

気球 VLBI 実験:

2021 年の実験報告と 2022 年の実験再提案

河野裕介, 土居明広^A, 小山友明, 亀谷收, 村田泰宏^A, 岳藤一宏^A, 米倉覚則^B, 岡田望^B, 本間希樹,

国立天文台, JAXA^A, 茨城大学^B

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。これまでのところ気象条件等の問題で放球機会が得られていない。実験システムは 2018 年度から放球場で待機状態にあった。2021 年 5 月に大樹実験場にてゴンドラの立ち上げ作業を行い健全性の確認ができ FRR を実施した。しかしながら気象条件のため 2021 年度も放球が実施されなかった。よって 2022 年度の放球を再提案する。

1. 2021 年度の実験の概要

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をフライト試験機を開発した (下図)。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



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



Altitude Control

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

Altitude 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

図 気球 VLBI ゴンドラ外観と搭載機器概要

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」を飛行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。

2021年の実験では、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ことを目指した。日本の地上望遠鏡群も実験に参加できる範囲の低周波帯 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 Inmarsat であり、強度の大きな人工電波である。天体(フライト時期で調整)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

2019年ミリ波帯にて、Event Horizon Telescope 国際プロジェクトが 230 GHz 帯(波長 1.3 ミリメートル)でのブラックホールの直接撮像に成功した(The Event Horizon Telescope Collaboration 2019)。データレートの飛躍的な向上(64Gbps)、非常に観測に恵まれた南米の ALMA サイト、マウナケアサイト、南極などの電波望遠鏡が参加したことや、ALMA の電波望遠鏡群をフェイズドアレイ合成し高感度望遠鏡化できたことなどがこの成果につながったと言える。日本の研究者チームも ALMA 山頂サイトの望遠鏡の信号の山麓のレコーダまでのデジタルデータ伝送や、イメージング技術の提供、サイエンス検討などで貢献している。

EHT の成果は、撮像によって直接的にブラックホール周辺の物理現象にアプローチすることができるようになったことを意味する。理論的研究も活性化し、銀河宇宙の進化の解明につながるブラックホールスピンの存在とその計測、一般相対論に対抗する諸学説との切り分け、強重力場・強磁場における相対論的プラズマ現象の解明など、強く期待されるようになってきた。しかしこれらの解明には、より高い空間分解能とより高画質なイメージング能力が必要である。空間分解能を向上させる一つの手段がより高い周波数での観測であり、高画質イメージングをもたらす手段の一つが基線群の拡充である。しかし望遠鏡の数の増加には限界があり、特にサブミリ波である 300GHz 以上で観測が十分に行える地上サイトは非常に限られている。気球や衛星の電波望遠鏡の投入は、大気の影響のないサイトの獲得という意義のみならず、位置が移動するため、時間の経過とともに「VLBI の実質的な基線数」を劇的に増加させることに寄与する。将来、サブミリ波~THz 帯におけるマイクロ秒角分解能のパラメータ領域は、飛行体電波干渉計の独壇場となる可能性がある。

飛行体電波干渉計には、スペース VLBI と成層圏気球 VLBI が考えられる。スペース VLBI ミッションは、完全な大気フリーな観測環境で、基線が非常に高速に変化するために、高画質化に決定的に寄与する手法の一つである。2019年9月には Caltech の Keck Institute にて NASA と EHT コラボレータを中心に将来のスペース VLBI の実現に向けたワークショップが米国で開催された(KISS workshop: http://kiss.caltech.edu/workshops/black_hole/black_hole.html)、サイエンス目標とミッション設計等が検討された。しかしながらスペース VLBI の大きな課題の一つにダウンリンクの問題がある。EHT の 64Gbps かそれ以上の広帯域なデジタルデータの常時ダウンリンクを実現するには、宇宙通信技術の発展を待つ必要がある。我々気球 VLBI グループの活動は、衛星計画のプリカーサー候補として注目され、この KISS workshop に招待された。気球では広帯域レコーダを搭載し、物理的に回収することができる。VLBI のデータ処理は後処理であり、着水・着陸後に干渉縞を分析する。また最先端のデバイスを短いタイムスケール・比較的小さなコストでフライトすることが可能であることは、気球を用いる大きなメリットである。気球局は、1~2 局であっても日々フライトの位置が変化するためイメージング上の基線数の増加に大きく寄与し、グローバル VLBI 観測網の飛躍的な性能向上につなげることができる。

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るとされる(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 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た。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。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、将来への展開を検討していく。

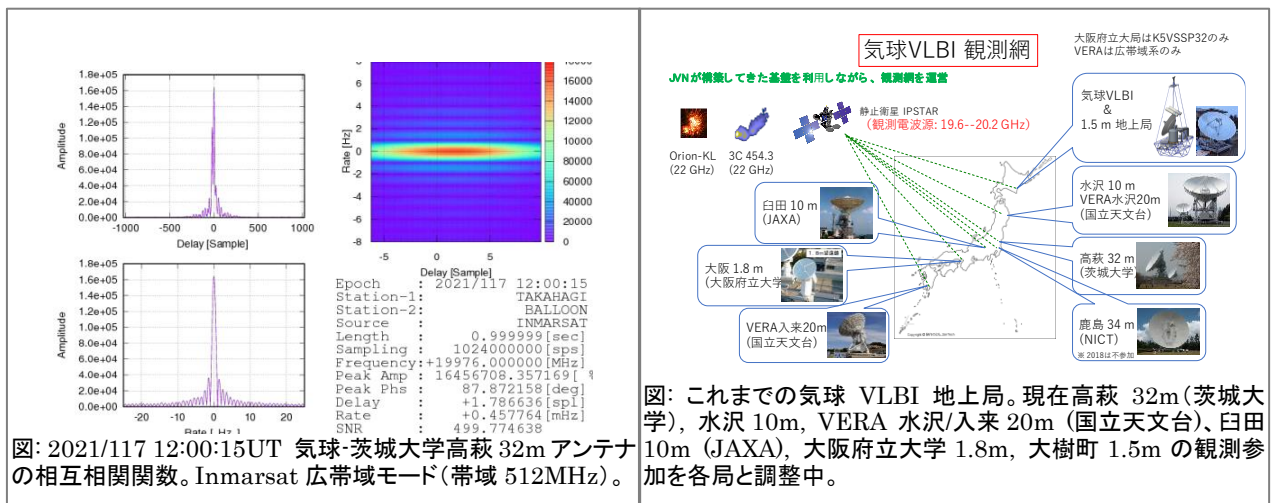
表 気球 VLBI の技術課題と検証方法(2021年度フライトモデル。2022年度モデルでは超広帯域データレコーダの部分に変更となる可能性がある)

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°C
基線変動補正	50マイクロン以下	×	○	40マイクロン
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マイクロン以下	○ 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. 2021年度の活動

気球 VLBI Gondola システムは、2016年度より大樹実験場で放球準備活動を行ってきた。主に気象条件によって放球の機会が得られていない。

2021年度は、5月17日よりVLBIチームは大樹入りした。まず前年度にFRRを通過し実験場で保管されていたGondolaの再起動作業が行われた。5月22日には、地上VLBI局(高萩32mアンテナ、水沢・臼田10mアンテナ、大樹町1.5mアンテナ、VERA局)と気球Gondolaの間でフライトリハーサル形式でVLBI観測を行った。Gondolaは地上通信シミュレータを用いてフライト運用に近い状態でリハーサルは行われた(ただし電源はACを利用)。この観測で全基線のプリンジが得られ、Gondola望遠鏡の健全性と地上局のスタンバイが確認できた。また本VLBI実験は昨年度までは1.5日に放球を確定して放球に



対応することになっていた。地上局はほかの目的の観測が行われており、気球との同時観測を行うには

調整時間が必要であるためである。今年度からは、直前に気象条件が好転することに対処できるように放球の0.5日前に放球を決断する体制が5月末から8月末まで維持された。

その後、感度試験、かみ合わせ試験などを経てFRRを通過した。その後長期にわたって気象条件が適さないことが予測されたため実験場を離れ、放球機会を待った。

しかしながら8月末までのすべての放球ウィンドウでVLBI Gondolaの放球に適する気象条件が整わず、2021年度も放球が見送られた。

6. 次年度の実験提案

GondolaはFRRを通過した状態からリチウムイオン電池と一部の受信機が外され保存されている。

これまで6年にわたり放球がなされていない原因は主に気象条件である。高層風、ジェット気流それぞれの悪条件が複雑に重なり満たさない状況が続いている。近年では1時間弱のレベルフライトを要求する数100kgクラスのGondolaは放球されていない。そこで2022年度は電波望遠鏡を大幅に50cmへ小型化することを検討している。これによりGondola構造体を含めて軽量化でき、かつビーム幅が大きくなるため姿勢サーチ時間の削減によりレベルフライト時間が35分へ短縮できる。気密容器や姿勢決定制御系は現行モデルを載せかえることにし、機器配置などは大幅に変更となるが、ソフトウェア等の変更はなく開発リスクは小さい。大規模な開発項目はGondolaと小型電波望遠鏡であるが、これまでの知見を用いて進めて行く。前ページの気球VLBIの技術課題と検証方法に対して、超広帯域データレコーダを削減する可能性があるが、本ミッションのサクセスクライテリアとして定めていた成層圏でのフリッジ検出や、エキストラサクセスである基線変動の補正の達成に関しては影響がない設計変更である。

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", *Advances in Space Research*, Volume 63, Issue 1, p. 779-793 (DOI: 10.1016/j.asr.2018.09.020)
- 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 ミッション」, 大気球シンポジウム, 2015, SA6000044037
- 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
- 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, 中原 聡美ほか, 「気球 VLBI 実験:2018 年の実験の報告と2019 年の実験再提案」, 大気球シンポジウム 2018, SA6000128002
- 河野 裕介, 土居 明広, 木村 公洋, 中原 聡美ほか, 「気球 VLBI 実験: 2019 年の実験の報告と2020 年の実験再提案」大気球シンポジウム 2019, SA6000140030
- 河野 裕介, 土居 明広, 木村 公洋, 中原 聡美ほか, 「気球 VLBI 実験: 2020 年の実験の報告と2021 年の実験再提案」大気球シンポジウム 2020, SA6000151014
- 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.
- 土居明広, 河野裕介, 山下一芳, 佐藤泰貴「気球実験のための姿勢制御システムの開発」, 宇宙航空研究開発機構研究開発報告, 20(009), 57-67, 2021