

極域実験に向けた気球望遠鏡 Gondra システムの検討

中野壽彦, 坂本祐二, 吉田和哉 (東北大学)

田口真, 山元夢摘 (立教大学)

莊司泰弘 (宇宙科学研究所)

高橋幸弘, 渡辺誠, 濱本昂, 今井正亮, 仲本純平 (北海道大学)

1. はじめに

気球望遠鏡は、大気球で望遠鏡を成層圏高度に飛翔させる、天体・惑星リモートセンシング手法である。成層圏では大気が地上の 1/100 程度と希薄であるため、シーイングが良好であり望遠鏡の回折限界に近い像を得ることができる。また水蒸気、炭酸ガス、オゾンなどの吸収物質が存在しないので、地上では観測できない紫外、赤外の波長帯まで観測領域を拡大できる。更に地上の大型望遠鏡のようなマシンタイムの制限が無く、長期間の連続観測が可能である。

気球望遠鏡で惑星を観測する場合、特に極域での観測が有利である。極域では夏期の可観測時間が長く、特に白夜であれば 24 時間以上の連続観測を行うこともできる。さらに極点を周回するジェット気流に乗せて飛翔させれば、10 日間程度で打上点付近に戻る飛翔を行うことも可能である。

我々の研究グループは、惑星観測のための気球望遠鏡「FUJIN (風神)」の開発を行っている。プロジェクトの目標は、極域周回飛行による長時間連続観測を実施することである。そのために、まず Gondra システムの基礎技術の確立を目指した、実験 Gondra の開発を継続している。これまでに、日本国内における技術実証フライトのための 1 号機 Gondra (FUJIN-1) が完成している。FUJIN-1 のフライトは 2013 年に実施予定である。

これと同時に、現在、2014 年以降の極域フライトのための 2 号機 Gondra (FUJIN-2) の検討、開発を始めている。FUJIN-2 は極域において 24 時間以上のフライトを行い、将来の極域周回フライトのための技術実証とデータ収集を目的としている。国内と極域での実験環境の差異や、将来の長期間観測で必要となる各技術を考慮して、より最適な Gondra システムを目指している。

また望遠鏡を中心に光学系の新規開発を行い、科学的にも有益な観測データの取得を目指す。

本稿では、FUJIN-2 Gondra の開発に関して、開発方針と検討を進めている各内容について報告する。Gondra 開発の中で、極域実験に向けて検討するべき点について整理する。そして各要素の検討・開発状況、特に Gondra 構造、望遠鏡光学系、指向制御系を中心に報告する。

2. FUJIN-2 による極域実験

本実験は極域でターンアラウンド飛行による 24~48 時間ほどの連続観測を行うことを考えている。放球点はエスレンジ (スウェーデン, キルナ) を候補として考えている。観測対象とするのは金星をはじめとする惑星全般である。図 1 に 2014~2015 年のエスレンジにおける最高・最低高度、太陽離角、視直径の様子を示す。2014 年 7 月ごろと、2015 年 5 月ごろに、長い観測時間を確保できることがわかる。

本実験の目的は、将来の極域周回フライトのための技術実証と、基礎データ収集を行うことである。そのため国内実験で実証した Gondra システムの各技術を前提として、極域フライトで必要となる新技術の開発を行う。また極域フライトに最適な運用方法の確立を目指す。

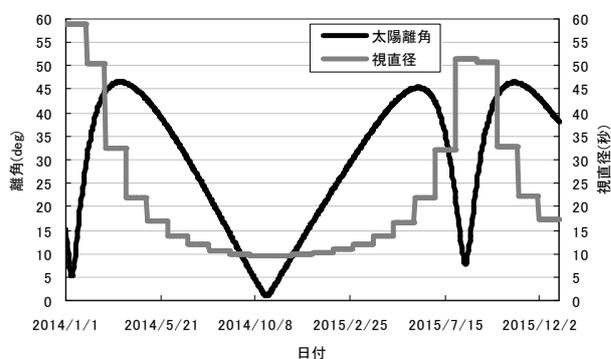
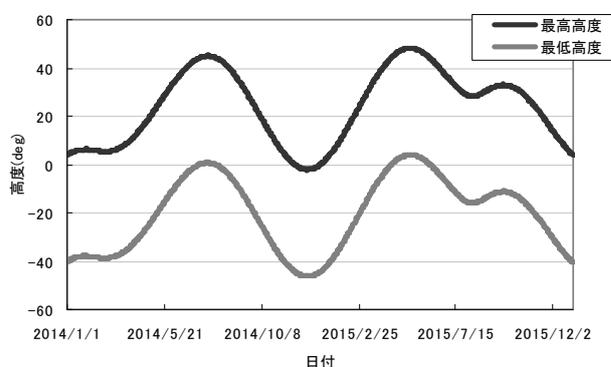


図 1. 2014~2015 年エスレンジにおける金星の最高・最低高度、太陽離角および視直径

極域実験に向けた開発の中で、検討すべきと考える点について以下に列挙する。

- ・フライト時間について、国内実験では約7時間、観測高度でのレベルフライトが2~3時間程度であったのに対し、極域では大幅に期間が長くなる。長期間フライトの中で、搭載機器が誤った動作をした場合でも、制御不能に陥らず正常状態に復帰して実験を継続できるような堅牢なシステムを目指す。
- ・フライト期間が長期化すると、上空の低温環境が機器に与える影響も大きくなる。特に光学系特性の変化は観測性能を劣化させる原因になるため、これを防ぐ、または補償できるシステムが必要である。
- ・光学系性能を向上させるためには望遠鏡を大型化しなければならない。本実験では国内実験より大型の望遠鏡を搭載する。極域周囲観測を行う時は、更なる望遠鏡の大型化を構想している。そのためより大型望遠鏡に適したゴンドラ構造にする必要がある。また大型望遠鏡に最適な指向制御システムを備える必要がある。
- ・長期間の運用を確実に実施するため、効率的な運用ができるシステムでなければならない。運用プロセスを可能な限り自動化して、地上局での作業負担を減らす。また極域実験に最適化した地上局システムを構築する。

3. ゴンドラ構造

ゴンドラ本体の重量が増加すると、必要となる気球も大型になると同時に、観測仰角を確保するため吊紐も長くしなければならない。ゴンドラの重量が必要以上に増加しないように、最適な構造を設計する。総重量は、600kg程度を考えている。

現在構想している、FUJIN-2ゴンドラの全体像を図2に示す。これまでのゴンドラと比較して大きく異なる点は望遠鏡のマウント方式である。FUJIN-2ではゴンドラ上部に架台を固定し、望遠鏡を吊り下げる方式とする。吊点付近に重量物を集中させることで、ゴンドラフレームにかかる負荷を軽減できるので、フレームを軽量化しやすくなる。

吊り下げ方式は、フライト終了時に地表に降下、着地した時の衝撃が、望遠鏡本体に直接伝わらないようにする点でも有効である。着地時衝撃でゴンドラ下部が適度に破壊するような構造にすることで、望遠鏡本体の損壊を最小限にすることができる。

望遠鏡以外の搭載機器について、FUJIN-1ゴンドラから変更の無いものは国内実験が終了してから回収してFUJIN-2に流用して開発コストを抑える。

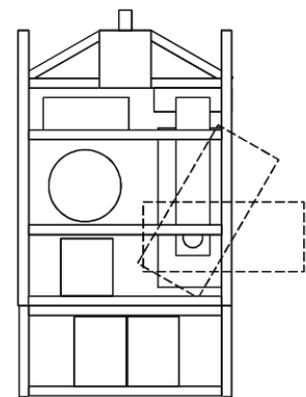


図2. FUJIN-2ゴンドライメージ

4. 望遠鏡の新規開発

FUJIN-1は市販の望遠鏡をそのまま流用していたが、FUJIN-2では気球望遠鏡に最適化した望遠鏡を独自開発する。現在、望遠鏡本体（鏡筒、架台）の製作は完了しており、光軸の調整、駆動系の製作、イメージセンサ設置部の製作などを進めている。望遠鏡の仕様の比較を表1に示す。

4.1. 構造

集光方法はカセグレン-ナスミスであり、回転可能なナスミス鏡により二焦点を有する。主鏡直径はこれまでより大型の408mmとする。焦点距離は12000~16000mmになる予定である。

4.2. 分光方式

本望遠鏡ではフィルターターレットを用いる。これにより観測像がイメージセンサに入射するまでの、フィルターの透過点や光路分岐点を減らし、観測像がなるべく劣化しないようにする。波長帯はUV~IRの範囲で10段階程度の設定ができるよう設計を進めている。

4.3. 焦点調整

地上で合焦調整をしたとしても、飛行高度は-40℃~-60℃の低温環境であるため、望遠鏡各部の収縮や変形が生じて焦点距離がずれる可能性が高い。断熱材やヒータでの温度制御では、焦点ずれの発生を完全に防ぐことを保証するのは難しい。そのためゴンドラシステムは、運用中に必要に応じて合焦調整を行う機能を実装するべきである。本望遠鏡は副鏡位置を任意にシフトさせて合焦を行う機構を備えている。位置調整のストロークは150mmであり、飛行時に発生する焦点ずれを補償するには十分な長さであると考えている。

国内の運用では、カメラのアナログ信号を地上でモニタしながら、マニュアル操作で合焦調整する方式であった。一方極域では、運用においてアナログ信号を使用する事が出来ない。さらに、極域周囲を行う場合は、テレメトリのデータ量が制限され、デジタル画像をリアルタイムでダウンリンクすることが困難である。FUJIN-2はマニュアル操作に頼らず、ゴンドラ側で自動的に合焦調整を行う機能を実装する。

表 1. 望遠鏡仕様の比較



図 3. 新望遠鏡

	FUJIN-1	FUJIN-2
メーカー/型番	MEADE/LX200GPS	IK 技研/-
集光方法	シュミットカセグレン	カセグレン-ナスミス
主鏡径	305mm	408mm
焦点距離	6096mm (望遠鏡 3048mm + パローレンズ)	12000mm~16000mm (TBD)
合焦機構	粗：主鏡シフト(手動) 精：マイクロフォーカサー /ストローク 12mm / DC モータ	粗：- 精：副鏡シフト/ストローク 150mm /2 相ステッピングモータ
ズーム機構	無	有
観測波長	UV(300-450nm) IR(700-1200nm)	UV~IR で 10 分光
分光方法	ダイクロイックフィルタ x2	フィルターターレット
イメージセンサ	WATEC CCDx2 個 VGA(659x494) モノクロ 10bit/pixel デジタル出力	デジタル CCD(TBD)x1 個
方向駆動	2 軸 (方位角, 仰角) DC モータ x 2 個 駆動分解能：1.6 x -3 deg	2 軸 (方位角, 仰角) 5 相ステッピングモータ x2 個 駆動分解能：1.2 x e-4 deg
総重量	約 70kg ゴンドラ全体の 14.6%	約 150kg

4.4. 駆動系

駆動系は二軸の方向駆動（方位角，仰角），ナスミス鏡回転部，副鏡シフト，ズーム機構，フィルターターレット機構の合計 6 つである．5 相または 2 相のステッピングモータを使用し，モータドライバ基板とソフトウェアは独自で開発する．モータのパルスがゴンドラ送受信系に悪影響を与える恐れがあるため，計装は外部に露出させず架台内部に収納する．

4.5. 光軸調整方法

望遠鏡と惑星センサのアライメントは，ゴンドラ搬送時の振動で狂いが生じる可能性が高い．そのためアライメント調整は現地に到着してから，フライト実験までの準備期間に行うことが望ましい．これまででは晴れた日の夜間に実際の星を使って調整していたが，準備期間内で必ずしも晴れた日があるとは限らない．そこで人工光源による調整手段が必要であると考え，レーザーやコリメータによる調整方法について検討している．

5. 指向制御系

気球望遠鏡は，飛翔中に目標天体を観測視野内に捕捉し追尾するための指向制御システムを有する必要がある．これまで，ゴンドラ方位角の姿勢制御（第一段階），望遠鏡駆動による粗指向制御（第二段階），TTM ミラーによる精指向制御（第三段階）の三段階で構成される指向制御系の開発し，地上実験で性能評価を行っている[2]．FUJIN-2 ゴンドラは，基本的にこの三段階指向制御系を継承するとともに，制御則の改良，制御モードの追加を行う．

< 第一段階，第二段階の協調制御 >

望遠鏡の土台となるゴンドラは，空間に対して完全には固定されていない柔軟ベースと見なせる．望遠鏡の方向を駆動すると，その反作用トルクはベースに外乱として加わり，ゴンドラ姿勢に変動が生じる．このとき，望遠鏡駆動の影響は，ゴンドラ全体に対する望遠鏡の慣性モーメントの比が大きくなるほど顕著になる．FUJIN-1 では望遠鏡がゴンドラに対して小さく制御にあまり影響しなかったが，FUJIN-2 では望遠鏡を大型化することによる影響について検討が必要である．

特に方位角方向の場合，望遠鏡の反作用トルクはゴンドラ姿勢制御系への外乱となる．外乱トルクが大きいと，

ゴンドラ姿勢制御系と望遠鏡指向制御系が連成し、制御が不安定になる原因となる。対策として、二つの制御系を協調化させる手法が考えられる。望遠鏡の反作用トルクは駆動状態から推定できるので、これをゴンドラ姿勢制御系にフィードフォワードとして加え、補償する制御則を追加すればトルクを効果的に打ち消せると考えられる。

仰角方向では、ゴンドラ姿勢制御は行わない。ゴンドラに搭載された望遠鏡の仰角指向制御に関しては先行研究がある[3]。この研究ではゴンドラを吊紐で懸下された二重振り子系とみなし、望遠鏡を含めたダイナミクスモデルが提案されている。これを参考に FUJIN-2 ゴンドラのモデルを構築し解析を行っていく。

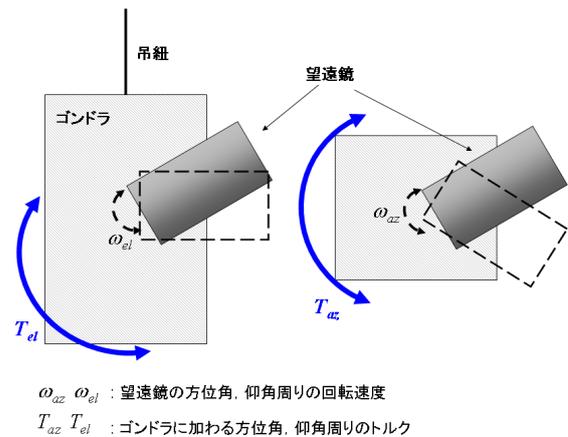


図 4. 望遠鏡駆動によるトルクの発生

<CMG アンローディングの姿勢補償制御>

CMG は回転するホイールのジンバル角を傾けることでトルクを発生するデバイスである。本ゴンドラでは姿勢制御アクチュエータとして搭載している。CMG は一定方向にトルクを発生させ続けると、ジンバル角度が増加していき、やがて飽和角度に達する。この場合、CMG のジンバル角度をもとに戻す、アンローディングを行う必要がある。

国内実験では CMG が飽和した場合、姿勢制御を一旦中断して、マニュアルでアンローディングする方法としていたが、この時ゴンドラ姿勢が大きく乱れるため望遠鏡の指向制御は継続できない。極域実験では、CMG アンローディング時に適切な姿勢制御を行い、目標への指向を維持できるような制御モードを開発する。

6. その他の検討事項

本稿の最後にあたり、ここまでで記述していない事柄について簡単に記述する。

- ・スターセンサに対する目標天体の導入オペレーションを自動化して、運用負担を軽減する。
- ・姿勢制御デバイスや望遠鏡駆動系に、復帰可能な電気的リミッタを備える。
- ・オンボードのデータストレージデバイスを改良する。これまで micro SD を使用していたが、コンパクトフラッシュ等に置き換え、書き込み速度と容量の向上を図る。バックアップ用を搭載してデータ欠損を防ぐ。
- ・極域運用では TCP/IP となるため、これに対応した地上局オペレーティングシステムを開発する。1 台のサーバマシンを介して、複数の端末で同時にオペレーションできるようなシステムを構築する。

参考文献

- [1] 田口真 他, 極域成層圏からのリモートセンシングを目指した気球搭載望遠鏡, JAXA-RR-09-007, pp53-72, 2010
 [2] Y.Shoji, et al, Highly Precise Pointing Control System on a Balloon-Borne Telescope for Optical Observation of Planets, Trans. JSASS Aerospace Tech. Japan, vol. 8, No.ists27, 2010.
 [3] 矢島信之, 他, 気球搭載望遠鏡の仰角制御, 東大宇宙航空研究所報告第 16 巻 2 号, pp1015-1031, 1980