

日韓VLBI・GPS観測

Japan—Korea VLBI and GPS Observation

測地部

石原 操・福崎順洋・吉村愛一郎・飛田幹男・雨宮秀雄
川原敏雄・根本正美・大滝 修・谷澤 勝

Geodetic Department

Misao ISHIHARA, Yoshihiro FUKUZAKI, Aiichiro YOSHIMURA,
Mikio TOBITA, Hideo AMEMIYA, Toshio KAWAHARA,
Masami NEMOTO, Osamu OTAKI, Masaru YAZAWA

測地観測センター

板橋昭房・齋藤 隆・佐々木正博・飯村友三郎・宮崎真一

Geodetic Observation Center

Akifusa ITABASHI, Takashi SAITO, Masahiro SASAKI,
Yuzaburo IIMURA, Shin-ich MIYAZAKI

要旨

大規模な地震の発生などから、ユーラシアプレートと北米プレートの境界が存在すると目されている日本海東縁部における地殻変動の把握や日本—大韓民国（韓国）間の測地網の高精度な結合、韓国GPS連続観測局や大韓民国経緯度原点への国際基準座標の提供などを目的として、国土地理院（GSI）は、大韓民国建設交通部国立地理院（NGI）と共同で、VLBI観測とGPS連続観測を実施した。

VLBI観測は、大韓民国水原（スウォン）市に日本から移設した可搬型VLBI観測システムと鹿島VLBI観測局との間で行った。平成7年10月から11月に24時間観測を4回行い、その内の3回について良好な解析結果を得ることができた。また、GPS連続観測は、システムを国立地理院構内に設置して、平成7年3月からGPS連続観測を開始し、観測データの収集・解析を行った。

以上の観測によって得られたデータを総合的に解析することにより、両国間の測地網をミリメートル（mm）オーダーで結合することができたとともに、大韓民国GPS連続観測局や大韓民国経緯度原点の位置を国際基準座標系で表すこともできた。また、この地域の地殻変動についても把握することができた。

1 はじめに

大韓民国の測地網は1910年（明治43年）～1918年（大正7年）に当時の朝鮮臨時土地調査局によって三角測量方式により整備された（「測量・地図百年史」）。日本の測地網との結合は1940年代に三角測量によって行われた（図-1）。その後、6.25動乱などのため、南韓地域

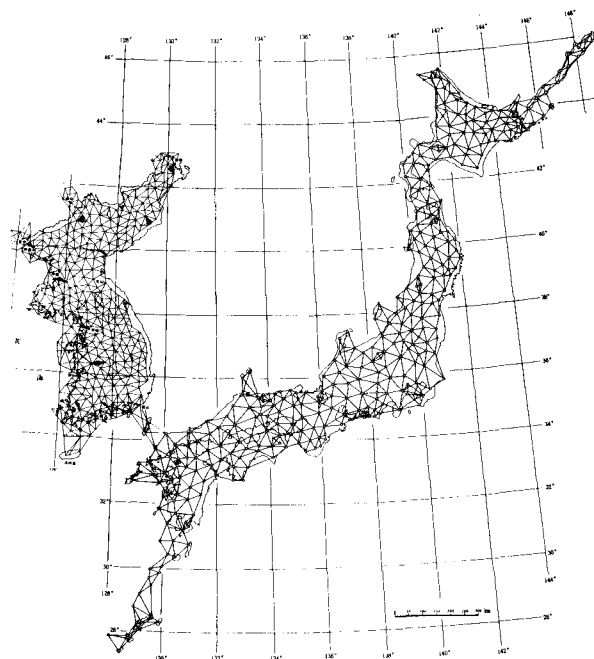


図-1 日韓一等三角網図

に設置された16,089点の三角点（1～4等）の大部分が破損され、亡失したのでこれを再設、復旧して使用している。国立地理院は1975年（昭和50年）からは精度度及び機能向上のため、我国（国土地理院）の技術協力を得て、光波測距儀を使用した精密測地網測量を実施している。大韓民国も日本と同様に測地網の偏位（歪み等）が存在し、これを修正するため、国際基準座標系に結合さ

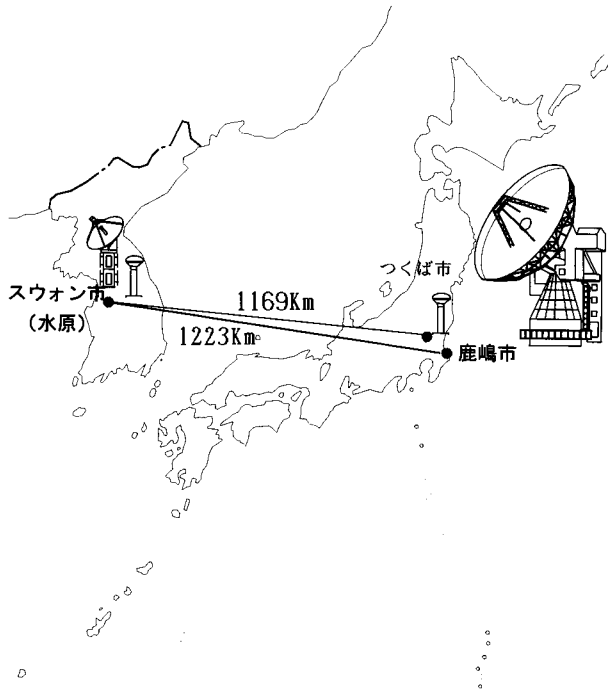


図-2 日韓VLBI・GPS観測基線

れている日本の測地網と大韓民国の測地網の結合を早期に実施することを我国に要望していた。

一方、我国においては、日本海東縁部において近年比較的大規模な地震が発生しており、この地域における地震発生のポテンシャル評価を早急に行う必要があるため、日本海を挟む日韓の基線の変動を高精度に測定し、現在の地殻変動の状況を把握する必要に迫られた。

前者のためには、位置計測技術として最も高精度である超長基線電波干渉計（VLBI）による観測が最適であり、後者のためには、時間的分解能に優れたGPS連続観測及びVLBI観測が補完しあい、状況把握するのが最良の方法である。そのため、国土地理院と協力関係にある大韓民国国立地理院と協力して、VLBI観測及びGPS連続観測を実施した（図-2）。本稿では、両者について、その実施方法や解析結果について報告する。

2 日韓VLBI観測

2.1 目的

日韓VLBI観測は、日韓測地・地図協力会議で早急な実施が合意されており、その合意に基づくものであるとともに、科学技術庁の科学技術振興調整費による総合研究（「日本海東縁部における地震発生ポテンシャル評価に関する総合研究」に伴う「 $10^0 \sim 10^2$ 年オーダーのプレート運動の解明」の一環としても実施された。その大きな目的は、日本一大韓民国間の測地網の高精度結合と地殻変動の把握である。測地網の高精度結合のためには、日韓間のVLBI観測及び大韓民国のVLBI観測点の近傍の基準点との取り付け観測を行うことでその目的を達成する。また、地殻変動の把握は並行してGPS連続観測



写真-1 移動用小型VLBIアンテナとGPSアンテナ

点も設置しており、これと共同して数年間の地殻変動の様相を監視することで達成する。

2.2 観測作業の概要

（1）観測機器及び移設

今回の観測は、可搬型VLBI装置をつくば市より大韓民国水原市国立地理院構内に移設し、鹿島26mアンテナとの間で実施した。可搬型VLBI装置は直径3.8mのパラボラアンテナ、K-4型VLBIシステム、水素メーザ周波数標準装置、遠隔自動監視・制御装置等で構成されており、アンテナ以外は車載型コンテナに搭載されている。アンテナは平成5年度補正予算で整備したものであり、同時に製作した新十津川局用アンテナと基本的に同一のものである。アンテナの詳細については、国土地理院時報（1995 NO84「新十津川VLBI観測施設の整備について」）を参照されたい。

（2）アンテナの組立・調整

国立地理院が建設したVLBI観測基台上に、移設したアンテナを組み立てた（写真-1）。この作業の終了後、配線接続及びシステム点検を実施した。システム点検は、アンテナビームパターン測定、システム雑音温度測定、各機器の動作及び機能確認等である。アンテナ受信系の能力はシステム雑音温度で評価することができるが、移設前よりも良好な結果を示した。この要因は水原がつく

ばと比べて、気温、湿度とも低かったためだと思われる。

(3) アンテナ軸校正及びVLBI観測

観測システムの機能確認に引き続き、アンテナの軸校正を実施した。軸校正とは、アンテナ設置後、太陽、月、クエーサー等の実際の電波源を観測し、最も強く電波が受信できるようにアンテナの各軸の駆動量に補正をすることである。3.8mアンテナの場合、大型アンテナと異なり受信感度が弱いためクエーサーを用いた軸校正を行うことができないため、軸校正の決定精度が悪くなる。

軸校正観測に基づき、最適と思われる軸校正パラメータを選び、最初の観測を10月16日～17日に実施することとした。

観測は国立地理院職員と協力して24時間観測を1セッションとしてSUWON-1～SUWON-4と名付けた観測コードの4セッションを実施した。各セッションではそれぞれ13個（第一セッションは12個）のクエーサーを用いて二百数十の観測を行った。第一セッション終了後、ただちに観測テープを日本に持ち帰り、相関処理を実施した。その結果、以下のことが判明した。①フリンジが検出できた星は軸校正観測で使った太陽の軌跡に近いものだけである。②X、Sバンドともすべてのチャンネルでフリンジが検出できている。したがって、受信系は正常である。③相関強度が、Sバンドは正常値に近い値であるがXバンドは非常に低かった。これは、軸校正が正しく行われなくて、ビーム半値幅が2.5度と広いSバンドにおいては電波が受信でき、ビーム半値幅が0.8度のXバンドは電波が正しく受信できなかったものと推測される。④使用している自動追尾型のアンテナ軸校正プログラムでは、正しいパラメータは得られない。

以上のことを踏まえ、軸校正観測を手動で2日間実施すると共に、プログラムを応急的に変更して軸校正パラメータを求めた。太陽追尾で新パラメータの正しさを確認後、SUWON-2の観測を10月24日～25日に実施した。第一セッションと同様に、観測終了後、テープを日本に持ち帰り相関処理を実施した。その結果、80%以上の星が解析できたので、予定どおり、SUWON-3の観測を10月31日～11月1日、SUWON-4の観測を11月1日～2日に実施した。

2.3 解析結果

VLBIの解析は、相関処理、バンド幅合成、データベース(D/B)作成及び基線解析の4段階に分かれる。相関処理はハードウェア処理であり、バンド幅合成以降はソフトウェア処理である。相関処理とバンド幅合成は、郵政省通信総合研究所鹿島宇宙センターの相関処理装置及びバンド幅合成ソフトウェアKOMBを借用して行った。相関処理結果及びバンド幅合成処理結果は、 α テープと呼ばれる形式でオープンリールテープに記録保存される。データベース作成は、通信総合研究所で開発されたソフトウェアKATS_MAKE_DB及びDBUP-

DATEを用いて行った。データベース作成では、バンド幅合成結果、ログファイル、惑星の暦、地球回転パラメータ、潮汐パラメータを取り込み、NASAゴダード宇宙飛行センター(GSFC)で開発されたMARKⅢ型D/B形式でデータベース化する。基線解析は、GSFCで開発されたソフトウェアCALC及びSOLVEを用いて行った。CALCは、電波星の位置を精密に計算するものである。また、SOLVEは、最終的に基線解析を行うソフトウェアである。今回の処理に用いたパラメータ等の基線解析条件を表-1に示す。

今回の解析では、ITRF94(IERS Terrestrial Reference Frame 94)と呼ばれる地球基準座標系に準拠して鹿島局の位置を固定(表-4最上段のEPOCH 1993.0の値)して解を求めた。ただし、電波星の位置にICRF93(IERS天文基準座標系)を用いたため、基線ベクトルはITRF93に準じたような結果が得られる。これに伴い、XYZの各成分でITRF94に対しては数mm程度の不確定さを含むことが予測される。ただし、基線長では1mm以内で一致するものと思われる。

前節でも述べているとおり、4セッションの観測データの内、最初のセッション(SUWON-1)のデータは水原局のアンテナの軸校正に問題があったため、SNが非常に悪く、大半のデータが解析不可能であった(表-2)。

日韓VLBI観測の基線解析結果を表-3に示す。表の

表-1 基線解析条件

項 目	
地球回転パラメータ	IERS Bulletin B
潮汐パラメータ	鹿島局と水原局とで同じものを用いた。
鹿島局の座標	ITRF94 (Epoch 1993.0)
電波星の位置	ICRF93 (国際天文基準座標系)
ケーブル補正データ	解析に使用せず
大気補正モデル	MTTDRFLY
電離層補正	S及びXバンドの同時受信より補正
クロック推定	1時間おき
大気推定	3時間おき
使用した星	SUWON-1 12星、SUWON-2～4 13星

表-2 各セッションでの使用電波源と解析数

星 名	SUWON-1	SUWON-2	SUWON-3	SUWON-4
3C84	3/23	19/22	21/21	18/21
0528+134	5/12	15/16	14/14	13/14
0537-441	6/6	0/6	0/6	0/6
0552+398	0/21	15/19	19/23	16/22
4C39.25	0/24	19/22	18/23	19/20
3C273B	20/23	15/17	16/20	15/17
3C279	-/-	11/13	10/14	10/12
1308+326	1/20	19/22	17/20	17/18
3C345	4/21	21/24	21/23	20/20
1921-293	14/14	14/16	12/14	13/14
2134+00	11/15	12/13	12/15	10/14
2145+067	9/12	9/12	10/12	8/11
3C454.3	4/20	17/19	17/21	15/21
総 数	77/211	186/221	187/226	174/210
採用率	36%	84%	83%	83%

解析数/観測数

上段には、鹿島26mアンテナ（EL「方位」・AZ「高度」軸中心）を基準とした水原3.8mアンテナ（EL・AZ軸中心）の基線ベクトルを示した。中段に、SUWON-2～4より得られた座標値の平均値を原点として各セッションの結果を水平、鉛直成分に変換した値を示した。また、下段には各成分ごとの観測精度を示した。図-3に表の中段の結果を示した。左図は東西南北成分、右図は東西上下成分を示す。楕円は観測精度を表す。

表-3 日韓VLBI観測基線解析結果

「鹿島局と水原局のアンテナ中心間の基線ベクトル」

観測名	D X (m)	D Y (m)	D Z (m)	S (m)
SUWON-2	935866.2336	778875.3022	117694.3693	1223251.5310
SUWON-3	935866.2386	778875.3028	117694.3626	1223251.5346
SUWON-4	935866.2439	778875.2921	117694.3937	1223251.5349
平均	935866.2387	778875.2990	117694.3752	1223251.5335
最大格差	0.0103	0.0107	0.0311	0.0039
SUWON-1	935866.1787	778875.3470	117694.4919	1223251.5293
差※	0.0600	-0.0480	-0.1167	0.0041

※ SUWON2～4平均とSUWON-1の差

「SUWON2～4の平均位置との差」

観測名	NS(南北:mm)	EW(東西:mm)	UD(上下:mm)	S(基線長:mm)
SUWON-1	+48	+19	+130	4.2
SUWON-2	8	+2	+1	-2.5
SUWON-3	-12	-2	-5	+1.1
SUWON-4	+20	+0	+4	+1.4

「成分ごとの観測精度(単位:mm)」

観測名	X	Y	Z	S	上下	東西	南北
SUWON-1	40.5	31.2	41.1	19.5	55.8	20.8	27.5
SUWON-2	17.4	15.1	17.4	5.8	27.3	7.2	5.9
SUWON-3	18.3	16.3	17.5	6.0	28.5	7.3	6.0
SUWON-4	17.5	14.6	15.8	6.2	26.1	7.5	5.7

SUWON-1を除くと水平方向の精度は5～8mm、上下（鉛直）方向の精度は26～29mm、基線長の精度は約6mmとなった。

VLBIでの上下方向の決定精度は、上下位置と時刻オフセット及び大気天頂遅延の3つのパラメータ間の分離性が悪いと、全パラメータ同時推定時の局位置は水平に比べて上下に大きな誤差を持つようになる。この量は仰角5度以下の観測をカットした場合で水平の3倍、10度で4倍、15度で7倍程度の誤差となる。これを改善するためには大気に関する感度が極端に良くなる低仰角の観測を増やす必要がある（日置，1990）。水原局の場合、西及び北側に林があり、その仰角は20度を越えている。その他の方向も建造物等によって上空視界が遮られ、一部の方向を除き10度以下の観測が確保できなかった。その結果の現れとして、上下方向の精度が水平方向の精度の4倍程度となったものと思われる。

観測間較差については、表-3中段及び図-3より明らかなように、東西（EW）及び上下（UD）成分は、解析個数が極端に少なかったSUWON-1は論外として、他の3観測では10mm以内で一致していた。また、南北（NS）成分では、SUWON-4が他の2観測に比べて30mm程度較差が生じていた。

南北成分での観測間較差（30mm）が観測精度（5～8mm）から期待されるものより大きな値となったが、その理由は現時点では不明であるので、日韓VLBI観測の成果としてはSUWON-2～SUWON-4の観測結果を平均した以下の基線ベクトル及び基線長を採用する。

$$\begin{aligned} DX &= +935866.2387\text{m} \\ DY &= +778875.2990\text{m} \\ DZ &= +117694.3752\text{m} \\ S &= +1223251.5335\text{m} \end{aligned}$$

2.4 水原VLBI観測点及び大韓民国経緯度原点の位置

日韓VLBI観測の基準局である鹿島局の位置は、国際実験から高精度に位置・位置変動速度とも求められてITRF94座標系として表されており（表-4最上段のEPOCH1993.0の値）、その精度は、位置で7mm、速

表-4 ITRF94座標系に基づき観測日に準拠した鹿島局及び水原局の位置

「鹿島26mアンテナの位置」

EPOCH	X (m)	Y (m)	Z (m)	Vx (m/年)	Vy (m/年)	Vz (m/年)
1993.0	3997892.2680	3276581.2620	3724118.2880	0.0018	0.0014	-0.0144
1995.813	3997892.2731	3276581.2659	3724118.2475	10月24日(297)		
1995.832	3997892.2731	3276581.2660	3724118.2472	10月31日(304)		
1995.835	3997892.2731	3276581.2660	3724118.2472	11月1日(305)		

「水原3.8mアンテナの位置」

観測名	X (m)	Y (m)	Z (m)	EPOCH
SUWON-2	3062026.0395	4055456.5681	3841812.6168	10/24(297) 1995.813
SUWON-3	3062026.0345	4055456.5688	3841812.6098	10/31(304) 1995.832
SUWON-4	3062026.0292	4055456.5581	3841812.6409	11/1(305) 1995.835
平均	3062026.0344	4055456.5650	3841812.6225	10/29(302) 1995.827

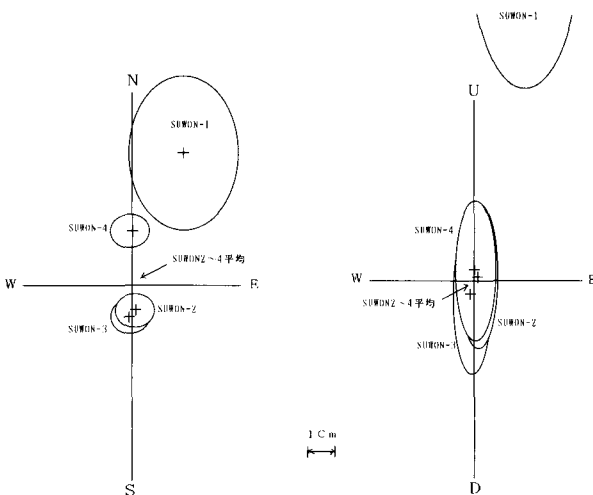


図-3 VLBI観測結果（水平、鉛直成分）

表-5 韓国内における各観測点の結合基線ベクトル

始点 → 終点	D X (m)	D Y (m)	D Z (m)	備考
水原VLBI77杆(ELAZ中心) → VLBI金属標	2.0835	-2.7686	-2.6404	偏心測定
GPS連続観測点※ → VLBI金属標	-0.620	4.755	-9.260	GPS観測
VLBI金属標 → 韓国経緯度原点	21.3983	-17.0460	50.8870	μ (96.3.6)
韓国経緯度原点 → GPS連続観測点※	-20.778	12.291	-41.627	μ
GPS観測ピラー上面 → 基準面中心	-0.034	0.045	0.042	偏心測定

※GPS連続観測点は観測ピラー上面中心

表-6 VLBI観測に基づく成果

「ITRF94 EPOCH: 1995.827」			
	X (m)	Y (m)	Z (m)
水原VLBI金属標	-3062023.9509	4055453.7964	3841809.9821
韓国経緯度原点	-3062002.5526	4055436.7504	3841860.8691
「WGS84」			
水原VLBI金属標	-3062023.9864	4055452.8072	3841810.0471
韓国経緯度原点	-3062002.5881	4055435.7612	3841860.9341

度で2 mm/yr程度である。これを基準として各セッションごとに、ITRF94座標系での鹿島局の観測日における位置を求め(表-4上段)、さらに、表-3の値を加味して水原VLBIアンテナの位置を求め表-4下段に示した。表中の平均値がITRF94座標系に準拠した1995年10月29日(EPOCH: 1995.827)の水原VLBIアンテナ(EL・AZ軸中心)の地心座標である。この値は国際基準系に基づいた水原局の位置の座標を表し、地殻変化以外に国際基準系に対する水原局の乗っているプレートの動きも反映する値なので、日々変化する性質のものである。

以上の結果は移設した3.8mアンテナのEL・AZ軸中心の地心座標であり、これを基準に水原VLBI観測点の金属標及び大韓民国経緯度原点の位置を求めた。金属標はVLBIアンテナを設置した基台の中央に埋設されている。また、大韓民国経緯度原点は、VLBI観測基台の北方56mの地点にある。

3.8mアンテナのEL・AZ軸中心とVLBI金属標、大韓民国経緯度原点及びGPS連続観測局間の基線ベクトルはGPS観測や偏心測定により表-5のように求められているので、表-4の座標にこの値を加味して両点の位置を決定した。結果を表-6に示すとともに大韓民国経緯度原点の位置を以下に示す。上記と同様に、この値も日々変化する性質のものである。

X = -3062002.5526m
Y = 4055436.7504m
Z = 3841860.8691m
(ITRF94 EPOCH: 1995.827)

2.5 大韓民国経緯度原点の成果との比較

大韓民国経緯度原点は精密測地網測量的出発点とするために1985年に設置された。原点成果は1980年～1984年にわたる原点観測成果(天文測量)に基づいて以下のように決められた。

緯度 = 37° 16' 31." 9034N
経度 = 127° 03' 05." 1451E
原方位角 = 170° 58' 18." 190 (東鶴山)

また、原点の実用成果は周辺の測地網(三角点)及び水準点より取り付けられ、以下のように決められている。

緯度 = 37° 16' 23." 15317N
経度 = 127° 03' 12." 02397E
= 127° 03' 22." 42897E (改正値加算)
標高 = 67.500m

実用成果は東京測地系座標(ベッセル楕円体)を使用している。日本では、原点経度に誤りがあるため大正7年に永久命令で告示し、既三角点成果表には「経度の改正値として+10." 4050を加うべき」として全国の成果を改めた(「現代測量学④」)が、大韓民国の実用成果ではこの改正値が加算されていないので、実際の測量で使用する時は成果表の値にこの改正値を加算して使用している。したがって、原点経度の実用成果は下段の値を使用している。

この実用成果をベッセル楕円体パラメータを用いて三次元直交座標に変換した値を表-7に示す。変換にあ

表-7 韓国経緯度原点成果の座標系による比較

	X (m)	Y (m)	Z (m)
VLBI成果 (ITRF94)	-3062002.5526	4055436.7504	3841860.8691
実用成果 (Bessel)	3061888.0070	4054976.6097	3841213.5405
VLBI成果 - 実用成果	-114.5456	460.1407	647.3286

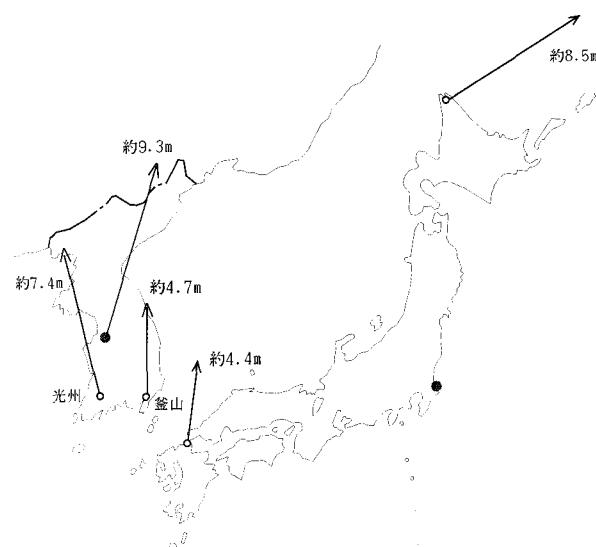


図-4 従来の測量成果との比較

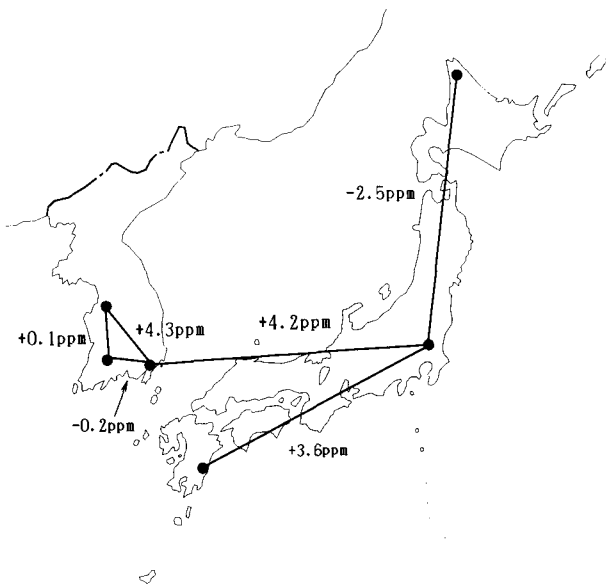


図-5 実用成果のスケール誤差

たっては標高を楕円体高とみなした。

ITRF94座標系と上記ベッセル座標系との差は

$$DX = -114.5456\text{m}$$

$$DY = 460.1407\text{m}$$

$$DZ = 647.3286\text{m}$$

となり、この差を大韓民国の測地座標系とITRF94座標系の変換パラメータと考えることができる。

また、VLBI観測で求めたITRF94座標系を筑波測地系92に変換すると

$$\text{緯度} = 37^{\circ} 16' 23." 443\text{N}$$

$$\text{経度} = 127^{\circ} 03' 22." 537\text{E}$$

$$\text{楕円体高} = 1.051\text{m}$$

となり、これと実用成果とを比較して、その結果を水平成分と鉛直成分に表すと以下になる。ここでは、現在の実用成果の値から今回得られた数値への向きで表す。

$$\text{北へ} \quad 8.9\text{m}$$

$$\text{東へ} \quad 2.7\text{m}$$

$$(\text{方位}17^{\circ} \text{に} 9.3\text{m})$$

$$\text{下へ} \quad 66.4\text{m}$$

水平成分は、現在の日韓測地網結合のもつ歪みを表していると考えられる。図-4に見られるように、日本測地網との結合地点にあたる釜山の三角点の歪量は北九州の三角点と同一の傾向にある。これに対して水原原点では、網の最も歪んでいる北海道の三角点より大きな歪み量となっている。なお、鉛直成分の大部分はジオイド高を表す。

また、VLBI観測及びGPS観測(3-3参照)による各点間の基線長に対する実用成果の基線長の比は図-5のようになった。釜山-筑波基線は宮崎-筑波基線(飛田, 1992)と同様の傾向となっている。

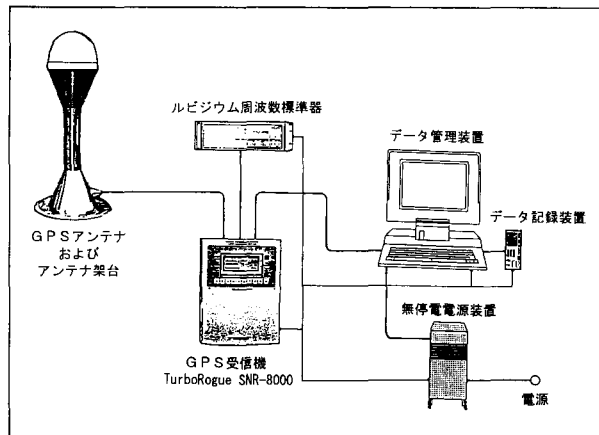


図-6 大韓民国GPS連続観測システム概要図



写真-2 大韓民国GPS連続システム

3 日韓GPS観測

3.1 日韓GPS共同観測

国土地理院では平成6年度から大韓民国国立地理院と協力して、時間的分解能に優れたGPS連続観測システムを水原市の国立地理院構内に設置して、平成7年3月からGPS共同観測を開始した。これは、日韓VLBI観測と同様に科学技術庁の科学技術振興調整費による総合研究の一環として実施された。

(1) 大韓民国GPS連続観測システムの概要

水原観測局に設置したシステム(図-6, 写真-2)は、国際GPS地球力学事業(IGS)のGPS連続観測局が標準的に使用しているGPS受信機を主に、下記の観測機器で構成されている。このGPS連続観測システムは国土地理院が国立地理院に寄託したものである。

①GPS受信機

・AOA TurboRogue SNR-8000

・AOA Choke Ringアンテナ

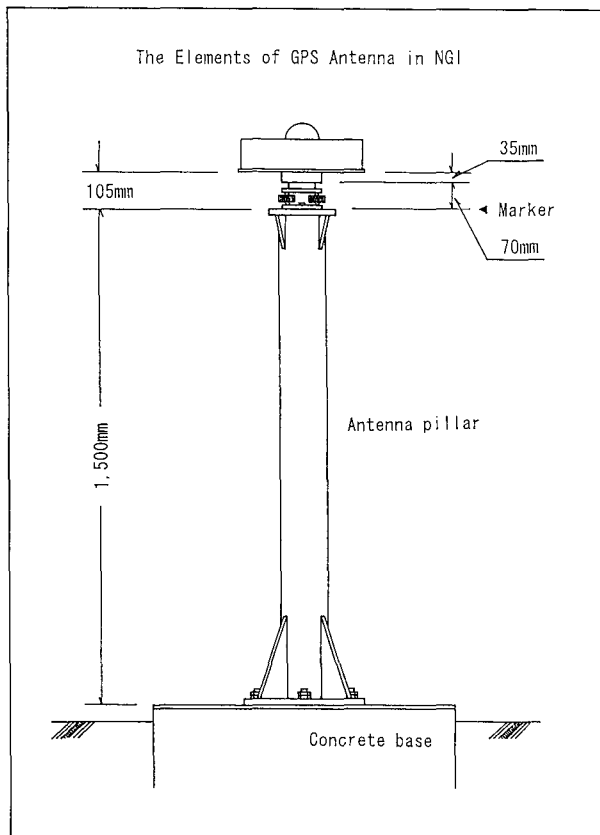
②ルビジウム周波数標準器

(周波数安定度: $\pm 2 \times 10^{-9}$)

③データ管理装置

・Unix Work Station

図-7 大韓民国GPSアンテナ架台



④無停電電源装置

GPSアンテナ架台（写真-1）は、平成7年2月に国立地理院によって建設された。アンテナ設置時の各要素は図-7のとおりである。

観測の設定は、IGSの観測基準に則って、協定世界時（UTC）0時から30秒のサンプリング間隔で24時間観測を行っている。これらの設定は、国立地理院にインターネットが導入された後、水原観測局の観測データをIGSに提供して、国際的なGPS連続観測局を目指すためである。

観測及び観測データの管理は、データ管理装置のプログラム制御により自動管理されている。しかし、インターネットが未導入のため、データ転送のみ唯一手動で行われている。現在のデータ転送は、4mmDAT装置により、カートリッジテープに観測データをコピーして、毎月一回の割合で国土地理院に郵送している。

（2）IGS筑波観測局（TSKB）の概要

国土地理院における国際GPS連続観測は、1988年から地球ダイナミクスの研究を目的とした国際共同GPS観測ネットワーク（CIGNET）の参加に始まり、1992年6月からのIGSテストキャンペーン、パイロットサービス観測を経て、1994年1月1日から定常運用が開始されたIGSの観測に至っている。現在の筑波観測局のGPSアンテナ架台（写真-3）は平成5年11月に設置

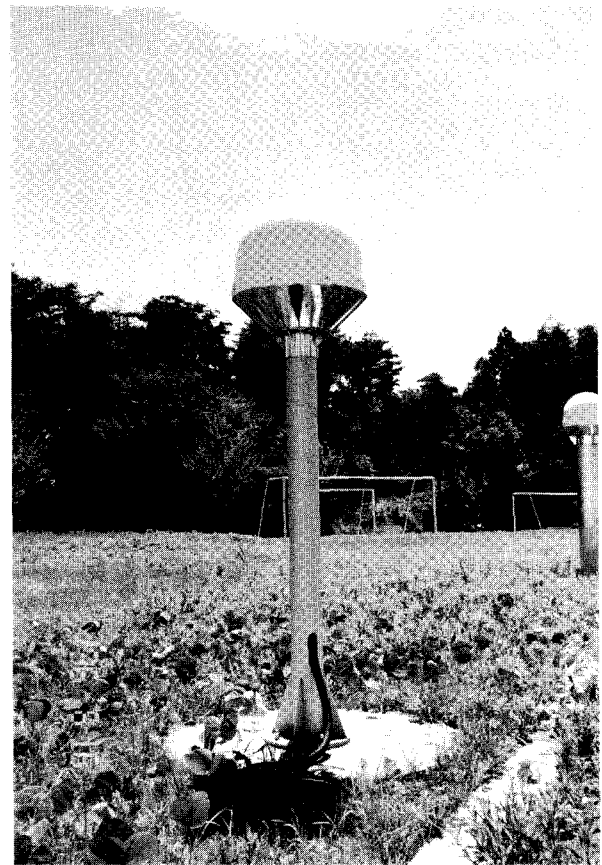


写真-3 IGS筑波観測局GPSアンテナ架台

され、12月からIGSの観測基準に則り定期的に連続観測データを取得し、インターネットを通じてIGSグローバルデータセンター（CDDIS）に毎日伝送している。これらの定常業務は、コンピュータによって全て自動的に行われている。

IGS筑波観測局のGPS連続観測システムは、下記の主な観測機器で構成されている。

①GPS受信機

- ・AOA TurboRogue SNR-8100
- ・AOA Choke Ringアンテナ

②セシウム周波数標準器

（周波数安定度： $\pm 1.5 \times 10^{-12}$ ）

③データ取得・転送装置および通信モデム

- ・PC IBM PS/V

④無停電電源装置

3.2 GPS基線解析

水原観測局（SUWN）、IGSグローバル観測局及び国内GPS観測局で覆う広域な東アジア地域の基線解析ネットワークを構成し、各局の観測データを用いて基線解析を行い、各観測局の変動量を算出した。

（1）基線解析の概要

基線解析ネットワークは、各プレートに2観測局程度

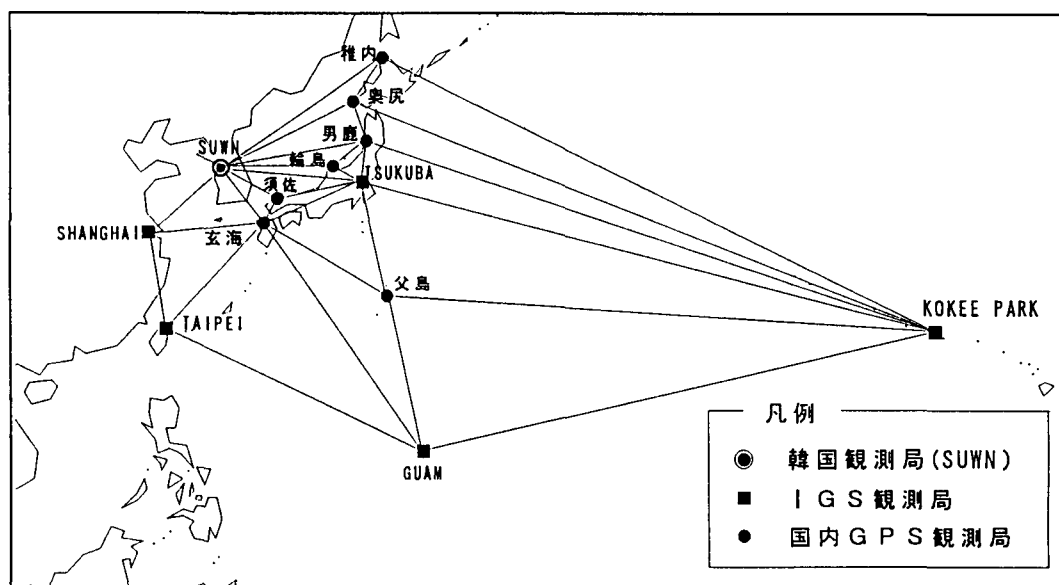


図-8 基線解析ネットワーク

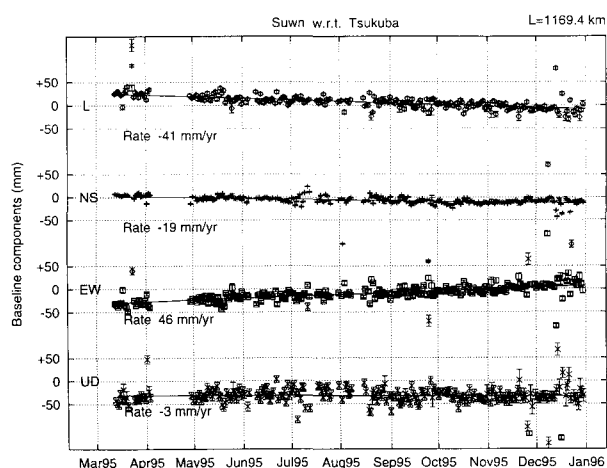
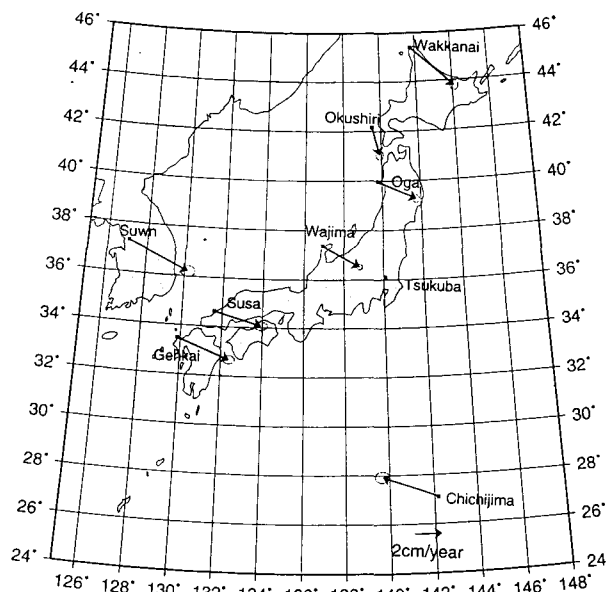


図-9 基線解析結果

が配置されるように、全13観測局（図-8）で構成されており、これらの観測局の連続観測データを用いる。基線解析ソフトウェアは、マサチューセッツ工科大学で開発された「GAMIT」及び「GLOBK」を使用し、IGS精密暦を用いてITRF座標系に基づいて解析を行っている。また、解析はIGS筑波観測局（TSKB）を固定点として1日毎に行い、解析結果は基線長（L）、南北成分（NS）、東西成分（EW）及び上下成分（UD）について表示を行い、解析で得られた速度（Rate）についても併せて表示する。

（2）基線解析結果

平成7年3月から12月までの連続観測データを用い、TSKBを固定して求められた水原観測局の変動量は、基線長が年間41mm短縮傾向にあり、南北成分が年間19mm南方に移動、東西成分が年間46mm東方に移動、上



Velocity field of EAST ASIA

図-10 速度変動ベクトル（TSKB局を固定）

表-8 日韓GPS基線測量（1994年10月）による基線ベクトル

始点 → 終点	DX(m)	DY(m)	DZ(m)	S(m)
GS15 → 水原原点	895200.560	745242.717	104151.817	1169452.158
水原原点 → 光州	-66964.173	116121.073	-181379.875	225537.055
水原原点 → 釜山	-235979.871	-18952.737	-178262.924	296350.090
光州 → 釜山	-169015.698	-135073.810	3116.952	216381.505

解析ソフトウェア: BERNESE Ver.3.4
軌道情報: IGS精密暦
観測期間: 1994年10月4日～7日
座標系: ITRF92

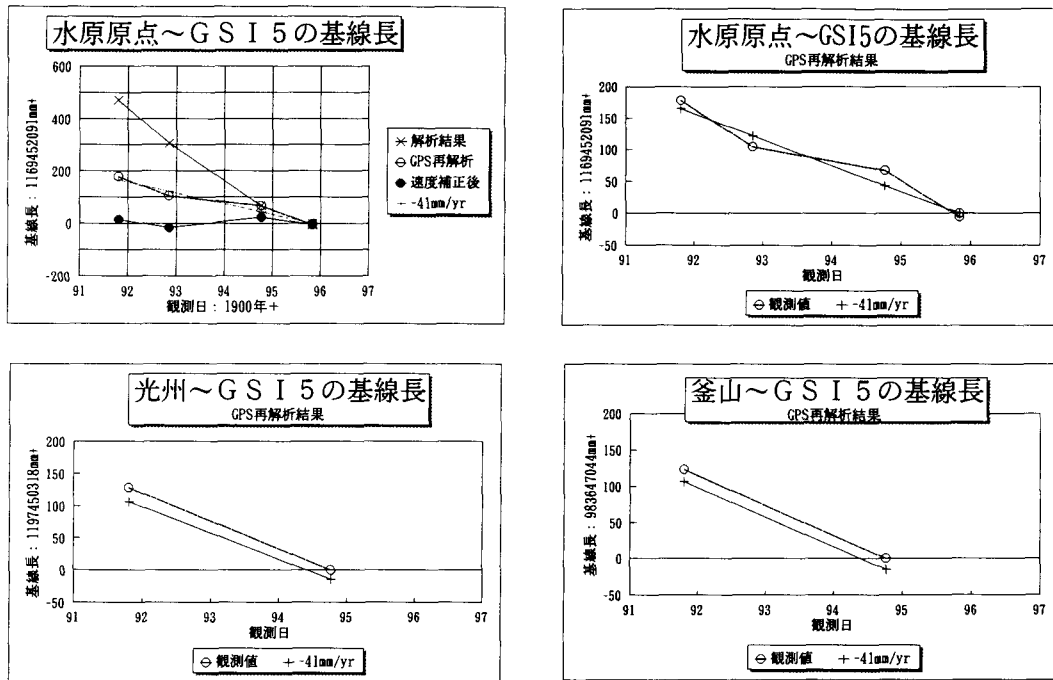


図-11 GSI5と大韓国内の各点との基線変化

下成分が年間3mm下方に移動している相対的な解析結果(図-9)を得た。同様に、基線解析ネットワークに含まれる各観測局の速度変動ベクトルは図-10のような結果を得ている。さらに、ITRF93座標系に基づいて求められた水原観測局アンテナ中心の座標値(3次元直交座標系)は以下のとおりである。

$$\begin{aligned} X &= -3062023.331 \text{ m} \quad (\text{rms} = 0.023 \text{ m}) \\ Y &= 4055449.102 \text{ m} \quad (\text{rms} = 0.021 \text{ m}) \\ Z &= 3841819.218 \text{ m} \quad (\text{rms} = 0.016 \text{ m}) \end{aligned}$$

3.3 日韓GPS基線測量

日韓間でのGPSによる基線測量はGPS連続観測以前に、つくば市のGSI5、大韓民国経緯度原点、釜山(二

等三角点)及び光州(二等三角点)の4点で1991年10月、1992年11月及び1994年10月に行われた。

1994年10月の結果を表-8に示す。また、GSI5と大韓国内の各点との基線長変化の様子を示したものを図-11に示す。左上図には大韓民国経緯度原点とGSI5との基線長の変化を示した。図中の解析結果(×印)とは観測当時の解析結果である。また、GPS再解析(○印)とは解析ソフトウェアにBernese Ver. 3.4、軌道情報にCOD(ベルン大学)精密暦等を使用して再解析したものである。速度補正後(●印)とは、GPS連続観測より求められた水原観測局の基線長変動量(-41mm/年)を考慮したものである。残りの3図は再解析の結果

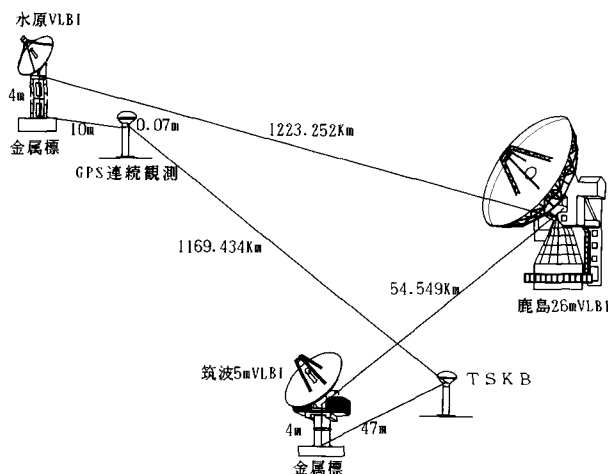


図-12 VLBI-GPS測地コロケーションの経路

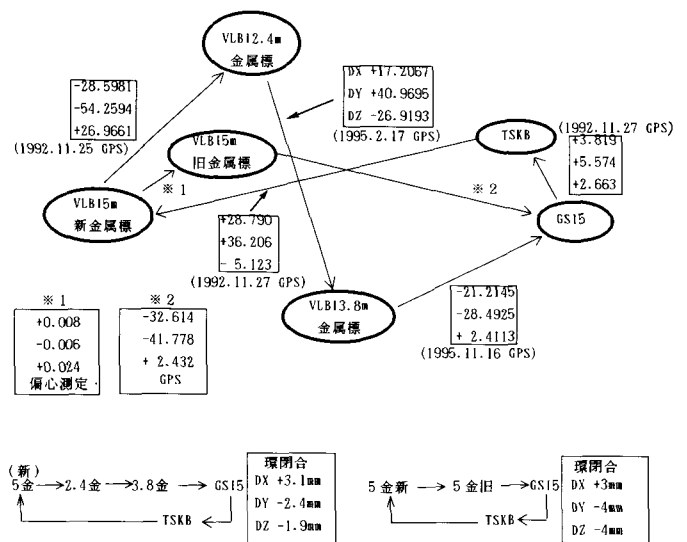


図-13 国土地理院構内におけるVLBIとGPSの関係

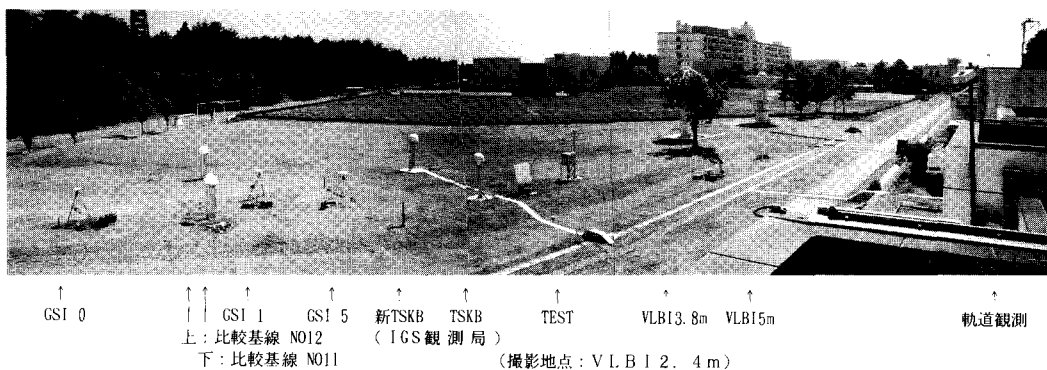


写真-4 国土地理院構内のVLBI及びGPS観測点

(○印)と-41mm/年の変動量(+印)を示したものである。光州-GSI 5, 釜山-GSI 5とも大韓民国経緯度原点-GSI 5と同様(図-10のSUWNと同様)な基線長変化量を示している。

4 VLBI-GPS測地コロケーション

日韓VLBI, GPS観測のそれぞれについては前節等で評価した。図-12に示すように大韓国内でのVLBI観測点とGPS観測局は同一の敷地内にあり非常に近傍である。また、日本側の観測局は前者が茨城県鹿嶋市、後

者がつくば市にあり、その距離は55km程度離れているが、鹿島-つくば間はVLBI観測により高精度な値で結合がなされている。さらに、両国内でのVLBI観測点とGPS観測局についてもGPS観測等により高精度な結合がなされている。本節では以上の成果を参考にして、VLBIとGPSの両者について比較検討する。

大韓国内におけるVLBI観測点, GPS連続観測局及び経緯度原点等の結合基線ベクトルは表-5にすでに示した。一方、つくばにおいての各観測点の配置は写真-4のようになっており、図-13に示すようにVLBI観測点4点(1点は5mアンテナの旧金属標で1991年11月以後、存在しない)とGPS観測局2点の関係が測定されている。これらの局について基線ベクトルの環閉合差を見ると最大で4mmである。ここで評価した基線ベクトル成果は測量の時期や方法が異なったものを使用しているので、各点間の真の座標関係を現している。また、アンテナのEL・AZ軸中心と金属標との関係は2~3mmの精度で偏心測定されている。

表-9 日韓VLBI, GPS観測のコロケーション

始点	終点	D _X (m)	D _Y (m)	D _Z (m)	備考
鹿島26mVLBI→筑波5mVLBI		40719.332	33656.672	13590.736	IER成果(ITRF94)
筑波5mVLBI→5mVLBI金属標		2.484	-2.078	-2.362	
5mVLBI金属標→TSKB		-28.790	36.206	5.123	GPS取付観測(1992.11.27)
TSKB→水原GPS連続観測局		895175.901	745249.402	104107.538	日韓GPS連続観測(ITRF92)…注1
水原GPS連続観測局→ピラー上		0.034	-0.045	0.042	
ピラー上→水原VLBI金属標		-0.620	4.755	9.260	GPS取付観測(1996.3.6)
水原VLBI金属標→水原VLBI		2.084	2.769	2.640	
水原VLBI→鹿島26mVLBI		-935866.239	-778875.299	-117694.375	日韓VLBI観測
環閉合		0.019	-0.030	-0.001	
鹿島→筑波→水原→鹿島		NS	EW	UD	NS:南北成分 EW:東西成分 UD:上下成分
		0.019	0.011	0.028	

注1) TSKB→水原GPS連続観測局: 1995/10/24~11/01(9日間)の平均値

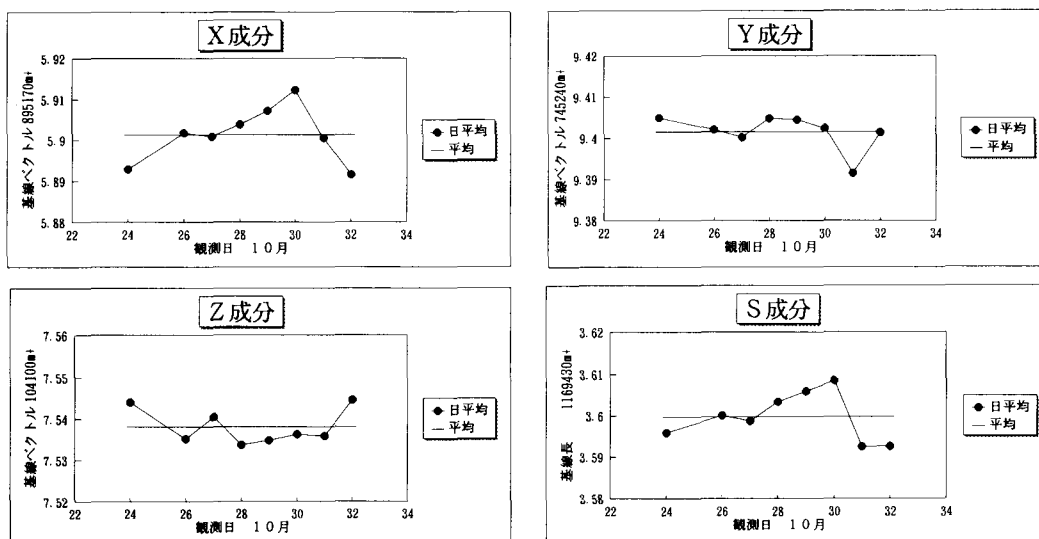


図-14 GPS連続観測局(TSKB-SUWN)間の基線ベクトル
(1995年10月24日~11月1日の観測データ使用)

比較は図-12に示す経路(2,447km)の基線ベクトルで環を作り,その閉合差を算出し評価することとした。結果を表-9に示す。

鹿島26m VLBIアンテナより筑波5m VLBIアンテナの基線ベクトルはITRF94の両局の値と移動速度よりVLBI観測時点の値を求めた。また,TSKBより水原GPS連続観測局の値はGPS連続観測データよりVLBI観測期間のデータを8日分選び,つくば(TSKB)を固定してGAMITで解いた。結果を図-14に示す。GPSの結果はITRF92座標系であるが,つくば-水原間の基線ベクトルだとITRF94座標系に変換しても1mm以内で一致するので変換は行っていない。

日韓VLBI, GPS連続観測に基づく成果を用いた基線ベクトルの環閉合差は以下ようになった。

南北成分 19mm
東西成分 11mm
上下成分 -28mm

また, 1994年10月の日韓GPS基線測量の結果に, GPS連続観測によって得られた水原観測局の変動量を加味して求めた値と日韓VLBI観測に基づく成果を比較すると,

南北成分 -3mm
東西成分 -17mm
上下成分 22mm

となった。VLBI成果とGPS成果は良く一致した結果となった。

5 おわりに

VLBI観測により両国間の測地網をミリメートル(mm)オーダーで結合することができた。また, 大韓民国経緯度原点の位置を国際基準座標系で表すこともできた。

GPS連続観測では大韓民国GPS連続観測局の位置を国際基準座標系で表すと同時に, つくば-水原間が年間40mm程度短縮している結果を得ることもできた。これは, 西南日本の変動と同傾向であり, 日本国内における

GPS連続観測網の解析結果をプレートテクトニクスに当てはめて解釈すると, 東北日本と西南日本が異なるプレート上にあることが支持され, さらに, 大韓民国と西南日本の間にほとんど相対運動が見られないことから, 東北日本がユーラシアプレートとは異なるプレート上にあるという説の信憑性が高くなる, と結論づけられる成果である。

最後に, 今回の観測を実施するにあたってご協力頂いた日韓の関係者, とりわけ, 国立地理院の測地課の方々に感謝の意を表します。

追補 国際GPS地球力学事業(IGS)の概要と国土地理院の役割

IGSの概要と国土地理院の役割について簡単に紹介する。IGSは, 測地学・地球物理学的な研究活動を推進するために, 各国関係機関の協力のもとで, 世界各地の研究者にGPSに関する情報を提供することを目的として, 国際測地学協会(IAG)が1991年2月に提唱し, 1994年1月1日から正式に定常運用を開始した。IGSの主な業務は, ①全世界にGPS衛星の追跡ネットワークを構築して連続観測をする。②各追跡観測局のデータをデータセンター群(グローバル, リージョナル)で集中管理して提供する。③解析センター群は観測データから, 精密軌道情報(精密暦), 地球回転パラメータ, 地殻変動等のデータを生成して提供する。等を定常的に行っている。国土地理院は, 1991年6月にIGSへの参加表明を行い, 次の業務を分担している。①筑波観測局(TSKB)の連続観測データを提供する。②IGSのグローバル観測データおよび解析データ等をアーカイブして, 国内のユーザーに提供する「地域データセンター」の業務を行う。③ITRF座標系を高密度に展開するため, グローバル観測局及び国内GPS観測局で構成されるネットワークをIGS精密暦及び地球回転パラメータを用いて解析を行い, IGSグローバルデータセンターに提供する「準解析センター」の業務を行う。

参考文献

- 齋藤隆他 新十津川VLBI観測施設の整備について, 国土地理院時報, No. 84, 1995年
日置幸助 VLBI局の上下位置精度向上法, 日本測地学会第73回講演会, 1990年4月
飛田幹男 最近の測量によって明らかになった基準点成果の特徴, 国土地理院技術資料, A・1-No. 154, 1992年
畑中雄樹 全国GPS連続観測網で捉えた日本列島の動き, 国土地理院技術資料, A・1-No. 182, 1996年
唐沢正夫他 日韓GPS共同観測, 日本測地学会第84回講演会, 1995年10月
須川 力 日本経緯度原点と鉛直線偏差, 現代測量学④, 日本測量協会, 1988年
測量地図百年史 国土地理院, 1970年