

4-3 衛星双方向方式

4-3 Two Way Satellite Time and Frequency Transfer

今江理人 鈴山智也 後藤忠広 瀧谷靖久 中川史丸 清水義行
栗原則幸

IMAE Michito, SUZUYAMA Tomonari, GOTOH Tadahiro, SHIBUYA Yasuhisa,
NAKAGAWA Fumimaru, SHIMIZU Yoshiyuki, and KURIHARA Noriyuki

要旨

衛星双方向時刻比較法は、時刻周波数比較法の中で最も高精度で比較することができる方式の一つとして研究開発や実用化への諸策が進められている。本論文では、国際原子時(TAI)の高度化へ向け、通信総合研究所(CRL)で進めている衛星双方向時刻比較法に関する活動、すなわち、多チャンネル方式時刻比較装置やアジア太平洋地域衛星双方向時刻比較網などに関して紹介する。

Two Way Satellite Time and Frequency Transfer (TWSTFT) is one of the most precise time transfer methods. Its developments and technical attempts for practical uses are under progress. This paper presents the research and development activities performed in CRL, such as development of multi-channel modems for TWSTFT and construction of the TWSTFT network in the Pacific Rim region.

[キーワード]

時刻比較, 衛星双方向時刻比較, 国際原子時

Time transfer, Two way satellite time and frequency transfer, International atomic time

1 はじめに

時間・周波数標準は各種標準の中でも最も正確(確度、安定度共に)な標準量であり、世界のトップレベルの一次周波数標準器では $1\sim 2\times 10^{-15}$ の確度が実現されている[1]。我が国においても、本特集別稿で述べられているように、通信総合研究所(CRL)や独立行政法人産業技術総合研究所でセシウム原子泉方式一次周波数標準器を開発中であり、国際的に見ても高いレベルでの確度実現が期待されている[2]。

一方、時刻の発生・維持には、全世界約50機関で稼働中の合計200数10台のセシウム原子時計と水素メーザー型周波数標準器などの相互比較結果を利用している。これを基準とし、上記一次周波数標準器の確度データで周波数微調整がなされて、最終的にはパリ郊外に設置されている国際度量衡局(BIPM)において国際原子時(TAI)が決定される[3]。

これらの一次周波数標準器相互間の比較や国際原子時構築のための時刻比較手段としては、1980年代初頭からGPS Common-view法が主力手段として用いられてきた[4]–[6]。図1は1990年代初頭までの国際時刻比較ネットワークを示したものであるが、すべてGPS一周波C/A code単一チャンネル方式が用いられていたことが分かる。

しかし、近年の一次周波数標準器の確度向上やTAIに用いられる原子時計の性能向上に伴い、従来のGPS Common-view法では比較精度としては不十分であり、1990年代後半になると、より精度の高い時刻比較法の研究開発の必要性がCCTF(国際度量衡委員会傘下の時間周波数諮問委員会)やITU-R(国際電気通信連合無線通信セクター)等の国際的な場で唱えられるようになった。各国の時間周波数標準研究機関では時刻比較手段の高精度化に向け、主に

- (1) 通信衛星を中継とした双方向伝送時刻比較法(衛星双方向時刻比較法)

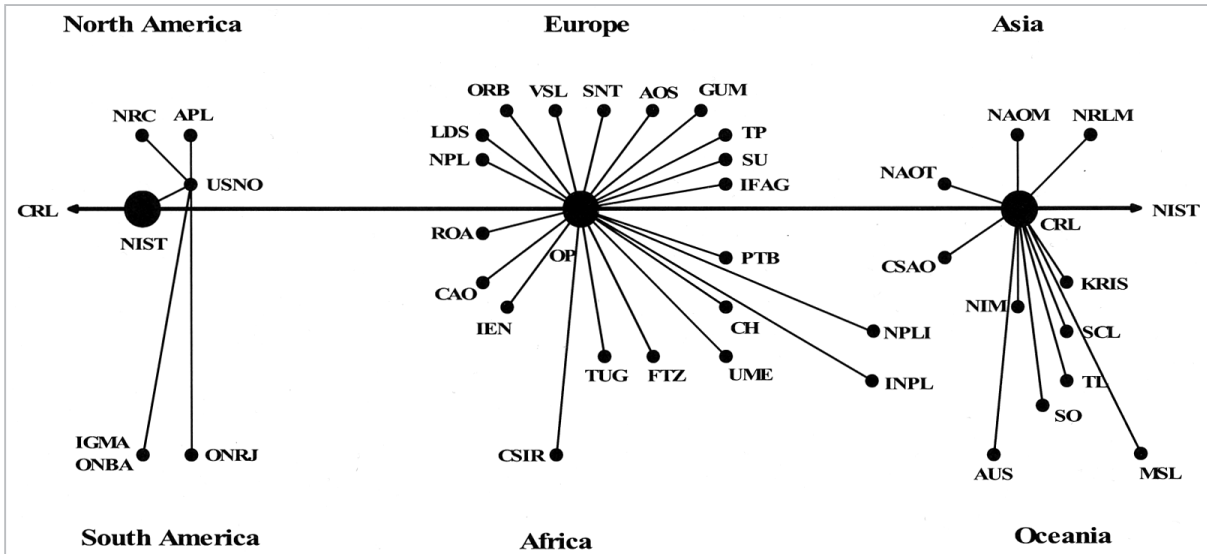


図1 1990年代初めまでのTAI構築のための国際時刻比較ネットワーク(比較手段は、1周波1channel GPS common-view方式のみ)

(2) GPS時刻比較法の高精度化
 の2方式について精力的に検討された。その結果、

現在の国際時刻比較網では図2に示すように複数の時刻比較手段が併用された形態となっている[7]。

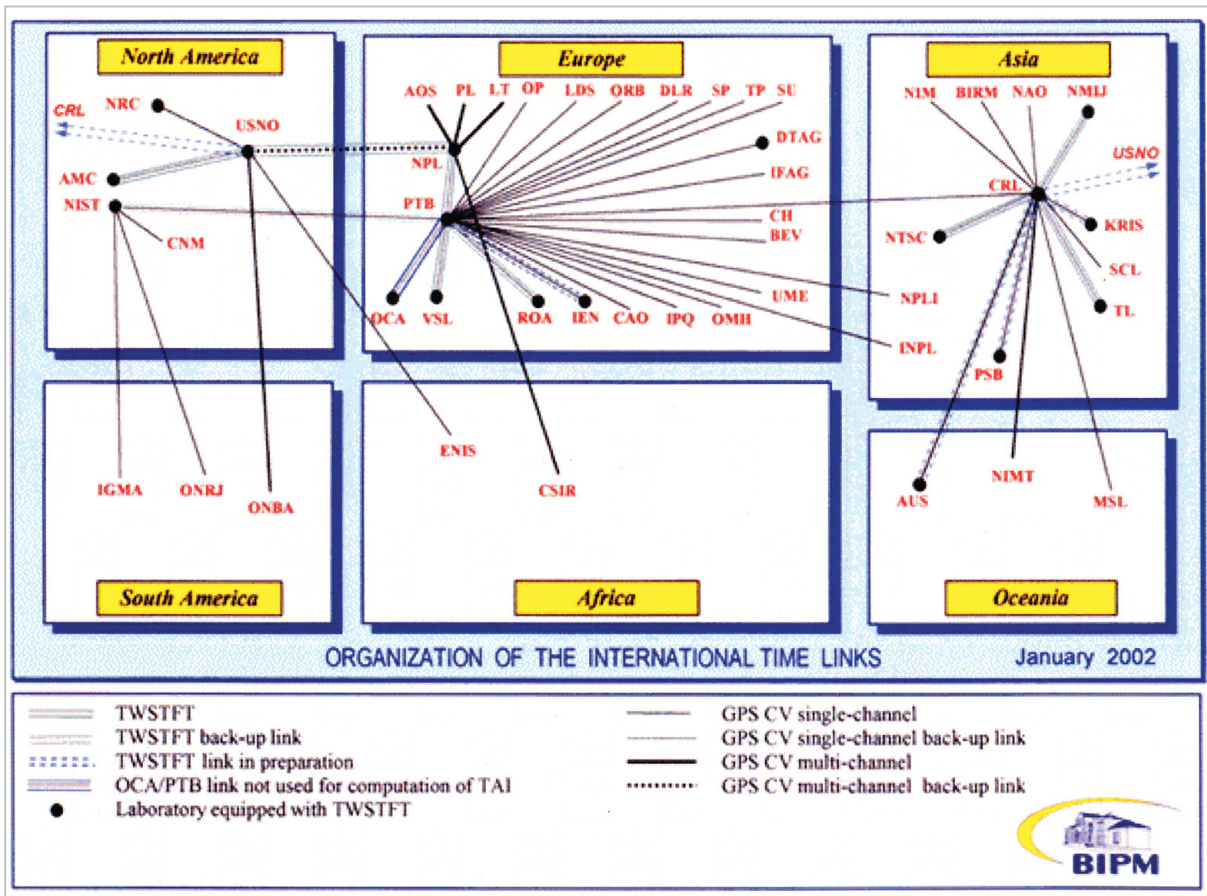


図2 2002年1月現在のTAI構築のための国際時刻比較ネットワーク(BIPMのWebサイトより。比較手段は、1周波1channel GPS common-view法、同マルチチャンネル法、衛星双方向が混在)

本論文では、CRLで進めている衛星双方向時刻比較法に関して紹介を行う。

2 衛星双方向時刻比較法の経緯

衛星双方向時刻比較法は、方式自体は1970年代中頃に実現されたものであるが、時刻比較精度1ns程度を実験的に実現させた、当時としては画期的な方式である。基本的原理等は本特集号別稿に譲る[8]。この高い比較精度のおかげで、同比較法を利用した相対論効果の一つであるサニャック効果の検証などがなされている[9]。

しかしながら、衛星双方向時刻比較法は精度としては他の方式に比べ数段優れているものの、GPS Common-view法の方がシステム構築が簡易で、かつコストパフォーマンスが高いため、1990年代までは実用化、特にTAI構築のための国際時刻比較網への適用には至らなかった。

3 衛星双方向時刻比較法の課題

近年のGPS Common-view法の限界へ達するほどの原子時計の高精度化に伴い、より精度の高

い比較方法として衛星双方向時刻比較法が見直されてきた。1990年代中頃からは欧米を中心として研究開発や実用化システムとしての確立が進められている。欧米の数機関では1998年頃から1週間に3回(1回当たり対向で2分間)の衛星双方向時刻比較セッションが実施されている[10]。その比較精度はサブnsレベルであり、1日に100観測近く行うマルチチャンネルGPS Common-view法に比べても格段に高精度の結果が得られている。

しかしながら、従来の衛星双方向時刻比較法も万能ではなく、

- ①運用コストが高い。
- ②同時に複数の局と比較できない。
- ③信号経路が送受信で同一でない部分の変動は相殺されない。

という課題がある。このうち②は従来の衛星双方向時刻比較装置が送受1ユニットのシングルチャンネルにしか対応していないからである。多数の局で行うためには測定時刻をずらさなければならず、そのために比較を同時に行うだけでなく、衛星回線の占有時間もかかるため、①をさらに増大させることにもつながる。また、③は

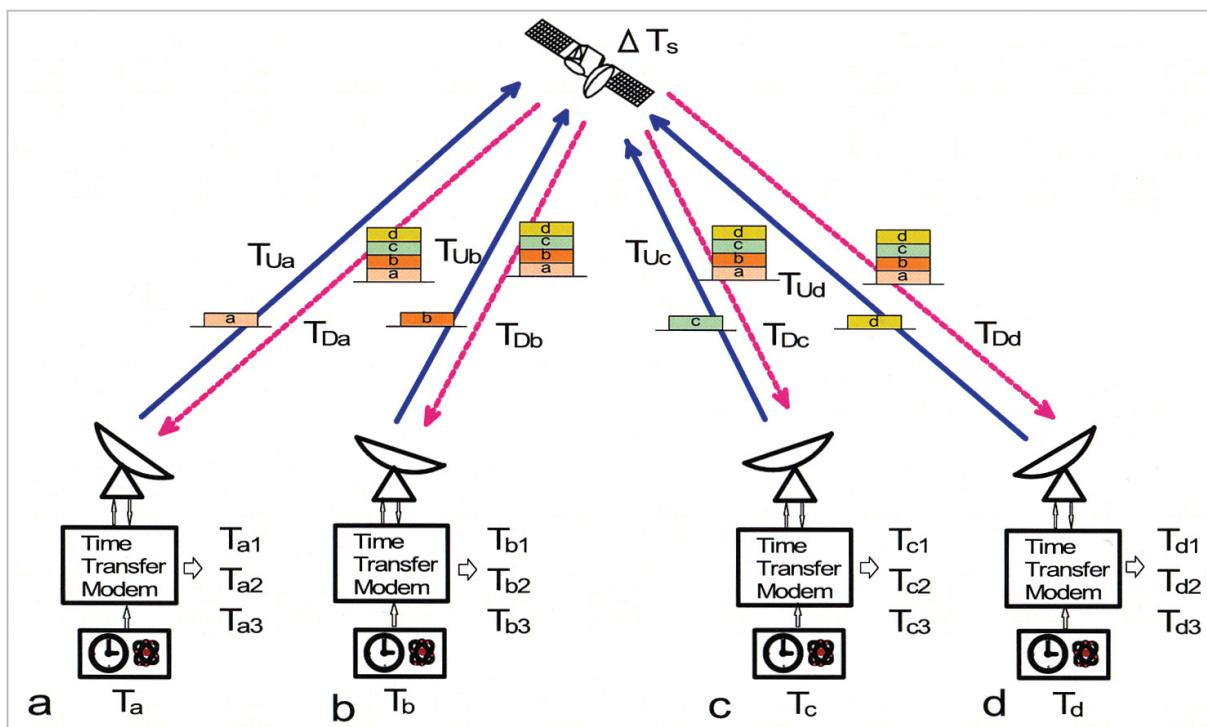


図3 マルチチャンネル方式衛星双方向時刻比較装置の多地点同時時刻比較の概念図

参加する各局で異なるPN符号で変調して送信する(CDMA)ことにより同時に時刻比較が可能。

衛星地球局内の遅延量についてキャリブレーションが必要であるというだけでなく、運用中の変動についても問題になるということを意味している。

次節で述べるマルチチャネル衛星双方向時刻比較装置は、上記の課題の多くを解消することを目的としてCRLで独自に開発を進めたものである。

4 多地点同時時刻比較等マルチチャネル時刻比較装置の開発^[11]

本装置は、図3に概念図を示すように、複数の地上局から同時に時刻比較用信号を送信する。送信信号は、各局異なる擬似雑音符号(PN code)で変調されるため、同一帯域を用いることができる。各局の信号は衛星上で重畳され地上へ伝送される。各地球局では複数の受信チャネルを用い、重畳された各局の信号に対して各チャネルが各相手局からの信号を局ごとに分離して処理し到来時刻を測定する。

これにより参加するすべての局の間の時刻比較を同時に行うことができる。すなわち、図3の例では、A-B、A-C、A-D、B-C、B-D、C-Dのすべての組合せの比較を同時に行うことができる。

このため、前節で記した①、②の課題を軽減することができ、特に、時刻比較の同時性を実現できることは、非常に意義が大きい。

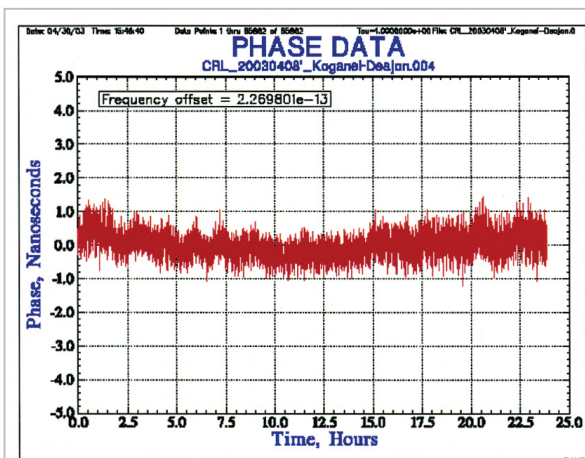
これを可能にしたのが図4に示した装置である。同装置は、表1に示す諸元を有しており、送信系2チャネル、受信系8チャネルで、原理的には一つの衛星中継器で同時に9局の比較を行うことができる。ただし、受信系2チャネルは地球局局内遅延時間変動測定に使用することを想定しているため、同時に比較できる最大局数は7局となる。



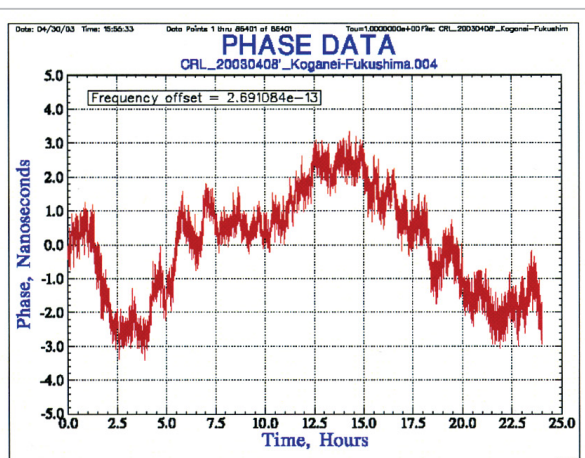
図4 マルチチャネル方式衛星双方向時刻比較装置の外観。送信2チャネル、受信8チャネルを装備。

表1 マルチチャネル時刻比較装置の諸元

拡散変調部channel数	2 channels
相手局との時刻比較用	1 channel
地球局内送受信系遅延時間変動	1 channel
逆拡散復調部channel数	8 channels
時刻比較用	6 channels
地球局内送受信系遅延時間変動測定	2 channels
変調方式	PN符号による直接方式スペクトル拡散変調
変調用PN符号クロック周波数	2.0475 MHz
変調用PN符号長	4095 bits
動作(時刻比較)可能回線品質	> +45 dB Hz
時刻比較精度	< 0.5 ns(受信回線品質に依存)
時刻比較頻度	1回/秒
通信機能	PN符号に重畳して取得データを参加局へ伝送
遠隔制御機能	インターネットを用いて遠隔地から制御可能



(a) CRL小金井(水素メーザ) vs. 韓国KRISS(水素メーザ)



(b) CRL小金井(水素メーザ) vs. おおたかどや山標準電波送信所(セシウム原子時計)

図5 マルチチャンネル方式衛星双方向時刻比較装置による3局(CRL小金井、韓国KRISS、CRL おおたかどや山標準電波送信所)間時刻比較結果

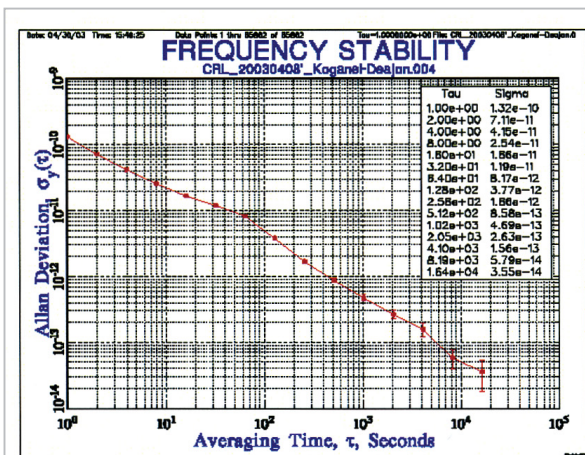
図5は、同装置を用いてCRL本所(東京都小金井市)、韓国標準科学研究所(KRISS; 大田市)、CRLおおたかどや山標準電波送信所(福島県)の3局間の時刻比較結果を示すものである。CRL本所とKRISSでは水素メーザ型周波数標準器を基準時計として用い、おおたかどや山標準電波送信所では、セシウム原子時計が基準時計として用いられた。

また、図6は同比較結果の周波数安定度を示している。これらの図を見ると、特にCRL本所-おおたかどや山標準電波送信所間の結果から、平均化時間数百秒以上では、両局の基準時計、

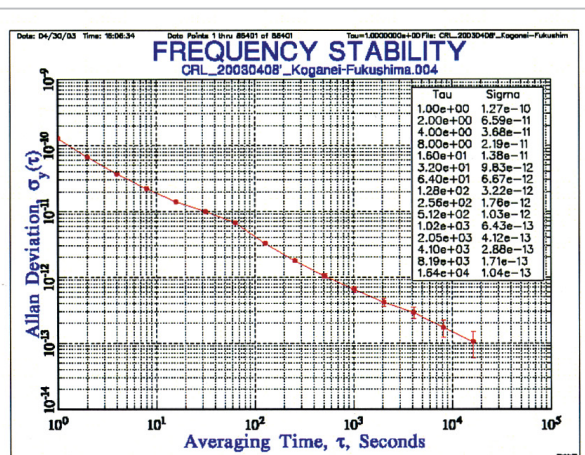
特に、送信所のセシウム原子時計の雑音特性が検出できていることが分かる。一方、CRL本所-KRISS間の結果から平均化時間10000秒で4~5×10⁻¹⁴の周波数比較が実現できており、1週間程度で10⁻¹⁶位の比較が可能であろうと期待できる。

5 アジア太平洋地域衛星双方向時刻比較ネットワークの構築

CRLは、産業技術総合研究所やアジア太平洋地域の主要時間周波数標準研究機関との共同で、衛星双方向時刻比較ネットワークをアジア太平



(a) CRL小金井(水素メーザ) vs. 韓国KRISS(水素メーザ)



(b) CRL小金井(水素メーザ) vs. おおたかどや山標準電波送信所(セシウム原子時計)

図6 前図の周波数安定度

洋地域の構築を進めている。すなわち

- ・INTELSAT衛星(平成14年度よりPAS-8へ移行)を用いた、日豪(CRLとオーストラリアNML)間
- ・JCSAT-3衛星(現在JCSAT-1B衛星へ移行)を用いた、
 - ①日中間(CRLと中国陝西天文台(現NTSC):平成10年10月末より)
 - ②国内間(CRLとつくば計量研究所(現産総研; NMIJ):平成11年3月末より)
 - ③台湾間(TL:平成12年6月より)

の時刻比較実験を各週2回の頻度で定期的に行っている。TAIへ貢献するためにこれらの結果をBIPMへ提供を開始したところ、BIPMでは同法によるデータと従来のGPS Common-view法によるデータとを比較して処理した結果として、上記の頻度でも衛星双方向時刻比較の方がGPS Common-view法よりも優れていることが明らかとなり、平成14年1月から、CRL-NTSC、CRL-TL、CRL-NMIJの結果が正式にTAIの計算に組

み入れられるようになった。

また、衛星双方向時刻比較ネットワークの拡大のため、韓国(KRISS)及びシンガポール(SPRING)の各機関との間で双方向時刻比較の準備を進め、現在予備実験を行っている。図7は、現在(平成15年3月末)におけるアジア太平洋地域の衛星双方向時刻比較ネットワークの現状を示している。特に、韓国KRISSとの回線では短期安定度に優れた水素メーザー標準器を両局とも基準時計として利用できるため、現在はCRL-KRISS間をマルチチャンネル時刻比較装置のためのテストベッドとして活用している。

6 まとめ

高精度時刻比較は原子周波数標準の開発ほどは脚光を浴びる研究課題ではないが、遠隔地の周波数標準の間の比較を行い、原子周波数標準の優れた安定度・確度を実証し、国際原子時へ貢献していく上で必須の技術である。

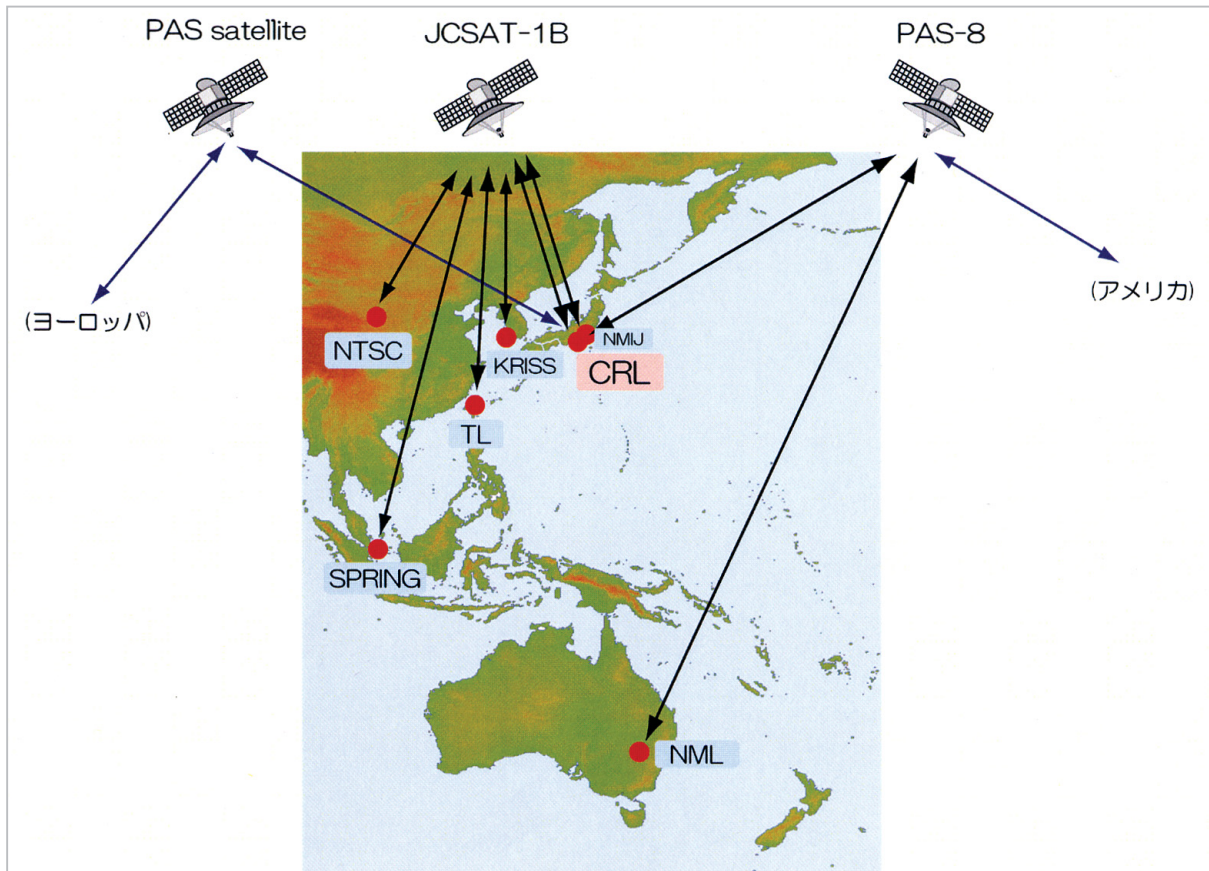


図7 アジア太平洋地域衛星双方向時刻比較ネットワークの現状

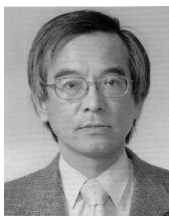
本稿では、主に衛星双方向時刻比較法に関して、国際原子時への寄与を中心に最近の研究開発の動向や現状の性能などについて紹介した。当該技術は電気通信や衛星測位基盤技術へも応用が図られつつあり、社会基盤を支えるものと

しても重要性が高い。

今後、より精度の向上や利便性の向上など、高精度時刻比較技術の高度化を目指し、研究開発を進めていきたい。

参考文献

- 1 S. Jefferts et. al. , "Accuracy evaluation of NIST-F1 ", Metrologia, Vol.39, 321-336, 2002.
- 2 黒須行, 福山康弘, 柳町真也, 古賀保喜, "原子泉方式のセシウム時間／周波数標準器", 光アライアンス, Vol.14, No.9, 35-38, 2003.
- 3 BIPM; "Annual Report of the BIPM Time Section", Vol. 10, 1997.
- 4 D.W. Allan and M.A. Weiss, "Accurate Time and Frequency Transfer During Common-View of a GPS Satellite", Proc. Freq. Cont. Symp. 334-346 ,8-MAY-80 192, 1980.
- 5 D.W. Allan, D.D. Davis, M.A. Weiss, A.J. Clements, B. Guinot, M. Granveaud, K. Dorenwendt, B. Fischer, P. Hetzel, S. Aoki, M.-K. Fujimoto, L. Charron, and N. Ashby, "Accuracy of International Time and Frequency Comparisons Via Global Positioning System Satellites in Common-View", IEEE Trans. Instr. Meas. 34 118-125, 1985.
- 6 D.W. Allan, "National and International Time and Frequency Comparisons", Proc. IEEE Freq. Cont. Symp. 55-60, 1983.
- 7 BIPM Web site, <http://www1.bipm.org/en/scientific/tai/tai.html>
- 8 今江, "時間周波数比較法の基礎", 本特集.
- 9 Y.Saburi, M.Yamamoto, and K.Harada, "High-Precision Time Comparison via Satellite and Observed Discrepancy of Synchronization", IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-25, No.4, 473-477, 1976.
- 10 J.Azoubib, D.Kirchner, W.Lewandowski, P.Hetzel, W.J.Klepczynski, D.Matsakis, T.Parker, H.Ressler, A.Soering, G.de Jong, F.Baumont, and J.A.Davis, "Two-Way Satellite Time Transfer Using INTELSAT 706 On A Regular Basis: Status and Data Evaluation", 30th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Applications and Planning Meetings: 30, 1999.
- 11 今江 理人, 後藤 忠広, 鈴山 智也, 澁谷 靖久, 中川 史丸, 田淵 良, "Time Transfer Modem for TWSTFT Developed by CRL", Proc. of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2002 (ATF2002), 2002.



いま え みち と

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



すま やま とも なり

鈴山智也

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



ごとう ちひろ
後藤忠広

電磁波計測部門時間周波数計測グループ
研究員
GPS 時刻比較



しば やすひさ
澁谷靖久

電磁波計測部門日本標準時グループ

なかがわ ひろまる
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

しみず よしゆき
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



くり はらのりゆき
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