

5-2 日本標準時発生・計測システム

5-2 *Generating and Measurement System for Japan Standard Timer*

花土ゆう子 今江理人 栗原則幸 細川瑞彦 相田政則 今村國康
 小竹 昇 伊東宏之 鈴山智也 中川史丸 清水義行
 HANADO Yuko, IMAE Michito, KURIHARA Noriyuki, HOSOKAWA Mizuhiko,
 AIDA Masanori, IMAMURA Kuniyasu, KOTAKE Noboru, ITO Hiroyuki,
 SUZUYAMA Tomonari, NAKAGAWA Fumimaru, and SIMIZU Yosiyuki

要旨

本稿では、通信総合研究所(CRL)における標準時発生・計測システムの概要を紹介する。現在稼働中のシステムは、主要部の二重化により信頼性が向上し異常時対応も迅速になったが、その後の機器の向上などにより、より高精度なシステムも実現可能になってきている。現在、新庁舎への移転を機に新システムの開発を進めている。新システムでは、水素メーザーの導入による短期安定度の向上、多チャンネルDMTDの導入による時刻差計測データの精度向上など、これまでのシステムからの大幅な改良が計画されている。

This article introduces the current and future systems for the standard time generating and measurement system at the CRL. The features of these current working systems compared with the former ones are dual redundancy in the main part. It is effective to improve reliable and rapid reaction to emergency situations. We are going to move the system to a new building next year and renew the current system on this opportunity. The new system will have many improvements such as an introduction of a hydrogen maser or multi-channel DMTD system, which enables it to realize a higher performance.

[キーワード]

協定世界時, 日本標準時, 計測システム, 水素メーザー, DMTD
 UTC(Coordinated Universal Time), JST(Japan Standard Time), Measurement system, Hydrogen maser, DMTD(Dual Mixer Time Difference System)

1 はじめに

日本標準時 JST (Japan Standard Time) は、協定世界時 UTC (Coordinated Universal Time) +9 時間として定義される。UTC は国際度量衡局 BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) が世界中の原子時計を合成して決定するものであるが、リアルタイムにその時刻が各国に送られるわけではない。一般的に各国の標準時は、その国の標準機関が発生する UTC (k) (k は機関略称) を元に作られる。日本では CRL が国家標準機関としてこの役割を担ってきた。CRL は、自局の原子時計及び標準時発生・計測

システムにより UTC に準拠する時系 UTC (CRL) を発生し、これが JST の元となりラジオやテレビの時報の基準となる。

標準時発生・計測システムにはある意味特殊な性格がある。例えば、時刻の管理においてはデータの連続性が重要な意味を持つ。つまり稼働状態に入ったシステムを安易に止めることはできない。また、一度出力された時刻は修正することができない。つまり発生した異常をさかのぼって修復することはできない。このことからシステム構築の際には、主機能だけではなくシステムの信頼性及び長期運用の容易性などが、非常に重要な要素となってくる。時には品質よ

りも信頼性を重視してシステムを構築する場合もあり得る。

日本標準時発生・計測システムは、1976年度に1世代目のシステムが稼働してから数えて、現在のものは4世代目になる。第1世代のシステムは、小金井本所一名崎送信所の時計相互の時刻差測定をTV同期信号仲介法と呼ばれる方法で実現し、ミニコンと呼ばれるプロセス制御コンピュータでシステム制御を行っていた。その後、GPSを用いた高精度時刻比較の開始(1984年)などの拡張を経て、1987年から運用を開始した第2世代のシステムは、複数の原子時計による実時間合成原子時方式の導入、GPIB制御下の高性能な測定機器の導入などにより、現在までのシステムの骨格を築いた。1995年から運用を開始した第3世代のシステムでは、ネットワーク接続による分散処理と通信機能の活用・データ処理解析の容易化等により、大幅な省力化を実現した [1]。

4世代目のシステムは、1999年秋より運用を開始し、現在に至る。システム主要部を完全二重化することにより、信頼性を高め異常時対応の迅速化を図った。このシステムは長波標準電波

送信所(以後、「長波局」と略す。)にも配備されている。さらに現在、2003年末新設予定の新庁舎への移設を機に、5世代目となる新システムを開発中である。このシステムは、標準時原振として水素メーザーの導入、新規開発した多チャンネルDMTD (Dual Mixer Time Difference System)の導入、システム主要部の三重化といったハード面の刷新に加え、標準時発生・制御部アルゴリズム変更やデータベースシステムの導入といったソフト面での改良も、多数予定されている。

本稿は、2でJST発生の仕組みについて簡単に述べ、3で現在の4世代目システムの概要を紹介、4で5世代目となる新システムの計画概要を紹介する。

2 JSTはどう作られるか?

最初に、JST発生の仕組みを紹介する。図1に、CRL小金井本所及び長波局における、標準時発生過程のブロック図を示す。

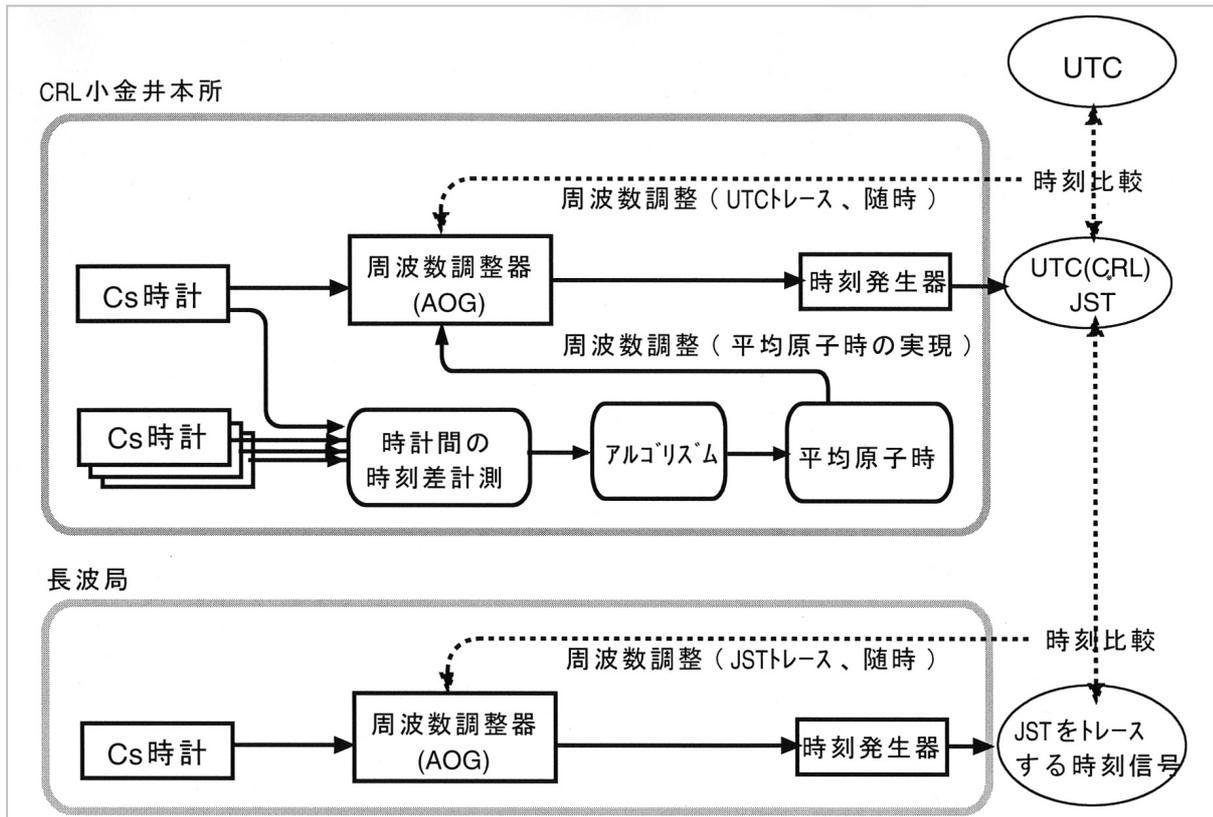


図1 CRL 小金井本所及び長波局における標準時発生過程

2.1 CRL本所における標準時発生

日本標準時は、CRL小金井本所にあるセシウム原子時計群の平均時刻(平均原子時)から作られる。平均原子時は、セシウム原子時計同士の時刻差データから計算される。平均原子時の詳しい計算方法は、本特集号**5-1**を参照されたい。平均原子時は計算値でしかないので、実信号として取り出したいときには、一つの時計を周波数調整することにより、平均原子時に合う信号を作り出せばよい。ただ、原子時計そのものを人為的に調整するのは原子時計の独立性上好ましくないため、実際には原子時計を原振とする周波数調整器(AOG: Auxiliary Output Generator)を用意し、これを調整することで平均原子時の実信号を発生させる。実信号としては、周波数の標準となる5MHz又は10MHz、1秒の標準となる1ppsを発生する。

この実信号により刻まれる時刻をUTC(CRL)と呼ぶ。この名称は、協定世界時UTCに合うようにCRLが発生する時刻、という意味である。UTC(CRL)を時差分の9時間シフトさせたものがJSTである。UTC(CRL)とUTCとの時刻差は、BIPMの発行するレポートCircular-Tにより毎月1回報知されるので、この値を参照しながら随時

UTC(CRL)の調整を行っている。

2.2 長波局における標準時発生

UTC(CRL)及びJSTはCRL小金井本所で作られるが、標準電波の基準となる時刻信号は、2局の長波局において発生している。長波局の詳細は本特集号**5-3**で紹介されるので、ここではCRL本所と長波局の時系の関係のみ簡単に述べる。

標準時として長波局から通報されるのは、長波局のセシウム原子時計から作られる時刻である。長波局の時系発生システムは、CRL本所と同様、セシウム原子時計及び周波数調整器AOGから成る。ただし、本所とは異なり自局内での平均原子時計計算は行っていない。長波局の時刻は、GPSコモンビュー法及び衛星双方向時刻比較法により常時高精度に監視され、UTC(CRL)及びJSTに同期するよう現地にて随時調整される。UTC(CRL)と各長波局との時刻差は100ns以内に保たれている。

3 現在の標準時発生・計測システム

CRL小金井本所における、現在の標準時発生・計測システムの概要を図2に示す。基本的に

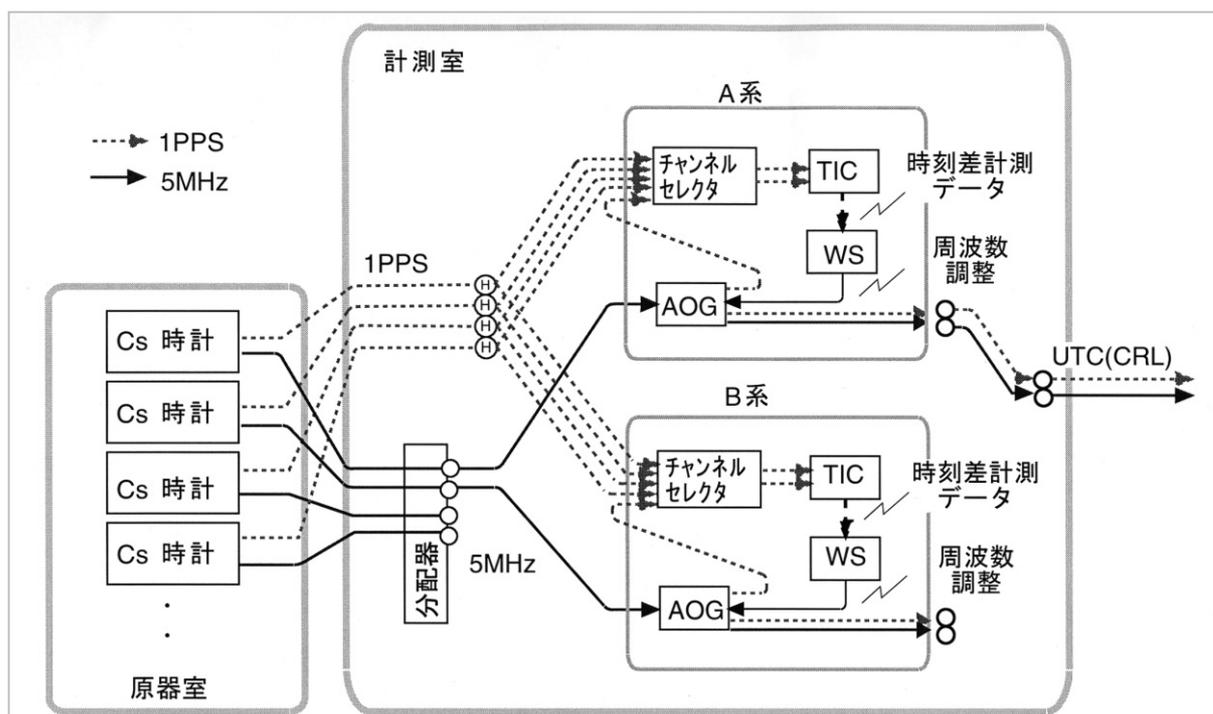


図2 現在の標準時発生・計測システム (4世代目)

TIC : タイムインターバルカウンタ、WS : ワークステーション

は2.1の構成に準ずる。以下に各部の機能を説明する。

3.1 構成

12台のセシウム原子時計の中から安定度の良いものを選び、周波数調整器AOGの原振とする。AOGの出力がUTC(CRL)の元信号となる。AOGから発生するのは、時刻同期用に用いられる1pps及び基準周波数として用いられる5MHzだけである。時刻信号(1pps各パルスの名前付け)は、NTPサーバ、電話回線による標準時供給システム(テレホンJJY)及び標準電波の送信信号発生装置などの2次装置において発生する。AOGの周波数は、平均原子時に沿うように1日1回自動調整される。また、UTCに50ns以内で同期するよう必要に応じ調整される。

平均原子時は、セシウム原子時計同士の時刻差データから計算される。各時計の1ppsを多チャンネルセレクタに入力、これを順次切替えタイムインターバルカウンタで全時計ペアの時刻差(位相差)を計測する。すべての計測制御及びデータ保存は、各系1台のワークステーションが担当する。各機器はGPIB又はRS232Cで制御される。システム全体の時刻は、ワークステーション時刻をNTPで制御することにより管理している。

セシウム原子時計出力分配後の発生・計測経路は、ワークステーションも含めて二重化されている。これをA系・B系と呼ぶ。外部に供給するUTC(CRL)の信号はこのうちの一方から取得する(現用系)。他方は予備系となる。二重化された経路のどこで異常が発生しても、UTC(CRL)の取得口を切り替えるだけで、正常なUTC(CRL)を迅速に供給することができる。

3.2 運用

時計間の時刻差計測は、UTC0時から4時間ごとに実施している。12台のセシウム原子時計だけでなく変動モニターしたい時計なども計測に加えるため、現在時計のペア数は200以上にも及び、計測には12分程度を要している。この計測データのうちUTC0時のデータを用いて平均原子時を計算し、その値に基づいてAOGの周波数が自動調整される。計測及び計算はA系・B系

の各々が同様に行う。A系とB系は対等であり、通常どちらかの系を現用として使用する。現用系のどこかに異常が発生した場合、直ちにUTC(CRL)の取り出しを予備系に切り替える。この場合、切替えによりUTC(CRL)に時刻差が生じるのを極力抑えるため、両系の時刻は常時数ns以内で同期するよう調整されている。両系の計測データは互いにバックアップ保存されている。

セシウム原子時計は恒温室を兼ねたシールドルーム(原器室)に設置される。セシウム原子時計のステータス及び5MHzの位相変動、AOGの位相同期状態、等は常時監視され、異常はメールで担当者に通知される。また環境データとして、原器室、計測室の温度湿度が4時間ごとに計測される。これらのリモート監視体制に加え、担当者による現場点検が毎日実施されている。停電対策としては、原器室・計測室全体が無停電電源化されているほか、標準時発生にかかわる機器(セシウム原子時計、AOG、分配増幅器)については更にDCバッテリーによるバックアップを有している。

UTC(CRL)は、GPSコモンビュー法や衛星双方向時刻比較法により、定常的に他機関との国際比較が行われている。これらの時刻比較データ及び5日ごと(MJD末尾が4.9の日)のUTC0時の時計間時刻差データがBIPMに送付され、TAI計算のデータとして活用される。BIPMはUTC-UTC(k)(kは機関名)の時刻差を毎月1回発行する(Circular-T)ので、この値を元にUTCとの時刻差が50ns以内となるよう、UTC(CRL)を調整する。こちらは自動調整ではなく必要に応じ担当者が手動で調整を行う。平均原子時の構成時計抜けに伴う影響でUTC(CRL)が大きく変動する問題があったが、現在ではその原因も判明し、改良後の平均時計算プログラムを予備系で運用している(本特集号5-1参照)。

4 新標準時発生・計測システム

標準時発生・計測システムは、建物(本所3号館)の老朽化のため新しい庁舎への移設が決まった。新庁舎(本所ネットワーク時刻認証棟)は2003年末に完成予定であり、システムは2004年度内に移設する予定である。この移設を機にシ

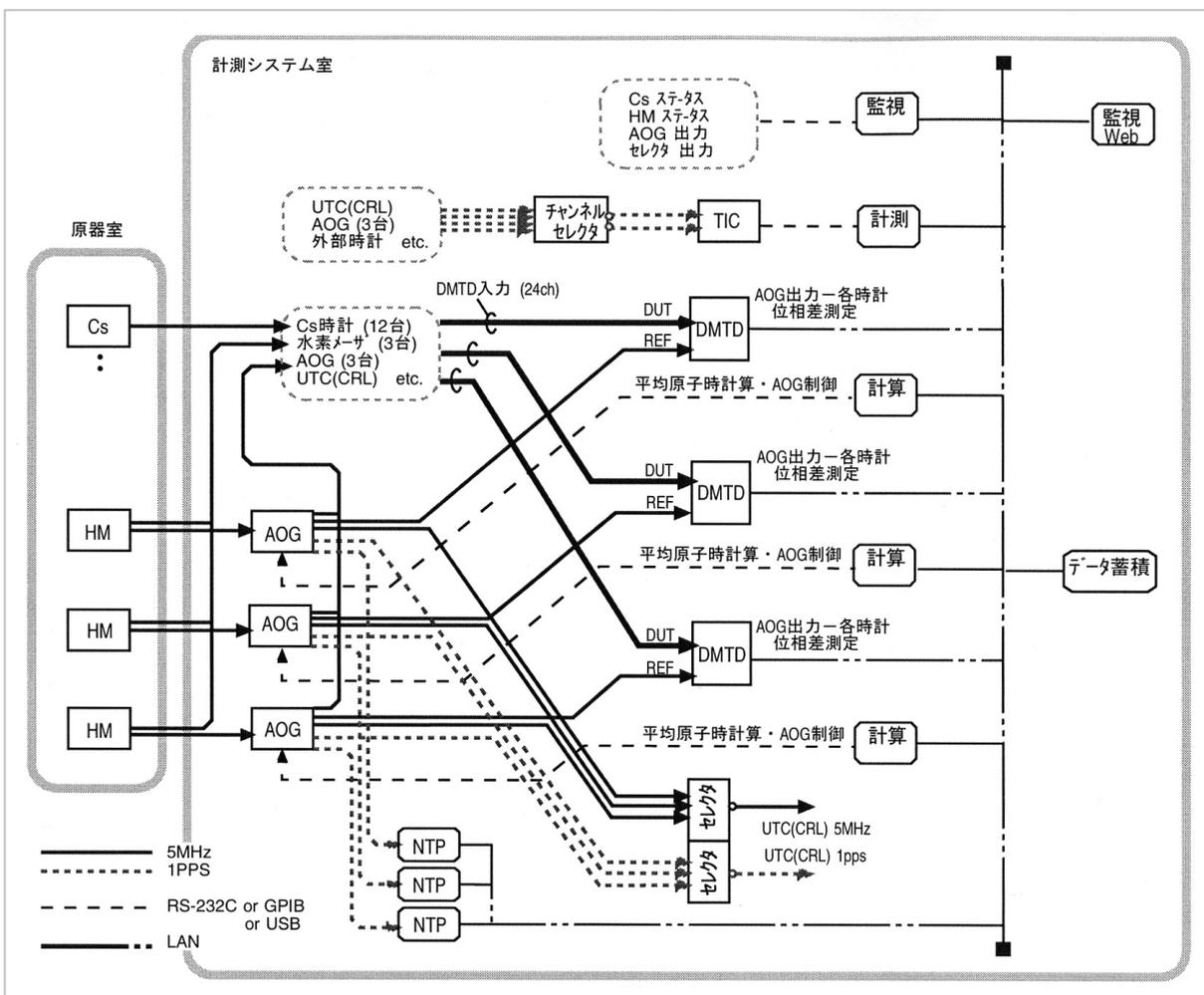


図3 新標準時発生・計測システム（5世代目）

Cs：セシウム原子時計、HM：水素メーザー、TIC：タイムインターバルカウンタ

システム自身も刷新することになった。新システムでは、周波数安定度としては30日で 2×10^{-15} 程度、時刻精度としてはUTCと10ns以内の同期を目標とする。新標準時発生・計測システムの構成案を図3に示す。基本的には現システムと同様、2.1で述べた構成に準ずる。現システムからの変更点やシステム構築上の留意点に着目しながら、以下に概要を紹介する。

(1) 標準時の原振を水素メーザーに

UTC (CRL) の原振をセシウム原子時計から水素メーザーに変更する。これは短期安定度の向上が目的である。図4に各種原子時計の安定度を示す[2]。 $\tau=5$ 日 ($\sim 4 \times 10^5$ s) より短期では水素メーザーの安定度がセシウム原子時計を上回っている。(ここでのセシウム原子時計とは実用機種 Commercial Cesium を指す。)ただしそれ以降で

はセシウム原子時計の安定度が勝るため、短期では水素メーザー、長期ではセシウム原子時計と、 τ の区間により参照する原子時計を切り替

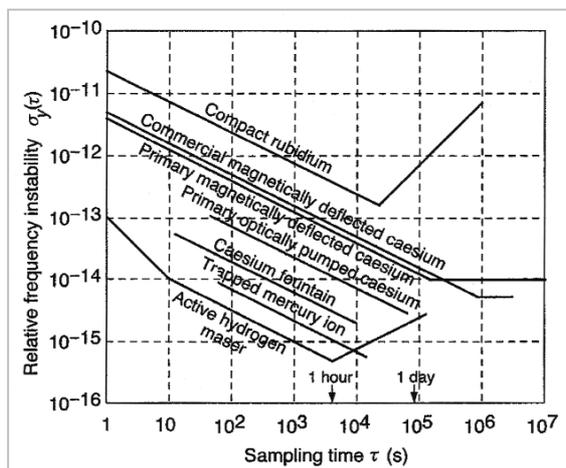


図4 各種原子時計の周波数安定度[2]

えて、より安定度のよい時系の実現を目指す。標準時計算・調整方式にも大幅な変更が必要となるので、新アルゴリズムの研究も併せて進めている。システム全系として装備される原子時計は、セシウム原子時計12台、水素メーザー3台の予定である。

(2) 多チャンネルDMTDによる5MHz位相差計測

時計間の時刻差計測において、従来の1pps位相差計測を5MHz位相差計測に変更する。測定周波数を上げることにより計測精度の向上が期待できる。また計測装置も、タイムインターバルカウンターからDMTD方式[3]-[5]に変更する。今回、各時計間の時刻差データを同時に取得するため、多チャンネルDMTDを開発した。平均原子時の計算においては、時計間の時刻差はすべて同時に取得されたものとして扱う。だが現状では、並列計測ができないためすべての時刻差データを同時に取得することはできない。もし計測の最中に各時計がドリフトすると、時計のふるまいを正しく把握できなくなってしまう(現状では、計測順番の最適化により、平均時計

算に用いる時計ペア計測に要する時間を30秒程度に抑えてあるので、ドリフトレート 2×10^{-13} の時計の誤差は6ps程度である。だがこの誤差は、計測に要する時間に比例して増大する。)多チャンネルDMTDによる同時計測であればこのような危険を回避できる。

DMTDの回路図を図5に示す。レファレンスとしてはAOGの5MHzを、DUT(Device Under Test)入力としては各時計の5MHzを入力し、双方をDDS(Direct Digital Synthesis)方式シンセサイザーで発生した共通ローカル信号により1kHzにビートダウンしてから位相差を測定する。計測データは毎秒ごとに出力される。平均原子時の計算には数時間おきの時刻差データで十分であるが、毎秒の計測データは計測値の異常検出に有効である。計測データは1秒間に500回までの平均も可能であり、現システムの1ppsワンショット計測に比べ測定精度の向上が期待できる。 $\tau = 1$ 秒で $1 \sim 2 \times 10^{-13}$ のシステム雑音を実測できる見込みである。

(3) 信頼性の強化

現システムでは1台のワークステーションがす

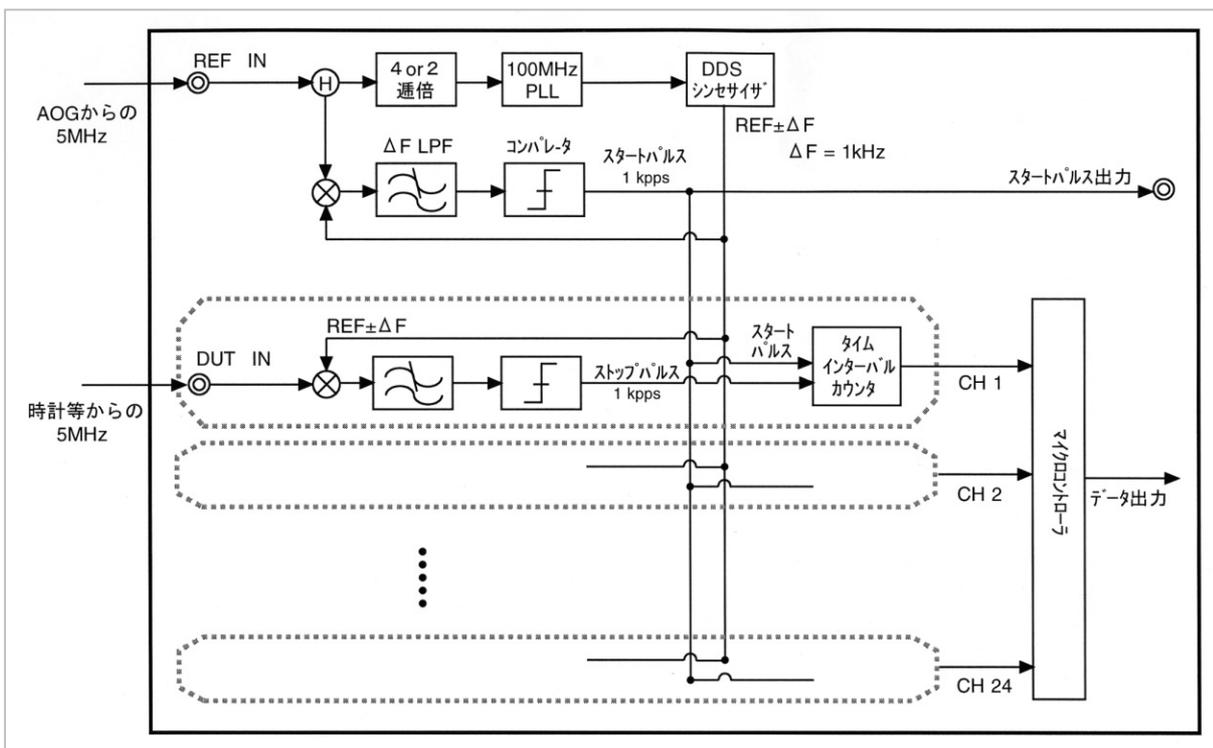


図5 DMTD回路図

すべての機能を担っていたが、新システムでは複数のPCに機能を分散させることで信頼性を高める。ワークステーションからPCに移行することで、機種依存性の高いOSから汎用性の高いOS (Windows、Linux)に移行が可能になり、将来の運用に対する柔軟性も増した。

システム主要部は現在の2系統から3系統に増設される。この中から多数決により最も安定な系を選ぶことができる。システム時刻管理についても、NTPサーバーを3系統装備する。

監視機能については、従来の項目(温湿度、セシウム時計のステータス、AOGステータス)に加え、DMTD入力信号及びDMTD自身のステータス、AOG出力信号、セレクタ出力信号(UTC(CRL))の品質、の監視を追加した。監視の主項目を表1に示す。監視項目はWeb表示され、現場から離れた場所でもほぼリアルタイムに情報を得ることが可能となる。システムの異常はWeb表示されると同時にメールで担当者に通知される。

表1 監視の主項目リスト

セシウム原子時計ステータス
水素メーザーステータス
AOGステータス
各室温湿度
AOG出力モニター
セレクター出力モニター
DMTD計測異常

(4) 系の切替え時におけるUTC(CRL)の連続性
システム多重化においては、切替え時のデータの連続性に注意しなければならない。現システムでは、A系・B系は、自系の測定データを用いて平均原子時を計算している。この場合、計算材料の時計は同じであっても測定機器が異なるため、両系の計測データ及び計算結果は厳密には別物である。つまり現システムにおいては、UTC(CRL)出力をA系からB系に切り替えた時、UTC(CRL)の連続性がとぎれることになる。新システムでは、3系統で測定したデータの中から

一つを選び、3系統ともこの計測データを用いて平均原子時を計算する。この方式により、系を切り替えたときでもUTC(CRL)の連続性は原理的に保たれることになる。

(5) UTC自動トレース

UTC-UTC(CRL)の時刻差に関して、これまでは担当者が手動で調整していたが、新システムでは自動調整により10ns以内(将来的には1~2ns以内)のUTC同期を目指す。BIPMによるUTC-UTC(CRL)時刻差の報告値は約一月遅れでしか判明しないため、同期精度を上げるには、UTC(CRL)の安定度向上と変動推定が必要となる。これらは新アルゴリズムの一環として研究を進めている。

5 まとめ

CRLは長年にわたり日本標準時を維持運用してきた。これを支える発生・計測システムにおいては、故障しないこと、万一故障しても復旧が簡単かつ速やかに行えること、将来の拡充や改良が可能であること、システムが複雑になりすぎてブラックボックス化しないこと、などの条件を考慮しなければならない。4世代目(現在のシステム)におけるシステムの完全二重化は、最小限の処置でできるだけ広範囲の異常を迅速にカバーするための措置であった。また5世代目(新システム)における計算機構成も、信頼性と将来に対する柔軟性を考慮した結果である。これはハード面だけではなく、アルゴリズム開発のようなソフト面においても重要な観点と思われる。また、自動化をどこまで進めるか、の線引きも難しい。異常時対応を考えるとケーススタディが困難であり、どこまで機械に判断させるか、という問題になる。例えば、異常時の出力切替えの最終判断は、新システムにおいても人が介在する方式になった。信頼性重視の一例といえる。

4世代目にあたる現在のシステムは、システムの二重化などの改良はあるが、ほぼ3世代目の方式を踏襲している。これに比べて5世代目となる新システムでは、セシウム原子時計とは性質の異なる水素メーザーの導入、新規開発した多チ

チャンネルDMTDによる計測、システム多重化の影響を受けないデータベースの作成など、多数の大幅な変更が予定されている。現システムとの連続性も含めた十分なテストののち移行する

予定である。

最後に、日本標準時が長年にわたり品質を保ちつつ運用されてきたのは、多数の関係者による不断の努力の賜であることを追記しておきたい。

参考文献

- 1 相田政則, "時刻周波数標準の発生, 維持, 供給 5.1 発生と公表の自動化システム", 通信総合研究所季報, Vol.45, No.1, pp.51-58, 1999.
- 2 Audoin. C. and Guinot. B., "The Measurement of Time", Cambridge University Press, pp.148, 2001.
- 3 小宮山牧児, "周波数と時間の計測法", 電波研究所季報, Vol.29, No.149, pp.39-53, 1983.
- 4 Allan, D. W., "The measurement of frequency and frequency stability of precision oscillators", NBS Tech. Note 669, May, 1975.
- 5 Allan, D. W. and Daams, H., "Picosecond time difference measurement system", Proc. 29th Annu.Symp. Frequency Control, pp.404-411, May, 1975.



花土ゆう子

電磁波計測部門時間周波数計測グループ主任研究員
ミリ秒パルサータイミング計測、原子時アルゴリズム



今江理人

電磁波計測部門時間周波数計測グループリーダー
周波数標準、特に精密時刻比較



栗原則幸

電磁波計測部門日本標準時グループリーダー
周波数標準、空間計測



細川瑞彦

電磁波計測部門原子周波数標準グループリーダー 理学博士
原子周波数標準、時空計測



相田政則

企画部企画室主任研究員
周波数時刻標準



今村國康

電磁波計測部門日本標準時グループ主任研究員
周波数標準



小竹 昇

電磁波計測部門日本標準時グループ研究員
時間・周波数標準



伊東宏之

電磁波計測部門原子周波数標準グループ研究員 博士(理学)
原子周波数標準



鈴木智也

電磁波計測部門日本標準時グループ研究員 博士(工学)
時間・周波数計測

中川史丸

電磁波計測部門時間周波数計測グループ専攻研究員 博士(理学)
衛星測位、衛星時刻比較

清水義行

電磁波計測部門日本標準時グループ特別研究員

時間・周波数標準の発生と供給／日本標準時発生・計測システム