

# 東京大学-JAXA社会連携講座と ブレークスルーへの取り組み

平成28年3月23日

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

研究開発部門 第三研究ユニット（JEDIセンター）

ユニット長 嶋英志



## 目次

東京大学-JAXA連携講座の概要

第一期(2008-2012)の計画と実績

成果とそれにいたるプロセスの一例

ヒドラジンの燃焼シミュレーションの実現

第二期(2013-2017)のテーマ設定と計画

## 目次

### 東京大学-JAXA連携講座の概要

#### 第一期(2008-2012)の計画と実績

#### 成果とそれにいたるプロセスの一例 ヒドラジンの燃焼シミュレーションの実現

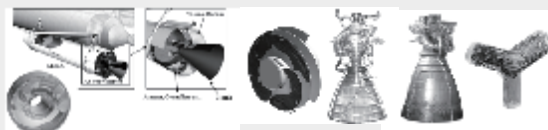
#### 第二期(2013-2017)のテーマ設定と計画

3

## 動機：講座設置前のJAXA数値シミュレーションの状況と問題点

### 状況(2007頃)

- 事故・不具合の原因究明に利用されている
- エンジンの設計開発で利用されつつある



例1) H-IIA/F6の事故原因究明 例2) LE-7A, LE-5Bの改良開発

### 問題点

- エンジン特有の現象を捉える物理モデルがなく参考情報程度
- 燃焼試験と同等に扱われるほど信頼に足る精度がない
- 開発後期での適用が多く、コスト低減・信頼性向上への貢献度が低い

### 解決策

#### 1.数値シミュレーションに組み込む物理・数学モデルの開発

- Solution: 東京大学社会連携講座

#### 2. 数値シミュレーションを活用した設計解析ツールの開発

- Solution: 情報化事業「ロケットエンジン設計解析ツールの高度化」(JAXA)

#### 3.数値シミュレーションを直接組み込んだ設計開発プロセスの構築

- Solution: 高信頼性開発プロセスと次期主力エンジンLE-X (JAXA)

4

## 東大-JAXA社会連携講座設置の目的

- 問題点
  - JAXAには、必要な物理数学モデルの開発能力がない
  - 宇宙応用に関し、国内においては研究分野として未成熟で、共同研究できる大学等がない
- 社会連携講座の必要性
  - JAXAとの共同運営による方向性の決定
  - 専任教員により先端的な研究を集中して実施
  - 機械工学、化学工学など多分野で成熟した技術を宇宙分野に導入
  - 若手研究者、技術者の育成
  - ALL-JAPAN研究体制の構築、国内研究分野としての確立
- 東大設置の必要性
  - ベースとなる高い研究レベル
  - ALL-JAPAN体制構築における地理的地位的アドバンテージ
  - 受け皿となる航空宇宙工学科の存在

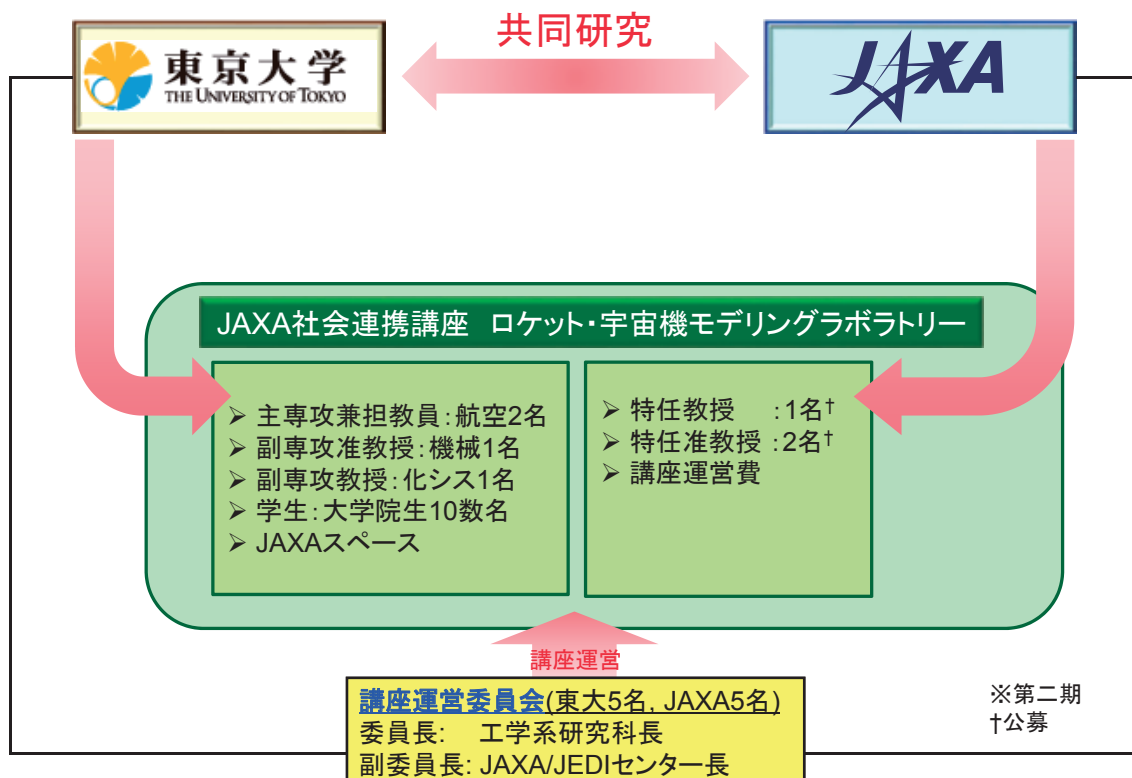


### 東京大学-JAXA社会連携講座の設置:

- ロケット・宇宙機の設計解析の基盤技術力の強化
- ロケット・宇宙機シミュレーションの物理・数学モデルの開発
- 日本のロケット・宇宙機シミュレーションを世界トップレベルへ

5

## 社会連携講座の組織体制※



6

## 目次

### 東京大学-JAXA連携講座の概要

#### 第一期(2008-2012)の計画と実績

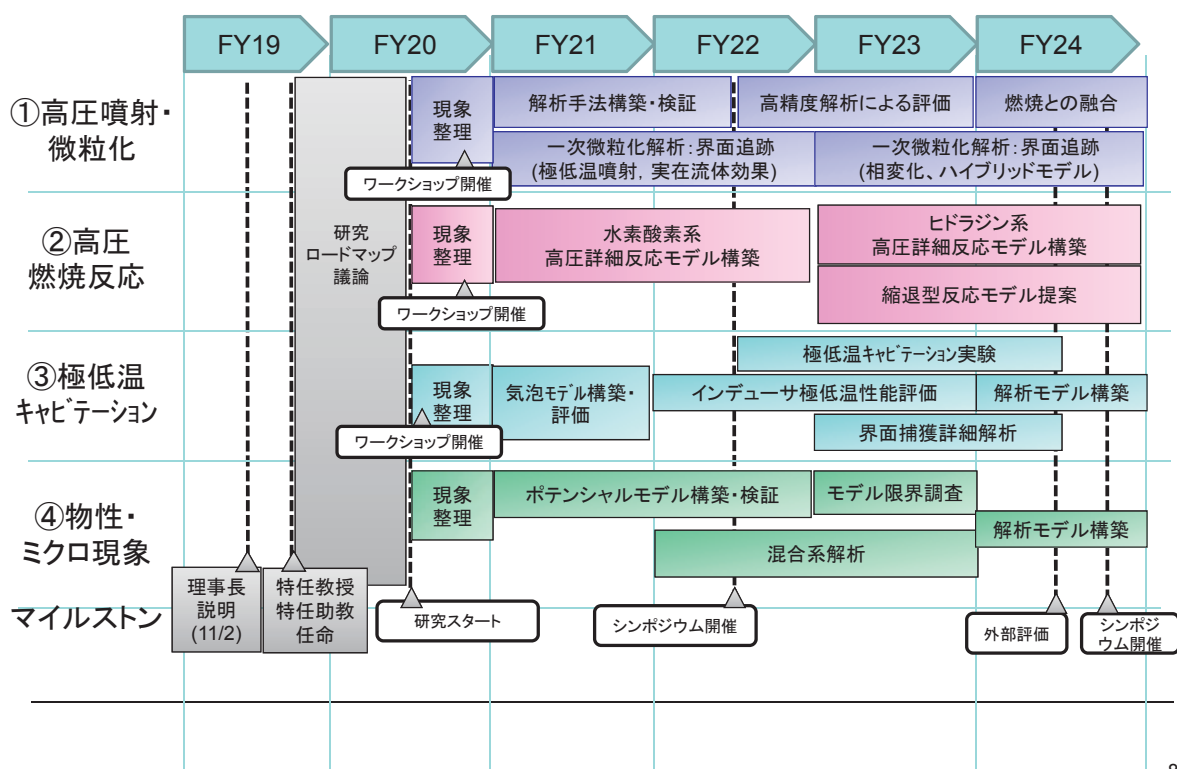
##### 成果とそれにいたるプロセスの一例

##### ヒドラジンの燃焼シミュレーションの実現

#### 第二期(2013-2017)のテーマ設定と計画

7

## 社会連携講座の研究年表(第一期)

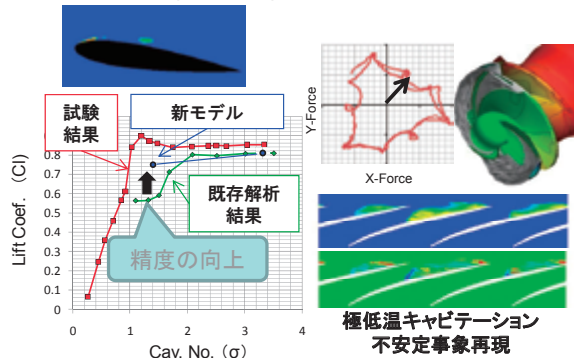


8

## 社会連携講座のアウトプット

### 極低温キャビテーション

- 素過程を考慮した**革新的キャビテーションモデル**を構築(世界初)
- 極低温キャビテーションで発生した**不安定事象を再現**(世界初)



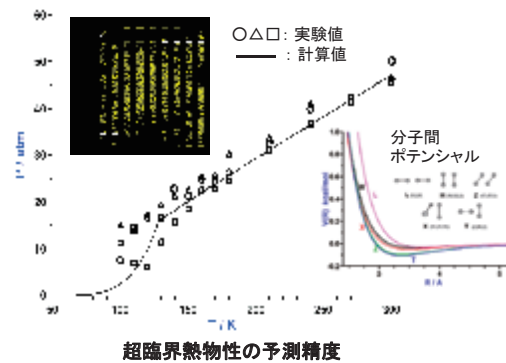
革新的キャビテーションモデルの予測精度

[代表論文]

- [1] S. Tsuda, et al., "A Numerical Investigation of Cryogenic Cavitation Inception with a Noncondensable Gas", Asian Joint Conference on Propulsion and Power 2010, AJCPP2010-064.
- [2] Tani, N., et al., "Investigation on an Influence of Flow Coefficient to Inducer Rotating Cavitation," ASME Journal of Fluids Engineering, 201

### 物性・マイクロ現象

- 世界最高精度のH<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>系分子間ポテンシャルの構築
- 構築したポテンシャルに基づく**非経験的手法**によりロケット推進薬の**超臨界熱物性を評価**(世界初)



超臨界熱物性の予測精度

[代表論文]

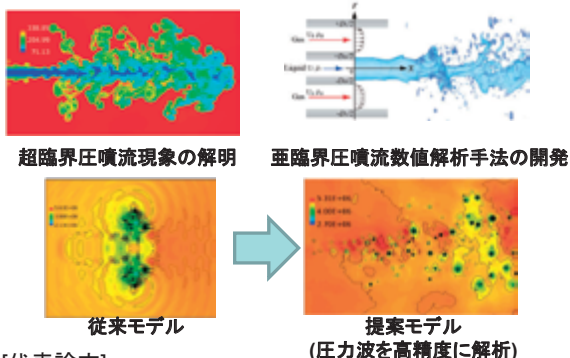
- [1] M. Koshi, et al., "An Evaluation of Thermal Properties of H<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> on the Basis of Ab-initio Calculations for Their Intermolecular Interactions", *Molecular Simulation*, DOI:10.1080/08927022.2010.536545(2011)
- [2] H.Nagashima, et al., "Limits of Classical Molecular simulation on the Estimation of Thermodynamic Properties of Cryogenic Hydrogen", *Molecular Simulation*, DOI:10.1080/08927022.2010.548383(2011).

9

## 社会連携講座のアウトプット

### 高圧噴射・微粒化

- 超臨界圧噴流に適した**堅牢かつ高精度の数値解析手法**を開発し、**超臨界圧噴射現象の特徴を解明**
- 亜臨界圧噴流用数値解析手法を開発
- **世界初の非経験的粒径推算理論モデル**を構築

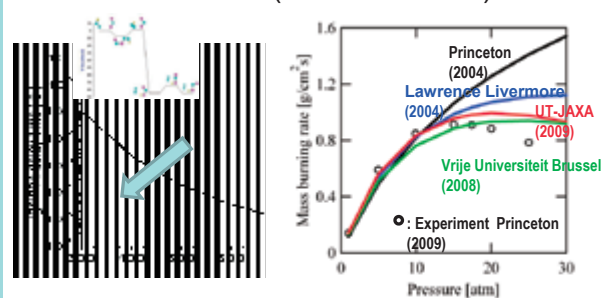


[代表論文]

- [1] H. Terashima, et al., "A High-resolution Numerical Method for Supercritical Flows with Large Density Variations", *AIAA J.*, Vol. 49, No. 12, (2011).
- [2] 井上智博ほか, "微粒化におけるエネルギー保存則に関する位置考察 (実験定数を必要としない粒径推算モデルの提案)", 微粒化,

### 高圧燃焼

- 世界最高精度のロケット燃焼(高圧)用**水素/酸素系詳細化学反応モデル**を構築
- 詳細化学反応計算のコストを劇的に低減する**革新的縮退手法**を確立
- **ヒドラジン系詳細反応機構**を構築し、**自着火機構を解明**(いずれも世界初)



ヒドラジン自己着火反応機構の解明 詳細反応モデルの予測精度

[代表論文]

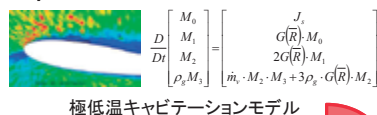
- [1] K. Shimizu, et al., "An Updated Kinetic Mechanism for High Pressure Hydrogen Combustion", *J. Propulsion and Power*, 27, pp.383-395 (2011).
- [2] Y.Daimon, et al., "Origin of hypergolic ignition of N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/NO<sub>2</sub> mixtures", *Science and Technology of Energetic Materials*, (2012)

10

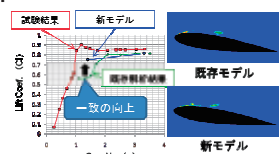
## 講座のアウトカム; ロケットエンジン設計解析技術

- 7つのキー解析技術の高度化により、欧米に匹敵もしくは上回るレベルに到達
- 解析技術の信頼性が向上し、エンジン設計・開発における活用の幅が拡大

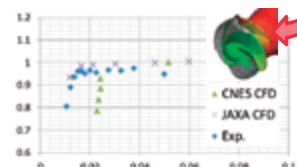
### Step1. 講座での物理・数学モデル開発



### Step2. JEDI設計解析技術の開発・検証



### Step3. 国際ベンチマークの実施

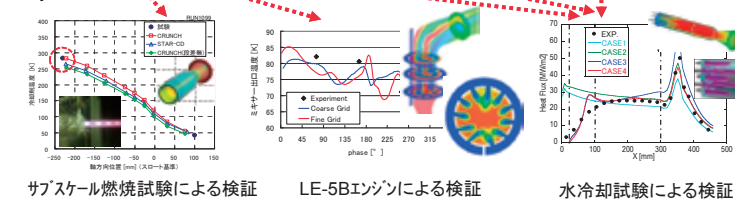


実機インデューサ揚程性能の高精度予測

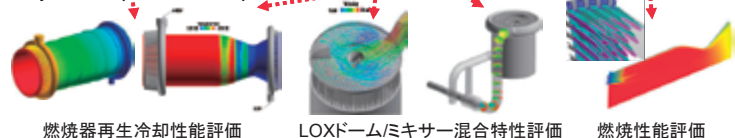
### Step1. 講座での物理・数学モデル開発



### Step2. JEDI設計解析技術の開発・検証



### Step3. 実機(LE-Xエンジン)への適用



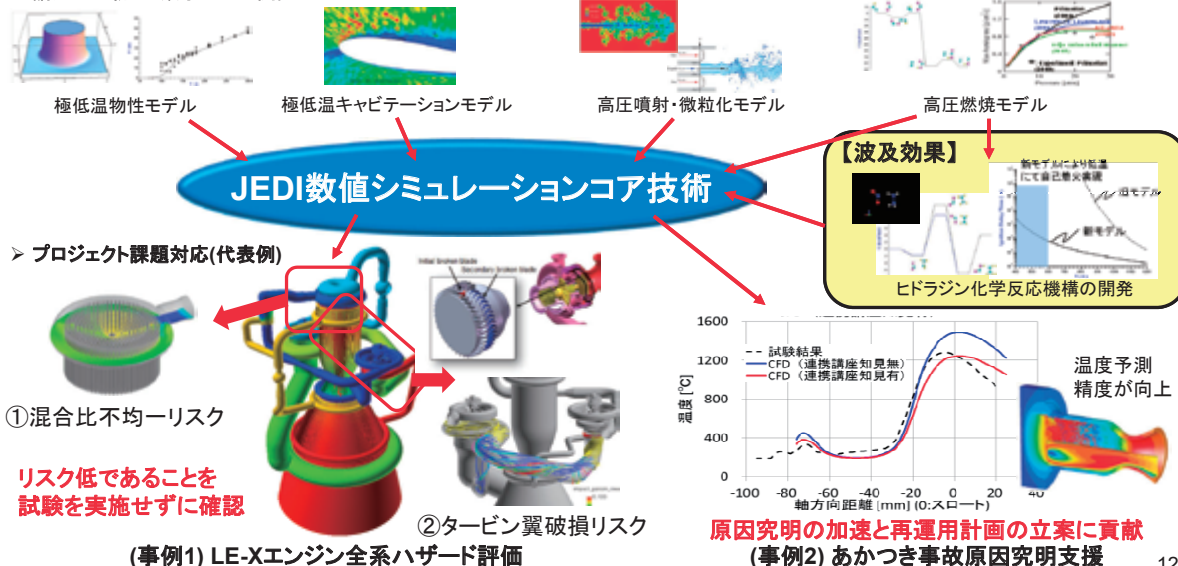
液体ロケットエンジン実機設計開発への適用の流れ

11

## 講座のアウトカム; プロジェクト課題解決

- 設計開発段階での数値シミュレーション技術の活用とそれによるリスク低減
  - 不具合対応以外での数値シミュレーション技術の利用拡大
- エンジンだけでなく衛星・探査機用スラスタ等の不具合対応にも利用が拡大
  - スラスタ開発メーカとの共同研究等により、メーカでの産業利用にも進展見込み

### ➢ 講座での物理・数学モデル開発



12



## 講座のアウトカム:産官学それぞれへの波及効果

### ① 大学

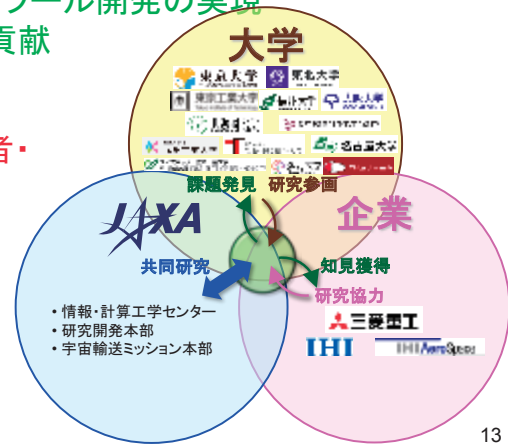
- ロケットエンジン研究開発に関わる若手研究者・技術者の育成
- ロケットエンジンシミュレーション分野の育成
  - ALL Japan体制の構築による国内研究の活性化
  - 国内のロケット産業コミュニティ内での情報共有と技術知見が向上
- 社会連携講座の模範を提示

### ② JAXA

- ロケットエンジン研究開発に関わる若手研究者・技術者の育成
- 現象理解と基礎物理モデルに基づく設計解析ツール開発の実現
- 現行プロジェクト課題への講座成果の適用と貢献

### ③ 企業

- ロケットエンジン研究開発に関わる若手研究者・技術者の育成
- 現象理解に基づく設計解析技術の向上
- 実エンジン開発への適用と信頼性向上



13

## 目次

東京大学-JAXA連携講座の概要

第一期(2008-2012)の計画と実績

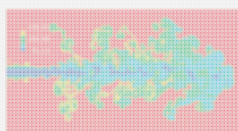
成果とそれにいたるプロセスの一例  
ヒドラジンの燃焼シミュレーションの実現

第二期(2013-2017)のテーマ設定と計画

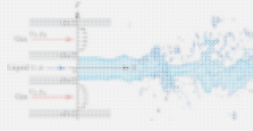
## 社会連携講座のアウトプット

### 高圧噴射・微粒化

- 超臨界圧噴流に適した**堅牢かつ高精度の数値解析手法**を開発し、**超臨界圧噴射現象の特徴を解明**
- 亜臨界圧噴流用数値解析手法を開発
- **世界初の非経験的粒径推算理論モデル**を構築



超臨界圧噴流現象の解明



亜臨界圧噴流数値解析手法の開発



従来モデル

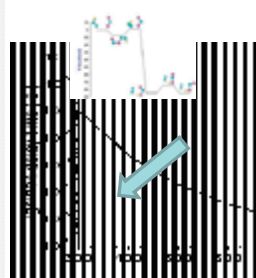
提案モデル  
(圧力波を高精度に解析)

[代表論文]

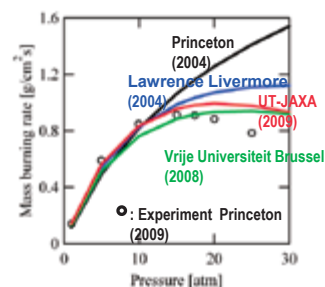
- [1] H. Terashima, et al., "A High-resolution Numerical Method for Supercritical Flows with Large Density Variations", *AIAA J.*, Vol. 49, No. 12, (2011).
- [2] 井上智博ほか, "微粒化におけるエネルギー保存則に関する位置考察 (実験定数を必要としない粒径推算モデルの提案)", 微粒化

### 高圧燃焼

- **世界最高精度**のロケット燃焼(高圧)用**水素/酸素系詳細化学反応モデル**を構築
- 詳細化学反応計算のコストを劇的に低減する**革新的縮退手法**を確立
- **ヒドラジン系詳細反応機構**を構築し、**自着火機構を解明**(いずれも**世界初**)



ヒドラジン自己着火反応機構の解明



詳細反応モデルの予測精度

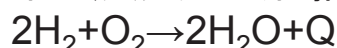
[代表論文]

- [1] K. Shimizu, et al., "An Updated Kinetic Mechanism for High Pressure Hydrogen Combustion", *J. Propulsion and Power*, 27, pp.383-395 (2011).
- [2] Y.Daimon, et al., "Origin of hypergolic ignition of N2H4/NO2 mixtures", *Science and Technology of Energetic Materials*, (2012)

15

## 詳細化学反応の重要性

酸素水素の燃焼反応(総括反応)



・この組み合わせの反応があること, その場合の発生熱量しか示していない。

- ・ 詳細化学反応式でないとわからない事
  - ・ 平衡状態:
    - ・  $\text{H}_2\text{O}_2$ 等との混合物での平衡状態
    - ・ 温度・圧力によって異なる
    - ・ 発生熱量も異なる. →ロケットでは推力も違う
  - ・ 平衡状態に至るまでの時間: 条件によっては, 長時間となり実用的に意味のない平衡状態もある.
  - ・ 着火, 消炎の条件→自己着火性燃料では特に重要
  - ・ 他

- ・ スラスタに使われるヒドラジンの詳細反応式は未知だった

16

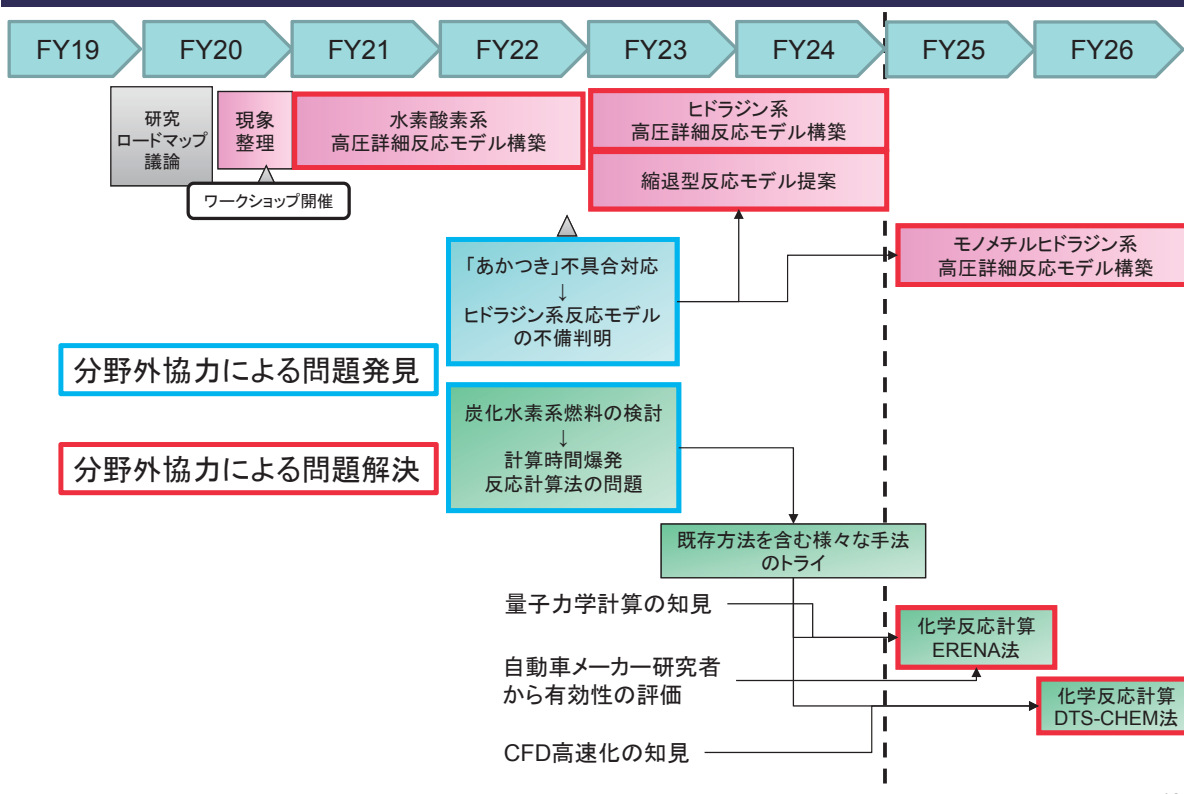


## 詳細化学反応数値計算の課題

- ・詳細化学反応では, 中間生成物を含め, 多くの化学種・反応の取り扱いが必要
  - ・酸素-水素: 8化学種, 27反応
  - ・ヒドラジン: 40化学種, 数百反応
  - ・ガソリン: 数百化学種以上, 数万反応以上
- ・詳細反応も1点(0次元)の化学反応のみであれば, 難なく計算できていた. (従来法の例: 5msec)
- ・しかし, エンジン内の現象解明のためCFD(流体計算)と組み合わせると, 莫大な計算時間が必要  
( $10^5$ 点 $\times 10^4$ step $\times 5 \times 10^{-3}$ sec =  $5 \times 10^6$ sec  $\approx$  2ヶ月)
- ・CFDに適した化学反応計算法が必要!

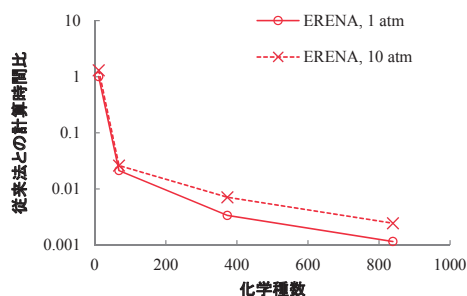
17

## 高圧燃焼反応の研究年表



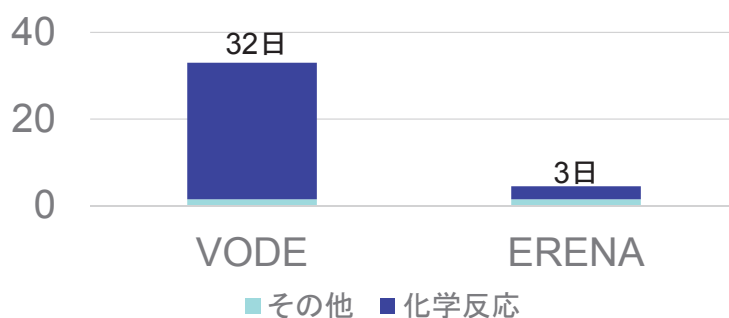
18

## 新・高速化学反応計算法(ERENA)の効果



- ・化学種数の増加に伴い, 従来法と大きな差.
- ・自動車エンジンでは数百から数千化学種数のモデルを使用するため, 数百倍以上計算速度向上が可能.
- ・シンプルな構造
- ・非常に安定

詳細化学反応を含むCFDの計算日数例



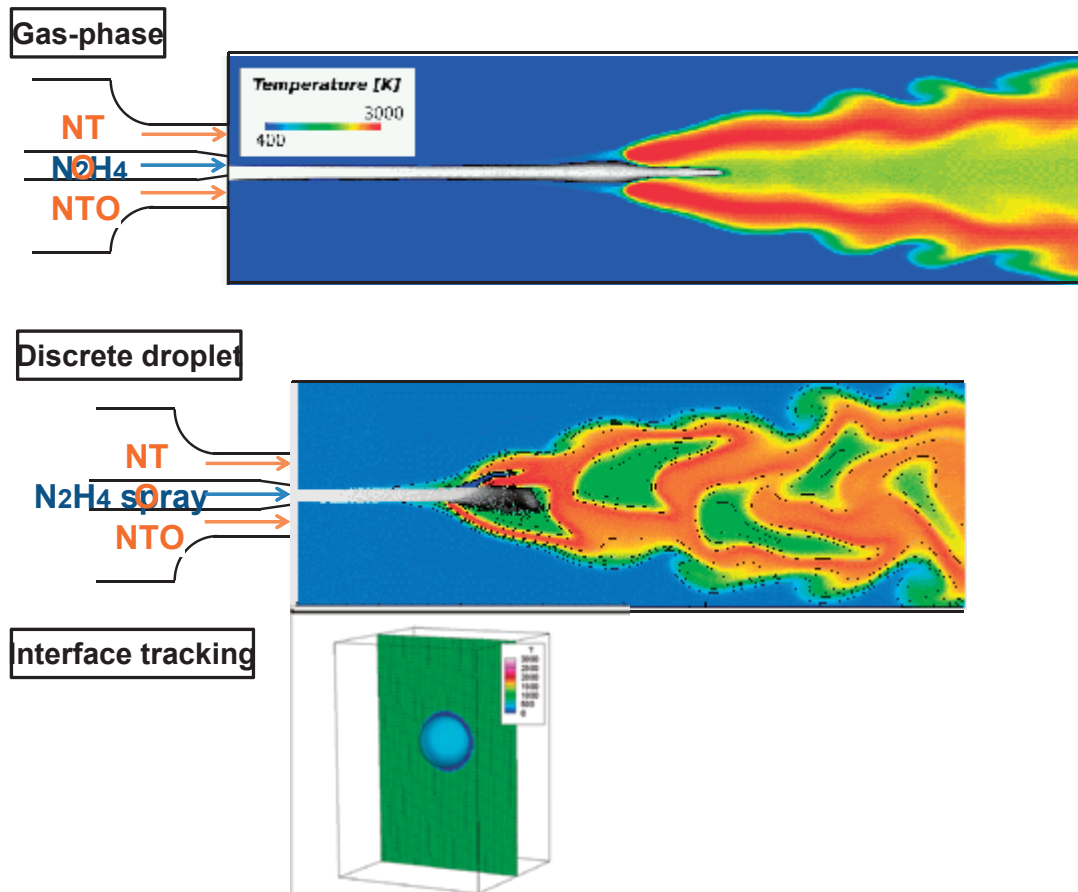
19

## 連携講座成果一例:ヒドラジン自己着火シミュレーション

- ・衛星等のスラスタで用いられる, ヒドラジン系自着火性燃料(ガス相)の着火燃焼数値シミュレーション
- ・分かるようになったこと
  - ・着火時期 → 温度分布
  - ・(温度, 圧力分布のもとでの)発生熱量 → 推力
- ・独自のキー技術
  - ・詳細化学反応式
  - ・化学(燃焼)反応の高速計算法

噴霧・フィルム等, 液体での反応は研究中

20



## 目次

東京大学-JAXA連携講座の概要

第一期(2008-2012)の計画と実績

成果とそれにいたるプロセスの一例

ヒドラジンの燃焼シミュレーションの実現

第二期(2013-2017)のテーマ設定と計画

## 第二期に向けての課題分析

### 宇宙輸送

#### 基幹ロケット高度化

目標: 相変化・入熱を考慮したタンク内熱環境定量予測  
現状: 相変化・入熱なしの液面挙動の定性的予測のみ  
問題: 相変化、入熱モデルの未成熟

目標: エンジン再着火時予冷推薬量の高精度予測  
現状: 定量性が保証できず対応不可  
問題: 相変化、入熱モデルの未成熟

#### 次期基幹ロケット

目標: 有人宇宙輸送の安全性評価  
現状: 限定したハザードモードにて定性評価  
問題: 本質的安全性を保証し証明するプロセスがない



### 宇宙科学

#### あかつきなど惑星・月探査機

目標: バルブ閉塞後のスラスト壁面温度定量予測  
現状: 限定的な条件にて壁面温度予測を実現  
問題: 半経験的なフィルムクーリングモデルのため制限有



#### ASTRO-Gなど天文衛星

目標: 微小G下における大型展開物指向性保証  
現状: 要求精度を満たすツールがなく対応不可  
問題: 接触・摩擦モデルの未成熟



### 有人宇宙

#### HTVなど有人宇宙船

目標: メインスラスト高周波振動燃焼要因特定  
現状: 振動数予測のみ実現し要因特定には至らず  
問題: 微粒化、反応、フィルムクーリングモデルの未成熟



### 宇宙利用

#### 次期通信・地球観測衛星

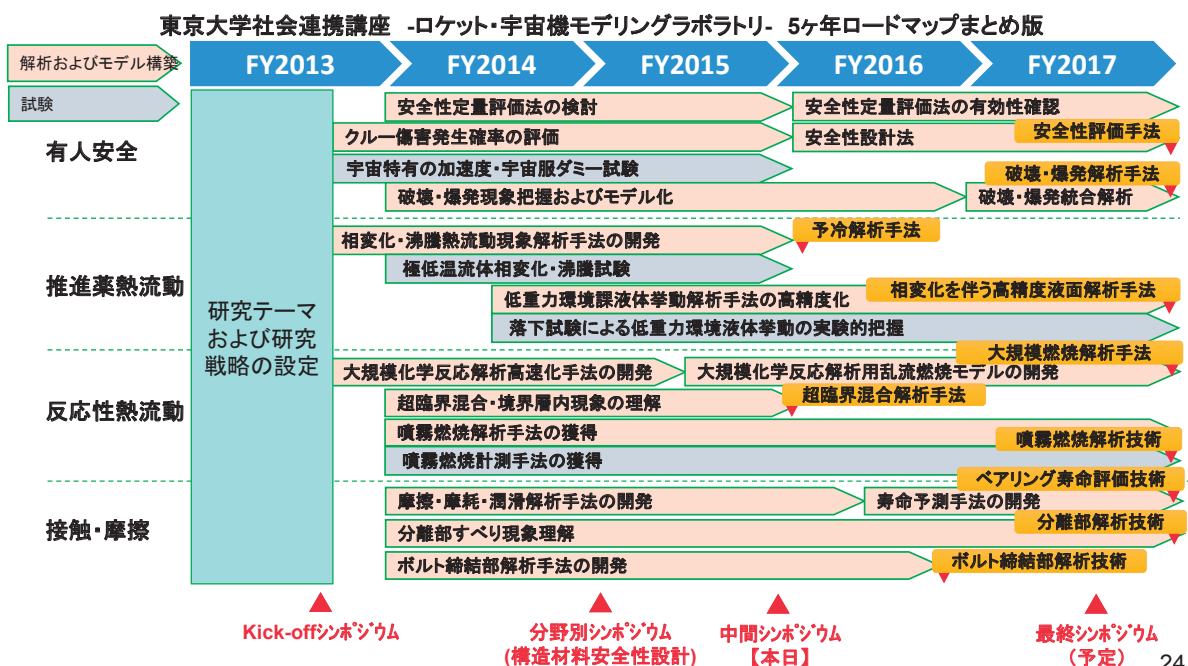
目標: 微小G下における大型展開物指向性保証  
現状: 要求精度を満たすツールがなく対応不可  
問題: 接触・摩擦モデルの未成熟



23

## 今期(FY2013-FY2017)研究ロードマップ

- 研究会、ヒヤリング、シンポジウム、調査を通して、必要性、有用性、先進性、実現可能性を備えた研究テーマおよび研究ロードマップをFY2013に設定した。



24

## さいごに

- ・社会連携講座の効果によってJAXA第三研究ユニット (JEDI)の技術力・プロジェクト課題対応能力は大幅に向上した。
- ・長期にわたる取り組みによる、分野研究レベル・若手研究者能力の引き上げで、講座期間内に留まらない成果創出が可能になった。
- ・大きな成果は分野外協力による課題発見・解決から生まれており、このシンポを契機として、新たな協力を進めてゆきたい。