

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。

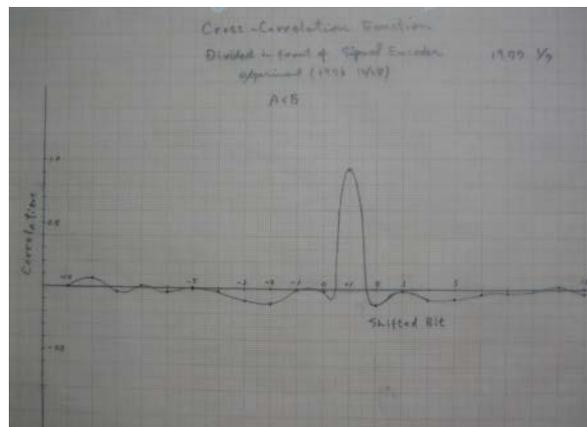
一方、1976年から新しい宇宙通信分野を開くミリ波通信というチャレンジングなECS計画が進められ、鹿島支所に実験実施センターが設けられました。この計画の進め方はこれまでのトップダウンの計画と異なり、計画をリードしていた畚野氏（後に所長）の意向もあって、実験テーマを募るといってこれまでにない新しい方法を探りました。今では科研費や宇宙開発関連プロジェクトではより大きな成果を得るため、多方面・多分野の研究・技術者からアイデアを募る方法は当たり前の方法になっていますが、当時しかも実用を目指した衛星計画ではまったく新しいやり方でした。（畚野氏のコメントで、サイエンスをやっている研究者のいるVLBIのグル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



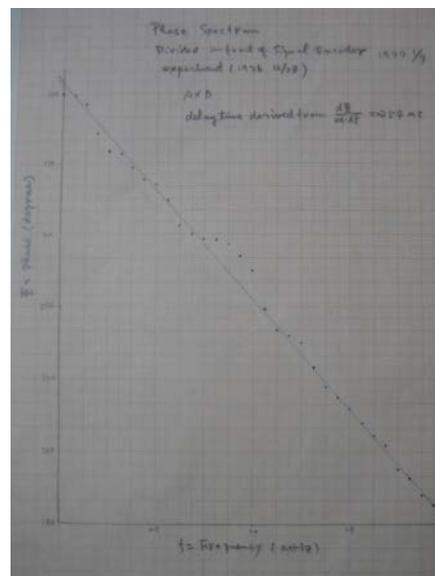
2.1 図 信号を2つに分けて一方に遅延を加えた後の相関関数の例

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認するため、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。

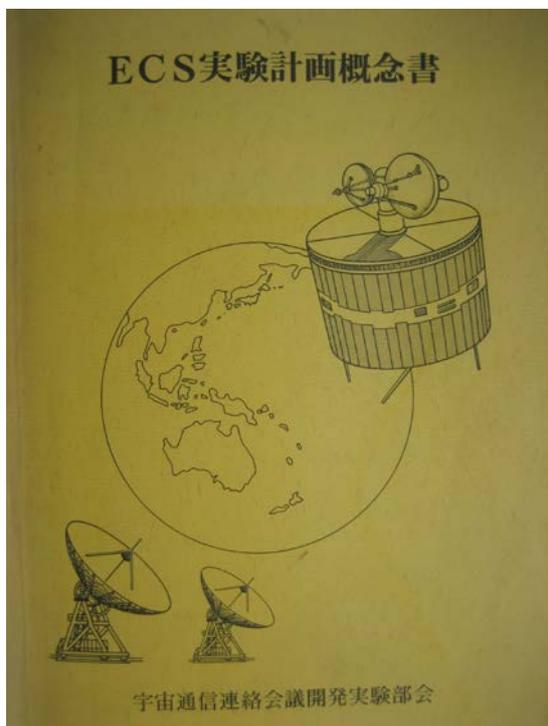
宇宙通信あるいは衛星計画に参加することは危険性も帯びていると考えられました。つまり、一般論ですが、衛星計画はスケジュールが厳しく管理されていて、また、大型の予算と多くの研究・技術者を動員してやっとできるプロジェクトです。研究・技術者にとって、他のプロジェクトに参加するのと少し異なった覚悟は必要だったと思われます。一旦始めたら最後まで遂行しなければならないことは言うに及ばないことです。そうなったら VLBI システム開発は途中で頓挫してしまうことにもなりかねません。だからといって、当時の情勢では ECS 計画に参加しなければ研究・技術者の大量動員のために衛星計画の草刈場になる危険もあります。3 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プロジェクトの概要 | 1 |
| 1.1 経 緯 | 1 |
| 1.2 エドモントン通信と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. 衛星通信回線の干渉実験 | 79 |
| 3.1 CSとの干渉実験 | 79 |
| 3.2 伝送衛星間干渉実験 | 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 1.7GHzの雑音減衰及び安定伝送に関する実験 | 104 |
| 4.3 主局 - 副局アンテナの取得 | 111 |
| 4.4 1.7GHz (35GHz) の伝送数値実験 | 113 |
| 4.5 シンチレーション特性の測定実験 | 117 |
| 4.5.1 距離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. エドモントン通信回線の他の実験 | 137 |
| - オートコングレッション、切替実験 | 137 |

4.2 図 概念書目次 1/2

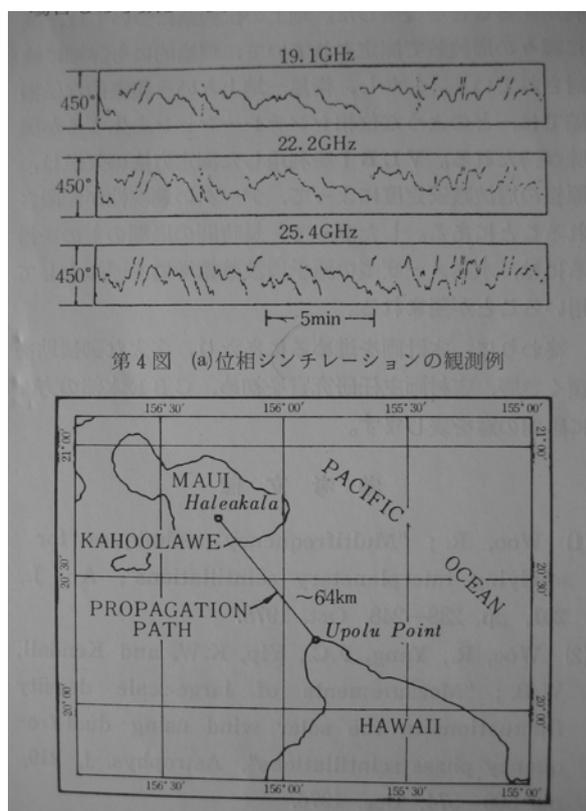
2.5 位相シンチレーションは何？

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。



第 4 図 (a) 位相シンチレーションの観測例

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 2π 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。

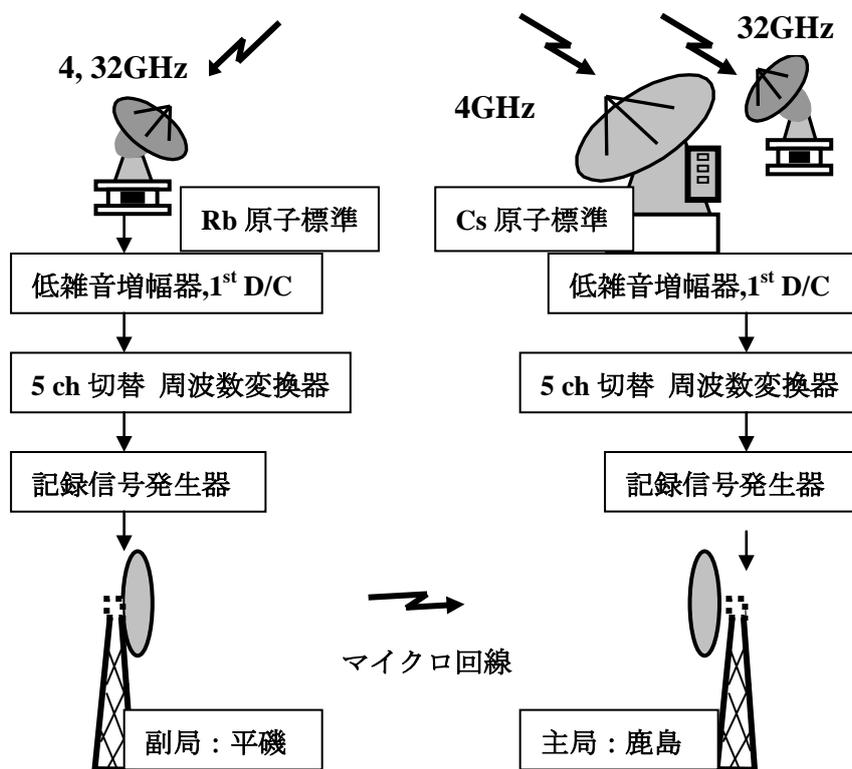
遅延の変化や位相差の測定は2)で述べたように、VLBIの得意とするところですから、この位相シンチレーションをVLBI装置で測ることができます。また、これまで地上でしか測定できませんでしたが、実際の宇宙通信に近い伝搬路での測定がVLBIによってできることは、大きな意義があるといえるでしょう。

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

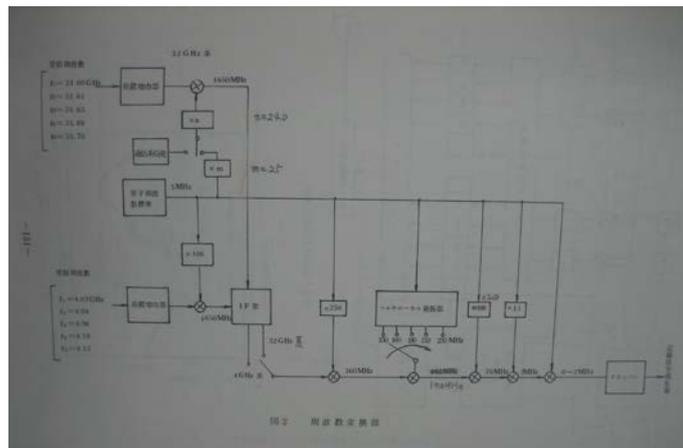


6.1 図 位相シンチレーション測定システムの概念図

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勧告されたのです。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⁽¹⁾ 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



10.2 図 K-2 システムの初FRINGE検出 (吉野氏所蔵)

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 ± 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 ± 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はないにせよ、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。

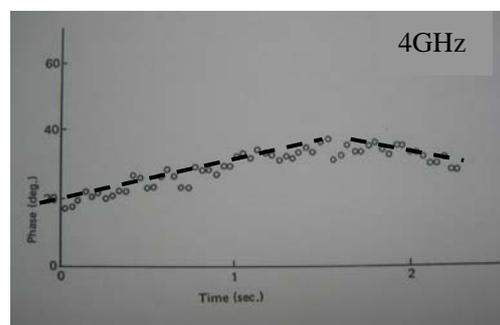
2.12 K-2 による位相シンチレーション等観測成果

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。

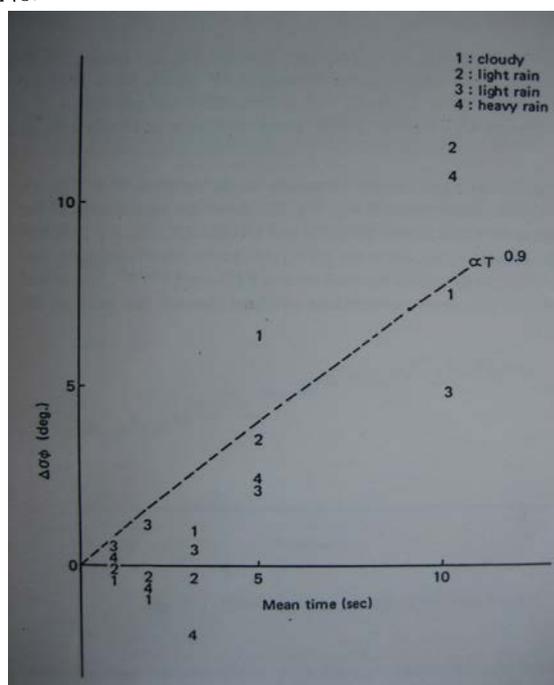
(1) 位相シンチレーションの測定

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 1×10^{-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。

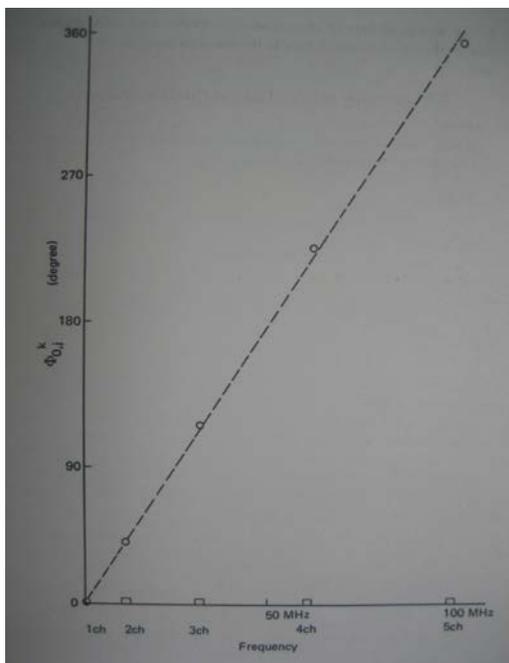
(2) 準星の観測による遅延の測定

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

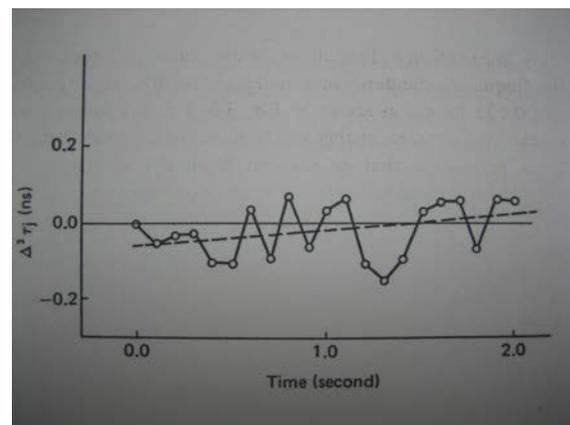
式（モデル）で示されていて、計算できます。この遅延の計算値と実際の観測値との差が重要です。この差が測定誤差なのか、遅延を計算するモデルを改良すれば小さくなる差なのか、研究者の洞察力が必要です。測定誤差なら何が原因なのか、計算するモデルならば何処を改善すれば差が少なくなるのか、それはどのような現象を示しているのか、などどんどんより深い考察に進みます。このような考察から、遅延時間を 0.1 ナノ秒の精度で測ると、大陸間の距離を 3cm の精度で、星の位置は“地球から月面に立った人を見たときの角度”（約 1 ミリ秒角）の精度で推定できるのです。“地球回転”についても、回転の方向は星位置と同じ精度で、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



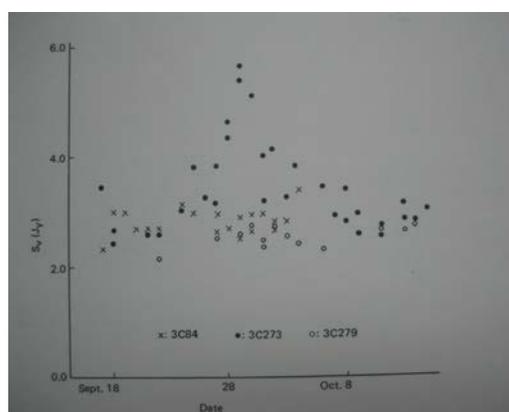
12.3 図 5 チャンネル間の位相差



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

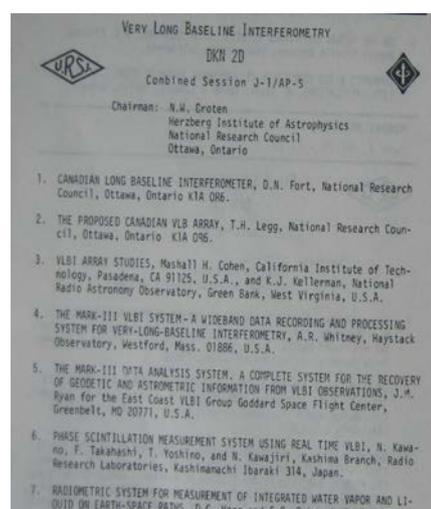
3つ目の実験は QSO3C273 と 3C279 からの電波が地球まで届く伝搬路が1年に1回だけ太陽の近くを通過するときがあります。このときを狙って鹿島と平磯2局で電波を受けて相関を求め、太陽コロナによりその位相と振幅の両方が変動するビジビリティーシンチレーションを測定しました。ビジビリティーシンチレーションは吸収で振幅が変化するのではなく、太陽周囲のプラズマに濃淡があるために、いろんな伝搬路を経た電波の合成波が地上に到達するため振幅と位相の両方が変化するものです。近い将来、人工惑星を打ち上げて太陽を含む惑星系の観測をする際、人工惑星が太陽の反対側から地球に向けて電波を送信するときに、このよう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言う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。

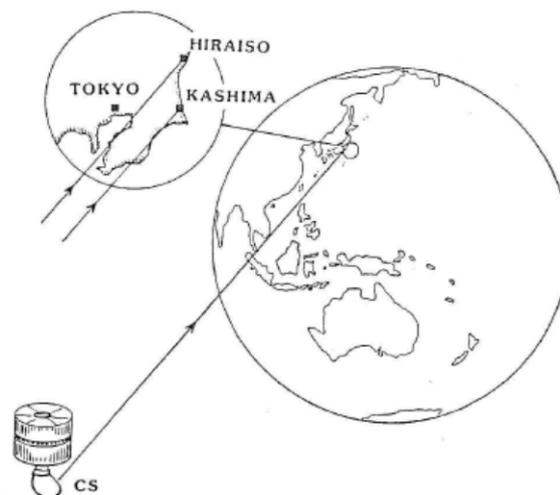
2.13 K-2 による CS の軌道測定実験

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 Δ

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。 Δ 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。

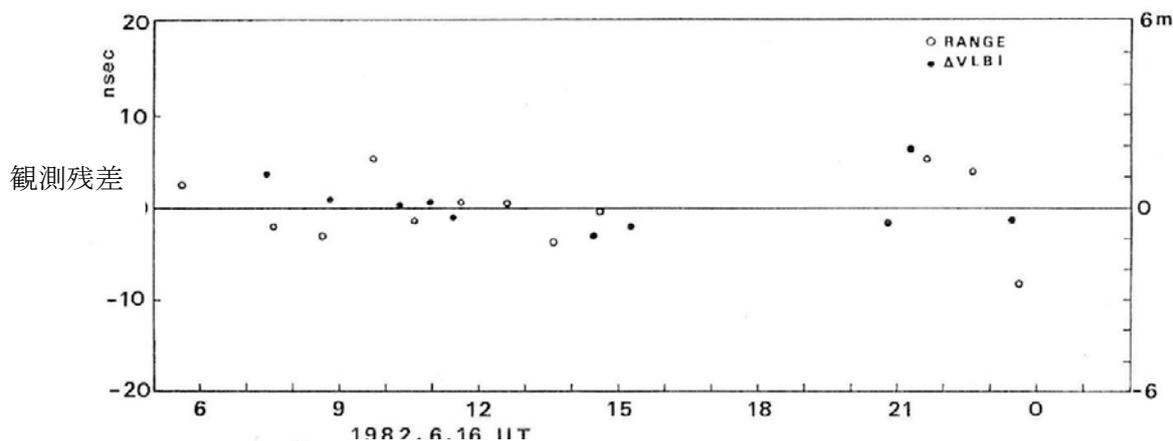
その結果、幾何学的遅延時間の測定精度は、CS では 0.3nsec 以内、準星では 10~140nsec 以内で、 Δ VLBI 観測値の総合精度は約 2nsec (60cm) となり、測距データ等を併用した軌道決定で衛星位置にして約 100m の精度が達成されました。実際の観測値と軌道決定による理論値をグラフ化すると 13.2 図のようにそれらの差 (観測残差) が、ほぼ 10nsec (3m)



13.1 図 CS の軌道測定実験の位置関係

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、 Δ 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.