

3-2 日本標準時の分散化

3-2 Decentralization of Japan Standard Time

中川史丸 花土ゆう子 後藤忠広 藤枝美穂 成田秀樹 松原健祐

齊藤春夫 伊東宏之 今村國康 水野道明 岸 浩司 田渕 良 土屋 茂

Fumimaru NAKAGAWA, Yuko HANADO, Tadahiro GOTOH, Miho FUJIEDA, Hideki NARITA, Kensuke MATSUBARA, Haruo SAITO, Hiroyuki ITO, Kuniyasu IMAMURA, Michiaki MIZUNO, Koji KISHI, Ryo TABUCHI, and Shigeru TSUCHIYA

日本標準時を生成・供給している情報通信研究機構（NICT）時空標準研究室では日本標準時の更なる高度化を目的に、日本標準時分散化の研究開発を進めている。標準時分散化は標準時生成・供給に関するシステムを日本各地に分散化することで、標準時の信頼性と精度の向上を目指すものである。これまで、神戸にある NICT 未来 ICT 研究所に神戸副局を整備し、分散化に必要な要素技術の開発を進めてきた。神戸副局は 2018 年 6 月に正式運用を開始、これにより現用システムがある東京で標準時の生成や供給ができない場合でも神戸から供給できる体制が整い、標準時の信頼性向上を実現させた。現在、次のステップとして精度の向上を目指し、分散化に適した時系生成アルゴリズムの研究や、遠隔地への高精度時刻周波数供給の研究開発を進めている。

NICT has been performing research and development of decentralization of Japan Standard Time for the purpose of the further advancement. Decentralization of JST aims at ensuring reliability and preciseness of the standard time through decentralization of system relating generation and supply. We have been developing technology necessary for decentralization of JST and established Kobe Sub-station in Advanced ICT Research Institute in Kobe. Kobe Sub-station started formal operation in June 2018. That increased reliability of JST system by implementing a backup system for the case where generation or supply of the standard time cannot be performed in Tokyo. As a next step, we are developing a new time scale algorithm for JST decentralization system and improving the precision of time frequency supply to a remote place.

1 まえがき

情報通信研究機構（NICT）で生成されている日本標準時は様々な方法で広く日本国内に供給され非常に多くの方々に利用されており、現代社会では標準時は高い信頼性と精度の両方が要求される社会インフラのひとつとすることができる。もし、自然災害等により日本標準時が止まる、あるいは間違った時刻を配信した場合、社会に計り知れない影響を及ぼすであろうことは容易に想像できる。幸いにも、これまで NICT が生成している日本標準時が止まったことはなく、また途切れることなくその精度と信頼性を維持してきた。しかし、2011 年に発生した東日本大震災の際は、標準時システム自体に影響はなかったものの、福島の高圧電波送信所からの送信を長時間停止せざるを得ない状況に陥ったことは、大きな教訓となった。

地震大国である日本においては、いつどこで被災す

るかを予測し完全な対策を施すのは容易ではない。日本標準時は長年にわたり、NICT 本部（東京都小金井市）に設置された日本標準時システムにより生成・供給されてきたが [1]、一極集中型のシステム運用を分散型にすることで、被災リスクを減らすことが期待できる。これが日本標準時分散化（分散構築）の最大の目的である。さらに日本標準時の分散化は、システムの拡張性（分散局の追加）・運用の柔軟性（複数の分散局を独立でも統合しても運用可能）においてもメリットが期待できる。

NICT 時空標準研究室では、日本標準時の更なる信頼性と精度の向上を目的に、日本標準時分散化の研究開発を進めている。本稿では、**2** で日本標準時分散化の目的及び概要、**3** で標準時分散化の研究開発について、**4** で分散化の要となる神戸副局について紹介する。

2 標準時分散化の概要と目的

分散化の対象となる標準時システムとは、日本標準時を発生・維持し、その時刻を様々な方法で供給する各システムである。それらは時刻の基となる原子時計群、標準時を発生させる標準時発生システム、原子時計や生成時系の時刻差を計測する計測システム、遠隔地の時刻差を計測する時刻比較システム、生成した時刻を配る供給システム、これらのシステムに異常がないか監視する監視システム等から構成されている[1][2]。4で述べる標準時分散化による神戸副局運用開始前は、これら標準時システムは標準電波の送信を除き、東京都小金井市にあるNICT本部にのみ設置されており(小金井本局と呼ぶ)、長時間の停電等小金井本局の運用に重大な障害が生じた場合、日本標準時生成の停止やその供給が止まるおそれがあった。

標準時分散化では、標準時システムに含まれる各システムを日本各地に分散化させ衛星等でリンクすることがその技術開発の基本となる(図1)。この際、単に小金井本局のシステムをコピーするのではなく、分散化の拠点となる各局に必要なシステムとその局に適した規模のシステムを設置し、局間の時刻比較リンクと制御監視に使用するネットワークを構築・運用することで、日本標準時の信頼性と精度の向上を目指した。運用は以下のプロセスとなる。

1. 複数の局に分散設置した原子時計を衛星仲介でリンクする。
2. 集めた全時計のデータを各局が共有する。
3. 各局が独立に合成原子時を生成する。元データを共有するのではほぼ同一の原子時系が生成される。各合成原子時を相互比較することで異常判断にも有用である。
4. 各局は、自局・他局いずれかの合成原子時を基に標準時を出力する。通常は、小金井本局の生成す

る時系を日本標準時とする。

このシステムの構築により、次の3点を実現させることが標準時分散化の研究開発の目的となる。

(1) 信頼性の向上

各地に設置された原子時計と標準時発生システムにより、日本標準時に準じた時系を生成することが可能となる。標準時の生成には原振としての原子時計のほかに長期安定度の良い複数台の原子時計により計算される合成原子時が必要になる。仮に小金井本局以外の局においても複数台の原子時計があれば、小金井本局と同じ手法により、独立した時系の生成が可能になる。これにより、例えば小金井本局で自然災害等により標準時生成ができなくなっても、別の局で標準時を生成することで、連続かつ安定した標準時の維持が可能となり、標準時の信頼性が向上する。

(2) 精度の向上

標準時発生システムにより生成される標準時の周波数安定度は、短期は周波数参照(原振)の原子時計の、長期は合成原子時の安定度に依存する。合成原子時は、時系生成アルゴリズム[3]により計算で求められるが、使用する原子時計の台数が増えるほどその安定度は向上する。しかしながらこれまでの日本標準時システムでは小金井本局の原子時計のみが利用されていた。

標準時分散化では、時刻比較リンクにより各地に設置されている原子時計間の時刻差を計測・計算できることから、リンクに接続された全ての原子時計を合成原子時計計算に組み込むことが可能になる。これにより、合成原子時の長期安定度が向上し、結果として日本標準時の精度向上につながることになる。ただし、遠隔地間の時計を合成するには、時刻比較リンク間の誤差等を考慮し分散化に適した時系生成アルゴリズムが必要になり、それらの研究開発が必須となる。

(3) 日本標準時の供給拠点の拡張

前述したように、標準時発生システムを設置した局では標準時に準じた時系の生成が可能になる。これらの局では小金井本局が使用できないときのバックアップとしてだけでなく、通常は日本標準時に非常に高い精度で同期した時系としての使用や供給も可能となる。時刻比較リンクの精度や標準時発生システムにおける制御方法に依存するが、供給拠点が增多することで、利便性や信頼性の向上が図られる。

標準時分散化は、小金井本局のコピー局を作成することで万一の事態に備えるという単純なものではなく、大元となる原子時計を分散させて設置し各局の原子時計を利用することで、信頼性と精度の両方の向上を、さらに新たな供給方法の開発を目的としている。

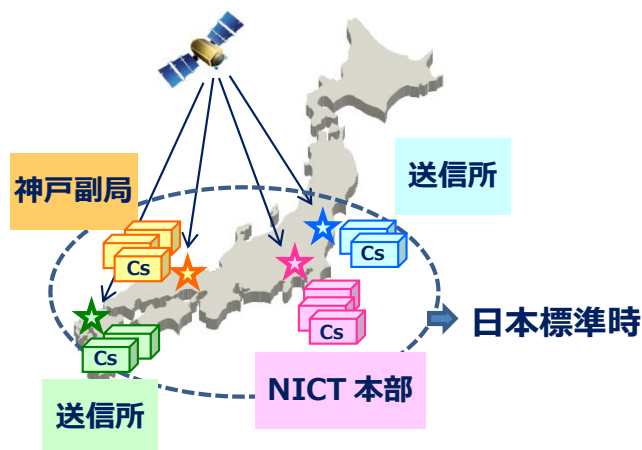


図1 標準時分散化のイメージ

3 標準時分散化の研究開発

本章では、標準時分散化の実現に向けてこれまでに実施したプロセス、これから実施する研究開発について、項目ごとに説明する。

3.1 分散局の整備

表1に標準時分散化における各局の構成を示す。小金井本部を本局とし、日本各地に分散化の拠点となる分散局を整備した。現時点の分散局は、新たに整備した神戸副局と、既に原子時計が設置されていた2つの標準電波送信所局から構成されている。

(1) 小金井本局

東京都小金井市にある NICT 本部内に設置されている、現用の日本標準時システムを、標準時分散化における小金井本局とした。本局では、標準時発生システム、供給システム等、全てのシステムから構成されており、各システムは以降構築する分散局の参考とされている。通常は本局で生成する時刻を日本標準時とし、国際時刻比較及び国内への供給サービスに使用する。

(2) 神戸副局

小金井本局に準ずる標準時副局として、新たに、兵庫県神戸市にある NICT 未来 ICT 研究所内に標準時神戸副局を開設した。規模としては本局よりやや小さいものの、本局とほぼ同じシステム構成となっており、小金井本局から標準時が生成・供給できない場合は神戸副局を現用とし標準時の生成・供給を開始する。詳細は4で述べる。

(3) おおたかどや山局、はがね山局（共に標準電波送信所）

2つの標準電波送信所では、標準周波数及び標準時の通報を目的とした電波を送信しているが[4]、その基となるセシウム原子時計が複数台設置されている。これら既存の原子時計を新たに標準時分散化に組み込

むべく、2つの送信所を標準時の分散局として使用できるように整備した。

NICT 以外の国内の各機関においても、時系維持以外を目的とした原子時計が設置されている。それらの原子時計が標準時分散化に容易に参加できるようにすることも将来的な目標のひとつである。

3.2 各局間の時刻比較リンク・データリンクの構築

標準時分散化では、各局に設置された原子時計と各局で生成した時系の全ての時刻差を知ることが最も重要となる。すなわち、全原子時計間の時刻差を得ることにより初めて、より精度の高い合成原子時が生成でき、それが日本標準時の高精度化につながる。また、全ての生成時系の時刻差を正確に計測することにより、日本標準時に対するトレーサビリティが確保でき、各局での時刻の信頼性向上につながる。そのためには、(1) 各局間の時刻差を比較する時刻比較リンクの構築、(2) 各局内の原子時計・時系の時刻差を計測する計測システム、(3) これらのデータを集約するデータベース、のそれぞれの構築が必要となる。

(1) については、GNSS (Global Navigation Satellite System) 時刻比較方式 [5] 及び衛星双方向時刻比較 (TWSTFT: Two-Way Satellite Time and Frequency Transfer) 方式 [6] を採用し、各拠点における基準時系 (局内の代表生成時系や、任意の原子時計等) 間の時刻差を定期的に計測する。各局で生成された時系は、定期的に時刻比較リンクの校正を行うことによって、そのトレーサビリティを確保している。小金井本局のみの運用では、時計間の出力する信号を直接測定器で計測可能なため、合成原子時の計算において測定系の誤差を考慮する必要はなかった。しかし、時刻比較リンクにより時計間の時刻差を算出する場合は、信号を直接計測した場合の誤差に比べてリンク誤差は極めて大きく、測定誤差を考慮した時系生成アルゴリズムの

表1 標準時分散化における各局の構成

局名	所在地	セシウム原子時計	水素メーザー	供給サービス
小金井本局	東京都小金井市	18 台	6 台	NTP TEL-JJY 光 TEL-JJY 周波数校正 タイムビジネス
神戸副局	兵庫県神戸市	6 台	2 台	NTP 光 TEL-JJY
おおたかどや山送信所局	福島県田村市／川内村	6 台	－	標準電波 (40 kHz)
はがね山送信所局	佐賀県佐賀市／福岡県糸島市	6 台	－	標準電波 (60 kHz)

※黄色は分散局

開発が必要となる。また、時刻差データの生成に遅延が生じる場合、発生システムの周波数制御の遅れが生じそれが誤差となることから、遅延と精度のトレードオフを考慮した発生システムにおける制御方法の検討が必要となる。

(2) については、局内の原子時計や生成時系との時刻差を定期的に計測するシステムである。計測対象にその局の基準時系を含めることで(1)の時刻比較とつながり、結果として全局内の原子時計の時刻差が計算により求まることになる。各局の計測システムはその局に設置される原子時計の構成により異なる。例えば小金井本局では多数の水素メーザーが設置されていることから、より精度と分解能が高いマルチチャンネルDMTDシステム(Dual Mixer Time Difference System)[7]を計測システムに採用し運用している。一方、セシウム原子時計のみが設置されているおおたかどや山局とはがね山局では、1 ppsの信号をタイムインターバルカウンターと高周波スイッチにより切り替えながら計測するシステムを設置し運用している。

(3) については、分散化専用のデータベースを構築、また各局にバックアップサーバを構築することで信頼性の向上を図っている。このデータベースに蓄積された時刻差データを元に、各局で時系が生成されている。同時に、小金井本局と各局間のネットワークが断絶した場合でも、その局内で時系を生成かつ安定運用できるように設計し準備してある。

3.3 各システムの構築

2で述べたように、標準時システムでは様々なシステムから構成されており、標準時分散化では各局に必要なシステムと規模を選択し構築されている。標準時分散化では、主に次のシステムから構成されている。

○原子時計群

すべての局に設置される。その本来の目的は各局、原子時計ごとに異なる。種類としては、主に発生システムの原振として使用される短期安定度の良い水素メーザーと、長期安定度を生かした合成原子時に使用する、また長波標準電波の標準周波数に使用されるセシウム原子時計がある。

○標準時発生システム

実際に日本標準時を発生させるのに必要となるシステム。原振である原子時計とその周波数を高分解能で調整する周波数調整器等から構成され、時系信号の生成・制御を行う。日本標準時としての運用が必要な局には設置される。

○監視システム

原子時計のステータス、各種時刻差、システムの設置された部屋の環境等を監視・記録し、異常があった

場合は通知するシステム。すべての局に設置されるが、局の構成に応じて規模が異なる。

○データベース

分散化システムは、各局がスタンドアロンでも統合化されても機能することが求められるため、情報の共有・相互比較・監視がスムーズに行える運用システムを構築し、そこで必要となるデータベースを構築した。

○供給システム

生成した日本標準時や日本標準時に準じた時刻を供給するシステム。電話回線を利用したTEL-JJY[2]や光TEL-JJY、インターネット回線を利用したNTP[8]等複数ある。

3.4 時系生成アルゴリズムの開発

日本標準時は複数台のセシウム原子時計の合成原子時を基に生成される[3]。合成原子時は原子時計間の時刻差データを基に時系生成アルゴリズムにより計算される。分散化システムにおける合成原子時アルゴリズムは、基本原理は現状のアルゴリズムと同じであるが、現状のアルゴリズムが単一の計測システム内のデータのみを用いるのに対し、標準時分散化では遠隔地の時計データも使用することとなる。その際、時刻比較リンクの誤差や計測された時計データの同時性等について考慮する必要が生じる。また、時刻比較リンクの異常により時刻飛びなどが生じた際に、いかに検知できるか、また除去・復旧するか等、分散化に適した手法の開発も必要となる。最終的には2で示した運用形態を実現する時系生成アルゴリズムの構築を目指す。これまでの成果については、4に記載する神戸副局での事例を参照いただきたい。

4 神戸副局の開設

本章では、小金井本部にある現用の標準時システムと対をなす神戸副局について紹介する。分散局の要となる神戸副局は、小金井本部が災害等により標準時の発生が停止しても、標準時生成を途切れさせず、また可能な限り連続して標準時を供給すべく、本部のシステムに準じる構成として設立を進め、2018年6月より副局としての正式運用を開始している。それぞれの局の構成の違いについては、表2を参照のこと。

副局の構築にあたり、最初に設置場所の選定を行った。本局がある東京都小金井市が自然災害等にあっても影響を受けにくく、基本インフラを確保しやすい場所であること等の条件を考慮し、兵庫県神戸市にあるNICT未来ICT研究所が選定された。

続いて、標準時システムの安定運用に必須となる原子時計や各システムを運用する恒温恒湿室、停電対策

表 2 小金井本局と神戸副局の構成

	小金井本局	神戸副局
位置づけ	・フルスペックの主局 ・定時、定常運用	・時系発生、時刻比較、供給の基本機能を備えるが、小金井本局より簡素。本局停止時は代替主局^{*1}に。 ・定時、定常運用（本局と並行運転）
	* 1 小金井本局非常時は、以下について神戸時系への切替えを行う。 ・機構法 14 条 3 項に基づき通報する「標準時」の基準を切替え ・BIPM に対する UTC(NICT) の切替え ・周波数標準局の運用に関する事項（無線局運用規則第 140 条）中の「通報される標準時」の切替え	
標準時の生成・時刻比較	・自局のみで、合成原子時 & UTC 同期時系の生成が可能。 ・衛星リンクで他局の時計も組み込むことで、統合した標準時を生成可能とする予定。	・同左（ただし、セシウム原子時計が少ない分、安定度は落ちる）。
システム構成	・セシウム原子時計 18 台 + 水素メーザー 4 台 ・計測システム：DMTD3 式 + TIC1 式 ・時系発生システム：3 重化 ・時刻比較システム：GPS3 式 + TWSTFT1 式 ・遠隔監視装置	・セシウム原子時計 6 台 + 水素メーザー 2 台 ・計測システム：TIC2 式 ・時系発生システム：2 重化 ・時刻比較システム：GPS1 式 + TWSTFT1 式 ・遠隔監視装置
供給サービス	・TEL-JJY ・光 TEL-JJY ・専用線 NTP ・公開 NTP ・タイムビジネス（計測データ公開サーバ） ・標準電波の遠隔監視・制御 ・周波数校正サービス	・光 TEL-JJY^{*2} ・公開 NTP^{*2} ・タイムビジネス（計測データ公開サーバ）^{*3} ・標準電波の遠隔監視^{*3}
	* 2：小金井本局と並列で利用可能。 * 3：冗長系	
発電機	・自家発電機（高圧 1 台 + 低圧 1 台）、運転継続 84 時間以上。	・自家発電機（低圧）、運転継続約 2 日間。

としての発動機付き発電機、原子時計や発生システム、時刻比較システム等を順次整備し、副局としての運用に必要となる技術開発を進めた（図 2）。

神戸副局は、小金井本局の予備局としての位置づけであることから、原子時計の数が本局と比べて少ない（表 1）。セシウム原子時計については、故障等も見込んで合成原子時が安定して生成できるように 6 台とし、水素メーザーも発生系のシステム数に合わせた 2 台構成となっている。さらにこの構成を考慮し、計測システムも本局で用いている DMTD システムは採用せず、一般的なタイムインターバルカウンター（Time Interval Counter：TIC）を用いたシステムとなっている。

先行して整備した原子時計や発生システム等により、副局における時系の生成を開始した。図 3、4 に時系生成の複数のプロセスを示す。動作確認を確実に行うため、段階を踏んで時系生成試験を行った。初めに、衛星仲介で計測した時刻差を基に、神戸副局にて日本標準時を高精度にトレースできるかどうかの試験（図 3 A）を行い、約 2 ns の精度を確認した。次に、分散局での時計を組み込んだ合成原子時系が順調に生



図 2 神戸副局の原子時系発生システム、計測システム、時刻比較システム

成できるかを確認するため、小金井本局を除く分散局全ての局での合成原子時系を計算し周波数安定度を比較した（図 3 B）。結果を図 5 に示す。分散局のみの時系において、短期の周波数安定度は小金井本局よりやや劣るものの、合成原子時系で重要となる長期（数日

3 日本標準時システム

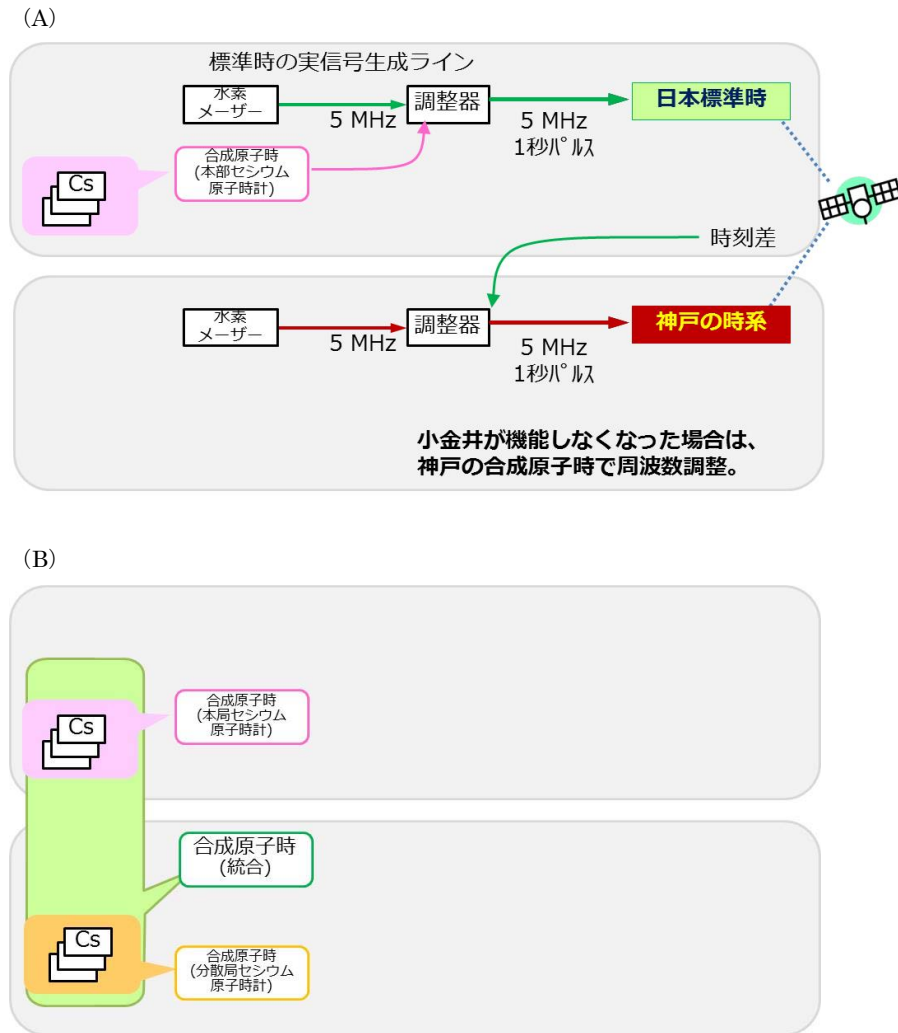


図3 小金井本局及び分散局 (神戸副局) における原子時系生成のプロセス (1)

程度)ではさほどの劣化はなく、分散局のみの時計でも安定に時系生成ができることを確認した。現在は、各局の合成原子時に基づいて原子時系を生成し、衛星仲介で時刻差を定期的にモニターしている(図4C)。最終的には、全ての原子時計の合成時系を共有する形態(図4D)に移行する予定である。次のステップとして、各種供給系の整備に着手した。供給系ではNTPサーバの設置や光TEL-JJYを設置し、これら供給系についても試験を進め、小金井本局と同等にサービスが可能であることを確認した。また、2局の標準電波送信所の監視システムも設置し、小金井本局から監視できない場合でも、神戸副局から標準電波の監視が安定してできるよう整備を進めた。あわせて、小金井本局が使用できなくなった場合の手順等も確認、文書化し、各職員が神戸副局への切り替えができるよう、訓練等も進めている、

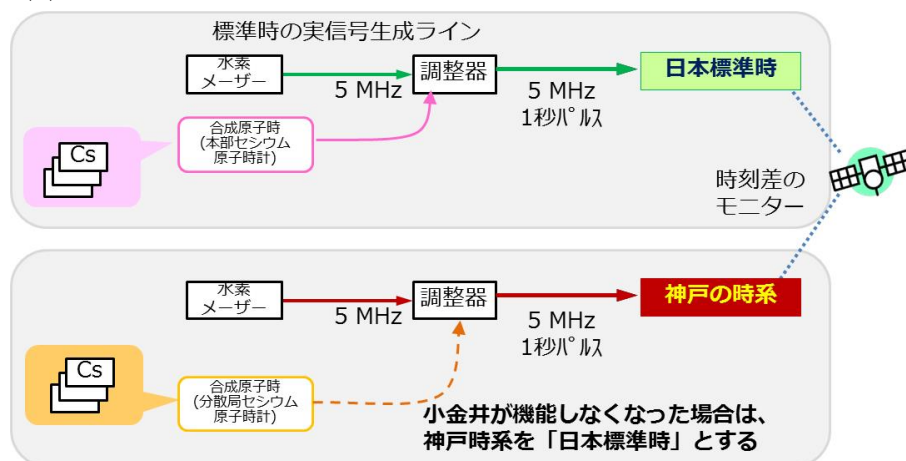
神戸の未来ICT研究所にて施設の工事設計を開始した2011年(平成23年)から約7年の整備期間を経て、2018年6月10日の時の記念日に神戸副局の正式運用

を開始し、小金井本局での標準時生成ができない場合でも、神戸より標準時を安定供給することが可能になった。

5 おわりに

これまで述べてきたように、標準時分散化は予備のシステムを作るという単純なものではなく、システムを分散化させることで、信頼性と精度の両方を向上させることを目的として研究開発を進めている。これまでに神戸副局等の整備を進め、信頼性向上については実現できた。しかしながら、残る精度の向上と高精度同期時系の供給については道半ばであり、今後も研究・開発を進めていく。また、次世代の標準時システムとして、光格子時計による標準時生成[9]の開発が進んだ場合、それらを標準時分散化に適應することも見据え、さらに日本標準時の精度と信頼性が向上することを目指していく。

(C)



(D)

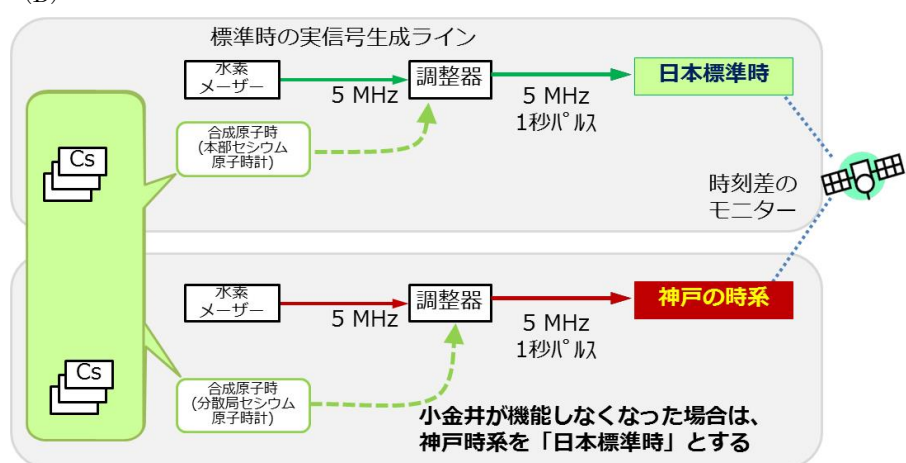


図4 小金井本局及び分散局(神戸副局)における原子時計生成のプロセス(2)

【参考文献】

- 1 中川史丸, 花土ゆう子, 伊東宏之, 小竹 昇, 熊谷基弘, 今村國康, 小山泰弘, "日本標準時システム概要と高度化," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.17-27, 2010.
- 2 今村國康, "日本標準時の運用と供給," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.87-95, 2010.
- 3 花土ゆう子, 今江理人, 相田政則, 細川瑞彦, 伊東宏之, 中川史丸, 清水義行, "原子時計決定アルゴリズム," 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.145-156, 2003.
- 4 栗原則幸, "長波標準電波," 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.167-173, 2003.
- 5 瀧口博士, 小山泰弘, 市川隆一, 後藤忠広, 石井敦利, Thomas Hobiger, "VLBI および GPS による時刻比較," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.239-247, 2010.
- 6 前野英生, 藤枝美穂, 相田政則, 李 廷魚, 田淵 良, 雨谷 純, "定常衛星双方向時刻比較," 情報通信研究機構季報, vol.56, nos.3/4, pp.173-181, 2010.
- 7 F. Nakagawa, M. Imae, Y. Hanado, and M. Aida, "Development of multi channel dual mixer time difference system to generate UTC (NICT)," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol.54, no.2, pp.829-832, 2005.
- 8 今村國康, 後藤忠広, 金子明弘, 今江理人, 栗原則幸, "ネットワークによる時刻供給," 通信総合研究所季報, vol.49, nos.1/2, pp.203-212, 2003.
- 9 H. Hachisu, F. Nakagawa, Y. Hanado, and T. Ido, "Months-long real-time generation of a time scale based on an optical clock," Scientific Reports, vol.8, 4243, 2018.

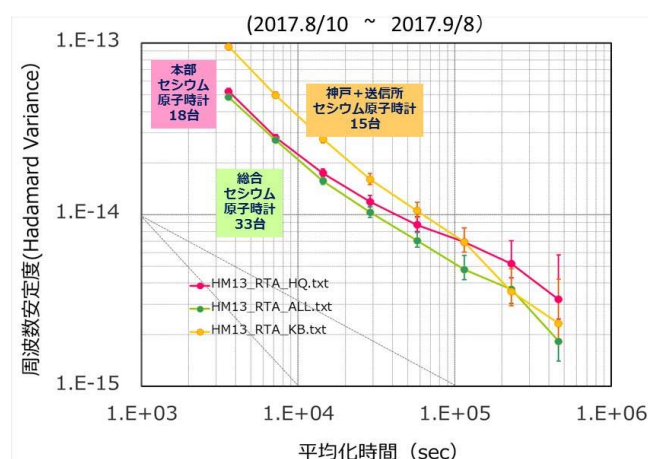


図5 各種合成原子時計の周波数安定度比較

謝辞

神戸副局の開発・整備にあたり、未来 ICT 研究所の企画室、また管理グループの皆様に御協力を頂いたことに、感謝の意を表する。



中川史丸 (なかがわ ふみまる)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
時間周波数標準、時刻比較

伊東宏之 (いとう ひろゆき)

総務省
国際戦略局
技術政策課
技術企画調整官
博士(理学)
周波数標準、レーザー分光

花土ゆう子 (はなど ゆうこ)

電磁波研究所
上席研究員
博士(工学)
時刻・周波数標準、高精度計測



今村國康 (いまむら くにやす)

電磁波研究所
時空標準研究室
標準時、周波数標準

後藤忠広 (ごとう ただひろ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(工学)
時刻比較、精密軌道決定

水野道明 (みずの みちあき)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員
時間・周波数標準

藤枝美穂 (ふじえだ みほ)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
博士(理学)
精密時刻比較、光ファイバ周波数伝送

岸 浩司 (きし こうじ)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員
時間・周波数標準



成田秀樹 (なりた ひでき)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員
時間・周波数標準

田淵 良 (たぶち りょう)

電磁波研究所
時空標準研究室
有期研究技術員



松原健祐 (まつばら けんすけ)

電磁波研究所
時空標準研究室
研究マネージャー
博士(理学)
周波数標準、標準時、レーザー分光



土屋 茂 (つちや しげる)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
時間・周波数標準



齊藤春夫 (さいとう はるお)

電磁波研究所
時空標準研究室
マネージャー
時間・周波数計測