



# VERA 計画始まる

三好 真

〈国立天文台 VERA 推進室 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

miyoshi@miz.nao.ac.jp

国立天文台 VERA 計画は相対 VLBI 法により最高 10 マイクロ秒角の絶対位置精度を達成し、我々の銀河系全域の三角視差測量を可能にする。予算が認められ、2000 年度には全 4 局中、石垣を除き、まずは水沢、鹿児島、父島の 3 局に口径 20 m 電波望遠鏡が建設される。

## 1. VLBI は最高の空間分解能

VLBI (超長基線電波干渉計) が空間分解能の点で大変優れている望遠鏡であることは宇宙研のスペース VLBI 衛星「はるか」の成功などで多くの方はすでにご存じでしょう。遠く離れた電波望遠鏡で同時に天体を観測、受信電波を記録、あとで処理することで電波望遠鏡のひろがりに匹敵する巨大望遠鏡の空間分解能が実現されます。アメリカの VLBI 網 VLBA は口径 8000 キロ、宇宙研の衛星「はるか」は地上の電波望遠鏡と組むことで口径 3 万キロもの大望遠鏡をつくりだします。その結果、VLBI による天体の電波写真は最高十数マイクロ秒角程度の解像度を示すに至っています。

## 2. 空間分解能は口径できまる？

「望遠鏡の空間分解能はその口径  $D$  に反比例し、観測波長  $\lambda$  に比例するからです」、そして「 $D$  が地球直径約 1 万キロ、観測波長が 1 cm だと空間分解能は 1 万分の 2 秒角……」という説明で、一般の人はともかく、天文学会員は納得してはいけません。

光学望遠鏡の場合、口径が大きくなると大気の影響によって実際の分解能が制限されます。これは天体からの光が大気を通過する際に、平行であるはずの波面が乱され、その結果、望遠鏡の焦点で 1 点に結ばなくなるからです。電波望遠鏡で

も同じで、大気の影響が出てきます。地球直径を口径にしようなどという VLBI ではなおさら、大気の影響が効いてくるのです。

おまけに VLBI の場合は、電波を受信したあとも、位相を揺らがすものがいくつもあります。温度が変化すれば伝送ケーブルは伸びたり縮んだりして位相を乱すし、現在、最高に安定な時計である水素メーザを使って時刻情報を管理しても、水素メーザの個性によって時刻の刻み方が違うのです。したがって VLBI の記録テープに保存される電波信号の波面はかなり乱れています。

## 3. フリンジ位相較正が決め手

それらを微妙な時刻同期なしに再生し、相関処理しても、フリンジ (= 干渉縞、VLBI の場合、干渉しても「縞」が見えるわけではない) は出ません。観測局ごとの時計のずれや、時刻を刻む速さを調整して初めてフリンジが出ます。その後の画像合成においても、位相の乱れの影響は無視できません。相関処理後のデータは天体の輝度分布の空間フーリエ成分を示すはずですが、なんの補正もせずに、フーリエ変換して天体画像を作り出しても、実物とは似ても似つかない像が現れるだけです。

VLBI はその技術が誕生して 30 余年になります。現在までに、位相クロージャ法などのアイデアを考え、乱れたフリンジ位相から天体の構造の情報を回復する術を開発した結果、「はるか」の観測結果



に示されるような電波写真を描きだすところまで来たのです。乱れた波面，フリンジ位相の狂いをいかに較正するかのテクニックが確立されて初めて，「望遠鏡の分解能は $\lambda/D$ である……」がVLBIでも実現されるのです。

#### 4. 天体位置の正確測定のがてな VLBI

乱れたフリンジ位相を較正するテクニックが整って，VLBIでは超高空間分解能でみた正しい天体像が得られるようになりました。しかしながら，そのVLBIの空間分解能で天体の位置が計測できるか？というところが大変難しいのです。フリンジ位相の乱れを較正するテクニック（例えば位相クロージャ法）は，本来天体の構造からおこるフリンジ位相変化だけを取り出し，残りの位相ずれを誤差として消し去ります。この時，天体の天球上での位置のずれによる位相ずれも，それらとともに取り去ってしまうのです。そのため，VLBI観測による電波写真には，天体の位置情報，つまり天球のここにあるという情報は含まれないのです。

筆者が電波天文を勉強し始めたころ，VLBIの論文を見て，不思議に思うことがありました。有名な超光速運動を示す電波写真をはじめ，多くのVLBIによる電波写真には座標の絶対値が記載されず，代わりに相対値で座標がふられているのです。どうして赤経 x 時 y 分 z.abc 秒，赤緯 D 度 E 分 F.GHI 秒と絶対的に記さないのか疑問に思いました。さらに論文の本文中にも天体の座標は精度良くは書かれていないことが多いのです。これらは電波写真を描くためにフリンジ位相の較正をすると正確な位置情報がなくなってしまうことを暗に示していたのだと，後日気がつきました。

#### 5. 位置天文は VLBI の未開領域

もちろん，VLBIは別の手法，バンド幅合成による群遅延時間の測定によって系外連続波電波源の天球上での位置を千分の1秒の精度で測定できま

す。しかしこの方法では「望遠鏡の分解能は $\lambda/D$ である……」にはまだ，たどり着いていないのです。その意味で，VLBIにとって位置をはかることはまだまだ苦手の分野だといえます。

しかもバンド幅合成という手法は連続波を放射する系外電波源には通用しても，ラインエミッション（特定の周波数のみ放射する天体）であるメーザ源などの位置測定にはつかえません。そのため従来のVLBIでは遠方のクエーサの位置を測り，安定な電波座標系をつくることはできても，銀河系の中で天体が運動してゆく様を確認したり，三角測量をすることは，あまりできませんでした。

#### 6. 相対 VLBI なら位置精度もでる

そこで考えられた方法が相対 VLBI です。位置を測りたい天体と，そのそばの位置の基準となる電波源とを交互に観測し，フリンジ位相を較正する方法です。大気の揺らぎのタイムスケールよりも速い周期でアンテナを交互に向け，VLBIを行うのです。目標天体と参照電波源で得られるフリンジ位相同士の差を求めます。二つの天体はほぼ共通の大気を通して観測しているので，フリンジ位相の差には大気による変動分は含まれません。また観測しているアンテナや使っている時計は同じものですから，これらの影響もほぼ打ち消されます。相対 VLBI はマイクロ波帯では，かなり成功しました。相対的に位置を測る，とはいえ，位置の参照となる天体が，何十億光年もの彼方のクエーサならば，事実上の不動点となり，天球上で絶対的な位置を測っているのと変わりません。Bartelら<sup>1)</sup>は NRAO512 と 3C345 の間で相対 VLBI を行い，3C345 のコアとジェットの動きを数十マイクロ秒角の精度で測り，3C345 のどれがコアでどれが吹き出すジェットかを明確にしました。

#### 7. VERA は初の相対 VLBI 専用望遠鏡

VERA 計画はこの相対 VLBI を専門に行う VLBI



望遠鏡計画です。VERA 計画の歴史は古く十数年前にさかのぼることができます。原型は国立天文台が改組、発足する以前の緯度観測所にあります。地球回転を精密に測定するため毎日 VLBI 観測を行おうという計画でした。岩手県水沢に 35 m 鏡、沖縄県石垣に 15 m 鏡を建設し、その 2300 キロの基線で定常観測するほか、国際的な地球回転観測にも参加し、また位置天文や AGN やメーザを調べる観測にも手を出そうという装置でした。

1989 年に国立天文台が発足し、「すばる」や電波ヘリオグラフとともに、VERA はその将来計画の一つとして実現が期待されました。しかし実現を待っているうちに、宇宙科学研究所で MV ロケットによる VSOP (スペース VLBI) 計画が始まったり、郵政省通信総合研究所では鹿島 34 m 鏡を主局とする西太平洋電波干渉計による日本広域地殻変動のモニターが実現したりしました。

そこで VLBI 関係者で VERA 計画を見直し、より意義ある計画にして推進しようという話が河野宣之氏らの音頭取りで始まり、1995 年には日本 VLBI 懇談会で議論が始まりました。その結果として石垣、父島、水沢、鹿児島島の 4 局に 20 m 級アンテナを 2 台ずつ設置し、相対 VLBI を主眼とする現在の VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry) の姿が現れました。

### 8. VERA 望遠鏡の目標

VERA 望遠鏡は岩手県水沢、東京都父島、鹿児島県入来、沖縄県石垣の 4 局に 20 m 級の電波望

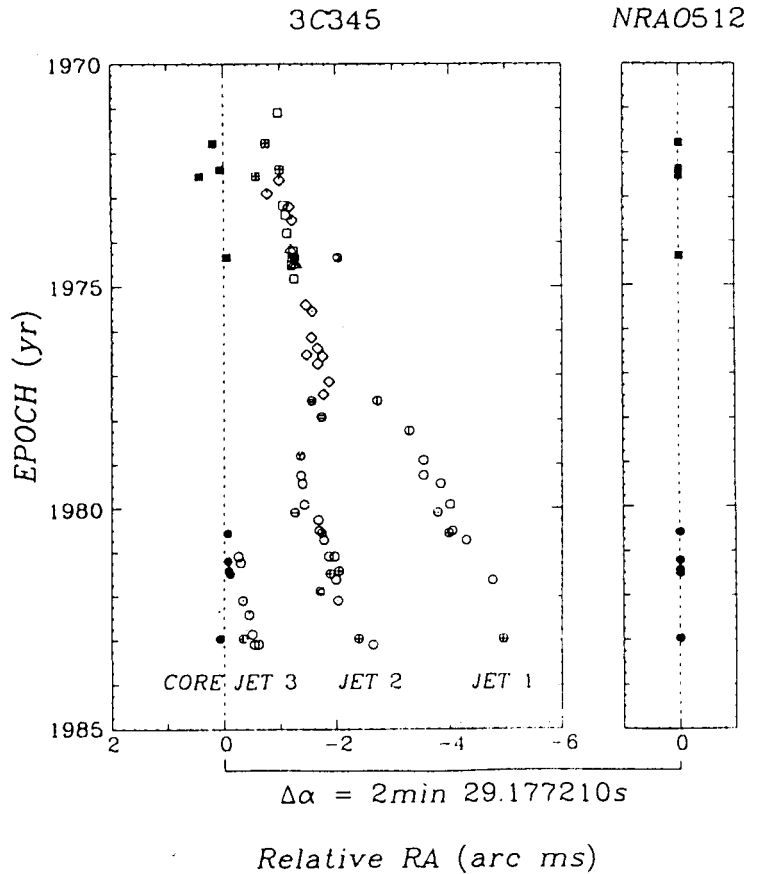


図1 相対 VLBI による観測例。Bartel et al (1986) より、NRA0530 を位置の参照点に用い、3C345 のコアとジェットの運動をもとめたもの。縦軸に観測年をとり、横軸に位置の変化をプロットしてある。

遠鏡を設置し、相対 VLBI を主とする VLBI 観測をおこないます。石垣と水沢を結ぶ基線は約 2300 キロあり、遅延測定精度 0.1 ミリを達成すれば 10 万分の 1 秒角で天体の位置が測定できます。これは銀河系内の天体の距離を悪くても 20 % 程度の誤差で年周視差から直接測距できることを意味します。

平成 11 年度の第 2 次補正予算で認められ、現在、石垣をのぞく水沢、父島、鹿児島に 20 m 口径の 2 ビームアンテナを建設するべく作業は進んでいます。相対 VLBI がもっとも威力を発揮する短センチ波からミリ波の領域で、銀河系にある SiO メー

ザ源、水メーザ源の位置を背景の系外電波源を位置基準として測り、年周視差と固有運動を求め、銀河系の構造とダイナミクス、ひいてはダークマターについて知見を得ようというものです。

## 9. スイッチングか複視野同時か？

センチ波の相対 VLBI ではその観測周波数が比較的低いこともあって、大気の揺らぎのタイムスケールは長く、1個のアンテナを振って、参照源と目標天体を交互に観測することで大気による位相変動は取り除くことができました。

ならば変動のタイムスケールの短くなるミリ波の VLBI ではどうなのか、これは大変難しい問題です。おなじ大気位相補償とは言っても、高地の大気の薄いサイトにおくミリ波サブミリ波の電波干渉計と、VLBI のようにアンテナが独立の大気のもとにあり、しかも高地とは限らないところに置く干渉計のそれとではかなり意味が異なるはずです。

VERA グループでは通信衛星からの 12 GHz ビーコンを利用し、観測局サイトである父島、水沢、鹿児島で大気位相モニターを行い、大気による位相の変動を調査しました。父島では M1 になったばかりの小山君が電波天文 OB の宮沢さんとがんばりました。その結果、サイトによる極端なちがいはないこと、位相が大変安定している時間もある一方で、変動が激しく、20 秒周期でスイッチングを行ったのでは十分な位相補償にならない時間も結構あることがわかりました。

鹿島—野辺山干渉計 (KNIFE) や VLBA で採った 43 GHz VLBI のデータからも、同様に 20 秒程度のスイッチングでは、VERA で狙いたい 10 万分の 1 秒角精度の達成はなかなか難しいことがわかってきました。

観測局がわずか 4 つしかなく、それぞれが独立変動する大気の下にある VERA では、スイッチング法はさけるべきだということがわかってきました。世界に例のない複視野同時 VLBI 機能をもつことで、十分な大気位相補償を行い、VERA に際

だった特徴を与えるべきだという話になりました。

## 10. 2 ビームアンテナは豪華な大気位相補償法

そんな中で考案されたのが 2 ビームアンテナです。一般にはマルチビームアンテナと言われています。複数の静止衛星からの電波を同時に受信できる大型アンテナができないかという動機から 1970 年代には盛んに研究されました。球面鏡の利用や、二つの焦点をむすぶよう鏡面をつくる双焦点アンテナの開発などが行われました。しかし通信衛星の電波の送信出力があがったことで、大型アンテナは不要になり、マルチビームアンテナの研究も下火になったのです。

VERA で採用する 2 ビームアンテナは、鏡面は放物面であり、ふつうのパラボラ型電波望遠鏡と同じです。異なるのは 2 台の受信機が天体の日周運動を追尾するため、稼働するステージに乗ってカセグレン焦点面にあることです。

野辺山 45 m 鏡でもマルチビーム受信機といって受信ホーンが複数並んだ受信機があります。アンテナの軸方向から来る電波はもちろん焦点を結びますが、やや斜めから来る電波も利得は落ちるもののやはり焦点を結びます。放物面を用いる場合、中心軸に対して ±1 度の範囲なら十分実用的な集光力を持つというのがメーカーの提案でした。2 ビームアンテナによる大気位相補償以上に豪華な大気位相補償法はおそらく今後とも現れないでしょう。

## 11. 2 ビームアンテナの重要課題

しかし 2 ビームアンテナを採用する相対 VLBI には、従来の干渉計や VLBI、相対 VLBI がない課題があります。機器からおきるフリッジ位相のずれ較正が非常に難しいのです。

アンテナや受信機、中間周波数伝送路など機器で生じるフリッジ位相の変化は何らかの方法で除去する必要があります。普段の VLBI、干渉計ではその位置が正確に求まっていて、その電波構造が

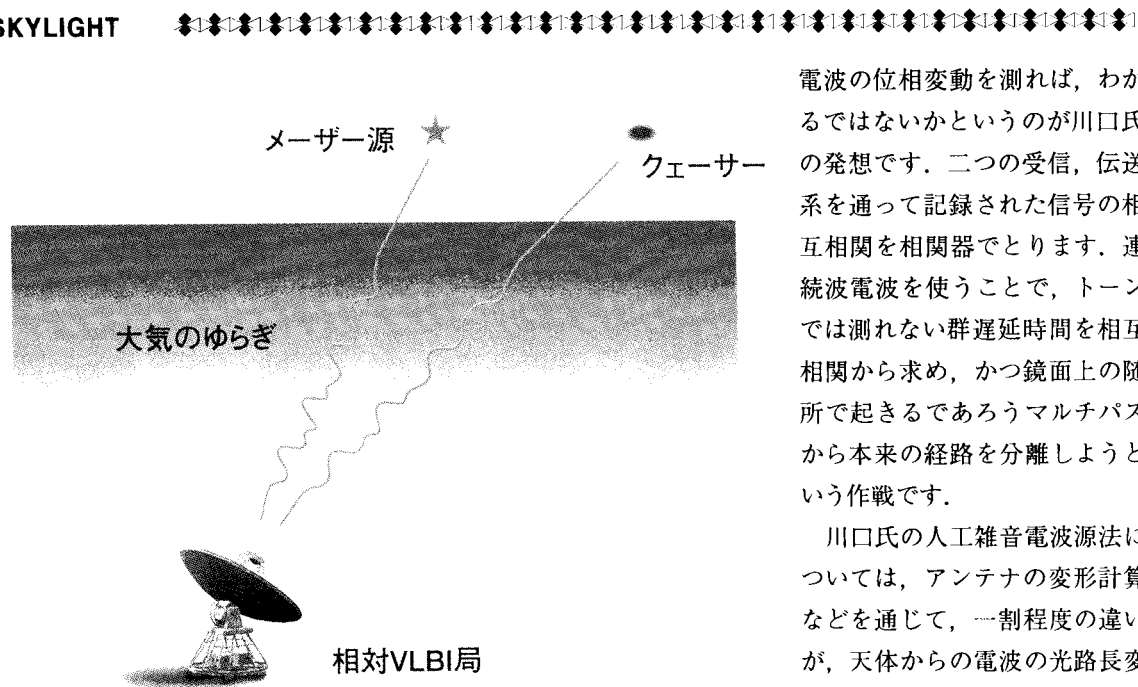


図2 相対 VLBI の原理図。近接するレーザー源とクエーサーを同時に観測することによって、ほぼ共通する大気のゆらぎを、フリンジ位相の差をとることで消去できる。

点状の電波源を較正用天体として観測することで、機器位相の較正を行ってきました。

2 ビームは残念ながら同時に同じ天体の電波を受信できません。同じアンテナ上とはいえ異なる位置にある二つのホーン、姿勢の違う受信機、温度環境の異なる信号伝送路など機器位相に違いを生じさせる部分がたくさんあります。これらの機器位相の較正法を確立しなければ、せっかくの理想的な大気位相補償も無意味になりかねません。

## 12. 川口氏の人工雑音電波源法

ひとつの工夫は、川口則幸氏提案の人工雑音電波源法です。鏡面上のある点から人工的に電波、それもトーン信号ではなく連続波を放射するようにします。この人工電波は副鏡にあたり受信機へと向かいます。その伝搬経路は天体から来る電波の経路と共通になります。この関係がいつも維持されるならば、アンテナの変形（自重や風、熱などでアンテナはひずむ）による光路長変化は人工雑音

電波の位相変動を測れば、わかるのではないかというのが川口氏の発想です。二つの受信、伝送系を通して記録された信号の相互相関を相関器でとります。連続波電波を使うことで、トーンでは測れない群遅延時間を相互相関から求め、かつ鏡面上の随所で起きるであろうマルチパスから本来の経路を分離しようという作戦です。

川口氏の人工雑音電波源法については、アンテナの変形計算などを通じて、一割程度の違いが、天体からの電波の光路長変化との間にはあるものの、かなりうまくいきそうだとわかりました。

## 13. 補完アンテナ法

しかし、観測装置というものは実際につくると予想外のことが起こるものです。なんらかの手段で検証する必要があります。そこで考案したのが補完アンテナ法です。

20 m 2 ビームアンテナの2系統の受信システムでは同時に同じ天体を観測することはできません。そのため、従来の干渉計や VLBI で行われる較正観測は使えません。もちろんスイッチング観測すれば交互に同じ天体からの電波を2系統の受信システムに入れることができます。しかし先に述べたように大気の時変動が速く、大気による位相変化が測定に入り込み器械位相の測定の精度は落ちます。

そこで2ビームアンテナのそば30 m以内に別の電波望遠鏡（補完アンテナ）を設置し、2ビームアンテナと電波干渉計をくみます。基線長30 m程度なら大気による位相変動はほとんどきかなくなります。補完アンテナを相手に2系統の受信システムをスイッチングし、それぞれで補完アンテナとの



間のフリンジを出します。そのフリンジ位相の差をとれば、大気の影響をうけずに、2ビーム間の器械位相差を測ることができます。この方法では基線が短いことで観測天体のほとんどを点源と見なせます。これも機器位相の測定には有利に働きます。

#### 14. 水沢 10 m 鏡を 補完アンテナに

補完アンテナ法を実際に行うために VERA 水沢局の 2 ビームアンテナは既設 10 m 鏡のそば 25 m のところに建設します。水沢 10 m 鏡は 1993 年に完成し、J-Net や測地 VLBI 観測、単独ではメーザの偏波観測に使われてきたものです。今後も VERA 望遠鏡の一部として活躍するわけです。

もともと水沢の 2 ビームアンテナの建設位置は 10 m 鏡から離れた場所を予定していました。補完アンテナ法を実施するため、無理を言って、急遽変更したものです。国立天文台管理部の皆様には多大の迷惑をおかけしたことを、この場を借り、お詫びします。

#### 15. 2 ビームアンテナ立ち上げに 知恵を貸してください

このように 2 ビームアンテナの機器位相差を較正する方針は定まってきました。しかし VERA システム全体を、どのようにして立ち上げを行うかについてはさらに知恵を必要とします。アドバイスをどうか VERA 推進室までお寄せください。

VERA 2 ビームアンテナは、みかけ上は、従来のアンテナと変わりません。しかし位相の変動、安定性をつねに考えねばならない、という点では前

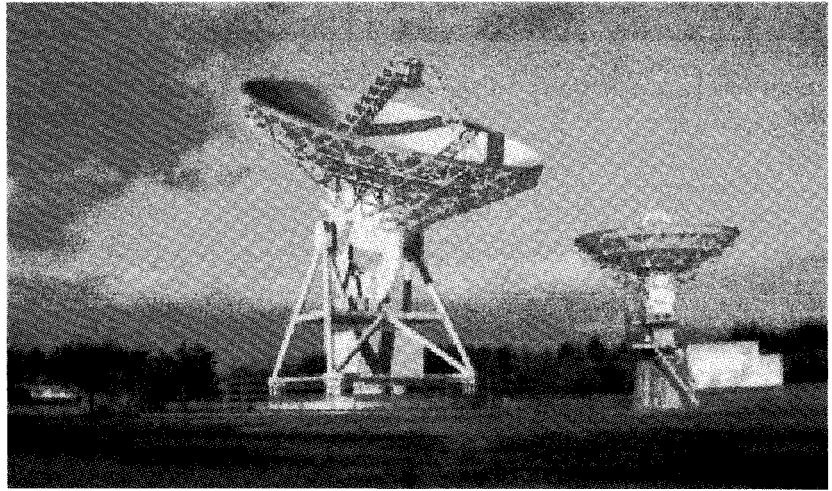


図3 アンテナ完成予想図 (水沢)。20 m 2 ビームアンテナと 10 m 補完アンテナ。水沢局は国立天文台水沢観測センターに建設される。

(真鍋盛二氏作製)

例のないものです。

VERA 2 ビームアンテナは三菱電機が製作を担当することになりました。古くは野辺山 45 m 鏡をつくり、最近ではハワイの「すばる望遠鏡」を作り上げたその力に期待しています。VERA の受信機はカセグレン焦点におき、機器位相を安定に保ったまま移動させねばなりません。その受信機システムは日本通信機が担当します。受信機や伝送系は温度を一定にし、安置するなら機器位相を安定に保つことは意外に容易です。VERA ではそうはいきません。日本通信機の野辺山で培ってきた力に期待しています。

#### 16. 鹿児島大学の協力

VERA 計画では、国立天文台単独ではなく、鹿児島大学と共同してその VERA 望遠鏡を作ろうとしています。2000 年 1 月 28 日には国立天文台・台長と鹿児島大学・学長の間で共同建設協定を締結しました。各観測局の電波望遠鏡の建設、立ち上げそして VERA 望遠鏡の運営、観測を一貫して共同で行おうというものです。鹿児島大学理学部の宇宙コースの学生や大学院生は、自分の大学キ

キャンパスを本拠にして、大きい仕事に関わることができるのです。

国立天文台は1994年秋から野辺山45m鏡、水沢10m鏡、鹿児島6m鏡に通総研鹿児島34m鏡の協力を得て、VLBI国内ネットワーク(J-Net)を運営してきました。鹿児島大学はJ-Netの観測運営の時から国立天文台に協力してきました。J-Net以外にも6m鏡を使ってメーザ源の強度モニターを行い、オリオン水メーザのバースト現象を発見するなどの貢献をしています。さらに日本VLBI懇談会ではじまったVERA計画の立案、予算獲得のための宣伝運動でも一貫して国立天文台と共同行動をしてきました。

## 17. VERAは大学共同利用研と大学のあり方を変えるか？

現在、科学のビッグプロジェクトは特定の太研究機関、例をあげるなら宇宙科学研究所、高エネルギー研究所、国立天文台などが推進します。大学の研究者は共同利用としてその大装置を利用することはできます。大学の研究者はいい研究をしようがんばると大学を留守にせざるをえず、大学は最先端の研究、教育の拠点としては弱体化せざるをえないといった現状があります。VERAでの、大学と共同利用研が共同して大装置を建設、立ち上げ、運営するという形態は21世紀の大型プロジェクトを考えるうえで大変重要な先鞭となるのではないかと考えます。

## 18. 石垣局の今年中の実現を

2000年度のうちに水沢、鹿児島、父島には20m 2ビームアンテナが姿を現します。その後、細かい調整を行い、2004年ころには共同利用もできるようにしたいと考えています。さらに残る石垣局を実現すれば、最大基線長は、水沢、

父島、鹿児島3局だけの場合に比べて2倍、2300キロになり、文字通り10万分の1秒角で位置天文のできる装置になります。

VERA望遠鏡によるサイエンスについても、この記事でくわしく紹介すべきであったかもしれませんが。銀河系を相手にするほかにも、晩期型星の研究、AGNの研究、測地学的研究、RISE(月測学)への利用などVERA望遠鏡で開かれる世界はたくさんあります。

しかし、VERA望遠鏡をどうやって良い望遠鏡にするかを考え、行動することが今一番大切だと筆者は考えています。装置はお金さえ払えばメーカーが作ってくれる、一流メーカーだから安心、というモノではないのです。特に最先端のもの、新技術を要するものは甘くありません。使う天文学研究者がメーカーと一緒に良くするために考えることが必要です。VERA望遠鏡が本当に立ち上がったら、その初期成果については誰かが語るはずで

## 参考文献

- 1) Bartel et al 1986, Nature, 319, 733  
VERA ホームページ  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/>

### Start of VERA

Makoto Miyoshi

National Astronomical Observatory, Japan Osawa  
Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: VERA (=VLBI Exploration of Radio Astrometry) is the first differential VLBI array. The VERA project was financially approved in 1999 and the three 20-m telescopes will be constructed at Mizusawa, Kagoshima and Chichijima stations in 2000. We can measure the distances and proper motions of Galactic masers in the whole Galaxy with the VERA. Adding the planned station Ishigaki to those three, the positioning accuracy will reach 10 micro arcseconds.