

# マルチレイヤプロトコル解析を用いた ISP 網運用方式の検討

## An ISP Network Management Scheme based on Multi-Layer protocol Measurement and Analysis

神谷 正人                      山崎 育生                      川村 龍太郎                      岩下 克  
Masato Kamiya                      Ikuo Yamasaki                      Ryutaro Kawamura                      Katsushi Iwashita

NTT 未来ねっと研究所  
NTT Network Innovation Laboratories

### 概要

インターネットサービスを提供する ISP は、顧客に対して高い通信クオリティを安定して提供することが重要である。本稿では、通信トラフィックの計測に基づき提供通信品質を制御する網運用方式に関して、基礎的な検討結果を示す。まず上位レイヤプロトコルを含む複数の通信レイヤのトラフィック観測・分析を行うことにより、ユーザが実際にアプリケーション使用時に享受する満足度を推定する方式について提案する。本検討では対象アプリケーションとして WWW を選択した。次に低い満足度の場合にその要因、発生場所を推定するため、traceroute を用いたアクティブ計測法を提案する。両提案方式の有効性を検証するため、実際の IP 網を用いた実験を行った。

## 1. はじめに

近年 ADSL や FTTH サービスの普及によるアクセスラインのブロードバンド化が急速に進展している。それに伴い、WWW 等の通信アプリケーション利用時における通信クオリティへの関心が高まっている。これまで通信クオリティを制約するボトルネックは、アクセスラインが支配的であった。しかしアクセスラインのブロードバンド化により、ボトルネックはサーバを含むエンド - エンドの多様な個所に分散する傾向にある。

一方、顧客にインターネットサービスを提供する ISP の立場では、顧客に対して高い通信クオリティを安定して提供することが事業上求められる。しかし多くの場合、通信のエンド - エンド経路は複数の AS (事業者) を経由しているため、ISP がその通信クオリティに直接関与可能な範囲は限られている。例えば、ISP 外のネットワーク部分やサーバにボトルネックが発生した場合、ISP 自身がそれを短期的に改善するのは難しい。しかし一方では、多くの一般ユーザにとっては、アクセスポイントから先のネットワークサービス (サーバを含む) はブラックボックスであり、それゆえ享受するサービスクオリティは全て「ISP が提供するサービスクオリティ」と認識される傾向がある。このような状況下において、ISP 事業者は、(1)ユーザが ISP サービスをどのように利用しているかを知ること、(2)ユーザが通信アプリケーション利用上、実際に享受するクオリティを知ること、(3)実現しているクオリティの要因を知ること、(4)クオリティ向上のために ISP として可能な対処法とその効果を知ることが、ネットワーク運用の観点から益々重要になると考えられる。例えば多数の顧客が利用している web サービスが、他の AS 内で発生しているボトルネックにより低品質となっていることが検出できれば、それを解決する新たなピアリングやサービスの ISP 内ホスティングなどによ

る解決を検討することが可能となる。

従来インターネットトラフィックの計測研究として TCP や UDP 等の比較的低位レイヤを対象としたトラフィック解析が多く行われてきた[例えば 1,2,3]。これらの方法を用いた TCP/UDP ポート番号検出により、上記(1)のユーザ利用サービス種別を検出することは可能である。しかし、その結果のみを用いて、ユーザがアプリケーションを利用する上で実際に享受している通信クオリティ (本稿ではユーザレベル QoS と呼ぶ) の推定や、更にその要因や対処法の推定をすることは難しいと考えられる。

本論文では、ISP 内において、上位レイヤプロトコルを含む複数の通信レイヤのトラフィック観測・分析を行うと共に、ICMP パケットや所定のサービスへの能動的なアクセスを行うことにより、上記の主に(2)と(3)の課題を解決する方法を提案し、実際の ISP 内において実施した検証実験結果を示す。

以降、2章において本論文で扱う上記2つの課題について詳述する。3章及び4章において、ユーザレベル QoS 推定手法及び、ユーザレベル QoS 要因推定法について述べる。5章において残された主な課題について考察を述べ、最後に6章において本稿のまとめを述べる。

## 2. プロトコル解析に基づく ISP 網運用

本章では、本論文の対象とする2つの課題について、その設定と条件を述べる。まず、図1に本研究で適用網として想定する ISP を示す。ISP は IX を介してインターネットに相互接続する。またユーザを顧客として持ち、各ユーザは ISP のアクセスポイントを経由してインターネットサービスを利用する。

### [課題1] ユーザレベル QoS の推定

前章で述べた通り、ISP にとって実際にユーザがアプリケーション利用時に体感している通信品質上の満足度

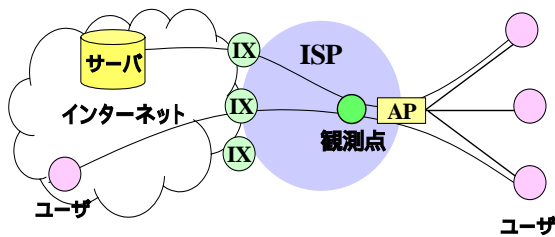


図1 想定する ISP 構成

(ユーザレベル QoS)の把握が重要である。本研究では現在最も利用割合が高いWWWを最初の検討対象として選択し、ISP 内観測点におけるトラフィック観測により、ユーザレベル QoS 推定を行う。

### [課題2] 実現しているクオリティの要因の推定

検出されたユーザレベル QoS が低い場合、その要因を検出できれば、ネットワーク運用上有益である。本検討ではISP 内観測点におけるトラフィック測定に加え、ICMP パケットの利用等によるアクティブ測定により、ISP の外部ネットワーク及びサーバを含めた通信のエンド-エンドにおけるボトルネックの所在、及びその程度を推定することを旨とする。

この2つの課題を解決する方式を検討する上で、我々は以下の条件を置いた。

1. 各 AS に存在する網管理機能(OSS)経由及び、自ISP 外のルータへの SNMP 等のマネジメントプロトコルを用いた情報収集方式は、事実上非現実的であるため使用しない。

2. ユーザ装置(PC 等)、サーバ装置、ルータ等に特別なソフトウェアを導入する方式を用いない。

これらの条件下では高精度の推定は望めないと考えられる。しかし我々は推定値の高精度化ではなく、むしろ現実的な網環境、及び利用可能な手法を用いてどの程度有意義な結果が得られるのかに着目する。

## 3. WWW利用時におけるユーザレベル QoS 推定手法

### 3.1 ユーザレベル QoS 推定法

WWW を利用しているユーザが体感する通信品質に関する満足度については、我々を含むいくつかの研究が既に行われている[4,5,6]。それらの結果から、web ページの要求から表示が完了するまでの「転送時間」がユーザ満足度に関係が深いことがわかっている。その一例として、図2、及び図3に我々が行った評価例を示す。図2に示す実験系を用意し、被験者による小規模な主観品質実験を行った。ネットワークのボトルネック帯域、及びコンテンツサイズを可変として Web ページ転送時間の異なる状

況を設定した。5名の被験者がランダムに選択されたパラメータ設定の下で、同一の Web ページに同時にアクセスを行い主観値を申告した。図3にその結果を示す。図3(a)はボトルネック帯域、及びコンテンツサイズの各設定時において、不満と申告した被験者の割合を示している。z 軸方向に0.2間隔で描かれている等高線のx-y平面への射影線を見ると、その間隔が非常に密集しており、さらにほぼ直線となっている。このことからユーザ満足度を高く保つには、コンテンツサイズに応じた帯域が必要であり、その帯域以下になると被験者は急激に不満状態となることがわかる。次に図3(b)に、図3(a)と同条件の試験において、ページ転送時間が8秒以上であった転送数の割合を示す。両グラフの等高線のx-y平面への射影を見ると、その位置、間隔の密度について非常に類似しており、満足度推定にページ転送時間検出が有効であることがわかる。また「8秒ルール[7]」に合致していることがわかる。

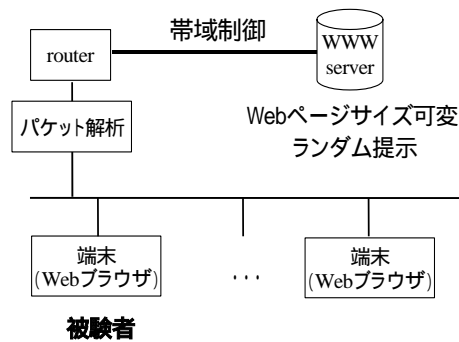


図2 主観評価実験系

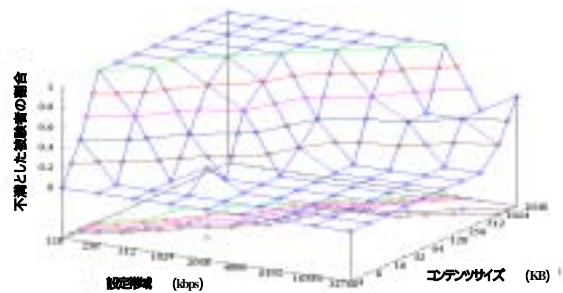


図3(a) 主観表価値: 不満とした被験者の割合

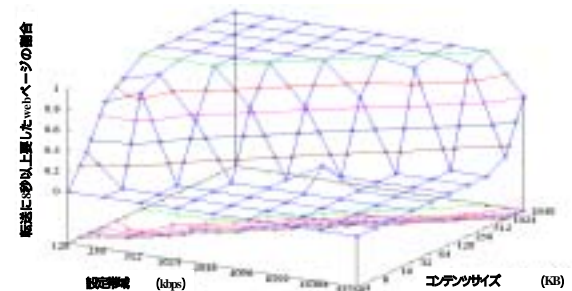


図3(b) 転送に8秒以上要した web ページの割合  
図3 ユーザ満足度主観評価実験結果

### 3.2 Web ページ転送時間検出法

Web ページは、ページ構成を記述した HTML データ、及び画像データ等の多様なオブジェクトにより構成される。サーバ - クライアント間では、各オブジェクトは複数の TCP フローを用いて並列転送される。Web ページ転送時間は、オブジェクトの転送トラフィックを観測し、同一 Web ページ内のオブジェクトを同定し、更に web ページ転送要求と、最終オブジェクト転送完了時刻を同定することにより検出できる。各オブジェクトの転送完了時刻は、各 TCP フローに着目し、TCP シーケンス番号の追跡、及び HTTP プロトコルの解析により検出することが可能である。

ページ転送完了を同定する方式として、HTML データ内に記述されたページ構成オブジェクト全ての転送完了を確認する方式が考えられる。しかし通信経路上にキャッシュ機能が存在する場合、オブジェクトの一部がキャッシュから読み出され、観測点を通過しない場合がある。このような場合でも web ページ転送終了を正確に検出するために、ユーザによる次の web ページの転送リクエストが発生した時点で、前 web ページの最後転送オブジェクトの転送終了時刻を遡って同定するアルゴリズムを用いた(図4)。

しかし HTML の記述能力を最大限利用して作成される実際の web ページには、上記のアルゴリズムだけでは正確に転送時間を検出できないものがある。これらの web ページに対して web ページ転送時間を正確に検出するため、以下の例外処理を加えて用いた。

(例外処理1)オブジェクト自動リロード対策:例えば広告バナー等、自動的にデータの再転送が繰り返されるオブジェクトは、web ページ転送時間を過大に見積る可能性がある。従って既知の広告配信サーバ等、特定のサーバから転送されるオブジェクトは、それが web ページを構成するオブジェクト群の中で最終転送完了オブジェクトになった場合でも、それを最終転送オブジェクトとしないこととした。

(例外処理2)ストリーミングオブジェクトの排除:現在 web ページの中には、ストリーミングオブジェクトが埋め込まれ、

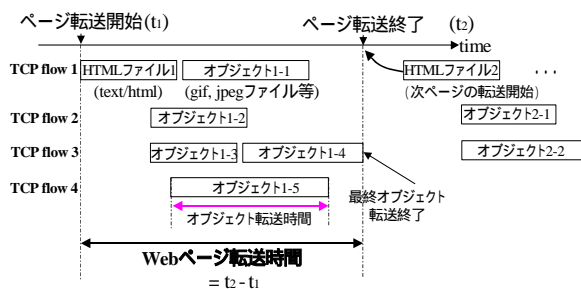


図4 web ページ転送時間解析法

自動的に再生されるものがある。これは web ページを構成するオブジェクトの1つではあるが、ユーザの満足度を測定する目的での web ページ転送時間を考えた場合、その転送時間を含めるのは適当ではない。そのため HTTP レスポンスの「Content-Type」フィールドを解析し、ストリーミングとみなされるオブジェクトの転送時間は、今回の web ページの転送時間を含めないこととした。

(例外処理3)WWW アプリケーション以外の排除:現在通信アプリケーションの中には、主としてプロキシを経由した通信を可能とする目的のため、TCP ポート80番を利用した独自プロトコルを利用したものがある。例えばメッセージアプリケーションなどがそれに該当する。本手法ではこれらを web ページを構成するオブジェクトと誤認識してしまう可能性がある。そのため、HTTP レスポンスの「User-Agent」フィールド、もしくは「Content-Type」フィールドを解析し、web ページを構成するオブジェクトとでないオブジェクトは除外した。

この様に IP, TCP, HTTP の3通信レイヤのプロトコルを組み合わせることで解析することにより、web ページ転送時間を解析する。

### 3.3 実 IP ネットワークにおける web ページ転送時間推定実験

実 IP ネットワークを用いて提案手法の検証実験を行った。ユーザのアクセスポイントにバケット複製可能なスイッチを設置し計測点とした(図1)。

計測点において検出した全 web ページアクセス、及びその内のある2つの web サイト A, B に対するアクセスの平均ページ転送時間の時間変化を図5に示す。ここで web サイト A は、今回の測定期間中アクセス数が最も多かった web サイトであり、web サイト B はアクセス数が比較的多い(7位)一方、ページ転送時間が長かった代表的なサイトである。まず全体平均の推移を見ると、およそ4秒程度に安定しており、0時頃にやや増加が見られることがわかる。一方 web サイト A に対するアクセスでは、全体的に短い転送時間が実現されている。しかし20時以降、22時をピークに増加し、4時ごろにかけて徐々に減少する傾向が見られる。また最大値(22時)は、最小値(4時)の約2倍となっており、時間帯によりページの転送時間が大きく変化することが確認できる。また web サイト B はページ転送時間が比較的長い傾向が見られる。このようなサイトに対して転送時間の改善に向けて何らかの対策ができれば、ユーザ満足度向上に大きく貢献することが期待できる。

次に web サイト A へのアクセスに対する時間帯別 web ページ転送時間分布を図6に示す。この結果から、時間帯によってwebページ転送時間の分布が多少異なり、トラフィックピーク時間帯(A.M.0時から1時)のwebページ転送時間は、トラフィック閑散時(A.M.7時から8時)に比べて若干長い傾向があることがわかる。またピーク時間帯では10%程度の転送時間が8秒以上となっている。webページ転送時間測定結果のユーザレベルQoSへの置換例を図7に示す。ユーザレベルQoSへの変換式は図3(a)に示

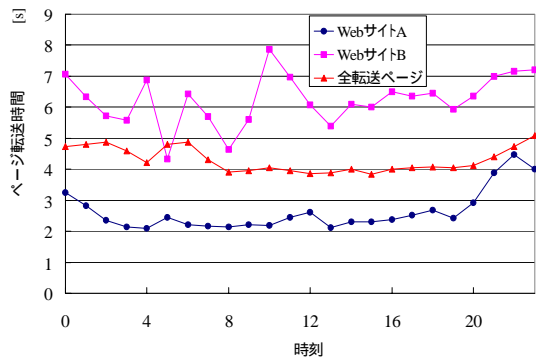


図5 時間帯別ページ転送時間

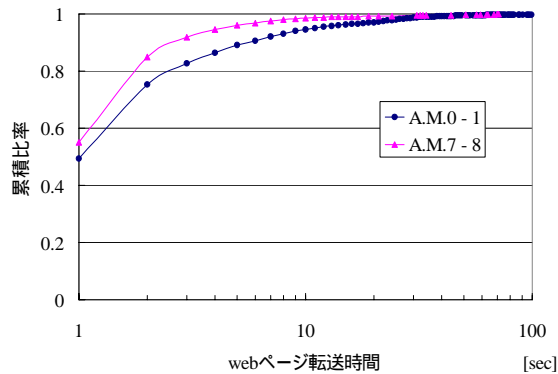


図6 web サイト A の時間帯別 PTT 分布

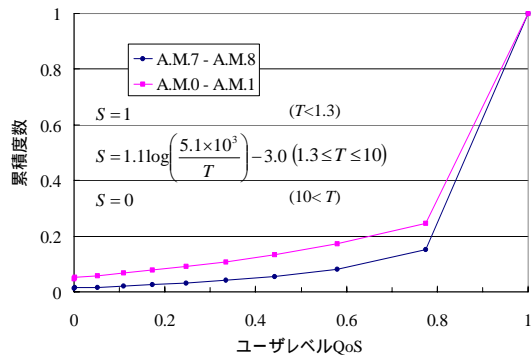


図7 時間帯別ユーザレベル QoS 分布

した主観品質評価実験結果から導出したものを用いた。

この実験により、提案アルゴリズムによって web ページ転送時間検出をリアルタイムで行うことが可能であり、その結果を用いてユーザレベル QoS が推定可能であることを確認した。

## 4. ユーザレベル QoS 要因推定法

### 4.1 ネットワークボトルネック検出法

検出したユーザレベル QoS 値が低い場合、その原因の発生場所、及びその程度を推定する必要がある。ユーザレベル QoS に影響を与える要因としては、ネットワーク内のトラフィック輻輳以外に、サーバ負荷、ユーザ端末負荷等が考えられるが、本検討では主としてネットワーク内トラフィック輻輳に依存する要因について検討した。

自 ISP 以外のネットワーク部分についても輻輳状態を推定する手法として、ICMP パケットを用いた traceroute[8] プログラムを用いることとした。経路上に輻輳がある場合、traceroute の ICMP パケットもユーザパケットと同一のキュー待ち合わせ遅延を受け、その結果が traceroute の結果に反映されるものと仮定した(この仮定に関するいくつかの課題は5章で議論する)。以下にそのアルゴリズムを示す。

事前に測定対象サーバに対して traceroute を十分繰り返し、各ホップごとの最小 RTT (RTTmin) 値を求める。この値は測定期間が十分に長い場合、ICMP パケットがほとんどキュー待ち合わせ遅延の影響を受けずに転送された場合の RTT 値と仮定できる。次に測定対象とした web サーバに対して traceroute を定期的に行い、各測定周期で得られた traceroute 結果と RTTmin の差分 (RTTmin 差分値) を算出し、この値がキューイング遅延により発生した増加時間と考える。各ホップ毎にその差分値を求めることにより、各ホップまでの遅延値を推定する。また隣接ホップ間の差分を算出することにより、各ホップ毎の遅延増加分を推定し、この値によりボトルネックリンクの推定を行う。

### 4.2 実 IP ネットワークにおけるネットワークボトルネック推定実験

前章と同一の IP ネットワークを用いて検証実験を行った。本実験では指定した WWW サーバに対して24時間、5分周期で traceroute を実行した。またネットワーク、及びノードに与える負荷を最小限にするため、各ホップに対する ICMP パケットの送出回数をデフォルトの3回ではなく1回とした。また今回の実験では RTTmin の検出にもこの結果を用いた。

ある web サイト C に対して、検出した RTTmin を図8に示す。この web サイトは米国内にあることを確認している。

HOP4 までが今回実験を行った ISP のルータであり、HOP5で他のASに接続している。またHOP5-HOP6間が日米間の国際回線となっている。

各周期における traceroute 値と RTTmin との差分 (RTTmin 差分値) の1時間毎の平均値を図9に示す。この結果から、アクセス ISP 内のホップまでの遅延値にはそれほど変動が見られないが、HOP5以降の他ASのホップまでの遅延値では、午前0時をピークとして増加が見られ、午前4時頃にかけて大きく減少し、その後再度増加していることがわかる。

同期間における、このwebサイトCへのアクセスの平均web ページ転送時間、及び転送ページ数の測定結果を図10示す。図9と比較すると、平均 web ページ転送時間は、サーバまでの遅延であるHOP11のRTTmin 差分値の変動と比較的類似している。このことから、RTTmin 差分値とWeb ページ転送時間の間にはある程度相関があると考えられる。この相関の定量的な検討については今後継続して行う予定である。

次に web ページ転送数が比較的多い時間帯(繁忙時間帯: 22時~1時)と少ない時間帯(閑散時間帯: 4時~7時)に関して、各ホップごとの RTTmin 差分値の平均値を図11に示す。この結果から、HOP3 までは閑散時と繁忙時で大きな差は認められないが、HOP4 - HOP5、及びHOP5-HOP6間でその差が大きくなっているのがわかる。設定した仮定が正しいとすると、このリンクにおける輻輳が、他のリンクより大きいと予想される。前述のとおり、HOP4 - HOP5 間は、AS 間接続リンク、また HOP5 - HOP6 間は日米間リンクである。

このように混雑が予想されるホップに対し、RTTmin 差分値は閑散時と繁忙時で変化することがわかった。これらの正確な検証には、他のAS内にあるルータのトラフィック情報等が必要となるため、今回は正確に確認することはしていない。今後は実験網やISP内ルータを用いて、リンク混雑度とRTTmin 値変動の定量的な評価を行う予定である。

同様の検討を、国内にあるwebサイト(webサイトD)に対して行った結果について、図12、及び図13に示す。図12の結果から、22時及び12時付近においてRTTmin 差分値が増加していることが確認できる。また図13の結果から HOP3 - HOP4、HOP6 - HOP7、HOP7 - HOP8間で繁忙時間帯と閑散時間帯のRTTmin 差分平均値が増大している。これらはいずれもAS間接続点であることがわかっている。HOP10-11間においてRTTmin 差分平均値が最も増加しており、このHOP間がユーザーレベルQoSに与える影響が大きいホップであることが予想される。

なお本測定では、特定のホップのRTT値が比較的安定

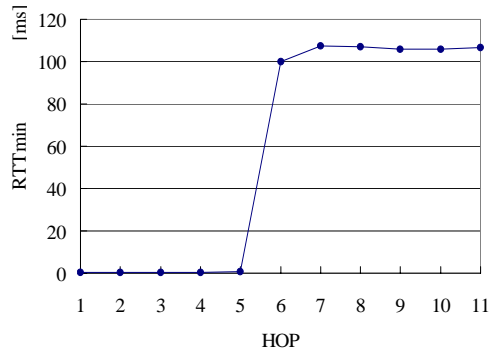


図8 RTTmin 値(web サイト C)

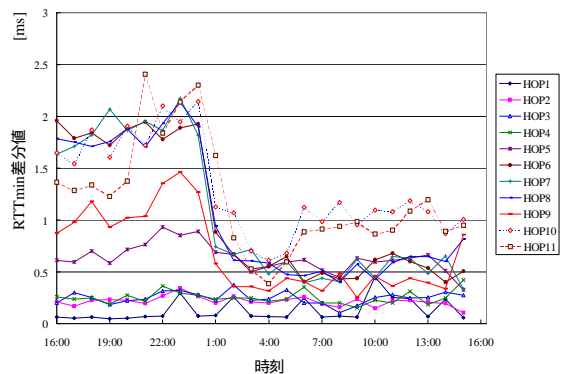


図9 RTTmin 差分値(web サイト C)

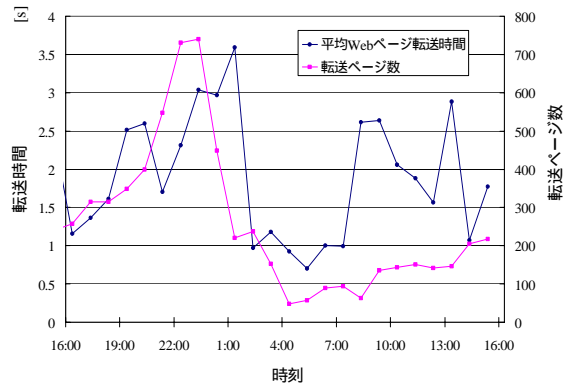


図10 平均 web ページ転送時間(web サイト C)

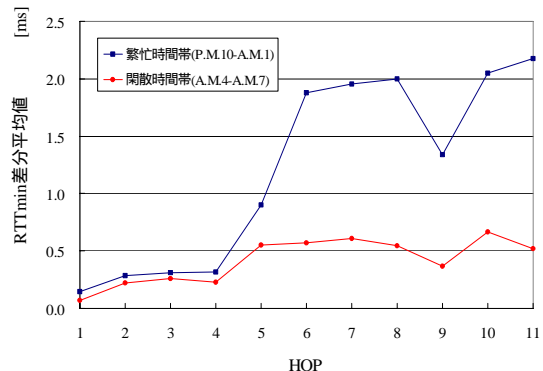


図11 ホップ別 RTTmin 差分平均値(web サイト C)

した頻度で非常に大きくなる現象があった。今回はこれらの値は除去することとした。具体的には、web サイト C 試験における HOP7 及び HOP9 から HOP11 である。これらの現象については次章で考察する。

## 5. 考察

提案方式に関する主な課題について以下に議論する。

### (1) traceroute の往復経路の異経路性について

IP 網ではエンド-エンド間の往復パケットが、それぞれ別経路を通る場合がある。これは主として AS のルーティングポリシーに依存して起こり、特に日米間のトラフィックでは比較的多く発生していることがこれまでの経験上わかっている。この異経路性は4章で述べた traceroute を用いた推定アルゴリズムに問題を及ぼす。つまり中継ルータから返される ICMP パケットの転送経路が、実際の測定対象サーバからのユーザパケットの転送経路と異なる部分を含む可能性がある。今後は実際の発生頻度と、それが結果に及ぼす影響、及びその検出法について検討する。

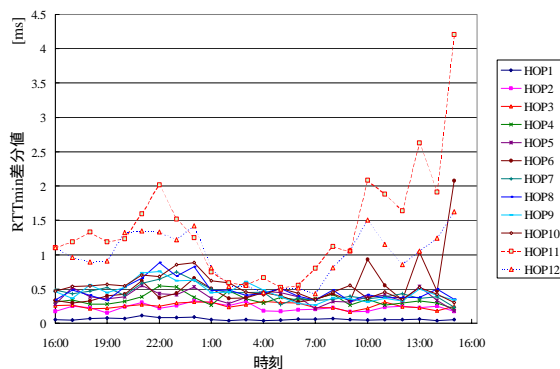


図12 RTTmin 差分値(web サイト D)

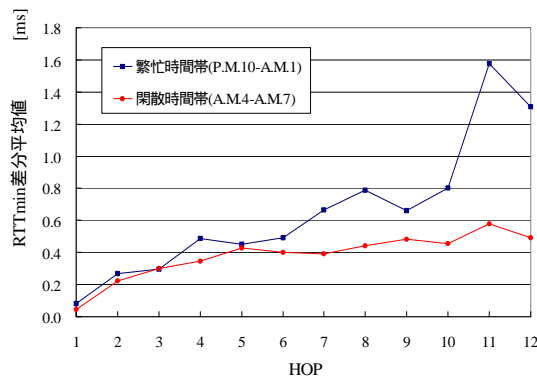


図13 ホップ別 RTTmin 差分平均値(web サイト D)

(2)ルータの ICMP 処理方法の差異が及ぼす traceroute 結果(RTT 値)への影響について

受信した ICMP パケットの内部処理メカニズムは、各ルータ種別により異なると考えられる。4章で用いたアルゴリズムでは、仮にルータ内部での処理時間(ICMP パケットの受信から応答送るまで)が一定の場合、その処理時間は最短RTTとの差分を取ることでキャンセルできる。しかしポーリングアルゴリズム等により、この装置内処理時間にばらつきが発生する場合、この方式を用いた推定は困難となる。実際に今回の実験の際にも、特定のノードへの RTT 結果が短い RTT と長い RTT の2つの群に明確に分離できるような特徴的なノードがあった。今後、代表的なルータにおける処理特性を調査し、この誤差が測定精度に及ぼす影響とその対処法について検討する。

### (3) traceroute が到達しないサイトについて

中継ルータ及び Web サーバ自身が ICMP パケットに対して返答しないよう設定されている場合、それらのホップに対しては traceroute 測定結果を得ることが出来ない。したがって、それらの区間に関しては4章で述べたボトルネック推定手法を適用することができない。(今回の試験では、ページ転送数の多い上位100web サイトの内、経路上最後の web サイトまでの全ホップから結果を取得できたものは約半数であった。)そのため、ICMP が到達しない部分に対する要因推定に関しては他の方法を検討する必要がある。

### (4)サーバ負荷に伴うユーザレベル QoS の低下検出について

4章で述べた traceroute を用いた要因分析法では、最終ノードは Web サーバである。従ってこの方法を用いてサーバのある種の負荷状態を推定することが可能であり、実際に図9、及び図12に示す通り、繁忙時のRTTは増加している。しかし多くの Web サーバはデータベース等が動作するバックヤードの計算機と複数で構成されており、そのためユーザがサーバ負荷により受ける web サービスの遅延をフロントエンドの計算機への traceroute 結果のみで推定するのは適切ではない。この問題を解決する測定方法については現在検討中である。

### (5) アクティブ測定に関する道義的問題について

今回利用した traceroute 等のアクティブ測定は、本来のデータ通信という目的とは異なる測定用のトラフィックを発生させる。これにより通信ノード等に負荷を与えることは望ましくない。より高精度のデータを取得するためには、測定試行回数の増加が効果的であるが、過剰に行った場合、通信ノードに対する攻撃となる恐れがある。以上を考慮した結果、今回行った実験では5分間に1度の頻度で、web サーバに対し traceroute を実行することとした。

## 6 . まとめ

トラフィック観測に基づく ISP 網運用を目的として, マルチプロトコル解析に基づくユーザレベル QoS 推定法を提案し, 実際の IP ネットワークを用いた実験により, その実用性を確認した.

また実現しているユーザレベル QoS の要因を明らかにするため, traceroute を用いた要因推定法を提案し, RTT の最小値からの差分がユーザレベル QoS と相関が高いことを確認した. 今後この相関の定量的な評価を行うと共に, WWW 以外のアプリケーションに対するユーザレベル QoS 推定法についても検討を行う予定である.

本稿では ISP 網運用の観点から方式を検討したが, 同様の方式はサーバ評価・運用にも有効であると考えられる. 今後はこの様な他の適用域についても検討を行う.

## 参考文献

- [1] K.Thompson, G.J.Miller, R.Wilder, "Wide-Area Internet Traffic Patterns and Characteristics", IEEE Network, November/December 1997.
- [2] V. Paxson, "Growth Trends in Wide-Area TCP Connections", IEEE Network, Vol. 8 No. 4, pp. 8-17, July 1994.
- [3] R. Caceres et al., "Measurement and Analysis of IP Network Usage and Behavior", IEEE Communication Magazine, May 2000.
- [4] 神谷正人, 鍋島正義, 田中裕之, 川村龍太郎, "WWW 利用時におけるユーザレベル QoS 推定法の検討", 2001 信学総大, B-11-22, 2001.
- [5] Anna Bouch, Allan Kuchinsky, Nina T. Bhatti, "Quality is in the eye of the beholder: meeting users' requirements for Internet quality of service", CHI 2000.
- [6] 林孝典, 六藤雄一, 中島伊佐美, "Web型サービスのレスポンスタイムに関する主観品質評価", 2001 信学総大, B-11-23, 2001.
- [7] <http://www2.zonaresearch.com/info/press/99-jun30.htm>
- [8] V.Jacobson, "traceroute", <ftp://ftp.ee.lbl.gov/traceroute.tar.gz>