

## 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
で
(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) 帯域幅帯域 (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) はパワエレの機能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、

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
	受信系設置ケーブル敷設	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ー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。

5mφ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。

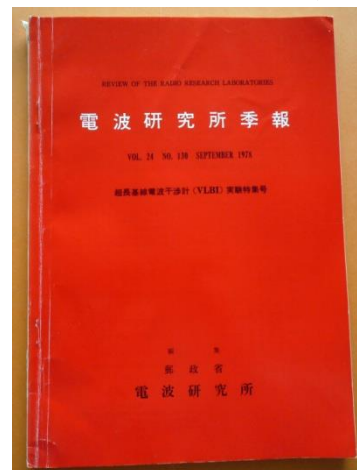


写真-6 電波研究所季報  
Vol.24 No.130 September1978  
超長基線電波干渉計 (VLBI) 実験特集号



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の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であるから、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

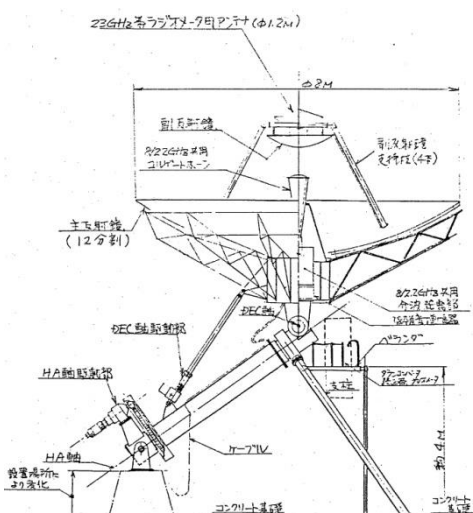


図-3 三菱電機より提案のあったアンテナの概観図。天体観測用望遠鏡で良く用いられている赤道儀式となっていた(三菱電機提供)

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)

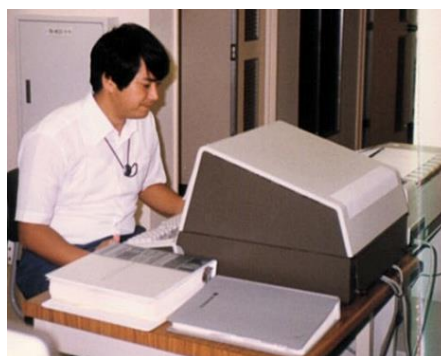


写真-9 筑波の観測室で VLBI を制御する  
ミニコンの端末を操作する齊藤隆

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。

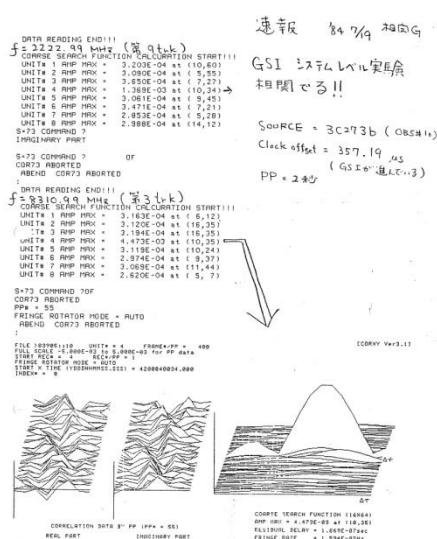


図-4 システムレベル実験後の相関処理で検出したフリンジ。電波研究所の相関処理グループが作成した速報(1984年7月19日)

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)、フリンジを検出した(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(エアロサーブ社製マクロメータ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)
	5~9	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、エアロサーブ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、フリン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。

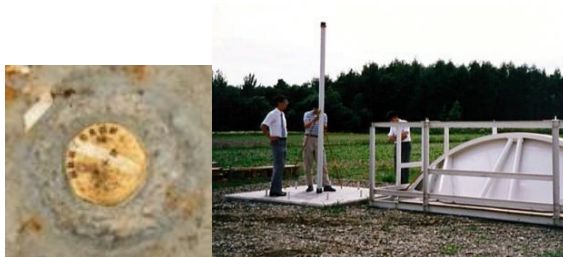


写真-13 アンテナを据え付ける基台の中央(右写真)には、金属標が埋設してある(左写真)。この形状は「測量法施行規則第一条(測量標の形状)」で定められている。金属標の上に水準標尺を立てているのは新田浩。1990年7月、新十津川にて

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。

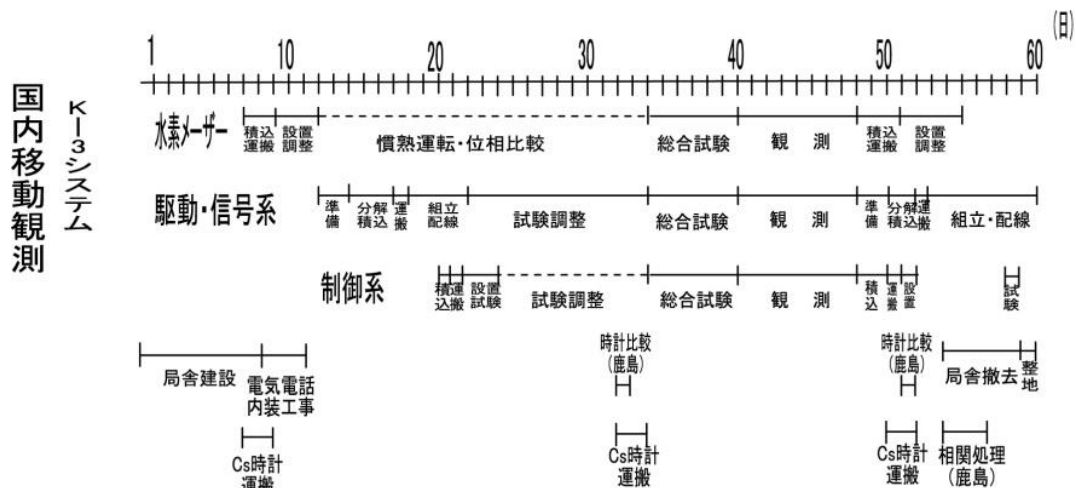


図-5 国内移動観測は準備から撤収まで、おおよそ2ヶ月の期間を要した

### (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、両方で協力し、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)と米溪武次(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・米溪武次が、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。



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を継続できるように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」(小板橋勝)

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、頻りに鹿島町(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、次はデーターベース作りである。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。

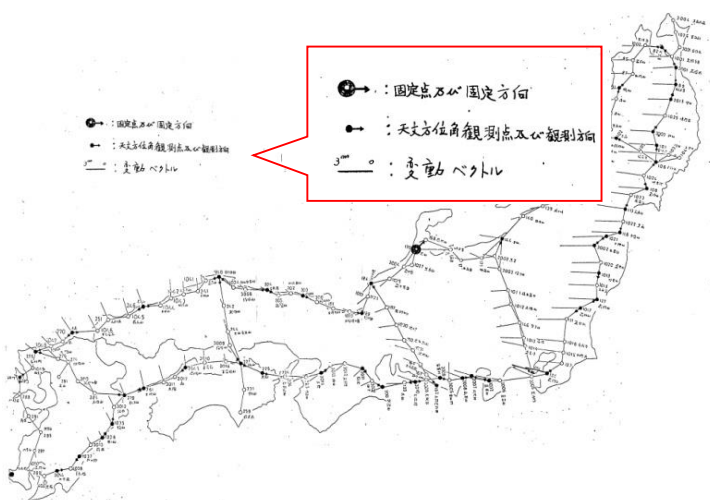


図-7 海津優と川口保は、「GDP 高精度トラバース測量」などの測量結果と実用成果を比較し図示した。図には、各観測点における変動ベクトルが示されている。赤枠内は図のスケール部分を拡大表示した

## (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。

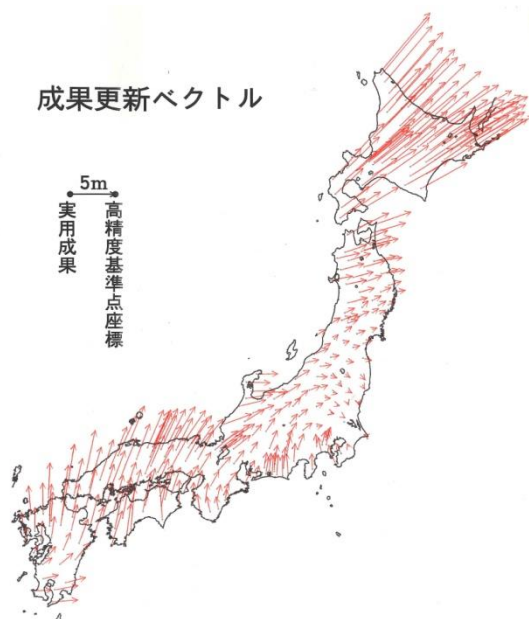


図-8 飛田幹男は、VLBI 成果と精密測地網測量の結果を用いて、基準点成果(実用成果)の特徴を明らかにした。上図は飛田が1992年5月29日の「技術研究発表会」で使用した(飛田幹男提供)

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

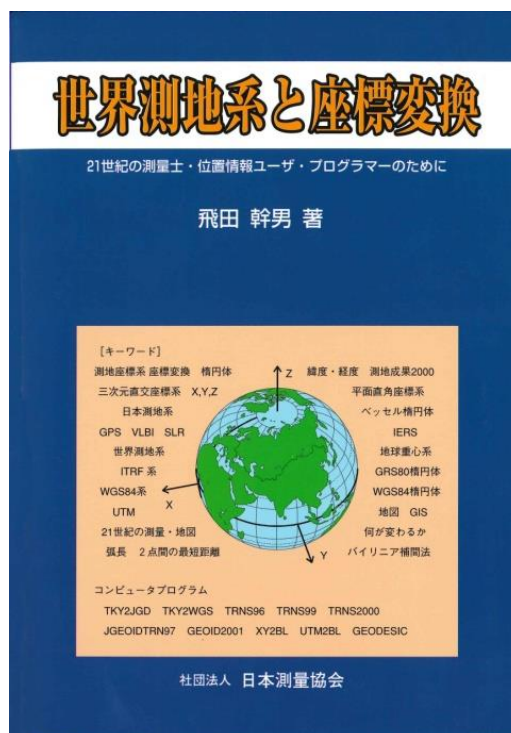


図-9 飛田幹男は、当時なじみの薄かった世界測地系への抵抗を減らし、再測量と比べ安価な座標変換を普及させることを目的に、「世界測地系と座標変換」を著作した。この本は、Tokyo97, WGS-84, ITRF 等の座標系その他、変換パラメータ、具体的な計算式、プログラム等が紹介されており、世界測地系導入を支援した。

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プコン(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。福崎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 の専門家がい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。