

令和 3 年 6 月 10 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H02874

研究課題名(和文)成層圏における電波干渉計フライト実証試験の再挑戦

研究課題名(英文)The flight test of radio interferometry in stratosphere

研究代表者

土居 明広(Doi, Akihiro)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・助教

研究者番号：90403641

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 5,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ブラックホール直接撮像による研究の将来を見据え、大気の影響を受けない新たな天文学研究サイトを切り拓くために、成層圏に電波望遠鏡を気球で打ち上げ、世界初の成層圏電波干渉計を実現するものである。技術フィージビリティスタディのためのフライト実証機は開発済みであり、一度放球台に乗ったが、フライトは実施されていなかった。フライト実験の再挑戦をおこなうのが本研究の範囲である。

実験準備は順調に推移した。しかし、3年+延長1年の間、気象条件および国内のヘリウムガス流通量の問題といった外部要因により、放球は実施されなかった。フライト実証機の性能は維持されており、将来の放球実現を目指す。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発したフライト実証機には数多くの新規技術開発が含まれている。我々のフライト実証機には、他の成層圏の運用システムに利用できる、高度なアンテナ指向制御システムを備えている。また、成層圏における大容量データ処理システム、高精度時刻系システム、マイクロオーダーの位置決定システムも備えており、今後の科学研究および成層圏を利用する産業界に波及することが期待される。

研究成果の概要(英文)： This research aim to launch a radio telescope into stratosphere using a scientific balloon, which will be the 1st radio interferometry in the world, in order to open a new site for future observations. Our flight had not been done yet, while the flight model for technical feasibility studies has been developed. Hence, this study scopes the achievement of the flight experiment.

All preparations had gone well. However, external factors, such as incompatibility with wether conditions or the Helium supply problem in Japan, prevented from our flight throughout three years and a one-year extension. The performances of the flight model has been maintained at a very high level. We are going to plan another flight in the future.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：宇宙工学 気球 干渉計 飛翔体 電波天文学 VLBI ブラックホール

1. 研究開始当初の背景

2017年度から研究を開始した。当時、LIGOにより重力波イベント GW150914 が検出され、重力波の存在が証明されたのみならず、ブラックホール連星系自体の発見とその衝突現象の発見、30~60 太陽質量といった比較的重いブラックホールの実在の証明を示した時であった。また、Very Long Baseline Interferometry (VLBI) の電波干渉計技術を用いた Event Horizon Telescope がブラックホールの直接撮像に挑んでいた時であった。ブラックホールに関する観測天文学が本格化する時代に備え、従来横たわっていた観測条件の限界を突破するための新しい観測アプローチを開拓するのが、この申請研究が扱う気球 VLBI の開発である。

本研究は、成層圏に電波望遠鏡を気球で打ち上げ、世界初の成層圏電波干渉計を実現するものである。フライト実証機により、大気の影響を受けない新たな天文学研究サイトを切り拓き、サブミリ波/テラヘルツ帯干渉計の将来計画を検討する。

フライト実証機は開発済みであり、2016年の夏に一度放球台(打上装置)に乗ったが、条件に到達せずフライトは実施されなかった。フライト実験の再挑戦をおこなう必要があった。

2. 研究の目的

本申請研究は、「気球 VLBI」の技術的フェージビリティスタディを目的としている。将来の成層圏に対応した VLBI 観測局に必要なと考えられる技術要素: (1) 気球-ゴンドラ系でなす振り子振動環境における電波望遠鏡アンテナ指向技術、(2) 同じく振り子振動環境における観測局位置の決定技術、(3) 同じく振り子振動環境における周波数標準時計の安定度、(4) 成層圏環境における高速データ記録装置システムの排熱機構、のフライト環境における検証をおこなう(なお、(5) 成層圏環境における電波望遠鏡高精度鏡面の維持、については別の研究プロジェクトにて並行して開発研究を進めている)。

3. 研究の方法

将来ミッションの観測周波数 300 GHz 程度を想定した場合、観測システムの周波数安定度は数 $\times 10^{-13}$ 以下、観測局の位置精度を含めた幾何遅延安定度は 50 ミクロン以下が必要である。気球における振り子環境において、これらを実現する技術的フェージビリティを検証するため、実証機を用いたフライト実験をおこなうアプローチである。干渉計を形成するための地上局は、日本の観測環境においては 20 GHz 帯が安定的に観測できる最高周波数であるため、今回のフライト実証機は観測システムは 20 GHz 帯に対応するかたちで構築した。観測目標電波源を静止衛星の強力な人工電波源とすることで、高い信号雑音比で干渉計安定度を検証し、300 GHz 相当における必要な安定度要求に適合するかを検証することができるようシステムデザインしている。なお、開発段階において成層圏環境相当の地上検証実験は、以前助成された科学研究費「ブラックホール直接撮像をおこなう気球サブミリ波 VLBI のキーテクノロジー(新学術領域研究)」にて完了している。

フライト実験は、JAXA 大樹航空宇宙実験場 (TARF) における共同利用プログラムを利用しておこなう。

4. 研究成果

2017年の夏に気象予測が放球条件に合致し、気球にヘリウムガスを注入し放球体制を構築するまでに至った(図1)。しかし気象条件(地上風)の急変により、直前に放球が中断された。JAXA TARF の判断による。気球は年度内の再利用可能な状態ではなく、実験は次年度へ延期となった。

2018年も、放球に必要な事前準備を順調に整えることができたが、シーズン中を通じて気象条件に恵まれることがなく、放球されなかった。

2019年は、日本国内におけるヘリウム流通量が細り、本実験の放球に必要なヘリウムガスを JAXA TARF が確保することができなかったため、当該年度の実験の中止が年度当初に決定した。この年は、

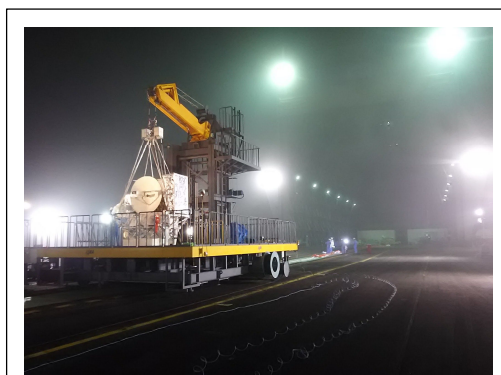


図1:放球直前段階の気球 VLBI (2017年)

本申請研究の3年度計画のうちの最終年度であったが、研究期間を1年間延長して、2020年度の放球を目指すことになった。

2020年は、放球に必要な事前準備を順調に整えることができたが、シーズン中を通じて気象条件に恵まれることがなく、放球されなかった。過去の気象予報情報を用いて、放球候補日の設定プロセスの過去検証・改善を実験場とともにこない、放球可能性を向上する検討をおこなった。

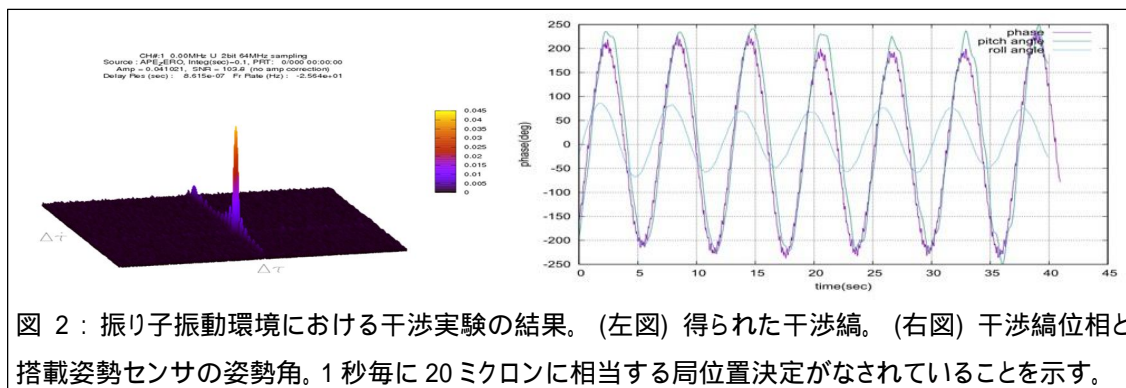


図 2： 振り子振動環境における干渉実験の結果。(左図) 得られた干渉縞。(右図) 干渉縞位相と搭載姿勢センサの姿勢角。1秒毎に20マイクロンに相当する局位置決定がなされていることを示す。

以上のように、研究準備段階は計画通りに進めることができたが、外的要因により放球にはいたらなかった。この期間、地上にてさまざまな性能確認試験をおこない(図2)、観測システムの堅牢性はさらに高まった。観測システムは高い性能を維持されているため、次年度以降の実験実施に期待をつなげ、フライト実験の実現を引き続き目指してゆく。

本研究期間において、気球 VLBI 観測局のシステム設計および開発に関する学术论文を出版した。また、地上におけるさまざまな検証について多数の学会発表をおこなった。またこの気球 VLBI 実現に必要な将来の関連技術/計画に関する学术论文も出版した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Doi, Akihiro; Kono, Yusuke; Kimura, Kimihiro; Nakahara, Satomi; Oyama, Tomoaki; Okada, Nozomi; Satou, Yasutaka; Yamashita, Kazuyoshi; Matsumoto, Naoko; Baba, Mitsuhsa; Yasuda, Daisuke; Suzuki, Shunsaku; Hasegawa, Yutaka; et al.	4. 巻 63
2. 論文標題 A balloon-borne very long baseline interferometry experiment in the stratosphere: Systems design and developments	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Advances in Space Research	6. 最初と最後の頁 779-793
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.asr.2018.09.020	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 小木曾 望、児玉 峻、木村 公洋、佐藤 泰貴、土居 明広、田中 宏明	4. 巻 15
2. 論文標題 多目的最適設計法を利用した気球VLBIにおける副鏡調整機構の故障を考慮した主鏡面構造設計	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 航空宇宙技術	6. 最初と最後の頁 91-100
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2322/astj.15.91	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kari Haworth, Michael D. Johnson, Dominic W. Pesce, ..., Akihiro Doi, et al.	4. 巻 51
2. 論文標題 Studying black holes on horizon scales with space-VLBI	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astro2020: Decadal Survey on Astronomy and Astrophysics, APC white papers	6. 最初と最後の頁 id. 235
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計16件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 土居明広
2. 発表標題 気球VLBI実験2018報告
3. 学会等名 水沢VLBI観測所VERAユーザーズミーティング
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居明広, 河野裕介, 木村公洋, 中原聡美, 下向怜歩, 長谷川豊, 小山友明, 鈴木駿策, 亀谷収, 村田泰宏, 米倉覚則, 岡田望, 保田大介, 関戸衛, 海老沢研, 井上芳幸, 石村康生, 本間希樹, 小川英夫, 田中宏明, 小木曾望, ほか
2. 発表標題 気球VLBI実験2018
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム2019
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 中原聡美, 土居明広, 河野裕介, 金口政弘, 山下一芳, 下向怜歩
2. 発表標題 ニッケル水素(NiMH)およびリン酸鉄リチウム(LiFePO ₄)電池セルの低温放電特性試験
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム2019
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 土居 明広, 河野 裕介, 木村 公洋, 中原 聡美, 下向 怜歩, 長谷川 豊, 小山 友明, 鈴木 駿策, 亀谷 収, 村田 泰宏, 米倉 覚則, 岡田 望, 保田 大介, 関戸 衛, 海老沢 研, 井上 芳幸, 石村 康生, 本間 希樹, 小川 英夫, 小木曾 望, 田中 宏明, 芝井 広, 成田 正直, 莊 司 泰弘, 坂東 信尚, 藤澤 健太, 青木 貴弘
2. 発表標題 気球 VLBI 実験: 2018 年の実験の報告と 2019 年の実験再提案
3. 学会等名 大気球シンポジウム
4. 発表年 2018年～2019年

1. 発表者名 下向怜歩、河野裕介、土居明広、中原聡美、馬場満久、海老沢研
2. 発表標題 気球VLBI搭載用 Star Tracker (STT) の開発
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居 明広
2. 発表標題 気球VLBI実験2017の報告と来年度の計画
3. 学会等名 第15回水沢VLBI観測所ユーザーズミーティング
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土居 明広
2. 発表標題 気球VLBI2017実験の報告と来年度実験の計画
3. 学会等名 2017年度VLBI懇談会シンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 土居 明広
2. 発表標題 高萩32mと成層圏VLBI局による気球VLBI実験
3. 学会等名 茨城大学重点研究 研究会「高萩・日立32m電波望遠鏡によるサイエンス」
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河野 裕介, 土居 明広, 木村 公洋, 小山 友明, 中原 聡美, 馬場 満久, 鈴木 駿策, 保田 大介, 岡田 望, 長谷川 豊, 亀谷 収, 米倉 覚則, 関戸 衛, 村田 泰宏, 山下 一芳, 松本 尚子
2. 発表標題 気球VLBI地上振り子フリッジ試験
3. 学会等名 第18回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居 明広, 河野 裕介, 木村 公洋, 中原 聡美, 保田 大介, 長谷川 豊, 岡田 望, 村田 泰宏, 鈴木 駿策, 小山 友明, 下向 怜歩, 小川 英夫, 海老沢 研, 本間 希樹, 真鍋 武嗣, 米倉 覚則, 関戸 衛, 亀谷 収
2. 発表標題 気球VLBIシステムとその開発
3. 学会等名 第18回宇宙科学シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 保田大介, 岡田望, 木村公洋, 小川英夫, 真鍋武嗣, 土居明広, 長谷川豊, 村田泰宏, 中原聡美, 河野裕介, 小山友明, 亀谷収, 鈴木駿策, 米倉覚則, 関戸衛
2. 発表標題 大阪府大 1.8 m 電波望遠鏡の K 帯給電系開発と気球 VLBI 実験
3. 学会等名 日本天文学会, 日本天文学会2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 河野裕介, 土居明広, 木村公洋, 小山友明, 中原聡美, 鈴木駿策, 保田大輔, 岡田望, 長谷川豊, 亀谷収, 米倉覚則, 関戸衛, 村田泰弘, 山下一芳, 松本尚子, 本間希樹
2. 発表標題 気球 VLBI 地上振り子試験
3. 学会等名 日本天文学会, 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居明広, 河野裕介, 中原聡美, 木村公洋, 鈴木駿策, 岡田望, 保田大介, 長谷川豊, 山下一芳, 佐藤泰貴, 馬場満久, 松本尚子
2. 発表標題 気球 VLBI の姿勢制御地上試験
3. 学会等名 日本天文学会, 日本天文学会2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居明広, 河野裕介, 佐藤泰貴, 木村公洋, 岳藤一宏, 小山友明, 秦和弘, 沖野大貴
2. 発表標題 スペースVLBI技術調査会の検討状況
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河野裕介, 土居明広, ほか
2. 発表標題 気球VLBI計画2020年報告と2021年の計画
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 土居明広, 河野裕介, 中原聡美, 下向怜歩, 井上芳幸
2. 発表標題 気球VLBIシステムの姿勢制御実験
3. 学会等名 宇宙科学シンポジウム2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	河野 裕介 (Kono Yusuke) (00370106)	国立天文台・水沢VLBI観測所・助教 (62616)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小山 友明 (Oyama Tomoaki)		
研究協力者	佐藤 泰貴 (Satoh Yasutaka)		
研究協力者	木村 公洋 (Kimura Kimihiro)		
研究協力者	亀谷 収 (Kameya Osamu)		
研究協力者	長谷川 豊 (Hasegawa Yutaka)		
研究協力者	岡田 望 (Okada Nozomi)		
研究協力者	米倉 寛則 (Yonekura Yoshinori)		
研究協力者	村田 泰宏 (Murata Yasuhiro)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	鈴木 駿策 (Shunsaku Suzuki)		
研究協力者	中原 聡美 (Nakahara Satomi)		
研究協力者	井上 芳幸 (Inoue Yoshiyuki)		
研究協力者	本間 希樹 (Honma Mareki)		
研究協力者	小川 英夫 (Ogawa Hideo)		
研究協力者	莊司 泰弘 (Shoji Yasuhiro)		
研究協力者	馬場 満久 (Baba Mitsuhisa)		
研究協力者	山下 一芳 (Yamashita Kazuyoshi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	田中 宏明 (Tanaka Hiroaki)		
研究協力者	石村 康生 (Ishimura Kosei)		
研究協力者	館 知宏 (Tachi Tomohiro)		
研究協力者	斉藤 一哉 (Saito Kazuya)		
研究協力者	渡邊 尚彦 (Watanabe Naohiko)		
研究協力者	坂東 信尚 (Bando Nobutaka)		
研究協力者	関戸 衛 (Sekido Mamoru)		
研究協力者	坂本 啓 (Sakamoto Hiraku)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	小木 曾 望 (Kogiso Nozomu)		
研究協力者	芝井 広 (Shibai Hiroshi)		
研究協力者	成田 正直 (Narita Masanao)		
研究協力者	藤澤 健太 (Fujisawa Kenta)		
研究協力者	小山 翔子 (Koyama Shoko)		
研究協力者	岸本 直子 (Kishimoto Naoko)		
研究協力者	仙場 淳彦 (Senba Atsuhiko)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
米国	Harvard University	Massachusetts Institute of Technology	California Institute of Technology	