

## 解説

# インターネットの 特性計測技術と その研究開発動向

鶴 正人 [tsuru@genesis.tao.go.jp](mailto:tsuru@genesis.tao.go.jp)  
通信・放送機構/  
日本テレコムインフォメーションサービス

尾家 祐二 [oie@cse.kyutech.ac.jp](mailto:oie@cse.kyutech.ac.jp)  
九州工業大学情報工学部 電子情報工学科

インターネットは、社会や経済のインフラストラクチャとしての品質が問われるようになってきた。インターネットにおける品質管理には、通信のエンドツーエンドの挙動、大域的挙動、局所的挙動を計測し、品質評価やその要因解析を行う必要があり、このための標準的な技術の確立が求められている。これらは、ネットワークの効率的運用や品質差別化サービスだけでなく、次世代のネットワーク装置、プロトコル、アプリケーションの研究開発にも不可欠である。本稿では、このようなインターネットの特性計測技術について最新の動向を踏まえて概説する。

## インターネットと計測

インターネットの成長はとどまるところを知らず、今や社会や経済のインフラストラクチャとみなされるようになった。それに伴い、単に接続性だけでなく、効率や信頼性、その上で提供されるさまざまなアプリケーションの品質までを含めた、各階層でのサービス品質 (QoS = Quality of Service) が問われてきている。特に、音声や動画の実時間アプリケーションやEコマースの進展により、インターネット上の品質保証への関心が高まっている。

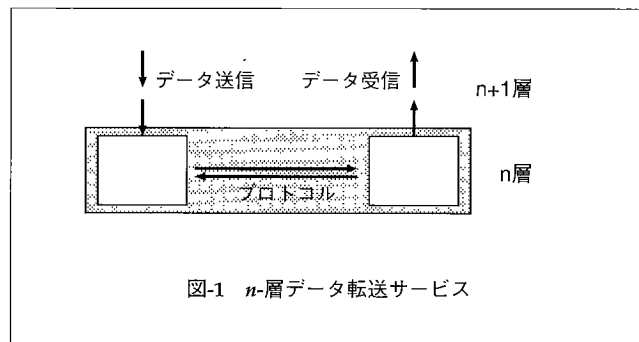


図-1 n-層データ転送サービス

インターネットでは、原則的に、中継ノード(ルータ)は、受け取ったパケットの宛先から次の中継先を決定し、そこへ転送を試みるだけである。パケットは送信した順番で届く保証もないし、途中のルータの資源不足で廃棄されることもある。そして、品質向上のための複雑な制御はエンドツーエンドのノード(通信の両端のホスト)間のプロトコルで実現するというポリシーで発展してきた。このポリシーは、経済性、柔軟性、頑強性、相互接続性をもたらし、巨大なインターネットを実現可能にした反面、その結果としての大規模性、多様性、管理の分散性などの特徴は、インターネットでの品質管理を、従来の電話網などに比べ格段に困難なものにしている<sup>1)</sup>。

一般に、品質を管理するには、品質の評価や品質を左右する状態の把握・予測のための計測が必要であり、インターネットにおいても、その特性を客観的に計測・解析・評価するための手法が、運用および研究開発のさまざまな場面で求められている<sup>2)</sup>。たとえば、

- ネットワークの運用・評価・経営管理：障害検出、障害解析、品質診断、SLA検証、利用量ベース課金、セキュリティ監視、利用者プロファイル作成、容量計画、資源最適配置、経路最適化、疑似トラフィック生成など。なお、SLA (Service Level Agreement) とは、ISPなどが利用者との間で定量的な品質の契約をとり交わすものである<sup>3)</sup>。
- 装置、プロトコル、アプリケーションおよびネットワークの研究開発：動作設計、動作解析、トレースデータ駆動型シミュレーション、疑似トラフィック生成、モデル解析におけるパラメタ推定など。
- ネットワークの適応的制御：フロー制御、経路制御、キュー制御、ポリシー制御、セキュリティ制御など。その代表例が、実は、普段から利用しているTCPにおけるフロー制御である。TCPでは、計測で得た情報を基に、連続して送信するパケット数や再送タイムを調整しながらパケットを送信する。

## 計測の対象

以下では、ネットワーク上のデータの流れを一般に「トラフィック」と呼ぶ。また、エンドツーエンドのホスト間のパケット転送経路を「パス」と呼ぶ。パスに沿ったIPパケットの流れがIP層のトラフィックである。一方、始点/終点のIPアドレスやアプリケーション種別(ポート番号)などで識

別される両端間の片方向あるいは双方向の一連のデータの流れをフローと呼ぶ。これはTCP/UDP層のトラフィックといえる。さらに、よりアプリケーション寄りのトラフィックとして、アプリケーションの意味を反映した双方向の並列/直列のフローのまとまりを広義の「フロー」と呼ぶ。

ネットワークは階層構造を持ち、特にデータの転送に限れば、 $n$ -層の機能は、送信側の $(n+1)$ -層から渡されたデータを転送し、受信側の $(n+1)$ -層に渡すことである(図-1)。このとき、 $n$ -層上の指定したエンドツーエンド通信の「品質」とは、その両端における送信側(入力)データ系列と受信側(出力)データ系列の相関と捉えることができる。たとえば、その2つが時間の遅れなく同一であるのが理想の品質といえる。

$n$ -層をブラックボックスとみて、ある時点でのあるエンドツーエンドの品質を知るには、入力/出力トラフィックの相関が分かればよく、たとえば、試験トラフィックを発生させてみて、送信/受信側での挙動を計測すればよい。

ただし、品質は、 $n$ -層内の「状態」によって大きく変化する。状態は、原理的には、 $n$ -層自身の静的な能力と、 $n$ -層上の動的な通信要求の発生に伴って変動する負荷によって決まるが、それらを直接に把握するのは困難であり、計測可能なものは、それらの結果としての、局所的な構成要素の挙動や大域的な通過中トラフィックの挙動である。しかも、それらの挙動は、構成要素の数の多さ、地理的な広がり、管理上の分断に起因して、正確にすべてを計測することが困難である。よって、計測した生の「品質」から信頼性・客観性のある情報を抽出することが重要な課題になる。

一方、 $n$ -層の品質管理では、 $n$ -層内の構成要素の局所的な品質・状態、さらに大域的なネットワークの構成・設定やそこを流れるトラフィックを継続的に計測し、モデル化や予測を行う。また、それらと $n$ -層上のエンドツーエンドの品質の対応関係を解析し、最終的に、適切なネットワーク構成や構成要素の選択、キューや経路などの制御によるトラフィック管理を行って、品質やコストパフォーマンスを向上させることが目標となる。

しかし、大域的なトラフィックの挙動は、品質との関係を考えるとき、巨視的な時間特性(どの時間帯は混む等)や空間特性(どこからどこへのアクセスが多い等)をみるだけでは不十分で、アプリケーションや利用環境ごとに異なる多様なフローの特性もみる必要がある。しかも、それらの特性は、利用者やホスト数の増加、回線容量や接続の変化、アプリケーションの流行、巨大データセンタや個人間(P to P)通信の出現などにより、変化していく。さらに、さまざまなレベルの相互作用、たとえば、適応的プロトコルによるエンドホストとネットワーク間の干渉、ネットワーク資源の共有によるフロー間の干渉、ネットワーク階層間の干渉などが、その挙動の複雑性を増幅する。このようなトラフィックの挙動の変動性・複雑性は、モデル化や予測を困難にしている。

結局、いつ・どこで・何を測れば必要十分な情報が得ら

れ、それをどう品質管理に活かすか、という基本的課題が未解決といえる。

### エンドツーエンドの品質の計測

まず、エンドツーエンドのIP層およびTCP/UDP層でのデータ転送に関する品質計測を考える。品質尺度(QoSパラメータ)としては、接続性、片道パケットロス、片道パケット遅延、往復パケット遅延(RTT=Round Trip Time)、遅延変動、スループットなどが代表的である。

以下、パケットロス、パケット遅延、スループットを説明する。なお、「帯域幅」はルータ間の伝送路の単位時間当たりの最大伝送可能データ量を意味する。

片道パケットロスは、片端から送信したIPパケットが他端まで届かないという事象であり、その発生率で表現する。ただし、上位の層の品質への影響を考えると、発生パターンも重要である。

- 1) ルータでの待ちキューのバッファ溢れ、
- 2) 下位の層での未配送やデータ誤り、
- 3) 経路の一時的消失、

などによって発生する。通常1)が多いが、無線や老朽化した回線では2)も無視できない。

片道パケット遅延は、片端から送信したIPパケットが他端に届くまでの経過時間である。

- 1) ルータでの待ちキュー滞在、
- 2) ルータでのパケット転送処理、
- 3) 伝送路でのパケット伝送(パケット長÷帯域幅)、
- 4) 伝送路での信号伝播(伝送路長÷伝播速度)、

などの時間の和となる。下位の層が誤り再送や圧縮制御などを行う場合は、それらの処理遅延が追加される。

往復パケット遅延は、往路と復路の各々の片道遅延の和である。往路と復路で経路が異なる場合もあるし、そもそも同じ経路でも向きが異なればその状態は異なるので、片道遅延の2倍というわけではない。

スループットは、一連のパケットを送ったときに達成できる単位時間当たりの転送データ量である。スループットはIP層より上位の層の動作(フロー制御)に依存する。もし、事前にパス上のボトルネック(最も帯域幅の小さい伝送路)の帯域幅が分かり、自分がパスを独占して使うならば、その帯域幅分の一定レートでパケットを送信すると(パケットロスがないならば)最大スループットが得られる。しかし、通常のインターネット通信では、帯域幅は事前には分からず、過大レートではパケットロスが発生し、過小レートでは帯域幅を有効に使い切らず、どちらも高スループットは得られない。しかも、他のフローと競合するので、最適な送信レートは変化する。よって、一般に動的フロー制御が用いられる。

次に、エンドツーエンドのアプリケーション層における品質計測について考える。これは、利用者の満足

度に直接結び付くもので、たとえば、FTPの転送時間、WWWやDBの応答時間、音声や動画の再生品質などであり、適切な品質尺度が模索されている。そして、品質管理のためには、それをネットワークに依存する部分とそれ以外の部分とに分離し、また、前者の品質を下位の層の品質へ対応付けることが必要になる。

たとえば、利用者が感じる「遅さ」を考えてみる。巨大なファイルのダウンロード時のスループットが低い原因は、個々のパケット遅延ではなく、サーバの負荷やアプリケーション層の方式に起因して転送していない時間が長いことかもしれない。また、WWWページの表示が遅い原因は、パケットロスが発生していて、それを検出して再送するまでの待ち時間が長いことかもしれない。

このような品質の分析や階層間の対応付けは、一般に単純ではない。最近のVoIPやマルチメディア通信、あるいは高度なビジネスアプリケーションにおいては、これらはより複雑化しており、今後の課題である。

### ネットワークの大域的挙動の計測

まず、インターネットの構成（ネットワーク間の接続や経路）の計測は、障害監視だけでなく、日々変化している正常な接続自体の把握にも必要である。また、経路の短期的変動の把握も重要である。

大域的なトラフィックの計測も盛んである。インターネット上のある地点を通過するフローを計測し、始点/終点のさまざまな単位、たとえば、サーバ、組織、ISP、国などで合計したもの、あるいはその中の特定のアプリケーションで合計したものの挙動を解析する。たとえば、1) フローごとの特性量（発生時間間隔、持続時間、パケット長、データ量、パケットロス、スループット等）の分布、2) フローの集合の単位時間の特性量（同時データ量や同時フロー数等）の時系列挙動、などを対象とする。さらに、多数のフローの個々の動作の計測データをトレースデータ駆動型シミュレーションに用いる場合もある。

このような計測は、運用や経営管理上の有用性だけでなく、研究上も注目されている。インターネット上のトラフィックの複雑な挙動を把握するには、実際に発生しているトラフィックを大域的・長期的に計測し、さまざまな時間粒度で解析して知見を深めるしかないからである。そのような観察から、たとえば、現状のTCPのフロー制御の評価・改善提案が行われたり（RFC2988: Computing TCP's Retransmission Timer）、集約されたフローの自己相似性が発見されたりしている。隠れた法則性や不変量を見つけることは、システムとしてのインターネットをモデル化し、それに基づいた解析や予測を行うための第一歩である<sup>4)</sup>。

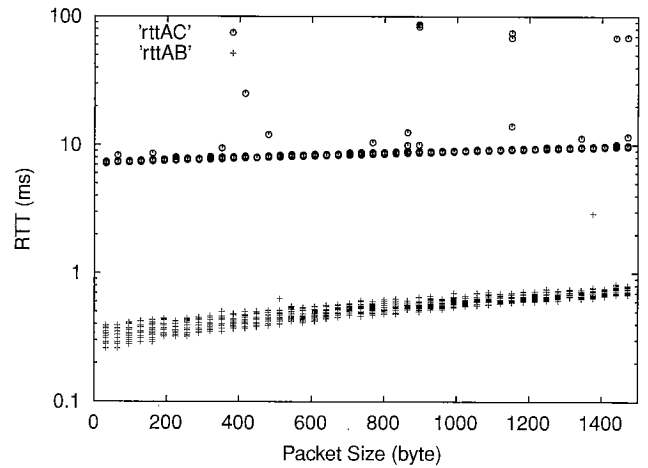


図-2 RTTの分布の例 (pathcharの原理)

### 計測の手法

計測の手法は、active計測とpassive計測に大別できる。active計測は、試験トラフィックを送受信し、その挙動を計測・解析して情報を得る。一方、passive計測は、ネットワークを流れている実運用のトラフィックを収集・計測・解析して情報を得る。

計測データの解析は、プロトコルの動作解析、フローの集約、時系列解析、統計処理などを含む。active計測による多数のパス上の計測データの相関を解析したり、passive計測による多地点での計測データを比較してパケットやフローを追跡したりするものもある。

一方、解析結果の多次元情報、トポロジ、地図との対応などの表示・表現には、2D/3Dのグラフや表などによる可視化が有用である。膨大な数の情報の可視化手法についての研究も行われている。

計測ツールに共通して考慮すべき問題として、信頼性、客観性（再現性・安定性）、コスト（経費・時間・手間）、精度や誤差、スケーラビリティ、計時精度（解像度・事象発生とのずれ・時刻同期）などが重要である。

計時精度が特に求められる場合は、汎用的なシステム上のソフトウェアツールの利用には注意が必要である。たとえば、WindowsやUNIX上のユーザプログラムで試験パケットの送信時刻を計時すると、その時刻と、実際にハードウェアから回線にパケットが送出された時刻とのずれが問題になることもある。

また、片道遅延などの計測では、送信側と受信側で時計を合わせる必要がある。このため、各々を、NTP (Network Time Protocol) を用いて最寄りの時刻サーバの時計に同期させたり、より高精度を求めるには、GPS (Global Positioning System) を用いてGPS衛星の時計に同期させたりする。

一方、誰が何を測ってよいか、測ることを許すかという問題や、運用トラフィックの計測データの公開に伴うプライバシーの問題にも配慮が必要である。

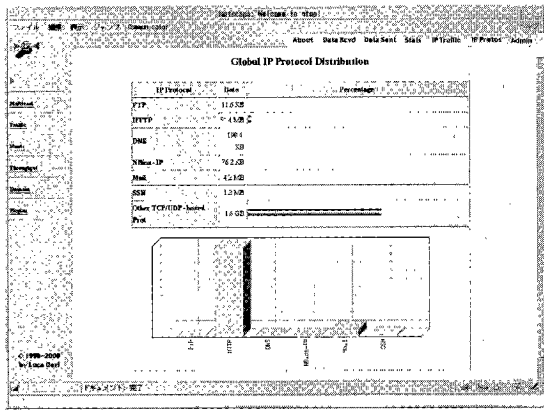


図-3 ntopの表示例

### active計測ツール

UNIX上で利用できる基本的なソフトを紹介する。

pingとtracerouteは古くからのツールで、前者は到達性、後者はパスを調べるが、他に往復パケットロスや往復遅延も測る。tracerouteは、ある終点に向けて、パケット生存ホップ数(TTL=Time To Live)の値を1から1つずつ増やしながらか複数回パケットを送信する。その終点までのパス上に存在するルータは、パケット中継時にそのパケット内のTTL値を1つ減じ、減じた値が1以上の場合は中継を行い、0になった場合はそのパケットを破棄してICMP Time exceeded通知パケットを返す。よって戻ってきた各ICMPパケットの始点IPアドレスをみることで、パス上の自分に近い方から順にルータが分かる。

pathcharやその改良版のpchar、bingは、パス上の伝送路の帯域幅を推定する。pathcharの原理を図-2で説明する。この図は、ホストAから(tracerouteと同様に)ルータBおよびその次のルータCへ各種サイズのUDPパケットを送りつけ、ICMP通知パケットが戻ってくるまでの時間(RTT)をプロットしている。AB間のRTTを $r_{tt_{AB}}$ 、AC間のRTTを $r_{tt_{AC}}$ と書く。RTTは、1) 待ちキュー滞在、2) パケット伝送、3) その他、の時間の和であるが、1) はキューが空のときは0で混んでいれば正、2) はパケット長÷帯域幅、3) はパケット長に依らず固定、と仮定する。

このとき、AからBへの伝送路、BからCへの伝送路の帯域幅を各々 $b_{AB}$ 、 $b_{BC}$ 、往路のUDPパケット長を $x$ と置く。復路は $x$ に依らずに固定長のICMPパケットが戻ってくることを考慮すると、 $c_{AB}$ 、 $c_{AC}$ を適当な定数として、 $x$ を固定したときの $r_{tt_{AB}}$ の最小値は、 $x/b_{AB}+c_{AB}$ 、 $r_{tt_{AC}}$ の最小値は、 $x/b_{AB}+x/b_{BC}+c_{AC}$ と書ける。

つまり、 $x$ を固定して何度も試行したときのRTTの最小値は、 $x$ を変化させると、 $x$ に関して一次関数になり、その直線の傾きは、 $r_{tt_{AB}}$ では $1/b_{AB}$ に、 $r_{tt_{AC}}$ では $1/b_{AB}+1/b_{BC}$ になる。この近似直線を求めることで、帯域幅 $b_{AB}$ および $b_{BC}$ が推定できる(ただし、図-2の縦軸は対数表示)。

trenoは、UDPパケットを送信し、対応するICMP通知パケットを受信することで、TCPのフロー制御の挙動を模擬し、TCPスループットを測る。

一方、netperf、tcp、iprefは、試験パケットの送信/受信側の双方で動作させるツールであり、TCPスループットやボトルネック帯域幅を測る。

ボトルネック帯域幅の計測は、試験パケットの送信レートをその帯域幅以上にして、隣接した試験パケットがその伝送路の手前のルータのキューに同時に滞在する状態を発生させる。このとき、それらの試験パケットの特異性：1) 受信側への到着間隔がボトルネック帯域幅で決まること、あるいは、2) RTT間の相関が上記の状態を境に大きく変化すること、などを利用して、その帯域幅を推定できる。

active計測の問題点を挙げる。まず、試験トラフィック自体がネットワークに負荷をかける。特に、統計的な精度を向上させるために多数の試験パケットを必要とする場合がある。対策としては、統計的収束をみながら適応的に回数を減らす、マルチキャストを使って通信量を減らす、などが行われている。

また、試験トラフィックがセキュリティ上の理由などから通過を禁止されている場合がある。あるいは、ルータにおいて、ICMPと通常のTCP/UDPのパケットの扱いが異なる場合が多く、実は、ICMPを用いて行った計測の結果には注意が必要である。

### passive計測ツール

まず、ネットワーク上を流れるパケットを取り込むツールとして、UNIX上で利用できる基本的なソフトを紹介する。tcpdumpは取り込んだパケットの情報をテキスト表示する。tcptraceはtcpdumpの出力を解析・可視化する。ntopは、取り込んだパケットを解析・可視化する。アプリケーション層の解析も可能で、サーバ監視・セキュリティ監視にも用いられる。図-3は、ntopによる、LAN上のトラフィックのプロトコル別総量表示である。NNStatやNeTraMetは、指定した条件のパケットやフローの統計や時系列変動を調べるためのもので、専用言語による細かい条件指定ができる。

一方、ルータやスイッチ、あるいはサーバなどのネットワーク構成要素が、通過トラフィックや経路、構成に関する情報を保持するのもpassive計測の一種と考えられる。これらの情報(計測データ)は、標準的なMIB(Management Information Base)または独自の形式で取り出せる。

なお、計測データを計測地点以外のサーバに転送して蓄積、解析することも多い。上で述べたネットワーク構成要素自身が計測を行う場合や、広域多地点での計測では、そのような転送は不可避である。計測データを計測地点からサーバへ転送する方式には、サーバからの定期的ポーリング、サーバへの自律的トラップ、およびそれらの混合がある。転送プロトコルは、標準的なSNMPを用いる場合と、効率や機能上の理由から

独自プロトコルを用いる場合とがある。

passive計測の問題点を挙げる。まず、ネットワークの高速化が進むと、パケットの取り込みは、処理性能的にもデータ量的にもより困難になっていく。さらに、計測データを他の場所のサーバに転送して集める場合は、その転送がネットワークに負荷をかける。

対策として、全パケットの取り込みだけでなく、ランダムなサンプリングや、特定条件のパケットのみの収集を使い分ける必要がある。また、パケット/パケットヘッダ内の全情報の収集だけでなく、特定部分の情報のみの収集や、収集と同時に解析や圧縮処理をして蓄積・転送量を減らす方法を使い分ける必要がある。処理性能や精度を専用ハード(FPGA)化によって向上させるための研究開発も進んでいる。

一方、NAT (Network Address Translation), プロキシ, VPN (Virtual Private Network) などの利用により、パケットヘッダの情報から本来のフローが解析できないという問題も発生してきている。

## 計測プロジェクト

インターネット計測に関する活動では、米国のCAIDAが有名である。そのホームページには多数の情報があるが、その中のTool Taxonomyには、数十の計測・解析ツールの情報がまとめられており、本稿で名前を挙げたツールもここから辿ることができる。

CAIDA以外にも、広域インターネット計測を行っているプロジェクトが多数ある(表-1)。日本では、WIDEのMAWIが対米回線のpassive計測データを公開している。一方、ISPなどが運用ネットワークの品質・トラフィック状態を公開している例も多い。

ここで、表-1のNIMIのプラットホーム上で、MINCグループ<sup>5)</sup>が行っている、複数のパスの観測からパス上の各部分(以下では「リンク」と呼ぶ。ただし必ずしもルータ間の伝送路だけを指すわけではない)の特性を推定する手法の原理を簡単に説明する。この手法では、マルチキャストを使って1つの始点から多数の終点へ試験パケットを送信し、終点で観測する。そのデータから、始点から終点への各パス上および途中までのリンクを共有している各パス集合上でのパケットロスや遅延の特性(事象の生起確率)を推定する。そして、それらの値から、各リンク上でのパケットロスや遅延の特性を計算する。

図-4において、始点Sから終点R<sub>1</sub>へのパスをp<sub>1</sub>、同じく終点R<sub>2</sub>へのパスをp<sub>2</sub>と置く。まず、パケットロスの場合、link<sub>1</sub>, link<sub>2</sub>, link<sub>3</sub>上でロスしない確率を各々A, B, C, パスp<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>上でロスしない確率を各々D, E, そして「p<sub>1</sub>またはp<sub>2</sub>上でロスしない」確率をFと置く。もし各リンクで独立にロスが発生するならば、

$$D=AB, E=AC, F=A(B+C-BC)$$

Project	URL
CAIDA	<a href="http://www.caida.org/">http://www.caida.org/</a>
NAI(active)	<a href="http://uatt.nlanr.net/">http://uatt.nlanr.net/</a>
NAI(passive)	<a href="http://moat.nlanr.net/PMA/">http://moat.nlanr.net/PMA/</a>
NIMI	<a href="http://www.ncne.nlanr.net/nimi/">http://www.ncne.nlanr.net/nimi/</a>
pingER	<a href="http://www-iepm.slac.stanford.edu/">http://www-iepm.slac.stanford.edu/</a>
Surveyor	<a href="http://www.advanced.org/surveyor/">http://www.advanced.org/surveyor/</a>
MatrixNet	<a href="http://www.matrix.net/">http://www.matrix.net/</a>
MAWI	<a href="http://www.wide.ad.jp/wg/mawi/">http://www.wide.ad.jp/wg/mawi/</a>
APAN	<a href="http://www.jp.apan.net/measurement/">http://www.jp.apan.net/measurement/</a>

表-1 計測プロジェクトの例

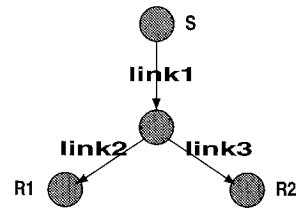


図-4 最も単純な木構造パス

が成り立ち、D, E, Fが与えられるならば、上の式から、A, B, Cは一意に決まる。一方、試行(始点からマルチキャストの試験パケットを投げる)の回数をNとし、R<sub>1</sub>とR<sub>2</sub>に届いた回数を各々N<sub>1</sub>とN<sub>2</sub>とし、R<sub>1</sub>とR<sub>2</sub>の少なくとも一方に届いた回数をMとする。もし定常性があり試行も独立ならば、大きなNに対して、D=N<sub>1</sub>/N, E=N<sub>2</sub>/N, F=M/Nという推定ができ、結局、A, B, Cが推定できる。

同様に、遅延の場合は、遅延が整数値をとると仮定し、link<sub>1</sub>, link<sub>2</sub>, link<sub>3</sub>の遅延がiである確率を各々A<sub>i</sub>, B<sub>i</sub>, C<sub>i</sub>とし、パスp<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>の遅延がi以下である確率を各々D<sub>i</sub>, E<sub>i</sub>, そして「p<sub>1</sub>またはp<sub>2</sub>の遅延がi以下である」確率をF<sub>i</sub>とおく。もし各リンクでの遅延が独立ならば、 $B_m^* \stackrel{def}{=} \sum_{i=0}^m B_i$  および  $C_m^* \stackrel{def}{=} \sum_{i=0}^m C_i$  として、

$$\begin{cases} D_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} B_i^*, E_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} C_i^* \\ F_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} (B_i^* + C_i^* - B_i^* C_i^*) \end{cases}$$

が成り立つ(0 ≤ m)。このとき、パケットロスの場合と同様に、D<sub>i</sub>, E<sub>i</sub>, F<sub>i</sub>は多数回の試行から推定可能であるとする。そして、A~Fの確率としての制約の範囲では、上の式が帰納的にかつ一意に解けて、結局、D<sub>i</sub>, E<sub>i</sub>, F<sub>i</sub> (0 ≤ i ≤ m)の推定値からA<sub>m</sub>, B<sub>m</sub>, C<sub>m</sub>が一意に推定できる。

## 研究開発動向

### 標準化、協調体制

ネットワークの利用者/提供者あるいは研究者の間での、計測に関する正確な共通理解、情報共有のために、品質尺度、計測方法、計測データの項目や表現形式などの標準化

RFC	Title (一部略記)
2722	Traffic Flow Measurement: Architecture
2720	Traffic Flow Measurement: Meter MIB
2681	A Round-trip Delay Metric for IPPM
2680	A One-way Packet Loss Metric for IPPM
2679	A One-way Delay Metric for IPPM
2678	IPPM Metrics for Measuring Connectivity
2330	Framework for IP Performance Metrics
2895	Remote Network Monitoring MIB Pld
2819	Remote Network Monitoring MIB
2788	Network Services Monitoring MIB
2021	Remote Network Monitoring MIB Ver.2
2544	Benchmarking Methodology for NID
1242	Benchmarking Terminology for NID

表-2 関連するRFCの例

が始まっている。特にエンドツーエンドの品質評価は、SLAに必須であり、ビジネスで使えるレベルになるよう整備が待たれている。また、分散管理されたインターネットにおいては、有効な計測には協調が不可欠である。情報の共有、公開の仕組みや計測用プロトコルの開発も重要である。

国際的な標準化<sup>6)</sup>は、IETFのIPPM (Internet Protocol Performance Metrics) WG, BMWG (Benchmarking Methodology WG), RMONMIB (Remote Network Monitoring WG)などで進められており(表-2)、ITU-TのSG13などとも協調している。

これらは、今後も新しいプラットフォーム(ギガビット級ネットワーク, マルチキャスト, IPv6等)に対応できるように継続的な拡張が必要である。

また、各アプリケーションごとの品質尺度の標準化が遅れていることから、QBP(九州インターネットプロジェクト)<sup>7)</sup>ではいくつかのアプリケーションに対して、標準的尺度や下位の層の品質との対応の検討を開始した。

### 品質の適応的制御と計測

インターネット上の品質制御では、フローを単位として、輻輳制御(効率性)、公平性、品質保証などをバランスよく実現する必要がある。一般に静的制御では不十分であり、通信中に計測に基づいて動的制御を行う。

それらは、エンドツーエンドでの制御と、ネットワーク内部での制御とに大別される。前者は、TCPフロー制御の改善、アプリケーション層でのTCP friendlyなフロー制御、経路やサーバの選択などを含む。コンテンツキャッシュサービスにみられるようなアプリケーション層での大域的トラフィック最適化も行われている。

後者は、ルータでのキュー制御(パケットスケジューリング, 廃棄制御), 経路制御(経路選択, 変更, カットスルー)などによるネットワーク資源の割り当て制御であり、エンドホストとの折衝・情報交換を行う場合もある。従来のインターネットの原則を崩しているともいえるが、DiffServ, IntServ, あるいはQoS Routingなどの活発な研究が進められている(RFC2990: Next Steps for the IP QoS Architecture)。

これらの実用化には、効率的な実時間計測や、効果の分析・評価のための計測が重要である。

### 統計的推定・分析

トラフィックの複雑な状態・挙動の把握と、その変動する状態下での品質の計測・評価には、統計的手法が不可欠である。特に、多数あるいは多種類の計測データから、有効な情報を抽出し、直接には測れない状態を統計的に推定したり、例外的事象やバイアスを除いて本来の特性を統計的に分析したりする手法が求められている。

前章のMINCの手法は、複数のパス上のパケットロスや遅延の特性を観測から推定し、それらを基にパスが通過する各リンク上の特性を推定する。その方法は、木構造のバスタポロジに適用でき、リンク間や試行間の独立性の仮定、数値の離散化などのモデルと現実とのずれが推定値に与える影響についても解析が行われている<sup>5)</sup>。一方、筆者らは、その計算方法が適用できるバスタポロジを木構造以外に広げ、さらにそれが適用できない一般の構造に対しても別の計算方法を提案した<sup>8)</sup>。

別の例として、複数のルータのインタフェース単位で計測したトラフィック量から、そこを通る各フローごとのトラフィック量を推定する問題がある。OD (Origin-Destination) 行列またはトラフィック行列の推定と呼ばれ、各フローのトラフィック量が互いに独立な正規分布をとると仮定してそのパラメータを推定する方法が提案されている<sup>9)</sup>。

ただし、こうした統計的手法の有効性を検証するには、シミュレーションだけでなく実ネットワークを使った実証実験も必要である。

謝辞 : 日頃からの議論やアドバイスに対して、QBP, 通信・放送機構GENESIS(次世代広帯域ネットワーク利用技術)プロジェクト, そして尾家研究室の皆様へ感謝します。また、本稿の執筆を助けてくださった東京大学情報基盤センターの江崎浩先生にこの場をお借りしてお礼申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 簡瀬憲一: インターネットの品質・トラフィック管理, 電子情報通信学会誌, Vol.82, No.10, pp.1054-1061 (1999).
- 2) Chen, T.M. (Ed.): Network Traffic Measurements and Experiments, IEEE Communications Mag. (May 2000).
- 3) 萩原和典, 石井宏之: ITサービスにおけるSLAの概要と動向, 情報処理, Vol.41, No.12, pp.1343-1348 (Dec. 2000).
- 4) Willinger, W. and Paxson, V.: Where Mathematics Meets the Internet, Notices of the AMS, Vol.45, No.8, pp.961-970 (1998).
- 5) <http://gaia.cs.umass.edu/minc/>
- 6) 木村卓巳, 中島伊佐美, 高土居広幸: IP品質尺度・測定法の標準化動向, 電子情報通信学会技術研究報告, CQ2000-7, pp.39-46 (2000).
- 7) <http://www.qbp.gr.jp/>
- 8) 鶴 正人, 滝根哲哉, 尾家祐二: エンドツーエンドの計測によるネットワーク内部の特性の推定, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2000-134, pp.7-12 (2000).
- 9) Cao, J., Davis, D., Wiel, S.V. and Yu, B.: Time-Varying Network Tomography: Router Link Data, J. Am. Stat. Assoc. (2000).

(平成12年12月25日受付)