

4-7 VLBI および GPS による時刻比較

4-7 VLBI and GPS Carrier Phase Time and Frequency Transfer

瀧口博士 小山泰弘 市川隆一 後藤忠広 石井敦利 Thomas Hobiger
TAKIGUCHI Hiroshi, KOYAMA Yasuhiro, ICHIKAWA Ryuichi, GOTOH Tadahiro,
ISHII Atsutoshi, and Thomas Hobiger

要旨

情報通信研究機構では、原子泉型周波数標準器及び光周波数標準器などの高精度周波数標準器を比較可能な、新しい時刻・周波数比較技術の1つとして、測地 VLBI 技術を提案している。これまで、VLBI による周波数比較能力を検証する目的で、搬送波位相を用いた GPS 周波数比較法と相互比較を行ってきた。検証の結果、GPS との時刻差は $\pm 200\text{ps}$ 以内に収まっており、また、時刻比較精度も 100 秒平均で 2.5×10^{-13} が得られたことから、測地 VLBI 技術には期待通りの時刻・周波数比較を行える能力がある事が判った。

As one of the new frequency transfer technique to compare the next highly stable frequency standards, we proposed the geodetic VLBI technique. We evaluated the ability of VLBI frequency transfer by comparison with GPS carrier phase frequency transfer. These comparisons showed that geodetic VLBI technique has the potential for precise frequency transfer. In this paper, we describe the previous comparison with VLBI and GPS carrier phase.

[キーワード]

VLBI, GPS, 時刻・周波数比較

Very Long Baseline Interferometry, Global Positioning System, Time and frequency transfer

1 まえがき

情報通信研究機構が開発している、原子泉型一次周波数標準器 (NICT-CsF1) の周波数確度は 1.9×10^{-15} に達しており [1]、更に、開発中の光周波数標準器の確度は 10^{-16} から 10^{-17} レベルが期待されている [2]。これら、一次周波数標準器の周波数確度を国際原子時 (International Atomic Time: TAI) に反映させるためには、一次周波数標準器と TAI の周波数差を正確に求める必要がある。しかし、各国が保持する一次周波数標準器や原子時計の時刻差を比較するための手段である衛星双方向時刻比較方式や GPS 搬送波位相時刻比較方式の精度は 1 日平均で 10^{-15} レベル [3] であるため、これら一次周波数標準器の確度を評価するためには、数日間の平均化処理が要求される。また、次世代の周波数標準器を比較するには数 10 日から数カ月の連続運転が要求されることになり、

事実上比較が不可能なことから、より短い平均化時間で確度評価結果の検証が行える時刻比較技術の出現が望まれている。

VLBI は、遥か彼方の天体から放射される電波を、複数のアンテナで受信し、その到達時間の差 (遅延時間) を精密に計測している。測地 VLBI では、通常 S 帯 (2 GHz) と X 帯 (8 GHz) の 2 周波で観測を行い、解析では、観測される遅延時間を、各種物理パラメータと、局の位置、速度、大気遅延と共に、基準局に対する観測局のクロックオフセットを未知パラメータとして、最小 2 乗法を用いて最適解を得る。この時、推定されるクロックオフセットの推定精度は、国際 VLBI 事業 (IVS: International VLBI Service for Geodesy and Astrometry) が実施する定常的な測地 VLBI 実験の場合で 20 ps 程度 (平均的な積分時間 80 秒) が得られており、GPS や衛星双方向時刻比較に比べ高精度の時刻比較の手段として期待でき

る。

この事から我々は、原子泉型周波数標準器及び光周波数標準器などの高精度一次周波数標準器を比較可能な、新しい時刻・周波数比較技術の1つとして、測地 VLBI 技術を提案すると共に[4][5]、現在の測地仕様の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力の検証を行っている[6]-[9]。測地 VLBI 技術を時刻・周波数比較に応用するという研究開発は、情報通信研究機構の前前身である電波研究所時代より行われており[10][11]、古くから国際実験などが行われている。今回は、将来の実用化に向け小型 VLBI システム (MARBLE: Multiple Antenna Radio-interferometer for Baseline Length Evaluation) の開発[12]も同時進行で行っている。測地 VLBI アンテナのほとんどは、アンテナ直径が 10 m を超える中・大型のものばかりである。開発中の小型 VLBI システムは、アンテナ直径が 1.6 m で、この小型 VLBI システム 2 台と大型のアンテナ 1 台を組み合わせた基線を基本とする構成を考えている。小型 VLBI システムの開発の現状は、文献[13]を参照のこと。本件では、これまで行ってきた、現在の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力の検証を目的とした、VLBI と GPS の比較について報告する。

2 VLBI 時刻・周波数比較と GPS 搬送波位相方式による時刻・周波数比較との相互比較

現在の VLBI システムでの時刻・周波数比較能力を検証する為に、同じ基線で測地 VLBI 実験と GPS 搬送波位相方式による時刻・周波数比較を並行して行い、結果を比較した。最初に、IVS、IGS (International GNSS Service) で行われている定常観測のデータを再解析した結果の比較を行い、次に、NICT 内部の鹿島-小金井基線による検証を述べる。

2.1 IVS、IGS データを用いた比較

IVS、IGS ネットワーク両方に所属する、Onsala 局 (スウェーデン) と Wettzell 局 (ドイツ) を選んだ (図 1)。VLBI アンテナは、両局共に口径 20 m で、GPS は IGS ID でそれぞれ、onsa と wtzr を使用した。両局共に、1 台の水素メーザを



図 1 ヨーロッパにおける IVS 観測局と IGS 観測局の分布

検証には、IVS、IGS 両観測局でかつ VLBI と GPS で基準信号を共有している Onsala 局と Wettzell 局を使用した。VLBI アンテナは、両局共に口径 20 m で、GPS は IGS ID でそれぞれ、onsa と wtzr を使用した。

VLBI と GPS で共有し、基準信号として使用している。使用したデータは、VLBI の方は R1 セッション (2 週間毎に行われる、EOP: 地球姿勢パラメータを決定する目的のセッション) のデータを、GPS の方は R1 セッションが日を跨いだ 24 時間観測なので、対応する様に 2 日分の RINEX ファイルを 1 つのファイルに編集した物を使用した。使用したデータのリストを表 1 に示す。なお、2008 年以降、Wettzell 局の GPS 受信機が変更された為に安定度が変化したので、比較には使用していない。VLBI、GPS それぞれの解析の詳細を表 2 に示す。VLBI の解析には、GSFC (Goddard Space Flight Center) 製の基線解析ソフトウェア Calc/Solve を使用した。また、GPS の解析には、JPL (Jet Propulsion Laboratory) 製の GIPSY-OASIS II ver.5.0 で、JPL 精密暦と時計補正情報を用い、300 秒毎のクロックオフセットを求めた。

Wettzell 局と Onsala 局の時刻差変動を VLBI、GPS それぞれで求めた結果を比較した。VLBI では、スキャン毎の遅延を基に、1 時間毎のクロックオフセットを求めている。この時、全セッションにおける推定誤差は 15 ps であった。GPS の結果には、日を跨いだ解析の為、日の境に不連続 (day-boundary discontinuity) が見られる。不連続の大きさの平均は 94 ps であった。GPS に day-

表1 使用したデータのリスト

VLBI					On: Onsala, Wz: Wettzell		GPS				
Session	Date	DOY	Time	Duration	Stations	Date	DOY	Time	Duration	Stations	
R1258	07JAN09	9	17:00	24	HhKkNyOnTsWfWz	07JAN09	9	-	-	-	
R1260	07JAN22	22	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWzZc	07JAN22	22	0:00	48	onsa, wtzr	
R1262	07FEB05	36	17:00	24	HhKkNyOnShTsWfWz	07FEB05	36	0:00	48	onsa, wtzr	
R1263	07FEB12	43	17:00	24	HhKkNyOnShTcWfWz	07FEB12	43	0:00	48	onsa, wtzr	
R1265	07FEB26	57	17:00	24	KkMcNyOnTcWfWzZc	07FEB26	57	0:00	48	onsa, wtzr	
R1270	07APR02	92	17:00	24	HhKkNyOnShTsWfWz	07APR02	92	0:00	48	onsa, wtzr	
R1271	07APR10	100	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWzZc	07APR10	100	0:00	48	onsa, wtzr	
R1273	07APR23	113	17:00	24	KkMcNyOnTcTsWfWz	07APR23	113	0:00	48	onsa, wtzr	
R1274	07MAY02	122	17:00	24	FtHhNyOnTcWzZc	07MAY02	122	0:00	48	onsa, wtzr	
R1285	07JUL16	197	17:00	24	HhKkOnWfWz	07JUL16	197	0:00	48	onsa, wtzr	
R1291	07AUG27	239	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWz-Zc	07AUG27	239	0:00	48	onsa, wtzr	
R1292	07SEP04	247	17:00	24	HoKkNyOnTcTsWfWz	07SEP04	247	0:00	48	onsa, wtzr	
R1293	07SEP10	253	17:00	24	KkNyOnTcTsWfWz	07SEP10	253	0:00	48	onsa, wtzr	
R1294	07SEP17	260	17:00	24	HhKkNyOnWfWz	07SEP17	260	0:00	48	onsa, wtzr	
R1295	07SEP24	267	17:00	24	HhKkNyOnTcWfWz-Ho	07SEP24	267	0:00	48	onsa, wtzr	
R1311	08JAN14	14	17:00	24	BdFtHhNyOnTcWfWz	08JAN14	14	-	-	-	
R1312	08JAN22	22	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz	08JAN22	22	-	-	-	
R1315	08FEB11	42	17:00	24	FtHhOnTcWfWz-Ny	08FEB11	42	-	-	-	
R1316	08FEB19	50	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz	08FEB19	50	-	-	-	
R1325	08APR22	113	17:00	24	BdFtHhOnTcWz-NyWf	08APR22	113	-	-	-	
R1327	08MAY05	126	17:00	24	BdFtHhNyOnTcWfWz	08MAY05	126	-	-	-	
R1334	08JUN23	175	17:00	24	FtHhMaNyOnTcWfWz	08JUN23	175	-	-	-	
R1336	08JUL07	189	17:00	24	FtHhNyOnTcWfWz-Bd	08JUL07	189	-	-	-	

表2 VLBI、GPSそれぞれの解析戦略

比較実験	項目	VLBI	GPS
IVS vs. IGS	ソフトウェア	Calc/Solve	GIPSY-OASIS II
	解析戦略	複数基線 S(2GHz)/X(8GHz)電離層補正 基準局:Wettzell / 鹿島34m	Precise Point Positioning (PPP) 各局でPPP後 クロックオフセットの差を求める
鹿島-小金井 基線	局位置	局位置	局位置
	推定パラメータ	大気遅延 /1h クロックオフセット /1h	大気遅延 /5分 クロックオフセット /5分

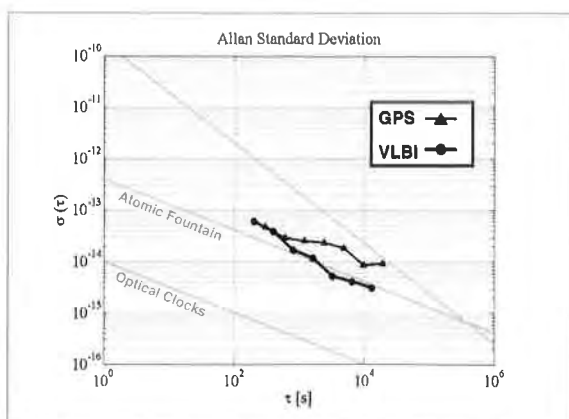


図2 VLBI、GPSの結果から求めた周波数安定度

短期安定度はVLBIとGPSに差は無いが、 10^3 s以上の平均化時間ではVLBIの結果の方が安定である。また、VLBIの結果は平均化時間 10^3 sで、原子泉型周波数標準器の安定度に到達する。全体的に、VLBIの安定度は平均化時間 10^3 sまで、 $1/\tau$ に沿った変化を示している。

boundary discontinuityが見られるものの、全体的な変動傾向はVLBIとGPSでよく合っていた(± 200 ps)。

周波数安定度を比較した結果を図2に示す(VLBI: 丸+実線、GPS: 三角+実線)。なお、VLBIは平均化時間1秒における観測量が得られないため約100秒平均の値をプロットしている。短期安定度はVLBIとGPSに差は無いが、 10^3 s以上の平均化時間ではVLBIの結果の方が安定であった。また、VLBIの結果は平均化時間 10^3 s以上で、原子泉型周波数標準器の安定度に達する。全体的に、VLBIの安定度は平均化時間 10^4 sまで、 $1/\tau$ に沿った変化を示した。これらの結果から、測地VLBI技術には期待通りの時刻・周波数比較を行える能力があると言える。

2.2 鹿島 - 小金井基線での比較

IVS、IGSのデータを用いた検証で、測地VLBI技術に期待通りの時刻・周波数比較能力がある事を示した。しかし、IVSのデータは24時間観測の為、長期の安定度については検証できない。そこで、NICT所有のVLBI局(鹿島34m、鹿島11m、小金井11m)とGPS局(ks34、ksmv、kgni: Trimble NetRS)を用いて長期の並行観測を行い結果を比較した。図3に、鹿島局、小金井局のアンテナ配置を示す。鹿島34mと鹿島11mアンテナは、同じ水素メーザを共有し、鹿島11mへは約300m基準信号を同軸ケーブルで伝送している。また、GPSの方は、それぞれVLBIアンテナ近傍に設置し、VLBIと同じ基準信号を用いている。

鹿島 - 小金井基線での実験は、2007年以降繰り返し行って来ている。2008年8月に行った実験の鹿島34m-鹿島11m基線の結果を示す。この実験は1週間以上連続で行った。また、この実験時の鹿島34m-鹿島11m基線では、VLBI、GPSと共にDual Mixer Time Difference (DMTD)法^[14]を用いた比較も行っている。解析方法は、上記と同じソフトウェアを用いた(表2)。VLBI、GPS、DMTDの3つの方法で計測された時刻差変動の結果を図4に示す。それぞれオフセット分は取り除いてある。DMTDの結果とVLBI、GPSの結果を比較すると、VLBIの結果は数日程

度の変動は良く一致するが、数時間で500psを超えるような変動は追いきれていない。対照的に、GPSの結果は数時間の変動は良く一致するが、day-boundary discontinuityにより、1日以上の比較ではDMTDの結果からオフセットが生じる結果となった、時刻差が数時間で500ps変動する原因は、鹿島11mアンテナのバックエンド室のエアコンによる温度変化が影響している。



図3 鹿島局、小金井局のVLBI、GPSアンテナの配置図

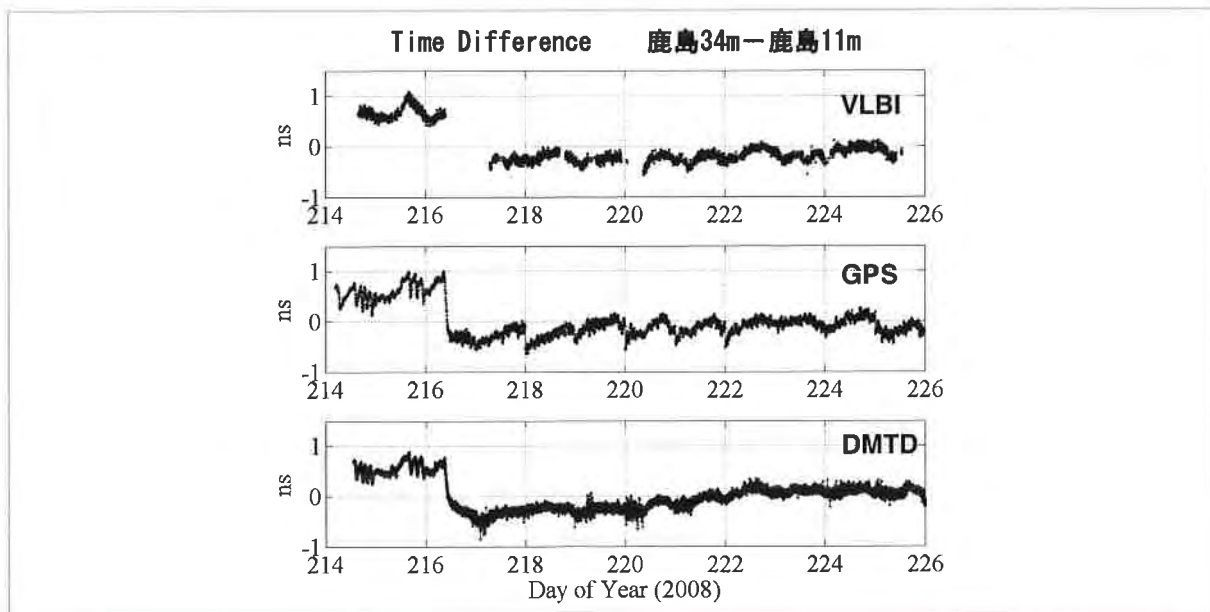


図4 VLBI、GPS、DMTDの3つの方法で計測された時刻差変動

鹿島34-鹿島11基線。

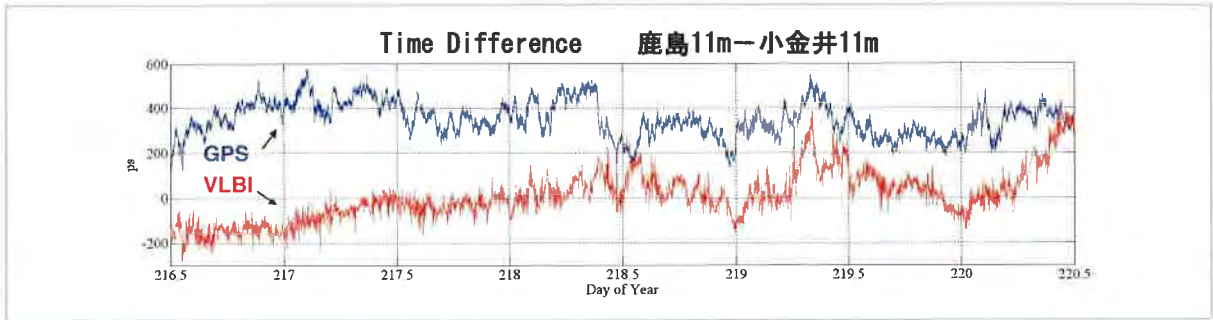


図5 2010年8月の実験から得られた時刻差変動
鹿島11m-小金井11m基線。

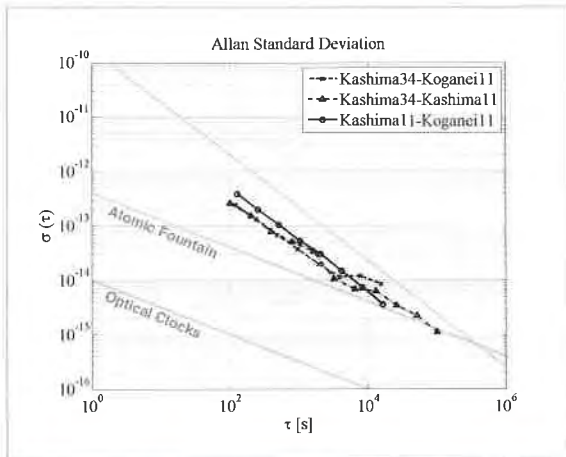


図6 鹿島-小金井基線で求めたVLBIの周波数安定度

鹿島34-小金井11、鹿島34-鹿島11は、2008年8月の実験。鹿島11-小金井11は、2010年8月の結果。

VLBIでこの変化を捉えられない原因は、解析上の問題で、解析ソフトウェアの改修により改善するものと考えられる。また、3つの技術に共通して日周変動が見られる。共通して見られることから、基準信号(10 MHz)の伝送系の変動と考えられる。エアコンの問題と合わせて、鹿島11m庁舎内に恒温槽を設置し、基準信号伝送系の分配アンプ等を全て恒温槽内に入れる対処を行った。これにより恒温槽内は、 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以内で安定している。この対処後に行った2010年8月の鹿島-小金井基線の実験結果を図5に示す。図5は、VLBI、GPS共通に見られる水素メーザの2次の変化までを共通のパラメータで取り除いたものである。真夏の実験で、晴天が続き降雨も全く無かったものの、日周変動はほとんど見られなくなった。恒温槽内に基準信号伝送系を入れた事が効果的であっ



図7 使用した可変長同軸管

日本高周波(株)社製。最大遅延変化量は、333.7 ps。ダイヤルを回すことで、内部でUの字になっている経路の伸縮が行える。

た。鹿島11m庁舎とメーザ室間の同軸ケーブルについては、温度対策は出来ていないので、気温変化に因るケーブル伸縮の影響がわずかに残っていると考えられる。

VLBIの結果から求めた周波数安定度の結果を図6に示す。共通の基準信号を用いた鹿島34-鹿島11基線の結果では、 10^5s 以上の平均化時間で原子泉型周波数標準器の安定度に到達する。

2.3 可変長同軸管を用いた比較

更に、VLBI、GPSが正しい時刻差を計測しているのかを検証する為に、可変長同軸管(図7)を用いて、実験中、人為的に時刻差を変化させる事で検証した。可変長同軸管は、日本高周波(株)製の物を用いた。可変ストロークは、100 mm(エアライン)で、最大遅延変化量は333.7 psになる。この最大遅延変化量333.7 psをどの位正しく計測しているかを、VLBI及びGPSで比較した。

VLBIは、鹿島34m、鹿島11mアンテナを用い、GPSについては、34m庁舎メーザ室におい

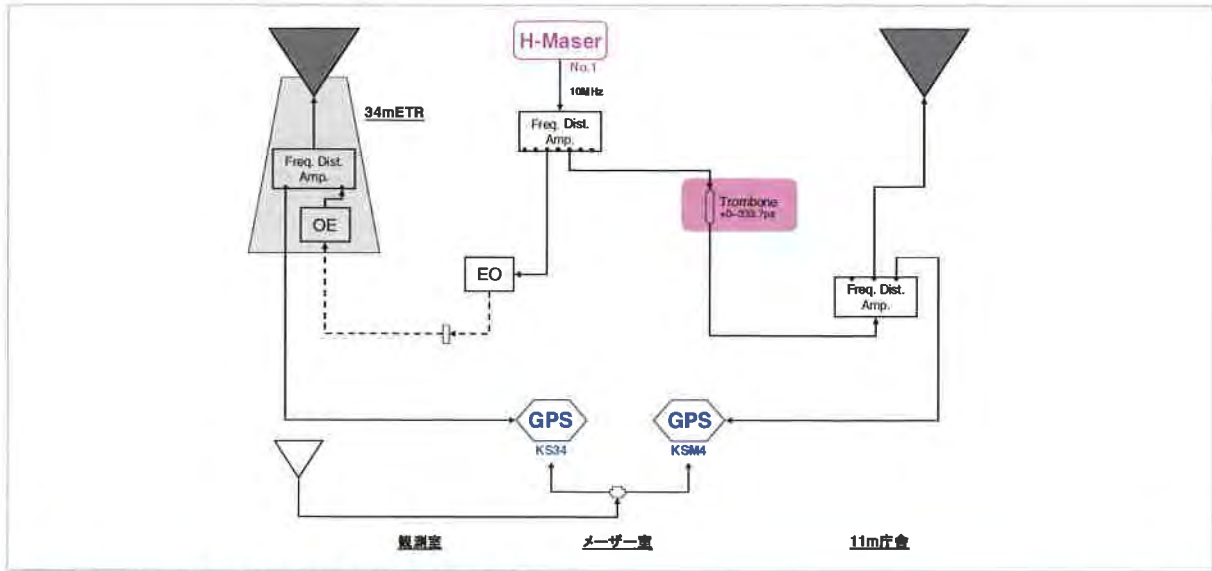


図8 実験時の基準信号(10 MHz)の経路図

実線は同軸ケーブル、破線は光ファイバを表す。

表3 通常の測地 VLBI 実験と本実験との違い

	通常測地VLBI実験	今回
観測	複数天体を受信	1天体(3C84)を追尾観測
	アンテナ切り換え時間	アンテナ切り替え時間なし
	異なる積分時間	積分時間一定
	通常24時間観測	数時間
データ解析	局位置	クロックオフセットのみ推定
	大気遅延	局位置は固定
	クロックオフセットを推定	

て、1つのアンテナを、外部入力の基準信号の経路が異なる2台の受信機で共有し観測を行った。基準信号は、VLBI、GPS共に、鹿島局のメーザ(No.1)を用いた。その際、基準信号は、光ファイバ及び同軸ケーブルで伝送した。可変長同軸管は、メーザから11 m庁舎への経路中に挿入した。詳細を図8に示す。

通常、測地 VLBI では、複数の天体を空間的に均一に分布するよう、交互に観測を行う。また、解析時には、クロックオフセット及び、大気遅延、局座標を推定する。しかしながら、今回の実験では、10秒毎の時刻差を求める為に、1つの天体(3C84)のみ追尾する観測を行い、解析でもクロックオフセットのみ推定を行った。通常の VLBI 実験との違いを表3に示す。VLBI の解析には、

Calc/Solve を使用した。また、GPS の解析には、NRC (Natural Resources Canada) 製の PPP ソフトウェアで、IGS 速報層と時計補正情報(30秒)を用い、30秒毎のクロックオフセットを求めた。人為的な変化は、手動で数分おきに可変長同軸管を伸縮させる事で行った。

図9に、VLBI、GPSそれぞれから求めた時刻差を示す(それぞれのオフセットは取り除いてある)。ステップ状に変化している部分が、可変長同軸管を用いて人為的に時刻差を変化させた所である。VLBI と GPS の比較では、大きな差は見られない。表4に、メーカーから提供された最大遅延変化量 333.7ps から推定される可変長同軸管の遅延変化(基準値)と VLBI、GPS の結果から求めた遅延変化の基準値との差をまとめた。VLBI の方

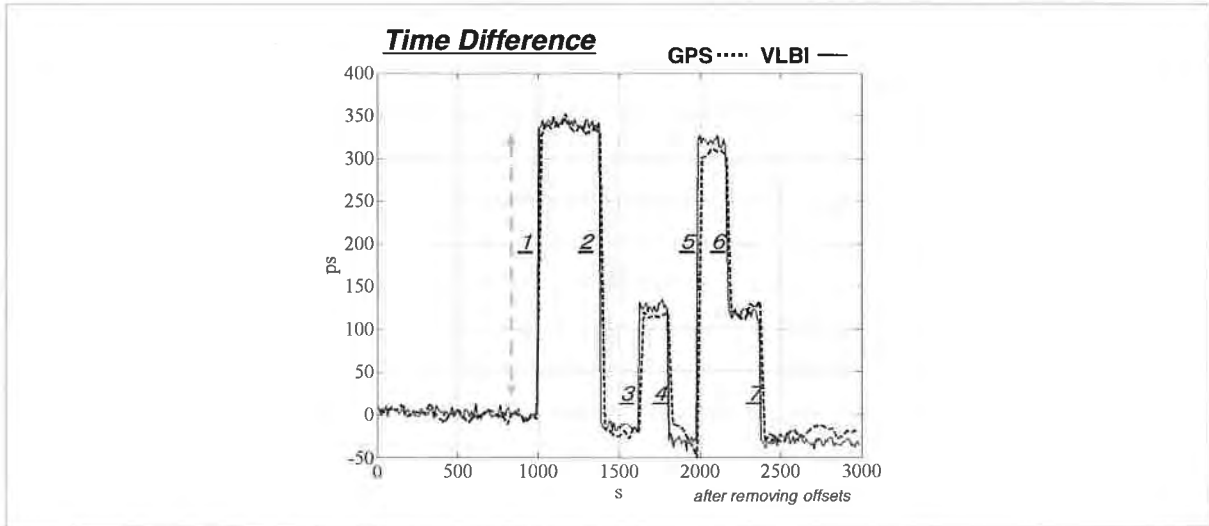


図9 VLBI、GPS から求めた時刻差変動

大きなステップ状の変化が、可変長同軸管を用いた人工的な遅延変化。

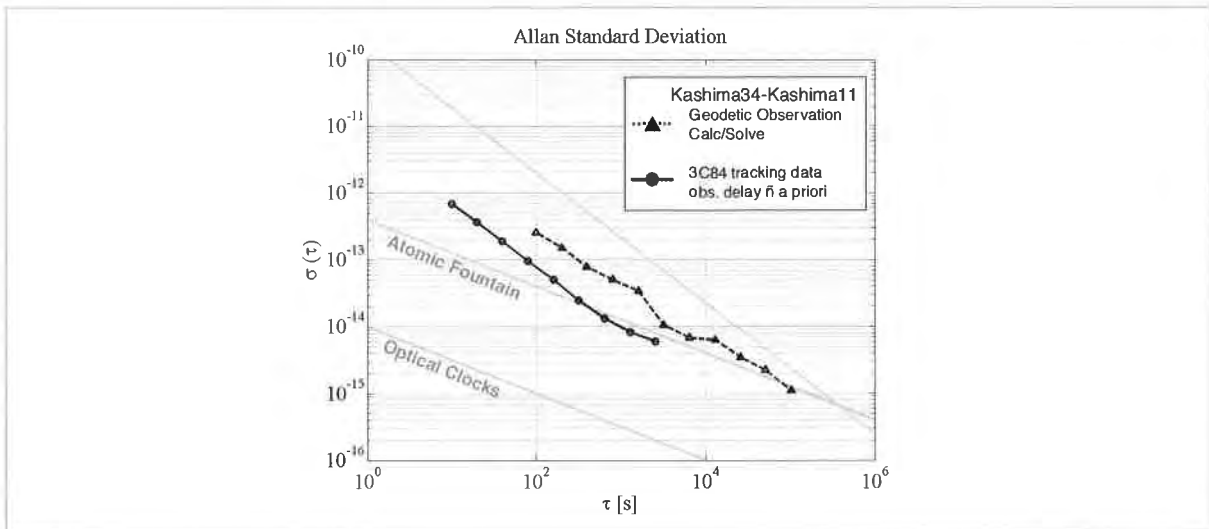


図10 VLBI の 10 秒積分、10 秒間隔の時刻差データから求めた周波数安定度

平均化時間約 500 秒で原子泉型周波数標準器の安定度に到達する。

表4 人工的な遅延変化の、メーカー値と、VLBI、GPS のメーカー値との差

	基準値	基準値との差	
		GPS	VLBI
1	333.7	3.6	2.8
2	333.7	16.5	15.2
3	147.2	12.8	0.0
4	147.2	17.0	4.6
5	333.7	11.6	19.5
6	186.7	0.6	9.8
7	147.0	9.2	7.3
	平均	10.2	8.5 ps

が、GPS に比べて若干基準値に近い結果を得られた。VLBI と基準値との差は、平均すると 10 ps 以下であった。この結果から、測地 VLBI は正しい時刻差を計測可能であると言える。

この実験で人為的に時刻差を変化させていない期間のデータを用いて計算した周波数安定度を図 10 に示す。これは 1 天体 (3C84) の追尾連続記録したデータを 10 秒毎に 10 秒積分して得られた遅延量からアプリアリ値を除いた残差から計算した。平均化時間 500 秒まで $1/\tau$ で変化している。前述の通り、通常の測地 VLBI とは異なるが、スケジュールの調整や開発中の ADS3000+ の様な

高速サンプラーを用いることで、GPSと同じ1秒積分のデータを取得する事も可能である。

3 まとめ

新しい高精度時刻・周波数比較の手段として測地 VLBI 技術を用いた方法を提案する為に、現在の VLBI システムでの比較能力の検証を行った。IVS、IGS のデータを用いた検証では、VLBI の結果は平均化時間 10^3 s 以上で、原子泉型周波数標準器の安定度を上回った。この結果から、測地 VLBI 技術には期待通りの時刻・周波数比較を行える能力があると言える。

更なる検証に、可変長同軸管を用いて人為的に時刻差を変化させ、VLBI が正しい時刻差を計測しているのか検証を行った。メーカー値である最大遅延変化量を基準として、VLBI 及び GPS の結果を比較しところ、VLBI の方が、GPS に比べて

若干基準値に近い結果を得られた。また、平均して人為的な変化部分の VLBI と基準値の差は 10 ps 以下であった。この結果から、測地 VLBI は正しい時刻差を計測している事が確かめられた。

今後は、小型 VLBI システム (MARBLE) を用いた検証や、ADS3000+ などの高速サンプラーを用いた検証を計画している。

謝辞

本研究では、IVS、IGS のデータを使用させて頂いた。GPS、VLBI の解析にはそれぞれ、JPL 製の GIPSY-OASIS II、NRCan 製の NRCan PPP、NASA GSFC 製の Calc/Solve を使用した。VLBI、GPS の観測には、関戸主任研究員、川合主任研究員、雨谷研究マネージャーにサポート頂いた。また、査読者から多くの有益なアドバイスを頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1 M. Kumagai, H. Ito, M. Fujieda, and M. Hosokawa, "Evaluation of caesium atomic fountain NICT-CsF1," *Metrologia*, 45, 139-148, 2008.
- 2 M. Takamoto, F.-L. Hong, R. Higashi, and H. Katori, "An Optical Lattice Clock," *Nature*, 435, 321-324, 2005.
- 3 J. Ray and K. Senior, "Geodetic techniques for time and frequency comparisons using GPS phase and code measurements," *Metrologia*, 42, 215-232, 2005.
- 4 小山泰弘 他, "日本地球惑星科学連合大会要旨," D106-002, 2007.
- 5 H. Takiguchi, T. Hobiger, A. Ishii, R. Ichikawa, and Y. Koyama, "Comparison with GPS Time Transfer and VLBI Time Transfer," *IVS NICT-TDC News*, No. 28, 10-15, 2007.
- 6 H. Takiguchi, Y. Koyama, R. Ichikawa, T. Gotoh, A. Ishii, T. Hobiger, and M. Hosokawa, "Comparison Study of VLBI and GPS Carrier Phase Frequency Transfer using IVS and IGS data," *IVS NICT-TDC News*, No. 29, 23-27, 2008.
- 7 H. Takiguchi, Y. Koyama, R. Ichikawa, T. Gotoh, A. Ishii, T. Hobiger, and M. Hosokawa, "VLBI MEASUREMENTS FOR FREQUENCY TRANSFER," *ATF 2008 Proceedings*, 2008.
- 8 H. Takiguchi, Y. Koyama, R. Ichikawa, T. Gotoh, A. Ishii, and T. Hobiger, "Comparison Study of VLBI and GPS Carrier Phase Frequency Transfer - Part II -," *IVS NICT-TDC News*, No. 30, 26-29, 2009.
- 9 H. Takiguchi, Y. Koyama, R. Ichikawa, T. Gotoh, A. Ishii, T. Hobiger, and M. Hosokawa, "VLBI Measurements for Frequency Transfer," *Highlights of Astronomy*, 15, 2009.
- 10 S. Hama, et al., "Japan-U.S. Time Comparison Experiment for Realizing Better Than 1-ns Accuracy by Using a Radio Interferometric Technique," *IEEE TRANS. ON INSTRUMENTATION AND MEASUREMENT*, Vol. 38, No. 2, pp. 640-643, 1989.

- 11 T. Yoshino, S. Hama, and H. Kiuchi, "PRECISE TIME COMPARISON WITH VERY LONG BASELINE INTERFEROMETRY," Journal of the Communications Research Laboratory, Vol. 39, No. 1, pp. 109-116, .1992.
- 12 A. Ishii, R. Ichikawa, H. Takiguchi, H. Kuboki, M. Kimura, J. Nakajima, Y. Koyama, J. Fujisaku, and K. Takashima, "Development of a compact VLBI system for a length examination of a reference baseline," IVS NICT-TDC News, No. 28, 2-5, 2007.
- 13 市川隆一 他, "距離基準超小型 VLBI システムの開発とその実証実験成果," 情報通信研究機構季報, 本特集号, 4-6, 2010.
- 14 B. Komiyama, "Frequency and time measurement methods," Radio Lab Bull, Vol. 29, 39-53, 1983.



瀧口博士
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ専攻研究員
 博士(理学)
 測地学
 htaki@nict.go.jp



小山泰弘
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループグループリーダー 博士(学術)
 宇宙測地、電波科学
 koyama@nict.go.jp



市川隆一
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループグループサブリーダー 博士(理学)
 地球物理学、測地学
 richi@nict.go.jp



後藤忠広
 情報推進室情報最適化チーム
 主任研究員
 時間・周波数標準
 tara@nict.go.jp



石井敦利
 株式会社エイ・イー・エス正社員/
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ特別研究員
 測地学
 a_ishii@aes.co.jp



Thomas Hobiger
 新世代ネットワーク研究センター
 光・時空標準グループ研究員 Ph.D.
 地球物理学、測地学
 hobiger@nict.go.jp