

早稲田大学大学院 基幹理工学研究科

博士論文審査報告書

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

--

2015年2月

インターネットの原型となった ARPAnet は、拠点間を接続するために専用線を用いていた。専用線は 2 箇所間の拠点間を直接に固定的に接続する回線で、交換機能を持たず、3 箇所以上の拠点間を直接に接続することができない。また専用線はビット単価が高く、高速な通信を実現するための費用が高額になる。1990 年代初頭にインターネットの商用インターネット利用が開始されると、専用線を利用するだけでなく、高速データ交換機能を持つ ATM (Asynchronous Transfer Mode) 網の利用が増加した。ATM はブロードバンド ISDN を実現する方式として ITU-T において標準化された 53 バイトの固定長のセルを用いる技術である。ATM を用いれば、専用線では実現できなかった 3 箇所以上の拠点間の接続が容易に実現できる。さらに、統計的多重化の効果によりビット単価が安い。このような特徴から、インターネットの基幹回線としての ATM の利用が急速に拡大した。しかし、インターネットのトラフィックが予想以上に急増して、ATM 網内で輻輳が発生する状況になった。そこで浮かび上がった課題は、ATM の契約値に基づく通信品質を保証すること、さらに複数のトラフィックの間で優先順位を付けて差別化をする技術である。

本論文は、インターネットを ATM の高速通信回線に収容する手法を提案して上記の課題にこたえるものである。本論文の研究手法の特徴は、実機の ATM スイッチや ATM カードを使用して実験評価を行ったことである。

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 章は、ATM の VBR (Variable Bit Rate) を用いた TCP/IP 通信の実現法を論じている。TCP/IP プロトコルを用いた構内網 (LAN) を ATM 網で相互接続するには、可変速度通信トラフィックの収容に適した ATM の VBR を選択すると良い。本論文は、実機を用いて広域網をエミュレーションする実験を行い、TCP トラフィックに適した VBR 用のトラフィックパラメータを定める方法を提案している。もし TCP トラフィックが ATM のトラフィックパラメータと適合しない場合には UPC (Usage Parameter Control) 機能によるセルの廃棄が起こる。このセル廃棄が TCP スループットに及ぼす影響を実験により評価する。

具体的には、TCP トラフィックを特徴づける通信試験を行い、パラメータである SCR (Sustainable Cell Rate, セルの平均速度) および MBS (Maximum Burst Size, 最大速度で連続送出可能なバースト長) を適切に定める。その SCR と MBS の数値よりも小さい値が設定された場合には、UPC 機能によるセル廃棄が発生する。この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。ここでは以下の事実が明らかになった。

a) 1 つの TCP コネクションに対応する SCR と MBS を適切に定めることができる。その数値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低下する。

b) 複数の TCP 多重コネクションの場合には、SCR は TCP コネクションの数だけ倍数する必要がある。MBS はコネクション数の倍数よりも小さい値の設定で良い。

第 3 章では、TCP のウインドウ スケール オプションを用いて、TCP トラヒックを広域 ATM 網 (VBR) に効率的に收容する方法を提案する。標準的な TCP のウインドウサイズは最大 64K バイトと RFC で規定されている。国際網では往復遅延時間 (RTT) が大きいいため、ウインドウ スケール オプションを用いてウインドウサイズを標準値から拡大するのが適切である。この場合の SCR と MBS の設定方法は第 2 章で述べた技術と同様である。さらにスループットの傾向も同様の特性を示す。ただし TCP 端末の性能が低い場合や、PCR (Peak Cell Rate, セルの最大速度) の値が物理回線速度 (本論文では 155 Mbit/s) に設定された場合には、求められた設定値よりも低い値に MBS を設定してもスループットの劣化が起こらない。

第 4 章では、ATM VBR における選択的セル廃棄オプションである Selective Cell Discard (SCD) を適用して輻輳制御を行う。このときのセル廃棄が 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適否を判断する。本論文は、SCD によるセル廃棄を SCR と MBS の UPC 違反セルに対して適用して、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 中継回線の利用率では同様の傾向を示すが、TCP スループットは高い公平性を提供できることが明らかになった。ATM 中継回線の有効利用の観点からすると、SCD を用いない VBR と比較して、より高い利用率を実現できる。

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する。第 5 章の実験では TCP トラヒックを対象として、UBR に対応させた DF (Default Forwarding) PHB (Per-Hop Behavior) 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 收容時の各申告帯域の保証、DF PHB との差別化がいずれも実現可能であることを明らかにした。

第 6 章は、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 QoS の差別化は重要な課題である。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 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

述を行う処理系を新たに開発した。この処理系の特徴は、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て実装したことにある。新機能と同時に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いる。

提案手法と従来型の 2 種類のルーティングプロトコルは、スケ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、QoS ルーティングプロトコルが起動される設計である。具体的な Motion JPEG フレームの動画転送実験を行い、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。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步を踏み出している。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、仮想化されたルータがトラヒック制御機能をスライス単位で柔軟に利用するために、本論文で得られた知見を活用することができる。

以上を要するに、本論文は 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パラメータの最適な設定手法を確立した。さらに ATM 網内で優先度の異なるトラヒックを差別化する手法を確立した。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研究して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した。現在のインターネットでは携帯電話の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は、本論文で検討して提案した技術が様々な形で応用できる。本論文の研究成果は、現在のインターネットが抱える諸課題の解決に向けて有用である。よって本論文は、博士（工学）早稲田大学の学位論文として価値あるものと認める。

2015 年 2 月

審査員

主査	早稲田大学教授	工学博士（東京大学）	後藤 滋樹
	早稲田大学教授	工学博士（早稲田大学）	加藤 勇
	早稲田大学教授	Ph.D.（イリノイ大学）	中里 秀則
	早稲田大学准教授	博士（情報科学）（早稲田大学）	森 達哉