

# 現 VERA 計画に対する意見書 計画の抜本の見直しを

三好 真 (VLBI 天文学; 国立天文台)

平成 20 年 8 月 21 日

現 VERA には (1) その科学目標の意義、(2) 目標達成の技術的妥当性、(3) 位置測定誤差の推定の 3 点についての検討が必要です。私はこの間、VLBI 分野の専門家としての責任を感じ、users meeting や VLBI 懇談会シンポジウム [1]、研究会 [2]、さらに天文学会年会 [3][4][5] での発表に加えて公開質問状 [6][7] でも問題点について示唆を行ってきました。VERA の予算獲得 (1998 年) より 10 年が経過し、見直しを行うには良い時期と考え、ここに意見書をまとめます。

## 1 その科学目標の意義に関する疑問

プロジェクトの公式科学目標は「銀河系内メーザ源 1000 天体 (の年周視差と固有運動) を 10 マイクロ秒角精度で測る」と定義されています。例えば国立天文台年次報告 (2006 年度) [8] には、以下のように記述されています。この科学目標は一般向け報道を含め、査読論文・研究集会での説明で繰り返し、述べられています。

「...従来に比べて 100 倍精度の高い 10 マイクロ秒角のアストロメトリ観測を行う。これによって我々の銀河系内の約 1000 個のメーザ天体について年周視差と固有運動の計測を行い、銀河系の 3 次元地図および 3 次元ダイナミックスを明らかにする。...」

まず、1000 天体の距離と運動を測ると銀河系の何がわかるのか? どんな学問的価値があるのか? これを明確にすべきです。最近の天文学会 (2007 年秋季年会) でも銀河分野の研究者から同様の質問がありました。実のところ 10 年前から電波天文関連研究者からも、この疑問の声はあり、いまだに回答されないままです。また学会 (2007 年秋季年会) では「役人向けの説明を学会等の科学の場でいつまで続けるのか? 研究として本当には何ができるのかを言うべき。」とのコメントもでています。

プロジェクトの責任として、実際には何をやるのかを明確に答える必要があります。実は、次に述べるように観測可能天体は著しく少数です。これらをふまえて、科学目標として掲げる「銀河系の構造・ダイナミックス研究」は可能であるのか、妥当かどうか再検討すべきです。最後に補遺として、この科学目標の設定の歴史的経緯を述べておきますが、この科学目標は銀河系研究の学問的目的というよりも、予算要求上の説明のために作られた色合

いが非常に濃いものです。10年経った今、装置性能の実際を明確に内外に示し、実際に何を目標にするのかを周辺関連分野の研究者とまじめに議論するべきではないでしょうか。

## 2 目標達成の技術的妥当性 測定対象は100天体未満

プロジェクトとしての目標測定天体数・精度は「1000天体（の年周視差と固有運動）を10マイクロ秒角精度で測る」としています。上記の国立天文台・年次報告のような公文書、一般向け報道を含め、多くの説明で「1000天体」と述べられてきました。しかし1000天体計測の可能性は実際にはありません。100天体がせいぜいであることを以下に説明します。

1. 2ビーム・アンテナ [9] の視野約2度以内には十分な数の位置参照源がありません。楽観的推定でも、水メーザ (1013天体) に対し約50%、SiOメーザ (1237天体) に対し約30%の存在率です [4]。
2. 銀河メーザ (典型 1mas、milli-arc-second) は VLBI の空間分解能に比べ、十分に大きいいため、過分解によって長基線では強度が低下、あるいは検出できなくなります。
3. 以下の4つのサーベイ結果からメーザ・参照源ペアを観測した際、両天体の検出率は、せいぜい20%であることがわかります。
  - 廣田報告は80の水メーザ・参照源ペアに対し両検出は8ペア (10%)、
  - チェ報告は57のSiOメーザ・参照源ペアに対し両検出は0ペア (0%)、
  - 最近の報告 [10] で106の水メーザ・参照源ペアに対し両検出は20ペア (19%)、
  - 07年 Users Meeting[21] で158の水メーザ・参照源ペアに対して、両検出は19ペア (12%)。

以上の3点から検出可能数  $N_{obs}$  は、計測精度の議論はさておき、

$$N_{obs} = (\text{全メーザ数}) \times (\text{参照源存在率}) \times (\text{両天体検出率}) = 1000 \times 0.5 \times (\sim 0.2) = \sim 100$$

と推定できます。

なお、1. 2. の問題は、私を含めメーザの研究者によって1998年頃の設計段階で予見、問題点として指摘されてきたことです。

装置・解析法の改良による測定可能天体数の向上は、或る程度は可能です。天体ペアの一方を検出すれば、位相参照積分で、残る片方の天体も検出・位置測定できるという説があり、精度によっては、可能です [11]。ただし、仮にフリッジを検出しても2ビーム間の異なる器差遅延、ゲイン差の影響が推定できず、電波イメージ精度と位置測定精度には制限があります。10マイクロ秒角精度が達成できるかという点、疑問があります。受信機の性能向上は検出数を増やします。しかし雑音レベルは大気分が卓越しており、受信機雑音の低減はさほどの感度上昇を生みません (特に43GHzで顕著)。また観測帯域Bの拡張は連続波源の検出向上に寄与しますが、効果は  $B^{0.5}$  に比例し、劇的改善とは言えません。さ

らに、ライン放射である、狭帯域放射の天体メーザには全く効果がありません。いっそ、2 ビームに代わり、広角度のスイッチング観測をした場合、アンテナが天体を捉えていない時間が発生し、実観測時間は2 ビーム法の場合の25% となり、感度は半分になります。いずれにせよ今後20 年程度のうちに観測可能数が1000 天体になることはあり得ません。

「1000 天体を計測する」を目標に「数十天体を毎年計測し、十数年観測を継続する」とする年次計画が組まれています。実際には観測可能天体は100 天体未満なので、もし年に数十天体を計測できるならば、2 年で全観測は終了することになります（もっとも、1 年周期の変動である年周視差を1 年間で精密に計測できるという考え方も疑問です）。実際の観測天体リスト [12] によると、十分な uv カバーで解像度を得て（観測時間5 時間以上）、高頻度の観測から位置変化がモニターされているメーザ源は、10 天体余りです（観測15 回以上なら1 天体、10 回以上が11 天体）。この数年の蓄積で5 回以上の観測があるメーザ源は29 天体であり、「1 年に数十天体を計測して…」という前提は実現していません。現実とは異なる事柄を前提に、長期観測計画や予算を組むべきではありません。実際にコンプライトなサーベイを行い、確実に位置測定の対象となるペア数を確認した上で計画を練りなおすべきです。また、その個数で銀河系の構造やダイナミクスについて何が得られるのか、銀河系研究の専門家を交えて十分に検討し、一定の共通理解を形成した上で観測計画は実施すべきでしょう。現在の「VLBI（運用）小委員会」は装置運営のための委員会であり、銀河系・位置天文学に関する十分な議論をするには、その有識者による委員会を別に組織するべきです。

銀河系研究の論点として以下の項目があります。n 天体 ( $n = 100 \sim 1000$ ) の運動と距離が測定できたとしたら

- 銀河系全体の構造とダイナミクスになにをもたらすか？
- 銀河回転の精密化はどこまでできるのか？
- ダークマター分布は本当には、どの程度推定できるのか？
- アームなどの局所的な構造・運動について新しいことはどの程度わかるか？

VERA 単独のデータに加え、既存の位置天文学データと併せることで上記の点における新展開があるかもしれません。これらについて、simulation などを通して、量的に見積もるべきです。

銀河系研究への直接の貢献は薄いとしても、天文学の基礎である位置天文学計測としての価値があるはずで、そこには、

- 地球基準座標系、力学基準座標系、恒星基準座標系さらに銀河系外基準座標系の結合とその維持・精度向上

という大テーマがあり、日本において唯一、位置天文学観測を実施しているプロジェクトである以上、座標系に関する研究は必須ではないでしょうか。特に電波座標系と光学座標系の結合では、 $100\mu\text{as}/\text{year}$  程度の固有運動・測定精度、100 天体の測定で十分な貢献が

可能です ([13] など)。

また銀河系研究に代替・付加するべきテーマも考えるべきです。

- 天体メーザ現象の理解への観測的研究。個々の研究者レベルでは既に実行されていますが、包括的な取り組みも行うべきかと考えます。
- 測地・地球物理への貢献。高頻度地球回転観測の再評価。GPSの台頭によって測地 VLBI の価値は低下したのは事実ですが、全く無意味になったとも思えません。日本には測地 VLBI の専門家はたくさんいたのですから、改めて検討していただき、良い意見を集めるべきです。
- 電波干渉計による精密計測技術としての工学的研究。計測装置として、ユニークである 2 ビーム・アンテナシステムの精度検証は工学的値打ちがあるはずです。

などです。

### 3 位置測定誤差の推定

国立天文台・外部評価 [14] にも

...but it must be realised that there is a possibility that they will not be able to achieve the original specification... 「当初目標精度の達成は不可能であることが、あり得ることを知るべきである」(日本語訳・三好)

と述べられているように、目標精度の達成は疑問です。しかし、天体位置測定において最も重要であるのは、その測定精度の信頼性です。(a) 観測装置を起源とする誤差の積み上げ (b) 観測データ解析から誤差の推定を行い、両者を比較し、矛盾の無いことを確認して、位置測定精度の信頼性を示してゆくことが必要です。外部評価は大気対流層を起源とする超過遅延の存在、基線誤差に言及しています。ここではさらに観測装置ハード自体が誤差要因であることを喚起したいと考えます。

#### (a) 観測装置ハードを起源とする誤差

観測装置計画は技術研究の側面をもちます。現 VERA 計画では 2 ビーム・アンテナという世界に例がないシステムが採用されています。光軸から離れた位置に受信ホーンを置き、最大 2.2 度角はなれた 2 方向からの天体電波を、同時に受信する装置は他にありません。また光軸からはずれた位置で受信する、という「やぶにらみ」状態の干渉計で遅延を測定し「精密な位置測定を実現する」という史上類例のない電波干渉計です。技術的に非常にチャレンジングであるのに、その技術的研究(検証実験とその報告)はほとんどなされていません。査読論文にそれらしい報告が 1 件 [23] ある以外は、公開技術レポートも見あたりません。装置に関する唯一のその査読論文では、結果的にデータの不適切な取り扱いが行われ、装置性能の検証としては不適當です。位置測定装置としての 2 ビーム・アンテナについて、私は 10 年間、考えましたが、多くの技術的疑問があります。高度に専門的になりますが以下に列挙します。

## 2 ビーム・アンテナに関する疑問 1: アンテナ受け入れ

10 マイクロ秒角の高精度天体位置測定には基線ベクトルと遅延の正確な測定が必要です。装置起源の遅延誤差も当然較正し、除去せねばなりません。許容遅延誤差はトータルで 100 ミクロンですが、装置起源の許容誤差（主に 2 ビームシステム間の許容機械遅延誤差）は 50 ミクロンです。これはアンテナ仕様書で規定されています。アンテナの受け入れに関して、どのような測定を行ってこれを検収・確認したのでしょうか？ここで光路長差はその時間変動成分ではなく、絶対値としての光路長差でなければなりません。現状の計測技術で、絶対値として、この精度の測定は困難とも思えます。どのように測定を行ったのか明確にするべきと考えます。

## 2 ビーム・アンテナに関する疑問 2: 電波雑音源による較正法

採用されている電波雑音源法は、機械遅延の較正法としては、疑問があります。主鏡を含む光学系とは全く無関係の場所から電波を放射し、その電波の遅延を測ることによって、なぜ光学系で発生する機械遅延誤差が精度よく測れる（あるいは推定できる）のか、その測定原理と達成精度が不明です。科学的・技術的な解説と検証結果を示すレポートが必要です。

## 2 ビーム・アンテナに関する疑問 3: 電波雑音源法では計測できない光学系起源の遅延誤差の存在

電波雑音源法では検知できない光学系起源の遅延誤差が存在します。ポインティング・エラーがある時、アンテナ・ビーム内位相特性によって位相遅延が生じます。この遅延誤差の存在は、アンテナ工学の知識として基本的なものです。特に、2 ビーム・アンテナのように光軸からはずれた位置でのアンテナ・ビーム内位相特性は非対称性をもち、追尾エラーによって系統的な遅延誤差を生みます。メーカーの計算値でも、アンテナのビームサイズの十数分の一のポインティング誤差が発生すると、50 ミクロン相当（43GHz の場合）の遅延が発生することが示されています。装置性能の確認として、アンテナ・ビーム内位相特性の実計測が必要なはずですが、例えば RISE グループでは、月面 VLBI 観測にそなえ、測定を実施し、その結果は IEEE 誌に論文掲載しています [15]。その結果から推定すると、VERA で観測する周波数帯（22、43GHz）では、通常の光軸上での受信方式においても、無視できない系統的遅延誤差を生じるものと推定できます。2 ビーム・アンテナで同種の測定実証ができない理由、あるいはしなくていい根拠があるなら示すべきです。

## 基線ベクトル精度に関する疑問

基線ベクトルの誤差は、 $w$ （天体方向）の誤差、すなわち遅延誤差を引き起こすだけでなく  $uv$  値にも誤差をもたらします。例えば 1 千 km 基線に 5mm の誤差があるとして、2 度離角の測定では 50 マイクロ秒角の位置誤差をもたらします。多くの銀河メーザは 2 千 km 基線では分解されてしまい、検出できなくなります。VERA の最長基線、2 千 km に対する誤差の議論は実際的ではありません。本来は各メーザの大きさに応じて、その検

出できる基線長で議論すべきで、典型的には1千 km 基線あたりを想定すべきです。この場合、2度離角を10マイクロ秒角精度で測るためには、許容基線長誤差は1mmになります。現在の測地 VLBI では達成困難な精度です。IAU シンポジウム 248(2007年10月)では、「10マイクロ秒角精度達成のためには局位置精度は5mm 以上(場合がある)」という講演がありました。基線誤差が大きくても位置精度のでる場合があるなら、きちんと説明すべきです。

## (b) 観測データ解析からの誤差推定

高精度位置天文学は、いわば計測学に属します。測定位置の誤差を検討してゆくこと自体が研究テーマであるはずで、VERA は、10マイクロ秒角精度の測定をめざした高精度位置天文学の装置です。しかるに位置誤差に関する検討がなおざりにされている感があります。古典的な光学位置天文学に比べてみるとわかりますが、VLBI による位置天文学は、誤差議論の検討項目出しすら不完全な状態にあります。さらに、前例のないアンテナ形式を用いた VERA では、従来考えもしなかった誤差要因が出現します [16]。誤差に関してしっかり検討・記述しなければ、位置天文学の観測データとしては、後世、無価値になります。以下観測論文・報告に見られる疑問点を示します。

### 観測論文に関する疑問 1: 不十分な各測定の誤差推定

プロジェクトとして幾つかの観測結果の論文があります。測定値の記述や誤差の検討が不十分です。

まず、VERA 論文では測定値を数字で示さず、図にプロットして済ませていることが多いようです。数字でしっかり示すべきです。アメリカの VLBA を使って、世界で初めて、水メーザの年周視差を計測した Hachisuaka et al.(2006)[17] や、30年前に初めて VLBI で水メーザ・スポットの運動を計測した Genzel et al. (1981)[18] などでは、個々の測定結果は表にして、数字で示しています。

次に、多くの VERA 論文では、1回1回の測定の誤差の推定もなされていません。そのためか、年周視差と固有運動を求める fitting では、「誤差なし or 不明」の場合のフィットを行い、その残差は  $\chi^2 = 1$  であるとして、個々の測定誤差を推定しています。精密測定と呼べる段階には来ていない、といわざるをえません。

誤差要因の一つである、大気遅延に関する議論はかなりあります [11][22]。ペア間の離角はせいぜい2度とはいえ、大気遅延に違いがないわけではありません。「大気による誤差は共通」と言いながら、厳密には共通ではなく、10マイクロ秒角精度の位置測定をめざす上では、大きな障害になります。「大気遅延差」の除去法は重要な技術です。S269の観測例では [22]、オリジナルなアイデアを考案・使ったとの記述があります。しかし以下の抜粋部分が示すように、その記述があまりにも希薄です。オリジナルなアイデアについては、もっと方法について具体的・量的な記述をすることが好ましいと思います。ちなみに、私は、この手法では、天体の位置情報は保存されず、手法自体が位置の誤差要因になると考えます。

In some epochs (especially in summer), the qualities of phase-referenced maps were not high due to residuals in tropospheric delay. To calibrate them, **residual zenith delays were estimated as a constant offset that maximizes the coherence of the phase-referenced map.** Typical residuals of zenith delay are 1 to 5 cm, but in the worst case (during the summer at Ishigaki-jima station) it was as large as 20 cm.[22]

一方で、装置起源の誤差については全く議論されていません。装置起源の誤差をきちんと考慮すべきです。特に、2 ビーム・アンテナのように、全く新しい方式を採用している場合、信頼性は装置を詳しく記述することで得られます。初めての手法においては詳細を述べるべきで、例えば、統計視差法（クラスター内の粒子の視線速度分散と固有運動分散が等価であると仮定して距離を推定する手法。）によって、初めて Orion KL の距離を計測した Genzel et al. (1981)[18] では、原子時計、基線、機器起源の位相遅延、天体の構造変化、大気変動の影響など一通りの議論を試みています。S269 の視差測定論文では、「VLBI の位置誤差推定はむつかしい」と、多くの誤差要因を議論することを避け、主に大気遅延による誤差を議論しています。多くの誤差要因について難しいなりに simulation や推定を試みるべきであると思います。

In figure 2, the error bars were estimated as the standard deviation from the best-fit with parallax plus linear proper motions. This error estimate was made because **it is difficult to predict the observational error in VLBI astrometry**; the error depends on many factors, such as the residual phase in phase-referencing, the error in zenith delay of the troposphere and the ionosphere, and the error in calibration of the instrumental offset, and so on, and is hardly predictable.[22]

装置からの誤差見積もりと、実際の測定結果からの推定誤差とを比較し、両者に矛盾がないことを確認して装置性能の確認をするのが、精密計測や物理実験学の基本に添う装置立ち上げです。2 ビーム・アンテナに関しては 10 年前に「装置の十分な較正や誤差計測ができない。だから精密位置測定には向かない。」という強い意見がありました。やはりその意見は正しかった、ということなのかもしれません。

もっとも、アメリカ VLBA による同種の観測論文でも位置の誤差推定に関しては十分な誤差検討ができていたわけではなく、VLBI による位置天文学は精密計測学としては未完成の域にある、というべきかもしれません。例えば、天体の非直線変動成分をすべて年周視差によると仮定して測定していますが、非直線運動には（連星系であれば）軌道運動によるものもあります。また観測局の位置変化にも年周成分が存在し、その反映もそこには含まれます。これらは古典位置天文学の常識なのですが、この手の考慮がなされていません。高精度位置天文学をめざすなら測地学や古典位置天文学関連の研究者との強力な連携が必要です。

## 観測論文に関する疑問 2: 不明点の多い解析の詳細

個々の結果をみると位置精度には大きなばらつきがあります。天文学会（2006年春季年会）で「現状での VERA の位置天文観測精度は、50 マイクロ秒角程度と考えられる。」[19] と公式発表されたにもかかわらず、その後の天文学会・研究会の個々の講演では、桁で下回る、まちまちな精度が述べられています。例えば、その9ヶ月後に開催された研究会の集録[20]では、年周視差・固有運動計測に関して、以下のような数字になっています。

天体	年周視差 ( $\mu\text{as}$ )	固有運動 (赤経) ( $\mu\text{as}/\text{yr}$ )	固有運動 (赤緯) ( $\mu\text{as}/\text{yr}$ )	集録
S269	$189 \pm 8$	検出せず	検出せず	本間集録
Orion KL	$2200 \pm 200$	$2800 \pm 200$	$-9000 \pm 200$	廣田集録
NGC1333	$4400 \pm 900$	$18200 \pm 4000$	$-6200 \pm 2000$	同
S Crt	$2900 \pm 500$	未計測	未計測	対馬集録

表 1: 2006 年度宇宙メーザ研究会 (2007 年 1 月 9 日 - 10 日・三鷹)・集録から。

公式発表 [19] における「位置天文観測精度」とは一度の測定における精度でしょうから、複数回の測定から統計的に得られる、年周視差や固有運動の測定精度とは違ってまかまかではありません。しかし S269 の場合を除いて、その隔たりがあまりに大きすぎ、整合性が感じられません。

ちなみに 2007 年 11 月の users meeting[21] では、1 月の研究会発表時に比べて、誤差が  $1/2 \sim 1/5$  になる報告が、なぜ改善されたかの、十分な説明のないまま、なされています。

天体	年周視差 (1 月) '07 年 1 月研究会 ( $\mu\text{as}$ )	年周視差 (11 月) '07 年 11 月 users meeting ( $\mu\text{as}$ )
Orion KL	$2200 \pm 200$	$2100 \pm 100$
NGC1333	$4400 \pm 900$	$4100 \pm 170$
S Crt	$2900 \pm 500$	$2300 \pm 200$

表 2: 1 年未満のうちに精度が 2 倍以上向上した例 [20][21]

多くの報告は相対 VLBI 法による電波イメージを示さないまま、いきなり天体位置の時間変化を示すプロットと、そこへの年周視差曲線の fitting 結果が示されます。幾つかの天体像を示した報告では、通常の電波イメージとは異なり、なにか較正が不十分なのではないかと思わせる (ノイズレベルの高い) 電波イメージである例が見受けられます。仮に測定精度が悪くても、それがどの程度なのか客観的な資料を示すべきです。特に相対 VLBI 法による電波イメージは是非とも示すべきです。この際、以下のようなデータ解析の細部をも明示すれば、データの信頼度は上がります。



1. 各基線のフリンジの位相・振幅の時間変化
2. クロージャ・フェーズ：観測データ、得られた電波像からのクロージャ計算値の一致度を含めて
3. 参照源と目標天体の電波イメージ：通常のマッピング法によるものと相対 VLBI 法によるものの比較

天体位置測定は測地座標系や地球回転パラメータと密接に関連しています。将来のそれらの改訂・改良によって位置測定値は修正される可能性があります。2 度離角の測定において、基線長が 1 ミリ修正されると測定位置は 10 マイクロ秒角シフトします（千 km 基線の場合）。どのような仮定やプロセスを経て得た結果であるのかを示していない論文は、将来無価値になってしまいます。結果を生の観測データから再現できるだけの詳細な記述をすべきです。特に S269 での測定（8 マイクロ秒角精度）は他に比べて桁違いに精度が良い結果を示しています（2007 年 7 月における報道・論文 [22]）。このトップ・データでは、解析の途中過程を明示して、その再現性・信頼性を示すべきです。

#### 装置基本性能を述べる論文について：不適切なデータの扱い

VERA 論文 A [23] は、その 2 ビーム・アンテナによる 10 マイクロ秒角位置天文学を実現する大気位相補償能力の確認をしたと主張する論文です。通常相対フリンジと異なる特徴を示しており、2 年前からそれに関する疑問を含め、何度か公開質問状 [6][7] を提出しています。論文 A についてはアーカイブ・データを直に検証し、以下のことが解りました。

1. 論文 A は最初の観測 1 時間のデータのみを用いて、上記結論を主張しています。ところが、観測時間は全体で 6 時間あるのに残り 5 時間について言及がありません。
2. 論文 A の「天体位置補正」によって最初の 1 時間については相対位相を平均 0° にします。コヒーレンスはその 1 時間に対してほぼ 1 を示し、アラン分散も白色雑音の振舞いを長いタイムスケールでも示します。これらから 2 ビーム・アンテナによる大気位相補償は成功しており、長時間積分そして高精度位置測定が可能であると論文 A は主張しています。  
しかし、「天体位置補正」のパラメータは最初の 1 時間の相対位相を平均 0 度にするのみで、その後の時間では、位相は非常に大きな変動を示します。つまり、先の「天体位置補正」は正しい天体位置補正量とは異なる値を用いていることとなります。
3. そこで、フリンジサーチによって全時間の位相変動を調べると、天体南中時において高速変動し、(天体位置ずれが引き起こす) 1 恒星日周期の正弦変動と異なる増減が見え、装置等に異常があることがわかります。事実、三鷹 FX 相関器の天体追尾パラメータのバグが、この異常の原因であったことが論文 A の出版後に判明しています（別紙 1 を参照ください）。
4. 論文 A が図示するアラン分散は、本来のデータに任意の関数フィットを行い、それを差し引いた残差に対する計算値です。本来のデータのアラン分散とは、大きく異なります。

以上より、論文 A のデータは同時相対 VLBI の位相補償効果を示していないし、2 ビーム・アンテナの装置性能が確認できるデータとも言えません。むしろ逆に、この時点で装置（相関器を含む）には大きなバグがあることを明確に示しています。特に、都合の良い最初の 1 時間分のみを用い、期待する結果を示さない全体の 8 割のデータを理由も示さず捨てている（データの S.N.R. は全時間で良好）のはデータの不適切な選択ではないでしょうか。また、位相補償効果の根拠となるアラン分散値も実際のデータ自体の性質を示していません。

従って論文 A は不適切なデータの取り扱いによって、取得データの本来示す結果とは逆の結論（= 装置基本性能が確認された）に至ってしまったものと言わざるをえません。

論文 A に関しては Erratum をだし、かつ、新たなデータで論文 A での結論と同様な結果が得られることを述べる論文を書くべきです。なお「私はそれには協力の用意がある」とプロジェクトには伝えてあります。上記のアーカイブ再解析の結果は論文にまとめて投稿済みです [24]。

## 4 まとめ

科学の実験においては、事前の予想と異なる実験結果がでたからといって、実験が無駄になるわけではありません。そこから何を見つけ、次にどう研究を進めるかが重要であると考えます。観測装置プロジェクトも実験の一つと、認識するべきです。VERA に関しては、目標精度 10 マイクロ秒角が達成されなくても、天文学に貢献する方法は幾つかあります。特に、座標系の結合・維持・精度向上では十分な貢献が可能です。銀河系の研究に関しては、周辺関連分野の協力を得て、少数の天体の運動測定からも可能な事柄を見だし、進めるべきです。

## 補遺：「1000 天体、10 マイクロ秒角精度」が科学目標になった経緯

VERA 計画は、1985 年頃に緯度観測所（当時）の将来計画として、地球回転の高頻度観測を測地 VLBI 法によって行う装置計画として始まりました [25][26][27]。当時、従来の光学観測に比べ、二桁も精度が高い地球回転運動の測定が VLBI によって実現しました。その導入は緯度観測所の研究活動に革命をもたらすと期待されました（= 以後「緯度観 VERA」とよぶ）。緯度観測所・東京天文台・空電研を併せ、1988 年に国立天文台が発足します。発足当時の 3 大計画として「電波ヘリオグラフ」、「すばる（当時 JNLT）」、「VERA」があり、前者 2 計画の予算獲得のあと、残る「VERA」も推進しようという機運が 1994 年ころに高まりました。ところが、GPS 測位技術の台頭により、測地・地球回転研究における測地 VLBI 法の価値は低下してしまい、「緯度観 VERA」では概算要求は難しい状況になっていました。そこで VLBI 関係者で”地上 VLBI 統一計画”として計画の練り直しが行われました（1994 年暮れ VLBI 懇談会シンポ等）。その結果、水沢・石垣に加えて鹿児島、父島を加えた 4 局構成で相対 VLBI 法に特化した計画となりました（= 「統一 VERA」とよぶ）[28][29]。しかし VLBI 関連研究者の関心のベクトルは多岐（= 測地、地球回転、位置天文学、晩期型星や星生成領域の天体メーザ、AGN の宇宙ジェット）の天体物理、さらには VLBI 技術自体）にわたり、これらをすべて考慮すると「統一 VERA」の科学目標は発

散してしまいます。結局、概算要求の理由付けとして有利で、元の VERA 計画自体の謳い文句の一部でもあった位置天文学を目標の柱にすることになりました。天体物理ではなく、位置天文学の計画とすることで、その後の ALMA (当時 LMSA) の概算要求説明と棲み分ける意図もあったと思われます。1995 年頃、検出されているメーザ源 (水メーザや SiO メーザ) はおよそ 1000 天体であったこと、それに加えて「緯度観 VERA」でも謳われていた測定精度 10 マイクロ秒角が融合した結果、以下のように、計画の科学目標の設定がされました。

「VERA 計画の目標は、世界最高性能の位相補償 VLBI 観測を行うことにより、銀河系内天体のアストロメトリ観測を行い、銀河系全域の空間構造および速度構造を明らかにすることであり、これが本プロジェクトの科学目標である。これを達成するためには、銀河系内全域において 20% 以下の相対精度で距離を計測する必要があり、従来に比べて 100 倍精度の高い 10 マイクロ秒角のアストロメトリ観測を行う。これによって我々の銀河系内の約 1000 個のメーザ天体について年周視差と固有運動の計測を行い、銀河系の 3 次元地図および 3 次元ダイナミクスを明らかにする。従来の対称性などを仮定した銀河系回転運動曲線を仮定のないものにし、銀河系内の運動学的質量分布を明らかにし、アーム構造や暗黒物質の分布を明らかにすることを研究目標とする。さらに観測局位置を高精度で計測することが必須であり、VLBI、GPS、重力計などを用いて総合的に精密計測を行うことによって測地・地球物理学における研究も展開されることが期待される。」(2006 年度国立天文台年次報告 [8] から)

以上の経緯から明らかなように、現 VERA の科学目標は銀河系研究の動向や必要性とはほとんど無関係に、予算要求の説明のために設定されたものであると言えます。

当時、私が説明するときは「メーザ 1000 天体を 10 マイクロ秒角台で測定する」と、「台」をつけて、精度目標については余裕を持たせて述べていたのですが、いつの間にか「台」が取れてしまい、今では上記のように「10 マイクロ秒角」が精度目標となっています。「メーザ 1000 天体を 10 マイクロ秒角...」は概算要求の説明と宣伝のために当時、私をふくめ概算要求に携わった人々が考案した「キャッチコピー」がその起源です。それが修正・改訂もされず、10 年過ぎた現在でも科学目標として据えられ、学会・研究会において銀河系の専門家に対してさえ説明されているのは、そろそろ考え直してほしいところです。

観測天文学をふくむ科学研究では、得られた科学的事実がもっとも重要なのであって [30]、希望する結果を得ることはそれにつく事柄です。科学の研究目標設定については当初の目標を形式的に貫き通すことよりも、観測実験結果という事実をふまえ、思慮をめぐらして研究の主眼を調整し、少しでも有意義な方向へ変えて行く方がよいのではないのでしょうか。

## 参考文献

- [1] 「2 ビーム・アンテナは玄人にもわかる説明を」、三好 真、VLBI 懇談会シンポジウム (2005.12.8-10)、<http://www.naoj.jp/kuroto051101.pdf>

- [2] 「2 ビームにオフセット遅延があったら高精度位置天文測定はできないはず」、三好 真、「mm、 $\mu$  arcsec、nGal で拓く測地・地球物理」研究会 (第2回) 2006.2.28、国立天文台・三鷹、<http://www.naoj.jp/060228obseq.pdf>
- [3] 「VERA ファーストFRINGE再解析」、三好 真、日本天文学会、2008 年春季年会、v88a. 学会予稿 (改訂版) : <http://www.asj.or.jp/nenkai/2008a/pdf/V88a.pdf>  
9 分口頭発表: <http://www.naoj.jp/2008sp-v88afin.ppt>
- [4] 「相対 VLBI 法による銀河メーザ位置天文学の問題点」、三好 真、日本天文学会、2008 年春季年会、r08c. 学会予稿: <http://www.asj.or.jp/nenkai/2008a/pdf/R08c.pdf>  
ポスタ: <http://library.nao.ac.jp/naoreport/10-34-1.pdf> (= 国立天文台・台報 2007)
- [5] 「現 VERA 計画は根本的な見直しを!」、三好 真、日本天文学会、2008 年春季年会、r09b. 学会予稿: <http://www.asj.or.jp/nenkai/2008a/pdf/R09b.pdf>  
3 分口頭発表: <http://www.naoj.jp/R09b-ATMOST100fin.ppt>  
同・ポスタ: <http://www.naoj.jp/R0b-fin.pdf>
- [6] 公開質問状 2006 年版、三好 真  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/UM2006/P2Miyoshi.pdf>
- [7] 公開質問状 2007 年版、三好 真  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/UM2007/P3UM07Miyoshi.pdf>
- [8] 国立天文台年次報告 2006、[http://www.nao.ac.jp/A\\_Report/A\\_Report\\_2006-J/index.html](http://www.nao.ac.jp/A_Report/A_Report_2006-J/index.html)
- [9] Kawaguchi N., Sasao T., Manabe S., in Proc. SPIE Vol.4015 Radio Telescope, ed H. R. Buthcer, p544 - p551, 2000.
- [10] 「VERA fringe-check results for H<sub>2</sub>O maser sources」 Hirota et al.,  
<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/CFP2006/Oh-listver3.5.txt>
- [11] Hirota et al., Publ. Astron. Soc. Japan 60, 37.44, 2008.
- [12] [http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/tmp/cum\\_list2007.htm](http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/tmp/cum_list2007.htm)
- [13] Soma, M., Proceedings of IAU Colloquium 180, Edited by Kenneth J. Johnston, Dennis D. McCarthy, Brian J. Luzum, and George H. Kaplan., p.115, 2000.
- [14] 国立天文台・国際外部評価資料 (2008 年) の電波研究部の項、  
[http://www.nao.ac.jp/Report/Radio\\_Astronomy.pdf](http://www.nao.ac.jp/Report/Radio_Astronomy.pdf)
- [15] Liu et al., IEEE T. A. P., 55, 5, 2007.
- [16] 「相対 VLBI 法による銀河メーザ位置天文学の問題点」、M.Miyoshi、国立天文台報、10、p.1-18、2007.

- [17] Hachisuka, K., et al., ApJ, 645, 337, 2006.
- [18] Genzel, R., Reid, M. J., Moran, J. M., & Downes, D., ApJ, 244, 884, 1981.
- [19] 「VERA 観測システムの位置計測精度」、小林秀行・他、日本天文学会 2006 年春季年会、V55a. <http://www.asj.or.jp/nenkai/2006a/html/V55a.html>
- [20] 「2006 年度宇宙メーザ研究会：恒星・銀河進化研究への応用」、今井裕（鹿児島大）主催、国立天文台・三鷹にて、2007 年 1 月 9 日－10 日.
- [21] 「全体的な進捗と今後の方針」、小林秀行、2007 年度 users meeting. <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/restricted/UM2007/T19UM07Kobayashi.pdf>
- [22] Honma, M., Bushimata, T., Choi, Y. K., Hirota, T., Imai, H., Iwadate, K., Jike, T., Kameya, O., Kamohara, R., Kan-Ya, Y., Kawaguchi, N., Kijima, M., Kobayashi, H., Kuji, S., Kurayama, T., Manabe, S., Miyaji, T., Nagayama, T., Nakagawa, A., Oh, C. S., Omodaka, T., Oyama, T. PASJ, 59, 889-895, 2007.
- [23] Honma, M., Fujii, T., Hirota, T., Horiai, K., Iwadate, K., Jike, T., Kameya, O., Kamohara, R., Kan-Ya, Y., Kawaguchi, N., Kobayashi, H., Kuji, S., Kurayama, T., Manabe, S., Miyaji, T., Nakashima, K., Omodaka, T., Oyama, T., Sakai, S., Sakakibara, S., Sato, K., Sasao, T., Shibata, K., M., Shimizu, R., Suda, H., Tamura, Y., Ujihara, H., Yoshimura, A., PASJ, 55, L57, 2003.
- [24] "Re-analysis of the First Fringe with 2-Beam in the VERA System", Miyoshi, M., submitted, 2008.
- [25] Fujishita, M., and Hara, T., The Impact of VLBI on Astrophysics and Geophysics; Proceedings of the 129th IAU Symposium, Cambridge, MA, May 10-15, 1987. Edited by Mark Jonathan Reid and James M. Moran. Symposium sponsored by IAU, URSI, NASA, et al. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p.483, 1988.
- [26] Hara, T., Proceedings of the Symposium on Application of Space Techniques to Astronomy and Geophysics, p.160-163, 1986.
- [27] Hara, T., Okamoto, I., and Sasao, T. Vistas in Astronomy (ISSN 0083-6656), vol. 31, p. 647-652, 1988
- [28] Miyoshi, M. 1996, in proceedings of the third East-Asian meeting on astronomy, July 17-21, 1995, Tokyo, Japan. Edited by Norio Kaifu. Tokyo, Japan: National Astronomical Observatory, p.481, 1996

- [29] Kameya, O., Sasao, T., and Miyoshi, M. The central regions of the Galaxy and galaxies, Proceedings of the 184th symposium of the International Astronomical Union, held in Kyoto, Japan, August 18-22, 1997. Edited by Yoshiaki Sofue. Publisher: Dordrecht: Kluwer, ISBN: 079235060X, p.327, 1998
- [30] 「科学を志す人へ」, 科学倫理検討委員会・編、化学同人、p.131、2007.

## The status of the Mitaka correlation center

SHIBATA, K.M., TAMURA, Y., BUSHIMATA, T., JIKE, T., and KOBAYASHI, H.

柴田克典、田村良明、武士侯健、寺家孝明、小林秀行（国立天文台）

### 1. 始めに

三鷹 VLBI 相関局では VERA を中心に VSOP、J-Net、南極 VLBI 等の相関処理を 24 時間体制で行っています。問題が多かった DIR2000 による 1Gbps 観測の処理も、まだまだ完璧とはいきませんが、稼働できるようになりました。2004 年からは土日も処理を行うことを考えています。

ここでは、DIR2000 の処理を通して見つかったバグ報告と相関処理の申し込みに関するお願いを記載させていただきます。

### 2. 大気差補正值のバグ

予測値計算に含まれていた大気差補正計算に以下のバグがありました。これらは相関局始まって以来のものと考えられます。

(1) EL 値で計算すべきところを天頂角を使っていました

高 EL 角及び低 EL 角で遅延率残差が大きくなります。2003 年 6 月以降は修正済みです。

(2) 補正值の加算の仕方が逆でした

低 EL 角で遅延率残差が大きくなります。2003 年 12 月以降は修正済みです。

これらのバグの影響は J-Net や VSOP の処理では顕著に見えず気がつかれていませんでした。VERA の 22GHz 2000km 基線で大きく影響が出てきたものと思われます。イメージングにはほとんど影響を与えないと思われませんが、補正の仕方を検討中です。

### 3. 相関処理の申請方法

VSOP、J-Net、VERA 以外の観測で相関処理を希望する方は観測の 1ヶ月前までに

<http://vsop.mtk.nao.ac.jp/vsop2002/correlator-2.html>

から申請をお願いします。追って相関局から処理可能かどうか返事をしますので、もし連絡がなければ [mtkfx@hotaka.mtk.nao.ac.jp](mailto:mtkfx@hotaka.mtk.nao.ac.jp) までメールでお問い合わせください。

今後、三鷹 VLBI 相関局の処理時間は VERA、VSOP 観測にほとんど費やされると予測されます。従って相関処理の申請をいただいてもすべてを引き受けることはできません。観測後に処理を依頼されても不可能な場合も予想されますので、必ず観測計画を立てる前に処理可能であることを確認してください。よろしくをお願いします。