

VERA と KVN による日韓合同観測網

澤田一佐 藤 聡 子

ほか VERA + KVN 合同観測チーム



〈国立天文台水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 岩手県奥州市水沢区星が丘町 2-12〉
e-mail: satoko.ss@nao.ac.jp

日本の VLBI 観測網 VERA と韓国 の VLBI 観測網である韓国宇宙電波観測網 (Korean VLBI Network; 以下 KVN) による, 国際 VLBI 共同観測プロジェクト「VERA + KVN 合同観測網」についてご紹介します。2001 年に日本と韓国の間で初めてのミリ波 VLBI 観測が実施され, その成功を受けて日韓 VLBI 共同開発研究が始まりました。われわれはアジア太平洋地域における大型ミリ波 VLBI 観測網としての定常運用を目指し, 2011 年より初期科学観測を開始しています。

1. 日韓 VLBI の黎明期

建設が終わったばかりの VERA で VLBI 観測が実施され, 世界初の 2 ビーム同時観測で天体検出に成功したのは 2002 年 5 月のことです¹⁾。そのちょうど 1 年前の 2001 年 6 月, 国立天文台ではまた別の VLBI 観測の挑戦が行われていました。国立天文台野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡と韓国の大徳 (テドク) 電波天文台の 14 m 望遠鏡の二つのミリ波望遠鏡間で初の日韓 VLBI 観測が実施され, 観測は見事成功しました。このとき望遠鏡が向けられた観測天体は赤色超巨星おおいぬ座 VY 星で, この観測は VLBI による世界で初めての 86 GHz 一酸化ケイ素メーザー放射検出をもたらすこととなりました²⁾。

観測周波数が高くなればなるほど技術的に難しくなる VLBI 観測において, 当時 86 GHz という観測周波数帯はとても野心的な挑戦でした。この頃世界を見回しても 86 GHz 帯観測機器を装備した VLBI 観測局はごく少数であり, また現在においても観測の実施例は決して多くはありません。もちろん, 日本および韓国にとっても 86 GHz 帯

VLBI 観測はこれが初の試みであり, 特に韓国では VLBI 観測そのものが初めてという状況でした。このとき日本では VERA の建設の大詰めを迎えていた頃, また韓国では韓国初の VLBI 観測網プロジェクト KVN が承認されたばかりの頃です。

この日韓 VLBI 観測の成功が後押しになり, 韓国では KVN プロジェクトが一気に勢いづくこととなります。また日本側も, VERA による銀河系立体精密測量を稼働させるとともに, 韓国を含めた東アジアへの VLBI 観測網の拡張に向けての活動を開始しました。この後, 両国はそれぞれの VLBI プロジェクトを推進しつつ, それらの国際拡張版として日韓 VLBI 共同観測を実現させるため, 手を携えて動き出していきました。この観測成功後すぐの 2002 年 9 月 27 日, 国立天文台は大徳電波天文台を部門として抱える韓国天文研究院との間で VLBI 共同研究に関する合意書を交わし³⁾, そしてさらに 2005 年 7 月 7 日, 再び韓国天文研究院と VLBI 関連器の共同開発に関する協定に調印しました⁴⁾。

2. VERA+KVN 合同観測の動機

なぜ日本と韓国の電波天文学者たちは、両国間の VLBI 合同観測を実現しようと考えたのでしょうか？ それには、両国がそれぞれ抱える VLBI 観測網の特徴の違いが合同観測の重要な動機として挙げられます。

VLBI は複数のアンテナを同時に同じ天体に向け、それぞれのアンテナで観測データを記録します。そのデータを集めて相関器で合成すると、アンテナ間の距離分の口径をもつ電波望遠鏡に相当する解像度が得られます。このとき、アンテナ間の距離（以下、基線長）が長いと、高輝度でコンパクトな空間構造の天体を細かく見るのには適していますが、逆に広がった空間構造の天体の検出は難しくなってきます。そのため、VLBI 観測で高い撮像性能を実現するには、できるだけ多くのアンテナを用いてさまざまな基線長のデータを取得する工夫をします。アンテナが2局あればアンテナの組合せは1通りですが、アンテナが3局なら組合せは3通り、4局なら6通り、5局なら10通り…と、アンテナ数が多くなればなるほど組合せ数は飛躍的に増え、バラエティーに富んだ基線長のデータが得られるようになります。そして実際、整備された世界の VLBI 観測網は、質の高い撮像が得られるように10局ないしそれ以上のアンテナを用いた観測を定常的に行っています。

日本の VLBI 観測網 VERA は、岩手県奥州市、鹿児島県薩摩川内市、東京都小笠原村、沖縄県石垣市の4カ所に口径20 mのアンテナを設置しています。4カ所のうち2カ所が離島なのは、日本国内でできるだけアンテナ間の距離を長く取るための工夫です。VERA は、高輝度でコンパクトなメーザー天体を用いた位置天文観測装置としての能力を最優先し、1,000–2,300 km の比較的長い基線長を確保した設計がなされています。そのため、淡く広がった天体構造の撮像はあまり得意ではありません。一方、KVN は口径21 mのアンテナ

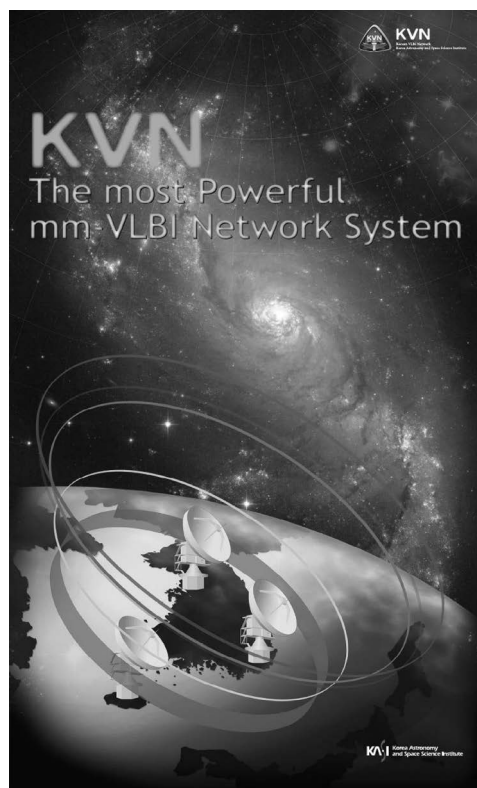


図1 韓国天文研究院作成のKVN宣伝ポスター。KVNはソウル市延世大学、蔚山市蔚山大学、済州島耽羅大学の各キャンパスに口径21 mのアンテナを配置する。

ナをソウル市内の延世（ヨンセ）大学、蔚山（ウルサン）市内の蔚山大学、済州島内の耽羅（タムナ）大学の韓国国内3カ所に配置したミリ波 VLBI 観測網で、300–500 km という短い基線長範囲に収まります（図1参照）。その結果、KVN で達成される角分解能は22 GHz帯で10ミリ秒角程度で、淡く広がった天体構造の検出は得意です。しかし、ほかの VLBI 観測網と比較して決して高解像度とは言えません。ところがこの VERA と KVN が手を組むと、図2が示すように21通りの長短さまざまな基線長がそろって互いの弱点を補い合い高撮像性能の相乗効果を生むことができます。それはすなわち、「日本と韓国が手を組めば、高い撮像性能のミリ波 VLBI 観測装置が誕生す

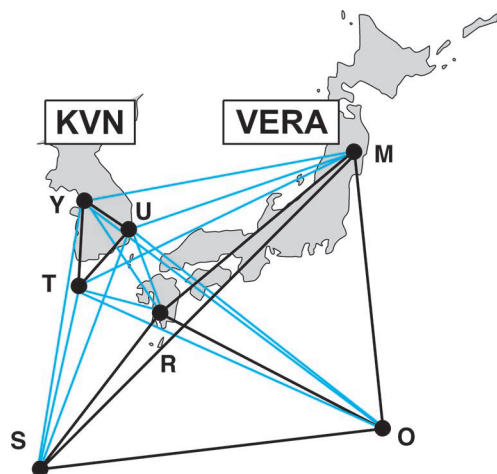


図2 VERAとKVNのアンテナ配置図。図上のアルファベットは、M: VERA水沢局, R: VERA入来局, O: VERA小笠原局, S: VERA石垣局, Y: KVN延世局, U: KVN蔚山局, T: KVN耽羅局。黒い線はVERAおよびKVNそれぞれの観測網内でのアンテナ間の組合せ。VERAとKVNが協力すると青い線で結ばれた組合せのデータが新たに得られ、観測データの質が大きく向上する。

る」という意味でもあるのです。

3. VERA+KVN 合同試験観測

2008年、KVNの建設が終盤を迎える頃、VERAとKVNの間では最初の合同VLBI試験観測の準備が進められていました。VERAとKVN間でVLBI観測を実現するため、観測モードや記録方式が一致するようVERAと同じVLBI記録システムをKVNにも搭載することになりました。そのシステムは、スペースVLBI計画VSOP用に開発されたVSOP観測装置で、128メガビット毎秒(Mbps)の記録レートで大型カセットテープに観測データを記録します。この観測装置で記録されたデータは国立天文台の三鷹相関器で相関処理することができます。このためにVSOP観測装置が韓国の3局に送られ、設置されました。

この年の11月1日、KVN 3局のなかでいち早く建設を終えた延世局とVERAの間で初のフリ

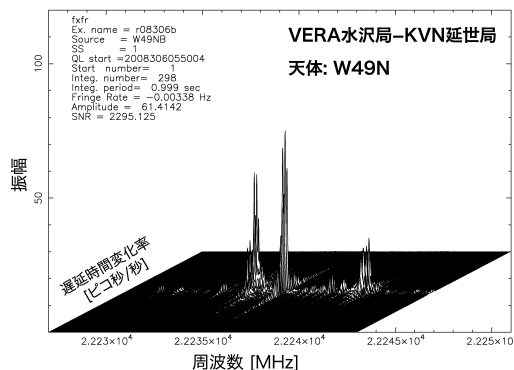
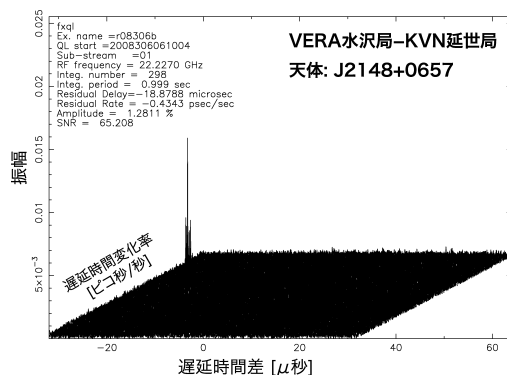


図3 VERAとKVN間の初FRINGE検出の図。図のピークは、二つのVLBI観測局で同時に受信した電波の波面がそろって強め合ったことを意味する。この図では、VERA水沢局とKVN延世局間の結果を代表として示している。(上) J2148+0657, (下) W49N。

ンジ検出試験観測が行われました。VLBIのFRINGE検出とは、異なるアンテナ間で受信した電波の遅延時間や遅延時間変化率が補正され、受信電波の波面がそろい天体の電波が検出された状態であることを示します。そしてこの状態になって初めて、アンテナ間の距離分の口径の電波望遠鏡が擬似的に誕生したと言えるのです。

観測天体は銀河系内で最も明るい水メーザー源W49Nと明るい活動銀河核J2148+0657が選ばれ、観測周波数は22 GHz帯に設定されました。そして試験観測の結果、両天体のデータで無事にFRINGEを検出することができました(図3参照)。2009年3月の試験観測では、別の観測周波

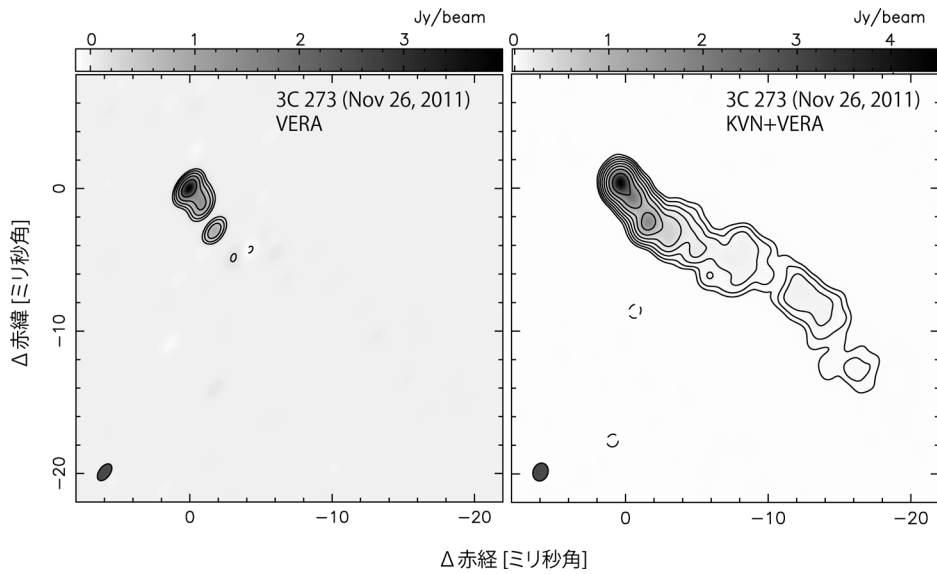


図4 近傍活動銀河核3C273の電波ジェットのVLBI画像の比較。(左)はVERA 4局のみの観測データから得られた画像,(右)はVERA+KVN 7局の観測データから得られた画像。VERAでは電波ジェットの明るいコンパクトな部分のみの構造が検出されるのに対し,VERA+KVN合同観測網を用いると淡く広がった構造の詳細まで再現されることがわかる。

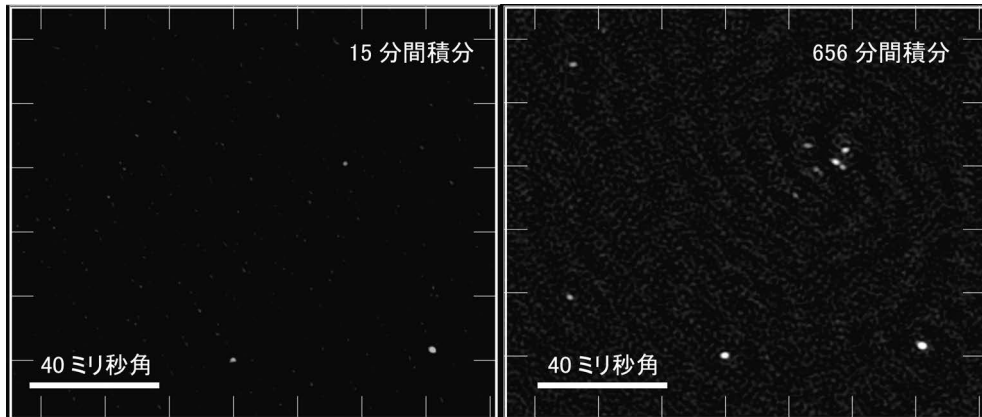


図5 ペルセウスS星水メーザー源に対するKVN+VERA撮像結果。いくつか見える白い点はメーザースポット。(左)は15分間の短時間観測で得られた画像,(右)は656分の長時間観測で得られた画像。

数帯である43 GHz帯でVERAとKVN延世局のフリンジ検出に成功しました。さらに、KVN 3局すべての建設が終わった2009年10月、VERAとKVNの合計7局の全アンテナが試験観測に参加し、22 GHzと43 GHzの両周波数帯でフリンジが検出されました。VERA+KVN合同観測網の誕生の瞬間です。

フリンジ検出成功の後、われわれはこの合同観測網を用いた撮像試験観測を開始しました。このために日韓の合同チームが編成され、ジェット構造をもつ活動銀河核や銀河系内の明るいメーザー源を観測天体を選んでデータ解析にあたりました。チーム会議のたびに各メンバーから報告される解析結果⁵⁾はどれもVERA+KVN合同観測網

の撮像性能の高さを示すもので、われわれは大いに興奮しました。図4は、近傍活動銀河核3C273の電波ジェットをVERA 4局のみとVERA+KVN 7局で観測したときの画像の比較で、VERAが苦手としていた淡く広がったジェット構造の詳細がVERA+KVN合同観測網によって見事に描かれています。

また、VERA単独あるいはKVN単独では実現できなかった15分間という短時間観測での撮像が可能であることを確認しました。図5(左)の赤色超巨星ペルセウスS星の水メーザーの画像がそれを示しています。このような短時間観測の撮像はVERA+KVN合同観測網の高い撮像性能により可能となった観測方法で、数多くの天体の画像を次々と取得しようという場合に適しています。一方、個々の天体をより詳しく調べる場合は、図5(右)のように10時間以上の長時間観測により微弱なメーザースポットの検出を目指します。VERA+KVN合同観測網によりこのような撮像モードの使い分けが可能となり、観測の幅が大きく広がります。

4. 日韓関連器共同開発

前述したとおり、VERAとKVNの協定には日韓共同のVLBI関連器開発も含まれています。国立天文台と韓国天文研究院の共同により設立された「韓日相関センター」は、2012年韓国天文研究院の大田(テジョン)キャンパスに腰を据え稼働を開始しました(図6参照)。

2012年11月、この韓日相関センターにてVERA+KVN合同観測網の1,024 Mbps記録レート観測データ同士の相関処理に成功しました。これは、VSOP観測装置を用いて行ってきたこれまでの観測の8倍の速度で観測データ記録が可能になったことを意味し、観測感度を2.8倍引き上げてくれます。この相関処理の成功により、記録方式および記録媒体の壁を超えたVLBI観測の幕開けを迎えたことになります。

世界のVLBI観測では各機関によってさまざまな記録方式が開発され、その記録方式に合わせて関連器もそれぞれに開発されてきました。VERAでは普段、国立天文台が開発した1,024 Mbps記



図6 韓国天文研究院に設置された韓日相関センターのVLBI関連器と、2012年11月に韓国天文研究院にて開催された日韓関連器執行委員会の参加者たち。

録レートによる磁気テープベースのVERAデータ記録方式にて運用しており、前述のVSOP観測装置よりはこちらのVERA観測装置のほうが主力装置です。一方、KVNは元々アメリカのマサチューセッツ工科大学ヘイスタック天文台が開発した記録装置Mark 5Bを標準装備として採用しています。かつてはこのような異なる記録方式同士の間接処理方法は限られており、例えばスペースVLBI計画VSOPで用いた三鷹観測局のコピーシステムによる記録方式変換など、極めて限定的に行われるだけでした⁶⁾。この「基本、共通装置でなければ間接処理できない」という制約条件から、VERA+KVN合同観測網の初期試験観測では記録レートが低いことを承知のうえVSOP観測装置を用いて行われてきたのです。しかし、韓日間観測センターは異なる記録方式のデータをVLBI標準インターフェイス(VSI)という共通の規格で入出力する仕組みをもち、このことにより異なる記録方式間の間接処理を可能にしました⁷⁾。

日韓合同観測器チーム内の連絡および情報共有は極めて密で、連日のように国際電話や電子メールによるやり取りをしています。筆者がメンバーとして参加し始めた2008年以降現在に至るまで、日韓間のTV会議はほぼ毎月継続して行われています。この会議はなんと発足当時から日本語で行われており、日本側のみならず韓国側も流暢な日本語で報告を行ったり議論を進めていくのです。ならば韓国側のメンバーは日本留学経験者ばかりなのか？と思われるかもしれませんが決してそうではなく、メンバーの半数以上はこの仕事のために日本語の勉強を本格的に始めた留学未経験の人たちなのだそうです。韓国側メンバーのこの並々ならぬ努力と熱意に、筆者をはじめとする日本側のメンバーは皆いつも舌を巻いています。が、韓国側メンバーはいつも冷静かつ平然としたもので、口をそろえて「観測器技術を学び開発を推進していくには、日本語は重要な言語だから」と言います。このような努力を惜しまぬメン

バーたちであったからこそ、この新技術満載の観測器は韓国で見事に花開いたのだと思わずにいられません。

5. 合同科学観測の稼働

合同観測網の整備が進み、性能評価も行われ、現在は徐々に試験観測から科学的な観測へとシフトしています。2011年より日韓合同科学ワーキンググループが発足し、観測テーマごとに星形成領域、晩期型星、活動銀河核、アストロメトリの四つのサブグループが編成されました。また、各グループからの観測提案を日韓の所長同士の会議で審査する仕組みも整えられました。それにより、2011年より数カ月に一度の頻度で合同科学観測のための期間が設置されるようになりました。現在、各グループで観測立案、観測スケジュール作成、データ解析、観測結果に関する議論が頻繁に進められています。

各グループ内での議論のみならず、グループを超えて関係者全員で顔を突き合わせ議論を行う合同科学会議も定期的に行われるようになってきました。2011年6月、国立天文台三鷹で記念すべき第1回目の合同科学会議が開催され、日韓両国から40名近い参加者が集い活発な議論が交わされました。その後ほぼ半年ごとに日韓交互に合同会議が開催され、国立天文台や韓国天文研究院以外の多くの大学からの講演および参加の申込みも増え、研究グループの裾野が徐々に広がっていくのを実感できるようになりました。そして2013年1月、ソウル大学での第4回目の会議では57名の参加者を数えるまでになりました(図7参照)。講演者の半数は両国の若手研究者や学生によって構成されており、しかもその数は毎回増大傾向にあります。

最近の会議では、単なる観測提案だけでなく初期科学成果が報告されています。そのなかでも、44 GHzメタノールレーザー源のVLBI初検出はVERA+KVN合同観測網の特長を活かした画期

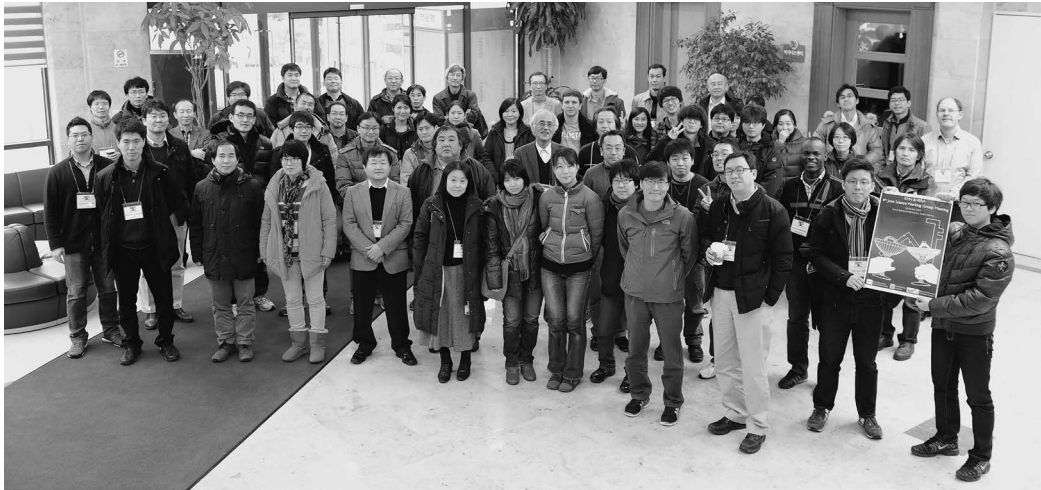


図7 2013年1月にソウル大学にて開催された第4回VERA+KVN合同科学会議の参加者たちの集合写真。

的な成果の一つです。数多くの遷移をもつメタノールメーザーは大質量星形成領域に付随していることが知られ、44 GHzメタノールメーザーは1万天文単位を超える広範囲に分布する特徴があります。その範囲の広さから原始星から噴出するアウトフローに付随しているのではないかと考えられています。44 GHzのメタノールメーザーのスポットの大きさは水メーザーや一酸化ケイ素メーザーと違って比較的大粒で、既存のVLBI観測での成功例はこれまでありませんでした。が、VERA+KVN合同観測網はその大粒のメーザースポットの検出に世界で初めて成功しました⁸⁾。ほかにも、VERA+KVN合同観測網の高撮像性能を活かした活動銀河核のジェット噴流のモニター観測⁹⁾、KVNの多周波数帯同時観測機能による晩期型星の水メーザーおよび一酸化ケイ素メーザーの同時観測など、これまでなかった新しい成果が報告されています。

6. 合同観測網で探る天の川銀河中心ブラックホールへの分子雲の接近現象

ここで、VERA+KVN合同観測網が目下準備を進めている観測計画をひとつご紹介します。

2013年現在、天の川銀河の中心部にある、いて座A*と呼ばれる巨大ブラックホールへ分子ガス雲（通称G2雲）の急接近現象が大きく話題を呼んでいます。G2雲の接近はドイツのマックスプランク研究所のGillessenらの近赤外線観測によって発見されました^{9), 10)}。G2雲の質量は地球のおよそ3倍と見積もられていて、2012年の時点で秒速2,000 km近い視線速度でいて座A*に近づいています¹¹⁾。2013年秋にはシュバルツシルト半径のおよそ2,200倍の距離まで最接近すると予想されています。潮汐力で引きちぎられたG2雲の素片がブラックホールに呑みこまれていく—そんな様子をリアルタイムで観測できる希有のチャンスに世界中の天文学者が注目しています。

これまでたびたびVLBIによるいて座A*観測が行われてきました。しかし、センチ波帯によるVLBI観測では、いて座A*周辺を覆っているプラズマが起こす散乱現象によって、いて座A*の電波像がぼやけて実際よりも見かけ上膨らんでしまう、いわば「ピンボケ効果」が問題となることが知られていました¹²⁾。この「ピンボケ効果」は、波長の2乗の依存性をもつことが確かめられています¹³⁾。したがって、ミリ波やサブミリ波といった短波長へと観測波長帯が移ると「ピンボケ効

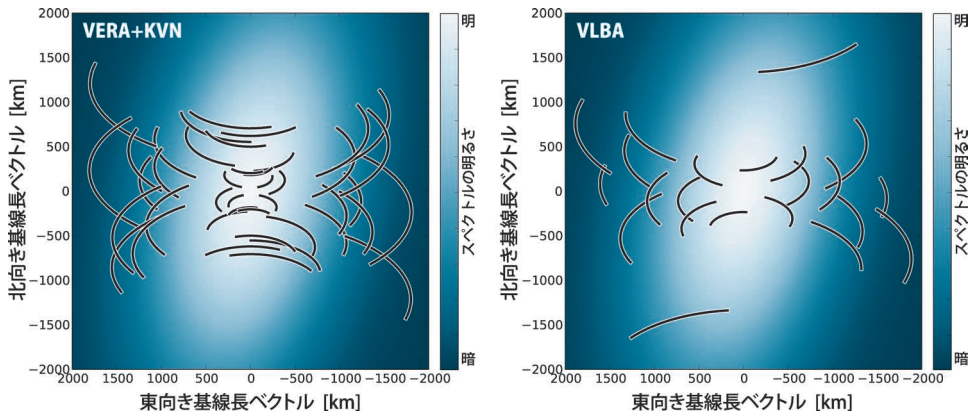


図8 いて座A*の画像の空間周波数スペクトル（背景）の上に、いて座A*をVERA+KVN合同観測網（左）とアメリカのVLBA（右）で観測した際にサンプリングされる空間周波数（黒線）を載せた図。いて座A*の場合、空間周波数が小さい部分に明るさが集中しているため、良質な画像を得るためには空間周波数が小さい、つまり基線長が短いVLBI観測網で観測をする必要がある。VERA+KVN合同観測網はまさにいて座A*の観測に最適なVLBI観測網と言える。

果」は軽減し、いて座A*自身の真の電波像がだんだんと姿を現してくるようになります^{14)~16)}。

そこで日韓合同科学サブワーキンググループの一つ活動銀河核グループは、G2雲の落下現象へ向けて22 GHzと43 GHzの短波長帯を用いたVERA+KVN合同観測網観測を開始しました。いて座A*はたいへん特殊な天体で、広がった空間成分からの放射が卓越しており、コンパクトな空間成分からの放射がほとんどないことが知られています。したがって、いて座A*の観測には短基線数が決定的に重要になります。VERA+KVN合同観測網はほかのVLBI観測網にはない「短い基線を密に数多くもつ」という優れた特長をもちます。この特長が、いて座A*の観測に極めて重要な意味をもつのです。

図8は、いて座A*の画像の空間周波数スペクトル（背景）の上に、いて座A*をVERA+KVN合同観測網（左）とアメリカのVLBI観測網VLBA（右）で観測した際にサンプリングされる空間周波数（黒線）を載せた図です。空間周波数は普段耳慣れない言葉ですが、画像の周期構造の細かさを表します。音や光の周波数が時間的な周期構造の細かさを表すのと似ています。日常生活

で用いられる音楽プレーヤーなどで再生中の音を低音（周波数が小さい）から高音（周波数が大きい）成分ごとに分けたスペクトルを表示することができますが、この図はそれぞれの「画像」版になります。図8の中心部分は空間周波数が小さく広がった構造の成分、外側は空間周波数が大きくコンパクトな構造の成分の強さを表します。天体から見たVLBI観測網の構成アンテナ間の基線長は空間周波数に比例しており、基線長に対応した天体画像の空間周波数成分を測定していくことで、VLBIをはじめとした干渉計は天体の画像を得ることができます。いて座A*の場合、図にあるとおり構造が比較的広がっていて、図の中心部分つまり空間周波数が小さい部分に明るい部分が集中しています。いて座A*の高品質画像を得るためには空間周波数が小さい、つまり基線長が短いVLBI観測網で観測をする必要があります。また、いて座A*の観測に重要な要素として観測局の位置が挙げられます。いて座A*は天の赤道より南にあるため、北半球高緯度に位置する観測局では南中高度が低すぎて十分な観測ができません。よって現実的に、いて座A*の観測可能なVLBI観測網は比較的低緯度に観測局をもつ

VERA+KVN合同観測網とアメリカのVLBAのみといえます。そして、VERA+KVN合同観測網のほうがVLBAより基線長が短く、より効率的に画像の情報を集められることを図8は示しています。

さらにこの合同観測網では、超音速落下するG2雲の前方に発生する可能性のある弓状衝撃波をもとらえようと試みています。弓状衝撃波の出現は、米ハーバード大学のNarayan教授らによって理論予言されました¹⁷⁾。G2雲が通過予定の数千倍のシュバルツシルト半径位置にはブラックホールに吸い込まれていくガスの降着円盤が存在すると考えられています。落下するG2雲は、この降着円盤の外縁部を突っ切ることが予想されます。その際に衝撃波による電子加速が起こり、22 GHz帯と43 GHz帯でも明るく光るという大胆な予言です。例えば磁場強度が0.06ガウスの場合、シンクロトロン放射による冷却時間スケールはおおよそ100年となり、その間はセンチ波帯で光り続けることが期待されます。2013年の秋以降、天の川銀河の中心に潜む巨大ブラックホールはいったいどのような天体現象を私たちに披露してくれるのでしょうか？ 今後が楽しみです。

7. 今後の発展, 拡張

VERA+KVN合同観測網は、さらに日韓を超えたアジア太平洋地域への拡張を目指しています。中国では上海天文台や烏魯木齊(ウルムチ)天文台がすでにそれぞれVLBI観測局をもち、ヨーロッパVLBI観測網の参加局として運用されています。さらに、北京・密雲(ペキン・ミュン)、昆明(クンミン)にそれぞれVLBI局が配置され、中国国内のVLBI観測網の整備が現在取り組まれています。これらの中国のVLBI観測局が加わると、最大基線長は6,000 kmに達し、世界最大級のVLBI観測網となります。また、オーストラリアなど南半球のVLBI観測局との共同観測も検討されており、そうなるとほぼ地球サイズ

のVLBI観測網が誕生することになります。そして、その実現の鍵になるのが韓日相関センターで、各国のさまざまなVLBI観測局からのデータを韓日相関センターが一つにまとめあげます。

そして何よりVERA+KVN合同観測網が目指すところは、確かな定常運用体制です。世界を見渡せばもちろん、ミリ波帯でのVLBI観測網はVERA+KVN合同観測網ばかりではありません。しかし、それらのミリ波VLBI観測はどれも限定イベント的で、観測時間や時期が大きく限られるものばかりでした。VERA+KVN合同観測網は、それぞれの観測網のプロジェクトと両立を取りつつ、合同観測網としての定常運用体制を整える予定です。例えば合同観測網による1年間の観測時間を1,500時間くらいまで取れるよう、観測頻度も観測者の希望に合わせて高頻度に取りれるよう、関係者同士で具体的な議論が進められています。もしこのような定常運用体制が整えば、短時間に激しい変動を示す天体のミリ波帯モニターVLBI観測も実現可能になります。例えば、すでに精力的な観測がVERAで実施されている活動銀河核の高エネルギー放射領域の探査に加え¹⁸⁾、VERA+KVN合同観測網の高撮像性能を活かしたジェット運動に関する研究への発展が考えられます。図4からもわかるように、比較的ジェットの下流の領域までを調査することが可能となるので、ジェット伝播過程における速度場の変化の研究進展が期待されます。ほかにも、星形成領域や晩期型星周囲に付随するメーザーの高頻度モニター観測は、原始星や晩期型星のごく近傍のガスの状態の変化や運動を調べるのに極めて重要な手がかりを与えてくれることになるでしょう。

謝 辞

この文章を執筆するにあたり、VERAおよびKVN両プロジェクトにおける、現在および過去の関係者の方々から多大なご協力をいただきました。VERA+KVN合同観測網は、日本と韓国両国の多くの関係者に支えられ運営しています。VERA+KVN合同観測網の全メンバーおよびサポーターの皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Honma M., et al., 2003, PASJ 55, L57
- 2) Shibata K. M., et al., 2004, PASJ 56, 475
- 3) 井上 允, 2003, 国立天文台ニュース1月号, No. 114, p. 11
- 4) 小林秀行, 2005, 国立天文台ニュース10月号, No. 147, p. 5
- 5) 例えば Sawada-Satoh S., et al., 2010, The 8th East Asia Meeting on Astronomy, held 10–15 October, 2010 in Shanghai, China
- 6) Shibata K. M., et al., 1998, IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources, 144, 413
- 7) Oh S.-J., et al., 2010, Sixth International VLBI Service for Geodesy and Astronomy. Proceedings from the 2010 General Meeting, “VLBI2010: From Vision to Reality,” held 7–13 February, 2010 in Hobart, Tasmania, Australia. Edited by D. Behrend and K. D. Baver. NASA/CP 2010–215864, p. 405.
- 8) 松本尚子ほか, 日本天文学会2012年秋季年会, P122a
- 9) Gillessen S., et al., 2012, Nature 481, 51
- 10) Burkert A., et al., 2012, ApJ 750, 58
- 11) Gillessen S., et al., 2013, ApJ 763, 78
- 12) Davies R. D., et al., 1976, MNRAS 177, 319
- 13) Rogers A. E. E., et al., 1994, ApJL 434, L59
- 14) Lo K. Y., et al., 1998, ApJL 508, L61
- 15) Bower G. C., et al., 2004, Science 304, 704
- 16) Doeleman S. S., et al., 2008, Nature 455, 78
- 17) Narayan R., et al., 2012, ApJL 757, L20
- 18) 新沼浩太郎, 永井 洋, 紀 基樹, 2013, 天文月報 106, 424

The VERA+KVN Combined Array**Satoko SAWADA-SATOH**

*Mizusawa VLBI Observatory, National
Astronomical Observatory of Japan,
2–12 Hoshigaoka-cho, Mizusawa-ku,
Oshu, Iwate 023–0861, Japan*

Abstract: We review the VERA+KVN combined array, the joint VLBI project between VERA and Korean VLBI Network (KVN). Since the first millimeter wavelength VLBI observations between Japan and Korea in 2002, collaborative VLBI observations and developments between Japan and Korea have been prompted. The VERA+KVN combined array has started the scientific operation in 2011, aiming to coordinate and schedule millimeter wavelength VLBI observations as one of the largest VLBI array in the Asia-Pacific region.