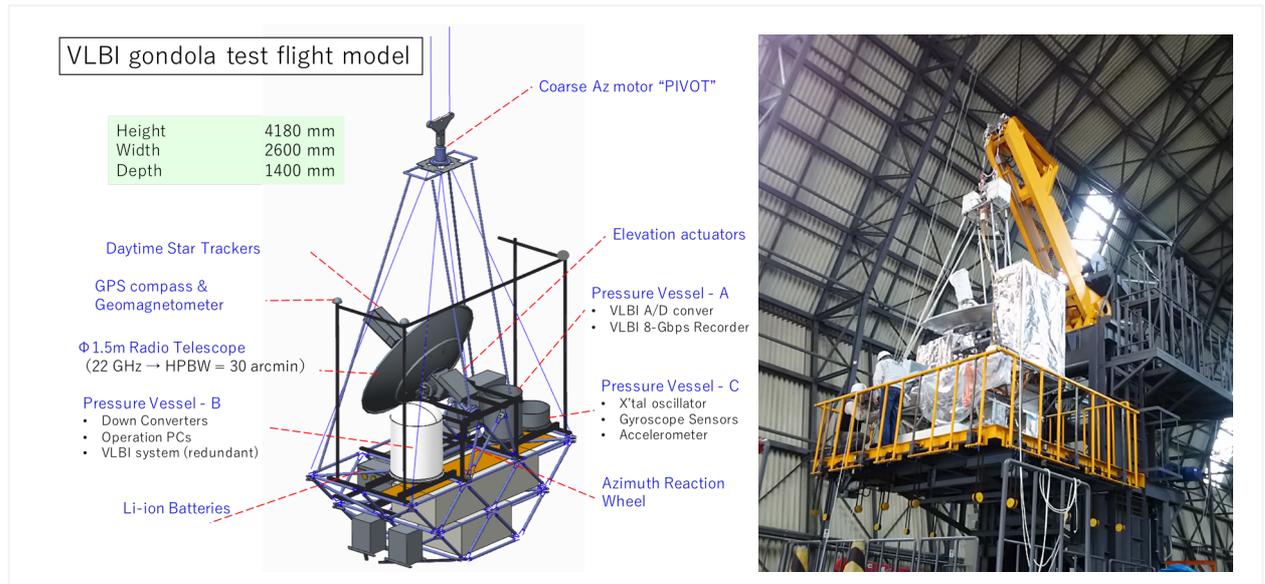


気球 VLBI 実験：2017 年の実験の報告と実験再提案

ISAS/JAXA, NAOJ^A, 大阪府大^B, 総研大^C, 東大^D, 茨大^E, NICT^F

土居 明広, 河野 裕介^A, 木村 公洋^B, 中原 聡美^C, 保田 大介^B, 長谷川 豊,
岡田 望^B, 村田 泰宏, 鈴木 駿策^A, 小山 友明^A, 下向 怜歩^D, 小川 英夫^B,
真鍋 武嗣^B, 米倉 覚則^E, 関戸 衛^F, 亀谷 収^A, 海老沢 研, 本間 希樹^A



概要

気球 VLBI は、地上からでは観測が困難な高周波数での電波天文イメージング観測を目的とした飛翔体を用いた将来の超長基線電波干渉計 (VLBI) ミッションの可能性を探るため、気球フライト試験機を用いたフィージビリティスタディをおこなう実験である。今回は大気の下にある地上望遠鏡と干渉計を組むことができる低周波数帯 (20 GHz) にて実験をおこない、将来のサブミリ波帯 (>300 GHz) での飛翔体 VLBI 実現に向けてフライト実証が必要な、周波数標準源振の安定度の確保、局位置の決定、広帯域データ記録システムの開発、望遠鏡指向精度の実現などの技術課題を検証する計画である。2017年7月24日未明、JAXA 大樹航空宇宙実験場からの放球を試みようとしたが、気象条件が変化し、実験の実施が見送られた。実験機器はそのまま残っている。実験場での準備作業と実験について報告するとともに、次年度の放球を再提案する。

1. ミッションの概要

電波干渉計を成層圏に展開することが可能かどうか技術的なフィージビリティを調査する目的で、気球搭載型電波望遠鏡ゴンドラシステムのフライト実験機を開発した。干渉計としては、Very Long Baseline Interferometry (VLBI) の原理と技術を用いる。VLBI の一素子として必要な機能はすべてゴンドラに搭載し (電波望遠鏡・受信機・周波数変換部・周波数標準源振・高速データ記録装

置・局位置決定システム)、飛翔体望遠鏡バスとしての機能(姿勢決定系・指向制御系・電源系)を合わせて実現する。1997年にM-Vロケットによって打ち上げられた電波天文技術実証衛星 HALCA にも、同じ VLBI の原理が用いられていたが、VLBI の心臓部というべき「周波数標準源振」「VLBI データ記録装置」は搭載せず、地上設備とし、運用制限のなかで科学成果を生み出した。今回の気球 VLBI ゴンドラシステムでは、将来のスペース電波干渉計に期待される「周波数標準源振」「高速データ記録装置」を飛翔体側への搭載するシステム構成としてこれを検証する。これは、システムのシンプル化・コスト低減・運用効率の向上に寄与する。

今回の実証実験では、JAXA 大樹宇宙実験場(TARF)から単機を放球し、地上の電波望遠鏡との間で干渉計を形成する。日本の地上望遠鏡群も実験に参加できる範囲の高周波帯 K-band (~20 GHz 帯、波長~1.5 cm) で観測する。目標電波源の 1 つは南西の空にある静止衛星 (IPSTAR or THAICOM4) であり、強度の大きな人工電波を利用する。観測システムの安定性を計測するとともに、成層圏の干渉計サイトとしての適合性を検証し、より高い周波数帯での将来ミッションの実現性を見極めたい。

2. 研究の背景

将来ミッションの可能性として、波長 1mm 以下 (周波数 300 GHz 以上)の「サブミリ波帯」で観測する VLBI が考えられる。現在、このような高周波帯の VLBI は地上で実験中の段階にあり、国際的に挑戦が始まりつつある。この周波数帯の宇宙電波でも、地球大気はいくらか通過してくるが、主に対流圏中の水蒸気の揺らぎにより波面が乱されるため、長い基線の干渉計形成は難しい。標高 5000 メートルの高地に建設された ALMA は、基線長 10 km オーダー (10 ミリ秒角オーダーの空間分解能に相当) となっている。大陸間基線の高周波 VLBI の実現は、主に 230 GHz 帯 (波長 1.3 mm) 以下で推進されている (e.g., Event Horizon Telescope Project: EHT)。地球大気の問題は、飛翔体・衛星観測局の実現により、抜本的に解決できる可能性がある。

将来のサイエンステーマとして、サブミリ波帯での長基線 VLBI が実現するマイクロ秒角の空間分解能を用いての「ブラックホールの直接撮像」や「ブレーザーの高エネルギー放射領域の直接撮像」や、未知の領域であるテラヘルツ帯での天体現象の高解像度撮像による研究分野の開拓が期待できる。ブラックホールもブレーザーも、その中心の高密度領域を見通すには、サブミリ波帯 (300 GHz 以上) の観測が望ましいと予想されている。すなわち高周波電波は、天体側にとって電磁波の通過窓である。反対に、電波干渉計にとっては、地球の対流圏は良好な通過窓ではない。成層圏は、実質的にスペースと同等の観測サイトである。

3. 技術課題と将来計画への展開の道筋

我々は、サブミリ波 VLBI の将来ミッションを想定して CTE 識別をおこない、ミッションクリティカルとなる技術要素について TRL 分析をおこなった。

その結果、フィージビリティを確認すべき技術的課題が以下のように抽出された:

- (1) 高周波帯電波望遠鏡の鏡面精度と冷却系搭載性、
- (2) 周波数標準源振の搭載環境での安定性
- (3) 高速データ記録装置の熱的成立性、
- (4) 姿勢決定・姿勢制御精度
- (5) 局位置決定

である。これらをさらに AD2 分析し、地上検証・フライト実証の両面から必要な検証試験計画を考察した。気球 VLBI はこれまでに例がないため、VLBI に特有の課題となる(2)(3)(4)(5)はフライト実証の形態で検証すべきと識別された。それらのフィージビリティスタディをおこなうのが、今回フライトに供する実験機である。特に(2)と(5)の検証には VLBI 観測そのものが必要となる。

(1)の高周波電波望遠鏡については他のミッションで関連技術のフライト実績が多くあるが、統合的な

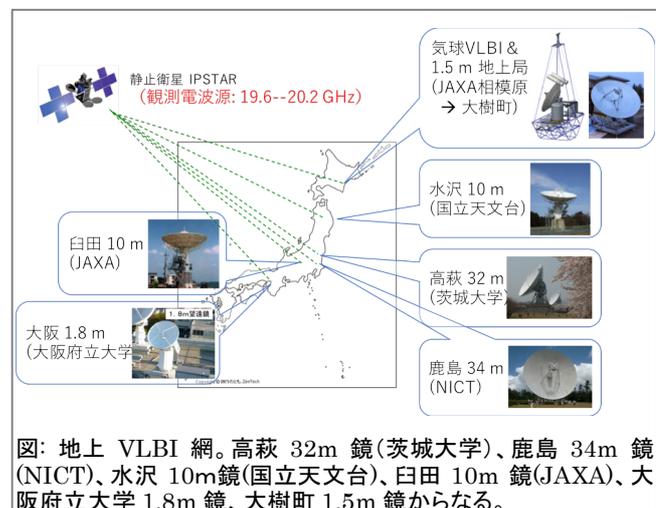
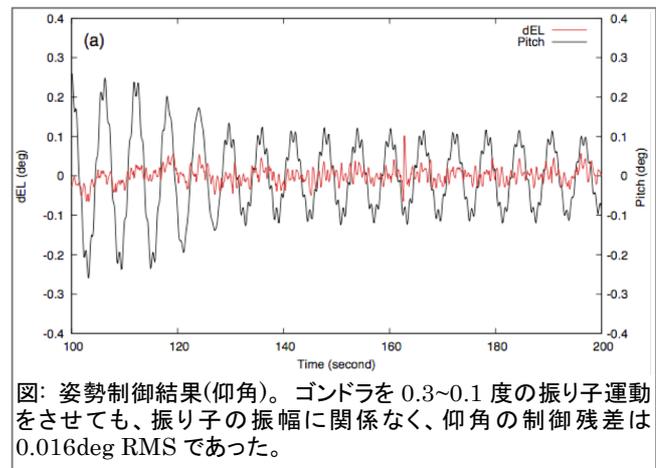
システムとして成立させるまでには多くの課題が予想される。次号機では高周波電波望遠鏡のシステム成立性を検証するためのフライト実証実験が必要と考えられる。次号機は、大樹町または豪州での実験を考える。工学委員会戦略的開発実験の枠組みにて、現在主鏡面の開発研究をおこなっており、初号機の開発と並行して進めている。

4. 実験場に入るまでの準備

JAXA 宇宙科学研究所(相模原キャンパス)の気球工学実験室にて、フルインテグレーションをおこない、組立手順の確立、気球工学側機器との電気インターフェース試験、全機能の動作確認試験をおこなった。その前に、前年度課題であった(1)新しい太陽シールドの設置と白色塗布による気密容器群の熱制御の改善とチャンバー試験、(2)摩擦が増大してきた PIVOT を交換するための新規開発とその10G 荷重試験、(3)広帯域 VLBI データ記録装置の繰り返し動作試験、(3)電池ボックスのヒーター動作自動化、(4)運用シーケンス大部分の自動化、(5)太陽センサの新規開発、(6)天体追尾観測機能の追加、(7)地上 VLBI 観測網との合同運用試験、(8)故障を誘発しない輸送計画の策定、などをおこない、信頼性を上げてきた。赤外線グループ実験室をお借りすることで、吊った状態で姿勢制御をおこないながら目標電波源の捕捉と指向追尾の実験、および VLBI 観測試験をおこなうことができた。この実験室には、クレーンと天体観測が可能な開口窓という稀有の設備があり、観測システムの end-to-end 機能試験が相模原キャンパスにいながら可能となった。

5. 実験場での活動

相模原で全ての機能を確認したゴンドラシステムは一旦解体したうえで輸送し、2017年6月26日から TARF の組立室にて再びフルインテグレーションをおこなった。全ての機器が正常動作し、輸送中の故障は発生していないことが確認できた(大樹町地上局 1.5m 鏡の架台は崩れていたため修理した)。以下の表に、実験場でおこなった準備活動と、その達成状況を示す。地上で検証できる範囲において、ミニマムサクセス(電波源を指向して受信)、フルサクセス(VLBI フリンジ検出)、エキストラサクセス(基線変動補正)の機能確認をすることができた。



予定していた現地準備作業	達成状況
フルインテグレーション	実施
姿勢制御試験	実施
姿勢決定センサの野外校正	3回実施。太陽が見えない時間帯、曇りにより、太陽センサ校正が遅れた。
観測ターゲット自動捕捉・追尾試験	実施
地上VLBI観測網との干渉試験	実施
振り子VLBI干渉試験	2回実施。1度目は地上VLBI局が観測失敗。
天体追尾試験	実施。月の追尾観測をおこなった。
天体の干渉試験	観測は完了。相関処理中。
大型クレーン長周期振り子試験	実施。風が強く、格納庫の中へ移動。野外観測を諦めたが、メインの姿勢・位置決定の獲得目標は達成し、再試験不要と判断。
フローティング試験	実施。電氣的・物理的に地上から浮いた状態で3時間の運用試験を実施。ただし、角度エンコーダに1発のデジタルノイズを観測。致命的な現象へ波及しないと分析、対策不要と判断。
通信感度試験	PASS。ただし、前日におこなった姿勢制御系電流リミットの変更でバグが混入していたことが発覚し、試験が一時中断した。
放球台リハーサルオペレーション	2度のやり直しののちPASS。1度目は放球当日の機器電源投入シーケンスを再現できていなかったことが判明したため。2度目は冗長系PCへの切替結果に不明瞭な点が観測されたため。
Flight Readiness Reivew	PASS
前日実時間運用試験(地上VLBI観測網)	実施
前日最終作業	実施
放球	天候により放球中止。全ての機器が正常ステータス。

6. 放球

7月24日早朝の放球のチャンスが訪れた。放球予定時刻は3:40AM。航跡予想が出され、ジェット気流が速くブーメラン飛行とはならない見込みとなった。レベルフライト高度に到達してから切り離しまで90分間の予想となった。前日7月23日のAM3:40から、地上VLBI局は、大樹町のPI運用室からの指令で実時間観測試験をおこなって本番に備えた。ゴンドラシステムには電源が投入され、防水封止が施された。23:00PMから放球準備が開始され、放球予定時刻まで気球側、PI側ともに順調に推移した。地上VLBI局は予定通り追尾と記録運用が開始された。しかし放球予定時刻をしばらく過ぎても、地上の気象条件が合わず、放球は中止となった。

7. 次年度の実験提案

システムは再び分解され、相模原キャンパスに持ち帰っている。我々は2018年度の大樹町実験を再度提案する。ブーメランフライトの放球実績が多いと聞く6月中旬～7月中旬のシーズンをターゲットとして希望したい。2017年度にTARF活動中に課題として上がった、PIVOT支持構造体の改造による高所作業車不要化、放射場モデルの詳細化を通じた熱設計の見直し、総重量削減、テレメトリQLの視認性の向上、スタートラッカーの改良、冗長系PC切替信頼性、などについて取り組んでいる。2018年度のTARF活動では、作業工程を大きく削減しPIグループ自身だけでかなりの準備作業をおこなえるようになる見込みであり、フォークリフト免許・移動式クレーン免許をPI自身で獲得したこと、大型クレーン試験は2017年度で完了したため不要なこと、PIVOT支持構造の改造により高所作業車が不要になること、放球までの全てのシーケンスを経験し効率化を検討できること、などがそれに寄与する。