

高速通信プロトコルにおけるレート制御機構の実装に関する検討

三宅 優 石倉 雅巳 鈴木 健二

国際電信電話(株) 研究所

ネットワークの高速化に対応するために、レート制御機構を有する通信プロトコルが提案されている。一般に、レート制御機構で使用されるパラメータの意味や、パラメータの送受信ホスト間での受渡し手順等はプロトコルの仕様として定められているが、通信性能に大きな影響を与える輻輳回避手順やパラメータ値の変更手順はプロトコルの実装者に委ねられている。本稿では、レート制御機構に使用されるパラメータ値の計算法や輻輳回避手順を、フロー制御機構と関連させて検討し、それに基づいて設計したプロトコルの性能評価を行ったので報告する。

**A Study on Implementation of Rate Control Mechanism
for High Speed Communication Protocol**

Yutaka Miyake Masami Ishikura Kenji Suzuki

KDD R & D Laboratories

Ohara 2-1-15, Kamifukuoka, Saitama 356, JAPAN

Communication protocols which have rate control mechanism are proposed for high speed networks. Generally, meaning and negotiation method of the parameters for rate control are defined as protocol specification. However the update timing of value for these parameters and congestion avoidance mechanism, which are important to obtain good performance, are up to protocol software implementation. This paper describes how to decide these parameters and schemes of congestion avoidance for rate control, and evaluates proposed algorithm.

1 はじめに

光通信技術の発展により、ネットワークの伝送速度が飛躍的に高速化している。また、ネットワークに接続される計算機も、非常に処理能力が高いものが比較的安く手に入れられるようになった。しかし、従来の通信プロトコルは、最近の高速ネットワークを考慮して設計されていないため、その高速性を十分に利用することが困難である。また、マルチメディア通信や分散処理など、ネットワークの高速化により可能となる新しい通信形態への対応も従来のプロトコルでは不十分であると言える。そこで、これらの問題を解決するために、新しい通信プロトコルが提案されている [1, 2]。

提案されている新プロトコルの特徴の1つとして、高速ネットワークで通信スループットを向上させるためのレート制御機構があげられる [3-5]。高速ネットワークにおける通信では、受信側の計算機や通信経路上に存在する中間ノードの処理能力以上の速度でパケットが連続して到着する場合、受信処理が間に合わずにパケットが破棄されるオーバーランが発生する可能性が高くなる。このオーバーランによるパケットロスは、誤り処理機構を起動させるために、通信スループットを低下させてしまう。そこで、パケットロスを抑えるために、受信側の計算機や中間ノードの処理能力に応じて送信側でデータの送出間隔を調整するレート制御機構の導入が、結果としてスループットを向上させることになる。

通信プロトコルの定めるレート制御機構の範囲は、一般にレート制御機構で用いるパラメータの意味や、送受信ホスト間でのパラメータの受渡し手順等である。プロトコルを実装する際には、これらのパラメータ値を決める手順が必要であるが、この手順すなわち設定されたパラメータ値は通信スループットや輻輳回避時の動作に大きく影響する。

本稿では、レート制御機構を実装する際に必要となるパラメータ値決定手順を、従来のウィンドウベースによるフロー制御機構の動作と関連付けて検討し、そのためのアルゴリズムを提案する。さらに、本アルゴリズムに従ったレート制御機能を実装する通信プロトコルとフロー制御機能のみのプロトコルを性能比較したので報告する。

2 フロー制御とレート制御の役割

コネクション指向の通信プロトコルでは、受信バッファおよび通信経路上に存在する中間ノードのバッファオーバーフローを抑えるために、フロー制御機構を保持する。例えば、現在一般的に利用されている TCP および OSI/TP4 では、スライディングウィンドウベースのフロー制御機構を有している。

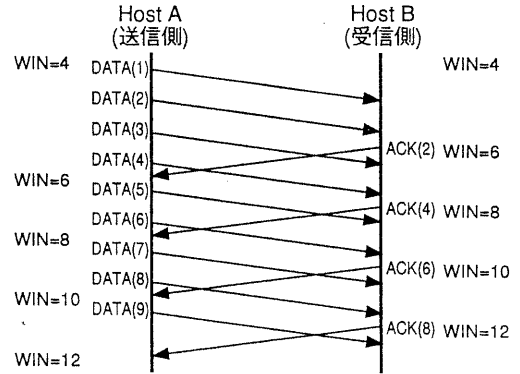


図 1: フロー制御機構の動作

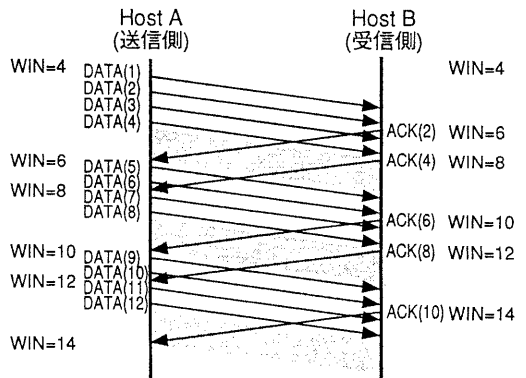


図 2: 高速ネットワークにおけるフロー制御機構の動作

図 1 に、Host A (送信側) および Host B (受信側) の間でのスライディングウィンドウベースのフロー制御機構の動作を示す。図において、DATA(x) はシーケンス番号 x のデータパケットを表し、ACK(x) はシーケンス番号 x までのデータパケットに対する確認応答パケットであることを示している。変数 WIN の値は、その時点において送信することが許される DATA パケットの最大シーケンス番号で、Host B からの ACK パケットによりその値は更新される。図 1 の場合、WIN の初期値は 4 であるため Host A は 4 つのパケットを送信した後にパケットの送信を停止する。その後、Host B からの確認応答によって WIN の値が更新されると、送信を再開する。

高速なネットワークや送受信ホスト間の伝送遅延が大きい場合には、確認応答の ACK パケットが送信側に到着するまでに時間がかかる。よって、フロー制御機構のウィンドウサイズが小さいとデータを送信できない時間が生じてしまう (図 2 参照)。そのため、伝送路の帯域に余裕があるが、スループットが向上しないという問題が発生する。このような場合にスループットを向上させるには、ウィンドウサイズを増やしてデー

タを送信できない時間を少なくすることが考えられる。

しかし、フロー制御機構でウィンドウサイズを拡大させて、スループットを向上させようとするると以下の問題が生じる。

1. 受信側ホストの処理能力を超える速度で送信側がデータを送出した時に、パケットロスが生じる。
2. 通信経路上の中間ノードで、バッファ容量が不十分であったり、連続して非常に多くのパケットを受信すると、そのノードでパケットロスが生じる。

これらの問題は、レート制御機構の導入により解決することが可能である。レート制御機構は、受信ウィンドウサイズが大きい場合においても送信側はデータを連続して送信せず、許されている送信レートの範囲内の速度でデータを送信する。この送信レートが、受信側ホストや中間ノードの処理能力内であれば、ウィンドウサイズを大きくしてもパケットロスの発生を抑えることができる。

3 レート制御機構の実装に関する問題点

3.1 輻輳回避

受信側ホストや中間ノードにおいて、処理能力以上の速度でパケットが到着した場合には、パケットロスが発生して通信プロトコルの誤り制御機構が動作を開始する。失われたパケットの再送要求を行う必要があるが、この時にフロー制御機構におけるウィンドウサイズやレート制御機構における送信レートを変更せずに再送を開始すると、通常時に送信されるパケットに加え、失われたパケットも再送されるために、さらに通信経路上にパケットが増えてパケットロスが発生する可能性が高くなる。このような状態が続くと、輻輳状態に陥り、ネットワークの使用が不可能になる場合もある。

一般に通信プロトコルでは、フロー制御機構やレート制御機構でのパラメータの意味や送受信ホスト間でのパラメータ値の更新方法を仕様として定めている。輻輳回避はフロー制御機構やレート制御機構のパラメータを操作して行うことになるが、この手順については、仕様の範囲外である。

また、パケットロスが発生して輻輳回避手順を起動する場合、その時点の通信において送出されるパケット量を制限していたのがフロー制御機構とレート制御機構のどちらであるかを考慮する必要がある。これは、送出されるパケット量を制限しているいずれかの機構のパラメータを操作する方が、輻輳回避時に効果が大きいためである。従って、ホスト計算機間で効率のよい通信を実現するには、フロー制御とレート制御を適

切に組み合わせた輻輳回避手順が必要である。

3.2 レート制御機構に用いるパラメータ値の決定

レート制御機構では、受信側でデータ転送レートの値を決定し、送信側でその値に基づいてデータ送信を行う。通信プロトコルでは、レート制御機構用パラメータの意味や、そのパラメータの送受信ホスト間での受渡し方法を仕様として定めており、パラメータ値の決定方法は、実装に依存する。

バルクデータ転送等で高スループットを得るには、レート制御機構に用いられるパラメータ値が非常に大きな役割を果たす。この値の最適値は、送受信を行っているホスト計算機の負荷、送受信間の通信経路上に存在する中間ノードの状態、ネットワークの使用率等が時々刻々と変化するため、これらの変化にあわせて動的に変更されることが望ましい。従って、最適パラメータ値を常に維持するアルゴリズムが必要となる。

3.3 フロー制御とレート制御の関係

フロー制御とレート制御の両機構が存在する通信プロトコルを用いて通信を行っている場合は、どちらかの機構により送信するデータ量が制限される。すなわち、フロー制御機構ではウィンドウサイズによって送信データ量が抑えられ、レート制御機構では現在与えられている送信レートのパラメータにより送信データ量が抑えられる。

通信時は、より高スループットが得られる機構により送信するデータ量を制御すべきであり、通信路やトラフィックの変化に従って動的に制御機構が切り替わる必要がある。

4 レート制御機構を含むプロトコルの実装

4.1 輻輳回避手順

フロー制御機構における輻輳回避方法としては、UNIX 4.3BSD-Tahoe における TCP の実装で採用されている “slow-start” と “multiplicative decrease” の組み合わせがある [8]。この方法は、プロトコル処理の負荷も軽く、高性能が得られる。

“slow-start” は、フロー制御機構で用いるウィンドウサイズを調整することにより、輻輳を回避する方法である。パケットロスを受信側で検出すると、変数 *cwnd* (輻輳ウィンドウサイズ) を 1 (パケット) とし、これを送信側に新しいウィンドウサイズとして伝える。このとき、

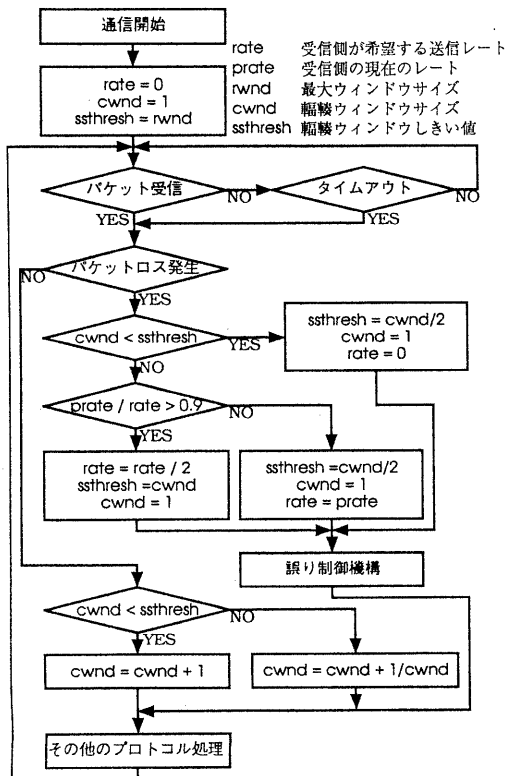


図 3: パケットロス検出時のプロトコル処理手順

ssthresh (slow start threshold) に cwnd の半分の値を与える (“multiplicative decrease”).

パケット受信毎に行われる cwnd の更新方法を以下に示す。

```

if (cwnd < ssthresh)
    cwnd = cwnd + 1;
else
    cwnd = cwnd + 1 / cwnd;

```

この方式をフロー制御機構とレート制御機構を持つプロトコルにおける輻輳回避手順について適用した場合を図3に示す。図において、rateは受信側が希望する送信レート、prateは、受信側における現時点でのレート、rwndは受信側が許容する最大ウィンドウサイズである。rateが0である時は、レート制御機構を用いないことを意味する。

送信開始時は、cwndを1として、レート制御を行わずに通信を開始する。パケットを受信してパケットロスが発生していなければ、cwndを更新する。パケットロスの発生時には、まずcwndとssthreshの値を比較する。ssthreshの方が大きい場合は、パケットロスが多量に発生していると考えられるため、レート制御機構をやめ、ssthreshの値を設定しなおして再送を開始す

る。cwndの方が大きい場合には、cwndを徐々に増加させている時にパケットロスが発生したことになる。この時には、まずrateとprateする。prateの値がrateの90%以上であればレート制御機構により転送レートが抑えられ、送出速度が速すぎるためにパケットロスが発生したと判断し、rateの値を半分にして送信を再開する。prateの値がrateの90%以下の場合には、prateの値を新しいrateの値として、送信を再開する。

この手順では、パケットロスの発生時にprateとrateを比較し、値がほぼ等しければレート制御機構により送信するパケットを制御し、そうでなければフロー制御機構により制御する。その結果、その時点での最適な制御方式が選択される。

4.2 送信レートの計算

4.2.1 通信開始時

通信開始時には、最適な送信レートを知ることができないため、4.1節で述べたように、レート制御を行わずにフロー制御のみで通信を開始する。“slow-start”によりウィンドウサイズを拡大していく段階でパケットロスが発生した時、その時点がフロー制御におけるスループットの限界と考えられる。よって、その値をレート制御機構での最初の送信レートとして、レート制御機構のパラメータを決定する。

4.2.2 定常時

定常時には、受信側でデータの受信状態を監視し、その結果を基に必要に応じて定期的にパラメータ値を送信側に通知する。具体的には、受信したデータのシーケンス番号から、単位時間内に送信したデータサイズとデータの実際に受信したデータサイズを求め、その値に応じてパラメータ値を更新する。

一定期間パケットロスが発生しなければ、送信レートを上昇させる。このとき、以前にパケットロスが発生した時のスループットを基準に上昇させる。この値と現在使用しているrateの値が接近するにつれて上昇させる割合を小さくし、基準となる値を越えた後も、緩やかな速度で上昇させていく [6]。

5 レート制御機構の評価

本稿で検討したレート制御の実装方法に基づいたレート制御機構を実装した通信プロトコルの評価実験を行った。本章では、その実験結果について述べる。

5.1 評価方法

図4に、今回行った評価試験の構成を示す。

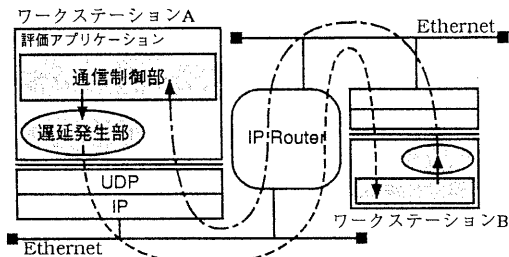


図 4: 評価試験の構成

通信プロトコル機能は UNIX ワークステーション上のアプリケーションとして作成し、2つのワークステーション上にあるアプリケーション間で実際にデータ通信を行って通信スループットを測定した。本アプリケーションは、コネクションレスプロトコルである UDP 上で動作する。誤り回復処理に関しては、Go-Back-N 方式で実行している。

ネットワークは 10Mbps の伝送速度を持つイーサネットを使用した。各ワークステーションは、別々のイーサネットに接続されており、イーサネット間は IP ルータによって接続されている。最大パケットサイズは、1.5k バイトとした。

また、伝送遅延がスループットに与える影響を調べるために、アプリケーション内に一旦パケットを指定時間蓄えてから送信する遅延発生部を設けた。

5.2 通信スループットの変化

フロー制御機構のみのプロトコルによる通信と、今回検討した方式を用いて実装されたフロー制御機構とレート制御機構をあわせ持つプロトコルの通信との性能比較を行うために、通信スループットを測定した。測定は、それぞれの通信方式に対し、遅延発生部において遅延処理を行わない場合 (往復遅延=0ms) と、遅延発生部において 100ms の遅延を発生させた場合 (往復遅延=200ms) について行った。なお、これらの遅延の他に、約 4~8ms の往復遅延時間がネットワークの伝送遅延およびプロトコルの処理により発生する。

測定した結果を、図 5 に示す。横軸は受信バイト数の累積を表す。通信開始時から、データを 1 メガバイト受信する毎に、過去 1 メガバイト受信するのに要した時間を計測し、過去 1 メガバイト受信している時のスループットを、その時点でのスループット値としている。

5.3 輻輳ウィンドウサイズの変化

5.2 節でのスループットの測定時に、フロー制御機構における輻輳ウィンドウサイズ (cwnd) の変化を計測した。その結果を、図 6 に示す。

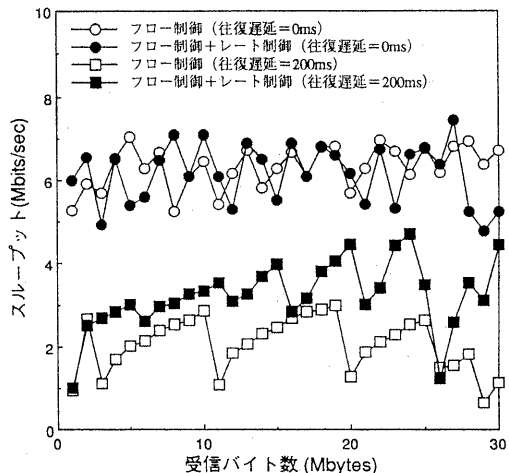


図 5: スループットの変化

6 考察

6.1 通信スループットについて

図 5 に示すように、ネットワークの伝送速度に対して通信を行っているホスト間での伝送遅延が小さい時 (往復遅延=0ms) は、今回検討した方法によってフロー制御機構とレート制御機構を組み合わせたプロトコルで、フロー制御機構のみ場合とほぼ同等のスループットが得られた。測定に使用したワークステーションに実装されている TCP によるスループット性能は、約 7.5Mbit/sec であった。今回の実装を行った環境では、プロトコル処理をユーザレベルのアプリケーションで行い、遅延を発生させるために、送信パケットを一旦キューに格納し、そのキューの中に送信可能なパケットがあるかを常にチェックしているため、カーネル内に実装されている TCP に比べ、プロトコル処理以外の部分での処理負荷が高くなっている。そのため、得られたスループットはフロー制御のみの場合と、レート制御機構を付加した場合のどちらもほぼ最高のスループットであるために、差がほとんど無くなったと考えられる。

往復遅延時間が 200ms の場合には、今回検討した実装方法によるレート制御機構の付加により、約 1.5~2 倍のスループット性能が得られた。フロー制御のみの場合は、輻輳回避段階で徐々に輻輳ウィンドウサイズを増やしている時にパケットロスが生じ、“slow-start”により送信を再開するという繰り返りである。レート制御の導入により、フロー制御のみの場合における最高スループットである約 3Mbit/sec 以上のスループットを達成する事が可能となった。

レート制御機能の導入により、特にネットワークが

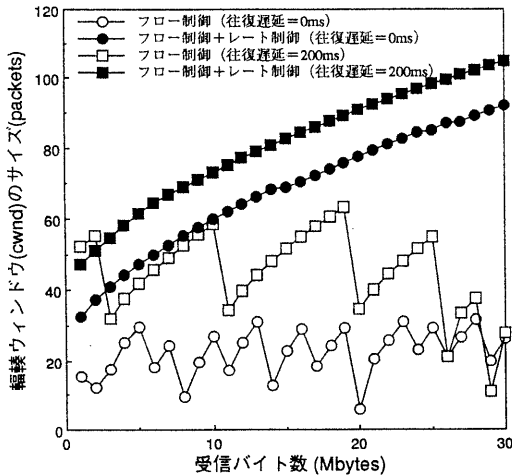


図 6: 輻輳ウィンドウサイズの変化

高速で遅延の大きい環境では、スループットが向上した。しかし、このような環境では、受信側が設定した新しいパラメータが送信側に伝わるのに時間がかかる。そのため、パケットロスが発生した時点の受信側のパラメータが、そのパケットを送信した時点での送信側のパラメータと異なる可能性がある。レート制御機構のように、ネットワーク性能を最大限に利用しようとしている状態では、失ったパケットを送信した時の送信側のパラメータを考慮して新しいパラメータを決めることにより、更に安定したスループットを得られると考えられる。そのために、レート制御機構のパラメータ操作にも伝送遅延を考慮した機構が必要であると考えられる。

6.2 輻輳ウィンドウサイズの変化について

フロー制御しか持たないプロトコルでは、ウィンドウサイズを徐々に増加させることによりスループットが向上するが、大きくなりすぎると単位時間内に到着するパケット数が増えるために、パケットロスが発生する。そのために、ウィンドウサイズを小さくして輻輳を回避し、再びウィンドウサイズを大きくしていく。これにより、図 6 に示されているように、ウィンドウサイズの変化は、ノコギリ型となる。

レート制御を導入した場合には、パケットの送信を制限する機構が 2 つ存在する。今回測定を行った範囲では、図 6 により、レート制御機構を導入した場合の輻輳ウィンドウサイズは常に増加している。これは、測定を行った範囲内では、レート制御機構の送信レートによってパケットの送信が制限されているために、輻輳ウィンドウサイズが大きくなり、フロー制御が通信に影響しないことを示している。レート制御用パラメー

タの最適値を決定する場合、定常的な通信時においてはフロー制御機構の影響を受けないことが望ましいが、今回検討した手順はこの方針に沿って動作していることが確認された。

7 まとめ

本稿では、レート制御機構を通信プロトコルに実装する際に必要となる輻輳回避機能を含むパケットロス発生時のプロトコル処理手順やレート制御機構のパラメータの設定方法について検討した。本検討は、フロー制御機構の輻輳回避手順に着目しており、高スループットを達成するために必要となるフロー制御とレート制御機構の協調動作が可能となる。また、評価実験により、検討した方式の有効性を確認した。

最後に、日頃御指導頂く KDD 研究所 浦野所長、眞家次長に感謝します。

参考文献

- [1] W. A. Doeringer, D. Dykeman, M. Kaiserswerth, B. W. Meister, H. Rudin and R. Williamson, "A Survey of Light-Weight Transport Protocols for High-Speed Networks," *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 38, pp. 2025-2039, November 1990.
- [2] T. F. La Porta and M. Schwartz, "Architectures, Features, and Implementation of High-Speed Transport Protocols," *IEEE Network Magazine*, pp. 14-22, May 1991.
- [3] "XTP Protocol Definition Revision 3.6," *Protocol Engines Inc.*, PEI 92-10, 11 January 1992.
- [4] D. Cheriton, "VMTP: Versatile Message Transaction Protocol - Protocol Specification," RFC 1045, February 1988.
- [5] D. Clark, M. Lambert and L. Zhang, "NETBLT: A Bulk Data Transfer Protocol," RFC 998, March 1988.
- [6] 三宅、石倉、鈴木、"高速通信プロトコルにおける動的なレート制御機構の実装と評価," 情報処理学会第 47 回全国大会、1F-7、1993.
- [7] 三宅、石倉、鈴木、"レート制御機構を有する XTP プロトコルの実装における輻輳回避手順に関する検討," 情報処理学会第 48 回全国大会、1D-7、1994.
- [8] V. Jacobson, "Congestion Avoidance and Control," *Proceedings of the ACM SIGCOMM Conference*, pp.314-329, August 1988.