

## 高速ネットワークを利用した高精度時刻比較

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

Precise Estimation of High-Speed Network Time-Transfer

Tsukasa IWAMA<sup>†a)</sup>, Akihiro KANEKO<sup>†</sup>, Akihiko MACHIZAWA<sup>†</sup>,  
and Hiroshi TORIYAMA<sup>†</sup>

あらまし タイムビジネス認定制度では、標準時配信局からの時刻配信方法は GPS (Global Positioning System) コモンビュー方式のみが定められた時刻比較方法である。ネットワークを利用した遠隔地との時刻比較には一般に NTP (Network Time Protocol) が用いられるが、単純な NTP ではネットワークの状況やソフトウェア処理の揺らぎ等の影響で精度の高いデータを取得することは困難である。またネットワーク処理系の精度が向上してもネットワーク上のパケット遅延時間自身の分散が大きすぎるため、そのままでは遠隔地の時計の計測及び時刻同期に用いるためには精度が不十分である。筆者らは、ソフトウェアの影響を排除した高精度なハードウェアネットワーク処理系を用い、測定によって得られたデータを統計的な処理を行うことでクロストラヒック等の影響を抑え遠隔地の原子時計との時刻比較精度を大きく向上させる方法について検討した。本論文では、GPS コモンビュー方式の代替手段となり得るネットワーク時刻比較システムについての検討結果と実現方法について提案する。

キーワード NTP, ネットワーク時刻比較, 片方向遅延時間

## 1. ま え が き

電子商取引の普及や政府の高度情報通信ネットワーク社会推進戦略本部 (IT 戦略本部) による電子政府の推進により、近年、情報の電子化が飛躍的に進んできた。情報の電子化が進むにつれて時刻情報の重要性も増大し時刻精度に対する要求も高まってきている。総務省では平成 16 年 11 月に時刻配信業務及び時刻認証業務を総称したいわゆるタイムビジネスを対象に「タイムビジネスに係る指針」を策定した [1]。この指針を踏まえてタイムビジネス認定制度が開始され、書面の電子保存を可能とする e-文書法 (「民間事業者等が行う書面の保存等における情報通信の技術の利用に関する法律」) においても認定されたタイムスタンプの付与が要件となっている。このように正確な時刻に対する需要は日に日に高まっており、正確で手軽な時刻の配信技術や時刻同期技術に対する要求も大きい。

タイムビジネス認定制度では、時刻配信局に原子時計を設置することが義務づけられており、標準時配信局からの時刻配信方法は GPS コモンビュー方式のみが定められている。GPS コモンビュー方式は世界的な時刻比較にも用いられている方式 [2] であり、高精度な時刻比較が可能であるが、現在のところ標準時配信局からのデータ公表を受けてから時刻比較を行うため、実時間で時刻比較を行うことが難しい。また、時刻比較用の GPS 受信機が必要となることに加え、受信アンテナの設置と精密な位置測定、並びにケーブルや受信機内部の正確な遅延時間測定が必要であり、特にデータセンタなどにおける導入・設置が難しい。

一方、ネットワークを用いた時刻の取得は比較的成本が低く、双方向性を有しているといった点で優位性が高い。また近年のネットワーク関連技術の飛躍的な進展により、1 Gbit/s 以上の高速なネットワーク回線が比較的容易に利用できるようになってきた。しかしながら、一般的に利用されている NTP では得られる時刻精度がネットワークの状況やソフトウェア処理系の割込みタイミングに依存する等、時刻の比較精度の面では大きく劣っている。またネットワーク上のパケット遅延時間自身の分散が大きすぎるため、そのま

<sup>†</sup> 情報通信研究機構, 小金井市

National Institute of Information and Communications  
Technology, 4-2-1 Nukui-kitamachi, Koganei-shi, 184-8795  
Japan

a) E-mail: iwama@nict.go.jp

までは遠隔地の時計の計測及び時刻同期に用いるためには精度が不十分である。

本論文ではソフトウェアの影響を排除した高精度なハードウェアネットワーク処理系を用い、測定によって得られたデータに対し統計的な処理を行うことでクロストラヒック等の影響を抑え、時刻比較精度を大きく向上させた高精度な「ネットワーク時刻比較システム」を提案する。ここで提案する「ネットワーク時刻比較システム」は、高速ネットワーク回線を利用することにより、遠隔地に設置してある原子時計を GPS コモンビュー方式に匹敵する精度で時刻比較を行うことのできるシステムである。

2. では、高速ネットワーク回線を利用して時刻比較を行うネットワーク時刻比較システムの構成について説明する。3. では高精度な時刻比較に必要な片側遅延時間データを用いた統計的なデータ処理方法を提案しトラヒックと各処理データとの関係について検討する。4. では GPS コモンビュー方式との時刻精度の比較を行いネットワーク時刻比較システムの正確さと実用可能性について検討する。最後に GPS コモンビュー方式の代替手段となり得るネットワーク時刻比較システムの実現方法を提案する。

## 2. ネットワーク時刻比較システム

### 2.1 遠隔地との時刻比較の性能測定

これまで我々はソフトウェア処理系の揺らぎの影響を受けない通過型高精度 UDP タイムスタンプ PUTS を開発し [3]、各種インターネット環境下において PUTS を用いた片方向遅延時間測定について報告してきた [4] ~ [6]。また PUTS のファームウェアを改良しハードウェア SNTP (Simple NTP) ボードとしてハードウェアレベルで NTP パケットを送受信できるようにした [7]。これらハードウェアネットワーク処理系を利用することにより、ネットワーク環境を常時安定させることができれば遠隔地の原子時計の時刻比較に利用できる。そこでクロストラヒック等で変化するネットワーク環境を統計的なデータ処理することで安定させる方法について検討した [6]。これらの研究結果から、高速ネットワーク回線を利用して原子時計の時刻比較が可能な高精度ネットワーク時刻比較システムを構築できる見通しが立った。

時刻比較システムの性能を考える上で一つの基準となるのが、タイムビジネス認定制度で採用されている GPS コモンビュー方式である。GPS コモンビュー方

式は、国家標準機関同士など世界的な時刻比較ネットワークや現在のタイムビジネス認定制度でも採用されている方式であり、時刻比較の正確さはアンテナ位置やケーブル等の遅延時間を正確に測定することにより 10 ns 以下のオーダを実現できる。そこで本論文で提案するネットワーク時刻比較システムにおいても GPS コモンビュー方式の時刻精度を比較対象とする。

タイムビジネス認定制度で採用されている GPS コモンビュー方式において、1 回の計測データにはコモンビュー用受信スケジュールに従い 13 分間受信して平均化したデータを用いる。現在、比較対象である標準時配信局の GGTTTS (Group on GPS Time Transfer Standards: GPS コモンビュー方式における時刻比較用データフォーマット) データの更新頻度は 1 日に 1 回である。このことからネットワーク時刻比較システムにおける測定データの平均化時間を 10 分とする。

本システムの比較対象である遠隔地の時計はルビジウム (Rb) とセシウム (Cs) を用いた原子時計である。Rb 原子時計及び Cs 原子時計それぞれの 10 分間の変動幅は、カタログの短期安定度から計算するとそれぞれ 1.2 ns 及び 0.6 ns 以下である。測定で使用するハードウェア SNTP ボードの時間分解能は 4 ns であり、平均化時間 10 分のそれぞれの原子時計のデータ変動量は本システムの測定分解能以下であるので変動の影響を無視できる。

### 2.2 ネットワーク時刻比較システムの構成

図 1 に本論文で提案するネットワーク時刻比較システムの構成を示す。中央の二つの原子時計が比較対象である。原子時計から下のブロック図がネットワーク時刻比較システム、上側が比較対象となる GPS コモンビュー方式を用いた時刻比較システムである。

Stratum1 サーバを東京都小金井市にある我々の研究室内に設置し、パケット送・受信機として [4] のハードウェア SNTP ボードを搭載した PC を東京都千代田区大手町と大阪市北区堂島の 2 箇所に用意した。双方の PC に搭載したハードウェア SNTP ボードはボード自体にも精度の高い OCXO (Oven Controlled Xtal Oscillator: 恒温槽付水晶発信器) を搭載しているが、高精度な測定を行うため原子時計を用いた外部発信器でタイムスタンプを生成した。これによりソフトウェア割込みの影響を受けない正確なタイムスタンプの生成が可能である。

タイムスタンプ生成に用いた原子時計は、Stratum1 サーバでは日本標準時のもととなる UTC(NICT)

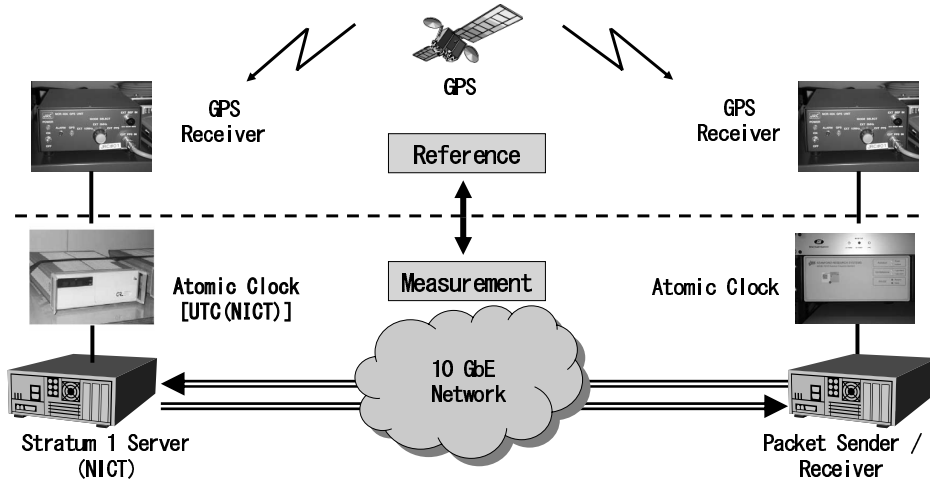


図 1 ネットワーク時刻比較システム  
Fig. 1 Block diagram of network time-transfer system.

(NICT が定める協定世界時), 東京・大手町に設置したパケット送・受信機では Cs 原子時計, 大阪・堂島に設置したパケット送・受信機では Rb 原子時計を用いた. また PC に搭載したハードウェア SNTP ボードは, 「NTP クライアント補助モード」で動作させた. 「NTP クライアント補助モード」とはパケット送・受信機用 PC の直前にハードウェア SNTP ボードを通過型ネットワークデバイスとして挿入し, NTP パケット送出時に始発タイムスタンプを上書きし, 受信時に参照先タイムスタンプを受信時タイムスタンプに書き換える動作をする. このことにより, 1 回のパケット送受信でハード的に書き込まれた原子時計の正確なタイムスタンプによる上り下り双方の片側遅延時間の測定値を取得できる.

ハードウェア SNTP ボードは 1000BaseT のワイヤレートで動作する. 高速なネットワーク環境として各建物内の PC 周りでは GbE (Gigabit Ethernet), 東京都内の小金井-大手町間は 10 GbE の専用線, または 10 GbE の共用回線である. また大阪の堂島へは東京の大手町から JGNII (Japan Gigabit Network II: 研究開発用ギガビットネットワーク II) の東京-大阪間の回線を利用しており, やはり 10 GbE の回線である. ボードの時間分解能と合わせてシステムとしての時間分解能は GPS コモンビュー法の時刻精度とほぼ同等の 10 ns 程度が期待できる.

### 3. 遅延時間のデータ処理

本論文で実施した測定では毎秒 7~8 回のパケット送受信を行ってデータを取得した. 取得データの一例を図 2 に示す. 図 2 (a) は東京都内で大手町から小金井に, (b) は大阪の堂島から東京の小金井に向けたパケットの片側遅延時間の測定データの例である.

大手町-小金井間は直線距離で約 25 km, 測定には専用回線を使用しているためトラヒックが少なく, 10 分間の片側遅延時間データ全体の標準偏差  $\sigma$  はほぼ 36~40 ns, 遅延時間の広がり全体で 200 ns 程度である. 一方, 大阪・堂島-東京・小金井間は直線距離で約 400 km, 通信距離も長く, JGNII の回線を使用しているため全体のトラヒックも多い. このため, 遅延時間の広がりには 18  $\mu$ s 程度まで広がっている. しかし, 次節で示すヒストグラムからかなりの割合のデータは最小の遅延時間からは 2  $\mu$ s 程度以内に存在する. また JGNII の東京-大阪間の回線では頻繁にトラヒックの変動があり, 図 2 (b) においても 0:00 (UTC) から 8:00 (UTC) の昼の時間帯でトラヒックが増大しており, 10 分間の片側遅延時間データ全体の標準偏差  $\sigma$  はほぼ 3~4  $\mu$ s, それ以外の区間では  $\sigma$  は 2  $\mu$ s 程度であった.

本測定ですべての送受信点に原子時計を使用しているため, 各送受信点の原子時計間の時刻差の変動量は 24 時間でも 1  $\mu$ s 以下である. このため, 図 2 (b) のようにクロストラヒックの影響で遅延時間が広がり,

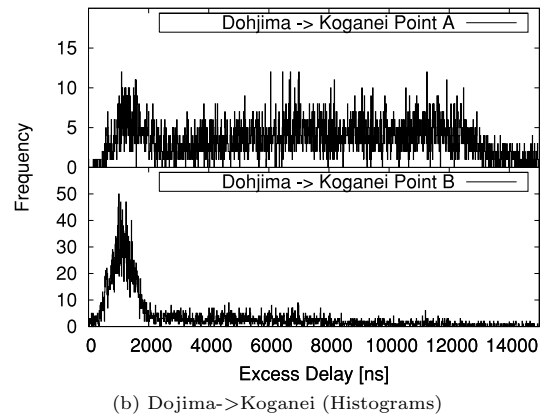
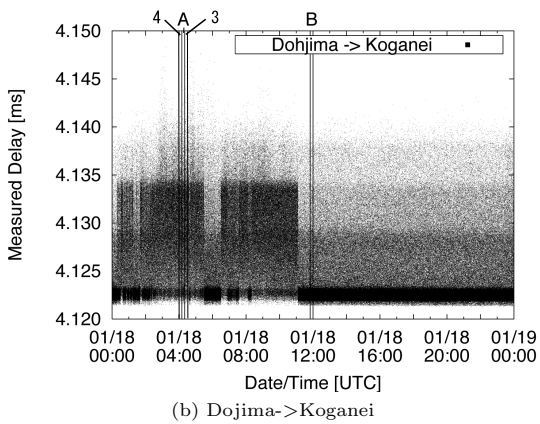
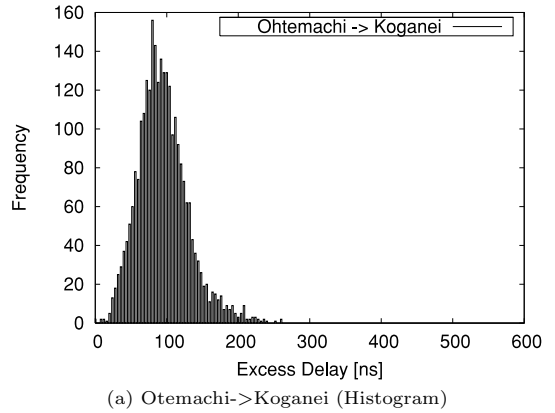
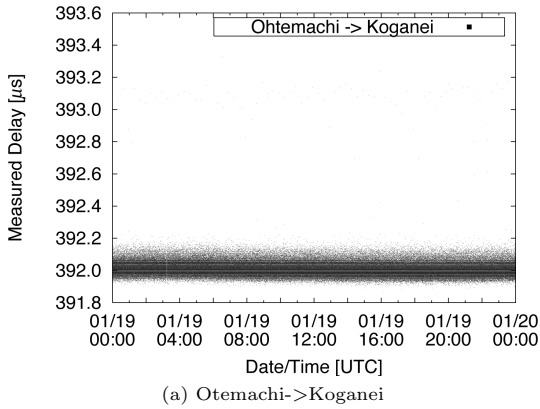


図 2 片側遅延時間データ例

Fig. 2 Samples of measured one-way delay data.

図 3 遅延時間データの度数分布

Fig. 3 Histograms of measured excess delay data.

かつ変動している状態から送受信点間の片側遅延時間データの値を  $\mu\text{s}$  以下の高い精度で計測して区間データの代表値を決定する手法が必要となってくる。Paxson や Moon は区間データの最小値を用いることにより、これら遅延時間変動の影響を除去して時刻同期を行うアルゴリズムを提案している [8], [9]。これは区間データの最小値はトラヒックの変動によって生じるキューイング遅延の影響を受けにくいと、区間データの代表値に適しているからである。しかし、今回の遅延時間データは時間分解能が数十 ns オーダと高いため、最小値であっても計測データがかなりばらつくと思われる。そこで今回は様々なトラヒック変動に対応でき、かつデータのばらつきが小さくなるようなデータ処理手法について検討した。

### 3.1 遅延時間データの分布

平均化時間内の遅延時間の統計的性質を調べるため、10 分の平均化時間における片側遅延時間の分布状

態を調べた。代表的な結果を図 3 に示す。図 3(a) は図 2(a) のようなクロストラヒックの影響がほとんどない場合の分布である。クロストラヒックがない場合はきれいな bell shape になることが分かる。図 3(a) の場合、遅延時間の最小値 ( $x$  軸の 0) から 160 ns 程度の範囲内に測定データの 95% が含まれる。

これに対し、図 3(b) は図 2(b) のクロストラヒックが多く最も遅延の広がりが大きかったポイント A と比較的遅延の広がりが少ないポイント B におけるヒストグラムである。図 3(b) ではクロストラヒックによるキューイング遅延の影響が出ているが、遅延時間の最小値から 2,000 ns の範囲で bell shape が確認できる。これはクロストラヒックの大きなポイント A においても存在している。

この bell shape の遅延時間分布は通信路のハードウェアに依存した遅延が主体の部分である。すなわち、通信路が同じ場合は分布度数の変化はあるが形状や分

幅幅がほとんど同じであるため、この部分のみを抽出することによりクロストラヒックによる影響を軽減し、測定した遅延時間の精度を向上させることができる。

### 3.2 遅延時間幅の抽出方法

測定データの抽出に際し、事前の作業としてその通信路の遅延時間幅（抽出幅）を求める必要がある。ここで、図 3 のそれぞれの度数分布の累積確率を正規確率紙上にプロットした結果を図 4 に示す。図 4 (b) においては、最も遅延の広がりが大きかったポイント A の次の 10 分間の平均化時間内のデータ（サンプル 3）及びポイント A の直前の 10 分間の平均化時間内のデータ（サンプル 4）の累積確率も示してある。

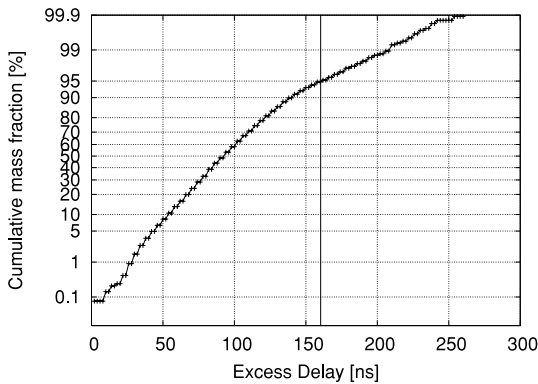
図 4 (a) では 165 ns 以下、図 4 (b) では 1,700 ns 以下の bell shape の部分が累積確率の大きさにかかわらず、ほぼ正規分布に近い分布形状をしていることが分かる。また分布形状の変化についても、図 4 (b) の比較的クロストラヒックの影響が小さいサンプル 1（ポ

イント B）及びサンプル 4 で直線が曲がりはじめた  $\Delta d = 1,700$  ns の部分でクロストラヒックの影響が大きいサンプル 2（ポイント A）及びサンプル 3 の直線も曲がりだす。図 4 (b) の結果から、bell shape はほぼ正規分布となり、かつクロストラヒックの大きさにほとんど影響されないといえる。

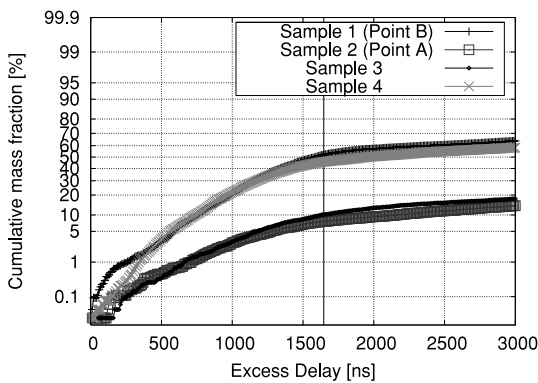
以上の結果から、抽出しようとする部分の遅延時間データの分布が正規分布に近い形状をしており、かつ、度数の変化があっても通信路が変化しない限り遅延の広がり幅が変化しないことに着目して測定データの抽出を行う。

### 3.3 遅延時間幅の決定

最初に、経路ごとの最小値から最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  を算定する。クロストラヒックがほとんどない場合の例として、図 5 (a) の左側に大手町-小金井間における 10 分間の平均化時間内のデータ約 2 週間分、2,000 サンプルの最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  の度数



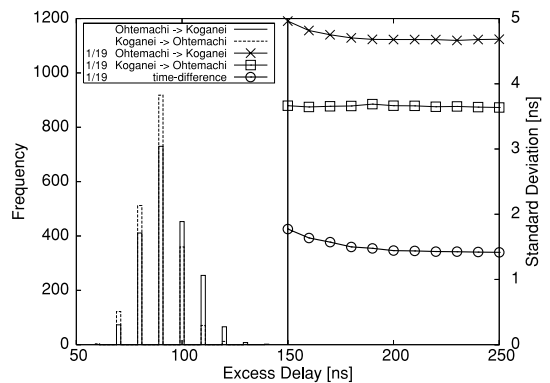
(a) Otemachi->Koganei (Cumulative mass fraction)



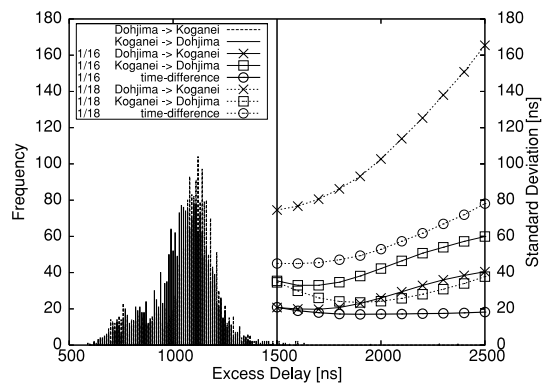
(b) Dojima->Koganei (Cumulative mass fractions)

図 4 遅延時間データの累積分布

Fig. 4 Cumulative mass fractions of measured excess delay data.



(a) Otemachi->Koganei



(b) Dojima->Koganei

図 5 最頻値遅延時間幅  $\Delta p$  と抽出遅延時間幅  $\Delta d$   
Fig. 5 Samples of calculated one-way delay data.

分布を示す．ここで点線が大手町から小金井に向けた経路，実線が小金井から大手町に向けた経路である．どちらの経路においても  $\Delta p = 90 \text{ ns}$  で度数が最大であることが分かる．

次いで最小値から最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  から，抽出する遅延時間幅  $\Delta d$  の最適値を求める．図 2 に一部示した 1 月 19 日の片側遅延時間データについて  $\Delta d = 150 \text{ ns}$  から  $\Delta d = 250 \text{ ns}$  まで最小値から遅延時間幅を変化させて抽出したデータの 1 日分の標準偏差を求めた．その結果を図 5 (a) の右側に示す．“x”印で示す結果が大手町から小金井に向けた経路の片側遅延時間 1 日分の標準偏差，“ ”印で示す結果が小金井から大手町に向けた経路の片側遅延時間 1 日分の標準偏差の結果である．この結果では，それぞれの原子時計のドリフト成分について考慮していないためドリフトの影響が重畳された結果となるが，相対的な標準偏差の大小の比較には影響がない．図 5 (a) から， $\Delta d = 170 \text{ ns}$  以上の場合，片側遅延時間の標準偏差はほぼ一定である．更に，“ ”印で示すのは，双方向の片側遅延時間データの差分データ，すなわち大手町の原子時計と小金井の UTC(NICT) の相対的な時刻差である．こちらの結果においても  $\Delta d = 180 \text{ ns}$  以上の場合，ほぼ一定である．これらの結果からクロストラヒックがほとんどない大手町-小金井間の場合， $\Delta d = 170 \text{ ns}$  以上，つまり  $\Delta p$  の 1.89 倍以上であれば安定した結果が得られる．

続いてクロストラヒックが激しい場合の例を図 5 (b) に示す．図 5 (b) の左側に堂島-小金井間における 10 分間の平均化時間内のデータ約 4 週間分，4,000 サンプルの最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  の度数分布を示す．ここで点線が堂島から小金井に向けた経路，実線が小金井から堂島に向けた経路である．この間のデータには，図 3 (b) の上部のポイント A のような遅延の広がり大きなものからポイント B のように比較的広がりの小さなものまで様々なデータがあるが，どちらの経路においても  $\Delta p$  は 1,000 ns から 1,200 ns の部分に集中しており， $\Delta p = 1,100 \text{ ns}$  で度数が最大である．

次に抽出する遅延時間幅  $\Delta d$  の最適値を求める．図 5 (a) と同様に，“x”印で示す結果が堂島から小金井に向けた経路の，“ ”印で示す結果が小金井から堂島に向けた経路の片側遅延時間 1 日分の標準偏差であり，“ ”印で示すのは，堂島の原子時計と小金井の UTC(NICT) の相対的な時刻差である．また各印を実線で結んであるデータは比較的クロストラヒック

が激しくない 1 月 16 日の結果であり，点線で結んであるデータは図 2~4 の (b) で示す非常にクロストラヒックの激しい 1 月 18 日の結果である．

1 月 18 日の堂島から小金井に向けた経路以外の片側遅延時間の標準偏差の結果からは  $\Delta d$  が 1,700 ns から 1,900 ns の区間で最も良い値が得られている．また 1 月 18 日の堂島から小金井に向けた経路の片側遅延時間の標準偏差の結果からクロストラヒックが激しい場合には  $\Delta d$  が 1,900 ns 以上になると急激に悪化することが分かる．

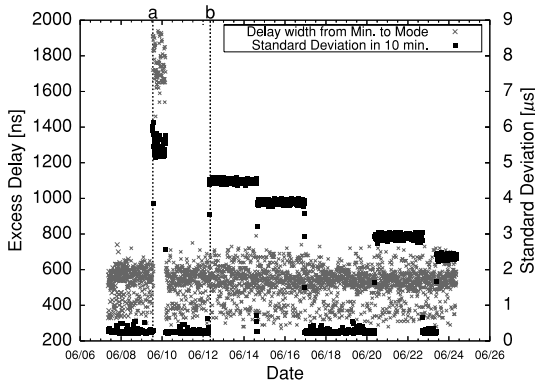
堂島の原子時計と小金井の UTC(NICT) の相対的な時刻差については，1 月 16 日の結果では  $\Delta d = 1,800 \text{ ns}$  以上で安定し，クロストラヒックが激しい 1 月 18 日の場合  $\Delta d = 1,900 \text{ ns}$  以上になると悪化する．これらの結果から，堂島-小金井間の遅延時間幅については  $\Delta d = 1,800 \sim 1,900 \text{ ns}$  ( $\Delta p$  の 1.64~1.73 倍) が適している．これはクロストラヒックが激しい場合には，図 3 (b) に見られるように bell shape の右すそ部分にはキューイング遅延による影響が現れているので， $\Delta d < \Delta p \times 2$  となることは妥当な結果である．

図 5 における双方の結果から，bell shape の部分を抽出する遅延時間幅  $\Delta d$  を求めるために，最初に測定対象である送受信間における 10 分間の平均化時間内の片側遅延時間データを数日間収集して最小値から最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  を決定する．次いで，クロストラヒックによる影響を考慮して， $\Delta p$  を 1.7 倍することによって抽出する遅延時間幅  $\Delta d$  の値とする．

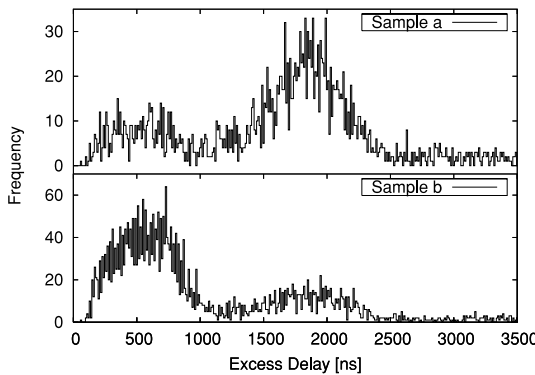
### 3.4 遅延時間幅のクロストラヒック特性

本節では遅延時間幅  $\Delta d$  のクロストラヒック特性を検証する．小金井-大手町間に専用回線と共用回線があることを利用して，小金井に Cs 原子時計を設置して大手町経由で小金井の UTC(NICT) と時刻比較を実施した．ここで，通信回線は小金井 [Cs]-(共用回線)-大手町-(専用回線)-小金井 [UTC(NICT)] となる．この際に，専用回線の片方向にクロストラヒックを発生させてクロストラヒックと遅延時間幅  $\Delta p$  との関係を実験した．測定結果を図 6 (a) に示す．

図 6 (a) の “x” 印は横軸の日時における最小値から最頻値までの遅延時間幅  $\Delta p$  であり，大きさを左側の縦軸で示す．図 6 (a) の “ ” 印は横軸の日時における 10 分間の片側遅延時間データ全体から求めた標準偏差であり，大きさを右側の縦軸で示し，クロストラヒックの激しさの指標となる．図 6 (a) の結果から，大きなクロストラヒックを発生させ，標準偏差が約  $5.5 \mu\text{s}$



(a) Delay width  $\Delta p$  and standard deviation



(b) Histograms of sample a and sample b

図 6 クロストラフィックを変化させた例  
Fig. 6 Dependency of cross-traffics.

以上ある場合には、遅延時間幅  $\Delta p$  は約  $1.7 \mu s$  程度の値となるが、標準偏差が  $4.5 \mu s$  以下の場合には、 $\Delta p$  は約  $600 \text{ ns}$  程度の値で一定である。すなわち、標準偏差が  $4.5 \mu s$  以下のクロストラフィックの場合には、bell shape の分布幅はほぼ一定である。

更にこの場合の度数分布を図 6 (b) に示す。図 6 (b) 上部は、標準偏差が約  $5.5 \mu s$ 、 $\Delta p$  が約  $1.7 \mu s$  の図 6 (a) の a 点における度数分布である。この前後の  $\Delta p$  が約  $1.7 \mu s$  の度数分布はほぼ同様な分布形状を示している。また、標準偏差が約  $4.5 \mu s$ 、 $\Delta p$  が約  $600 \text{ ns}$  の図 6 (a) の b 点における度数分布を図 6 (b) 下部に示す。bell shape の形状が二つ連続して生じ、クロストラフィックの量に対応して遅延の小さな bell から次の bell へと遷移していく。また、次の bell shape の方が分布幅が広がっている。

図 6 (b) の結果からクロストラフィックが激しくなると遅延時間幅  $\Delta d$  に対応する bell shape の形状が変

化するのではなく度数が変化し、bell shape の分布が複数となり、徐々に後方の分布に度数が移行していく。また、後方の分布ほど分布の幅が広がるものと考えられる。このため、クロストラフィックが激しい場合においては延帯域幅  $\Delta d$  の部分の総データ量が減少し、抽出されたデータから求めた値の信頼性が失われる。

以上の結果から、上記の方法で求めた遅延時間幅  $\Delta d$  は、クロストラフィックの量によらず通信路及び通信路を構成するハードウェアが変更しない限り有効である。ただしクロストラフィックが激しくなると、遅延時間幅  $\Delta d$  内に含まれるデータの数減少するため、データの信頼性が失われる可能性が大きい。

### 3.5 遅延時間データの抽出

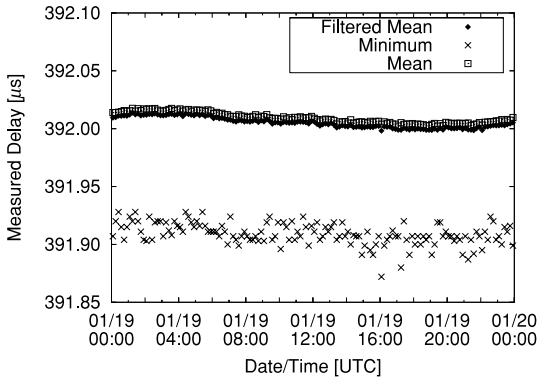
本節では遅延時間幅  $\Delta d$  を用いて遅延時間データを抽出する。遅延時間データの抽出方法であるが、取得したパケットのデータを 10 分ごとにソートして最小値  $t_{min}$  を求める。次いで  $t_{min}$  から  $t_{min} + \Delta d$  までのデータを抽出して平均値を求め標本区間の遅延時間データとする。このようにして求めた遅延時間データの例を図 7 に示す。図 7 のデータは図 2 で示した片側遅延時間データから算出した結果である。図 7 では比較対象として [8], [9] にあるように一般に用いられている区間最小値、及び全データ平均値も併せて表示している。

図 7 (a) からクロストラフィックがほとんどない場合、全データ平均値と抽出データ平均値はほぼ一致しており、区間最小値データよりも安定したデータとなる。図 7 (b) から、クロストラフィックが激しい場合、全データ平均値はキューイング遅延の影響で大きく変動するが、抽出データ平均値はかなり安定しており、クロストラフィックが激しい部分では区間最小値と同等程度、トラフィックが安定している部分では区間最小値よりも安定していることが分かる。

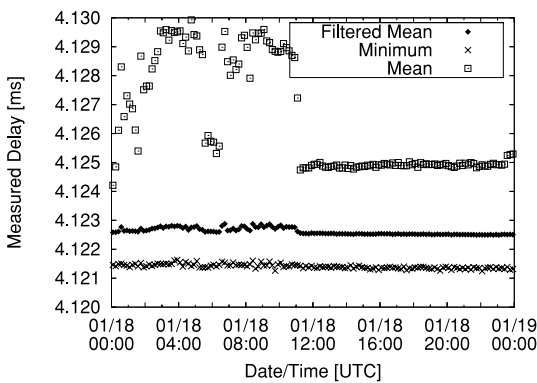
### 3.6 抽出データの平均値による時刻比較

次に、このようにして計算した片側遅延時間データを用いて 2 点間の時刻比較を行った結果を図 8 に示す。比較対象データは図 7 と同様に区間最小値及び全データ平均値である。図 8 の縦軸は、大手町及び堂島から小金井方向の片側遅延時間と小金井から大手町及び堂島方向の片側遅延時間の差分を 2 分の 1 にした値で、大手町及び堂島の原子時計から見た小金井の原子時計の相対時刻差を示している。

なお遅延時間データのクロストラフィックの影響を示す指標として 10 分間片側遅延時間データ全体から求



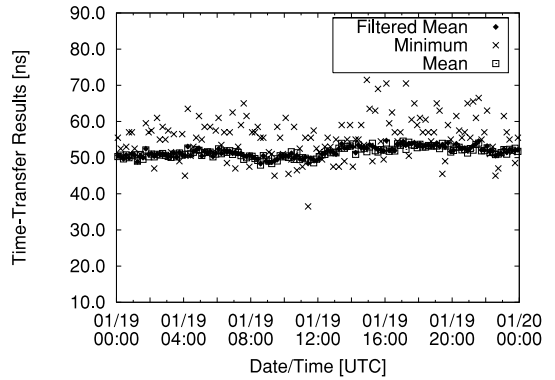
(a) Otemachi->Koganei



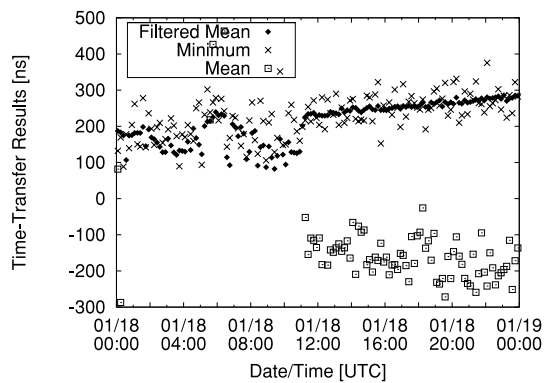
(b) Dojima->Koganei

図 7 計算した片側遅延時間データ例

Fig. 7 Samples of calculated one-way delay data.



(a) Otemachi-Koganei ( $\sigma \approx 40$  ns)



(b) Dojima-Koganei ( $\sigma \approx 2 \sim 4$   $\mu$ s)

図 8 2点間のネットワーク時刻比較例

Fig. 8 Samples of network time-transfer results.

めた標準偏差  $\sigma$  を併記する．また ns オーダの時刻比較となると原子時計同士の不規則な時刻差変動も無視できないため、データの分布範囲で精度を示す．

図 8(a) から非常に安定した通信路の場合 ( $\sigma \approx 40$  ns)，全データ平均値及び抽出データ平均値はほぼ一致しており、どちらも数 ns オーダでの時刻比較が可能である．区間最小値を用いる場合は、10~15 ns 程度のばらつきが生じる．図 8(b) においてクロストラヒックの激しい部分 ( $\sigma \approx 3 \sim 4$   $\mu$ s) では全データ平均値は図 8 の表示範囲に収まりきれない．このときのデータの広がりには 200 ns 程度であるが、計測結果が区間最小値や抽出データ平均値の結果から 2~3  $\mu$ s のオフセットが生じており実用的な計測結果ではない．これに対し、抽出データ平均値及び区間最小値は 100~200 ns の範囲内で推定できている．

更にクロストラヒックが小さな部分 ( $\sigma \approx 2$   $\mu$ s) においては区間最小値は 100 ns 程度の広がりがあるのに

対し、抽出データ平均値は 10~20 ns 程度の精度で計測可能となる．ここで、図 8(b) の結果からクロストラヒックが小さな部分 ( $\sigma \approx 2$   $\mu$ s) において全データ平均値では幅 200 ns 程度の計測精度を得ることができるが、区間最小値及び抽出データ平均値と比較して 400 ns のオフセットが生じている．全データ平均値におけるオフセットの原因は、キューイング遅延の影響が堂島から小金井に向けたパケットの場合と小金井から堂島に向けたパケットの場合で異なることから生じた誤差によるものと考えられる．

更に遅延時間データの標準偏差と計測精度との関係を調べるため、大手町-小金井間で共用回線を使用した場合 ( $\sigma \approx 200$  ns) の時刻比較結果と JGNII 東京-大阪間の回線で動画の伝送実験が行われていたとき ( $\sigma \approx 10$   $\mu$ s) の時刻比較結果を同様な方法で求めた．

$\sigma \approx 200$  ns の場合、抽出データ平均値は 10 ns 程度



表 1 標準偏差と計測精度の関係  
Table 1 Compare SD with data accuracy.

SD	Filtered Mean	Mean	Minimum
40 ns	数 ns	数 ns	10 ~ 15 ns
200 ns	10 ns	20 ns	40 ~ 50 ns
2 $\mu$ s	10 ~ 20 ns	200 ns (offset -400 ns)	100 ns
3 ~ 4 $\mu$ s	100 ~ 200 ns	200 ns (offset -2 $\mu$ s)	100 ~ 200 ns
10 $\mu$ s	100 ~ 200 ns	1 $\mu$ s (offset -3 $\mu$ s)	200 ns

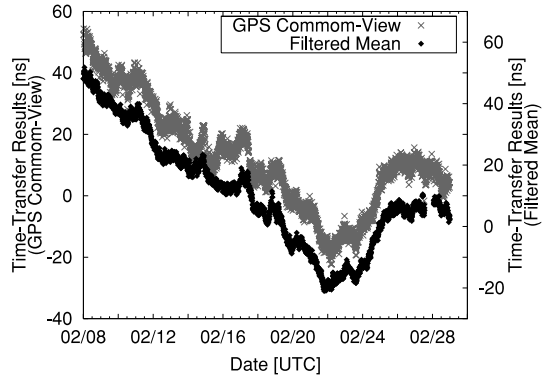
の精度, 全データ平均値は 20 ns 程度の精度, 区間最小値は 40 ~ 50 ns 程度の精度であった。また,  $\sigma \approx 10 \mu$ s の場合, 抽出データ平均値は 100 ~ 200 ns 程度の精度, 最小値は 200 ns 程度の精度であった。このとき, 全データ平均値は 1  $\mu$ s の計測精度を得ることはできるが計測結果に 3  $\mu$ s 程度のオフセットが生じておりやはり実用的な値にならなかった。

これらの標準偏差と計測精度の関係を表 1 にまとめる。表 1 から区間最小値は算出が容易な上に比較的精度が高く安定した結果が得られる。全データ平均値はトラヒックが少ない場合は, 最小値よりも高い精度であるが, トラヒックが増大するにつれて精度が悪化しクロストラヒックが大きい場合はキューイング遅延による大きな遅延時間に影響されて実用的ではない。これに対し, 抽出データ平均値は, 今回比較したすべてのトラヒック状態において最高の計測精度を示した。特に, 標準偏差が 200 ns 程度までは 10 ns 以下の非常に高い精度が期待できる。

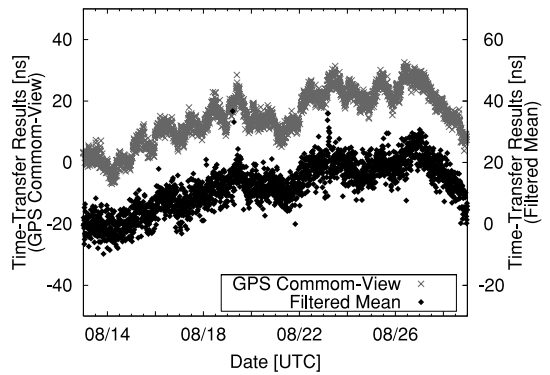
以上の結果から, 専用回線など非常に安定し, かつ GbE 以上の高速なネットワーク回線を利用できる場合, 今回提案した抽出データ平均値を用いる手法では 10 ns 以下の計測精度が可能となり, GPS コモンビュー方式に匹敵する性能が期待できる。

#### 4. GPS コモンビュー方式との比較

最後に時刻比較の正確さを確認するために, GPS コモンビュー方式と抽出データ平均値との比較を行う。GPS コモンビュー方式を用いた時刻比較システムは大手町にのみ設置してあるので, 比較対象は標準偏差 40 ns の場合と 200 ns の場合のみである。また比較対象の GPS コモンビュー方式のデータについてもコモンビューの両局からとも高度 60 度以上の GPS 衛星のデータのみを使用したため, 計測精度は 10 ns 以下の高精度である。



(a)  $\sigma \approx 40$  ns



(b)  $\sigma \approx 200$  ns

図 9 GPS コモンビュー方式との比較

Fig. 9 Compare GPS common-view with filtered mean.

比較結果を図 9 に示す。図 9 の縦軸は, 大手町の原子時計から見た小金井の原子時計の相対時刻差を示している。図 9 (a) は標準偏差 40 ns の場合の比較結果である。比較のため, 10 ns ずらした状態で表示している。図 9 (a) ではネットワーク時刻比較の計測結果は GPS コモンビュー方式の結果と一致しており正確さに問題はない。また測定精度の面ではネットワーク時刻比較の方が GPS コモンビュー方式よりも計測データのばらつきが小さい。

図 9 (b) は標準偏差 200 ns の場合の比較結果である。図 9 (b) では 20 ns ずらした状態で表示している。計測データの正確さについては問題ないがばらつきについては 10 ns 程度であり高精度な GPS コモンビュー方式よりもばらつきが大きい。しかし高度 30 度以上の GPS 衛星を用いた GPS コモンビュー方式の結果とは同程度のばらつきである。今回の GPS コモンビュー方式では小金井-大手町間が 25 km 程度なので高度 60 度以上のコモンビューデータが 1 日当り 110 ~ 130 個

取得できる。しかし、受信地点間の距離が大きくなると双方とも高度 60 度以上の衛星を一定数以上確保することが困難となるため、高度 30 度以上のデータも使用する必要がある。一方ネットワーク時刻比較システムでは通信距離に関係なく常に 10 分間データを取得できること及び計測の 10 分後から時刻比較データを利用できることなどを考慮すると図 9(b) のばらつきが 10 ns 程度の計測データであっても原子時計の時刻比較に十分利用できる。

次に、図 6 の場合と同様に小金井の Cs 原子時計に GPS 受信機を設置して大手町経由で小金井の UTC(NICT) と時刻比較を実施した。このときに標準偏差が  $2.2 \mu\text{s}$  となるようクロストラヒックを発生させた。比較結果を図 10 に示す。図 10 も図 9(b) と同様に、横軸が日付、縦軸はそれぞれの方法による相対時刻差で 20 ns ずらした状態で表示している。図 10 の場合、GPS コモンビュー方式の方は、GPS 受信アンテナの設置場所が近接しているため電離層による影響がキャンセルされてデータのばらつきが非常に少ない。一方、ネットワーク時刻比較の方の計測結果は、標準偏差が  $2.2 \mu\text{s}$  であるが、ばらつきは 10 ns 程度で表 1 の結果を実証している。また、全体の傾向もよく一致しており、原子時計同士の時刻差を再現している。

図 10 の結果から、10 分間片側遅延時間データ全体から求めた標準偏差が  $2 \mu\text{s}$  程度の場合であっても、表 1 で示すように 10 ~ 20 ns 程度のばらつきで時刻比較ができると思われるが、このような回線状態についてはもっと長期間の測定で検証する必要がある。

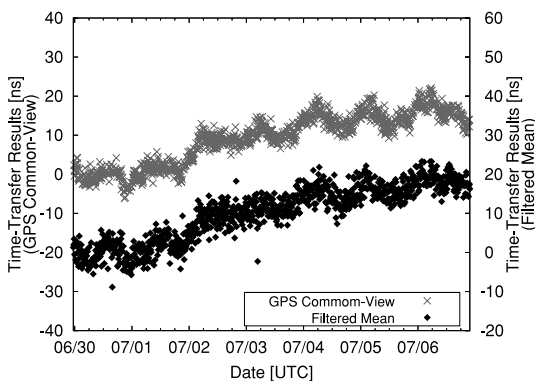


図 10 標準偏差が大きい場合の比較結果 ( $\sigma \approx 2.2 \mu\text{s}$ )  
Fig. 10 Compare GPS common-view with filtered mean. ( $\sigma \approx 2.2 \mu\text{s}$ )

## 5. む す び

本論文では高速ネットワーク回線を利用して Stratum1 サーバ及びパケット送・受信機にハードウェア SNTP ボードを用いたネットワーク時刻比較システムの原子時計の時刻比較への利用可能性について、GPS コモンビュー方式と比較して検討した。

その結果 GbE 以上の高速ネットワーク回線を利用することで高精度な遅延時間測定を行うことができ、またトラヒックの影響が少ない部分のデータを抽出して平均値をとることにより高精度な時刻比較が可能であることを示した。更に GPS コモンビュー方式の計測データと比較することで片側遅延時間測定データ全体の標準偏差が  $2 \mu\text{s}$  程度の場合であっても、10 ~ 20 ns 程度のばらつきで時刻比較ができ、標準偏差が 200 ns 以下であれば計測データのばらつきが 10 ns 以下で十分実用的なシステムとなること、また標準偏差が 40 ns 以下の専用回線を用いることで GPS コモンビュー方式以上の計測結果を取得できることを示した。

本ネットワーク時刻比較システムは測定後 10 分で計測値を算出できるため、リアルタイムに近い形で時刻比較が可能となり、よりきめ細かな時刻同期システムを構築することが可能となる。ただし高精度な計測結果を得るためにはあらかじめ原子時計の初期値を正しく合わせてあること、及びハードウェアを含めた通信路の状態が普遍であることが前提である。通信路の状態が変化した場合は再度最小値から抽出する遅延時間幅  $\Delta d$  を計算し直す必要がある。また通信路の状態が変化すると、片側遅延時間に不連続な時間ずれが生じるのでこれに対する対策も必要となる。今後はこれら通信路の状態が変化した場合についても対応できる仕組みについて検討を進める必要がある。

謝辞 本論文を執筆するにあたって、様々な御指導・御助言を頂きました電気通信大学情報システム学研究所伊藤秀一教授及び岡田和則助教授に感謝致します。

## 文 献

- [1] 総務省報道資料, “タイムビジネスにかかわる指針(ネットワークの安心な利用と電子データの安全な長期保存のための)の策定” 総務省, Nov. 2004.
- [2] Bureau International des Poids et Mesures, “Annual Report of the BIPM Time Section (2003),” Bureau International des Poids et Mesures, 2004.
- [3] 町澤朗彦, 鳥山裕史, 岩間 司, 金子明弘, “通過型高精度 UDP タイムスタンプの開発,” 信学論(B), vol. J88-B, no.10, pp.2002-2011, Oct. 2005.
- [4] 鳥山裕史, 町澤朗彦, 岩間 司, 金子明弘, “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；信学技報，IA2004-24，Jan. 2005.

- [5] 金子明弘，岩間 司，町澤朗彦，鳥山裕史，“ネットワークによる時刻比較”；2005 信学総大，B-16-1，March 2005.
- [6] 岩間 司，金子明弘，町澤朗彦，鳥山裕史，“インターネット環境における遅延時間の統計処理”；2005 信学総大，B-16-2，March 2005.
- [7] 鳥山裕史，町澤朗彦，岩間 司，金子明弘，“ハードウェア SNTP サーバの開発”；信学技報，CQ2005-12，April 2005.
- [8] V. Paxson, “On calibrating measurements of packet transit times,” Proc. ACM SIGMETRICS 1998, pp.11–21, 1998.
- [9] S.B. Moon, P. Skelly, and D.F. Towsley, “Estimaion and removal of clock skew from network measurements,” Proc. IEEE INFOCOM '99, pp.227–234, New York, 1999.

(平成 18 年 3 月 22 日受付，7 月 14 日再受付)



鳥山 裕史 (正員)

昭 58 名大大学院情報工学専攻博士課程前期課程了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。平 2~5 ATR 通信システム研究所。平 5~6 ドイツテレコム研究所客員研究員。画像符号化，情報通信などの研究に従事。



岩間 司 (正員)

昭 58 山梨大・工・電子卒。昭 60 東工大大学院修士課程了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。以来，電波伝搬特性解析，移動通信のセル構成，標準時，時刻認証基盤技術の研究に従事。現在，電磁波計測部門タイムアプリケーショングループ主任研究員。平 2 本会篠原記念学術奨励賞受賞。IEEE 会員。



金子 明弘 (正員)

昭 57 昭和第一工業高・電気卒。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。以来，VLBI，時刻比較，周波数標準等の研究に従事。



町澤 朗彦 (正員)

昭 59 上智大・理工・電気電子卒。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。平 6 科学技術庁に出向し，IMnet 立上げに参与。平 8~11 Univ. Canterbury 客員研究員。平 15 JGN2 立上げに参与。画像の高効率符号化，視覚情報処理，計算機ネットワークの研究に従事。日本認知科学会会員。