

次世代広帯域ネットワーク 利用技術の研究開発 (GENESIS)

本プロジェクトは、来たるべきグローバルなマルチメディア社会のインフラとしての、広帯域高品質なグローバルネットワーク（次世代インターネット）の早期実現を目指し、その構築および利用のために必要な基盤技術の研究開発を目的としている。

次世代インターネットにおいては、マルチメディア通信、リアルタイム通信の効率的実現が不可欠であるが、そのためにはさまざまな観点からの多くの要素技術を有効に組み合わせることが必要になる。また、国際的な協調、相互運用性も重要である。そこで、ネットワークに関する制御技術、アプリケーション技術、そして計測技術という3本の柱の下に8つのサブテーマを扱い、理論研究から実証実験まで総合的な研究開発を行った。また、海外の研究開発用広帯域ネットワークと相互接続し、国際共同実験にも積極的に参加した。本稿では、プロジェクトの構成、研究開発の概要などを紹介する。

宮原秀夫 大阪大学
miyahara@ics.es.osaka-u.ac.jp

下條真司 大阪大学
shimojo@cmc.osaka-u.ac.jp

尾家祐二 九州工業大学
oie@cse.kyutech.ac.jp

久保田文人 独立行政法人通信総合研究所
kubota@crl.go.jp

中川晋一 独立行政法人通信総合研究所
snakagaw@crl.go.jp

金子 功 (株) SCC
kaneko.isao@sed-c.co.jp

はじめに

次世代広帯域ネットワーク利用技術の研究開発プロジェクトは、インターネットの急速な普及を起爆剤として各国でマルチメディア社会実現の動きが始まったことを受けて、グローバルなマルチメディア社会の実現に向けた技術面のさまざまな課題を関係各国と協調して解決していくため、平成9年度に通信・放送機構（TAO）の研究プロジェクトとして始まった。通称GENESIS (Global Experimental Networks for Information Society) プロジェクトと呼ばれ、平成11年度で計画は終了したが、その成果を踏まえて平成12年4月から2年間、体制も新たに第IIフェーズとして研究を継続し、平成13年3月に多くの成果をあげて終了した。本稿では第IIフェーズで実施した内容を中心にGENESISプロジェクトを紹介する。

本プロジェクトでは、マルチメディア社会実現のため文字情報だけでなく音声や画像情報をインターネット技術によって統合的に伝達する広帯域ネットワーク技術の開発が進みつつあるとの認識の下、多様なニーズに対応した新たなマルチメディアサービスの提供を実現するためには広帯域ネットワークの構築とともに、その利用技術が次世代ネットワーク実現の鍵であるとの問題意識をもって臨んだ。広帯域・高品質な次世代ネットワークの実現ならびにその利用技術に関しては、きわめて多くの要素技術が必要であり、多様な研究開発が必要になる。本プロジェクトにおいては、大きく分けて3つの研

究課題に取り組み、相互に連携しながら研究開発を進めた。3つの研究課題とは、次世代広帯域ネットワークの構築／運用のための基盤技術の利用方法を明らかにする「制御技術」、ユーザが利用するマルチメディア接続やサービス提供の「アプリケーション技術」、ならびに上記技術の設計・実装・評価のための「計測技術」である（図-1）。以下、各研究テーマの概要、それらの研究テーマの中で実証実験として実施した国際および国内の広域実験の概要を述べ、最後にまとめる。

研究体制（表-1）としては北九州、豊中、小金井の3グループに分かれていたが、Japan Gigabit Network (JGN) を介して3拠点をDigital Video (DV) で結んだ遠隔会議を頻繁に行って連携を図った。各研究グループは、九州工業大学、大阪大学、通信総合研究所（CRL）、高エネルギー加速器研究機構（KEK）と共同研究を行い、一体となって研究開発を実施した。また、日欧間を結んで国際広帯域ネットワークを構築し、University College London (UCL) や欧州中央原子核研究機関（CERN）など各国の研究機関と協調して国際共同実験も実施した。

研究開発の概要

●制御技術

次世代インターネットの構築／運用の基盤となるネットワーク制御技術に関しては、「マルチQoS（サービス品質）ネットワーク制御」、「マルチクラス環境下におけるサービス品質の多様性」、「IPv6による基幹ネットワ

次世代のインターネット
グローバルなマルチメディア社会のインフラ
マルチメディア通信, リアルタイム通信の効率的実現

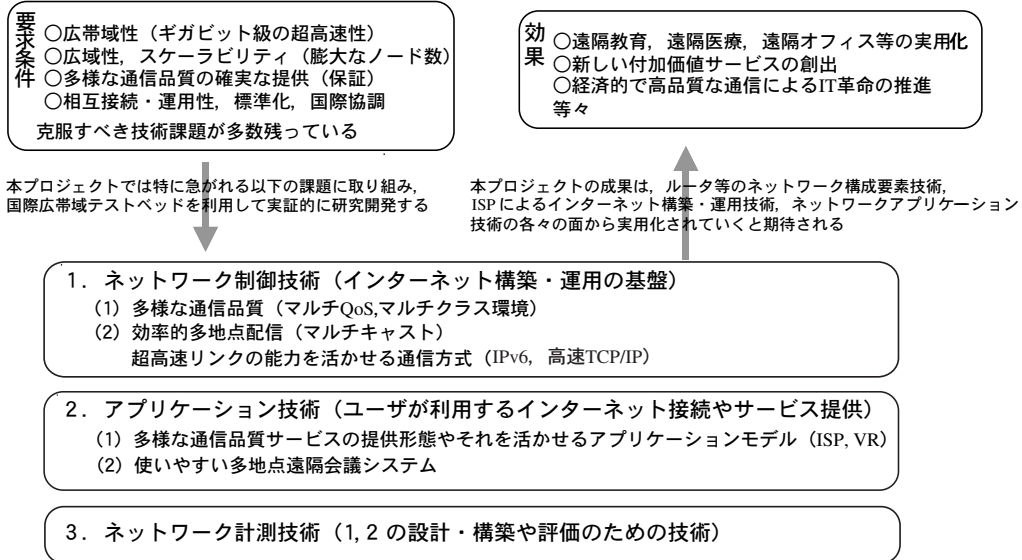


図-1 研究開発テーマの関連図

宮原 秀夫プロジェクトリーダー	共同研究機関
北九州次世代広帯域ネットワークリサーチセンター 尾家 祐二サブリーダー, 熊副 和美研究員, 池永 全志研究フェロー, 堀 良彰研究フェロー 金子 功サブリーダー, 鶴 正人研究員, 川原 憲治研究フェロー	九州工業大学
豊中 GENESIS 研究グループ 下條 真司サブリーダー, 八木 輝研究員, 若宮 直紀研究フェロー, 長谷川 剛研究フェロー 藤川 和利研究フェロー, 奥田 剛研究フェロー	大阪大学
小金井 GENESIS 研究グループ 久保田 文人サブリーダー, 植月 修志研究員, 荻田 幸雄研究フェロー 中川 晋一サブリーダー, 北口 善明研究員	CRL KEK

表-1 研究体制 (第IIフェーズ)

ーク」, 「ネットワークにやさしいマルチキャスト通信」, 「ギガビットレベルにおける TCP/IP の適用性」のサブテーマを掲げ, さまざまな角度から研究開発を行った。

「マルチ QoS ネットワーク制御」では, 個々のユーザの QoS 要求に対するきめ細かい対応や適応的な制御を目指し, それを柔軟に実現する基盤となる可能性を秘めた新しいパラダイムであるアクティブネットワーク技術を取り上げ, ストリームコード型アクティブノードのプロトタイプを PC ベースで実装し, 性能評価を行った。また, JGN を用いた広域広帯域アクティブネットワーク実験環境 (テストベッド) を構築した (図-2)。一方, アクティブノード上で動作するいくつかのアクティブアプリケーション (サーバ負荷分散や最適経路選択, ノード間再送機能付きマルチキャストなど) を試作し, テストベッド上での実証実験も行った。これらを通して, アクティブネットワーク技術の潜在的有効性を示し¹⁾, また, 実用化への課題も明らかにした。

「マルチクラス環境下におけるサービス品質の多様性」

では, QoS ネットワーク実現のために有望視されている要素技術として, Diffserv (Differentiated Services), 分散型 QoS 経路制御, 集中型 QoS 経路制御を取り上げ, QoS トラフィックと BE (Best-Effort) トラフィックの効率的な共存を目指して, 既存手法の性能分析や改善手法の提案を行い, 数値実験や実ネットワーク実験によって評価した。Diffserv 技術では, AF-PHB (Assured Forwarding Per-Hop Behavior) を利用した統計的帯域割り当てサービスのための RIO (Random Early Detection with In/Out bit) キューでのパラメータ調整手法を提案し, 高スループットと低遅延を実現できることを示した。また, 複数ドメインを経由するフローに対して Diffserv 技術が提供できる QoS に関して, マーキングポリシーの種類とネットワークトポロジの影響を明らかにした (図-3)²⁾。分散型 QoS 経路制御では, 経路制御プロトコルである OSPF (Open Shortest Path First) を拡張し, QoS トラフィックに対しては空き帯域ベースで, BE トラフィックに対してはリンク帯域ベースで経路表を作成する手法を提案し, ネットワーク利用効率が改善されることを示した。集中型 QoS 経路制御では, QoS (Bandwidth Broker) サーバの一元管理による経路制御において, クラス別トラフィックに対する経路の再配置の手法および BE トラフィックの性能も考慮した経路割り当ての手法を提案し, 有効性を示した。

「IPv6 による基幹ネットワーク」では, 広域広帯域ネットワークにおいて重要となる, 大容量コンテンツ流通と高精度時刻同期を取り上げた。大容量コンテンツ流通技術に関しては, IPv6 ネイティブの広域広帯域ネットワークを構築し, DV over IP のような実時間大容量転送を使った遠隔会議などの実験を通して, 性能評価や課題

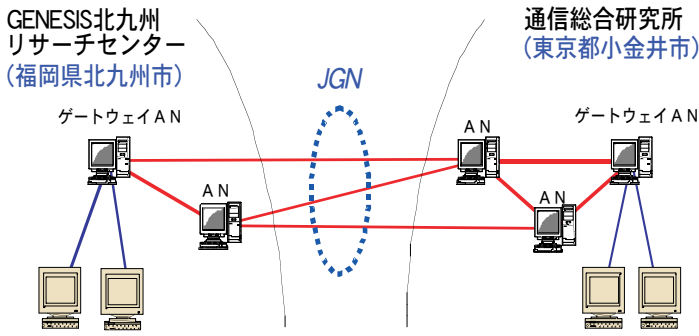


図-2 アクティブネットワークテストベッド

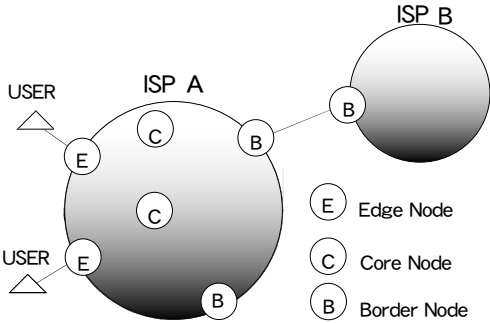


図-3 Diffserv

の抽出を行った。また、高精度時刻同期技術に関しては、その第一歩として、PC ベースの高精度時刻サーバを試作し、高精度水晶発振器あるいはセシウム原子時計からの外部信号と、Linux OS における nanokernel を用いることで、標準偏差で 200 ナノ秒台の時刻精度を実現した³⁾。

「ネットワークにやさしいマルチキャスト通信」では、広帯域ネットワークにおけるキラーアプリケーションの1つと考えられる実時間動画配信（動画画像マルチキャスト）を取り上げ、クライアントごとに異なる要求品質やネットワーク条件を考慮し、サーバやネットワークの負荷をできるだけ低く抑え、かつ、既存のデータ通信と効率的に共存することを目指した制御技術の提案を行い、数値実験と実ネットワーク実験によって評価した。まず、アクティブネットワークを用いた動画画像マルチキャストのためのフレームワークを検討し、トポロジやクライアントの要求品質を考慮した効率的なマルチキャストグループ構成アルゴリズムや、アクティブノードにおける品質調整機構を提案し⁴⁾、ネットワークプロセッサ上に実装し、有効性を示した（図-4）。また、競合トラフィックとの公平性を考慮した動画配信を実現するために、ネットワークの負荷状態から競合 TCP 通信の振る舞いを推定し、それに基づき動画画像の送信レートを制御する手法を提案し、MPEG-2 および MPEG-4 に関して、その有効性を示した。

「ギガビットレベルにおける TCP/IP の適用性」では、広帯域ネットワーク上での TCP によるデータ通信の性

能を取り上げ、その帯域を十分に活かし、かつ公平性を保ったデータ転送を可能にするためのサーバ（エンドホスト）側の技術に関して、さまざまな手法を提案し、数値実験と実ネットワーク実験によって評価し、いずれも大幅な性能向上が可能であることを示した。具体的には、まず、エンドホストでの TCP 処理のボトルネックの1つがメモリコピーであることを示し、それを削減する手法を提案した。また、サーバにおいて TCP コネクションが必要とするバッファなどの資源を、コネクションの特性/状態に応じて動的にかつ公平に割り当てる手法を提案した⁵⁾。さらに、Web プロキシサーバのように、サーバ側、クライアント側の双方と TCP 通信を行ってデータ転送の中継を行うサーバに関して、広帯域を効率的に過不足なく使い切るために必要となるフローやサーバ資源の管理手法を提案した。一方、それらの新方式のサーバと既存サーバが混在する環境での性能評価実験も行い、方式移行の課題を明らかにした。

●アプリケーション技術

次世代インターネットを有効に利用するために必要な、インターネット接続やサービス提供のためのアプリケーション技術に関しては、「QoS に対応した ISP（インターネットサービスプロバイダ）モデルとアプリケーション」、「構成が容易な多地点遠隔会議システム」のサブテーマを掲げ、具体的な QoS サービス提供アーキテクチャやその上で利用される高度なアプリケーションの研究開発を行った。

「QoS に対応した ISP モデルとアプリケーション」では、高品質な通信サービスを実際に提供するフレームワークを取り上げ、課金等をふくめたサービスモデルを検討し、その実現に必要な QoS サーバの機能や構成を明らかにし、プロトタイプを実装した⁶⁾。さらに、その QoS サーバとのインタフェースを持つユーザアプリケーション（DV over IP を用いたテレビ会議）や管理者用 GUI を試作し、実証実験を通して、有効性を示した（図-5）。

一方、そのようなネットワーク上で利用される新し

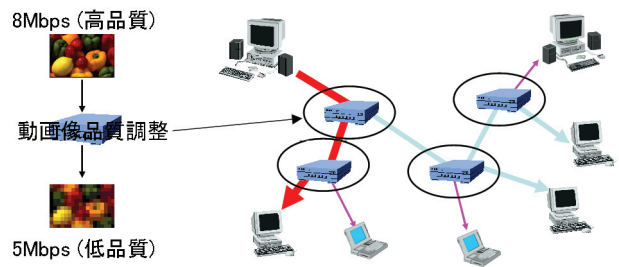


図-4 ネットワークにやさしい動画画像マルチキャスト

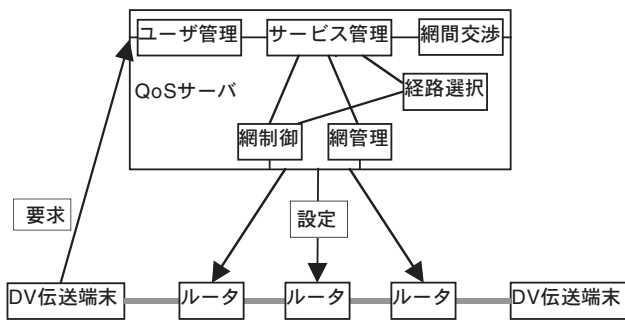


図-5 QoS サーバの構成



図-6 CittaTron のクライアント GUI

いタイプのアプリケーションとして、多人数参加型ネットワークゲーム（仮想空間共有型アプリケーション）を取り上げ、個々のユーザごとに異なるネットワーク環境の差を隠蔽し、多数のユーザが参加した場合もスケールして、全体としてアプリケーションレベルの品質を維持するための技術を検討した。具体的には、CittaTron と名付けた、多数の参加者が仮想空間内で宝探しを行うネットワークゲームのサーバおよびクライアント（図-6）を試作し、その中で、仮想空間内の移動に関する情報の転送頻度や仮想空間の最小単位の（ユーザ数に合わせた）動的調整、また、効率的なサーバの配置およびクライアントからのサーバ選択、複数サーバによる分割管理などの手法を提案し⁷⁾、数値実験と実ネットワーク実験によって有効性を示した。

「構成が容易な多地点遠隔会議システム」では、広帯域ネットワーク上で普及が期待されるアプリケーションとして高品質多地点遠隔会議を取り上げ、この普及を妨げている大きな原因である、会議前の環境構築（ネットワーク機器や映像音声機器の設定・調整）や会議中の操作（映像音声機器の動的制御）の煩雑さを解消し、ネットワークや映像音声機器の素人でも容易に利用できるシステムを目指して、（半）自動化技術を検討した。具体的には、各拠点ごとのローカルの音声映像機器を管理するサーバと全体を調整するサーバとを置き、それらを用いて拠点内の各機器の初期化、設定や拠点間のネットワーク接続などを Plug and Play で行う方式、およびソフトウェアエージェントを用いて、遠隔講義などにおける

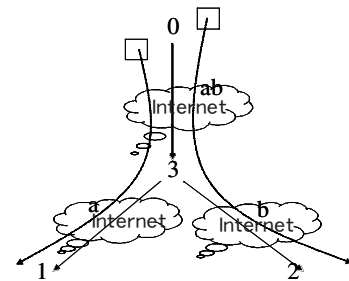


図-7 部分区間のパケットロス率推定

複数のカメラや映像切り替え装置の制御を被写体の動きに応じて自動で行う方式について、プロトタイプを開発し、実証実験によって有効性を示した。

●計測技術

以上のネットワークの制御やアプリケーションに関する技術の設計、実装、評価には、通信品質やネットワーク状態の計測が不可欠である。しかし、次世代インターネットにおいては、広域性、広帯域性、および管理の分散性などによって、ネットワーク内部の局所的あるいは大域的な状態を直接的に計測することが困難または非効率な場合がある。そこで、そのような特性を（計測が容易な）他の特性から間接的に推定するための技術を取り上げ、特に同時多地点の計測データ間の相関を用いた統計的推定法（ネットワークトモグラフィ）の適用範囲を拡大する手法の提案を行い、数値実験や実ネットワーク実験によって評価した。

具体的には、複数のエンドツーエンドパス上でのパケットロスの観測からの、パス内の部分区間（その区間を共有するパスの組によって区別される）上でのパケットロス率の推定に関して手法を提案し、推定ツールを試作し、有効性を示した（図-7）。これにより、エンドノードまたはエッジルータでの計測からネットワーク内部の局所状態を把握することが可能になった。さらに、複数点での通過トラフィック量（集約フローの流量）の観測からの、個別フロー（そのフローが通過する観測点の組によって区別される）の流量統計の推定に関して手法を提案し⁸⁾、有効性を示した。これにより、個々のパケット内の始点・終点 IP アドレス情報を参照することなしにフローの特性を把握することが可能になった。

実験ネットワーク

本プロジェクトでは、国際回線や JGN 等の実験ネットワークを用いて数多くの実証実験を行った（図-8）。その主なものを表-2 に示し、その中のいくつかの実験について以下で紹介する。

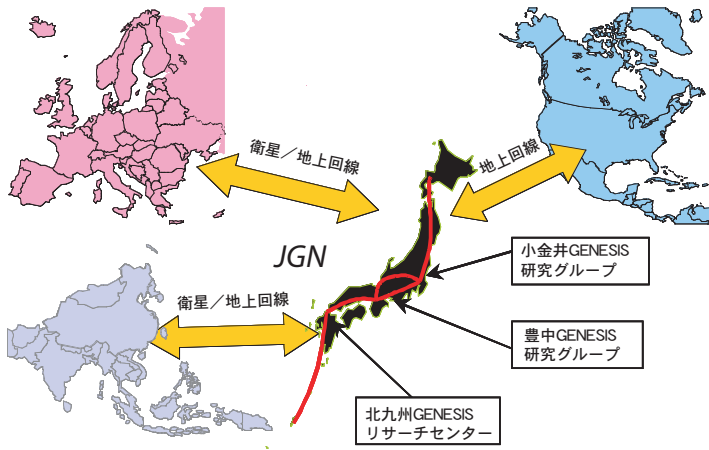


図-8 広域実験用ネットワーク

平成 9年10月～ 平成10年2月	GIBNプロジェクトに参加しての日本カナダ間のHDTV会議
平成10年3月～	JEGプロジェクトに参加しての日欧の各種遠隔高速通信実験
平成12月7月	INET2000での多地点DV over IP 放送実験 (DV Land)
平成12月10月	多人数参加型ネットワークアプリケーションの負荷分散実験
平成12月11月	アクティブアプリケーション評価実験
平成12年12月～	IPv6による広帯域広域ネットワーク運用実験
平成13年1月	ICOIN15会場と欧州を結ぶ日欧国際多岐点ビデオ会議
平成13年10月	DDW-JapanでのIPv6 Multicast を用いたDV中継実験
平成13年11月	SC2001 における QoS サーバデモ実験

表-2 主な国際・国内実験

●国際実験

国際実験としては、GIBN (Global Interoperability for Broadband Networks) プロジェクトや JEG (Japan-Europe Gamma) プロジェクトに参加し、遠隔通信実験を数回実施している。JEG プロジェクトの回線を用いた実験としては平成 12 年 7 月に実施した「INET2000 での多地点 DV over IP 放送実験 (DV Land)」がある。これは横浜にて開催された INET2000 会場に向けて DV over IPv6 の映像を送信する実験で、20Mbps の日欧広帯域回線を用いて行われ、ジュネーブにある CERN からモンブランの山並みの映像を中継した。さらに JGN を用いて札幌、金沢、北九州、那覇から現地の風景を中継し DV over IPv6 の技術を広く紹介した。

また平成 13 年 1 月には、CRL と共同で、日欧間に IPv6 による常設の広帯域実験ネットワークの構築を行った。このネットワークは小金井の CRL とロンドンの UCL との間に 20Mbps で常設された光ファイバーによる回線で、アメリカ大陸を経由した非常に長い経路である。この海外線を用いた実験として平成 13 年 1 月末に、小金井 (CRL)、別府 (ICOIN15 会場)、ロンドン (UCL)、マドリッド (IPv6 Summit 会場) を DV over IPv6 によって結ぶ遠隔 4 地点ビデオ会議を実施した。

当日は図-9 のように国際回線を 40Mbps に増速して中継を行った。映像音声の多地点配信には、小金井に他の 3 会場の映像音声を集め、そこで 4 カ所分を合成したものを各拠点に配信する方法を用いた。この実験では日本から欧州方向へのトラフィックにのみデータの欠損が発生するトラブルに見舞われたが、送信映像の転送量の調整等で会議自体は問題なく実施でき、

国際間のインタラクティブ性を持った多地点間コミュニケーションを実現する、広帯域ネットワークによる実時間双方向通信の可能性を示すことができた。

●国内実験

国内では主に JGN を用いて各研究テーマの検証実験を実施した。「QoS に対応した ISP モデルとアプリケーション」の研究では、平成 12 年 10 月に、多人数参加型ネットワークアプリケーション (CittaTron) の複数サーバを用いた負荷分散機能の広域実験を行った。この実験では JGN をバックボーンとするネットワークの 3 地点 (沖縄、倉敷、園部) に、クライアントから移動情報等を受け取り、クライアントへ仮想空間情報を送るサーバ (Virtual Space Server : VS サーバ) を 1 台ずつ置き、また、沖縄には、ユーザのログイン・ログアウトを管理し、クライアントをどの VS サーバに接続させるかを決定するマスタサーバも置いた (図-10)。そして、インターネットを通じて、実験の日時をアナウンスし、クライア

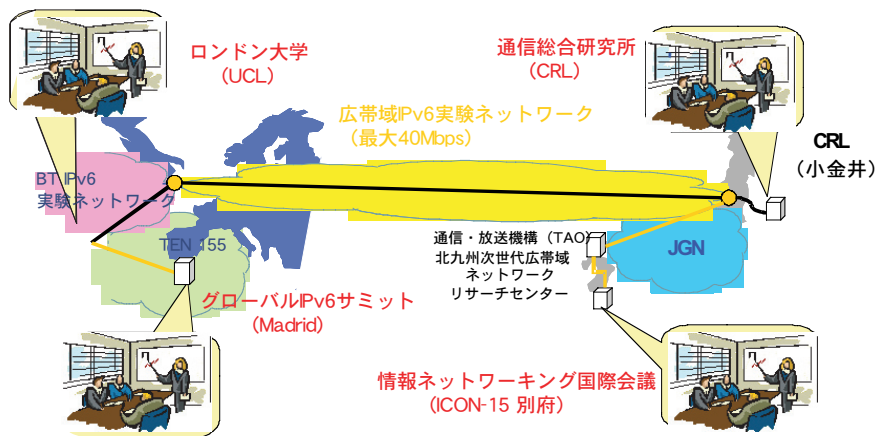


図-9 日欧多地点ビデオ会議

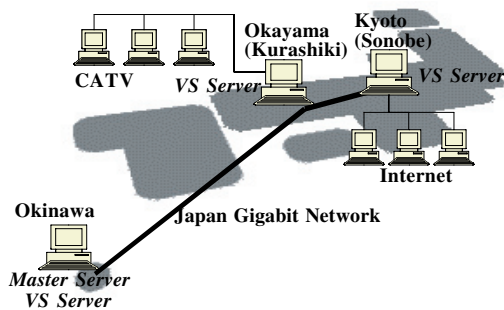


図-10 多人数参加型ネットワークゲーム

ントプログラムを配布し、不特定のユーザにインターネット経由で参加してもらった。また、それ以外にCATV網経由でのクライアントも用意し、それらがマスタサーバに接続することで実験を実施した。このとき、同時接続ユーザは最大50人程度であり、VSサーバ間の負荷分散は機能したが、マスタサーバがボトルネックになるという問題が発生した。ただし、その後、この問題への対策を施し、VSサーバを2台用いて実験した結果では、全体としての負荷分散が有効に機能し、スケーラビリティが向上することを確認した。

また、「IPv6による基幹ネットワーク」の研究では、平成12年12月よりCRLと共同でIPv6ネイティブ広域広帯域実験ネットワークを構築し、運用実験を進めてきた。このネットワークは関東地区、関西地区、および沖縄地区に分かれており、地域内では2.4Gbpsの大容量光ネットワークやWDMを用いたギガビットイーサネット等により構成され、大規模なIPv6ネイティブネットワークとなっている。また各拠点間はJGNを用いて関東-関西間は600Mbps、関東-沖縄間は124Mbpsにて接続しており、通信プロトコルにはIPv6のみを利用している。この実験ネットワーク上で定常的なネットワーク運用実験や広帯域通信実験を実施し、現状のIPv6対応製品における高速通信時の性能上の問題などを抽出することができた。

まとめ

本プロジェクトでは、次世代広帯域ネットワークの構築および利用に必要な技術に関して、さまざまな課題の解決や可能性の追求を行うために、多角的な研究、開発および実験・評価を行った。その成果は、アクティブネットワークの適用性の評価、Diffservを用いた品質制御手法の改善、広域広帯域ネットワークでのIPv6実用化の課題抽出、マルチキャスト配信の効率化、TCP/IP通信の高速化、大規模仮想現実アプリケーションの開発、QoSサーバの開発、多地点遠隔会議の構成半自動化、通信特性の統計的推定など多岐に渡り、多数の学術論文や

国際会議などにおける発表を行うとともに、国内外においてさまざまな実験を行い、各研究テーマとも初期の目標をおおむね達成することができた。その中には、世界初のIPv6ネイティブ日欧間広帯域通信など注目すべき実験もあった。

本プロジェクトの成果は、超高速リンクの能力を活かし、多様な通信品質や効率的な多地点配信が利用可能な次世代広帯域ネットワークの構築・運用に資するとともに、新しいマルチメディアアプリケーションやインターネットサービスの構成法を明らかにし、ネットワーク内部の状態把握を容易にするものとして、今後の活用が期待される。また、研究の進め方についても、高品質な遠隔会議や電子的な情報共有を駆使して分散した研究者間の連携がうまくいったことや、内外の研究者と連携して実証実験を積極的に行ったことは特筆されるべきである。

先に述べたように本プロジェクトは本年3月をもって完了したが、その成果をさらに発展させるため、残された課題や新たに指摘された課題が、同じく通信・放送機構のギガビットネットワーク研究開発プロジェクトの中で「アクティブネットワーク技術等を用いたネットワークアーキテクチャの研究」に引き継がれている。

最後に、本稿では触れることができなかったが、第Iフェーズでも多くの重要な研究がなされており、その成果を引き継いで上記の研究が行われた。また、大阪大学、九州工業大学、独立行政法人通信総合研究所、文部科学省高エネルギー加速器研究機構の各組織の関係各位にも多大なご支援・ご協力をいただいた。ここに記して感謝する。

参考文献

- 1) Kubota, F., Egawa, T., Saito, H., Uetsuki, S., Komine, T., Otsuki, H. and Hasegawa, S.: QoS Restoration that Maintains Minimum QoS Requirements - A New Approach for Failure Restoration: IEICE Trans. Communications, Vol.E83-B, No.12, pp.2626-2634 (2000).
- 2) Kumazoe, K., Hori, Y., Ikenaga, T. and Oie, Y.: Quality of Assured Service through Multiple DiffServ Domains, IEICE Trans. Information and Systems, Vol.E85-D, No.8, pp.1226-1232 (2002).
- 3) Kitaguchi, Y., Okazawa, H., Shinomiya, S., Nakagawa, S., Kidawara, Y. and Hakozaki, K.: Development of High-Accurate Time Server for Measurements of the Internet, Proc. ICOIN16, Korea, 9C-4.1-4.8 (2002).
- 4) Akamine, H., Wakamiya, N. and Miyahara, H.: Heterogeneous Video Multicast in an Active Network, IEICE Trans. Communications, Vol.E85-B, No.1, pp.284-292 (2002).
- 5) Hasegawa, G., Terai, T., Okamoto, T. and Murata, M.: Scalable Socket Buffer Tuning for High-Performance Web Servers, Proc. ICNP2001, Riverside, CA, pp.281-289 (2001).
- 6) Yagi, H., Manzoor, H., Kitani, M., Baba, K. and Shimojo, S.: Network Functionalities Necessary for QoS Service Provisioning, Proc. IEICE/IPSJ Internet Workshop 2001, Tokyo, pp.165-170 (2001).
- 7) Hori, M., Iseri, T., Fujikawa, S., Shimojo, S. and Miyahara, H.: CittaTron: a Multiple-server Networked Game with Load Adjustment Mechanisms on the Internet, Proc. the 2001 SCS Euromedia Conference, Valencia, Spain, pp.253-260 (2001).
- 8) Tsuru, M., Takine, T. and Oie, Y.: Inferring Link Loss Rates from Unicast-based end-to-end Measurement, IEICE Trans. Communications, Vol.E85-B, No.1, pp.70-78 (2002).

(平成14年9月18日受付)