OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	情報通信ネットワークにおける適応型サービス品質制御技術に関する研究
Author(s)	勝山, 恒男
Citation	大阪大学, 2009, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/814
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

情報通信ネットワークにおける
適応型サービス品質制御技術に関する研究

2009 年 1 月

勝 山 恒 男

情報通信ネットワークにおける
適応型サービス品質制御技術に関する研究

提出先　　大阪大学大学院情報科学研究科

提出年月　2009 年 1 月

勝 山　恒 男

関連発表論文

1. 学術論文誌掲載論文

[1] 勝山恒男，高橋英一，田村直広，小谷野修，安達基光，石橋宏司，“IP ネットワークにおけるサービス品質解析方式,” 情報処理学会論文誌, vol.43, no.2, pp.456-464, Feb. 2002.

[2] T. Katsuyama, H. Kamata, S. Okuyama, T. Suzuki, Y. Minakuchi, K. Yano, "Multimedia Paper Services/Human Interfaces and Multimedia Communication Workstation for Broadband ISDN Environments," *IEICE Trans. COM*, vol.E76-B,no.3, March 1993.

[3] 勝山恒男，安家武，野村祐士，若本雅昌，野島聡，木下和彦，村上孝三，“レイヤ 2 ネットワークにおけるループ障害のリモート診断方式,” 情報処理学会論文誌，条件付採録

2. 国際会議発表論文

[1] M. Adachi, S.Kikuchi, T. Katsuyama, " NEPRI: Available Bandwidth Measurement in IP Networks," *ICC2000*, Session S12.4, June 2000.

[2] T. Katsuyama, Y. Sugimura, "Key technology for IP convergence," *China VoIP conference 1999*, Sept. 1999.

[3] H. Kamata, T. Katsuyama, T. Suzuki, Y. Minakuchi, K. Yano, “Communication Workstation for B-ISDN: MONSTER,” *Globecomm'89*, 1989

[4] S. Morita, T. Katsuyama, K. Itoh, Y. Hayami, "Elastic Basket Switching - Application to Distributed PBX," *ICC'87*, 1987

[5] S. Morita, T. Katsuyama, K. Itoh, H. Hayami, "Elastic Basket Switching - Application to Distributed PBX," *ICC'87*, 1987

[6] T. Tsuda, K. Hasui, T. Katsuyama and M. Kato, "An Experimental Model of a Multiservice Digital Subscriber Loop System with Simultaneous Voice and Hand-drawing Communication Feature," *ISSLS'84*, 1984

[7] K. Hausi, T. Katsuyama, M. Kato and S. Hattori, "Handwritten Message Switching in an Integrated EPBX," *Localnet Conference*, 1983

3. 国内研究会等発表論文

[1] 勝山恒男，神田陽二，”現場業務を実行・最適化するサービス基盤技術,” 富士通、vol.58, no.3, pp.234-239, May 2007.

[2] 勝山恒男，木村康則，”仮想自律化のためのシステム技術,” 富士通，vol.56，no.1, pp.75-80, Jan. 2005.

[3] 勝山 恒男，野島 聡，有山 隆史，”プロアクティブな運用管理を実現するセンタ/ネットワークの統合管理技術,” 富士通, vol.54, no.5, pp.396-401, Sept. 2003.

[4] 勝山恒男，淺川和雄，“インターネットミドルウェア技術,” 富士通, vol.52, no.4, pp.322-328, July 2001.

[5] T. Katsuyama, A. Hakata, M. Katoh, A. Takeyama, "High-Performance IP Service Node with Layer 4 to 7 Packet Processing Features", *FUJITSU Sci.Tech. J.*, vol.37, no.1, pp.42-49, June 2001.

[6] 菊池慎司，松本晋一，佐藤義治，青柳好織，安達基光，勝山恒男，“異なるリソース間の相互作用を考慮した Web サーバシステムのモデル化,” 信学技報, NS2001-153, 2001.

[7] 関口敦二、土屋哲、石橋宏司、安達基光、勝山恒男、野島聡，“ポリシィ制御型ネットワークにおけるポリシィ生成方式,” 信学技報, IN99-58, CQ99-36, Oct. 1999.

[8] 青木武司，菊池慎司，高橋英一，岡野哲也，安達基光，勝山恒男，“IP ネットワークの性能測定技術,” 信学技報, CQ98-32, 1998.

[9] 菊池慎司，青木武司，安達基光，勝山恒男，“IP ネットワークの利用可能帯域幅推定方式,” 情処全大, 1998.

[10] 福永厚，渡辺理，勝山恒男，”テレビ会議コミュニケーションの評価,” ヒューマンインタフェース研究論文集, vol.3, no.1, pp.53-60, 1994.

[11] 山口一雄，松田喜一，勝山恒男，伯田晃，山下治雄，“マルチメディア通信と ATM 関連技術,” 信学技報, CS94-4, pp.23-30, April 1994.

[12] 村野和雄，松田喜一，勝山恒男，飯田一朗, “広帯域端末技術,” 信学誌, vol.74, no.11, pp.1177-1185, 1991.

[13] 勝山恒男，“広帯域 ISDN サービスと通信ワークステーション,” 電気四学会 連合大会，July 1991.

内容梗概

本研究は、筆者が、大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻在学中および、(株)富士通研究所在職中に行ってきた情報通信ネットワークにおけるサービス品質に関する研究をまとめたものである。

電話網に代表される従来ネットワークでは、そのサービス品質は事前に設計可能であった。しかし、IP パケットをベースとしたインターネット/イントラネットのサービス品質は、ベストエフォートという原則に代表されるように、厳格な品質維持を行うのではなく、状況に応じて提供品質が変化する。近年、インターネット技術が企業システムや社会基盤に適用されに伴い、また、SaaS などにみられるように提供サービスが重視されるに伴い、サービス品質維持への要求が格段に高まっている。負荷変動時にも安定した品質を提供することは必須であり、また、万が一のサービス停止時間を最小化することも緊急の課題となっている。本質的なサービス品質維持のためには、提供品質を監視分析して、ネットワーク制御を行うという適応的な制御が不可欠であるが、現状では、これらのサービス品質維持は、ネットワーク QoS 技術に委ねられており、サービスの追加変更に応じて、サーバ等のエンドシステムも含めた設備増減や構成変更を行うなどのネットワーク稼働状況に広範囲に適応するレベルには達していない。

これらの背景から、本研究では、適応型サービス品質制御を実現する技術について、提供品質の制御技術から、ネットワークシステムの安定性を高める技術までを検討している。

第 1 章では、序論としてネットワークサービスに関する背景を述べ、機能よりはサービス性が重視される知識化が進む社会の中で、適応型サービス制御が必要とされる理由をまとめ、通信品質・安定品質に関する技術課題を示した。第 2 章では、マルチメディアサービスの増加に伴い、従来のネットワーク品質(QoS)だけでなく、ユーザの体感品質(QoE)が重要となっていることから、従来、明確に品質期待値が示されていなかったインタラクティブメディア、特に、複数の画像情報をブラウズするというサービスの QoE 期待値を実験評価して明らかにした。第 3 章では、適応制御を実現する品質解析技術について、稼働中のネットワークから得られる負荷量や構成情報の範囲内で、シミュレーションモデルを生成することを特徴とする解析方式を提案した。実験評価を通して、実用レベルの精度が得られることを確認している。第 4 章では、IP ネットワークでは、システムの安定品質を高めるためには、冗長化による高信頼化技術では不充分であり、ネットワークを用いた遠隔診断技術による迅速な障害復旧が必要となることを指摘した。その上で、ネットワークを構成する基礎となるレイヤ 2 ネットワークの最も深刻な障害であるループ障害について、従来は不可能視されていたネットワークの機能回復を実現して、障害箇所を特定する診断技術を提案評価している。第 5 章では、結論を述べた。

目次

第1章序論

社会は、工業社会から知識経済社会に向かいつつある[1]。知識経済社会では、モノとしての工業製品を所有することやその機能の価値よりは、その製品の機能を使いこなしたり、その利用から得られる経験やノウハウを含めた知識が価値ある資産となる。現在、ブロードバンドネットワークに支えられた Web2.0 や、SaaS (Software as a service) に代表されるサービス化[2-3]が、進行している。この段階は、本格的な知識経済社会への入り口と位置づけられ、モノとしての機能ではなく、それらが提供するサービスに価値が見いだされている。良いサービスには人が集まり、情報発信がなされ、それが、集積されるとさらなる付加価値が生まれる。Amazon における書籍購入時のリコメンデーションサービスは、似た行動をとる複数のユーザの購買行動を一種の情報発信と見なし、集積されたこれらの情報に基づいて、次の購買を促すサービスであり、情報の集積が付加価値を生む正の循環の典型的な例である。今後は、個々のサービスに共通する知恵や、サービス提供から得られる経験を総合した知識を応用したサービスに一層の価値が見いだされるようになっていくものと考えられる。

クラウドコンピューティングなどのサービスとシステムの分散化の潮流の中で、情報通信ネットワークには、ますますあらゆる情報が流れるようになる。ネットワークは、情報のみならず、運用管理も通して、接続される全てのエンドポイントの状況を最も直接的に知りうる存在でもある。従って、ネットワークは、サービス提供に関するサービス経験の実態を知り、これらを仲介して、新たなサービスを見いだせる大きな可能性を秘めている[4]。これが、将来の知識経済社会における知識のひとつの源泉となることが期待される。社会の事象をネットワーク関係と捉えて、分析を行う複雑ネットワーク科学やネットワーク生態学[5]の研究は、この期待の顕れと見ることができる。また、サービスを科学し、サービスの生産性を上げたり、より良いサービスマネジメントを目指すサービスサイエンス研究[6]もこれを後押しするものである。

ネットワークサービス制御技術が、サービス化、知識化の最も根底をなす重要な技術となりうるためには、工業製品の機能仕様としてのサービス提供ではなく、ユーザが求めているサービスをいつでも安定して提供することが不可欠である。つまり、機能提供ではなく、品質の保証されたネットワークサービスの提供が実現できてこそ、トラヒックの流れなどの把握情報も、サービスの観点から分析管理できる

情報になる。

電話網に代表される従来のネットワークでは、起こりうる状況をトラヒック理論などで予測し、また、ネットワーク構成も明確に規定することで、十分な事前設計を行い、安定したサービス品質を提供してきた。ところが、サービスの柔軟性では大変優れた Transmission Control Protocol (TCP)/Internet Protocol(IP) によるパケット通信に基づくインターネット/イントラネットワークの時代となると、そのサービスの柔軟性や拡張性とは逆に、サービス品質はベストエフォートの原則の下に、明確には担保されてこなかった。このベストエォートの原則は、技術進歩の過程の中で、大変に見識に満ちたものである。しかし、上述の提供サービスに価値がある時代においては、提供品質が担保されていないという問題は致命的である。この品質問題に対して、トラヒックを複数のフローに分け、そのフロー毎に多数のパケットの転送を制御するネットワーク QoS 技術が開発実用化されてはいるが、予め与えられたトラヒック入力条件の下で、提供品質を制御するものであり、一般的に起こりうるサービス追加や負荷変動などの条件変化の下でも、ユーザが期待する品質を保証するものとはなっていない。本研究では、IP パケットをベースとした情報通信ネットワークにおいて、提供品質を維持管理するという基本的な課題について研究し、これを解決する技術を提案する。これは、将来の知識経済社会において、ネットワークがサービス化や知識化の根底を支える技術でもある。

なお、本論文で述べる情報通信ネットワークには、通信キャリアの提供する公衆ネットワークと共に、企業などの私設ネットワークも含めることとし、特に、言及しない場合には、これらに共通する技術を考察していく。

改めて、電話網に代表される従来ネットワークにおけるサービス品質管理[7-8]について、詳しく考察する。品質基準としては、接続、伝送、安定の観点がネットワーク構築の指針となっている。接続品質は、通信設備が正常に動作し、かつ、正常なトラヒックが加わった状態において、呼の接続・応答・復旧の各過程における「サービスの迅速性あるいは確実性」を規定している。伝送品質は、通話の了解性あるいは快適性とユーザ満足度と対応させた「ネットワークの伝送特性 (伝送損失、雑音等) の目標値」を規定している。安定品質は、電話サービスを途絶させることなく継続して提供するため、「ネットワークが正常サービスを提供できない状態にある時間の割合」を規定している。

通信キャリアの提供するネットワークでは、これらのサービス品質が満たされるように、品質基準のエ

ンド-エンド目標値を網品質目標値として設定している。この網品質目標値を、エンド-エンドの接続形態をモデル化した標準接続系 (HRX: Hypothetical Reference Connection) に従い、HRX を構成する各装置に割り振っていく考え方がとられている。例えば、国際 HRX の最長系は、発信国内に 4 局、国際接続に 5 局、さらに、着信国内に 4 局の合計 13 局の交換局から構成される総長 27500km の系となる。このそれぞれの交換局や伝送リンクに、品質基準から割り出された接続遅延や伝送遅延、また、接続損失などが割り振られていく。

接続品質設計の基礎となるのは、ネットワーク構成のモデルに加えて、トラヒック理論、待ち行列理論である。これらの理論は、トラヒック量に対する設備数と呼損率あるいは、待ち時間の関係を明らかにするものである。現実の利用状況とも符合する呼びのランダム生起や保留時間の指数分布を前提とすることで、理論的に、上述の関係が厳密に明らかになる。この理論を根拠にし、接続品質を割り振られた個々の装置を設計していくことが可能となる。

このように、従来ネットワークでは、ネットワーク全体の制御方式が統一して管理されていることを前提とし、トラヒック要因等の利用条件も明確であることに基づいて、事前設計によって品質維持を行う考えが採られている。

このような従来ネットワークに対して、データ通信を始め、マルチメディア情報を柔軟に提供する技術が開発されてきた。電話サービスを実現した時分割多重技術を発展させる多元交換方式等の検討を経て、固定長のセルによってマルチメディア情報の転送を行う ATM (Asynchronous Transfer Mode)方式が開発され、実用化も進んだ。しかし、最終的には、パケット交換方式が今日の情報通信ネットワークの基本となっている。

この最も土台となる通信方式が、1974 年に、ビントン・サーフ (Vinton Cerf) とボブ・カーン (Bob Kahn) が発明した Transmission Control Protocol (TCP)/IP (Internet Protocol) である[9]。この技術は、1982 年には、ARPANET に採用された。このプロトコルでは、情報はパケットと呼ばれる単位に小分けにして送られる。1983 年 には、デスクトップ・ワークステーションが出現し, その多くが このTCP/IP を含むバークレイ版 UNIX を搭載しており、TCP/IP 普及の素地を作った。さらに、1984 年には、ドメイン名システム (DNS) が導入され、ホスト数が 1,000 を突破した。また、1989 年には、WWW (World Wide Web) が、CERN (欧州共同粒子物理研究機構) の物理学研究者によって

開発された。この情報を表示するブラウザとして、米国イリノイ大学において、Mosaic が開発された。Mosaic は、マルチメディア情報を取り扱うためのグラフィカルユーザインタフェース(GUI)を備えており、テキスト以外の画像情報などの種々のメディアが使いやすく扱える画期的なものであった。1993 年に普及し始めた後、インターネットのユーザやトラヒック量は爆発的に増加し、今日に至っている。

このように、音声などに限定されないマルチメディア情報を効率良く転送しうる IP パケットをベースとするインターネット/イントラネットなどの IP ネットワークは、今日、人々の日常生活になくてはならない最も重要な社会基盤のひとつとなるまでに普及している。しかし、サービス品質は設計、管理も充分に担保されているとは云えない。担保しえない理由は、第 1 はオープン性にある。すなわち、網構造が、規定されず、自由にルータ等の情報交換ノードが付加削除できることにあり、従来ネットワークの標準接続系に相当するモデルを設定することができない。また、ネットワークを利用するトラヒックが音声から映像、データまで多種多様であり、サービス品質の事前設計に活用できる呼のポアソン生起などの法則性が見いだせない。このような多様化は、新しいサービスを生み出す上では大きな利点であるが、サービス品質を規定することは困難となる。第 2 の理由は、TCP や IP が、ベストエフォートを基本原則として動作する点にある。各層のプロトコルは、品質維持を目標に制御を行うのではなく、状況に応じて最大限の接続性を確保するように動作する。そのため、遅延時間などの提供品質は変化することになる。また、エンド-エンドアーキテクチャと呼ばれるように、パケットの再送制御は、端末間で制御される。このため、ネットワーク内のルータやゲートウェイなどの個々のノードの処理性能には高いものは求められないが、逆に、ネットワーク内での品質維持のために充分な情報は得られず、ネットワーク内の各ノードにおいて品質制御を行うことは難しくなる。

この IP ネットワークに対して、サービス品質を維持管理する技術として、ネットワーク QoS 技術[10-11]が開発導入されてきた。ネットワーク QoS は、過剰な設備を投入することなく、また、多種多様なトラヒックを柔軟に扱えるというパケット交換方式の利点を損なうことなくサービス品質を維持管理する技術である。トラヒックのフロー毎にパケットフォワーダを制御して、多数のパケットの転送順序を管理することで転送速度、転送遅延や遅延変動(ジッタ)が所望の値になるようにする。この実現には以下の Intserv (Integrated Service) 方式と、Diffserv (Differentiated Service) 方式の 2 方式がある。

Intserv 方式は、フローの単位に QoS を提供する基本的なサービスである。ここでのフローとは、同じアプリケーションから発信され、共通の QoS サービスを行うパケットの時系列である。Intserv では、通信開始に先立ち、RSVP (Resource reservation protocol) を用いて、必要なリソースの予約を行う。具体的には、送信アプリケーションは送信フローのトラヒック特性を通知し、受信アプリケーションは必要となる QoS を決定して、ネットワークに通知し、ネットワークの経路上の各ゲートウェイは、この QoS 確保に必要となるネットワークリソースを予約する。Intserv 方式は、フロー単位の QoS 制御を忠実に実行する方式であるが、各ゲートウェイでは、フロー毎の状態を保持して、パケットヘッダとフロー状態を参照しながら、各パケットを処理する必要がある。そのため、ネットワーク規模が大きくなると、フロー数は膨大になり、ゲートウェイには高い処理能力が要求される。

Diffserv 方式は、この欠点を改善する方式である。本方式では、パケットの Type_of_Service フィールド(IPv4 の場合)、または、Traffic_Class フィールドの中の DS コードポイント(IPv6 の場合)だけを見て、パケット処理を行う。この処理はひとつのゲートウェイだけで完結し、以降のゲートウェイの QoS 制御動作とは無関係である。つまり、エンド-エンドのサービス規定をせずに、QoS のための部分的な機能を提供することに徹しており、ユーザがこれらを組み合わせて所望の QoS を実現する必要がある。このような実現方式であるため、ネットワークのスケーラビリティは向上させることが可能となる。

このようにネットワーク QoS 技術は、フローのトラヒック特性が与えられた場合に、その範囲の中で、パケットの転送を制御することによって、所望の品質を達成する技術である。

ネットワーク機能の実現技術とは別の観点として、サービス品質に関するネットワークの利用面の状況を考察する。近年、IP ネットワークが企業システムや社会基盤に適用されるに伴い、提供サービスの品質維持への要求が格段に高まっている。負荷変動時にも安定した品質を提供することは不可欠であり、また、万が一のサービス停止時間を最小化することも緊急の課題となっている。さらに、トラヒック量が年率およそ 20-40%で伸長[12-13]しており、Web2.0[2-3]や放送型サービスなどの多様なサービスへと利用形態が拡大している。今後はさらに、IP ネットワークが、人やモノの移動を減らすことによって地球環境問題を軽減する手段としても、大いに期待されている。そのためには、面談での会議に匹敵する高精細なマルチメディア情報の通信も必要となる。これらのことは、より精細な画像情報から、センサ情報のような極めて少ない情報までがネットワークを流れることを意味し、トラヒック特性

の広がりや、可用性・保守性などの度合いにも今まで以上の多様性が求められることになる。また、モバイルネットワークや P2P ネットワークなどのオーバレイネットワーク、アドホックネットワーク等においては、ネットワークトポロジィも動的に変化していく。すなわち、インターネットでは、随時、新しいドメインやエンドシステムなどの増設移動などが可能であったが、この頻度がさらにあがることが想定される。このようなネットワークシステム環境下で、従来にも増して、確実で安定したサービス品質維持が求められる。

このためには、パケット転送の制御を行うネットワーク QoS 技術だけではなく、これに加えて、サービスの量的変化や新サービス追加等の質的変化に応じて、的確にネットワーク設備を増設したり、経路やデータセンタ等のサイト追加を含むネットワーク全体の構成変更を迅速に行うなどの広範囲な制御が不可欠である。究極的には、サービス状況の変化に即応して、目標とするサービス条件になるように、自ら最適化を行い、自己組織化していくことで、サービス品質だけでなく、システム最適化を実現する自律型制御が期待される。コンピューティング分野では、自律コンピューティング[14-16]、あるいは、オートノミックコンピューティング[17]と呼ばれる自律化技術が研究開発されている。そのゴールは、自ら自己修復して最適条件で動き続けるシステムである。また、生物システムの挙動やメカニズムに着想を得て、新たなネットワーク制御技術を創出すること[18]などが始まっている。

自律型サービス品質制御の構成概要[19]を図 1-1 に示した。サービスポリシーは、ネットワークシステムを用いてどのようなビジネスを行うかなどを勘案して、運用者や管理者が設定するサービスを行う上での目標を与えるものである。サービスポリシーの設定以降は、システムが自動実行を行い、人が介在せずに、サービスポリシーが示す目標に見合うように自律エンジンが制御を行う構造である。この自律エンジンの中には、解析技術を含め、監視(Measure)・分析(Analysis)・計画(Planning)・実行(Execution)の各機能がおかれている。これらの各機能を連結する要に、システム知識がある。構成情報データベース CMDB(Configuration Management Database) [20-22]はそのもっとも基礎的な情報である。過去の障害情報などもこのようなシステム知識のひとつと考えられ、これらを活用することで、自己修復が可能となる。どのような事態になっても、システム目標に照らして最適となる制御を行って、常に動き続けるシステムが狙いである。本技術は、まだ、完全な実用化段階には到達していないが、その要素機能である CMDB や、運用手順の自動実行(RBA: Run Book Automation)[23]などは既に実用域に達しており、着実に技術進歩を遂げている。

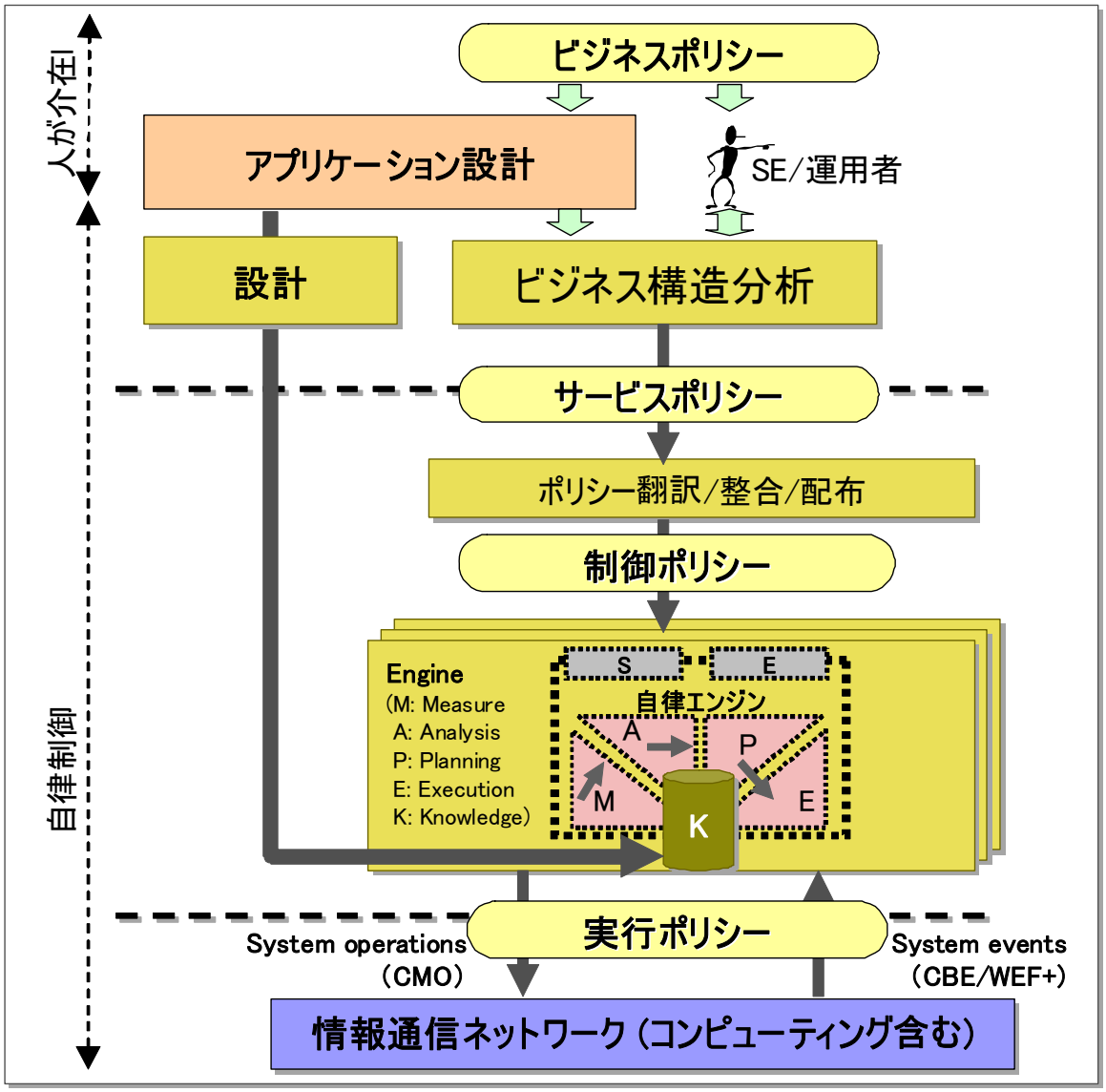


図 1-1 自律型サービス品質制御

自律型制御は、究極のゴールであるが、ここに至るためには、まず、システムが自ら最適化動作を行う前の段階として、システムと管理者などの人間系が分担し合って、最適化や品質維持を行う適応型制御技術[24]を確立する必要がある。この考え方を図 1-2 に示す。事前に設計したリソース(設備)の範囲内で運用管理するだけでなく、情報通信ネットワークのサービス提供品質や各機器の使用率を常時計測し、この結果を解析して、ボトルネックなどの所在の有無や箇所を分析する。必要があれば、どれだけの帯域やサーバ数などの追加リソースを投入すれば、どのようなサービス品質が得られるかを予測する。その上で、ネットワーク設備の増減設や構成変更も含めたネットワーク制御を実

行する。これらの各技術は、現実のネットワークがどのような構成になっているかを表す構成情報を随時参照しながら実行される。このサイクルは、狭義のサービス品質維持のみならず、障害などへの対処にも同様に適用でき、復旧時間を短くしたり、障害の未然防止につながり、ネットワークシステムの安定性を大きく向上させることが期待できる。

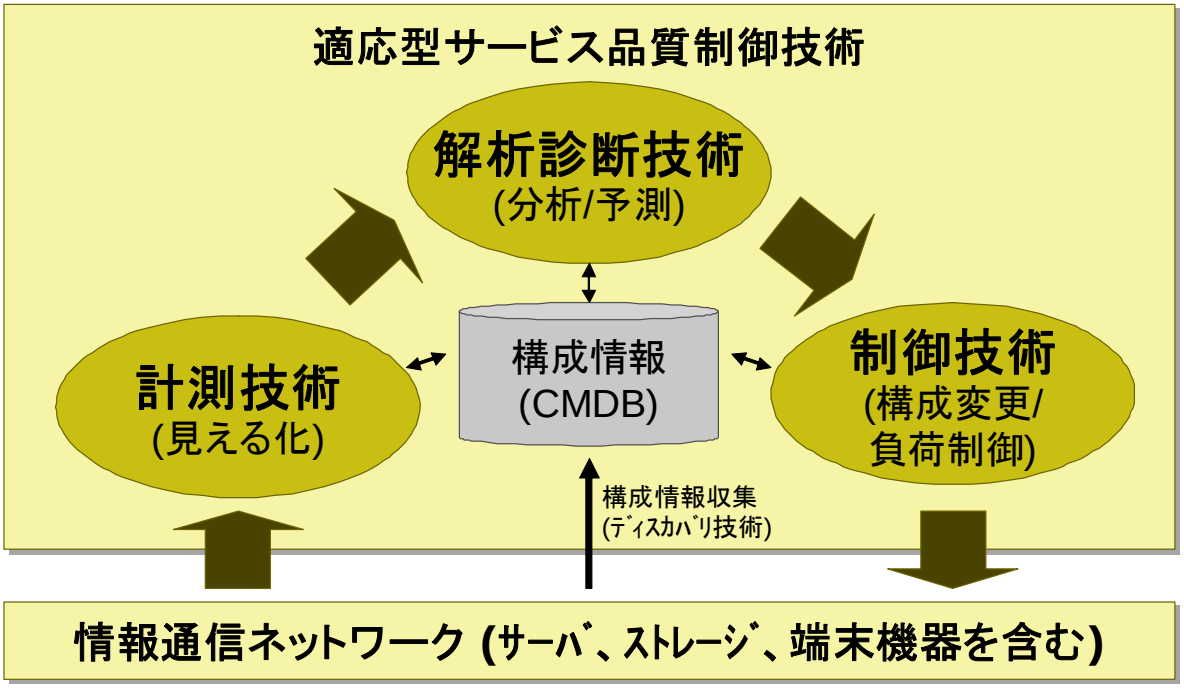


図 1-2 適応型サービス品質制御技術

このような考え方は従来からも、ネットワーク管理システム(NMS) [7][25]として検討されてきている。また、ネットワーク管理システムと GMPLS (Generalized multiprotocol label switching) 技術を活用したネットワーク管理[26]により、マルチレイヤネットワークを管理する技術なども研究されている。これらに対して、適応型サービス品質制御は、計測からネットワーク制御までをリアルタイムな一連の流れとして扱う点と、サーバなどのエンドシステムも含めたエンド-エンドサービスを管理対象に加えている点で、発展形として位置づけられる。

リアルタイム性では、トラヒックエンジニアリング技術[27]によって、トラヒック状況に応じたネットワークのルーティング条件の動的制御が具体化しており、さらに、時間軸を含めたトラヒックエンジニアリング[28]も提案されている。また、エンド-エンドサービスの点でも、ネットワークのエンドシステムと位置づけら

れるサーバにおいて、サーバ負荷分散技術[29]が実用化されてきている。本技術では、サーバ負荷分散装置(Server Load Balancer)が持つ仮想的に割り振られた IP アドレスへのパケットを、最も適当なサーバへ向けて IP アドレスを振り直して送信する技術がひとつの基本となっている。通常は、最も負荷の少ないサーバへパケットを送付するが、複数のTCPコネクションが組み合わされてサービスされる電子ショッピングのような例にも対応しうるように、コネクションやその間の関係にも配慮した高度な制御も行われる。本技術を土台にして、データセンタでは、負荷に応じて、サーバプールからコンピューティングリソースを逼迫しているサービス向けに動的に割りつけたり、戻したりするユーティリティコンピューティングも実用化されている。この技術により、サーバの負荷だけでなく、ネットワークの負荷も考慮した所望情報への配置制御が可能となってきている。サービス品質制御においても、このようなエンドシステムの動的構成変更にも対応した適応型サービス品質制御技術が必要となる。

なお、サービス品質の評価項目としては、接続品質・伝送品質・安定品質が基本となっていたが、接続品質および伝送品質については、パケット単位に情報転送を行うという特質、および、現状の IP ネットワークでは、パケット転送遅延やそのゆらぎ、パケット損失が品質を左右していることを考えて、パケット転送に係る上述の品質 (本論文ではこれらを通信品質と呼ぶ) と安定品質を考えていくことが適当である。そのための技術課題としては、求められるサービス品質の評価、品質監視による適応的な品質制御を行うための分析技術、ネットワークシステムの安定性を向上させ、いつでも所望のサービスが利用できるようにシステムを維持する技術がある。

これらの背景から、本研究では、適応型サービス品質制御を実現する技術を提供品質の維持に関する技術から、安定性を高める技術までを検討している。本論文の構成と概要を以下に述べる。

まず、第 2 章では、サービス品質の目標値を検討した。有償化され、また、個人生活や社会活動にとって重要なマルチメディア情報サービスが増加していることに伴い、従来のネットワーク品質(QoS: Quality of Service)だけでなく、ユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) が一層重要となっている。そこで、従来、明確に品質期待値が示されていなかったインタラクティブメディア、特に、複数の静止画をブラウズするサービスの実験評価を通して QoE 期待値を明らかにする。

次いで、第 3 章で、適応型制御を実現する品質解析技術について、シミュレーションモデル生成にポイントをおいた品質解析方式を提案した。現実のネットワークでは、各構成機器の性能等は完全

には把握されていないことが多い。そこで、多少の精度や高負荷時の複雑な挙動を正確にシミュレートすることは犠牲にしても、稼働中のネットワークの負荷量等の計測や MIB 情報などの直接取得しうる情報の範囲内で、シミュレーションモデルを生成することを特徴とするシミュレーション方式を提案している。実験評価を通して、提案する生成モデルで実用レベルの精度が得られることを確認した。

さらに、第 4 章では、ネットワークのサービス品質のもうひとつの重要な要素であるシステムの安定品質を高めるためには、従来から高信頼化のための一般的な手段である冗長化だけでは不充分であり、ネットワークを用いた遠隔診断技術による迅速な障害復旧によってトータルに稼働率を高めることが不可欠であることを指摘した。その上で、基本的なネットワーク機能であるレイヤ 2 ネットワークに注目し、その典型的な障害であるループ障害について、従来は不可能視されていたネットワークの機能回復を実現して、障害箇所を遠隔から特定する診断技術を提案評価している。

第 5 章では、本論文における研究成果のまとめとして、サービス品質のユーザ体感品質の評価を踏まえて、提案した品質解析技術や、安定品質を高める遠隔診断技術によって、適応型サービス品質制御が実現できることを述べた。

第2章 マルチメディア情報サービスのユーザ体感品質を高めるインタフェース方式とサービス品質評価

2.1. 緒言

本章では、以下の各章でのサービス品質の制御や管理の検討や技術提案に先立ち、サービス品質について考察し、その定義や品質目標値の指針を示す。サービス品質とは、「あるべき姿への一致度」と考えられる[8]。生産者からみた製品仕様はひとつの「あるべき姿」である。一方、消費者からみた「あるべき姿」とは、その商品に対する期待である。このように「あるべき姿」のとらえ方は、立場によって異なる。また、商品価格や置かれた状況によっても変わるものと考えられる。しかしながら、あまりに広範囲にサービス品質を捉えても、品質制御技術との関係が明確ではなくなるため、本論文では、第 1 章でも述べたようにサービス品質を通信品質と安定品質に分け、通信品質については、ITU-T での規定[30]を参考にして、その尺度を、「情報をエンド-エンドに、遅延を少なく(速度)、正確に、確実に転送すること」と定義して、議論を深めていく。なお、この尺度は、文献[11]におけるネットワーク QoS 技術の定義を、「あるフローのデータが目的地に配送される速度(データレート)、パケットの配送所要時間(ネットワーク遅延)、ネットワーク遅延の変動(ジッター)などが所望の値になるように、ネットワーク内の各ゲートウェイが到着する多数のパケットの入出力順序を制御する技術」としていることとも整合している。また、ITU-T 勧告 Y.1541 も、4 種類の尺度として、パケット転送遅延、パケット転送遅延揺らぎ、パケット損失率とパケット誤り率を規定している。誤り率が加わっているが、他の 3 尺度は同様である。そこで、伝送上の誤り率がかなり低くなっている現状などを考慮して、本論文でも前 3 種類の尺度をネットワークサービスの通信品質尺度として考え、本章および第 3 章の議論を進めていく。なお、サービスがいつでも利用しうるかを表す安定品質については、第 4 章で議論する。

通信品質の尺度として、さらに根本に立ち返って考えるべき点がある。0AB-J の音声電話サービスや VoD (Video on Demand) などの有償サービスや、電子取引などにおいてもマルチメディア情報を体感するサービスが増加していることに伴い、パケット転送遅延やゆらぎ、パケット損失というネットワー

ク上での転送品質(QoS: Quality of Service) とユーザ体感品質 (QoE: Quality of Experience) とを区別して考えるようになってきている点[31-34]である。国際標準化機関 ITU-T でも、2007 年に QoE の定義を行っている。QoE は、図 2-1 に示すように、ネットワーク性能やアプリケーション性能を表す QoS に対して、人間の知覚・認知特性を考慮した品質である。そこで、本章では、まず、QoE について考察を行い、これに基づく、QoS については第 3 章で議論を行うこととする。

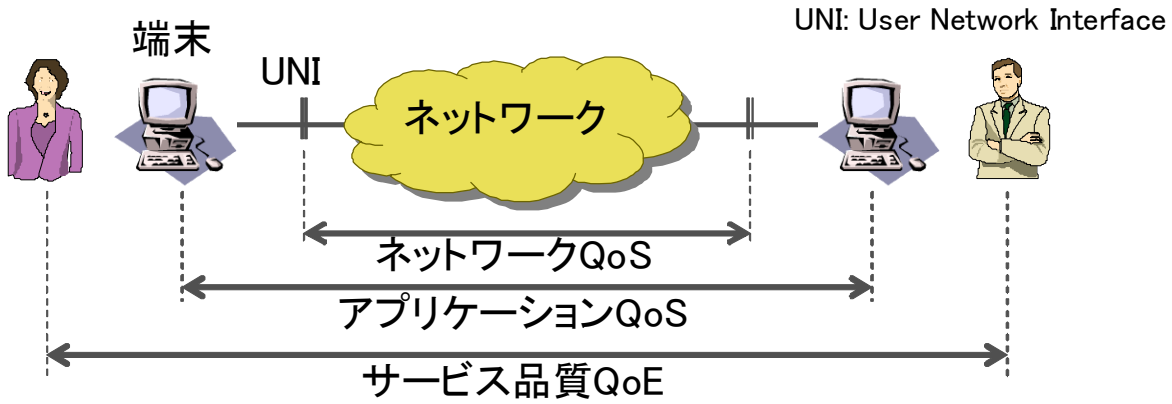


図 2-1 ユーザ視点での QoE とネットワーク/アプリケーション QoS[8]

QoE としては、音声・映像に関して、主観品質評価として、平均オピニオン評点(MOS: Mean Opinion Score) に代表されるように人間自身が感じる体感品質を評価する手法が採られており、IP 電話サービスの音声品質評価法や MPEG-2 映像の符号化品質の評価法の標準化が進んでいる。サービス品質としては、まず始めに、QoE を規定し、それに対応した QoS を規定して、設計や管理を行う。現実には、QoS マッピング[35]と呼ばれる QoE と QoS との対応関係を定めておき、常に、QoE を計測しなくとも、品質管理ができるようにしている。ネットワークや端末の各種 QoS パラメータから QoE を推定する客観品質評価手法も具体化されている。例えば、IP 電話サービスでは、0AB-J 番号を取得するためには、ITU-T で E-model による R 値と呼ばれる QoE 指標が 80 以上となるように総務省令で規定されており、この条件を満たすように、端末要因・環境要因・ネットワーク要因に関する 20 の QoS パラメータを実現する必要がある[36]。

しかしながら、上述の音声・映像のような情報が連続してユーザに送られるストリームメディアの研究が進展しているのに対して、マウスクリック時に情報提示が行われるようなオンデマンド型のサービス(本

論文ではインタラクティブメディアと呼ぶ)の応答時間に対する QoE の解明は進んでいない。これは、一般的な情報サービスでは、いかに迅速に情報提示が行われるかが重要であって、その詳細まではサービス性に影響しないとみられていたためと考えられる。例えば、電子ショッピングサービスでは、応答時間が 8 秒を越えると、ユーザはそのサイトを離れてしまうという「8 秒ルール[例えば、37]」が経験則として知られている。これは、重要な経験則であるが、マウスクリックという大まかな要求に対する応答に関するものであり、どのようなマルチメディア情報提示を行うかということを明らかにした上での期待値を示すものにはなっていない。

そこで、本章では、明確に品質期待値が示されていなかったインタラクティブメディア、特に、複数の静止画や動画をユーザ操作に応じてブラウズするサービスの QoE 期待値について、実験評価を通して明らかにする。まずは、第 2.2 節では、ブロードバンドネットワークによって提供されるマルチメディア情報サービスの特徴を整理し、これとユーザの情報環境の関係を考察する。第 2.3 節では、「紙」の良さを電子化したヒューマンインタフェースによる情報環境を提案した。その上で、第 2.4 節では、提案ヒューマンインタフェースを実現する試作端末システムの構成を示した。その上で、本試作システムを用いて、サービス品質の中でも最も重要な情報提示の応答時間のユーザ満足度の度合いを主観評価法である一対比較法によって評価した。

2.2. マルチメディア情報サービスと個人情報環境

ブロードバンド IP ネットワークは、これを活用するという観点から見ると、2つの重要な特徴を持っている。第 1 の特徴は、100Mb/s を越える非常に大きな通信帯域である。この帯域により動画（全画面）や精細な静止画像を含むマルチメディア情報といった大容量のデータを通信させることができる。この帯域は、通常のパソコンの内部バスの 32 ビットバスに相当している。従って、あたかもワークステーションやパソコン内のプロセッサ・バスが地球上を覆うような世界が拡がることになり、地理的に離れていても互いにデータを共有しあう環境が提供されることになる。ブロードバンドネットワークは、コミュニケーションとコンピュータ技術を統合する鍵となるといえる。

第 2 の特徴は、同時通信が可能な通信チャネルが多数実現できることにある。つまり、高速化（通

信速度）した複数の通信チャンネルを統合すれば、分散配備された多数のマルチメディア情報の共有も可能になる。

この 2 つの特徴を最大限に応用したサービスは、WWW としても実現されている。多数のユーザが動画情報を含めて、相互に情報を共有することのできる環境、つまり、「広域に分散された広帯域マルチメディア情報を共有する」サービスである。この例を図 2-2 に示す。ネットワークの各所には、それぞれの組織（企業、公共団体等）が独立して管理運営するマルチメディア・データベースが置かれている。ユーザは、広域に分散された情報のリトリーブ、つまり、新聞社のニュースを見ながら、より詳しい情報が必要であれば、そのニュースソースである企業のデータベースを直接アクセスし、プロモーションビデオを含む詳細情報を得つつ、同時に、そのニュースの与える影響（株価など）や、関連する統計情報などの背景情報を情報サービス会社などから総合的に得ることができる。この例では、ブロードバンドネットワークの特徴を活かすことで、複数のデータベースを共有したひとつの情報空間が、ユーザの見るひとつの画面の中に実現されている。本例は、クラウドコンピューティングのひとつのサービス例とも捉えうる。

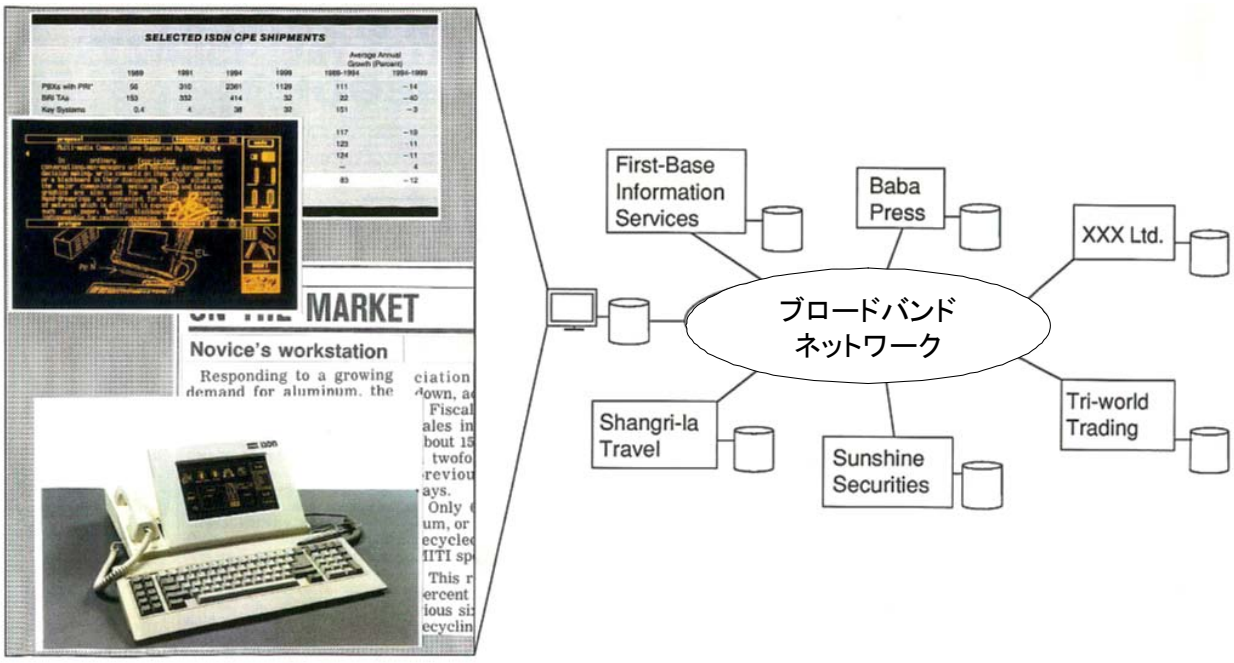


図 2-2 ブロードバンドネットワークが実現するマルチメディア情報サービス

ブロードバンドネットワークを最大限に利用するにあたり、まず、現在の個人情報管理における環境

を考察する。特に、ブロードバンドマルチメディア情報環境の最も代表的な利用分野と考えられるオフィスの情報環境を取り上げて考察する。オフィスでは、ユーザの扱う情報の多くは「紙」上に表されている。電子メールや、電話に代わって不在時にも連絡のつく音声メールの利用も進んでいるが、大部分の情報は「紙」の形で生産・保存・複製・伝達されている。我々のオフィスでの日常生活は、大きく会議・面談などのコミュニケーション活動と、読む・書くなどの情報活動に二分されるが、一般に、資料の使われない会議は少なく、オフィスワーカは、四六時中、大量の紙に取り囲まれて日常の業務をこなしているといえる。

古代エジプト人が紀元前約 3200 年にパピルスを発明し、重要な出来事を石・木・粘土板の代わりにパピルスに記すようになってから、また、紀元 105 年、後漢の時代に蔡倫が紙を発明して以来、5000 年以上もの長きにわたり我々は、「紙」に慣れ親しんでいる。「紙」は人類の大きな文化資産であり、長い間の英知の集積がノウハウとして生きているメディアである。

「紙」とは、即物性があり、大変判り易いメディアである。高速なブラウジング（パラパラと紙をめくる）も可能であり、また、ページや章は読み手にドキュメントのどこを読んでいるかを明確にさせる効果もある。さらに、空間を利用してドキュメントを管理するというように、存在そのものがひとつの情報となっている。

しかし、物理媒体であるが故の欠点もある。使用できるメディアがテキスト、図表、写真などに制限され、表現力には限界がある。また、資料を物理的に束ねることで管理する為に一元的な管理を強いられることになる。情報の加工・再利用にも手間がかかり、保存するために大きなスペースを必要とする他、資源環境問題もある。

マルチメディア情報環境が真の情報インフラストラクチャとなる為には、「紙」メディアの良さを維持しつつ、その上で、上述の欠点を補うようなマルチメディア化が求められる。すなわち、動画を含むマルチメディア情報を「紙」のように扱えるヒューマンインタフェースの追求が重要である。紙の利点に、即物性を活かした空間的な管理方法がある。物理的な配置・相互関係を情報の整理に利用する等、電子的にも人間の空間管理能力を活かせる枠組みを提供していく必要がある。紙片という枠組みはその代表であるが、これだけではなく、この紙を置く空間も含めた総合情報環境としての実現が期待される。

2.3. マルチメディアヒューマンインタフェースの提案

2.3.1. サービスコンセプト

本節では、上述の期待に応えるヒューマンインタフェースを提案する。今までの研究開発においても、紙メディアを代替する電子メディア[38]が検討されており、日常的に読んだり書いたりするのに使用される「紙」の電子化、つまり、紙の様式、見た目を維持し、通常の物理的な利用感覚に近づけることがなされてきた。さらに、Web2.0 時代となり、「紙」としての機能だけではなく、マルチメディア情報、双方向の情報収集、ハイパーメディアといった高度な機能を活かす為の開発が実用化されている。

マルチメディア情報を表示するとしても、従来の紙のイメージを崩さないようにすることが有効である。ウィンドウ表示はコンピュータをかなり身近に感じさせるものであるが、この紙のイメージとは合わない面もある。紙のメディアが即物的で分かり易いのは、物理的な配置・相互関係を情報の整理に利用できるからと考えられる。

また、マルチメディア化と共に、情報共有・ネットワーク化がネットワークサービスとしては重要である。ビデオ、音声、アニメーションをひとつのページの中に一体化した表現（マルチメディア化された紙。例えば、説明資料や、電子名刺など）を、ハイパーメディア技術によってネットワーク内各所の情報への非線形アクセスを実現する必要がある。

2.3.2. 提案するヒューマンインターフェース

ヒューマンインターフェースについて述べる前に、本節では、上述のような環境にあるオフィスで扱うことになるマルチメディア、特に、従来の文字中心のメディアにはない特徴をもっている画像メディアに焦点をあて、その特徴を簡単に整理する。

まず大きな特徴として、「画像情報は全体を見ることで始めて意味を持つ」ということが挙げられる。しかしながら、人や状況によって様々に同じ画像も多様に解釈されることがある。こうした特性は、文字情報とは異なるものであり、同じような扱い方をするのでは、その持ち味を充分に発揮することはできない。例えば、画像情報を中心とした複数の文書を区別するためには、アイコンやタイトルなどの記

号化された情報に代えて、実物をそのイメージを保持しうる範囲で縮小した「ミニチュア」を用いて、わかりやすく管理することが、メディアの特質に合う。

文字情報と比べると、画像情報は人の直観に訴えるものである。従って、その操作においても対応のとれた直観的な情報の扱い方ができねばならない。そこで、これらを扱う時の操作においても、画像等を直接指し示して、選択や動画のリトリーブ制御を行うなどの手法が適している。

これらの点を考慮したヒューマンインタフェースの提案にあたっての基本方針は以下である。

(1) 使い慣れた現実の「紙」ベースの表現環境

バインダ、ポストイット、しおり、名刺などの日常的に使われる「紙」を模擬実現する。つまり、現実のオフィスと同様に、メモ用紙を机の脇や壁に貼りつけることに相当することが電子的に可能になれば、広い意味の使い勝手として、かなり実際の紙に代わり得ると考えられる。

(2) 空間管理能力を活かせる枠組み

紙の利点に、即物性を活かした空間的な管理方法がある。また、人は物理的な配置・相互関係を情報の整理に利用できる[39-40]という、紙メディアの即物的な分かり易さを活かすことも重要である。通常、紙片という枠組みはその代表であるが、これだけではなく、読者の目（視線）の動きといった空間も含めた総合情報環境としての最適な枠組みを追求する。これにより、ブラウジング時にも、不要な視線の移動を減らし、疲れにくく読み易いインタフェースを実現できるものと考えられる。

(3) リアルな操作感をうるタッチセンス手法

上述のように画像は、直感に訴えるものである。画像情報を表現するものは画像情報しかないという考えから、画像情報も、抽象化せずに直接操作を可能とする。さらに、これらを扱う為の操作も画像等を直接指し示せるように、タッチセンス機能を用いた手法をとる。

(4) マルチメディアの特性を活かす操作

既存の「紙」的な役割に加え、マルチメディア、相互通信、ハイパーメディアといった高度な情報に対する機能へも対応できるようにする。

上述の原則に従って開発されたヒューマンインタフェースのデスクトップシーンを図 2-3 に示す。デスクの上には、紙を複数枚とじた「バインダ」が置かれている。情報の内容によって異なるが、基本的には、ページを開くと動画が自動的にスタートする。画面を指で触ると静止し、再度触れると再スタートするなど直接的な操作方法を取っている。ページの下の部分を指で順方向に撫でると、視覚的にも紙がめくられるようなアニメーションによって、ページめくりが行われる。指で素早くこすれば、複数ページがパラパラとめくられる。逆方向にこすれば、前のページに戻る。ページをめくっていく基本をこのように実現した。また、ページの右下をノック（2 回軽くたたく操作で、ある状態に入りこむという意味を持たせている）すると、デスクの上の方に「ミニチュア」化され、しまっておくことができる。ミニチュアでは、文書のトップページを縮小してサムネイル表示している。開く時は逆にミニチュアをノックすることで、デスクトップに文書を開くことができる。このように簡単に各々の資料をファイリングすることができる。また、ユーザは、アイコンに代えてミニチュアを用いることで、画像情報の特質を活かした直観的な情報管理ができ、限られたスクリーンを有効に活かすことができる。ミニチュアなどの実情報を想起させる情報提示や空間に置かれた紙や文書に結びついた情報表現は、実生活の中で扱われる複雑であいまいな情報の管理をビジュアル情報によって直観的に管理しうる重要なポイントである。

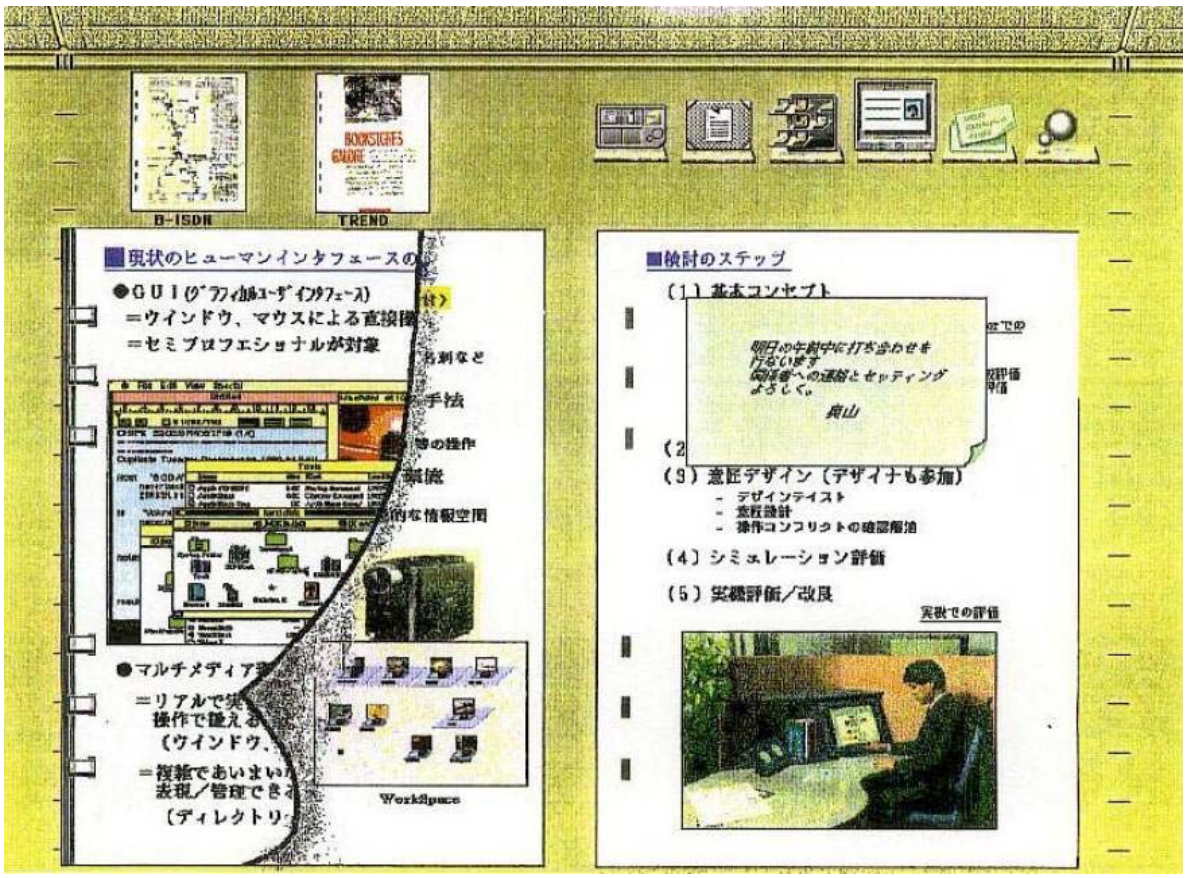


図 2-3 提案ヒューマンインタフェース: 紙の良さを電子化した情報提示

図 2-3 には、スクリーンの右上端に電子ポストイットも置かれている。ポストイットのアイコンを指でタッチすると、新しいポストイット紙片が画面上に現れる。その紙に内容をタイプ入力し、開いているページに指でタッチして貼り付けることができる。図では、右側のページにひとつのポストイットが貼り付けられている。

図 2-4 には、デスクトップの前に置かれた壁(パーテション)を中心とするシーンを示す。現実の世界でも、デスクの前や横にパーテションがある。本ヒューマンインタフェースは、この空間的な環境を模擬したものである。現実と異なるのは、この壁が複数面あり、右や左に隠れた壁を簡単に表示できることである。左右に壁を回しながら、ここに貼り付けられた文書を見ていくことができる。操作としては、壁の部分に指を触れながら、そのまま画面上を右(左)に撫でていく。その動きにつられて壁が動く。壁には、紙片をそのまま縮小表示した「ミニチュア」を自由な位置に貼りつけることができる。壁上の「ミニチュア」

をタッチして、デスクの上方に触れると、その「ミニチュア」がデスク上に移動するので、図 2-3 のデスクシーンに移って読むことができる。このように壁（パーテション）を使って情報管理をし、ドキュメントの貼り付けやミニチュア化の組み合わせを空間情報管理ツールとして提供している。

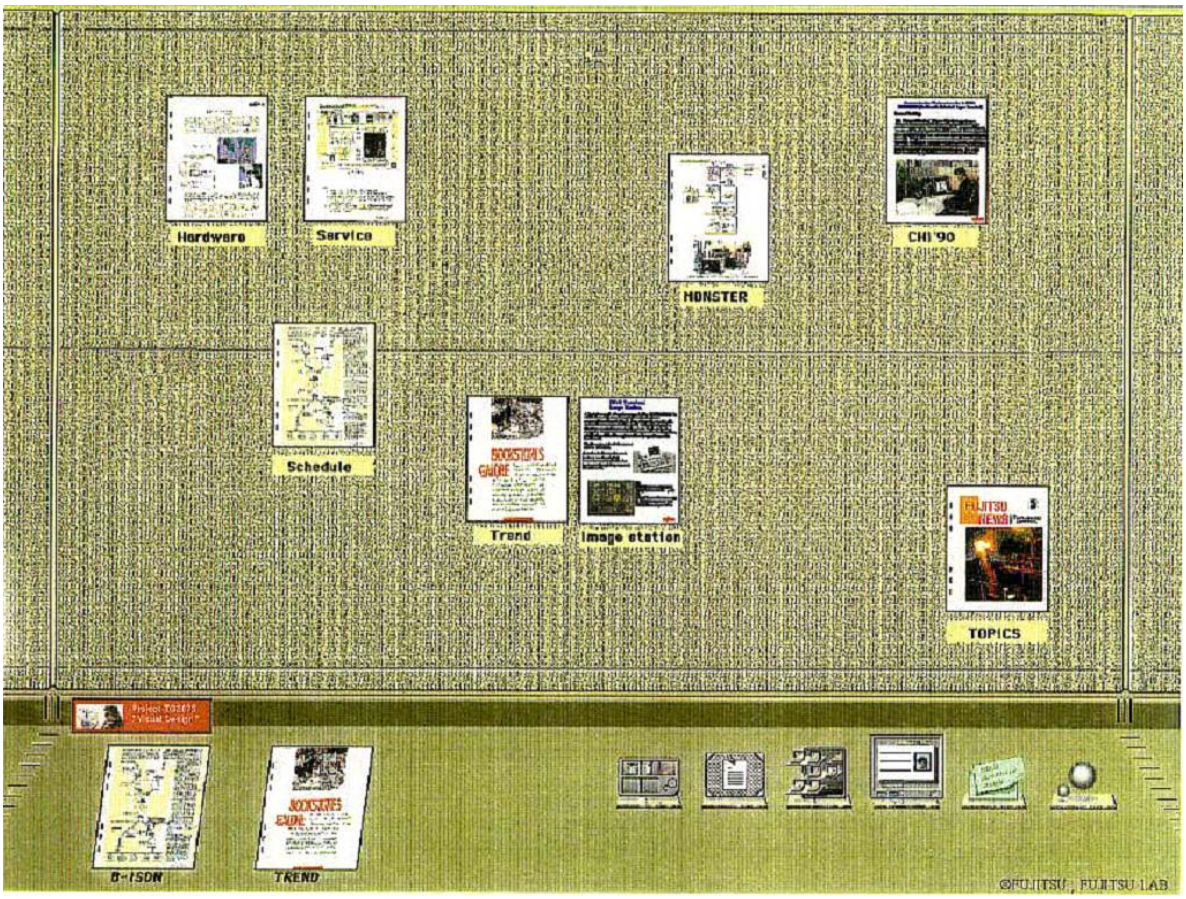


図 2-4 提案ヒューマンインタフェース: パーテション

スクリーン上の大きな動画面は、マルチメディア情報活用するのに最も適している。紙のイメージを維持しつつ、この能力を活かすために、文書中の動画情報の部分では、前述のスタート、ストップ等の直観操作だけでなく、2 回画像部分を叩くノック操作によって、紙のイメージを損ねずに、動画を図 2-5 に示すように大きく表示できるようにした。

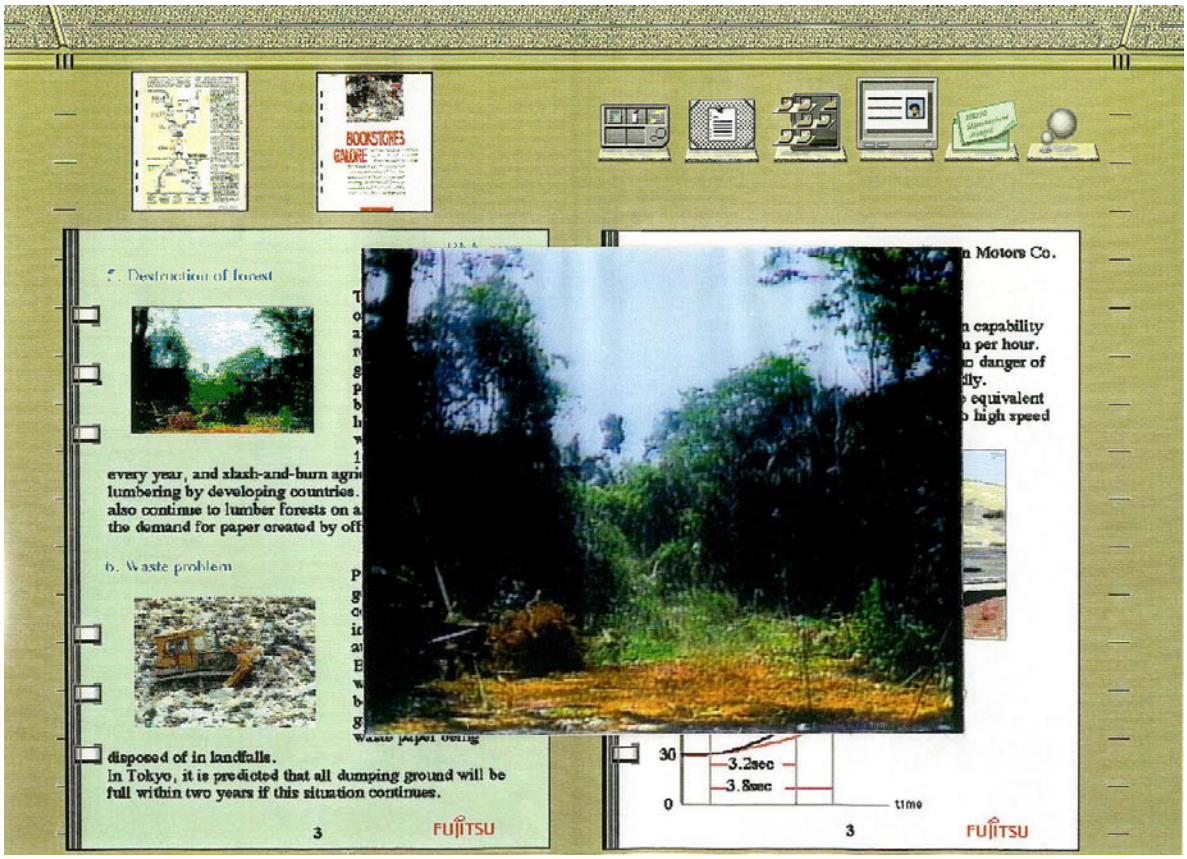


図 2-5 提案ヒューマンインタフェース: 動画表示

次に図 2-6 では、ハイパーメディア情報の表示方法を示す。ハイパーメディアは、誰でもが簡単に扱える情報検索の一つとして、また情報を集約する上でも非常に有効な手段である。この機能を、紙のイメージを損ねずに活かすために、ページの中の黄色の背景色を持つキーワードに触れると、その項目に関する参照情報などのハイパーメディア構造をとるページがディスプレイの右部分にスライドしながら現れるインタフェースとした。丁度、文書の中の付録ページなどをバインダから外して、表示することに相当する。

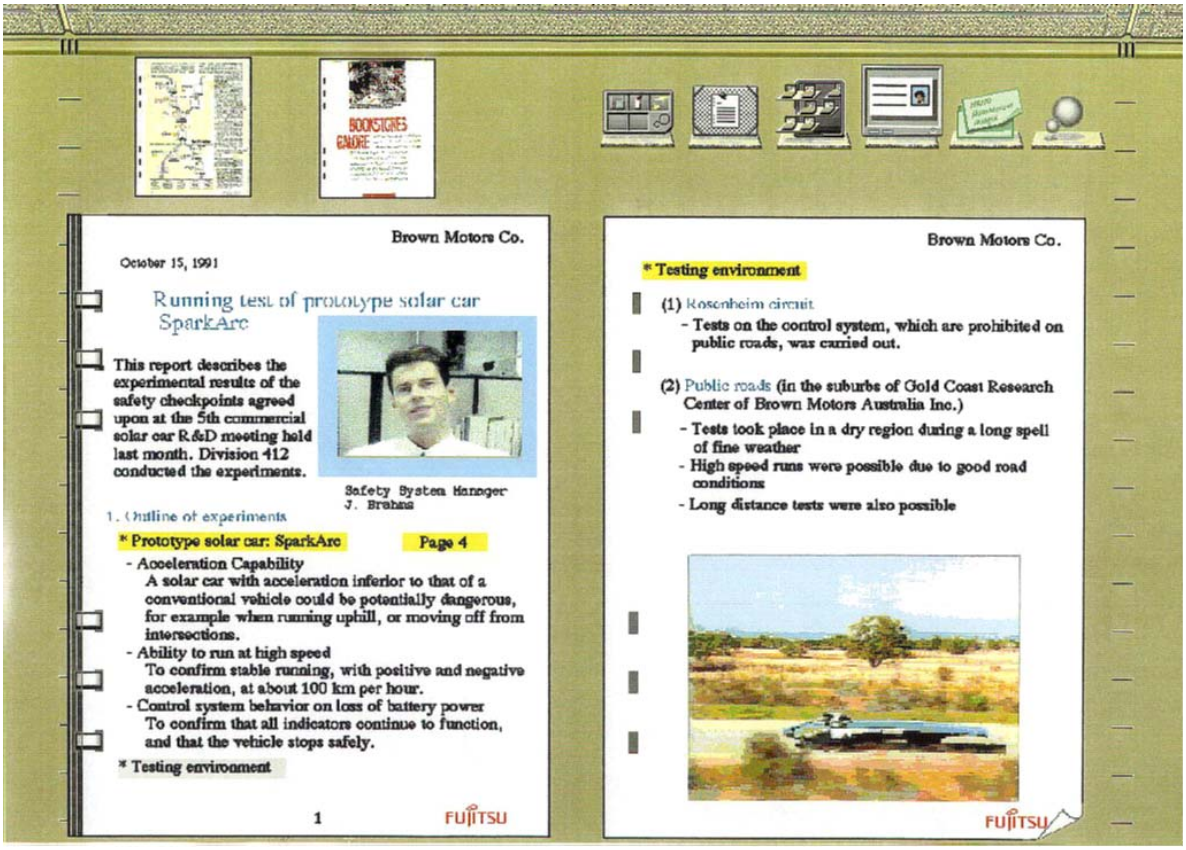


図 2-6 提案ヒューマンインタフェース: ハイパーメディア表示

インタラクティブな操作が出来るというメリットは、今までの「紙」では果たしえなかった機能である。図 2-7 の左下にある生産過程を表したフロー図のどこかの過程を表す部分に指で触れると、自動的にページ右下にあるビデオウィンドウが、該当する画像情報を再生し始める。ユーザは、インタラクティブにビデオを再生することができる。

上述の提案インタフェースに関する主な特徴は、使い慣れた現実の環境を維持する「紙」ベースの表現空間（空間フレーム）である。特に、デスクや壁はこの空間フレームの代表である。紙をひっくり返したり、取り出したり、置いたり、貼り付けたりといいう「紙」特有の操作性を活かした電子空間を構成するヒューマンインタフェースを実現している。また、ページめくりや、指で触れることによる選択、ノック操作もまた、紙と同様の空間操作である。この提案インタフェースによって、マルチメディア情報をより直観的に使いやすく操作しうるものと期待される。

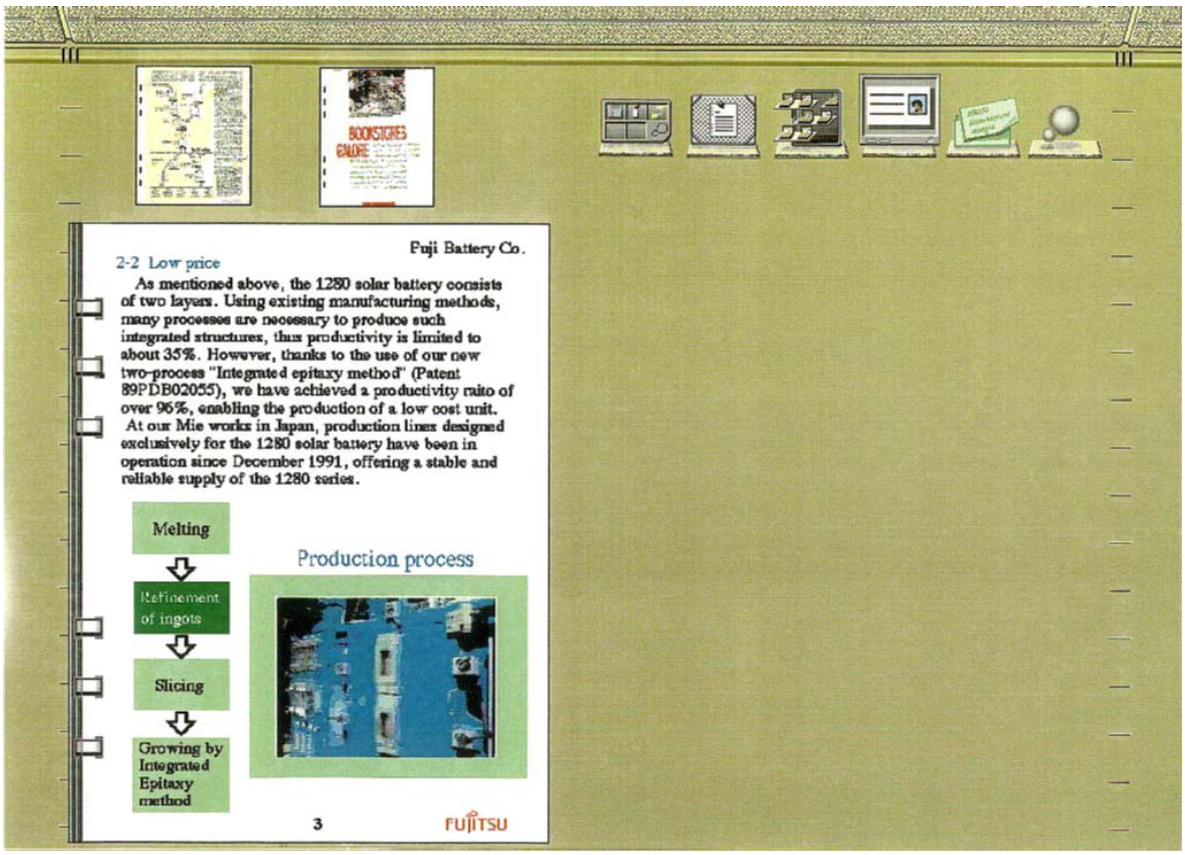


図 2-7 提案ヒューマンインタフェース: インタラクティブな情報提示

2.4. サービス品質の実験評価

2.4.1. 要求機能と技術課題

上述の提案ヒューマンインタフェースを実現するためには、以下の 3 機能が必要となる。

- 同時に2ページを表示できる高解像度カラー表示機能
- 複数の動画や画像(写真、画像、文字など)を同時に表示する機能
- 高い応答性を得るための高速画像処理と画像表示機能

表示画素数の増加や、より自然で柔軟なマルチメディア・プレゼンテーションの実現を考えると、現状のワークステーション機能を越えた高いリアルタイム処理が要求される。ブロードバンドネットワークにより、ネットワークの転送速度は速くなるが、端末機能を含めたトータルシステムとしては、要求速度に追いついているとはいえない。紙を扱うヒューマンインタフェースを実現するためには、多くの処理をリアル

タイムに行う必要があり、ディスク装置等の周辺デバイスのアクセス・転送速度や、CCP などの通信系に、また、情報を受信した後の処理に以下のボトルネックが生ずる。

- 紙の輪郭表示を行うウィンドウ制御におけるソフトウェア処理の機能不足
- 表示しうる動画サイズや、ライブ表示数の制限
- ソフト処理によるビットマップ画像処理速度の性能不足

2.4.2. 実験システム

これらのボトルネックを解消し、サービス評価を目的とした実験システム構築にあたり、ワークステーション本体に専用マルチメディア・アクセラレータを付加する方式をとった。図 2-8 は、実験端末の基本構成を示す。端末は、ワークステーションとマルチメディアアクセラレータの 2 要素から構成されている。ブロードバンドネットワークからの情報は、メディア毎に分離されて、アクセラレータに送られ、それぞれのメディアに合わせた拡大・縮小等のリアルタイム処理が分散して実行され、分散フレームメモリ(MPU)に格納される。これらのマルチメディア情報は、後述するように各フレームメモリを連携させるピクセルバスによって、柔軟かつリアルタイムに選択されて、汎用ワークステーションのディスプレイに表示される。

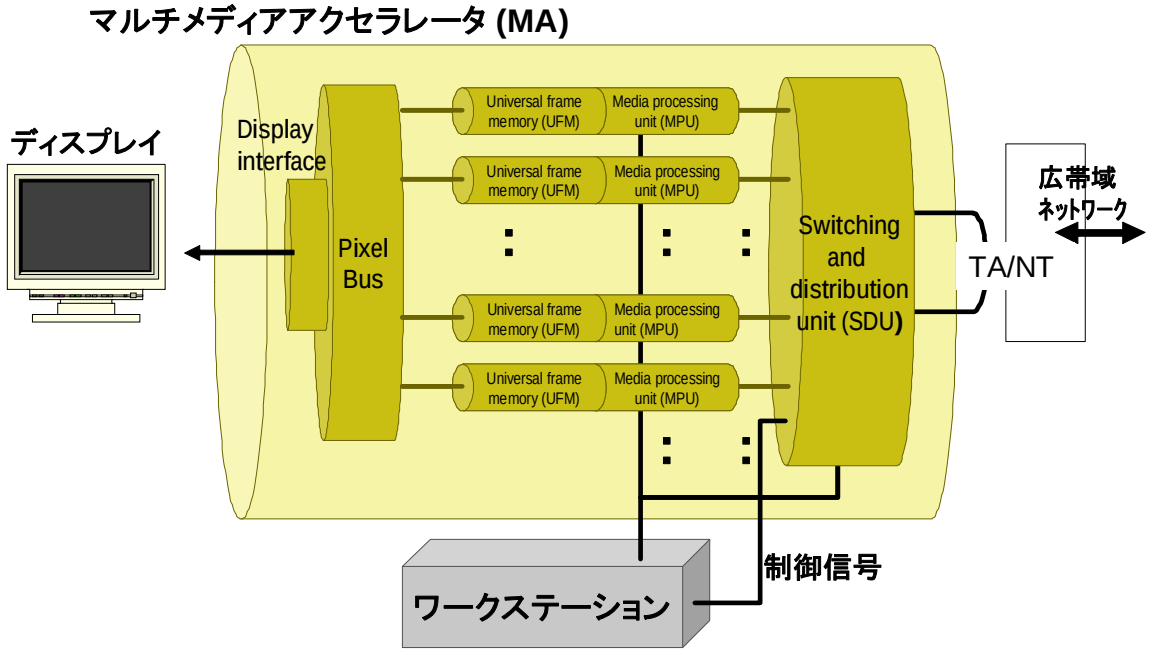


図 2-8 実験システムの基本構成

プレゼンテーション制御機能とバス構造に関する詳細を図 2-9 に示す。矩形だけでなく、柔軟な形状を持つページ境界制御を行うアウトラインジェネレータ(OLG)は、ピクセル毎にグループ識別子(GID)を出力する。この GID はページ上部、ページ下部、背景など、論理的なプレゼンテーション領域を識別する情報である。また、表示の各部分は、異なる分散フレームメモリ(UFM)とメディア処理表示ユニットによって生成される。例えば、図 2-9 の左側のページ上部は、エリア 1 という 2 つの領域で構成されている。この時、左側のエリア 1 はユニット A へ、矩形のエリア 1 はユニット B にそれぞれ対応付けられているとする。各ユニットでは、自身が持つ GID と OLG から送られてきた GID を比較して、自ユニットの情報をピクセルバスに送信するか否かを決める。この場合、ユニット B の分散フレーム・メモリ（UFM）では、受信 GID が同じであるので、優先度 ID が高い UFM が選択され、マスクがオフであれば、ユニット B のピクセルデータが、次のユニット C への出力データとして送信される。このような処理がユニット毎に繰り返される。つまり、同じ GID を持っている場合、優先 ID の高い方のユニットがピクセルデータとして表示されることになる。事前に、表示の背面裏面の関係を優先度 ID として設定しておくことで、適切な情報表示ができる。矩形領域は、ベースとなるエリア 1 の上に載っていると考えると、ユニット A の情報をユニット B の情報が上書きするように、ユニット B のデータが送信されることになる。

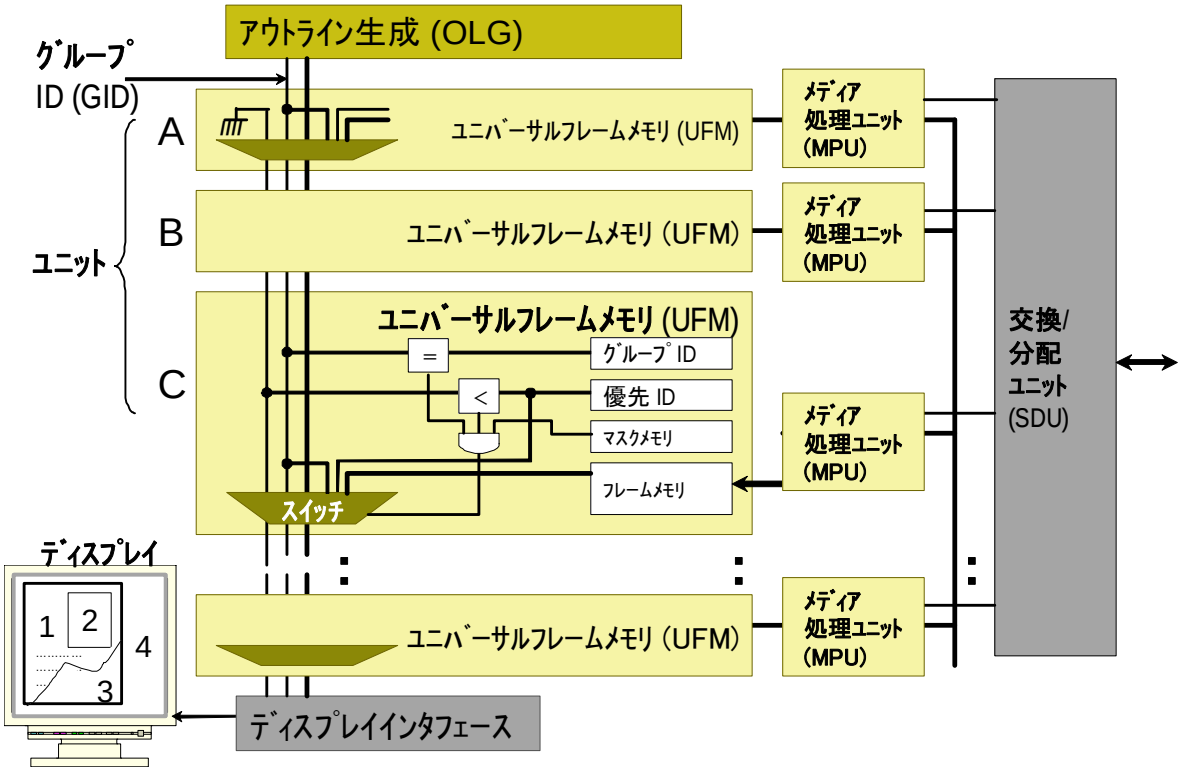


図 2-9 画像表示部の構成

GID 表示されたエリアで何らかの変更が行われると、リアルタイムにその変更に対応した情報が OLG から送信され、対応したマルチメディア・プレゼンテーションが実現される。つまり、ユーザ操作によってリアルタイムに変化する処理は、全て OLG に集約される構成をとっている。この方式により、複雑な形状となるエリア境界を、ユーザ操作に応じて、リアルタイムに生成できる。この実現方式を PPDS（パラレルピクセルデータ移行）と呼んだ。安定した高速操作が可能な PPDS を適用すると、汎用バス構造よりもはるかに手軽に表示の枠組みを生成することができる。各分散フレームユニットでは、表示データのアドレス位置だけを管理すれば良く、これは、ユーザ操作によって殆ど変更されないので、各ユニットの構成は単純化される。

上述の構成に基づいて、実験システムを試作した。SUN/4 ワークステーションをホストワークステーションとして用いた。拡張バス経由でそのホストへ NT/TA（ネットワーク・ターミネータやターミナル・アダプター）インタフェースを持つ MA（マルチメディア・アクセラレータ）を付加し、ブロードバンドネットワーク上の受信情報を収容する。図 2-10 に操作状況を示すように、試作システムを、通常のオフィスの状況と同じように文書などのレポートやメール、メモなどがあたかも実際の作業デスクにあるのと同じ感覚でディスプレイ上に表現されている。

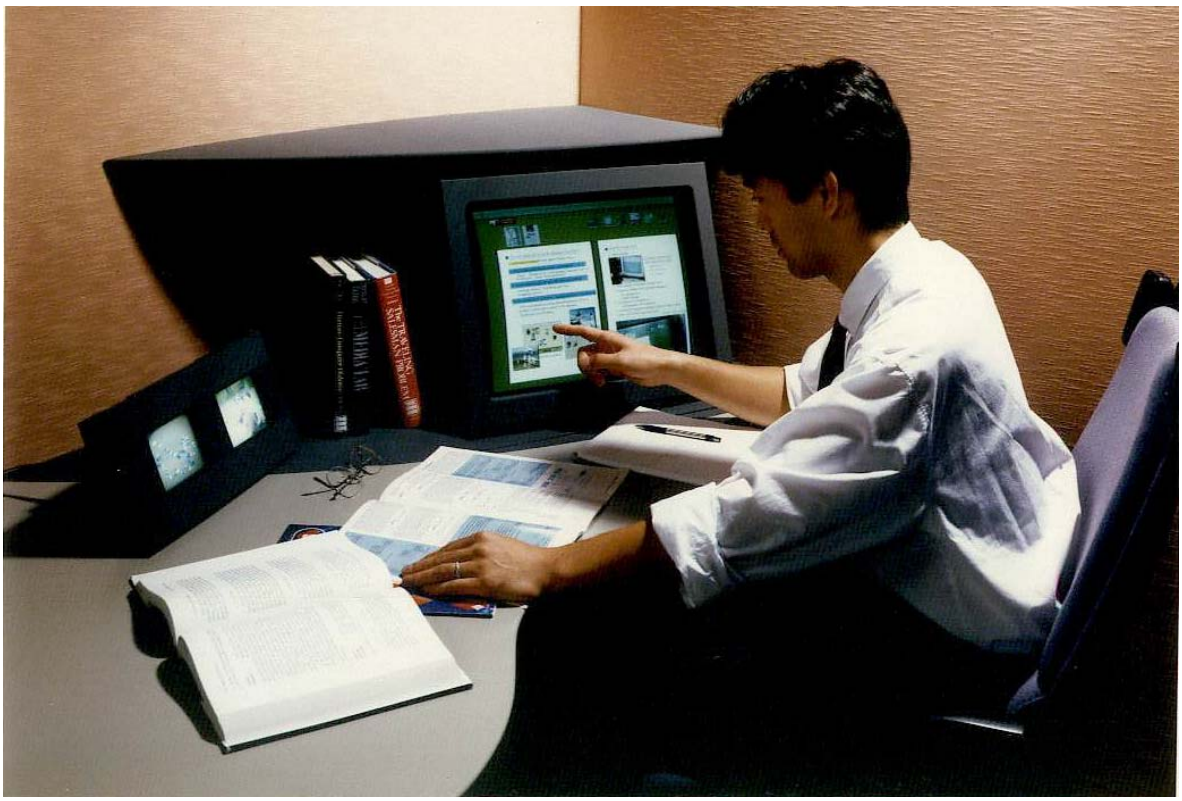


図 2-10 実験システムの操作

2.4.3. サービス品質の実験評価

実験システムを用いて、マルチメディア情報サービス品質の主観評価実験を行った。本論文で提案しているインタフェースの中でも最も大きな特徴となるページを「めくる」というインタラクティブな操作を対象として評価した。情報提示の応答性が最も評価の中心となることを考えて、異なる 4 種のページめくりを用意し、これらを主観的に比較評価することで、最も好ましい応答性を明らかにすることを目的とした。予備調査として、実際の本のページめくりを観察したところ、次々の検索対象を探すという目的の下では、約 0.7 秒でページめくりをしていた。この値を参考にして、電子化環境では、より素早い応答が期待されることを想定して、各ページ切り換え時間を設定することとした。4 種のページめくりとは、

① フリップ　　0.015 秒でほぼ瞬時にページが切り換わる表示

② ワイプ-1　　0.14 秒で比較的早くページが切り換わる表示

③ ワイプ-2　　0.29 秒でページが切り換わる表示

④ ワイプ-3　　0.52 秒でゆったりとページが切り換わる表示

である。

主観評価の観点は、操作への応答性に加えて、操作の優しさや温かみの点、さらに、総合評価としての使ってみたいと考えるか否かという点を加えた以下の 3 点とした。質問文を鍵括弧内に示すように、特に、総合評価は、最終的に被験者が使ってみたいのはどちらかという質問としており、応答性や温かみを含めた全体的な評価となっている。

1） 応答性:「ページ切り換わり方に心地良さを感じるか?」（以下、Speedy と表現）

2） 温かみ:「ページの動きに温かい感じがするか?」（以下、Warm と表現）

3） 総合評価:「日常の仕事に使ってみたいと思うか?」（以下、Useabe と表現）

評価実験では、一般的に主観評価や官能評価の手法として良く知られている一対比較法[41]で統計的に、4 種のサービスのスコアを算出した。すなわち、評価対象としている 4 種のサービスの中の全ての 2 種の組み合わせに対して、どちらが、質問としている観点で良いと思うかの回答を得る。回答は、どちらともいえないという中立回答を許容して、いずれかの良い方を選択するものであり、点数化はしていない。なお、一対の中で、先に提示したものを選択するという順序性があることを想定して、全ての組み合わせにおいて、提示順序を逆にした一対も含めて評価を行っている。この質問を、先の応答性などの 3 種で行った。一対比較法とは、同じ質問に対する複数の被験者の回答が正規分布となると仮定して、評価対象の評価結果の中心値からの片寄りを標準偏差として求め、各評価対象の優劣を表す相対スコアとするものである。異なる質問間での定量評価はできないが、同じ質問については、4 種のサービス間の定量的な順位付けができる。

実験を行った環境は以下のとおりである。

- 表示装置： 照度 400lx の下で、ユーザより、50～80cm の距離に置かれた 19 インチディスプレーを用いた。
- 表示環境： ディスプレイ上の 20 x15.4 cm の表示大でページ情報を表示した。
- 表示内容： 文字、画像、動画で構成されている24ページから成るマルチメディア文書情報を表示した。

評価では、操作入力よりは、表示品質の主観評価を行う目的から、操作入力は、キーボード操作として各被験者の入力の差異をなくしている。また、被験者は、10 名で、個々独立に評価実験を行った。

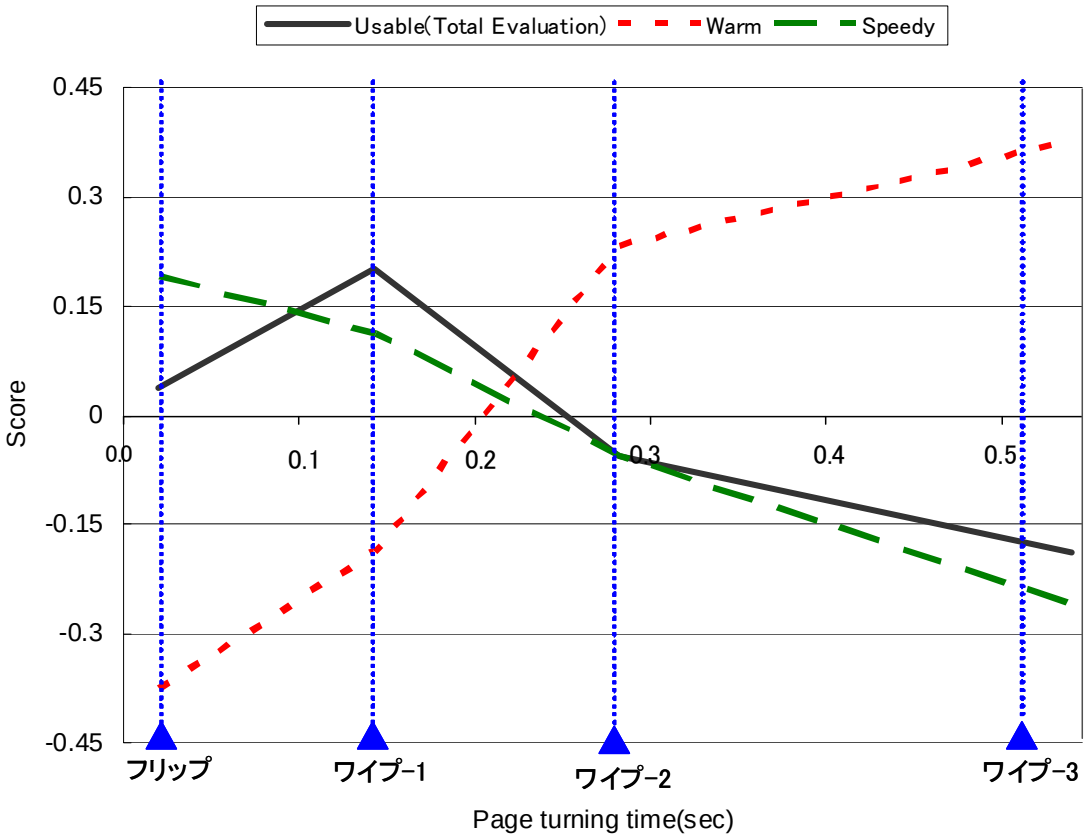


図 2-11 サービス品質の評価結果

評価結果を、図 2-11 に示す。横軸は、ページを「めくる」表示時間を、縦軸は一対比較法に基づく評価の相対スコアを示しており、数値が高いほど、良い評価となる。ページめくり速度が速いほど、Speedy の評価値は良くなる。一方、速さが遅い程、Warm の評価は高い。総合評価と考えられる Usable では、ワイプ-1、すなわち、0.14 秒という応答時間のページめくりが最も良い評価となった。なお、F 検定では、F(3, 108)=3.6, P=0.015* for usability, F(3, 108)=3.9, P=0.011* for speedy, and F(3, 108)=23.3, P=0.000* for warm) となっており、各パラメータの統計誤差は、非常に小さい。

総合評価に見られるように、単に高速なページめくり程、使いやすさや心地よさが良いとはいえず、ある程度の切り換わりを認識できる情報提示が好ましいことが判る。ただし、0.3 秒より長い切り換わり時間は、瞬時の切り換わりよりも総合評価は悪い。今回は、4 種のページめくり速度だけの評価であるため、ワイプ-1 が最適であるとは結論づけることはできない。0.2 秒以下について、より細かいペー

ジめくり速度のサービスを評価した実験によらなくては、最適な応答時間を絞り込むことはできず、これは今後の課題である。しかしながら、フリップとワイプ-2 の評価結果を見ると、最適応答時間は、およそ 0〜0.2 秒の範囲にあると結論づけることができる。

2.5. 結言

本章では、ブロードバンドネットワークを利用したマルチメディア情報環境について考察し、ヒューマンインタフェースを提案した。

動画・静止自然画・アニメーション・イラスト等の画像メディアを単に帯域の広いメディアの一種として扱うのではなく、人がどのようにそれらを認知理解するかという観点から、それらに適したインタフェースを構築していくことが重要である。これによって、画像メディアの真価を見いだすことができる。動画は単に、動く静止画ではない。自然画は単に言葉の不備を補う補足情報ではない。マルチメディア資料が動く写真の貼りつけられた目新しい資料というだけでは、実際の利用には結びつかない。例えば、携帯機器の外観を表す映像も、動画になれば、機器の質感や重量を一瞬にして理解できるようになる。このような特質を引き出して、始めて、マルチメディア化が現実の情報行動を助けるものとなっていくものと思われる。この考えの下に、提案したヒューマンインタフェースの狙いは、「紙を越える」インタフェース、よりリアルな情報表現、そして、人の空間管理能力を活かすことのできる枠組みの提供である。「紙」を基本として、デスクやパーテションから成る情報空間や、画像メディアの表現形式であるミニチュア、また、タッチセンスによる直観操作法などを特徴としている。

次いで、本ヒューマンインタフェースを実現する実験システムを構成し、ユーザ体感評価(QoE)の解明の進んでいないインタラクティブメディアに相当するページめくりによるマルチメディア情報のブラウジングの期待品質を主観評価した。ページめくり表示で提示する際の応答時間を一対比較法によって評価した結果、ページを「めくる」操作では、最適応答時間は、0.2 秒以下にあることが明らかとなった。

この評価結果は、第 2.1 節で述べた電子ショッピングサービスにおける応答時間が 8 秒を越えると、ユーザはそのサイトを離れてしまうという「8 秒ルール」よりもかなり、短い。また、現実の本のページをブラウジするようにめくっていく時間間隔は、0.7 秒程度であるが、これよりも短い。この結果から、人は、情

報が電子化された環境では、かなり早い応答性を期待していることが分かる。従って、マルチメディア情報を快適にサービスするためには、ネットワーク制御によるサービス品質の維持が従来考えられていた以上に重要となる。特に、IP 電話やビデオ・オン・デマンドのようにマルチメディア情報を有償提供する場合には、応答時間の維持制御は必須である。

第3章情報通信ネットワークにおける適応型サービス制御のための品質解析技術

3.1. 緒言

第 1 章で述べたように、増大する IP ネットワークの社会的重要性に応えるには、サービス品質劣化を事前に予測して、このような事態を避ける制御方式が求められる。このためには、図 3-1 に概念を示すように、常時、品質を計測し、これに基づいて、網全体でのサービス品質を解析評価し、さらに、品質劣化を避けるように動的な負荷制御、あるいは早期の網再設計を行う管理サイクルから成る適応型サービス品質制御が必要である。

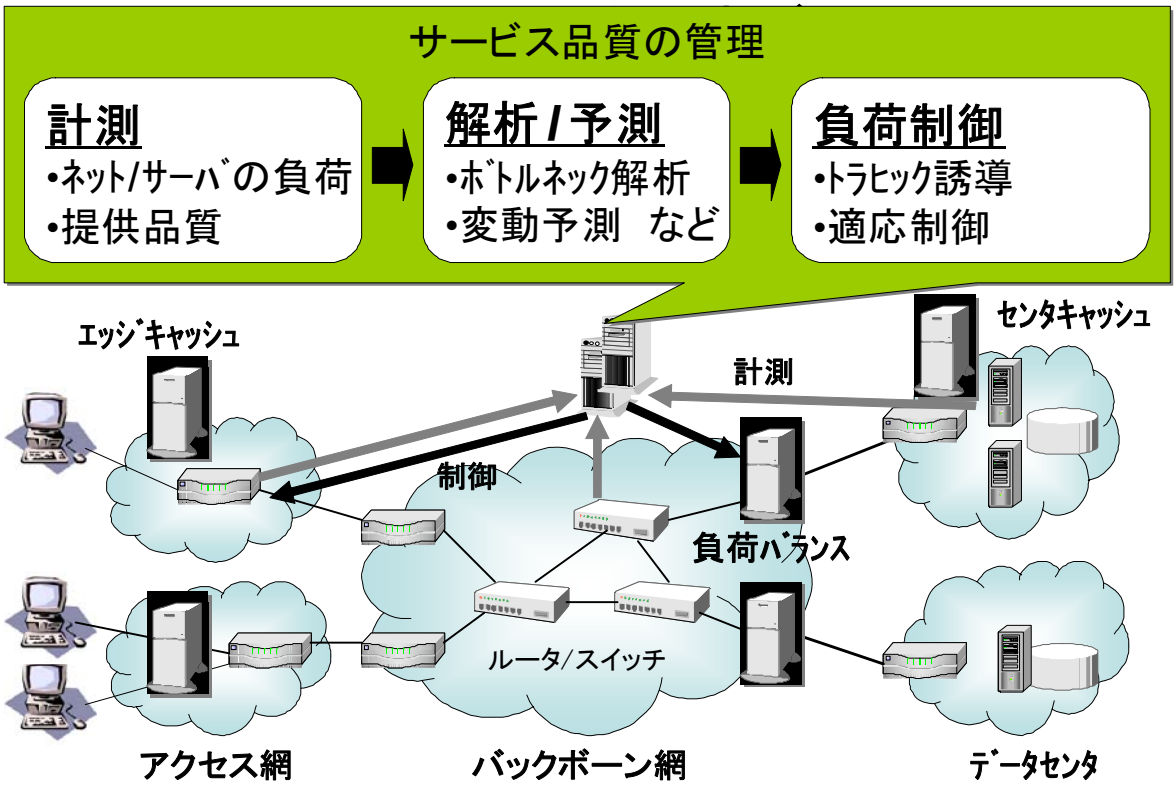


図 3-1 サービス品質管理の考え方

適応型サービス品質制御の目的は、サービス品質が維持されるようにパケットの流れを制御し、さらに、サーバや伝送路などのネットワーク資源の利用効率が最大となるように制御し、経済的なサービ

ス品質管理を行うことにある。具体的には、まず、各資源の利用率、つまり負荷状況を計測し、また、第 2 章で述べた通信品質も同様に計測する。その上で、ネットワーク全体の負荷状況、例えば、ボトルネック箇所の分析を行い、これに基づいて、品質維持や最適資源配備となるように必要となるネットワーク設備を追加/削減したり、ネットワーク全体のパケットの流れを制御することになる。

以下、主要な構成技術である計測技術・解析技術・制御技術の研究開発動向を述べる。

負荷量や通信品質の計測技術には、大別して、計測専用のパケットを実際のサーバ等に送信するアクティブ計測手法と、ネットワーク機器においてユーザパケットの振る舞い(応答時間等)を観測するパッシィブ計測手法がある[42-45]。後者の典型例は、保守プロトコル(SNMP)によって、ルータやブリッジなどのネットワーク機器の MIB 情報を収集する方法であり、現状のネットワーク管理システムでは、この方法が中心である。各ネットワーク機器がすでに持っている機能を利用するため、実現性に問題はないが、対象機器が必要とする MIB 情報を収集していない場合もありうる。また、収集情報からでは、必ずしも、ネットワーク全体の状態を特定することができない場合もある。大規模ネットワークでは、解析処理に時間を要することもあり、サービス状況に即応した制御が難しい場合もある。

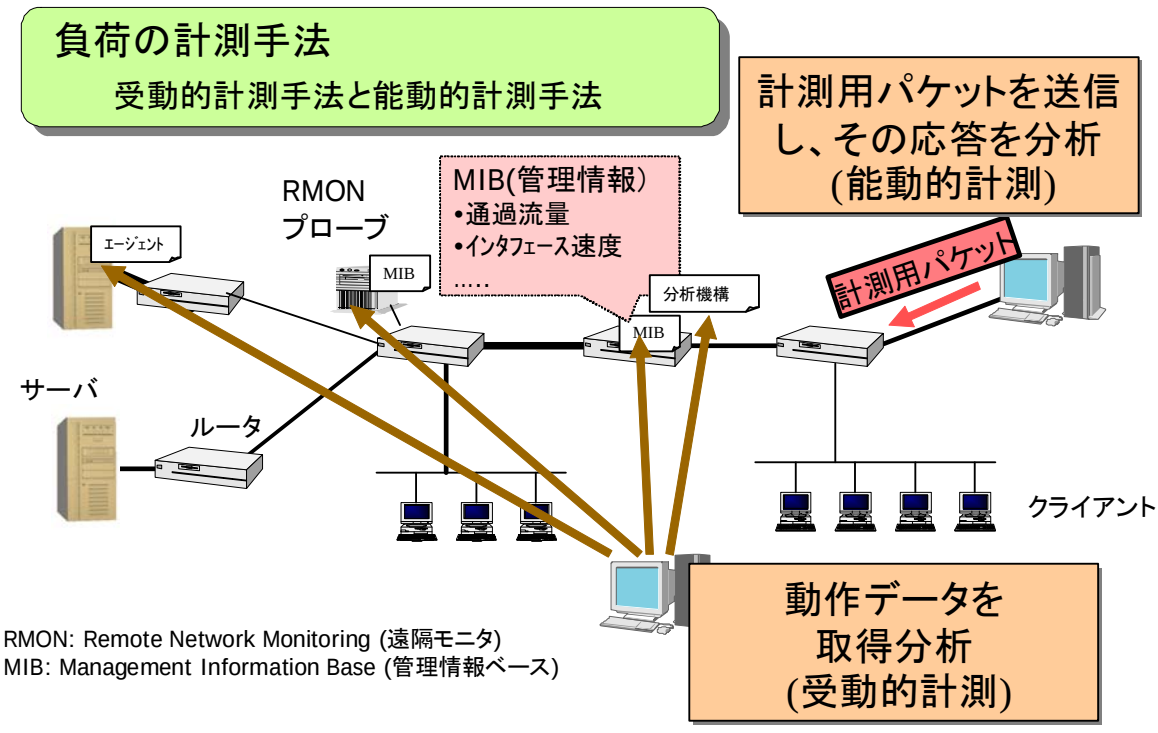


図 3-2 ネットワーク負荷や通信品質の計測技術

これに対して、アクティブ計測は、ICMP エコーパケットを利用した ping によって、経路上のホストへの到達可能性とパケットのラウンドトリップタイム（以下 RTT）を計測することを基本としている。その拡張として、複数の計測パケットを用いて、これらの応答時間の解析から、ネットワークの可用帯域、すなわち、サービスとして利用可能な空き帯域を計測する技術がある。C-Probe[46]や pathload[47-48]、Initial Gap Increasing[49]などが提案されてきている。pathload では、複数プロービングパケットの中の隣接するパケット間(パケットペア)の転送時間の増加、或いは、減少傾向を分析して、可用帯域を計測している。例えば、クライアント-サーバ間の特定ルート内の最小空き帯域を調べる C-Probe や筆者らが提案した NEPRI 方式[50-51]は、図 3-3 に示すように、特定ホストまでにある複数のリンクの中で、新たなサービスに利用可能な余剰の帯域が最小のリンク帯域、つまり、可用帯域を求める技術である。計測ポイントからは、複数のプロービングパケットを送出し、そのパケットが折り返して戻ってくる伝搬遅延時間を解析して可用帯域を求める。プロービングパケットがボトルネックとなっているキューに同時にキューイングされた時に発生するプロービングパケット間の相関現象[52]を検知することが基本である。手法としては、計測ポイントに計測機能をもたせ、プロービングパケットをホストマシンで折り返させる両方向計測と、計測ポイントにのみ計測機能を実装する片方向計測がある。どちらも、最小の余剰帯域を持つリンク(ボトルネックリンク)の帯域を求める。このボトルネックリンクには、一般のトラヒック(クロストラヒック)も流れている。主要なプロトコルである TCP には、流量制御があるため、単純にプロービングパケットを余剰転送能力限界まで送出してしまうと、クロストラヒックの方が適応的に減少してしまい、真の可用帯域は得られない。この条件下でも計測しうる技術が必要となる。

この技術課題を解決するために、個々のプロービングを独立に評価するのではなく、プロービングパケット間に見られる関係に着目して、クロストラヒックが存在する中でも敏感にプロービングパケットの応答を検知する手法が一般的となっている。例えば、良く知られている Pathchar[53]では、RTT の最小値を求めて、そのパケットサイズとの関係から可用帯域ではないが、ボトルネックとなる転送帯域を推測している。これらの技術により、数秒間の計測で、誤差 20%以下での利用可能帯域の計測が可能となっている。

各技術に共通する問題としては、一般的に多種のトラヒックが流れる中での計測となるために、一

般のサービスパケットからの影響を除去する目的で、多数のプロービングパケットを送出する必要がある点である。つまり、精度の向上と計測にかかるオーバヘッドが課題となる。

これらのアクティブ計測技術では、特定の目的、すなわち、特定のサーバまでの応答時間などに狙いを定めて計測を行うため、そのサーバ負荷量やそのサーバまでに至る全ルートの最小空き帯域という直接的な結果が得られる。反面、このような手法では、単独でネットワーク全体の状態を把握するには不十分である。実際には、計測用保守パケットの送信が部分的に制約される等の条件下での計測となるため、アクティブとパッシィブの両方式を組み合わせることが実用的である。

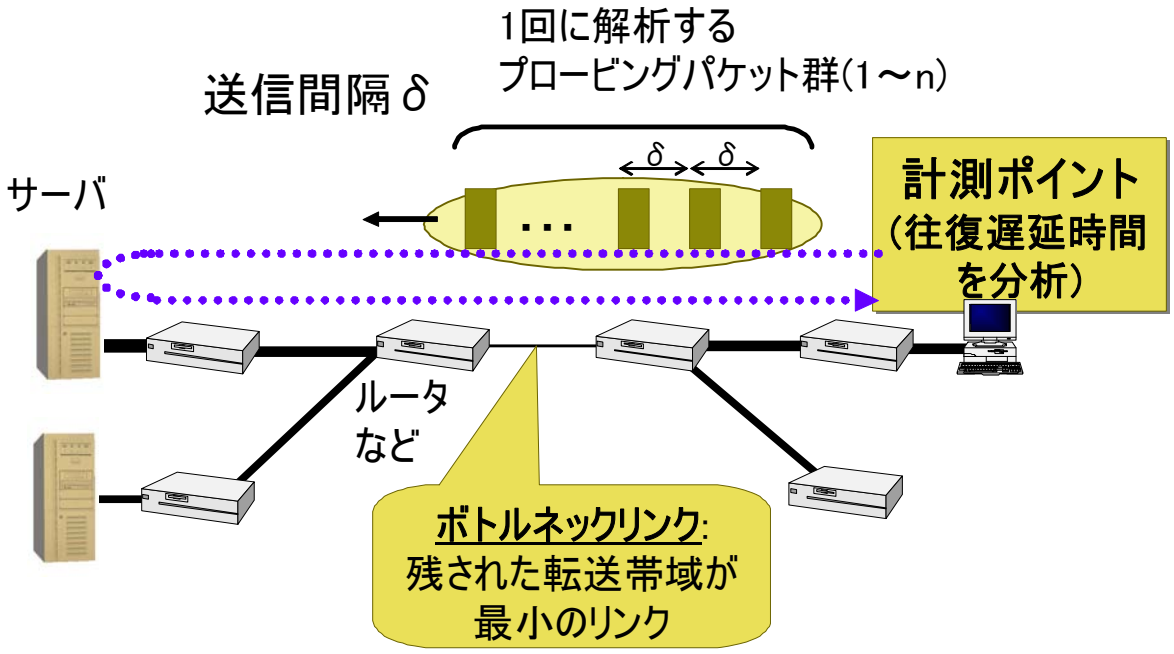


図 3-3 帯域計測技術

適応型サービス品質制御実現のための第 2 の技術は、計測結果に基づくネットワーク全体のサービス品質の解析評価である[52]。これには、主に理論的な解析手法とシミュレーションによる方法がある。シミュレーション技術では、実ネットワークの接続形態を反映したシミュレーションモデルを計算機上に構築し、ユーザ情報の転送状況を模擬することにより、応答時間などのユーザへの提供サービス品質を知ることができる。現状のネットワークのボトルネック箇所の特定等を行うばかりでなく、将来に想定されるユーザ数増加や、サーバ機器の増強などの条件下でのサービス品質変化を予測することもでき、先手を打ったネットワーク管理に有効である。

解析結果に基づいて、最終的には、ネットワーク機器を直接間接に制御するか、あるいは、品質を維持するようにネットワーク機器の増設等の網設計を行うなどのアクションをとることになる。これが、第3 の技術、ネットワーク制御技術である。制御コマンド送付などの方法もあるが、インターネット上で特定経路に集中して流れているデータを、複数の経路に自動的に分散させ、ネットワーク資源の有効利用を図るトラヒックエンジニアリング技術 [27] や、ポリシィ型制御技術 (Policy-based Management) [55]が開発されている。既に、データセンタで実用化されているユーティリティコンピューティング技術では、動的なネットワーク制御も開発されており、アプリケーションサーバ等をニーズに応じて、サーバプールから必要数を切り出して、逼迫しているサービスにオンデマンドで割りつけることによって、目標とするサービス品質の維持が行える。

本論文では、これらの技術要素のうち、実用に供する上で技術課題が残されている第 2 の評価解析手法について、その構成法を提案した。以下、第 3.2 節では、サービス品質解析手法の概要を述べ、その課題を明らかにする。次いで、第 3.3 節で、シミュレーションによる解析評価を行う提案方式を述べる。モデル化の考え、ならびに、各ネットワークモデルのパラメータ値の取得法を示す。第 3.4 節では、提案手法を実ネットワークに適用した場合の評価結果を示した。

3.2. サービス品質解析

3.2.1. 評価手法の概要

評価解析の対象であるネットワークサービス品質としては、第 2 章で述べたように応答遅延時間、ゆらぎと、パケット損失が一般的である。特に、IP ネットワークの重要な応用である電子ショッピング等のコンシューマ利用では、応答遅延時間が非常に重要となる。そこで、以下では、サービス品質として応答遅延時間に着目して議論する。

評価手法には、大別して、解析手法とシミュレーション手法がある[56]。この他にも実際のサービス要求を発生させてその応答を分析する KeyNote[57]等のベンチマーク手法もあるが、網全体の評価というよりは、外部からのサービス監視評価の側面が強い。また、品質レベルに対応した具体策を講じ

るためには、ネットワークの品質劣化要因の分析が必要となり、解析やシミュレーションが不可欠である。

解析、シミュレーションの両手法の中では、大規模化する IP ネットワークの概略品質を即座に把握して、適切な対応をとる必要性が増大している状況を考えると、図 3-4 に概要を示すシミュレーション手法の適用範囲を拡充することが重要と考えられる。Capacity on Demand に代表されるようにサービス状況に応じて網制御を行うことが現実的になりつつあることを考えると、時々刻々変わりゆく IP 網サービス品質を計測監視し、これに基づくシミュレーション評価を行い、臨機応変に品質維持を図ることが期待される。

以上の議論を踏まえ、以下では、サービス品質状況に即応して制御動作を行うことに有効なシミュレーション型の品質評価手法について議論を進める。また、評価対象サービスについては、現状のインターネットの中心的サービスである Web 情報サービスを取り上げて議論する。

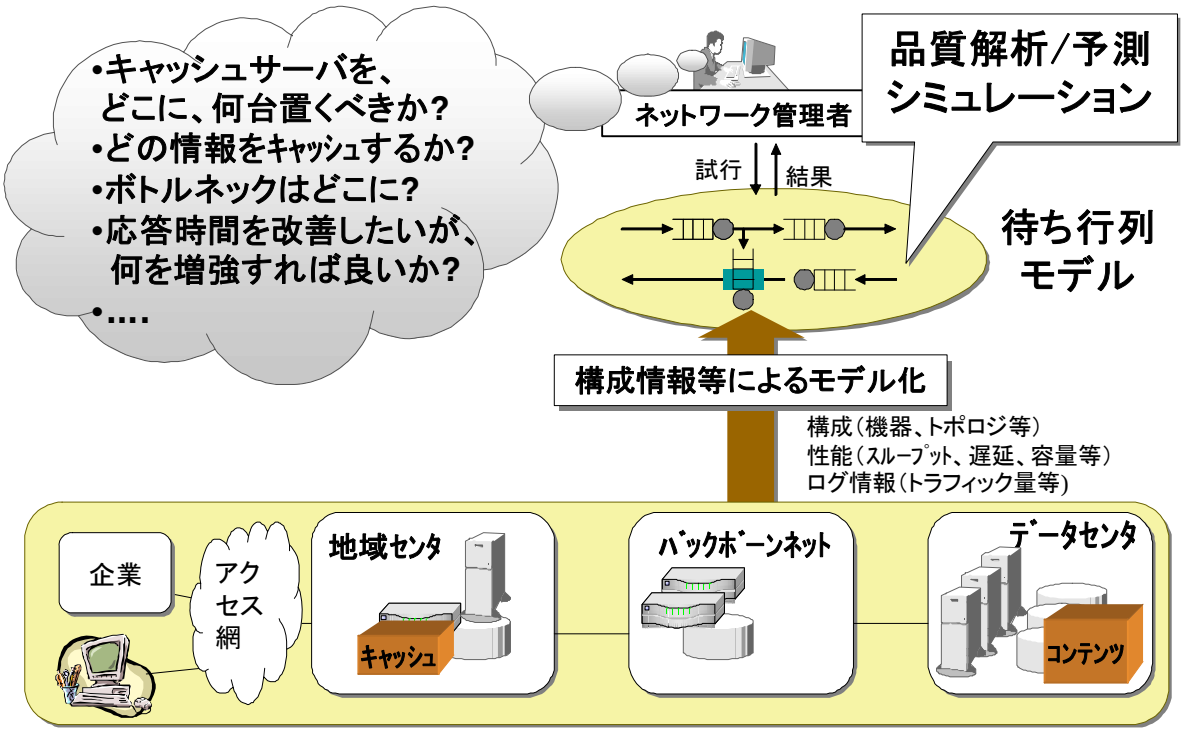


図 3-4 シミュレーションによる品質解析

3.2.2. シミュレーション解析評価手法の一般構成

シミュレーション評価では、まず、評価対象となる IP ネットワークのネットワーク形状を知る必要があ

る。次いで、網を構成する各要素をモデル化し、さらに、各モデルの具体動作を規定するパケット処理時間などのパラメータ値を設定する。最も基本的なシミュレーションモデルは、表 3-1 に示す各要素を実ネットワークに合わせて組み合わせたものとなる。

表 3-1 シミュレーションモデルの構成要素

要素	説明
ルータ	ルーティング処理に伴うパケット処理遅延を表す。
リンク	パケットが転送される伝送遅延を模擬する。伝送路への転送の待ち時間も評価対象となる。
サーバ	Web サーバにおける Web サービスを、パケット送受信レベルでシミュレートし、パケット受信から応答パケット送信までの時間を模擬する。
クライアント	関連する各クライアントの動作を表し、Web リクエスト（パケット）の発生、サーバモデルとのパケット送受信を模擬する。このパケットはクライアント、サーバ間のルータ、リンクを伝播する。

シミュレーションでは、構成要素の各種パラメータ値を決定して、要求トラヒックを発生させ、最も典型的なサービスである Web リクエストのサービス時間を求める。Web サービスのレスポンス時間は、クライアントとサーバ間を往復するパケットの各要素での消費時間（通過時間）の総和として求まる。

3.2.3. シミュレーション評価技術の課題

自由独立なネットワークの集合体であるインターネットでは、たとえ、イントラネットであっても、管理者もバラバラで、また、専任者がいない場合もあり、各構成要素の処理能力値などの細部までは管理されていないことが多い。各要素の処理能力等の固有値を事前に把握していたとしても、現場での機器更改によって、実際の構成と合わなくなることも現実には非常に多い。

そこで、動作中のネットワークから処理能力値などを直接収集し、その範囲内でシミュレーション評価できることに、実用上、大きな意味がある。近年、ITIL でもシステムの構成情報を厳密に管理する

構成管理データベース (CMDB: Configuration Management Database) の研究開発が進み、実用化もなされている[19-21]。最新の構成情報を獲得する Discovery 技術の開発も進んでおり、シミュレーションに必要な情報収集結果は、CMDB に体系的に格納できるようになってきた。従って、技術課題は、収集した情報の範囲内でシミュレーションモデルを生成しつつ、実用精度を得ることである。本論文では、この技術課題を解決する生成モデルについて提案する。

3.3. 品質解析シミュレータの提案

3.3.1. 構成方針

前節で述べた課題に対して、最も解析評価したい点は、大きく目標品質を逸脱してパケットが複雑な振る舞いをする状態の解析ではなく、正常にパケット転送される状況や、これを多少逸脱した程度の状態を知る点にあることに着目した。この場合、サーバ等の各要素のトラヒックモデルはさほど複雑なものは要求されず、処理能力値の計測等によって、シミュレーションの各要素のパラメータ値を得られる可能性がある。そこで、ネットワーク計測や一般的なネットワーク管理システムの持つトポロジィ情報を活用して、モデル形成と解析を行う方式を開発した。

3.3.2. モデル化

本節では、提案手法における各構成要素のモデル化の考え方を述べる。構成要素は、ルータ、リンク、サーバ、クライアントとする。なお、クライアントは、ポアソン分布等の評価条件に応じた確率分布でサービス要求を発生するモデルであるので、ここでは詳述しない。

評価対象は、Web サーバへのアクセス時の応答時間である。評価対象であるサーバ・クライアント間の通信に影響を与える他のパケットも含めたシミュレーションが必要である。そこで、評価対象に影響を与えるトラヒックをまとめて、「環境トラヒック」と呼ぶことにする。この関係を概念的に図 3-5 に示した。つまり、評価対象外の複数のサーバやクライアントから受発信されるパケットが作り出すトラヒックが環境トラヒックとなる。環境トラヒックは、評価対象ではないので、詳細解析の必要はない。そこで、対象外の複数クライアントやサーバをまとめて扱い、総和トラヒックとして評価ルートに印加されるものとした。つまり、環境トラヒックは、複数クライアントをまとめたことに相当する擬似的なクライアントから発生

させることにする。この処理は、リンク毎に行い、環境トラヒックの除去は、次段のルータにて対応するパケットを廃棄することで行う。つまり、流入する複数の環境トラヒックに、相互の関係はなく、独立であるとして扱うこととした。つまり、評価対象ルート以外の部分の詳細評価も行わないことになり、シミュレーション計算量の削減が図れる。環境トラヒックの流入量は、シミュレーションに先立って、マネジメントシステム等から収集することとした。なお、環境トラヒックをまとめて扱うことによる誤差は、実験により評価することにする。

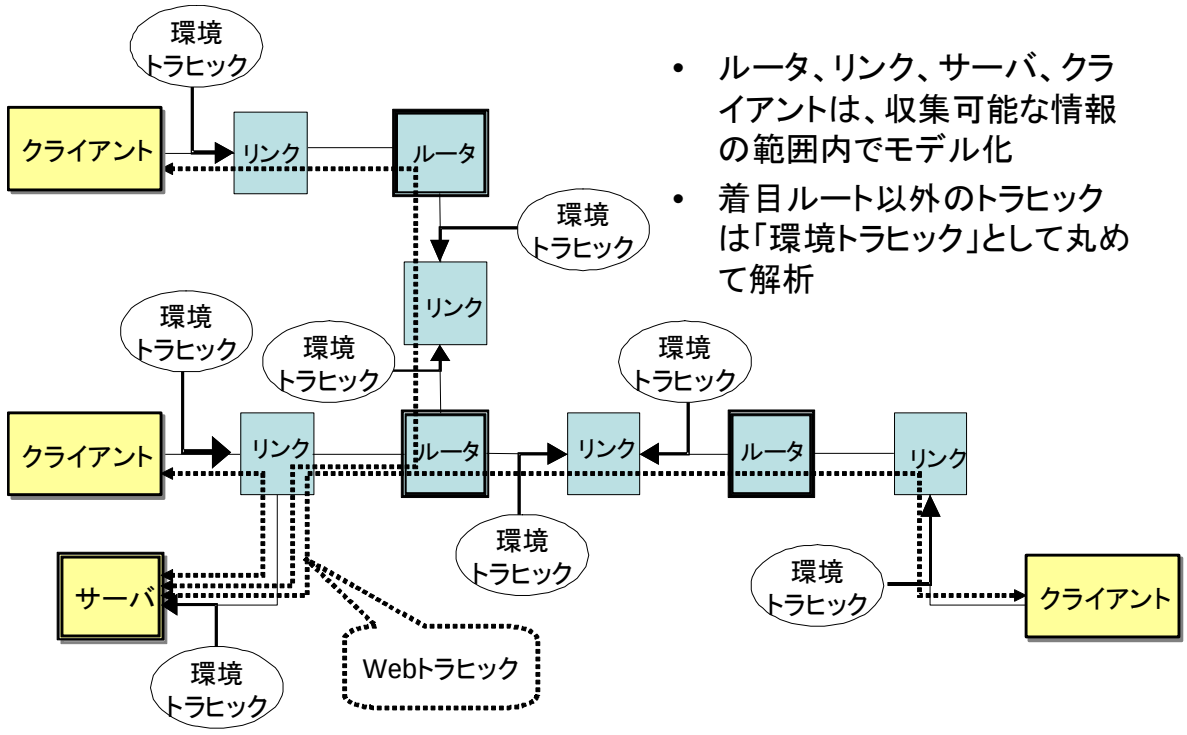


図 3-5 シミュレーションモデル

(1) ルータ

ルータモデルでは、パケットのルーティング処理による遅延をシミュレートする。1 パケットのルーティング処理時間は、パケットサイズとは関係なくすべて同一と考えられる。そこで、ルータモデルは、図 3-6 に示すように、以下の 2 要素で構成されるものと考えた。

- ルーティング処理: パケットを転送すべき伝送リンクを決定し、また、非評価対象である環境トラヒックパケットを破棄する処理装置
- キュー: ルーティング処理を行う資源が空くのを待つための待ち行列

(2) リンク

クライアントや、ルータ、サーバ間を結合するリンクモデルは、パケットが伝送路などを転送する時間をシミュレートする。同じく図 3-6 に示すように、以下の 2 構成要素を考えた。

- 転送処理: パケットがリンクを通過する際に消費される時間をシミュレートする。伝送帯域幅とパケットサイズとの関係で求まる。パケットサイズの影響を受けるルータの転送処理もこの中に含めて考えた。
- キュー: 転送処理を行う資源が空くのを待つための待ち行列

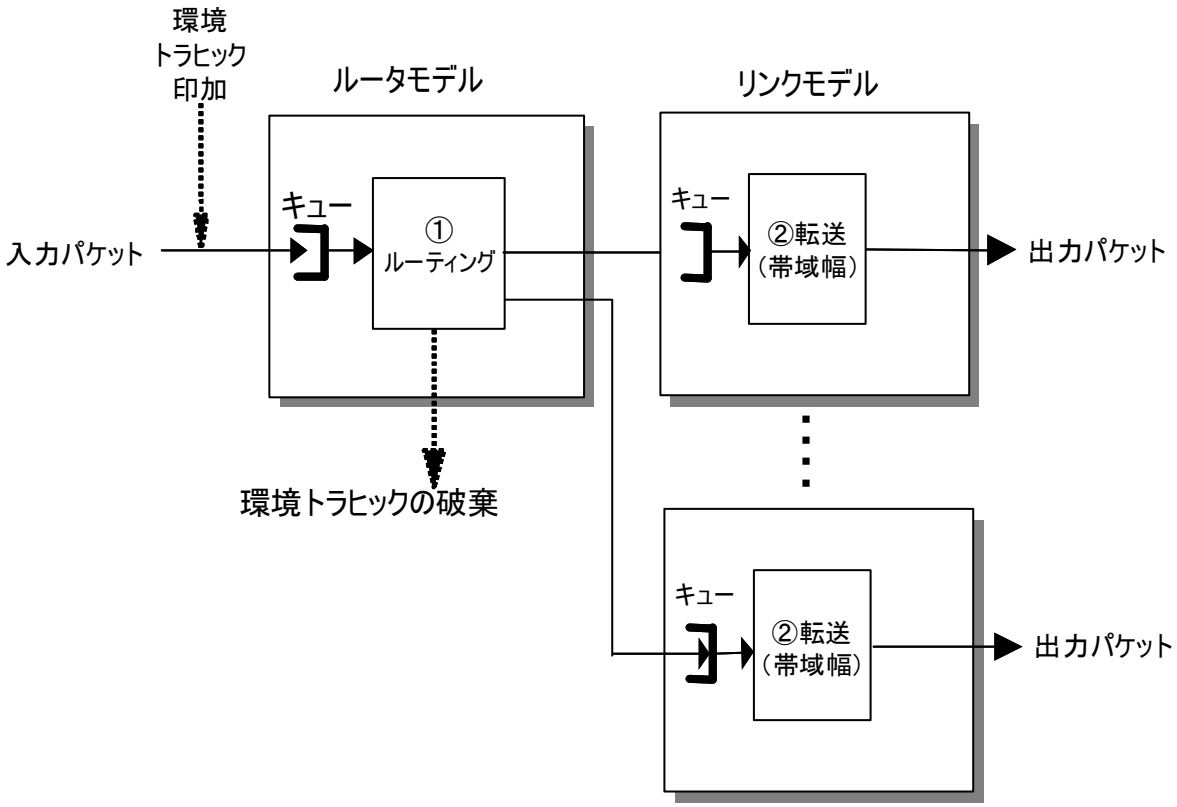


図 3-6 ルータおよびリンクのモデル化

(3) サーバ

サーバモデルでは、Web 情報サービスを要求する接続開始要求パケット受信から、所望の全 Web データを送信するパケット群の送出終了までの全処理をモデル化する。

まず、Web 情報サービスの機能構成を、以下の 3 処理から成るものと考えた。

- 接続要求の受け付け処理(以下、接続処理と呼ぶ。)
- HTTP コマンドの解析、CGI (Common Gateway Interface) 処理も含む実行処理(以下、内部処理と呼ぶ。)
- Web 情報のロード処理とネットワーク転送処理(以下、併せて転送処理と呼ぶ。)

これらの処理時間は基本的には、データを送信するために必要な伝送能力に依存するネットワーク資源と上述の各処理を実行する CPU 資源によって決まる。つまり、処理時間は、ネットワーク資源と CPU 資源のそれぞれの待ち行列でシミュレートできる。そこで、両資源での処理の待ち行列の関係について、以下に分析考察した。

まず、CPU リソースの各処理への関わり方を分析することを目的として、サーバへの CGI 負荷[1]を増減して、100KB のページからなるサービス時間を実測した。図 3-7 に、サービス時間を、上述の 3 処理の総和時間と、転送処理時間、接続処理時間の各個別処理時間に分けて示した。横軸は秒当りの CGI 要求頻度、縦軸は各時間の平均である。総和時間はオープンからクローズ(connection 開始から close 終了)まで、転送時間はサーバからの最初のデータ送信から最後のデータ受信まで、接続時間はオープン開始からオープン終了まで(connection 処理)の時間である。クライアントとサーバは 100Mbps スイッチで接続し、CGI アクセスとページロード以外のトラヒックはない状態での実測結果である。

[1] 2 から 1000 までの素数の数をカウントし、その結果を返す CGI。

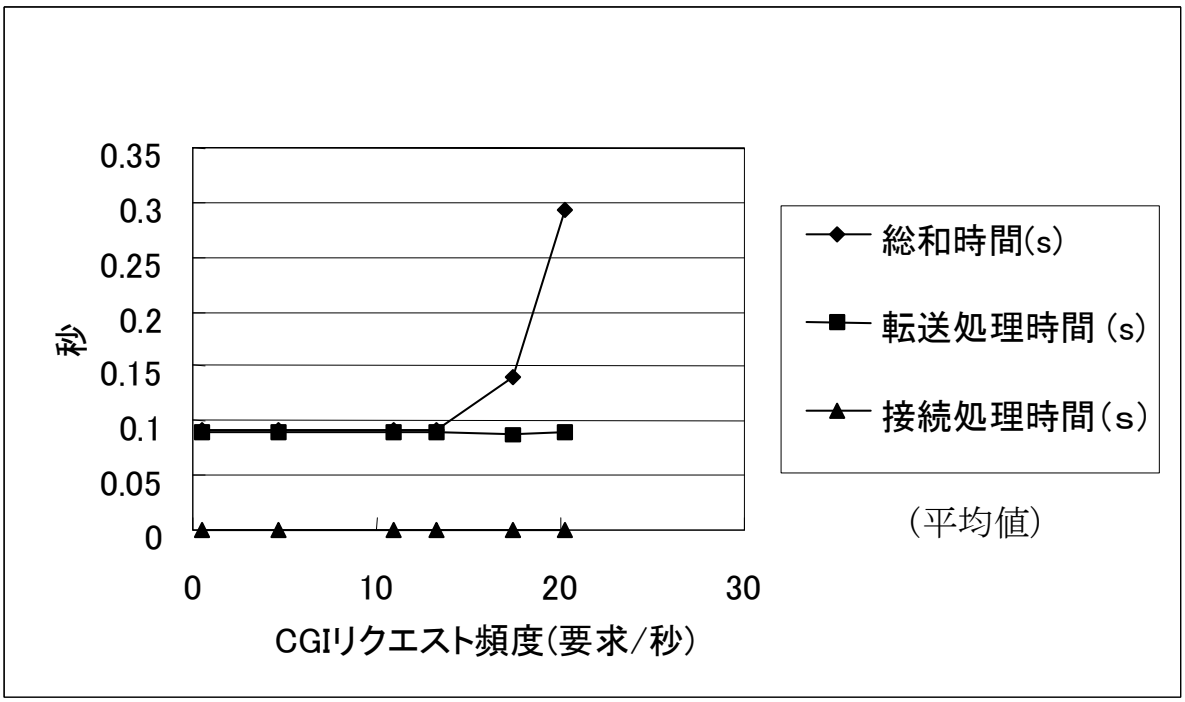


図 3-7 CGI 負荷のサービス時間への影響

総和時間はCGIリクエスト頻度の増加、つまりCGI 負荷の増加に伴って、長くなるが、転送時間と接続時間には、ほとんど変化がみられない。従って、CGI 負荷の影響を強く受けているのは、全体処理から、転送と接続処理を除いた時間、つまり、内部処理時間だけであると推測できる。

さらに、200KB のページロードについて、CGI 負荷をかけた時(load high)[2]とかけない時(load low)のロード時間を TCP レベルで測定した結果を、転送の経過時間の形で図 3-8 に示す。横軸は、読み込んで転送したバイト数で、縦軸は GET コマンド送信からの経過時間を示す。図 3-7 の条件と同じく、クライアント-サーバ間は 100Mbps スイッチで接続し、CGI アクセスとページロード以外のトラヒックはない。

[2] 2 から 10000 までの素数の数をカウントし、その結果を返す CGI を 10 プロセスがアクセス。

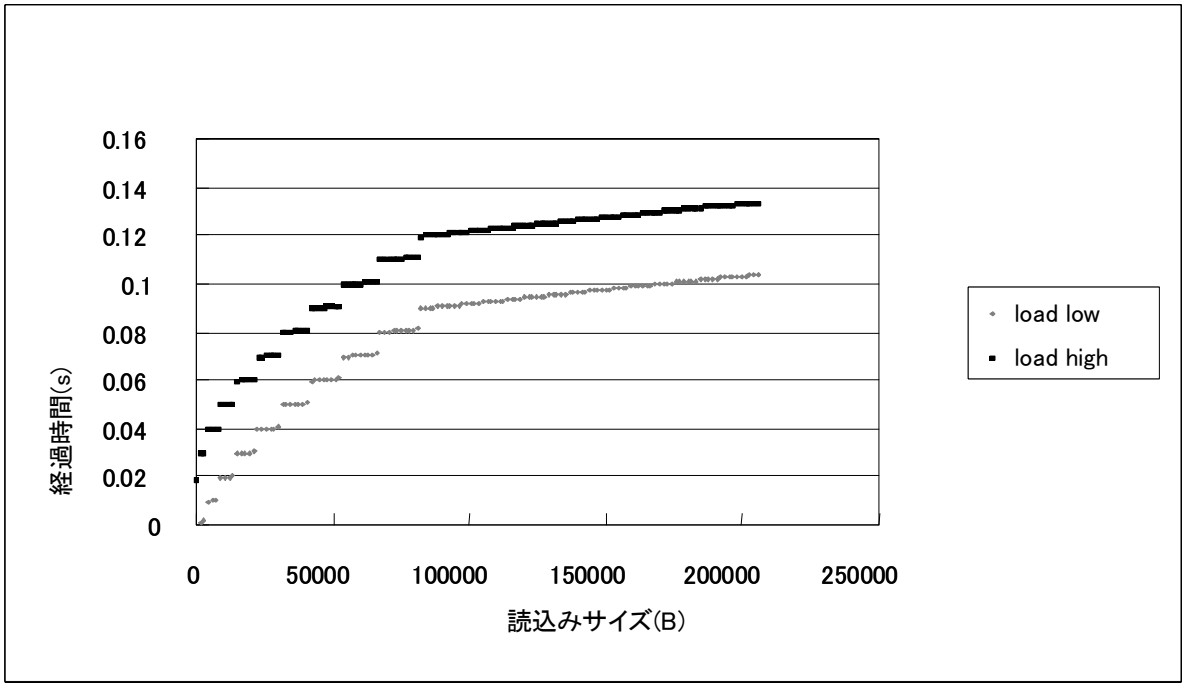


図 3-8 CGI 負荷のデータ転送への影響

図から分かるように、CGI 負荷の有無に関係なく、処理時間の傾向はほぼ同じである。違いは読込み 0 バイトの経過時間、つまり、内部処理時間である。これは GET コマンド送信からサーバの ack 受信までの時間で、実験環境では経路の影響を無視できるので、サーバ内部での GET コマンド処理時間に相当する。また、ほぼ連続している部分はクライアントからの ack 送信後のサーバのデータ送信であることをパケットダンプ結果から確認している。CGI 負荷が、内部処理時間にのみ影響することが、ここでも明確になった。

次に、接続時間と転送時間の相関について分析した。転送負荷を増減した時の接続時間への影響の測定結果を図 3-9 に示す。様々なサイズのページを様々な頻度でアクセスした時の接続時間である。CGI 負荷はない。

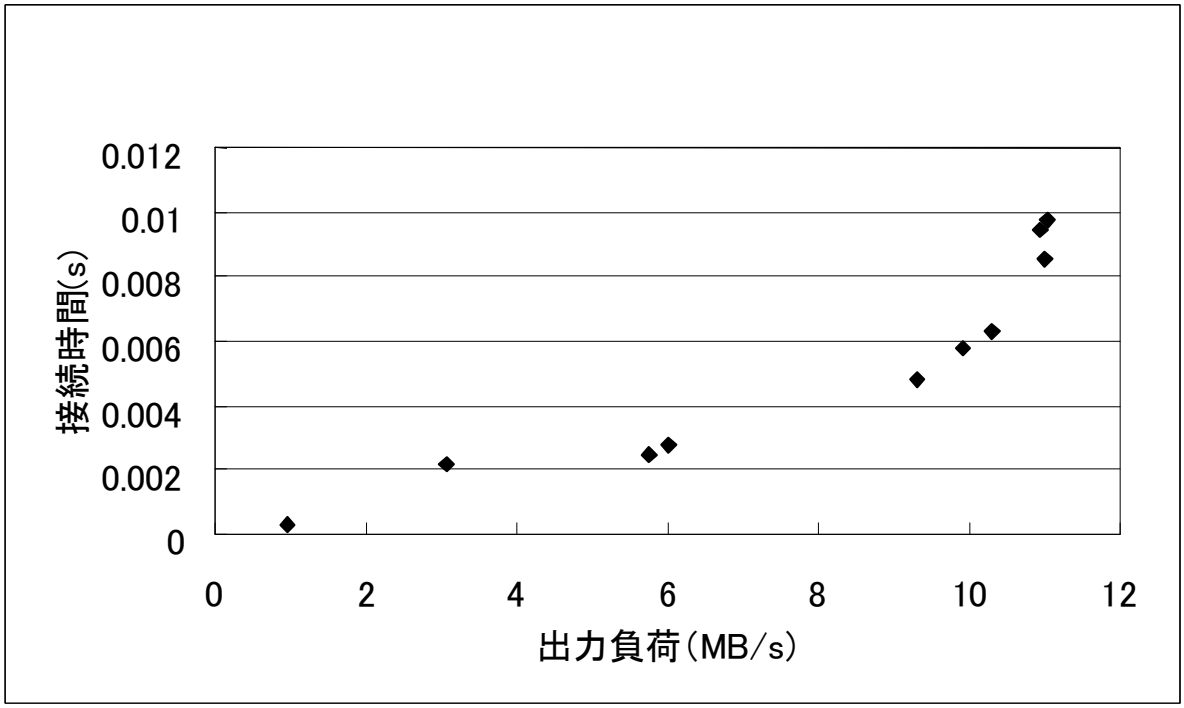


図 3-9 出力負荷の接続時間への影響

横軸はサーバの出力負荷(単位時間当りの出力バイト数)、縦軸は接続時間の平均を示す。接続時間が、転送負荷の上昇に伴い、増加することがわかる。接続処理は CPU 資源とネットワーク資源を使う。接続処理は、CGI 等の内部処理よりは優先度が高い処理であり、カーネル実行で定型処理[3]であるため、CPU 資源使用時間はほぼ一定である。図 3-7 の CGI 負荷と接続時間の結果でも、これが表れている。これらのことから、接続時間の増加の原因は、データ送出にあたってのクライアントとの通信量増加の影響と考えられる。つまり、ネットワーク資源では、接続処理と、データ送出処理が混在しており、両者ともにカーネル実行であることから、上の結果はデータ送信処理中、接続処理が待たされたものと推測できる。

以上の結果から、次のことがいえる。

- 内部処理は、並列に処理されている他の内部処理(CGI 処理等)で待たされる。
- 接続処理と転送処理は、内部処理の影響を実質的には受けない。
- 接続処理は、並行している他のクライアントへのデータ送信処理の影響を受ける。

[3]ここでは Web サービス処理のみを考えている。一般にはメモリ不足によるスワップ処理などが生じ、定型処理とは言えない。

そこで、サーバモデルの構成を図 3-10 のように考えた。本モデルは、CPU 資源とネットワーク資源を代表する2つの待ち行列 C、N からなる。

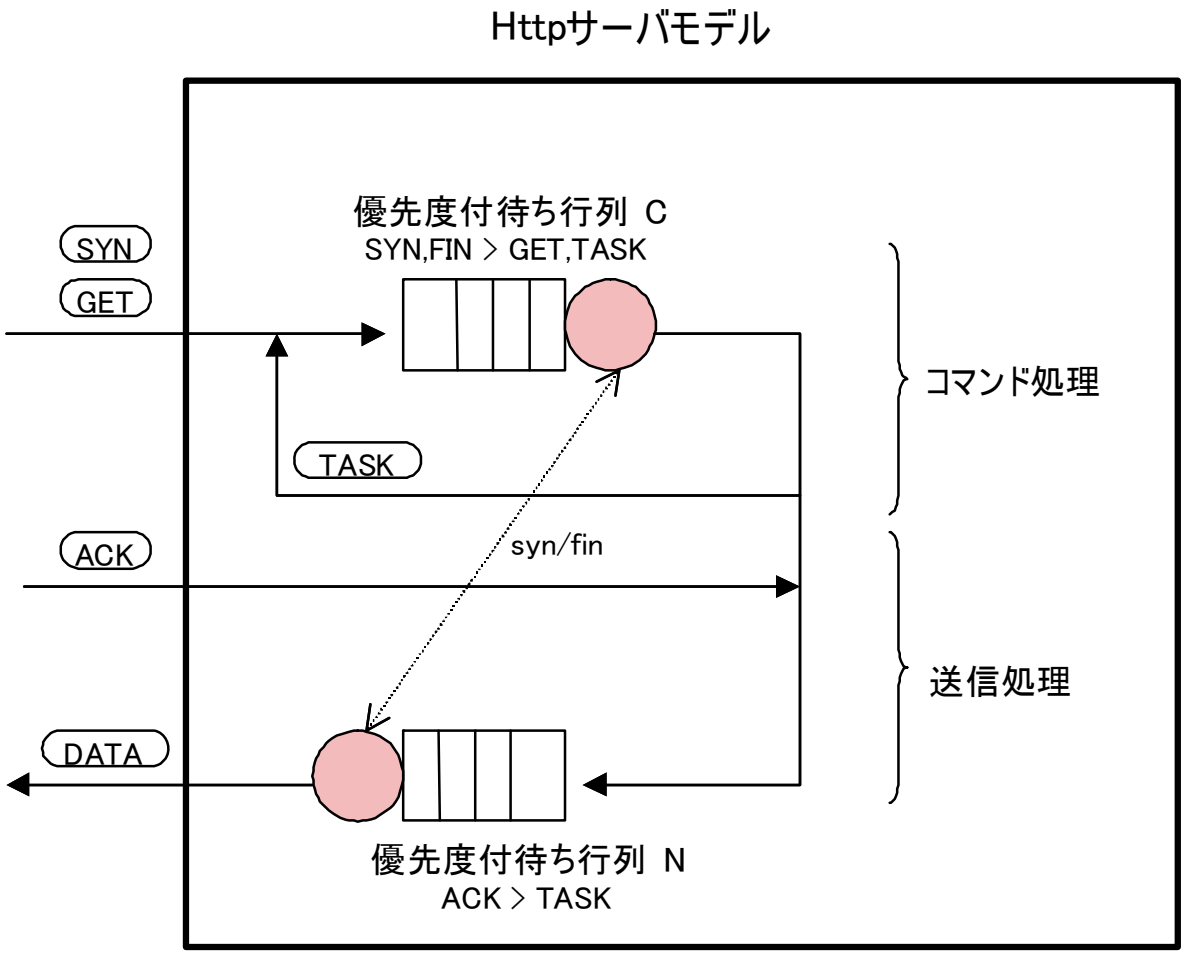


図 3-10 サーバのモデル化

待ち行列 C

待ち行列 C は、CPU の内部処理をシミュレートし、フィードバックを持っている。フィードバックは OS による TASK の時分割処理をシミュレートするためであり、OS の振る舞いについての一般的な解釈から導入した。一般に OS の Quantum 時間は 100 ミリ秒程度である。接続処理では 100 ミリ秒以上かかるケースはないと考えられるので、時分割処理は内部処理のシミュレートにのみ意味を持つ。シミュレータは、GET コマンドが CPU 資源を消費する総時間を、複数の Quantum 時間で処理するように動作する。つまり、待ち行列 1 回の処理で、使用総時間に達しなければ、このタスクは再び行列 C につながれる。以降、使用時間合計が使用総時間に達するまで、待ちと CPU 資源使用を繰り返すこと

で CGI 処理および GET 処理等の内部処理をシミュレートする。

また、接続要求パケット SYN を優先処理することとして、接続処理が内部負荷の影響を受けない性質をモデル化した。なお、転送処理の影響を受けることを表すために、行列 C だけでなく、後述の行列 N も一定時間使用することとした。つまり、接続処理(TCP コネクション確立制御)では、SYN パケットに対し、オープン時間だけ資源を占有した後、ACK を待ち行列 N へ出す。

待ち行列 N

待ち行列 N は、ネットワーク資源に相当し、データ送信処理をシミュレートする。待ち行列 N は、行列 C の処理結果 TASK と、クライアントからの ACK を受けて動作する。ACK を直接行列 N へ入力しているのは、転送処理が CGI 負荷すなわち待ち行列 C の影響を受けないことからである。

リソース N の使用時間を決定するためには、サーバの送信速度と送信サイズが必要である。そこで、スロースタートとスライディングウィンドウをシミュレートした。最初の送信時にクライアントへ送る転送ファイルサイズを送信総サイズとして設定し、送信サイズが送信総サイズに達するまで、TCP バルクデータフロー動作をシミュレートする。なお、輻輳ウィンドウサイズを決定する機能には他に輻輳回避アルゴリズムがあるが、3.3.1 節でも述べたように、シミュレーション評価の主目的が、輻輳状態に至る前段階の詳細解析であり、高負荷状態の詳細解析までは求められないことから、パケット損失には対応する必要はないものと考えた。

3.3.3. パラメータ値の取得

本節では、前節で述べた各モデルの具体動作を表す各パラメータ値の取得方法について述べる。

(1) ルータ、リンク

必要となるパラメータ値は、ルーティング処理時間と転送帯域幅である。これらは、基本的に、計測用サーバから、パケット長 L バイトの ICMP Echo パケットを送出して、そのルータから ICMP 応答パケットが戻ってくるまでの往復遅延時間 RTT から求める。この考え方を図 3-11 に示した。つまり、ルータ i+1 への RTT から、ルータ i への RTT を引くことで、ルータ i のルーティング処理時

間や、ルータ i と i+1 間のリンクの転送時間を求めることができる。

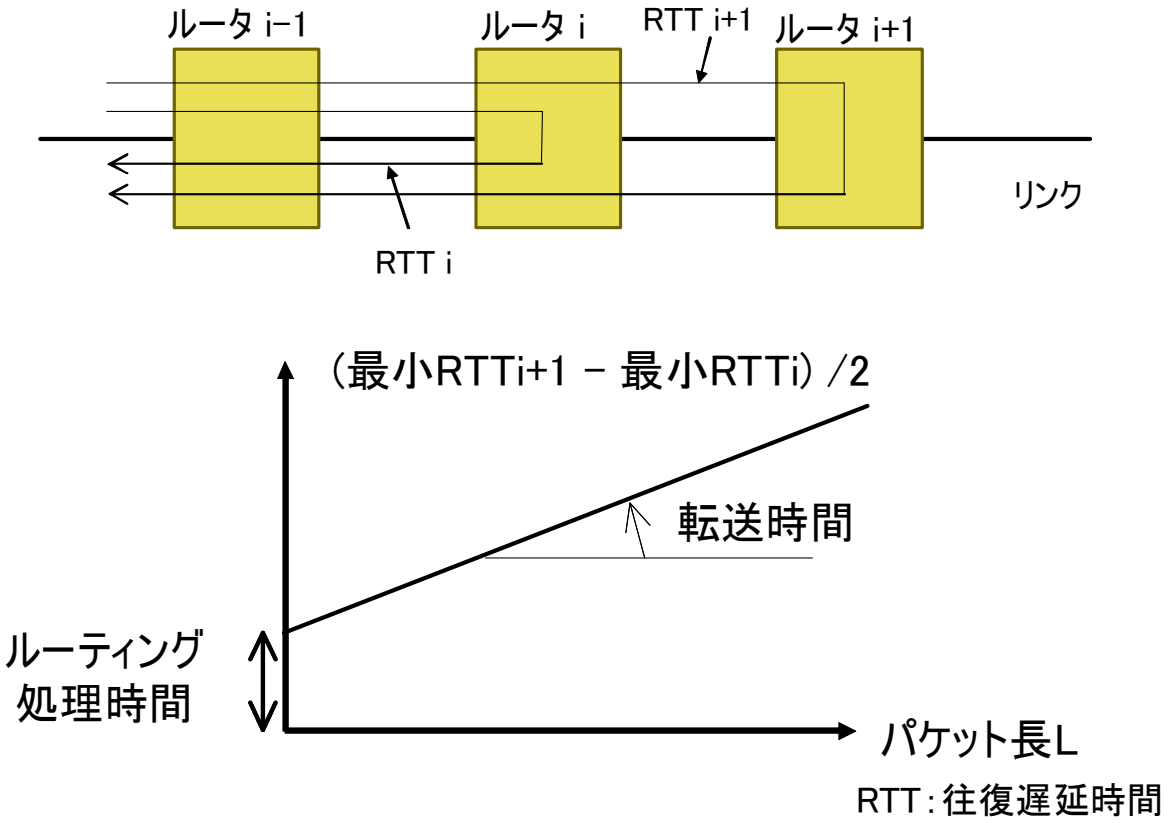


図 3-11 ルータ、リンクのパラメータ値の求め方

ただし、この方法では、計測パケット以外のパケットの影響を受けるので、複数回計測してその最小値を処理時間とする。さらに、パケット長 L を変えて複数計測し、L の固定分として、パケットサイズ依存がないルーティング処理時間を、また、L の比例分として、帯域依存である転送時間を求める。なお、帯域計測については、B-Probe 等の方法も知られており、また、MIB 情報からも求められる。いずれの方法でも良い。

(2) サーバ

3.3.2 節で述べたサーバモデルのパラメータは次の通りである。

- 内部処理のための CPU 使用時間

  1リクエストの処理に要する時間

- 転送ファイルサイズ

  1リクエスト当たりのサーバの送信データサイズ

【CPU 使用時間】

1. まず、現在の Web サーバの負荷レベルを検出する。つまり、対象サーバについて、平均アクセス頻度 λ（リクエスト/秒）および同じくサービス平均時間 T（秒）を取得する。待ち行列理論におけるリトルの法則より、滞在ジョブ平均数 N(= λ T)を求め、N<2 ならば高負荷でないとする。高負荷でなければ、次ステップ以降を行う。
2. 評価対象の URL に関して、ネットワーク管理を行うサーバから、実際に Web リクエストを送出して、最初のデータ受信までの最小時間 Ts(s)、GET コマンドパケットサイズ Sg(B)、受信データサイズ S1(B)を計測する。
3. リンクモデルのパラメータ値である帯域値に基づき、Sg、S1 から転送遅延時間を求める。また、経路上のルーティング処理時間の総和を求める。
4. CPU 使用時間は、

   使用時間 = 最初のデータ受信までの時間

   – 転送遅延時間の総和 – ルーティング処理時間の総和

   となる。

【転送ファイルサイズ】

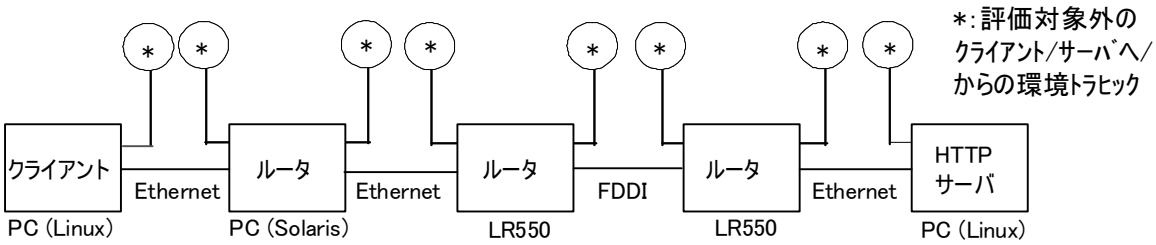
ネットワークマネジメントシステムで把握している Web サービス管理情報から求める。つまり、データサイズとアクセス頻度から、1 アクセス当たりの平均データサイズを得る。

3.4. 提案方式の評価

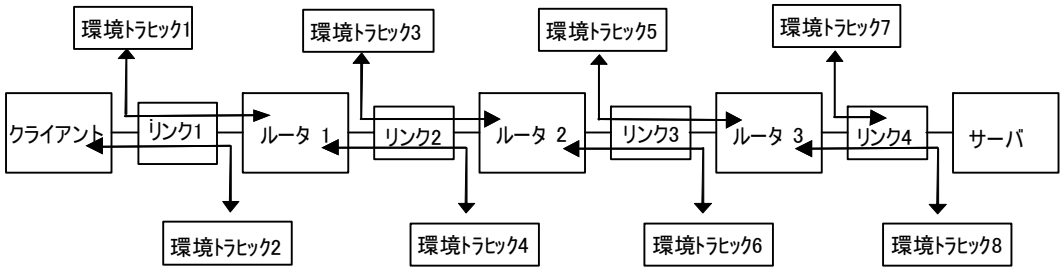
前節で提案した解析方式の妥当性を実際のネットワークでの実測値と比較して評価した。評価は、4 ホップからなる小規模実験ネットワークと、実用に供されている大規模イントラネットで行った。

まず、実験ネットワークでの評価結果を述べる。評価したネットワーク構成は、図 3-12(a)に示すよ

うにクライアントーサーバ間に4ルータが存在する構成である。シミュレーションモデルは、各構成要素を組み合わせた図 3-12(b)の形態となる。



(a) 実ネットワーク(実験環境)



(b) シミュレーションモデル

図 3-12 比較評価実験

表 3-2 には、計測で得た実験システムのパラメータとして、ルータのルーティング処理時間、リンクの伝播遅延時間、および、8 種の環境トラヒックのパケット到着間隔と平均パケット長を示す。本表に示す環境トラヒックを印加した条件で、クライアント-サーバ間での HTTP サービスを評価した。クライアントからサーバに対して GET パケットを送った時刻から、サーバが返送した最後データパケットをクライアントが受信した時刻までの応答時間(RTT)を、シミュレーション値と実測値で比較した。なお、応答データは、サーバにおいて CGI 処理によって、生成される。データが多くなると、複数のデータパケットに分割されて転送されることになる。このデータ量はパラメータとして評価した。なお、シミュレーションでは、コネクションの開始と終了処理については省略している。

表 3-2 実験システムのパラメータの計測結果

(a) ルータのルーティング処理時間 (計測値)

ルータモデル	ルータ1	ルータ2	ルータ3
ルーティング処理時間(s)	1.0e-4	7.0e-4	1.0e-3

(b) リンクの伝搬遅延時間 (計測値)

LANモデル	リンク1	リンク2	リンク3	リンク4
帯域幅(b/s)	10M	10M	100M	10M
伝播遅延時間(μs/B)	86	530	150	86

(c) 環境トラヒックの流入量 (計測値)

環境トラフィック	トラヒック1	トラヒック2	トラヒック3	トラヒック4	トラヒック5	トラヒック6	トラヒック7	トラヒック8
平均パケット到着時間間隔(s)	0.13	0.19	0.015	0.015	0.003	0.002	0.41	0.14
平均パケット長(B)	308	308	258	512	429	569	673	328

ページサイズが 50K バイトの場合について、シミュレーションと実測をそれぞれ 100 回ずつ行い、RTT を計測した。その結果をヒストグラム表示したものを図 3-13 に示す。シミュレーションと実測の結果を比較すると、標準偏差は、実測が 10.6 となり、シミュレーションの 5.9 よりも大きくなったが、平均値、中央値と最小値はほぼ一致している。ばらつきが大きい理由は、擾乱を与える環境トラヒックを、仮想的に大きなクライアントであるかのようにまとめて扱ったことによるばらつき減少や、パケット衝突時の再送制御をシミュレーションしていないことによるものと考えられる。

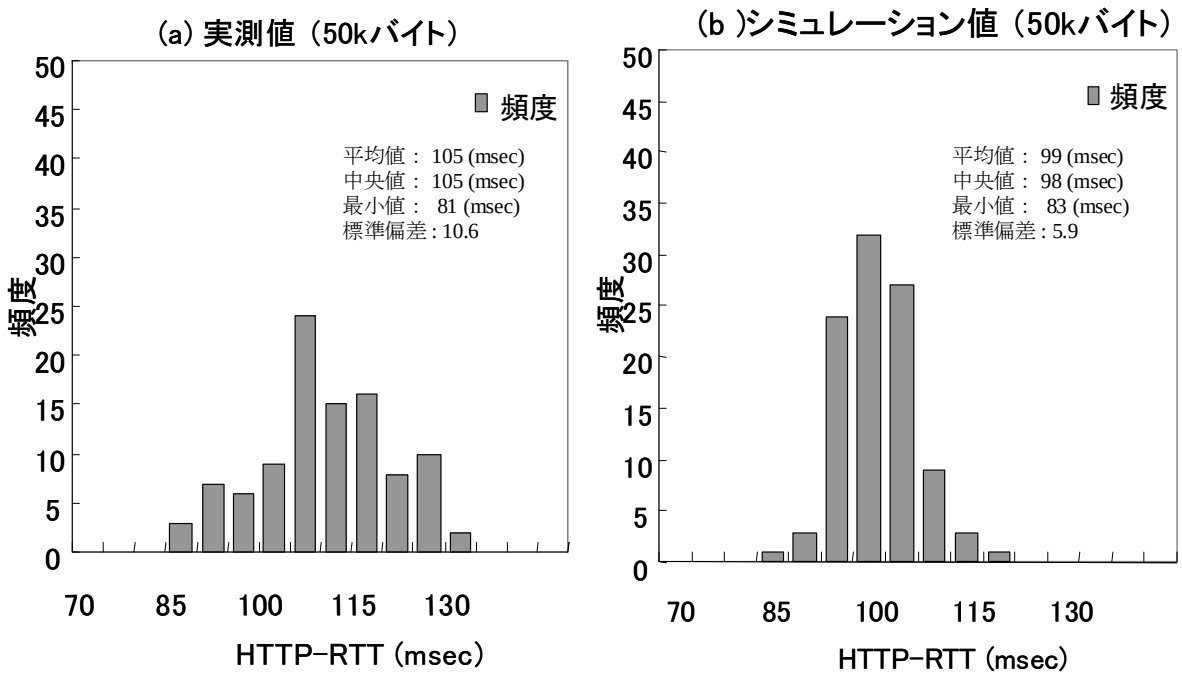


図 3-13 比較結果(1)

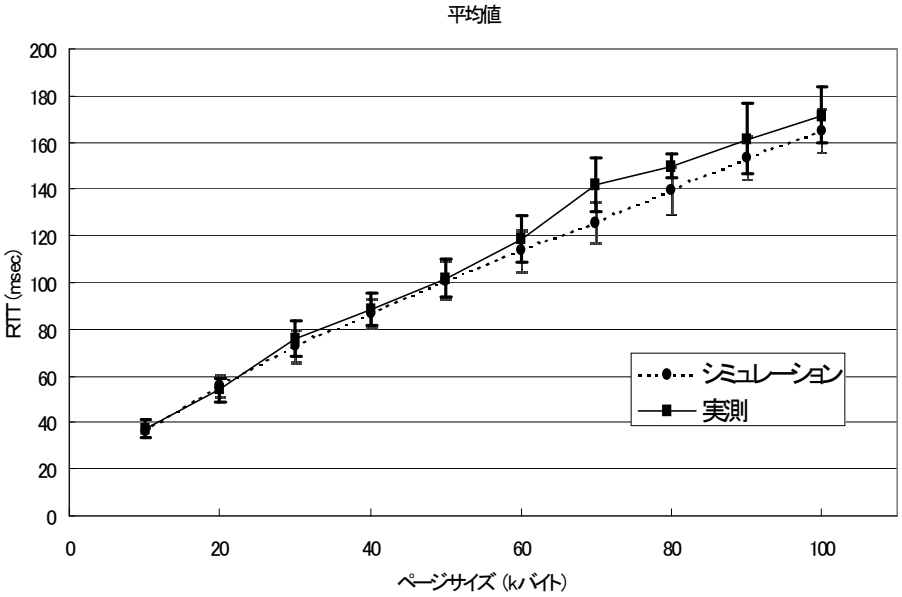


図 3-14 比較結果(2)

ページサイズを 10K バイトから 100K バイトまで、10K バイト毎に変えて比較した結果を、図 3-14 に示した。なお、図 3-13 に見るように、実測値、シミュレーション値共に、ひとつの中心を持つ分布をし

ていることから、評価は、中央値ではなく平均値で行っている。転送データ量が 60K バイトを超える辺りから、シミュレーション結果がやや短い時間となっている。この理由も同様に、データ量が大きい場合に差が広がっている傾向から、環境トラヒックのばらつきの少なさや、再送制御をシミュレートしていないためと考えられる。

この実験環境においては、シミュレーションと実測の RTT は比較的良く一致しているといえる。

次いで、実用イントラネットでの評価を行った。評価対象は、1 つの Web サーバを 3 拠点にあるクライアントが利用するサービスである。合計 4 拠点の総数 23 サブネットからなるネットワークが、日常の一般サービスも供されているバックボーンネットワークに接続されている。評価対象となるルータ総数は 22 である。

シミュレーションの所要時間は、マシン環境が、CPU Pentium3、700MHz、メモリ量 500MB の場合に、10 秒間のシミュレーションをおよそ 38 分間で計算した。充分に実用的な計算時間であると考えられる。また、サービス時間のシミュレーション値は平均 RTT が 0.7 秒(最大値: 2.1 秒、最小値: 0.4 秒)であり、対応する実測値は平均 1.4 秒(最大値: 2.1 秒、最小値: 0.9 秒)となった。最大値は一致しているが、シミュレーションの最小値が小さい。シミュレーション開始後の過渡状態の除去が不十分であるためと考えられる。ただし、この比較では、日常の業務で利用されているイントラネットでの評価であるため、実測とシミュレーションとの比較条件は厳密には同一でないので、参考程度と考えるべきものである。

3.5. 結言

本章では、インターネットの普及進展に伴い、通信品質の解析評価が今まで以上に重要になるとの認識のもとに、シミュレーションによる品質解析手法の提案を行った。解析手法開発にあたっては、シミュレーションモデルの生成にあたって、現実には、システムの構成情報が完璧には把握されていないことが一般的であることを考えて、多少の精度や高負荷時の複雑な挙動を正確にシミュレートすることを犠牲にしても、ネットワーク資源の処理能力計測や MIB 情報というシステムが取得できる情報の範囲内で、シミュレーションモデルを生成することに重点をおいた。開発手法を、小規模実験網で評

価し、実測値とシミュレーション値を比較評価した。実験の範囲では、良く一致する結果が得られた。通常の IP ネットワークでは 10%程度の変動が常にあることを考えると、実用上充分な精度が得られているものと考えられる。さらに、実際のイントラネットを対象とした評価も行い、充分に実用規模でのシミュレーションが可能であることも示した。

モデル生成の情報を稼働中ネットワークから取得する技術に関しては、ディスカバリ技術と呼ばれる情報収集技術の開発が進んでいる。収集結果の格納も、ITIL で推奨されている構成情報管理データベース CMDB の実用化が進み、整備されてきている。本提案を適用しうる条件が、実用の場でも整い始めているといえる。

今後の技術課題としては、IP ネットワークの代表的サービスである Web サービスは、動的コンテンツなど、一層複雑な構造で実現されてきていることの考慮が求められる。また、応答時間短縮やサーバ負荷軽減を狙って、コンテンツキャッシュも重要になっている。キャッシュサービスでは、ひとつのページを構成するオブジェクトが複数のサーバに分割して格納される。また、SOAP (Simple Object Access Protocol) 等のプロトコルによって複数サービスを連携させる技術も重要となっている。シミュレーションにおいても、今後はこれらを反映した一層精緻なモデル化が必要となる。この場合、サーバモデルの精細化だけではなく、コンテンツを構成する個々のオブジェクトを独立して扱う必要があり、モデル化と共に、計算時間短縮も重要な課題となる。また、本提案では、TCP コネクションの並列処理は評価対象としていないが、コンテンツキャッシュサーバなどでは、並列アクセスを利用して応答時間を向上させる技術が使われている。シミュレーションの中でも、コネクション制御のモデルへの組込みが求められる。

第4章 情報通信ネットワークの安定品質を向上させる監視診断技術

4.1. 緒言

前章までで述べた通信品質と並んで、ネットワークシステムの安定品質はサービス品質のもうひとつの重要要素である。電話サービスでは、接続品質、伝送品質、安定品質を規定していた。IP ネットワークでは、パケット通信を行うことから、接続品質は、パケットの到達性、つまり、リーチャビリティに相当する。また、伝送品質は、無線区間を除けば、ビット誤り率は非常に小さくなっているので、実質的には、パケット遅延、揺らぎやロスなどの通信品質となる。第 3 章では、これらを解析する技術を論じた。安定品質は、常にサービスを受けられる安定性であり、システム信頼性や可用性、保守性が含まれる概念であると考えられる。例えば、公衆通信サービスにおける商用システムでは、サービス指標やSLA(Service Level Agreement) として、通信品質と共に、稼働率(全サービス時間の中で故障によりサービス提供不能となった時間の割合)や、故障からの復旧時間を中心とした安定品質を定めており、極めて重要な品質評価ポイントとなっている。本章では、サービス品質の重要な側面である安定品質を向上させるための技術について、考察し、IP ベースの情報通信ネットワークの保守管理形態に適した技術を提案する。

なお、コンピュータシステムに対しては、RASIS (Reliability, Availability, Serviceability, Integrity, Security の略) が品質項目といわれる。Reliability（信頼性）は、故障しにくいことであり、個々の構成要素の信頼度が基本となる。Availability(可用性)は、システムの高い稼働率を維持できることである。Serviceability（保守性）は、障害が発生した場合に迅速に保守しうることを指す。Integrity（保全性）は、データについて、これが矛盾をもたず一貫性を保っていることであり、Security（安全性）は、機密性が高く、不正アクセスがなされにくいことを指す。I(保全性)と S(安全性)は、主に扱う情報についての品質項目であるため、ネットワークの安定品質は、他の R(信頼性)、A(可用性)、S(保守性)の 3 項目を包含する概念と位置づけられる。

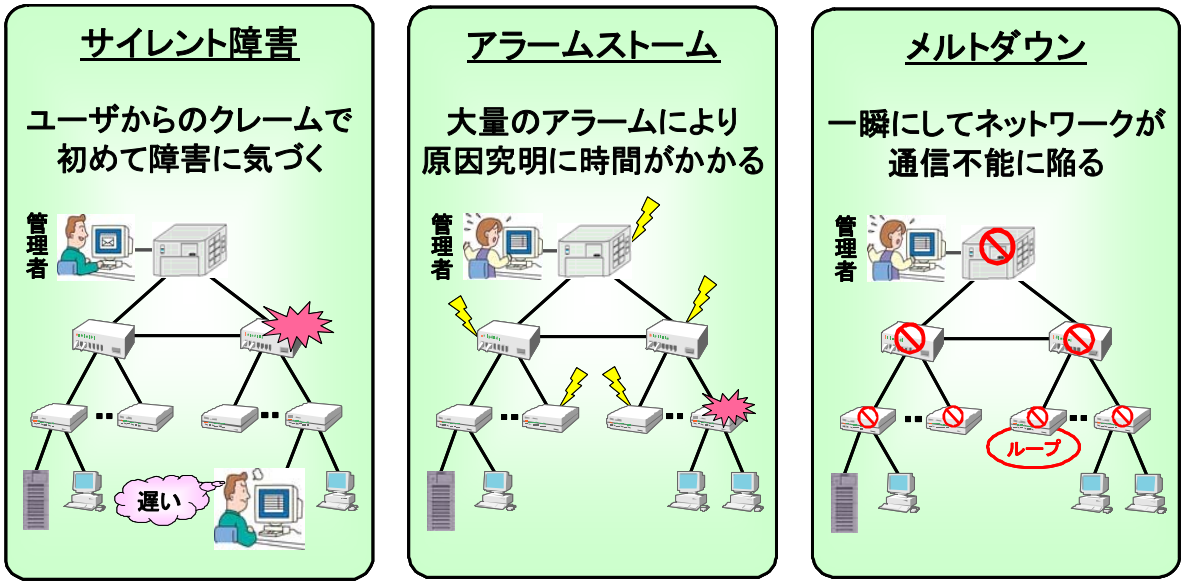


図 4-1 IP ネットワークにおける典型的なシステム障害

図 4-1 にいくつかの典型例を示すように、現状のネットワークでは、安定品質を損なう障害の発現が多様化し、解決も難しくなっている。例えば、サイレント障害は、運用システムの監視からは問題発見ができず、エンドユーザからのクレームで初めて障害に気がつくケースである。また、アラームストームは、ひとつの原因によって、異なる機器から多数の障害メッセージが上がり、根本原因を分かりにくくし、その結果、障害復旧に多くの時間を要する。メルトダウンとは、レイヤ 2 ネットワークのループ障害のように、数秒以下の短時間でネットワークのセグメント内全域が通信不能に陥り、復旧のために各機器のリセットが必要となり、復旧の手がかりになるログ情報もとれなくなるケースである。このような重要な障害が無視できない頻度で発生しており、この問題に的確に対応することが極めて重要である。

従来から、安定品質を高めるためにはシステム 2 重化などの冗長構成が採られてきたが、冗長構成が解決技術とはならい場合が増えてきている。その第一の場合は、マルチベンダ構成が一般的となり、他社機器を含めた起こりうる全ての組み合わせを想定した事前の機能試験ができなくてっていることである。そのため、システム導入当初には問題がなくても、ある機器のバージョンアップや、システム構成の変更によって、内包していたバグに起因してシステム障害が発生する。第二の場合は、人間系に絡む障害が増えていることである。図 4-2 は、富士通内で把握している障害事例を原因別に分析したものである。機器故障や高負荷など、冗長構成や負荷分散で対処できる障害は、17%に過ぎず、

運用者や設計者などの人に起因する障害、すなわち、ヒューマンエラーに関わる障害が 83%にも上る。

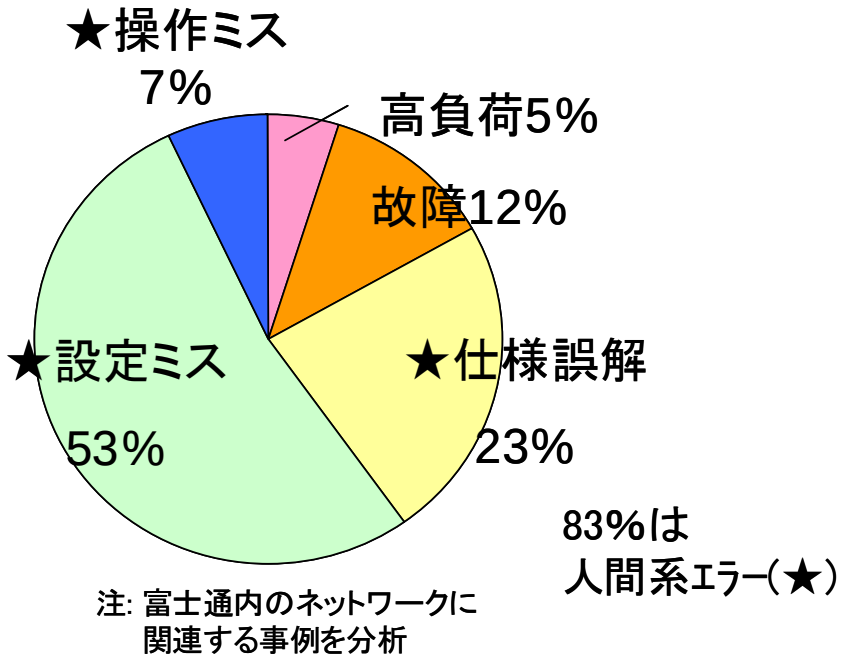


図 4-2 安定性を損ねる要因

これらの残存バグとヒューマンエラーという２つの要因に対して、安定性を向上させるための方策は異なる。残存バグについては、障害発生後の予備系切り換えやシステム再立ち上げ時に、同一構成条件での立ち上げではなく、負荷を低減させるなどによって、発現バグの可能性を低下させることが考えられる。また、システムのバージョンアップなどの変更を加えている場合には、これを元に戻して、システム立ち上げを行う必要もある。ただし、どの手段も確実とはいえない。一方、ヒューマンエラーについては、CMDB 等によってシステム構成変更を厳密に管理し、障害を引き起こした操作を特定できるようにして、障害原因を早期に割り出すことが考えられる。また、運用手順の形式記述に基づいて、規定されていない運用操作を監視することや、運用手順規定そのものの正常性を事前に論理的に検証することも必要であるが、これらの対策も、原因究明の複雑さや 2 次的なヒューマンエラーの混入可能性が残り、いずれも確実な方法とは言い切れない。これら 2 つの要因に共通することは、たとえ、従来の高信頼対策の基本である冗長構成をとっても、障害を回避することはできない点である。

そこで、安定性を向上させるためには、冗長構成を含む事前防止策だけではなく、むしろ、障害か

らの迅速な復旧や、障害箇所の特定診断を的確迅速に行うことが必要となる。本論文では、この考えから、特に、ネットワークの最も土台となるデータリンク制御を行うレイヤ 2 機能に着目し、レイヤ 2 機能によるネットワークを構成する最も典型的なイーサネットを取り上げて、その障害に対する安定品質向上技術を検討し、新しい診断技術を提案する。

イーサネットは、ローカルエリアネットワーク（LAN）で最も一般的な技術であるばかりでなく、広域ネットワークにも急速に適用され始めている。2000 年頃におけるイーサネットの適用範囲は、ビルやフロア内の高々数 100 台の端末からなるネットワークであり、あるセグメントから他のネットワークへの接続はルータ、あるいは レイヤ3スイッチを介して行われていた。しかし、近年では、VLANによってブロードキャストセグメントと物理セグメントを分離できるようになり、イーサネットを広域ネットワークとして活用する事例が増えつつある。具体的には、複数のフロアにまたがった LAN の構築や、建物を越えたイントラネットへの適用、さらに、キャリアによる広域イーサネットサービスとしての利用などが挙げられる[58]。

しかし、本来のイーサネットは少数のセグメントから成るネットワークを対象としており、OSI のプロトコル階層におけるレイヤ 2 機能、すなわち、データリンク制御が主たる機能である。各種ルーチングプロトコルや、障害等に対応する管理プロトコルは、レイヤ 3 で提供され、レイヤ 2 の管理プロトコルとしては、ループ経路を遮断するための STP (Spanning Tree Protocol) 群[59-61]のみが規定されている。アドレス解決には LAN セグメントの接続形態がバス構造であった頃に設計されたブロードキャスト型の ARP (Address Resolution Protocol) が用いられている。

そのため、レイヤ 2 スイッチを多段に接続したイーサネットでは、何らかの障害、配線ミス等のトラブルが発生した場合、ブロードキャストによる影響がネットワーク全域に及ぶ。また、管理機能の不足から、トラブル位置の検出と修復に多くの手間がかかる。最も重要な大規模ネットワーク障害と認識されているレイヤ 2 ネットワークのループ障害(以降、単にループ障害と呼ぶ)[63-65]は、現在でもイーサネットの大きな弱点であり、一旦、この障害が発生すると、ARP などのブロードキャストパケットがループ経路を巡回し続けるためにネットワークは高負荷になり、通信不能に陥る。この障害を回避する従来技術としては前述の STP が挙げられる。しかし、全てのスイッチで STP を動作させねば効果が得られないことなど、実システムへの適用性に課題があり、完全な防止手段はないのが現状である。

イーサネットの構成要素であるレイヤ 2 スイッチは、レイヤ 3 スイッチに比較して構成がシンプルであり、

パケットのデータグラム転送という本質的な機能に特化したネットワークノードである。イーサネットを更なる大規模ネットワークでも利用するためには、その特長を失うことなく、より安定で信頼度を高いものにする管理体系の構築が、重要かつ緊急の課題であると言える。

現実的には、全てのループ障害を事前に防止することは不可能である。そこで、本論文では、事前防止型のアプローチではなく、原因箇所を迅速に探索発見する診断型のアプローチを提案する。提案方式は、以下の 2 ステッププロセスを特徴としている。まず、診断端末より送信するロングパケットによって、ノード負荷の低減を行い、また、架空 MAC アドレスを用いたブロードキャスト ARP 要求を発生させることで、誤った MAC アドレス学習を訂正させ、本来の通信機能を回復させる。次に、誤学習の成否と大量にパケットを受信しているポート数からループ発生箇所を特定する。

以下、第 4.2 節では、ループ障害によって通信が途絶する現象を通信帯域と通信経路形成の点から明らかにし、この現象を回避するための従来技術とその問題点を述べる。次に、第 4.3 節で前述した特徴を有するループ障害の原因箇所特定方式を提案し、第 4.4 節で試作システムを用いた実験によって提案方式の有効性を明らかにする。最後に第 4.5 節で今後の検討課題とその見通しを示す。

4.2. ループ現象の解析と従来技術の問題点

4.2.1. ループ現象の解析

複数のレイヤ 2 スイッチ(以下、SW と呼ぶ)で構成された一般的なイーサネットの例を図 4-3 に示す。このとき、ひとつのスイッチの機器障害によって配下の全ての通信が途絶することを避けるために、図 4-3 の点線に示す冗長リンクを設け、例えば SW-A の障害時には、この冗長リンクを利用することで、通信を継続できるような構成にすることが一般的である。ただし、この冗長リンクによってループ経路が生じないように、通常動作時は、スパニング・ツリー・プロトコル(STP)によって、冗長リンクのポートを論理的に通信できない状態に設定している。ループが構成される原因としては、STP機能に障害が発生し、通常動作時に冗長リンクでのパケット転送が行われてしまう場合や、STP による対処を行っていない SW の 2 つのポートを直接折り返し接続するケーブル誤接続などがある。その挙動は、原因によら

ず、また、複数のスイッチに渡って発生する場合も、単体のスイッチで発生する場合も同じである。以下、簡単のために、スイッチ単体でのループ障害発生を例にとって、その挙動を示す。

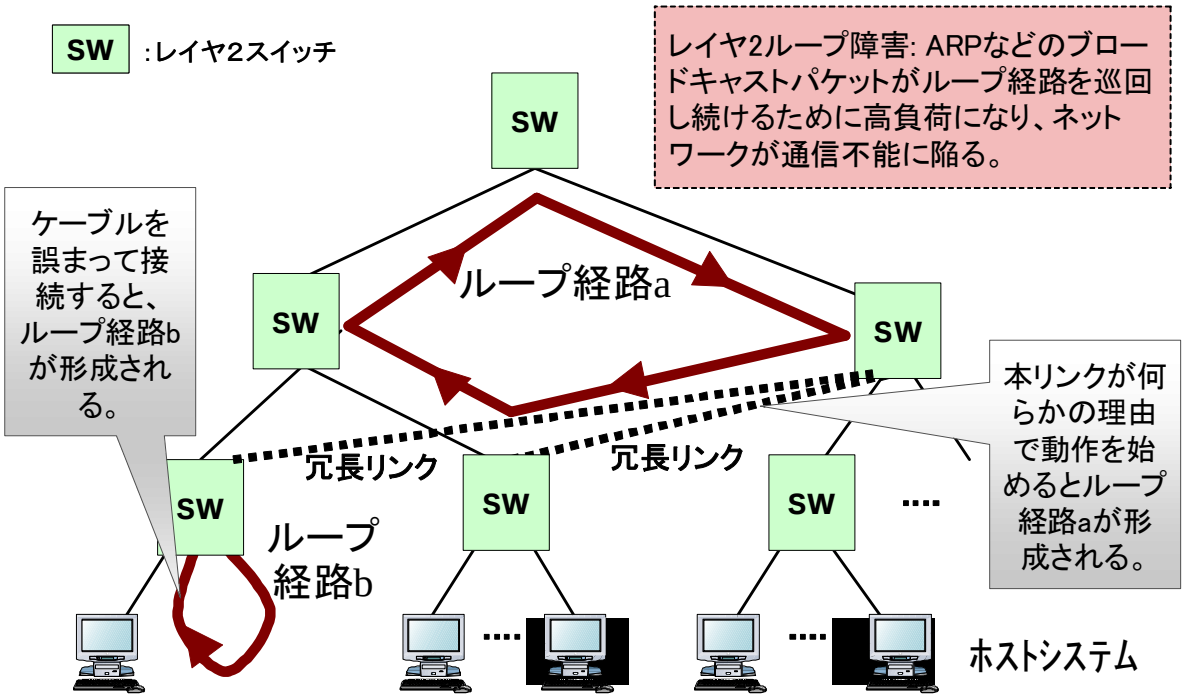


図 4-3 ループ障害の発生例

(1) ブロードキャストストームによるノード負荷増大

ループが構成されたネットワークに送信された ARP, NetBIOS 等のブロードキャストパケットは、サブネット内全域に転送され、ループを構成するスイッチ（以下では、L-SW と呼ぶ）では、同じパケットが巡回を続け、ブロードキャストパケットとして永久に転送され続ける。レイヤ 3 では、TTL(Time To Live)というホップ数カウンタがあり、レイヤ 3 中継装置でルーティング処理を行う毎にこのカウンタが減算され、0 になるとパケット廃棄される機構があるが、レイヤ 2 では同様の機構がないため、ブロードキャストストームと呼ばれる大量のブロードキャストトラヒックが発生する。この影響で、帯域が大幅に圧迫され、また、同一サブネット内のコンピュータシステム（以下では、サーバやクライアントシステムなどを総称して端末と呼ぶ）およびスイッチは高負荷となり、稼働停止や、処理能力の著しい低下を引き起こす。

(2) MAC アドレスの誤学習による通信途絶

同一サブネット内の L-SW が、ブロードキャストパケットを大量に送信している送信端末であるかのように見える現象が起きる。例えば、図 4-4 に示す例では、発信端末(X)からのブロードキャストパケットは、L-SW でループし、L-SW からさらに他の SW に発信される。SW では、パケットを受信したポートの方向にパケットの発信端末が存在するとして MAC アドレスを学習するため、各 SW では L-SW に向かうポートに端末(X)があると学習する。すなわち、ブロードキャストパケットの発信端末と L-SW の間にある全てのスイッチで、MAC アドレス誤学習が起きる。端末(X)が L-SW に存在するかのような MAC アドレス学習が行われる。その結果、ブロードキャストパケットの発信端末に宛てた通信は、全て、L-SW に向かい、発信端末には届かなくなる。

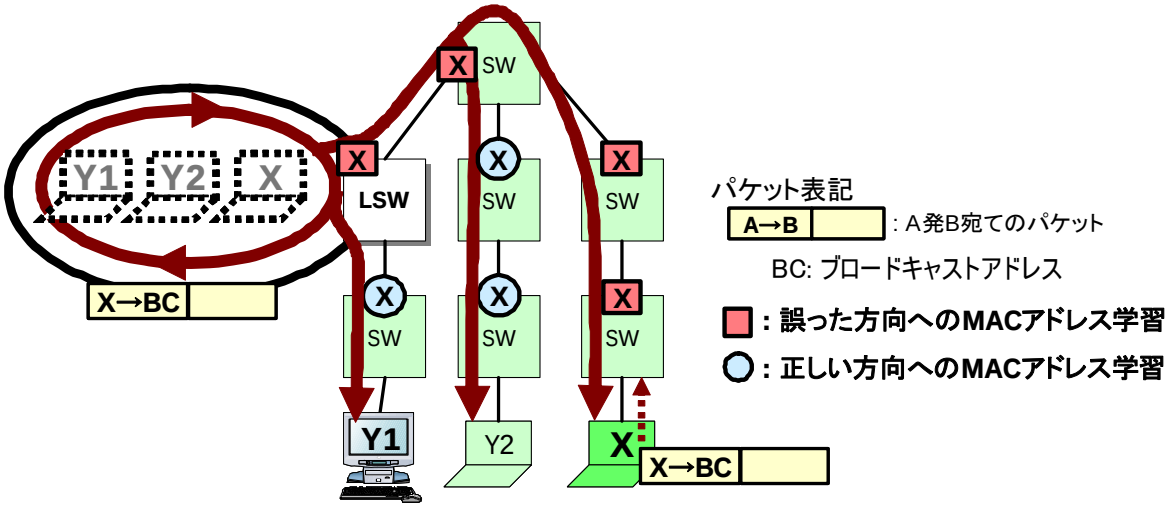


図 4-4 パケットループによる MAC アドレスの誤学習

このように、ループ経路の形成は、ブロードキャストストームによる負荷増大と、MAC アドレスの誤学習という 2 点の問題を引き起し、正常な通信ができなくなるという重大な障害の原因となる。

4.2.2. 従来技術とその問題点

従来技術としては、ループの発生を防止する技術と、発生したループの影響を軽減する技術がある[62-64]。

防止技術としては、前述の、STP が最も良く利用されている。本プロトコルでは、ループを構成する冗長リンクのポートからブロッキングポートを選定し、そのポートの通信機能を停止させる。

- CPU 障害などの場合、パケット転送は正常だが、STP が動作しないような装置故障が発生する。この場合ループ転送を防止できない
- 冗長構成を形成する装置の中に、STP の制御パケットを中継しないスイッチが１台でもあると機能しない。

一方、ループの影響を軽減する技術としては、ループパケットを個別に検知してフィルタリングする技術がある。本技術では、通過パケットをリアルタイムに全数検査し、同一内容のパケットが一定閾値以上通過した際に、そのパケットを廃棄する。あるいは、特殊なループ検出用パケットを送信し、そのパケットが戻ってきたことでループ障害を検出し、該当するネットワークを閉塞する技術[65]もある。しかし、これらの手法にも以下の問題点がある。

- システム構成に依存するが、障害箇所を特定するためには、多数の本技術搭載スイッチを配備する必要があり、経済的でない。
- 通過パケットをリアルタイムに検査する必要があり、高い処理能力を得るために専用機能[66]を付加する必要がある。

また、レイヤ２にも、レイヤ３と同様に、パケットの生存時間を規定する技術も考えられている[67]。2004 年の IETF で議論が開始されたが、以下の問題点がある。

- 現システムを構成するスイッチに新機能を導入する必要があり、既存網への適用は現実的でない。
- ブロードキャストの本質的な役割を維持する必要があることから、単なる転送回数規制として規定するだけで十分かなど、標準技術とするためには検討すべき点が多い。また、MAC アドレスの誤学習を回避することはできないため、この技術だけで通信の疎通性を確保することはできない。

このように、レイヤ 2 ネットワーク発展に伴って、対応技術が開発されつつあるが、完全な対策とはなっておらず、経済的で確実にループ障害に対応できる方式の開発が急務となっている。

4.3. ループ障害原因のリモート診断方式の提案

4.3.1. 提案方式のアプローチと特長

ネットワーク利用形態の中には、一瞬も停止させられないミッションクリティカルなシステムもあるが、数分程度の停止を許容する代わりに経済的で簡易な管理が期待されるものも多い。このような場合には、ループ障害を予防する技術までは要求されず、発生した障害を迅速に復旧させる技術を経済的に実現することが重要となる。そのためには、ループ障害の原因箇所を正確に特定する技術が必要である。例えば、ケーブル誤接続による障害の場合では、早期に誤接続箇所を特定できれば、原因である誤接続ケーブルを抜き取る作業そのものは非常に簡単で、直ちに障害を解消することができる。停止時間も長くならず、高価な付加機能を有するレイヤ2スイッチを導入する必要もないため、経済的である。しかし、従来は、ループ障害が発生するとネットワークの正常な機能は全て失われるため、ネットワークを利用したリモート診断は不可能と考えられていた。

本節では、従来の事前防止型のアプローチではなく、その原因箇所をネットワークに接続された端末から迅速に探索発見する診断型のアプローチをとる方式を提案する。図 4-5 に手順を示すように、まず、過負荷およびアドレス誤学習によって通信機能を失っているネットワークの高負荷の緩和とアドレス誤学習の訂正を行い、その機能を回復する。次に、通信機能が回復したネットワークを用いて、診断用の端末からループ箇所を診断する。このとき、ループトラヒック流をたどって L-SW を特定する方法と、誤学習の状況を分析して L-SW を特定する方法を組み合わせている。

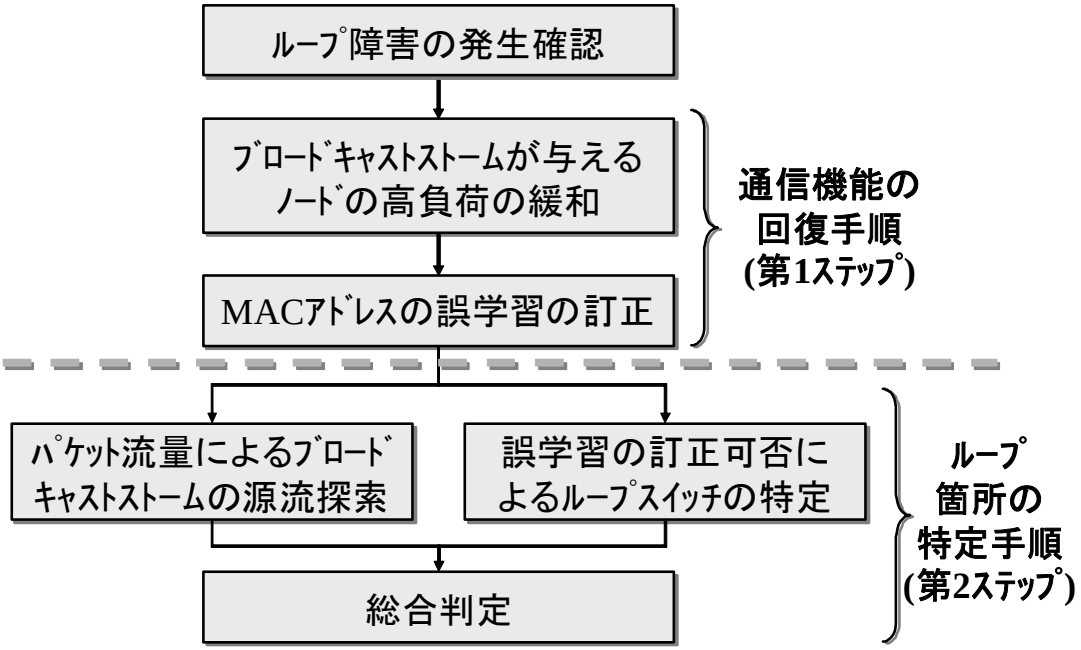


図 4-5 提案方式のリモート障害診断手順

4.3.2. 通信機能の回復手順 (第 1 ステップ)

リモート診断の第 1 ステップとなる通信機能の回復手法を以下に示す。

(1) 障害の検出

まず、障害の疑いのあるレイヤ 2 ネットワークに探索用の端末(以下、探索端末)を接続する。具体的には、以下に述べる診断手順を実行可能なパーソナルコンピュータなどを用いる。探索端末はパケットキャプチャにより、同一内容のブロードキャスト/マルチキャストパケットを一定数以上受信したことで、ループ障害発生を検出する。パケット全数検査を行う必要はないため、探索端末に高い処理能力は求められない。

(2) ノード負荷の低減

一般に、平均パケット長が短くなるほど、単位時間あたりのノード到着パケット数が増大し、ホストシステムの処理負荷は大きくなる。ブロードキャストストームの多数を占めるのは、ブロードキャスト通信を行う ARP 要求パケットであり、このパケット長は通常 64 バイトと短い。そこで、ホストシステムやスイッチの負荷を低く抑えるために、探索端末から、パケット長の長いブロードキャストパケットをネットワークに送出し、ループパケットをロングパケットに置換する。一般に、ロングパケットのスイッチ内バッファの滞留時間は長いので、パケット廃棄される確率は、ARP要求等のショートパケットの方が高くなる。このた

め、パケット長の長いブロードキャストパケットを連続送出することで、ショートパケットが駆逐される。

(3) MAC アドレス誤学習の訂正

第 4.2 節で述べたように、L2 ループ発生時にはブロードキャストストームにより各スイッチで MAC アドレス誤学習が起きている。この状態では、探索端末からパケットを送出してもその応答は L-SW に向かうため、正しく通信できない。診断のためには、探索端末(X)と診断対象(T)間の双方向通信を正常化させる必要がある。そこで、探索端末から診断端末へ向かう送信経路の誤学習訂正の後に、逆方向である探索端末への受信経路の誤学習訂正を行う 2 つの手順で訂正を行う。

以下に図 4-6 (a),(b)を用いて、探索端末の送信経路と受信経路のそれぞれの訂正手順例を示す。なお、誤学習訂正過程では、誤学習しても影響のない実在しない MAC アドレスを設定したブロードキャスト ARP 要求を発生させている。

- 手順 1: 探索端末の送信経路の誤学習訂正

  探索端末(X)から、架空アドレス(P)発で診断対象(T)(同図では端末(A))を要求する ARP 要求を大量に送信し、ループパケットをこれで置換する。

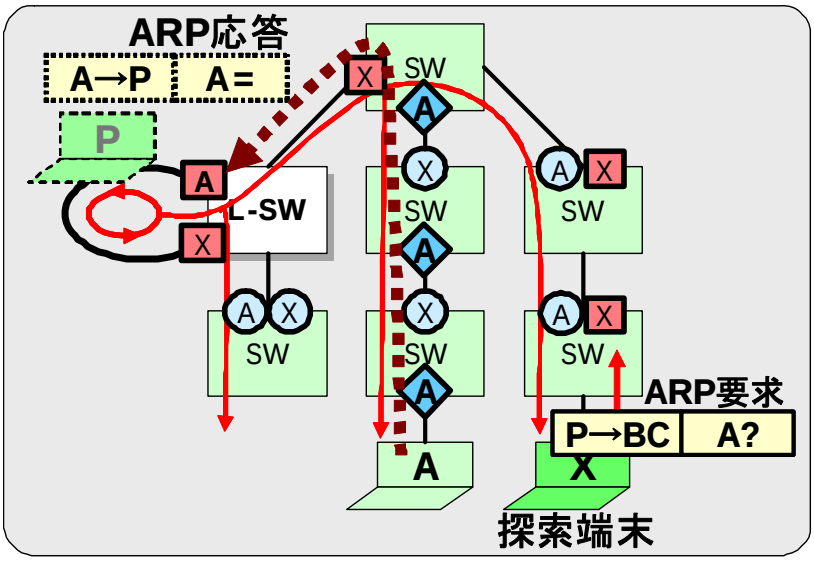
  次いで、L-SW からフラッディングされる本 ARP 要求に応える診断対象(T)からの ARP 応答によって、同図の破線経路上 SW における探索対象(T)の誤学習が訂正される。なお、残りのスイッチの学習は、元々、誤っていないので、修正の必要はない。

- 手順 2: 探索端末への受信経路の誤学習訂正

  探索端末(X)から、架空アドレス(P)発で探索端末自身(X)を要求する ARP 要求を送信する。

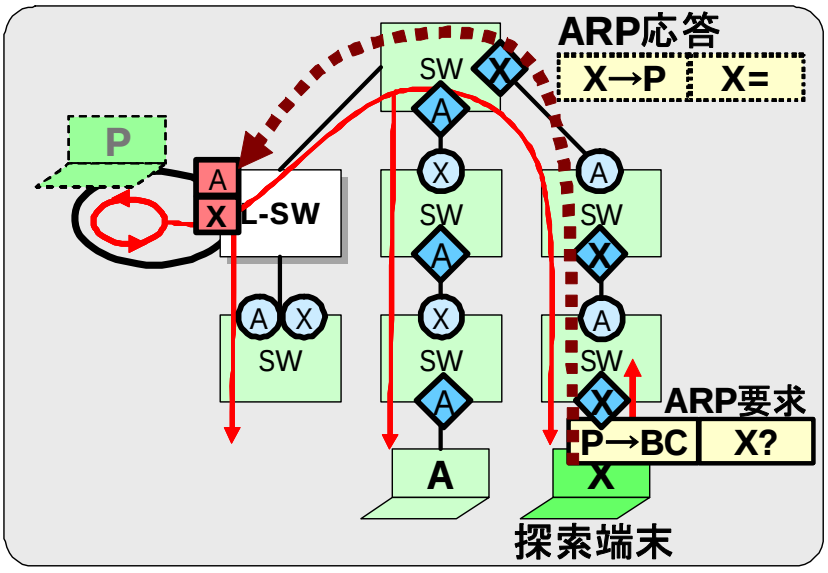
  次いで、L-SW からフラッディングされる本 ARP 要求に応える探索端末(X)からの ARP 応答によって、同図の破線経路上SWにおける探索端末(X)の誤学習が訂正される。なお、残りのスイッチの学習は、元々、誤っていないので、修正の必要はない。

(a)手順1: 送信経路のアドレス誤学習訂正



:誤ったMACアドレス学習
:ループ発生時にも正常なMACアドレス学習
:修正されたMACアドレス学習

(b)手順2: 受信経路のアドレス誤学習訂正



:誤ったMACアドレス学習
:ループ発生時にも正常なMACアドレス学習
:修正されたMACアドレス学習

パケット表記

A→B	C?

: A発B宛てのCの MACアドレスを 要求する ARP要求パケット

A→B	C=

: A発B宛てのCの MACアドレスを 応答する ARP応答パケット

P: 該当端末のない架空アドレス
BC: ブロードキャストアドレス

図 4-6 MAC アドレスの誤学習の訂正

本手順の後、探索端末(X)と診断対象(T)間の通信が回復し、MIB 取得や ping による疎通確認等が可能となる。本手順は、通信を回復させたい診断端末毎に行う。

なお、以降の原因箇所の特定手順の前に診断対象(T)のMACアドレスを取得しておく必要がある。MAC アドレスが予め分からない場合には、MAC アドレス誤学習訂正手順に先立って、探索端末(X)から診断対象(T)のアドレスを解決する通常のブロードキャストARP要求を行っておく。すると、TからXへのユニキャストのARP応答パケットがループ箇所で周回するようになる。この応答パケットは、誤学習が訂正されると同時に、ループから取り出され、X はそのユニキャスト ARP 応答を受信することができる。この手順で予め必要なのは診断対象(T)のIPアドレスだけであり、通信機能の回復手順の実行中にT の MAC アドレスを取得することができる。

4.3.3. ループ箇所の特定手順 (第 2 ステップ)

通信機能が回復したネットワークを用いて、ループの原因箇所を特定する提案手法を以下に示す。原因箇所がブロードキャストストームの発生源となっていることから、その発生方向から問題箇所を絞り込むトラヒック流量検査方式と、L-SW だけは誤学習を訂正できないことを逆に活用した誤学習訂正の確認結果によって、ループ箇所を絞り込む疎通確認方式を併用することを特長としている。

(1) トラヒック流量検査方式

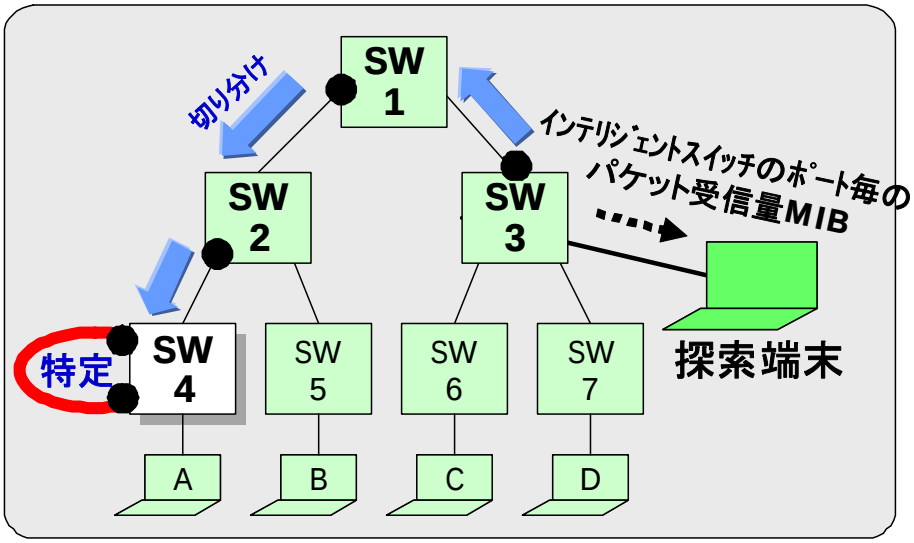
L-SW がトラヒックの大量発生源となることから、L-SW 以外のスイッチでは、L-SW がある方向の 1 ポートからパケットを大量受信するが、L-SW では、ループを構成する 2 ポートから大量受信することとなる。この特性は、図 4-7(a)の単一スイッチでループが構成される場合だけでなく、図 4-7(b)の複数スイッチでループが構成される場合においても同様である。そこで、各スイッチの各ポートのパケット受信量(パケット数)を取得し、以下のように判定する。なお、ループ障害では、ループ障害に起因する受信パケットは他のパケットと比べて圧倒的に多くなるので、判定は容易である。

- パケット大量受信ポートが 1 つ: 本スイッチは L-SW でなく、そのポート方向に L-SW が存在する。

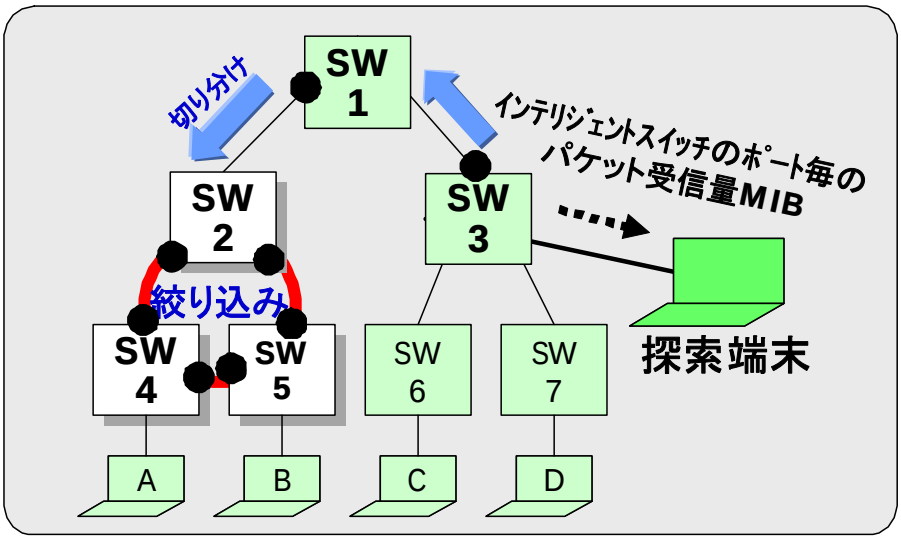
- パケット大量受信ポートが 2 つ:　本スイッチが L-SW であり、そのポート対でループしている。

図 4-7(a)の単一スイッチループの場合は、スイッチ SW4 から大量受信ポートが 2 つ抽出されることになり、このスイッチが L-SW であり、ループポートも特定できる。図 4-7(b)の複数スイッチループの場合は、スイッチ SW2，SW4 の両方で大量受信ポートがそれぞれ 2 つ抽出されることになり、SW5 を含めた 3 台のスイッチでループしていると判断できる。

(a)単一スイッチでループしている場合



(b)複数スイッチでループしている場合



●: パケットの大量受信ポート

図 4-7　ポート通過量によるループ箇所の特定

なお、本方式は、各スイッチのポート毎のパケット受信量の取得が前提であるが、図 4-7(b)の例で、もし、SW5 のパケット受信量が取得できないとしても、SW5 を含むループが形成されていることはトポロジから判断可能である。SW5 だけでなく、より多くのスイッチが間に入っていて、枝分かれしているトポロジの場合には、ループ構成を特定はできないが、いくつかのループ構成の可能性を挙げることはできる。このように、1 台でもポート毎のパケット受信量が取得できるスイッチがあれば、その大量受信ポートを遡ることで、L-SW がある方向を、絞り込むことができる。本方式は、以下の特長を持つ。

- スイッチのポート単位にループ箇所を特定/切り分けが可能
- スイッチ内に、多くの場合具備されている一般的なポート毎のパケット受信数カウンタを利用しているため、経済的な実現が可能である。

(2) 疎通性確認方式

前節の MAC アドレス誤学習是正処理を行った後も、探索対象の接続関係によっては通信を回復できない端末が存在する。すなわち、誤学習訂正の手順では、L-SW を周回し続けるパケットによって、再度、誤学習されてしまうために、L-SW は誤学習されたままになる。その結果、探索端末から見て、L-SW より先に位置する端末との間の通信は回復できない。

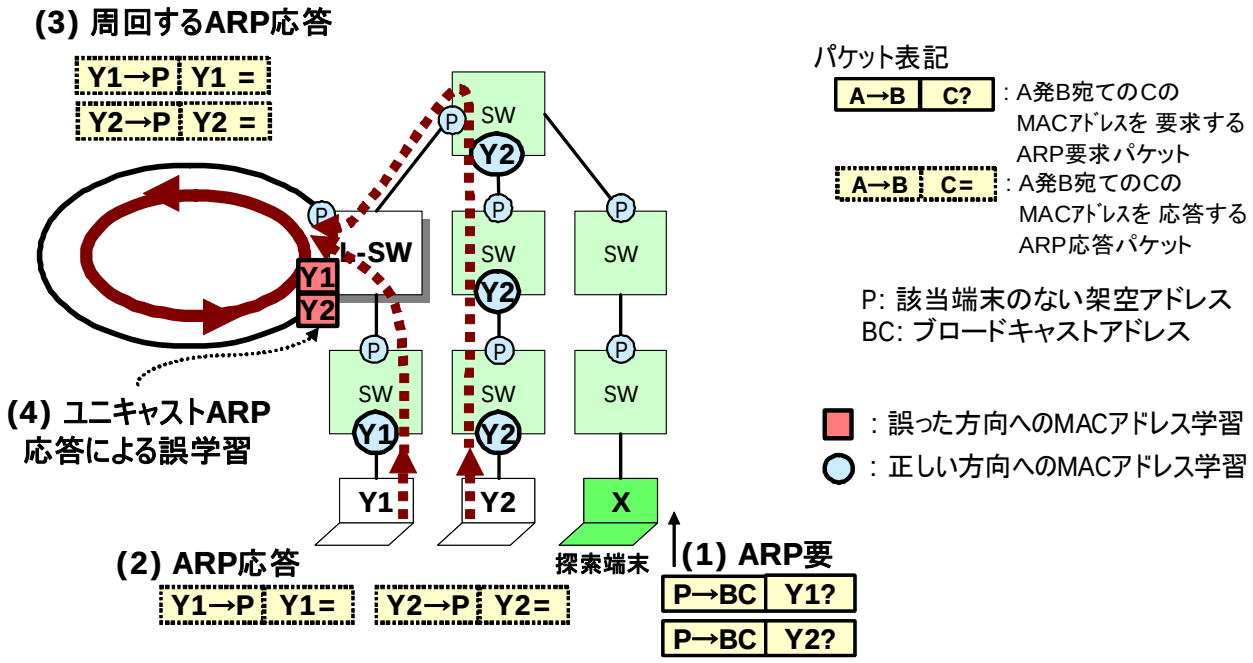


図 4-8 MAC アドレス誤学習訂正時のﾕﾆｷｬｽﾄﾊﾟｹｯﾄの振舞い

図 4-8 は、MAC アドレス誤学習訂正処理における ARP ユニキャスト応答パケットの振る舞いを示したものである。探索端末(X)は、架空アドレス P 発で Y1 および Y2 の MAC アドレスを解決する ARP 要求を送信すると(同図(1))、ARP 要求はループし L-SW からフラッディングされ、端末(Y1),(Y2)は ARP 応答(同図(2))を要求元である P 宛にユニキャストで返信する。ARP 要求によってアドレス P は全スイッチで L-SW の方向に学習されているため、これらの ARP 応答パケットは L-SW に引き込まれるように転送され、各スイッチの Y1, Y2 に対する MAC アドレス誤学習が訂正される。しかし、L-SW において、このユニキャスト ARP 応答は周回し続けるため(同図(3))、L-SW でのみ再び誤学習状態となる(同図(4))。つまり、L-SW での誤学習だけは訂正されない。

この結果、探索端末(X)から見て L-SW を経由しない位置に接続されている端末(Y2)への通信は回復するが、探索端末(X)から見て L-SW を経由する位置に接続されている端末(Y1)への通信は回復しないことになる。この特性は、図 4-9(a)の単一スイッチでループが構成される場合だけでなく、図 4-9(b)の複数スイッチでループが構成される場合においても同様である。

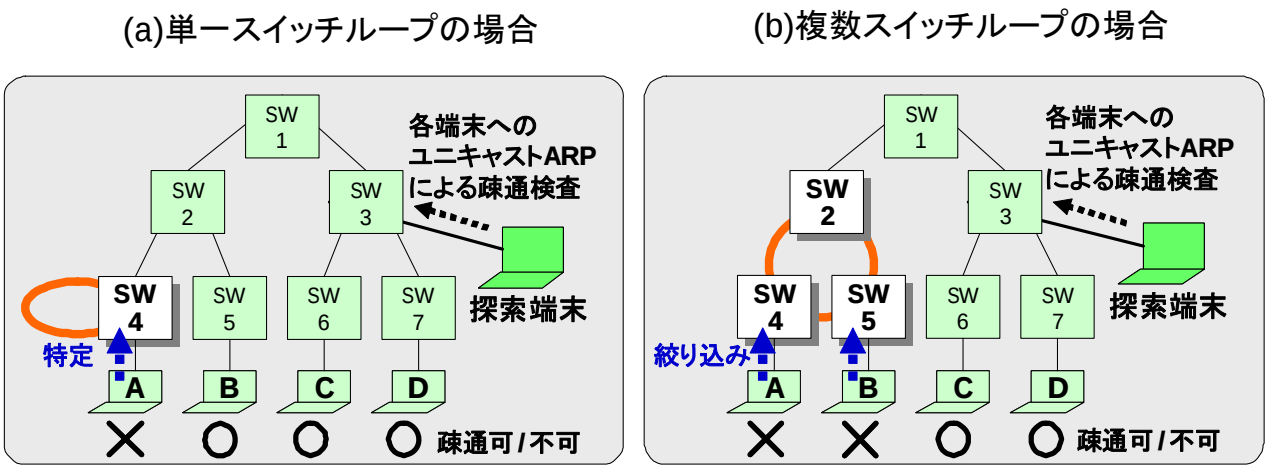


図 4-9 疎通検査によるループ箇所の特定

この現象を活用すると、探索端末から、各端末に対して、ping 等の一般的な手段により疎通確認を行うことで、以下のように判定できる。

- 疎通可: 探索端末と探索対象との経路上に L-SW はない。

- 疎通不可： 探索端末と探索対象との経路上に L-SW がある。

図 4-9(a)の単一スイッチループの場合は、端末(A)のみ疎通不可となることから、SW4 が L-SW であると特定できる。図 4-9(b)の複数 SW ループの場合、端末(A),(B)が疎通不可となることから、その共通する経路上の SW である SW2 が L-SW であり、SW2 の単一スイッチループ、あるいは、SW2と、SW4 または SW5 を含む複数スイッチループのいずれかであると絞り込むことができる。本手法の特長を以下にまとめる。

- ループが発生したサブネットに、端末が接続されているだけで良いので汎用性が高い。

(3) 両方式の組み合わせ

トラヒック流量検査方式では、ノードから流量方向を検査するのに対し、疎通性確認方式では、端末までのルート、つまり、方向からノードを絞り込む診断を行っている。ノードからルート方向の探索をするトラヒック流量方式に対して、ルート方向からノードを探索する疎通性確認方式との位置づけである。そのため、どちらか 1 つの方式では L-SW、および、ループポートを完全には特定できない場合でも、両方式を併用することで、被疑範囲を狭められる場合がある。例えば、図 4-9(b)の場合、SW2 単独あるいは、3 スイッチでのループ構成の可能性を残していたが、トラヒック流量検査方式を併用して、SW2 と SW4 でそれぞれ 2 つの大量受信ポートを検出していれば、複数スイッチループであることが特定できる。

表 4-1 に、2 種の提案方式の特質や前提条件をまとめて示す。前提条件としては、トラヒック流量方式では、検査対象のスイッチのポート毎のパケット受信量(パケット数)が取得可能なことである。一般的には、SNMP に対応したインテリジェントスイッチであれば、本条件を満たすことが多い。なお、トポロジ依存ではあるが、前述のように全てのスイッチが本条件を満たしていなくても、ループ箇所としていくつかの候補を挙げることは可能である。また、疎通性確認方式では、ping 等が利用可能なことが条件となるが、これも特殊な条件ではない。ping の他には、ユニキャスト ARP も同じ用途に適用できるので、ネットワークの構成条件に合わせて選択しうる。なお、表中には、参考として、STP の条件も併せて示した。

表 4-1 診断の前提条件と方式特徴

方式 / 項目	提案方式 (トラヒック流量検査)	提案方式 (疎通性確認)	STP
狙い	ループ発生箇所の特定 (原因箇所診断)		ループ発生の防止
方式の概要	スイッチポートから、ブロードキャストストームの方向を検知して診断	検査対象端末と探索端末間のルート上のループ構成スイッチの存在を検知して診断	ループを形成するひとつのポートを論理的に通信不可に設定
対象とするネットワーク構成の条件	各スイッチのポート毎のパケット受信量(パケット数)の取得	制約なし	インテリジェントスイッチが必要
使用するプロトコル	SNMP, Telnet	Ping, ARP	STP
探索のための条件/情報	SNMPのコミュニティ名、トポロジ、スイッチのIPアドレス (ただし、探索中にアドレス情報は取得可能)	トポロジ、端末のMACアドレス (ただし、探索中にアドレスは取得可能)	

4.4. 提案方式の評価

4.4.1. 試作システムと診断結果

提案方式の有効性を検証するため、試作システムを開発した。試作システムは、図 4-10 に示すように、フリーソフトであるキャプチャエンジン WinPcap とソケットAPIを用いる ARP や SNMP 送受信を行うプロービングモジュール、および、リモート探索・診断ロジックを実行する探索モジュールから構成され、WindowsXP あるいは Windows2000 の.NET Framework 上で動作する。診断は、本システムを障害の発生しているサブネットの任意のスイッチに接続し、GUI を通じて実行する。診断結果として、トラヒック流量検査方式では、大量パケット受信している同一スイッチのポート対あるいは L-SW が存在する方向のポート番号を表示し、疎通性確認方式では、探索対象端末までの経路に L-SW が存在するか否かを表示する。

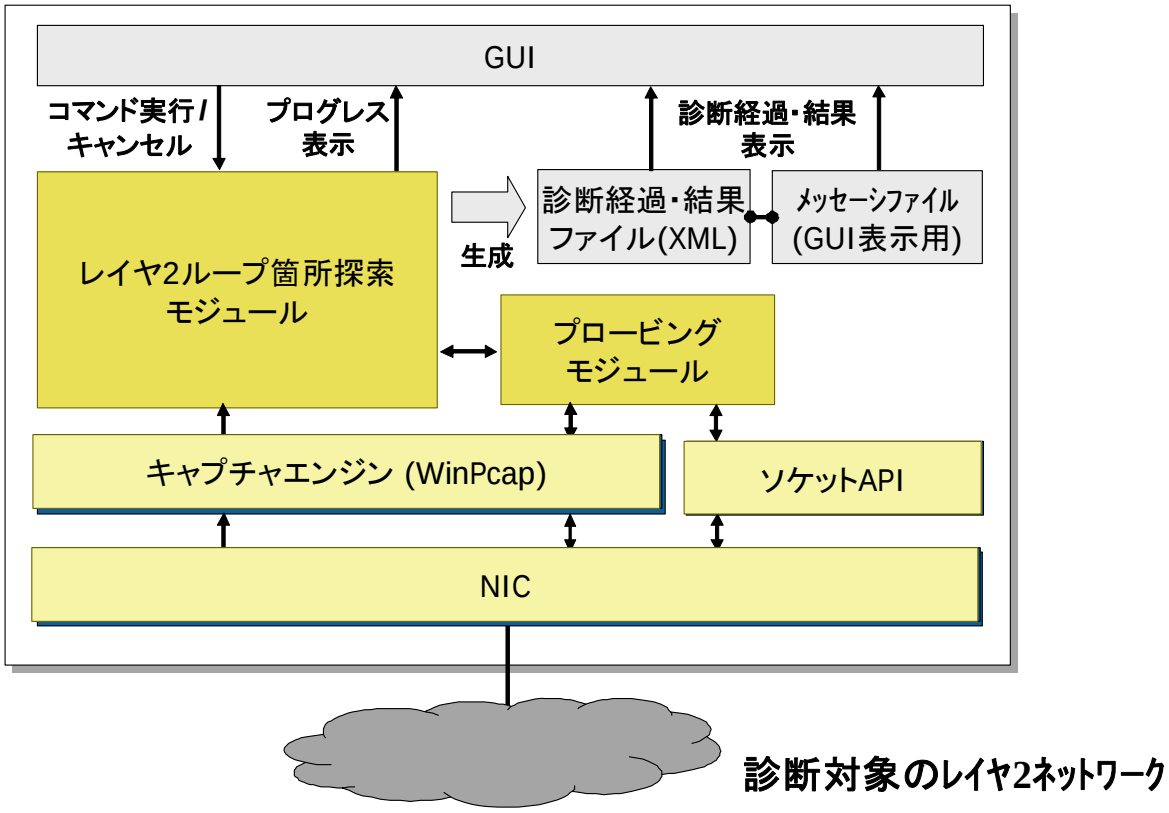
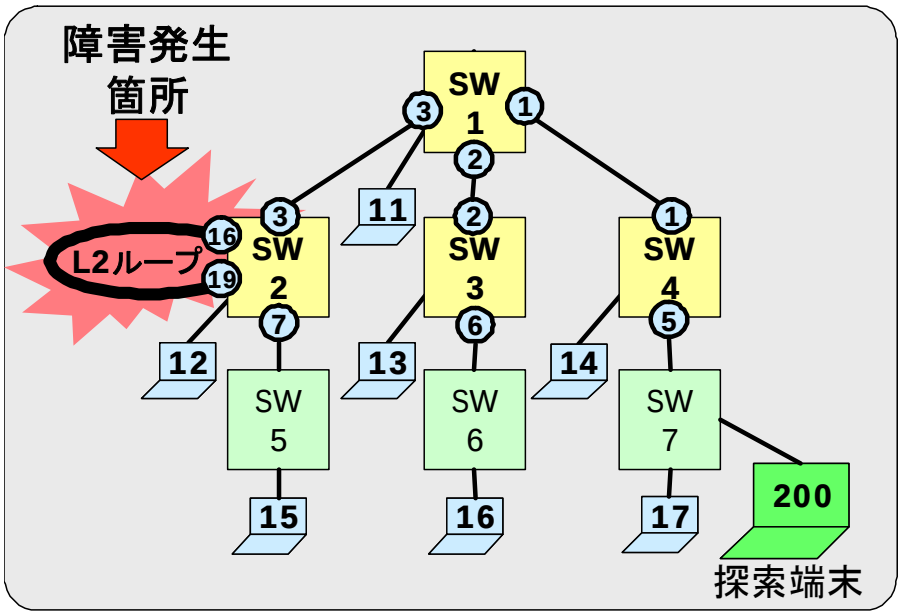


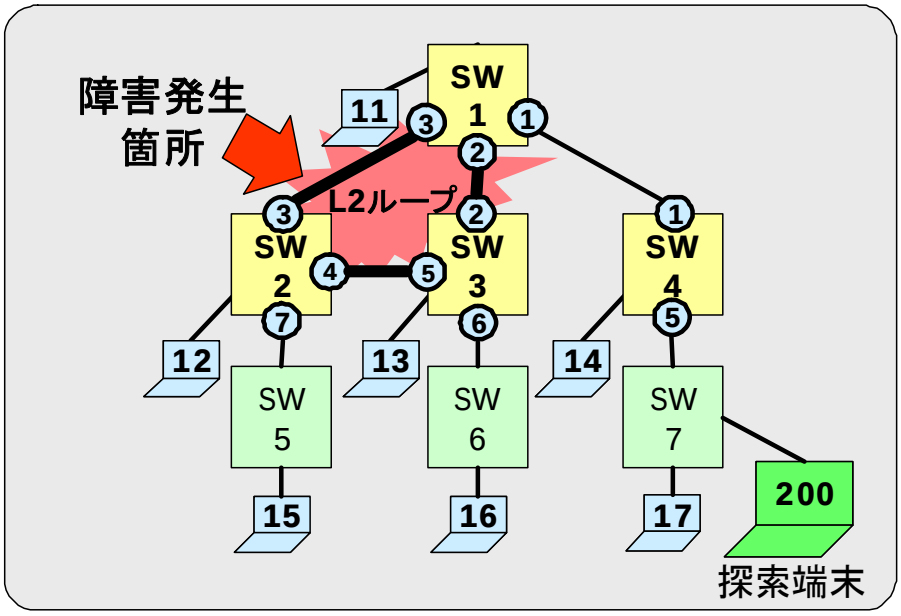
図 4-10 提案方式の試作システム

図 4-11 に示す 2 つの実験環境でループ障害を発生させ、診断結果の評価を行った。実験環境 1 は単一スイッチ(SW2)による折り返しループの場合であり、実験環境 2 は複数スイッチ(SW1,SW2,SW3)でのループの場合である。トラヒック流量検査方式では SW1～4 の 4SW を探索対象に、疎通性確認方式では端末 11～17 の 7 端末を探索対象とした場合、期待される診断結果は以下のようになる。

実験環境1: 単一スイッチループの場合



実験環境2: 複数スイッチループの場合



SW1,2: Cisco Catalyst2950
SW3: Extreme Summit1i
SW4: Fujitsu SH4124T

SW5: Buffalo LSW10/100-8H
SW6: Planex FX-08M
SW7: Fujitsu SH1537

図 4-11 実験ネットワークの構成

[実験環境 1 の場合]

- トラヒック流量検査方式

  SW2 の ポート 16 と 19 の対でループしている。

  SW1 の ポート 3 の方向に L-SW が存在する。

  SW3 の ポート 2 の方向に L-SW が存在する。

  SW4 の ポート 1 の方向に L-SW が存在する。

- 疎通性確認方式

  端末 12,15 との経路上に L-SW が存在する。

  端末 11,13,14,16,17 との経路上に L-SW は存在しない。

[実験環境 2 の場合]

- トラヒック流量検査方式

  SW1 の ポート 2 と 3 の対でループしている。

  SW2 の ポート 3 と 4 の対でループしている。

  SW3 の ポート 2 と 5 の対でループしている。

  SW4 の ポート 1 の方向に L-SW が存在する。

- 疎通性確認方式

  端末 11,12,13,15,16 との経路上に L-SW が存在する。

  端末 14,17 との経路上に L-SW は存在しない。

パケット受信量取得や疎通確認中にも、探索対象の端末やスイッチからブロードキャストパケットが送信されるなどにより、通信状態は動的に変化するため、期待される結果を得られない場合もある。そこで、実験環境 1,2 において、各方式ともに 300 回の試行を行い、診断結果を評価した。その結果を表 4-2 に示す。ループを特定または絞り込める診断成功の割合は、実験環境 1,2 のいずれの場合も、トラヒック流量検査方式では 90%以上、疎通性確認方式でも 78%以上であった。また、いずれの方式でも診断誤りは認められなかった。このことから、提案方式が有効であると言える。

表 4-2 診断結果

実験環境1: 単一スイッチでループの場合

方式	診断成功				診断不能	診断誤り
	ポート特定	ポート絞り込み	スイッチ特定	スイッチ絞り込み		
トラヒック流量検査方式	250 (83%)	27 (9%)	0 (0%)	21 (7%)	2 (1%)	0 (0%)
疎通性確認方式	-	-	187 (62%)	59 (20%)	54 (18%)	0 (0%)

実験環境2: 複数スイッチでループの場合

方式	診断成功				診断不能	診断誤り
	ポート特定	ポート絞り込み	スイッチ特定	スイッチ絞り込み		
トラヒック流量検査方式	101 (34%)	164 (55%)	0 (0%)	7 (2%)	28 (9%)	0 (0%)
疎通性確認方式	-	-	163 (54%)	73 (24%)	64 (21%)	0 (0%)

ポート特定: LSWのループポートを全て特定できた場合
ポート絞り込み: LSWのループポートの一部(片側)まで特定できた場合
スイッチ特定: LSW(の一部)を特定できた場合
スイッチ絞り込み: LSWを複数スイッチのいずれかまで絞り込めた場合
診断不能: 診断失敗、または、結果に矛盾があった場合
診断誤り: 誤ったループポートやスイッチが特定された場合

なお、ポートやスイッチの特定まで至らず、絞り込みとなる場合として、トラヒック流量検査方式では大量受信ポート判定で期待される結果の一部しか取得できない、あるいは、MIB 取得自体が失敗することがあった。また、疎通性確認方式では、探索対象のブロードキャストパケットが再度ループし、その探索対象に対する診断ができない場合があった。例えば、実験環境 1 において、トラヒック流量検査方式で SW2 からポート 16 の片側ループポートしか特定できない場合、あるいは、疎通性確認方式で端末 12 に対する診断ができなかった場合(この場合、SW2 と SW5 が被疑スイッチと診断される)などがそれに当たる。また、診断不能は、トラヒック流量検査方式で抽出すべきポート以外のポート

が抽出される、疎通性確認方式で疎通可能となるべき端末に対して疎通不可となる等により、診断結果に矛盾が生じた場合である。いずれの場合も、試行を繰り返すことにより、診断成功の確率を高めることが可能である。

なお、探索端末が L-SW に直接接続された場合にも、トラヒック流量検査方式では、L-SW のループポート対を抽出できるため、診断可能である。また、疎通性確認方式では、全ての探索対象端末に対して疎通不可となることから、探索端末が接続されたスイッチ がL-SW、あるいは、複数 L-SW のうちの 1 つであると判断できる。

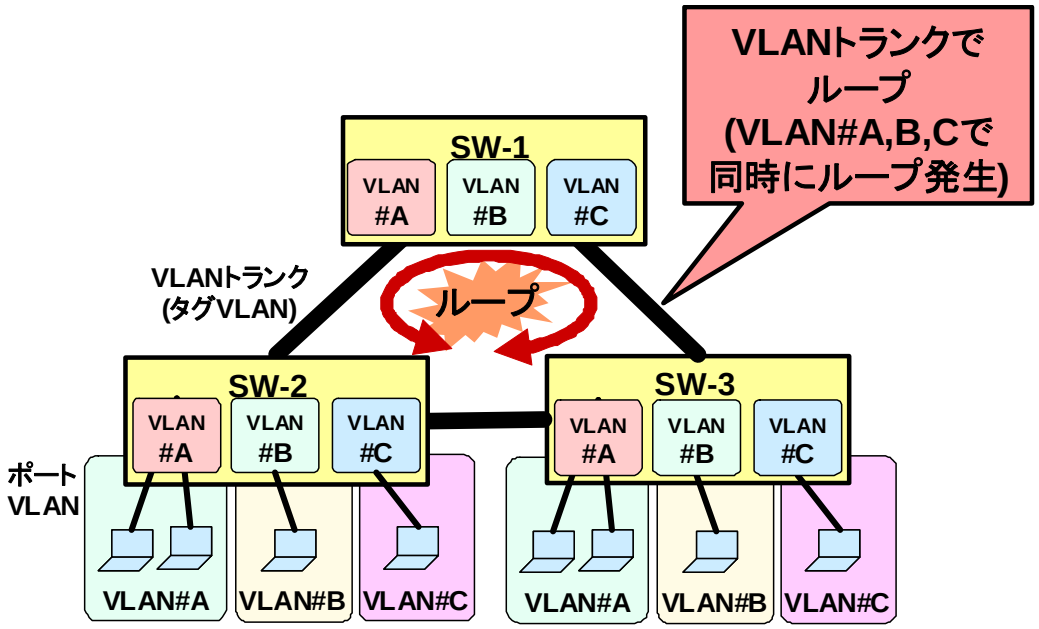
また、試作システムにおける探索時間は、以下の通りであった。

- 流量検査方式で、スイッチ当たり平均 20 秒
- 疎通確認方式では、端末当たり平均 15 秒

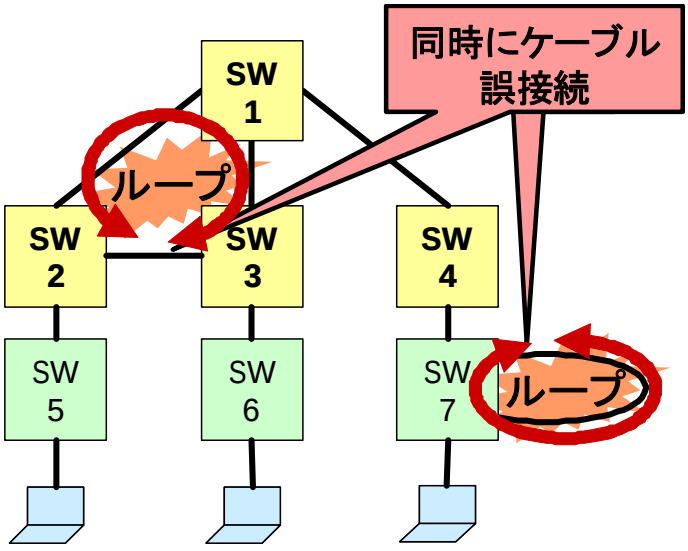
探索処理内容は、スイッチあるいは端末毎へのパケット受信量取得や疎通確認であるため、台数に比例して増加する。例えば、一般的なレイヤ 2 ネットワークとして、スイッチ数を 20、平均的なポート数を 10、端末数を 200 程度とした場合の総診断時間は、およそ 7～8 分間となる。従来のループ障害によるネットワークダウン時間が半日以上に及ぶ場合が多いことを考えると、診断時間の点からも充分に実用的であるものと評価できる。

なお、複数のループが同時に発生する場合について、以下で説明する。図 4-12 上に示すように、第一の場合として、 単一障害が複数の VLAN トランクに影響して複数のループが構成される場合がある。この他に第二の場合として多重障害により、2 箇所以上で同時にループを構成する場合もある。現実的に起こりやすいのは第一の場合であり、この場合、VLAN ごとに個別に考えると、同一 VLAN 内には、複数のループが同時に発生することはなく、これまでに説明した手順どおり、各 VLAN で独立して診断を行うことが可能である。しかも、どの VLAN 環境で診断を行った場合でも、同じ被疑箇所（ループ構成にある VLAN トランク）を示すことができるため、よりループ箇所を特定しやすくなる。第二の場合も、同一サブネット内で複数のループが発生するケースでなければ、第一の場合と同様に、各サブネットで独立して診断可能である。一方、図 4-12 下のように、特に同一サブネット内で複数のループが発生するケースの場合、単一ループの場合と異なり、ループを周回するパケットが、他のループによって増幅される現象が発生し、ステップ-1 の通信機能の回復手段が有効に機能しなくなり、診断

できない場合がでてくる。しかしながら、第二の場合は、一般的には 7～8 分間と考えられる診断時間の中で、複数障害が発生する場合であって、単一のループ障害や上述の第一の場合と比べて極めて発生頻度が小さいと考えられる。従って、第二の場合に対応できないとしても、提案方式は、十分に実用範囲にあるものと考えられる。



第一の場合: VLANトランクでループする。



第二の場合: 多重障害により、2箇所以上で
同時にループが発生する。

図 4-12 複数のループが同時に発生する例

4.4.2. 通信機能回復の持続性

ループ障害が発生している中での探索であるだけに、一旦、行った 4.3.2 節に示した負荷低減や疎通確保も、端末が発信する ARP 要求等の新たなブロードキャストパケットの送信で元に戻ってしまう可能性がある。そこで、本節では、この通信機能回復の持続性を評価し、本方式による持続性が実用上充分であることを示す。

まず、負荷低減について評価する。図 4-13 は、処理負荷軽減のためにロングパケットを注入し続けた状態でのネットワーク流量を計測したものである。10 秒以下で最初にループしていた 64 バイトのショートパケットが、全て注入した 1514 バイトのロングパケットに置換されていることがわかる。また、同図では、ロングパケットの注入中に、毎秒 1 つの新たな ARP 要求を発生させているが、パケット流量の増加は見られておらず、ループパケット数削減の効果が確認できる。これをノードに与える負荷量で評価するため、ループパケット長とノード負荷率の関係を測定したグラフを図 4-14 に示す。パケット長が 64 バイトでは、Mobile Pentium 4 3.2GHz クラスの高性能端末でも、端末負荷は 80%に至るが、パケット長が 1514 バイトでは、端末負荷は 5%程度と低く安定する。このことから、ロングパケット注入により、端末の負荷は 1/20 に軽減されていると言え、非常に効果的であると評価できる。また、代表的なインテリジェントスイッチである Cisco 社製の Catalyst 2950 の場合は、パケット送受信処理がハードウェアで実現されるアーキテクチャのため、ループの影響を受けにくく、CPU 負荷は常に 20%～30%程度で安定している。つまり、スイッチについては、ロングパケット注入による CPU 負荷の軽減効果は認められないが、常に通信には十分な能力を持つことを示している。以上より、ノード負荷に関しては、端末負荷の低減が重要であり、ロングパケット注入はこれに対して、大きな効果があるといえる。

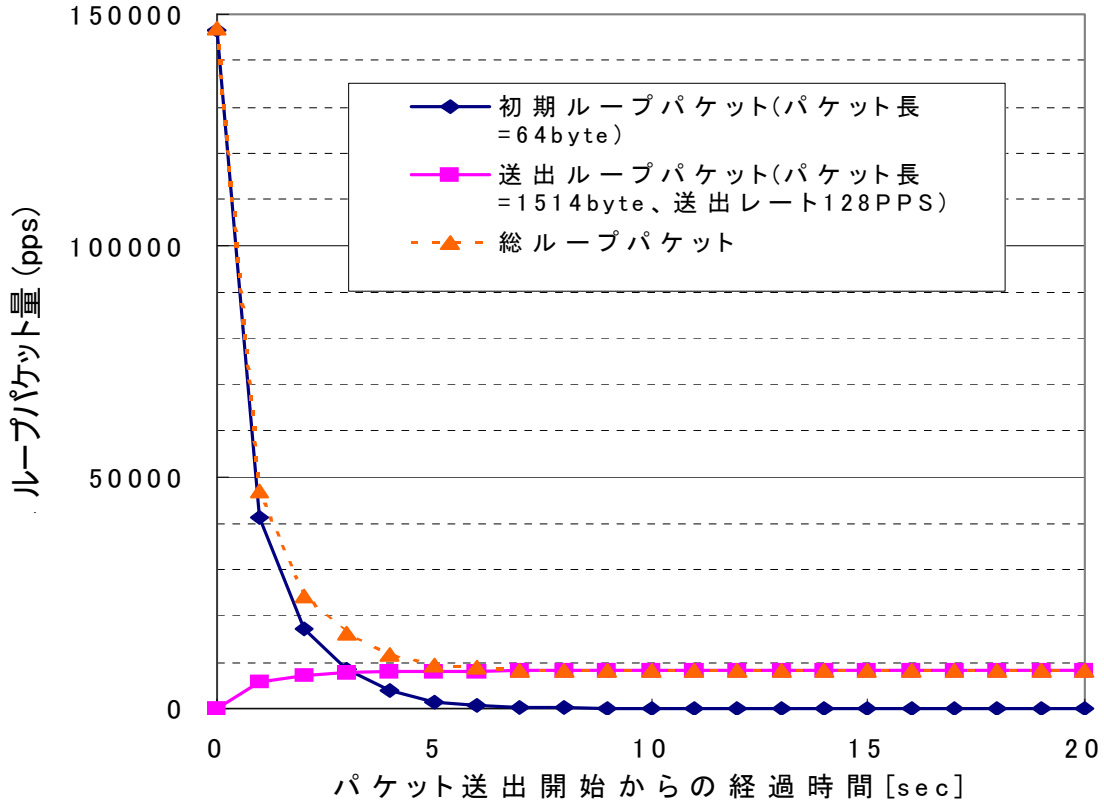


図 4-13 ロングパケット注入による負荷低減効果

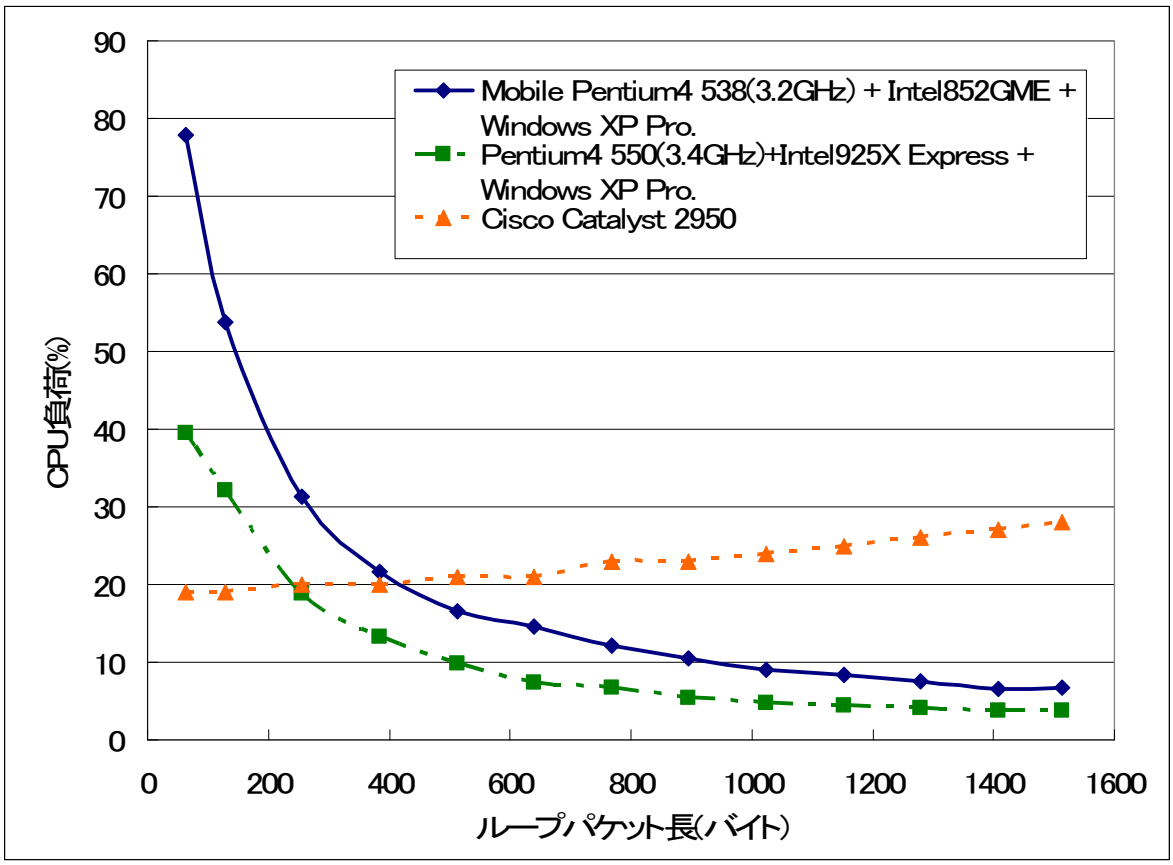


図 4-14 パケット長と端末の負荷の関係

一方、ネットワーク帯域の点からは、ブロードキャストストーム発生中は伝送路帯域が殆ど全てブロードキャストパケットで占有されている。ロングパケットに置換しても、基本的にこの状況は変わらない。この状態で、SNMP や ARP などの診断用パケットが利用可能であるかを評価した。MAC アドレスの誤学習が発生せず、ロングパケットのみがループしている環境にて、2 台の端末間にて 50msec 間隔で 64 バイトおよび 1500 バイトのユニキャスト ARP 要求パケットをそれぞれ 10 万回送信したときの受信 ARP 応答数からロス率を計測した。計測は、インテリジェントスイッチである Cisco Catalyst 2950 の場合と、安価な非インテリジェントスイッチである Planet FX-08M の場合について行った。この結果、どちらの場合も全くパケットロスは発生しなかった。ブロードキャストストームが発生している環境でも、第 1 ステップを実行することで正常に通信ができることが確認された。

以上のことから、本方式によれば、診断中に、ロングパケットを注入し続けることで、新たなループパケットの増大も抑制し、必要な通信を可能とするものと評価できる。

4.4.3. 提案方式の有効性と今後の課題

試作システムを用いた実環境による評価の結果、提案方式の有効性が確認できた。提案方式の最大の特長は、ループ発生によって失われているネットワークの通信機能を、ロングパケット注入による負荷低減およびアドレス再学習によって回復させることである。診断には、ブロードキャスト ARP 要求のような一般的なパケットを用いるため、スイッチに特別な機能を必要とせず汎用性も高い。また、診断の全過程を探索端末からリモートで行うことができ、実用性が高い。

提案方式でさらに検討すべき点として、スイッチで QoS 制御が設定されている場合、パケットの種類によって処理優先度が異なるため、注入するロングパケットで、スイッチや端末の負荷を軽減できない場合があり得る。また、スイッチ内のバッファ障害が発生している場合には、ロングパケット注入が有効に働かない可能性もある。これらの解決策は今後の課題であるが、探索端末の接続箇所を変えるなど、運用面である程度対応できるものと考えられる。

次に、通信疎通のために行った誤学習の訂正の持続性を評価した。4.3.3 節の疎通性確認方式では、端末当たり20 秒間にわたって、疎通性を確認しているが、この間に、対象としている端末からの新たな ARP 要求が発信されると、訂正したアドレス学習が誤った状態に戻ってしまう。提案方式では、対象端末の ARP 発信を監視しつつ、検査を行っており、ARP 発信が検出されると、誤学習訂正の動作をやり直す。しかし、もし、疎通確認動作中に頻繁に、ARP 要求発信がなされると、誤学習訂正を繰り返すことになり、探索ができないという問題がある。そこで、実用ネットワークの上で、端末当たりの ARP 要求間隔を実際に利用されているネットワークで実測した。結果は、

- 実測 1: 端末数 71、1 時間 10 分計測の場合、平均送出間隔 191 秒 (標準偏差 125 秒)
- 実測 2: 端末数 73、1 時間 55 分計測の場合、平均送出間隔 251 秒 (標準偏差 115 秒)

となった。通信の主流は、World Wide Web に代表されるユーザが起動するリクエスト・レスポンス型通信であり、IP 通信に先立って行われる ARP 要求には規則性はない。しかし、ループ状態では ARP 要求は成功しないため、ARP 要求はリトライされる。例えば、Windows の場合は、3 回送信される。

この条件で、以下のように探索時間 20 秒の中で ARP 要求パケットが送信される確率を算出した。まず、2 つの実測結果から、平均送信間隔を 210 秒、標準偏差を 120 秒とした。次いで、ARP 要求の発生過程をポアソン分布（ARP 要求の発生間隔を指数分布）であると仮定すると、20 秒間に ARP パケットが送信される確率は 9.1%となる。ループ中には、ARP 要求が必ず失敗し、リトライされるので、この回数を 3 回と仮定すると、疎通確認に失敗する確率は、9.1% × 3 = 27.3%となる。この場合、もし、提案方式の疎通性確認方式を 3 回まで実行するとすれば、失敗確率を 27.3%の 4 乗＝0.56%まで低減できることになる。従って、提案方式は充分な実用性を持つものと評価できる。

今後の技術課題としては、ネットワークトポロジの事前取得との連携が重要である。本提案では、ネットワークトポロジなどの構成情報の取得については詳述していないが、端末アドレスについては、リモート探索時に診断の前段階として、機能の回復したネットワークを用いて、IP アドレスや MAC アドレスを取得することも可能である。また、トポロジの自動取得を実現する技術も研究開発が進んでおり、この機能との統合による適用範囲の拡大や診断精度向上が考えられる。

4.5. 結言

サービス品質の重要な要素である可用性向上のために重要と考えられる障害からの迅速な復旧を実現する技術として、ネットワークを活用した遠隔診断技術を検討した。特に、IP ネットワークの社会普及に伴い、大規模化し、重要性を増す広域イーサなどのレイヤ 2 パケット網における最も重大な障害であるループ障害を解析し、その原因箇所をリモート診断する技術を提案した。ループ障害の発生を防止する技術が従来の中心であるが、防止技術自身の障害や全スイッチに適用できないなど、完全な回避には問題があった。そこで、本提案では、回避よりも、発生原因を迅速に特定診断する技術を考案した。従来は、ループ障害が発生すると、ネットワーク機能は全て失われると考えられてきたが、通信機能を回復する手段が存在することを示した。これを利用して、リモートからのループ障害箇所を特定する方式を提案した。その特長は、以下の 2 ステッププロセスから成っている。即ち、第一ステップとして診断端末より送信するロングパケットによって、ノード負荷の低減を行う。また、架空 MAC アドレスからの ARP 要求の送信による MAC アドレス誤学習の訂正を行い、本来の通信機能の

回復を行う。第二ステップとして、大量パケット受信ポートの箇所や、誤学習訂正が失敗するルートから、ループ箇所のリモート特定を行う。本方式の診断端末を試作し、診断結果ならびに診断時間を評価し、その有効性を確認した。

今後の残された検討課題として、実ネットワークでの実際の多数の障害事例への適用を通した評価がある。また、ネットワークトポロジの自動探索技術との併用による適用範囲の拡大も今後の技術として重要である。

第5章結論

IP パケットをベースとした情報通信ネットワークにおいて、常にサービスし続けるという安定性を含めた提供品質を維持管理することを目指し、適応型サービス品質制御技術を構成する核となる技術を提案し、その実用性を示した。得られた主な成果は以下のとおりである。

第 1 章では、工業社会から知識経済社会へ向かう過程の中で、モノとしてのサービス品質から、ユーザがいつでもサービスを利用しうるという視点でのサービス品質の制御が不可欠となっていることを指摘した。その上で、これを実現するゴールと考えられる自律型サービス品質制御の構想を示した上で、これを実現する基礎でもあり、その前段階としても位置づけられる適応型サービス品質制御の基本構成を示した。この制御を行う際の検討課題として、品質目標値の明確化、適応型サービス品質制御技術を構成する計測、解析診断、ネットワーク制御の各技術の確立、そして、サービスを提供するシステムの安定性の確保を挙げた。

第 2 章では、品質目標値の明確化について検討した。まず、ブロードバンドネットワークを利用したマルチメディア情報環境について考察し、ヒューマンインタフェースを提案した。「紙を越える」インタフェース、よりリアルな情報表現、そして、人の空間管理能力を活かすことのできる枠組みの提供がポイントである。「紙」を基本として、デスク／パーテションから成る情報空間や、画像メディアの表現形式であるミニチュア、また、タッチセンスによる直観操作法などを特徴としている。さらに、本ヒューマンインタフェースを実現する実験システムを試作し、ユーザ体感評価(QoE)の解明の進んでいないインタラクティブメディアであるページめくりによるマルチメディア情報のブラウジングの期待品質を実験によって評価した。ページめくり表示で提示する際の応答時間を一対比較法で主観評価した結果、ページを「めくる」操作では、最適応答時間は、0.2 秒以下にあることが明らかとなった。この結果は、電子ショッピングサービスにおける経験則である応答時間が８秒を越えると、ユーザはそのサイトを離れてしまうという「８秒ルール」よりもかなり、短く、また、現実の本のページをめくる時間 0.7 秒程度よりも短い。マルチメディア情報を快適にサービスするためには、ネットワーク制御によりサービス品質を維持が従来考えられていた以上に重要となることを示した。

次いで、第 3 章では、適応型サービス品質制御の重要構成技術であるシミュレーションによる品質

解析手法の提案を行った。解析手法開発では、シミュレーションモデルの生成において、現実には、システム構成情報が正確に、また、網羅的には把握されていないことが一般的であることを考えて、多少の精度や高負荷時の複雑な挙動を正確にシミュレートすることは犠牲にしても、ネットワーク資源の処理能力計測や MIB 情報というシステムが自動取得できる情報の範囲内で、モデル生成することを特徴としている。開発手法を、小規模実験網で評価し、実測値とシミュレーション値を比較評価した。実験の範囲では、良く一致する結果が得られた。通常の IP ネットワークでは 10%程度の変動が常にあることを考えると、実用上充分な精度が得られているものと考えられる。さらに、実際のイントラネットを対象としたシミュレーション時間の評価も行い、充分に実用規模でのシミュレーションが可能であることも示した。

第 4 章では、サービス品質の重要な要素である安定品質向上のための技術を考察した。ヒューマンエラーが増え、また、高度化するシステムでは残存バグも存在しうるという条件下では、冗長構成をとることでは、安定品質は向上できない。障害からの迅速な復旧を実現する技術が重要となることを指摘し、ネットワークを活用したリモート診断技術を検討した。特に、IP ネットワークの社会普及に伴い、大規模化し、ネットワークの土台としての重要性を増す広域イーサなどのレイヤ 2 ネットワークにおける最も深刻な障害であるループ障害を解析し、その原因箇所をリモート診断する技術を提案した。ループ障害の発生を防止する技術が従来の中心であるが、防止技術自身の障害や全スイッチに適用できないなど、完全な回避には問題があった。そこで、本論文では、回避よりも、発生原因を迅速に特定診断する技術を考案した。従来は、ループ障害が発生すると、ネットワーク機能は全て失われると考えられてきたが、通信機能を回復する手段が存在することを示した。これを利用して、リモートからのループ障害箇所を特定する方式を提案した。その特長は、以下の 2 ステッププロセスから成っている。即ち、第一ステップとして診断端末より送信するロングパケットによって、ノード負荷の低減を行う。また、架空 MAC アドレスからの ARP 要求の送信による MAC アドレス誤学習の訂正を行い、本来の通信機能の回復を行う。第二ステップとして、大量パケット受信ポートの箇所や、誤学習訂正が失敗するルートから、ループ箇所のリモート特定を行う。本方式の診断端末を試作し、診断結果ならびに診断時間を評価し、その有効性を確認した。

本論文で提案した技術を総合することで、通信品質と安定品質の両面からサービス品質を捉えた

適応型サービス品質制御の基礎を実現しうるものと考えられる。さらに、これらの技術は、第 1 章で述べた自律型サービス品質制御においても、引き続き、重要な役割を果たす。さらに、サービス品質維持に加えて、通過する全ての情報を把握しうるという情報通信ネットワークの持つ潜在能力を、知識経済化する社会の中において、ユーザの社会活動や経済活動に新たな価値付与として活かしうることが期待できる。Web2.0 はその過程におけるひとつの例であるが、ネットワーク内の情報と情報の関係から新たな付加価値ある情報を創り出すという Web2.0 のサービスモデルは、広義のネットワークそのものである。現状では、このような新サービスとネットワーク機能との連携は弱いが、今後の知識化に向かう中では、ネットワーク機能を拡充して、サービスとの連携を図ることによるさらなる新サービスの創出が期待できる。その時においても、本論文で述べた監視技術、分析技術、実行技術や診断技術が、重要な基礎技術として役立つものと考えられる。

謝辞

本研究は、筆者が、大阪大学大学院情報科学研究科情報ネットワーク学専攻在学中および、(株)富士通研究所在職中に行ってきた情報通信ネットワークにおけるサービス品質制御技術に関する研究をまとめたものである。

本研究をまとめるに際し、とりわけご懇切なるご指導とご鞭撻を賜った大阪大学大学院情報科学研究科　村上孝三教授に謹んで深謝の意を表します。情報科学研究科情報ネットワーク学専攻村田正幸教授、今瀬真教授、東野輝夫教授、中野博隆教授には、本研究を行うにあたり多くのご指導、ご助言を頂きました。厚く御礼申し上げます。また、有益な種々のご教示ご助言を頂きました大阪府立大学工学部知能情報工学科　戸出英樹教授、大阪大学大学院情報科学研究科　木下和彦准教授に深謝の意を捧げます。

富士通研究所においては、研究当初より、多くの場で深みのあるご指導ご教授を頂きました顧問(前　常務取締役)　森田修三博士に心から感謝致します。また、富士通　常務理事　石田安志氏には、新しい発想を生み出す多くの技術的サジェスチョンを頂きましたことを、深く感謝致します。富士通研究所　社長　村野和雄博士、常務取締役　津田俊隆博士、常務取締役　吉川誠一氏、取締役　雁部洋久博士、フェロー　坂下善隆氏、特別顧問　宮澤君夫博士、前顧問　林弘氏のご好意あるご指導とご鞭撻によって、研究を進めることができました。衷心より感謝致します。

それぞれの研究テーマにおいて、共に議論し研究開発を進めさせて頂きました安達基光氏、中条孝文氏、野島聡氏、飯田一朗博士、加藤正文氏、鎌田肇氏、若本雅晶氏、中後明氏、奥山敏氏、鈴木利光氏、水口有氏、矢野勝利氏、勝野昭氏、福山訓行氏、土屋哲氏、高橋英一博士、森永正信氏、野村祐士氏、菊池慎司氏、宮崎英明氏、安家武氏に感謝致します。各氏との日頃の熱心な議論の積み重ねがあって、本研究を形にしていくことができましたことを深く感謝致します。

参考文献

[1] P.F. ドラッカー, 断絶の時代, ダイヤモンド社, 1999.

[2] 大向一輝, 橋本大也(編), “Web2.0 の現在と展望,” 情報処理, vol.47, no.11, pp.1194-1236, Nov. 2006.

[3] 小川浩, 後藤康成, Web2.0 Book, インプレスジャパン, March 2006.

[4] 阪田史郎, “Web2.0の新潮流 - Web2.0とネットワーク関連技術動向 -,” 信学会 通信ソサイエティマガジン, no.1, pp.50-66, 夏号, 2007.

[5] 林幸雄(編), “複雑ネットワーク科学の拡がり,” 情報処理, vol.49, no.3, pp.275-320, March 2008.

[6] 日高一義, “サービス・サイエンスについての動向,” 情報処理, vol.47, no.5, pp.467-472, May 2006.

[7] 浅谷耕一(編著), 通信ネットワークの品質設計, 電子情報通信学会, 1993.

[8] 間瀬憲一(編著), マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質, 電子情報通信学会, 1998.

[9] 尾家祐二, 後藤滋樹, 小西和憲, 西尾章治郎, インターネット入門, 岩波書店, 2001.

[10] P. Ferguson, G. Huston, インターネット QoS, 戸田巌監訳, オーム社, 2000.

[11] 戸田巌, ネットワーク QoS 技術, オーム社, 2001.

[12] 我が国のインターネットにおけるトラヒックの集計・試算, 総務省報道資料, http://www.soumu.go.jp/s-news/2008/080829_9.html, Aug. 2008.

[13] 新世代ネットワーク研究開発戦略本部(著), 新世代ネットワークビジョン, (独)情報通信研究機構, Sept. 2008.

[14] 安達基光, 折笠秀明, “ユーティリティコンピューティング技術,” 富士通, 54-4, pp.293-297, July 2003.

[15] 勝山恒男, 野島聡, 有山 隆史, ”プロアクティブな運用管理を実現するセンタ/ネットワークの統合管理技術,” 富士通, 54-5, pp.396-401, Sept. 2003.

[16] 土屋哲，安達基光，”ユーティリティコンピューティングと運用変革,” 富士通, 56-5, pp.439-446, Sept. 2005.

[17] J.O. Kephart, D.M. Chess, “The vision of autonomic computing,” *Computer Magazine*, IEEE Computer Society, pp.41-50, Jan. 2003.

[18] 若宮直紀，村田正幸，“生物に着想を得た情報ネットワーク制御,” 信学論誌, vol.J89-B, no.3, pp.316-323, 2006.

[19] 勝山恒男，木村康則，“仮想自律化のためのシステム技術,” 富士通, 56-1, pp.75-80, Jan. 2005.

[20] ITIL v.3, itSMF International, 2007

[21] 勝野昭，土屋哲，安達基光，“TRIOLE オーガニックコンピューティングアーキテクチャ,” 富士通, 56-3, pp.228-233, June 2007.

[22] “ITIL ベースの構成管理を支援する統合 CMDB 技術 既存 DB を仮想的に統合してシステムを見える化,” 富士通ジャーナル先端テクノロジー, http://jp.fujitsu.com/about/journal/technology/20081001/, Oct. 2008

[23] David Williams, “IT Operations Run Book Automation,” Gartner, May 2007.

[24] 勝山恒男，高橋英一，田村直広，小谷野修，安達基光，石橋宏司，“IP ネットワークにおけるサービス品質解析方式,” 情処論, vol.43, no.2, Feb. 2002.

[25] 前川貴夫，矢田浩二，“IP ネットワーク管理,” 信学誌, vol.87, no.12, pp.1010-1015, Dec. 2004.

[26] 大塚祥広，木村辰幸，柳沼英樹，渡辺篤，今宿亙，“GMPLS 対応マルチレイヤネットワーク管理方式の提案,” 信学論誌, vol.J89-B, no.11, pp.2103-2116, 2006.

[27] D. Awduche, et al., “Overview and principles of Internet traffic engineering,” RFC3272, IETF, May 2002.

[28] M. Katoh, A. Okada, T. Katoh, “The Concept and Model of 4 Dimensional Traffic Engineering,” *International Conference on Networking and Services*, 2006

[29] T. Bourke，サーバ負荷分散技術，オライリー・ジャパン(オーム社)，2001.

[30] ITU-T Rec. X. 140, “General quality of service parameters for communication via public data networks,” Sept. 1992.

[31] 阿部威郎，石原豊，吉野秀明, “次世代のサービス品質技術動向,” 信学会誌, vol.91, no.2, pp.82-86, Feb. 2008.

[32] 高橋玲, “マルチメディア QoE 評価技術の標準化動向,” 信学技報, CQ2007-9, April 2007.

[33] 高橋玲, “マルチメディア QoE 評価技術の研究・標準化動向,” 信学技報, NS2007-111, Dec. 2007.

[34] 今井悟史，仲道耕二，宗宮利夫, “大規模ネットワークにおける映像配信サービスの体感品質定量化に関する一検討,” 信学技報, CS2007-58, Jan. 2008

[35] 伊藤嘉浩，田坂修二, “IP ネットワーク上での音声・ビデオ伝送におけるユーザレベル QoS の多次元評価,” 信学論誌, vol.J88-B, no.3, pp.689-702, 2005.

[36] 高橋玲、吉野秀明、北脇信彦, “IP 電話サービスの通話品質評価技術,” 信学論誌, vol.J88-B, no.5, pp.863-874, 2005.

[37] “8 秒ルール,” IT インダストリレポート, p.62, JEITA, Feb. 2001.

[38] A. Kay, A. Goldberg, "Personal dynamic media, *Computer*, vol.10, no.3, pp.31-41, March 1977.

[39] R.A. Bolt, The human interface, Van Nostrand Reihold, New Yprk, 1988.

[40] D.A. Henderson et al., "Rooms: The Use of Multiple Virtual Workspaces to Reduce Contention in a Window-based Graphical User Interface," *ACM Tran. Graphics*, vol.5, no.3, pp.211-243, July 1986.

[41] 豊田秀樹(編著)、共分散構造分析[技術編] 第 3 章 シェッフェの一対比較法、朝倉書店、2003.

[42] 鶴正人，尾家祐二, “インターネット計測における推定技術の新潮流,” 信学技報, IN2003-22, pp.37-42, June 2003.

[43] 鶴正人，尾家祐二, “インターネットの特性計測技術とその研究開発動向,” 情報処理, vol.42, no.2, Dec. 2001

[44] 木村卓巳，谷口浩久，高土居広幸, “インターネットパス帯域測定法の比較評価,” 信学技報, SSE98-209, IN98-181, pp.67-78, March 1999.

[45] 長谷川亨，阿野茂浩，鶴正人，尾家祐二, “大規模ネットワークの品質計測・障害推定技術,” 信学誌, vol.91, no.2, pp.92-97, 2008.

[46] R. L. Carterp M.E. Crovella, "Dynamic server selection using bandwidth probing in wide-area networks," *Technical Report-96-007*, Boston University, March 1996.

[47] M. Jainp C. Dovrolis, “Pathload: a measurement tool for end-to-end available bandwidth,” *PAM 2002*, pp.14-25, March 2002.

[48] M. Jain, C. Dovrolis, “End-to-End Available Bandwidth: Measurement Methodology, Dynamics, and Relation with TCP Throughput,” *Proc. ACM SIGCOMM*, August 2002.

[49] N. Hu, P. Steenkiste, “Evaluation and Characterization of Available Bandwidth Probing Techniques,” *IEEE J. Selected Areas in Communications*, vol.21, no.6, August 2003.

[50] 青木武司，菊池慎司，高橋英一，岡野哲也，安達基光，勝山恒男, “IP ネットワークの性能測定技術,” 信学技報, CQ98-32, 1998.

[51] M. Adachi, S. Kikuchi, T. Katsuyama, "NEPRI: Available Bandwidth Measurement in IP networks," *ICC2000*, S12.4, June 2000.

[52] J-C. Bolot, "Characterizing End-to-End Packet Delay and Loss in the Internet", *Journal of High-Speed Networks*, vol.2, no.3, December 1993.

[53] V. Jacobson, “Pathchar – A Tool to Infer Characteristics of Internet Paths”, MSRI, 1997. ftp://ftp.ee.lbl.gov/pathchar/msri-talk.pdf

[54] 間瀬憲一, "インターネットの品質・トラヒック管理(1)-ネットワークのモデル化と品質・トラヒック管理の概要," 信学誌, vol.82, no.10, pp.1054-1061, 1999.

[55] 関口敦二，土屋哲，石橋宏司，安達基光，勝山恒男，野島聡, "ポリシィ制御型ネットワークにおけるポリシィ生成方式," 信学技報, IN99-58, CQ99-36, Oct. 1999.

[56] 山田博司, "インターネットの品質・トラヒック管理(4)-サービス品質評価とネットワークシミュレー

ション," 信学誌, vol.83, no.2, pp.137-142, 2000.

[57] http://www.keynote.com/

[58] 岩田淳ほか, "広域イーサネット標準化動向と NEC における広域イーサネットへの取り組み (その 1)," ITU ジャーナル, vol.33, no.10, pp.4-11, 2003.

[59] 802.1D-2004 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Media Access Control (MAC) Bridges

[60] 802.1W-2001 IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Common Specifications - Part 3: Media Access Control (MAC) Bridges: Rapid Configuration

[61] 802.1S-2002 IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Amendment 3 to 802.1Q Virtual Bridged Local Area Networks: Multiple Spanning Trees

[62] 安留多伎 明良, 広域イーサネット技術概論, p.191, 信学会, 東京, 2005.

[63] 岩田 淳, "広域イーサネット技術概論," 信学会東京支部講演会資料, 2008.

[64] 安藤雅人, "広域イーサネットの運用管理技術," 信学技報, IA2007-12, July 2007.

[65] 堀川健史, 加島伸悟, 鈴木宗良, "GAVES におけるユーザ網ループ検出," NTT 技術ジャーナル, vol.18, no.4, 2006.

[66] 長嶋潤, 瀬戸康一郎, 青島健次, 長谷川貴史, "次世代広域イーサネット網向けスイッチングハブの開発," 日立電線, no.24, pp.13-16, Jan. 2005.

[67] "IETF IP Virtual Link eXtension BOF," IETF, http://www.ietf.org/ietf/04aug/ipvlx.txt, Aug. 2004.