

## 高速インターネット環境におけるパケット遅延時間の精密測定

鳥山 裕史<sup>†</sup>      町澤 朗彦<sup>†</sup>      岩間 司<sup>†</sup>      金子 明弘<sup>†</sup>

<sup>†</sup> (独) 情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町 4-2-1  
E-mail: tori@nict.go.jp

**あらまし** 電子商取引の普及、トランザクションの高速化などに伴い、処理に用いられる時刻情報の重要性が高まっている。本論文では、高精度ハードウェアタイムスタンプを用いた高速回線でのパケット遅延時間計測結果を紹介し、一定の条件下では、数百ナノ秒程度の精度で時刻配信が可能という見通しを示す。

**キーワード** 片方向遅延時間, 時刻同期, タイムスタンプ

### Precise Measurement of Packet Transmission Delay in High-Speed Internet Environment

Hiroshi Toriyama<sup>†</sup>      Akihiko Machizawa<sup>†</sup>      Tsukasa Iwama<sup>†</sup>      Akihiro Kaneko<sup>†</sup>

<sup>†</sup> National Institute of Information and Communications Technology,  
4-2-1 Nukuikitamachi, Koganei, Tokyo 184-8795 Japan  
E-mail: tori@nict.go.jp

**Abstract** The accuracy of computer clocks became more important according to the popularization of electronic commerce and to the increase in transaction speed. We have precisely measured IP packet delay in high-speed backbones using hardware timestamps. The experiment result shows that the remote clock can be synchronized in the precision of some hundred nano-seconds.

**Keyword** One-Way Delay, Time Synchronization, Time-Stamp

#### 1. はじめに

電子商取引や電子行政手続の普及に向けて、時刻を安全かつ正確に把握することが、ますます重要となってくる。また、通信、情報処理の高速化に伴って、ログ等に用いられる時刻精度に対する要求も高まってきている。

日本標準時を取得する方法としては、標準電波、テレホンJJYなどが実運用レベルで利用可能であり、さらに高精度な需要に対しては、GPSコモンビューを用いた方法[1]、衛星双方向方式[2]などがあるが、これらでは、アンテナを設置する必要があったり、設備が大かかりになったりすることから、データセンタ等で利用するのは容易とはいえない。

手軽に利用できるものとして NTP を用いた方法[3]が試験的に運用されている。インターネットを用いた時刻取得はコストが低く、電子時刻認証などに必要となる双方向性を有しているといった点で優位性が高いが、得られる時刻精度がネットワークの状況に依存するなど、信頼性の点では注意すべき点がある。

我々のグループでは、さまざまなインターネット環境に対し、それぞれに適するプロトコル、得られる時刻精度等についての検討を行っているが、このうち、時刻供給先を大手プロバイダ、大手データセンタ、大学など、安定した高速回線が利用できるケースに限定

すれば、良好な時刻供給精度が得られると考えている。今回、小金井(東京)ー大手町(東京)ー堂島(大阪)を結ぶ 10Gbps 回線を対象に、高精度ハードウェアタイムスタンプ(PUTS: cascadable Passing through precision UDP Time-Stamping device)[4]と原子時計を用いて UDP パケットの伝送遅延時間を計測し、その結果に対し検討を加えたので報告する。

今回の実験結果は、データセンタ内、または、光ファイバで直結されたような近隣のデータセンタ間では、1マイクロ秒を十分に下回る精度での時刻同期が可能であることを示している。また、東京ー大阪間のような遠隔地の時計も、大きな経路変更がないなど、通常の状態では1マイクロ秒以下の精度で同期できると考えられる。

#### 2. パケット伝送遅延時間測定

##### 2.1. 実験機器およびネットワーク構成

小金井ー大手町間の実験構成概要を図1に示す。大手町に設置された仮想クライアントマシンは、小金井に設置されているサーバマシン宛に UDP パケットを定期的に送信する。サーバマシンは、特定のポート宛に送られてきたパケットをそのまま送信元に返送し、クライアントマシン側で記録・蓄積される。各マシンに隣接して、高精度ハードウェアタイムスタンプ

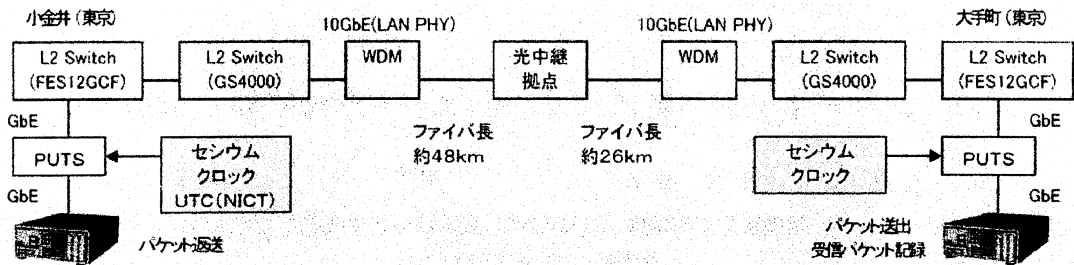


図1. 小金井 — 大手町 間の実験構成

(PUTS)が設置され、送信されたパケットには、サーバへの上り方向で2回、下り方向で2回タイムスタンプが書き込まれる。それぞれの方向のパケット伝送遅延時間が等しいと仮定できれば、これらのタイムスタンプから、2つの時計の時刻差を求めることができ、クライアント側の時計を正確に同期させることができる。

本実験で用いた UDP パケットのフォーマットを図2に示す。PUTS は、ホップ数に従って、所定の位置に秒、ナノ秒それぞれ32ビットのタイムスタンプを書き込み、ホップ数をインクリメントする。PUTSの秒カウンタには、起動時に UNIX time の秒数がセットされ、その後、基準クロックからの秒パルスでカウントアップする。ナノ秒フィールドは、基準クロックから供給される 10MHz 信号を過倍した 250MHz クロックを基準としており、直前の秒パルスからのカウント数の4倍の値を用いている。

PUTS は、1000BaseT のワイヤレートで動作し、また、カッスルー動作により、その通過遅延はパケット長にかかわらず一定である。PUTS には、IP アドレス範囲、ポート番号などにより処理対象となるパケットを限定する機能があるが、処理対象外のパケットについても、同じ遅延時間で転送される。

ネットワークインターフェースとして、実験室内部分には GbE、長距離部分には 10GbE が使用されている。長距離部分の光ファイバには、分散補償用ファイバ (3~6km、コイル状) が挿入されており、図中のファイバ長は、これを含んだ値である。

小金井-堂島間の実験構成を概要を図3に示す。機器構成は小金井-大手町とほぼ同様で、途中に JGN II の東阪間リンクが挿入された形となっている。この区間のファイバ長は不明であるが、大手町-堂島間の直線距離、404 km を下回ることはない。

## 2.2. 基準クロック

小金井でのクロック信号源としては、日本標準時信号を用いた。本実験では、日本標準時との絶対的な同期精度は必要ないが、単独のセシウム時計より高い安定度が期待できる。大手町では市販のセシウム時計を用いた。カタログ値では、1日あたりの計時誤差は10ナノ秒程度となっている。この時計は、実験システム構築時に、運搬時計法により時刻較正しているが、その後は自走している。

堂島では、小型のルビジウム時計を用いている。実

	0	1	2	3 (バイト)
0	-	-	ホップ数	-
4	-			
8	-			
16	-			
20	クライアント送信タイムスタンプ(秒)			
24	クライアント送信タイムスタンプ(ナノ秒)			
28	サーバ受信タイムスタンプ(秒)			
32	サーバ受信タイムスタンプ(ナノ秒)			
36	サーバ送信タイムスタンプ(秒)			
40	サーバ送信タイムスタンプ(ナノ秒)			
44	クライアント受信タイムスタンプ(秒)			
48	クライアント受信タイムスタンプ(ナノ秒)			
52	パディング(任意長)			

図2. 実験に用いたUDPパケットのフォーマット

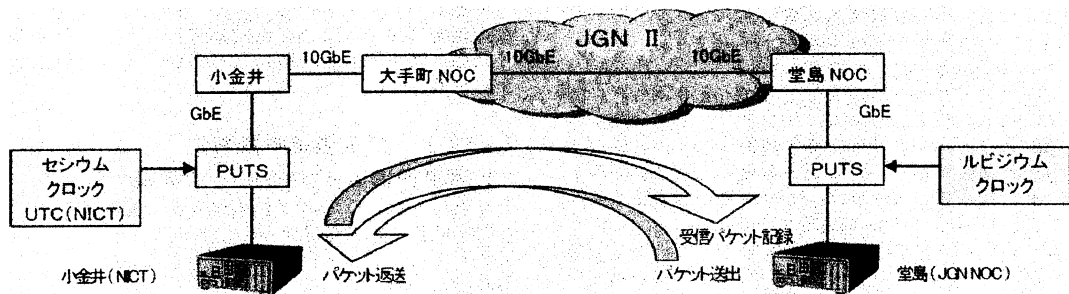


図3. 小金井 — 堂島 間の実験構成

験システム構築後、1週間程度の測定を行い、この結果を元に、往復遅延時間が同一であると仮定し、ルビジウム時計の時刻差、および周波数偏差の遠隔補正を行った。この補正後、ルビジウム時計は自走させている。

このルビジウム時計の安定度は、短期では市販のセシウム時計に比べ1桁劣る程度であるが、1週間程度の期間では、3桁程度の差に広がる。

### 3. 実験結果

#### 3.1. パケット長対遅延時間特性

小金井-堂島間で、送出するパケット長を変えながら遅延時間を測定した結果を図4aに示す。PUTSはカットスルー動作をするため、通過遅延時間はパケット長の影響を受けないが、実験経路中にあるL2スイッチは、ストアアンドフォワード動作をするため、パケット長が長いほど、伝送遅延時間は長くなる。

図から、パケット長が長いほど遅延時間の分散が小さくなる傾向が読み取れる。これは、長いパケットの場合、パケット全体が受信される間に、クロス trafik の送出が終了し、実際にクロス trafik による待ちが発生する率が低い、という理由が考えられる。

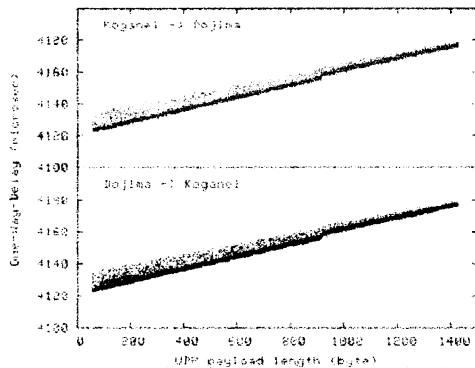


図4. a パケット長対遅延時間特性 (堂島)

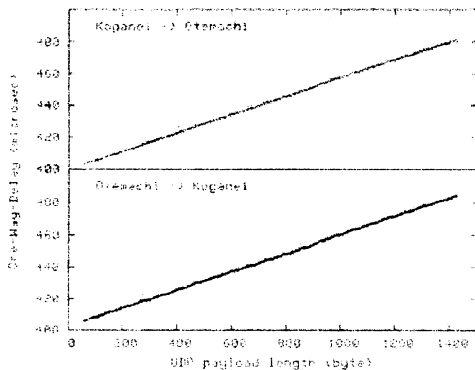


図4. b パケット長対遅延時間特性 (大手町)

る。パケット長 1,000 バイト弱で、遅延時間が不連続になっており、その左右では若干傾きが違う。この現象は、GS4000 を経由しない室内実験では観測されなかったことから、GS4000 の特性であろうと推測される。

小金井-大手町間 (図 4b) でも全体の傾向は同様であるが、クロス trafik が少ないため遅延時間の分散は小さい。

#### 3.2. 長期間連続測定

ペイロード長 56 バイト、および 1,472 バイトの UDP パケットを 0.5 秒間隔で交互に連続送信し、遅延時間データを取得した。図 5a は、小金井-堂島間で観測された片方向遅延時間をプロットしたものである。ここでは、1,472 バイトのパケットで測定した遅延時間データから、連続する 50 個のデータの最小値を用いることにより、クロス trafik の影響を小さくしている。11月16日から20日にかけて大きなクロス trafik があったが、その影響は 1 マイクロ秒程度に収まっている。ここでは最小値を用いるという単純なフィルタを用いたが、実際に時刻同期を行う場合には、線形計画法[5]など適切な処理を行うことによって、クロス trafik 等の影響をさらに小さくできる可能性がある。

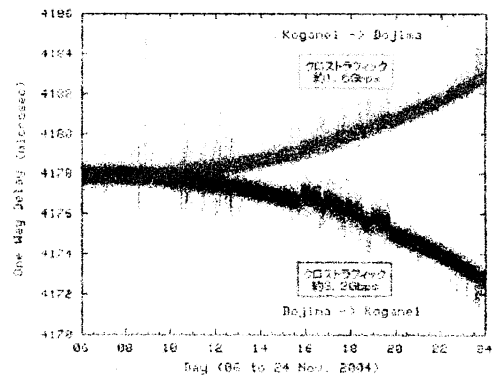


図5. a 遅延時間測定値の変化 (堂島)

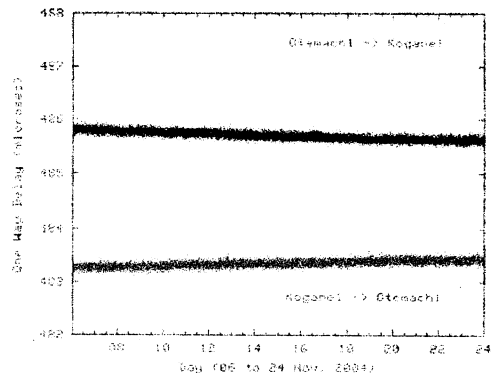


図5. b 遅延時間測定値の変化 (大手町)

時間の経過にしたがって、往復の遅延時間測定値に差が出てきているのは、ルビジウム時計のドリフトが主因であると考えられ、そのドリフト量は18日間で、およそ5マイクロ秒程度である。この実験環境での時刻測定精度は、1日ないし数日間のドリフトを測るのに十分であり、この測定結果をルビジウム時計にフィードバックすることにより、十分な安定度で同期させることができると考えられる。まだ数値的な検討は十分でないが、測定値の分散(477ナノ秒)などから、1マイクロ秒を下回る同期精度が得られるものと思われる。

小金井-大手町間のグラフ(図5b)は、きれいなカーブを画いており、18日間の測定で、セシウム時計のドリフトが観測できている。

#### 4. 時刻同期精度に関する考察

IPによって遠隔地にある時計を精度良く同期させることは、本実験の主要な目的の1つである。

一般に、ネットワーク経由での時刻供給は、誤差の影響から短期の安定度は低いのが、この誤差は蓄積される性質のものではないため、平均化時間が長くなるほど、安定度は、基準時計のそれに近づく。これに対し、ルビジウム時計では、短期安定度は良好なもの、平均化時間が数時間を越えると、安定度が悪化する傾向にある。他の原子時計、TCXOなどでも同様の傾向か、もしくは、平均化時間に対して安定度が頭打ちになる傾向を示す。

短期安定度の高いローカル時計と、高精度なIP時刻比較技術を組み合わせ、ローカルクロックに適切なフィードバックを行うことにより、遠隔地で、短期から長期にわたる安定な時刻(周波数)が得られる。これは、一般に用いられているNTPでも同様で、この場合、安定度 $10^{-5}$ 程度の内蔵水晶発振器とNTPパケットによるミリ秒レベルの時刻比較を組み合わせている。

本実験での大手町および堂島の測定結果の安定度を図6に示す。堂島および大手町の値は、それぞれのローカル時計と遅延時間計測の不安定さが加算されたものとなっている。RubidiumおよびGPSは、比較のための参考値で、それぞれ市販品のカタログから抜粋

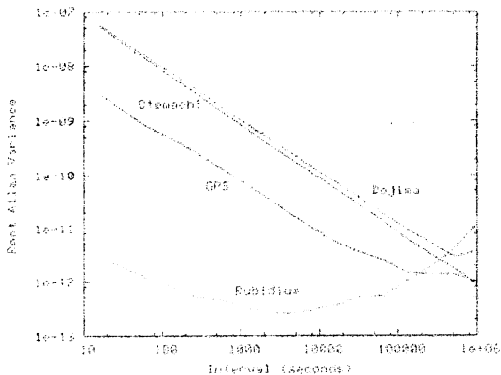


図6. 安定度の比較

したものである。この図から、本実験での遅延時間計測は、数日間以上の長期ではGPSレーザに遜色ないレベルであり、また、ルビジウム時計単体の安定度を上回ることがわかる。

短期についても、測定データの時系列フィルタリングによって、1桁程度改善が見込まれる。

ネットワーク経由の時刻供給で大きな問題になる点として、往復遅延時間の差がある。往復遅延時間の差は、他に較正する手段がない限り測定不能であり、これは、遠隔地の時計の絶対的なずれを生じさせる。また、ネットワーク経路の変更や、工事、災害による迂回などによって、往復の遅延時間差に変動が生ずる場合、遠隔地の時計の安定度にも影響する。

後者については、十分信頼できる時計を持ち、遅延時間のジャンプを検出できれば、影響を相殺できる可能性がある。また、データセンタ内、または、光ファイバで直結されたような近隣のデータセンタ間では、もともとの遅延時間自体が小さく、また、往復遅延時間に差を生ずる要因が少ないことから、これが問題となる可能性は低い。

前者の絶対的な時刻同期精度についても、短距離では問題が少ない。往復遅延時間の差が不明な場合、図7に示すように、

$$(T1 - T0) + (T3 - T2)$$

だけの不確かさが生ずる。このうち、光ファイバ長などに応じた遅延時間がわかっているならば、その分を除外することができる。

小金井-大手町の場合、光ファイバ長は片道74kmで、光ファイバの信号伝達速度が真空中の高速の70%であるとすると、この部分の遅延時間は352マイクロ秒となり、不確かさは、100マイクロ秒程度の範囲に収まる。データセンタ内などの環境では、この不確かさも、さらに小さな値となる。

大手町-堂島間の光ファイバ長は不明であるが、その直線距離、404km分の遅延時間は除外できる。これから算出した不確かさは、3.7ミリ秒程度となる。ミリ秒レベルの不確かさが許されない場合には、GPS

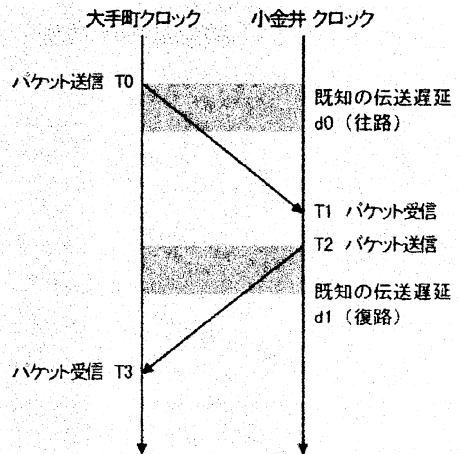


図7. 時刻同期精度の限界

コモンビュー方式など、他の精密測定方式の利用、または併用が必要となる。

## 5. おわりに

現状でも、NTP により、インターネット経由で容易に時刻が取得できるが、その精度、信頼度は十分でないケースも多い。信頼できる正確な時刻をできるだけ容易な手段で取得できるようなインフラを構築する際に、本実験の結果は、IP による時刻供給がどの場面に適するかを検討材料のひとつになるう。

今回の実験は、時計を自走させての遅延時間測定であったが、今後、測定結果のフィードバックにより時計を制御するシステムを作成し、実際の安定度等を検証していく。

実験に用いたハードウェアタイムスタンプ(PUTS)は、カスケード接続によって区間ごとの遅延時間を測定するため、また、パケット長の影響を調べるために、独自のパケットフォーマットを採用しているが、今回の実験のように1対1で用いる場合には、NTP パケットフォーマットを用いても同様の結果を得ることができる。現在、ハードウェア SNTP サーバの開発を進めており、これは通常の NTP クライアントからも利用することができる。

今回の実験では、クライアント側にも PUTS を用いたが、クライアント補助機能に限定した簡易なハードウェア、もしくは PC のクロック自体を OCXO などによって高精度化し、割込みハンドラなどのソフトウェアで処理することにより、低コストのクライアントが実現できる[6]。これらの方法についても検討を進めたい。

**謝辞** 本実験には、JGN II 東阪間回線を利用して頂いた。関係の方々に感謝する。

## 文 献

- [1] 内藤, 栗原, “電子時刻認証システム開発—遠隔地の標準時刻校正手法の確立—,” 通信総合研究所第105回研究発表会, Nov.2003
- [2] 今江, 他, “衛星双方向方式,” 通信総合研究所季報, 第49巻, 第1.2号, pp.121-128, Mar./Jun.2003
- [3] 今村, 他, “ネットワークによる日本標準時供給システム,” 第1回情報科学技術フォーラム, 情報・システムソサイエティ, O-7, Sep.2002
- [4] 町澤, 他, “通過型高精度 UDP タイムスタンプの開発,” 信学技報, 1A, Jan.2005
- [5] S.B.Moon, P.Skelly, and D.Towsley: Estimation and Removal of Clock Skew from Network Delay Measurements. In Proceedings of the IEEE INFOCOM, pp.227-234, March 1999.
- [6] 町澤, 北口, “割込みハンドラと高精度 pc によるソフトウェアタイムスタンプの精度改善,” 信学論(B), vol.J87-B, No.10, pp.1678-1685, Oct.2004