

## 日本の VLBI 史（初期及び発展期）

「ハワイが年間 8cm の速度で日本に近づいている」とか、「地球の直径の大きさに相当する巨大電波望遠鏡の分解能で準星を観測した」、など耳にしたことがあるでしょう。大陸間の距離を cm 単位で測る能力を持ち、また、月に立つ人を見分ける分解能（ミリ秒角）で天体観測できるこの技術は VLBI と呼ばれ、1970 年頃からカナダや米国と並んで日本の研究・技術者たちが開発に挑み、日本で大きく発展した技術です。この資料では、初期及び発展期における基礎的な試験システムの開発から国際実験の成功まで 7 年に及ぶ悪戦苦闘の様子や、その後の世界を驚かせた数々の観測と成果を紹介します。

現在（2015 年）、日本での VLBI システムの開発開始から既に 40 年を経ており、当時の貴重な資料を残すため、旧郵政省電波研究所鹿島支所第 3 宇宙通信研究室のメンバーを中心にした「日本の VLBI の初期及び発展期の資料収集と記録を残す会」が 2013 年に結成されました。本資料は同研究所 OB、国土地理院などの関係機関（OB）や関連会社の方々の協力の下、会のメンバーによる編集により完成したものです。

平成 27 年 7 月

日本の VLBI の初期及び成長期の資料収集と記録を残す会

# 1. 日本における VLBI 技術のはじまりと K-1 システムの開発

河野宣之

## 1.1 NASA からのテレックス

20 世紀末から 21 世紀はじめにかけて宇宙・地球観測に大きな変革をもたらした VLBI 技術の日本への到来は 1971 年 5 月、米国 NASA から送られてきた 1 通のテレックスで始まりました。これ以前にも国内外の研究集会などで VLBI は話題に上げられていましたが、実際に日本での開発に動き始めさせた出来事としてはこのテレックスと考えられます。1.1 図がそのテレックスです。そこに書かれていた内容は、要約すると以下のようなものでした。

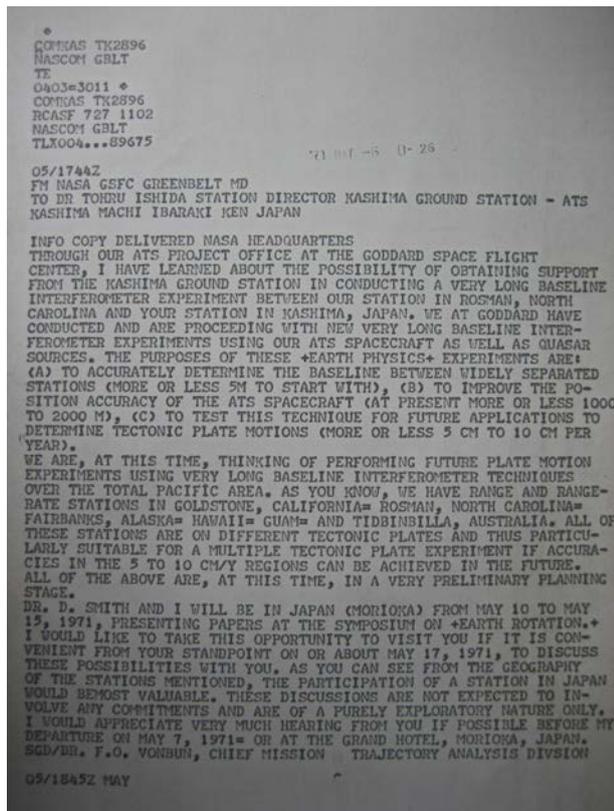
石田 亨博士 鹿島地上局所長 様  
NASA ゴダード宇宙飛行センター  
より

.....

私たちは将来、環太平洋地域にある地上局が参加して、VLBI という技術で静止衛星と準星の観測を計画しています。その目的は(A)数千 km 遠距離にある地上局間の距離を最初は 5m の精度で決め、(B) 静止衛星の位置決定精度を改善し (今は 1~2 km も誤差がある)、(C) 将来、プレート運動を誤差 5~10 cm できめることができる技術をテストすることです。日本にもぜひ参加してもらいたいと思っています。5 月 15 日に日本の盛岡に行く予定があり、そのついでに電波研究所に立ち寄って議論できれば幸いです。

.....

NASA ゴダード宇宙飛行センター・  
軌道解析部門長 F.O.フォンブレン



1.1 図 NASA の Vonbun 氏から石田鹿島支所  
長に送られてきたテレックス

このテレックスが準星とか地球物理に関係している文面から、当時東京大学東京天文台と電波で天体を観測していた天文グループ (川尻、尾嶋、河野) にコピーが配布されました。グループの中では、天体をミリ秒角で観測できそうな VLBI というものすごい技術がカナダやアメリカでテストされているという情報は天文関係者から既に流れていました。およそ半年前の 1970 年 10 月に鹿島支所で開催された「電波天文学に関する鹿島シンポジウム」で、鹿島支所のアンテナを使って VLBI 観測ができないか、議論されていたからです。何しろ、数千 km もある地上局間の距離を“とりあえず 5m の精度で決める”とか、将来、年間 5cm のプレートの動きを測定できる技術のテストをする、とか、多少関係しているグループでさえ「非現実的な夢の話」と考えざるを得ませんでした。

何はともあれ、このテレックスに応じて、電波研究所鹿島支所と周波数標準部で NASA との 2 つの会合が 1971 年 5 月 17 日と 1971 年 5 月 19 日に持たれました。

鹿島支所での会合の出席者は

日本側：

石田 亨 鹿島支所長  
森本 雅樹 東京大学東京天文台

NASA 側：

Dr. F.O.Vonbun Mission Chief: Trajectory Analysis Division, GSFC  
周波数標準部での会合の出席者は、

日本側：

佐分利 義和 周波数標準部長  
村主 行康 衛星研究部長  
松波 直幸 東京大学東京天文台

NASA 側：

C.F.マーチン 博士 NASA, Aeronautical Chart & Information Center

でした。鹿島支所の会合では水素メーザ原子周波数標準が話題になった。当時、水素メーザは周波数標準部に設置されていて“建物”で、鹿島に移動はとても無理と考えられたからです。周波数標準部でのこの会合で、米国では 1969 年に国内の局間で準星を既に VLBI 観測したこと、近い将来、日本を含めた実験を期待している、と NASA の希望が述べられました。そして、今後、26m アンテナや鹿島局の資料を提供するなどの協力が確認されました。



1.2 図 IAU シンポジウム“地球回転”の参加者に配布された記念品（文鎮）（河野所蔵）

ところで、周波数標準部の会合には東京天文台から電波天文関係者でなく、位置天文学

が専門の松波氏が参加しています。おそらく松波氏は JPL と研究面で深い関係があったことから、参加されたのではと思われます。テレックスにも書かれていたように、盛岡で開催された国際天文学連合 (IAU) の地球回転に関するシンポジウムは当時の岩手県水沢市にある緯度観測所が開催地組織委員会を受け持ち、岩手県の盛岡市で開催されたものでした。VLBI が 光学観測に変わり 2 桁も高精度の地球回転観測に取って代わる技術と予想され、VLBI に関連する幅広い技術を持つ、通信分野の研究機関が表舞台に立つことになったのは注目に値します。その後、地球回転の国際観測は NASA 主導の VLBI 観測 (IERS) に移り、光学による観測 (IPMS) は廃止に追い込まれました。1.2 図はこの国際シンポジウムの参加者に配られた文鎮です。写真にある数式は極運動の変動に Z 項を発見した木村博士にちなんだものです。この記念品が長年続いた光学観測の廃止と VLBI という新技術への移行を象徴するものになりました。まことに感慨深い限りです。

## 1.2 NASA との協力はすぐには進まず。

最初に述べたテレックスを受け取った石田支所長は 1974 年 1 月、ワシントンで開催された NASA 地上局会議に出席しました。会議に向う途上、ロスアンゼルスジェットの推進研究所 (JPL) に立ち寄りしました。JPL では VLBI 装置開発が盛んに行われていて、そのすさまじさに圧倒されたそうです。また当時、頭脳流出として話題になったカルフォルニア工科大 (カルテク) の金森博士からプレートテクトニクスの話や、サンアンドレアス断層の地震観測などの話を聞き、地震予知への電波技術の応用が今後の鹿島の研究の柱の一つになるであろうと考えた、と語っています。訪問後、ワシントンで開催された NASA 地上局会議に出席され、GSFC の VLBI の進捗状況を見、カルテク・JPL より遅れている印象を持たれたそうである。しかし、石田支所長ら電波研究所幹部は技術的には 1 歩先を進んでいる JPL より、GSFC との協力を選びました。その理由は、日本の技術開発はこれからであり、JPL と組むとイニシアチブを取られてしまう危機感を持ったようです (鹿島 25 周年回想録「パラボラと共に」参照)。また石田支所長はつぎのようにも回想しています。「GSFC を先に訪問して JPL より一歩遅れている GSFC の状況を知ってから JPL を訪問していたら JPL に対する対応も多少変わっていただろう」。実際、日本が先端技術を習得する時間を稼げたことから、この判断は正しかったと考えられます。

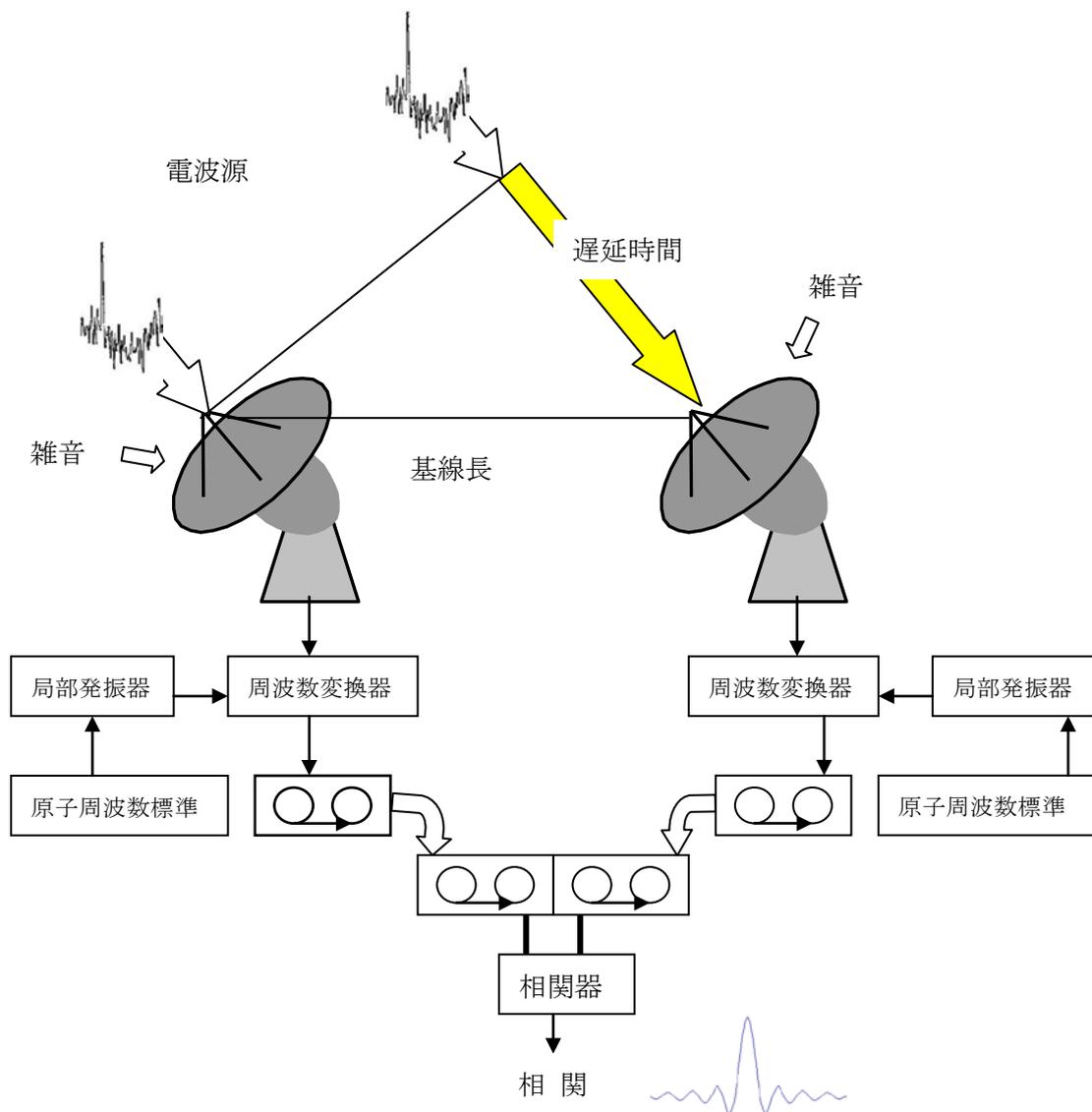
この理由以外に、鹿島では NASA 本部 GSFC と各種の宇宙通信実験を頻繁におこなっており、この協力関係の延長として VLBI も加える、あるいは既に協力関係があり、やりやすい、と考えたのではないのでしょうか。しかしこの後、数年は、NASA との VLBI 実験の実施などの急な進展はありませんでした。

これに対して、アメリカの天文グループはオーストラリアなどに Mark-II システムを持ち込み、米国との間で 1969 年に VLBI 実験を実施しています。日本の鹿島に持ってこなかったのは、鹿島が 4GHz 帯の受信機しか揃えておらず、VLBI で受信する電波天文用 S/X 帯とは異なっていたからと思われます。宇宙通信実験が目白押しの当時、これらを中止して 26m アンテナを電波天文用周波数の受信に変更することはありえないことでした。

## 1.3 VLBI の原理

これから VLBI システムの開発の歴史を辿っていきますが、VLBI とはどのようなものか少しだけ説明しておきます。だいたいどのようなものかわかれば完全に理解しなくてもよいで

す。3.1 図に示すように、電波を出す天体を遠く離れた2つのアンテナ・受信機で同時に受信します。その信号を一旦磁気テープに記録しておいて、後で持ち寄って再生し、2つの信号が記録された時刻の差（遅延時間：ちえんじかん）をもとめる装置です。2つの受信信号はもともと同一信号ですから、記録された2信号を再生して掛け合わせると、2つの信号がピッタリ遅延時間だけズラしたとき、その結果は大きな値になります（相関が最大）。でも2つのアンテナ・受信機が記録する信号には記録するまでに互いに異なるいろんな雑音が入ってしまって、掛け算の結果は大きなピークにならず、実際には低い山になってしまいます。強い電波を出す電波源（以後、電波星）を受信する場合でも、互いに異なる雑音の強さのほう数十から数百倍にもなります。ですからできるだけ強い天体を受信したいのです。



3.1 図 VLBI の原理

VLBIで受信する信号について大事なことがあります。2つの信号がピッタリ一致したところを探すのですが、いろんな周波数成分からなるめっちゃくちゃな信号（広帯域雑音）の場合の方が相関のピークが鋭く、遅延時間を正確に求めることができます。例えば数百MHz（1億ヘルツ）の広帯域雑音を受信するとおよそ0.1ナノ秒（100億分の1秒）の正確さ（精度）で遅延時間を測ることができます。これは光や電波がわずか3cm伝わる時間です。ですから、この正確さで遅延時間を計ると、3.1図の黄色い矢印の長さを3cmの精度で測定できることとなります。つまり、人工衛星や電波星を大陸間で観測すると、その距離を3cmの精度で測ることができます。でもそのためには2局に置いた時計や受信機が正確に働いていなければなりません。例えば0.1ナノ秒の精度で測るには、両局の時計は観測時間中にその差が0.1ナノ秒以上ズレないものでなければなりません。このような時計は原子周波数標準といわれ、必ず必要になります。受信機や記録なども大変な安定性と高速性が要求されます。このように、VLBIシステムは先端技術の粋を集めた、しかもおおきな装置なのです。

#### 1.4 VLBIで受信するのは雑音

さて3)で述べたように、VLBIで100億分の1秒の精度で遅延時間を求め、大陸間の距離差を3センチメートルの精度で求めるには、1つの電波源から出た数億ヘルツ（数百メガヘルツ）もの広帯域雑音（当時のTVの画像記録するときの数十チャンネル分）を受けなければなりません。これだけ広い帯域の信号は人工のものでは衛星に搭載されている低雑音電力増幅器に信号を入力しないときに出力される信号とか、それほど多くありません。一方、電波を放射する天体電波源の多くはこのような広い帯域の雑音を放射しています。ところが地球から遠くにあるため、電波の強さは衛星に較べて遥かに弱くなります。だからできるだけ電波をいっぱい集める大きな電波望遠鏡（パラボラアンテナ）が必要になります。

ところで星から来る電波はきれいな波形をした信号でなく、まるでめっちゃくちゃな波形をしている雑音です。こんな信号が受信したい信号なんてチョット変ですよ。でも地球上の異なる大陸で受信する雑音は両方とも数十億光年離れたところから放射された同じ雑音ですから、うまく時間をずらしてやると波形は似通っていて、相関があるはず。ですから相関を求める場合は雑音ですが信号（相関のある雑音）なのです。

大陸間の距離を求めたり、地球の回転を細かく調べる目的の観測では、準星（QSO）や電波銀河を観測します。準星は通常、数億光年以上も離れた距離にある強い電波を出す電波星です。どうしてこのような遠くの電波星を観測するのでしょうか。例えば大陸間の距離を数cmの高精度で観測するVLBIでは、角度1ミリ秒（1ミリ秒角）以上広がった電波星を観測すると理想的な相関が得られなくなります。角度1ミリ秒というのはおよそ月に立った人を地球上から見た時の角度です。つまりチョットでも広がりのある電波星はダメで、広がりの極めて小さい電波源でなければなりません。遠くにあるものは小さく見えます。ですから数億光年以上も遠くにある電波星QSOは多くの場合、小さく見え、その割りに強い電波を出すので、VLBI観測にうってつけなのです。

#### 1.5 電波天文グループは鹿島支所の“お荷物”

少し話がそれますが、VLBIがどのような環境の下で鹿島において開始されたのか理解

してもらうため、VLBI 開発が始まる直前の鹿島の状況を述べておきましょう。当時鹿島支所の主研究業務である宇宙通信研究のための実験は数多く実施されていました。これに加え、東京大学東京天文台と鹿島支所電波天文グループ（川尻、尾嶋、河野）が協力して鹿島支所の 30m アンテナその後 26m アンテナを使った日本の電波天文学が細々とおこなわれていました。宇宙通信実験と電波天文観測がおこなわれている一方で、東京天文台三鷹では分子が出す電波（分子線）の観測のための 6m アンテナの建設が進んでいました。更に、日本の電波天文研究者悲願の大型アンテナを野辺山に建設する計画が実現できそうな情勢になっていました。このような中で鹿島支所の VLBI システム開発が芽生えたのです。これらが対比できるように、5.1 表にまとめて示します。

1971 年に NASA と始めて議論された後、1972 年に電波研究所として次年度予算要求を出そうという話が持ち上がり、これに対応するため、急ぎ VLBI の勉強会が始めることになりました。当然のことながら、そう簡単に予算が取れるはずはなく、VLBI で予算を確保できたのはなんと 8 年後の 1979 年でした。この 8 年間のうち前半の 4 年間は東京天文台との電波天文観測がおこなわれていました。この観測は“電波研究所の本来の業務ではない”、との声は喧しかったのですが、当時の湯原所長の英断で 1975 年に研究所内の予算で VLBI システムを開発する決定が下され、電波天文観測を縮小・廃止し、電波天文グループが VLBI システムの開発に専念していくことになりました。

	VLBI	宇宙通信	日本の電波天文学
1969(S44)		ATS-1によるSSB通信実験 &SSCC雲写真取得実験	「45m大型電波望遠鏡計画」天文研連で採択される
1970(S45)	鹿島シンポジウムでVLBI日本実施が話題になる	ATS-1によるPCM通信実験ISIS観測	日本学術会議で建設推進の決議 三鷹に6mミリ波アンテナ完成
1971(S46)	NASAから石田支所長にVLBIの協議提案のTELEX	ATS-1によるSSRA通信実験	
1972(S47)	VLBI勉強会開始 (text:Continental Drift, etc.) (VLBIで次年度予算要求を予定のため:獲得7年後)	TD-1Aテレメ受信	6mアンテナの受信機製作
1973(S48)	予算×	各種衛星通信実験	
1974(S49)	予算×	ATS-1管制開始	6mアンテナでメチルアミン分子の発見 12月国土地理院40cmφレーザ望遠鏡 2月堂平に3.6mφ月レーザ望遠鏡設置 12月水路部・地理員SLR試作機鹿野山 地理員鹿野山でNNSSDブロー位置測
1975(S50)	VLBIシステム開発開始(K-1) 実行予算1.1千万	ATS-1による時刻同期実験	
1976(S51)	VLBIシステム開発(K-1) 実行予算1.1千万	CS/BS庁舎完成	
1977(S52)	国内基礎実験成功、K-2開発開始、3研発足 ECS開発費	ETS-2打ち上げ、CS打ち上げ ECS実験設備建設	地理院、水路部SLR試験するも不検出 測地学審議会が第4次地震予知建議 6月:名大とフアラデー回転の観測
1978(S53)	K-2開発 ECS開発費	CS/BS通信実験・管制開始 ECS実験設備建設	45m、ミリ波干渉計の建設開始
1979(S54)	K-2運用開始、VLBI技術開発5ヵ年計画(K-3)開発 初の予算獲得	CS/BS通信実験・管制開始	

5.1 表 VLBI システム開発と宇宙通信実験および電波天文施設建設計画

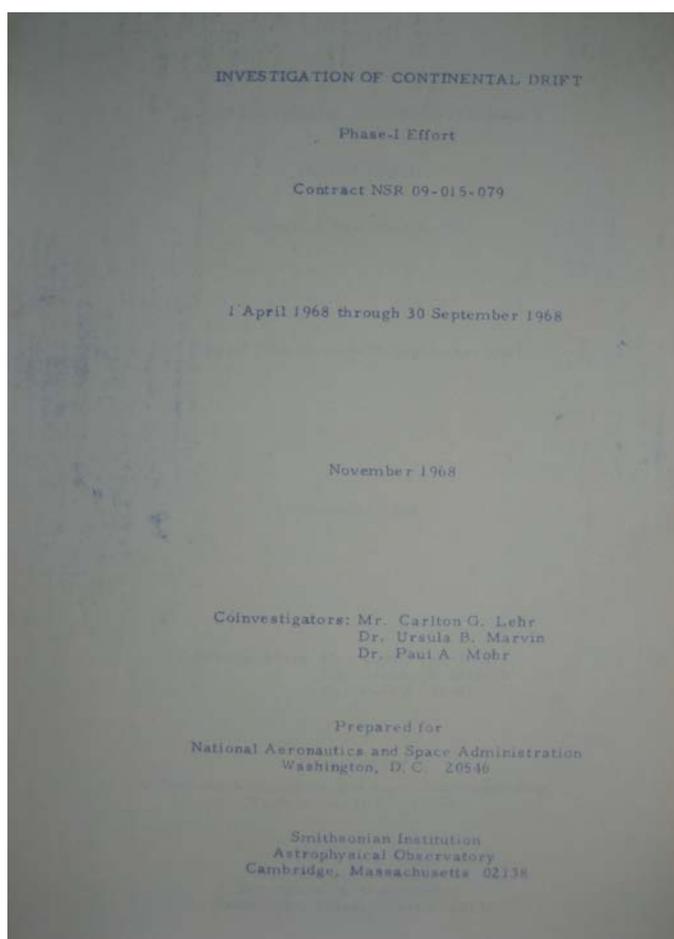
このように、VLBI システム開発に必要な大蔵省予算はなく、宇宙通信の研究などで獲得した一部をまわしてもらって(研究所内の予算)、なんとか進めていくような状況でした。ご存知の通り、全ての研究者・グループは限られた予算で最大の成果を上げようと努力しています。宇宙通信の研究者にとって、苦勞して取ってきた予算は研究所本来の業務以外

の電波天文観測や、海のものとも山のものとも分からない VLBI に使われるのには、耐え難かったのは当然でしょう。

尾嶋さんと三木さんは低雑音受信機などの専門で宇宙通信実験に不可欠の人でした。これに反し、川尻室長と河野さんは宇宙通信プロジェクトから金をくすめて、よそ様の仕事をしているとのレッテルを張られる羽目になっていました。当然、矛先は2人に集中し、特に川尻さんは室長でもあったから、宇宙通信の研究者から事あるごとに“口撃”を受けていました。“身内”の河野までもが川尻さんに八つ当たりをときどきしたので、川尻さんは四面楚歌であったでしょう。河野さんは酒好きでした。酒の場ではよくプロジェクトや研究テーマが議論になり、VLBI の予算に関して罵倒を浴びせられました。ある支所長が酒の席で VLBI について非難ではないが、問題点を指摘しました。河野さんはあろうことか猪口の酒を支所長の顔に浴びせてしまいました。今なら、即“くび?”であったろうが、支所長は百戦錬磨の方で、河野さんをたしなめるだけでその場を納めました。70歳になろうとしている河野さんは今でもこの行状を反省しています。

## 1.6 VLBI 勉強会

1972年7月、輪番で解説するセミナー方式で勉強会が始まりました。カルテクに留学していた尾嶋さんが多くの VLBI 関連文献を持ち帰り、また東京天文台経由で別の文献も集まっていました。参加者は川尻、橋本、尾嶋、河野さんの4名でした。テキストは NASA とスミソニアン天文台で纏められた “Investigation of continental drift” で Phase I, II, III の3部作です。これにサイエンス誌や Radio Science 誌に掲載された論文が加えられました。一言で言うと、“よく分からなかった”。例えば受信機だと S/N、Noise figure、Gain など、始めての言葉ばかりでした。データ処理では FFT、パワースペクトル、相関関数などは学生時代に一応習ったが、使った経験はなく、かなり戸惑いました。信号処理については、宇宙通信が専門の横山さんがリーダーで開いていた Rice の雑音理論のゼミが役立ちました。クラウドの有名な Radio Astronomy のゼミは参加者の研究生活の中で最も基本になる知識を教えてくれたのではないかと想像します。VLBI の概念を習得したのは、Rogers の



6.1 図 VLBI 勉強会のテキスト

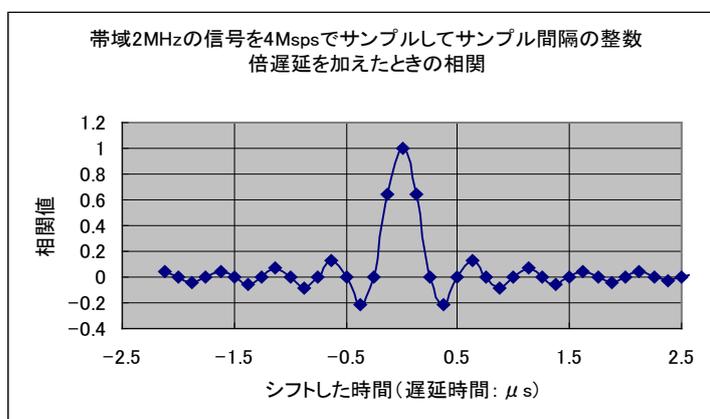
有名なバンド幅合成の論文を何度も何度も読んで、やっと理解したときです。ここまでに至るのに、2年ぐらいかかったかな？

### 1.7 負の相関 (専門以外の方は飛ばして読んでください)

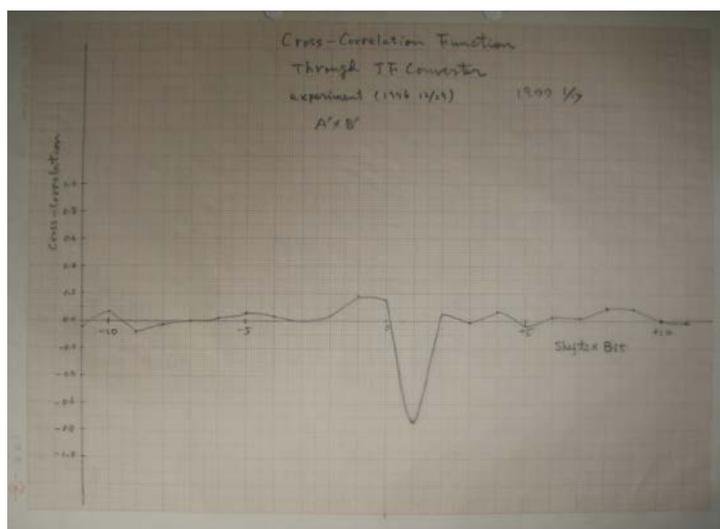
VLBIでは同じ発信源からの信号を遠く離れた2箇所で受信しますから、2箇所にその信号が到達する時刻の違い、別の言い方をすれば遅れ時間(遅延時間)だけずらせば、互いに異なる雑音が混ざっていても、同じ信号成分の相関が出るはずですが。広い帯域を持つ同じ信号の相関(自己相関関数)は7.1図に示すとおりです。雑音がある場合は最大値が1より小さくなるだけのはずですが。ところが、あるときアンテナで受信して、増幅して周波数変換をして、2つに分岐した信号の相関を取ると、教科書に出てくる相関関数(7.1図)を丁度ひっくり返した7.2図の相関が出てきました。このような相互相関関数は普通の信号解析やスペクトル解析の本には出てきません。

最初はこの理由がよく分からず、装置がおかしいのか、相関関数の計算に間違いがあると考え、あれこれ見直しました。この理由は有名なバンド幅合成の論文(A.E.E.Rogers, Radio Science, 1970)を読んで初めて理解することができました。

実は人工衛星や電波星から来る電波の受信は非常に高い周波数です。このため、そのままでは余りにも変化が早すぎて記録もできないので、2局ともある決められた周波数信号(ローカル周波数信号)を掛けた後、低い周波数にし(周波数変換)した後、サンプルしたり、記録したりします。このような周波数変換をせずに、アンテナで受けた信号を直接サンプル・記録し、一方をズラして直接相関を取るのであれば、7.1図のような自己相関関数になります。そこで、「周波数変換された後の一方の信号を遅延時間だけズラせる意味」を考えて見ます。これは周波数変換しない信号だけずら



7.1 図 教科書に良く出てくる相関関数



7.2 図 VLBI で得られた相関関数の例 (河野所蔵)

たいのに、ローカル信号もろとも遅延時間だけズラせることに等しくなります。このためローカル信号は遅延時間の分の位相だけズレてしまっているのです。もちろんローカル信

号は既に掛け合わされているので、ローカル信号だけズラさない分けにはいきません。このようにローカル周波数信号を掛け合わせて周波数変換する場合は、その後の信号をシフトするだけでは 7.1 図の相関は得られず、一方の信号に  $2\pi$  ローカル周波数  $\times$  遅延時間の位相だけ回転してやらなければなりません。この位相は遅延時間だけでなく、2 局の周波数標準の不安定さなど多くの原因で変化しますが主に観測するアンテナが載っている地球が動いたり、電波源である人工衛星が移動したりすると大きく変化します。この位相回転はフリッジ回転と言われています。

## 1.8 “VLBI 装置の試作で様子を見よう” が開発開始の理由？

VLBI 装置はすでに述べたようにカナダと米国で精力的に開発されていました。一方、オーストラリア、ロシアなどの多くの国々は「外国製品の導入」の道を選んだのです。その理由は、微弱電波の受信、精密原子時計、高速データの記録、高速データの処理、極めて複雑な解析ソフトウェア等、広範囲の研究・技術者・専門家を動員しなければ開発できない技術であり、これだけの分野の専門家を集めるのは難しい、と判断したのだと思います。ところが、日本は自力開発の道を選びました。

鹿島支所では主流の宇宙通信の研究をサポートする第 2 宇宙通信研究室の中の一部である電波天文グループ、このグループは鹿島支所のお荷物であったことはすでに述べましたが、彼らだけで開発するには荷が重過ぎることは誰が見ても明らかでした。開発に必要な人・金・組織すべての面で脆弱だったからです。にもかかわらず、電波研究所が VLBI 装置開発に踏み出したことについては、少し醒めた目で振り返って見ることにします。

前にも述べましたが、石田氏所長は VLBI は地球物理・天文・測地の画期的な将来技術になり得、電波研究所が進めるべき研究のひとつであろう、と考えていました。しかしこのような純粋な志からだけで開発を進めようとしたのではなかったと考えます。つまり、VLBI が将来、重要な技術になる可能性は認識しつつ、関連する部門は将来の自らのために関与しておいたほうが後々よいかかもしれないという思惑があったのではないのでしょうか。例えば、微弱電波の受信、高速データの記録・処理は鹿島で始めようとしている通信衛星や放送衛星との関連があります。少なくとも東京天文台に協力して電波天文観測をさせておくより自らの研究にプラスになり、“少しはまし”である（当時の船川支所長は電波天文グループを今後どうするか、悩んでいらっしやったことが前述の回想録に述べられています）。

一方、精密原子時計は周波数標準部で開発してきており、VLBI システムの心臓部でもあり、原子周波数標準の新たな利用分野が開け、今後の新しい周波数標準の開発に好影響を与えるであろうと考えたのは想像できます。しかし、基礎実験での時刻比較や原子周波数標準の提供、その後も続く VLBI システム開発に終始一貫してリード・全面的な支援していただいたのは、湯原所長や、佐分利部長を始めとする周波数標準部の皆さんであったことは明記しておかなければなりません。周波数標準部なくして日本の VLBI システムの開発は 100%あり得なかったといえます。

さらに、1970 年代後半は電波研究所を支えてきた電離層の研究も少し手詰まり状態が見えてきたころです。ひょっとして電波研究所の将来プロジェクトの一つになること、なきにしもあらず、少しだけつぎ込んで（1975,1976 年の 2 年にわたって 1,100 万円/年）様子を見よう、が VLBI 装置開発に踏み切った真相ではなかろうかと想像します。この決断を

したのは当時の湯原所長です。このように、最初の VLBI システムである K-1 開発の頃は、電波研究所には本格的に VLBI システムの開発をやろうといった意気込みはまだなかったと思います。「親のすねばかりかじっているどら息子を見かねて VLBI という仕事を、ほんの少しの期待を持って、やらせたら、“あにはからんや” ちゃんとした仕事を始めた」が真相と考えます。

日本の電波天文学の変遷から見るとまた別の見方ができます。もう一度 5.1 表で説明しましょう。鹿島支所 30m アンテナ、その後 26m アンテナでの準星や活動銀河の観測は K-1 の開発が開始される前年を最後に観測は行われなくなりました。この頃、東京天文台は東洋レーヨンの支援で 6m アンテナを三鷹に建設を始め、1972 年に完成し、ミリ波帯の分子線の観測が始まっていたからです。この結果、26m アンテナ使用の Continuum の観測は田原さんのグループ 4 人だけとなりました。更に 1970 年に日本学術会議で 45m 大型電波望遠鏡計画の建設推進の決議がなされ、文部省に早急に調査費をつけてもらうべく準備が始まっていました。調査費が付いたのは 1976 年でしたが、このような 3 つの動きが 1972 年ごろに生まれ、1974 年を最後に鹿島 26m アンテナを用いた Continuum の観測は幕を閉じ、一方、鹿島支所の電波天文グループは VLBI システムの開発に専念していったのです。

このように、鹿島での電波天文観測は日本の電波天文学初期における一定の役割を果たしましたが、日本の電波天文関係者が自力で電波望遠鏡を建設して観測し、自らの目的を達成できる大型電波望遠鏡を建設する時代に入り、鹿島支所の天文グループは、これまでアンテナを東京天文台の研究者と共に利用し、共同研究者として観測する状況が崩れてきたこと、つまり、鹿島支所での観測自体の必要性が薄らぎ、電波天文グループの存在意義を問い直さざるを得ない時期には入ったと言えます。当時、電波研究所の中で生きられる目標を自分で探さなければという焦燥感を電波天文グループの全員が禁じえなかったと思われま

す。日本が VLBI 装置を自力開発する道を選んだのは、「上に述べたお家の事情」もありましたが、電波研究所の幹部が「VLBI は将来、重要な技術になる」と判断して、この道を選んだことに違いはありません。先達の“先見の明”に敬服しなければなりません。

## 1.9 日本最初の VLBI システムの開発

1975 年から第 2 宇宙通信研究室は先に述べた他のプロジェクトで得た予算を回してもらい (1,100 万円/年が 2 年) 自力で VLBI 装置の開発に乗り出しました。アンテナ・低雑音増幅器・周波数変換器までは宇宙通信で使っているものを流用し、ビデオコンバータやハード全体にわたって尾嶋さんが設計・製作をリードしました。記録信号発生器と相関器は通信実験装置の流用は不可能で、開発せざるを得ませんでした。記録装置は米国 Mark-II VLBI システムを参考に開発することにし、東芝 AMPEX に頼み込みました。とうじの VTR はかなり高額でしたから、VTR2 台だけで契約額を超えたと思いますが、デジタル信号の記録用に東芝 AMPEX の西村さんが大改造してくれました。

記録信号発生器 2 台と相関器を VTR の残りの額で作ってくれるメーカーは勿論すぐには見当たりませんでした。日本通信機ならば技術レベルも高く、また一品料理もやってくれるかもしれないという情報が入り、すぐに電話をして鹿島に来ていただきました。なんとしてでも作ってもらおうと、現在だけでなく将来のことまで、あることないこと皆話しました。技術の平田さん・荒井さんと一緒にきた営業の青柳さんは、郵政省の仕事だからち

やんとした予算を準備していると思っていた、と後で告白してくれました。数日後、引き受けてくれるとの連絡があり、一堂、小躍りするほど喜びました。このような貧乏プロジェクトへの日本通信機や東芝 AMPEX の献身的な協力があって、わが国最初の VLBI のブレードモードモデル



(9.1 図:K-1 VLBI システムと後で名づけられました) は実験のおよそ半年前にできあがったのです。

一方、とりわけ相関器は有り合わせでできるものではなく、高橋富士信さんと新人の吉野さんが精力的に取り組み、日本通信機と協力して完成させました。また、2 信号の相互相関からコヒーレンス、パワースペクトル、位相スペクトルや遅延を推定するソフトウェアは河野さんと高

9.1 図 K-1 システムのバックエンド、一番左が VTR。左に立つのは吉野さん (川尻氏撮影)



9.2 図 電子計算機 NEAC3100 と平磯支所の皆さん。左から 3 人目が河野 (河野氏所蔵)

橋富士信さんが初の実験の 2 年前から開発をしてきていて、不十分ながら実験半年前には動きはじめていました。問題は相関結果を相関器から計算機にどうして取り込むかです。計算機は NEAC3100 という、現在のパソコンの能力よりはるかに劣る計算機が磁気テープ

装置 2 台・ラインプリンター・テレタイプ・操作盤などを従えて、ちょっとした実験室一杯に鎮座していました (9.2 図)。コンパイラーは磁気テープベースで簡単なプログラムでも数分かかってコンパイルしていました。相関結果の取り込みのソフトウェアは若い高橋富士信さんが機械語に近い言語を操って作り上げました。NEAC3100 にはコンソールがあり、動作している番地などが白熱ランプで表示されます。高橋さんはそれらの明暗を見て、スイッチを押し、計算機を止めてプログラムの変更をしていました。そばで見ている者には高橋富士信さんは、まるで手品師のようでした。若い研究者にこの話を時々します。すると、高橋富士信さんの“すごさ”にも驚くのですが、それより、そんなに動作の遅い計算機があったのかと感心しています。

### 1.10 製作会社の苦勞

電波研側の研究者は仕様や製作の条件を示して、必要な機能を持った装置を製造会社に作ってもらうパターンがほとんどです。予算が十分あれば製造会社側も相応の人を割り当て、担当者が議論しながら製作に当ることができそうですが、K-1 のような極めて乏しい予算の中で製作する場合は、最低の人数つまりたった一人しか担当することができません。受信機や技術のリーダーは営業の青柳さんでした。担当した技術者は一人ですので相談や議論する人がおらず、想像を絶する重圧を感じたであろうことは想像に難くないことです。記録信号発生器は平田さんが 1 年で 1 台目を作り、2 台目は平田さんが他の仕事が入りぬげざるを得なくなり荒井さんに渡したそうです。荒井さんは相関器も一人で製作していたので、大変だったに違いありません。しかし、相関器の開発が遅れ気味だったので、「キャッチボールをやるのに一人では無理ですよー」と高橋富士信さんから苦言……。営業の青柳さんは会社の工場に記録信号発生器と相関器の製作を担当することが決まったので頼みに行ったら、「こんな安い金で仕事を持ってくるな」とたいそう怒られたそうです。K-1 ではないが K-3 の開発で、川口さんは遠慮なく製作会社に望外な要求をたびたびしたそうです。会社の中では川口さんは「鹿島のとんでもない悪代官」、と呼ばれるようになったそうです。新しい装置の開発で製作する会社の技術者とそれを依頼する研究者が織り成す人間模様はどの場合でもそれはそれは感激ものですよ。

話は前後しますが、営業の青柳さんは国内基礎実験の後、丁度、風呂に入っているとき、川尻室長から成功の報を受けたそうです。喜びの大きさがこの記憶を今も呼び戻せるのだと思います。研究者だけで装置を作り、実験をしているのではなく、みんなの力でやれていることをしっかり自覚しなければいけません。

### 1.11 人間相関器

相関器が正常に動く前の K-1 開発初期の頃、2 台のサンプラーでサンプルした 0 又は 1 の信号を計算機 NEAC3100 に取り込み、2 つの信号の相互相関を極めて原理的な手法で計算したことを紹介しましょう。受信信号は VTR で記録される前に 1 ビットサンプルされます。つまり信号を極端に増幅すると台形のような波形になり、高いレベルを 1、低いレベルを 0、にデジタル化します。100 ページ以上も繋がったラインプリンターには 1 列目だけに 1 ビットサンプルされた結果の 0 又は 1 が並んでいて、20m 以上ある実験棟の端から端まで広げられました。河野さん、高橋富士信さん、吉野さんの 3 人の中から 2 人がペアになって、最初の行から 2 信号それぞれ 0 か 1 かを読み上げ、川尻さんがそれを聞いて 2

人の値が一致すると“相関あり”で“正”の字の1画を書いてゆく、2人の値が違っていると相関なしの“正”の1画が加えられます。2人が同時に読む行を1つつずらして（ラグ数を変える）行けば相関が計算できるわけです。言うなれば人間相関器です。

ところが何十ページも進んでゆくと、集中力がなくなって1,2行飛ばして読んでしまいます。ラグ数を間違えたのです。何行目から間違えていたかわかるはずはないので、初めからやり直さなければなりません。“正”を書いている川尻さんが大声で“しっかり見て読め”と怒鳴るのです。こんなとき、3人は他人の失敗を“そんなに咎めるべきでない”と自分の非は棚に上げて、内心ひどく川尻さんを恨みました。閻魔様つまり川尻さんの地獄から解放させてくれたのは相関値を取り込むNEAC3100のソフトウェアを開発した高橋富士信さんでした。

### 1.12 国内実験の相手局

K-1の開発は始まったものの、VLBIは2地点で同時に受信した信号の相関を取ることで始まります。従って1局だけでは実験はできません。受信周波数は宇宙通信の4GHz帯であったのでこの周波数帯を持つ局に限定されます。いきなり外国局との実験は難しく、国内で大型アンテナと4GHz帯の受信機を兼ね備えた局を持っているの



12.1 図 日本電電公社 横須賀通信研究所 12.8m アンテナ  
(吉野所蔵)

は当時の電電公社とKDDだけでした。KDDはインテルサットでの宇宙通信を業務としており、高萩に休んでいるアンテナ・施設もあったのですがすぐに使えないなど、相手局探しは容易ではありませんでした。当時の船川支所長は一計を案じ、当時の電電公社・横須賀通信研究所（以下横須賀通研）が所有する実験用アンテナ・受信施設の借用を取り付けてくれました。われわれ天文グループは婚約者が決まった気分で、たいそう喜んだものです。

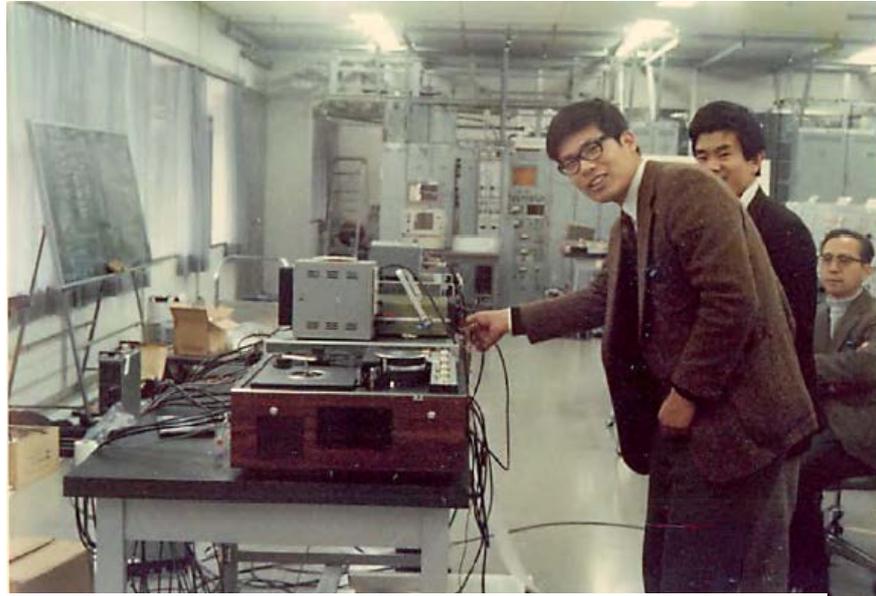
実験準備のため皆で横須賀通研の見学に行きました。その施設は、多くの測定器や研究・技術者の人数、豊富な実験装置などどれを取ってみても鹿島支所を凌いでいることを受け入れざるを得ませんでした。私はまだ若くて日本の通信研究の状況を理解しておらず、郵政省は勿論新しい宇宙通信技術の実験で大きな成果を上げていたが、米国のベル研究所を目標にしていた横須賀通研と電電公社電気通信研究所は日本の通信研究の総本山として君臨していることを始めて認識しました。鹿島支所の宇宙通信グループのメンバーで天文グループを批判する人がいましたが、日本のトップレベルでの比較になると色々と事情があるのだな、と安堵の感を禁じえませんでした（宇宙通信グループの方々にはすみません）。

何はともあれ、船川支所長のご尽力で鹿島26mアンテナの相手も決まり、相手局を想定

して準備が可能になってきました。

### 1.13 実験準備

VLBI は 2 局で独立に受信した信号の相互相関から遅延などの量を推定します。しかし相手局のアンテナや受信機を鹿島まで持ってきてテストすることはできないので、両局ともアンテナと受信機は正常に動作すると仮定して、アンテナ・受信機で受信した信号を



13.1 図 実験準備をする左から尾嶋さん、小池さん、小林さん  
(吉野所蔵)

VTR に記録する信号に変換する以降の装置のテストしかできないのです。前者はフロントエンド、後者はバックエンドと呼ばれています。そこで、26mアンテナ・受信機で受信した信号を2つに分け、鹿島と横須賀に持っていきバックエンドに入力して相互相関を求めてみるテストをおこないました。同じ信号を2つに分けたただけだから相互相関は1(100%)であるはずだが、そうは問屋が卸さない。周波数変換器の前後で信号を分けたり、サンプラーの直前で分けたりして、相互相関の値を見ながら、問題の箇所がどこにあるか調べていきました。VLBI は前にも述べたが2つの信号の遅延を最終的に求めるので、受信してからサンプルするまでに装置の中で遅れが生じ、2局での差は相関をとるときに必要な遅延時間として考慮しなければなりません。各局で受信信号のケーブルの長さは大きく異なるのでその量は相関処理をするときに重要です。つまり、どちらの信号をどのくらい遅らせれば相関が最大になるか明確にしておかなければならないのですが、実際に計算しようとすると、これが大変なのです。ここで述べたケーブルの長さだけでなく、遅延を考慮しなければならぬことが多く、そのうち+か-が分からなくなりました。この混乱は日本で最初の相関を出すときに問題になったのです。これについては、後で詳しく話します。

サンプルされた信号はVTRに記録されました。当時のVTRはりんご箱より一回り大きな大きさで、当然のことながらアナログ信号を記録します。しかし、VLBIではデジタルの0または1からなる4Mbpsデジタル信号なので、急速デジタル信号が記録できるように改造してしまいました。この改造には、米国のVLBI装置Mark-IIを参考にしたのですが、機種もまったく異なる日本製のレコーダー(東芝アンペックスTOAMCO VR-489-DR)を改造するという、勇気には感服しました。

実験準備には新人の吉野さんと周波数標準部から転勤してきた小池さんの活躍は特筆すべきです。天文グループのメンバーは尾嶋さんが工学部電気系の出身で、他の3人は全員物理出身なので実験装置の組み上げとなると、どこか頼りない。工学部電気系の新人である吉野さんと、原子標準や時刻比較に関係した多くの実験・開発を経験してきた小池さんが加わったことで、実験準備は俄然スムーズに行きだしました (13.1 図)。

#### 1.14 実験日程

前の節で述べたように、鹿島局と横須賀局用のシステムを並べ、受信機の出力を2つに分けてそれぞれのシステムに入力して相関を求めたり、遅延を求めるテストを繰り返して、両方のシステムが正常に動作していることを確認したのは実験開始の2週間前でした。しかし、これで2式の中の1式を横須賀に持ってゆけば実験できる、と言うほど単純な実験ではないのです。

まず人工衛星と電波星を追跡しなければなりません。人工衛星の出す電波を受信するにはアンテナを人工衛星に向けなければなりません、人工衛星の仰角と方位角を計算するには人工衛星が何時何処にあるかを定める軌道要素が必要です。軌道要素は衛星を管制している NASA からもらうのですが、1ヶ月も前のものだと誤差が大きくなり、アンテナをその角度に向けても衛星は別のところにある可能性があります。このときは実験のおよそ2週間前に教えてもらいました。

次は電波星を確実に受信するための準備です。鹿島の26mアンテナは以前から電波星を受けていたので何の問題もなかったのですが、横須賀のアンテナは衛星を使った通信実験専用ですから、衛星の電波が最も強く受かる方向に自動的に向くようになって(自動追尾)いました。ところが今回の実験の場合は雑音を受けるので、このような追尾はできず、正しく計算してちゃんと計算した方向に向けて(プログラム追尾)電波が最も強く受かるようにしなければなりません。あらかじめ計算機で計算した仰角と方位角をアンテナに与えても、アンテナが本当にその方向を向くとは限らないのです。その理由は、アンテナの向いている方向は仰角と方位角それぞれの角度検出器と言う角度を測る装置の出力ですが、この検出器を取り付けるときの誤差が必ずあります。つまり、横須賀の12.8mアンテナで、“電波星が実際にある方向と計算した方向とのズレ”、をあらかじめ調べておく(アンテナポインティングチェック)必要があることとなります。7人スタッフが鹿島から横須賀に移動して到着した翌日にこの測定を行いました。この日はなんと実験の前日でした。

横須賀に到着した7人は翌日、アンテナポインティングチェックをすぐ開始すると共に、VLBIシステムの組み上げを行い、僅か1日で準備完了にこぎつけました。翌日29日夜のインテルサットIV衛星の受信に向け、高橋富士信さんはすぐに鹿島へとんぼ返り、小池、尾嶋さんも29日鹿島へ帰り、鹿島での観測準備に入りました。

インテルサットIV号衛星の受信は夜9時過ぎに始まり、両局とも受信した電波の強度は十分強かったのですが、VLBIでは相関が出ない限り何の成果にもなりません。受信信号はVTRのテープに記録されているのでこのテープを再生して相関を取らねばなりません。それができるのは鹿島だけです。ところが磁気テープの記録はチョット注意しなければならないことがあります。受信信号はVTRで磁気テープ記録されますが、アナログ信号記録用になっており、デジタル信号の記録は性能ぎりぎり、信号を記録したVTRでないと再生できないことが“まま”あります。データが記録されたテープだけを鹿島に持ち帰

って再生できなかつたら相関どころではなくなります。このため記録した VTR もテープと一緒に鹿島に持ち帰る作戦を実行したのです。この相関が出さえすれば両局で同じように受信・記録すればよく、安心して以後の観測ができるという算段なのです。

最初の観測は電波強度の大きい静止衛星インテルサット IV 号を受信することにしました。インテルサット IV 号の出す電波は強い電波星のさらに数十倍もあり、装置のテストにはうってつけでした。その後、つよい QSO やラヂオ銀河を選んで交互に受信するスケジュールを組み、1月29日から2月4日までの1週間観測することにしました。14.1 図は手書きの観測スケジュール（川尻さん作成）です。観測スケジュールには実験のはじまる2週間ほど前に東京天文台の松波助教授、土屋助教授と国土地理院の北郷部長（3方とも当時）が見学に来た鹿島に見えています。松波助教授は1.でも述べましたように NASA との最初の会合に出席され、VLBI の実現のため応援してくれましたが、数年後若くして逝去されました。土屋助教授と北郷部長はその後も日本の VLBI の発展にご尽力いただき、K-3 システムの開発や国土地理院と電波研究所との協力体制を作り上げるなど、わが国の位置天文学・測地学への利用に尽力されました。わが国の VLBI の発展の歴史に記しておかねばならない3人の方々でしょう。

VLBI 国内基礎実験日程表 (予定)

月	日	A.M.	P.M.	G.S.T.
1月	10日			
	11日			
	12日			
	13日			
	14日			
	15日	成人の日		
	16日			
	17日	NASAへ報告同合せ		
	18日	時刻調整準備 (鹿島 20:00)	日通機 鹿島バックアップ	観測準備の研習(伊藤) 佐藤, 伊藤氏 (12-18日)
	19日	水	二研打合せ	実行準備提出
	20日	木	YOKへ打合せに出発(6:00)	0-01ル系定度テスト
	21日	金	(ソフトボール大会)	松波土屋, 北郷氏見学 (15)
	22日	土	26日追尾テスト↑	
	23日	日	予備日 (マラソン大会)	
	24日	月		
	25日	火		
	26日	水		
	27日	木	電源線引出 (2研+11社=2研) Yok センシング	
	28日	金	Yok センシング ボイニング	Yok ボイニング 4:27, インテルサット4号受信
	29日	土	(小池帰院) テータ処理	鹿島帰院
	30日	日	インテルサット4号 27	電波星(0時)
1月	31日	月	3C84	夜 ATS-1 7時
2月	1日	火	予備	(3C4593) 3C293
	2日	水	ATS-1, 3C293	ATS-1, 3C4593
	3日	木	予備	(インテルサット 02 3C84) 佐藤氏(Yok), 伊藤氏(KAS)
	4日	金	ATS-1, インテルサット 02 3C84	ATS-1 インテルサット 02 3C84
	5日	土	予備	徹夜
	6日	日		鹿島 観測同合せ
	7日	月		

14.1 図 鹿島—横須賀間の最初の VLBI 実験日程表 (川尻所蔵)

### 1.15 時刻比較

もう一つやっておかなければならない準備がありました。VLBI では同じ電波を2つの局で“同時”に受けます。でも両局の時計が“完全”に合って(同期)いなくても良く、時計差が一定であれば原理的には良いのですが、相関を取るときに時計差も考慮して、一方の信号をどれだけずらせばよいか分からないと、相関の計算ができません。両局の時計のズレをどれだけ精度で知っておけばよいか言うと、およそ100万分の1秒(1マイクロ秒)ぐらいです。両局ともセシウム原子周波数標準と呼ばれるセシウム原子が放射する電波を基準にした非常に安定な時計を使用します。そこで、横須賀用の時計は先ず鹿島のセシウム原子周波数標準と比較してズレを鹿島で直接測定し、電源を入れたまま静かに横須賀までもってゆく作戦です。この準備をしたのは小金井の周波数標準部の佐藤さん、伊

藤さん、小林さんでした。運搬中はバッテリーから電源が供給されますが、横須賀に着くまでに渋滞に巻き込まれ、バッテリーが上がってしまったら、元の木阿弥です。時計は電源車で運ぶことにしました。観測期間中に時計がズレるとデータ処理・解析を難しくします。東京タワーから出す TV 放送波は実は鹿島も横須賀でも受けられるのです。そこで、この TV 放送波中の特定の信号が鹿島と横須賀に到着する時間差を測ってその変化から時計差をモニターすることにしました。

### 1.16 日本で最初の相関

1977 年 1 月 29 日、日本時間の 21 時過ぎから先ずインテルサット 4 号系 (F8) 衛星を受信しました。この実験の受信周波数がこの衛星の通信に用いる周波数帯に丁度一致し、しかもほとんど使用されない予備の TV チャンネルであったので、衛星の送信機 (TWT) は通常、広帯域の雑音をフルパワーで出力しています。その強度は電波星の数十倍にもなり、しかも静止衛星なので 0.2 度程度しか動かない絶好の電波源でした。アンテナ・受信機が衛星電波をちゃんと受けているかはこのくらいの強度になると十分、受信強度モニターで確認できます。しかし、遅延時間をもとめるための相関を出さない限り成功とはいえないので、数十分の観測後すぐに VTR と記録したテープともども車に積み込み、深夜 10 時ごろ横須賀を出発、鹿島に向ったのです。

鹿島では、横須賀で実験準備を終え、2 日前に鹿島に戻っていた高橋富士信さんが相関処理の準備を万端整えていました。河野さんと高橋富士信さんによる相関検出の作業が NEAC3100 が据えられた計算機室と、テープレコーダーと相関器が設置された筋向いの部屋を歩き来しながら始まったのは 1 月 30 日午前 1 時半でした。

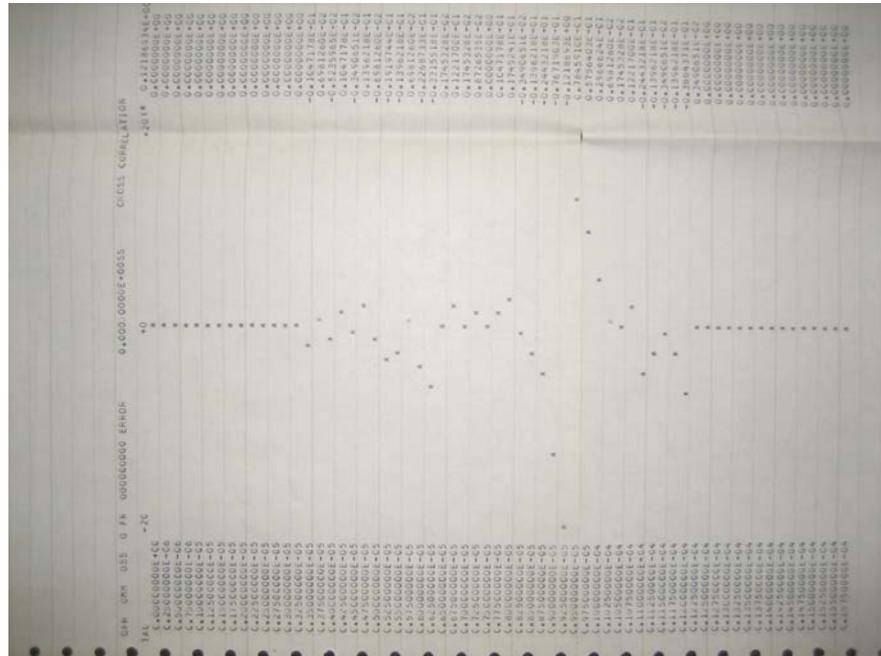
相関のときに一方の信号をどれだけの時間をずらせば相関が出るか、あらかじめ高橋富士信さんが予測値として別途計算していました。相関結果は LP にグラフになって打ち出されるようにしていました。最初の相関結果がパンパンという音と共に打ち出されました。予測値付近で大きな相関が目の前の LP に現れるはずですが、息詰まるような一瞬！・・・ところが、相関はゼロ付近を僅かに上下しているだけでグラフに大きな山がない！ 何故！ 本当？ どの装置が正常でない？ 実験失敗？などがめまぐるしく頭の中を駆け巡りました。その後はしばし放心状態。

気を取り直して、2 人で議論が始まり、遅延時間が間違っている可能性が大きいという結論になり、どちらをどのくらい遅らせるかの計算のやり直しをしました。2 回目の計算では確かに 1 回目の時の遅延時間とは異なっていました。やはり遅延時間の計算が間違っていたと確信して、2 回目の相関作業を開始。再び LP から相関が出力されるパンパンという音にあわせて結果を覗き込む。今度は 2 人ともかなり自信があり、目の前に相関が大きく上下する図が出ているはずですが、ところが、なんと、やっぱり相関なし。2 人ともしばらくは何も話せませんでした。実験は失敗。横須賀にもこの結果を知らせて、問題箇所を見つけなければ・・・。計算器室の脇にソファがあり 2 人とも気落ちしてがっくりと体を横たえました。

しばらく無言が続いた後、どちらともなく、「どうせダメだろうが遅延時間のプラスをマイナスにしてみよう」とまったく根拠のない、非科学的な行動に何故か二人とも納得しました。3 回目の相関作業開始、そして LP の音にあわせて相関のグラフを覗き込む。勿論今度は相関の期待はほとんどありません。ところが、なんと上下の大きく振動した相関が

現れているのではないですか。相関の部分を持ち離し、上下に大きく振動する相関関数を 2人で何度も何度もみて確認しました。1 時半に始めた作業は既に午前 5 時過ぎになっていました。16.1 図がその最初の相関です。ただの LP 用紙に打ち出されたグラフに過ぎませんが、実に壮観(相関：そうかんのダジャレ)でした。

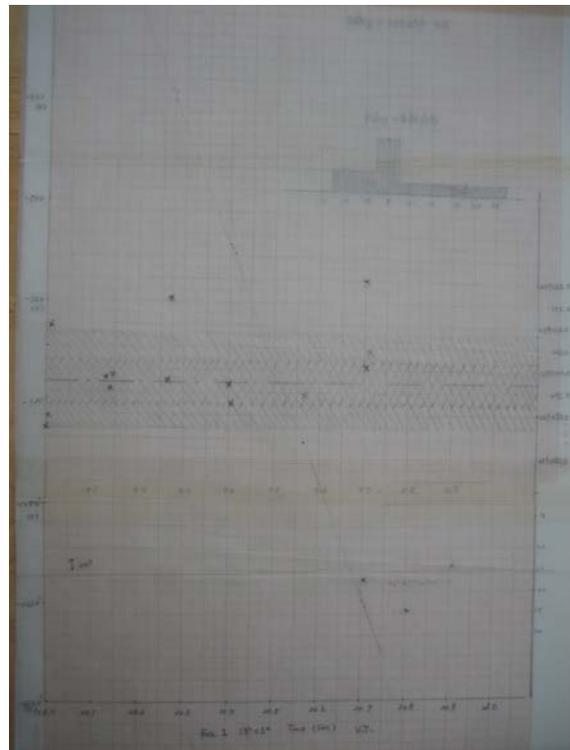
その後、実験メンバー全員の喜びは爆発し、成功の報は横須賀にも伝えられました。10 年後には世界を凌駕する VLBI の最初の成果は、なんとも自慢できない出来事から始まってしまいました。



16.1 図 最初の VLBI による相関 (河野所蔵)

### 1.17 日本最初の VLBI 実験の精度

さて、相関が出て、VLBI 最初の実験は成功したのですが、一体どれだけの精度で遅延は決まったのでしょうか。静止衛星はその名の通り地球上から見てほぼ静止して見えるので観測期間が数秒程度では衛星と両局までの距離は少ししか変化せず、それらの差はほぼ一定と考えられますので、求められた遅延時間のバラツキから直接、観測精度が推定できます。17.1 図の右上方の図が 1 秒間の観測で得られた遅延時間の度数分布です。データ数が少ないので正確にはいえませんが、概略±5 から±10 ナノ秒です。5 ナノ秒~10 ナノ秒は電波が 1 秒間に 1.5m~3m 進む距離ですから、衛星から 2 局までの距離差を 1.5m~3m の精度で求めることができたことを示しています。当時は衛星と地上局間の距離は電波を往復させてその時間と変化率を測る R&RR が用い



17.1 図 最初の実験結果における遅延決定精度はおよそ±10 ナノ秒 (河野氏所蔵)

られていて、ほぼ同じくらいです。持ち合わせの装置を使って最初の観測でこの精度を達成できたことは、将来、しっかりした装置開発をすれば従来の技術を遙かに越える可能性があり、この実験の成功は、大きな大きな、第1歩になったと言えます。

### 1.18 所内の反響

実験成功の年 1977 年の 10 月に VLBI システム開発を主目的とする第 3 宇宙通信研究室が発足しました。これは、この年に ETS-II 衛星が打ち上げられ、通信衛星 (CS) の打ち上げが迫っており、更にその翌年 1978 年には放送衛星 (BS) の打ち上げが予定され、ETS-II と CS・BS 衛星を用いた実験をそれぞれ遂行するため、これまでの第 1 宇宙通信研究室が 2 つに別れ、第 1 及び第 2 宇宙通信研究室となり、これまでの第 2 宇宙通信研究室が玉突きで第 3 宇宙通信研究室となったのです。宇宙通信実験の体制を充実させるといういきさつは別として、VLBI システム開発を主目的とする研究室の発足はその後の開発を進める上で大きなステップになりました。

実験成功が生んだ最大の成果は次の VLBI システム K-2 の開発が所内で認められ、世界の趨勢である遅延時間推定精度 0.1ns の実現に見通しを得たことでしょう。国内基礎実験で達成された精度は 17) で述べましたが、5 ナノ秒～10 ナノ秒程度であり、これに対して米国で開発が進んでいる Mark-III システムは 0.1ns といわれていました。この精度に近づくには、人・金・組織、全ての面で改善が必要であり、基礎実験は成功したものの、本格的な開発には大きな壁がありました。これを打破させてくれたのは ECS 計画でした。

ECS 計画はミリ波通信を実用化する目的の衛星計画であり、ミリ波の減衰やシンチレーションなどの電波伝搬の問題解決も課題の 1 つでした。そこで、ミリ波で起こる位相変動 (位相シンチレーション) を VLBI で観測しようという提案をしました。基礎実験を成功させ、グループがある程度の実力を示したことで、電波強度の減衰しか論じられていなかった電波伝搬の研究に位相変動の測定という斬新さも、提案が認められた理由でしょうが、それよりもおそらく、後で述べるように学界の反響の大きさや、幹部が VLBI の将来性を見据えて、ECS 計画の予算の下に実施するこのような提案を認めたものと思われます。K-1 の開発から K-2 の開発の移行については K-2 システム開発の章で詳しく述べます。

### 1.19 国内の反響

1977 年の日本最初の VLBI 実験の成功が国内の関連する測地学や天文学で、どのような反響を呼んだか振り返ってみましょう。米国国立天文台 (NRAO) が中心になって 1973 年ごろ開発された Mark-II は広帯域受信が必ずしも要求されない電波天文分野で既に広く利用され、高分解能の天体観測が数多く計画・実施されていました。しかし今回の基礎実験は観測周波数が電波天文と異なる宇宙通信の周波数帯であったことから国内外の電波天文研究者が注目することは少なく、むしろ位置天文学の関係者が将来に向けて強い関心を持ったといえるでしょう。

実験成功の翌年 1978 年 7 月には測地学審議会 (当時の文部大臣の諮問機関) から第 4 次地震予知五カ年計画において「宇宙技術によるプレート及び地殻変動観測」の新たな要請があり、VLBI システムの開発を進めることが盛り込まれ、建議先に郵政大臣が新たに加えられました (昭和 55 年版通信白書、測地学から地球システム科学へ—測地学審議会 100 年—)。建議に盛り込まれたことにより、また K-2 の開発の進展と相まって、建議の翌年

1979年から「VLBI 技術開発 5 ヵ年計画」の予算が認められることになり、日本での高精度 VLBI システムの開発がようやく本格的に開始されることとなります。

日米間の協力は、非エネルギー分野の日米科学技術協力協定（1980年5月1日締結）に基づき、1983年から日本（電波研究所）と米国（航空宇宙局）との間で VLBI 実験により地殻変動などを調べることが合意されたので、更にこの後になります。国内実験の成功が生んだ直接の動きではありませんでした。

一方、最初のしかも国内での基礎実験に過ぎないことから、社会的な反響はあまりなく、複数（数件）の新聞報道（地元紙「いはらき」1977年1月、など）があったに過ぎませんでした。

## 1.20 VLBI システム開発を取り巻く情勢

実験が行われた 1977 年前後は測地目的では米国を中心に VLBI システムの改良がおこなわれた時期でした。測地を目的とする VLBI は遅延時間を高精度で測定しなければならず、そのためには広帯域受信をどのように解決するかにかかっていた。この解を与えたのは A.E.E.Rogers のバンド幅合成法でした。この方法は、測地応用に要求される遅延時間測定精度 0.1ns を実現するには広い帯域全部を受信・記録する必要はなく、例えば 1 チャンネルが 2MHz の比較的狭い帯域を数百 MHz 内に十数チャンネルだけ適当に配置して受信すれば、実質数百 MHz を受信したときの遅延測定精度 0.1ns を得ることができる、という画期的なアイデアでした。この手法に適したシステム Mark-III が 1975 年ごろからヘイスタック観測所と GSFC で開発され始めました。一方、JPL のグループは ARIES と名づけたカリフォルニア地域の地殻変動の測定を可搬型 VLBI システムで開始していました。しかし本格的な測地目的の国際 VLBI 観測は Mark-III の完成後 1980 年に入ってからでしたので、日本の最初の実験は外国で本格的に始まる数年前になります。このことは重要な意味を持ちます。つまり日本が米国 Mark-III に肩を並べる VLBI システムの開発を成功させれば、国際観測において米国と同時にスタートラインに立てるということです。

## 1.21 日本最初の VLBI 実験成功は世界の VLBI へのスタート

1977 年の日本で最初の VLBI 実験から 3 年後の 1979 年には、テープレコーダーを使わず、観測データをすぐにマイクロ回線で送る VLBI システム (K-2) を開発し短時間の測定精度ですが、0.2 ナノ秒を達成しました。この精度は、当時米国で達成されつつあった 0.1 ナノ秒（距離差にして 3cm）に迫り、精度の面では、ほぼ射程距離に入れることとなります。しかし K-2 は観測した信号をレコーダーに記録しないので、何処の局でも使えるシステムではありません。このため何処でも使え、一層高精度のシステム (K-3) を 1979 年に米国の NASA と協力して開発を開始することになりました。これは当初、NASA が観測機器の持込を意図していたものの、これに待ったをかけた K-1、K-2 の実績をベースに日本独自の開発計画を示し、実現した計画です。K-3 は 1983 年には完成して、米国と予備実験を開始、翌年の 1984 にハワイが日本に近づいていることを実証しました。

1971 年 NASA の Vonbun 氏が石田支所長に宛てた手紙に始まった VLBI に関する協力は目標の 0.1 ナノ秒の測定ができる技術レベルに日本が到達した 8 年後にやっと始まったこととなります。K-1、K-2 という独自の VLBI システムを開発しながら、外国の技術を丸ごと受け入れることなく、自らその技術を高め、高い技術レベルに達してから、国際的に通

用するシステムの開発協力をおこなう方法を採用したことは、その後の VLBI 技術の応用で世界を凌駕する成果へ繋がったと考えられます。つまり、1 番目に、国土地理院や情報通信研究機構で実施された測地応用 VLBI システムの開発。2 番目に、JAXA、国立天文台、情報通信研究機構による人工衛星に VLBI システムを搭載し、宇宙—地球間で世界初のスペース VLBI を実現。3 番目に、国立天文台と JAXA による日本の月探査計画 SELENE では相対 VLBI という観測方法を用いて 7 ピコ秒（距離換算で約 2mm）の測定精度の世界記録を達成。4 番目に国立天文台による相対 VLBI 観測法による銀河回転の観測システム VERA の実現などです。

しかし、その道のりは決して平坦ではありませんでした。最初の実験に成功したものの、その経費は他のプロジェクトが獲得した経費の一部を譲ってもらったもので、プロジェクトとしては未だ一人前ではありませんでした。3 研が鹿島支所の「お荷物」であることはもう少し続きますが、先に述べた 1978 年 7 月に測地学審議会の第 4 次地震予知 5 カ年計画に VLBI システムの開発が盛り込まれたことから、すぐその年に予算要求を開始しました。これから自らの力で予算・人・組織を獲得していかなければなりません。とりわけ、テープレコーダーや相関などのための高速デジタル処理、地球回転やプレート運動などの科学的考察といった高度な技術と関連科学を進める研究者をいかに確保するか。更に、外国との国際協力は不可欠であり、そのための組織の整備など、ほとんどゼロの状態からの出発でした。

最後に、上に溜まった雨水を大臣にかけるなどの不手際もやってしまったアンテナですが、日本の VLBI 技術のシンボルになった今はなき鹿島支所 26m アンテナの勇姿をご覧ください。



21.1 図 日本の VLBI 観測はこのアンテナからはじまりました。その後、日本の位置の基準（国土地理院に移管後）にもなり、日本の VLBI 技術のシンボルでした。（情報通信研究機構所蔵）

## 2. 高精度 VLBI へのステップアップと K-2 システムの開発

河野宣之

### 2.1 精度 5 ナノ秒では米国に太刀打ちできない

1977年に国内基礎実験が成功しましたが、その遅延決定精度は5ナノ秒でした。この頃、米国ではNASAやヘイスタック観測所を中心にMark-III（マークスリー）と呼ばれる高精度VLBIシステムの開発が進み、遅延時間の測定精度は0.1ナノ秒が常識になろうとしていました。これは光速を掛けるとおよそ3cm。一方、国内実験の成果は1.5m（＝光速×5ナノ秒）であり、プレート運動のような年間数cmの動きと言われているプレート運動の検出には使えず、これではとても太刀打ちできません。基礎実験を足場に高精度VLBIシステムの開発へステップアップを図らねばなりません。

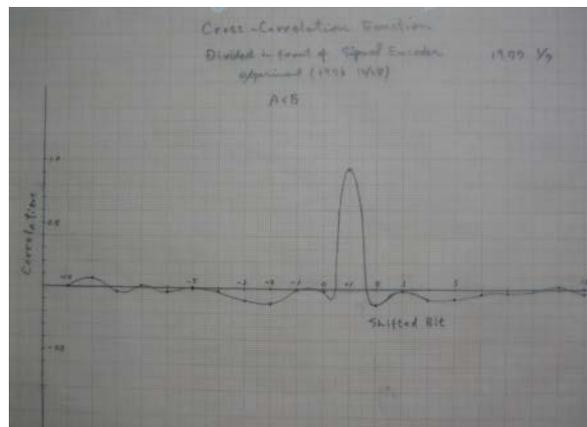
一方、1976年から新しい宇宙通信分野を開くミリ波通信というチャレンジングなECS計画が進められ、鹿島支所に実験実施センターが設けられました。この計画の進め方はこれまでのトップダウンの計画と異なり、計画をリードしていた畚野氏（後に所長）の意向もあって、実験テーマを募るといってこれまでにない新しい方法を探りました。今では科研費や宇宙開発関連プロジェクトではより大きな成果を得るため、多方面・多分野の研究・技術者からアイデアを募る方法は当たり前の方法になっていますが、当時しかも実用を目指した衛星計画ではまったく新しいやり方でした。（畚野氏のコメントで、サイエンスをやっている研究者のいるVLBIのグループが参加するのは望ましいこと、と述べています）。

ところで、VLBIの精度の限界は地球の大気による遅延の変動です。そして、その小さく短期の変動現象として位相シンチレーション（5）で詳しく述べます）があります。この位相シンチレーションの通信への影響はECS衛星計画の中で、ミリ波伝搬実験の一つになりうると考えたのは河野さん、高橋富士信さんと吉野さんなど3研の若手でした。つまり、実験テーマを募集しているECS計画に応募して、高精度VLBIシステムを開発し、これを用いて位相シンチレーションを測定することによりECSの伝搬実験のひとつとして貢献する、というシナリオです。この背景には、K-1で開発が途切れると、VLBIシステムの開発に付いた火が消えてしまう、消さないためには開発を継続して、できるだけ米国のレベルに早く近づこうという意図もありました。

### 2.2 遅延測定の高精度化の鍵を握るのはバンド幅合成法

VLBIの測地学や位置天文学への応用では、観測から得られる遅延時間を基にして、例えばアンテナ間の距離（観測局の位置）などいろいろな量を推定します。ですから、遅延の観測精度がいろいろな量を推定するときの推定精度に大きく影響します。

ところで世界の常識になりつつある遅延観測精度0.1ナノ秒に立ち上がる壁は何なのでしょう。ここで少し専門的になりますが、バンド幅合成というVLBIのなかで重要な一つの技術を説明します。



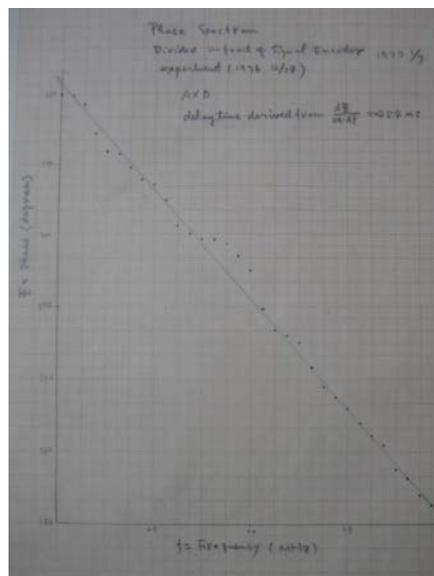
2.1 図 信号を2つに分けて一方に遅延を加えた後の相関関数の例

K-1 システムで、同じ信号を 2 つに分けて一方に少しずつ遅延を加え、2 つの信号の相関 (2 つの信号の一方に遅延を与え、両者を掛け、足し合わせた結果と遅延との関係を示す量)を取ると 2.1 図のような結果が得られました。

この相関から各周波数での位相差を求め、グラフに描くと 2.2 図のようになります。位相差とは水面に立つ波には高いところと低いところがあって進んで行きますが、2 つの信号 (電波) の位相差が 0 度のときは 2 つの波の高低がピッタリ一致しているときをいい、高低が逆になっているときは位相差が 180° といいます。例えば、彼女がデパートに買い物に行こうと君を誘ったとき、君も丁度買い物に行きたかったとすると、彼女と君の位相差はゼロ度ですね? この図で、縦軸の位相差が横軸の周波数に対して直線状に変化していることに気付くでしょう。遅延は位相差を周波数差で割った量です。つまりこの直線の傾きなのです。傾きが大きいと 2 つの信号が時間的大きくずれていることを示しています。ですから一方の信号を進めたり、遅らせたりして相関を求めると、この傾きが変わってきます。この傾きの観測精度 (つまり遅延の観測精度) は位相差のバラツキ (2.2 図で上下のばらつき) が大きいと悪くなり、横軸の周波数幅 (帯域幅と言います) が広いと観測精度が良くなることが分かります。

位相差のバラツキは受信する電波源の強さにもよりますが、電波星を受信する限り、数度くらいが精一杯です。一方、帯域幅は K-1 では僅か 2MHz (1 MHz = 1,000,000Hz) でしたが、50 倍の 100MHz にすると、原理的には遅延の精度も 50 倍良くなることとなります。ところが、一言で周波数幅を 50 倍の 100MHz に広げる、といっても実際には大変です。データを VTR に記録していますから、VTR が 50 台必要になりますし、デジタル信号の処理速度も 50 倍高速化しなければなりません。受信帯域幅 100MHz は当時の技術では大きな壁でした。

この壁を破ったのは米国ヘイスタック観測所の A.E.E.Rogers 博士が考案したバンド幅合成法という画期的なアイデアでした。この方法は、例えば帯域幅 100MHz 全体の信号を受信すると、そのデータ量は最低でも帯域幅の 2 倍 bps になり、なんと 200Mbps にもなります。ところが、バンド幅合成法では、たとえ 1 チャンネルが 2MHz の狭い帯域の信号であっても、100MHz の帯域幅の中に数~十数チャンネルだけ適当な周波数に配置して受信すれば、実質的に 100MHz 帯域幅全部を受信した場合と等しい遅延推定精度が得られる、というものです。1)で述べた米国 Mark-III システムもこのバンド幅合成法をつかっています。日本のグループもこの技術の確立が高精度 VLBI システム開発の鍵を握っていると考えていました。そこでこの技術を確立するため、ECS 計画でこの技術を応用した位相シンチレーション測定システムを開発して、位相変動 (位相シンチレーション) と同時に遅延も高精度で測定することを提案しよう、と検討していました。



2.2 図 3.1 図の相関関数から得られる各周波数における位相。傾きが遅延時間に相当する。

### 2.3 国内基礎実験前後の電波研究所鹿島支所の情勢

1977年1月に国内基礎実験に成功した後、2研のメンバーはすぐに本格的な高精度 VLBI システムの開発に進めることができると、夢を膨らませていました。しかし、世の中はそれほど甘くはなかったのです。そこで、当時の鹿島支所における VLBI システム開発を取り巻く情勢を述べることにします。そしてそのような情勢の中で2研がどのようにして高精度 VLBI システムの開発にステップアップして行ったか述べることにします。

K-1 の開発は他プロジェクト業務との掛け持ちしている人を含めても6人で、かけた費用は衛星計画の地上施設のそれと比較すると僅か 1~2%に過ぎず、一つの衛星計画全体からすると1%にも満たない規模のものでした。国内実験そのものは電波研の中ですら目立つほどの実験ではありませんでした。ですからこの実験の成功で VLBI システムの開発が一気に加速することはなかったのです。

先ず、3.1 表「1970 年代後半の鹿島における VLBI と宇宙通信・衛星関連実験の比較年表」をご覧ください。1976年にCS/BS 庁舎が旧 30m アンテナ台地に建設され、K-1 国内実験が行われた1977年にCS（通信衛星）とETS-II（技術試験衛星）、次の年の1978年にはBS（放送衛星）と更に電離層衛星ISS-bが打ち上げられ、電離層データの取得も始まりました。これらの衛星を用いた通信・放送・伝搬実験とデータ取得・衛星管制を実施するため、衛星管制課に加え、鹿島支所内で組織替えがありました。第1、2宇宙通信研究室からなる2つの研究室体制から、第1宇宙通信研究室がETS-IIによる伝搬実験、第2宇宙通信研究室がCS/BSを用いた宇宙通信・放送実験、その結果、これまでの第2宇宙通信研究室は第3宇宙通信研究室（以後3研）に玉突きで新たに発足しました。それぞれの衛星関連計画はいかに研究・技術者を確保して実験が遂行できる体制を作り上げていくか、四苦八苦していました。

	VLBI	宇宙通信・衛星関連実験
1974		EOS計画はミリ波通信を目指す、予備実験をETS-II(春)
1975	VLBIシステム(K-1)開発に実行予算 (湯原所長)	衛星管制課発足
1976	VLBIシステム(K-1)開発に実行予算 (湯原所長)	実験項目、実験施設の詳細計画の検討。CS/BS庁舎完
1977	01月:国内基礎実験 10月:3研発足	2月:技術試験衛星(ETS-II)打ち上げ EOS実験計画概念書承認。CS打ち上げ
1978	位相シンチレーション実験はEOS実験計画に参加承認 7月:測地学審議会第4次地震予知5ヵ年計画	EOS地上局設備(4)+レーダ(2)整備開始、10月:新1研 ETS-II成果発表。BS打ち上げ。ISS-b打ち上げ
1979	4月:VLBI技術開発5ヵ年計画(K-3)開始(5)K-2開発 佐分利・小林正副本部長、川尻主幹	CS・BS通信実験・運用管制開始 2月:EOS-a失敗 CS・BS通信実験・運用管制
	10月:VLBIシステム研究開発推進本部発足 12月:	ISS-bによる電離層観測 EOS伝搬実験
1980	1月:川尻室長米国でK-3 & Mark-III互換性を調査 2月:非エネルギー分野における日米科学技術協力第2 回会合(田尾所長)@ワシントン	地上施設をリ利用した伝播実験 2月:EOS-b失敗
	6月:K-2成果発表、ヘイスタック訪問K-3 & Mark-III互換 性の調査	ミリ波衛星通信実験開始
1981	5月:NASA一行鹿島へ(K-3 & Mark-III互換性)	

3.1 表 1970 年代後半の VLBI と鹿島における宇宙通信・衛星関連実験の比較年表

このように、鹿島支所は大型予算を擁し、研究・技術者を大量動員する4つの大きな衛星プロジェクトが同時進行する時代に突入していました。一方、第3宇宙通信研究室は1977年1月に国内基礎実験を成功させ、これから VLBI システムの本格的なシステムの開発に取り組めると関係者は期待していました。しかし、VLBI システム開発のステップアップのための1977年度予算の目処は立たず、継続して開発することはあきらめざるを得ない状

況でした。このため、3 研のパワーは国内実験のデータ処理・解析に傾注されることになったのですが、3 研のメンバーは心中穏やかではなかったのです。つまり、4 つの衛星プロジェクトに動員されるのではないか（このころ草刈場という言葉が流布していました。草刈場：村人がそれぞれ必要なときに草を刈っていける共有する草地をいい、各衛星プロジェクトが3 研の研究・技術者を自分のプロジェクトメンバーにすることのたとえ）、との懸念です。この懸念は早速表面化しました。当時の電波研究所における実行計画の番頭である企画課長が「いつまで VLBI をやっているのだ、国内実験がうまくいったのならそれでよいではないか（やめてよいではないか）、いつまで VLBI プロジェクトを続けるのだ」（川尻：電波研・通信総研の思い出集）と言っているという流言が鹿島まで伝わってきたのです。また、鹿島支所という狭い社会の中で、実験にあくせく動く者と、悠然とデータ処理・解析にいそしむ者とはうまくかみ合わないのは、当然の成り行きでした。

国内実験の2 ヶ月後、1977 年4 月には K-1 の受信機やハードウェア全体を取り仕切ってきた尾嶋さんが本所に転勤しました。代わりに川口さんが3 研に配属されましたが、後述するように VLBI に専念することはできませんでした。また K-1 の実験で活躍した小池さんは3 研に在籍したまま、ECS 計画の26m アンテナの改修などに既に動員されていて、継続的な高精度 VLBI システムの開発は予算的にも人的（実質 K-1 の実験時より1.5 人減の4~5 人）にも厳しい状況になっていました。

一方、日本の電波天文学の研究者たちは1978 年に野辺山の施設建設が始まり、これに全力を注がねばならない時期になっていて、3 研のメンバーと東京天文台とが協力してこれまでやってきたような天文観測をする環境は既になくなっていました。

このように、予算がなく、中心的な研究者が転勤し、衛星計画に協力のための動因で弱体化した3 研の進むべき道はどのようなものになったのでしょうか。

## 2.4 国内実験 (K-1) 後の3 研の進む方向

ECS 計画に参加して位相シンチレーションの測定を担当するか否かは3 研にとって極めて大きな選択でした。川尻室長は東京天文台と協力し、宇宙通信実験が盛んな中、厳しい研究環境と条件の下で鹿島支所26m アンテナを用いて日本の電波天文観測を独自に切り開いてきていました。また国内基礎実験の成功で位置天文学や測地学分野の反響に手ごたえを感じていたと思われます。できれば3 研はこのまま宇宙通信や衛星計画と一線を隔し、VLBI 技術開発に専念したいと考えたのも無理からぬことでした。

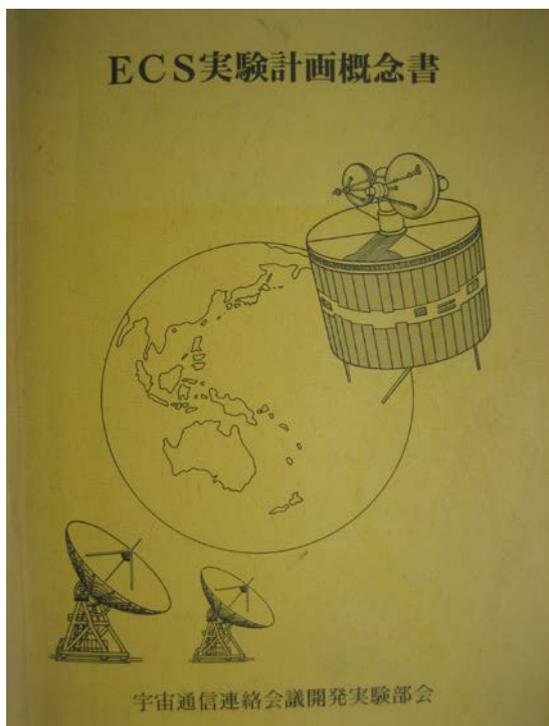
宇宙通信あるいは衛星計画に参加することは危険性も帯びていると考えられました。つまり、一般論ですが、衛星計画はスケジュールが厳しく管理されていて、また、大型の予算と多くの研究・技術者を動員してやっとできるプロジェクトです。研究・技術者にとって、他のプロジェクトに参加するのと少し異なった覚悟は必要だったと思われます。一旦始めたら最後まで遂行しなければならないことは言うに及ばないことです。そうなったら VLBI システム開発は途中で頓挫してしまうことにもなりかねません。だからといって、当時の情勢では ECS 計画に参加しなければ研究・技術者の大量動員のために衛星計画の草刈場になる危険もあります。3 研の中では意見がすぐまとまるほど容易に決定できる選択ではありませんでした。

3 研が ECS 計画参加に動いたのは、VLBI 技術が将来有望な技術であるとの認識を ECS 計画の本部が示してくれたことでした。つまり、位相シンチレーション測定装置は ECS 伝

搬実験の装置の一つであると同時に、将来有望な高精度 VLBI システムを目指して開発する装置でもありと位置づけられたのです。これは ECS 計画リーダーの畚野氏の考えで、それを現場で受け入れてくれたのは、ECS 計画を担当する 1 研の林室長や室員のみなさんでした。このような位相シンチレーションの測定装置の位置づけは ECS 計画の中での 3 研の独自性が担保され、高精度 VLBI システムの開発が継続できる道を示してくれたこととなります。別の言い方をすれば、VLBI グループが電波研究所の中に居場所が見つかったと言えるでしょう。

この結果、3 研は ECS 計画の伝搬実験の一つである位相シンチレーション測定実験を提案すると共に、この実験の一つを担当することが認められたのです。そして 1977 年度から位相シンチレーション測定装置 (VLBI システム K-2) の開発を ECS 計画の予算を使って開発することになりました。このようにして、VLBI システムの開発は ECS 計画の中で、高精度 VLBI システム開発へのステップを踏むことになったのです。図 5.1 と 5.2 に ECS 実験計画概念書の表紙と目次を示します。

第 1 部でも述べましたが K-2 開発の予算は ECS 計画担当者が苦勞して獲得した予算であり、実施に当って他の実験施設や装置整備の経費を節約して搾り出した予算でした。その苦勞の真っ只中にいた 1 研の室長の告白を紹介しましょう。「ECS グループが VLBI 実験を支援したのは、26m アンテナを ECS 実験に使用する代償でもあった。が、それよりも将来研究をして、重要であるとの判断から、決して多くない予算から、ECS グループは経費を投入した。当時 3 研は、電波天文と言うことで、セコハン (26m) アンテナの有効利用の道を細々と進んでいた。よく、川尻、河野君には言ったのだが“人の余り物で研究するなど、ハイエナみたいな研究はするな、堂々と必要性を強調し、予算を取るようにすべきだ、と。」(パラボラと共に:1993)。この発言は正にその通りで、反論の余地はないと思えます。



4.1 図 ECS 実験計画概念書

ECS 実験計画概念書目次	
1. ECS システムの概要	1
1.1 経 緯	1
1.2 システム構成と ECS 実験	1
1.3 実験システムの概要	2
2. 衛星通信に関する基本的測定及び実験	17
2.1 シンチレーション特性の測定	17
2.1.1 搭載アンテナの特性測定	17
2.1.2 搭載中継器の特性測定	22
2.2 地上局装置の特性測定	33
2.2.1 アンテナ特性の測定	33
2.2.2 送信系受信装置の特性	46
2.3 衛星通信システムの伝送特性の測定と実験	61
2.3.1 通信方式の検討及び伝送品質の評価に関する実験	61
3. 衛星通信周波数の干渉実験	79
3.1 CS の干渉実験	79
3.2 伝送帯域干渉実験	83
4. 伝 送 実 験	99
4.1 雑音特性の測定と統計的解析	99
4.2 伝送の雑音減衰及び安定伝送に関する実験	104
4.3 主局 — 副局 アイソレーション	111
4.4 1.9 GHz (35GHz) の伝送帯域実験	113
4.5 シンチレーション特性の測定実験	117
4.5.1 搭載シンチレーション特性の測定実験	117
4.5.2 伝送シンチレーション測定実験	125
5. システム構成関係の他の実験	137
— オートコヒーレント、切替実験	137

4.2 図 概念書目次 1/2

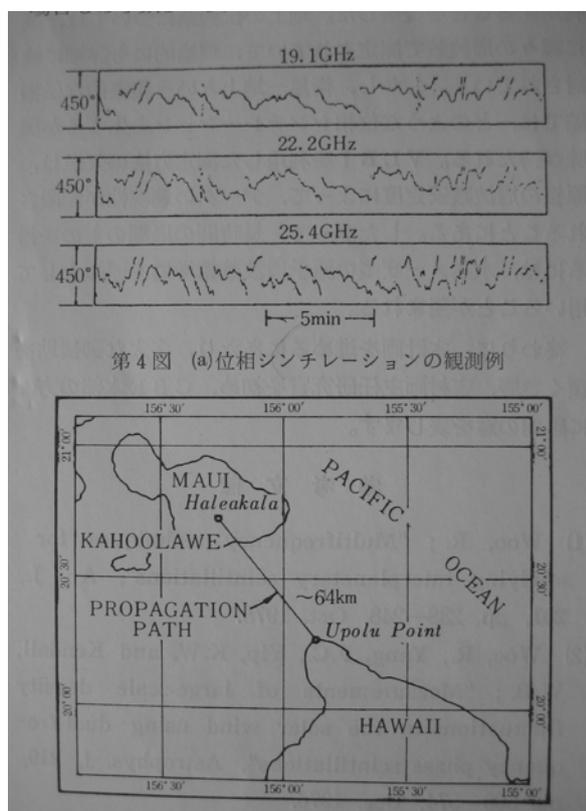
## 2.5 位相シンチレーションは何？

位相シンチレーションシステムを開発することにより VLBI システムの重要な観測量である位相と遅延の測定精度を上げ、位相シンチレーションのミリ波通信への影響を明らかにすると同時に、世界の VLBI のレベル近づこうとの 3 研の意図については既に述べました。ところで位相シンチレーションがどういうものなのでしょうか。少し詳しく説明しましょう。

人工衛星から出た電波は地球大気の中を通過（伝搬：でんぱん）して地上のアンテナまで届きます。ところが地球大気は濃いところや薄いところが塊になって複雑に分布していて、しかも移動しています。このため、伝搬路で遅延の変化が生じます。例えば、濃い塊を通過するとアンテナに到着する時間が平均より少し遅れます。薄いところを通過した時は早く到着します。この遅延の変化はアンテナで受信している信号の位相変化として表れ、通信にいろんな悪さをします。このランダムな位相変動は位相シンチレーションと呼ばれています。地上数十 km までの高さの対流圏（たいりゅうけん）で生じる中性大気による遅延の変化は周波数が高くなるほど（周波数に比例して）大きくなり、位相シンチレーションが強く現れます。ですから周波数の非常に高いミリ波になると無視できない影響が現れると考えられます。

対流圏の位相シンチレーションは当時、地上の 1 点から基準周波数信号を送信し、目標点で周波数変換して折り返した信号を受信して、送信信号と受信信号との位相差の変動として測定されていました。この場合、地上すれすれの伝搬路になり、地面や海面で反射された電波も一緒に受信するので、その影響を分離することが困難でした。5.1 図はハワイで行われた位相シンチレーションの測定実験の例です。2 島間の距離は約 64km です。切り立った崖の上に送受信機を設置していたとしても周囲の海面や地上の岩などからの反射波に影響は避けられません。周波数はミリ波に近い高い周波数で行われ、測定結果を見ると、高い周波数ほど位相変動が大きいことが明らかです。

一方、VLBI 技術を使って、高度の高い人工衛星や天体電波源を 2 点で受信して 2 信号の位相差を測定すれば、このような影響は避けられます。但し、2 点間の距離より大きなスケールの大気揺らぎの影響は 2 点とも影響を同じように受けるので相殺されてしまいます。つまり ECS 実験では主局と副局間が約 47km ですから、47km 以下のスケールを持つ対流圏内での揺らぎの影響を測定することになります。



5.1 図 地上回線での位相シンチレーションの測定例(Thompson M.C. et al. IEEE Trans. AP-23, No6, 1975.)

ところで、位相シンチレーションは宇宙通信やミリ波通信にとって重要な量であることを2, 3の例を上げて説明しましょう。位相を利用する通信、例えば人工衛星の軌道推定にはドプラー周波数偏移が良く使われます。これには地上の送信波と人工衛星の間を信号が往復する間の位相変化の測定します。このため、地球大気の位相シンチレーションの影響をやはり受けます。5-1 図で、変化の大きいときは30秒で $2\pi$ 変化しているので1/30Hz変化していることに相当します。マイクロ波での測定精度が数ミリ Hz 程度ですので、決して小さい値ではありません。また、位相シンチレーションは電波が受信アンテナに入射する角度（入射角）の変動としても現れる現象なので、この方面の研究においても重要です。

一方、地上100km以上では地球の大気の一部は電離した層（電離層：でんりそう、と呼ばれる）があり、対流圏の場合は周波数が高くなるとその影響も大きくなるといいましたが、電離層の影響は逆に周波数が高くなると小さくなります。地上で測定される地球大気による位相変動はこの2種類の変動の和になり、上に述べたような悪影響を及ぼします。

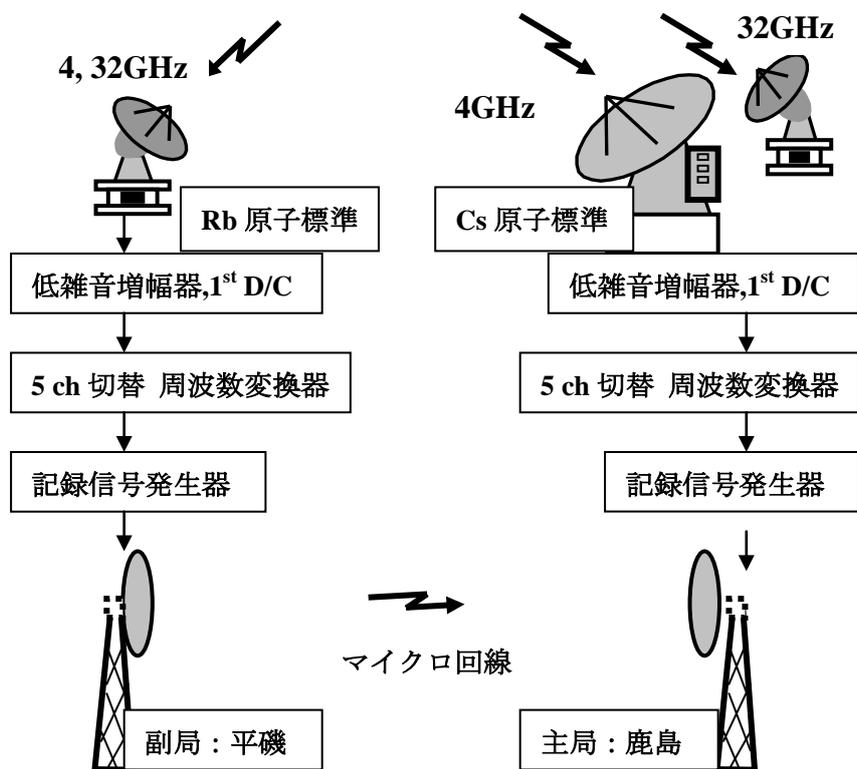
遅延の変化や位相差の測定は2)で述べたように、VLBIの得意とするところですから、この位相シンチレーションをVLBI装置で測ることができます。また、これまで地上でしか測定できませんでしたが、実際の宇宙通信に近い伝搬路での測定がVLBIによってできることは、大きな意義があるといえるでしょう。

## 2.6 K-2 システムの概要

K-2 システム開発の目標は1)、2)や5)で述べましたが、伝搬路で発生する遅延変動を位相差の変動として高精度で測定することと、2つのVLBI局で同一の電波源からの電波が到達する時間差（遅延）を1ナノ秒以下の誤差で測定して、世界のレベルに近づくことです。この目標を実現できる装置の概要を以下に説明します。

ECS計画では衛星を用いてミリ波通信を実用化するために2箇所以上で同時に2つの局で通信（中継）を行い、一方が

悪天候で通信状態が悪くなると他方の通信局に切り換える、サイトダーバシティ方式を想定して実験計画が立てられていました。このため鹿島（主局）から北に47km離れた平磯に副局が設置され、6.1図に示すように、中継される通信信号は地上マイクロ回線の主

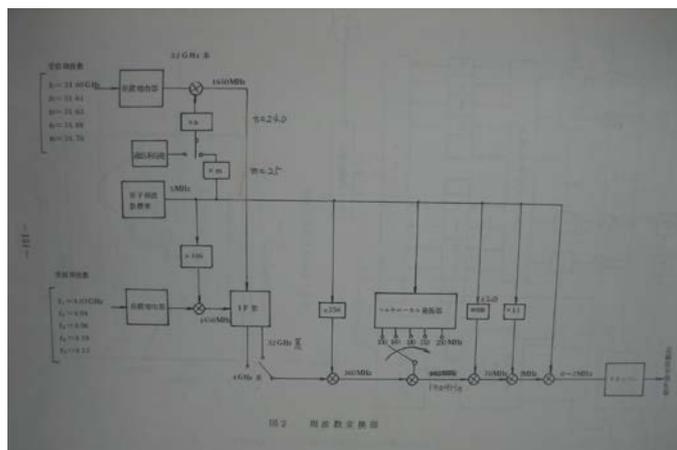


6.1 図 位相シンチレーション測定システムの概念図

局に送られるように設計されていました。そこで、VLBI 実験では、鹿島と平磯局で衛星あるいは電波星を受信し、平磯局で受信した信号を地上マイクロ回線により鹿島に送れば、鹿島で受信した信号と平磯で受信した信号の相関をリアルタイムで求めることができます。つまり、位相シンチレーションの測定や VLBI 実験を、通常なら両局に備えなければならない記録装置なしで、実施できる大きなメリットがあります。

しかし、この通信回線は 60Mbps (60,000,000 ビット毎秒)のデータを送れるのですが、そもそも通信実験データを送ることを目的にしており、VLBI 実験に割り当てられるのはせいぜい数 Mbps でした。2)でも述べましたが、VLBI 高精度化の最大の課題はバンド幅合成技術を確立することでしたが、十数チャンネルの受信をすると、数十 Mbps もの伝送速度が必要になってしまいます。VLBI 実験で使用できるのは、せいぜい K-1 の 1 チャンネル分のデータ伝送量である 4 Mbps でした。バンド幅合成法の実験は不可能と考えざるを得ませんでした。しかし、良いアイデアが見つかったのです。つまり、全てのチャンネルを同時に受信せずに、ローカル周波数を一定時間ごとに変えて最大 100MHz ズラせて受信する方法です。こうすれば、全ての周波数を観測するまでに時間がかかり、且つこの間の遅延時間の変動が測定誤差になってしまいますが、最大 100MHz の帯域幅を実現できます。

さて、次の問題はバンド幅合成のチャンネルをいくつにするかの検討です。1 チャンネルの帯域幅は記録装置の制限でどのシステムも 2MHz にしています。例えば、1 チャンネルを n の周波数に順次切り替えて受信すると、バンド幅合成には n 個の周波数で観測しなければなりませんから、通常的全チャンネル同時観測と較べると n 倍の観測時間を必要とします。ところが、主・副局に置いた原子標準は観測時間内に 1 ナノ秒以上ずれてはなりませんので、観測時間は限られていて、概ね 300 秒以内に制限されます。ですから、できるだけチャンネル数を減らしたいのです。しかし、Mark-III システムではバンド幅合成のために十数チャンネルも受信しています。そこで川口さんと河野さんが遅延を高精度で決めるために無駄の少ない方法(最小冗長バンド幅合成法)を考えました。この方法ですと 5 チャンネルだけで 1 ナノ秒以下を達成できると予想されました。例えば、K-1 の周波数帯域幅が 2MHz で遅延決定精度は±5 ナノ秒でしたから、5 チャンネルを切り換える周期の間の周波数変動がないとすると、帯域幅が 50 倍の 100MHz ですから、遅延決定精度は 5 ナノ秒の 50 分の 1 の 0.1 ナノ秒になります。これに周波数切り換え周期の間のランダムな位相変動を考慮しても、1 ナノ秒より小さくなることが十分期待できます。世界の趨勢のバンド幅合成技術による遅延測定精度 0.1 ナノ秒にグッと近づけると、目論んだのです。6.2 図に 5 チャンネル周波数切り替え装置の概念図を示します。



6.2 図 5 チャンネル周波数切り替え装置の概念図

## 2.7 K-2 システム開発のスタート

1977年の後半から K-2 開発が開始されました。ECS 実験用 10mφアンテナが主局と副局に建設されました。平磯の副局のアンテナには 4GHz 帯とミリ波用 32GHz 帯の受信機が装備されており、主局では 4GHz 帯は 26m アンテナが使用され、32GHz 帯は 10m アンテナが使用されました。アンテナ受信機やマイクロ回線が他の ECS 実験と共用のため、頻繁に ECS 実験の打ち合わせがもたれました。K-2 の製作にはアンテナなどの地上施設の製作を担当している日本電気が複雑なインターフェースを取りやすいなどの理由から引き受けてくれました。日本電気の K-2 開発担当は中山氏になり、鹿島に長期間滞在して K-2 ソフトの開発に当たってくれました。電波研側は川尻室長を先頭に、現場では若手中心に、河野さん、高橋富士信さん、吉野さん、小池さん、そして尾嶋さんの後任に川口さんが入り、開発に当りました。このように、4)で述べた 3 研の状況とは少し変わってきていました。1977 年の前半は国内基礎実験の成果を電波研究所の機関紙である季報特集号に纏める作業があり、両方を平行しておこなわざるを得ませんでした。

川口さんについては 4)で述べた状況がしばらく続き、尾嶋さんが鹿島から本所へ転勤したあとアンテナ・受信機担当となりましたが、CS/BS プロジェクトを担当する 2 研にはアンテナ・受信機の担当者が手薄だったため 3 研で VLBI をやりながら CS/BS のアンテナ・受信機を担当するという離れ業をこなしていました。アンテナの測定、例えばアンテナ利得の測定では、天体電波源を観測するので、電波天文観測と接点があります。3 研から見ると川口さんを半分取られていると思いたくなり、一方、川口さんは本籍地に自分の寝るところがないと思っても致し方ないことでしょう。しかし、4)で述べたように、4 つの衛星計画が同時進行する当時の状況下で VLBI の開発が完全な体制を望むべくもありません。支所長がこのような体制をとったことは理解できます。つまり、3 研を草刈場にしない一つの（唯一の）解であったかもしれません。ところが、当の川口さんは 3 研に籍を置きながら、2 研の衛星計画に参加して、積極的に新しいアンテナ測定法などに挑戦していました。後年、川口さんが国立天文台と JAXA を又にかけて、大きな活躍をする礎がこのとき作られたのではないかと、言い逃れかもしれませんが、勝手に想像します。川口さんはこのときの苦しみ（ジレンマ）を以下のように、表現しています。「電波天文（3 研）を立てようとするれば衛星（2 研）がたたず、衛星を立てようとするれば天文が立たず、「俺は 2.5 研の室長である」とひそかに考え……。このことについては、長年 3 研にいた者にとって忸怩（じくじ）たる思いがありました。

K-2 の開発に戻りましょう。担当する日本電気の中山さんはもともとアンテナを専門としており、干渉、位相、相関といった VLBI 特有の処理法は容易に理解してくれました。それどころか、部分的には、我々が追いついていけないほどの深い理解と開発のスピードがありました。物静かで控えめな人でしたので私たちが理解していないところがあっても、あえて指摘はせずに“二ター”とほくそえんでから（どうだ、あなたには理解できないだろう！！といわんばかりに）、われわれに説明してくれました。

K-2 の開発開始は国内の電波天文、位置天文、測地関係者に、「電波研が本気で VLBI システムの開発をするのかもしれない」というある種の驚きをあたえたと思われま。研究会などで関係者に会うと、国内実験成功で「K-1 開発やりましたね！おめでとう！ところで、この後はどうするのですか？」から「K-2 を始めたそうですね！電波研は本気で高精度システムの開発をやるんですか？」に変わってきました。この差は情勢の変化とし

て決して小さいものではなかったと思われます。

## 2.8 K-2 開発 2 年目 (1978 年 7 月)、測地学審議会が「第 4 次地震予知 5 カ年計画」の建議 (日本の VLBI システム開発に最も大きな影響を与えた出来事)

K-1 による基礎実験から 1 年半後、K-2 の開発も 2 年目に入って佳境に入った 1978 年 7 月、測地学審議会から「第 4 次地震予知 5 カ年計画」の建議が出され (測地学から地球システム科学へー測地学審議会の 100 年ー)、この中で、宇宙技術を含め、測地測量の基礎技術研究の進展を図ることが指摘されました。そして、建議先に新たに郵政大臣が加わったのです。つまり、「超高精度 VLBI システムの開発研究」の推進が郵政大臣に勸告されたのです。郵政省はこれを受けて、概算要求に「超高精度 VLBI システムの開発研究」を加え、予算化して 1979 年度から K-3 の開発研究の開始を決めました。日本の VLBI 開発を真の意味で後押ししたのはこの建議でした。従ってこの諮問は日本の VLBI 開発において最大の出来事であったことは間違いありません。

結論から言えば、VLBI 関連予算要求は毎年出していたものの落選続きでした。この建議により、1979 年度から「超高精度電波干渉計システムの開発研究」の予算が付くことになったときの喜びは筆舌に尽くせないものがありました。詳しくは「第 3 部」で述べますが、このとき電波研究所内で 3 研に向けてよくいわれた言葉は「苦節十年」でした。VLBI 技術開発のスタートが勉強会の始まった 1972 年とすると「苦節七年」が正しいのですが。

建議に VLBI が盛り込まれた背景を調べてみるため、出された 1978 年 7 月以前の測地・位置天文学に関連した装置開発について 8.1 表に示します。僅か 2 年余の間に、NNSS ド

1975 年 2 月	東京天文台：月レーザー測距用 3.6m φ 望遠鏡 (カセグレイン) 堂平設置
1976 年 3 月	国土地理院と海上保安庁水路部、協力して SLR 試作機を鹿野山に完成 国土地理院：於鹿野山、堂平、NNSS ドプラーで位置観測、誤差数十 m
1977 年 1 月	電波研究所：VLBI 国内基礎実験 成功 国土地理院と海上保安庁水路部協力して SLR 調整、試験するも不検出
1977 年 7 月	測地学審議会が第 4 次地震予知計画の建議

8.1 表 測地学審議会の建議が出される以前の測地・位置天文学に関連した装置開発 (国土地理院時報 1977 年、Report of Hydrographic Researches No.12, March, 1977)

プラーによる測位、月レーザー測距、衛星レーザー測距、VLBI の 4 技術の装置が整備され、あるいは既に整備されていた装置で実験が実施されています。1977 年 7 月までに得られた実験の結果は、前の 2 つの装置については十分な精度が得られないか、信号自体を検出できないという見通しの立たない状況、後の 2 つ、つまり SLR<sup>(1)</sup> と VLBI が現システムの改造などをすることにより将来の高精度測定を実現できる可能性を示すことができたようです。建議はこの結果の成否をそのまま反映しているように見えます。

## 2.9 建議の後、国内での測地・位置天文観測装置開発の状況は大きく変わる

K-2 の開発とは直接関係しませんが、建議が出された後、関係機関の協力、開発や装置の利用などで大きな変化が見られました。また K-3 の開発などにもからむ重要な出来事がありました。このような状況を少し述べておきましょう。

建議が出された後、日本では VLBI と SLR の宇宙技術を用いた測地技術の開発と応用が急激に進展することになりました。先ず、2 年後、国土地理院は 1980 年に電波研究所と VLBI の応用について協力の覚書を結んで、VLBI に踏み込む決断をしています。

東京天文台は地上から送信し、月面で反射して戻ってくるレーザパルスを検出できず、当初の目標であった月レーザ測距を断念し、3.6m φ 望遠鏡は結局 1982 年に SLR 用に改修し、SLR の観測をしましたが定常的に行うことはなく、最終的に 1992 年にオーストラリアで γ 線望遠鏡に転進 (“CANGAROO”計画の一環として利用) させることになりました。

海上保安庁水路部は SLR の技術開発を継続して精力的に改良を進め、その後米国の測地衛星を利用して 1982 年から SLR 観測開始し、更に国産のレーザ測距用衛星を打ち上げ (“あじさい” 1986 年 8 月 H-I で打ち上げ) て、日本における SLR を発展させて行きました。

電波研は第 3 部で述べるように測地・位置天文だけでなく他の分野でも VLBI を応用して大きな成果を上げていきました。このように測地・位置天文の僅か 2 年余の戦国時代とも言うべき時代があり、それぞれの機関が自らの将来の道を決め、歩くことになりました。つまり、3 機関は主要観測手段に宇宙技術を導入して高精度の観測を目指して動き始める一方、それまで日本の測地・位置天文学に大きな貢献をしてきた緯度観測所は 1978 年に江刺地球潮汐観測施設をスタート、絶対重力計による重力測定など、これまでの流れに沿って、地球物理学的な研究・測定の方角に進み続けました。一連の動きは、これまで測地や位置天文学にはおよそ関係なかった “宇宙技術” の開発を主要課題にする、あるいは新たに導入した (てきた) 機関とそうでない機関に分かれることになりました。つまり、宇宙通信や測地を業務とする文部省以外の機関が宇宙技術を導入し、これまでより 1~2 桁高精度の観測を目指して動き始めたことになります。

参考文献 (1) : Sasaki M., An Experimental System for Satellite Laser Ranging, Report of Hydrographic Researches No.12 March, pp.95-106, 1977.

## 2.10 ECS - a 静止軌道投入失敗と K-2VLBI システム稼動開始

1979 年 2 月、ECS-a は種子島から打ち上げられ、無事衛星になりました。ところがドリフト軌道の遠地点でアポジーエンジンによる加速で静止移動に投入しようとした直後に信号が途絶えてしまいました。後の原因究明で、切り離れたエンジンが衛星に追突した、と結論されたと聞いています。関係者の落胆は大きかったが、予備機を次年度打ち上げることができるとの事で、“まだ救いがある” と解釈することにしました。

担当の位相シンチレーション測定実験準備 (K-2 の開発、10.1 図) はほぼ順調に進んでいました。ECS - a がなくても ETS-II や CS 衛星を受信して実験は実施できるので、追い詰められた



10.1 図 K-2 システム

状況はありませんでした。それよりも、K-3 の開発がスタートしつつあったので、K-2 の開発を急ぎ、実験を早く開始しなければと、3 研は少しあせっていました。

1979年9月19日深夜の10時40分、鹿島支所 26m アンテナ庁舎内に設置された K-2 の相関のモニター画面に 10.2 図に示すきれいな相関関数が表示されました。5 つの相関関数が重畳されて表示されているが、それぞれ周波数スパン 0, 10, 30, 60, 100MHz に設定された 5 つのチャンネルに相当する。VLBI の宿命なのですが、観測したときには実験が成功か失敗か分からず、データを持ち寄って相関が出て初めて成功であることが分かります。実験後



から相関が出るまでの精神的な負担は決して軽いものではありません。ところが K-2 は 47km 離れた副局の平磯で観測したデータはマイクロ回線を経由してリアルタイムで送ってくるので、すぐ結果が出るのです。“それじゃー感動も少ないでしょう”、と言うかもしれませんが、とんでもない、最初の相関が出たときの喜びはどんな VLBI 実験でも大きいものです。大きな複雑なシステムができ上がったことの証拠を示すものですから。

日本電気の中山さんと 3 研のスタッフの注意は遅延の測定結果に注がれていました。バンド幅合成の計算から得られた結果はなんと誤差  $\pm 0.2$  ナノ秒でした。詳しくは 12) の観測成果で述べます。

## 2.11 ECS-b の静止軌道投入の失敗 (1980 年 2 月) と善後策

ECS-a の静止軌道投入の失敗からほぼ 1 年後の 1980 年 2 月に再度、同時に製作された予備機 ECS-b が打ち上げられました。ECS-a の静止軌道投入失敗から 1 年の間に、位相シンチレーション測定装置 (K-2) は完成し、遅延時間決定精度  $\pm 0.2$  ナノ秒の達成や大気による位相変動を数度の誤差で測定するなど大きな成果を上げていました。一方 ECS プロジェクトとしては ETS-II を使った伝搬実験で着々とミリ波通信の実用化に向けた基礎的な実験が進められていました。ですから、ECS-a の失敗はそれほど大きな影響もなく ECS-b が上がれば十分リカバーできるという印象を、プロジェクトを進める 1 研のメンバーは感じていたようでした。

しかし 1980 年 2 月、ECS-b もドリフト軌道に順調に乗せられたにもかかわらず、最後の静止軌道への投入で再び失敗したのです。関係者の落胆は大きく、これに追い討ちをかけるように、一旦認められた次年度 1980 年度予算を返還せよと大蔵省から連絡がありました。衛星は宇宙の藻屑になったのでしょくないにせよ、次年度が始まる僅か 1 ヶ月前で、地上施設などを有効利用した実験計画を立てるなどの厳しい要求をされました。ECS 計画を進める本部や担当の 1 研メンバーの苦悩は目に余るものがありました。

位相シンチレーションの測定で参加した 3 研もこのための地上施設をどのように利用して成果を上げるか問われました。これには河野さんが主に対応しました。装置は稼動し、前述のように既にいくつかの成果を上げており、また ECS 衛星を使ったミリ波での実験は

できないものの、4GHz 帯で他の衛星を使って実験を継続できる見通しがありましたので、それほど難しい資料作りではありませんでした。

ECS 衛星失敗にもかかわらず、3 研にとって大きな安心を与えていたのは、8) で述べたように、既に 1979 年度から「超高精度 VLBI システムの開発研究」が予算化され、未だ初期の段階であれ、スタートしていたことです。この計画は当初、日本独自のシステムで、遅延測定精度 0.1 ナノ秒を目指していたのですが、K-2 開発で 0.2 ナノ秒を既に実現していたので、ある程度の見通しを持ってこの計画に移って、専念できる自信ができていました。

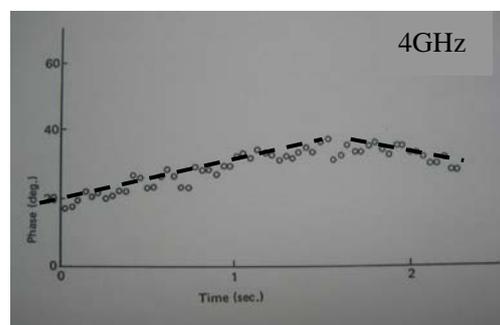
## 2.12 K-2 による位相シンチレーション等観測成果

8) で述べましたが、1979 年度から K-3 の開発が始まりました。そこで、開発中の K-2 を早期に完成させ、目的である位相シンチレーションの実験を実施し、予定の成果を上げ、K-3 の開発にできるだけ早く専念できる環境を作る必要に迫られていました。このような理由により、1979 年度後半から 1980 年度中頃までに K-2 を用いた各種の実験が組み込まれました。

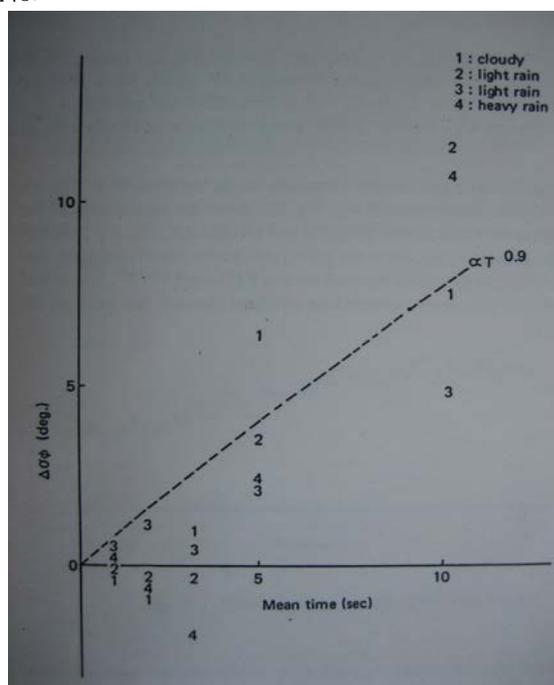
### (1) 位相シンチレーションの測定

先ず手懸けられたのは本来の目的である中性大気（対流圏）による位相シンチレーションの測定です。位相シンチレーションの測定結果の 1 例として静止通信衛星 CS を受信したときの変動の大きい例を 12.1 図に示します。この位相変動の中には原子標準に起因するランダムな位相変化が含まれています。その量は例えば 4GHz の電波で測定すると、10 秒で数度以上も変化する可能性があります。一方、5.1 図の地上伝搬路での測定結果には海面反射波などの影響が含まれるものの、大気の変動による位相シンチレーションが大半と考えられます。天頂方向での K-2 による観測の場合と異なり、受信周波数が約 5 倍の 20GHz、伝搬距離が 64km です。その量は 10 秒で 60 度程度です。地上付近の密度に換算すると地球大気の高さは十数 km といわれています。大気による位相変動は大気の厚さと周波数にほぼ比例することから、仰角 90 度の天頂方向の衛星を受信すると、この 1/20 程度と見積もられ、10 秒で数度ぐらい変動すると予想されます。これは原子標準に起因する位相変動とほぼ同じです。

上の例では、原子標準によるランダムな位相変化が含まれ、位相シンチレーシ



12.1 図 位相シンチレーションの例



12.2 図 平均時間後の位相変化量の RMS (1 ~ 3 秒の RMS を差し引く)

オンを測定しているとは言いがたいこととなります。このため、対流圏での位相シンチレーションの測定は仰角が低いインテルサットや ATS-1 を受信して測定しました。対流圏を伝搬する距離が仰角 90 度の場合と較べて数倍～約 10 倍も大きいので、位相変化も比例して大きくなり、原子標準に起因する位相変動より大きい量として観測することができます。12.2 図がその 1 例で、平均時間だけ経過したときの位相変化量（平均値は 0）の RMS を、1～3 秒での RMS（雑音による短時間変動に相当）を引いて、示しています。観測結果は日時、季節によって異なりますが、仰角 90 度方向の観測に換算すると、周波数安定度（ $\Delta f/f$ ）にしておよそ  $1 \times 10^{-13}$  の数倍でした。周波数安定度とは観測周波数  $f$ 、位相変化量を求める時間  $T$  とすると、予想される位相変動は、概ね  $(\Delta f/f) \times f \text{ (Hz)} \times T \text{ (秒)} \times 360^\circ$  と表されるような量で、仰角 90 度に換算すると用いた原子周波数標準のそれと同程度でした。

位相シンチレーションは VLBI 観測の精度の限界を与えます。つまり位相シンチレーションが大きいときは相関が小さくなってしまい（コヒーレンスの減少）ます。コヒーレンスが減少した相関を使って解析したり、距離などを推定すると推定誤差は大きくなってしまいます。このように、位相シンチレーションは VLBI 観測において大変重要で、気候、季節やその日の天気でも変化します。K-2 を用いて、日本のいろんな気象状態で位相シンチレーションが測定されました。これらの結果はその後の VLBI 観測計画を立てるときなどに利用されています。

この他にも位相シンチレーションが大きな影響を与える例があります。人工衛星の軌道を知るためにドプラー周波数偏移（略してドプラー）がよく使われます。救急車のピーポーピーポーという音は近づくときは高音に聞こえますが、遠去かるときは逆に低音に聞こえます。地球を回る人工衛星からの電波を地上局で観測していると同じように、周波数が高低の変化をします。このような現象はドプラーといわれます。このドプラー観測精度の限界は位相シンチレーションによって与えられるので大変重要です。特に波長の短いミリ波ではドプラーの観測をして測定精度を上げようとしても、位相シンチレーションはほぼ周波数に比例して大きくなるので、なかなか高精度は得られません。12.2 図から観測周波数 4GHz で 1 秒間に 1 度ぐらい変化しています。この位相変化は周波数にして数ミリ Hz に相当しますから、4GHz でドプラーを観測すると、どんなに立派な装置を作っても 1 秒程度で数ミリ Hz ぐらいは位相シンチレーションで乱されます。ミリ波（30GHz）で観測すると周波数倍つまり 4GHz の場合より約 8 倍も位相シンチレーションで乱されると予想されます。30 年後の現在でもドプラー観測精度は数 GHz で観測した場合、1 ミリ Hz 程度です。30 年も経って観測精度が少しも改善されていないなんていわないでください。自然に逆らうことはできませんので。でも、この観測でマイクロ波帯における日本での人工衛星のドプラー測定精度の限界を知ることができたのです。

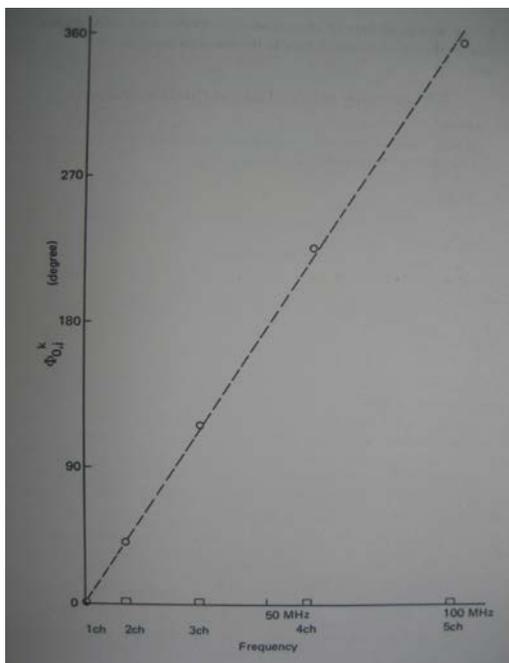
## (2) 準星の観測による遅延の測定

次に行われた実験は準星（QSO）を観測して遅延時間を求めることです。実は遅延の予測計算は複雑な計算から求められます。その計算をどんな風にするかチョットだけ説明しましょう。第 1 部の 3)において 3.1 図「VLBI の原理」の黄色い矢印の長さを 3cm の精度で測定できることとなります。つまり、人工衛星や電波星を大陸間で観測すると、2 つの VLBI 局間の距離を 3cm の精度で測ることができます。”と述べました。ランダムな地球大気の影響などは別途補正することにして、もし星の方向（星位置）を仮定すると、2 つの VLBI 局の位置（局位置）と地球がどの向きにどの速さで回転しているか（地球回転）数

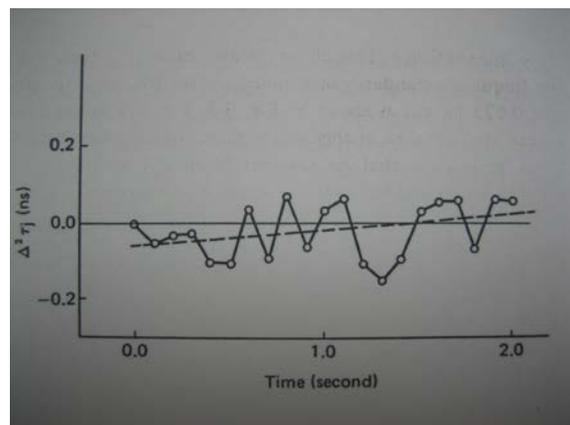
式（モデル）で示されていて、計算できます。この遅延の計算値と実際の観測値との差が重要です。この差が測定誤差なのか、遅延を計算するモデルを改良すれば小さくなる差なのか、研究者の洞察力が必要です。測定誤差なら何が原因なのか、計算するモデルならば何処を改善すれば差が少なくなるのか、それはどのような現象を示しているのか、などどんどんより深い考察に進みます。このような考察から、遅延時間を 0.1 ナノ秒の精度で測ると、大陸間の距離を 3cm の精度で、星の位置は“地球から月面に立った人を見たときの角度”（約 1 ミリ秒角）の精度で推定できるのです。“地球回転”についても、回転の方向は星位置と同じ精度で、回転速度は数日で 1000 分の 1 秒程度の精度で推定できます。このようにしてモデルが改良されると、いつでも 0.1 ナノ秒以内の誤差で遅延を計算できるようになります。モデルの改良は今でも延々と続いています。

12.3 図は 5 チャンネル間の位相差を示しています。この直線の傾きが遅延に相当し、傾きの誤差が遅延測定誤差に相当しますから、遅延測定精度はおよそ 0.2ns となります。世界の趨勢である 0.1ns に後一步のところまで来たといえます。

12.4 図は準星を観測して遅延を求め、計算値との差の変化を示しています。差のバラツキは 0.2 ナノ秒程度ですが、数秒を越える周期の変化が乗っかっています。調査の結果、バラツキは観測精度、長い周期の変動の原因は原子周波数標準に起因するものが主であると分かりました。位置天文学や測地学への応用を考えると、長時間の正確な遅延の測定が必要です。安定な原子周波数標準の開発は今後大きな力を注がなければならない課題であることが分かりました。つまり、K-2 で採用した Cs や Rb 原子周波数より 2 桁近い安定度を持つ水素メーザ原子周波数標準の開発が不可欠といえます（K-3 では Cs や Rb より 2 桁も安定な水素メーザ原子周波数標準を電波研で開発します）。



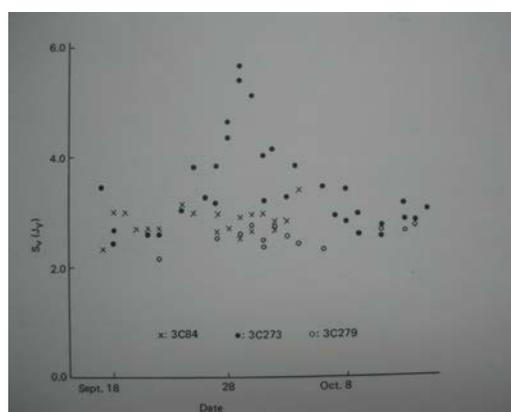
12.3 図 5 チャンネル間の位相差



12.4 図 5 チャンネルによるバンド幅合成による遅延推定結果

### (3) 太陽プラズマによる位相シンチレーションの測定

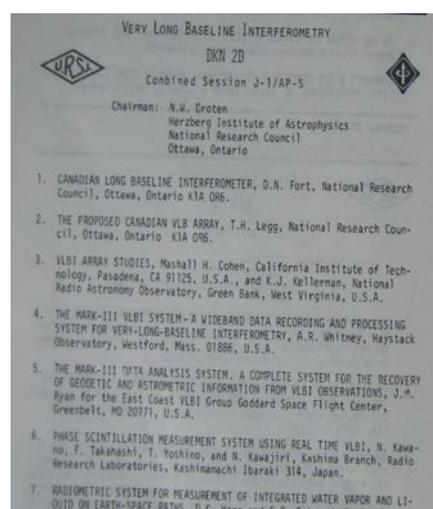
3つ目の実験は QSO3C273 と 3C279 からの電波が地球まで届く伝搬路が1年に1回だけ太陽の近くを通過するときがあります。このときを狙って鹿島と平磯2局で電波を受けて相関を求め、太陽コロナによりその位相と振幅の両方が変動するビジビリティーシンチレーションを測定しました。ビジビリティーシンチレーションは吸収で振幅が変化するのではなく、太陽周囲のプラズマに濃淡があるために、いろんな伝搬路を経た電波の合成波が地上に到達するため振幅と位相の両方が変化するものです。近い将来、人工惑星を打ち上げて太陽を含む惑星系の観測をする際、人工惑星が太陽の反対側から地球に向けて電波を送信するときに、このような太陽コロナによるビジビリティーシンチレーションで通信が不可能になると予想されます。太陽コロナのような太陽周縁プラズマによるビジビリティーシンチレーションはこれまで主として低い周波数で定常的に観測されていましたが、K-2 による観測は実際に通信に使用されるマイクロ波帯での観測であり、その結果は近い将来、人工惑星との通信の実用に供すると期待されていました。12.5 図は準星 3C273 の伝搬路が 1979 年 9 月 28 日に太陽に近づいたときのビジビリティーシンチレーションの絶対値の変化を示しています。電波源 3C279 と 3C84 の伝搬路は太陽から離れている時で、比較のために示しています。観測結果は、伝搬路の太陽中心からの距離の3乗にほぼ逆比例していました。これは太陽風のモデルから計算される予想値にほぼ等しく、マイクロ波でもこのモデルが当てはまることが分かりました。



12.5 図 太陽コロナ掩蔽によるビジビリティーシンチレーション

K-2 の成果の利用について纏めてみましょう。遅延測定精度 0.2 ナノ秒については K-3 によってさらに高精度化へのステップとなりました。対流圏の位相シンチレーションは VLBI 観測の基本量として、その後、関係者の資料として利用されました。また、VLBI の限界を与えている位相シンチレーションを克服する観測方法(相対 VLBI)を考案して、日本独自のプロジェクトである VERA 計画や月探査計画セレーネで応用することになります。一方、太陽プラズマによるビジビリティーシンチレーションの成果は、日本の惑星探査機が打ち上げられ、太陽裏側からの通信が実現され、シンチレーションの通信への影響の実測へと繋がっていきました。

1980 年 6 月、K-2 の成果はカナダのケベックで開催された URSI (国際電波科学連合) と IEEE/AP (アメリカ電気電子通信学会/アンテナ・電波伝搬研究会) 共催のシンポジウムで発表されました。12.6 図は VLBI セッションの目次です。この発表以外は、



12.6 図 URSI シンポジウム VLBI セッションプログラム

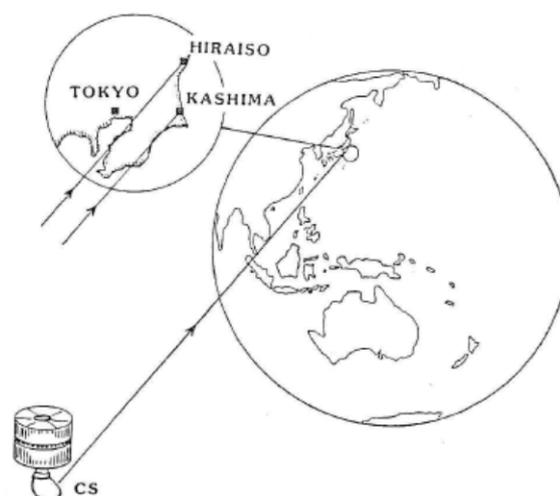
米国から Mark-III 開発に関する発表が 2 件、伝搬路の遅延時間の変化を測るラジオメーター関係 2 件、JPL (NASA ジェット推進研究所) とカナダの VLBI 網の構築に関連する 3 件で、合計 8 件と VLBI だけのセッションとしては異例の盛会でした。特にカナダでは北緯 39 度線上に 9 個のアンテナを配置する計画や米国では国内に 10 個のアンテナを配置した大 VLBI 網の構築計画が日本より約 1 桁も大きい予算で検討されていました。日本の K-2 については発表後、休憩時間もないほど、特性、製造会社、値段、開発状況、今後の計画について質問攻めに合いました。世界各国の VLBI 研究者がプレート運動や地球回転の観測など VLBI によって新しい数々の窓を、一番乗りで開こうとする意気込みでいっぱいでした。本格的な VLBI が始まりつつある夜明け前、という感じを受けました。そして日本もやっと高精度 VLBI システム開発の仲間入りができたとする印象を強く受けました。K-2 の開発で日本は米国、カナダに次いで 3 番目に高精度 VLBI システムを開発した国になりました。

K-2 の成果発表を終了し、いよいよ K-3 の開発にエンジン全開となっていきます。

### 2.13 K-2 による CS の軌道測定実験

電波研究所の K-2 VLBI システムは、鹿島の 26m アンテナと平磯の 10m アンテナによる基線長 46 km を地上のマイクロ波通信回線を用いて実時間で結ぶシステムです。基線長は必ずしも長いものではありませんが、4GHz 帯で受信帯域幅 2MHz の 5 つのチャンネルで実時間の VLBI 相関観測が行える画期的なシステムでした。

この K-2 システムにより、1982 年の 6 月 16 日から 17 日にかけて実験用静止通信衛星 CS の 4GHz 帯の中継器が発生する雑音電波と CS の近くに見える 7 つの天体電波源 (準星) を 2 つのチャンネルを用いて交互に観測する  $\Delta$



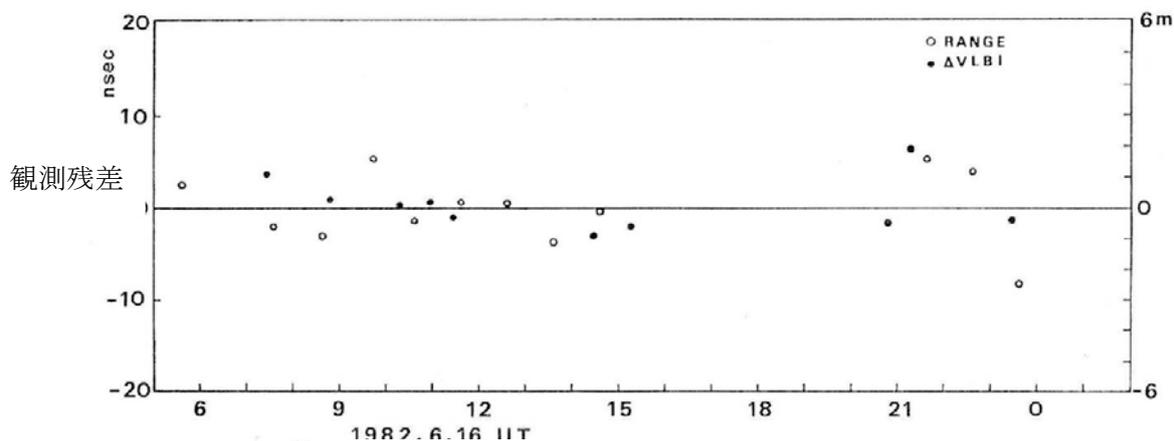
13.1 図 CS の軌道測定実験の位置関係

VLBI (Differential VLBI、差分 VLBI) 手法による CS の軌道測定を行いました。(VLBI による衛星の軌道測定、高精度軌道決定の背景については、4.2 項に記述。) 13.1 図に CS の軌道測定実験の位置関係を示します。この実験は、衛星管制グループ (衛星管制課) が鹿島の VLBI グループ (第三宇宙通信研究室) の支援を受けて実施したものです。  $\Delta$  VLBI 観測と平行して、鹿島の CS 地球局において CS の測距 (100kHz 測距信号の伝搬時間を衛星折り返しで測定) と測角 (19.45GHz の衛星電波の到来角度測定) を行い、これらを総合して衛星の軌道決定を行いました。

その結果、幾何学的遅延時間の測定精度は、CS では 0.3nsec 以内、準星では 10~140nsec 以内で、  $\Delta$  VLBI 観測値の総合精度は約 2nsec (60cm) となり、測距データ等を併用した軌道決定で衛星位置にして約 100m の精度が達成されました。実際の観測値と軌道決定による理論値をグラフ化すると 13.2 図のようにそれらの差 (観測残差) が、ほぼ 10nsec (3m)

以内となっており、上述の軌道決定精度の裏付けとなります。

これまでの手法による静止衛星の軌道決定の精度は、衛星位置にしてせいぜい数 km から数百 m というところで、実用上もそれで問題はありませんでした。しかし、衛星を用いた測位や航法、地上の高精度のリモートセンシングなどのためには、さらに高い精度での軌道決定が必要となることが予想されており、衛星の高精度軌道決定における VLBI 技術の有用性を示す実験となりました。(この項、塩見)



13.2 図 CS の軌道決定における観測残差

この項の参考文献 (代表的なもの)

- (1) 塩見他、 $\Delta$  VLBI 法による静止衛星の高精度軌道決定、電波研究所季報 Vol.30, No.155, 1984, pp.185-198.
- (2) Shiomi, T. et al., Differential interferometry for precise tracking of a geosynchronous satellite, J. Guidance, Vol.9, No.2, 1986, pp.143-148.

#### 14) ECS 計画への参加は VLBI 開発に何を与えたか

K-2 の開発は 1977 年 1 月の国内基礎実験の成功後、1979 年 12 月までおよそ 3 年間を費やして完成しました。その成果は、対流圏と電離圏で発生する位相シンチレーションの観測や遅延測定精度 0.2 ナノ秒に代表される大きな成果を挙げました。一方、国内基礎実験の 1 年半後の 1978 年 7 月に測地学審議会から第 4 次地震予知 5 カ年計画において VLBI システムの開発の建議がなされ、翌年 1979 年度から超高精度 VLBI システムの開発の予算化が郵政省によりなされました。このような国内の一連の動きは、K-2 の開発開始が電波研つまりは郵政省が本格的に開発に乗り出したという印象を関係者に広く与えた結果と考えるのが妥当でしょう。

ECS 計画に参加して、研究・開発グループとして得た最も重要なことはこれまで獲得したくても獲得できなかったグループの居場所ではなかったかと思われまます。“3 研も電波研が進める計画に参加している”という意識をもてたことは、長く続いた卑屈な意識からの脱却であり、電波研という組織の一員になったという、存在感と今後への発展性を与えてくれたと考えます。もう一つの成果は、K-2 開発の成功により“米国の Mark-III に匹敵するものだって作れそうだ”という自信めいたものも 3 研のスタッフの中に生まれてきた

と思われます。百歩譲って K-2 の開発が建議に影響を与えなかったとしても、このような 3 研スタッフの意識の変化は K-3 開発に入る際に非常に重要なことだったと思います。

ECS 計画については、衛星自体は失敗でしたが、先に述べたように新しい研究・開発の方法を採ることによって、位相シンチレーション実験だけでなく、多方面に大きな成果を残したことは間違いありません。

3 研のスタッフにとっては大きなプロジェクトに入るのは全員始めてでした。これまでは研究・開発全て室員 5, 6 名と話し合うことで済みました。時にはメーカーとの打ち合わせや共同研究に関する議論がありましたが、この時には関係者が室員に加わって話し合い・打ち合わせで事足りました。ところが ECS 計画に入ると話し相手が数十人になり、目的遂行のために多くの人々が一つの課題に意見を述べ、纏め、行動するといったこれまで経験したことのない中で活動することになりました。これらの活動は関係する複数の研究室員と衛星計画の掲げる目的を共有することができ、いろんな難しい問題にも積極的に取り組む意識を持つことができた、と思っています。平たく言うと、仲間と一緒にやろうという気持ちが湧いてきた、ということです。またプロジェクトの推進には、相応しい人・金・組織を準備しなければならないこと、プロジェクトの管理手法も必要に迫られて勉強することになりました。後年、3 研のメンバーも再びプロジェクトに参加することがあり、このような実践の中で学んだ研究開発のやり方はずいぶん役立ったといえるでしょう。

このような経験を「虎穴にいらずんば、虎兇を得ず」に譬える人がいるかもしれませんが、少し違います。この格言は「危険を顧みず、一か八かやってみる」という語感がありますが、K-2 の開発は 3 研のスタッフが知恵を絞って自らが歩む道を探した結果でした。一か八かやってみたことでは決してありませんでした。

\* \* \* \* \*

#### 参考資料

馬場義男、人工衛星レーザー測距装置、国土地理院時報、1977 年。

細野、金子、坂本、NNSS ドプラー観測による位置決定、国土地理院時報、1977 年。

Minoru Sasaki, An experimental System for Satellite Laser Ranging, Report of Hydrographic Researches, No12, March, 1977.

### 3. 1 K-3の歴史と概要

#### (米国 Mark-III と互換性を持つ超高精度 VLBI システム:K-3 の開発)

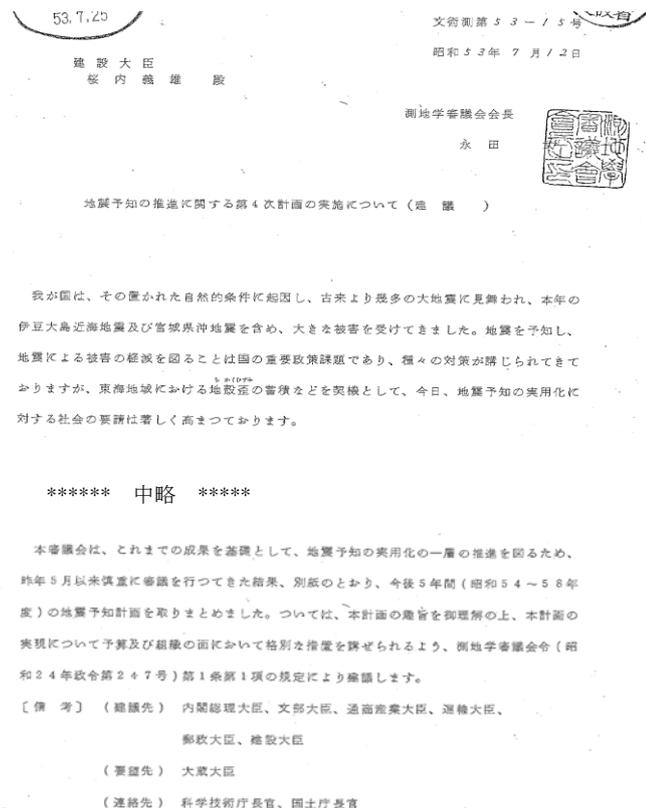
河野宣之

K-3 の開発は 1979 年に予算化され、当初、日本独自の超高精度システムの開発を目標にスタートしました。ところがその直後、日米両国が協力して国際 VLBI 実験の実施を掲げた日米科学技術協力協定が結ばれました。この実験に使用できる装置にするため、大幅な仕様や予算計画の変更を経て、日米の研究者の協力による日本のシステムの開発が行われました。第 3 部では K-3 のシステム開発までが記述されます。K-3 システムを利用した日米実験によるプレート運動の実証や日米実験以外の各種実験については第 4 部で述べられます。

#### 3.1.1 第 4 次地震予知計画の建議が日本の超高精度 VLBI システムの開発を可能にした

1977 年 1 月の VLBI 国内基礎実験の成功後、第 3 宇宙通信研究室（以後 3 研）は ECS 計画に参加して K-2 システムの開発に専念していました。その開発も 2 年目を迎え、高精度 VLBI システムの壁である 10 分の数ナノ秒の精度に対して見通しが立ってきた 1978 年 7 月、文部大臣の諮問機関である測地学審議会から「第 4 次地震予知 5 カ年計画」の建議 (1.1 図) が提出されました。この中で、宇宙技術を含め、測地測量の基礎技術の研究の進展を図ることが指摘 (1.2 図) されました。そして、建議先に新たに郵政大臣が付け加えられたのです。郵政省はこれを受けて、電波研究所の概算要求に「超高精度電波干渉計システムの開発研究」を加え、予算化して 1979 年度から K-3 の開発研究が開始されることになりました。このことについては K-2 の開発中であり、第 2 部の 8) でも述べられています。

1972 年から始まった鹿島支所の 4 人の研究者（川尻、橋本、尾嶋、河野さん）による勉強会から 7 年後、年中行事にもなった VLBI システム開発の大蔵予算要求はようやく日の目を見ることになりました。このころ 3 研に対して「苦節 10 年」という言葉がよく言われていました。良い意味に取れば、「長い間苦勞して勝ち取った予算なので成功を期待します」、ですが、悪い意味に取ると、“こ



1.1 図 測地学審議会の第 4 次地震予知 5 カ年計画 (建議)

んな長い間成果を出さず、他人のふんどしで相撲を取ってきた、今後、成果を出す実力があるのか不安だ”とも取ることができます。しかし、やっている3研にしてみると、野球でたまたまバットを出してホームラン打ったのとは違って、しっかり勉強し、国内で基礎実験をやり、ECS 衛星計画の中でも成果が出せるレベルに達した上での予算獲得でした。予算額は衛星計画には遥かに劣りますが、将来性では負けない可能性を秘めており、飛ぶ鳥を落とす勢いの衛星計画と張り合える多少の自信（過信？）は持っていました。このように、日本の本格的な高精度 VLBI システムの開発を真の意味で後押ししたのはこの建議であり、日本の VLBI 開発において最大の出来事(第2部8)と9)を参照してください)であったことは間違いありません。開発のための力量も K-1、K-2 の開発を通して次第に培われていました。

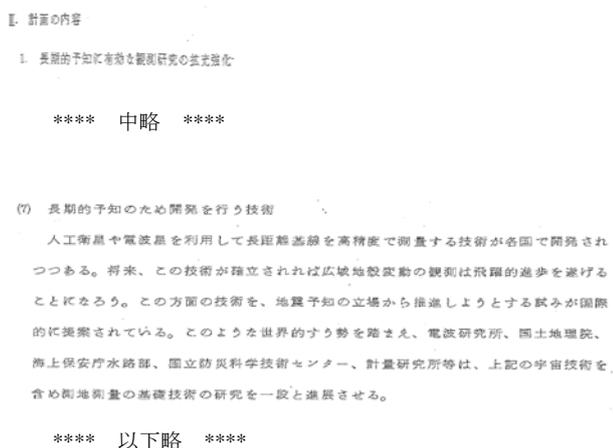
建議が出されて約2ヵ月後の1978年9月11日に東京新聞に記事が掲載されました。“星から来る電波を観測して地震を予知しよう—という風変わりな計画が進んでいる。郵政省電波研究所が来年度から5カ年計画で研究に取り

組み、実用化をめざしているもので、地震予知ばかりでなく、世界の大陸が大昔から現在に至るまでに移動しているという「大陸移動説」や「海洋底拡大説」を実証することにも役立ち、成果が期待されている。“。今から考えると予算の大筋がまとまるのは年末なのに9月はチョット早すぎる気もしますが、このときには郵政省が既に次年度の大蔵予算で確保すると決断していたと思われます。米国はこの予算化にすぐに対応しました。1978年末、日本で開催された「日米合同調査計画の宇宙分野における日米専門家会議」での議論がスタートしています。米国の計画に日本を取り込もうというのでしょうか、2)で述べるように会議は難航しました。

### 3.1.2 日本の VLBI の方向を決めた日米実験用 K-3 システムの開発計画

次年度から「超高精度 VLBI 技術の開発研究」が認められる見通しになった1978年末に「日米合同調査計画の宇宙分野における日米専門家会議」で VLBI における日米協力の議論がなされました。米国にとっては、自国で開発し、ほぼ完成している Mark-III システムを持ち込めば、最も簡単に、目的である日本を含む国際 VLBI 網を手に入れることができることは明白です。しかし、日本にとって2号機である K-2 の目標達成の見通しが立ってきて、本番の K-3 の予算化がなされる状況で、Mark-III の導入は受け入れがたいことでした。この会議には前衛星研究部長であった村主特別研究官と川尻3研究室長が参加しました。なかなか折り合いがつかず、結局、半年以上経った1979年6月の3回目の会合で米国 Mark-III システムと“互換性のあるシステム”を電波研が開発することになったのです。

このときは、3号機である本格的な K-3 システムの開発5カ年計画が既にスタートしていた時期であり、また3ヵ月後(9月)には K-2 システムの本格運用が開始される時期で



1.2 図 建議の中の“計画の内容”の抜粋

もあり、さらに VLBI システム開発本部が発足する 4 ヶ月前でした。このような時期に日本が超高精度システムの開発を急遽取りやめることはありえず、一方米国は前に述べたように近い将来グローバルな VLBI 観測網を展開する計画は譲れない。このような状況を考えると、日米両国が受け入れられる解は他には見当たらなかった、というのが真相でしょう。

サー、大変です。スタートしたばかりの 5 カ年計画を 1 年も経たないうちに大変更しなければなりません。それも、どういうものかはっきり分からない外国システムと互換性を持たせたシステムを開発すると言うのですから。以下に「宇宙分野における日米専門家会議」に出席した川尻室長と 1 年目にして計画の大変更を余儀なくされた佐分利 VLBI システム開発本部（3）で説明します）本部長の回顧録を記しておきます。

“その後（国内 VLBI 基礎実験の後：河野注）、次世代システムとして、・・・実時間相関システム（K-2 と後に命名）を開発する一方、昭和 53 年末（1978 年末）「日米合同調査計画」の話がスタートすることになります。・・・。上記計画に基づく日米 VLBI 実験の申し込みは黒船来航にも似て電波研側の態度を決めかねさせるに十分なものでした。まがりなりにも電波研側で VLBI システムを開発した後だったので、どのような形で協力関係を結ぶかについては色々と議論のあるところでした。結局 3 回目（1979 年 6 月）の会合で村主特別研究官（当時）による米国側との打ち合わせの結果、電波研は米国側開発の MARK-III VLBI システムと“Compatible”なシステムを 5 年間（昭和 54 年～58 年）で完成させる・・・。”  
（川尻：パラボラと共に）

“最初は測地学審議会「第 4 次地震予知計画」建議を根拠に基礎技術開発の内容で 1979 年に予算化され、次年度（1980 年度）には NASA との国際共同プロジェクトへの計画改訂を何とか認めてもらったが、予算額は極めて厳しいものであった。・・・」（佐分利：電波研・通信総研の思い出集）

上に述べたような 1978 年から 1980 年にかけての 3 年間の動きが日本の VLBI の方向を決めたといっても過言ではないでしょう。長年の悲願であった予算化が達成され、当初、基礎技術開発に位置づけられていた K-3 の開発の方針は、Mark-III と同等の機能・性能を持ち、互換性を持つシステム開発の方針に大きくレベルアップされました。このような変更は日本にとって得策だったのでしょうか、評価してみる必要があります。

すでに述べましたが、米国の圧力があつたにせよ、Mark-III の導入は受け入れがたいことでした。しかし、日本が独自の高精度システムをたとえ開発しても、K-3 を世界に展開するには、当時、電波研の開発グループの実力はまだまだ不足していたと思われます。一方、「本当に超高精度システムの開発をやり通せるか」の不安に対しては、K-2 の開発で高精度 VLBI システム開発には少しの自信と開発グループである 3 研の電波研における存在感が後押ししてくれたと思われます。結果論ですが、開発期間であった 5 年で NASA からの資料と議論で我々の技術レベルは格段に上がりました。またその性能ばかりでなく機能や使いやすさは十年以上の経験を基にしており、とても歯が立たないほど優れていたと思います。もう一点、考慮しなければならないことがあります。すなはち、米国・NASA の外圧です。当初の予算額は 5 カ年で 5 億円あまりでしたが（6）で詳しく説明します）、日米実験に使用するための互換性を持たせるための追加要求は決して小さくは（ほぼ倍増）ありませんでした。また、開発後のグローバルな観測計画のための予算化も大蔵への説明に大変な苦勞がありました、かなりの部分が受け入れられました。

振り返ってみれば、かなり危ない橋を渡ってきたように思えます。K-2 システムの開発がなく、あるいは K-3 システム開発のスタートがもう 1 年遅れて、また、日本の実績がありあわせの装置の K-1 の成功だけであつたら、僅か 6 人のメンバーで Mark-III と同等のシステム開発の勇気が持てたかどうか、Mark-III の導入がありえたのではないかと。そして、もし Mark-III を導入していたら、その後の日本での VLBI 技術の大きな発展はなかったのではないのでしょうか。当時の建議を作成された方々、郵政省の方や電波研の幹部の先見の明に新ためて敬服の念を抱く次第です。

尚、K-3 と Mark-III システムを用いた実験の実施については、1980 年 2 月、ワシントンにある米国国務省及び NASA 本部で非エネルギー分野における日米科学技術協力に関する議論がなされました。郵政省を代表して田尾電波研所長が出席し、日米実験の合意がなされ、55 年 5 月 1 日協定が締結されました。この協定に基づき、1983 年から日本（電波研究所）と米国（航空宇宙局）との間で VLBI 実験によりプレート運動などを調べることが合意されました。これを報道する記事が電波タイムスの 1980 年 5 月 9 日に掲載されました。

### 3.1.3 日米実験用 K-3 システムの開発は社会や関係機関へ大きな反響を呼ぶ

国内実験が報道された後、VLBI に関する記事は少なく、1978 年 7 月に第 4 次地震予知計画の建議を根拠に、郵政省が VLBI システム開発の予算化に動き出してから、ぼつぼつと新聞などで報じられていました。ところが、日米協力による実験が計画されてから、社会的な注目度が急激に上がりました。新聞や放送だけでなく、色んな雑誌にも取り上げられるようになりました。例えば、毎日新聞などが 1980 年 2 月 18 日前後に日米実験計画を報じました。

当初計画の K-3 システムは米国システムと肩を並べる超高精度を目標にし、プレート運動や広域地殻変動の測定などに利用できるものとしていました。使いやすさや機能の面で大きな差があったものの、性能の面では日米実験のための仕様変更後も大きな変化はなく、また応用や成果についても新たに加わったことはありません。にも拘わらず、日米実験計画が公表された途端に、社会的に大きな反響を呼び始めたことは、熟考に値します。いくつかの原因は考えられます。まず、“日本の装置が国際実験に参加し、殆どの国民が知っている大陸移動説やプレート運動を国際協力で実証する”、という夢のような話、これに加えて、“数十億光年より遠い星の電波を受信して日米間の距離を数 cm で求める、というちょっとやそつとでは想像できない、奇妙・キテレツな装置を使う実験”、が多くの人々の関心を呼んだと考えられます。前者は当初の K-3 の開発計画と変わりはないので、前者と後者の相乗効果が生んだ反響と考えるべきでしょう。

プロジェクトを展開する際に、社会的反響は予算獲得など、プロジェクトの実現や成功に深く関わります。特に科学プロジェクトには子供たちだけでなく大人も耳を傾けて関心を持つような目的、あるいは夢と結びつけることが強調されるべきでしょう。

このころ、測地や位置天文分野での新技術の議論も活発になっていました。国土地理院は 1981 年に VLBI 開発プロジェクトチームを発足させ、近い将来、測地網の規制に VLBI 技術を利用する計画を明確にし、また、超高精度 VLBI システム完成後には国内の VLBI による測地観測に関する協力をする、との覚書を電波研究所と交換しました（詳細については 3.22 を参照してください）。

### 3.1.4 VLBI システム研究開発推進本部発足

K-3 を開発する 3 研を取り巻く当時の鹿島支所の状況はどうだったのでしょうか、4.1 表にこの頃の VLBI と宇宙通信の関連事項を年表にまとめて示します。CS と BS の通信実験が 1978 年に始まり、1979 年に ECS-a が静止衛星軌道投入に失敗はありましたが、ETS-II を使った伝播実験で衛星計画は最も華やかな時期でした。これらの衛星計画に加え、VLBI システム K-3 の開発も徐々に本格化していき、予算化に続き、組織の強化が図られました。

	VLBI	宇宙通信など
1977	01月:国内基礎実験 10月:3研発足 位相シンチレーション実験はECS実験計画に参加承認	2月:技術試験衛星II(ETS-II)きく2号打ち上げ ECS実験計画概念書承認、12月CS打ち上げ ECS地上局設備(4)+レーダ(2)整備開始、10月:新1研
1978	7月:測地学審議会第4次地震予知5ヵ年計画 12月日米合同調査計画スタート日米実験話題に上る	ETS-II成果発表、4月BS打ち上げ CS,BS通信実験・運用完成開始
1979	4月:VLBI技術開発5ヵ年計画(K-3)開始(5) 佐分利・小林正副本部長、川尻主幹 6月:日米合同調査専門家会議VLBIの日米実験使用 10月:VLBIシステム研究開発推進本部発足 12月:	2月: ECS-a 失敗
1980	1月:川尻室長米国でK-3&Mark-III互換性を調査 2月:非エネルギー分野における日米科学技術協力第2回会合(田尾所長)@ワシントン、5月締結 6月:K-2成果発表、ヘイスタック訪問K-3&Mark-III互換性の調査	地上施設を利用した伝播実験 2月:ECS-b失敗、ミリ波衛星通信実験開始 6月 BSのTV中継器故障
1981	5月:NASA一行鹿島へ(K-3&Mark-III互換性) 12月VLBI実験庁舎完成 本部:佐分利本部長、川尻副本部長、吉村主幹に移動	
1982	5月 上海天文台 叶、銭氏来所、日中VLBI実験希望 11月K-3のMark-IIIとの適合性試験成功	1月 BS放送実験・運用完成終了
1983	11月日米システム互換性確認実験成功	2月 CS-2a打ち上げ、ISS-b電離層観測終了 12月 18mアンテナにS&Lバンド受信機能追加
1984	1月第1回日米システムレベル実験成功 2月第2回日米システムレベル実験成功 6月 ΔVLBI法により精密軌道決定 7月国際VLBI実験開始日米間の距離を2cmの精度 10月 VLBIによる日米時刻同期実験	10月 スペースシャトル合成開講レーダー実験
1985	9月 日中VLBI実験開始 11月 日米VLBI実験解析プレート運動の実証	1月ETS-V/EMSS海岸・・・開発センター設置 9月DE-1テレメトリ受信開始 11月CS静止軌道外へ

4.1 表 K-3 の開発スタートのころの VLBI と宇宙通信関連の実施項目

このような状況は鹿島支所に留まらず電波研究所全体が対応しなければ、5 つもの大・中のプロジェクトを遂行できない事態になっていました。そこで、電波研究所の研究目標を新たに各研究部に対応させて 5 つの柱が立てられました。その中の 1 つとして、周波数標準部の“周波数標準に関する研究”が定められ、世界規模の時刻比較などが研究目標に掲げられました。これに加えて、VLBI は将来の大きなプロジェクトになることが期待されるとして、周波数標準部の研究項目に K-3 システムの一部である水素メーザ原子周波数標準の開発が組み込まれました。このような経緯があつて、本部長は K-1 や K-2 の開発で原子周波数標準や時刻比較を指導してきた佐分利周波数標準部長、K-3 で欠かすことのできない水素メーザ周波数標準を開発してきた同部の小林室長が副本部長、現場の鹿島の川尻 3 研室長が主幹となってプロジェクトを引っ張っていくことになりました。わずか 6 人の鹿島 3 研もプロジェクトに対応できるよう、状況が大きく変わりつつありました。川尻室長は対外関係や本部とのやり取りで手一杯になり、河野さんはこの年からお金の計算と

各部装置（サブシステム）の製作が遅滞なくできるようケアすることが本職（最初は飲み会を企画する役も分担しましたが、その後飲み会の回数が多くなり輪番制にした）になりました。一応、高橋富士信さんが解析ソフト関係、吉野さんがバックエンド、新しく入った川口さんがフロントエンドの担当、小池さんが ECS 計画の一部分担と原子周波数標準の開発で周波数標準部との橋渡しになったのですが、実のところ全てを全員が担当するようなものでした。

本部の最初の仕事は日本独自のシステムから Mark-III システムと互換性を持つシステムの開発への計画変更を大蔵省に説明、納得してもらって予算を増やすことでした。しかし予算増は困難を極めました。これについては 3.6 で述べます。本部の苦労はほんの始まりで、その後、鹿島から、予算増の合唱・人員増・分担の改変など次々に出される要求に対応する苦しい毎日が 4 年間続きました。

### 3.1.5 米国システムとの互換性は不平等条約であったか？

日本は米国のシステム Mark-III と互換性のあるシステムを開発することになりましたが、互換性とはどういうことでしょうか。簡単に言うと、2 つの異なる装置を取り換えても同じ動作をするとき、2 つの装置は互換性があるといえます。K-3 は 10 以上の装置で構成されているので、装置によって多少異なりますが、基本的にはそれぞれの装置が取り換え可能でないと完全な互換性があるとはいえません。チョット長くなりますがもう少し具体的に言うと、日米それぞれ開発したシステムを使って観測するが、それぞれが観測データを同じフォーマットで同じ内容を記録し、テープを相互に送りあって記録データを再生でき、相関処理・解析を行って遅延などの量から距離など推定でき、結果も一致するハードウェアとソフトウェア、ということになります。数億円もする 2 式 1 組の VLBI 装置のハードと処理解析ソフトウェア両方に渡って外国が作ったものと互換性のある装置を作ることがいかに困難であるか、だれにも分かってもらえると思います。米国が“アメリカの作ったシステムと同じものを作れるものなら自分で作ってみなさい、必要な情報はあげます、但し 1984 年予定の日米共同実験で使用できなければなりませんよ、自分で作れなければその金で米国システムを買いなさい”といっているのと同じことだ、と思いたくもなります。おそらく、米国も日本がそのうち音を上げて、購入に変更するという予想がなかったとはいえないでしょう。(2 年後の 1982 年 5 月、互換性を主要なテーマにして NASA チーム 10 人と 3 研メンバーが鹿島支所で議論しました。このとき、互換性の影響が大きい装置の担当者が「Mark-III を受け入れればこんな無駄な議論はしなくて済むのに」との発言があったことを付け加えておきます)。

どうしてこのような不平等条約とも思える取り決めに合意したのでしょうか。2)で少し述べましたが、重要なことなのでもう少し詳しく述べます。最初に、この取り決めで、米国と日本それぞれのメリットとデメリットを明確にしておきましょう。米国にとっては、「自国で開発した装置と“同じもの”を日本のお金で作ってくれ、予定通りのスケジュールで日本を国際観測網の中に入れて米国主導にすれば大きなメリットが期待できる」と考えたことははっきりしています。もちろん、米国製を買ってくれるともっとよいと考えていることは明らかです。デメリットとしては 10 年の経験の差がある技術力を日本に提供しなければならないことでしょう。しかし学術研究の装置開発では商品の開発とは異なり、開発後に大量生産で大きな利益を生むものではなく、むしろ開発後の例えば世界観測網運

用の負担を両者で持つことになって軽減でき、逆にメリットと考えられ、NASA はむしろ後者を期待していたと考えられます。(また実際に 1988 年からこれを国際地球回転サービス事業 (IERS) に発展させていきました。)

一方、日本は VLBI の経験で 10 年近く経験の差があり、米国の技術習得は世界のトップレベルへ達するには不可欠であり、また日本が国際観測に乗り出すには NASA の外交手腕は有効であろう、と考えたのです。このようなメリットがある一方、デメリットとしては米国システム購入と較べると数倍の費用と約二十人の多分野の研究・技術者が 5 年以上をかけなければならないことでしょう。しかし、前者のメリットが後者のデメリットを遥かにしのぐことは 1990 年以降に日本が VLBI 技術の応用として K-3 開発後に 4 つの世界トップレベルの研究プロジェクト(K-4 と KSP の開発と日本周辺広域地殻変動の測定、VSOP による宇宙 VLBI、VERA による天の川銀河の地図作り、SELENE による月の測地学)を実施・成功させたことでも明らかです。また、これらの成果は日本の科学者だけのものでなく、世界の科学者に提供され、研究に利用されました。VLBI 分野における国際協力は、この日米の協力が発端になったことも記しておきます。

互換性をどう実現させたか、K-3 が完成する 1983 年までの経過のあらましをまとめて述べておきましょう。1979 年 6 月の専門家会議で合意されてからすぐに、互換性の項目と内容(5.1 表)、そしてそれをどう実現するか、文献調査から始められました。まず、米国 NASA

本部 GSFC から Mark-III システムマニュアルが送られてきて、この資料から主要な機能・性能を明確にすることでした。これと並行して、1980 年 1 月に川尻室長が、1980 年 6 月には河野主任研究官が NASA を始めとする米国関連機関からいろんな技術資料を集め、互換性の項目の確認を行ってきました。技術資料については 1980 年 7 月に GSFC から Mark-III Documentation という米国システム全体を詳しく説明した資料の改訂版が届き、これを完全に理解することが互換性を持った超高精度 VLBI システムの開発の第一歩と考え、各装置の担当者が分担して当りました。開発後にはそれぞれが互換性を持つかどうかのテストは吉野さんや杉本さんが米国に行ってテストしました。また NASA とのやり取りをスムーズにしたのは、高橋富士信さんが NASA・GSFC に 1982 年から 1 年間在外研究員と滞在したことでした。日本側にとっては NASA の技術的な情報がどんどん入ってくるし、質問や Mark-III について理解不可能なことを高橋さん経由で NASA に気軽に質問できる。逆に、NASA にとっては日本の進捗状況が手に取るように見えます。このように、高橋富士信さんは日米間の橋渡しとして役割をはたしました。

互換性の項目	互換性の項目	互換性の項目	互換性の項目
受信機	送信機	アンテナ	データ処理
...	...	...	...

5.1 表 米国システム Mark-III との互換性の項目

### 3.1.6 日米実験用システムへの変更に伴う予算増の困難

“日米実験を実施する”という計画の改訂により予算増が不可欠になったのですが、大蔵省の財布の紐はきつく、期待する増額がままならず、システムの完成する 1983 年度まで佐分利本部長の苦労は続くことになりました。

1979年度の当初計画から翌年1980年度に予算計画変更の提案の一部を6.1表に示します。予算額が各装置と項目ごとに分けられていて各項目の下段の\*が付いているのがNASAとの国際共同プロジェクトへの計画改訂による予算増の部分です。当初予算(5.2億円)を超える増加分が要求されています。予算が2倍以上になったことから、当然、大蔵省への要求は厳しいと予想されていました。

当時の本部長の回顧録がその苦労を物語っています。“最初は測地学審議会「第4次地震予知計画」建議を根拠に基礎技術開発の内容で1979年に予算化され、次年度にはNASAとの国際共同プロジェクトへの計画改訂を何とか認めてもらったが、予算額は極めて厳しいものであった。鹿島からの列車で3研の担当と乗り合わせると、上野に着くまで開発費の窮状と増額を訴えられたりし、予算獲得の努力を直接見てもらうために室長さんにも大蔵説明に立ち会ってもらったりした”。

区分	79年度	80年度	81年度	82年度	計
(1) 測地学本部					
測地学本部	402,000				402,000
測地学本部	100,000	132,000			232,000
測地学本部	100,000				100,000
測地学本部	50,000				50,000
測地学本部	2,000				2,000
測地学本部	1,000				1,000
測地学本部	1,000				1,000
測地学本部	1,000				1,000
測地学本部	20,000				20,000
(2) 測地学本部					
測地学本部	10,000	10,000			20,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
(3) 測地学本部					
測地学本部	2,000				2,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
(4) 測地学本部					
測地学本部	2,000				2,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000
測地学本部	10,000				10,000

6.1表 日米協定に伴う予算計画の変更

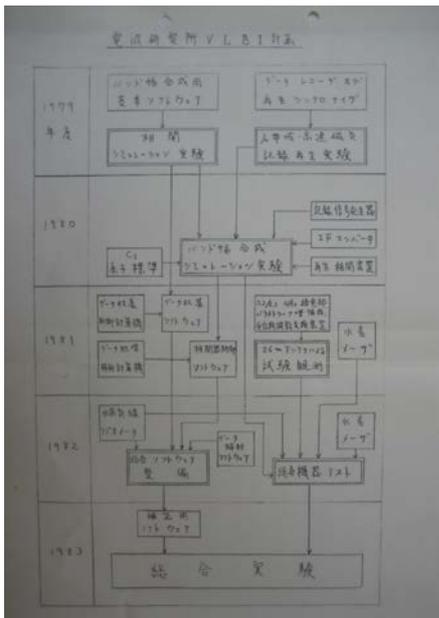
その大蔵説明に河野室長が佐分利本部長のお供をしたことがあります。郵政本省の予算関係の人が大蔵省の薄暗い建物のとある一室(多分主査の部屋)に約束の時間に案内されました。入ると先ず目に入ったのは机の後ろの壁に広島カープの旗が飾られていました(後で郵政本省の人にその主査はプロ野球広島カープのファンと聞きました)。本部長が増額の説明をし、質問され、解答するというやり取りが熱気を帯びてきたころ、なんとその主査は机の上に足を上げて質問をしたり、回答を聞き始めました。私はあっけにと取られて主査を凝視しました。周波数標準の研究分野では世界的に名前の知られた50歳がらみの本部長が真剣に説明する正面で、30数歳の若い主査がこんな態度で対応しているのを目の当たりにして、官僚組織の実態を垣間見ることができました。つまり、大蔵の主査は、予算は国民の税金を国民のために生かせるよう、いかに分配するか模索する立場なのに、まるで自分の金を懐から出すのと勘違いしているのではないか、あるいは、大蔵官僚である自分は特別に偉い官僚と勘違いしているのではないかと疑わざるを得ませんでした。結局、その日には担当主査から期待する回答は何も得られませんでした。説明が終了して大蔵省の建物を後にしました。怒りと悔しさと頭の中は混乱していて、本部長に掛る言葉が見つからないまま、地下鉄の入り口までできてしまいました。結局、“ご苦労様でした”の一言で3人は分かれましました。室長は鹿島行きの列車の中で、今日のできごとを繰返し思い浮かべ、先ほど経験したことがどういうことなのか、頭の中を整理しようとしていました。本部長は予算増額がいかに難しいか、現場の者にも経験させておいたほうがよいだろうとの考え

であると、自分なりに納得しました。しかし、収穫は当面何もなく、鹿島のスタッフのみんに、明日どう説明しようかと考え込んだまま、列車は鹿島についてしまいました。ひょっとして、「本部長はスタッフへの説明を私にさせようとしたのかなあ・・・」。結論から言うと、増額はかなり認められました。大蔵省の主査も当初の計画から突然2倍以上を要求され、更に毎年毎年、増額要求では頭に来るのも、後から思えばある程度理解できます。また大蔵省の職員が皆、上記のような人ばかりでなく、極めて特別な例であったことも述べておきます。

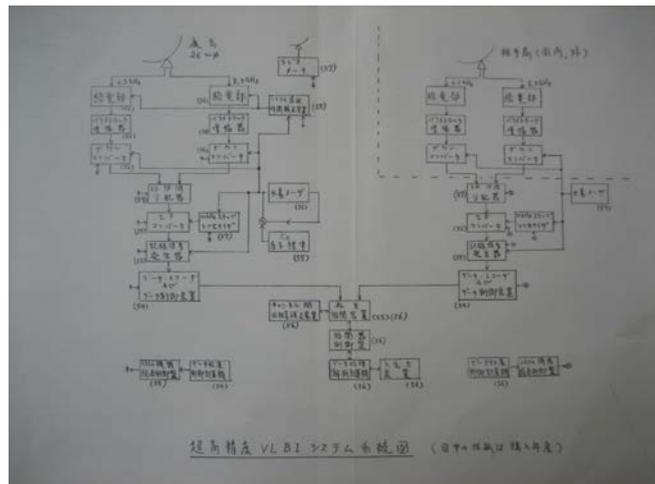
### 3.1.7 どの装置から開発するか：開発スケジュールの検討

多数の装置からなる大きなシステムの開発に当っては、どのような順序で開発していくかはその成否を左右する重要なポイントです。予算は各年度に、ある程度分散させ、機能・性能テストをするために製作・完成させる順序を明確にしなければなりません。また、K-3システムの特徴である米国システムとの互換性を持たせ、研究・技術者の構成を考慮しつつ、K-1やK-2で経験していない装置の開発に時間を要すると考えられるものを早く手懸けしなければなりません。考慮すべきファクターが多く、実際には大変難しい課題です。そこで、最も重視すべき2点、つまり米国システムとの互換性、K-1やK-2の開発で経験していないため開発に時間を要すると予想されるものに重点を置いて、スケジュールを組み、これに他の考慮すべき点を加えてゆくことにしました。解決できそうにない問題が生じると、一旦戻って考え直すという方法を基本に、各担当のメンバーが議論に議論を重ね開発スケジュールを組み上げました。

互換性を持たせる装置として最も重要で、K-2でも開発しておらず、時間がかかりそうなのは、全員、データレコーダーで一致しました。数十Mbpsの当時日本では最高速のデータを記録する装置であり、このデータが記録された磁気テープが日米で交換され、処理・解析されて例えば日米間の距離が求められるのですから、技術面と互換性の両方の面で重



7.1 図 テスト・スケジュール



7.2 図 K-3 システムのブロック図と構成する装置の開発年度 (吉野氏編)

要であり、問題なく最初に手をつけるべき装置でした。初年度の1979年から早速、開発に着手しました。この装置が完成すれば、米国で記録されたデータを再生したり、記録内容やフォーマットが一致しているか、などの互換性にきわめて重要な多くの項目がチェックできます。次にテストデータでもよいので日本で記録したデータを米国で再生テストをする。その次は米国データを処理して見るために、関連器の開発と言った具合に開発順序が決められて行きます。そして、これを遂行するための研究・技術者の確保ができるか、テストをするための米国出張計画など、次々にスケジュールに組み込まれて、全体スケジュールとして可能か議論されました。最終的に決められた装置テストのスケジュールと K-3 システム構成と開発年度を 7.1 図と 7.2 図に示します。

### 3.1.8 製作を統括する会社がない：サブシステムごとに約 10 社と契約

K-3 システムの開発はスタートしたものの、当初から大変大きな問題を抱えていました。それはシステムの統括を 1 社も引き受けてくれるところがなかったのです。K-3 システムのような多数の装置（サブシステム）からなる複合装置を作るとき、一般にひとつの装置は独立したものでなく他のいくつかの装置から信号を入力したり、逆に他の装置へ信号を出力します。これらの信号のやり取りは電圧、波形とか信号の内容（インターフェースを取る）に齟齬があるとたちまち全体としては動作しなくなります。この理由から多くの場合、1 社（主契約者）が全体をまとめ、調整する役割を引き受けます。ところがその役割をしてくれる会社がないのです。電波研究所も面子があるので幹部がいろんな会社に頼みに行きましたが、結局ダメでした。引き受けてくれない理由は明らかでした。先ず①予算が少なすぎて会社側はインターフェースを調整する人を確保できない、②装置が 10 種以上に別れ、しかもいずれも特殊で高度な技術を必要とし、1 装置だけでも多くの技術者と費用が必要なのに、10 以上の装置をカバーすることは負担が大きすぎる、③開発した後、大量に売れる装置でない（私たちはこのような装置を一品料理といいます）ので赤字で開発したら永久に採算がとれない、です。結局、主契約会社なしで製作する以外なくなりました。10 を越える装置についてそれぞれ競争入札で一番安い会社が製作し、装置間のインターフェースは全て電波研の研究者がやる、という大型装置としては前代未聞の開発方法になってしまいました。このことは、極端に言えば、ピン 1 本に至るまで正確に 3 研のスタッフが把握しなければならないという覚悟を初めにしなければなりませんでした。

サブシステムごとに契約を行うため、2 年目の 1980 年頃は、実際には検討した順序通りに開発・契約が進まず、一部暗礁に乗り上げつつありました。そこで 1981 年に本部の強化がなされ、副本部長は川尻さん、主幹は吉村さんに交代しました。会社との契約は吉村主幹が先頭になって強力に進め、1、2 年で概ね予定の開発スケジュールに載せることができました。契約した会社は驚くなかれ、10 社を超えました。但し、アンテナで受信した信号を磁気テープ装置で記録できる信号にするまでの複数の装置（バックエンド）だけはまとめて（株）アンリツが引き受けてくれました。このような協力がなければ 3 研のスタッフの頭はパンクしていたかもしれません。

### 3.1.9 急激な増員

K-3 システム開発は米国システムと互換性を持ち、期日までしっかり完成させる、などの国際的な責任を負っていました。またほんの一部を除いてどの装置も国内ではこれまで

経験したことのない高度な技術を駆使しているため、研究・技術者の増員は緊急且つ不可欠になっていました。

このようなシステム全体を構成する装置（サブシステム）が高度な技術を要し、且つ大規模な場合の製作について既に述べましたが、設計する研究・技術者サイドについても、いくつかのサブシステムを取りまとめる役とシステム全体をまとめる役は必ず必要です。また担当者が1名の場合、個人の思い込みや見落としがありうるので、2つ以上を担当する人もいましたが、それぞれのサブシステムには2名以上が担当しました。例えば、プログラムを組んでいるときバグに遭遇しないことは先ずありえません。すぐ原因を発見して修正し、解決するのですが、時々どうしても自分でその原因を発見できないことがよくあります。ほとんどの場合、その人の思い込みが邪魔をしています。もし2人で担当していたらもう一人の人が間違った思い込みを発見できる場合が多いのです。およそ10のサブシステムがあるので、重複して担当する人もいますが、取りまとめ役を入れると20人以上必要になります。このため、鹿島支所の3研のほかに、本所の周波数標準部の1研究室に主要なサブシステムの一つである水素メーザ原子周波数標準の開発を担当してもらうなど、所内での開発体制の工夫と努力がなされました。しかし、K-3の開発で認められた増員はわずか1名でした。上記の水素メーザ原子周波数標準の開発を除いて1名の増員で大きなシステムを開発することは到底不可能なことでした。一方、国立の機関は総定員法という法律で人数が規定されています。従って一時的に大変だからといって職員を増やすことは困難です。VLBIグループはこの難題をどう解決したのでしょうか。

プロジェクトなどの短期あるいは中期的な増員は研究所内で研究テーマを変更して研究室を移動、あるいは退職による補充のための新人を割り当てるなどの“大鉦を振る”わざを得なかったのです。このような要員の確保の仕方は衛星計画の開始とともに既に実行されていました。その頃、4.1表にも示すように、ECS-aとECS-bの静止軌道投入失敗、BS中継機の故障があり、また当時の実験は2、3年後に終了予定で、1980年頃から衛星計画が少し下火になりつつあったため、上記のような対応によるVLBI開発要員の増加は幸い大問題にはなりませんでした。

しかし、人数を揃えれば新しい装置が開発できるわけではなく、それぞれの装置の開発ごとに異なる専門分野の人が必要になります。また、研究者にとって長年続けてきたテーマの変更は一生の問題です。電波研では公式に進路調査をやっていましたが、K-3開発に必要な10人もの人がこれまでの研究テーマを変更して参加することは当然ありませんでした。そこで個別に、よく言えば研究室の移動の希望を聞く、悪く言えば自分のプロジェクトに誘う（当時、このような誘いは「一本釣り」と言われていました）ことが衛星計画などで公然と行われていました。VLBIについても衛星計画と変わりはありませんでした。少し遡りますが、K-1、K-2も含めたVLBIシステム開発全期間の3研の研究・技術者の推移を9.1表に示します。1976年にK-1開発からK-3開発が本格化する1979年まで5~7名でほとんど変わらず、日米実験が決定した1980年に1名増、開発が本格化した1981年4名増、開発に加えて互換性などのテストが始まった1982年に5名が増員になっています。少し違った見方をすると、合計10名もの増員は電波研究所がいかにかVLBIシステム開発に重要性を認め、力を注いだかこの表から明らかでしょう。また、研究所内を説得し増員を指揮した本部長をはじめとする本部の努力に敬服せざるをえません。

年	1975	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85
室員数	5	7	7	6	6	7	11	16	16	16	18
備考	K-1 開発 → K-2 開発 → K-3 開発 →										

9.1 表 3 研の室員数の変遷

### 3.1.10 VLBI 実験庁舎完成

1981 年度に入り、K-3 システムの一部が納入され始めました。26m アンテナ庁舎は ECS-b の失敗はありましたが、ECS 地上施設を使った伝搬実験は継続されており、その後もミリ波通信技術の開発は継続される予定でした。このため、向う 3 年間に K-3 システムが納入されると、26m アンテナ庁舎の一部を陣取って実験を行うには手狭になっていました。また水素メーザ原子周波数標準は厳しい温度管理と無停電化が必要なため、これらを完備した VLBI 用に実験庁舎を建てることになりました。一方、前年まで、26m アンテナは ECS 伝搬実験の 4GHz 帯実験に使用されていました。K-2 の実験もこの中に入っていました。日米実験の実施予定が決まり、宇宙通信の周波数帯 4GHz と 6GHz から 2GHz と 8GHz 帯に周波数変更して、VLBI 専用に利用する予定になりました。このため、26m アンテナへの制御信号を送ったり、逆にアンテナからの受信信号などを受け取るにはできるだけアンテナに近いほうが便利です。そこで



10.1 図 VLBI 実験庁舎（右下）と 26m アンテナ

26m アンテナに近い西側（10.1 図）に建設することになりました。アンテナ・フロントエンド以外の関連装置は全てこの VLBI 実験庁舎に設置され、実験などもこの建物で行うことになりました。しかし、この仕事場はプレハブでした。というのは、互換性確保や必要な機能・性能を持つ装置の開発に注力するあまり、他の計画の予定を調査せず、26m アンテナ庁舎全体を VLBI に利用できると思いきり思い込んでいて、あわてて建設したからです。

### 3.1.11 1981 年 5 月 NASA 一行鹿島へ

来る日も来る日も Mark-III の Documentation の理解に頭を捻ることになりました。しかし、何故こんな回路を作るのかとか、不要ではないかといった多数の疑問点が蓄積されていきました。

この状況は本部も把握しており、一度、日米のシステム開発関係者が集まって議論して一気に多くの疑問を解決しよう、ということになりました。1982 年 5 月、米国の VLBI 研

究・技術者 10 人の一行は電波研本所と鹿島支所を訪問しました (11.1 図)。鹿島支所では日米のシステムを分担する装置ごとに 3 グループに分かれ、並行して議論されました。その様子は凄まじいものでした。とにかく日本側としては互換性を持たせるには Mark-III の中途半端な理解は禁物ですし、逆に、必要ないものを互換性の項目に入れるのは無駄な労力と金をつぎ込むこととなります。ハードウェアでは、回路は勿論、素子まで米国のシステムに合わせれば互換性の問題は少なくなります。日本の会社が製作するのですからそんなことはとてもできません。1.8 でも述べましたが、3 研のメンバー自身が米国システムの完全な理解の下に日本の会社の技術者と議論し、互換性を持たせて製作する、というプロセスを踏まなければなりません。このため、日本側は微に入り細を穿つ議論を



11.1 図 NASA 一行が鹿島支所を訪問

延々と続けました。実際、互換性が主要なテーマの 1 つであったこの会合には日本の担当する会社の技術者は一人も参加していませんでした。

この“団体交渉”は日米の距離を一気に縮めました。アメリカのやることはなんでも正しいという意識 (敗戦の痛手?) が当時の日本人には心の片隅にあって、まして高度なシステムを作った研究技術者を前にすると、心の片隅に埋もれていた意識が首を持ち上げてきましたが、激しい議論はすぐにこれを払拭してくれました。むしろ両者は議論をおおいに楽しむことになりました。その後この議論に参加した人たちと多くの国際研究集会で会い、友達づきあいが続くこととなります。

### 3.1.12 K- シリーズ VLBI システムの名前の由来

鹿島支所が中心になって開発した VLBI システムには K-O という名前がつけられています。その由来は諸説あって、実のところははっきりしていません。公式の会議などで決められた名前ではなく、短くて便利であったため、誰からともなく使用されて、いつの間にか公式な名前になった、というのが真相でしょう。少し当時使用されていた名前について話しましょう。

1979 年度に「超高精度 VLBI システム」の開発がスタートしました。この装置は鹿島支所で開発する 3 世代目の VLBI システムです。既に述べたように、最初のシステムは「国内基礎実験に使用した VLBI システム」、2 番目は「位相シンチレーション測定システム」、と長い名前を使ってきました。さすがに 3 番目の「超高精度 VLBI (超長基線電波干渉技術) システム」になると呼び名が長すぎて、まるで落語に出てくる「寿限無」のように、3 研のスタッフ自身もうんざりしていました。

NASA が中心になって開発してきた米国システムは 2 号機から Mark-II (マークツー)、3 号機は Mark-III (マークスリー) と呼ばれ、公式の文書にも使われていました。当時、日

本の大メーカーの車にも改良型に **Mark-II** (マークツー) と名前がつけられていて、このような名前の付け方は簡易で短く、しかも改良型とわかりやすいものでした。そこで、日本のシステムもこのような名前をつけたらどうかという意見がそれとなく出て、これまでの長い名前にうんざりしていたスタッフは大いに賛成し、色んな案が出されました。記憶は確かでないのですが、**RRL-O** (**Radio Research Laboratories**:電波研究所) とか **Kashima-O** とか、本所のある地名小金井市の **Koganei-O** が候補に挙がっていたと思います。いずれも長く、簡単に **Kashima** の **K-O** という案が出されました。しかし、当時の3研のメンバーは6人中、川尻、河野、小池、川口の4名も **K** で始まっており、高橋富士信さんと吉野さんの二人が異なっていました。人の名前の頭文字を使うのは良くない、との意見もありました。あれやこれやの議論(少なくとも公式の会議ではなかった)で **Kashima** の頭文字であり、本所と水素メーザ原子標準を開発する周波数標準部のある小金井市の頭文字でもある **K** を冠にした **K-O** にしたらどうかという意見が支配的でした。その後、簡易でしかも3台の区別も明確であったため、みんなが使い始めました。そして1979年度の電波研年報に以下のような文章とともに公になりました。「**VLBI** システム研究開発推進本部：米国 **Mark-III** システムの調査を詳細に行い、これとの両立性及び将来の精度をも考慮した当所システムの構成案 (**K-3** システムと呼ぶ) を作成した」。この年度の米国との会議の資料にも **K-3** 名が使用され、国際的にも **K-O** という名前が使用されることになりました。

### 3.2 VLBI 実験庁舎完成

河野宣之

1981 年度に入り、K-3 システムの一部が納入され始めました。26m アンテナ庁舎は ECS-b の失敗はありますが、ECS 地上施設を使った伝搬実験は継続されており、その後もミリ波通信技術の開発は継続される予定でした。このため、向う 3 年間に K-3 システムが納入されると、26m アンテナ庁舎の一部を陣取って実験を行うには手狭になっていました。また水素メーザ原子周波数標準は厳しい温度管理と無停電化が必要なため、これらを完備した VLBI 用に実験庁舎を建てることになりました。一方、前年まで、26m アンテナは ECS 伝搬実験の 4GHz 帯実験に使用されていました。K-2 の実験もこの中に入っていましたが、日米実験の実施予定が決まり、宇宙通信の周波数帯 4GHz と 6GHz から 2GHz と 8GHz 帯に周波数変更して、VLBI 専用に利用する予定になりました。このため、26m アンテナへの制御信号を送ったり、逆にアンテナからの受信信号などを受け取るにはできるだけアンテナに近いほうが便利です。そこで 26m アンテナに近い西側 (2.3-1 図) に建設することになりました。アンテナフロントエンド以外の関連装置は全てこの VLBI 実験庁舎に設置され、実験などもこの建物で行うことになりました。



2.3-1 図 VLBI 実験庁舎 (右下) と  
26m アンテナ

### 3.4 フロントエンド

雨谷 純

鹿島 26 m アンテナのフロントエンドを、国際 VLBI 観測に対応できるように昭和 56 年に検討を開始し、開発最終年度の 58 年に改修を終了した。それまでの 26 m アンテナのフロントエンドは、通信実験用の C バンド送受信対応のものだったが、それを S・X バンド対応に改修した。受信機室はそれまで使われていた物をそのままに、中身をすべて交換した。受信機室に大型導波管で引き込まれた信号は、S 帯と X 帯に分離され、それぞれ左右円偏波に変換された。X バンドについては、通常の国際 VLBI で使用される 8,180 MHz~8,600 MHz の他に、7,780 MHz~8,200 MHz の低周波バンド(X' バンド)を設け、小型のアンテナを相手とする VLBI でも S/N が稼げるよう、広帯域受信が可能な構成とした。

受信機室内に周波数変換部が置かれ、S バンド(2,200 MHz~2,320 MHz)が 180 MHz から 300 MHz、X バンド、X' バンドが 100 MHz~520 MHz の IF 帯にそれぞれ変換された。

この改修は、日本電気により行われた。低雑音増幅器、周波数変換部、ローカル信号発生部のすべてが日本電気のいわゆるディスクリート品だった。当時の仕様は、日本電気との話し合いで決められ、ある程度のマージンを設けた仕様になっていたが、通例、それよりもかなりよい性能のものが納入されていた。X バンドの低雑音増幅器は、ペルチェ冷却のパラメトリックアンプだったが、雑音温度 60 K は当時としては高い性能の物であった。横浜工場での立ち会い検査では、導波管立体回路の損失や低雑音増幅器雑音温度の精密測定を実際に見せてもらったが、導波管すら見たことのなかった私にとっては、とても勉強になった。その日本電気とは、後年、準天頂衛星でも世話になったが、搭載系はともかく、地上系アンテナの中身はすべて外国製のパッケージ品で、往年の一流開発者の気概は片鱗も見られないものとなっていて、残念に思った。

遅延校正信号の開発が間にあわず、日米実験のフリンジテスト時は、遅延校正信号の代わりにシンセサイザの信号を注入したが、実験の間中、受信機室にこもってシンセサイザ出力のオンオフを下の実験室からの指示に従って行ったのが思い出される。後日、フリンジ解析を行った米国から、「妙なキャリアが混入している」と指摘され、苦笑いをしたものだ。

フロントエンドで思い出されるのは、「茶筒」と呼んでいた 26 m アンテナの螺旋階段である。フロントエンドの性能測定のためには、液体窒素の大型魔法ビン(20 リットルくらいだったか)や、ヒューレットパッカード社のスペアナ 141T、シンセサイザ 8660C など、超重量級の測定器を手で持ち上げなくてはならず、体力はもちろん、精神力もかなり要求された。後年のもろもろの苦勞(?)に耐えられたのも、この時の「苦行」のおかげかもしれない。また、この茶筒は、付近の鳥たちにとっては「罌」のようなもので、一旦迷い込むと自力での脱出は困難だったようだ。年に一羽くらいは、「ご遺体」の片付けをしたものだった。

※下線部に関しては、外部公開の場合は、「時代の移り変わりを感じた。」くらいにしときます^^;; また、写真については、手元にないので、今度鹿島に出張した時に、探してみます。

### 3.5 K-3VLBI システム用水素メーザの研究開発 -Hの研究にはげめ-

森川容雄

電波研の水素メーザの研究開発の歴史は昭和 40 年代にさかのぼる。昭和 41 年に米、スイスについて世界で三番目にメーザ発振に成功し、昭和 50 年頃には  $10^{-15}$  台の周波数安定度を実現していたが、当時の H メーザは 400l/s と 200l/s のイオンポンプを二台使用し、畳二枚×高さ約 2m ほどの大きさがあり、車で運搬することは想定されていなかった。しかし昭和 54 年に始まった K-3VLBI システム用 H メーザの開発では、 $10^{-15}$  台の周波数安定度を実現すると共に、小金井から鹿島に運搬するために H メーザの小型軽量化と可搬性が課題になった。H メーザの小型化は水素ビーム効率を改善しイオンポンプの負荷を低減することでイオンポンプと真空系を大幅に小型化し達成した。また、磁気シールドを真空内に設置し、断熱性を改善すると共に 1.4GHz の空洞共振器の固定に皿バネを使用し、共振器周波数の温度係数を改善し  $10^{-15}$  台の周波数安定度を実現した。

開発した H メーザを小金井から鹿島に輸送するときが一番心配したことは輸送時の振動により 1.4GHz の空洞共振器の周波数がずれることであった。このため鹿島に着くと早速鹿島の SG を借りて共振器の周波数をチェックしたところ、周波数のずれが許容範囲を超えていた。本当に周波数がずれていると、真空を開け共振器周波数を再調整しなければならないが、そのためにはメーザを小金井に送り返す必要がある。このため、鹿島三研のメンバーが見守る中、平静を装いながらも内心はかなり焦りながら共振器周波数の測定系を再チェックしたところ SG がフリーラン状態になっていたことが原因とわかり、SG の Ext. Ref に信頼できる 5MHz を接続したところ共振器周波数は許容範囲内にあることが確認でき、その後は順調にメーザ発振に成功し、内心ほっとしたのを覚えている。その後、二台のメーザの周波数比較をしたところ不規則に  $4\sim 5\times 10^{-14}$  レベルの周波数変動が観測された。最初、原因がわからず頭を抱えた。いくら考えても原因を特定できず頭を冷やすためメーザ庁舎の外に出ると、頭上で 26m アンテナが星を追尾して動いていた。庁舎に戻り環境磁場をモニターするとアンテナの動きに応じて 10mG 以上磁場が変動していた。二台のメーザのビート周波数を測定するため、一台には C 磁場と呼ばれる静磁場を通常よりかなり大きめに設定していたため、環境磁場の影響を受けやすく、これが原因であることが確認でき安心した。この現象は 1984 年に NASA GSFC で開かれた国際研究集会 (PTTI) で発表したところ、ドイツの WETZEL のグループが注目し、メーザを地下に設置したことを後年吉野さんから聞かされた。その後は大きなトラブルもなく K-3VLBI システムの基準周波数源として使用され日米 VLBI 実験等に貢献することができた。

最後に私事で恐縮だが、私はメーザを開発していた 1981 年に結婚した。結婚式の当日、鹿島三研から「エッチノケンキュウニハゲメ」という祝電をいただいたが、披露宴の出席者の中でこの意味を正確に理解できるのは当時の VLBI 本部長の佐分利総合研究官をはじめとする電波研関係者だけであったため、披露宴で読まれることはなかった。読まれることはなかったが、一番記憶に残っている祝電であり、実際、私はその後長きにわたり H の研究を続けることになった。当時の鹿島三研の皆様に感謝する次第である。

### 3.6 バックエンドの開発

木内等

K-3 バックエンド部は、フロントエンド部 (2 or 8 GHz 帯) で受信後増幅され、100-500MHz の中間周波数 (IF) 信号に周波数変換された信号を入力し、時刻符号付のデジタル信号に変換する部分であり VLBI で最も特色の出る部分である。この部分にメジャーな変更があると VLBI の世代が代わる。このことから、K-3 は“鹿島の3代目”を意味している。

VLBI では信号処理に相関処理という方式を採用しているため、各観測局で用いるバックエンドの互換性が不可欠である。互換性というのは、信号周波数、帯域、フィルタ特性、データサンプリングレート、時刻符号、データフォーマットなど相関器からみたデータが同じことを意味する。大陸間 VLBI 観測の実現を目指していた日本は、はるか先を走っていた米国の Mark-III と互換性をとる必要に迫られた。この Mark-III は新しい技術が盛り沢山であり、革新的なものであった。K-3 バックエンドの開発は、米国の Mark-III 技術に追いつくための模索だったとも言える。

当時、国立天文台では Mark-III を買って使おうという考え方があったが、これは我々の目指す方向とは一線を画するものであった。そのため、Mark-III の資料に嚙り付きながら技術習得と技術開発を行った。近年の高度に集積化された LSI と異なり、ハードウェアの試作・改修を通じブラックボックス的なところは排除することができた。我々は K-3 バックエンド開発を通じ、VLBI ハードウェアの奥深さと技術の美しさを知ることとなった。個人的感想で申し訳無いが筆者は、バックエンドで 2 回、バンド幅合成関連ハードウェア (位相校正、相関器) で 2 回、システムの美しさで鳥肌が立ったのを覚えている。

現在の技術をもってすれば、全データをデジタル化しソフトウェア処理も可能かも知れない。しかしそれは、物量と金と力にものを言わせたものにも感じられ、美しさは微塵もなく工学的興味さえ萎えてくる代物にも思える。例えば、解析的な解法と計算機にものを言わせた数値解析の違いの様なものである。そういう意味でも黎明期のシステムは本質に基づいた高精度化の工夫が盛り沢山の美しいものであった。

開発を通じ VLBI の世界の常識を叩き込まれた。それは、受信する信号は受信機雑音より弱いことが当たり前であること、受信信号のコヒーレンス (可干渉性) の維持のための周波数変換信号の高位相安定度化の重要性、周波数変換時の不要帯域 (イメージ) 信号の漏れ込み抑圧の重要性、局内遅延補正の重要性を何度も体験することとなった。日本を代表する通信関係の装置開発も行ってた有名測定器メーカーやミキサ・フィルタ等の製作を得意とする当時のベンチャー企業にも製作をお願いしたが、通信での常識 (VLBI での非常識) が壁となり、バックエンドのアナログ部の開発に時間を要した。この困難さは、電話の向こうで担当者の声がしているにも関わらず居留守を使われたという話にも象徴されるほどメーカーにも困難なものであったに違いない。最終的には、日本のメーカーは全ての技術を習

得し、我々も回路試作・実物改修を通じ、身をもって技術習得することができた。今にして思えば、全てをいじれる良き時代であったのかも知れない。

K-3 バックエンドは、バンド幅合成に最適化したデータ収集装置であり、以下の機器から構成されている。各装置の主な機能を紹介する。

#### (1) IF 分配器

100-500MHz の IF 信号をビデオコンバータ 16 台に分配する装置である。ビデオコンバータの周波数変換のための信号（ローカル信号と呼ばれる）の第3高調波による影響を除くため最低周波数の3倍が帯域内に存在しないように、Low-IF: 100-230MHz, High-IF: 210-500MHz に分離し、必要な一方を各ビデオコンバータに送る。

#### (2) ビデオ変換器（16台）

高位相安定 10kHz ステップシンセサイザ、広帯域イメージリジェクションミキサ、7次バターワースローパスフィルタが内蔵されている周波数変換装置であり、入力された IF 信号の指定された周波数領域をデジタル信号に変換可能な低い周波数（ビデオ信号）に周波数変換する。イメージリジェクションミキサでローカル信号の上下側波帯を分離周波数変換する。これは、相関処理時に上下側波帯で地球回転によって引き起こされるドップラ成分の位相回転（フリッジ回転：相関処理参照）が逆になり、お互いが雑音となるため、分離し片方の成分だけを用いることで信号対雑音比をよくするためである。シンセサイザの位相安定度、イメージリジェクションミキサの不要波（イメージ）抑圧性能が優位性を決めるのであるが、これらの開発が最も困難であった。シンセサイザの位相安定度は位相時ループのゲインを低雑音で如何に大きくするかが難しく、イメージリジェクションミキサでは広帯域（10kHz - 4MHz）にわたる 90 度移相器部分が問題であった。

#### (3) フォーマッタ

入力されたビデオ信号をデジタル化し、データに世界協定時（UTC）時刻を付加しレコーダに送る。デジタル化は、入力帯域の2倍のナイキストレートで1ビットサンプリングされる。1ビットというと信号の正負のみの情報でありデータを大幅に損失すると思われるが、失うのは振幅情報 36%のみで位相情報の損失は無い。信号位相が重要な測地 VLBI には最適で無駄のないシステムと言える。サンプリングクロックタイミングの位相安定性が重要である。

#### (4) デコーダ

フォーマッタからレコーダに送られ記録されたデータのエラーレート検出

#### (5) 位相較正信号発生器

アンテナ低雑音増幅器以降の全ての系の遅延量を周波数特性も含め補正するための信号発生装置であり、バンド幅合成のための重要な役割を持つ。

バックエンドとは独立した機能であるが、バックエンドラック内に格納される。

(6) 基準信号分配器

全ての機器に水素メーザ原子標準からの高安定基準信号を分配する。

(7) 電源部

各機器に DC 電源を供給。

それぞれの機器にデバイスコントローラを持つ差し替え可能な（ラインリプレーサブル）装置で、国際的にスタンダードな GP-IB バスを採用している。

### 3.7 データレコーダ

浜 真一

データレコーダというと、あの重たく大きな磁気テープ（直径 14 インチ、幅 1 インチ）が大量に並べられている光景が思い浮かぶ。これは、元々は放送局用のビデオテープをデータ記録用に使ったもので、通常の実験では 1 時間に 1 本程度消費していた。24 時間実験だと 20 本を超え、これを特注のハコ（通称「クビオケ」）に詰め、関連処理装置のあるところに SAL 便で送っていたのである。データレコーダ自体は、Mk-III と同様、ハネウェル社のものを VLBI 用に小改造（テープ走行速度の変更）したものである。

VLBI では、非常に大量のデータが各観測局で発生する。典型的な実験では、一局当たり 2.5 テラ bit（63Mbps\*400 秒\*100 観測程度を想定）のデータが発生するが、これを記録できるのは、1980 年当時では体積当たりの記録密度が稼げる磁気テープが唯一の解であった。ちなみにフワード・リバーズ各 14 トラック、テープの速度は 135ips なので、記録密度は 933kb/in<sup>2</sup>（≒145kb/cm<sup>2</sup>）となる。（ちなみに 120 分の DAT では 11Gb/巻、4,850kb/cm<sup>2</sup>）。

今から見るととてもハイテクとは言えないこのような磁気テープでも、当時はココム（対共産圏輸出統制委員会）の対象品となっており、アメリカに送るためでさえ、通産省の許可が必要であった。通産省に「磁気テープを輸出するのではない。送りたいのは記録されている学術実験データである」という説明をして、包括許可を得ていた。

磁気テープは使い回しするので、米国で関連処理が終わると大量の磁気テープが送り返されてくる。これを消磁装置にかけ、磁気テープの保管棚で管理するのであった。

鹿島でも関連処理を行うことになった。そのため、テープ同期（二局のデータの頭出し）をしなければならない。再生できた時刻ラベルを基に、進んでいる方のテープ速度を一定時間低下させ、再び 135ips に戻して時刻ラベルを読む。時刻ラベル差が関連器の入力バッファ以内になったら、関連開始フラグを立てる。これを当時の HP パソコン上に HP-Basic でプログラムを組んだが、これは良い経験であった。テープ速度の制御時間は計算可能だが、計算機の演算・入出力時間やレコーダの応答速度があるので、細かいパラメータは試行錯誤であった。

磁気テープは約 3.4m/s という高速で磁気ヘッドに接して走行しているせいか、テープが少しずつ摩耗するようだった。時々磁気ヘッドを有機溶剤を付けた綿棒で清掃した。質の悪くなったテープでは BER（ビットエラーレート）が 10<sup>-3</sup> 台（今の常識では考えられないですね）にもなり、テープ同期に時間を要したり関連処理時にエラーが起こったりすることもあった。またバキュームモーターのブラシがよくすり減ったので、たまのブラシ交換も印象的。

何とかもっと高密度化したいということで文献調査などもしているうち、ヘイスタック観測所から、新しい方式が提案された。通称インチワームという LVDT 素子で、トラック幅を狭くした磁気ヘッドをテープの幅方向に微小に動かし、記録可能なトラックを 1 桁増やそうというもの。これはヘッド位置の再現性が機械的に難しいだけでなく、再生信号の S/N が低下するため BER が悪化するので、実用上では信頼性に欠け、本格的に運用する前に K-4 のカセットテープ時代を迎えることになった。

ともあれ、ブラックボックスではない「物」を扱い、その動作が具体的に見え・制御できる、というのは貴重な経験であった。

付録：DAT に関する数値の根拠

テープ幅：3.8mm、テープ長：60m（120 分用）

1 巻の記録容量：標本化 48kHz（標準） \* 16b サンプル \* 2ch = 1536Mbps

∴ 記録密度 [b/cm<sup>2</sup>] は、 $(1536M * 120 * 60) / (60000 * 0.38) = 4.85M[b/cm^2]$

## 3.9 計算機・データベース

高橋幸雄

### 3.9.1 計算機について

当時使っていた計算機に関して、記載しておく。私が赴任した 1982 年当時は、私の大学院でも、やっとスーパーコンピュータが使われ始め、学生でも少し使うことができた。しかし、そこでは、パンチカードで FORTRAN 言語を入力して読ますという事であった。当時は 16 ビットマシンで、32 ビットマシンが出始め、計算機の時代の走りであったが、今思うとその性能は現在のスマホまたは簡易な PC ぐらいの性能しかなかったのかもしれない。そんな中、電波研に入所し、VLBI の開発を行った時には、最先端の PC や計算機があり、驚いたものである。話を聞くと、私の先輩たちは、26m の大型電波望遠鏡を計算機ではなく、人間が手で天体を追尾したとか、紙テープを手で読んだとか、目で相関処理という信号処理を行ったなど、神業に近い逸話をきき、驚きを覚えたが、私が入所した 1982 年には、そうした話はなく、最先端の計算機を使い放題で使うことができた。

物理モデルのソフトでは 25000 ステップくらいあり、他のソフトウェアも同じ程度の量のソフトウェアばかりで、それをカードでやるなどは不可能であるが、その当時の最先端のミニコンピュータが導入された。

計算機としては HP1000 という YHP (横川ヒューレットパッカー社) の計算機が、1982 年頃にあり、それをういた開発が進められていた。当時は、スーパーコンピュータはあったが、まだまだ世の中で広く汎用に使われてはおらず、この計算機は、当時ではミニスーパーコンピュータであった。16 ビットマシンで、計算速度は 0Mps で、デスクタイプの交換できるハードディスクを持ったものである。1 デスク約 350MB の容量だった?。当時としては画期的であるが、今でいえば、スマホの能力の 2 桁以上も低い能力のものである。当時は、この計算機を使ったワープロもあり、それで報告書も作っていたが、日本語対応は不十分で、日本語報告は手書きであった。当時、この計算機を用いたメール的な機能でやり取りをしていた。その意味では、かなり恵まれた環境であったと思う。

その後計算能力、記憶量など 1 桁良くなった HP1000A900 が 1990 年頃に導入された。また、電波源解析や JPL との実験で、天文観測などでよく使われていた DEC の VAX 計算機も導入し、電波源観測などへの利用も開始した。これらに使われていたのは、それから長く科学技術計算のプログラム作成で使われていた FORTRAN 言語である。

また制御システムとしては、HP-IB という HP 特有の測定器などの制御プロトコルを、多くの装置で使っていたため、それができる BASIC の HP の計算機を多数購入し、使用していた。1990 年代までは、制御には BASIC が世の中で通常に使われていた。今でも Excel ではビジュアル BASIC が使われているが、2000 年以降は C 言語などの制御用の言語に置き換わった。その後開発された VLBI システム KSP の制御まで、HP の計算機を用いていた。

### 3.9.2 データベース

HP システムには、K3 システム特に解析システムで中心となるデータベースシステムがある。VLBI の場合は、米国で作られた Mark-III データベースといわれる、自分たちで作成した 1 ファイルのデータベースである。基本的には、ほとんどの場合、ランダムアクセスは不要で、1 実験全体のデータを用いることが多く、観測単位でのデータをシーケンシャルにデータベースにするものであった。ただし、そうはいつでも、多少ランダムアクセスを早めるためにハッシュを用いたデータアクセスとデータリンクの構造も持っていたが、最低限のものであった。

当時、データベース機能が少しずつ世の中で強化され広まってきたところであり、今ではビッグデータなど当たり前にする検索やデータ統合管理などを行うデータベースの概念の走りであった。我々は、VLBI でもそうしたデータベースの概念をとりこみ、編集の容易さや管理の容易さなどを追及して、当時の先端的な HP のデータシステムである DB システムを採用することにした。そのため、K3 システムは、データベースアクセスを一から作り上げ、それに伴って新しいシステムとなった。その後は、VLBI の場合は、シーケンシャルアクセスで十分であることから、現在では Mark=III の米国のデータファイルが基本的には今でも使われているが、データベースの機能をフルに使うという今では当たり前の概念を実現していた。

また VLBI のデータベースの重要なことは、観測データだけではなく、解析方法を残しておくことができ、解析の再現が可能である。今の成果の信頼性を過去にさかのぼって保持できていて、今の時代で課題となる研究データの蓄積あるいは解析の再現性と信頼性を先取りしていた。

バンド幅合成  
近藤哲朗  
Ver.2014-08-21

電波研に入所（1981年7月1日）して即鹿島支所の第三宇宙通信研究室に配属であったが当初はK3-VLBIシステムのハードウェア開発グループに所属し、初仕事は「遅延校正器」のGP-IBインターフェースの作成であった。「TMS9914というGP-IB専用ICを使って遅延校正器用のインターフェースを作れ」というKハードウェアグループリーダーの命を受けて、さてどのように実現するかを考えたが、大学時代、TTLロジックのみで木星電波観測用アンテナの自動追跡装置を作った経験があり、その経験を大いに生かして、GP-IBインターフェースの初期化、コマンド解釈をすべてをTTLロジックで行うGP-IBインターフェース装置を設計した。TTLロジックでコマンド解釈を行うため、コマンドとして複雑なもの（例えばXX=YYYのような記述）は使えず、単にアルファベット1文字のみをコマンドとして採用し、実にシンプルなコマンド体系（コマンドはA,B,C,Dのみだったか）のGP-IBインターフェース装置を作り上げた。Kハードウェアリーダーによれば、実際に形になったものとしてはこのGP-IBインターフェース装置がK-3システム初とのことだった。赤子の魂百までなのか、TMS9914と言う名称は今でもすっと頭に浮かんでくる。

さて、遅延校正器用のGP-IBインターフェース完成後はソフトウェアグループの所属となりTソフトウェアグループリーダーの元でK-3ソフトウェアの開発に携わることとなる。こうして関わったのが本題の「バンド幅合成ソフトウェア」KOMBの開発である。KOMBという名称は当時、K-3として開発するソフトウェアは出だし“K”で統一した名前をつけようという事で、バンド幅合成関数が櫛の歯状になることから櫛を意味するCOMBの最初の“C”を“K”に変えてKOMBと名付けた。後付けで何たらかたらの略であるとの元の名称をつけましたが今となってはそれが何だったか手元にメモは残っていない。ともかく、こうしてKOMBのいう名前のソフトウェアの開発が始まったのである。それが延々と続いて、今現在も進化を続けているのは正直なところ驚きである。

K-3システムが開発の参考にした米国のMark-IIIシステムではバンド幅合成ソフトはFRNGEと呼ばれていた。干渉計のフリンジにちなんだ名前かと思うが、当時のミニコンではプログラム名は5文字までしか許されずFRINGEではなくFRNGEになったものと思われる。当時自分ではフリンジではなく何故か「フルンゲ」と呼んでいたように思う。

ところでこのフルンゲをK-3用に移植なり少し改修すればKOMBとなるのではないかと思ひ、プログラムの解読に取り掛かったのだが、少し昔の自分のプログラムでさえ動作を思い出し更に改修を行うのは大変な事なのに、まして他人のプログラム。解読作業の困難さが予想された。実際に少し解読を試みるがその大変さにすぐに方針を変更し、原理を勉

強しつつ全くのゼロから作り上げることにした。ただ出力フォーマットは揃えた。結果的には中身を完全に理解したバンド幅合成ソフトウェア KOMB を作り上げることができた。現在においても進化を続ける KOMB の原ソフトウェアである。

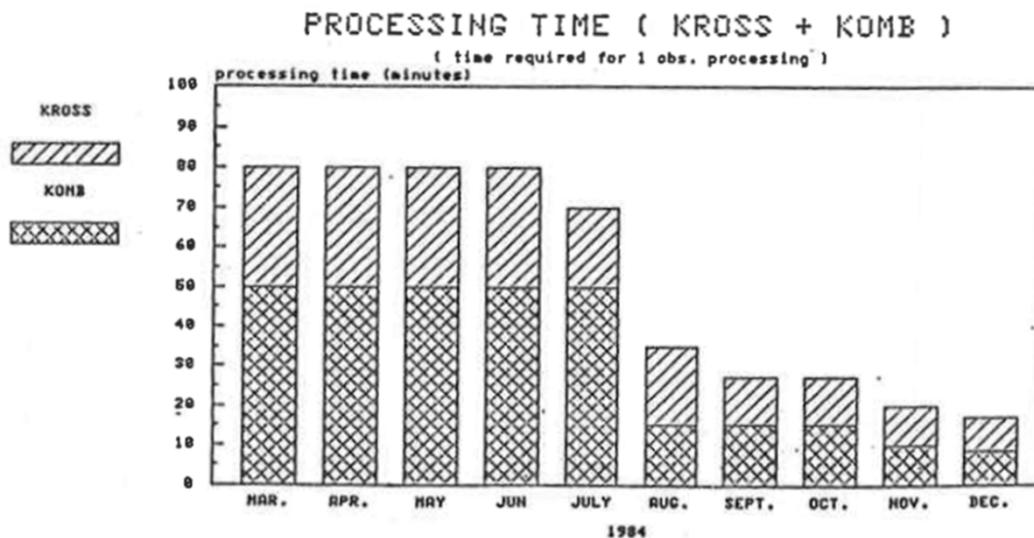


図 1 KROSS (相関処理) と KOMB の処理時間の変遷 (開発直後)<sup>1</sup> (Kondo, et.al., 1984)

図 1 は KROSS (相関処理) と KOMB の開発直後の処理時間と数か月後の改良後の処理時間の変遷を示す。開発当時 KOMB はミニコンピューター HP1000/45F 上で動いていたが、100 秒程度のデータを処理するのに 50 分もかかっていた。プログラムの改良により約 10 分程度へと処理時間を短縮したが、実観測時間の 10 倍程度も処理時間がかかっていたのである。しかし、現在の KOMB はノート PC で走らせても本当に“あっ”という間に処理が終わる。留まることのない計算機の処理スピードの発展には驚くばかりである。また現在では相関処理もハードウェアではなくソフトウェアで行うのが普通になってきている。

<sup>1</sup> Kondo, T., S. Hama, and H. Kunimori, The processing capability of K-3 VLBI correlation system, Proc. Symposium on Relativistic Framework and New Techniques in Astrometry and Geodesy, Kashima, pp.406-414, Dec.12-15, 1984.

## 3-14 物理モデル計算 ～VLBI における物理の応用

高橋幸雄

### 3.14.1 VLBI におけるモデル計算

VLBI では、観測されるデータは、遥かかなたの電波天体からくる雑音的な自然電波を地上の2局で観測し、その到達時刻の遅延時間及びその時間変化である。これから、この遅延時間を用いて、それらに関する各種物理現象の数値を、モデル化して推定していく。すなわち観測値 ( $\tau_o$ ) と、物理モデルを仮定して予測値 ( $\tau_c$ ) を計算し、その差が小さくなり、差がランダムな量だけになってばらばらな分布になるように物理モデルの数値を調整していく。推定する方法は、いろいろあるが、線形推定法 (パラメータの変数の多乗乗の効果は小さいので1次だけで推定) が、観測精度が良く安定し、高い信頼度で解析ができる。そのためには、多乗乗項が非常に小さくなるほど、観測値と予測値の差をできるだけ小さくしておく必要がある。さらに、推定するパラメータをあまり多くすると精度が下がったり、信頼度が無くなること、推定できない物理モデルもあるため、予測値はできるだけ正確なものを用意しておく必要がある。また、推定を行う最小2乗法やカルマンフィルター法等に使われる推定パラメータの偏微分値が必要になる。これを行うのが物理モデル計算である。この流れの概念を図1に示す。

推定において、VLBI のいい点は、一番大きい要因である基線ベクトル (2局の相対位置) が、遅延時間  $\tau$  に対して直角三角形というシンプルな幾何学性から、線形性があるため、推定がシンプルな式になるため、推定がやりやすく、安定度や信頼度が高くなる。

物理モデルは、最新のモデルを使う。さらに、VLBI で測定され精度が上がったモデルも多くあり、その最新データを使うようにする。章動や歳差、地球回転はもとより、天体の位置や、大気の補正などは、いくつかの最新観測値を駆使して推定し、解析の信頼度をあげていく。

また、大気モデルは、いろいろなモデルがあり、どのモデルがいいか、あるいは推定する時のパラメータ法によって、推定がうまく行くものもあり、その方法は解析方法や目的に合わせて行っていく。

それでは、どんな物理学が関係するか、先ず VLBI の原理から理解を始めよう。VLBI (超長基線電波干渉計) は、宇宙の遥か彼方の天体からくる電波を、地上の複数の電波望遠鏡で観測して、その到達時間差を高精度に測定するもので、いわゆる干渉計である。その概念図を図2に示す。そのルーツは、天体の形を観測する電波干渉計技術である。従来は、天体の構造・形を観測するのに使われており、比較的近い同じエリアに望遠鏡を配置した電波干渉計であるが、それを地球規模の非常に遠いところの電波望遠鏡群で観測することで、地上の位置や地球回転など、いろいろな測定ができるようになった。それは、一番重要な時刻の同時性、時刻の正しさが独立して保持できるようになったことと、大容量の記録が可能になったことによって実現できるようになった。

電波が放射する宇宙彼方の天体から、辿っていくことにする。宇宙の果てにある天体の位置関係である。いわゆる位置天文であるが、10 億光年以上の遙か彼方の天体の位置は動いていないように見えるが、実は動いており、その話は後述の電波位置天文の節です。

次に、電波が到達している経路がある。宇宙を電波が辿ってくる間には、星間物質や重力の影響などがある。場合によっては、未知の物質による影響もある。ただしこれらの影響があったとしても、VLBI では地上に到達した複数の電波望遠鏡の相対時間差(遅延時間)だけが意味を持つため、その経路の違いはほとんど無視できるが、電波源位置や構造・形に現れる。

太陽系にきた電波は、次に影響があるのが、太陽や惑星の重力場による相対論効果の影響である。また太陽コロナの近くを通過した場合は、コロナによる遅延が発生するため、この効果も考慮する。あるいは土星や木星など大型惑星の重力場も、電波の方向が近く、その近傍をかすめる場合も含める必要がある。これも、電波源の位置・方向を変える効果の方が大きい。特に太陽重力場の曲りの効果は、伝搬経路が太陽に一番近づく距離に反比例してモデル化されている。

やっと、電波が地上付近にたどり着いてきた。これに掛かった時間は、数 10 億年もかかり、壮大な旅の末である。そのため、電波は極めて微弱となる。ここで注意してほしいのは、VLBI で観測するのは天体からの電波といっても、GPS などの人工的な規則正しい信号とは違って、共通雑音である。発信源が雑音でも星の規則正しい信号でも何でも、地上にたどり着いた時に共通であればいいのである。

地上にたどり着くにつれて、観測地点間の共通性が無くなっていくので、しっかりしたモデルとして経路の違いを補正しないとイケない。まず出てくるのが、地球を覆っている電子の層、電離層の影響である。電波は、電離気体の中を伝搬すると、電子が揺らされ、屈折や遅延(位相は位相遅延として進み、群遅延は遅れる)を起こす。

次が、大気の影響である。大気は大きく分けて、水蒸気と、それ以外の乾燥大気に分けて考える。それぞれの振る舞いが異なり、場所や時間依存性が大きく、局所的な現象でもあり、その効果を正しくとらえることは難しく、主な誤差要因になっている。特に難しいのは、伝搬路であり、屈折と遅延の両方の影響を考えないとイケない。しかも、経路全体での遅延は、高さや方向によっても異なる。そのトータルなものが大気による伝搬遅延である。一方、データがあるのは地上付近の主に観測地点での気圧、水蒸気圧、気温であり、それから上空や方角によつての違いを推測することになり、難しさや不確定が増してくる。

乾燥大気は、地上から 30km 位までの高さまで広がっており、遅延としてみた場合は、天頂付近でトータルで 2-3 m と大きいですが、大局的な変動であるため、方角の違いも比較的小さく、モデル化しやすく、比較的正しいモデルが提案されている。一方、難しいのが水蒸気成分である。こちらは雨などの気象データのうち、方角や時間変動、あるいは局所性が強く、モデル化しにくいですが、非常に多くのモデルの提案がなされてきている。

VLBI では、この不確定な大気の伝搬を、モデルを立ててパラメータ化し推定し、精度を

上げている。

最近は、GPS 等の多種の観測データなどを活用した電離層の観測データ、大気の観測データ、水蒸気の観測データが提供されるので、これらを用いて、予測を高精度にすることができるようになったが、大気モデルの推定は、ほぼ必ず行うので、最終的には自分の観測データで、大気の状態を推定し、精度を上げている状況と言ってもいいかもしれない。

電波はアンテナに到達するが、そこでもう二つ補正をしないとイケない。電波はどこにたどり着くと到達時刻として記録されるかという、電波から電気信号に変換され増幅や周波数変換などの後、サンプリングされる。つまり電波はアンテナの大きな面で電波を1点に集め、それを信号処理してケーブルなどで伝送して時刻と合わせて記録する。この集約点は、すべての電波が同じ時刻にたどり着く場所でもある。VLBIで観測される時刻は、この点で受信すると想定した時刻に対して一定量を加えたものである。時刻同期を目的とする以外はこの一定の時間は無関係となる。一方、アンテナによっては、この集約点の位置が、異なる方向の天体を観測すると、動いてしまう。一方我々が求めたいのは地上に対して動かない基準点である。そこで、この集約点を基準点にする補正をアンテナ軸補正と呼ぶ。集約点が動く軌道を関数にして、1つの基準点に変換することである。

次に、ケーブルを伝送する時に、ケーブルの状態、例えば温度などで、屈折率が変わり、遅延時間の変化が生じる。この変化の補正が必要で、これはケーブル遅延補正、あるいは内部遅延補正である。これは、ケーブルの材質によって、温度と同じ変化をしたり、逆の変化をする。また経路の全体の温度環境や光伝送ケーブルを使う場合などはケーブルの捻じれで遅延が生じることもあるが、ケーブル遅延として補正する。

なお、アンテナ軸補正やケーブル遅延は、変化を取り除けば、時刻差として一定値が加わることになる。時計の正確な時刻差を測る時刻同期実験では、この一定値を正確に求めないとイケない。その方法は、較正装置を介在して求める方法を取るが、それは時刻同期実験のところで記載される。

これで長い電波の旅は終わったように思えるが、その過程の中で、まだ出ていない物理効果がある。これは、電波への影響と云うよりは、位置関係あるいは座標変換について述べないとイケない。一つは、相対論効果である。観測される遅延時間は、どの座標系で見た時刻差なのかという事である。実験に用いている原子時計は、地球のジオイド上での時刻で、地球の重心固定座標系で見た時刻である。一方、我々が相手にしている電波は宇宙の果てから来た電波で、これが平面波であるとして幾何学的な取り扱いができるのは、太陽系の影響を受けない座標系から見た現象である。この座標系を太陽系重心にいる人から見たものとして太陽系重心座標系とする。この2つの座標系の変換をしないとイケない。ここには地球の公転運動や、木星、土星の動きなどが影響する。相対論的座標系変換を求める。それを行うと、太陽系重心座標系と地球固定系座標系の時間変換も行う。

もう一つは、天体に対する基線の向きであり、太陽系重心座標系と地球慣性基準座標系（地球重心座標系で方向を定義したもの）の回転すなわち軸の方向の座標変換である。そ

の回転座標変換を、地球回転及び歳差、章動と呼んでいる。太陽系の外から見ると、地球の平均形状軸は、太陽の引力の影響でコマのようにまわっており、大きな首振りで見られる 25800 年で一周している。これを歳差運動という。星の位置が動いていなくても、地上で見ていると次第に動いていって 25800 年して元に戻るように見える。もう一つは、地球内部の核とマンツルの結合や共振現象などで、大きな首振りの周りで周期的な小さな首振りを行っている。一番大きく長い周期で 18.6 年で、それ以外にも多くの周期をもった変動がある。これらに関しても、かなり精密なモデルが提唱されており、それを上回って、VLBI でより正確な測定もされている。

次に平均形状軸と実際の地球の表面の動きとして、自転運動と、自転軸の動き（極運動）がある。世界時 UT1 と呼ばれる地球回転の角度に相当する時刻と、地球上における地球の自転の形状軸の位置すなわち極運動（Wobble）である。これに関しては、以前は天体の光の望遠鏡観測などで得られたデータを用いて観測されていたが、VLBI のほうがはるかに精度がよく、今では VLBI や GPS などの宇宙測位技術での高精度な測定値を用いたり、推定している。

また、地球は太陽や月の重力で潮汐と呼ばれる引っ張る力（引力）で形状を変形し、1 日数 10cm にも達する。固体地球の地球潮汐による観測局の変化を補正する。さらに、海等の水の動きも潮汐等によって影響をうける。潮の満ち引きがそうである。この潮の満ち引きによる地球表面の負荷の変化によっても地球表面が変形する海洋潮汐負荷効果の補正を行う。さらに、自転軸の揺らぎによる潮汐変化が現れ、それによる潮汐への影響として極潮汐補正も行う。

こうした計算をする場合、地球、太陽、月、木星や土星のようなその他の惑星等の計算式を、日本では海上保安庁の水路部やアメリカの JPL などが出していて、それを計算する。これらの数値は、潮汐の計算や座標変換における太陽・月・地球の位置関係に使われる。

さらに、2つのアンテナ間の相対位置（基線ベクトル）は、各実験内では一定の固定値であるが、プレート運動や地殻変動などで、地球上の位置で動かないものはない。単に相対位置を推定する以外に、長期間の複数の実験を用いる場合は、位置として、ある基準日における位置とその変化という形で推定することもある。

VLBI で求まるのは、相対位置であり、各観測局の位置（X、Y、Z や緯度、経度、高さ等）として表示するには、位置の基準が必要である。この位置の基準となる地球基準座標系をどうするかに関しても考えておく必要がある。

最後に時刻差について述べる。観測時刻には、各観測局の時系の差がある。時系の差の特徴は、電波天体を切り替えても、それに寄らず、短い時間に関しては一定のオフセットまたは時刻に対しての 1 次変化で、電波天体や方角に寄らないという事である。すなわち、推定する場合、短い期間で見ればオフセットと時間の一時傾斜の推定を行えば推定できる。1 日程度で見れば、不規則の時間変化やジャンプが見られるので、それにあつた推定を行う。

### 3.14.2 物理効果とモデル式

それでは、3で紹介した物理効果について個別に示し、1990年代までに使っていた物理モデルは以下のようなものがある。詳細説明が必要な場合は、元に戻って各項目をクリックしてください。

- 2. 1 電波源位置変化、電波源の構造
- 2. 2 宇宙空間伝搬
- 2. 3 コロナの影響
- 2. 4 重力歪曲効果（太陽など）
- 2. 5 太陽系慣性（重心）座標系と地球重心固定座標系の変換（相対論効果）
  - ①延時間、観測局の位置変換
  - ②太陽系慣性座標系時刻(力学時:TDB、Barycentric Dynamical Time)と国際原子時(TAI)
- 2. 6 回転座標系
  - ①歳差
  - ②章動
  - ③地球自転運動(UT1)
  - ④極運動(Wobble)
  - ⑤UT1 や長周期角運動と大気などとの関係
  - ⑥地球自転・極運動の補間法
- 2. 7 電離層遅延補正
- 2. 8 大気遅延
  - ①乾燥大気遅延
  - ②水蒸気遅延
  - ③総合モデル
- 2. 9 地球潮汐
- 2. 10 海洋潮汐負荷・大気負荷
- 2. 11 極潮汐（Pole Tide）
- 2. 12 太陽・月・惑星位置計算（エフェメリス、天体歴）
- 2. 13 アンテナ軸補正
- 2. 14 局内遅延（ケーブル遅延）補正
- 2. 15 プレート運動を考慮した位置推定
- 2. 16 地球基準座標系（ITRF）
- 2. 17 時系

これら物理モデルを用いて、理論計算を行う。VLBIの観測量は、遅延時間及び遅延時間変化率の2つの物理量で、その観測値と、理論計算値の差が小さくなるようにパラメータ

を推定していく。理論計算を高精度の行うことができること、最も変動の大きい位置変化に関しては線形性が成り立つため、推定は線形1次式で解析が行うことができる。この推定に用いる各物理効果のパラメータに関する遅延時間、遅延時間変化率の偏微分値が必要となる。推定するたびに偏微分計算をするのは非効率であるため、偏微分値をあらかじめ計算しておき、データベースに格納しておき、必要に応じて取り出して、推定時に使う。

さらに、遅延時間、遅延時間変化率における各物理効果の大きさがどのくらいあるかを、すぐに取り出せるように、寄与の大きさも事前に計算しデータベースに収納しておく。

### 3.14.3 計算ソフトウェアの製作

物理モデルを計算するソフトウェアは米国 Mark-III の CALC と呼ばれるものがあり、それに、いくつかの日本のモデルを組み込んで新しく作り直した KAPRI を作成した。

CALC は、Fortran と呼ばれる当時の計算機の言語で広く使われていたもので書かれている。26000 ステップのソフトであった。もちろんコメント行も多く、実質はその 1/3 くらいが実行行で、全体の文字数は、注釈も含めて約 12 万文字くらいである。

大学で、学んではいたが、これほどのプログラムを見たのは初めてで、それを就職したばかり新人に全部見ておけというのであった。これが、VLBI の出会いでもあり、この中に VLBI における物理学が詰まっていたとは、当時は知るよしもなかった。それを、昼夜、土日なく、勉強しながら頭に入れて言ったのである。ここから、壮大な物理の世界に入り込んでしまった。

CALC を分析して、各種モデルを理解し、それをもとに KAPRI を開発したが、両者の大きな違いは、K3 システムの DB として独自のシステム KASTL をつけたもので、これとのアクセスを作った点や、海洋潮汐モデルを緯度観測所のモデルを導入したこと、章動モデルとして新しいモデルを導入したことなどである。また、座標・時系変換において、相対論効果を取り入れたモデルにしたことなどであった。

### 3.14.4 他機関との連携について

こうした多岐にわたる物理に係るために、日本の多くの機関と仲良くやることができた。まず、地球回転等に関しては、当時の国立天文台緯度観測所（現自然科学研究機構国立天文台水沢 VLBI 観測所）である。章動の理論のバイブル、Whar のモデルに深くかかわった笹尾教授がおられ、一から教わった。また、横山教授、真鍋教授等多くの素晴らしい地球回転の研究者と一緒にモデル用のソフトの作成などを進めることができたことは、大きな財産となった。また、解析や VLBI 実験、さらには新しい装置の開発、天文台の VELA 計画等長く深くお付き合いをすることになった。非常にいいパートナーであったと思っている。緯度観測所は、VLBI が登場するまでの高精度な地球回転パラメータの UT1、地球自転軸の (Wobble X,Y) などを、光学観測で測定する世界規模のネットワークの日本の観測点で、多くの地球回転などに関する物理現象を発見してきた由緒ある観測所である。ちなみ

に、水沢のそばに平泉があり、世界遺産になったが、そこに行く機会があった。また、個人ごとであるが海鞘を食べれるようになったのも、水沢に何回も訪れたことによる。

国立天文台としては三鷹本部の位置天文を観測する研究者とも深く関係してきた。我々の VLBI は、地球の観測をするだけでなく、電波源の位置も高精度に観測でき、三鷹と水沢などの位置天文の研究者とも関係した。

天文台以外で関係が深いのは、建設省国土地理院（現国土交通省国土地理院）である。こちらの研究者とも仲良く長く連携をしてきた。物理モデル作成ではなく、一緒に多くの VLBI 実験をやってきて、測地座標を決めることをやってきた。他の章で紹介があるので、ここでは省略する。

測地座標系に関係する宇宙測地技術としては、日本では、我々電波研での VLBI と並行して、運輸省海上保安庁水路部（現国土交通省海上保安庁海洋情報部）が SLR 等のレーザ測距技術の開発、観測を行ってきた。この水路部とも、測地系の関係では深く連携をしてきた機関である。今でも思い出されるのが、日本測地系の改訂として進めた測地系 2000 を作る時に、地理院、水路部、天文台などと一緒に、我々も参加して議論したことを思い出す。

外国では、VLBI のモデルに関しては、米国の GSFC や、MIT の Heering 教授、ドイツの Shu 教授などが関係していた。

### 3.14.5 VLBI における物理学との出会い

VLBI は、一体何か。超長基線電波干渉計、言葉で表せばこれだけであるが、宇宙ができた初期の電波が、現在の地球にたどり着き、それを最新の電気工学の電波望遠鏡で観測し、そして情報処理して、その結果、ハワイが日本に近づくという地表面の地殻変動・プレート運動を観測し、地球回転などの測定を行う壮大な物理学のドラマがここにある。私は、大学で、原子核理論をやっていたが、そこで学んだ流体核運動が、実は地球においても起きていた。また原子核力等での現象が、パルサーや電波の発生などにも絡んでおり、ミクロな世界の現象が、実はマクロな世界でも同じように出てきたというのは驚きであった。宇宙の現象は、ミクロやマクロ等の違いこそあれ、どこでも、類似した現状が起きており、宇宙が大きな統一した法則の中にあることを、実感した瞬間でもあった。

また、光の曲りなど、重力場による相対論が出てきたことは、この技術の深さを知った。それは、扱っているのは、巨大な電波天体であり、地球であり大きなスケールでの対象を扱いながら、相対論効果が出てくるオーダ ( $10^{-9}$ ) も、同時に扱わなければならない、このスケールの大きさと、微小な物理効果まで扱うとてつもない技術であった。実は、精度が上がれば上がるほど、考えないといけない物理効果は複雑で多岐にわたることも、VLBI の進化に伴って物理を考える時に遭遇したことである。そう、VLBI は、あらゆる物理効果を駆使し、かつ物理効果を考慮していく驚くべき学問であったのである。それは、逆に、VLBI が、いろいろな物理現象を解き明かす技術でもある裏返しの事でもある。

電波の位置や、電波減の解明や、重力レンズなどの現象から、太陽系の動き、伝搬、地球回転やプレート運動等の地球科学、相対論効果にも出てくる重力場による時系の影響、電離層の影響、太陽コロナの影響、湿度や気圧や日常の気象と関係する大気の伝搬、そして測地系等いろいろなものが関与している。もっとも驚くべきことは、地上には不変な基準はなく、最も長期にわたって動きが少ない基準を宇宙の天体に求めたことでもある。すなわち、地上の基準を、宇宙の果てにある天体にしたということで、宇宙と地球が同じ土俵でつながったわけである。これほどまでに広いスケールを同じように扱う技術はおそらく他にはない。そのため、物理現象が広い範囲に多岐にわたることになるのである。

### 3.14.6.1 電波源位置変化、電波源の構造

高橋幸雄

VLBI で観測する電波天体の選び方には2種類ある。1つは、電波天体自身の形や動き(構造)、含まれる物質を観測する電波天文学を目的とする場合である。もう一つは、地球上の位置や地球回転等を観測する測地観測を目的とする場合である。後者では、電波源の位置とその変化を観測する電波位置天文学も含める。ここでは、後者について述べる。

測地 VLBI における一番の基準・拠り所は何かというと、宇宙の果てにある宇宙が誕生した初期の巨大なクェーサと呼ばれる天体などの電波天体である。そのほとんどが10億光年以上も遙か彼方にあり、太陽系から見て、長期にわたってその位置関係はほとんど変化しない基準系をつくることができる。世の中で最も変化しない基準系と言ってもよい。

我々が目や普通の天体望遠鏡で見ている星は、比較的近い天体で、それらは相互に動いていて、長く観測すると動きが顕著に見える。このような個々の天体で異なる運動を天体の固有運動という。その固有運動を観測し、固有運動を含めた天体の位置天文基準系を作っていたが、精度を高めるためには限界があった。そこで、宇宙の果てにある電波天体をもとにした基準系を構築して、それをもとにした座標系の体系を作ることになった。VLBI はそれを行うことができる重要な技術であった。

赤方偏移が大きい遙か彼方にある電波天体を選び、それらの集合体で、電波天体基準系を構成する。これにより、相対位置関係はほとんど変化しない座標系ができたが、方向の基準を決めないといけない。VLBI 当初は、非常によく使われていた 3C273B と呼ばれる電波天体(クェーサ)の位置(DSN(新宇宙探査)で決めた位置)の赤経・赤緯を基準としていた。しばらくこの基準系が用いられ、電波源位置を示すカタログが作られた。日本でも電波研究所が、最初に VLBI を用いた電波源カタログを作り提示した。

その後、観測が進み、観測精度が向上するにつれて、電波源の構造(電波を発する場所や形)が変化し、それにつれて 1mas 程度の電波源位置が変化することが観測されるようになった。我々が見ている電波天体の位置は、構造を持った各場所から電波が出てきており、その総和が観測されているが、観測される位置は構造に応じて仮想的な一点に平均化したものとなる。形や電波の発する分布(電波源構造)が変化すると、この平均化した位置が動いてしまう。すなわち、動かないと思っていた遙か彼方の電波天体の位置が動いて見えるのである。実際、観測した電波源位置の数年から数10年に掛けてその変化を見ていくと、多くの電波天体で、不規則にダイナミックに変化している状況が観測された。

そこで、次にとった基準系の定義の仕方は、なるべく変化がないような天体を観測から見つけて、それらを位置基準天体にして位置基準座標系を構成する。このとき、これらの各天体の位置を基準にして1次基準座標系を作る。位置は、それまで観測された位置をもとにして行うが、再観測しながら次第に正確な位置を固定していく方法で決められた。位置変化が大きい電波天体は、その程度に応じて2次基準系等に分類して基準系を構築して

いった。

各天体の位置変化は長期間の観測結果から相対位置が変化しないことから確認される天体を見つけて選ぶことを行った。

しかし、位置が動かない天体は電波が弱く、SN比（信号と雑音比）で観測精度が決まる VLBI では観測精度が悪くなる。また、ほとんどの電波源は構造を持っている。そこで、観測しやすい強い電波天体も、1日の観測期間や短期間では位置が変化しないと仮定し、観測を行い、推定を各実験毎に行う。その後、長いスパンの複数実験の位置推定結果からその天体の位置とその変化を推定してきた。これにより、測地 VLBI では、高精度な観測ができることになった。基準は1次基準座標系である。

一番理想は、電波源構造を考慮に入れた（電波源の強さの分布の重みづけ平均化等）位置の変化を解析に取り込みながら、測地 VLBI の解析を行うことも含めた解析を行うことが望ましい。 $\tau \mathbf{g} = \mathbf{B} (\mathbf{s} + \Delta \mathbf{s})$ 、 $\Delta \mathbf{s}$  は赤経、赤緯の方向空なる 2次元ベクトルであり、 $\Delta \mathbf{s}$  方向ごとの電波強度が求められる（電波源マップ=強度分布）。 $\Delta \mathbf{s}$  に強度分布の重みをつけて  $\tau \mathbf{g} = \mathbf{B} (\mathbf{s} + \Delta \mathbf{s})$  の平均を求める。

### 3.14.6.2 宇宙空間伝搬

高橋幸雄

遙か彼方の巨大な電波天体からの電波が地球に到達する間には、膨大な空間の中を伝わってくる。その空間の中は、真空だけではなく、いろいろな媒質が途中にあり、それによって位相変化や遅延などが生じる。しかし、幸いなことに、それらが地上に到達する電波においては、ほとんど共通に影響するため、地上の複数の観測地点の観測値に異なる影響を及ぼすことは無い。そのため、一般には、通常の各観測内では、宇宙空間の伝搬路の影響は考えない、あるいは観測されないものと考えていい。

ただし、分子線などの規則正しい信号を観測する電波天文観測では、位相に影響を及ぼすので、その影響が観測されることもあり、宇宙空間伝搬にある物質の推定にも役立つ。

また、宇宙空間に巨大な質量をもった領域が伝搬路の近くにある場合、伝搬路が曲げられる重力歪曲現象が起きる。これによって、電波源位置の変化として現われる可能性がある。これは重力レンズの観測としても知られる。

### 3.14.6.3 コロナの影響

高橋幸雄

太陽は、太陽系空間に巨大な量のプラズマを放出し、太陽近辺はプラズマの粒子が高密度でかつ不均一に分布している。この中を通ると、電波が曲げられたり、遅延が生じる。この影響は伝搬路が太陽に最も近づく距離の2乗と6乗に反比例した項による式となり、近づけば近づくほど大きな影響を及ぼす。また周波数の2乗に反比例する。このコロナによる影響は、一般にこの影響がでる太陽の方向にある天体を観測すると、太陽からの電波が強く、観測できないこともあり、太陽の方向にある電波天体は観測しないようにしているため、通常の観測では、太陽から伝搬路の距離は非常に遠く、解析においては無視できる程度で、このモデルを使う例はほとんどない。また、電離層補正と同じく、周波数の2乗に反比例するので、2周波観測で補正される電離層補正の中に含まれる。

#### 3.14.6.4 重力歪曲効果（太陽など）

高橋幸雄

巨大な重力があると、その重力を中心とした重力歪みができ、その歪みの空間を電波が通過すると、電波の進行方向が変化する。これが重力歪曲効果で相対論効果の一つである。この影響は、1967年 Shapiro が式で表し、重力中心からの伝搬路の最接近距離に反比例した式で補正される。このモデルを、当初導入していたが、VLBI の精度が上がるにつれて、さらに高精度が要求され、1989年 Shapiro が詳細なモデルを提案した。主は太陽重量による効果がほとんどであるが、太陽系で大きな惑星の木星や土星の重量歪曲効果も含めた式となっている。

さらに、土星や木星による星食や接近が起きる時に重力歪曲効果の実験を行い、相対論効果の実証を行うこともある。

### 3.14.6.5 太陽系慣性（重心）座標系と地球重心固定座標系の変換（相対論効果）

高橋幸雄

#### （1）遅延時間、観測局の位置変換

宇宙から来る電波を見る場合、同じ現象でも別な座標系の人が見ると、異なって見える（異なった表現になる）。2点に到達する電波の進行が並行であるという現象は、太陽系重心（あるいは太陽系から離れた立場）にいるものが見た現象である。一方実際観測している地球固定座標系で見た現象は、少し違った表現になる。この関係を表したのが、相対論効果である。座標系間の変換を相対論効果も含めて表記する必要がある。大きく分けて、回転座標系変換とその他の変換に分けて考えて、前者は、この後の地球回転系で示す。ここでは、その他の座標変換について述べる。

VLBI の場合、観測量が遅延時間差という2地点の電波が到達した時刻差で、その場合、それぞれの座標系での時刻や位置（基線ベクトル）を、太陽系慣性（重心）座標系と地球重心固定座標系の変換を行う。

太陽系重心座標系での A、B 局に同位相の電波が到達する時刻  $T_A$ 、 $T_B$ 、地球重心固定座標系での A、B 局に同位相の電波が到達した時刻  $t_A$ 、 $t_B$  とすると、それぞれの関係を、相対論的に座標変換を行う。また、その中に含まれる、基線ベクトル  $\mathbf{B}$  と電波天体の方向ベクトル  $\mathbf{S}$ （主な項は、 $\mathbf{B}$  と  $\mathbf{S}$  の内積）についても、座標変換が必要となる。方向ベクトル  $\mathbf{S}$  は主に回転変換で表され、地球回転系として示す。一方位置及び基線ベクトルに関しても相対論による変換を行う必要がある。

時系の変換においては、公転軌道を地球が動いていることによる時系の変化と、月や太陽、惑星による重力による影響があり、これらをモデル化し式にしたものが 1981 年 Moyer が提案したが、これは粗い精度であった。高い精度が必要であり、相対論変化に相当する正確な式が使用された。

ここで、注意しないといけないこととして、基線の2局間のうち、どちらか基準になる局を決めて、もう一方の局（リモート局）に電波が到達した時刻の差となるが、その場合電波が到達する遅延時間  $\tau$  の間に、リモート局が公転や自転などで動くことも考慮に入れて計算する必要がある。その場合、式に  $\tau$  の多項式となるため、その式の展開なども行う必要がある。この効果を忘れることがあるので、注意しておく。

#### （2）太陽系慣性座標系時刻(力学時 : TDB、Barycentric Dynamical Time) と国際原子時 (TAI)

太陽系慣性座標系の時刻は、当時力学時 TDB (barycentric dynamical Time) と呼ばれ、地上で原子時計などが刻む地球重心座標系の TAI (国際原子時、international atomic Time) との変換が必要となる。太陽や月、木星、土星などの重力の影響や軌道などからモデル化した 1981 年の Moyer の式が用いられた。この式で求められた TDB は、歳差・章動などの天文物理モデルの時間引数で使われ、精度は粗くても問題はなかった。

### 3.14.6.6 地球回転系

高橋幸雄

地球回転系は、電波源方向ベクトルの太陽系慣性（重心）座標系と地球重心座標系間の座標回転変換である。それぞれの電波源方向ベクトルを、 $\mathbf{S}$  と  $\mathbf{s}$  で表し回転行列  $\mathbf{R}$  とすると、 $\mathbf{s} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{S}$  で表わされる。この回転行列を示すと

$$\mathbf{R} = \mathbf{R}_p \cdot \mathbf{R}_n \cdot \mathbf{R}_d \cdot \mathbf{R}_w$$

となる。ここで、 $p$  は歳差 (precession)、 $n$  は章動 (nutatation)、 $d$  は日周運動 (diurnal rotation)、 $w$  は (長周期) 極運動 (wobble) を示し、それぞれの座標回転行列を示す。それぞれの説明を以下に示す。

#### ① 歳差 (precession)

地球は、自転軸の周りに回転しながら、その自転軸が、太陽系の外から見ると、太陽の引力や月の引力によって、首振り運動をしている。地球の公転軌道面に比べて、自転軸の面（赤道面）は約 23.4 度傾き、月が地球を回る公転軌道面は約 5.1 度傾いている。また、太陽、地球、月の距離も日々変化している。これらの影響で、地球の自転軸が太陽系の外から見ると、約 25800 年と非常に長い周期で、地球の公転面に垂直な方向に対して 23.4 度の角度を保ちながら、ゆっくりと首振りをして 1 周している。これは、独楽を回していると、しばらくすると、その軸がゆっくり首振り現象をするのと似た現象である。この長期のゆっくりした首振りを歳差とよぶ。その座標回転は、非常に長期なため、観測時刻（ある元期からの観測時刻の時間）の一次、二次、三次項で展開された式であらわされ、1977 年の Lieske などにより正確なモデルが提案された。なお、ここで用いられる時刻は、太陽系慣性座標系での時刻であり、観測時刻を太陽系慣性座標系の時刻（力学時；TDB）に変換したものをを用いる。

モデルに対して、観測値の推定が行われ、歳差常数と呼ばれるパラメータの推定を行い、より正確なモデルが提唱されてきている。

#### ② 章動 (nutatation)

歳差と同様に、太陽、月の重力により、地球自転軸の首振り現象であるが、歳差が、非常に大きな非常にゆっくりとした長周期の首振りに対して、章動は、その歳差運動の周りの比較的小さな首振り現象を、章動という。原因やその発生メカニズムは類似しているが、章動については、地球の内部のマントルや核の相互作用による自由振動や共鳴現象などが関係している。いろいろモデル化されているが、1980 年に J.Wahr が 106 周期成分による非常に正確なモデルを提案し、このモデルを使うことで、高い精度が実現できた。

章動の場合、平均黄動傾斜角（地球の公転軌道面と平均赤道面との傾き； $\epsilon_0$ ）と瞬時の黄動傾斜角（ $\epsilon$ ）、春分点の公転軌道面での経度（黄径）の瞬時値と平均値からの変化分  $\Delta$

$\phi$  で表せられる、特に  $\Delta \varepsilon = \varepsilon - \varepsilon_0$ 、 $\Delta \phi$  を章動のパラメータという。

ここで用いられる式においても力学時 TDB を引数にして計算される。また、この計算を行うときに、月や太陽の位置関係を表す天文基本角という 5 つのパラメータを計算する必要がある。この 5 つは、月の平均近点離角 (L)、太陽の平均近点離角 (Ld)、昇交点からの月の平均黄径 (F)、太陽と月の平均離角 (D)、月の平均昇交点黄径 ( $\Omega$ ) で、ここでも TDB の引数とした幕項での計算式となっている。5 つの基本天文角の算式としては、Flandersen の式や 1994 年の Simon 式などがある。

章動の周期で一番長いものは 18.6 年で、一番大きな項でもあり、その半分の 9.3 年が次に大きい。全部で 106 項からなるモデルを用いてきたが、より精密なモデルとして Herring による 263 周期成分のモデルも 1990 年代提案された。

現在では、モデル計算をして章動は実験毎に推定されることが多いので、どのモデルを使ってもほぼ同じ結果となる。

## ② 自転運動 (diurnal rotation)

前の 2 項目の歳差・章動による座標回転を行うことで、座標系は自転軸が動かない座標系に移る。そこで見た場合、地球が約 86400 秒 (1 日) で自転している。この自転軸の周りの座標回転を地球自転運動として次に説明する。

自転軸周りの回転を表す回転角として使われるのがグリニッジ視恒星時 (GAST ; Greenwich Apparent Sidereal Time) で、グリニッジ子午線と平均春分点のなす角 GMST (Greenwich Mean Sidereal Time) に章動の効果  $\Delta \phi \cos(\varepsilon)$  を足したもので表される。この GMST は 0 時 UT1 での GMST に対して、地球回転角速度  $\omega$  と世界時 (地球の自転角に相当する時間) UT1 の積を足すことで求められる。世界時 UT1 は、0 時 UT1 のグリニッジ子午線を通過した天体が、現在どこにあるかをグリニッジ子午線からみた回転角に相当する時刻と考えられる。このうち、GMST(0 時 UT1) 及び地球回転角速度  $\omega$  は数値的に求められ、UT1 が観測値として求める。UT1 は時刻の経過を表しているものであり、日常で使われている国際原子時系 TAI が刻む時刻の経過とほとんど近いので、観測値としてみる場合は、TAI からのずれ  $\Delta UT1 = UT1 - TAI$  を観測値としている。なお、他の観測から求めた  $\Delta UT1$  の数値等を使って各観測時刻毎の  $\Delta UT1$  を内挿補間などで求め各実験内で補正し、それからのずれは各実験内で一定値として  $\Delta UT1$  を推定し、0 時 UT1 のあらかじめ用いた数値を加えて、0 時 UT1 の観測値とすることが多い。1 日の間でも変化するので、 $\Delta UT1$  を 1 日内で複数に分けて詳細に推定し、1 日内的変化を求めることもある。

以前は、この  $\Delta UT1$  は天体の光学観測で測定されていたが、その精度から、現在では VLBI や GPS 等の宇宙測位技術で測定されるようになった。

## ④ (長周期) 極運動 (wobble)

ここまでの座標回転変換で、地球は回転しないほぼ止まっている状況まで来た。しかし

まだ座標系（見ている視点）は自転軸の方向に向いている。この自転軸を、地球の表面で見るとふらふら動いている。この変化のうち平均自転軸（平均形状回転軸）の動きを長周期極運動とし、その地球表面の位置を角度で示し、X,Y 成分で示す。この座標回転をおこなうことで、座標系は平均形状になり、その位置が地球表面の我々の位置座標系に直結するものになる。その時の座標系の方向を定義しておく必要があり、1900-1906 年の平均極位置である慣用国際原点（CIO）を Z 軸とし、ゼロ子午線方向を X 軸とした座標系とする。

長周期極運動であるが、非常にゆっくりとした継続的な傾向（永年的な変化）としては、西経 60 度のグリーンランドの方向に年間 3mas（ミリ秒角）ずつ動いている。これらは、地球内部のマントルの動きとも関係しているかもしれない。次に、顕著な動きとしては、約 430 日のチャンドラー周期成分と年周期成分が重なった形で現れる。チャンドラー周期の成分の原因は、大気説や海洋変化説などがある。

#### ⑤ UT1 や長周期角運動と大気などとの関係

UT1 と長周期極運動の観測値を VLBI 等で高精度に行えるようになり、その変化がより明確になり、1 年以下の細かな変化も観測できるようになった。巨大地震による地殻変動によって質量分布の変化から、わずかではあるが、UT1 や長周期極運動に変化が見られた観測結果もある。

特に、風等の大気循環と固体地球の相互作用により、全地球の大気角運動量と固体地球の角運動量との交換（総角運動量は保存）が行われる。UT1、Wobble は、固体地球の回転や、動きである。大気循環と地球回転は、どちらが原因であるかははっきりしていないが、原因と結果としてみるよりも、相互に関係しあう総合システムとして地球をとらえたほうが正しいと考える。

大気との相関関係で顕著なのは、エルニーニョ、ラニーニョ現象と非常に良い相関がある。また風などから求められる全地球大気角運動量の変化と、UT1 等の地球回転の観測値が非常に良い一致を示している。気象変化に見られる週間変化や季節変動なども、一致している。大局的な変化は、地球内部のマントルや核運動の動きに関係するが、大気循環との関係は明確になっている。

また、UT1 の観測値で、1 日内での変化もみられることが判明したが、それに関しては、他の UT1 の観測値から 1 日内の変化を内挿補間で補正し、1 日で 1 つの推定値として求めることが多い。しかし場合によっては 1 日内をいくつかの区間に分けてそれぞれで UT1 を推定を行うなどで詳細な変化を求めることができる。

#### ⑥ 地球自転・極運動の補間法

モデル計算では、予め地球回転の  $\Delta UT1$  (UT1) や長周期極運動（以下地球回転パラメータと呼ぶ）を用いて地球回転変換の計算を行う必要がある。これらの数値は、他の VLBI 観測などで観測された数値や、過去の観測値を用いた予測計算等の数値を用いる。

地球回転パラメータに関しては、1980年代当初は、天体の光学観測が主流であった IPMS (国際極運動観測事業) と BIH (国際時報局) の予報値、速報値、最終値を用いていた。その後 IERS (国際地球回転事業、international earth rotation service) に統合し、VLBI や GPS 等の宇宙測位技術を用いた 5 日毎の測定値と 1 ヶ月くらい先までの毎日の予報値が報告され、それを用いることになった。測定値も、すぐに観測値を知りたいという要求もあることから速報値と最終値の 2 種類があり、速報値は 1-2 週間遅れで、最終値は 1 ヶ月以上遅れて発表されていた。

VLBI の場合は処理して解析できるまでに、ファイル伝送がない当時は、数週間遅れとなるのが通常で、解析時に速報値が取得できれば、その速報値を用い、もし予報値しかない場合はそれを用いた。最終値が手に入った段階で、それを再入力して DB を作り、再解析を行う。なお、1990 年代以降は、地球回転観測が頻繁にかつ密に行われ、その観測値の間隔が、5 日から 3.5 日になり、さらに内挿計算の精度も上がり、速報値や最終値が毎日の地球回転パラメータが示されるようになってきた。

こうした地球回転パラメータを入手して実際に使う場合、実験が行われる前後 5 個程度のデータを用いて、観測時刻に内挿して用いる。この内挿方法もできるだけスムーズで、かつ近傍のデータ値の変化を反映した方法を用いる。

長周期極運動は、短期の大きな変動はなく、用いる 5 個程度の変化も大きくないので、シンプルな内挿補間でも、誤差はほとんどない。一方、 $\Delta UT1$  は、内挿に使用するデータ間隔の 1 ヶ月にもなるため、大気循環と関係性が大きいこともあって、すべての変化を内挿も埋めることはできないが、できるだけ再現する必要がある。そのため、3 次スプライン補間や 3 次多項式補間を用いた。5 日間のデータでは数日内での変化は補正できないが、毎日の観測値が手に入るようになってきた段階では、内挿補間による短期間の変化をフォローできなるようにはなってきた。

さらに、 $UT1$  においては潮汐による影響が大きく表れるが、この潮汐の影響は、モデル化しやすいので、それをあらかじめ除くことで、内挿の精度が高くなる。そこで、1981 年に Yoder がモデル化した  $UT1$  に対する潮汐補正を用いる。この式は主要な 62 周期成分で計算する。この式に含まれる地球潮汐ラブ定数については VLBI で推定した正確な数値に変更して用いることができるようになった。IERS が公表した  $\Delta UT1$  からこの潮汐成分をモデルで計算し、その後内挿して、再度観測時の潮汐効果を計算して足すことで、正確な観測値の  $\Delta UT1$  を求める。長い周期成分は、内挿間隔の 1 ヶ月程度で見ると、緩やかな変化で内挿で十分補間できるため、実際のデータを用いた内挿の方が精度がいいので 1 ヶ月以上の長い周期の成分は用いない。

IERS でも、こうしたことを配慮し、潮汐成分のうち 35 日以下の成分を除いた数値  $\Delta UT1R$  も合わせて公表している。 $\Delta UT1R$  を用いる場合は、これを単に内挿し、その後潮汐モデルによる 35 日周期以下の成分で計算した補正を加えることで、観測時間の  $\Delta UT1$  を求めることができる。

### 3.14.6.7 電離層遅延補正

高橋幸雄

地球の周りには、大気圏の他に、熱圏 60km から 800km に掛けて電子が多く集まる幾つかの電離層でおおわれている。電離層は、宇宙から降り注ぐ強烈な電波（X 線や $\gamma$ 線）や宇宙線、宇宙プラズマ・太陽風などから、生命を守ってくれる防護服の役割をしている。さらに、入射角によっては電波が反射され、アマチュア無線や短波放送など遠くまで放送を伝搬する役割も果たしている。

この電離層を通過するとき、電子と相互作用をし、電波の伝搬屈折率が変わること、方向が曲がったり、電波の速度が変わる。位相速度では速くなり、群速度では遅くなる。電離層による遅延時間に光速を掛けると電離層を通過するために伝搬路が長くなった（Excess Path）と見ると、この量は、周波数のべき乗に反比例し、伝搬路にある総電子数に比例する。2乗の項がメインである。その大きさは、総電子量に依存するが、日中の電離層が活発なときには、天頂方向に対して X バンド帯（8GHZ）で数 m オーダとなる。低仰角では、さらに多くくなり、天頂の数倍から 5 倍くらいになることもある。電離層が不活発な夜は、その影響は小さくなり、1桁くらい小さくなることもある。

この電離層効果の特徴は、メインが周波数の 2 乗に反比例するので、2 周波数の観測値で電離層で補正することができる。測地 VLBI では、広く使われていた X バンド（8.4GHz 帯）の代表周波数  $f_x$ 、S バンド（2.4GHz 帯）の代表周波数  $f_s$  を用いて、その差から求める。

遅延時間を数式で表すと  $\tau(X) = \tau + K/f_x^2$ 、 $\tau(S) = \tau + K/f_s^2$  で表される。K は視線方向の総電子数に比例する量である。これから共通する電離層遅延を含まない遅延時間  $\tau$  を求めると

$$\tau = (f_x^2 \tau(X) - f_s^2 \tau(S)) / (f_x^2 - f_s^2)$$

この式は、GPS 等の他の技術においても、電離層遅延の影響を 2 周波観測で求める式となっている。

また、同時に、観測値誤差も、この式に応じて

$$\sigma_{\tau}^2 = (f_x^4 \sigma_{\tau(X)}^2 + f_s^4 \sigma_{\tau(S)}^2) / (f_x^2 - f_s^2)^2$$

となることは注意が必要である。

### 3.14.6.8 大気遅延

高橋幸雄

我々が日常時に吸って暮らしている空気、これは地上付近では、約 8 割の窒素と約 2 割の酸素からなり、その割合は高さによっても変わってくるが、モデル化しやすく、標準大気モデルが示されている。非常に高高度まで存在し、約 30km の成層圏が目安である。一方、水蒸気は、不規則に、高さや場所、環境によっても変化する。大体の目安は、地表表面 2-3km あたりまでである。この水蒸気は、雨等の気象に大きくかかわってくる。水蒸気成分に対して、窒素や酸素などを乾燥大気と呼ぶ。

これらの大気を電波が通過すると、誘電率が真空のときと違ってくるため、電波の遅れや曲りが発生する。それは高さによっても違い、電波が通過するすべての大気の影響の総和が大気遅延である。

#### ①乾燥大気遅延

窒素や酸素による大気は、非常に安定し、モデル化しやすく、これらによる乾燥大気遅延は、地上の気圧、気温、標高で計算される。VLBI における遅延は、伝搬してくる間のすべての大気による影響の総和であるため、高さ方向の大気密度の分布や、球面に分布したところに来る曲がり効果などをレイトレーシングで計算していく。高さ方向の大気密度の分布や温度が、高気圧や低気圧など気象条件や地域や、海や山などの環境によって違って来るように考えられるが、実際上は地上の気圧、気温、地表の標高でほぼ表せられるほど、安定してモデル化しやすいものである。

この乾燥大気の遅延は、天頂方向で約 30km 位の層を伝搬して約 7ns (2m) の遅延となり、大きな数値となる。また仰角 30 度では 2 倍、仰角 10 度では 5 倍くらいになり、非常に大きな遅延となる。

気象条件や周りの環境によって違って来る部分に関しては、局所性による不規則変化は少なく、大気推定の中に含まれる形で、推定されることになる。

#### ②水蒸気遅延

乾燥大気に比べて、水蒸気は、海や山などの周りの環境や、昼夜、既設、場所、標高、気象状況、地域性によって大きく変化する、不規則で、しかも局所的な変化も大きい。特に海沿いの観測局（例えば鹿島局）では、方角で遅延が異なったり、朝夕の水蒸気の変化が大きい時間での揺らぎが局所性が大きくなる。また、季節変化も大きく、冬は水蒸気が少ないが、夏は 1 桁くらい水蒸気が多くなる。高さ分布に関しても、条件、場所、時間によって大きく変化する。モデル化も難しく、最も大きな誤差要因になっている。

モデル化しにくいので、水蒸気を観測するために、水分子線の周波数付近の複数の周波数で放射強度を観測し水蒸気量を測定する水蒸気ラジオメータと呼ばれる装置の開発を行

った。一部利用したこともあるが、安定した信頼性のある運用が難しいこともあり、モデル化の向上もあって、乾燥大気+水蒸気による遅延を推定する方法だけで精度を向上することができるようになった。

水蒸気遅延の天頂での量は、夏 30cm 以上で、冬 5cm 以下となる。低仰角の観測では、その5倍にもなり、それが不規則に変化するので、取り扱いが難しい。

水蒸気遅延の単独モデルが提案されていたが、乾燥大気と水蒸気成分を合わせた統一モデルが、数多く提案されてきて、それを利用することが多くなった。

### ③総合モデル

最初使われたのが 1970 年代に提案された Marini のモデルがあるが、その後、季節変動や、アンテナの方位角を考慮したモデル式が提案されるようになり、推定後の残差が飛躍的に改善してきた。

大気の推定方法は、地上の気温、気圧、水蒸気圧による総合大気モデルでほぼ推定し、残りにモデルからのずれを、仰角依存性の違いから天頂方向で換算した遅延時間をパラメータとして推定する。特に海に近い局など方位角依存性も含めて推定することもある。推定で 1-2 時間毎に大気遅延パラメータ（天頂方向での遅延時間に換算した値）の変化率を機械的に推定する方法が用いられ、飛躍的にばらつきが小さくなり、精度が上がった。この推定値は、その 1-2 時間における近傍の水蒸気による遅延と、乾燥大気のモデルからのずれの平均的な数値となっている。

### 3.14.6.9 地球潮汐

高橋幸雄

地球潮汐は、地球に働く太陽や月等の重力により、固体の地球が変形する現象である。月は地球の周り（正確には地球と月の重心の周り）を回転（公転）しており、回転を除くと月に近い部分はより月に引っ張られ、一方月に遠い部分は引力が弱いから遠ざかる。ラグビーボールのような扁平形となる。重力から公転するために使われる力を除いた残りを潮汐力という。主には質量に比例し距離の3乗に反比例する。この潮汐力によって、地球は月に対して扁平する。地球は1日1回自転しているため、この扁平が周期的に変化する。月側と反対側とは同じ効果になるため、半日周期になる。この現象は太陽の重力に対しても同じように起きる。地球の公転軌道面と月の軌道面が5度傾いていたり、月の回転は約1ヶ月周期、地球の公転は1年周期であることの違いや、地球からの距離が、時間とともに変化することなどから、細かな周期の成分が出てくる。

その大きさの比率は質量  $M/r^3$  の比率であるため、月と太陽の潮汐力は約 1:3000 と、圧倒的に月のほうが大きい。

また、潮汐力がわかっても、その力に対して、地球がどう変化するかの応答係数（潮汐力と変形の間関係係数）が必要で、このうち地面に対して垂直方向をラブ常数( $l$ )、水平方向を志田常数( $h$ )と呼び、弾性体である地球の弾性率等によって決まるものである。

地球潮汐の大きさは上下方向に 30cm、水平方向に数 cm の変化となる。

この効果を計算するときには2つの方法を取っている。

一つは、地球、月、太陽の位置を軌道計算から正確に計算した、天体歴（エフェメリス）により、観測時の月、地球、太陽の位置を求め、それを用いて、潮汐の式に当てはめて計算する方法である。軌道計算はかなり正確に求められているので、応答係数の問題はあっても、正確な式として計算できる。この潮汐の応答係数も推定することはできるようになっているが、通常各1つ1つの VLBI 実験で潮汐常数を推定することはほとんどない。一方、潮汐常数の推定を行うため非常に多くの VLBI 実験をまとめて解析することで、潮汐常数を高精度に求めることで、潮汐常数の精度も VLBI によって向上している。

次に、潮汐力を、天体歴ではなく、周期成分に分けて幾何学的に計算する方法が提案されている。代表的なのが Cartwright&Eden による 484 周期成分に分けた幾何学的な計算式である。この方法が用いられたのは、単に時刻と位置を引数にしてだけで計算できることであるが、もう一つに大きな利点は、周期成分に分けたことである。潮汐力に対する潮汐常数は、周期成分によって違ってくることがわかってきた。地球のマントルや核の相互作用から、ある周期に対しては共鳴現象がおき、応答係数が大きく違うものがある。したがって、その効果も含めたより正確な式として使われる。

さらに、この2つの方法を合わせたものとして、天体歴と通常のラブ常数、志田常数を使って計算し、さらにラブ常数、志田常数が通常値と大きく異なる周期成分に関しては、その違いを周期成分計算式で補正する方法である。これが一般的に使われている。

### 3.14.6.10 海洋潮汐負荷・大気負荷

高橋幸雄

海洋も潮汐力の影響をうけ潮の満ち引きが発生する。太陽と月が同じ方向または反対にあると、その力は合わさって大きくなり大潮になり、逆に 90 度の位置関係だと小さくなって小潮になる。海洋などは流体であるため、固体と違ってすぐに応答した変化をせず、流動性により、時間差（数時間）時間をもって変化する。ただし、観測局は固体地球（地面）の上にあるので、直に海洋潮汐が影響するのではなく、海洋潮汐が重石となって近傍の大地の変形を行うことを海洋潮汐負荷と呼んでいる。風船の上にものを乗せると、周りが埋没して変形するのと同じ現象である。これは単に、沈み込むだけでなく、弾性体の地球表面が沈む一方その反動で隆起する部分も出てくる。海面の上がり下がりによって観測局位置が変化するもので、主な効果は上下方向であるが、水平方向の変化も発生する。大きさは、場所によって大きく違うが、上下方向で数 cm、水平方向で 1cm になる。

この計算は、海洋潮汐力とそれによる海洋の変化を正確に計算したものを用意し、それに対して、それが陸地にどのくらい影響するかをモデル化して求める。日本では、緯度観測所（現天文台水沢観測センター）が、数値化して計算できるデータを提供してもらい、それを用いて計算できるようにした。

さらに、海洋と同じく、大気の重みの違いによって大地を押し力が変化し、それによって位置が変化する。特に、気圧変化等によって変わってくる。これを大気負荷効果といい、この補正も考えないといけないが、大きさは海等に比べてはかなり小さい。

#### 3.14.6.11 極潮汐 (Pole Tide)

高橋幸雄

極運動に起因する潮汐による位置の変化である。自転軸と形状軸が一致していない場合、自転軸の周りの回転と形状が異なることにより、自転軸の周りで回転する以外の力が発生し、それによる変形が生じる。この補正を極潮汐と呼び、自転軸のずれの大きさに比例した形で求められる。

### 3.14.6.12 太陽・月・惑星位置計算 (エフェメリス、天体歴)

高橋幸雄

太陽、月、地球、他の惑星等の軌道計算は、古くからおこなわれ、現在では非常に正確に求められるようになってきた。ただし、それらは過去も未来も含めて、高速の計算機で計算されたもので、それを一般に使いやすいデータにして公開している。日本の旧海上保安庁水路部（現海洋情報部）や米国の JPL などが出している **Development Ephemeris** である。これらは、惑星や月、地球、太陽、惑星等毎に一定の期間に分割し、式で計算するために必要な式の係数を提供している。この係数と計算式で、任意の時間での位置を、その式と係数で計算する。VLBI のデータベースには、この **Ephemeris** データから、各観測時における各天体の軌道などを計算して持っておくようにしている。

### 3.14.6.13 アンテナ軸補正

高橋幸雄

入射する電波は平面波と仮定し、アンテナの光軸に垂直の波が光軸上の 1 点に収束するが、この点を受信点といい、この受信点を通り波面が来る方向を示す軸を光軸と呼ぶ。一方アンテナを動かしても不動な点をアンテナ駆動交点といい、この光軸上にアンテナ駆動点があれば、その波面に対する位置関係が一定であり、どんな天体を観測しても、一定のオフセットだけの差となる。一方、光軸上にアンテナ駆動点がなく、ずれていると、アンテナを駆動することで、その方向により、波面とアンテナ駆動交点との関係が変化する。この受信点とアンテナ駆動交点との関係を補正するのがアンテナ軸補正である。

昔はアンテナ軸補正のパラメータも推定することもあるが、その値と補正式は変化しないので、ほとんど推定することはない。

#### 3.14.6.14 局内遅延（ケーブル遅延）補正

高橋幸雄

VLBI の場合は、アンテナ軸補正で示すように、地上にきた信号を、パラボラアンテナで 1 点に集約し、それを受信し、サンプルして信号として記録する。このサンプルされた時刻が、信号に記録された時刻である。この 1 点に集約した放射点から受信機までは空間で一定の距離となるが、受信された信号がサンプル装置まで伝達するケーブル等は、温度環境によって、あるいは光ケーブルの場合は捻じれ等によって変化する。そのため、PCAL (位相較正)、DCAL(遅延較正)の測定を行う。ケーブルに折り返し信号を送ることで測定されるものである。VLBI では、これらは主に時刻と同じようなものであり、時刻変化として推定されるが、誤差要因となるので、DCAL での測定値で補正するのが一般的である。

この補正に関しては、ケーブルや装置によって足す場合と引く場合の 2 通りがあり、プラスかマイナスかの確認を行っている。

さらに、時系と同じ効果になるため時刻の変化・時刻差を調べる時刻同期実験においては、ケーブルの変化なのか、時刻の変化なのかを分離しないといけないので、局内遅延の測定は不可欠となる。

### 3.14.6.15 プレート運動を考慮した位置推定

高橋幸雄

プレート運動のモデルに関しては、多くの論文があり、ここでは、プレート運動を考慮した推定に関係したものを述べる。

地球表面は、10数枚（諸説あり）の地殻の板に分かれて相互に動いている。その動きは、日本等のプレート境界にある場所では、プレート運動という大局的な動き以外に境界部の変形による複雑な位置変化をしている。プレート中央の観測局どうしであれば、ほぼ一定の速度で動いている。一方、プレート周辺部の観測局においては、プレート運動による大きな変化に不規則な変動が組み合わさった変化となる。

全ての観測局は多かれ少なかれ地殻運動や変動の影響で動いていて、位置だけではなくその位置変化と合わせて表す必要がある。位置と位置変化は、各実験で位置を推定しその時間変化を見る方法と、複数の実験を一度に解析しある元期での位置とその変化を推定する方法がとられる。プレート境界から離れた局に対しては、その位置変化がプレート運動を表す。それをを用いてプレート運動の回転角速度と回転軸をパラメータとして推定することができる。

### 3.14.6.16 地球基準座標系 (ITRF)

高橋幸雄

VLBI の一番の特徴は、位置の基準が遙か彼方の電波天体の位置で、位置は動くとしても非常にわずかであるため、長期間にわたって安定した信頼性の高い測定ができることである。また、基準座標系の方向の定義が明確にできることでもある。こうした利点を生かして、VLBI で観測した結果などを使って、地球基準座標系が国際協力で構築された。これを、地球基準座標系 (ITRF) と呼ぶ。VLBI だけでなく、GPS や SLR 等の宇宙測位技術のすべてを使って作られたが、基準となる測定として VLBI は重要な役割を果たした。特に、長期安定性をもつ信頼性を提供するものとして、フレームワークの最も基準を提供する技術となっている。

当初は、地球基準座標系として、実際の観測局位置と方向などを基準にしていた。しかし、地上にあるものは、プレート運動や局所的な地殻変動などで、動かない観測局は無く、限られた局で定義するのは不適切である。そこで、動きが安定している複数の観測局を選び、それらの位置関係 (相対位置と位置変化) の全体で基準座標系を構築する方法がとられた。すなわち観測局位置のある集まりでフレームワークを維持しようとするものである。

そのためには、変化が安定した基準局と、変化が不規則や測定が不十分な観測局に分けて、それぞれを重みを付けて地球上全体の観測網として、地球基準座標系が作られた。日本の位置や測地系なども、日本の観測結果を含めて決められている国際地球基準座標系に基づいている。

### 3.14.6.17 時系

高橋幸雄

VLBI では、観測局ごとに信号のサンプル時刻が観測された信号とともに記録される。この時の時刻は、VLBI 局の時計（時系）が用いられる。この時系の差が、各観測の中で 2 局の遅延残差やその変化の中に含まれる。これら時計の同期差（時系の差、クロック差）を、観測遅延時間から推定する。時系の差は、電波源に寄らずに共通である。そのため、ある時間間隔に分けて時系の差の変化やオフセットをパラメータとして推定値する。この時系の推定に含まれるものとしては、アンテナ構造による一定の伝達時間やサンプルまでのケーブル伝搬の時刻等の局内遅延差も含まれるため、本当の時系の差は、これら局内遅延差を正確に求めないと求まらない。そのため時刻同期実験では、局内遅延を変化だけでなく絶対値として正確に測定する苦労が必要となり、特殊な時刻同期用の装置が必要となる。

観測値をいくつか集めて、その共通性から時系の差を推定するためには、ある程度の観測の間で時系は安定あるいはシンプルな変動（例えば時間の 1 次変化程度）であることが必要である。そのためには数時間（観測数で言う 10 個から 100 個）の間安定な時計が必要で、原子時計が不可欠となった。もし、数分で 0.1ns 変化する時計では時系の変化か他の物理効果や観測天体の違いによるものかが分離できない。もちろん、1 観測内でも安定しないと、観測自体ができなくなる。そこで、100 秒から 10000 秒の間で安定度がいい原子時計として、水素メーザの時系を用いられることになった。10000 秒以上の時間間隔での安定度に関しては、推定で求めることができるので、上にあげた時間間隔での安定度が最も重要なものである。その時間間隔で 10ps~100ps の安定度が理想的で約  $10^{-15}$  の安定度が望ましいものであった。当時、原子時計で、標準時を決定するのに使われていた Cs 原子時計は、この時間間隔での安定度が十分でなかったため、その時間間隔での安定度を示す新しい原子時計として、水素メーザが開発され、用いるようになった。Cs 原子時計は 1 日以上以上の長期安定度が良いため、1 日以上長期時系は Cs 原子時計で、1 日以内の実験での時系は水素メーザの併用・組み合わせで運用していた。また、Cs 原子時計に関しては、衛星などを用いた時刻同期などを行って、大きな時系の差がないように管理されていた。

また、水素メーザも 2 台併用するなどして、相互の時系の安定を測定するようにして運用を行うなど、時系管理を厳密に行った。VLBI 実験ができるようになったのは、この水素メーザ時計などを初めとした時系管理が正確にできるようになったことが、技術的に大きな成功要因でもあった。

時系に関しては、2 局の時系の変化が遅延時間として見ることもできる。どの観測局の時計が変化したかは、複数の局で、複数の基線（観測局のペア）で見ると、変化の共通性（同じ時刻で同じような変化が共通した観測局がある基線で見られる）から、どの観測局の変化を解析者が推定する。変化としては、大きく分けて、1 次変化の変化率が変わる折れ曲がり現象と、時系が飛ぶジャンプの現象が見られる。その他、時刻管理が不十分な場合は

2次変化やさらに高次項の変化が発生する。

最後に、解析において、当初は、解析者が時系の変化を判断しながら解析していたが、時系においても、1-2時間に1回自動的に時刻の変化を推定する方式がとられ始め、水素メーザの性能も上がってきたことも含めて、この方法で精度が高くなり、時系の変化が解析結果にはあまり影響することはなくなった。

## 3.15 パラメータ推定

高橋幸雄

### 3.15.1 VLBI におけるパラメータ推定

観測された観測値（2局の到達遅延時間及びその時間変化）には、前節のアプリモデルで述べた物理現象が含まれている。そこから、物理現象の物理量などを推定することを、パラメータ推定という。いわゆる、遅延時間という求めたい物理現象と直接結びつかない観測量から、求めたい物理現象に翻訳して、その影響を取り出す（推定する）ことである。こうしたプロセスは、ほとんどすべての観測においても類似している。今回説明する手法は、観測値から物理的な意味を持つものに変換すると言ってもいい過程である。すなわち、1つの観測値だけでは、何も物理量はわからないが、それらをたくさん集めて（母集団を形成）、その中から必要な要因の因子を取り出す統計学における一般の多変数解析である。

VLBI でも、この推定が一番肝心なところであるが、一方では解析の仕方や解析者の判断に依然する部分でもある。

物理現象を表す場合、前節のアプリモデルで述べたように物理現象をモデル化し、パラメータ化する。このパラメータを推定する形になる。

こうした統計学で多変数解析を行う方法には、古くから研究がなされ、多くの方法が提示されている。パラメータ推定では、物理モデルが非線形式の場合が多く、パラメータで展開すると、多項項が含まれるが、その場合、推定は複雑になり、推定の初期値ややり方によって大幅に変わる等の不安定性をもつ。一方、多項項は無視できるほど小さいとして一次項だけを推定する線形の推定ができれば、シンプルでかつ安定で信頼性があるため、最も一般的に使われる。正確な予測値があれば、多項項が小さいとして無視でき、1次項だけが主となるため、線形性が成り立つので、VLBI では、できるだけ正確な予測値を求め、線形推定を使って推定している。

VLBI の推定における大きなメリットは、一番不確定要因が大きい観測局の位置に関して、幾何学性（直角三角形）が成り立ち、観測局の位置に関しては、位置が少しずれていても線形推定を用いることができる完全線形性となる事である。式で記載すると、観測量の遅延時間差  $\tau$  は、

$$\tau = (S_x \cdot B_x + S_y \cdot B_y + S_z \cdot B_z) / c + \text{補正}$$

となる。 $S_x, S_y, S_z$  は地球固定系で見た天体の方向ベクトルで、 $B_x, B_y, B_z$  は基線の XYZ 成分です。この式で  $B_x, B_y, B_z$  に関しては完全に線形性が成り立つ。

一方、GPS 観測では、GPS の場合は、地上では球面波面となるため、位置に対して幾何学性が成り立たず、遅延時間差は、GPS と地上局の距離の差で、距離を求めるため、各位置  $X, Y, Z$  が 2 乗の平行根の中に入り非線形となるため、位置推定では、非線形推定を使わざるを得ない。この点が、GPS と根本的に違って推定の安定度、信頼度が高く、比較的少ない観測値でも推定ができる理由でもあり、VLBI が本質的に有利な点であった。

線形推定に関しても、多くの方法があるが、VLBI では、最も一般に使われている線形最小2乗法を用いることをベースにしている。これは1実験や複数実験のすべての観測値を集めてきて、それを母集団として、(観測値—予測値)の差が最も小さく、かつ残の傾向性が無いランダムとなるようにパラメータを推定するものである。式で記載すると以下のよう表すことができる。この式は、実は、推定したパラメータを用いると、観測値の残差の偏差が最少となる場合である。

$$\begin{pmatrix} \tau_{o1} - \tau_{c1} \\ \tau_{o2} - \tau_{c2} \\ \vdots \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \partial \tau 1 / \partial p1 & \partial \tau 1 / \partial p2 & \cdots \\ \partial \tau 2 / \partial p1 & \partial \tau 2 / \partial p2 & \cdots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p1 \\ p2 \\ \vdots \end{pmatrix}$$

その他の代表的な線形推定法として、線形カルマンフィルター法があり、それを用いた推定も行われてきた。この線形カルマンフィルター法は、観測値を一度に集めて解析する最小2乗法と違って、観測値が出てきたら逐次、その誤差要因がどの物理パラメータから来るかの割合を推測して、ずれを各パラメータに振り分ける逐次解析法である。母集団が無限であれば、線形2乗法と一致する。また、時間的なパラメータの変動をとらえる場合や、リアルタイムで解析を行い制御に利用していくような場合において優れている。一方、初めのデータ数が少ない段階での解析が不安定で解析の信頼が落ちたり、あるいは初期値の設定によって結果が異なることもあり、安定性には多少問題がある。この解析は、MIT や JPL などが VLBI の解析で使っていた。

我々も、両方の解析方法を使って解析した。

### 3.15.2 パラメータ推定の実施方法

パラメータの推定は、他の解析と同じく、(観測値—(予測値+パラメータ修正による補足値))を画面で見ながらやっていく。これを解析における遅延残差呼ぶ。以下に最小2乗法による解析について述べる。

#### ① 任意性の決定

VLBI の解析は、1つ目が、任意性の除去と呼ばれるもので、バンド幅合成を行うときに出てくる一定値(任意性と呼ぶ)の整数倍の違いが出てくるものである。観測値を求めるバンド幅合成処理において、粗決定を行い、それをもとに精決定とおこなうことで追い込んでいくが、任意性分の違いが残ってしまうことがある。その場合は、全体の遅延残差を見て、一定の間隔でスプリットしている状況を見ながら、一つのラインに集約する。1つの観測値の観測誤差が0.1ns以下で、パラメータがずれていても、数ns以下であるのに比べ、任意性は数10ns~100nsと、1桁から2桁違うので、目で見てわかる。その場合、注意しないといけないのが、複数基線での観測においては、各3基線間で見ると、 $AB - AC + BC = 0$ と閉じないといけない。それを注意して、任意性を調整・決定する。この操作で、数ns以下の残差にすることができる。

#### ② データ品質の確認

次の操作は、観測値で信頼がない、あるいは品質の悪いデータを解析から外す操作を行う。SN が悪いなど以外に、データ処理において、間違っただ観測値を求めてしまうこともあり、それらは解析に使えないので、解析から落とす操作をする。解析に使用するか、解析から外すかは、解析者が判断し、データの品質情報に記録し、その後は、それをもとに処理していく。

まずは位置推定やいくつかのパラメータを簡単に推定する粗い推定を行い、特に大きな残差を示すものは、解析から落としていく。これを繰り返しながら、データの品質を確認していく。残差の rms (二乗平均平方根) と、各観測の残差とを比べながら判断していく。統計学では、分散 ( $\sigma$ ) の 3 倍  $3\sigma$  の範囲内にある確率は 99.7% で、1 観測 1 基線で 100-300 個観測があるとして、統計学的に  $3\sigma$  より外れた数は 1 個以下である。さらに  $5\sigma$  以上になる確率はゼロに近いので、 $5\sigma$  以上は何らかの間違いがあったものとして解析から落とすことになる。 $3\sigma$  から  $5\sigma$  の間の残差に関しては、解析の方法による変わってくることもあり、解析者の判断や、解析方法に寄ることもある。しかし、その数も数個程度であり、全体の影響としては、解析結果にはほとんど影響しないので、その範囲での残差を持ったものの使用する・しないは、それほど重要ではない。一般に  $3\sigma$  以内は使用し、それよりも大きな残差は外してしまうことが多かった。これで、大体残差を  $\pm 1\text{ns}$  以下のレンジに絞り込めることになる。

### ③ 時系データの変化の解析

次に問題となるのが、観測局の時系の変化である。時系は、水素メーザと呼ばれる原子時計によるものであるが、この原子時計は、短期間の安定度は非常にいいのであるが、数時間以上の長期の安定度は、悪くなっていく。そのため、数時間で見ると、時系の変化が折れ曲がったりジャンプしたりしてしまう。これは不規則で予測できないため、残差を見ながら、解析者が、このあたりに変化があったのではということ推測して推定を行う。それは観測局毎に起きるので、基線で見ると共通性が見てくることを利用して推測する。大きな変化は簡単であるが、小さな変化については、解析者の判断によることが多かった。推定するパラメータを多くすると、残差は小さくなるが、信頼度が低くなることもある。その判断は非常に難しく、ある意味では解析者のパーソナル判断となっていた。これにより、さらに絞り込んで、大体残差を  $\pm 0.5\text{ns}$  以下のレンジに絞り込めることになる。

### ④ 大気推定

もう一つ、誤差要因の一つで、不規則で扱いにくいものとして、大気遅延の推定を行う。これは時系ほどわかりやすくなく、仰角が低いものと仰角が高いものの残差から判断していくが、一般にみて極めて判断しにくい。そのため、1 実験 1 つとか、一定間隔で推定するなどが用いられてきた。実は、大気遅延と電離層遅延は両方とも、仰角と呼ばれる水平と天頂の間のアンテナの向きの角度に依存して変化するので、電離層補正値が無い場合には、大気と同時に電離層遅延も推定は大まかに可能である。

### ⑤ 位置の解析

位置がずれているとどうなるか。1つの電波源を見ていくと、日周変化の一部分（一般に観測天体は日周運動をしており地平線に沈むため、すべての時間で観測されない）が見られる。非常にきれいな三角関数で、しかも観測天体の赤緯によってその振幅が変わってくるので、わかりやすい。一般に、解析において、①の任意性除去後は、常に位置推定は行ってから残差を見ていく。

#### ⑥ その他のパラメータ

ここまでが基本の解析であるが、これ以外に、アプリモデルで出てきた物理モデルのパラメータを、目的や残差によって行っていく。地球回転パラメータの推定では、観測局の中で、3×観測局成分のうち7成分以上を固定して推定しないようにしないといけない。また、章動に関する推定を行うこともあるが、観測局が多くなると推定できない。その推定値には、歳差も含まれる。また、電波源の位置などで、特に電波源の中で残差が大きくなる傾向などがあると、電波源位置の推定も行う。また電波源位置とその変化を目的とした推定も行っており、その場合は、既知とした電波源は推定せずに、それ以外は推定するなどを行う。その電波源位置の変化が、重力場によって変化するなどの相対論効果の実証を行う実験にも使われた。

#### ⑦ 補正

解析を行うときには、パラメータ推定の他に、観測値による補正を行う。その1つが、電離層補正である。電離層は、大気の外側に位置する電子の帯電離層を電波が通過するとき電波の到達時間に遅れが出る現象であるが、観測局毎に違ってくる。この電離層による遅延は、周波数によって異なる。そこで、2つの周波数（S帯（2GHz）とX帯（8GHz））を使って、その差から大気遅延量を求めて補正する。Xバンドで1ns以下であるが、変動としては大きいので、2周波数での観測値を用いてその差から補正することが一般的である。2周波数を使って電離層を補正するのは、測位GPSでも同様である。最近ではGPSの電離層観測値を補正值として用いることもある。周波数が高くなると、その2乗分の1で小さくなっていく。そこで、22GHz帯で観測すると、電離層補正は小さくなり、補正しないで大気遅延として推定に含めることで、推定ができる。S帯/X帯での観測では、S帯の観測は電離層補正のためだけに使われていて、そのためX帯での観測精度より、電離層補正すると、各観測の精度誤差は悪くなる。すべての信号を1周波数に注力して観測できるので精度も高めることができる。これを22GHz測地VLBIのアイデアで、日本が提案したもので、その実験を日伊実験として成功させた。しかし、電波源の強度や、受信機や装置、さらに精度の観点で、大幅に精度を改善するほどにはならなかったことなどから、大きく普及はしなかった。その実験結果は、別な章で記載されている。

#### ⑧ 再重みづけ (re-weighting)

最後に少しテクニカルな操作について述べますが、詳細な手続きなので、理解ができない場合はスキップしてください。テクニカルではありますが、VLBIの誤差の本質を意味するものでもあります。通常各観測値の誤差で、データの信頼度の重みづけを行います。観

測誤差が大きいものは、その2乗の逆比例でデータの重みづけをするのが一般的ですが、VLBIでは、それだけでは、 $\chi$ 検定と呼ばれる誤差とばらつきが統計学において妥当かどうかを見る方法があり ( $\chi = 1$  近辺が正しいばらつき)、VLBI解析において、 $\chi$ が1ではなく、ほとんどが2とか3になる。これは、解析後のばらつきが、観測値のSN比から評価した誤差よりも大きいという事を示す。また、SNが小さい場合でも、大きい場合でも、あまり残差の大きさが変わらないという事もある。これは、全体で見ると一様なばらつきになったとしても、SN比以外のばらつきを発生する原因がどこかにあることを示す。その一つの原因が、推定の不完全さであるし、SN以外のばらつきを発生する何かの原因があるように思え有る。後で述べる系統的な誤差がそれに値するオーダとなっている。

いずれにしてもその評価ができないし、解析後の残差がSNにあまり依存しない一様なばらつきであるように見えることから、SNによる誤差以外に基線ごとに、すべての観測値に一定の誤差を付け加えて、各観測の誤差 $\sqrt{(\sigma(\text{SNR})^2 + \sigma_c^2)}$ として $\chi$ が1になるように $\sigma_c$ を計算し、各観測誤差を $\sqrt{(\sigma(\text{SNR})^2 + \sigma_c^2)}$ とする操作を再重みづけと呼び、再重みづけによる推定と推定パラメータの誤差を求める。多くのケースで $\sigma_c >$ 各観測誤差 $\sigma(\text{SNR})$ で、ほぼ同じ重みづけに近くなる。

なぜ、このようなことが起きるかは明確ではないが、ランダムなSNR以外の系統的な誤差などがあるものと考えている。

今回、最小2乗法という、観測データを集めてきてまとめて解析する推定方法について述べたが、カルマンフィルターを使った場合、パラメータの時間変化を再現でき、①の任意性除去、②のバッドデータ除去後の、時系や大気の1実験内の変化を再現するのに有用で、解析者の判断に寄らずに推定できるというメリットがある。安定した推定を行うか、パラメータの随時的な変化を含めた解析を行うか、これは解析の判断で、どちらもメリット、デメリットがある。

### 3.15.3 推定パラメータについて

#### (1) 位置の推定

通常、すべての実験で位置推定を行う。ただし、VLBIは相対位置関係だけが求められるので、どこか1局は基地としないといけない。基準点があればそれを、あるいは、その実験の中で、多くの実験から位置が精度良く求められているとか、位置変動が安定しているあるいは少ない局を基準局として推定しないようにする。残りの局は、位置推定を行う。また、以下に述べる地球回転パラメータを推定する場合は、2局と1方向を固定しないと同時に推定できない。そのため、地球回転パラメータを同時に推定する場合は、3局を基準にして固定することが多い。

なお、位置の推定においては、位置のXYZ成分を推定することが標準である。これはXYZ成分表示では、推定の線形性が成り立つため、誤差解析がしやすいことや位置概念が得

やすいなどがある。しかし、位置として見た場合、XYZよりは、水平成分（東西成分、南北成分）と垂直成分に分けて3成分を推定する方法があり、そのほうが誤差の要因として分離して解析しやすい。たとえば、大気遅延誤差と垂直成分と時系の3者のパラメータは、相関が高く、相互に影響し合う。そのため精度も、水平成分が一般に誤差が大きく測定の信頼性も低くなる。一方水平成分は、高精度に測定できる。特に観測網の形からみて、東西、南北の成分の誤差を発生する要因も違ってくるため、その特徴もあり、それぞれを推定するのがいい。もし、XYZ成分だと、こうした誤差要因がすべての成分に影響するため、解析などでは、水平成分と垂直成分を推定することが、多くなってきた。

#### （2）地球回転パラメータの推定

地球回転パラメータは、座標回転を示すもので、観測網の回転と関与するため、どこか1つの軸とその周りの回転を固定しないと推定できない。したがって、3局以上を固定し、観測局は他の観測で求められた位置を使うなどする。特に時間変化が少なく、精度がいいものを固定し、地球回転パラメータを推定する。なお、地球回転に関しては、どこか1時点を固定し、そこからの変化を求めるような場合（1日の中での地球回転パラメータの変化を求めるようなケース）や、複数の観測を合わせて解析する方法がよく使われた。この場合は、固定した1時期の地球回転パラメータは、他の観測から用いて、その時点での地球回転パラメータを基準とすることで、観測局の位置と地球回転パラメータの両方を推定数することができる。こうした解析の工夫をすることで、目的とする観測値をうまく推定することが、観測者の手腕でもある。

#### （3）歳差・章動の推定

歳差・章動は、観測する天体の位置に関係するもので、推定することはできるが、1日の中の短い期間での場合は、推定誤差が大きくなることもあり、複数実験での推定で求めることが望ましい。また、歳差と章動は通常1実験や短い間の複数実験では分離できない。そのため、章動を推定するが、その中に歳差が含まれてしまう。章動の周期性を用いて、歳差と分離することができるが、どの周期成分を推定するかで、解析にするためのある一定の実験期間が必要となる。一般に歳差は推定せず、章動の2成分を推定することが多い。

#### （4）天体位置の推定

天体の位置推定は、さらに長期間の観測が必要となる。また、歳差・章動と天体の位置が関係しており、同時にすべてを推定することはできない。まず、基準になる天体を固定し、それ以外の天体や位置があまり精度よく定まっていない天体の位置を推定する。基準の天体であるが、最初はVLBIの天体の基準としていた3C273Bをもとにしていた。しかし、詳細な天体位置観測をすると、天体の構造という電波源の広がりや、その分布の変化によって、位置が変化することがわかってきた。特に比較的近い天体や電波源の形が大きなものはそうした影響があり、位置が動かないとか、点のような天体ではなきため、基準には不適で、位置を推定したほうがいいということがわかってきた。しかも、その形が大きいと、見え方によっても観測される位置が1日の中でも変化することがわかってきた

め、場合によってはそうした補正を行うこともある。しかし、一般には、1 実験での平均一をとして1 実験全体で推定することが多い。問題なのは、そうした構造・分布が時間とともに変化することである。そこで、構造・分布が小さいあるいは変化しない測地用の適した天体を基準にし、構造や・分布を持った天体は観測しないか、観測した場合も位置推定を行うことが一般的になってきた。

こうした基準になる位置変化が少ない天体位置を求めたり、逆に構造を持った天体の位置変化を求める観測をして、電波位置座標系を作っていく。数年観測すると、歳差・章動と、電波天文固有の位置変化と、構造・分布の変化による位置変化が、合わさった位置変化が見られ、そこから、各特徴から、それぞれの成分を推定していく。

#### (5) 時系の推定

時系（時刻）は、すべての局が独立に運用された時系（原子時計）をもとにしているため、各観測局で個々の変化をする。この変化が、基線における遅延時間などでは、両方の観測局の時系が合わさった形で現れる。観測値の遅延時間とその変化率においても、微分の関係で現れる、さらに、電波源によらず、同じ変化をするという特徴がある。

ある観測局に関係した基線すべて共通の変化が見られた、例えばある時刻にすべて似たような時系の変化があれば、その局の時系が変化したとして、推定するのである。解析者は、目で見ながら、その共通した時刻変化を見つけて解析することが、重要な能力であった。パラメータはあまり増やさないほうがいいので、ばらつきを小さくすることと、こうした時刻や後で述べる大気の変化の推定をいれることとの兼ね合いで、パラメータを入れていく。VLBI の初期は、こうした解析が行われてきたが、観測数が増え、個々の観測精度も上がってくることや、原子時計の性能が向上し安定になってきたなどで、短時間で推定できるため、ある一定間隔、例えば 2 時間毎に変化のパラメータを入れて推定する自動化がすすめられた。これによって解析者による解析結果の違いや、その負担が大幅に軽減され、多くの実験が一様の結果を提供することができるようになった。時刻は、ほとんどこうした機械的に一定間隔で推定することが通常使われる。

#### (6) 大気の推定

大気も時系と同じく、観測局に依存しているパラメータである。大気の推定パラメータは天頂方向の遅延誤差（計算値からのずれ）を求めるもので、観測局で共通した傾向があるが、時系のようにすべての電波源で共通では見えず、仰角（アンテナの垂直方向の角度）依存性を持っているためわかりにくい。仰角によってばらつきの傾向を時間とともに追ってみていくのであるが、難しいため、当初から 4 時間とか 6 時間で推定することが多かった。大気は日周変化をするため、4 時間とか 6 時間はその意味でも変化をフォローすることができるので、そうした方法での推定を行っていた。その後、観測数が増え、個々の観測精度も上がってくることによって、時系と同じく、2 時間程度で変化を推定する方法が持たれるようになり、誤差が飛躍的に小さくなった。すなわち、妥当な推定ができるようになった。その後、大気の中で水蒸気成分が大きな誤差養親となっていることで、モデル

の改良や、水蒸気の地域性を考慮した方位依存性などを推定に入れることで、精度はますますよくなってきている。これも、ほぼ機械的にパラメータが推定できるようになってきた。

#### 3.15.4 解析の変革（複数実験のマージ）

VLBI では、最初は1実験単位で解析をしていた。しかし、実験が集まってくると、マルチ実験をまとめて解析するようになってきた。これが大きな解析の変革となった。ただし、基本は各実験で解析を一通り行った後に、全体でまとめて解析していく。これにより、データ数が多くなり、安定した解析ができるというメリット以外に、推定パラメータの推定方法も多様になった。

例えば、従来の推定では、位置変化や地球回転パラメータの推定を各実験毎でやり、その推定値を持ち寄って全体の変化をみていた。プレート運動も、各位置を観測時期でプロットしてその傾斜から速度を求めていた。マルチ実験の解析ができると、プレート運動を、初期位置とその変化率（位置速度）で推定したり、地球回転パラメータの変化を推定できるようになった。また、天体位置や歳差・章動も安定して推定できるようになった。これにより、推定の信頼度は、飛躍的に改善したと言える。

一方、こうしたマルチ実験をまとめて解析するには、母集団が大きすぎかつ推定パラメータ数も膨大になる。計算行列式も、推定パラメータ数の2乗に比例するため、計算が追いつかないだけでなく、計算の桁数のオーバーフローで正確な解析ができなくなるという事が起きる。そこで、実際はマルチ実験で共通なパラメータに関してのみ全体で解析するが、時系や大気など、個々の実験特有なパラメータは他と独立であるので、分離して推定する手法が用いられた。

カルマンフィルタは、単に順に実験を追加しながら処理していくことで対処できるので、マルチ実験の解析では、解析方法の工夫はあまり要らない。

2つ目の変革は、時系と大気の推定時間間隔を、自動的にセットして推定する手法が用いられたことである。大気は、朝昼夕夜の変化があることはわかっており、また時系は2時間くらいは安定であるが、それ以降は変化するので、2時間毎に自動的に推定する。ただし、大気や通常の時系などで連続性があるものは、折れ曲がりとして変化率の変化だけ推定する方法がとられた。これができるようになったのは、推定時間間隔内の観測データが十分あることで、VLBIの装置の高精度化やアンテナの駆動時間の短縮などから実現できたため、当初の実験では、2時間当たり10個以下の状況ではできなかった。この方法で、解析者のパーソナル判断が不要で、ほぼ機械的に解析処理ができるようになり、労力の軽減だけでなく、多くの実験処理を素早く行うことができるようになった。

#### 3.15.5 K3VLBI システムの推定ソフトウェア

日本で開発した K3VLBI システムの解析ソフトウェアは、KLEAR と呼ばれるもので、

物理現象として明確にする Clear からつけられたものである。その解析ソフトウェアの大半は、米国の Mark-III の Solve と呼ばれるソフトウェアを解析して、その方法を踏襲したものであるが、一番大きな違いは K3-DB (KASTL) を用いたため、そのインターフェースを新たに作ったことである。また、このシステムは、当時では斬新であった、マンマシーンインターフェースが優れており、各観測のポイントにカーソルを持って行き、そこでキーをいれることで、バッドデータかそうでないかの選択をしたり、任意性を調整したりすることができた。今のタッチ式パネルのイメージに近く、まだワープロも十分普及していなかった今から 30 数年前のシステムとしては、素晴らしいものであった。

### 3.15.6 誤差理論に関する考察及び新しい推定方法の一考

VLBI で用いられている解析は、ランダムな分布をしているという母集団全体でのランダムセンスを前提とした解析であった。統計学は、基本的にはその原則から成り立っている。それは、正しいのだろうか。VLBI で多くの解析を実施した中で得た経験としては、全体を集めてくればランダムであるが、その個別を見るとばらつきが決してランダムではなく、よく見ると隣と近い系統的な誤算が見られるのではないかと思われる。もちろん、その傾向が顕著で、何らかのパラメータとの相関があれば推定をすることもできるが、ばらつきはありながらばらつきの大きさが違ったり、一定の傾向性はあるが 10 個程度集めればばらつくなど、完全にランダムとは言えない状況で、ランダムネスが系統的に変化しているという解釈もできる。近接したデータでは相関がある温度や環境など何らかの共通した原因による誤差が発生して系統的な要因によって生じた雑音としてみることもできる。

推定した後の残差を、完全にランダムな雑音と、系統的な雑音に分けて考えてみた。簡単に説明すると通常ランダムとしている母集団に対して時間的に隣接した残差の差を取って、その差が個別の標準偏差とどう違うかということ調べた。大体 7 個分くらいは、それによる残差が減り、それ以降の相関はなかく減らなかったという事がわかった。すなわち、隣接したものにおけるバラつきと、全体的に発生するばらつきに分けることができ、全体的なばらつきは、SNR からのばらつきに近く、隣接した系統的なばらつきが加わったような結果が見られた。誤差を考える時には、完全なランダムネスの誤差と、近接したものがなんらかの関係を持ちながら発生する系統的な誤差に分けて考えるべきであろう。これは、VLBI に限らずに、すべての物理の解析において考慮すべきで、この 2 つのファクターを、同じと方法ではなく、別な方法で評価すべきではないかと考える。

### 3.16 日本最初の国際 VLBI 実験の先陣争い？

1980年代に入り、SLR や VLBI の装置が米国をはじめとして各国で次第に整備され、いろんな実験計画が提案されてきました。わが国でも、K-3 システム開発は 5 カ年計画の最終年度（1983 年度）に入り、各サブシステム個別のテストとそれらを組み合わせたテストが延々と続く毎日でした。開発の総仕上げとして 1984 年 1、2 月に日米で共同観測（システムレベル実験）を行い、開発の最終目標である両国で観測・記録されたデータを送りあってから双方が並行して処理・解析を行い、日米間の距離をセンチメートル単位で求めるスケジュールが両国で公表されました。一方、旧東京天文台はその頃、米国の Mark-III システムを購入し、その手始めに、1983 年 12 月、米国のヘイスタック観測所と VLBI による国際天文観測がシステムレベル実験に先立ち計画されました。2 つの機関が整備してきたそれぞれの装置を用いて、異なる実験が僅か 2~3 ヶ月の間に予定されたこととなります。

その後、1983 年度に入り K-3 の開発は順調に進み、互換性の最終確認や処理・解析テストが実験に入る前に必要であるとの認識は日米双方で一致し、できるだけ早い時期にこのテストを実施して、本格的な実験に備えることになりました。その後、1983 年 11 月にこのテストができそうであることが両国で確認されました。結局、電波研究所と NASA は 1983 年 11 月初旬に双方のシステム全体の機能・性能と互換性をテストする日米システム互換性確認実験をシステムレベル実験に先立ち実施することになりました。

この確認実験は独立に記録したデータを双方が再生・相関などの処理・解析できるかどうか最大の目的でしたので、僅か 2 日間の観測でした。観測データは NASA ゴダード宇宙センターと日本の電波研究所でそれぞれ開発された 2 つのソフトウェアで独立にかつ並行して処理・解析が行われました。そして両システムの互換性の確認は勿論、日米間の距離が cm の精度で初めて求められました。詳しくは次の項「日米システム互換性確認実験の成功」で述べられます。当初から計画されていたシステムレベル実験も次の次の項「システムレベル実験」に述べられているように、予定通り実施され、これ以降、本格的な観測が始まりました。

一方、1983 年 11 月の日米システム互換性確認実験から 1 ヶ月後、旧東京天文台は米国から購入した Mark-III システムを用いて、VLBI で天文観測を実施しました、処理・解析はソフトウェアが日本で整備されていなかったため、米国ヘイスタック観測所で行われ、天体の高分解能観測に成功しました。

### 3.17 日米システム互換性確認実験の成功

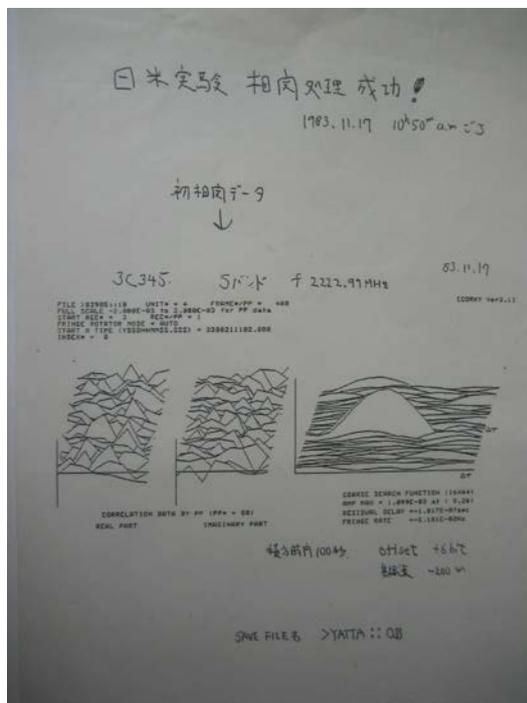
河野宣之

両国の全システムの機能・性能と互換性を確認するための日米システム互換性確認実験は日本時間 11 月 5 日と 6 日の 2 日に渡って日本の鹿島局、米国のカリフォルニア州のモハービー局とオーエンズバレー局の 3 局が同時に参加して、実施されました。日本から河野室長（当時）がモハービー局で実験に参加することになり、1983 年 10 月から 11 月までモハービー局に滞在し、実験の準備、実験の実施、実験後のデータが記録された磁気テープの日本への輸送などに当りました。しかし、実際にはモハービー局の運用責任者である C.G.Koscielsky（通称チャック）氏がすべてやってくれて、河野さんは確認するだけでした。2 人は毎日、車で 40 分ほど離れたモハービーの町から VLBI 局まで通っていました。町を出ると砂漠の中のまっすぐな道をひたすら走るだけです。チャックさんはハンドルをロックする装置を自分で作って、ハンドルを持たなくてもよい装置にした、とっていました（奥さんのえりこさんは日本人で彼自身も来日の経験があるそうでした）。モハービー局は 12.2mX-Y 型アンテナ・受信機に Mark-III システムが完備されていて、アポロ計画のバックアップ局の役割も果たしました。局の周りは見渡す限り砂漠で、休み時間に周りを散歩していたら、蠍（さそり）とコヨーテに気を付けるよう注意されました。

観測は問題なく終了し、観測データの記録された磁気テープは実験の運命を決める大事な大事なものであり、1 巻は河野さんが直接持って帰り、残りは輸送にして、輸送時のトラブルがあっても相関処理できる対策をしていました。河野さんは数日後ロサンゼルスに移動しました。数ヶ月前まで JPL に塩見さん（河野さんの後の 3 研究室長）が在外研究員で滞在し、VLBI による静止衛星の精密軌道推定を研究していました。

翌年 1984 年に精密軌道推定を目的に日米共同実験が議論されていたので、責任者である J.F.Jordan 博士と実験などについて打ち合わせを行いました。この実験の行方も今回のシステムレベル実験の結果如何にかかっており、相関が出るまでは不安な毎日を送っていました。精密軌道推定は VLBI の重要な応用の一分野であり、日本の VLBI の始まりである NASA からの Telex にも提案されていました。また電波研の開発すべき将来技術の一つでもあり、是非、成功させたい実験でした。

日本のほとんどの新聞が 11 月 5 日と 6 日の日米実験を報じました。実験から 12 日後の 11 月 17 日に鹿島の相関器が米国から送られてきた観測データと鹿島のデータから見事な



17.1 図 実験後 12 日目に初の日米共同実験の成功を示す相関

相関結果を出しました。17.1 図は相関処理を行った近藤さんがまとめた相関結果です。日米間の VLBI による測地、位置天文学、電波天文学の本格的なスタートのテープが切って落とされたのです。新聞だけでなく TV、ラジオ、雑誌など多くの報道機関は日米間の距離を数 cm の誤差で求められる実験の成功を報じ、祝福をしてくれました。

### 3.18 日米システムレベル実験の成功

吉野泰造

日米間の VLBI 実験の実現に向けては、「日米合同調査計画の宇宙分野における日米専門家会議」における合意（1979 年）を基に、多くの関係者の努力が重ねられてきた。そして、1984 年初めに、いよいよその成果が試される段階に至った。NASA は、1979 年 8 月の米国の国内実験（Haystack—NRAO—OVRO）を皮切りに、MarkIII を用いた多くの実績を積んできており、準備は十分である。従って、ここで日本が加わる本格的な国際実験の成果は、日本側が急ピッチで開発を進めたシステム開発の完成度を明らかにするものであった。

システムレベル実験（約 24 時間の本実験）は 2 回計画され、第 1 回目は 1 月 23 日に鹿島（26m）—Mojave（12m）の 2 局間、2 回目は 1984 年 2 月 25 日に鹿島—Mojave—HatCreek の 3 局間で行われることになった。第 1 回目の実験では、米国側観測局（Mojave 局：図 1）において実験に立ち会うことが吉野に命ぜられた。この出張は当人にとって、初の海外出張であり、その点でも、最近のような海外渡航の気持ちはあまりなかった。ただ、前年の日米予備実験で VLBI の観測に成功しFRINGEを確認されていたので（参照：河野さん原稿）、そもそも実験が成立しないというような不安は無く実験に参加できたのは大きな支えであった。こうして、1 年後に華々しく報道されることになった太平洋プレートの運動についての測定の第一歩を踏み出した（Mojave 局は太平洋プレート上にないが、シリーズ化した CDP 実験の皮切りであった）。

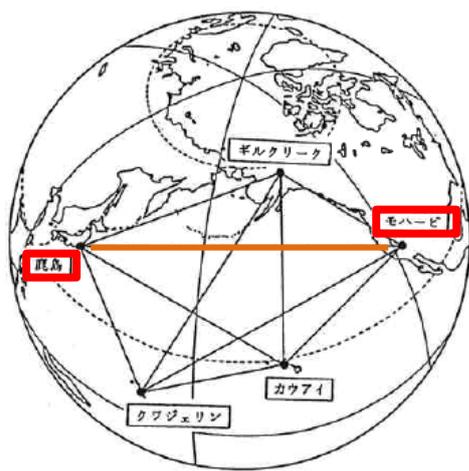


図 1 鹿島 Mojave 基線



図 2 米国

Mojave 局アンテナ

(12.2m ; XY マウント)

この実験について思い起こすと、K-3の国際実験の重要な一步であるという緊張感とともに、強く記憶に残るのは、筆者にとって、初の海外出張となったこの出張の出発当日（1984年1月19日）の気候である。この日は、東京に記録的な大雪が降った日であった。記録によれば、東京22cm、千葉26cmという積雪量である。朝は、雨模様であった鹿島から大雪の成田まで、川口さんに車で送ってもらった。しかし、途中（佐原大橋あたり）でタイヤにチェーンを付けたものの利根川を越えると佐原からは先に進めず、何とか佐原駅にたどり着きダイヤの乱れたJRに飛び乗り、やっとの思いで成田にたどりついた。成田に着いたとき、既に出発時刻は過ぎていたが、やはり、飛行機は飛ばず、チェックイン後は、当てもなくひたすらロビーにて待った。そのうち、飛行場の売店の食べ物はすべて売り切れとなった。深夜になって、飛ぶ見込みのない機内に誘導された。席は最後尾。前方から軽食が回ってきたが、前列の人で尽きた。残ったのはビールのみ。こうして、ビールを糧に翌朝まですごす経験をした。その間、この出張はどうなることやらと思ったが、翌朝、16時間遅れで、やっと飛行機は飛び立つことになった。目処がついたところで、小金井に連絡を入れたが、吉村本部長から「もうついたのか？」と聞かれ、事情を説明した。結局、サンフランシスコ経由で（予定はロスアンゼルス（LA）直行）、約20時間遅れで、LAに到着した。それでも、グレイハウンドのバスに乗り込み、Barstowという町で1泊した後、観測所の職員の車で予定通りモハビ局にたどり着くことが出来た（遅延の影響は吸収できた）。ともかく、大雪の成田から、温暖で乾燥したモハビ砂漠にある観測局への到着であった。なお、帰国後にこの苦労話をたっぷりしようとしたが、どうも、川口さんが当日の顛末を3研の面々に披露し、よほど楽しんだと見え、誰も改めて話を聞こうとしないので少々がっかりしたのを覚えている。

さて、日米実験が成功するためには、両国のVLBIシステムの互換性が大事である。このため、互換性確保のために、開発段階から、様々な確認が行われたが、特に注意が必要であったのは、システムの自動的な制御を司る「自動運用システム」である。日本側K-3のKAOS（Kashima Automatic Operating System）は、米国MarkIIIのField SystemのVer. 4.2に対して互換性をとることを事前合意していた。しかし、現地に到着して、確認したところ既にVer. 4.3に進化しており、少々心配になった。しかし、その差異は一部のログフォーマットの違いであり、実験遂行に影響しないことが確認でき、そのまま続行することを了解した。また、実験の成立には、両局で同一の観測スケジュールを使うことにも留意する必要がある。間違いの無いよう、実験の主要パラメータが記載されたオリジナルスケジュールを日本からフロッピーディスクで大事に運んできた。NASA側は1週間前に、数観測の抜けを見つけ観測局に連絡されていたので、それも含め日本側のスケジュールと照合し問題の無いことを確認した。当時は、実験スケジュールをフロッピーで交換していたが、NASAは計算機ネットワークでスケジュールの転送が確立していた（まだ、現在のインターネットがなかった時代の話です）。

こちらは、実験前に、現場スタッフにひとつひとつ確認し間違いの無いように進めたが、現場はあっさりしたもので、既に、米国では手慣れた実験のひとつという感じで、ある意味、頼もしくも感じた。この実験の記録テープは、その後、日本で相関処理された。

この結果、鹿島- Mojave の基線長は、 $8,091,824.13 \pm 0.04$  (m) と求まり、最初の国際 VLBI での測地成果が、満足できるレベルで得られた。その後、WPAC-1 実験 (1984 年 7 月 28 日) においてハワイ局 (Kauai) と初めて基線を結び、太平洋プレート運動の検出という大舞台に乗り出すことになる。そして、その実験から 1 年以上経過した 1985 年 11 月に、太平洋プレート運動検出の報道発表が行われたが、個人的には記者発表の 1 ヶ月前から長期在外研究でドイツに渡っており、日本での生の興奮を味わうことが出来なかった事だけがやや残念である。

#### <NASA のリーダーシップ>

日米システムレベル実験の後、その足で、東海岸に向かい、国際 VLBI 実験を率いる NASA の GSFC のグループを訪問した。今後の本格実験に向けさまざまな情報交換を行った後、夜の懇親の場で、Tom Clark から、「今は、自分たちの知識経験を提供しているが、これからは日本が技術を発展させ、その成果を米国や世界に提供する番だ」と発破をかけられた。これを、単なるお世辞のたぐいと受け取る向きもあるかもしれないが、今も記憶しているのは、それだけ真面目な顔で要求されたからだと思う。その後、この期待に日本は応えたと思うが、その感想を聞いたことはない。また、1988 年には CDP 生みの親の Edward Flinn さんに、シチリア (伊) で開かれたワークショップで西太平洋電波干渉計画とマーカス局の写真を見せたところ、大きな声で “Beautiful!” そして、“What can I do for you?” と言われた。「良い計画は、どんどん進めよう。協力出来ることは皆で協力して。」という暖かくも力強い精神が伝わってきた。そして、CDP のリーダーの風格を感じた。しかし、その時、Flinn さんは重い病にかかっておられ、それを押して会議に参加されていたのである。翌年、他界されたことを後に知った。

### 3-19 K- シリーズ VLBI システムの名前の由来

鹿島支所が中心になって開発した VLBI システムには K-○ という名前がつけられています。その由来は諸説あって、実のところははっきりしていません。公式の会議などで決められた名前ではなく、短くて便利であったため、誰からともなく使用されて、いつの間にか公式な名前になった、というのが真相でしょう。少し当時使用されていた名前について話しましょう。

1979 年度に「超高精度 VLBI システム」の開発がスタートしました。この装置は鹿島支所で開発する 3 つ目の VLBI システムです。既に述べたように、最初のシステムは「国内基礎実験に使用した VLBI システム」、2 番目は「位相シンチレーション測定システム」と長い名前を使ってきました。さすがに 3 番目の「超高精度 VLBI (超長基線電波干渉技術) システム」になると呼び名が長すぎて、まるで落語に出てくる「寿限無」のようで、3 研のスタッフ自身もうんざりしていました。

NASA が中心になって開発してきた米国システムは 2 号機から Mark-II (マークツー)、3 号機は Mark-III (マークスリー) と呼ばれ、公式の文書にも使われていました。当時、日本の大メーカーの車にも改良型に Mark-II (マークツー) と名前がつけられていて、このような名前の付け方は簡易で短く、しかも改良型とわかりやすいものでした。そこで、日本のシステムもこのような名前をつけたらどうかという意見がそれとなく出て、これまでの長い名前にうんざりしていたスタッフは大いに賛成し、色んな案が出されました。記憶は確かでないのですが、RRL-○ (Radio Research Laboratories:電波研究所) とか Kashima-○ とか、本所のある地名小金井市の Koganei-○ が候補に挙がっていたと思います。いずれも長く、簡単に Kashima の K-○ という案が出されました。しかし、当時の 3 研のメンバーは 6 人中、川尻、河野、小池、川口の 4 名も K で始まっており、高橋富士信さんと吉野さんの二人が異なっていました。人の名前の頭文字を使うのは良くない、との意見もありました。あれやこれやの議論 (少なくとも公式の会議ではなかった) で Kashima の頭文字であり、本所と水素メーザ原子標準を開発する周波数標準部のある小金井市の頭文字でもある K を冠にした K-○ にしたらどうかという意見が支配的でした。その後、簡易でしかも 3 台の区別も明確であったため、みんなが使い始めました。そして 1979 年度の電波研年報に以下のような文章とともに公になりました。「VLBI システム研究開発推進本部：米国 Mark-III システムの調査を詳細に行い、これとの両立性及び将来の精度をも考慮した当所システムの構成案 (K-3 システムと呼ぶ) を作成した」。この年度の米国との会議の資料にも K-3 名が使用され、国際的にも K-○ という名前が使用されることになりました。

### 3.20 K-3 開発の意義

河野宣之

K-3 システムは日米実験をはじめとする国際 VLBI 観測や国土地理院との協力をはじめとする国内 VLBI 観測などに広く利用されました。1984 年から始まった上記観測は 1989 年の西太平洋電波干渉計に代わるまでの 5 年間は、年を重ねるごとに増加していることが 20.1 表から明らかです。このような状況を踏まえ、K-3 開発の意義を確認しておきましょう。

	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990
日米実験	○	○	○	○	○	○	○
国際時刻比較実験	○	○	○		○		
地理院と国内測地	○	○	○	○	○	○	○
日独実験	△	○		○			○
日中実験	△	○	○	○			
南極 VLBI 実験		△			△	△	○
小型可搬局実験			○	○	○		
Space VLBI			○	△			
日豪実験				○		○	○
西太平洋実験(K-4)				△補正	△	○	○
パルサー実験						○	○
地球回転観測						○	○
VLBI/GPS 実験							○
日伊実験							○
鹿島-野辺山実験							○
太陽風シンチ観測							○
22GHz VLBI 実験							○
				△:	準備	開発	
				○:	実験	実施	

20.1 表 K-3 システムが使用された各種 VLBI 実験

K-3 システムそのものは、機能・性能面で米国 Mark-III システムと同等であり、一部を除いてこれを超えるものではありませんでした。しかし、Mark-III との互換性を持つことで国内外の実験に参加でき、完成後は上記のような広い利用範囲を得ています。一方、「日本が多くを注いでアメリカの模倣品を作ったに過ぎない」と批判的な意見を持つ人は少なくありません。第 3 部で述べてきたように、この意見は必ずしも否定できませんが、全て受け入れるべきものでもありません。Mark-III に採用されている技術レベルは、当時の日本の VLBI に関連する技術よりかなり高く、当時、Mark-III システムに匹敵するあるいは超えるシステムを日本単独で開発することは困難であったと考えられます。“模倣品（外見を似せて作った中身の違う「模造品」とは異なる）を作る”ことによって、あるいは開発途上の日本は米国の研究・技術者と議論することにより日本の技術レベルが格段に上がったことは明らかです。そして、“模倣品を作る”ことだけで終わらなかったことも強調しておかなければなりません。第一に、日米実験だけでなく、多くの国際・国内実験が企画され、これらに使われ、プレート運動の実証、地球回転観測、準星などの電波源構造の解明など多くの科学成果を出してきました。また、衛星計画の最盛期を過ぎた後のおよそ 10 年間、VLBI の成果が電波研究所を活気づけました。2 番目に、K-3 の開発に留まらず、引き続いて、K-4、小型 VLBI システム、KSP システムなどの高精度 VLBI システムを独自に開発して、米国と対等、一部では追い越すほどになりました。3 番目に、更に K-3 などのシステム開発を経験した研究・技術者はここで得た高度の技術を活用し、新たな VLBI を応用したシステムの開発プロジェクトに挑んで行きました。世界最初のスペース VLBI の実現、10 $\mu$  as の驚異的な世界最高角度分解能で銀河の立体地図を作る VERA システムの開発、更に日本の月探査機で世界トップの精度数 ps の遅延を観測量にして、数 m 単位で軌道決定をするなど、歴史に残るプロジェクトをやり遂げました。わが国で K-3 システムの開発がなければ、諸外国が立てた計画に指をくわえて傍観する以外なかったことでしょう。当時、日本は、米国システムを購入するか、互換性のあるシステムを作るか、2 者択一の選択を迫られました。どちらを選んだのが正解であったかは明らかでしょう。

### 3-21 NASA クラスタル・ダイナミック・プロジェクトへの参加

川尻 轟大

#### 3.21.1 はじめに

標題に関連する事柄の始まりと、1980年1月から2月にかけて、約1ヶ月に亘り、NASAのVLBI関連施設を調査して回った時の印象に残る事どもを記述してみます。何しろ三十数年前の調査旅行なので、記憶の怪しいこと、又科学的・技術的な記述が少ないこと等ご容赦くだされば幸いです。

標記プロジェクト参加のスタート時、交渉にあたられた村主総合研究官(当時)から、電波研側は米国側のMark IIIと両立性のある(compatible)システム(後にK-3と命名)を開発して共同実験に参加する、そのため米国側からMark IIIに関する資料を提供してもらい、との条件で始める、と聞かされた。

尚この調査旅行のスポンサーは当時の科学技術庁であり、中期在外研究員として、比較的短期間に派遣が決定されたことであった。

#### 3.21.2 NASA 本部

NASA(=米国航空宇宙局)とのVLBIがらみの関わりについては河野氏がK-1システム開発の初めの部分にふれておられる。NASAが標記プロジェクト(=地殻力学プロジェクト(Crustal Dynamic Project以下CDPと略))をやることになったことについては、以下の話を現地で聞いた。

NASAは、宇宙にばかり予算を使うのではなく、“民生的”な面にも使うべきである、とのことでスタートしたとのこと。

ワシントンDCにあるNASA本部へ最初の挨拶に行った。ここにはCDP関係の数名のマネージャーが勤務しておられた。特に、日米科学技術協力協定討議の分科会で知り合ったフリン(Flinn)氏とその上司の方が主に、NASA関係付属の研究機関等の研究者・技術者らを相手に、予算などの要求に対する調整などで長電話で対応しているのが印象的であった。(フリン氏はその後数年して癌で亡くなられたのは残念であった。)フリン氏の上司の方の両親が住んでいるところが、たまたま小生の日系2世(半)の従兄姉が住んでいるニュージャージー州ブリッジトンという田舎町である、との共通点で親しみが湧いた。

#### 3.21.3 ゴダード宇宙飛行センター(=GSFC)

GSFCを訪問した時、いきなり5~6人の中間管理職と思しき人々に囲まれ、矢継ぎ早に、“あれもしましょう。”“これもしましょう”と畳み掛けられて、いささか辟易したのを思い出す。特に、後に深く関わることになるT.クラーク氏が国際共同プロジェクトの推進に熱心であった。クラーク氏は、自分の使っている日電製の記録紙レコーダーがなかなか故障しない、と小生に褒め言葉を呈するのであった。

#### 3.21.4 ヘイスタック観測所

ヘイスタック観測所は、マサチューセッツ工科大学(=MIT)に所属し、ボストンの西方約100kmの林の中にひっそり存在し、ドームで覆われたアンテナが有名であった。訪問時は二月初めのことととても冷たい風に驚かされたものである。ここには、観測周波数合成法の論文で有名なア

ラン・E・E ロジャーズさんが所長で、その下に十名程のエンジニアが常駐し、働いていた。それぞれフロントエンドからバックエンドまで各部署が専門化され、担当が決まっていた。そして世界各地の観測所と連携して CDP を推進しているのが印象的であった。

小生の滞在はボストン市内のホテルに4泊し事務の方にヘイスタックまで毎日送迎してもらっていた。何日かの日、ロジャーズ氏が小生を突然自宅につれて行った事がある。彼の奥さんが急に現れた小生を見て困惑したのか、早口で不満らしきこと（ヒアリング追いつかず）を云われたが、

小生は沈黙するのみであった。この間ロジャーズ氏は弁解がましいことを一言も言わず、小生はあつけにとられていた次第である。

又、別の日、ボストンで有名な博物館を訪ねたまでは良かったのであるが、タクシーの降り際に「

あれがボストン博物館ですか？」と念を入れて訊いたとたん、タクシーが動き出してしまった。車の中に、南極で越冬した貴重なカメラを置き忘れたのに気がついたのは車が100mほど走った後

であった。ロジャーズ氏が種々問い合わせてくれたが、カメラは行方不明となった。

### 3.21.5 米国国立天文台 (NRAO) 付属施設

当時の VLBI 端末は Mark-II と云われ、NASA からの資金援助の所為か、米国内のあちこちで製作されていた。その一つに NRAO の（ヴァージニア大学の？）付属施設でのバックエンド製作が挙げられる。シャーロッテヴィル（ヴァージニア州）における製作室では、女性のエンジニアが

製作・調整に当たっていたのが印象に残っている。その後雪の積もった NRAO も見学したが、ワシントン DC に帰ってロスアンゼルスに飛ぶのに乗り継ぎ時間が十数分しかなく、大いにあわてたことであった。元々エアチケットは、ワシントン DC-ロスアンゼルス直行便ではなかったのであるが、

あわてて”飛び乗った”のがデンバー（コロラド州）行きであり、最初に着陸したのがクリーブランド

（オハイオ州）であった。隣の席の米国婦人が、「あんたここで乗り換えなきゃだめですよー！」と云ってくれて、はっと我に返る始末であった。寒い米国北東部から暖かい南西部に着いた時は正直ホットしたことであった。

### 3.21.6 CalTec と JPL

JPL（ジェット推進研究所）は元々 CalTec（キャルテック＝カリフォルニア工科大学）の付属施設としてスタートしたのであるが、その後 NASA が JPL に大きな研究投資をしたので、親（キャルテック）よりも子供（JPL）の方が大きくなったのが真相だと聞かされた。キャルテック内ではデータ処理を担当する若い研究者が装置を紹介してくれた。又、ここに滞在中、以前小生が長期在外研究員

としてミシガン大学時代に世話になった M. クライン氏（惑星電波の専門家）と再会出来たことは幸運であった。

JPL はロスアンゼルス北方に接するパサデナ市にある。ここにも VLBI 関係者が数名居り、その主任的存在のレッシュ（Retsh）氏に種々お世話になった。レッシュ氏は地表付近の温度、湿度を含めた遅延時間の除去に優れた手法を編み出しておられた。滞在中、レッシュ氏にゴールドストーンアンテナを見学できるか、と訊いたところ、「ちょっと待ってー」と云いながら、ものの数分ぐらいで翌日の見学許可が下りたとのことであった。

次の日郊外の小空港をたずねると、ゴールドストーン行きの小さな飛行機”NASA セブン”が待機していた。飛行機の中は座席が数個あるだけで数人が乗り込むとすぐに飛び上がった。眼下にカリフォルニア南部の風景や、遠くからの飲み水用水路などが目に入ってきた。左右に旋回するときなどは壁際に押し付けられて大いに加速度を味わうこととなった。（その後旅客機には数

多く乗ったが、これほど小さい飛行機はこのとき以外には無い。)

現地では案内の方を一人付けていただき、DSN (=Deep Space Network)用64mアンテナのヘソ(カセグレン給電部)と云えるところまで上らせてもらった。食堂では、日本人戦争花嫁上がり(?)の人なのか、小生にサービス良く、アイスクリームを二つくれたのを覚えている。

ここで目を見張ったのはIF(中間周波数)用のラックがずらっと一列に十台以上並んでいたことである。(鹿島ではせいぜい二台ぐらいだったかと思うので。)それだけ多様な周波数で観測・実験を実施していたのであろう。日系人の中村氏等が説明してくれた。

### 3.21.7. おわりに

以上は当時のNASA 地殻力学プロジェクトの黎明期の状況であり、このほか西独(当時)、スウェーデン等を巻き込んで、世界的なプロジェクトに発展しつつあった。又一方米国内では、このプロジェクトの測量的性格から、National Geodetic Survey, US Geological Survey といった部局を巻き込んでいった。そして国際的には国際測地学会等の組織へと繋がっていくのであった。

断片的な記述で申し訳ないが、筆者の経験した当時の状況の一端でも理解していただければ幸である。

## 3. 22 地理院 VLBI の初期及び発展期

石原 操

### 3. 22. 1 国土地理院の VLBI 開発前夜【昭和51年～55年】

年末恒例のNHK紅白歌合戦。白組トリは五木ひろし。大トリは赤組の八代亜紀が「雨の慕情」を熱唱した。昭和55年、1980年の大晦日のことである。この年の10月に芸能界を引退した山口百恵は出場しなかった。国土地理院(以下、地理院と略す)の本院が東京目黒から筑波に移転して2回目の紅白。多くの職員は、ペンキの匂いも残る真新しい宿舎でTV観戦した。百恵ファンにとっては、物足りない正月を迎えた。

例年のことだが、地理院広報の「新春増刊号」が、昭和56年(1981)の年明け早々に職員に配られた。田島稔・参事官(肩書は当時、敬称略)は、同号に、「宇宙測地の発展はとりわけ激動的で、数千Km離れた2点間の距離を数cmの精度で測定する超長基線電波干渉計(VLBI)は・・・(中略)・・・画期的な測定原理であり、宇宙測地の本命となるでしょう。・・・」と、新春雑感を述べた。“ブイ・エル・ビー・アイ”。多くの職員にとっては初めて目にする言葉だ。

小牧和雄・人工衛星係長は、年末に須田教明・測地部計画課長より「VLBIの予算がついてしまったよ」と打ち明けられていた。

年明け早々から難題をこなさなければならない思いと、新しい事業に取り組む期待とが複雑に絡み合った正月を迎えた。

これよりさかのぼる5年前。昭和51年(1976)3月、SLR(人工衛星レーザー測距)装置が鹿野山測地観測所に設置された(写真-1)。昭和57年(1982)の打ち上げを目途として開発が進められていた国産測地衛星の観測に必要な地上装置だ。法月鉄工所の製作によるもので、地理院と海上保安庁水路部(以下、水路部と略す)が共同研究で使用する。この装置は「レーザートラッカー」と呼んだ。



写真-1 鹿野山測地観測所に1976年に設置されたSLR装置(レーザートラッカー)

研究が達成したあかつきには、当時、測地測量の課題であった、①国内測地網の規正、②離島位置の決定、③日本測地原点の確立、などが解決できる。国産測地衛星は地理院と水路部が要望し、宇宙開発事業団(現:JAXA)が開発を進めていた。

水路部の佐々木稔は鹿野山測地観測所に長期にわたって滞在し、SLR装置の調整や実験を行った。観測所の所員や測地部測地第二課の人工衛星係もこの作業に加わった。佐々木は主に衛星追尾や装置の自動制御ソフトの開発に当たった。

東京天文台の古在由秀や土屋淳、富田浩一郎も鹿野山に足を運ぶなどして、この研究に協力した。古在・土屋・富田らは東京天文台堂平観測所で、昭和43年(1968)からレーザー測距装置(レーザーレーダと呼んだ)による人工衛星の測距実験を行って成功していた。

佐々木や測地観測所の所員などは、しばらく研究に取り組んだ。測距実験に用いる人工衛星としては、Beacon-C(米国)や Starlette(フランス)、Lageos(米国)などを対象とした。しかし、この時は実際に人工衛星を追尾、測距するまでには至らなかった。

鹿野山での研究が進展しないため、佐々木は SLR 装置の一部(コンピューター)を東京築地の水路部に運び、そこで SLR の研究を継続した。地理院は SLR 装置による「国内測地網の規正」や「日本測地原点の確立」を断念する方向に進んでいった。この後、地理院と水路部は共同で SLR の研究をすることは無かった。

この頃、海外では地理院・水路部が共同で導入した SLR 装置より高性能な装置が開発され始めた。

水路部のその後の SLR に関する取り組みについて、佐々木(66)は「水路部では、新たな SLR 装置の予算要求を昭和54年(1979)に行い、昭和55年度予算で認められた。そして、昭和57年(1982)1月に米国 GTE Sylvania 社製の装置を下里水路観測所に導入した」と語る。

地理院では、昭和53年(1978)に同型の装置を「人工衛星レーザー測距装置」(写真-2)という名で昭和54年度概算要求(4億7千2百万円)として要求した。しかし、この要求は認められなかった。翌、昭和54年(1979)、昭和55年度概算要求として1億4千850万円(次年度3億4千650万円を要求する予定)と要求額を減じ要求したが、結局、SLR 装置は2年連続で認められなかった。この時、何故、予算要求が認められなかったかは明らかでない。



写真-2 この SLR 装置を予算要求したが認められなかった。導入されていたら、地理院の宇宙測地の流れは大きく変わっていた

### 3. 22. 2 SLR から VLBI へ【昭和55年】

藤田尚美・地殻調査部長は昭和55年(1980)3月に、10日間、米国に出張した。UJNR(日米天然会議)地震予知技術専門部会の打ち合わせと、米国の測量事業の調査が主な目的だった。この時、NGS(国立測地局)、USGS(米国地質調査所)、NASA(航空宇宙局)など、米国の各機関を訪れ、多くの研究者と議論した。藤田はその時の様子を「米国かけある記」として、「測量」1980年7月号に記した。

「カーター(NGS)の所では、簡単な操作盤でキーをたたき、VLBI(超長基線電波干渉計)では2点間の何千 Km の距離が、わずかのうちに今までの、観測結果がcm以下まで表示されるのを見て、さすがと思った。「極運動、地球回転、プレート運動等の世界規模の位置決定には VLBI が最も優れているとの点では、米国の研究者の意見はほとんど一致している」。「VLBI の精度は現在10cmをきっており、3cmが近い将来の目標になっている」。

藤田は、米国出張で VLBI の有効性を目の当たりにしてきた。同時に藤田は、「極めて遠方にある電波星からの電波干渉による VLBI 方式は、電波星座標系によるもので、他の宇宙測地技

術である、NNSS や SLR の方法と比べて、誤差源が少ないという長所を持っている」と考えた。

藤田は日本に戻ると、「予算要求は、SLR から VLBI にすべき」とした。藤田の VLBI 導入についての熱意もあり、昭和56年度概算要求では、前年まで「人工衛星レーザー測距装置」としていたものを、「VLBI 装置」(1億5千5百万円)と変更した。だが、誰もが「VLBI 装置」の予算がすぐに認められるとは思わなかった。

ところが、昭和56年度の導入が認められた。小牧が須田より昭和55年(1980)の年末、「予算がついてしまったよ」と打ち明けられた話だ。

藤田(83)はこの頃の様子について書簡を寄せた。その中に、「SLR については『反射型の人工衛星がいつまで続くか危惧があった』、『レーザー測距装置が結果を出すに至らなかった』(これが)SLR から VLBI への切り替えの一因となった」と記している。

また「予算が認められた場合、電波研究所の協力は得られると考えていましたか」との問いに、「VLBI の導入には、電波研の援助、協力が不可欠でした。省庁間の技術協力には何の心配もありませんでした。事実、ことはスムーズに運びました。当時、電波研には、多大な援助と協力を頂きました。深く感謝する次第です」と答えた。

VLBI 研究の目的について、昭和55年(1980)の予算要求資料には、①国際的測地網の結合、②精密測地網の規正、③地震予知のための地殻変動測定及びプレート運動の検出、の3点を掲げた。そして、SLR から VLBI に予算要求を移行する理由は、「国土地理院では、従来から同種(①～③)の目的を満たすものであるが、VLBI に比して精度の低い国産衛星による測地システムの開発研究を進めてきた。この方式は昭和60年代の初期に実現されると思われるが、VLBI 方式は現時点で考えられる最良のものであり、各国でその開発に努め、既に米国の NASA に於いて開発を終了し、フィールドで使用開始されているものである」と記した。

### 3. 22. 3 VLBI 開発

#### (1) VLBI 開発プロジェクトチームの結成【昭和56年1月～3月】

「来年度中に VLBI アンテナを完成させる」。新年早々であったが早急に対応しなければならない。林哲郎・測地部長らの喫緊の課題だった。

早速、測地部内に「VLBI 開発プロジェクトチーム」(表-1)が結成された。そして昭和56年(1981)1月12日、第1回開発プロジェクト会議が開かれた。チームの牽引や会議の主導は石原正男・測地第二課長補佐に託された。

チームリーダー	林 哲郎	測地部長
副リーダー	須田教明	計画課長
委員	細野武庸	研究員
〃	西村 修	調査員
〃	宮崎大和	測地第一課長
〃	吉村好光	調査員
〃	西修二郎	天文係長
〃	村上 亮	測地第一課
委員兼事務局	石原正男	測地第二課長補佐
〃	海津 優	基線係長
委員	小牧和雄	人工衛星係長
〃	齊藤 隆	測地第二課
〃	馬場義男	測地第三課長補佐
事務局	五十嵐隆太郎	測地第二課長
〃	佐々木与四夫	測地第二課
〃	西田文雄	〃
〃	川口 保	〃
(関係者)	田牧克彦	管財課契約係長

表-1 VLBI 開発プロジェクトチームの構成員(1981年1月)。測地部の主だった者がチームのメンバーになった

最初の会議では、VLBI 開発に必要な技術的・事務的事項に関する問題が話し合われた。併せて、プロジェクトチーム内での業務分担(表-2)が決定された。

プロジェクトチーム業務分担	◎事務的担当者
電波研・天文台との業務連絡	◎吉村、宮崎、石原
業者とのコンタクト	◎石原、事務局
学習会の開催	◎細野、西村、村上
海外資料の収集	◎馬場、齊藤
設置場所、建物の検討	◎西、村上
仕様書の作成、契約関係	◎小牧、◎海津、事務局

表-2 開発プロジェクトチーム内の業務分担

1月14日、西村蹊二・院長と林哲郎が事務局と共に電波研究所鹿島支所に赴き、協力を依頼した。地理院が VLBI 開発を行うには、電波研究所をたよりにするしか手段はなかった。それまで、北郷俊郎・測図部長や宮崎大和・測地第一課長ら一部の者を除き、電波研究所との人的・技術的交流はあまり無かった。

1月23日、プロジェクトチームのスタッフ・事務局員、総勢9名がマイクロバスで鹿島支所に出かけた。そこでは、VLBI の現状について説明を受けるとともに、26mアンテナの見学を行った。

1月27日、第2回開発プロジェクト会議が開かれ「VLBI の最終遅延決定精度を0.1nsec(3cm)」、「アンテナは10m 径固定式で筑波に設置する」ことが決められた。

2月18日、第1次仕様案をプロジェクト事務局がまとめた。仕様は「アンテナは10m 径で移設可能、遅延決定精度 0.1nsec、電波星および人工衛星追尾可能、Mark-3・K-3との両用性、AZ-EL マウント方式」であるとされた。この案で、日本電気に見積要求がなされた。日本電気は26mアンテナの製作会社だった。

3月6日、第3回開発プロジェクト会議が開かれ、アンテナの可搬性と追尾維持の容易性を重視して「アンテナ径を最小のものとする」、「人工衛星追尾を考慮しない」ことが決められた。

3月9日と10日、電波研究所からの出席者も交え、第4回開発プロジェクト会議が開かれた。

そこでは、協力体制について話し合い、引き続き、アンテナシステム、遅延時間決定精度、測地測量等についての説明・討議が行われた。電波研究所からは、川尻轟大・河野宣之・高橋富士信・川口則幸の4名が参加した。

3月19日、プロジェクトチームは電波研究所に赴き、石原正男が第2次仕様案および前日に日本電気より提案された仕様案について説明し、引き続き、技術的な討議を行った。

この時、地理院側から電波研究所に対して「26mと5mのアンテナを使ったVLBI実験での予測遅延決定精度」の見積もりについて検討依頼がなされた。これに対し、川口則幸は翌日までに答えを導き、結果を石原宛

石原様
前回打合せで、電波研の検討事項であった NEC 案のアンテナを使用した場合の予測遅延決定精度の検討結果を送ります。その結果
(1) 予測精度 0.17 nsec
(2) 目標値 0.10 nsec より大きい。
そこで考えらるる対策としては
(1) アンテナ直径を大きくする。(5m → 8m 程度)
(2) アンテナ径は元のままで
(i) 観測時間 300 sec → 600 sec (√2改善)
(ii) チャネル数 (Xバンド 5ch → 10ch ; √2改善) 増加
(iii) 受信帯域幅 (300MHz → 400MHz) (4/3改善)
(iv) 電波源の強度に制限 (27y 以上 → 37y 以上) (1.5改善)
等の全部もしくは一部を用いることにより改善が図れる。
等が考えられます。特に (ii), (iii) は パラメータの調整で済むに過ぎないので 容易に行えます。特に (iii) の場合、磁気テープの読み取り率が向上
大さくなります。以上
電波研 鹿島 川口 則幸
1981/3/23

図-1 川口則幸から石原正男宛に送られた「予測遅延決定精度」の見積もりと5mアンテナとした場合の技術改善策(1981年3月23日)

に送付した。そこには、計算結果と、日本電気から提案のあった5mアンテナを、「8m径にする」か、「技術改善をする」ことで仕様を満たすことが書かれていた(図-1)。

様々な困難や曲折があったが、電波研究所の協力を得て、昭和55年度内に、VLBIシステムの概念設計と、5mアンテナ(アンテナ機構部と言う)の仕様書が作成された。

3月30日、VLBI研究に対する“覚書”が、電波研究所長・栗原芳高と国土地理院長・西村蹊二で交換された。この“覚書”は、地理院に予算が認められた「VLBI装置」の技術開発を、両機関で相互に協力して推進することを確認しあうため交わされた。

プロジェクト会議の当初、「アンテナは10m径固定式で筑波に設置する」と決められたものが、最後には、「5m径で移設可能」となった事情について、小牧和雄(63)は次のように振り返る。小牧は、仕様書作成の責任を負っていた。

「検討当初、鹿島26mアンテナを相手に新アンテナで確実に成果を出すためには、10m径が必要。技術を確立してから移動型にしよう。また、交通規制の厳しい国内では、車載型等の移動式アンテナは不可能かなとも考えていた。そんな折、田島参事官と同行での出張があった。常磐線内で『VLBIはどうなっている』と聞かれ、『10mで筑波固定』と答えると、参事官はこの案は『こまる』とした。急ぎ、アンテナの仕様を再検討することとなった」。また、小牧は「あの時、田島さんとの出張がなければ、筑波に10mの固定アンテナを作り、地理院での、その後のVLBIの歴史は大きく変わっていたかも知れない」と感慨深げに語った。

## (2) VLBIシステム整備【昭和56年～59年】

地理院は4月に多くの者が配置転換する。石原正男は開発プロジェクトチームに金子英樹を迎えることを希望していた。昭和56年(1981)4月1日、開発プロジェクトチームの事務局も務める基線係長のポストに金子英樹が就いた。金子は測地観測所や人工衛星係での経験が長く、

VLBI開発プロジェクトチーム 昭和56年4月		
チームリーダー	北郷俊郎	測地部長
副リーダー	須田教明	計画課長
〃	石井晴雄	測地第一課長
委員兼事務局	吉村好光	測地第二課長補佐
委員	西村 修	計画課
〃	西修二郎	重力係長
〃	村上 亮	測地第一課
〃	小牧和雄	測地第二課調査員
〃	海津 優	人工衛星係長
委員兼事務局	金子英樹	基線係長
委員	齊藤 隆	測地第二課
〃	中堀義郎	水準第三係長
事務局長	五十嵐隆太郎	測地第二課長
事務局	川口 保	測地第二課
〃	長通 元	測地第二課
参与	宮崎大和	企画部企画調整課長

表-3 VLBI 開発プロジェクトチームの構成員 (1981年4月)

電子機器や天文観測、人工衛星観測に精通していた。同日付けで測地部長は林哲郎から北郷俊郎に、測地第二課長補佐は石原正男から吉村好光に代わった(表-3)。

金子らは、アンテナ機構部の仕様を更に深め、7月16日、鹿島支所に赴いた。「アンテナ機構部の調達」について、詰めの打ち合わせを行うためである。

参加者は地理院が、石井晴雄・吉村好光・西村修・海津優・金子英樹・中堀義郎の6名。電波研究所が、川尻轟大・吉村和幸・加藤清治・河野宣之・高橋富士信・川口則幸・黒岩博司・近藤哲朗・

浜真一・國森裕生・兩谷純の11名。総勢 17 名による会議だった。

会議では、アンテナ機構部の官報公告用仕様書について話し合われた。そして、吉村好光から「5社から問い合わせがあり、3社からプロポーザルがあった」とのことも報告された。また、吉村から技術審査について協力依頼がなされた。これに対し、河野宣之・第三宇宙研究室主任研究官から「電波研が技術審査に協力する」旨の発言がなされた。吉村和幸・周波数標準値研究室長からは、水素メーザ周波数標準部（以下、水素メーザと略す）の調達経験を基に「官報公告から技術審査」までの一連の流れについて説明があった。

8月19日、地理院はアンテナ機構部について「超長基線電波干渉計装置 受信系 一式」の調達として官報公告を行った。9月29日、国際入札を行い明星電気が落札した。納入期限は翌年の昭和57年(1982)3月20日とした。

アンテナ機構部は、明星電気の守谷工場(茨城県)で製作され、昭和57年(1982)3月、地理院構内に設置された(写真-3、4)。



写真-3 明星電気守谷工場で作  
作中の5mアンテナ(上)と機器を  
検査する吉村好光(下中央)



写真-4 地理院構内に設置された  
5mアンテナ(上)1982年3月。駆  
動操作部(下)は、上写真のアン  
テナ後方、右側建物内に設置した



写真-5 2台のトラックに積み込まれた5mアンテナ。左のトラックには架  
台部と基礎部が、右のトラックには3分割された反射鏡部が積み込まれ  
ている(地理院構内、1986年の宮崎「新富」移設時)

口径は5m、総高7m、総重量 10tとなった。輸送と短時間での組み立てを考慮し、反射鏡部、架台部、基礎部に分割できる構造となった。更に反射鏡部は両端を切り取って三分割になる構造となった(写真-5)。

昭和55年(1980)に行った予算概算要求時には全体の整備計画を昭和56年度～58年度の3カ年とした。この計画に含まれていなかった「水蒸気ラジオメータ」と「システム遅延時間校正装置」の必要性が電波研究所側より提案された。昭和56年(1981)3月19日の合同会議でのことである。両装置が電波研究所側より提案されるまで、地理院では、その必要性の認識はなかった。

昭和56年(1981)に行った概算要求では、整備計画に両装置を含め、期間も1年延長して昭和

年度	名 称	価格(千円)	納入会社
S56	超長基線電波干渉計装置 受信系一式		明星電気
	フロントエンド部一式	89,000	日本電気
S57	IF分配器及び記録信号発生部	28,700	安立電気
	広帯域磁気記録装置	57,860	山武商会
	追跡駆動制御部	23,700	明星電気
	受信系整置ケーブル敷設	16,000	〃
	コリメーション設備1台	6,560	〃
S58	水素メーザ周波数標準部	85,100	安立電気
	システム遅延時間校正装置	21,440	明星電気
	データ収集制御部	28,300	〃
	ビデオコンバータ	81,100	安立電気
	システム調整	6,050	明星電気
S59	試験調整機器	38,274	
	時刻周期システム	6,966	
	水蒸気ラジオメータ	52,200	
	磁気記録再生部	6,440	

表-4 VLBI システムの整備年度と価格及び納入会社。空欄部分は調査したが不明だった

59年度までの4カ年とした。

昭和56年度のアンテナ機構部の製作に続き、昭和57年度には、前置増幅部と周波数変換部で構成されるフロントエンド部と追跡駆動制御部の製作などが行われた(表-4)。昭和58年度には、水素メーザとシステム遅延時間校正装置などが製作された。昭和59年度には、スペクトラムアナライザ等の計測器で構成される試験調整機器や水蒸気ラジオメータが整備された。これをもって、5mアンテナを主体とする地理院の VLBI システムのすべて

の機器が揃うこととなる。

地理院で整備した VLBI システムを当初「G-1」と呼んだ。「国土地理院:GSI」の G を冠した。電波研究所のシステムが「K-1」~「K-3」だったので、これに習い、地理院では最初の VLBI システムを「G-1」とした。「K-3」は後に「K-4」へと発展したが、「K-4」システムを取り入れた地理院の VLBI システムは「G-2」と呼ぶことはなかった。「G-1」の呼称も初期の頃使われただけだった。

### (3) 鹿島-筑波 VLBI 予備試験(コヒーレンスロスの推定)【昭和58年】

地理院・電波研究所の合同会議では、当初から、システム整備に関する議論と併せて、共同実験(システムレベル実験や移動観測)の計画についても議論されてきた。

昭和58年(1983)3月17日、合同会議が地理院で開かれた。そこでは、電波研究所による「K-3」の開発状況と、地理院の「VLBI システム」の整備状況を踏まえ、共同実験を昭和59年度より始めることが確認された。会議の参加者は、地理院側が、須田教明・田中穰・吉村好光・小牧和雄・金子英樹・中堀義郎・佐藤昇・西村修・村上亮・松村正一の10名。電波研究所側が吉村和幸・河野宣之・川口則幸・吉野泰造の4名だった。

共同実験を開始するには、それまでに、5mアンテナのコヒーレンスロスを確認する「予備試験」を行う必要があった。コヒーレンスとは、日本語では「可干渉性」とも言われ、VLBI 観測において、この量がある一定以上でないと、フリンジ(干渉ピーク)が正常に検出されない。そのため、コヒーレンスロスの把握は、極めて重要な作業だった。

昭和58年(1983)9月、電波研究所では、26mアンテナ・受信系を含む全ての K-3VLBI ハードウェアが完成した。この時、地理院では「VLBI システム」が水素メーザなど一部を除き完成していた。

昭和58年(1983)10月3日から4日間、「予備試験」を行った。電波研究所側も「K-3」の出来ばえの確認のため、VLBI関係者(表-5)の総力をあげた取り組みとなった。川口則幸がこの試験の取りまとめを行った。

鹿島支所	河野宣之			
アンテナグループ	川口則幸	栗原則幸	雨谷 純	高橋幸雄
バックエンドグループ	小池国正	吉野泰造	黒岩博司	木内 等
自動運用グループ	村上秀俊	金子明弘	小園晋一	高橋富士信
相関処理グループ	國森裕生	浜 真一	近藤哲朗	杉本祐二
周波数標準部	森川容雄	佐藤得男	今江理人	

表-5 VLBI 予備試験の電波研究所側の担当者

試験は、4日間のうちの大半が、5mアンテナ・受信系の特性測定に費やされた。試験の内容は、①アンテナ効率の測定、②システム雑音温度のチェック、③相関実験、だった。筑波の基準信号は、セシウム原子時計を用いた。

結果、コヒーレンスロス53.3%が得られた。予測された値は53.5%だったので、ほぼ同じ値になった。これにより、将来の測地精度3cmをめざした共同実験に向けて大きな見通しが立った。川口はこの結果を11月8日付けの報告書(図-2)として取りまとめ、関係者に配った。

5mアンテナ予備観測 報告書	
観測日	昭和58年10月3日～10月6日
報告日	昭和58年11月8日
報告者	電波研究所 鹿島支所 川口則幸
(1) 予備試験観測の概要	P1
(2) Xバンド受信系の較正結果	P2
(3) Sバンド受信系の較正結果	P7
(4) 新月観測によるXバンドアンテナ絶対利得の測定	P11
(5) Co-A観測によるSバンドアンテナ絶対利得の測定	P21
(6) 3C273/3C84観測によるコヒーレンスロスの測定	P23
(7) 残された問題点	P29

図-2 VLBI 予備試験の報告書(表紙)。川口則幸が取りまとめた報告書は30ページに及んだ(1983年11月8日)

#### (4) VLBI オペレーション・グループの発足【昭和59年】

昭和59年(1984)5月23日、開発プロジェクト会議が開かれ、VLBI開発の検討が一段落した状況を踏まえ、チームの改組が話し合われた。この会議で「VLBI 開発プロジェクトチーム」は解散し、今後は「VLBI オペレーション・グループ」としてVLBIの運用を行っていくことが決められた。新たなグループは、前年(1983)4月7日に発足した測地技術開発室の応用測地係(金子英樹・長通元・川口保・新田浩)、宇宙測地係(齊藤隆・松坂茂)と測地第一課の天文係(佐々木充雄・鈴木平三・高橋信雄・宮崎孝人・林保)で構成された。

グループリーダーを金子・応用測地係長、副リーダーを齊藤・宇宙測地係長が担うことになった。セシウム原子時計を管理運用していた天文係もグループに加わった。馬場義男・測地技術開発室長が全体の責任を負った。この時、グループの一員となった松坂は、その後の地理院VLBIの歴史に深く関わるとともに、IVS(国際VLBI事業)の評議員を8年間務めるなど、国内外のVLBIの発展に貢献した。

#### (5) VLBI 開発当時の思い出

VLBI 開発プロジェクトチームが結成された当初よりチームに参加していた海津優(62)と齊藤隆(56)は当時の様子を次のように述べる。

### 「VLBIを始めたころ」(海津優)

あれは、昭和 55 年前後だと記憶しているが、VLBI 開発プロジェクトチームが立ちあげられ、勉強会が始まった。電波干渉法自体は、電波天文でそれなりに知られた方法だったから、大学で天体物理を勉強した中で少し齧っていて知ってはいたが、仕事で勉強しなおすことになろうとは思っていなかった。既存の論文を読んで互いに紹介したり、電波研究所季報(写真-6)を読んだり、電波研究所に話を聞きに行ったりしたことを覚えている。

このチームが発足したころには、それまで恒星を背景に写真を撮ると同時にレーザー測距を行うことで地上と衛星の間のベクトルを観測するという日本独自の測地衛星の開発を行っていたところを、ほぼ全天候で観測ができ、精度的にも地球潮汐の観測に成功したりして目処がつきはじめていた VLBI に地理院の測地網規正手段に関する方針が変わっていったころであったから、電波研究所とのお付き合いと同時に、それまでの経緯から海上保安庁水路部とも衛星測地に関する相談も進めるという 2 正面で活動していた。ただ、衛星測地については、測地部長、測地 2 課長補佐、人工衛星係長、鹿野山(測地観測所)くらいが 2 足の草鞋で関与していて、大勢は VLBI に向いていた。



写真-6 電波研究所季報  
Vol.24 No.130 September1978  
超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号



写真-7 「日本からの留学生は、皆、研究面でも生活面でも NGS における VLBI グループリーダー、ウィリアム・カーターさんにお世話になった。日々の研究ではチームのダグラス・ロバートソンさん、アパート探しなどではミランダ・チンさんに大変にお世話になった。写真は、パーティでチンさん(後姿)と談笑するカーターさん」と海津優は語る。(写真:海津優提供)

小牧さんと私が 2 代続けて人工衛星係長時代に宇宙開発関係長期在外研究の研究先として NGS (National Geodetic Survey) を選び、研究テーマも VLBI の測地利用とすることが暗黙の決まりごとであったのもそういう組織を挙げて速やかに測地 VLBI の事業としての立ち上げを考えていた時期であったことを思えば当然のことであった。留学先(写真-7)では、同時期にゴダードへきていた電波研究所の高橋富士信さんとお互いの研究先を訪問しあったり、会議で訪米した電波研究所の塩見さんが NGS に訪ねてこられたりして、電波研としては、弟子の地理院

を早く一人前にして、研究成果が事業に生かされるように骨折ってくださっていたと思う。帰国間際に、緯度観測所の真鍋さんが NGS に留学してこられて、天文学の立場から測地 VLBI を研究されるのを隣で眺めていたのも良い思い出である。しかし、その当時

は、国土地理院は「研究もするけど身分は全員行政職」という組織であったから、研究所に比較すると短時間で配置転換があった。組織同士の合意で支援していただいていたので、表立ってはおっしゃらないが、個人的に酒を飲んだ時など、電波研究所の研究者からは、ようやく言葉が通じるようになると配置転換で変わってしまっ素人が入ってくるが、地理院は本気で勉強する気があるのかとぼやかれることもあった。もちろん組織としては同じ者が所属が変わっても検討会には参加できるよう気を配ってもらっていたのだが、それをテーマとして日夜集中的に取り組んでいる研究者からみると、若干頼りなく思えたであろうことは想像に難くない。その後、平成になってから地理院にも研究センターができ、研究職も導入されたが、あの頃はそんなものであった。それでもまあよく勉強したと思う。現在ではそれなりに専門家が育って、業務として組織的に実施しているのだから、電波研究所のみなさんの心配は結果的には杞憂であったわけではある。



写真-8 明星電気守谷工場内で製作中の5mアンテナ。架台部に部品を取り付けている。海津優らは、製作現場を見学した

あのころの地理院は職人の世界で、われわれ上級甲種採用のものは先輩に「お前ら学者の分際で職人面をするんじゃない。10年早いわ!」といわれたもので、「学者でなんかないですよ」と抗議すると「お前なんざ学者だよ」と一蹴されたものであった。もちろんここでいう学者というのは「仕事もできないのにへ理屈だけはこねるかわいげのない若造」という意味で、けなしているわけである。そういう雰囲気であったから、ちゃんと動くものを作って、きちんと運用に習熟して座標を出すことが一番大切なわけで、わからんことは先達に頭を下げて教わり、「自分で目をつぶってもできるように」なるのが大切なことであった。そんな雰囲気の中であっただけにVLBIについて忘れられないのは5m移動局のアンテナ作成が明星電気に発注され、もうじきアンテナと駆動部分が完成するというところに守谷の工場を見学に行かせてもらった時のことである。このアンテナは、トラックに積んで、一般道を移動できるように、口径5mの主鏡の両端を切り離して3分割でき、しかも組み立て後の鏡面精度が0.2mmというやたら厳しい仕様であったから、普通のレーダーのアンテナと違い、プレスで絞って終わりというわけにはいかなかったのである。結局最後はゲージを当てながら木槌でたたき、熟練の職人が手で触ってなめらかになっていることを確認、さらにゲージを当ててこれを繰り返すという、最先端技術にありがちな「最後は職人芸」の世界だった。この時にはこのアンテナの駆動速度の速さを自慢して担当さんがあまりに高速で振り回したら抵抗が過熱して煙が出て一瞬焦ったなどという落ちも付いていたのだが、鏡面仕上げで、仕上げ担当の技師のおじさんを紹介して「この人の指先に最後は頼るのです」という説明、そう言われたおじさんがちょっと照れくさそうな顔で黙々と叩いては撫でている姿に、やたら

感動したのを覚えている。

精度を出すためにフロントエンドをペルチェ冷却でキンキンに冷やして、そこから出る熱を通常のヒートポンプで冷やしていたので、小型のアンテナのハブの両側にヒートポンプの室外機がぶら下がって、あまりスマートとはいえないずんぐりとした外観であった。このアンテナは、電波研究所鹿島支所にあった2.6mのアンテナを親局として国内に設置された「基台」のうえに次々移設されてそれぞれの点の座標を測定するのに使われ、初期の目的を果たし、今ではモニュメントとして筑波の天文観測等の隣で眠りにについている。あの小さなアンテナはその後32mにつながる地理院のVLBIの第一歩であり、われわれの若き日の誇りであった。

### 「私とVLBI」(齊藤隆)

昭和55年、私は建設省国土地理院に入省し、測地部測地第二課人工衛星係でNNSS(Navy Navigation Satellite System)を利用した測量や、鹿野山測地観測所にあったSLR(Satellite Laser Ranging)装置(レーザートラッカーと呼ばれていた。)のメンテナンスなどに携わっていた。その年の12月頃だったと思うが、当時、人工衛星係長だった小牧和雄氏が、突然、「こんなことやっているどころじゃない。」と言って、手にしていた資料を机の上に放り出した。何事かと聞くと、VLBIの予算が内示されたということだった。「VLBIって何ですか?」。それが、私とVLBIとの最初の出会だった。

翌年1月、VLBI開発プロジェクトチームが設置され、私もそのメンバーに入ることになった。早速VLBIについて先進的に研究開発を行っていた郵政省電波研究所の鹿島支所を訪問するから、「おまえも来い」と言われ、国土地理院のマイクロバスで鹿島に向かった。筑波(「つくば」でないのは、当時、国土地理院の所在地が筑波郡谷田部町だったた

め・・・)から2時間ほどすると、車窓から大きなパラボラアンテナが見えた。これがVLBIに使用されていた直径2.6mのアンテナであった。このアンテナが将来、国土地理院に移管されることになるなど、この時はだれも考えもしなかったと思う。

鹿島見学後、電波研究所季報のVLBI特集号や既存の論文を読んで勉強したりして、翌年度から開発を始めるVLBIの基本設計をどうするか検討を進めていったが、その頃の詳細はあまり記憶にない。要求した予算費目が筑波関連施設整備費であったことから、当初は直径10m級のアンテナを筑波に設置することを想定して、資料を集めて

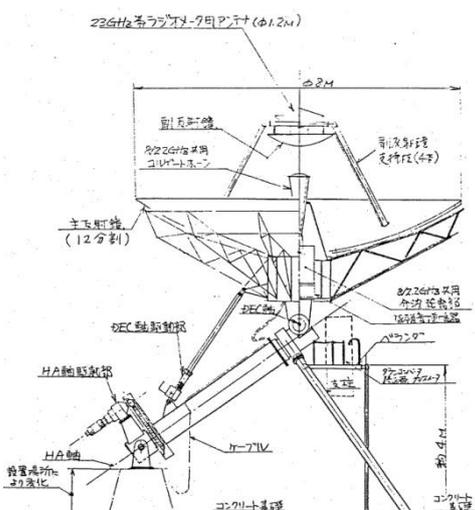


図-3 三菱電機より提案のあったアンテナの概観図。天体観測用望遠鏡で良く用いられている赤道儀式となっていた(三菱電機提供)

いろいろな案を検討していたと記憶している。アンテナは当初からカセグレン式を想定していたと思うが、その架台については、初期にはいろいろと考えられていたようだ。いつ頃だったかよく覚えていないが、鳩山の地球観測センターに設置されていた、人工衛星からのデータを受信するためのX-Y式架台を持つ直径10mのアンテナを見学したり、収集、提案された資料の中で赤道儀式架台を持つ直径12mのアンテナの図面を見たりした記憶がある。

なお、測地網の規正をVLBI整備の目的のひとつとしていた国土地理院としては、北海道や九州など測地網の外縁部での観測が必要であったため、当初から移設可能な装置を考えていた。しかし、10m級のアンテナを移動させるのはかなり困難と思われ、アンテナだけは各地に設置して、バックエンドのみを持ち運ぶ案なども考えられていたと記憶している。その中で、アンテナの小型化を検討することになり、電波研究所の川口氏の計算結果等から、鹿島の26mアンテナを相手にするならば5m級のアンテナでも観測可能ということになった。これにより、国土地理院の目的により即したVLBI装置が実現できるようになったといえよう。

私は、昭和56年度から、全国の一等、二等三角点の測量を行う三角第一係に異動したため、長期出張が多くなり、VLBI開発プロジェクトチームに入っただけのもの、ほとんど開発には貢献しなかった。同じ測地第二課の基線係が実務を担当して、アンテナ、フロントエンド、バックエンド、水素メーザ等の調達を進めていったと記憶している。昭和56年度は、直径5mの可搬型アンテナの競争入札が行われた。記憶している限り、アンテナの製作には3社が応札し、明星電気が落札した。また、アンテナ内部に設置されるフロントエンドは別途調達されたが、それは日本電気製であった。アンテナにフロントエンドを取り付けに来た日本電気の技術者が、アンテナに大きく明星電気のロゴが描かれているのを見て、「ここにNECと書かれていないとなあ・・・。」といていたのをふと思いついた。

翌年度からは、電波研究所が開発したK-3型のVLBI装置を、国土地理院が購入するという方法で順次整備していった。なお、当初は3年で完成の予定であったが、途中で4年計画に変更されていた。

私がVLBIに本格的に関わるようになったのは、昭和59年4月に宇宙測地係長に異動してからである。前年、測地部に測地技術開発室が設置され、同室の宇宙測地係と応用測地係がVLBI開発を担当することになった。昭和59年度は、VLBI開発の最終年度であり、水蒸気ラジオメータなどの調達が行われたが、それらと並行して、実際に観測を行うための調整が進められており、同年5月にはVLBI開発プロジェクトチームもVLBIオペレーショングループに再編された。その後、

昭和59年度 システムレベル実験(JEG-1)

(JEG: Japanese Experiment for Geodesy)

昭和60年度 筑波-鹿島基線観測(JEG-2)、

筑波-鹿島-野辺山観測 (JEG-3)  
宮崎 VLBI 観測点選点作業  
昭和 61 年度 宮崎-鹿島基線観測 (VEGA-M1, M2)  
(VEGA:VLBI Experiment for Geodetic  
Application)  
筑波-鹿島基線観測 (JEG-4)  
父島 VLBI 観測点選点作業  
昭和 62 年度 父島-鹿島基線観測 (VEGA-C1, C2)  
筑波-鹿島基線観測 (JEG-5)

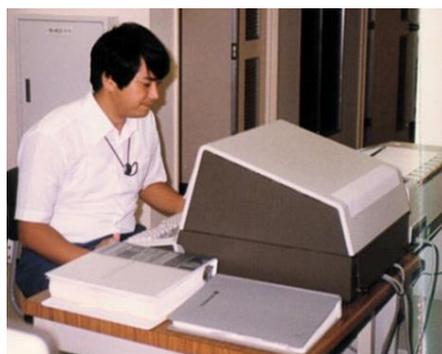


写真-9 筑波の観測室で VLBI を制御するミニコンの端末を操作する齊藤隆

に携わった。これらについては、本文で詳しく述べられているので、そちらに譲ることにするが、小型とはいえ直径 5 m のパラボラアンテナや、繊細な調整が必要な水素メーザーを移動させて観測することは、非常に緊張する作業であった。毎回、移設後に行うフリンジテストの結果が出るまでは心配でしかたがなかった。

また、父島観測点については、フィリピン海プレートの動きを検出するという目的を果たすためには、父島をおいてほかにはないという状況の中、島中探してもなかなかいい場所が見つからなかった。最終的には、東京都のご協力を得て、公園の敷地をお借りすることができたが、それまでの間、胃の痛い思いもした。

これらの移動観測作業と並行して、VLBI の将来計画として、全国 VLBI 観測網の整備計画などの検討や、移動観測を容易にするため、HP-BASIC を使って PC 上で動く観測制御ソフトウェアの作成なども行っていた。

その後、昭和 63 年 4 月に建設大学校の教官に異動となり、VLBI からしばらく離れることになったが、平成 6 年 4 月から約 2 年間、測地技術開発室長として、再び VLBI にかかわることになった。その間、直径 3.8 m のアンテナと K-4 システムによる新しい VLBI 装置を用いた日韓 VLBI 観測、始良、父島、新十津川への VLBI 固定局の設置、長年の希望であった大型アンテナの建設などにもかかわることができた。

そして、平成 26 年、次世代 VLBI である VGOS 仕様の石岡 VLBI 局が、私の自宅からわずか 2 km 程の丘の上に建設中である。私と VLBI との関係はこれからもまだ続いていくようだ。

### 3. 22. 4 鹿島・筑波基線 VLBI 実験【昭和59年～平成3年】

昭和58年(1983)10月の予備試験で「VLBI 装置」の機能確認ができた。そこで、予定どおり、昭和59年度より共同実験を始めることとした。

昭和59年(1984)7月11日、鹿島26mアンテナと筑波5mアンテナ間での「システムレベル実験」の打ち合わせが、鹿島で開かれた。そこでは、実験の目的が、①基線長を求め、レーザー測距値と比較、②時刻比較、であり、実験期日が、7月18日から2日間、とのことが確認された。会議には、地理院から、金子英樹・齊藤隆の2名。電波研究所から、河野宣之・川口則幸・

雨谷純・高橋幸雄・吉野泰造・黒岩博司・木内等・金子明弘・高橋富士信・杉本祐二の10名が参加した。

前年(1983)の10月5日、K-3VLBIシステムを用いた史上初の日米間 VLBI システムレベル実験が、鹿島26m局と米国西海岸のモハービ局(12m)、オウエンズバレー電波観測局(40m)の3局の間で行われ成功していた。

システムレベル実験は、7月18日10時(JST)から19日12時26分(JST)までの昼夜を通した26時間強に渡る連続観測だった。この実験は「JEG1」と呼んだ。JEGは「ジェグ」と言う。

筑波5mアンテナの運用は、地理院の4名(金子・齊藤・松坂・新田)と、電波研究所からの応援4名(杉本・金子、國森・栗原)の8名が交代して行った。一方、鹿島の観測は、黒岩・高橋(幸雄)、浜・小池、雨谷・近藤、木内・吉野が二人一組となり、交代で行った。

前日、17日には杉本・金子(明弘)が先発組として筑波に来て、実験の準備を地理院と協力して行った。その夜には、“前夜祭”と称した懇親の場が持たれた。

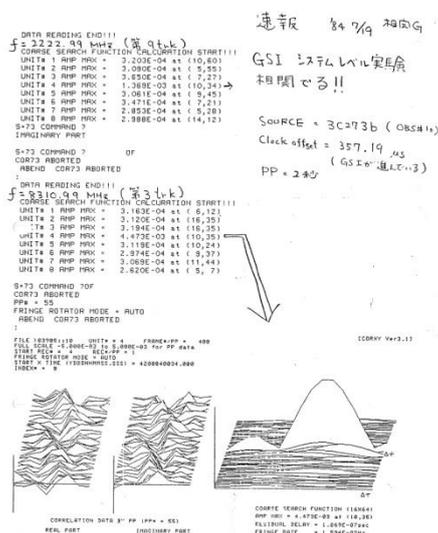


図-4 システムレベル実験後の相関処理で検出したFRINGE。電波研究所の相関処理グループが作成した速報(1984年7月19日)

実験観測は順調に行われた。観測後、杉本らは急ぎ鹿島に戻り、相関処理を開始した。そして、同日(7月19日)、FRINGEを検出した(図-4)。引き続き基線解析を行い、54,548.55mの結果を得た。一方、地理院による光波測距儀を用いた地上測量では、54,548.66mの結果を得ていた。差は11cmだった。地上測量の誤差は、おおよそ10cmと見積もられていたため、実験は成功した。この結果を知らされ、関係者一同、安堵した。杉本と黒岩はこの結果を測地学会第63回講演会(1985)で報告するとともに、共著で測地学会誌(第32巻、第1号、1986)に投稿した。

「JEG1」観測の前後、7月17日と7月20日、新田浩・松坂茂と天文系の林保はセシウム原子時計を鹿島に運搬し、筑波、鹿島で運用している水素メーザの時刻比較を行った。これは、相関処理を成功させるために行う必須の作業だった。鹿島、筑波両局の時刻は、 $\pm 8 \mu\text{sec}$ 以内に同期がとれていることが望ましいとされていた。「JEG1」前後に行われたセシウム原子時計の運搬による時刻比較と VLBI 解析による結果は約10nsecで一致していた。これは測地目的では全く問題がない結果だった。

地理院では、天文観測や人工衛星観測のため、昭和47年(1972)からセシウム原子時計を本院と鹿野山測地観測所で運用していた。本院では3台のセシウム原子時計を運用し、維持管理を天文係が担った。

地理院の精密時刻は、東京天文台(三鷹)のセシウム原子時計との間で、時刻比較を介して保持した。本院での時刻比較は、セシウム原子時計を運搬した直接比較や、NHK TVの垂直同期信号を用いた定時(毎日)での比較によるものだった。この他、ロラン C 電波も用いられていた。

一方、鹿野山測地観測所では、これらの比較を行なうとともに、東京天文台の松波直幸や中嶋浩一らと、61.22MHzの超短波無線を介した時刻比較の研究も行っていった。この頃、東京天文台や地理院の時刻保持のため、東京天文台(天文時部)の飯島重孝・藤原清・原孝や地理院の石原操・鹿野山測地観測所が、両組織の併任職員となっていた。

地理院は、JEG観測の実施以前からセシウム原子時計の運用と高精度な時刻比較のノウハウを持ち合わせていた。しかし、水素メーザの運用は始めてで、その取り扱いが苦労した。新田浩(60)は「私は VLBI の時刻管理を担当したが、水素メーザの運用は特に気を使った」。「水素メーザのアラームがよく鳴り、自分達では手に負えないこともしばしばで、その度ごとに、アンリツの森謙二郎さんなどを呼ぶこととなった」と当時の様子を語る。

「JEG1」の再現性を確認するため、「JEG2」を昭和60年(1985)8月、更に、季節変化を確認するため、「JEG3」を昭和61年(1986)2月に行った。JEG1～JEG3の3回の基線長は2cmの範囲で一致した。これは、驚異的な結果だった。VLBIを用いれば、原理的には千キロの基線でも、同様な精度で結果が得られると予想されたからだ。地上測量では、日本経緯度原点(東京都港区)から遠く離れた日本列島の両端で、数mの誤差が生じるだろうと推測されていた。

昭和61年(1986)11月4日～7日、齊藤隆と松坂茂は基線解析の習熟のため、電波研究所において、同所システムを用いて、JEG1～JEG3の解析を独自で行った。地理院はこれを境に、解析技術のノウハウを蓄積していった。



写真-10 天文観測室内で水素メーザを調整するアンリツ社員。水素メーザは両面開きドア付の移動型恒温槽に入っている

年	月日	GPSの主な出来事	月日	VLBIの主な出来事
1986 (S61)			10.	DELP(鹿島26m-新富5m)
1987 (S62)	2.10~3.4	国土地理院で初のGPS受信機(エアロサービス社製マクロメータII)導入		
	10.17~10.27	国土地理院周辺にGPS観測点6点を設置	11.	DELP(鹿島26m-父島5m)
1988 (S63)	3.7~3.11	GPSによる長距離観測(筑波、鹿野山、父島、宮崎)を実施		
	4.	GPSとVLBIによる基線長の比較観測(筑波-鹿島)		
	5~9	GPS受信機(ミニマック2816、トリプル4000SX)導入	10.	DELP(鹿島26m-新富5m)
		筑波周辺にGPS用の長・短基線を設け試験観測を実施		
1989 (H1)	10.	GPS衛星軌道解析の観測を新十津川、宮崎、鹿屋、父島で実施		
	10.28~11.1	父島、宮崎、つくばのVLBI観測点を与点とし、GPSで一等三角点「沖ノ島」を設置	11~12	DELP(鹿島26m-父島5m)
1990 (H2)	10.2~10.25	室蘭地区で精密測地網二次基準点測量をGPS測量機で実施(14点)	7.	超長基線測量(鹿島26m-新十津川5m)
	11.2~12.1	雲仙岳噴火活動に伴う緊急観測をGPS測量機で実施(11点)		
1991 (H3)	2.18~3.19	上総地区で精密測地網一次基準点測量をGPS測量機で実施(20点)		
		軌道追跡局を4箇所(新十津川、筑波、鹿野、父島)設置	9~11	超長基線測量(鹿島26m-水沢5m)
	4.	精密測地網一次基準点測量作業にGPS測量機を正式導入		
1992 (H4)	7.	2周波型GPS測量機による試験観測(トリプル4000SST)を実施		超長基線測量(鹿島26m-相良5m)
	12.	GPS連続観測網構築に向けて試験観測(ライシステム200)を実施	12.10	26mアンテナ施設受渡式
		公共測量作業規程にGPS測量を追加	7.	MDX(鹿島34m-鹿野山2.4m)
1993 (H5)	3.	基準点体系分科会で「電子基準点」の用語が用いられる。	9~10	超長基線測量(鹿島26m-海海5m)
		補正予算で電子基準点整備を要求し、認められる。	11~12	超長基線測量(鹿島26m-新富5m)
		電子基準点(地上型・屋上型)を東海・南関東地域に110点設置		
		国際GPS地球力学事業(IGS)が発足し、国土地理院も加わる。	2.7~6.30	26mアンテナ改修工事
1994 (H6)	4~	GPS連続観測点100点を全国に均等に設置		
	4.1	地殻連続監視施設COSMOS-G2の運用開始(南関東・東海地域、110点)	11.	地球環境研究(鹿島34m-砺波2.4m)
	6.1	第5次基本測量長期計画決定。電子基準点640点を計画		
	10.1	全国GPS連続観測網GRAPESの運用開始(南関東・東海地方を除く全国、100点)	9.29~H7.2.28	26mアンテナ改修工事
	10.4	「北海道東方沖地震(M8.2)」に伴う地殻変動を全国GPS観測網が初めて検出		
	1.17	「兵庫県南部地震(M7.2)」に伴う地殻変動を検出	1.	MDX(鹿島34m-鹿野山2.4m)
1995 (H7)	2.28	GPS連続観測施設の設置等も含まれる平成6年度第2次補正予算が成立	2.	北海道新十津川町に3.8mアンテナ設置
	10.6	伊豆半島東部の群発地震活動に伴う地殻変動を検出	10~11	日韓VLBI観測(鹿島26m-SUWON3.8m)
	11.2	喜界島及び奄美大島へGPS連続観測点設置		

表-6 昭和61年(1986)から平成7年(1995)までの地理院のGPSとVLBIの主な出来事。GPSは平井英明作成「電子基準点に関する主な出来事」より一部を引用。表内、「宮崎」と「新富」は同一地点。「MDX」は、首都圏の鹿島・筑波・小金井・鹿野山に設置したVLBI基線を言う

地理院は昭和62年(1987)に初めてGPS受信機を導入した。機種は、エアロサービス社製のマクロメータIIだった。そして、昭和63年(1988)3月7日から11日にかけて、測地第二課人工衛星系の井上康司・板橋昭房・辻宏道は、筑波-鹿島間でGPS観測を実施した(表-6)。観測後、井上らは、この結果を解析し、JEG1~JEG4の結果(基線長の平均値:54,548.55m)と比較した。その差は2cmでGPSとVLBIによる基線長は一致した。この時、GPS受信機は、鹿島では26mアンテナから97m離れた「電研1」に、筑波では5mアンテナから53m離れた「人工衛星観測点」に設置した。

昭和63年(1988)4月1日、「電波研究所」は「通信総合研究所」(以下、通総研と略す)と改称した。さらに、平成元年(1989)5月、通総研鹿島支所は関東支所となった。

### 3.22.5 移動観測

#### (1) DELPと超長基線測量【昭和61年~平成5年】

鹿島、筑波間の「システムレベル実験」の成功を受け、いよいよ移動観測(測地応用VLBI実験)に臨むこととなる。

国際学術連合会議(ICSU)は、昭和55年(1980)の総会で、国際リソスフェア探査開発計画(Dynamics and Evolution of the Lithosphere Project:略称DELP)を決定した。

地理院は、我が国の DELP 計画の内の一課題である「プレート運動の実測」に参加することとした。その内容は「電波研究所と協力して、日本及びその周辺海域で VLBI による超長基線の繰返し測定」を行うものである。得られた成果は「プレート運動及びこれに起因する広域地殻歪みの検出」と「日本列島精密測地網の規正」に用いる。地理院が DELP に取り組んだ期間は、昭和61年度から平成元年度までの4ヵ年だった。



写真-11 DELP での最初の移動観測風景(1986年)。宮崎「新富」の観測局舎(プレハブ)内にて。左より、松坂茂、川口保、金子英樹、齊藤隆

地理院はDELP実施のため「国際リソースエア探査計画経費」として予算要求を行い、4年間に渡り、各年、4千万円程度が認められた。これにより、地理院のVLBIは研究開発から事業へと推移した。DELPに基づく観測は、鹿島・宮崎「新富」と鹿島・父島の2基線で、各々、1年おきに実施した(表-7)。

観測年		観測場所		予算事項
昭和61年	1986	新富	宮崎県	DELP
昭和62年	1987	父島	東京都	
昭和63年	1988	新富	宮崎県	
平成元年	1989	父島	東京都	超長基線 測量
平成2年	1990	新十津川	北海道	
平成3年	1991	水沢	岩手県	
平成4年	1992	相良	静岡県	
平成5年	1993	海南	和歌山県	
〃	1993	新富	宮崎県	

表-7 5mアンテナを用いた国内移動観測

観測結果は折々に公表した。例えば、齊藤隆は、昭和62年(1987)5月の日本測地学会講演会で「宮崎-鹿島基線 VLBI 観測(VEGA-1. 2解析結果)」と題して、講演を行った。ここでは「宮崎-鹿島の距離約950Km が数cm

の誤差で測定できたことは確実であり、日本最初の可搬型 VLBI 装置による移動観測は成功した」という報告を行った。共同研究者として、地理院の吉村好光・金子英樹・川口保・新田浩・松坂茂と、電波研究所の徳丸宗利・栗原則幸・浜真一・雨谷純・金子明弘が名を連ねた。

飛田幹男と松坂茂は、鹿島・父島の2回の VLBI 観測を解析し、結果を平成3年(1991)、国土地理院時報(No73)に記した。この中で、(父島は)「2年間で北に29mm±11. 8mm、西に68mm±7. 6mmという有意な基線ベクトルの変化が検出された。世界で初めてフィリピン海プレート運動を実測したことになる」と述べた。

地理院はDELPに引き続き、平成2年度から「超長基線測量」と予算事項を変更し、国内移動観測を行った。これは、測地学審議会の「地球科学の推進」の“建議”での「DELP 計画の成果を踏まえた継続的な事業の実施」や「第六次地震予知計画の推進」での「VLBI 等宇宙技術を積極的に活用し、プレート運動や広域地殻変動の観測を行なう」とされたことに答えるため実施した。

この観測は、鹿島との間で、新十津川(北海道)、水沢(岩手県)、相良(静岡県)、海南(和歌山県)で行い(表-7)、平成5年(1993)11月の新富(宮崎県)が最後となった(写真-12)。最後の新富の観測では、機器の老朽化が原因で、順調に動作しない状況もあり苦労した。これ以後、5mアンテナを用いて VLBI 観測を行なうことはなかった。昭和57年(1982)3月の地理院構内への5mアンテナの設置から11年が過ぎていた。



写真-12 5mアンテナ最後の移動観測。1993年、宮崎「新富」にて。左より、飛田幹男、小坂橋勝、石原操

## (2) 移動観測の観測工程

松坂茂(58)は初期の頃の国内移動観測の様子を、次のように述べる。

### 「移動観測」(松坂茂)

移動観測と一口にいつてもその中には、様々な工程が含まれる。まず、最初の工程として、選点、基台設置、測量がある。この段階を「地上測量」と呼ぶこととする。次に、「移設段階」となる。この工程は、観測室建設、アンテナ設置、機器運搬と試験調整、フリッジテストまでを含む。そして最後に、「本観測」となる。

#### 1. 「地上測量」

最初の作業は、VLBI アンテナを設置する場所を選ぶ「選点」から始まる。「上空視界の確保」、「10tクレーンの横付け」、「地盤が堅固か」、「人工電波の有無」、「電気・電話の確保」など、考慮しなければならない事は多岐にわたる。



写真-13 アンテナを据え付ける基台の中央(右写真)には、金属標が埋設してある(左写真)。この形状は「測量法施行規則第一条(測量標の形状)」で定められている。金属標の上に水準標尺を立てているのは新田浩。1990年7月、新十津川にて

宮崎の選点では、熊本県内や長崎県内など、九州各地を探したが都合の良い場所がなかなか見つからず、最後に宮崎県新富町に行き着いた。父島の場合は島内の4ヶ所を候補地として選点し、最終的に一地点に絞り込んだ。新十津川と水沢は、地理院で管理している敷地内とした。

場所が決まると、地元の業者に委託し、アンテナを据え付けるための基台工事を行ってもらう。基台上の中央には、中心に十字の

印がある直径8cmの金属標を埋設する(写真-13)。ここを「VLBI観測点」と言う。アンテナのAZ・EL中心と「VLBI観測点」の位置関係の把握は次の方法を用いた。水平方向に関しては、AZ回転軸に光学求心器が取り付けられているので、これを用いて、金属標の十字の中心とAZ回転軸の中心の関係を把握する。EL軸の高さについては、基準マーカがアンテナの外側に取り付けられているので、レベルや鋼巻尺を使用して、金属標との比高を

求めた。(写真-14)

測量は、「VLBI 観測点」を日本測地系に高精度で取り付けるためのもので、測地網の規正や従来の測量成果との比較のため、欠くことができない作業となる。測量は精密測地網測量に準じて行った。

## 2. 「移設段階」

移設段階では、実際に装置を筑波から運搬するが、総重量が 15t 以上になるため、そう簡単ではなかった。まず、安定するのに最も時間のかかる水素メーザを運ぶ。水素メーザは、その安定性が精度に直接響くので慎重に取り扱う。この作業は、水素メーザの製作会社であるアンリツにお願いした。筑波では、屋根が開閉できる天文観測棟の一室に置かれていたので、搬出入は、クレーンを用い、上空から吊り上げる大掛かりな作業となった(写真-15)。

水素メーザ設置後、3週間程度は慣熟運転させる。その後、セシウム原子時計を直接運ぶ等の方法を用いて鹿島の水素メーザと時刻の同期をとる。

筑波でのアンテナの分解と、現地での組立は、それぞれ 1~2 日もあれば充分だった。この作業は明星電気が担当した。他の機器も到着したら、ケーブルを繋ぎ、全体の調整を行い観測準備 OK となる。とは言っても、ケーブルの接続だけでも半端な数ではなく、間違わずに接続するのに神経を使った。

次の段階として試験調整を行なう。これは、5 m アンテナを正しく電波星の方向に向けてするためのもので、天体観測を行なって実施する。この作業を「軸校正」と言った。

この工程での最後にFRINGEテストを行なう。これは、両局(鹿島局・移動局)で数個の星を同時に観測し、実際に相関をとって機器の動作確認を行うもので、本観測前の最終確認となる。テスト後、磁気テープを鹿島に送り相関処理を行う。「FRINGE」が検出できないと、時刻同期が取れていないか、電波星にアンテナが正しく向いていないか、それとも他の原因か、大いに悩むこととなる。原因がすぐに分らないと、お互いに相手局が原因ではないかと疑心暗鬼に陥る。



写真-14 EL 軸の高さを決めるため、新十津川人工衛星観測室の屋上で水準測量を行なう唐沢正夫。1990年7月



写真-15 水素メーザは、クレーンで吊り下げられている箱(恒温槽)の中に入っている。普段は右側の建物内に設置してあるので、上空から吊り上げ、搬出する

### 3. 「本観測」

本観測では、24時間連続で、16～20の電波星をのべ150～160回観測する。記録される磁気テープは30巻以上になる。機器の操作はほとんどコンピュータが自動運用してくれるので、人間は基本的にはテープの掛け代えだけをやればよい。しかし、初期のうちは自動運用プログラムのバグなどでかなり悩まされ常時監視していなければならないこともあった。

移設作業でのコンピュータは、ミニコン1台とパソコン2台、都合3台を使用した。自動運用でミニコンを用い、パソコンは試験調整と時刻比較のためのものだった。

移動先では、24時間観測を2回、1週間を置いて実行する。これは、気象などの影響を見るほか、事故などに備える目的もあった。

準備から撤収までのすべての工程に要する期間は約2ヶ月だった(図-5)。可搬型といってもこのようにかなりの時間と、それに伴う多額の経費が必要なので、1年に1箇所しか移動観測はできなかった。

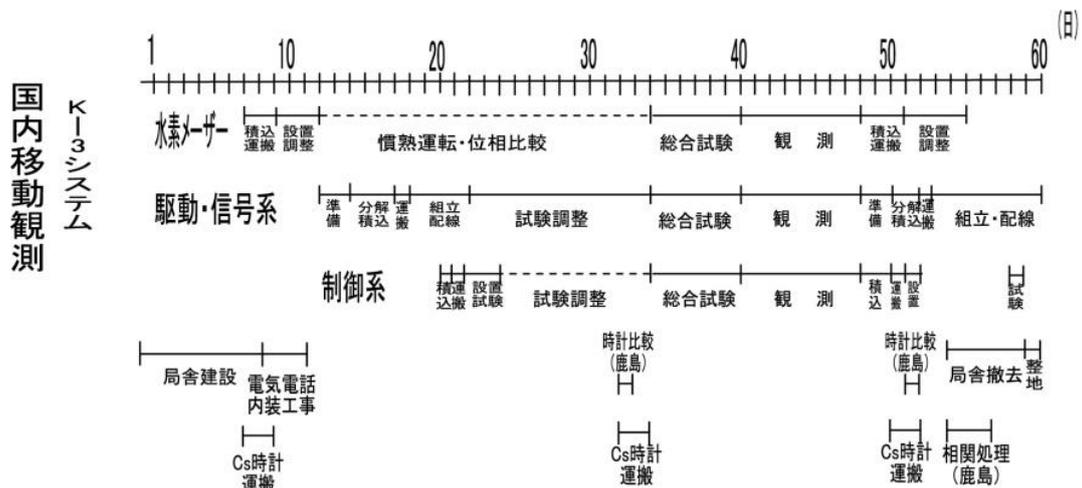


図-5 国内移動観測は準備から撤収まで、おおよそ2ヶ月の期間を要した

### (3) KAOS から GAOS へ【昭和62年～平成2年】

5mアンテナを主体とする VLBI 装置は可搬型であったが移設と運用は容易ではなかった。作業を合理化するには、VLBI システムを小型化し可搬性を高めることと、運用についても簡便な方法とする必要があった。そこで、測地技術開発室では昭和63年度より平成2年度までの3年間、「VLBI 装置の移動性向上」に関する研究に取り組んだ。この研究の課題の一つにパーソナルコンピュータによる制御ソフトウェアの開発があった。飛田幹男と松坂茂が、主に、この開発に取り組んだ。

VLBI 観測は観測自動制御ソフトウェアを用いて24時間の連続観測を行なう。5mVLBI システムでは、通総研で開発された観測制御プログラム“KAOS”を使用してきた。「KAOS」は「K-3 Automatic Operation Software」を略したもので、“ケイオス”と言う。

「KAOS」は、ミニコンピュータ上で走るソフトウェアで、非常に多くの機能を有していた。それ

が故、プログラムが巨大で、様々な問題も抱えていた。

代表的なものとして、24時間に渡る1回の観測で、最低1回はプログラムの停止 (TERMINATE) が起こった。これにより、約1割の観測が失敗した。観測者は、観測が始まると、いつ起こるか分からないプログラムの停止に備えるため、気の抜けない時間を過ごした。これは、24時間、昼夜を通じた。更に、コンピュータは”ミニ“とは言え、ハード的には、それなりの大きさの形状とデリケートな構造で、可搬型として使用するには不向きだった。

そこで、飛田らは、VLBI装置の小型化と作業の簡略化を目指して、全く新しい観測自動制御ソフトウェア“GAOS”の開発に取り組んだ。「GAOS」はパーソナルコンピュータ上で走るソフトウェアで「GSI Automatic Observation Software」を略した。”ギャオス“と言う。プログラム言語として HP BASIC を用いた。

松坂ら測地技術開発室では、この研究を正式に開始する前年の昭和62年(1987)にソフトウェアの基本思想(表-8)を考えるとともに、これに基づいたコーディン

パーソナルコンピュータ上で走る
誰もが理解しやすい高級言語を使う
プログラムの変更とチェックが容易なインタプリタ言語を使う
24時間連続運転を目標とし、途中で停止してもすぐに復帰できる
観測スケジュールの任意の場所からスタート可能
観測スケジュールのチェックが容易

表-8 観測自動制御ソフトウェア“GAOS”の基本思想の主な項目

グを開始した。翌年の昭和63年(1988)4月1日、東北地方測量部より宇宙測地係に配置換えとなった飛田もこの研究に加わり、彼が中心的に「GAOS」の開発を進めることとなった。翌、平成元年(1989)に「GAOS Ver1.1」が完成した。そして、その年の2月22日～23日、JEG7で初めて使用した。JEG7は一度も止まることなく観測が終了した。この後、JEG8(1989.9)、JEG9(1990.3)、VEGA-C3～C5(父島:1989)、VEGA-S1～S4(新十津川:1990)の9回の観測でも使用した。結果、一つの失敗も無く運用できた。これにより、1人のオペレータがテープの交換だけを行えば良くなり、観測作業が大幅に簡素化されることとなった。

飛田と松坂は、この間の取り組みについて、「VLBI 観測自動制御プログラム“GAOS”の開発」と題して地理院の平成2年度調査研究年報で報告した。彼らは、報告の後段に、「観測自動制御ソフトウェアの開発はこれをもってほぼ完成した。このソフトウェアがもたらす観測回数の増加は、まさに、国土地理院の VLBI 観測グループが目指すものである」と記した。

### 3. 22. 6 鹿島26アンテナ

#### (1) 通総研から地理院への移管【平成2年～平成4年】

平成2年(1990)8月9日、中堀義郎・測地技術開発室長は一通の電話を受けた。「平成3年度に26mアンテナを廃棄する方向で検討している。定期保守を行えば、今後、10年は使用できる。アンテナと局舎の一部を地理院に移管することが可能か。検討してもらいたい」。相手は通総研の高橋富士信・VLBI 推進本部主幹だった。通総研では「34mの多目的アンテナが昭和63年(1988)に設置され、本格運用がなされるに至り、26mアンテナが不要となった」という事情があった。

中堀と高橋らは、26mアンテナの移管について検討を開始した。半年後の平成3年(1991)3

月28日。地理院と通総研の会議の場で、猿渡岱爾・関東支所長から、26mアンテナの今後の運用の考え方が正式に述べられた。そして、移管についての事務手続きについて、両者で協力し、具体的につめていくことになった。

平成3年(1991)6月4日、地理院では、「郵政省通信総合研究所所管の26mVLBI アンテナの国土地理院への所管換について」の第1回打ち合わせ会議が開かれた。「所管換」とは、各省各庁の長の間において国有財産の管理を移すことをいう。

この会議には、総務部から、若林夏男・会計課長や山本美弘・管財課長など事務官6名と、測地部から、中堀義郎と吉池健・応用測地係長、佐々木正博・計画課計画第一係長の3名が参加した。



写真-16 26mアンテナ内部で、機器の説明をする通総研の栗原則幸(下)と説明を聞く中堀義郎(上左)と米沢武次(上右)。1991年6月14日

ここでは、中堀から「鹿島34mアンテナは地理院のルーチンワークに対応できない」ことと、「地理院による26mアンテナの使用計画」などが説明された。一方、事務方からは、「26mアンテナの移管については慎重な検討が必要」。「予算措置が必要」との指摘がなされた。

10日後の6月14日、移管後の維持管理計画を立てるため、地理院、通総研、日本電気の3者による打ち合わせが通総研で行われた。ここでは、近年の保守状況が報告されるとともに、日本電気より、今後の、「補修と改修の項目」と、「経費と優先度」が説明された。この打ち合わせには、地理院から中堀義郎・飛田幹男・米沢武次が、通総研から、今江理人・栗原則幸・雨谷純が、日本電気から、米田勇治・衛星通信システム課長他3名が参加した。これに併せ、同日、栗原則幸が地理院側参加者に対して26mアンテナの説明を行った(写真-16)。

6月18日、通総研の所議で、「26MφVLBI アンテナについて、地理院で希望があれば所管換する」旨の確認がなされた。

6月24日、地理院の院議に所管換に関する議題が諮られた。ここでは、「平成4年度予算要求事務と調整を図りながら、平成3年度中に移管事務を進める」とのことが決められた。

その後、「所管換に関する作業班」が、地理院では井上登・測地部長を、通総研では内田國昭・関東支所長をトップとして、それぞれに立ち上げられた。

お互いの作業班は、連携を取り、事務作業を進めた。そして、10月15日、両者で伴い大蔵省関東財務局との打ち合わせに望んだ。この場において、財務局側より、「本件事案は『所管換になじむ』」との回答を得た。また、正式な所管換手続きの時期は、「平成4年度予算が確定後、速やかな時期」との見解と、「財務局はこの話を大蔵本省に伝える」とのことが聞かされた。打ち合わせには、地理院から山本美弘・管財課長、都築政治・管財課補佐、佐々木孝志・管財係長、通総研から森巧・会計課補佐が参加した。



# 鹿島26m VLBI 観測施設開局



昭和六十三年度から国土地理院が可搬型差速器を用いて実施してきた超長基線電波干渉法(VLBI)観測において、相手局として用いられてきた郵政省通信総合研究所東支所の二十六メートル大型アンテナを移管して、国土地理院のVLBI観測施設として新たに開局することになりました。アンテナの移管にあたり、平成四年十二月十日、茨城県鹿島町にある通信総合研究所東支所において、関係者の出席のもと、二十六メートル大型アンテナの移管式が行われ、式に先立ち、施設受渡式が行われました。

当日の受渡式では、アンテナの財産管理に関する文書が、宮崎大和と通信総合研究所長と奮野ふごの両氏の間で交換されたのを除き、今後の利用に関する覚書が、井上登と通信総合研究所長と奮野ふごの両氏の間で交換されました。

このアンテナは、口径が二十六メートルあり、高い測距精度が達成できる、国際的に見ても第一級のVLBI専用アンテナです。その性能を生かして、昭和五十九年から、国際VLBI観測の基局として使用され、プレート連によってハワイと日本の間の距離が年約六センチメートルずつ縮まっています。また、国土地理院の可搬型VLBI装置によるVLBI観測でも、一貫して相手局として使用され、国内のVLBI観測の産物の原典としても重要な役割を担っています。さらに、このアンテナは、今後国土地理院がアメリカ合衆国航空宇宙局(NASA)と共同で実施する国際VLBI観測の基局として利用する際、国内でVLBI観測でも引き続き使用されます。これらの観測は、国内測地網の高精度化、プレート運動の詳細な解明、海面変動の観測等に貴重なデータを提供することができます。国際VLBIアンテナによる観測を開始することで、国土地理院がめざす世界を視野にいたった観測に、また一歩を踏み出すことができました。



図-6 26mアンテナの施設受渡式を伝える地理院広報(1993年1月15日号)。握手をする奮野(ふご)の信義・通総研所長(左)と宮崎大和・地理院長(右)。院長後方は、塚原弘一・測地部計画課長(左)と井上登・測地部長(右)

地理院は、平成4年度概算要求に、新たに「国際超長基線測量経費」と、「26m VLBI 施設の維持経費」を盛り込んだ。しかし、12月に示された最初の予算内示では要求は認められなかった。「これでは、26mアンテナの移管は不可能となる」。そこで、復活要求に活路を見出すこととした。平成3年(1991)12月25日、当初要求よりは減額されたが予算は認められた。追加内示額は、筑波-鹿島間の往復旅費や保守料など総額、419万7千円だった。地理院は、平成4年度より、26mアンテナを用いた「国際超長基線測量」も実施できるようになった。

地理院と通総研は、付帯する物品の管理換や土地・建物の使用に関する事務手続きを進め、平成4年(1992)12月10日、関東支所において、26mアンテナの施設受渡式に臨んだ(図-6)。式では、アンテナの財産管理に関する文書が宮崎大和・地理院長と奮野(ふご)の信義・通総研所長との間で交換された。ここに至るまで、中堀義郎が高橋富士信より一報を受けてから、2年4ヶ月の歳月を要した。測地技術開発室長は中堀から村上亮に代わっていた。

## (2) 大規模改修【平成6年～平成7年】

中堀から測地技術開発室長を引き継いだ村上亮にとって、26mアンテナの維持管理をどのようにするかが課題だった。移管を受けた平成4年(1992)12月には、アンテナが建設された昭和43年(1968)10月から24年の歳月が経過していた。通総研では、毎年実施していた定期保守を平成元年(1989)に打ち切った。それからは、年1回程度、駆動部分にグリス塗布とオイルの注入を自分達で行なっていた。塗装も昭和60年(1985)に前回塗装の上に上塗りをしたのが最後で「内部でサビが進行している可能性がある」と日本電気より指摘されていた。サビや外壁の腐食は誰の目にも明らかだった。それより、最も気がかりな事は(普段、近くから見る事が出来ない)「アンテナ主反射鏡を支えるボルトが緩んでいて、鏡面パネルが脱落するのではないか」との心配だった。

村上は、平成5年(1993)の秋、石原操・宇宙測地係長らと相談し、日本電気より指摘されて

いた項目の改修や主反射鏡のボルト調査を補正予算(平成5年度第2次)で行なうことを決断した。



写真-17 アンテナ主反射鏡パネル(上部)を固定するボルトは、腐食が進み、切断一步手前のものもあった

翌、平成6年(1994)、26mアンテナの改修工事が日本電気に発注された。工期は、平成6年(1994)2月7日から6月30日だった。作業は、腐食部分の補修、外周のサビ落としと塗装、アンテナボルト緩み調査、駆動電力増幅装置(DCPA)の更新などだった。アンテナボルト緩み調査は、クレーンを用いての高所作業だったので、大掛かりなものとなった。

調査の結果、村上らの心配は的中した。主反射鏡パネルをバックアップストラクチャ(主反射鏡の骨組み)に固定する、3024本の、ほとんどのボルトは腐食が進み(写真-17)、ボルトやナットを廻すことは不可能だった。これを放置すれば、鏡面精度の著しい悪化を招くだけでなく、最悪、主反射鏡パネルが高所から地上に落下し、人的被害が起こることも考えられた。

また、副反射鏡も老朽化が進んでいた。これらの状況が知らされ、緊急な対応を迫られた。

「更なる改修か解体か」。一昨年(平成4年)より始まった「国際超長基線測量」を継続するには、「更なる改修」しか方法はなかった。つくばに大型アンテナを整備する計画が日の目を見るのは、まだ先の話だった。

地理院は「二度目の改修」に踏み切り、平成5年度第3次補正予算で対処することとした。工事は、平成6年(1994)9月29日から、翌、平成7年(1995)2月28日までの5ヶ月間に及んだ。二度に渡る改修の費用は総額で4億円を超えた。通常経費では、とうてい賅える金額ではなかった。

二度目の改修工事は困難を極めた。「高所での長期間にわたる作業」(写真-18)、「ボルトがはずれないため、“ナット割工法”の採用」、「ボルト交換後のアンテナ鏡面精度の確保」、「交換ボルトの落下防止」など、多くの対応が必要だった。特に、ボルト交換に伴う鏡面精度の確保は、トータルステーションを用いた(写真-19)高度で気の遠くなるような作業(ボルト交換前後の差が各ボルトとも0.5mm以内とする)だった。



写真-18 ボルト交換は、クレーンを使うなどした高所での作業が長期間にわたった。バックアップストラクチャには工事用踏み板を敷き詰めた



写真-19 トータルステーションを用いて、ボルト交換前後の鏡面パネルの高さの差を0.5mm以内に調整した。この作業は、ボルト1本ごとに行なった



写真-20 福崎順洋は改修前後、アンテナ特性試験を行なった(鹿島の観測室にて)



写真-21 大規模改修後の26mアンテナ。地理院に移管されたので、「GSI」の文字をアンテナ受信機室の外壁に記入した

26mアンテナの改修が長期間に及ぶので、この間に計画されていた国際観測と国内観測をどうするかも測地第二課の川原敏雄・超長基線係長や測地技術開発室の石原操・宇宙測地係長などにとって課題だった。幸いにも、通総研が「VLBI観測の長期中断は良くないので、34mアンテナを使用してもVLBI観測を継続する必要がある」との認識にたってくれた。

改修期間中に予定されていた、国際観測8回と国内観測4回は34mアンテナを借用した。川原(61)は「34mアンテナは通総研の施設のため、全面的な協力を得たが、何回も操作方法を聞くこともできず、必死で覚えた」と語る。

26mアンテナの改修前後で、アンテナの能力が同等になるか確認する特性試験を日本電気と福崎順洋・超長基線係が個別に行った(写真-20)。結果、両者はほぼ同じ値となった。そして、改修前と比べ、鏡面精度は「低下していない」との結論が得られた。

平成5年に地理院に採用された福崎は、平成6年(1994)3月、超長基線係に異動した。彼は大学でVLBIを学んでいた。地理院では数少ない経験者だった。福崎は、着任早々から関連器の整備なども任されていた。

26mアンテナは延命した。その後、26mアンテナは日韓測地網の結合や世界測地系の導入に貢献し、その役割をつくば32mアンテナに譲った。26mアンテナは、国内外あわせて、305回の観測に参加した。

「(26mアンテナは)つくば32mアンテナとの結合観測を十分に行なった後、2003年(平成

15年)に享年35歳で解体された」と、測地第二課当時に解体に携わった辻宏道・測地観測センター衛星測地課長(51)は語る。

### (3) 26mアンテナ移管当事の思い出

地理院 VLBI の開発と初期の運用は、主に測地技術開発室が担当した。初代の室長は馬場義男(昭和58-59年度)が務めた。それ以後、吉村好光(昭和60-63年度)、中堀義郎(平成元年-3年度)、村上亮(平成4-5年度)、齊藤隆(平成6-8年度)と引き継がれ、最後の室長を村上真幸(平成8-10年度)が務めた。村上真幸・測地部長(57)は、「私は、開発室長の時、VLBI に関わることはほとんど無かった」と語る。村上真幸が室長を勤めていた頃、測地技術開発室では、VLBI から干渉 SAR へと研究の軸足を移していた。この当時、VLBI は主に測地第二課が担当した。

国土地理院の職員の多くは技術職、技官である。大半の技官が地理院に採用された後、建設大(現国土交通大)で測量を1年間学ぶ。その後、ある者は本院に、ある者は地方測量部に配属する。そこでは、測量や地図作成などに携わる。VLBI に関わる部署に配属された人で、電子技術や電波天文のノウハウを持つ者は稀である。ほとんどの者は、初めて経験する。平成4年(1992)4月より長期間 VLBI に携わった小坂橋勝・宇宙測地係もそんな中の一人だった。

測地技術開発室長だった中堀義郎(62)と VLBI に初めて接した小坂橋勝(45)は、26mアンテナが移管された当時の様子を次のように振り返る。

#### 「国際観測への挑戦」(中堀義郎)

「DELPE」事業を始めてから通信総合研究所(CRL)の26mアンテナ移管を受けて国際観測を開始するに至った時期は、国土地理院(GSI)のVLBI事業にとっては大きな転換点でした。その時に測地技術開発室に在籍していたので、その経緯について記憶を頼りに書いてみたいと思います。

#### 1. DELPE 後への模索

私が出向先の科学技術庁研究開発局から GSI に戻り、測地技術開発室長に異動したのは、「DELPE」計画の最終年度である1989年(平成元年)4月でした。私の最初の重要な仕事は、終了間近となった DELPE 後の VLBI をどうするのか、1990年度からの予算要求に向けて、新たな展望を示すことでした。

GSI の VLBI は、DELPE の主要な研究テーマである「フィリピン海プレートの運動の検出」と基本測量である「国内精密測地網測量の規正」という2つの大きな目的を掲げてスタートしました。「DELPE」でのフィリピン海プレートの観測は、宮崎と父島に移設した5mアンテナの可搬型システムと鹿島の26mアンテナとの間で行われました。1986年に宮崎、1987年に父島、1988年に宮崎、1989年に父島と年に1か所の観測を行った後、

1990年以降は「精密測地網測定の規正」という第2の目的のために宮崎、父島以外の場所にVLBIを移設して観測することはほぼ既定路線であったと思います。しかし、VLBIを続けるためには実はいくつかの難しい問題がありました。

一つは、装置類の更新の問題でした。GSIのVLBI観測装置は、1981年度から4年間で整備されたもので、耐用年数が近いので更新を急ぐ必要がありました。移設観測のために観測装置の維持費と移設観測に毎年4,000万円程度の経費が使われていました。これだけの大きな予算で、かつ年1回しか行わない移設観測ですから失敗は絶対許されません。移設した時に装置が100%稼働するという信頼性が必要でした。しかし、水素メーザ原子時計が不安定になることがあるなど、担当者は本番の観測でうまく装置が作動するかどうかが強い不安感を感じていました。また、他の装置類についても耐用年数を迎えていました。残念ながら、DELP後のVLBIの活用は「精密測地網の規正」だけが目的ということでは、更新に必要な予算を新たに調達できる展望は誰も持ってなかったのです。

二つ目は、共同研究のパートナーであり頼りにしていたCRLから、「CRLはVLBIの研究をいつまでも継続できない可能性があるので、その場合でもGSIはVLBIを継続できるよう早く立ち上げてほしい」とかねがね言われていたことです。最初の頃、GSIは、観測が終わると、観測記録テープをCRLに運んで、CRLに相関処理から測位解を求めるところまで全部お願いしていました。「立ち上げてくれ」と言われても、我々にとっては、ハードウェアはブラックボックスだし、相関処理も基線解析も自前ではできない状況で、知識とノウハウの蓄積が明らかに足りない状況でした。どれも技術的に難しい問題だけに、「VLBIはもうやめてもいいじゃないか」という議論が幹部の間で交わされたと聞いたことがあります。測地技術開発室の中でも、この先、VLBIをどうやって続けるのかという疑問と強い閉塞感が職員の間にあることを感じました。

## 2. 新たな課題－VLBIを用いた海面変動モニタリング

こうした中で、我々にもかすかな光が見えたと感じることができるようになったのは、1988年に地球基準座標系に責任を持つ国際機関であるIERSが発足し、ITRF89（当時はIERS座標系と言っていました）が公表され、さらに高精度な地球基準座標系の構築と維持管理を国際協力により行うということを知ったことと、第1回気候変動に関する政府間パネル（IPCC）が開催され、地球の温暖化に伴い海面上昇が進行しつつあり、将来はもっと加速度的に上昇することになるというような地球環境問題がセンセーショナルにクローズアップされ、IUGG及びIAGでは1987年に既に海面変動の監視のために宇宙測地及び絶対重力点のネットワークを構築すべきであることが決議されていたことを知ったことがきっかけでした。

NASAは、1,000kmに1点という高密度な国際宇宙測地観測ネットワークで地球基準座標系を構築し、海面変動の監視やプレート運動などの地球科学に活用しようというFLINN計画を新たにスタートさせようとしているところでした。国際協力で高精度地球

基準座標系を構築し定常的に維持管理する方向に進むということであれば、GSIがそれに参加する理由は十分あります。地球上の日本の位置とその変化を事業として継続的に監視することは、測量の基準の構築と管理という観点からまさにGSIの本来業務です。

また、GSIは、高さの基準としての平均海面の観測を過去約100年実施してきました。従って、長期的な海面変動を解明することもまたGSIの本来業務であることは言うまでもないことです。

GSIがVLBIを用いてグローバルな環境問題に取り組んでいこうという方向に明確に進み始めたのは、1990年度になってからだったと思います。1990年の「国土地理院概要」で海面変動の監視というようなことがGSIの仕事として掲載されました。もちろん1991年度概算要求に向けた重点施策にも盛り込まれました。当時測地部長だった野々村元院長は、確か環境庁に長く務められたことがあり、VLBIで海面上昇の監視という地球環境問題について積極的な対応をされました。

私たちがいつも参考にしてきたのはNGSの**William E. Carter**氏の“Geodetic Fixing of Tide Gauge Bench Marks(1989)”という論文です。海外ではどうなっているかと聞かれた時には、カーター（Carter）氏の論文を引用して説明していました。

ちょうど、1990年に地球環境研究総合推進費という競争的研究資金が新たに設けられ、それにCRLの高橋幸雄氏と連携して、小型可搬型VLBI局の開発及びVLBIとGPSによる験潮場の位置測定を内容とする「宇宙測地技術を用いた海面上昇の影響評価に関する研究」を提案したところ、幸運にも研究が採択されました。この研究資金は、研究費だけでなく外国旅費や外国からの研究者の招へい旅費もあり、老朽化した可搬型システムのK3からK4システムへのアップグレード、米国との共同研究の推進、移設観測の経費の削減、韓国におけるVLBI観測、等に大いに役立ちました。この資金を得られたことがきっかけで、GSIのVLBIの国際協力が実質的に勢いをもって前進し始めたように思います。

### 3. GSIにおける日米の研究協力の開始

「海面変動のモニタリング」という課題にしても、「高精度な地球基準座標系の構築」という課題にしても、継続的にVLBI予算を確保して機器の維持更新をしながら事業を進める必要がありました。そのためにはどうしても国際的な研究観測活動の中にGSIがしっかり位置づけられていることが必要でした。そこでGSIとしてもVLBIに関する国際観測のリーダー的な存在であるNASAとコンタクトを持ちたいと考えていたところ、NASAからも積極的なアプローチがGSIにありました。

GSIがVLBIの観測結果の解析をGSIにおいて可能となるよう、NASAに解析プログラムの提供を求めたところ、1989年9月にNASAのゴダード宇宙航空管制センター(GSFC)のC. Ma博士より膨大な解析ソフトウェアが提供されるとともに、フォーマルなアグリーメントによる人的な交流についても示唆がなされました。C. Ma博士は、1990年3月に国

土地理院においでになり、VLBI技術及びその地球科学的な成果について意見交換と情報交換を行いました。その内容についてははっきり記憶していませんが、5月には同博士からNASAが他機関と結んだ協定文書の写しが送られてきて、NASAのコンタクトパーソンはNASA本部固体地球科学部Dr. BaltuckとGSFCのCDPプロジェクトマネージャーのMr. Bosworthである旨連絡がありました。この2名の方は、1990年8月の暑いときにGSIにおいでになり、GSI及びNASAのプロジェクトにつき情報交換を行いました。GSIのVLBIや駿潮を含めた測地観測施設の見学をしていただき、GSIの事業、CRLとの共同研究、地球環境研究総合推進費による研究等について説明を聞いていただきました。また、NASA側からは、NASAの次期プロジェクトについてはGSIが予算要求中の海面上昇の監視等共通の課題があるので、そのうち共同研究への参加呼びかけをGSIに送るので協力してもらいたい旨話がありました。この時は、つくば市で一番背の高い三井ビルの最上階で一緒に中華料理を食べて、交流を深めたように記憶しています。

1991年の1月にNASAの新しいプロジェクトであるDOSE (Dynamics of the Solid Earth) 計画の発表文書がGSIに送られてきました。すぐに、GSIもDOSEに参加を希望する旨返事をしました。4月には、Bosworth氏よりGSIがFLINNに参加することは非常に重要であり、正式に合意文書を交換しての研究協力を促す手紙を受け取りました。それを受けて、1991年6月、国土地理院長からNASAあてに、GSIとしての課題提案

“Sea Level Monitoring in Japan” を正式に送付しました。GSIの提案は、DOSEの中のFLINNの共同研究課題の一つに位置付けられました。

DOSEにおけるNASAとGSIの協力は、さらに上位の日米の国家間の正式な協力として



写真-22 水沢(岩手県)での移動観測。1991年11月25日。雪が降り続く中、鏡面の雪を取り除きながら観測を行なった。写真ではストロボの光でアンテナが良く見えるが、実際は暗闇の中、懐中電気の明かりを頼りにした除雪作業だった。中堀義郎と吉村和幸(電波研)もこの日の観測に立ち会っていた



写真-23 2.4mの小型アンテナ。砺波(富山県)、1994年11月。架台は水蒸気ラジオメータの架台を利用した。写真の右側は1992年に導入した車載型コンテナ。可搬型水素メーザとK-4システムの開発により、装置が小型化されコンテナ収納が実現した

て位置づけるために、日米科学技術協力協定下の協力課題として提案され、1991年7月両国間で合意されました。NASAとCRLの間で「地殻変動とプレートの運動に関する研究」の課題が実施中であったので、同じ課題名の2番目のカウンターパートとして整理され日米で合意されることになったと記憶しています。

1991年11月25日には、水沢5mアンテナと鹿島26mアンテナの間のVLBI観測にNASAのフェアバンクス観測局が参加した3局によるVLBIの試験観測が実施されました。この日は、水沢は雪模様で観測条件は良くなかったと記憶しています。この観測は、5mアンテナによるGSIとNASAと

の最初でおそらく最後の共同観測となったのではないのでしょうか。

DOSEへの参加と、それが日米科学技術協力協定に位置付けられたことによって、予算獲得も容易になりました。地球環境研究総合推進費は、金額は限られていましたが、2.4m位の小さなアンテナとトレーラーでそのまま運送できるバックエンド部を収容したコンテナが開発されました。これにより、国内移動観測の労力が軽減され、コンテナは後に韓国でのVLBI観測にも利用されました。

測地技術開発室には、海外の主な大型VLBIアンテナの写真パネルとか国際VLBI観測局の観測網図を飾ってありました。いつかはこのような国際観測網に参加できるようになろうという気持ちは職員の間で共有していたと思います。NASAとの協力を構築していけば、将来、補正予算のチャンスが訪れたときにGSIが大型アンテナを整備し、CRLに代わってGSIがルーティン的な国際VLBI観測を担えるようになるかもしれないという強い期待はありました。こうした国際観測への思いは、CRLからの26mアンテナの移管という思いがけない形で実現することになりました。CRLからGSIへ鹿島26mアンテナを移管するような流れになったのも、NASAとGSIの研究協力の方向性がはっきりしていた、ということがあったからではないかと思います。

#### 4. 研究者の交流

DOSEへの参加提案をしたことで、GSIとNASAやNGSとの間で人の往来が増加しました。1990年9月に、NASAのC. Ma氏との連絡役であった松坂係長が2週間の予定でNASAを訪問し、VLBIの解析ソフトウェア及び小型VLBIに関する研究交流を行いました。また、松坂係長は1990年10月から1年間NGSのカーター氏のもとへ長期在外研究員として留学されました。私も、1991年3月に渡米し、ワシントンでNGS、NASAの本部及びゴダードのCDPオフィスを訪問し、研究協力についての打ち合わせを行いました。海軍天文台の相関センターやNOAAの次世代型超音波験潮儀を試作している研究室等を訪問しました。また、カーター氏の論文に出てくるVLBI観測点とそれに関連付けられた験潮場の中で、マイアミ郊外のリッチモンド観測所とマイアミ験潮場、ボストン近郊のヘイスタック観測所、ウェストフォード観測所とボストン験潮場等留学中の松坂さんと一緒に視察しました。各観測所には、GPS連続観測点はもちろんのこと、SLR点、絶対重力点、超電導重力計等があるのを興味深く見学しました。帰路、ハワイのキーパーク観測所と近くの験潮場にも立ち寄りしました。

1991年10月に開かれたNASAのCDP研究代表者ワーキンググループ会合には、GSIから初めて松坂、飛田君が参加しました。

また、1990年度にはNGSのカーター氏を、1992年3月にはNASAの解析ソフトの専門家であるJ. Ryan氏をGSIに招へいしました。Ryan氏はたいへん気さくな方で、「柳仙」という焼き鳥屋で楽しく酒を酌み交わしたことが印象的でした。米国以外では1991年、IERSの事務局を担当していたフランスIGNのC. Boucher氏とP. Willis氏がDORISの装

置を日本に設置する件で、英国の海洋学者D. Pugh氏が驗潮に関する件で、GSIを訪問されるなど、著名な研究者との交流もありました。

また、中期在外研究員として1991年11～12月オランダ測量局を訪問し、海面変動のモニタリングと関連する測地技術についてワークショップに参加しました。オランダでも当時VLBI点、SLR点、絶対重力測定点、驗潮場をつなぐGPSのネットワークが構築されていて、それらの観測所の見学をしました。横道にそれですが、オランダの驗潮場で見た驗潮儀は、フロートの上下運動による滑車の回転をベローズでロータリーエンコーダーに伝える構造で、私が驗潮係長であった1983年に設計したGSIの驗潮儀と同じ構造だったので、びっくりしたと同時にうれしくもあり、オランダへの親近感を覚えました。

#### 5. CRLとの共同研究の展開と26mアンテナの移管

CRLは、GSIがVLBIの整備を始めて以来、ハード面でもソフト面でも常に全面的にGSIの支援をしてくださいました。私がVLBIの担当室長の時は、CRL小金井の高橋富士信氏、鹿島の杉本室長、今江室長には大変お世話になりました。鹿島26mアンテナとGSI 5 mアンテナとの間のVLBI測量は、私の在任中父島（1989年）、新十津川（1990年）及び水沢（1991年）において、CRLの技術指導をいただきながら共同研究として実施されました。

それ以外にも、1989年度には測地技術開発室の職員を1名、鹿島に3か月ほど技術研修のため受け入れていただきました。そのせいかCRLとGSIの風通しがずいぶん良くなったように感じました。

また、1991年日韓測地協力会議においてVLBI観測の実施が協力テーマに取り上げられたことを受けて、CRL雨谷氏にご協力いただき、一緒に韓国の国土地理情報院と電波研究所を訪問し、VLBIを実施するための実行可能性調査をしました。また、インチョンの水準原点や驗潮場の見学をしました。

1990年には、前述の地球環境研究総合推進費による研究にCRL高橋幸雄氏と共同で取り組みました。また、同年8月にCRLから思いがけず鹿島26mVLBIアンテナの移管のお話をいただきました。GSIがVLBIにおけるNASAとDOSEでの共同研究協力を推進しようとし大型アンテナを必要としていること、及びCRLでは34mアンテナの運用が行われ26mアンテナの必要性が低下したこと等の状況を勘案して、このような移管という提案になったと記憶しています。CRLの提案以後、GSIが大型アンテナを必要とする理由の整理、大型アンテナの新規要求の可能性、26m移管の場合の維持管理の問題点の検討等1992年度の概算要求に向けて、CRLとの綿密なる打ち合わせを重ね、1991年6月24日の院議でGSIとしてアンテナの移管事務を正式に進めることが決定されました。移管に関する大蔵省財務局の承認を得る事務手続き及びGSIの26mアンテナを運用したVLBI国際観測の予算要求が承認されたことを踏まえて、GSIは1992年度、正式に26mアンテナの

移管を受け、いよいよ国際観測に参加するということになったのです。

### 「鹿島での作業雑感」(小坂橋勝)

VLBI に始めて接するのは平成4年(1992)。GPS が地理院に本格導入されてまだ数年。「VLBI とは?」。全く未知の世界との遭遇だった。

最初の仕事はマークⅢレコーダを筑波から鹿島へ運搬することだったと記憶する。当時は鹿島26mアンテナを使用して国際観測に参加を始めた時であった。

フロントエンドにバックエンド。その他、配線が多数。本当に何をやるのか、他の人がやっているのが全く不明だった。

国際観測で使用するマークⅢレコーダを高密度版に更新したとはいえ、4時間でテープ交換。地理院から行った3人が交代しながら24時間の連続観測。地理院より持ち込んだマットレスをバックエンド横にあるテープ保管庫の床に敷き、カビ臭い部屋で毛布にくるまり仮眠を取った。まだ若かった自分でも徹夜に近い観測はしんどかった。仮眠中に起こされる事もしばしばだった。「テープ交換を失敗した」「アンテナがリミットになり止まった」「アンテナのヒューズが切れた」・・・などなど。

これらのトラブルに始めのうちは対応できず、CRLの人を呼ぶ事となる。夜中であるうが、観測データを欠くわけにもいかず、申し訳ないと思いながら、呼ぶしかなかった。

小山さん、栗原さん、雨谷さん、近藤さん、高橋(幸雄)さん、等々。その都度、トラブルの対応を教えてもらいながら、それをメモにする。人事異動があっても教えてもらった事を後任者に引継ぎ、無駄にしないように考えた。しかし、限界がある事も事実だった。

「地理院さんに教えても、すぐ人が変わるからまた教えなきゃいけないだよーね・・・」と言われた事もあった。でも、それを言われるのは1度だけ。それ以降は本当に嫌な顔をせず対応していただいた。

国内観測の後は相関処理である。これもまた、CRLのマシンを借りる事になる。「FRINGE」。あまり馴染みのない言葉に出くわす。ウィンドウズですら一般的ではない時代。世間ではまだほとんど普及していないインターネットに接続し各種パラメータの取得。FRINGEなるものが理解でき、それが出たときは正直嬉しかった。

相関処理は観測と同じ時間がかかる。24時間にわたってテープを交換する。ここでも止まる事がしばしば。別室で研究に打ち込んでいる小山さんたちを呼び出すことになる。

「すみませーん。また、止まったんですがー」、「すみませーん、FRINGEが出ないんですがー」。アンテナ運用と同じく、親切丁寧に対応していただいた。

当時は成田主任と二人、観測や相関処理のため、頻繁に鹿島町(現鹿嶋市)を訪れた。まだJリーグもなく、少し寂しい町だったが、「とんかつ」の旨い店があり、よく食べに行った。

やっとの思いで相関処理を終え、次はデータベース作りである。相関処理の延長戦で

あるが、相変わらず理解できない言葉が飛び交う中、何とか作り終え、筑波まで帰宅の途に付く。

筑波で、小さな DAT テープに入ったデータベースを、松坂さんと飛田さんに渡せば私達の任務は終了となる。ここから先は、松坂さんと飛田さんの出番。最後の解析が待っている。二人が地理院のワークステーションにデータベースを読み込んで呪文を唱えると、あら不思議、答えが出てくるのであった。

「アンテナ周辺に人がいない事」「車の窓が閉まっている事」「最低これだけは確認を怠らない事」と最初に言われたことを思い出す。26mアンテナ運用での最重要事項。それは、一番始めにアンテナを傾けて、たまっている水を排出する事だった。

### 3. 22. 7 世界測地系導入への貢献

#### (1) 測地網の規正・VLBI開始前【～昭和60年】

昭和55年(1980)3月に米国を訪問した藤田尚美・地殻調査部長は、帰国後、「宇宙技術の測地利用」と題した文を日本測量調査技術協会の機関紙、APA(No14-4、1981.1.1)に記した。彼は、その中で、基準点の“昭和成果の確立”について言及した。

「昭和49年度から日本列島精密測地網測量が開始され、すでに全国の約半分程度がカバーされ、昭和58年には概成の予定である。これはレーザー測距儀を用いた距離測定を主としたもので、従来の三角測量の倍以上の精度をもっている。しかし、これといえども、原点から離れるに従って日本列島のはずれではかなりの誤差が累積してしまう宿命を背負っている。この精密測地網測量の結果を精度よく地球楕円体にはりつけるには、どうしても宇宙技術を駆使せざるを得ない」。

そして、結びで、「VLBI による超精密測地網の確立およびその変動を知ることが出来れば、昭和成果の確立はもとより、極運動、地球回転、プレートテクトニクス、地震予知の分野に画期的な資料を提供することになろう。」と、地理院が取るべき対応の想いを記した。

当時、日本の測地原点(経緯度原点)の位置は世界的にみた場合、南東の方向に 500m 程度ずれていることが分かっていた。しかし、この正確な偏位量は不明だった。更に、原点から遠く離れた北海道や九州の一、二、三等三角点の成果は、原点の“ずれ”がなくとも、10m 程度の位置誤差があるだろうと考えられていた。その原因は、測量誤差の累積と日本列島の地殻変動の影響によるものとされた。

当時用いられていた基準点成果は、明治から大正にかけて行なわれた一～三等三角測量のデータを用いて計算されたものだった。この成果は、東京の測地原点で明治に行なわれた天文測量で得られた経緯度を基準とした。

この基準点成果を「実用成果」と言った。基本測量や公共測量などで利用する公式成果だ。一方、地震などで地殻変動が生じた場合、再測量を行なったが、この場合でも、「実用成果」は、変更しないで、旧来の成果をそのまま公式的成果として用いることが多かった。新たに計算さ

れた成果は、「学術成果」と呼び、地震予知研究などの学術的な目的のみに使用した。

原点の“ずれ”の信憑について、一つの事例として、昭和40年(1965)に測地部の鈴木弘道・測地第一課長は、地理院時報第29集の「人工衛星と測量」の中に次のことを記した。

「明治以来日本では東京を原点として三角測量が行なわれ、三角網は西へ延びて九州から壱岐対馬を経て朝鮮半島に北上した。一方満州では、新京を原点とする三角測量が行なわれた。両方の三角網が朝鮮の国境で結合されたとき、両測地座標系の間には系統的な差が見出された。それによれば東京原点をもととする経緯度は、新京系に比し、緯度は約十秒南にあり、経度は約十七秒東にあった。従って点の位置としては、約五百米南東にずれることになる」。



写真-24 スウェーデンAGA社製のジオジメータ8型。1968年から地理院に導入され、光波測距儀の主力機器として、精密測地網測量などに使われた。写真は鹿野山測地観測所の別館屋上で撮影。レーザー光を明瞭にするため、タバコをくゆらした。背景の夜景は、木更津と東京湾を隔てた東京

測地測量の関係者は、「日本測地原点の確立」や「日本測地網の規正」が念願だった。藤田が思い抱いた“昭和成果”の実現である。これに対応すべく、地理院は、精密な基準点成果の整備と全国的な地殻変動の様相把握のため、「日本列島精密測地網測量一次基準点測量」(以下、精密測地網測量と略す)を開始した。昭和49年(1974)のことである。この測量は、光波測距儀(写真-24)を用いた辺長測量を主体としたもので、昭和59年(1984)に全国を一巡した。測地網は約2,900点で構成され、約8,300辺が観測された。この測量は、その後も繰り返し行われた。

昭和57年(1982)、吉村好光・測地第二課長補佐は、精密測地網測量が進む中での VLBI 網の形を検討した。方法は、精密測地網測量で用いられた三辺測量を主体とする三角網に VLBI 基線を逐次付加し、三角点の座標精度の向上の様子を見積もるといったものだった。

彼は、「沖縄を除く全ての三角点が絶対精度 30cm以下、相対精度 1ppm以内で決定するためには、2辺(筑波-新十津川、筑波-鹿屋)の VLBI 基線があれば充分である。」との結論を得た。もし、VLBI での規正を入れない場合、「日本の南北両端での座標誤差は3mを超える」との結果も得た。

吉村は、この研究成果を昭和58年(1983)1月、「測地網規正への VLBI 利用の立場から」と題して、「位置天文学における新技術研究会」集録に記した。

精密測地網測量を始める6年前の昭和43年(1968)、地理院は、光波測距儀や経緯儀を用いた全国規模の測量、「弧長測量」を開始した。昭和47年(1972)からは、この測量を引き継ぐ形で、「GDP 高精度トラバース測量」を行なった。これらの測量は測地第二課の基線係が担当し、昭和55年(1980)まで続いた。

新十津川、鹿野山、鹿屋の人工衛星観測点を「地上測量」で結合すること、地殻変動の把握が目的だった。弧長測量や GDP 高精度トラバース測量、精密測地網測量など地上どうして行なう測量を「地上測量」と呼んだ。GDP とは「国際地球内部ダイナミクス計画」を略したものだ。



写真-25 GSI 型人工衛星写真赤道儀(鹿野山測地観測所にて。昭和 38 年度配備)。人工衛星(エコーなど)の飛跡を、恒星をバックに写真撮影し、衛星の位置を求めた。本土の観測点と離島などの観測点で同じ衛星を同時に観測し、離島位置の決定などに寄与した。地理院・水路部・東京天文台による共同観測も行われた

この測量を開始する背景の一つとして、地理院は、昭和41年(1966)より、鹿野山など3箇所の人工衛星観測点や隠岐島などの離島で、光学観測による測地衛星観測を行っていた(写真-25)。測地第二課の人工衛星係や鹿野山測地観測所が担当した。離島位置の本土測地網への結合や測地網の規正が目的だったが、人工衛星観測点間の「地上測量」による高精度な弧長測定が、別途、必要だった。

昭和56年(1981)、海津優・基線係長は係員の川口保とともに、「弧長測量」と「GDP 高精度トラバース測量」の成果を用いて全国同時網平均計算を行なった。そして、実用成果と比較し、実用成果の変動ベクトルを明らかにした(図-7)。これにより広域での実用成果の歪みがおぼろげだが、明らかとなった。

海津(62)は、「験潮の結果から、輪島(石川県)が長期的にきわめて安定であること、原点に近い油壺(神奈川県)は、フィリピン海プレートの沈み込みの影響で6mm/年、程度で沈み込みが続いていることを考慮して、石川県にある宝達山(ほうだつさん)を固定点とした。実用成果に対する改正量であるが、大まかにいえば地殻変動による変動が見えている。と、当時考えた」と語る。

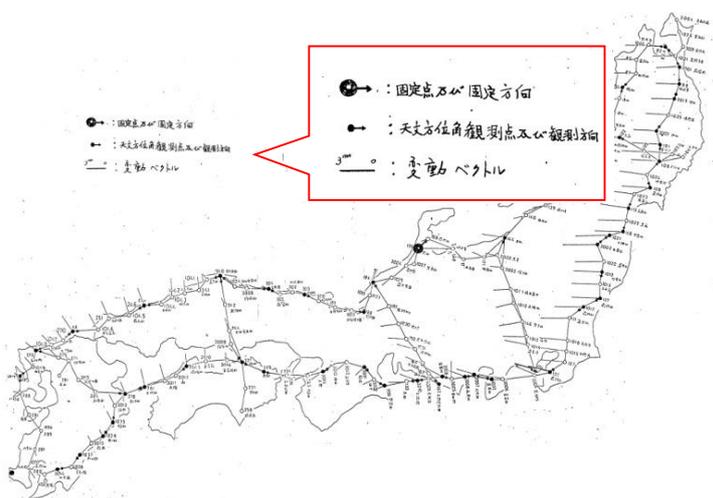


図-7 海津優と川口保は、「GDP 高精度トラバース測量」などの測量結果と実用成果を比較し図示した。図には、各観測点における変動ベクトルが示されている。赤枠内は図のスケール部分を拡大表示した

## (2) 測地網の規正・VLBI開始後【昭和61年～平成4年】

昭和61年(1986)10月、宮崎-鹿島間で初の VLBI 観測が行なわれ、その結果が明らかにな

った。測地技術開発室の川口保・応用測地係らは、宮崎-鹿島における GDP 高精度トラバース測量などの「地上測量」との比較を試みた。海津と川口が使用した全国同時網平均計算データとVLBI成果との比較だ。この時、精密測地網測量のデータも一部使用した。

「地上測量」の結果には「RAPP81」と呼ばれる当時としては比較的高精度なジオイドデータを加味した。結果、両者の基線長は11cmと、極めて良く一致した(表-9)。川口らは実用成果との比較も試みた。4.38mの違いだった。

観測・計算手法	基線長	VLBIとの差
VLBI観測	948,551.35m	
地上測量(ジオイド考慮)	948,551.24m	-0.11m
地上測量(ジオイド無視)	948,550.74m	-0.61m
実用成果	948,555.73m	+4.38m

これにより、川口らは、VLBIによる測地網の規正で、日本国内の三角点の精度向上が可能であるとの感触を得た。川口は、この

表-9 VLBI アンテナ間(宮崎-鹿島)の VLBI による基線長と「地上測量」及び実用成果による基線長の比較結果

結果を昭和62年(1987)5月19日、測地学会第67回講演会で報告した。齊藤隆、新田浩、吉村好光、松坂茂が共同研究者として名を連ねた。この頃、川口は、測量が進行中の精密測地網測量のデータと VLBI の比較も行いたいとの希望を抱いていた。

昭和62年(1987)5月23日、VLBIを担当している測地技術開発室に測地情報開発係が新たに発足した。白井康友が初代の係長になった。測地情報開発係は係長一人だけの係りだった。通常国会での予算案審議が売上税法案問題をめぐって大幅に遅れ、本予算は5月20日ようやく成立した。このため、測地情報開発係は年度初めの4月1日ではなく、5月23日の発足となった。

係長に就いた白井には、「測地観測量総合網平均に関する研究」と称する VLBI 成果を用いた「日本測地網の規正」の研究が任された。彼は、吉村好光・測地技術開発室長と協力し、研究を進めた。

白井と吉村は、平成元年(1989)、「VLBI による測地網の規正」と題した研究成果を地理院時報(1989 No69)に記した。ここでは、第1回目の精密測地網測量と VLBI による宮崎-鹿島基線と筑波-鹿島基線の成果を用いた。二人は VLBI を用いた「日本測地網の規正」の諸端を開くとともに、川口保が希望した、「VLBI と精密測地網測量の比較」を叶えた。

この時、時代は昭和から平成へと移り変わっていた。藤田が思い抱いた“昭和成果”は、実現していなかった。明治時代に行われた基準点成果の構築に相当する新たな基準点成果が構築されるまで、今しばらくの歳月が必要だった。

地理院は、“昭和成果”ではなく、“平成成果”の早期構築を目指し、院内で組織的な検討を開始した。平成元年(1989)9月のことである。

この組織を「基準点体系分科会」と言った。分科会は宮崎大和・参事官が会長を務めている「国土地理院技術協議会」の下に立ち上げ、平成元年(1989)9月20日、第1回目の会合が開かれた。初代の分科会長は石井晴男・測地部長だった。分科会は事務局員8名を含めて測地

部・地殻調査部・企画部所属の22名で構成された。構成員のほとんどは、地理院内で、“測地系”と呼ばれる人達だった。石井の後、野々村邦夫・測地部長(平成2年度)、井上登・測地部長(平成3年度)、西修二郎・測地技術調整官(平成4年度)が引き継ぎ、平成5年(1993)3月までの3年半の間に9回の会議が開かれた。

分科会の取りまとめは、中堀義郎・測地技術開発室長、齊藤隆・測地部研究官、今給黎哲郎・測地部研究官が代々行った。そして、平成5年(1993)3月29日、最終報告書、「新しい基準点体系を求めて」が柴田正雄・技術協議会長(参事官)に提出された。

そこには、「測地基準点の目的は、『いつでも』『どこでも』『必要な精度で』位置の情報の基準を提供することである」とうたった。

そして、これを実現するため、「電子基準点」の整備が提案された。具体的には、「(今後10年間で)標石基準点の再構成と50点程度の電子基準点の設置をめざすべき」とした。

更に、報告では、「平成成果を早期に構築し、地球重心座標系、日本測地系、双方での座標値を提供できる電子的なデータサービス体制の確立をめざす」。「今世紀中を目標とし、2001年には新しい成果を公表する」。「VLBIによる観測点を最高次の基準点として、グローバルな座標系に結び付けられた座標を提供できる基準点体系とする」。「国内 VLBI 観測により、測地網の規正を行なう」といった内容も盛り込まれた。

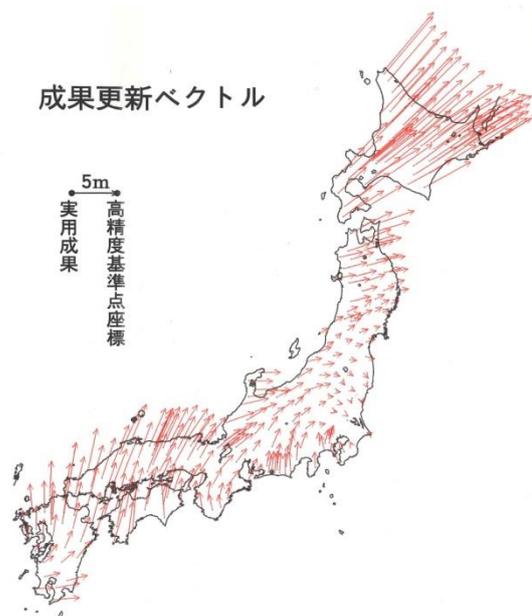


図-8 飛田幹男は、VLBI 成果と精密測地網測量の結果を用いて、基準点成果(実用成果)の特徴を明らかにした。上図は飛田が1992年5月29日の「技術研究発表会」で使用した(飛田幹男提供)

基準点体系分科会で検討が続く中、測地情報開発係では、“平成成果”構築の研究と実務を進めていった。測地情報開発係長は、白井康友から宮崎清博(平成2年4月～)、飛田幹男(平成3年4月～)と引き継がれた。

飛田は、平成3年度まで行った VLBI 国内移動観測と精密測地網測量の結果を用いて、全国測地網平均計算を行った。結果、約20cmの精度の全国高精度基準点座標を試算した。同時に、三角点などの基準点成果(実用成果)の特徴を定量的にとらえた。この結果は、平成4年(1992)5月29日の「第21回 国土地理院技術研究発表会」で報告した(図-8)。

飛田がこの研究を成し遂げるには、それまでに蓄えられた精密測地網測量の観測値、約1万8千個について、ひとつひとつ注意深く点検することが必要だった。前任の宮崎清博は、膨大な量の精密測地網測量データを丹念に整理していた。飛田(52)は、「前任の宮崎さんによる緻密な作業が無ければ、自分の研究は成り立たなかった」と語る。

飛田はその後、この研究を継続、発展させ、「筑波測地系 1992(基準点座標92)」(平成6年)や「Tokyo97(TKY2WGS for Windows)」(平成10年)、「TKY2JGD for Windows」(平成12年)を次々に完成させ公表した。

これらの成果は、平成14年(2002)の世界測地系の導入に繋がるものとなった(図-9)。

### (3) 測地成果 2000 と VLBI 成果【平成5年～13年】

地理院は「基準点体系分科会」で示された方針に沿って、「新たな基準点体系の構築」の準備を進めた。平成5年(1993)には、「平成成果構築検討委員会」が測地部内に立ち上げられ、技術的な検討を開始した。平成7年(1995)3月6日、平成成果の具体的構築方法が検討委員会より示された。「基準座標系は、“日本測地系(ベッセル)”と“世界測地系(ITRF系)”の二つの成果を提供する。「楕円体原子と経緯度原点数値はそのまま(旧来のまま)とし、法令はなるべくいじらない立場をとる」といった内容だった。

これより2ヶ月前の平成7年(1995)1月17日、兵庫県南部地震(阪神淡路大震災)が発生し、大きな被害をもたらした。これを境に、電子基準点の全国整備やVLBI固定観測局(写真-27、28)が補正予算によって早いスピードで進められた。特に、10年間で50点整備するとされていた電子基準点は、平成7、8年度の2年間だけで677点整備された。この事も相まって、新国家基準点体系構築の実現性が高まり、平成9年(1997)3月、再度、基準点体系分科会を立ち上げた。

この分科会を「基準点体系分科会(Ⅱ)」と言った。平成元年(1989)に「基準点体系分科会」を立ち上げた時には、後に、再度「基準点体系分科会」が立ち上がるとは想像していなかった。そこで、両分科会を区別するため、別の名前をつける必要があった。新たな分科会を「基準点体系分科会(Ⅱ)」と呼び、最初の分科会を「基準点体系分科会(Ⅰ)」と呼ぶこととした。

分科会(Ⅱ)は、平成10年(1998)3月までの1年間行われ、12回の会議が開かれた。分科会の取りまとめは齊藤隆・測地技術調整官が行なった。基準点体系分科会(Ⅰ)と比して、短期間だが、精力的な開催となった。分科会には、本院内のすべての部・センターが参加し、院の総

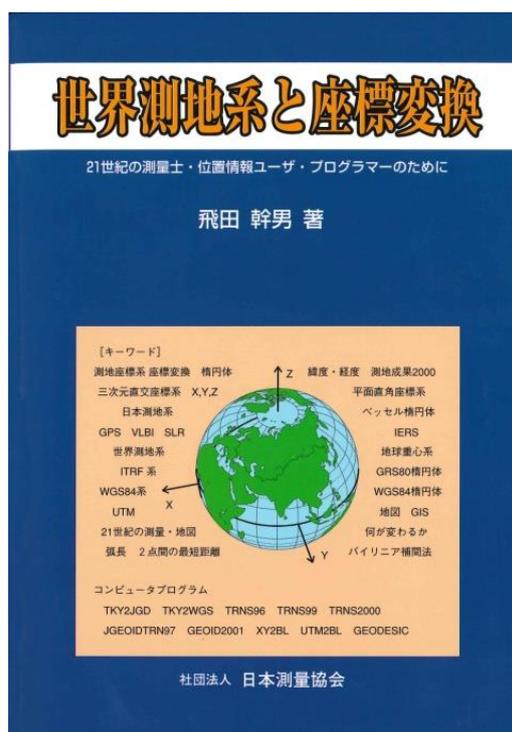


図-9 飛田幹男は、当時なじみの薄かった世界測地系への抵抗を減らし、再測量と比べ安価な座標変換を普及させることを目的に、「世界測地系と座標変換」を著作した。この本は、Tokyo97, WGS-84, ITRF 等の座標系その他、変換パラメータ、具体的な計算式、プログラム等が紹介されており、世界測地系導入を支援した。

力をあげた取り組みとなった。

分科会には、法律の改正事務に精通した総務部の谷川通夫・調整官も加わった。谷川は、平成8年(1996)6月1日に建設本省河川局より異動となり、この役職に就いていた。

平成9年(1997)9月1日、矢口彰は、測地観測センター長から、同日付けで辞職した塚原弘一の後を引き継ぎ、測地部長に就いた。これと同時に分科会長も引き継いだ。矢口が引き継いだ間際の10月にまとめられた中間報告では、「世界測地系を導入する」との結論は見いだせていなかった。“測量法の改正”を伴うことが大きな足かせになっていた。

齊藤隆(56)は、「平成9年10月の分科会(Ⅱ)の中間報告書のとりまとめまでは私が行いましたが、その後から翌年の3月半ばまで、私はオーストラリアで在外研修中でしたので、最終報告書の取りまとめにはかかわりませんでした」。「この間は、分科会に設置された各WGが中心的に活動をしていたかと思います」。「私の研修の内容は、オーストラリアで進行中だった世界測地系への移行の状況を視察して、日本での導入の参考とするものだったので、分科会の内容と関係は深かったのですが・・・」と語る。

一方、分科会長だった矢口(65)は、この当時の様子について、「分科会長に就任するまでは、新たな基準点体系の構築に関して特別の関心はありませんでした」。「当時、『日本測地系を世界測地系に変更するには、国会審議が必要で、簡単な事ではないのでは』などの意見を耳にしました」。(測量法の改正について)「谷川さんにも意見を聞きましたが、同様に、『簡単な事ではない』との返事だったように思います」と語る。

矢口は熟慮を重ねた。そして、「世界測地系を導入する必要がある」との想いに至り、困難が伴うだろうが、「法律を変え世界測地系を導入する」との方針を固めた。

平成10年(1998)3月、最終報告書の説明を行なうため矢口は、オーストラリアから帰国した齊藤と共に野々村邦夫・院長の元を訪れた。矢口は、「測量法の改正を目指したい」との考えについて、野々村に意見を仰いだ。「野々村院長は、『測量法の改正をへたに打ち出して、つぶれたらこまる』と慎重な様子もあったが、反対はされなかった」と矢口は語る。

齊藤も、この時の様子について、「矢口部長が、野々村院長に今後の方針の確認を求めて、測量法改正を目指すことになったと記憶しています」と語る。

平成10年(1998)3月20日、基準点体系分科会(Ⅱ)の最終報告書、「新しい日本の位置基準 測地成果 2000」は完成した。そこには、「世界測地系の採用については、一部に時期尚早とする考え方もあるが、・・・世界測地系の採用を行なうことが適当と考えられる」と記されていた。また、「世界測地系での基準点体系を“日本測地系 2000”、これにより求められた基準点成果を“測地成果 2000”という」といった内容も記されていた。

地理院は、これを境に、測量法の改正を伴う“世界測地系の導入”に踏み出すことになった。

測地成果2000構築のための実務である基準点成果作成作業は、測地第二課が進めた。この内のVLBIは福崎順洋が担当した。この作業に引き続き、電子基準点は越智久巳一、三角点は丸山一司・成田次範・嵯峨諭・加川亮が担当した。杉田要・測地第二課長補佐が全体の取りまとめを行った。新しい成果の公表時期(目標)を西暦2000年としたので、実務に費やせる時間は限られていた。

測地部では実務作業と平行して、「測地成果2000の構築に必要な事項の検討解決」を目的とし、「測地成果2000構築推進会議」を設立した。そして、平成10年(1998)6月24日、第1回会議を開催した。会議の取りまとめは測地技術調整官(齊藤隆・村上真幸・松村正一・今給黎哲)が代々担い、平成14年(2002)3月まで、延べ、32回開催した。

平成9年(1997)4月、福崎は、飛田幹男・測地第二課長補佐から、世界測地系導入に必要なVLBI観測結果の決定(座標の算出)をまかされた。福崎に与えられた作業期間は、電子基準点等の後続の計算作業があるので、3ヶ月程度だった。この時、測地第二課の課長補佐は、飛田と杉田の二人が務め、飛田がVLBI関連業務の取りまとめを担当していた。福崎(46)は当時の作業の様子を次のように振り返る。

#### 「世界測地系導入に伴うVLBI各局の座標算出」(福崎順洋)

当時、鹿島26m局が、国際観測に参加するとともに国内観測の主局として使用されていたので、まず、鹿島26m局の座標値が、世界測地系導入の基準の点(いわば0級基準点のようなもの)とされた。また、国内VLBI観測によって決められたVLBI観測局の座標を、その後の電子基準点の座標算出時の与点(固定点)として用いる構想であった。

まず、鹿島26m局の座標を算出するために、ITRF94に記載されている座標値及び速度値を用いて、元期(epoch)1997.0における鹿島26m局の座標を求めた。求め方は、ITRF94に記載されている値が元期1993.0として決められているので、元期を1997.0に変更するために、4年分の移動速度を計算(すなわち、\*\*mm/year×4year)して、その値をITRF94の座標値に加算した。

次に、新十津川局、海南局、宮崎局の座標を求めた。この3局については、1993年(H5)～1997年(H9)にかけて取得された観測データが残っていたので、相関処理及び基線解析を実施して、各局の座標値を求めた。この時は、測地成果2000構築に間に合わせるために導入した新型相関器(いわゆるKSP相関器)を急遽立ち上げて、当該データの相関処理を進めた。また、基線解析の際は、既知局座標として上記で求められた鹿島26m局の座標値(元期1997.0)を採用した。これはすなわち、その後、新十津川局及び海南局の座標値も電子基準点の座標算出の与点となったので、鹿島26m局が、日本の新測地系(測地成果2000)の実質的な原点となった、と言える。

電子基準点を規正するデータを得るため、昭和61年度から行われた全国の超長基線測量のデータを現在のシステムで再処理し、平成9年(1997年)1月1日を元期とする、鹿島VLBI観測点を基準とした各VLBI観測点の座標を算定した。ただし、個々の観測点については下記のような状況があることから、電子基準点座標の基準としては鹿島、新十津川、海南の3局とした。なお、測地成果2000の最終値の算定にあたって、始良や父島及び今後予定される宮古島での観測値等の最新データの導入を妨げるものではない。

新十津川	平成2年、6～9年の観測値があることから問題なし。なお、速度ベクトルはITRF94に示されている値を使用
水沢	平成3年の観測値のみ、速度ベクトルは鹿島のものを使用
鹿島	ITRF94座標が示されており問題なし
相良	平成4年の観測値のみ、速度ベクトルは鹿島のものを使用
海南	平成5年の観測値のみ、速度ベクトルは鹿島のものを使用
磯波	平成6年の観測値のみ、速度ベクトルは鹿島のものを使用
新富	昭和61、63年、平成5年の観測値があるが、平成8年末の日向灘の地震での変動が大きく、電子基準点の規正には不適切
始良	新観測値未入手
父島	昭和62年、平成元年の観測値があるが、電子基準点網との結合によりトブコン(アシュテック)観測網とトリプル観測網とを乖離させる可能性が大きい

一方、過去に1度だけ移動観測が行われた局については、移動速度を求めることができないため、ITRF94に記載されている座標値を、そのまま採用した。

相関処理及び基線解析の作業は、当時基線解析係の係員であった、高島(和宏)と共同で行なった。福岡と高島が両者別々に解

図-10 基準点体系分科会(Ⅱ)内に設置した、新成果構築準備会では、測地成果2000で使用するVLBI観測点を検討した。(基準点体系分科会(Ⅱ)中間報告より抜粋)

析を行ったため、結果にミリメートル単位で差異が生じた。苦慮した末、双方の値

を平均するという方法に落ち着いた。現在では、この点を改善して、係員(あるいは業務受託者)が解析した結果を、係長が点検する、という手順で定着している。

私が担当したのは、VLBI各局の座標算出までであったが、その後、基準点体系分科会(Ⅱ)などの議論を経て、最終的には、測地成果2000構築のために採用されたVLBI局は、鹿島26m局、海南局及び新十津川局の3局であった(図-10、写真-26)。



写真-26 左から、鹿島26m局、海南5m移動局、新十津川3.8m固定局。測地成果2000では、これら3局のVLBI局の座標が使われた。

測地成果2000では、VLBIの西日本における固定点として海南観測点(和歌山県)を使用した。これより西にある新富(宮崎県)

は平成8年(1996)に起きた日向灘の地震による影響があるため、使用できないという事情があった。だが、海南では平成5年(1993)に1度しか観測をしていなかったため、元期を1997.0に変更するための移動速度ベクトルが定かでなかった。熟慮した結果、鹿島26m局の移動速度ベクトルを用いた。関係者は、この判断が正しいか一抹の不安があった。

新たに整備したVLBI始良局(鹿児島県)でVLBI観測を開始したのは、平成9年(1997)8月

なので、福崎の座標算出作業には、始良の VLBI 成果は間に合わなかった。この後、平成10年(1998)、石原操・測地第二課専門職は、測地成果2000の確認を行った。方法は、始良 VLBI 観測局の位置座標につて、VLBI 成果と近傍の電子基準点より GPS 観測で決定した測地成果2000による成果の比較である。結果、東西成分で8mm、南北成分で10mm、上下成分で29mmしか違わなかった。この結果に、石原も含め関係者一同、安堵した。

#### (4) 改正測量法の成立【～14年】

平成13年(2001)6月12日、第151回国会の衆議院本会議で、我が国の経緯度を日本測地系から世界測地系へと移行させることについて審議がなされた(図-11)。これが、世界測地系導入の最後の関門だった。

午後一時三分開議
○議長(綿貫民輔君) これより会議を開きます。
○議長(綿貫民輔君) 日程第一、測量法及び水路業務法の一部を改正する法律案を議題といたします。委員長の報告を求めます。国土交通委員長赤松正雄君
赤松正雄君 ただいま議題となりました法律案につきまして、国土交通委員会における審査の経過及び結果を御報告申し上げます。
本案は、測量及び水路測量の基準に関する世界標準化の進展等を踏まえ、所要の措置を講じようとするものであります。その主な内容は、
第一に、測量法において、基本測量及び公共測量における経緯度は、世界測地系に従って測定しなければならないこととする、
第二に、水路業務法において、水路測量は、経緯度については世界測地系に、その他の事項については政令で定める基準に、それぞれ従って行わなければならないこととするなどであります。
本案は、参議院先議に係るもので、去る五日本委員会に付託され、翌六日扇国土交通大臣から提案理由の説明を聴取し、八日質疑に入り、世界測地系への移行が国民生活に与える影響、改正内容の周知徹底を図る必要性等について質疑が行われました。同日質疑を終了し、採決の結果、本案は全会一致をもって原案のとおり可決すべきものと議決した次第であります。以上、御報告申し上げます。(拍手)
○議長(綿貫民輔君) 採決いたします。本案は委員長報告のとおり決するに御異議ありませんか。〔「異議なし」と呼ぶ者あり〕
○議長(綿貫民輔君) 御異議なしと認めます。よって、本案は委員長報告のとおり可決いたしました。

図-11 第151回国会の衆議院本会議での測量法及び水路業務法の一部を改正する法律案の審議(衆議院議事録より引用)

○矢野政府参考人 ただいま地球の姿の話がございましたけれども、これは地球の天体観測、天文観測でこういう形だということを想定して測量しているということなんですが、人工衛星が飛ぶようになりまして地球の重心の位置が正確にわかるようになった。また、地球の大きさも、従来想定されていたよりも、楕円形の長い方の軸が七百四十メートルぐらいは長いということがわかってきたということでもございまして、そういう部分で過去のものとずれている、そこを動いているという表現にはなりますけれども、そういうことで、技術そのものが進んだ結果として地球の姿がよくわかってきた。また、地球の中の大陸間の問題にしましても、例えばハワイが日本に年間六センチ近づいてきている、こういうような測量もさせていただいているということで、地球の姿全体が少し変わってきている、あるいは地球の中の大陸間の位置関係も変わってきている、こういうようなことが今技術が進んだ結果わかってきた、こういうことでございます。
--

図-12 衆議院国土交通委員会の質疑(衆議院議事録より引用)

衆議院本会議の4日前、6月8日の衆議院国土交通委員会の質疑に、矢野善章・国土地理院長は政府参考人として出席した。矢野は、それまで蓄積してきた鹿島26mアンテナが捉えたハワイと鹿島間の VLBI 成果を答弁に盛り込んだ(図-12)。

「測量法及び水路業務法の一部を改正する法律案」は平成13年(2001)6月12日、可決成立した。その後、6月20日に公布され、翌、平成14年(2002)4月1日に施行された。

昭和時代からの測地測量の課題だった、①国内測地網の規正、②離島位置の決定、③日本測地原点の確立は、この日、4月1日に結実した。

地理院の村上真幸と海洋情報部の仙石新は、測地学会誌、53巻第1号(2007)の「世界測地系への円滑な移行」の中に、次の一文を記した。

「国土地理院と海上保安庁海洋情報部は1980年代から宇宙測地技術の開発と実用化に取り組んできた。国土地理院はVLBI、海上保安庁はSLRとそれぞれ異なる技術に取り組んでいるが、両技術は世界測地系構築の上で相補的な役割を果たしてきている。VLBIは地球重心座標系の方向を正確に決定し、また地球回転パラメータの決定に欠かせないデータを提供する。一方、SLRは地球重心座標系の原点である地球重心の位置を正確に決定し、また座標系のスケールの正確さを保つ上で欠かせないデータを提供する。両機関がそれぞれ異なる技術に取り組んだことにより、わが国は世界測地系構築の国際的な観測活動に大きく貢献している」。

地理院がVLBI、水路部がSLRと、宇宙測地技術でたもとを分かつ日から、二十有余年が過ぎていた。



写真-27 1997年に新たに整備されたVLBI固定観測局。左は始良局(鹿児島県)、右は父島局(東京都)。両アンテナとも直径10mで米国Scientific-Atlanta社製アンテナを使用し、日本通信機が納入



写真-28 1998年に整備されたつくば3.2mアンテナ(茨城県つくば市、国土地理院構内)。製作・納入はNEC

### 3. 22. 8 地理院VLBIの新たな展開【平成7年～平成26年】

平成7年(1995)のとある日、齊藤隆・測地技術開発室長は土肥規男・企画部長より「部長室に来るように」との内線電話を受けた。部長室を訪れた齊藤に向かって、土肥は「次に整備するVLBI固定局はどこにするか」と聞いた。齊藤は「つくばに大型アンテナを作りましょう」と、常々考えていたことを答えた。地理院は平成7年度第2次補正予算に、「VLBI連続観測施設整備費」として、地理院構内に大型アンテナを要望した。

地理院では、5mアンテナなどの可搬型 VLBI システムに代わり、固定型 VLBI 観測局の整備を平成6年(1994)より開始した。最初は、平成7年(1995)2月の北海道新十津川町への3.8mアンテナの設置だった(写真-26)。平成9年(1997)には、直径10mのアンテナを鹿児島県始良町と東京都の父島に設置した(写真-27)。翌、平成10年(1998)3月には、地理院構内に齊藤らが念願していた直径32mの大型 VLBI 観測局(写真-28)が完成した。



写真-29 5mアンテナの前に並ぶ地理院の平成25年度 VLBI 関係者(2013年12月19日撮影)。左より、水野翔太+、高島和宏、石田貴史+、田邊正、原哲也+、村上真幸、福崎順洋、黒田次郎、川畑亮二、栗原忍、中島俊夫+、若杉貴浩(+は、業務委託者)



写真-30 茨城県石岡市内に整備中の VGOS 対応 VLBI アンテナ。アンテナ径13.2m。MTメカトロニクス社製(ドイツ)を使用し、東陽テクニカが納入

VLBI の専門家がなかった地理院において、5mアンテナの開発は独自では不可能だった。それから30有余年経った今、地理院内にも世界に誇れる専門家が育っている。福崎順洋、高島和宏、栗原忍、小門研亮、川畑亮二などだ。

現在、地理院ではこれらの人達と村上真幸・測地部長や田邊正・宇宙測地課長、黒田次郎・宇宙測地課補佐(写真-29)らが VGOS(VLBI Global Observing System) 対応のアンテナを茨城県石岡市内に整備している(写真-30)。世界の中でも先駆的な取り組みで、アジア初の整備である。

「VGOS対応のアンテナは平成26年度中に稼動する」と聞く。5mアンテナ開発当事と質は異なるが、多くの困難を乗り越え、その日を迎えようとしている。

平成26年(2014)3月31日

文責：石原操。本稿作成にあたり、田邊正・小島泉・田中庸夫・栗原忍の諸氏に協力いただいた。

### 3.23 遅延予測値計算プログラム KAPRI への緯度観測所の貢献

真鍋盛二

#### 3.23.1 ことの始まり

緯度観測所 (ILOM) は当時最も精度の高い宇宙測地計測手段として期待され、しかも位置天文学研究の蓄積が生かされる VLBI を光学位置天文観測に続く観測手段として採用する方針を立てたが、ハードウェアを設置することは当面困難と予想されたので、まずデータ解析能力を備えるべくソフトウェアの研究に着手していた。一方、電波研究所では日米測地 VLBI 実験を行うべく NASA Mark III に匹敵する K3 システムの開発を開始した。

測地 VLBI では観測地点の位置を決定することが主目的であるが、緯度観測所はその主要要因である地球の回転と変形の研究では実績を積んでいた。他方、電波研究所は VLBI 技術の実績はあるが、この分野の経験は少なく、両機関が協力することとなったのである。

#### 3.23.2 ILOM の寄与

MERIT Standards にこだわらず最新モデルに基づく地球の回転と変形の計算ルーチン群を作成した。

**地球潮汐** MERIT standard では日周帯のいくつかの周波数について Love 数( $h_0$ )、Shida 数 ( $l_0$ ) の周波数依存性を付加しただけであるが、KAPRI では Wahr の理論式をほぼ完全な形で、また、起潮力ポテンシャルには Cartwright-Taylor-Edden の展開を取り入れた。 $h_0$  と  $l_0$  に関する偏微分係数は計算していない。海洋潮汐をはじめとして潮汐変動は複雑であり、単純に  $h_0$  と  $l_0$  では表現できない上に、より敏感な観測方法が存在すると考えたからである。

**海洋潮汐荷重** MERIT Standards には含まれていない。Farrell の荷重ラブ数と Schwiederski の海洋潮汐モデルに基づき、ILOM で開発された GOTIC で計算された 9 分潮の振幅と位相を取り込んだ。Farrell の荷重ラブ数は Gutenberg-Bullen の地球モデルに基づいているので、1066A モデルに基づく下記 Wahr による章動理論と矛盾するが、それは無視した。地球潮汐と同様の理由で偏微分係数は計算していない。

**歳差** Lieske et al による IAU1977 を採用した。

**章動** Wahr 及び Kinoshita による IAU1980 を採用した。核の粘性及び海洋の影響がある可能性を考慮し、偏微分係数を計算している。

極運動 予測値は IPMS または BIH の観測値を用いるが、精度不足と考えられるので偏微分係数を計算している。

**日周運動及び UT1** 地球潮汐による周期変動 (Yoder et al) を予測値に取り入れている。MERIT Standards は周期 13.7-35 日だが、13.7 日-18.6 年まで取り入れることもできる。

### 3.23.3 プログラム

Mark III の CALC に則ったプログラム構造とコーディングスタイルを採用した。データベースインターフェースも Mark III に準拠している。しかし実体は独自のものである。

## 4.2 プレート運動の検出

日置幸介

CDP (Crustal Dynamics Project)の日米 VLBI 実験が実質スタートしたのが 1984 年、私が VLBI チーム (当時の電波研究所鹿島支所第三宇宙通信研究室) に入った年です。プレート運動が見えるには当時の VLBI の精度 (公称 3cm でした) では最低でも一年の観測期間が必要でした。したがって、プレート運動を「検出」できたのは翌 1985 年、鹿島が相関処理を担当した 1985 年の 5/15-16 にかけて行われた NPAC (Northern Pacific)-1 実験データの基線解析直後だと思います。その後同じく 1985 年夏に行われた EPAC (Eastern Pacific)や WPAC (Western Pacific)実験の解析データが出そろった秋に記者発表を行い、その結果多くの新聞で大きく報道されました。特に毎日新聞では一面のトップ記事 (昭和 60 年 11 月 6 日朝刊) となり、夕刊の漫画「まっぴら君」(加藤芳郎) にも登場しました。プレートテクトニクスは当時既にほとんどの地球物理学者 (地震、大気海洋、超高層大気などを研究対象とし、物理的な手法で今の地球を研究する人たち) には信じられていましたが、直接証拠を見るまで信じないという多くの地質学者 (岩石や化石から地球の歴史を論じる人たち) がいました。後者の人にとって VLBI の成果は大きな意味を持っていたと思います。

1984 年当時、潮汐や地球回転などの測地学的な知識は、VLBI チームの両高橋氏 (幸雄さん、富士信さん) や文部省緯度観測所 (当時) の協力によって十分なレベルに達していましたが、プレート運動などの地球動力学 (ジオダイナミクス) 的な知識は共有されていませんでした。1984 年に鹿島に赴任した私の最初の仕事の一つが、鹿島とカウアイ (ハワイ) やクワゼリン (マーシャル諸島) の VLBI 局間の基線長変化の予測値を計算することでした。プレートの相対運動は、ある点 (オイラー極) の周りの回転運動として表現できます。様々なプレートの組み合わせにおけるオイラー極の緯度経度と回転角速度は、*Minster & Jordan* [1978]による RM2 (RM は Relative Movement の略) というモデルに与えられていました (その後プレート運動モデルは米国 Northwestern Univ.グループによる NUVEL-1 モデル[*DeMets et al.*, 1990]が主流となって現在に至る)。そのモデルを使って、年間の基線長変化の予測値が年間何 cm であるという計算を行いました。

当時鹿島が位置する東日本が何プレートに属するかについて、論争が起こっていました。初期のプレートテクトニクスでは北米プレートとユーラシアプレートの東北アジアでの境界が確定していませんでしたが、1980 年代始めまではなんとなく日本列島はユーラシアプレート上にあると思われていました。ところが 1983 年の日本海中部地震 (秋田沖で発生し、多くの小学生が津波で亡くなった地震) を契機に東北日本北米プレート説[e.g. *Nakamura*, 1983]が注目されるようになりました。その後東北日本マイクロプレート説[*Seno*, 1985]、東日本オホーツクプレート説[*Seno et al.*, 1996]、西日本アムールプレート説[*Heki et al.*, 1999]などが登場し、東アジアのプレート境界論は戦国時代を迎え、現在に至ります。ちなみに

高校の地学の教科書では、日本列島の東半分が北米プレート、西半分がユーラシアプレートとなっており、その境界は点線で描かれている例が多いようです。

プレートは基本的に剛体として運動しますが、境界付近ではプレートが変形して地殻変動が生じます(地震に向けた歪の蓄積など)。そのこと自体はわかっていたはずですが、VLBI や SLR (Satellite Laser Ranging 当時我が国では海上保安庁が観測を行っていた)の業界ではそのような認識は薄かったように思います。80年代後半になって鹿島の動きを詳しく解析してみると、鹿島 VLBI 局はユーラシアプレートや北米プレートに固定されているのではなく毎年西北西に数 cm の速度で動いていることがわかってきました。同じころ紀伊半島の先端に近い下里 SLR 局も西北に同じような速度で動いていることも新聞で報道されました(見当違いのコメントが識者によってなされていたことを覚えています)。今では、それらは沈み込む海洋プレート(鹿島の場合は太平洋プレート、下里ではフィリピン海プレート)が陸側プレートと固着しているため、それらの動きが部分的に陸側にも生じていると理解されています。ちなみに鹿島に蓄積した西北西向きの動きのほとんどは、2011年東北沖地震の際の海向きの動きで解消されました。

### 4.3 新聞の4コマ漫画にも出た「ハワイ日本に接近中」

河野宣之

1984年7月から日本の鹿島を含む太平洋域やヨーロッパも入って国際 VLBI 観測が開始されました。開始から1年余後に、この間で測られた太平洋域の鹿島を含む4つの VLBI 局間の距離と1年間の距離変化率が日米で発表され、日本では電波研から発表されました。この日は奇しくも、2年前に最初に日米システム互換性確認実験が実施された丁度同じ日の1985年11月5日でした。距離の誤差は1cm~3cmで、なんと太平洋に浮かぶ島ハワイやマーシャル諸島のクワジェリン島が日本方向に1年に4~8cmの割合で近づいていると言うのです。多くの新聞やTV ラジオがこの驚くべき結果を大きく報道しました。発表翌日の11月6日の朝日新聞の記事として、日米の科学協力で達成されたこの快挙は1面を飾りました。その2日後の8日に4コマ漫画の“アサッテ君”にハワイが日本に近づいていることが取り上げられました。作者の園山俊二さんもハワイ接近の結果に驚きをもって接したに違いありません。

世界の多くの人々がこの成果を目にしたと思われませんが、この成果は測定技術において極めて高い精度を達成したことだけでなく、科学的にも大きな成果になりました。つまり、プレート運動を直接測って、古代から延々と今も間違いなく継続されていて、ウエゲナーの大陸移動説を実証したことになります。この成果はその後の地球物理学に大きな変化をもたらしました。

#### 4.4 VLBI と SLR の競争、更に GPS が加わり、測地は宇宙技術の時代へ

河野宣之

この頃、測地・地球回転の観測が宇宙技術という新しい手段を得て大きく変わる時代に入っていました。日本でも、これらの分野で宇宙技術の開発・実験が進められました。つまり、1982 年から宇宙技術による新しい測地観測が毎年のように実施されました（3.9-1 表）。その皮切りは 1982 年の海上保安庁水路部による SLR（Satellite Laser Ranging：衛星レーザー測距）です。その後、電波研が毎年のように VLBI 関連の新しい観測を実施し、1986 年国土地理院の VIBI による測地実験と米国 GPS 干渉測位計のデモンストレーションではぼ出揃ったと思われます。いずれの技術や観測方法も 10 年～20 年あるいはそれ以上にわたって開発・改良されてきましたが、1982 年から 1986 年にかけて、僅か 4 年で日本において宇宙技術による測地関連実験がほとんど実施されたことは大変奇妙に見えるかもしれません。

1982 年	海上保安庁水路部、下里で SLR 観測開始
1983 年	電波研、国際基線で VLBI 観測開始
1984 年	電波研、VLBI による静止衛星の精密軌道決定
1985 年	電波研、日米共同 VLBI 観測でプレート運動の実証 国土地理院、5mφ アンテナで VLBI システムレベル実験
1986 年	海上保安庁水路部、測地衛星“あじさい”を打ち上げ、国産衛星で SLR 開始 国土地理院、電波研と協力して 5mφ アンテナで測地 VLBI 実験開始 国土地理院で米国 GPS 干渉測位計のデモンストレーション

3.9-1 表 1982 年から 1986 年の間に宇宙技術による測地・位置天文観測のテスト観測が数多く実施された。

第 2 部 8. で述べましたが、この 4 年間は始まる前に、宇宙技術が測地・位置天文学の将来を担う技術と認識して、各機関が装置の開発・整備を以前から開始しており、この 4 年間に実験を実施するまでに至った、とみなしてよいでしょう。ところで測地・位置天文の観測に何故 3 つもの宇宙技術が検討されたのでしょうか。3.9-2 表に測地・位置天文学の観測技術と測定精度の目安を示す一覧表です。VLBI や SLR は短距離でもほぼ等しい精度ですが大型システムなので短距離の測定には実際には使用されず、大陸間などの長距離の測定に向いています。一方、GPS は干渉測位法で数百 km まで数 mm の精度が可能ですが、これ以上の距離になると精度が低下します。地上測量は宇宙技術の装置と比較すると間便ですが数十 km まで、せいぜい百 km までの距離測定で数 mm～数 cm の精度です。また、宇宙技術による観測以前の光学望遠鏡による星の位置観測などでは宇宙技術と比較すると 1～2 桁も劣ることが分かります。この頃を境に、ガリレオの時代から続いてきた光学による地球回転や位置天文観測あるいは中距離（100km）以上の測地は宇宙技術に取って代わることになりました。大陸移動説、海洋底拡大説、プレート運動などはこれまでは仮説に過ぎませんでした。これらは VLBI によって実証され、数年後に理科の教科書にも登場して今や中学生にも知られるようになりました。このような地球科学の飛躍的な進歩に日

本の科学・技術が少なからず貢献したことをここに記しておきたいと思います。そして観測技術の進歩が新しい科学を生みだしたまさにその時代であったことも記しておきます。

	測地 (精度の目安)	位置天文・地球回転 (精度の目安)
VLBI	数百 km 以上の長距離 (精度: 数mm)	星の位置: 長基線観測で精度は (1mas) 地球回転: 長基線観測で(十分の 1ms x 1mas)
SLR	数百 km 以上の長距離 (精度: 数mm)	地球回転: 長基線観測で(十分の 1ms x 1mas)
GPS	数百 km まで (精度: 数mm)	
地上測量	数十 km まで (精度: 数mm)	
光学天文観測	1 点で観測 (精度: 1m~数 m)	星の位置: 精度は数十 mas 地球回転: 精度は数 ms
		1 mas: 1 ミリ秒角=月面上で人の背丈の角度 1 ms: 1 秒の 1000 分の 1

3.9-2 表 測地・位置天文観測における種々の観測技術と精度



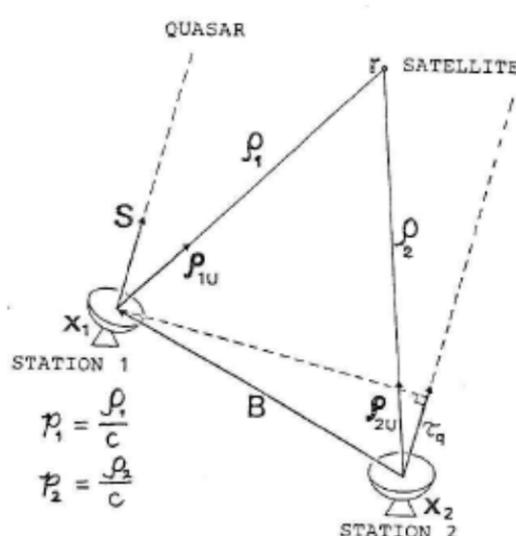
3.10-1 図 K-3 システム開発で開発グループが郵政大臣の表彰を受ける。

## 4.5 衛星の高精度軌道決定

塩見正

### 4.5.1 背景

人工衛星の軌道決定とは、衛星の軌道上の位置や速度などを測定して衛星の軌道パラメータ（軌道半径や離心率、赤道面からの傾き、ある時刻における位置、など通常は6つのパラメータ）を求めることです。衛星の軌道上の位置や速度を測定するには、地球上の衛星追跡局から衛星までの距離やその変化率、衛星の方向（衛星電波の到来角度）の測定など多様な方法が用いられます（衛星自体に搭載した光学センサーなどを用いる手法もあります）。



他方で、VLBI 技術を用いると、地球上の VLBI 局（基線）の位置や、天体電波源の方向を非常に高い精度で求めることができます。このことから、VLBI 技術により人工衛星の地球での方向を高精度で測定して、人工衛星の軌道を高い精度で決定することが期待されます。その際、人工衛星と、その近くに見えて高い精度で位置が知られている天体電波源（準星）とを交互に VLBI で観測して、天体電波源の方向を基準にして人工衛星の方向を高精度に求める手法（差分または相対 VLBI 手法、Differential VLBI : DVLBI、デルタ VLBI :  $\Delta$  VLBI、などと呼ばれる）が有効となります。この差分手法を用いることで、天体電波源と人工衛星の VLBI 観測に共通に含まれる電波伝搬などによる誤差を差し引くことができるからです。

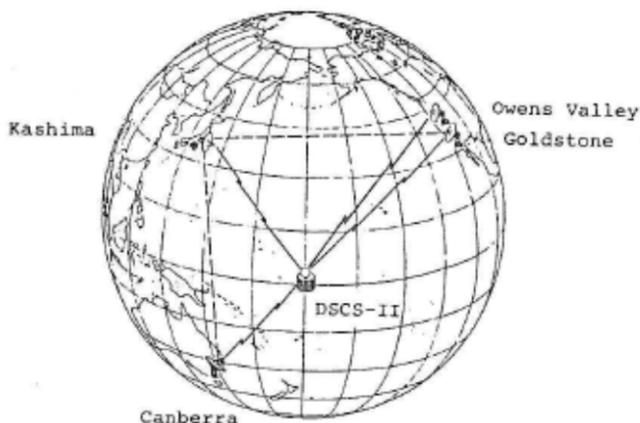
この方法は、とりわけ深宇宙探査衛星の高精度の軌道測定に有効だとして米国において 1970 年代ころから注目され、実験的な応用も試みられてきました。地球から非常に遠い深宇宙探査衛星の軌道測定では、従来手法では衛星までの距離は測距法で高精度に得られるのに対して、それに直行する方向（地球局から衛星を見る視線の角度）の精度が低いことが問題でしたが、これを VLBI で解決しようというわけです。

そこで、電波研究所においては VLBI 技術の応用の一環として、鹿島支所の第 3 宇宙通信研究室の VLBI グループの支援を得て、衛星管制グループにより 1982 年に鹿島一平磯基線の K-2 システムを用いた実験用静止通信衛星 CS の軌道決定実験を実施しました (2.2 項)。そして、1984 年に、衛星管制グループと米国ジェット推進研究所 JPL との共同により鹿島 K-3 システムと JPL のデータ記録システム (Mark-II バックエンド装置、これは米国の深宇宙追跡局のバックエンド装置との互換性のため) を用いて米国の通信衛星 DSCS-II の高精度軌道決定実験 (1984 年) が実施され、期待通りの成果をあげました。そしてその後、日

本における深宇宙衛星や月探査衛星などの高精度軌道決定にも用いられるようになりました。

#### 4.5.2 JPL との共同による米国の通信衛星 DSCS-II の高精度軌道決定実験（1984 年）

1982 年 6 月の  $\Delta$  VLBI 法による CS の軌道測定実験のあと、同年 10 月から電波研究所鹿島支所から研究者（塩見）が米国 JPL において VLBI 技術を含めて衛星軌道測定等に関するテーマで在外研究を行いました。そして電波研究所鹿島支所では VLBI グループが K-3VLBI システムの開発、日米実験の成功など、活発な研究活動を進めていたことが背景となり、電波研究所と JPL との共同で大陸間超長基線の DVLBI で太平洋上の静止衛星の高精度軌道決定実



験を行う計画が具体化しました（上記の CS 軌道測定実験では  $\Delta$  VLBI と称していましたが、以下では DVLBI とします）。

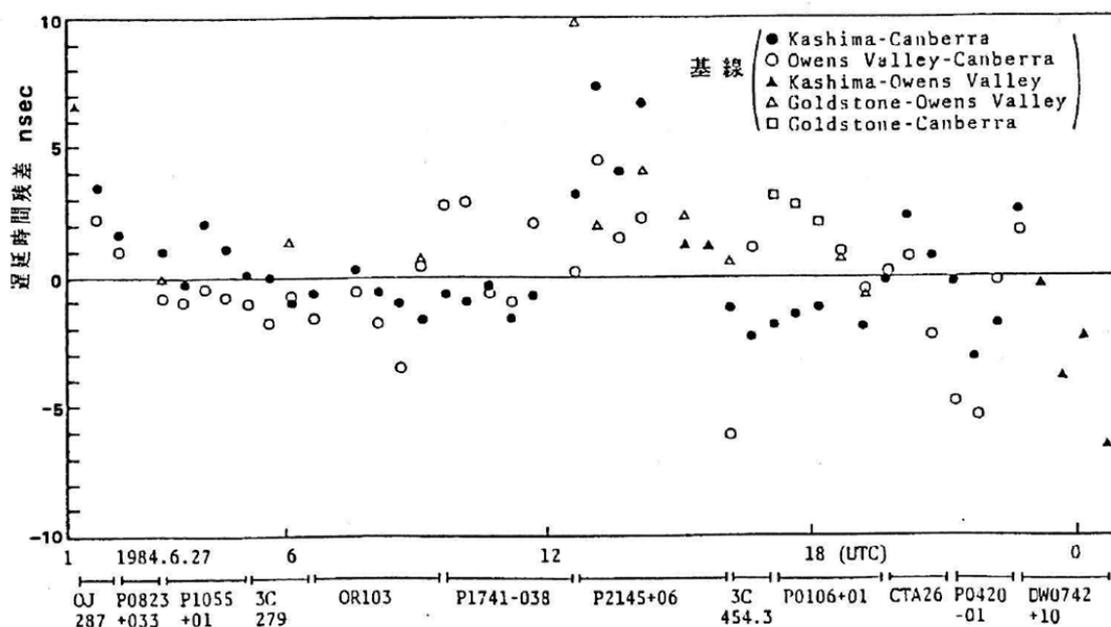
この実験は、日本の鹿島局、米国のゴールドストーンとオーストラリアのキャンベラの二つの NASA 深宇宙追跡ネットワーク局、およびカリフォルニア州のオーウェンズバレー局（カリフォルニア工科大学所属）による文字通り的大陸間にまたがる超長基線の VLBI を構成し、太平洋上の米国の通信衛星 DSCS-II を対象として、1984 年 6 月 25 日、27 日、29 日の 3 回（それぞれ 24 時間）実施されました。観測は



上の写真：小園、鈴木、L.K.S.、塩見、磯谷、黒岩  
下の写真：後列左から西垣、川口、小園、黒岩、鈴木；  
磯貝、河野；佐藤、塩見、L.K.S.、川合；柳谷、川尻  
の各氏

衛星の 2GHz 帯のテレメトリ送信電波を帯域 2MHz の 2つのチャンネルで行い、DVLBI のための天体電波源 (準星) は 12 個を選びました。VLBI システムとしては、鹿島では K-3VLBI システムに記録部は JPL から運びこまれた Mark-II バックエンド装置を使用しました。これは、米国とオーストラリアの局では Mark-II が用いられたのでこれらとの整合性のためです。JPL からは、技術者 L. K. Skjerve 氏が来日しました (写真は衛星管制課や三研関係者と実験室や懇親会で)。

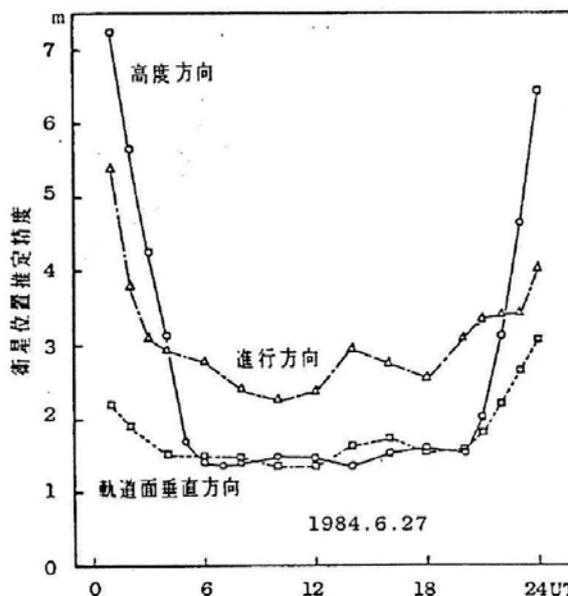
VLBI のデータ処理は米国 JPL で行い、DVLBI データによる衛星の軌道決定は日米でそれぞれ実施しました。DVLBI 観測値と軌道決定による理論値との差 (観測残差) は、図に示



DVLBI 遅延時間観測値の残差 (下部に位置基準とした準星とその観測時間帯を示す)



JPL の共同研究者 Dr. J. S. Border



観測誤差およびモデル化誤差を考慮した衛星位置推定精度

すようにほぼ 5nsec (1.5m) 以内となっており、双方で、推定精度の解析で静止衛星の位置にして 4m~10m程度の精度で軌道が求められました。これは予想どおり、大陸間の超長基線による DVLBI で衛星の位置が衛星自体の大きさ程度の高い精度で求められることを実証したものです。

その当時から、地球の周りを周回する人工衛星や、深宇宙を航行する人工惑星、そして月面や惑星上での探査機などの軌道や位置を地球上からの観測によって高精度で求めることは、数々の衛星プロジェクトで必要になっており、この国際共同実験で VLBI が有力な手段となることが実証されました。

この項の参考文献 (代表的なもの)

- (1) Border, J. S., F. F. Donovan, T. Shiomi and N. Kawano, Precise inteferometric tracking of the DSCS II geosynchronous orbiter, AIAA 24th Aerospace Sciences Meeting, Reno, Nevada, 1986.
- (2) 塩見、河野、VLBI による静止衛星の高精度軌道決定、日本航空宇宙学会誌 第 35 巻、第 404 号 1987 年、pp.425-432.

日米実験  
近藤哲朗  
Ver.2014-08-21

日米実験の話に入る前に少し関連データモニタープログラムの開発の話をしたい。“K”で始まる“公式”K-3 ソフトウェアとは別に“cor”で始まる K-3 型関連データのモニタープログラムを開発した。このモニタープログラムは K-3 相関器開発時のチェックに大活躍したばかりではなく実際の実験時にはフリンジの確認およびクロックオフセットの決定に欠かせないソフトウェアであり現在においても"cor"シリーズの進化したソフトウェアが実運用で使われている。この"cor"シリーズ開発初期、今では業界でなじみとなったフリンジの3次元表示の開発に取り組んだ時のことである。相関データおよびフリンジ（サーチ関数）の3D表示プログラム"corxy"を完成させ、初めてフリンジの3D表示を喜んでいたのだが、どうも少しどころか大いにおかしい。フリンジが出ていない状況でも見事なフリン

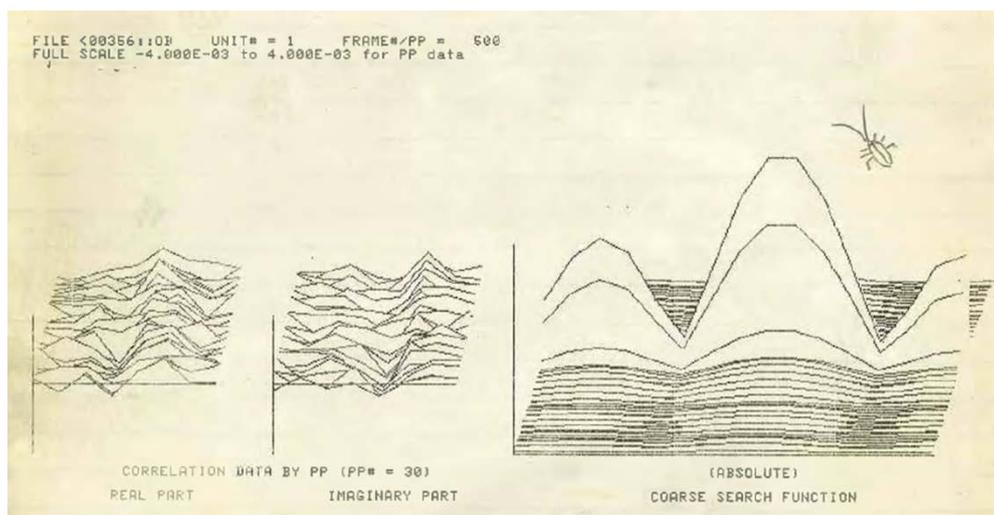


図1 "corxy"によるフリンジの3D表示、だが虫（バグ）が潜んでいた。

ジが出るのである。図1は当時のノートからコピーしたものであるが、一番右がいわゆるフリンジの3D表示だが、見事な1枚屏風のような絵が明らかに相関が出ていない場合にも得られるのである。結局プログラムにバグがあり改修後は正常な結果を示すようになったが、当時にノートにはフリンジの絵に虫（バグ）が書きこまれていた。

こうして"cor"シリーズの完成により、K-3システムで閉じて相関処理および結果の評価が可能となったのである。そして1983年10月5日国土地理院との間でK-3VLBIシステム初のVLBI試験観測を実施、翌6日にはK-3相関器および"corxy"によりK-3システムの初フリンジを確認したのである。

では本題の日米実験に入ろう。国土地理院との試験観測を成功させた1ヶ月後の1983年11月5日に初の日米VLBI実験（試験観測）が実施された（図2）。米国側からはモハービー局とオウエンズバレー局が参加した。米国の観測データ（テープ）は鹿島に航空便で送ら

れてきた。そして僅か 12 日後の 11 月 17 日に待望の日米実験初フリンジを検出に成功した (図 3) (12 月 2 日に検出したオウエンズバレー局とのフリンジが日米初フリンジ検出かあるときから間違っ記憶していたが、今回昔の資料を見直して 11 月 17 日にモハービとの間でフリンジを検出していたことを確認した)。



図 2 日米初観測時の様子 (記録映画「動く大地」より)

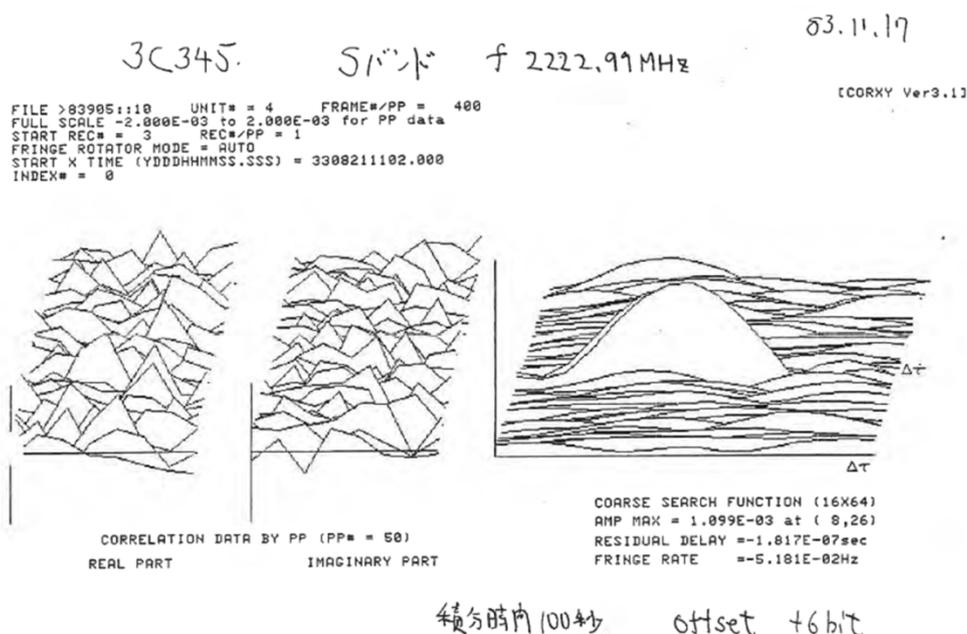


図 3 記念すべき日米実験(1983年 11月 5日)初フリンジ。相手局はモハービ。

日米試験観測の成功を受けて、1984年 1月および 2月のシステムレベル実験と称する総合試験観測を経て NASA が主導する国際 VLBI 観測に定期的に参加することとなる。

第2回 システムレベル実験体制

6時間 実験開始が早くなったので、分担もそのまま繰上げる。

班名	アンテナ	EAOS	バックエンド	レコーダー
第1班	川口	小園	小池	浜
第2班	高橋幸	高橋喜	木内	国森
第3班	雨谷	金子	吉野	近藤
第4班	栗原	村上	黒老	杉本

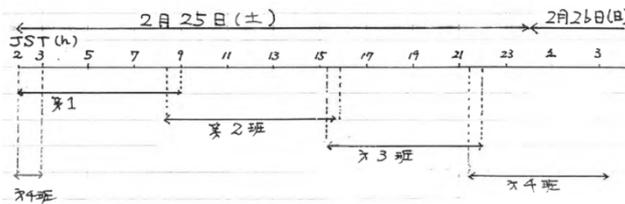


図 4 第2回システムレベル実験（1983年2月）時の分担表

図4は2回目のシステムレベル実験時のオペレーターの分担を示した当時の分担表（T橋 F 信氏作成かな？）であるが、当時は観測時の分担を「アンテナ・受信系」、「バックエンド・水素メーザー」、「レコーダ」、「自動運用」の4つに分けて観測にはそれぞれの分担に一人を貼り付ける4人で一つの班を構成しオペレーションを行った。24時間実験は6時間ずつの分担で4班、計24名でオペレーションを行った。観測時の最も重要なオペレーションは約30分毎のテープ交換である。重さ4.5kgのオープンリールテープを交換するのであるが、先端を少しなめて湿らせて空リールに巻き付けるなど、独特のノウハウがあったのを思い出す。

1983年の夏から本格的な国際VLBI実験に参加したが、その頃からはオペレーションの班構成は2名/班となっていた。俗説では4名/班の体制では麻雀に興ずる班が出てくる（きた）のでオペレーションに支障を来たしかねないということがまことしやかにささやかれたが真偽のほどは定かではない。私は1984年から日米実験の担当となり、オペレーターの割り当てや米国との連絡を担当した。図5に1984年夏シリーズの国際実験分担表を示すが、このころには2日間近い実験を僅か5班（述べ10名）でこなすようになっていた。当時の国際実験は図からも分かるように土日月に行われることが多かった。これは米国のアンテナがNASAの深宇宙局（DSN局）を使っている関係から追跡業務のない週末に専ら測地VLBI実験に使用したためと聞いたことがあるような気がするが。ともかく、我々にとっては7月、8月は休みなし、という状況だった。

こうしたマンパワー頼りのVLBI観測であったが、当時の支所長には夜間のオペレーターへの食事の差し入れなど気を使っていたのを思い出す。

E. PACIFIC POLAR EXPERIMENT SCHEDULE (1984) (1984年夏季)

日	曜日	実験名	観測地	観測時間	観測内容
7月6日	土	E.PAC-1	東京・金子	07:28	観測・高緯
7月7日	日	E.PAC-1	東京・金子	08:58	観測・高緯
7月8日	月	E.PAC-1	東京・金子	08:58	観測・高緯
7月13日	土	E.PAC-2	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月14日	日	E.PAC-2	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月15日	月	E.PAC-2	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月21日	日	E.PAC-3	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月22日	月	E.PAC-3	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月28日	日	E.PAC-4	東京・高緯	18:28	観測・高緯
7月29日	月	E.PAC-4	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月3日	土	E.PAC-5	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月4日	日	E.PAC-5	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月5日	月	E.PAC-5	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月10日	土	E.PAC-6	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月11日	日	E.PAC-6	東京・高緯	18:28	観測・高緯
8月12日	月	E.PAC-6	東京・高緯	18:28	観測・高緯

注：観測時間は現地時間による。観測地の変更の可能性あり（予備表1、2）

図 5 1984年夏シーズンの国際 VLBI 実験分担表

当時の日米実験は太平洋プレート運動の実測を目指した「太平洋（PACIFIC）実験」と極運動の測定を目指した「極（POLAR）実験」に分けられる。我々にとって一番大きな成果はハワイの日本接近を実測したことであろう。当時のマスコミを多少賑わし、新聞の4コマ漫画にも取り上げられたほどであった。

## 4.7 日独実験

吉野泰造

ドイツの VLBI と日本の VLBI の歴史を見ると、ともに米国の強い影響を受けたとはいえ、両国がそれぞれ独自に得意な技術を発展させ、同時期に技術の発展を重ねてきたことを見て取ることが出来る。そして、初期段階では必ずしも密な調整を行ったわけではないのに、それぞれが次の道を切り開き、対等な立場で協力が行われるに至ったことがわかる。まずは、世界の潮流の中で我が国とドイツの活動を見ていきたい。

### <<国際的な VLBI 動向>>

- 1979 年            NASA は CDP を開始
- 1982 年 5 月    IAG 東京 (各国から多数の宇宙測地の開発、及び観測計画が報告された。)
- 1979 年 8 月    MarkIII システム米国で稼働開始 (Haystack-NRAO-OVRO)

### <日独は、ほぼ同時期に国際 VLBI 開始>

- 1983 年 7 月    Wettzell 局 (20m) 初の VLBI 実験 (Wettzell-Onsala)
- 1983 年 11 月   日米間で初の VLBI 試験観測 (鹿島-Mojave-OwensValley)
- 1984 年 1 月    日米システムレベル実験開始
- 1984 年 1 月    Wettzell 局で定常 VLBI 実験開始 (IRIS, INT, CDP)

### <初めての日独協力実験>

- 1985 年 11-12 月 日独実験 (2週間の UT1 監視集中観測) 鹿島-Wez

### <日本がやや先行して南極 VLBI 開始>

- 1990 年 1 月    南極 VLBI (鹿島-昭和基地)
  - 1993 年 1 月    南極 VLBI (0' Higgins-Santiago-HartRAO-Hobart)
- ただし、1992 年 1 月～1992 年 6 月の実験は不調

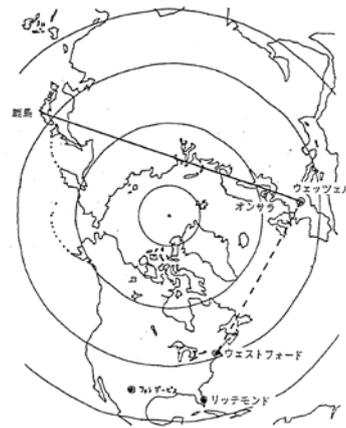
### <定常的な日独協力実験 (日本側は国土地理院) >

- 2002 年～ 日独基線 UT1 監視 (INT2) つくば-Wettzell

上記の流れを再度、表 1 に示す。

表1 日本とドイツの VLBI の活動対比

	世界の動き	日本	ドイツ
1979	CDP 開始		
1982	IAG 東京		
1983		日米 初 VLBI(K3)	Wettzell 局 初 VLBI(MarkIII)
1984		日米 システムレベル実験	NEOS, INT, CDP
1985		日独実験(UT1 集中観測)鹿島-Wez	
1990		南極 VLBI	
1993			南極 VLBI(O' Higgins)
2002		日独 UT1 監視 (INT2)つくば-Wez	



日独実験基線と IRIS 局  
(実線: GJRO 基線, 破線: IRIS 連日観測基線)

図1 初めての日独協力  
UT1 監視集中観測)KAS-WEZ)

国際 VLBI 実験に向け、システムの準備段階で、日独は異なる対応をとった。天文月報 (1987 年 8 月号) でも述べたが、ドイツは自主開発路線を取らなかった。日本は国産の K-3 を開発したが、ドイツは MarkIII を米国より導入した。これは、技術開発を前面に出す日本の電波研究所と、実利用の組織 (当時は IfAG, 現在の BKG) の差が出たと考える。ただし、鹿島局のアンテナは、既存の 26m を改修して対応したが、Wettzell では新たに VLBI 専用の 20m アンテナを建設した (1983 年)。このアンテナ開発では、もともとメカに強いドイツの技術力がよく活かされており、その技術は、Wettzell で後に建設された TwinTelescope や、石岡に建設された VGOS アンテナにおいても息づいている。

日独 VLBI 関係者の接触は、IAG 会合（第 1 回の Scientific Assembly）が東京の経団連会館で開催された 1982 年の 5 月に始まる。この第 1 回の会議には、ドイツの VLBI の成果発表が何件か含まれており、これが吉野の長期在外研究（独・ボン大学）のきっかけとなった。IAG 会合の際、NASA を始めとする米国からの大デレゲーションが鹿島を訪れ、その後、日本が参加する、国際 VLBI 実験を前にとっても良い機会となった。いずれにせよ、日独両国は、NASA の CDP 実験に積極的に参加しており、その中で両局は協力する流れにあった。

日独で最初の自主的な実験として、顕著な潮汐周期のひとつである Mf（2 週間周期の潮汐）の 1 周期分の 2 週間の連日実験を 1985 年に行った。観測の結果、UT1 の観測結果は、米独（Wettzell—Westford）基線に基づくものと、日独基線を用いたもの間には系統誤差が現れた。原因を究明した結果、個々の実験で採用されていた基準座標系の違いに系統誤差の要因を見つけることができた。再処理により、系統誤差がきれいに消えて、すべての観測点がきれいに並んだときは、ボン大学の研究室においてうれしさがこみ上げてきたのを思い出す。これは、小さな 1 例に過ぎないが、米国依存の実験を行った際にぶつかったハードルのひとつであり、大げさに言えば、自分たちの力で道を切り開くことの心地よさでもあった。

その後、やはり Wettzell の SLR 研究者である Ulrich Schreiber が小金井を訪問した際に、機器開発で”Stand on your feet !”という言葉投げかけられた時の強い印象を思い出す。

そして、その後も、両国は相次いで南極 VLBI を成功させ、国際的に VLBI をリードする立場となった。日独は互いに独自に VLBI 開発を進めたと述べたが、以下のような逸話がある。即ち、小金井で水素メーザの開発にあたった森川さんは、PTTI（16th Annual PTTI Meeting、1984）での研究発表において、アンテナ駆動（26 m アンテナの駆動）による外部磁界変動で、周辺に設置した周波数標準へ影響が現れることを指摘した。このため、同研究会に出席していた Wettzell 局の Wolfgang .Schlueter は、アンテナに近い地上建物に設置していた水素メーザを直ちに地下室に移すことを決断したと本人の口から聞いたことがある。こうして、日独協力は、今も、つくば(国土地理院)-Wettzell 間の UT1 監視の定常観測 (INT2、INT3) につながっている。

表2 Wettzell 局(20m)の建設から VLBI 実験開始まで

16./17.10.1980	Survey of authorization committee at the end of 1980 to provide the required budget to setup the Radio Telescope Wettzell (RTW)
12.05.81	Article of agreement between IFAG (now BKG) and KRUPP/MAN
06.07.81	Predefinition of location RTW
08.09.81	Setup of construction site for ferroconcrete tower by company Zankl, Viechtach
10.09.81	First works for grounding
21.09.81	Start of casing and bond works <a href="#">(Picture)</a>
13.10.81	First snowfall and obstructions due to the weather
from 22.10.81	Snow height up to 50 cm; Continuation of work
23.11.81	Completion of ferroconcrete tower (50 cm snow during the night, total snow height 1 meter)
28.04.82	Begin of work for RTW Operating Center
13.05.82	Setup of KRUPP/MAN construction site
14.06.82	Begin of reflector installation <a href="#">(Picture)</a>
29.06.82	Completion of Operating Center shell
20.07.82	Installation of azimuth part and elevation parts on ferroconcrete tower <a href="#">(Picture)</a>
25.08.82	Reflector lift <a href="#">(Picture)</a>
11.10.82	Completion of RTW Operating Center
25.05.83	Supply and installation of MARK III VLBI Data Acquisition Terminal <a href="#">(Picture)</a>
29./30.06.83	Installation of feed and feedcone
30.06.83	Inspection of Radiotelescope
11.-18.07.83	Installation / gauging of S/X-band amplifier with support from H. Lochner (RT Effelsberg) and H. Reichert (GIUB)
14.07.83	Gauging of receiver with liquid nitrogen
15.07.83	Measurement of first source 3C274 at 19:00 MESZ in X-band
18.-29.07.83	Installation of MK III Field System Software and HP1000 - DEC11/23 (Mrs. Vandenberg and Mr. Knight - Interferometrics)
20.07.83	1st Test Wettzell-Onsala in X-band(ONS), 1 tape
16.-18.11.83	RED-142: 1. successful 24-hour experiment in S/X-band
from 09.01.84	Participation in 5 resp. 7-day intervals in all POLARIS/IRIS- and NEOS-A observations

([http://www.fs.wettzell.de/VLBI/histor\\_e.html](http://www.fs.wettzell.de/VLBI/histor_e.html))

表3 Wettzell 局(20m)の VLBI 実験数(1983 年の試験観測開始～1994 年まで)

Zusammenfassung der VLBI-Experimente mit dem 20m-Teleskop												
Beobachtungen	Jahr 1900+											
	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94
IRIS-A												
NEOS-A+B	3	67	72	72	72	73	73	73	59	48	60	62
INT[Delta(UT1)]	-	73	211	276	281	282	287	287	292	236	281	225
IRIS-S	-	-	-	4	5	3	3	12	12	12	12	12
EUROPE	-	-	-	-	-	5	2	4	3	5	4	6
NASA	-	2	12	12	12	5	1	-	21	22	15	23
NASA-Astronomie	-	-	-	-	2	2	-	-	-	-	-	-
USNO-Erdrotation	-	-	-	-	-	-	-	-	1	11	6	14
Uni/MPI/R	-	-	-	-	-	-	-	3	5	-	2	2
mobile Kampagnen	-	-	-	-	-	-	10	-	4	21	4	4
sonst. 1h - 8h Messungen	-	16	13	25	27	1	19	23	22	1	1	2
sonst. 24h MkII Messungen	-	-	1/0	0/0	1/0	7/3	18/3	3/4	9/1	13/0	0/0	2/0

([http://www.fs.wettzell.de/VLBI/mprogr\\_d.html](http://www.fs.wettzell.de/VLBI/mprogr_d.html))

## 4.9 日伊実験

木内等

VLBI の原理を学び、一通りシステムを組み上げてみるといろいろと応用してみたいくなるものである。その一つが日伊・日豪実験として行われた 22GHz 実験である。

VLBI の遅延決定精度は受信帯域幅に依存し、広帯域信号になるほど高精度化が期待できる。受信周波数が高くなれば受信帯域幅を広くすることは容易である。これは比帯域（受信帯域／受信周波数）が同じ場合、受信周波数が高くなれば容易に受信帯域幅を上げられることによる。バンド幅合成法（詳細は別章のバンド幅合成参照）は、VLBI の精度を飛躍的に向上させた技術であり、櫛の歯状に収集した僅かなデータであたかも櫛の歯の端から端までの広帯域データ全てを連続に収集したのと等価な精度を得る事ができる画期的な技術である。最近では金に物を言わせ、カー杯高速サンプリングして 1ch で広帯域化し、高精度にしたという触れ込みのシステムが跋扈しているが、局内位相変動補正をしていないなど一寸首を傾げたいくなるものもある。システムに美しさが無く、嘆かわしい感じさえするのは、バンド幅合成という技術で感動した私だけだろうか……。特に測地を主目的にしたシステムでは、局内の位相変動補正は重要である。日伊実験は、高周波でのバンド幅合成法を可能にするために考えられた手法のデモンストレーション実験であり、世界初の試みであった。この手法により、バンド幅合成法の使用周波数制限は無くなる。

バンド幅合成を成立させる肝となる技術の一つが、櫛の歯状に収集される夫々の信号の局内遅延・位相変動を補償する位相較正信号である。これは非常に時間幅の狭いパルス信号を正確な時間間隔で繰り返すことで発生させることができる。時間間隔  $T$  での繰り返し信号は、周波数軸上で位相の揃った周波数  $1/T$  の整数倍の正弦波の集まりとなる。この正弦波が櫛の歯の 1 つずつに入る様にしてやれば、この位相の揃った位相較正信号を基にして、局内遅延・位相変動をキャンセルすることができ、あたかも櫛の歯の端から端までの広帯域データを収集したのと等価な精度を得る事ができる。

ハード的には、ステップリカバリーダイオード（当初はトンネルダイオードを使用、そうですあの江崎ダイオードです）で発生させていたが、VLBI で位相較正信号として使用できる上限は 12GHz 程度であった。パルス幅が狭いほど高

周波まで信号を発生できるため、L 成分の無い抵抗を使用したり、いろいろなドライブ方式を試みたが、高周波化は難しかった。さらに、高周波まで発生させると基準信号の信号位相が逡倍されるため環境の影響を受け易いなど問題点も見えて来た。つまり、そのままでは 22GHz 実験は不可能ということになる。22GHz の 1ch での VLBI はできても、バンド幅合成を用いた高周波 VLBI ができない。

しかしながら、ここでもう一度バンド幅合成の原理に立ち返ってみると、位相較正信号はゼロ Hz で位相がゼロになる必要はないという結論に達する。だったら低い周波数で位相較正信号を発生させ、周波数変換（アップコンバート）したって問題無いはず、ということで発想された日本オリジナルの技術であり、日伊 22GHz 実験で実証を試みた。

当時の鹿島 3 研はお金は（も？）無かったが自由な雰囲気があり、VLBI システムをいじり倒し、いろいろな実験を試すことが許されていた。これも自分たちで VLBI システムを作った結果だと思う。また、上司が新もの好きだったのも“ペーパー”の私には幸いした。

さて日伊 22GHz 実験に話を戻そう。イタリア人は、あのローマ帝国の末裔なわけだが、人生を楽しみながら仕事をしているという印象が残った。初めて駅に着いた時、オンタイムであった事に驚かれた。一方、鹿島から送った荷物はなかなか届かず、空を指差しながら“今あの辺だ”という説明をしていた。観測所はだだっ広く、ゲートの前がイタリアでも有名な庶民的なレストランがあり、昼から自家製のワインを炭酸水で割りながらゆっくりと食事を楽しんでいる。なぜワインを炭酸水で割るのかと聞いたところ、“だって酔ってしまうじゃないか”という回答が帰ってきた。総量規制の概念は無さそうである。イタリア人、何か好きだな。

こんな雰囲気、我々の製作したアップコンバータ方式の位相較正信号を搭載、鹿島とイタリアへ輸送した K-4 システムでの実験が行われた。イタリアのボローニャのアンテナ、システムは技術的に枯れている上、挑戦的な実験であることもあり、皆協力してくれたので、のんびりした雰囲気の中でも不思議とうまく行った。40 ソース、240 スキャンを行い 152 フリンジを得た。初めての 22GHz 測地実験で 3cm を切る精度で基線ベクトルも得られた。

#### 4.11 国際時刻比較実験

吉野泰造

当時の電波研究所(現在の情報通信研究機構)が K-3 型 VLBI の開発を行った主な目的は、大陸間プレート運動検出に代表される「測地」と、組織の所掌に基づく「精密時刻同期」にあった。後者では、従来の運搬時計法や、発展途上であった GPS 時刻同期を凌駕する国際間の精密時刻同期の手段を手に入れることが期待された。米国側の窓口は、USNO (米国海軍天文台) で、1983 年に来日した William J. Klepczynski (USNO) と基本合意がなされ、1984 年の日米システムレベル実験開始時点では、佐分利本部長と Klepczynski の間で、その年の秋に初実験を行うとの合意書間が交わされようとしていた。そこで、1984 年の 1 月に日米システムレベル実験後に吉野が、西海岸からワシントン D. C. にある USNO を訪問し Klepczynski と情報交換を行った。USNO も、運搬時計による時刻同期から、宇宙技術を用いた方法に移行にとっても熱心で、改めて、GPS の利用以外に VLBI を用いた方法を是非取り込みたいとの希望が聞けた。この実験では、NASA の関与はなく、USNO 側は、観測局の運用のみ (あるいは相関局の運用まで) を行い、その他の実験のアレンジは日本側が行った。ともかくやってみようということで 1984 年 10 月 3 日に鹿島局と米国の Richmond 局 (フロリダ) の間で初の実験を行った。採用システムは、相手局が NASA 方式の MarkIII であるので、互換性には不安はない。USNO が自由に運用できる Richmond 局との距離は 1 万 km もあり、観測する電波星の相互可視域は狭いが、選択した 4 星の観測から無事FRINGEを確認出来た。続いて、その年の 12 月 6-7 日には、鹿島-MarylandPoint-Richmond の間で 24 時間の測地実験を行った。

USNO 側は、従来の運搬時計法とは異なる、新時代の時刻比較法を開始することを、急いでいるようにも感じ取れた。おそらく USNO の事情もあり、事業の到達度が優先し、成果について両方で検討する場はあまりなかった。その後も、日本側で、簡単な観測スケジュールを作り、その観測結果を USNO と共有した。出てきた 0.1 ナノ秒精度の観測量には、観測局間の時刻差以外に様々な固定遅延が混在しており純粋に時刻オフセットを 0.1 ナノ秒精度で求めるのは難しかった。まずは、両局間の相対レートが正確に求まるとも考えたが、やはり、両局間の時刻差そのものが要求され、そのままの形での実験継続には疑問が持たれるようになった。このため、その後、川口さんの考案した、ゼロ基線干渉計 (ZBI) を用いて両局間の固定遅延差を校正し観測毎に時刻差が求められるようになった。なお、相手局の Richmond 局 18m アンテナは、その後、1992 年のハリケーン (Andrew) で、その構造はアメのようにねじ曲がり無残な姿となった。

#### 4.15 地球回転実験

高橋幸雄

地球回転とは何か。アプリモデルのところで記載したが、大まかに言うと、多少厳密ではないが、太陽系の外にいる人が、地球にいる人との物理現象の見方の違いのうち方向の違いで、座標系の回転座標変換を示すものである。地球の自転軸は、公転しているときに首振り現象をしていて、非常に長い 25800 年で一周する運動（歳差運動）と、18.6 年以下の多数の短い周期項による首振りをする章動運動がある。さらに、地球は、自転軸の周りを 1 日で 1 周する自転運動を行い、さらに、自転軸は、地球の形状軸に対して極運動 (Wobble) という運動をしている。これらを地球回転運動というが、VLBI は、この地球回転の測定で威力を発揮してきた。特に、UT1 と呼ばれる、世界時に関するもので、地球の自転の回転角を示すもので、それはある時期の地球の方向を定義し、そこからのずれを示すものである。地球の中にいると、基準になる地球の方向と回転角というのは判別しにくいですが、VLBI は方向性の基準が天体であることから、方向性の基準が安定で定義が明確にできるため、地球の方向を測定する地球回転測定の基準に適している。この利点から、地球回転の測定を VLBI が担ってきた。

この章の地球回転観測は、地球の自転と極運動を地球回転パラメータと呼んで、その観測を主に扱う。その他、位置や地球回転パラメータとは振る舞いが違う章動・歳差の推定も同時に推定することはできる。

VLBI が登場する前の地球回転の観測はどうであったかという、望遠鏡で星を観測して地球回転を観測していた。その観測所として、国立天文台緯度観測所（現国立天文台水沢 VLBI 観測所）であり、非常に長い歴史と輝かしい成果を上げてきている由緒ある観測所である。しかし 1980 年代からの VLBI の登場により、光の天体観測による地球回転の精度に比べ、2 桁以上精度のよい VLBI 観測に時代に移行していった。

初期の日本の VLBI 観測は、米国の地殻変動観測プロジェクトの元、位置の変動の観測が主に行われていたが、その推定と同時に地球回転パラメータを推定していた。地球回転パラメータの推定と位置推定は切り離せないものである。位置推定を中心に行う場合は、地球回転パラメータは、他の観測で得られた地球回転パラメータを内挿補間などして使用し、推定しないこともある。一方、マルチ実験での解析などは、位置も地球回転パラメータも推定する。VLBI 実験を行えば、位置も地球回転パラメータも推定できるという特徴があり、VLBI 実験全体が地球回転観測になっているといってもいい。

地球回転パラメータの変化を長期的にモニターしていくには、その周期変動をとらえることが必要で、定期的な観測を長期に行っていくことが必要であり、国際的な協力で、地球回転パラメータの定期的な観測が行われている。

日本の VLBI による地球回転観測は、日米実験においても、地球回転パラメータの推定を行っていたが、本格的な地球回転パラメータの観測を開始したのは、1987 年に設立された

国際的な IERS（国際地球回転事業）がスタートしてからである。これは、国際極運動観測事業（IPMS）と国際時報局（BIH）の地球回転事業を統合したものである。観測は 1988 年 1 月からで、日本では、これを受けて、総務省電波研究所（現 NICT）と国立天文台緯度観測所が協力して、地球回転パラメータを観測する実験を、世界と協力して実施した。日本が世界に責任を果たすためには、ちゃんとした体制で、観測スケジュールから処理まで責任を持って行う必要があり、両機関の関係者が、その実施に向け多くの協議を重ね、日本でやることの重要性を鑑み、実施することとなった。1 年前の 1987 年から、予備実験を行い、1988 年から、日本が主導して行った IRIS-P 実験を 1994 年まで実施した。通信総合研究所の 26m アンテナと、環太平洋やハワイ等の米国の 3 局を用いた観測網で実施した。その他、極を囲む観測網で主に極運動を観測する POLAR 実験を、国際協力に参加して実施していた。また、欧米を中心とした大西洋観測網による 5 日毎の IRIS-A 実験が行われていた。日本の IRIS-P 実験は、処理の能力もあり、頻度は月数回程度であったが、5 日毎に行われていた IRIS-A 観測に対して、他の観測網の他の実験で再現性があることを定期的に保持しておく意味で、信頼性の向上に貢献できた。

この IRIS-P 観測で最も大きな貢献は、10 日から 2 週間連続して地球回転観測を行う集中観測を、日本が提唱し実施したことである。IRIS-P のすべての観測局が 1 日フルの参加はできないため、観測時間を限定したり、参加局を少なくして実施した。この観測は、IRIS-A 等の 5 日毎の実験では観測できない 1 日から数日の連続変動を観測するため、そうした連続的な変化は、当時は大きくないとしてあまり注目だれていなかったが、地球回転の変動が気象などの気候変動に大きく関与することが言われ始めており、不規則な短期間変動があるのかどうか、それがどの程度の大きさなのかを解明するために実施した。その結果、不規則な変動が観測され、短期変動の観測の重要性や、その要因についての考察に、大きく貢献した。

日本の地球回転観測で、水沢観測所の 10m アンテナを用いて 1992 年から観測を行うようになった。また、地球回転観測は、地球回転連続観測事業（CORE）が 1997 年から始まり、国土地理院に移行した 26m アンテナも参加して観測を行った。

国際的な地球回転観測は、その後、1999 年に地球回転 VLBI 観測も含む VLBI 観測全体として、IVS（国際 VLBI 事業）として世界中の観測協力で進められ、現在も地球回転パラメータの連日の観測値を提供している。

先駆的な短時間変動の連側観測の実施や、地球回転パラメータの定常的な観測を主導的に実施してきた等、日本の地球回転観測も大きな貢献を果たしてきたと言える。

#### 4.16 パルサーの VLBI 観測

浜 真一

パルサーVLBI をやったのは 1992 年ですので、今回の VLBI 史の範囲外かもしれませんが、K-3 を利用した成果なので、少し書いておきます。

パルサーは、周波数が高くなると急に信号が弱くなります。周波数の二乗またはそれ以上に反比例して強度が弱くなるので、周波数帯の選択は大きな要素でした。国内の大型アンテナを相手局として考えると 1.5GHz 帯と 2GHz とが候補でしたが、当時 34m アンテナで受かる 1.5GHz 帯はすでにノイズが大きくて使い物にならず、2GHz 帯での観測としました。電波強度が弱いので、相手局は臼田の 64m アンテナ。藤沢氏にはお世話になりました。結局、当時鹿島の 34m アンテナは何か問題（何だったか思い出せません）があったようで、鹿島側は 26m アンテナを用いました。

電波源は、強度があり、しかしながらカニパルサーのようには広がっていない PSR 0329+54 (周期=714.5m 秒) を選びました。

パルサーは周期的に信号が出ているわけですが、出ている時間は 1 割以下。試算では、通常の相関処理を数百秒行っても相関検出がぎりぎり。このように信号強度の弱いパルサーの相関をとるため、K-3 相関器にはパルサーゲートという機能があり、信号が出ていない間は相関処理を止めることが可能でした。これは Mk-III 相関器にあった機能を取り入れたもので、1980 年代に既に Mk-III のゲート機能を利用したパルサーVLBI が行われています。

しかし、そのままでは K-3 ではパルサーゲートが使えないことが判明、相関器の予備ユニットの一つを少し改造（通常の相関処理には影響しない）して、何とか相関処理をしました。当時、結果が出る前に PTTI に発表申し込みをしておいて、PTTI 開催日が迫るなかで、必死にどこかの配線を切ったり別の線をつないだりして、相関処理の試行を繰り返したはずですが、今となってはどこをどう手を入れたか、具体的に思い出せず、愕然です。しかし、先日木内さんから以下のメールを頂きました。感謝です。

- > 外部のパルサータイミング信号を TTL レベルに変換し、相関器の相関カウンタ
- > (シンクロナスカウンタ) と総ビットカウンタの chip enable を制御しています。
- > パルサー観測時の改造で、時刻符号を抑制するようにしていたかは不明。
- > 最終的には時刻符号抑圧も可能な予備ユニットを作りました。

なお広帯域では分散（信号がパルサーから地球までの媒質のため周波数成分によって遅延時間が異なり、波形が時間方向に引き伸ばされること）が大きくなることもあり、ユニットの改造は 1 チャンネルのみで、バンド幅合成はしていませんでした。

PSR1937+21 のようなミリ秒パルサーにも挑戦したかったのですが、強度が弱いこと、また 1 PP (この時間内は相関器に与えるパラメータを一定とし、この時間毎に相関値を積分してホスト計算機に送る) が 5ms に量子化され、1 PP 内で 1 回しかゲーティングができないことから、実現には至りませんでした。

ともあれ、そもそもこんなゲート機能を相関器に組み込んだ MK-III の先見の明には、本当に驚かされました。

## エピソード

### 6.1.1 K-3 開発秘話 2 題

河野宣之

#### (1) ダクト伝搬

予算の配分は開発の成否を決める重要な要素です。各サブシステムの担当者はそれぞれ製作会社と議論して必要額を出してきます。毎年のことですが、集計すると予算で準備可能な額の2倍以上になります。集計係は河野さんですが、このような額を本部に出しても叱られるだけで、とてもそのまま提出できません。担当者との壮絶な議論が始まります。担当者は必要な機能・性能をぎりぎり絞り込んで安く上げようとメーカーと散々議論して煮詰めた額に対して、身内の河野さんから文句を言われるのですから、担当者は怒り心頭です。特に K さんは口角泡を飛ばして予算の削減に抵抗しました。この声は廊下で繋がった別の建物にいても河野さんと K さんの議論が聞こえたそうです。廊下というダクトに沿って音声伝搬していたということです。

#### (2) 第3 宿舎の夜の銀座通り

3 研の研究室や VLBI 実験棟は夜 9 時を過ぎても明かりが消えることはありませんでした。酒好きの河野さんは 9 時を過ぎると時々、酒に誘っていました。夏、奥さんが実家に帰ると頻繁に自宅に誘って鬼のいぬ間の命の洗濯よろしく、みんなで宴会をもちました。河野さんの宿舎は多少奥まったところに会ったので、近所の職員の皆さんは河野さんの家に通じる道を、3 研のメンバーが頻繁に通るので、“夜の銀座通り”と名付けました。あるとき河野さんは仕事が片付かないので先に行って飲んでいるように伝えました。後からみんなのいる我が家へ帰ると、Ku さん曰く、“冷蔵庫につまみが何もありません、買って置いてください”。とっさのことで河野さんは“すまん、すまん、明日買っておくから”。よく考えると他人の家の冷蔵庫を空けて空だったとしても不平を言うほうがおかしい！

## エピソード

### 6.1.2 短編逸話集

吉野泰造

#### <鹿島到着とパラポラ・ホテル（着任当時）>

昭和 51 年（1976 年）のことです。電波研に就職し、最初は人事院の初任研修、そして研究所の研修を終え、5 月の連休前（？）に、鹿島第 2 宇宙通信研究室へ着任した（当時はまだ 3 研はなかった）。引っ越し荷物は運送屋さんに頼み、自分は同期の杉本さんの車（CIVIC でした）に同乗し、一路、鹿島に向けて出発した。鹿島には研究所の研修で 1 度訪れており、初めての訪問ではなかったが、これから長期にわたる活動の始まりであり、不安と希望の混じった気持ちであった。旧神宮橋も渡り、車はようやく鹿島支所に到着した。30m ホールの前付近に車を停めた。管理課で駐車スペースを教えてもらい、そこに移動しようとする地盤が緩んでいて車が泥に埋もれ脱出出来なくなった。すると、新人が来たのも珍しかったと思われるが、面白そうなことが起きたと、あちこちから職員の皆さんが近づいてきて車を持ち上げ簡単にその場から脱出することができた。その時の皆さんの楽しそうな顔を思い出す。鹿島は本当に家族的でした。

この年の 5 月の連休は、第 3 宿舎完成と共に、第 1 宿舎住人（主に世帯）の引っ越しが始まり、その空いたところに新人を入れるという算段でした。しかし、アサインされた宿舎はまだ先住者の退去に手間取っており、その間、待機状態となりました。管理課からは、

「取りあえずパラポラ・ホテルを利用して下さい」

と言われました。パラポラ・ホテルは、ベッドが 1 つだけの簡素な宿泊設備でした。そこで、そこに引っ越し荷物も含め詰め込んで、とにかく新生活が始まりました。その時、既婚者であった杉本さんは、新しい第 3 宿舎に入られたと思います（“独身はつらいよ”）。パラポラ・ホテルは、狭く、カプセルホテルよりはマシですが、早く普通の宿舎に移りたいと思ったものです。パラポラ・ホテルは、隣が食堂なので三食の心配はないものの、

パラポラ・ホテル→食堂→職場→食堂→パラポラ・ホテル

というパラポラ・ホテル生活が 1 週間以上続きました。

#### <26m グリースアップ>

「そろそろグリースアップをしよう」と川尻さんが声をかけると、つなぎに着替え、ウエスをかき集めて 26m 内部のギア室に集合です。川尻さんの指導のもと、大型歯車についている古いグリスをハケでかき取り、新しいものを塗っていくのです。以前、鹿島を中継した衛星通信実験の際、人力によるアンテナ駆動をアンテナ内部に人が張り付いて行ったので“奴隷船”という言葉が使われたようですが、この作業をやるたびに“奴隷船”の言葉が頭をよぎりました。また、エレベーションのセクターギア（屋外に露出）に対しては、モリコートと呼ばれる黒い潤滑剤を塗りました。この場所では、海風を受けるので

ろっとしたモリコートが髪に付くこともあり難儀しました。こうした作業は土曜（当時は勤務日）に行うことが多かったので、終わった後は、軽く風呂に入り、その後、床屋で髪を切りに行ったりしました。床屋のハサミにモリコートが残っていなければ良いのですが。

<K-1 実験へいざ出陣 ー鹿島出発前の様子と出発直後の一混乱ー>

今回、収集された当時のV L B I 資料に

「国内基礎実験日程表（予定含む） 第2宇宙通信研究室」

で始まる資料がありました（川尻さん作成）。これによると、

昭和 52 年（1977 年）1 月 2 7 日（木）

・電源車＋7 人出発（2 研＋小林三郎氏）

と書かれています。後で、この資料はワープロ化されていますが、最初は川尻さんの手書きでした。当時の生々しい記憶が蘇ります。

このスケジュールの中には、

「2 1（金）（ソフトボール大会）」

と記入がある一方、同日に

「（松波、土屋、北郷氏見学 1 3 時）」

とありますのでこの日は所内大会に参加できず川尻さんとしては残念だったのでは。

さて、横須賀通研に向けた出発の当日、全員が電源車に乗ったわけではありません。自家用車を適当に提供しあいこれに分乗して横須賀に向かいました。仕事に自家用車を使うなど、今では考えられませんが、のどかな時代で、誰も問題を感じていませんでした。新人の吉野は、独身なので車が空いていないわけがなく、“命令”に従い、何人かを同乗させることを快諾しました。さて、すべての車が一斉に鹿島支所を出発しました。午前 9-10 時頃でしょうか。目的地は明確ですので、特に、途中の移動経路や連絡等、事前の調整はありませんでした。吉野の車は、出発して間もなく、信号のせい、前の車を見失いました。しかし、「特に気にしないで目的地に向かおう」という同乗者の声により、独自に目的地に向かって運転を続けました。

横須賀に到着すると、何と室長には厳しくしかられました。大事な実験なので、皆でそろって行く事を想定されていたためです。他の車は途中で時々こちらの動きを想像しながらパーキングエリアで待つなどしたそうです。道理で、吉野の車は横須賀に一番乗りし他の車の到着を待ったわけです。携帯電話も、カーナビもない時代のことでした。

移動については事前に調整は無かったのに・・・と思いつつ、目先には大事な実験が待っていたので、すぐに気持ちを切り替え必要な作業を始めました。

なお、K-1 実験は 1977 年 1 月末の実施でしたが、K-3 を使った日米のシステムレベル実験は、1984 年 1 月 23 日に実施されました。つまり、K-1 実験は、日米実験のおよそ 7 年前の同じ 1 月のことだったことがわかります。この時は、そんな国際実験のことは全く考えていませ

んでした。

K-1 実験前の日々スケジュールを記した歴史的な資料を再掲します。

VLBI 国内基礎実験日程表(予定含む)		第2宇宙通信研究室
昭和52年(1977年)	AM	PM
1月		
	(10日~20日 シミュレーション)	
13(木)		
14(金)		・YOK D/C チェック ・26m用追尾テープ作成
15(土)(成人の日)		
16(日)		
17(月)・NASAへ6要素問い合わせ		・標準部よりCs時計(YOK用)(佐藤、伊藤氏17~18日)
18(火)・時刻同期整備 (鹿島、談話会)	(日通機、東芝アンベックス来所)	
19(水)・二研打ち合わせ	(局内デレイ用ケーブル撤去)	・実行予算提出
20(木)・YOKへ打ち合わせに出発 (日帰り:川尻・尾嶋、河野)	・ローカル系安定度テスト	
	(21日~22日システムチェック)	
21(金)(ソフトボール大会)	・液体室素手配 (松波、土屋、北郷氏見学 13時)	
22(土)(停電09時~15時)	・26m 追尾テスト	
23(日)(予備日)		
24(月)	(24日~25日 鹿島セッティング)	
25(火)		
26(水)	・(小林三郎・佐藤氏着、電源車到着、積み込み)	
27(木)・電源車+7人出発(2研+小林三郎氏)	・YOK セッティング	
28(金)・YOKセッティング、ボイテイングチェック、	・インテルサット4号受信	
	(高橋(富)帰鹿)	
29(土)(小池帰鹿)	データ処理	(尾嶋帰鹿)
30(日)・相関 初検出 (インテルサット4号又は電波星のデータから)		(瞬断あり)
31(月)・3C84観測	夜	ATS-1テスト
1(火)(二月) 予備		(3C454.3) 3C273
2(水)・ATS-1、3C273		・ATS-1、3C454.3
3(木) 予備		(インテルサット又は3C84) 佐藤氏(YOK) 伊藤氏(KAS)
4(金)・(3C273)、ATS-1、インテルサット又は3C84		
5(土) 予備	・撤収	鹿島着、時刻・周波数合わせ
6(日)		

<深夜の26m庁舎で人間相関器>

計算機のLP用紙はサイズが大きいため、プログラムのチェックや、データの確認を机上で行うのが難しいときがよくあります。このため、よく研究室の人は床にLP用紙をならべて、這いつくばって作業をしていました。こうした光景を見慣れる内に、気付けば自分も同じようなことをしていました。

これを国内基礎実験(K-1実験)の迫った昭和51年(1976年)の11-12月頃にもやりました。相関器の完成度が低かったため、相関処理は計算機で行うことにしました。相関処理は大事なプロセスなので、相関処理のプログラムを手計算で確認する必要ありと判断し、いくつかの擬似的な入力信号(X局、Y局の単純な時系列データ)をもとに1ビット毎の演算を手で確認したのです。まずは、2系統の単純な時系列データをLP用紙に打ちだし広い26m庁舎の床に並べました。そこに、1人ずつ付いて順にデータを読み上げます。これを聞いてEX-NORの演算結果を“1”または“0”と応えます(ここに1人)。これを記録する人が1人で、合計4人での作業でした。途中、間違えたりすると〇〇さんから

厳しく注意されますので緊張感を持っての作業です。この作業をビットシフトをかけて何回か実施し、無事確認を終えました。作業は、開発期間の最終段階でもあったため、深夜になり、明け方（4 時頃？）、一度解散し、2 時間程度後に再開というペースで行われました。これを後に、“人間相関器”と呼ぶようになりましたが、それ以降はこの“相関器”を使うことはありませんでした。しかし、この原理は身をもって体験したので決して忘れることはありません。

なお、LP 用紙はとても有用で、管理課は飲み会の前に、いつも会議室のデリカテーブルの上に LP 用紙を並べ、そこに柿の種などのつまみを置き、後は飲み物だけで歓談（重要な技術交流を含め）が行われたのです。

#### < 26 m 受信機室の恐怖 >

26 m アンテナの受信機室は、カセグレン焦点の位置する地上十数mの高さにありました。K-1~K-2 時代は 26m アンテナを使った電波天文観測もよく実施していたので、受信機室に位置するコールドダミーを冷やすため、液体窒素を受信機室まで持ち上げました。容器は10リットルと30リットルの2種類が有り、通常は10リットルですみましたが、通常の観測時間では不足気味でした。そこで、30リットル容器を持ち上げようとする2人がかりでらせん階段を持ち上げていく必要がありました。あるとき、重い測定器と30リットルの液体窒素容器を持ち上げるため、三木さんが受信機室の壁を取り外し、受信機室天井に置いたホイストを外に突き出しました（もともとそのような構造だった）。地上に置いた、測定器と液体窒素容器を機械の力で引き上げるのです。三木さんは、事も無く作業を進めていましたが、取り外した受信機室の壁の外は柵も何も無く、踏み外したら真っ逆さま・・・という状況でした。その頃でも、何という設計だろうと思いましたが、やはり、皆さんあまり頻繁にはこの機能を使っておらず、ほとんどの場合、苦労してらせん階段で荷物を引き上げました。それにしても、安全安心が声高に叫ばれる今の時代にはあり得ない光景でした。

#### < K-1 はいずこに？ >

日米実験の成果が出て、VLBI がある程度、市民権を持つようになってくると、最初の K-1 装置について、「どこにある？」「装置の写真は？」「記録テープは残っているか？」等々質問を受けることが多かった。しかし、現物だけは探しても見つからなかった。K-2 の実験が始まる頃、26 m 庁舎の中でも、庁舎とアンテナの間の渡り廊下の奥の方に追いやられたのは認識していたが、気付いたときは遅かった。

かつて、鹿島支所の測定器委員を担当した頃、古い測定器を処分しようとする強硬な反対派が現れ、彼らを説得できず、取りあえず、テレコマ庁舎（当時は、古い機材の倉庫で測定器の墓場にもなった）に移動しようと言って、庁舎の測定器棚を整理したことを覚えている。そのため、K-1 を探しに、テレコマ庁舎まで行ったことがあるが、やはり見つか

らなかった。古いものを大事にしすぎる（捨てない）のも困ったものだが、ひとつの役目を果たした装置は、捨てるにしても何人かの判断で決めて欲しかった。でも、3研が一定の評価を受けるようになったのも、これまで、過去を振り返らず前進あるのみというスタイルで来たからかもしれない。すると、この VLBI の歴史を書いている行為はどうか・・・

#### <TELEX/FAX/TELEMAIL>

今回のVLBI史の1ページ目は、NASAのVonbun氏から石田鹿島支所長に送られてきたTELEXで始まる。そう、当時の国際通信は、まだ、TELEXが主流だった。また、電波研から海外に連絡をするにはTELEXの案文と訳文を小金井に送り、送信のための決裁文書に多くの承認の印が必要であり、急いでも1日はかかった。これも、鹿島→小金井の送信でFAXが使えるようになったので“高速化”できたのである。FAX装置が鹿島に導入された頃、CS/BS庁舎に1台設置されたので、小金井に送る文書が出来ると秘書のお嬢さんをお願いして、よく本庁舎からCS/BS庁舎まで送信に行ってもらった。

そうこうするうちにNASAからTELEMAILの利用を促され（高橋（富）さんのGSFC滞在の頃）、頻繁に使うようになった。特に、日米実験開始の頃、いろいろな実験の担当振り分けで吉野は国際実験を受け持ったため、かなり頻繁に海外との連絡にTELEMAILを使うことになった。でも、実際にメッセージを打ち込んだのは秘書の野口さんだった。

TELEMAILの威力は大きく、畚野所長からも（NASA等への）メッセージ通信を依頼された。研究者間だけの通信であったので、コンピュータウィルスとも無縁で、その意味では、現在より気持ちよくシステムを使えた時代であった。

なお、GE MarkIIIといった別の通信サービスもあり、必要に応じこれも利用した。

#### <1局 VLBI 事件>

何の場合でも同じだが、VLBI は実験を始める前の準備がとても大事。組織間の協力では、その下地作りから入念に行うことが必要だ。CDP 実験の場合、NASA が国際協力における強力なリーダーシップを発揮し、そのもとで計画が進められるので、大船にのった気持ちがする。しかし、自主性を発揮した国際実験を独自に始めようとする、NASA が当たり前のように行っている事前の準備を自分でやらないといけない。

こんな経験をしたことがある。ある時（多分、1986年頃）、欧州（仏）の某機関が、VLBIの実験協力を直前になって求めてきた。週末の実験であったが、川口室長から、できれば対応するように言われ、（大規模の実験では無かったため）1人で何とか都合をつけてスケジュールや磁気テープなどの準備作業を行った。しかし、当日、NASA 主導の実験ではないので、いつもは送られてくる実験開始のメッセージが流れてこない。実験提案者が不慣れなのかと思い（およそ半日程度）観測を続けた。しかし、どうも様子がおかしい。提案者には、週末で連絡がつかない。そこで、たまたま実験室にやってきた川口さんに相談し、

同じ観測に参加しているアラスカの Fairbanks 局に電話しようということで、コンタクトを取ったところ「あの実験はキャンセルされた」との情報を得た！何と、全くの無駄作業。1 局 VLBI ではないか。この実験の提案者には、腹立ち紛れに、イヤミたっぷりのテレメールを提案者に送った。原因は中止連絡をきちんとしなかった提案者の不注意であるが、十分な協力の下地ができた CDP 等の実験では考えにくい事件であった。

#### <欧州 VLBI 報告>

高橋（冨）さんが米国滞在中に始めた“VLBI Summit”（米国 VLBI 便り）のレベルには遠く及ばないが、これに触発され、ドイツ滞在時に随時、「欧州 VLBI 報告」（資料を紛失し、題名は未確認）を書いて鹿島に送った。システムレベル実験の成功には GSFC での高橋（冨）さんの活躍がとても大きかったが、実験のキーとなる双方の観測システムの互換性情報を綿密に確認することで、実現性に目処が付いたことは大きい。当時、何でも米国中心に進められていた国際 VLBI であるが、次の時代に向けて、日本が力を付けたときに自立して計画を進められるよう、出来るだけ世界の生の情報を鹿島側に提供しようという心意気で書いていたように記憶している。覚えている人はいないかな？

#### <システムのネーミング>

後に、K-1 と呼ばれることになった VLBI システムの開発、実験を行っていた頃、技術的に学んだ米国システムの名前が MarkII システムであることは認識していたものの、名前などなくとも何も困らなかった。その当時は、鹿島で開発した VLBI システムのブロック図といえば、K-1 のブロック図に決まっていた。しかし、その後、K-2 開発が始まると、議論の中で、K-1 と K-2 の話が混じって混乱する事態が生じ始めた。質実剛健の 3 研上層部は、ネーミングなど全く関心を持たず、いかに良い開発成果をもたらすかしか眼中にないようであった。しかし、混乱がさらにひどくなり、放置できない状態となったため両システムを呼び分けることを提案した（あたりまえの流れだが言わなければそのままと見えた）。名前は何でも良いというので「鹿島の 1 号機」として K-1、2 号機は K-2 と呼び習わした。その後、K-の由来が何であるか諸説（開発者のイニシャル、小金井、国分寺等々）語られるようになったがこれらの理由は後付けであり、上記のように単純な由来である。しかし、この言葉が世界に通用するようになり、もっとしやれた名前がなかったのかとも思い返している。

#### <見学対応>

いつも VLBI 施設への見学対応は頻繁に要請があった。鹿島でも、小金井でもその対応をかなり数多くこなしたことを覚えている。多いときは、日に 3 回も。国内国外から、老若男女が来られた。小金井では、研究所の見学ルートに入らなくなったら（プロジェクトが）危ないよなどと言われ、半分は義務化していた。ある時は、大物政治家に握手を求められ

たり、一般人が目を輝かせ本当にうらやましい仕事だと言われたりした。あまりの頻繁な対応で、少しは鍛えられ、客の反応で話を即座に切り替えることも出来るようになった。しかし、時には、某国（アジア）の研究機関からの見学では、意図的にイヤミを言われることもあったが、概ね好意的な反応で、時に、こちらも感心するような質問を受け勉強になった。

#### <位相シンチレーション実験（K-2）の時刻同期>

K-2 のシステムがほぼ完成し、鹿島-平磯の実験を開始する前に、両局の時刻同期を計画した。運搬時計法でこれを行うため、鹿島から Cs 時計を車で運び、平磯の時計合わせをしようとした。出発前に、鹿島で入念な時計あわせを行う高橋（冨）さん。道中も慎重な運転、そして随時、時計が稼働を続けていることの確認をしながら平磯に到着。さて、外部バッテリーを外し、時計を平磯局のサイトまで運び込もうとしたら、何と、時計がダウン・・・！ Cs 時計は、内部バッテリーでも短時間の動作が可能はずだが、このバッテリーがあがっていたのか外部バッテリーから切り替わった途端に時計は STOP。この時、高橋（冨）さんは平然と両局を結ぶマイクロ回線の端局に向かい、鹿島側と連絡を取り始めた。まるで、手順通りのように、マイクロ回線を使って双方向で時刻同期を達成した。では、何のため運搬時計を実施したのか・・・?? ここは、理由を問わない方がよさそう。どんな事態にも冷静に対応する高橋（冨）さんでした。お見事。

## エピソード

### 6.1.3 解析のあれこれ

高橋幸雄

解析において記憶に残ることとしていくつか書いておきたい。

#### (1) 解析方法 1

CDPプログラムとして協力していた米国GSFCのChopo Ma博士が日本を訪れた1985年ころであるが、当時基線解析を主に行っていた中で、大気の推定において、私が6時間毎に解析していた。当時は、基本的には1実験で1パラメータの推定をとり、仰角の依存性と遅延残差を見ながら、特にずれが大きい区間に大気推定を入れていた。個人の解析感覚に依存していたが、そこに6時間毎に、入れた推定をしていたことを、話したところ、その方法については一定の評価はもらった。その後、2時間毎に変化率を自動推定する方法が主流になる数年前のことで当たった。大気の本質が、時間的に日変化などが大きな要因であることが分かったが、その先駆けの推定であったが、その本質をもう少し探究すれば、日本から新しい解析が提案できたかもしれないことは残念である。

#### (2) 解析方法 2

当時解析は最小2乗法を用いることが多くあった。米国のJPLがカルマンフィルタを用いた解析方法を行い、日本でもその方法の解析ソフトを作成して行ったが、結果としては大きな違いはなかったが、微妙な違いがあり、この違いは気になっていた。それ以外に、新しく独自に差分による解析方法を提案した。これは、VLBIでは、同時には複数の電波源を観測できないが、連続した複数の観測値では、時刻やその変化率が共通であることから、近隣のデータ間の差分を取る方法である。これにより、近隣のデータで共通な要素はキャンセルされ、推定する必要はなくなると同時に、推定したいモノだけが際立つ効果が得られる。この方法のいい面は、後で分かったことだが、物理モデルの誤差以外に、システム誤差は完全にランダムではなく、近隣のデータでは共通性がある傾向があったため、その後さ要因も来てくれたことで、完全にランダムな誤差要因だけが残ることになった。途中でこの解析システムの開発を止めたが、もう少し続けていればよかったかもしれない。

#### (3) 地球回転パラメータの日変化

地球回転パラメータの日変化を見つけた時である。1990年ころであるが、地球回転の実験を国立天文台の緯度観測所と一緒にやり、我々が地球回転に力を入れていた時期である。当時は、日本主導の地球回転観測を数多く行ってきた。その時に、地球回転パラメータの中で、自転軸の方向の動きを示す極運動(WOBLLE)のXY成分を、細かく分析したところ、日変化が見られた。研究会などには報告したが、原因まではわからなかった。しかし、

それが、実は歳差・章動のモデルからのずれであることがあとでわかる。歳差・章動と地球回転軸の方向は、深く関係していて、式で見ると地球自転の日変化が間に挟んだ関係になっていて、それが日変化を表していたのである。当時は、歳差・章動を推定することは一般的でなく、位置変化を中心に推定していたが、歳差・章動を推定するには、いくつかの局位置が既知であるなどの条件が必要であった。そのため、推定されていなかった。マルチ実験の解析（複数の実験を用いた解析）を行い、位置関係が変化しにくい観測局の位置を固定したり、個々の実験での位置変化ではなく、連続した観測局の速度変化を推定するというように、観測局の位置推定パラメータの自由度を減らすことで、地球回転パラメータの推定を安定して実施することができるようになったが、当時はそこまでの解析はできていなかった。そのため、日変化の理由までには至らなかったのも残念である。

#### （４）日本初の VLBI 電波源カタログと電波源解析

星の位置に関しては、日本で最初の高精度な電波源位置カタログを作成したが、その後も電波源の位置についての研究を進めていた。当時電波源の位置推定は、特に星によって残差が大きいものだけを推定していた。こうして星の位置が高精度に決めることはできたが、そのデータがたまったところで、時間変化を見た。すると多くの電波源で、位置が一定の速度で変化する傾向と、不規則であるが変動をしている傾向が見られた。この変化が何なの、2つの解釈をしていて、歳差のパラメータの変化によるもの、もう一つは地球から見た電波源の位置が変化していると考えた。歳差は、電波源に対して一定の規則での変化を示すが、それ以上に電波源の位置変化を示すものがあつた。これは電波源の構造が見えるものほど大きいということもあり、これが、我々の観測している位置は、電波源の構造の平均的な位置であるという解釈を得た。物理的な中核の動きは小さくても、実はほとんどすべての電波源は、周りにジェットや電波を発する構造を持っており、それが数か月単位で変化しているので、平均的な位置が動いているように見える。ただし、その動きは不規則である。動かないとしていた電波源も、歳差や章動のモデルが正しくないことで位置が動いているように見えるが、それは推定で求めることができる。一方、星の構造変化による動きは不規則であり、推定はできないので、区別してみることができる。その電波源位置変化は、電波源の構造が見える場合には大きくなる傾向にある。

その当時の基準電波源 3C273B などの星の構造に関する解析を行った。当時は、計算機はパーソナル的に開いている時間を費やすことができ、多くの時間を計算にかけることができた。データが多くないことや、他の物理モデルの影響などがあつたこともあり、当時の電波源の解析を行う AIPS というソフトでは解析できず、独自に構造を簡単なパラメータにして、いくつかの構造でどのような一致をするかを、時間をかけて推定した、その結果 3C273B などのいくつかの構造の変化を求めることはでき、論文にすることはできた。

## (5) 電波源の強度変化の解析と構造

こうした電波源の構造は、実は、電波源の観測される電波の強さの変化を及ぼす。観測したデータを見てみると、電波源の強度すなわち信号の強さが同じ条件でも違っていることを感じていた。そこで、おそらく初めてのころみであったと思うが、電波源の強度の事案変化を調べてみた。そのためには本来アンテナ性能の攻勢が行われたいけないが、当時はまだ不十分で、それをできるだけ除く方法を考え、案恵那性能以上に大きな変化をしていることを示した。これは非常に面白い発見であり、かつ電波源の強度喧嘩が構造によりダイナミックに変化していることが分かったのは面白い発見であった。

## (6) ケーブル遅延

ケーブル遅延の符号の話がある。ケース類遅延は、温度によって変化し、それを補正する手間にケーブル遅延補正のデータを取っていた。これは、ほぼ同じ経路に人工的な信号を入れて、信号ケーブルなどを通るときのその温度変化などの変化を補正するものである。この補正を、プラスにするかマイナスにするかという問題があった。実はケーブルの誘電体の温度変化によって発生するのであるが、誘電体は温度にチャイしてプラスとマイナスの変化をするものがある。それが局毎ごとに代わっていて、その符号がどちらかであるかを、確認することも行った。これは観測当初に確認することであり、今では決まっているが、実験当初は、この問題は結構大きな話であった。やり方は、プラスとマイナスを入れてみて残差が小さくなるほうをとっていたが、この時間変化が時刻の時間変化や大気遅延の時間変化などと推定上では干渉して、なかなかむつかしいことであった。

## (7) 地球回転の観測

地球回転だけを目的にショート解析を行う観測も 1990 年行った。恋の解析を担当し、当時は 5 日に一回程度の地球回転観測を、毎日の変化を観測できることを示した。それによりショート観測の重要性を国際的にもしめし、その後の地球回転の短時間変化」を求める観測につながっていったのではないかと考えている。

## (8) システムレベル実験の解析

本格的な観測は、1984 年 1,2 月のシステムレベル実験の位置解析である。これは、実は、10 c m 精度の日本の位置を正確に初めて決めたものである。幸いにもその解析を担当させてもらった。当時は、はじめ手の本格的な解析のため、その方法なども手探りでやっていたが、それなりの推定はできた。問題は、1 回目の実験の基線が東西の 1 基線で、成分によっては推定精度が悪いものがあり、2 回目の複数実験との違いが出たことである。いろいろな解析方法をとって、どれが正しいかを決めていく時に葛藤があった記憶がある。

### (9) 初めてのプレート運動解析

1985年の日本で初めてのプレート運動すなわち日本とハワイの位置変化を求めることであった。その担当も私が行う機会に恵まれた。当時は、解析をしている中で、いくつかの解析方法によって異なった結果が出てきた。特に大気や時刻の推定方法で変わってくる。一方、その結果が、当時数百万年の地質学的データから出したプレートモデル (Minster&Jordan) のモデルでの1年間の変化に比べて、遅い数値が出た。推定誤差から見ても1 $\sigma$ という67%の信頼度よりも大きな差であった。どの数値を公表すべきかという話もあったが、最終的にはもっとも正しいと思われる方法で出したが、あとで見ると、モデルは現在ではあり程度だとゆであることが分かったので、当時の実験は、ある誤差の中での違いであったということであるが、統計上の3 $\sigma$ で見ればその範囲になっており、プレート運動の最初の瞬間的な変化を観測したことができたことになる。すなわちプレート運動のハワイと日本の変化を最初に高精度に測定し実証した。これは非常に記憶に残ることであり、誇りに思うことである。これらを踏まえて、日本から最初に論文として世の中に出したのも、1985年の日米資源会議での報告であった。残念なのは、そうした成果を、日本側で論文にして発表が遅れたことである。当時は自転車操業的に、開発を進め日米尾実験を行い、解析をするだけに追われていて、論文にまとめる雰囲気になかったこともあったと思う。

## エピソード

### 6.1.4 JPL 技術者 L.K.Skjerve 氏

塩見正

1984 年の K-3 による JPL との DVLBI 共同実験では、鹿島局では JPL から搬送された Mark-II バックエンド装置を使用しました。そのために JPL から技術者 L. K. Skjerve 氏が来日し、実験期間中、鹿島のホテルに滞在しました。その彼が、実験機器の準備中にあるコードの配線をする時に、親指と人さし指の爪でビニール外皮をむきちぎったのを見ました。私達ならニッパーを使うところです。腕力があり入れ墨がちょっとある軍隊経験も



あるような風貌の人でしたが、その彼が鹿島のホテルのことが話題になったとき、「・・・ダーティムービーがあって・・・」と言ったのを覚えています（風貌に似合わずおそらくは敬虔なキリスト教徒かなどと勝手に想像した次第）。共同実験のほぼ 1 年



後の 1985 年の 7 月から 2 か月間、筆者が JPL に滞在した機会に、彼の案内でカリフォルニア州の NASA ゴールドストーン深宇宙追跡局を見学しました。その帰りに彼の自宅（ゴールドストーン局の最寄りの町バーストリーにあるモバイルホームだった）を訪問、食事をいただきましたが、彼の奥様というのが若い



美人だったというおまけもありました。（塩見）

写真：鹿島で L.K.Skjerve 氏と衛星管制課の磯貝、鈴木、澤田各氏  
カリフォルニア州バーストリーで L.K.Skjerve 氏夫妻  
ゴールドストーン地球局のアンテナの一つ（人物は Skjerve 氏）

## エピソード

### 6.1.5 ワールドカップについて

高橋幸雄

2002年、日韓合同ワールドカップに関して、その誘致活動を日本あげて行っていた。NICT（当時 CRL）は、鹿島に VLBI 観測施設があり、この鹿島は、J リーグ発足時期から参加している鹿島アントラーズがある町でも有名である。鹿島においても、ワールドカップ誘致が悲願であったこともあり、少しでも誘致に向けた支援ができないか、地元も含めた人々の意識を高められないかということで、鹿島の皆さんからの援助もあって、34m アンテナに、ワールドカップ誘致に向けた支援の絵のシールを貼ってピーアール活動に協力した。1996年4月末から1997年5月まで1年継続した。

この絵に関しては、アンテナの性能を落とさないように、導電率なども含めて検討を行った。特に22GHz帯などの高い周波数での観測も行っていたため、この材質には注意した。また、後元に戻すことも考えて、特殊なシールを貼ることにした。

通常アンテナは天頂を向いているため、見えないが VLBI 観測などアンテナを動かすときには、いろいろな方向に向くため、見ることはできた。そばを通っている道路から見ることもでき、近くに鹿島アントラーズのクラブがあるので、そこを訪れる人なども見る機会があったと思う。また、鹿島上空は、国内外の航空路の通り道でもあり、飛行機からこのアンテナを見たときに、この図が見えたときは感動であった。



図 ワールドカップ誘致に向けた絵を描いた鹿島34m アンテナ

## エピソード

### 6.1.6 要石と鹿島神宮

高橋幸雄

VLBI の日本の発祥に地である鹿島は、関東地域の東の端にあり、北米プレート上にあるが、太平洋プレート沈み込みやフィリピン海プレートのもぐり込みの影響で、地殻変動や地震が多い地域でもある。

鹿島局の近くには、鹿島神宮という日本建国・武道の神様である「武甕槌大神」を御祭神とする、神武天皇元年創建の由緒ある神社がある。700年頃の「常陸国風土記」にも記載がある由緒ある神社である。そこには、国宝であり日本最古最大の直刀もあり、鹿島神宮に仕えるト部氏で「鹿島の太刀（たち）」という古くからの剣法の継承者ということで剣豪の塚原ト伝も生まれ育った地でもある。

この鹿島神宮を奥に入っていくと、その先に要石がある（図1）。この要石は、表に出ている部分はほんのわずかであるが、水戸黄門（徳川光圀）が七日七夜掘り続けても底が見える様子がなく、あきらめたといわれるもので、地震を押さえつけている石として、昔から信仰がある。



図1 鹿島神宮にある要石

また、江戸時代の安政の大地震の時に、地震から守るお札として、鹿島神宮の要石をモチーフにしたナマズ絵が描かれた（図2）。

VLBI で、測地 VLBI 実験を開始し、世界測地網とつながった基準点となり、またプレート運動の実測を初めて行い、地殻変動観測の先駆けとなった鹿島という地に、地震を抑える要石伝説があるというのも、不思議な関係を感じる。



図2 ナマズ絵（地震を抑える要石のお札）  
出展 IPA「教育用画像素材サイト」より

## 表彰

### 6.2.1 郵政大臣表彰、NASA Group Award と電子通信学会業績賞の受賞

K-3 システムは 1983 年 11 月、初の日米間の VLBI 実験により、十分な互換性を持つことが確認され、その後の 1984 年 1 月と 2 月にも日米間のシステムレベル実験は繰り返され、必要とされる機能・性能も有することが確認されました。鹿島 3 研や周波数標準部の VLBI システム開発グループはこの功績により 1984 年 4 月通信記念日に郵政大臣表彰を受けました。

1984 年 7 月から日・米はもちろん、ヨーロッパの VLBI 局を含む国際

VLBI 実験が開始されました。1984 年 7 月から 1 年間の国際実験により、1985 年 11 月太



3.10-1 図 K-3 システム開発で開発グループが郵政大臣の表彰を受ける。



3.10-2 図 NASA Group Achievement Awards が日米 VLBI 実験関係者に送られる。



3.10-3 図 電子通信学会業績賞 佐分利、川尻、河野氏に贈られる。

平洋プレートが現在も移動していることが明らかにされ、プレート理論が実証されました。この成果は世界を駆け巡り、1985 年 12 月には NASA 長官からプレート運動の実証に対し、日米の VLBI グループに団体賞 (Group Achievement Award) が送られました。また 1986 年 4 月には K-3 VLBI システムの開発の功績により佐分利義和氏 (VLBI システム研究開発推進本部長)、川尻轟大氏 (VLBI システム研究開発推進副本部長) と河野宣之氏 (同本部総括主任) の 3 名に電子通信学会業績賞が贈られました。

## 編集後記

本資料は日本の VLBI の初期及び発展期の資料や記録として未だ十分とは言えず、今後  
も皆様のご意見や資料の追加・修正により充実を図っていく予定です。また、初期及び  
発展期に続き、VLBI 応用技術が日本で開花する時代がこの後、到来します。すなわち、  
測地 VLBI (KSP など)、VSOP、VERA、RISE 等の一連の計画が実施され、世界を驚かせて  
きました。これらの技術は測地学、天文学、宇宙探査などの広範な研究分野に広がって  
います。従って、資料収集や成果の記録等には、多くの人々の協力は不可欠となります。  
関係者が連携して遅くない時期に開始されることが期待されます。

最後に、電波研究所 OB、国土地理院などの関係機関や会社の方々への協力にあらためて  
深く感謝いたします。また、中心になってとりまとめを行ってきた「日本の VLBI の初期  
及び発展期の資料収集と記録を残す会」の趣旨とメンバーを以下に記すこととします。

\*\*\*\*\*

### 「日本の VLBI の初期及び発展期の資料収集と記録を残す会」 設立趣意書

VLBI(超長基線電波干渉法)は代表的な宇宙技術の一つとして、電波天文学、測地学や宇  
宙科学などにおいて、これまで新たな研究分野を開拓し、また現在も新しい観測技術とし  
てこれらの分野を牽引する重要な役割を果たしています。カナダや米国で始まった VLBI  
は 1970 年代後半に入り日本でもシステム開発が開始されました。開始後、日本の研究・開  
発は目覚ましい発展を遂げ、わが国が開発した観測システムは今や世界をリードするに至っ  
ていると言っても過言ではありません。

この技術が日本に導入された初期においては先行するカナダや米国で培われた技術を習  
得し、成長期においては諸外国と対等に観測を実施し、更にわが国独自の観測システム  
の開発へと変遷してきました。これらの役割を主として担ってきたのは元郵政省電波研究所  
鹿島支所の旧第 3 宇宙通信研究室(厳密には国内基礎実験の後に旧第 2 宇宙通信研究室を  
受け継いで発足、以後旧 3 研)であります。

現在、旧 3 研の時代からおよそ 30 年が経ちました。初期と成長期は旧 3 研のメンバーが  
日本の VLBI 技術を作り上げ、発展させてきた歴史でもあります。これらの時期では予算、  
体制ともに厳しい状況の中で、画期的な成果を上げ、今日の VLBI の発展を築いてきまし  
た。現在も技術立国を標榜するわが国においては、多岐にわたって新たな技術を開発し、世  
界に伍していこうとする試みが数多く見られ、これらを応援する意味でも、わが国におけ  
る VLBI 技術開発の足跡を記録に残していくことは重要と考えます。しかし残念ながら、4  
分の 1 世紀以上も経つと、当時の資料は紛失、成果も記憶から離れていき、忘れ去られつ  
つあります。

このような現状を踏まえ、旧第 3 宇宙通信研究室のメンバーを中心に、当時の貴重な関  
連資料を収集し、また現場で奮闘する様子などを記録し、後世に遺すことを目的として本  
会を発足させるものであります。

平成 25 年 6 月 1 日 (電波の日)

日本のVLBIの初期及び成長期の資料収集と記録を残す会

メンバー：(旧3研在籍順)

川尻轟大、河野宣之、高橋富士信、吉野泰造、小池国正、川口則幸、  
浜 真一、杉本裕二、黒岩博司、 近藤哲朗、国森裕生、雨谷 純、  
村上秀俊、栗原則幸、木内 等、 金子明弘、高橋幸雄、日置幸介

(世話人：河野、吉野、高橋幸)

\*\*\*\*\*