considered (Terashima and Koshi, CNF 2015)



SIP「革新的燃焼技術」への参画  
 自動車会社との共同研究

## 他分野への展開



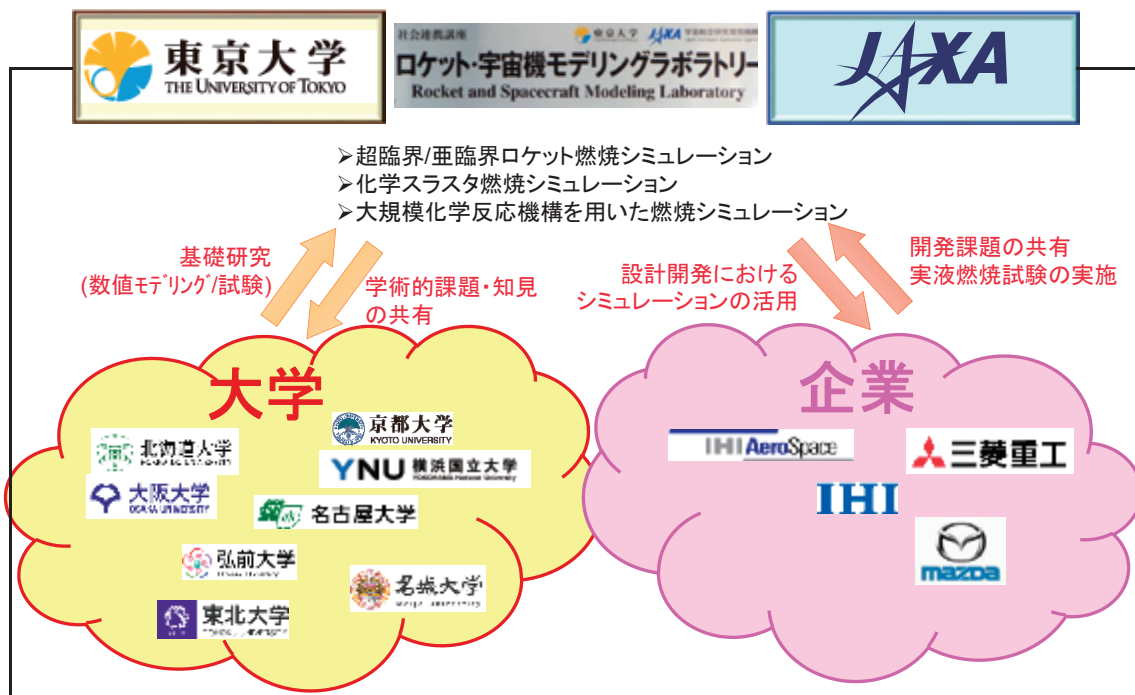
液滴連鎖分裂現象  
 “successive fragmentation”  
 の発見と解明 (2016)

江戸時代以来の謎が解明

$$\text{length scale} \propto \frac{\rho v^3}{\kappa \sigma}$$

$$\text{time scale} \propto \frac{\rho^2 v^4}{\kappa \sigma^2}$$

## 研究協力体制の広がり



先週のAJCPP2016でOS 『Thrusters』 で3セッション：上記機関から計12講

## まとめと今後の展望

ロケット・宇宙機エンジンの燃焼現象（反応性熱流動現象）を主たる対象として、

シミュレーション技術と要素試験を活用した支配因子の抽出と、  
実機試験・開発へのフィードバックを試みている。

これまでに、

素反応と流体計算をカップリングした世界最速の数値解析技術を構築し、  
従来難しかった、実推薬の直接解析が可能になりつつある。

こうした、超高精度解析の実機スケールの展開は今後の課題である。

並行して開発に取り組んでいる、

支配因子を抽出したほどよい予測技術も適用することで、  
個々の現象とエンジン性能の感度を調査できるようになりつつある。

まだ道半ばであるが、

実のある連携を続けることで、ロケット・宇宙機エンジン開発の、  
更に良いループを回せるよう、講座の活動を発展させていきたい。