

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

# 博士論文概要

## 論文題目

広域データ通信ネットワークにおける品質保証  
と差別化に関する研究

Communication Quality Assurance and  
Differentiation for Wide Area Data Networking

申請者

|           |     |
|-----------|-----|
| 阿野        | 茂浩  |
| Shigehiro | ANO |

2014年12月

広域データ通信は、1990年代初頭の商用インターネット開始と共に大きく発展し、今や社会のインフラストラクチャーとして深く浸透している。インターネットは、広域の離れた拠点を相互接続するため、当初は専用線を用いていた。ところが専用線には交換機能がなく2拠点間を固定接続しており、複数拠点の接続ができない。また専用線はビット単価で比較すると通信料が高額となり、その契約速度が制約されることが多く、安価に広域の複数の拠点間で高品質なデータ通信を実現することが難しい。この課題にこたえるために、商用インターネット利用の開始に伴い、従来の専用線利用から高速データ交換網である ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網への置換が加速した。ATM は広帯域 ISDN (Integrated Services Digital Network) の実現方式として ITU-T (International Telecommunication Union – Telecommunication sector) において標準化された 53 byte 固定長のセルの交換技術である。ATM が想定した通信速度は 155 Mbit/s であり、当時としては高速であった。ATM では、専用線では実現不可能であった複数拠点間での接続が可能であり、インターネットにおける基幹回線としての利用が急速に拡大した。しかし、インターネットトラヒックの想定以上の急増により、ATM 網内でも輻輳の発生が懸念される状況となった。そこで、ATM における契約値に基づく通信品質の保証、さらにはベストエフォート型の低優先トラヒックと高優先トラヒックの差別化をすることが、重要な研究課題となった。

本論文では、急増するインターネット通信を ATM に代表される高速通信回線に収容する手法について提案を行い、実際の ATM スイッチや ATM カードを利用して実験評価を行った結果を報告する。具体的には、ATM による TCP/IP トラヒックの広域網への効率的収容方法について、各種申告パラメータの最適な設定手法について述べる。また ATM 網内での優先度の異なるトラヒックの差別化手法について述べる。さらに、インターネットの高品質化・高機能化を実現する手法として、アクティブネットワーク技術を挙げ、アクティブネットワーク上でのネットワーク輻輳監視機能とトラヒック経路制御機能の融合について提案する。この監視・制御機能を融合するネットワークアプリケーションとして、ネットワーク輻輳監視機能に基づく、QoS (Quality of Service) 経路制御機能をアクティブネットワーク処理系上に実装し、その実験評価を実施して、有効性を論じる。

第1章は、本論文の背景を述べるとともに本論文の概要を述べている。

第2章では、ATM VBR (Variable Bit Rate) による TCP/IP 通信の収容手法について論じる。広域 ATM 網が導入されるに伴い、TCP/IP プロトコルに従った LAN 間通信を収容するために、可変速度通信トラヒックの収容に適した ATM VBR が注目されている。本論文は、実際の広域網をエミュレーションした実機を用いた実験に基づき、トラヒック収容法の評価を行った。本論文では、TCP トラヒックに対応する VBR 用のトラヒックパラメータの推定方法と、端末からの TCP トラヒックが、広域 ATM 網と契約したトラヒックパラメータと適合しない場合に、UPC (Usage

Parameter Control)機能によるセル廃棄が TCP スループットに及ぼす影響を、通信実験により評価している。具体的には、TCP トラヒックの振舞いを特徴づける試験を行い、SCR (Sustainable Cell Rate)および MBS (Maximum Burst Size)を推定した。その推定した SCR と MBS よりも小さい値が設定された場合に、UPC 機能におけるセル廃棄の影響を受けて TCP スループットがどのように劣化するかを評価した。本論文では、以下の事実を明らかにすることができた。

a) 1本の TCP コネクションに対応する SCR と MBS は、TCP 送受信ソケットバッファ、最大セグメントサイズ、往復遅延時間から計算されるスループットとバースト長に対応する。それよりも小さい値を設定すると、UPC セル廃棄のためにスループットが劣化する。

b) 複数本の TCP 多重コネクションの場合、SCR は TCP コネクションの数だけの倍数が必要となる。MBS はコネクション数の倍数よりも小さい値の設定で充分である。上記の推奨値よりも小さな SCR や MBS を設定しても、スループットの低下は軽微である。

第3章では、ウインドウスケール オプションを用いて、TCP トラヒックの広域 ATM 網への VBR による効率的收容方法を提案する。標準的な TCP のウインドウサイズは最大 64k バイトと規定されている。RTT が大きな国際網の場合には、ウインドウスケール オプションを用いて、大きなウインドウサイズを使用することが適切である。この場合の SCR と MBS の設定方法は第2章で言及する手法と同様であり、スループットの傾向も同様の特性が得られる。ただし TCP 端末の性能が低い場合や、PCR の値が物理回線速度の 155 Mbit/s に設定された場合には、MBS を計算された設定値よりも低い値に設定してもスループットの劣化が発生しない。事前に同じ通信環境でのトラヒックの特徴づけ試験を行うことにより、最適な MBS を設定することができる。

第4章では、Selective Cell Discard (SCD)と呼ばれる、ATM VBR における選択的セル廃棄オプションを適用して輻輳制御を行った際に、セル廃棄が TCP/IP 通信のスループットに与える影響について論じる。SCD は、ATM スイッチが輻輳時にセルを選択的に廃棄するための ATM スイッチにおける制御手法である。SCD は ATM ヘッダ内の CLP (Cell Loss Priority)ビットの有無により輻輳時のセル廃棄の要否を決める。本論文は、SCD によるセル廃棄を、SCR と MBS の UPC 違反セルに対して実行して、輻輳時のスループットの劣化に関する評価を行った。その結果、ベストエフォート型の UBR (Unspecified Bit Rate)と比較して、本論文で検討した手法は、広域 ATM 中継回線の利用率は同様の傾向を示すものの、TCP スループット間で高い公平性を提供できることが明らかとなった。ATM 中継回線の有効利用の観点では、SCD を用いない VBR と比較した場合、非常に高い利用率を実現できることも明らかとした。

第5章では、IP ネットワークにおいて、通信品質(QoS)の保証を可能とする

Differentiated Services (Diffserv)の Assured Forwarding (AF)を ATM の SCD を用いた VBR によりエミュレーションする手法を提案し、その有効性について論じている。この実験は TCP トラヒックを対象として、UBR に対応させた DF (Default Forwarding) PHB との対比を行った。その結果、AF PHB 内の TCP トラヒックの公平性、異なる AF PHB 収容時の各申告帯域の保証、DF PHB との差別化が実現可能であることを明らかにした。

第6章では、アクティブネットワークによる IP 通信の品質差別化について論じる。インターネットにおける高機能化やユーザに対する QoS の差別化は、上述の通り重要な課題である。この解決策として、アクティブネットワーク技術が有効である。本論文では、アクティブネットワーク処理系上での QoS ルーティング制御アプリケーションとして、SC (Stream Code)と呼ばれるアセンブリ言語ベースでパケットの動作記述を行う処理系を開発した。その処理系の特徴は、ネットワーク輻輳監視機能と QoS ルーティング機能を融合した実装を実現したことにある。また、従来型のベストエフォート型通信のルーティング機能も実装しており、同じネットワーク上で2種類のルーティングプロトコルが動作可能である。

2種類のルーティングプロトコルは、スケーラビリティを考慮して、リンクステート型のルーティングプロトコルを基本としている。ネットワーク輻輳監視プロトコルと QoS ルーティングプロトコルは、それぞれ別の SC により記述する。2つの SC の連携は、ネットワーク輻輳監視プロトコルが輻輳を検知した場合に、そのリンクの発側アクティブノード内において輻輳を通知するシグナルにより、QoS ルーティングプロトコルが起動される設計とした。アクティブノード内には、利用される頻度の高い SC のライブラリや常駐プログラムを具備することができる。この機能によりパケット内に格納されるプログラムサイズの最小化を図り、現実的なルーティングプロトコルとして実装可能となった。具体的な Motion JPEG フレームの動画転送実験では、QoS ルーティングによる高優先度トラヒックが、経路の切替えも含めてストレスなく受信側で視聴できることを確認した。

第7章は結論である。以上に述べたように、ネットワークの品質保証や差別化は、ネットワーク機器におけるトラヒックの輻輳制御と経路制御の両輪により実現する必要がある。本論文では ATM を用いたネットワークノードのトラヒック制御と、スケーラブルな QoS ルーティング制御を組み合わせることにより課題の解決に向けて一歩を踏み出している。現在のインターネットでは携帯データトラヒックが急増しており、さらなる高速化・大容量化が進んでいる。このようなネットワークにおいて、本論文で提案して検討した技術が様々な形で応用できる。また、近年注目を集めているネットワーク仮想化技術においては、アクティブネットワークの基本技術が応用されている。仮想化されたルータにおいて、各種トラヒック制御機能をスライス単位で柔軟に利用可能とするために、本論文で得られた知見を活用することができる。

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

氏名 阿野 茂浩 印

(2014年 12月 現在)

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）   |
|-------|--|
| ○論文   | Shigehiro ANO, Nicolas DECRE, Toru HASEGAWA,<br>“Experimental TCP Performance Evaluation on Diffserv AF PHBs over ATM SBR Service,” Telecommunication Systems - Modeling, Analysis, Design and Management - Special Issue on the networks, Kluwer Academic Publishers [Netherlands], Vol.19, No.3-4, pp.425-441, MARCH - APRIL, 2002.  |
| ○論文   | Shigehiro ANO, Nicolas DECRE, Toru HASEGAWA,<br>“Experimental TCP Performance Study on Emulating Diffserv Assured Forwarding over ATM SBR Service,”<br>2002年情報処理学会論文誌(2月号, 「マルチメディアコミュニケーションシステム」特集, Vol.43, No.2, pp.444-455, FEBRUARY, 2002.   |
| ○論文   | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Koji NAKAO, Toshihiko KATO, Takashi EGAWA, Koji HINO, Yoshiaki KIRIHA, Fumito KUBOTA,<br>“QoS Routing-based Congestion Management over Active Internetworking System using Stream Code,”<br>2001年電子情報通信学会英文論文誌(6月号 B分冊 [IEICE TRANSACTIONS on Communications], Special Issue on New Developments on QoS Technologies for Information Networks), Vol.E84-B, No.6, pp.1569-1580, JUNE, 2001. |
| ○論文   | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO,<br>“An Experimental Study on Performance during Congestion for TCP/IP Traffic over Wide Area ATM Network Using VBR with Selective Cell Discard,”<br>2000年電子情報通信学会英文論文誌(2月号 B分冊 [IEICE TRANSACTIONS on Communications], IEICE / IEEE Joint Special issue on Recent Progress in ATM Technologies), Vol.E83-B, No.2, pp.155-164, FEBRUARY, 2000.                              |
| ○論文   | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO, Kenji NARITA, Kanji HOKAMURA,<br>“Performance Evaluation of TCP/IP Traffic Using Window Scale Option over Wide Area ATM Network with VBR Service Category,”<br>1998年電子情報通信学会英文論文誌(11月号 B分冊 [IEICE TRANSACTIONS on Communications], Special issue on Performance and Quality of Service (QoS) of Multimedia Networks), Vol.E81-B, No.11, pp.2090-2099, NOVEMBER, 1998.      |
| ○論文   | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦, 成田 憲治, 外村 幹治<br>“VBRを用いた広域ATM網上のTCPトラヒックの性能評価,” 1997年電子情報通信学会和文論文誌(6月号 B-I分冊 [通信 I-情報通信システム・理論], マルチメディアネットワーク/サービスと品質論文特集), Vol. J80-B-I No.6, pp.375-386, JUNE, 1997.   |
| 論文    | Toru HASEGAWA, Shigehiro ANO, Fumito KUBOTA,<br>“Programmable Traffic Monitoring Method Based on Active Network Techniques and Application to DDoS Detection,” 2004年電子情報通信学会英文論文誌(7月号 B分冊 [IEICE TRANSACTIONS on Communications], Special Issue on Next Generation Networks Software), Vol.E87-B, No.7, pp.1890-1899, JULY, 2004.  |
| 総説    | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 鈴木 基広, 江川 尚志, 植月 修志, 久保田 文人,<br>“柔軟なネットワーク構築を目指すアクティブネットワークのテストベッドと広域実験,” 2001年情報処理学会誌「情報処理」解説論文(4月号), Vol.42, No.4, 通巻434号, pp.376-381, 2001年4月.  |

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別 | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）  |
|-------|---|
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Fumito KUBOTA, Takashi EGAWA,<br>“QoS Monitoring & Routing Management over Active Internetwork System,” Dagstuhl Seminar 02071, Concepts and Applications of Programmable and Active Networking Technologies.  |
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Nicolas DECRE, Toru HASEGAWA,<br>“Experimental TCP Performance Evaluation on Diffserv Assured Forwarding over ATM SBR Service,”<br>IEEE International Conference on Networking (ICN’ 01), Colmar, France, July 10-13 2001, Proceedings, Part II, pp.825-835.   |
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Hardy RÖDIGER, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO,<br>“Detailed Experimental Evaluation on Congested TCP/IP Traffic over VBR with Selective Cell Discard Option,”<br>The 6th Asia-Pacific Conference on Communications (APCC 2000), Seoul, Korea, October 30-November 2 2000, Proceedings II, pp.696-700.                           |
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO,<br>“A Study on Accommodation of TCP/IP Best Effort Traffic to Wide Area ATM Network with VBR Service Category Using Selective Cell Discard,”<br>IEEE ATM’ 99 Workshop, Kochi, Japan, May 24-27 1999, Proceedings, pp.535-540.   |
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO, Kenji NARITA, Kanji HOKAMURA,<br>“A Study on Accommodation of TCP/IP Traffic Using Window Scale Option to International ATM Network with VBR Service Category,”<br>1st IEEE International Conference on ATM (ICATM’ 98), Colmar, France, June 22-24 1998, Proceedings, pp.484-491.              |
| ○国際会議 | Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO, Kenji NARITA, Kanji HOKAMURA,<br>“Performance Evaluation of TCP Traffic over VBR in Wide Area ATM Network,”<br>IEEE ATM’ 97 Workshop, Lisboa, Portugal, May 25-28 1997, Proceedings, pp.73-82.  |
| 国際会議  | Fumito KUBOTA, Shigehiro ANO, Toru HASEGAWA, Toshihiko KATO, Takashi EGAWA, Koji HINO,<br>“Implementation and Evaluation of Active Internetwork System Using Stream Code Based Active Network,”<br>The 15th International Conference on Information Networking (ICOIN-15), Beppu, Japan, January 31-February 2 2001, Proceedings, pp.232-239. |
| 国際会議  | Fumito KUBOTA, Toru HASEGAWA, Shigehiro ANO, Koji NAKAO, Toshihiko KATO, Koji HINO, Yoshiaki KIRIHA,<br>“Congestion Management based on Routing Function over Active Internetworking System,”<br>2000 Fourth Asia-Pacific Network Operation and Management Symposium (APNOMS 2000, Nara, Japan, October 11-13 2000, Proceedings, pp.91-102.   |
| 講演    | 阿野 茂浩, Nicolas DECRE, 長谷川 亨,<br>“Diffserv AF PHB の SBR によるエミュレーション時の DF PHB との TCP 性能評価,”<br>2001 年電子情報通信学会ネットワークシステム、光スイッチング共催研究会(12 月), pp.79-84, NS2001-183, PS2001-49.  |

## 早稲田大学 博士（工学） 学位申請 研究業績書

| 種 類 別        | 題名、 発表・発行掲載誌名、 発表・発行年月、 連名者（申請者含む）  |
|--------------|---|
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨,<br>“ATM VBR 上での Diffserv AF PHB の TCP 性能に関する実験的評価,”<br>2001 電子情報通信学会総合大会(春季)(3月), B-7-144.  |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨,<br>“Diffserv AF PHB の ATM によるエミュレーション時の TCP 性能評価,”<br>2001 年情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会(3月), pp. 67-72, DPS102-12.                                    |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 中尾 康二, 加藤 聰彦, 日野 浩志, 桐葉 佳明, 久保田 文人,<br>“ストリームコードを用いたアクティブネットワーク上でのルーティングプロトコルの実装,”<br>2000 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会(秋季)(9月), B-7-44.                   |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦, 成田 憲治, 外村 幹治,<br>“ウインドウスケールオプションを用いた TCP トラヒックの広域 ATM 網への収容方法に関する実験的検討,”<br>1997 年電子情報通信学会情報ネットワーク研究会(11月), pp. 37-44, IN97-125.           |
| 講演           | 長谷川 亨, 阿野 茂浩, 加藤 聰彦,<br>“Selective Cell Discard 及び Early Packet Discard を組み合わせた ATM 網の輻輳制御方式とその評価,”<br>1997 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会(秋季)(9月), B-7-99.                |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦, 成田 憲治, 吉田 浩二,<br>“複数本の TCP トラヒックの VBR を用いた ATM 網への収容に関する一検討,”<br>1997 年電子情報通信学会総合大会(春季), B-7-102.  |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦, 成田 憲治, 吉田 浩二,<br>“ATM 網上の TCP トラヒック特性の評価,”<br>1996 年情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会(11月), pp. 101-106, DPS79-19.                                   |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 成田 憲治, 加藤 聰彦,<br>“ATM 網の UPC ポリシングによる TCP スループット劣化に関する一検討,”<br>1996 年電子情報通信学会通信ソサイエティ大会(秋季)(9月), B-744.   |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦,<br>“ATM 網における Available Bit Rate (ABR) 上の TCP の動作解析,”<br>1996 年情報処理学会マルチメディア通信と分散処理研究会(3月), pp. 55-60, DPS75-10.                           |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 山崎 克之, 加藤 聰彦,<br>“ATM レイヤ品質を考慮した TCP/IP の性能評価,”<br>1996 年電子情報通信学会総合大会(春季)(3月), B-803.   |
| 講演           | 阿野 茂浩, 長谷川 亨, 加藤 聰彦, 鈴木 健二,<br>“ATM 上の Available Bit Rate (ABR) を用いた TCP の実現法に関する一考察,”<br>情報処理学会第 51 回全国大会(平成 7 年後期), 2F-4.                                     |
| その他<br>(社内誌) | Shigehiro ANO,<br>“Efficient TCP/IP Communication Over ATM Networks,”<br>Konnichiwa - Greeting from KDD No.108 (Spring 1998)” RESEARCH INSIGHT,”<br>pp. 10-15.” |
| その他<br>(社内誌) | 阿野 茂浩, 成田 憲治,<br>“ATM 網における効率的な TCP 通信の実現,”<br>KDD テクニカルジャーナル 30 号(1997 年秋季号)(10月)「けんきゅう REPORT」, pp. 18-20.  |