

# 宇宙と地球を測るものさし—超長基線電波干渉計—

藤 下 光 身\*

## 1. 今までの天文月報

これから私が書こうとしている超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometer—VLBI) については、この天文月報にも過去に何度か文章が載せられています。第 68 巻 (1975 年) の 3 月号には土屋淳さん・松波直幸さん・中嶋浩一さんが「長基線電波干渉計の測地・位置天文学的利用 (I)」を書いています。これには VLBI の動作原理や他の測地新技術との比較が説明されています。同じ巻の 4 月号にはその (II) があり、ここでは VLBI を位置天文学・測地学に使う立場から両学問分野の内容・VLBI による観測の原理・各種の誤差とその大きさ・VLBI の測地利用の意義が書かれています。これら (I), (II) の文章はきちんとした数学的な取り扱いで書かれていますので、まだ読まれていない人には是非一読されることを勧めます。さて、さらに同じ巻の 5 月号には平林久さんが「天体物理に与えた VLBI 8 年間の影響」と題して、VLBI の歴史・各テーマごとの VLBI 観測の意味と現状・VLBI での位相決定の問題・VLBI の将来などについて書かれています。第 71 巻 (1978 年) の 3 月号には川尻轟さんが「VLBI 国内基礎実験を終えて」を書かれています。これには日本で行われた VLBI のハードウェアや実験の様子が詳しく説明されています。

## 2. ものさし VLBI と作図 VLBI

図 1 に VLBI の一般的な概念図を示します。地球のスケールで離れた 2 つ以上のアンテナで同一の天体からの電波を同時に受信し、各々のアンテナが独自に持っている周波数標準でこれを低い周波数へ変換します。次のステップは種類によって異ったものもありますが、一般的にはその後信号は 0 または 1 の 2 進のデジタル量へ変換され、磁気テープに記録されます。この磁気テープを持ち寄って再生し相関処理を行うのです。この様に必要な物理量を得ます。さて VLBI は位置天文学・測地学に用いられるものと天体物理学に用いられるものの 2 種類に分けることができると思います。位置天文学・測地学に用いるものは群遅延時間やフリンジレートを測定して、それから電波星の位置や地球の回転の様子、アンテナ間の距離などを求めます。これを以下では「ものさし VLBI」と呼びます。天体物理学に用いるものはビジビリティの振幅を測定してそれから天体の電波の強度分布図を作ります。こちらは以下「作図 VLBI」と呼びます。それらは観測の様子やアンテナまわりに関してこんな点が違ってきます。

- A. 作図 VLBI ではそのときそのときの興味による天体を見るのに対し、ものさし VLBI ではいつも決まった。できるだけ点状の、つまりできるだけ図の書けない電波源を見ること。
- B. 作図 VLBI ではそのときそのときの興味による周波数の電波を受けるのに対し、ものさし VLBI では測定に都合の良い、いつも決まった周波数で観測すること。

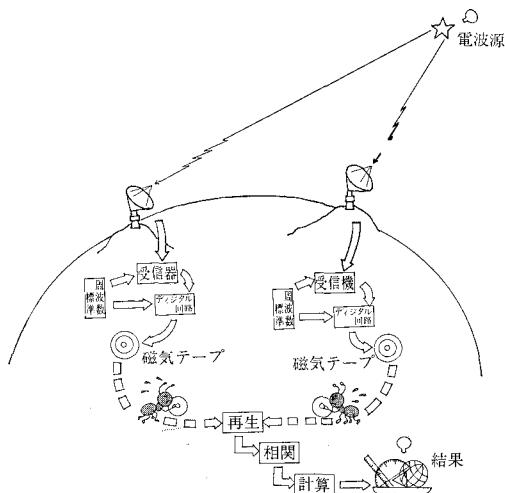


図 1 VLBI とは？

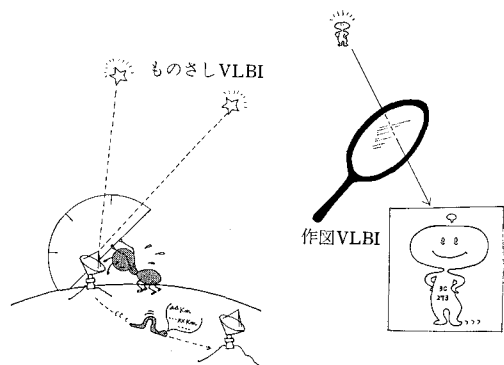


図 2 ものさし VLBI と作図 VLBI

\* 緯度観 Mitsumi Fujishita: Astrometric and Geodetic Very Long Baseline Interferometer (図=Kazuko Kikuchi)

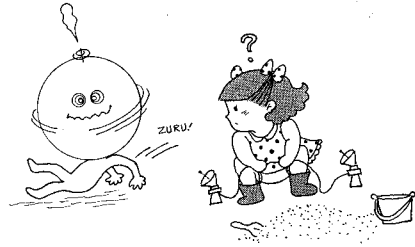
C. ものさし VLBI では電波の伝搬の様子をモニターする必要があること。すなわち2つの周波数で受信することによって伝搬路のプラズマの影響を除いたり、水蒸気ラジオメーターを使用することによって地球大気内の水蒸気の影響を除いたり、さらに局内遅延時間測定装置によってケーブルの伸びなどの影響を除くことを行います。

D. ものさし VLBI のアンテナの設置場所はそれがアンテナ間の距離も測定するため、地殻変動や大陸移動の観点から、あるいは光学観測など他の観測所との結果の比較といった観点から選ばれます。

ところでものさし VLBI では図3の様なデータ処理の流れとなっています。これも一般的かつ原理的にはということですが、例えば遅延時間を求めるためには各アンテナで記録されたデータを集めてその相互相関を求めます。これをフーリエ変換し相互相関スペクトルとします。この位相を周波数で微分して群遅延時間を求めます。この群遅延時間というのがものさし VLBI の直接の測定量です。これは天体から出た雑音電波が2つのアンテナの間にどれだけ時間の差で届いたかということの意味する量です。半日とか1日の間でいくつかの電波源を時間を変えて何回か観測することによって、いくつかの群遅延時間が求められます。この群遅延時間は電波源の位置、2つのアンテナを結んだ線(ベースライン)の長さや方向、その時の地球の回転軸の位置などで表現されます。そこでこれらの観測方程式を作り、群遅延時間を入れて解くことによって必要な量を求めるのです。これがものさし VLBI の原理です。

3. ものさし VLBI の現状

VLBI は 1961 年にソビエトで考えられたそうですが、1967 年にアメリカの 2 グループとカナダの 2 グループ



が別々に実験に成功しました。ものさし VLBI としての最初はカナダのアルゴンキンパーク電波観測所とプリンスアルバートレーダー研究所の間、約 2000 km を測定したのが最初であろうとされています。ですから 1967 年から数えても今年でまだ 16 年たったところということになります。この間アメリカでは信号をデジタル化して磁気テープに記録する方式を改良して来ました。この記録の方式によってマーク I、マーク II、マーク III と分類されています。VLBI の 1 つのポイントはぼう大なデータをどの様にして相関器へ伝えるかということにあるものですから、この方式が分類の対象となっているわけです。マーク I 方式は最初に使用された方式で、電子計算機に用いる磁気テープに直接記入するものです。しかしこれでは記録できるデータがあまり多くないので次のマーク II 方式が考えられました。これはビデオテープレコーダーを用いて記録するもので、約 6 倍の記録ができる様になりました。マーク III 方式はこれをさらに改良したもので、業務用ビデオテープを使用して最大でマーク II 方式の 28 倍の記録ができるものです。現在マーク III A とかマーク IV とか呼ばれる。さらに多くのデータの記録できる方式に改良中です。マーク III 方式を用いて地球の回転運動を連続的に観測するために、ポラリスと呼ばれるネットワークが建設されています。アメリカ国内のフォートデイビス、ボストン、リッチモンドの 3 局から構成されています。現在リッチモンドを除いて他は完成しています。また、アメリカ、オーストラリア、スペインにある深宇宙探査用の地上局では、地上の通信回線を用いてデータ通信を行い VLBI 観測をしています。これはブロック I と呼ばれています。現在マーク III 方式と互換性のあるブロック II 方式へと改良されているはずですが、さて、ものさし VLBI には固定局と呼ばれるものと、移動局と呼ばれるアンテナを車に積んであちこち動き回れる方式のものがあります。アメリカでは西海岸にあるサンアンドレアス断層の動きをこの移動局で観測しています。その場合相関を取る相手の局は固定局です。この移動局はエアリーズと呼ばれていまして、現在 3 台あります。最初のは 9m、2 番目のは 4m、3 番目のは 5m の直径のアンテナのものです。いずれもマーク III 方式で記録をします。これはオライオンという名で商品化され

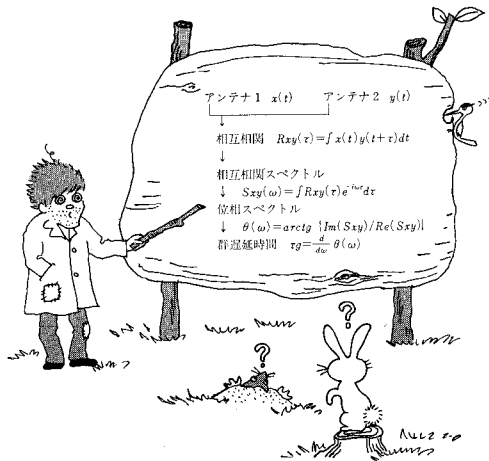


図3 ものさし VLBI のデータ処理

ています。ところで今までの記述では天体電波源を見ると考えていたのですが、単に地上の長さを測るだけならば人工衛星を使った方が電波が強い分だけ有利なわけです。そこでアメリカでは汎地球測位システムの人工衛星を用いた移動用の装置が開発されています。2種類あって、1つはマクロメーターと呼ばれるもので背中に乗せて運べる程度の大きさのものにすることを旨として開発されたものです。これは前にはマイティマイツとガバックバック VLBI と呼ばれていたものの商品名です。1980 年に行われた実験では約 100 m を測って 5 mm から 7 mm の内部精度が出ました。もう1つはシリーズと呼ばれるもので直径 1.5 m のアンテナを持つものです。1982 年に行われた実験では 2.8 m を測って内部精度は 2~3 cm でした。図 4 にオライオン・マクロメーター・シリーズの様子を示します。他の国の様子ですが、カナダでは 1967 年の実験以来、受信した電波をデジタル量としないでビデオテープに記録するアナログ方式を改良中です。次に中国では上海天文台で開発が進んでいて、マーク I に相当する方式で 1979 年に干渉させることに成功しました。日本では郵政省電波研究所で開発が続けられています。このシステムは K-1, K-2, K-3 に分類されます。K-1 はアメリカのマーク II に相当するもので 1977 年に実験が行われました。K-2 は 1977 年より開発されたもので実時間 VLBI と呼ばれる方式のものです。これは受信したデータをただちにマイクロ波通信回線を用いて相関器に送り、群遅延時間を求めるものです。K-3 はマーク III と両立性のあるもので、1983 年に行わ

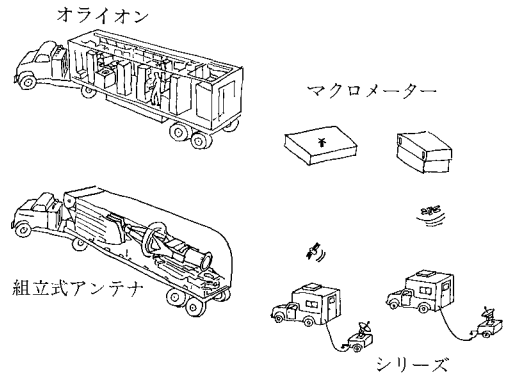


図 4 オライオン・マクロメータ・シリーズ

れる日米合同 VLBI 実験に用いられるものです。この K-3 の物理モジュールと呼ばれるソフトウェアは私の所属する緯度観測所で作っています。また、建設省国土地理院では、直径 5 m の可搬性のある VLBI を開発中です。表 1 に天体電波源を見る VLBI の各種のデータ記録又は伝送の方式をまとめました。

4. メリット計画

1983 年 9 月から 14 カ月間メリット計画が行われようとしています。このメリット計画というのは、国際天文学連合と国際測地学・地球物理学連合の支持のもとに行われる国際的な研究観測計画のことです。メリット (MERIT) とは「地球回転の監視と観測・解析の各技術間の相互比較」という意味の英語の略記です。さてこの

表 1 各種 VLBI のデータの記録又は伝送の比較

	カナダの方式	アメリカマーク I	アメリカマーク II	アメリカマーク III	アメリカブロック方式	日本 K-1	日本 K-2	日本 K-3	中国の方式
観測周波数	10.7 GHz	7.85 GHz	Sバンド	S, Xバンド	S, Xバンド	4.180~4.182 GHz	4.030~4.132 GHz	2.2~2.4 GHz 8.1~8.6 GHz	1.4 GHz
受信チャンネル数	(1)	6(最大 8)	1~2	1, 7, 14, 28	S 3~4 X 5~6	1	5	7~14	1
1チャンネル周波数幅	4 MHz	360 kHz	2 MHz	125 kHz~4 MHz	250 kHz	2 MHz	2 MHz	2 MHz	62.5 kHz
記録又は伝送の方式	アナログ	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル	デジタル
レコーダ	IVC 825	Ampex TM-12	RCA VDT 501	Honeywell M-96	) 実時間伝送	Toamco VR 489	) 実時間伝送	Honeywell M-96	不明
テープ幅	1"	1/2"	1/2"	1"		1/2"		1"	1"
使用電子計算機	不明	IBM 360モデル 50	HP 2100シリーズ	HP 1000シリーズ	VAX 11/780	NEAC 3100	NEAC 3200	HP 1000シリーズ	DSJ-131
その他	(米)オーエンスバレイ, (英)チルボルトンでも使用	1978年5月廃止			マークII準拠 ブロックIIはマークIII相当	マークII準拠		マークIIIと両立する	マークI相当

本計画に先立って1980年8月から3カ月に亘って予行演習が行われました。ものさし VLBIはこの時期に先のポラリスの2局やアメリカ・ヨーロッパのいくつかの局が参加しすばらしい成果を出しました。これらのうちからロバートソンとカーターの論文にある結果を引用します。参加局はアメリカではポラリスの2局(フォートデビスとボストン)とオーエンスバレイ電波観測所、イギリスのチルポルトン観測所、ドイツのエフェルスベルグ観測所、スウェーデンのオンサラ宇宙空間観測所でした。マークⅢ方式を用いて期間内に1週間の観測を2回行いました。記録したデータテープはアメリカへ運び処理されました。その結果、極運動と呼ばれる地球の回転軸の移動は1ミリ秒角から3ミリ秒角の精度で、又、回転速度の変化は50マイクロ秒から90マイクロ秒の精度で観測されました。これは1日の値としては従来の光学観測と比べて2桁程良い精度です。また観測局間の距離は、長い方ではオンサラとフォートデビスの間が7940732 m 32 cm 1 mm ± 7 cm 2 mm と測定されました。短い方ではフォートデビスとオーエンスバレイの間が1508195 m 37 cm 5 mm ± 1 cm 7 mm でした。全く驚くべき精度です。メリット計画の本観測ではどんな成果が出るか今から楽しみです。

### 5. ものさし VLBI の 1 つの意味付け

ものさし VLBIは高精度の測距・測角をするということなので実に様々な応用分野があります。項目だけを上げますと太陽・木星による相対論の検証、銀河回転の検証、地球の回転運動のパラメーターの決定、人工衛星の軌道決定、測地網の規正、地球潮汐の観測、大陸移動の観測、地殻変動の観測、時刻同期などです。しかしながら私は、ものさし VLBIとは結局、天球基本座標系と地球基本座標系を高精度で定めそしてそれらを高精度で結合するものだと思うのです。今のところ天球の座標系はFK 4と呼ばれる私達の銀河に属する約1500個の星で作られています。そのため銀河の回転や星の固有運動によってこの座標系は歪んできています。ものさし VLBIでは宇宙のスケールで考える程遠方にあるQSOの位置を1ミリ秒角の精度で決めることができます。QSOには固有運動がないと考えられますので長期に亘って安定な座標系が保たれるでしょう。これの持つ学問的な意味は大きく、例えばこれと私達の銀河の星の位置を比較すれば銀河回転に関する知識はかなりはつきりしたものとなるでしょう。さて地球ではその座標系はいくつかの天文観測所の採用された経度と緯度から作られています。緯度に関して言うならば国際緯度観測事業の5つの観測所の1900年から1906年の各々の平均の緯度を決めてしまい、これから国際慣用原点と呼ばれる極を定めています。

す。この5つの観測所は日本の水沢、ソビエトのキタブ、イタリアのカルポフォルテ、アメリカのゲザスバーグとユカイヤです。ところが地殻変動などがあるため、これらの観測所の相互の位置は不変とは考えられません。実際そのためと思われる極の永年移動という現象が見つかっています。今までの観測方法では個々の観測所の位置の変化が出せないでその補正ができません。従って地球の座標系も歪んでいることでしょう。さて大陸移動の平均速度は年間約10 cmと言われていますからもしこの速度で連続的に動いているものなら、もしさし VLBIでは1年を待たないで移動が見つかると思われます。適当な大きさの局地的なVLBIのネットワークとこれらを結合する全地球的なネットワークがあれば局地的な地殻変動や大陸移動を決めることができ、より合理的な地球座標系の定義ができるものと思われます。この両方の座標系がしっかりと決められれば宇宙と地球に関する学問が大きく進歩するでしょう。

### 6. おわりに……VLBI という名前

VLBIは日本語では超長基線電波干渉計と呼ばれることが一番多いかと思います。でもその定義は一般には「独立な局部発振器を持った電波干渉計」とされていますので、素直な名前は独立局発電波干渉計といったところでしょうか。実際、超長基線は可能ですが本質ではありません。任意の基線長とすることができるというのが本質でしょう。英語ではどうでしょうか、まず略語ではやはりVLBIが一番多く使用されています。私の1318編VLBIの関係の論文を集めたリストでは、その表題にVLBIと書いてあるものが242編ありました。その他ではVLBが6編、LBIが1編です。ではVLBIの中身はというとVery Long Baseline InterferometryとVery Long Baseline Interferometerの2種類がある様です。前者は57編、後者は19編でした。これはソフトを見るかハードを見るかといった感覚の差なのでしょう。日本語でも超長基線電波干渉法という表現があります。さて日本語では「電波」の2字がはいって使われることが多い

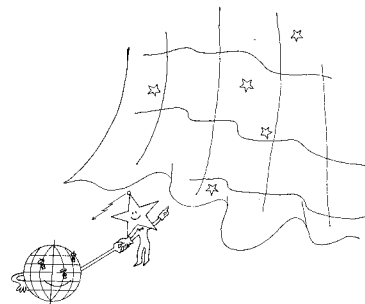


図5 VLBIは地球と天球を結ぶ

のですが、英語ではどうでしょうか。VLBRI はありませんが Radio を入れたものは 17 編あります。しかし日本語で一番多く使用されている超長基線電波干渉計の原語と考えられる Very Long Baseline Radio Interferometer は 1 編しかありませんでした。英語ではその他に Very を付けないものが 33 編あり、日本語でも単に長基線電波干渉計と呼ぶことがあります。次にこれは多分ロシア語から英語へ訳されたものと思いますが Superlong Baseline Interferometry という表現がありました。あと特別な表現として Transatlantic Long Baseline Interferometer, Trans-Pacific Interferometer, Intercontinental Radio In-

terferometer などというのがあります。日本語でも大陸間電波干渉計といった表現があります。中国では VLBI は甚長基線干渉測量方法と呼ばれています。ものさし VLBI と作図 VLBI を分割した名前のように思われます。さて 1982 年の夏にフランスで開かれた研究会の最初の案内状では Very Large Baseline Interferometry となっていて、ついに広がりを持ったネットワークで考える時代が来たかと思ったのですが、次からのものでは Long に訂正されていました。それと、トム・クラークさんが Very Low Basic Intelligence と言ったそうです。

## 書 評

### 天体軌道論

長谷川一郎 著

(恒星社厚生閣, 昭和 58 年 1 月 10 日発行, 407 頁, 4800 円)

最近のパソコンの普及は天文計算を身近なものにし、その結果、天文計算に興味をもつ計算アマチュアが非常に増えてきている。彼等が好んで実行する計算のひとつに、太陽系内の小惑星、彗星などの軌道要素を求める、「軌道決定」の手続きがある。しかし、これらの内容を含む「軌道論」は位置天文学の中でもかなり特殊な分野で、大学でもめったに講義されず、ましてそのテキストとくときは、日本語で書かれたものはほとんどないと同然であった。これから軌道論を学ぼうと志す人にとって、今まではたいへん不便な状況であったといえる。

本書は、この軌道決定の手続きを中心とし、軌道力学に関する内容を集大成したもので、著者長谷川氏の永年の研究の結晶である。そして、アマチュアのみならず専門家にとっても便利な形で本書が出版されたことは、まことに時宜を得たものであり、位置天文学に関心をもつものの一人として、喜びにたえないことである。

本書は、付録を別にして 15 章で構成され、大別すると 1~5 章は基礎事項、6~9 章が中心部分の各種の軌道決定法、10 章以降が軌道改良、摂動計算など軌道計算に関する付加事項である。どの章も豊富な文献を土台にして、式の変化をていねいに追って説明があり、計算例も示されて、親切な書き方である。一般に軌道決定の計算手続きは初心者には非常にわかりにくく、テキストに沿って計算を行っても、はじめは計算の意味も内容もちっともわからずやみくもに進むという場合が多い。私は、本書に、計算の進め方に対してなるべく見透しのよい説明を大いに期待したのであるが、その点には多少の

不満がのこった。それでも、公式集のまとめがあるので、初心者でも本書をたよりに計算することは十分に可能と思われる。

なお、本書の第 1 章は、「天体の軌道決定には、天球上の天体の見える方向を観測し、それと、その観測が行われた時刻とが用いられる。」というなんとも抵抗の大きい文章ではじまる。これは例として挙げただけであるが、本書の中にはこの流儀の不用意な言葉の使い方、構文の不完全さが各所に見られ、読みにくい。今後当分我が国にただひとつの軌道論のテキストとして使用されるであろう本書のために惜しまれる点である。また 51 ページの楕円の図は焦点の位置が悪いので、近日点が距離の極大の点になってしまっている。誤解をされないよう、次の版ではぜひ訂正していただきたい。(長沢 工)

## お知らせ I

### 名古屋大学理学部物理学教室教官公募

1. 公募人員 助手 1 名
2. 所属部門 天体物理研究室 (A 研)
3. 専門分野 天体宇宙物理の理論
4. 着任時期 決定後できるだけ早い時期
5. 任 期 5±2 年
6. 提出書類
  - 履歴書 ○ 研究歴 ○ 業績リスト
  - 主要論文別刷 ○ 研究計画
  - 推薦の場合は推薦書
7. 公募締切 1983 年 4 月 30 日 (土)
8. 宛 先 ① 〒464 名古屋市千種区不老町  
名古屋大学理学部物理学教室  
永井ひろ美
9. 問合せ先 ② 同物理学教室  
藤本光昭  
電話 052-781-5111 内線 2427
10. その他 封筒に「応募書類在中」と朱書の上、書留とすること