

# 高精度時刻サーバの開発 — 10 ギガビットネットワーク時代の計測技術 —

中川 晋一 町澤 朗彦 鳥山 裕史 岩間 司

(独) 情報通信研究機構 新世代ネットワーク研究センター

## ギガビットネットワーク計測ということ

今世紀初頭 (というには少し早い) が、「次世代情報通信基盤の開拓」という題目で、研究開発用ギガビットネットワーク (JGN) を用いた次世代ネットワーク技術の研究を行っていたころのことである。デジタルビデオ動画像伝送を用いた IP マルチキャスト<sup>1)</sup> や、インターネットコントロールカーをモデルとした遠隔操作の実用化、IPv6 を実用化した KAME<sup>☆1</sup> を後押しして世に出す少し前。

とても静かで地味な東京大手町の某会議室で、JGN と実験インターネットである WIDE との相互接続のトポロジを決めるミーティングを行っていた (図-1)。ネットワークの相互接続についての要件定義は、レイヤの下から行う。レイヤ3 までの相互接続の場合、お互いのルーティング情報を交換するための中立的なレイヤ3 セグメント (小さな相互接続用のネットワーク) を作成する。このときも、回線の敷設状態 (物理的な防火壁を通してもらったこともあった) を含めた調達済みの割り当て帯域の確認、ATM スイッチの設定、ルータの設定、DNS と淡々と進んできた。図-1 は、当時の JGN (左下) と、WIDE をはじめとする実験ネットワーク (右上) が、約 300 メートル離れた 2 つのビルに別々に存在し、これらを接続するためにさまざまな回線やネットワーク機材を設置した様子を示している。OC12 とは ATM ネットワークとしては単一の SDH 網として提供可能な限界値であった 622Mbps を示している。突如 T 大学の K 先生が飄々とした口調で話し始めた。

「時計 (インターネットの分身である彼にとって時計とはもちろん NTP である) は、通信総合研究所 (当時の NICT の名称) が日本標準時を配信するってくらいだから、やっぱここは何かするよね?」<sup>☆2</sup> 「まあ、標準時に合やすかどうかは別として、NTP くらいなら最近 Trimble 社の GPS 受信装置もあるので、アンテナさえ何とかすれば、たとえば、K 社ビルの屋上とかに置いてラックまで何とかすればいいんじゃない?」「あ、そか、どれくらいの精度が出るか分からないけど、やってみるか」。これくらいの軽い会話だった。

インターネット伝送品質を研究しようとしていた我々のグループでも「JGN の伝送遅延を計測する」ために、図-2 (a) に示すような計測実験を予定していたところでもあり、「K ビル屋上に GPS アンテナを設置」という計画は持っていた。たとえば、東京と小倉の 2 カ所に Stratum 1 を設置し、この 2 つのポイント間での伝送遅延を計測すれば、JGN の伝送遅延を計測できるだろう、という考えだった。図-2 (b) に示すように、大手町の K 社ビル屋上にアンテナを設置、ケーブルを XX 階 (セキュリティの問題もあり、明確に申し上げることは

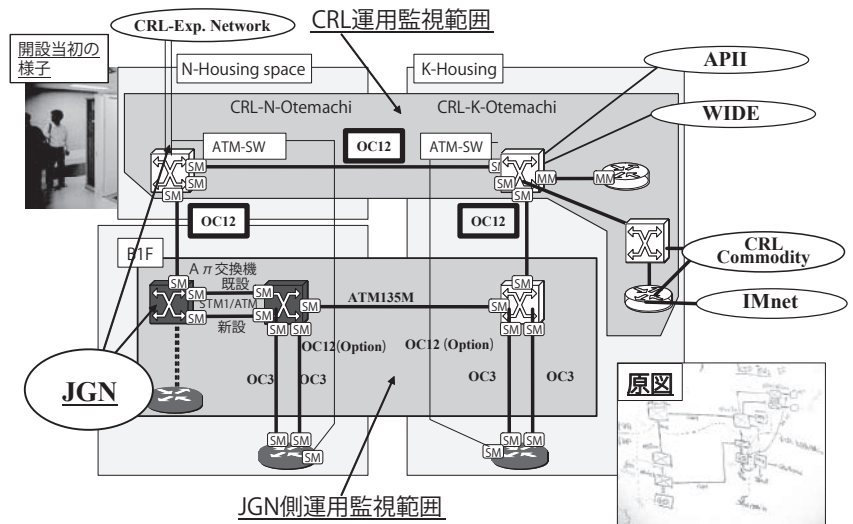
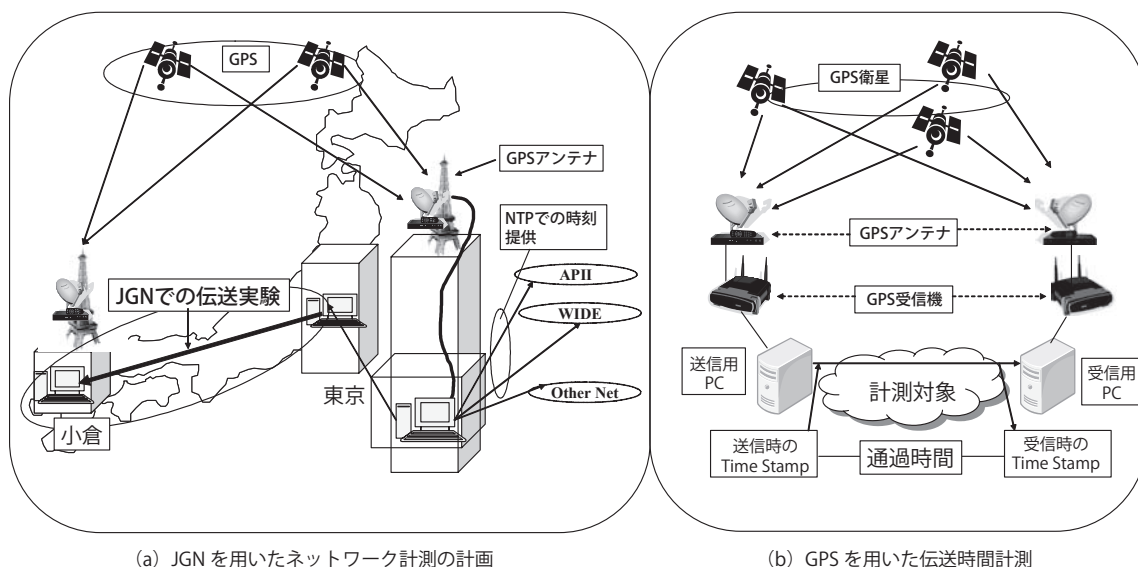


図-1 1999年のJGNと我が国の実験ネットワークの接続案(検討過程)

☆1 本誌 2008 年 3 月号を参照されたい。

☆2 「そんなこと、縦割りのお役所でできるはずないけど一応言っておこう」という彼一流の小粒だがピリッとくる一言。時々気を失ったふりして無視しないと宿題だけで破滅する。



(a) JGN を用いたネットワーク計測の計画

(b) GPS を用いた伝送時間計測

図-2 計画当初の超高速ネットワーク伝送時間計測の実験計画案

できない) のハウジングスペースに引くことにした。ここに GPS 受信機を設置し、PC で NTP サーバをあげて Stratum 1 として稼働させることになった。

この 1990 年代後半から 2000 年代初頭の時期は、インターネットの通信路の伝送帯域が kbit/s から Mbit/s へ、さらに Gbit/s へと急激に変化した時代であった。パケットロスと遅延ジッタの事前予測による伝送効率の向上を目的として、インターネットトラフィックの特性解析を行おうとしているところだった。V. Paxson らによって始められたネットワーク伝送時間の解析は、今日の CAIDA、鶴らの Internet tomography や村田らのバックボートトラフィックのべき乗性等の成果につながっていくが、まだまだ黎明期だった。途中経路のスイッチの混雑(Congestion)を伝送時間の増加から推定するために、どの程度の時刻粒度(時刻同期の最低単位のオーダがミリ秒では不十分だろうか、マイクロ秒あるいはナノ秒までを必要とするのかどうか)かを模索しているところだった。我々の見積もりは、大体 100Mbit/s のイーサネットスイッチ 1 個の伝送遅延がスイッチのスペックから 100 マイクロ秒程度と予測できることから、途中経路の混雑を予測するためには多分 10 マイクロ秒、できれば 1 マイクロ秒の時刻同期ができればよいだろうと考えた。Stratum 1 でのこの精度の実現は後述するように実は大変困難だったのだが、「GPS の時刻精度がナノ秒までいけるだろう」などの甘い見積もりで機材の設置を行うこととなった。

ここで、まず難関に直面した。図-2 (b) に示すように、この計測系は GPS のアンテナ、GPS 受信機、Stratum 1 用の PC サーバからなる。実際の機材の設置を行おうとしたビルでは、屋上からさらに上層の鉄塔があり、ここに GPS のアンテナを設置するが、屋上から鉄塔までの

管路長が約 100 メートル、屋上からハウジングスペースまでの管路長は、約 300 メートルであることが判明した。合計 400 メートルである。ここを同軸ケーブル 1 本で受信した GPS 信号を伝送する必要がある。さらに、ケーブルの電気抵抗のために、間に信号増幅用のアンプを入れる必要も出てくる。合計管路長約 400 メートル、同軸ケーブルの電気信号の伝搬速度を約 20 万キロメートル/秒とすると、400 メートルもあると 2 マイクロ秒もかかってしまう。このため、まったく予想外のビル最上階でのハウジング増設をお願いすることになった。ここでも管路長約 200 メートルだったが下まで行くよりはずっと短い。GPS で時刻同期すればネットワーク計測なんて簡単だろう、と言っていた目論見はとても甘かったことを知らされたのである。

### 遅延と時計はコインの表裏

さて、ネットワークの性能指標 (IPPM : IP Performance Metrics) となるネットワーク遅延はパケットの送信時刻と受信時刻の差であるが、送信時のタイムスタンプは送信側の時計で打刻し、受信時のタイムスタンプは送信側の時計で打刻するため、実際の遅延時間のほかに送信側と受信側の時計の誤差(時刻差)も含んでしまう。そこで、この遅延時間を疑似遅延 (Pseudo-delay) PD と呼ぶことにする<sup>☆3</sup>。

$$PD = t^R - t^T = d + e$$

ただし、 $t^R$  は受信側の時計での受信時刻、 $t^T$  は送信側の時計での送信時刻である。また、 $d$  は実際の遅延時間、 $e$  は受信側の時計と送信側の時計との時刻差である。

<sup>☆3</sup> GPS で用いられる疑似距離 (Pseudo-range) からのアナロジーである。

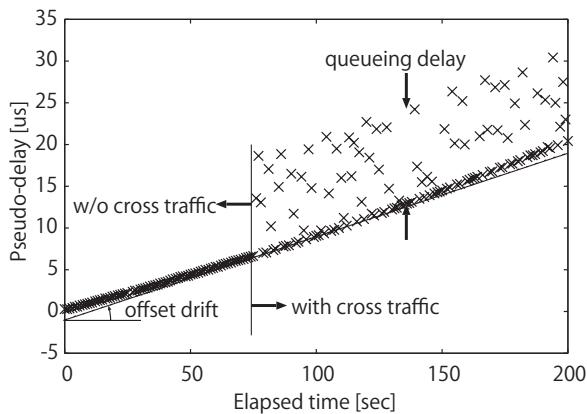


図-3 疑似遅延とクロックレート

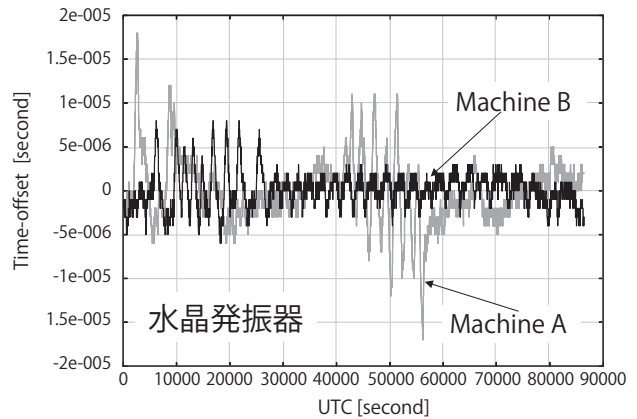


図-5 PC 内部クロックの長期安定度の比較

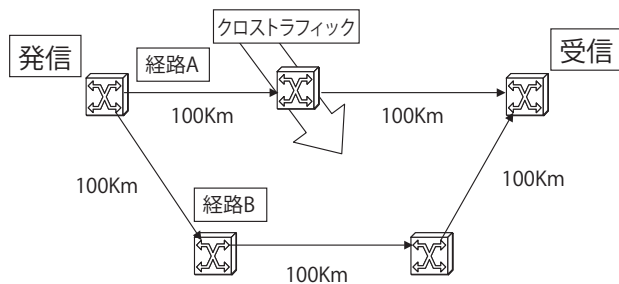


図-4 クロストラフィックにより経路が迂回されている例

図-3 に疑似遅延の計測例を示す。送信側の時計と受信側の時計の進む速さ(クロックレート)が等しくないため、徐々に疑似遅延が増加していることが分かる。図-3 では、クロックレートの差は 0.1ppm 程度であるが、通常のパーソナルコンピュータは数十 ppm ほどの誤差を持っているため、疑似遅延のオフセットドリフトは、あっという間にミリ秒に達する。また、図-3 では、計測開始より 70 秒後付近より、正方向にキューイング遅延が見られる。キューイング遅延とオフセットドリフトの両者の存在が遅延時間計測と時刻同期の課題となっている。ここで、観測値 PD が得られたときに、時刻差  $e$  が既知であれば、遅延時間  $d$  は一意に定まり、逆に、遅延時間  $d$  が既知であれば、時刻差  $e$  を求めることができる。このように、遅延時間と時計はコインの表裏の関係にあり、ネットワーク計測では時刻同期が重要となる。

### 超高速ネットワーク伝送遅延計測の課題

先に述べたように、伝送速度が kbit/s, Mbit/s, Gbit/s と 1000 倍ずつ増加するという事は、伝搬するパケットの伝送速度も増加する。JGN のようなネットワークの場合、途中経路にさまざまなスイッチが介在するが、同じ長さのパケットを伝送する場合、それぞれのスイッチングノードにおける滞留時間が 1000 分の 1 ずつになることも意味している。たとえば、図-4 に示すように、

発信から受信に対して、経路 A で送信しているものをクロストラフィックが大きくなり、経路 A が輻輳を起こす前に、経路 B に迂回したいというような制御を行いたいとすれば、発信-受信の間で、クロストラフィックによるスイッチでのキューイング遅延を検知する必要がある。イーサネットの場合メディアが 100Mbps では、このようなキューイング遅延 1 回について最大 120 マイクロ秒、ギガビットイーサネットの場合は最大 12 マイクロ秒、10 ギガビットイーサネットの場合、最大 1.2 マイクロ秒程度である。これらの通過パケットの伝送時間から途中経路のキューイング遅延を検知することで、本例のような迂回を行いたい場合、ギガビット級ネットワークでは、1 マイクロ秒オーダでの伝送遅延の検出が必要になる。このような条件で GPS から得られる時刻精度が、計測対象の時間間隔と同程度で見込まなければならないのは問題である。さらに、通常使用している Linux-OS はどの程度の時刻精度で稼働しているかも調べる必要がある。問題は山積みであった。

### 高精度 PC の開発に向けて

そこで、オペレーティングシステムの動作精度を測定するために、若干 Linux オタクであった上司を説得しセシウム原子時計を購入、1PPS を入力として、PC の内部時計のドリフト(時計のずれ)を長時間計測した。図-5 がそれである。±10 マイクロ秒で変動するマシン A に比べて、マシン B は 5 マイクロ秒以内の変動である。この実験からギガビットクラスのネットワークのキューイング遅延(目標精度 1 マイクロ秒)を検出するには、通常の PC の動作精度では不可能なことが分かる。そこで、PC そのものの内部時計を高精度化する必要があることが判明した。通常、PC の CPU は 2~3GHz で動作しているが、おもとの発振器はたった数十円の水晶発振子である。しかし、この水晶発振子の周波数は温度変動が

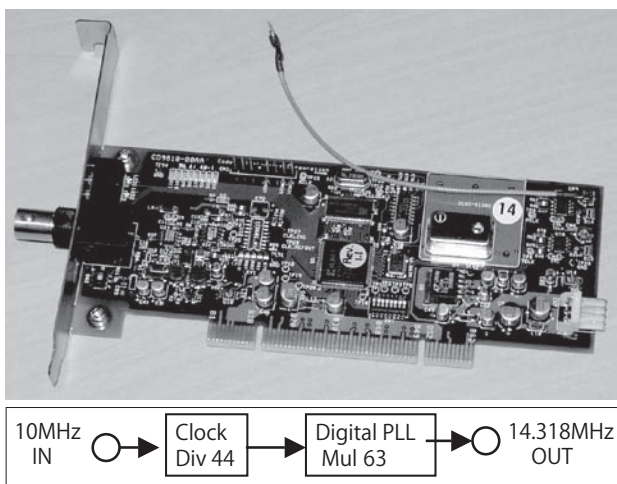


図-6 基準信号入力ボード

激しく、PC自身の発熱や周囲の温度変動で大きく変動してしまう。上司に相談したところ、「恒温槽に入れるしかないんじゃない？」という意見もあったが、まさかPCを恒温槽に入れて持って歩けるわけではない。そこでまず、オシレータを入れ替えてドリフトが変化するかどうかを調べてみるようになった。図-6に示す周波数変換ボードを開発し、セシウム原子時計の10MHz基準信号を14.318MHzに変換し、PCのマザーボードに搭載されている水晶発振子の代わりに駆動してやれば、という行き当たりばったりである。図-7をご覧ください。だから研究は止められぬ。恒温槽などに入れることもなく、同じカーネルでセシウム原子時計を導入した右では、ドリフトの変動幅が長期安定度で1マイクロ秒以内を達成したのである。それまで通説とされてきたPCの内部クロックは温度管理が大変困難であり恒温槽に入れて温度安定にしなければならないとされた常識を修正した<sup>2)</sup>。

さらに、Linuxのカーネルを改造し、割り込みハンドラでタイムスタンプを打刻することによって、パケット受信時刻をサブマイクロ秒で取得することができるように

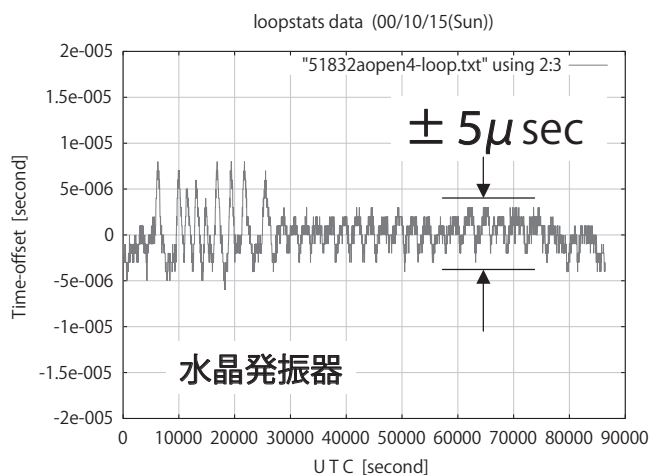


図-7 セシウム原子時計発振によるPC内部クロックの安定化

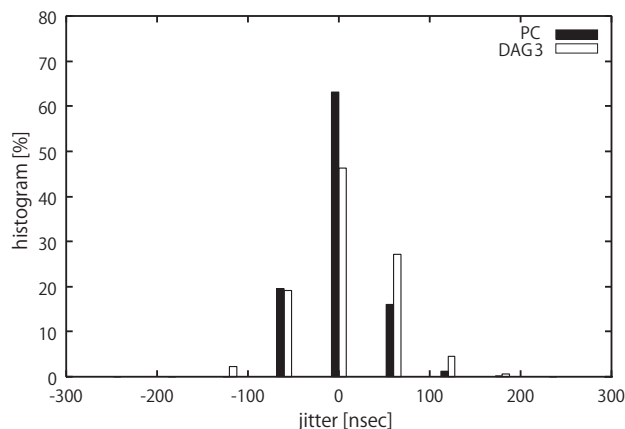
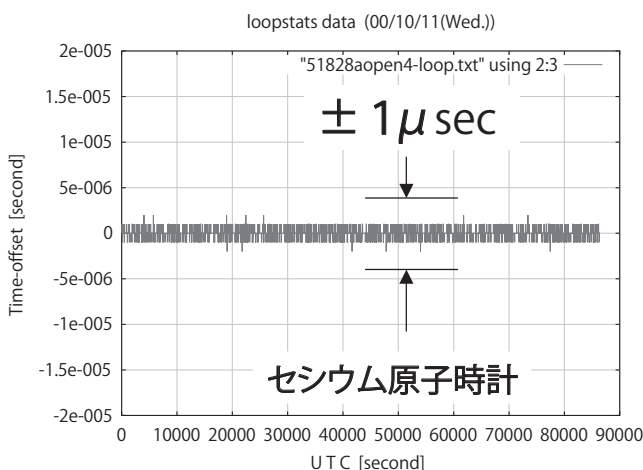


図-8 専用ハードウェアを超える高精度なソフトウェアタイムスタンプ

なった。その精度は専用ハードウェアシステム(DAG3)と並ぶ(図-8)。セシウム原子時計を使えば、長期にわたって(約1年)マイクロ秒程度の精度が得られる。しかし、高精度な時刻同期手法を開発し、TCXOでもマイクロ秒精度を維持できることが判明した。そこで、我々は、京セラ(株)の発振器部門(現京セラキンセキ(株))と富士通(株)と協力し、PC用温度補償型水晶(TCXO: Temperature Compensated Xtal Oscillator)を搭載したPCを作製し(図-9)、このようなわずかの改造でPCの時刻精度が改善されることを確認した。

### 超高速ネットワーク研究用デバイス

PCによるソフトウェアタイムスタンプでも、ネットワークの速度が100Mbpsくらいであれば、十分な精度を実現できることが分かったが、ギガビットイーサネット、あるいはさらに高速な10ギガビットイーサネットなどのような高速ネットワークでパケット1つ1つに対して割り込み処理でタイムスタンプを打刻すると、割込



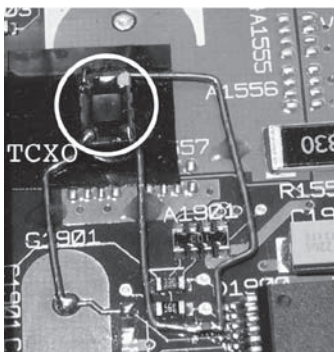


図-9 温度補償型水晶 (TCXO) 駆動 PC

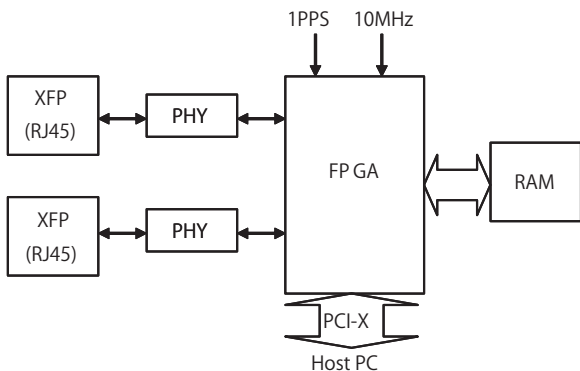
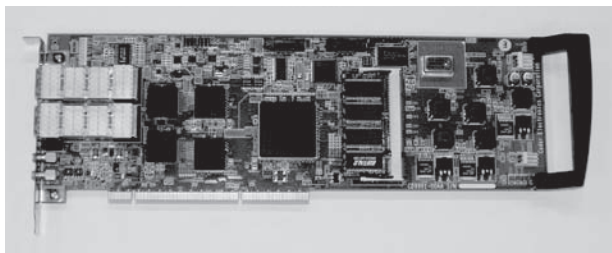


図-10 VHNM : Versatile High-speed Network Module の概観

みマスクの影響で、連続して到着するパケット (packet train) に対してはタイムスタンプ精度が低下してしまう。

このように高速ネットワークでは PC による計測の限界が露になってくるため、**図-10** に示す専用ハードウェア (VHNM : Versatile High-speed Network Module) を開発した<sup>3)</sup>。本ハードウェアは、ネットワークポート (XFP あるいは 1000Base-T) を 2 口有し、外部より 10MHz と 1PPS の基準信号を入力する。また、RAM を 2 ギガバイト有しており、タイムスタンプのほかに、10Gbps までのワイヤレートでパケットのキャプチャおよび発生を可能とする。さらに、機能はすべて FPGA により構成されているため、自由に機能の改造や付加が可能であり、後述の時刻サーバの試作などでも活躍している。

## 超高速ネットワークの計測

### ネットワーク帯域の推定<sup>7)</sup>

回線速度(帯域)を知りたい場合に使うのが帯域推定技術である。サンプルファイルを送って平均速度を求めた

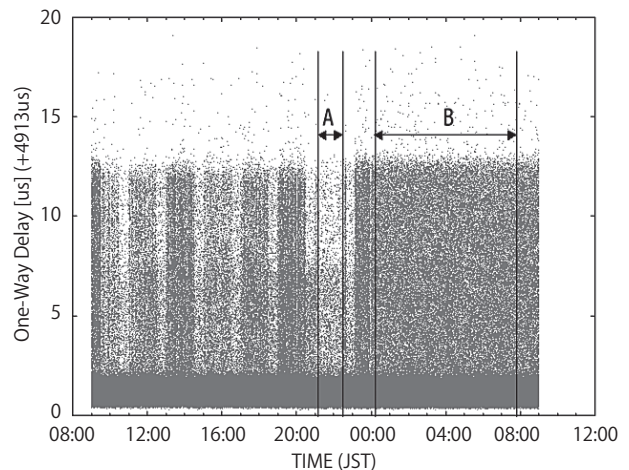


図-11 VHNM による片方向遅延計測例

のでは、空き帯域を測っているだけで、実際の回線速度を測ることはできないし、また、無意味なサンプルファイルを送って空き帯域を埋めてしまえば他の利用者の邪魔となってしまう。そこで、パケットサイズの違いによるバッファリング時間の変化を利用する。一般のネットワークスイッチやルータでは、ストア・アンド・フォワードと呼ばれる転送方式が使われており、パケットの末尾まですべてがバッファに収まってから転送する。このバッファリングの速さは回線速度に等しく、バッファリングに要する時間は、パケットサイズ  $S$  に比例し、回線速度  $W$  に反比例するため、伝搬遅延  $D$  を加えたネットワーク遅延  $T$  は  $T = S / W + D$  と表すことができる。つまり、長短 2 つの長さ ( $S_1, S_2$ ) のパケットのバッファリング時間 ( $T_1, T_2$ ) の差から、次式のように回線速度を推定することができる。

$$W = (S_1 - S_2) / (T_1 - T_2)$$

MTU サイズを 1500 バイトとすると、1000Base-T におけるバッファリング時間は高々 12 マイクロ秒であるため、遅延時間の計測にはサブマイクロ秒の精度を必要とする。

### 空き帯域の推定

回線速度に対して、実際に使われているトラフィックが分かれば、空き帯域を推定することができる。NICT が研究用に提供している JGN2plus の小金井 (東京都) と堂島 (大阪府) 10Gbps との間の片方向遅延を VHNM を用いて計測した (**図-11**)。また、経路上の大手町に設置している L2 スイッチの負荷グラフも合わせて示す (**図-12**)。トラフィックの増加と遅延時間の増大がきれいに対応していることが分かる。図-11 中の区間 A および B について、遅延時間のヒストグラムを作成した (**図-13**)。トラフィック増加に伴うキューイングの発生が、遅延時間の変化となって表れている。ヒストグラム

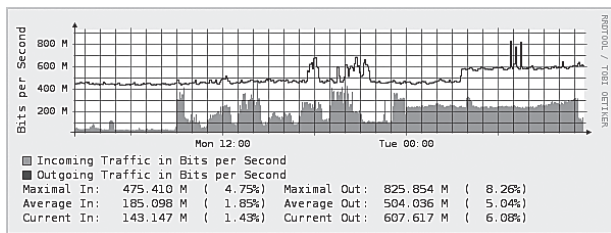


図-12 図-11と同一時刻帯を含む期間の経路ルータ負荷グラフ (JGN2plus ネットワークオペレーションセンター提供)

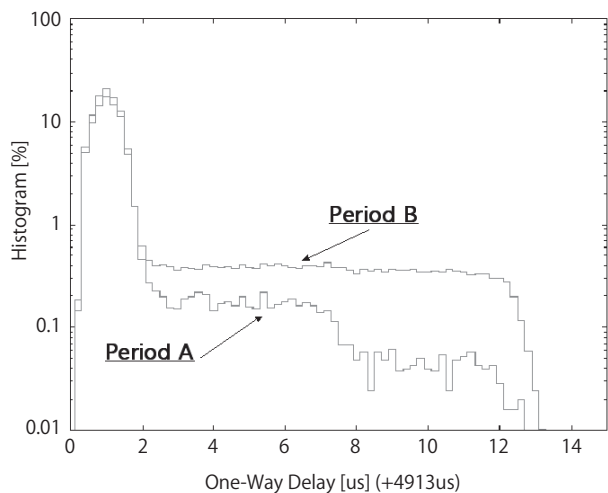


図-13 遅延ヒストグラム

左側の山はキューイングを受けずにネットワークを通過できたパケットの比率であるので、空き帯域に相等する。

### 通過型タイムスタンプ

VHNM を用いたタイムスタンプの特徴の1つとして、複数のVHNMをネットワークに縦列に挿入し、通過するパケットにタイムスタンプを挿入することができる(図-14)。通常のE2E計測では、途中のネットワークはまったくのブラックボックスであり、複数区間の状態が絡み合って複雑な様相を呈している。そこで、このような通過型タイムスタンプ(PUTS: Passing through UDP Time-Stamper)が各リンクに設置してあれば、各区間の挙動を把握することができる。いわば、X線撮影における造影剤のようなものである。

実際に運用されているネットワークの途中で、通過型タイムスタンプ装置を挟み込むことは、信頼性を損ねる

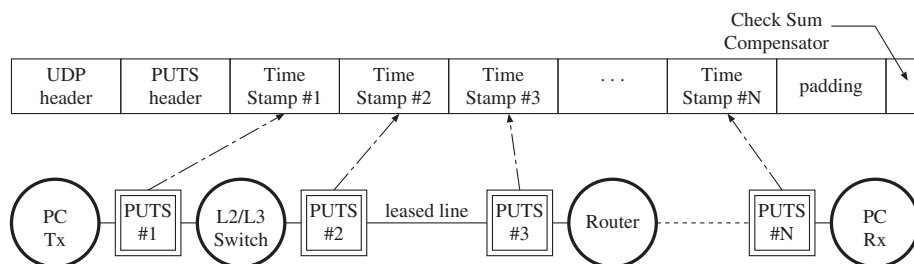


図-14 通過型タイムスタンプ(PUTS: Passing through UDP Time-Stamper)を用いたネットワーク計測の概念

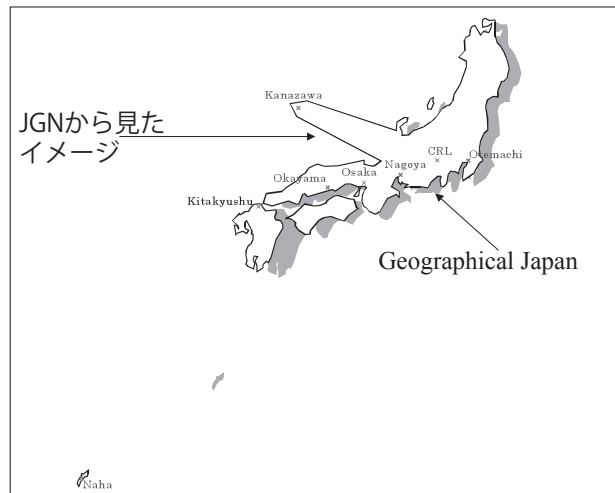


図-15 JGN 遅延マップ

可能性もあり、実用には至っていないが、近年提案された高精度時刻同期プロトコル IEEE1588 のトランスパレントクロック技術を搭載したルータやスイッチでは、スイッチングエンジンを挟むように、入力時と出力時にハードウェアタイムスタンプを取得するようになっているので、通過型タイムスタンプ機能の搭載も可能となってきた。

### 遅延マップ

JGNの大手町から主要アクセスポイントまでの遅延時間を測定し、遅延時間を距離に見立てて地図を作成したところ(図-15)、金沢と沖縄までの遅延時間が突出していることが判明した。なお、影のように見えるグレーの部分は、実際の距離による、いわゆる一般の地図である。遅延時間は、音声通話などのようなリアルタイム性の強い用途では問題となることがあり、地理的距離の割に遅延時間が長い場合には、対策が可能な場合もある。計測の結果、一部のセグメントで地理的距離との乖離が見られた。その後、通信キャリアの協力により、0種網<sup>☆4</sup>の情報開示が行われた。ネットワークの物理網の情報は通信キャリアにとってセキュリティの問題も大き

☆4 一般ユーザに提供される1種,2種,3種電気通信事業の回線ではなく、たとえば1種事業者が購入するファイバーのことをいう。

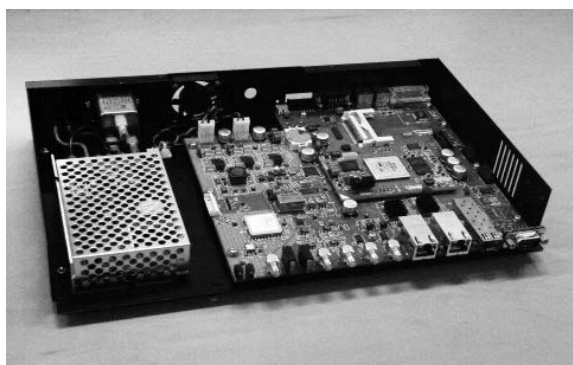


図-16 NICT 公開 NTP サービスで使用中のハードウェア NTP サーバ

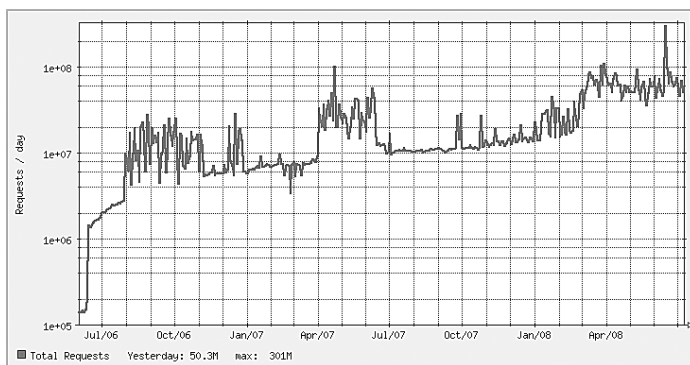


図-17 2006年以降のNTPリクエスト数の推移

いため、ほとんど開示されることはないが、関係各位の協力が得られた。提供された回線は、以下の物理網を経由していることが分かった。

当時、回線キャリア A は、東京-北陸間の直接の物理網を保持していなかった。そのため、キャリア A は、大手町を基点として長野で別のキャリア B の回線に乗り換え、キャリア B 側の事情で千葉県内まで一度折り返した後、金沢のキャリア B の局舎で再收容しキャリア A の回線として到達した。そのため、東京-長野間を 2 回通ってから金沢に到達することになり、地理的距離感よりも遅延が大きくなった。このように、提供されている物理網の回線品質をユーザが計測できることは難しい。しかし、放送型のストリームデータ伝送などでは、あらかじめ伝送路の遅延特性を把握して Jitter を設定する必要があり下位レイヤの情報を取得することも重要と考えられる。

## 周波数・時空情報配信

### 時空情報配信

ネットワークの遅延を正確に測ることは、時計を正確に合わせることに同じことなので、VHNM は NICT の公開 NTP サービス用のサーバとして白羽の矢が立ち、2006 年 6 月 12 日より時刻の提供を開始した。現在は、時刻サーバ専用に新たなハードウェアを利用している(図-16)<sup>4)</sup>。以来、NTP リクエスト数は順調に伸びてきており(図-17)、多い日には 1 億以上のリクエストに応え、情報家電等の製品のデフォルト時刻サーバへの利用も広がってきている。

従来の NTP サーバでは、アクセスの集中によるサーバ過負荷が問題となっており、米国 NIST の Stratum 1 サーバ群や Microsoft 社のサーバなどでは、サーバ 1 台あたりの処理能力を超える毎秒 5000 リクエスト以上が殺到し、応答できない状況が頻発していた。一方、我々のハードウェア NTP サーバは、ワイヤレートでパケッ



図-18 ネットワーク時空サーバ

トにタイムスタンプを打つ能力を有しているため、毎秒 100 万リクエスト以上の処理能力があり、まだまだ余裕がある。

一方、インターネット経由では、往路と復路の遅延時間が等しいとは限らず、高精度な時刻同期は困難であるため、LAN ごとに時刻サーバを設置できるように、小型の時刻サーバも開発した(図-18)。LAN であれば、クライアント PC の時計を 100 ナノ秒程度の精度で合わせることが可能である。この時刻サーバは時刻だけではなく、位置情報(空間座標)も提供するため、ネットワーク時空(NST: Network Space-Time)サーバと呼んでいる。位置と時刻は GPS 信号から同時に得られるため、親和性が高い。

なお、NTP サーバはコーダ電子(株)(<http://www.coder.co.jp/>)より発売されており、評価用クライアントソフトは<http://groups.google.co.jp/group/network-space-time/>で配布している。

### 周波数配信

時刻同期に比べると地味(?)ではあるが、周波数配信は、計量法で定められている国家標準(長さや重さなど)の 1 つで、放送局や携帯電話など無線機器で使用する電波の周波数やさまざまな機器の動作周波数の基準として重要で、NICT 公開 NTP サービスを使った周波数配信の研究を進めている。インターネットを用いた場合、高精

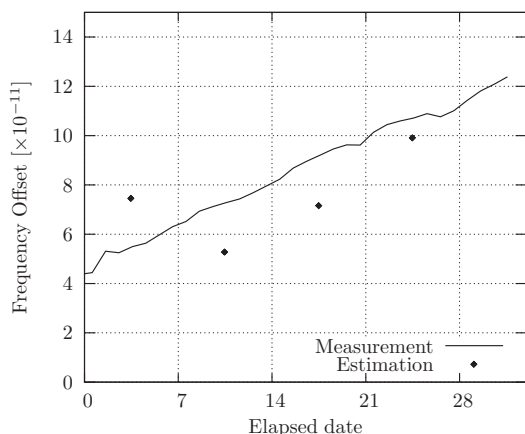


図-19 インターネットを介した周波数制御

度な時刻同期は困難ではあるが、周波数の高精度な較正は可能であり、現在のところ、インターネットを介して0.00002ppmほど(2×10のマイナス11乗)の周波数偏差を実現している(図-19)<sup>5), 6)</sup>。GPS電波の届かない屋内などでの利用が多いフェムトセル基地局の周波数制御への応用などで期待されている。

### 同期パケットネットワークに向けて

非同期の長所を前面に出して快進撃を続けるパケットネットワークであるが、リアルタイム性の強いアプリケーションでは、リアルタイムネットワークの要求も根強くある。LANなどの小規模なネットワークではTime Triggered Protocol (TTP) などスケジューリングによるリアルタイムイーサネットなどが実用化されてきている。インターネットやキャリアネットワークなどのより大規模なネットワークでも、VoIPなどリアルタイム性を必要としてきているが、まだ十分には応えられてはいない。高精度な時刻同期は、緻密なスケジューリングを可能とし、大規模ネットワークでのリアルタイム性を高めていくであろう。しかし、スケジューリングには多少のマージン(ガイドタイム)が必要となるが、VoIPなどの個々の短パケットにガイドタイムを設けては、回線効率が低下してしまうため、同方向へ転送する複数のパケットを1つの長パケットにまとめる「パケットマージ手法<sup>8)</sup>」が有効と考えられ、総合的にこれら技術をまとめていく方向での技術開発が期待される。

**謝辞** 本稿の内容は、次世代インターネット技術開発のために参画した数多くの研究者の研究業績を情報処理学会員各位への情報提供を目的として集約しまとめたものである。以下、本研究内容をご指導・ご協力いただいた諸氏を列挙し謝意を表する。塩見正氏(元NiCT理事)、高橋富士信氏(元CRL主席研究員)、寺崎明氏(元郵政

省技術政策課長)、松井房樹氏(元郵政省技術政策課長)、雨宮明氏(元郵政省技術政策課調査官)、久保田文人氏(NiCT新世代ネットワーク研究センター長)、岡沢治夫氏(元NiCT主任研究員)、北口善明氏(元NiCT特別研究員)、大野浩之氏(元NiCTグループリーダー)、楠正継氏(NTTコミュニケーションズ)、村上仁巳氏(元KDDI研究所長)、箱崎勝也氏(元電気通信大学教授)、尾家祐二氏(九州工業大学教授)、浅見徹氏(元KDDI研究所長)ならびに諸氏に深謝する。

#### 参考文献

- 1) Machizawa, A., Sugiura, K., Komine, T., Okazawa, H., Nakagawa, S. and Uetsuki, S.: On the Delay and Quality of DV Transmissions Systems using ATM Networks, Proc. 15th International Conference on Information Networking (ICOIN-15), pp.709-713, Beppu (2001).
- 2) Okazawa, H., Machizawa, A., Nakagawa, S., Kitaguchi, Y., Asami, T. and Ito, A.: Advanced NTP Synchronization Device for Internet Monitoring Tools, INET2001, Stockholm (June 2001).
- 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-B, No.10, pp.2002-2011 (2005).
- 4) 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, Vol.J89-B, No.10, pp.1867-1873 (2006).
- 5) 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, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-D, No.12, pp.2553-2563 (2006).
- 6) Machizawa, A., Iwama, T. and Toriyama, H.: Software-Only Implementations of Slave Clocks with Sub-microsecond Accuracy, International Symposium on Precision Clock Synchronization for Measurement, Control and Communication (ISPCS2008) (to be published, 2008).
- 7) 北口善明, 町澤朗彦, 箱崎勝也, 中川晋一: 高精度時刻PCによる片道遅延時間によるネットワーク帯域推定手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J87-B, No.10, pp.1696-1703 (2004).
- 8) 篠宮俊輔, 中川晋一, 山岡克式, 酒井善則: パケットマージ手法によるQoS改善効果の数値解析, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J88-B, No.3 (2005).

(平成20年7月31日受付)

中川 晋一 (正会員)

snakagaw@nict.go.jp

(独) 情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター主任研究員, 北陸先端科学技術大学院大学客員准教授, 次世代インターネット技術の研究に従事。医師。博士(医学), 本誌CWG幹事。

町澤 朗彦

machi@nict.go.jp

(独) 情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター主任研究員, 画像の高効率符号化, 視覚情報処理, 計算機ネットワーク, 時刻同期の研究に従事。

鳥山 裕史

tori@nict.go.jp

昭58年名大・大学院情報工学専攻博士前期課程了。同年郵政省電波研究所(現情報通信研究機構)入所。画像符号化, 画像通信, 時刻情報応用技術の研究に従事。博士(工学)。

岩間 司

iwama@nict.go.jp

(独) 情報通信研究機構新世代ネットワーク研究センター研究マネージャ。陸上移動伝搬, 1-3 GHz帯周波数開発, 周波数校正のMRA化, 電子時刻認証, ネットワーク時刻同期の研究に従事。博士(工学)。