

第XVIII部

JBプロジェクト

第18部

JBプロジェクト

第1章 概要

JBプロジェクトは、1998年に、WIDEプロジェクト、ITRC、CKP(サイバー関西プロジェクト)が中心となって、広帯域/高機能の研究テストベッドの構築を行い、それを用いた研究開発ならびに実証的実験を展開推進するために発足させた研究開発プロジェクトである(代表: 慶應義塾大学 村井純教授)。JBプロジェクトは、国際的にはAPAN、AIII、APIIなどとの協力をを行いながら、国際的先進研究開発テストベッドの1つの拠点として、国際接続ならびに国際的な共同研究開発を行うことを目指している。本年度も数多くの研究開発の成果を得ることができた。本報告書では、基盤技術として、次世代のインターネットにおける基盤技術となる、ポリシ制御技術と次世代インターネットが必要とする計測ツール、IPv6 経路制御技術に関する研究開発成果の報告を行う。

第2章 はじめに

インターネット技術は、グローバルでユービキタスなデジタルコミュニケーション環境を多様なデータリンクを用いて提供する。インターネット技術は、当初のコンピュータサイエンスの研究者による研究者のためのデジタルネットワーク基盤から、世界中の人々とデジタル機器を相互接続し、産業活動と生活活動を支えるデジタルネットワーク基盤へとその役割がより一般化した。したがって、21世紀のインターネットは、ますます多様になるデジタルメディアと要求条件に柔軟に対応できなければならない。すなわち、21世紀のグローバルユービキタスなデジタルネットワークの基盤となるための進化を遂げさせ

なければならない。このような、技術的な進化を実現するためには、進化に必要な技術の研究開発と、実ネットワーク環境での実証的な技術検証、さらに、先進的な実ネットワーク環境を JB プロジェクトのネットワークに接続された研究者に提供することで、次世代インターネットに対する新たな要求条件が明確化/顕在化されるとともに、新しいアプリケーションに対する研究開発が加速化されるものである。次世代インターネットは、以下のような環境を提供できなければならない。

- Internet for everyone
- Internet for everything
- Internet everywhere
- Internet at anytime
- Internet any way

1998年度から2000年度まで、JBプロジェクトにおいて戦略的に取り組んできた研究開発は以下に挙げるものであり、すべての研究開発は、次世代インターネットの基盤プロトコルである IP バージョン 6 に集約化した。

- IPv6 (IP バージョン 6)
128 ビットのアドレス長を持つ IPv6 は、次世代インターネットで要求される大量のアドレスを供給することができる。これにより、これまでのインターネットの発展と進化を支えてきたエンドエンドアーキテクチャモデルを 21 世紀にも継続して提供することができる。IPv6 の基盤ソフトウェアの研究開発は v6 分科会において展開されており本章での報告は行わないが、v6 分科会で研究開発された、IPv6 システムは、JB プロジェクトネットワークを用いて実証的な検証が行われ、国際的な参照ソフトウェアとしての品質と信頼を確立することができた。
- ポリシ制御技術
JB プロジェクト発足時には Diffserv 技術や Intserv 技術を用いた QoS/CoS の提供を大きな研究開発の目標としていた。実際、Diffserv

や Intserv は IETF でも技術標準化が進展し、既に、商用のルータやホストにおける実装も流通している。QoS/CoS に関する研究開発活動を進める中で、QoS/CoS 以外にもさまざまなポリシーが存在し、ポリシー制御技術の中の 1 つのインスタンスとして、QoS/CoS を捕らえる必要があることが認識されるようになった。その結果、QoS/CoS 研究の次段階として、ポリシー制御技術に関する研究開発を展開している。さまざまなユーザ (システム運用者やエンドユーザ) のポリシーを矛盾なく、かつ柔軟に実現するための、汎用的で抽象度の高いポリシーの定義を確立し、これを実現するためのシステムアーキテクチャの研究開発が研究開発の目標である。本報告書では、ポリシー制御技術の 1 つの方向性でもある Bandwidth Broker システムを用いた QoS/CoS を提供するポリシー制御システムの研究開発と実証実験と、これを支えることになる計測技術に関する報告を行う。

●iGrid2000

2000 年 7 月横浜で開催された INET2000 において、iGrid2000 を共催した。iGrid (<http://www.startap.net/igrid>) は、広帯域高機能のインターネット基盤を用いた、最先端の科学技術アプリケーションの研究開発を行う国際協調プロジェクトであり、研究成果を導入した、国際的協調ネットワーク環境を構築している。iGrid2000 では、JB プロジェクト/WIDE プロジェクトが中心となって、欧州、北米、アジアと日本を、広帯域インターネットで相互接続し、最先端の科学技術アプリケーションのデモンストレーションを行った。

第 3 章 JB プロジェクトの概要

JB プロジェクトの目的は、Nation-wide な次世代研究開発テストベッドの構築と運用、さらに、これを用いた実ネットワーク環境での実証的技術検証である。さらに、JB ネットワークはグローバルな研究開発テストベッドの一員であることが必須であり、

APAN、APII、AIII、Internet2 や 6REN など、国際研究開発組織との協調関係を確立し、国際的な研究開発テストベッドとの相互接続を行っている。

JB プロジェクトのテストベッドは、WIDE プロジェクト、ITRC、CKP (サイバー関西プロジェクト) が協力して構築しているものであり、さまざまなデータリンク技術が利用/適用されており、さまざまな組織のテストベッドと相互接続ならびにオーバーレイしている。

- 総務省 JGN (ジャパングガビットネットワーク)
- 総務省 通信総合研究所 APII テストベッド
- APAN/TransPac
- WIDE インターネット (含む TTNNet 殿、NTT グループ殿との共同研究)
- AIII テストベッド
- BBCC

第 4 章 ポリシー制御技術

JB プロジェクト発足時には Diffserv 技術や Intserv 技術を用いた QoS/CoS の提供を大きな研究開発の目標としていた。QoS/CoS に関する研究開発活動を進める中で、QoS/CoS 以外にもさまざまなポリシーが存在し、ポリシー制御技術の中の 1 つのインスタンスとして、QoS/CoS を捕らえる必要があることが認識されるようになった。その結果、QoS/CoS 研究の次段階として、ポリシー制御技術に関する研究開発を展開している。さまざまなユーザ (システム運用者やエンドユーザ) のポリシーを矛盾なく、かつ柔軟に実現するための、汎用的で抽象度の高いポリシーの定義を確立し、これを実現するためのシステムアーキテクチャの研究開発が研究開発の目標である。

本章では、ポリシー制御技術の 1 つの方向性でもある Bandwidth Broker システムを用いた QoS/CoS を提供するポリシー制御システムの研究開発と実証実験と、これを支えることになる計測技術に関する報告を行う。

デジタル技術の発展によってインターネットは着実に安定性を増し、人々の興味は到達 性から通信の

品質へと移ってきた。現在、この要求を満たすために Diffserv と Intserv が標準化されている。しかし、標準化は優先配送制御を実現するための機構のみにとどまり、インターネット全体での運用モデルについては触れられていない。QoS/CoS ポリシの実現のために必要なアドミッション制御機構のアーキテクチャすら確立することができておらず、現状では、Hand-Configuration による、静的な契約のみを想定したもののみが考えられている。本章では、インターネットにおける Diffserv の階層化された運用モデルを提案している。そのモデルでは、ネットワークの末端部において人間の介在しない動的な契約システムが必要となる。そこで我々は、動的な帯域割り当てシステムの実装および WIDE 合宿における運用実験を行った。本章ではその報告および結果と評価について述べる。

4.1 通信品質への要求

近年のインターネットの発展は、日々の生活の情報化を加速している。人々は電話や FAX に加え、電子メールと WWW という情報交換のための手段を手に入れ、それに対する依存度は日に日に高まっている。

これに伴い、展示会や国際会議といった各種イベントにおいてネットワークを必要とすることが多くなった。各種相互実験を行ったり、あるいは単なるライフラインとしてインターネットが必須となりつつあるからである。また、DV over IP[120] や WMT (Windows Media Technology) といったストリーミング技術の発展により、これらのイベントを TV にかわりインターネットにおいて中継・配信することが多くなった。

このようなストリーミングコンテンツを高い品質で配信し続けるためには安定して広帯域を確保し続ける必要がある。しかし、現在のインターネットは最善努力 (Best Effort) の枠組みで動作しており、ストリーミングの帯域を確保するためにストリーミング専用の回線を用意しているというのが現状である。

インターネットの黎明期には、ユーザの最大の関心事は到達性であった。当時はさまざまな障害により到達性の失われることがしばしば発生したためである。しかし、動的経路制御を始めとするさまざまな技術の発展によりインターネットの安定性が増した今日、人々の関心事は上記のような要求から通信

の品質や帯域の確保へと移行してきた。

このような現状を受け、RSVP や Diffserv を始めとするさまざまな品質保証のための技術が提案されている。しかし、アドミッション制御やサービスモデルの欠如により、実運用には至っていない。本報告では、品質保証の仕組みとして Diffserv を取り上げた。

4.2 Diffserv の概要

Diffserv (Differentiated Services) は、インターネットにおける通信品質を保証するための仕組みとして標準化されている。Diffserv では、ISP (Internet Service Provider) が提供する限定されたサービスを DSCP (Diffserv codepoint) と呼ばれる識別子によって分類し、優先制御によって通信品質を統計的に保証する。サービスを受ける顧客は ISP とのサービスレベルの契約 (SLA; Service Level Agreement) を結ぶ。これらのサービスはスループットや遅延、遅延の揺らぎなどの統計的な指標によって表される。

同一のポリシーによって運営される Diffserv ネットワークを DS ドメインと呼ぶ (図 4.1)。DS ドメインの境界には入口/出口境界ノードと呼ばれる機器が設置され、DS ドメインに流入するフローはすべて入口境界ノードを通過する。入口境界ノードでは SLA にしたがって分類され、現在のフローの状態を勘案して IP ヘッダに DSCP を付加する。DS ドメインの内部では、同一の DSCP を持つすべてのフローは集約され、ホップ毎に DSCP に関連づけられたキュー制御などの処理をされる。この集約を BA (Behavior Aggregate)、ホップ毎の処理を PHB (Per-Hop Behavior) と呼ぶ。

Diffserv の枠組みでは、PHB に利用するキュー制御アルゴリズムやアドミッション制御 (ポリシーの適用や資源配分機構等) の方式を限定していない。このた

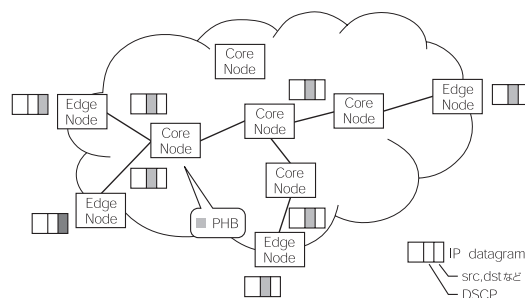


図 4.1. Diffserv の概要

め、サービス提供者である ISP は、様々なキュー制御アルゴリズムとアドミッション制御を組み合わせることにより特色あるサービスクラスを定義し、品質保証サービスを構築・提供することができる。また、複数のフローを DSCP ごとに集約することにより、より多くのフローが集中する DS ドメイン内部のスケラビリティを実現している。

このように、Diffserv では DS ドメイン内におけるフローの扱いの枠組みのみを標準化したものであり、運用モデルやアドミッション制御機構と独立している。現在、アドミッション制御機構は静的なものが考えられているが、我々は個々のユーザが動的に資源要求を行うモデルを考えている。しかし、動的な資源要求に関する運用実験はほとんど例をみない。そこで我々は、次節で述べる WIDE 合宿の合宿ネットワークで動的帯域予約の運用実験を行った。

4.3 WIDE 合宿での運用実験

4.3.1 概要

今回の合宿では、インターネットへの接続に ATM over T1 を利用した。この ATM 回線上に 3 本の PVC を設定し、2 本を WIDE 藤沢 NOC に、1 本を WIDE 奈良 NOC に接続した。

本実験ではこの対外線を 1 つの DS ドメインとして扱い、ユーザからの動的な要求によるトラフィックの優先制御はこの対外線の両端で行った。Diffserv での DSCP の付加は DS ドメインの境界点である合宿ネットワークの出口ルータで行う必要がある。このため、インターネットに接続するためのルータが複数設置された合宿ネットワークでは、通常の方法ではそれぞれのルータを入口境界ノードとして設定・運用する必要がある。このような設定・運用上の負荷を軽減するため、ATM PVCブリッジングの技術を利用することによって、1 つのルータに ATM レベルで全てのトラフィックを集中させ、DSCP の付加やトラフィック制御を行う入口境界ノードの数を減少させた。

また、インターネットから合宿ネットワークへのトラフィックも同時にサービスの対象とした。これに関しても、ATM レベルですべての PVC を WIDE

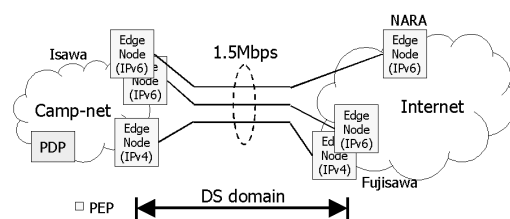


図 4.2. WIDE Camp-net のトポロジ

藤沢 NOC に集中させ、PVCブリッジングによる単一の入口境界ノードで DSCP の付加やトラフィック制御を行った後に合宿ネットワークへ接続するという手法をもちいた。

入口境界ノード内では、ALTQ[94] を利用してトラフィック制御を行った。合宿ネットワークまたはインターネットから DS ドメイン (対外線) へのトラフィックには、石和または藤沢に設置した入口境界ノードの入力インターフェースのキューでマーク付加を行った。また、出力インターフェースのキューでは、入力側で付加された DSCP にしたがって、HFSC[80] と RIO[34] を利用したスケジューリングとキュー制御を行った。

ルータへの品質制御パラメータの供給には COPS (Common Open Policy Service)[17]¹ を利用した。品質制御パラメータの管理、アドミッション制御および課金管理 (後述) を行う PDP (Policy Decision Point) は合宿ネットワーク内で運用した。また、PDP の決定にしたがって品質制御パラメータを受け取り、実際に品質制御を行う PEP (Policy Enhancement Point) は対外線の両端に設置した入口境界ノードで運用した。

4.3.2 サービスクラス

帯域予約サービスは、合宿ネットワーク内のすべ

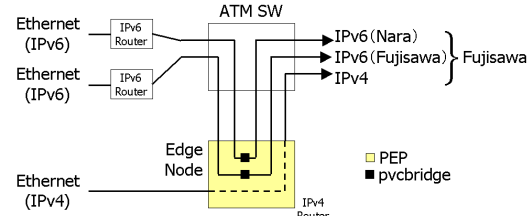


図 4.3. 第 2 層の設定

¹ インターネットにおいて通信品質保証サービスを提供するためには、管理ポリシーにしたがってそのネットワークを構成する各機器ごとに通信品質パラメータを決定する必要がある。さらに、決定したパラメータを各機器に配布するとともに、そのパラメータにしたがって機器の設定を行わなければならない。COPS は IETF によって 1999 年に標準化が行われた基盤プロトコルである。

てのユーザに対して提供された。このサービスは、フローを始点と終点の組 (*src, dst*) で分類・集約し、その集約 (以下フロー集約と呼ぶ) を AF (Assured Forwarding)[61] 方式で優先制御するものである。

前節で述べたように、対外線は T1 (1.5Mbps) であった。まず、予約のためにこの帯域を 64kbps の帯域を持つ 19 個のブロックに分割した (図 4.4)。これらのうち、18 ブロックがユーザからの予約に利用され、残りの 1 ブロックは常に優先されるべきネットワークの制御情報 (COPS の制御メッセージや経路制御情報等) に利用された。

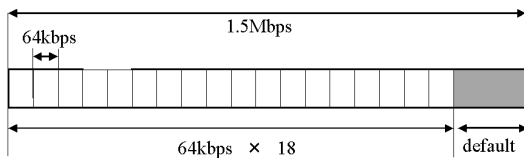


図 4.4. 対外線の分割

予約した合宿参加者には 1 ブロックが割り当てられる。したがって、参加者は 1 つの予約につき 64kbps の帯域を確保することができる。同一のフロー集約に対しては同時に 1 つの予約しかできない。つまり、参加者は帯域の足し込みを行うことはできない。また、参加者に割り当てた帯域は 18 ブロックであるため、同時に予約可能な最大値も 18 であった。一方、輻輳が発生していないときには、使われていないブロックは他のトラフィックで共有される。

合宿参加者がブロックを予約すると、TRTCM (Two Rate Three Color Maker)[62] によって DSCP が付加される。参加者のフロー集約が 64kbps 以内の場合は青色にマークされ、優先的に処理されるようになる。また、64kbps 以上 96kbps 未満のものについては黄色にマークされる。さらにそれ以上については赤色にマークされ、予約を行っていないその他のトラフィックと同様に扱われる。

4.3.3 課金アーキテクチャ

特定のユーザによる帯域の占有を防止するため、長期にわたる帯域予約を抑制する仕組みが必要である。本実験では、合宿参加者全員にアカウントを発行し、一定量の仮想通貨を配布した。この仮想通貨は帯域の予約時間に応じて減少し、仮想通貨がなくなると予約ができなくなる。仮想通貨の単位は WU (WIDE Unit) とし、合宿の参加者には合宿開始時に一律 2000WU を配布した。また、1 ブロックの予約

を 1 分間行うためには 10WU 必要であるとした。

さらに、現在の仮想通貨の残量や自分の予約状況を確認したいというユーザ要求が予想される。本運用実験では、Web を通して現在の帯域予約状況および仮想通貨の残量を知ることができるようにした。

4.3.4 予約クライアント

現在のところ、ユーザが網に直接要求するようなプロトコルで COPS と強調して動作することが想定されているものはない。そこで、この実験のためにユーザが網に予約要求を行うための一時的なプロトコルを設計した。このプロトコルにより、ユーザは Diffserv ネットワークに対し、最寄りの PEP を通して帯域を要求することができる。また、ユーザの認証情報や予約フローに関する詳細情報は予約メッセージ内に含まれる。

さらに、ユーザにはこのプロトコルを実装した帯域予約クライアント「PEPe」を提供した。このクライアントは IPv4 および IPv6 の両方に対応した。Diffserv ネットワークでの予約プロセスが終了すると、PEPe は PEP から予約要求に対する結果を受け取る。これには予約の成功・失敗、および失敗した場合にはその原因が含まれている。

4.4 結果と考察

前述したように、WIDE 合宿の参加者数は 236 人であった。その一方、DS ドメインは T1 (1.5Mbps) の対外線であり、参加ユーザ数と比較して広帯域回線であった。このため、各ユーザは十分な帯域を利用することが可能であり、帯域を予約したユーザが優先制御の利益を得ることができない。そこで、本運用実験では合宿参加者の帯域予約サービスの利用を促進するために、対外線路上に突発的で人為的な輻輳を発生させた。

輻輳は高帯域を消費する UDP トラフィックをインターネット側から合宿ネットワークに向けて送信することによって発生させた。合宿参加者の利用するサービスは WWW・POP・FTP といったインターネットから合宿ネットワークへのトラフィックが発生するものが多い。そのため、前述のような UDP トラフィックを発生させることによって輻輳を参加者によりいっそう強いものとして感じさせることができる。UDP トラフィックの送信開始時刻と終了時刻を表 4.1 に示す。

表 4.1. 人為的輻輳の発生時間

開始時刻	終了時刻
3/15 18:14:50	3/15 18:19:05
3/16 12:33:37	3/16 13:39:28
3/16 13:42:54	3/16 13:49:03
3/16 16:19:47	3/16 19:39:47
3/16 20:55:27	3/16 23:49:24

次に、インターネットから合宿ネットワークへのトラフィックを図 4.5 および図 4.6 に示す。これらの図はそれぞれ輻輳が発生していないときおよび UDP トラフィックによって輻輳が発生させたときのトラフィックを示している。輻輳中は対外線上でパケットの喪失が発生した。

次に、合宿参加者からの予約要求の数を図 4.7 に示す。UDP トラフィックによって輻輳が発生しているときに予約要求が集中している様子がわかる。

また、予約エラーの数を図 4.8 に示す。これは何らかの理由により PDP で拒否された予約要求の数を表している。表 4.1 や図 4.7 と比較すると、予約エラーの多くは対外線の輻輳時に発生している。前

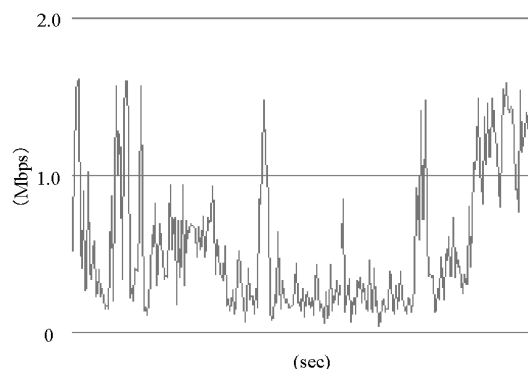


図 4.5. 通常時のトラフィック

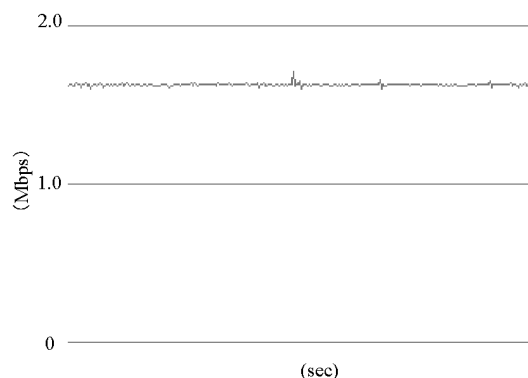


図 4.6. 輻輳時のトラフィック

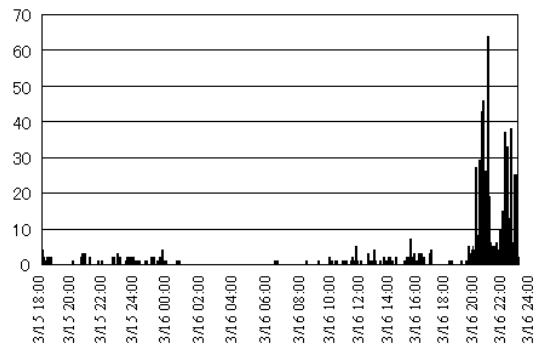


図 4.7. 予約要求数

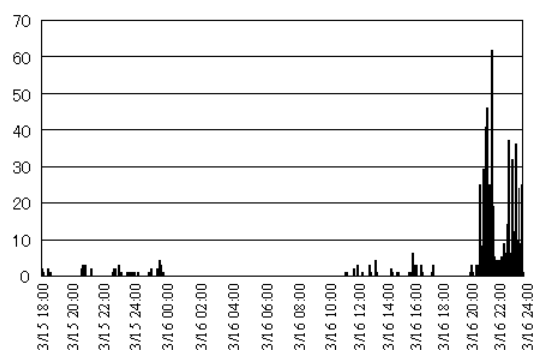


図 4.8. 予約エラーの数

述のように、本運用実験では DS ドメインの帯域を分割し、そのうち合宿参加者の帯域予約用に 18 ブロックを割り当てた。図の予約エラーのほとんどは、上記の帯域予約用ブロックの枯渇により発生したものである。

これらから、合宿参加者からの予約要求は輻輳時に集中しており、逆に輻輳が発生していないときには予約がほとんどなかったことがわかる。また、擬似的な輻輳が回を重ねるごとに予約要求の数が増えていることが観測される。この現象は、合宿参加者が輻輳時の対外線の通信品質に価値を見だしていること、時間の経過とともに動的な帯域予約システムの有用性を理解するようになることを示していると考えられる。

インターネット上での突発的な輻輳を予測することは困難である。特にイベント等では、ユーザの挙動によってストリーミングコンテンツの品質が劣化するといった状況が起りやすい。また、イベントでは少数のユーザが狭帯域を共有することが多い。このため、ユーザ自身も他のユーザの挙動に大きく影響され、通信品質の劣化を感じる可能性も高いと考えられる。そのため、今回の運用実験に見られるようなユーザの挙動を考えれば、個々のユーザに動的

な帯域予約システムを提供することは有用であると考えられる。

今回は、WIDE 合宿における Diffserv ネットワークの運用実験について説明した。VoIP などの新しいインターネットアプリケーションの登場とともに、通信品質への要求が高まっている。このことは、輻輳時にユーザが集中して帯域予約要求を行うという、本実験の結果からも見て取ることができる。特に、狭帯域を少数のユーザで共有するイベントの場合、通信品質への要求はさらに顕著なものである。

Diffserv は統計的に通信品質を保証するための枠組みであるが、その運用モデルの曖昧さから実用段階までは程遠い。特に、動的な資源予約に関してはその有用性やスケーラビリティに疑問の声も多い。しかし、今回の運用実験は Diffserv の実運用に向けた大きな一歩であるといえよう。今後は、動的資源予約についてさらに実験を重ねるとともに Diffserv 運用モデルに関する議論を深め、DS ドメイン内でのトラフィックエンジニアリングや DS ドメイン間での帯域取引の可能性等について検討および実験を行う予定である。

第5章 トラフィック計測技術

5.1 研究の背景と必要性

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（通信の両端）のノード（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。

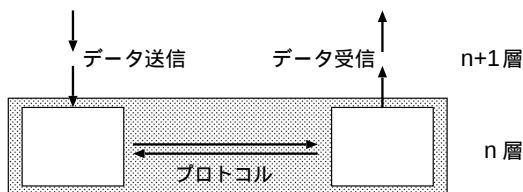
一般に、品質を管理するには、品質の評価や、品質を左右する状態・要因の解析のための計測が必要であり、インターネットにおいても、その特性、す

なわち、それを構成する様々な構成要素の状態やその上のトラフィックの挙動を計測することが不可欠であり、そのためにはトラフィックを客観的に計測・解析・評価するための手法が、以下のような運用及び研究開発の様々な場面で求められている。

- ネットワークの運用・フィールド評価：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。
- ネットワークの動的・適応的制御：送信フロー制御、QoS ルーティング、ポリシー制御、セキュリティ制御など。適応的制御の代表例が、実は、普段から利用している TCP 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マを調整しながら送信フロー制御を行う。

5.2 計測の対象

以下では、ネットワーク内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び、これは TCP/UDP 層のトラフィックと言える。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一連の並列／直列のフローのまとま

図 5.1. n -層データ転送サービス

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、 n -層ネットワークの品質とは、 n -層が $(n+1)$ -層に提供するサービス機能の品質である。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 $(n+1)$ -層に渡すことと言える。

この時、1) 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。例えば、その 2 つが時間遅れなく同一であるのが理想の品質であろう。2) 品質は、 n -層の「能力」と n -層の「状態」で決まる。但し、「能力」は、指定 (制御) された「状態」下での品質として定義できるので、直接計測する対象は、品質と状態と言える。

但し、インターネットの状態は、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、厳密な定義や計測が困難である。一方、ネットワーク上にデータを流すことによって状態が発生するので、原理的には、状態は過去からその時点までのトラフィックによって決定される。そして、現実的にも、ネットワークを通過中のトラフィックは、ネットワークの品質に直接的に影響し、トラフィックの計測が状態の把握につながる。

n -層をブラックボックスと見て、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判ればよく、例えば、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。しかし、一般にインターネット上の品質は、独立でない多数の要因に左右され、状態に敏感である。しかも状態は刻々変化するので、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や状態、さらに大域的なネットワークの構成やそこを流れるトラフィックを継続的に計測し、把握や予測を行う。また、それらと n -層の品質

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、経路やフローの制御によるトラフィック管理を行って、 n -層の品質を維持、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、それが品質に与える影響を考える時、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) を見るだけでは不十分で、アプリケーションや利用環境毎に異なる多様なフローの特性も見ることが必要がある。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、巨大データセンタの出現などにより変化していく。さらに、様々なレベルの相互作用、例えば、適応的プロトコルによるホストとネットワーク間干渉、ネットワーク資源の共有によるフロー間干渉、ネットワーク階層間干渉などがその挙動の複雑性を増幅している。

そして、このような挙動の複雑性は、いつ・どこで・何を測れば十分なのか、それをどう品質管理に活かすか、という基本的課題の解決を困難にしている。

5.3 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 層及び 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、例として、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りの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。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) も頻発することがある。

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制御や圧縮

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時に達成できる単位時間あ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)の帯域幅がわかり、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、帯域幅は事前には判らず、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、アプリケーション層における品質計測について考える。エンドツーエンドで計測可能な品質があったとして、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へ分離し、また、ネットワークに依存する部分の品質を下位の層の品質へマッピングすることが必要になる。

例えば、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が遅いのは、個々のパケット遅延が原因ではなく、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く、スループットが低いことが原因かも知れない。あるいは、WWWページの表示が遅いのは、パケットロス発生時に再送を検出するまでの待ち時間が長いことが原因かも知れない。

さらに、VoIPや狭帯域の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、このような階層間の品質の対応づけは、ますます複雑になる。

5.4 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/終点の様々な単位、例えば、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などの挙動を解析する。例えば、1) フロー毎の特性量(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、などが対象である。

このような計測は、運用上や経営計画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、様々な時間粒度で解析して知見を深める必要がある。例えば、そのような観察から、現状のTCPのフロー制御の評価・改善提案が行われたり(例えば、RFC2988: Computing TCP's Retransmission Timer)、集約されたフローのトラフィック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。

5.5 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、試験パケットを送受信し、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のパケットを収集・計測・解析して情報を得る。

計測データの解析は、プロトコルの翻訳、時系列化、統計処理などを含む。active計測において多数のパス上の計測データの相関を解析したり、passive計測において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、トポロジー、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。大規模な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・安定性等)、コスト(経費・時間・手間等)、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・時刻同期等)が重要である。

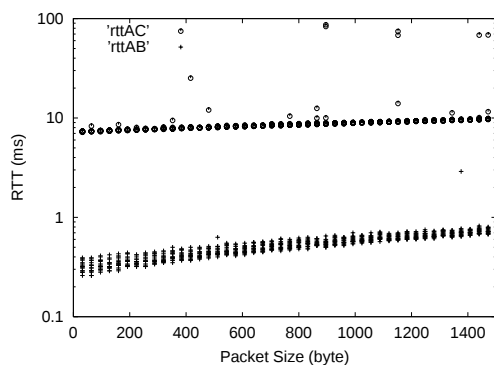


図 5.2. RTT の分布の例 (pathchar の原理)

計時精度が特に求められる場合は、ツール (システム) 内部の動作にも注意が必要である。例えば、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、送信要求が OS でスケジュールされ、ハードウェアに渡って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。

5.5.1 アクティブ計測ツール

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 exceed 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 アドレスをすることで、パス上の自分に近い方から順にルータが判る。

pchar (pathchar の改良版) や bing は、パス上の伝送路の帯域幅を推定する。pchar の原理を図 5.2 で説

明する。この図は、ホスト A から (traceroute と同様に) ルータ B 及びその次のルータ 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 rtt_{AB} 、AC 間の RTT を rtt_{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) はキューが空の時は 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。

この時、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 を固定した時の rtt_{AB} の最小値は、 $x/b_{AB} + c_{AB}$ 、 rtt_{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時の 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、 rtt_{AB} では $1/b_{AB}$ に、 rtt_{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} 及び b_{BC} が推定できる (但し、図 5.2 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して、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, ttcp, ipref などは、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。この時、それらの試験パケットの特異性：1) 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 間の相関がそ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掛ける。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。また、それらの試行が独立性を要する場合は、送信間隔をあまり短くできない。対策としては、統計的収束を見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。

5.5.2 Passive 計測ツール

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。ntop は Web ベースの対話型ツールで解析・可視化も行う。図 5.3 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(フロー)の統計や時系列変動を見るためのもので、専用言語による細かい指定ができる。Coralreef は、光スプリッタを用いて ATM セルを取り込み計測・解析するツール(OC3/12/48MON)のソフトウェア群である。

一方、ルータやスイッチ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)を、MIB (Management Information Base) またはその他の独自形式で取り出す。

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、及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掛ける。

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など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などを使い分ける必要がある。一方、処理性能や精度を専用ハード(FPGA)化によって向上させる方法もある。

さらに、NAT、プロキシ、VPN 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。

5.6 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、本章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 5.1)。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、NIMI のプラットフォーム上で、MINC プロジェクトが行っている、複数のパスの観測からパス上の部分経路(以下では「リンク」と呼ぶ。但し必ずしも物理的な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及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

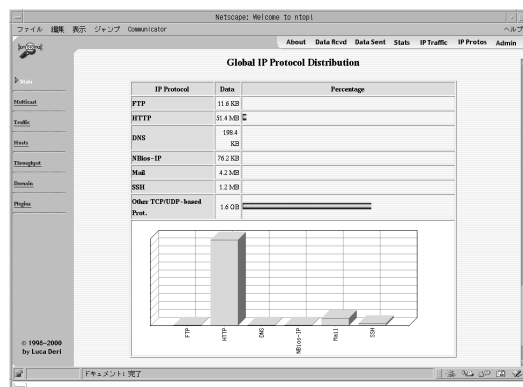


図 5.3. ntop の表示例

表 5.1. 計測プロジェクトの例

Project	URL
CAIDA	http://www.cadia.org/
NAI(active)	http://watt.nlanr.net/
NAI(passive)	http://moat.nlanr.net/PMA/
NIMI	http://www.ncne.nlanr.net/nimi/
MINC	http://gaia.cs.umass.edu/minc/
pingER	http://www.iepm.slac.stanford.edu/
Surveyor	http://www.advanced.org/surveyor/
MatrixNet	http://www.matrix.net/
MAWI	http://www.wide.ad.jp/wg/mawi/
APAN	http://www.jp.apan.net/measurement/

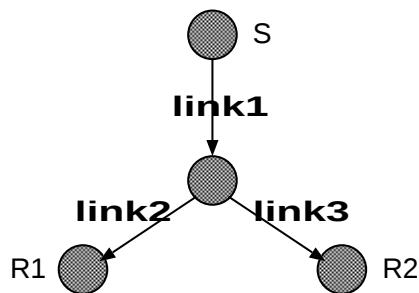


図 5.4. 最も単純な木構造パス

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 5.4 において、始点 S から終点 R_1 へのパスを p_1 、同じく終点 R_2 へのパスを p_2 と置く。まず、パケットロスの場合、 $link_1, link_2, link_3$ 上でロスしない確率を各々 A, B, C 、パス p_1, p_2 上でロスしない確率を各々 D, E 、そして「 p_1 または p_2 上でロスしない」確率を F と置く。各リンクで独立にロスが発生すると仮定すると、

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

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_1 と R_2 に届いた回数を各々 N_1 と N_2 とし、 R_1 と R_2 の少なくとも一方に届いた回数を N_{12} とする。定常性があり試行も独立であると仮定すると、大きな N に対して、 $D = N_1/N, E = N_2/N, F = N_{12}/N$ 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、遅延が整数値を取ると仮定し、 $link_1, link_2, link_3$ の遅延が i である確率を各々 A_i, B_i, C_i とし、パス p_1, p_2 の遅延が i 以下

である確率を各々 D_i, E_i 、そして「 p_1 または p_2 の遅延が i 以下である」確率を F_i と置く。各リンクでの遅延が独立だと仮定すると、 $B_m^* = \sum_{i=0}^m B_i$ 及び $C_m^* = \sum_{i=0}^m C_i$ として、pt

$$\begin{cases} D_0 = A_0 B_0, & E_0 = A_0 C_0 \\ F_0 = A_0 (B_0 + C_0 - B_0 C_0) \\ D_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} B_i^* \\ E_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} C_i^* \\ F_m = \sum_{i=0}^m A_{m-i} (B_i^* + C_i^* - B_i^* C_i^*) \end{cases}$$

が成り立つ。この時、パケットロスの場合と同様に、 D_i, E_i, F_i は多数回の試行から推定可能である。そして、 $A \sim F$ の確率としての制約条件の範囲では、上の式が帰納的にかつ一意に解けて、結局、 D_i, E_i, F_i ($0 \leq i \leq m$) の推定値から A_m, B_m, C_m が一意に推定できる。

5.7 研究開発動向

5.7.1 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が急がれている。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、公開の仕組みも重要である。

国際的な標準化は、IETF の IPPM (Internet Protocol Performance Metrics) WG、BMWG (Benchmarking Methodology WG)、RTFM (Realtime Traffic Flow Management) WG などで行われており、ITU-T の SG13 とも協調している。

表 5.2. 関連する RFC

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
2819	Remote Network Monitoring MIB
2788	Network Services Monitoring MIB
2074	Remote Network Monitoring MIB PId
2021	Remote Network Monitoring MIB Ver.2
1757	Remote Network Monitoring MIB
2544	Benchmarking Methodology for NID
1242	Benchmarking Terminology for NID

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に拡張していく必要がある。

5.7.2 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。一般に静的制御は困難であり、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の大別される。前者には、TCP フロー制御の改善、TCP friendly なアプリケーション層のフロー制御、パスやサーバの選択などを含む。最近は、コンテンツキャッシュサービスに見られるようなアプリケーション層での大域的経路最適化も行われている。

後者には、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) などを含む。ある意味でインターネットの原則を崩すものであるが、Weighted Fair Queueing や、Diffserv、Intserv、あるいは QoS Routing などの活発な研究が進められている。

これらの実用化には、実時間制御での効率的な計測や、制御の効果の分析・評価のための計測が重要である。

5.7.3 統計的推定・分析

インターネット上の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[69] 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、木構造のパスボロジーに適用でき、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関しても解析が行われている。

別の例として、複数のルータのインターフェース単位で計測したトラフィック量から、そこを通る各パス毎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取ると仮定してそのパラメタを推定する方法が提案されている [22]。

但し、こうした統計的手法の有効性はシミュレーションだけでなく実データを使った検証も必要である。

5.8 iGrid2000

5.8.1 iGrid2000 の目的と背景

iGrid (<http://www.startap.net/igrid>) は、高速高機能のインターネット基盤を用いた、最先端の科学技術アプリケーションの研究開発を行う国際協調プロジェクトであり、研究成果を導入した、国際的協調ネットワーク環境を構築する。iGrid は国際協調型の研究プロジェクトであり、近年、我が国からの参画も増加している。そこで、INET2000 の開催に合わせ、iGrid の活動成果を iGrid2000(<http://www.startap.net/igrid2000>) として、実ネットワークを用いてデモンストレーションを行った。

iGrid2000 は、米国インディアナ大学 EVL (Electronic Visualization Laboratory)、イリノイ大学、アルゴンヌ研究所、東京大学、慶應義塾大学を中心に、iGrid2000 実行委員会を組織し、運営された。iGrid2000 では、高速ネットワークを用いた革新的なアプリケーション、地球規模での分散コンピューティング、遠隔医療システム、遠隔操作、遠隔協調アプリケーション、高精細デジタルマルチメディア蓄積配送システムなどをデモンストレーションすることができた。すなわち、最先端のインターネット技術を投入した、最先端の先進的かつ革新的なアプリケーションのデモンストレーションを行った。iGrid プロジェクトは、Internet2 における研究開発活動の方向性を示しているプロジェクトであり、Internet2 の研究開発活動の根幹をなす。さらに、iGrid は、国際協調型の研究開発と実証実験を目的としており、Internet2 の国際展開 (協調・共同活動) の根幹をなしているといえる。

デモンストレーションは、実際に高速広域ネットワークを用いて運用された。iGrid2000 の実施にあたっては、総務省 JGN (Japan Gigabit Network)、APAN TransPac (Asian Pacific Advanced Network Trans Pacific) リンク、STARTAP、WIDE プロジェクトネットワークの協力のもと、国際デモンストレーションシステムの構築運用を行った。iGrid2000 の活動は、INET2000 との協調開催の形態をとり、INET2000 の技術会合の中では、iGrid2000 パネルも企画した。また、iGrid は、事実上、米国 UCAID Internet2 におけるアプリケーションの研究開発活動を先導している。この研究開発グループに 我が国

のインフラ技術およびアプリケーション技術に関する研究開発活動を、学术界のみならず、産業界にも広くかつ効果的に示すチャンスであり、それらの国際的認知度の向上と、海外への普及、さらに、国際共同研究活動を促進することができたといえよう。

5.8.2 iGrid2000 の概要

iGrid 2000, the International Grid, demonstrates how the power of today's research networks enables access to remote computing resources, distribution of digital media, and collaboration with distant colleagues. The concept of connecting geographically distant computing resources and people seamlessly, efficiently and routinely over high-performance networks is itself a major research topic, as computer scientists and application scientists worldwide prototype the 21st-century advanced computational infrastructure, or "grid." iGrid highlights both the achievements in grid architecture development and the advancements it enables in science, engineering, cultural heritage, art and architecture, media communications and distance education.

iGrid features 24 applications from 14 regions - Canada, CERN, Germany, Greece, Japan, Korea, Mexico, The Netherlands, Singapore, Spain, Sweden, Taiwan, United Kingdom and the United States - with emphasis on tele-immersion, large datasets, distributed computing, remote instrumentation, collaboration, human/computer interfaces, streaming media, digital video and high-definition television.

Applications are presented on impressive display technologies: the CAVE virtual-reality theater developed by the University of Illinois at Chicago, the Super-High Definition digital cinema system from NTT Network Innovation Laboratory, and the Access Grid presentation environment developed by Argonne National Laboratory. Two ImmersaDesks as well as plasma displays also showcase applications in virtual-reality (stereoscopic) or large-screen (monoscopic) mode.

iGrid is connected to the JGN, the WIDE Project Network (in cooperation with NTT,

TTNet and PNJC Communications), APAN and the APAN/TransPAC (100 Mbps) link to STAR TAP, the international, interconnection point in Chicago, Illinois.

5.8.3 iGrid 2000 Applications

- Access Grid
Using the Access Grid for Wide Area Group Collaborative Visualization Rick Stevens, Argonne National Laboratory, USA, Chicago (USA)
- ALIVE
ALIVE: Architectural Linked Immersive Environment Edward J. Breedveld, SARA, The Netherlands, The Netherlands, Chicago (USA)
- Anatomy Lecture
Human Anatomy Lecture-on-Demand at the National University of Singapore J.A. Gilles Doiron, National University of Singapore, Singapore, Singapore
- Argus
Argus: Controlling Real-Time Imaging Sensors from a Virtual Environment Rachel Brady, University of Illinois at Urbana-Champaign, USA, Champaign-Urbana (USA)
- Black Hole
Online Monitoring and Steering of Remote Black Hole Simulations Ed Seidel and Thomas Radke, Max-Planck-Institut f?r Gravitationsphysik, Albert-Einstein-Institute, Potsdam/Golm, Germany, Germany, Champaign-Urbana (USA), Argonne (USA)
- Blue Window Pane
Blue Window Pane II Margaret Dolinsky, Indiana University, USA, Indiana (USA)
- Cultural Heritage
Transoceanic Exploration of Cultural Heritage in Virtual Reality Jason Leigh, University of Illinois at Chicago, USA, Chicago (USA)
- CyberCAD
CyberCAD: Internet Distributed Interactive Collaborative Design Kim-Cheng Tan, Temasek Polytechnic, Singapore, Singapore, Indiana (USA)
- DIAL
Data and Information Access Link (DIAL): A Web based Distributed Data and Information System for Global Change Data and Applications Ramachandran Suresh, NASA ESDIS /RITSS, USA, Washington DC (USA), Japan
- Digital Cinema
Digital Cinema 2000: Super High Definition Digital Movie Communication System Tatsuya Fujii, NTT, Japan, Japan
- Distributed Simulation
Distributed Simulation Analysis between Scientists Located in Germany, US, and Japan Sandia National Laboratories, USA Arthurine Breckenridge and Rena Haynes, Sandia National Laboratories, USA, Albuquerque (USA), Germany
- Finite-Difference Code
Steering and Visualization of a Finite-Difference Code on a Computational Grid Erik Engquist, Royal Institute of Technology, Sweden, Lennart Johnsson, University of Houston, USA, Sweden, Houston (USA)
- GiDVN
GiDVN: Global Internet Digital Video Network Joe Mambretti, International Center for Advanced Internet Research (iCAIR), Northwestern University, USA, Chicago (USA), Canada, Japan, Singapore, The Netherlands, Sweden, CERN, Spain, Mexico, Korea
- Haptic Collaboration
Haptic Collaboration in a Networked Immersive Environment Koichi Hirota, University of Tokyo, Japan, Japan
- Image Based Rendering
Tele-immersive Image Based Rendering Jason Leigh, University of Illinois at Chicago, USA, Chicago (USA), Berkeley (USA)
- MediaZine
MediaZine: A Combination of Television, WWW, Telecommunications and 3D Com-

puter Graphics Stefan Noll and Hartmut Chodura, Fraunhofer Institut Graphische Datenverarbeitung (IGD), Darmstadt, Germany, Germany, Singapore

● Miletus

Shared Miletus Dave Pape, University of Illinois at Chicago, USA, Maria Roussou, Foundation for the Hellenic World, Chicago (USA)

● Particle Physics

Distributed Particle Physics Research Harvey B. Newman and Julian J. Bunn, California Institute of Technology, USA, and CERN, Switzerland, Pasadena (USA), Switzerland

● PWM

Plate Window Manager (PWM): 2D Window Manipulation System in a Virtual 3D World Yoshisuke Tateyama, Telecommunications Advancement Organization (TAO), Japan, Japan

● Subaru

High Speed Networking with Subaru Telescope in Hawaii Hiroshi Esaki, University of Tokyo, Japan, Japan, Hawaii (USA)

● Tamshui River

A Virtual GIS-Based 3D Hydrodynamic Model of Tamshui River Shin-Jye Liang, National Center for High-Performance Computing, Taiwan, Taiwan, Germany

● Telemicroscopy

Advanced Networking for Telemicroscopy Martin Hadida, National Center for Microscopy and Imaging Research, San Diego Supercomputer Center, USA, San Diego (USA), Berkeley (USA), Japan

● TIDE

TIDE: The Tele-Immersive Data Explorer Jason Leigh, University of Illinois at Chicago, USA, Chicago (USA)

● Video Avatar

Video Avatar Communication in Networked Virtual Environment Tetsuro Ogi, University of Tokyo and Telecommunications Advancement Organization (TAO), Japan, Japan

● iGrid 2000 Supporters

- Japan Ministry of Post and Telecommunications (MPT), Japan
- Japan Ministry of International Trade and Industry (MITI), Japan
- Foundation for MultiMedia Communications, Japan (FMMC)

● iGrid 2000 Organizing Institutions

- University of Illinois at Chicago
- Indiana University
- Keio University/ WIDE Project
- The University of Tokyo

● iGrid 2000 Co-Organizing Institutions

- Communications Research Laboratory, Japan
- Telecommunications Advancement Organization of Japan

● iGrid 2000 Contributors

- American Power Conversion Japan Corp
- Asia-Pacific Advanced Network Consortium (APAN) / TransPAC
- Asia-Pacific Information Infrastructure (APII)
- ATT
- Cisco Systems K.K.
- Cisco Systems, Inc.
- Concert
- Foundry Networks, Inc. / Mitsui Co., Ltd.
- Gemini Project
- Hitachi, Ltd.
- IBM
- Indiana University
- Keio University
- KDD Corporation
- Litton Network Access Systems (LNAS)
- MKOCN (Mauna Kea Observatory Network)
- MPT Japan Gigabit Network
- National Astronomical Observatory of Japan (Subaru Telescope)
- Nissho Electronics Corporation
- NTT Communications Corporation
- Osaka University
- PNJ Communications Inc.

- Settsu Metal Industrial Co.,Ltd.
- SGI Japan, Ltd
- Sony Marketing (Japan), Inc.
- STAR TAP
- Sumitomo Corporation
- Time Warner Telecommunications, Hawaii, USA
- TOKYO TELECOMMUNICATION NETWORK CO., INC.
- University of Hawaii
- University of Illinois at Chicago
- The University of Tokyo
- University of Washington
- Wire One Technologies, Inc.
- WIDE Project

第6章 むすび

JB プロジェクトは、次世代インターネット技術の研究開発を、WIDE プロジェクト、ITRC、CKP (サイバー関西プロジェクト) が共同して、推進するプロジェクトである。JB プロジェクトでは、共同で、研究成果を導入した、研究開発テストベッドの構築と運用を行い、研究者の研究をさらに加速するとともに、発展させることを目指している。

JB プロジェクトの当初の目標であった、IPv6 技術、マルチキャスト技術、QoS 提供技術、先進的な次世代ミドルウェアとアプリケーション技術の研究開発活動により、基本的な研究開発を完了するとともに、個別の技術を統合化し、JB プロジェクトテストベッドにおいて、実験運用を行った。特に、SOI (School On The Internet) プロジェクトでは、IPv6、マルチキャスト、通信品質保証、高精細動画 (DV; Digital Video) のリアルタイム転送を実現する DVTS と呼ぶミドルウェアの研究開発を行うことができた。JB プロジェクトの研究開発の成果は、IPv6 における KAME などのように、国際的にも広く認められ、参照ソフトウェアとして、広く学界および産業界において利用されている。JB プロジェクトとしての活動は、次世代インターネットの基盤技術およびミ

ドルウェア技術の確立を推進し、その結果として、iGrid2000 においては、技術的にも大きな貢献を行うことができた。

今後も、JB プロジェクトでは、さまざまな研究組織との協調関係を維持発展させ、継続的に次世代インターネット技術に関する研究開発活動の促進を推進させていく予定である。特に、ポリシ制御ネットワークアーキテクチャの確立は、今後の重要な課題の1つであろう。

第7章 謝辞

JB バックボーンは、さまざまな組織から提供されている高速デジタル基盤を利用している。総務省 JGN (Japan Gigabit Network)、総務省通信総合研究所 APII テストベッド、AIII、TTnet 殿、NTT グループ殿、など、多くの組織との共同研究を通じて、テストベッドが運用されている。

