

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。

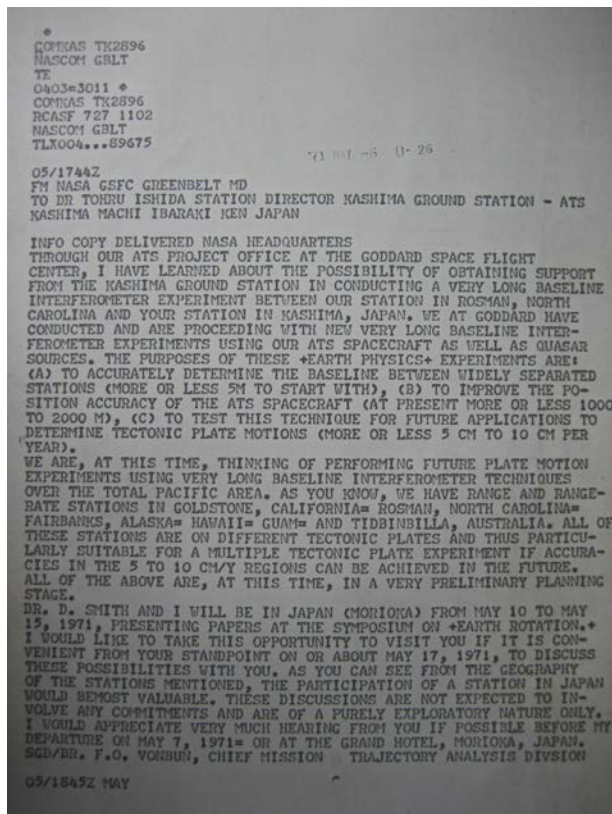
石田 亨博士 鹿島地上局所長 様
NASA ゴダード宇宙飛行センター
より

.....

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。

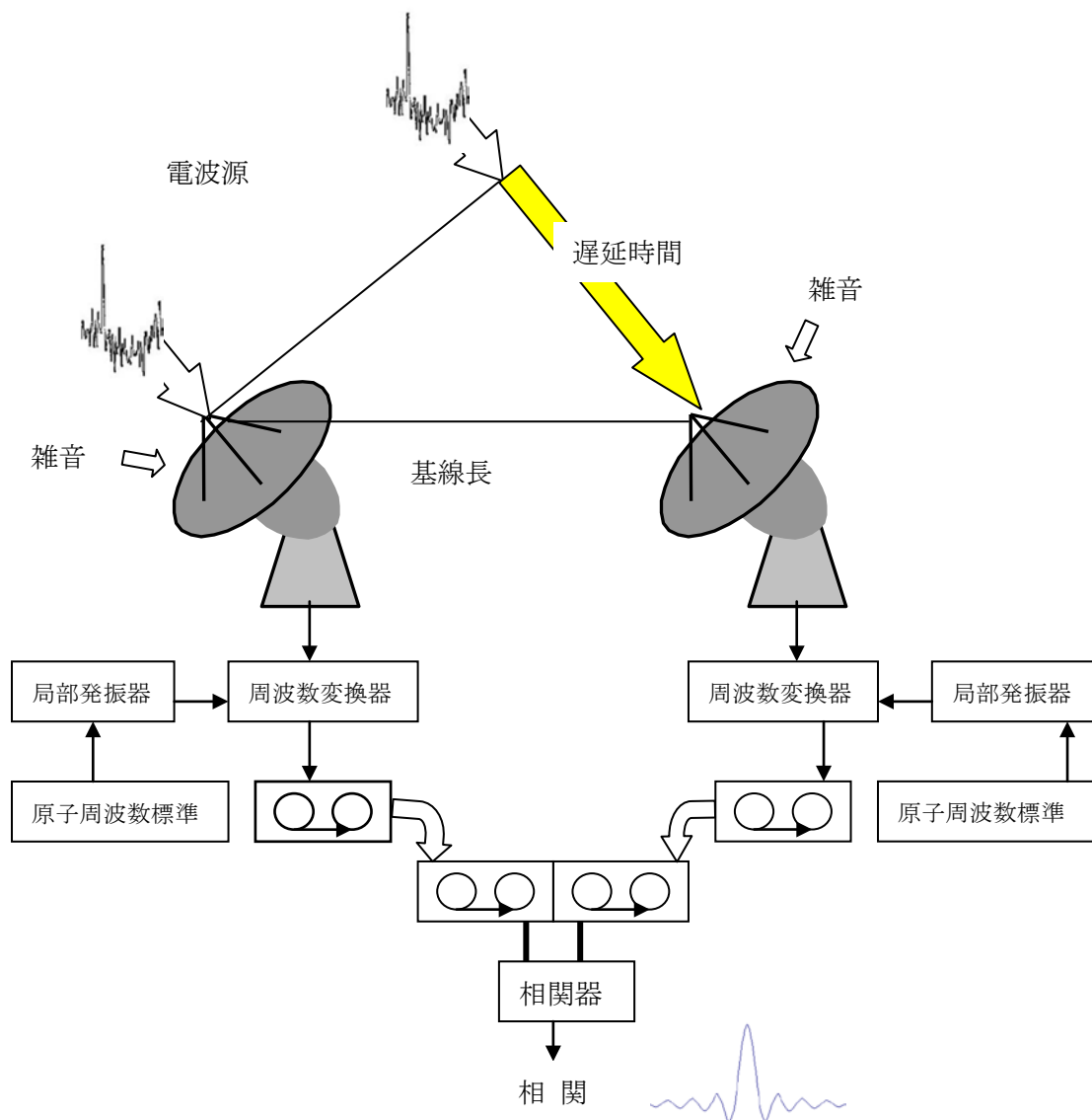
この理由以外に、鹿島では NASA 本部 GSFC と各種の宇宙通信実験を頻繁におこなっており、この協力関係の延長として VLBI も加える、あるいは既に協力関係があり、やりやすい、と考えたのではないのでしょうか。しかしこの後、数年は、NASA との VLBI 実験の実施などの急な進展はありませんでした。

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

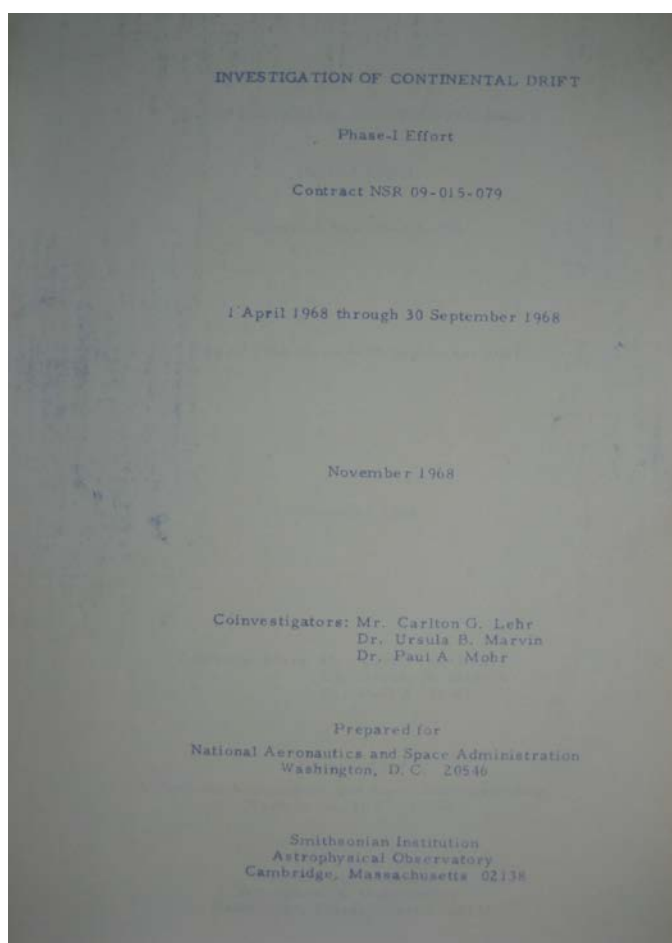
このように、VLBI システム開発に必要な大蔵省予算はなく、宇宙通信の研究などで獲得した一部をまわしてもらって(研究所内の予算)、なんとか進めていくような状況でした。ご存知の通り、全ての研究者・グループは限られた予算で最大の成果を上げようと努力しています。宇宙通信の研究者にとって、苦勞して取ってきた予算は研究所本来の業務以外

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

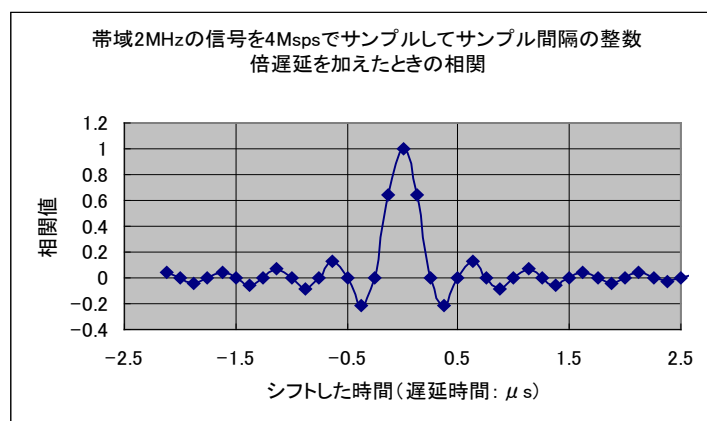
有名なバンド幅合成の論文を何度も何度も読んで、やっと理解したときです。ここまでに至るのに、2年ぐらいかかったかな？

1.7 負の相関 (専門以外の方は飛ばして読んでください)

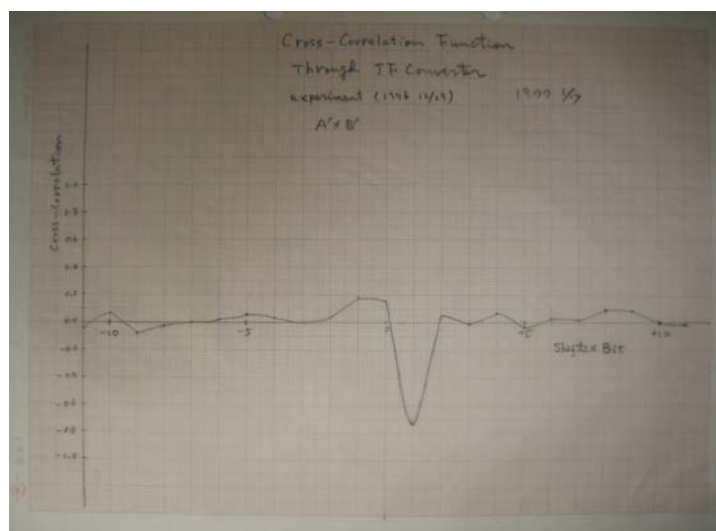
VLBIでは同じ発信源からの信号を遠く離れた2箇所で受信しますから、2箇所にその信号が到達する時刻の違い、別の言い方をすれば遅れ時間(遅延時間)だけずらせば、互いに異なる雑音が混ざっていても、同じ信号成分の相関が出るはずですが、広い帯域を持つ同じ信号の相関(自己相関関数)は7.1図に示すとおりです。雑音がある場合は最大値が1より小さくなるだけのはずですが、ところが、あるときアンテナで受信して、増幅して周波数変換をして、2つに分岐した信号の相関を取ると、教科書に出てくる相関関数(7.1図)を丁度ひっくり返した7.2図の相関が出てきました。このような相互相関関数は普通の信号解析やスペクトル解析の本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

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、ローカル信号もる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 2π 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もし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る、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。

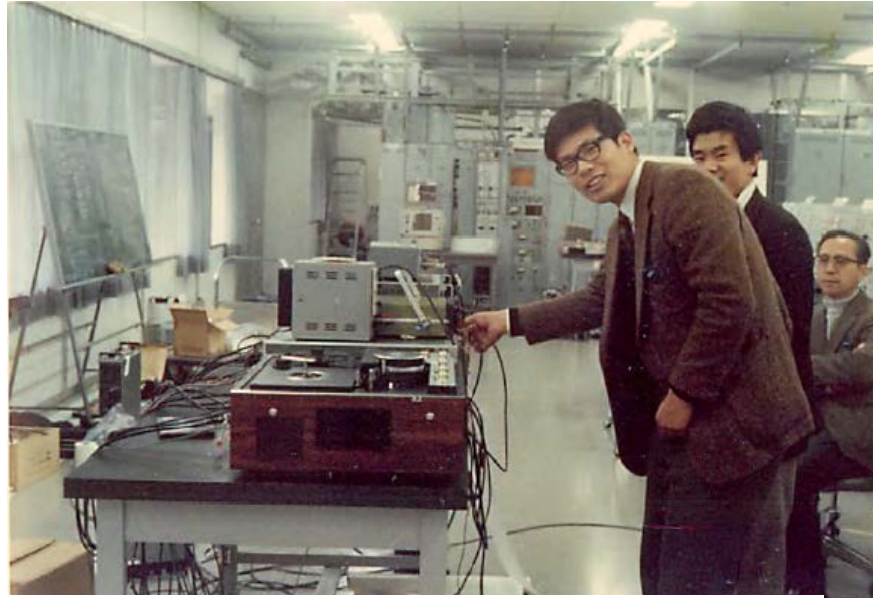
実験準備のため皆で横須賀通研の見学に行きました。その施設は、多くの測定器や研究・技術者の人数、豊富な実験装置などどれを取ってみても鹿島支所を凌いでいることを受け入れざるを得ませんでした。私はまだ若くて日本の通信研究の状況を理解しておらず、郵政省は勿論新しい宇宙通信技術の実験で大きな成果を上げていたが、米国のベル研究所を目標にしていた横須賀通研と電電公社電気通信研究所は日本の通信研究の総本山として君臨していることを始めて認識しました。鹿島支所の宇宙通信グループのメンバーで天文グループを批判する人がいましたが、日本のトップレベルでの比較になると色々と事情があるのだな、と安堵の感を禁じえませんでした（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りません。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)		
		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への参事同席		
	18日	時刻調整準備 (原島 録音機) 日通機 録音機バックアップ		
	19日	水	二研打合せ	
	20日	木	YOKへ打合せに出発 (6時)	
	21日	金	(ソフトボール大会) 松波土屋、北郷氏見学 (10)	
	22日	土	26日追尾テスト↑ 準備中	
	23日		予備日 (マラソン大会)	
	24日			
	25日			
	26日			
	27日	木	電源機出張 (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 27日 Yok ボイニング 4277, インテルサット4号受信	
	29日	土	(小池帰院) テータ処理 21日 11月 11日 11日 11日	
	30日		インテルサット4号 27日 電波星(0時)	
2月	1日		予備	
	2日	水	ATS-1, 3C273	
	3日	木	予備	
	4日	金	ATS-1, インテルサット 3C84	
	5日	土	予備	
	6日		備忘録	
	7日			

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の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。

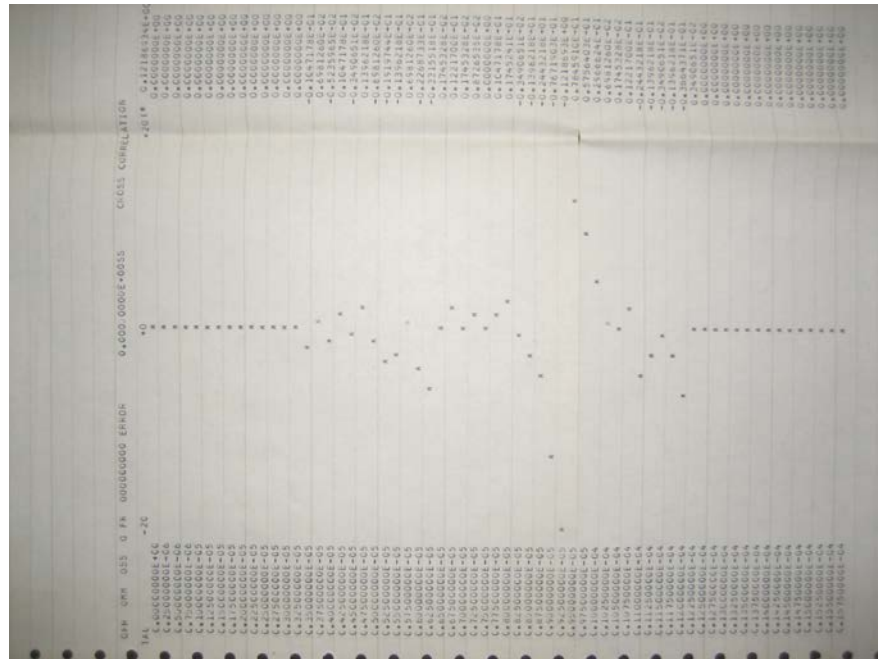
相関のときに一方の信号をどれだけの時間をずらせば相関が出るか、あらかじめ高橋富士信さんが予測値として別途計算していました。相関結果は LP にグラフになって打ち出されるようにしていました。最初の相関結果がパンパンという音と共に打ち出されました。予測値付近で大きな相関が目の前の LP に現れるはずですが、息詰まるような一瞬！・・・ところが、相関はゼロ付近を僅かに上下しているだけでグラフに大きな山がない！ 何故！ 本当？ どの装置が正常でない？ 実験失敗？などがめまぐるしく頭の中を駆け巡りました。その後はしばし放心状態。

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。

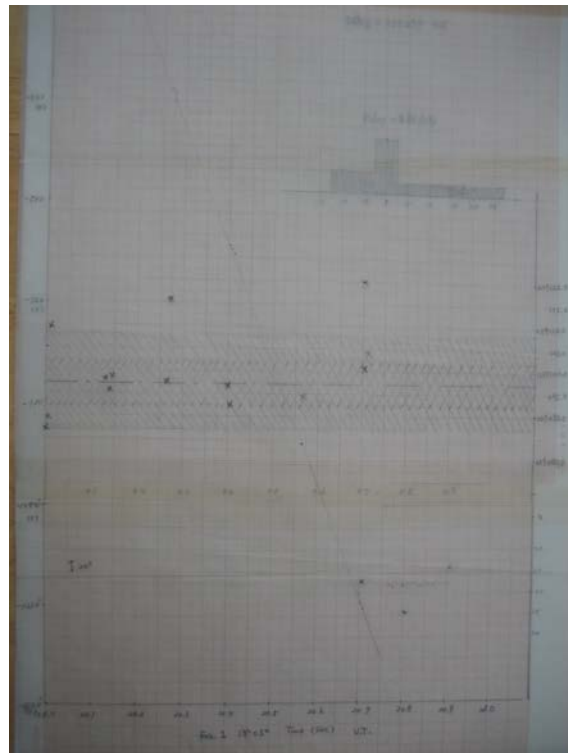
その後、実験メンバー全員の喜びは爆発し、成功の報は横須賀にも伝えられました。10 年後には世界を凌駕する VLBI の最初の成果は、なんとも自慢できない出来事から始まってしまいました。



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、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に合意されたので、更にこの後となります。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となります。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えることです。

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）