

高信頼性XCASTプロトコルへのキャッシュ導入の検討

松森 純, 楯岡 孝道, 阿部 公輝*

電気通信大学 情報工学専攻[†]

概要

効率的なデータ配信を行うことができる従来の高信頼性XCASTでは、再送方式の評価基準として、送信元ノードのみのトラフィックに着目している。しかし、これではネットワーク全体のトラフィックが考慮されない。そこで、各リンクを通過するパケット数の総和をトラフィック量の評価基準に導入し、アクティブネットワーク技術で用いられるキャッシュ機能に着目する。本論文では、XCAST対応ルータにキャッシュ機能を持たせることを提案する。提案手法によるネットワーク全体のトラフィック量の削減、通信効率の向上、必要なキャッシュサイズについて、数式により見積もり、さらにシミュレーションによって評価した。その結果、無線リンクを用いたネットワークを模した環境において、ネットワーク全体として約8%、最も効果があらわれるリンクにおいて約30%のトラフィック削減効果を確認した。また、現実的な容量のキャッシュで効果が現れることも確認した。

1 はじめに

近年、インターネット回線の高速化に伴い、IP電話やビデオ会議、インターネット放送といった、同一の情報を多数の受信ホストに対して送信するアプリケーションの重要性が増してきている。従来、このような1対多通信は、1対1通信を複数回行うことによって実現されてきた。しかしながら、送信局の負荷、およびネットワークのトラフィックが受信局数に応じて増加していき、限りあるネットワーク資源を有効に活用することができないという問題があった。

この問題は、マルチキャスト技術によって解決す

ることができると考えられており、これまでに数多くのマルチキャストプロトコルが提案されてきた[1]。その中でも、近年のインターネットではIPマルチキャスト[2]が広く用いられ、研究されてきた。しかしながら、IPマルチキャストのようなホストグループ型のマルチキャストには、グループ数に対するスケーラビリティがないという問題点がある[3]。また、IPマルチキャストでは、ユニークなマルチキャストアドレスの割り当て機構が必要となる[4]。

この問題を解決するマルチキャストとして、XCASTが提案されている[5]。XCASTは中間ルータに状態を保持せず、複数の送信先アドレスをすべてパケット内部に明示して配送するプロトコルであり、グループ数に対するスケーラビリティが高く、ユニークなマルチキャストアドレスの割り当て機構を必要としない。少数のメンバーを持つ、多数のグループが存在する環境においてIPマルチキャストよりも効率的に動作するプロトコルである。

しかしながら、XCASTは通信の信頼性が確保されないため、通信の途中でパケットが紛失する可能性がある。そのため、そのままでは信頼性を要求される通信に用いることができない。たとえば、XCASTを用いたビデオ会議を実行中、参加者に資料のデータファイルを配布したい場合など、XCASTを用いて配布することは難しい。信頼性マルチキャストはこれまでも数多く提案されている[6, 7, 8, 9]が、IPマルチキャストをベースとしているため、参加者の少ないグループにデータ配信をするという用途に向くものではなかった。

その問題を解決した高信頼性XCAST[10]では、プロトコルのトラフィックを論じるにあたり、パケットサイズとパケット数のみを問題としていた。しかしながら、ネットワーク全体としてのトラフィック量を考えるためには、隣接ノードへのパケット送信と、複数リンクを経由するノードへのパケット送信は、

*Jun MATSUMORI, Takamichi TATEOKA, Kôki ABE

[†]Department of Computer Science, The University of Electro-Communications

区別される必要がある。

本研究では、アクティブネットワーク技術[11, 12, 13]で用いられるキャッシュ機能に着目する。そして、XCAST対応ルータにキャッシュ機能を持たせることによるネットワーク全体のトラフィック量の削減、通信効率の向上を評価する。また、最適キャッシュサイズの求め方について検討する。

第2章では、高信頼性XCASTプロトコルの説明と、本論文で提案するキャッシュ機能を組み込むことによる改良方式について述べる。第3章ではまず、損失のあるネットワークにおけるトラフィック量と、トラフィック削減に必要なキャッシュ量を見積もる。第4章では、より多様なネットワークにおける提案手法の効果を評価するため、ネットワークシミュレータns-2[14]への、高信頼性XCAST、およびキャッシュの組み込みについて述べる。第5章では、シミュレーション結果を示し、提案手法の有用性と必要となるキャッシュサイズの見積もりの正しさを確認した。第6章では考察を行い、第7章でまとめる。

2 高信頼性XCASTプロトコルとキャッシュの導入

本章では、はじめに[10]で提案された高信頼性XCASTプロトコルの概略を例を用いて説明し、その後、キャッシュ機能を組み込むことによる改良方式について述べる。

論文[10]では、XCAST再送を用いることによって、ユニキャストで再送する場合と比較してトラフィック量の少ない、効率的な信頼性通信を行うことができることが示された。

送信パケットにはシーケンス番号が付加される。受信者はシーケンス番号をもとにパケット紛失を検出し、送信者に向けて再送要求する。再送要求を受け取った送信者は、XCASTを用いて再送を行うことにより、理想的な再送を行うことができる。

たとえば、図1のネットワークにおいて、四角で囲まれたものは送信者、受信者を表し、丸で囲まれたR1からR3はそれぞれXCAST対応ルータを表す。それぞれを結ぶ線Link1からLink7がリンクである。送信者からのパケットが、Link2において紛失したとする。すると、受信者1, 2がパケットの紛失を検出し、再送要求が送信者に向けて送られる。再送要求を受

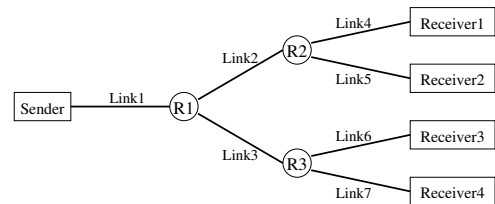


図 1: 評価用ネットワーク

け取った送信者は、XCASTを用いて受信者1, 2に向けてデータパケットの再送を行う。ユニキャストを用いた場合は、同一内容のパケットがLink1, 2上を2回ずつ通過するのに対し、XCASTを用いて再送を行うと、同一内容のパケットがLink1, 2上を複数回通過するということがない。つまり、効率的に再送を行うことが可能である。

ここで、さらに効率のよい再送を行うため、XCAST対応ルータ R1 にデータをキャッシュすることを考える。受信者1, 2からの再送要求がXCAST対応ルータ R1 に到達した時点で、R1 は自身のキャッシュを探索、該当データが存在する場合は再送要求を送信者に転送することなく、受信者1, 2に対してXCAST再送を行う。キャッシュしたデータは、送信者からのデータがルータに到達してから、パケット紛失による受信者からの再送要求が到着するまでの、比較的短い時間ルータ上に存在していればよい。それほど大きなキャッシュサイズは必要ないと考えられる。キャッシュサイズは、たとえばルータの負荷に応じて動的に変更することができる。キャッシュに該当データが存在しない場合は、キャッシュがもともと存在しない場合と同様の処理を行う。

3 トラフィック量およびキャッシュ量の見積もり

本章では中間ノードへのキャッシュ導入による高信頼性XCASTの効率向上をトラフィックの面から評価するにあたり、まず予備実験として、計算によりトラフィック量を見積もる。さらにトラフィック削減に必要なキャッシュ量を見積もる。

3.1 トラフィック量の見積もり

論文[10]では、再送機能にXCASTを用いた場合と、ユニキャストを用いた場合とが比較され、XCASTを用いた場合のほうがより性能がよいことが示された。そこで、再送機能にユニキャストを用いた場合、XCASTを用いた場合、さらにキャッシュを導入した場合のそれぞれについて、小さな例において条件を単純化してネットワーク全体のトラフィック量を見積もる。

以下に、計算条件を示す。

- 評価用ネットワークとして、図1を仮定する。
- 再送要求機能としてはNACKを仮定する。
- キャッシュは常にヒットする。
- 再送要求パケット、再送信パケットが紛失した場合、同一パケットが再送されるものと仮定する。

送信者が受信者に向けて送信したいデータパケットの数を N とし、パケットがリンクを通過する際の紛失率を p とする。また、トラフィック量は、各リンクにおけるパケット通過数の総和と定義する。

論文[10]では、再送要求機能にNACKを用いる場合のデータパケット1個のサイズを776バイト、NACKのサイズを52バイトと仮定し、全体のトラフィックの評価を行っていた。しかしながら、NACKはパケットが紛失した場合のみ送信されること、NACKのサイズはデータパケットに対して十分に小さいことから、本論文では、NACKが消費するトラフィックについては考えない。

以上の条件に基づいて、導出した結果を以下に示す。

まず、再送機能にユニキャストを用い、キャッシュを使わない場合の再送トラフィックは式(1)で見積もることができる。

$$T_{resend,u,nc} = \frac{\{1+(1-p)+(1-p)^2\}^2}{(1-p)^3} 4pN \quad (1)$$

次に、再送機能にXCASTを用い、キャッシュを使わない場合は、式(2)で見積もることができる。

$$\begin{aligned} T_{resend,x,nc} &= \frac{1+2(1-p)+4(1-p)^2}{(1-p)^3} pN \\ &+ \frac{1+(1-p)+2(1-p)^2}{(1-p)^3} 2(1-p)pN \\ &+ \frac{1+(1-p)+(1-p)^2}{(1-p)^3} 4(1-p)^2 pN \quad (2) \end{aligned}$$

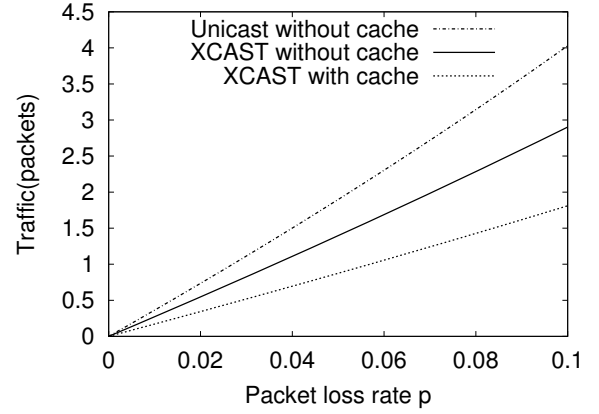


図 2: 再送トラフィックの比較

さらに、再送機能にXCASTを用い、キャッシュを使う場合は、式(3)で見積もることができる。

$$\begin{aligned} T_{resend,x,c} &= \frac{1+2(1-p)+4(1-p)^2}{(1-p)^3} pN \\ &+ \frac{1+2(1-p)}{(1-p)^2} 2(1-p)pN \\ &+ \frac{1}{1-p} 4(1-p)^2 pN \quad (3) \end{aligned}$$

これらの式を、損失率 p の値を変化させて計算した結果を図2に示す。

$p = 0.1$ のとき、再送機能にユニキャストを用いた場合を基準として再送機能にXCASTを用いると約30%再送トラフィックを削減でき、キャッシュの導入によってさらに約35%再送トラフィックを削減できることを図2から見積もることができる。

3.2 キャッシュサイズの見積もり

3.1節で中間ノードにキャッシュを加えることにより、全体のトラフィック量が削減されることを示したが、その場合に必要となるキャッシュサイズはどのように求められるか検討する。

キャッシュが組み込まれている中間ノードをデータパケットが通過すると、そのパケットはキャッシュ内に保存される。下流ノードからそのパケットに対する再送要求が送られてきた場合、キャッシュ内のデータが再送信される。データパケットが通過してから、再送要求が送られて来るまでの時間は、中間ノード

から下流ノードへのRTT(Round Trip Time)と等しくなる。従って、キャッシュがヒットするためには、当該中間ノードから下流ノードへの、最大RTTだけ保存されていなければならない。つまり、必要なキャッシュサイズはパケットストリームの流入速度と、下流ノードの最大RTTから求めることができる。

一般に、受信者側でパケット紛失を検出するためには、その次のパケットを待つ必要がある。そのため、中間ノードをデータが通過してから再送要求が中間ノードに届くまでの時間が実質的なRTTとなり、受信者までのリンクの遅延時間を k 、パケット送信間隔を l とした場合、以下の式によって求めることができる。

$$\text{実質的なRTT} = k * 2 + l \quad (4)$$

必要なキャッシュサイズは、実質的なRTTをパケット送信間隔で割ることにより求められる。

$$\text{必要なキャッシュサイズ(個)} = k * 2 / l + 1 \quad (5)$$

4 シミュレータへの組み込み

より多様な条件下におけるパケットのふるまいを観察するため、ネットワークシミュレータ ns-2[14]に、高信頼性XCAST、およびキャッシュを組み込んだ。

再送要求機能としては、NACK方式を採用した。NACK方式では、受信者がどの一連番号のパケットを受け取ったのかを確認する方法がない。そのため送信者は、過去に送信した内容を永久に記憶しておく必要があり、リアルタイムストリーミング通信を行う際には特に問題となる。しかしながら高信頼性XCASTプロトコルは、すでに存在するある一定のサイズのデータを複数の地点に転送することが目的であり、送信者が過去の送信内容を消去する必要は少ない。またこの方式には、キャッシュが組み込まれている中間ノードからXCAST再送を行う処理を単純化できるという利点がある。

4.1 送信者側の動作

信頼性のある通信を行うためには、受信者が紛失を検出する必要がある。そのため、送信者は送信パケットに一連番号をつけて送信する。

NACKが到着すると、送信者は該当パケットを再送信待ちリストに入れ、タイマを起動する。すでに

再送信待ちリスト内に該当パケットが存在する場合は、再送信パケットの送信先リストにNACKの送信元を追加する。タイマによって送信者は他受信者からのNACKをしばらく待った後、XCAST再送を行う。この、再送をしばらく待つ時間を、NACK収集時間(T_{cn})と呼ぶ。

4.2 受信者側の動作

受信者は、送信者から送られてきたパケットの一連番号を監視し、パケット紛失を検出すると、NACKを送信者に向けて送出する。

パケット紛失の検出は、以下のような手順で行われる。 $N-1$ 番目までのパケットが正常に到着し、その後、 $N+1$ 番目のパケットが到着すると、 N 番目のパケットの紛失を検出し、NACKを送出する。その後、再送パケットが届くまでの間、一定の時間間隔(T_{sn})でNACKを送出し続ける。

4.3 キャッシュが存在するノードの動作

キャッシュが存在するノードの動作は、データパケットを受信した場合と、NACKを受信した場合とで、大きく2つに分けることができる。

データパケットを受信した場合は、パケットはキャッシュにコピーされ、その後、パケットはキャッシュが存在しない場合と同様の経路で転送される。データパケットが再送信されたものであるかどうかは、区別しない。

NACKを受信した場合は、キャッシュ内を探索し、該当パケットがキャッシュ内に存在しない場合、NACKはキャッシュが存在しない場合と同様の経路で転送される。

該当パケットがキャッシュ内に存在する場合は、該当パケットを再送信待ち状態にし、タイマを起動する。すでにキャッシュ内の該当パケットが再送信待ち状態になっている場合は、再送信パケットの送信先リストにNACKの送信元を追加する。タイマによって他受信者からのNACKをしばらく待った後、XCAST再送を行う。キャッシュにおいて再送をしばらく待つ時間も、送信者における場合と同様、NACK収集時間(T_{cn})とする。

5 シミュレーションとその結果

本章では、前章で述べた結果をもとにシミュレーションを行う。各シミュレーションにおける共通の条件は以下の通り仮定する。

- NACK収集時間 T_{cn} は十分に長いものとする。
- NACK再送信までの時間 T_{sn} は十分に長いものとする。
- 各リンクのバンド幅は送信データに対し十分に大きいものとする。
- 送信パケット数は10000パケットとする。

5.1 数式による見積もりとシミュレーション結果との比較

数式によるトラフィック量の見積もりと、シミュレーションによって得られたトラフィック量とを比較するため、数式によるトラフィックの見積もり、およびシミュレーションによるトラフィック量の測定を行った。ここでは、共通の条件に加えて以下の条件を仮定した。

- 評価用ネットワークとして、図1を仮定する。
- パケットの送信間隔は20msとする。
- 各リンクの遅延時間は10msとする。
- キャッシュは常にヒットする。
- 数式による見積もりでは、再送要求パケット、再送信パケットが紛失した場合、同一パケットが再送されるものと仮定する。

結果を図3に示す。図3の凡例中、calcとあるのが数式による見積もり、ns-2とあるのがns-2によるシミュレーション結果である。評価用ネットワークにはリンクが7本存在するため、理論上の最適トラフィック量は $10000 * 7 = 70000$ となり、紛失率 p の増大とともにトラフィック量は増加する。数式による見積もりと、ns-2でのシミュレーション結果は、よく一致している。

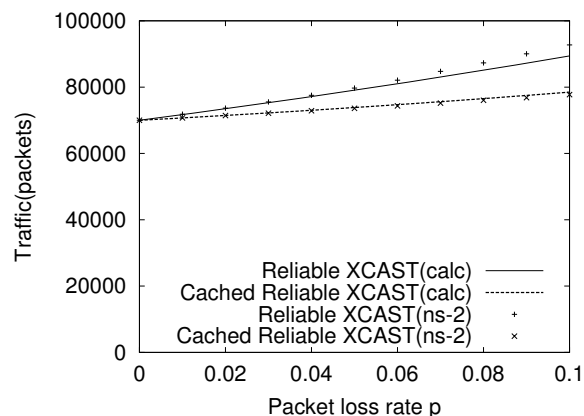


図3: 数式による見積もりとシミュレーション結果の比較

5.2 キャッシュ量とトラフィックの関係

3.2節において、必要なキャッシュ量はパケットストリームの流入速度と、下流ノードの最大RTTから求めることができると述べた。このことを、シミュレーション結果から確認する。ここでは、共通の条件に加えて以下の条件を仮定した。

- 評価用ネットワークとして、図1を仮定する。
- パケットの送信間隔は20msとする。
- 各リンクの遅延時間は100msとする。
- 各リンクのパケット紛失率 p は0.01とする。

この条件においてキャッシュ量を変化させた場合、トラフィック量がどのように変化するか、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を図4に示す。

キャッシュの位置によって、受信者までのリンクの遅延時間は変化する。評価用ネットワークでは、R2, R3に設置したキャッシュと、R1に設置したキャッシュとでは、必要なキャッシュサイズが異なる。仮定した条件を式(5)に代入すると、R2, R3のキャッシュはサイズが11以上の時、R1のキャッシュはサイズが21以上の時に有効に動作すると見積もれる。

図4では、キャッシュサイズが11を超える部分、および21を超える部分でトラフィックが階段状に減少している。これはそれぞれR2とR3のキャッシュが有効に動作し始める部分、R1のキャッシュが有効に動作し始める部分に対応していると考えられる。これ

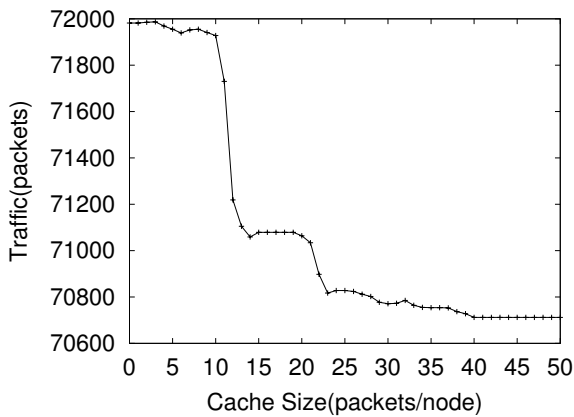


図 4: キャッシュサイズとトラフィックの関係

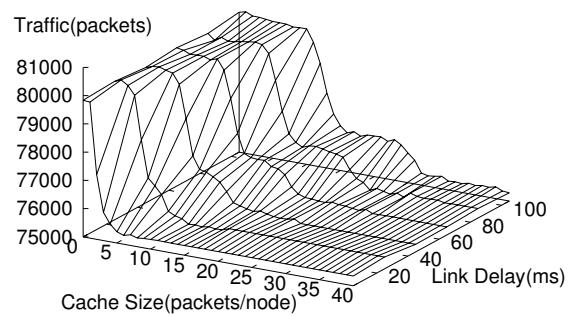


図 5: キャッシュ量、リンクの遅延時間とトラフィックの関係

によって3.2節の見積もりと、実際のシミュレーション結果との対応がとれていることが確認できた。

また、RTTと、必要なキャッシュ量についても調べるため、x軸にキャッシュ量、y軸に各リンクの遅延時間、z軸にトラフィック量を取り、最適キャッシュサイズについて検討する。ここでは、共通の条件に加えて以下の条件を仮定した。

- 評価用ネットワークとして、図1を仮定する。
- パケットの送信間隔は20msとする。
- 各リンクのパケット紛失率 p は0.05とする。

この条件においてキャッシュ量とリンクの遅延時間を変化させた場合、トラフィック量がどのように変化するか、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を図5に示す。

図5から、リンクの遅延時間が増大するにつれて、キャッシュが有効動作するために必要なキャッシュサイズが大きくなることが確認できる。また、このグラフは式(5)によって求められるキャッシュサイズとの対応をとることができる。

以上のシミュレーション結果から、最適キャッシュサイズは、キャッシュから受信者までの最大RTTの関数となることが確認できた。受信者までのリンクの遅延時間を k 、パケット送信間隔を l とした場合、以下の式によって求めることができる。

$$\text{最適キャッシュサイズ(個)} = k * 2/l + 1 + \alpha \quad (6)$$

本シミュレーションでは、データパケットが再送信されたものであるかどうかに関わらず、キャッシュ

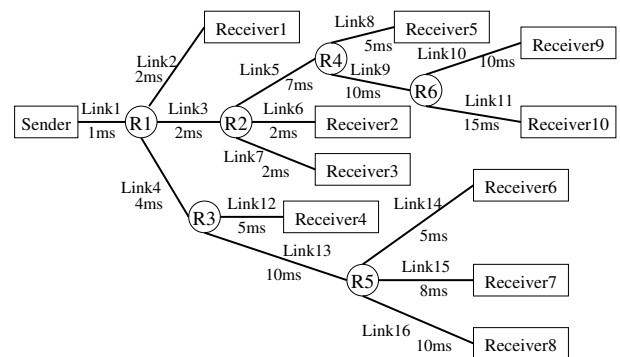


図 6: より現実的な評価用ネットワーク

に保存されるため、必要なキャッシュサイズはパケット紛失率 p に応じて大きくなる。その余裕分を α として表現した。

5.3 現実的なネットワークでのシミュレーション

本章では、より現実に近いネットワークとして無線リンクを用いたネットワークを想定し、高信頼性XCASTへのキャッシュ組み込みの効果について評価する。

評価用ネットワークとしては、論文[10]における評価用ネットワークをもとに、以下のように各種パラメータを設定したものを用いる。

- ネットワークトポロジとして、図6を仮定する。

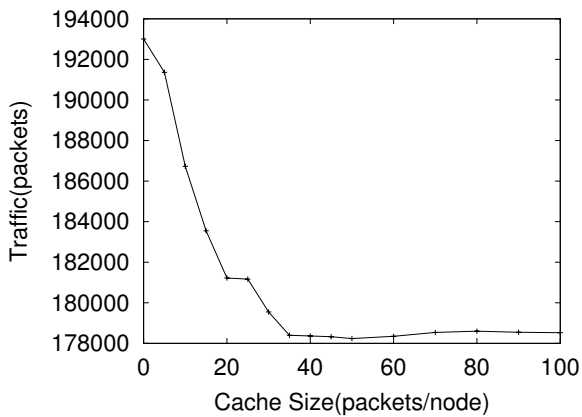
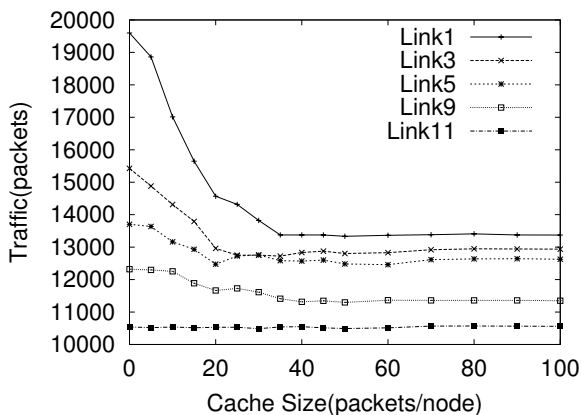


図 7: キャッシュサイズとトラフィックの関係

図 8: キャッシュサイズとリンク毎のトラフィック量
の関係

- パケットの送信間隔は2.4msとする。
これは1パケットあたり1500bytesで、5Mbpsの速度で送信した場合に相当する。
- 各リンクの遅延時間は図6に示した通りとする。
- 各リンクのパケット紛失率 p は0.05とする。
これは主に無線リンクを想定した数値である。

この条件においてキャッシュ量を変化させた場合、トラフィック量がどのように変化するか、シミュレーションを行った。シミュレーション結果を図7に示す。また、各リンク毎のキャッシュ導入によるトラフィック量を図8に示す。図6のネットワークトポロジにはリンクが16本存在するため、理論上の最適トラフィック量は $10000 * 16 = 160000$ となる。

図6における最大RTTは、R1からReceiver10までの、68msとなる。式(6)に条件をあてはめると、必要なキャッシュサイズは $30 + \alpha$ 個となる。それを上回るサイズのキャッシュは、トラフィック減少にそれほど効果を及ぼさないと考えられる。図7では、キャッシュサイズ30ないし35までは効果的にトラフィックが減少し、その後はあまりトラフィックが減少していない。すなわち、必要キャッシュサイズに関する推論が正しいことを、シミュレーションによって確かめることができた。また、図8からは、送信者に近いリンクほど、キャッシュによるトラフィック削減効果が高くあらわれることが確認できた。

なお、キャッシュサイズが35の時、送信者に最も近いリンク(Link1)におけるトラフィック削減率は約30%、ネットワーク全体としてのトラフィック削減率は約8%となった。

6 考察

高信頼性XCAST[10]は、送信元のトラフィック量に着目し、XCAST再送を導入することによってトラフィックを減らせることを示した。しかしながら本論文では、それでは不十分であると考え、トラフィック量を各リンクにおけるパケット通過数の総和と定義し、ネットワーク全体の平均的なトラフィック量を減らすためにはキャッシュの導入が効果的であることを示した。

また、送信者に近いリンクほど再送パケットの影響によりトラフィックが多くなるが、本論文で提案したキャッシュによるトラフィック削減効果は、送信者に近いリンクほど高いことがシミュレーションによって確かめられた。このことは、ネットワークのボトルネックを解消する上で、有用であると考えられる。

前章では、1パケットあたり1500bytesで、5Mbpsの速度で送信した場合、最大RTT68msの条件下において、キャッシュサイズはパケット35個相当、すなわち52500bytesあれば充分であることが示された。仮に1Gbpsの速度で送信したとしても、キャッシュとして必要なメモリサイズは約10MBとなる。このサイズは、近年のインターネット技術から見て非現実的であるとは言えない。

さらに、XCASTにおいては、分岐点以外のルータがXCASTに非対応であっても動作するため、その

他のルータは一般的なルータ機能のみでよい。キャッシュ導入においても同様のことが言えるため、一般に懸念されるルータへの機能追加によるインターネットへのインパクトが最小限で済むと考えられる。

7 おわりに

高信頼性XCASTにキャッシュを組み込むことによってトラフィック量が少なくなることを理想的な小さな例を使って確かめた。その結果に基づき、ネットワークシミュレータにプロトコルを組み込み、キャッシュサイズとトラフィック量の関係、必要となるキャッシュサイズの求め方について示した。また、求められた必要キャッシュサイズをより現実に近いネットワークに組み込み、効果的にトラフィックが減少することを確認した。

今後の課題としては、キャッシュサイズの動的変更があげられる。キャッシュから受信者までのRTTを測定し、今回得られた結果に基づいて動的にキャッシュサイズを設定することにより、つねに最も効率的な状態でキャッシュを用いた高信頼性XCAST通信を行うことができると考えられる。また、中間ルータに機能を追加することによるオーバーヘッド、キャッシュの処理に要する計算時間、グループの動的変化への対応、キャッシュ機能を導入するルータの配置、導入コストについても考慮する必要があると考えられる。

謝辞

有益なご助言を頂いたことに対して、査読者のみなさまに感謝いたします。

参考文献

- [1] K. Obraczka, "Multicast Transport Protocols: A Survey and Taxonomy," IEEE Communications Magazine, pp.94-102, January 1998.
- [2] S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting", RFC1112, Aug. 1989.
- [3] M. SOLA, M. OHTA, T. MAENO, "Scalability of Internet Multicast Protocols," proceedings of INET 98, July 1998.
- [4] L.H. Sahasrabudde and B. Mukherjee, "Multicast Routing Algorithms and Protocols: A Tutorial," IEEE Network, vol. 14, no. 1, pp. 90-102, Feb. 2000.
- [5] Y. Imai, H. Kishimoto, M. Shin and Y. Kim, "XCAST6: eXplicit Multicast on IPv6", IEEE/IPSJ SAINT2003 Workshop 4, IPv6 and Applications, Orland, Jan. 2003.

- [6] S. Floyd, V. Jacobson, C. Liu, S. McCanne, and L. Zhang, "A Reliable Multicast Framework for Light-weight Sessions and Application Level Framing," IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol.5, No.6, pp. 784-803, Dec. 1997.
- [7] L.H. Lehman, S.J. Garland, and D.L. Tennenhouse, "Active Reliable Multicast," Proc. IEEE INFOCOM'98, pp581-589, San Francisco, USA, Mar. 1998.
- [8] T. Speakman, J. Crowcroft, J. Gemmell, D. Farinacci, S. Lin, D. Leshchiner, M. Luby, T. Montgomery, L. Rizzo, A. Tweedly, N. Bhaskar, R. Edmonstone, R. Sumanasekera, and L. Vicisano, "PGM Reliable Transport Protocol Specification," RFC 3208, Dec. 2001.
- [9] 木下真吾, "リライアブルマルチキャスト技術の最新動向," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J85-B, No.11, pp.1819-1842, Nov. 2002.
- [10] 伊藤政利, 下川俊彦, 山下雅史, "高信頼性XCASTプロトコルの設計," 情報処理学会論文誌, Vol.43, No.11, pp.3530-3539, Nov. 2002.
- [11] K. Psounis, "Active Networks: Applications, Security, Safety and Architectures," IEEE Communications Surveys, pp.2-16, First Quarter, 1999.
- [12] 山本 幹, "アクティブネットワークの最新動向," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.8, pp.1401-1412, Aug. 2001.
- [13] 山口 誠, 橋本 隆, 山本 幹, 池田 博昌, "Active Network技術を適用した信頼性マルチキャストプロトコルの性能評価," 電子情報通信学会論文誌, Vol.J84-B, No.3, pp.334-343, Mar. 2001.
- [14] "The Network Simulator - ns-2", <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.