

# 国際的なVLBI観測

キーワード：国際VLBI事業  
国際大容量高速通信  
地球回転

宇宙測地課長補佐

高 島 和 宏

# 国際的なVLBI観測

## 1. はじめに

平成14年4月に、改正測量法が施行され、世界測地系に準拠した測地成果が使用されるようになった。この測地成果算出の際には、茨城県鹿島にあった鹿島VLBI観測局が1984年より継続して実施してきた国際的なネットワークによるVLBI観測による成果(ITRF94)を基準に用いている。観測開始当初は、郵政省電波研究所(現、情報通信研究機構)による運用であったが、1992年12月、国土地理院に観測局が移管され、それ以降、国際VLBI事業が主導する地球規模のネットワークによるVLBI観測を国土地理院が定期的に高頻度で実施している。

## 2. VLBIの目的

VLBI観測とは星からの電波を複数のアンテナで受信する観測方式を指し、大きく測地VLBI観測と天文VLBI観測に分けられる。VLBIの原理を図-1に示す。国土地理院では大地を測るための測地VLBI観測を行っており、国立天文台では星の構造や位置を知るための天文VLBI観測を行っている。国土地理院で行っている測地VLBI観測では、以下の3つの柱を目的としており、それらの目的を達成するためには、国際的な協力体制が必須である。

### 1) 測地網の規正

改正測量法が2002年4月より施行され、測量の基準がVLBIやGPSの宇宙測地技術を用いた世界測地系へ変更された(図-2)。

### 2) 地球姿勢の計測

地球は、1日に1回自転しているが、月の引力や地球内部の様々な現象(図-3)により、自転速度や自転軸の向きが変化する。銀河系外にある電波源を基に測るVLBI観測では、これらの変化をより正確に測定することが可能である。

### 3) プレート運動の把握

プレート運動は、年間数cmという非常にわずかな動きであるが、日本列島は図-4に示すように4つの地殻プレートの境界付近に位置し、この境界付近ではプレートの衝突や沈み込みが起これり、巨大地震や火山噴火の原因となっている。

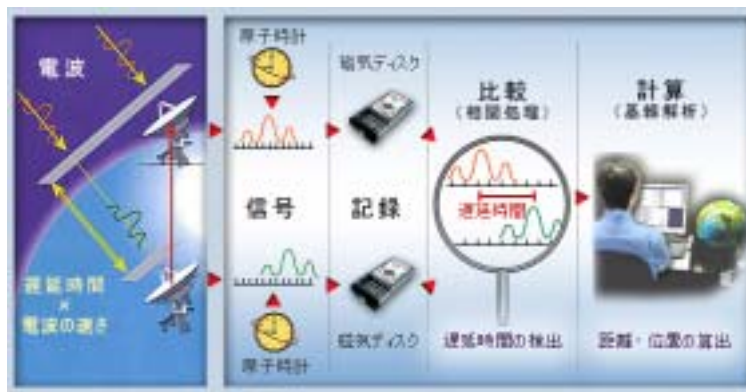


図-1 VLBIの原理

電波星からの電波を複数の観測局で受信し、正確な原子時計の時刻データと共に磁気ディスク記録したものを相関処理局において遅延時間を検出し、それらの遅延時間をもとに、距離や位置などの計算を行う。



図-2 宇宙測地技術に基づいた測地系  
世界測地系への移行時には、VLBI 観測局による成果を元に、全国の電子基準点 (GPS) を用いて計算を行っている。

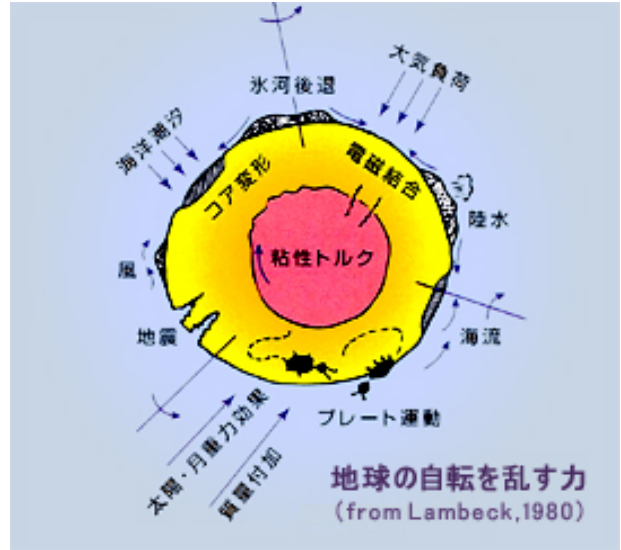


図-3 地球回転を乱す様々な現象  
太陽・月の重力による変化だけではなく、気象や地震など様々な要因で地球回転は不規則になっている。そのため、モデル化は非常に難しく、高精度な地球回転パラメータは、実測することが必要である。

VLBI horizontal velocity around Japan, November 2005

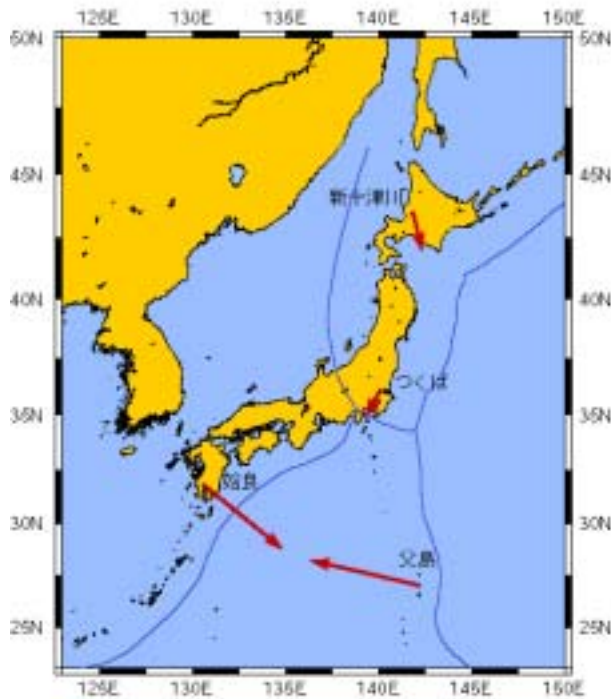


図-4 日本周辺のプレート運動  
北米プレート、ユーラシアプレート、フィリピン海プレート、太平洋プレートなど日本周辺では4つのプレートがお互いに接しており、非常に複雑な地殻変動を起こす原因となっている。



写真-1 5m可搬型 VLBI 装置

1981年より、共同研究にて開発を開始した可搬型アンテナである。パラボラ面は3分割することができ、トレーラーで運搬し、日本国内の各地で観測を実施した。

### 3. 国際 VLBI 観測

国土地理院のVLBI観測は、1981年に郵政省通信総合研究所（当時）と協力して、5 m可搬型VLBI装置（写真－1）を使用し、通信総合研究所所有の鹿島26mVLBI観測局（写真－2）を相手局として国内観測を行うことより始まった。1992年12月、その鹿島観測局の移管を受け、国土地理院は国際VLBI観測への第一歩を踏み出すこととなった。その後、1998年3月、国土地理院構内に測地目的としては国内最大級のアンテナ口径を持つ、つくば32mVLBI観測局（写真－3）が完成し鹿島観測局から国際VLBI観測の責務を引き継いだ。国土地理院における、国際観測として最初に実施されたのが、日米科学協力協定に基づいた、NASA（米国航空宇宙局）のDOSE（固体地球力学プロジェクト）への参加によるものであった。また、1995年の秋に、日本－韓国間の測地網の高精度な結合等を目的として、大韓民国建設交通部国立地理院（当時）と共同で日韓VLBI観測を実施した。韓国における観測は可搬型3.8 mVLBIアンテナを国土地理院より移設して行った。

現在、国土地理院はIVSが主導する国際VLBI観測への参加の他、国内VLBI観測網を用いた国内VLBI観測も実施している。測地VLBIアンテナとして非常に高性能であるつくばVLBI観測局は、高精度が必要とされる定常的な測地VLBI観測が可能な観測局として、アジア地域における主要な観測局として位置づけられている。同時に、これまで築き上げてきた鹿島VLBI観測局での観測成果をつくばVLBI観測局へと高精度に引き継ぐため、NASA及び通信総合研究所と協力して実施したJapan-Tie観測および国土地理院独自で計画実施する結合観測を高頻度で行った。これらの結合観測が完了し、高精度での成果移転が実現できたため、鹿島26mVLBI観測局は、2004年1～3月に解体撤去され、約34年間におよぶ運用を終了した。



写真－2 鹿島 26mVLBI 観測局

1968年衛星通信用パラボラアンテナとして建設。1977年よりVLBI実験に使用。1984年に初の日米間VLBI観測に成功。日本の国際VLBI観測の幕開けとなる。  
（郵政省通信総合研究所による運用）



写真－3 つくば 32mVLBI 観測局

1998年運用開始。設計段階から、VLBI専用観測局として位置づけられており、世界最高レベルの性能を誇る。



#### 4. 国際VLBI事業 (IVS)

1997年, こうした国際的なプロジェクトなどの諸活動を調整する国際測地VLBI観測組織の設立の声がVLBI研究者らから上がり, 国土地理院もその理念に賛成の意を表明した. その後, 各国間での議論や調整により, 1999年3月1日, 国際VLBI事業 (IVS) が設立された. IVSは,

- 1) VLBI観測事業の促進
- 2) 研究開発活動の促進
- 3) VLBI成果利用者との相互関係を深めグローバルな地球観測の枠組みの中にVLBIを位置づけること

を目的とし, 16ヶ国30機関の加盟の下, 評議会を筆頭に中央事務局, VLBI観測局, オペレーションセンター, 相関局, 解析センター, データセンター, 技術開発センターにより構成された (図-5). 国土地理院は, VLBI観測局と相関局として設立当初から参加している. 図-6にIVSに加盟しているVLBI観測局を示す. また, 国土地理院からVLBI観測局代表として評議員1名が選出され, IVS組織運営に貢献している. IVSでは, 2年に1回開催される総会が最も重要な会議として位置づけられており, 最新技術などの情報共有や運営方針などについて, 複数日に渡って様々な議論がなされる. そのIVS総会の第2回開催地として, 日本が選ばれ, 2002年2月に, つくば市において国土地理院は, 通信総合研究所 (当時) と共催でIVS総会を開催している. 現在, IVS設立からまもなく10年が経過しようとしている. このためIVSは, 今後のVLBIのあり方や技術開発・運営方針などについて, ワーキンググループを結成し, 「VLBI2010」と題する2010年に向けたビジョンを発表したところである.

##### 4. 1 IVS 定常観測

IVS 主導で実施される国際 VLBI 観測は, 24 時間観測と 1 時間観測の大きく 2 つに分けられる. 24 時間観測は, 地球規模での観測ネットワークをフルに生かした観測であり, IVS 観測の主体となっている. この 24 時間観測は地球回転パラメータ, 国際地球基準座標, 国際天球基準座標など求める目的に応じてシリーズ化されている (表-1).



図-5 IVS 組織図

観測局, 相関局, データセンター, 解析センターの4つの組織によりサービスの定常フローを形成している. オペレーションセンター, 技術開発センターは, それらを支援する立場として存在し, 組織全体を中央事務局により調整されている.



図-6 IVS 加盟 VLBI 観測局

2006年現在, 加盟国は17ヶ国あり, 29箇所の観測局にて国際VLBI観測が実施されている. 観測局は, 全ての大陸に配置されているが, 北米, 東アジア, 欧州が比較的密度が高くなっているのに対し, 南米, アフリカなどの南半球には残念ながら観測局が少ない状況となっている.

表－1 IVS 24時間観測の種類と目的

観測の種類	目的
IVS-R1 IVS-R4	地球回転パラメータ (EOP) 算出 (週 2 回)
IVS-T2	地球基準座標 (ITRF) 算出
IVS-E3	地球回転パラメータ (EOP) 算出 (月 1 回)
APSG EUROPE JADE	アジア環太平洋, 欧州, 日本 各地域の座標算出
Ohiggins Syowa	南極域の座標算出
RDV (VLBA)	天文 VLBI 観測局との結合
IVS-CRF	天球基準座標 (ICRF) 算出
IVS-R&D	調査研究

IVS の行う 1 時間観測は、地球回転パラメータのうち、地球自転速度 (UT1) を求めるためだけに特化した観測である。そのため、観測ネットワークは、2 局 1 基線のみで構成され、毎日実施されている。現在は、ドイツ-ハワイ基線で月曜日から金曜日までの 5 日間、つくば-ドイツ基線で土、日曜日の 2 日間が実施されている。通常、24 時間観測は、成果算出には数ヶ月を要するが、この 1 時間観測は、UT1 算出結果をナビゲーションシステム関係など宇宙開発分野に迅速に提供することを目的としているため、全ての観測に優先して、即時処理を求められている。国土地理院においては、土、日曜日のつくば-ドイツ基線における観測を担当すると共に、そのデータの相関処理も担当している。当初は、磁気テープ記録であったため、ドイツから ekspres 便を用いて航空便でデータを輸送していたが、処理完了まで 1 週間以上を要することもあった。2005 年から導入された eVLBI 技術では、取得したデータを磁気ディスクに記録し、そのデータを高速インターネット回線を利用してファイル転送する方式となり、データ転送にかかる時間が格段に短くなった。同時に、当初は相関処理専用で製作されたハードウェア相関処理装置を用いての処理であったため、処理速度に限界があったが、eVLBI 技術導入に併せて、PC による分散ソフトウェア相関処理システムを導入し、32 台の PC を用いた並列処理を行うことで、従来の 2 倍近い処理速度が得られるようになった。その結果、つくば-ドイツ基線で実施される 1 時間観測は、1～2 日以内での成果算出が可能となっている。

これら IVS による観測スケジュールは、IVS による各観測局ならびに相関処理局との日程調整を経て、観測日時が決定され、それに従って各機関による運用が行われる。IVS 発足前は、これらの調整を各国の機関同士で調整を行う必要があり、特に複数の観測局が参加する 24 時間観測のスケジュール調整は困難を極めていた。現在でも祝祭日・長期休暇・予算措置・人員体制などは、各国により事情が異なるため、それらを加味した上でのスケジュール調整は非常に労力のかかる作業となっている。表－2 に 2006 年 6 月のスケジュールを一例として示した。1 時間観測は毎日コンスタントにスケジュールリングされているが、24 時間観測は様々な要因により、毎日実施することは実現できておらず、連続して行われている日程もあれば、逆に数日間空いてしまっている日程も存在する。このスケジュール調整の難しさは、有人運用が原則となっている VLBI 観測の難しさとも関係していると言える。

表－2 2006年6月のIVS観測スケジュール

「INT～」：1時間観測，その他は24時間観測

日	月	火	水	木	金	土
				1 R4226	2	3
				INT106152	INT106153	INT206154
4	5	6 R1227	7 E3053	8 R4227	9	10
INT206155	INT106156	INT106157	INT106158	INT106159	INT106160	INT206161
11	12 R1228	13 R4228	14	15	16	17
INT206162	INT106163	INT106164	INT106165	INT106166	INT106167	INT206168
18	19 R1229	20	21 CRDS28	22 R4229 JD0606	23	24
INT206169	INT106170	INT106171	INT106172	INT106173	INT106174	INT206175
25	26 CRDS29 R1230	27	28	29	30	
INT206176	INT106177	INT106178	INT106179	INT106180	INT106181	

#### 4.2 IVSキャンペーン観測

IVSでは、定常的な観測の他、調査研究や技術検証を目的としたR&Dキャンペーン観測を実施している。昨年実施したCONT05キャンペーン観測を、その代表例として、ここで紹介する。

CONT05とは、IVSが主体となり実施された15日間連続の国際VLBI連続観測で、世界各国から11観測局が参加した。つくば32mVLBIアンテナはアジア・オセアニア地域で唯一の観測参加局となり、このCONT05キャンペーン観測の成功の鍵を握る重要な観測局の一つとして位置づけられている。このキャンペーン観測の目的は、地球が自転する速度など、地球規模の動きを高精度かつ長期間連続的に求めることである。特に地球の自転速度は刻々と変化しており、ときどき「うるう秒」が挿入されるのは、地球自転変化分を調整するためである。通常は、2～3日毎に観測で得られるデータを元に、毎日の地球回転の様子を補完推定している。その推定された値は、他分野でも利用されている。CONT05では、地球規模のデータを連続取得し、世界で初めて1日の中で変化する地球自転の様子を高精度に実測することに挑戦したキャンペーン観測である。また、得られたデータを潮汐や大気の動きと比較することにより、地球規模の気象変化や地球内部構造の解明に貢献するとともに、他の宇宙測地技術とも比較することで、GPSなどの宇宙測地技術全般の精度向上も目的としたものである。表－3にCONT05キャンペーン観測の概要を示す。

VLBI連続観測は、IVSの下で過去にも実施されており、最近では2002年にCONT02が行われている。しかしながら、当時は観測データを磁気テープに記録し、相関処理局へ発送する方法がとられていたため、人員・経費の面から、欧米のみに偏った観測網しか構築することが出来ず、良好な結果は得られていない。

その後、世界各局のVLBI観測局では、磁気ディスク方式の記録システムの導入が進み、国土地理院では、情報通信研究機構(NICT)が開発したK5システムを導入した。これらの技術革新により、運用コストの低減が可能となり、CONT05において、つくば観測局を含め、地球全体を広域にカバーする観測網による実施が実現した。図－7にCONT02とCONT05への観測参加局を示す。

表-3 CONT05 観測概要

<p>参加観測局                  TSUKUB32 (日本), SVETLOE (ロシア), ONSALA60 (スウェーデン),                  WETTZELL (ドイツ), HARTRAO (南アフリカ), TIGOCONC (チリ),                  KOKEE (米国ハワイ), ALGOPARK (カナダ), WESTFORD (米国),                  GILCREEK (米国アラスカ), NYALES20 (ノルウェー) 計 11 局</p> <p>観測スケジュール 2005 年 9 月 12 日 17:00(UT)~27 日 16:30(UT) 計 15 日間</p> <p>データ記録速度 256Mbps</p> <p>取得データ量 約 11 テラバイト 約 6600 スキャン (つくば観測局)</p>
<p>相関処理                  ワシントン相関局, ヘイスタック相関局, ボン相関局</p>
<p>基線解析                  IVS 解析センター (世界約 20 機関)</p>



図-7 CONT02 参加局 (青丸), CONT05 参加局 (青丸+赤丸)  
 前回のCONT02 (2002 年実施) の参加局 (8 観測局) と比較し, 観測局数が増え, 地球全体をカバーする観測網となっている. より高精度な観測結果が期待できると共に, つくば観測局はアジア・オセアニア地域唯一の観測局として, 重要な役割を担った.

写真-4 磁気ディスク記録装置  
 「K-5 システム」

PC 4 台を用いて, 並列記録することで, 最大 512Mbps の記録が可能.

国土地理院つくば観測局では, CONT05 キャンペーン観測に K-5 と呼ばれる磁気ディスク記録装置(写真-4)を用いて参加し, 観測データを, 全て高速インターネット回線により米国へオンライン転送した. データの取得率は, 98.9%と非常に高く, 国際的にも信頼できる観測システムならびに運用体制であることをアピールできた. 観測後の相関処理は, IVS 相関処理局であるワシントン相関局, ヘイスタック相関局, ボン相関局の 3 局により相関処理を分担して実施した. 通常の観測と比較して観測局数やデータ量が多いため, 相関処理には, 約 3 ヶ月程度を要し, 15 日間分の観測全てのデータベース作成が完了したのは, 12 月末となった. 現在, 世界各国の IVS 解析センターにおいて, CONT05 キャンペーン観測のデータ解析が急ピッチで行われているところである. 国土地理院においては, 毎週末, ドイツヴェッツェル観測局との UT1 決定を目的とした観測を行っていることから, それらのデ



ータとの比較のため、CONT05 キャンペーン観測データベースを UT1 パラメータ決定に着目した解析を実施した。

毎週末実施している観測では、観測時間が 1 時間と短いため、日内変化を捉えることはできていない。そこで、15 日間連続観測である特徴を生かし、30 分毎に UT1 パラメータを推定し、その 15 日間連続の変化を算出した。算出した UT1 の値を図-8 に示す。図-8 には、通常実施されている 1 時間観測結果の値を同時にプロットしてある。このグラフから読み取れるように、変化量が大きい期間と小さい期間の差が大きいことと、日内変化も線形とは言えない様子が見て取れる。

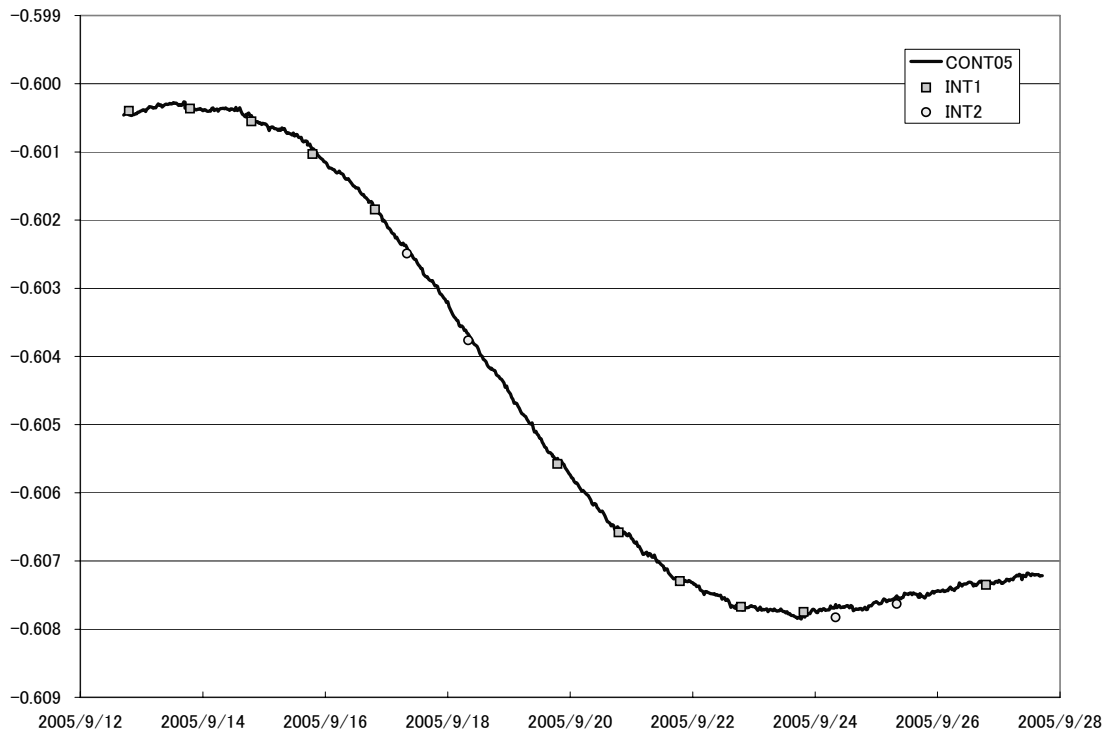


図-8 UT1 パラメータ算出値 (9月12~27日)

実線：CONT05, □・○印：IVS 1 時間観測

15 日間連続観測の期間中、最初の 3 日間および最後の 6 日間程度の変化量に比べ、期間の半ばに地球回転が急激に遅くなる大きな変化が見られた。このような UT1 の大きな変化は、従来から IVS により、1 日 1 回実施されてきた 1 時間観測の結果 (□・○印) から読みとることができる。しかしながら、1 日の中でも細かな変動が見られ、それらは非線形である可能性が高いことを示している。

#### 4. 3 VLBI 観測データのグローバル解析

IVS により実施された観測データは、IVS 相関処理局で処理された後に IVS 解析センターで日々解析が行われ、IVS データセンターにて蓄積・管理されている。国土地理院ではこれらのデータを使用し、全地球的な解析 (グローバル解析) を行なってきた。このグローバル解析をすることで、観測局位置・移動速度、地球回転パラメータを高精度に求めることができる。

IVS で蓄積されているデータは 1979 年から現在までの国際 VLBI 観測データであり、日本周辺の観測局における観測データ数も徐々に増加してきた。そのため、日本周辺の測地座標系を高精度に決定することができるため、グローバル解析を実施している。

解析データは、IVS のデータセンターに置かれている VLBI データベースファイルを用いている。解析ソフトウェアは NASA ゴダード宇宙飛行センター 開発の CALC/SOLVE を使用した。CALC/SOLVE ではコントロールファイルと呼ばれるファイルに解析条件等を記述するが、主要な内容としては観測局

位置・速度，電波源位置などの拘束条件や推定するパラメータの選択，使用観測局・電波源の選択などである．拘束条件については下記のように設定した．

<拘束条件>

- 1) 比較的位置が正しく求められている電波源の位置を回転に関して拘束をかける．今回の解析で拘束したのは，ICRF defining source と呼ばれる 212 個の電波源である．
- 2) 比較的位置が正しく求められている観測局(少なくとも 3 年間の観測期間があり, 20 セッション, 1000 スキャン以上のデータを取得し, 地震等の大きな地殻変動がない局)の位置と速度を回転と平行移動に関して拘束をかける．今回の解析で拘束したのは, Westford(米国), Wettzell(ドイツ) など 35 局である．
- 3) 1), 2) 以外の観測局位置と速度・電波源位置には適当な拘束条件をかける．特に観測局位置と速度は 10m 程度のゆるい拘束にしておく．
- 4) 日本国内観測やカナダの国内 VLBI 観測など, 基線長 1500km 以下の小さなネットワークでは, 地球回転パラメータ を正しく推定できないためこのようなセッションではそれをアプリオリ値(米国海軍天文台による算出値)に拘束するか, 前後のセッションで推定された値から補間計算する．
- 5) 観測中の何らかのトラブルで観測時間が 18 時間に満たない観測局のデータは使用しない．
- 6) 観測局は 1997.0 年エポックで位置推定し, 同時に速度も推定する(グローバルパラメータ)．

これらの解析条件を設定し, 解析を行った結果として各観測局の位置座標, 速度場, 地球回転パラメータなどが得られた．解析結果のうち, 各観測局がプレート運動等により動く速度を示した速度場ベクトルを図-9 に示す．



図-9 グローバル解析により得られた各観測局の速度場ベクトル

1 年間に動く量が矢印で示されている．矢印のスケールは, 約 5000 万倍に誇張しており, 左下に示す矢印の大きさが年間 5 cm の速度を表す．

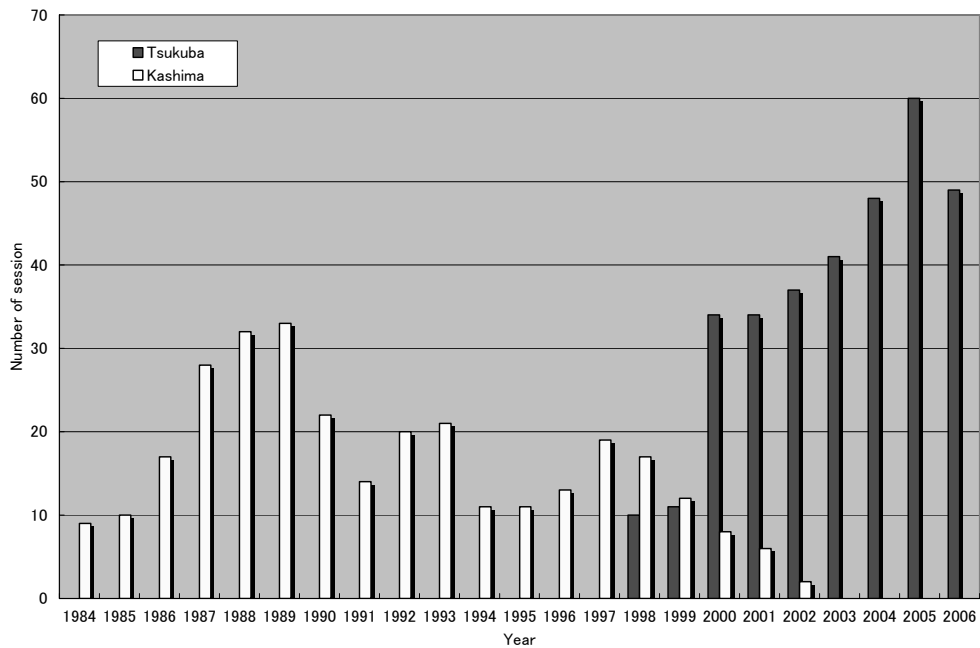


図-10 国際観測実施回数

1984年から鹿島 VLBI 観測局にて実施した年間の国際観測回数をプロットしている。国土地理院に鹿島 VLBI 観測局が移管された1992年以前の観測は、通信総合研究所（現、情報通信研究機構）による観測実施回数を示している。1998年につくば VLBI 観測局が運用を開始して以降、5年間は、両局による並行観測を実施し、鹿島局の成果をつくば局へ高精度に引き継いでいる。2005年は、15日間連続のCONT05（15回分に相当）を実施したため、突出して観測回数が増加している。

## 5. 終わりに

国土地理院は測量国家機関であり、国際VLBI観測に参加する目的の一つに、地球規模の測地基準系の構築に寄与することがあげられる。不変に使える確固とした測地網を求めて観測精度を向上させてきた結果、その精度は、地球回転のゆらぎや地殻の運動を検出する程にまでなってきた。そして、高精度になった観測技術は、副産物として様々な分野に知見を与えてくれた。このような状況の中にあつて、国土地理院では、鹿島VLBI観測局を用いた国際的なVLBI観測を実施してきた。その後、つくばVLBI観測局という世界の中でも最上級の性能を持つ測量器械を手にした。図-10には、これら2局による国際VLBI観測実施回数を示した。つくばVLBI観測局に観測が移行して以降、その性能の高さや運用面での改良から、観測実施回数が飛躍的に伸びている。これを最大限に利用し、国際協力を更に進めて、地震予知等へ応用するとともに、地球環境、地球科学等、より広い分野に貢献して行くことが重要だと考えている。

## 参考文献

International VLBI Service for Geodesy and Astrometry 2004 Annual Report, edited by D. Behrend and K. Baver, NASA/TP-2005-212772, 2005.

辻宏道, 田辺正, 河和宏, 高島和宏, 宮川康平, 栗原忍, 松坂茂 (2004) : 鹿島26m VLBIアンテナの測地学への貢献, 国土地理院時報, 第103集, 53-62.