

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24540242

研究課題名(和文)サブミリ波超長基線電波干渉計におけるイメージング手法の開発

研究課題名(英文)Development of new imaging technique for sub-mm VLBI

## 研究代表者

本間 希樹 (Honma, Mareki)

国立天文台・水沢VLBI観測所・教授

研究者番号：20332166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：サブミリ波VLBIで位相を用いたイメージングを実現するために、シミュレーションおよびミリ波VLBI観測の実データに基づきイメージング技法の検討を行った。具体的には、最少二乗によるモデルフィット、マルコフ連鎖モンテカルロ法によるモデル推定、圧縮センシングによる画像再構成などを検討し、それらの手法の有効性を実証した。また、これらの手法を実データに適用することで、ブラックホール撮像の最重要ターゲットであるM87で、シュバルツシルト半径の5.5倍の構造を検出し、また、クロージャー位相の検出にも成功するなど、将来的にブラックホールシャドウの直接撮像につながる科学的成果を上げた。

研究成果の概要(英文)：In order to realize imaging with sub-mm VLBI using visibility phase information, we have explored imaging technique based on simulation data as well as real observational data of mm-VLBI. The methods we have considered include model fitting with least-square method, model estimation with Markov Chain Monte Carlo method, compressive sensing and so on. We have applied these methods to the real data of mm-VLBI observations, and for the first time successfully detected the radio core of M87 at 1 mm with a size of 5.5 Schwarzschild radii and also closure phase information on M87, which led us one step closer to the direct imaging of black hole shadows with sub-mm VLBI.

研究分野：ブラックホール天文学

キーワード：ブラックホール 活動銀河中心核 電波天文学 超長基線電波干渉計 サブミリ波

## 1. 研究開始当初の背景

銀河の中心に超巨大ブラックホールが存在していることはすでに観測的にも多数の証拠によって確実視されているが、そのような「超巨大ブラックホール候補天体」を事象の地平線スケールまで分解し、本当にブラックホールが存在することを確認した例はまだない。もし、事象の地平線が存在すれば、ブラックホールは図1のように降着円盤を背景として「黒い穴」として見えると期待される。この「黒い穴」の直接検出は、現代天文学および物理学にも大きなインパクトを与える重要課題であり、今後10年間で観測天文学が果たすべき一大目標のひとつである。

現在、巨大ブラックホールの事象の地平線を分解することができると考えられている唯一の観測手法は、サブミリ波 VLBI である。2008年には銀河系中心の巨大ブラックホール Sgr A\*でのサブミリ波 VLBI 観測が Nature 誌で報じられるなど(Doeleman et al. 2008)、近年、サブミリ波 VLBI を用いたブラックホール観測に期待が高まっている。これまでサブミリ波 VLBI の観測は、米国の10mクラスの望遠鏡を中心に観測が行われていたが、日本も我々のグループが国立天文台のASTEを用いて2010年に国際共同観測を実現するなど(科研費基盤(A) 2009年~2011年)、巨大ブラックホールの観測へ向けた動きが国際的に加速しつつある(図2)。しかし、これまでの観測では、十分な信号帯雑音比で位相を計測することができないために、干渉計の観測情報のうち振幅のみしか得られず、そのためにサブミリ波 VLBI による通常の干渉計手法によるイメージングはまだ成功していなかった。

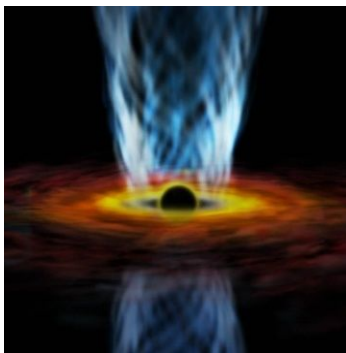


図1: ブラックホールの想像図。中央の黒い穴が「ブラックホールシャドウ」

## 2. 研究の目的

本研究では、巨大ブラックホールの直接撮像を見据えて、サブミリ波 VLBI におけるイメージング技術の確立を目的とする。サブミ

リ波 VLBI は、巨大ブラックホールの事象の地平線スケールを分解可能な唯一の装置として期待されているが、通常の干渉計と同様のイメージング観測を実現した例はまだない。これは、主に感度不足のために、干渉計の観測量(振幅および位相)のうち位相情報が取得できないことによる。本研究は高感度化を達成することでこの問題を解決し、サブミリ波 VLBI で位相を用いたイメージングを達成することを目的としていた。

本研究の計画段階のサブミリ波 VLBI 観測で位相を測定した例がなかったために、当初計画では、ソフトウェア関連器等の技術を駆使し、サブミリ波 VLBI における隣接局の phase-up 技術を確立してサブミリ波 VLBI の検出感度を向上させ、位相情報を用いたイメージングを実現することを目指していた。

一方、その後の広帯域記録技術を中心とする観測技術の進展により、本研究期間中に不完全ながらも位相情報が観測データから得られるケースが出始めてきた。具体的には、3つの観測局から一つ得られるクロージャ位相である。クロージャ位相は、複数基線で得られるビジビリティ位相が縮退してイメージングをするのには不完全であるものの、天体の構造情報を含んでいる点では非常に重要な情報である。このような観測の進展を受けて、本研究計画でも研究開始後は、クロージャ位相を用いたサブミリ波 VLBI イメージングの実現も新たな課題として設定した。

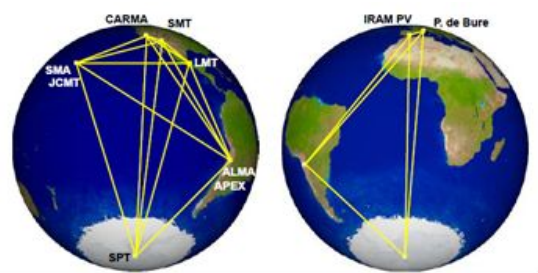


図2: 国際サブミリ波 VLBI アレイ(EHT: Event Horizon Telescope)の局配置図。これまで定常観測はハワイ、アリゾナ、カリフォルニアの3局だったが、現在他の局でも試験が進められている。

## 3. 研究の方法

現在入手できる最も波長の短い VLBI 観測データとして、図2に示した EHT による波長1mm帯のミリ波 VLBI のデータを取得し、その詳細なキャリブレーション法を検討した。そして現段階で世界最高感度のデータを取得し、クロージャ位相などを含む観測データからイメージングを行った。具体的なイメージングとしては、最少二乗法あるいはマ

ルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC 法)等によるモデルフィット、また、より精密な位相が得られた際によりよいイメージングを実現することをめざし、圧縮センシングなどの手法によるイメージングについて、シミュレーションおよび実データを用いて検討を行った。

また、計画当初より検討していた phase-up 技術による高感度化については、世界で最も強力なミリ波サブミリ波望遠鏡である ALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array) を phase-up する国際プロジェクト APP (ALMA Phase-up Project)に参加し、phase-up 関連の開発および試験観測を行った。

#### 4. 研究成果

まず、ブラックホール撮像の主要なターゲット天体である M87 について EHT による観測データのキャリブレーションと解析を進めた。その結果、2009 年の観測で初めて M87 の中心核を検出することに成功し、ブラックホール半径の 5.5 倍程度の構造を検出することに成功した。この段階では位相に関する情報はクロージャー位相も含めて得られていないが、ブラックホール極近傍の構造を検出した大きな成果として、この結果は Science 誌に出版された(発表論文)。図 1 のブラックホールの想像図はその発表資料として作成されたものであり、特にブラックホール極近傍のジェットの根元領域が今回の観測では検出されたと考えられている。

M87 についてはその後さらなる追加観測と解析が進められ、最近になって初めて M87 でクロージャー位相の検出に成功した。その測定結果はクロージャーがほぼ 0 というもので、現段階でイメージの取得や、理論から期待される天体構造の切り分けまでは至っていない。しかし、クロージャー位相の検出成功を

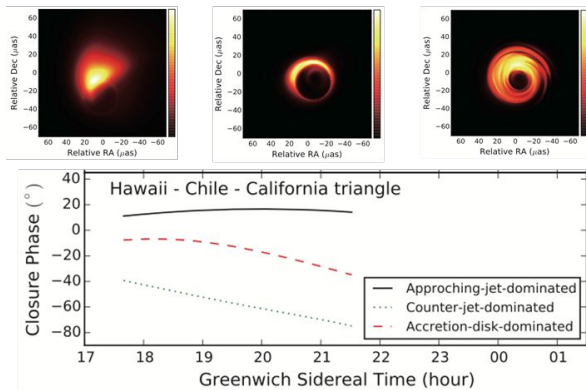


図 3 : 異なる 3 種の理論モデルが予想する M87 のイメージ(上)と、ALMA が参加した場合に予想されるクロージャー位相(下)。ALMA の参加によりモデルが分離可能である。

受けて、シミュレーションによる検討を行った結果、異なる理論が予測するモデルイメージが、チリの ALMA を含む基線によって明確に分離できることが示された(図 3)。なお、この結果は、研究協力者の秋山和徳氏らを中心に進められたものであり、秋山氏はこの結果を中心として博士論文をまとめ、平成 27 年度の東京大学総長賞を受賞している。また、本研究成果については秋山氏を筆頭著者とする国際共同研究論文として英文査読論文に投稿されている。

また、クロージャー位相によるイメージングを実現するために、もっとも位相情報が得やすい明るい天体であるキャリブレータ天体についても観測と解析を進めた。具体的には電波からガンマ線まで非常に明るい活動銀河中心核である NRA0530 について、観測されたビジビリティから MCMC 法を用いて最適なイメージを推定し、イメージを得た(図 4)。さらに、長波長のイメージとの比較を行い、ジェットの傾斜角や、ドップラーファクターなど相対論的ジェットを特徴づける物理パラメータに制限をつけることに成功した。この研究では過去に行われた 3 局での波長 1.3 mm のミリ波 VLBI のデータを用いており、今後のミリ波サブミリ波 VLBI の実データ解析の観点からも貴重な準備となった。本研究成果についても現在国際共同研究として英文査読論文を準備中である。

また、同種の手法を別のキャリブレータ天体である 3C279 にも適用し、ブラックホールから出る相対論的ジェットが、ブラックホール近傍で折れ曲がる様子なども検出されている。

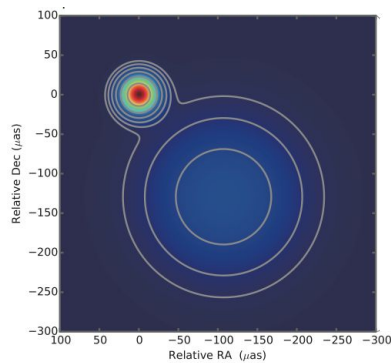


図 4 : NRAO 530 の EHT による観測データを使った MCMC によるモデリングイメージ。

さらに、現在稼働している米国の 3 局からなるサブミリ波 VLBI アレイや、今後期待される新しい観測局を含むアレイでより高分解能のイメージングが可能かを探るために、圧縮センシングの技法によるイメージング

についても検討した。まず、サブミリ波 VLBI 観測を模したシミュレーションデータに対して圧縮センシングを適用し、超解像イメージングが可能であることをシミュレーション上で示した。これによって、現実的な電波干渉計でブラックホールを見た場合に、通常技法に対してより高い分解能でブラックホールシャドウを分解できる可能性が示された(発表論文)。また、この手法をさらに発展させたイメージング技法として、クロージャ位相にもとづく超解像技法についても現在検討を進めており、これについても実現可能性が示されつつある。

また、上記で開発された超解像技法を実際に米国の VLBA の観測データに適用し、本技法によるイメージング性能を検証した。実観測データへの本技法の適用としては初めてのものである。その結果、7 mm 帯という比較的長い波長の観測ではあるものの、M87 のブラックホール近傍に迫る優れた超解像画像を得ることができた。図 5 は従来手法との比較で、左が従来手法による M87 イメージ、右が超解像の M87 イメージである。いずれも最も明るい中心核から右手にジェットが吹き出す様子が見られるが、ジェットの縁が明るく輝く現象が中心核近傍から始まっていることが、超解像画像でははっきり捉えられている。また左手にカウンター・ジェットがはっきりと見られることも超解像技術の恩恵である。実データで超解像に成功した本研究はブラックホールの直接撮像への重要なステップである。今回我々が開発した手法は国際的にも注目されており、サブミリ波 VLBI 観測やブラックホールの直接撮像に関係した世界の研究者が一同に会する国際研究会 “Event Horizon Telescope 2014” (開催地: Perimeter Institute、カナダ)に招待され、今回得られた成果に関する報告を招待講演として行った(学会発表)。

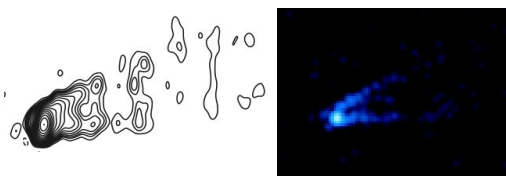


図 5 : M87 の VLBA による波長 7 mm 帯の電波写真。左が従来手法、右が圧縮センシングによる結果。左右は全く同じデータに基づくイメージであり、新手法による分解能の向上が顕著である。

また、ALMA をサブミリ波 VLBI 観測可能にする phase-up についても国際チームと共同で検討を進めた。具体的には光多重伝送による高速データ通信装置を開発・設置し、性能評価試験を進めた。その成果として ALMA Phase-up モードでの VLBI の試験観測に成功

し、基本的な性能が達成されていることが明らかになった。

また、ブラックホールの直接撮像を見据えて、M87 や Sgr A\*、あるいはブレーザー天体などの活動銀河中心核について電波による高分解能観測をベースに研究を進め、様々な成果を上げた(発表論文、 )。

## 5 . 主な発表論文等

(雑誌論文)(計 15 件)

VLBI observations of bright AGN jets with the KVN and VERA Array (KaVA): Evaluation of imaging capability, Niinuma, Kotaro, 他 71 名, 14 番目, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 103, p.1-16, 2014 (査読あり)

<http://pasj.oxfordjournals.org/content/66/6/103>

DOI:[10.1093/pasj/psu104](https://doi.org/10.1093/pasj/psu104)

Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling, Honma, M., Akiyama, K., Uemura, M., Ikeda, S., Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 95, p.1-14, 2014 (査読あり)

<http://pasj.oxfordjournals.org/content/66/5/95>

DOI:[10.1093/pasj/psu070](https://doi.org/10.1093/pasj/psu070)

Microarcsecond Radio Astrometry, Reid, M. J., Honma, M., Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 52, p.339-372, 2014 (査読あり)

<http://www.annualreviews.org/doi/full/10.1146/annurev-astro-081913-040006>

DOI:[10.1146/annurev-astro-081913-040006](https://doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-040006)

A Strong Radio Brightening at the Jet Base of M 87 during the Elevated Very High Energy Gamma-Ray State in 2012, Hada, K., 他 20 名, 11 番目, The Astrophysical Journal, 788, 165, p.1-13, 2014 (査読あり)

<http://iopscience.iop.org/0004-637X/788/2/165/>

DOI:[10.1088/0004-637X/788/2/165](https://doi.org/10.1088/0004-637X/788/2/165)

A Hot Molecular Circumstellar Disk around the Massive Protostar Orion Source I, Hirota, T., Kim, M.K., Kurono, Y., Honma, M., The Astrophysical Journal Letters, 782, L28, p.1-5, 2014 (査読あり)

<http://iopscience.iop.org/2041-8205/782/2/L28/>

DOI:[10.1088/2041-8205/782/2/L28](https://doi.org/10.1088/2041-8205/782/2/L28)

Evidence for a Nuclear Radio Jet and its Structure down to  $10^3$  Schwarzschild Radii in the Center of the Sombrero Galaxy (M 104, NGC 4594), Hada, K., 他 6 名, 5 番目, The Astrophysical Journal, 779, 6, p.1-13, 2013 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/779/1/6/>  
DOI:[10.1088/0004-637X/779/1/6](https://doi.org/10.1088/0004-637X/779/1/6)

The Innermost Collimation Structure of the M87 Jet Down to  $\sim 10$  Schwarzschild Radii, Hada, K., 他 8 名, 5 番目, The Astrophysical Journal, 775, 70, p.1-7, 2013 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/775/1/70/>  
DOI:[10.1088/0004-637X/775/1/70](https://doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/70)

Multi-Epoch VERA Observations of Sagittarius A\*. I. Images and Structural Variability, Akiyama, Kazunori, Takahashi, Rohta, Honma, Mareki, 他 2 名, Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, 91, p.1-13, 2013 (査読あり)  
<http://pasj.oxfordjournals.org/content/65/4/91>  
DOI:[10.1093/pasj/65.4.91](https://doi.org/10.1093/pasj/65.4.91)

X-Ray and Radio Follow-up Observations of High-redshift Blazar Candidates in the Fermi-LAT Unassociated Source Population, Takahashi, Y., Kataoka, J., Niinuma, K., Honma, M., 他 5 名, The Astrophysical Journal, 773, 36, p.1-11, 2013 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/773/1/36/>  
DOI:[10.1088/0004-637X/773/1/36](https://doi.org/10.1088/0004-637X/773/1/36)

Fine-scale Structure of the Quasar 3C 279 Measured with 1.3 mm Very Long Baseline Interferometry, Lu, Ru-Sen, 他 32 名, 16 番目, The Astrophysical Journal, 772, 13, p.1-10, 2013 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/772/1/13/>  
DOI:[10.1088/0004-637X/772/1/13](https://doi.org/10.1088/0004-637X/772/1/13)

Multi-frequency VLBI Observations of the Broad Absorption Line Quasar J1020+4320: Recently Restarted Jet Activity?, Doi, A., 他 16 名, 15 番目, Publications of the Astronomical Society of Japan, 65, 57, p.1-6, 2013 (査読あり)  
<http://pasj.oxfordjournals.org/content/65/3/57>  
DOI:[10.1093/pasj/65.3.57](https://doi.org/10.1093/pasj/65.3.57)

Fundamental parameters of the Milky Way Galaxy based on VLBI astrometry, Honma, Mareki, 他 33 名, Publications of the

Astronomical Society of Japan, Vol.64, 136, p.1-13, 2012 (査読あり),  
<http://pasj.oxfordjournals.org/content/64/6/136>  
DOI:[10.1093/pasj/64.6.136](https://doi.org/10.1093/pasj/64.6.136)

VLBI Observations of the Jet in M 87 during the Very High Energy gamma-Ray Flare in 2010 April, Hada, Kazuhiro, 他 8 名, 6 番目, The Astrophysical Journal, 760, 52, p.1-5, 2012 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/0004-637X/760/1/52/>  
DOI:[10.1088/0004-637X/760/1/52](https://doi.org/10.1088/0004-637X/760/1/52)

Jet launching structure resolved near the supermassive black hole in M87, Doeleman, Sheperd S., 他 32 名, 13 番目, Science, 338, pp. 355-357, 2012 (査読あり)  
<http://www.sciencemag.org/content/338/6105/355.full>  
DOI:[10.1126/science.1224768](https://doi.org/10.1126/science.1224768)

Resolving the inner jet structure of 1924-292 with the event horizon telescope, Lu, Ru-Sen, 他 21 名, 9 番目, The Astrophysical Journal Letters, 757, L14, p.1-5, 2012 (査読あり)  
<http://iopscience.iop.org/2041-8205/757/1/L14/>  
DOI:[10.1088/2041-8205/757/1/L14](https://doi.org/10.1088/2041-8205/757/1/L14)

〔学会発表〕(計 3 件)

本間希樹, 圧縮センシングを用いた電波干渉計のイメージング、日本天文学会秋季年会, 2012/9/21, 大分大学, 大分県・大分市

Honma, M., Maser Astrometry with VLBI and Galactic Structure, 12<sup>th</sup> European VLBI Network Symposium (招待講演), 2014/10/10, Cagliari, Italy

Honma, M., Super-resolution imaging with sparse modeling, Event Horizon Telescope 2014 (招待講演), 2014/11/14, Waterloo, Canada

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕  
出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕  
受賞等

本間 希樹 (研究代表者)  
・自然科学研究機構若手研究者賞(2014 年 6 月)  
・日本天文学会欧文報告賞(2015 年 3 月、筆頭著者として)

秋山 和徳 (研究協力者)  
・東京大学総長賞(2015 年 3 月)

秦 和弘 (研究協力者)  
・井上研究奨励賞(2015 年 2 月)

ホームページ等  
<http://www.miz.nao.ac.jp/submilli/top>

## 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・教授  
研究者番号 : 20332166

### (2)研究分担者

なし

### (3)連携研究者

永井 洋 (NAGAI, Hiroshi)  
国立天文台・チリ観測所・特任准教授  
研究者番号 : 00455198

小山 友明 (OYAMA, Tomoaki)  
国立天文台・水沢 VLBI 観測所・専門研究職員  
研究者番号 : 70425403

川邊 良平 (KAWABE, Ryohei)  
国立天文台・電波研究部・教授  
研究者番号 : 10195141

### (4)研究協力者

秋山 和徳 (AKIYAMA, Kazunori)

田崎 文得 (TAZAKI, Fumie)

秦 和弘 (HADA, Kazuhiro)