A large, high-resolution image of Earth from space occupies the left half of the slide. It shows a curved horizon with swirling white clouds over a dark blue ocean and brownish-green landmasses.

# 事例に学ぶ！ 機械学習を用いた健全性管理 ～宇宙機推進系の故障検知を例に～

富永 晃司

国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)  
研究開発部門 第二研究ユニット 推進系技術領域

# アウトライン

- 1.はじめに
- 2.宇宙機推進系とPHM技術
- 3.センシング技術
- 4.PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)
- 5.まとめと今後の展望

# 1.はじめに

## 2. 宇宙機推進系とPHM技術

## 3. センシング技術

## 4. PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)

## 5. まとめと今後の展望

## 講演目的

宇宙機推進系の健全性管理における機械学習の適用事例を通じて、直感だけに頼らない**データ駆動型故障診断アプローチ**を共有すること

### ■センシング技術

- FBG式光ファイバーセンサによる多重化圧力動応答計測
- センサデータの前処理、圧力計測精度評価
- 実機相当試験での技術検証

### ■PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)

- 周波数応答関数を用いた流量、気泡混入の異常検知・診断(低計算コスト)
- 時系列、周波数応答特性からの特徴量抽出、分類学習(やや低計算コスト)



# 自己紹介



## 富永 晃司

### 【略歴】

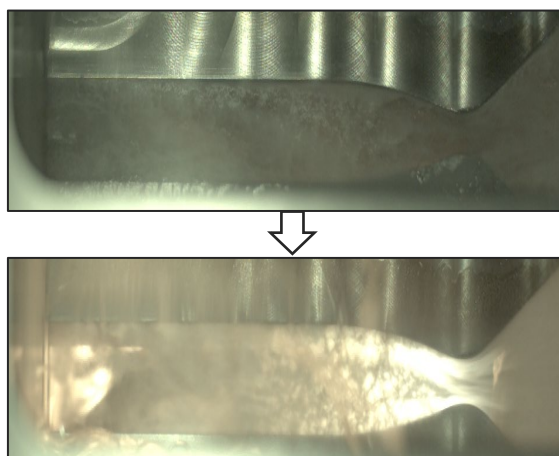
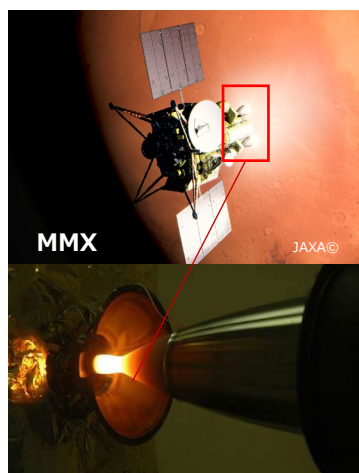
2021 - : 国立研究開発法人 宇宙航空研究開発機構(JAXA) 入構  
研究開発部門 第二研究ユニット 推進系技術領域所属  
MATLAB歴: 6年 (大学~)

### 【主な研究課題】

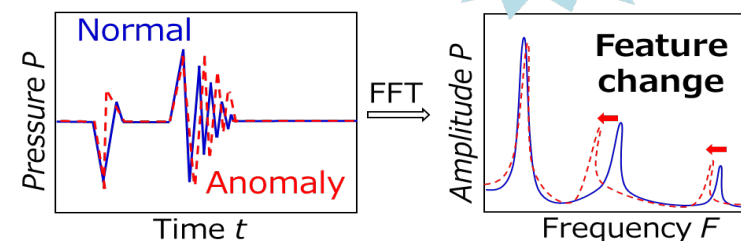
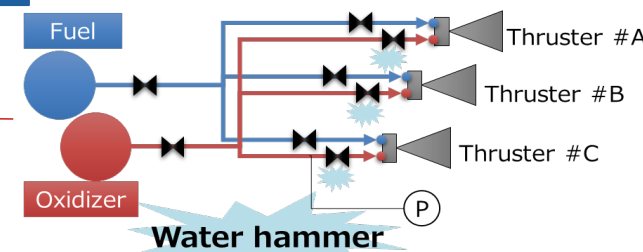
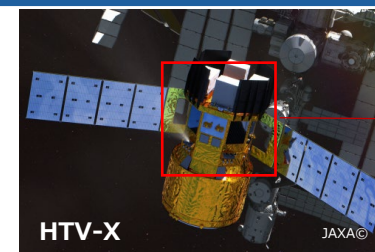
- ・ 二液式スラスタにおける不安定着火現象の解明とモデル化
- ・ 推薬供給システムの健全性管理技術



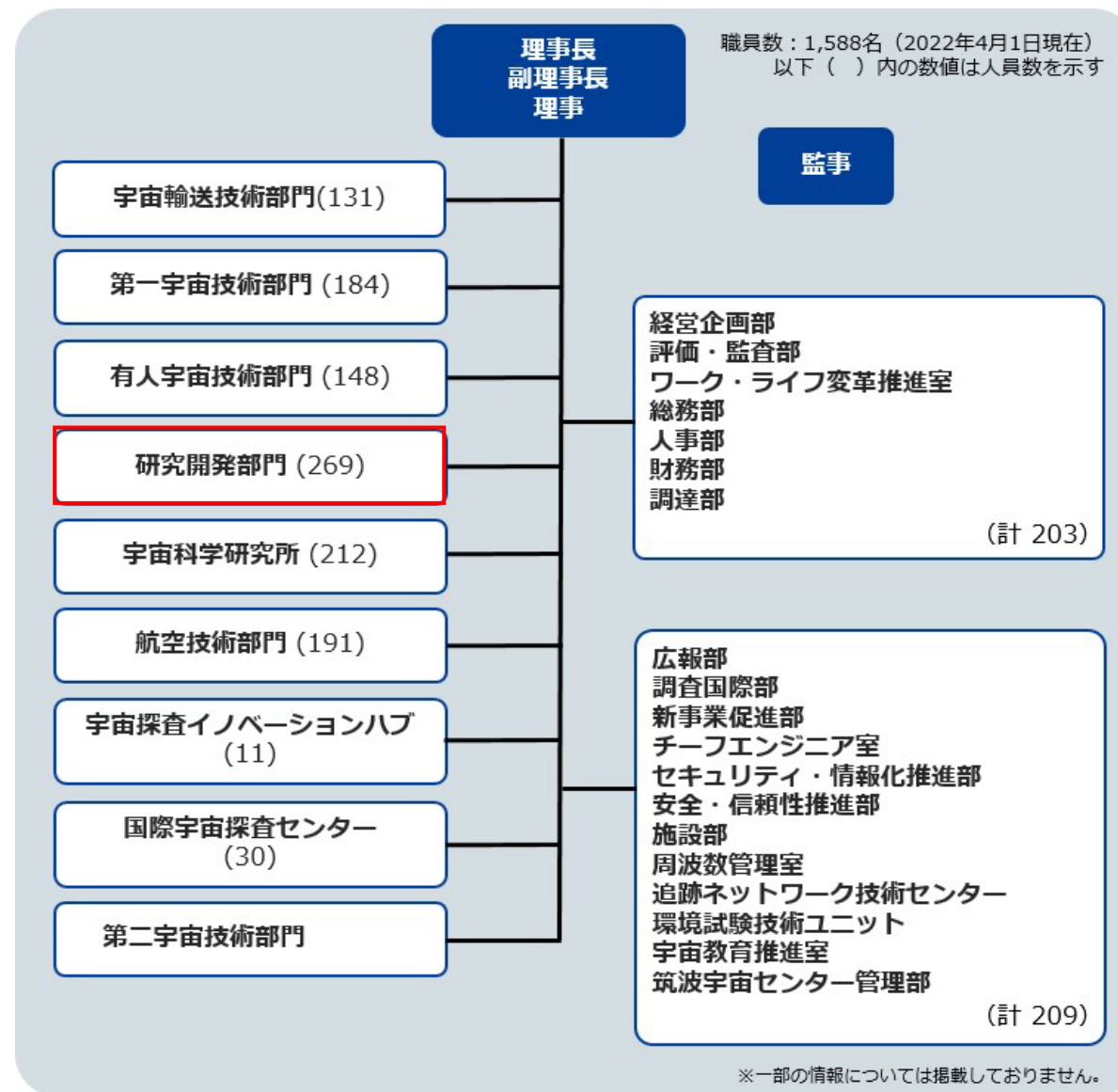
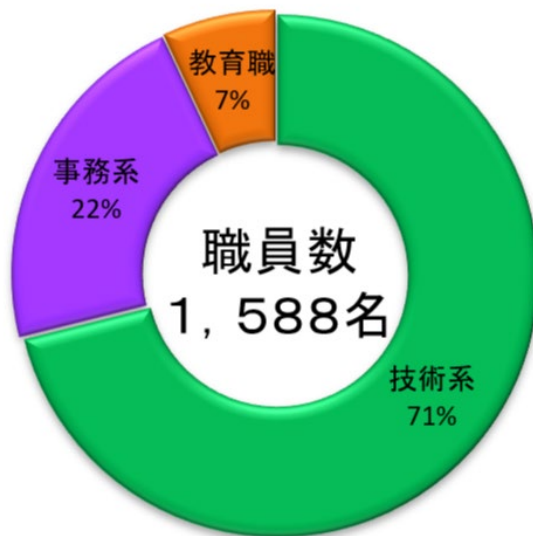
### 不安定着火現象の研究



### ヘルスマネジメント研究



# JAXA概要 —組織編—





# JAXA概要 一事業所編一



調布航空宇宙センター



角田宇宙センター



内之浦宇宙空間観測所



種子島宇宙センター



筑波宇宙センター



相模原キャンパス



東京事務所



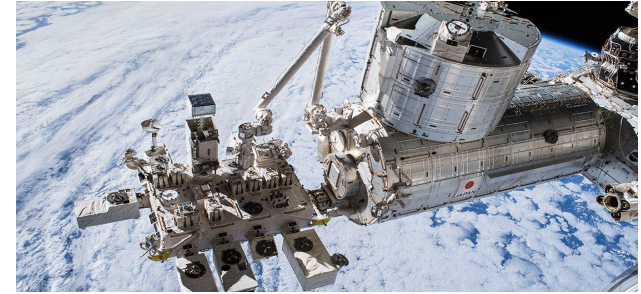
# JAXA概要 一事業編一



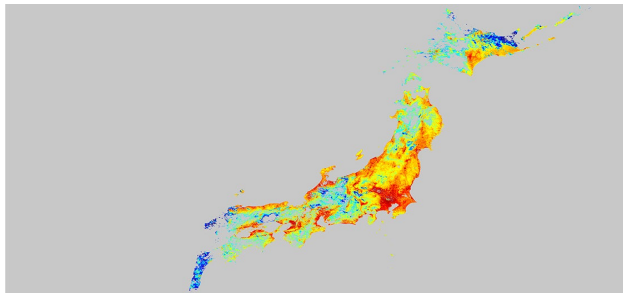
宇宙輸送



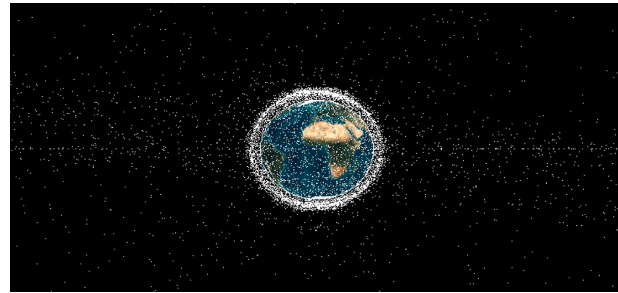
研究開発



有人宇宙開発



衛星データ利用



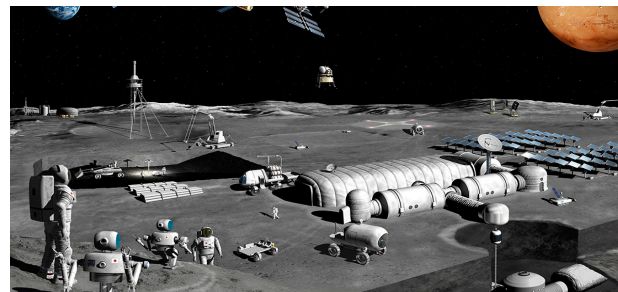
デブリ除去



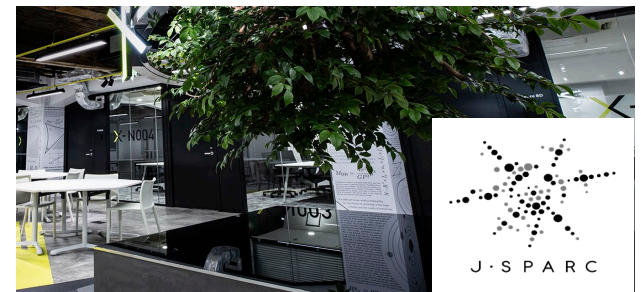
科学探査



航空技術



有人探査



ビジネス共創etc...

1.はじめに

## 2.宇宙機推進系とPHM技術

3.センシング技術

4.PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)

5.まとめと今後の展望

# 宇宙機推進系のライフサイクルと課題



## 宇宙機システムのライフサイクル

コンセプトデザイン、設計

製造、組み立て、試験

運用



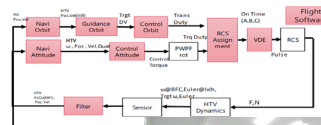
宇宙機システム

制御システム

推進系

供給系統

エンジン



領域毎の設計検討

ハードウェア中心の評価・検証

少ない実績、乏しいデータ蓄積

### リスクアセスメントでの課題

- 多領域にまたがった複雑なシステム構成
- 従来のハードウェアを中心とした評価・検証にかかる膨大なリソース
- 地上試験での実運用条件、環境の再現性不足

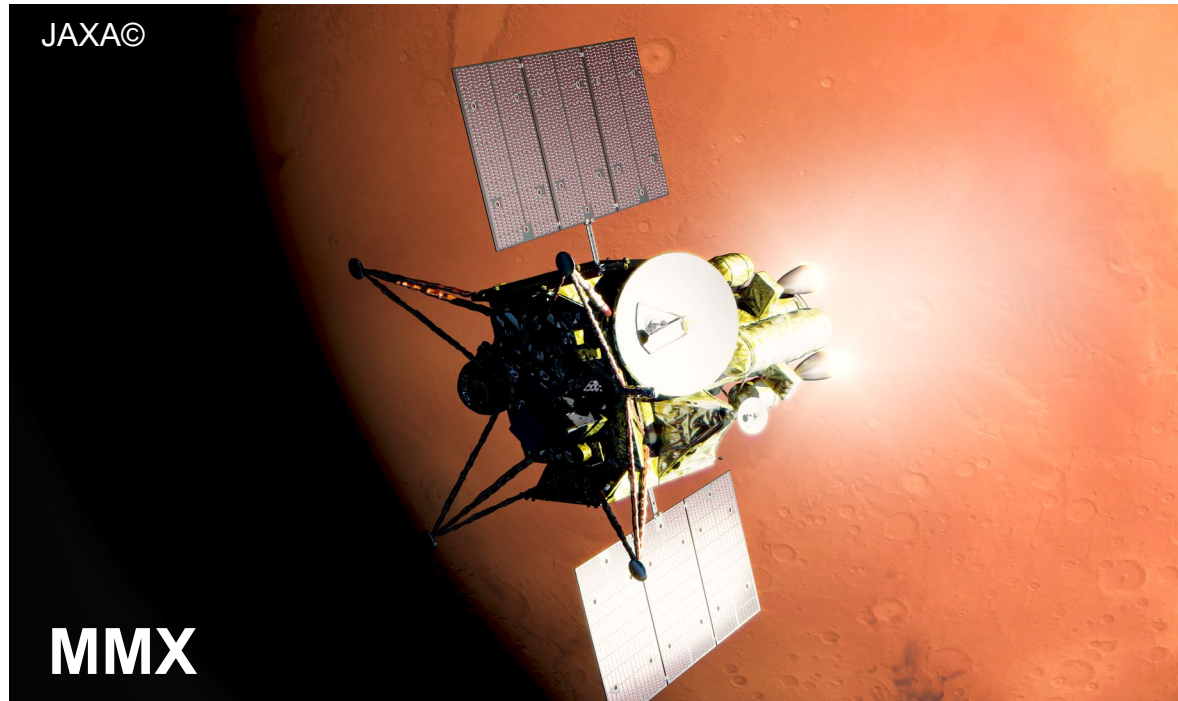
### リスクへの対処における課題

- 多様なリスク事象と、システムへの波及・伝播
- 運用実績・機数が少なく、計測リソースの厳しい制約によるデータの不足
- 専門家の経験や知見に依存した対処方策

宇宙機推進系におけるPHM技術をご紹介！

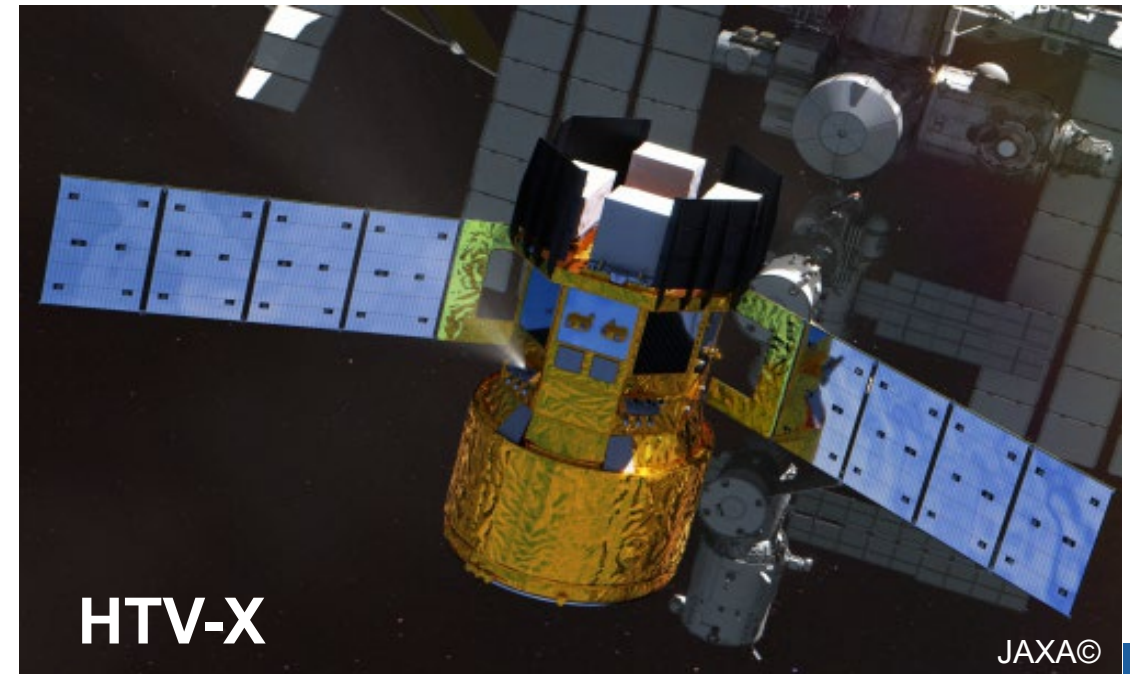


# 宇宙機推進系とは？



全備質量	16 ton
スラスタ推力	120 N × 8本 × 3系統

全備質量	4 ton
メインエンジン推力	500 N × 6本
姿勢制御用スラスタ推力	20 N × 16本



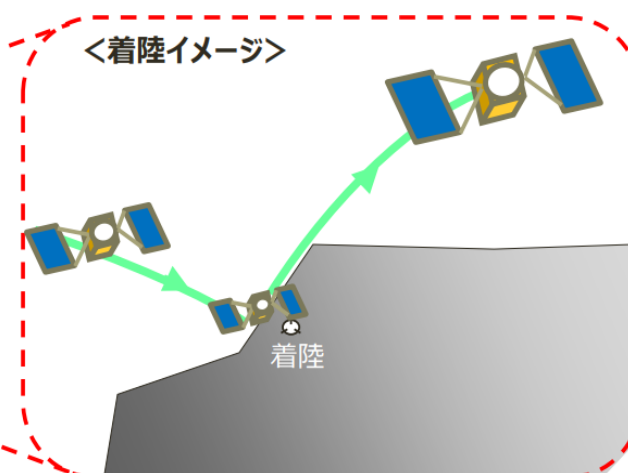
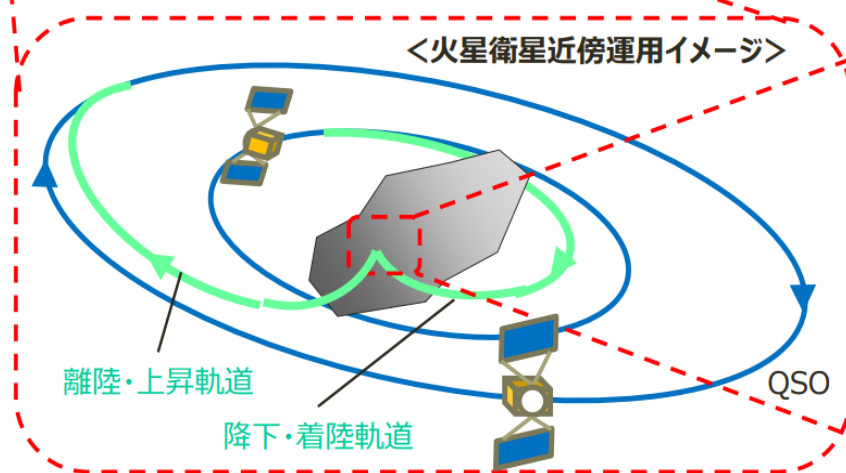
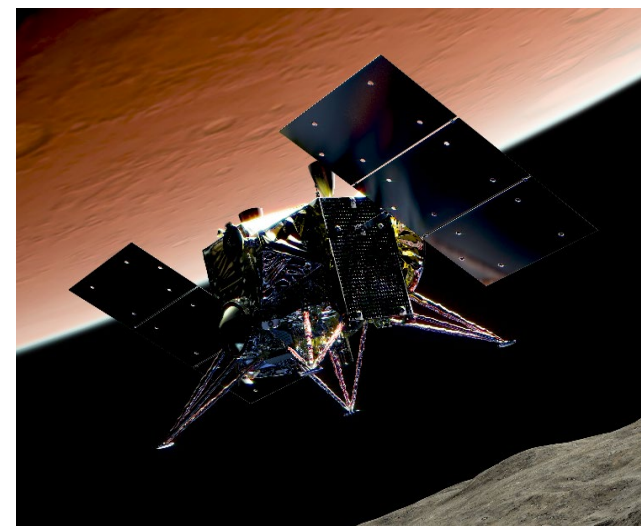
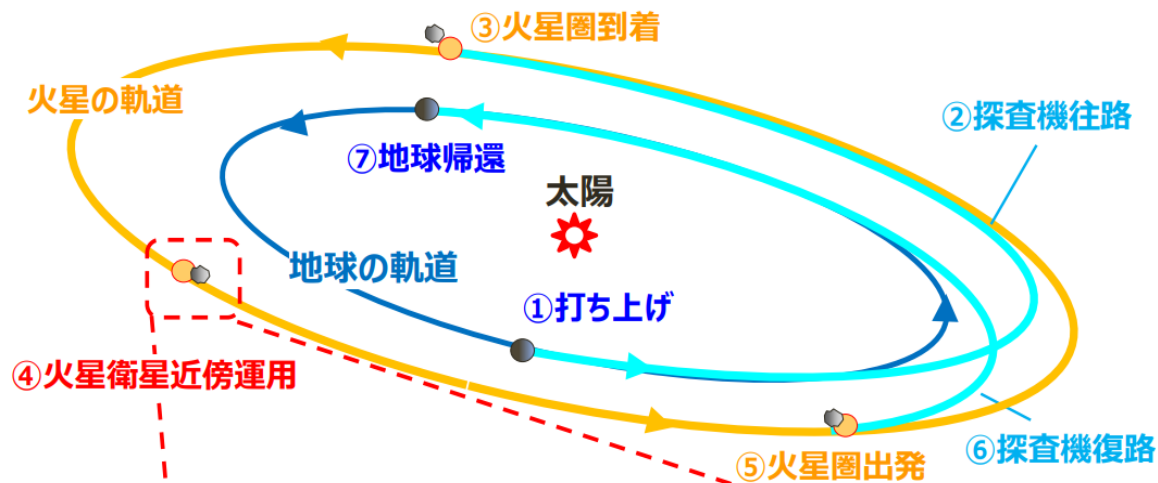
# 宇宙機推進系とは？

✓宇宙機による宇宙探査：HTV-XによるISSへの物資補給，軌道上実証



# 宇宙機推進系とは？

✓宇宙機による宇宙探査：MMXによる火星衛星サンプルリターン

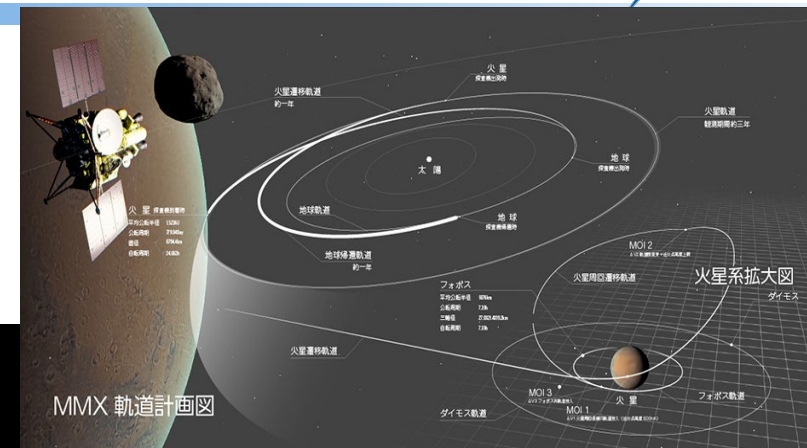


©JAXA



## ① 宇宙機の軌道を変える:軌道制御

- 軌道投入, 接近、離脱, 再突入
- 地球軌道から惑星遷移軌道への遷移
- 天体への離着陸



## ② 宇宙機の姿勢を変える: 姿勢制御

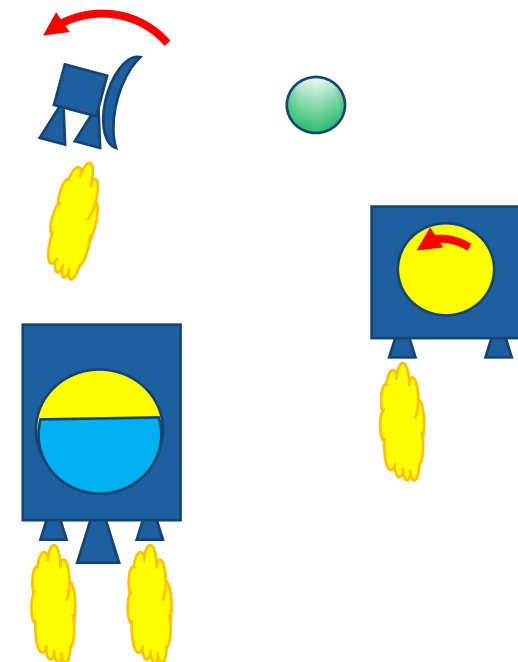
- ロケットから分離時の回転静止
- 軌道制御前の噴射姿勢変更

### ③ ホイールの回転を抑える:ホイールアンローディング

- 姿勢制御用ホイールの回転数を上限内に抑えるためのスラスト噴射

#### ④ 宇宙機に加速度を発生させる:アレッジセトリング

- タンクの推薬を排出口の側に押しつける



## 高度なミッション&規模の大きい宇宙機には推進系が搭載されるケースが多い

# 宇宙機推進系概要 -種類-



推進系

化学推進

コールドガス(N<sub>2</sub>, He)

1液(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)

2液(N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/NTO)

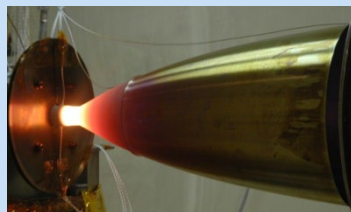
電気推進

イオン(Xe)

ホール(Xe)

自身の専門

## 化学推進系



ヒドラジン1液  
ヒドラジン2液  
MMH2液  
コールドガス  
など

### メリット

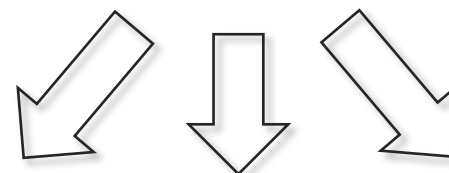
推力が大きい  
コストが安い  
必要電力が少ない

### デメリット

比推力が小さい

### 適用例

軌道投入を急ぎたい静止衛星ミッション  
軌道変換に大推力を要する探査ミッション  
重力天体への着陸ミッション



## ハイブリッド型

大	推力	小
低	ペイロード比	高
安	コスト	高
小	電力	大

## 電気推進系



イオンエンジン  
ホールスラスタ  
など

### メリット

比推力が大きい

### デメリット

推力が小さい  
コストが高い  
必要電力が多い

### 適用例

ペイロード比率を上げたい静止衛星  
軌道変換に高推力を要さない探査ミッション

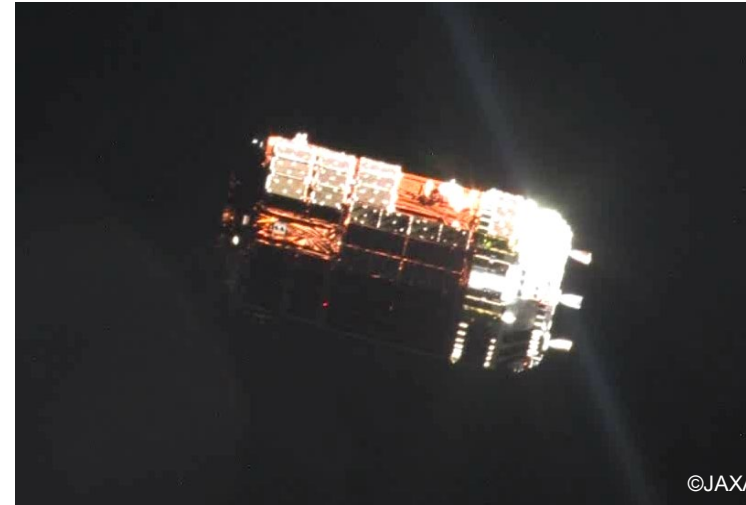
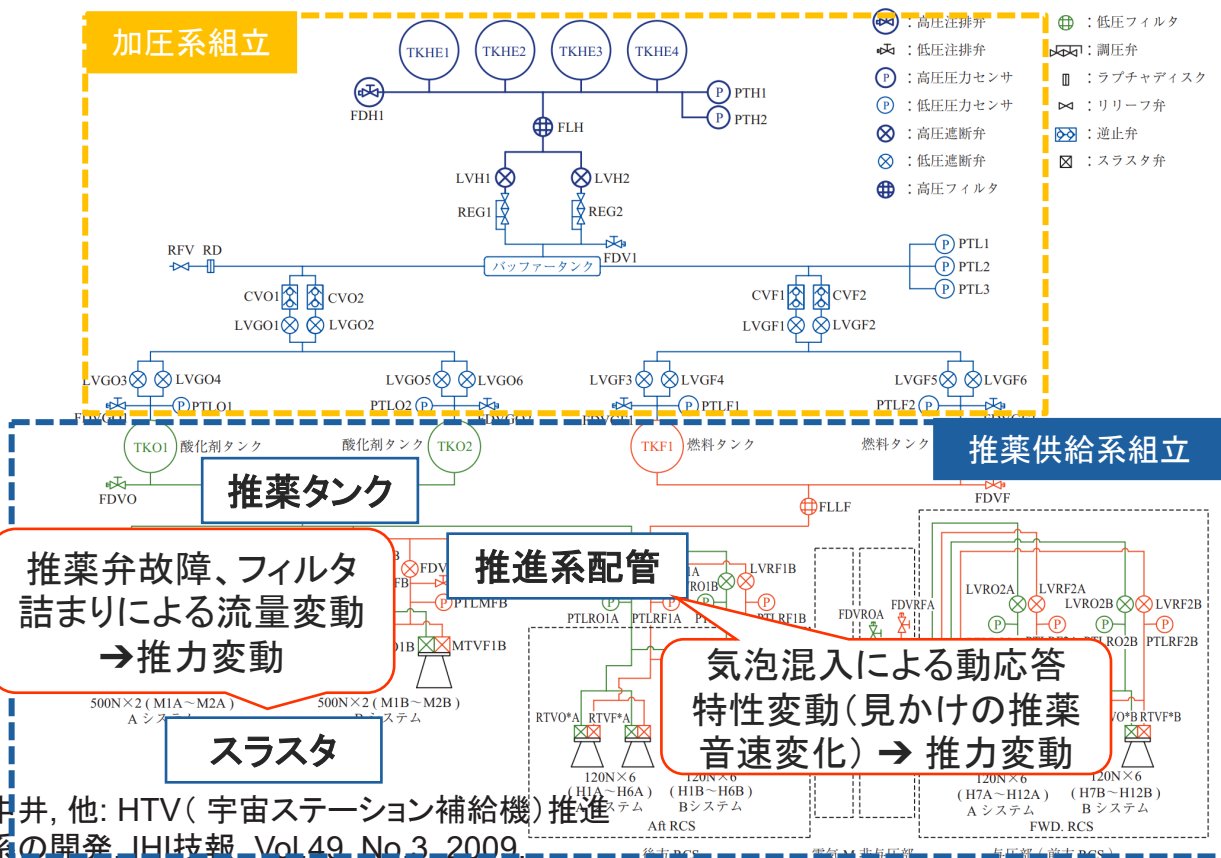
(注)スラスタ: 衛星では姿勢制御など大きな速度変化を生じない用途に使う小型のエンジンをスラスタ(thruster)と呼んでいる(推力:thrust). 液体化学推進系でエンジンという呼称は推力400N程度以上のもの  
で使うが、電気推進のイオンエンジンは推力20mNでエンジンと呼んでいる。固体推進薬を用いたものはモータと呼ぶことが多い。

# 化学推進系の推薬供給における課題

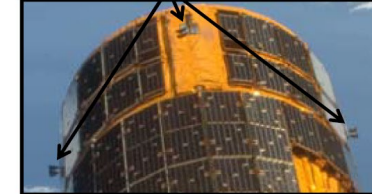


## HTV こうのとりの (二液式推進系)

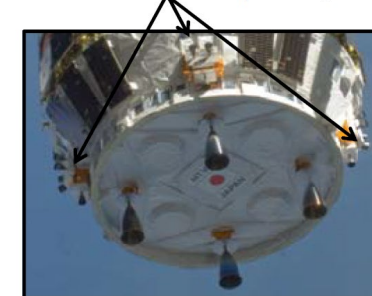
- ・120Nスラスタ×28式 (主従系)
- ・500Nエンジン×4式
- ・搭載推薬量: 2500kg程度



Fwd. RCS Thruster (HBT-1)



Aft. RCS Thruster (HBT-1)



S. Takata, et al., Design Verification Results of Japanese 120N Bi-propellant Thrusters (HBT-1) Based on its First Flight in HTV3, 2013.



# 宇宙機推進系の推薬供給における課題



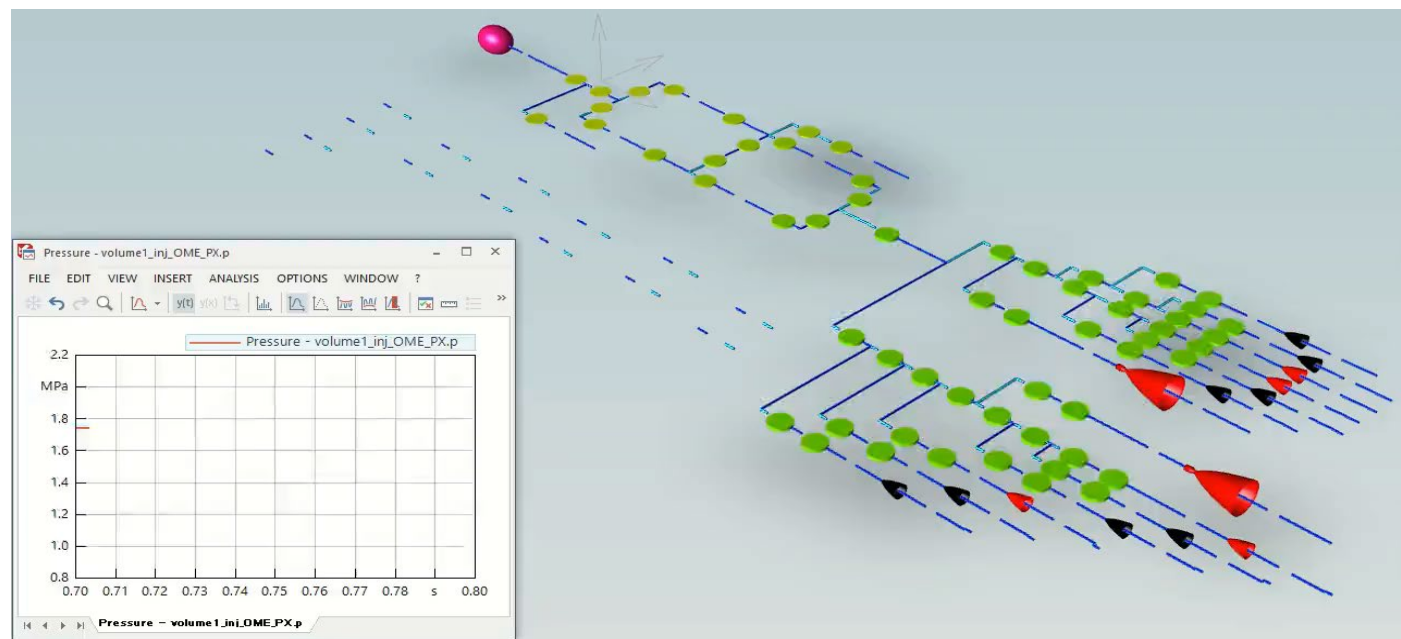
- 推進系におけるリスクとして、スラスタ推薬制御弁の開閉作動時に発生する過大なサージ圧(水撃)による配管・機器の損傷や破壊が挙げられる。
- 水撃による**圧力動応答特性を活用することで配管内の流体特性変化を捉えることができる。**

水撃サージ圧( $\propto$ 流量、音速):  $P_{wh} = \rho \cdot c \cdot \Delta V$

圧力変動周期( $\propto$ 音速、1/配管長):  $f_{wh} = c/4L$



©JAXA



1.はじめに

2.宇宙機推進系とPHM技術

**3.センシング技術**

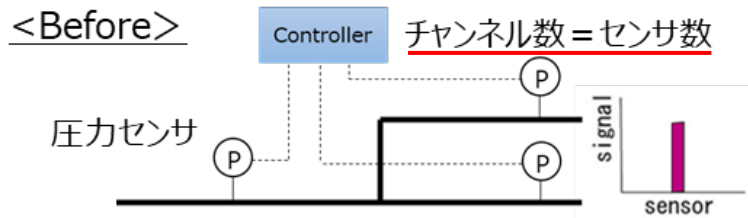
4.PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)

5.まとめと今後の展望

# FBG式光ファイバーセンサ圧力計測手法



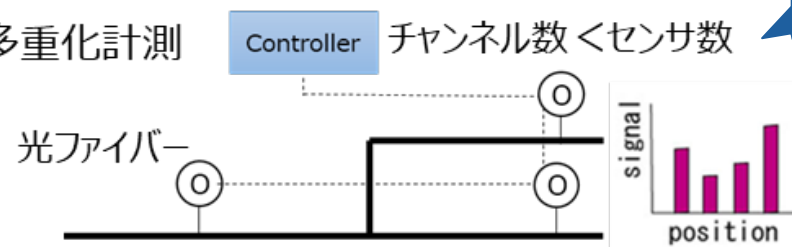
- 圧力モニタ: 圧力センサ→ 網羅的な配置は質量、コスト, センサチャンネル数制約で困難。
- **ファイバーブラッググレーティング(FBG)式光ファイバーの多重化**により、単チャンネルで計測点数を増加。配管外部から無加工で非侵襲の艤装を実現。



	圧力センサ	光ファイバー計測
計測点	単点計測	単点 or 複数点計測 分布計測
計測物理量	圧力のみ	圧力 (+温度)
計測方法	流体と接触	流体と非接触
計測精度	高い	?
耐ノイズ	あり	より強い
チャンネル数	1チャンネル1センサ	1チャンネル複数センサ も可能
耐振動特性	あり	?
施工性	容易	?
フライト実績	あり	なし

<After>

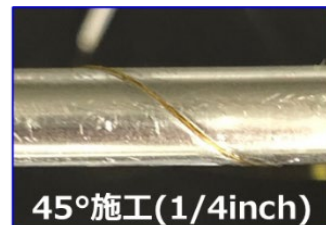
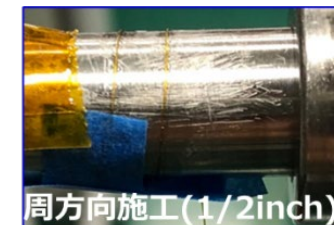
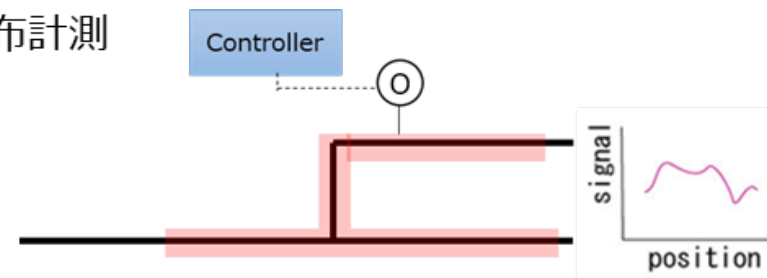
① 多重化計測



チャンネル数低減し、  
多点計測可能

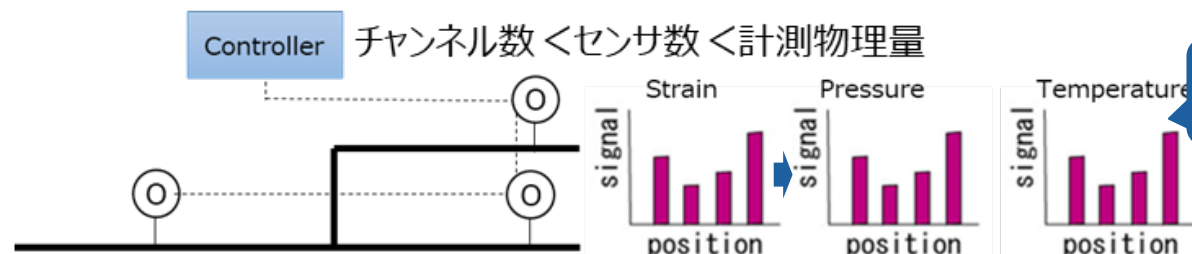


② 分布計測



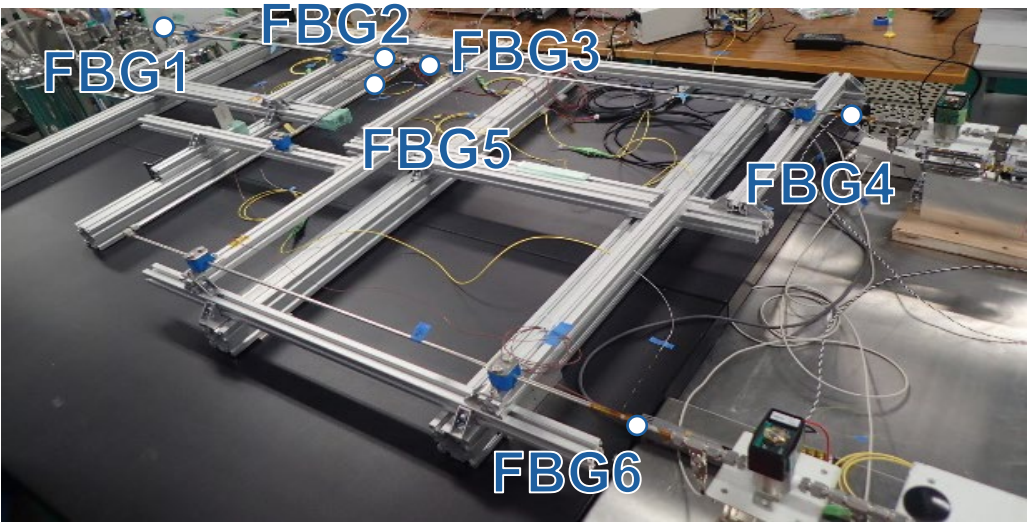
配管艤装の工夫  
(左: 太径, 右: 細径)

③ 複数物理量計測



計測ひずみが温度と  
圧力に感度を持つ

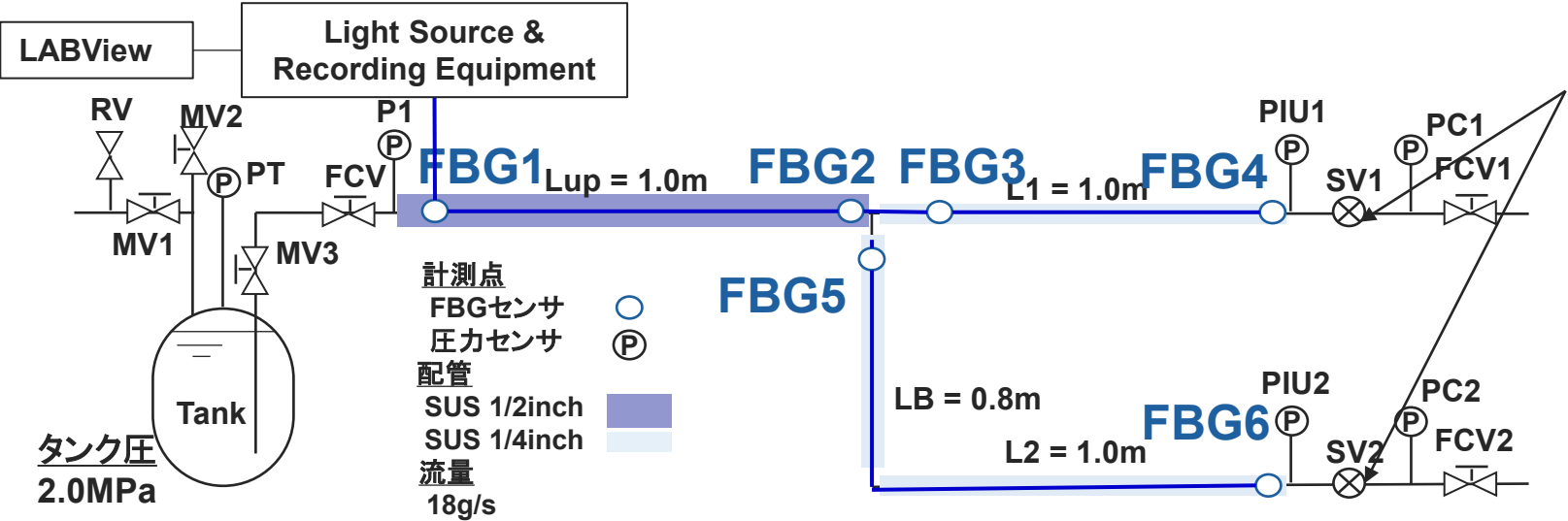
# FBG式光ファイバーセンサ計測精度検証



Test No.	Test condition
Test-01	正常モード(電磁弁1, 2正常開閉)
Test-02	電磁弁2故障模擬
Test-03	電磁弁1故障模擬
Test-04	正常モード (配管分岐追加)
Test-05	気泡混入模擬 (配管分岐追加)

流量異常

気泡混入異常



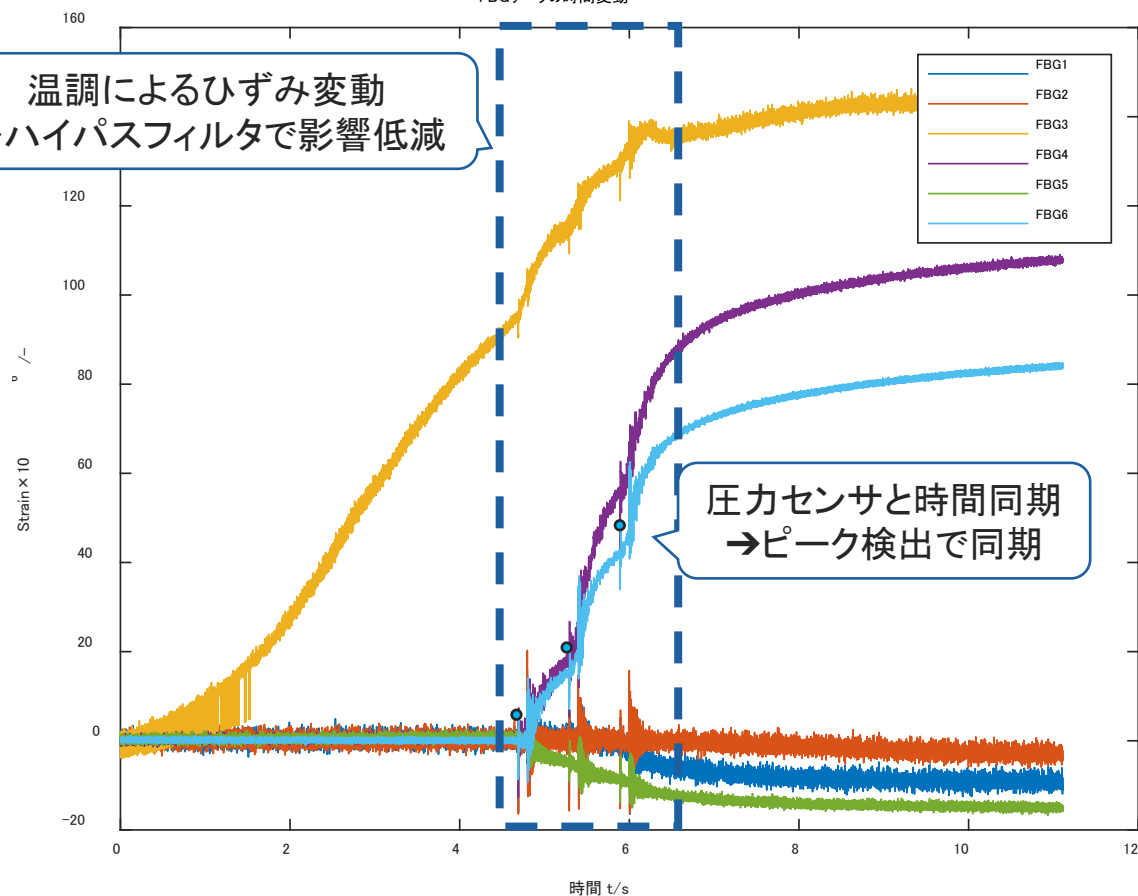
スラスタパルス噴射を模擬し、電磁弁1,2を開閉



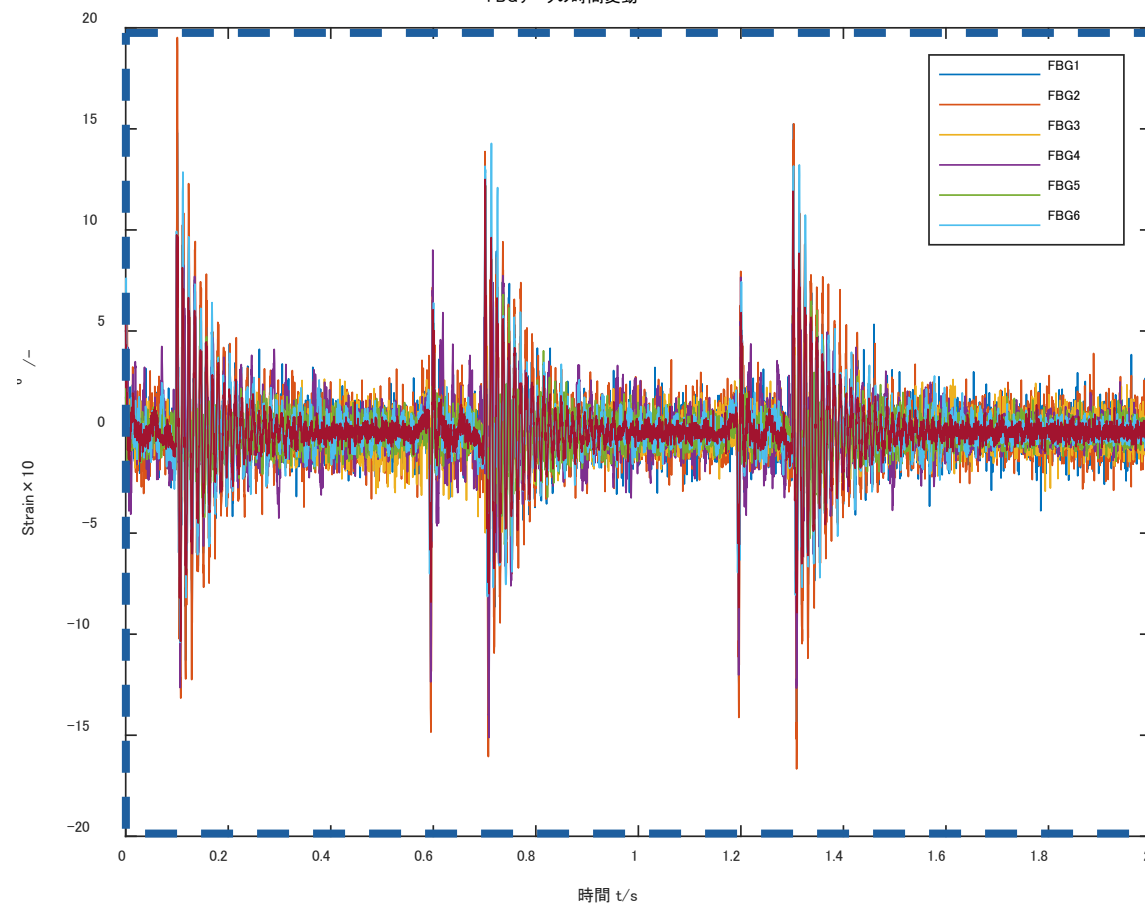
- ✓ 各種フィルタ処理の試行
- ✓ FFT解析
- ✓ 時系列、周波数特性比較

- ファイバーブラッググレーティング(FBG)式光ファイバーはひずみとして圧力と温度を計測。
- 水撃圧力動応答と温度変化は時間スケールが異なるため、ハイパスフィルタで分離可能。

FBGデータの時間変動



FBGデータの時間変動

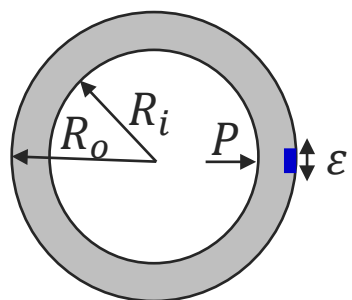




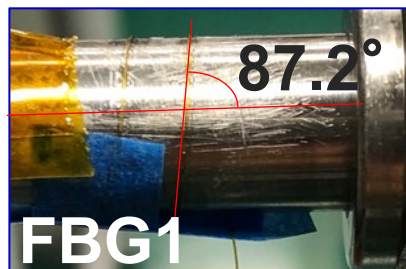
# 圧力計測精度、周波数応答特性評価

- 近傍の圧力センサでの計測結果とFBGセンサ計測データを比較。
- 時系列データおよび周波数応答特性が精度よく取得できることを示した。

## ひずみ-圧力変換



供給配管を  
厚肉円筒と  
仮定

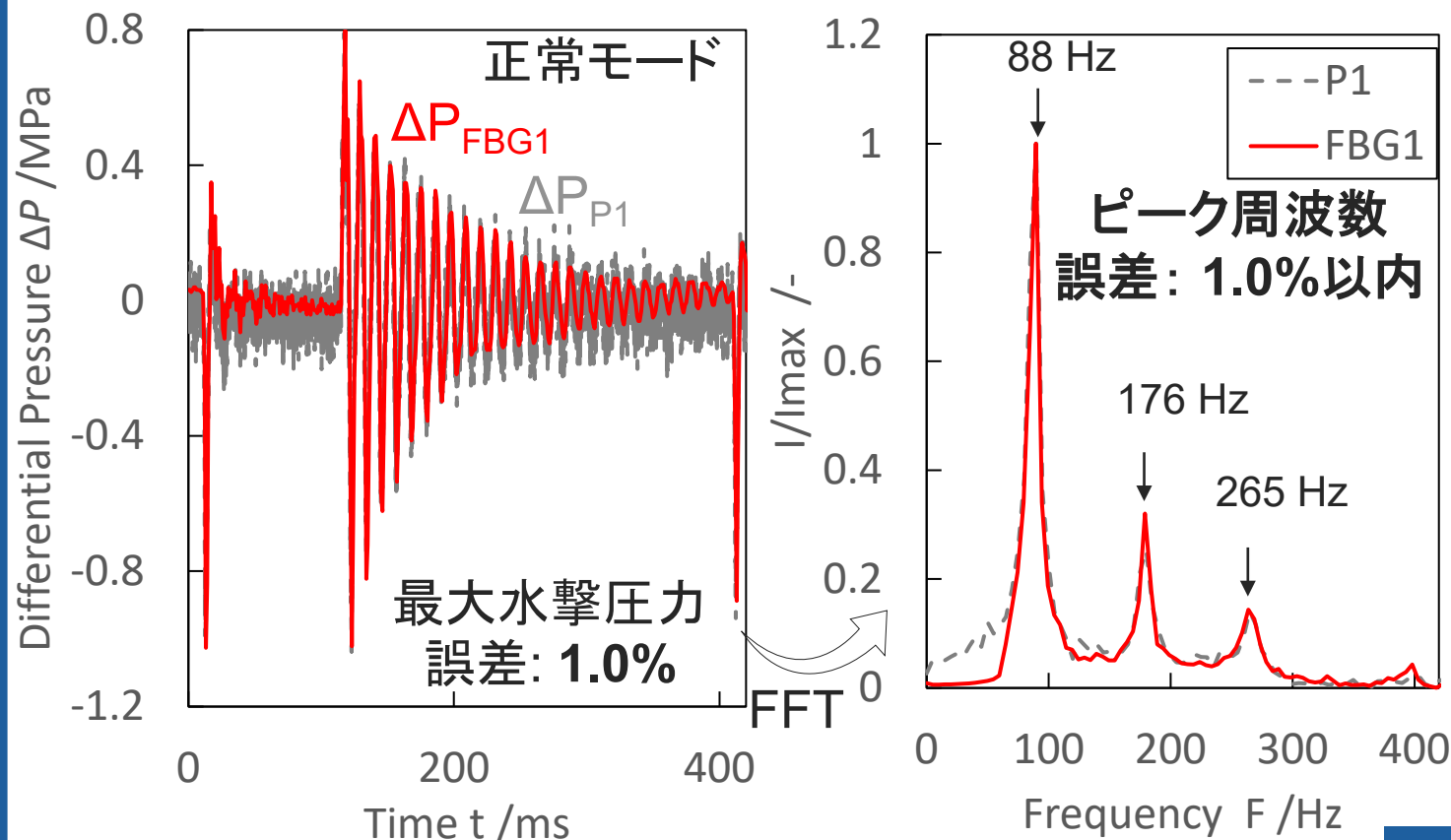


FBGの実巻き付け  
角度でひずみ値  
補正

$$\Delta P_{FBG} = \frac{E}{2(1-\nu) \cos(90^\circ - \theta)} \frac{R_o^2 - R_i^2}{R_i^2} \varepsilon$$

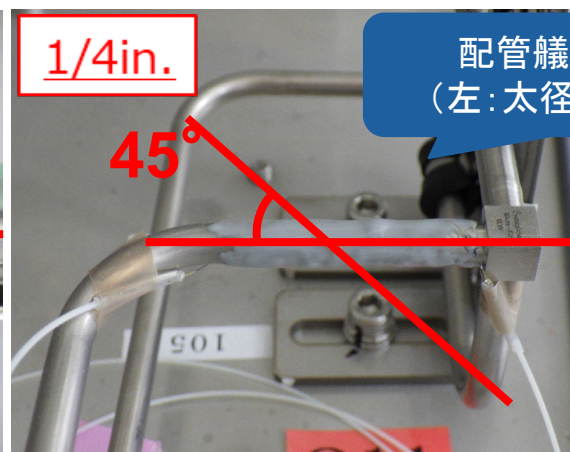
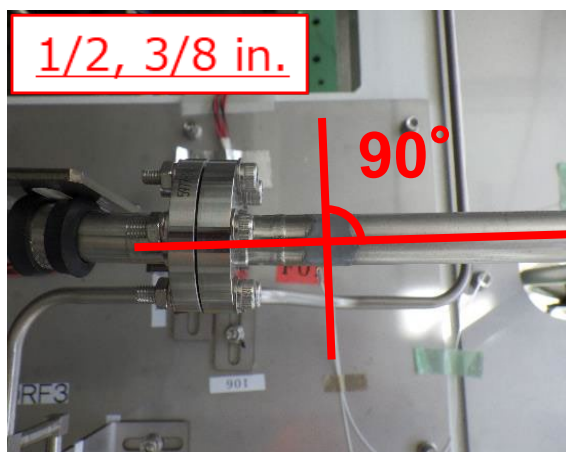
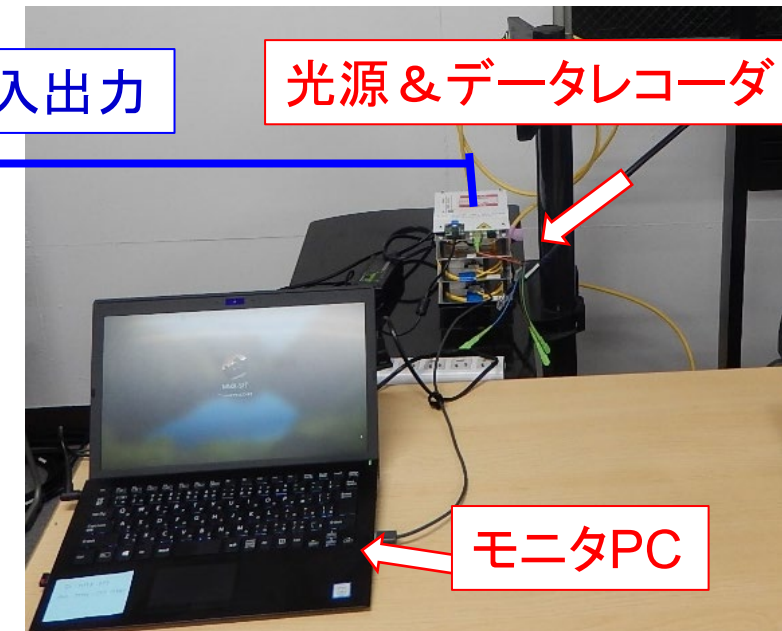
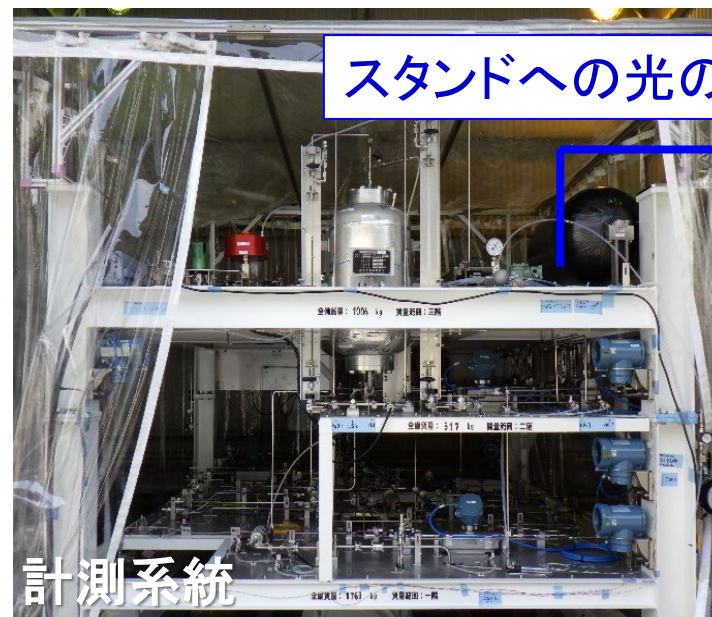
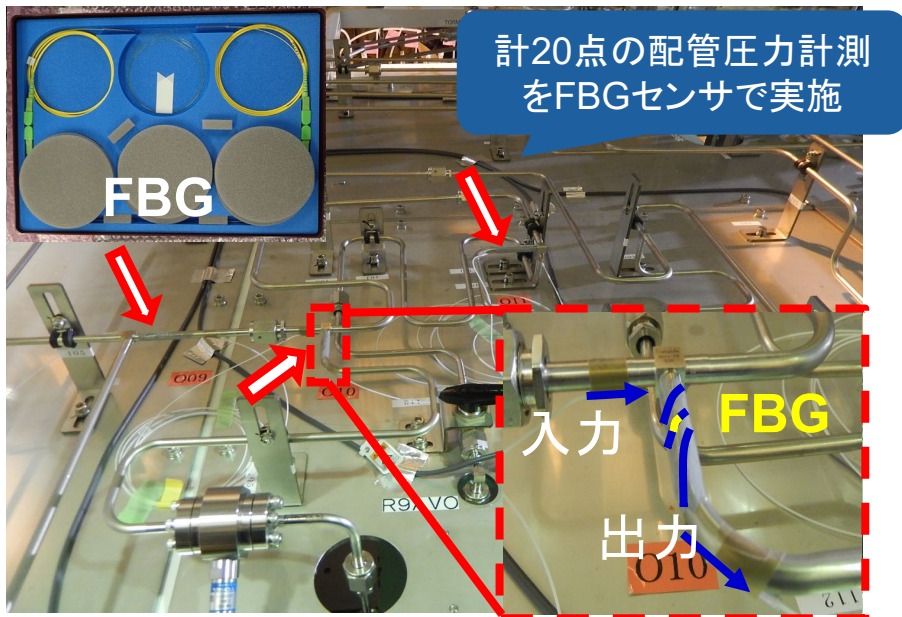
$E$ : ヤング率,  $\nu$ : ポアソン比

## 時系列、周波数特性評価





# 実機相当試験での圧力動応答計測



配管艤装の工夫  
(左:太径, 右:細径)

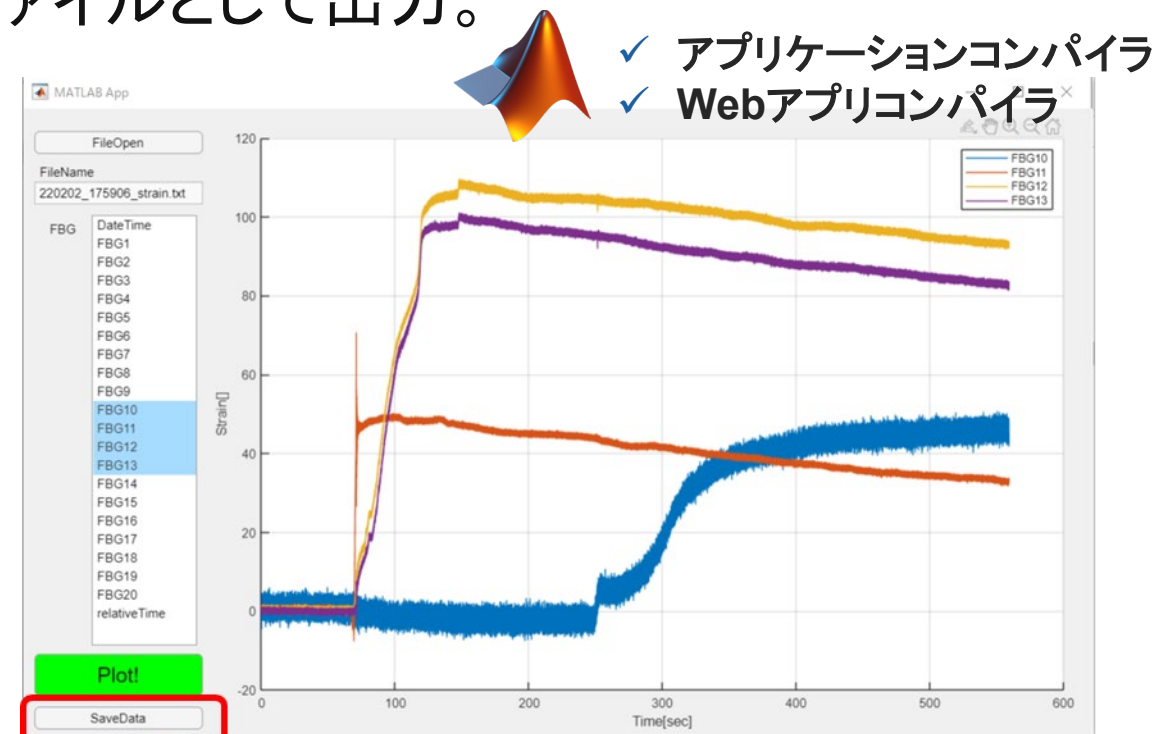
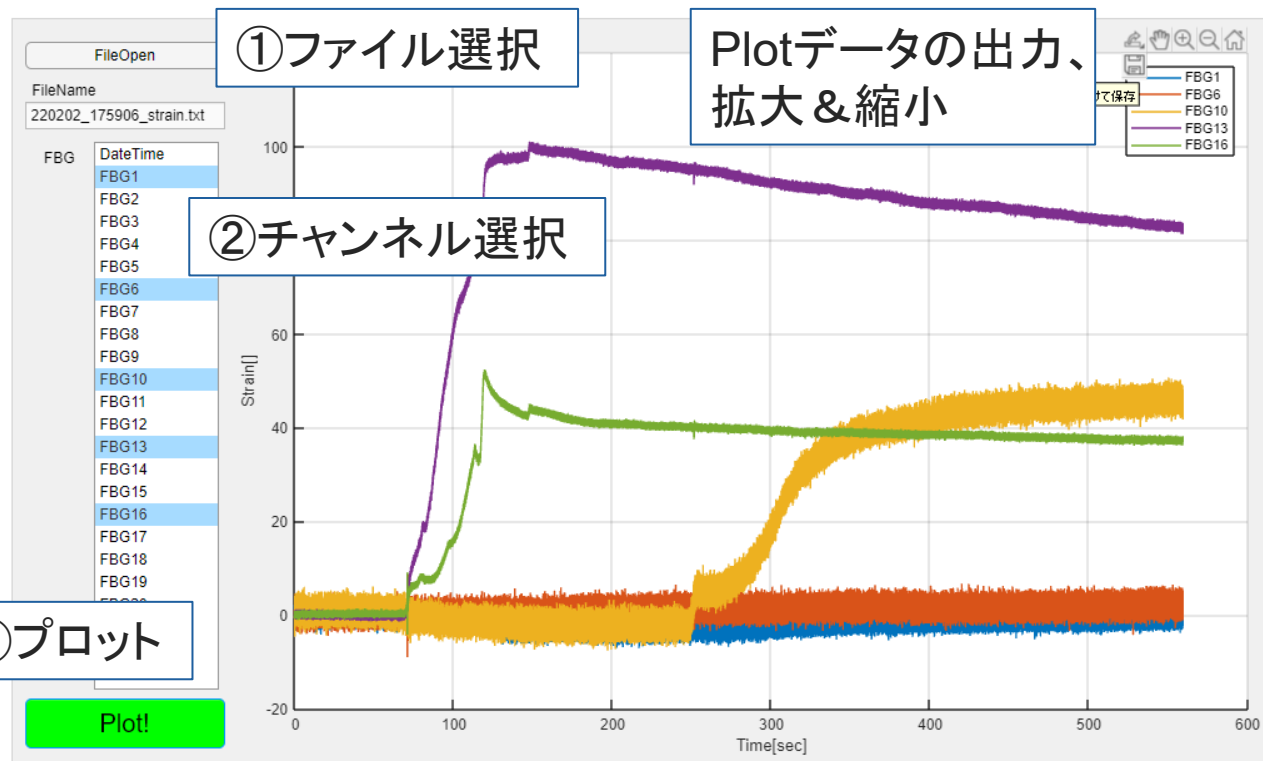


- 現場での。。。
- ✓ スタンドアローンAPP活用
  - ✓ 時系列データの前処理
  - ✓ 圧力動応答取得精度評価
  - ✓ 周波数応答解析

# 計測現場でのMATLAB APP活用



- 簡易なスタンドアローンAPPおよびWebアプリとして計測直後にクイックなデータ確認を実現。
- 即座に計測の不具合、特徴把握を実施し、MATファイルとして出力。



- ✓ スタンドアローンAPP版(データ読み込み短時間、クイック評価)
- ✓ Webアプリ版(データ読み込み長時間、後日簡易確認向け)

220202_175906_strain.mat	15,156 KB
220202_175906_strain.txt	75,728 KB



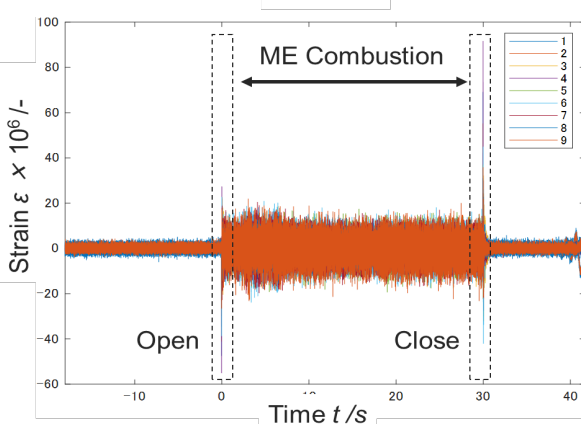
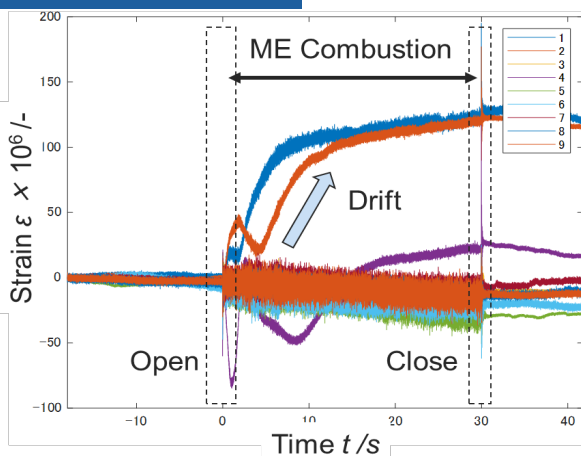
# 実機相当試験での圧力データ取得、比較評価



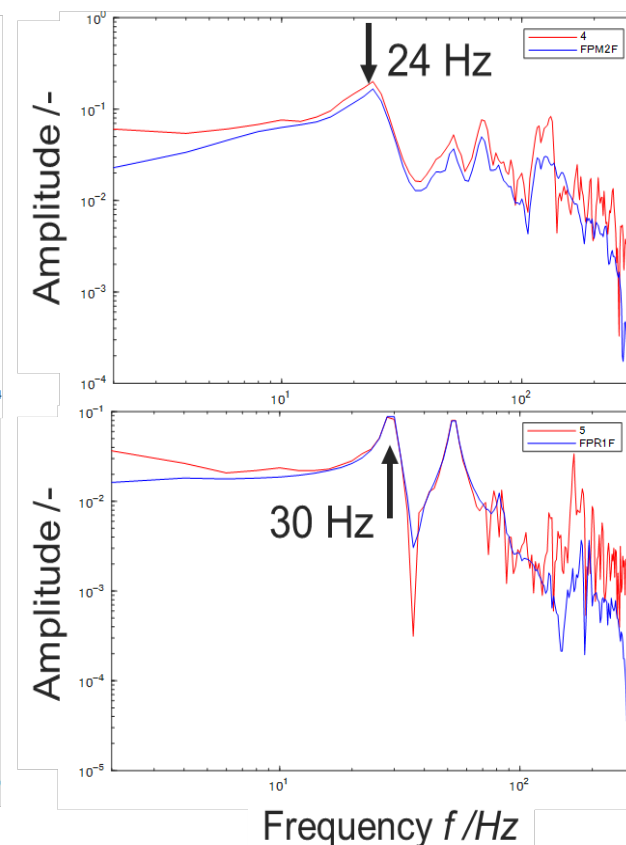
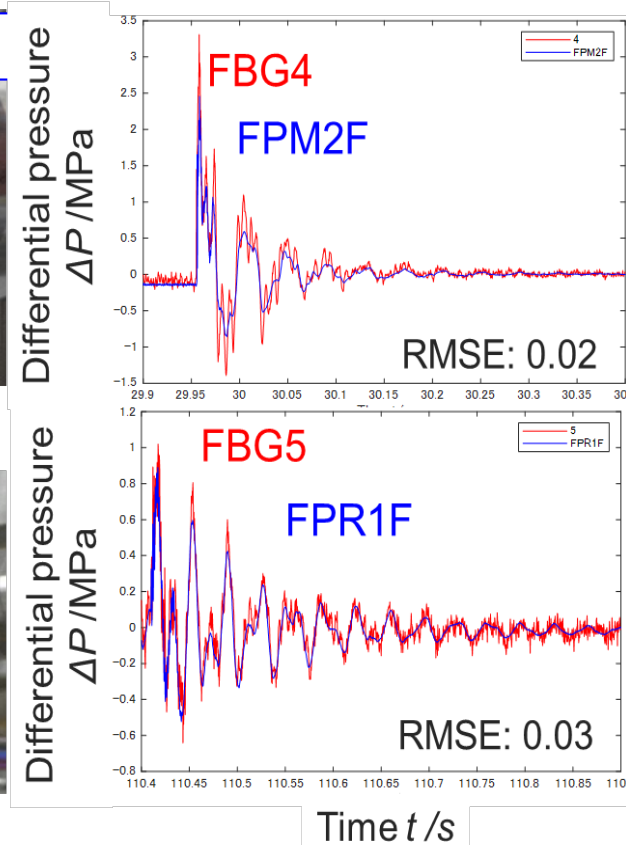
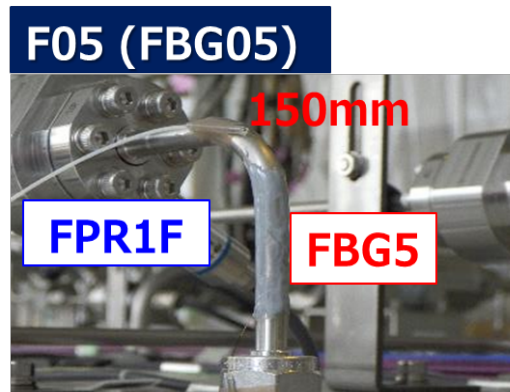
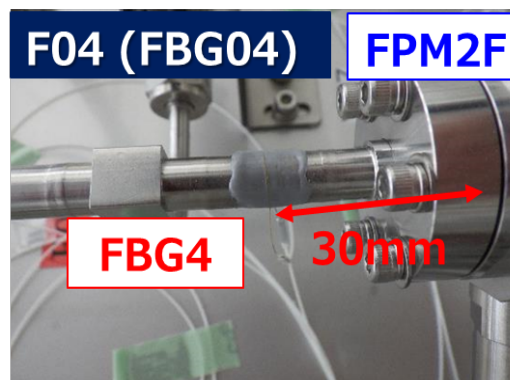
■ 実機相当燃焼試験でのFBGセンサ計測データを取得、評価

■ 同一プロセスにより即応で近傍の圧力センサとのデータ比較、クイックデータレビューを実現

## フィルタ処理



## 時系列、周波数応答特性評価



1.はじめに

2.宇宙機推進系とPHM技術

3.センシング技術

**4.PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)**

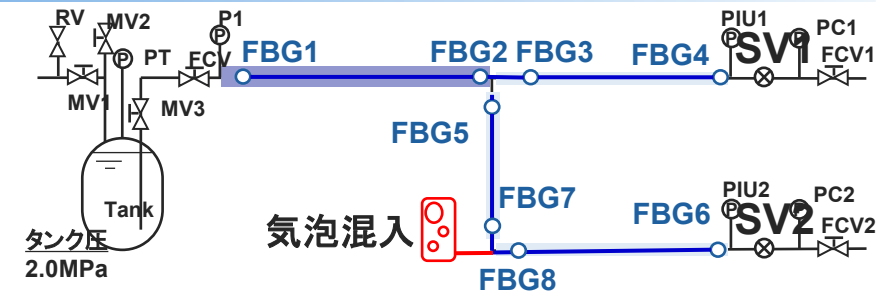
5.まとめと今後の展望

# 機械学習モデル構築に向けた特徴確認

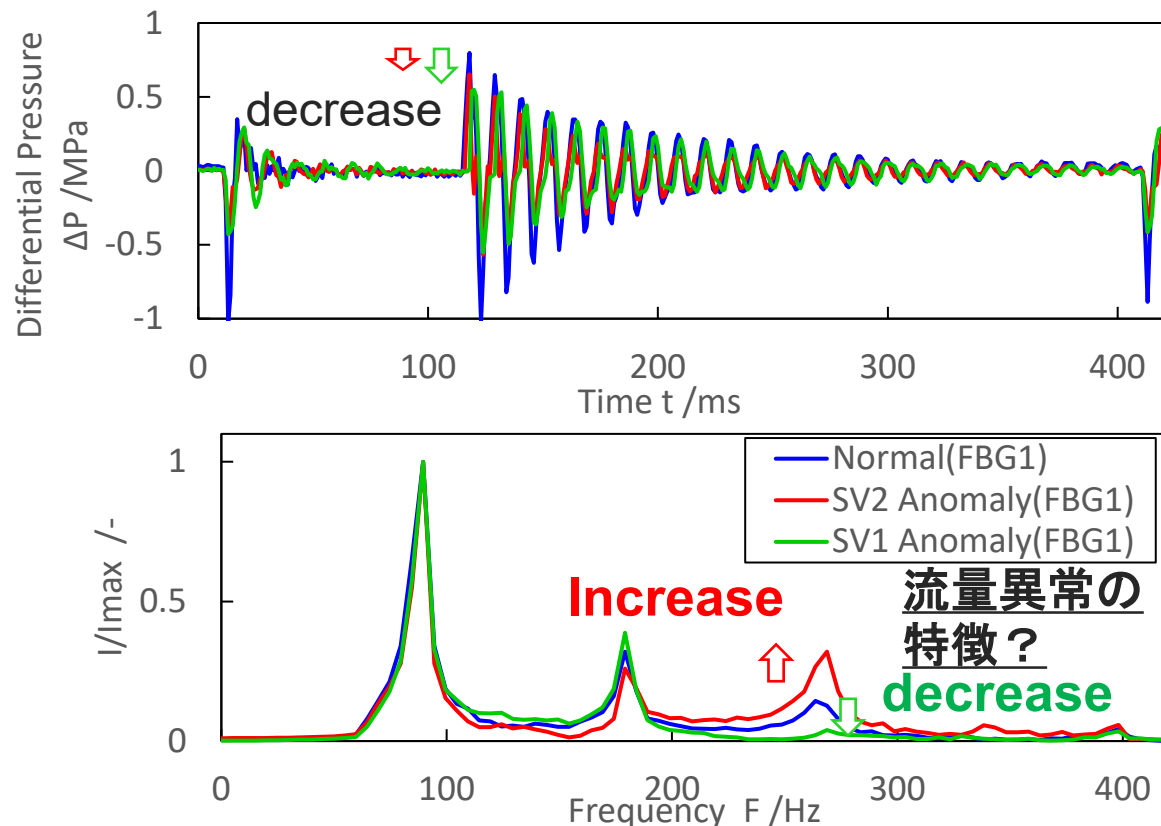


## ■ 水流し試験での正常、異常ケースの特徴変化

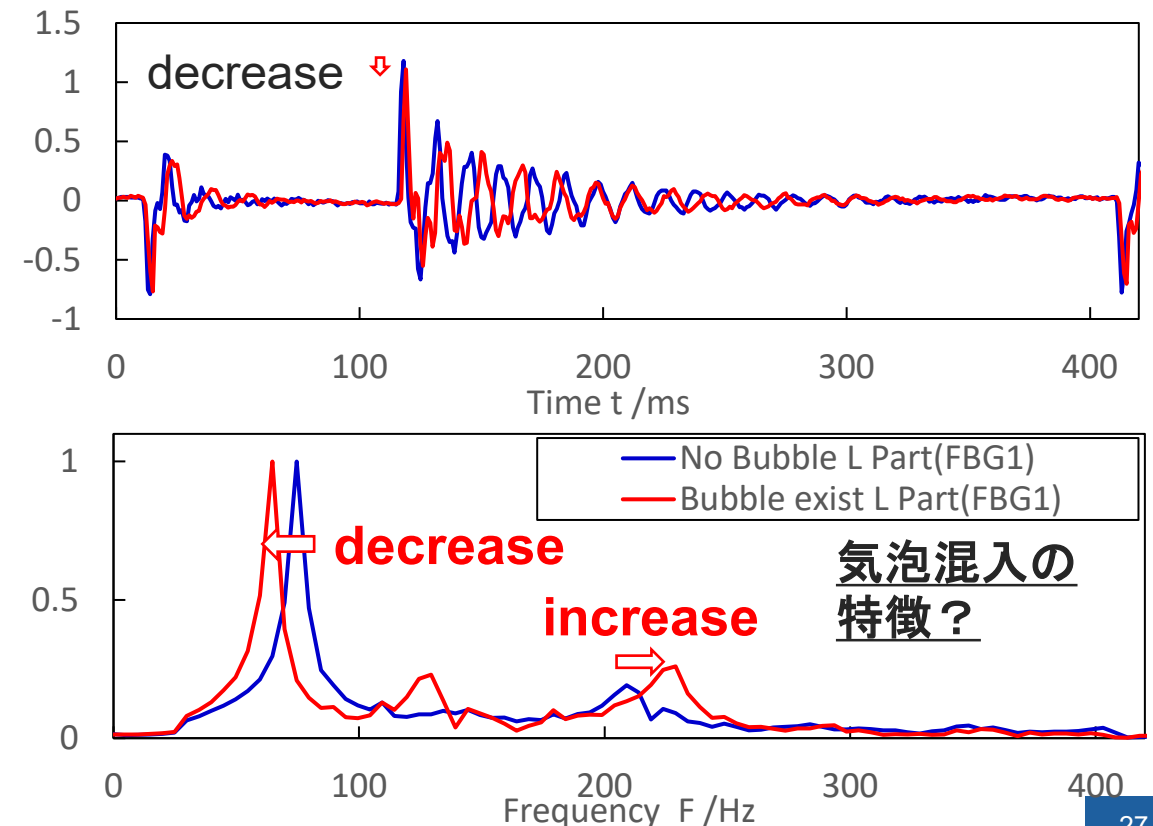
- ✓ 模擬ケース: バルブ故障による流量異常、配管気泡混入異常
- ✓ 時系列、周波数応答特性を確認 → 周波数応答特性で特徴変化大



### 正常&流量異常モード比較(FBG1)



### 正常&気泡混入モード比較 (FBG1)

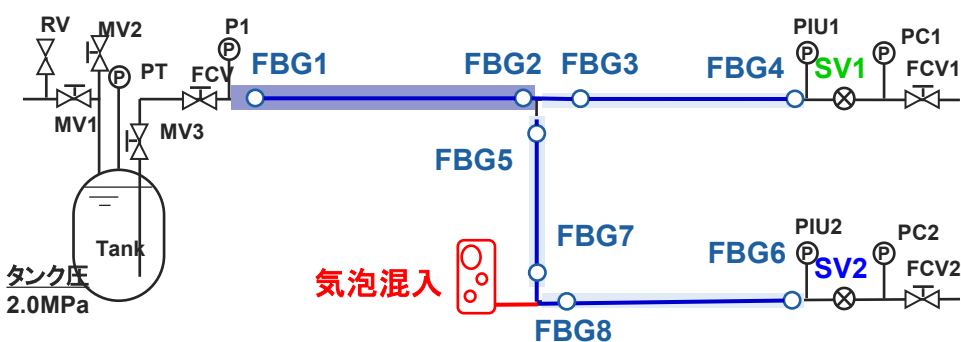


# 周波数応答関数による流量、気泡混入異常検知

- ✓ 低計算コスト
- ✓ 簡易モデル

■ 周波数応答関数：振動伝達系の入力と出力の関係を表した関数。伝達関数。

■ FBGセンサ間での周波数応答関数を取得 → 正常と異常で最小二乗誤差大。



出力フーリエスペクトル(ex. FBG6)

$$H(f) = \frac{B(f) \times A^*(f)}{A(f) \times A^*(f)}$$

入力フーリエスペクトル (ex. FBG5)

\*複素共役

周波数応答関数ゲイン

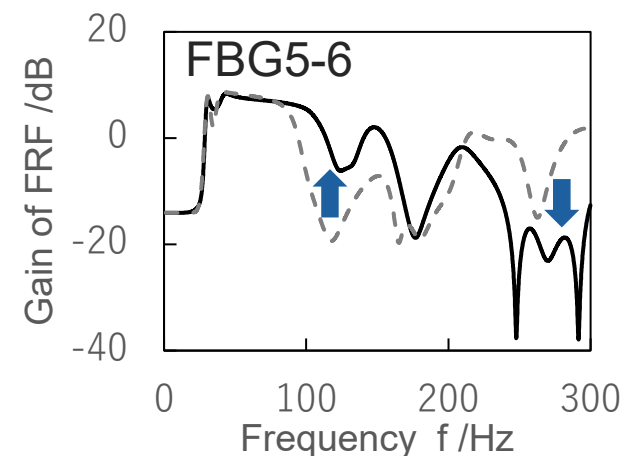
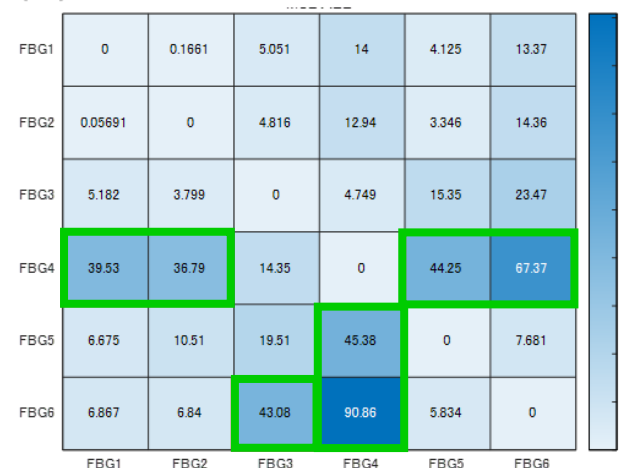
$$F(f) = 20 \log|H(f)|$$

→ 正常  $F(f)$

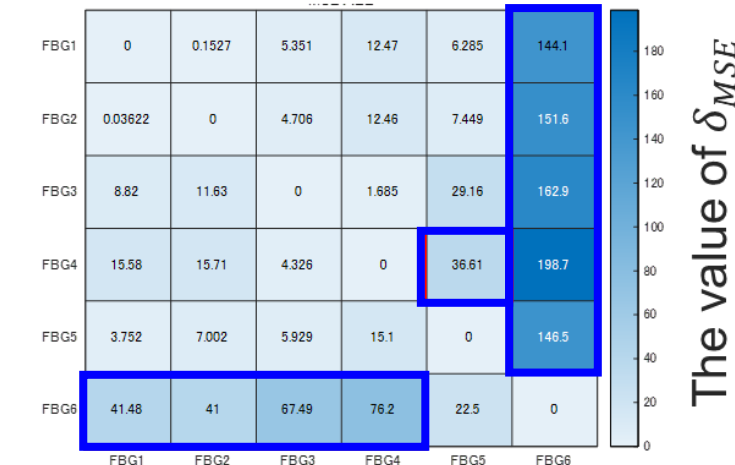
↕ 平均二乗誤差  $\delta_{MSE}$

→ 異常  $F(f)$

(a) SV1バルブ流量異常



(b) SV2バルブ流量異常



(c) 気泡混入異常



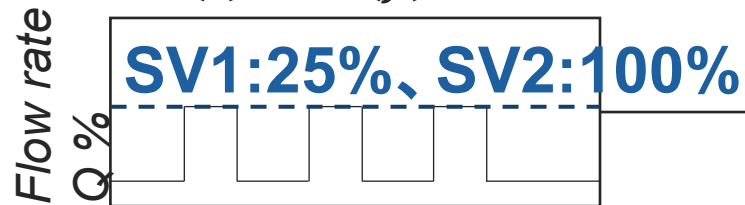


# 周波数応答関数による流量異常診断

- ✓ 低計算コスト
- ✓ やや簡易モデル



入力  $A(t) \rightarrow A(f)$ : 2 data

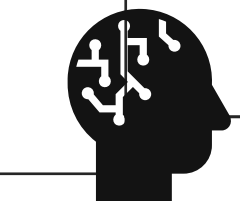
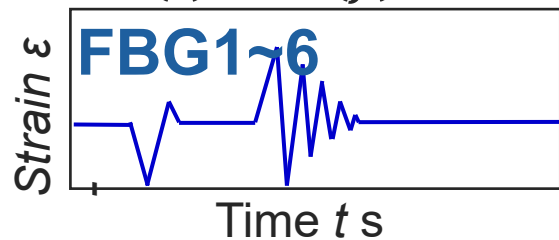


学習データから逆周波数  
応答関数行列を各センサ  
データ間に対し構築

SV1 **25%**  
SV2 **100%**

離散時間逆フーリエ変換  
 $A(t) = \text{ifft}(\hat{G}(f) \cdot B(f))$

出力  $B(t) \rightarrow B(f)$ : 6 data



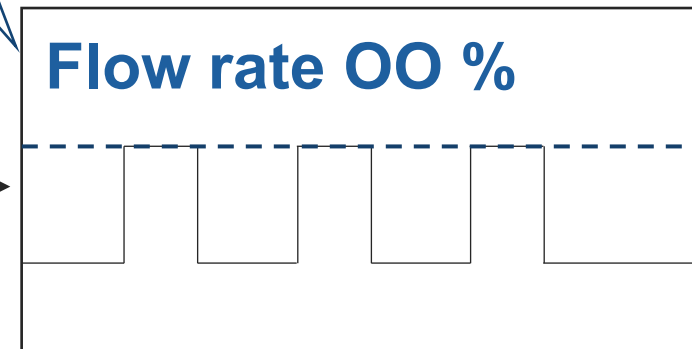
Training data

$$\hat{G}(f) = \frac{A(f) \times B^*(f)}{B(f) \times B^*(f)}$$

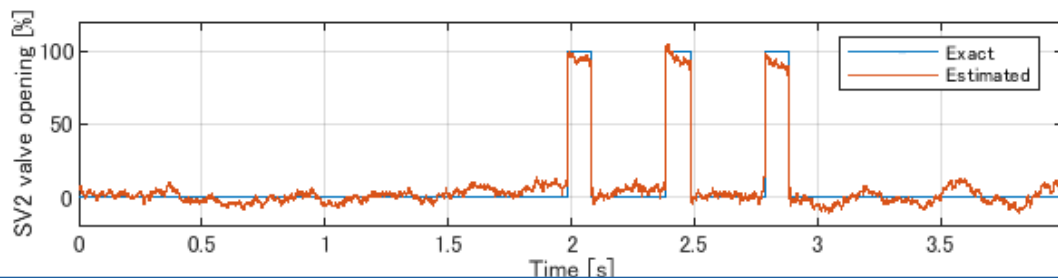
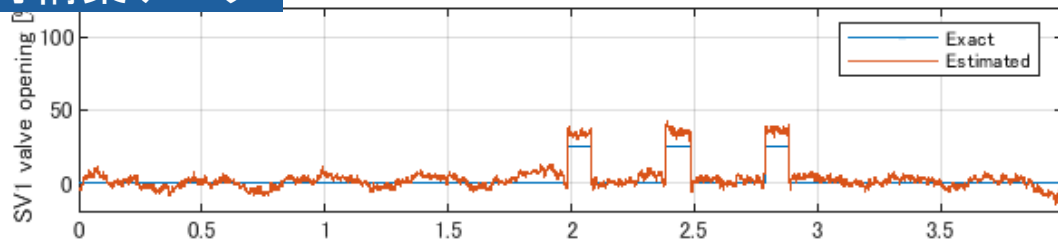


Test data

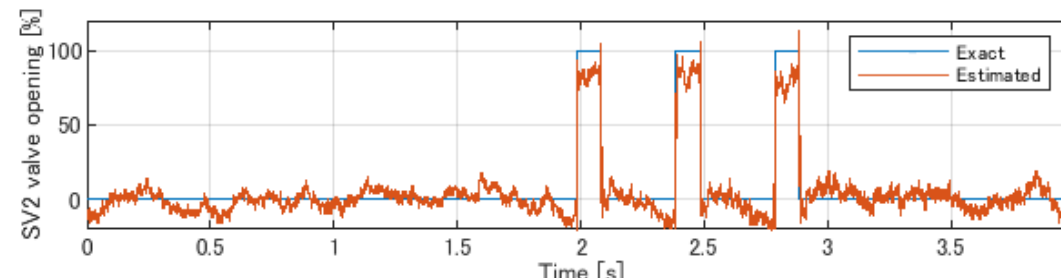
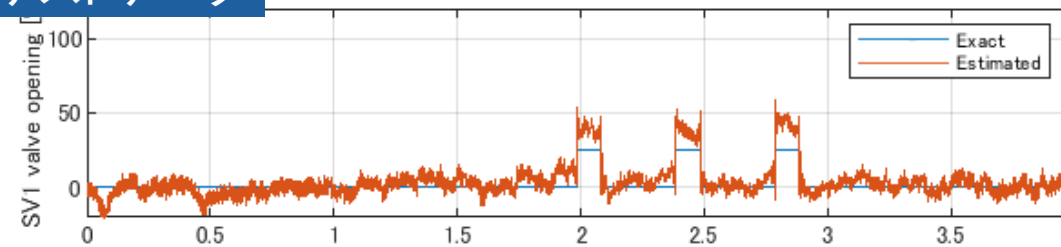
**Flow rate 00 %**



再構築データ



テストデータ

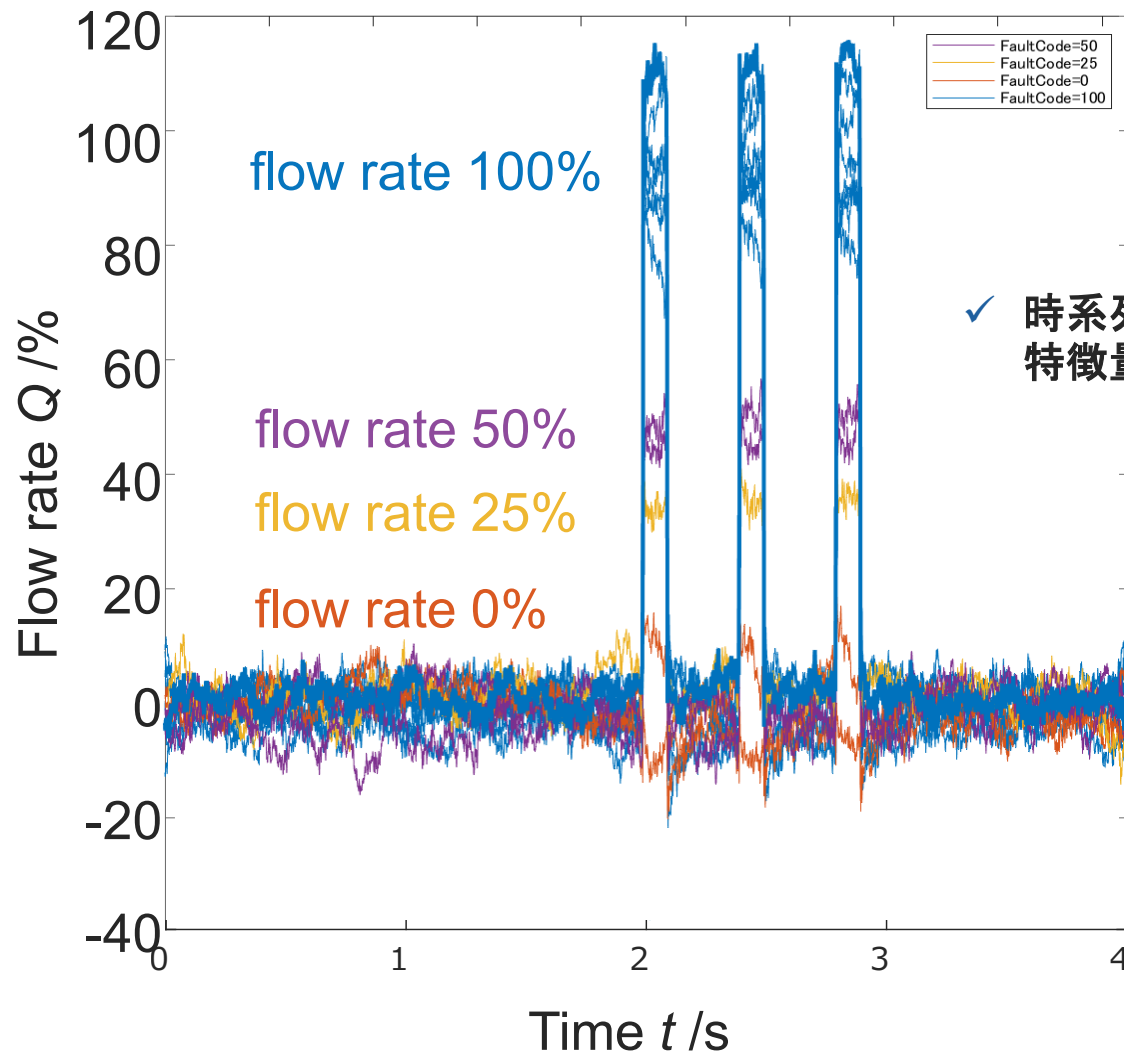


# 流量時系列データからの特徴量抽出

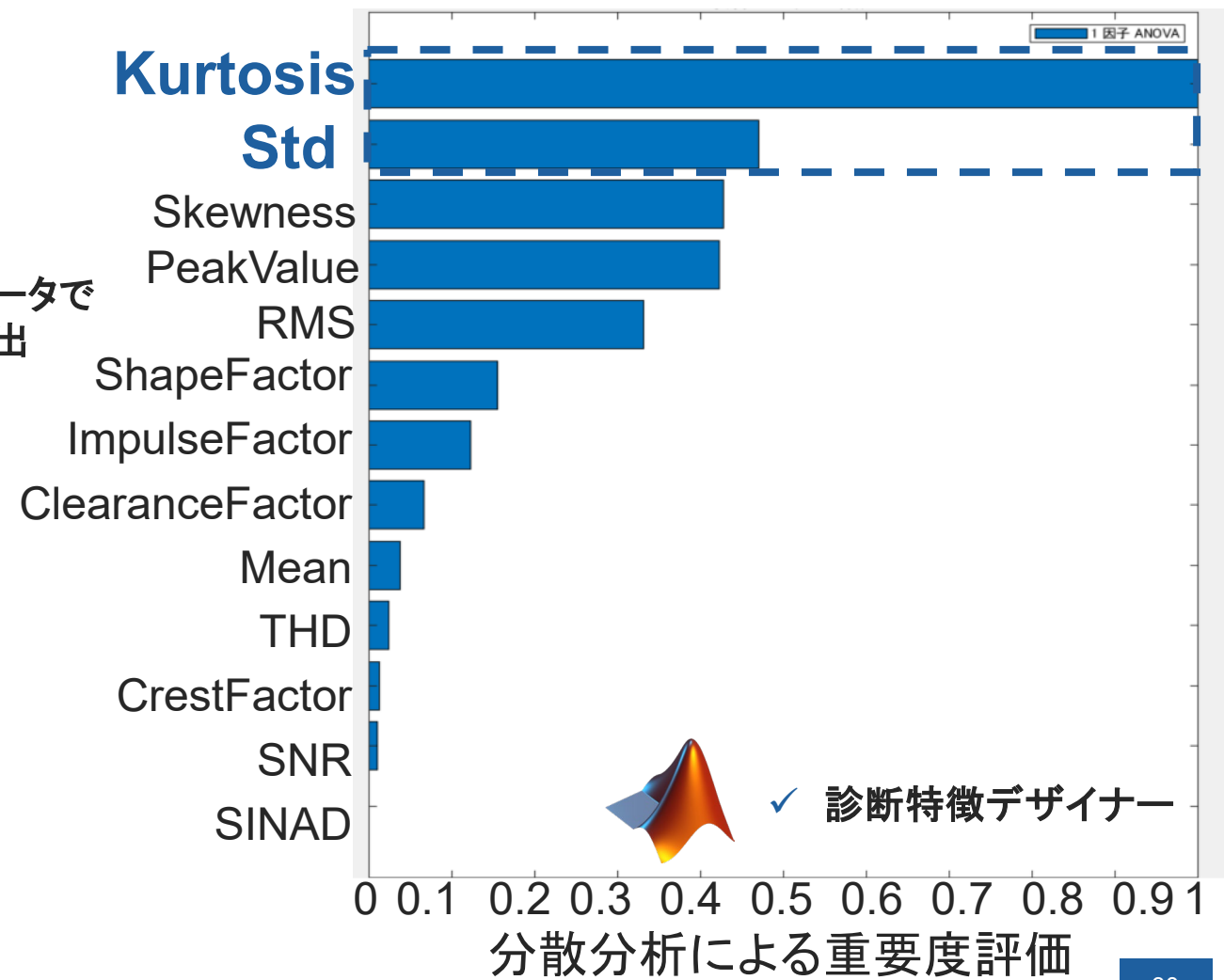
- ✓ 中計算コスト
- ✓ 機械学習モデル



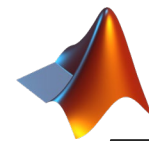
■ 2つの特徴量(尖度, 標準偏差)を1因子ANOVAスコアの高い特徴として抽出



✓ 時系列データで  
特徴量抽出



# 流量分類モデルの構築



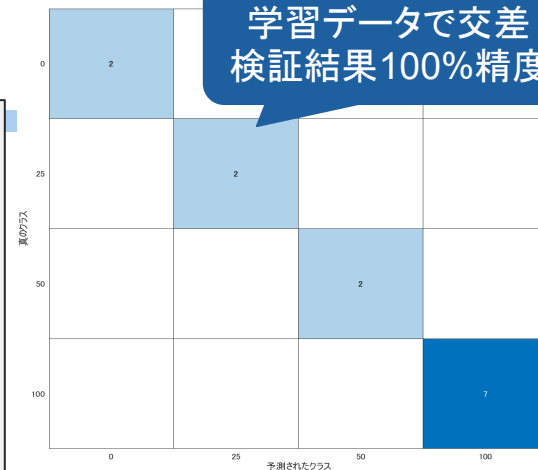
✓ 分類学習器

学習データで交差  
検証結果100%精度

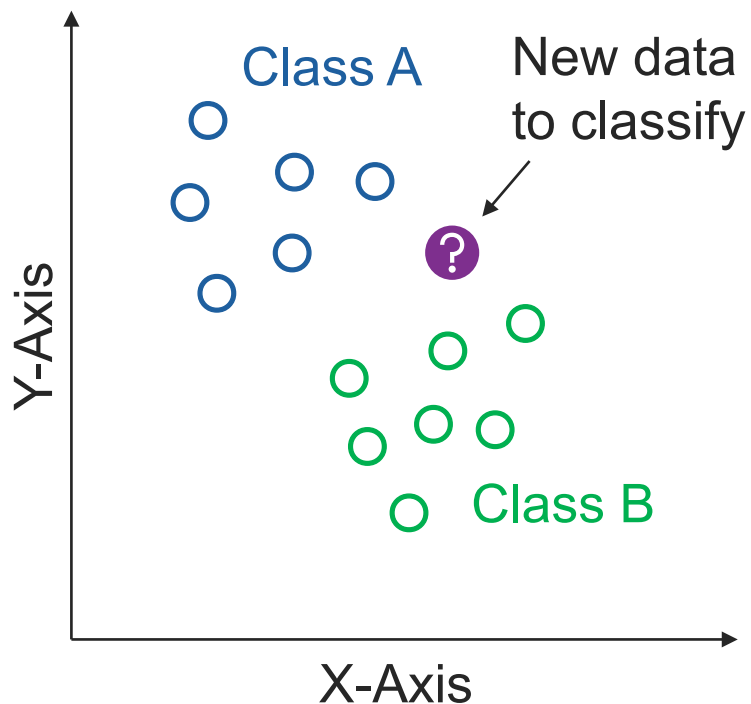
## ■k-最近傍アルゴリズム(KNN)

- ✓ ノンパラメトリック教師あり学習分類器
- ✓ 近接性を使ってデータを分類・予測

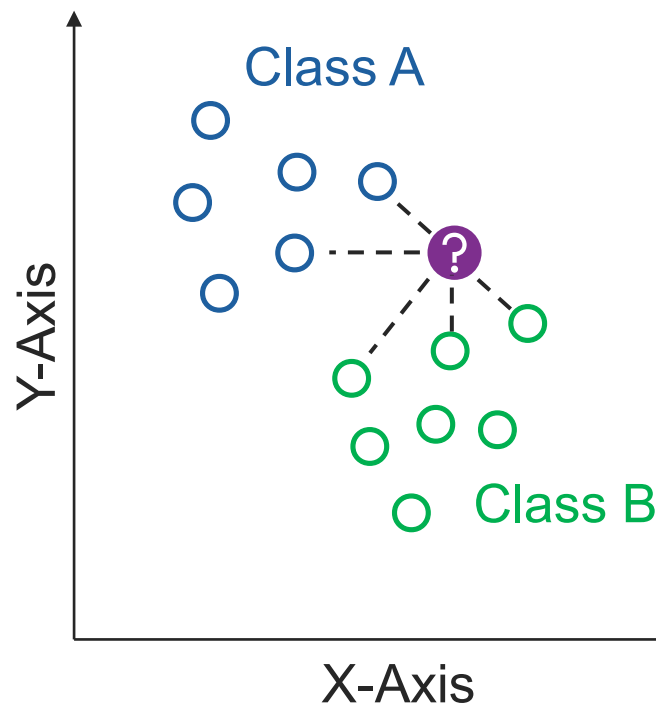
学習結果	
精度 (検証)	100.0%
総コスト (検証)	0
予測速度	~200 観測数/秒
学習時間	1.3668 秒
モデルタイプ	
事前設定: 細かい KNN	
近傍の数: 1	
距離計量: ユークリッド	
距離重み付け: イコール	
データの標準化: true	



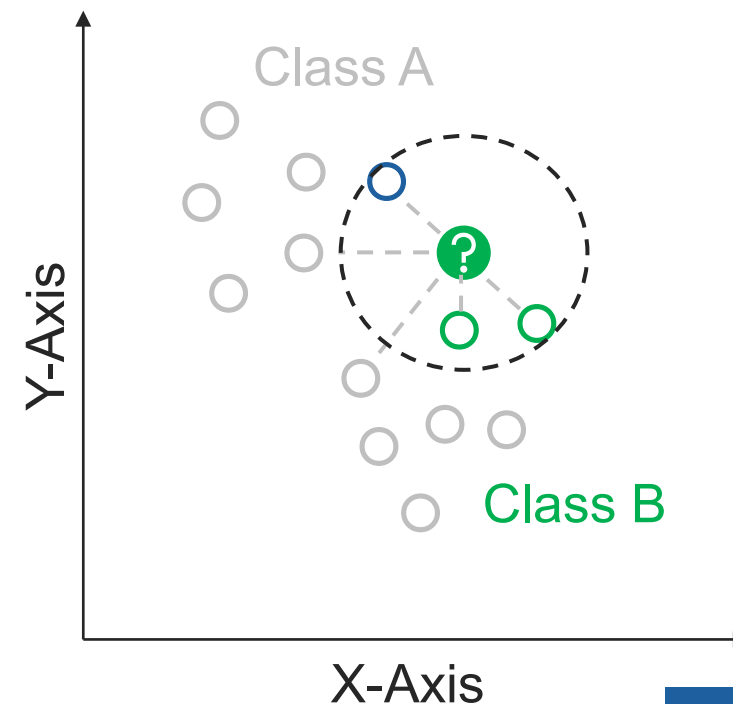
## テストデータの導入



## 近傍データ探索



## クラス分類



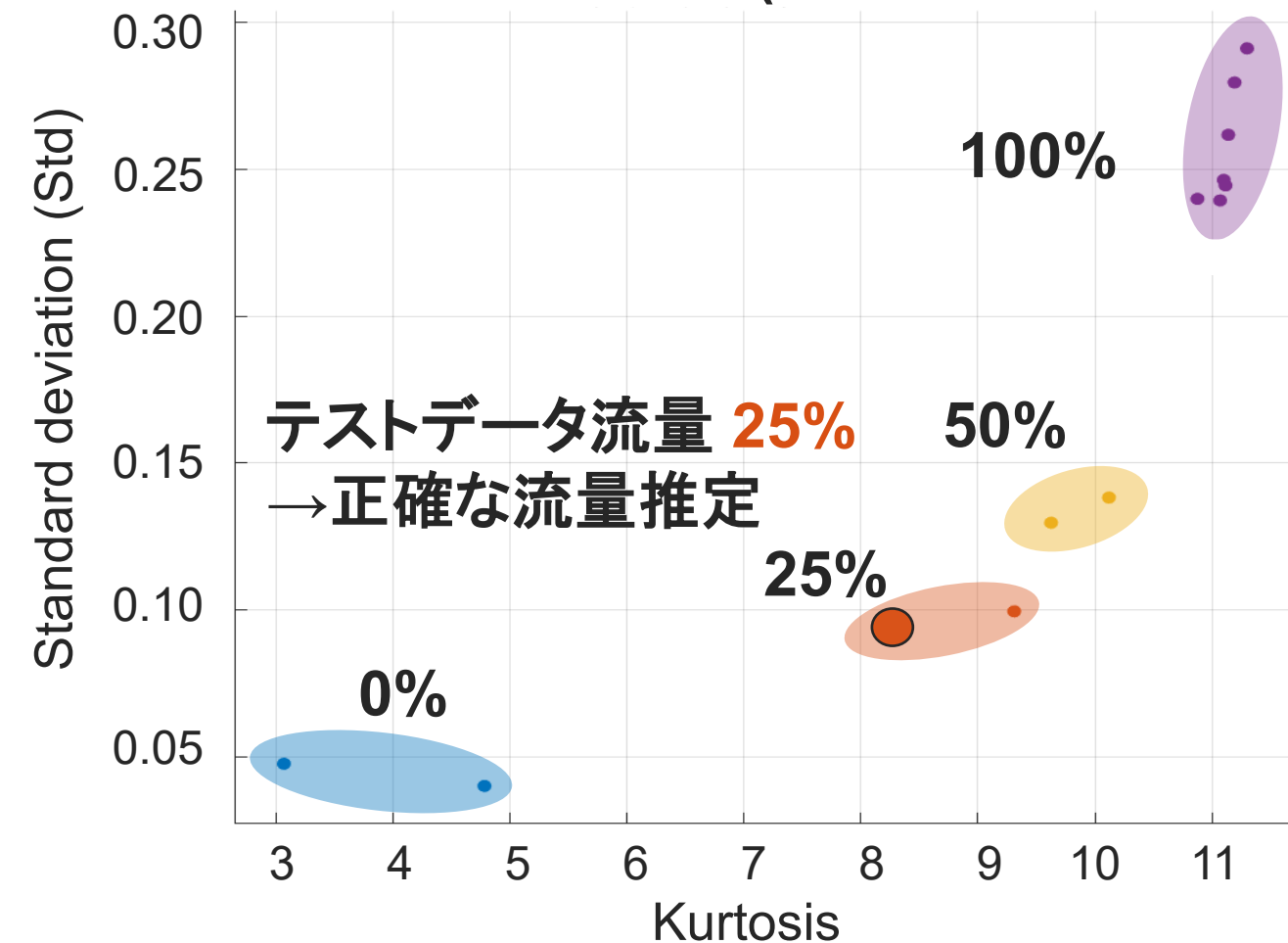
# 流量分類の検証

- ✓ 中計算コスト
- ✓ 機械学習モデル

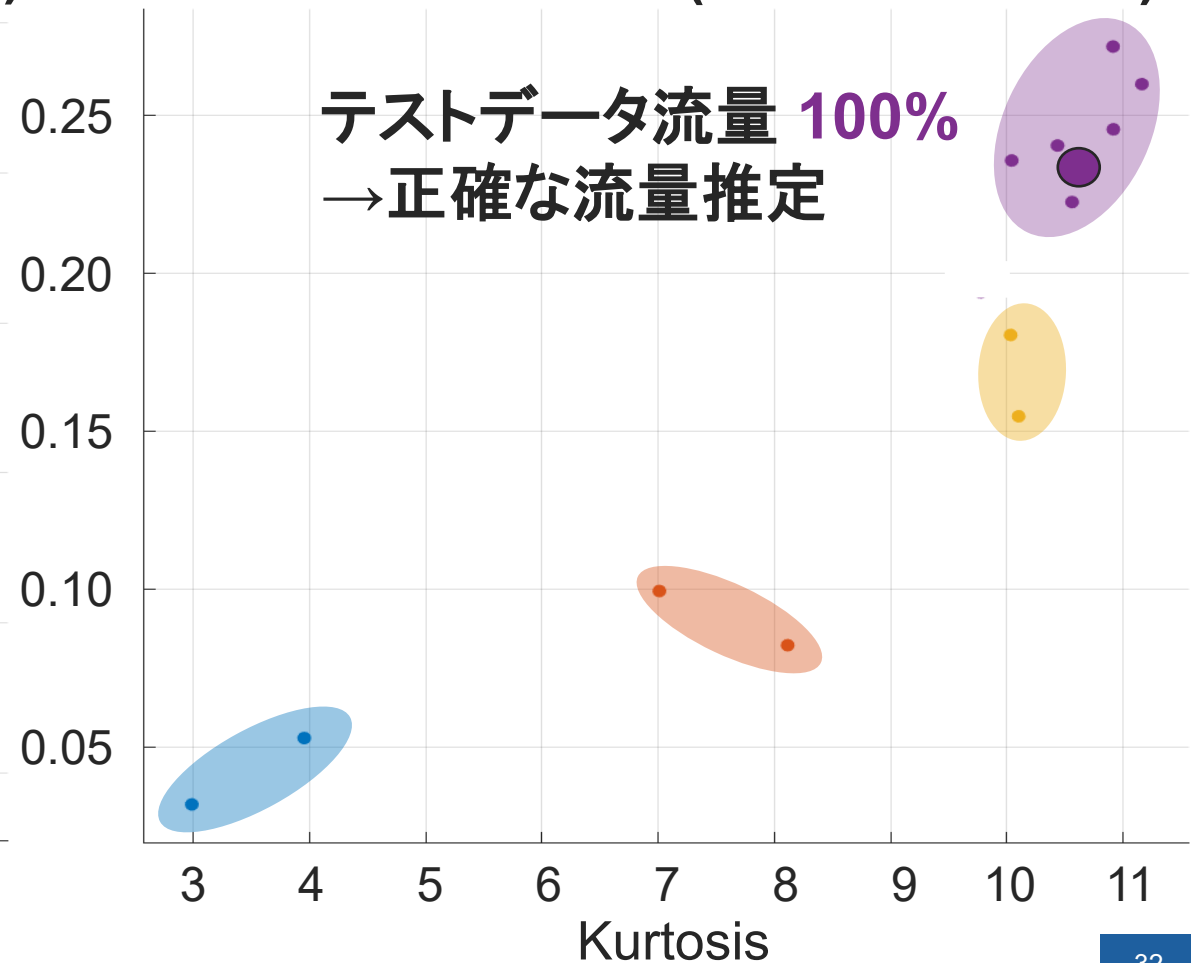


■KNNでの分類 → 流量異常を正しく推定できることを確認(気泡混入に対しては不明)

テストデータの検証 (SV1:25%流量異常)



テストデータの検証 (SV2:100%流量)



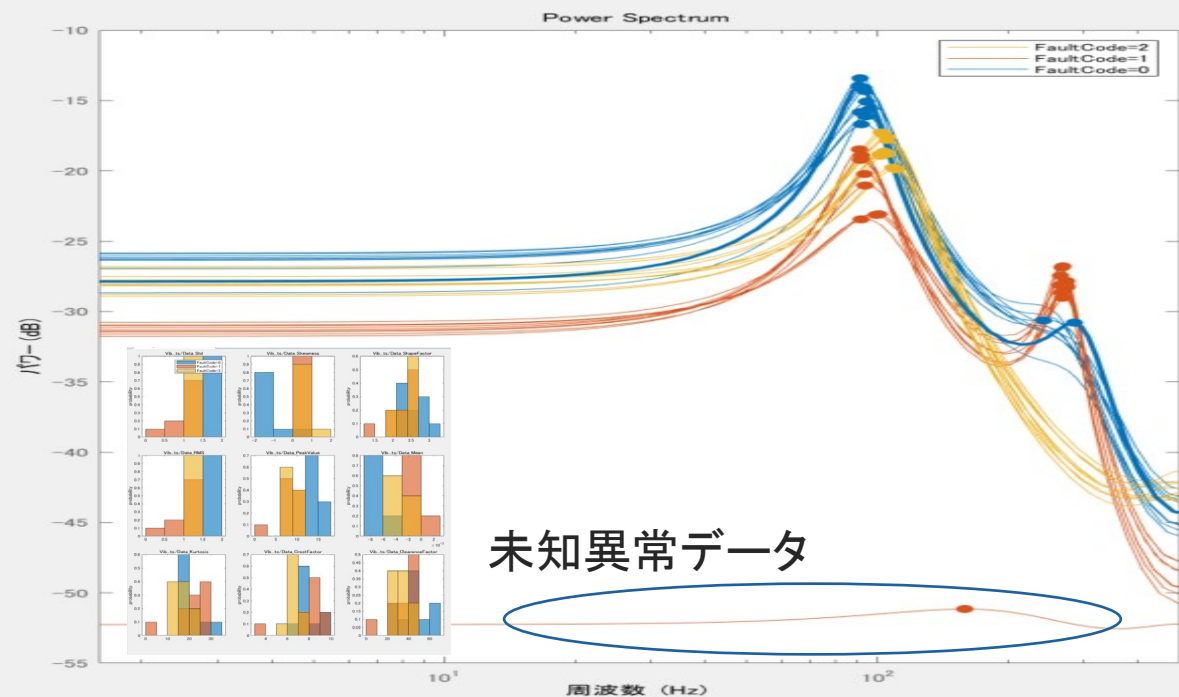


# 流量、気泡混入異常感度の高い特徴量抽出

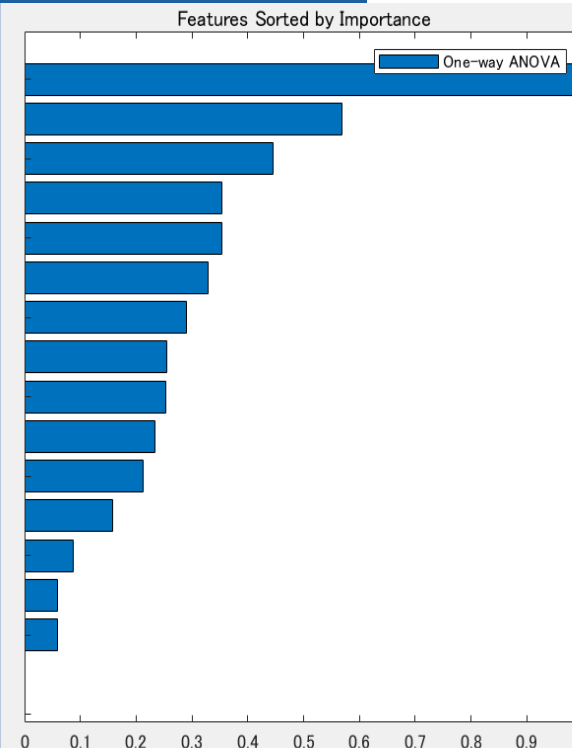
- ✓ 中計算コスト
- ✓ 機械学習モデル

- 前述の特徴量とは異なり、時系列および周波数データにFFTを実施。
- 正常、SV2流量異常、気泡混入異常の3ケースで特徴量抽出、ランク付け。
- 重要度の高い特徴量として周波数ピーク強度、バンドエネルギーを抽出。

## 特徴量抽出



## 特徴ランク付け



Feature	One-way ANOVA
Vib...ec/Data_PeakAmpl	9.0268
Vib...ec/Data_BandEnergy	5.1417
Vib...ts/Data_Skewness	4.0278
Vib...ts/Data_Std	3.1927
Vib...ts/Data_RMS	3.1927
Vib...ts/Data_Kurtosis	2.9703
Vib...ts/Data_PeakValue	2.6249
Vib...ts/Data_ClearanceFactor	2.2980
Vib...ts/Data_ImpulseFactor	2.2879
Vib...ts/Data_CrestFactor	2.1138
Vib...ts/Data_ShapeFactor	1.9176
Vib...ts/Data_Mean	1.4324
Vib...ec/Data_PeakFreq1	0.7849
Vib...ts/Data_SINAD	0.5330
Vib...ts/Data_SNR	0.5286
Vib...ts/Data_THD	NaN

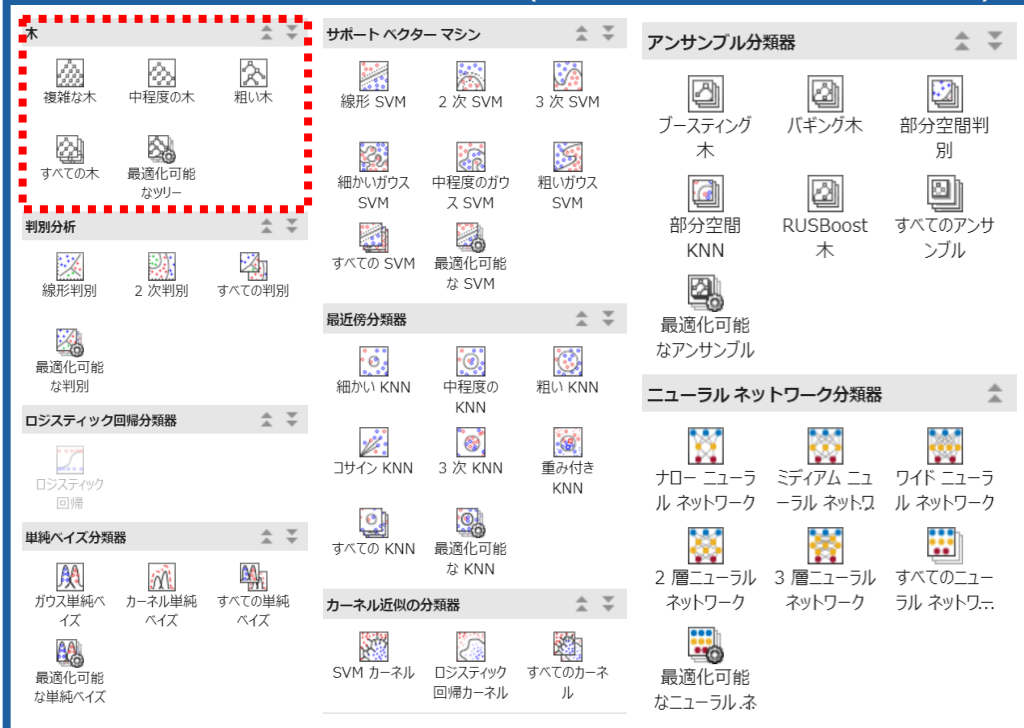
# 流量異常と気泡混入異常に汎用的な分類学習手法

- ✓ 中計算コスト
- ✓ 機械学習モデル

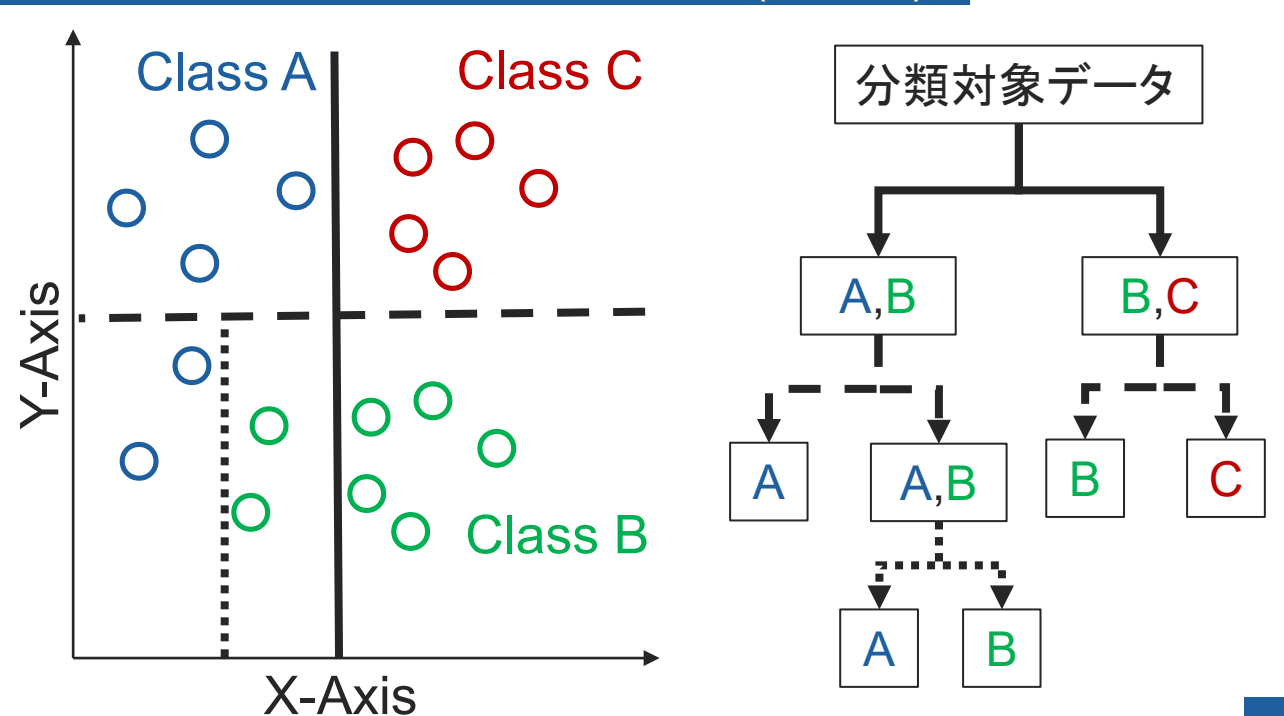
## ■ 決定木 (Decision Tree)

- ✓ ツリー構造を用いて分類する機械学習手法。ノンパラメトリックな教師あり学習の手法。
- ✓ 利点: 分類プロセス等の点で可読性が高い、外れ値に対してロバスト。低計算コスト。

### 代表的な機械学習手法(MATLAB 分類学習器)



### 流量、気泡に対する異常診断モデル(決定木)

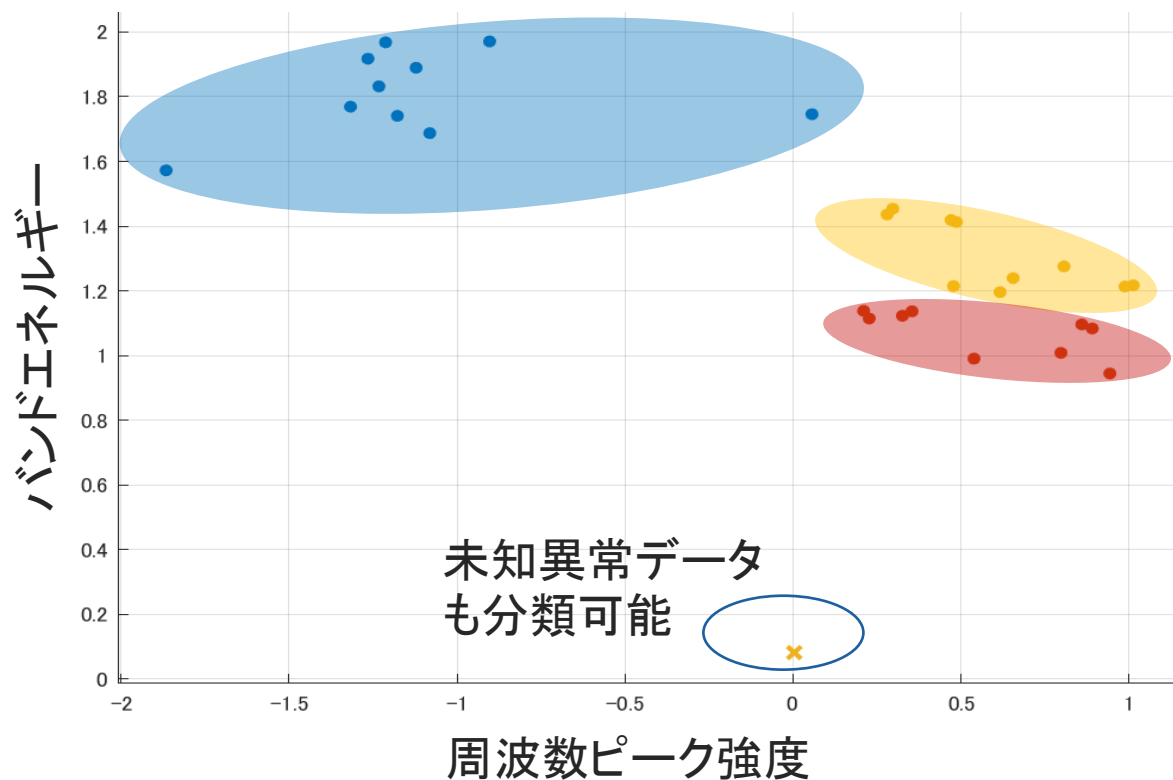


# 機械学習モデルの構築、検証

- ✓ 中計算コスト
- ✓ 機械学習モデル



- 決定木分類学習器を用いて分類学習を実施。ランクの高い特徴量(周波数ピーク強度、バンドエネルギー)相関を可視化すると、明確に領域が異なることが分かる。
- 正答率97%程度と非常に高い結果。→ 今後はさらに**複雑な系(実機相当)に対して分類学習を実施し、モデルの適用性や汎用性を検証**する予定。



正答クラス(推定)	正答クラス(実測)		
	正常	流量異常	気泡異常
	10	9	10
正常			
流量異常			1
気泡異常			

1.はじめに

2.宇宙機推進系とPHM技術

3.センシング技術

4.PHM技術(故障検知診断、機械学習モデル)

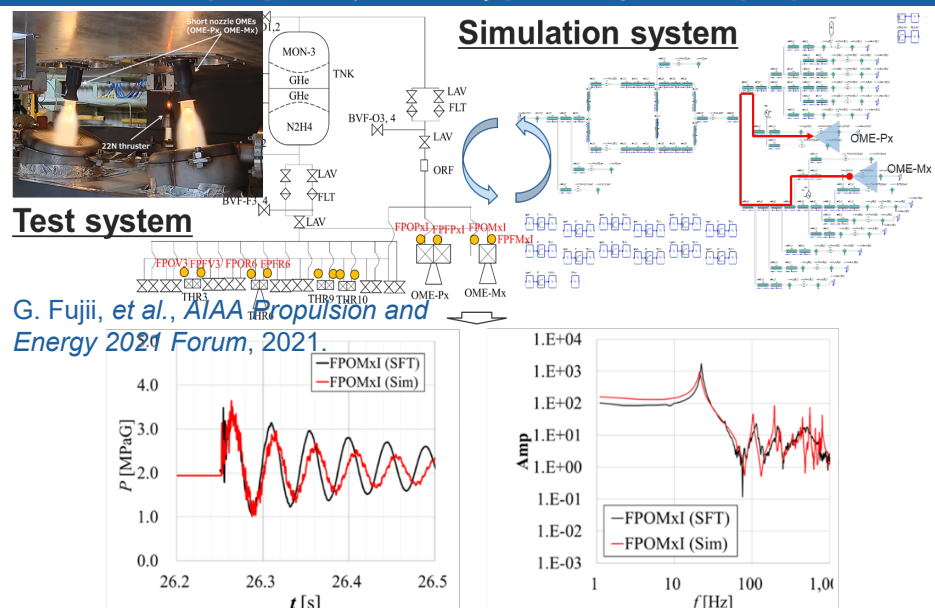
5.まとめと今後の展望



# まとめと今後の展望

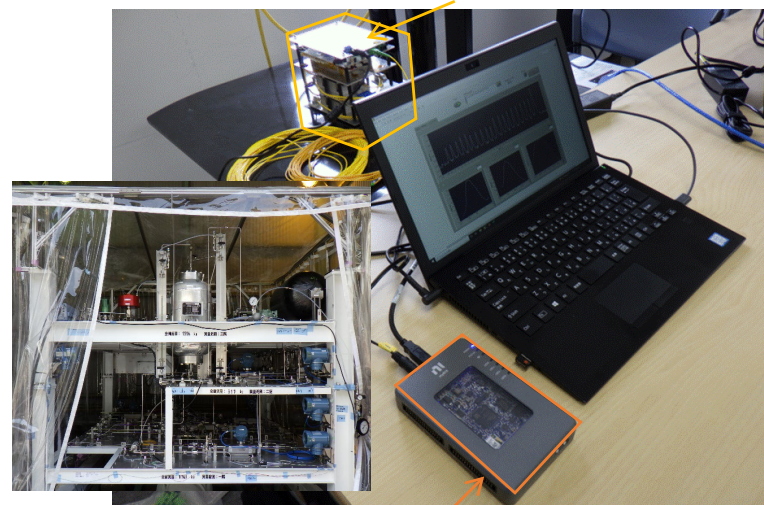
- JAXAでの宇宙機推進系PHM技術について、**センシング&故障検知、診断技術**の観点から紹介した。
- 今後さらに宇宙機に対するPHM技術の必要性は増加すると考えられ、**ハードおよびソフト面双方でPHM技術は重要**となる。
  - ✓ 地上試験とモデルベースの連携による宇宙機推進系設計およびリスクアセスメント手法
  - ✓ 運用段階におけるオンボード自律・自動的な故障診断・予知保全によるヘルスマネジメント手法
  - ✓ 宇宙ステーション、月面基地等へのPHM技術拡張適用、インフラ高度化

## 地上試験&数値計算での設計・評価



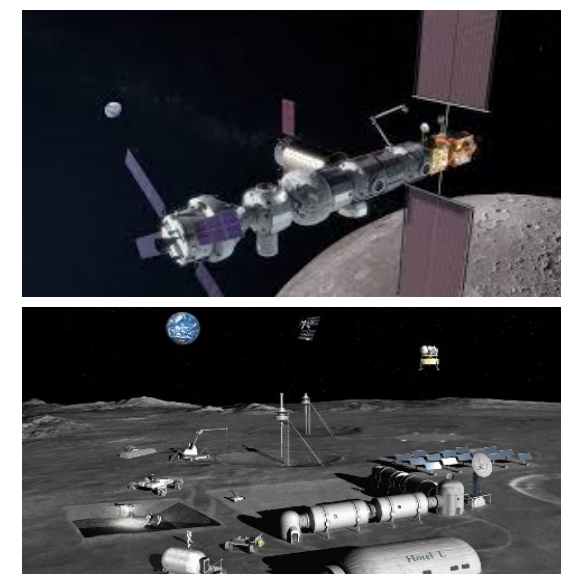
## オンボードヘルスマネジメント技術開発

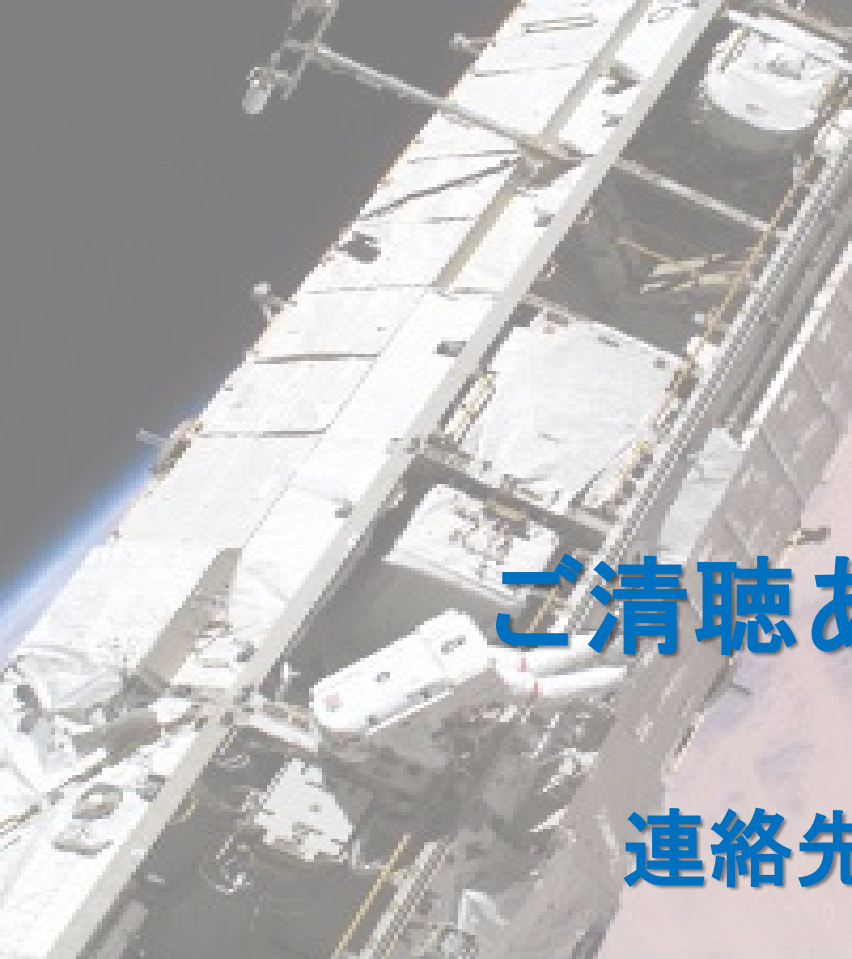
### FBG light source and data acquisition unit



### Data collection and post-processing device

## 宇宙インフラの高度化





ご清聴ありがとうございました！



連絡先 : [tominaga.kohji@jaxa.jp](mailto:tominaga.kohji@jaxa.jp)

