

高性能姿勢制御システムの研究

Study of High Performance Satellite Attitude Control System

高精度ファイバージャイロ IRU の研究

Study of High Performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit

システム誘導技術 G

鈴木秀人、兒子健一郎、川井洋志

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

Hideto SUZUKI、Kenichiro NIGO、Hiroshi KAWAI

Abstract

Aiming for the application to the future spacecraft attitude control system, we are studying the high performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit (FOG-IRU). To fulfill the requirements of low noise, stable bias and stable scale factor, we adopt the high power Fiber Light Source, a long fiber coil (several kilo-meters) and the digital serrodyne closed loop configuration. This paper outlines the result of our FOG-IRU development during FY15 such as improvement of 1st FOG experimental model, radiation test of high power light source, design and manufacturing of 2nd FOG experimental models, implementation of light source noise compensation circuit and component system design of FOG-IRU.

1. はじめに

本研究の目標は、従来よりも高精度の FOG(Fiber Optical Gyro : ファイバージャイロ¹⁾)による衛星搭載用 IRU(Inertial Reference Unit : 慣性基準装置)を開発することである。ファイバージャイロは光学式ジャイロのひとつであり、機械式の衛星搭載用ジャイロ(例えば、TDG : Tuned Dry Gyro、FRIG : Floated Rate Integrating Gyro)に比べて、可動部が無く原理的に高信頼性を有し、無擾乱振動、広ダイナミックレンジ、瞬時起動可能などの有利な性質を持つ。宇宙適用例もある²⁾が、精度が現時点では機械式のものに及んでいない。そこで本研究では高精度化を指向している。

具体的な目標仕様をTable 1に挙げる。将来の観測衛星などの高精度姿勢決定要求を考慮して設定した。特に Random Walk とは角速度計測値に含まれるランダムノイズ成分の大きさを表す指標であり、姿勢決定精度を左右するもので、小さいことが望ましい。IRU と恒星センサからなる標準的な姿勢決定系構成において、ランダムノイズ 1arcsec(1σ)の恒星センサの信号をフィルタ処理して 0.1arcsec(1σ)の姿勢決定精度を達成できることを目標に、高精度 FOG-IRU の Random Walk の値を設定した。

Table 1 : Target Specifications of High Performance Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit

項目	性能
Random Walk (Angular)	0.0005 [deg/ \sqrt{h}] (1σ)
Bias Stability (Short Term)	0.002 [deg/h] (1σ)
Scale Factor Stability	10 [ppm] (1σ)
Maximum Range Rate	10 [deg/s]
Life Time in Orbit	5 [years] (LEO) (immediate specification)
Mass (of an IRU)	Should be less, but not specified explicitly in this study.
Electric Power (of an IRU)	Should be smaller, but not specified explicitly in this study.

複数年にわたり計画されている本研究の主な実施内容を以下に列挙する。

- 1) 高精度化を具現するジャイロに関する技術要素を取り込んでハードウェア化すること
- 2) IRU コンポーネント全体としての成立性の検討
- 3) 試作品等の設計・製作・試験・データ評価
- 4) 実験機器として軌道上実証するのに適切な EFM(Engineering Flight Model)の設計・製作
FOG-IRUの原理等は割愛する¹⁾。本件旧での高精度化等を具現するための技術要素を以下に挙げる。
 - 1) EDF 光源：高出力光源のため S/N 比が向上し、Random Walk 低減。耐放射線性向上。
 - 2) シングルモードの長ファイバー：測定原理式に基づく感度向上。通信用で安価で入手容易。
 - 3) オクタポール巻き：ファイバの物理的・光学的特性の偏在を打ち消して、バイアス安定性を確保。
 - 4) RIN 補正回路：光源ノイズを低減し、Random Walk 低減。
 - 5) デジタルゼロダイン方式：左右両周り光の位相差を補償する位相変調を行う帰還により、良好なスケールファクタ特性、広ダイナミックレンジ確保。
 - 6) 光 IC、ツイндеポラライザー：消光比 60[dB]以上の偏光素子の特性を生かし、偏波面保存ファイバである必要を無くし、安価で入手容易に。

FY13 より研究を開始し、東京大学の保立和夫教授(宇宙科学研究所でロケット用 FOG-IRU(Fiber Optic Gyro Inertial Reference Unit)を開発)に客員として助言を頂きつつ、宇宙科学研究所の二宮敬虔教授、橋本達明助教授、戸田知朗助手らと共同で開発を進めている(研究開始当初、3 機関連携研究として。JAXA 設立後は機構内共同で実施)。本稿では一連の研究開発のうち FY15 の成果について述べる。

2. 研究の概要

FY15 に実施した研究項目を以下に挙げる。

- 1) 部分試作モデル(FY14 製作)の改善設計
今回開発する FOG-IRU の技術的特長をハードウェアで実現するために、FY14 に部分試作モデルを作成した。FY15 では、この特性を取得し、誤差要因の把握に努め、設計改善を行った。
- 2) FOG EM 検討モデル(4 式)の設計と製作
部分試作モデルで把握された特性を反映して、さらにひとつフェーズを進めた研究モデルを 4 式設計・製作し、個体差の傾向を確認し、4 式の FOG から 1 式の IRU を構成する検討に使用する。光源やファイバに関する誤差要因を考慮して、Random Walk、Bias Stability(Short Term)の目標達成のための解析を行い、FOG の基本パラメータであるサニャック係数を決定した。また、構造・回路・光学要素について設計を行った。
- 3) RIN(Relative Intensity Noise：相対強度雑音)補正回路設計製作評価
光源のノイズ(RIN)はランダムウォークの主要原因となりえるが、これを低減する方式として採用した、アクティブ方式(RIN モニタ・光源駆動電流フィードバック)に必要な補正回路を製作した。
- 4) 耐放射線試験
ファイバコイルの耐放射線試験照射サンプル 3 式を製作した。EDF 光源の耐放射線試験照射サンプルの製作 3 式を製作し、試験・結果考察を行った。
- 5) 高精度 FOG-IRU システム検討
FOG 配置(3 軸、4 軸 Skew)と質量・電力・信頼度予測、バックアップ光源の構成、耐放射線部品の抽出を行った。

3. 成果の概要

2節の項目に対応してFY15 成果を述べる。

1) 部分試作モデル(FY14 製作)の改善設計

FY14 のデータ評価では部分試作モデルで、Random Walk 0.0016[deg/√h] (1σ) が計測されており、目標仕様の 0.0005 [deg/√h] (1σ) に及ばないこと判明している。そこで以下の2点の改善を施した。

- i) パルス分割回路の高分解能化：デジタルゼロダイン方式の階段状ランプ波形ジェネレータのアップデータクロックを 64 倍にして、パルスウェイト 3.87 [arcsec/pulse]を 1/64 倍にして高分解能化した。
- ii) オーバーサンプリング回路：A/D 変換クロックによるサンプリングは、デジタルゼロダイン方式による位相変調の半周期毎に 8 回であったところを、同半周期毎に過渡応答中を除く間に 12 回に変更して、Random Walk の低減を可能にした。

また、温度降下時にのみ過大 Random Walk の発生(Fig.2 中段)が確認されており(温度一定時：Fig.2 上段)、要因分析系統図を用いて原因特定が試行錯誤された。具体的には、デジタルゼロダイン方式に必須のファイバー光の位相変調(Fig.3)のためのフィードバックループをオープンにしたり、FOG 出力の周波数解析を行ったりした。特に、部分試作モデルであるため、余長部(デポライザ部を含む)は余裕を持たせて固定フリーになっていたが、これをファイバーと一緒に

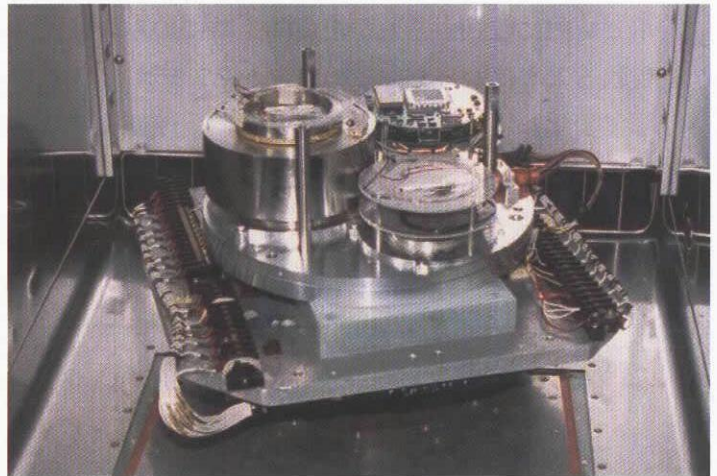


Fig.1 : 1st Experimental Model(部分試作モデル)

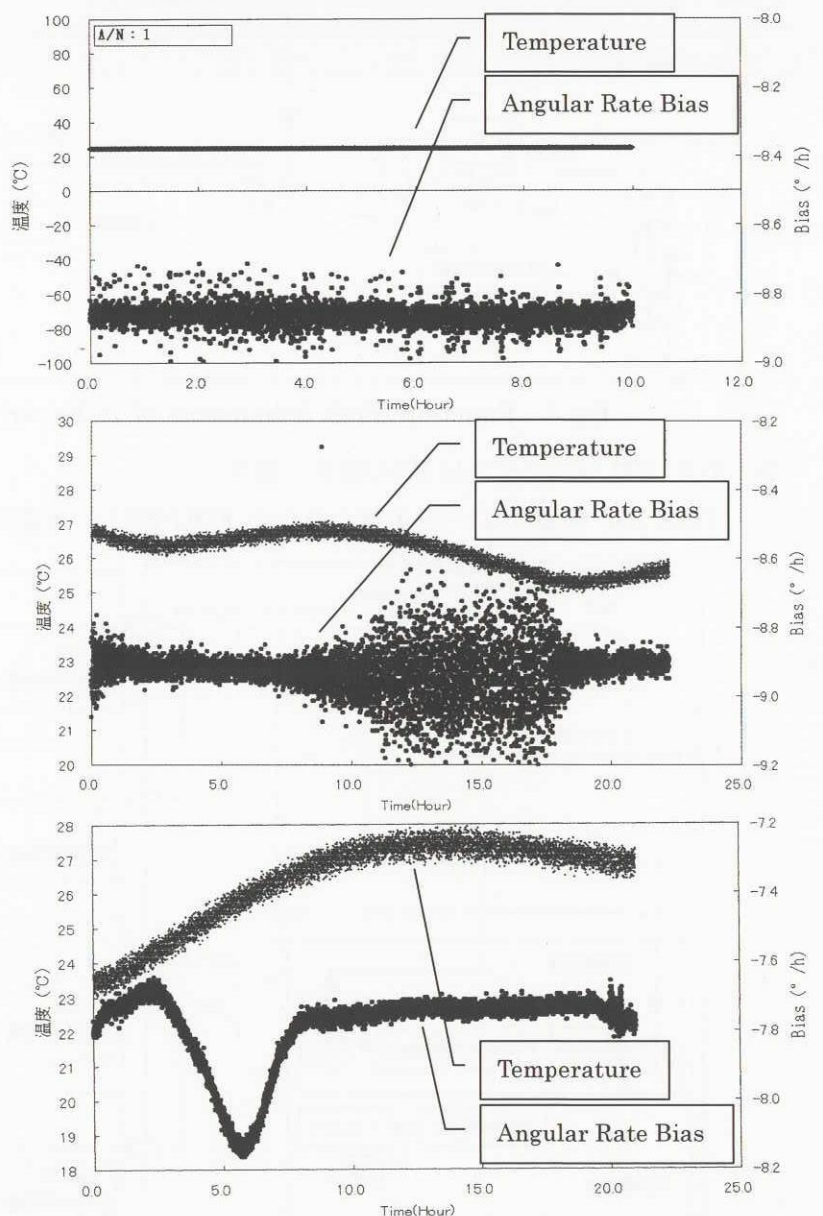


Fig.2 : Random Walk and Bias Stability Anomaly due to Temperature Dependency

ポビン内に収納すると、温度降下時にのみの過大 Random Walk が現れなくなり、バイアス変動が現れるようになった。このことから、デポラライザ・ファイバの光学的特性変動が収納状態に付随して変化していることが予想される。性能安定に直結する不都合な現象なので、FY16 以降に原因解明を継続する。

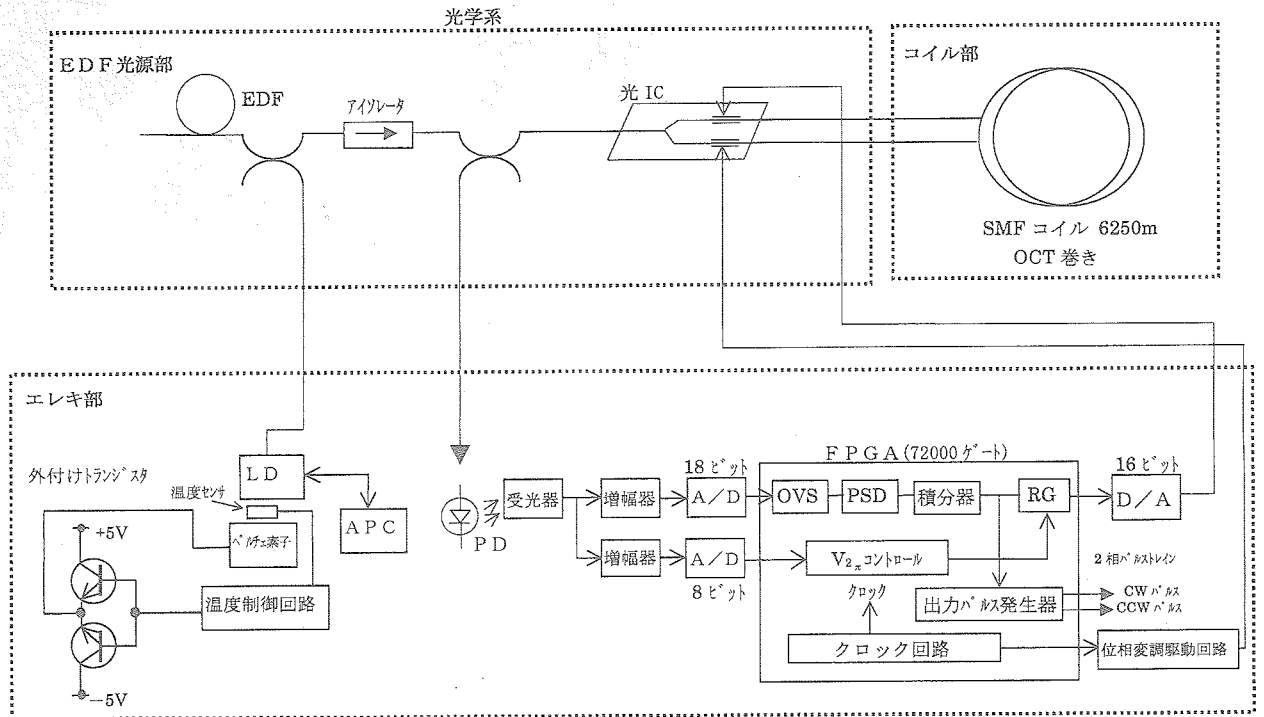


Fig.3 : Function Block Schematics of 1st Experimental Model(部分試作モデル)

2) FOG EM 検討モデル(4 式)の設計と製作

Fig.4 に、想定している 4 軸からなる FOG-IRU の機能ブロック図を示す。4 軸構成の是非は、5)

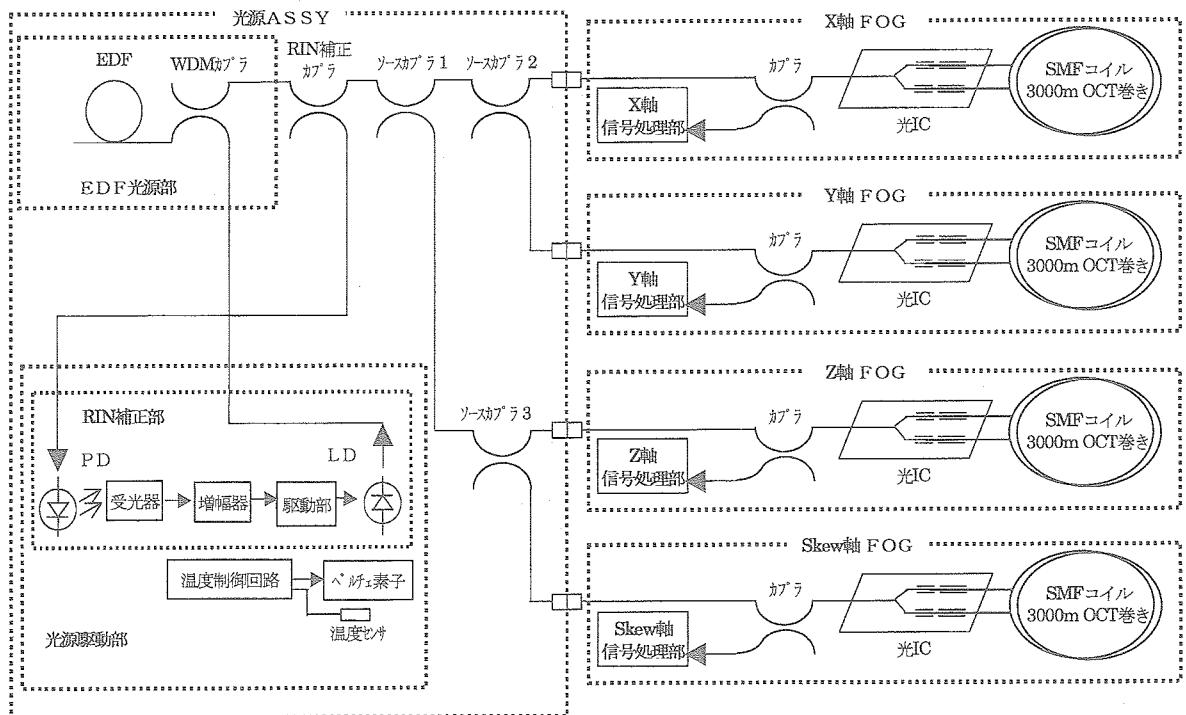


Fig.4 : Function Block Schematics of at2nd Experimental Model(EM 検討モデル)

項で示す。EM 検討モデルでは、性能に余裕を持たせるために Random Walk $0.00022[\text{deg}/\sqrt{\text{h}}]$ (1σ) を目標として、RIN が $-130[\text{dB}]$ であることを前提 (3) 項参照) に、パラメタ配分を行った。その結果を Table 2 に示す。また、製作した EM 検討モデルの外観を Fig.5 に示す。

Table 2 : 2nd Experimental Model Design Parameter(EM 検討モデル)

ファイバ長	3000[m]	サニャック係数	5.02[s]
ボビン高さ	25[mm]	パルスウェイト	0.0666[arcsec/pulse]
コイル段数	88	消費電力	27.5[W]
コイル半径	60[mm]		6.1[W](光源駆動部)+4×5.35[W](信号処理部)

3) RIN 補正回路設計製作評価

本研究で採用予定のアクティブ式の RIN 補正回路で、回路パラメタを複数のうちから最適な組み合わせに設定して、RIN を測定した結果を Fig.6 に示す。ジャイロの変調周波数 $17[\text{kHz}]$ 付近で当初見込みの $-125[\text{dB}]$ よりも良好な $-130[\text{dB}]$ が試験から確認された。

4) 耐放射線試験

EDF 光源の FOG への適用は過去に例がないので、耐放射線性は十分に評価されていない。システム設計を行ううえで、また未知の開発要素の有無を洗い出すために試験を実施した。照射条件は $0.1[\text{krad/hr}] \times 20[\text{hr}]$ である。結果を Fig.7 に示す。3 式ともに結果はよく一致し、減衰率は $-0.33\text{-}0.43[\text{dB/krad}]$ という試験結果となった。これから、光源強度が $-1[\text{dB}]$ 減少を FOG 光学系で許容しないとすれば、 $2.5[\text{krad}]$ となる。 $100[\text{krad}]$ の軌道上条件を満たさないので、EDF 光源にはシールドが必要となる。一般に半導体光源が有する照射停止後の劣化回復現象は EDF では見られなかった。

5) 高精度 FOG-IRU システム検討

Fig.8 の 4 種を FOG の軸配置を考案して、質量比較を行った。放射線シールド厚 (Al t1.5)、センサーブロックの違いで、質量に差が出ている。冗長も考えると、「4 Axis Type 1」が好ましいが、他機器や海外競合 FOG-IRU と比較すると質量を半分程にする必要がある。



Fig.5 : 2nd Experimental Model(EM 検討モデル)
Upper : Coil (4 sets)
Middle : Coil (Inner Side) (4 Sets)
Lower : Light Source (1 set for 4 Coils)
RIN比較 (IF=200mA)

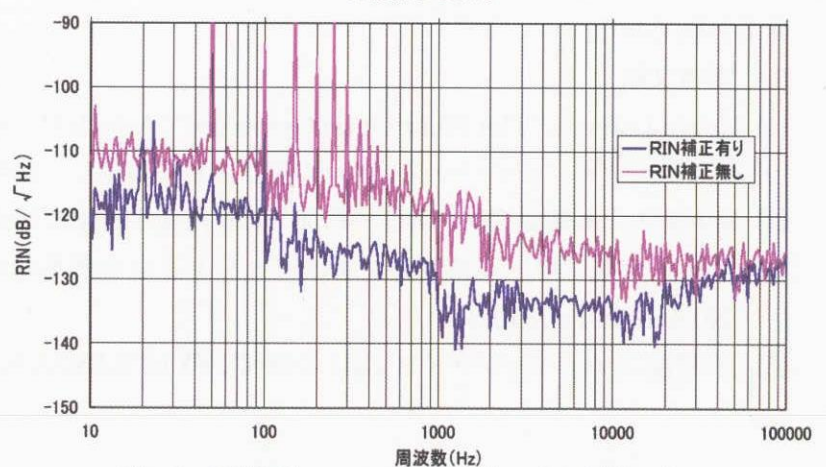


Fig.6 : RIN Compensation Circuit's Effectiveness

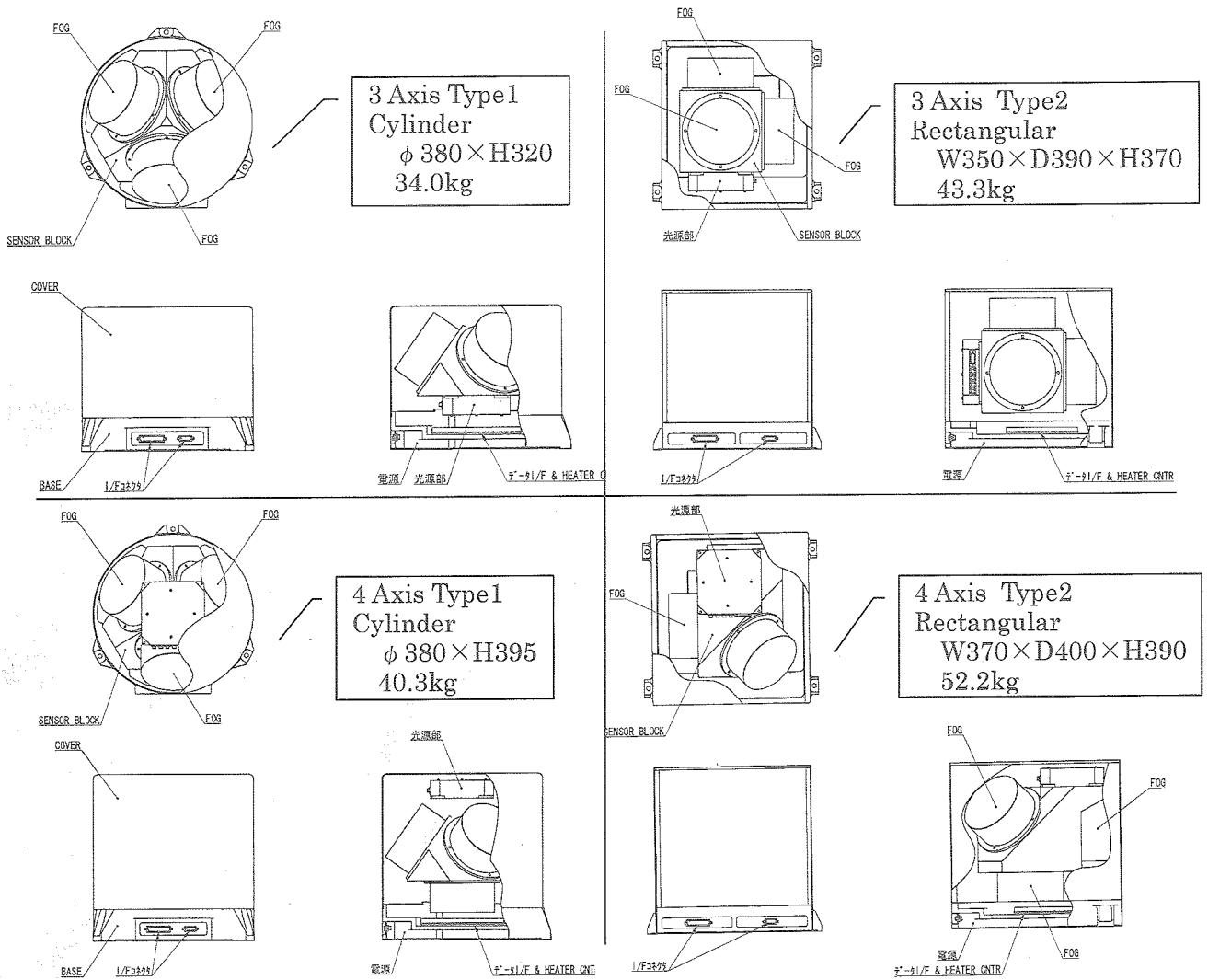


Fig.7 : FOG-IRU Axis Configuration Trade-Off

4. まとめ

FY15 では、RIN 補正回路の有効性に目処が立った。具体化を進めた EM 検討モデルを製作した。IRU としての方式にトレードオフを行い、4 軸 Skew 配置円筒型形状にメリットがあると判断し、重量・電力・性能見通しを立てた。一方で、部分試作モデルで確認されている誤差現象の解明と、IRU としての重量(及び電力)の削減の実現、具体的な EDF 光源のシールド方法の検討といった今後への課題を解決して、FY17 に予定している IRU の EM 設計に反映していく。平成 20 年度に軌道上実証実験飛行を実現する計画である。

5. 参考文献

- [1] Herve Lefevre, "The Fiber-Optic Gyroscope", Artech House Inc., 1993, ISBN 0-89006-537-3
- [2] 保立和夫, "光ファイバージャイロの現状と将来展望", 「光学」第7巻(1998), pp.352-pp.359
- [3] 鈴木秀人, "高精度 FOG-IRU の研究", 日本航空宇宙学会年会, 2003
- [4] 大野有孝他, "中・高精度光ファイバージャイロの価格低減技術とその応用", レーザ研究 vol.26, NO.4(1998), pp310-313
- [5] "高精度ファイバージャイロ IRU の研究", FY14 NASDA 技術研究本部 研究成果概要