

人工衛星用リアクションホイールの微小振動制御のためのアンギュラ玉軸受の軸方向振動のマルチボディダイナミクス解析

東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻
橋本 浩平、波田野明日可、泉聡志、酒井信介
JAXA研究開発部門 間庭和聡、小原新吾、西元美希
エムエスシーソフトウェア 山中 孝司



The University of Tokyo

研究履歴

- 2013年度卒業論文 舘 祐樹 “宇宙機器用転がり軸受における保持器挙動についての機構解析”
- 2014年度卒業論文 中嶋 智司 “宇宙機器用転がり軸受ユニットの振動擾乱についての機構解析”
- 2015年度修士論文 橋本 浩平 “宇宙機器用アンギュラ玉軸受の機械的因子による振動擾乱のマルチボディダイナミクス解析”
- 2016年度卒業論文 小杉祐紀 “宇宙機器用転がり軸受の繰り返し振動による圧痕形成の有限要素法解析”
- 2017年度卒業論文 浅川悟大 “衝撃振動を受ける宇宙機器用アンギュラ玉軸受の圧痕形成と転動体の挙動解析”として継続中
- その他、展開構造物、ボルト、グリースなどを研究会では検討



The University of Tokyo

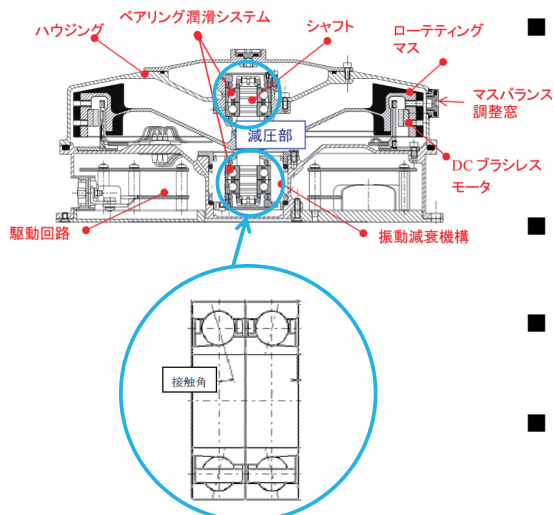
発表内容

1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
5. パラメータ設計
6. 結論



The University of Tokyo

背景



- 宇宙用リアクションホイール^[1]
 - 人工衛星の姿勢を制御する機器
 - 組合せアンギュラ玉軸受を使用
 - 観測センサなどへ悪影響を与えないために、回転中の軸受の振動擾乱を抑える必要がある
- 半径方向の振動
 - ロータの不釣り合いが原因
 - マスバランスの調整により制御しやすい
- 軸方向の振動
 - 軸受の形状誤差やホイールの組立誤差が原因
 - あるレベル以下では制御困難
- 高周波の振動
 - 振幅が小さいため問題になりにくい

組合せアンギュラ玉軸受^[2]

500Hz以下の低周波の軸方向振動の低減とばらつき抑制が課題

[1] 井澤克彦, 岩田隆敬, 田島崇男, 田邊和久, 梶田直希, 谷口典史, 高信頼性低擾乱ホイールファミリー小型タイプの開発, 宇宙科学技術連合講演会講演集(2012).

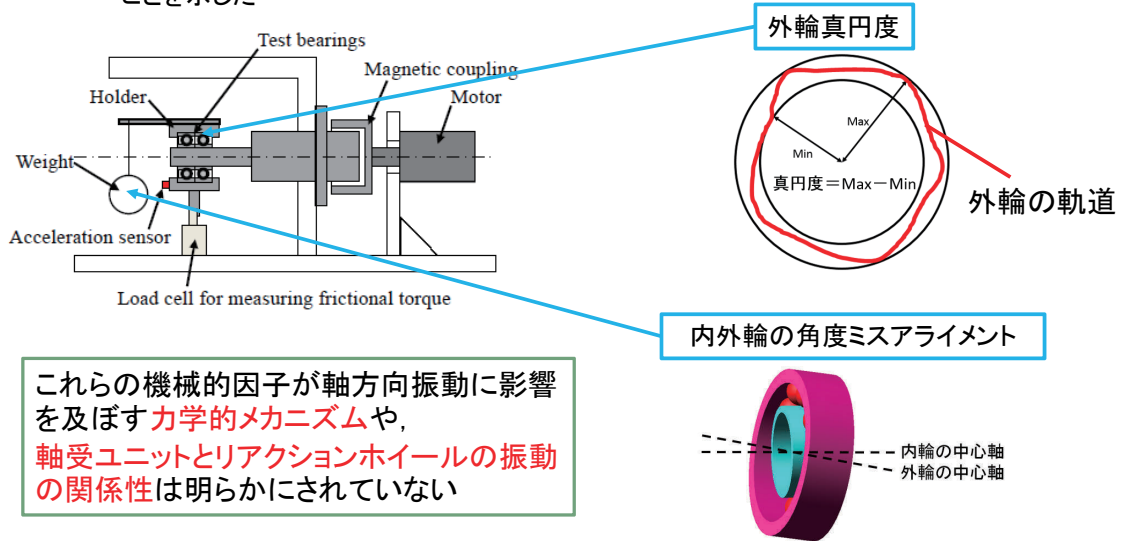
[2] 井澤克彦, 市川信一郎, 高速回転ホイール(高速回転ホイール開発を通しての知見), 宇宙航空研究開発機構研究開発報告(2008).



The University of Tokyo

背景 回転試験

- リアクションホイールに用いられる軸受ユニットの回転試験^[3]
 - 外輪真円度や内外輪の角度ミスアライメントを変化させて試験
 - これらの機械的因子が軸方向振動の回転2次成分(回転数×2の周波数)を増加させることを示した



これらの機械的因子が軸方向振動に影響を及ぼす**力学的メカニズム**や、**軸受ユニットとリアクションホイールの振動の関係性**は明らかにされていない

[3] 間庭和聡, 小原新吾. アンギュラ玉軸受の軸方向微小振動を発生させる機械的因子について, トライボロジー会議予稿集, 盛岡(2014).



The University of Tokyo

目的

- 機械的因子が玉軸受の振動に影響を与える力学的メカニズムの解明
 - リアクションホイールの一部である軸受ユニットのマルチボディダイナミクス解析
 - 形状誤差や組立誤差による影響を観察
- リアクションホイールの軸方向振動を低減させる設計指針の提案
 - リアクションホイール全体のマルチボディダイナミクス解析
 - パラメータ設計により各機械的因子の影響の大きさを相対的に評価



The University of Tokyo

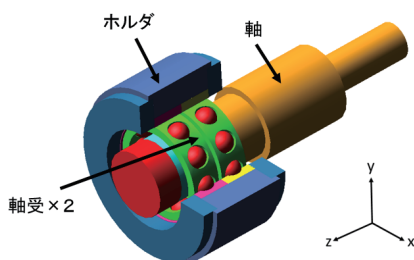
発表内容

1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
5. パラメータ設計
6. 結論



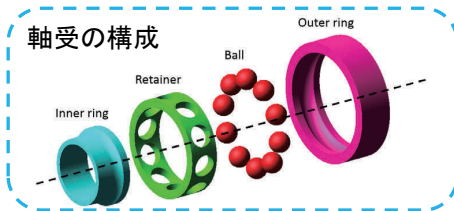
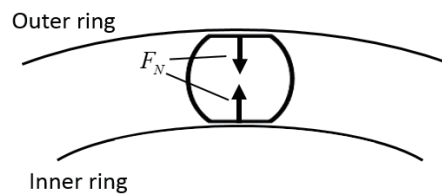
The University of Tokyo

モーダル解析 モデリング・解析条件



軸受ユニットの解析モデル(モーダル解析用)

- 軸はビーム要素
- 軸以外は剛体
- 転動体-軌道輪間に法線力を定義



解析条件

法線力: Hertzの弾性接触理論

$$F_N = K \delta^{3/2} \quad K: \text{剛性係数(等価弾性係数)} \\ \delta: \text{幾何学的干渉量}$$

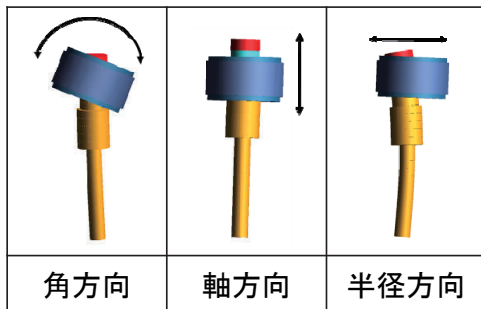
ソフトウェア	Adams2014.0.1 (MSC Software)
拘束条件	両端フリー: 軸とグラウンドを非常に弱いばねで結合 片端固定: 軸の片端を固定
解析タイプ	静解析, モーダル解析

両端フリー、片端固定の
2つの境界条件でモーダル解析



The University of Tokyo

モーダル解析 試験結果と解析結果



加振試験、解析ともに
3つのモード形状を観測

固有振動数[Hz]

モード		試験	解析
両端フリー	角方向	533	481
	軸方向	3150	2977
	半径方向	7970	8138
片端固定	角方向	477	476
	軸方向	1850	1849
	半径方向	8300	7667

試験と解析で、固有振動数が概ね一致

静止状態の軸受ユニットの振動特性を再現する解析モデルが完成



The University of Tokyo

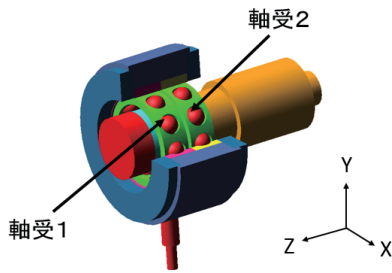
発表内容

1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
5. パラメータ設計
6. 結論



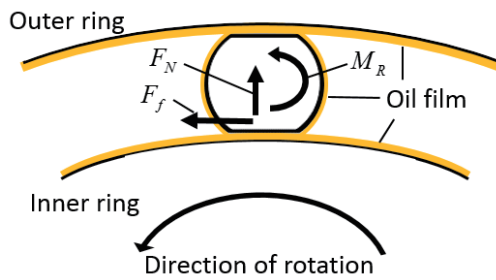
The University of Tokyo

動解析モデル



動解析用の軸受ユニットモデル

- 回転中は転動体-軌道輪間に油膜が発生
- 転動体-軌道輪間に**法線力・接線力・転がり粘性抵抗**を定義



法線力: Hertzの弾性接触理論

接線力: $F_f = \mu F_N$
 摩擦係数 μ は油膜厚さ H_c の関数として定義
 H_c は弾性流体潤滑理論(EHL理論)^[4]で求める

転がり粘性抵抗:
 転動体の回転を妨げるトルク^[5]
 $M_R = R_b \times 2.86 E' R_x^2 k^{0.348} G^{0.022} U^{0.66} W^{0.47}$

[4] B.J.Hamrock and D.Dowson. Isothermal Elastohydrodynamic Lubrication of Point Contacts, Part II - Ellipticity Parameter Results, Transactions of the ASME Journal of Lubrication Technology, Vol.98, pp.375-378, 1976.

[5] Luc Houperit, Ball Bearing and Tapered Roller Bearing Torque: Analytical, Numerical and Experimental Results, Tribology Transactions Vol.45 3 pp.345-353 (2002).



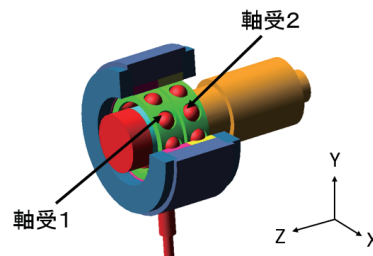
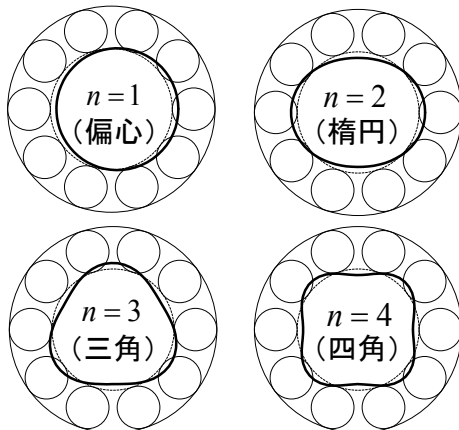
機械的因子の与え方 1. 内外輪の非真円性

内外輪の軌道円に1~4次のうねり

$$r(\theta) = r_{def} + \sum_{n=1}^4 A_n \cos(n\theta + \phi_n)$$

内輪のn次のうねり
 ↓
 内輪1回転につきn周期の加振力
 ↓
 回転n次成分の振動を誘発^[6]

低周波の振動が課題であるため, n=1~4とする



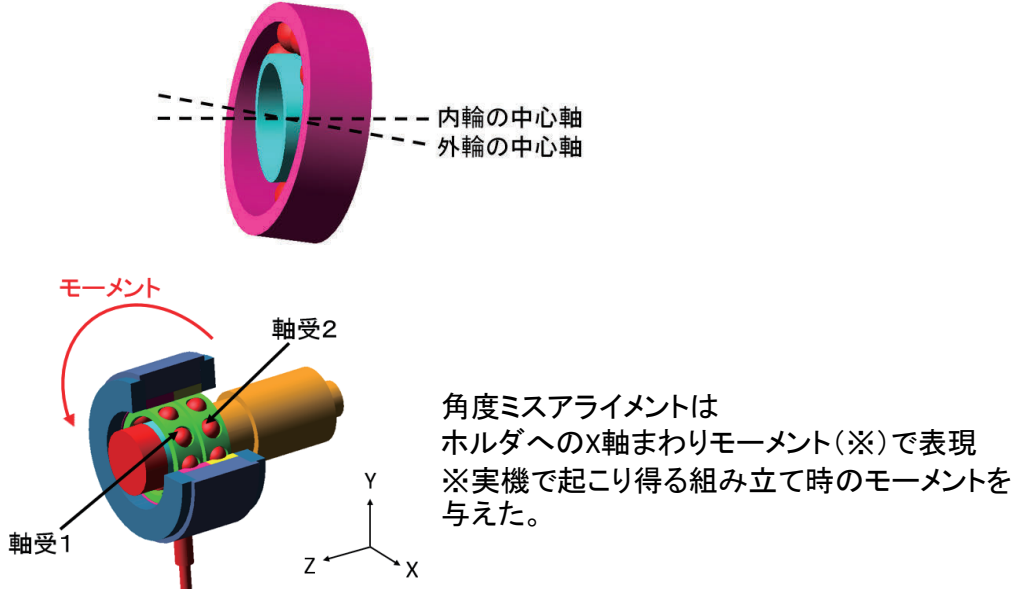
非真円性は軸受1の内外輪にのみ与える

[6] J. Sopanen, A. Mikkola, "Dynamic model of a deep-groove ball bearing including localized and distributed defects. Part 2: Implementation and results," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 217(3), 213-223, 2003.



機械的因子の与え方 2. 角度ミスアライメント

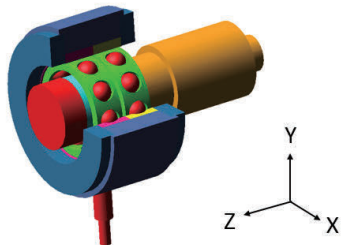
内外輪の角度ミスアライメント＝内外輪の中心軸の傾きのずれ



メカニズム解明の流れ・解析条件

内輪のn次のうねり: 回転n次成分の振動を誘発

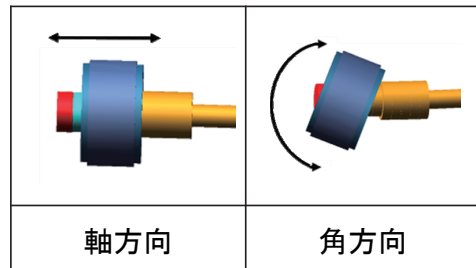
- ①内輪の非真円性のみ
 - ②内輪の非真円性＋角度ミスアライメント
 - ③内輪の非真円性＋外輪の非真円性
- 角速度ミスアライメント・外輪の非真円性が回転次数成分に与える影響を観察



解析条件

拘束条件	軸の端の「z軸まわりの回転以外の自由度」を拘束
変位境界条件	軸の端をz軸まわりに100Hzで回転
解析タイプ	動解析
解析時間	1.0s
出力	ホルダの軸方向, 角方向加速度

軸の回転数が100Hz
 ⇒100 × n Hzの振動が回転n次成分に相当

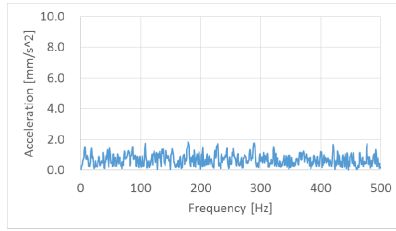


角方向を観察対象に含めたのは、リアクションホイールへの軸方向擾乱への影響が無視できないと考えたため

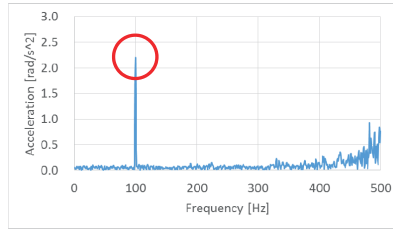


①内輪非真円性のみ

軸受1の内輪に1～4次のうねりを重ねあわせ、ホルダの加速度をFFT解析



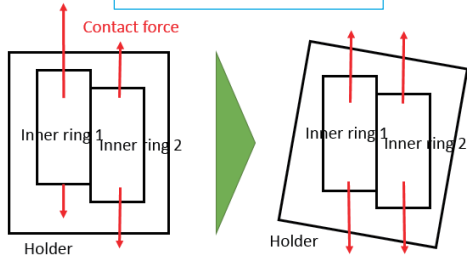
軸方向



角方向

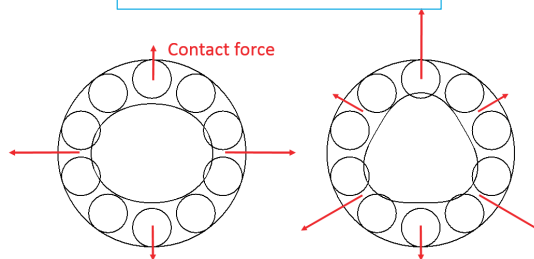
回転1次成分の
角方向振動が観測
2次以上の成分は
観測されなかった

内輪の1次のうねり



ホルダが傾いて荷重バランスをとる

内輪の2次以上のうねり



全体の荷重バランスが乱れない

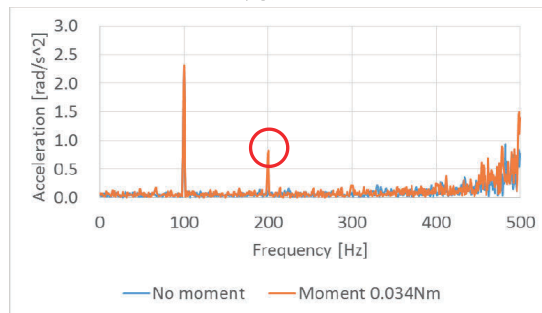
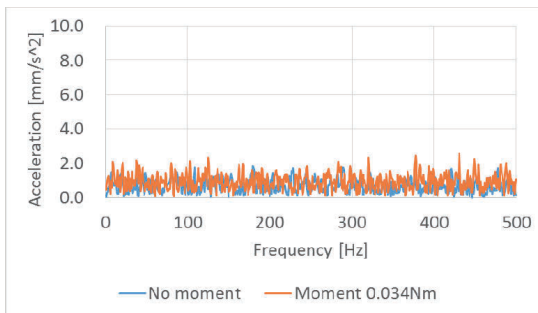


The University of Tokyo

②内輪非真円性+角度ミスアライメント

※内輪に1～4次のうねりをすべて重ね合わせた状態でモーメントを負荷

軸方向 ホルダの加速度をFFT解析 角方向



①との比較	角度ミスアライメントによる影響
回転1次(内輪1次うねり)	変化なし
回転2次(内輪2次うねり)	角方向
回転3次(内輪3次うねり)	—
回転4次(内輪4次うねり)	—

(内輪2次うねり)+(角度ミスアライメント)=(回転2次成分の角方向振動)

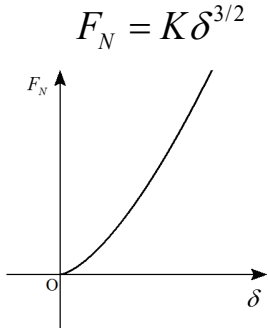
角度ミスアライメントは回転2次成分にのみ影響を与える



The University of Tokyo

②内輪非真円性+角度ミスアライメント メカニズム

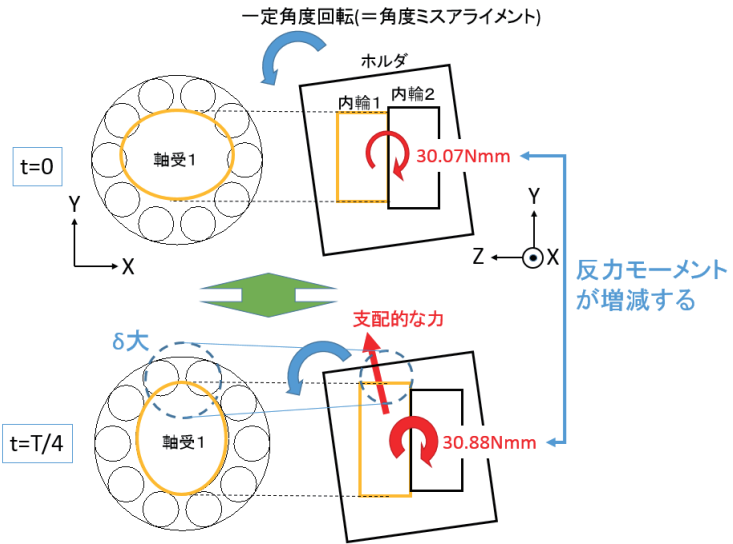
転動体-軌道輪間の法線力:



幾何学的干渉量 δ は非線形性を持ち、特に δ が大きい領域がホルダの運動に強く影響する。

内輪2次のうねり=楕円

ホルダを一定の角度傾けたときの反力モーメントを算出



δが大きい領域の有無の変化が角方向の加振力となる

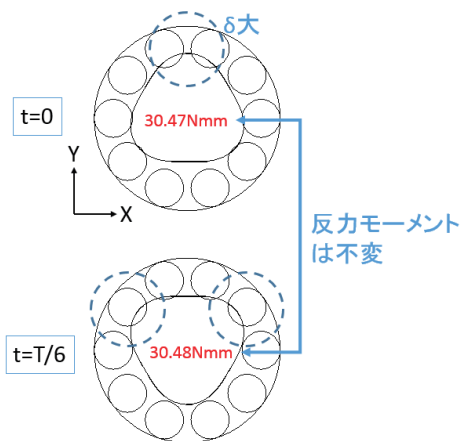


The University of Tokyo

②内輪非真円性+角度ミスアライメント メカニズム

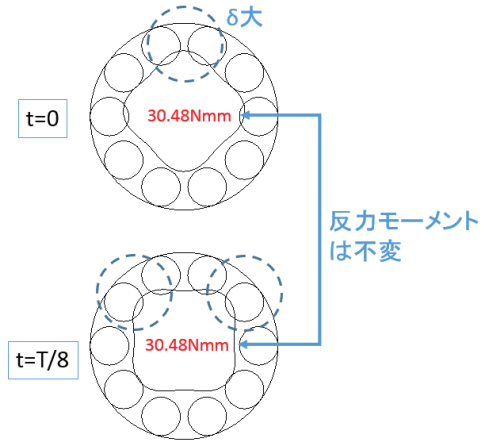
内輪3次のうねり=三角

ホルダを一定の角度傾けたときの反力モーメントを算出



常に上側にδが大きい領域があり、荷重バランスが変化しない

内輪4次のうねり=四角



常に上側にδが大きい領域があり、荷重バランスが変化しない

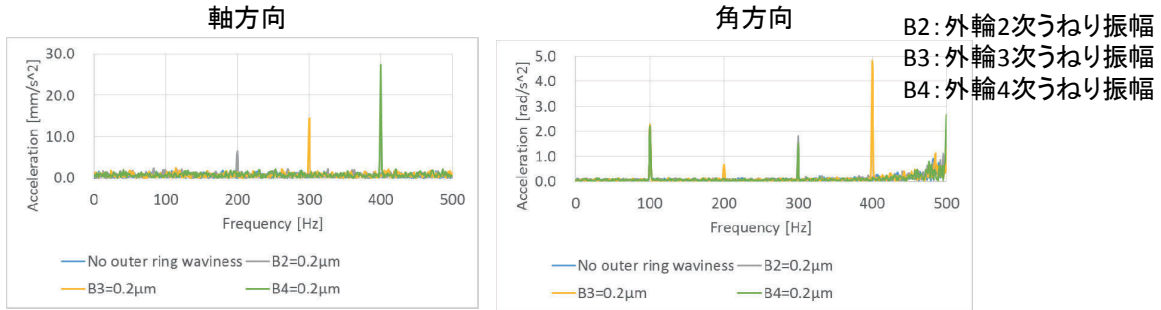
回転2次成分のみ角度ミスアライメントの影響を受けるメカニズムが解明された



The University of Tokyo

③内輪非真円性＋外輪非真円性

ホルダの加速度をFFT解析

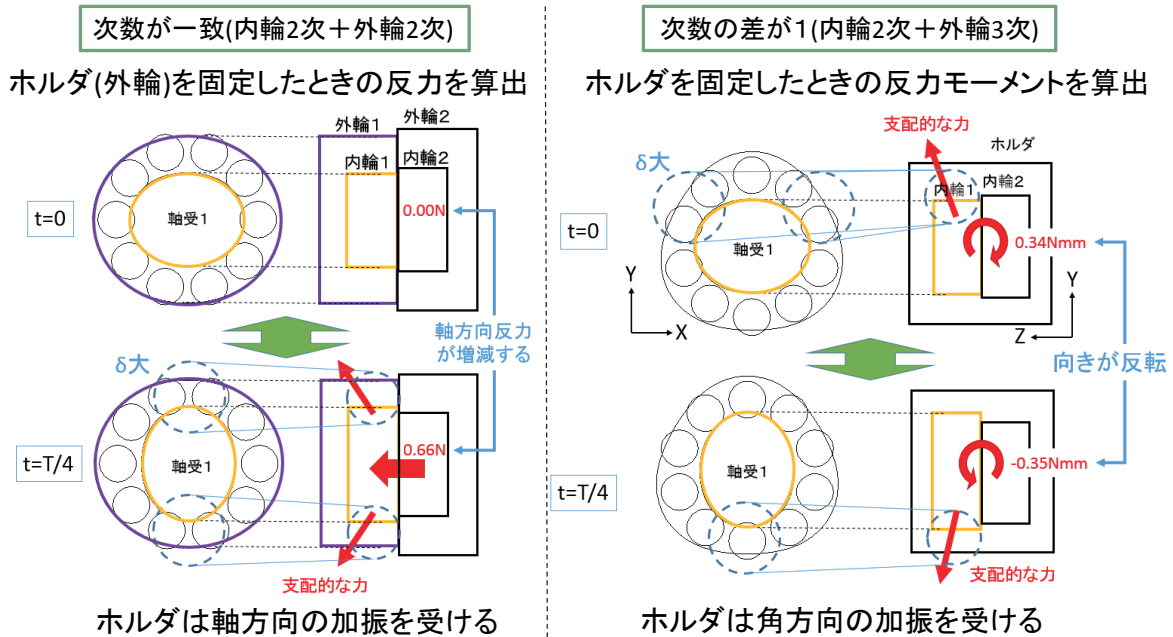


	外輪2次うねり	外輪3次うねり	外輪4次うねり
回転1次(内輪1次うねり)	変化なし	変化なし	変化なし
回転2次(内輪2次うねり)	軸方向	角方向	—
回転3次(内輪3次うねり)	角方向	軸方向	角方向
回転4次(内輪4次うねり)	—	角方向	軸方向

内外輪のうねりの次数が一致⇒軸方向振動
 内外輪のうねりの次数の差が1⇒角方向振動



③内輪非真円性＋外輪非真円性 メカニズム



内外輪のうねりの次数と発生する振動方向の力学的メカニズムが解明された



発表内容

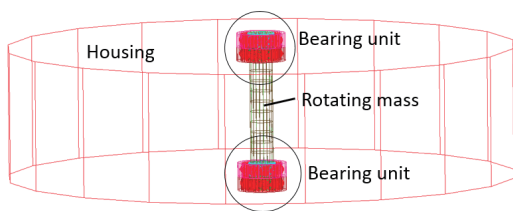
1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
5. パラメータ設計
6. 結論



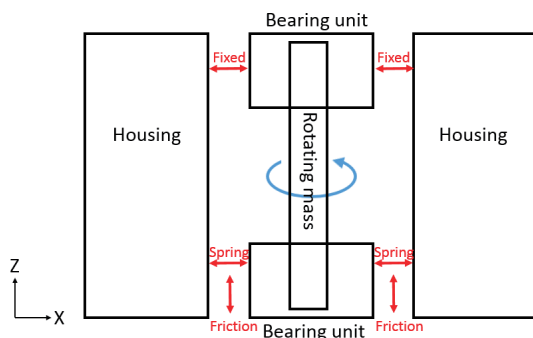
The University of Tokyo

リアクションホイールの解析 モデリング・解析条件

リアクションホイール全体をモデリング



- ・上側のホルダをハウジングに固定
- ・下側のホルダとハウジング間に半径方向のばね力と軸方向の摩擦力を定義
- ・内輪・外輪の非真円性、角度ミスアライメントをすべて与えた



解析条件

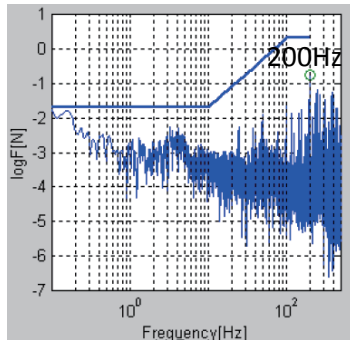
ソフトウェア	Adams2014.0.1 (MSC Software)
拘束条件	ハウジングをグラウンドに固定
変位境界条件	ローテティングマスをZ軸まわりに100Hzで回転
解析タイプ	動解析
解析時間	0.5s
出力	ハウジングのZ軸方向並進力



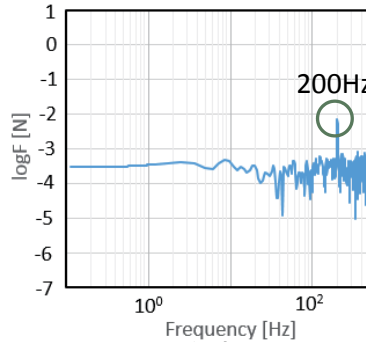
The University of Tokyo

リアクションホイールの解析 解析結果

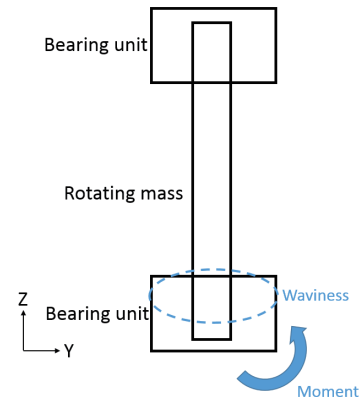
ハウジングの軸方向並進力をFFT解析



試験[4]



解析



内輪2次のうねり
 +
 角度ミスアライメント
 外輪2次のうねり

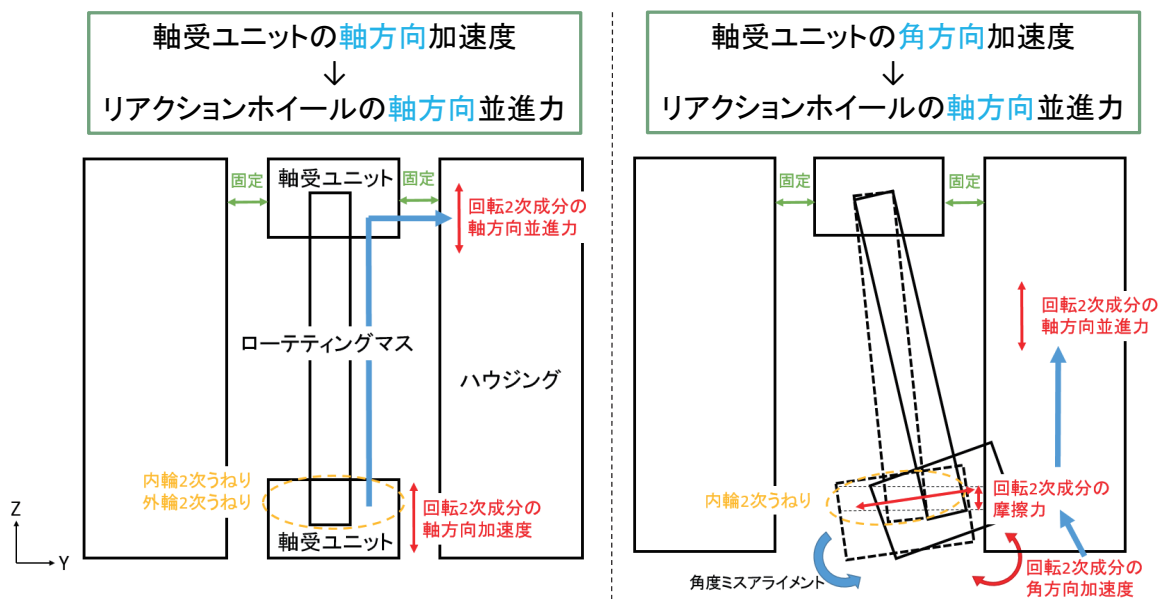
- 解析モデルは軸方向擾乱のオーダーの観点で妥当
- リアクションホイールでも軌道輪の非真円性や角度ミスアライメントにより回転2次成分の擾乱が発生することを確認

[4] 田邊 他, 次世代高性能フライホイールの擾乱特性評価, 第51回宇科連(2007).



リアクションホイールの軸方向擾乱のメカニズム

軸受ユニットの回転2次成分の振動がリアクションホイールに伝わるメカニズム



軸受ユニットの角方向, 軸方向振動はともにリアクションホイールの軸方向擾乱を招く



発表内容

1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
- (5. パラメータ設計)
6. 結論

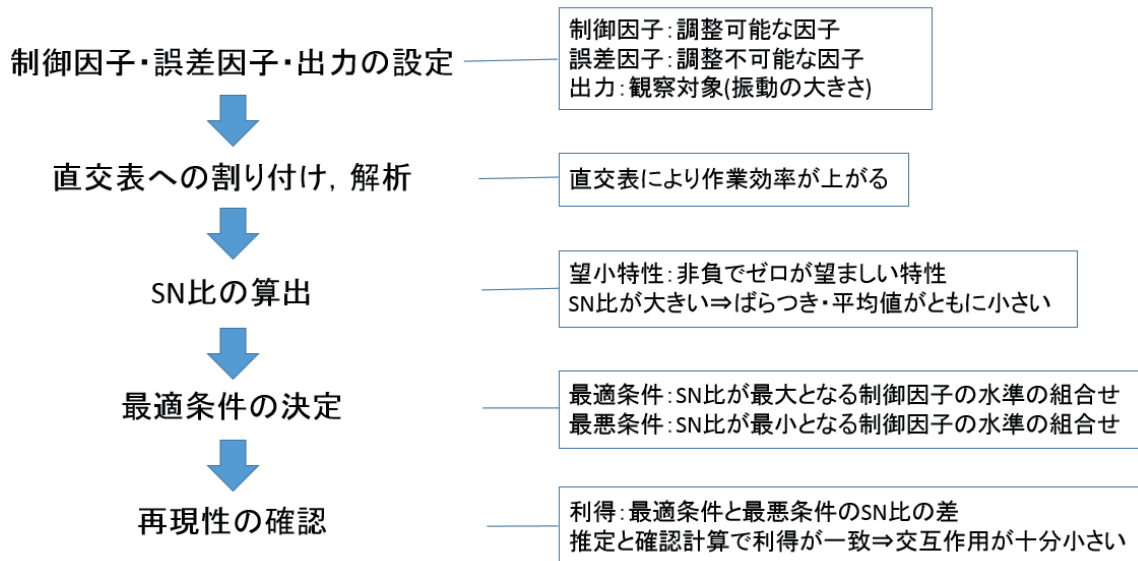


The University of Tokyo

パラメータ設計 概要

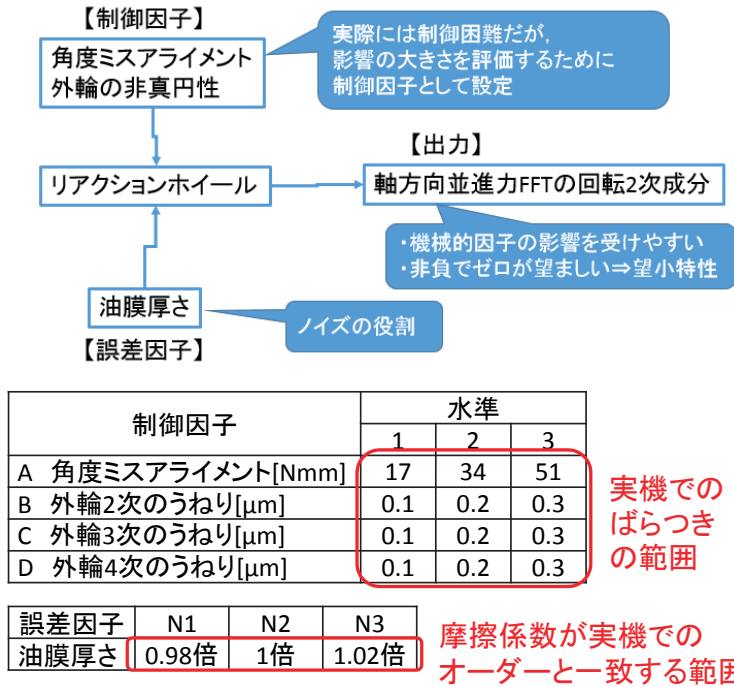
■ パラメータ設計

- 品質工学における設計手法
- 外乱によるばらつきを抑える設計を目指す



The University of Tokyo

パラメータ設計 手法



直交表

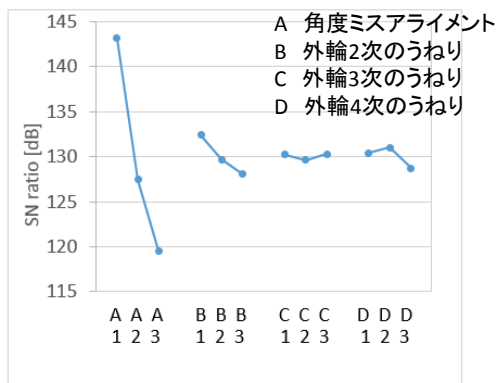
No.	A	B	C	D
1	1	1	1	1
2	1	2	2	2
3	1	3	3	3
4	2	1	2	3
5	2	2	3	1
6	2	3	1	2
7	3	1	3	2
8	3	2	1	3
9	3	3	2	1

9 × 3 = 27回の解析を行う



The University of Tokyo

パラメータ設計の結果の概略



各制御因子ごとのSN比に換算

	制御因子の組合せ				SN比[dB]	
	A	B	C	D	推定結果	確認計算結果
最適条件	1	1	3	2	48.57	48.55
最悪条件	3	3	2	3	39.06	39.02
利得					9.51	9.53

SN比への影響の大きさ=軸方向擾乱への影響の大きさ

角度ミスアライメント >> 外輪の非真円性

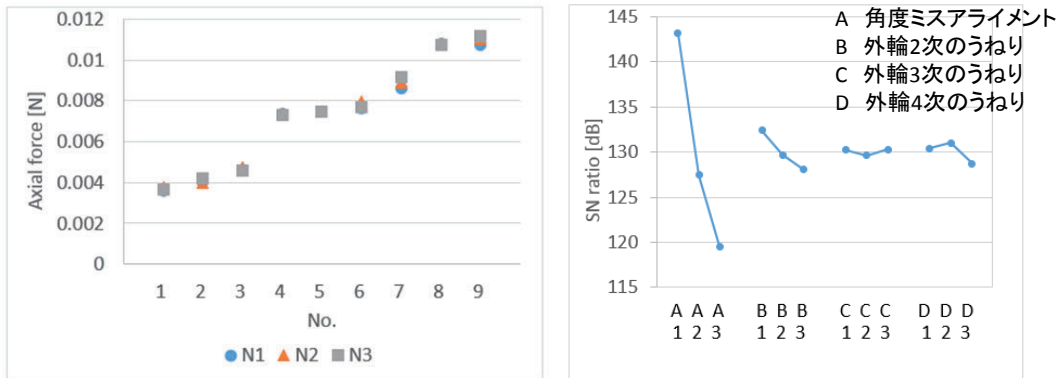
推定と確認計算で利得がほぼ一致→各制御因子間に交互作用はほぼ存在しない

→それぞれの機械的因子が独立に振動に影響する



The University of Tokyo

パラメータ設計 解析結果とSN比



各制御因子ごとのSN比に換算

SN比への影響の大きさ=軸方向擾乱への影響の大きさ
角度ミスアライメント >> 外輪の非真円性



パラメータ設計 再現性の確認

	制御因子の組合せ				SN比[dB]	
	A	B	C	D	推定結果	確認計算結果
最適条件	1	1	3	2	48.57	48.55
最悪条件	3	3	2	3	39.06	39.02
利得					9.51	9.53

- 外輪の3次, 4次のうねり(C, D)は小さいほどよいという結果にならなかった
 - 影響がほぼないため, どの値でも関係がない
- 推定と確認計算で利得がほぼ一致
 - 各制御因子間に交互作用はほぼ存在しない
 - ⇒ **それぞれの機械的因子が独立に振動に影響する**



発表内容

1. 背景と目的
2. モーダル解析
3. 機械的因子による振動のメカニズム
4. リアクションホイールへの応用
5. パラメータ設計
6. 結論



The University of Tokyo

結論

- 機械的因子が軸受の軸方向振動に影響を及ぼすメカニズムを明らかにした
 - 内外輪の角度ミスアライメントは回転2次成分の振動にもっとも強く影響する
 - 内外輪のうねりの次数が一致すると軸方向振動が発生する
- 軸受ユニットの角方向, 軸方向振動はともにリアクションホイールの軸方向擾乱を招く
- パラメータ設計によってリアクションホイールの設計指針を提案した
 - 角度ミスアライメントは外輪真円度よりも優先的に抑えるべき因子である
 - 角度ミスアライメントと外輪の各次数のうねりはほぼ独立な因子である



The University of Tokyo

人工衛星打ち上げ時に形成される 軸受圧痕が振動擾乱に及ぼす影響

東京大学大学院 工学系研究科 機械工学専攻
 浅川悟大、小杉祐紀、波田野明日可、泉聡志、酒井信介
 JAXA研究開発部門 間庭和聡、小原新吾
 エムエスシーソフトウェア 山中 孝司



先行研究と課題

◎ 打上げ振動を模擬した加振試験 [1]

- ▶ リアクションホイールの簡略化モデルを加振試験
- ▶ 様々なパラメータの振動条件と圧痕形成の関係性を示した
- ▶ 加振中の軸受内部の接触力および挙動を明らかにした

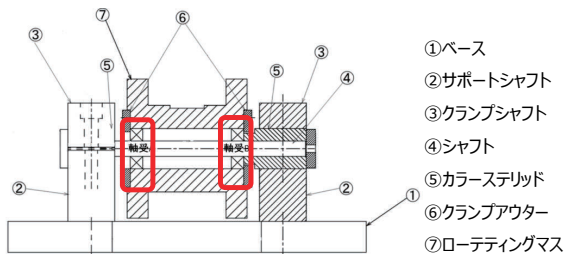


図.リアクションホイールの簡略化モデル

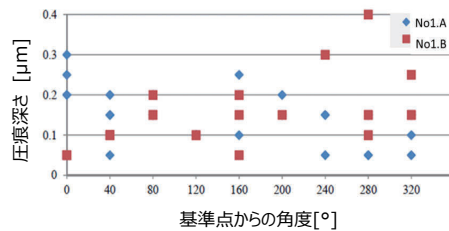
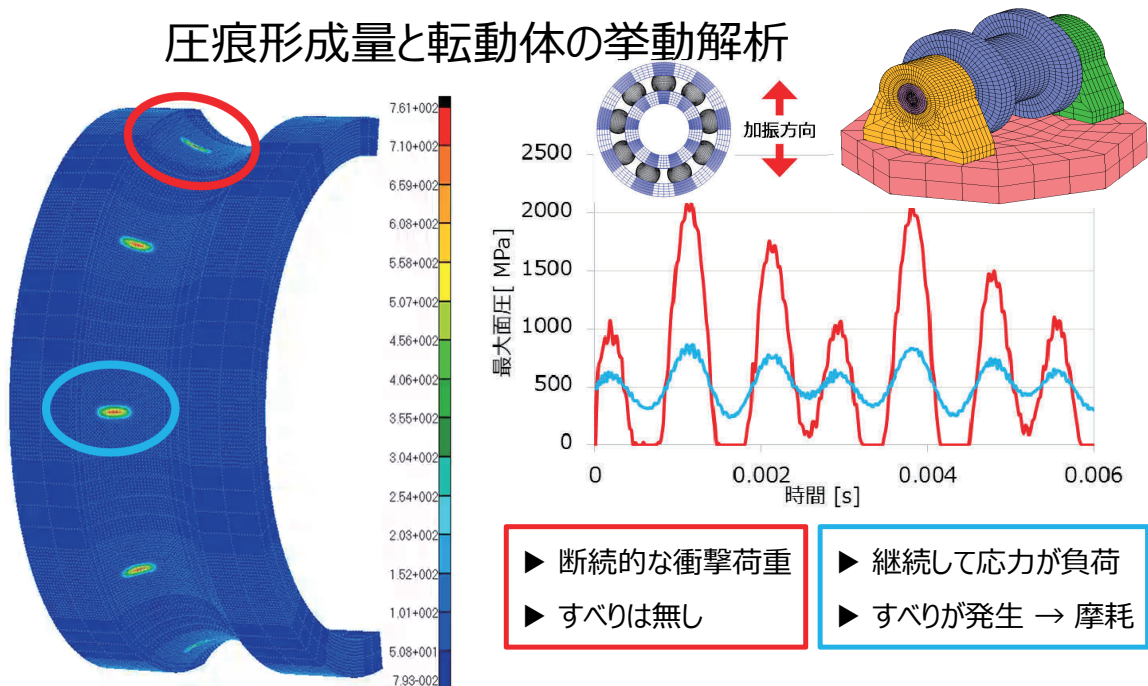


図.内輪に形成された圧痕数と深さ

課題	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 加振中の転動体/内外輪の圧痕形成量が未知 ▶ 定量的な予測には至っていない
-----------	--

[1] 星加幹, 打上げ環境下における高精度アンギュラ玉軸受の圧痕生成メカニズム, 首都大学東京大学院修士論文, 2012

振動衝撃を受ける宇宙機器用アンギュラ玉軸受の 圧痕形成量と転動体の挙動解析



動画：内輪に生じる相当応力
(MSC Dytran)

➔ 加振方向に対する転動体の位置により、
圧痕形成メカニズムが異なる可能性