

気球 VLBI 実験:

2018 年の実験の報告と 2019 年の実験再提案

ISAS/JAXA, NAOJ^A, 名大^B, 東大^C, 茨城大^D, 大阪府立大^E, NICT^F, 理研^G, 早稲田大^H, 防衛大^I, 阪大^J, 山口大^K

土居 明広, 河野 裕介^A, 木村 公洋^B, 中原 聡美, 下向 怜歩^C, 長谷川 豊, 小山 友明^A
 鈴木 駿策^A, 亀谷 収^A, 村田 泰宏, 米倉 覚則^D, 岡田 望^E, 保田 大介^E, 関戸 衛^F
 海老沢 研, 井上 芳幸^G, 石村 康生^H, 本間 希樹^A, 小川 英夫^E, 小木曾 望^E, 田中 宏明^I,
 芝井 広^J, 成田 正直, 莊司 泰弘^J, 坂東 信尚, 藤澤 健太^K, 青木 貴弘^K



Payload: Balloon-borne VLBI Station

Total weight	611.5 kg (2018)
Height	4180 mm
Width	2600 mm
Depth	1400 mm

Radio Telescope

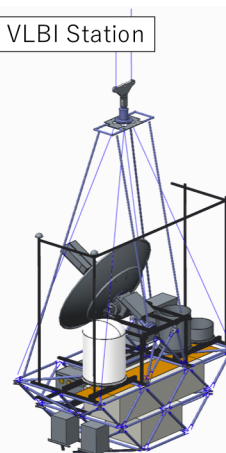
- Φ 1.5m Cassegrain
- HPBW = 0.6 deg at 20 GHz

Frontend

- 19.5—23.0 GHz
- LHCP/RHCP (Room Temp.)

Backend

- Oven-Controlled X'tal oscillator (OCXO)
- VLBI sampler ADS3000+
- recorder VSREC (8Gbps)
- VLBI sampler K5VSSP32 + NUC (128Mbps)
- digital spectrometer



Attitude Control

- Coarse Az motor "PIVOT"
- EL actuator
- AZ reaction wheel

Attitude Determination

- Coarse sensors
 - Geomagnetic sensor
 - GPS Compass
 - Sun sensor
- Fine sensors
 - 3-axis Fiber-optic/MEMS gyro
 - (Star tracker x2)

Position Determination

- GPS
- gyros, accelerometer

Power Supply System

- Li-ion Batteries (LiFePO4)
- 400—700W
- 5000Wh

概要

気球 VLBI 実験は、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の、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ものである。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) にて実験をおこなう。将来のサブミリ波帯 (>300 GHz) での飛翔体 VLBI 実現するにあたり、まだ関連技術にフライト実績のない周波数標準源振と広帯域データ記録システムの搭載、基線補償技術について、また望遠鏡指向精度を達成するコンセプトの検証をフライト実験を通じておこなう。前回 2017 年度は、気象条件の変化により放球直前で延期となった。今回 2018 年度も、準備は整っていたが気象条件に恵まれず、放球されなかった。実験システムはそのまま保存している。次年度の放球を再提案する。実験場での準備作業と地上実験について報告する。

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 Gondola 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 Gondola 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 Gondola 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。また、この実験は、将来の干渉計サイトとしての気球環境の可能性についての調査になる。

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である。天体 3C454.3 の電波も観測する計画である。搭載する VLBI 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 を想定する。この周波数帯の宇宙電波でも、地球大気をいくつか通過してくるが、対流圏中の水蒸気の揺らぎにより波面が乱され、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 は現在、基線長 16 km (10 ミリ秒角オーダーの空間分解能に相当) で運用されている。大陸間基線の高周波 VLBI の実現は、現在 230 GHz 帯以下 (波長 1.3 mm 以上) で達成されている (e.g., Event Horizon Telescope Project: EHT)。300 GHz 以上での VLBI は、将来可能であったとしても、少数の地上サイトに限定されると思われる。この問題は、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。大気に影響を受けない新たなサイトの獲得という面と、移動する観測局の獲得という2つの側面がある。移動局は、天体観測におけるサンプリング空間の向上に寄与し、複数局分の働きをする。

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」、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) の観測が必要であると考えられている。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

成層圏での電波干渉計/VLBI は、世界的にみて、類似のミッションは存在しない。我々は、将来のサブミリ波 VLBI 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、ミッションを策定する前にフィージビリティを確認すべき技術的な課題が6つ抽出された (表)。VLBI を確立するには、(A)天体電波に望遠鏡を向けて受信する、(B)安定した干渉計システムで記録する、ことができればよい。(A)に関しては、同等技術のフライト実績が世界的に見られる。一方、(B)に関してはフライト実績がなかった。これらを 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検討した。

(B)に関してできるだけクイックに、しかも将来ミッション(300 GHz)の要求精度を検証できる試験フライトミッションをデザインした。それが今回提案する実験である。コストのかなりを占められる(A)に関する部分は大幅に簡素化した (口径 1.5m, 20 GHz 常温受信機, 姿勢制御 0.1 度角)。開発した Gondola

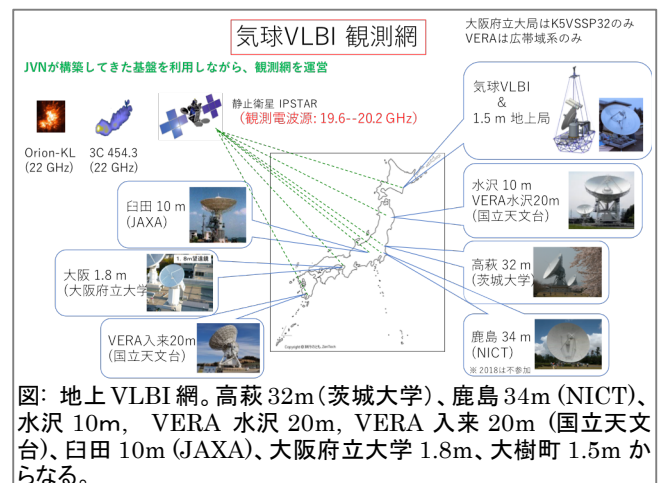
ランスシステムは、地上実験で必要な性能基準をクリアし、フライト実験の段階に移行した。

将来必要な高周波電波望遠鏡については、世界的な実績があっても、統合的なシステムとしての成立性は検証の必要があり、課題として残る。姿勢制御については、振り子振動(～0.1 度角)に影響されない仕組みが必要であるが、NASA WASP のコンセプトを取り入れ、今回のフライト試験機に搭載している。望遠鏡面については、工学委員会戦略研究の枠組で試作を含めた開発をおこなっているなど、並行して一部着手している。地上の VLBI プロジェクトの結果がある程度見え始め、将来の飛翔体 VLBI の議論が世界的に始まっている。今回のフライト実験で干渉計部分の技術的見通しを得たうえで、その後は国際的な協力関係のなかで関連する技術を統合し、豪州などの機会を利用したフライト実験へつなげてゆきたい。

将来科学ミッションの要求		同等技術のフライト実績	本フライト実験での検証	我々の地上実績
周波数標準源振 (OCXO) の搭載	安定度 10 ⁻¹³ 以下	×	○	8x10 ⁻¹⁴
超広帯域データレコーダーの搭載 (A/D converter, SSD)	32Gbps 以上 (8Gbps xN) 保温と排熱 (アクティブ熱制御)	×	○ (N=1)	8 Gbps, 250 Watt, ～15℃
基線変動補正	50ミクロン以下	×	○	40ミクロン
姿勢制御	18秒角以下 (振り子キャンセル)	○ WASP (NASA) など	△ (姿勢決定系が～60秒角)	振り子キャンセル OK (70秒角)
サブミリ波望遠鏡	口径2m以上, 鏡面精度30ミクロン以下	○ BLAST (米国), PRONUS(仏)	×	(センチ波望遠鏡を搭載)
冷却受信機の搭載	4ケルビン, 2週間以上	○ BSMILES (NICT), STO (NASA)	×	(常温受信機を搭載)

4. 実験場に入るまでの準備

我々の Gondola システムは完成しており、前年度の大樹町滞在時、Flight Readiness Review を通過した。その後、いくつかの小さな改良をおこなった: (1) Gondola 構体を白色塗布し熱変形に対する懸念の緩和、(2) Gondola が想定外に高速回転した場合に対応できる PIVOT ブレーキの追加とチャンバー動作試験、(3) スタートラッカーのチャンバー内撮影試験、(4) 姿勢制御系の高周波化 (10 → 20 Hz)。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、組立手順の再確認、気球工学側機器との電気インターフェース試験、機器の動作確認を総合的におこなった。VLBI 観測システムは前年度から変更がないため相模原での VLBI 観測試験を省略したが、国立天文台水沢 VLBI 観測所が主導して多くの VLBI 観測試験が地上観測網にておこなわれ(図)、信頼性向上と運用手順の確認をおこなった。



5. 実験場での活動

相模原で動作確認がおこなわれた Gondola システムは、一旦解体したうえで輸送し、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。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)の機能確認をおこなった。

時系列で述べる。気球 VLBI の PI グループは単独で TARF 入りし (6/7)、6/28 のフライトレディを目指して準備を開始した。6/18 に大気球グループが TARF に到着、共同準備作業を開始した。6/25 に嚙合試験合格、6/26 に通信感度試験をおこなうが運用手順に問題があり、6/28 に再試験・合格、放球台に装填された。6/29 に最終嚙合試験合格、Flight Readiness Review に通過した。予定より一日遅れとなったが、準備は概ね順調であった。しかし、気象条件が当面整う見込みがないことが判明し、PI チームは一旦本州に戻った (7/3)。放球に備え、PI チームは 8/4 に再び TARF 入りした。しかし気象条件が悪化し、残る放球ウィンドウでの可能性がほぼなくなったため、

8/7 にゴンドラシステムを保存状態にした。8/10、チームは TARP からの撤退を完了した。

現場での立ち上げ作業について記載する。TARP 到着後2日で (6/10)、気球局--大樹地上局--臼田局の間で VLBI フリンジ(狭帯域系)を検出し、システムの主要部分の健全性をまず確認できた。広帯域 VLBI 系は、輸送中の振動によるものと思われる不具合(接触不良)が発生したが固定方法の改善により翌日解決した。またフリンジ形状の異常が本州の相関局から報告され、これは単なるデータ処理上の誤りであったことが後で判明したが、当初は観測システムのハードウェアを疑ってしまい、健全性の再確認にかなりの時間を要した。ギガビットのデータを相関局とやりとりする必要があり、作業時間の多くがデータ伝送で占めた。広帯域 Wifi 回線を自前で用意していたのだが、早々に容量を使い切ってしまった。また、フィールドでは無磁気回転台を用いた地磁気計・GPS コンパス・太陽センサの校正、STT バッフル試験もおこなった。

6. 次年度の実験提案

ゴンドラシステムは、Flight Readiness Review を通過した状態からリチウムイオン電池を抜いた状態で保存されており、次年度の再起動時に問題が生じるリスクは小さい。我々は 2019 年度の大樹町実験を再度提案する。気球 VLBI はこれまで3度放球台に載ったが、いずれも放球機会を逃している (2016 年は PI 側準備不足、2017 年と 2018 年は天候条件)。新提案では、大樹町での長時間フライトの放球実績が多いと聞く 6 月初旬を含むシーズンを希望する。2018 年度は春に豪州実験が運用されたため、この時期を希望できなかった。この時期だと 2018 年度実験で予定していた2天体のうち1天体の観測可能性が失われ、結果的にレベルフライト要求時間が削減される。また、姿勢制御をおこなうことから、振り子擾乱を小さく抑えたいため最低高度の要求がある。風圧 (\propto 気圧 \times 風速²) を指標に考えると、50 hPa 以上 (19 km 以下) で急激に悪化する傾向がみられる。この高度では、電波伝搬の観点では実質的には影響はない。

謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費 JP16K05305, JP17H02874, JP26120537, カシオ科学振興財団(2014), 稲盛財団(2015) の助成を受けました。また、本研究の一部は、理化学研究所-JAXA 共同研究契約のもとで実施されました。本実験は、宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所が提供する大気球による飛翔機会を利用します。

References

- Akihiro Doi, Yusuke Kono, Kimihiro Kimura, Satomi Nakahara, Tomoaki Oyama et al. "A Balloon-Borne Very Long Baseline Interferometry Experiment in the Stratosphere: Systems Design and Developments", Journal of Advances in Space Research, 2018, in press. (DOI: 10.1016/j.asr.2018.09.020)
- 土居明広、河野裕介、木村公洋、中原聡美、保田大介ほか、「気球 VLBI 実験:2017 年の実験の報告と実験再提案」, 大気球シンポジウム 2017, SA6000103021
- 土居明広、河野裕介、木村公洋、馬場満久、松本尚子ほか、「気球 VLBI 実験:2016 年の実験の報告と実験再提案」, 大気球シンポジウム 2016, SA6000057002
- 河野裕介, 土居明広, 木村公洋ほか, 「気球 VLBI 地上振り子試験」, 宇宙科学シンポジウム 2018, SA6000118081
- 中原聡美, 土居明広, 河野裕介, 「気球搭載型 VLBI 用電波望遠鏡の姿勢決定装置の開発状況」 宇宙科学シンポジウム 2017, SA6000060197
- 土居明広, 田中宏明, 石村康生ほか, 「気球搭載用サブミリ波望遠鏡主鏡の試作」, 宇宙科学シンポジウム 2017, SA6000060198
- Satou, Y., Doi, A., Ishimura, K., Tanaka, H., Ogi, Y., Higuchi, K., Kono, Y. and Kimura, K.: Development of High Precision Reflector for Balloon-borne Radio Telescope, 30th International Symposium on Space Technology and Science, 2015-c-31, 2015, pp. 1-6.