

原子時系発生システムの高度化に関する研究

花土 ゆう子

電気通信大学大学院情報システム学研究科  
博士（工学）の学位申請論文

2008 年 6 月

# 原子時系発生システムの高度化に関する研究

## 博士論文審査委員会

主査 加藤 聰彦 教授

委員 本多 弘樹 教授

委員 曾和 将容 教授

委員 福地 一 教授

(首都大学東京)

委員 李 還幫 客員准教授

著作権所有者

花土 ゆう子

2008

# A study for upgrading of an atomic timescale generating system

Yuko Hanado

## Abstract

An atomic time scale is a time scale generated by an atomic clock. In practice, an atomic time scale is usually obtained by averaging many atomic clocks within a special generating system. Quality of hardware and methodology of data processing of this system directly affect on the quality of the time scale.

In this study, we present a combined solution of upgrading a generating system of atomic time scale through improvements of a Japan Standard Time (JST) generating system. There are two aspects for improving a JST generating system, that is, hardware improvement and software improvement. In hardware improvement, we developed a new generating system, while in software improvement, we investigated and improve a time scale algorithm which is of how to compute JST time scale from several atomic clocks.

The presented solution is with a new JST generating system and includes various upgrading. First, hydrogen masers were introduced for improving short-term frequency stability. Second, a newly developed measurement device achieves extremely high measurement precision. Moreover, a data processing program automatically removes

data from a measurement device that works in unfavorable conditions. This new JST system started a regular operation in 2006. We confirmed that quality of JST was highly improved by this new system.

To improve the JST time scale algorithm, unexpected large rate changes of JST time scale were investigated and solved. In our approach, we investigated their causes by checking the equations of time scale algorithm. After determining the causes, solutions were searched both theoretically and by simulations. As a result, we found the solutions for each problem and confirmed their efficiency by computer simulation.

In conclusion, using the proposed solution, we highly improved Japan Standard Time system and achieved an atomic time scale with high quality.

# 原子時系発生システムの高度化に関する研究

花土 ゆう子

## 概要

原子時系とは原子時計に基づいて刻まれる時刻である。天文観測から得られる時系に代わり、世界の標準時として使われるようになった。原子時系は通常多数の原子時計を合成して得られるが、その発生システムの良し悪しにより、出力結果である原子時系の品質が大きく左右される。本論文では、原子時系の一つである日本標準時の発生システムを対象とし、より品質の高い原子時系を得るための方法を探求した。

日本標準時は、情報通信研究機構（NICT）内の原子時計群を合成して作られる。このように作られた原子時系を平均原子時と呼ぶ。正確さ・安定性・信頼性を兼ね備えた日本標準時を維持するには、発生システムにおいてハードウェア・ソフトウェア双方が高い品質を保持していなければならない。本研究においては、ハードウェア面からのアプローチとしては日本標準時発生システムの新規設計開発を、ソフトウェア面からのアプローチとしては日本標準時の基となる平均原子時計算アルゴリズムの改良研究を、それぞれ課題とした。

新システム開発においては、短期安定度、計測精度、信頼性の向上を目標とした。

まず、日本標準時実信号の源として短期安定度に優れる水素メーザーを新たに導入することで、短期安定度が一桁以上向上した。水素メーザーの導入にあたり、従来のカウンタによる計測法では精度が不足することが判明したため、専用計測装置として 24ch-DMTD 装置（DMTD5）を新規開発した。この装置で可能になった多チャンネル同時観測によりタイミングずれによる計測誤差が解消され、また DMTD 方式の特色である分解能拡大の効果により、計測精度を従来に比べおよそ一桁向上することができた。DMTD5 は、高精度である反面、計測中断が起きると位相の連続性が失われやすいという弱みがあるため、DMTD5 計測とカウンタ計測を合成する処理プログラムを新たに開発した。この処理により、カウンタ計測の信頼性と DMTD5 計測の高精度の双方を活かすことができる。またこの処理プログラムには、多数決原理により故障装置のデータを自動排除するプロセスも組み込まれており、計測の信頼性向上に貢献している。

新システムは、2006 年 2 月より定常運用を開始した。運用開始後の実測データにより

日本標準時の評価を行い、旧システム時代に比べ、周波数の短期安定度、UTC への同期精度、信頼性が明らかに向上したことを確認した。

時系アルゴリズムの研究においては、日本標準時で実際に発生した問題への対応を通して、現状のアルゴリズムの問題点を洗い出し、解決を図った。

問題の一つは、日本標準時のもととなる平均原子時の計算から時計が 1 台抜けた場合、平均原子時自身に大きなレート変動が起きることであった。基本の計算式に戻って調査したところ、各時計のレート計算式が時計の近々の変動を反映しにくい形であり、レート推定誤差が累積しやすいことが原因と判明した。解決策として、時計の変動を反映しやすいレート計算式を採用することにより、時計抜けによる平均原子時のレート変動を抑えることに成功した。さらに、いくつかの妥当な近似と仮定を取り入れることにより、時計抜けによる時系レート変動量を推定する理論式を新たに導いた。

もう一つの問題は、個々の時計のレート急変動により日本標準時に大きなレート変動が生じることであった。解決には、異常時計を検知し計算から一時的に除くことができれば良いというシンプルな発想に基づき、各時計のレート変動検知機能をアルゴリズムに導入した。検知方法及びパラメータ設定については、理論的考察とシミュレーションによる確認を行い、最適な方法と値を模索した。

試行錯誤の中で、異常時計の検知排除においては各時計の重みづけも併せて検討する必要がある、ということが判明した。数学的に最適と思われる重みづけを用いた場合、異常時計の影響が大きくレート変動検知機能も有効に働かない。これは、この重みづけがノーマルな時計を仮定した場合の最適解であり、異常時計がある場合には最適と言えなくなるため、と思われる。シミュレーションと理論的考察を重ね、異常時計がある場合に適する重みづけを確定し採用することとした。

最終的に最も効果的と思われる方式を適用し、日本標準時と同じ条件でシミュレーションを行ったところ、時系の変動抑制に非常に有効であることが確認できた。この方式は、近々日本標準時運用の正規プログラムに適用される予定である。

結論として、新日本標準時発生システムの開発によって、日本標準時における周波数安定度、UTC への同期精度、および信頼性は明らかに向上した。また、時系アルゴリズム改良に関しては、時計抜けまたは個々の時計のレート急変動に起因する日本標準時のレート変動を抑えるための改良を行い、日本標準時の周波数長期安定度を改善した。原子時系発生システムの高度化および高品質な原子時系の長期的な維持のためには、ハードウェア・ソフトウェアの両面において、条件や目的に応じた最適な方法を探求し続けることが必要である。

# 目次

## 第1章 はじめに

1.1	原子時系の誕生	1
1.2	世界の状況	1
1.3	日本の状況	2
1.4	日本標準時の概要	2
1.5	原子時系発生システムの研究	3
1.6	本論文の研究内容と構成	4

## 第2章 各種時系と標準時

2.1	はじめに	6
2.2	時系とは	6
2.3	時系の分類	6
2.3.1	計測対象による時系の分類・天文時、物理時、放送時	7
2.3.2	作り方による時系の分類・積算時と力学時	7
2.3.3	固有時と座標時	7
2.4	種々の時系	8
2.4.1	太陽時と恒星時	8
2.4.2	世界時 UT と UT1	8
2.4.3	歴表時 ET	9
2.4.4	天体力学計算に使われる時系・TDT、TDB、TT、TCG、TCB	9
2.4.5	国際原子時 TAI	10
2.4.6	協定世界時 UTC	11
2.5	標準時に関する歴史的な流れ	11
2.5.1	標準時採用への動き	11
2.5.2	秒の定義の変遷	12
2.5.3	TAI、UTC の確立	13
2.6	標準時発生、利用、管理の仕組み	13
2.6.1	TAI の発生	13



2.6.2	UTC の発生	14
2.6.3	各機関における標準時の発生	14
2.6.4	UTC のトレース	15
2.6.5	時間・周波数に関する国際組織	16
2.7	2章のまとめ	18

### 第3章 原子時系の発生原理

3.1	はじめに	19
3.2	原子時計の評価法とふるまい	19
3.2.1	stability と instability	19
3.2.2	原子時計出力の表し方	20
3.2.3	周波数安定度の評価方法	21
3.2.4	実用原子時計の具体例	22
3.3	平均原子時による原子時系構築	24
3.3.1	原子時系に求められる品質	24
3.3.2	なぜ平均原子時が必要か	26
3.3.3	平均原子時の計算：定義式	27
3.3.4	平均原子時の計算：実際の計算式	31
3.3.5	計算式に関する補足	32
3.4	時系アルゴリズム	33
3.4.1	重要なパラメータ	34
3.4.2	代表的な時系アルゴリズム	36
3.5	平気原子時の実信号化	37
3.5.1	実信号化の原理	37
3.5.2	実例	37
3.6	3章のまとめ	39

### 第4章 日本標準時の概要

4.1	はじめに	40
4.2	日本標準時の歴史	40
4.2.1	標準時制度の確立と中央標準時	40

4.2.2	標準電波による標準時の通報	41
4.2.3	計量法の改正と日本標準時	41
4.2.4	日本標準時発生システムの歴史	42
4.3	日本標準時の概要	42
4.3.1	日本標準時の仕組みと役割	42
4.3.2	発生システムの基本構成	44
4.3.3	各方面での利用	44
4.4	研究の必要性	45
4.5	4章のまとめ	46

## 第5章 原子時系発生システムハードウェアの向上 ～新日本標準時発生システムの開発～

5.1	はじめに	47
5.2	新システムの開発	47
5.2.1	原子時計	51
5.2.2	時刻差計測部	51
5.2.3	計測データ処理部	55
5.2.4	冗長性	58
5.2.5	平均原子時 TA と UTC(NICT)	58
5.2.6	制御、監視部、環境	60
5.2.7	開発時の注意点	62
5.3	開発の経緯と実運用への準備	63
5.4	システムの総合評価	64
5.5	今後の課題	66
5.6	5章のまとめ	67

## 第6章 原子時系アルゴリズムの向上（1） ～時計抜けにおける周波数変動の改善～

6.1	はじめに	68
6.2	変動事例と原因調査	68
6.3	時系アルゴリズム改良による変動の抑制	73

6.4 変動量の推定式	73
6.5 6章のまとめ	76

## 第7章 原子時系アルゴリズムの向上（2）

### ～異常時計の影響による周波数変動の改善～

7.1 はじめに	77
7.2 変動事例と原因調査	77
7.3 重みづけの検証	80
7.3.1 3種の重みづけの比較	80
7.3.2 重みづけに関する考察	81
7.4 レート検証の導入	84
7.4.1 パラメータの設定	86
7.4.2 シミュレーション結果の比較	87
7.4.3 レート検証に関する考察	90
7.5 改良アルゴリズムの効果	92
7.6 7章のまとめ	92

## 第8章 結論

8.1 研究結果	93
8.1.1 新日本標準時発生システムの開発	93
8.1.2 時系アルゴリズムの改良研究	94
8.2 成果のまとめと考察	95

付録1. アラン分散の計算法	98
----------------	----

付録2. DMTD (Dual Mixer Time Difference) system	100
---	-----

付録3. 主な時系アルゴリズム	102
-----------------	-----

A3.1 TAI 計算アルゴリズム: ALGOS(BIPM)アルゴリズム	102
A3.2 NISTの時系アルゴリズム: AT1(NIST)アルゴリズム	105
A3.3 USNOの時系アルゴリズム: A.1(USNO,MEAN)アルゴリズム	108

付録 4. 日本標準時の時系アルゴリズム .....	111
A4.1 旧システムのア​​ルゴリズム : Alg4 .....	111
A4.2 新システムのア​​ルゴリズム : Alg5 .....	112
参考文献 .....	114
謝辞 .....	119

## 図目次

図 3.1	$f^a$ ノイズのパワースペクトル密度とアラン分散	23
図 3.2	平均原子時 TA 計算方法の概念図	28
図 3.3	平均原子時 TA の計算における各種パラメータの関係	29
図 3.4	平均原子時 TA の実信号化における各種パラメータの関係	38
図 4.1	日本標準時の仕組みと役割	43
図 4.2	日本標準時発生システムの基本構成	43
図 5.1	日本標準時発生システム新旧の比較	48
図 5.2	新システム（原子時計と計算機を除く）の外観	49
図 5.3	原子時計及び計測機器の安定度	52
図 5.4	DMTD5 外観	54
図 5.5	DMTD5 ブロック図	54
図 5.6	計測データ処理の概念図	56
図 5.7	AOG 出力結果と TA' との時刻差	61
図 5.8	UTC-UTC(NICT)の年間変動（2001～2006）	65
図 5.9	UTC-UTC(NICT)年間変動の周波数安定度	65
図 5.10	2006 年における UTC-UTC(各機関)の周波数安定度	66
図 6.1	2002 年における UTC-UTC(NICT)の時刻差	69
図 6.2	レート推定値が不相当であった場合の累積誤差	71
図 6.3	レート推定による累積誤差があった場合における時計抜けの影響	71
図 6.4	シミュレーションの結果	72
図 7.1	UTC-UTC(NICT)の時刻差	78
図 7.2	UTC-UTC(NICT)、UTC-TA <sub>JST</sub> の時刻差	78
図 7.3	UTC-各 Cs 時計の時刻差	79
図 7.4	CS#36 を除いた場合のシミュレーション TA <sub>JST</sub>	79
図 7.5	異なる重みづけで作った TA の安定度比較	82
図 7.6	UTC-各 Cs 時計の周波数安定度	82
図 7.7	時計の重みの相関	83
図 7.8	レート変動リミット係数の比較	85

図 7.9	UTC-TAw0 のアラン標準偏差	.....	87
図 7.10	UTC-TAw1 のアラン分散	.....	88
図 7.11	UTC-TAw2 のアラン分散	.....	89
図 7.12	改良 TA の効果	.....	91

## 表目次

表 3. I	$f^{\alpha}$ ノイズの分類と名称	23
表 3. II	Cs 時計 5071A 周波数安定度	25
表 3. III	H メーザー RH401A 周波数安定度	25
表 5. I	新旧システムの機能比較	50
表 5. II	水素メーザーの性能	52
表 5. III	DMTD5 の性能	53
表 5. IV	システム監視箇所	61
表 7. I	レート検証試験時の区分指標	85

# 第1章 はじめに

## 1.1 原子時系の誕生

正確な時刻・時間は、現代の人間活動において、なくてはならないものとなっている。もし日々の生活から時計がなくなったら、あらゆる社会活動に支障が起き、大きな混乱が生じるであろう。一方学術的に見ると、時間とは飛びぬけて高い精度で計測のできる基本物理量であり、時刻及び時間（または逆数である周波数）測定の正確さは、超高精度な実験・観測の成否を決定的に左右する。

このように、正確な時刻・時間（及び周波数）は、日常生活及び最先端技術の両面において非常に重要なものであるが、国際的な定義が確立し、世界的に統一された標準的な時刻・時間が使われるようになったのは、比較的近代の19世紀になってからであった。

歴史的には長い間、天文観測により時刻・時間が決められてきたが、観測精度には限界があり、時間の単位である秒の定義の不正確さの原因となっていた。定義の精度を飛躍的に高める突破口となったのは、原子時計の急激な進歩である。

原子時計とは、原子が状態変化する際に放射する電磁波の周波数を利用した時計である。その周波数は物理法則に厳密に従う。精密計測技術の進歩により、原子時計の周波数は15桁のオーダーで確定することができるようになった。また1500万年に1秒しか狂わない超高安定な原子時計も開発されている。

原子時計の刻む時を原子時系と呼ぶ。現在の世界の標準時は、原子時系を基にしている。

## 1.2 世界の状況

時間の単位である1秒がセシウム（Cs）原子の遷移周波数を基に定義されたのは、1967年である。この定義を受け、世界中の原子時計の合成から作られる国際原子時TAIが確立され、最も正確かつ安定な時間・周波数標準として参照されるようになった。現実の原子時計にはどうしても個々の周波数のふらつきがあるため、多数の原子時計を合成することでそのふらつきを均し、高い安定度を実現するのである。このように作られた原子時系を平均原子時と呼ぶ。この国際原子時に閏秒調整を施した協定世界時UTCが作られ、世界の標準時の基として参照されるようになった。

TAI及びUTCは、国際度量衡局（BIPM）が発生し維持管理している。BIPMは、国際単位系確立の発端となったメートル条約に基づき設立された国際機関である。TAIを計算す



るプログラムは BIPM により開発され、平均原子時を発生する計算方式（時系アルゴリズム）の代表例となっている。

各国の標準機関は、UTC を参照しながら自国の標準時を作り、国内に供給する。この方式に国際的な拘束はなく、各国はそれぞれ独自のシステムで標準時を発生している。時系アルゴリズムは目的や条件に応じて最適な方式が異なるため、各機関において研究開発が進められている。独自の時系アルゴリズムを開発し、複数の原子時計から平均原子時を発生している機関もある。平均原子時の基本的な計算原理はほぼ共通しているが、パラメータ設定や異常判定の方法などにそれぞれの特色がある。

### 1.3 日本の状況

日本において時間・周波数標準に関する研究・業務を行っている公的機関としては、独立行政法人産業技術総合研究所の計量標準総合センター（NMIJ）、独立行政法人情報通信研究機構（NICT）、国立天文台（NAO）がある。

NMIJ（旧通産省工業技術院計量研究所）は、計量標準の整備と関連業務を一体的に実施し、計量標準の要となる中核機関である[40]。時間・周波数標準に関しては、SI 単位としての秒やメートルの実現のため、一次標準器と呼ばれる超高確度原子時計や次世代光周波数標準技術の開発、時刻比較や標準伝送技術の研究、周波数校正サービス等を行っている。

NICT（旧郵政省電波研究所から旧通信総合研究所を経て現名称に）は、情報通信分野の公的研究機関であり、古くより国家標準電波の送信業務を担ってきた経緯から、時間・周波数標準の研究に関しても長い歴史を持つ。周波数標準供給や報時の観点から、一次標準器や光周波数標準技術の開発、時刻比較や標準伝送技術の研究、周波数校正サービス等を行い、加えて、時刻認証、測位、空間計測などの幅広い応用研究も行っている。中でも特に重要な任務は、日本標準時（Japan Standard Time、JST）の発生と供給である。

NAO の水沢 VERA 観測所は、世界時を決めるための国際地球回転事業に参加し、TAI の構築に寄与している。また中央標準時を発生し、インターネットによる参照サービスを行っている[41]。

### 1.4 日本標準時の概要

日本標準時 JST は、NICT 本部（東京都小金井市）に設置された原子時計群から日々作り出される平均原子時を基にしている。

日本標準時を作る、と言うと驚かれることが多いが、それは、標準時とは絶対的な基準

を参照して一意に決まるものである、といった印象があるためであろう。UTC がリアルタイムに存在し、信号線で伝送されてきたその時刻を9時間ずらして表示するだけ、という方法で JST を決めるのであれば、作るという言葉は確かにそぐわない。だが UTC はリアルタイムには存在せず、時刻信号として利用できる実信号も持たないため、このような方法ではリアルタイム時刻としての日本標準時を実現できない。NICT は、自局の原子時計群を最適な方法で合成することで高安定な原子時を作り、それを実信号化した時刻を UTC に合うよう調整しながら運用する。これが日本標準時として供給される。この合成の仕方（時系アルゴリズム）は一意ではなく種々の方法が可能である。日本標準時を作る、と表現するのはそのためである。

日本標準時は、国内においては、各種報時サービスや周波数標準の確度校正などを通じて、日常生活から先端技術に至るまで、その基盤を支えるために不可欠なものとなっている。国際的には、高い安定度と信頼性を保つ日本標準時を維持し続けることにより、技術力及び組織体制への高い信頼が得られる。また日本標準時構築に使われる原子時計群は、世界の標準時の源である国際原子時 TAI を構成する原子時計群の一部でもある。

## 1.5 原子時系発生システムの研究

標準時として用いられる原子時系には、一般に次のような品質が求められる。

- (A) UTC との高い同期精度（基準の時刻からずれない）
- (B) 周波数短期安定度の高さ（ふらつかない）
- (C) 周波数長期安定度の高さ（一度合わせたらずれない）
- (D) 高い信頼性（トラブルに強い）

これらを実現できるかどうかは、その発生システムの性能にかかっている。発生システムには、信号源となる原子時計、計測や実信号発生のためのハードウェアシステム、また平均原子時を用いる場合にはその計算のための時系アルゴリズム、が必要だが、これらのいずれに問題があっても、品質の高い原子時系は得られない。

このうち原子時計に関しては、開発品ではなく市販の製品（実用原子時計）を用いるケースが多い。標準時の定常運用においては、均一な品質の時計が安定して入手できることが重要だからである。日本標準時においても、主として市販の原子時計群を用いて原子時系を計算している。

一方他の二つ、ハードウェアシステムと時系アルゴリズムに関しては、目的や状況に応じて最適な方法の模索が不可欠であり、その高度化のためには継続的な研究が必要である。標準時発生は止めることができずやり直しもできないため、システムや計算プログラムの更新は大きなリスクを伴う作業ではあるが、原子時計の性能や計測技術の進歩に応じてハ

ードウェア・ソフトウェア両面の向上を図らねば、標準時の品質は向上しない。研究を怠れば品質の現状維持さえ困難になるかもしれない。

研究の方向性として留意したいのは、標準時における原子時系発生システムの高度化においては、確実な運用のための安全性・信頼性と、最高性能を引き出すための新規的な要素という、相反しがちな二つをにらみながらバランスを取る必要があるということである。この判断基準には一般的な解はなく、成果は実績で確認することとなる。

## 1.6 本論文の研究内容と構成

本論文では、原子時系発生システムの高度化のための研究成果をまとめる。日本標準時発生システムを研究対象として、日本標準時という原子時系の品質向上を目指した。

具体的な課題は、①新日本標準時発生システムの開発、及び②時系アルゴリズムの研究、の二つに大別される。課題①は、ハードウェア面からの改善に相当し、1.5章で述べた要求品質(A)(B)(D)の向上につながる。課題②は、ソフトウェア面からの改善に相当し、要求品質の主に(C)の向上に寄与する。本論文は、この二つの課題に関する研究結果をまとめた。

論文の構成を以下に述べる。2章から4章において、日本標準時を理解するための背景となる事柄、及び基礎知識を紹介し、5章から7章に、日本標準時向上のための研究内容を報告する。8章を全体のまとめとする。

2章では、様々な時系及び標準時について紹介する。時系という言葉は一般的でないため、まず簡単にその概念を述べ、次に時系の分類と個別の定義をまとめた。標準時に関しては、歴史的な経緯を概説したのち、現在の主な標準時の概要を紹介する。

3章では、原子時系の発生に関する基礎知識をまとめる。はじめに原子時計の振る舞いと扱いに関する事項を述べ、次いで世界の標準時および日本標準時の基となる平均原子時について説明する。計算の基本式とともに、構築における重要な考え方をまとめた。また、時系アルゴリズム設計時に重要となるパラメータ設定の留意点を述べ、世界の代表的な時系アルゴリズムを紹介する。最後に、平均原子時を実信号化する方法についてまとめる。

4章では、日本標準時とはどのようなものかを知るために、背景および基礎知識をまとめた。はじめに日本標準時の発生から利用までの流れと世界との関連を述べ、次いで発生の具体的方法及び利用について、簡単にまとめた。また日本標準時の研究の必要性についても触れる。

5章以降が、本論文の研究内容となる。日本標準時の品質向上を目的として、ハードウェアとソフトウェアの両面から改良を試みた。

5章において、ハードウェア面での取り組みとして行った、日本標準時発生の新システ

ム開発についてまとめる。旧システムと比較しながら新システム各部の詳細を説明し、総合機能評価として、定常運用開始後の稼働状況と今後の課題とを報告する。

6章及び7章は、ソフトウェア面での取り組みとして、時系アルゴリズムの改良に関する研究結果をまとめる。日本標準時運用において実際に起きた二つの問題について、原因を調査・解明し、時系アルゴリズムの改良を行い、効果を確認した。

6章では、日本標準時を構成する原子時計が計算から抜けた時に起きる急激なレート変動についての研究結果をまとめる。この問題は、時計の不適切なレート推定法が原因であることを解明し、レート計算方法を改良することにより症状の改善を確認した。

また7章では、時計抜けのようなイベントが何もない場合に生じた急激なレート変動についての研究結果をまとめる。この問題は時計自身のレート変動が原因であった。解決のため、重みづけの検討及びレート異常検証機能の追加を行い、改良アルゴリズムにより、異常時計の影響を大幅に抑制することができた。

最後に8章として、本研究で得られた成果をまとめる。

## 第2章 各種時系と標準時

### 2.1 はじめに

原子時系は、標準時の基として使われる重要な時系である。だが原子時系の誕生は比較的新しく、それまでは天文観測から定められる天文時系が主流であった。標準時においても、現在の定義がなされるまでにはさまざまな変遷があった。

本章では、標準時が原子時系により確立された背景について紹介する。前半は、時系に関する基礎知識をまとめる。時系という言葉は一般的でないため、2.2章でまず簡単にその概念を紹介した。また、時系にはさまざまな種類があり歴史的に重要なものも多いため、時系の代表的な分類を2.3章で、より具体的な各時系の名称と定義を2.4章で紹介した。後半は、標準時に関する基礎知識をまとめる。歴史的な経緯を2.5章で紹介し、現在の標準時がどのように作られ管理されているかを2.6章で紹介する。文中に現れる様々な組織については、2.6.5章にまとめて紹介した。

### 2.2 時系とは

時系 (time scale) とという言葉の説明には、いくつかの表現がある。相対論を扱う場合には、4次元座標系における時間軸、を指す。また国際電気通信連合 (ITU) の勧告によれば、"A system of unambiguous ordering of events." [55] と規定される。直訳すると「出来事を明白に順序づけるシステム」、言い替えれば、時を測るための規則、となるであろうか。国際無線通信諮問委員会 (CCIR) の勧告によれば、"an ordered set of scale markers with an associated numbering" と規定される [66, p.7]。こちらは直訳すると「番号のついた物差し目盛りの集合」となるであろうか。

客観的な時の流れは、物理現象を基に表される。この時利用される物理現象の起きるタイミングは、自然の法則に従うものであり人が操作するものではないが、そのタイミングの表し方は、人が作る規則によりいろいろと変化する。つまり時系には、定義の違いにより様々な種類が存在する。

### 2.3 時系の分類

様々な種類の時系は、着目点によっていくつかの分類ができる。本論文では以降、単体

で用いるときは「時系」、接頭語が付いた場合には「～時」（天文時、原子時など）と表記することにする。

観測・計測対象による分類としては、天文時、物理時、放送時がある。より本質的な分類として、作り方そのものの違いで分けた、積算時と力学時がある。また相対論の考慮が必要となる時系においては、固有時と座標時の区別も重要である。

### 2.3.1 計測対象による時系の分類・・・天文時、物理時、放送時

天文現象に基づき定める時系を天文時 (astronomical time)、振り子や水晶の振動周波数等の物理現象に基づくものを物理時 (physical time)、無線報時など情報通信に基づくものを放送時 (broadcast time)と呼ぶ。原子・分子における状態遷移を利用した原子時計の刻む原子時 (atomic time) は、物理時の一種である[31, p.144]。

天文時および原子時は、国際的な標準時に深く関係するため (2.5 章参照)、2.4 章でより詳しく説明する。天文時においては、観測対象は世界にただ一つの自然現象であり長期に渡り中断がない、観測量は位相 (時刻) であり、時間の単位は長期間の平均的な位相変化を必要に応じ均等分割して得られる、といった特徴がある[24, p.78]。一方個々の原子時計による原子時においては、計測対象はただ一つとは限らず、時計の寿命により中断し、観測量は周波数であり、時間の単位は高周波の波の数を何億回と積算することで得られる、というように、天文時とは対照的な特徴がある。

### 2.3.2 作り方による時系の分類・・・積算時と力学時

一定の周期性があると思われる現象の繰り返しを数えることで決める時系を、積算時 (integrated time scale)という。基本となるデータは、物理現象の起きる間隔である。太陽の日周運動で日を重ねる太陽時、原子の出す電磁波の周波数で秒を重ねる原子時は、積算時である[66, p.7]。

一方、物体の運動において実際に観測された位置を運動方程式で計算された位置と比較し、その時刻を決める方法がある。このようにして決める時系を、力学時 (dynamical timescale) という[31, p.148]。基本データは、運動方程式に基づき計算された、物体の位置の時系列データである (ただし初期値には観測結果を用いる)。地球の公転に基づく歴表時 ET (Ephemeris Time) は力学時である。

積算時は、観測や計測から比較的短時間で求めやすいが、誤差の積算が避けられず[45, p.13]、また現象の周期が不正確な場合は安定度に影響が出る。一方、力学時は、数学的にはエレガントだが長期の観測が必要であり、また運動モデルにおける初期パラメータ選定の良し悪しに影響される。[45, p.15]

### 2.3.3 固有時と座標時

ニュートンの古典力学においては、時間とはどこで誰が測っても同じという一様なものであった。だが相対性理論においては、このような絶対的な時間は存在しない。

相対性理論では、時間を計るものさしとして原子時計など十分正確な時計を考える。固有時 (proper time) とは、物体にはりついた時計の刻む時系である。物体の速度が速くなるほど、また物体の置かれた場所の重力ポテンシャル絶対値が大きくなるほど、その時計の進み方は遅くなる。一方、座標時 (coordinated time) とは、空間座標の 1 点 (通常は座標原点) に静止した時計の刻む時刻を基準とし、それを座標系全体にわたって定義する時間である。[32, p.7]

観測精度が上がるにつれ、時系構築においても相対論的な考え方が不可欠となってきた。特に力学時および原子時を考える際には、固有時と座標時の区別が重要である。

## 2.4 種々の時系

2.3 章で分類した時系は、具体的な定義の違いによりさらに様々な種類に分かれる。以下に主な時系をまとめる。

### 2.4.1 太陽時と恒星時

**太陽時** (solar time) は、太陽の子午線通過から次の子午線通過までを 1 日とする時系である。地球の公転軌道が楕円であること、また公転軌道と自転軸が約 23.5 度傾いていることから、太陽日の長さは実は一定ではない。そのため周期項を取り除いた平均太陽時を用いるのが一般的である。これはいわば、赤道上を一定速度で移動する仮想太陽 (平均太陽) による太陽時である。太陽の高精度な観測は困難であることから、実際には次の平均恒星時に一定の換算を施して平均太陽時を求めている[31, p.146]。

**恒星時** (sidereal time) は、恒星 (厳密には春分点) の子午線通過から次の子午線通過までを 1 日とする時系である。恒星日は太陽日より約 4 分だけ短くなる。春分点も地球の歳差・章動により天球上で動くため、恒星日の長さは実は一定ではない。そこで、平均太陽時にならば、恒星時から周期項を取り除いた平均恒星時が導入された[31, p.146]。

太陽時と恒星時は、天文時であり、積算時である。

### 2.4.2 世界時 UT と UT1

**世界時 UT** (Universal Time) は、経度ゼロ度における平均太陽時である。平均恒星時から直接求めた世界時を UT0、UT0 に極運動の修正を加えた時系を UT1、UT1 に経験式に基

づく自転速度変動の修正を加えた時系を UT2 と呼ぶ (UT2 はのちに経験式が正しくないことが判明したため使われなくなった)。世界時は本来は自転に基づく時系全体を指す呼び名であったが、現在では UT1 を指すことが多い[31, p.147]。

UT1 における 1 秒は、平均太陽日の 1/86400 と定められる。1960 年までは、UT1 における 1 秒が秒の単位であった[66, p.7]。

UT は天文時であり、積算時である。

### 2.4.3 歴表時 ET

**歴表時 ET** (Ephemeris Time) は、本来は天体の力学的運動から求める時系の呼び名であるが、古典力学に基づく地球の公転運動から求める時系[45, p.278]を指すことが多い。まず天体の運動方程式から、何時何分にこの天体の位置はここ、という歴を作り、観測で求めた位置を当てはめて歴の時刻を補間することで時系を作る。

ET は、1958 年の国際天文学連合 (IAU) で決定された[45, p.278]。ET の 1 秒は、1900 年 1 月 0 日 12 時における平均太陽年の 1/ (86400\*365.2422) と定められる。平均太陽年とは太陽が春分点を通過する平均間隔である。ET の原点は、1900 年 1 月 0 日 12 時の世界時 UT に合うよう定められた。ET の 1 秒は、1960~1967 年の間、SI 秒 (2.5.2 章参照) の基準であった[66, p.8]。

ET は天文時であり、力学時である。ET は 1980 年代半ばに地球力学時 TDT (後に TT と変更)および太陽系力学時 TDB に置き換えられたため、現在は使われていない[31, p.149]。

### 2.4.4 天体力学計算に使われる時系・・・TDT、TDB、TT、TCG、TCB

**地球力学時 TDT** (Terrestrial Dynamical Time)は、ジオイド上に静止している標準時計の固有時である。IAU において 1979 年に定義され、1991 年以降は地球時 TT と呼ばれるようになった[45, p.239]。歴表時 ET に代わる時系で、ET との連続性を維持していた。

**太陽系力学時 TDB** (Barycentric Dynamical Time)は、太陽系重心における力学時である。IAU において 1979 年に定義された[45, p.239]。TDB と TDT (つまり TT) との差は最大でも 1.6ms 程度の周期項のみである[31, p.149]。

**地球時 TT** (Terrestrial Time) は、ジオイド上に静止している標準時計の固有時である。1991 年以前は地球力学時 TDT と呼ばれており、歴表時 ET に代わり使われるようになった時系である。TT は国際原子時 TAI により具現化されているが、歴表時 ET との連続性を保つため、TAI に対して 32.184 秒の時刻差をもつこととなった[45, p.238]。

$$TT (TAI) = TAI + 32.184 \text{ 秒}$$

**地心座標時 TCG** (Geocentric Coordinate Time) は、地心に静止している標準時計の固有



時から、地球自身の重力場の影響を除いた時系である[31, p.149]。人工衛星の運動を記述する際などに使われる。

**太陽系重心座標時 TCB** (Barycentric Coordinate Time) は、太陽系重心に静止している標準時計の固有時から、太陽系各天体 (太陽含む) の重力場の影響を除いた時系である[31, p.149]。太陽系天体の運動を記述する際に使われる。

TT、TCG、TCB に関する重要な決議として、1991 年の IAU Resolution 4 がある。ここでは、座標時は地上の原子時から導かれること、時間の単位を SI 秒とすること、地心における座標時は 1977 年 1 月 1 日 0 時において TAI と 32.184 秒差を持つこと、TCG 及び TCB は地球重心および太陽系重心を原点とし上記を満たす時系であること、TT はジオイド面での SI 秒を単位とし TCG と一定のレート (歩度) 差を持つ座標時であること、等が規定されている。[32, p.7]

## 2.4.5 国際原子時 TAI

### ■ 定義

**TAI** (International Atomic Time) は、1971 年に国際度量衡委員会 (CIPM) により定義された。

「TAI は、国際単位系における時間の単位である秒の定義 (SI 秒) に従って、いくつかの機関で運転されている原子時計の指示値に基づいて BIPM が定める基準となる時刻の座標である。」 [17, p.93]

この時点での SI 秒の定義は、

「1 秒は、Cs133 原子の基底状態の 2 つの超微細準位間の遷移に対応する放射の 9192631770 周期の継続時間」 (1967-1968 年第 13 回 CGPM)

である[17, p.57]。つまり TAI は、多機関の原子時計群の合成により、SI 秒を実現するべく国際度量衡局 BIPM が作り出す時系である。

Cs 原子による SI 秒の 1 秒は歴表時 ET の 1 秒に合うよう定められた。また TAI の原点は、1958 年 1 月 1 日の UT2 に一致するように定められた[45, p.237]。

### ■ 相対論を考慮した補強

相対論的には、原子時計の刻む 1 秒は、ある場所に置かれた時計の固有時として理解されるべきである。つまり、Cs 原子に基づく SI 秒の定義は固有時である。

だが世界の標準時として用いる時系では、離れた場所での時刻比較ができなければならない。つまり、固有時ではなく座標時で表された時系が必要である[45, p.37]。この観点からみると、上記の TAI の定義においては場所に関する記述がなく、このままでは固有時としての定義でしかない。

このことから、1980年の秒の定義のための諮問委員会（CCDS）レポートにおいて、TAIの定義が補強された。

「TAIは、回転するジオイド上で実現されるSI秒を目盛りの単位とした、地心座標系で定義される座標時の目盛りである。」 [17, p.93]

この定義により、TAIは地球時TTを理想化する時系となった。さらにこの定義は、1991年のIAU Resolution 4で補強された。

「TAIは、その理想とする地球時TTを実現する一つの時系であり、TTとは一定の差32.184sだけ異なっている。」 [17, p.94]

歴史的な理由により、TAIは発足時において歴表時ETと32.184秒だけ違ってしまった。TAIとETの1秒の長さは等しいのでこの差は不変である。よってTAIはETの後継者であるTTとも同じ時刻差を持つことになったのである[31, p.150]。

$$TT = TAI + 32.184 \text{ 秒}$$

TAIは原子時であり積算時である。TTを実現する時系であることから、相対論的変換により、力学時であるTCG、TCB、TDBと関連づけることができる。

#### 2.4.6 協定世界時 UTC

UTC (Coordinate Universal Time) は、TAIの1秒を時間の単位としつつ、時刻がUT1から大きくずれないように修正した時系である。UTCに関しては、ITU 勧告 ITU-RTF460 (1970年)において、次の内容が定義されている。

「UTCはBIPMがIERSの協力により維持する時系であり標準周波数及び時間信号の供給の基礎をなすものである。UTCの歩度は厳密にTAIと一致しているが整数秒だけ異なっている。UTC時系はUT1と近似的に一致させるために1秒だけ挿入、あるいは削除（正あるいは負の閏秒）する調整を行う。」 [34, p.5]

この勧告を受け、1972年に現在のUTCがスタートした[45, p.62-63, p.255]

$$UTC(t) - TAI(t) = n \text{ 秒} \quad (n \text{ は整数})、\quad |UTC(t) - UT1(t)| < 0.9s$$

UT1との時刻差が0.9秒を越えそうになったら、1秒ステップで時刻を修正する。この時に調整する1秒を、閏秒 (leap sec) と呼ぶ。閏秒による現在の調整法は、将来的には変更されるかもしれない。現在ITUの下部組織であるITU-Rの下で議論が進められている最中である。

UTCは世界時という名称であるが、TAIに準ずる原子時である。

### 2.5 標準時に関する歴史的な流れ

2.4 章では種々の時系を定義による区別で紹介した。本章では、歴史的な流れに沿って世界の標準時が形作られた経緯をまとめてみる。

### 2.5.1 標準時採用への動き

正確な時刻・時間の計測は、古くは農業における暦の必要性、近代では海外貿易における航海術の必要性などから、いろいろと研究されてきた。だが 18 世紀頃までは、世界的な規模で時刻や時間の決め方を統一しようとする動きはなく、各地方はそれぞれの太陽時に従う時刻を使い生活していた。異なる経度においては太陽時による時刻が異なってくる。このように、地域により異なる時系を総称して、地方時 (local time) という[31, p. 147]。

19 世紀になり鉄道が普及し短時間で長距離の移動が可能になると、地域間の時差が問題になるようになった。19 世紀末には、英国や米国において、国内で統一的に時刻を定義しようとする動きが始まった[3, p.213]。

このような動きを受け、1884 年 10 月、25 か国の参加による万国子午線会議が開催された。この会議では、本初子午線の取り方を統一すること、本初子午線としてグリニッジ子午線を採用するよう参加国政府に提案すること、東経西経の決め方、本初子午線の 0 時から始まる 24 時間制の平均太陽日を世界日として採用すること (ただし地方時の使用を妨げない)、等が決議された[3, p.217]。本会議において、初めて経度の取り方が国際的に統一され、世界日 (世界時) の採用が合意された。日本でもこの決議に基づき 1886 年に勅令 51 号が發布され、標準時制度が確立された (4.2.2 章参照)。

### 2.5.2 秒の定義の変遷

一方、時間の単位に関しては、メートル条約という国際的な枠組みの中で、定義が決められるようになっていった。メートル条約は、計量単位の確立のため 1875 年に締結された国際条約であり、現在でも計量単位に関する様々な国際活動の基盤となっている。

1960 年に、メートル条約における最高議決機関 CGPM (2.6.5 章参照) において、基本物理量における国際単位系 (SI) が定められた。[17, p.7]。時間における国際単位は (SI) 秒である。秒の定義の変遷をまとめると、

1960 年以前： 平均太陽日の 1/86400、

1960 年 (SI 秒)： 歴表時の 1900 年 1 月 0 日 12 時に対する太陽年の  
1/31556925.9747 倍

(1956 年 CIPM で定義、1960 年第 11 回 CGPM で承認)、

1967 年 (SI 秒)： セシウム 133 原子の基底状態の二つの超微細構造準位の間の  
遷移に対する放射の周期の 9192631770 倍の計測時間

(1967-1968 年 第 13 回 CGPM で決定)、

となっており、太陽時から歴表時 ET を経て原子時へ、定義の基となる時系が移り変わってきたことがわかる[17, p.55-60]。

平均太陽日による定義は、自転周期の安定度があまり良くないことから ET による定義に変更されたが、この定義法にも、長期の観測結果が必要であること、力学モデルにおける初期パラメータに影響されること、などのデメリットがあった。一方、急速に発達した Cs 原子時計において、天文時よりもはるかに正確に秒を実現できることが示された。秒の定義において最も重視されるのは正確さである。このことから秒の定義は、長い歴史をもつ天文時から原子時に移り代わることとなった。

### 2.5.3 TAI、UTC の確立

SI秒がCs原子による定義となったことを受け、第14回CGPMの要請を受けたCIPMは、国際原子時 TAI の定義を 1971 年に決定した。ここで TAI は、SI 秒に基づき BIPM が定める基準時系となった。

TAI はその後、回転するジオイド上の SI 秒を単位とする地心座標時であること（1980年CCDSレポート）、32.184秒の時差で地球時 TT を実現する時系であること（1991年IAU Resolution4）、の2つの定義で補強され、計量単位、標準時としての立場、天文計算に必要な時系との関係、のそれぞれにおいて、明確に国際承認された時系となった。

時間単位の定義においては原子時が基準と定められたが、実生活においては太陽の動きを反映するような標準時がやはり必要である。これに関しては、報時との関係により ITU-R が議論の場となった。

結果として、原子時と世界時のマッチングを取った協定世界時 UTC が作られることとなった。1960年代に始まった旧 UTC（に相当する時系）では、原子時を UT1 に合わせるため周波数調整も行っていたが[45, p.62-63]、1970年のITU勧告を受け1972年から始まった現在のUTCでは、時刻差調整のみを行っている。UTCが広く利用されるようになったことを受け、第15回CGPM（1975年）は、UTCが常用時の基礎であることを確認しその使用を推奨する、と述べている[17, p.59]

TAI は、最も確かな周波数の基準として使われ、究極の確度と安定度と信頼性の実現を目標とする。また UTC は、各国の標準時の基準として広く利用されている。

## 2.6 標準時発生、利用、管理のしくみ

本章では、現在世界の標準時が体的にどう作られ、利用され、管理されているか、を紹介する。

## 2.6.1 TAI の発生

TAI は二つのステップで計算される。まず、世界中の原子時計を合成して平均原子時 EAL (Echelle Atomique Libre) という時系を作り、次に、その EAL に一次周波数標準器という超高精度な原子時計による周波数精度調整を施したものが TAI となる[45, p.243]。この計算と公表は BIPM が行う。

平均原子時の計算 (3 章参照) には、時計同士の時刻差データが必要である。世界中の各標準機関  $k$  は、UTC( $k$ ) (2.6.3 章参照) と各原子時計との時刻差計測データを、毎月 1 回 BIPM に送付する。送付するのは前月の 5 日毎 (MJD 末尾が 4,9 の日) の計測データである。同じ場所にある時計同士は直接時刻比較できるが、離れた場所の時計の時刻を比べるには人工衛星を仲介とした時刻比較[66, pp.16-23]が必要となるため、各機関はこの時刻比較結果、例えば GPS time と各 UTC( $k$ )との時刻差計測データ等も、BIPM に送付する必要がある。集められた時計データから、ALGOS という時系アルゴリズム (3.4.2 章、付録 A3.1) により、EAL が計算される。

一次周波数標準器は、数機関で開発された約 10 台が TAI 校正に寄与している。一次周波数標準器は超高精度な原子時計であり、稼働時間は一般に時限的である。運用及び周波数の評価が容易ではないため、BIPM へのデータ報告は随時となる。

TAI の計算は毎月 15 日前後に行われ、前月分の 5 日毎 (末尾が 4,9, の MJD) の値がまとめて算出される。

TAI の現状について、2007 年の BIPM 報告[44]から以下に抜粋する。周波数安定度は平均化時間 40 日で  $4 \times 10^{-16}$ 。38 ヶ国 58 の機関から送られる約 300 台の時計が TAI 計算に寄与している。時計の割合は、H メーザー 21%、Cs 時計 (5071A) 65%、他 14% の比率となっている。一次標準器による周波数調整は、1997 までは隔月で  $-1 \times 10^{-15}$ 、2004 年以降は毎月  $-0.7 \times 10^{-15}$  で実施されている。

## 2.6.2 UTC の発生

TAI に閏秒調整を加えた時系である UTC は、TAI と同様、毎月 1 回、末尾が 4,9 となる MJD における値のみが得られることとなる。つまり UTC の値は 5 日毎値にしか存在しない。

閏秒挿入の決定は、世界時 UT1 の公表を行う国際地球回転事業 (IERS) の勧告に基づき BIPM が行う [70]。UT1 は地球回転観測結果から決定される [45, pp.264-278]。閏秒調整は、12 月 31 日または 6 月 30 日の最後の秒で行われる。つまり、1 秒遅らせる場合には 23:59:60 が挿入される。これまでのところ 1 秒進ませる調整が実施されたことはない。

UTC は、時刻配信における基準として、世界中で参照されている。

### 2.6.3 各機関における標準時の発生

TAI 及び UTC は、発生方法からわかるとおりリアルタイムに値が得られる時系ではない。これは両者が、リアルタイム性を犠牲にしても、長時間のデータ蓄積と解析により究極の確度・安定度を追求する時系であるためである。

一方各標準機関においては、例えば報時などの目的により、リアルタイムに使える安定な時系が必要なので、UTC に準じたその機関独自の時系 UTC(k) を作っている。UTC(k) (k には標準機関の略称が入る) とは、各標準機関が UTC に準じて自局内の原子時計により独自に作り出す時系である。UTC(k) は、商用時計の出力とリンクし、リアルタイムにアクセスできる実信号を伴う。作り方に国際的な決まりはないが、CCDS 勧告 (CCDS1993) によれば、UTC と 100ns 以内で同期することが望ましいとされている [66, p.10]。

現状は、地球を基本的に 15 度又は 7.5 度毎の経度を中心とするタイムゾーンに分け、ゾーン内では経度に応じた時差を加えた UTC(k) (k は国家標準機関) を一律に用いている国や地域が多い。このように決めた時系を (地方) 標準時 (standard time) と呼んでいる [45, p.42]。実際には、国や地域の事情で 30 分又は 1 時間以外の時差を加えている場合もある。

日本の場合は、情報通信研究機構 (NICT) が作る UTC(NICT) に、東経 135 度に相当する時差 9 時間を加えた時系が、国内の標準時として広く用いられている。これは日本標準時 JST (Japan Standard Time) と呼ばれている (4 章参照)。

TA(k) は、研究などに用いる安定な参照時系を得るために、機関 k が独自に作る平均原子時を指す。TA(k) はフリーランの原子時計で作成し、一般に物理的な具現化はしない。TA(k) は、その機関内の原子時計との時刻差を用いて表すことができる [66, p.10]。

### 2.6.4 UTC のトレース

UTC(k) を UTC にできるだけ近い値で保つには、UTC との時刻差を知らねばならない。UTC - UTC(k) の値は、BIPM の発行する Circular-T という月報で定期的に報告される。Circular-T は毎月 15 日頃公表され、BIPM の web page (<http://www.bipm.org/en/bipm/>) により誰でも閲覧可能である。

内容としては、前月の UTC-UTC(k)、TAI-TA(k)、EAL と TAI の周波数差、各一次周波数標準器と TAI の周波数差、UTC 及び TAI と GPS time 及び GLONASS time の時刻差、TAI 計算に寄与する標準機関との時刻比較リンク状態、の各項目が掲載される。

各機関は、Circular-T 上で前月の 5 日毎の UTC-UTC(k) の値を見ることにより、その時点での UTC(k) の動きを知ることができる。だが UTC との現在の時刻差は来月の公表を待た

ねばならず、Circular-T を利用しての UTC(k)の調整は、現在の時刻差を推測しながら行うこととなる。

UTC はリアルタイムではなく実信号出力も持たない時系であるため、UTC とのリアルタイム時刻比較は、本質的にできない。例えば GPS 受信機において UTC との時刻差データを出力する機種がある場合、ここでの UTC とは GPS 管理局である米国海軍天文台 (USNO) の発生する UTC(USNO) を指すと思われる。ただし UTC(USNO)は非常に良く UTC に同期しているため、10ns オーダーの同期精度で良い場合には UTC の代用として全く問題はない。

## 2.6.5 時間・周波数に関する国際組織

最後に、時間・周波数に関する国際組織の概要と役割を簡単に紹介する[24, pp.316-319][14, pp.108-109]。設立の主目的が異なるいろいろな組織が、それぞれの領域において時間・周波数の問題を扱っているため、やや複雑である。

政府機関の組織としては、計量単位の国際統一を担うメートル条約関連組織と、電気通信分野の国際調整を担う ITU 関連組織がある。また経済圏毎の地域組織においても、貿易等における相互承認の必要性から、関連の活動が盛んになってきている。非政府の学術連合である IAU・URSI も、数々の重要な勧告を行っている。

### ■ メートル条約に基づく国際組織・機関

#### \* 国際度量衡総会：CGPM (Conference General des Poids et Mesures) [17, p.1]

メートル条約全加盟国の政府代表により構成され、4年ごとに会合を持つ。国際単位系の普及と改良の手段の討議、計量学上の基本的な新測定結果の承認、BIPM の運営に関する重要事項の採択、などが主な使命である。

#### \* 国際度量衡委員会：CIPM (Comite International des Poids et Mesures) [17, p.2]

メートル条約に基づく活動を行うための実行団体。国籍の異なる 18 名の委員により毎年の会合を持つ。測定単位の世界的統一性を確保することが主な使命である。CGPM の諮問により技術問題を研究し、結論を CGPM に答申する。

CIPM は、専門別に諮問委員会 CC (Consultative committee) を持つ。諮問委員会は、CIPM から使命された計量関係の試験所・研究所の代表者が委員となり、単位に関する勧告を CIPM に提案する責任を持つ。

#### \* 時間・周波数諮問委員会 CCTF (Consultative Committee for Time and Frequency)

秒の定義のための諮問委員会 (前身は CCDS)。会合は不定期である。

#### \* 国際度量衡局：BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) [17, p.1]

メートル条約により創設された機関。主に CIPM の監督のもとに働く実行機関・

研究所である。物理的な諸測定の世界統一を確保することが使命である。

■ **国際電波通信連合：ITU** (International Telecommunication Union) [74]

国連の専門機関の一つで、電気通信分野に関する政府間会議である。無線周波数スペクトルの最適使用をはかり、標準時や周波数供給の方法を協議する。

\* **無線通信セクター：ITU-R** (ITU Radio communication Sector)

ITU の下部組織であり、国際無線通信諮問委員会 CCIR が前身である。無線通信技術・運用等の問題の研究及び勧告の作成を行う。テーマ毎に7つの SG (Study Group) が設置されている。時と周波数に関連するのは、主に SG7 "Science service" の WP7A (Working Party) "Time signals and frequency standard emissions" [42] である。重要な勧告としては、UTC を定義した ITU-R TF.460 等がある。

■ **地域の計量組織**

\* **アジア太平洋計量計画 APMP** : [22]

アジア・太平洋地域の国家計量研究所による組織。他の地域・経済圏にも同等の組織がある。アジア・太平洋経済協力 APEC 傘下に位置づけられる。1980 年設立当時は、地域の計量標準の向上と途上国支援が主な活動であった。90 年代以降は、国際相互承認 Global MRA (Mutual Recognition of Arrangement) に関する活動が主体となっている。Global MRA とは、国際計量標準の同等性確保のため、メートル条約下で結ばれた協定である。

APMP の長期的活動を実施するため、CIPM の諮問委員会に対応する 8 分野の技術委員会 TC (Technology Committee) がある。

\* **時間・周波数技術委員会：TCTF** (Technical Committee of Time and Frequency)

APMP の技術委員会。時間・周波数に関する活動を行う。

■ **国際学術連合：ICSU** (International Council of Scientific Unions) [72]

国連の中のユネスコの組織の一つで、多数の学術連合および特別委員会から成る、非政府の連合である。関連の深い下部組織に URSI, IAU, IUGG がある。

\* **国際電波科学連合：URSI** (International Union of Radio Science) [78]

ICSU の下部組織。電波科学の全ての問題を扱う。10 の学術委員会があり、委員会 A "Electromagnetic Metrology" が時と周波数に関わる。重要な勧告としては、Cs 原子の基準周波数の定義 (1960 年)、原子時による秒の定義 (1963 年)、UTC システムの改訂 (1967 年) 等がある。

\* **国際天文学連合：IAU** (International Astronomical Union) [71]

ICSU の下部組織。約 40 の学術委員会があり、時に関わりが深いものには、第 31



委員会 "Time"、第 8 委員会 "Ephemeris"、第 19 委員会 "Variation of latitude" 等がある。重要な勧告としては、ET の定義 (1952,1955,1958 年)、Cs 原子の基準周波数の定義 (1961 年)、報時に関する全般的な勧告 (1964 年) 等がある。

\* **国際測地学・地球物理学連合：IUGG** (International Union of Geodesy and Geophysics)

ICSU の下部組織[75]。測地と地球物理に関する問題を扱う。7 つの協会があり、そのうち IAG (International association of Geodesy) が、座標系や地球回転に関する学術委員会を持つ。

\* **国際地球回転事業：IERS** (International Earth Rotation and Reference System Service)

IAU と IUGG により創設され、地球回転に関する観測データを提供する[73]。

## 2.7 2章のまとめ

時系とは、ある規則に従う時の流れである。規則自身は物理現象に従うものであるが、時間の流れの表し方は、人の決めた定義によって変わりうる。定義の違いにより、さまざまな時系が生まれてきた。

近代化につれて、世界的に統一された時系が必要となり、時間単位、時刻について国際的な取り決めがなされるようになった。従来は天文時を基として時間単位や標準時を定めていたが、原子時の方がはるかに正確に時間を定められることが明らかとなり、現在では、秒の単位も標準時も、原子時を基に定められている。国際原子時 TAI は、SI 秒との関係、力学時との関係も明確に定義され、あらゆる時系の基となる時系として確立した。実用上では、TAI に基づく協定世界時 UTC が国際的な標準時として用いられている。

各国の国家標準機関  $k$  は UTC に準じる UTC( $k$ )により、その国の標準時を維持する。UTC と UTC( $k$ )の時刻差は BIPM の発行する月報で知ることができる。UTC( $k$ )の作り方に国際的な拘束条件はなく、各機関にゆだねられている。日本においては、NICT の作り出す UTC(NICT)が日本標準時 JST として広く一般に利用されている。

## 第3章 原子時系の発生原理

### 3.1 はじめに

本章では、原子時計から作られる原子時系の発生原理、より具体的には、複数の原子時計の合成から計算される平均原子時の計算方法を説明する。2章で述べたとおり、世界の主な標準時は平均原子時から作られている。

原子時系の説明に先立ち、原子時計の基本的な性質や扱い方を3.2章で紹介する。3.3章では、原子時系に求められる品質を紹介し、原子時計の性質も踏まえて平均原子時の必要性を説明する。3.4章では、基本的な計算式とその理解のための重要なポイントを説明する。3.5章では、具体的な計算方式（時系アルゴリズム）における重要パラメータ設定時の留意点をまとめ、世界の代表的な時系アルゴリズムを簡単に紹介する。最後に、机上の平均原子時を実信号化する方法を3.6章で紹介する。

### 3.2 原子時計の評価法とふるまい

原子時計は、原子のエネルギー準位間の遷移周波数を利用して、高安定な周波数信号を出力する発振器である。その遷移周波数は物理法則にのっとり確定できるものであるが、実際の原子時計においては、原子の受ける外的な擾乱や電子回路上のノイズなどにより、出力周波数がずれたりゆらいだりする（ただしこのゆらぎは非常に小さく、原子時計の周波数は一般の発振器に比べ桁違いに安定である）。このゆらぎは時計毎にそれぞれであり、それらをどのように合成しより安定な時系を作るか、が原子時系構築の課題となる。

原子時系構築においては、原子時計自身には通常人為的な調整を加えない。原子時計の周波数ゆらぎはあるがまま受け入れ、計算の段階で適当な処理を施すのである。つまり、原子時構築には、原子時計のふるまいを理解し、適当な処理・評価を行うことが必要である。以下に原子時計出力信号の扱い方・評価方法をまとめる。

#### 3.2.1 stability と instability

はじめに、語句の使い方について述べておく。frequency stability という語は、厳密には frequency instability と表されるべき事象にも使われることが多い。frequency stability とは「発振器が与えられた期間内のいかなる区間においても同じ周波数を生成できる能力」を表す単語である。また国際的に推奨されている frequency instability の定義は、「与えられた期間

内で自然に又は環境的に引き起こされる周波数変化」[55, p.6]である[64, TN-15]。instability は、電子回路の熱的ノイズ、共振器の固有ノイズ、機器のエージング、環境変化によって引き起こされる[45, p.67]。これらを考慮すると、これから議論する原子時計の周波数ゆらぎに関しては厳密には instability を用いるのが妥当と思われるが、instability の訳語である不安定度という語が使われることはほとんどないため、慣例上 stability に相当する安定度という単語を用いることにする。

以後の議論では、instability を生じる周波数ノイズを、ランダムなものとする系統的なものに分けて考える。事前の評価で系統的ノイズと思われるものをあらかじめ取り除き、その後に残るものをランダムノイズとみなし、解析を行う[45, p.67]。ただし一般に、系統的ノイズとランダムノイズの完全な切り分けは困難であり、事前の評価法に依り結果が変わることもある。

### 3.2.2 原子時計出力の表し方

原子時計の性能評価において、基本となる表現をまとめる。

原子時計は、定格の周波数を持つ発振器である。その出力はあるべき周波数  $\nu_0$  を維持するはずなので、 $\nu_0$  からの周波数ずれにより原子時計の性能が評価される。

出力信号は、以下の式で表すことができる。 $\Phi(t)$ は位相の瞬時値を表す。

$$V(t) = V_0 \{1 + a(t)\} \sin \Phi(t) \quad \dots\dots (3.1)$$

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0 t + \phi(t) \quad \dots\dots (3.2)$$

これは、出力の変動を位相ゆらぎで表した形である。ここで、 $V_0$ は定格電圧、 $a(t)$ は電圧のずれである。通常、電圧変動は小さい ( $a(t) \ll 1$ ) として無視する。また  $\nu_0$  は定格の周波数、 $\phi(t)$ は  $\nu_0$  による位相変動からのずれである。 $t$ は秒の定義に基づく理想的な時刻（理想時と呼ぶ）とする。[45, pp.68-69]

周波数の瞬時値  $\nu(t)$ は次の形となる。

$$\nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\Phi(t)}{dt} = \nu_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\phi(t)}{dt} = \nu_0 \left( 1 + \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\phi(t)}{dt} \right) \quad \dots\dots (3.3)$$

ここで、以下の量を導入する。

$$x(t) = \frac{\phi(t)}{2\pi\nu_0} \quad \dots\dots (3.4)$$

$$y(t) = \frac{dx(t)}{dt} = \frac{1}{2\pi\nu_0} \frac{d\phi(t)}{dt} \quad \dots\dots (3.5)$$

$x$  は時間（位相）変動量、 $y$  は規格化した周波数変動量に対応する。 $x$  及び  $y$  を用いて位相及び周波数の瞬時値を表すと、それぞれの意味がより明確になる。

$$\Phi(t) = 2\pi\nu_0 \{t + x(t)\} \quad \dots\dots(3.6)$$

$$\nu(t) = \nu_0 \{1 + y(t)\} \quad \dots\dots(3.7)$$

定格周波数  $\nu_0$  から  $\nu_0 y(t)$  だけずれた周波数  $\nu(t)$  でもって刻まれる時刻  $t+x(t)$  が、この原子時計の固有時となる。

### 3.2.3 周波数安定度の評価方法

#### ■ 平均周波数

発振器としての原子時計の性能は、出力の周波数ゆらぎがどれだけ小さいか、で評価される。これは、3.2.2 章で定義した周波数変動量  $y$  で表される。(3.7)式により、 $y$  は次の形であることがわかる。

$$y(t) = \frac{\nu(t) - \nu_0}{\nu_0} \quad \dots\dots(3.8)$$

$y$  は無次元であり、発振器の性能を表す際に便利な量である。

周波数の計測には、通常ある程度長いサンプリング時間  $\tau$  が必要なので、周波数の瞬時値  $\nu(t)$  を実測することはできない。そのため通常は、次の平均周波数  $\bar{y}$  を周波数変動量とする。

$$\bar{y}(t) = \frac{x(t) - x(t - \tau)}{\tau} \quad \dots\dots(3.9)$$

ある評価期間において  $\bar{y}$  のばらつきが小さいほど、周波数安定度が良いと評価される。

#### ■ 周波数ゆらぎのモデル化

周波数  $y$  の振る舞いは、周波数領域においてはパワースペクトル密度  $S_y(f)$  で表される。逆に言えば、スペクトル密度  $S_y(f)$  の解析により、原子時計の周波数ゆらぎを評価できる。 $S_y(f)$  は、 $y(t)$  を狭帯域フィルタ  $[f, f+\Delta f]$  に通した後の値  $y(t, f, \Delta f)$  を二乗平均し、単位帯域当たりに換算したものと定義される[39, p.15]。ここで  $f$  はフーリエ周波数であり、解析で用いる概念的な量である。

周波数ゆらぎの解析のため、ランダムノイズを表す数学的モデルが作られた。このモデルにおいては、 $y$  はエルゴード的でありガウス分布をなし平均値はゼロとなる、と考え、 $S_y(f)$  を次式のような多項式で表すことにする[45, p.72]。この多項式モデルにより、発振器

出力のふるまいを良く説明できることが知られている[14, p.25]。

$$S_y(f) = \sum_{\alpha=-2}^2 h_{\alpha} f^{\alpha} = h_{-2} f^{-2} + h_{-1} f^{-1} + h_0 f^0 + h_1 f^1 + h_2 f^2 \quad \dots\dots(3.10)$$

$h_{\alpha}$ は各成分のスペクトル密度の強さを表す。各成分にはそれぞれノイズの名称がつけられており（表 3.1）、原因がよく知られているノイズもある。このモデルは、ノイズ発生原理からこうあるべきもの、として導かれたものではなく、発振器の振る舞いを現象論的に説明するために導入されたものであることに注意したい[14, p.30]。理論的な導出ではなくとも、たかだか5個の項目で周波数ゆらぎの解析に十分な知見を得ることができるという意味で、(3.10)式は大変有意義なモデルと言える。

### ■ 周波数安定度の尺度・・・アラン分散

時間領域においては、以下で示されるアラン分散を、周波数安定度の尺度として定義する。アラン分散は、平均周波数から計算される2標本分散である[39,p21]。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \langle (\bar{y}_{k+2} - \bar{y}_{k+1})^2 \rangle = \frac{1}{2} \left\langle \left( \frac{(x_{k+2} - x_{k+1}) - (x_{k+1} - x_k)}{\tau} \right)^2 \right\rangle \quad \dots\dots(3.11)$$

ここで、 $\bar{y}_k = \bar{y}(t_k)$ 、 $x_k = x(t_k)$ 、 $t_{k+1} = t_k + \tau$  ( $k=0,1,2,\dots$ )、 $\langle \rangle$ は  $k \rightarrow \infty$ の無限時間にわたる平均を表す。実際には無限時間の平均はできないため、有限個のサンプルデータで求めた値をアラン分散値として使用する。計算方法の詳細は付録1に記述した。

アラン分散の値は、2標本の時間間隔  $\tau$  に依存する。また、アラン分散とスペクトル密度の間には変換公式があり、周波数領域での評価と時間領域での評価とは理論的に関連づけられる[39, p.22]。

$\log(\sigma_y) - \log(\tau)$  グラフを描くと、ノイズのタイプにより固有の傾きとなる[45, p.76]。図 3.1 に、パワースペクトル密度及びアラン分散における  $f^{\alpha}$  ノイズの振る舞いを示す。実際には、時間領域で計測を行い、アラン分散のグラフにより、その原子時計の周波数安定度やノイズタイプの情報を得る事が多い。本論文においては、図 3.1 の  $\log(\sigma_y) - \log(\tau)$  グラフにおいて  $p=0$  となる時の  $\sigma_y$  値を、その時計の到達安定度と呼ぶことにする。

### 3.2.4 実用原子時計の具体例

原子時計のふるまいを感覚的に把握するために、実際の例を紹介しておく。原子時計には、自身の周波数ゆらぎの要因を見積もることができる一次周波数標準器という超高確度な精密時計もあるが、ここでは、標準時の基となる平均原子時で用いられる実用原子時計（市販されている原子時計）の例を示す。

表 3.1  $f^\alpha$  ノイズの分類と名称[45, p73]

$\alpha$	ノイズ
2	White phase noise
1	Flicker phase noise
0	White frequency noise
-1	Flicker frequency noise
-2	Random walk frequency noise

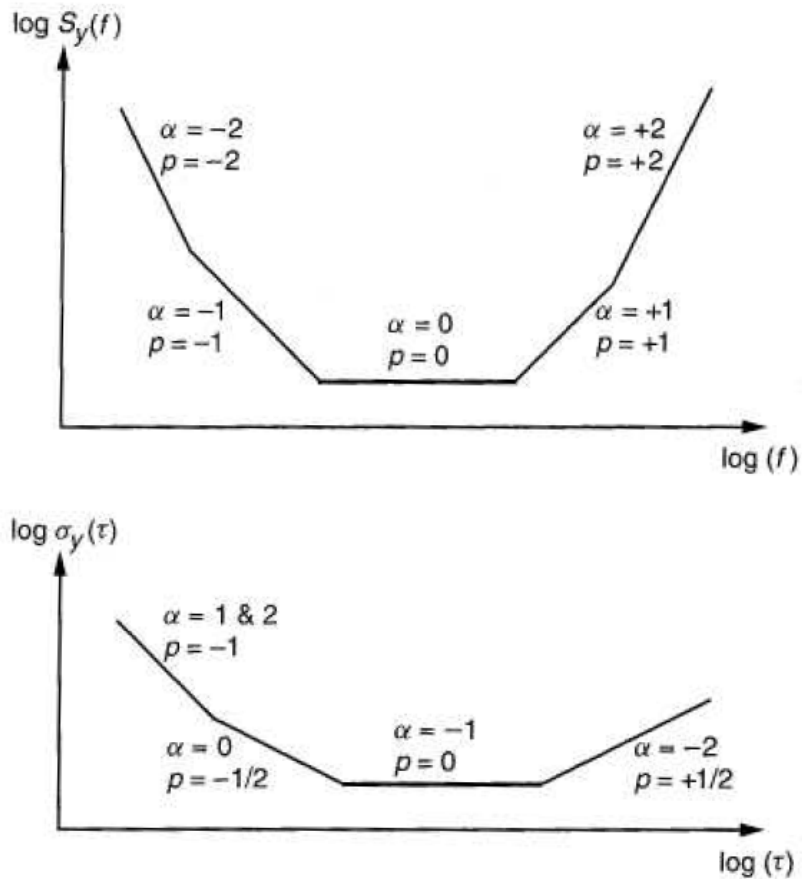


図 3.1  $f^\alpha$  ノイズのパワースペクトル密度とアラン分散[45,p76]

$p$  は各直線の傾きを表す。

現在、原子時系構築において主に用いられているのは、Cs 原子時計（以後 Cs 時計と表記）と水素メーザー周波数標準器（以後 H メーザーと表記）である。一般に、Cs 時計は長期安定度が良く、H メーザーは短期安定度が良い。

Cs 時計の実例として、NICT で運用中のセシウム周波数標準 5071A (Symmetricom, Inc.) のデータを表 3.2 に示す[77]。この機種は TAI 構築に用いられる原子時計の中で最も高いシェアを持ち、日本標準時の原子時系構築にも使われている。

H メーザーの実例としては、同じく NICT で運用中の水素メーザー原子周波数標準器 RH401A (アンリツ株式会社) [43]のデータを表 3.3 に示す。詳細は 5 章表 5.2 を参照されたい。この製品は現在、日本標準時の信号源として使われている (5.2.1 章)。

表 3.2 及び表 3.3 を比べると、 $10^4$ 秒以下の平均化時間  $\tau$  においては、H メーザー RH401A の安定度が Cs 時計 5071A を上回る。だが一般的にはこれ以降 H メーザーの安定度は落ちていき、 $\tau \sim 5$  日のあたりで Cs 時計の安定度が H メーザーを上回ることが多い。Cs 時計の安定度は一般的に  $\tau \sim 30$  日あたりで到達安定度を示す例が多いようである。

原子時系構築においては、原子時計のこのような特性を念頭におき考察を進める必要がある。

### 3.3 平均原子時による原子時系構築

#### 3.3.1 原子時系に求められる品質

原子時系において一般に求められる品質を以下にまとめる[66, pp.13-15]。特に重視されるのは、安定度および信頼性であり、この二つの向上を目的に時系アルゴリズムの設計を行う。確度も要求される時系の場合には、一次周波数標準器による周波数調整が必要となる。

##### ■ 確度 (Accuracy)

時系の確度とは、時系の尺度単位（目盛りの間隔）を定義値とできるだけ合う値に維持できる能力、で表すことができる。時系の尺度単位の定義値は SI 秒であるが、これは理想値であるため、現実的には一次周波数標準器の出力との周波数差を用いて確度を評価する。

平均原子時においては、時系アルゴリズムの目的は安定度の向上であるため、確度向上のためには、別途、平均原子時を一次周波数標準器に合わせて周波数調整する必要がある。TAI はこの方法で高い確度を実現している。

##### ■ 安定度 (Stability)

時系の安定度とは、時系の尺度単位が時間の経過によらず一定の間隔を維持できる能力を指す。その間隔が定義に一致しているかどうかは問わない。

表 3.2 Cs 時計 5071A 周波数安定度[77]

Averaging Time(sec)	$\sigma_y(\tau)$	
	Standard cesium beam tube	High-performance cesium beam tube (Option 001)
$10^{-2}$	$\leq 1.5 \times 10^{-10}$	$\leq 1.5 \times 10^{-10}$
$10^{-1}$	$\leq 5.6 \times 10^{-11}$	$\leq 1.5 \times 10^{-11}$
$10^0$	$\leq 5.6 \times 10^{-11}$	$\leq 5.0 \times 10^{-12}$
$10^1$	$\leq 2.3 \times 10^{-11}$	$\leq 3.5 \times 10^{-12}$
$10^2$	$\leq 5.6 \times 10^{-12}$	$\leq 8.5 \times 10^{-13}$
$10^3$	$\leq 1.8 \times 10^{-12}$	$\leq 2.7 \times 10^{-13}$
$10^4$ <sup>(1)</sup>	$\leq 5.6 \times 10^{-13}$	$\leq 8.5 \times 10^{-14}$
1day <sup>(1)</sup>	$\leq 2.0 \times 10^{-13}$	$\leq 3.0 \times 10^{-14}$
5days <sup>(1)</sup>	$\leq 1.0 \times 10^{-13}$	$\leq 2.0 \times 10^{-14}$

<sup>(1)</sup>Specified only under laboratory conditions.

表 3.3 H マーザーRH401A 周波数安定度[43]

Averaging Time(sec)	$\sigma_y(\tau)$
$10^0$	$\leq 4 \times 10^{-13}$
$10^1$	$\leq 4 \times 10^{-14}$
$10^2$	$\leq 5 \times 10^{-15}$
$10^3 \sim 10^4$	$\leq 2 \times 10^{-15}$
Long term	$\leq 2 \times 10^{-15}$



一般には、安定度が時系の品質で最も重視される。安定度が良ければ変動が予測できるため補正がしやすく、思い通りの時刻差・周波数をもつ時系が実現しやすいからである。安定度の評価で良く用いられる指標はアラン分散である。

平均原子時の安定度は、時計自身の安定度と時系アルゴリズムの設計の双方に依存する。また安定度の計算は、常に他の時系や時計との比較で行われる、ということに注意する。

#### ■ 信頼性 (Reliability)

時系の信頼性とは、状況の変化があっても影響を受けずに通常の品質を維持できる能力である。例えば、平均原子時においては必ず時計の入替えが生じるので、時計の出入りによる影響を最小にするような時系アルゴリズムを設計する必要がある。実際の運用においては、非常に重要な要素である。

#### ■ 入手までの時間 (Delay of access)

時系は、準リアルタイムで結果が得られるものばかりとは限らず、何日も経たないと結果が出ないものもある。これは時系によって計算条件や目的が異なるためである。TAI の場合には、高い信頼性と長期安定度の実現を目標とするため、時間はかかっても多数の時計の長期間データで計算する方法を採用している。一方、UTC(k)のように報時や実験研究のために用いる時系は、準リアルタイムに発生させる必要がある。また時系計算に使うデータの計測精度が十分でない場合には、計測誤差を減らすため長時間の平均が必要となり、この平均時間よりも短い間隔での時系更新ができなくなる。

時系アルゴリズムの設計においては、上記の各項目に注意し、条件や目的に応じた出力方法の検討が重要である。

### 3.3.2 なぜ平均原子時が必要か

原子時計の出力信号の周波数は、それぞれにずれたり揺らいだりする。つまり定義通りの周波数・1秒信号が出てくるわけではない。できるだけ定義に近い1秒信号を得て、理想的な原子時系を作るにはどうすればよいか？

一つの方向は、周波数ずれやゆらぎの原因を抑える、つまり誤差要因をできるだけ排除した時計を作る、というものである。このような時計を一次周波数標準器と呼ぶ。一次周波数標準器は、物理的効果による各種の周波数ずれを計測により評価し、誤差要因を見積もる事で、己の出力周波数の不確かさを見積もることができる。一次周波数標準器は、最も信頼できる周波数・時間を提供する時計であり、同等の品質を持つ他の周波数標準との比較なしにその値を受け入れることができる標準器である[45, p.65]。だが一次周波数標準器には、誤差評価や保守・調整の際に運転を止める必要があり、連続運転に最適とは言えないという一面もある。

実運用上では、連続した時を刻める時計が必要である。だがどんな時計にも故障や寿命があり、1台だけで長期間連続した時系を発生することはできない。つまり、連続時系を維持するには、複数の時計を組み合わせる事が不可欠である。

複数時計の使い方として、1台の時計をマスター、他の時計はバックアップとして運用し、不具合時には次々とマスター時計を入れ替えながら連続時系を維持する方法もあるが、より安定な時系を作る方策として、複数の時計を合成して仮想時系を作る方法がある。この方法では、複数の時計の変動を適正に加重平均することで、各時計のふらつきをならし、原理的には個々の時計よりも安定度の勝る時系を作ることができる。この時系を平均原子時と呼ぶ。時計の台数が多いほど、各時計のふらつき・不具合が平均原子時に与える影響を抑えられると期待できる。

平均原子時は、数でもって個々の時計のゆらぎをならし故障の影響を減ずる、というスタンスに基づく方式なので、できるだけ均一な品質の時計が安定して確保できることが望ましい。そのため通常、一次周波数標準器に比べれば確度は劣るが、比較的安価で連続運転のできる原子時計（実用原子時計）が用いられる。実用原子時計から作った平均原子時に、一次周波数標準器による周波数校正を適宜行うことで、正確で安定な連続時系が得られる。国際原子時 TAI はまさにこの方式で作られている。

平均原子時の計算に用いる原子時計は、無調整の状態（フリーラン）で運用する。仮に原子時計に変動が生じても時計自身の調整は行わず、時系アルゴリズム上で影響を抑える方策を取る。

### 3.3.3 平均原子時の計算・・・定義式

以下に平均原子時の基本的な作り方を紹介する。世界の多くの標準機関がこの方式に基づく時系アルゴリズムで平均原子時を発生し、標準時の基としている。日本標準時アルゴリズムもこの方式を基本としている。異なる計算方式（カルマンフィルタを用いる等[49]）もあるが、標準時アルゴリズムとして採用している例は少なく、ここでは言及しない。

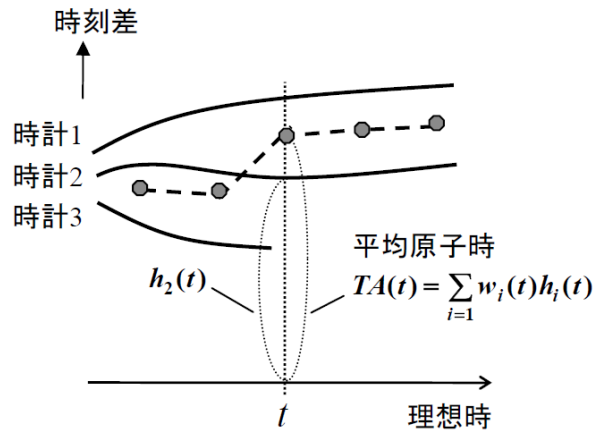
以下、平均原子時を TA と表す。計算式の説明においては参考文献[38][39][65][66]を参考とし、著者自身の解釈も加味した。図 3.3 も著者自身の解釈を含むものである。

以下の計算において、材料となる時計同士は独立であり、そのデータに相関はないものとする。

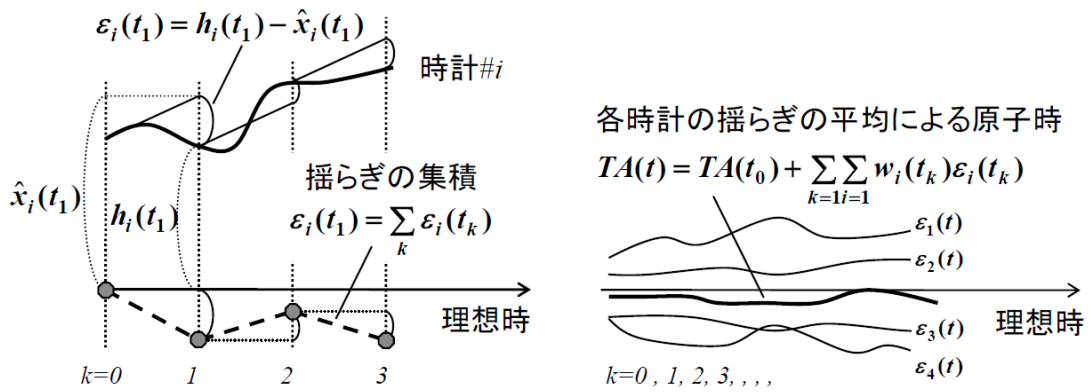
TA を求めるもっとも単純な式は以下のように表せる（図 3.2(a)参照）。

$$TA(t_k) \equiv \sum_{i=1}^N w_i(t_k) h_i(t_k) \cdots (3.12)$$

$$\sum_{i=1}^N w_i(t_k) = 1 \cdots (3.13)$$



(a) 各時計の単純平均による平均原子時 TA



(b) 各時計の揺らぎの加重平均による平均原子時 TA

図 3.2 平均原子時 TA 計算方法の概念図

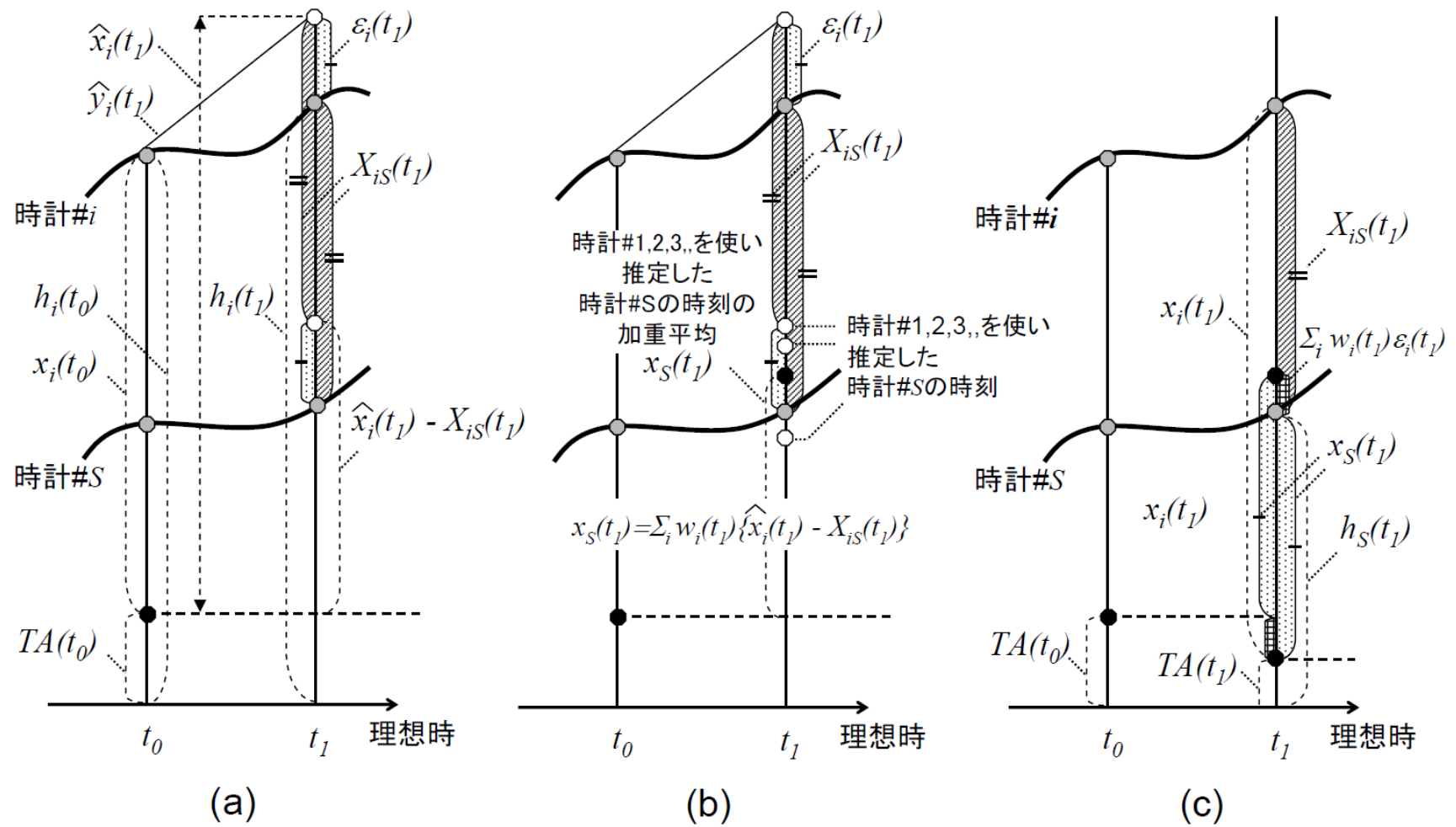


図 3.3 平均原子時 TA の計算における各種パラメータの関係

ここで、 $TA(t)$ は時刻  $t$  における平均時、 $i=1,2,\dots,N$  は各時計を表す指標、 $k$  はタイミングを表す指標、 $w_i(t)$ は各時計の重み、 $h_i(t)$ は各時計の指示値、つまり理想時に対する時刻差である。重みは各時計の周波数安定度に応じた形を取る。理想時とは定義された秒の積算であり、概念上の時刻である。

(3.12) 式を表す図 3.2(a)においては、ある時点  $t_0$  で時計#3 が抜けたとすると、時刻  $h_3(t_0)$  がそのまま計算から抜けるために加算結果の変動が大きい。これを避けるには、各時計の時刻変動の系統的な成分を取り除き、残りの変動をその時計固有のランダムなゆらぎとみなし、平均すればよい (図 3.2(b))。そもそも各時計のランダムゆらぎをならすために平均するので、ゆらぎに関係のない系統的な変動成分を除いておいても問題はないのである。

この考え方に基づき TA の計算式を定める。まず準備として次の諸量を導入する。各量の関係は図 3.3(a)のようになる。

$$x_i(t_k) \equiv h_i(t_k) - TA(t_k) \cdots (3.14)$$

$$\hat{x}_i(t_k) \equiv x_i(t_{k-1}) + \hat{y}_i(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdots (3.15)$$

ここで  $x_i$  は平均原子時 TA と時計# $i$  との時刻差、 $\hat{x}_i$  は TA に対する時計# $i$  の時刻差予測値である。 $\hat{y}_i$  は TA に対する時計# $i$  の予測周波数偏差 (予測レート) である。これは  $x_i$  の過去値から計算される (具体的な計算方法は 3.4.1 章参照)。なぜ予測レートを使うのかと言うと、時刻  $t_k$  で基準となるべき  $TA(t_k)$  はこの段階でまだ存在しておらず (これから計算する)、時刻  $t_k$  での実際のレートが計算できないためである。

TA 計算式(3.12)式を、予測可能な値  $\hat{x}_i$  を取り除いた次の式に書き換える。

$$TA(t_k) \equiv \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \{h_i(t_k) - \hat{x}_i(t_k)\} \cdots (3.16)$$

ここで、時計の実際の時刻と予測値との時刻差を予測誤差  $\varepsilon$  とする。 $\varepsilon$  は時計の周波数ゆらぎから生じると考えられる。各パラメータの関係は図 3.3(a)でも確認できる (ただし図は  $\varepsilon$  の符号が負の場合に相当)。

$$\varepsilon_i(t_k) \equiv h_i(t_k) - \{\hat{x}_i(t_k) + TA(t_{k-1})\} \cdots (3.17)$$

(3.16)式と(3.17)式から、TA は  $\varepsilon$  の集積であることがわかる。

$$TA(t_k) = TA(t_{k-1}) + \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \varepsilon_i(t_k) \cdots (3.18)$$

つまり、時計# $i$  の時刻  $h_i$  から系統的な変動成分を取り除いた後に残る変動成分  $\varepsilon_i$  を加重平

均したものが、平均原子時 TA である。

(3.18) 式は TA の本質を表すものであり、時系アルゴリズムの検討においても重要な役割を果たす式である。

### 3.3.4 平均原子時の計算・・・実際の計算式

(3.16)式及び(3.18)式により TA を表すことができた。だが実は、これらの式から直接 TA を計算することはできない。例えば(3.16)式の  $h_i$  は、基準となる理想時が不可知なので絶対値を知ることができない。同様に、(3.18)式の  $\varepsilon$  も TA が定まるまでは計算できない量である。

実体のあるもので TA を規定するには、「時計# $i$  から  $x_i$  だけずれた時刻」等と表すしかない。 $x_i$  は、実は時計# $i$  と時計# $j$  の時刻差  $X_{ij}$  から計算することができる。 $X_{ij}$  は、TA の一連の計算式において唯一実測で得られる値である。 $X_{ij}$  の計測ノイズは、時計自身の周波数揺らぎに比べて無視できる程度に小さいとする。

$$X_{ij}(t_k) = h_i(t_k) - h_j(t_k) = x_i(t_k) - x_j(t_k) \cdots (3.19)$$

$X_{ij}$  を用いてある時計# $S$  の  $x_S$  を表すことができる。(3.16)式を(3.14)式に代入し、(3.19)式を用いると、以下の式が得られる (各パラメータの関係は図 3.3(b)参照)。

$$\begin{aligned} x_S(t_k) &= h_S(t_k) - \sum_{i=1}^n w_i(t_k) \{h_i(t_k) - \hat{x}_i(t_k)\} \\ &= \sum_{i=1}^n w_i(t_k) \{h_S(t_k) - h_i(t_k) + \hat{x}_i(t_k)\} \\ &= \sum_{i=1}^n w_i(t_k) \{\hat{x}_i(t_k) - X_{iS}(t_k)\} \cdots (3.20) \end{aligned}$$

# $S$  以外の各時計# $i$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) についても、 $x_S$  の値から  $x$  の値を計算できる。

$$x_i(t_k) = x_S(t_k) + X_{iS}(t_k) \cdots (3.21)$$

(3.21)式で求めた  $x_i$  を次の時刻において(3.15)式の右辺に代入し、計算を繰り返し行うことにより、 $x_i$  時系列データを得ることができる。時計# $i$  について  $x_i$  が決まれば、その時計を仲介として TA の時刻が定まることになる (図 3.3(c)参照)。

平均原子時 TA の計算とは、実際にはこのように、時計# $i$  と TA との時刻差  $x_i$  という値の時系列データを得るプロセスを意味する。(3.15)式、(3.20)式、(3.21)式が実質的な計算式となる。予測レート  $\hat{y}_i$ 、重み  $w_i$  は共に  $x_i$  の過去の値から計算されるので (3.4.1 章参照)、

$x_i$ の初期値と時計間の時刻差計測値  $X_{is}$ があれば、TA が計算できる。

TA 計算の開始においては、レート及び重みを計算するための  $x_i$ の過去値、および(3.15)式で用いる  $x_i$ の初期値が必要である。TA が存在しないのだから  $x_i$ 値も存在しないのだが、便宜上、各時計との時刻差が測れる何か一つの時系 (UTC や安定度の最も良い時計等) を TA の代用として、計算開始に必要な  $x_i$ 値を用意することができる。これは、代用とした時系が TA の起点となることを意味する。TA 計算は過去値を参照するため、時刻と周波数の初期値は基本的に保持されるが、TA 計算開始後に調整値を適宜加味することで、初期値の影響は後日容易に補正できる。

### 3.3.5 計算式に関する補足

TA 計算において、その意味を理解する上で著者が重要と思ういくつかのポイントを、以下にまとめる。

#### ■ 計算の基準時系は TA 自身

一つは、計算の基準を TA 自身に取るということである。

すべての計測値・計算値は、基準に対する相対的な値である。計測・計算においては、何を基準としているのかを常に明確にしておかないといけない。計測結果においては基準の変動か被測定物の変動かを分離できないため、最も信頼できるものを基準にするべきである。この意味では理想時を基準に取るのが理にかなっているが、理想時は概念上の値にすぎず、具体的に計算に取り込むことができない。

理想時の次に最も安定なものは TA 自身である。そうなるように TA を作っているはずだからである。この理屈により、過去の TA 自身を基準として用いることにするのである。TA 定義式における  $x_i, \hat{x}_i, \bar{y}_i$  は、すべて TA を基準としている。

TA が最も安定であるというのは、ある意味統計に基づく推測であり客観的保証はない。実際に確認するためには、複数の同等 (かそれ以上) に安定な時系と比較するしかないが、TA 構築の途中では、比較が通常できないため確認の術はない。不適当なアルゴリズムで計算した場合 TA が大きく変動することもある。TA を基準として時計等を評価する際には、TA 変動の可能性も念頭に置くべきである。

#### ■ $x_s$ 計算式の意味

次に、 $x_s$  計算式である(3.20)式の物理的意味を考えてみる。

(3.20)式の  $\hat{x}_i$  は時計# $i$ における予測値であり、 $\hat{x}_i - X_{is}$  は、時計# $i$ を用いて予測した時計# $s$ の時刻である (図 3.3(b))。これを仮に  $\hat{x}_{s,i}$  と表す。この時、自身を除く  $N-1$  台の時計を用いて予測した時計# $s$ の時刻  $\hat{x}_{s,i}$  ( $i=1,2,\dots, N-1$ ) は、一意には定まらない。これは各時計の予測値  $\hat{x}_i$  が予測誤差を含むためである。各時計の予測誤差が全くなければ ( $\epsilon_i=0$ )、

時計#S の予測時刻  $\hat{x}_{S,i}$  ( $i=1,2,\dots,N-1$ ) は全て一致するはずであるが、実際には各時計には異なる予測誤差があるため、時計#S の時刻としては N-1 個の異なる値が生じてしまう。

だが、時計#S の時刻  $x_S$  は一つに定まらねばならない。N-1 個の値のどれか一つが真値である、と判断する根拠は何もないので、各時計における予測誤差を応分に信じることにし、N-1 個の値の平均値を  $x_S$  として採用することにする。これが(3.20)式の意味である。 $x_S$  の値が定まることにより、TA も一意に定まる。つまり、各時計の予測誤差の平均から TA が定められたことになる。

式の変形で得られた(3.20)式だが、この式の解釈からも TA が誤差平均の集積で得られることが理解できる。

#### ■ TA 計算の前提条件

3.3.3 章および 3.3.4 章の計算方式は、時計の今の状態が過去のふるまいからほぼ予測でき、その予測変動分を取り除いた後のふらつきは、平均でならして小さくできる、という前提に依る。言い換えれば、この前提が成り立たない時、TA が安定である保証はなくなる。実際の計算においては、この前提が成り立つ範囲や、成り立たせるためのパラメータ設定方法、前提が成り立たない場合の処置、などについても考慮する必要がある。

### 3.4 時系アルゴリズム

3.3 章で紹介した TA 計算式は原理的なものであり、実際に計算を行うには、より具体的に各種パラメータを設定しなければならない。平均原子時 TA の具体的な計算方法・規則を、時系アルゴリズムと呼ぶ[14, P.129]。

時系アルゴリズムにおいては、最適な方法というものがただ一つ決まっているわけではない。例えば、作ろうとする時系において短期安定度と長期安定度のどちらが重要か、また、リアルタイムで時系を発生する必要があるか否か、等により、時系アルゴリズムの構築法は異なってくるだろう。目的や条件をよく考慮し、最適な時系アルゴリズムを模索することが重要である。

時系アルゴリズムの構築においては、計算の基本式が同じでも、パラメータ設定の違いにより、作られる時系の性質が大きく変わってくる。本章ではまず、3 つの重要なパラメータ（計算間隔、レート、重み）の設定について考慮すべき点をまとめた。次に具体例として、世界の代表的な時系アルゴリズムの概要と特色を、簡単に紹介する。



### 3.4.1 重要なパラメータ

#### ■ 計算間隔[66, pp.26-27]

(3.19) 式の時刻差  $X$  には、通常ある期間平均された計測データを用いる。計測誤差を減らし、原子時計本来の変動を得るためである。

一般に、計測誤差が大きいほど平均時間  $T_0$  を長く取る必要がある。局内の計測システムで取得したデータにおいては、計測誤差が比較的小さいため、数分～数時間の平均化が通常行われる（GPS 衛星による遠隔時計の時刻比較データにおいては、電離層の影響などにより計測誤差が大きい場合、日単位の平均化時間が必要となる）。平均化で均されるため、 $T_0$  よりも短い期間での時計の変動は把握できない。つまり TA の計算間隔は  $T_0$  よりも短くはできない。このことから TA は、1 時間おき、数日おき、といったように離散的に定められることになる。

TA の計算間隔（アップデート間隔） $T$  に関しては、2 種類の作り方がある。

(A) 間隔  $T$  毎に最新の TA をアップデートする。

直近の過去  $n > 1$  個のデータ（区間  $nT$ ）から時計のふるまいを評価し、間隔  $T$  毎に各時計の重み・レート进行計算する。前回の計算と計算区間のオーバーラップがあり、 $T$  間隔の移動平均のような処理になる。過去の TA について再計算はしない。

この方法では準リアルタイム（遅れは  $T$ ）で TA が定められるが、時計の異常なふるまいを判断しにくい。

(B) 間隔  $nT$  毎に、過去の  $T$  間隔の TA を  $n$  個まとめてアップデートする。

具体的には、 $nT=30$  日毎に過去の TA を  $T=5$  日おきに  $n=6$  点定める、といった方法。過去  $nT$  区間のデータから時計のふるまいを評価し、TA のアップデート時に各時計の重み・レートを計算する。重み・レートは区間  $nT$  内で一定値となる。前回の計算と、計算区間のオーバーラップはない。

リアルタイム性には欠けるが、時計の異常なふるまいの判断がしやすい。

(A)方式は、多くの標準機関で採用されている。代表例として NIST の AT1 ( $T=2$  時間、 $nT=10$  日) がある。一方(B)方式は、BIPM の TAI ( $T=5$  日、 $nT=30$  日)、USNO の A.1(MEAN)等の時系アルゴリズムで採用されている。

#### ■ 予測レート[66, pp.30-31]

(3.15) 式の予測レート  $\hat{y}_i$  は、時計と TA との時刻差  $x_i$  を用いて計算される。最適な計算方法は、時計の性質や評価区間の取り方によって変わる。以下に、周波数変動の違いによるいくつかのケースをまとめる。

(1) ホワイトノイズが支配的な場合：

例えば実用 Cs 時計で、平均化時間  $\tau = 1 \sim 10$  日の場合。区間  $\tau$  の予測レートは、その

前の複数の区間  $\tau$  においてレートを計測し、その平均値を採用するのが良い。

(2) ランダムウォークが支配的な場合：

例えば実用Cs時計で、 $\tau = 20 \sim 70$ 日の場合。区間 $\tau$ の予測レートは、直前の区間  $\tau$  で計算したレートを採用するのが良い。

$$\hat{y}_i(t_k) = \bar{y}_i(t_{k-1}) = \frac{x_i(t_{k-1}) - x_i(t_{k-1} - \tau)}{\tau} \dots (3.22)$$

Cs時計においては、到達安定度が得られるのはこの区間になるため、予測レートを (3.22) 式で計算することが多い。

(3) リニアドリフトが支配的な場合：

水素メーザーで、 $\tau =$ 数日の場合。区間 $\tau$ の予測レートは、直前の区間  $\tau$  のレートからドリフトを除いたものを採用するのが良い。

同じ時計を用いていても、計算間隔が異なれば考慮すべきノイズの性質が異なる。レート計算方法も変わってくるため注意する。

#### ■ 重み[66, pp.28-29]

時計の重み  $w_i$  も、時計とTAとの時刻差  $x_i$  を用いて計算される。一般には、周波数分散  $\sigma^2$  の逆数を取ることが多い。

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \Big/ \sum_{i=1}^N \sigma_i^2 \quad \dots (3.23)$$

周波数分散としては、目的や条件に応じて、通常分散、フィルタ付分散、アラン分散、のいずれかが用いられる。区間  $\tau$  で求めた周波数分散から重みを決定した場合、TAの周波数安定度は、平均化時間  $\tau$  の近辺で最適化されることになる。このことから、時計の性質やTAの目的にあった区間  $\tau$  で周波数分散を計算する必要がある。

時計の周波数分散は、TAを基準に計算される。この時、特定の時計に重みが偏るおそれがあることに注意したい。極端に重みの大きな時計がある場合、TAはその時計の振る舞いに支配されるため、TAに対するその時計の変動は相対的に小さくなり、その時計の重みはより大きくなる、という循環が生じる。この場合、その時計がある時点で不安定になったとしても、それを判定して重みを落とす機構がないため、TAはその時計に同期して不安定になってしまう。

これを避けるには、不偏分散を用いる方法[69]や、重みに上限を課す方法がある[46]。重みに上限を課すことで、最適化は犠牲になるが、TAの信頼性は高くなる。

### 3.4.2 代表的な時系アルゴリズム

世界の各標準機関は、それぞれ独自の時系アルゴリズムで標準時を発生している。それらの多くは 3.3 章の計算式を基本的に踏襲しているが、計算間隔、レートや重みの決め方により、種々なバリエーションがある。また、時計や計測データの異常に対する方策も時系アルゴリズムの重要な要素であり、工夫が凝らされている。実際長期の運用においては様々な不測事態が発生するため、それらの影響をいかに効率よく抑えるか、はアルゴリズム研究の大きな課題である。

以下に、異なるタイプの代表的なアルゴリズム 3 例について、概要と特色を簡単に紹介する。それぞれの計算の詳細は付録 3 にまとめた。

#### ■ ALGOS(BIPM)アルゴリズム

ALGOS(BIPM)は、国際原子時 TAI の元となる平均原子時 EAL の時系アルゴリズムである。以下の説明の詳細は文献[46][65] [66] [67]を参照されたい。

特徴は、計算に用いる時計数が圧倒的に多いこと、また 1 カ月分のデータをまとめて計算する post-process 方式を採用していることである。これは、EAL 及び TAI においては、リアルタイム性よりも長期安定度と信頼性が重視されるためである。長期間のデータを俯瞰して評価できるため、異常データの検出がしやすい。

計算は 3.3 章の基本原則に基づく。EAL の更新は月に 1 回で、前月の 5 日おきの値をまとめて算出する。時計のレートは 30 日間の最小二乗近似直線の傾きから求める。また重みは 1 年分のレートの古典的分散を用いて計算する。このことにより EAL 及び TAI は季節変動の影響を受けにくい。最大重みの制限により一部の時計への偏重を防ぐ。レート変動を 1 年分の標準偏差を基準値として監視し、変動の大きな場合は重みゼロとする。計算への復帰は最短でも 4 カ月後だが、それでも十分な時計数が確保できるのは、参加時計数が多いためである。レートと重みの計算において、時計の種類による区別はしていない。

#### ■ AT1(NIST)アルゴリズム

AT1(NIST)アルゴリズムは、NIST の平均原子時 AT1 を計算する時系アルゴリズムである。以下の説明の詳細は文献[61][65] [68]を参照されたい。

特徴は、再計算・追計算を行わずリアルタイム性を重視していることである。また扱う時計数は 10 台程度と比較的少ない。

計算は 3.3 章の基本原則に基づく。時計の時刻差計測、AT1 の計算及び更新の間隔は、すべて 2 時間である。時計のレートおよび重みの計算に指数フィルタを適用し、一定期間内のデータ平均において過去データの寄与を弱める手法を取る。これは区間内データを等しく扱う ALGOS との相違点であり、長期変動は除去できないが、短期変動を均すのには有効な方法である。レート計算においては、過去の周波数の絶対値は記憶せず周波数の変化分だけを追っていく。重みは分散ではなく予測誤差を使って求める。誤差変動の監視に

より異常時計を計算からはずす。

#### ■ A.1(USNO,MEAN)アルゴリズム

USNOの時系アルゴリズム (Percival algorithm) は、USNOの約80台の原子時計から平均原子時A.1(USNO, MEAN)を計算する。以下の説明の詳細は文献[47][48][58][59][63]を参照されたい。原子時計の内訳は、セシウム時計約60台・水素メーザー約20台であり、TAIに次いで多くの時計を計算に用いる。

計算は3.3章の基本原理に基づく。最大の特徴は、セシウム時系と水素メーザー時系を個別に作り、短期長期でそれぞれの比率が変わるような重みづけで合成をする点である。そのため、75日間のデータセットで遡り計算を行い、最適なパラメータを設定する。準リアルタイム (1時間毎) に結果を出力するが、遡りと再計算を行うpost-process方式を採用している。

### 3.5 平均原子時の実信号化

ここまで、平均原子時 TA の計算方法について紹介してきた。だが TA はいわば机上の時刻であり、TA と実時計との時刻差を計測で得るためには、TA に即した実信号が必要である。本章では、TA の実信号化の原理を簡単に説明する。各量の関係を図 3.4 に示す。

#### 3.5.1 実信号化の原理

3.3 章において、TA は時計#S から  $x_S$  シフトした時刻 (時計#i からであれば  $x_i$ ) であることを述べた。これは見方を変えると、 $x_A=0$  を実現する時計#A があれば、時計#A の時刻を TA と見なせるということである。時計#S と時計#A の時刻差は  $X_{SA} = x_S - x_A = x_S$  となる。

$x_A=0$  を実現するには、TA に対する時計#A の周波数偏差及び時刻差を求め、それをキャンセルする調整値を時計#A に与えればよい。時計#A に原子時計を充てることもできるが、周波数調整した原子時計は TA 計算に参加できなくなるため、原子時計を信号源とした周波数調整器を時計#A として用いることが多い。以降この例で話を進める。周波数調整器を #A、その信号源となる原子時計 (原振と呼ぶ) を時計#a、と表す。

周波数調整器の出力を TA に即した実信号とみなし、リアルタイム準 TA と呼ぶ。リアルタイム準 TA は、調整間隔よりも長期においては TA と同等の安定度、調整間隔より短期においては時計#a の安定度を、原理的に示すことになる。

#### 3.5.2 実例

周波数調整器に与える調整値の具体的な計算例を紹介する。

調整器#A の時刻を  $h_A(t_k)$  と表す。調整器#A の出力をリアルタイム準 TA とする。時刻  $t_k$

に  $y_{adj}$  の周波数調整を与えるとすると、(3.14)・(3.15)・(3.17)・(3.22)式から、調整器#A の  $t_{k+1}$  における時刻は次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} h_A(t_{k+1}) &= \hat{x}_A(t_{k+1}) + TA(t_k) + \varepsilon_A(t_{k+1}) \\ &= \{x_A(t_k) + \hat{y}_A(t_{k+1}) \cdot (t_{k+1} - t_k)\} + \{h_A(t_k) - x_A(t_k)\} + \varepsilon_A(t_{k+1}) \\ &= [x_A(t_k) + \{\bar{y}_A(t_k) + y_{adj}(t_k)\} \cdot (t_{k+1} - t_k)] + \{h_A(t_k) - x_A(t_k)\} + \varepsilon_A(t_{k+1}) \\ \therefore h_A(t_{k+1}) &= h_A(t_k) + \{\bar{y}_A(t_k) + y_{adj}(t_k)\} \cdot (t_{k+1} - t_k) + \varepsilon_A(t_{k+1}) \dots (3.24) \end{aligned}$$

ここで、レート  $\bar{y}_A(t_k)$  は原振時計#aのレートに従うため、 $\bar{y}_A(t_k) = \bar{y}_a(t_k)$  となる。また未来の値  $\varepsilon(t_{k+1})$  は知る事ができないため、 $\varepsilon(t_{k+1})=0$  とみなして計算を進める。これらのことから、(3.24)式は以下の形となる。

$$h_A(t_{k+1}) = h_A(t_k) + \{\bar{y}_a(t_k) + y_{adj}(t_k)\} \cdot (t_{k+1} - t_k) \dots (3.25)$$

発振器#A の出力が TA を実現するには、 $h_A(t_{k+1})$  が  $TA(t_{k+1})$  に一致すれば良い。だが  $t_k$  において未来の値  $TA(t_{k+1})$  は知る事ができないため、 $TA(t_{k+1}) = TA(t_k)$  とみなして計算を進める。(3.14) 式の  $TA(t_k)$  は次の式で表される。

$$TA(t_k) = h_A(t_k) - x_A(t_k) = h_A(t_k) - \{x_S(t_k) + X_{AS}(t_k)\} \dots (3.26)$$

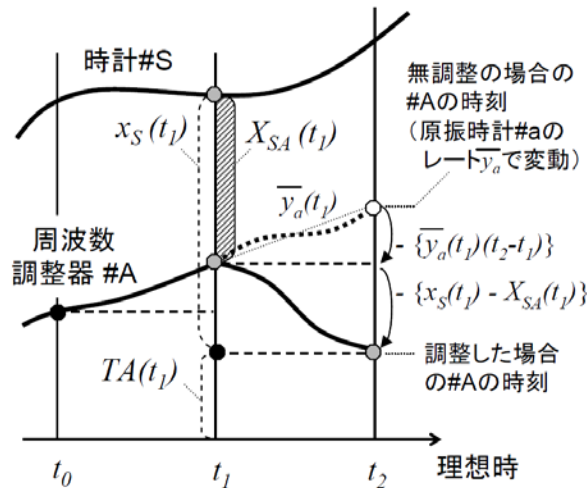


図 3.4 平均原子時 TA の実信号化における各種パラメータの関係

(3.25) 式の  $h_A(t_{k+1})$ =(3.26) 式の  $TA(t_k)$  を解くと、 $y_{adj}$  は以下の式となる。

$$y_{adj}(t_k) = \frac{X_{SA}(t_k) - x_S(t_k)}{t_{k+1} - t_k} - \bar{y}_a(t_k) \dots (3.27)$$

この  $y_{adj}$  を時計#A の調整値として与えることで、時計#A の出力であるリアルタイム準 TA は TA をトレースすることになる。右辺 1 項目は TA に対する時計#A の時刻差調整量、2 項目は周波数差の調整量である。

通常  $TA(t_{k+1}) \neq TA(t_k)$  であるため、制御は後追いとなり、リアルタイム準 TA は完全には TA と一致しない。また  $\varepsilon(t_{k+1}) \neq 0$  であるため、リアルタイム準 TA は完全には TA と一致しない。ただし、信号源に安定度の良い時計を用いることで  $\varepsilon(t_{k+1}) \sim 0$  となり、制御誤差を小さくすることが可能である。第 5 章の新日本標準時発生システムにおいて、この実例を示す。

### 3.6 3章のまとめ

本章では、原子時計に関する基本的事項と平均原子時の基礎をまとめた。

実用原子時計では、個々の時計において周波数ゆらぎがある。系統的なものは事前に予測し除去できるが、ランダムなものは予測できないため、多数の原子時計の平均による平均原子時により、安定な原子時系を構築する。

平均原子時 TA は、個々の原子時計の予測誤差  $\varepsilon$  の集積から作られるが、TA=数値、という形では表せず、実時計からの時刻差  $x$  で規定する。TA 計算とは  $x$  の時系列データを求める作業である。 $x$  の値は、過去の  $x$  の計算値とその時点の時計間時刻差  $X$  の実測値から計算する。これは、過去の自分を基準とする再帰的な計算方法であり、結果の評価においてはその点に留意すべきである。

実際には、時系アルゴリズムにおけるパラメータ設定（各時計のレートや重み、計算間隔）や異常対処法により、作られる時系の性質が大きく変わってくる。現実の時系計算においてはこれが多くの問題の原因となり、研究が必要となる。

平均原子時自身は机上の時刻であるが、実信号化することで実際の時計と同等に扱うことができる。ただし実信号化には誤差が伴うことに留意する。

## 第4章 日本標準時の概要

### 4.1 はじめに

2章・3章では、原子時系と標準時に関する基礎知識について紹介してきた。本章以降では、日本標準時に焦点を合わせる。日本標準時 JST は、情報通信研究機構 NICT にある原子時計群を合成して作られる平均原子時であり、日本における実質的な標準時として広く利用されている。5章以降で、本論文の主部である日本標準時発生システムに関する研究結果を詳述するが、その前に本章において、日本標準時の概要を知るための背景および基礎知識をまとめた。はじめに4.2章で歴史的経緯を概説し、4.3章で現在の日本標準時について、発生の仕組みや利用状況を紹介する。

### 4.2 日本標準時の歴史

#### 4.2.1 標準時制度の確立と中央標準時

19世紀末の世界的な標準時確立の動きは、日本にも直ちに影響を及ぼした。1884年10月の国際子午線会議(2.5.1章参照)を受けて、1886年(明治19年)に勅令第51号が交付され、日本の標準時制度が確立された。この勅令は、以下の3点を定めるものであった。

- ・グリニッジ天文台の子午線を経度の基準とすること。
- ・この基準から東西180度を東経・西経と定めること。
- ・1888年1月1日より、東経135度の子午線時を日本一般の標準時とすること。

その後、1895年に台湾と澎湖列島が日本の属領になったのを機に、東経120度の子午線時を西部標準時と呼び、東経135度の子午線時を中央標準時と呼ぶこととなった(明治28年勅令167号)[3, pp.220-222]。また1933年には、当時日本の委任統治領となっていた南洋群島にも、東経165度および150度に相当する標準時がそれぞれ設けられた(昭和8年南洋庁告示第42号)。だが、1937年に西部標準時が廃止され(昭和12年勅令第529号)、更に第二次大戦後に南洋群島の標準時に関する告示も消滅したため、その後は中央標準時のみが存在することとなった[27]。中央標準時は世界時つまり平均太陽日に基づくものであり、その決定は国立天文台設置の目的の一つとして定められている[35]。

勅令第529号はその後改正されておらず、中央標準時の名称は現在も法的に存続している[3, p.254]。

## 4.2.2 標準電波による標準時の通報

1886年の勅令第51号により日本の標準時制度が確立された直後から、標準時の通報が逋信省（後の郵政省）により行われることとなった。1911年（明治44年）開始当時は、東京天文台から伝送された中央標準時を、銚子無線局から電波送信するという方式であった。一方、無線通信の利用が進むにつれ、周波数標準の送信も必要となってきた。1940年（昭和15年）には、逋信省の検見川送信所から、周波数基準としての標準電波の発射が開始された。1948年（昭和23年）からは、この標準電波に、報時としての標準分秒信号の情報も載せられるようになる[35]。当時、標準時計は東京天文台、周波数標準器は逋信省電波標準所の管轄であった[3, pp.49-50]。

以後、標準電波による周波数標準と報時は、逋信省→郵政省（電波研究所→通信総合研究所）→総務省（通信総合研究所）→情報通信研究機構 NICT、の流れで一貫して行われてきた。現在法的には、総務省設置法第4条73、および、独立行政法人情報通信研究機構法第14条3において、周波数標準値の設定・標準電波の発射・標準時の通報、が規定され、NICTがその業務を実施している。

1951年（昭和26年）当時は、標準周波数及び報時の基信号は電波研究所の有する原子時計から発生するが、報時信号については、東京天文台から通知される中央標準時により校正することとなっていた[37, pp.12-13]。その後 UTC が世界の標準時として用いられるようになったことから、日本においても UTC+9 時間を標準時として報時することとなった。

## 4.2.3 計量法の改正と日本標準時

時間の単位については、計量法で定義されている。1951年（昭和26年）に交付された計量法においては、秒は平均太陽日の  $1/86400$  として定められ、東京天文台がこれを決定すると規定されていた（旧計量法第3条の3）。この定義を受け、報時信号としても天文台から通知される中央標準時を用いていた。

だがその後、SI 秒の定義の変遷に基づき計量法は改正され、1972年（昭和47年）には、秒は Cs 原子の遷移周波数により定義されることになった[3, p.254]。これを受け、同じく1972年より、電波研究所の原子時計から作り出される日本標準時が、報時に用いられるようになった[37, p.17]。

改正後の計量法において原子時を決定する公的機関の指定はない[35]が、NICT の発する日本標準時は、秒の定義に基づく原子時であり、世界の標準時である協定世界時 UTC との同期も維持され、様々なサービスを通じて日常生活から科学技術に至る様々な用途に利用されていることから、実質的な日本の標準時として広く利用されている。



## 4.2.4 日本標準時発生システムの歴史

日本標準時は、電波研究所・通信総合研究所・NICTにおいて、30年余に渡り発生・維持されてきた[2][21][37, p.153]。

日本標準時発生・計測システムの1世代目は、1976年より自動化が進められ1977年度に整備された。このシステムは、電波研究所小金井本所一名崎標準電波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。また1978年には平均原子時TA(RRL)の計算を開始している[4]。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。4世代目のシステムは、1999年秋より運用を開始した[29]。システム主要部を完全2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にも配備された。

その後、実験棟の老朽化のため新棟が建設されることとなり、日本標準時システムも新棟に移ることになった。これが新システム開発の契機となり、2006年2月に、5世代目となる新システムが定常運用を開始した。新システム開発に関しては、5章でその詳細を述べる。

## 4.3 日本標準時の概要

### 4.3.1 日本標準時の仕組みと役割

日本標準時の基本的な発生の仕組みと役割の概要を図4.1に示す。

NICT小金井本部の有するCs時計群の合成から作られる平均原子時TAが、日本標準時の元となる。この平均原子時TAに基づく実信号を作り、これがUTCにできるだけ同期するように調整する。これをUTC(NICT)(NICTが作るUTCに準拠した信号の意味、2.6.3章参照)と呼ぶ。UTC(NICT)の時刻を9時間シフトしたものが日本標準時JSTである。図から明らかなように、UTC(NICT)及びJSTは、UTCに合うよう調整は付加されるものの、NICTで独立に作られる時系である。

NICTは、日本標準時の発生だけでなく世界の標準時の構築にも貢献している。NICTの原子時計群の時刻差計測データは国際度量衡局BIPMに送られ、国際原子時TAIの計算に使われる。また、NICTの開発した一次標準器[54][56]のデータもBIPMに送られ、TAIの確度校正に寄与している。

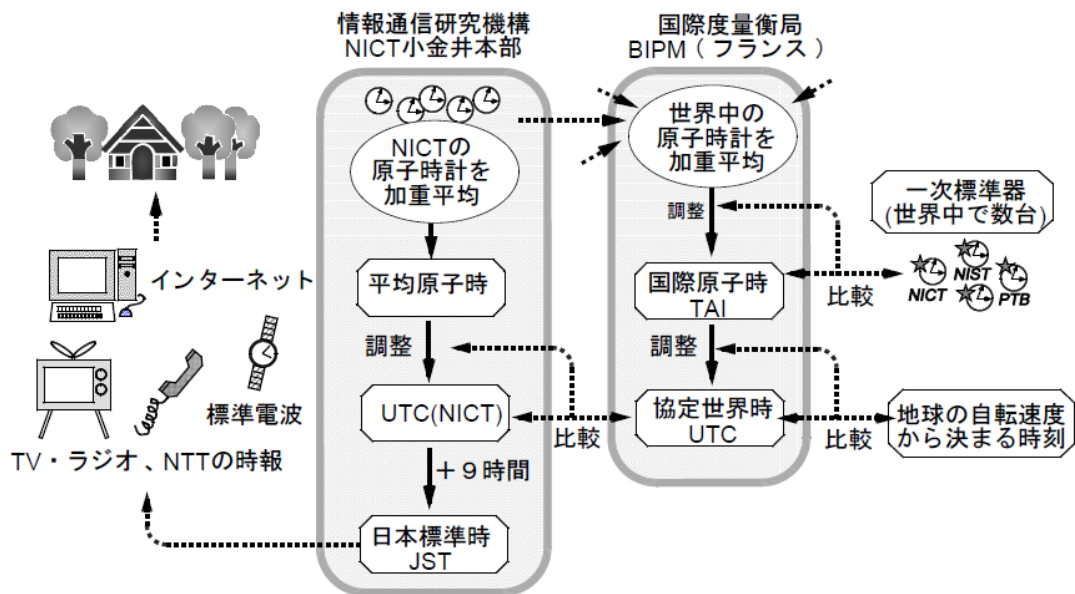


図 4.1 日本標準時の仕組みと役割

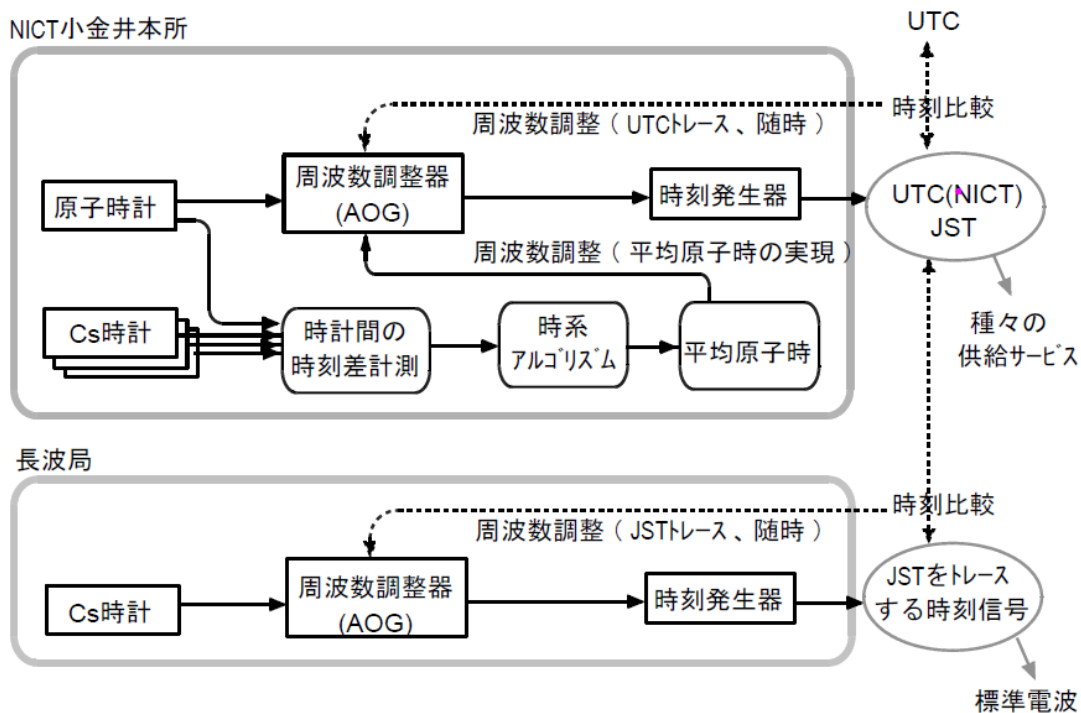


図 4.2 日本標準時発生システムの基本構成

### 4.3.2 発生システムの基本構成

より詳しい日本標準時発生システムの基本構成を図 4.2 に示す。

日本標準時の元となるのは、NICT 小金井本部で運用される Cs 時計群である。各 Cs 時計は、恒温恒湿のシールドルームにおいて、人為的な操作を加えずフリーラン状態で運用する。Cs 原子時計間の時刻差は、定期的に計測され、TA 計算に用いられる。TA 計算においては、計測誤差も込みで時計の変動とみなされるため、原子時計の性能を損なわない高精度な時刻差計測が必要となる。TA 計算の時系アルゴリズム[28]は、3.3 章の方式にのっとる。TA の実信号化のため、信号源となる原子時計（原振と呼ぶ）及び周波数調整器 AOG を用いる。AOG が TA をトレースするよう、1 日 1 回 AOG の周波数を調整する（3.5 章参照）。AOG の出力する 5MHz, 1pps を積算した時系が、UTC(NICT)および JST となる。

UTC(NICT)は、衛星を使った高精度時刻比較技術[6]により、他局の標準時や時計と時刻比較できる。以前は GPS Common-View 法を用いていたが[18]、現在はより高精度な GPS All-in-view 法[19]や双方向時刻比較法[7]が使われるようになった。特に双方向時刻比較は、TAI への貢献において重要となるアジア-ヨーロッパ間の時刻比較データとして BIPM に正式に採用され[57]、またドイツの計量標準研究所 PTB と NICT 間における一次標準器の直接周波数比較に用いられる[50]など、高精度時刻比較法の主流となっている。

また NICT の計測データを BIPM に定期的に送付することにより、BIPM の月報 Circular-T に UTC-UTC(NICT)の時刻差が掲載される。この値を参照し、UTC との時刻差が許容量（CCDS 勧告では 100ns、2.6.3 章参照）を超えないよう、適宜調整を実施している。ただし Circular-T は毎月 15 日前後に前月の結果をまとめて発行する形式なので、例えば月頭の UTC-UTC(NICT)の値を知ることができるのは、最大約 45 日後になる場合もある。このことから、Circular-T を用いた調整は常に後追いで行うことになり、現状を予測しながら調整量を加減することになる。

### 4.3.3 各方面での利用

NICT で発生した日本標準時は、国内の標準時刻として、また周波数の国家標準として、さまざまなサービスにより国内のユーザーに供給されている。

最も広く利用されているのは、長波帯標準電波による時刻配信[5][15][16]であろう。送信所は 2 カ所（福島県の大鷹鳥谷山、佐賀県と福岡県の県境にある羽金山）にあり、標準周波数と時刻とを供給する。送信時刻は送信所内の Cs 時計から作られ、衛星による時刻比較により JST と 100ns 以内の同期を確保する。標準電波は、電波時計をはじめ、地震・気象観測機器、道路標識点滅同期制御、地上波デジタル放送の基準発振器等、各方面で利用されている。

ネットワーク上で時刻を供給する NTP サーバー[8][9]においては、毎秒 100 万リクエスト

ト以上の処理能力を有するシステムを開発し、2006年6月より一般利用者向けのサービスを開始した[25]。開発した高速ボードを活用した時刻比較精度向上の研究が進められている[12][13][33]。

テレホン JJY は、アナログ電話回線により時刻を供給する[1][36]。パソコンとモデム、汎用通信ソフトを用いて、回線遅延程度の精度で JST を得ることができる。業務用の専用受信装置を用いれば回線遅延を補正でき、1ms 以下の精度で JST と時刻同期できる。テレホン JJY は、NTT や放送局の局時計の時刻同期など業務用によく利用されている。

標準周波数の利用としては、周波数標準器の校正がある[10]。利用者が機器を NICT に持ち込んで行う搬入校正が主であるが、GPS 衛星を利用した時刻比較による遠隔校正も実施している。正確な周波数標準は、発信器、さらにはそれを内蔵する計測機器の精度・確度を保つ上で非常に重要である。

また電子商取引・電子決済等において、正確かつ公的に承認された電子的な時刻情報を提供するサービスも、近年開始している[11][26]。

## 4.4 研究の必要性

日本標準時の発生においては、実績ある他機関の標準時発生方法を移植すればよいのでは、という考え方もあろう。TAI や UTC のように究極の確度・精度を実現している時系もあれば、米国の標準機関 NIST (National Institute of Standards and Technology) や USNO のように高品質な標準時を維持・供給している例もある。

だが、利用目的や使用する原子時計・計測機器など諸条件が同一でない場合、他機関の方式が最適となる保証はない。例えば、TAI や UTC は確度・精度を追求するためリアルタイム性を犠牲にしており、実用標準として使われる日本標準時とは利用目的が根本的に異なる。NIST は Cs 時計と H メーザーを混在して平均原子時 TA を計算しており(付録 A3.2)、Cs 時計だけで TA を作る日本標準時においては、より単純な方式で十分な可能性がある(単純性は問題発生の抑制に非常に重要である)。USNO で使用する時計数は非常に多く(付録 A3.3)、これも日本標準時とは条件が異なる。学習のための模倣は有意義であるが、内容の理解と発展のための研究は常に必要である。

日本標準時の改良に向け、5 章ではハードウェア新システムの開発について、6 章・7 章では日本標準時で生じた問題に即した時系アルゴリズムの改良について論じる。新システムの構成は基本的に 4.3.2 章に述べたものと同じ、時系アルゴリズムも 3.3.3 章及び 3.3.4 章の基本式にのっとりながら、基本に基づき組み上げた(と考える)結果に、初期段階では気づかなかつた様々な問題が生じた。それらの原因の追及と対処方法の探索が、本論文の主な研究内容である。

## 4.4 4章のまとめ

日本において初めて標準時制度が確立されたのは明治時代である。当時の法律では天文時から標準時を定めていた（中央標準時）。この法律は現在も存続し中央標準時は法的に生きている状態であるが、現在、国内の実質的な標準時として主に使われているのは、NICTの発生する日本標準時である。

NICTの前身である国立研究所は、標準時制度確立直後より標準電波による標準時通報の任務を負い、関連技術開発の経緯により、原子時計による時刻・周波数標準の研究に深く関わってきた。国際的な秒の定義が天文時から原子時に変更されたことを受け、日本における標準時も原子時計に基づくものに代わっていった。NICTは、標準時を通報するだけでなく原子時計から発生する業務も担うようになった。だが日本標準時に関する法的な定義はなく、制度的にはやや曖昧な状態となっている。

日本標準時は、NICTが自局の原子時計群を合成して発生・維持し、各種サービスを通じてユーザーに供給している。報時だけではなく国家周波数標準の供給も、あらゆる精密技術の支えとして重要な意味を持つ。またNICTの原子時計計測データは、国際的な標準時の構築にも寄与している。

標準時の発生に関しては、各機関において最適な方法が異なるであろうことから、日本標準時においても独自の研究が必要である。5章において、ハードウェアの改良に関する研究、6章・7章において、ソフトウェアの改良に関する研究を論じる。

# 第5章 原子時系発生システムハードウェアの向上 ～新日本標準時発生システムの開発～

## 5.1 はじめに

本章では、日本標準時発生のための新システムの開発について、その詳細と評価結果を述べる[52]。本システムは、原子時系発生システムにおけるハードウェアの具体的な1例であり、その機能向上の探求は、原子時系発生システムの高度化の研究につながる。

新システムの設計においては、以下の方策により、日本標準時で目標とする (A) UTC との高い同期精度、(B) 高い周波数短期安定度、(D) 高い信頼性 (1.5 章参照)、の実現を目指した。

1. 日本標準時の信号源として H メーザー新規導入→ (A) (B)
2. 高精度計測装置の新規開発・導入→ (A) (B)
3. システム主要部の多重化→ (D)
4. 監視機能の強化→ (D)

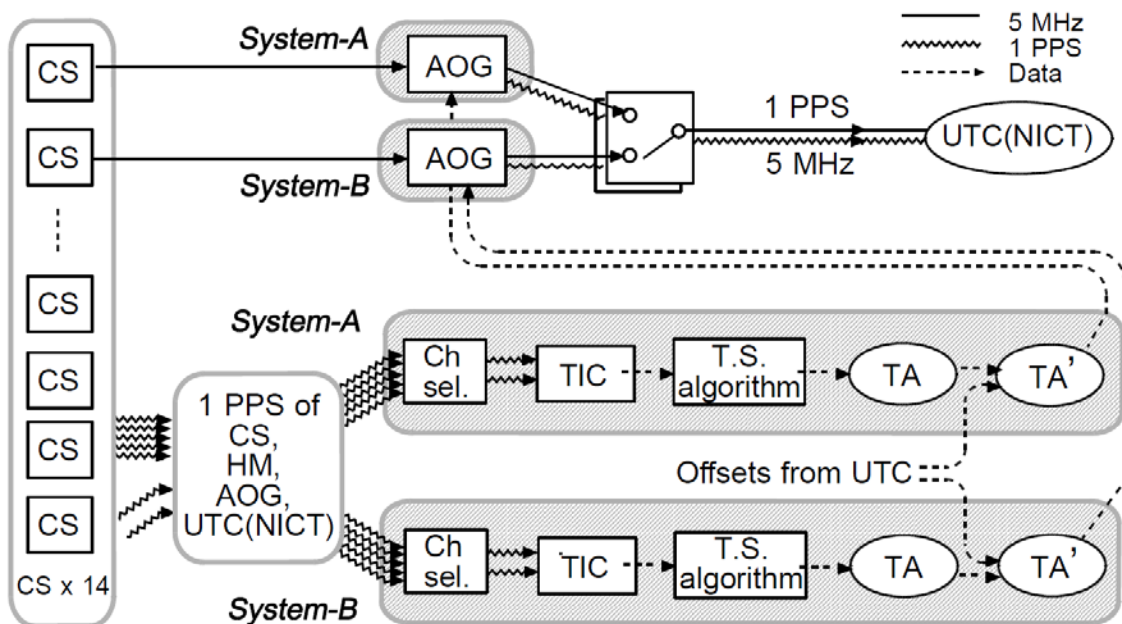
H メーザー導入は、直接的に周波数短期安定度を向上させる。これは時刻制御精度の向上にもつながり、UTC 同期精度の向上に寄与することが期待できる。H メーザーの性能を活かすため、高精度計測装置の新規開発が不可欠な要素となった。多重化と監視機能の強化は、システム全体の信頼性の向上につながる。

新システムの数値目標としては、UTC との同期精度 10ns、および、周波数安定度  $2.6 \times 10^{-15}$  @45 日の実現を目指した。周波数安定度については、Circular-T 発行までの最大 45 日間、10ns 以内の同期を維持するための値である。

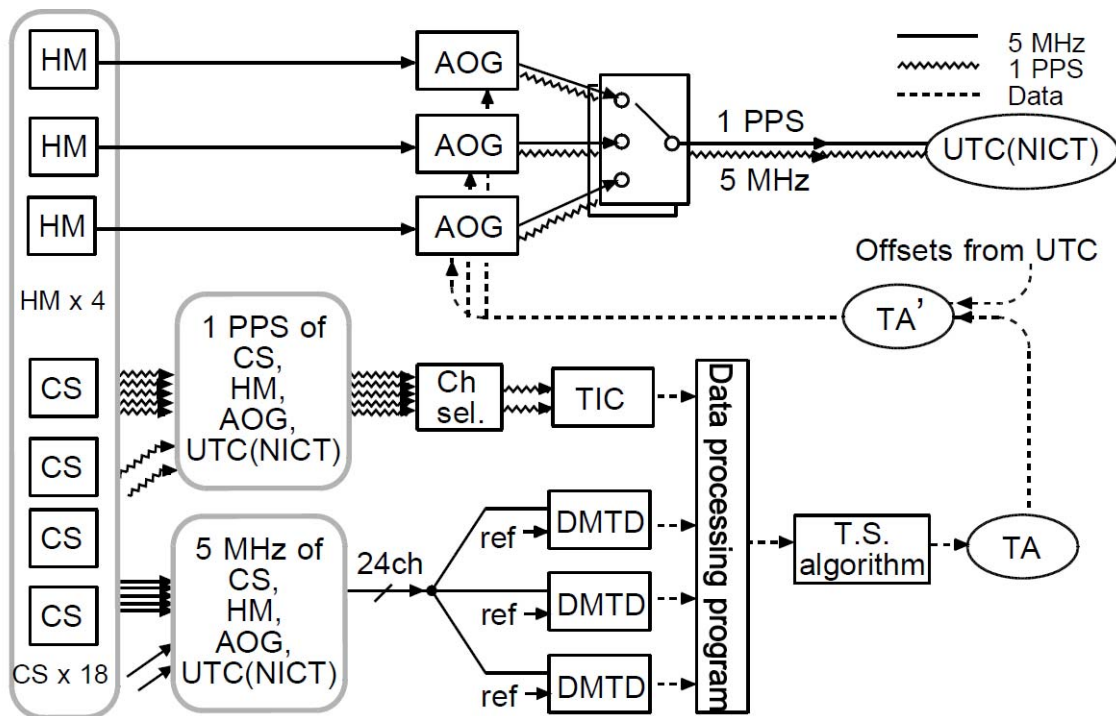
はじめに、5.2 章で第 4 世代 (旧システム) と比較しながら第 5 世代 (新システム) の詳細を述べる。開発の経緯と実運用化の準備を 5.3 章で紹介し、システムの総合機能評価として、定常運用開始後の稼働状況と今後の課題とを 5.4 章で報告する。

## 5.2 新システムの開発

図 5.1(a)に第 4 世代 (旧システム) のブロック図を、図 5.1(b)に第 5 世代 (新システム) のブロック図を示す。また、新旧システムの比較を表 5.1 にまとめる。新旧システムとも



(a) 旧システム (第4世代)



(b) 新システム (第5世代)

図 5.1 日本標準時発生システム新旧の比較



図 5.2 新システム（原子時計と計算機を除く）の外観



表 5.1 新旧システムの機能比較

	項目	旧システム	新システム	変更のメリット
発生系	UTC(NICT)の元時計 (AOGの原振)	Cs時計	Hメーザー	周波数短期安定度の向上
	周波数調整器	AOG	AOG	
	キャリア分配アンプ	オシロクオーツ社アンプ	SDI社アンプ	アイソレーションの向上
	冗長系	発生・計測ともに同等品が2系統	発生・計測ともに同等品が3系統	多数決で最も良い系をセレクトできる
	現用・予備の切替え	手動でつなぎ変え	リレーセレクト(切替え判断には担当者介在)	変更の履歴を残せる
	UTC(NICT)(最終出力)の品質	直接のモニターなし	リアルタイムモニター	品質が常時チェックできる
計測系	時計の時刻差計測 (機器)	タイムインターバルカウンタ (SR620)	DMTD5 (日通機新規開発)	複数信号の同時計測
	時計の時刻差計測 (方法)	IPPS を ワンショット で 4h毎	5Mz を 100回平均 で毎秒	計測精度向上
	計測データ異常値判定	TAプログラム内で実施	DMTD処理プログラム&TA計算プログラムで実施	異常判定の多重化 & アラート発生可能
アルゴリズム	平均原子時TA	Cs時計群	Cs時計群	
	TA計算材料となる時刻差計測値	UTC0hのワンショット値 を そのまま	毎秒の100回平均値 の 1時間毎の平均値	計算精度向上
	TA計算材料となる時刻差計測値	各系の計算には 自系で取ったデータを使用	各系の計算には 合成処理データを使用	各系が同一材料で計算することで、同一結果が得られる
	AOG調整方法	Csのレートを 1次フィットし 24h毎に調整	Hメーザーのレートを 1次フィットし24時間毎に調整	
	UTCトレース	担当者判断で随時	担当者判断で随時	
監視制御	時刻管理	NTP 2台	NTP 3台	多数決で最も良い系をセレクトできる
	計算機	計算機は1系統に1台(全機能集約)	計算機は1系統に複数(機能分散)	リスク分散
	ファイルの共有化	ファイルは計算機毎に分離	ファイル共有で一元化、データベース化	ユーザーインターフェースの簡略化
	監視	項目の個別チェック	監視を独立させて一元化、webでモニター	監視機能の強化、効率化

に基本構成は図 4.2 及び 4.3.2 章の説明にのっとるが、新システムにおいてはほぼ全ての箇所  
所に改良が加えられ、全体として大幅刷新したシステムとなっている。新システムの外観  
を図 5.2 に示す。

以下に、旧システムと比較しながら新システムの各部について紹介する。

## 5.2.1 原子時計

旧システムの原子時計は、Cs 時計 14 台のみであった。新システムは、H メーザー4 台  
(アンリツ株式会社 RH401A) と Cs 時計 18 台 (Symmetricom Inc.高性能チューブ 5071A)  
を有する。H メーザーは日本標準時の原振 (信号源となる原子時計) として、Cs 時計は平  
均原子時構築のために用いられる。

4 世代目のシステムまでは原振に Cs 時計を用いていたが、日本標準時の周波数短期安定  
度向上のため、今回の新システムで初めて H メーザーを導入した。作業としては時計を入  
れ替えるだけの単純なものとも思えるが、H メーザーの導入により計測精度の向上が必要  
となり、新しいデータ合成処理の必要も生じるなど、新システムの構成を決定する大きな  
要因になっている。

RH401A の性能を表 5.2 に示す。また 5071A と RH401A の周波数安定度を図 5.3 に比較  
する。原振を Cs 時計から H メーザーに変えることにより、UTC(NICT)における 10s~100s  
の周波数短期安定度はおよそ 100 倍向上することが期待される。ただし、長期 (目安とし  
て 10 日以上) の安定度においては Cs 時計の方が H メーザーに勝るため、日本標準時の長  
期安定度は従来と同じように Cs 時計の平均原子時 TA で確保する。

TA は従来と同様に Cs 時計群のみから作られる。H メーザーは今のところこの計算には  
参加していない (将来的には検討)。新システムにおける TA 計算に関しては、5.2.5 章およ  
び 7 章で述べる。

## 5.2.2 時刻差計測部

### ■ 旧システムでの問題

時計同士の時刻差計測に関して、旧システムでは、各時計の 1pps (pulse per sec) 信号を  
チャンネルセレクトで順に切替えながら、1 ペアずつ汎用の TI (Time Interval) カウンタで  
時刻差を計測していた。1pps 信号の計測では 1 計測に最低 1 秒かかる。計測誤差の低減に  
は繰返し計測の平均が有効なのだが、計測時間短縮のため、旧システムでは平均なしのワ  
ンショット測定結果を計測値として採用していた。

この方法は、シンプルだが改良の余地を多く含んでいた。まず計測データの同時性の問  
題である。平均原子時 TA の計算では、各時計の時刻差データを同時に取得された値とし

表 5. II 水素メーザーの性能

Carrier outputs	Frequency	5MHz(2ch), 10MHz(2ch), 100MHz(1ch), 1.4GHz(1ch)
	Level	13dBm±2dB
Timing outputs	Format	1PPS(2ch)
	Level	TTL
Stability	1s	$\sigma_y \leq 4 \times 10^{-13}$ (auto-tune off)
	10s	$\sigma_y \leq 4 \times 10^{-14}$ (auto-tune off)
	100s	$\sigma_y \leq 5 \times 10^{-13}$ (auto-tune off)
	$10^3 \sim 10^4$ s	$\sigma_y \leq 2 \times 10^{-15}$
	Long term	$\sigma_y \leq 2 \times 10^{-15}$ per day
Sensitivity	Temperature	$\leq 4 \times 10^{-13}/^\circ\text{C}$
	Magnetic	$\leq 2 \times 10^{-13}/\text{Gauss}$
Function	frequency control	Range: $2 \times 10^{-9}$ , resolution: $7 \times 10^{-16}$
	Cavity auto-tuning	no external reference required

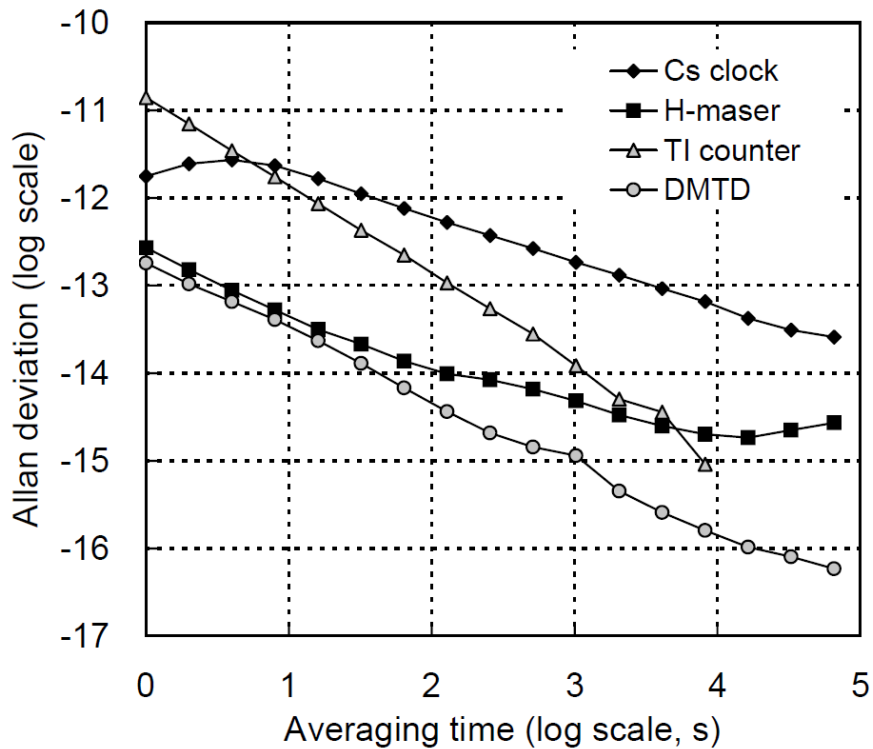


図 5.3 原子時計及び計測機器の安定度

表 5.3 DMTD5 の性能

Input frequency	5MHz (10MHz is also available)
Beat-down frequency	1kHz
Input channels	24
Sampling period	1 s
Resolution	2 ps at 5 MHz (without averaging)
Averaging	1~100 samples

て扱う。3 章の(3.20)式において、 $X_{is}(t_k)$ は、同一時刻  $t_k$  における各時計と計測基準時計 S との時刻差である。だが実際には時計台数が多いため、ワンショットで計測しても終了まで約 30 秒もかかってしまっていた。つまり計算で用いる計測データは同時取得されたものではなく、時計の変動を正しく反映しているとはいえなかった。

また計測精度を上げるためには、1pps 信号より周波数の高いキャリア信号での計測が望まれていた。

#### ■ DMTD (Dual Mixer Time Difference) の導入

これらの問題に対処するため、新システムでは、新規開発した 24ch-DMTD システム（日通機、DMTD5）を、主たる時刻差計測装置として採用することにした。

DMTD 法は、周波数の近い 2 つの入力キャリア信号を共通ローカル信号でダウンコンバートし、得られた 2 つのビート信号の位相差を計測する手法である[39, pp.54-57]。原理を付録 2 に示す。位相拡大により分解能を高め高い計測精度を得ることができる。また共通ローカルを使うことにより、ダウンコンバート時の付加ノイズが計測に及ぼす影響を抑えることができる。DMTD 法自身は既存の技術であり、市販の汎用計測器もあるが、我々の要望を満たす製品はなかったため、日本通信機株式会社と共同で DMTD5 を新規に開発した。本装置においては、多チャンネル化により複数計測の同時取得を実現したこと、またハードウェアにおけるサイクルスリップ防止機能（後述）を備えていることが、他の同種機器にはない特色である。

DMTD5 のスペックを表 5.3 に、外観を図 5.4 に、ブロック図を図 5.5 に示す。DMTD5 では、計測基準となる H メーザー 5MHz 信号と 24 個の入力 5MHz 信号との時間差を、完全に同時に計測する。入力 5MHz を DMTD5 内部で 1kHz に周波数変換することで、位相分解能を 5000 倍する。サンプリングクロックは 100MHz であり 1kHz 計測値の位相分解能は 10ns であるので、5MHz 信号の相対的な位相分解能は 2ps となる。DMTD5 は 100 サン

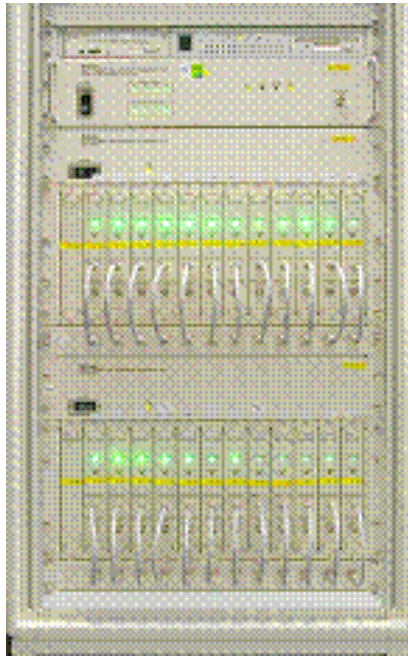


図 5.4 DM5TD5 外観

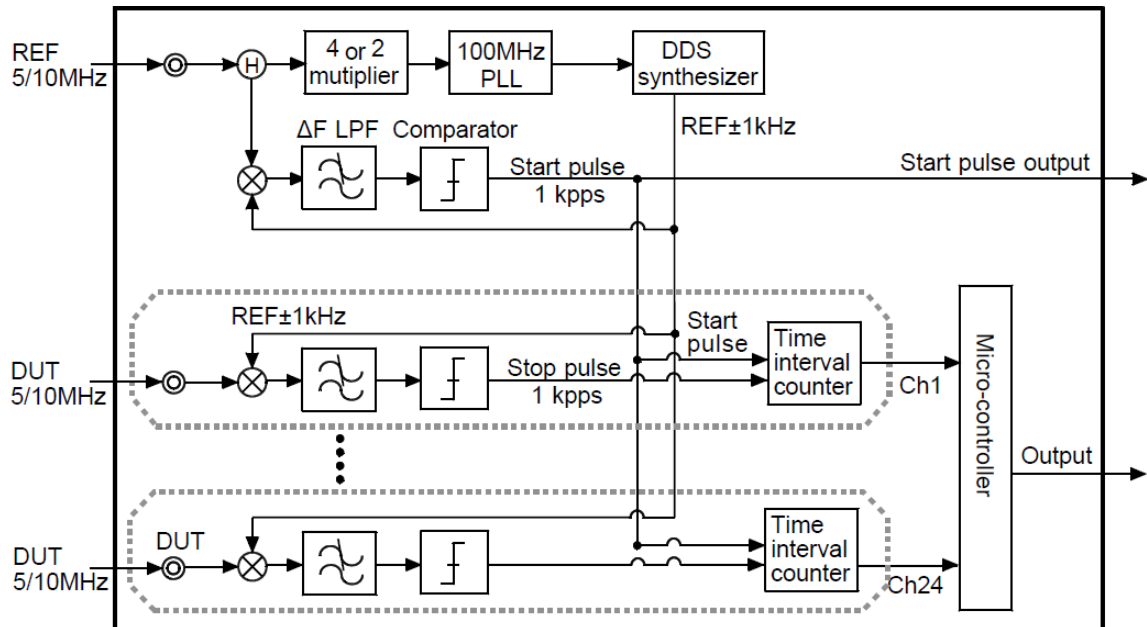


図 5.5 DM5TD5 ブロック図

プルデータの平均値を毎秒出力するので、最終的な位相計測精度は 0.2ps となる。詳細な性能は文献[60]を参照されたい。

DMTD 法による 5MHz 同士の時刻差計測は、TI カウンタによる 1pps 同士の計測に比べ高精度なデータが取得できる。だが 5MHz 計測においては、1pps 計測に比べ 1 周期の間隔が短いため、周期のミスカウント（サイクルスリップ）による位相の不確実性が生じやすい。DMTD5 は、ハードウェア的に位相ゼロ近辺の危険ゾーンを検出し、位相をずらすことでカウントミスを防ぐことができる。具体的には、被測定信号と基準信号の時刻差が 1ns より小さくなったら、被測定信号の位相を 2ns オフセットして安全ゾーンで計測する。この機能により、データを連続取得できる場合であれば、基準信号に対して周波数偏差  $1 \times 10^{-9}$  以内の被測定信号に対して、サイクルスリップを防ぐことができる。サイクルカウント値は各計測値と共に出力される。

DMTD5 と TI カウンタにおけるシステムノイズを図 5.3 に示す。一つの信号を入力直前で 2 分配しその時間差を計測することで、装置自身のシステムノイズが得られる。DMTD5 のシステムノイズは H メーザーの周波数安定度より低いことから、DMTD5 が H メーザーの毎秒計測に有効であることが確認できる。

### 5.2.3 計測データ処理部

#### ■ DMTD5 と TI カウンタの併用

DMTD5 の導入により計測精度が向上し、サイクルスリップによる位相の誤算出も防止することができるようになった。だがこの機能は万能ではなく、長期に渡りデータが取得できない場合には、データ欠損期間に何周期位相が回ったかを知ることはできない。

この問題に対処するため、新システムでは、DMTD5 による 5MHz 計測と共に TI カウンタによる 1pps 計測を併用することとした。1pps の計測は毎時行い、旧システムと同じ計測法を取る。1pps 計測は、計測精度では 5MHz 計測に劣るが、1 周期間隔が長いためサイクルスリップの確率が低く、データ欠損時でも位相の連続性を保ちやすい。

データの使い方としては、カウンタ計測値で初期位相を決定し、以後は DMTD5 で計測した高精度な周波数値により変動位相を積算していく。この方法により、1pps 計測の信頼性と 5MHz 計測の高精度の双方を活かすことができる。

#### ■ 異常判定と合成処理の自動化

DMTD5 と TI カウンタのデータ合成においては、更に、データの自動選別機能も新たに組み込んだ。

図 5.1(b)で示すように、新システムの計測部は、3 台の DMTD5 と 1 台の TI カウンタが並行して同じ時計ペアの時刻差計測を行う。最終的にはこの 4 組の計測データから計測値

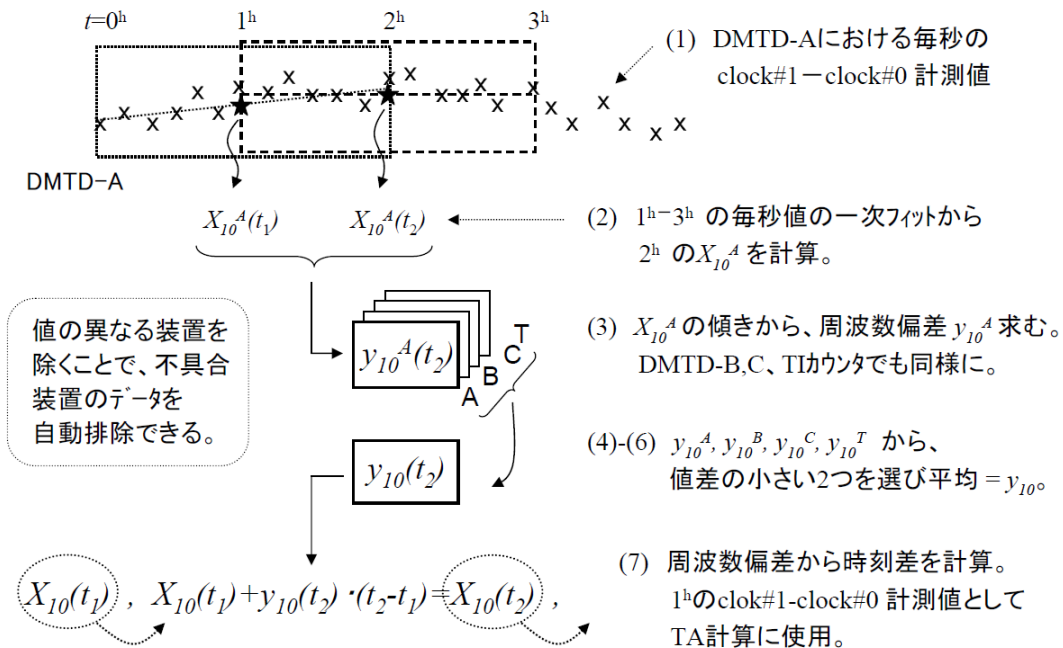


図 5.6 計測データ処理の概念図

を一つ決める。4 台の中の一つをマスターとし、その装置に不具合があれば他と切り換える、というのが最も単純な方法だが、不具合判断と切り換えを自動で処理したいと考えた。

新規開発した処理プログラムでは、4 組の計測データ全てを用いて、異常検知と計測データの合成を行う。4 台の計測装置は同一時計ペアの信号を計測するので、装置が正常であれば、結果は皆ほぼ等しくなるはずである。だがもし 1 台が故障した場合、その計測値は他の装置と異なる値を示すだろう。つまり、4 組の計測データを相互比較することで、故障した装置を判別し、そのデータを除いて処理を進める事ができる。

このような自己診断機能を有したデータ処理は、新システムで初めて導入されたものであり、計測機能における信頼性を大きく向上させた。処理方法の詳細を以下に述べる。概念図を図 5.6 に示す。

#### ■ 処理手順

インデックス  $i=1,..,17$  は各 Cs 時計を表す。計測基準時計を clock#0 とする。インデックス A,B,C は 3 台の DMTD5 を、T は TI カウンタを示す。処理は以下の 7 つの手順による。

- (1) clock#i と clock#0 の時刻差  $X_{i0}$  は、DMTD\_A,B,C においては毎秒の計測値が、TI カウンタにおいては正時の計測値が出力される。

- (2) 正時  $t_k$  における clock#i と clock#01 の時刻差  $X_{i0}(t_k)$  を、以下の方法で定める。  
各 DMTD においては、 $t_k-1$  時から  $t_k+1$  時の 2 時間分の毎秒値から、一次フィットにより、正時  $t_k$  での値  $X_{i0}^A(t_k)$ 、 $X_{i0}^B(t_k)$ 、 $X_{i0}^C(t_k)$  を定める。  
TI カウンタに関しては、正時の計測値そのものを  $X_{i0}^T(t_k)$  とする。
- (3) 正時  $t_k$  における、clock#0 に対する clock#i の周波数偏差  $y_{i0}$  を、装置毎に以下の式で計算する。

$$y_{i0}^A(t_k) = \frac{X_{i0}^A(t_k) - X_{i0}^A(t_k - \tau)}{\tau} \quad \dots\dots(5.1)$$

$\tau$  は 3600s である。 $y_{i0}^B(t_k)$ 、 $y_{i0}^C(t_k)$ 、 $y_{i0}^T(t_k)$  も同様に計算される。

- (4) 装置毎に求めた周波数偏差について、他装置との差（機差）の総和を計算する。  
DMTD\_A における機差総和  $S^A$  は以下の式で求められる。 $S^B$ 、 $S^C$ 、 $S^T$  も同様である。

$$\begin{aligned} S_i^A(t_k) = & |y_{i0}^A(t_k) - y_{i0}^B(t_k)| \\ & + |y_{i0}^A(t_k) - y_{i0}^C(t_k)| \\ & + |y_{i0}^A(t_k) - y_{i0}^T(t_k)| \quad \dots\dots(5.2) \end{aligned}$$

- (5)  $S^A$ 、 $S^B$ 、 $S^C$ 、 $S^T$  同士を比較することで、異常な計測装置を検出する。  
もし DMTD\_A が故障し  $y^A$  が異常値となれば、 $S^A$  は他の  $S^B$ 、 $S^C$ 、 $S^T$  に比べて大きくなるはずである。 $S^A$ 、 $S^B$ 、 $S^C$ 、 $S^T$  を小さいほうから 2 つ選ぶ。仮に  $S^A$ 、 $S^C$  が選ばれたとすると、DMTD\_A、DMTD\_C の計測結果が、最も機差が小さく信頼できる値と判断されたことになる。
- (6) (5) で選んだ 2 つの装置の計測結果から、clock#i と clock#0 の周波数偏差  $y_{i0}$  の代表値を求める。  
仮に  $S^A$ 、 $S^C$  が選ばれたとすると、 $y_{i0}^A$  と  $y_{i0}^C$  の平均が代表値として採用される。

$$y_{i0}(t_k) = \frac{y_{i0}^A(t_k) + y_{i0}^C(t_k)}{2} \quad \dots\dots(5.3)$$

- (7) (6) で求めた周波数偏差から、clock#i と clock#0 の時刻差を定める。  
この値が TA 計算の材料として使われる。

$$X_{i0}(t_K) = X_{i0}^T(t_0) + \sum_{k=1}^K y_{i0}(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) \quad \dots\dots(5.4)$$

初期位相には、連続計測を開始した時の TI カウンタ計測値を採用する。

この方法により、異常のある計測装置のデータは自動的に排除され、また 4 台の計測装置のうち最低 1 台の装置が動いていれば、自動的に計測データが生成される。

もし 1 台のデータしか取得されない場合には、その値が代表値として採用される。この機能は、意図的に特定の装置の計測値を採用したい時に便利である。例えば、計測を開始



するにあたって TI カウンタの結果だけを残すことにより、自動的に TI カウンタの値が初期値として採用される。通常は DMTD5 の計測結果が 3 台でほとんど一致するため、計測誤差の大きな TI カウンタ値がはじかれる結果となる。

#### ■ その他の異常処理

計測装置の異常だけでなく、各計測値の異常も、上記の処理過程で検知を行っている。例えばプロセス(1)において、毎秒の計測値が 2 時間分の全データで計算した標準偏差の 10 倍を越えた場合、そのデータは異常として削除される。またプロセス(3)においては、基準信号に対する周波数偏差が  $5 \times 10^{-10}$  (可変) を越えた場合、その時計を異常と判定している。

### 5.2.4 冗長性

旧システムでは、計測部（チャンネルセクタと TI カウンタ）と信号発生部（原振と AOG）を一体として 2 重化していた（図 5.1 (a)）。一方をマスター系とし、その出力を UTC(NICT)して用いる。この方式はシンプルではあったが、装置の使い方としては効率的ではなかった。例えばマスター系において計測装置に不具合が起きた場合、信号発生部に異常がなくても系の切り換えが必要であった。

新システムでは、信号発生部は 3 重化（異なる H メーザーを原振とする 3 台の AOG）、計測部は 4 重化（DMTD5 が 3 台、セクタ+TI カウンタが 1 組）されている（図 5.1 (b)）。5.2.3 章で述べた計測データ合成処理により、最低 1 台の計測装置が稼働していれば、計測データが自動的に蓄積される。

この改良により、計測装置の不具合は（全機故障が起きない限り）致命的ではなくなり、マスター系の切り換えは信号発生部の不具合時のみで済むようになった。

### 5.2.5 平均原子時 TA と UTC(NICT)

#### ■ 平均原子時 TA

5.2.3 章のプログラムで処理された計測データから、日本標準時の基となる、Cs 時計の平均原子時 TA を計算する。この計算に用いる時系アルゴリズムは、基本的に 3.3 章の原理に従っている。

旧システムで長く使用された時系アルゴリズムを Alg4 と呼ぶことにする。Alg4 の詳細は付録 A4.1 に記した。Alg4 式には、TA 計算から時計が抜ける際 TA 自身に大きな周波数変動が生じる、という問題があり、新システム移行前に一部改良された (Alg4a)。この問題に関する研究の詳細は第 6 章に述べる。

新システム開発にあたっては、時系アルゴリズムの研究改良は次のステップとし、当面は従来の計算方式を踏襲することにした。新システムのアルゴリズムを Alg5 と呼ぶことに

する。Alg5 は、重み計算を若干変更した以外は Alg4a とほぼ同じである。Alg5 の詳細は付録 A4.2 に記した。

新システムにおいて TA 計算法の抜本的な改変は行わないものの、入出力の整合等により計算プログラム自身は作り直す必要があったため、利便性に関して以下の改良を行った。

- 1) 計算条件のパラメータ変更を容易にした。

将来の時系アルゴリズム改修の際、できるだけ柔軟に対応するためである。

- 2) 平均原子時 TA と各時計との時間差を保存するようにした。

旧システムでは、UTC(NICT)を UTC に合わせる場合、TA に調整量を付加した TA' を作り AOG は TA' を参照するという方法を取っており、データとしては TA' と各時計の時間差しか保存していなかった。AOG 制御と UTC(NICT)発生にはそれで支障なかったのだが、調整量を付加する前の TA と各時計との時間差の記録がないというのは TA 解析には大変不便だったため、新システムにおいて改善した。

- 3) UTC(NICT)の元となる TA を一本化した。

旧システムには、図 5.1(a)に示すように二つの冗長系 system\_A,B があり、各系は、自系の測定データから各々 TA を作り、各 AOG を制御していた。これはつまり、マスター系の切換えにおいて、UTC(NICT)の元となる TA が別系に切り替わることを意味する。旧システムでは AOG の制御誤差が大きかったため TA 乗換えで生じる不連続は無視できていたが、厳密に言えばこれは、UTC(NICT)に不連続を生じる方法であった。新システムでは、TA を一本化することで、マスター系切換えによる時系の不連続を解消した。

新システムの TA は、5.2.3 章の処理プロセス(7)で作られた各時計の位相データ  $X_{i0}(t_k)$  を用いて、Alg5 により計算を行い、毎時の結果が算出される。ただし 5.2.3 章でも述べたとおり、計測処理結果は 1 時間遅れで出力されるため、TA の計算結果も 1 時間遅れで生成される。

#### ■ UTC(NICT)

TA を体現した UTC(NICT)の実信号となるのは、原振となる H メーザーの周波数を外部リファレンスとする周波数調整器 AOG の出力信号である。基準周波数となる 5MHz キャリア信号、及び時刻同期に用いる 1pps 信号の 2 種類が AOG より出力され、UTC(NICT)の実信号となる。

UTC(NICT)の実信号は伝送経路による遅延を受けるため、どのポイントでの時刻かを定義しておかないと（つまり基準点を決めておかないと）混乱する恐れがある。UTC(NICT)の基準点は、1pps 計測用 TI カウンタの入力点とした。これは計測における利便性のためである。例えばある任意の時計と UTC(NICT)との時刻差を知りたい場合、この TI カウンタで

測定すれば、直接その計測値を持って UTC(NICT)との時刻差とすることができる（ただしその時計の出力信号を伝送する経路の遅延は別途補正する必要がある）。

TA をトレースするための AOG 周波数調整に関しては、3.5 章の計算法で調整量を算出する。(3.27)式 1 項目の時刻差調整量に関しては、旧システムでは調整期間  $t_{k+1}-t_k$  を 1 日としていたが、やや過調整になりがちだったため、新システムでは調整期間を可変とし、よりゆるやかな調整ができるようにした。現在は  $t_{k+1}-t_k$  を 2 日に設定している。

(3.27)式における TA に対する原振のレート  $\bar{y}_a$  の計算法は、原振となる時計の性質により異なる。旧システムでは Cs 時計を原振としていたため、到達安定度の得られる  $\tau=30$  日でレートを計算していた。新システムでは H メーザーを原振とするため、過去 5 日のデータから  $\bar{y}_a$  を計算する。これは、TA 対 H メーザーの安定度が  $\tau=5$  日のところで到達安定度を得るからである。

AOG 調整量は TA 計算と同時に毎時の値が算出されるが、実際の調整は今のところ、従来と同様、日に一度 (UTC1 時 20 分) の実施としている。AOG 調整は日本標準時の品質に直接影響する作業であることから、新システム運用開始時には安全のため、実施頻度を最小としたのである。将来的にはより高頻度な制御も検討している。

UTC をトレースするための AOG 調整に関しては、担当者の判断により随時行う方法とした。必要に応じて UTC に対する調整量を入力し、その値が TA に対する調整量に上乘せされ、AOG 調整量となる。

図 5.7 に AOG 出力と TA' (TA に UTC に対する調整量を加えたもの) との時刻差を示す。このグラフは AOG の制御誤差を表す。制御誤差が大きければ、原振の良さが UTC(NICT) に反映されないことになる。原振による制御誤差の違いを見るため、原振に Cs 時計を使用した期間のデータを使った。原振が H メーザーの場合 (AOG-A,C)、Cs 時計の場合 (AOG-B) に比べて明らかに制御誤差が小さいことがわかる。これは、原振が H メーザーになり短期安定度が向上したことに加え、DMTD5 の導入で計測精度が向上したことによる効果と思われる。

## 5.2.6 制御、監視部、環境

旧システムにおいては、1 台のワークステーションが全ての制御・計算を担っていた。新システムでは、処理機能毎に計算機を分け、負荷を減らすと共に故障による機能停止拡大のリスクを抑えた。サーバーとして Linux PC、機器の制御には Windows PC を使用している。測定データと計算結果はデータベースにまとめられ、解析などでの参照がしやすくなった。計算機の時刻は NTP (Network Time Protocol) により UTC(NICT) に同期している。

システム監視に関しては、旧システムよりもチェック箇所を増やした。主なチェック項目を表 5.4 示す。DMTD の毎秒出力値のチェックは、イベントの発生時刻の特定ができ

表 5.4 システム監視箇所

ステータス監視	Cs 時計
	H-メーザー
	AOG
	データロガー (温湿度計測)
	オシロスコープ (UTC(NICT) 信号出力モニタ)
定常計測 及び 計算状況の監視	DMTD 計測(5MHz)
	TIカウンタ計測(1PPS)
	温度・湿度
	平均原子時 計算
	AOG 制御
信号品質の監視	UTC(NICT) 出力 5MHz・& 1PPS 信号の波形
	各時計の位相ジャンプ
	各時計の周波数変動異常
	各時計の周波数サイクルスリップ

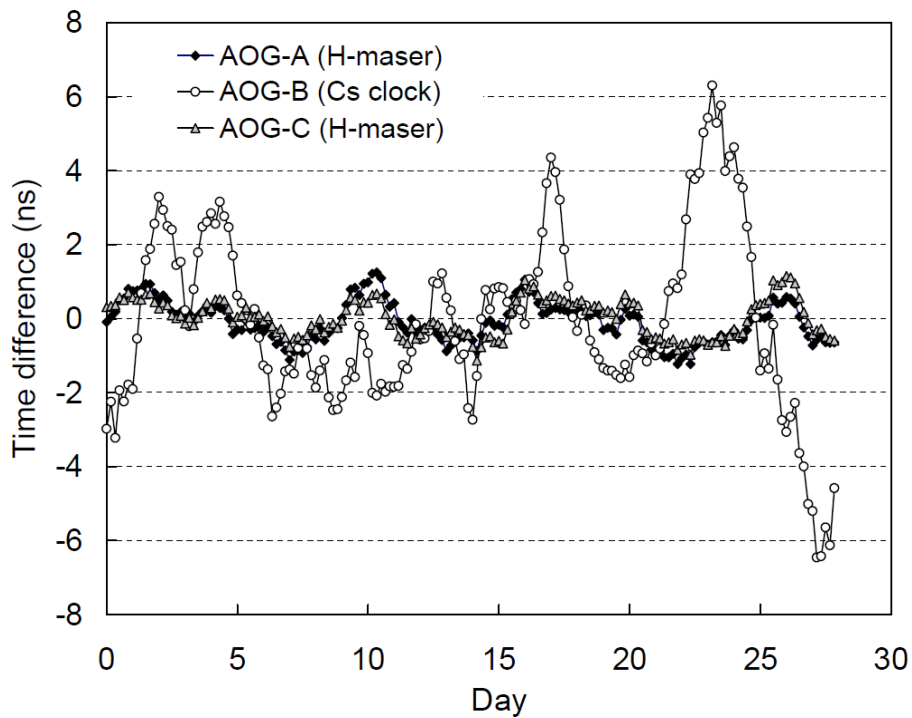


図 5.7 AOG 出力結果と TA'との時刻差

るため、入力信号の異常調査に大変有効である。またオシロスコープによる UTC(NICT) 実信号のリアルタイム監視も、異常の早期検出に非常に有効である。信号への影響が少ない高インピーダンスのプローブを用い、出力信号そのものを直接監視するようにした。また新システムでは、新規開発された監視プログラムにより、異常内容を web ブラウザ上で確認できるようになった。検知された異常は、直ちに電子メールで担当者に通知される。

システム環境に関しては、外的要因による被害を最小限に抑えるため、建物自身に地震・停電・防犯などの対各種対策を講じた。時計は4つの電磁シールドルームに分配して配置され、計測機器と計算機は別の計測室に設置されている。原器室は温度  $24 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 、湿度  $40 \pm 10\%$  に保たれている。建物の主電源は発電機付きの UPS により無停電化されており、新システムはこの UPS から電源供給を受けている。原子時計及び主要な機器は更に個別の DC バッテリーを持ち、万一の停電に備えている。

### 5.2.7 開発時の注意点

その他、設計・開発時に留意したことをいくつか補足する。

#### ■ 機器の設置

装置の温度変化は計測精度に大きな影響を与える。ラック内配置においては、可能な限り装置間スペースを取り排熱できるよう心がけた。だが Cs 時計のラック設置においてはこのスペースが十分でなかったことが、システム運用開始後に判明した (5.5 章で後述)。メンテナンス等に伴う時計の出入りに際し隣接する時計に温度変動が生じてしまっており、設置環境の改良を予定している。

#### ■ 計測装置のリファレンス

計測機器の外部リファレンスには最も正確な周波数を使うのが良い。仮にリファレンス周波数が正規周波数の  $(1 + \alpha)$  倍だった場合、計測値は  $(1 + \alpha)$  倍に誤算出される。この意味で、測定機器の外部リファレンスには、最も周波数が正確と思われる UTC(NICT) の実信号を用いるのが良い。だが UTC(NICT) は 1 日 1 回周波数調整があり、毎秒連続計測を行う DMTD には不向きであったため、DMTD のリファレンスには H メーザーの 5MHz を使用した。H メーザーと UTC(NICT) の周波数を比べると  $\alpha = 10^{-13}$  程度であり、計測値における誤差は無視できる。TI カウンタに関しては、計測のタイミングが UTC(NICT) 周波数調整とは重ならないため、リファレンスには UTC(NICT) の実信号を使用している。

#### ■ 信号分配

UTC(NICT) の出力信号は多数の実験室に分配供給されている。旧システムでは、遠方の供給先でケーブルがオープンになり、その反射が供給元の分配器の別の出力に影響を及ぼすことがあった。新システムでは、アイソレーションの良い分配器を選択するとともに、日本標準時発生に重要な信号は、使用状態の固定した分配器から取るように配置した。シ

システム内の分配については接続先の無いコネクタを全て終端した。分配の段数が増すにつれ信号のレベル低下・ノイズ増加・遅延が生じるため、設計においてはできるだけ少ない段数で分配できるよう配慮した。

#### ■ 危機回避・利便性に対する配慮

人為的ミスを防ぐためには、システムの使いやすさ・把握しやすさが非常に重要である。信号の伝送においては中継部が少ない方が品質確保には良いのだが、経路の明示化のため敢えてパネル中継を主要結線部に取り入れた。

システム内部の配線においては、装置の物理的な距離に応じた最短のケーブルで配線してしまうと、同一機能を有すべき冗長系において伝送経路長の違いによる遅延差が生じるおそれがある。冗長系を組む場合には、ケーブル長を揃えて配線した。また、時刻差の絶対値が必要でない場合でも、ケーブル遅延量を把握しておくことは異常発見に役立つ。経路の切替えが起こりうる箇所では、切替えによる遅延量変化を防ぐため、同じ長さのケーブルを使用し経路長を揃えた。

異常発生時の原因調査のため、信号伝送やデータ処理においてはできるだけ途中の状況を調査できる構成とした。また想定される異常を洗い出し、迅速な回避・復旧策が打てるよう、また最悪の場合にも最低限の機能が確保できるよう配慮した。

機器配置においては、後々の修理や拡張性も考慮し、作業空間をできるだけ確保した。定常運用開始後にも、バグ改修やシステムの機能拡張が必要になる可能性がある。その場合にも、定常運用に影響を及ぼさずにシステムの機能チェックや改修試験ができるよう、主要計算プログラムにはテストモードを設けた。

### 5.3 開発の経緯と実運用への準備

新システムの開発プロジェクトは2002年に始まった。開発チームの主メンバーは6名であり、筆者はチームリーダーを担務した。

新システムは2004年完成の新実験棟で運用されることとなり、旧棟で稼働する旧システムで日本標準時を維持しながら、新棟で新システム開発を行った。新システムの開発は、旧システムの運用とはほぼ独立に進めることができたが、Cs時計だけは、数が足りないため両システムで共用することとなった。新棟に移設したCs時計の信号を旧棟へ伝送して日本標準時の計算に用いることにしたが、この作業の際、時計データの計測中断と伝送遅延の変化は避けられない。移設した時計データはしばらく計算に使えないため、スケジュールを綿密に組み、新旧両システムで必要なCs時計数を確保できるよう気を配った。

新棟完成までの最初の2年間は、DMTD5の開発と試験システムでの各部動作確認を行った。DMTD5の開発においては、チャンネル間機差の解消、毎秒データの確実な取得、デー

タ処理手順の不備による計測ミスの解決など、問題が山積みであったが、最終的には実用化に耐えうる装置が完成し、定常運用開始後のトラブルはほとんど起きていない。試験システムにおいては、各計測機器の単独動作確認と性能評価を行い、不安のある装置については別機種への交換や改修を行った。配線や機器組み上げの感触もこの時に確認し、本システム構成案に反映した。

新棟完成後はそこで本システムを組み上げ、総合動作を試験した。総合動作確認後、異常発生シミュレーションを重ねて対策不足箇所を強化した。試験途中で明らかとなった問題解決のためやや大がかりなシステム変更も発生し、1年以上を費やすことになったが、信頼性を確保するために必要な過程であったと考える。また、担当者の運用訓練としても有意義であった。最後に旧システムとの並行運転で結果の整合性を確認し、旧システムからの引継を行った。

平均原子時 TA の計算では、各時計のレートや重み計算に、TA との時刻差の過去データが必要である (3.3 章参照)。計算開始にあたっては、旧システムの TA 計算結果を流用した。だが時計間の時刻差計測値は、伝送経路の違いにより新旧システムで整合が取れない。そのため、各時計の旧データに時刻オフセットを加味して新システムとの整合をとり、計算に用いた。UTC に対する旧 TA の時刻差と周波数偏差は、新 TA 計算開始時にあらかじめキャンセルした。このほか、精密時刻比較に用いる GPS 受信機、各種時刻サービスシステムにおいても、移設にともなうデータ欠損や遅延量変化に対応するため、事前の計測と移設計画が周到に調整された。

上記の開発経緯を経て、2006 年 2 月 7 日より新システムの定常運用を開始した。

## 5.4 システムの総合評価

図 5.8 に、新システム稼働後の UTC に対する UTC(NICT)の年間変動を示す。これは Circular-T レポートの報告値である。比較のため、旧システム時代の 2001～2005 年の値も共に載せた。2006 年の UTC(NICT)は、UTC に対してほぼ安定して推移しており、旧システム時代に比べて変動が明らかに小さく、ほぼ目標である  $\pm 10\text{ns}$  以内の同期を達成することができた。2006 年 2/7 から 2007 年 2/7 で計算した周波数安定度を図 5.9 に示す。過去 5 年間で比較的安定だった 2001、2003、2005 年の安定度も、比較のため共に示す。旧システム時代の値と比べ、短期安定度が明らかに向上しており、周波数安定度の目標値 ( $2.6 \times 10^{-15}$  @45 日) に勝る安定度も確認できた。これらの結果により、新システムにおいて設計時の目標が実現できたことを確認した。

参考のため、他の主な標準機関との安定度比較を図 5.10 に示す。これは、2006 年における UTC-UTC(k) (k は各機関名) および新システムの周波数安定度である。他国の機関と

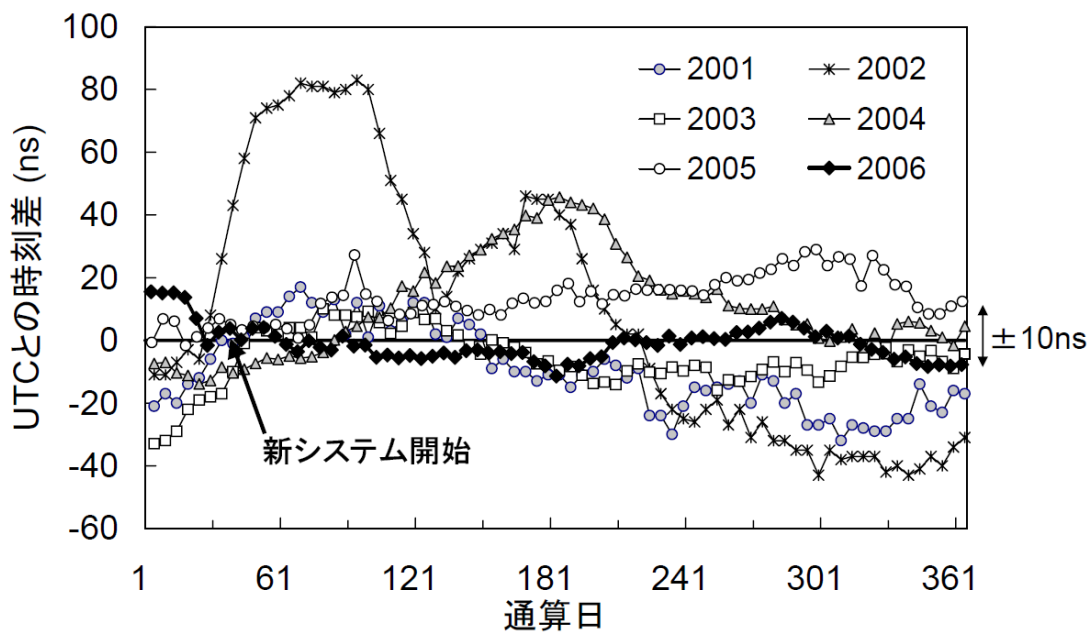


図 5.8 UTC-UTC(NICT)の年間変動 (2001~2006)

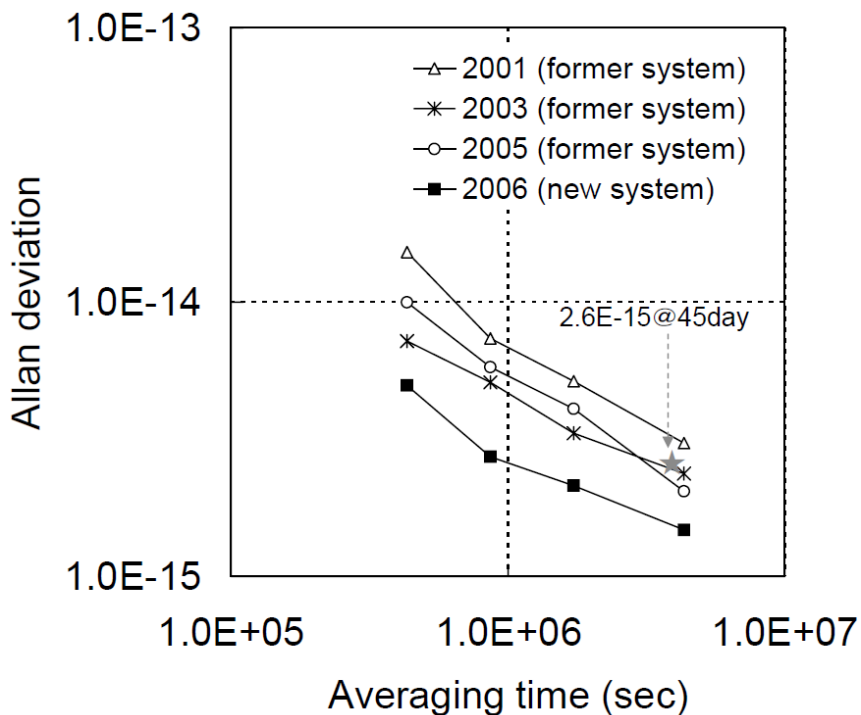


図 5.9 UTC-UTC(NICT)年間変動の周波数安定度



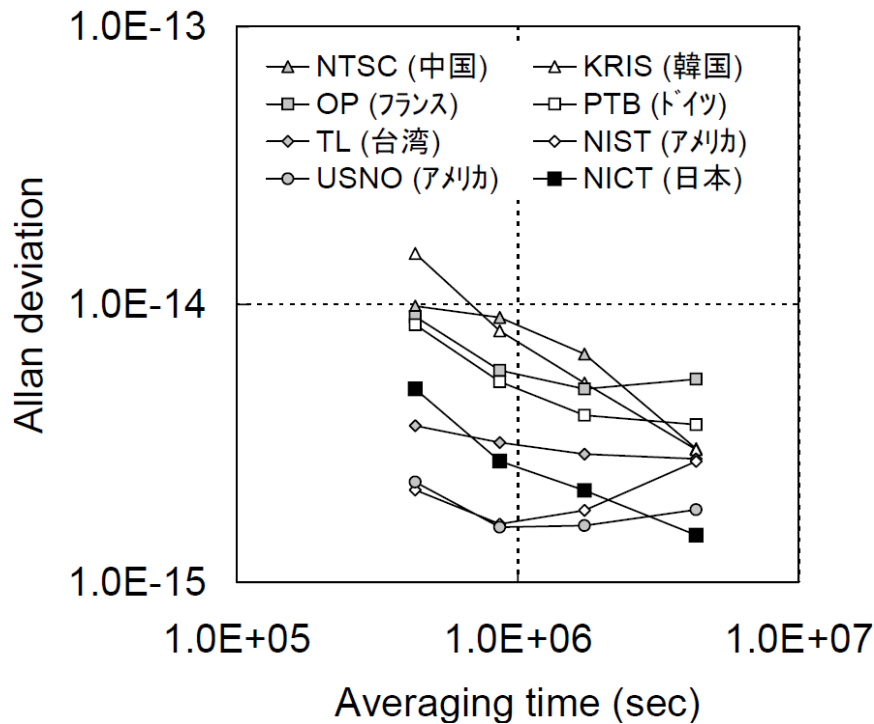


図 5.10 2006 年における UTC-UTC (各機関) の周波数安定度

比べてもかなり良い結果が得られた。短期安定度においてはアメリカの 2 機関 (NIST、USNO) とやや大きな差があるが、これは、NICT が Cs 時計のみで平均原子時 TA を構築しているのに対し、この 2 機関は H メーザーを TA 構築に加えているためと思われる。NICT においても TA 構築に H メーザーを加えることにより、短期安定度の一層の向上が期待できるであろう。5.2.5 章でも軽くふれたが、今回の新システム開発においては、ハードウェア改良を主な目的とし、時系アルゴリズムの根本的な改変は行わなかった。ハード・ソフト両面での大規模刷新はリスクが大きく、問題発生時の切り分けが複雑困難になると判断したためである。6 章・7 章で述べるとおり時系アルゴリズムは研究過程にあり、TA 構築に H メーザーを加える試みも、今後の研究課題の一つである。

## 5.5 今後の課題

2007 年 2/7 までのデータにおいて非常に良い結果が得られたが、それ以降、UTC(NICT) において大きなレート変動が数回生じている。詳細は 7 章で述べるが、この問題は、日本標準時を構成するいくつかの Cs 時計の急激な周波数変動が原因であった。

根本的な解決策は Cs 時計の周波数変動を抑えることであるが、これは時計内部の問題であり、対策は難しいと思われる。ただ我々のシステムにおいても、Cs 時計の設置環境の改善が必要であることがわかってきた。Cs 時計は、恒温高湿シールドルーム内のラックに 4～5 台ずつ組み込まれている。ある時メンテナンスのため時計を 1 台ラックから引き抜いたところ、隣接する時計数台に大きな温度変動が生じた。これは時計の設置間隔が狭すぎたためと思われる。調べたところ、すべての周波数変動が温度変動に起因するとも言いきれない結果ではあったが、少なくとも時計の設置間隔を広げることで温度環境は良くなり、周波数変動を引き起こす恐れのある要因を一つ取り除くことができる。近日作業予定である。

問題解決のための別のアプローチは、時系アルゴリズムの改良である。TA における異常時計の影響を抑えることができれば、UTC(NICT)の長期安定度は向上し、UTC との同期精度も良くなるはずである。この問題に関して、アルゴリズム改良検討を行った。7 章での詳細を論ずる。

## 5.6 5 章のまとめ

日本標準時発生のための新システム開発を通して、原子時系発生システムのハードウェアの高度化を追求した。新システムにおいては、H メーザーを原振として導入することにより短期安定度の向上を果たした。また新規開発した DMTD5 による 5MHz 計測の導入により、H メーザー計測にも十分な高精度で多チャンネル同時計測を達成した。5MHz 計測には位相飛びのリスクがあるが、TI カウンタによる 1pps 計測との並列計測により問題を解決した。また、計測データ合成処理プログラムの開発により異常データの選別を自動化し、計測結果の信頼性向上を実現した。

定常運用開始後の結果としては、2006 年においては UTC に対して 10ns 以内の時刻同期を達成し、周波数安定度においても目標値の実現を確認した。だが 2007 年以降、急激なレート変動により UTC との時刻差が 10ns を越える現象が発生している。調査の結果、これらの変動は Cs 時計の急変動に起因するものと判明した。これは時系アルゴリズムで解決しうる問題と思われる。この問題に関しては 7 章で詳細な議論を行う。

結論として、新システムのハードウェアは当初の目標を達成しうるポテンシャルを有しており、ソフトウェア（時系アルゴリズム）の改良により、日本標準時の長期安定度も改良されると思われる。

## 第6章 原子時系アルゴリズムの向上（1）

### ～時計抜けによる周波数変動の改善～

#### 6.1 はじめに

6章・7章では、原子時系アルゴリズムの向上のための研究結果をまとめる。原子時系発生システムにおいては、5章で述べたハードウェアとこれから述べる時系アルゴリズムと、どちらの機能が不十分でも高品質な原子時系は得られない。1章において、標準時として用いられる原子時系に求められる品質として、(A)UTCとの高い同期精度、(B)高い周波数短期安定度、(C)高い周波数長期安定度、(D)高い信頼性、の4点を挙げた。(A)(B)(D)に関してはハードウェアの機能向上により実現が図られたが、(C)の実現には優れた時系アルゴリズムが必要となる。時系アルゴリズム研究の手段として、日本標準時において発生した問題の解決を試みた。日本標準時の時系アルゴリズムは、ほぼ3章で紹介した原理そのままの基本的な計算法を採用しているため、日本標準時で生じた問題は原子時系アルゴリズムの基本に関わる問題と言える。

6章では、日本標準時の計算からある時計が抜けた場合に生じる周波数変動について、原因調査とアルゴリズム改良結果を報告する[30][51]。この問題は旧システム（第4世代）時代の日本標準時で何度か発生し、長期安定度を劣化させるため解決が望まれていた。6.2章で事例を紹介し、原因の推察を行う。6.3章ではこの推察にもとづきアルゴリズム改良を行い、その効果を確認する。さらに6.4章で変動量の推定式を導き、この式で計算した変動量とシミュレーションによる変動量が一致することから、一連の考察が妥当であることを確認する。

#### 6.2 変動事例と原因調査

図6.1に2002年および2003年のUTC-UTC(NICT)の時刻差を示す。これはBIPMの月報circular-Tの報告値に依る。UTC(NICT)は旧システム（第4世代）で発生されたものであり、UTC(NICT)の基となる平均原子時TAは時系アルゴリズムAlg4で計算されている(5.2.5章、付録A4.1参照)。UTC(NICT)計算における時計の出入りや周波数調整などのイベントは、挿入コメントで示した。2002年のMJD52296に1台のCs時計CS#21が抜けたことにより、UTC(NICT)に急激な周波数変動が生じている。

時計抜けによる急激な周波数変動は、日本標準時の旧システム時代に何度か発生してお

り、問題となっていた。UTC(NICT)の基となる平均原子時 TA は、ある時計が TA 計算から抜けても TA 自身には影響がないような計算方法を採用しており (3.3.3 章)、本来このような急激な周波数変動は起きないはずだからである。TA 計算を具体化する時系アルゴリズム Alg4 (5.2.5 章、付録 A4.1 参照) に問題があるとの予測はされていたが、原因は長らく不明であり、変動量の予測もできなかった。だがこのような大変動は UTC(NICT)の長期安定度に影響を及ぼすことから、改善が望まれていた。

TA の計算式に立ち返り、原因を考えてみる。TA は各時計の位相変動の予測誤差  $\varepsilon_i$  の集積である (3.18 式)。 $\varepsilon_i$  は時計 # $i$  の実際の時刻と予測値との時刻差である (3.17 式)。TA 計算から時計 # $i$  が抜けた場合、 $w_i \varepsilon_i$  だけ TA が変動する。 $\varepsilon_i$  が大きければ TA の変動量も大きくなるだろう。 $\varepsilon_i$  が大きくなるのは、予測がはずれた時である。予測値は一次の変動量で計算しており、この傾き (予測レート  $\hat{y}_i$ ) が不適当なのではあるまいか。

この推測に基づき、予測レートに系統的誤差があるとして式を立ててみる。各時計の予測レート  $\hat{y}_i$  として、過去の値から計算した一次変動の傾きを用いるとする (3.22 式)。ここで  $\hat{y}_i$  として、最適値  $\bar{y}_i$  のかわりに  $\Delta y$  だけずれた  $\bar{y}_i^m$  を採用してしまった場合を考える (図 6.2(a))。

$$\hat{y}_i(t_k) = \bar{y}_i^m(t_{k-1}) \equiv \bar{y}_i(t_{k-1}) - \Delta y_i(t_{k-1}) \dots (6.1)$$

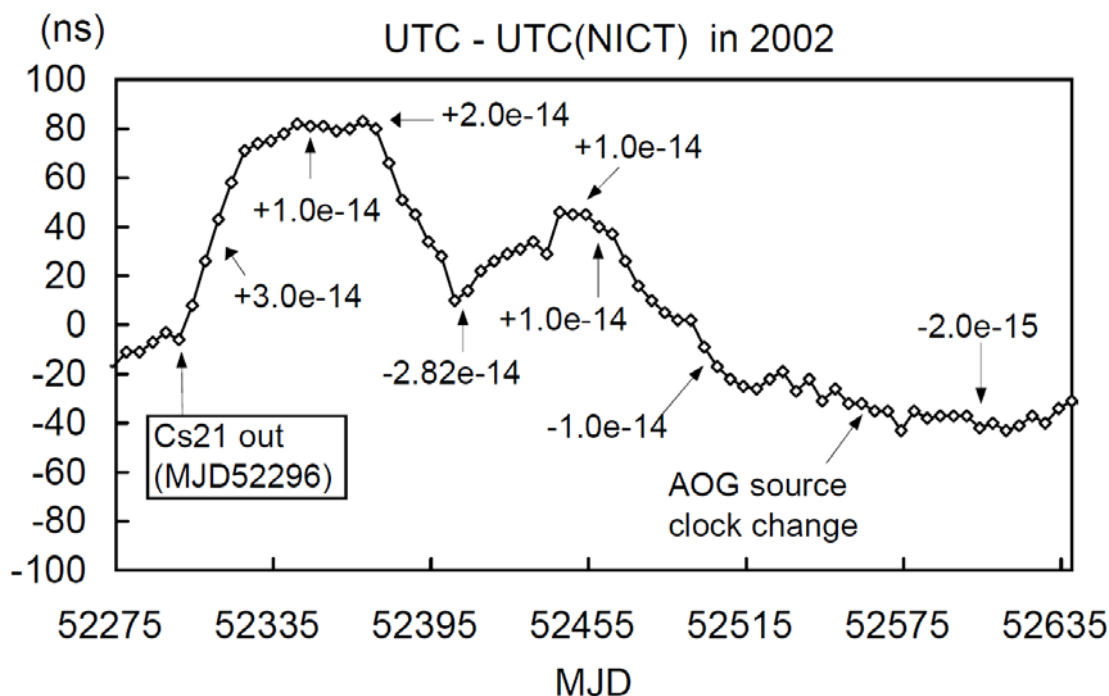


図 6.1 2002 年における UTC-UTC(NICT)の時刻差

(3.15)式から(3.18)式、及び(6.1)式より、 $\bar{y}_i^m$ で計算した場合のTAを $TA^m$ とすると、

$$\begin{aligned} TA^m(t_k) &= \sum_{i=1}^N w_i(t_k) [h_i(t_k) - x_i(t_{k-1}) - \{\bar{y}_i(t_{k-1}) - \Delta y_i(t_{k-1})\} \cdot (t_k - t_{k-1})] \\ &= TA^m(t_0) + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \varepsilon_i(t_k) + \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \Delta y_i(t_{k-1}) \cdot (t_k - t_{k-1}) \dots (6.2) \end{aligned}$$

となり、レート推定誤差 $\Delta y_i$ に由来する時刻差が重み付きで累積していくことがわかる(図6.2(b))。ここである時計# $j$ が抜けると、 $w_j(t_k) \Delta y_j(t_{k-1}) \cdot (t_k - t_{k-1})$ が消失することで $TA^m$ が変化し、 $\Delta y_j$ が大きいほど $TA^m$ の周波数が大きく変動することになる(図6.3)。

時系アルゴリズム Alg4 においても、このように予測レートが系統的誤差を含んでいるのではないかと推測し、計算式を見直してみると、重みは以下の方法で計算されていた。

$$\text{計測開始後 60 日まで} \quad \bar{y}_i(t_k) = \mathbf{0} \dots (6.3)$$

$$\text{計測開始後 61 日目} \quad \bar{y}_i(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - 60T)}{60T} \dots (6.4), \quad T = 86400(s)$$

$$\text{計測開始後 62 日以降} \quad \left| \bar{y}_i^{10}(t_k) - \bar{y}_i(t_{k-1}) \right| \leq 10^{-12} \quad \text{なら} \quad \bar{y}_i(t_k) = \bar{y}_i(t_{k-1}) \dots (6.5)$$

$$\left| \bar{y}_i^{10}(t_k) - \bar{y}_i(t_{k-1}) \right| > 10^{-12} \quad \text{なら} \quad \bar{y}_i(t_k) = \frac{\bar{y}_i^{10}(t_k)}{1 - w_i(t_k)} \dots (6.6)$$

$$\text{ただしここで、} \quad \bar{y}_i^{10}(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - 10T)}{10T} \dots (6.7), \quad T = 86400(s) \quad \text{である。}$$

(6.5)式、(6.6)式での計算では、直近10日のレート $\bar{y}_i^{10}(t_k)$ と前回の計算で用いたレート値との差が $10^{-12}$ を越えない限り、前回のレート値が踏襲されていく。つまり Alg4 では、最悪 $10^{-12}$ 近い周波数ずれ $\Delta y_i$ により誤差が日々累積していく可能性があることがわかった。これが時計抜けの際に急激な周波数変動が起こる原因と考えられる。

時計の信頼性が低い時代には、時計のふらつきに左右されにくいこの方式が危険回避の意味で有効だったと思われるが、時計の性能が向上し信頼性も増した昨今では、時計の変動をより反映しやすい計算方法が妥当と思われる。

### 6.3 時系アルゴリズム改良による変動の抑制

Alg4 における適切でない予測レート計算式が、予測誤差の累積を生み、時計抜けによる

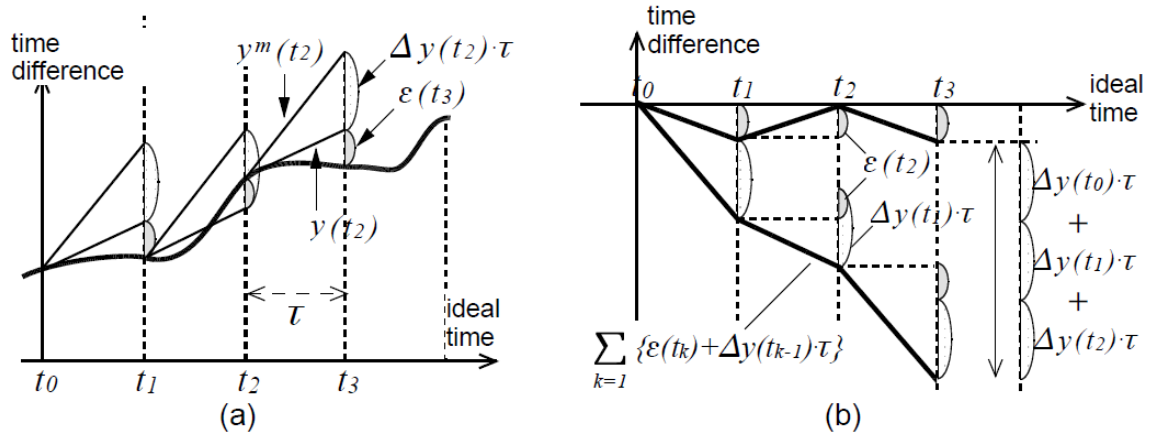


図 6.2 レート推定値が不適當であった場合の累積誤差

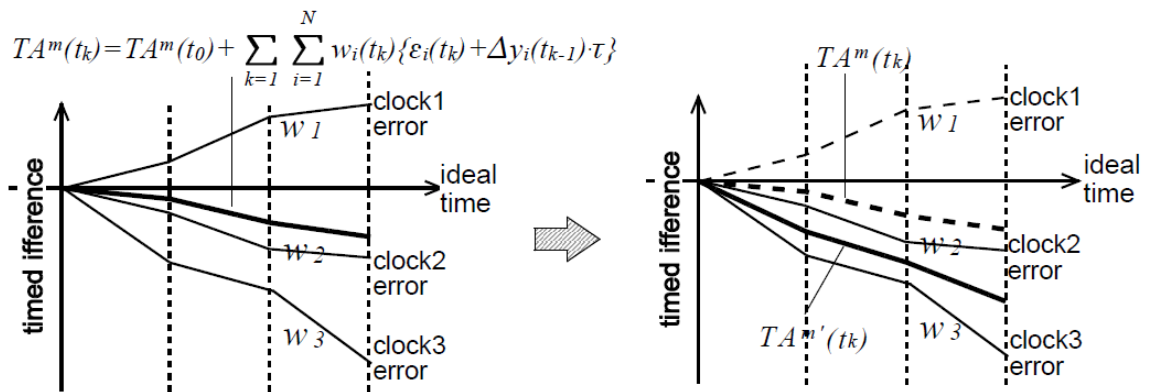
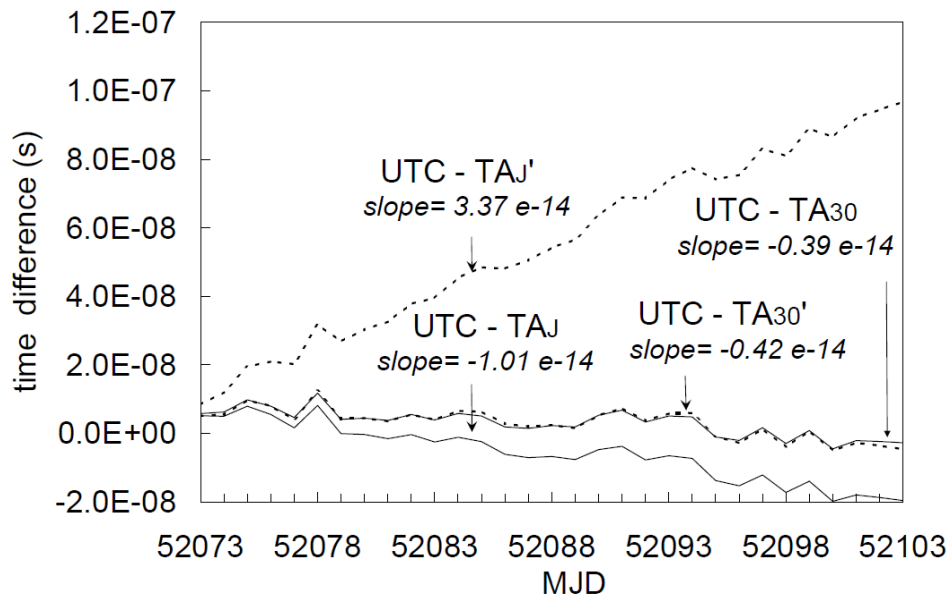
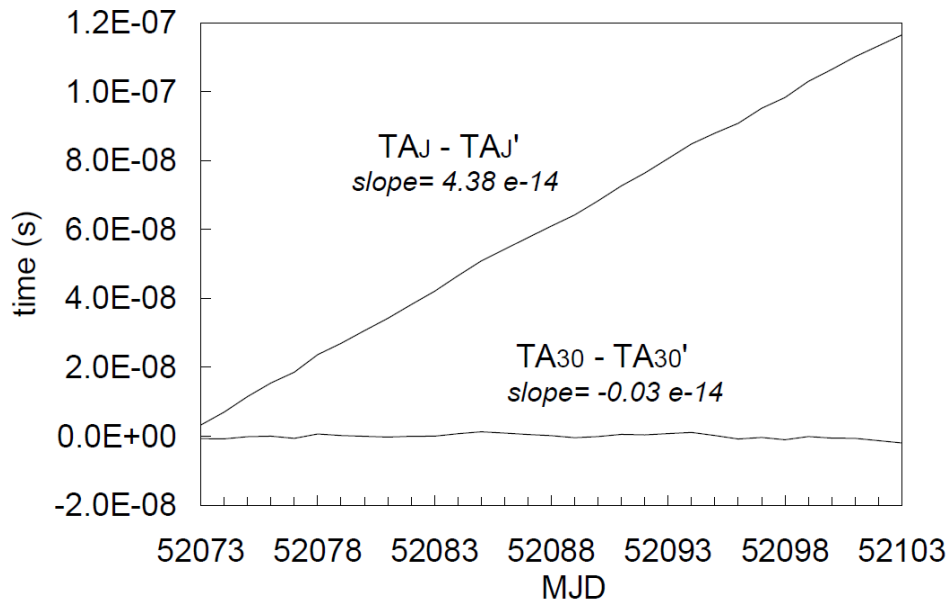


図 6.3 レート推定による累積誤差があった場合における時計抜けの影響



(a) UTC と各時系との時刻差



(b) 各時系において CS#21 がある場合と無い場合の時刻差

図 6.4 シミュレーションの結果

TAJ は UTC(NICT)の基となる TA、TAJ'は TAJ から CS#21 を抜いたもの、TA30 は直近 30 日レートで計算した TA、TA30'は TA30 から CS#21 を抜いたもの。

TA 変動を引き起こしていたと思われたため、予測レート計算式を変更して効果を見る。(6.5)式、(6.6)式の初期値重視型のレートに代え、時計の直近のふるまいをより反映し予測誤差を抑えられるように、直近 30 日のレート

$$\bar{y}_i^{30}(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - 30T)}{30T} \dots (6.8), \quad T = 86400 \text{ (sec)}$$

を用いた時系 TA30 をシミュレーションで作し、時計 CS#21 を抜いた時のレート変動を UTC(NICT)の場合と比べてみた。計算区間を 30 日にしたのは、Cs 時計の到達安定度は平均化時間 30 日近辺で得られるためである。他の要因による変動と区別するため、計算区間はイベントが何もなかった時期を選んだ。

UTC と各時系の時刻差を図 6.4(a)に、各時系において CS#21 がある場合ない場合の時刻差を図 6.4(b)に示す。TAJ は UTC(NICT)の基となる TA、TAJ'は TAJ から CS#21 を抜いたもの、TA30 は(6.8) 式を用いたシミュレーション TA、TA30'は TA30 から CS#21 を抜いたものを、それぞれ表す。CS#21 を抜いた場合、UTC(NICT)の基となる TAJ のレートは大きく変動するが ( $4.38 \times 10^{-14}$ )、TA30 のレートはほとんど変動しなかった ( $-0.03 \times 10^{-14}$ )。この結果から、各時計のレート計算方法を(6.5) 式及び(6.6)式から(6.8)式に変更することにより、時計抜けによる TA のレート変動を緩和できることがわかった。

改良後の時系アルゴリズム (Alg4a と呼ぶ) は、新システムの時系アルゴリズム Alg5 のベースとなっている。

## 6.4 変動量の推定式

上記のシミュレーション結果を定量的に確認するため、 $TA^m$  から 1 台の時計を抜いた場合のレート変動を(6.2)式から導いてみる。

$TA^m$  のレート  $R^m$  は以下のように表せる。

$$R^m(t_M) = \frac{TA^m(t_M) - TA^m(t_0)}{M\tau} \dots (6.9) \quad t_M = t_0 + M\tau, \quad M = 30$$

(6.2)式を見直す。時計の時刻差において、一次変動分を除いた後の成分が  $\varepsilon_i$  なのだから、 $\varepsilon_i$  の累積 ((6.2)式右辺第 2 項) はほぼレートゼロとみなしてよい。このことを用いると(6.2)式より  $R^m$  は以下の形になる。

$$\begin{aligned} R^m(t_M) &= \frac{TA^m(t_M) - TA^m(t_0)}{M\tau} \\ &= \frac{1}{M\tau} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \varepsilon_i(t_k) + \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \Delta y_i(t_{k-1}) \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
&\approx \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=1}^N w_i(t_k) \Delta y_i(t_{k-1}) \\
&= \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M w_1(t_k) \Delta y_1(t_{k-1}) + \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=2}^N w_i(t_k) \Delta y_i(t_{k-1}) \cdots (6.10)
\end{aligned}$$

時刻  $t_0$  直後に 1 番目の時計 ( $i=1$ ) が抜けたとする。この場合の時系を  $TA^{m'}$  とすると、そのレートは同様に以下で表せる。

$$R^{m'}(t_M) = \frac{TA^{m'}(t_M) - TA^{m'}(t_0)}{M\tau} \approx \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \sum_{i=2}^N w'_i(t_k) \Delta y_i(t_{k-1}) \cdots (6.11)$$

$w'_i$  は 1 番目の時計が抜けた後の、他の時計の重みである。これは、以下の議論により時計抜け前の重み  $w_i$  と関連づけることができる。

各時計の重みは、平均原子時に対するその時計の周波数安定度に依存するので、ある時計が抜けた際もその後の平均原子時が安定であれば、他の時計の安定度が左右されることはない。日本標準時は 10 台以上の時計から構成され、しかも特定の時計が平均原子時を支配することがないように重みに上限を設けているため、ある時計が抜けても平均原子時の安定度への影響は小さいと考えられる。この場合、時計同士の重み比は時計抜け前後でほぼ同じと考えられるので（仮定 1）、 $w'_i$  は以下の式で表せる。

$$w'_i(t_k) \approx A w_i(t_k), \quad i \geq 2 \cdots (6.12)$$

ここで  $A$  は比例係数である。規格化条件  $\sum_{i=1}^N w_i(t_k) = 1$ ,  $\sum_{i=2}^N w'_i(t_k) = 1$  も考慮すると

$$A = \frac{1}{1 - w_1(t_k)} \cdots (6.13)$$

となる。また日本標準時で使用している Cs 時計 (HP5071A) の場合、時計が正常であれば重みの時間変動はさほどないと考え、

$$w_i(t_k) \approx w_i(t_0) \cdots (6.14)$$

と見なせるとする（仮定 2）。これらを仮定すると、時計抜け後の重みは

$$w'_i(t_k) = \frac{w_i(t_0)}{1 - w_1(t_0)} \cdots (6.15)$$

と表せるので、(6.11)式は以下のように近似できる。

$$R^{m'}(t_M) \approx \frac{1}{M} \frac{1}{1 - w_1(t_0)} \sum_{k=1}^M \sum_{i=2}^N w_i(t_0) \Delta y_i(t_{k-1}) \cdots (6.16)$$

これらの式から 1 番目の時計がある場合ない場合のレート差を計算する。(6.10)式、(6.16)式より、

$$\begin{aligned}
& M\{R^m(t_M) - R^{m'}(t_M)\} \\
& \approx \sum_{k=1}^M w_1(t_0) \Delta y_1(t_{k-1}) + \left\{ 1 - \frac{1}{1 - w_1(t_0)} \right\} \sum_{k=1}^M \sum_{i=2}^N w_i(t_0) \Delta y_i(t_{k-1}) \\
& = \sum_{k=1}^M w_1(t_0) \Delta y_1(t_{k-1}) - \frac{w_1(t_0)}{1 - w_1(t_0)} \left\{ MR^m(t_M) - \sum_{k=1}^M w_1(t_0) \Delta y_1(t_{k-1}) \right\} \\
& = \frac{w_1(t_0)}{1 - w_1(t_0)} \left\{ \sum_{k=1}^M \Delta y_1(t_{k-1}) - MR^m(t_M) \right\} \cdots (6.17)
\end{aligned}$$

となる。(6.1)式を代入してまず以下の形を得る。

$$M\{R^m(t_M) - R^{m'}(t_M)\} \approx \frac{w_1(t_0)}{1 - w_1(t_0)} \left\{ \sum_{k=1}^M \bar{y}_1(t_{k-1}) - MR^m(t_M) - \sum_{k=1}^M \bar{y}_1^m(t_{k-1}) \right\} \cdots (6.18)$$

ここで以下の関係を利用する。まず(3.14)式、(3.15)式、(3.17)式、(6.1)式から

$$x_1(t_k) - x_1(t_{k-1}) = \bar{y}_1^m(t_{k-1}) \cdot \tau + \varepsilon_i(t_k) - \{TA^m(t_k) - TA^m(t_{k-1})\} \cdots (6.19)$$

が得られるので (ただし  $t_k - t_{k-1} = \tau$ )、この式を  $t_0$  から  $t_M$  まで加えてやると、

$$x_1(t_M) - x_1(t_0) = \sum_{k=1}^M \bar{y}_1(t_{k-1}) \cdot \tau + \sum_{k=1}^M \varepsilon_i(t_k) - \{TA^m(t_M) - TA^m(t_0)\} \cdots (6.20)$$

右辺 2 項目はゼロとみなせるのでキャンセルし、(6.9)式を使えば

$$\frac{x_1(t_M) - x_1(t_0)}{\tau} = \sum_{k=1}^M \bar{y}_1(t_{k-1}) - MR^m(t_M) \cdots (6.21)$$

となるので、(6.21)式を (6.18) 式に代入すれば、

$$R^m(t_M) - R^{m'}(t_M) = \frac{w_1(t_0)}{1 - w_1(t_0)} \left\{ \frac{x_1(t_M) - x_1(t_0)}{M\tau} - \frac{1}{M} \sum_{k=1}^M \bar{y}_1^m(t_{k-1}) \right\} \cdots (6.22)$$

となる。これが 1 番目の時計が抜けた場合の  $TA^m$  のレート変動を表す式である。 $w_i(t)$ ,  $x_i(t)$ ,  $y^m_i(t)$  は全て  $TA^m$  計算時に与えられる量であるため、レート変動量が実際に計算可能な形で表せたことになる。

シミュレーションの例で(6.22)式の妥当性を確認してみる。6.3章でレート変動を調べた2つの時系 TAJ 及び TA30 において、計算時に得られた各パラメータを(6.22)式右辺に代入したところ、TAJ においては  $4.38 \times 10^{-14}$ 、TA30 においては  $-0.03 \times 10^{-14}$  の値が得られた。これは図 6.4(b)における実際のレート変動 (6.22 式左辺に相当) と一致することから、(6.22)式はレート変動の評価式として妥当と思われる。

実運用においては、不慮の事態により時計が突然抜け、その後の時系レート変動予測が必要になることもある。この場合シミュレーションと異なり、時計がある場合の計算ができないため、 $x_i$  及び  $y_i^m$  については時計抜け前の値で計算を行い、変動量を予測することになる。抜けた時計の安定度が良く時計の平均台数が多いほど、良い予測結果が得られる。

## 6.5 6章のまとめ

時計抜けによる日本標準時の急激な変動は、時計のレート計算式が実態に即していなかったことが原因であった。初期値重視型のレートを、時計の直近の状態を反映しやすいレートに変更したところ、時計が抜けても標準時に大きな変動が生じなくなった。数式からの検討においても、いくつかの仮定を設けることにより、時計抜け時の TA 変動量を比較的単純な (6.22)式で表すことができた。この式で変動量を計算したところ、実際の TA レート変動量と良い一致を見たことから、時計抜けの原因が不適切なレート設定であること、その場合 TA に生じるレート変動量が(6.22)式で見積もれること、を確認することができた。

この問題は、時系アルゴリズムにおいてレート設定の影響力を示す例といえる。初期値重視型のレートも基本から逸脱した計算法ではなく、時計の信頼性が低い時代には、時計の異常に左右されにくい良い方法であったと考える。だが時計の信頼性が向上してからは、安定度を優先できるようになり最適な計算法が変化した。このように時系アルゴリズムの具体化においては、時計の性質や目的を考慮しパラメータの最適化を図る必要がある。

## 第7章 原子時系アルゴリズムの向上（2）

### ～異常時計の影響による周波数変動の改善～

#### 7.1 はじめに

7章では、6章に引き続き、日本標準時の時系アルゴリズムの改良について述べる。この章で調査研究するのは、日本標準時における急激なレート変動である。5章で紹介した新発生システムの定常運用開始後、時計抜けや保守作業等のイベントがない時間帯にも関わらず日本標準時の周波数が急変する事態が何度か発生しており、日本標準時の長期安定度を劣化させている。

7章ではこの原因を究明し、改修した時系アルゴリズムの有効性を確認する[53]。7.2章で問題となる事例を紹介し原因を調査した。原因は日本標準時の計算で使われるCs時計のレート急変であった。問題解決に向け、時系アルゴリズムにおける重みづけの検討を7.3章で行う。7.4章ではさらにレート検証機能の導入を行い、変動抑制のための最適な方法を模索する。最後に7.5章において、最適と判断されたアルゴリズムを日本標準時の問題に適用し、その有効性を確認する。

#### 7.2 変動事例と原因調査

図7.1に、2006年以降のUTC-UTC(NICT)の時刻差を示す。これはBIPMの月報circular-Tの報告値に依るものである。UTC(NICT)は、5章で報告した新システム（第5世代）で発生されたものであり、UTC(NICT)の基となる平均原子時TAは時系アルゴリズムAlg5で計算されている（5.2.5章、付録参照）。UTC(NICT)計算における時計の出入りや周波数調整などのイベントは、挿入コメントで示した。

2006年末頃からUTC(NICT)に何度か大きな周波数変動が生じている。UTC(NICT)には人為的な周波数調整が含まれるため、基となるTA（ $TA_{JST}$ と表す）の変動を確認したところ（図7.2）、MJD54084（'06.12.25）近辺で周波数変動が起きていた。このような周波数変動は、システム上の作業などが特にならない時期に起きているケースもあった。

変動の原因を調査するため、UTCに対する各時計の変動を見た。図7.3にUTCに対する各Cs時計の変動を示す。変動を見やすくするため、時計毎に全区間で一次フィットをかけて図示している。MJD54084近辺に着目すると、MJD54064あたりからCS#36のレート

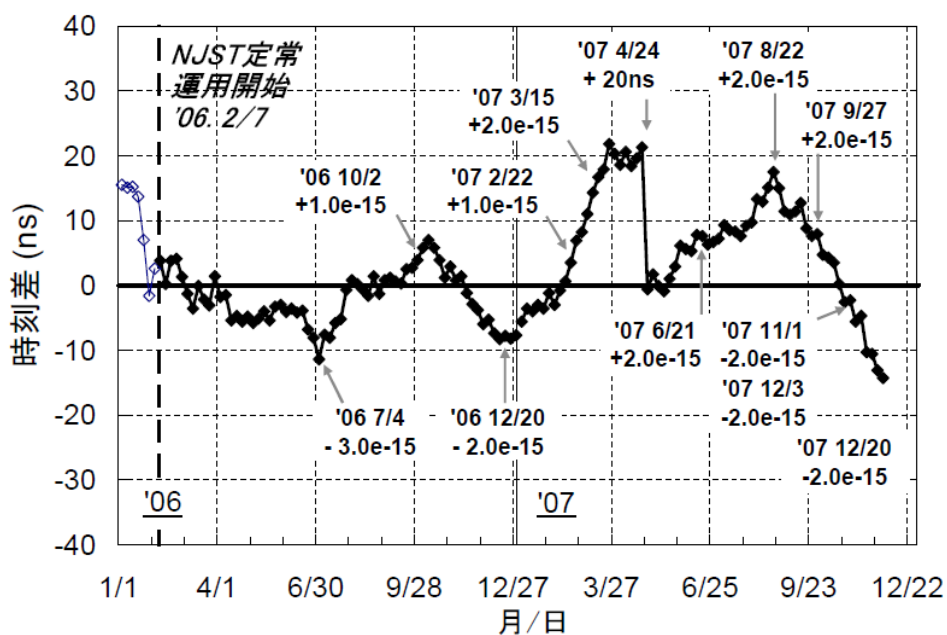


図 7.1 UTC-UTC(NICT)の時刻差

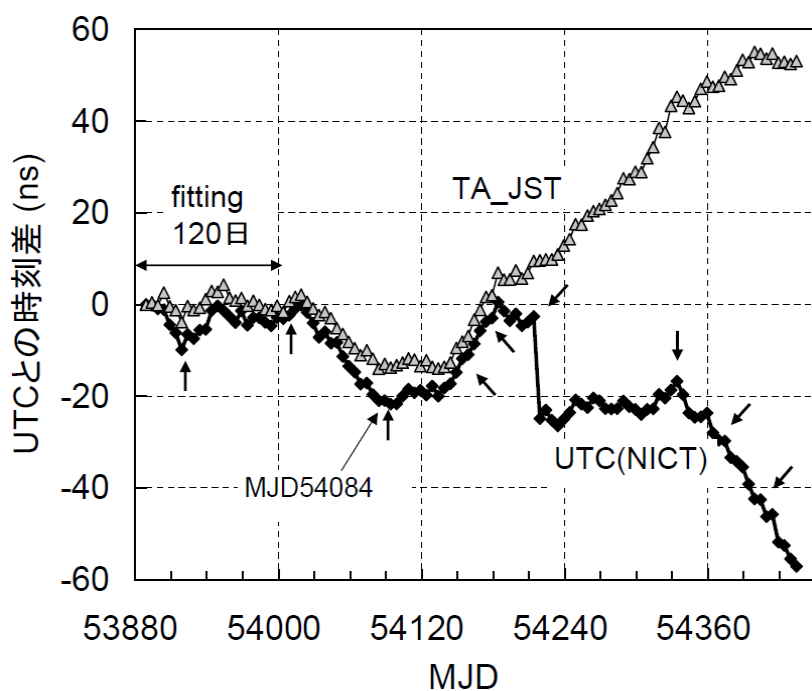


図 7.2 UTC-UTC(NICT)、UTC-TA<sub>JST</sub>の時刻差 ('06.6/1~'07.12/31)

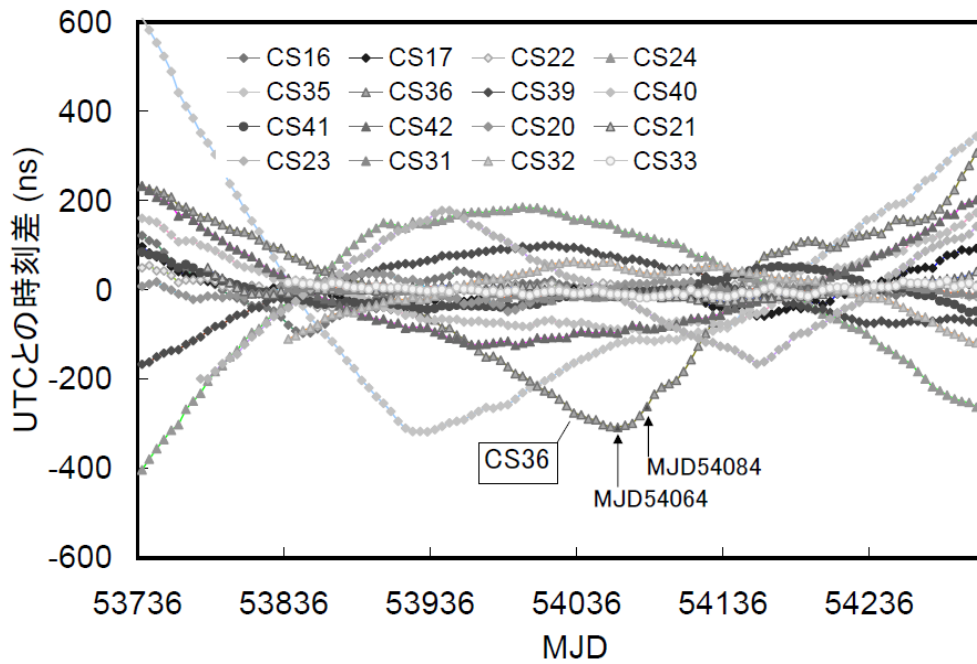


図 7.3 UTC-各 Cs 時計の時刻差  
全区間にわたり各時計に一次フィットをかけた後の図。

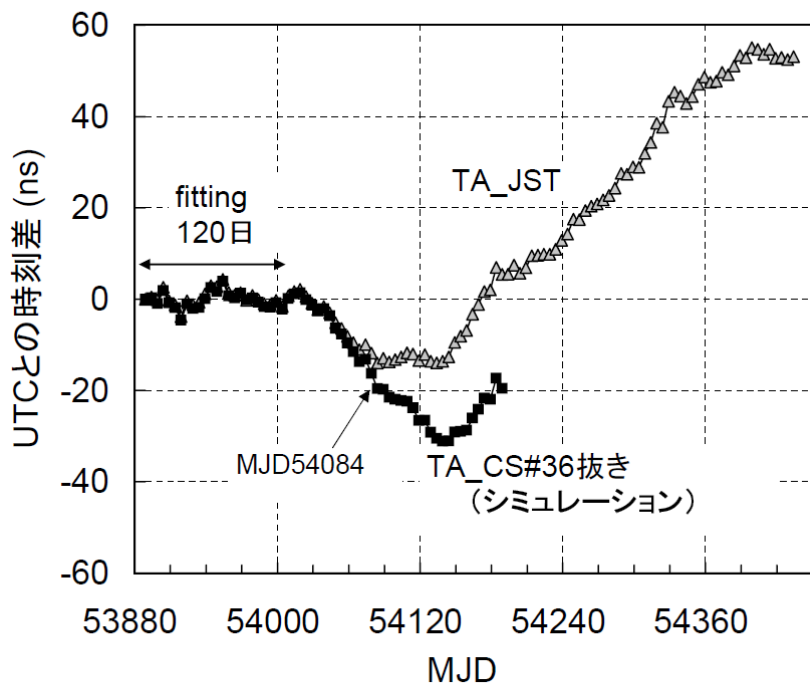


図 7.4 CS#36 を除いた場合のシミュレーション  $TA_{JST}$

が急変していることがわかる。そこで CS#36 を除いた TA<sub>JST</sub> をシミュレーションしたところ、MJD54084 近傍の曲がりが見事に小さくなった (図 7.4)。このことから、CS#36 のレート急変が MJD54084 近傍の TA 変動をもたらしたことが判明した。

## 7.3 重みづけの検証

### 7.3.1 3種の重みづけの比較

TA 計算に使われる時計にレート急変が生じた時、TA 自身にどのような影響があるのかを考える。

6 章の議論において、不適切なレート設定をした場合、予測誤差が累積することを示した ((6.2)式参照)。6 章の議論はレート計算式の設定に問題がある場合であったが、時計のレートが急変し変動前のレート値と変動後のレート値に  $\Delta y$  の差が生じた場合でも、数式上では同じ扱いとなる。つまり TA において、レート予測誤差  $\Delta y$  に由来する時刻差が重み付きで累積していく ( $w_j(t_k)\Delta y_j(t_{k-1}) \cdot (t_k - t_{k-1})$ )。ただし 6 章の問題では、不適切なレートにより累積した予測誤差が時計抜けにより突然消失することが時系変動の原因だったのに対し、今回の問題においては、レート急変で生じた予測誤差が突然加わるのが時系変動の原因である。

今回の問題においては、本来、重みづけによる変動抑制の効果があるべきと考えた。時計のレート急変を検知してその重みを落とすような時系アルゴリズムであれば、 $\Delta y$  が増加しても  $w$  が減少して相殺するため、上記のような大きな TA 変動は生じないはずである。Alg5 ではこの機能が不十分であったため問題が生じたのではと考えた。Alg5 の重み計算方法は適切でないのであろうか。そこでまず、重みの計算方法を基本に戻って検証した。

加重平均においては、平均結果の不確かさが最小になるような重みづけが最適とされる。設定される。(3.18)式で表される TA の不確かさ  $\Delta TA$  は、以下の式で計算できると考えた。

$$\Delta TA(t_k) = \sum_{i=1}^N w_i(t_k)^2 \varepsilon_i(t_k)^2 \dots (5.30)$$

これを最小にする重みは、以下のようになる[23, pp.180-184]。

$$w_i(t_k) = \frac{1/\varepsilon_i(t_k)^2}{\sum_{i=1}^N (1/\varepsilon_i(t_k)^2)} \dots (5.31)$$

$\varepsilon$  は TA 計算の過程では値を確定できないため、 $\varepsilon$  に準じると思われる量で代用する。3.3.3 章で述べたとおり、 $\varepsilon$  は時計の変動の予測誤差であり、一般には時計の周波数ゆらぎから

生じる。そこで時計の周波数安定度を示すアラン標準偏差  $\sigma_y$  ((3.11)式) を  $\varepsilon$  の代わりに用いることにする。この重みを  $w_2$  で表すとすると、 $w_2$  は以下の式で定義される。

$$w_{2_i}(t_k) \equiv \frac{1/\sigma_{y_i}(t_k, \tau)^2}{\sum_{i=1}^N (1/\sigma_{y_i}(t_k, \tau)^2)} \dots (5.32)$$

$w_2$  を「強い重み」と呼ぶことにする。

理論的に最適と思われる  $w_2$  を用いて TA を計算してみた。確認のため、以下の異なる二つの重みづけ  $w_1$ 、 $w_0$  でも同様に TA を計算し比較した。 $w_1$  を「緩い重み」、 $w_0$  を「等重率」と名付ける。 $w_1$  は Alg5 で採用されている重みづけである。

$$w_{1_i}(t_k) \equiv \frac{1/\sigma_{y_i}(t_k, \tau)}{\sum_{i=1}^N (1/\sigma_{y_i}(t_k, \tau))} \dots (5.33)$$

$$w_{0_i}(t_k) \equiv 1/N(t_k) \dots (5.32)$$

TA 計算におけるパラメータとしては、予測レート計算区間は 30 日、 $w_2$ 、 $w_1$  におけるアラン分散の平均化時間  $\tau$  は 30 日とした。 $w_2$ 、 $w_1$ 、 $w_0$  を用いて計算した TA をそれぞれ  $TAw_2$ 、 $TAw_1$ 、 $TAw_0$  と名付ける。

結果を図 7.5 に示す。 $TAw_2$  の安定度は  $TAw_1$ 、 $TAw_0$  に比べむしろ悪く、 $w_2$  が  $w_1$  や  $w_0$  に比べて適した重みづけとは言えない結果となった。また、 $w_2$ 、 $w_1$ 、 $w_0$  のいずれのケースにおいても良い長期安定度は得られず、重みづけの工夫だけでは異常時計の影響が取り切れない、という結果となった。

### 7.3.2 重みづけに関する考察

強い重み  $w_2$  が最適な重みづけとならなかった理由を考える。 $\sigma_y(\tau=30 \text{ 日})$  を用いて計算した各時計の重みは、 $\tau=30$  日における TA の安定度を最適化する効果をもつ。だが、ある  $\tau$  において最良の時計が他の  $\tau$  においても最良とは限らない。確認のため、図 7.3 に示した UTC と各 Cs 時計の時刻差データを用いて、アラン標準偏差を計算した (図 7.6)。 $\tau=30$  日で最も安定度の良い時計 CS39 は  $\tau>30$  日では安定度が劣化している。このような状況で  $\sigma_y(\tau=30 \text{ 日})$  から求めた重みを CS39 に与えると、TA の長期安定度を損なう結果となるのではないか。3 種の重みの中で、最も  $\sigma_y(\tau=30 \text{ 日})$  への依存度が高い  $w_2$  の場合に、最も長期安定度の悪い結果となったと考えられる。

この推察の妥当性を確かめるため、二つの TA において各時計の重みを比較した。一つは  $\sigma_y(\tau=30 \text{ 日})$  を用いた  $w_2$  で計算した  $TAw_2$ 、もう一つは  $\sigma_y(\tau=60 \text{ 日})$  を用いた  $w_2$  で計算し



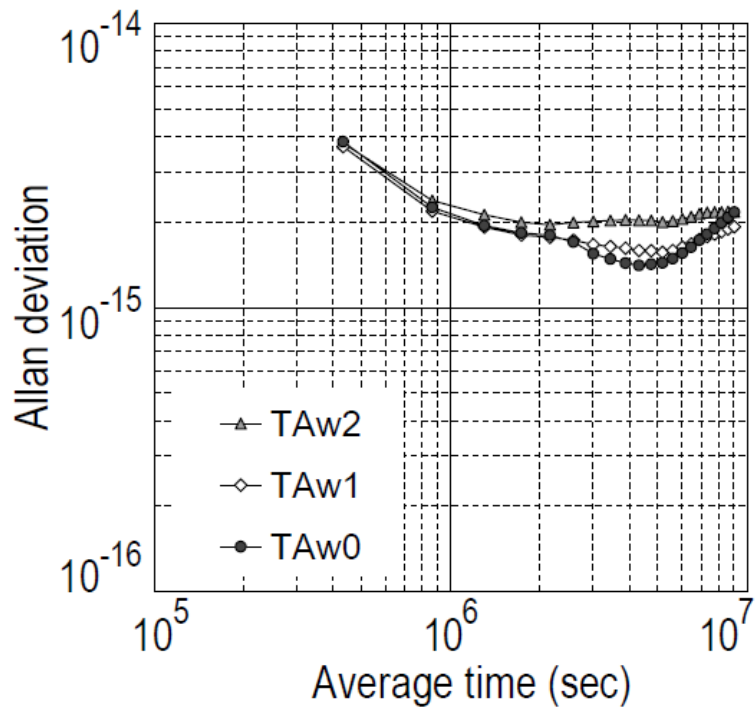


図 7.5 異なる重みづけで作った TA の安定度比較

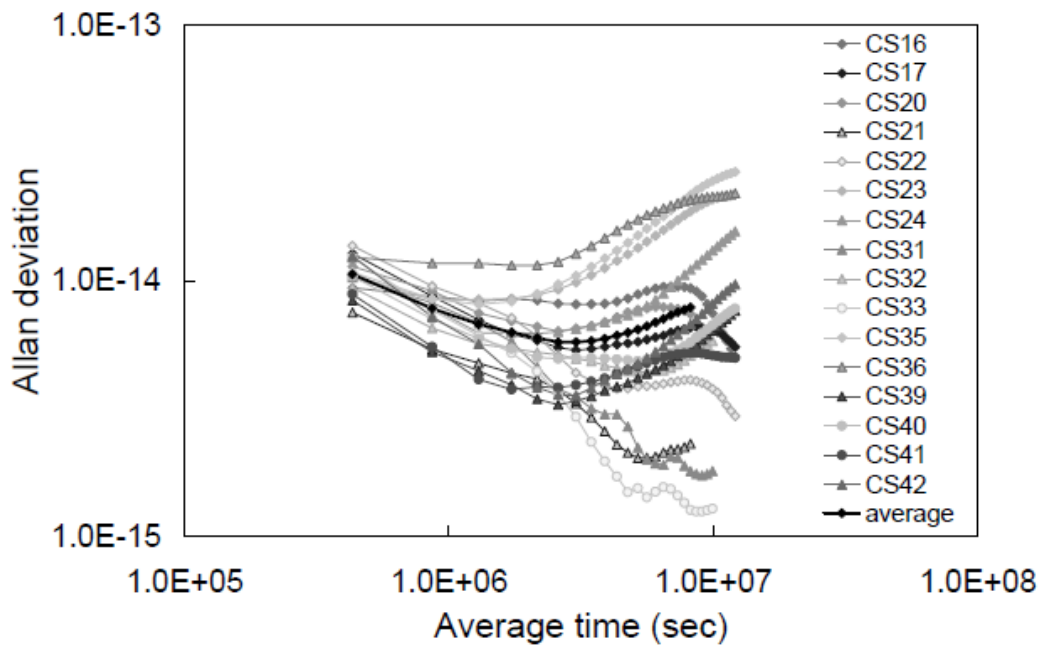


図 7.6 UTC-各 Cs 時計の周波数安定度

た  $TAw2A60$  である。 $TAw2$  における時計# $i$  の重みを  $w30_i(t)$ 、 $TAw2A60$  における重みを  $w60_i(t)$  で表す。重みの最大値は 0.3 に固定した。 $w30_i(t)$  は TA を  $\tau=30$  日で最適化する値、 $w60_i(t)$  は TA を  $\tau=60$  日で最適化する値、とみなせる。 $w30_i(t)$  と  $w60_i(t)$  の相関を見ることで、 $\sigma_y(\tau=30 \text{ 日})$  に強く依存する重みが TA の長期安定度を劣化させるかどうかを確認する。

図 7.7(a)に、全時計全区間における  $w30_i(t)$  対  $w60_i(t)$  の分布を示す。相関が強ければ、 $w30_i(t)$  が  $\tau=60$  日でも TA を最適化できると判断できるのだが、分布は  $y=x$  の線から大きくはずれた。特に、 $w60_i(t)$  値は小さいのに  $w30_i(t)$  値は大きいサンプルが多数ある。これは長期安定度の悪い時計が  $TAw2$  において大きな重みを占めていることを意味し、 $TAw2$  の長期不安定性を示唆する。このことから上記の推察の妥当性が確認できた。またかなりのデータが最大値 0.3 に分布している。これは、重みがいくつかの時計に偏り TA がその時計の変動にひきずられ不安定化する傾向があることを意味する。

さらに比較のため、図 7.7(b)に緩い重みを用いた  $TAw1$  における同様の試験結果を示した。 $TAw2$  の場合に比べ、比較的  $y=x$  近辺の狭い範囲に分布が集中している。また最大値 0.3 を取るデータも明らかに少ない。これらの結果により、 $TAw1$  において  $TAw2$  より良い長期安定度が得られた直接の原因が確認できた。

$w2$  が最適な重みづけになる、との思考過程のどこが不適當だったのだろうか。この思考過程には、 $\sigma_y$  が  $\varepsilon$  の代用として使えるという仮定があった。この仮定が崩れた場合、 $w2$  が最適な重みづけとは言えなくなる。実際、 $\sigma_y(\tau, t_k)$  は  $\varepsilon(t_k)$  の代用にならない場合がある。(3.11)

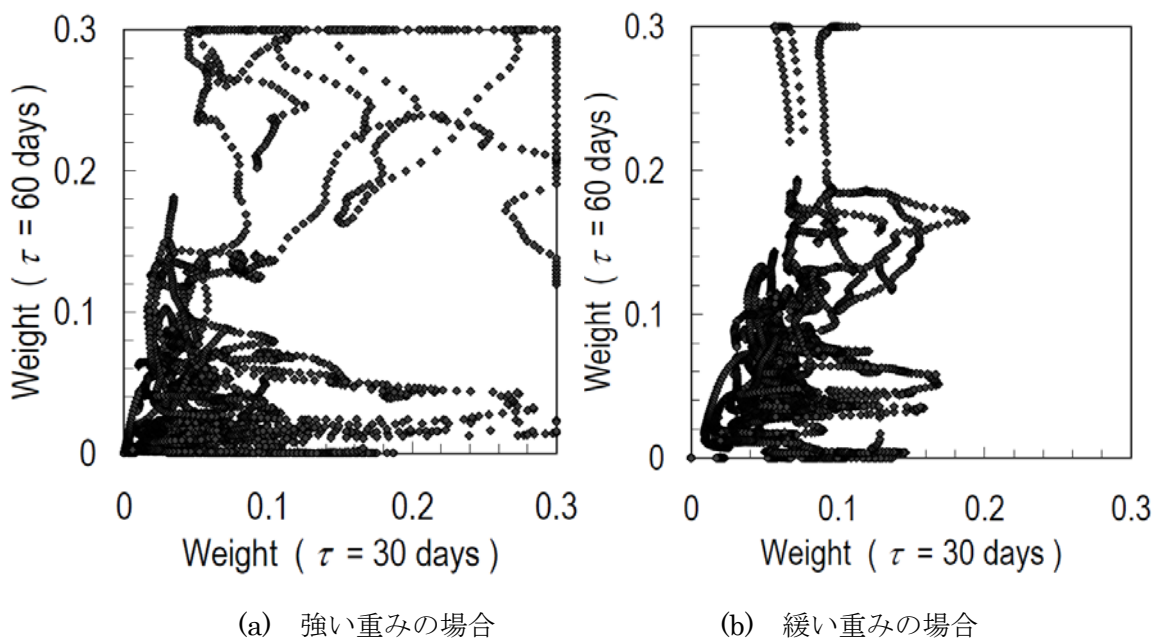


図 7.7 時計の重みの相関

式で示すように  $\sigma_y(\tau, t_k)$  は多数のサンプルの平均値である。時計のレート急変が起きた場合、 $\varepsilon(t_k)$  はすぐに増大するが、 $\sigma_y(\tau, t_k)$  においては平均の効果で変動が過小評価され、 $\sigma_y(\tau, t_k)$  が  $\varepsilon(t_k)$  の変動を反映するとは言えなくなる。また上記の検証で示したとおり、 $\sigma_y(\tau = \tau_l)$  はある特定の平均化時間  $\tau_l$  における安定度であり、全ての  $\tau$  において  $\varepsilon$  の代用となるわけではない。これらの事から、 $w_2$  が最適な重みづけでなくなる事例は論理的にもあり得ると考えられる。

では、 $\varepsilon$  の代用としてアラン分散  $\sigma_y$  を重みづけに使うのは全く不適當なのだろうか。アラン分散は常態的な安定度は反映するため、時計の善し悪しの判定基準としては便利な指標でもある。異常時計を他の手段で排除できれば、アラン分散  $\sigma_y$  を用いた重みづけでも良い結果が得られるのではないだろうか。

この考えに基づき、より積極的に異常時計を除くため、レート検証を導入する。

## 7.4 レート検証の導入

7.3.1 章において、重みづけの工夫だけでは異常時計の影響を排除できなかった。時系変動の原因は時計のレート急変なので、時計のレート値そのものの変動を監視する必要があると考え、レート検証を導入する。

3.3.5 章でも述べたように絶対的な基準時系がないため、時計のレート変化は、その時計自身の過去のレート値と比較して判断する。変化量があるリミットを越えたら重みを落とす又は予測誤差  $\varepsilon$  を小さくする、との対応で、レート急変時計の影響が抑えられるのでは、と考えた。 $\varepsilon$  を小さくするというのは、つまり実態に合ったレートを取ることである。通常レート値は、安定度がもっとも良くなる区間（Cs 時計の場合  $\tau = 30$  日近辺）で計算するが、レート急変後の実態に素早く対応するには、より短期間のレートを採用するのが望ましい。ということで、レート急変を検出したら短期レートに変更する、という手法を考えた。

試験方法として、レート急変を検出したら重みをゼロにする（検証1）、重みは変えずに短期レートを採用する（検証2）、短期レートに変更し重みも半分にする（検証3）、の3通りで、結果を比較する。急変から時間が経ちレートが落ち着いたと判断された時、重みは自動的に復活する。この手法は、基本のアルゴリズムにレート検証プロセスを付加するだけで実現できるため、TA 計算の根本には影響を及ぼさずに結果の改善ができると思われる。

レート検証機能を追加したアルゴリズムで TA を計算し、異常時計の影響が抑えられるかどうかを調べることにした。その際、 $w_2$ ,  $w_1$ ,  $w_0$  の3種の重みでの比較も行い、どの重みで最も良い結果が出るかについても検証する。

表 7.1 レート検証試験時の区分指標

W0	w0(等重率)
W1	w1(1/σy)
W2	w2(1/σy <sup>2</sup> )
RT	レート推定区間(T=10,30,60 日)
Aτ	アラン分散平均化時間(τ=10,30,60 日)
nc	レート検証なし
C1	レート検証1(重みゼロ)
C2	レート検証2(1日レート)
C3	レート検証3(1日レート&重み半分)

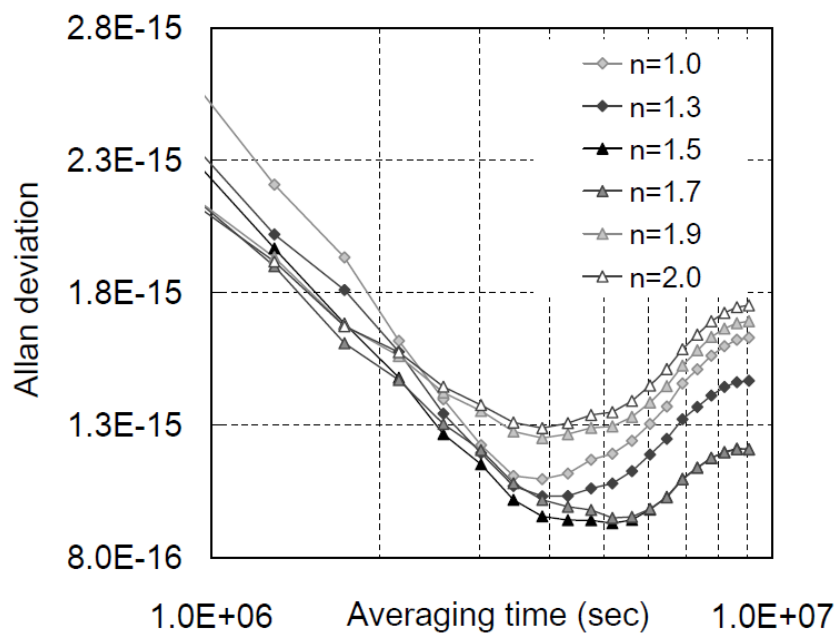


図 7.8 レート変動リミット係数の比較

## 7.4.1 パラメータの設定

試験に先立って、実際の計算に必要ないくつかのパラメータを設定する。不適当な値を用いると効果がないばかりか問題の元にもなるため、十分な検討が必要である。

TA 計算に関しては、レート計算区間、重みの付け方を決めなければならない。またレート検証に関しては、レート比較間隔、レート変動リミットを決めなければならない。それぞれのパラメータについて以下に検討する。

### ■ レート計算区間 (R)

レート計算区間が長いとレート急変に対する反応が鈍くなる。だが短すぎると、時計自身のふらつきによりレート値の不確かさが大きくなり、レート急変の判断がしにくくなる。単純には、Cs 時計のアラン標準偏差が最も良くなる平均化時間 30 日を  $R$  とするのが最適と思われるが、上記の兼ね合いを見るため 30 日の前後で区間を設定し、 $R=10, 30, 60$  日の 3 ケースで結果を比較した。

### ■ レート比較間隔 (P)

過去値との比較においては、どれほど前の値と比べるのが問題となる。比較間隔を  $P$  とし、最新のレート  $\bar{y}(t)$  と過去値  $\bar{y}(t-P)$  を比べるとする。レート計算区間を  $R$  とした時、 $P < R$  とすると、レート計算区間のオーバーラップにより  $\bar{y}(t)$  と  $\bar{y}(t-P)$  には相関が生じるため、変動が検出しにくくなる。一方、迅速な変動検出のためにはできるだけ短い  $P$  が好ましいため、相関の発生しない最短の  $P=R$  と設定した。

$R$  を小さくすれば  $P$  も小さくなり変動への対応が迅速になりそうでもあるが、短期でのレート推定は不確かさも大きく、レート変動の検知精度が下がるデメリットもある。いずれの値が適切かを調べるため、 $R=P=10, 30, 60$  日で計算を行い、結果を比較した。

### ■ レート変動リミット

レート変動検出リミットは、過度な異常検知を避けるため、レート値自身の不確かさより大きくなければならない。レート値自身の不確かさは  $\sigma_y(\tau=R)$  で見積もることができる。

TA 計算で使用する Cs 時計はすべて同機種であることから、全時計の周波数安定度の平均を典型的な周波数安定度とみなし、判断の基準とすることにした。全時計の平均周波数安定度は、 $\sigma_{y\_ave}(\tau=10 \text{ 日})=7.78 \times 10^{-15}$ 、 $\sigma_{y\_ave}(\tau=30 \text{ 日})=5.76 \times 10^{-15}$ 、 $\sigma_{y\_ave}(\tau=60 \text{ 日})=6.47 \times 10^{-15}$  となった。これを Cs 時計の安定度の典型値とし、各  $\tau$  におけるレートの不確かさとして用いることにする。

リミットを  $n \cdot \sigma_{y\_ave}$  とし、 $n=1 \sim 2$  の範囲で値を変えて TA を計算し、最適な  $n$  を調べた。TA は、 $R=30$  日、 $P=30$  日のレート検証とし、リミット異常のレート変動で時計の重みをゼロとする方式で計算した。結果を図 7.8 に示す。 $n=1.0 \sim 1.5$  において徐々に安定度が良くなり、 $n=1.5 \sim 1.7$  で最も良い安定度が得られた。 $n > 1.9$  では、逆にリミットが緩く変動時

計の影響が残り、安定度が悪くなっている。この結果に基づき、レート変動リミット係数としては  $n=1.6$  を採用することとする。最終的には、 $R=10$  日の場合のリミット値  $=1.6 \times 7.78 \times 10^{-15} = 1.24 \times 10^{-14}$ 、 $R=30$  日の場合のリミット値  $=1.6 \times 5.76 \times 10^{-15} = 9.2 \times 10^{-15}$ 、 $R=60$  日の場合のリミット値  $=1.6 \times 6.47 \times 10^{-15} = 1.03 \times 10^{-14}$  を使用した。

#### ■ 重み ( $w_2, w_1, w_0$ ) 及び $\sigma_y$ 計算における平均化時間 $\tau$ (A)

重みは、7.3.1 章で求めた  $w_2, w_1, w_0$  の 3 種類を比較した。 $w_2, w_1$  においては  $\sigma_y(\tau=A)$  を用いるため、それぞれについて  $A=10, 30, 60$  日の 3 通りを計算した。

### 7.4.2 シミュレーション結果の比較

計算方法及びパラメータの違いを表す指標を表 7.1 に示す。それぞれの条件で計算した TA に指標をつけて表した。

まず、等重率  $w_0$  で計算した場合を図 7.9 に示す。効果判定のため、レート検証なしの場合を共にプロットした。 $R=10$  (左図) においては、レート検証を入れると安定度が悪くなった。 $R=60$  日 (右図) においては、悪影響もないが効果もあまりない。 $R=30$  日 (中図) においては、レート検証の効果が著しい。特に検証 1 と検証 3 で良い結果が得られた。

次に、緩い重み  $w_1$  での計算結果を図 7.10 に示す。 $R=10$  日 (左列) においては、等重率  $w_0$  の場合と同様に、検証を入れるとレート検証なしの場合よりも全てのケースで安定度が悪くなった。また  $A=60$  日 (下段) においても、レート検証を入れると安定度が悪くなった。レート検証の効果が著しいのは、等重率  $w_0$  と同じく  $R=30$  日の場合 (中列) である。特に  $A=10$  日 (上段) において最も良い長期安定度が得られている。 $R=60$  日 (右列) においてはレート検証の効果は無いか小さかった。

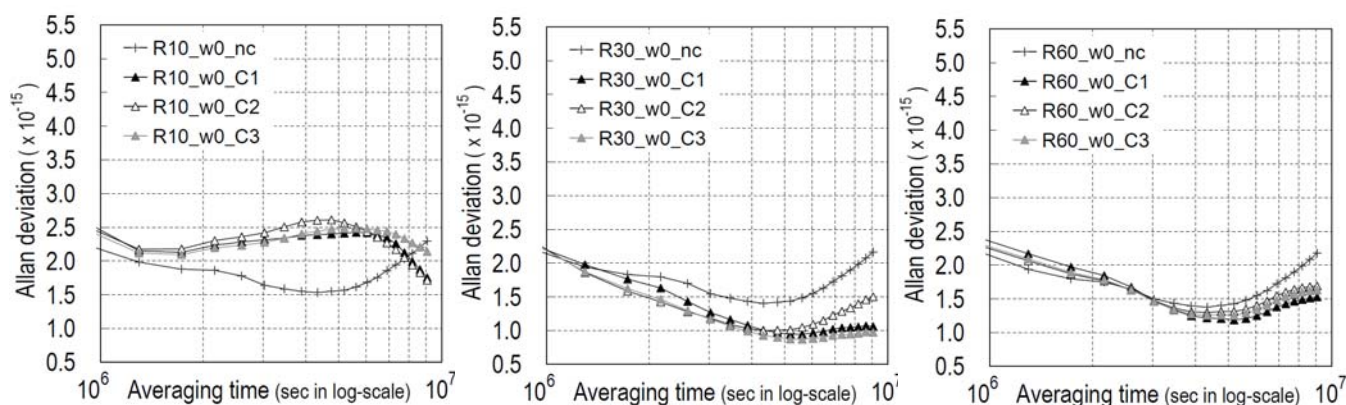


図 7.9 UTC-TAw0 のアラン標準偏差

左： レート R=10 日、中： R=30 日、右： R=60 日

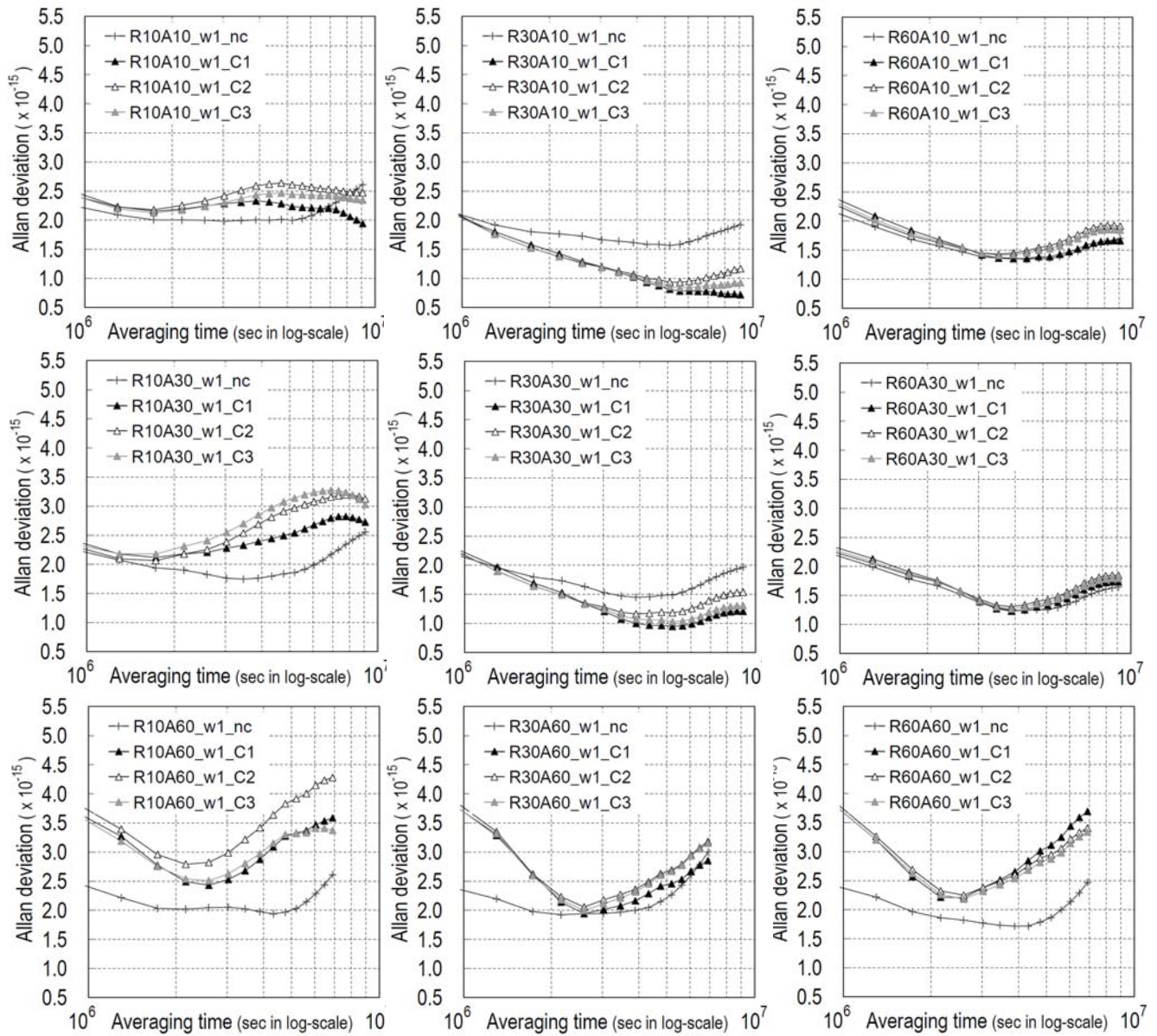


図 7.10 UTC-TAw1 のアラン分散

左：レート R=10 日、中：R=30 日、右：R=60 日  
 上：平均化時間 A=10 日、中：A=30 日、下：A=60 日

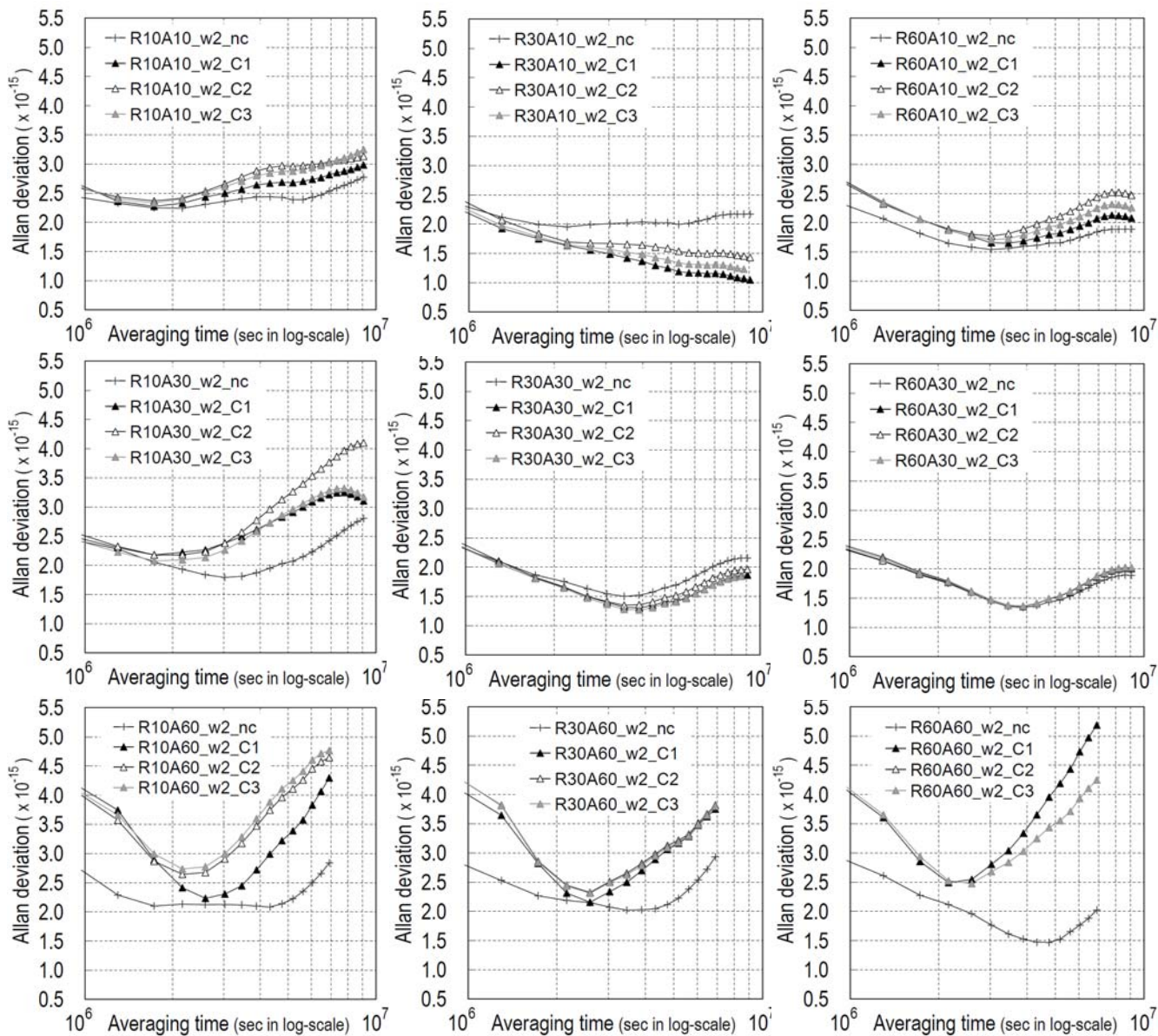


図 7.11 UTC-TAw2 のアラン分散

左：レート R=10 日、中：R=30 日、右：R=60 日

上：平均化時間 A=10 日、中：A=30 日、下：A=60 日



最後に、強い重み  $w_2$  での計算結果を示す (図 7.11)。緩い重み  $w_1$  での結果と傾向は同じである。同じ計算条件で比較した場合、 $w_1$  に比べて安定度はおしなべて悪い。また、同じレート・同じ検証法における等重率の結果と比較しても、安定度が劣る結果となった。

### 7.4.3 レート検証に関する考察

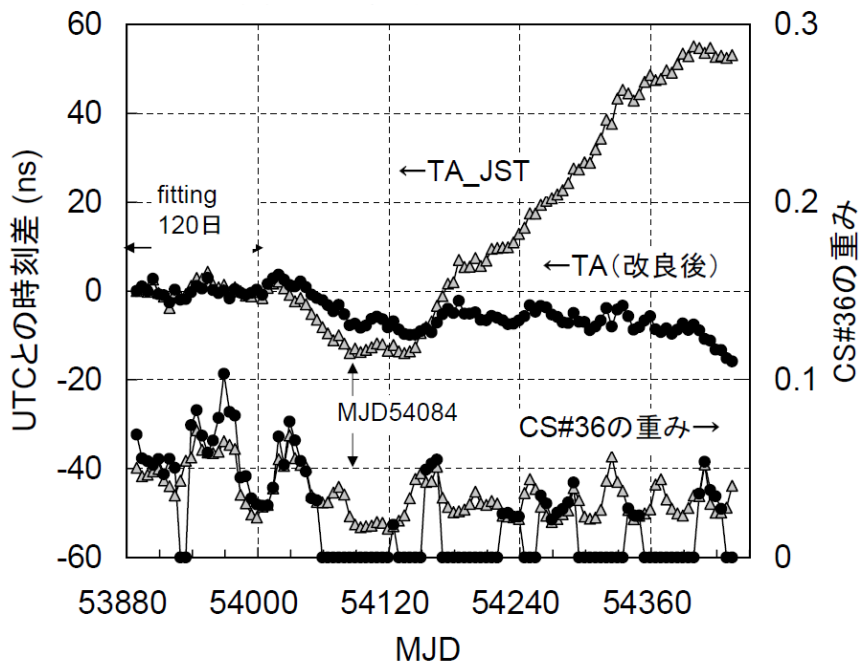
レート検証試験結果をまとめると、全てのケースで最も良い安定度を示したのは、 $R=30$  日、 $w_1$ 、 $A=10$  日、検証法 1 の場合であった。

まず、検証方法に着目する。 $\varepsilon$  を小さくする (検証 2) 方法でも安定度の向上は見られたが、重みを落とす (検証 1) 方法がもっとも効果的であった。解釈としては、時計の台数が減りすぎると平均の効果が減じて平均原子時のメリットが失われるが、 $1.6\sigma_{y\_ave}$  のリミットはガウス分布の場合 89% のサンプルは確保するということであり、台数減少のデメリットはさほど問題にはならない。むしろ怪しい時計は完全に除く方が良い安定度を導くのだと思われる。

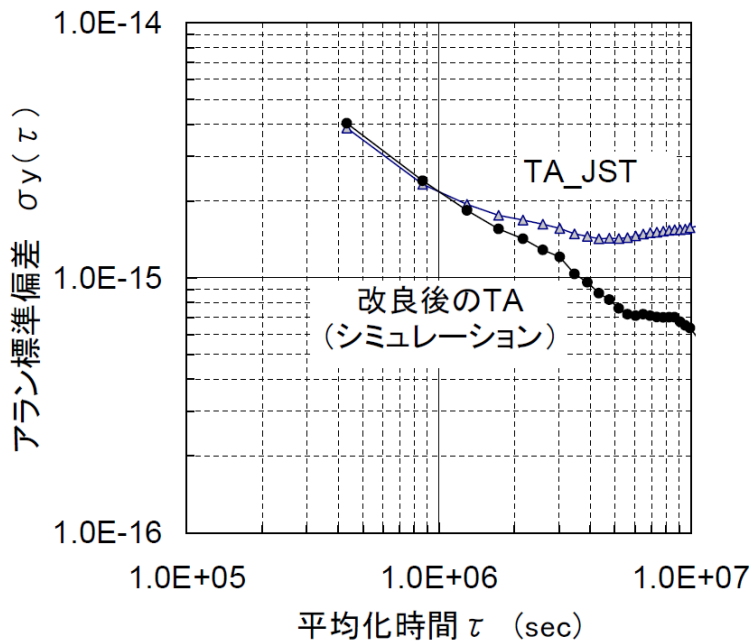
次にレート計算区間に着目する。 $R=30$  日で最も良い安定度を示すのは、7.4.1 章で述べたとおり予想通りの結果である。 $R=10$  日の場合に安定度が悪いのは、時計自身の安定度が 10 日ではさほど良くないため、レート値自身が不安定になるのが原因と思われる。 $R=60$  日において検証の効果が小さいのは、レート変動があっても区間が長いめにならされてしまい、リミットにかかる率が小さくなるためと思われる。ただ  $R=60$  日は、計算方法による差異が小さく、最高の結果は出ないとしても非常に悪い結果にもならないと思われるため、長期のデータが確保できる場合には低リスクで良い方法と思われる。

重みづけについては、緩い重み  $w_1$  が総じて良い結果を示した。次いで等重率  $w_0$  が良い結果となり、最も安定度が悪い結果を示したのは強い重み  $w_2$  であった。レート検証を取り入れても各時計の周波数変動を完全には取りきれず、むしろ、そもそも安定度の似通った同機種の時計には極端な差別化をしない方が良いのかもしれない。

$w_2$  及び  $w_1$  における  $\sigma_y$  の平均化時間については、 $\tau=60$  日では安定度が大きく劣化し論外であった。 $\tau=10$  日では  $\tau=30$  日より長期安定度が良くなった。この結果によれば、 $\tau$  の最適値は 10 日となる。この理由を考える。図 7.6 における各時計の安定度を見ると、 $\sigma_y(\tau=10$  日) の値は  $\sigma_y(\tau=30$  日) の値に比べて時計同士の差が小さい。つまり  $\sigma_y(\tau=10$  日) を用いた重みは  $\sigma_y(\tau=30$  日) を用いた重みよりも時計の差別化がゆるやかになり、良い結果を生じたと思われる。



(a) UTC-改良 TA 及び CS#36 の重み



(b) アラン分散

図 7.12 改良 TA の効果

## 7.5 改良アルゴリズムの効果

7.3 章及び 7.4 章の結果によれば、異常時計の影響を抑えるのに最も有効だったのは、30 日レート及び  $\sigma_y(\tau=10 \text{ 日})$  を用いた緩い重み  $w1$  で計算した TA に、30 日前の値と比べてレートが  $9.2 \times 10^{-15}$  以上変化した場合にはその時計の重みをゼロにする、というレート検証機能を追加した時系アルゴリズムであった。

この改良アルゴリズムで計算した TA を、改良前の  $TA_{JST}$  と比べてみる。結果を図 7.12 に示す。UTC との時刻差 (図 7.12(a)) において、改良後の TA では明らかに変動が小さくなっている。MJD54084 近辺の変動に関して詳しく見る。改良後の TA において該当箇所の変動は明らかに小さい。また 7.3 章で変動の原因と確認した CS36 の重みも、該当区間 (06.11.20-07.1.19) でゼロとなっており、異常時計が計算からの確に排除されたことがわかる。MJD54084 以外で見られる複数の変動についても抑制効果がみられることから、改良アルゴリズムには汎用的な効果があると考えられる。図 7.12(a) のデータから計算した周波数安定度を図 7.12(b) に示す。改良 TA においては長期安定度が格段に向上していることが明らかである。

これらの結果から、この改良アルゴリズムが TA における異常時計の影響を抑えるのに有効と判断し、近々日本標準時システムへ実装する予定である。

## 7.6 7 章のまとめ

2007 年以降日本標準時に発生したレートの大変動は、TA 計算に用いる Cs 時計の一部で生じた急激なレート変動が原因であった。異常時計の影響を抑えるため時系アルゴリズムを見直したところ、時計の重みづけにおいては、 $\sigma_y(\tau)$  に強く依存しない緩い重み  $w1 \propto 1/\sigma_y(\tau)$  の方が、原則論で最適と思われた強い重み  $w2 \propto 1/\sigma_y(\tau)^2$  よりも TA を安定化することがわかった。更に、レート値自身の変動を監視し異常と判断したらその時計の重みを落とす、というレート検証機能を付加することにより、日本標準時で問題となったレート変動が大きく抑制できることを示した。

この問題は、実際の運用においては時計に異常はつきものと考え、それに対処できる時系アルゴリズムを準備する必要がある、ということを示す。異常対応においては、できるだけ理論的に解決策を生み出したいが、すべての異常を予測し理論的に検討することは非常に困難である。理論的なアプローチに加えシミュレーションで効果を確認しつつ対応策を模索しているのが、時系アルゴリズム改良の現実的な方法と考える。

## 第8章 結論

### 8.1 研究結果

本論文では、原子時系発生システムの高度化に関する研究結果をまとめる。原子時系発生システムの実例として、日本標準時システムを対象とする研究を行った。

標準時としての原子時系に求められる品質としては、(A) UTC との高い同期精度、(B) 周波数短期安定度の高さ、(C)周波数長期安定度の高さ、(D)高い信頼性)の4点が挙げられる。これらの向上を目標として、ハードウェア・ソフトウェア両面から改良を行った。

#### 8.1.1 新日本標準時発生システムの開発

ハードウェア面からのアプローチは、新発生システムの設計・開発である。新システムの基本構成は従来システムと同じではあるが、発生部から監視・制御部に至るまであらゆる部分に大幅な改良を加えた。

##### ■ 改良ポイント

まず信号発生部においては、日本標準時実信号の原振として、Cs 時計に換え H メーザーを導入した。Cs 時計に比べ短期安定度に優れる H メーザーを原振とすることで、日本標準時の短期安定度が一桁以上向上した。導入当初は H メーザーの動作がやや不安定であったが、時間が経つにつれ落ち着いてきている。H メーザーを日本標準時システムに組み込むのは初の試みであるため、運用実績を重ね、装置の特性を把握し扱いに習熟していく必要がある。

H メーザーの導入は、計測装置の高精度化を必要とした。従来の汎用タイムインターバルカウンタによる 1PPS 計測では性能不足であったため、専用計測装置として 24ch-DMTD 装置 (DMTD5) を新規開発した。この装置で可能になった多チャンネル同時観測により、タイミングのずれによる計測誤差が解消された。また DMTD 方式の特色である分解能拡大の効果により、従来のカウンタによる 1 PPS 計測に比べ計測精度をおよそ一桁向上することができた。

DMTD5 は、1PPS のカウンタ計測に比べて高精度な計測ができる反面、トラブル等により計測中断が起きると位相の連続性が失われやすい、という弱みがあった。そこで、DMTD5 による 5MHz 計測とカウンタによる 1PPS 計測を並行して行い、状況に応じて計測結果を合成する処理プログラムを新たに開発した。この処理により、カウンタの信頼性と DMTD5

の計測精度の双方を活かすことができる。また処理においては、3 台の DMTD5 とカウンタ 1 台の測定結果を比較しあい、多数決原理により故障装置のデータを自動排除するプロセスを導入した。この処理プログラムにより、4 台の計測装置のうち最低 1 台が動いていれば、装置切り換え不要で自動的に計測データが取得できるようになった。

#### ■ 新システムでの日本標準時

新システムは、2006 年 2 月より定常運用を開始した。運用開始後の実測データにより日本標準時の評価を行ったところ、2006 年のデータにおいては、旧システム時代に比べ安定度が明らかに向上し、目標値（UTC と 10ns 以内の同期、周波数安定度  $2.6 \times 10^{-15}$ @45 日）も達成した。これらの結果により、新システムの開発は日本標準時の品質向上に大きく貢献したと判断した。

2007 年以降、予測外の大きなレート変動により UTC との時刻差が大きく変動する事態が何度か生じている。原因を調べたところ、日本標準時の基となる平均原子時 TA の計算に使われる Cs 時計のレート変動が影響を及ぼしていることがわかった。これはシステム（ハードウェア）の問題ではなく、時系アルゴリズム（ソフトウェア）の問題である。本論文の後半はこの解決策の研究となる。

### 8.1.2 時系アルゴリズムの改良研究

ソフトウェア面からのアプローチは、時系アルゴリズムの改良研究である。日本標準時において予測外の変動が発生したため、その問題解決を通じて、時系アルゴリズムを見直し考察した。

#### ■ 時計抜けによる変動の解決

問題の一つは、日本標準時の基となる平均原子時の計算から時計が 1 台抜けた場合、日本標準時自身に大きなレート変動が起きることであった。原理的には、時計が抜けても日本標準時自身には大きな変動を生じないアルゴリズムのはずだったからである。

基本の計算式に戻って調査したところ、各時計の推定レートの計算式が、時計の近々の変動を反映しにくい形であることがわかった。このためレート推定誤差が累積しやすく、その結果平均原子時に対して大きな時刻差を持つことになった時計が計算から抜けると、平均原子時自身に大きなレート変動が生じることとなる。解決策として、レート計算式を時計変動を反映しやすい形に変更してシミュレーションしたところ、時計抜けによる平均原子時のレート変動を抑えることに成功した。さらに、いくつかの妥当な近似と仮定を取り入れることにより、レート変動推定量の計算式を新たに導いた。

改良前のレート計算式は、初期値で与える長期計測結果を基本的に保持する形であった。時計の性能が低い時代においては、安定度の悪い短期データに振り回されない措置として、

意味のある計算方法だったと考える。だが時計の性能が向上し、短期でも安定な結果が得られるようになったため、最適な計算方法が変化したのである。

この問題は、時系アルゴリズムのパラメータ設定においては、条件に応じた適切なレート推定が重要であることを示唆する例と言える。

#### ■ 異常時計による影響の抑制

もう一つの問題は、新発生システム稼働後の2007年以降に数回生じた、大きなレート変動である。これらは時計抜けのようなイベントがない時期に生じていた。原因を探るため各Cs時計の変動を調べたところ、該当時期にレートが急変している時計が見つかった。その時計を抜いてシミュレーションすると変動がおさまることから、個々の時計のレート変動が平均原子時自身に影響を及ぼしていることが確認された。

当初、時計群を加重平均する際の重みづけが最適であれば、レートの急変する異常時計の重みはおのずと小さくなり平均原子時への影響はないはず、と考えた。異常時計の影響があるということは重みづけが不適切なのであろう、との推測により、原理的に最適と思われる重みづけ ( $1/\sigma_y^2$  に比例する形) でシミュレーションしたところ、効果がないばかりか他の重みづけ ( $1/\sigma_y$  及び等重率) にも劣る結果となってしまった。

種々の試験の結果、アラン分散  $\sigma_y$  に強く依存する重みづけは異常時計を強調する場合があること、また、アラン分散から計算する重みづけだけでは時計のレート急変の影響を抑えきれないこと、が明らかとなった。これらの結果は理論的な考察からも裏付けられた。

この結果により、問題の解決には積極的な異常検知と対策が必要、と考え、各時計のレート検証機能を導入した。異常検知方法及び計算パラメータの設定については、理論的な考察とシミュレーションによる確認を行い、最適な方法と値を模索した。最終的に最も効果的と思われる方式を時系アルゴリズムに導入し、日本標準時と同じ条件でシミュレーションを行ったところ、変動抑制に非常に有効であることが確認できた。この方式は、近々定常業務のプログラムに適用される予定である。

この問題は、数学的に最適と思われる方法が実際のケースでは必ずしも最適とは限らない、ということを示す例であった。これは、数学的に計算式を組み立てる段階では、対象となる時計が理想的・典型的な状態にあることを前提としているためである。時系アルゴリズム構築においては、計算の意味や暗黙の前提等をよく理解し、実状に合う方法を選択していかなければならない。

## 8.2 成果のまとめと考察

新日本標準時発生システム(ハードウェア)の開発により、日本標準時における (A)UTC

との同期精度、(B)周波数短期安定度、(D)信頼性、のそれぞれが明らかに向上した。また日本標準時に生じた急激なレート変動についても、時系アルゴリズム（ソフトウェア）の改良により症状が改善されることがわかり、(C)長期安定度の向上においても大きな成果があったと考える。

原子時系の発生は、極端に言えば、原子時計の信号を取り出して合成し、基準からずれないように調整しながら運用するだけ、の作業である。原理は単純で簡単であり、計算も（本論文で扱った内容においては）ほぼ四則演算で足りてしまう。だが実際に原子時系を作ろうとした場合、はたと悩む場面が数多くあった。何故単純に見える工程で悩んだのか、その原因を考えてみる。

原因の一つは、原子時系を作る作業が時間の物差しそのものを作る作業であるため、と思われる。つまり計測においても計算においても、作業の途中で実際に使える絶対的客観的な基準がないのである。例えば時計のふるまいを評価する際にも、何を基準にしたかで結果が変わってくる。計測・計算の結果は常にある基準に対する相対値なのだが、その基準が明示的でなく誤解を生じたり、安定と信じた基準自身が実は安定でなかったり、といった事が起こりうる。計測や計算を行えばなんらかの数値は出てくるが、その値が何を表すのかを正しく理解しないと、結果を前に混乱することとなる。

UTCを参照する場合には、安定で独立な基準が得られるため、上記のような混乱は避けられそうである。だがUTCはリアルタイム時系ではなく、現在のUTCとの時刻差を知る術はないため、予測という過程が避けられない。平均原子時の計算においても、自分自身を基準にとるため過去の値を参照することになり、現在値を求める際には予測が必要となる。予測に誤差はつきものであり、どのような方法が最も誤差が少なく最適かを調べるため、試行錯誤が必要となる。

また標準時においては、高品質でも脆弱なシステムは不適である。リアルタイム時系発生においては発生した異常を遡って取り消すことはできず、また積算時である原子時系においては、将来にわたってその異常の影響が残るからである。だがロバスト性の確保と精度追求における最適化とは相反することもあり、設計時には両者の兼ね合いを考慮しなければならない。

長期運用においてトラブルは必ず起きる。システム設計においては、可能な限りケーススタディを行うべきだが、トラブルを未然に防ぐため過剰に複雑なシステムを組むのは逆効果と考える。トラブル発生と拡大には人的な要因も非常に大きいので、ハードウェアもソフトウェアも直感的な把握しやすさを意識した設計を心がけたい。また状況によっては、トラブル防止対策よりも発生後の迅速な原因解明と復旧処置に重点を置く方が効果的な場合もあると考える。

標準時として用いる原子時系の発生においては、原理的には一見単純に見えながら、ハ

ードウェア・ソフトウェア共に、様々な検討と考察が必要であることがわかった。原子時計のふるまいやシステム動作に関しては、予測不能な事象が起きることもあるため、原子時計発生システムの高度化のためには、理想的な状態における理論的考察だけではなく、現実の時計の計測データやシステムの運用データも判断の材料として用いるべきである。これらは長期運用の間に変化するであろうし、また、原子時計の目的や使われ方も時代とともに変化するであろう。その際、状況に応じた最高品質の原子時計を発生するためには、原子時計発生システムを良く理解した上での高度化が必要であり、そのためにも今後継続した研究が必要である。



## 付録 1. アラン分散の計算法

本章では、時間領域における周波数安定度の尺度であるアラン分散の具体的な計算法を説明する[39, pp.26-27]。

アラン分散は、3.2.3 章の (3.11) 式で定義される。

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2} \left\langle (\bar{y}_{k+2} - \bar{y}_{k+1})^2 \right\rangle = \frac{1}{2} \left\langle \left( \frac{x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k}{\tau} \right)^2 \right\rangle \dots\dots (3.11)$$

ここで、 $x_k = x(t_k)$  は位相、 $\bar{y}_k = \bar{y}(t_k)$  は平均周波数、 $t_{k+1} = t_k + \tau$  ( $k=0,1,2,\dots$ ) は間隔  $\tau$  毎に取ったサンプリング時刻、角括弧は無限時間にわたる平均を意味する。

だが無限時間の平均は実現不可能であるため、実際には有限個の測定値から  $\sigma_y$  (厳密には  $\sigma_y$  の推定値) を計算することになる。

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &= \frac{1}{2M} \sum_{k=1}^M (\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k)^2 \\ &= \frac{1}{2M} \sum_{i=1}^M \left( \frac{x_{k+2} - 2x_{k+1} + x_k}{\tau} \right)^2 \dots\dots (A1.1) \end{aligned}$$

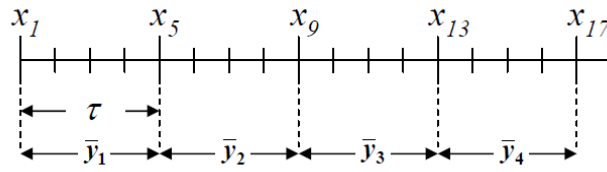
$M$  は  $\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k$  ペアの数である。推定の信頼性を高めるには  $M$  を大きく取る方が望ましい。

計算に用いる計測データのサンプリングは、本来の定義によれば、図 A1.1(a) のように重複がないように取る。図 A1.1(a) の例の場合には

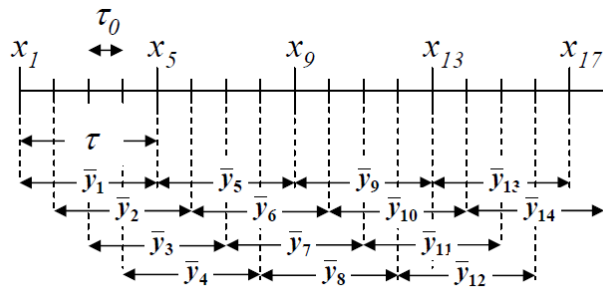
$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot 3} \left\{ (\bar{y}_1 - \bar{y}_2)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_3)^2 + (\bar{y}_3 - \bar{y}_4)^2 \right\} \dots\dots (A1.2)$$

だが計測データ数が十分でなく、重複無しのサンプリングでは個数  $M$  が少ない場合には、図 A1.1(b) に示すように、重複したサンプリングで計算する事もできる。この場合、計測データ間隔を  $\tau_0$ 、 $\tau = n\tau_0$  とし、計測データ数を  $N$  とすると、

$$\begin{aligned} \sigma_y^2(\tau) &= \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} (\bar{y}_{i+1} - \bar{y}_i)^2 \\ &= \frac{1}{2(N-2n)} \sum_{i=1}^{N-2n} \left( \frac{x_{i+2} - 2x_{i+1} + x_i}{\tau} \right)^2 \dots\dots (A1.3) \end{aligned}$$



(a) 重複無し



(b) 重複あり

図 A1.1 アラン分散のためのサンプリング形式[39, p.27]

図 A1.1(b)の例の場合には

$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2 \cdot 10} \left\{ (\bar{y}_1 - \bar{y}_5)^2 + (\bar{y}_2 - \bar{y}_6) + \dots + (\bar{y}_{10} - \bar{y}_{14})^2 \right\} \dots\dots (A1.4)$$

重複ありの場合サンプル数は増えるが、各  $\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k$  の値の重複度が大きいことから独立性が損なわれており、統計的な有効データ数は  $N - 2n$  にならないことに注意する。

## 付録 2. DMTD (Dual Mixer Time Difference) System

ここでは、DMTD 方式による計測精度向上の原理を説明する[20][39,pp.54-57][76]。

図 A2.1 に DMTD system のブロック図を示す。各発振器の周波数は、以下の式で表せる。

$$V_0(t) = \sin[2\pi\nu_0 t + \phi_0(t)] \quad \dots\dots(A2.1)$$

$$V_1(t) = \sin[2\pi\nu_1 t + \phi_1(t)] \quad \dots\dots(A2.2)$$

$$V_2(t) = \sin[2\pi\nu_2 t + \phi_2(t)] \quad \dots\dots(A2.3)$$

ここで、共通ローカル発振器 (XFER Osc) の出力を  $V_0$ 、周波数を  $\nu_0$ 、位相を  $\phi_0$ 、測定する発振器 1 (Osc#1) の出力を  $V_1$ 、周波数を  $\nu_1$ 、位相を  $\phi_1$ 、発振器 2 (Osc#2) の出力を  $V_2$ 、周波数を  $\nu_2$ 、位相を  $\phi_2$  とする。各ミキサの出力信号は

$$V_{B1}(t) = \frac{1}{2} \cos[2\pi(\nu_1 - \nu_0)t + \phi_1(t) - \phi_0(t) + \phi_S] \quad \dots\dots(A2.4)$$

$$V_{B2}(t) = \frac{1}{2} \cos[2\pi(\nu_2 - \nu_0)t + \phi_2(t) - \phi_0(t)] \quad \dots\dots(A2.5)$$

ここで、 $V_{B1}$ 、 $V_{B2}$  は Osc#1 用・Osc#2 用の各ミキサ出力、 $\phi_S$  は Osc#1 直後の位相シフトで加える位相調整量である。

各ミキサ出力信号の  $i$  番目の立ち上がりのゼロクロス時刻は、 $\cos$  の括弧中を  $2n\pi$  ( $n$  は整数) とおくことで計算できる。

$$t_1^i = \frac{-\phi_1(t_1^i) + \phi_0(t_1^i) - \phi_S + 2n_1\pi}{2\pi(\nu_1 - \nu_0)} \approx \frac{-\phi_1(t_1^i) + \phi_0(t_1^i) - \phi_S + 2n_1\pi}{2\pi\nu_B} \quad \dots\dots(A2.6)$$

$$t_2^i = \frac{-\phi_2(t_2^i) + \phi_0(t_2^i) + 2n_2\pi}{2\pi(\nu_2 - \nu_0)} \approx \frac{-\phi_2(t_2^i) + \phi_0(t_2^i) + 2n_2\pi}{2\pi\nu_B} \quad \dots\dots(A2.7)$$

ここで、 $\nu_1$  と  $\nu_2$  は規定周波数  $\nu_c$  に近い値とし、 $\nu_c$  とローカル周波数  $\nu_0$  とのビート周波数を  $\nu_B$  とした。

カウンタで計測するのは、 $t_1^i$  と  $t_2^i$  の時刻差  $\Delta t^i$  である。

$$\Delta t^i = t_2^i - t_1^i = \frac{\phi_1(t_1^i) - \phi_2(t_2^i) + \phi_0(t_2^i) - \phi_0(t_1^i) + \phi_S + 2(n_2 - n_1)\pi}{2\pi\nu_B} \quad \dots\dots(A2.8)$$

ここで、 $\phi_0(t_2^i) - \phi_0(t_1^i)$  は、共通ローカル発振器の時刻  $t_1^i$  から  $t_2^i$  間の位相変動である。 $\phi_S$  を調整して  $t_1^i$  をできるだけ  $t_2^i$  に近づけると、 $\phi_0(t_2^i) - \phi_0(t_1^i) \approx 0$  とすることができる。

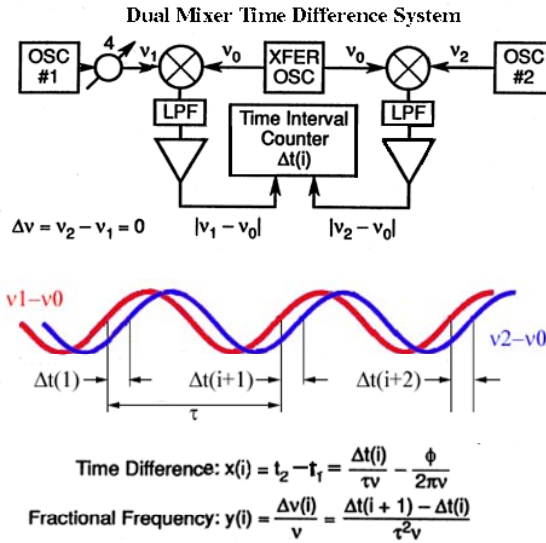


Figure 1.5

図 A2.1 DMTD system の原理図[76]

$$\begin{aligned} \Delta t^i &= t_2^i - t_1^i \approx \frac{\phi_1(t_1^i) - \phi_2(t_2^i) + \phi_S + 2(n_2 - n_1)\pi}{2\pi\nu_B} \\ &= \frac{\phi_1(t_1^i) - \phi_2(t_2^i)}{2\pi\nu_B} + \frac{\phi_S}{2\pi\nu_B} + \frac{n_2 - n_1}{\nu_B} \quad \dots\dots(A2.9) \end{aligned}$$

DMTD 法による計測精度向上の度合いを見るため、共通ローカルでビートダウンする前の発振器 1, 2 の出力を、そのままカウンタで測った場合を考える。各出力の i 番目の立ち上がりのゼロクロス時刻を  $T_1^i, T_2^i$  とすると、その時刻差  $\Delta T^i$  は以下のように表せる。

$$\Delta T^i = T_2^i - T_1^i = \frac{-\phi_1(T_2^i)}{2\pi\nu_2} - \frac{-\phi_1(T_1^i)}{2\pi\nu_1} \approx \frac{\phi_1(T_1^i) - \phi_1(T_2^i)}{2\pi\nu_c} = \frac{\phi_1(t_1^i) - \phi_1(t_2^i)}{2\pi\nu_c} \quad \dots\dots(A2.10)$$

(A2.9) 式を用いて、

$$\Delta T^i = T_2^i - T_1^i = \frac{\nu_B}{\nu_c} \Delta t^i - \frac{\phi_S}{2\pi\nu_c} - \frac{n_2 - n_1}{\nu_c} \quad \dots\dots(A2.11)$$

$n_2 - n_1$  は絶対時間を求める時には必要であるが、ビート信号が測定中に 1 サイクル以上変化しない場合にはゼロとして良い。

(A2.11) 式では (A2.9) 式より  $\nu_B/\nu_c$  だけ計測精度が高められていることがわかる。例えば  $\nu_c=5\text{MHz}$  の信号を  $\nu_B=1\text{kHz}$  にビートダウンして計測する場合、DMTD system での計測値  $\Delta t$  の 1/5000 の精度で  $\Delta T$  が得られることになる。

## 付録 3. 主な時系アルゴリズム

### A3.1 TAI 計算アルゴリズム : ALGOS(BIPM)アルゴリズム

#### ■ 概要

ALGOS(BIPM)は、国際原子時 TAI の元となる平均原子時 EAL の計算アルゴリズムであり、BIPM が管理する (2.6.1 章)。EAL は世界中の多数の原子時計を加重平均した時系であり、EAL に一次周波数標準器による周波数調整を加味したものが TAI である。ALGOS は 30 年以上前に作られ、パラメータ設定等などの修正は行われてきたが、本質的な考え方に大きな変質はなく、3.3 章に述べた基本原理に基づき計算される。

式の表現は一部参考文献に従ったが、 $h' \rightarrow -\hat{x}$ ,  $Bp \rightarrow \hat{y}$ ,  $x \rightarrow -x$  と読み替えることで 3.3 章の式と対比できる。本章全体に渡り、文献[65][66][67]を参考とした。

#### ■ 計算に用いる原子時計

2007 年の報告[44]では、38 ヶ国 58 の機関から送られる約 300 台の時計が EAL 計算に寄与している。原子時計の典型的な安定度は、Cs 時計/スタンダードタイプで  $5 \times 10^{-14}$  (5 日)、Cs 時計/高性能) で  $1 \times 10^{-14}$  (5 日)、H メーザーで  $2 \times 10^{-16}$  (1 日) (カッコ内は平均化時間)。時計の割合は、H メーザー 21%、Cs 時計 (5071A) 65%、他 14%の比率となっている。

#### ■ 計算間隔

計算には、前月の 5 日毎 (MJD 末尾が 4,9 の日) に計測された時計間の時刻差データを用いる。計算における 1 区間は 30 日である。EAL 値は 30 日毎にアップデートされ、5 日毎の計測データ 7 個のセットから、5 日毎の 7 個の EAL を一度に計算する。出力は 5 日毎 (MJD 末尾が 4,9 の日) の値となる。

$$t = t_0 + mT / 6, \quad m = 0,1,2,3,4,5,6, \quad T = 30\text{日} \quad \dots\dots(A3.1)$$

$t$  は EAL 計算時刻、 $t_0$  は前区間の計算における最終日、つまり 30 日前の時刻、 $T=30$  日はアップデート間隔である。世界中の時計データは主に GPS Common View(CV)方式により時刻比較されるため (著者注: 現在は GPS all in view(AV)方式)、その計測データの平均化に必要な日数として 1 区間 30 日となった。今後時刻比較精度が上がるにつれ、計算間隔は短縮されると思われる。1 区間内の計算においては、推定レートと重みを変更しない。

## ■ 計算式

EAL を  $TA(t)$  と表し、以下の3式を定義する。

$$TA(t) \equiv \sum_{i=1}^N w_i \{h_i(t) + h'_i(t)\} \quad \dots\dots(A3.2)$$

$$x_i(t) \equiv TA(t) - h_i(t) \quad \dots\dots(A3.3)$$

$$X_{is}(t) \equiv h_s(t) - h_i(t) \quad \dots\dots(A3.4)$$

$w_i$ は加重平均における重み、 $h_i(t)$ は時刻  $t$ における時計# $i$ の指示値、 $x_i(t)$ は時計# $i$ とEALとの時間差である。 $X_{is}(t)$ は時計# $i$ と時計# $s$ の時刻差で、計測から求まる値である。

$h'_i(t)$ は、計算区間の区切りにおいて各時計がEALに対して連続性を保つための補正項である。

$$h'_i(t) = x_i(t_0) + Bp_i(t) \cdot (t - t_0) \quad \dots\dots(A3.5)$$

$x_i(t_0)$ は、時刻  $t_0$ で位相連続性を保つための時刻補正項である。

上の式から、以下の連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N w_i x_i(t) = \sum_{i=1}^N w_i x_i(t_0) + \sum_{i=1}^N w_i Bp_i(t) \cdot (t - t_0) & \dots\dots(A3.6) \\ X_{is}(t) = x_i(t) - x_s(t) & \dots\dots(A3.7) \end{cases}$$

これは  $N$ 個の未知数  $\{x_i\}$  に対する  $N$ 個の方程式となるので、一意に解を定めることができ、 $N$ 個の  $x_i(t)$ が求まることになる。その結果、時計# $s$ とEALとの時刻差  $x_s$ は以下の式で与えられる。

$$x_s(t) = \sum_{i=1}^N w_i \{h'_i(t) - X_{is}(t)\} \quad \dots\dots(A3.8)$$

## ■ 推定レート

$Bp_i$ は、現区間  $[t_0, t_0 + T]$ における時計# $i$ の推定レートであり、前区間との周波数連続性を保つため、前区間  $[t_0 - T, t_0]$ のレート  $B_i(t_0)$ と同じ値とする。これは計算間隔が30日の場合、Cs時計のノイズは主にランダムウォークとなるためである(3.4.1章)。ここでのレートは全てEALに対する周波数差である。1区間内においては  $Bp_i$ として同じ値を計算に用いる。

$$Bp_i(t) = B_i(t_0), \quad t = t_0 + mT/6, \quad m = 0, \dots, 6 \quad \dots\dots(A3.9)$$

$B_i(t_0)$  は、前区間 $[t_0 - T, t_0]$  内の  $x_i(t)$  7 点の最小二乗近似直線の傾きから求める。ランダムウォークノイズの場合、本来は、 $B_i(t_0) = \{x_i(t_0 + T) - x_i(t_0)\} / T$  で計算するのが適当なのだが、区間最後のデータが異常値の場合のリスクを避けるため、最小二乗で求めている。

## ■ 重み

現区間 $[t_0, t_0 + T]$  内の重みは、以下の式で計算される。

$$w_i(t_0) = p_i / \sum_{i=1}^N p_i, \quad p_i = \frac{1}{\sigma_i(12, T)^2} \quad \dots\dots(A3.10)$$

$\sigma_i(12, T)$  は、過去 1 年間にわたる毎月のレート値 (12 個) の古典的分散 (アラン分散ではない) である。

TAI を構成する原子時計は、高性能 Cs 時計 HP5071A、H メーザー、それ以外、の 3 種に大別される。少数の時計に重みが偏ってしまうのは問題だが、できるだけ安定度の良いタイプの時計が大きな重みを持つように設定したい。この要望を満たすため、重みの定義はいくつかの変遷を経てきたが[67]、現在は以下のように定義される[46]。

$$w_i(t) \geq w_{\max} \Rightarrow w_i(t) = w_{\max}, \quad w_{\max} = A / N \quad \dots\dots(A3.11)$$

ここで、 $N$  は時計の台数、 $A$  は経験的に決められる定数である。 $A$  が大きいほど最大重み  $w_{\max}$  を得るための  $\sigma_i^2(12, T)$  のしきい値は小さくなり、安定度の良い時計しか最大重みを得られなくなる。時計の差別化のためには  $A$  を大きくしたいが、大きすぎると  $w_{\max}$  を獲得できる時計台数が減ってしまうため、その兼ね合いで  $A$  値が決定されている。現在は  $A=2.5$  が設定されており、2007 年の報告によれば、時計のおよそ 13% が最大値を取得している[44]。

## ■ 異常処理

原子時計の異常に対する対策としては、現区間のレート  $B_i(t_0 + T)$  が過去 1 年間分のレートの平均  $Bave_i$  から大きくずれたら重み 0 とする、という方法を採用している。最近の文献には具体的な計算式が載せられていないが、古い文献での計算式を引用しておく[65][67]。

$$B_i(t_0 + T) - Bave_i > 3\sqrt{6/5}\sigma_i(5, T) \Rightarrow w_i(t) = 0 \quad \dots\dots(A3.12)$$

当時はアップデート間隔  $T$  が 60 日だったため、1 年間に 6 回の計算を行っていた。 $Bave$  は過去 5 回分の計算におけるレートの平均値、 $\sigma_i(5, T)$  は過去 5 回分のレートの分散であり、それぞれ過去 1 年間にわたる計算結果に相当する。現在はアップデート間隔  $T$  が 30 日になったため、過去 11 回分の計算における値から計算を行っていると思われる。

一度重みゼロとなった時計が計算へ復帰するのは最短で 4 カ月後である[45、p.249]。レ

ート変動を起こした時計はしばらく計算からはずれることになるが、参加時計数が多いため、この方法でも必要な時計数は十分確保できる。

#### ■ 特色

ALGOS(BIPM)の最大の特色は、前月 1 カ月分の 5 日毎の値を遡って計算する post-process 方式を採用していることである。これは、EAL 及び TAI においては長期安定度と信頼性が重視されるためである。リアルタイム性はないが、長期間の過去データを俯瞰して処理できるため、異常の検出がしやすく、時計の変動を適切に評価できる。また、重みは過去 1 年間のデータから計算されるため、季節変動の影響を受けにくい。対象とする時計数が非常に多いことも特色の一つである。時計の種別毎にレート推定・重みの計算法を変えることもできるが、2000 年の段階では、その措置は取られていない[45, p.250]。

### A3.2 NIST の時系アルゴリズム : AT1(NIST)アルゴリズム

#### ■ 概要

AT1は、NISTの有する約10台の原子時計群から構成される平均原子時である。TAIやUTCと異なり、リアルタイム発生を目的とする。AT1 (NIST)アルゴリズムは、ALGOS(BIPM)と同様3章の基本原理に基づくが、レート推定及び重みの計算法に特色がある。

式の表現は一部参考文献に従ったが、 $\hat{x} \rightarrow -\hat{x}, \hat{y} \rightarrow -\hat{y}, \mathbf{x} \rightarrow -\mathbf{x}$  と読み替えることで3章の式と対比できる。本章全体に渡り、文献[61][65][66][68]を参考とした。

#### ■ 計算に用いる原子時計

2002年の報告によれば、AT1は、NISTの有する4台のCs時計と5台のHメーザーから作られている[61]。

#### ■ 計算間隔

計算には、2時間毎に計測される時計間の時刻差データを用いる。計算における1区間は2時間である。AT1値は2時間毎にアップデートされ、直前の計算結果だけを用いて、現区間のAT1を計算する。計算結果は2時間毎の値となる。

$$t = t_0 + T, \quad T = 2\text{時間} \quad \dots\dots(A3.13)$$

$t$  は AT1 計算時刻、 $t_0$  は前回の計算時刻、 $T=2$  時間はアップデート間隔である。予測レー



トと重みは、毎計算毎に変化する。

## ■ 計算式

AT1 を  $TA(t)$  と表し、以下の2式を定義する。

$$\mathbf{x}_i(t) \equiv TA(t) - \mathbf{h}_i(t) \quad \dots\dots(A3.14)$$

$$\mathbf{X}_{ij}(t) \equiv \mathbf{x}_i(t) - \mathbf{x}_j(t) \quad \dots\dots(A3.15)$$

$\mathbf{h}_i(t)$ は時刻  $t$ における時計# $i$ の指示値、 $\mathbf{x}_i(t)$ は時計# $i$ とAT1との時間差である。 $X_{is}(t)$ は時計# $i$ と時計# $S$ の時刻差で、計測から求まる値である。

AT1と時計# $i$ の時刻差の予測値  $\hat{\mathbf{x}}_i(t_0 + T)$ は、次の式で表される。

$$\hat{\mathbf{x}}_i(t_0 + T) = \mathbf{x}_i(t_0) + \hat{\mathbf{y}}_i(t_0) \cdot T + \frac{1}{2} D_i \cdot T^2 \quad \dots\dots(A3.16)$$

ここで、 $\hat{\mathbf{y}}_i(t_0)$ は推定レート、 $D_i$ はドリフトレートである。 $D_i$ は一次周波数標準器を基準として100日毎にアップデートする[61]。 $\hat{\mathbf{x}}_i(t_0 + T)$ は、一つ前の計算結果  $\mathbf{x}(t_0)$ 、 $\hat{\mathbf{y}}_i(t_0)$ から計算できる。

この  $\hat{\mathbf{x}}_i(t_0 + T)$  と同時刻の計測値から、時刻  $t_0 + T$ における時計# $S$ とAT1との時刻差  $x_s$ は、以下の式で与えられる。重み  $w_i$ としては一つ前の計算結果を使う。

$$\mathbf{x}_s(t_0 + T) = \sum_{i=1}^N w_i \{ \hat{\mathbf{x}}_i(t_0 + T) - \mathbf{X}_{is}(t_0 + T) \} \quad \dots\dots(A3.17)$$

## ■ 推定レート

推定レート  $\hat{\mathbf{y}}_i(t)$ は、その時の単純レート  $y$ と一つ前の計算結果とから、以下の形で計算できる。計算結果は、次の回の  $x_s$ の計算で使われる。

$$\mathbf{y}_i(t_0 + T) = \frac{\mathbf{x}_i(t_0 + T) - \mathbf{x}_i(t_0)}{T} \quad \dots\dots(A3.18)$$

$$\hat{\mathbf{y}}_i(t_0 + T) = \frac{1}{m_i + 1} \{ \mathbf{y}_i(t_0 + T) + m_i \hat{\mathbf{y}}_i(t_0) \} \quad \dots\dots(A3.19)$$

この式により、過去値の寄与は指数関数的に小さくなっていくため、この係数を指数フィルタと呼ぶ。主ノイズがホワイトFM及びランダムウォークFMの場合、 $m_i$ は次式で計算される。

$$m_i = \frac{1}{2} \left\{ -1 + \left( \frac{1}{3} + \frac{4}{3} \frac{\tau_{\min,i}^2}{T^2} \right)^{1/2} \right\} \quad \dots\dots(A3.20)$$

$\tau_{min,i}$  は時計# $i$  が最も良い安定度を示す平均化時間である。つまり係数  $m$  は時計毎に異なる値となる。

## ■ 重み

時刻  $t$  での重みも、過去値の寄与を小さくするため、同様に指数フィルタ付の形で計算される。計算結果は、次の回の  $x_s$  の計算で使われる。

$$\hat{\varepsilon}_i(t_0 + T) = |\hat{x}_i(t_0 + T) - x_i(t_0 + T)| \quad \dots\dots(A3.21)$$

$$\varepsilon_i^2(t_0 + T) = \frac{1}{N_\tau + 1} \{ \hat{\varepsilon}_i^2(t_0 + T) + N_\tau \varepsilon_i^2(t_0) \} \quad \dots\dots(A3.22)$$

$$w_i = \frac{1}{\varepsilon_i^2(t_0 + T)} \bigg/ \sum_{i=1}^N \frac{1}{\varepsilon_i^2(t_0 + T)} \quad \dots\dots(A3.23)$$

定数  $N_\tau$  は 15 から 30 日の値に設定される。 $\hat{\varepsilon}_i$  は、変動の予測値と実際との差である。重みの最大リミットは 0.3 である。

## ■ 異常処理

$\hat{\varepsilon}_i$  は予測値と計算値の誤差である。この値が大きい時計は不安定な時計とみなし、重みを落とす。

$$\hat{\varepsilon}(t_0 + T) > 4\varepsilon_i \quad \Rightarrow \quad w_i = 0 \quad \dots\dots(A3.24)$$

$$4\varepsilon > \hat{\varepsilon}(t_0 + T) > 3\varepsilon_i \quad \Rightarrow \quad \text{linearly deweighted } w_i \quad \dots\dots(A3.25)$$

## ■ 特色

AT1(NIST) は、リアルタイム性を重視するため、遡り計算や再計算等を行わず、現在の値を計算し出力して行く。一つ前の計算結果だけを使い計算を進めていき、過去の周波数の絶対値は記憶しない。周波数の変化分だけを追っていくという所はアラン分散の計算法に似ている。ただしこの方法の場合、長期変動の情報を失う可能性もある。

レート及び重み計算で用いられる指数フィルタは、ある区間内のデータを平均する際古いデータほど重みを減らす、という効果がある。これは区間内データを等しく扱う ALGOS との違いである。この方法は、短時間の変動をならすのに有効であるが、季節変動などの長期変動は除去できない。

### A3.3 USNO の時系アルゴリズム : A.1(USNO,MEAN)アルゴリズム

#### (Percival algorithm)

##### ■ 概要

Percival algorithm は、USNO の有する原子時計群から構成される平均原子時 A.1(USNO, MEAN)の時系アルゴリズムである[62]。A.1(USNO,MEAN)は、UTC(USNO) の基となり GPS 衛星時系の基にもなるため、各方面への影響力が大きな時系である。この時系アルゴリズムも本質的には 3.3 章の基本原則に基づくが、時計種別毎に時系を作り合成する点に特色がある。本章全体に渡り、文献[58]を参考とした。

##### ■ 計算に用いる原子時計

2005 年の報告によれば、A.1 は、USNO の有する 62 台の Cs 時計と 17 台の H メーザーから作られる平均原子時である[59]。

##### ■ 計算間隔

計算には、1 時間毎に計測される時計間の時刻差データを用いる[48]。A.1 値は 1 時間毎にアップデートされる。計算の 1 区間は 75 日であり、毎時の計算においては過去 75 日間分を毎回遡って計算する[63]。計算結果は 1 時間毎の値となる。

$$t = t_0 + T, \quad T = 1\text{時間} \quad \dots\dots(A3.26)$$

$t$  は A.1 計算時刻、 $t_0$  は前回の計算時刻、 $T=1$  時間はアップデート間隔である。

##### ■ 計算式

AT1 を  $TA(t)$  と表し、以下の 2 式を定義する。

$$x_i(t) \equiv TA(t) - h_i(t) \quad \dots\dots(A3.27)$$

$$X_{si}(t) \equiv x_s(t) - x_i(t) \quad \dots\dots(A3.28)$$

$h_i(t)$  は時刻  $t$  における時計# $i$  の指示値、 $x_i(t)$  は時計# $i$  と AT1 との時間差である。 $X_{si}(t)$  はマスター時計# $S$  と時計# $i$  の時刻差で、計測から求まる値である。

AT1 と時計# $i$  の時刻差の予測値  $\hat{x}_i(t_0 + T)$  は、次の式で表される。

$$\hat{x}_i(t) = x_i(t_0) + \hat{y}_i(t_0) \cdot T + \frac{1}{2} D_i(t_0) \cdot T^2 \quad \dots\dots(A3.29)$$

ここで、 $\hat{y}_i(t_0)$  はレート、 $D_i$  はドリフトである。 $\hat{y}_i(t_0)$  は現在のレートで表せる。

$$\hat{y}_i(t_0) = \hat{y}_i(t) - D_i(t_0) \cdot T \quad \dots\dots(A3.30)$$

これらの式から、時刻  $t_0+T$  における時計#S と A.1 との時刻差  $x_s$  は、以下の式で与えられる（これは 3 章の 3.20 式に相当する） [47]。

$$x_s(t) = x_s(t_0) + \sum_{i=1}^N w_i \{ X_{is}(t_0) - X_{is}(t) + \hat{y}_i(t)T - \frac{1}{2}D(t_0)T^2 \} \quad \dots\dots(A3.31)$$

右辺第 1 項を左辺に移し両辺を  $T$  で割ると、計算が周波数ベースで行える。

$$\frac{x_s(t) - x_s(t_0)}{T} = \sum_{i=1}^N w_i \left\{ \frac{X_{is}(t_0) - X_{is}(t)}{T} + \hat{y}_i(t) - \frac{1}{2}D(t_0)T \right\} \quad \dots\dots(A3.32)$$

具体的な計算は、次のステップで行う [58]。

- 1) 毎時の時刻差計測データから 1 時間のレート値を作成。 → (A3.32)式右辺第 1 項
- 2) Cs 時計だけの時系（レートの時系列）を作る。 → (A3.32)式計算 ( $D=0$  とする)
- 3) 2)の Cs 時系を基準として各時計のトレンド計算。 → (A3.32)式の {} 内を計算
- 4) Cs 時計だけで時系（レートの時系列）を作る。 → (A3.32)式 ( $D=0$  とする)
- 5) H メーザーだけで時系（レートの時系列）を作る。 → (A3.32)式
- 6) 4)及び 5)のレート時系列を重み付きで合成し、時間積分して A.1 時系作成。

## ■ レートとドリフトの推定

レート  $y$  とドリフト  $D$  の推定値は、1 時間のレート値を 1 データとし、長期間のデータの最小二乗フィットにより決定する。Cs 時計・H メーザーの双方とも、平均化時間 1 時間の領域ではホワイト FM ノイズが支配的なので、この方法で問題はない(3.4.1 章)[47][48]。

## ■ 重み

Cs 時系を作る際（上記ステップ 4）には、全時計の重みを等しく取る。H メーザー時系（ステップ 5）においても同様である。

現在から遡って 75 日間分の合成時系を作る際（ステップ 6）には、遡り時間に応じた重みを各時系に加えて平均を行う。具体的には、短期では H メーザー時系に高い重み、長期では Cs 時系に高い重みがかかるような重みづけをする。各時系の重みを次のようにとる。

$$w_{HM} / w_{CS} = \sigma_{CS}^2 / \sigma_{HM}^2 \quad \dots\dots(A3.33)$$

$\sigma_{CS}$ 、 $\sigma_{HM}$  はそれぞれ典型的な Cs 時計、H メーザーのアラン分散である。この重みづけ

により、平均化時間  $\tau$  が数時間の領域では  $w_{HM} : w_{CS} = 10:1$ 、 $\tau$  が 25 日以上の領域では逆転して  $w_{HM} : w_{CS} = 1:10$  の比率となる。アラン分散は約 1 年分のデータから計算する。さらに、60 日以上前の値の計算においては H メーザーの重みをゼロにし、長期変動の影響を抑えている[47]。

## ■ 異常処理

レートとドリフトの変化を監視し、閾値を越えた場合には、ステップ 3 のモデルを見直す。

## ■ 特色

A.1の最大の特色は、Cs時系とHメーザー時系を個別に作り、短期長期でそれぞれの比率が変わるような重みづけで合成をする点である。そのため、75日間のデータセットで遡り計算を行い、最適なパラメータを設定する。準リアルタイム（1時間毎）で結果を出力するが、遡りと再計算を行うpost-process方式を採っている。またA.1は、TAIに次いで多くの時計から計算される時系である。

## 付録 4. 日本標準時の時系アルゴリズム

### A4.1 旧システムのアゴリズム : Alg4

日本標準時の旧システムで使用されたアルゴリズム Alg4 について、詳細を述べる。計算の基本は、3.3 章の方式にのつとる。計算は既出の 3 式に従う。

$$\hat{x}_i(t_k) = x_i(t_{k-1}) + \hat{y}_i(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) \cdots (3.15)$$

$$x_S(t_k) = \sum_{i=1}^n w_i(t_k) \{ \hat{x}_i(t_k) - X_{iS}(t_k) \} \cdots (3.20)$$

$$x_i(t_k) = x_S(t_k) + X_{iS}(t_k) \cdots (3.21)$$

計算間隔は 1 日毎、毎日 UTC0 時に各時計の  $x_i$  を計算する。時計間の時刻差計測データ  $X_{iS}$  には、UTC0 時の 1pps ワンショット計測値を用いた。

各時計の予測レート  $\hat{y}_i(t_k)$  は、基本的に(3.22)式の  $\bar{y}_i(t_{k-1})$  を用いて計算する。計測開始後の経過時間により、以下の条件に従う。

$$\text{計測開始後 60 日まで } \bar{y}_i(t_k) = 0 \cdots (6.3)$$

$$\text{計測開始後 61 日目 } \bar{y}_i(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - 60T)}{60T} \cdots (6.4), \quad T = 86400(s)$$

$$\text{計測開始後 62 日以降 } \left| \bar{y}_i^{10}(t_k) - \bar{y}_i(t_{k-1}) \right| \leq 10^{-12} \quad \text{なら} \quad \bar{y}_i(t_k) = \bar{y}_i(t_{k-1}) \cdots (6.5)$$

$$\left| \bar{y}_i^{10}(t_k) - \bar{y}_i(t_{k-1}) \right| > 10^{-12} \quad \text{なら} \quad \bar{y}_i(t_k) = \frac{\bar{y}_i^{10}(t_k)}{1 - w_i(t_k)} \cdots (6.6)$$

$$\text{ただしここで、} \quad \bar{y}_i^{10}(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - 10T)}{10T} \cdots (6.7), \quad T = 86400(s) \quad \text{である。}$$

各時計の重み  $w_i$  は、以下の式で計算する。

$$w_i(t_k) = \frac{1/z_i}{\sum_{i=1}^N (1/z_i)} \cdots (A4.1)$$

$$\begin{pmatrix} z_1 \\ z_2 \\ \vdots \\ z_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} (1-w_1)^2 & (w_2)^2 & \cdots & (w_N)^2 \\ (w_1)^2 & (1-w_2)^2 & \cdots & (w_N)^2 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ (w_1)^2 & (w_2)^2 & \cdots & (1-w_N)^2 \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_N \end{pmatrix} \cdots (A4.2)$$

$$p_i = \sigma_{y_i}^2(\tau) \dots (A4.3)$$

ここで、 $p$  は  $\tau=10$  日で計算したアラン分散、 $z$  は不偏分散である[69]。(A4.1)及び(A4.2)式の重みづけは、平均原子時 TA において特定の時計に重みが偏ることを防ぐための方法である。重みには時計台数に応じた下記の上限を設ける。時計が 3 台以下の時には計算不能とする。

台数	3	4	5	6	7以上
上限	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3

Alg4 のレート計算式は、後に、直近 30 日区間で計算する方式に変更された (Alg4a、6.3 章)。

## A4.2 新システムのアルゴリズム : Alg5

新システムで使用中のアルゴリズム Alg5 について、詳細を述べる。計算の基本は、3.3 章の方式にのっとる。計算は既出の 3 式に従う。

$$\hat{x}_i(t_k) = x_i(t_{k-1}) + \hat{y}_i(t_k) \cdot (t_k - t_{k-1}) \dots (3.15)$$

$$x_S(t_k) = \sum_{i=1}^n w_i(t_k) \{ \hat{x}_i(t_k) - X_{iS}(t_k) \} \dots (3.20)$$

$$x_i(t_k) = x_S(t_k) + X_{iS}(t_k) \dots (3.21)$$

計算間隔は 1 時間毎、毎時約 20 分に各時計の  $x_i$  を計算する。時計間の時刻差計測データ  $X_{iS}$  には、5.2.3 章の方法で合成処理した計測データを使用する。計測データは 1 時間遅れでアップされるため、平均原子時 TA も 1 時間遅れとなる。AOG の周波数調整値は、TA のアップデートに合わせて毎時計算されるが、実際の制御は、旧システムと同様に 1 日 1 回に設定されている。将来的には、より高頻度に AOG 制御を行う可能性もある。

各時計の予測レート  $\hat{y}_i(t_k)$  は、基本的に(3.22)式の  $\bar{y}_i(t_{k-1})$  を用いて計算する。計測開始後の経過時間により、以下の条件に従う。

$$\text{計測開始後 } R \text{ 日まで} \quad \bar{y}_i(t_k) = 0 \dots (A4.4)$$

$$\text{計測開始後 } R \text{ 日目以降} \quad \bar{y}_i(t_k) = \frac{x_i(t_k) - x_i(t_k - T_R)}{T_R} \dots (A4.5), \quad T_R = R * 86400(s)$$

$R$  は可変であり、現在は 30 に設定されている。これは Alg4 の方法で生じた問題の解決に

有効であった計算式である (6.2 章参照)。

各時計の重み  $w_i$  は、以下の式で計算する。

$$w_i(t_k) = \frac{1/z_i}{\sum_{i=1}^N (1/z_i)} \dots (A4.6)$$

$$z_i \equiv \sigma y_i(\tau) \dots (A4.7)$$

ここで、 $z$  はアラン標準偏差である。 $\tau$  は可変であり現在は  $\tau=10$  日に設定してある。

重みには時計台数に応じた下記の上限を設ける。時計が 3 台以下の時には計算不能とする。

台数	3	4	5	6	7以上
上限	0.5	0.45	0.4	0.35	0.3

重みの計算法は、Alg4 に比べ単純化されている。Alg5 は最終形態ではなく、できるだけ単純な方法から出発して最適な方法を模索し改良していきたいと考えたからである。

また計算には、アラン分散ではなくアラン標準偏差を用いた。理論的にはアラン分散を用いるべきと思われたのだが、事前にくいつかの例で計算したところ、アラン標準偏差を用いる方が結果が良くなる傾向があったからである。両者の比較に関しては、第7章で詳しく述べる。



## 参考文献

- [1] 相田政則、佐藤得男、山森聡、"電話回線による精密時刻比較"、電波研究所季報、vol.31、No.160、pp.115-124、Dec. 1985.
- [2] 相田政則、"5.1 発生と公表の自動化システム"、通信総合研究所季報—時系と周波数標準、vol.45、Nos.1/2、3・6月号、pp.51-58、1999.
- [3] 青木信仰、"時と暦"、東京大学出版会、1982.
- [4] 今江理人、"IV-3 平均原子時 TA(RRL)の決定"、電波研究所季報、vol.29、No.149、pp.193-200、Feb. 1983.
- [5] 今江理人、五十嵐通保、三木千紘、細川瑞彦、花土ゆう子、今村國康、大塚敦、"5.3 長波標準電波局新設計画"、通信総合研究所季報—時間・周波数標準特集、vol.45、Nos.1/2、3・6月号、pp.73-82、1999.
- [6] 今江理人、"4.1 時間・周波数比較法の基礎"、通信総合研究所季報—時間周波数特集号、Vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.103-110、2003.
- [7] 今江理人、鈴木智也、後藤忠広、澁谷靖久、中川史丸、清水義行、栗原則幸、"4.3 衛星双方向方式"、通信総合研究所季報—時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.121-128、2003.
- [8] 今村國康、後藤忠広、"5.2.1 NTP による時刻同期"、通信総合研究所季報—時間・周波数標準特集、vol.45、Nos.1/2、3・6月号、pp.59-63、1999.
- [9] 今村國康、後藤忠広、金子明弘、今江理人、栗原則幸、"5-6-2 ネットワークによる時刻供給"、通信総合研究所季報—時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.203-212、2003.
- [10] 岩間司、栗原則幸、今江理人、鈴木智也、小竹昇、大塚敦、"5-4-2 搬入校正と遠隔校正"、通信総合研究所季報—時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.181-188、2003.
- [11] 岩間司、栗原則幸、今江理人、今村國康、小竹昇、後藤忠広、鈴木智也、森川容雄、"5-5 電子時刻認証システム開発"、通信総合研究所季報—時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.189-194、2003.
- [12] 岩間司、金子明弘、町澤朗彦、鳥山裕史、"高速ネットワークを利用した高精度時刻比較"、電子情報通信学会論文誌、vol.J89-D、No.12、pp.2553-2563、2006.
- [13] 岩間司、町澤朗彦、鳥山裕史、"オフセット補正機能を用いたネットワーク長期時刻比較"、電子情報通信学会論文誌、vol.J91-B、No.4、2008 (to be published).

- [14] カルタシヨフ、P. 著、福與人八、大浦宣徳、倉持内武訳：時と周波数：精密時間計測の基礎と応用、講談社、東京、1980.
- [15] 栗原則幸、"5-3 長波標準電波"、通信総合研究所季報－時間・周波数標準特集、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.167-174、2003.
- [16] 栗原 則幸、"長波標準電波：電波時計の基準信号"、電気学会誌、vol.125、No.8、pp.496-499、2005.
- [17] 工業技術院計量研究所訳・監修、"国際単位系(SI) 国際文書第7版(1998年版)"、日本規格協会、1999.
- [18] 後藤忠広、金子明弘、澁谷靖久、今江理人、"4-2 GPS コモンビュー法"、通信総合研究所季報－時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.111-120、2003.
- [19] 後藤 忠広、森川 容雄、"全視法による GPS 時刻比較の精度評価-Evaluation of time transfer precision with GPS all in view-"、電気学会論文誌 C、vol.125、No.8、pp.1185-1190、2005.
- [20] 小宮山牧児、"II-2.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.
- [21] 佐藤得男、伊藤猛男、相田政則、"V-2-1. 実用標準の設定と維持"、電波研究所季報、vol.29、No.149、pp.241-249、Feb. 1983.
- [22] 瀬田勝男、アジア太陽地域における国際協力、計測と制御、第40巻、第7号2001年7月、pp.502-506.
- [23] Taylor J. R.著、林茂雄、馬場 涼訳、"計測における誤差解析入門"、東京化学同人、2000.
- [24] 時研究会編、時の科学、コロナ社、昭和40年.
- [25] 鳥山裕史、町澤朗彦、岩間司、"ハードウェア SNTP サーバの開発"、電子情報通信学会論文誌 B、J89-B、No.10、pp.1867-1873、2006.
- [26] 鳥山裕史、岩間司、"タイムスタンプに関する実証実験報告書"、タイムビジネス推進協議会報告書、2006.
- [27] 沼田尚道、"日本に時差があった頃－時刻と経度と金星観測－"、ITU ジャーナル、vol.38、No.3、pp.41-43、2008.
- [28] 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、"5.1 原子時決定アルゴリズム"、通信総合研究所季報－時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.145-156、2003.

- [29] 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、"5-2. 日本標準時発生・計測システム"、通信総合研究所季報－時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.157-165、2003.
- [30] 花土ゆう子、細川 瑞彦、今村 國康、小竹 昇、"日本標準時における周波数変動の改善"、電気学会論文誌 C、vol.125、No.8、pp.1236-1243、2005.
- [31] 福島登志夫、"現代測地学－第3章 基準座標系"、日本測地学会発行、1994.
- [32] 細川瑞彦、"2. 四次元時空と基準座標系"、通信総合研究所季報－時系と周波数標準、vol.45、Nos.1/2、3・6月号、pp.3-18、1999.
- [33] 町澤朗彦、岩間司、鳥山裕史、"インターネットを介した遠隔周波数比較に関する一検討"、電子情報通信学会情報ネットワーク研究会収録論文、vol. IN2007-170、pp.67-72、2008.
- [34] 森川容雄、"2-1. 時間・周波数の定義と国際原子時/協定世界時"、通信総合研究所季報－時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.3-7、2003.
- [35] 森川容雄、"2-4. 日本の時間・周波数標準の変遷"、通信総合研究所季報－時間周波数特集号、vol.49、Nos.1/2、3・6月号、pp.25-32、2003.
- [36] 森谷中宣、赤塚正、佐藤得男、相田、政則、"公衆通信回線による標準時供給システム"、日本時計学会誌、vol.142、pp.1-16、1992.
- [37] 郵政省通信総合研究所標準測定部、"標準電波五十年の歩み"、H3年3月発行.
- [38] 吉村和幸、"IV-2. 原子時のアルゴリズム"、電波研究所季報、vol.29、No.149、pp.175-192、Feb. 1983.
- [39] 吉村和幸、古賀保喜、大浦宣徳、"周波数と時間"、電子情報通信学会、1989.
- [40] 産業技術総合研究所計量標準総合センターweb ページ、<http://www.nmij.jp/info>.
- [41] 国立天文台水沢 VERA 観測所天文保持室 web ページ、<http://www.miz.nao.ac.jp/time.html>.
- [42] 総務省電波利用ホームページ (<http://www.tele.soumu.go.jp/j/inter/itu-r.htm>) .
- [43] アンリツ株式会社、水素メーザー原子周波数標準器 RH401A 説明書
- [44] Arias E. F.、"Status report on TAI"、7th Meeting of representatives of laboratories contributing to TAI、BIPM、12-13 Sep. 2006.
- [45] Audoin C. and Guinot B.、"The measurement of Time"、Cambridge University Press、2001.
- [46] Azoubib J.、"A revised way of fixing an upper limit to clock weights in TAI computation"、Proc. of 32th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting、pp.195-209、2000.

- [47] Breakiron L. A., "Timescale algorithms combining cesium clocks and hydrogen masers", Proc. of 23th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp.297-305, 1992.
- [48] Breakiron L. A. and Matsakis D., "Performance and characterization of U. S. Naval Observatory clocks", proc. of 32th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp.269-288, 2000.
- [49] Davis, J. A., Greenhall C. A. and Stacey P. W., "A Kalman filter clock algorithm for use in the presence of flicker frequency modulation noise", Metrologia, vol.42, pp.1-10, 2005.
- [50] Fujieda M., Goto T., Piester P., Kumagai M., Weyers S., Bauch A., Wynands R. and Hosokawa M. " First comparison of primary frequency standards between Europe and Asia", Proc. of European Frequency and Time Forum(EFTF) 2007, vol.20071EEE, pp.937-941, 2007.
- [51] Hanado Y., Hosokawa M., Imamura K. and Kotake N., "Improvement of Frequency Change at Japan Standard Time", Electrical Engineering in Japan, vol.157, No.1, pp.29-37, 2006.
- [52] Hanado Y., Imamura K., Kotake N., Nakagawa F., Shimizu Y., Tabuchi R., Takahashi Y., Hosokawa M. and Morikawa T., "The new Generation System of Japan Standard Time at NICT", International Journal of Navigation and Observation (to be published), 2008.
- [53] Hanado Y. and Hosokawa M., "Improvement of Rate Shift in an Average Atomic Time Scale", Japanese Journal of Applied Physics (to be published), 2008.
- [54] Hasegawa, A., Fukuda K., Kajita M., Ito H. and Kumagai M., "Accuracy Evaluation of Optically Pumped Primary Frequency Standard CRL-01", Metrologia, vol.41, No.4, pp.257-263, 2004.
- [55] ITU-R Recommendation, "Glossary and definitions of time and frequency terms", ITU-R TF.686-2, p.12, 2002. (<http://kyc.ntsc.ac.cn/gb/ITU-R-REC-TF.686-2-200202-I!!PDF-E.pdf>)
- [56] Kumagai, M., Ito H., Kajita M. and Hosokawa M., "Evaluation of caesium atomic fountain NICT-CsF1", Metrologia, vol.45, pp.139-148, 2008.
- [57] Maeno H., Fujieda M., Aida M., Shimizu Y., Tung L. Q., Tabuchi R. and Hosokawa M., "TWSTFT Network Status and Plans in the Pacific-Rim Region", Proc. of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency (ATF) 2006, pp. -8, 2006.
- [58] Matsakis D., Tutorial of timekeeping, personal communication.
- [59] Matsakis D., "Time and frequency activities at the U. S. Naval Observatory", Proc. of 17th CCTF meeting, vol. CCTF06-04, 2006.
- [60] Nakagawa F., Imae M., Hanado Y. and Aida M., "Development of Multi channel Dual Mixer Time Difference System to generate UTC (NICT)", IEEE Trans. Instrum. Meas., vol.54, No.2, pp.829-832, April, 2005.

- [61] Parker T., "Time Scales Using Hydrogen Masers", Tutorial at 34th Annual precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, Dec. 2, 2002.
- [62] Percival D. B., "The U. S. Naval observatory clock time scales", IEEE Trans. on Inst. and Meas., vol.IM27, pp.376-385, 1978.
- [63] Skinner J. and Koppang P., "Analysis of clock modeling techniques for USNO cesium mean", Proc. of 38th Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Meeting, pp.373-377, 2006.
- [64] Sullivan D. B., Allan D. W., Howe D. A. and Walls F. L., "Characterization of Clocks and Oscillators", NIST Technical Note 1337, 1990.
- [65] Tavella P., C. Thomas, "Comparative Study of Time Scale Algorithms", Metrologia, vol.28, pp.57-63, 1991.
- [66] Thomas C., Wolf P. and Tavella P., "Time Scales", BIPM Monographie 94/1, 1994.
- [67] Thomas C. and Azoubib J., "TAI computation: study of an alternative choice for implementing an upper limit if clock weights", Metrologia, vol.33, pp.227-240, 1996.
- [68] Weiss M. and Weissert T., "A new time scale algorithm: AT1 plus frequency variance", Proc. of 21th Annual precise Time and Time Interval Systems and Applications Meeting, pp.343-357, 1989.
- [69] Yoshimura K., "calculation of unbiased clock-variance3s in uncalibrated atomic time scale algorithms", Metrologia, vol.16, pp.133-139, 1980.
- [70] BIPM web ページ ([http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time\\_server.html](http://www.bipm.org/en/scientific/tai/time_server.html)) .
- [71] IAU web ページ (<http://www.unesco.org/iau/>).
- [72] ICSU web ページ (<http://www.icsu.org/index.php>) .
- [73] IERS web ページ (<http://www.iers.org/>).
- [74] ITU web ページ (<http://www.itu.int/net/home/index.aspx>) .
- [75] IUGG web ページ (<http://www.iugg.org/>).
- [76] NIST web ページ (<http://tf.nist.gov/phase/Properties/one.htm#one>)
- [77] Symmetricom 50701A web ページ ([http://www.symmttm.com/pdf/Precision\\_Frequency\\_References/DS\\_5071A.pdf](http://www.symmttm.com/pdf/Precision_Frequency_References/DS_5071A.pdf))
- [78] URSI web ページ (<http://www.ursi.org/>) .

## 謝辞

本論文をまとめるにあたり、貴重な時間を割き親身に御指導を頂きました、電気通信大学大学院情報システム学研究科の加藤聰彦教授、曾和将容教授、本多弘樹教授、李還帮客員准教授、首都大学東京大学院システムデザイン研究科の福地一教授に、心から感謝いたします。

日本標準時の新システムの開発は、多数の方々の尽力の上に成し得た成果であります。実動チームは筆者を含む6名で構成され、今村國康氏には主に計算機に関わるシステム構成の設計開発を、小竹昇氏には主に原子時計の運用調整及び旧システムとの同時運転の調整を、中川史丸氏には主に DMTD5 の開発援助及び計測データ処理プログラム作成を、清水義行氏には主に平均原子時計計算プログラム作成及び旧システムからの移行調整を、田淵良氏には主に DMTD5 の開発援助及び監視プログラムの作成を、それぞれ担当頂きました。各氏の真摯な努力無しには新システムの完成はあり得ず、心より敬意を表すると共に深く感謝いたします。また開発整備において、有益な御助言及び御助力を頂きました Lam Quoc Tung 氏、相田政則氏、大塚敦氏、後藤忠広氏、伊東宏之氏、熊谷基弘氏、鈴山智也氏、澁谷靖久氏に、心より感謝いたします。プロジェクト遂行においては、立ち上げ時に尽力くださった今江理人氏、栗原則幸氏、長い開発期間において多大な支援と御指導を頂きました高橋幸雄氏、森川容雄氏に、深く感謝いたします。また、新棟の環境整備及び契約等の諸事でお世話になりました皆様に、この場を借りてお礼申し上げます。

時系アルゴリズムの研究においては、日本標準時システムで取得したデータを使用させて頂きました。データを快く提供くださいました日本標準時プロジェクトの皆様に、心より感謝いたします。また研究の方向を定め成果をまとめるには、細川瑞彦氏との議論が不可欠でした。多忙な時間を縫い熱心に議論くださり、数々の有益な御指摘を頂きました細川氏に、心より深く感謝いたします。

研究の推進と本論文の執筆を見守り応援してくださいました、久保田文人氏、吉村和幸氏、次世代時刻周波数標準プロジェクトの皆様、内外の友人達に、心より感謝いたします。また本研究は、長きにわたる時間・周波数標準の研究開発の結果と日本標準時の安定運用の実績に基づくものであり、先輩諸氏の積年の活動に深い敬意と謝意を表します。

最後に、研究及び論文執筆の期間中、直接・間接に支援してくれた家族に感謝します。

## 関連論文

- [1] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Fumimaru Nakagawa, Yoshiyuki Shimizu, Ryo Tabuchi, Yukio Takahashi, Mizuhiko Hosokawa and Takao Morikawa

論文題目 : "The new Generation System of Japan Standard Time at NICT"

2008年4月、International Journal of Navigation and Observation, volume 2008, Article ID 841672,

(第5章の内容)

- [2] 全著者名 : 花土ゆう子、細川 瑞彦、今村 國康、小竹 昇

論文題目 : 「日本標準時における周波数変動の改善」

2005年8月、電気学会論文誌 C, Vol.125, No.8, pp.1236-1243

(第3章、第6章の内容)

- [3] 全著者名 : Yuko Hanado, Mizuhiko Hosokawa, Kuniyasu Imamura, and Noboru Kotake

論文題目 : "Improvement of Frequency Change at Japan Standard Time"

2006年10月、Electrical Engineering in Japan, Vol.157, No.1, pp.29-37

(第3章、第6章の内容)

- [4] 全著者名 : Yuko Hanado and Mizuhiko Hosokawa

論文題目 : "Improvement of Rate Shift in an Average Atomic Time Scale"

2008年4月、Japanese Journal of Applied Physics, Vol.47, No.4, pp.2294-2299

(第7章の内容)

## 参考論文

- [1] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura and Michito Imae  
論文題目 : "Upgrading of UTC(CRL)"  
2003年5月、Proceedings of 2003 IEEE International frequency control system & PDA exhibition and 17th European frequency and time forum, Tampa, USA, 5-8 May
- [2] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Fumimaru Nakagawa, Yoshiyuki Shimizu, Ryo Tabuchi, Yukio Takahashi, Mizuhiko Hosokawa and Takao Morikawa  
論文題目 : The New Generation System of JAPAN Standard Time at NICT (invited lecture)  
2007年6月、Proceedings of European Frequency and Time Forum and the IEEE Frequency Control Symposium (EFTF·IEEE-FCS'07), Geneva, Switzerland, 29 May - 1 Jun., pp.378-384
- [3] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Fumimaru Nakagawa, Yoshiyuki Shimizu, Ryo Tabuchi, Lam Quoc Tung, Yukio Takahashi, Mizuhiko Hosokawa and Takao Morikawa  
論文題目 : The New Generation System of JAPAN Standard Time at NICT  
2006年12月、Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2006 (ATF2006), New-Delhi, India, 11-13, Dec., pp.69-76
- [4] 全著者名 : Yuko Hanado  
論文題目 : A Quick Review of Time Scale Algorithm (invited lecture)  
2006年12月、Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2006 (ATF2006), New-Delhi, India, 11-13, Dec., TF5II
- [5] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Fumimaru Nakagawa, Yoshiyuki Shimizu, Ryo Tabuchi, Lam Quoc Tung, Yukio Takahashi, Mizuhiko Hosokawa and Takao Morikawa  
論文題目 : Introduction of New generation system of Japan Standard Time  
2006年9月、Proceedings of 7th meeting of representatives of laboratories contributing to TAI, BIPM, France



- [6] 全著者名 : Yuko Hanado, Michito Imae, Masanori Aida, Mizuhiko Hosokawa, and Noriyuki Kurihara  
論文題目 : Present and Future of UTC(CRL) Generation System  
2002年3月、Proceedings of IV International Time Scale Algorithm Symposium, IV TSAS-03
- [7] 全著者名 : Yuko Hanado, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Yukio Takahashi, Mizuhiko Hosokawa, Takao Morikawa and NJST working group  
論文題目 : The new generation system for Japan Standard Time  
2004年10月、Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2004 (ATF2004), Beijing, China, 18-19 Oct, pp. 230-235
- [8] 全著者名 : Yuko Hanado, Yasuhisa Shibuya, and Michito Imae,  
論文題目 : Upgrading of the frequency stability of UTC(CRL)  
2002年11月、Proceedings of Asia-Pacific Workshop on Time and Frequency 2002 (ATF2002), Daejeon, Korea, 5-8 Nov., pp.192-198
- [9] 全著者名 : Yuko Hanado, Michito Imae, Noriyuki Kurihara, Mizuhiko Hosokawa, Masanori Aida, Kuniyasu Imamura, Noboru Kotake, Hiroyuki Itoh, Tomonari Suzuyama, Fumimaru Nakagawa and Yoshiyuki Shimizu  
論文題目 : Generating and Measurement System for Japan Standard Time  
2004年6月、Journal of the NICT, Vol.50, No.1/2, pp.169-177
- [10] 全著者名 : Yuko Hanado, Michito Imae, Masanori.Aida, Mizuhiko Hosokawa, Fumimaru Nakagawa and Yoshiyuki Shimizu  
論文題目 : Algorithm of Ensemble Atomic Time  
2004年6月、Journal of the NICT, vol.50, No.1/2, pp.155-167