



VLBI観測で追い求めた銀河系および ブラックホールの姿

本 間 希 樹

〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢星ガ丘町 2-12〉

e-mail: mareki.honma@nao.ac.jp

筆者はこれまで約20年にわたってVLBI技術を用いた観測的研究を行ってきました。この度、VLBI観測による銀河系およびブラックホールに関する研究を評価していただき、2020年度の林忠四郎賞を受賞させていただきました。本稿では筆者のこれまでの研究の流れを途中経過も交えながら振り返り、どのように今回の成果に辿り着いたのか、その概要を述べたいと思います。

まえがき

この度、「超長基線電波干渉計に基づく銀河系構造の研究と巨大ブラックホール・シャドウ撮像への貢献」を評価いただき、2020年度林忠四郎賞という大変名誉ある賞を私が受賞させていただきました。推挙いただいた方々や選考に関わった方々はもちろん、若かりしころにご指導いただいた先生方や先輩方、そして私のこれまでの研究に協力いただいた方々を含め、すべての関係者にまず心より感謝を申し上げます。私のここ20年間の研究は、超長基線電波干渉法（VLBI: Very Long Baseline Interferometry）をベースにしたものであり、その性質上、国内および海外に多数の共同研究者を必要とするものです。今回の受賞は、関係者の皆様のサポートなしには到底なしえなかったことを、感謝の意味も込めてここに明記しておきます。

さて、本稿では、私が天文学研究に関わるようになった大学院時代から現在に至るまでの25年程度の期間を振り返って、私がどのような歩みで研究を進めてきたか、そして今回評価していただいた成果にどうやって辿り着いたかを述べたいと思います。特に強調したいのは、ここに辿り着く

までに決して一本のまっすぐな道があったわけではなく、紆余曲折しながらも研究を続けた結果がこうなった、という点です。そのため、本稿は研究成果の中身そのものを詳しく掘り下げるといよりは、私のこれまでの研究活動にまつわる雑多な話をまとめたものとなりますが、それが次世代の研究者にとってわずかでも今後の参考となれば幸いです。

1. 研究の出発点

私が東京大学理学部の天文学科に進学したのは1992年（学部3年）、そして同大の大学院に進学したのは1994年です。学部の卒業研究および大学院で東京大学天文学教育研究センターの祖父江義明教授に指導いただくことになった縁で、銀河に関わる研究をやることになりました。祖父江さんは、多くの方がご存知のとおり大変アクティブな研究者で、銀河に関して様々な研究を進めていましたが、その中で私は銀河の回転に興味を持ちました。そのころ（そしていまでも）暗黒物質の正体は未解明の大きな問題で、1993年にはマゼラン雲方向に重力マイクロレンズ現象が初検出され、暗黒物質問題が天文学的手法で解決できる可能性がにわかに出てきたころでした。暗黒物質の

正体をしっかりと見極めるためには、まずその分布をしっかりと決めることが必須であり、そのために天の川銀河の回転をまず抑えようというのが当時の研究のモチベーションでした。

そのため修士・博士時代には中性水素の観測から天の川銀河の回転速度を測定し、また、その回転速度から予想される重力マイクロレンズ天体の質量推定などの研究を行いました。ただ、その後の研究の進展はすでに知られているとおりで、残念ながら重力マイクロレンズを起こす天体で暗黒物質は説明できないことが判明しています。いまでは暗黒物質の正体は天文学的な質量を持った天体ではないということになっており、暗黒物質の研究は現在、素粒子実験へと主軸が移っています。その意味では、私が大学院に入ったときに貢献したいと思っていた暗黒物質の正体解明は、これまでの間にどんどん自分の手の届くフィールドから遠ざかってしまっているわけです。改めて研究というのは本当に先が見えないものだと感じます。加えて、当時から25年経てもやはり暗黒物質は正体不明のままですから、科学上の大きな課題解決にはやはり長い時間と多くの研究者の力が必要なことも感じます。

もちろん、大学院時代の貴重な経験は、研究者としてやっていくために大いに役に立ちました。私の指導教官であった祖父江さんは、当時（そして、退官された現在も）研究者であることを楽しみながらバリバリ研究をされています。このような良きロールモデルに出会えたことは私が研究者を目指す上で決定的な影響を与えましたし、また祖父江さんを筆頭に自由闊達に議論しながら研究を進める雰囲気が研究室にあり、そのような良い環境を提供してくれた研究室メンバーにも感謝しております。現在自分自身が“教授”という肩書を持って大学院生を指導する立場にあることを、当時の祖父江さんと比べてみると、自分の姿勢が院生にどこまでポジティブなフィードバックを与えられているのか、少々疑問と自己反省を感じて

しまいます。

また、当時のことを思い出してもう一つ付け加えるならば、当時国立天文台の三鷹キャンパス内にいる大学院生は、所属機関（東大、総研大、その他）や分野、学年の隔たりなく院生プレハブにあつまっていました。そこでは祖父江研究室以外の仲間にも大変お世話になりましたし、分野の異なる研究者と議論したり切磋琢磨したりする貴重な場でもありました。その当時の仲間の多くが、現在各大学や研究機関で活躍しているのは大変嬉しいことです。最近このような分野の垣根を越えた交流の場が減っているように感じられ、やや寂しく思っています。

2. VERAによる銀河系計測

さて、私の大学院時代はまったくVLBIと関わりがありませんでした。私がそれに関わるようになったのは、博士号取得後に国立天文台のVERAプロジェクトに加わってからです。これも振り返ってみると偶然の産物と言えなくもありません。私が学位をとったのは1999年3月ですが、多くの研究者と同じくポスドクでどこに行くか（行けるか）が問題になりました。ところが運の良いことに、ちょうどその直前にVERA建設の調査費がつき、プロジェクトが動き出すこととなったのです。新たに始まるプロジェクトですから、当然人が必要になります。そんなタイミングの良さもあって、私は国立天文台の研究員に採用となり、1999年4月からVERAのグループに所属することになりました。もし私の学位取得とVERAの建設承認のタイミングが一年でもずれていたら、私はVERAに関わっていなかった可能性もあります。その場合、私の研究者人生はまったくVLBIに関係ないものとなり、その後ブラックホールの撮影にタッチすることもなかったかも知れません。そう考えると偶然のめぐり合わせも、また大事なものだと思つづく感じます。

このような経緯でVERAに関わるようになって



図1 VERAの20m電波望遠鏡の鏡面の工場仮組の様子。私がVERAに参加した当時はアンテナの建設前であり、文字通り0からのスタートでした。

たのですが、なにしろ最初はまだアンテナがない状態でした。そこで、望遠鏡システムの検討や準備観測の実行など、予備的などころから活動を始めることになりました。一方で、幸いにも1999年には水沢、入来、小笠原の3局の建設予算が認められ、また、翌年には石垣島の建設も認められるなど、建設については順調に進みだしました。図1はVERAのアンテナの仮組の様子で、いまとなっては大変懐かしいVERA建設前の姿です。何も無い所からのスタートを象徴的に示す写真としてここに掲載しておきます。

大学院時代に装置開発にまったくタッチしていなかった私ですが、VERAの望遠鏡の建設から装置の性能評価に至るまで、最初からシステムを立ち上げることができ、このことは非常に貴重な経験になりました。この経験がなければ、その後自分達で新たな観測装置を立ち上げてまでミリ波のVLBIをやろう、と考えることはなかったでしょう。

VERAに加わって最初の3年間で、建設と評価、天体信号の確認までは比較的順調に進みました。しかし、その後位置天文計測の精度を十分に出すまでには、長い歳月がかかりました。なにしろ、VERAは10マイクロ秒角台の位置決定精度とい

う、これまでに経験したことのない位置天文計測を目指していたので、そもそもその精度を確認するための物差しがなかったのです。当時日本ではVSOPプロジェクト（1997年打ち上げの電波望遠鏡搭載衛星を用いたVLBI観測）などによってVLBIのイメージング観測での実績はすでにありました。VSOPによるイメージングはもちろんすごいことなのですが、VSOPが狭視野観測なのに対し、VERAでは最大2度離れた天体の相対位置計測をするので、実はVERAの要求精度はけた違いに高いのです。例えばVSOPで1000ミリ秒角（mas）スケールの画像を1masの分解能で描く場合、視野と分解能の比はたかだか1000:1です。一方、VERAでは2度離れた天体に対して相対位置を精度10マイクロ秒角で測ります。これを比にすると、720000000:1となり、要求精度がVSOPに比べて何ケタも違うのです。ですので、それに伴って局位置や遅延予測計算、位相遅延計測などに要求される精度が、通常のイメージングVLBIに比べてはるかに高くなります。実際、建設時のVERAではVSOP用に開発された相関器を使って相関処理を行っていましたが、VERAの解析を始めてみると、その相関器で使われていた予測値計算プログラムに問題があって必要な精度が出ないことがわかり、このバグ出しに結構な時間を取られました（念のために書いておきますが、VSOPで狭視野の画像を得るには何ら影響のないものであり、だからこそVERAになって初めて見つかったものです）。また、2ビーム間の伝播遅延の差を補正するシステムの立ち上げとその検証にも数年の時間がかかりました。

このような苦勞を経てVERAでようやく位置天文観測の精度が出て、年周視差の測定ができるようになったのは2005年の終わりから2006年ごろのことでした。建設開始からすでに5年以上の月日が流れています。そして、最初の成果が論文として発表されたのは2007年のことで、このときS269とオリオンKLの年周視差計測が報告され

ました [1, 2]. 当時としては, S269 は年周視差で距離を決めた最も遠い天体であり, 長年の苦勞を経てようやく VERA が世界第一線の装置として完成したことになります. 1999 年に私が VERA の研究員となってから実に 8 年の時間がたっており, ざっくり「一仕事 10 年」というプロジェクト研究の時間スケールを経験することになりました. このような経験があったため, それ以来私は 10 年先の天文学の動向を予想して行動することを心がけるようになりました (もちろん予想は簡単ではないのですが…, まずは考えることが重要だと思っています).

VERA はその後も観測を続け, 2012 年には当時 VERA や米国 VLBA などによって観測された 52 個のメーザー天体の観測結果を取りまとめた論文を主著者としてまとめることができました [3] (この論文では幸い, 日本天文学会欧文研究報告の論文賞を受賞することができました). VERA に参加してから 10 年以上の月日がたつて, 初めて目指していた銀河系の回転研究の結果をまとめることができた瞬間でした. VERA の観測はその後も続き, 2020 年にはその後の位置天文観測成果を含めたカタログ論文が出版されました [4]. 筆頭著者は水沢 VLBI 観測所の廣田朋也さんです. 廣田さんとは, 2007 年の初期成果発表も含めて長年 VERA で一緒に仕事をしてきました. また, この間 VERA の推進にあたって指導的役割を果たしてこられた, 笹尾哲夫さん, 小林秀行さん, 川口則幸さんらにもお世話になりました. これらの方々をはじめ, VERA 関係者のこれまでのサポートに改めて感謝いたします.

さて図 2 に示したのが, これまでの VERA をはじめとする VLBI の観測によって描き出された星形成領域メーザーの分布と運動になります. いわば, この分野のこれまでの集大成の結果と言っても良いでしょう. この図からは, 銀河系が場所によらずほぼ一定速度で円運動する様子や, 渦巻への星形成領域の集中, さらに銀河系中心部で星

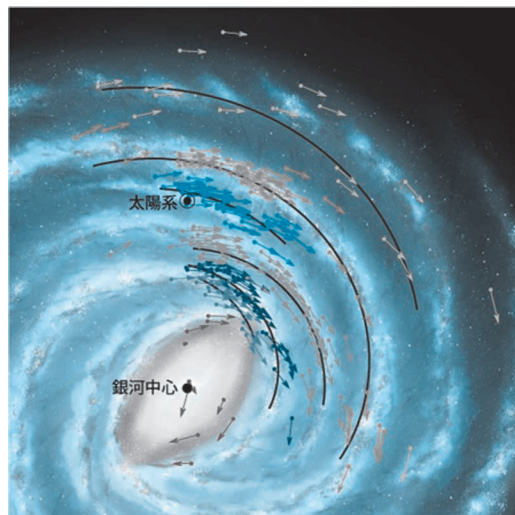


図 2 VERA や米国 VLBA による 15 年以上の位置天文観測から描き出された天の川銀河の構造と運動. 各点と矢印が星形成領域の位置と運動を表している. 銀河系が場所によらずほぼ一定速度で円運動回転する様子や, 渦状腕への星形成領域の集中など, 銀河系の基本的な姿が見て取れます.

形成領域のメーザーが少ないことなどが見て取れます. これらの VLBI の観測結果の統計解析から, 銀河定数のうち Θ_0 (太陽近傍の銀河回転速度) が, 現在の IAU 推奨値 (1985 年) の 220 km/s に比べて大きくなること示唆されています. なお, この間, VERA の良きライバルとして, VLBA を用いた BeSSeL プロジェクトも多くのメーザー天体の位置天文学計測を続けてきており, お互いに切磋琢磨しながら研究を進めてきました. BeSSeL のリーダーであるハーバード・スミソニアン天体物理センターの Mark J. Reid 氏とは, VERA を始めて以来 20 年の付き合いになり, この間 VLBI を用いた位置天文観測に関する Review 論文 [5] を一緒に書いたことも大変貴重な経験でした. Mark 氏は, この分野の優れた先輩であり, また同じ分野の良きライバル仲間として, 常にいろいろな刺激を与えてくれたことをここに記しておきます.

3. ミリ波VLBIへの展開

少し時間を巻き戻して、2008年に話を戻します。この年は私の研究者人生の第二の転換点であったとも言えます。前年の2007年にVERAの初期成果を出すことができたので、そのころVERAのグループでは、どんどんVERAの観測を続けて成果を出すとともに、さらにその次に何を目指すか、ということも議論され始めていました。すでに述べたように、私はVERAで「一仕事10年」ということを体験していたので、今後VERAを続けていくという自然な研究展開に加えて、10年後に新たに花開くであろう「次の種」も探しておこうと、おぼろげながらも考えるようになっていました。

そこにちょうど大きなニュースが飛び込んできます。そのニュースを持ってきてくれたのはVERAで長年一緒に仕事をやってきた小山友明さんです。2008年夏にシカゴで開催されたURSI（国際電波科学連合）の会合で、MITヘイスタック天文台のShep Doeleman氏らのグループが、天の川中心のブラックホール候補いて座Aスターを、米国内の3局からなるミリ波VLBI観測網で検出した、と発表したのです[6]。その結果によれば、いて座Aスターの大きさは予想されるシュバルツシルト半径の5倍くらいと制限づけられていました。これは本当に衝撃的な成果で、現地でその話を聞いた小山さんは帰国後すぐに私のオフィスにやってきて、「本間さん、すごい成果がでていますよ」とその成果を熱心に説明してくれました。

いて座Aスターがシュバルツシルト半径の5倍程度の大きさを持っている、ということは、事象の地平面スケールの構造が捉えられ始めていることを意味します。例えば、回転していないシュバルツシルトブラックホールでは、ブラックホールの影の大きさの期待値はシュバルツシルト半径の5.2倍であり、観測とだいたい一致しています。

つまり、これはいて座Aスターが恐らくブラックホールであるということを示唆しており、今後さらに望遠鏡の性能を上げればブラックホールの影が見えるようになるかも知れない、と強く期待させるものです。そこで、小山さんと早速、「では我々日本はどうするか？」ということを考え始め、有志を募って検討を開始しました。すぐに秦和弘さんや永井洋さんら、現在も活躍中のVLBI分野の若手研究者が参加してくれることになりました。

当時、ALMAは建設中だったのでそれをすぐにVLBIに使うことはできません。一方、日本はALMAの準備のために直径10mのASTE望遠鏡をチリで運用していました。そこで、このASTEをミリ波VLBIの局として整備し、米国と組んで観測をすれば、さらに解像度を上げていて座Aスターのブラックホールの影が写真に撮れるかもしれない、と考えたのです。すぐに米国の代表であるShep氏にコンタクトしたところ、米国側も是非一緒にやろうということになりました。また、国立天文台側では、当時の台長だった観山正見さんやASTEを所管する野辺山宇宙電波観測所長の川邊良平さんらのサポートもあって、計画を進められることになりました。この方針が整ったのは2008年の秋のことですが、このタイミングもいまから考えれば結構運が良かったと思います。もし仮に米国側の成果が1,2年早く出ていたら、その時点ではまだVERAの初期成果が出ていないので、私が新たにミリ波VLBIに挑戦するということは、観測所としても当然受け入れられなかったでしょう。実際、私が2008年にミリ波VLBIも始めると言い出した際には、「VERAはどうなるんだ？」と心配する人や計画に反対する人もいました。ただ、そこは研究者としての直感で、今後必ず面白くなる将来性のある研究と思いましたが、心配や批判はさておき、とにかく前に進むことにしました。

ところが、ここから先の展開はやはり、「一仕

事10年」となりました。ASTEによるミリ波VLBI実験から始まった我々の活動は、最終的に2019年にEHTの成果発表として結実するまでに、10年を超える長い紆余曲折がありました。まずASTEの観測は2010年春に最初の観測にこぎつけたものの、天体の信号が未検出のままその後の観測が中断してしまいました。これは、ちょうどそのころ宇宙研と国立天文台のVLBIグループが協力して進めていたVSOP-2プロジェクトが危機的な状況に陥り、ASTEの観測実験を継続することが難しくなったためです（なお、関係者の努力にもかかわらず、VSOP-2は残念ながら2011年にプロジェクトの中止が決定となりました。しかし、そのような困難にもめげず、旧VSOP-2メンバーでその後EHTでも活躍している方が複数いることも付記しておきます）。

ASTEの観測ができなくなっても、やはりチリの観測局の整備は重要ですし、そのころにはALMAが近いうちに稼働する状況になっていたため、次はALMAのphase-up（各アンテナの信号を加算して1台の巨大なVLBI局に合成すること）に取り組むことになりました。ALMA自身が大きな国際協力なので、ALMAのphase-upも当然国際協力となりました。その中で我々が貢献したのは、標高5000 m強のALMAの観測サイトから中間山麓施設まで観測データを一本の光ファイバーで波長多重伝送するための光伝送装置の開発です。これは、日本がそれまで培ってきた光結合VLBI技術の経験を買われて、担当したものです。

しかし、ALMA phase-upの一員として参加するだけでは、日本のプレゼンスはなかなか出しにくいのが難点でした。より大きな本質的な貢献をしたいと思う一方で、我々には日本から提供できる新たな望遠鏡があるわけでもありませんでした。そこでいろいろ悩んだ末に我々が考えたのが、データ解析面での貢献です。プロジェクトの目標はブラックホールの影の撮影ですから、当然

より良い写真を撮影するための解析ソフトウェアが最終的には鍵になります。そこに我々の独白色を入れることができれば、日本からのオリジナルな貢献として、私達のプレゼンスをより大きく示すことができはず、と考えたのです。

4. スパースモデリングとの出会い

ちょうどそのような時期に、スパースモデリングという新たな数理的技法に、私は出会うことになります。そのきっかけを作ってくれたのは広島大学の植村誠さんです。植村さんは当時、スパースモデリングの天文学への適用例を広げることを考えていました。ちょうどそのころ、スパースモデリングで幅広い研究分野の研究を加速させようという大型科研費（新学術領域）を東京大学新領域創生科学研究科の岡田真人さんが中心となって準備を進めており、植村さんもその一員として天文学分野でのアプリケーションを広げようとしていたのです。スパースモデリングの噂を聞きつけた私は、何となく面白そうだななど、思って植村さんに話を聞いてみることになりました（植村さんは幅広い分野で声かけをしたようですが、具体的に手を挙げたのは私を含めてわずかだったようです。面白そうなことにとりあえず反応する感度について言えば、私の“アンテナ”はますます良好なものだったと言えるかもしれません）。

植村さんはすぐに国立天文台に来てセミナーをしてくれ、応用の一例として変光星の光度曲線の周期解析について紹介してくれました。昼間や悪天候による観測の欠損のために歯抜けになった光度曲線からもととの周期を推定する、という一次元のフーリエ変換の問題でした。歯抜けのデータに0を入れて解く代わりに、スパースモデリングで“スパースな解”を選択すると、ゴーストによるノイズがきれいに落とせ、また解像度も向上することを教えてくれました。植村さんが示してくれたこのサンプルが絶妙だったおかげで、私はすぐにそれがブラックホールの撮像に使えるのだ

と思いました。我々がVLBIでやる画像処理は2次元フーリエ変換ですから、次元は違いますが基本は同じ数学的問題です。しかも望遠鏡の配置のせいでデータが歯抜けになるのも、データが欠損した光度曲線の問題とよく似ています。そして、スパースモデリングを使うと周波数の解像度が上がった、というアウトプットが何より魅力的でした。なにしろ、ブラックホール撮影は人類史上最も高い解像度を目指したプロジェクトです。もし我々がこの方法をその画像処理に応用して、より良い画像を得ることができれば非常に大きな貢献になりえます。特に当時懸案だったのが、2大ターゲットの一つ、M87の質量がはっきり決まっておらず、太陽の約30億倍または60億倍という、2つの説があったことです。もし小さい方が真値だとすると、EHTで当初予定していた波長1.3 mmの観測でも視力が足りず、ブラックホールの影が見えないリスクがありました。もしそれをスパースモデリングで解決できれば大きなインパクトをもたらすはずでした。

そのような方向性でまとめたのが、スパースモデリングによるVLBIの画像解析の可能性を示した2014年の論文です[7]。植村さんに加えて、当時私の研究室の院生だった秋山和徳さん、そして統計数理研究所の池田思朗さんもチームに加わってくれ、この方法の有効性について先鞭をつけることができました。もちろんこの論文は第一報的な位置付けであり、スパースモデリングをさらに実用的なものとして完成させるためには、プログラミングおよび評価を中心にさらに多くの時間と労力が必要でした。それを実現してくれたのは私ではなく若手研究者の皆さんで、特に私の院生でその後MITにて活躍中の秋山和徳さん、そして水沢でポスドクだった田崎文得さん、笹田真人さん、森山小太郎さんらの頑張りには改めて感謝と敬意を表したいと思います。また、池田思朗さんという数理のプロから適切なアドバイスをいただけたことも大変有効でした。最近では、観測天文

学でもデータ科学の専門家と連携していろんな問題を解決しようという動きが盛んですが、その流れの一つを作ることができたのではと思っています。

5. EHTの観測実現と成果発表

ASTEの実験から始まり、ALMAのphase-upの開発と試験、そしてスパースモデリングによるソフト開発も進めているうちに月日は流れ、ミリ波VLBIはEHT (Event Horizon Telescope) という大きな国際協力プロジェクトに成長します。そして、いよいよ2017年にALMAを含めた初めてのEHTの観測を実現するに至ります。地球上の6か所8台のアンテナを用い、まさに“地球規模”の電波干渉計を合成して、ブラックホールの影の撮影に挑戦したのです。ターゲットは、天の川中心の巨大ブラックホールいて座Aスターと、M87の2つです。この2つのブラックホールだけが、影の撮影が可能な大きさを持った候補天体なのです。いて座Aスターの影の大きさの期待値は約50マイクロ秒角、それに対してM87は60億太陽質量の場合で40マイクロ秒角、半分の30億太陽質量の場合は20マイクロ秒角です。EHTの観測網の大きさと波長(1.3 mm)から期待される分

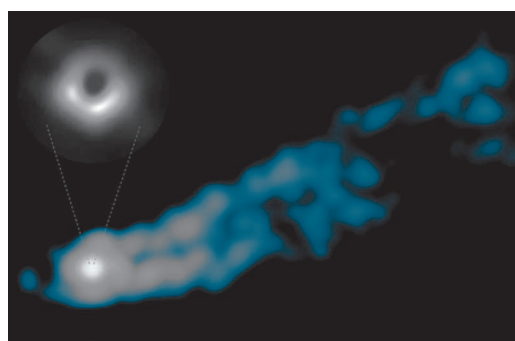


図3 左上: EHTが撮影したM87の中心核の巨大ブラックホールの影。波長1.3 mmの観測。右下: 同じくM87の中心核から出るジェットを東アジアVLBI観測網で捉えたもの。観測波長は7 mm。

解能は20マイクロ秒角程度でした。

観測は2017年4月初旬に行われ、いて座Aスター、M87とも無事にデータ取得できました。幸いどの局も比較的良い天気恵まれ、大きなトラブルもなく観測を実行できました。観測はメディアの注目度も高く、各観測局にテレビカメラが入ったり、またブラックホールの観測が始まったことがニュースで取り上げられたりしました。中には気の早いメディアによって「ブラックホールの撮影に成功か?」というフライングめいた報道もありましたが、実際には観測終了後、成果を得るまでも長い道のりで、結果的には画像の公表までさらに2年の月日を要しました。データの輸送も数か月がかりですし、その後関連処理も何度も繰り返して、遅延などの較正精度を上げていきました。それと平行して画像解析ソフトの評価試験を行い、いて座AスターとM87以外のEHTの観測データを用いて、画像解析がちゃんとできることを確認しました。そして、チームメンバーがブラックホールの影の撮影に挑んだのは、観測から一年以上たった2018年6月のことです。

画像解析では、4つの独立なチームを作り、最初はお互いに手の内を秘密にして解析を進めました。これは、誰か一人が「好ましい画像」を得てその情報を周りにシェアした場合に、他の解析が無意識のうちにそれに引っ張られるのを防ぐためです。このように慎重を期した解析を行い、最終的に各チームの解析結果を開示して比較すると、どのチームも見事にM87のリング状の構造が確認されました。その後も丹念に解析結果の確認や理論モデルとの比較、そして科学的解釈を行った上で初期成果論文をまとめ、史上初のブラックホールの影の撮影の成果(図3)は最終的に6本の論文として2019年4月10日に出版されました[8-13]。同じ日、世界6か所で同時刻に記者発表が行われて成果が発信され、大きなニュースとなったのは読者の皆さんの多くもご存知のとおりと思います。この記者発表は、まったく同じ時刻

に開始しただけでなく、ブラックホールの画像をオープンする時間まで4月10日UT 13:07と厳密に規定されていました(普段からナノ秒の時刻同期を要求する、VLBIの研究者らしいやり方でした)。EHTの初期成果の詳細については、すでにいろんなところで報告があるのでここでは詳しくは割愛しますが、改めて興味を持っていただいた方は原論文を参照いただくか、あるいは天文月報に日本語の解説記事[14-17]も掲載されていますので、そちらも参考にいただければ幸いです。

ところで最初に発表された画像が、いて座AスターでなくてM87だったことに、多くの人が意表をつかれたのではないかと思います。これは、EHTチーム内で両方の天体の解析を行った上でこのことで、いて座AスターよりもM87の方が確実な画像および成果を先に出せると判断したからです。この差はいて座Aスターの変動のタイムスケールが短いことが要因の一つです。電波干渉計では通常8-10時間程度の積分時間をかけて、その間は相手の天体の変動しないと仮定して静止画像を撮影しています。しかし、いて座Aスターでブラックホールの近くを回転するガスの周期は数分から数10分と、撮影時間よりもはるかに短くなり、いわば“ぶれた写真”になってしまうのです。いて座Aスターの時間変動の扱いについては、今後のこの分野の大きな課題で、難しい問題であると同時に、ブラックホールのダイナミックな姿を捉えうる可能性があるという意味では、大変興味深いテーマでもあります。

それから、M87の質量は結局重い方の、太陽の約65億倍、ということで決着がつけました。これは、私達日本チームにとってはちょっとだけ残念な結果でした。もし小さい方の約30億倍であれば、スパースモデリングなどの新しい画像解析方法のおかげでブラックホールの影が見えた、という流れになった可能性があったからです。しかし、実際にはM87の質量は重い方が正しく、見かけのサイズも大きかったので、従来法でも影

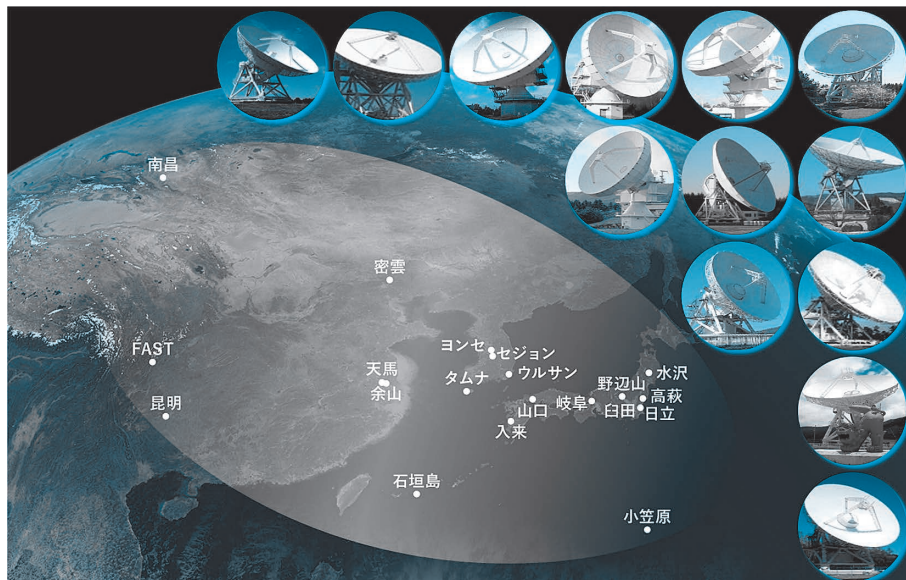


図4 日本、韓国、中国の望遠鏡を組み合わせた東アジアVLBI観測網。VLBI分野の次の10年の主力装置として国際的にも期待されています。筆者がVLBIに関わり始めた当時はこのうち多くの望遠鏡が存在しておらず、EAVNの実現そのものがここ20年間のアジア地域におけるこの分野の発展を物語っています。

を分解することができました。そのため、結果的にスパースモデリングの解像度向上が決定的な役割を果たすことはありませんでした（最終画像では、従来法の解像度に合わせるという、保守的な立場をとっています）。それでも、3つの異なる方法の一つとして解析結果をクロスチェックするのに大きな役割を果たしました。そして何より、世界中に配信されたブラックホールの最終画像は3つの手法の平均になっていますので、最終画像に日本からも大きく貢献できたことが良かったと思っています。

6. 今後の展開

このように筆者はこの20年間VLBIに関わってきて、銀河系の構造やブラックホールの影の撮影などの研究を進めてきました。すでに書いたようにずっと「一仕事10年」なので、20年間で大きなテーマをちょうど2つこなしたところです。今後ですが、私の定年まで幸いあと15年ほどありますので、もう一仕事（あるいは2つ？）できる

ことになります。については次の15年間、どのような研究展望があるのか、その可能性も少しだけ述べて本稿を終わりにしたいと思います。

まず、ブラックホールの研究ですが、画像としてその姿を直接見る時代が到来したので、これから劇的な進展が期待されます。その存在は確実となったので、今後はブラックホールというシステムの理解へと中心課題が移っていくでしょう。巨大ブラックホールは本体に加えて降着円盤からのガス供給とジェットの出射というダイナミックな系であり、そのシステム全体の理解や、そのシステムが母銀河にどのような影響を及ぼしてきたかの理解などが、今後の天体物理学の課題となっていくと期待しています。もちろん、極めて強い重力場中での物質や光のふるまいを詳細に観測することで、もし万が一にも一般相対性理論にほころびが見えるようなことがあれば、それは非常に大きなボーナスとなるでしょう。これらの研究では引き続きVLBIの高分解能が大きな役割を果たすと期待されていて、EHTのプロジェクト内でも

次世代のngEHT (next generation EHT) の検討が進められています。また、ジェットの研究では多波長観測がものを言うので、現在水沢 VLBI 観測所が国際協力で推進している東アジア VLBI 観測網 (EAVN: East Asian VLBI Network, 図4) の活躍も楽しみです。

一方、銀河系の研究の今後についてですが、銀河系の中でどこが生命誕生にとって都合が良いのか、あるいは言葉を変えると、私達の太陽系がこの場所にあるのは必然なのかどうか、という問いがこれから非常に興味深い対象になってくるでしょう。これについては VLBI のアストロメトリによって直接的に解決できる問題ではなく、多波長の観測と理論を組み合わせた広範なアプローチが必要になってきます。では、今後銀河系の研究で、VLBI が果たすべき役割はなくなったのでしょうか？

私の予想では、今後非常に重要な銀河系天文学の課題において、VLBI 技術が大きな役割を果たすと強く期待しています。それは、地球外文明を探す“SETI” (Search for Extra Terrestrial Intelligence) です。宇宙人および高等文明が地球以外に存在するかどうかを検証することは、「人類とは何か？」を知るため、また、人類の未来を占う上でも極めて重要です。宇宙人の存在を実証するための有力な手法の一つが、宇宙人が使っているはずの人工電波を検出することです。宇宙人が太陽に比較的近い星の周囲に住んでいて、かつ地球人と同程度レベルで電波を使っていたとして、そこから漏れ出る電波をキャッチするのです。

現在の地球上の電波望遠鏡の感度を考えると、その検出はまだ非常に難しいです。しかし、SKA (Square Kilometer Array) やさらにその先の大型電波望遠鏡ができれば、近傍の星の宇宙人探査が現実的な対象となってきます。その際、SETI で最も重要なのは地球上の混信の除去であり、そのためには電波望遠鏡をできるだけ場所を離して観測する VLBI の技術が有効です (地球上からの混

信を極限まで落とすことが可能です)。そして万が一、どこかの星から人工電波がキャッチされたら、次にやるべきことは VLBI によるアストロメトリ観測です。相手の人工電波源の位置と動きを測ることで、宇宙人が住む星までの距離はもちろん、彼らの惑星の公転や自転、さらには電波源の位置と分布から惑星上の地形分布などの研究も可能になります。これについてはまだかなり遠い未来の夢物語ですが、VERA で培ってきた VLBI 位置天文学の技術が、このような新たな分野で大いに活躍するのを是非見てみたいと思っております。そのような時代が次の 10 年程度でやってくるかどうか、まったく保証はありませんが、VLBI にこれまで関わって来た研究者として、今後の進展を大いに楽しみにしています。

謝 辞

冒頭でも述べましたが、これまでの研究活動を一緒に進めてくださったすべての皆様に改めて感謝申し上げます。文中に実名で紹介させていただいた方は特にこれまでの研究に関して非常にお世話になりましたので、感謝の意を込めて名前を挙げさせていただきました。もちろんここに書き切れなかったたくさんの方々にも大変お世話になっていることを改めて強調いたします。特に、東京大学天文学教育研究センターの祖父江研究室のメンバー、国立天文台の水沢 VLBI 観測所や鹿児島大学の VERA 関係者各位、日本の VLBI 懇談会の皆様、東アジア VLBI 観測網の共同研究者、そして EHT の共同研究者に改めてお礼申し上げます。

参考文献

- [1] Honma, M., et al., 2007, PASJ, 59, 889
- [2] Hirota, T., et al., 2007, PASJ, 59, 897
- [3] Honma, M., et al., 2012, PASJ, 64, 136
- [4] Hirota, T., et al., 2020, PASJ, 72, 50
- [5] Reid, M. J. & Honma, M., 2014, ARA&A, 52, 339
- [6] Doeleman, S. S., et al., 2008, Nature, 455, 78
- [7] Honma, M., et al., 2014, PASJ, 66, 95
- [8] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L1

- [9] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L2
- [10] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L3
- [11] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L4
- [12] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L5
- [13] EHT collaboration, 2019, ApJ, 875, L6
- [14] 松下聡樹, 本間希樹, 井上允, 2019, 天文月報, 112, 444
- [15] 田崎文得, 小山翔子, 森山小太郎, 2019, 天文月報, 112, 446
- [16] 中村雅徳, 水野陽介, 川島朋尚, 2019, 天文月報, 112, 448
- [17] 秋山和徳, 浅田圭一, 秦和弘, 2019, 天文月報, 112, 450

The Structure of the Galaxy and Super-massive Black Holes Pursued with VLBI Observations

Mareki HONMA

Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-12, Mizusawa Hoshigaoka, Ohshu-city, Iwate, 023-8651, Japan

Abstract: I have been conducting observational research using VLBI for last 20 years in particular on the Galaxy's structure and imaging of super-massive black holes, for which I have been awarded Hayashi prize in FY 2020. Here I summarize my researches for last 20 years, including not only the science outputs but also works and processes behind the scene.