

## オンラインゲームを用いたネットワーク品質の大規模計測

手島 孝人<sup>†a)</sup> 丹 明彦<sup>†</sup> 渡辺 奏<sup>†</sup> 吉田 健一<sup>††b)</sup>

## Large-Scale Measurements of Network Quality Using Online Game

Takahito TEJIMA<sup>†a)</sup>, Akihiko TAN<sup>†</sup>, Sou WATANABE<sup>†</sup>, and Kenichi YOSHIDA<sup>††b)</sup>

あらまし インターネット上の通信を使ったアプリケーションが一般化し、遅延やパケットロスなどの通信品質への要求水準が高まる一方、そのようなアプリケーション自身を使った通信品質計測が可能になってきた。本論文ではその一例として、全世界で稼動しているオンラインゲームを使った通信品質計測実験について述べる。実験では実際に稼動しているオンラインゲームの通信状況を分析し、世界 163 カ国（地域）・IP アドレスで数えて 120 万ホスト間の通信遅延やその揺らぎなどの実データを 1,600 万点以上得た。本論文でははじめにその計測方法の特色について説明し、次に同一国内通信や国際通信における遅延の状況、国ごとの特色、帯域別・時間帯別に見た遅延の変化について計測結果を報告する。

キーワード インターネット計測、通信品質、エンドユーザ、遅延

## 1. ま え が き

近年日本では、FTTH をはじめとするブロードバンド環境の普及に伴い高速なインターネット通信網が整備されてきている。このような高速なネットワークを効果的に利用しているアプリケーションの代表は Web ブラウジングや動画配信などであるが、多人数が同時に世界を共有して楽しむようなオンラインゲームもその一つである。動画配信の品質は利用可能な帯域に左右されるが、ユーザ間の相互作用が大きいオンラインゲームでは、帯域だけではなく、通信遅延もアプリケーションの品質を決める重要な要素である。しかしながら、世界のインターネットの通信遅延の実態は、通信品質を原因とする障害に煩わされることなく、オンラインゲームを楽しむのに必要な水準では明らかになっていない。比較的少ないサンプルで精密な遅延計測を行っている例や [1]~[5]、計測を行う仕組み・観測システムの研究 [6], [7] などはあるものの、エンドツーエンドの通信遅延の測定は依然として困難であるのが

現実である。

我々は、世界各国で実稼動しているオンラインゲームの動作を解析して、エンドツーエンドの片道通信遅延の大規模な計測を行った。同一仕様の家庭用ゲーム機器及びソフトウェアを用いることで均質な条件を整え、世界 163 カ国（地域）・IP アドレスで数えて 120 万ホスト間の通信遅延データ 1,600 万点の実測値を得ることができた。この結果は ISP 内部や家庭内のネットワーク機器の遅延も含めた統計値であり、アプリケーションにとって実用的な実測値である。

次章以下ではまずオンラインゲームから見た通信遅延の要因とその計測に関する関連研究について述べ、今回の計測の測定方法、及びその結果を示す。最後にまとめと今後の研究課題について述べる。

## 2. 通信品質がオンラインゲームに及ぼす影響

## 2.1 通信品質とオンラインゲーム

本論文で議論するオンラインゲームとは、地理的に離れた一般家庭のエンドユーザ同士が、ネットワークを経由して互いの情報を交換し相互作用するものである。このようなオンラインゲームにおいて、ユーザ体験を左右する通信品質は以下の要素から構成される。

## (1) 遅延の絶対値

ユーザ間の通信遅延が絶対的に小さければ、より高

<sup>†</sup> (株) ポリフォニー・デジタル, 東京都  
Polyphony Digital Inc., Tokyo, 135-0051 Japan

<sup>††</sup> 筑波大学大学院ビジネス科学研究科, 東京都  
Graduate School of Business Science, University of Tsukuba,  
Tokyo, 112-0012 Japan

a) E-mail: tejima@polyphony.co.jp

b) E-mail: yoshida@gssm.otsuka.tsukuba.ac.jp

## 論文/オンラインゲームを用いたネットワーク品質の大規模計測

精度で複雑な相互作用を用いてゲームを楽しむことができる。通信遅延が大きくなるとフィードバックの遅さがストレスになりゲーム性を損なうばかりか、予測処理も困難になっていく。許容される遅延の大きさはゲームの特性に大きく依存する。

## (2) 遅延の揺らぎ・パケットロス

同一の通信セッション間では、各パケットが一定の遅延で到達することが望ましい。オンラインゲームは一定期間ごとに入力を受け取って演算する処理を繰り返しており、遅延の絶対値が平均的に小さくとも、パケットごとにその量が大きく変化するような場合はこの周期処理に間に合わず情報が欠落してしまう場合がある。また一定量の遅延を予測して見掛け上隠ぺいするような処理も困難になる。パケットロスの場合も同様である。

## (3) 帯域

Web ブラウジングや動画配信ではデータセンタなどに設置されたサーバと各クライアントとの通信は下り中心の非対称なものであるが、ユーザ間で相互接続を行うオンラインゲームでは上り通信も下り通信と同程度の通信容量が必要となる。特に ADSL 接続のエンドノードでこの点が問題となり得る。

## (4) 接続性

一般家庭のユーザ同士が直接接続を行う場合、NAT 越えができずに接続ができないことがある。集合住宅などで同一のルータ内に多数のクライアントが収容されている場合などでも NAT 越えができなかったり、接続が不安定になることがある。

以上の4点のうちどの要素がオンラインゲームの品質を大きく左右するかは、そのゲームの特性によって異なるが、オンラインゲームの中には特に通信遅延について厳しい要求品質をもつものがある。例えば本研究で測定対象としたオンラインレースゲームにおいて、ゲームに登場するクルマの速度を考慮すると、100 ms (ミリ秒) 以上のネットワーク遅延は望ましいものではない。180 km/h で走行するクルマは、100 ms で 5 m (およそクルマ 1 台分) 移動する。多くのオンラインレースゲームでは動き予測処理などを組み込み、このような遅延を隠ぺいするように対処しているが、遅延が著しく大きくなると予測と実際の結果の差異は増大する。

図 1 は、本アプリケーションにおいて、あるコース上を約 80~100 km/h で走行するクルマの実際の軌跡 (白抜き四角) と、通信遅延量に応じて予測した

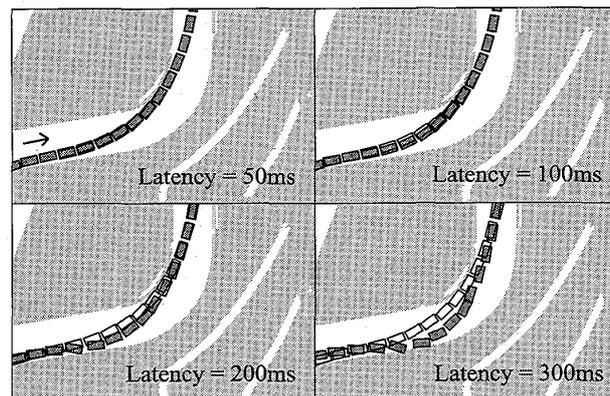


図 1 通信遅延の違いによるクルマの軌跡の予測誤差  
Fig.1 Prediction error caused by packet delay.

位置 (グレーの四角) とを図面上にプロットしたものである。予測手法には、通信相手の遅延量に応じて実際に通信して得た過去の物理量 (座標、回転量など) と予測結果の履歴から外挿するアルゴリズム (推測航法 [8]) を用いている。予測処理は各クライアントがそれぞれ通信相手のクルマの表示に対して行い、あるユーザが操作するクルマは、ユーザ本人の画面上では実際の位置に、通信相手の画面上では予測位置に表示される。図 1 から、片道遅延が 100 ms 程度では軌道に大きな誤差は見られないが、200 ms 以上ではクルマ 1 台分以上の誤差が生じていることが分かる。この誤差は見た目上の動きに違和感を与えるばかりでなく、他ユーザのクルマとの接触を誤判定する原因にもなり、ゲームの整合性を損なってしまうおそれも高くなる。

遅延の量によってゲーム進行が影響される大きさはゲームの特性によって異なるが、一般的にユーザ操作に対する即応性の高い格闘ゲームやレースゲームにおいてこの問題は深刻であり、通信処理の最適化、通信相手の選定などによってなるべく遅延を少なく抑えることが重要である。このような考察を基に、本研究においては、100 ms 以下の遅延での通信を行うことをアプリケーションの目標とし、およそ 10 ms 単位の精度での遅延計測手法を設計した。

オンラインゲームの場合、通信遅延は主として以下の二つの要因で構成される。

## (1) ソフトウェア遅延

アプリケーションの通信処理が必要とする時間である。ゲームなどのインタラクティブアプリケーションでは通信処理だけでなく、画像処理や物理シミュレーションなど負荷の高い処理も同時に行う必要がある。これらの処理に CPU 資源を効果的に分配するため、通信処理を一定間隔で実行するようにスケジュールす

る場合がある。この場合、パケットが到達した後、その内容を実際に利用するまでの待ち時間も通信遅延に含まれる。

## (2) ネットワーク遅延

ブロードバンドルータの処理時間、無線 LAN の処理時間、モデムや ONU の処理時間などを含む家庭内ネットワーク機器の遅延と、IX でのルーティング・キューイングにかかる時間、バックボーンの伝送路を光若しくは電気信号が伝わるのに要する ISP 間の遅延の合計である。

上記二つのうちソフトウェア遅延はゲーム開発者がある程度制御可能であるが、ネットワーク遅延は外的要因で変化するため、その状況を計測しておくことはゲームの品質向上のために必須である。

## 2.2 通信品質計測に関する関連研究

ネットワークの品質計測は重要な研究テーマであり、古くから多くの研究・開発が行われてきた [1]~[7]。しかし、世界のインターネットの通信遅延の実態は、通信品質を原因とする障害に煩わされることなく、オンラインゲームを楽しむのに必要な水準なのかについては明らかになっていない。世界中から多人数が参加するオンラインゲームを通信品質を原因とする障害をなるべく受けまいよう設計するには、できるだけ多くのホスト間のエンドツーエンドの遅延・パケットロスの情報を集める必要がある。特に本研究が対象とするオンラインゲームの参加者は 100 万人を超えており、必要とされる地域も多く、膨大なデータが必要である。

このとき、ネットワーク機器に備わる計測の仕組みを使ったパッシブな計測だけでは取得可能なデータ数に限りがある。また、ADSL などアクセス網や NAT などの機器の影響まで含めた計測は難しく、アクティブ計測技術 [9] が適していると考えられる。しかし、単純にアクティブ計測技術を適用しようとしても、多数のサイトの協力を得て計測を行うことは容易ではない。サイトの協力なしにエンドツーエンドの帯域測定を行うツール [10] の利用や、ネットワークトモグラフィー技術 [11], [12] を用いた間接的な計測は実質的に観測点を増やした効果を期待できる。また、ホスト近辺の DNS サーバを使ったパケットロスの推測技術 [13] など代替の計測点を使う方法や、確率的計測パス決定手法と分散データベース構築手法からなる大規模計測用のシステムアーキテクチャの検討 [14] なども大規模な計測を実施するのに重要な研究である。石橋らは、従来のような時系列上の特性中心の計測でなく空間的な

計測の重要性を述べている [15] が、そのような新たな視点からの分析も重要である。また近年発展しつつある計測技術としてオーバレイネットワークの品質計測がある [16]。オーバレイネットワークは計測の対象としてだけでなく、計測技術への応用 [17] としても重要性を増している。

一方オンラインゲームでの用途を考慮すると、計測精度については最新の技術は必ずしも必要ではない。例えば北口らは、水晶振動子を使った汎用 PC による遅延計測には 170 マイクロ秒程度結果に分布幅があることを指摘し [18]、水晶振動子を高精度な発振子に置き換えた専用ハードとリアルタイム系の OS を組み合わせ、タイムスタンプ誤差 34 ナノ秒の高精度計測装置を開発している [19]。しかし前節で述べたとおり、世界中のユーザ間通信を対象としたオンラインゲームの設計に必要な計測精度は片側遅延で 10 ミリ秒程度であり、汎用 PC による遅延計測などでも十分必要な精度は確保できる。

以上、近年の計測技術の進展を考慮しても、オンラインゲームの品質保証には、主として多数のデータを取得する必要から、アプリケーション自身に計測機能を含める方法が有望に思われる。同様な発想の研究として [20] がある。本研究では同期時刻を基準とするセッション中の片道遅延計測を主眼として、大規模データを取得した上で、GeoLite データベース [21] の地理情報を組み合わせた、163 カ国 (地域)・22,000 都市にわたるエンドノード間の通信遅延を国別・地域別や帯域・時間帯別に分析した。

## 3. 通信遅延の計測方法

前章で述べたように、通信遅延が及ぼす影響を分析することは、オンラインゲームにとって重要である。本研究では家庭用ゲーム機器用に全世界で発売されたオンラインレースゲーム (以下本アプリケーション) において、ゲームの進行のためにサーバに集まる情報を統計的に集計することで通信遅延に関する実測データを得た。図 2 にこの計測に用いたシステムの構成図を示す。

このシステムにより、ユーザがゲーム中にインターネット対戦機能を実行するたびに、以下の手順によりユーザノード間の通信遅延・帯域に関する統計情報が管理サーバに得られる。

### (1) 接続先の決定

本アプリケーションのインターネット対戦機能を実

## 論文/オンラインゲームを用いたネットワーク品質の大規模計測

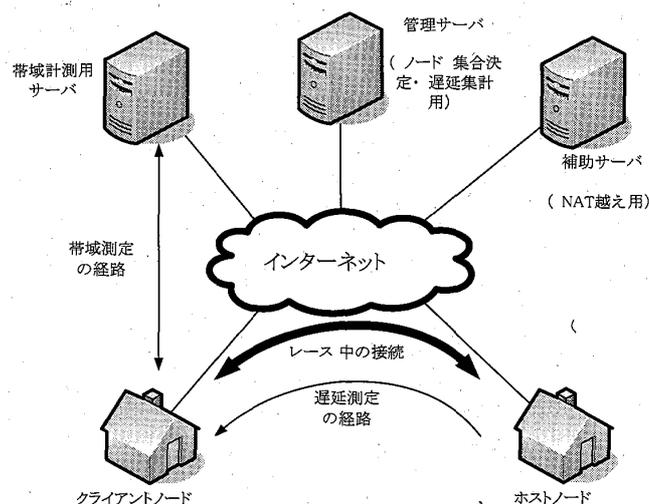


図2 システム構成図  
Fig.2 System diagram.

行するノードは、管理サーバに対戦相手となる他のノードの情報を問い合わせる。管理サーバはその時点で同じくレースを希望している他のノードを検索し、無作為に2~16ノードの集合を作成し、その集合の要素となったノードリストをレースに参加するノードとして各ノードに返す。

各ノードはこのリストを基に相互に接続を行い、セッションを開始する。必要に応じてNAT越えのために外部の補助サーバとの通信を利用するが、一度接続が確立した後はノード間で直接送受信を行う。

### (2) 帯域計測

ノードごとに帯域計測を行う。具体的には、世界数箇所に設置した帯域計測専用のサーバを通信相手として、各ノードごとに一定サイズのデータを送受信するのに必要な時間を測定する。データの送受信にはUDPを用いている。

### (3) ホスト決定

各ノードは測定した帯域とNATの状況を管理サーバに報告する。管理サーバは参加ノード内でNAT越えに関する技術的問題が少なく、かつ帯域の大きいノードをそのレースのホストとして指名する。その他のノードはクライアントとなる。クライアント間の通信は直接行う場合(メッシュ型)と、ホストを経由して行う場合(スター型)がある。どちらの方式をとるかはレース開始時に決定し、そのレース中は変わらない。

### (4) 時刻同期

レースを開始する前に、ノード間で時刻を同期する。ホストは各クライアントに自己の内蔵時計に基づいた

時刻を提供する。クライアントはホストとのRTTを用いてこれを補正し、NTPと同様の手法で平滑化して同期時刻として取り扱う(詳細は5.1.1で述べる)。一定時間経過し同期時刻が安定した後にレースを開始する。RTTを用いた時刻同期の平滑補正処理はそのレースが終了するまで継続する。

### (5) 通信処理

レースが行われている間、ノード間ではクルマの座標などのゲームに必要な情報を一定間隔ごとに送受信し合う。この頻度はノードの帯域や参加人数(ノード数)などによって変化するが、50~200ms間隔である。各送信パケットには送信ノードの同期時刻でタイムスタンプを記録している。受信ノードが受け取ったパケットのタイムスタンプと、受信ノードの同期時刻との差が、片方向の通信遅延として得られる。この遅延量は、レースの物理シミュレーションに必要な基礎的情報としてゲーム本体のプログラムで利用される。

### (6) 集計処理

各レースは3~8分程度で終了し、ノード間の接続は切断され、セッションは終了する。今回の計測では、1レースにつき(レース参加者数-1)個のセッションに関する遅延情報を集計した。各クライアントはホストとの通信遅延の平均値をそのセッションの平均遅延時間として管理サーバに報告する。更に各クライアントにおいて、レース中の同一セッション内での遅延の揺らぎを計測するために、8ms間隔の度数表を作成し、各パケットの遅延時間ごとに分布をカウントした。この度数表と平均値から、セッション内での遅延の分散及び標準偏差を得た。

## 4. 計測結果

### 4.1 概要

2008年4月1日~5月31日(期間A)、2008年8月1日~9月30日(期間B)の遅延情報を無作為に選び、1,600万セッション・120万IPの片道遅延情報を抽出した。一セッションを一サンプルとしており、同一の通信相手でも異なるセッションについては重複してカウントした。更にこのデータセットに対してGeoLiteデータベース[21]を用いて地理情報を参照し、国別・地域別の通信遅延分布を163カ国(地域)・22,000都市にわたって得た。

日本国内を送信元とする通信の遅延を、受信側の都市ごとに地図上に図示したものが図3である。この図では100サンプル以上得られた都市について、遅延の

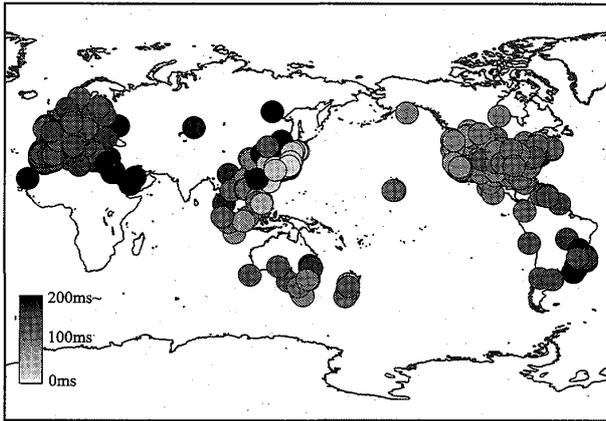


図 3 日本から世界各地への通信遅延図  
Fig. 3 Connection latency map from Japan to various countries.

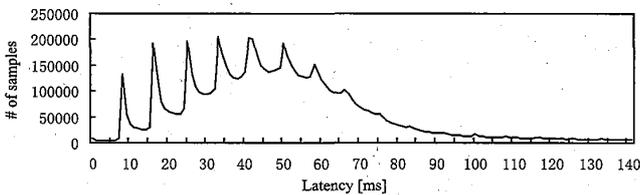


図 4 全通信の遅延分布  
Fig. 4 Latency distribution of all samples.

平均値を丸の色で区別している。図で分かるように、おおむね地理的な距離に応じて遅延が増大している。ヨーロッパよりもアメリカの方が遅延が少ないが、これは日本からヨーロッパへの通信がアメリカを経由する機会が多いことを考えると妥当な結果である。

全セッションの片道遅延分布を図 4 に示す。全体の平均値は 112 ms, 中央値は 51 ms である。およそ 8 ms ごとにピークが出ているが、これは測定に利用したアプリケーションの処理特性によるものであり次章で議論する。

全セッションの片道通信遅延と、時刻同期処理に用いた RTT の平均値との比較を図 5 に示す。相関係数は 0.80 で、計測された片道遅延はおおむね RTT/2 の値と一致している。

#### 4.2 帯域

各ノードについて計測した帯域を図 6 に示す。日本では FTTH の浸透により、上り・下りとも 80 Mbit/s を超えた帯域をもつノードが非常に多い。韓国やスウェーデンにも同様に FTTH と見られるノードの存在が確認できる。一方でアメリカやイギリス・オーストラリアでは上りの帯域が狭い ADSL 接続が中心と推定でき、下り帯域は 20~30 Mbit/s まで存在するが、5 Mbit/s 以上の上り帯域をもつノードはほとんど存在

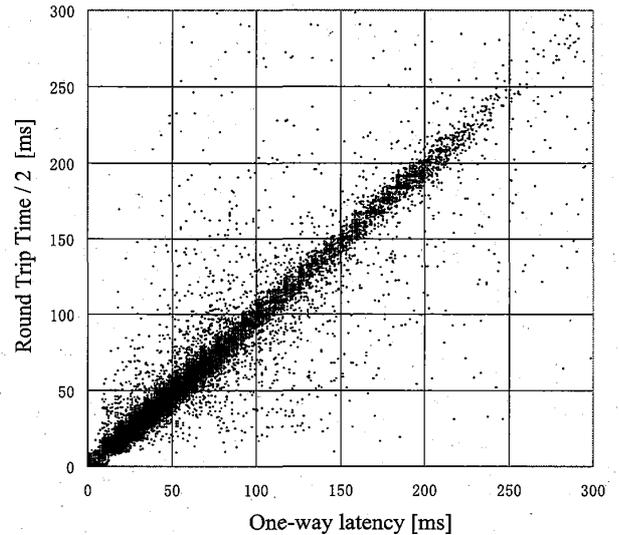


図 5 RTT と片道遅延の相関  
Fig. 5 Correlation between RTT and one-way latency.

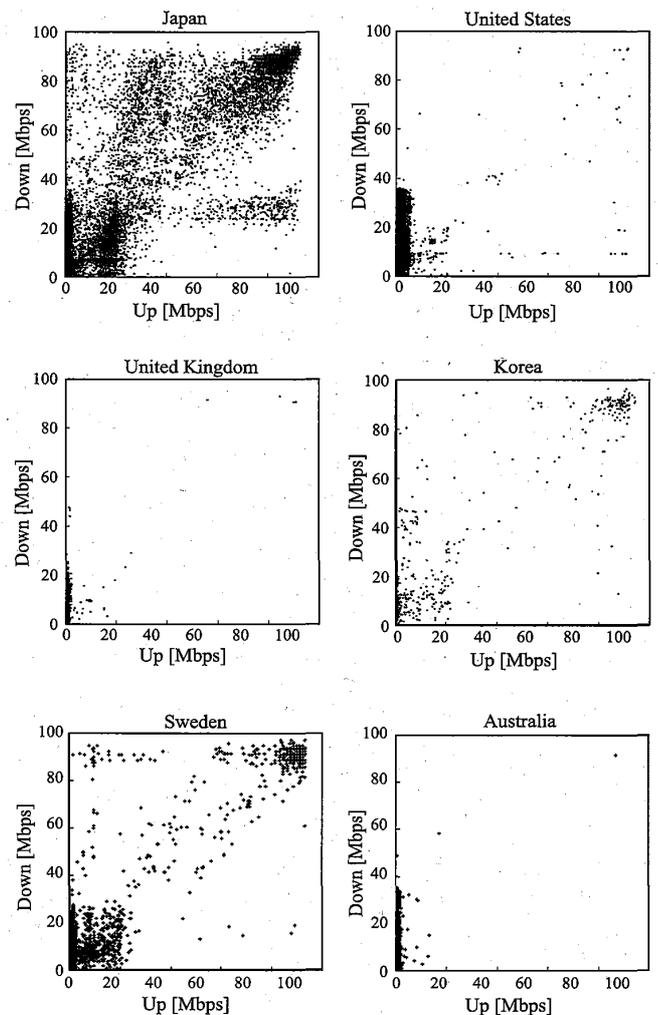


図 6 国別の上り・下り帯域散布図  
Fig. 6 Scatter chart of upstream and downstream bandwidth by country.

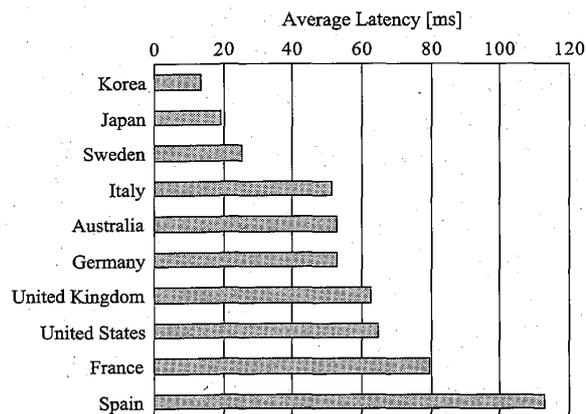


図 7 国内通信の平均遅延

Fig. 7 Average latency of domestic connection.

表 1 各国の国内通信の遅延統計

Table 1 Latency statistics of domestic connection.

Country	Mode	Median	Std. dev.	# of samples
Korea	8 ms	8 ms	26.15	23,808
Japan	16 ms	18 ms	22.44	1,786,648
Sweden	8 ms	17 ms	37.50	55,937
Italy	25 ms	37 ms	65.26	92,521
Australia	33 ms	38 ms	65.03	44,520
Germany	33 ms	39 ms	71.55	328,957
United Kingdom	33 ms	40 ms	100.21	284,398
United States	33 ms	47 ms	75.74	3,033,671
France	51 ms	56 ms	91.51	659,257
Spain	50 ms	58 ms	151.86	64,657

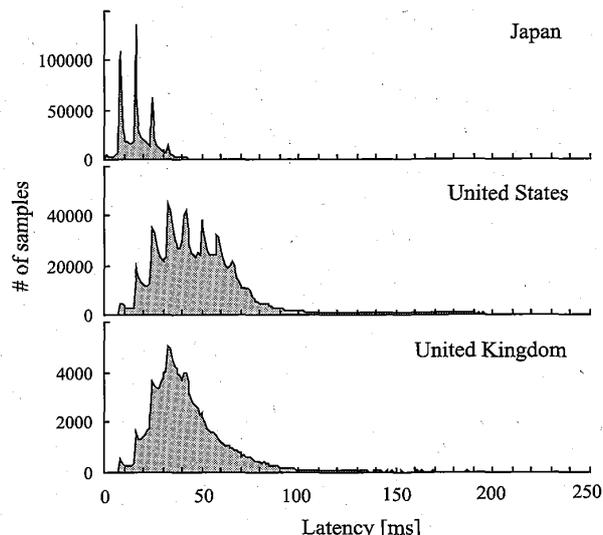


図 8 国内通信の遅延分布

Fig. 8 Latency distribution of domestic connection.

日本・アメリカ・イギリスの国内通信の遅延分布を示す。ニューヨークからロサンゼルスまでは直線距離で 4,000 km あり、真空中の光速でも 13 ms の遅延が生じる。光ファイバ中の伝達速度はこの 2/3 程度といわれており、実際に敷設されているネットワーク経路長などを加味すると、20~40 ms の遅延が生じるのは妥当である。

#### 4.3.2 帯域と遅延の関係

次に国内通信における遅延を帯域別に図 9, 図 10 に示す。送信側では上り帯域, 受信側では下り帯域でそれぞれ分類している。日本国内において送信側に 70~80 Mbit/s のサンプルが多くなっているが、これは全ノード中の数が多いのではなく、本アプリケーションがなるべく帯域の大きいノードをホスト (=送信側) として選択するように制御する仕組みになっており、サンプルが多く抽出されるためである。また、帯域ごとの平均遅延を示す折れ線グラフが途切れている箇所は、100 サンプル以上のデータが得られなかった帯域区分である。

日本国内の上り帯域別遅延を見ると、0~2 Mbit/s では非常に遅延が大きく、それ以降は緩やかに遅延が小さくなっている。本アプリケーションではホストの上り帯域は、状況に応じて数百 kbit/s~2 Mbit/s を消費する。つまり、上り帯域 0~2 Mbit/s のホストノードはアプリケーションの要求する通信容量を確保できないことがあり、大きな遅延が生じてしまっている。一方 3 Mbit/s を超えるとあまり大きな変化はなくなる。海外では十分な帯域があるケースのサンプルが少な

しない。

### 4.3 国内通信

図 7 及び表 1 に主要な国ごとの国内通信の遅延統計を示す。アプリケーションの仕様上の制約や時差などの理由により国によってはサンプル数に開きがあるが、いずれも十分な数の母集団が得られている。

#### 4.3.1 遅延の概要

通信遅延の平均値は国によって大きな差があることが分かる。日本・韓国・スウェーデンは他国に比較して FTTH が普及しており (図 6), 帯域不足によるキューイング遅延の懸念は少ない。また国土が比較的限られているために国内通信の物理的距離が短く、少ない遅延で通信できていると考えられる。

一方イギリス・フランス・スペインでは国土の大きさに比較して大きめの遅延となっているが、これは主として帯域不足によるキューイング遅延, 及び ADSL モデムの処理遅延などが主要因と考えられる。

アメリカはイギリスなどと同様の理由も考えられるが、広い国土による物理的な伝送遅延の存在が、遅延が大きめにしている主因であると考えられる。図 8 に、

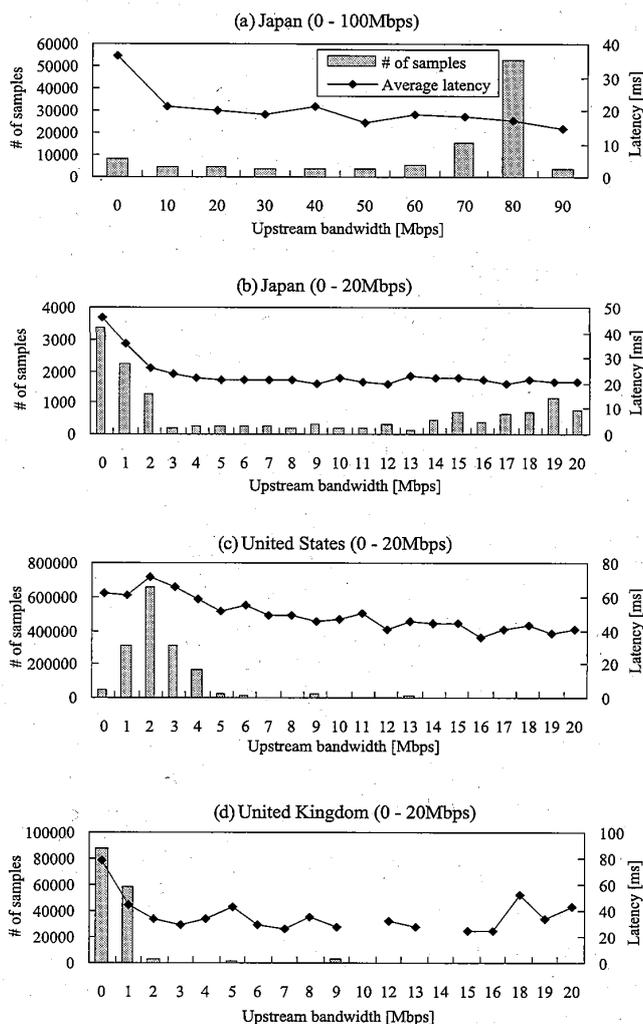


図 9 送信側の上り帯域別遅延 (国内通信)  
Fig. 9 Upstream bandwidth and latency of sender.  
(domestic connection)

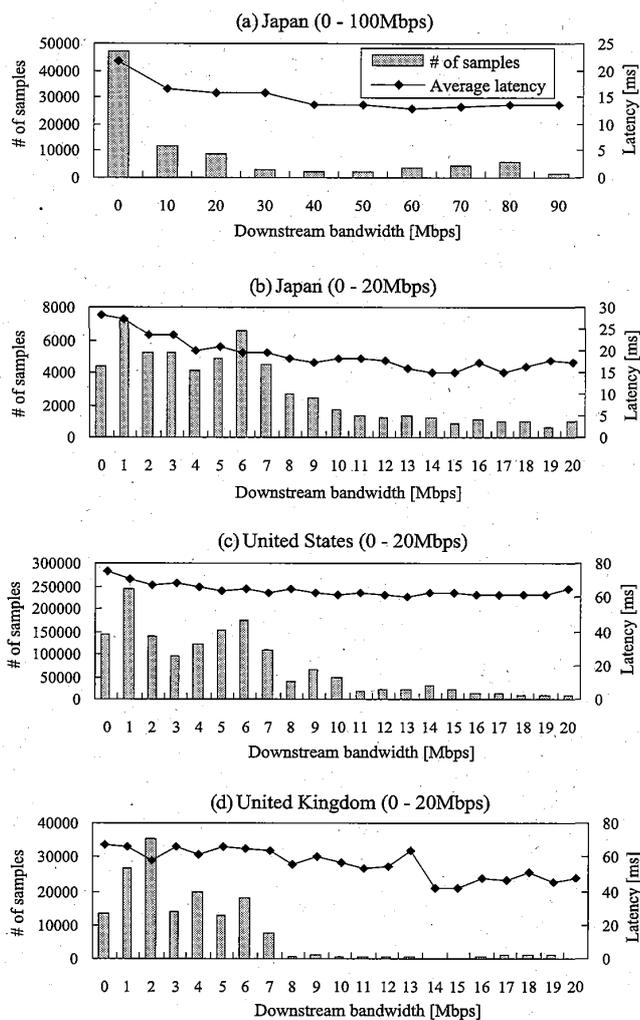


図 10 受信側の下り帯域別遅延 (国内通信)  
Fig. 10 Downstream bandwidth and latency of receiver.  
(domestic connection)

いが、数十 Mbit/s の帯域があっても遅延が比較的大きい。アメリカの場合は国土の広さによる伝送遅延のためと考えられるが、イギリスの国土は伝送遅延が問題になるほどの広さではなく、ISP より上流でのキューイング遅延などの別の原因が大きいと推定される (4.3.4 参照)。

#### 4.3.3 時間帯と遅延の関係

図 11 は、日本・アメリカ・イギリスの国内通信遅延を時間帯別に集計した図である。日本では 20 時～24 時の時間帯でごくわずかに遅延が大きくなる傾向が認められるが、はっきり現れるような遅延の増大は見られなかった。一方アメリカやイギリスでは、現地時間の夕方～夜間において遅延が大きく、早朝は遅延が小さい。イギリスではその差は 30 ms に及んでいるが、これはトラフィックの集中によるキューイング遅延

の影響を大きく受けている可能性がある。

セッション間の遅延のばらつきを時間帯別に標準偏差で示したのが図 12 である。図 11 と同じ傾向を示しており、混雑時には遅延のばらつきも大きくなっている。またアメリカやイギリスに比べると、日本国内の通信は比較的均質であるといえる。

#### 4.3.4 同一セッション内での遅延の揺らぎ

同一セッション中での通信遅延の揺らぎを時間帯別に示した (図 13) (注1)。

日本国内では全時間帯を通じて 3 割程度のセッションにおいてセッション中の遅延の揺らぎが 2 ms 以下であり、揺らぎが 10 ms を超えることはほとんどない。一方アメリカやイギリス国内の通信では、夕方～

(注1)：同一セッション内での遅延の分散及び後述する推定パケットロス率については、製品リリース時期の関係で期間 B (2008 年 8 月 1 日～9 月 30 日) でのみ計測を行った。

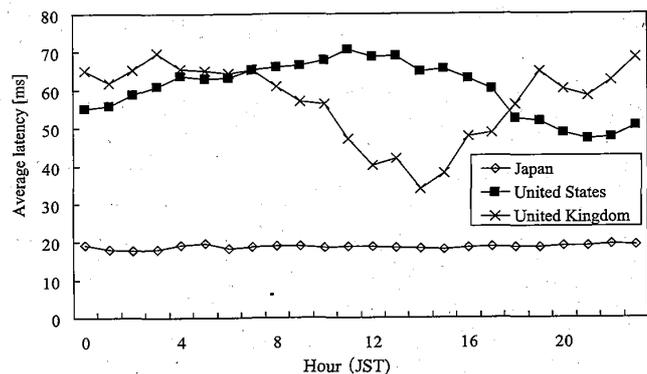


図 11 時間帯別遅延平均 (国内通信)  
Fig. 11 Hourly average of domestic connection latency.

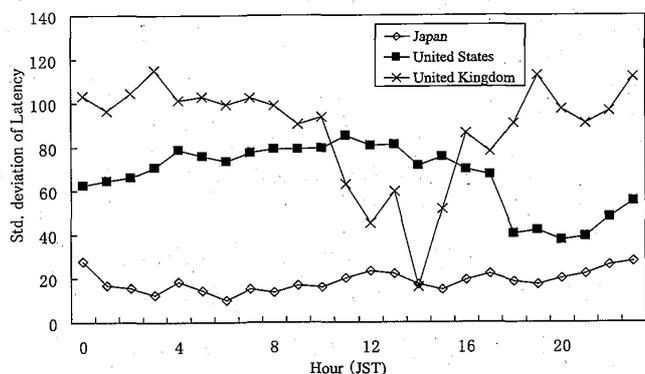


図 12 時間帯別遅延のばらつき (国内通信)  
Fig. 12 Hourly variance of domestic connection latency.

夜間に揺らぎが増大する傾向が見られ、特にイギリスの場合にはそれが顕著である。前節までの分析も踏まえると、遅延の揺らぎが大きく変動するイギリスの国内通信では、通信の集中によるキューイング遅延の影響が大きいものと考えられる。キューイング遅延が家庭内-ISP のアクセスで発生しているものなのか、バックボーン・IX において発生しているものなのかはこのデータからは判断できないが、家庭で用いられている LAN 機器の帯域は、低速な無線 LAN によるものでも、本ゲームに必要とする帯域より十分大きいことから、バックボーン・IX、あるいは ISP アクセス網において発生している遅延であると推定できる。家庭内で発生している遅延であれば、同様な機器を使っている日本国内の通信においても、同様な遅延の揺らぎが観測されるはずである。

#### 4.4 国際通信

図 14 に、日本と海外各国との国際通信の遅延分布を示す。アメリカに対する通信遅延は 60 ms 付近から始まり、150 ms 程度まで広く分布している。この結果

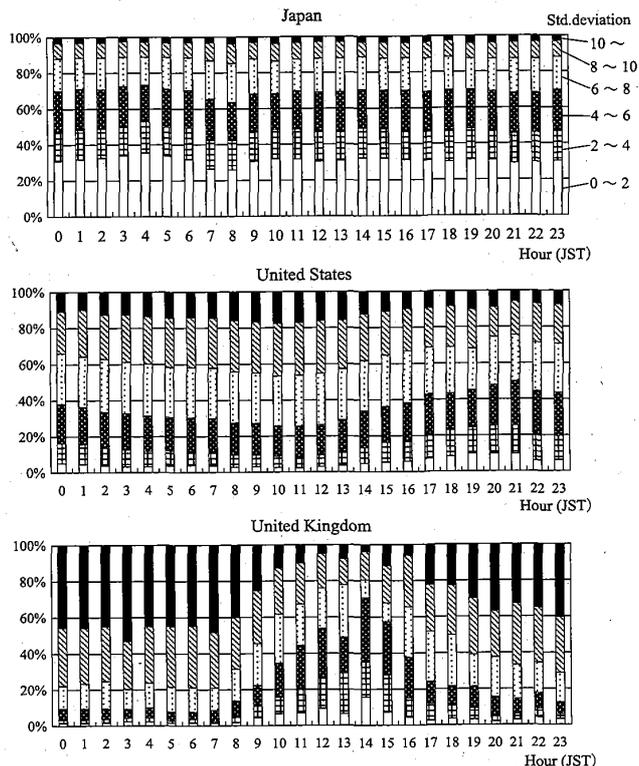


図 13 国内通信の同一セッション内での遅延揺らぎ (標準偏差)  
Fig. 13 Standard deviation of latency in a session of domestic connection.

で注目すべきことは、日本からアメリカへの通信遅延が、アメリカから日本への通信遅延より若干短く計測されていることである。後述するように、測定に使用したオンラインゲームは上り帯域に一定の負荷を生じる。米国から日本にパケットを送信した場合、米国内部の ADSL 上り帯域の狭さにより遅延が生じ図 14 に記されたように非対称の遅延が生じたものと考えられる。この結果は図 9、図 10 に示した帯域と遅延の関係と整合する。

イギリス・フランス・ドイツに対してはほぼ同様に 130~200 ms の遅延で通信が行われている。これらのヨーロッパ向けの通信のほぼすべてがアメリカ経由である。

オーストラリアへの通信では、80 ms 付近と 150 ms 付近に二つの大きなピークが見え、120 ms 付近が谷になっている。これは日本からオーストラリアへの伝送経路が複数あることを示唆している。実際にオーストラリアに存在するいくつかの IP アドレスに対して traceroute を行うと、表 2 のような結果が得られる。日本からオーストラリアまで、アメリカ西海岸を経由する場合としない場合があり、遅延が大きく異なっ

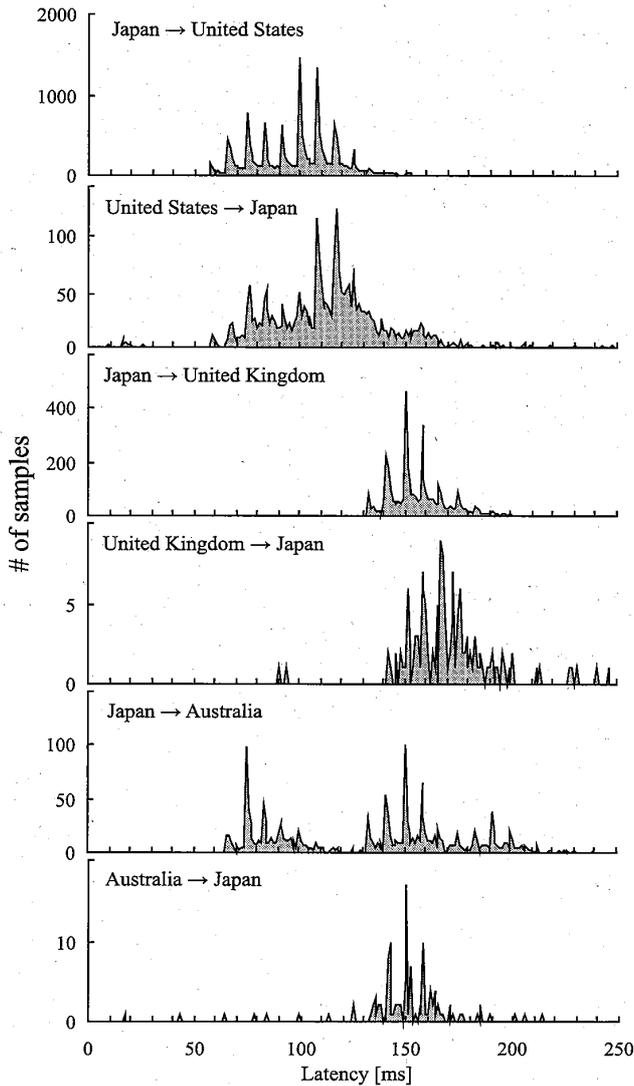


図 14 国際通信の遅延分布  
Fig. 14 Latency distribution of international connections.

表 2 日本からオーストラリアへの経路と遅延例  
Table 2 Network route from Japan to Australia and examples of latency.

経路	経由地	遅延 (RTT)
1	起点 大阪	0 ms
	東京	10 ms
	シドニー	123 ms
	終点 キャンベラ	130 ms
2	起点 大阪	0 ms
	東京	10 ms
	ロサンゼルス	125 ms
	シドニー	290 ms
	終点 ブリスベン	299 ms
3	起点 大阪	0 ms
	東京	10 ms
	サンノゼ	113 ms
	メルボルン	278 ms
	終点 シドニー	310 ms

いる。したがってこのような遅延の分布も妥当であるといえる。

## 5. 考 察

### 5.1 計測の精度

#### 5.1.1 時刻同期の精度

本研究の計測で得られた片道遅延は、ホスト-クライアント間で同期させた時刻のタイムスタンプを基準にしている。この時刻同期に誤差を与える要因は、以下の3点である。

- (1) 内蔵時計の機器間の誤差
- (2) 時刻同期処理時間の揺らぎ
- (3) 通信遅延の揺らぎ

ここではそれぞれについて本計測における誤差の大きさを評価し、遅延計測の精度を検討する。

#### (1) 内蔵時計の機器間の誤差

北口ら [18] の指摘にもあるように、水晶駆動の時刻情報は温度変化などの理由で、1秒間で約  $33 \mu\text{s}$  程度の誤差を生じることがある。数分間の計測においては最大で 10 ms 程度の誤差を生じる可能性があるが、本アプリケーションでは、接続中は数秒間隔での時刻同期処理を継続して実施しており、時計精度によって 1 ms を大きく超えるような誤差を生じることはないと考えられる。

#### (2) 時刻同期処理方式に起因する誤差

本研究で用いたオンラインゲームは、ビデオ信号の同期間隔である毎秒 59.94 回の画面更新を基準とするゲーム進行と同期して、 $1\text{s}/59.94 = 16.68\text{ms}$  ごとにすべての通信処理を行うように設計されている。

図 15 に、時刻同期が  $16.68\text{ms}$  ごとにどのように処理されるかを示す。図でクライアント/ホストでの時間進行を示す横軸上の縦棒 ( $T_0$ ,  $T_1$ ,  $T_r$  の位置) は、クライアント/ホストでの時刻同期処理のタイミング

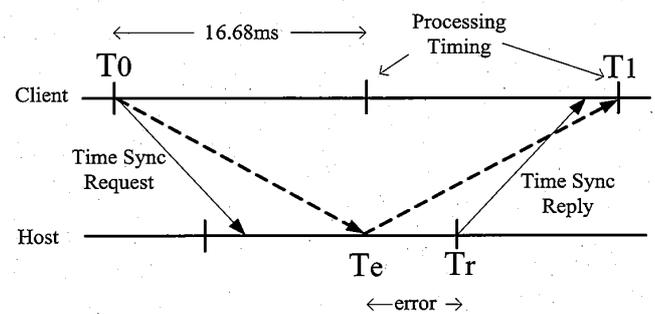


図 15 時刻同期処理の様子  
Fig. 15 Timing diagram of synchronization process.

を示す。図示したように、このタイミングはそれぞれ画面更新に同期しており、クライアント/ホストの間でずれている。クライアントが時刻  $T_0$  に発信した時刻同期要求は、一定の伝送遅延を経てホストに到着するが、到着直後に処理が行われるのではなく、返信処理は次の処理タイミング  $T_r$  で実行される。ホストは  $T_r$  を含む返信を送信して、同様にクライアントは次の処理タイミング  $T_1$  でその返信を受け取る。以上の処理はクライアントからは点線で示した経路とみなすことができ、RTT は  $T_1 - T_0$  に相当する。  $T_1$  時点でのホスト時刻を  $T_r + (T_1 - T_0)/2$  として、自己の時計をホスト時刻に補正する。このとき、  $T_0$  と  $T_1$  の中点である  $T_e$  と  $T_r$  の差が誤差になる。処理周期を  $F$  ( $= 16.68$  ms)、片道遅延の  $F/2$  の剰余を  $L$  とすると、誤差  $e$  の範囲は

$$0 \leq |e| \leq \max\left(\frac{F}{2} - L, L\right) \leq 8.3 \text{ ms} \quad (1)$$

である。

### (3) 通信遅延の揺らぎなどに起因する誤差

図 15 に示したようにクライアントは時刻同期要求に要した RTT の半分の時間を復路の所要時間とみなして同期時刻を補正しているが、経路の遅延に揺らぎが存在するなどの理由によって往路と復路の所要時間が異なる場合には、その差に応じて誤差が発生する。

以上の点を踏まえて、時刻同期処理の精度を検証するため、アプリケーションに用いた時刻同期処理と同一のプログラムを利用してソフトウェア上でのシミュレーションを行った。片道通信遅延の大きさ  $L$  は、[22] の研究結果に従い、伝送にかかる固定遅延量  $l_f$  とキューイングやふくそうの影響による揺らぎ  $G(l_v)$  の和として

$$L = l_f + G(l_v) \quad (2)$$

で表されるものと仮定した。ここで、  $G(l_v)$  には平均  $l_v$  のガンマ分布の乱数を用いた。また、内蔵時計は各シミュレーションごとに、1000 ms につき標準偏差  $33 \mu\text{s}$  の乱数で与えられる一定の誤差があるものとした。

このシミュレーションの結果を図 16 に示す。縦軸は絶対誤差の平均値、横軸は固定遅延量  $T_f$  であり、遅延揺らぎ  $T_e$  が一定の系列を複数図示している。理論値は式 (1) から得られる値である。遅延の揺らぎが一定であれば遅延の絶対値が大きくなっても誤差は 3~4 ms 程度で変わらず、揺らぎ平均が 50 ms と大きい場合には 5 ms 程度の誤差になる、という結果が得ら

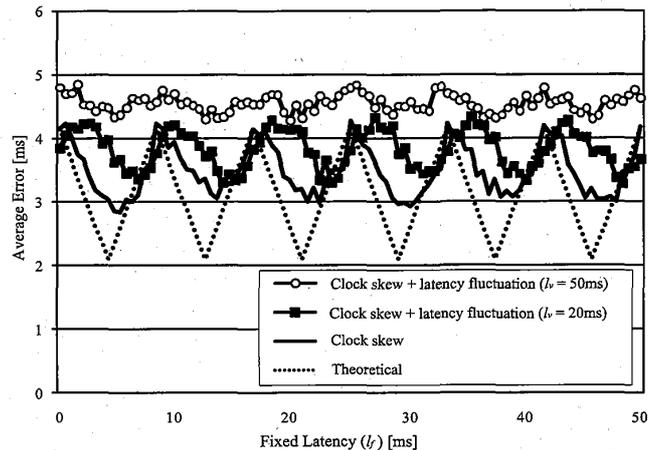


図 16 時刻同期精度のシミュレーション結果  
Fig. 16 Simulation results of timestamp accuracy.

れた。

以上の結果から、本研究の計測における時刻同期の精度は平均して  $\pm 5$  ms 程度であると考えられる。

### 5.1.2 片道遅延測定精度

図 15 に示したように、本アプリケーションではクライアントとホストの時刻差の補正量は、基本的には 8.3 ms 単位となる。前章までの統計に用いた片道遅延は、ホストが記録したタイムスタンプをクライアントがもつ同期時刻と比較し、8.3 ms 単位で計上している。図 4、図 8、図 14 に示した遅延時間の分布が 8.3 ms ごとにピークを示しているのはこの理由による。

しかしながら、セッション中に遅延の揺らぎがある場合は同期時刻が平滑化されることから、8.3 ms の倍数にならない遅延が得られる。この場合の遅延量は、図 4 などにおいて 8.3 ms ごとのピークの後に少し尾を引く形での分布として現れており、ソフトウェアの処理の内容と整合している。図 8 ではピークがはっきりしている国とそうでない国があるが、遅延の揺らぎが大きければ時刻同期の平滑化処理により 8.3 ms 単位から外れた遅延が計測されるためであり、図 13 で得た遅延の揺らぎとも符合している。

日本国内の遅延は 10 ms 以下であることが多く、本研究の計測では国内での地域的な分析に十分な精度は得られていないが、米国と日本の比較などの用途には十分な精度である。ソフトウェア処理の改良によってより精度を高めることは可能であるが、今回利用したオンラインゲームにとっては 10 ms オーダの精度で十分な情報が得られるため、精度向上のための過剰なソフトウェア処理負荷は回避した。

### 5.1.3 地理情報の精度

GeoLite データベースの地理情報にも一部誤ったデータが混入している可能性があり、地理的分析においてノイズデータを生成する一因となっているが、提供元の資料によると精度は 99.5% であるとされ、十分なサンプルが得られた今回の計測では無視できる範囲であると考えている。

### 5.2 パケットロス

今回使ったオンラインゲームは遅延に対する要求が厳しく計測機能も備えていた。ここまでの結果は、その計測機能を用いたものである。ネットワークの QoS としてはパケットロスも重要であるが、残念ながら、その計測機能は備えておらず、正確な計測はできなかった。ただし、以下の方法で粗い推定は可能であったので、参考までに結果を述べる。

今回使ったオンラインゲームは通信処理の間隔がレース中一定にしてあるため、(レース所要時間)/(通信間隔)によって受信すべきパケット総数が概算できる。また通信は UDP で行われ、受信パケットの数はパケットロスにより直接影響を受ける。そこで

$$1.0 - \frac{\text{(実際に受信処理したパケット数)}}{\text{(概算パケット総数)}} \quad (3)$$

を推定パケットロス率とした。この方法で推定した国内通信での推定パケットロス率の分布を図 17 に示す。

いずれの地域でも 0.5% の点にピークが見える。また同一のプログラムを用いてパケットロスがほとんど生じない LAN 環境で計測を行ったところ、ほぼ同様の分布が見られた。

これは、本計測では概算パケット数に誤差が生じて

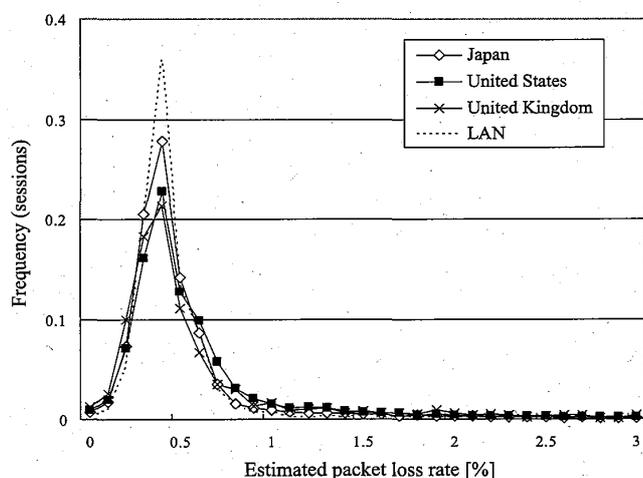


図 17 推定パケットロス率  
Fig. 17 Estimated packet loss rate.

いるためと推定される。今回の実験ではセッション開始時と終了時にパケットを送受信しない一定の期間があり、送信パケット数が実際よりも多めに見積もられてしまう。このため実際よりも多くロスが存在するように見えているが、この誤差はセッション時間に依存し、平均して 0.5% 程度のロスとして計上されている。

したがって、パケットロス率については今回の実装では正確な測定ができなかったことが確認できたが、近年のネットワークではロスがほとんど発生していない(最大でも 0.5% 程度)可能性が高い。いずれの国の計測結果も LAN 環境での結果とほぼ一致していることを考慮すると、実際のネットワークでもロスはほとんど生じていないと推測できるためである。

### 5.3 計測結果のアプリケーションへの応用

2. で述べたように、オンラインゲームでは通信遅延がゲームの品質に大きな影響を与える。通信相手となるゲームプレイヤーの組合せを決定する際には、なるべく遅延の少ないペアを作るような仕組みが有効であり、本研究で得られるような世界規模での計測結果はその意思決定をする上で役に立つ。

また、帯域不足によるキューイング遅延が発生しやすい地域・時間帯での通信では、遅延の揺らぎが非常に大きくなる場合があることにも注意しなければならない。例えばイギリス国内の通信においては、混雑時には半数以上のセッションで標準偏差 10 ms 以上の揺らぎが計測されている。遅延の揺らぎの大小は、アプリケーション側で遅延を隠ぺいさせるための予測処理の設計において重要な要素である。

上記のような計測結果の利用はアプリケーション開発にとって重要なテーマであり、今後の課題である。

## 6. むすび

インターネット上の通信を使ったアプリケーションが一般化し、通信品質への要求水準が高まる一方、そのようなアプリケーション自身を使った通信品質計測が可能になってきた。本論文ではその一例として全世界で稼動しているオンラインゲームを使った通信品質計測実験について述べ、以下のことを明らかにした。

- インターネットでの通信品質の計測には様々な手段が存在しているが、アプリケーション自身に計測機能を組み込むことで、そのアプリケーションにとって最適な情報を必要最小限の負荷で得ることができる。

特に本計測に用いたように市販するオンラインゲームを有効に活用することで、他の方法では実現困難な

大規模計測を容易に、かつ継続的に行うことができる。

● 世界 163 カ国 (地域)・IP アドレスで数えて 120 万ホスト間の通信遅延やその揺らぎなどの実データ 1,600 万点以上を解析することで、同一国内通信や国際通信における遅延の状況、国ごとの特色、帯域別・時間帯別に見た遅延の変化について以下のことを明らかにした。

－ 国内通信の通信遅延の大きさは国により大きく異なっていることが分かった。遅延の大きな国では、通信の混雑による帯域不足が遅延に影響を与えている可能性が高い。また国際通信では同じ相手国に対しても様々な経路が存在し、遅延のばらつきも大きくなることが確認できた。

－ 今回の計測では、日本国内の通信環境が国際的に見て極めて優れていることが分かった。これは望ましいことでもあるが、世界規模で運用するアプリケーションを設計する際の試験環境としては不適であるともいえる。世界各国での通信遅延の実測値が数多く得られたことで、今後実情に即した試験環境を構築することが可能である。

なお本計測は、特定のオンラインゲームに参加しているエンドユーザを対象とした測定である。またスター型接続の場合には帯域などの通信品質の良いノードをホストに選択した上での経路を測定しており、母集団全体が世界のインターネット全体の品質特性を網羅しているわけではない。しかし国別・帯域別・時間帯別などの分析は、それぞれ母集団を分割して可能な限り妥当な評価を行った。また、エンドユーザの実環境を対象に、新たな計測機器やソフトウェアの導入などの負担を強いることなく世界規模での品質情報がリアルタイムに得られるという点で、アプリケーション自身が行う計測機能は有用性が高いと考えている。

アプリケーションが要求する通信遅延は様々である。本論文で報告したような実測データを前提とすることで、アプリケーションの設計段階において通信遅延を考慮しやすくなり、より品質の高いサービスを提供することができるようになることを期待している。実際のアプリケーションにおいて、遅延統計を考慮して有効に活用するような設計を行うことが今後の課題である。

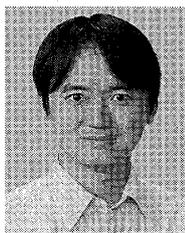
## 文 献

- [1] J.-C. Bolot, "End-to-end packet delay and loss behavior in the internet," SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol.23, no.4, pp.289-298, 1993.
- [2] 菊池 豊, 藤井資子, 山本正晃, 永見健一, 中川郁夫, "遅延計測による日本のインターネットトポロジーの推定," 信学技報, IA2007-27, July 2007.
- [3] M.S. Borella and G.B. Brewster, "Measurement and analysis of long-range dependent behavior of internet packet delay," INFOCOM (2), pp.497-504, 1998.
- [4] C. Fraleigh, S. Moon, B. Lyles, C. Cotton, M. Khan, D. Moll, R. Rockell, T. Seely, and S.C. Diot, "Packet-level traffic measurements from the sprint ip backbone," IEEE Netw., vol.17, no.6, pp.6-16, 2003.
- [5] B.-Y. Choi, S. Moon, Z.-L. Zhang, K. Papagiannaki, and C. Diot, "Analysis of point-to-point packet delay in an operational network," Comput. Netw., vol.51, no.13, pp.3812-3827, 2007.
- [6] <http://www.caida.org/home>
- [7] <http://www.wide.ad.jp/project/wg/mawi-j.html>
- [8] J. Smed and H. Hakonen (著), 中本 浩 (訳), コンピュータゲームのアルゴリズム&ネットワークング, ボーンデジタル, 2007.
- [9] M. Jain and C. Dovrolis, "Pathload: A measurement tool for end-to-end available bandwidth," Proc. Passive and Active Measurements (PAM) Workshop, pp.14-25, 2002.
- [10] D. Croce, T. En-Najjary, G. Urvoy-Keller, and E.W. Biersack, "Fast available bandwidth sampling for adsl links: Rethinking the estimation for larger-scale measurements," Proc. PAM, 2009.
- [11] 鶴 正人, "ネットワークトモグラフィ技術の研究動向," オペレーションズ・リサーチ: 経営の科学, vol.53, no.6, pp.321-327, 2008.
- [12] M. Coates, A. Hero, R. Nowak, and B. Yu, "Internet tomography," IEEE Signal Process. Mag., vol.19, no.3, pp.47-65, 2002.
- [13] Y.A. Wang, C. Huang, J. Li, and K.W. Ross, "Queen: Estimating packet loss rate between arbitrary internet hosts," Proc. PAM, 2009.
- [14] 田上敦士, 長谷川輝之, 阿野茂浩, 長谷川亨, "ユビキタスネットワークにおける大規模計測システムアーキテクチャ," 信学論 (B), vol.J89-B, no.10, pp.1885-1893, Oct. 2006.
- [15] 石橋圭介, "広域インターネットトラフィック測定・分析と異常トラフィック検出," 信学技報, IN2007-107, Dec. 2007.
- [16] M. Demirci, S. Lo, S. Seetharaman, and M. Ammar, "Multi-layer monitoring of overlay networks," Proc. PAM, 2009.
- [17] M. Allman, L. Martin, M. Rabinovich, and K. Atchinson, "On community-oriented internet measurement," Proc. PAM, 2008.
- [18] 町澤朗彦, 北口善明, "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.
- [19] 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," 信学論 (B), vol.J87-B, no.10, pp.1696-1703, Oct. 2004.
- [20] Y. Lee, S. Agarwal, C. Butcher, and J. Padhye, "Measurement and estimation of network qos among peer

xbox 360 game players,” Proc. PAM, 2008.

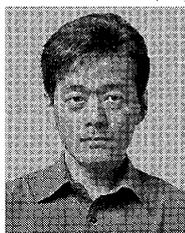
- [21] <http://www.maxmind.com>  
 [22] K. Kobayashi and T. Katayama, “Analysis and evaluation of packet delay variance in the internet,” IEICE Trans. Commun., vol.E85-B, no.1, pp.35–42, Jan. 2002.

(平成 21 年 1 月 30 日受付, 5 月 29 日再受付)



手島 孝人 (正員)

1996 京大・工・合成化学卒。同年 (株) ナムコ入社。2007 筑波大・ビジネス科学研究科修士課程了。1999 年 4 月より (株) ポリフォニー・デジタルにて、家庭用ゲーム機器向けソフトウェアの開発に従事。



丹 明彦

1991 東大・工・計数卒。同年 4 月日立製作所中央研究所入社。1994 年 12 月より (株) ソニー・コンピュータエンタテインメント, 1998 年 4 月より (株) ポリフォニー・デジタルにて、家庭用ゲーム機器向けソフトウェアの開発に従事。



渡辺 奏

2006 年 10 月より (株) ポリフォニー・デジタルにて、家庭用ゲーム機器向けソフトウェアの開発に従事。



吉田 健一 (正員)

1980 東工大・理・情報科学卒。同年日立製作所入社。1992 年 9 月博士 (工学, 大阪大学)。2002 年より筑波大学大学院ビジネス科学研究科教授。インターネット上の各種データを、機械学習の手法を使って解析する研究に従事。人工知能学会会員。