

狭帯域リンク上でのトラフィック制御に関する検討

鶴久康治[†] 岡村耕二^{††}
後藤幸功[†] 荒木啓二郎[†]

家庭の PC から ISP への PPP 接続のような個人的用途のための通信路においても、実時間アプリケーションのサービス品質の保証は重要である。このような通信路においては、競合するフローの種類や本数が少ないためにトラフィック制御のオーバーヘッドは比較的小さい。本稿では N-ISDN 回線上で B チャンネルごとへの振分及び、キューイング機構を利用することにより、帯域を効率的に共有する手法を提案する。またキューイング機構からのフィードバックによって、キューへの帯域割当量を動的に調整する方法も提案する。

Study of Traffic Control on Narrow Bandwidth Link

KOJI TSURUHISA,[†] KOJI OKAMURA,^{††} YUKINORI GOTO[†]
and KEIJIRO ARAKI

It is important to provide guaranteed QoS of real-time applications even over a channel of communication for personal use, such as PPP-connection between home PC to ISP. Over the channel, overhead of traffic control is rather low since the number of flows in the channel tends to be very small. In this paper, we propose methods to distribute packets into each ISDN B-channel and to use a queueing mechanism in order to share bandwidth over N-ISDN efficiently. We also propose a method for dynamic adjustment of bandwidth allocation according to feedback from the queueing mechanism.

1. はじめに

インターネット上における通信を、サービス品質 (QoS) の保証を必要とするような通信とそれ以外の最善努力 (Best Effort) 型通信とに切り分け、それぞれに要求されるサービス品質を保証するような統合サービスの実現は今日の重要な課題である。サービス品質の保証を必要とする実時間アプリケーションがより普及するためには、このことは家庭の PC から ISP (Internet Service Provider) への PPP (The Point-to-Point Protocol) 接続のような個人的用途の通信路においても例外ではない。

インターネットではサービス品質の保証が必要な通信はフローごとに識別される。統合サービスを実現するには、フローをある属性によって分類した集合 (ク

ラス) に対して、それぞれに対応するサービス品質をルータが保証する必要がある。

一般に、ルータ間の単一の通信路を複数のフローが共有するときは、各フローのパケットは多重化され、互いに干渉し合うことでサービス品質の劣化を招く。よってクラスごとのサービス品質を保証するためには、クラスに属する全てのフローの送出統計を基に、ルータにおいてネットワーク層からのパケット送出タイミングを調整するようなトラフィック制御が必要となり、そのオーバーヘッドは大きくなる。さらに通信路の下位層が Ethernet のような共有型メディアである場合は、他の通信路のパケットと競合するためにサービス品質の保証はより困難となる。

それに対して、下位層が ATM の VC (Virtual Circuit) や ISDN の B チャンネルのようなメディアである場合は、ルータ間を point-to-point で接続した通信路を占有することができ、他の通信路のパケットによる影響は小さい。

従って、フローを分類したクラスごとにそれぞれ独立した通信路を割当てることが可能であるならば、クラス間の相互干渉は小さくなる。通信路間での回線

[†] 九州大学 大学院システム情報科学研究科
Graduate School of Information Science and Electrical
Engineering, Kyushu University
^{††} 九州大学 情報処理教育センター
Educational Center for Information Processing, Kyushu
University

共有は下位層によって行なわれるために、ネットワーク層でパケットの送出を調整するスケジューラの必要がなくなり、トラフィック制御のオーバーヘッドも軽減される。

本稿では、N-ISDN 回線の B チャンネルをクラスに割当て、ISP へ PPP 接続した通信路において効果的なトラフィック制御によってサービス品質保証をすることを検討する。このような個人的用途のための通信路においては、競合するフローの数やその種類がバックボーンのネットワークと比べて非常に少ないために、フローをサービス品質保証型と最善努力型の二つのクラスに分類し、それぞれに 1B チャンネルを割当てることでサービス品質保証に十分な効果が期待できる。そこで、フローのパケットを B チャンネルに振り分ける BCD (B-Channel Distributor) を提案し、通常の FCFS (First Come First Served) キューを使用する場合や、CBQ (Class-Based Queueing) によるトラフィック制御を行う場合と比較し評価する。

また、一般的なキューイング方式の問題点として、各クラスに対する処理の重みが静的な値であり、動的に変化するトラフィックにとって最適であるとは限らないことがある。そのために、トラフィックの統計を基にしてクラスごとの重みを動的に調整する機構を提案し、さらに BCD を n チャンネルへ拡張することを考える。

2. N-ISDN でのトラフィック制御

本稿では通信モデルとして、2B チャンネル 128Kbps の N-ISDN 回線を使用した ISP への PPP 接続を想定する。複数のチャンネルを束ねて利用する MP (The PPP Multilink Protocol) によって、常に 2B チャンネルを占有している状態であるとする。

このような通信路における特徴は、バックボーンのネットワークに比べて流れるフローの種類やその本数が圧倒的に少ない点である。流れるフローを細やかにクラス分けしなくても、サービス品質保証型とそれ以外の最前努力型の二つのクラスに分類して、二種類のサービス品質を対応するそれぞれに提供することが可能であれば、サービス品質保証に十分な効果が期待で

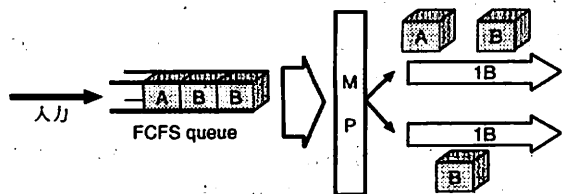


図 1 FCFS キューイングによるパケット転送
Fig. 1 Packet forwarding with FCFS queue

きる。

通常、PPP 接続した回線に対してパケットを送出するルータ (以降、送信器とする) では、MP を利用して 2B チャンネルを仮想的な一本の太い PPP リンクとみなしている (図 1)。キューより取り出されたパケットは、MP によって空いている B チャンネルを選択して送信される。

送信器の送出部のキューは単純な FCFS (First Come First Served) で、最善努力型通信とサービス品質保証型通信のパケットが混在し、1B チャンネルのみで通信を行っているときと同様である。

サービス品質が劣化する原因は、このキューイング処理で最善努力型通信とサービス品質保証型通信のパケットが競合することである。一方の通信のパケットがキュー全体を占めることで、他方の通信のパケットが全く送出されない場合もある。FCFS キューは全ての入力に対して公平に先入れ先出しを行うために、任意の通信のサービス品質を保証することができない。

任意の通信に対してサービス品質を保証するためには、通信をクラスに分類し、限られた帯域 (128Kbps) をそれぞれに割り当てる (帯域を制限する) ことが必要となる。そのためにはクラスごとにキューを保持して、それぞれ割り当てられた帯域を越えないようにパケット送出を調整するスケジューラが不可欠となり、そのオーバーヘッドは大きなものとなる。

2.1 CBQ

FCFS キューに代り、フローのサービス品質を保証するためのさまざまなキューイング機構が提案されている。理論的な研究やシミュレーションを行っただけのものが多い中で、既に実装されていて、試験的に運用されているキューイング機構である CBQ を例として取り上げる。

CBQ (Class-Based Queueing)¹⁾²⁾³⁾ は、ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) の Van Jacobson によって提案され、同研究所の Sally Floyd によって解析、シミュレーションが行われてきたキューイング方式である。

CBQ におけるクラスは、階層的な木構造を構成する。クラスの属性は、パケットの配送元や配送先、プロトコル、サービスの種類等があり、上位のクラスの属性と必ず包含関係が成り立つ。各クラスは独立したキューを保持し、入力パケットはフィルタに通されることによって、属性に適合するクラスのキューに詰められる。ここではサービス品質保証型と最善努力型の二つのクラスを用意して、サービス品質保証型クラスに対して高い優先度を与える (図 2)。

CBQのスケジューラはクラスに割り当てられた優先度に従って、適当なクラスを選択してパケットを送出する。一般的に静的優先度(Static Priority)を利用するキューイング方式は、低い優先度のパケットの使用帯域が枯渇し公平さに欠ける側面がある。しかし、CBQはクラスの使用帯域が割り当てられた帯域制限値を越えると、そのクラスからのパケット送出手を差し止め、より低い優先度のクラスのパケットを送出する。

またCBQの大きな特徴の一つに階層的なクラス構造による帯域共有があり、帯域制限値を越えても親クラスから帯域を借り入れることができる。借り入れ処理は、クラス数が多ければ大きなオーバーヘッドがかかるが、ここではクラス数は二つなので考慮しない。

CBQに入力されたパケットはフィルタに通され、適合するクラスのキューへ詰められる。スケジューラは優先度の高いサービス品質保証型クラスのキューからパケットを取り出す。キューが空もしくは使用帯域が制限値を越えていれば、最善努力型クラスのキューからパケットを取り出す。スケジューラはパケットを取り出した後に下位層へパケットを送出する。下位層ではFCFSキューのときと同様にMPによってBチャンネルが選択されパケットが送出される。

CBQでは、下位層への出口がFCFSキューのときと同様に一つであるため、複数のキューによって共有するためにスケジューリングが必要となり、パケットの優先的な送出やクラスの帯域制限が可能となるが、スケジューラのオーバーヘッドがかかる。

2.2 BCD (B-Channel Distributor)

ここで、各型の通信パケットをそれぞれBチャンネルごとに振り分けるBCDを提案する(図3)。パケットをBチャンネルに振り分けることで、送信器から受信器までの通信路は仮想的に二本確保されたと考えることが可能である。

クラスは最善努力型とサービス品質保証型を用意し、送信器を通過するフローをクラス分けするためのフィルタを設ける。また送信器においては、それぞれのク

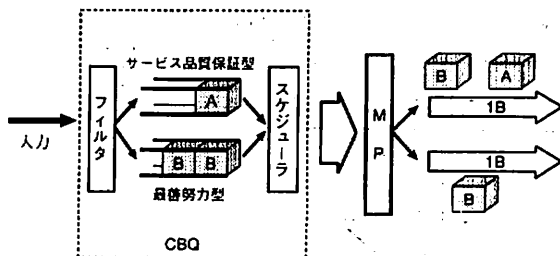


図2 CBQによるトラフィック制御
Fig. 2 Traffic control with CBQ

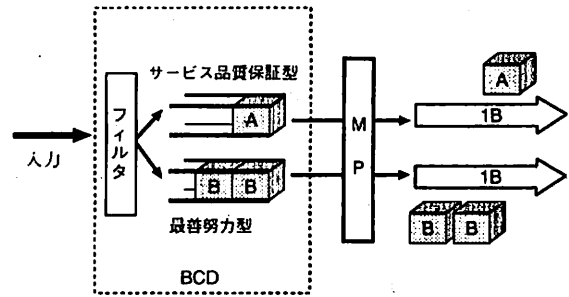


図3 BCDによりパケットをチャンネルへ振り分ける
Fig. 3 Distributing packet to each channel by BCD

ラスに対応する独立したキューを保持する。

クラスの属性はCBQと同様に、パケットの配送元、配送先、プロトコル、サービスの種類を付与する。送信器に入力されたパケットは、まずあらかじめ用意しているフィルタに通されクラス分けされる。クラス分けされた後はキューに詰められ、そのまま出力される。MPによるBチャンネル選択は行われず、クラスに割り当てられたBチャンネルを使用してパケットを送出する。

CBQのようなキューイング処理では、ネットワーク層から下位層への出口を複数のクラスで共有するために、パケット送出を調整するスケジューラが必要となる。しかしBCDではクラス間、即ちチャンネル間での回線共有は下位層によって行なわれるために、ネットワーク層で考慮する必要は無く、最善努力型通信とサービス品質保証型通信はお互いに保護される。一方のクラスのパケットがリンクを占有し、他方のクラスのパケットの送出を妨害することもない。また輻輳時においても、送信器による処理の公平さも全く失われない。しかも送出スケジューラが必要ないために、FCFSキューのときに比べ増加するオーバーヘッドはフィルタリングの処理による分だけである。

しかし、クラスはそれぞれ1Bチャンネルしか持たないために、各クラスの最大帯域は64Kbpsにまで制限されてしまう。一方のクラスの通信が全く行われていないときでも、他方のクラスが使用可能な帯域は64Kbpsである。同一条件下でFCFSキューが最大128Kbps使用可能であることを考慮すると、チャンネルを借りる機構が必要となる。

チャンネル借り入れ機構は通信の保護の点から、全く使用されていないチャンネルのみを借りるべきである。チャンネルの一部のみを借りようとすると、クラスのキュー内に他のクラスのパケットが混在することになり、パケット送出に影響を与えてしまう。故に、他方のキューが空であるときのみチャンネルを借りることを許可する。

しかし、両方のクラスのキューにパケットが存在する場合には、効率的な帯域共有ができないこともある。例えば一方のクラスが 80Kbps、もう一方のクラスが 20Kbps を使用する通信である場合、前者はチャンネルを借りることができず、帯域は 64Kbps に制限され、両チャンネルで合計 84Kbps しか使用することができない。

このように BCD は、スケジューラを必要としないためにオーバーヘッドの小さなトラフィック制御を行うことが可能であるが、特定の条件下においては帯域の内部断片化が起り、効率的な帯域割当てをすることができない場合もある。

2.3 比較

BCD はスケジューラが必要なく、入力パケットをキューに振り分けるだけでクラスに対する帯域の制限が可能であるが、それぞれの最大帯域は 64Kbps にまで制限され、チャンネル借り入れ機構を導入しても帯域の内部断片化が起る。帯域を算出してチャンネルの一部を借りるような、より複雑な借り入れ機構を導入するとオーバーヘッドが大きくなり、CBQ に対する利点が無くなる。

しかし、内部断片化は、両方の型の通信の入力があり片方みのパケット入力レートが 64Kbps を越えた場合のみ起る。それ以外の場合には、オーバーヘッドも小さく非常に効率のよいトラフィック制御が可能である。

但し、輻輳時の帯域の割当の比は常に 1:1 であり、この比が両方の型の通信にとって常に最適であるとは限らない。

一方、CBQ はオーバーヘッドは BCD よりも大きい帯域の割当てをより細かくでき、帯域の内部断片化を引き起こすこともない。さらに、クラスの帯域制限値を付与できるということは、輻輳時に保証する最低帯域を変更できるということである。この比を決定する重みを調節し、帯域割当ての最適化を行うことができるならば、オーバーヘッドの大きさを考慮しても BCD よりも有用性があると予想される。

しかし、優先度や帯域制限値のようなパケットスケジューラの振る舞いを決定する自由度としての重みは、いずれも静的な値である。従って重みは、過去のトラフィックパターンを参照する等して送信器の管理者が静的に決定できるが、その値もまた常に最適であるとは限らない。

そこで、キューイング処理部からのフィードバックを基に、各通信に対する重みを動的に調整する機構を提案する。送信器の状態から判断し、自律的にパケッ

トスケジューリングの振る舞いを調整し、通信ごとの帯域割当ての最適化を行うことを目指す。

3. 動的重み調整

動的重み調整は、送信器の状態からクラスごとの重みを算出し、調整することで、パケットスケジューリングの振る舞いを調整する(図 4)。

ここで指す重みとは、パケットスケジューリングの各クラスに対する処理を決定するパラメタであり、CBQ にとってはクラスごとの使用帯域制限値である。CBQ では優先度も考慮する必要があるが、クラス数が 2 であるために、時間制約を受けるサービス品質保証型通信に対して高い優先度を付与して固定する。

クラスに付与する重みを決定する重要な要素は、一方のキューが空であるならば他方のキューのパケットが全ての帯域を利用できることである。さらに、輻輳時のルータの処理が一方に極端に偏ることのない公平さを提供できることである。これらの条件を満たしながら変動するトラフィックに対応して重みを調節する。

また BCD においても、スケジューラは無いがクラスに割当てられたチャンネル数によりクラスの帯域が変動するために、各クラスのチャンネル数を重みと考えることができる。ここでの通信モデルでは、チャンネルとクラスが同数であるために動的に重みを調整すると、チャンネルを割当てられていないクラスがあり公平さを欠くことがある。しかし、 m のクラスに対して n のチャンネル ($m < n$) を用意することができるならば、動的な重みの調整に従い余剰なチャンネルの貸借によって最適化を計ることができる。BCD の n チャンネルへの拡張については 4 節で述べる。

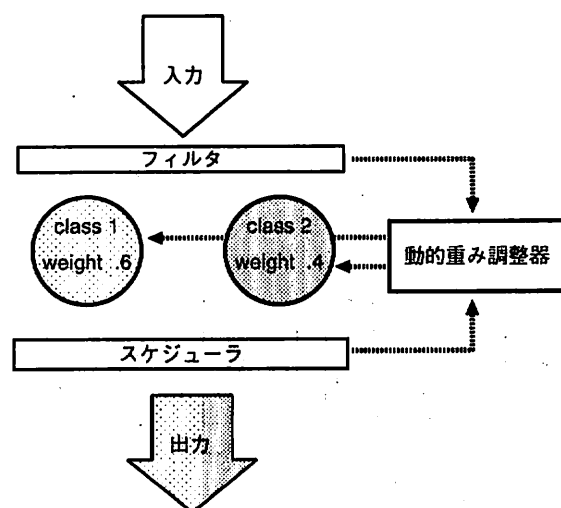


図 4 動的重み調整
Fig. 4 Dynamic weight adjustment

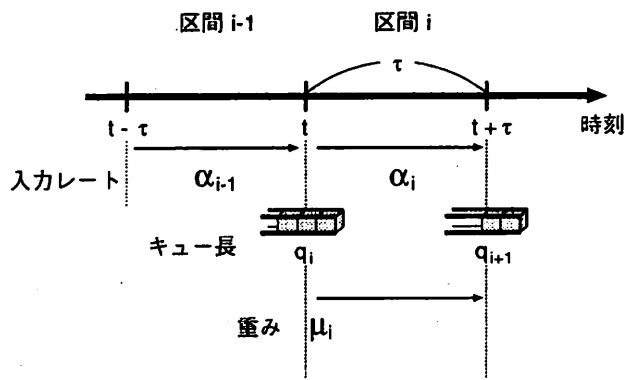


図5 重み見積り区間
Fig. 5 Weight estimation slot

3.1 重み見積り法

ここでは、各クラスのキューが要求する理想帯域の比によって、キューに対する重みを周期 τ で調整する(図5)。

時刻 t から $t+\tau$ までの区間 i の重み μ_i は時刻 t において決定する。時刻 t におけるキュー長を q_i 、区間 i におけるパケット入力レートを α_i とすると、時刻 $t+\tau$ におけるキュー長 $q_{i+1} = 0$ となるような理想的な帯域 λ_i は $(q_i/\tau) + \alpha_i$ である。

しかし、パケット入力レートは予測できないために、 τ が適当に短い期間であるならば、パケット入力レートは劇的に変化をしないとし、 α_{i-1} を代用する。

$$\lambda_i = \frac{q_i}{\tau} + \alpha_{i-1} \quad (1)$$

最善努力型通信とサービス品質型通信のそれぞれのキュー b, g の区間 i における重み μ_i^b, μ_i^g は

$$\mu_i^b = \frac{\lambda_i^b}{\lambda_i^b + \lambda_i^g}$$

$$\mu_i^g = \frac{\lambda_i^g}{\lambda_i^b + \lambda_i^g}$$

とする。

この手法により、一方のキューにしばらく入力パケットが無ければ、他方のキューの重みは1となり帯域を占有することができる。また輻輳時においては、送信器での処理の公平さは失われない。

3.2 考察

この重み見積り法は、一方のキューにパケットが無ければ他方が帯域を占有し、両方のキューにパケットがあれば公平に帯域を共有することができる。

しかし、最善努力型通信とサービス品質保証型通信のそれぞれの特性を考慮していないために重みの最適化がなされないことがある。例えば、ftpは連続する大

きなパケットを転送するためにどうしても入力パケットレートが高くなる。それに比べて、音声データはパケット長も小さく入力レートも低い。ftpのキューは式(1)において q_i, α_{i-1} が共に大きく、その重みも徐々に大きくなり、音声データのキューの重みを圧迫してしまう。

また τ は適当な値を選ばなければならない。途中のネットワークの状態によってパケットの遅延時間は揺らぐためにパケット入力レートは大きく変動し、 τ が小さければ予想されるパケット入力レートは0となることもある。

重みを最適化するためにはキューイング機構からのフィードバックとしてさらに、パケットの平均レイテンシやパケット長、パケット入力レートの変動等を考慮し、重みを算出する必要がある。

また、狭帯域リンク上でのパケットスケジューリングに特有の問題として、パケットごとの伝播時間が長いことが挙げられる。狭帯域であるために、パケット長が単位時間当りの伝送量に対して大きい。従って、パケットスケジューリングを行っても、一つのパケットが回線を占有する時間が長く、処理を待たされるパケットの遅延時間も大きくなる。よって、MTU (Maximum Transmission Unit) を考慮してスケジューリングする必要があると考えられる。

4. n チャネルへの拡張性

ここで取り上げた通信モデルにおいては、2Bチャネル故に二つのクラスしか用意しなかったが、より高速なネットワークへのBCDの拡張性について考える。

一般に、等しい帯域を持つ n のチャネルを m のクラスに対して割り当てるとすると、

$m > n$ のとき

一つのチャネルを複数のクラスで共有するために、クラス間でのパケットの保護がなされない。

$m = n$ のとき

一つのクラスに対して一つのチャネルを割り当てることが可能であるが、帯域の内部断片化を引き起こす可能性がある。

$m < n$ のとき

一つのクラスに対して複数のチャネルを割り当てることが可能であるため、各クラスの輻輳時の最低帯域を保証すると共に、余剰なチャネルを貸借することで柔軟性のある帯域共有が可能となる。

BCDを固定帯域のチャネルを使用した高速ネット

ワークへ適用する場合、広帯域のチャンネルをクラスに一本ずつ割り当てるよりも、より狭帯域のチャンネルを複数割り当てる方が、帯域の内部断片化を避けることができる。

また可変帯域のチャンネルを使用する場合は、チャンネル間の帯域の貸借が可能ではあるが余剰帯域の算出等の処理が必要となるために、固定帯域のチャンネルを多数使用してチャンネルを貸借した方が、より単純な帯域の貸借が可能である。

クラス数が増大すると、クラスは平面的な配列よりもCBQのような木構造を形成する方が、チャンネル借り入れ処理は効率よく行うことができる。親クラスは全ての子クラスの状態を管理して子クラス間でのチャンネル貸借を仲介することで、すべてのクラスの状態を検査する必要がなくなる。

クラス数の増加に伴いBCDのクラス分け処理のオーバーヘッドは増大するが、クラス数以上のチャンネルを割り当てるのが可能であるならばパケットスケジューラが必要無く、パケットスケジューラのオーバーヘッドも増大するCBQに比べて、はるかに有用性があると考えられる。

またチャンネル数がクラス数よりも多ければ、動的な重み割当をチャンネル貸借処理部に適用することができ、自律的にクラスの帯域制限値を増減させ、オーバーヘッドの小さなトラフィック制御が可能となる。

5. おわりに

CBQに代表されるようなキューイング処理でトラフィック制御を行なうには、ネットワーク層から下位層への出口がクラス間で共有されるために、クラスからのパケットの出力を調整するパケットスケジューラが必要となり、そのオーバーヘッドは大きなものとなる。

しかし下位層がISDNのBチャンネルやATMのVC等の通信路の場合、各クラスにチャンネルを割り当てることができれば、クラス間のパケット出力調整は下位層に任せることができ、パケットスケジューラが必要なくなる。

本稿では、2Bチャンネル128KbpsのN-ISDN回線のような個人的用途のための通信路で効率的な帯域共有するために、通信をBチャンネルごとへ振り分けるBCDを提案し、CBQによるトラフィック制御と比較した。このような通信路においては、競合するフローの種類や本数は非常に少なく、最善努力型とサービス品質保証型のクラスに二分してトラフィック制御をしても、品質保証への十分な効果が期待できる。

BCDでは帯域の内部断片化が起り、十分な帯域割

当ができないことがあるが、スケジューラを必要としないために、パケットの入力レートの状態によってはオーバーヘッドの小さな非常に効率のよい帯域共有が可能であることを示した。

一方CBQはオーバーヘッドはBCDに比べ大きいですが、より柔軟な帯域割当ができ、内部断片化を引き起こすこともない。さらにクラスに帯域制限値を与えることができるということは、輻輳時に保証する最低帯域の比を変更できることである。この比を決定する重みを調節し、帯域割当の最適化を行うことができれば、オーバーヘッドの大きさを考慮しても有用性がある。

クラスの帯域制限値のような、パケットスケジューリングの振る舞いを決定する重みは静的に設定を行わなければならない。その値によって最適な帯域割当が行われるとは限らない。そこでキューイング処理部からのフィードバックを基に重みを動的に調整する機構を提案した。

また、BCDをより高速で広帯域なネットワークへ適用するための拡張性について述べた。クラス数が増大してもそれ以上のチャンネルを使用できるならば、CBQよりも有用性があることについて述べた。

今後は、本稿で述べたトラフィック制御手法であるBCD及び、CBQと動的な重み割当機構をISDNルータへ実装し、それぞれの測定・評価を行う。

また、キューイング機構の重み見積り法はまだ改善の余地が多くあり、測定・評価と並行して検討する。しかし、重みの最適化を評価するためには、アプリケーション層での定量的な評価は難しいため、パケット単位の評価の手法を考える必要がある。

参考文献

- 1) Floyd, S. and Jacobson, V.: Link-sharing and Resource Management Models for Packet Networks, *IEEE/ACM Transactions on Networking*, Vol. 3, No. 4, pp. 365-386 (1995).
- 2) Wakeman, I., Ghosh, A., Crowcroft, J., Jacobson, V. and Floyd, S.: Implementing Real Time Packet Forwarding Policies using Streams, *Usenix 1995 Technical Conference*, pp. 71-82 (1995).
- 3) 長健二郎: PC UNIX ルータによるトラフィック制御の実現, *Internet Conference '97* (1997).