

東京大学-JAXA社会連携講座シンポジウム  
2016年3月23日(水)

## 機械要素の高信頼・長寿命化を目指した 接触摩擦シミュレーション技術の構築

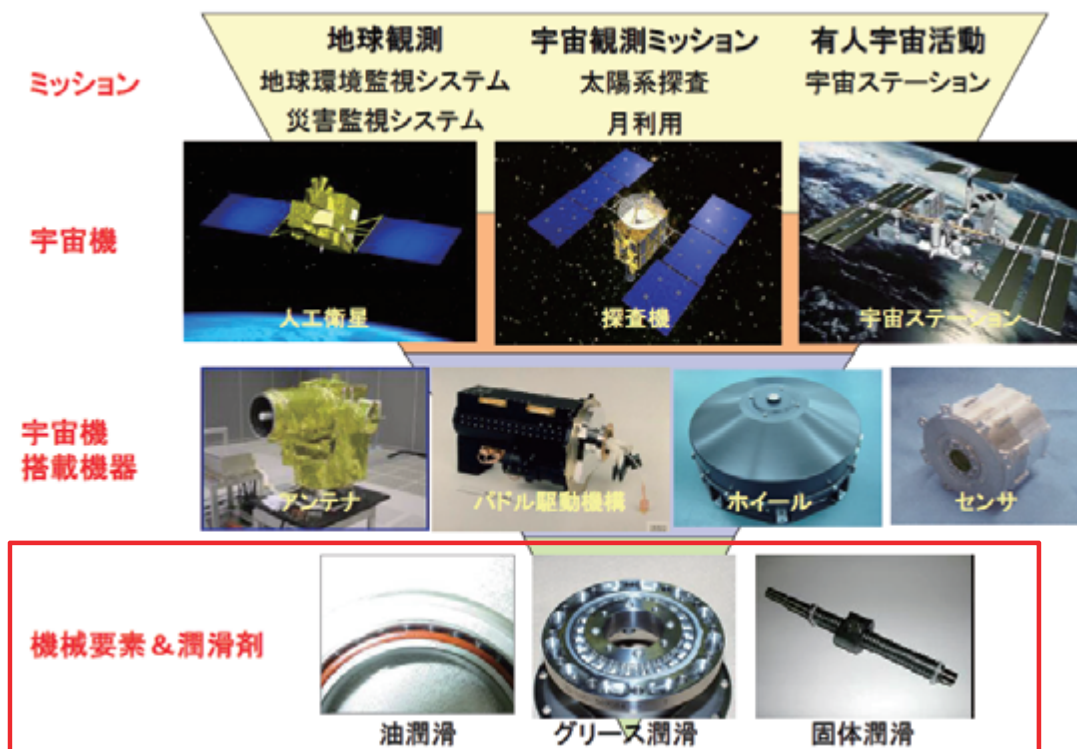
雨川 洋章<sup>1</sup>、泉 聡志<sup>2</sup>、清水 太郎<sup>1</sup>、酒井 信介<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 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)

<sup>2</sup> 東京大学

1

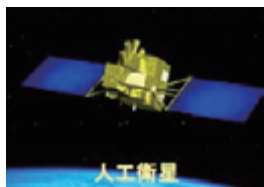
### 1. トライボロジーが支える宇宙ミッション



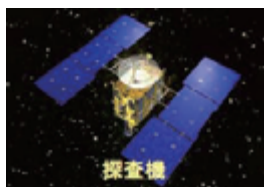
2

## 2. 宇宙機の高度化のために

### 【宇宙機に求められてること】

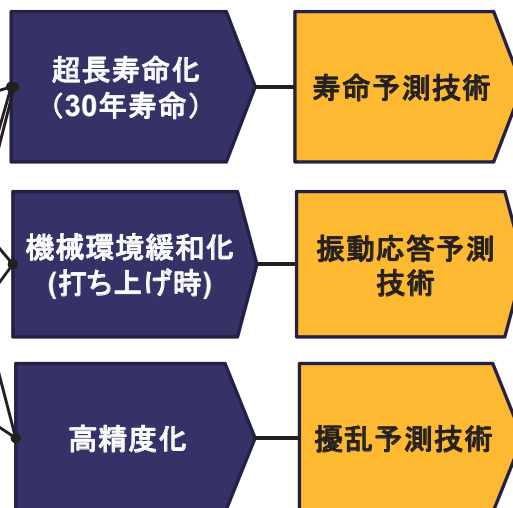


- ✓ 危機管理、災害に即応できるよう、**位置制御の高精度化**
- ✓ 運用年数の**長期化**
- ✓ 衛星への**衝撃負荷緩和**



- ✓ **長期運用に対する信頼性向上**
- ✓ 探査活動の**拡大**

### 【必要技術】

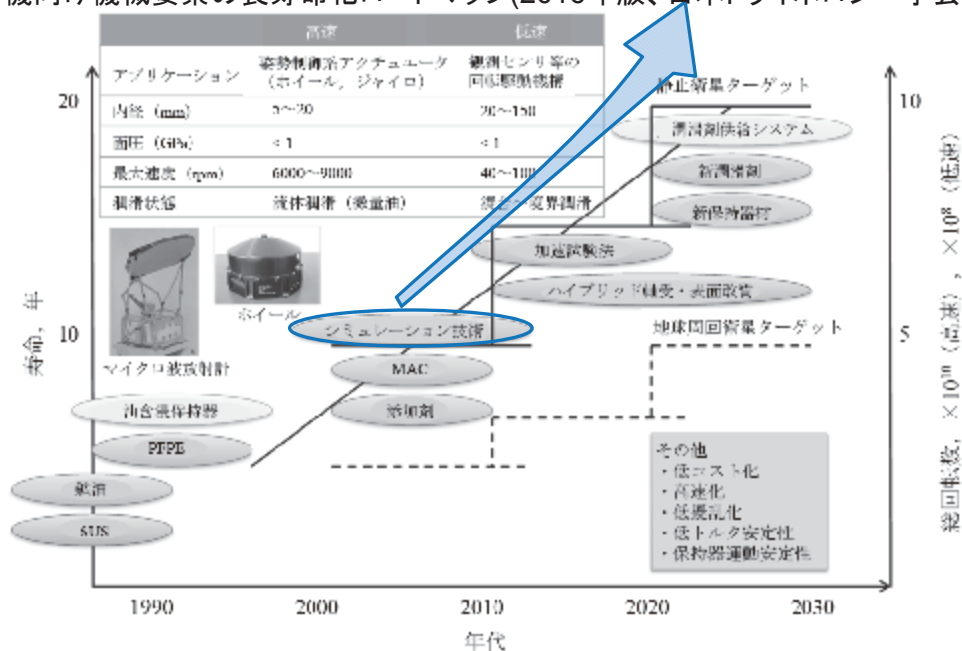


3

## 3. 機械要素とシミュレーション

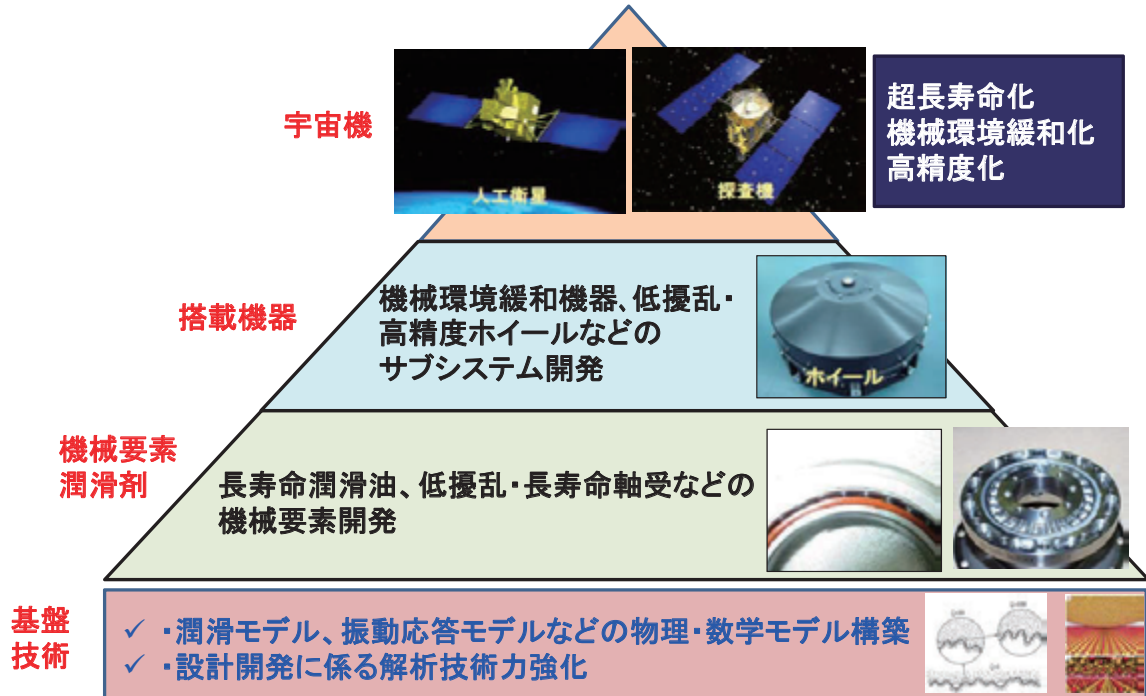
機械要素の研究開発は、これまでの試験実証中心の検討から、シミュレーション中心に移行する。

【宇宙機向け機械要素の長寿命化ロードマップ(2016年版、日本トライボロジー学会)】



## 4. 接触摩擦グループの目的

接触摩擦のシミュレーション基盤技術を構築し、宇宙機の開発課題解決に貢献する。



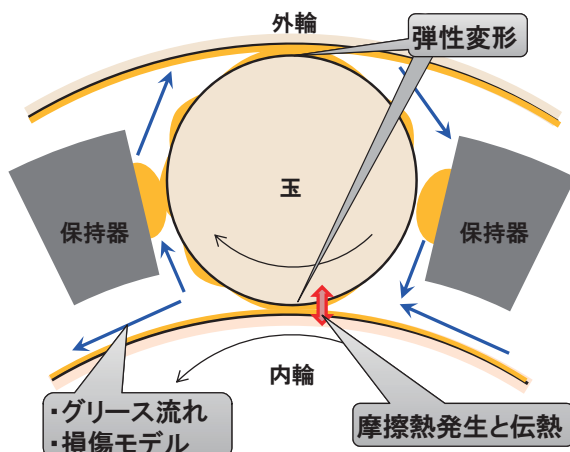
5

## 5. 開発項目

### 5.1 潤滑寿命予測技術

#### 開発イメージ

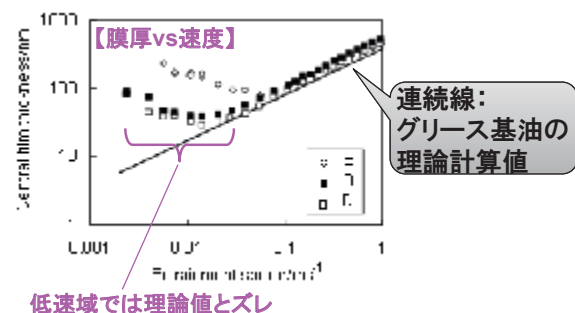
- 熱・流体・構造連成解析手法を構築し、転がり軸受の動的現象をまるごと再現。
- グリースの流体解析手法を構築。
- グリースの損傷モデルを導入することで数値シミュレーションで潤滑寿命を予測。
- 歯車などの他の機械要素にも展開可能な汎用予測技術。



#### 技術ベンチマーク

- 熱・流体・構造の連成解析の事例無し。
- グリース潤滑では接触部近傍・比較的高速での再現に留まる。全体流体解析の事例なし。
- 潤滑寿命は試験的検討に留まり、数値シミュレーションによる研究事例無し。

#### 【グリースメーカーの事例】



重ら、EHL低速域におけるグリース潤滑、石油学会 年会・秋季大会講演要旨集、2008f(0), pp. 136 (2008)

6

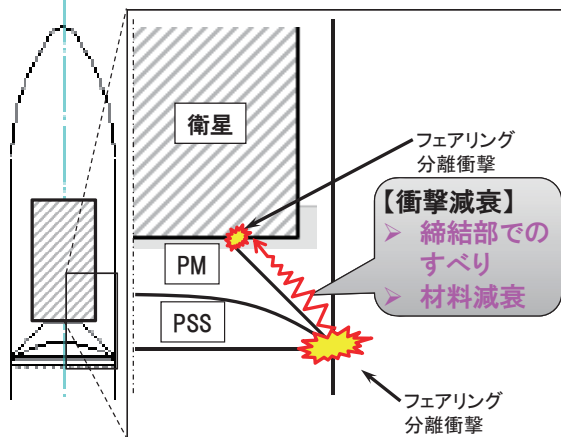
## 5. 開発項目

### 5.2 振動応答予測技術

#### 開発イメージ

- 衝撃や高周波振動に対する**非経験的摩擦減衰モデル、ボルトゆるみ評価手法**の構築。
- 試験検討の豊富な**衛星分離部**を対象とする。基盤技術につき宇宙機などにも展開可能。

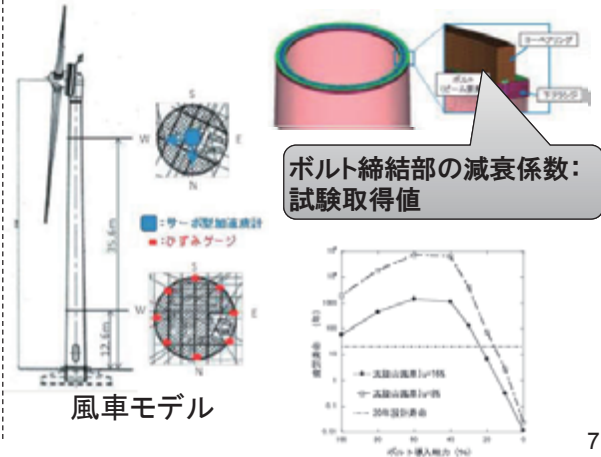
#### 【フェアリング分離の事例】



#### 技術ベンチマーク

- 3次元有限要素法を活用した事例は多数報告されている。
- 固体接触部の減衰は**試験的に取得**（構成が変われば要再試験）、**経験的に設定**
- ボルトゆるみは正弦波振動などに留まる。

#### 【風力発電向け風車の事例】



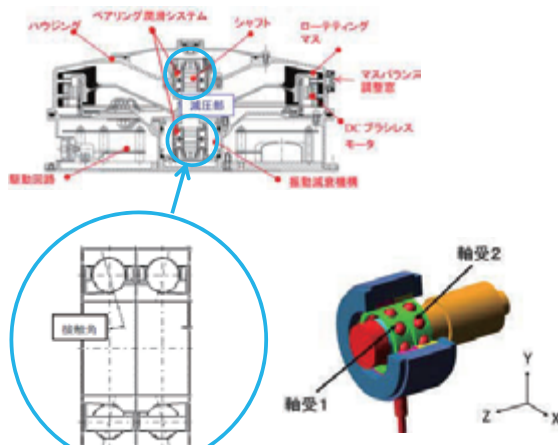
7

## 5. 開発項目

### 5.3 擾乱予測技術

#### 開発イメージ

- 機械要素の**動特性モデル化手法**(**ガタ、組立誤差、衝撃塑性変形含む**)を構築。
- 擾乱発生を再現する**解析手法**の構築。
- 擾乱低減、ばらつき抑制の設計評価に活用する。



組合せアンギュラ玉軸受

#### 技術ベンチマーク

- 詳細な数学モデルを構築して数値解析する試みが多くなされているが、**システムおよびサブシステムレベルでの擾乱をまるごと予測**する手法は確立されていない。

#### 【NASAの事例】

$$\begin{bmatrix} I_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & I_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & I_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_y \\ \ddot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & c_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & c_{rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_x \\ \dot{\theta}_y \\ \dot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -I_{zz} & 0 \\ 0 & 0 & I_{xx} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_x \\ \ddot{\theta}_y \\ \ddot{\theta}_z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{rx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{ry} & 0 \\ 0 & 0 & k_{rz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \\ \theta_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_x \\ \tau_y \\ \tau_z \end{bmatrix}$$

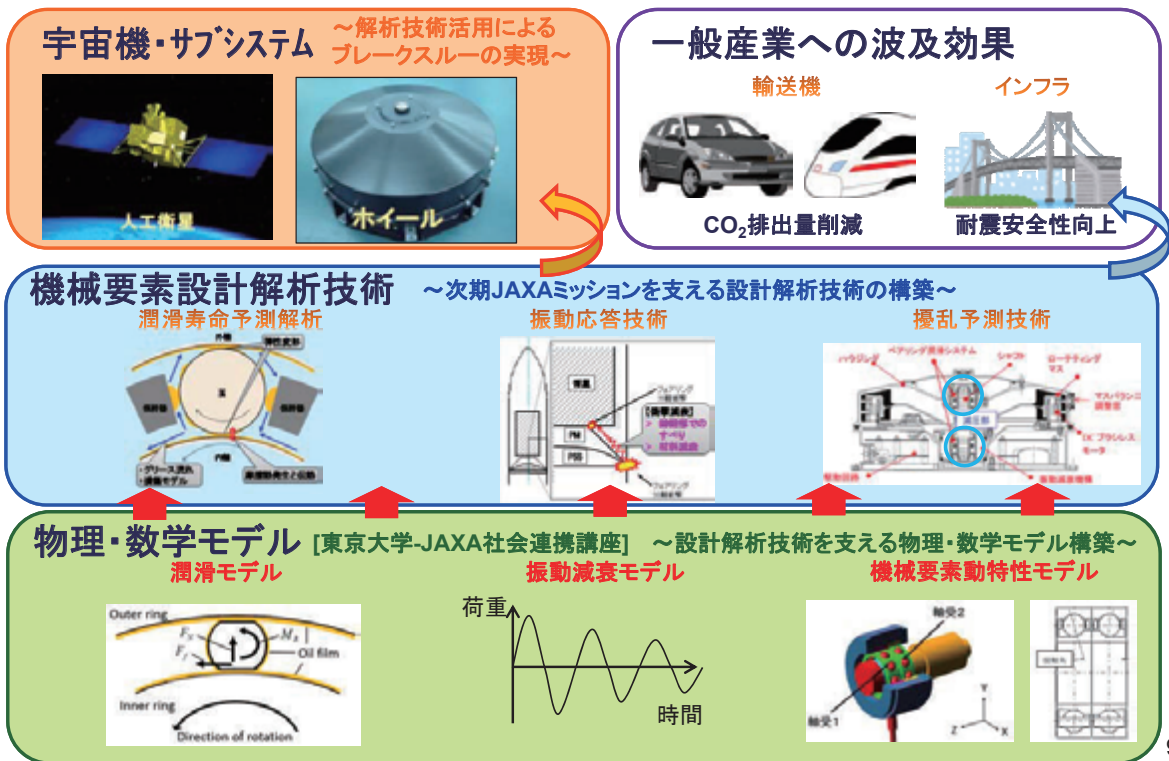
リアクションホイールの数学モデル

Liu et al, AISS Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, AIAA2008-7232 (2008)

8

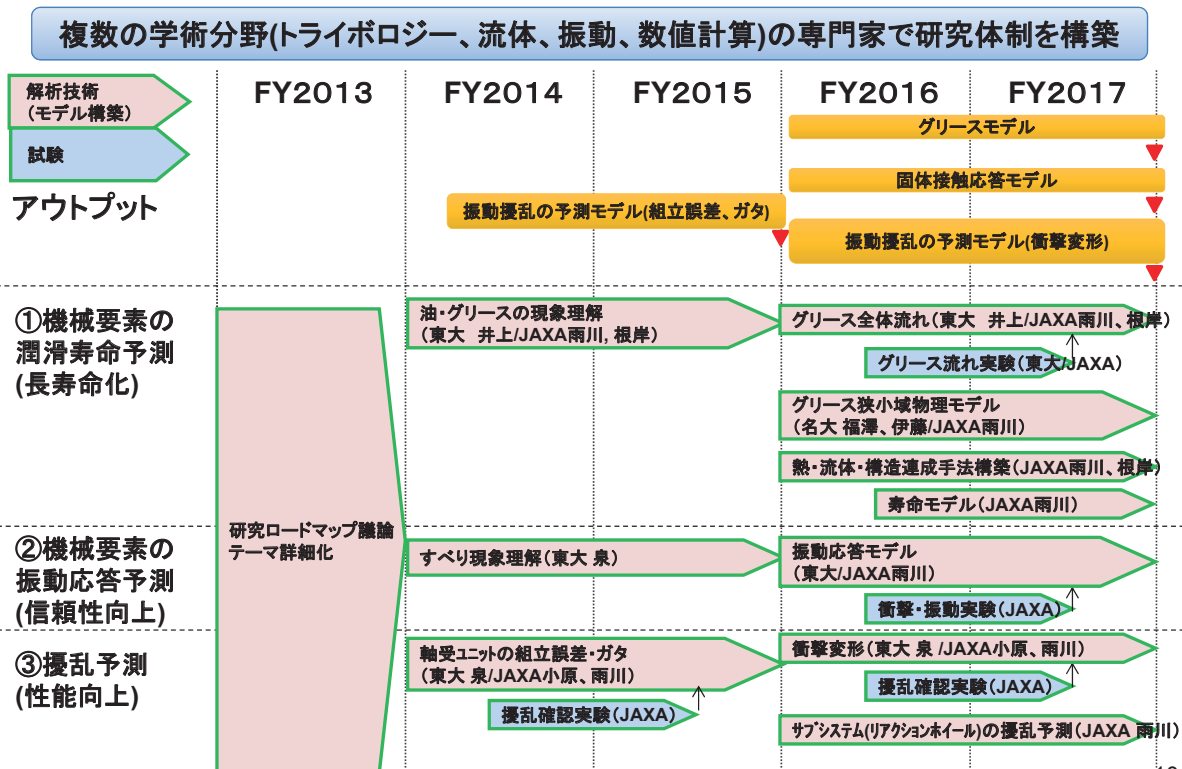


## 6. 接触摩擦研究のアウトカム、波及効果イメージ



9

## 7. 開発体制と工程

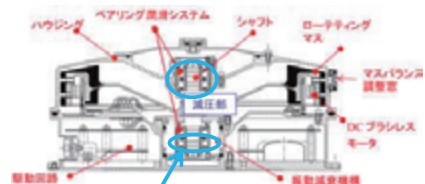


10

## 8. これまでの研究成果概要

- リアクションホイール向け軸受ユニットの動解析モデルを構築。
- これまで不明だった**軸方向回転二次振動成分発生メカニズム**の解明。  
⇒ 今後、JAXA主体で動解析法を実機に適用し、**低擾乱・高性能化開発**に活用する。

【軸受ユニットと動解析モデル】



法線力モデル

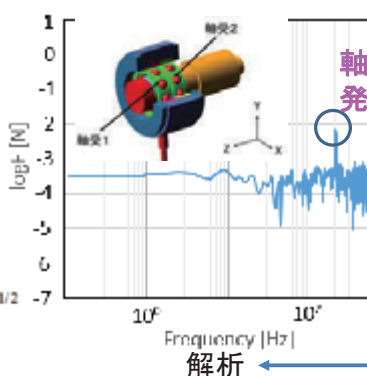
$$F_N = K\delta^{3/2}$$

$$K = \frac{\pi k_g E_{eff}}{\xi^{3/2}} \left( \frac{2\zeta R}{9} \right)^{1/2}$$

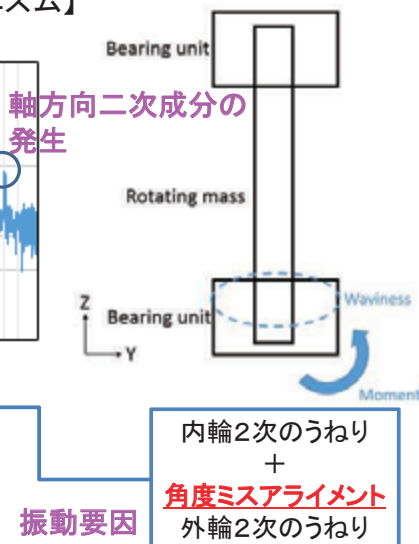
粘性抵抗モデル

$$M_R = R_b \times 2.86 E' R_x^2 k^{0.348} G^{0.022} U^{0.66} W^{0.47}$$

【解析結果と擾乱メカニズム】



解析



振動要因

- ✓ 橋本ら、日本機械学会 第28回計算力学講演会論文集、No. 006 (2015)
- ✓ 橋本、東京大学大学院修士論文 (2016)

11

## 9. まとめ

- 接触摩擦グループは宇宙機の機械要素を対象に、寿命予測、振動応答予測、擾乱予測技術の開発に取り組んでいる。
- 動解析モデルの構築によって、軸方向回転二次振動成分の擾乱予測が可能となった。
- 接触摩擦のシミュレーション基盤技術を構築し、宇宙機の開発課題解決に貢献する。



12