

UT1決定のための日独共同VLBI観測について IVS Intensive VLBI Experiments for UT1 determination between Tsukuba and Wettzell

測地部 栗原 忍・高島和宏・田辺 正・河和 宏・宮川康平
Geodetic Department Shinobu KURIHARA, Kazuhiro TAKASHIMA,
Tadashi TANABE, Hiroshi KAWAWA, Kohei MIYAGAWA

要 旨

国土地理院は、ドイツ連邦地図測量庁 (BKG)・ボン大学測地学研究所 (GIUB) との共同プロジェクトとして、地球自転運動決定のための超長基線電波干渉計 (VLBI) による観測を実施している。これは今まで国土地理院が行ってきた測位のためのVLBIと異なり、地球の自転速度 (UT1) を測るものである。国土地理院では、2003年度からほぼ週1回のペースで観測を行っており、その結果は良好である。

国際VLBI事業 (International VLBI Service for Geodesy and Astrometry; IVS)¹では、現在週5日実施しているUT1のためのVLBI観測を週7日行うことを目標にしている。また、ブロードバンドデータ送信を利用したリアルタイム相関処理等の技術開発が進みつつあり、将来は地球自転運動のより細かい変動が監視できると思われる。

1. はじめに

国土地理院では、世界測地系の維持や、そのために必要な地球自転運動の決定等を目的として、IVSの枠組みの下、VLBIによる国際および国内超長基線測量を実施している。このうち、地球の自転速度 (UT1) の決定のための観測を1999年、2002年に実施した。また、2003年度はほぼ週1回のペースでこの観測を行っている。国土地理院の事業では今まであまり馴染みのなかったUT1について、その測地事業における重要性の紹介を兼ね、概要・観測の経緯・成果、そして将来計画について述べる。

2. UT1について

2. 1 UT1とは

VLBIやGPSなどの宇宙測地技術で用いられる時系は、協定世界時 (Coordinated Universal Time; UTC) である。日本標準時 (Japan Standard Time; JST) はUTCに9時間を加えたものである。UTCは、国際原子時 (International

Atomic Time; TAI) をベースとしており、時計の進む速さ、すなわち一秒の長さはTAIと同じである。TAIは国際度量衡局 (Bureau International des Poids et Mesures; BIPM) によって管理されており、世界30ヶ国以上にある200以上の原子時計を用いて決められている。原子時計は1秒を常に変わらず精密に刻むのに対して、地球の自転はその回転スピードを徐々に落としている。したがってこれを放置すると次第に誤差が蓄積して最終的には昼夜が逆転してしまうようなことも起こりかねない。そこでUTCは地球の自転とつじつまを合わせるために、地球の自転に基づいた時系である世界時 (Universal Time; UT) との差が±0.9秒を超えないように閏秒を挿入 (または削除) している。過去の閏秒挿入について表-1 (国立天文台, 2003) に示した。最近の閏秒挿入は1999年1月1日で、現在、UTC-TAIは-32秒である。

表-1 過去の閏秒挿入時期と原子時との差

年 月 日	UTC-TAI	年 月 日	UTC-TAI
1972 1 1	-10 s	1983 7 1	-22 s
1972 7 1	-11 s	1985 7 1	-23 s
1973 1 1	-12 s	1988 1 1	-24 s
1974 1 1	-13 s	1990 1 1	-25 s
1975 1 1	-14 s	1991 1 1	-26 s
1976 1 1	-15 s	1992 1 1	-27 s
1977 1 1	-16 s	1993 1 1	-28 s
1978 1 1	-17 s	1994 1 1	-29 s
1979 1 1	-18 s	1996 1 1	-30 s
1980 1 1	-19 s	1997 1 1	-31 s
1981 7 1	-20 s	1999 1 1	-32 s
1982 7 1	-21 s		

世界時には、UT0, UT1, UT2がある。グリニッジ天文台 (イギリス) における平均太陽時をUT0、それに極運動の影響による経度変化を補正したのがUT1である。UT1はある瞬間の地球の自転を忠実に反映した時系であり、UTCの閏秒調整の目安にしているのもUT1である。さらにUT1から、偏西風、地球潮汐などに起因する季節変化を取り除いたものがUT2である。かつてはこのUT2が日常生活の基準となる時刻系として広く使われていたが、1972年に現在のUTC閏秒調整方式に変更になった。

¹ IVS は、VLBI 観測を実施あるいは支える機関が国際的に協力して立ち上げた組織で、1999 年 3 月に発足した。これは、GPS や SLR で行っている国際事業 (IGS および ILRS) に相当する事業を VLBI で行うことを目指して、IAG (国際測地学連合) の下に設立されたものである。

2. 2 なぜUT1が必要か

宇宙測地技術になぜUT1が必要なのだろうか。地球の自転速度の誤差が測位誤差にどれだけ影響するのかを見積もってみた。VLBIの解析において、地球姿勢パラメータ (EOP) を推定せず、観測局位置のみを推定する場合、EOP は国際地球回転事業 (International Earth Rotation and Reference Systems Service; IERS) が公表しているC04シリーズの値を既知として使用することが多い。C04シリーズはVLBI, LLR (Lunar Laser Ranging), GPS (Global Positioning System), SLR (Satellite Laser Ranging), DORIS (Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) など複数の宇宙測地技術を使って算出している。VLBIのみから推定されるUT1はC04シリーズに必ずしも一致せず、その差は10~20 μ 秒程度、大きいときには50 μ 秒にもなる。仮に、解析に使用した観測日のUT1が50 μ 秒ずれていたとする。50 μ 秒の地球自転は赤道付近で2.3cm, 日本付近では1.9cmに相当するので、cmオーダーの誤差が位置推定に影響することになる。高精度化した宇宙測地技術では地球自転について正確に求めておかなければならないのである。

2. 3 UT1を測るには

EOPを測る技術で最も優れているのがVLBIである。VLBIでは5つのEOPすべてを決定することができる唯一の手段である。EOPとは、そもそも地球の外 (太陽系慣性座標系) から地球を見た人が、地球の自転 (UT1), 地球の自転軸の天球に対するふらつき (歳差・章動), 自転軸の地表面に対する動き (極運動) を記述したパラメータであるから、太陽系慣性座標系 (CRF) で記述された電波源を観測して地球基準座標系 (TRF) で記述された観測局位置を推定するVLBIであれば、その2つの座標系を結びつける回転行列としてEOPを推定することは容易なことである。人工衛星を利用したSLRやGPSでは極運動を決定することはできてもUT1を絶対的に決めることはできず、VLBIによって初期値を与えてやらなければならない (表-2 横山, 1994)。今のところ、VLBIに勝るUT1計測技術は世の中に存在しないのである。

3. 観測の経緯

IVSは地球基準座標系 (TRF), 天球基準座標系 (CRF), 地球姿勢パラメータ (EOP) を精度良く決定するためのVLBI観測等を国際協力の下行っている。観測は24時間の観測のほか、1~2時間程度のintensive (集中・強化) 観測と呼ばれるものがある。これは、EOP (極運動, UT1, 章動) のパラメータのうちUT1の値のみを迅速に、かつ高い時間分解能で求めることに最適化したものである。

Intensive観測の歴史は古く、IVS発足以前の1984年から米国海軍天文台 (USNO) 主導でNEOS intensive観測

表-2 各種宇宙測地技術から得られるパラメータ

		VLBI	SLR	LLR	GPS
CRF		○	×	×	×
TRF		○	○	○	○
EOP	極運動	○	○	▲	○
	UT1	○	△	○	△
	歳差・章動	○	×	○	×

○：可能 △：可能だがVLBIによる初期値が必要

▲：原理的には可能 ×：不可

表-3 intensive観測基線

期 間	基 線
1984.04~1994.02	Westford (米) -Wettzell (独)
1994.03~1995.12	Green Bank (米, 26m) -Wettzell
1996.01~2000.06	Green Bank (20m) -Wettzell
2000.07~現在	Kokee Park (米) -Wettzell Tsukuba (日) -Wettzell

このほか、Matera (伊), Gilmore Creek (米) が準レギュラー局として参加

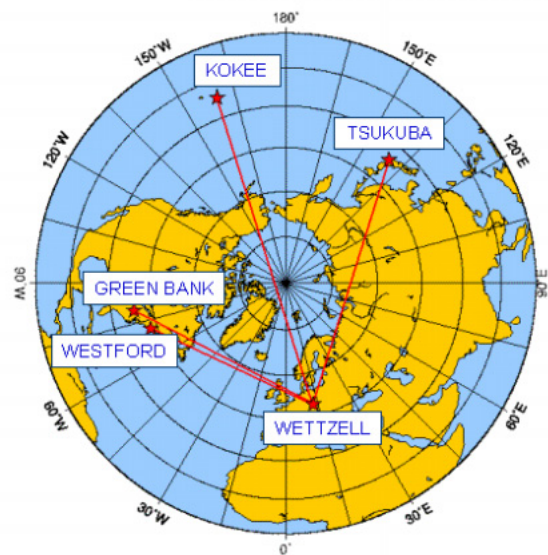


図-1 intensive観測基線

が行われていた。USNOは軍事目的のため、独自に時刻を保持しておくことが必須だったのである。地球自転に対して感度を高めるためには東西に伸びた基線 (表-3, 図-1) での観測が必要である。

現在のレギュラーintensive観測は2000年7月から、ヴェッツェル観測局 (ドイツ) とコキーパーク観測局 (ハ

ワイ) との間でMark-IV VLBIシステムを使用した観測を行っている。その頻度は2003年現在およそ週4回である。UT1は時々刻々と変化するもので、より高い時間分解能で明らかにすることは、VLBIはもちろんのこと、GPS、SLRなどの他の宇宙測地技術による高精度な位置決定のためには必要不可欠である。しかし、Mark-IV関連局の処理能力の限界から、Mark-IVシステムを用いた観測の増加はこれ以上見込めない状況にあった。そこでK4システムを所有するつくばとヴェッツェルに白羽の矢が立った。IVSからはかねてよりintensive観測へのつくば局の参加が要請されており、2002年度の観測はこの要請に応えたもので、20セッションを実施した。独立した基線、異なるシステムで観測することで、ヴェッツェル-コキパーク基線の解が持つ系統誤差を検証する役割も果たしている。

なお、1999年にも15回のintensive観測(tswzシリーズ)がつくば-ヴェッツェル間で試験的に行われているが、今回はデータのサンプリングレートを128Mbpsから256Mbpsに上げ、短時間でより多くの電波源を観測できるようにしている。

4. INT2シリーズの概要

つくば-ヴェッツェル間のintensive実験シリーズは、IVSの実験名では、INT2シリーズと呼ばれている。ヴェッツェル-コキパーク基線のINT1シリーズに対してこの名前が付いた。プロジェクト全体の調整は、IVSの下GUIBが担当し、観測はBKGと国土地理院が、相関処理は国土地理院が担当する。

記録系は通信総合研究所が開発した日本製のK4 VLBIシステムを使用し、観測データはD-1と呼ばれる業務用ビデオカセット(容量96GB)に記録される。1セッションの観測電波源数は延べ20個で、1個あたり平均120秒程度記録し、1セッションの観測は1時間程度で終了する(表-4、図-2)。使用テープ本数は1セッションあたり1本である。



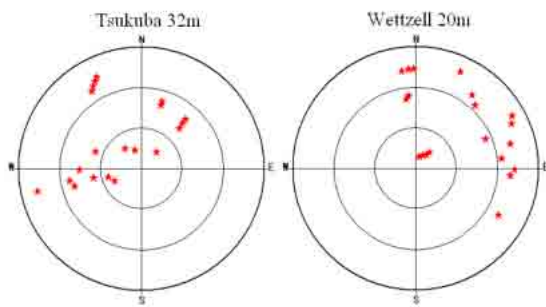
写真-1 つくば観測局



写真-2 ヴェッツェル観測局

表-4 観測電波源の種類と個数(2003/05/17)

電波源	個数	電波源	個数
0059+581	4	0804+499	2
0528+134	2	1300+580	3
0552+398	1	1357+769	2
0556+238	2	CTA26	1
0743+259	2		



図－２ 電波源配置 (2003/05/17)

観測は、毎週土曜日の夕方4時30分から行われるため、つくば観測局では金曜日の午後にセットアップし、観測は無人で行われる。アンテナは観測開始時刻までSTOWピンと呼ばれるアンテナ仰角方向の駆動を物理的にできないようにするピンが挿入され、またインターロックもかかっているため方位角方向の駆動も誤動作することはない。観測10分前にそれらのロックがはずれ、自動的にアンテナが駆動する仕組みになっている。観測終了後も、観測前と同様にロックがかかるため、安全面上の問題はない。観測が終了すると、ドイツから航空便で観測テープが送られてくる。観測が土曜日に行われ、早ければ翌週の水曜日につくばにテープが届く。関連処理には、国土地理院のK4 (KSP) 型関連処理装置 (写真－3) を使用する。Intensive観測の関連処理の場合、他のセッション (国内VLBI観測JADEなど) の処理を行っていても、それを一時中断し、intensiveの処理を優先させる。これも、UT1の値を迅速に供給するための方法である。処理は特に問題がなければテープ到着日のうちに終了し、関連処理結果は一次解析 (アンビギュイティー除去・電離層補正等) の後、IVSデータセンターへ送付され、世界の解析センターで解析される。解析結果は、IVSを通じてIERSへ送られ、世界中のユーザに利用されている。

5. 成果

今回、INT2のデータを独自に解析し、INT1シリーズとの比較などを行った。

5. 1 解析方法

解析には、米国航空宇宙局ゴダード宇宙飛行センター (NASA/GSFC) で開発されたソフトウェアCALC/SOLVE release 2003. 06. 20を使用した。比較のため、今回のINT2シリーズだけでなく、INT1シリーズ、1999年に実施したtswzシリーズ、それ以前のNEOS intensiveシリーズ (1997年以降) もすべて同条件で解析した。表－5に解析条件をまとめた。



写真－3 国土地理院のK4 (KSP) 型関連処理装置

表－5 解析条件

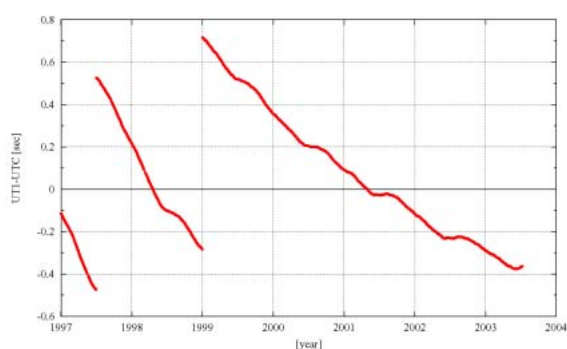
データ期間	1997. 01. 02～2003. 07. 08
セッション数	1534セッション (Tsukuba-Wettzell 40セッション)
推定パラメータ	UT1-TAI 天頂湿潤大気遅延量 (オフセット) クロックの相対変化量 (2次式)
アプリアリ	電波源位置 : ICRF-Ext1 観測局位置 : ITRF2000 極運動・UT1 : USNO finals 章動 : IERS 1996 model based on IAU1980

推定したパラメータは、UT1-TAI、天頂湿潤大気遅延量 (オフセット)、クロックの相対変化量 (2次式) である。電波源位置・観測局位置はそれぞれICRF-Ext1・ITRF2000の値を使用した。ただし、つくば局のITRF2000座標値は1999年に行ったレール交換による鉛直方向の変動量を考慮していないため、その補正値を加えてある。

Intensive観測の観測データからは極運動とUT1を同時に推定することはできないため、極運動についてはアプリアリ値を既知として解析する。NASA/GSFCの解析グループは、極運動にUSNOが公表している最終値を使用しており、今回の解析はそれに習った。また章動 (歳差を含む) のオフセット値の推定も行わず、IERS 1996モデルをそのまま使用している。

5. 2 解析結果

全1534セッションの解析を行い以下の結果を得た。図－3はUT1-UTCの時系列グラフで、縦軸の単位は秒である。1997年7月1日と1999年1月1日で不連続になっているのは閏秒の挿入があったためである。



図－3 UT1とUTCの差

このグラフより、地球の自転が原子時計をもとにした時系であるUTCに対して徐々に遅れをとっていることがよくわかる。

図－3では、縦軸スケールが余りにも大きすぎるので、エラーバーなどは見えなくなっている。そこで、IERS C04シリーズの値を差し引いてプロットしたものが図－4、および、図－5である。IERS C04シリーズはVLBI、GPS、SLRなど複数字宙測地技術の統合解であるため、今回VLBIだけから求めたUT1に必ずしも一致しない。赤い点がつくばーヴェッツェル基線の結果、黒い点は2000年7月より前がグリーンバンクーヴェッツェル基線、それ以降がコキーパークーヴェッツェル基線の結果である。縦軸の単位は μ 秒である。1999年に13回実施した、tzwzシリーズと2002年に20回実施したINT2シリーズは、C04に対するばらつきが大きい、2003年のセッションでは差はほとんどなく、10 μ 秒以内である。これは、IVS解析センターが2003年以降のつくばーヴェッツェル基線の結果を解析に含めて計算し、IERSのC04算出におけるつくばーヴェッツェル基線の重みが大きくなったためと考えられる。

個々のセッションの標準偏差をシリーズごとに平均したものが表－6である。1セッションの観測数が極端に少ないものは含んでいない。シリーズごとに比較すると、INT2シリーズの標準偏差が一際小さいことがわかる。この原因の一つに記録密度の違いが挙げられる。

一般に、記録密度と標準偏差の間には、

$$\text{記録密度 } n \text{ 倍} \Rightarrow \text{標準偏差 } \frac{1}{\sqrt{n}}$$

の関係がある。INT2シリーズは1チャンネルあたり16Mbpsで記録しているのに対し、NEOSとINT1シリーズは4Mbps、tzwzは8Mbpsである。INT1は2001年途中から8Mbpsになっている。ちなみに、24時間セッションで推定されるUT1の標準偏差は5.2 μ 秒程度であるから、INT2ではたった1時間の観測でそれに匹敵するほどの精度が得られており、結果は良好であるといえる。

表－6 標準偏差の比較

シリーズ	標準偏差 (μ 秒)	システム
NEOS & INT1 (～2000. 06)	15. 69	Mark-IV
INT1 (2000. 07～)	14. 37	Mark-IV
tswz	12. 62	K4
INT2 (2002～)	7. 76	K4
Total	15. 48	

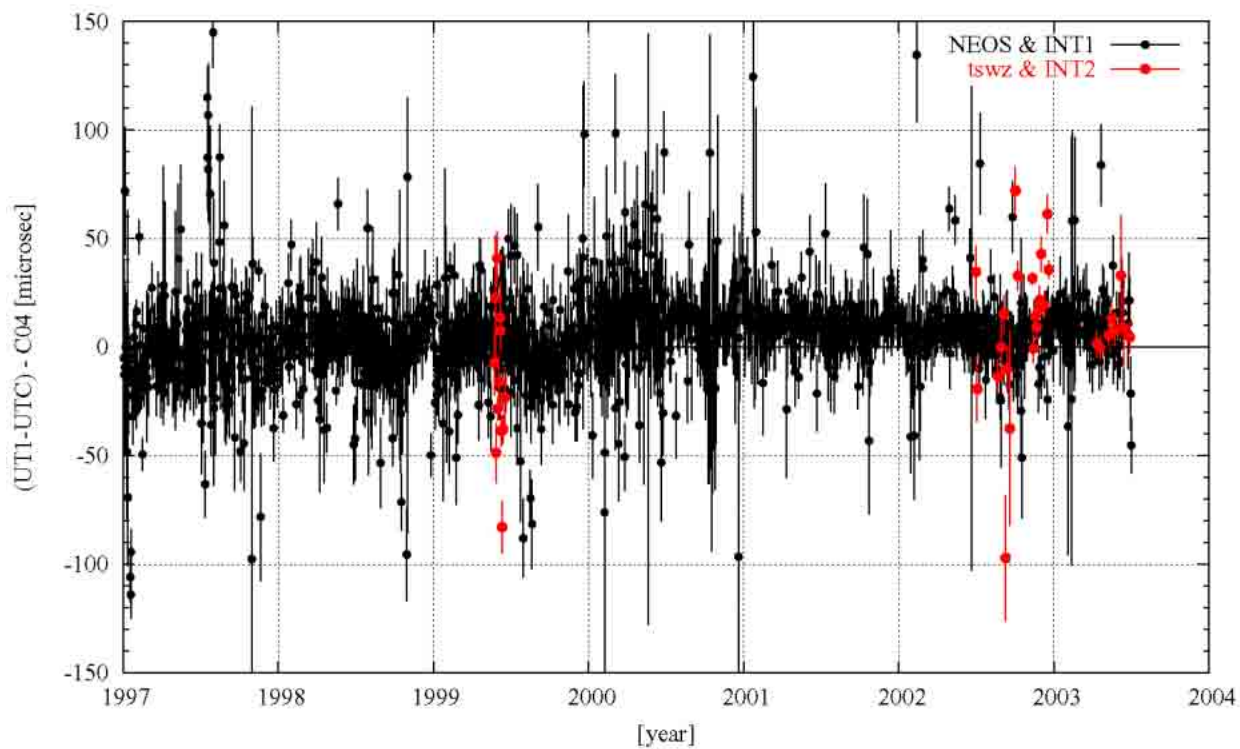


図-4 UT1-UTC (IERS C04 との差)

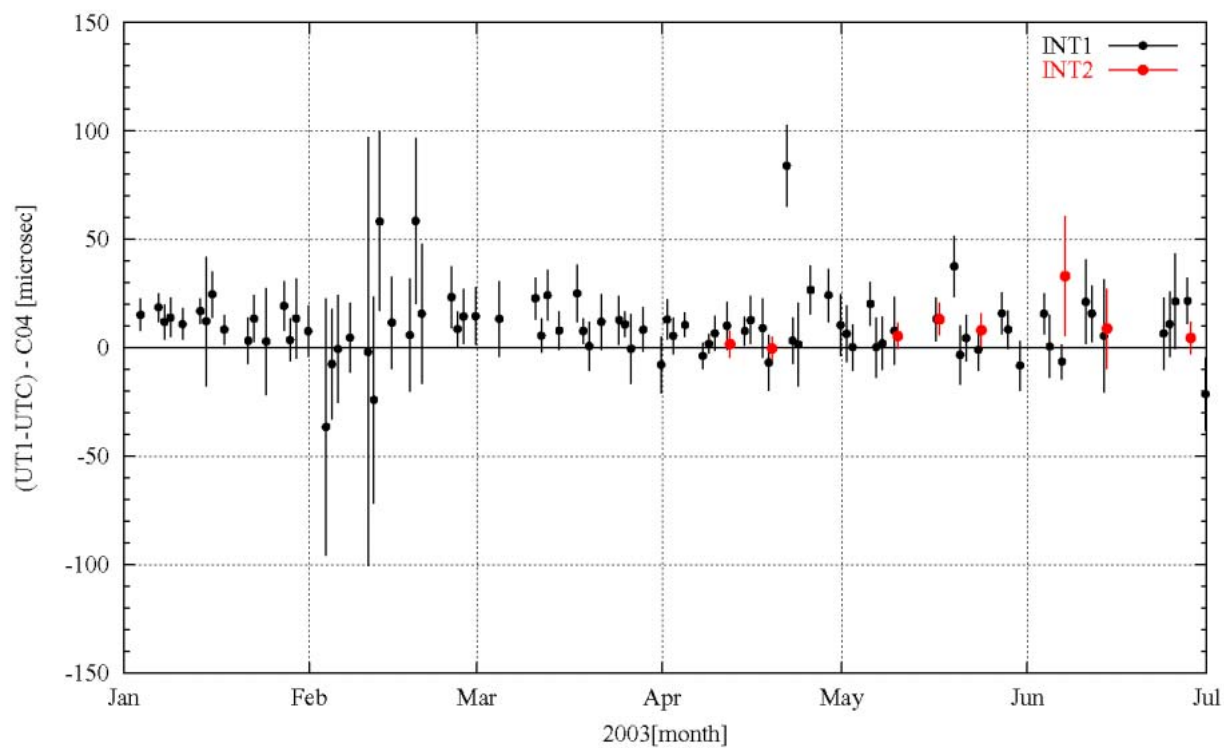


図-5 UT1-UTC (IERS C04 との差, 2003 年上半期を拡大)

6. 将来計画

6. 1 IVSの方針

IVSでは、今まで以上に高い時間分解能で、より短周期のUT1変動を監視することを目標にしている。表－7は2003年10月のintensive観測の予定を表している。現在、毎週木曜日と日曜日には観測が行われていない。IVSのWG2（観測プログラムと成果に関するワーキンググループ）最終報告（Schuh et al, 2002）では、「K4相関処理局は、毎週1回のintensive観測セッションを継続し、将来的に観測日数を増加することを強く推奨する。」とある。無人運用の利点を生かして、K4システムで日曜日にも観測することが強く望まれている。また、カナダなどで使われているS2システムで木曜日に観測するなどすれば、毎日1時間は地球のどこかでUT1を測っていることになる。

表－7 2003年10月のintensive観測予定

2003年10月						
日	月	火	水	木	金	土
			1	2	3	4
5	6	7	8	9	10	11
12	13	14	15	16	17	18
19	20	21	22	23	24	25
26	27	28	29	30	31	

■ コキークヴェッツェル ■ つくばヴェッツェル

表－8はWG2最終報告のUT1に関する具体的な目標を定量的に示したものである。2005年には週7日、しかも1日1時間だけでなく連続でという意味である。これが実現すれば、1時間、或いは10分の時間分解能も可能になり、海洋潮汐などに起因する半日以下の短周期変動の解明に非常に有効である。

また、データの適時性（観測終了から成果が公表されるまでの時間）について、2002年には3～4日という目標を掲げているが、2003年現在、INT2データ処理に関しては4～6日要している。その日数のほとんどがテープ輸送にかかる時間である。テープベースでの観測を続けている以上、これ以上の改善は望めないため、WG2でも磁気テープによる記録方式に替わり、オンラインデータ送信による観測システムの開発を推進すべきであると報告している。

表－8 IVSのUT1に関する現状と目標

		24h session	Intensive
現 状	精度	5 μ sec	20 μ sec
	頻度	～3日/週	～4日/週
	分解能	1日	1日
	遅延	IVS-R: 1～4週間 他: 1～4ヶ月	1週間
	信頼性*	中	低
目 標	精度	2～3 μ sec	5～7 μ sec
	頻度	7日/週（連続）	
	分解能	1時間/10分	
	適時性	2002年: 3～4日 2005年: 1日	
	信頼性*	高	

* 信頼性のレベル

低: 複数の機関が解析しているが、同一ソフトウェアを使っている。

中: 複数の機関が異なるソフトウェアで解析しているが、観測データは1つのネットワークセッションだけである。

高: 中と同じだが、部分的に並行観測される複数のネットワークセッションのデータを使用している。

6. 2 次世代観測システム

現在、IVS技術開発センターを中心に、各VLBI観測局と相関局をオンラインで結びリアルタイムでデータを送信する方式（e-VLBIやIP-VLBIと呼ばれる）が研究されている。試験的に通信総合研究所と米国ヘイスタック観測所等で実験が行われ、オンラインデータ転送方式での観測に成功している。また、2002年には、国立天文台との共同研究により、国土地理院のつくばVLBI観測局と東京都三鷹市にある国立天文台の三鷹VLBI相関局が光ケーブル接続によりオンライン化された。写真－4につくばVLBI観測局に設置された光ネットワーク端末装置を示す。この回線は、国立情報学研究所が全国に展開するスーパーサイネットを使用したもので、1回線で2Gbpsという大容量の通信が可能となっている。

リアルタイムデータ送信によるUT1観測を実現するためには、つくば観測局とヴェッツェル観測局、そして、つくば相関局の間を大容量光ケーブルで結ぶ必要があり、現実的には費用面などの問題がある。そこで、準リアルタイム方式と呼ばれるインターネットVLBI観測システムが通信総合研究所において開発が進んでいる。これは、受信したデータを一時的にコンピュータのハードディスクに保存し、観測終了後にインターネット回線を利用して、相関局へファイル転送（FTP）する方式である。このデータ記録システムを測地VLBIに応用したものをK5システムと呼び、つくば観測局に2002年度導入された（写真－5）。



写真-4 光ネットワーク端末装置（つくば観測局）

この観測システムは、既存のインターネット回線を利用することで、回線費用を抑え、インターネットを利用できるところならば、世界中どこでも利用可能であるという特徴を持っている。しかしながら、この方式でも回線容量の問題があり、1時間分の記録データ（約100Gbyte）を1日以内に転送するためには10Mbps以上の高速インターネット回線が必要となる。

これらのVLBI観測システムのオンライン化については、近年のIT進歩に伴い実現の可能性が高まってきており、6.1で述べた10分毎のUT1値をほぼリアルタイムに得ることも可能にするだろう。このようなリアルタイムに近いUT1値の公表は、測地分野への貢献だけでなく、航法、地球物理、天文など、さまざまな分野にも利用価値が出てくると考えられる。

参考文献

- 国立天文台編（2003）：理科年表 平成15年（机上版），丸善
 横山紘一（1994）：地球回転変動監視のための国際観測事業，現代測地学，A-3-5，543-555，日本測量協会
 Harald Schuh et al（2002）：IVS Working Group 2 for Product Specification and Observing Programs, Final Report,
http://ivscc.gsfc.nasa.gov/WG/wg2/IVS_WG2_report_130202.pdf.
 長沢工（1985）：天体の位置計算（増補版），地人書館，256pp.

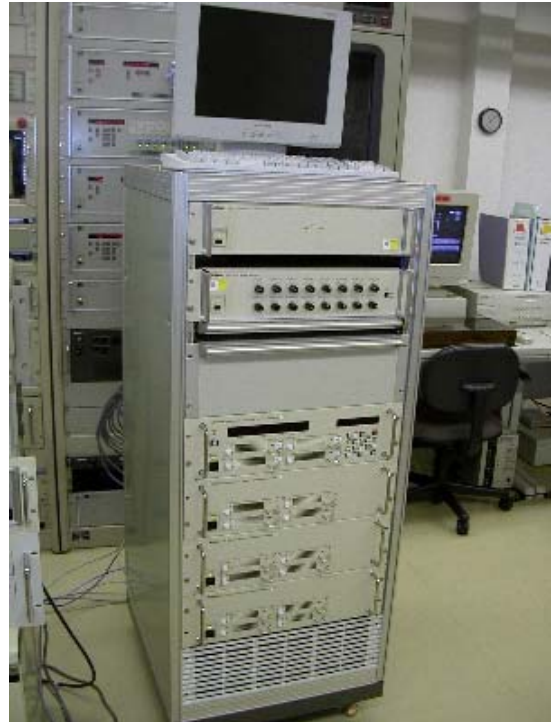


写真-5 K5データ記録システム

7. おわりに

国土地理院は、測量行政を所掌する国家機関として、明治の時代から業務を遂行して来た。近年の測量技術の目覚ましい進歩により、VLBI、GPSなどといった宇宙測地技術が誕生し、測量の既知点として人工衛星や電波星まで使うようになってきた。ローカルな地面の動きだけでなく、宇宙から見た地球がどのような振る舞いをしているかという地球姿勢パラメータも測量の重要なファクターになってきている。国土地理院は、オンライン化など最先端の技術を取り入れて、IVSを中心とした国際的な共同プロジェクトに積極的に参加していくこととしている。