天文保時室とNTPサーバー

松　田　　浩
〈国立天文台　〒181 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉
e-mail : time@gravity.mtk.nao.ac.jp

NTP (Network Time Protocol) とはUNIXに基づくネットワークにつながれた，計算機同士の時刻を合わせるための一つの方法である．

なぜ，天文保時室でNTPサーバーを研究することになったか，時刻とネットワークの関わりについて紹介する．

1．国立天文台天文保時室と時刻

国立天文台天文保時室は，セシウム原子時計やGPS受信機等を使って精密国際時計比較を行い，得られたデータを協力研究機関と交換して，国際原子時（TAI : International Atomic Time)，協定世界時（UTC : Coordinated Universal Time）の作成に寄与し，日本の標準時である中央標準時を維持管理してきた．

世界各地の研究所で測定された時計比較のデータは，天文観測所からの地球回転データとともに，フランスにある国際度量衡局と国際地球回転観測事業に集められ，それぞれ国際原子時と世界時（UT 1 : Universal Time 1）が決められ，これを基に協定世界時が決められる（図1）．

国際原子時の決定には，世界中の二百数十台のセシウム原子時計が参加していて，それぞれに前後数ヶ月の安定度，精度を考慮した重みづけをした上で平均を取って決められている．たとえば，最新型の精度の良い時計を買ってきて動かしたとしても，初めの8ヵ月は，時計の存在は発表されるが重みの数値すら付かない．その後の4ヵ月間は観察期間でようやく重み0が付いて，初めて時計に重みが付けられるまでには最低1年間かかる．

またセシウム原子時計自体は正確な発振器でしかないので，時計として使うためにはGPS等を使って他の研究機関との時計比較をして，時刻合わせをしなければならない．保時という名前の様に，時計は継続して動いてこそ意味があるので，これを維持管理☆するのは気の長い，しかし気の抜けない仕事である．

このように現在われわれが使用している時刻は，セシウム原子時計で決まる1秒の長さを積算し，天文観測で求められる地球の自転運動のふらつきを加味して決められている．これをうるう秒で調整するのであるが，UT 1-UTCが±0.9秒以内に収まるように，

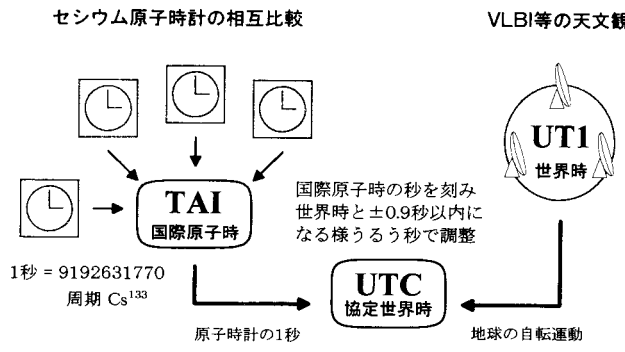

図1　協定世界時について

12月か6月の末日（日本ではUTCより9時間進んでいるから，1月1日か7月1日の8時59分59秒）に1秒を挿入もしくは，引き抜くことで行われる．今まで挿入される“正のうるう秒”ばかりで，引き抜かれたことはない[1]．よく「次のうるう秒は，いつ入りますか？」という質問を受けるが，地球の自転によるわけで，実施数ヶ月前に国際度量衡局から連絡があるものの，それがない時は「地球に聞いてください」というのが答えになる（表1）．

一方天文観測は，天文保時室の前身である東京天文台天文時部において，写真天頂筒（PZT: Photo Zenith Tube）を使い，地球の自転運動を±10 msの精度で観測していた．しかし，1988年国際的に地球回転の観測は，このような従来の光学による方位・位置観測から，電波，レーザーを使った高精度の距離観測（VLBI，月・人工衛星レーザー等）に移行することになり，精度が原子時計（10^{-13}）とかけ離れていることもあって，その年の5月でやめることになった．数年前から，光による精度の高い地球回転の観測にも対応できる，光赤外干渉計の計画も始まっている．

また天文時部はその昔，時刻を決定し維持する保時と，その時刻を通報する報時，無線報時による外国との時刻比較をする経度の3部門であった．三鷹キャンパスの敷地内に今でも国際報時所の門柱が残っている．かつて三鷹から報時を行っていたこともあったのだが（1924～1951年），標準電波による報時が小金井の電波研究所（現・通信総合研究所）に移ってから，天文保時室は報時の手段を持たなかった[2]．NTPを始めるまでは．

年	月	日	ΔT
1972	1	1	10
1972	7	1	11
1973	1	1	12
1974	1	1	13
1975	1	1	14
1976	1	1	15
1977	1	1	16
1978	1	1	17
1979	1	1	18
1980	1	1	19
1981	7	1	20
1982	7	1	21
1983	7	1	22
1985	7	1	23
1988	1	1	24
1990	1	1	25
1991	1	1	26
1992	7	1	27
1993	7	1	28
1994	7	1	29
1996	1	1	30

ΔT は TAI - UTC 単位は秒

表1　TAIとUTCの関係

2. WIDE（Widely Integrated Distributed Environments）プロジェクトとの出会い

今日の技術革新はとどまる所を知らない．その中でも最も動きが著しいのは計算機の分野であることは論をまたないだろう．現在世界的に張り巡らされている計算機ネットワーク，インターネットも，元とも言えるイーサネット（Ethernet）が発表されてから，まだ20年がたったばかりである．日本でも大学，研究所のボランティア的な活動を中心に環境が整備され，昨今のブームにのって広く一般にも知られるようになった．

このインターネット上で何ができるか，それを実現するためにはどんな問題点があり，解決するにはどんな技術が必要か，といった大規模広域ネットワークの総合的な研究と運用を行っているのが，WIDEプロジェクト[3]である．

はじめはある雑誌のネットワークの解説記事[4]が，天文台と計算機ネットワークというまったく畑の違う研究者，技術者を結び付けるきっかけになったのであるが，すぐにWIDEのNTPワーキング・グループというメーリング・リストが開設され，ネットワークの上で実際の問い合わせや議論が行われた．

さて，どうしてネットワークでつながれた計算機の時刻があっていると都合が良いのだろうか．まず，広域ネットワークのような分散環境で，ファイルやデータベースを共有して協調作業を行っている場合，ファイルの新旧や，データベースの更新時期を明確にできる事．次に正確な時計を使って，ネットワークの伝送経路の分析を行う事ができ，メールの配送などのサービスの効率向上が

はかれる事．また，時刻の不確かさ，同期性のなさのために出来なかった，例えば交通機関，金融機関の仕事への応用が可能になる事．そのため，計算機の研究者は正確な時刻を欲しがっていた．

一方，天文保時室は保時している時刻をネットワーク上の時刻同期に活用できるという事で，1992年春からWIDEプロジェクトとの共同研究が始まった．

そのころは，天文台でもようやくネットワーク環境が整い，先に述べた国内外の関係機関との時計比較データ交換を電子メールで始めた時期であった．筆者もUNIX環境に触れ始めたばかりだったので，慣れるまで苦労したが，電子メールを使っての会議や，文書や図，データをネットワーク上で持ち寄っての出版等，驚くことばかりであった．

3. ネットワーク上の時刻同期

実際に測ってみるとわかるが，それぞれの計算機の内蔵時計の進み具合は一様でなく，複数の計算機の時計は，そのままではすべて異なった時刻を指していると考えて良い．もちろんこのような問題を解決するためにUNIXに基づく計算機ネットワークでは，いくつかの方法がある．

ただ単に，2台の計算機同士の時刻同期であればrdateというプログラムで，一方の計算機に他方の時刻を合わせることができる．しかし，このやり方には，秒単位で一挙に時刻を合わせるため時刻に連続性がなくなる事，合わせようとする計算機の時刻が本当に合っているかわからない事等の問題があって，ネットワークの時刻同期には不向きである．

もう一つは，timedを使う方法である．これは，地域的に限られたネットワークにつながれた計算機の持つ時刻の平均を取り，これに合わせるやり方である．当然時刻を合わせようとするそれぞれの計算機でこのプログラムを働かせなければならないが，“デーモン”と呼ばれる，計算機立ち上げ時に起動されバックグラウンドに常駐するシステム処理用プログラムであるため，一度動かしてしまえば特に意識することない．また計算機の時計の進み具合を早くしたり遅くしたりして時刻を合わせられるため，連続性を保った時計合わせができる．ただし，この方法でもそのネットワーク全体の時刻がずれていた場合には間違った時刻に合せてしまう事がありうる．

最後の一つがNTPによる時刻同期システム（以下NTPシステム）で，インターネットのような広域ネットワークにおいて，時刻を同期させるために開発されたプロトコル（通信方法の取り決め）である．NTPではUTCに同期した時計を持つ計算機が，ネットワークにつながっていることを前提としていて，NTPデーモンを働かせておけば自動的に計算機の時刻をUTCに同期させてくれる．また，timedと同様時刻だけでなく，時計の進み具合も調整してくれる．

保時室では，NTPシステムで前提となるUTCに同期したセシウム原子時計がすぐに利用できるので，広域ネットワークにも対応できるこの方式を採用することにした．

4. NTPのしくみ

NTPはネットワーク上でクライアント-サーバーモデルで働くため，この時刻情報を提供する計算機をNTPサーバーと呼ぶ（図2）．

NTPサーバーは，UTCに同期して最も精度の高いサーバーからstratum（階層）1，2，3，……

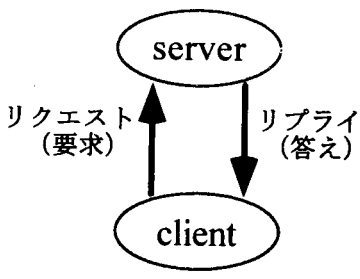

図2　サーバーとクライアント

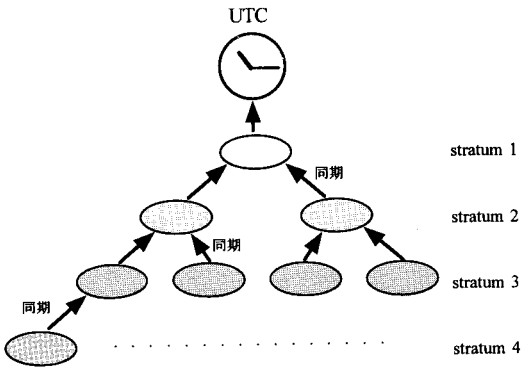

図3　NTPサーバーのツリー構造

とランク付けされたツリー構造になっている．stratum 1のサーバーにとって，stratum 2のサーバーはクライアントになり，同様にstratum 2のサーバーにとって，stratum 3のサーバーはクライアントになる．こうして，階層の高い方から低い方へ時刻の受け渡しをして，ネットワーク全体の時刻同期を取るしくみであるから，その精度・確度もそれに応じていると考えて良い（図3）．

stratum 1サーバーをUTCに同期させるには，一般に短波報時，（最近になって）GPSが用いられ，これらの受信機から時刻情報を受け取っている．

アメリカでもWWV，WWVH等の短波報時（日本ではJJYにあたる）や，GPS受信機を用いた物がほとんどで，UTCに同期したセシウム原子時計を使った物は少ない．1994年春の天文台のNTPサーバー1号機立ち上げ前は，日本国内では太平洋を越えてアメリカの精度の良くない短波報時を元にしたstratum 1サーバーを参照して，stratum 2サーバーを維持している状態であった．

実際にNTPサーバーによって時刻を同期する手順を考えてみると次の様になる．

クライアントが時計を合わせるのに必要となる，ある時刻におけるサーバーの時計との差

$\Delta T = t'c - t's$ は，次の様に計算される（図4）．

時刻t1にクライアントからサーバーにむけて時刻情報の要求をする．これがサーバーに届いた時刻t2とクライアントに向け情報を送り出す時刻t3を一緒にして送り返す．

こうして，クライアントに時刻情報が届いた時刻をt4とすると，ネットワーク上の伝送遅延が行き帰りで等しいと仮定すれば，ΔT は次の式で求められる．

$$\Delta T = t'c - t's = \frac{t1+t4}{2} - \frac{t2+t3}{2}$$

また，ネットワーク通信による遅延dは

$d = (t4 - t1) - (t3 - t2)$

で求められる．

これを何度か行って ΔT やdの分散を計算し，この値の変化を見て通信経路の安定度，時刻精度を判断してデータの取捨選択を行う．また複数のNTPサーバーが参照できる場合，得られた時刻情報のばらつきをstratum番号による重みづけを行って評価し，精度に問題がありそうなサーバーを不適格として参照しないようにする事もある．

この様な一連の動作は前述のNTPデーモンと呼ばれる専用処理プログラムによって，自動的かつ定期的に行われるので，ユーザーが意識するこ

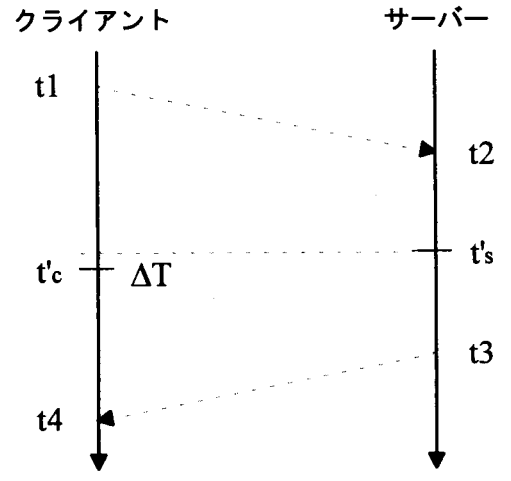

図4　NTPによる時刻同期の手順

となく，計算機内部の時計を適格なサーバーに同期させることができる．その際UNIXのシステムコールを使い，時計の進み具合を遅くしたり早めたりして，時刻を緩やかに同期させることができる．

NTPはUNIX上で動くフリーソフトで，主要なFTPサイトに大抵置いてある．stratum 1サーバーでなければ，UNIXが動いてインターネットにつながっていれば，このソフトウェアをインストールしていくつかの設定をするだけで，NTPによる時刻同期が実現できる．現在のバージョンはxntpd 3.4である．興味を持たれた方はぜひNTPを立ちあげてみていただきたい．

5. stratum 1 NTPサーバーの実現

セシウム原子時計を使ってstratum 1 NTPサーバーを実現するために用意した装置は次のようなものである．まずセシウム原子時計から出力される1秒パルスと1 MHz信号を計算機に取り込まれる時刻情報にするため，2組のバイナリカウンタで積算して，秒，マイクロ秒の32 bitデータに変換するカウント回路を製作した．これはセシウム原子時計自体には時刻の情報を持っていないため(最新のものは出力出来るようになったが)，それぞれを計数して，UNIXで標準的に使われる時刻を格納する構造体struct timevalの秒：tv_sec (1970年の1月1日UT 0時からの積算秒)と，マイクロ秒：tv_usecに一致させるためである．人間には積算秒ではいつの事だかさっぱりわからないが，計算機の内部では年月日時分秒で表わされるより処理し易い．

こうやって作った秒，マイクロ秒の32 bitデータを計算機に実装されたパラレルI/Oボードから読み込む．計算機には，最初の予備実験の段階では，時刻を読み込む手持ちのPC-9801とイーサネットを通じてつながれたUNIXワークステーションNEWSで1つのサーバーとして機能させていた．これを1台にまとめるために，計算機にはボードの拡張が容易で，UNIX互換OSが動かせるIBM-PC互換機を使い，BSD系のOSを採用した．また，このOSは基本ソフトのソースコードが開示されているため，セシウム原子時計の時刻情報を読み込むために付け加える部分をOSの内部に取り込むことが可能になる．もちろんこれは，WIDEのメンバーがいるから出来たことで，プログラムと言えばBASICとFORTRANしかさわったことのない筆者にとっては，C言語でOSの内部にまで手を入れてしまうというのは信じられない事であった．

予備実験用のシステムを2組使って，ネットワーク遅延の変化，計算機の内蔵時計の分解能調査等をした結果，同一構内のネットワーク（例えば国立天文台三鷹キャンパス内)であれば，NTPを使って数十マイクロ秒の精度で時刻同期が可能である見込みがついた．

しかし，天文台三鷹と東京工業大学（目黒区）の間等，いくつかの回線を経由するもっと広域のネットワークになると，NTP単独ではネットワーク遅延等で時刻同期の精度はサブミリ秒程度しか得られない．また，運用していくうちにNTPシステムの問題点も見えてきた．

その一つは，まだ国内のstratum 1サーバーは少数であり，これに多数の問い合わせが集中した場合，ネットワークの通信量が増えて時刻精度が落ちるばかりか，他の通信にも影響を与えることになりかねない．

これを防ぐためには，安価で簡便なNTPサーバーを開発し，少しでも多くのstratum 1サーバーを稼動させることにより，問い合わせを分散する必要がある．また，時刻精度がそれほど必要ない計算機がstratum 1サーバーを直接参照することがないように，stratumの適正な運用も必要となって来るであろう．

6. GPSを使ったNTPサーバー

現在，精度の高い時刻情報をもっとも手軽に得

られるのはGPSである．もともとGPSは，精密な位置を求めるためのシステムであるが，GPS衛星から送られてくる位置決めのために必要な情報のなかには，搭載されたセシウム原子時計の時刻情報も含まれている．また，GPS受信機はセシウム原子時計の様な設備や手間がいらず，アンテナを接続し電源を入れるだけでUTCに同期した時刻が得られる．そこでGPS受信機を使ってNTPサーバーを立ちあげれば，外部ネットワークが簡単に引けない孤立した環境（例えば観測所等）でも，衛星が受信可能な場所であれば，NTPシステムでの時刻同期が可能になる．

最新のNTPサーバー用プログラム・パッケージには，市販されている何種類かのGPS受信機が標準でサポートされていて，海外だけでなく国内でもGPSを使ったNTPサーバーが立ちあげられている．

しかし，我々はセシウム原子時計の代わりに，1秒信号の出力できるGPS受信機（古野電気GN-72 T）と，1 MHz信号は安価な水晶発振器で代用して，これを先に製作したNTPサーバーのカウント回路に同じように入力して，GPSを使ったNTPサーバーを構成した．

前述したカウント回路には，1秒信号と1 MHz信号の同期がとれていない場合，秒信号でマイクロ秒カウンタをリセットできる回路を組み込んである．もし，水晶発振器の1 MHz信号 が温度変化のため，10^6マイクロ秒≠1秒になってもそれ以上の誤差は出ない．

実験ではGPS受信機と水晶発振器の精度にもよるが，数百～数十マイクロ秒の時刻精度を実現できそうである．これ以上の精度が必要な場合には，例えば天文台のセシウム原子時計とGPS受信機の時刻差の測定値をネットワークで公表すれば，リアルタイムとはいかないが，短時間でマイクロ秒程度の時刻精度が得られるはずである．

7. おわりに

1994年春から1号機は，「世界で初めて，UTCに同期したセシウム原子時計直結の Stratum 1 サーバー」として本格運用を始め（IPアドレスは133.40.40.133と回文になっている．ちなみに133はセシウムの原子量である），プロジェクトは今も少しづつではあるが前進している．今年1月には，1号機のOSと共に時刻取り込みソフトのバージョンアップを行い，2号機もまだ非公開ではあるがStratum 1として動きはじめた．

また，すばる望遠鏡でもほとんどの計算機の時刻同期に，先に述べたGPSベースのNTPサーバーで，水晶発振器のフィードバックに工夫した改良版が使われる事になっている．

最後になったが，NTPをはじめるきっかけを作ってくれた大橋正健さん，また天文保時室とWIDEのメンバー，特にNTPワーキング・グループで中心となって我々を引っ張ってくれている大野浩之さんに感謝したい．それから，これまでにネットワークを育て，支えてきた多くの人々に感謝したい．

参 考 文 献

1）国立天文台編，1995，理科年表平成8年度版，P 168
2）青木信仰，1982，時と暦
3）WIDE Project 編，bit 別冊インターネット参加の手引き 1994，「時刻基準の設置」，P 263
4）山口 英，1992，「NTP」，UNIX MAGAZINE，2月号，P 29

Time Keeping Office and NTP Servers

Koh MATSUDA
National Astronomical Observatory

The NTP (=Network Time Protocol) is a method to synchronize clocks of UNIX-based computers via computer networks. We introduce the history of our research on the NTP server and their present status. Also we discuss on the fundamental relations between the deployment of computer networks and the clock synchronization.