

● 特集：生きたインターネット研究への取り組みと成果

2. WIDEテストベッドとその運用

加藤 朗／東京大学

渡辺恭人, 中村 修／慶應義塾大学

WIDE Projectでは、関係者にインターネットの接続性を提供するとともに、各種の実験の場とするため、WIDE Internetと呼ばれるネットワークを運用している¹⁾。本稿ではWIDE Internetの概要について述べる。

黎明期

WIDE Projectはその名が示すように広域分散環境の共同研究プロジェクトである。1987年当時は、JUNET²⁾によって電子メールや電子ニュースの配送がUUCPを用いたバケツリレー方式のバッチ転送によって実施されていた。また一部の大学には初期のキャンパスネットワークが導入され始めており、情報関係学科や計算機センターなどが接続されていた。しかしながら、インタラクティブな通信が可能な広域ネットワークとしては、メインフレームを接続したN1ネットワークしかなく、WIDE Projectでは、研究環境となるネットワークを構築するところから始めなければならなかった。

1988年7月に、東京大学大型計算機センターと東京工業大学工学部情報工学科の計算機を64kbpsのデジタル専用線で接続することによってWIDE Internetの運用が開始された。続いて東京大学大型計算機センターと慶應義塾大学理工学部数理科学科が64kbpsで接続され、3つの大学の間でのIPデータグラムの交換が可能になった。

3大学の接続に際して、商用のルータ専用機も市販が始まっており、それを利用することもできたが、ソフトウェアを変更することができないため、Sun3/260などにSCPと呼ばれていたシリアルインタフェースカードを増設し、XNSのシリアルプロトコルを用いたSunlink/IRを使用した。SunOS 3.5のソースコードは入手していなかったが、ネットワーク関係はおおむね4.3BSDあるいは4.3BSD-Tahoe版に基

づいていたため、あまり不自由は感じなかった。

この接続を行うため、当時、直接のインターネットの接続性がないことから、各大学では任意のIPアドレスを勝手に使用していた。これを改め、SRI-NICから正式に割り当てられたClass Bアドレスに移行を行う必要があった。経路制御は、それぞれの大学で運用されていたRIPをそのまま拡張して運用した。

筆者の一人が在籍していた東京工業大学では、情報工学科は正式なアドレスに変更したものの、他の学科、特にJUNETの中心的な計算機であったtitccaと呼ばれていたVAX-11/730（後にSun3に更新）に関する電子メールや電子ニュースの通信をこの64kbpsのリンクを経由して搬送できるようにする必要があった。そのため、Sun3/260のカーネル中にアドレス変換機能を実装して対応した³⁾。現在のNATとは異なり、単にTCP/UDPのチェックサムの補正を行うだけであったが、電子メールなどに関しては問題なく動作した。

1989年8月には、慶應義塾大学とハワイ大学の間に64kbpsの専用線を開設し、ハワイ大学における太平洋地域へのインターネット接続プロジェクトであるPACCOM経由で国際的なインターネットの接続性を得ることができた。この頃の国際リンク上のトラフィックは、ftpが約40%を占め、telnetが約10%と続いていた。

発展期：接続の拡大・普及

WIDE Internetの目的には、単に関係者の計算機環境を相互接続するだけではなく、「使える」インターネット基盤を確立し、広範囲な接続性を提供することによってインターネットの発展に寄与することも含まれていた。そのため、当初から電子メールレベルではJUNETと相互に接続されていたし、WIDE Internetに前後して運用を開始した、学術情報網のX.25パケットネットワークを利用してIPの運用を行ったJAINおよび東京大学理学部を中心とした理学関係組織にIPおよびDECNETのサービスを提供した

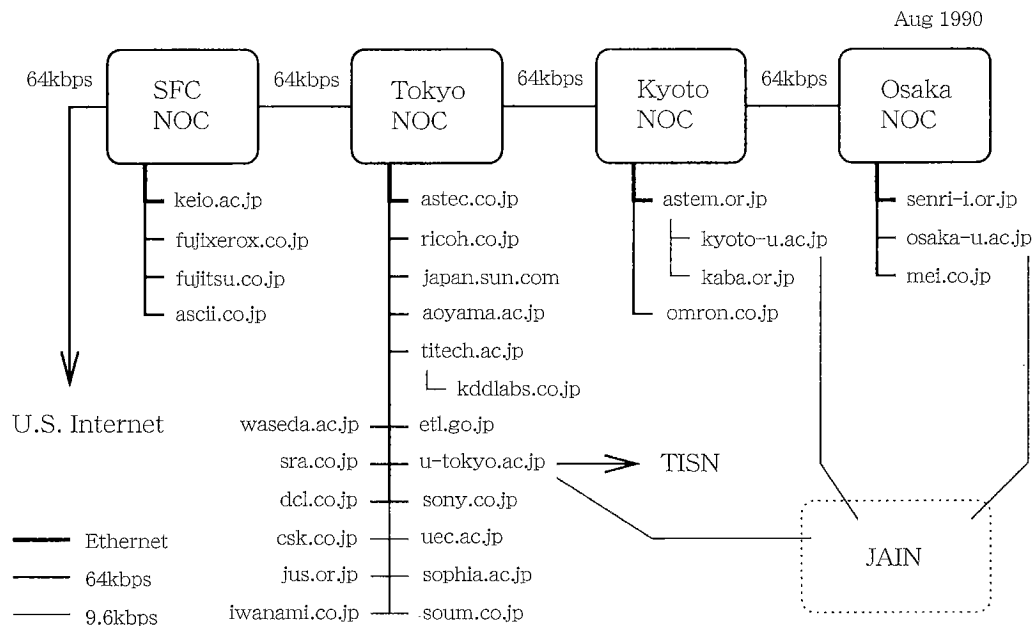


図-1 1990年8月のWIDE Internetの構成

TISNとも早くから相互接続されていた。

1990年に京都大学が接続されると、JAINとの間での経路制御の問題が生じてきた。たとえば東京大学から京都大学へは、JAIN経由とWIDE経由の2通りの経路が存在していた。JAIN経由の方がルータの段数では少なかったが、64kbpsでX.25網に接続し、他の大学へのトラフィックも同じ64kbpsを共有していたJAINよりも、64kbpsながら専用線を使用していたWIDEの方が転送能力では優れていた。このため、単純にRIPを運用するだけでは済まなくなり、フィルタリングを行ったり、Metricの操作を行う原始的なポリシ経路制御がJAINのグループとの調整の結果実施された。なお、この頃のWIDE Internetの構成を図-1に示しておく。

1991年には東京理科大学と慶應義塾大学の間が音声品目の専用線にモデムを使用し、9.6kbpsのCSLIPで接続された。これによりBITNETの日本部分と電子メールの相互通信が国内で可能になった。この回線は1992年10月には64kbpsに増速された。また、1992年に運用を開始したSINETとも、64kbpsで接続を行った。さらに1994年に運用を始めたIMnetとも1.5Mbpsで相互接続が始まった。

当時多くの学術コミュニティは、これらのネットワーク以外にNiftyServeやPC-VANなどの商用BBSを利用していたが、相互の電子メールの交換ができなかった。そこで、1992年にNiftyServeおよびPC-VANをそれぞれ9.6kbpsの専用線で接続し、国内のインターネットとこれらのBBSの間の電子メールの相互交換

を可能にした。商用BBS側では、SMTPゲートウェイが設置されたが、アドレスの変換などの機能、および当時の社会背景として一部のネットワークのみとの交換に限定するようなフィルタ機能の導入がWIDE側のゲートウェイに対して行われた。このサービスは、1993年に商用BBSが商用ISPに接続されるまで行われ、1日2000通程度のメールの転送を行っていた。

1993年になると我が国でも商用のインターネットサービスプロバイダが運用を開始した。そのいくつかとWIDEは早期に相互接続されていたが、商用プロバイダ相互間の通信はアメリカ合衆国経由になっていた。この問題を回避するため、1995年にプロバイダ相互間を接続する実験プロジェクトであるNSPIXPがスタートした。当初はEthernetのリピータハブを使用していたが、接続プロバイダ数の増加に伴いEthernet Switchが導入された。NSPIXPは1.5Mbpsを上限に、原則としてすべてのプロバイダ間でBGPによる経路交換を実施することになっていたが、トラフィックの急増により遅延やパケット損失の多発などの問題が起こった。

そのため、1996年にはFDDI Switchを用いたNSPIXP-2を開設し、容量の問題を解決した。さらに1997年には大阪にNSPIXP-3を設置し、東京にしかなかった相互接続点の分散化の実験運用が開始された。

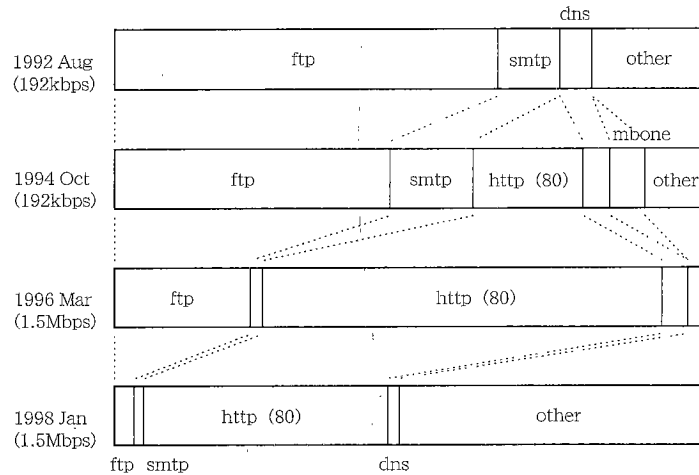


図-2 WIDEの国際線の利用形態の変遷

WIDE Internetの利用

当初は研究者、それも計算機科学関連の研究者がファイルの転送や電子メールの交換に用いられていたインターネットも、接続性が広がり、商用の利用が可能になるとその利用形態も大きく変わってきた。そのため、ネットワークの利用形態に関するいくつかの統計の収集も行われてきた。

1つのルータに複数のリンクが収容されている場合、ルータ内部で折り返すデータまで含めてすべてのトラフィックをモニタすることは容易ではない。そのため、採取地点を限って統計をとることにした。低速リンクがワークステーションの高速シリアルポートに接続する場合には、あまり影響を与えずに統計をとることができるが、回線帯域が広がるにつれ、ルータとしての転送機能に影響を与える。そのため、特に国際リンクについては、国際回線をいったんルータに収容し、Ethernetを介して別なルータへ接続するようにした。このEthernetを別なワークステーションでモニタすることにより、運用に影響を与えずに統計を得ることにした。

図-2は1992年から1998年にかけての、WIDEの国際リンクの国内に向かう方向について、パケットの総バイト数の比率をプロトコル別に示したものである^{*}。1992年の時点では主要なアプリケーションはftpであり、おそよ2/3がftpで占められていたことが分かる。1994年になるとhttp、すなわちWWWの利用が始まったことが分かるが、主要なアプリケーションはftpであり、電子メールなどの利用もトラフィックの比率としては大きなものになっていた。

1996年になると192kbpsから1.5Mbpsへ回線帯域が増強されたが、支配的なアプリケーションはhttp

になっている。回線帯域が増えているので、比率としては減少しているが、ftpのトラフィック量そのものは増加している。1998年になると、port番号80のhttpは41.3%であるが、tcpのその他のトラフィックが48%を占めるようになってきている。これは、WWWがport 80以外に8080をはじめとするさまざまなport番号を使用するようになったことによるものと考えられる。dnsの比率が下がったのは、1997年8月から国内でRoot DNS Serverの運用が開始されたことによるものである。

データリンク技術

インターネットの1つの特徴は、多くの種類のネットワーク媒体上でIPデータグラムの転送が可能になっていることである。専用線は2点間のデータリンクとしては安定性に優れていたが、高価であったため、他の媒体を活用してインターネットとしての接続性を得ることも検討された。

その媒体の候補の1つが学術情報センターの運営していたNACSIS/X.25網であった。これは限られた数の国立大学にしか交換機が設置されておらず、どこでも利用できるわけではなかったが、交換機間のパケット伝送には課金はされていなかった。そのため、Sony NEWS-800シリーズ、Sun3、SparcStation-1などの上で動作するX.25パケットドライバが作成された⁴⁾。X.25網を利用した場合、中継交換機の遅延が比較的大きく、帯域を十分に活用できないことがあるため、ルータ間で複数のコネクションを設定し、転送性能を上げる試みもなされた。このドライバはJAINにも提供され⁵⁾、NACSIS/X.25網を利用したインターネットの拡大に貢献した。

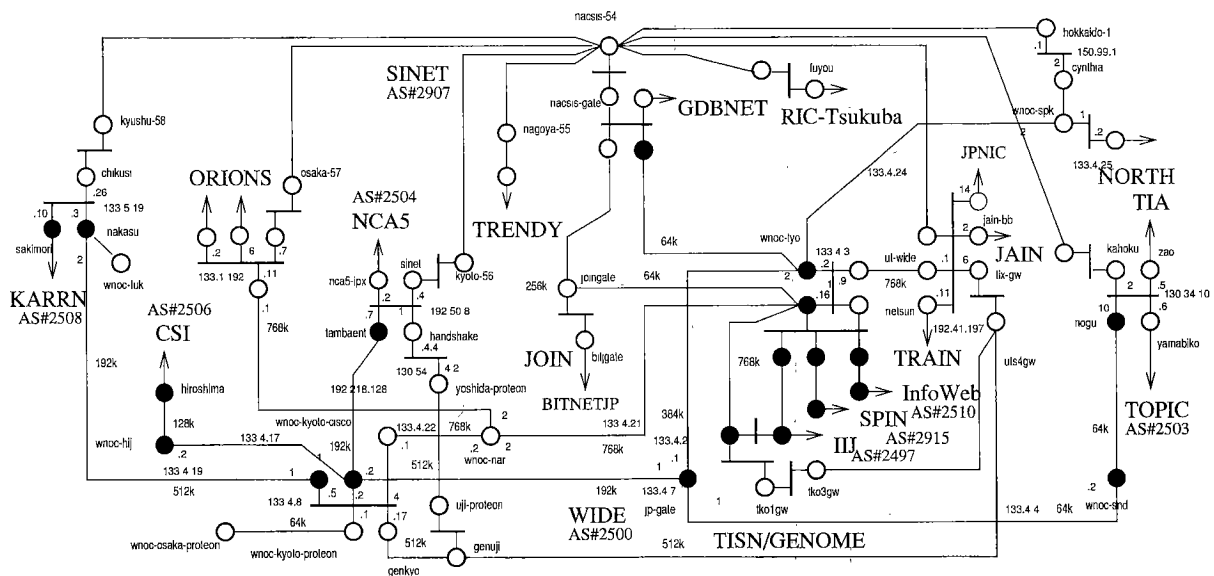
1988年頃から利用が可能になってきた媒体としてISDNがある。ISDNでは、パケット転送も可能にな

^{*} データは1992年度WIDE Project報告書および慶應義塾大学の渡辺恭人による。

Japanese IP Interconnection

4 Jun 1994

● BGP speaker
○ Non BGP speaker



Note: The coloring of the routers/links illustrates only routing domains; not implies their ownership.

Please report fixes to kato@wide.ad.jp.

Copyright 1992-94 by Akira Kato, a member of JEPG/IP

図-3 1994年7月の国内のInternetの構成

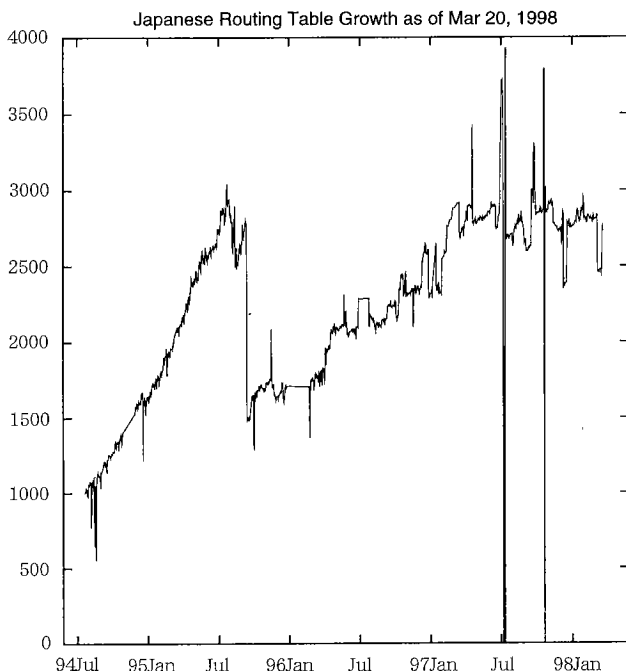


図-4 国内の経路数の変化

ったが、B channel上の回線交換を利用して64kbpsのデータリンクを設定することができる。当時のインターネットの主要リンクが64kbpsの専用線であったことを考えると、有望な媒体の1つであった。そこで、

X.21インターフェースを持つTAとSunのRS232CポートあるいはSun3/Sun4のMCP通信カードを接続し、X.21手順で発呼・着呼を行うドライバが作成された⁶⁾。

商用のISDN網を利用したため、課金、特に意図に反して頻繁に発呼を繰り返すことや、pingや経路制御トラフィックのため切断されないという課金事故の問題を避けることができなかったため、インターネットの一部として定常的に利用することはできなかった。しかし、会議会場でのインターネットアクセスや、自宅からのインターネットアクセスには盛んに用いられた。さらに、複数のデータリンクをIPからは1つのネットワークインターフェースに見せる仮想インターフェースドライバも開発され、2つのB channelに負荷を分散させ、128kbpsの接続を得る実験も行われた⁷⁾。

会議会場でのインターネット

1991年頃からISDNドライバが稼働を始めたため、臨時的ISDN回線さえ確保できれば、インターネットの接続性を会議会場に持ち込むことが可能になった。1991年7月に北九州市で開催されたJWCC '91をはじめ、1992年1月に箱根で開催された情報処理学会プログラミングシンポジウムや、WIDE Projectで年2回実施している合宿会場にインターネット利用環境を設

The WIDE Internet

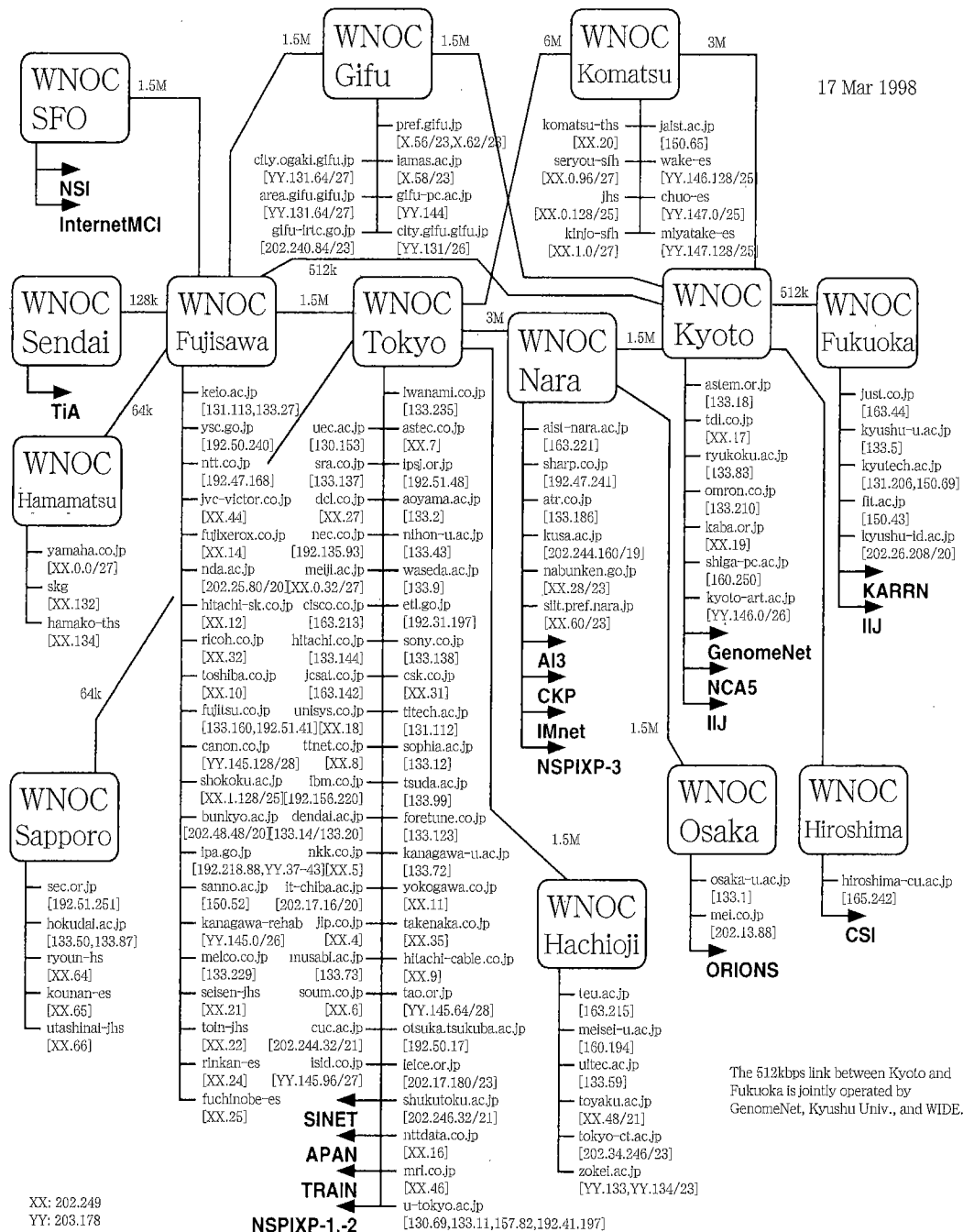


図-5 1998年3月のWIDE Internetの構成

け、会議中での電子メールのアクセスを可能にした。また、1992年6月に神戸市で開催されたJNET '92ではX端末を50台設置し、本格的な端末ルームを運営した。この際、インターネットへは192kbpsの臨時専用線を利用したが、バックアップとしてISDN回線も準備された。

1992年3月の合宿では、会場がISDNのサービス範囲外であったため、音声品目の専用線を2回線設置し、

19.2kbpsの専用線モデムと仮想インタフェースドライバを用いて38.4kbpsの接続を行ったこともあった。1994年頃からVSAT可搬局を利用して、合宿の際、衛星を利用した接続も同時に行うようになった。当初は会場からインターネットへはISDN経由、インターネットから会場へは衛星経由にして、遅延による影響を抑える試みもなされた。最近ではNATと併用し、トラフィックの性質によって地上線と衛星回線を使い

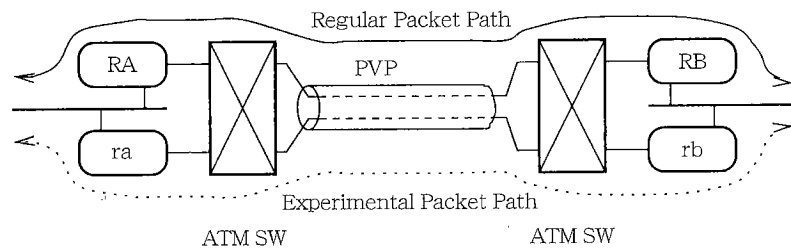


図-6 ATMを利用した実験環境

分けるような実験も行われている。

会議会場にインターネットの接続性を準備することは、論文発表を行うカンファレンスにおいては、発表後にデモンストレーションが可能になる程度であり、直接の効果はあまり高くないかもしれない。無論、多くの研究者にとって、空き時間に電子メールをチェックすることは、しばしば数日に渡って開催されるカンファレンスに出席するためには必須には違いない。それに対し、その場での議論や作業を主眼とするワークショップでは、参加者が直接データに触れ、あるいは必要な参考資料を取り寄せることができるため、インターネットの接続性は必要不可欠になってきている。

特にWIDE Projectの合宿ではこの傾向が強く、近年では200台以上の計算機が会場に持ち込まれるようになってきている。これぐらいのユーザが集結することになると、ある程度の実験も可能になる。たとえば、ある瞬間に地上線経由であった接続を参加者には告知せず衛星経由に切り替えることによって、遅延の増加によるユーザの反応を知ることもできるし、トラフィックの性質によって地上回線と衛星回線を自動的に使い分ける技術や帯域予約、CSRなどの実験も合宿ネットワーク上で行われるようになってきている。

経路制御

1993年頃までは、商用のISPは我が国ではまだ運用を開始しておらず、国内のインターネットの経路制御は、単一メインのRIPを用いて行われていた。この際、ある程度のポリシー経路制御を実現するため、アクセスリストによる経路広告の制限やメトリックの管理などが行われていた。海外のインターネットは、国際リンクの利用が許されている範囲では、default経路によって表現されていた。

インターネットの広がりに伴い、経路数が増加した。1993年10月には約340の経路が存在し、そのため、RIPによる経路制御には次のような問題が発生していた：

- RIPではメトリックが1~16と小さな範囲でしか表

現できないため、きわめて限られたポリシーしか実現できない。

- RIPは30秒に1回全部の経路の広告を行う。そのため、ルータのCPUや、RIPメッセージが消費する回線帯域などのオーバーヘッドの増加が問題になる。
- 経路数の増加に伴い、1回の広告で生成するパケット数も増加し、性能の劣るルータがすべてのパケットを受信できなくなる。

このため、1992年頃から各ネットワークの運用担当者間で、ネットワーク間の経路制御についてはRIPを止め、BGPに移行することが申し合わされた。これに先だって、WIDE InternetではIGPをRIPから、当時GatedやProteon、Ciscoなどで利用可能になっていたOSPFに移行することにした。

移行に関して、各接続点では経路をOSPFとRIPの相互の間で変換する必要がある。このため、WIDE InternetがRIPで広告するメトリックを、OSPFに移行する前と後で変化しないように設定して、当時の経路制御ポリシーに影響を与えないようにする必要があった。国内のインターネットの相互接続に関係する部分だけであったが、図-3のように相互接続図を作成し、ホップ数を数え、OSPFからRIPに経路を広告する際に設定するメトリックを求めた。RIPとOSPFを並行に動作させ、経路の選択の順序を操作することによって移行作業を実施した⁸⁾。

1993年に商用プロバイダの運用が始まると、経路制御ポリシー表現の可能なBGP-3に移行を開始し、同年秋にほぼ移行を完了した。さらに1994年に入り経路の集約の可能なBGP-4が利用可能になると、これに移行を行ったが、Classlessな経路制御に対応していないネットワークがあったため、経路の集約は直ちには実施できなかった。1994年から1995年にかけて、国内の経路は毎月100程度の割合で増加していったため、経路の集約が必要になった。その結果、1995年9月から経路集約を開始することで合意した。

図-4は最近までの国内の経路数の変動を記したものである。経路の集約によって約3000経路を約1700経路へと、経路数をほぼ半減することができた⁹⁾が、そ

の後のインターネットの接続の普及とともに経路数は徐々に増加してきた。1997年になって、大きなISPには大きなアドレスブロックが割り当てられるようになり、また接続に際してアドレスの付け替えを行うことが浸透するようになると、経路数の増加はあまり見られなくなり、現在は3000経路弱となっている。

最近のWIDE Internet

64kbpsでスタートしたWIDE Internetも、接続範囲を広げていき、現在、図-5に示すような構成になっている。ネットワークトラフィックが増加するにつれ回線の混雑やパケット損失が多発するようになった。そのため、主要なリンクについては、512kbps～6Mbpsに帯域の増強が行われた。また、IPv6などの技術に関しては、TDMで1.5Mbpsの帯域を64kbpsと1472kbpsに分割し、前者をIPv6に、後者をIPv4に割り当て、IPv6の実装上あるいは運用上の問題がIPv4の接続性に重大な影響を及ぼさないように運用が行われてきた。

最近ではcell単位の課金が行われないATM専用線が利用可能になってきた。単に従来の専用線より安価な場合があるということだけではなく、ネットワークの実験には便利になってきている。IPv6のように、現在は比較的狭い帯域でも問題のない実験ではTDMで分割する方式でもよいが、ネットワークの負荷が必要でかつ十分な安定性が保証されていない実験に関しては、専用線の場合、必要な帯域の倍の容量が必要であり、経済的ではない。

ATMを柔軟な帯域分割装置とみなした場合、図-6のように、常時使用するVCと実験用のVCを用いたリンクを並行に設定する。このとき、リンクに対するOSPFのコストを変えることにより、トラフィックを実験用リンクを通す。実験用のルータがダウンした場合などは、OSPFのタイムアウト後、自動的にトラフィックは定常リンクに戻る。また、実験終了時にはOSPFのコストを復元することにより、パケット損失を発生させずに実験を行うことができる。

常用と実験用のVCは、経路制御プロトコルの負荷を除けば、片側が使用されている時には反対側は負荷がかからないため、両方のVCを合わせたものに対してshapingを行うことにより、リンクを通過する負荷に対応した帯域の契約をすればよい。

WIDE Internetの今後

当初はWIDE Project関係者の間の接続性を確保し、インターネット上でのさまざまな実験を目的とし

ていたWIDE Internetであるが、商用ISPから接続性を得ることができるまでは、インターネットの普及・拡大ということに力が注がれてきた。JUNETとの電子メールの交換のみならず、各種ネットワークとの相互接続を行ってきた。

WIDE Projectとしてインターネットの設置が一段落すると、むしろ当初の目的通り、各種の実験基盤として活用されることになった。実験は研究室内でも可能ではあるが、実際のネットワークトラフィックとの整合性をチェックするためには、実際のインターネット上で実験を行い、データの収集を行うことが不可欠である。最近では、後述のように、IPv6の接続実験を行う基盤であるWIDE 6boneの運用や、CSRなどの新しい技術のインターネット上での評価に用いられている。さらに帯域予約などの実験をこの上で実施することも検討されている。

WIDE Internetの運用は、WIDE Projectの関係各位の有志によって支えられている。商用ISPなどと異なり、専任のオペレータは不在である。研究者が運用のために時間を割かなければならないことに関する議論はあるが、ネットワーク運用にある程度は関与していないと、実際的なネットワーク研究を進めることは難しいという側面も考慮しなければならない。

商用ISPのネットワークは、接続性の保証はしていないところが多いとはいえ、頻繁にダウンさせることは許されない。その点、WIDE Internetは、実験の場合には、ダウンする頻度や時間を最小にするような努力は当然なされるが、ネットワークのダウンも許容されている点で他に類をみないものになっている。そのため、この基盤はインターネットの新しい技術に対する実験環境・評価環境として依然として重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 村井純ほか: 大規模分散環境WIDEの構築, 情報処理学会マルチメディアと分散処理研究会資料, 42-8 (May 1989).
- 2) Murai, J. and Kato, A.: Researches in Network Development of JUNET, In Proceedings of SIGCOMM '87 Workshop, ACM (1987).
- 3) 加藤 朗, 当麻喜弘: アドレス変換を伴う計算機ネットワークの構成, 電子通信学会全国大会論文集 (1989).
- 4) 本田和弘ほか: WIDE上のX.25機能の実装と設計, 情報処理学会マルチメディアと分散処理研究会資料, 42-9 (May 1989).
- 5) 平原正樹: X.25網を利用したIPネットワークの構築, 情報処理学会マルチメディアと分散処理研究会資料, 51-3 (July 1991).
- 6) 稗田 薫, 加藤 朗, 村井 純: ISDNを用いたネットワークアーキテクチャに関する実験, 情報処理学会マルチメディアと分散処理研究会資料, 51-9 (July 1991).
- 7) Kato, A. and Hieda, K.: Network Module Structure for Heterogeneous Datalinks, In Proceedings of INET '92, Internet Society (1992).
- 8) 加藤 朗ほか: 日本のipインターネットの経路制御方式, 情報処理学会マルチメディアと分散処理研究会ワークショップ (Nov. 1993).
- 9) 加藤 朗: アドレスおよび経路制御の現状, IP Meeting '95予稿集 (Nov. 1995).

(平成10年4月1日受付)