

推進薬・反応性研究グループ成果例  
2018/1/22



*HTV, space vehicle from Japan to ISS  
video taken from ISS (JAXA)*

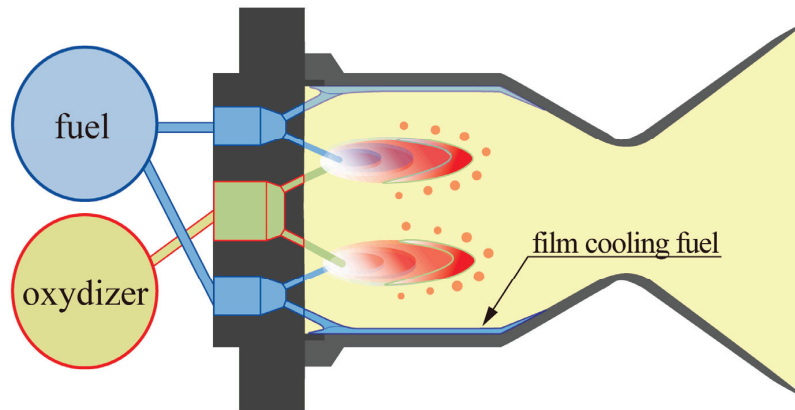
# 推進薬混合モデルに基づく 二液スラスト性能予測法の構築

井上 智博 (東大)

## 二液スラスタの役割と性能

$$F = \dot{m} \cdot c^* \cdot C_F$$

(推力[N] = 推進薬流量[kg/s] × 特性排気速度[m/s] × 推力係数)

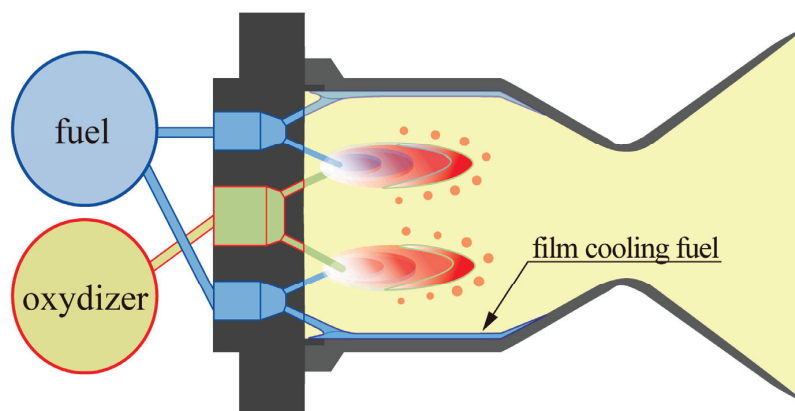


- 燃焼室の性能は、特性排気速度 $c^*$ によって与えられる。
- $c^*$ は、推進薬の種類と、燃料酸化剤の混合特性によって決まる。
- 高性能スラスタ開発には、主噴射器に加えて、フィルム燃料の効果も含めた上で、幅広い混合比に対する $c^*$ を予測・評価することが重要。

## 二液スラスタの役割と性能

$$F = \dot{m} \cdot c^* \cdot C_F$$

(推力[N] = 推進薬流量[kg/s] × 特性排気速度[m/s] × 推力係数)



$$c^* = f(\rho, D, V, FC, MR)$$

since Rupe, 1950s

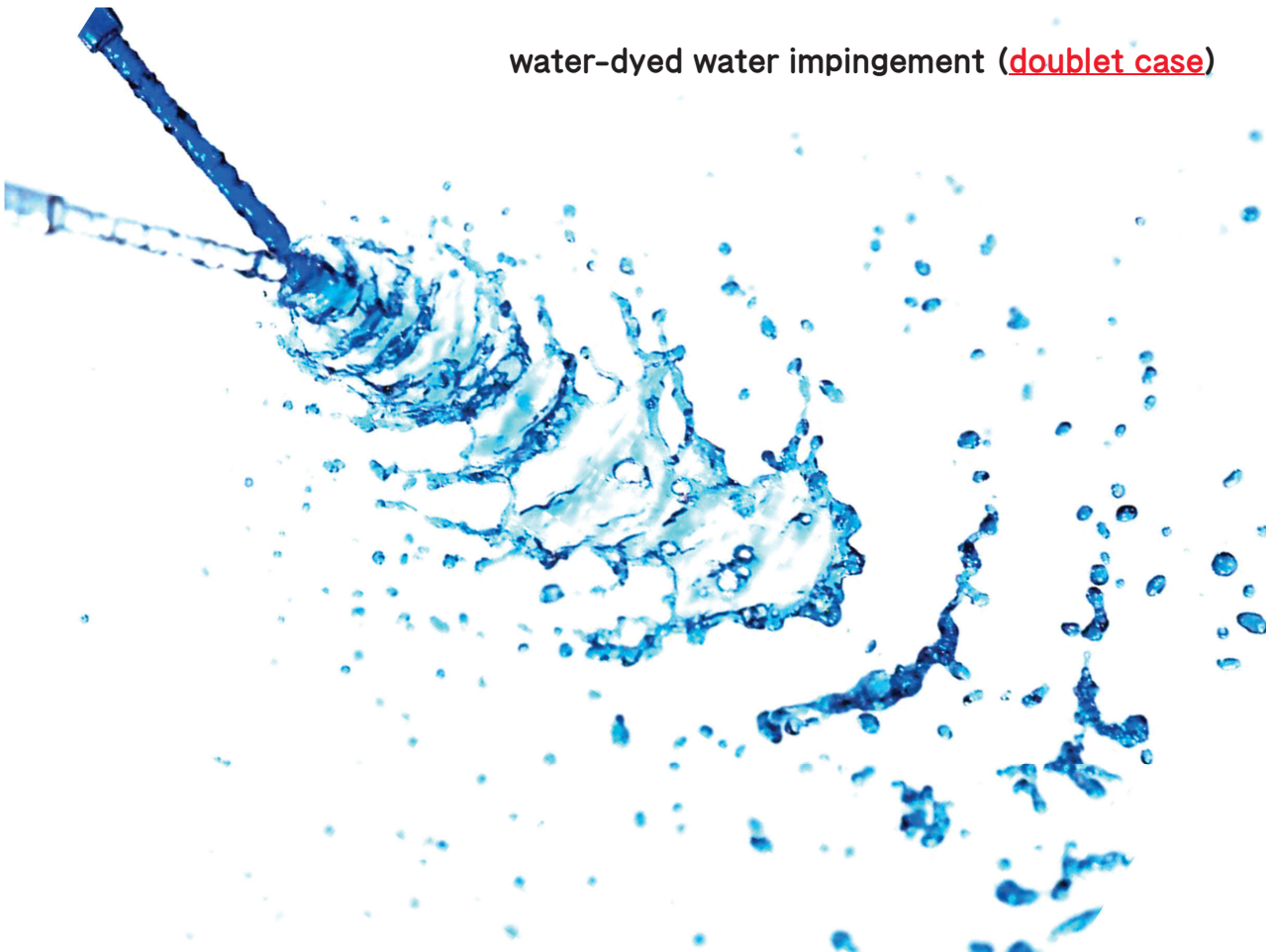
## 本発表で紹介する 推進薬・反応性グループのブレークスルー

人工衛星用二液エンジンの性能 (特性排気速度) を  
世界で初めて数理モデル化することに成功。

- 一連の推進薬熱流動現象を支配するパラメータの定式化と物理的意味の明確化。
- 大胆な一次元モデルの構築。
- 広範な混合比に対する性能を予測可能。
- 所望の性能を実現する噴射器形状が判明。

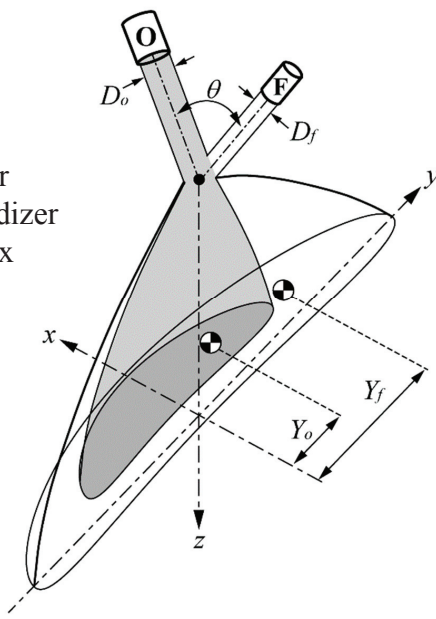
5

water-dyed water impingement (**doublet case**)

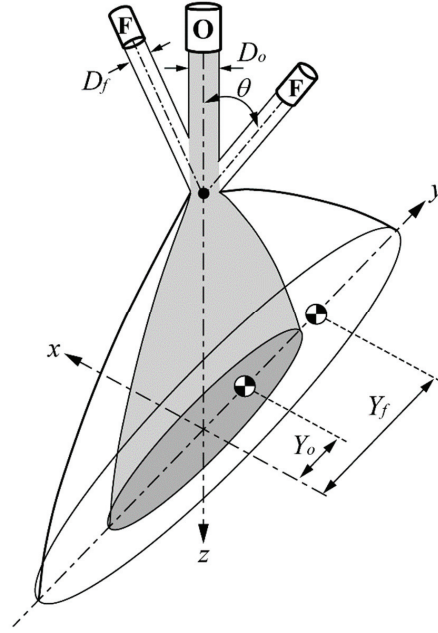


# 噴射器形状と噴霧構造

$\rho$ : density  
 $V$ : velocity  
 $D$ : diameter  
 $N$ : fuel/oxidizer  
 $\dot{q}$ : local flux  
 $o$ : oxidizer  
 $f$ : fuel



doublet (N=1)



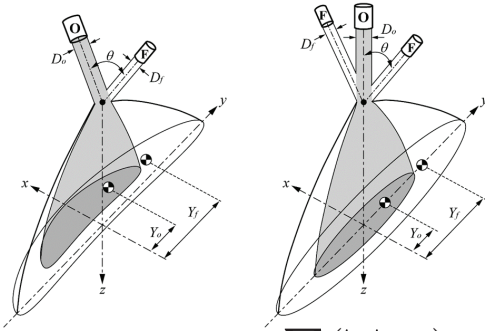
triplet (N=2)

酸化剤と燃料それぞれのy方向重心位置の“絶対値”を Y とする。

$$Y_o = \frac{\sum (|y| \cdot \dot{q}_o)}{\sum \dot{q}_o} \quad Y_f = \frac{\sum (|y| \cdot \dot{q}_f)}{\sum \dot{q}_f}$$

7

## 水流し試験結果のまとめ



酸化剤重心位置 |  $Y_o = \frac{\sum (|y| \cdot \dot{q}_o)}{\sum \dot{q}_o}$

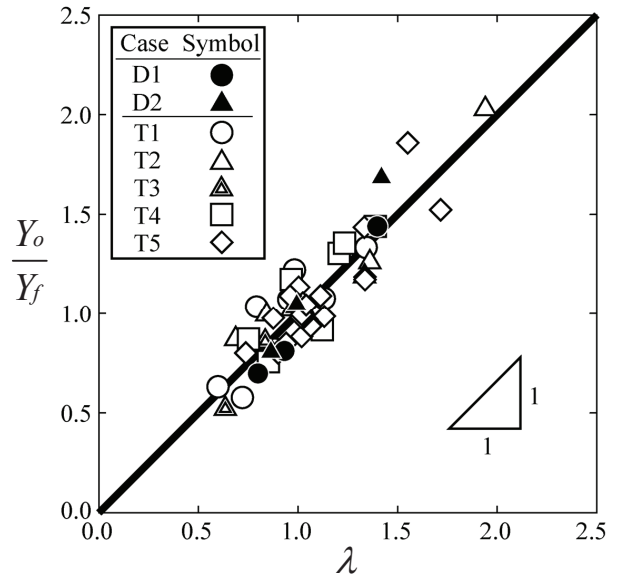
燃料重心位置 |  $Y_f = \frac{\sum (|y| \cdot \dot{q}_f)}{\sum \dot{q}_f}$

無次元噴射条件

$$\lambda \equiv \sqrt{N \frac{\rho_f V_f^2 D_f}{\rho_o V_o^2 D_o}}$$

(N = 1 for doublet, 2 for triplet)

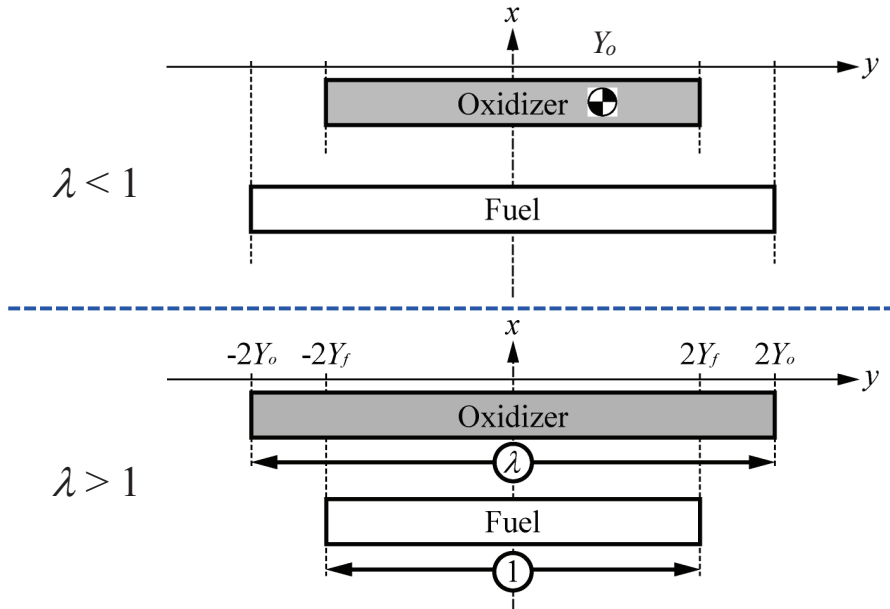
Type	Case	$D_o/D_f$	$\theta$
Doublet	D1	1.2	58
	D2	1.3	78
Triplet	T1	1.5	45
	T2	1.6	45
	T3	1.6	55
	T4	1.7	45
	T5	1.8	45



水流し試験結果

# 1次元混合分布モデルと長さスケール

$$\lambda = \frac{Y_o}{Y_f}$$

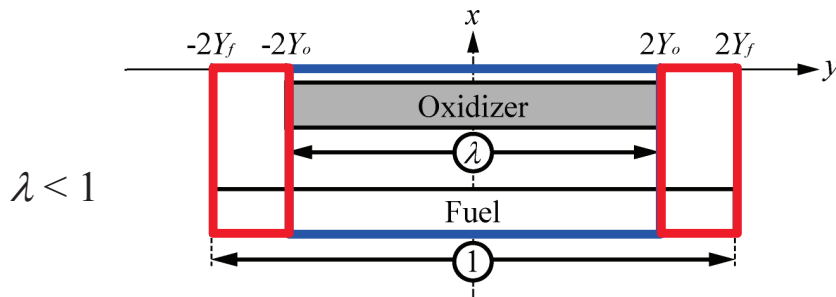


酸化剤と燃料の噴霧幅の比 =  $\lambda$

9

# 1次元混合分布モデルと長さスケール

$$\lambda = \frac{Y_o}{Y_f}$$



※ mixture ratio =  $\frac{\text{oxidizer flow rate}}{\text{fuel flow rate}}$

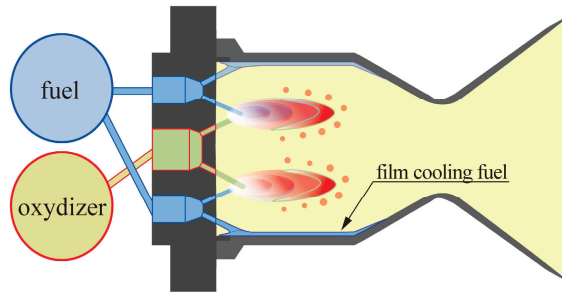
@  $|y| < 2Y_o$   $MR_{local} = \frac{\dot{m}_o}{N \cdot \dot{m}_f \cdot \lambda} = \frac{\overline{MR}}{\lambda(1 - \overline{FC})} \rightarrow c^*(MR_{local})$

@  $|y| > 2Y_o$   $MR_{local} = 0 \rightarrow c^*(0)$

@ film fuel  $MR_{local} = 0 \rightarrow c^*(0)$

10

# 噴射条件の関数としてのc\*定式化



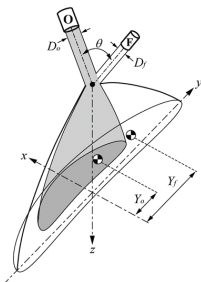
$$\lambda \equiv \sqrt{N \frac{\rho_f V_f^2 D_f}{\rho_o V_o^2 D_o}}$$

$\overline{MR}$  : 全体混合比 (全酸化剤流量/全燃料流量)  
 $\overline{FC}$  : フィルム率 (フィルム燃料流量/全燃料流量)

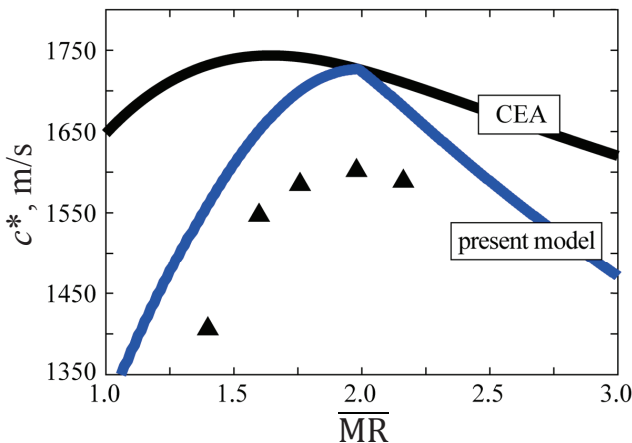
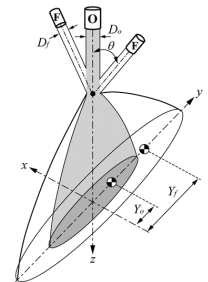
$$\left\{ \begin{array}{l} \lambda < 1 \quad c^* = \frac{c^* \left( \frac{\overline{MR}}{\lambda(1-\overline{FC})} \right) \cdot (\overline{MR} + \lambda(1-\overline{FC})) + c^*(0) \cdot (1-\lambda(1-\overline{FC}))}{\overline{MR} + 1} \\ \lambda > 1 \quad c^* = \frac{c^* \left( \frac{\overline{MR}}{\lambda(1-\overline{FC})} \right) \cdot \left( \frac{\overline{MR}}{\lambda} + 1 - \overline{FC} \right) + c^*(+\infty) \cdot \left( 1 - \frac{1}{\lambda} \right) \overline{MR} + c^*(0) \cdot \overline{FC}}{\overline{MR} + 1} \end{array} \right.$$

11

# c\* モデルの検証

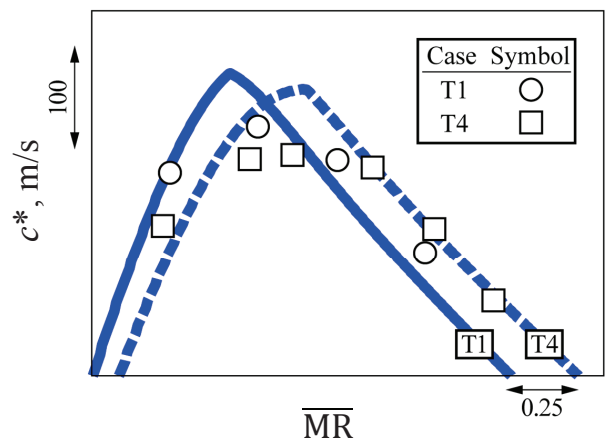


- 平衡計算 (0次元モデル)
- ▲ ○ □ 燃焼試験 (MON/MMH)
- 本計算 (1次元モデル)



**Doublet ( $\overline{FC} = 0$ )**

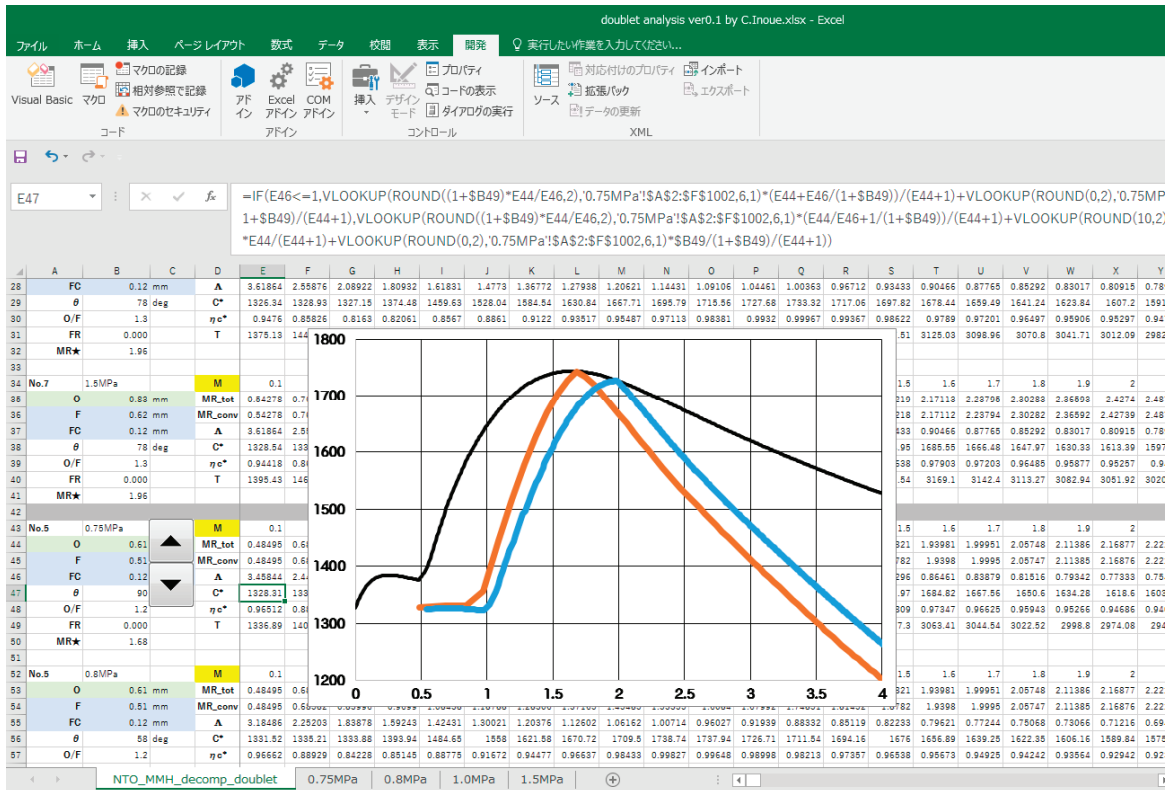
(Doublet exp. by Kumagai, 1986)



**Triplet ( $\overline{FC} = 0.3$ )**

12

# Excelでc\* を計算



(Doublet)

13

## 支配パラメータが分かると何が良い？

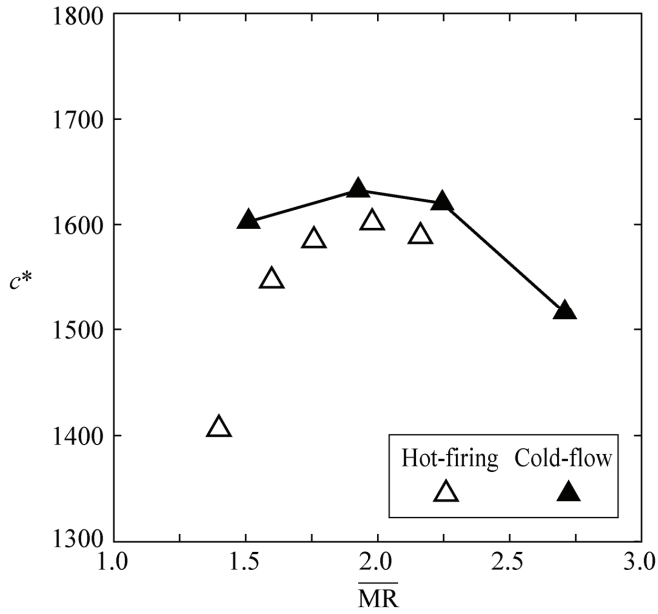


is governed by

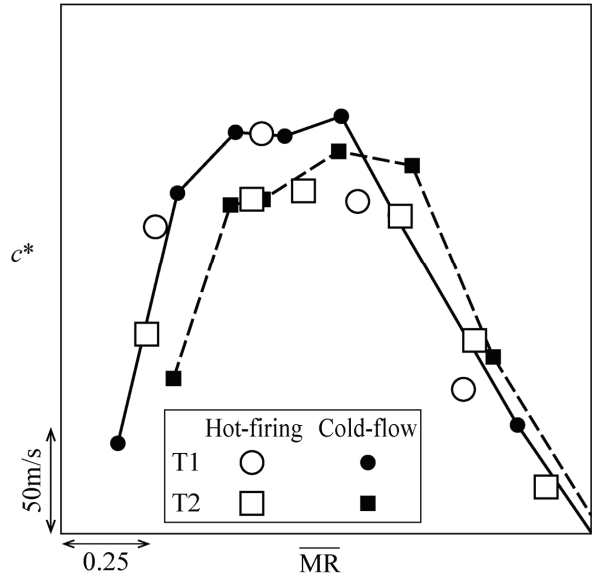
$$\lambda \equiv \sqrt{N \frac{\rho_f V_f^2 D_f}{\rho_o V_o^2 D_o}}$$

14

# “水”流し試験と燃焼試験の比較

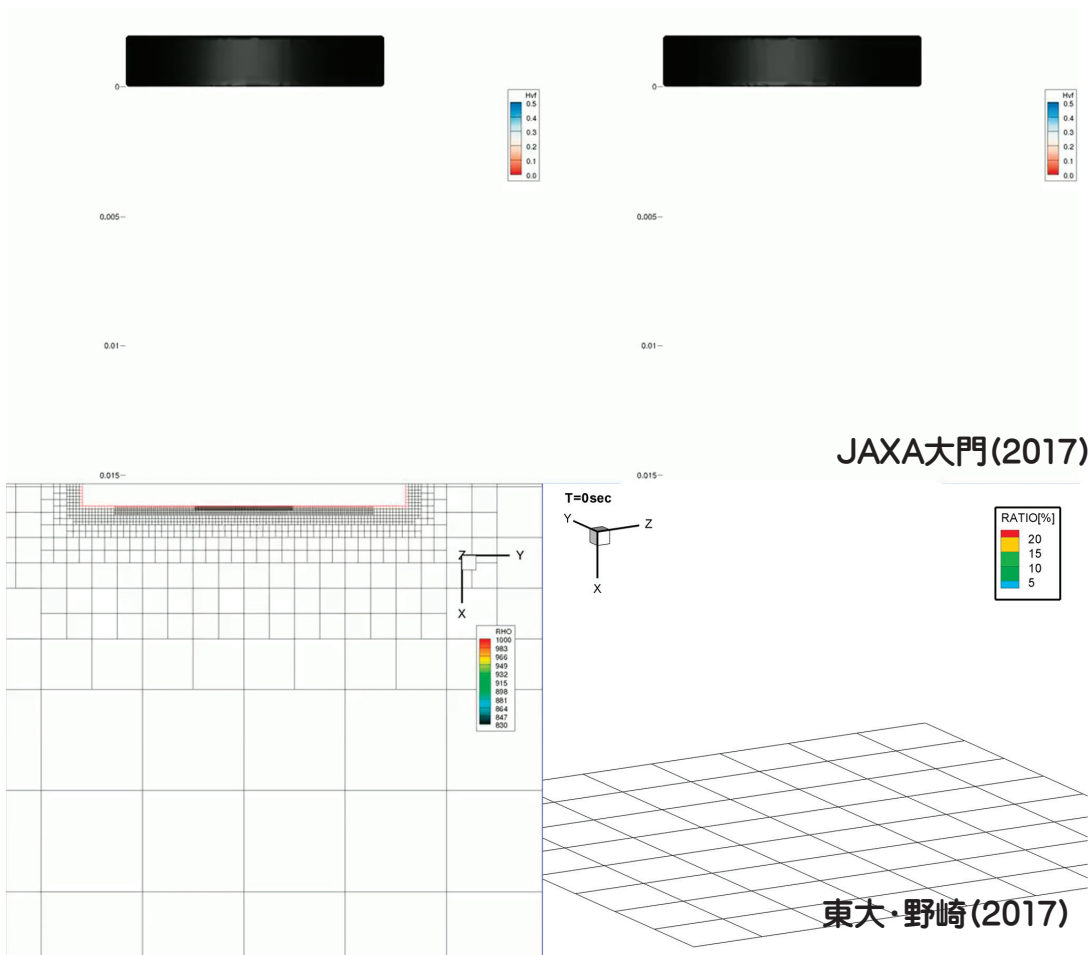


Doublet



Triplet

mixture ratio of water is converted to NTO/MMH





## One of 推進薬・反応性グループのブレークスルー

人工衛星用二液エンジンの性能 (特性排気速度) を  
世界で初めて数理モデル化することに成功。

$$c^* = f(\lambda, \overline{FC}, \overline{MR})$$

- 現象を支配するパラメータの理解 (本質の抽出)
- 大胆な一次元モデル (筋の良いモデル)