

Title	資源予約プロトコルRSVPにおけるWFQ法を用いた公平な帯域制御法
Author(s)	松永, 泰義
Citation	
Issue Date	2000-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	author
URL	http://hdl.handle.net/10119/1363
Rights	
Description	Supervisor:堀口 進, 情報科学研究科, 修士

修 士 論 文

**資源予約プロトコル RSVP における
WFQ 法を用いた公平な帯域制御法**

指導教官 堀口進 教授

北陸先端科学技術大学院大学
情報科学研究科情報システム学専攻

松永 泰義

2000 年 2 月 15 日

要 旨

近年，マルチメディア通信を行うために帯域を保証したネットワークが必要とされている．IP(Internet Protocol)はベストエフォート型のデータ転送を行うため，マルチメディア通信には不向きである．IP上でマルチメディア通信を行うためには，RSVP(Resource reSerVation Protocol)などを用いて帯域予約を行う必要がある．マルチメディア通信は大きな帯域幅を必要とするため，限られた帯域を効率よく利用するための帯域制御方式が必要である．本研究では，WFQ(Weighted Fair Queueing)法に帯域要求量の最大値と最小値を定義したWFQMM(WFQ with the Maximum and the Minimum bandwidth)を用いた公平な帯域割り当て法を提案する．待ち行列の $M/M/s$ モデルを用いたシミュレーションを行った結果，帯域制御を行わない場合に比べて安定した満足度（平均帯域量）が得られ，帯域予約開始までの待ち時間を少なくすることができた．また，WFQMM法を用いて予約を行ったストリームは，帯域制御を行わずに帯域予約を行った場合に比べてパケット遅延を抑えることができた．

目次

1 序論	1
1.1 研究の目的と背景	1
1.2 本論文の構成	3
2 マルチメディア通信	4
2.1 はじめに	4
2.2 QoS を考慮したネットワーク	5
2.2.1 ATM	5
2.2.2 マルチメディア LAN	6
2.3 資源予約プロトコル RSVP	7
2.3.1 RSVP の概要	7
2.3.2 RSVP の問題点	9
2.4 まとめ	9
3 公平な帯域割り当て法	10
3.1 はじめに	10
3.2 帯域割り当ての指標	11
3.2.1 公平性	11
3.2.2 満足度	12
3.3 WFQ 法による帯域割り当て法	12
3.3.1 WFQ 法の概要	12
3.3.2 WFQ 法の問題点	13
3.4 WFQMM 法による帯域割り当て法	13
3.4.1 WFQMM 法の概要	13
3.4.2 WFQMM 法の問題点と課題	14

3.5	帯域予約プロトコルの解析モデル	15
3.5.1	待ち行列理論	15
3.5.2	M/M/1	16
3.5.3	M/M/s	17
3.5.4	M/M/sを用いた解析モデル	18
3.5.5	平均値の法則	19
3.5.6	M/M/sを用いた待ち時間の推測	21
3.6	帯域予約開始時刻の推定手法	21
3.6.1	帯域予約開始時刻推定法の概要	21
3.6.2	待ち行列理論による推定時刻の導出	23
3.7	まとめ	24
4	性能評価	25
4.1	はじめに	25
4.2	ストリーム帯域予約の性能評価	25
4.2.1	実験の概要	25
4.2.2	WFQMM法の性能評価	26
4.2.3	窓口数による性能評価	28
4.2.4	ネットワーク状態による性能評価	28
4.2.5	ストリーム帯域予約の性能に対する考察	32
4.3	パケット転送の性能	32
4.3.1	パケット転送の概要	32
4.3.2	ネットワークシミュレータ nam との比較	34
4.3.3	WFQMM法とベストエフォート方式によるパケット遅延の性能	34
4.3.4	WFQMM法とベストエフォート方式によるパケットの転送量	36
4.3.5	各帯域予約法によるパケットの遅延の性能評価	39
4.3.6	各帯域予約法によるパケット転送量の性能評価	39
4.3.7	パケット転送性能に対する考察	39
4.4	まとめ	42
5	結論	43
5.1	まとめ	43
5.2	問題点と今後の課題	43

図 目 次

2.1	RSVP の位置する層	7
2.2	RSVP メッセージの手順	8
3.1	M/M/1 の状態遷移図	16
3.2	M/M/s の状態遷移図	17
3.3	窓口数決定の概念図	19
3.4	L_q/W_q の時間変化	20
3.5	待ち時間の計測値	21
3.6	帯域予約開始時刻の推定手法	23
4.1	WFQMM 法によるストリームの満足度の時間変化	27
4.2	WFQMM 法によるストリームの待ち時間の時間変化	27
4.3	WFQMM 法の窓口数 s による満足度の時間変化 ($\lambda = 0.7$)	29
4.4	WFQMM 法の窓口数 s による待ち時間の時間変化 ($\lambda = 0.7$)	29
4.5	窓口数 s による ρ と μW_q の関係図	30
4.6	WFQMM 法の窓口数 s による満足度の時間変化 ($\mu = 0.1$)	31
4.7	WFQMM 法の窓口数 s による待ち時間の時間変化 ($\mu = 0.1$)	31
4.8	ネットワーク状態 ρ による満足度の時間変化	33
4.9	ネットワーク状態 ρ による待ち時間の時間変化	33
4.10	ネットワークシミュレータ nam の動作状況	35
4.11	nam と同一パラメータによるシミュレータのパケット平均遅延	36
4.12	WFQMM 法とベストエフォート方式のパケット最大遅延	37
4.13	WFQMM 法とベストエフォート方式のパケット平均遅延	37
4.14	WFQMM 法とベストエフォート方式の累積パケット数	38
4.15	WFQMM 法とベストエフォート方式の平均パケット数	38
4.16	各帯域予約法によるパケット最大遅延の時間変化	40

4.17 各帯域予約法によるパケット平均遅延の時間変化	40
4.18 各帯域予約法による累積パケット数	41
4.19 各帯域予約法による平均パケット数	41

第 1 章

序論

1.1 研究の目的と背景

近年, ATM(Asynchronous Transfer Mode:非同期通信モード)や Gigabit イーサネットなどの高速ネットワークの登場により, 動画像や音声データをコンピューターネットワーク上でリアルタイムに送受信するマルチメディア通信が注目されている. マルチメディア通信は, 通常のデータ通信よりも送受信するデータ量が多い. そのため, 快適なマルチメディア通信を行うためには, 安定した QoS(Quality of Service)[1, 2] を得ることができるネットワークが必要である. しかし, ネットワークの帯域は制限があるために, 常に高品質のデータ転送が可能であるとは限らない.

マルチメディア通信は, 高速かつ QoS を保証したネットワークが必要である. QoS とは, ネットワークのサービス品質のことであり, 帯域量・パケットの転送品質により決まる. パケットの転送品質には, パケットの転送に必要な時間(遅延)やパケットの損失率がある. 利用できる帯域量が多い場合, パケットの転送品質が向上し, QoS は向上する. また, 安定した帯域量の供給はパケットの転送品質に重要であるため, マルチメディア通信を行うには, 帯域予約が不可欠である. さらに, マルチメディア通信には, パケットの遅延保証が重要である. ほぼ全てのパケットが受信ホストに届かない場合, 受信ホストは良質な動画像や音声の再生ができない. よって, パケットの遅延は, 動画像の再生に影響のない範囲にする必要がある. 以上のことから, QoS を保証したネットワークとは主に帯域を保証し, 遅延の最大値(最大遅延)を保証するネットワークのことである.

現在, QoS 保証を行うネットワークには ATM がある. ATM では, 53 バイトの固定長セルを使用し, CBR(Constant Bit Rate), VBR(Variable Bit Rate), ABR(Available Bit Rate)などのサービスクラスが定義されている. ユーザーは, 必要とするサービスクラス

を選択することにより、QoS 保証されたネットワークを利用できる。CBR は常に決められたビットレートが確保されるため、音声サービスなどに適している。VBR は rt-VBR(real time-VBR) と nrt-VBR(non real time-VBR) の 2 種類があり、ビットレートは可変である。ABR はネットワーク状態などにより、ユーザーが指定した最大と最小の範囲でビットレートが変化する。ABR はインターネットの環境で発生する多数の SVC(Switched Virtual Connection) に対して有効である。このように、ATM は非常にマルチメディア通信に対して有効なネットワークである。しかし、IP パケットを ATM 上に転送する場合、IP アドレスと ATM アドレスの変換を行う必要があり、ATM 上に、インターネットの IP パケットを転送する IP over ATM の研究が行われている。

インターネットの IP は、QoS を保証する仕組みが確立していない。そのため、IP 上で QoS を保証する仕組みが必要である。そこで、IETF(Internet Engineering Task Force) は IP 上で動作する資源予約プロトコル RSVP(Resource reSerVation Protocol)[3, 4] の標準化を進めている。RSVP は、帯域予約を行う手順の規約について規定したプロトコルである。RSVP は送信ホストから受信ホストが経由するルータに、RSVP メッセージと呼ばれるシグナルリングを送信することにより、帯域予約を実現する。RSVP を利用し、各ユーザーが任意に帯域予約を行う場合、限りある帯域がすぐに枯渇する可能性がある。そこで、多くのストリーム（帯域予約を行うフロー）が限られた帯域を効率的に利用するため、帯域制御の研究が現在盛んに行われている。

帯域を効率的に利用するために、Gupta ら [5] は帯域要求量に最大値、最小値を使用し、各ストリームの優先度に基づいて帯域量を決定する手法を提案した。また、板手ら [6, 7] はネットワークの混雑時に、ストリームの品質関数の評価から、既存のストリームの帯域を調整する手法を提案した。しかし、従来の研究は混雑時の帯域の効率利用や帯域割り当ての際の公平性のみを考慮し、ネットワーク状態に依存する公平な帯域割り当て法である。

本研究では、先ず WFQ(Weighted Fair Queing) 法 [1, 8, 9] による公平な帯域割り当て法と帯域予約開始時刻推定法について議論する。WFQ 法は、帯域割り当て量を重みつけにより帯域量を決定する手法である。しかし、WFQ 法は帯域量の上限と下限が設けられていないために、必要以上の帯域が割り当てられることや最低限の帯域の供給が保証されないという問題点がある。

そこで、本研究は、WFQ 法に最大・最小帯域要求量を組み合わせた WFQMM(WFQ with the Maximum and the Minimum bandwidth) 法を提案する。帯域制御には、新たなストリームに必要な帯域を作り、公平な帯域割り当てを行う必要がある。新たなストリームに対して、次々と帯域予約を実行した場合、ネットワークに存在するストリームの QoS

が急激に低下する可能性がある．そこで，本研究は満足度（時間あたりの平均帯域量）を導入することにより，待ち行列理論 [10, 11] を用いて帯域予約を行う時刻を決定する帯域予約開始時刻推定法を提案する．待ち行列理論はネットワークのトラフィック測定のモデルに多く利用される [12]．帯域予約開始時刻推定法により，ストリームの QoS の急激な低下の緩和をすることができる．

提案する帯域予約法の性能を詳しく調べるために，WFQMM 法および帯域予約開始時刻推定法のシミュレータを設計および実装をし，性能評価を行う．ストリームの評価指標には，満足度および帯域予約開始までの待ち時間を用いる．また，帯域予約を行ったストリームに，パケット転送を行い，パケットの遅延および転送量の評価を行う．ベストエフォート（パケット転送の最善努力方式）および最大・最小要求帯域量で予約を行う場合と比較して WFQMM 法のパケット遅延および転送量の有効性について詳しく議論する．

1.2 本論文の構成

本論文の構成は以下の通りである．第 2 章では，現在のマルチメディア通信を行うためのネットワークやプロトコルの現状および問題点をまとめる．第 3 章では，ストリームの指標に用いる満足度を定義し，WFQ 法および本研究で提案する WFQMM 法について述べる．また，帯域予約ネットワークに待ち行列理論を用いたモデル化と帯域予約を開始する時刻を決定する帯域予約開始時刻推定法について述べる．第 4 章では，ストリームの満足度および帯域予約開始までの待ち時間，パケット遅延および転送量をシミュレーションによって評価する．第 5 章では，本研究の結果をまとめるとともに，今後の課題について述べる．

第 2 章

マルチメディア通信

2.1 はじめに

本章では，マルチメディア通信を行うために，QoS を保証したネットワークやプロトコルについて述べる．マルチメディア通信とは，コンピューターネットワークを用いて，動画像や音声などをリアルタイムに送受信する通信のことである．マルチメディア通信の実現のために，画像や音声をネットワーク経由で効率良く転送する研究が多く行われている [13, 14, 15]．マルチメディア通信を良好に行うためには，ネットワークに QoS の保証を行う必要がある．QoS を保証したネットワークとは，基本的には帯域保証と遅延保証を行ったネットワークである．

QoS 保証を実現したネットワークには ITU-T(International Telecommunication Union: 国際電気通信連合・通信セクター) により標準化された ATM がある．ATM は 53 バイトのセルと呼ばれる固定長データを使用し，25Mbps, 155Mbps, 622Mbps などの伝送速度を持つ通信回線を提供する．ATM は規定されたサービスクラスを利用することにより，QoS 保証を行うことが可能である．

また，LAN(Local Area Network) 上で，マルチメディア通信を行うためのマルチメディア LAN の研究が進められている．LAN はデータの伝送路を複数のホストが共有して使用するために，アクセス方式（伝送路の使用の手順）を定義しなければならない．マルチメディア LAN とは，アクセス方式をマルチメディアに適した方式を実装した LAN である．マルチメディア LAN の代表例には，ATMR[19] が挙げられる．

一方，従来のインターネットで使用する IP はベストエフォート型であるために，マルチメディア通信を実現できない．そこで，IETF は IP 上で帯域予約を行い，マルチメディア通信を行うためのプロトコルとして RSVP の標準化を進めている．RSVP は IP 上で帯

域予約を行うための手順を示したプロトコルである。RSVP は、送信先ホストから受信先ホストまでのルータに帯域予約を行うための RSVP メッセージを通達し、帯域確保を実現する。

本章の構成は以下の通りである。2.2 節では、マルチメディアに適したネットワークである ATM とマルチメディア LAN について述べる。2.3 節では、IP 上で帯域予約を行うプロトコルである RSVP について述べる。2.4 節では、マルチメディア通信のまとめを行う。

2.2 QoS を考慮したネットワーク

2.2.1 ATM

本章では ATM(Asynchronous Transfer Mode:非同期通信モード) の基本的な特徴について紹介する。ATM は広域網におけるマルチメディアネットワークを目指した交換方式として ITU-T により標準化された。ATM の特徴として、以下の 3 つが挙げられる。

- 固定長セルにより、高速かつ広帯域なデータ転送が可能である
- LAN, WAN(Wide Area Network) を問わない、シームレスな環境が提供できる
- QoS 保証機能がある

ATM は、53 バイト (48 バイトのデータ+5 バイトのヘッダ) の固定長セルを用いて 25Mbps, 155Mbps, 622Mbps などの種々の伝送速度を実現する。また、ATM の特徴は通信サービスの品質保証であり、規定された以下のサービスクラスを利用できる。

CBR(Constant Bit Rate) : CBR は常に決められたビットレートが保証される。一定のビットレートを保証できることから音声などの転送に多く用いられる。

rt-VBR(real time-Variable Bit Rate) : rt-VBR は最低限必要な帯域を保証し、他の VC(Virtual Channel) が使用していない帯域を借りることができる。rt-VBR は動画などの帯域が大きくなるほど、良質になる通信に利用される。

nrt-VBR(non real time-Variable Bit Rate) : nrt-VBR は短時間に高い通信帯域を必要とする場合に利用される。

UBR(Unspecified Bit Rate) : ベストエフォート型。最大ビットレートを規定し、帯域を共有して利用する。

ABR(Available Bit Rate)：指定した最大と最小の範囲内で帯域で通信状態に応じて変化する．インターネットでの多数の SVC に対して，対応できるサービスクラスであると検討されている．

以上のサービスクラスの中では，CBR が通信帯域の確保や遅延保証のために最優先されるクラスである．

ATM は現在のインターネットに代わる新しいネットワークとして考えられたが，爆発的に普及したインターネットと ATM が置き換わることは難しい．そのため，現在では ATM 上で IP を利用するために，IPOA(IP Over ATM) が研究がされている．ATM 上で IP を利用するためには，次の方法が挙げられる．

LAN emulation：従来の LAN にそのまま ATM を利用できるようにデータリンク層でエミュレーションする方式である．データリンク層で扱うフレームは ATM レイヤでカプセル化され，ユーザーはバックボーンに ATM が使われていることを意識しないで IP を利用することができる．

Classical IP over ATM：IP アドレスを ATM-ARP(ATM-Address Resolution Protocol) で ATM アドレスに変換する．ATM-ARP はホストやルータの IP アドレスと ATM アドレスの対応テーブルを持っており，IP パケットに対して ATM アドレスと IP アドレスの相互変換を行う．

2.2.2 マルチメディア LAN

マルチメディア LAN は，LAN 上でマルチメディア通信を実現することである．LAN では，全ての端末が伝送路を共用するため，その伝送路に対するアクセス方式を決める必要がある．現在のイーサネットで一般的に利用されている CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) は，伝送路上で衝突が起こると一定時間後にパケットの再送が行われる．CSMA/CD は伝送路が 30%以上使用されている場合衝突が頻発し，遅延の保証を行うことができなくなる．現在の CSMA/CD は伝送効率が悪く，マルチメディア通信には不向きである．そこで，伝送路に対するアクセス方式をマルチメディア通信に適している方式にすることにより，LAN 上でマルチメディア通信を実現することができる．マルチメディア LAN に望ましい機能には以下が挙げられる．

- 高いスループットが得られること
- 低い遅延時間で通信が行えること

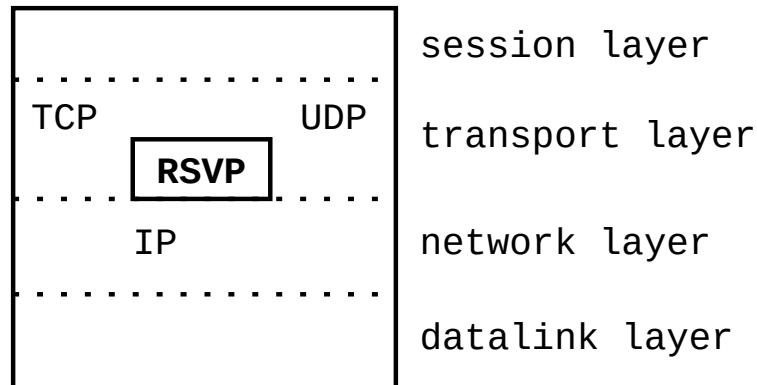


図 2.1: RSVP の位置する層

- 最大遅延時間が保証されていること
- マルチキャストが行えること

現在，考えられている主なマルチメディア LAN には ATMR が挙げられる．ATMR は ATM-LAN の利用のために開発されたため，QoS 保証に優れている．ATMR は，NTT 交換システム研究所によって開発された方式である．各ノードはセルの転送数を公平に割り当てられ，データを送信する．

2.3 資源予約プロトコル RSVP

2.3.1 RSVP の概要

本節では，インターネットで利用する IP 上で動作する資源予約プロトコル RSVP(Resource reSerVation Protocol)[3, 4] について述べる．RSVP は IP 上で帯域予約を行うための手順を示したプロトコルである．RSVP を利用することにより，IP 上に帯域の確保を行うことが可能となる．RSVP は図 2.1 のようにネットワーク層の IP の 1 つ上位に位置するトランスポート層で動作する．RSVP は以下の特徴を持っている．

- トランスポート層に位置し，IP4 および IP6 上で動作する．
- ユニキャストの他，将来マルチキャストで動作するように設計されている．
- 受信ホストが主導で動作する．

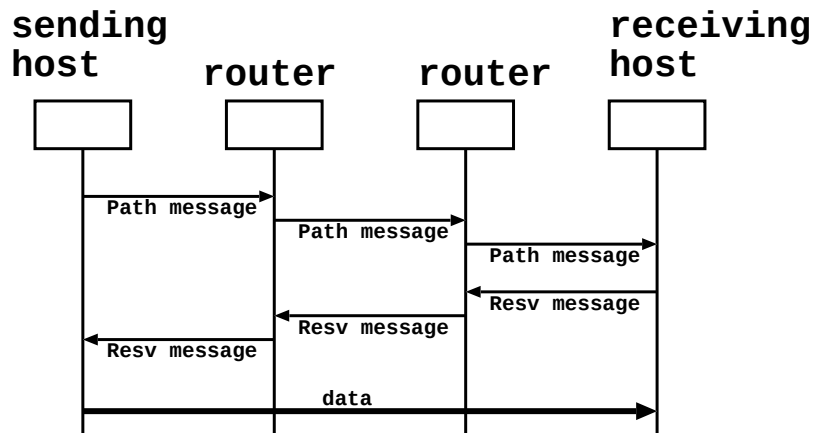


図 2.2: RSVP メッセージの手順

- 通信中の状態変更に動的に対応できる。

RSVP は送信ホストと受信ホストがホスト間に存在するルータに、RSVP メッセージを送信することにより動作する。RSVP メッセージには以下の種類がある。

Path メッセージ：送信ホストから受信ホストに送信されるメッセージであり、データパケットの種類、ルーティングなどの情報を持っている。

Resv メッセージ：受信ホストから送信ホストに送信されるメッセージであり、予約要求の情報を持っている。

Teardown メッセージ：予約情報を取り消すメッセージである。

Error メッセージ：予約が要求通りに行えない場合などに発生し、帯域予約のエラーに関する情報を持つメッセージである。

RSVP のメッセージ手順を図 2.2 に示す。送信ホストから Path メッセージを受信ホストに伝達する。Path メッセージは受信ホストまでに存在するルータを経由する。Path メッセージを受信したホストは Resv メッセージを送信先ホストに返送する。Resv メッセージがエラーを起こすことなく、送信ホストに届いた場合、帯域予約が完了する。RSVP のメッセージ中にエラーが発生した場合は、Error メッセージをルータもしくはホストが送信し、帯域予約は失敗する。

2.3.2 RSVP の問題点

RSVP は IP 上で帯域予約を行うためのプロトコルとして注目されている。しかし、RSVP はいくつかの問題点を抱えており、現在は、実用化のための実験段階である。以下に RSVP の問題点を挙げる。

- ホスト間に存在するルータが RSVP 非対応である場合、そのルータを経由したリンク上での帯域保証を行うことができない。マルチメディア通信は、ホスト間の全てのリンクで帯域保証が行われない場合、良質な通信をできない可能性がある。
- RSVP を利用した帯域保証を行う場合、ユーザーは単一プロバイダ内のみで帯域保証を行うことは少ない。複数のプロバイダを経由する帯域の利用方法が困難である。
- RSVP にはルーティングの機能は実装されていない。要求された QoS 条件を満たす最適なルーティングを設定することが困難である。
- RSVP は、帯域予約を行うためのプロトコルであるため、要求される QoS 条件に完全には応えることができない可能性がある。

2.4 まとめ

本章では、QoS を考慮したネットワークとして、ATM やマルチメディア LAN について述べた。現在 ATM 上で IP を利用する IP over ATM が研究されている。また、IP 上で動作する資源予約プロトコル RSVP の問題点について議論した。RSVP を利用することにより、IP 上で帯域を保証し、マルチメディア通信を行うことができる。ところが、各ユーザーが RSVP を帯域割り当ての制御を受けることなく利用した場合、通信帯域がすぐに枯渇する可能性がある。よって、帯域予約を行うことができるネットワークは、ネットワークの品質を考慮した帯域制御を行う必要がある。次章では、帯域制御を行うために、WFQ 法について議論し、新しい WFQMM 法を提案する。また、ストリームの帯域予約のモデル化について述べる。

第 3 章

公平な帯域割り当て法

3.1 はじめに

動画像や音声をネットワークで転送する場合、ユーザーの求める品質要求が満足されるものが望ましい。ユーザーの品質要求に応えるためには、ユーザーが求める帯域量を確保する必要がある。しかし、現在のインターネットで利用されている IP はベストエフォートにデータを転送する。そこで、IETF は IP 上で帯域予約を行う手順を規定したプロトコル RSVP の標準化を進めている。各ユーザーが RSVP を用いて自由に帯域予約を行った場合、限りある帯域資源が予約によりすぐに枯渇する問題がある。したがって、ユーザーの求める品質要求を可能な限り満たし、できるだけ多くのユーザーにサービスを提供するために帯域制御を行う必要がある。

IP 上にデータを転送する場合、データは可変長の IP パケットに分割される。IP パケットを転送するにはパケットに対して帯域の割り当てを行う必要がある。本研究はパケットの帯域割り当て法の 1 つである WFQ 法をストリームの帯域割り当て法に利用する。WFQ 法をストリームの帯域割り当てに用いる場合の問題点を挙げ、WFQ 法に最大・最小要求帯域量を定義した WFQMM 法を提案する。

WFQMM 法を用いて新たなストリームに帯域を割り当てる場合、ストリームの QoS が著しく低下する問題がある。そこで、待ち行列理論を用いてストリームの満足度（時間あたりの帯域量）を基準にした帯域予約開始時刻を決定する帯域予約開始時刻推定法を提案する。帯域予約開始時刻推定法は推定時刻を待ち行列理論を用いて推定する。

本章の構成は以下の通りである。3.2 節では、帯域割り当ての指標である公平性について検討し、満足度を定義する。3.3 節では、WFQ 法の概要と問題点について述べ、3.4 節では、WFQMM 法の概要と問題点について述べる。3.5 節では、待ち行列理論を用いて、

ストリームの帯域予約をモデル化を行い待ち時間について検討する．3.6 節では，帯域予約を開始する時刻を決定する帯域予約開始時刻推定法を提案する．3.7 節は，本章のまとめである．

3.2 帯域割り当ての指標

3.2.1 公平性

本節では，帯域割り当ての公平性について議論する．全てのストリームが要求する帯域量を割り当てることができる場合は公平性について検討する必要はない．しかし，帯域量は有限であるため，全てのストリームに対して要求通りの帯域量を保証することができない場合がある．そのような場合，可能な限り多くのストリームが満足できる公平な帯域割り当てを実現する必要がある．ネットワークの帯域割り当てにおける公平性として以下の2つが挙げられる．

グローバルアクセス公平性：全ノードで公平な帯域割り当てが行われることである．グローバルアクセス公平性を保たないと有利となる端末がネットワークを独占し，QoS 保証ができなくなる．

ローカルアクセス公平性：自ノードの使用するリンク間で公平な帯域割り当てが行われることである．マルチメディア通信では，ネットワークのトラフィック分布の偏りが大きくなるため，伝送路の帯域を有効に使うために，ローカルアクセス公平性を保つ必要がある．

帯域割り当ては以上のことに考慮する必要がある．公平な帯域割り当てを行うためには，要求帯域量に幅を持たせることで実現できる．要求帯域量の幅を利用することにより，柔軟に帯域を変化することができる．また，ストリームごとに必要な帯域量が違うために，全てのストリームに同じ帯域量を与えることは，必ずしも公平とは言えない．以上のことから，帯域割り当ての公平性の指針として以下の条件を持つ手法について検討する．

- 特定のストリームが帯域を独占しないために，必要帯域量の上限を設ける．
- 全てのストリームは，最低限必要な帯域量が保証される．
- ストリームに割り当てられる帯域量は重みづけにより，帯域量を変化させる．

3.2.2 満足度

QoS は利用できる帯域量，遅延，パケットロス率などの要因で変化する．しかし，それらの要因は密接に関係しており，遅延は帯域の使用率に大きく影響することが分かっている．遅延 D と帯域の利用率 U は一般に 3.1 式を満たす．

$$D = \frac{D_0}{1 - U} \quad (3.1)$$

ここで， D_0 は全ての帯域が利用できる場合の遅延である．3.1 式より，帯域量を大きく予約することで遅延増加を防ぐことができる．

次にストリーム i の時刻 t_0 から時刻 t の満足度 $S_i(t_0, t)$ を 3.2 式で定義する．

$$S_i(t_0, t) = \frac{1}{q_i^{max}} \frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t r_i(\tau) d\tau. \quad (3.2)$$

ここで，各変数の意味を以下に示す．

$$\begin{aligned} q_i^{max} &: \text{ストリーム } i \text{ の最大要求帯域量} \\ q_i^{min} &: \text{ストリーム } i \text{ の最小要求帯域量} \\ r_i(t) &: \text{ストリーム } i \text{ の帯域量} \end{aligned}$$

3.2 式は，帯域要求を行ってからサービスの終了までの単位時間あたりの帯域確保量を， $1/q_i^{max}$ により正規化した値である．正規化により，全てのストリームの満足度 $S_i(t_0, t)$ は $0 \sim 1$ の範囲となる．満足度 $S_i(t_0, t)$ が 1 となる場合は，帯域予約の待ち時間がなく，サービス中の帯域割り当て量が常に q_i^{max} の場合である．満足度 $S_i(t_0, t)$ は帯域確保量が大きい場合や，ストリームが帯域要求を開始してから実際に帯域予約ができるまでの待ち時間が小さい場合に大きくなる．

3.3 WFQ 法による帯域割り当て法

3.3.1 WFQ 法の概要

WFQ(Weighted Fair Queing) 法 [1, 8, 9] は FQ(Fair Queing) 法と呼ばれるパケットのデータ転送帯域割り当て法に重み付けを可能とした方法である．本研究では，WFQ 法を

ストリームの帯域予約に拡張し，その有効性について評価する．WFQ 法により，時刻 t におけるストリーム i に割り当てられる帯域量 $r_i'(t)$ は

$$r_i'(t) = \begin{cases} \frac{\phi_i}{\sum_{j \in B(t)} \phi_j} \gamma, & i \in B(t), \\ 0, & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3.3)$$

となる．ここで，各変数の意味を以下に示す．

$r_i'(t)$: ストリーム i の帯域量

ϕ_i : ストリーム i の重み

γ : 帯域の全体量

$B(t)$: 時刻 t に存在するストリームの全体集合

3.3.2 WFQ 法の問題点

WFQ 法では，帯域割り当て量の上限と下限が定まっていない．そのため，帯域量を必要以上に割り当てることや，最低限必要な帯域量が保証されない問題点がある．例えば，あるユーザーが 10Mbps の帯域量を要求した場合，WFQ 法ではストリームに与えられた重みにより，10Mbps を下回る可能性がある．また，重みが大きい場合，20Mbps の帯域量を割り当てられる可能性がある．更に，帯域割り当て量の下限が存在しないため，ストリームの受け入れ数に限りがない．したがって，ストリーム数が増えるほど，各ストリームに割り当てられる帯域量は少なくなる．

3.4 WFQMM 法による帯域割り当て法

3.4.1 WFQMM 法の概要

WFQ 法の問題点を考慮して，WFQ 法に最大・最小要求帯域量を規定する WFQMM(WFQ with the Maximum and the Minimum bandwidth) 法について提案する．WFQMM 法は，最大要求帯域量の定義により必要以上の帯域が割り当てが行われることはない．また，最小要求帯域量の定義により，最小の帯域量を保証することができる．WFQMM 法はネットワーク状態により，最大帯域量と最小帯域量の範囲で帯域割り当て量を変化させ，帯域の効率的な利用ができる．WFQMM 法を 3.4 式に示す．

$$r_i(t) = \begin{cases} \frac{\phi_i}{\sum_{j \in B(t)} \phi_j} \gamma', & q_i^{max} \geq r_i'(t) \geq q_i^{min}, \\ q_i^{max}, & r_i'(t) > q_i^{max}, \\ q_i^{min}, & q_i^{min} > r_i'(t). \end{cases} \quad (3.4)$$

ここで，各変数の意味を以下に示す．

- $r_i(t)$: ストリーム i の帯域量
- γ' : 利用できる帯域量
- q_i^{max} : ストリーム i の最大要求帯域量
- q_i^{min} : ストリーム i の最小要求帯域量

利用できる帯域量 γ' はストリームに q_i^{min} の帯域量を保証するために，一般的に全帯域量 γ' より小さくなる．3.4 式により q_i^{max} と q_i^{min} の範囲でストリームに対して動的に帯域を割り当てることができる．非混雑時には q_i^{max} を，混雑時には q_i^{min} の帯域をストリームに割り当てることにより帯域の効率的な割り当てが可能となる．

3.4.2 WFQMM 法の問題点と課題

WFQMM 法は以下の問題点がある．

- 混雑時は q_i^{min} の値によりストリームの割り当て帯域量が決まるため， q_i^{min} の値を慎重に決定しなければならない．
- 帯域量が動的に変化するため，ホスト間に存在するルータが情報を交換する必要があるため，ルータの情報交換の手順を明確にする必要がある．

q_i^{min} の決定には具体的には次のような問題が起きる．常にストリームに割り当てられた帯域量がストリームの必要帯域量を満たしているとは限らない．例えば，動画像はフレームによって，必要な帯域量が変化する．そのため， $r_i(t)=q_i^{min}$ と帯域が割り当てられた場合に， q_i^{min} では動画像転送の必要帯域を満たさない場合が起きる．その場合の解決策を以下に示す．

- (i) あらかじめ上記の問題点が起こらないように q_i^{min} を設定する．
- (ii) 動画の品質を調整することにより解決する．

(iii) 動画像フレームに優先度を用いて、優先度の高いフレームを送出する.

以上にあげた解決策を行うためには、動画像の必要帯域量を導出する必要がある. 例えば、動画像のデータ形式 Motion JPEG に関しては 3.5 式で必要帯域量 q_{need} を導出できる.

$$q_{need} = pc\alpha f \quad (3.5)$$

q_{need} : 必要帯域量
 p : 画像の大きさ (pixel)
 c : 解像度 (bit)
 α : 画像の圧縮率
 f : フレームレート (1/s)

各フレームの q_{need} を導出し、 q_{need} の最大値を q_i^{min} と設定することにより、割り当てられた帯域量が必要帯域量に満たない問題点は解決される. しかし、 q_{need} の最大値を q_i^{min} と設定することにより、割り当て帯域量の無駄使いが考えられる. そこで、 q_i^{min} の帯域量で必要帯域量のある程度満たすことができる値に設定する. そして、割り当てられた帯域量が必要帯域量に満たない場合は、画質の調整、フレームの差別化などにより、問題を解決することができる [13].

以上のことから WFQMM 法の今後の課題には、ストリームの動画像転送の場合のパラメータ ($\phi, q_i^{max}, q_i^{min}$) の設定が挙げられる.

3.5 帯域予約プロトコルの解析モデル

3.5.1 待ち行列理論

本節は待ち行列理論 [10] について紹介する. 待ち行列理論はコンピューターネットワークのパケットの転送モデル、帯域予約モデルなどに対してよく用いられる. 待ち行列の型は $X/Y/Z(A)$ の形で表し、以下の意味を持つ.

- X 到着の確率分布
- Y サービスの確率分布
- Z サービスを受けることができる窓口数
- A 待ち行列に並ぶことができる限界数

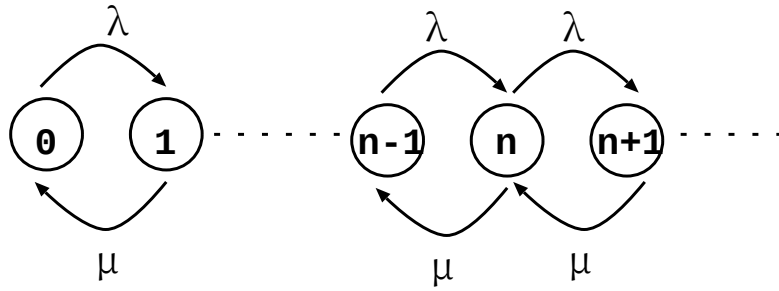


図 3.1: M/M/1 の状態遷移図

A が ∞ の場合は省略する．また， X, Y には以下の記号が入る．

M 到着はポアソン分布，サービスは指数分布

D 一様分布

G 一般分布

M はランダムな到着およびサービスをモデル化する場合に多く使用される．

また， λ を単位時間あたりの平均到着数， μ を単位時間あたりの平均サービス数， s をサービス窓口数， $\rho = \lambda/(s\mu)$ をトラフィック密度， $a = \lambda/\mu$ とする．

3.5.2 M/M/1

待ち行列 M/M/1 は，到着はポアソン分布，サービスは指数分布で窓口数 $s=1$ の待ち行列を指す．図 3.1 に，M/M/1 の状態遷移図を示す．M/M/1 の系内数（待ち行列数とサービスを受けている数）の確率分布は，到着率 λ ，サービス率 μ ， $\rho < 1$ と定義し，3.6 式で表される．

$$p_n = \rho^n(1 - \rho). \quad (3.6)$$

そして，待ち行列の平均値 L_q ，系内数（待ち行列数とサービスを受けている数）の平均値 L ，待ち行列の平均待ち時間 W_q ，および系内数の平均時間 W は以下の式で表される．

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)} = L - \rho. \quad (3.7)$$

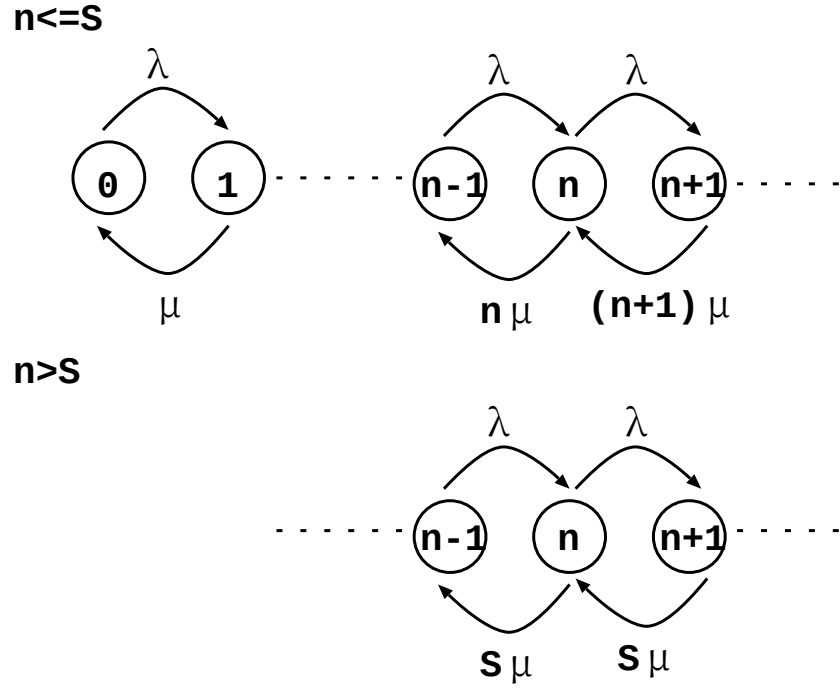


図 3.2: M/M/s の状態遷移図

$$L = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}. \quad (3.8)$$

$$W_q = \frac{\rho}{(1 - \rho)\mu}. \quad (3.9)$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (3.10)$$

3.5.3 M/M/s

待ち行列 M/M/s は、窓口数 s が複数の待ち行列を指す。図 3.2 に、M/M/s の状態遷移図を示す。図 3.2 より、M/M/s の系内数は窓口 s が全て埋まっていれば 1 つのサービスが終了する確率は $s\mu$ であり、窓口 s が全て埋まっていない場合は 1 つのサービスが終了する確率は $n\mu$ (n は待ち行列に存在している系内数) である。系内数の確率分布は、到着率 λ 、サービス率 μ 、 $\rho < 1$ 、 $a = \lambda/\mu$ と定義し、3.11 式で表される。

$$p_n = \begin{cases} \frac{a^n}{n!} p_0, & 0 \leq n \leq s \\ \frac{a^n}{s! s^{n-s}} p_0, & s \leq n \end{cases} \quad (3.11)$$

ここで p_0 は 3.12 式で表される.

$$p_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{a^n}{n!} + \frac{a^s}{(s-1)!(s-a)}} \quad (3.12)$$

待ち行列の平均値 L_q , 系内数の平均値 L , 待ち行列の平均待ち時間 W_q , 系内数の平均時間 W は以下の式で表される.

$$L_q = \frac{\lambda \mu a^s p_0}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2} \quad (3.13)$$

$$L = L_q + a. \quad (3.14)$$

$$W_q = \frac{\mu a^s p_0}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2} = \frac{L_q}{\lambda}. \quad (3.15)$$

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (3.16)$$

3.5.4 M/M/s を用いた解析モデル

本節では, 待ち行列理論を用いたストリームの帯域予約のモデル化について述べる. 待ち行列 M/M/s では窓口 s は変化しない. 実際のストリームの帯域予約は, 帯域量の上限は存在するが, サービスを受け入れるストリーム数は一定ではない. したがって, M/M/s を利用して帯域予約ネットワークをモデル化を行う場合, 窓口数 s を明確に定義する必要がある. 本研究では, 初期の窓口 s を 3.17 式で定義する.

$$s = \frac{(\text{帯域量全体})}{(\text{混雑時におけるストリームの帯域量})} \quad (3.17)$$

割り当てられる帯域量の合計が帯域量全体と等しい場合は問題は起きない. しかし, 多くの場合, 帯域量全体を予約に使用することはできないため, 帯域予約に使用されない帯域量分が誤差を生じる. そこで, 本研究ではストリーム列 R_m^k に対する窓口数 s'_k の期待値を窓口数 s と定義する. 図 3.3 は, ストリーム列 R_m^k が全帯域量 γ に設けることができる窓口数 s'_k を示している. そして, s'_k の期待値を 3.18 式より導出し, 窓口数 s と定義する.

$$s = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N s'_k \quad (3.18)$$

ここで, 各変数の意味を以下に示す.

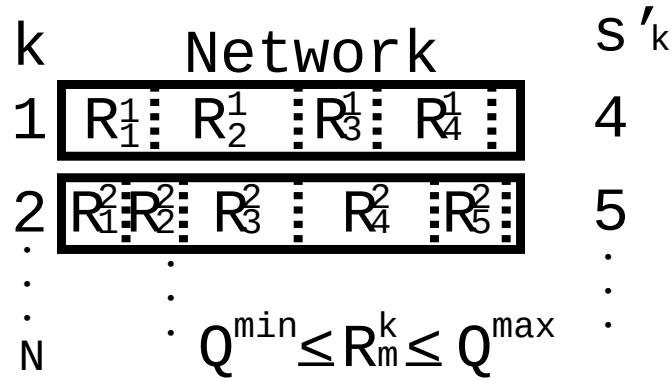


図 3.3: 窓口数決定の概念図

- $Q^{\min}$: ストリームの割り当てられる帯域量の下限
 $Q^{\max}$: ストリームの割り当てられる帯域量の上限
 R_m^k : ストリーム m が得られる帯域量

全ての R_m^k 列に対する s'_k の期待値を求め窓口数 s を決定するためには膨大な計算量が必要である．そこで本論文では，1000 組の R_m^k 列を用いて窓口数 s を導出する．

3.5.5 平均値の法則

平均値の法則は平均待ち行列数 L_q と平均待ち時間 W_q の関係を示した式である．平均値の法則はリトルの定理と呼ばれることもあり，一般に窓口数 s とは無関係に成り立つ．平均値の法則を 3.19 式を示す．

$$L_q = \lambda W_q \quad (3.19)$$

3.19 式より L_q/W_q の値は λ の値と等しいことが分かる．そこで，シミュレータの信頼性を確認するため，平均値の法則を満たしているかを検討する．シミュレータのパラメータは， $\lambda = 0.7$, $\mu = 0.1$ とした．図 3.4 に L_q/W_q の計測値を示す．ここで，timestep は 100 ミリ秒である．図 3.4 より， L_q/W_q の計測値は 0.7 の近辺にあり，帯域予約のモデルは平均値の法則を満たしていることが分かった．

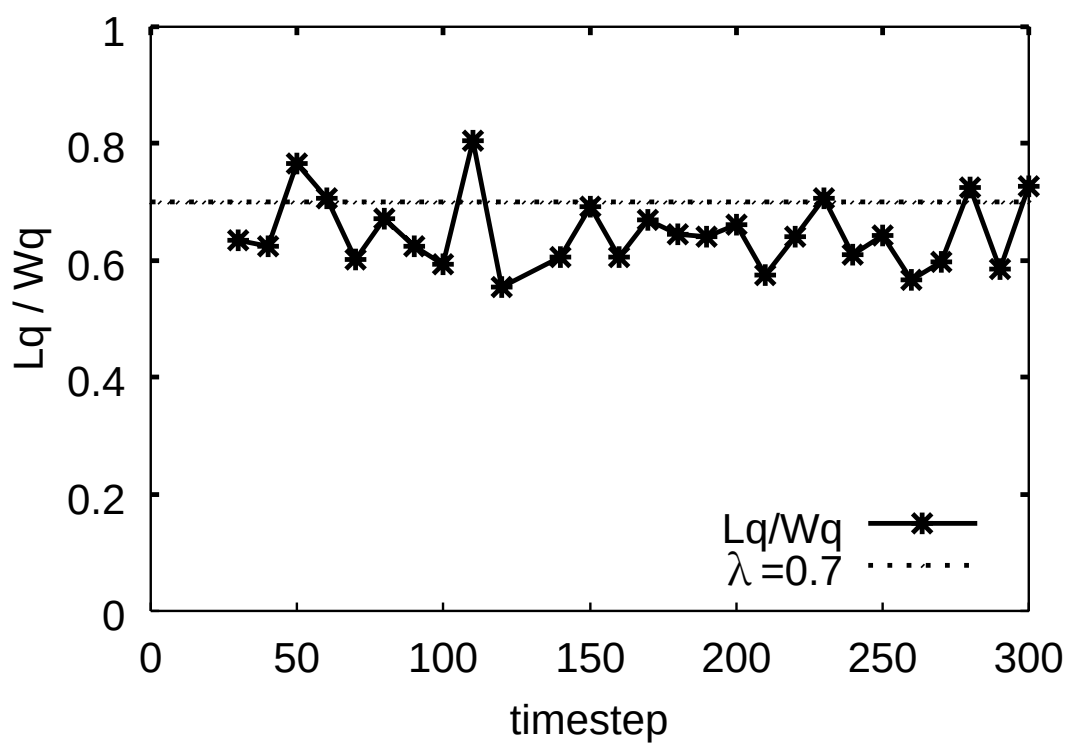


図 3.4: L_q / W_q の時間変化

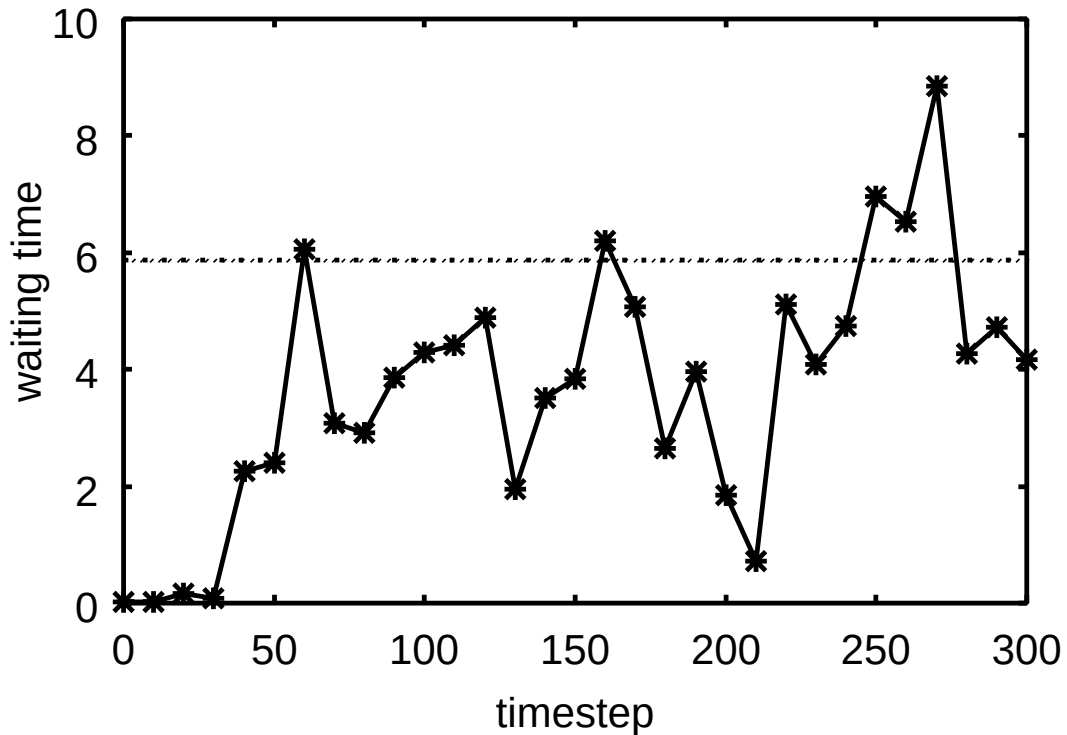


図 3.5: 待ち時間の計測値

3.5.6 M/M/s を用いた待ち時間の推測

待ち行列理論を用いてストリームの帯域割り当て開始時刻までの待ち時間の推定を行う。 $\lambda = 0.5$, $\mu = 0.1$, $s = 6$ と定義した場合、待ち時間は式 3.15 より 5.875 と導出できる。シミュレーションにより、待ち時間の計測値を図 3.5 に示す。ここで、timestep は 100 ミリ秒である。図 3.5 より、計測値にばらつきが存在するが、50timestep 以降の待ち時間の平均値は 6.05 であり、推測値に良く一致することが確認できた。

3.6 帯域予約開始時刻の推定手法

3.6.1 帯域予約開始時刻推定法の概要

新たなストリームを受け入れることができる場合、次々と帯域予約を認めるとネットワークが急速に混雑する。この場合、多くのストリームを受け付けることにはなるが、個々のストリームの QoS が急激に低下する可能性がある。また、既存のストリームの帯域割

り当て量を保つために、新たなストリームの帯域予約制限が厳しい場合、新たなストリームが予約帯域を割り当てられるまでに要する時間が増大する。

そこで、本研究では待ち行列理論を用いてモデルとなるストリームを基準に考え、そのモデルストリームの満足度を比較することにより帯域予約時刻を決定する手法を提案する。以下にモデルストリームの変数を定義する。

$$\begin{aligned} t_{start}^{model} &: \text{モデルストリーム帯域要求開始時刻} \\ t_{end}^{model} &: \text{モデルストリーム推定帯域予約終了時刻} \\ t_{input}^{model} &: \text{モデルストリーム推定帯域予約開始時刻} \\ q_i^{model} &: \text{モデルストリーム要求帯域量} \end{aligned}$$

モデルストリームは次の手順で満足度を導出する。

- (i) 帯域予約を行うストリームと同時刻 t_{start}^{model} にモデルストリームを生成。
- (ii) 待ち行列理論の平均待ち時間を用いて t_{input}^{model} を推定する。
- (iii) 待ち行列理論のパラメータ μ を用いて t_{input}^{model} を決定する。
- (iv) モデルストリームの満足度を導出する。

t_{input}^{model} は 3.5.6 節に説明したように、待ち行列理論を用いて推定し、 t_{end}^{model} は待ち行列理論のパラメータ μ の値より決定する。以上のパラメータを決定した後、3.20 式により t_{input} を導出する。

$$S_i(t_{start}^{model}, t_{end}^{model})|_{r_i(t_{input}^{model})=q_i^{model}} \leq S_i(t_{start}, t_{end})|_{r_i(t_{input})=q_i^{require}} \quad (3.20)$$

ここで、各変数の意味を以下に示す。

$$\begin{aligned} t_{start} &: \text{ストリーム帯域要求開始時刻} \\ t_{end} &: \text{ストリーム推定帯域予約終了時刻} \\ t_{input} &: \text{ストリーム推定帯域予約開始時刻} \\ q_i^{require} &: \text{ストリーム要求帯域量} \end{aligned}$$

3.20 式を概念を図 3.6 に示す。ストリームは 3.20 式を満たす場合、時刻 t_{input} に帯域予約を開始できる。3.20 式の左辺は $M/M/s$ モデルによる q_i^{model} で帯域予約が行われた場合のモデルとなるストリームの満足度である。3.20 式の右辺は $q_i^{require}$ で帯域予約が行われた場合のストリーム i の推定満足度である。 $S_i(t_{start}, t_{end})$ が $S_i(t_{start}^{model}, t_{end}^{model})$ を下回らないように帯域予約が行われる時刻 t_{input} を決定する。 $S_i(t_{start}, t_{end})$ が $S_i(t_{start}^{model}, t_{end}^{model})$ を下

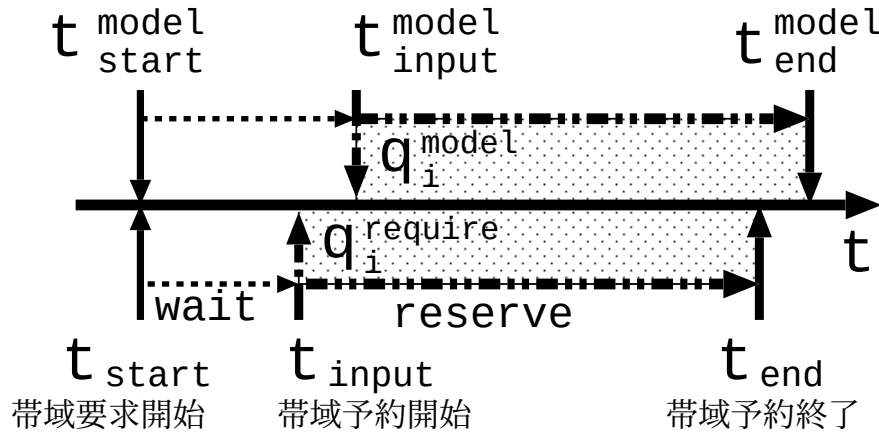


図 3.6: 帯域予約開始時刻の推定手法

回らない時刻は図 3.6 の t_{input} の位置より時間軸上マイナス方向の場合である．満足度は待ち時間が短くなると満足度は高くなるが，待ち時間を短くすると既存のストリームの QoS が低下する可能性があるため，本研究では $S_i(t_{start}, t_{end}) = S_i(t_{start}^{model}, t_{end}^{model})$ を満たす時刻 t_{input} にストリームの予約を開始する．

3.6.2 待ち行列理論による推定時刻の導出

帯域予約開始時刻推定法におけるモデルストリームの推定帯域予約開始時刻 t_{input}^{model} の導出について検討する．3.5.4 節において窓口 s の定義について述べた．窓口 s を定義した後，待ち行列理論を用いて推定時刻の導出を行う．待ち行列 M/M/s において帯域予約開始までの待ち時間 W_q は 3.21 式より導出できる．

$$W_q = \frac{\mu a^s p_0}{(s-1)!(s\mu - \lambda)^2} = \frac{L_q}{\lambda} \quad (3.21)$$

$$t_{input}^{model} = t_{start}^{model} + W_q \quad (3.22)$$

窓口数 s を定義し，ストリームの発生率 λ ，ストリームのサービス率 μ を設定することにより，モデルの帯域予約開始までの待ち時間の推定を行うことができる．よって，3.22 式よりモデルストリーム帯域予約開始時刻 t_{input}^{model} は，モデルストリームの帯域要求開始時刻 t_{start}^{model} に待ち時間 W_q を加えた値と推定できる． t_{input}^{model} を導出後，3.20 式を用いてストリームが帯域予約を開始時刻 t_{input} を求める．

3.7 まとめ

本章では，WFQ 法の概要と問題点を述べ，WFQMM 法を用いた帯域割り当て法を提案した．WFQMM 法は，WFQ 法に最大・最小要求帯域量を導入することにより，公平かつ効率的な帯域割り当てを実現することができる．また，ストリームの帯域割り当てによる指標として満足度を定義した．待ち行列理論を用いて，モデルストリームを基準に帯域予約の時刻を決定する帯域予約開始時刻推定法を提案した．

次章では，WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法をシミュレータに実装し，ストリームの満足度および帯域予約までの待ち時間についての評価を行う．また，帯域予約を行ったストリームにパケットを転送し，パケットの遅延および転送量についての評価を行う．

第 4 章

性能評価

4.1 はじめに

本章では，WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法をシミュレータに実装し，評価を行う．ストリームの性能評価には，WFQMM 法と最大・最小要求帯域量での帯域予約を満足度と帯域予約開始までの待ち時間の性能について評価する．また，WFQMM 法において ρ や窓口数 s を変化させた場合の満足度と待ち時間の変化について議論する．帯域予約を行ったストリームにパケットを転送するシミュレータを実装する．シミュレータにより，パケットの遅延と転送量について評価し，WFQMM 法のパケット転送の効率性の向上を示す．

本章の構成は，以下の通りである．4.2 節では，ストリームによる満足度と帯域予約開始までの待ち時間について評価する．4.3 節では，パケット転送により，パケットの遅延と転送量について評価する．4.4 節は，性能評価のまとめである．

4.2 ストリーム帯域予約の性能評価

4.2.1 実験の概要

WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法をシミュレータに実装し，ストリームの満足度と帯域予約までの待ち時間についての評価を行う．ストリームの待ち時間はストリームが帯域予約要求を開始してから実際にそのストリームが帯域予約を開始する時間である．本研究では，シミュレータに実装する以下に示す 3 つの帯域割り当て法を評価する．

WFQMM 法

帯域割り当て法に WFQMM 法, 帯域予約開始時刻は帯域予約開始時刻推定法で行う.

帯域予約開始時刻推定法のパラメータは $q_i^{model} = q_i^{max}$, $q_i^{require} = q_i^{min}$ とする.

MAX 法

帯域が割り当てられている時刻 t において $r_i(t) = q_i^{max}$ とする. また, 帯域予約開始時刻は帯域に要求の空きが出き次第行う.

MIN 法

帯域が割り当てられている時刻 t において $r_i(t) = q_i^{min}$ とする. また, 帯域予約開始時刻は帯域に要求の空きが出き次第行う.

シミュレータでの各手法に共通して使用するパラメータの意味は以下の通りである.

λ	ストリームの発生確率
μ	ストリームサービス終了確率
ρ	トラフィック密度: $\lambda/(s\mu)$
γ	全帯域量: 100Mbps
timestep	シミュレータの単位時間: 100 ミリ秒

4.2.2 WFQMM 法の性能評価

WFQMM 法と MAX 法, MIN 法による満足度と待ち時間における比較を行う. ネットワークが次第に混雑するパラメータ $\lambda = 0.5$, $\mu = 0.15$ を用いる. 3.5.4 節の窓口の定義より, MAX 法では窓口数 $s=4$, MIN 法では窓口数 $s=5$ である. WFQMM 法は混雑時は MIN 法の窓口数 $s=4$ に近付き, 閑散時は MAX 法の窓口数 $s=5$ に近づく.

図 4.1 に各手法を用いた満足度を示す. 帯域要求受け付け開始時は, ネットワークに帯域予約されているストリームは存在していない. 50timestep 経過後, 全体帯域量がほぼ予約されてネットワークが混雑し始める. 図 4.1 の満足度はストリームの帯域予約要求発生時刻から現時刻までの満足度を示している. 図 4.1 から分るように, WFQMM 法の満足度はネットワークの閑散時に MAX 法と同等になる. また, 混雑時における WFQMM 法の満足度は, MAX 法, MIN 法に比べて高い. 図 4.2 に各手法を用いた待ち時間を示す.

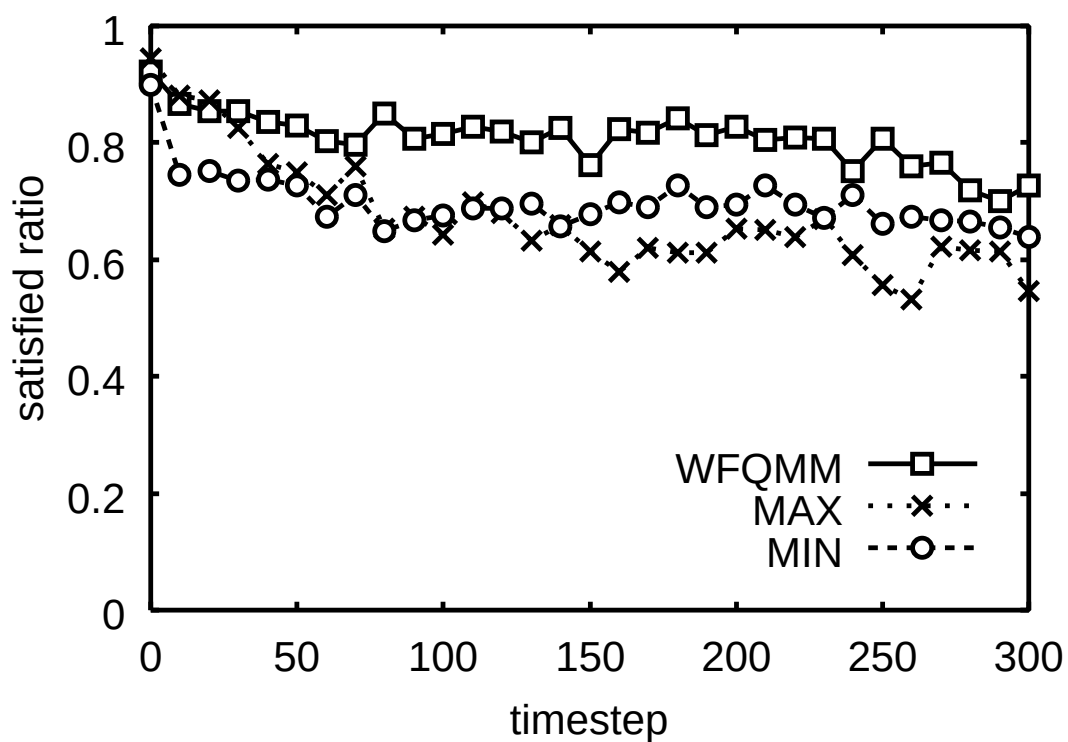


図 4.1: WFQMM 法によるストリームの満足度の時間変化

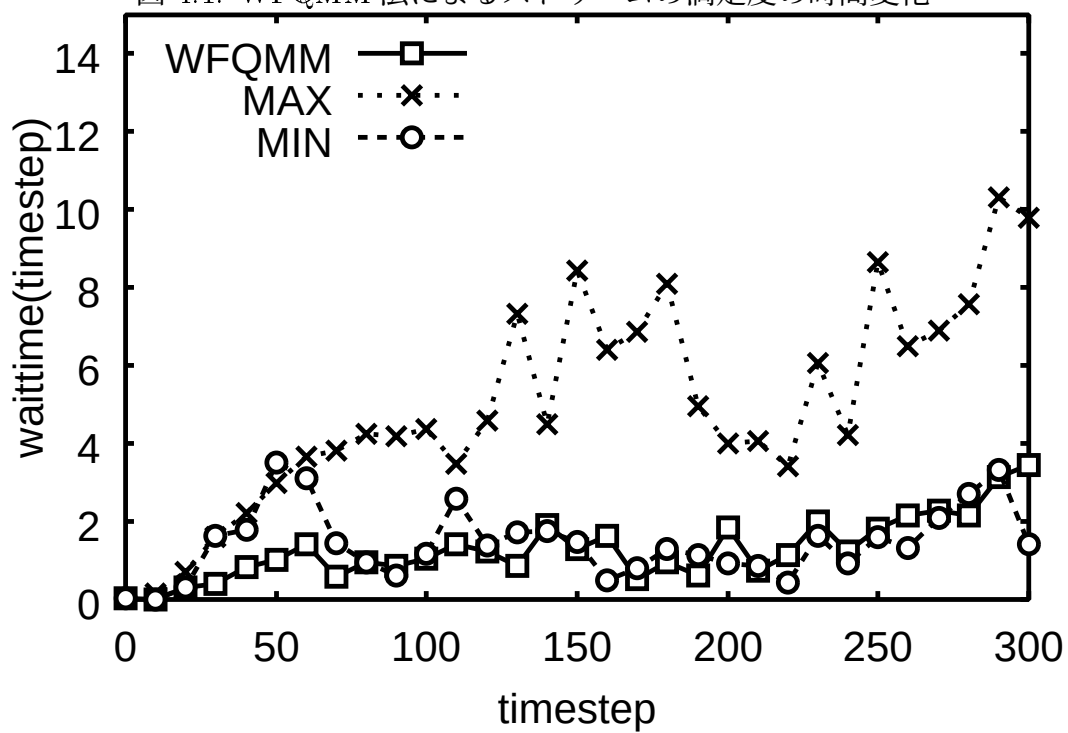


図 4.2: WFQMM 法によるストリームの待ち時間の時間変化

図 4.2 から分るように，WFQMM 法の待ち時間は MIN 法の待ち時間とほぼ同じである．これは，帯域予約開始時刻推定法のパラメータ $q_i^{require}$ は待ち時間が最も小さくなるパラメータ q_i^{min} と定義したためである．以上のことから WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法を用いると，満足度を保ちつつ待ち時間を削減することができる．

4.2.3 窓口数による性能評価

ρ を一定とし，異なる窓口数 s によるストリームの満足度と待ち時間の評価を行う．窓口数 s による性能を評価することにより，ネットワークに受け入れる適切な窓口数の検討をすることができる． $\lambda = 0.7$ を一定とし， $\mu = 0.1$ で $s=8$ ， $\mu = 0.2$ で $s=4$ の 2 つパラメータにおいて比較する．図 4.3 に WFQMM 法の窓口数 s をパラメータにした場合の満足度の時間変化を示す．図 4.3 より $\mu = 0.1, s = 8$ の方が $\mu = 0.2, s = 4$ に比較して，やや高い満足度を示している．図 4.4 に WFQMM 法の窓口数 s をパラメータにした場合の待ち時間の変化を示す．図 4.4 より，窓口数 s による待ち時間はほぼ同じであった．

ρ の値が等しいにも関わらず，満足度が異なることは待ち行列理論を使用して説明できる． μW_q は平均待ち時間の平均サービス時間に対する割合を示している．つまり，平均サービスの何倍を待ち行列の待ち時間に費やすかを示している．図 4.5 から分るように， ρ の値が一定の場合，窓口数 s が大きくなるにつれて μW_q が小さくなることが分かる．すなわち，窓口数 s が大きい場合は，ストリームがサービス終了までに費やした時間中に，帯域を割り当てられた時間が長いことを示す．以上のことから ρ を一定とした場合，窓口数 s が多い方が高い満足度を示すことが分かる．

また， ρ を一定にし， λ と窓口数 s を変化させた場合の WFQMM 法のストリームの満足度と待ち時間の評価を行う． $\lambda = 0.7, \mu = 0.1$ で $s=8$ ， $\lambda = 0.35, \mu = 0.1$ で $s=4$ の場合の満足度を図 4.6 に示す．図 4.6 から分るように， ρ を一定とし， μ を変化させた場合と同じ傾向の満足度が得られる． $\lambda = 0.7, \mu = 0.1$ で $s=8$ ， $\lambda = 0.35, \mu = 0.1$ で $s=4$ の場合の待ち時間を図 4.7 に示す．図 4.7 から分るように，窓口数 $s=8$ の場合は，待ち時間が小さくなることが分かった．

4.2.4 ネットワーク状態による性能評価

ネットワークの状態による WFQMM 法の満足度と待ち時間の評価を行う．ネットワークの状態は λ と μ のバランスにより決定される．ストリームの帯域発生量に比較して，十分受け入れことができるネットワーク状態であれば，ネットワーク状態は良い．ストリームの帯域発生量に比較して，十分受け入れことができない状態はストリームにとって好ま

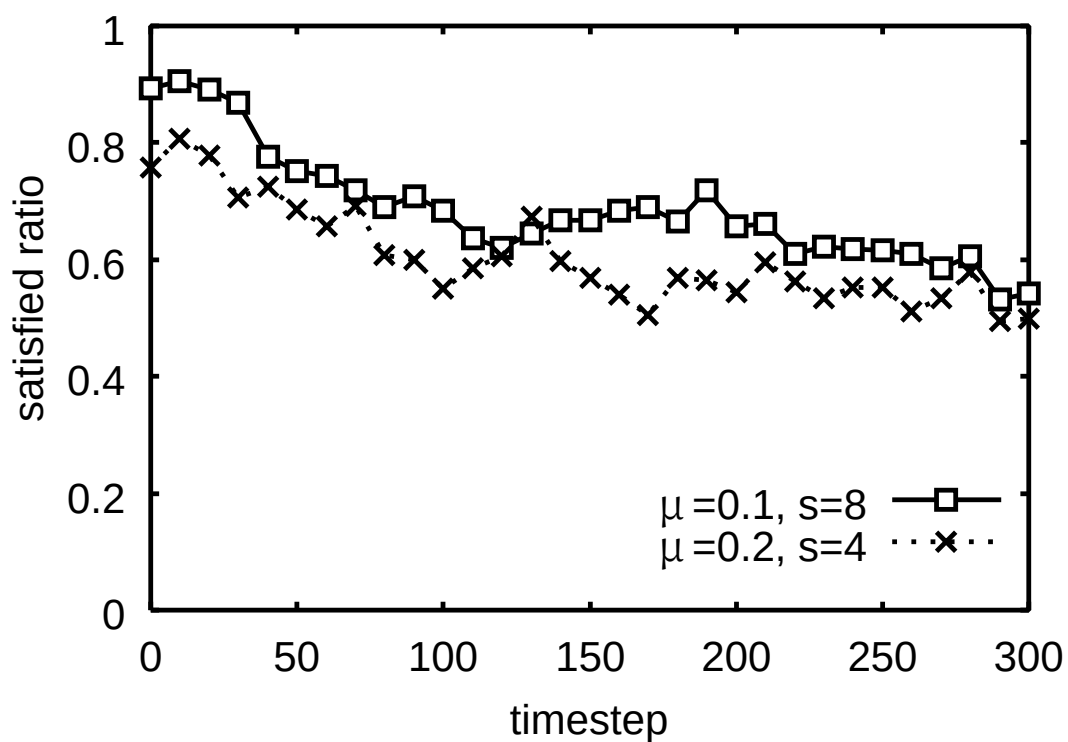


図 4.3: WFQMM 法の窓口数 s による満足度の時間変化 ($\lambda = 0.7$)

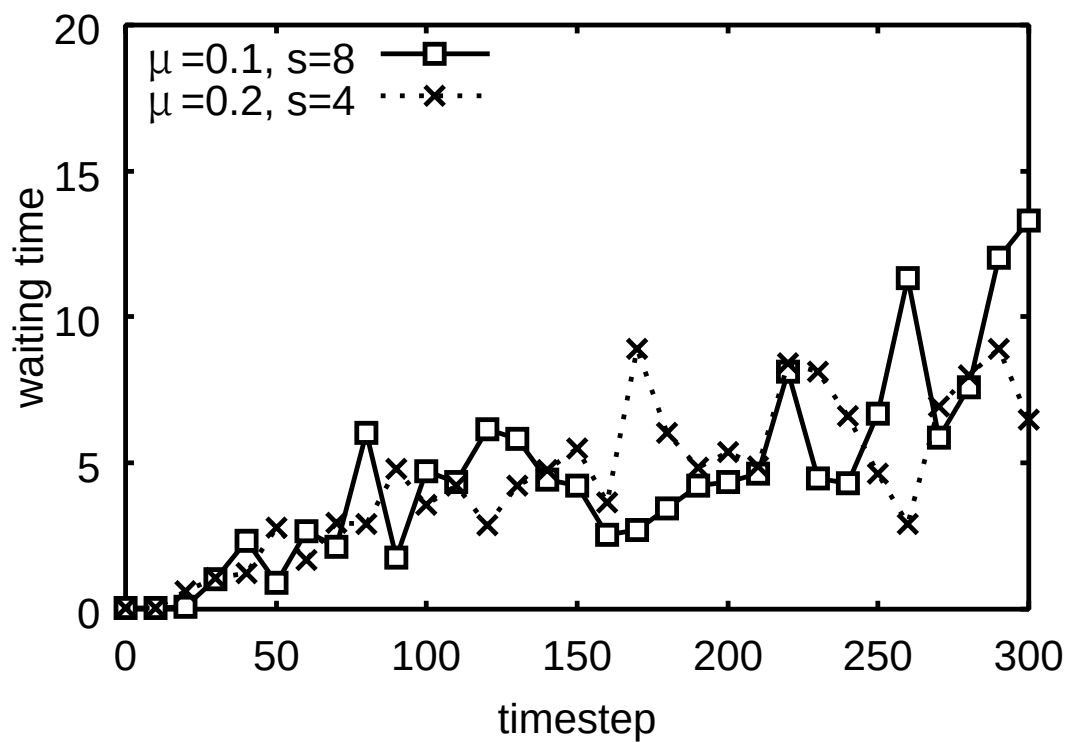


図 4.4: WFQMM 法の窓口数 s による待ち時間の時間変化 ($\lambda = 0.7$)

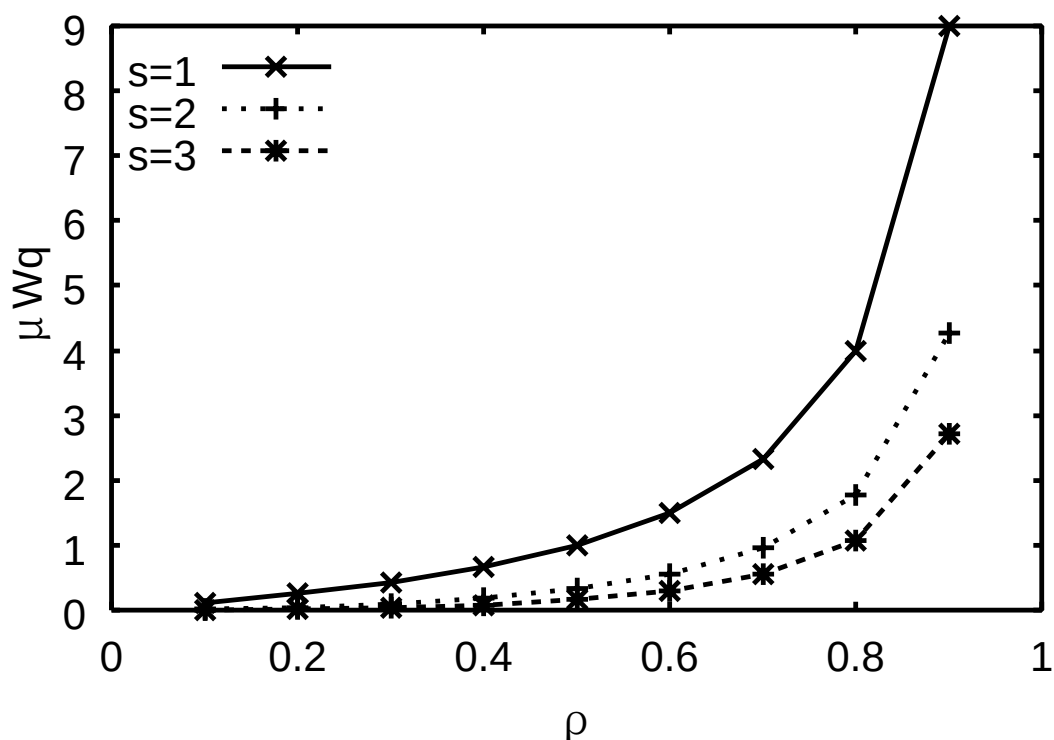


図 4.5: 窓口数 s による ρ と μW_q の関係図

しいネットワーク状態ではない．そこで，ストリームの帯域予約に対して好ましいネットワーク状態を調べるために，ネットワークの状態を待ち行列理論を用いて定義する．待ち行列理論によれば，待ち行列 $M/M/s$ の状態は以下の2つに分類できる．

- (i) $\rho < 1$: 待ち行列は平衡状態になるため，安定したサービスを提供できる．
- (ii) $\rho \geq 1$: 待ち行列が長過ぎて，望ましいサービス状態とは言えない．

以上のことより，ネットワーク状態は ρ を評価することにより判断できる．上記の (i), (ii) の状態を比較するために，以下のパラメータを用いたシミュレーションを行った．

- $\lambda = 0.5, \mu = 0.1$
- $\lambda = 0.7, \mu = 0.1$
- $\lambda = 0.9, \mu = 0.1$

混雑時における窓口数 s は8である．したがって， $\lambda = 0.5, \mu = 0.1$ および $\lambda = 0.7, \mu = 0.1$ は (i) $\rho < 1$ の状態であり， $\lambda = 0.9, \mu = 0.1$ は (ii) $\rho \geq 1$ の状態である．以上のパラメータを

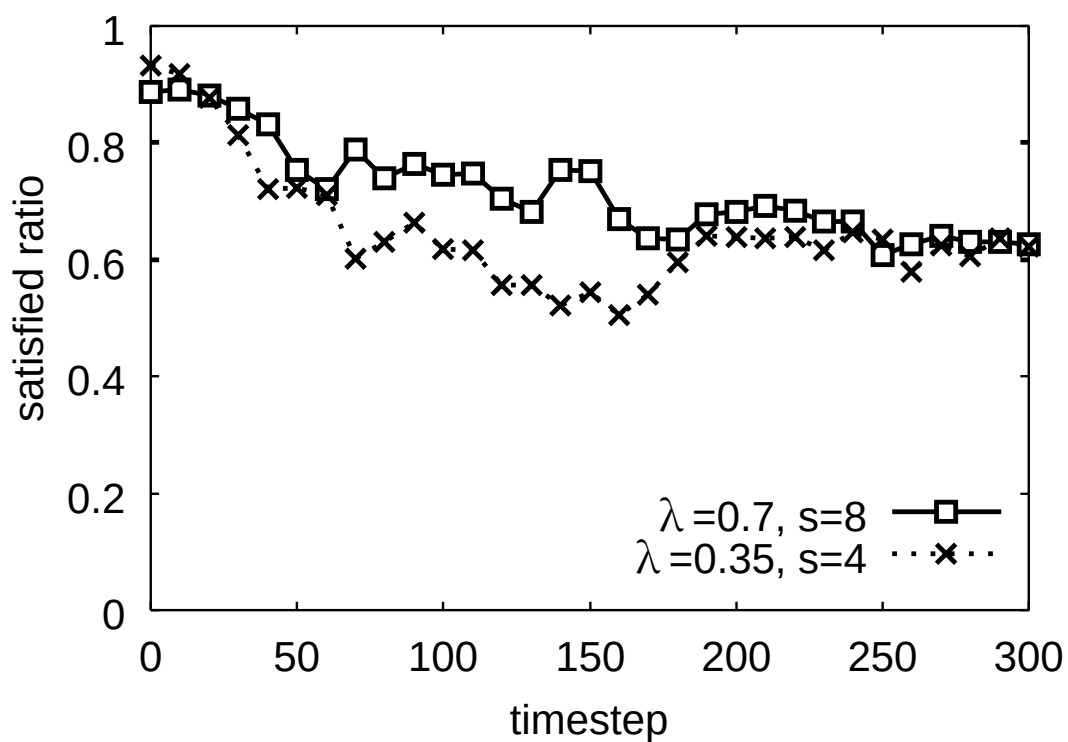


図 4.6: WFQMM 法の窓口数 s による満足度の時間変化 ($\mu = 0.1$)

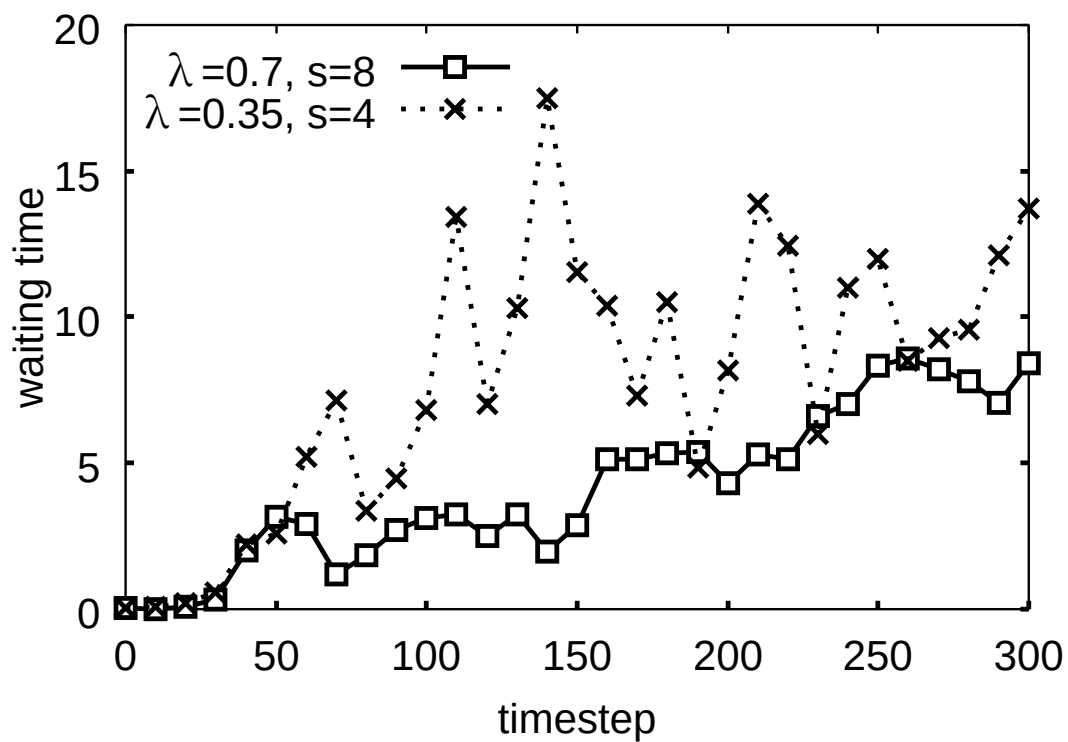


図 4.7: WFQMM 法の窓口数 s による待ち時間の時間変化 ($\mu = 0.1$)

用いた WFQMM 法の満足度の時間変化を図 4.8 に示す。図 4.8 より、(i) の条件では、満足度はそれぞれ 0.8, 0.6 となる。(ii) の条件では、満足度が約 0.2 と非常に低くなる。WFQMM 法の待ち時間の時間変化を図 4.9 に示す。図 4.9 より、(ii) の条件の場合は (i) に比べ 6 倍以上の待ち時間が必要となる。(ii) の条件では、待ち行列が平衡状態とならずに待ち行列が長くなり過ぎるために、満足度と待ち時間の評価が低下する。

4.2.5 ストリーム帯域予約の性能に対する考察

WFQMM 法を用いたストリーム帯域予約手法の性能評価を行った。実験結果により以下のことが分かった。

- WFQMM 法はネットワークの閑散時において MAX 法と同等の満足度を得ることができる
- WFQMM 法はネットワークの混雑時において MIN 法と同等の満足度となる
- WFQMM 法の待ち時間は MIN 法と同等の待ち時間に抑えることができる
- ρ が一定の場合、大きい窓口数 s は高い満足度が得られる
- $\rho \geq 1$ の場合、待ち行列が平衡状態にならないため、 $\rho < 1$ を満たす必要がある

次節では、帯域予約を行ったストリームにパケット転送を行うシミュレーション実験を行い、パケット遅延と転送量について議論する。

4.3 パケット転送の性能

4.3.1 パケット転送の概要

シミュレーションにより、帯域予約を行ったストリームにパケットを転送し、パケット遅延と転送量の性能について詳細な検討を行う。パケット遅延とは、パケットの転送時間である。単一リンクにおけるパケット遅延は以下のように分類できる。

処理遅延：パケットがリンクの先頭ノードに正しく受信されてから、送信リンクの待ち行列に割り当てられるまでの時間

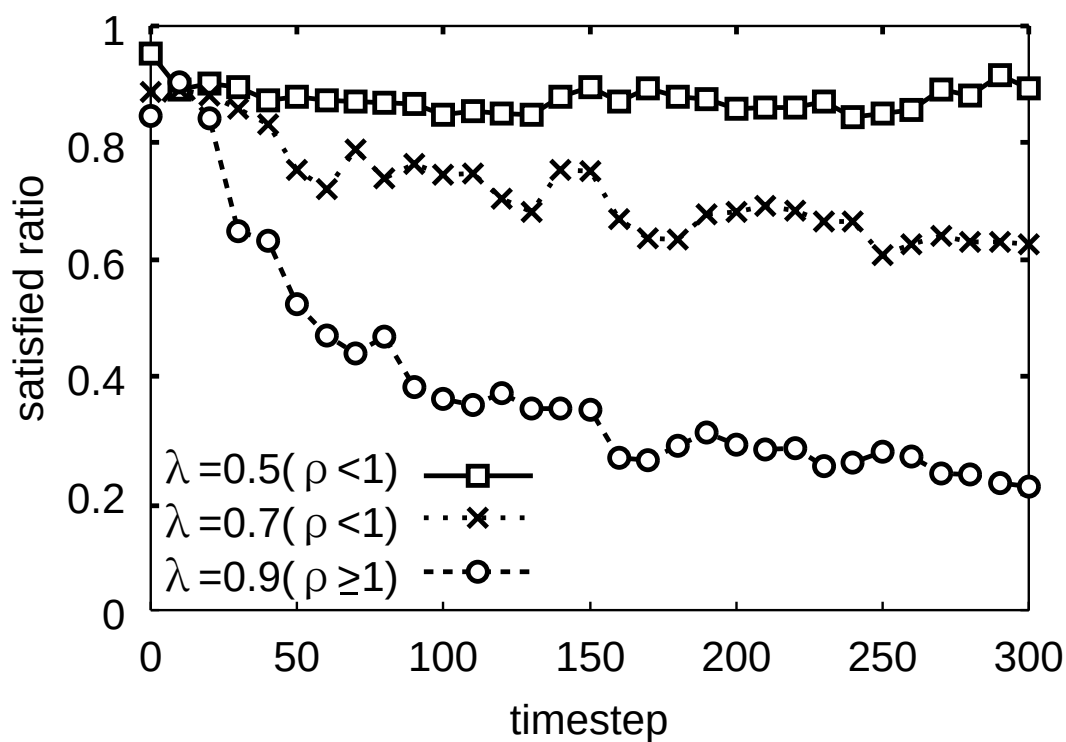


図 4.8: ネットワーク状態 ρ による満足度の時間変化

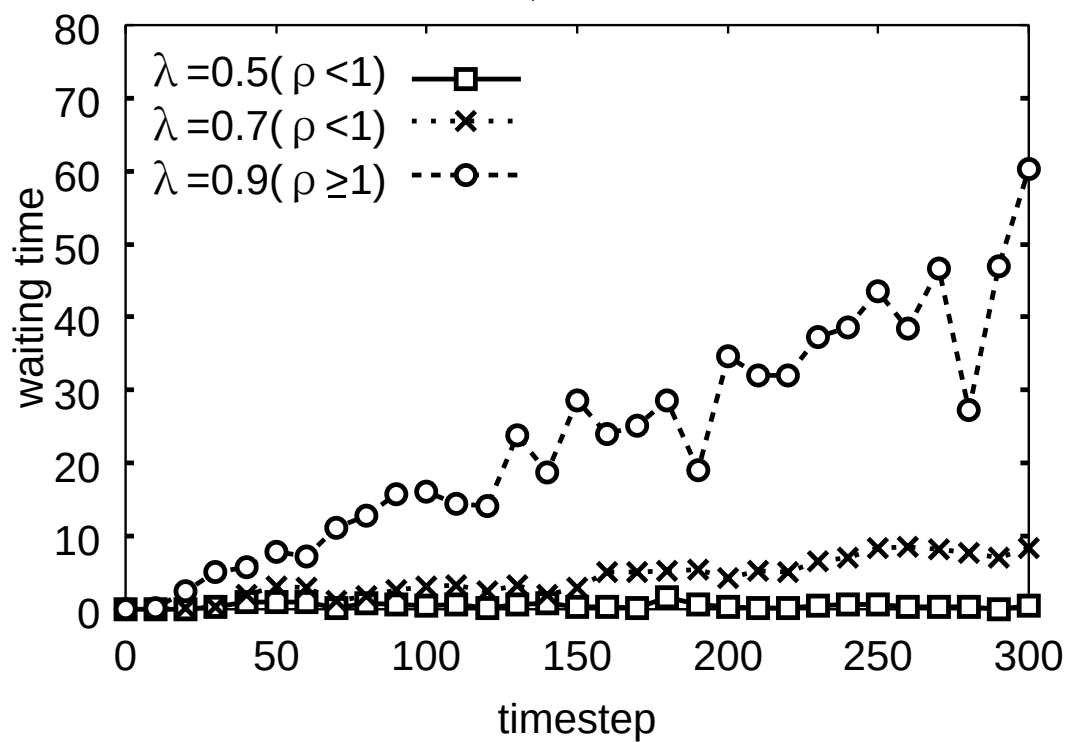


図 4.9: ネットワーク状態 ρ による待ち時間の時間変化

待ち行列遅延：パケット送信のために待ち行列に割り当てられてから，送信が開始されるまでの時間

伝送遅延：パケットの最初のビットが送信されてから，最後のビットが送信されるまでの時間

伝搬遅延：リンクの先頭ノードで最後のビットが送信されてから，それが後部ノードで受信されるまでの時間。

本研究では，待ち行列遅延と伝送遅延の合計値をパケット遅延と定義する．遅延は利用できる帯域量やパケット転送量に大きく影響を受ける．特に最大遅延（遅延の最大値）を保証することが重要である．音声や動画像を転送する場合，最大遅延が保証されていないと，音声や動画像を再生すべき時刻が決定できない．パケット転送量を転送を完了したパケット数と定義する．シミュレーションではパケットのロスは起きないものと仮定した．

4.3.2 ネットワークシミュレータ nam との比較

本研究で使用するシミュレータの信頼性を確認するために，図 4.10 に示すパケット転送のアニメーションシミュレータ nam1.0[17] を使用しパケット遅延の比較を行った．nam のパラメータは以下の通りである．

パケット発生率 20 ミリ秒毎
帯域量 1.5Mbps
パケットサイズ 800byte

以上の設定で，nam より求めたパケットの 1 リンク当たりの平均遅延は 14 ミリ秒であった．本研究で使用するシミュレータを同条件で計測し，その結果を図 4.11 に示す．本研究において設計・構築したパケットシミュレータの平均遅延は，nam の平均遅延 14 ミリ秒とほぼ同等の結果が得られた．これにより，シミュレータの信頼度を確認することができた．

4.3.3 WFQMM 法とベスト エフォート 方式によるパケット遅延の性能

帯域予約を行いパケットを転送した場合と帯域予約を行わずにパケットを転送した場合（以下ベストエフォート方式と呼ぶ）の遅延について議論する．帯域予約法は WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法を用いる．シミュレータで用いるパラメータは以下の通りで

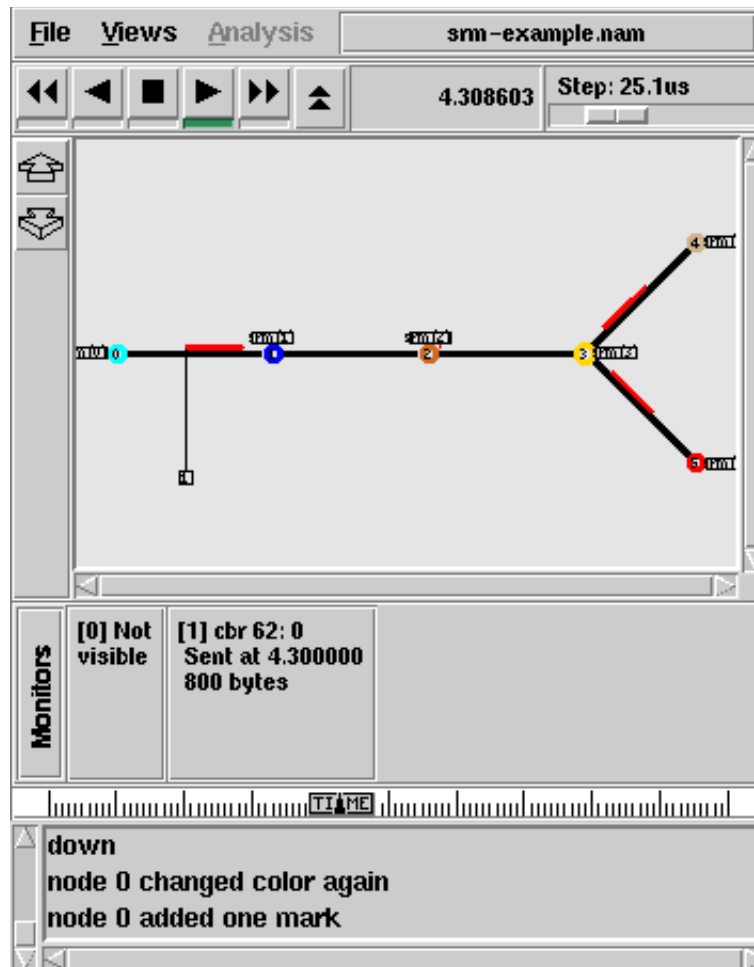


図 4.10: ネットワークシミュレータ ns の動作状況

ある。

帯域量	100Mbps
パケットサイズ	64-1518byte
シミュレーション回数	100 回
パケットの単位時間	1 ミリ秒
ストリームの単位時間	100 ミリ秒

WFQMM 法によるパラメータは $\lambda = 0.5$, $\mu = 0.1$ である。WFQMM 法およびベストエフォート方式はパケットの合計発生量は同じである。図 4.12 に WFQMM 法とベストエフォート方式のパケット最大遅延の時間変化を示す。図 4.12 より、最大遅延は WFQMM

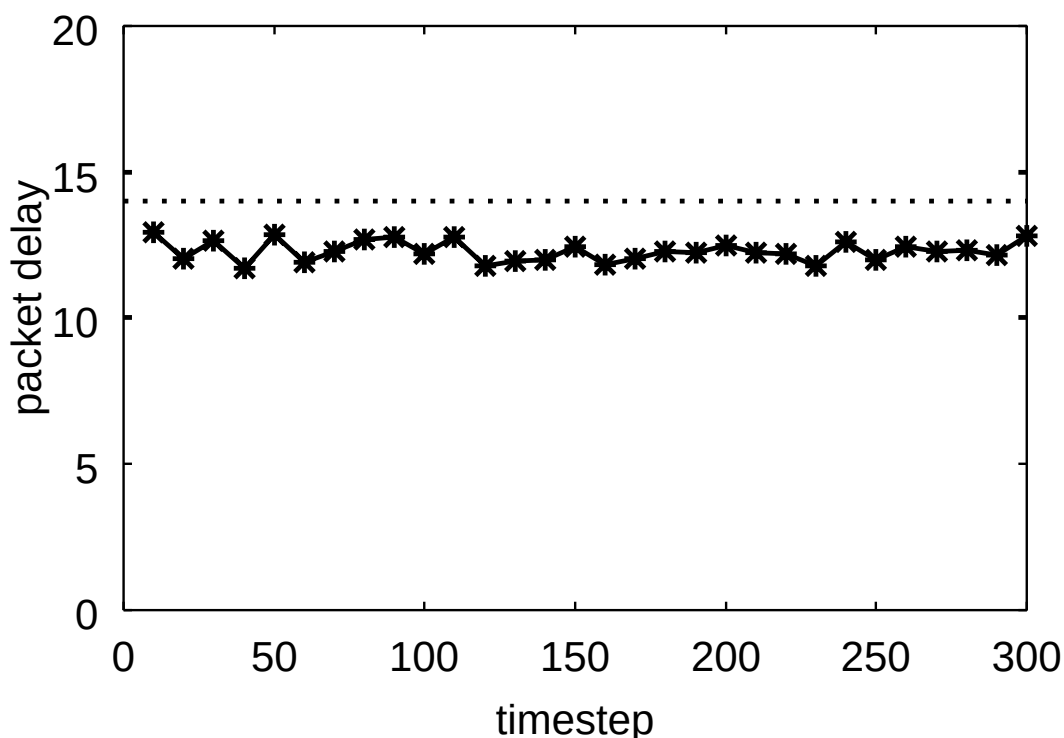


図 4.11: nam と同一パラメータによるシミュレータの packets 平均遅延

法とベストエフォート方式はほぼ同等である．ベストエフォート方式では，利用できる帯域量が大きいため最大遅延は抑えられている．図 4.13 に WFQMM 法とベストエフォート方式の packets 平均遅延の時間変化を示す．図 4.13 より，WFQMM 法の場合，平均遅延をベストエフォート方式と比較して低く抑えることができた．WFQMM 法では，ストリームごとに帯域が保証されている．そのため，個々の packets の待ち行列遅延は小さくなり packets の平均遅延を抑えることができる．

4.3.4 WFQMM 法とベストエフォート方式による packets の転送量

WFQMM 法とベストエフォート方式による packets 転送の累積 packets 数と単位時間あたりの平均 packets 数について評価を行う．各種パラメータは前節と同じである．図 4.14，図 4.15 に packets 転送の累積 packets 数と平均 packets 数を示す．図 4.14 から分かるように，累積 packets 数は単位時刻の経過とほぼ比例した値である．WFQMM 法の場合はベストエフォート方式と比較して，packets の転送数が多いことが分かる．WFQMM 法では，ベストエフォート方式に比べて待ち行列遅延を抑えることができるため，packets

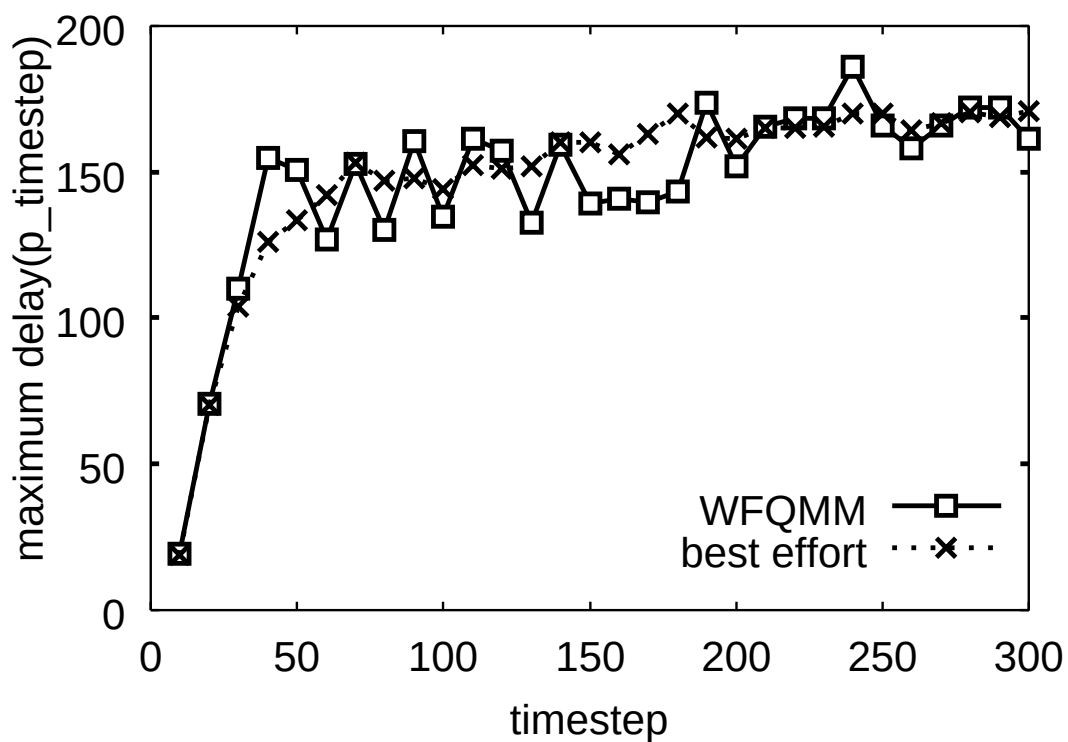


図 4.12: WFQMM 法とベストエフォート方式の packets 最大遅延

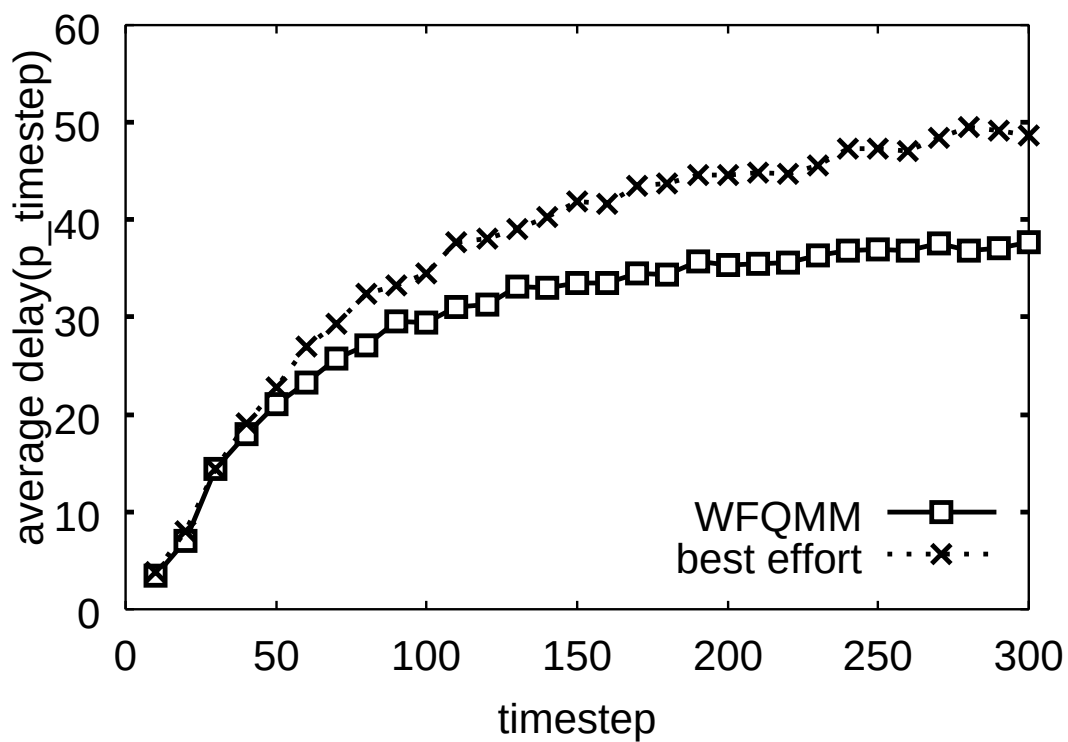


図 4.13: WFQMM 法とベストエフォート方式の packets 平均遅延

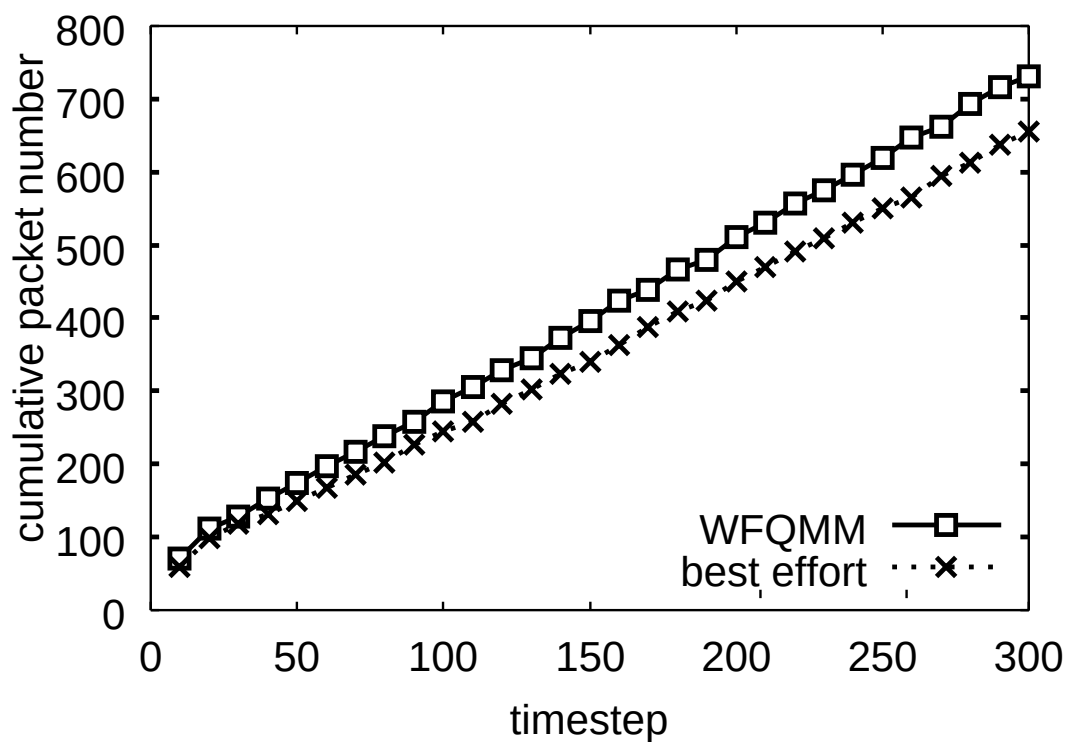


図 4.14: WFQMM 法とベストエフォート方式の累積パケット数

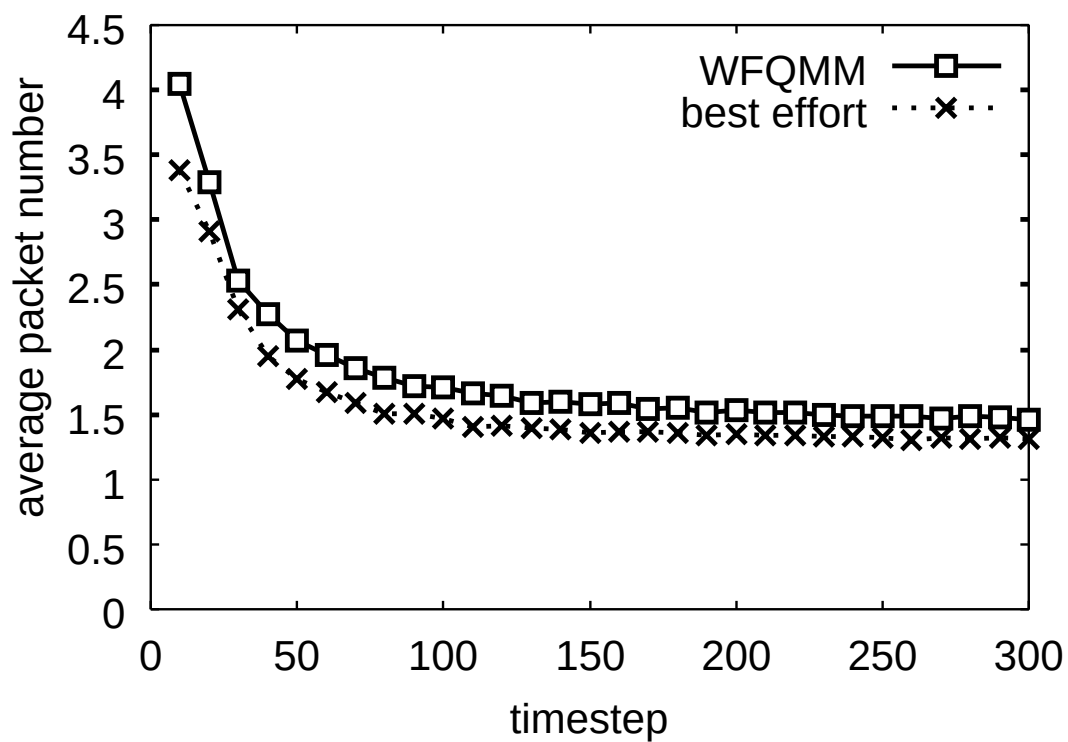


図 4.15: WFQMM 法とベストエフォート方式の平均パケット数

ト数を多く転送することができた。

4.3.5 各帯域予約法によるパケットの遅延の性能評価

前節では、WFQMM 法とベストエフォート方式によるパケット転送の性能評価を行った。本節では、WFQMM 法と MAX 法, MIN 法で帯域予約を行った場合のパケット転送の評価を行う。図 4.16, 図 4.17 に WFQMM 法, MAX 法, MIN 法によるパケットの最大遅延および平均遅延を示す。図 4.16 から分かるように、WFQMM 法は MAX 法, MIN 法に比較して、最大遅延が小さくできる。WFQMM 法は MAX 法, MIN 法に比較して、 q_i^{max}, q_i^{min} の範囲で動的に帯域を割り当てられるため、MAX 法, MIN 法に比べて帯域を効率良く予約できるためである。

4.3.6 各帯域予約法によるパケット転送量の性能評価

WFQMM 法, MAX 法, MIN 法によるパケットの転送した累積パケット数と平均パケット数について評価を行う。図 4.18 に WFQMM 法, MAX 法, MIN 法によるパケットの転送した累積パケット数を示す。図 4.18 より、パケットの累積パケット数は単位時刻の経過とほぼ比例した値となっている。図 4.19 に WFQMM 法, MAX 法, MIN 法によるパケットの転送した平均パケット数を示す。図 4.19 より、パケット転送開始直後、ネットワークがほとんど利用されていない状態であるため、パケットの転送した平均パケット数が上昇する。WFQMM 法は各パケットの遅延を抑えることにより、MAX 法, MIN 法に比較して多くのパケットを転送できる。

4.3.7 パケット転送性能に対する考察

WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法によるパケット遅延と転送量の評価を行った。実験結果より、以下のことが分かった。

- WFQMM 法はベストエフォート方式と比較して、パケットの平均遅延を抑えることができる。
- WFQMM 法はベストエフォート方式と比較して、高いパケット転送量を実現できる。
- WFQMM 法は MAX 法および MIN 法に比較してパケットの最大遅延・平均遅延を抑えることができる。
- WFQMM 法は MAX 法および MIN 法と比較して高いパケット転送量を実現できる。

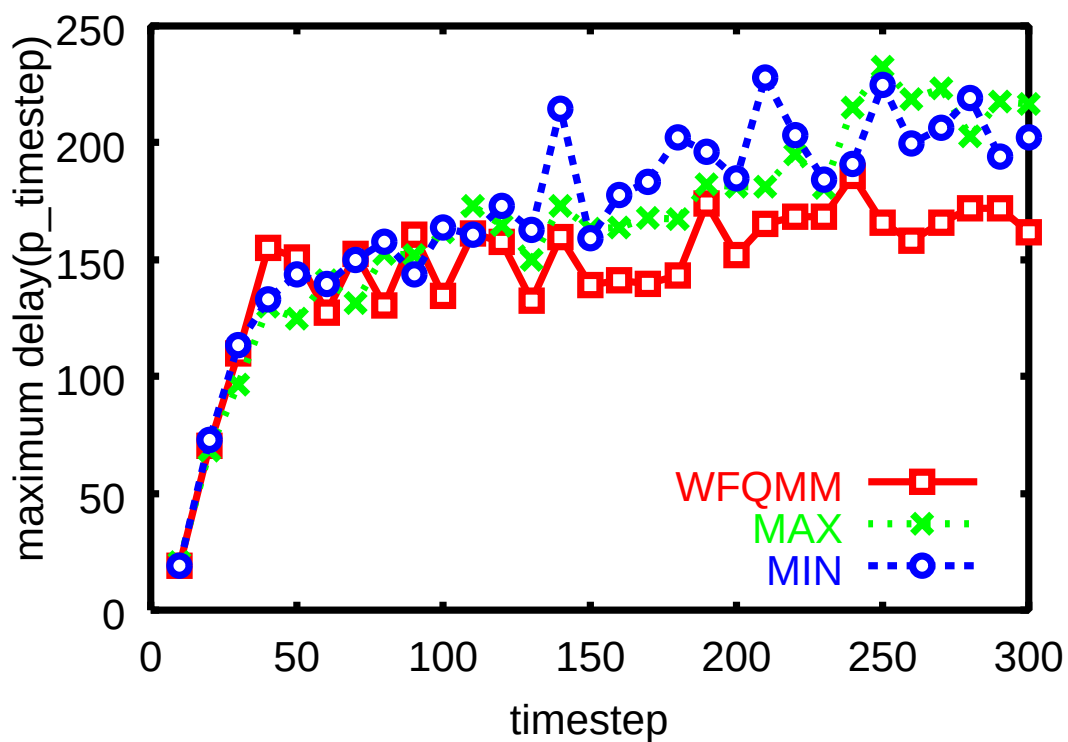


図 4.16: 各帯域予約法によるパケット最大遅延の時間変化

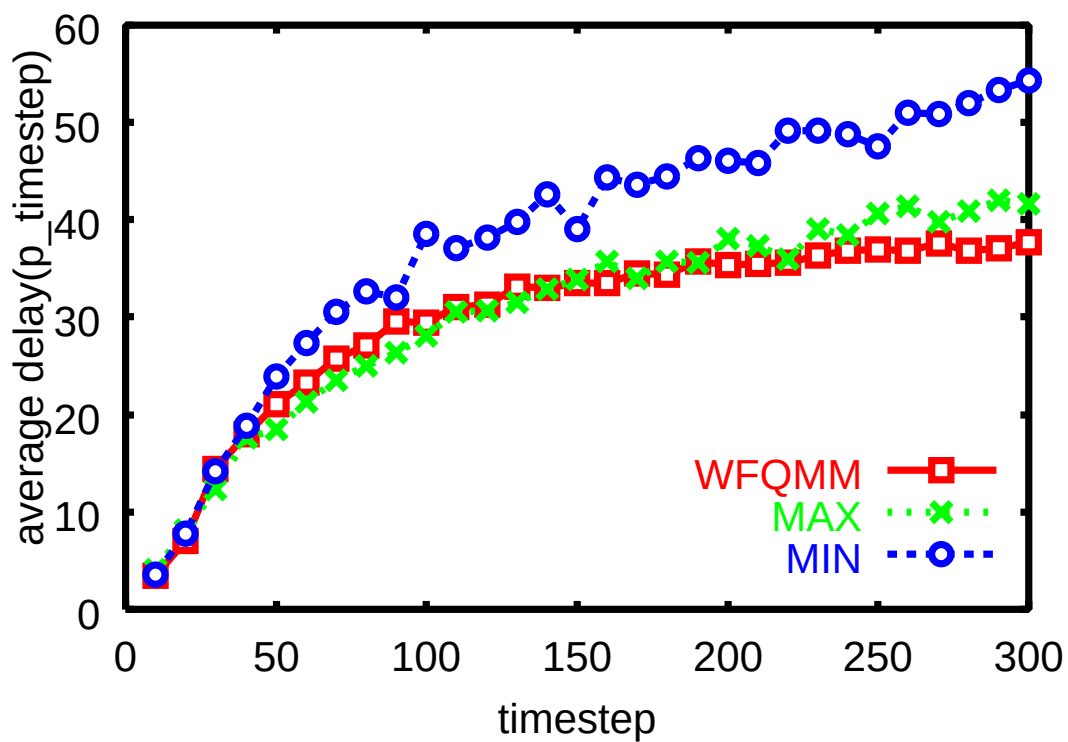


図 4.17: 各帯域予約法によるパケット平均遅延の時間変化

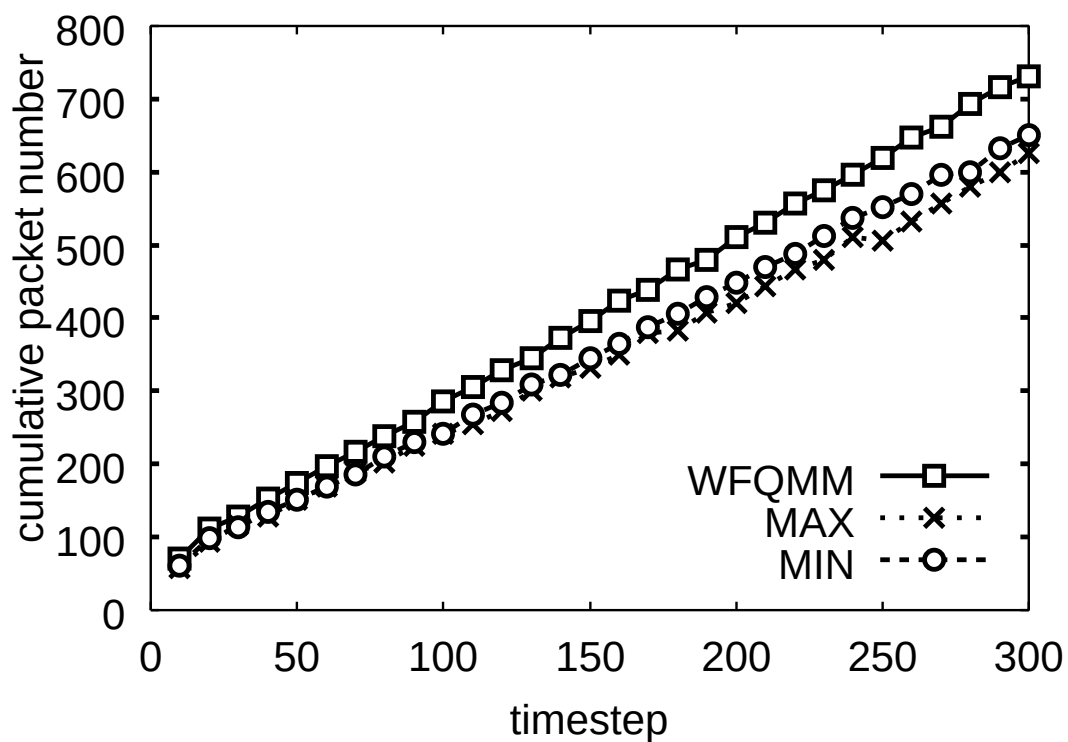


図 4.18: 各帯域予約法による累積パケット数

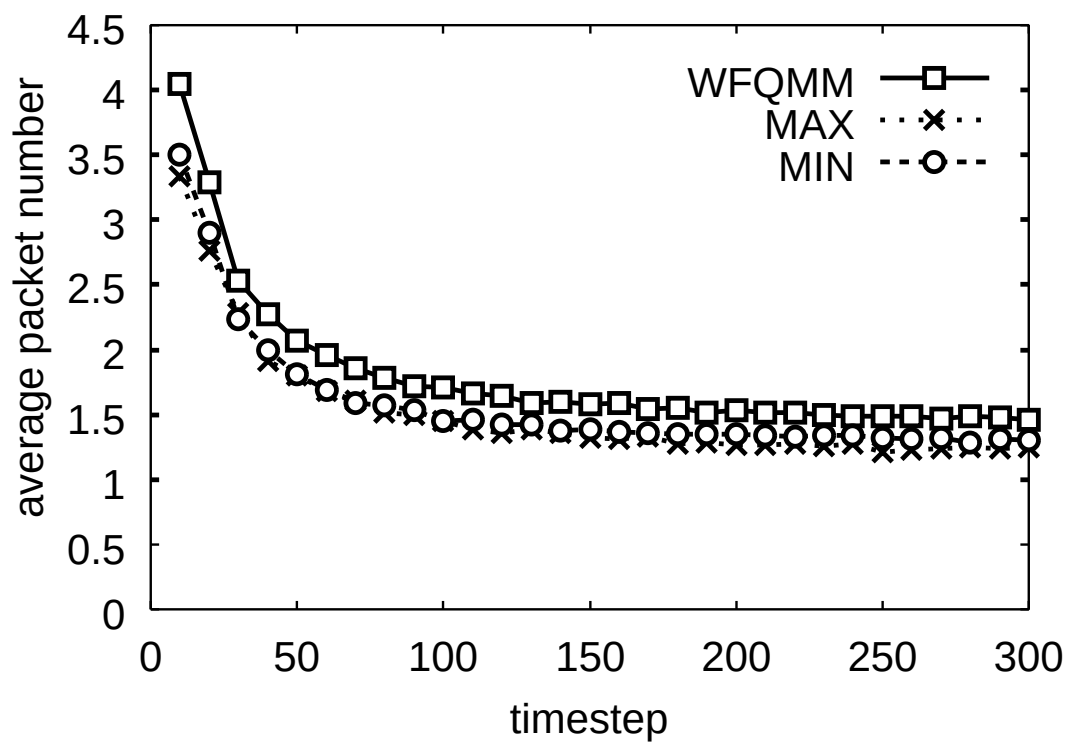


図 4.19: 各帯域予約法による平均パケット数

4.4 まとめ

本章では、新しく提案したWFQMM法と帯域制御法の性能について満足度や待ち時間の評価を行った。MAX法およびMIN法と比較した結果、WFQMM法は閑散時において、MAX法と同程度の満足度を満たしつつ待ち時間を少なくすることができた。混雑時において、WFQMM法はMAX法およびMIN法に比較して大きな満足度を得ることができ、待ち時間をMIN法と同程度に抑えることができた。また、 ρ を一定とした場合、窓口数 s が多い方が高い満足度を得ることを示した。

帯域予約を行ったストリームにパケットを転送するシミュレータを構築し、パケット遅延および転送量について評価を行った。WFQMM法はベストエフォート方式に比較して平均遅延を抑え、高いパケット転送数を実現できる。また、WFQMM法はMAX法およびMIN法と比較し、パケット最大遅延・平均遅延を抑えて高いパケット転送数を達成することができる。

以上のことから、WFQMM法はストリームの効率的な帯域の割り当てによりパケット遅延を抑えることができる。そして、小さなパケット遅延より、より高いパケット転送量を実現することができる。

第 5 章

結論

5.1 まとめ

ストリームの帯域割り当て法として、WFQ 法に最大・最小要求帯域量を導入した WFQMM 法を提案した。WFQMM 法は公平かつ効率的な帯域割り当てをすることができる。また、新たなストリームを受け入れる場合に、WFQMM 法のストリームの QoS が低下しないように、待ち行列理論に基づいた帯域予約開始時刻推定法を提案した。

WFQMM 法と帯域予約開始時刻推定法を実現するストリームの帯域予約シミュレータを設計し、実装した。WFQMM 法は MAX 法および MIN 法に比較して、高い満足度と少ない待ち時間が実現でき、その有効性が確認できた。また、 ρ を一定にした場合、WFQMM 法は窓口数 s が多い方が満足度が高くなることが分かった。

予約を行ったストリームにパケット転送を行うシミュレータを構築し、ベストエフォート方式に比べ、パケット遅延および転送量とも優れていることが分かった。

5.2 問題点と今後の課題

現在の WFQMM 法を用いた帯域制御法の問題点を以下に示す。

- $M/M/s$ を用いたモデル化による窓口数 s は、期待値を求めて導出する。そのために窓口数が整数値になるとは限らない。整数値に近い窓口数 s の場合は理論に近い値を導くことができるが、整数値に遠い窓口数 s の場合は、待ち時間の推測などに誤差が出る可能性がある。
- ユーザーがストリームの q_i^{max}, q_i^{min} を決定する。ところがユーザーは必ずしも適切

な値を決定するとは限らない．したがって、実際の転送データ量により、 q_i^{max}, q_i^{min} の適正度をチェックし、 q_i^{max}, q_i^{min} を修正する機構が必要である．

- WFQMM 法を用いた帯域制御法は現在のところ単一のリンクを前提として検討している．帯域予約を行う場合、必ずしも単一のリンクのみで帯域を予約するわけではなく、複数のリンクを経由する場合が多い．複数のリンクを経由する場合、リンクにより使用できる帯域量が異なるために、リンクごとに割り当てられる帯域量が異なる問題点が生じる．

今後の研究課題として待ち行列理論を用いたモデル化の改良、 $q_i^{max}, q_i^{min}, \phi$ を決定するユーザーインターフェースの構築および複数リンク上での帯域予約法が考えられる．

謝辞

本研究を行うにあたり，終始懇切なる御指導，御鞭撻を戴いた堀口進教授に深く感謝致します。

また，様々な面で御助言，御教授戴きました阿部亨助教授に心から感謝致します。

山森一人博士，井口寧博士、林亮子博士には，日頃から細部に渡り多大な御指導，御助言を戴き，心より感謝致します。最後に日頃より多大な御援助，御協力を頂きました当研究室の皆様に心より感謝致します。

参考文献

- [1] R.Guerin, V.Peris, "Quality-of-service in packet networks:basic mechanisms and directions", Computer Networks 31, pp.169-189(1999)
- [2] D.Reinger, D.Raychaudhuri, M,Ott, "A Dynamic Quality of Service Framework for video in broadband Networks", IEEE Network, Vol.12, No.6, pp.22-34(1998)
- [3] IETF,Resource-ReSerVation-Protocol(RSVP),RFC2205,
<http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt>
- [4] RSVP-research-report,
<http://www.intap.or.jp/INTAP/information/report/h9-network/2.3/rsvp.html>
- [5] A.Gupta, W.Howe, M.Moran and Q.Nguyen, "Resource Sharing for Multi-party Real-time Communication", Proc. of INFOCOM'95, pp.1230-1237(1995)
- [6] 板手寛治, 山口弘純, 東野輝夫, 谷口健一,"動画の品質劣化の許容度を考慮した帯域制御の一方式", 情報処理学会研究報告,98-DPS-88,Vol.98,No.31,pp.67-72(1998)
- [7] 板手寛治, 山口弘純, 安本慶一、東野輝夫, 谷口健一, "多人数参加型アプリケーションにおける品質要求を考慮した帯域制御の一方式", 情報処理学会論文誌, 99-DPS, Vol.40, No.1, pp.132-141(1998)
- [8] H.Zhang, "Service Disciplines for Guaranteed Performance Service in Packet-Switching Network", Proceedings of the IEEE vol.83, no 10, pp.1374-1396(1995)
- [9] A.Demers.S.Keshav, "Analaysis and simulation of a fair queueing algorithm", Journal of Internetworking:Research and Experience 1, pp.3-26(1990)
- [10] 森村英典、大前義次、応用待ち行列理論 (1975)、日科技連出版社

- [11] D.Bertsekas, R.Gallager, 八星豊剛, DATA NETWORKS, オーム社
- [12] 西田悦雄, "利用可能帯域を意識した適応転送制御に関する研究", 北陸先端科学技術大学院大学 (1999)
- [13] 後藤幸功, 長野央, 荒木啓二郎, "インターネットにおける QoS 保証された動画配送システム", 情報処理学会論文誌, Vol.40, No.11, pp.4127-4142(1999)
- [14] O.Verscheure, X.Garcia, "User-Oriented QoS in Packet Video Delivery", IEEE Network, Vol.12, No.6, pp.12-21(1998)
- [15] W.Knightly, B.Shroff, "Admission Control for Statistical QoS:Theory and Practice", IEEE Network, Vol.13, No.2, pp.20-29(1999)
- [16] S.Floyd, V.Jacobson, "Link-Sharing and Resource Management Models for Packet Networks", IEEE/ACM TRANSACTIONS ON NETWORKING, VOL.3, NO.4, pp.365-386(1995)
- [17] UCB/LBNL/VINT-Network-Simulator-ns,
"http://www-mash.cs.berkeley.edu/ns/ns.html"
- [18] K.Imai, T.Ito, H.Kasahara, and N.Morita, "ATMR: Asynchronous transfer mode ring protocol", Computer Networks ISDN Syst, vol.26, no.6, pp.785-798
- [19] I.Rubin, "Performance Analysis and Design of CQBT Algorithm for a Ring Network with Spatial Reuse", IEEE/ACM, VOL.4, NO4, pp.649-659(1996)

発表論文

- [1] 松永泰義, 阿部亨, 堀口進, ”資源予約プロトコル RSVP における WFQ 法を用いた公平な帯域制御法”, 平成 11 年度電気関係学会北陸支部連合大会 講演論文集, C9, pp.156(1999 年 10 月)

- [2] 松永泰義, 阿部亨, 堀口進, ”資源予約プロトコル RSVP における WFQ 法を用いた公平な帯域制御法”, 電子情報通信学会技術研究報告, IN99, Vol99, No.437, pp.43-48(1999 年 11 月)

- [3] 松永泰義, 山森一人, 阿部亨, 堀口進, ”資源予約プロトコル RSVP における公平な帯域制御 (WFQMM) 法の性能評価”, 電子情報通信学会技術研究報告, SSE99, Vol99, No.674, pp.111-116(2000 年 3 月)