

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月31日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2009年～2011年

課題番号：21244019

研究課題名(和文) サブミリ波VLBI観測による銀河系中心巨大ブラックホールの事象の地平線の観測

研究課題名(英文) Sub-mm VLBI observations of the event horizon of the super-massive black hole at the Galaxy center.

研究代表者

本間 希樹 (HONMA MAREKI)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・准教授

研究者番号：20332166

研究成果の概要(和文)：

巨大ブラックホールの事象の地平線スケールに匹敵する分解能を有するサブミリ波 VLBI アレイを実現するために、チリ共和国のアタカマ高地に位置する国立天文台の ASTE 望遠鏡を VLBI 観測可能にするための装置整備を行った。さらに実際に ASTE を用いてチリの観測局を含む初めての国際サブミリ波 VLBI を実行した。チリを含む基線のデータは現在のところフラックスと輝度温度の上限値を与えるにとどまっているが、この間行われた国際サブミリ波 VLBI の観測から、銀河系中心の巨大ブラックホール Sgr A* において事象の地平線の数十倍スケールの構造で短期変動が初めて観測されるなど、ブラックホール近傍の構造に関して新たな知見が得られた。

研究成果の概要(英文)：

In order to build a sub-mm VLBI array which is capable of resolving the event horizon scale of super-massive black holes, we have equipped ASTE telescope in Chile with instruments necessary for conducting sub-mm VLBI observations. Based on this, we have conducted international sub-mm VLBI observations including Chilean station for the first time. While fringes are yet to be detected with Chilean baselines and the results only provide an upper limit on the flux and brightness temperature of the source, based on observations with other baselines we have detected short-term variability of Sgr A* in a scale of a few tens of the event horizon, providing us a new clue to understand detailed structures in the vicinity of the super-massive black hole.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	27,500,000	8,250,000	35,750,000
2010年度	7,200,000	2,160,000	9,360,000
2011年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	37,700,000	11,310,000	49,010,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：ブラックホール、サブミリ波、VLBI、事象の地平線、銀河系中心

1. 研究開始当初の背景

銀河の中心部に巨大ブラックホールが存在するという説は、多数の観測事実から支持

されており、研究者の間でも広く受け入れられている。しかし厳密には、これまでの観測的証拠は銀河の中心部に非常に高密度な質

量集中が存在することを示しているだけで、その中心天体が真にブラックホールであるかはまだ確定されていない。

一方、ブラックホールを非常に高い分解能で観測すると、ブラックホール近傍の降着円盤の放射がブラックホールの重力場で歪められた時空を伝播することで、中心部にシュバルツシルト半径の数倍の穴が開いた構造（いわゆるブラックホールシャドウ）が見えることが理論的に予測されている（図1）。このようなブラックホールシャドウを分解して撮像することができれば、事象の地平線の存在をほぼ直接的に確認していることになり、ブラックホール存在の究極の証明を与えることができる。

このような観測の対象としても最も注目されているのが銀河系中心に位置する超巨大ブラックホール Sgr A*（サジタリウス A* = 射手座 A*）で、その質量は約 400 万太陽質量であることが知られている。Sgr A*は我々から観測した際の見かけの大きさが最も大きいブラックホールであり、そのシュバルツシルト半径は角度にして約 10 マイクロ秒角程度になることが予想されている。これは現在の超長基線電波干渉計（Very Long Baseline Interferometer）の技術をミリ波・サブミリ波帯に応用することで、近い将来実現可能な分解能である。



図1：福江らによるブラックホールシャドウのシミュレーションの例。このような「黒い

穴」を捉えることが、ブラックホールの存在の究極の証明を与える。

2. 研究の目的

このような背景の元、ブラックホールの直接撮像が可能な超高分解能を有する電波干渉計を実現し、それによるブラックホール観測を実行することが本研究の目的である。具体的には、国立天文台がチリ共和国のアタカマ高地に有する ASTE 望遠鏡（図2）を VLBI 観測可能な望遠鏡に整備し、それを用いて国際サブミリ波 VLBI 観測を実行する。これにより既存のサブミリ波 VLBI 観測網の基線長を一気に2倍に拡大でき（図3）、分解能も2倍向上できる。さらに、チリは南半球に位置し、アタカマ砂漠はサブミリ波観測に地球上で最も適したサイトであるので、高感度な観測も期待できる。観測で得られたデータは最先端の理論モデル・シミュレーション結果と比較し、ブラックホール周囲の降着円盤構造や、ブラックホール時空のパラメーター（質量、スピン等）などを制限することも将来的な視野に入れている。



図2：国立天文台の ASTE 望遠鏡。チリ共和国のアタカマ砂漠（標高 4900m）に位置するミリ波サブミリ波帯の望遠鏡である。

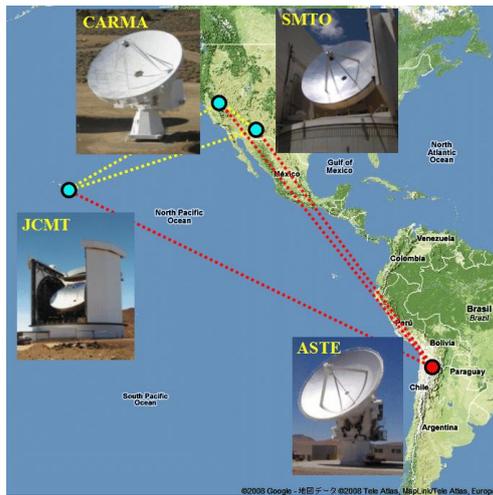


図3：既存のサブミリ波観測網（米国の3局）とチリの ASTE を含む観測網。チリ局を加えることで基線長は倍増する。

3. 研究の方法

国立天文台の ASTE 望遠鏡に VLBI 観測に必要な装置を搭載し、VLBI 局として国際的なサブミリ波 VLBI 観測網に参加する。そして、サブミリ波 VLBI の国際観測によって超巨大ブラックホールの超高分解能観測を行い、ブラックホールシャドウを撮像して、事象の地平線の存在を直接的に確認することが究極的な目標である。このために、本研究は以下のような3年計画で実施した。

○平成21年度：ASTE 望遠鏡の VLBI 用観測装置の整備と評価

ASTE 望遠鏡を VLBI 観測可能にするために、超高安定度周波数標準、230GHz 帯冷却受信機、VLBI 用超広帯域レコーダー等を設置する。これらをアタカマ砂漠にある ASTE 観測所に設置するために、コンテナを新たに設置する。また、設置した装置について、その性能評価を進める。

○平成22年度：ASTE 望遠鏡への搭載と評価、国際観測の実施

ASTE サイトに設置した装置の性能評価を

進めるとともに、国際観測を実施しデータを取得する。さらに取得したデータの解析を行う。

○平成23年度：観測データの解析と科学的議論

観測を継続するとともに、データの解析および結果の解釈も行う。

4. 研究成果

国立天文台がチリ共和国のアタカマ高地に有する ASTE 望遠鏡での VLBI 観測を実現するために、VLBI 観測に必要な装置の整備を最初に行った。まず、VLBI 観測のために必要な高安定度時計装置として、オシロクオート社の超高安定度クリスタル発信機 (OCX08607) を用い、クリスタル発信機で VLBI 観測に必要な安定度が得られるかを評価した。具体的には水沢 VLBI 観測所の水素メーザーとの時計安定度比較を行い、超高安定クリスタル発信機が 100 秒以内の時間スケールで 10^{-13} の安定度を持つことを確認した。さらに、計測された位相揺らぎから、本研究計画の主観測周波数である 230GHz においても、クリスタル発信機を用いて 10 秒間の可干渉性を保つことができることを確認した。さらに、国立天文台の VERA アレイを用いて、このクリスタル発信機を周波数標準としたセンチ波の VLBI 観測実験もを行い、期待通りのフリッジ検出に成功した。この結果は、水素メーザーよりも一桁廉価である超高安定度クリスタル発信機が VLBI 局の周波数標準となりうることを実証したものであり、今後の地上・スペースでの VLBI 局の構築に応用が期待される。

また、VLBI 観測で使用する 230GHz 帯の受信機として、国立天文台の ALMA 用のプロトタイプとして開発された受信機を改修し、

ASTE 望遠鏡に最適化した光学系を搭載した。また、信号を周波数変換するための局部発信機用の通倍チェーンを作成し、その安定度も評価した。これによって 230GHz で VLBI 観測を実行する基礎技術・システムがほぼ確立した。この受信機システムは今後も ASTE を用いた VLBI 観測で使用可能であるだけでなく、ALMA カートリッジを搭載可能なデュワーを持つ他局（例えば、台湾・米国がグリーンランドに移設を進める ALMA プロトタイプ望遠鏡など）でも利用可能であり、今後の観測でも有効に利用できる。

上述の周波数標準や受信機システムに加えて、観測データを記録するために必要な HDD や SSD を購入し、さらに、これらの装置群をチリの ASTE サイトに設置するための観測棟コンテナと合わせて、2009 年秋から 2010 年の年初にかけてチリのアタカマ高地宛てに発送し、2010 年 1 月～3 月にかけて ASTE 望遠鏡のサイトでこれらの装置を設置した。さらに実際に 230GHz の受信機を望遠鏡に搭載して冷却し、天体に向けて受信機試験を行い、木星など標準天体の受信に成功している。さらに、2010 年 3 月には、アンテナからデジタルバックエンドまでの信号伝送試験およびその安定度計測試験に成功し、ASTE での VLBI 観測を実行可能な状態まで立ち上げた。

これらの準備を元に、2010 年 4 月には米国マサチューセッツ工科大、ハーバード大などと協力してのチリ局を含んだ初めての国際 VLBI 観測を行った。具体的には、米国アリゾナ州の SMT0、ハワイ州の SMA を相手局とし、ASTE を含めた 3 局による 230GHz 帯での VLBI 観測を行い、複数の明るい参照電波源や本研究の主対象である超巨大ブラックホール Sgr A*などを観測した。これは、チリ局を含んだ国際的な 230 GHz VLBI として世界で初めてのものである。相関処理は米国ヘイスタック観

測所および国立天文台の三鷹で行い、日本での相関処理については、我々がこれまで開発してきたソフト相関器を用いることで、非常に広いパラメーター範囲内でフリッジ探査を行った。この際にソフト相関処理からデータ解析にいたるまでの必要なソフトウェアの整備を行い、データ処理の流れを確立した。なお、この観測データの処理に関連して、国立天文台にて大容量の観測データを保持するために、磁気記録装置 OCTADISK を導入している。

その結果、チリ基線では目標天体、参照電波源ともフリッジが検出されなかった。この原因については、チリを含む基線は 6000 km から 9000 km と長いために天体の構造が著しく分解された可能性がある。もし天体が分解されている場合には、チリを含む基線での天体の強度が 1 Jy 程度以下という制限が得られ、天体の輝度温度を制限する科学的に有意義な情報となる。しかし一方で、何らかの装置トラブルが観測中に発生した可能性も現段階では完全には排除できていない。これについては引き続き装置状況やデータの確認を進めるとともに、再観測を行うことで最終的な決着をつけることを目指す。特に、同じアタカマ砂漠に位置している欧州南天天文台の APEX 望遠鏡との共同観測はこの問題解決に極めて有効であり、現在国際協力の可能性を検討中である。

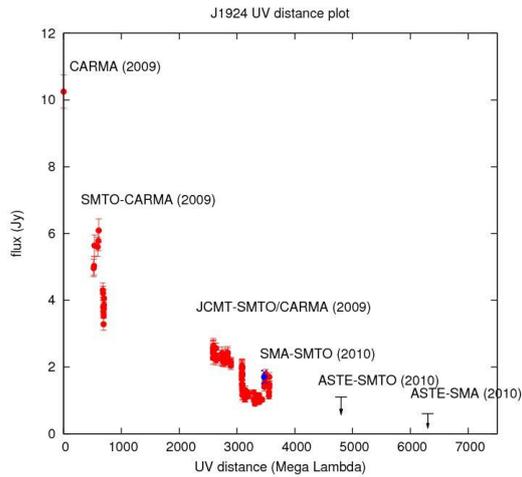


図4：ASTE観測により得られたフラックス（縦軸）の上限値。横軸は基線長、縦軸は天体強度を表し、右側の極めて長い基線の情報が今回ASTEによって初めて得られた。

また、チリ基線に関する観測結果の妥当性を調べることも目的として、2010年の観測に加えて、ASTEを含まないその他の230GHz帯のVLBI観測についても国際協力のもとにデータ解析を進めている。その結果、2009年の観測では数日間に数十シュバルツシルト半径のサイズでSgr A*の構造が変化していることを初めて見出し、論文として出版した。また、Sgr A*と並んでブラックホール撮像の重要な候補天体であるM87に関する観測結果の解析処理も進めている。その結果、M87のブラックホール近傍にシュバルツシルト半径の数倍の非常にコンパクトな成分の検出に初めて成功した。この結果は、M87のジェットの根元の大きさに制限を与えるものであり、それを元にブラックホールのスピンパラメーター等に制限を付ける試みが現在行われている。

さらに、2011年4月にも米国の3局のアレイを用いた国際サブミリ波観測が行われ、この観測についてもデータ解析を国際共同で進めている。この観測では特に、Sgr A*やM87

の偏波に関する情報が初めて得られており、詳しい解析が現在も続けられている。また、このVLBI観測に合わせて、国立天文台のVERAおよび韓国のKVNを用いたフォローアップ観測も実行しており、こちらについても解析と論文執筆を進めているほか、VERAを用いたSgr A*のミリ波帯での長期モニター結果についても解析を終了して論文を投稿中である。

今後は本研究で得られた開発・研究成果をベースにさらに観測を進め、230 GHz帯でのVLBI観測でさらなる科学的成果産出を目指す。また、今後のこの研究の発展についても国際サブミリ波VLBIチームの中で議論を進めており、ASTEなどを用いた実験に加えて、将来的にはALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array)をphase-upさせてサブミリ波VLBI観測網さらに発展させてゆく方向性が検討されている。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計6件)

① Doeleman S., ..., Honma M., ..., Oyama T., et al. “An ALMA Beamformer for VLBI and Phased Array Science, Proceedings of URSI, 査読無, 2012, in press

② Honma M., “Maser Astrometry with VERA and Galactic Structure”, Proceedings of IAU 287, 査読無, 2012, in press

③ Petrov L., Honma M., Shibata K. M., “The KCAL VERA 22 GHz Calibrator Survey”, AJ, 査読有, 143, 2012, 35-40
DOI:10.1088/0004-6256/143/2/35

④ Fish V., Doeleman S., ..., Honma M., ..., Oyama T., et al., “1.3 mm Wavelength VLBI of Sagittarius A*: Detection of Time-variable Emission on Event Horizon Scales”, ApJ, 査読有, 727, 2011, L36-L39
DOI: 10.1088/2041-8205/727/2/L36

⑤ Honma M., et al., “Astrometry of the Star-Forming Region IRAS 05137+3919 in the Far Outer Galaxy”, PASJ, 査読有, 63, 2011, 17-22

⑥ Nagai H., Suzuki K., ..., Honma M., et al., "VLBI Monitoring of 3C 84 (NGC 1275) in Early Phase of the 2005 Outburst", PASJ, 査読有, 62, 2010, L11-15

[学会発表] (計 3 件)

① Honma M., "Sub-mm VLBI Activity in Japan", Taiwan Sub-millimeter VLBI Telescope Workshop, 2011/Nov/9, Taipei, Republic of China

② Doeleman S., ..., Honma M., et al., "The Event Horizon Telescope: (sub)mm VLBI of Sgr A* and M87*", "Building on New Worlds, New Horizons", 2011/Mar/9, Sante Fe, NM, USA

③ Honma M., "Current status of sub-mm VLBI with ASTE", sub-mm VLBI workshop, (2010/Jan/25), Westford, MA, USA

[その他]

ホームページ等

<http://www.miz.nao.ac.jp/submilli/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

本間 希樹 (HONMA MAREKI)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・准教授
研究者番号：20332166

(2) 研究分担者

川邊 良平 (KAWABE RYOHEI)
国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・教授
研究者番号：10195141
(平成 23 年度は連携研究者)

(3) 連携研究者

川口 則幸 (KAWAGUCHI NORIYUKI)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・教授
研究者番号：90214618

小山 友明 (OYAMA TOMOAKI)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・研究員
研究者番号：70425403

河野 裕介 (KONO YUSUKE)
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教
研究者番号：00370106

河野 孝太郎 (KOHNO KOTARO)
東京大学・天文学教育研究センター・
教授
研究者番号：80321587

江澤 元 (EZAWA HAJIME)
国立天文台・チリ観測所・助教

研究者番号：60321585

(4) 研究協力者

秋山 和徳 (AKIYAMA KAZUNORI)
東京大学・理学系研究科・大学院生

永井 洋 (NAGAI HIROSHI)
国立天文台・チリ観測所・研究員

秦 和宏 (HADA KAZUHIRO)
総合研究大学院大学・物理科学科・
大学院生

小川 英夫 (OGAWA HIDEO)
大阪府立大学・理学部・特任教授

木村 公洋 (KIMURA KIMIHIRO)
大阪府立大学・理学部・研究員

岩下 浩幸 (IWASHITA HIROYUKI)
国立天文台・野辺山宇宙電波観測所・
研究技師