

MOVE THE WORLD FORWARD

MITSUBISHI  
HEAVY  
INDUSTRIES  
GROUP

東大社会連携講座

## 二液式スラスタ開発における 推進薬・反応性熱流動研究の適用と期待

三菱重工業株式会社  
宇宙事業部  
宇宙機器技術部 衛星推進機器設計課  
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

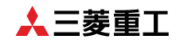


### 本日の発表内容



1. 製品紹介
2. フライト実績
3. 推進系設計における現状開発プロセスと課題
4. 目指している開発プロセス
  4. 1 性能予測解析技術
  4. 2 霧化CFD適用事例紹介
  4. 3 燃焼CFD適用事例紹介
  4. 4 水流し試験による性能評価
5. 成果と今後期待すること

## 1 MHI製品紹介



**衛星推進系**（RCS: Reaction Control System / OME: Orbit Maneuver Engine）  
 姿勢制御装置 軌道制御装置

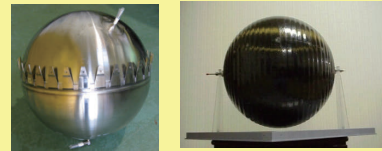
**ロケット用姿勢制御装置**（SJ: Side Jet / RCS）

当社製品例①: 衛星用RCS / OME



当社製品②: イプシロンロケット2段用RCS

タンク



チタン合金、CFRP製

スラスタ

1液式  
スラスタ



2液式スラスタ

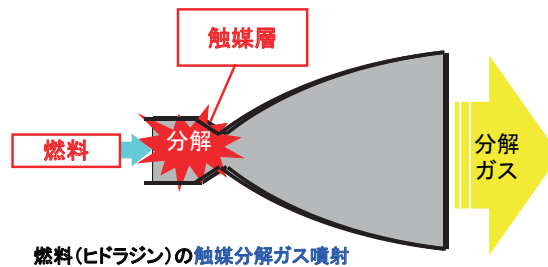
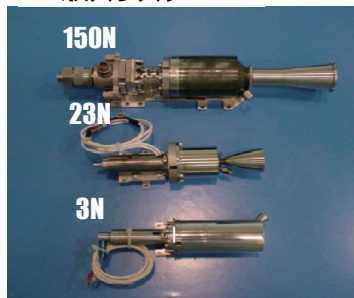


© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

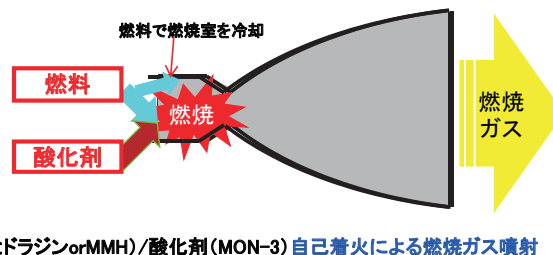
## 1 MHI製品紹介 ～ 一液式スラスタと二液式スラスタ



一液式スラスタ



二液式スラスタ



© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

## 1 MHI製品紹介



### 一液式推進系

主用途：中・低軌道衛星、ロケット姿勢制御装置



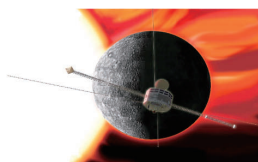
太陽観測衛星“ひので”



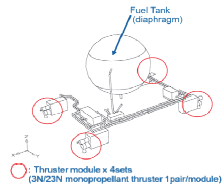
イプシロンロケット2段RCS

### コールドガスジェット推進系

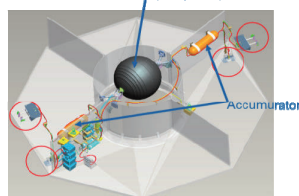
主用途：小型衛星、ロケット



水星探査機“MMO”



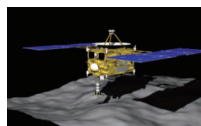
○ : Thruster module x 4sets  
(3N/23N monopropellant thruster 1 pair/module)



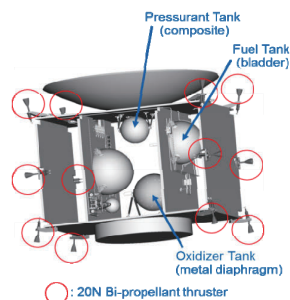
○ : 0.4N cold gas thruster

### 二液式推進系

主用途：静止衛星、惑星探査機



小惑星探査機“はやぶさ”



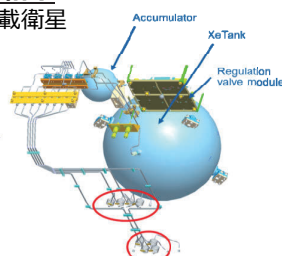
○ : 20N Bi-propellant thruster

### 電気推進用推進供給系

主用途：電気推進搭載衛星



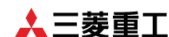
小惑星探査機“はやぶさ”



○ : Interface connector to ion thruster assy.

© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

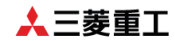
## 2 フライト実績



昭和/平成	S40~H5	H7~H12	H13~H17	H18~H22	H23~
ロケット用 姿勢制御装置 (SJ、RCS)	K L M-4S M-3C M-3H M-3S S-520S M-3S II M-V M-3S II (SJ) 実績8機 K.L.M.用 累計実績 40機	M-V1号機(はるか搭載) ▼(H9.2.12) M-V4号機(ASTRO-E搭載) ▼(H12.2.10) M-V3号機(のぞみ搭載) ▼(H10.7.4) M-V(SJ)1機/年 再使用ロケット実験機 ▼H11~ ▼(H8.2.12)	M-V5号機(はやぶさ搭載) ▼(H15.5.9) M-V6号機(すざく搭載) ▼(H17.7.10) M-V7号機(ひので搭載) ▼(H18.9.23) M-V8号機(あかり搭載) ▼(H18.2.22)	▼イプシロンロケット(H25~)	
科学衛星用 推進系 (RCS)	ルーペー金星探査衛星(RCS) ▼“さきがけ”(S60.1.8) ▼“すいせい”(S60.8.19) 工学試験衛星(RCS) ▼“ひてん”(H2.1.24) 磁気圏観測衛星(RCS) ▼(H4.7.24) 無人宇宙実験衛星(RCS/OCT) ▼(H7.3.18) SFU 火星探査機(RCS/OME) ▼(H10.7.4) のぞみ	宇宙天文台(RCS) ▼(H9.2.12) 地球周回天文衛星(RCS)(H12.2.10) はるか ASTRO-E すざく ▼赤外線天文衛星(RCS) (H18.2.22) あかり 金星探査機(H22.5.21) ▼(H15.5.9) 小惑星探査機(RCS) ▼(H15.5.9) はやぶさ	▼X線天文衛星(RCS) (H17.7.10) 太陽観測衛星(RCS) (H18.9.23) ひので ▼赤外線天文衛星(RCS) (H18.2.22) あかり 金星探査機(H22.5.21) ▼(H15.5.9) 小惑星探査機(RCS) ▼(H15.5.9) はやぶさ ▼ひまわり-7(H18.2.18) ▼USERS(H14.9.10) ▼SERVIS-1(H15.10.29)	▼X線天文衛星(H28.2.17) ひとみ ▼赤外線天文衛星 SPICA 小惑星探査機 ▼(H26.12.3) はやぶさ2 ▼水星探査機(H30) BepiColombo MMO ▼小型科学衛星(H25~)	▼月着陸実験機 SLIM ソーラーセイル ▼外惑星探査機▼ ▼革新衛星 ▼みちびき (H22.9.11) ▼ひまわり8 (H26.10.7) ▼DS2000
実用衛星他		▼大気圏再突入 実験機用推進機 (OREX)(H5)			

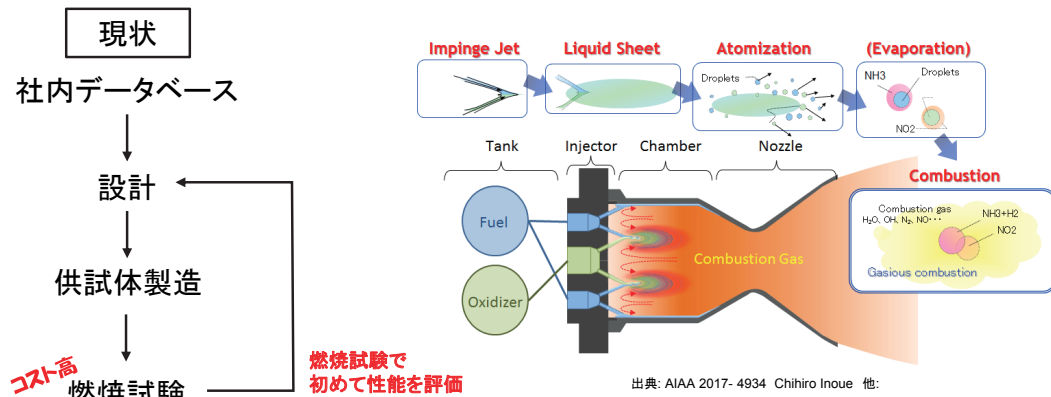
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

### 3 推進系設計における現状開発プロセスと課題



- ① 衛星ミッション要求による推進系に対する作動要求が衛星毎に異なる
- ② 推進薬の化学反応計算が非常に複雑であり、流体、燃焼の連成解析が困難
- ③ スラスタは物が小さく、各部の圧力・温度計測が困難

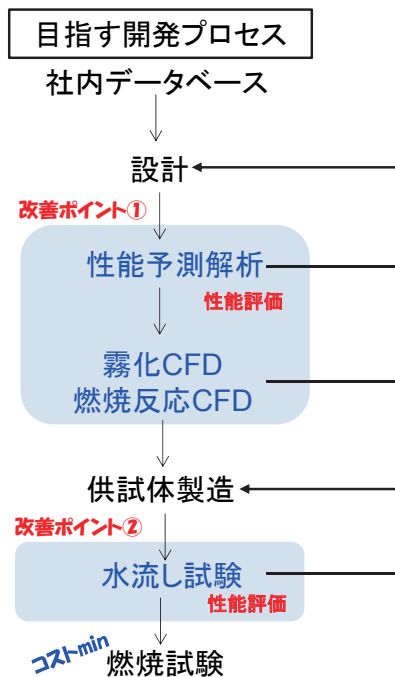
→ 従来解析による推進系の性能評価ができておらず、燃焼試験を繰り返している



推進薬・反応性熱流動解析の適用で開発プロセスを改善したい

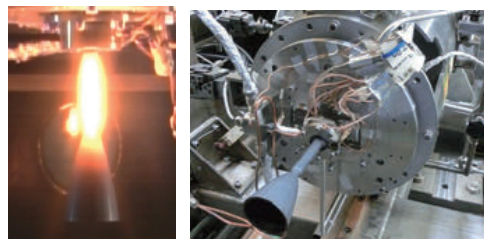
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

### 4 目指している開発プロセス

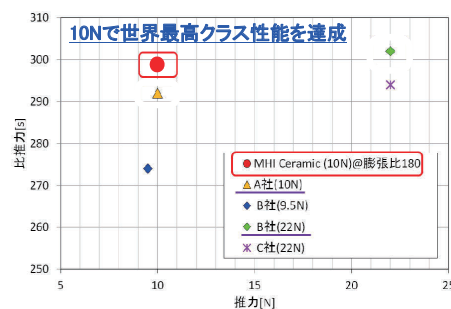


#### 【適用事例】

次世代商用衛星向け10N二液スラスタ(現在開発中)



三菱重工技報 Vol.54 No.4 (2017)



開発プロセスの改善により設計期間、開発費用が低減できる

© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

## 4.1 性能予測解析技術



### 【適用事例】

次世代商用衛星向け10N二液スラスタ

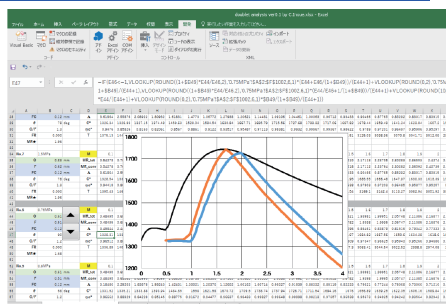
### 【解析によって得られた結果】

従来ツールでは評価が困難であった噴霧状況や  
フィルムクーリング等の影響を考慮した性能予測が  
可能となった

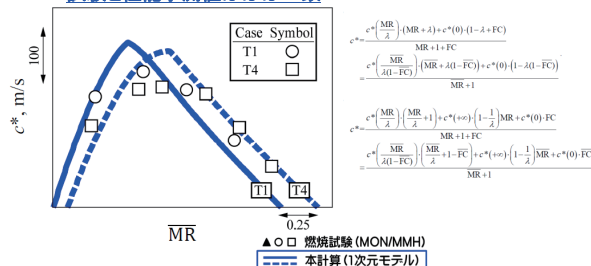


10Nセラミックスラスタ燃焼試験状況

### 主要パラメータを明らかにし一次元計算により性能予測



### 試験と性能予測値はほぼ一致



噴射器形状等の設計パラメータから効率よく性能予測が可能となった

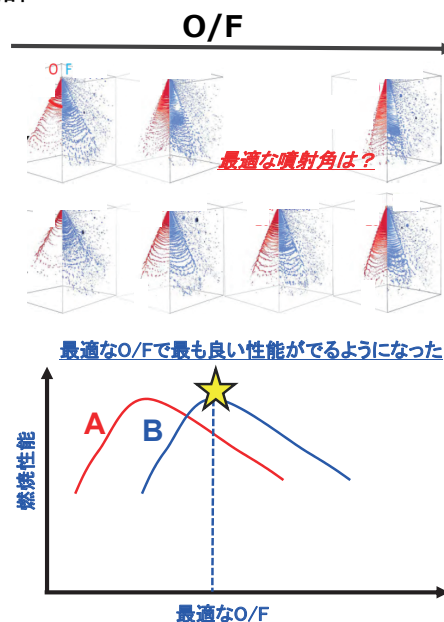
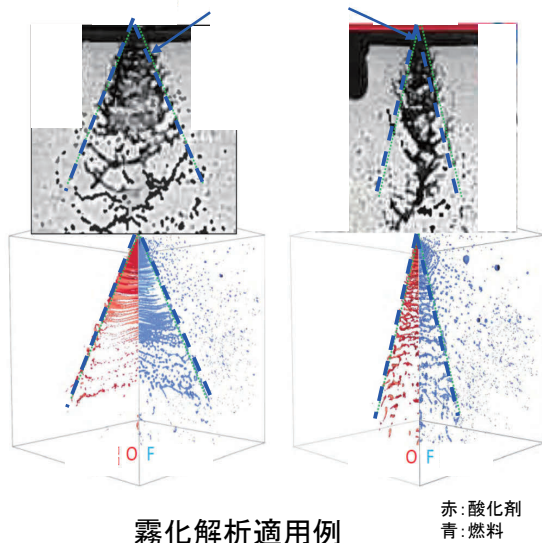
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

## 4.2 霧化CFD適用事例



霧化CFDで最適な噴射角を導き出し噴射器を設計

### 霧化CFDと可視噴霧試験の噴射角が一致

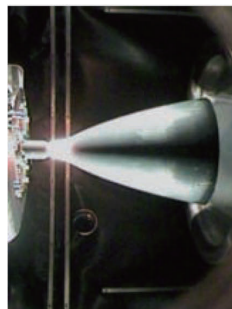
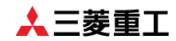


霧化CFDによる噴射状況評価により燃焼性能を評価可能

© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.



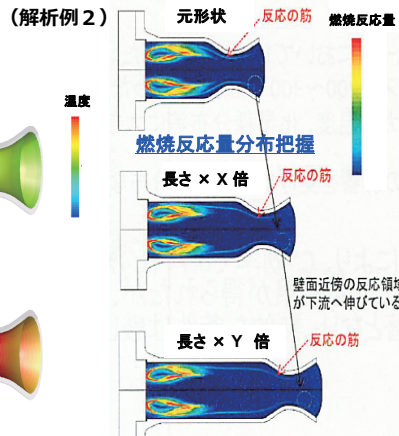
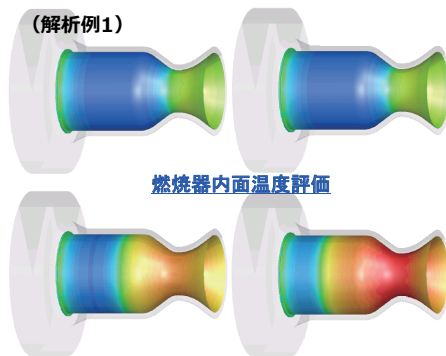
## 4.3 燃焼CFD適用事例



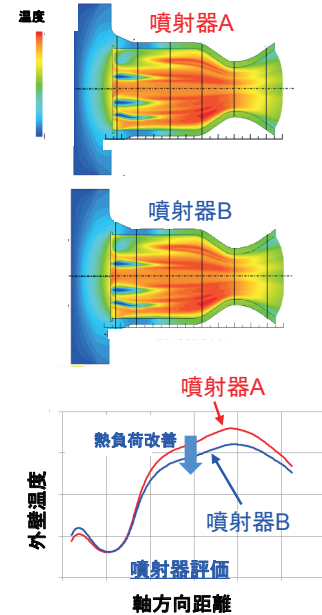
500Nセラミックスラスタ燃焼試験状況

【適用事例】  
500Nセラミックスラスタ

【解析によって得られた結果】  
燃焼室の温度分布  
燃焼反応や生成物分布  
→ 燃焼器長さ形状に対する最適値



(解析例3)



燃焼室内の現象の把握ができ燃焼器の最適形状の効率的な設計が可能となった

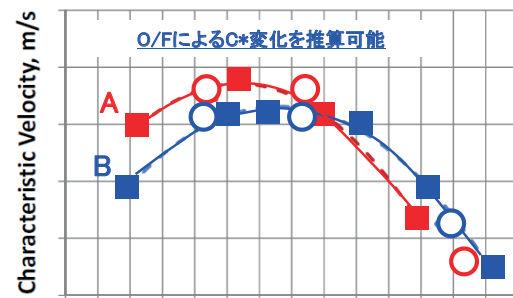
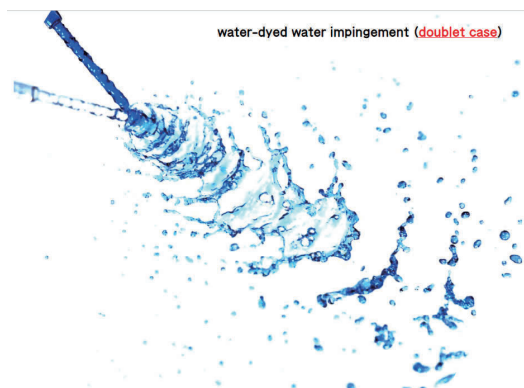
© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

## 4.4 水流し試験による性能評価



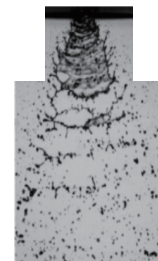
【適用事例】  
次世代商用衛星向けに10N二液スラスタ開発

【解析によって得られた結果】  
燃焼試験で得られた性能を水流し試験で確認することができた



- 燃焼試験(A)
- 燃焼試験(B)
- 水流し試験(A)
- 水流し試験(B)

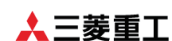
O/F



噴射器の水流し試験の結果で燃焼試験結果を予想できる見込みを得た

© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

## 5 成果と今後期待すること



### 推進薬・反応性流動研究を適用することで…

- ① 定常作動時における高精度な性能解析が可能
- ② 10Nスラスタの高性能化に適用し設計期間の短縮及び供試体製造数低減が可能
- ③ 水流し試験による性能評価によって燃焼試験回数を減らすことが可能



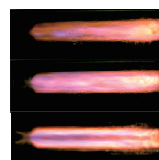
10Nスラスタ燃焼試験



500Nスラスタ燃焼試験

### 今後期待すること…

- ① 可視化によりパルス作動時や着火時などの過渡特性の解析手法確立
- ② 大推力スラスタへの開発適用のためのマルチエレメントの噴射器の解析
- ③ 一液式スラスタ触媒中の反応性熱流動解析



10N可視化試験

本研究を適用することでスラスタの開発における開発期間、コスト、リスクの低減を図る

© 2017 MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD. All Rights Reserved.

MOVE THE WORLD FORWARD

MITSUBISHI  
HEAVY  
INDUSTRIES  
GROUP