国内VLBIとGEONETの結合と観測結果の比較
The combination results of domestic VLBI network and GEONET

測 地 部　石原　操・根本恵造・川原敏雄・岩田昭雄
芝　公成・高島和宏・小林京子
Geodetic Department
Misao ISHIHARA, Keizo NEMOTO, Toshio KAWAHARA, Masao IWATA
Kousei SHIBA,Kazuhiro TAKASHIMA, Kyoko KOBAYASHI

地理地殻活動研究センター　松坂　茂
Geography and Crustal Dynamics Research Center　Shigeru MATSUZAKA

企 画 部　大木章一
Planning Department　Shoichi OGI

要　旨

国土地理院では，平成７年度からVLBI固定観測局を国内に整備し，定常的に運用を行うようになった。また，全国にはGPS連続観測点が整備され，これも定常的に運用している。この両システムを高精度な取り付け測量によって結合することにより，異なる宇宙測地技術の統合が図られ，宇宙測地における新たな知見を得ることができるとともに，その成果は21世紀の我が国の測量の基準となる測地成果2000の確立に反映されることになった。

今回，我々が行った取り付け測量は，主にGPS測量によるもので，その精度は水平（東西，南北）成分で5mm，鉛直（上下）成分で20mm程度と考えられる。また，VLBIとGPSの両宇宙測地技術より得られた成果の比較は，新十津川局（北海道），鹿島局（茨城県），父島局（東京都），姶良局（鹿児島県）の４局を用いて行い，VLBIとGPSとが良く一致している結果（水平成分で10mm以内）が得られた。

複数宇宙測地技術の結合に関して世界の動向を反映させるには，今後，VLBIとGPSの取り付け測量精度をミリメートルレベルで実現することが必要である。

１．はじめに

VLBIやGPS，SLRなどの宇宙測地技術では，それぞれ得意とする分野と，そうでない分野が存在するため，これらの技術を用いて地球の諸科学現象を解明するためには，各々の技術から得られた成果を統合する必要がある。また，同じシステムにしても，観測方法や解析方法の違いにより，得られた成果に系統的な差が存在する。この系統的な差を検出・把握するためにも，異なる宇宙測地技術システムを用いて相互比較を行い，成果の信頼性を高める必要がある。

異なるシステム間の相互比較は，お互いの観測装置をなるべく近距離に配置し，システム間の位置関係を正確に測量して決定し結合を行った後に実施する。

国土地理院では，平成７年（1995）から順次VLBI固定観測局が国内に４局（新十津川，父島，姶良，つくば）整備され，従来から運用されていた鹿島26m局と合わせて５局が定常的に運用されるようになった。一方，全国にはGPS連続観測点（GEONET）が約1000点整備されており，毎日，各々の観測点の位置が計測されている。

このように，国土地理院で運用している宇宙測地技術システムにはVLBIとGPS，すなわち，５局８基線からなるVLBI観測網と約1000点からなるGEONETがあり，これを結合することによって，お互いの観測成果の比較が可能である。そこで，これら２つの宇宙測地技術システムによって得られたデータ（1996年～1998年）を用いて相互比較を実施し，座標系の整合性の検証を行ったので報告する。

２．VLBIとGPSの結合

VLBIで得られる成果は，VLBIアンテナの参照点（通常は方位軸と高度軸の２つの回転軸の交点）間の基線ベクトルである。プレート運動の検出のように２つのアンテナ間の距離変化だけを測定することが目的であるならば，不動点となる参照点が変動しない構造を有するアンテナと，高精度な基線解析のできるシステムの構築を目指せば良い。これに対して測地網の規正や海水面変動のモニター，GEONETとの結合などを行う場合には，VLBIアンテナの参照点と近傍の基準点（電子基準点や三角点等）との関係を高精度に決定する必要がある。

通常，VLBIアンテナの参照点（以下参照点と呼ぶ）は，トータルステーション等で視準できる目標点が存在しない。そこで，何らかの測量方法と解析手法を用いて

基準点と参照点の位置関係（基線ベクトル）を推定する必要がある。我々は，このための方法を幾つか実践したので，本節ではこの方法について述べる。

2.1 GPS測量による取り付け方法

図－1に示すようにVLBIアンテナの副反射鏡上にGPSアンテナを取り付け，VLBIアンテナを各方向に回転させることによって，VLBIアンテナは球面の軌跡を描く。この時，地上や屋上に設置した基準点（以下，地上基準点と呼ぶ）でも同時にGPS観測を実施し，VLBIアンテナがそれぞれの方向を向いている状態での位置関係の測量を行う。

GPS測量は，図－2に示すようにVLBIアンテナの方位（AZ）と高度（EL）を適当な値の場所に何カ所か固定して（図では黒丸で示した３２カ所），それぞれの場所で１～２時間のスタティック観測を行う。

この時，地上基準点に設置するGPSアンテナはVLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナと同型式のものとする。また，地上基準点に設置したGPSアンテナの向きは，VLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナの向きが変わるごとに，水平方向だけが一致するようにする。

参照点と地上基準点間の基線ベクトルを求める方法としては，以下の①～③の方法を用いた。

① 未知パラメータを，参照点の３次元座標，VLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナの初期位置（VLBIをAZ180度，EL90度に向けた時の位置），VLBIアンテナの北からのずれ，の７つとした最小二乗法による方法。

② 参照点からVLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナまでの疑似距離を計算し，三次元網平均する方法。

③ VLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナの軌跡を平面直角座標に変換する。そして，水平（東西，南北）成分の参照点位置は，同一EL角における軌跡が円であると仮定して円の中心と半径を求める。円の中心位置はEL角を変化させた時，それぞれ求められるので（図－２ではEL30，50，70，90度でそれぞれ１個），平均して参照点位置を決定する。鉛直（上下）成分は，同一AZ角における軌跡が円であると仮定して円の中心と半径を求める。この時の円の中心位置の上下方向の座標が鉛直成分となる。

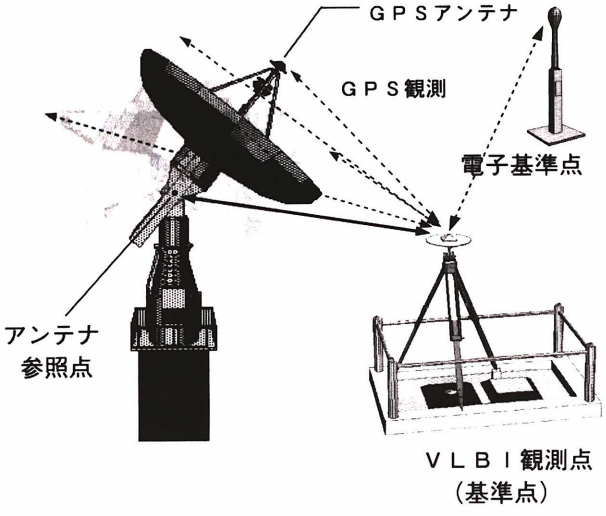
なお，VLBIアンテナに取り付けたGPSアンテナの軌跡を，①②では球と仮定し，③では平面上の円と仮定した。したがって，VLBIアンテナを傾けた時に重力によってVLBIアンテナが変形した場合や，GPSアンテナが傾けられて測定された時の位相中心の変位がある場合などでは，球や円と仮定できないことも考えられるので，特に鉛直（上下）成分では，精度が低下することが予想される。

2.2 トータルステーションなどを用いた取り付け方法

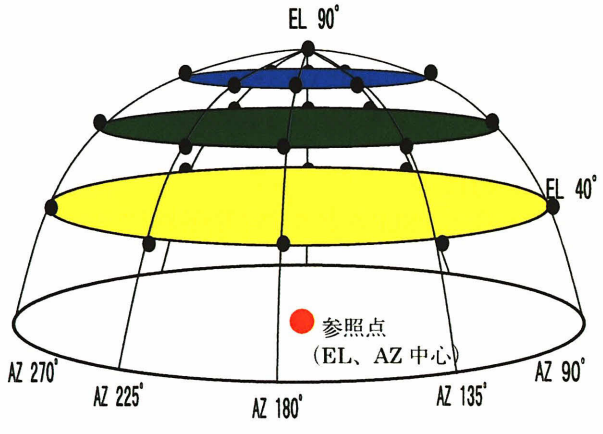
VLBIアンテナの周辺数カ所（通常は２，３カ所）に設置した地上基準点から，トータルステーションやＥＤＭを用いて実施する測量方法である。この場合，VLBIアンテナに測量用のターゲットを取り付けて，GPSのスタティック測量のようにVLBIアンテナを各方向に回転させ，地上基準点とそれぞれの点での位置関係を決定するとともに，参照点位置を推定する。

2.3 小型アンテナ（新十津川3.8mアンテナ）での取り付け方法

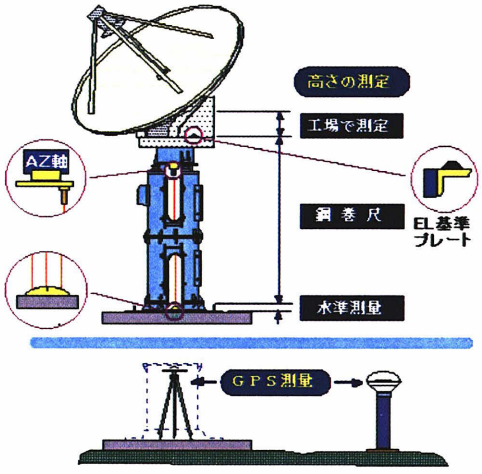
3.8mVLBIアンテナでは図－３に示すように，方位軸（AZ軸）の中心下部に赤色レーザ照射器が取り付けてあり，VLBIアンテナを回転させるとこのレーザ照射器も同様に回転する。そこで，VLBIアンテナが設置されている基台に埋設された金属標にこのレーザ光を照射し，VLBIアンテナの回転軌跡を描画する。そして，参照点と金属標との関係を水平面内で偏心測定を行う要領で実



図－１　ＧＰＳを用いた取り付け測量



図－２　ＧＰＳ測量方法



図－3　3.8mVLBIアンテナ取り付け測量

表－1　KS-13と鹿島26mアンテナ参照点間の比高観測結果

観測日	観測・解析方法	比高(m)
1997/4/22	GPS　③	13.709
1997/5/7	GPS　①	13.713
1997/5/7	GPS　③	13.688
1997	トータルステーション	13.713
1993	EDM等	13.688

施し決定する。精度は1～2mm程度である。

一方，VLBIアンテナには高さの基準となるEL基準プレートが取り付けられており，高度軸（EL軸）との高さ方向の関係はVLBIアンテナメーカーの工場で正確に測定されている。そこで，金属標から高度軸までの比高は，この値と鋼巻尺による測定値（地上マーカーとEL基準プレート間）及び水準測量による測定値（地上マーカーと金属標間）によって求める。

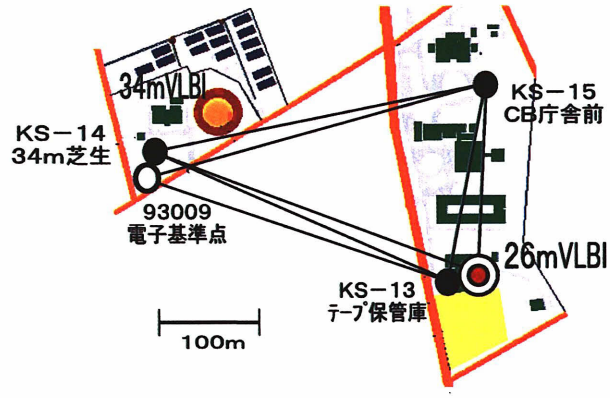
なお，金属標の上部にVLBIアンテナが常設されているので，VLBIアンテナの近傍に基準点を設置し，VLBIアンテナの設置前に金属標とこの基準点の関係をGPS測量等によって決定する。

3．結合測量の実際

3.1　鹿島局

鹿島局は図－4に示すように地上基準点（KS-13，14，15）と電子基準点（93009）がある。地上基準点と26mアンテナの取り付け測量は，GPSによって1997年4月22日と5月7日～8日に行った。また，トータルステーションによる測量を1997年に，EDM及びトランシットを用いた測量を1993年に行った。

5月7日～8日の観測は，発達した低気圧の通過のため一時的に最大瞬間風速が20mを超える強風下での観測であった。また，4月22日の観測は他の観測目的のため



図－4　鹿島における基準点の位置関係

表－2　取り付け測量によって決定した鹿島の基準点座標（26mアンテナ座標が基準）

(ITRF94, Epoch 1997.0)

	X(m)	Y(m)	Z(m)
鹿島26mアンテナ	-3997892.275	3276581.268	3724118.230
KS-13	-3997865.260	3276601.899	3724105.665
KS-14	-3997609.276	3276755.699	3724234.582
KS-15	-3997804.801	3276474.811	3724269.200
93009位相中心	-3997615.532	3276762.716	3724230.638
93009ARP*	-3997615.480	3276762.674	3724230.589

*ARP：Antenna Reference Point

に実施したもので，基準点上のGPSアンテナは常に北方向に固定したままの状態であった。使用したGPSアンテナはCompact　L1/L2　w　G/Pアンテナである。

地上基準点（KS-13，14，15）間の基線ベクトルは，4月22日と5月7日の間でその差が最大4mmだったので，両日の平均値を採用値とした。

参照点と地上基準点間の関係については，水平成分に関しては4月22日と5月7日のGPSによる結果とし，鉛直（上下）成分に関してはGPSによる結果とKS-13においてのトータルステーションやEDM等の従来の測量方法による結果を用いて決定した。水平（東西，南北）成分では，4月22日と5月7日の較差が最大3mmであった。鉛直成分は，解析手法の違い（2.1節の①～③）や両観測日の結果で，最大30mm程度の較差があったが，平均をとるなどの方法を用いて地上基準点と参照点間の関係を決定した。参考としてKS-13と参照点間の比高についての各観測結果を表－1に示す。

KS-13，14，15と電子基準点93009との関係もスタティック測量によって得られているので，これらの解析結果を用いて，最終的には全体を三次元網平均して各点の座標を決定した（表－2）。基準となる座標はVLBI26mアンテナのIERSのテクニカルノートに掲載された局位置(ITRF94，Epoch 1993.0)及び速度ベクトルを使用して求めた1997.0年の値である。

鹿島局における取り付け測量結果の評価を行うことを目的として，電子基準点93009（鹿島）と92110（つくば１）のGEONETの結果（1998年５月と６月の２ヶ月間のデータを使用，基線長54km）及び1998年６月25日に実施した鹿島26mとつくば32m間のVLBI観測結果ならびに鹿島，つくばでのVLBIと電子基準点間の取り付け測量結果を用いて環を作成し，座標閉合差の検討を行った。その結果，閉合差は東西成分で－６mm，南北成分で６mm，鉛直成分で－29mmであった。

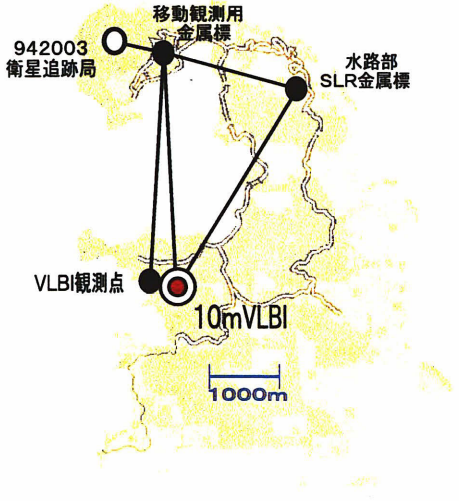
なお，つくば局での取り付け測量については現在も実施中であるので本報告では記述しない。また，図－４には通信総合研究所が運用している34mVLBIアンテナが表示されているが，このアンテナとの座標結合に関しては現在実施中である。

3.2　父島局

GEONETに含まれる父島でのGPS連続観測点には衛星追跡局（942003）がある。また，VLBIアンテナの近傍には地上基準点としてVLBI観測点が埋設されている。更に，衛星追跡局とVLBIアンテナの間に移動観測用のVLBIアンテナ基台があり，この中央に金属標が埋設されている。父島におけるこれら観測点の関係を図－５に示す。

父島局で運用しているVLBIアンテナ（10m）の副反射鏡上部にはGPSアンテナ（Permanent L1/L2　w　G/P）が取り付けられている。

VLBIアンテナと地上基準点（移動観測用金属標及びVLBI観測点）の取り付け測量は，1997年８月28日～29日にGPS測量によって実施した。VLBIアンテナを各方向に向けた時のGPSのスタティック測量時間は各々１時間である。10mアンテナも3.8mアンテナと同様に高さの基準となるＥＬ基準プレートが取り付けられており，高度軸（EL軸）との高さ方向の関係がVLBIアンテナメーカー工場で正確に測定されている。そこで，このＥＬ基準プレートとVLBI観測点との比高をトータルステーションを用いて測定した。



図－５　父島における基準点の位置関係

VLBI観測点から参照点に至る基線ベクトルを水平成分と鉛直成分に変換し表－３に示した。解析方法の①②③は２．１節の①②③である。また，ＥＷは東西成分，ＮＳは南北成分，ＵＤは鉛直（上下）成分を表す。

衛星追跡局と移動観測用金属標との取り付け測量は，1995年３月に行った。また，父島には海上保安庁水路部のSLR局があり，この局との取り付け測量も1997年に実施されている。

3.3　始良局

始良局には，構内に電子基準点970837があるが，VLBI観測を開始した時点では，この電子基準点の運用は行われていなかった。そこで，970837（始良）の運用が開始された後のデータを用いて，この点に一番近い電子基準点950486（牧園）との関係を決定した。具体的には，970837と周辺３点（牧園，都城，福山）の電子基準点データを用いて周辺３点の電子基準点を既知点として基線解析を行い関係を求めた。なお，周辺３点の電子基準点の既知点座標としては測地成果2000の座標（ITRF94，Epoch1997.0）を用いた。

VLBIアンテナの近傍には地上基準点としてVLBI観測点が埋設されているが，この点は，東側が林で全天の上空視界確保が困難なため，新たに仮杭（北側駐車場）を埋設し，この点を取り付け測量の基準点とした。始良における各観測点の位置関係を図－６に示す。

始良局で運用しているVLBIアンテナ（10m）の副反射鏡上部には父島と同様にGPSアンテナ（Permanent L1/L2　w　G/P）が取り付けられている。

参照点と地上基準点（北側駐車場）との取り付け測量は，1998年３月４日～８日にGPS測量によって実施した。VLBIアンテナを各方向に向けた時のGPSのスタティック測量時間は各々2.5時間である。また，VLBI観測点

表－３　父島VLBI観測点と参照点の取り付け測量結果

観測・解析方法	EW(m)	NS(m)	UD(m)
GPS・①	16.395	-16.818	10.844
GPS・②	16.396	-16.787	10.862
GPS・③	16.394	-16.809	10.851
トータルステーション			10.841

表－４　始良北駐車場と参照点の取り付け測量結果

観測・解析方法	EW(m)	NS(m)	UD(m)
GPS・①*	15.780	-30.331	12.697
GPS・②	15.798	-30.321	12.865
GPS・③	15.793	-30.310	12.850
トータルステーション			12.861

*①が他に比べて較差が大きいため，採用しなかった

と参照点との比高の観測は，父島と同様にトータルステーションを用いて行った。仮杭（北側駐車場）から参照点に至る基線ベクトルを水平成分と鉛直成分に変換したものを表－4に示す。GPSによる①の解析方法での鉛直成分が他の値に比べて較差が大きかったので，取り付け基線ベクトルの決定では①の値は採用しなかった。

3.4 新十津川局

新十津川局は，VLBIアンテナ下部に地上基準点がある。また，観測局舎屋上に父島と同様なGPSの衛星追跡局（942001）がある。更に，同屋上には偏心点（金属標）も埋設されている。新十津川における各観測点の位置関係を図－7に示す。

参照点とVLBIアンテナ下部の基準点との取り付け測量は2.3節で述べた方法で実施した。また，この基準点と偏心点及び衛星追跡局との取り付け測量は1994年12月に行った。

3.5 各観測局における基準点等の位置関係（基線ベクトル）

各観測局の取り付け測量結果をまとめたものを表－5に示す。表内の鹿島局には26mVLBIアンテナとKS-13間の基線ベクトルが2個あるが，下段の値は測地成果2000を構築する時に提供した基線ベクトルである。

4．VLBIとGPSの解析

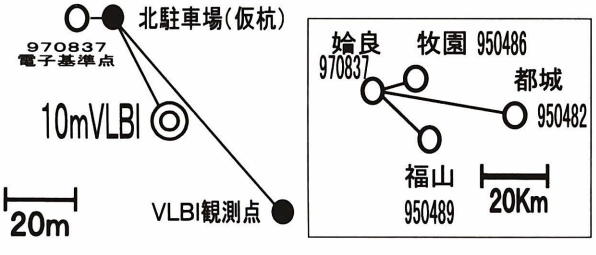
4.1 VLBIの解析

VLBIの解析は，相関処理をKSP相関器，バンド幅合成をKOMB，基線解析ソフトとして，CALC Ver.8.2及びSOLVE Ver.5.1018を用いた。基線解析では，基準位置として鹿島局のITRF94を与えている。また，電波源位置としてICRF94，地球回転パラメータにはIERSのBulletin B，海洋潮汐加重による局位置変動の補正にはSengokuモデルを用いた。

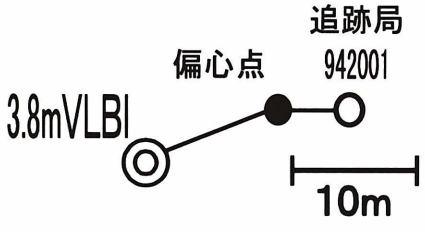
新十津川，鹿島，父島，姶良の4局同時観測の場合，相関処理は，鹿島，父島，姶良の3局3基線と新十津川，鹿島の2局1基線とに分けて実施している。

基線長の観測精度は，鹿島，姶良，父島の関係する基線が2～4 mm，鹿島－新十津川基線が5～7 mmである。また，局位置（座標）の精度は，姶良，父島の水平（東西，南北）成分が2～4 mm，鉛直成分が12～15mmである。新十津川は水平成分が3～9 mm，鉛直成分が16～22mmである。

ここで表した局位置の精度（位置推定の精度1σ：以下「内部誤差」と呼ぶ）は，局位置の確度（測位結果の再現性）ではないことに注意すべきである。24時間連続観測による観測局位置の確度は，内部誤差の3～4倍程度ではないかと考えられるので（石原，1999），水平成分を考えると父島，姶良では±10mm程度，新十津川で±15mm程度が予想される。



図－6　姶良における基準点の位置関係



図－7　新十津川における基準点の位置関係

表－5　各観測局における基準点等の位置関係

自→至（鹿島）	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
26mVLBIｱﾝﾃﾅ→KS13	27.015	20.631	-12.565
26mVLBIｱﾝﾃﾅ→KS14	282.999	174.432	116.352
26mVLBIｱﾝﾃﾅ→KS15	87.474	-106.457	150.970
93009ARP→93009位相中心	-0.052	0.043	0.049
26mVLBIｱﾝﾃﾅ→93009ARP	276.795	181.406	112.359
26mVLBIｱﾝﾃﾅ→KS13*	27.033	20.626	-12.580

*測地成果2000への提供値

自→至（父島）	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
VLBI観測点→VLBIｱﾝﾃﾅ	-23.723	-2.345	10.028
移動金属標→VLBIｱﾝﾃﾅ	-1264.787	920.630	-3030.329
移動金属標→VLBI観測点	-1241.064	922.975	-3020.301
VLBIｱﾝﾃﾅ→追跡局ARP	1692.553	-5.277	2844.041
位相中心→追跡局ARP	0.061	-0.047	-0.040
VLBI観測点→SLR金属標	-473.100	-2369.922	2482.244

自→至（姶良）	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
北側駐車場→VLBIｱﾝﾃﾅ	-29.509	10.156	-18.976
北側駐車場→970837位相中心	4.506	10.013	2.267
位相中心→970837ARP	0.046	-0.054	-0.044
VLBIｱﾝﾃﾅ→950486ARP(牧園)	-10224.592	-11312.188	2953.864
北側駐車場→VLBI観測点	58.371	-384.424	55.674

自→至（新十津川）	dX(m)	dY(m)	dZ(m)
VLBIｱﾝﾃﾅ→基台金属標	2.421	-1.910	-2.925
基台金属標→偏心点	-5.271	-9.511	5.951
追跡局位相中心→追跡局ARP	0.050	-0.039	-0.060
VLBIｱﾝﾃﾅ→追跡局ARP	-6.487	14.411	3.901

*ARP：Antenna Reference Point

4.2 GPSの解析

GPSの解析については，「気象研究ノート」（宮崎・畑中，1998）に詳しく記述されているので，これを参考にして以下に必要な部分を記述した。

GPS連続観測システム（GEONET）の定常解析には，主解析ソフトとしてBernese/BPFソフトウェアが用いられている。入力となるデータは各観測点のRINEX形式のデータである。そして，IGS最終精密暦（ITRF系）による解析を行う。地球回転パラメータとしては，IERSのBulletin Bが用いられている。

解析の初期値としてはITRF94（1996.6.30～1998.3.1）及びITRF96（1998.3.1～）であり，ある特定の点に対して非常に強い拘束を与えている。具体的には，約1000点の観測網を受信機メーカ別の網（Trimble網，Ashtech網，Leica網）に分け，それぞれの網を独立なものとして扱っている。TSKB局（つくばIGS局）の近傍にはそれぞれの観測網の観測点が存在しており，TSKB局の座標値をもとに，つくばの各観測点の座標値を決定する。そして，つくばTrimble局（92110），Ashtech局（942002），Leica局（96TKB4）の座標値に対して0.1mmという強い拘束力を与えて，それぞれの網に含まれる観測局の座標を推定する。Ashtech網（父島，新十津川等）とLeica網はそれぞれの全点を一度に処理する。Trimble網（牧園，姶良，鹿島等）は，総点数が多いため全点を一度に処理できないため，小さなregionalなクラスターに分割して処理し，ADDNEQプログラムで結合して成果を算出している。

なお，通常解析で使用している初期座標値は，電子基準点92110（つくば1）のものである。この座標値は，1996年4月18日に，その前の32日間の観測データをもとにしてTSKBを固定して算出したものである。

5．VLBIとGPSの比較に用いたデータ

5.1 比較に用いたデータ

比較に用いたVLBI観測データは次に示すもので，連続した24時間観測により1つの基線解が得られている。

鹿島－姶良－父島

1997/ 8/26　1997/11/ 3　1998/ 2/19　1998/ 6/25

鹿島－新十津川

1996/ 6/26　1996/10/22　1996/11/14　1997/ 5/28
1997/11/ 3　1998/ 6/25

GPSデータは次に示す観測点と期間のもので，1日毎に1つの局位置（座標値）が得られている。

950486（牧園：電子基準点）	1997/ 8～1998/ 8
942003（父島：衛星追跡局）	1997/ 8～1998/ 8
942001（新十津川：衛星追跡局）	1996/ 6～1998/ 6
93009（鹿島：電子基準点）	1996/ 6～1998/ 8

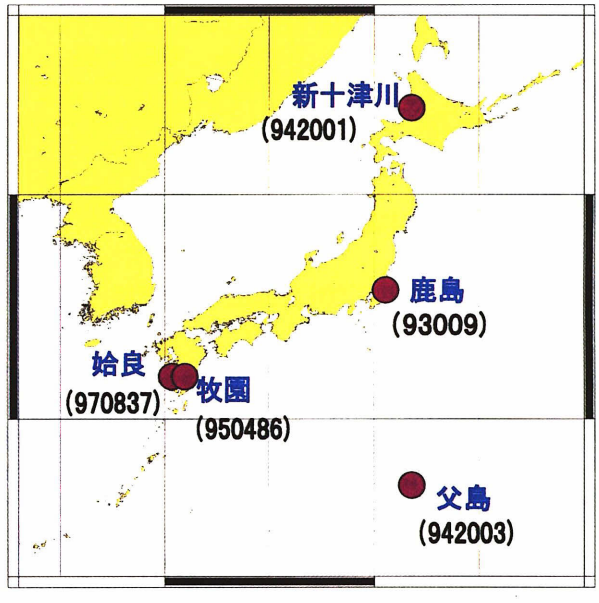
姶良局のGPSデータについては，VLBIアンテナの近傍に電子基準点（姶良970837）があるが，この点の運用は1998年2月からなので，比較には姶良VLBI局に最も近い電子基準点（牧園950486）のデータを使用した。図－8にVLBI観測網図，図－9に今回比較のために使用したGEONET観測点の配点図を示す。

5.2 VLBIによる基線ベクトルと各観測局の位置座標

VLBIの基線解析では，基準位置として鹿島局のITRF94（Epoch 1993.0）を与えている。そこで，基線ベクトルを必要とする2観測点を選び両者の座標差を算出し，これをVLBIアンテナ参照点間の基線ベクトル（dXV，dYV，dZV）とする。この値はVLBIの解析結果より得られる。

各観測局の国際地球基準座標系（ITRF）に基づく座標値は，表－6に示す鹿島26mVLBIアンテナのITRF96の座標値（X，Y，Z）と速度ベクトル（Vx，Vy，Vz）を用

図－8　VLBI観測網図



図－9　比較に使用したGEONET観測点配点図

表－6　鹿島26mVLBIアンテナのITRF96座標と速度ベクトル

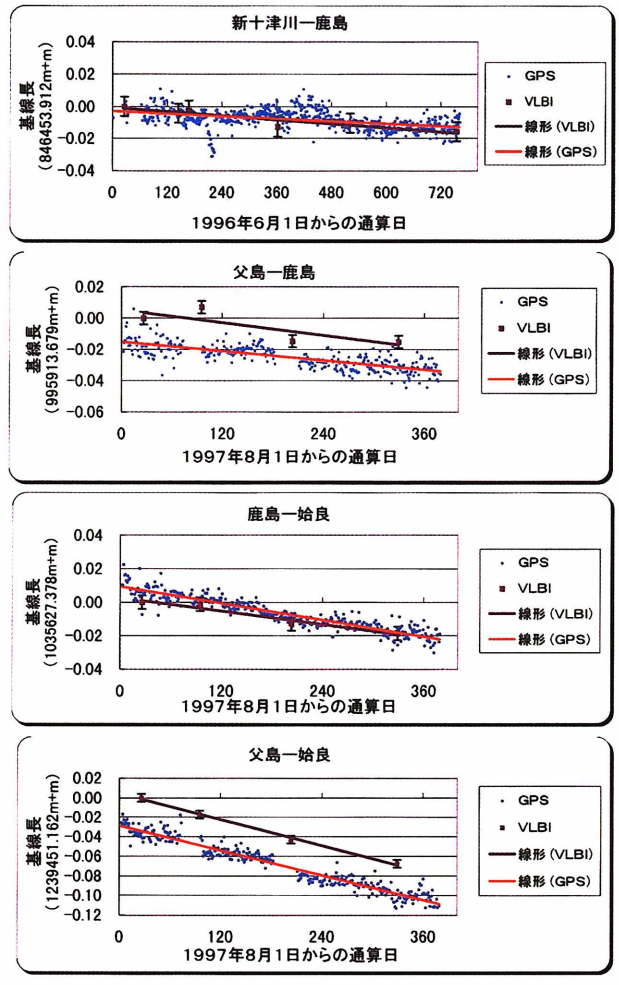
Epoch 1997.0

ITRF96	X(m)	Y(m)	Z(m)
	-3997892.263	3276581.277	3724118.220
速度ベクトル	Vx(m)	Vy(m)	Vz(m)
	-0.0013	0.0024	-0.0129

表－7　VLBI観測より求めた各観測局の位置座標

ITRF96

観測局	観測月日	X(m)	Y(m)	Z(m)
鹿　島	96/ 6/26	-3997892.262	3276581.276	3724118.227
26m	96/10/22	.263	.277	.223
	96/11/14	.263	.277	.222
	97/ 5/28	.264	.278	.215
	97/ 8/26	.264	.279	.212
	97/11/ 3	.264	.279	.209
	98/ 2/19	.264	.280	.205
	98/ 6/25	.265	.281	.201
父　島	97/ 8/26	-4490618.458	3483908.178	2884899.125
10m	97/11/ 3	.454	.189	.114
	98/ 2/19	.448	.197	.134
	98/ 6/25	.442	.192	.125
姶　良	97/ 8/26	-3530219.298	4118797.540	3344015.815
10m	97/11/ 3	.343	.572	.831
	98/ 2/19	.352	.566	.832
	98/ 6/25	.374	.564	.811
新十津川	96/ 6/26	-3642142.088	2861496.688	4370361.853
3.8m	96/10/22	.071	.671	.822
	96/11/14	.053	.664	.809
	97/ 5/28	.084	.659	.801
	97/11/ 3	.069	.674	.799
	98/ 6/25	.090	.673	.793



図－10　VLBIとGPSの基線長比較

いて，VLBI観測日における鹿島26m座標値を算出したものに，上で求めた各観測日の基線ベクトル(dXV, dYV, dZV)を加算した値(XV, YV, ZV)とする（表－7）。

5.3 GPSによる基線ベクトルと各観測局の位置座標

GPSによる基線ベクトルは，鹿島93009，父島942003，牧園950486，新十津川942001のGPS連続観測点（GEONET観測点）からVLBI観測と関連する2観測点を選び（例えばVLBIが鹿島－姶良基線の場合，GPSは鹿島と牧園），両者の座標差を算出し，これをGPS観測点間の基線ベクトル（dXG，dYG，dZG）とする。そしてこの値に，GEONET観測点から参照点までの取り付け値（表－5の値）を加算する。この作業によってVLBIで得られた参照点間と同じ区間のGPSによる基線ベクトル（dXG，dYG，dZG）が得られ，両者の比較が可能となる。なお，GPSによる基線ベクトルは日々得られる。

各観測局のITRF96に基づく座標値は，VLBIと同様に，GPS観測日における鹿島26mVLBIアンテナ座標値を算出したものに，上で求めた各観測日のGPS基線ベクトル（dXG，dYG，dZG）を加算した値（XG，YG，ZG）とする。

6．比較結果

6.1 各観測局間の基線長

VLBIとGPSのそれぞれの基線長は，VLBIアンテナ参照点間の，VLBIによる基線ベクトル（dXV，dYV，dZV）とGPSによる基線ベクトル（dXG，dYG，dZG）からそれぞれ計算したものである。VLBIとGPSの基線長の比較結果を図－10に示す。

縦軸の「0」位置は，新十津川－鹿島基線は1996年6月26日，父島－鹿島，鹿島－姶良，父島－姶良基線については1997年8月26日のVLBIによる基線長である。図には両者の一次回帰直線も示した。

新十津川－鹿島，鹿島－姶良の基線長は，VLBIとGPSの差が数mmであり良く一致している。これに対して父島が関連した基線長は，父島－鹿島が15～22mm，

父島－姶良が26～36mmと数センチメートルほど不一致が見られる。父島－鹿島基線に見られるVLBIの季節変化が現実の基線長を表しているか観測誤差なのかは現時点では判断できない。

基線長の年間変化率を表－8に示すが，父島局に関連した基線以外はVLBIとGPSがおおむね一致している。変化率較差の最大は父島－鹿島基線で，年間6.7mmとなる。各局間の基線長はすべて短縮傾向にある。

6.2 VLBIとGPSによる各観測局座標（ITRF96）の比較

各観測局におけるVLBIとGPSの座標比較のため，次のような計算処理を行った。

最初に基準位置としてVLBIのある特定の日の座標値（ＸＶ，ＹＶ，ＺＶ）を選定し，次に求めようとする日のVLBIまたはGPSの座標値を選ぶ。これが例えばGPSの座標値（ＸＧ，ＹＧ，ＺＧ）だとすると，この両者の差を算出し，この値を東西，南北，鉛直（上下）成分に変換する。この値は，VLBIの基準位置の座標からの変化量となる。基準位置座標としては，新十津川は1996年6月26日のVLBI座標値，姶良・父島は1997年8月26日のVLBI座標値とした（表－7の各観測局の最上段の値）。

ここで求めた結果を図－11～13に示した。縦軸の「0」位置は，上で述べたように新十津川は1996年6月26日，父島，姶良は1997年8月26日のVLBI座標値である。横軸は1996年6月1日（図－11）及び1997年8月1日（図－12，13）からの通算日である。

1）新十津川局（図－11）

VLBIとGPSの差は東西成分が5 mm，南北成分が10mm程度であり，ほぼ一致している。鉛直成分は約100mm程度の差がある。時間経過に対する変動量はVLBIとGPSでほぼ一致している。図ではGPSによる鉛直成分の変化量が15mm/年程度になっているが，VLBIの変化の様子やGPSの誤差等を考慮すると，鉛直成分は変化していないと見るべきだろう。

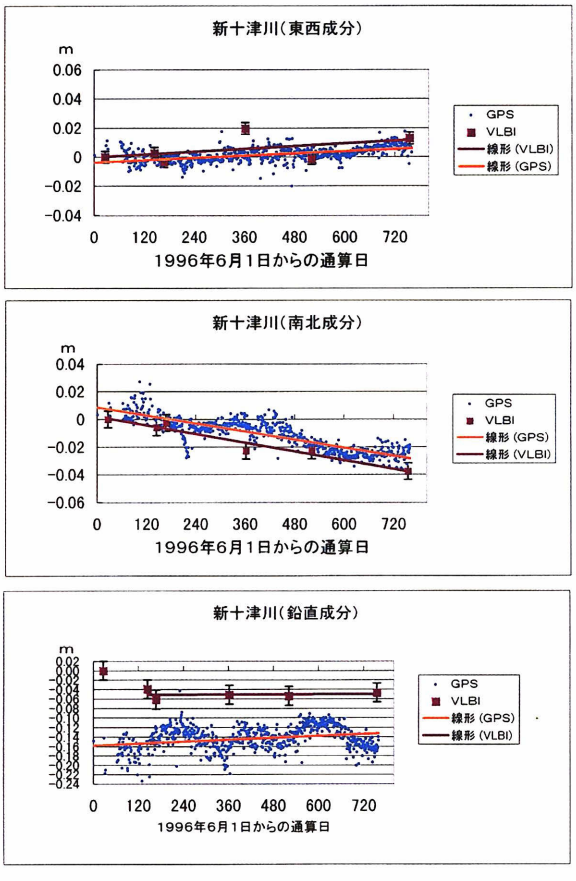
GPSには明らかに年周変化が現れている。特に鉛直成分が顕著である。また，VLBIの最初（1996年6月26日）の鉛直成分が他のVLBIデータと比べて50mm程度離れているが原因は不明である。

2）姶良局（図－12）

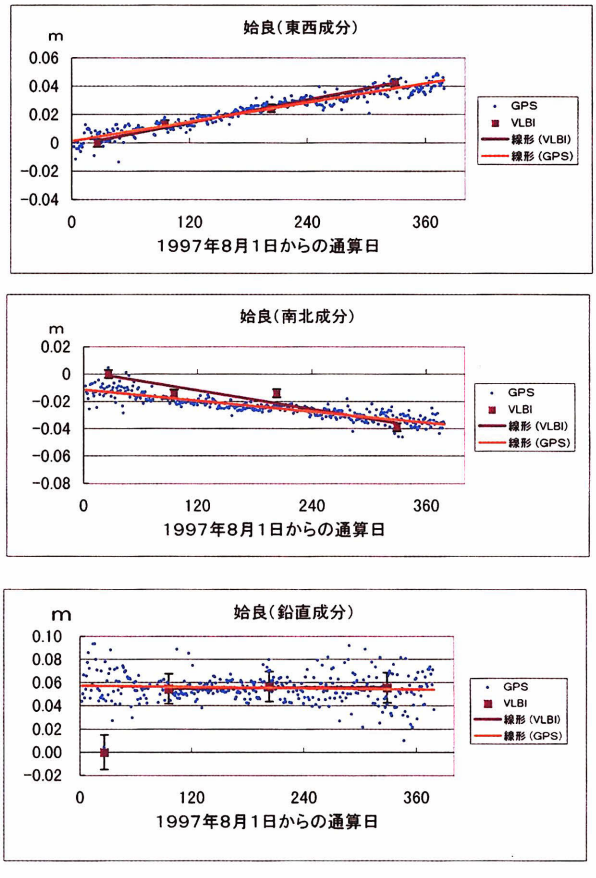
東西成分はVLBIとGPSで一致している。南北成分も

表－8　基線長の年間変化率

	VLBI (mm/年)	GPS (mm/年)
鹿島－新十津川	-7.8	-4.3
父島－鹿島	-24.9	-18.2
姶良－鹿島	-24.3	-25.0
姶良－父島	-81.7	-75.1



図－11　新十津川局におけるVLBIとGPSの座標比較



図－12　姶良におけるVLBIとGPSの座標比較

VLBIの測位結果の再現性（±10mm）以内である。

VLBIの鉛直成分の1997年8月26日の値は明らかに特異な値である。この量は約60mmだが原因は不明である。このデータを無視するとVLBIとGPSの間で有意な差は見られない。

3）父島局（図－13）

VLBIの東西成分，鉛直成分の時間変化に有意な傾向は見られない。南北成分が回帰直線に対して誤差が大きいが，測位結果の再現性（±10mm）程度なので，図に示された回帰直線の傾きが信頼できる値かどうかわからない。

VLBIとGPSを比較すると東西成分に20mm程度の有意な差が表れている。始良局ではVLBIとGPSが一致しているので父島－始良基線長のVLBIとGPSの較差（約30mm：図－10参照）はこの差が寄与している。

鉛直（上下）成分はVLBIとGPSの間に約80mmの差が存在するが，時間経過による変化は存在しない。

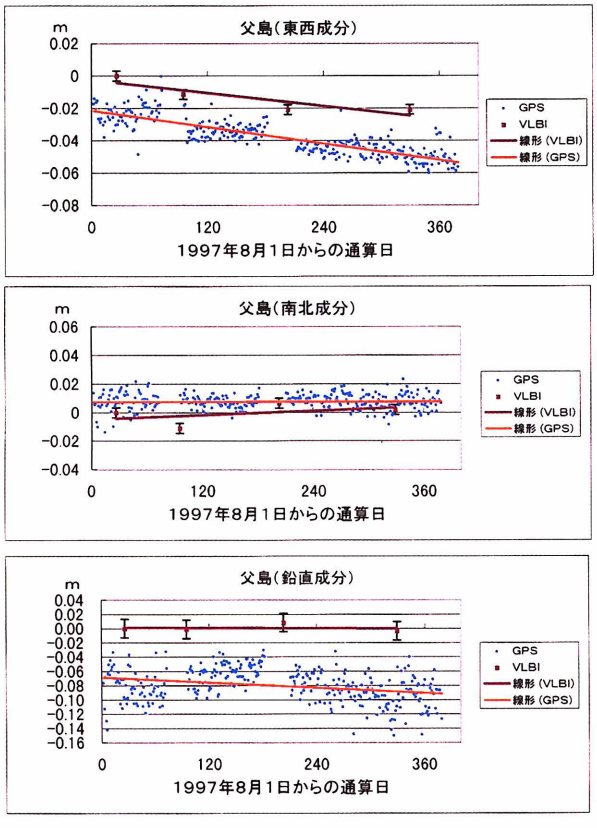
4）父島局におけるTrimble受信機を用いた観測

鉛直成分の絶対値が，新十津川で約100mm，父島局で約80mmと，ともに一致しない。また，他の比較値に比べて父島の東西成分がVLBIとGPSで不一致である。これらの理由は定かでないが，父島，新十津川局ともGPSはAshtechの受信機を使用しており，GEONETのAshtech網に含まれている。そこで，1999年2月19日に父島VLBI観測点において24時間のGPS観測を実施した。使用した受信機はTrimble4000ssi，アンテナはPermanent　L1/L2　w　G/Pである。また，2月17～18日にはVLBI観測が鹿島－父島間で行われている。

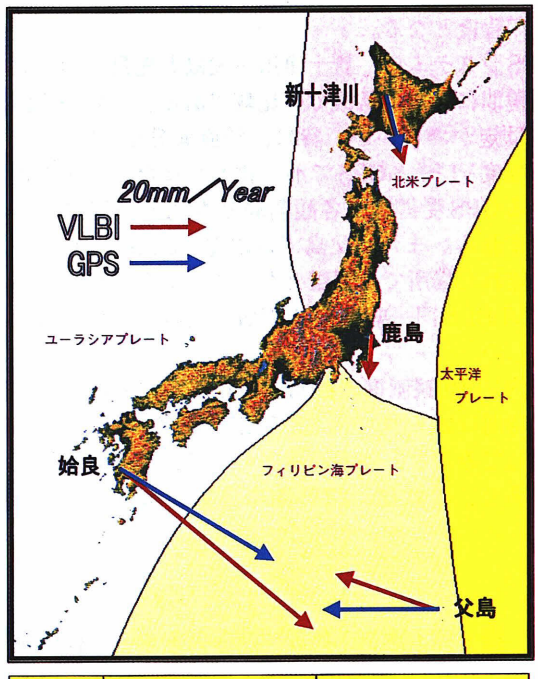
GPSの基線解析はBernese（ＩＧＳ暦）を用いて，父島から最も近いTrimble網である母島960603のGEONET観測データを用いて父島－母島間（48km）で行った。そして，母島960603－VLBI観測点（父島）の基線ベクトルとして上記の値，鹿島－父島間の基線ベクトルとして2月15～23日のGEONET観測網による値の平均値，VLBIとGPS間の取り付け値として表－5の値，VLBI観測値として2月17日の値を使用して，VLBIとGPSの座標比較を行った。その結果，2月17日のVLBI座標（父島）を基準にして，母島を経由して決定したGPSの値が，東西成分で－13mm，南北成分で＋10mm，鉛直成分で＋16mmという結果になった。これは父島衛星追跡局を経由して比較した値（図－13：東西－20mm～－15mm，南北10mm～5 mm，鉛直－80mm）より一致した値である。

5）各局の速度ベクトル

図－14に各観測局の速度ベクトルを示す。鹿島26mアンテナの速度ベクトルはIERSの公表値(ITRF96)である。新十津川，父島，始良の速度ベクトルは，図－11～13に示した各観測局の東西成分と南北成分の変化量（一次回帰直線）より求めた1年間当たりの移動量を元にして図示した。



図－13　父島におけるVLBIとGPSの座標比較



観測局	VLBI		GPS	
	移動量（mm）	方位角	移動量（mm）	方位角
鹿島	１２．０	１８５度		
父島	２８．０	２９０度	３１．１	２７０度
始良	６４．５	１３０度	４７．８	１２１度
新十津川	２０．２	１６３度	１８．５	１６６度

図－14　移動速度ベクトル

7．考　察

VLBIとGPSの結合では，VLBIアンテナの副反射鏡上にGPSアンテナを取り付けて地上基準点との結合測量を実施したが，この取り付け測量の精度は水平（東西，南北）成分で5mm，鉛直（上下）成分で20mm程度だと考えられる。

GPSを用いた取り付け測量では，特に，鉛直成分の決定精度が悪い。これは，鉛直成分を決定するためにVLBIアンテナを傾けた状態でGPS観測を実施する必要があり，特に，大口径VLBIアンテナでは重力によりアンテナが変形し，これに取り付けたGPSアンテナの回転軌跡が球や円と仮定できない場合があるからである。また，一方のGPSアンテナが傾けられて測定される状態となるため，このような状態では位相中心が移動することも考えられ，そのために精度が低下することが予想される。今後，GPSを利用した取り付け測量を行うのであるならば，位相中心の移動量を把握するための検定が必要である。

次に，各観測局におけるVLBIとGPSの座標の相互比較では，両者間はおおむね一致している結果となった。特に，鹿島－新十津川，鹿島－姶良間は約850kmと1000kmであるがVLBIとGPSとの水平成分の差は10mm以内であった。この差には両システムの整合性の相違と取り付け測量の誤差が含まれるが，仮に取り付け測量誤差が各観測局とも5mmとすると2局間の比較ではその誤差が7mmとなり，今回，得られたVLBIとGPSの較差と同程度となる。

GPSシステムは，新十津川・父島と鹿島・姶良局では異機種間による受信機での比較である。これが原因かどうかは定かでないが，特に，鉛直成分が10センチメートル程度VLBIとGPSで不一致となった。今後の比較に用いるGPS受信機は各観測局とも同一機種にすることが望まれる。また，父島では現在，GPSとVLBIが3km程度離れた場所での運用となっているが，可能であるならばVLBIと同一敷地内にGPS連続観測点があることが望ましい。

国内VLBI観測網の観測は現在年4回であり，各回の観測時間は24時間である。VLBI観測値（図11～13）を検討してみると，回帰直線からの較差が10mm程度のものもあり，これは，24時間の連続観測による内部誤差（2～4mm）の3～4倍程度であり，他のVLBI実験結果と同倍率である。したがって，各局における座標の時間変化が季節的なものなのか観測誤差なのかを判断するためには，1回当たりの観測頻度を多くするか観測期間間隔を短くする必要がある。

8．おわりに

「複数宇宙測地技術による広域地殻変動観測に関する国際ワークショップ」が1999年1月に開催された。ここでは，各国における複数宇宙測地技術の統合に関する情報交換と，今後の課題として，複数宇宙測地技術の統合化やコロケーションが重要であるとのことが確認された。

一方，1999年3月にIVS（国際VLBI事業）が発足し，IGS，ILRSとともに国際協力による宇宙測地観測態勢が整備された。これらの組織に加盟した機関による観測結果はIERSにおいて調整計算され，ITRF座標として公開される。この時，VLBI網，GPS網等は，コロケーションサイトと呼ばれる取り付け局で重量を付けて結合される。このコロケーションサイトには，1ミリメートルを切る高精度な取り付け測量が求められている。

このように複数宇宙測地技術の統合に関しては国際的な見地に立っても重要であり，また国内において高精度な測地網を構築する場合においても，複数の宇宙測地技術を統合する必要があり，このために，観測手法，解析手法，評価等に関する調査研究が必要である。そこで，院内に「複数宇宙測地技術の統合に関する分科会」を研究連絡会議の下に1999年4月に設立させた。この分科会では，各国で行っている複数宇宙測地技術の統合に関する情報の収集や，VLBIとGPSの高精度取り付け方法の検討を行う。そして，分科会で検討された結果に基づいて実際の測量を行い，結合方法の評価を行う予定である。

このような背景の中にあって，本報告では，これまでに行った取り付け測量の現状やVLBIとGPSの2つのシステムの整合性を検討した。今後は，ここで得られた成果を参考にして，複数宇宙測地技術の統合化やコロケーションを検討していく。なお，本報告書をまとめるにあたり，GEONET成果を衛星測地課の澤田正典氏に提供していただいた。

参考文献

石原　操・根本恵造・松坂　茂・大木章一・福崎順洋・岩田昭雄・井上武久・芝　公成・谷澤　勝・高島和宏・永田勝裕・小林京子（1998）：国土地理院におけるVLBI観測網とGPS観測網の結合，1998年度VLBIシンポジュウム集録

石原　操（1999）：VLBI国内観測結果とVLBI・GPSコロケーション，技術報告書

大木章一・石原　操・根本恵造・福崎順洋・岩田昭雄・芝　公成・谷澤　勝・高島和宏・永田勝裕・小林京子（1998）：国内超長基線測量結果，1998年度VLBIシンポジュウム集録

Shoichi OGI, GSI VLBI Group (1999)：Status Report of Geographical Survey Institute Japan, 13th Working Meeting on European VLBI for Geodesy and Astrometry

Shoichi OGI, Misao ISHIHARA, Yoshihiro FUKUZAKI, Masao IWATA, Kousei SHIBA, Masaru YAZAWA, Kazuhiro TAKASHIMA, Katsuhiro NAGATA (1999)：Comparison of the Time Variation with GSI VLBI Domestic Experiments and Daily GPS Measurements, Proceedings of the International Workshop on Geodetic Measurements by the collocation of space techniques on Earth

川原敏雄 (1998)：VLBIアンテナAz－El中心取付による座標値の算出，技術報告書

宮崎真一・畑中雄樹 (1998)：国土地理院GPS連続観測システムの概要，日本気象学会，気象研究ノート，第192号

Shigeru MATSUZAKA, Misao ISHIHARA, Keizo NEMOTO, Kyoko KOBAYASHI (1999)：Local tie between VLBI and GPS at Geographical Survey Institute, Proceedings of the International Workshop on Geodetic Measurements by the collocation of space techniques on Earth