

周波数標準の校正法とその不確かさ

今江 理人*, 雨宮 正樹*, 藤井 靖久*, 鈴山 智也*

(平成18年10月24日受理)

Calibration methods of frequency standards and their uncertainties

Michito IMAE, Masaki AMEMIYA, Yasuhisa FUJII, Tomonari SUZUYAMA

1. はじめに¹⁾

時間・周波数は、従来「長さ」、「質量」等と並んで基本単位の1つであると共に、各種計量標準の中で最も不確かさの小さいものである。実際、時間・周波数一次標準器では、今日 1×10^{-15} の不確かさで定義値を実現できている。その正確さとともに、時間・周波数標準は、遠隔地におかれた標準器間の比較が、電磁波を用いて可能であるという他の標準には無い特徴を有している。

時間・周波数標準の国際的な枠組みとしては、図1に示すように各国の国家計量標準研究機関(NMI)並びに天文台等の合計58機関で稼働している300台前後の原子時計(セシウム原子時計や水素メーザ型周波数標準器)の相互比較のデータや機関間の比較データが国際度量衡局(BIPM)に集約される。BIPMでは、集約されたデータを用いて各時計の重み付け平均として計算されるEALと呼ばれる時系を計算する。このEALに対して、一次周

波数標準器による評価結果を加味して周波数微調整がなされ、国際原子時(TAI)と呼ばれる時系が計算される。TAIは「原子時計のみのデータで計算されるものであり、地球の自転とは独立した時系であるが、世界時(UT1)との関係を1秒以内に保つためTAIに対してうるう秒調整を行って得られる協定世界時(UTC)が最終的に決定される。この計算は、毎月1度、前月分のデータに関して実施され、その結果はBIPMの時間セクションからCircular-Tというレポートで公表されると共に、MRAに参加している機関に関しては、BIPMのWeb siteの基幹比較データベース(KCDB)にCCTF-K2001.UTCというコードで登録される²⁾。この基幹比較も他の量と異なる部分の1つであり、

基幹比較参照値はUTC

日常的なTAI構築のためのGPS common-viewや衛星双方向時間周波数比較(TWSTFT)が基幹比較として採用

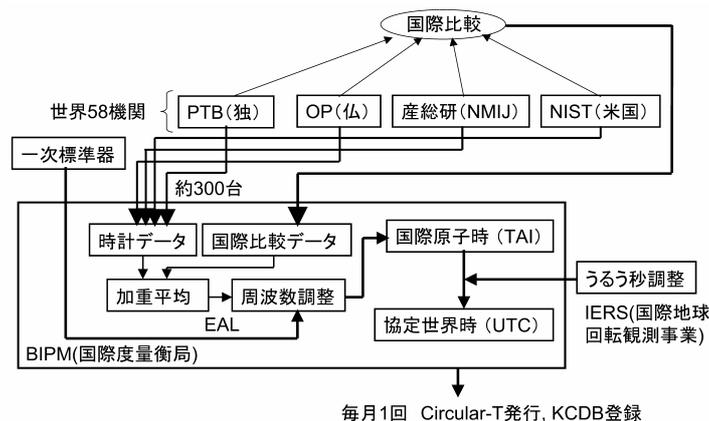


図1 TAI, UTC発生のおしきみ

* 計測標準研究部門 時間周波数科

本論文は当所における校正証明書等の不確かさ算出における一般的な考え方を記述したものであり、個別の校正証明書等に記載される不確かさ評価とは必ずしも一致しているわけではありません。

基幹比較の結果が, 毎月BIPMのTime sectionにより準備されKCDBに掲載といった特徴がある.

なお, 最新の情報では, TAI並びにUTCのSI秒に対する不確かさは 1×10^{-15} 程度に達しており, その安定度は, 平均化時間40日で 4×10^{-16} を実現している.

各NMIでは, 通常自機関において実時間で発生しているUTC(k) (kは機関の略称であり, 産業技術総合研究所(産総研)の場合は, UTC(NMIJ))を用いて校正サービスを実施している. すなわちUTCは, 実時間で生成される物ではなく, 上述の通り, 1ヶ月遅れで前月分が公表されるものであり, かつ, 5日毎の値しか計算されないため, UTC(k)が実際の校正には使用される訳である.

2. 校正の方法

2.1 校正原理

産総研の時間(周波数)校正サービスでは, 大別して次の2種類の校正形態を用いている.

持込校正

遠隔校正

持込校正は顧客の校正器物を当所に持ち込んでいただき, 周波数国家標準で直接校正を実施する形態であり, 一方, 遠隔校正は校正器物を顧客のサイトに置いた状態で校正を行う形態である.

さらに持込校正では周波数測定法と時間間隔測定法の2つの方式を用いている. これは, 校正器物の性能に合わせて準備しているもので, 校正器物の不確かさが大きい場合は前者を, 小さい場合には後者を用いている.

遠隔校正では, 産総研サイトと顧客サイトで同時にGPS衛星を受信し, GPS timeというGPS衛星が準拠する時系を仲介として比較を行うが, 校正器物と周波数国家標準の時刻差(位相差)を測定するものであり, 基本原理としては, 時間間隔測定法に分類できる方式である.

2.2 発振器からの出力信号と周波数

発振器からの信号Vは一般に, 時刻をt, 振幅を V_0 , 公称周波数を f_0 , 位相を $\varphi(t)$ とすると,

$$V(t) = V_0 \sin(2\pi f_0 t + \varphi(t)) \quad (1)$$

と表され, その瞬時位相 $\Phi(t)$ は次式で表される.

$$\Phi(t) = 2\pi f_0 t + \varphi(t) \quad (2)$$

その瞬時周波数 $f(t)$ は,

$$f(t) = f_0 + (1/2\pi) \cdot d\varphi(t)/dt \quad (3)$$

と表される.

発振器からの周波数は, $f(t)$ を直接周波数カウンタで測

定するか, あるいは $\varphi(t)$ を位相計またはタイムインターバルカウンタ等で測定してこれを時間で微分することにより求めることができる. 即ち, 直接周波数カウンタで測定する方式が2.3節で述べる「周波数測定法」に該当し, $\varphi(t)$ の時間変化量として周波数を求める方式が2.4節の「時間間隔測定法」並びに2.5節の「GPS common-view法」に該当する.

2.3 周波数測定法による校正原理

周波数測定法では, 校正器物からの出力信号の周波数をUTC(NMIJ)の基準信号を外部基準信号とした周波数カウンタで計測することにより, 校正器物の周波数偏差を求める. 即ち, 周波数カウンタの原振が周波数国家標準に周波数同期して計測するので, 周波数カウンタの測定結果そのものが, 周波数国家標準を基準として測定した校正器物の周波数に相当する.

図2は, 産総研の周波数測定法における校正システムの構成を示している. UTC(NMIJ)は, セシウム原子時計や水素メーザ型周波数標準器を原振として生成される. 生成された基準信号(10 MHz)は, 分配アンプ1で分配された後, 約80 mの同軸ケーブルを用いて周波数校正システムを設置してある実験室(校正室)へ伝送される. 同室では, 分配アンプ2で基準信号を受け, 周波数カウンタの外部基準信号として入力される. 周波数カウンタは, 校正器物に応じてゲートタイムと測定回数が決定され, 平均化処理, 並びに不確かさ計算がなされる.

2.4 時間間隔測定法による校正原理

時間間隔測定法による周波数の測定は, 図3に示すように, 校正器物の信号とUTC(NMIJ)の基準信号との位相差(時間間隔)を定期的に測定する. このとき, 校正器物からの信号は, 5 MHz, 10 MHzのいずれかであり, UTC(NMIJ)からの基準信号は, 10 MHzを使用する. 時間間隔測定を1秒毎に行い, 毎回の時間間隔測定結果を $\Delta T(t)$ とすると, τ 秒平均の規格化周波数偏差は,

$$\Delta f/f_0 = (\Delta T(t + \tau) - \Delta T(t)) / \tau$$

として計算できる.

このとき, タイムインターバルカウンタに入るstart信号とstop信号であるが, 両者が同じ周波数の場合は, 基本的にどちらをstart入力, stop入力に入れてもかまわないが, 周波数が異なる場合は, 周波数が低い方をstart入力に, 高い方をstop入力に入れることにより, $\Delta T(t)$ の曖昧さを除去することができる.

すなわち, 5 MHz と10 MHzとの間で時間間隔測定法で周波数測定を行う際は, 5 MHz信号をstart, 10 MHz信

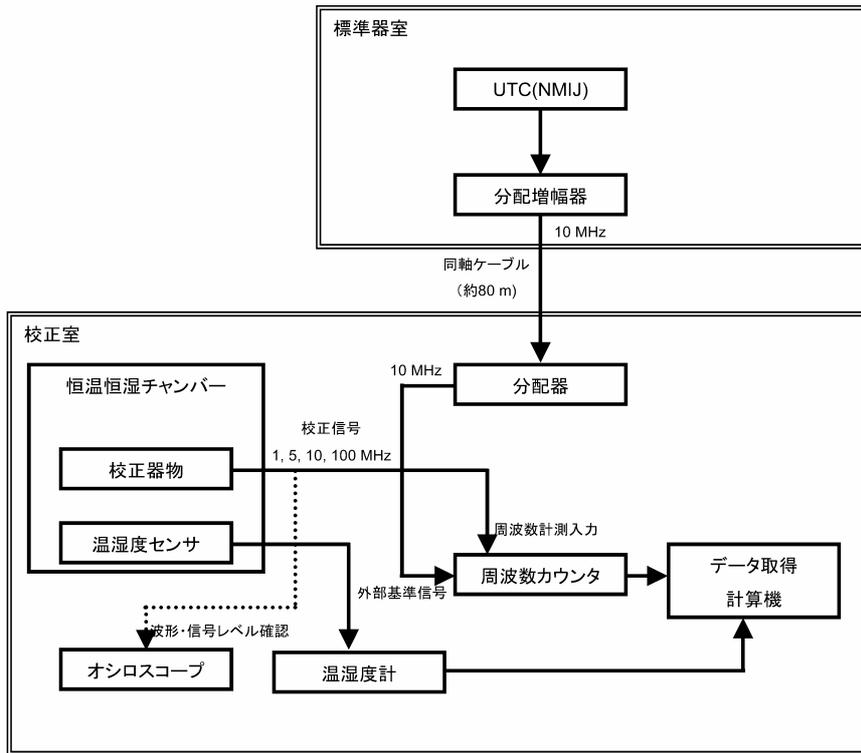


図2 周波数測定法による周波数校正システム

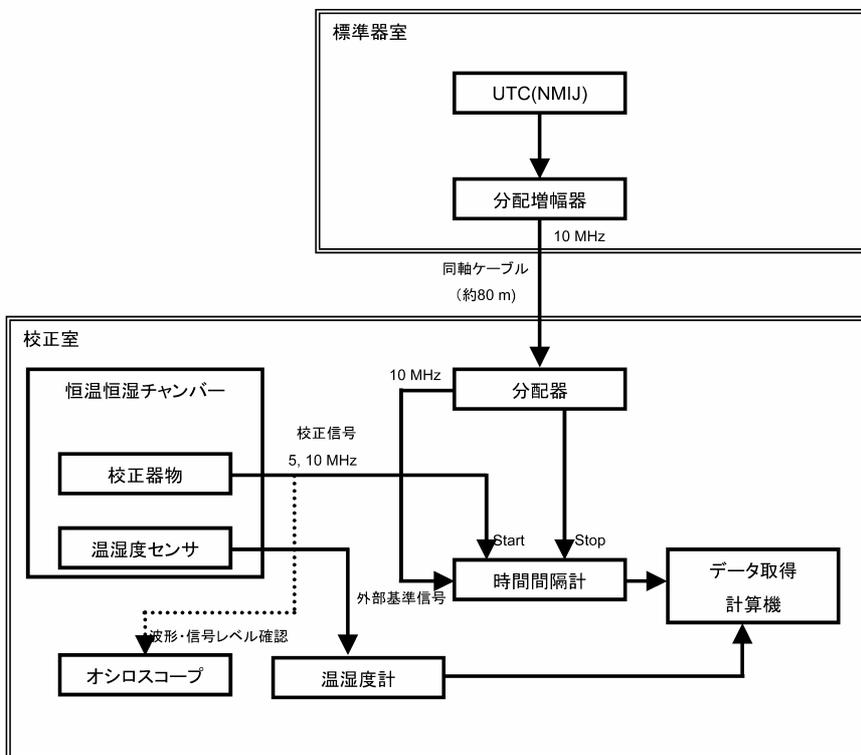


図3 時間間隔測定法による周波数校正システム

号をstop入力として測定を行う。この場合, 5 MHz信号で時間間隔の計数を開始し, その後最初の10 MHz信号で計数を終了することにより, 一義的に“位相差”を計数できるが, 逆の場合は, 10 MHzの信号で計数を開始するため, 10 MHzの1周期分の曖昧さを生じることになる。即ち, 計数開始のタイミングと10 MHzと5 MHzの位相関係により, 100 nsの曖昧さを生ずる。この曖昧さは, 位相測定の「サイクルスリップ」に該当するわけであるが, 時間間隔測定は毎秒1回行うため, 校正器物の周波数がUTC(NMIJ)に比べて1秒間に1周期以上変化しなければ容易にサイクルスリップ有無の判定, 並びに補正は可能である。

2.5 GPS common-view法³⁾

周波数遠隔校正法として, BIPMでTAIを決定する際に広く用いられているGPS common-view法を用いる。この方法は, 遠隔複数地点におかれた周波数標準器の周波数・時刻を比較する時, 各地点で同時に同一のGPS衛星の信号を受信して, GPS timeと比較対象の周波数標準器の時刻との差を求める。それらのデータの差をとることにより, GPS timeは相殺され, 遠隔地点におかれた周波数標準器間の時刻比較が行われる。さらに, 時間において測定することにより, 時刻比較結果の差から周波数比較を行うことができる。

図4に原理図を示すが, GPS common-view法により, 産総研と顧客側で同時にGPS衛星からの信号を受信し, 両者における基準時計(当所の場合は, UTC(NMIJ))を基準としてGPS timeとの時刻比較を実施する。

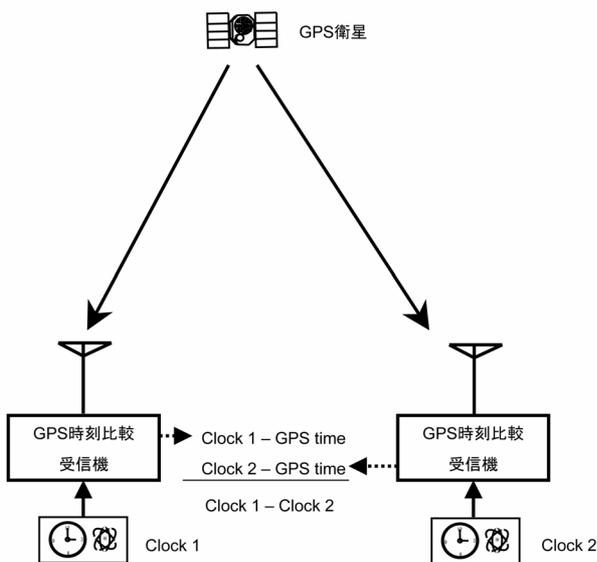


図4 GPS common-view法による時刻比較原理図

顧客側の受信結果は, 定期的に産総研側サーバにInternet等を介して伝送され, 産総研での受信結果との差が計算される。産総研側では, 常時, 1周波マルチチャネル受信機でUTC(NMIJ)を基準にしてGPS衛星を受信しており, 顧客側の受信結果と同一観測(観測時刻, 観測衛星が同一)のものを抽出して差をとり, GPS timeを仲介として, UTC(NMIJ)と顧客側校正器物の時刻差を計算する。

すなわち,

産総研側測定値

$$\Delta T_{NMIJ}(t_1, PRN\#n) = UTC(JCSS, t_1) - GPS_time(t_1) + Error_{NMIJ} \quad (1)$$

顧客側測定値

$$\Delta T_{client}(t_1, PRN\#n) = User_clock(t_1) - GPS_time(t_1) + Error_{client} \quad (2)$$

(1), (2)式で, PRN#nは, GPS衛星識別番号を示し, Error_{NMIJ}, Error_{client}は, 各種誤差要因により生ずる誤差成分である。

(1)式と(2)式の差から特定2次標準器と顧客側校正器物の時刻差は, 次式のように求まる。

$$\begin{aligned} \Delta T(t_1, PRN\#n) &= \Delta T_{NMIJ}(t_1, PRN\#n) - \Delta T_{client}(t_1, PRN\#n) \\ &= UTC(NMIJ, t_1) - User_clock(t_1) + Error_{NMIJ} - Error_{client} \end{aligned} \quad (3)$$

両者の周波数差は, τ 秒後に同様の測定を行うことにより,

$$\Delta f(t_1, PRN\#n) = [\Delta T(t_1, PRN\#n) - \Delta T(t_1 + \tau, PRN\#n)] / \tau \quad (4)$$

として求まる。

顧客側受信機に対する必要条件は, 時刻比較におけるデータ交換の国際標準フォーマットであるCGGTTS形式⁴⁾でデータを出力できることである。このような受信機は, シングルチャネル受信機(同時に受信できるGPS衛星数が1個のもの)やマルチチャネル受信機(複数のGPS衛星を同時に受信することができるもの)が存在する。GPS common-view法の基本的な原理は, 同時に受信できる衛星数には基本的には依存しないが, 複数衛星を同時受信できる受信機は, 測定の回数を飛躍的に増大することができ, 不確かさを向上する上で有効である。すなわち, 古典的なシングルチャネル受信機では1日に設定できる受信スケジュールの数が48観測であるが, マルチチャネルの受信機では, 最大700~900観測/日まで増大することが可能であり, 不確かさの点で, マルチチャネル受信機の方が有利である。

図5に本方式を用いた周波数遠隔校正の概念図を示す。

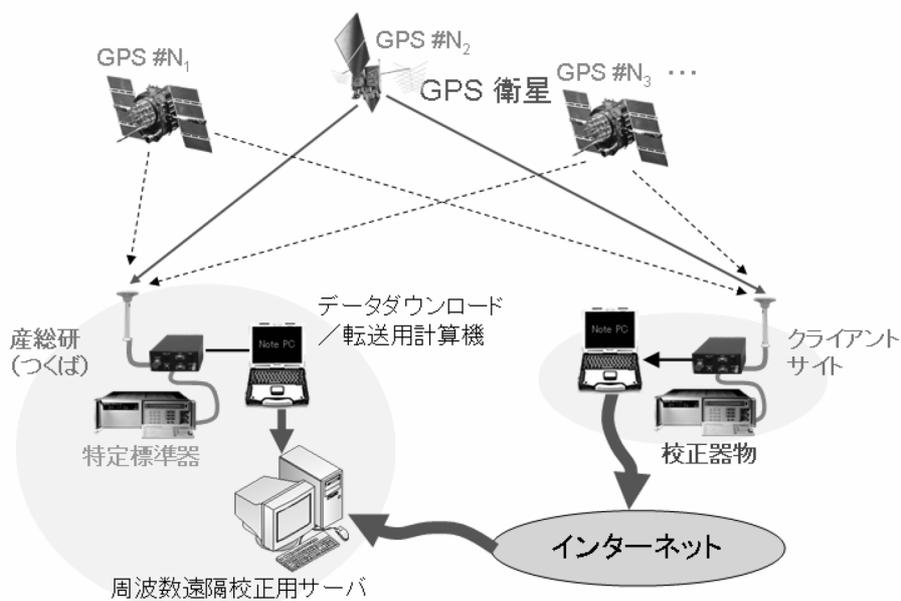


図5 産総研の周波数遠隔構成概念図

3. 測定の不確かさの推定方法

周波数測定の不確かさの要因には、(1)UTC(NMIJ)の不確かさ、(2)分配増幅器の不確かさ、(3)分配用の同軸ケーブルの不確かさ、(4)測定方法の不確かさ、(5)校正器物に依存した不確かさ、の5つがある。ここで校正測定能力 (Calibration Measurement Capability) を規定するものとしては、(1)~(4)による不確かさであり、不確かさの推定は、ISO国際文書「計測における不確かさの表現ガイド (GUM)」に則って行う。

3.1 持ち込み校正の不確かさの要因

(1) UTC(NMIJ)の不確かさ u_1

UTC(NMIJ)は、日常の国際時刻比較で、GPS衛星や衛星双方向時刻比較法を用いて、他国の時間周波数標準機関などとの間で比較が行われている。その比較結果は、国際度量衡局 (BIPM) に提供され、国際原子時 (TAI) の構築に用いられ、TAIにうるう秒調整がなされた結果として、協定世界時 (UTC) が決定される。UTCは、時間周波数標準分野における基幹比較参照値として利用され、UTCと各時間周波数標準機関のUTC(k)の差は、国際度量衡局が毎月1回、Circular-Tとして公表している。Circular-Tには、各国の一次周波数標準器で評価されたTAIすなわちUTCのSI秒からの偏差とその不確かさに関する情報が記載されている。

(a) UTCの不確かさ⁵⁾

Circular-Tに記載されているUTCのSI秒からの偏差と不確かさの履歴を表1に示す。

上記のデータにおけるUTCの不確かさの最悪値は 2.8×10^{-15} である。CMCの算出にあたってはUTCの不確かさとして最悪値 2.8×10^{-15} を採用することとする。

(b) UTC-UTC(NMIJ)の不確かさ⁵⁾

UTC-UTC(NMIJ)の不確かさは、日常の時刻比較結果に基づき、2005年1月よりBIPMが算出し、Circular-Tに公表している。その結果を表2に示す。

ここで、 u_A はUTC-UTC(k)の決定の主に時刻比較リンクのノイズによる変動分を、また、 u_B は、時刻比較リンクに用いている比較方法のバイアス値の不確かさを示している。このため、時刻サービスを行う際に u_A および u_B がその不確かさに影響するが、周波数校正に関しては u_B は関与しない。このため、ここでは u_A のみをUTC-UTC(NMIJ)の不確かさとして採用する。なお、最新のものは、Common-view法からAll in view法に変更がなされた結果、不確かさが大きく改善されているが、ここでは、これまでの値を採用している。その結果、1日平均におけるUTC(NMIJ)のUTCに対する不確かさは、 $u_A/86400/5 \times \sqrt{5}$ より 7.2×10^{-15} となる。

(c) 1ヶ月間の原振の不確かさ

通常、UTC-UTC(NMIJ)の値として、Circular-Tに掲載される1ヶ月前の値を用いて校正を行うために、不確かさとしてUTC(NMIJ)の原振の1ヶ月間の周波数安定度を

表1 UTCのSI秒からの偏差と不確かさの履歴

推定期間		SI秒からの偏差	不確かさ
MJD	年月日		
53184-53214	2004 JUN 28 - 2005 JUL 28	5.6×10^{-15}	2.3×10^{-15}
53214-53244	2004 JUL 28 - 2004 AUG 27	3.1×10^{-15}	1.9×10^{-15}
53244-53274	2004 AUG 27 - 2004 SEP 26	2.1×10^{-15}	2.5×10^{-15}
53274-53309	2004 SEP 26 - 2004 OCT 31	2.3×10^{-15}	2.8×10^{-15}
53309-53339	2004 OCT 31 - 2004 NOV 30	4.5×10^{-15}	1.9×10^{-15}
53339-53369	2004 NOV 30 - 2004 DEC 30	3.6×10^{-15}	2.6×10^{-15}
53369-53399	2004 DEC 30 - 2005 JAN 29	4.6×10^{-15}	1.1×10^{-15}
53399-53429	2005 JAN 29 - 2005 FEB 28	5.0×10^{-15}	1.9×10^{-15}
53429-53459	2005 FEB 28 - 2005 MAR 30	4.7×10^{-15}	2.4×10^{-15}
53459-53489	2005 MAR 30 - 2005 APR 29	4.2×10^{-15}	2.4×10^{-15}
53489-53519	2005 APR 29 - 2005 MAY 29	5.8×10^{-15}	1.8×10^{-15}
53519-53549	2005 MAY 29 - 2005 JUN 28	5.0×10^{-15}	2.6×10^{-15}
53549-53579	2005 JUN 28 - 2005 JUL 28	5.9×10^{-15}	1.8×10^{-15}
53579-53609	2005 JUL 28 - 2005 AUG 27	3.0×10^{-15}	1.9×10^{-15}
53609-53639	2005 AUG 27 - 2005 SEP 26	5.0×10^{-15}	1.3×10^{-15}
53639-53674	2005 SEP 26 - 2005 OCT 31	5.1×10^{-15}	0.8×10^{-15}
53674-53704	2005 OCT 31 - 2005 NOV 30	3.9×10^{-15}	1.5×10^{-15}
53704-53734	2005 NOV 30 - 2005 DEC 30	4.1×10^{-15}	1.7×10^{-15}
53734-53764	2005 DEC 30 - 2006 JAN 29	3.5×10^{-15}	0.9×10^{-15}
53764-53794	2006 JAN 29 - 2006 FEB 28	2.9×10^{-15}	0.9×10^{-15}
53794-53824	2006 FEB 28 - 2006 MAR 3	2.4×10^{-15}	0.9×10^{-15}
53824-53854	2006 MAR 3 - 2006 APR 29	1.9×10^{-15}	1.4×10^{-15}
53854-53884	2006 APR 29 - 2006 MAY 29	1.7×10^{-15}	1.6×10^{-15}
53884-53914	2006 MAY 29 - 2006 JUN 28	1.9×10^{-15}	1.8×10^{-15}
53914-53944	2006 JUN 28 - 2006 JUL 28	1.7×10^{-15}	1.8×10^{-15}
53944-53974	2006 JUL 28 - 2006 AUG 27	2.7×10^{-15}	1.5×10^{-15}
53974-54004	2006 AUG 27 - 2006 SEP 26	2.7×10^{-15}	1.7×10^{-15}

表2 UTC-UTC(NMIJ)の不確かさ

	$u_A(\text{ns})$	$u_B(\text{ns})$	$u(\text{ns})$
2005.1	2.7	6.5	7.0
2005.2	2.7	6.5	7.0
2005.3	2.7	6.4	6.9
2005.4	2.7	6.4	6.9
2005.5	1.4	6.4	6.6
2005.6	1.4	6.4	6.6
2005.7	1.4	6.4	6.6
2005.8	1.4	6.4	6.6
2005.9	1.4	6.4	6.5
2005.10	1.4	6.4	6.6
2005.11	1.4	6.4	6.5
2005.12	1.4	6.4	6.6
2006.1	1.4	6.4	6.6
2006.2	1.4	6.4	6.6
2006.3	1.4	6.4	6.5
2006.4	1.3	6.3	6.4
2006.5	1.3	6.2	6.3
2006.6	1.3	6.2	6.3
2006.7	1.4	6.3	6.5
2006.8	1.4	6.4	6.5
2006.9	0.7	5.1	5.1

表3 セシウム原子時計の周波数安定度仕様値

平均時間(τ)	周波数安定度($\sigma_y(\tau)$)
10秒	3.5×10^{-12}
100秒	8.5×10^{-13}
1000秒	2.7×10^{-13}
10000秒	8.5×10^{-14}
100000秒	2.7×10^{-14}
5日	1.0×10^{-14}
30日	1.0×10^{-14}
フリッカーフロア	1.0×10^{-14}

加算する必要がある。

さらにUTC(NMIJ)の生成のための装置は原振となる原子時計と周波数調整用の装置(AOG)であり, それぞれの周波数安定度, システム雑音をそれぞれ(d)(e)に示す. 最終的なUTC(NMIJ)の不確かさ u_1 は(a)(b)(c)(d)(e)の各不確かさの二乗和の平方根により求める.

(d) UTC(NMIJ)の原振となる原子時計の周波数安定度

UTC(NMIJ)は産総研で維持している原子時計の内の一台を原振として生成される. 原振としてセシウム原子時計を用いた場合, その仕様値は各平均時間 τ (秒)におけるアラン標準偏差で表された周波数安定度 $\sigma_y(\tau)$ (最悪値)

周波数標準の校正法とその不確かさ

表4 水素メーザ発振器の周波数安定度仕様値

平均時間(τ)	周波数安定度($\sigma_y(\tau)$)
10秒	3×10^{-14}
100秒	9×10^{-15}
1000秒	3.0×10^{-15}
86400秒	3×10^{-15}
30日	5×10^{-15} (実績より)

表5 周波数カウンタ仕様値

ゲート時間	相対不確かさ ($k=1$)
10秒	6.7×10^{-12}
100秒	6.7×10^{-13}
500秒(最大)	1.3×10^{-13}

は表3の通りである。

また、2006年3月よりUTC(NMIJ)の原振として水素メーザ型周波数標準器を用いている。その周波数安定度の仕様値は、表4に示す通りであり、実測によりこれよりも優れていることを確認している。

(e) 周波数調整装置 (AOG) のシステム雑音

UTC(NMIJ)の周波数調整は AOGにより行われる。AOGのシステム雑音の最大値はAOGの仕様値より、アラン標準偏差で示すと1秒で 3×10^{-13} であり、平均時間が1秒以上では $1/\tau$ で減少する。

(2) 分配増幅器のシステム雑音 u_2

UTC(NMIJ)の分配は分配増幅器により行われる。そのために分配増幅器の挿入による不確かさの増分を考慮する必要がある。使用している分配増幅器の周波数安定度はマニュアルの記載から1秒で 1×10^{-14} となる。

(3) 同軸ケーブル u_3

周波数標準器や周波数調整装置等により生成されるUTC(NMIJ)は同軸ケーブルにより持ち込み校正が行われる校正室に供給されており、CMC算出にあたり、本ケーブルによる不確かさの増分を考慮する。実際にケーブルが布設された状態でシステム雑音を測定して評価した。

なお、周波数遠隔校正用GPS受信機は、UTC(NMIJ)の生成と同一実験室に設置されており、当該ケーブルによる影響は無い。

(4) 測定方法の不確かさ

周波数校正の方法は、周波数測定法、時間間隔測定法の2種類である。それぞれの不確かさを下記に示す。

(4-1) 周波数測定法の不確かさ u_{4f}

周波数測定法において、校正に使用される周波数カウンタの仕様値から、各ゲート時間における測定の相対不確かさ ($k=1$) は、表5のように記述される。またゲート時間を固定し、測定回数をNとするときの不確かさは $1/\sqrt{N}$ により求める。

表6 タイムインターバルカウンタ仕様値

平均時間 τ	$\sigma_y(\tau)$
10秒	3.3×10^{-12}
100秒	3.3×10^{-13}
1000秒	3.3×10^{-14}
10000秒	3.3×10^{-15}
86400秒	0.4×10^{-15}
100000秒	3.3×10^{-16}

(4-2) 時間間隔測定法の不確かさ u_{4t}

時間間隔測定法ではタイムインターバルカウンタを用いる。校正に使用するタイムインターバルカウンタの仕様から各平均時間における測定の相対不確かさ ($k=1$) は、表6のように記述される。

3.2 遠隔校正の不確かさの要因

遠隔校正における不確かさの要因は、3.1節(1)のUTC並びにUTC(NMIJ)に関する部分は持ち込み校正と共通である。同(2)並びに(3)は該当しないため不確かさには計上していない。以下では、GPS common-view法における不確かさの要因に関して記す。

GPS common-view法における不確かさの要因としては、GPS衛星の軌道誤差によるもの、搭載原子時計に起因するもの、GPS衛星からの信号の伝搬路上伝搬媒質（電離層、大気層）に起因するもの、受信アンテナ位置誤差によるもの、受信機によるもの、マルチパスによるものが挙げられる。

また、GPS common-view法では、各誤差要因が依頼者側の受信点と校正事業者との位置と距離並びに衛星の位置に依存して複雑に変動する。

さらに、受信機による誤差も受信チャンネル数（同時受信できる衛星数）やスケジュールできる観測数などの要素に依存する成分があり、複雑に関連しているため、定式化して評価することが難しい。

このため、GPS common-view方式を用いた周波数遠隔校正では、

受信機の種類

- ・マルチチャンネルかシングルチャンネルか（1日の観測数）

電離層遅延

- ・太陽活動極大期と極小期

依頼者側受信点位置

- ・当所からの基線長

で場合分けして、各誤差要因に関して不確かさ推定の考え方を以下で記す。

(a) GPS衛星軌道誤差 u_{orb}

GPSから実時間で利用者に提供されている放送軌道要素の誤差は、数m ~ 10 m程度とされており³⁾、common-view方式の場合、基線長が長いほど軌道誤差による影響が大きくなる。また、衛星と地上の2地点の位置関係で影響の大きさが異なるが、光速度をc、衛星軌道誤差を ΔR とし、基線長をD、地表からGPS衛星までの距離をRとすると、軌道誤差の時刻比較に対する影響は、概略

$$\Delta t \sim (\Delta R \cdot D/R) / c$$

と考えることができる。

表7の軌道誤差による不確かさは、 $\Delta R = 5$ mとし、Rの平均値として 22,700 kmを仮定して24時間平均で求めたものである。シングルチャネルとマルチチャネル受信機での違いは、サンプル数として10倍を考慮して $1/\sqrt{10}$ としている。

(b) 搭載時計誤差 u_{clock}

搭載原子時計の誤差に起因する影響は、common-viewが完全な形で行われていると仮定し、0とした。

(c) 電離層遅延 u_{ion}

電離層は長期的には、太陽活動度（11年周期）、季節に依存して変化し、日周的にも地球自転に伴い変動する。このため、正確な電離層活動に伴う不確かさは推定し難いが、GPS衛星のL1（1557.42 MHz）一周波による単独測位での電離層誤差は概ね40 cm ~ 10 m程度とされている⁶⁻⁷⁾。

また、GPS衛星からの航法情報には電離層遅延の補正モデルが含まれており、通常、L1一周波受信機では、この補正モデルを用いて電離層遅延を補正している。

common-view方式時刻比較の場合は校正事業者と顧客の両地点における電離層遅延の差分として影響するため、

両地点の位置関係、距離に依存するがある程度は相殺され、電離層遅延については、GPS衛星から提供される電離層補正モデルである程度は補正されている。

このため、電離層遅延に起因する不確かさの評価の定式化は困難であるが、日本付近における不確かさとして、表7に記した値を設定した。すなわち、受信機の種類、校正事業者と顧客の距離（近距離（50 km程度）、中距離（500 km程度）、長距離（1,600 km程度））、並びに太陽活動度としては極大期における値を想定して設定した。この値は、24時間平均における値である。

(d) 大気遅延 u_{trop}

大気遅延は、量的には乾燥大気で2 ~ 3 m、うち水蒸気遅延で40 cm程度の遅延である⁶⁻⁷⁾。大気遅延に関しては、GPSからは補正モデル等は提供されないが、通常GPS受信機内でモデルを用いて補正が行われている。量的には電離層遅延に比べ1桁程度小さい値となるが、電離層遅延同様、定式化した評価は困難である。表7の不確かさは、両地点の差分が影響するため、2地点間の距離、受信機のタイプで場合分けして評価を行った。

(e) 受信点位置誤差 u_{pos}

受信点位置誤差は、1セッションにおけるばらつき（マルチチャネル受信機では同時複数受信した結果のばらつき）に影響するため短期での時刻比較結果の劣化につながる要因である。1日以上での観測時間では一定のばらつきと見なすことができる。1 mの受信点位置誤差は、1日間の観測で概ね3 ns p-pに相当する。表7では、これを周波数偏差に換算して不確かさを計上した。マルチチャネル受信機では、サンプル数の観点から不確かさをシングルチャネル受信機の1/3とした。

表7 GPS common-view法の不確かさ

	シングルチャネル受信機			マルチチャネル受信機		
	50 km	500 km	1,600 km	50 km	500 km	1,600 km
(a)GPS衛星軌道	$<4.25 \times 10^{-16}$	$<4.25 \times 10^{-15}$	$<1.57 \times 10^{-14}$	$<1.42 \times 10^{-16}$	$<1.42 \times 10^{-15}$	$<4.53 \times 10^{-14}$
(b)GPS搭載時計	0	0	0	0	0	0
(c)電離層遅延	$<5.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-13}$	$<4.60 \times 10^{-13}$	$<2.50 \times 10^{-14}$	$<5.00 \times 10^{-14}$	$<2.40 \times 10^{-13}$
(d)大気遅延	$<2.31 \times 10^{-14}$	$<2.31 \times 10^{-14}$	$<2.31 \times 10^{-14}$	$<7.72 \times 10^{-15}$	$<7.72 \times 10^{-15}$	$<7.72 \times 10^{-15}$
(e)受信点位置	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$
(f)受信機雑音	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<3.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$	$<1.00 \times 10^{-14}$
(g)マルチパス	$<3.00 \times 10^{-14}$					
GPS Common-view法の不確かさ	$<7.57 \times 10^{-14}$	$<1.15 \times 10^{-13}$	$<4.63 \times 10^{-13}$	$<4.23 \times 10^{-14}$	$<6.05 \times 10^{-14}$	$<2.47 \times 10^{-13}$

周波数標準の校正法とその不確かさ

(f) 受信機雑音 u_{rec}

受信機雑音による影響とは、主に受信信号と受信機内熱雑音(アンテナ雑音を含む)の比(S/N)に起因する。一般的なGPS時刻比較用受信機での性能としては、CGGTTSフォーマットにおける国際時刻比較での13分間平均値のバラツキとしては、3 ns程度である。マルチチャネル受信機では、同時に複数個の衛星を受信できることから、シングルチャネルの受信機に比べ1/3程度の不確かさとして計上した。実際の校正サービスにおいては、初期検査などで受信機の性能を評価する。

(g) マルチパスによる誤差 u_{multi}

マルチパスとは、アンテナ近くに障害物があった場合にそれからの反射波を受信することで正しくない擬似距離が測定されてしまうことである^{(6)~(7)}。マルチパスの影響は、受信機の性能や受信環境に依存するため、数値的に議論することが難しい。BMC計算上表7では、一般的な受信機並びに受信環境を想定し、不確かさシングルチャネル受信機で数ns、マルチチャネル受信機でも同等として計上した⁽⁴⁾。

3.3 測定の不確かさの算出

不確かさの各要因である $u_1 \sim u_{4f}$ 等の二乗平方根を求めることにより、合成標準不確かさ u を算出する。また、拡張不確かさ U は包含係数 k を2として求められる。

$$u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{4f}^2}$$

$$U = k u \\ = 2 u$$

その結果得られる周波数測定法、時間間隔測定法、並びにGPS common-view法における測定の不確かさを表8、9、10に示す。それぞれの表で()の数値は、UTC(NMIJ)の原振として水素メーザ型周波数標準器を用いた場合の不確かさである。

3.4 校正・測定能力

周波数持込校正の校正・測定能力は、前節等で規定した校正条件および校正方法により求める。周波数持込校正、並びに遠隔校正の校正・測定能力を表11に示す。

表8 周波数測定法における測定の不確かさ

不確かさの成分		平均化時間(s)			
		10 ³	10 ⁴	86400	10 ⁵
UTC(NMIJ)の不確かさ u_1		2.8 ×10 ⁻¹³ (6.7 ×10 ⁻¹⁴)	8.8 ×10 ⁻¹⁴ (2.2 ×10 ⁻¹⁴)	3.2 ×10 ⁻¹⁴ (9.7 ×10 ⁻¹⁵)	3.0 ×10 ⁻¹⁴ (7.9 ×10 ⁻¹⁵)
内訳	(a)UTC	2.8 ×10 ⁻¹⁵	2.8 ×10 ⁻¹⁵	2.8 ×10 ⁻¹⁵	2.8 ×10 ⁻¹⁵
	(b)UTC-UTC(NMIJ)	6.7 ×10 ⁻¹⁴	2.1 ×10 ⁻¹⁴	7.2 ×10 ⁻¹⁵	6.7 ×10 ⁻¹⁵
	(c)1ヶ月間の推定不確かさ	1.0 ×10 ⁻¹⁴ (5 ×10 ⁻¹⁵)			
	(d)原振の不確かさ	2.7 ×10 ⁻¹³ (3 ×10 ⁻¹⁵)	8.5 ×10 ⁻¹⁴ (3 ×10 ⁻¹⁵)	2.9 ×10 ⁻¹⁴ (3 ×10 ⁻¹⁵)	2.7 ×10 ⁻¹⁴ (3 ×10 ⁻¹⁵)
	(e)AOGシステム雑音	3 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶
分配増幅器のシステム雑音 u_2		1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶
同軸ケーブル u_3 (ケーブル長 : 80 m)		1.1 ×10 ⁻¹⁵	3.8 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶	< 1 ×10 ⁻¹⁶
周波数測定法(周波数力ウインタ) u_{4f}	ゲート時間(s)	500	500	500	500
	測定回数(N)	2	20	172	200
	不確かさ	9.2 ×10 ⁻¹⁴	2.9 ×10 ⁻¹⁴	9.9 ×10 ⁻¹⁵	9.2 ×10 ⁻¹⁵
合成標準不確かさ		2.9 ×10 ⁻¹³ (1.2 ×10 ⁻¹³)	9.3 ×10 ⁻¹⁴ (3.7 ×10 ⁻¹⁴)	3.3 ×10 ⁻¹⁴ (1.4 ×10 ⁻¹⁴)	3.1 ×10 ⁻¹⁴ (1.3 ×10 ⁻¹⁴)
拡張不確かさ ($k=2$)		5.9 ×10 ⁻¹³ (2.4 ×10 ⁻¹³)	1.9 ×10 ⁻¹³ (7.4 ×10 ⁻¹⁴)	6.7 ×10 ⁻¹⁴ (2.8 ×10 ⁻¹⁴)	6.3 ×10 ⁻¹⁴ (2.6 ×10 ⁻¹⁴)

表9 時間間隔測定法における測定の不確かさ

平均化時間(s)		10 ³	10 ⁴	86400	10 ⁵
不確かさの成分					
UTC(NMIJ)の不確かさ u_1		2.8×10 ⁻¹³ (6.7×10 ⁻¹⁴)	8.8×10 ⁻¹⁴ (2.2×10 ⁻¹⁴)	3.2×10 ⁻¹⁴ (9.7×10 ⁻¹⁵)	3.0×10 ⁻¹⁴ (7.9×10 ⁻¹⁵)
内訳	(a)UTC	2.8×10 ⁻¹⁵	2.8×10 ⁻¹⁵	2.8×10 ⁻¹⁵	2.8×10 ⁻¹⁵
	(b)UTC-UTC(NMIJ)	6.7×10 ⁻¹⁴	2.1×10 ⁻¹⁴	7.2×10 ⁻¹⁵	6.7×10 ⁻¹⁵
	(c)1ヶ月間の推定不確かさ	1.0×10 ⁻¹⁴ (5×10 ⁻¹⁵)			
	(d)原振の不確かさ	2.7×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)	8.5×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)	2.9×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)	2.7×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)
	(e)AOGシステム雑音	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶
分配増幅器のシステム雑音 u_2		1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶
同軸ケーブル u_3 (ケーブル長：80m)		1.1×10 ⁻¹⁵	3.8×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶
タイムインタバルカウンタの不確かさ u_{4t}		3.3×10 ⁻¹⁴	3.3×10 ⁻¹⁵	0.4×10 ⁻¹⁵	3.3×10 ⁻¹⁶
合成標準不確かさ		2.8×10 ⁻¹³ (3.4×10 ⁻¹⁴)	8.8×10 ⁻¹⁴ (2.3×10 ⁻¹⁴)	3.2×10 ⁻¹⁴ (9.7×10 ⁻¹⁵)	3.0×10 ⁻¹⁴ (9.3×10 ⁻¹⁵)
拡張不確かさ ($k=2$)		5.6×10 ⁻¹³ (6.8×10 ⁻¹⁴)	1.8×10 ⁻¹³ (4.6×10 ⁻¹⁴)	6.4×10 ⁻¹⁴ (2.0×10 ⁻¹⁴)	6.0×10 ⁻¹⁴ (1.9×10 ⁻¹⁴)

表10 GPS common-view法における測定の不確かさ

不確かさの成分	シングルチャネル GPS受信機			マルチチャネル GPS受信機			
	基線長50km	基線長500km	基線長 1600km	基線長50km	基線長500km	基線長 1600km	
UTC(NMIJ)の不確かさ u_1	3.2×10 ⁻¹⁴ (9.7×10 ⁻¹⁵)						
内訳	(a)UTC	2.8×10 ⁻¹⁵					
	(b)UTC-UTC(NMIJ)	6.7×10 ⁻¹⁵					
	(c)1ヶ月間の推定不確かさ	1.0×10 ⁻¹⁴ (5×10 ⁻¹⁵)	1.0×10 ⁻¹⁴ (5×10 ⁻¹⁵)				
	(d)原振の不確かさ	2.7×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)	2.7×10 ⁻¹⁴ (3×10 ⁻¹⁵)				
	(e)AOGシステム雑音	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶				
分配増幅器のシステム雑音 u_2	1×10 ⁻¹⁶	1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	< 1×10 ⁻¹⁶	
GPS common-view法の不確かさ u_{4c}	< 7.6×10 ⁻¹⁴	< 1.2×10 ⁻¹³	< 4.6×10 ⁻¹³	< 4.2×10 ⁻¹⁴	< 6.0×10 ⁻¹⁴	< 2.5×10 ⁻¹³	
合成標準不確かさ	8.19×10 ⁻¹⁴ (7.63×10 ⁻¹⁴)	1.19×10 ⁻¹³ (1.16×10 ⁻¹³)	4.65×10 ⁻¹³ (4.64×10 ⁻¹³)	5.24×10 ⁻¹⁴ (4.33×10 ⁻¹⁴)	6.80×10 ⁻¹⁴ (6.12×10 ⁻¹⁴)	2.49×10 ⁻¹³ (2.47×10 ⁻¹³)	
拡張不確かさ ($k=2$)	1.64×10 ⁻¹³ (1.53×10 ⁻¹³)	2.38×10 ⁻¹³ (2.31×10 ⁻¹³)	9.30×10 ⁻¹³ (9.28×10 ⁻¹³)	1.05×10 ⁻¹³ (8.67×10 ⁻¹⁴)	1.36×10 ⁻¹³ (1.23×10 ⁻¹³)	4.89×10 ⁻¹³ (4.94×10 ⁻¹³)	

表11 周波数校正の校正・測定能力

種類	校正の形態	校正範囲	校正・測定能力 ($k=2$)		
周波数	持ち込み校正	1, 5, 10, 100 MHz	周波数測定法		2×10^{-13}
		5, 10 MHz	時間間隔測定法		1×10^{-13}
	遠隔校正	5, 10 MHz	シングルチャネル GPS受信機の場合	基線長50km	1.7×10^{-13}
				基線長500km	2.4×10^{-13}
				基線長1600km	9.3×10^{-13}
			マルチチャネル GPS受信機の場合	基線長50km	1.1×10^{-13}
				基線長500km	1.4×10^{-13}
				基線長1600km	4.9×10^{-13}

4. おわりに

産業技術総合研究所において実施している周波数供給サービスの現状の概要を紹介した。特に、遠隔校正は、2005年より提供開始している。遠隔校正は、顧客の校正器物を運搬することなく、また、高頻度の校正が実施できることから顧客にとって利便性が高く、顧客サイトの標準器が比較的安価で安定度が優れたものでなくても、不確かさの小さい校正サービスに活用することができ、今後の校正形態として大いに期待されているものである。

参考文献

- 1) E. F. Arias : Report of the BIPM Time section for the period 2004-2006, CCTF/06-26, CCTF 2006.
- 2) <http://kcdb.bipm.org/appendixB/default.asp> (BIPM web site)
- 3) D.W.Allan, M.A.Weiss : Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite, 34th Annual Frequency Control Symposium, pp.334-346, May 1980.
- 4) D.W.Allan and C.Thomas : Technical directives for standardization of GPS time receiver software, Metrologia, Vol.31, pp.69-79, 1994.
- 5) BIPM time section, Circular T.
- 6) Victor S. Zhang : Time and Frequency Transfer Using GPS, 30th NIST Time and Frequency Metrology Seminar, June 2005.
- 7) 日本測地学会編著, 「第9章 誤差要因」, 新訂版GPS - 人工衛星による精密測位システム -, 日本測量協会, pp.211-238, 1989.