

衛星姿勢制御用リアクションホイールの擾乱解析^{*1}

Disturbance Analysis of Reaction Wheel for Satellite Attitude Control

谷脇滋宗^{*2}, 工藤雅仁^{*3}, 里誠^{*4}, 狼嘉彰^{*5}

Shigemune TANIWAKI^{*2}, Masahito KUDO^{*3}, Makoto SATO^{*4}, Yoshiaki OHKAMI^{*5}

Dynamics of a ball bearing retainer of the reaction wheel is investigated through experimental tests and numerical simulations. Disturbances of normal and abnormal RWs are compared, and then relation between retainer mass imbalances and their dynamics are investigated. As results, a trade-off relation between instability reduction and disturbance reduction is verified and one of the criteria to decide the appropriate mass imbalance is proposed.

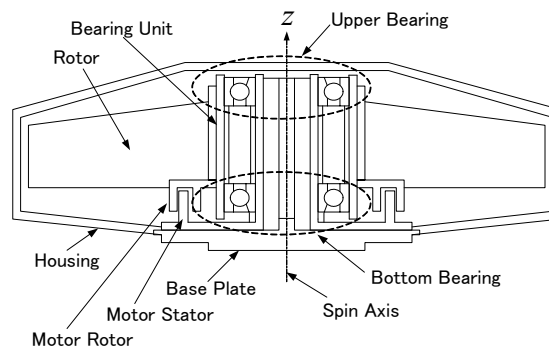
Key Words: Reaction Wheel, Disturbance, Ball Bearing, Retainer Instability, Spacecraft

1. 緒 論

衛星を高精度に姿勢制御する場合、アクチュエータとしてリアクションホイール (RW) を用いるのが一般的であるが、RWは主要な内部擾乱源でもある^{[1]-[5]}。図1に技術試験衛星VI型 (ETS-VI) や通信放送技術衛星 (COMETS) などに搭載されたものと同型のRWの概観と内部構造を示す。ロータをボールベアリングで支持し、ロータを加減速することでスピニング軸回りの制御トルクを発生し、またある角速度に保持することで角運動量を蓄積する機能を実現している。制御トルク以外の不確定あるいは不要な並進力やトルクが衛星の姿勢安定度を劣化させる擾乱として働く。RWの擾乱の主要因としてロータの質量アンバランスが挙げられるが、特にボールベアリング式の場合は、これに加えてベアリングの構造的制約や欠陥に起因するものがある^{[3]-[5]}。ロータの質量アンバランスに起因する擾乱は、単一剛体の1軸まわりの回転運動として精度よくモデル化され、ロータ質量中



(a) Configuration



(b) Inner structure

Fig.1 RW

^{*1} 日本機械学会論文集 (C編) 第71巻 第701号(2005)pp.21-28 投稿原稿より引用

^{*2} 松山市文京町3 愛媛大学大学院理工学研究科 (Graduate School of Science and Engineering, Ehime University)

^{*3} 三菱スペース・ソフトウェア株式会社 (Mitsubishi Space Software Co. LTD.)

^{*4} 宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency)

^{*5} 慶應義塾大学 (Keio University)

平成18年11月2日 受付, 平成19年1月31日 受理

心がスピン軸からオフセットしていることによって生じるスタティックアンバランスと、ロータ慣性主軸がスピン軸から傾斜していることによって生じるダイナミックアンバランスとして容易に説明される。一方、ボールベアリングの構造に起因する擾乱は、さまざまなボールベアリング式RWにおいて、ボールの間隔を保持するための機構部品であるリテーナの回転周波数と観測される擾乱周波数とが同期することから実験的に確認されているが、詳細な擾乱発生メカニズムについては不明な点が多い。また、ベアリング単体の詳細な数学モデルを構築してリテーナインスタビリティなどの現象を数値解析する試みもいくつかなされているが^{[6]-[9]}、RWシステムとして発生する擾乱レベルを解析的に評価した例は見当たらない。

そこで本研究では、同一のベアリング構造を有する4台のRWについて擾乱を実測・解析するとともに、RWの数学モデルにより、内部構造と発生擾乱との因果関係を調べる。擾乱実測に際しては、著者らが開発した1次元空気浮上式擾乱測定装置^{[10]-[12]}を用いる。本装置により、0.1～10 Hzの低周波数帯域の並進力を 1×10^{-4} Nオーダーで評価することが可能である。さらに、数学モデルは、ベアリングのボールと内外輪との非線形弾性接触、ボールおよび内輪との接触によるリテーナの非ホロノミック拘束、ハウジングの柔軟構造を考慮するものである。リテーナの質量アンバランスをパラメータ化して数値シミュレーションを実施し、比較解析を行う。さらにこれらの結果を踏まえ、リテーナのインスタビリティ抑制と擾乱抑制に効果的なリテーナの質量特性の決定法について提言する。

2. 擾乱実測

2.1 1次元空気浮上式擾乱測定装置^{[10]-[12]}

図2に擾乱測定装置の外観を示す。本装置は、その測定原理から、1次元空気浮上式擾乱測定装置と呼ぶ。供試体RWは並進1自由度方向の運動がフリーのエアスライドに取り付けられ、RWの発生する擾乱によって生じるスライド部の変位をレーザ変位計によって測定し、変位量から擾乱力を逆算するものである。

エアスライド部の構成は、直方体形状のブロックの側面2面、底面1面の各面をエアパッドで支持するようになっており、これにより、並進1自由度方向のみ低摩擦でスライド可能な構造とした。さらに、スライド方向を弱いバネで支持し、復元力をもたせた。スライド部の運動は、1自由度のバネ・ダンパ・マス系として定式化できる。これに正弦波状の外力が作用したときの変位応答と入力との関係は次式で表される。

$$F = X \sqrt{(k - m\omega^2)^2 + (c\omega)^2} \quad (1)$$

ただし、 m は浮上部全体の質量、 k はバネ定数、 c はダンパ定数、 X はスライド部の変位振幅、 F は擾乱振幅、 ω は擾乱周波数を意味する。擾乱測定に先立ち、 m の値は質量計で計測し、 k と c の値は浮上部全体の自由減衰波形より同定しておく。レーザ変位計によって測定したスライド部変位の時系列データをFFT解析し、得られた ω と X の組を式(1)に代入することで、 F が求められる。

擾乱測定装置のバックグラウンドノイズと感度特性の目安を図3に示す。ただし、バックグラウンドノイズは、供試体を停止した状態で浮上部の変位を測定し、これを式(1)に従い擾乱力に換算したものである。これは、床面や周辺大気から伝わる環境外乱や擾乱測定装置そのものが空気圧振動により発生する擾乱を表す。また、感度特性は、レーザ変位計の仕様分解能を式(1)の X として代入し、各周波数

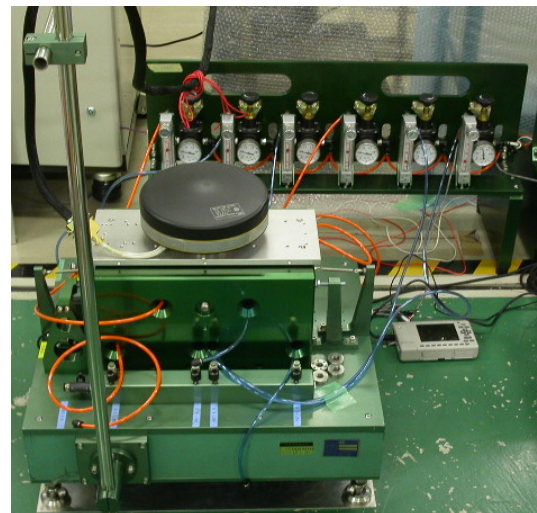


Fig.2 1-d.o.f. Air-Floating Disturbance Detector

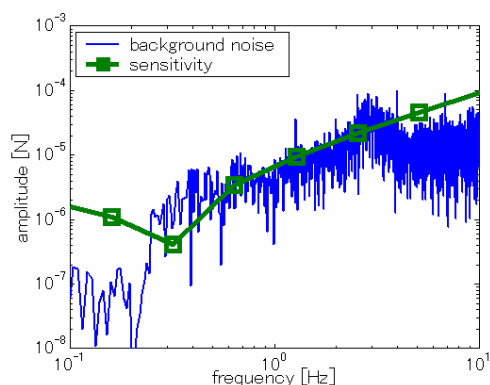


Fig.3 Detectable Disturbance Level

Table1. Specification of RWs

SRW-A,B	Torque	-0.12 to 0.12 [N]
	Momentum	-6 to 6 [Nms]
	Angular Velocity	-3500 to 3500 [rpm]
LRW-A,B	Torque	-0.12 to 0.12 [N]
	Momentum	-30 to 30 [Nms]
	Angular Velocity	-4000 to 4000 [rpm]

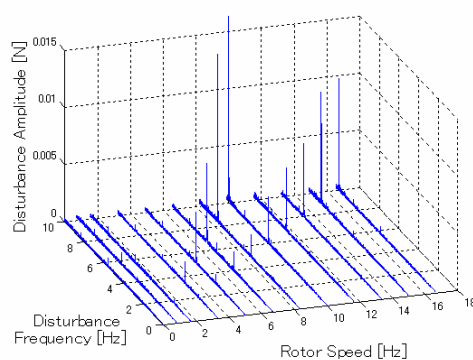
ω に対する F を求めたものである。これは、レーザ変位計単体の仕様から決まる擾乱測定限界の目安である。これらの曲線から、0.1～10 Hz の低周波数帯域において 1×10^{-4} N の擾乱測定精度があることが確認できる。

2.2 供試体 RW

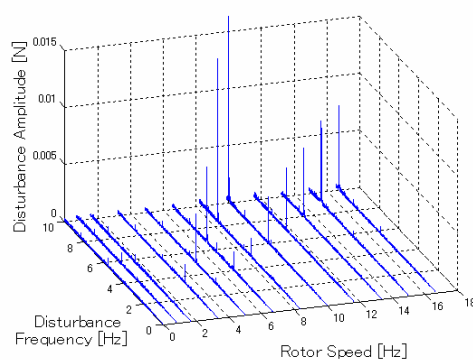
表 1 に示す 4 台の RW (SRW-A, SRW-B, LRW-A, LRW-B) を供試体として用いる。SRW-A,B に対して LRW-A,B は大型のロータおよびハウジングを有しているが、いずれも図 1(b) に示す内部構造を有しており、ベアリングについては同一設計である。ただし、LRW-B については、動作確認試験においてリテーナインスタビリティ^{[6]-[9]}と呼ばれるリテーナの振動現象に典型的なジャージャー、ガーガーと響く狭帯域の音響が確認されている。リテーナインスタビリティの発生頻度、振動・音響の強さは大小さまざまであり一概に異常と判断されるものではないが、場合によっては RW の機能・性能・信頼性 (寿命) を劣化させる要因やその兆候であることが経験的に知られている。

2.3 擾乱実測結果

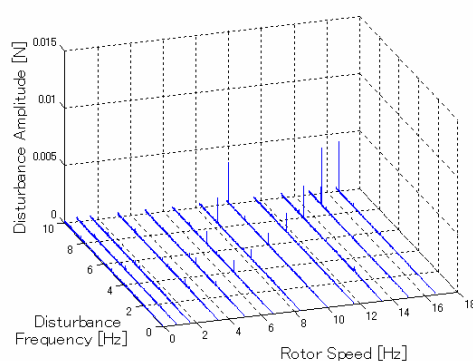
各 RW について 50～1000 rpm (0.83～16.67 Hz) のロータ角速度で定常回転させ、スピンドル軸と直交する方向の並進力を測定した。各角速度において 200Hz で 3 分間サンプリングした変位データを 2.1 節で述べ



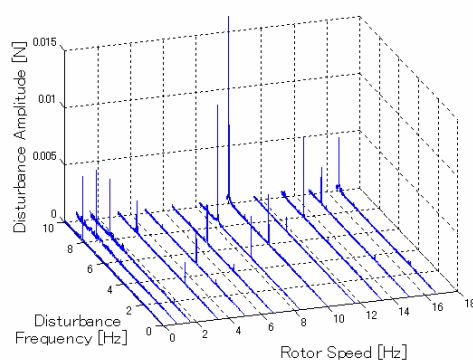
(a) SRW-A



(b) SRW-B



(c) LRW-A



(d) LRW-B

Fig.4 Disturbances

た手順により並進力に換算した。また、バックグラウンドノイズ評価のために回転停止時のデータも測定した。これらの結果を図4に示す。いずれのRWも、回転周波数と同期するロータのスタティックアンバランスと回転周波数の0.6倍の擾乱が際立っている。後者の擾乱は、その周波数がボールと内外輪の寸法より幾何学的に計算されるボールの公転周波数、すなわちリテーナの回転周波数と一致することから、リテーナに起因する擾乱と考えられる。また、回転周波数とは無関係のピークが所々に見られるが、回転停止時のピークの周波数と一致していることから、バックグラウンドノイズと考えられる。

次に、回転周波数の0.6倍の擾乱、すなわちリテーナの動的挙動に起因すると考えられる擾乱のピークを抽出し、4台のRWについてまとめて図5にプロットする。また同図に、理想的な形状と均質な質量分布をもつ仮想的なリテーナが、内輪やボールとの隙間の距離だけスピ軸から半径方向にオフセットしているものと仮定して計算される遠心力をノミナルスタティックアンバランスと名づけてプロットする。いずれのRWも大局的には角速度の増加とともに擾乱振幅の増加傾向が見られオーダ的にはノミナルスタティックアンバランスと一致するが、局所的には角速度の増加とともに擾乱振幅の凹凸が認められ、ノミナルスタティックアンバランスのような放物線にはならない。特にリテーナインスタビリティが異音として確認されたLRW-Bについては、凹凸が他と比べて顕著である。

上記のような実測結果から、リテーナに起因する擾乱の発生メカニズムは、ロータの発生するスタティックアンバランスのように、単一軸まわりの回転運動による遠心力としては説明が困難である。そこで次の3節では、リテーナやRW全体の詳細な数学モデルによるシミュレーションによって擾乱発生メカニズムを解析した結果を示す。

3. 数値シミュレーション解析

3.1 数学モデル概要

数学モデルは、ベアリングのボールと内外輪との非線形弾性接触、ボールおよび内輪との接触によるリテーナの非ホロミック拘束、ハウジングの柔軟構造を考慮するものである。

(a) ボールと内外輪との弾性接触 RWの内部構造は、図1(b)に示すように2個のベアリングを一体化したベアリングユニットの内側のシャフトがベースプレートに片持支持され、ユニットの側面がロータを支持するようになっている。また、ベアリング内外輪とボールとの隙間を取り除くために与圧が加えられるが、この値は数10N程度と一般のベアリングよりも弱めである。これは、RWの場合スピ軸まわりのロストルクも極力抑制する必要があるためである。したがって、機構部品の中で内外輪とボールとの接触部の剛性は比較的低い。そこで、図6のような数学モデルを考え、ベアリングユニットの外側のシャフト、上下2組のベアリングの外輪、ロータは単一剛体として運動し、これとは独

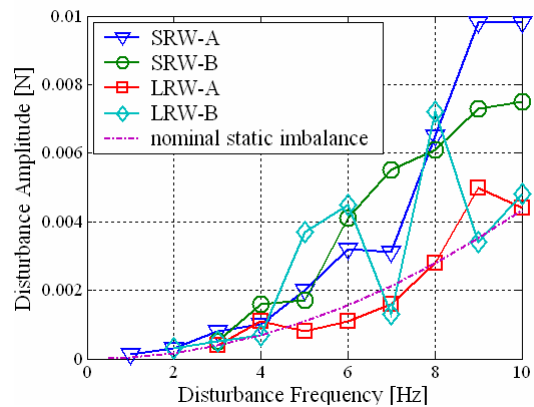


Fig.5 Disturbances (balls and retainer spin frequencies)

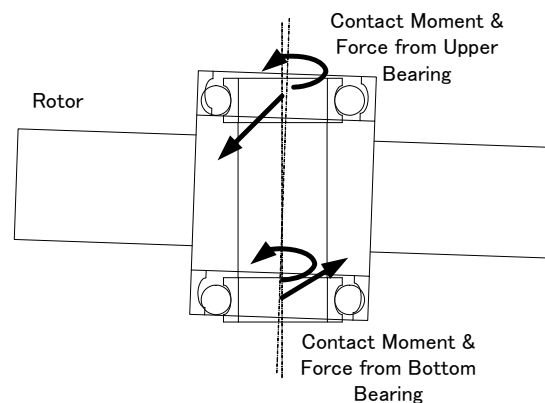


Fig.6 Rotor dynamics and ball contact model

立にベアリングユニットの内側のシャフト，上下 2 組のベアリングの内輪も単一剛体として運動し，その下端がベースプレートの構成部材に弾性的に結合されるものとする。さらに，上下ベアリングに 12 個ずつ含まれるボール個々の接触力が，内外輪に対して相互に作用するものとする。したがって，接触力を計算するとき，ボールの公転運動による接触点の移動量を求める必要があるが，これについてはボールおよび内外輪の幾何学的寸法に従い，キネマティックに計算するものとする。また，ボールと内外輪との接触部はいずれも曲面であることから，ヘルツの方法により接触力を計算するものとする。ヘルツの方法は，以下の仮定に基づくものである。

- ・ 接触部は，楕円面となる。
- ・ 接触楕円の大きさは，物体の主曲率半径に比べ，十分に小さい。
- ・ 接触面には垂直応力のみ働く。
- ・ 両物体とも弾性域にある。

RW のベアリングは，先に述べたように低圧で与圧されており，またオイル潤滑によってもロストルクが極めて低く抑えられている，すなわち接触面内方向の摩擦が小さいため，上記のような仮定は妥当である。詳細な計算方法は，文献[10]に示す。

(b) リテーナの非ホロノミック拘束 リテーナは，ボールの間隔を一定に保持する機能を有するが，ボールの自転運動や，内輪とリテーナとの相対回転運動を妨げないようにするため，ボール直径に対するリテーナのポケット寸法や，内輪軌道面直径に対するリテーナ内面直径に余裕を持たせている。そこでリテーナの運動は，スピン軸回りの 1 自由度回転運動とスピン軸直交面内の 2 自由度並進運動を考慮した 3 次の動力学方程式を，ボールおよび内輪に対するリテーナの相対変位を考慮した非ホロノミックな拘束条件のもと解くものとする。図 7 に，接触状態を計算するための形状モデルを示す。接触面垂直方向の反発力については相対変位に関し非線形なバネ力としてモデル化し，接触面内での相互力は，相対速度に比例する摩擦力としてモデル化する。

(c) ハウジングの柔軟構造 ロータやリテーナが発生する擾乱の外部への伝達特性は，ハウジングの柔軟構造特性に起因して周波数依存性がある。そこで，有限要素法により求めた低次の振動モードと，ロータやリテーナの運動との連成解析を行う。図 8 にハウジングのメッシュモデルを示す。中央に見えるのが図 7 のベアリング部である。モード解析によって得られる低次から 7 個の振動モード，約 250Hz から 1000Hz までを動力学解析に用いる。

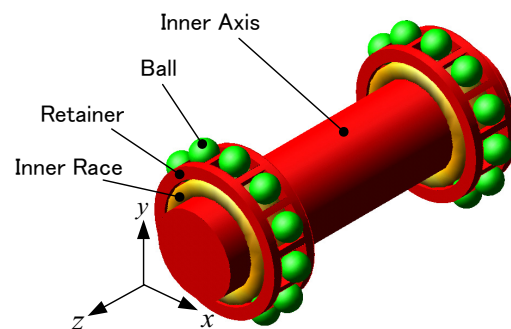


Fig.7 Bearing shape model

3.2 擾乱計算結果

2 節の実験に用いた RW のリテーナの材質は，コットンフェノリックと呼ばれる繊維質を樹脂で固めたものであり，繊維の隙間に潤滑剤であるオイルを保持する構造になっている^[13]。したがって，繊維密度やオイル分布の不均一性によって，リテーナの質量中心は幾何学的中心からオフセットをもつことになる。これを考慮し，リテーナ質量中心のオフセット量をパラメータ化した数値解析を行う。

ロータが 600rpm で定常回転している場合を例に，質量中心のオフセットがない場合の計算結果を図

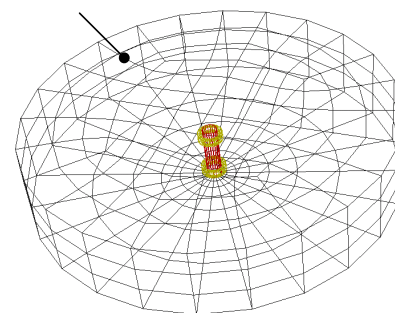


Fig.8 Housing FEM model

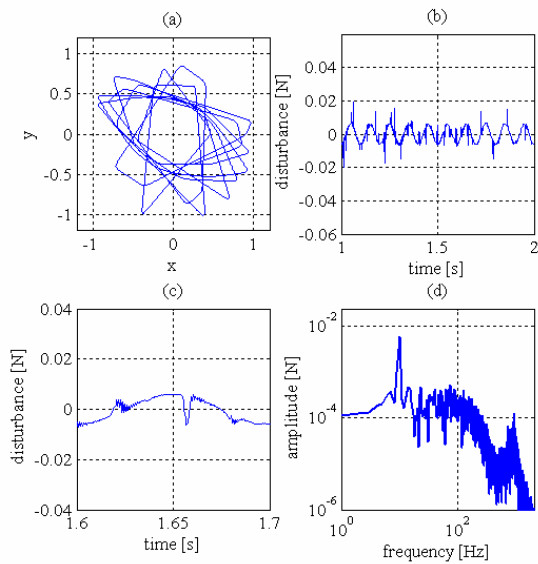


Fig.9 Simulation results
(C.M. offset: none, Rotor speed: 600rpm)

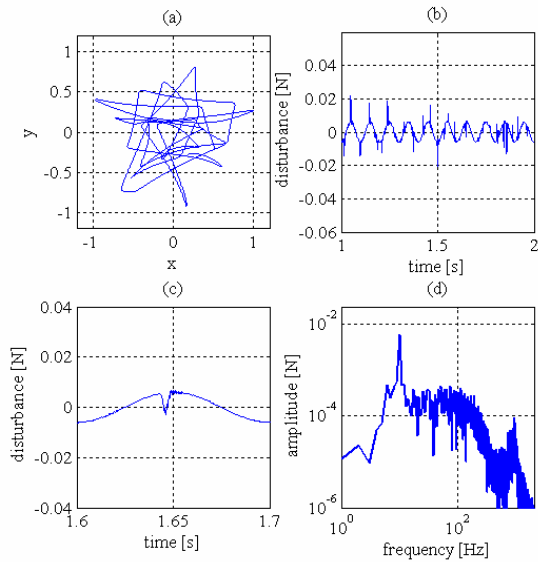


Fig.10 Simulation results
(C.M. offset: 0.31, Rotor speed: 600rpm)

リテーナがボールや内輪と非接触状態においても幾何学的中心が非直線的な軌跡を描くのは、質量中心のオフセットにより回転運動と並進運動が干渉するためである。また、オフセットと擾乱力との関係は、図 (d)の周波数特性から明らかなように、オフセット量が大きくなるとリテーナの回転周波数 6 Hz と同期する擾乱成分が大きくなる。

次に、ロータが 1000rpm で定常回転し、かつ質量中心の無次元化したオフセット量が 1.56 である場合の計算結果を図 13 に示す。図 11 と比較し、幾何学的中心の回転半径が安定していることがわかる。角速度の増加に従い回転半径が安定化される傾向は、文献[6],[7]において実験的にも確認されている。また、図 13 (b),(c)の擾乱力の時系列波形をみると、リテーナ対ボール、またはリテーナ対内輪の接触時間とロータ回転周期が近接しており、リテーナの衝突による擾乱とスタティックアンバランスによる擾乱の区分が困難になっている。しかし、図 13 (d)の周波数特性をみると、スタティックアンバラン

9 に示す。図 9 (a)は、慣性座標系からみたスピン軸直交面内のリテーナの幾何学的中心の軌跡を、スピン軸の中立点を原点として 1s 間プロットしたものである。ただし、リテーナはボールおよび内輪との接触によってほぼ円形の領域に拘束され、図 9 (a)の縦横両軸のスケールは、この円の半径で除して無次元化したものである。図 9 (a)より、リテーナは中立点から半径方向に無次元距離 1 移動したところで、ボールまたは内輪と接触・衝突し、速度ベクトルが折り返されるような運動を繰り返しているようすがわかる。次に図 9 (b)は、慣性系に固定されたスピン軸直交方向の並進力擾乱を、(a)と対応する時刻のものについて時系列表示したものである。リテーナの衝突によって発生するインパルス的な擾乱が、ロータのスタティックアンバランスによって生じる正弦波状の擾乱に重畳されていることがわかる。図 9 (c)は(b)を拡大したものであり、衝突を引き金として約 800Hz の高い周波数の擾乱が過渡的に生じていることがわかる。これは、ハウジングおよびボールの弾性振動モードが励起されたことによるものである。図 9 (d)は(b)の周波数特性である。10 Hz のピークはスタティックアンバランス、800Hz のピークはリテーナの衝突によって励起された弾性振動による擾乱である。しかし、本シミュレーションケースからは、リテーナのスピン軸回りの回転周波数と同期する 6 Hz の擾乱は確認できなかった。

次に、ロータが 600rpm で定常回転し、かつ質量中心の無次元化したオフセット量が 0.31, 1.56, 3.13 である場合の計算結果をそれぞれ図 10~12 に示す。図(a)を比較すると、オフセットが大きい方が、幾何学的中心が回転運動する傾向にあり、その回転半径が安定することがわかる。なお、リ

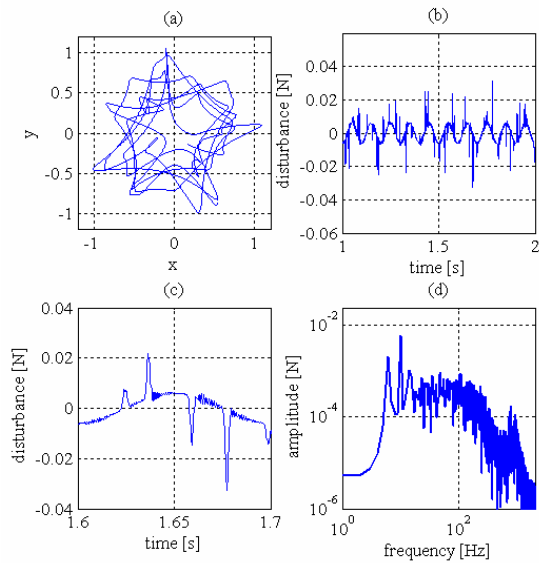


Fig.11 Simulation results
(C.M. offset: 1.56, Rotor speed: 600rpm)

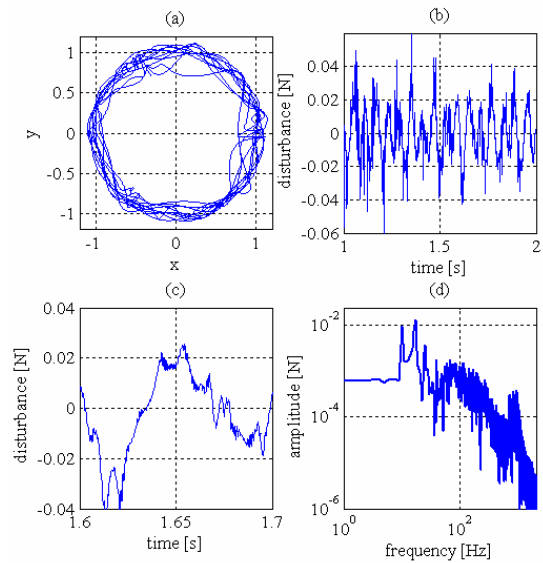


Fig.13 Simulation results
(C.M. offset: 1.56, Rotor speed: 1000rpm)

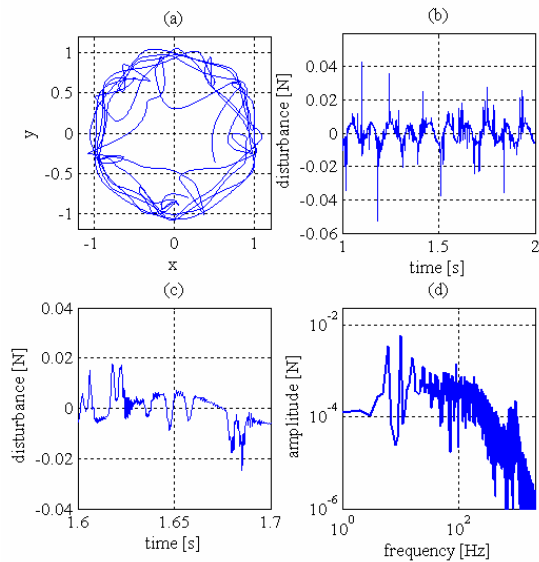


Fig.12 Simulation results
(C.M. offset: 3.13, Rotor speed: 600rpm)

スによる 17Hz の擾乱ピークとリテーナの回転周波数に同期する 10Hz の擾乱ピークが確認できる。

以上の計算結果より、リテーナの質量中心のオフセットが大きくなるに従い、リテーナの幾何学的中心の回転半径は安定するが、擾乱力は大きくなることがわかる。したがって、質量中心をオフセットさせることは、リテーナインスタビリティを抑制するために有効であるが、低周波の擾乱力を増加させる要因となることがわかる。文献[6],[14]の研究では、リテーナ質量中心のオフセットを積極的に利用してリテーナインスタビリティを抑制することが試みられており、ポケット寸法や摩擦特性をパラメータ化した数値計算により最適化を図っているが、擾乱力については言及していない。次節では、両者の観点で質量中心のオフセット量を規定する方法について述べる。

4. 提 言

本節では、リテーナ質量中心のオフセット量を、インスタビリティ抑制と擾乱力抑制の両面から決定する方法について述べる。

4.1 解析的考察

図 14 は、スピン軸直交平面内のリテーナの幾何学的中心と質量中心の関係を示したものである。リテーナの幾何学的中心が、ボールおよび内輪との接触によって拘束される可動範囲境界の半径を a とする。また、リテーナ質量中心のオフセット量を b とする。

$$2a < b \quad (2)$$

を満たすようにオフセット量を規定した場合、質量中心が幾何学的中心の可動範囲の外ある一方で、ジャイロ効果によってリテーナ全体が質量中心回りに回転しようとするため、リテーナには常に可動範囲境界に押し付けられる方向に力が働くこととなる。したがって、幾何学的中心は可動範囲境界に沿って安定した回転半径の軌跡を描く、すなわちリテーナインスタビリティが抑制される。しかし、 b を大きくすると遠心力による擾乱が大きくなるため、この上限についても言及する。リテーナの質量を m_R 、リテーナの角速度を ω_R とすると、安定した回転半径のもとのリテーナの遠心力は

$$m_R(a+b)\omega_R^2 \quad (3)$$

と考えることができる。したがって、許容される擾乱力が ω_R^2 の係数 α として要求されるとき、

$$m_R(a+b)\omega_R^2 < \alpha\omega_R^2 \quad (4)$$

を満たす必要がある。式(2),(4)を合わせると、リテーナ質量中心のオフセット量の規定条件

$$2 < \frac{b}{a} < \frac{\alpha}{am_R} - 1 \quad (5)$$

が得られる。

4.2 数値解析例

幾何学的中心の可動範囲境界の半径で質量中心オフセット量を無次元化した値 b/a をパラメータ化し、0~3.2の範囲でリテーナインスタビリティと擾乱力を評価した結果を図15に示す。ただし、図15(a)のリテーナインスタビリティは幾何学的中心の回転半径の標準偏差を b で無次元化した値を指標とし、図15(b)の擾乱力は周波数解析結果よりリテーナ回転周波数と同期する擾乱の振幅を抽出したものである。また、図15(b)には、式(3)で計算される擾乱力の予測値についても破線で示す。図15(a)より、いずれのロータ角速度においても $b/a \leq 1$ である場合は回転半径の変動が大きいが、ロータ角速度が 600rpm の場合は $b/a \geq 1.8$ において、1000rpm の場合は $b/a \geq 1.2$ において比較的回転半径が安定することがわかる。一方、図15(b)より、オフセット量の増加、およびロータ角速度の増加にともない、擾乱力が增大するが、オフセット量の増加によりリテーナ幾何学的中心の回転半径が安定化されるに従い、予測値に近づくことがわかる。以上より、リテーナ質量中心のオフセット量の規定条件として式(5)が有効であり、リテーナインスタビリティ抑制と低

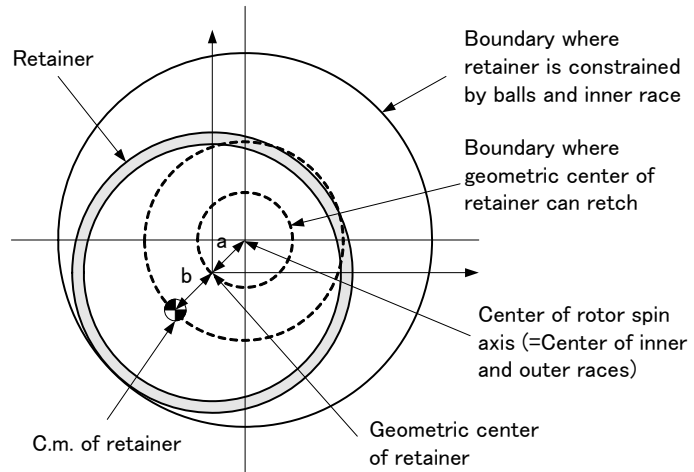
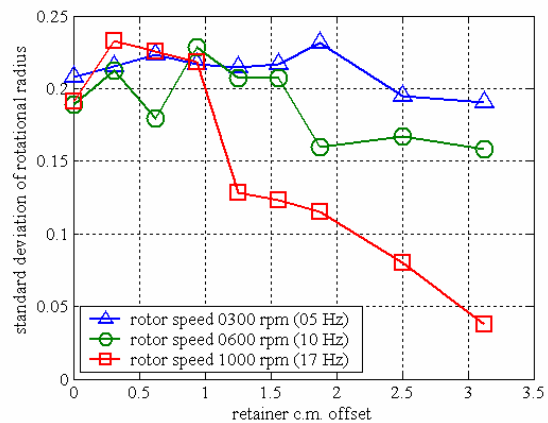
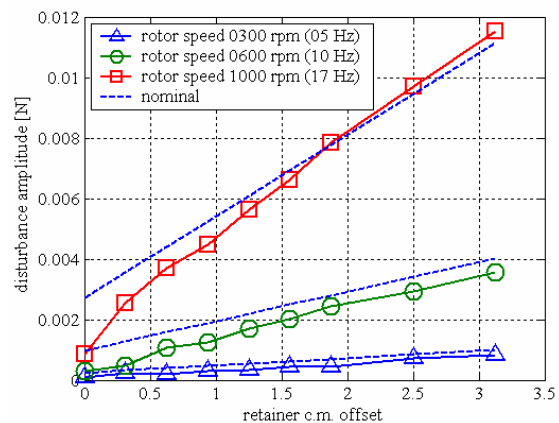


Fig.14 Retainer offset geometry



(a) stability



(b) disturbances

Fig.15 Retainer c.m. offset v.s. stability & disturbances

周波擾乱力抑制のトレードオフを図ることが可能である。

5. 結 論

本論文では、衛星姿勢制御用 RW の機構部品であるボールベアリング・リテーナの動的挙動に起因する擾乱について、実測および数値シミュレーションによって解析した結果について述べた。これらより、リテーナの質量中心のオフセットに対する、リテーナインスタビリティと擾乱力の関係を明らかにした。さらに質量中心のオフセットを積極的に利用し、インスタビリティ抑制と擾乱力抑制の両面からオフセット量を規定する方法について述べた。

文 献

- [1] 吉田憲正, 一本 潔, 小林健郎, 二宮敬虔, 橋本樹明 他: Solar-B における超高精度指向精度達成のためのシステム技術, 第 45 回宇宙科学技術連合講演会 (2001).
- [2] Nelson Pedreiro, Next Generation Space Telescope Pointing Stability, Denver (2000), AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference.
- [3] Bill Bialke, High Fidelity Mathematical Modeling of Reaction Wheel Performance, AAS98-063 (1998).
- [4] Bill Bialke, A Complication of Reaction Wheel Induced Spacecraft Disturbances, AAS97-038 (1997).
- [5] R. A. Masterson, D. W. Miller, R. L. Grogan, Development and Validation of Reaction Wheel Disturbance Models (Empirical Model), J. Sound and Vibration (2002), 249(3), 575-598.
- [6] Edward A. Boesiger, Mark H. Warner, Spin Bearing Retainer Design Optimization, Proceedings of the 25th Aerospace Mechanisms Symposium (1991), 161-178.
- [7] E.A. Boesiger, A.D. Donley, S. Loewenthal, An Analytical and Experimental Investigation of Ball Bearing Retainer Instabilities, J. of Tribology, Vol. 114 (1992), 530-539.
- [8] Bill Bialke, Experiences with Differentiation Ball Bearing Retainer Instabilities, Proceedings of the 32nd Aerospace Mechanisms Symposium (1998), 213-222.
- [9] J.W. Kannel, S.S. Bupara, A Simplified Model of Cage Motion in Angular Contact Bearings Operating in the EHD Lubrication Regime, J. of Lubrication Technology, Vol. 100 (1978), 395-403.
- [10] Shigemune Taniwaki, Yoshiaki Ohkami, Experimental and Numerical Analysis of Reaction Wheel Disturbances, JSME International Journal Series C (2003), Vol.46, No.2, 519-526.
- [11] 谷脇滋宗, リアクションホイールの内部擾乱管理の研究, 平成 14 年度宇宙開発事業団技術研究本部研究成果報告書(2003), 309-314.
- [12] 初鳥陽一, 狼嘉彰, 谷脇滋宗, 衛星姿勢制御用ホイールの振動的トルッキング時発生擾乱測定, 日本機械学会論文集 (C 編), Vol 70, No695(2004), pp1944-1950.
- [13] 里 誠, 市川信一郎, 佐々木彰, 小原新吾, 大原達也, ホイールの改良研究, 日本航空宇宙学会第 34 期年会講演会(2003), 航空宇宙技術研究所.
- [14] Peter L. Conley, Space Vehicle Mechanisms: Elements of Successful Design, Interscience(1998), 320.