

誘導制御機器の信頼性向上研究

Study on improvement for Guidance and Control Actuators/Sensors

次世代高性能ホイールの研究

Study on an advanced reaction wheel with high performance

システム誘導技術グループ 井澤克彦、市川信一郎、里誠
 マテリアル・機構技術グループ 小原新吾、佐々木彰

(Expert Group for Guidance, Control and Dynamics)

Katsuhiko Izawa, Shinichiro Ichikawa and Makoto Sato

(Expert Group for Mechanism and Materials Engineering)

Shingo Obara and Akira Sasaki

Abstract

We started developing an advanced reaction wheel based on a study for a reaction wheel with high torque and low disturbance characteristics since FY13. The advanced reaction wheel is characterized by small and high performance in comparison with a current domestic wheel and will be supplied to various satellite missions. In FY15, we have completed primary designing and manufacturing a Bread Board Model(BBM) and have verified the BBM to comply requirements for the wheel. And we have studied on improvement for bearing lubricant system and wheel rotor design. This paper describes summary for these studies and study plan in FY16.

1. はじめに

観測ミッションにおける姿勢指向精度・安定精度要求が高精度化し[1], さらに一般衛星からも搭載機器への熱・機械環境要求が厳しくなっており, 姿勢制御用アクチュエータであるリアクションホイールに求められる高トルク, 低擾乱, 高耐振動性, 広使用温度域等に対する要求は近年高度化しつつある。従来型国産リアクションホイールでは信頼性を保ちつつ, これら高性能化要求を達成するのは困難であることが判明し, 高性能化・高信頼化に必要な基盤技術(軸受・潤滑システム, 高耐振動構造設計, 高トルク低リップルモータなど)を基礎から新規に開発する必要があることが明確になった (Fig.1 に高トルク・低擾乱ホイール構造の概要を示す)。

これを受け, 平成13年度より, 宇宙3機関(旧宇宙科学研究所, 旧航空宇宙技術研究所, 旧宇宙開発事業団)連携協力事業の一環として, 将来の観測衛星への応用を目標とした「高トルク・低擾乱ホイールの研究」を開始し, 平成14年度には研究モデルの試作・評価を通して開発仕様を満足することを確認し, 高トルク・低擾乱ホイールの開発に目処を付けた[2]。平成15年

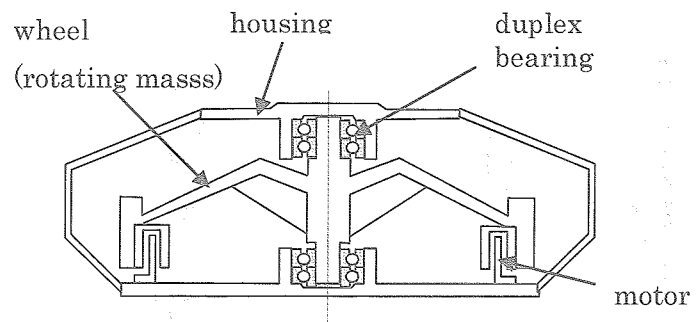


Fig.1 Architecture of a reaction wheel with high torque and low disturbance characteristics

度からは、更なる信頼性向上を目的に、軸受・潤滑システム、高耐振動構造設計に関するホイール改良研究を開始した。また、同平成15年度からはホイール改良研究に並行して、高トルク・低擾乱ホイールの成果をベースに、一般衛星向けの次世代ホイール（以下、高速回転ホイールとよぶ）の開発に着手した。

本報告では、平成15年度に実施した、ホイール改良研究、高速回転ホイールの基本設計、試作モデル製作・評価の成果、さらに平成16年度の研究計画について報告する。

2. 研究の概要

平成15年度は大きく以下の2つの研究項目を実施した。

- ① ホイール改良研究
- ② 高速回転ホイール開発研究

①のホイール改良研究は、開発仕様をすべて満足するものの、ベアリング・潤滑システム、高耐振動構造設計に信頼性向上の観点から改良すべき点が見出され、改良に取り組んだものである。機構内外の有識者の協力を得て、信頼性向上案を立案・評価し、ホイール設計に反映した。

②は①を含めた高トルク・低擾乱ホイールの成果をベースに、一般衛星向けに高トルク仕様を緩和し、小型・軽量かつ高性能なホイールの開発を開始した。試作モデルを製作・評価し、開発仕様を満足することを確認した。

3. 成果の概要

3・1 ホイール改良研究

3. 1. 1 ベアリング・潤滑システム信頼性向上研究

ベアリング・潤滑システム信頼性評価試験の準備・試験工程において、オイルの白濁化(Fig.2)、ベアリングボールの濡れ不良（デウェッティング）現象(Fig.3)が確認された。

オイル白濁化については、白濁化していないオイルと潤滑に係る物理特性を比較したが有意差は無かった。デウェッティング現象についても、試験中のベアリング潤滑特性値トレンド、試験後のベアリングボール・レース表面拡大顕微鏡観察に異常は見られず、また、運転中にベアリングボールとレース間に油膜が正常に形成されていることを接触電気抵抗測定法により確認した。これらより、両現象ともベアリング潤滑・磨耗特性に有害な影響を与えるものではないと判断されたが、信頼性向上の観点から、研究を実施した。

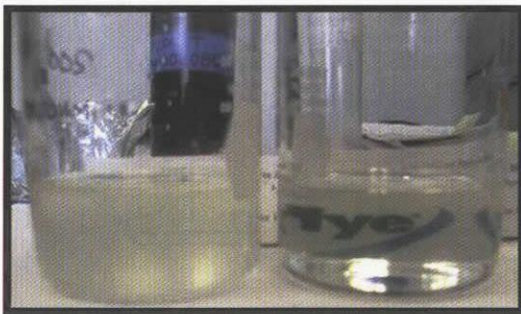


Fig.2 Clouded Oil(left)

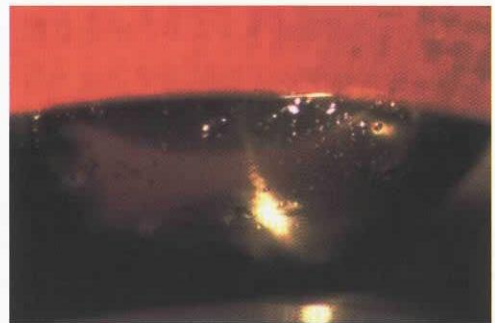


Fig.3 Dewetting Phenomenon on bearing ball

なお、本研究はマテリアル・機構技術グループ、及び、マテリアル・機構技術グループと油潤滑軸受に関する共同研究を実施している東京工業大学・益子研究室の協力を得て実施した。研究の詳細は、別

発表のマテリアル・機構技術グループ「油潤滑軸受のトライボロジー特性に関する研究」[3]に譲り、ここでは概要のみを述べる。

ーオイル白濁現象

オイルの白濁化については、オイル中に含まれる添加剤間の反応であるとの仮説の下、添加剤の組合わせ実験を実施した。結果、磨耗防止剤と酸化防止剤に含まれる硫黄の組み合わせが原因であることを突き止め、酸化防止能力、オイルへの溶解性、オイル潤滑特性への影響を試験にて評価した上で、硫黄を含まない別種の酸化防止剤に変更することとした。

ー濡れ不良（デウェッティング）現象

濡れ不良（デウェッティング）現象についても、機構内外の有識者の協力を得て原因究明に当たったが、原因の特定には至らなかった。原因究明は継続して実施することとし、国内外の文献、オイルメーカーコメントを参照し、ベアリングとオイルとの濡れ性向上策、更に、デウェッティングを含めた変化（一時的な油量増減などを想定）の影響を受け難くなるよう、ベアリング・潤滑システム内のオイルフロー／オイルサーキュレーションを強化する信頼性向上策を検討・評価した。前者については、ベアリング材のオイル・TCP（リン酸エステル）ソーキング（高温浸漬）、ホイール及び使用有機材のベーキング、後者についてはリテーナへのチャンネルグリース（オイル溜め）が有効であることが分かり、ベアリング・潤滑システム設計に反映した。

上記の信頼性向上策を反映したベアリング・潤滑システム設計／工程確立の検証を目的に、ベアリング・潤滑システム認定試験を平成16年度に実施する予定である。

3. 1. 2 耐振動性向上研究

平成14年度に、構造モデルを用いた振動試験により加速度応答データを取得し、これを構造解析結果とコリレーションし、クリティカル部位であるベアリングに負荷される荷重及び安全マージンを推定した。安全マージンの算出においては、精密回転、寿命を考慮して従来ホイールでの経験から安全係数(2)を設定している。QTレベルのランダム振動において、アキシャル方向加振では十分なマージンを有するものの、ラジアル方向加振では余裕がほとんどないことが判明した（Table.1）。同時に、原因がラジアル加振においてロータの共振倍率が高い構造にあることが分かった。平成15年度は、共振倍率の低減策を調査・検討した。すべり摩擦等を利用した構造減衰、及びマスダンパ等の付加ダンパ機構はロータアライメントを変動させる恐れがあり低擾乱要求から採用が難しいと判断した。材料減衰に期待し、ロータの材質をこれまでのチタン合金からステンレス材に変更することとした。変更によるトレードオフをTable.2に示す。若干のマージン向上が見込まれるとともに、材料・加工費用の改善が見込まれる。

平成16年度に既存ホイールモデルに設計を反映し、機械環境試験にて妥当性を確認する予定である。

Table.1 Margin of Safety for bearing pairs on random vibration(QT)

Direction	M.S.*1		Spec.
	Axial*2	Radial*3	
Fixed Bearing Pair	1.0	0.0	>0
Floating Bearing Pair	5.1	0.0	

M.S. = bearing axial/radial basic static load rating/ (safety factor(2)×load×3σ) -1

Acceleration level *2: 17.8Grms, *3: 12.0Grms

Table.2 Ti-Alloy Rotor v.s. SUS Rotor

Item	Ti-Alloy Rotor	SUS Rotor(on analysis)
Mass of Rotor	6.7kg	7.2kg (+0.5kg)
Frequency(Radial mode)	325Hz	354Hz(+29Hz)
Q factor	37	32(-5)
M.S.	0.0	0.1(+0.1)
Manufacturing Cost	High	Low

3. 2 高速回転ホイール開発研究

3. 2. 1 高速回転ホイール開発方針

高トルク・低擾乱ホイールの成果をベースに、一般衛星向けに高トルク仕様を緩和し、小型・軽量かつ高性能なホイールの開発を目指して研究を開始した。開発に当たり、以下の開発方針を設定した。

①「高トルク・低擾乱ホイール」で確立した技術（高信頼軸受潤滑システム、高耐機械環境ハウジング、低擾乱ロータ）を活用し、高トルク・低擾乱ホイールの高信頼・高性能を維持しつつ、高速回転・駆動回路一体化による軽量化、低コスト化を図る。更に、開発期間、開発リスクを最小に抑える。

②一般衛星からの多様な角運動量要求に対応するよう、角運動量範囲でサイズを別とするシリーズ開発を行う。低角運動量域（10～30Nms）をカバーするモデルM、高角運動量域（30～80Nms）をカバーするモデルLの2種をシリーズ開発する。（Fig.4 参照）

③温室効果ガス観測技術衛星(GOSAT)への高速回転ホイール搭載を目指し、高速回転ホイール開発の中で、GOSAT用フライホイールの開発も行う。

④メーカーとの共同開発とし、作業・費用を分担する。JAXA：モデルL開発，メーカー：モデルM開発

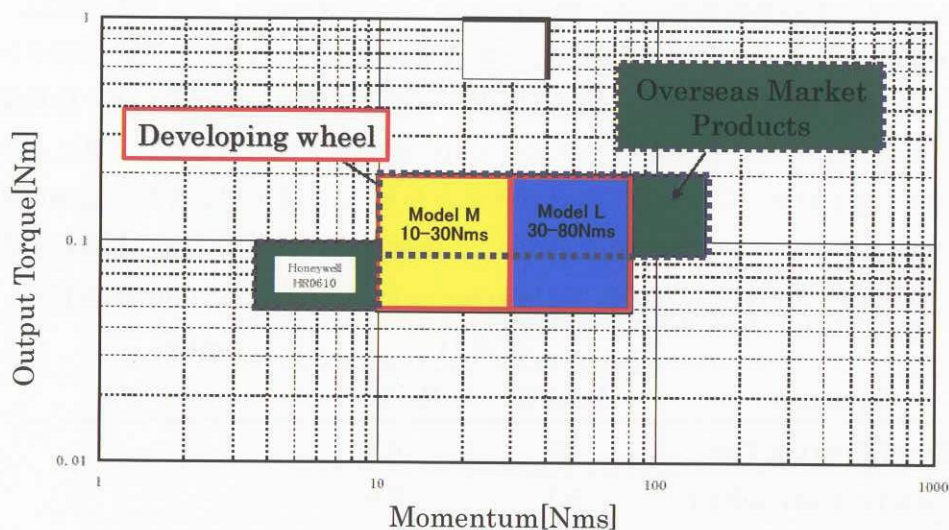


Fig.4 Developing wheel products series

3. 2. 2 高速回転ホイール開発仕様

方式設計を実施し、高速回転ホイールモデル M/モデル L の最適サイズ、電源方式（バス電源直結方式あるいは DC/DC 変換方式）、モータ方式（単相インバータ方式あるいは PWM 方式）を検討した。結果、モデル M/モデル L のそれぞれの最適サイズを決定し、電源方式は、質量、バス電源ラインとの電気絶縁の容易さ、トルク・バス電源電圧仕様変更への拡張性、の項目に優位な DC/DC 方式を選択した。また、モータ方式は、トランジスタ個数が少なく済み、開発実績もある単相インバータ方式を選択した。

方式設計に引き続き、基本設計を実施し、電気・機械性能が要求性能を満足すること、熱・構造設計が成立することを解析にて確認し、開発仕様を策定した。

解析の一例として、熱回路網数学モデルによる熱解析結果を Table.3 に示す。高速回転ホイールで熱的に最もクリティカルであるベアリング温度を解析条件を振って求めたものである。インタフェース温度上限の +55°C でベアリング温度は許容温度（+90°C）に対して 15°C 以上のマージンを有し熱設計が成立していることが分かる。また、インタフェース温度 +65°C としても許容温度を下回っており、一時的であれば +65°C まで使用温度上限を拡張できる目処を得た。今後、試作モデルを用いて熱数学モデルの精緻化を図り、使用温度範囲の限界を確認する予定である。

Table. 3 Thermal Analysis Results for Developing Wheel

Condition		Results	Note
Interface Temperature [°C]	Speed	Temperature [°C] @Floating Baring Pair	
+55	6000rpm	+74	Allowable Temperature of Baring Pair +90 [°C]
+65	6000rpm	+84	
+65	3000rpm	+74	
+55	±6000rpm @0.1Nm	+74	

3. 2. 3 試作モデル製作・評価

Table.4 の開発仕様に基づき、モデル M の試作モデルを製作した。試作モデルの外観を Fig.5 に示す。この試作モデルを用いて機能性能試験を実施し、機能性能仕様をすべて満足することを確認した。試験結果を Table.4 に示す。質量、ロストルク、消費電力とも開発仕様より大幅に良好な性能を示し、海外市場製品に互するホイールが開発できる目処を得た。

この結果を受けて、詳細設計フェーズへの移行を判断した。平成 16 年度には詳細設計と認定モデルの製作・認定試験を実施する予定である。



Fig.5 Bread Board Model(BBM) of Developing wheel(Model M)

Table.4 Specifications of Developing wheel(Model M) and Test/Inspection Results of Bread Board Model(BBM)

#	Item	Specifications	Test/Inspection Results
1	Momentum	20Nms±1%	19.9Nms (-0.6%)
	Inertia of rotor	0.031831kgm ² ±1%	0.0316485kgm ² (-0.6%)
2	Speed Range	±6000rpm	±6200rpm
3	Output Torque	>0.1Nm@±6000rpm	>0.12Nm@6000rpm、30V
4	Loss Torque	<0.03Nm	<0.0128Nm
5	Stick(Break away) Torque	<0.015Nm	<0.008Nm
6	Dimension	<Φ284×155mm	Φ279×150mm
7	Mass	<8.35kg	7.366kg(before bonding)
8	Static Inbalance	<0.1g·cm	0.012g·cm(on assembly)
9	Power consumption	<33W@6000rpm	12.4~14.6W@6000rpm
10	Coast down time	>10.9 min.	>42 min.

4. まとめ

平成15年度に実施した、ホイール改良研究、高速回転ホイールの基本設計、試作モデル製作・評価の成果について報告した。

ホイール改良研究では、ベアリング・潤滑システム、耐振動構造設計についてそれぞれ信頼性向上策、改良策を検討・評価した。平成16年度は試験による検証を目的とし、ベアリング・潤滑システムについては認定試験、耐振動構造設計については機械環境試験を実施する。

高速回転ホイール開発については、平成15年度に基本設計フェーズを完了した。平成16年度からは詳細設計フェーズに移行し、詳細設計、認定モデルの製作、認定試験を実施する。

参考文献

- [1]R.A.Laskin and S.W.Sirlin, "Future Payload Isolation and Pointing System Technology", Journal of Guidance, Control and Dynamics, Vol.9, No.4, July-August1986,pp.469-477.
- [2] 井澤, 市川その他「高トルクリアクションホイールの研究」, 日本航空宇宙学会論文集第34期年会講演会
- [3]小原, 佐々木, 今川その他「油潤滑軸受のトライボロジー特性に関する研究」, 平成15年度総合技術研究本部成果報告会