

# 天文広域精測望遠鏡 VERA の概要

川口 則 幸

〈国立天文台 水沢 VLBI 観測所 〒023-0861 奥州市水沢区星ガ丘町2-12〉

e-mail: kawagu.nori@nao.ac.jp



天文広域精測望遠鏡計画 (VERA: VLBI Exploration of Radio Astrometry) は2000年に開始されたプロジェクトで、日本国内に4基の電波望遠鏡を配備し、最長2,300 km 基線の VLBI 観測網を形成しています。この VLBI 観測網により天体の位置を正確に計測し、年周視差からわれわれの銀河系内にある天体までの距離を精密に計測するのが VERA の目的です。計測結果の科学的な成果は、今月号および継続号の論文で詳しく述べられますが、ここでは、VERA 計画の概要とプロジェクトの歴史的な背景について紹介します。

## 1. VERA 建設の経緯

VERA (VLBI Explorations of Radio Astrometry)<sup>1)</sup> 計画は国立天文台が2000年より開始した VLBI (超長基線電波干渉計) による電波位置天文観測プロジェクトです。電波位置天文学は、旧緯度観測所で笹尾哲夫氏のリーダーシップにより1980年代に検討が開始されたプロジェクトで、電波天体の位置を正確に計測してわれわれの銀河の構造や回転を明らかにする計画です。天体の精密な位置決定には、観測局の精密な位置決定、地球回転に関する精密な計算、大気の影響に関するさまざまな補償技術が必要とされ、緯度観測所が長年蓄積した研究の集大成として結実したものです。特に大気の影響率、揺らぎを補償する2天体同時観測システムが世界で初めて電波望遠鏡に導入され、2ビーム望遠鏡として実現されました。2ビーム機構をもつ特殊な電波望遠鏡の開発だけでなく、観測結果を精密に解析する専用のソフトウェア (VEDA) や、観測局の位置に影響を及ぼすさまざまな地球物理的要因を予測するソフトウェアなども開発されました。当初は4アンテナ1基線 (2局) 方式、2アンテナ4局方式などが検

討されましたが、最終的には1アンテナで構成される観測局を日本列島全域に配置する現行案となりました (図1)。当初はミリ波帯の観測に適した冬季寒冷気象の北海道地区での建設も検討しましたが、銀河中心の観測に適した水沢局を北限とした南方に展開するアレイ配置となりました。最大基線長は2,300 kmで43 GHz帯における合成

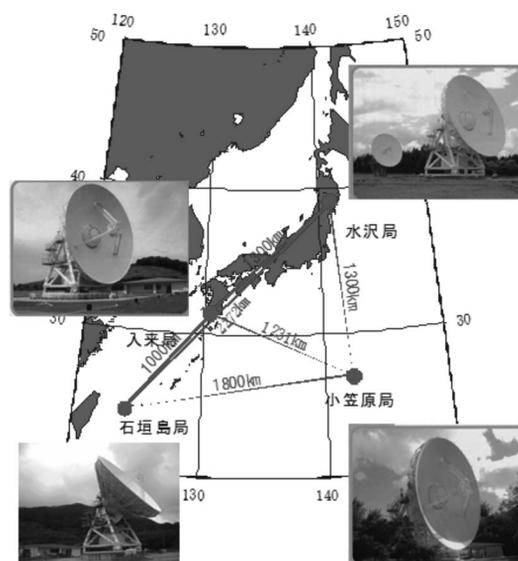


図1 VERA 観測網。

ビーム幅は0.7ミリ秒角の分解能をもちます。2000年度には岩手県水沢市（現 奥州市水沢区）、鹿児島県入来町（現 薩摩川内市）、東京都小笠原村の3地点にそれぞれ直径20 mの電波望遠鏡が建設され、翌2001年度には沖縄県石垣市に同型の望遠鏡が建設されました。その後、受信機や観測装置の整備を行い、2002年度にVERA 4局のネットワークでのVLBI試験観測に成功しています。2003年度に初めての位置天文試験観測を行い、第1回のVERAユーザーズ会議が開催されました。2004年度から試験的な共同利用観測が開始され、2006年頃に最初の精密位置決定と年周視差計測による距離決定に成功しました<sup>2), 3)</sup>。その後、定常観測を継続し、現在までに30天体以上について年周視差の計測に成功し、VERA 特集号としての論文集を2回、天文学会欧文報告(PAS)にて公表しています<sup>4), 5)</sup>。また、個別の科学成果も多数得られ、修士論文、博士論文として出版されています。

## 2. VERA 望遠鏡の概要

### 2.1 VERA 望遠鏡

VERA望遠鏡は、直径20 mのカセグレンアンテナの一次焦点面に2台の受信機を配備し、2天体を同時に観測できる機能を備えた世界で初めての望遠鏡です。6本の可動ジャッキに支えられた2台の受信機プラットフォーム上に、ガスヘリウム冷却された22 GHz帯と43 GHz帯の低雑音受信機が搭載されています。22 GHz帯は星形成領域に多く見られる水分子メーザ天体の観測に、43 GHz帯は晩期型星などに多く見られる一酸化ケイ素分子メーザ天体の観測に使用されます。6本のジャッキの長さを制御することで、受信機プラットフォームの位置は正確に設定され、0.3–2.2°の離角をもった二つの天体を同時に観測できます。2天体の位置角は視野回転台によって追尾されます。上部機器室に設置された2ビーム機構や受信機は、電波透過膜（フィドーム）によって

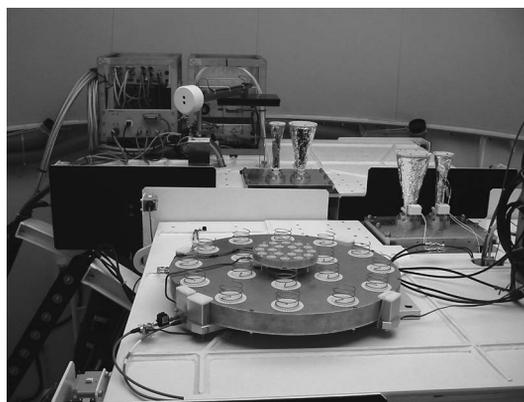


図2 上部機器室の受信機。手前の円形の装置がS/X帯（2 GHzと8 GHz）のロープロファイラーヘリカル給電装置、奥に見える二つの円錐形の装置のうち大きいほうが22 GHz帯、小さいほうが43 GHz帯の給電ホーン。

外部から遮断され、内部は強力な空調機によって一定の温度に保たれています。図2は上部機器室の内部の様子で、6本のジャッキで支えられたプラットフォーム（スチュワートプレート）に冷却受信機や周波数変換装置が搭載されています。大きめの円錐ホーンが22 GHz帯の給電ホーンで、小さいものが43 GHz帯給電ホーンです。スチュワートプレート上には22 GHz帯と43 GHz帯の冷却受信機のほかに、S/X帯（2 GHzと8 GHz）のロープロファイラーヘリカル給電装置も搭載されています。S/X帯の給電装置・受信装置は測地VLBI観測に使用されています。この給電装置は、法政大学との協力で製作されました。世界に先駆けて22 GHz帯での測地観測も実施し、S/X帯測地観測に比べてより精度の高い局位置データを生み出しています。位置天文観測のターゲットは水分子メーザ天体や一酸化ケイ素メーザ天体の観測が主力でしたが、新たに6.7 GHz帯のメタノール受信系も新設されました<sup>6)</sup>。この6.7帯ホーンは大阪府立大学の協力を得て開発されたものです。

VERAは2天体を同時に観測することで、共通する大気の屈折率の揺らぎを除去することが可能



図3 2ビーム観測による大気屈折率揺らぎ補償（位置補償）の概念図。ターゲット天体（メーザー）と基準天体（準星、キューサー）が十分近ければ大気の変動は共通と考えられるので、同時観測することで揺らぎを補正することが可能になります。

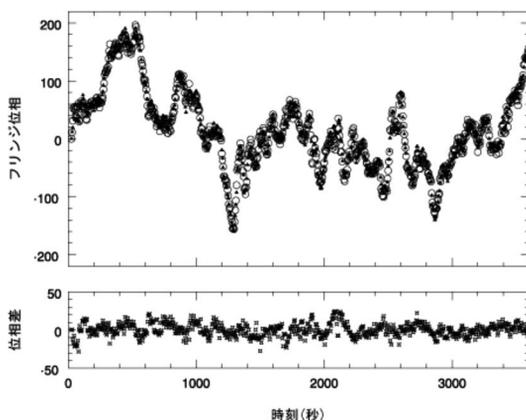


図4 2ビーム観測による大気屈折率揺らぎ補償（位相補償）の実例。W49NとOH43.8-0.1という離角0.65度の2天体を同時に観測すると、そのフリンジ位相は大きな時間変動を示します（上図の白い丸と黒い三角で表示されています）。それぞれの大きな位相変動はほぼ振り舞いを示すため、差をとると変動がほぼ完全に除去されることがわかります<sup>7)</sup>（下図）。

です。天球上における天体位置の基準となるキューサー（準星）と銀河系内のメーザー天体を同時に観測し、その2天体の位置関係を精密に計測します（図3）。図4に2ビームで観測された2天体のフリンジ位相の時間変動を示します。それぞれの大きな位相変動はほぼ同じ振り舞いを示し、差をとると屈折率の揺らぎによる位相変動がほぼ完全に除去されることがわかります<sup>7), 8)</sup>。キューサーは数億光年遠方なので、天球上で不動点とみなすことが可能ですが、銀河系内のメーザー天体は年周視差によってその位置を変えます（図5）。1年間に数回の観測を継続することで年周視差を計測し、天体までの距離を計測します。VERAの潜在的な角度検出能力は10マイクロ秒角です。天体までの距離は年周視差の逆数に比例するのでVERAは10 kpc（キロパーセク、1 kpcは3,260光年に相当）遠方の天体までの距離を10%の誤差で決定することが可能です。

受信装置の内部で発生する電気的な遅延時間の変動は、フィドームの周囲に配置された共通の人工雑音源を2台の受信機で受信し、それらの相互相関関数を実時間で計測することで除去します。

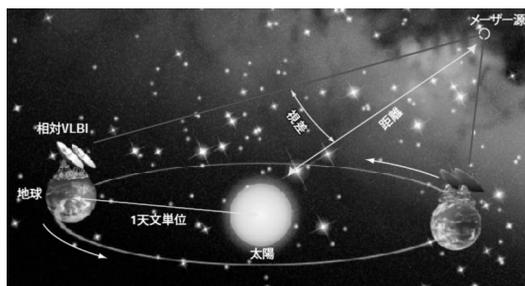


図5 年周視差による天体の見かけの位置変化の概念図。

この較正方式は「ホーンオンディッシュ法」と呼ばれており、受信機内で発生する遅延時間変動だけでなく、副反射鏡の重力による「たわみ」によって発生する光路長変動も自動的に補正されます。ホーンオンディッシュ法を実現し、高精度の2ビーム観測法を確立したのはVERAが世界で最初です。

## 2.2 VERA 観測システム

VERA望遠鏡の上部機器室の低雑音受信機で受信された信号は、超高速AD変換装置でデジタル

データを伝送するため、望遠鏡と観測棟が遠く離れていてもその間の伝送路の電気的な遅延変動は全く観測には影響を及ぼしません。サンプリング速度は毎秒1 GHz、生み出されるデータは1ビーム当たり2ギガビット毎秒、総伝送量は4ギガビット毎秒になります。上部機器室に配備されたAD変換装置（ADS-1000）2台と光データ伝送装置は、毎秒2ギガビットの通信回線を2チャンネル使用していますが、現在毎秒10ギガビットの伝送能力をもつ回線に変更しています。この変更により、将来は1ビーム当たり毎秒4ギガビット、2ビームで8ギガビットの伝送が可能になります。このような超高速AD変換技術や超高速データ通信技術は、水沢VERA観測所のサブプロジェクトであった光結合VLBI推進室で開発されたものです。光結合VLBI推進室はその当初の開発課題を達成し、現在では水沢VLBI観測所開発部門に統合されています。開発部門では、現在さらに高速のAD変換（50 GHz）や光波長多重による高速遠距離の光データ伝送の技術開発を進めています。

1ビーム当たり毎秒2ギガビットで取得された観測データは、すべて磁気テープに記録することはできません。VERAの観測システムの開発当時、世界で最も広帯域の磁気記録装置DIR-1000でも毎秒256メガビットが限界でした。そこで、新たな磁気記録装置の開発を行い、毎秒1ギガビットの記録が可能な新しい磁気記録装置DIR-2000が開発されました（図6）。テープデッキ部は、従来のDIR-1000と全く同じですので、従来の磁気テープ自動交換システムをそのまま使用することができます。この磁気記録装置は、旧来型の磁気テープ記録装置DIR-1000の記録速度を4倍にしたもので、ロータリーヘッドに新フィルムヘッドを採用し、16ヘッドの並列記録で毎秒1ギガビットの記録速度を達成しました。ヘッドの摩耗に対応するヘッドチップの交換作業は、観測所の専門研究員によって行われています。



図6 三鷹相関処理局。左手前のテープカートに磁気記録装置DIR-2000が4台稼働、正面にFX型相関処理装置と計算機によるソフトウェア相関器が稼働。

### 2.3 VERA 相関処理システム

VERAの相関処理は、スペースVLBI「はるか」観測用に開発されたVSOP相関器を改造して使用しています。VSOP相関器は、世界で初めて採用されたFX型相関器で、毎秒256メガビット、10局の相関処理が可能でした。VERAの観測では、毎秒1ギガビット、少なくとも4局の相関処理を行わなければならないので、10局分のFXエンジンを2局ずつペアに組み合わせると5局で毎秒1ギガビットの相関処理を可能にしました。再生相関処理には、観測局で用いられている1ギガビットレコーダDIR-2000を4台使用しています（図6）。FX型相関器は1990年代に開発されたもので、毎秒1ギガビット、5局に相関処理能力が限定されているので、現在計算機によるソフトウェア相関処理システムを開発しています。8台の計算機を使用し、毎秒1ギガビットであれば16局の、将来の広帯域化による毎秒4ギガビットであれば4局の相関処理能力を目指しています。この相関処理能力は世界トップレベルになっています。

### 3. VERAが目指すサイエンス

VERA計画は、電波による高精度位置天文観測を定期的に行い、われわれの銀河系のダイナミク

スを明らかにしようとするものです。われわれの銀河に多数存在する星形成領域の水メーザー天体や晩期型星周辺の一酸化ケイ素メーザー天体からの電波をVERA4局で受信し、その天体の方向を精密に計測します。さらに背景となるクエーサーの位置を基準としてメーザー天体の年周視差を計測してその距離を明らかにします。方向と距離が計測されると、その天体の銀河系での位置が明らかになり、その位置の変化からわれわれの銀河の回転運動を明らかにすることができます。科学的な成果の詳細は本報告に引き続いて述べられますので<sup>9)~11)</sup>、ここでは省略しますが、これまでの計測ですでに銀河の回転速度がこれまでに知られている速度よりも速いことや、太陽系周辺の渦状腕（アーム）構造が明らかにされつつあります。

#### 4. 国際協力

VERA観測網の観測局は4局しかなく、高精度の位置天文観測は行えますが、詳細な天体像を撮像する能力に劣る面があります。米国のVLBI観

測網VLBAでは全米に10局の観測局を配置し、高い撮像能力をもっています。位置天文観測だけでなく撮像能力の向上を図るために、日韓で協力した観測を開始しました。韓国では、国内に3局のVLBI観測局を配置（ソウル局、ウルサン局、チェジュ局）し、韓国VLBIネットワークKVNを近年開設しました。VERAの4局とKVNの3局を加えることで、撮像能力は飛躍的に高まりました。詳しくは、次号以降の別記事に報告がある予定です。

韓国とは、共同して最新の相関処理装置も開発しました。現在定常的に使用している三鷹のVERA相関局では、毎秒1ギガビット5局までの相関処理しか行えません。VERAとKVNを合わせて7局の相関処理を行うためには新しい相関処理装置が必要になったために開発を進めてきました。この相関処理装置は韓国天文研究院（大田市）の東アジアVLBIセンタ庁舎内に設置されており、最高速度毎秒8ギガビットで、16局までの相関処理が可能です。2013年からは定常的な運

表1 VERAの年表.

年度	主な出来事	その他
1999	試験研究費による2ビーム受信実験を開始	VERA推進室の設立（室長：笹尾哲夫）
2000	水沢局、入来局、小笠原局の建設	山口局がKDDより譲渡
2001	石垣局の建設	
2002	4局のファーストライト（天体からの電波を初受信） 4局ネットワークによるVLBIフリッジ検出（干渉計）に成功	
2003	位置天文観測の開始 第1回VERAユーザーズ会議を開催	VERA推進室（室長：真鍋盛二）
2004	試験的共同利用を開始	VERA観測所の設立（観測所長：小林秀行）
2005	大学連携VLBI観測の開始	VERA観測所（観測所長：小林秀行）
2006	初めての精密位置計測（年周視差含む）に成功 水沢VERA観測所の設立（観測所長：小林秀行） 光結合VLBI推進室設立	日韓共同相関器の検討開始
2007	最初の年周視差計測成果について記者発表 VERA建設に関する感謝状贈呈式開催	茨城局がKDDIより譲渡
2008	日本天文学会欧文報告VERA特集号 日韓共同相関器の開発開始	茨城局の整備計画開始
2009	韓国VLBIネットワーク（KVN）とVERAの共同観測開始	水沢VLBI観測所設立（観測所長：小林秀行）
2010	日本天文学会欧文報告VERA特集号 東日本震災により水沢局、茨城局被災	水沢VLBI観測所（観測所長：川口則幸）
2011	VERA2偏波化・広帯域化計画開始	水沢局の震災復旧
2012	VERA10周年記念式典開催	茨城局の震災復旧

用が開始される予定になっています。

韓国だけでなく中国とも観測協力を進めており、東アジアVLBI観測網はさらにイタリア局やロシア局にも広がりを見せており、共同観測の計画も進められています。

## 5. ま と め

VERA計画は、1980年代に計画が検討され、2000年に初めて予算化され、最先端のアンテナ技術、デジタル技術、通信技術を駆使して建設されました。2002年にファーストFRINGEに成功し、2005年から本格的に位置天文観測が開始され、現在に至っています。2012年度も年間5,000時間にも及ぶVLBI観測を行っています。2020年を目標に500天体以上の位置と運動を明らかにして、われわれの銀河系の回転運動や構造を明らかにすることを目指しています。国内の大学（北海道大学、茨城大学、筑波大学、岐阜大学、山口大学、鹿児島大学）と連携した観測も行うとともに<sup>12)</sup>、観測と並行して技術開発も大阪府立大学と連携しながら進め、VLBI技術の進展にも大きな貢献を行っています。また月惑星探査計画（RISE）においてもVERAのS/X帯観測装置による観測で月周回衛星の軌道を正確に決定するなどの大きな貢献も行いました。宇宙からの光学位置天文観測計画（国立天文台のジャスミン計画やESAのGAIA計画）でも天体の精密位置決定を目指しています。光の波長帯では、多くの星々が密集した銀河面の観測は困難なので、銀河中心や銀河面を主としたVERAの電波観測結果と連携することで、われわれの銀河に関する理解と知識が深まることが期待されます。本特集号では引き続きVERAの観測成果やアルマとの連携などが紹介される予

定になっています。われわれの観測によって生み出される天文学的に最も基本的かつ計測が困難である「天体までの距離」という基本的情報が、天文学に大きな貢献を行うことを願って終わりとなります。

## 参考文献

- 1) VERAプロジェクトのホームページ  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/index.htm>
- 2) Honma M., et al., 2007, PASJ 59, 889
- 3) Hirota T., et al., 2007, PASJ 59, 897
- 4) PASJ VERA特集号, 2008, PASJ 60, 5
- 5) PASJ VERA特集号, 2011, PASJ 63, 1
- 6) 松本尚子, 2011, 天文月報104, 718
- 7) Honma M., et al., 2003, PASJ 55, 571
- 8) Honma M., et al., 2008, PASJ 60, 935
- 9) 本間希樹, 2013, 天文月報106, 310
- 10) 永山 匠, 2013, 天文月報106, 316
- 11) 坂井伸行, 2013, 天文月報106, 321
- 12) 面高俊宏, 2012, 天文月報105, 626

### A Brief Introduction of VERA, VLBI Exploration of Radio Astrometry Noriyuki KAWAGUCHI

*Mizusawa VLBI Observatory, National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: VERA project started in 2000 with four 20-m radio telescopes those are located over Japan, Mizusawa, Iriki, Ogasawara and Ishigaki. They form a VLBI array of 2,300 km extension. The array is dedicated to use in radio astrometry observations which aims at obtaining accurate trigonometric distances to stars in our galaxy by measuring their annual parallax motion. The scientific importance will be discussed in other papers in this and those in the successive issues. This article gives a brief summary and history of the VERA project to get better understandings for these papers.