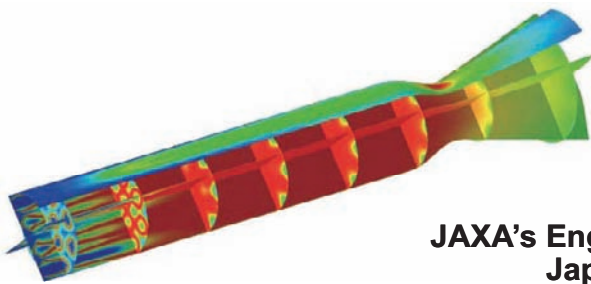


# 再生冷却エンジン燃焼室熱流束を支配する燃焼現象把握およびモデル評価

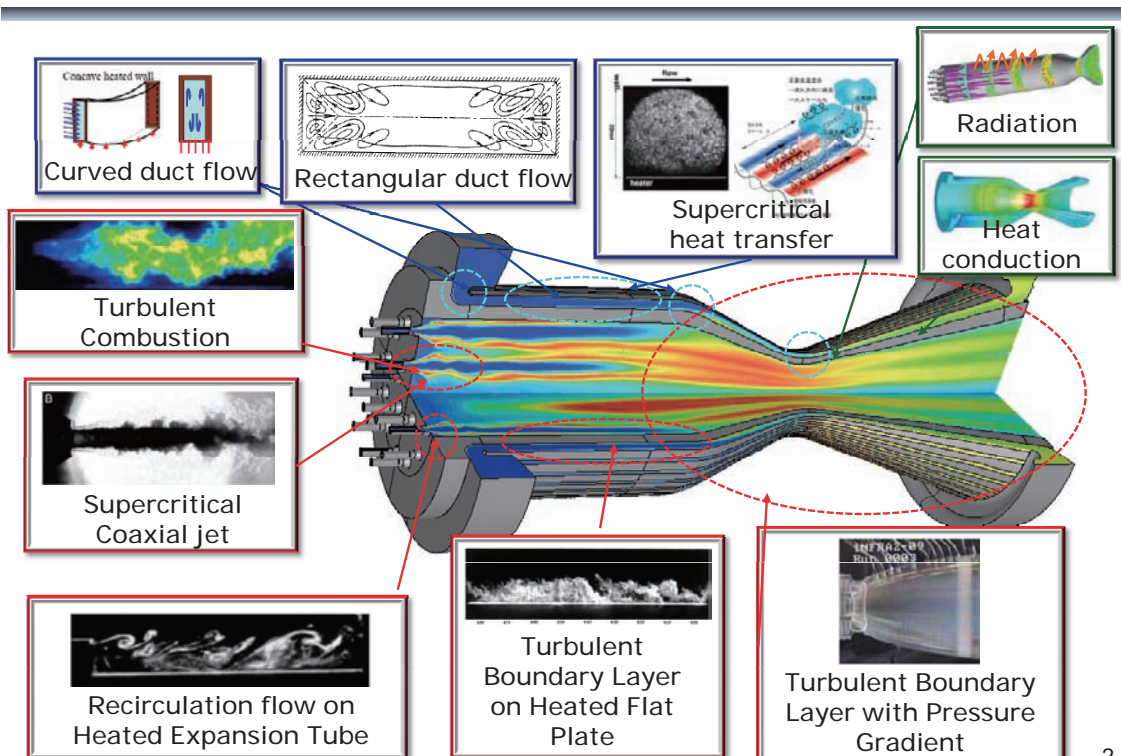


大門優 (JAXA)

JAXA's Engineering Digital Innovation Center  
Japan Aerospace Exploration Agency

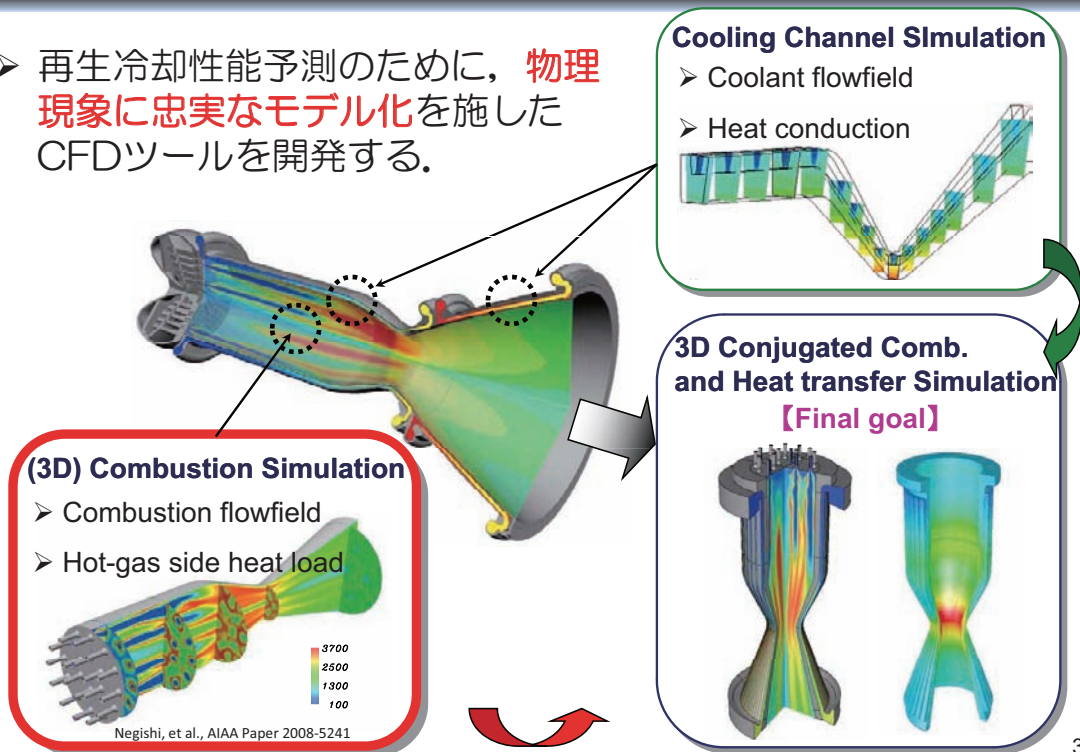


## 再生冷却エンジンにおける諸現象



## JEDIの目指す再生冷却性能予測ツール開発

- 再生冷却性能予測のために、物理現象に忠実なモデル化を施したCFDツールを開発する。



3

## 東大社会連携講座との関連性

FY2008	FY2009	FY2010	FY2011	FY2012
--------	--------	--------	--------	--------

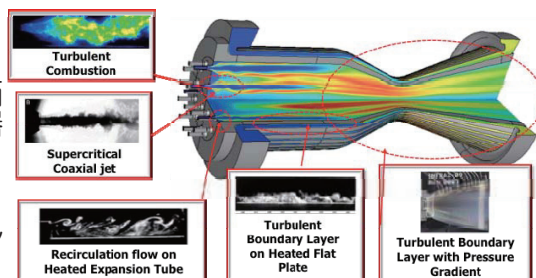
① 燃焼流解析基盤技術の整備

➡ 現行燃焼流解析の高精度化（高圧条件下における水素酸素反応モデル（**越モデル**）の開発）

② 乱流燃焼解析手法の構築

➡ 燃焼効率評価，熱流束予測，燃焼振動解明に向けた取り組み等の大規模燃焼流解析の実現

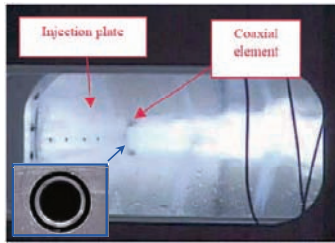
- FY2009～FY2010
  - 超臨界状態方程式の導入を実施。
  - 乱流境界層に着目し，熱流束評価の基礎検討およびロケット燃焼器内部における現象理解。
- FY2010～
  - 越モデルの導入，乱流燃焼モデルの検討，実機への拡張。



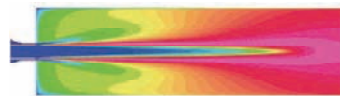
4

# ロケット燃焼器 燃焼試験と解析の現状

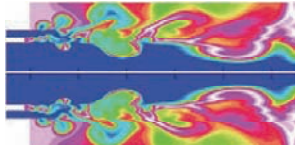
## Single-Element Research



Lin et al. 2005 (RANS)



Oefelein et al. 2007 (LES)



- 特に米国にて高精度なCFDが検討されている。
- 理想気体においては、2億点LESで実験の熱流束をよく再現すると報告がある。
- 反応は詳細反応、Flameletなど様々。
- 超臨界での定量比較はあまり聞かない。

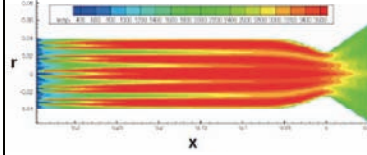
## Subscale Multi-Element Verification & Validation



Knab et al. 2002

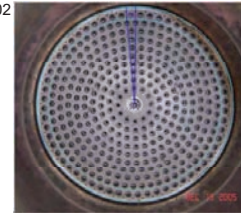


Hagemann et al. 2006 (RANS+液滴モデル)

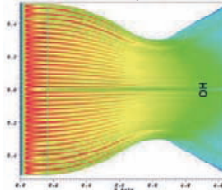


- 物理モデルは簡略化されているが、特に欧州にて積極的に実施されている。
- 超臨界状態を粒子を飛ばすことで模擬している。(最近実在気体効果を考慮したものが報告され始めた)
- 反応はFlameletなど方程式の少ないものが主流。

## Fullscale Multi-Element Industrial Need



Preclik et al. 2005 (RANS+液滴モデル)



- 物理モデルは簡略化されているが、特に欧州にて積極的に実施されている。
- 反応はFlameletなど方程式の少ないものが主流。

5

## 目的

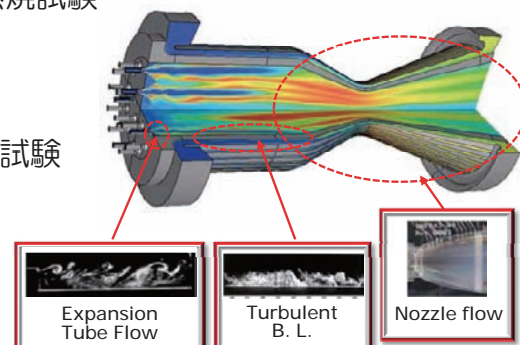
高精度CFDツール開発において熱流束評価に着目し、乱流境界層の壁面漸近挙動モデルの検証、実在気体物性の導入を実施する。また、実際の燃焼試験を模擬することで熱流束評価に関連する現象理解を促進する。

### 理想気体条件下における検証

- 加熱平板：燃焼室の平行部における加熱平板乱流境界層
- ノズル：ノズル部における圧力勾配を持つ乱流境界層
- 加熱拡大管：噴射器と燃焼室から構成される急拡大部における再循環流れ
- GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験

### 実在気体条件下における検証

- 実在気体効果の導入
- GH2/LOXマルチエレメント燃焼試験



## 解析手法

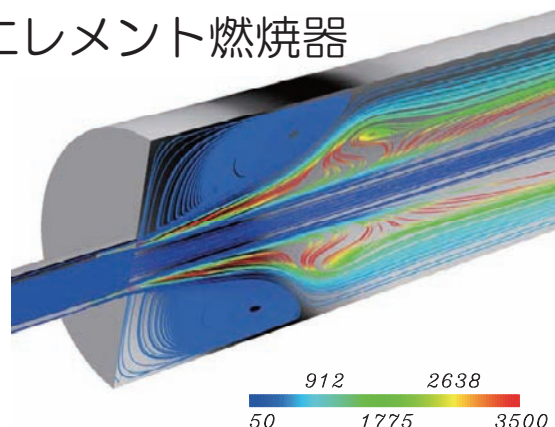
- CRUNCH CFD (米国CRAFT Techにて開発)
- 支配方程式: 3D Compressible Reynolds Averaged NS eq. (Density Based) with Pre-conditioning
- 空間差分: 2<sup>nd</sup> order Upwind
- 時間積分: Implicit Gauss-Seidel
- 燃焼モデル: Laminar finite rate proposed by Petersen and Hanson JPP Vol.15 No.4 1999
- 乱流モデル: Standard k-ε model with near-wall models
  - Model 1: Low-Re type [Papp and Dash *AIAA-2001-880* 2001]
  - Model 2: 2-layer type [Wolfshtein *Int J. Heat and Mass Transfer* 1969]
- 状態方程式: SRK and HBMS hybrid

Low-Re type	2-layer type
$\mu_t = C_\mu f_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon}$ <p><math>f_\mu</math>: Damping function</p>	$\mu_t = W\mu_t + (1-W)\mu_{t,alg}$ $\mu_{t,alg} = C_\mu \rho \sqrt{k} [C_w y (1 - Re_k / 70)]$ $W = \frac{1}{2} \left[ 1 + \tanh \left( \frac{Re_k - Re_k^*}{10} \right) \right]$

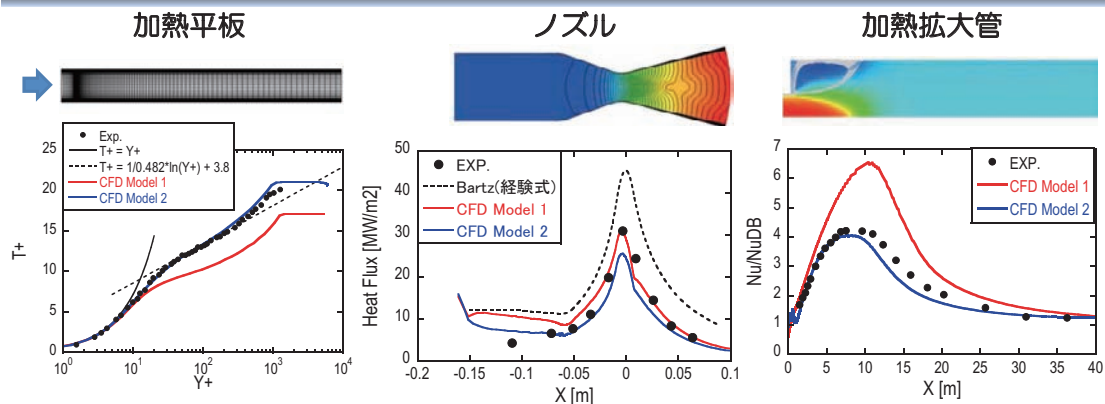
7

## 理想気体仮定における検証

- 乱流境界層における壁面漸近拳動モデルの検討
  - 加熱平板
  - ノズル
  - 加熱拡大管
- GH2/GO2シングルエレメント燃焼器
  - 熱流束評価



## 壁面漸近挙動モデルの検証



Near-Wall Model	Flat Plate	Nozzle	Expansion tube
Model 1 (Low-Re)	Fair	Good	Bad
Model 2 (Two-layer)	Good	Fair	Good

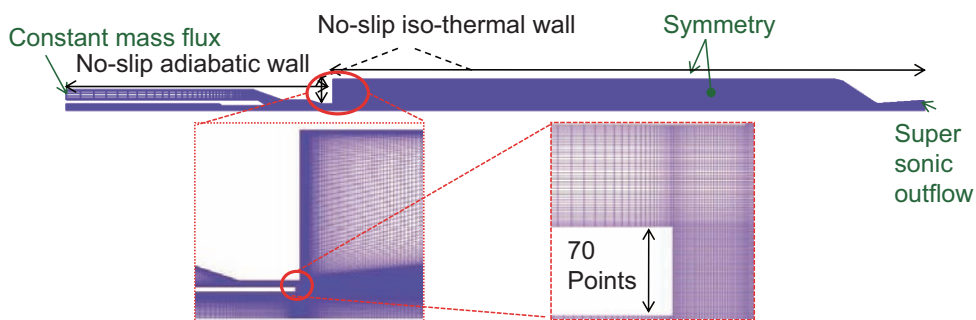
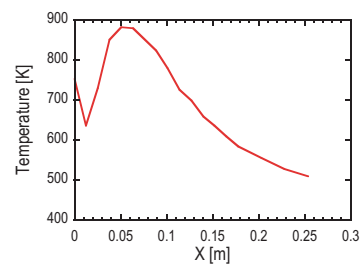
- 流れ場の特徴によって、適切な壁面漸近挙動が異なる。

9

## GH2/GO2シングルエレメント燃焼解析 -計算条件-

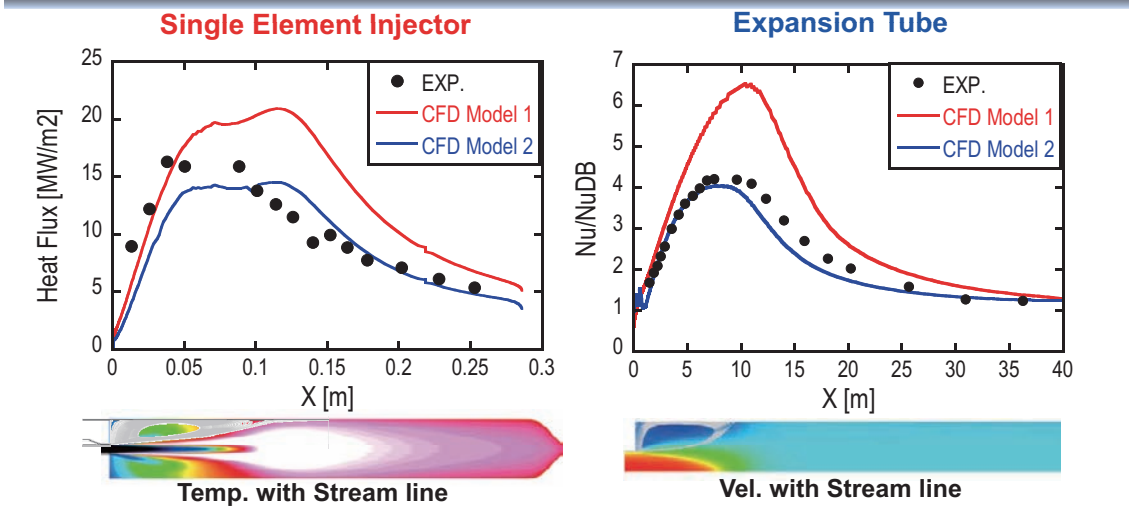
- 解析対象: 高温噴射条件のGH2/GO2 同軸型シングルエレメント燃焼器
- 条件:
  - 燃焼圧力 = 5.2MPa
  - 燃料温度 = 800 [K]
  - 酸化剤温度 = 711 [K]
  - 燃料質量流量 =  $3.31 \times 10^{-2}$  [kg/s]
  - 酸化剤質量流量 =  $9.04 \times 10^{-2}$  [kg/s]
  - 壁面温度 = 一定 (see right fig.)
- 格子
  - 322000 nodes
  - 最小格子幅 = 0.3  $\mu$ m ( $Y^+ < 1$  in all zone)

Marshall et al. (Penn. State Univ.),  
AIAA-2005-3572, 2005.



10

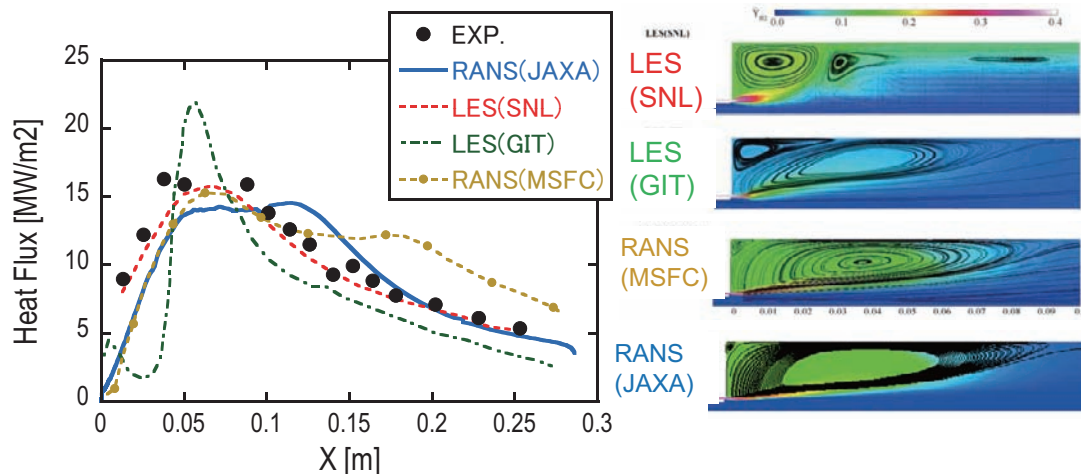
## GH2/GO2シングルエレメント燃焼試験



- シングルエレメント熱流束分布はModel 2の方が、Model 1よりも良い結果を示している。
  - 拡大管と同じ傾向を持つ。
- シングルエレメントでは再循環領域における熱流束レベルを適切に評価できる壁面漸近挙動モデルを使う必要がある。

11

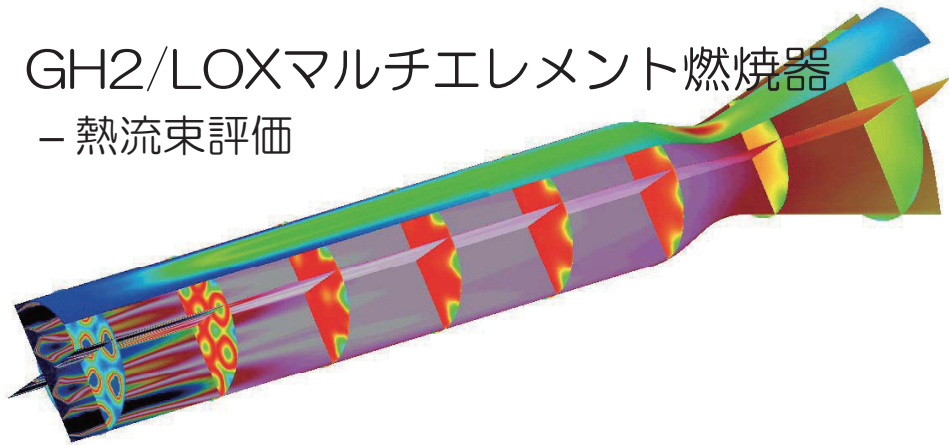
## 米国の他グループとの比較



- 熱流束分布だけを見ると必ずしもRANSとLESでLESが良いとは限らない。
- 循環の大きさがRANSとLESで異なる。
- 壁と噴射器の距離が遠いシングルエレメント燃焼試験における熱流束は再循環領域の再現性（大きさ、濃度分布、熱流束レベル）が重要である。
- LES (Sandia National Lab.)
  - 格子点数：2億点，8化学種19素反応，3D，非定常
- LES (Georgia Institute of Tech.)
  - 格子点数：360万点，Subgrid eddy brake-up model，3D，非定常
- RANS (Michigan State Univ.)
  - 格子点数40万点，6化学種28素反応，2D，定常
- RANS (JAXA)
  - 格子点数32万点，9化学種19素反応，2D，定常

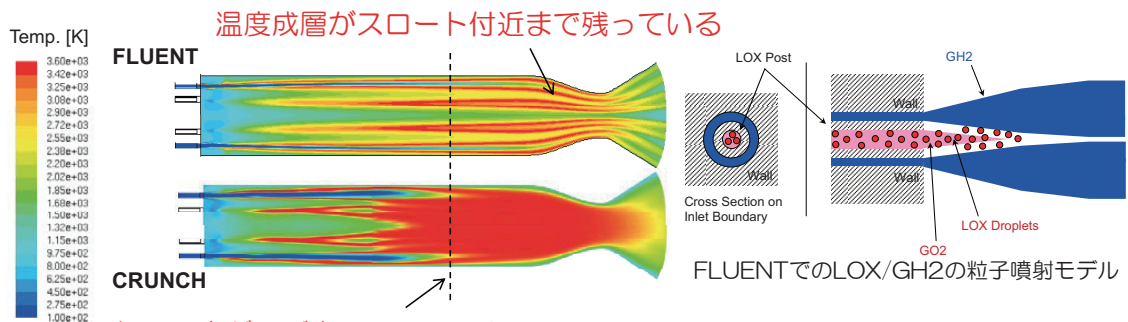
## 実在気体効果を含めた検証

- 実在気体効果の導入
  - SRK, HBMSハイブリッド
- GH2/LOXマルチエレメント燃焼器
  - 熱流束評価



13

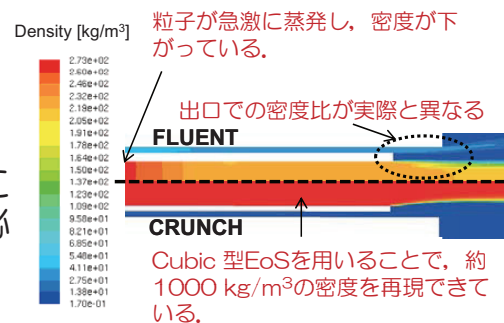
## 実在物性効果の導入



温度成層がスロート付近まで残っている

平行部で反応がほぼ完了しているように見える。

- CRUNCHとFLUENTでは流れ場の様子が大きく異なる。
  - 粒子噴射モデルを使用する際には、適切な粒子径を設定する必要がある。



粒子が急激に蒸発し、密度が下がっている。

出口での密度比が実際と異なる

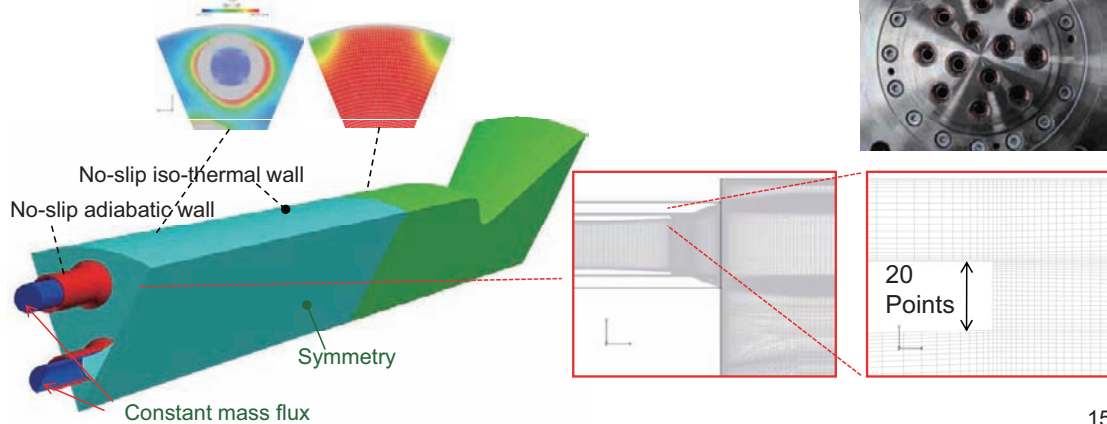
Cubic型EoSを用いることで、約  $1000 \text{ kg/m}^3$  の密度を再現できている。

密度分布

14

## GH2/LOXマルチエレメント燃焼解析-計算条件-

- 解析対象: 超臨界GH2/LOX マルチエレメント燃焼器
- 条件
  - 燃焼圧力 5.0MPa
  - エレメント本数 12本
- 計算格子
  - 1700000 (Full Injector) + 900000 (Half Injector) + 4200000 nodes (Top Chamber) + 300000 (Nozzle) = 7.1 M points
  - 最小格子幅 = 0.5 μm (Y+ < 4 in all zone)



15

## GH2/LOXマルチエレメント燃焼解析-計算条件-

Near-Wall Model	Flat Plate	Nozzle	Expansion tube
Model 1 (Low-Re)	Fair	Good	Bad
Model 2 (Two-layer)	Good	Fair	Good

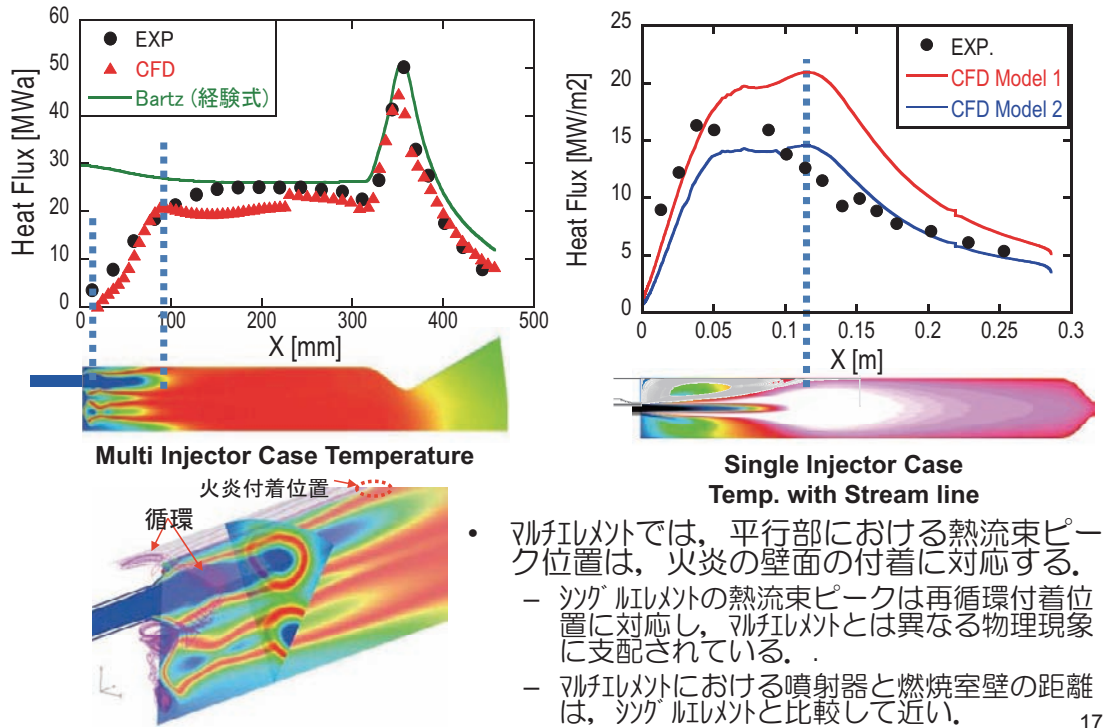


- 領域によって壁面漸近挙動モデルを変えた。
  - 急拡大管，平行部ではtwo-layer model (model 2).
  - ノズル部ではLow-Re model (model 1).

16



## GH2/LOXマルチエレメント燃焼解析



17

## 現在の課題と今後の計画

### 課題

- シングルエレメントの結果の通り、再循環流れを十分正確には表現できていない。
- RANS解析であっても解析負荷が高い。
- 不連続格子位置における熱流束の不連続性。

### 今後の計画

- 乱流燃焼モデルの検討。
- 越モデル (高圧水素酸素素反応モデル) の導入。
- 実スケールへの拡張。
  - 高速化検討
  - 簡略化指針の検討

### その他気になっていること

- 壁面付近での反応
- 輻射

18

## まとめ

熱流束評価に着目し、乱流境界層の壁面漸近挙動モデルの検証、実在気体物性の導入を実施した。また、実際の燃焼試験を模擬することで熱流束評価に関連する現象を理解した。

Near-Wall Model	Flat Plate	Nozzle	Expansion tube
Model 1 (Low-Re)	Fair	Good	Bad
Model 2 (Two-layer)	Good	Fair	Good

- 異なる3つの特性を持つ乱流境界層をすべて完璧に評価できる壁面漸近挙動モデルはなかった。
  - 今のところ、場所によってモデルを使い分けている。



- シングルリミット燃焼解析を実施し、再循環領域の評価が熱流束分布を支配していることがわかった。
- マルチリミット燃焼解析を実施し、シングルリミットと異なり、火炎付着位置が熱流束分布を支配していることがわかった。

19

## 謝辞

マルチエレメント燃焼試験を実施し、データをご提供いただきました角田宇宙センターの皆様、MHI名古屋誘導推進システム製作所の皆様に対して、ここに謝意を評します。

20