

東京大学-JAXA社会連携講座シンポジウム
 ～産官学の連携による宇宙開発分野でのブレークスルー～
 2018年1月22日(月)@東京大学 浅野キャンパス 武田先端知ビル

接触・摩擦研究グループ成果報告

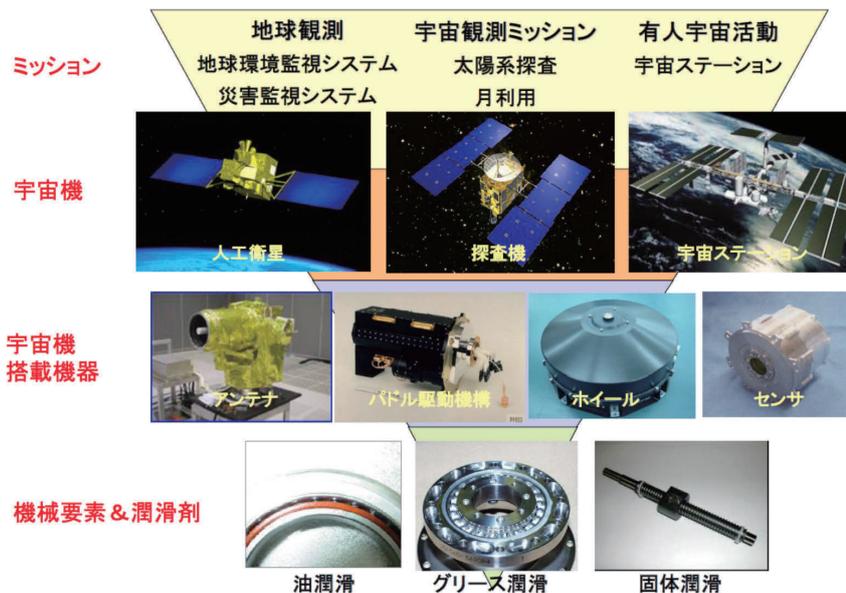
転がり軸受内のグリース流れ予測解析手法の開発

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構

雨川 洋章

1. 背景(宇宙機の潤滑)

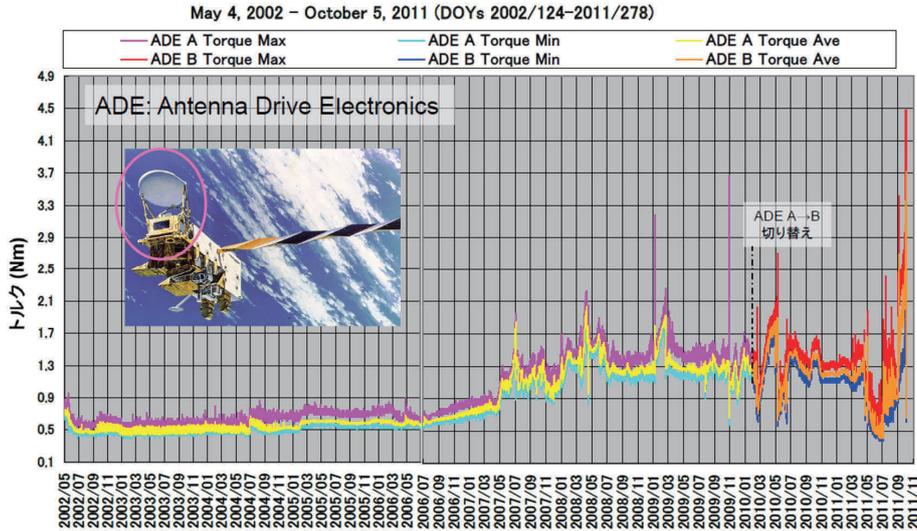
◆ 人工衛星等の宇宙機では、高い潤滑性能と保油性からグリース潤滑の利用が拡大。



宇宙空間での運用中のメンテナンスは困難であり長寿命であることが求められる一方で、搭載機器が使える電力が限られ低摩擦であることも求められることから、低摩擦化と長寿命化の両立が必要。

2. 背景(長寿命化)

- ◆ 機構系の潤滑寿命が人工衛星の寿命を決める場合が多い。



マイクロ放射計駆動機構(AMSR-E)のトルク上昇

宇宙開発委員会報告(委30-4) 2011年10月11日より

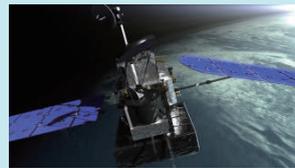
- 設計寿命を現状の5~10年から10~20年に延ばすべく長寿命化研究を進めている^[1]。

[1] 間庭ら, トライボロジー会議2016秋新潟予稿集, C2 (2016)

3. 研究背景; グリース挙動数値解析への期待

今後の宇宙機設計開発の目標

- 長寿命化; 5~10年 → ~30年
- 低擾乱化 → 観測精度向上
- 低トルク → 省エネ化



技術課題

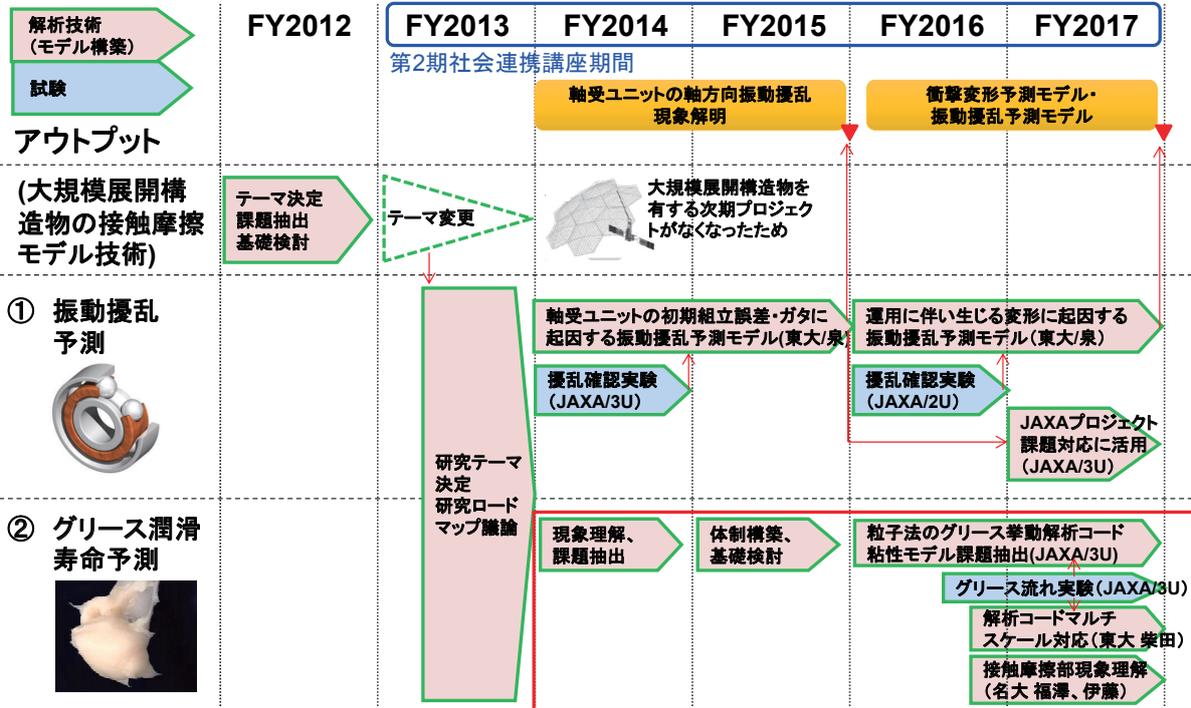
- 軸受の潤滑メカニズムの解明 → グリース挙動把握
- 擾乱発生メカニズムの解明 → トルクの高精度予測
- 軸受寿命の加速試験法の確立 → 支配要因の特定



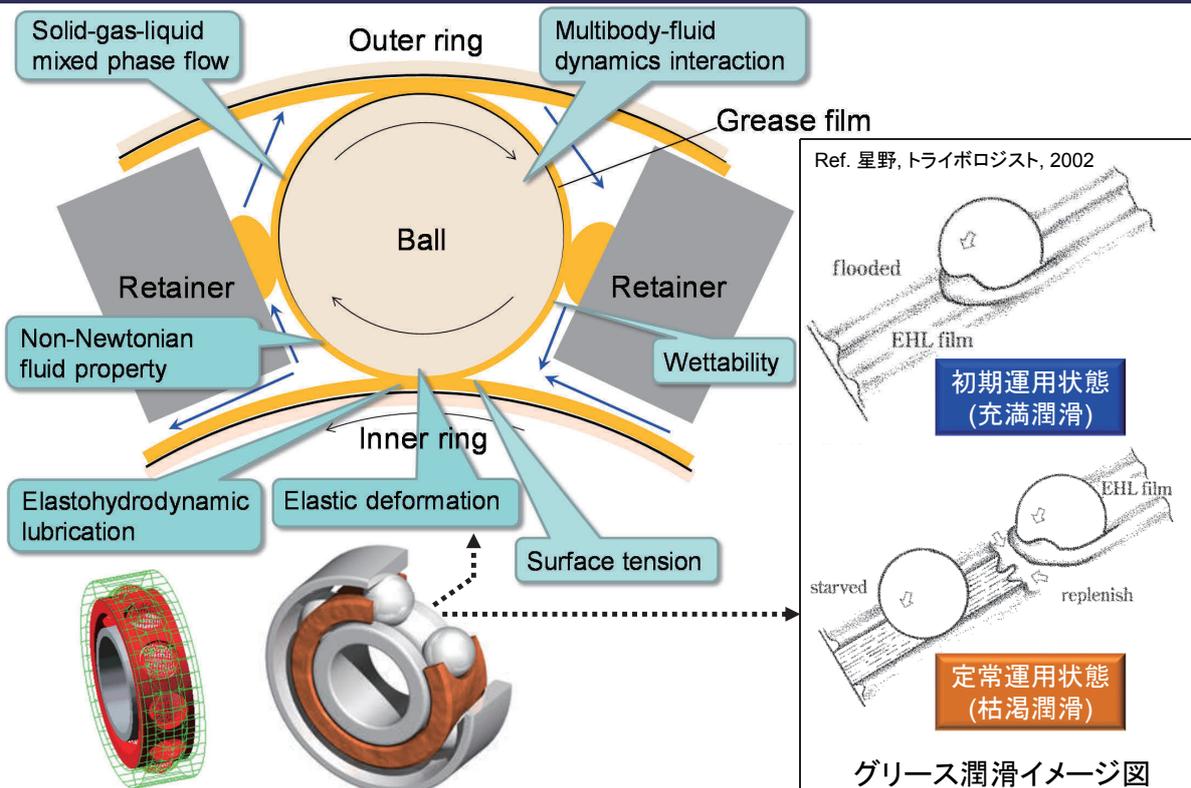
数値シミュレーション技術への期待 軸受内のグリース挙動解析の確立

- 転がり軸受内のマクロなグリース挙動の把握
- 潤滑部(弾性流体潤滑)近傍のグリース挙動と軸受トルクの把握
- 長寿命化、低擾乱化、低トルク化を実現する新たな設計提案

4. 研究の変遷

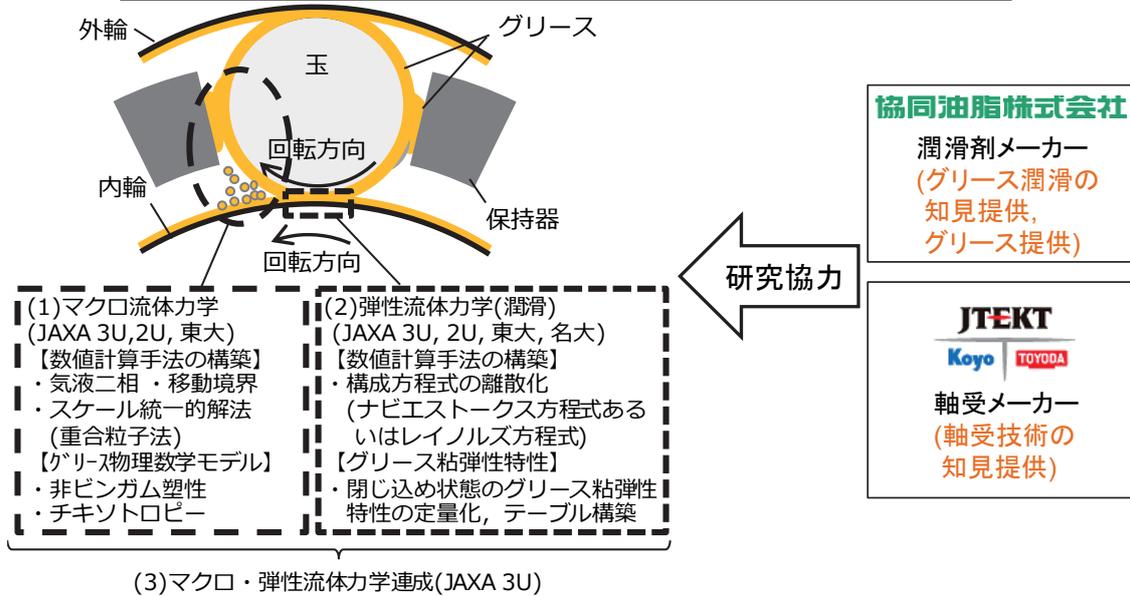


5. 転がり軸受内グリース流れ解析で考慮すべき物理現象



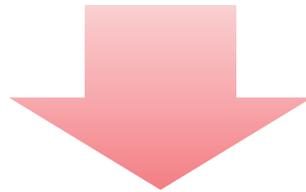
6. 研究体制

- ✓ 数値計算、トライボロジー、流体力学と、専門の異なるメンバーが集まるAll Japanの研究体制を構築。
- ✓ 科研費採択(研究期間2017～2019年度)。
- ✓ 第一段階として、グリースのマクロな挙動の解析技術を構築。



7. 研究目的

宇宙機の長寿命化(低トルク化、低擾乱化含む)に向けた
 転がり玉軸受内のグリース挙動解析技術の構築



本発表では、研究の第一段階として実施した以下の項目について報告する。:

- ①グリースマクロ挙動の把握と検証データの取得
 → グリースダム崩壊実験
- ②グリースマクロ挙動のCFD解析技術構築
 → 粒子(MPS)法ベースの基本ソルバー構築

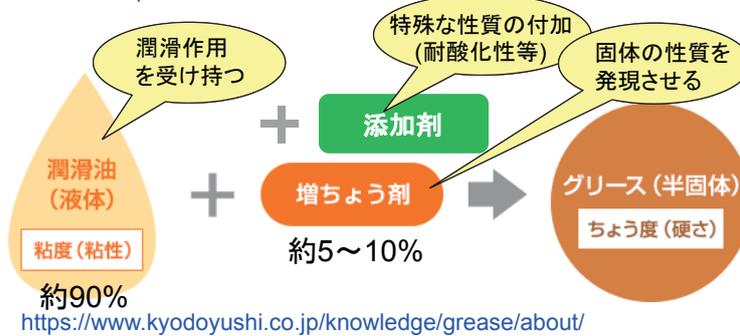
8. グリースの特徴

グリースの定義(JIS):

潤滑油中に増ちょう剤を分散させて半固体または固体状にしたもの。
 特殊な性質を与える他の成分(添加剤)が含まれる場合もある。



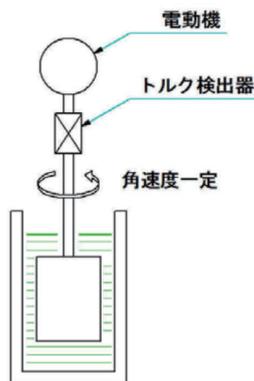
<http://www.kure.com/lubrication/>



9. 供試グリースの流動特性

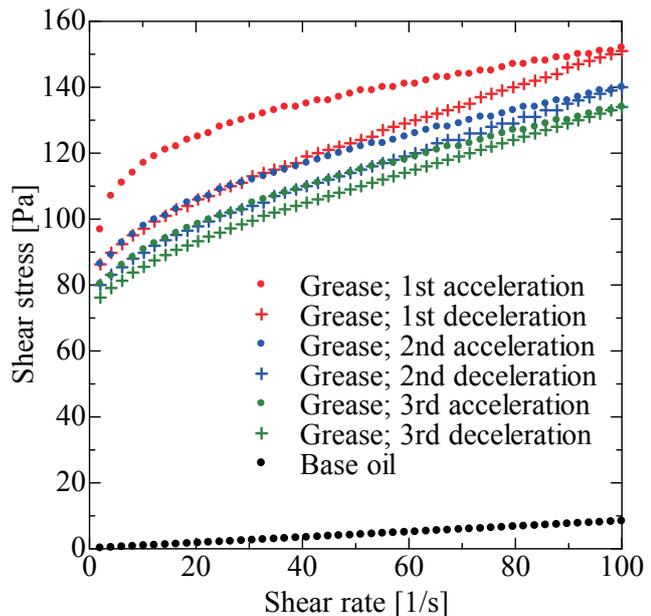


供試グリース



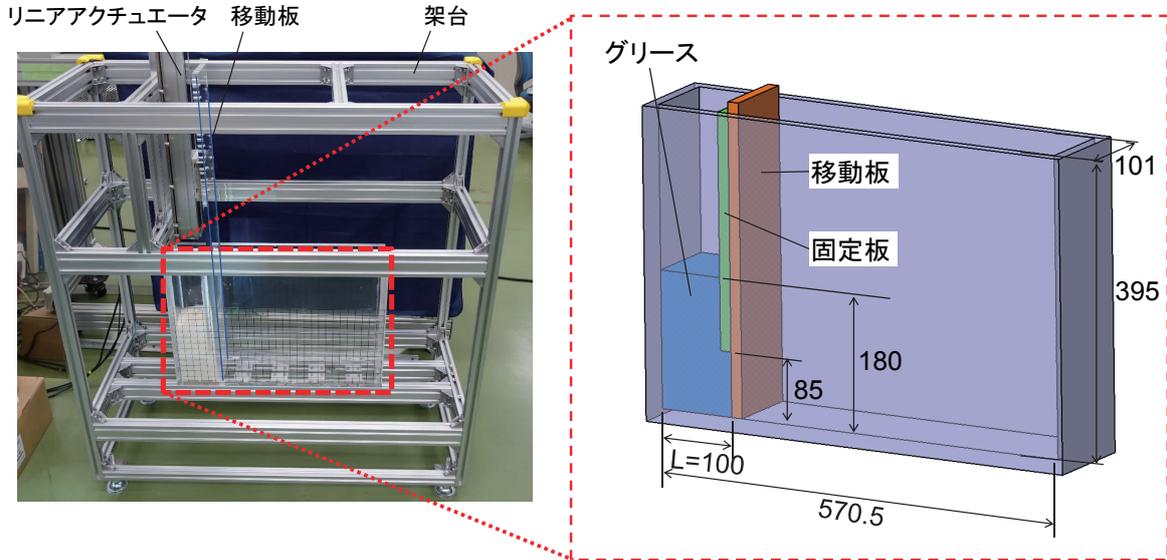
回転式粘度計

- ・増ちょう剤: リチウム石けん
- ・基油: 合成炭化水素油
- ・基油密度: 870 kg/m³
- ・基油動粘度(40°C): 47.7 mm²/s



- ✓ 降伏応力(塑性)を有する
- ✓ せん段ひずみ速度依存性を有する
- ✓ 時間依存性(チキソトロピー)を有する

10. グリースダム崩壊実験の概要



- グリースをよく攪拌して充填した後、約30分後に試験を実施
- 移動板を除去した後の崩壊の様子を高速度カメラで撮影

11. 数値計算手法; Moving Particle Simulation(MPS)法

支配方程式: **非圧縮性Navier-Stokes方程式**

音速と圧力
の関係式
(微圧縮性を仮定)

$$\frac{dp}{d\rho} = c^2$$

(注: c は音速, p は圧力, ρ は密度)

$$\Delta t \leq C_D \frac{l^2}{\nu}$$

(注: Δt と拡散数 C_D , l は粒子径, ν は粘性係数)

運動量保存式

$$\frac{D\vec{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla \cdot (p\vec{I}) + \frac{\mu(\dot{\gamma})}{\rho} \nabla^2 \vec{u} + \frac{2\bar{S}}{\rho} \nabla \mu(\dot{\gamma}) + \vec{g}$$

(注: $\frac{D}{Dt}$ は時間微分, $\mu(\dot{\gamma})$ は粘性係数, $\nabla \mu(\dot{\gamma})$ は速度勾配テンソル, \vec{g} は平均せん断速度, 外力項(重力)は影響は小さいとして無視)

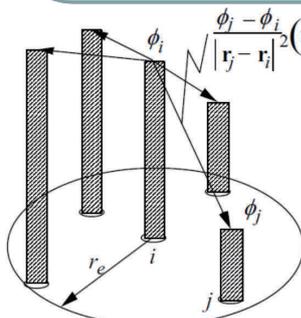


図2 勾配モデル

空間微分を“粒子間相互作用モデル”で表現

グラディエントモデル

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \frac{\phi_j - \phi_i}{|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|^2} (\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)$$

(注: w は重み関数)

ラプラシアンモデル

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i|)]$$

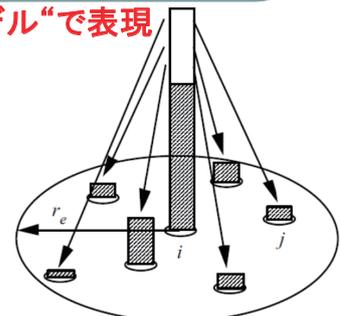


図3 ラプラシアンモデル

越塚, “粒子法による流れの数値解析,” ながれ, 2002.

12. グリース粘性係数のモデル化

- ✓ 不動状態を高粘度でモデル化し、塑性とひずみ速度依存性を考慮
- ✓ 時間依存性(チキントロピー)は非考慮

Bingham-Papanastasiou model

- 1987年に提案された修正ビンガム流体モデル *Ref. Papanastasiou, J. of Rheology, 1987*
- 不動状態と流動状態を指数関数で滑らかに接続

$$\mu(\dot{\gamma}) = \eta_p + \frac{\tau_Y}{\dot{\gamma}} \left(1 - e^{-m|\dot{\gamma}|} \right)$$

降伏応力
応力成長指数

塑性粘度
平均せん断速度

where

平均せん断速度

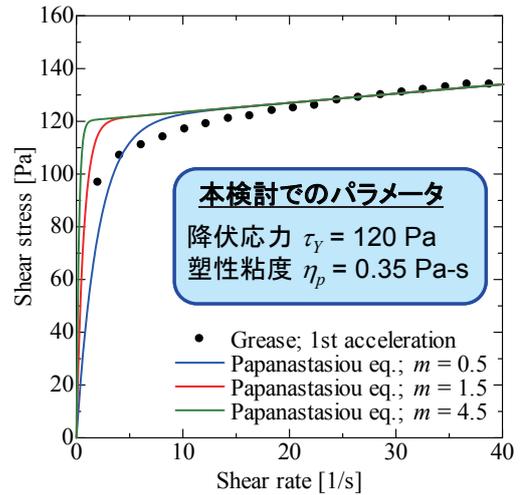
$$\dot{\gamma} = \sqrt{2\Pi_D}$$

$$\Pi_D = \frac{1}{2} D_{ij} : D_{ij}$$

$$= D_{xx}^2 + D_{yy}^2 + D_{zz}^2 + 2(D_{xy}^2 + D_{yz}^2 + D_{zx}^2)$$

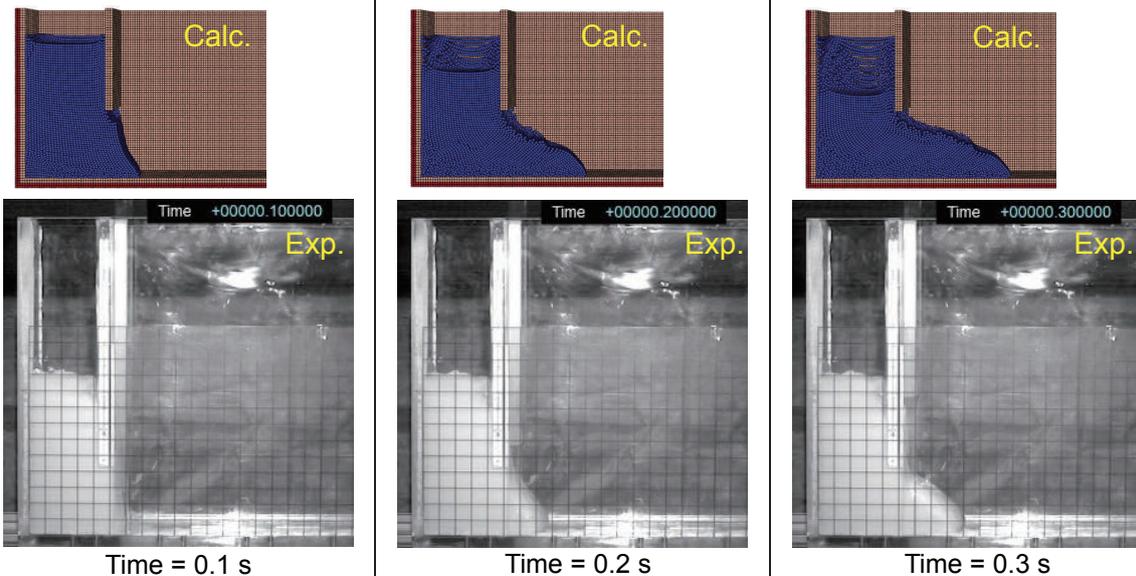
速度勾配テンソル

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} D_{xx} & D_{xy} & D_{xz} \\ D_{xy} & D_{yy} & D_{yz} \\ D_{xz} & D_{yz} & D_{zz} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)$$



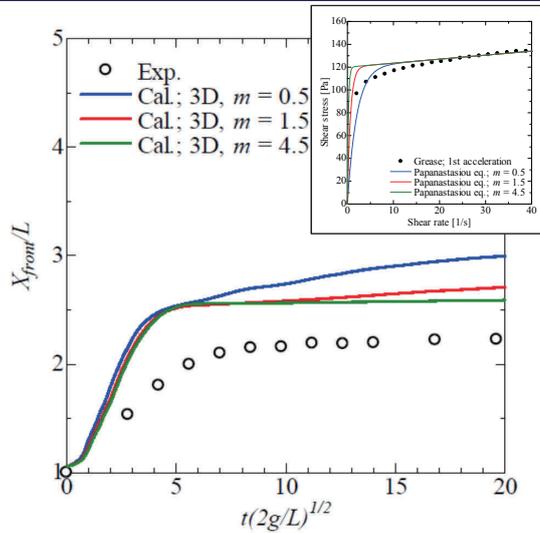
※“1回目増速”時の計測値をモデル化

13. ダム崩壊の様子



- 稼働板を除去するとともにグリース柱が崩壊を開始。
- グリースは流動開始からブーツ状となり流動停止。ブーツ状となる現象は解析と試験で一致。

14. ダム崩壊の前縁部移動履歴



3D計算での応力成長指数 m の影響評価

- 応力成長指数 m の調整で後半の崩壊速度は調整可能
- 崩壊時の速度や減速時の位置が合わない
 - ➔ グリース粘度モデルの選定&改良、不動状態(固体)の計算が課題

15. まとめ

- 宇宙機の長寿命化(低トルク化、低擾乱化含めて)に向けた転がり玉軸受内グリース挙動数値解析技術の必要性和課題、今後の展望について説明した。
- 研究の第一段階として、マクログリース挙動の把握と数値解析手法の検証のための「グリースダム崩壊実験」について説明した。
- MPS法をベースとしたグリースマクロ流れ解析手法を構築し、「グリースダム崩壊実験」との比較結果と今後の課題を示した。

- ✓ グリース流動(粘度)特性のモデル化(特に低ひずみ速度域)
- ✓ 不動状態のモデル化(弾塑性:変位と応力の関係)
- ✓ 弾性流体潤滑のモデル化(粘度の圧力依存性、固体弾性変形)
- ✓ 流体-機構連成

etc ...