

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 5 日現在

機関番号：62616

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2013～2017

課題番号：25120007

研究課題名(和文) スパースモデリングを用いた超巨大ブラックホールの直接撮像

研究課題名(英文) Imaging Super-massive Black Holes with Sparse Modeling

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) 53,900,000円

研究成果の概要(和文)：巨大ブラックホールの直接撮像のため、スパースモデリングを用いた電波干渉計の超解像技法を開発した。それを既存の実データに応用して超解像が可能であることを実証し、M87の巨大ブラックホールの最も近いところでジェットの本根を分解することに成功した。また、巨大ブラックホールの直接撮像を目指す国際ミリ波VLBI網の観測を2017年4月に初めて実現した。そして、開発した手法によりブラックホール撮像可能な分解能が得られ、巨大ブラックホールの直接撮像が実現できるレベルに到達していることを示した。さらに、スパースモデリングの手法を天文学の様々なデータ解析にも応用し、この手法の有効性を幅広く示した。

研究成果の概要(英文)：In order to obtain resolved images of super-massive black hole shadows, we developed super-resolution imaging techniques for radio interferometry based on sparse modeling. We applied newly-developed methods to existing observational data and confirmed its performance, and resolved the jet root structure at the nearest location from the super-massive black hole of M87. We realized the first observations with the international mm-VLBI network in April 2017. By applying our methods to the data, we successfully obtained the angular resolution high enough to resolve the black holes, and showed that imaging of black hole shadow is achievable. We also extended applications of sparse modeling to various types of astronomy data analyses, and demonstrated its effectiveness in general astronomy.

研究分野：電波天文学

キーワード：ブラックホール 電波天文学 電波干渉計 イメージング 疎性モデリング

1. 研究開始当初の背景

ブラックホールは、アインシュタインの一般相対性理論によりその存在が予言されている宇宙でもっとも高密度な天体である。ブラックホールの近傍には光面(photon sphere)という領域が作られ、その内側を通る光子の軌道はブラックホールの事象の地平面に交差する。ブラックホールの事象の地平面は光が脱出できなくなる特異面であるため、光面は事象の地平面が作り出す漆黒の影(ブラックホールシャドウ)として観測される。これが観測されれば、ブラックホールの存在を直接的に示す証拠になるほか、重力波のような動的な重力場だけでなく、より静的な重力場の一般相対性理論の検証に繋がる。

Event Horizon Telescope (EHT) は電波干渉計技術を用いてこのブラックホールシャドウを直接検出する計画である。EHT のターゲットは我々の銀河中心 (Sgr A*) や近傍銀河であるおとめ座 A (M87) の中心に存在するそれぞれ 400 万、60 億太陽質量の巨大ブラックホールである。これら両天体のブラックホールシャドウのサイズ(シュワルツシルト半径の約 5 倍) の視直径はそれぞれ約 50、35 μ 秒角である。一方で従来のイメージング方法によって達成可能な EHT の空間分解能は、観測波長と EHT の最大基線長の比で決まり、およそ 20 μ 秒角となる。現状の観測ではブラックホールシャドウの半分程度の空間分解能を達成することが可能である(図 1)。しかし、ブラックホールシャドウを含めた周辺環境をより詳細に理解するためには、より高分解能の画像が求められ、従来の手法を超えた解像度のイメージング手法が模索されている。

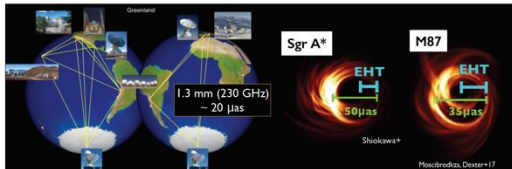


図 1: EHT に参加する電波望遠鏡と空間分解能。EHT の 2017 年観測には日本の国立天文台が運用に参加するチリの ALMA が参加することで高感度な観測が行われた(左)。これにより、Sgr A*やM87で予想されているブラックホールシャドウ直径以下の空間分解能での観測が実現できることが期待される(右)。

2. 研究の目的

本研究では、スパースモデリングの手法を電波干渉計によるブラックホール観測に応用して超解像イメージング技法を確立する。電波干渉計の回折限界は、観測量不足のために基礎方程式が不良設定問題になることに起因しており、疎性モデリングで不良設定問題を解くことで超解像が達成できる。電波干渉計観測に適用可能な超解像技法を確立するために、基礎方程式や観測ノイズ、期待されるイメージの性質などを考慮し、電波干渉計の問題に最適化された超解像技法を開発す

る。さらに、それを EHT による実観測に適用してブラックホールシャドウの直接撮像を確実に成し遂げるとともに、シャドウ以外のブラックホール研究分野で科学的成果を挙げることも目指す。

3. 研究の方法

(1) 電波干渉計による観測では天体画像 I のフーリエ成分(ビジビリティ)が観測される。観測行列であるフーリエ行列を F とすれば、ビジビリティは $V = FI$ で与えられる。もしビジビリティが波数空間上で完璧にサンプリングされれば、観測データを逆フーリエ変換することで天体画像を再構成できる。しかし観測する波数は二つの望遠鏡を結ぶ基線ベクトルに相当するため、限られた数の望遠鏡で観測を行うと、観測データは天体画像の画素数に比べて通常少なくなる。従って、電波干渉計における画像復元問題は劣決定問題となり、たとえ観測ノイズがない理想の場合であっても上記の観測方程式を満たす解は無数に存在する。

電波干渉計を用いたイメージングではスパース再構成の最も初歩的な手法である CLEAN と呼ばれる手法が 1970 年以来用いられてきた[引用文献 1]。CLEAN (以下従来法) はサンプルされていないビジビリティ(あるいはモデル残差)に 0 を仮定して、逆フーリエ変換を行い、天体画像のドメインで疎な解をもとめる。この手法では逆フーリエ変換の際に生じる観測データの波数空間分布の影響を大きく受け、ブラックホールの画像復元など超解像が必要とされるデータには適さないことが近年示されてきた(発表論文)。

そこで我々は疎性モデリングを応用したイメージング手法の開発に取り組んでいる。最初に我々が取り組んだのは LASSO(Least Absolute Shrinkage and Selection Operator)による画像復元である。LASSO による画像復元は式 1 で表される。

$$I = \underset{I}{\operatorname{argmin}} (\|V - FI\|_2^2 + \Lambda_\ell \|I\|_1), \quad (\text{式 } 1)$$

subject to $I \geq 0$,

LASSO では、無数の解の中からスパースな解を抽出する ℓ_1 ノルムを、最小二乗法の項に加えて最小化問題を解く。

(2) ℓ_1 ノルムによる画像再構成は、画像の輝度分布が疎であるという仮定に基づいている。そのため、再構成された画像は解く画像の視野やピクセルサイズの設定に大きく影響されるほか、より広がった天体の再構成には適さない。そこで我々は ℓ_1 ノルムと合わせて Total Variation (TV) を制約項とし、イメージの勾配が疎になるような画像復元の手法を開発した。式 1 の右辺に TV を加えることで式 2 のように拡張される。

$$I = \underset{I}{\operatorname{argmin}} (\|V - FI\|_2^2 + \Lambda_\ell \|I\|_1 + \Lambda_{tv} \|I\|_{tv}), \quad (\text{式 } 2)$$

subject to $I \geq 0$,

$\|I\|_{tv}$ は画像の TV であり、 ℓ_1 はその正則化パラメータである。式 2 は二つの正則化パラメータを持つが、これは交差検定 (発表論文) や大自由度班が開発した交差検定の近似である LOOE によって観測データから決定することができる [引用文献 2,3]。我々が TV 制約に最初に用いたのは、幅広く使われている isotropic TV (以下 isoTV) である (式 3)。そして現在は、エッジがなく滑らかな画像を選択するために、勾配の 2 乗の和を用いる制約 (Total Squared Variation; TSV) を採用している (式 4)。

$$\|I\|_{tv} = \sum_i \sum_j \sqrt{|I_{i+1,j} - I_{i,j}|^2 + |I_{i,j+1} - I_{i,j}|^2} \quad (\text{式 3})$$

$$\|I\|_{tsv} = \sum_i \sum_j (|I_{i+1,j} - I_{i,j}|^2 + |I_{i,j+1} - I_{i,j}|^2) \quad (\text{式 4})$$

(3) 電波干渉計には、ビジビリティの他にクロージャー (closure) 量という観測量がある。ビジビリティ V は複素数であり、振幅 $V = |V|$ と位相 $\phi = \arg V$ の二つの実数で表すことができる。実際の観測では、各望遠鏡の感度の時間変化、大気の影響などによる系統誤差が、振幅・位相に生じている。クロージャー量は、このような各望遠鏡起因の系統誤差によらないロバストな観測量であり、それぞれ位相と振幅について、

$$\psi_{ijk} = \phi_{ij} + \phi_{jk} + \phi_{ki}, \quad (\text{式 5})$$

$$A_{ijkl} = \frac{|V_{ij}| |V_{kl}|}{|V_{ik}| |V_{jl}|},$$

で定義される。ここで ϕ_{ij} , V_{ij} は観測局 i と j 間で取得されたビジビリティ位相及び振幅であり、クロージャー位相とクロージャー振幅は上記のように同時に観測された閉じた 3 局あるいは 4 局の基線を結ぶビジビリティによって計算することができる。これらの量は系統誤差の影響を受けず、データ較正時の不定性を排除することができることから汎用性が高い。そのため EHT においてもクロージャー量が主要な観測量となることが期待されている。

4. 研究成果

(1) 我々の最初の成果では、LASSO によって従来法に比べておよそ 4 倍ほど高い空間分解能の実現が可能であることが示された (発表論文)。図 2 は M87 の観測シミュレーションの結果を示す。従来法ではブラックホールの構造が、0 詰めをした逆フーリエ変換の過

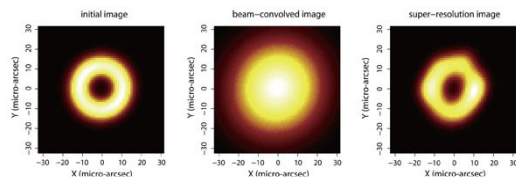


図 2: M87 のブラックホールシャドウの EHT 観測シミュレーションにおける画像再構成例。モデル画像 (左) とそれを EHT の回折限界で畳み込んだ画像 (中央)、そして疎性モデリングによって再構成された画像 (右) を表している (発表論文)。

程で消滅してしまい、イメージ上での正確な解の推定が困難である。一方、LASSO を用いて観測方程式を直接解くことで、シャドウを復元することが実際に可能であることが示された。なお、本成果の図 2 は、電波干渉計の教科書として世界的な名著の最新版に掲載され、国際的に認知されつつあることを付記しておく。

(2) LASSO に isoTV を加えたことによって、より高い性能で画像の再構成ができることが示された (図 2; 発表論文)。しかし、isoTV は画像のエッジを保存する制約であるため、ガス状の天体が多く輝度分布が滑らかに変化する天体画像に応用すると人工的な構造を作り出すことが分かった。そこで ℓ_1 +TSV 制約を導入し、天体の明るさが滑らかに変化する実際の天体画像に多く見られる特徴とよくマッチした画像が得られた (発表論文)。図 3 は EHT 観測のシミュレーションデータから各手法を使って再構成された画像の比較を表している。 ℓ_1 +isoTV は、従来法では見えないブラックホールシャドウを復元することに成功しているが、放射領域の輝度分布がモデル画像に比べて、平坦で幅が広く、エッジが強くなっている。一方、 ℓ_1 +TSV 制約の画像では、 ℓ_1 +isoTV の人工的な構造がより緩和され、シミュレーションの元画像に近くなっている。 ℓ_1 +TSV 制約によって、天体の種類や視野・ピクセルサイズなどの画像の細かいパラメータによらず、より高品質な画像が得られようになった。現在 ℓ_1 +TSV 制約を用いた式 2 の手法は、ALMA などの電波干渉計の標準解析ソフトである CASA への実装が進められているほか、実観測データに応用され始めている (研究成果 5,6)。

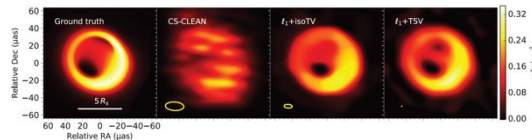


図 3: Sgr A* のブラックホールシャドウのシミュレーションにおける画像再構成例。シミュレーションによる初期画像 (左) と従来法によって再構成された画像 (中央左)、 ℓ_1 +TV による画像再構成 (中央右) と ℓ_1 +TSV による画像 (右) を表している (発表論文)。

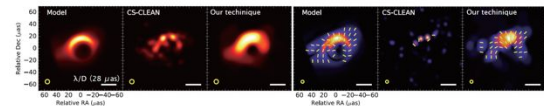


図 4: M87 のブラックホールシャドウのシミュレーションにおける 1.3mm の再構成画像。左からシミュレーションによる初期画像、従来法によって再構成された画像、 ℓ_1 +TV による再構成画像、シミュレーションされた偏光マップ、従来法によって再構成された画像、そして ℓ_1 +TV による再構成画像を表している (発表論文)。

(3) これまで述べた手法は電波放射の全輝度の画像を復元する手法であるが、これらの手法は容易に偏光のイメージングに拡張することができる。式 1, 2 において非負条件が課されているのは、放射の強度が非負だからである。一方、電波観測では偏光のフーリエ成分も取得することが可能であり、この偏光画像は負の値も取りうる。そこで非負条件を緩和して偏光画像を復元する手法の開発を行った。 ℓ_1 +TV 制約は偏光についても高い性能を持ち、全強度画像と同様に従来の 4 倍程度の高い実効解像度を達成できることがわかった(図 4、発表論文)。

(4) 我々はクロージャー量から画像を復元する手法の開発も行った。まずクロージャー位相の基線ごとの位相を高精度で復元する手法(PRECL)を新たに確立した(発表論文)。またクロージャー位相とビジピリティ振幅から直接画像を復元する手法にも取り組んだ(発表論文)。図 5 にビジピリティ振幅とクロージャー位相を用いて ℓ_1 +isoTV 制約で復元された M87 の擬似観測データの画像を示す(発表論文)。クロージャー位相を用いても従来法よりも高品質な画像が復元されていることがわかる。

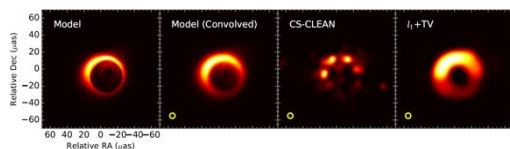


図 5: クロージャー位相から復元した画像。モデル画像(左から 1・2 番目)を使ってシミュレーションデータを作成し、画像復元を行った(3・4 番目)。左から 3 番目は従来法による画像であり、超解像度ではうまく復元できていない(発表論文)。

(5) 我々は新手法のシミュレーションデータによる評価のみならず、実際の観測データを用いて画像の復元、評価および研究を行っている。我々の開発した手法を用いて Very Long Baseline Array (VLBA) によって取得された M87 の 43GHz (波長 7mm) と 86GHz (3mm) の観測データから画像復元を行った。その結果得られた画像(図 6 左)では従来手法(図 6 右)に比べてより詳細な構造を検出できることがわかった。M87 はブラックホールの近傍から双極状に相対論的ジェットが噴出しており、観測者側に向かうアプローチジェット(明るいコアから右)と観測者と反対に向かうカウンタージェット(コアから左)の構造が明確にわかることで、ジェットの根元の物理を明らかにし、ジェット駆動の謎を解決する鍵となることが期待される。疎性モデリングによる再構成画像は従来法の画像に比べ、よりコア近くの構造を分解できたことで、従来では到達し得なかったコアから $10R_S$ (R_S : シュバルツシルト半径)でもジェットの二又構造があることを見出した[引用文献 4]。

(6) また実観測データを用いた評価の一環と

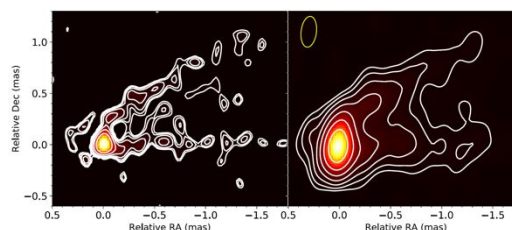


図 6: M87 の 43GHz 観測データから疎性モデリング(左)と従来法(右)によって復元した画像。

して、アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計(ALMA)による原始惑星系円盤天体 HD14252 の観測データに本手法を適用した。ALMA は望遠鏡の配置を変えることで最大基線長が変化するので、同じ観測周波数でも空間分解能を変化させることができる。そこで空間分解能が 3-4 倍異なる観測データをイメージングすることで、疎性モデリングの超解像イメージングの性能を調べた(図 7)。その結果、従来法のイメージは人工的な構造が多く見られるのに対し、 ℓ_1 +TSV 制約は高分解能データから復元された画像とほぼ同じ画像が復元できていることがわかる。この研究から我々の手法によって 3-4 倍の空間分解能向上が達成できることが実観測データから示された。

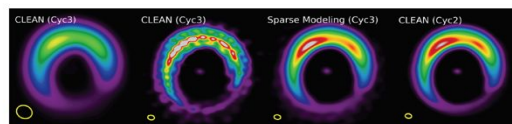


図 7: 原始惑星系円盤 HD 142527 の ALMA の観測データのイメージング結果。左側の 3 つの図は、低分解能データから復元された画像で、左から順に従来法、従来法の超解像イメージ、疎性モデリングによる超解像イメージを表す。右図は高分解能の従来法のイメージである。

(7) 2017 年 4 月に ALMA を含めた 6 か所 8 台の電波望遠鏡による EHT の本格的な科学観測が初めて行われた。ALMA 望遠鏡によって、ビジピリティデータの空間周波数分布及び EHT 全体の感度は今までとは比較にならないほど向上し、ブラックホールシャドウの画像化が期待されている。現在は国際協力のもと、データの較正や較正天体のイメージングが勤められており、我々も疎性モデリングの手法を使って画像復元を行なっている。いよいよ 2018 年 7 月にはブラックホールシャドウの復元に挑戦する予定である。

(8) 天候や天体の位置、観測割り当て時間などの様々な制限により、天体の明るさの時間変化を記録した時系列データ(光度曲線)は、不等間隔なサンプリングを持つデータになりやすい。このような光度曲線の周期解析をするとき、離散フーリエ変換などの従来法では、データのスパース性により偽信号がいくつも検出されてしまうという問題があった。そこで、発表論文 では、天文学分野で初めて、LASSO 法を用いた周期解析法を提案した。

また、多くの矮新星という変動天体にこの手法を適用してきた結果、変動に含まれる周波数成分が有限個である場合、この手法は、近接した複数周期の分解、刻一刻と変わっていく周期変化の追跡に有効であることを示した(発表論文)。

(9) スペクトルの輝線構造の時系列データを使って、連星系降着円盤の輝度分布を再構成する、ドップラートモグラフィという手法は、制約付き最小二乗法で解くことができる。隣接ピクセル間の差の絶対値の総和を最小化する全変動最小化を制約項とするモデルを開発し、矮新星 WZ Sge のデータにこの手法を応用した結果、MEM では再構成できなかった局所的な構造や円盤全体の非対称な形状が再構成できた(発表論文)。この手法は特にデータが少ない場合に有効である。

(10) Ia 型超新星は極大時の等級が共通しているため、銀河の距離を推定することに使われる。天体の色(スペクトルの傾き)と減光速度が極大等級の良い説明変数となることが知られているが、より精度を高くするためにさらなる説明変数を探す研究が盛んに行われている。我々はスペクトルデータも説明変数の候補に加え、係数の1次ノルムを最小化する LASSO で変数を選び、交差検証法でモデルを選択する手法をこの問題に応用した。従来は提案される変数は研究ごとに異なっていたが、本研究ではスペクトルデータを含めてもモデルが改善しないことが示された(発表論文)。本研究は当該分野で初めて現代的なモデル選択手法を導入した事例となった。さらに、より適切な変数選択手法について本領域内の計画研究 B01-2 班、C01-3 班との共同研究に発展した。

(11) 活動銀河核ジェットの偏光観測は磁場の情報を与えてくれる唯一の観測手段として重要である。不規則に時間変動する天体の光度・スペクトル・偏光の特徴を捉えることは、そのパラメータの多さから非常に難しい。そこで、本領域内の計画研究 C01-4 班と共同研究を行い、データを時間方向に伸びたチューブとして表現することで6つの変数の時間変化を1つの画面で可視化するツール「TimeTubes」を開発した。これによってブレーザー天体 PKS 1749+096 の従来は気づかなかった偏光の特性を発見した(発表論文)。

<引用文献>

1. Högbom, J.A.: Aperture synthesis with a non-regular distribution of interferometer baselines, *Astronomy and Astrophysics Supplement*, Vol. 15, pp.417-426, (1974)

2. Obuchi, T., & Kabashima, Y.: Cross validation in LASSO and its acceleration, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, Vol. 5, 5, 053304 (2016)

3. Obuchi, T., Ikeda, S., Akiyama, K., Kabashima, Y.: Accelerating cross-validation with total variation and its application to super-resolution imaging, *PLOS ONE*, Vol. 12, 12, e0188012 (2017)

4. Tazaki, F., Hada, K., Akiyama, K., Ikeda, S., Kuramochi, K., Sasada, M., Honma, M.: Reconstruction of ten Schwarzschild radii scale jets of M87 with sparse modeling, *The Astrophysical Journal*, submitted

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13件)査読あり

Kuramochi, K., Honma, M. (9 番目), and 7 coauthors: Superresolution interferometric imaging with sparse modeling using Total Squared Variation, *The Astrophysical Journal*, (2018), in press, arXiv:1802.05783

Akiyama, K., Honma, M. (11 番目), and 10 coauthors: Superresolution Full-polarimetric imaging for radio interferometry with sparse modeling, *The Astronomical Journal*, Vol. 153, 159, 10pp., (2017), DOI:10.3847/1538-3881/aa6302

Akiyama, K., Honma, M. (6 番目), and 4 coauthors: Imaging the Schwarzschild-radius-scale structure of M87 with the event horizon telescope using sparse modeling, *The Astrophysical Journal*, Vol. 838, 1, 13pp., (2017), DOI:10.3847/1538-4357/aa6305

Uemura, M. (1 番目) and 7 coauthors: TimeTubes: visualization of polarization variations in blazars, *Galaxies*, Vol. 4, 3, p.23, 9pp., (2016), DOI:10.3390/galaxies4030023

Ikeda, S., Honma, M. (5 番目), and 3 coauthors: PRECL: A new method for interferometry imaging from closure phase, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 68, 45, 9pp., (2016), DOI:10.1093/pasj/psw042

Uemura, M. (1 番目) and 8 coauthors: Optical polarization variations in the blazar PKS 1749+096, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 69, 6, pp.1-12, (2016), DOI:10.1093/pasj/psx111

Uemura, M.(1 番目), Kato, T. (2 番目), and 2 coauthors: Doppler tomography by total variation minimization, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 67, 22, pp.1-12, (2015), DOI:10.1093/pasj/psu154

Uemura, M.(1 番目) and 3 coauthors: Variable selection for modeling the absolute magnitude at maximum of Type Ia supernovae, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 67, 55, pp.1-9, (2015), DOI:10.1093/pasj/psv031

Ohshima, T., Kato, T.(2 番目), and 46 coauthors: Study of negative and positive superhumps in ER Ursae Majoris, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 66, 67, 68pp., (2014), DOI:10.1093/pasj/psu038

Honma, M.(1 番目), Uemura, M.(3 番目), and 2 coauthors: Super-resolution imaging with radio interferometry using sparse modeling, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 66, 95, 14pp., (2014), DOI:10.1093/pasj/psu070

Pavlenko, E., Kato, T.(2 番目), and 6 coauthors: Dwarf nova EZ Lyncis second visit to instability strip, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 66, 113, pp.1-11, (2014), DOI:10.1093/pasj/psu101

Osaki, Y., & Kato, T.: Study of superoutbursts and superhumps in SU UMa stars by the Keplerlight curves of V344 Lyrae and V1504 Cygni, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 65, 95, 25pp., (2013), DOI:10.1093/pasj/65.5.95

Kato, T., & Uemura, M.: Period analysis using the Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (Lasso), *Publications of the Astronomical Society of Japan*, Vol. 64, 122, 9pp., (2012), DOI:10.1093/pasj/64.6.122

〔学会発表〕(計 5 件)

田崎文得、秦和弘、秋山和徳、池田思朗、倉持一輝、本間希樹 『43/86 GHz 周波数帯での VLBI 観測とスパースモデリングを用いた M87 中心核構造の研究』日本天文学会 2017 年春季年会、S02a、2017
植村誠、伊藤亮介、Longyin Xu、中山雅紀、Hsiang-Yun Wu、渡辺一帆、高橋成雄、藤代一成 『プレーザーで観測される偏光の時間変動の 3 次元可視化』日本天文学会 2016 年秋季年会、Z109b、2016
本間希樹、田崎文得、倉持一輝、秦和弘、秋山和徳、池田思朗 『スパースモデリングを用いた電波干渉計イメージング』日本天文学会 2016 年秋季年会、Z110b、2016

池田思朗 『スパースモデリングと天文データ解析』日本天文学会 2016 年秋季年会、Z113r、2016

秋山和徳、池田思朗、倉持一輝、田崎文得、本間希樹 『Event Horizon Telescope による電波銀河 M87 のブラックホールシヤドウと直線偏光の超解像イメージング』日本天文学会 2016 年秋季年会、Z115a、2016

〔図書〕(計 1 件)

本間希樹、講談社、巨大ブラックホールの謎 宇宙最大の「時空の穴」に迫る、2017 年、270 ページ

〔その他〕

ホームページ

<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

植村 誠 (UEMURA, Makoto)

広島大学・宇宙科学センター・准教授

研究者番号：50403514

加藤 太一 (KATO, Taichi)

京都大学・理学研究科・助教

研究者番号：20283591

(3) 連携研究者

野上 大作 (NOGAMI, Daisaku)

京都大学・理学研究科・准教授

研究者番号：20332728

(4) 研究協力者

秦 和弘 (HADA, Kazuhiro)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・助教

研究者番号：60724458

大島 誠人 (OSHIMA, Tomohito)

西はりま天文台・研究員

笹田 真人 (SASADA, Mahito)

広島大学・宇宙科学センター・特任助教

田崎 文得 (TAZAKI, Fumie)

国立天文台・水沢 VLBI 観測所・特任研究員 研究者番号：10800609

秋山 和徳 (AKIYAMA, Kazunori)

マサチューセッツ工科大・ヘイスタック観測所・Jansky Fellow