

# ワイヤレスマルチキャストにおける ネットワーク支援を用いた輻輳制御方式

齋藤 健 山本 幹  
大阪大学大学院工学研究科  
565-0871 吹田市山田丘 2-1  
yamamoto@comm.eng.osaka-u.ac.jp

あらまし マルチキャスト通信における輻輳制御では、フィードバックの集中を避けるために、代表ノードと送信ノードとの間でフィードバック情報を授受することで、送信レートを調整する方法が一般に用いられている。また、TCP親和性を実現するために、代表ノードには最も輻輳状況の劣悪な受信ノード、すなわち最低スループットとなる受信ノードが選ばれる。ワイヤレス環境では、無線伝送路の影響による最低スループット受信ノードの変動に対応して代表ノードが選出され、マルチキャストセッションのスループットが著しく劣化する、代表ノード変動問題が発生する。この問題を解決するために、本研究では、ネットワーク支援技術を用いて有線/無線ネットワークの境界ルータがパケットの到着履歴を受信ノードへ通知し、これを受信ノードが自らの受信履歴と比較することでパケットロスの発生要因を正確に判定する方法を提案する。また、TCPにもネットワーク支援技術が用いられた場合の新しいTCP親和性の概念として、ネットワーク支援TCP親和性の概念を提唱し、これを実現するネットワーク支援を用いたマルチキャスト輻輳制御方式の提案を行う。

## Wireless Multicast Congestion Control with Network Support

Takeshi SAITO, Miki YAMAMOTO  
Graduate School of Engineering, Osaka University  
yamamoto@comm.eng.osaka-u.ac.jp

Abstract In multicast congestion control, the receiver of the worst congestion level is selected as the representative and transmission rate of the sender is adjusted to TCP throughput of the representative. This approach has high scalability and TCP friendliness. However, when this approach is applied in wireless communications, wireless-caused packet loss will cause to frequent change of the representative. This frequent change of representative makes the sender adjust its transmission rate to the tentative worst receiver, which brings severe performance degradation to wireless multicast. We propose two network support approach which resolve this representative fluctuation problem.

### 1. まえがき

近年、WLANの普及などによりワイヤレス通信環境における高速データ通信が可能となり、有線で提供されているサービスをワイヤレス環境下でもシームレスに実現することが期待されている。この動向の一つに、ワイヤレス環境において1対多もしくは多対多通信を実現する、ワイヤレスマルチキャスト通信がある。

特定多数のユーザに一括して情報を配信する技術であるマルチキャストを、インターネット上で実現するためのプロトコルとして、IP マル

チキャスト[1]がある。IP マルチキャストでは、トランスポート層にUDPを用いている。すなわち、IP マルチキャストでは、全く輻輳制御が規定されていない。このままの形でIP マルチキャストを運用した場合、ネットワーク輻輳に対して全く送信レートを制御しないため、TCPとの親和性が問題となる。すなわち、現在のインターネットにおける主要トラフィックであるTCPと、IP マルチキャストがボトルネックを共有した場合、TCPトラフィックは輻輳発生時に送信レートを抑制するのに対し、マルチキャストは全く送信レートを抑制しないため、マルチキャストの

使用帯域が TCP に比較して大きくなるという問題が生じる[2]。マルチキャストを普及させるためには、このような TCP との不公平な帯域配分問題を解決する輻輳制御を実装することが不可欠となる[3]。

マルチキャスト輻輳制御の技術課題に、上記の TCP との親和性以外に、スケーラビリティの問題がある。マルチキャスト通信では、一般に多くの受信ノードを収容するため、TCP のようなフィードバックを用いた輻輳制御を単純に適用した場合、送信ノードに多くの受信ノードからのフィードバック情報が集中する、いわゆる Feedback Implosion[4]が発生する。マルチキャスト輻輳制御においては、輻輳制御が最も輻輳状況の劣悪な受信ノードに対して動作することが求められる。すなわち、送信ノードからの送信レートが最も輻輳状況の劣悪な受信ノードの輻輳を回避するレートに設定されることが、要求条件となる。従って、輻輳制御の観点からは、この最悪輻輳状況にある受信ノードからのフィードバック情報のみが重要である。このような観点から、最悪輻輳状況にある受信ノードを代表ノードとして選出し、送信ノードとこの代表ノードの間でフィードバック情報の授受を行う、輻輳制御方式が提案されている[5][6]。代表ノードを用いた方法では、代表ノードから送られるフィードバック情報をもとに、送信ノードが TCP と同等の送信レートに調整することで、TCP 親和性とスケーラビリティの双方を実現している。

マルチキャスト輻輳制御をワイヤレス通信環境に適用した場合、無線伝送路の劣化と輻輳制御の相互影響により、大きくその性能を劣化させる可能性がある。輻輳制御は、ネットワーク輻輳に対して、送信ノードの伝送レートを下げる動作を行う。ただし、輻輳制御自体がトランスポート層に実装されるため、輻輳の発生をエンドホストで観測できるパケットロスによってのみ判定する必要がある。無線伝送路では、輻輳を要因としないパケットロスがバースト的に発生する可能性がある。例えば、フェージングによる無線伝送路の一時的劣化は、その区間に伝送されるパケットのバースト的パケットロスを誘発する。このようなパケットロスの発生により、この無線伝送路の下流に位置する受信ノードが一時的に代表ノードに選択される可能性がある。フェージングは送信レートを下げなく

てもある時間経過すれば回復するという性質をもつため、輻輳制御の本来の目的から言えば、ワイヤレス通信環境に起因したパケットロス（以下ワイヤレスロス）に逐次対応して、代表ノードの選択を変更する必要は全くない。本稿では、代表ノードアプローチのマルチキャスト輻輳制御をワイヤレス通信環境に適用した際に発生する技術課題として、無線伝送路の通信品質に応じて代表ノードが不必要に更新される問題を取り上げ、その解決手法の提案を行う。以下、この問題を、代表ノード変動問題 (Wireless-caused Representative Fluctuation Problem) と呼ぶ。

本稿では、まず代表ノード変動問題がどれほどの性能劣化をもたらすかという点を検証するために、シミュレーションを用いた性能評価を行う。さらに、代表ノード変動問題を解決するには、ワイヤレスロスと輻輳により発生したパケットロス（以下輻輳ロス）とを区別することが必要であることを示し、これを実現する方法としてネットワーク支援を用いた方法を二つ提案する。両者の差異は、ネットワーク支援により得られたワイヤレスロスと輻輳ロスの区別情報を、代表ノード選択のみに適用するのか、代表ノード選択と送信ノードの伝送レート制御の双方に適用するのかという点にある。すなわち、ワイヤレスロスと、輻輳ロスの区別は、両者とも同じ方法を用いる。具体的には、有線/無線の境界部分に位置するルータ（以下境界ルータ）が、自身が観測したパケットロス情報を下流のワイヤレスアクセス受信ノードに通知する。この観測されたパケットロスは、有線部分で発生したパケットロスであり、その要因はほぼ間違いなくネットワーク輻輳である。受信ノードは、自身で観測したパケットロスと、通知されたパケットロスとの差分をとり、この差分をワイヤレスロスであると識別する。

第一のネットワーク支援による輻輳制御として、このパケットロス要因の識別情報を、代表ノード選択のみに適用し代表ノード変動問題を解決する方法を提案する。本提案方式では、従来通りワイヤレスロスと輻輳ロスを区別しない TCP を対象に TCP 親和性を実現することを目的としている。

第二のネットワーク支援輻輳制御として、代表ノード選択のみならず送信ノードの伝送レート制御に対しても、パケットロス要因の識別情

報を用いる方法を提案する。つまり、第一のネットワーク支援輻輳制御ではワイヤレスロスに対しても送信ノードの伝送レートを減少させていたが、第二の方法ではワイヤレスロスに対しては伝送レートを減少させない。第二の方法を提案した背景には、TCP がなんらかのネットワーク支援技術によりワイヤレスロスに対して伝送レートを減少させないような機構を導入した場合に、マルチキャスト輻輳制御は対象 TCP をネットワーク支援型 TCP とした TCP 親和性を議論すべきであるという点がある。このため、本稿では新しく「ネットワーク支援 TCP 親和性」という概念を提案し、このネットワーク支援 TCP 親和性を実現する方法として、第二のネットワーク支援輻輳制御を提案する。

## 2. マルチキャスト輻輳制御における代表ノードアプローチ

マルチキャスト輻輳制御には、送信ノードが全受信ノードへの送出レートを調整する方法（送信ノード駆動型）と、受信ノードが自らの輻輳状況に応じて受信レートを調整する方法（受信ノード駆動型）の二つの方法がある。送信ノード駆動型では、受信ノードから送出されるフィードバック情報をもとに、送信ノードが輻輳状況を把握し、送信レートを調整する。後者の受信ノード駆動型では、送信ノードはあらかじめ送信データを階層符号化などを用いて複数に分割し、それぞれを別のマルチキャストグループへと送出する。受信側では、自らの輻輳状況に応じて、参加するマルチキャストグループを調整することで、輻輳制御を実現する。受信ノード駆動型輻輳制御は、階層符号が適用でき、一部の情報を受け取った場合でも問題ない、リアルタイム画像伝送などに応用分野が限られるため、本稿では送信ノード駆動型を対象とする。

送信ノード駆動型マルチキャスト輻輳制御では、多数の受信ノードから送信ノードへ向かって送出されるフィードバック情報を用いて、伝送レートの調整を行う。多数のフィードバック情報が送信ノードに集中する、いわゆる Feedback Implosion を回避するために、フィードバック情報として NAK が一般的に用いられる。送信ノードが NAK を受け取った場合、その受信ノードに対しては経路上で輻輳が起こっている

と判断し、送信レートを下げる。同一パケットに対する NAK が複数到着した場合には、送信ノードで同一パケットに対するものであることを識別し、重複して伝送レートを下げるといった誤動作を避けることが可能である。ところが、複数の受信ノードにおいて、異なるパケットに対するパケットロスが発生し、それぞれに対して NAK が送出された場合、送信ノードでは個々のパケットに対する NAK について 1 度ずつ伝送レートを下げる。この場合、各受信ノードの平均パケットロス率よりもかなり多い頻度で伝送レートを下げられる可能性が大きく、スループットが不当に大きく下げられる状況が発生する。マルチキャスト輻輳制御特有のこの技術課題は、Loss Path Multiplicity 問題[7]と呼ばれている。

輻輳制御の観点からは最悪輻輳状態にある受信ノードからのフードバック情報のみが重要であるという観点から、Loss Path Multiplicity 問題に対処する方策として、代表ノードを用いる方法が提案されている[7]。この方法では、最悪受信ノードを代表ノードとして選択し、この代表ノードからのフィードバック情報に対してのみ輻輳制御機構を動作させるというものである。この方法により、複数の受信ノードより到着する NAK のそれぞれに対応して伝送レートを下げるといった動作が回避され、Loss Path Multiplicity 問題が完全に解決される。代表ノードを用いるマルチキャスト輻輳制御として、TFMCC[5]や pgmcc[6]が提案されている。両者ともに、受信ノードから定期的に送られてくるパケットロス率と往復伝播遅延に関する情報を用いて、各受信ノードの TCP スループット[8]を推定し、このスループットの最小のノードを代表ノードとして選択する。TFMCC では、この代表ノードから送信ノードへ定期的にフィードバック情報を送り、このフィードバック情報により送られるパケットロス率と往復伝播遅延をもとに代表ノードの TCP スループットを推定する。送信ノードは、この推定 TCP スループットに送信レートを合わせることで、TCP 親和性を実現しつつ、Loss Path Multiplicity 問題を解決している。pgmcc では、代表ノードは代表ノードへ向けて ACK を送り、これをもとに TCP と同様にウィンドウフロー制御を動作させることで、TCP 親和性ならびに Loss Path Multiplicity 問題の解決を実現している。

### 3. ワイヤレス環境における代表ノード変動問題

有線ネットワークでの使用を想定して開発されたマルチキャスト輻輳制御方式を、そのままの形でワイヤレス環境に適用した場合、いくつかの技術的問題が発生する。この問題のいくつかは TCP においても発生し[9]、その性能を大きく劣化させる[10]。例えば、エンドホストではパケットロスがワイヤレスロスであるか輻輳ロスであるか判別できないため、TCP はワイヤレスロスに対しても送信ノードの伝送レートを下げる動作を起動する。本来ワイヤレスロスは輻輳ロスの発生と相関がなく、伝送レートを下げたとしてもワイヤレスロスの発生を抑制できるものではない。また、ワイヤレスロスの要因となる無線伝送路の劣化は、時間の経過とともに回復することが見込まれ、ワイヤレスロスに対して送信レートを下げる必要はない。このような、エンドホストにおけるワイヤレスロスと輻輳ロスの判別不能による、スループットの劣化は TCP ならびにマルチキャスト輻輳制御の双方に見られる現象である。

これに対し、ワイヤレス環境がもたらすマルチキャスト特有の性能劣化要因として、各受信ノードの無線伝送路の品質変動に伴い代表ノードが変動し、一時的に無線通信品質の劣悪な受信ノードを選択的に代表ノードとして選出するという問題が考えられる。ワイヤレス環境において、代表ノードアプローチをとるマルチキャスト輻輳制御方式を適用した場合、無線伝送路の品質劣化にともなうバースト的なパケットロスの発生により、このワイヤレスロスを観測した受信ノードが代表ノードに選択される可能性が大きい。ワイヤレスロスの発生要因である無線伝送路の通信品質の劣化は、同一無線伝送路を共有している受信ノードでなければ、その発生に相関はなく独立に発生する。従って、マルチキャストに属する受信ノードが増加するに従い、いずれかの受信ノードが無線通信品質劣化に陥っている確率が増え、こういった劣化ノードを順次代表ノードとして選択する状況が発生しやすくなる。このような状況では、瞬時的に性能が劣化した受信ノードが順次代表ノードとして選択されるために、マルチキャスト輻輳制御のスループットが大きく劣化する。この問題は、マルチキャストに属する受信ノード数の増

加に伴い顕在化する問題であり、スケーラビリティに関する技術課題の一つと捉えることができる。筆者らは、この現象を代表ノード変動問題と呼び、本稿においてこのマルチキャスト輻輳制御特有の技術課題に対する解決策として、ネットワーク支援を用いた方法を提案する。

### 4. ネットワーク支援を用いたマルチキャスト輻輳制御方式

本章では、代表ノード変動問題を解決する方法として、ワイヤレスロスと輻輳ロスの判別にネットワーク支援を利用した方法を提案する。この方法により得られた判別情報を、代表ノード選択のみに適用した方法を 4.1 節で、さらに送信ノードのレート制御にも適用した方法を 4.2 節において提案する。

#### 4.1 代表ノード選択にネットワーク支援を用いた方式

本節では、代表ノード変動問題への対策として、ネットワーク支援を用いた方法を提案する。代表ノード変動問題の本質は、エンドホストがワイヤレスロスと輻輳ロスが検知できないことにある。すなわち、ワイヤレスロスを識別できれば、これを TCP スループット推定時のパケットロス率計算にカウントしないことで、無線伝送路の通信品質劣化に起因する一時的な受信ノードのスループット劣化に過剰に反応して代表ノードが頻繁に変動することを回避できる。

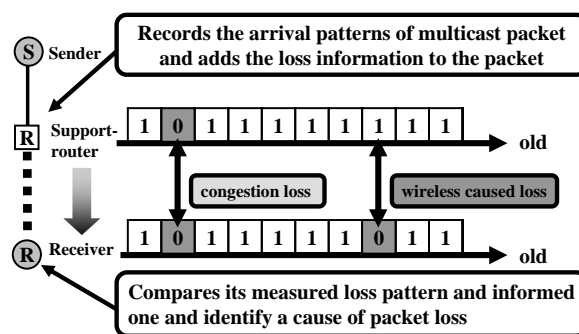


図 1 ネットワーク支援を用いたパケットロス要因の識別

ネットワーク支援を用いて、ワイヤレスロスと輻輳ロスを検知する方法として、図 1 に示す方法を提案する。有線/無線ネットワークの境界に位置するルータは、自らのパケット受信履歴を保存する。このパケット受信履歴の中で、

未受信の packets があれば、それは有線部分での packet loss であり、輻輳により廃棄されたものである可能性が高い。この受信履歴情報を、例えばピギーバックにより受信ノードへ通知し、受信ノードは受け取った履歴と自らの受信 packet 履歴を比較する。この両者に差分が生じた場合には、その差分に該当する packet loss は、無線部分で発生したものである。このように、有線/無線ネットワークの境界ルータの支援により、受信ノードにおけるワイヤレス loss の正確な把握が可能となる。なお、図 1 では簡単のために packet 番号を用いて説明しているが、受信 packet (群) の両端のバイト番号を通知することで、この方法が実現可能である。

また、上記の方法とは異なるクロスレイヤアプローチによるネットワーク支援も考えられる。境界ルータは、ワイヤレス環境に対してはワイヤレスアクセスポイントとして振舞うため、データリンク層でのフレーム損失などの把握が可能である。このデータリンク層でのフレーム損失情報をもとに、packet の無線部分での廃棄を正確に検知することが可能となる。本方法では、データリンク層とネットワーク層以上のレイヤが協調して動作することが必要となり、クロスレイヤアプローチとなる。この方法で取得したワイヤレス loss 情報を、受信ノードに通知することで、受信ノードでのワイヤレス loss の識別が可能となる。

これらの方法により識別されたワイヤレス loss 情報をもとに、輻輳 loss に対してのみ代表ノード選出過程を動作させることで、代表ノード変動問題を解決する。具体的には、例えば TFMCC にネットワーク支援を用いた場合を例にとると、以下のような動作を行う。まず、TFMCC は、以下の式に基づき TCP スループットの推定を行っている。

$$X = \frac{s}{R * (\sqrt{\frac{2p}{3}} + (12\sqrt{\frac{3p}{8}}) * p * (1 + 32p^2))} \quad (1)$$

上式は、packet サイズ  $s$ 、平均往復伝播遅延  $R$ 、受信ノードで観測される packet loss 率  $p$  が与えられたときの TCP スループットを与える式である[8]。この式で算出された推定 TCP スループットの値が最も低い受信ノードが代表ノードとして選出される。この(1)式の算出に用いられる packet loss 率  $p$  に対し、ワイヤレス loss はカウントせず、輻輳 loss に対してのみカウントす

ることで、無線部分で発生したワイヤレス loss の影響を排除することが可能である。

なお、このワイヤレス loss の識別を、送信ノードの伝送レートの算出に用いた場合、当然マルチキャストセッションのスループットは向上する。ただし、本節では従来の TCP を対象に TCP 親和性を論じているため、公平性を議論する対象である TCP がワイヤレス loss の影響を排除したものでない以上、マルチキャスト輻輳制御の伝送レート制御にワイヤレス loss 識別情報を加味した場合には、TCP 親和性が崩れることとなる。すなわち、マルチキャストセッションが、TCP に比較して、高いスループットを得る状況が発生する。マルチキャスト輻輳制御の目的の一つに、TCP 親和性の実現があるので、本節ではあえて伝送レート制御には識別情報を用いないものとした(次節では、対象 TCP を変えて、伝送レート制御にも識別情報を用いた方法を提案する)。

#### 4.2 レート制御にもネットワーク支援を用いた方式

TCP においては、ワイヤレス loss の影響により、ワイヤレス環境ではスループットが大幅に劣化することが知られている[10]。これを改善する方法として、ネットワーク支援を用いる方法がいくつか提案されている[11][12]。これらの TCP が普及した場合、ワイヤレス環境においてワイヤレス loss による性能劣化が改善され、旧来の TCP との親和性を目的としたマルチキャスト輻輳制御と共存した場合には、ネットワーク支援 TCP のスループットがマルチキャストセッションのスループットに比較してかなり高くなる不公平の生じる可能性がある。このような状況では、TCP 親和性の議論は、ネットワーク支援 TCP を対象に論じるべきである。本稿では、このような考え方にに基づき、新しく”ネットワーク支援 TCP 親和性”という概念を提唱する。

マルチキャスト輻輳制御においてこのネットワーク支援 TCP 親和性を実現するためには、前節の代表ノード変動問題を解決することはもちろんのこと、送信ノードの伝送レート制御にもワイヤレス loss 識別情報を使用する必要がある。例えば、ネットワーク支援 TCP の一つの例である I-TCP[11]を用いた場合、境界ルータにおいて TCP コネクションが分断され、送信ノードに対してはワイヤレス loss が全く隠蔽される。このため、送信側 TCP にはワイヤレス loss による送

信レートの抑制が全く働かず，有線ネットワーク内で発生する輻輳ロスに対してのみ送信レートが抑制される．従って，このようなネットワーク支援 TCP と共存する環境では，マルチキャスト輻輳制御はワイヤレスロスに対して送信レートを下げる動作を行わないように改良する必要がある．

このような動作を実現する方法として，送信ノードでのレート制御メカニズムに対して，ネットワーク支援により得られたワイヤレスロス情報を用いて，ワイヤレスロスに対しては送信レート抑制を行わない方法を提案する．具体的には，pgmcc に対しては，ワイヤレスロスは無視して動作させる．また，TFMCC に対しては，(1)式による送信ノードの送信レート（TCP スループット推定式にあわせたレート）の計算の際に，パケットロス率  $p$  にはワイヤレスロスをカウントしない方法を提案する．

## 5. 性能評価

### 5.1 シミュレーションモデル

本稿では，ワイヤレスマルチキャスト輻輳制御における代表ノード変動問題の評価，ならびにネットワーク支援によるその解決法の評価を行うことを目的としている．代表ノード変動問題の影響を評価するに当たっては，TCP トラヒックと同一条件下においてマルチキャストトラヒックが TCP と公平に帯域を共有しているかという点を評価する必要がある．評価にあたっては，ワイヤレスマルチキャストセッションが TCP と同一リンクを共有している状況，ならびに TCP と同一リンクを共有していない受信ノードからも代表ノードが選ばれる状況の，双方が発生しうるモデルを用いる．具体的には，図 2 に示す評価モデルを用いた．

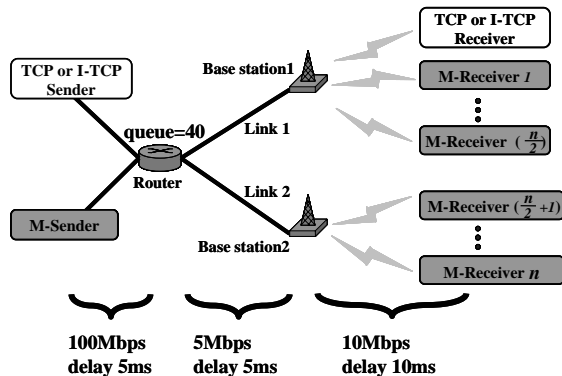


図 2 シミュレーションモデル

このモデルにおいては， $n$  個の受信ノードをもつワイヤレスマルチキャストセッションが一つ存在し，半数の受信ノードが TCP とリンクを共有し，残りの半数は共有しない．無線部分でのパケットロスの発生については，フェージングによるバースト的パケットロスの発生を考慮して，文献[13]で用いられる無線 LAN モデルを用いた．具体的には，10 秒ごとの一定区間で 5% を上限としたパケットロス率をランダムに設定する．マルチキャストセッションに適用する輻輳制御としては，今回 TFMCC をベースとし，これにネットワーク支援の方法を適用した．

### 5.2 代表ノード変動問題の影響

図 3 に，TCP Reno と TFMCC（提案方式を全く導入していないもの）が共存する場合の，それぞれのスループット特性を示す．横軸は，マルチキャストセッション内に存在する受信ノード数  $n$  を示す．従来のマルチキャスト輻輳制御を，そのままの形でワイヤレス環境に適用した場合，受信ノード数の増加に伴い，TCP と比較してマルチキャストセッションのスループットが大きく劣化している．このことから，本稿で指摘した代表ノード変動問題が，マルチキャスト輻輳制御に多大な影響を及ぼすことが分かる．また，受信ノード数の増加に伴い顕在化する問題であることから，代表ノード変動問題はスケラビリティの観点での技術課題の一つであるといえる．

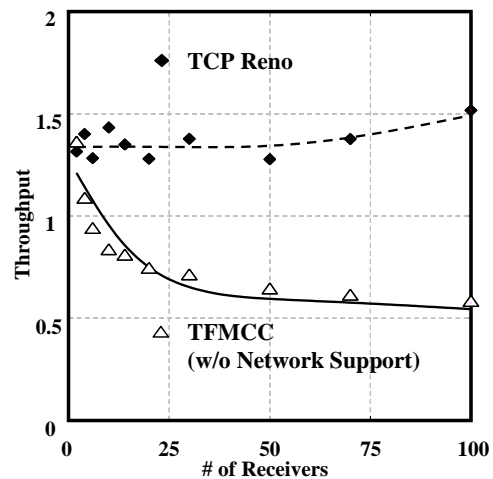


図 3 代表ノード変動問題による劣化

### 5.3 ネットワーク支援による代表ノード変動問題の解決

図 4 に，本稿 4.1 節で提案した，代表ノード選択にのみワイヤレスロス情報を用いる方法（以



下ネットワーク支援 I: 図中 NSI と標記) を適用した場合のスループット結果を示す. 横軸には, マルチキャスト受信ノード数  $n$  をとり, TFMCC をベースとしてネットワーク支援 I を適用したマルチキャスト輻輳制御のスループットと, TCP Reno のスループットを示している. この図より, ネットワーク支援を用いた代表ノード選択手法により, 代表ノード変動問題が解決され, マルチキャストセッションと TCP とがほぼ等しいスループットを得ていること, すなわち TCP 親和性が実現されていることが分かる.

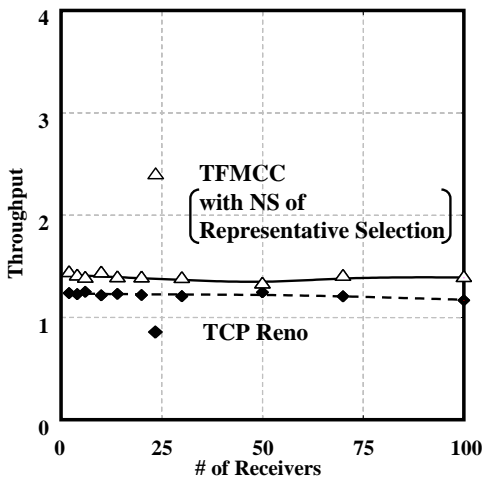


図4 ネットワーク支援による代表ノード変動問題の解決

#### 5.4 ネットワーク支援 TCP 親和性の実現

図5に, ネットワーク支援 I を TFMCC に適用したマルチキャスト輻輳制御と, ネットワーク支援 TCP である I-TCP が共存する状況での, 両者のスループット特性を示す. ネットワーク支援 I では, 代表ノード選択に対してのみネットワーク支援で得られたロス要因識別情報を適用している. すなわち, 送信ノードの送信レートの計算には, ワイヤレスロスであるか輻輳ロスであるかの判別情報は用いられていない. I-TCP では, 境界ルータで TCP コネクションが分断され, ワイヤレスロスは送信ノードから全く隠蔽されており, ワイヤレスロスに対して送信レートが抑制されることはない. このため, 図5にあるように, I-TCP がマルチキャストセッションに比較して非常に高いスループットを得て, マルチキャストセッションを大きく抑圧している.

これに対して, マルチキャスト輻輳制御においても, ネットワーク支援により得られた情報により判別したワイヤレスロスに対して, 送信

ノードの送信レート抑圧動作を行わせない方法を適用した場合 (以下ネットワーク支援 II: 図中 NSII と標記) のスループット性能を図6に示す. 図6より, マルチキャスト輻輳制御に対し, ネットワーク支援で得られたロス情報を, 代表ノード選択のみならず送信レート抑制メカニズムにも適用することにより, マルチキャストセッションのスループットが大きく改善されている. そして, ネットワーク支援 TCP である I-TCP とほぼ等しいスループットを得ており, ネットワーク支援 TCP 親和性が実現されている.

また, 図4と図6を比較すると, TCP ならびにマルチキャストセッションの双方ともに, ほぼ等しいスループットを得るという (ネットワーク支援) TCP 親和性を実現しつつ, 両者のスループット自体が大きく改善されている. これは, 輻輳制御のレート制御メカニズムに対してワイヤレスロス情報を積極的に利用し, ワイヤレスロスによる性能劣化を回避したためである.

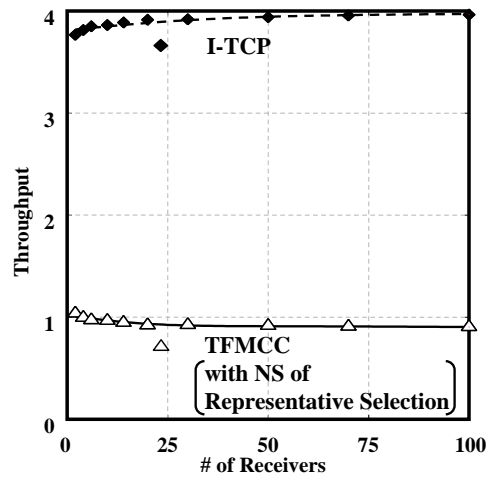


図5 I-TCP との共存

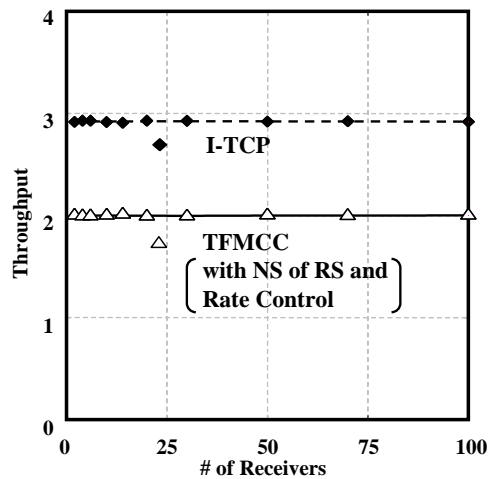


図6 ネットワーク支援 TCP 親和性の実現

## 6. まとめ

本稿では、代表ノードアプローチをとるマルチキャスト輻輳制御をワイヤレス環境で用いた場合、無線伝送路の一時的な通信品質の劣化が独立して複数の受信ノードに発生することにより、一時的にスループットが劣化した受信ノードを順次代表ノードとして選択する代表ノード変動問題が発生することを明らかにした。代表ノード変動問題は、受信ノード数の増加に伴い顕在化する問題であり、一種のスケラビリティ問題と捉えることができる。この代表ノード変動問題を解決する方法として、ネットワーク支援技術を用いてルータがサポートすることで、ワイヤレスに起因するパケットロスと輻輳に起因するパケットロスを識別し、輻輳に起因するロスに対してのみ代表ノード選択処理を行う方法を提案した。この方法が、TCP とボトルネックを共有する状況で、TCP とほぼ等しいスループットを得ることを明らかにし、TCP 親和性を実現することを示した。また、TCP がネットワーク支援技術を用いてワイヤレス環境で性能劣化を起こさないように改善された場合には、ネットワーク支援 TCP を対象として TCP 親和性を議論すべきであるという立場から、新しくネットワーク支援 TCP 親和性という概念を提唱した。このネットワーク支援 TCP 親和性を実現するマルチキャスト輻輳制御として、上記の代表ノード選択処理のみならず、送信ノードにおける送信レート制御メカニズムにもワイヤレスロス判別情報を利用する方法を提案した。本提案方式が、ネットワーク支援 TCP とほぼ等しいスループットを得ており、ネットワーク支援 TCP 親和性を実現することを性能評価により明らかにした。

## 参考文献

- [1] S.Deering, "Host Extensions for IP Multicasting," IETF RFC 1112, Aug. 1989.
- [2] J.Mahdavi and S.Floyd, "TCP-Friendly Unicast Rate-based Flow Control," Technical Note sent to the end2end-intenet mailing list, January, 1997,
- [3] M.Yamamoto, "Multicast Communications -Present and Future," IEICE Transactions on Communications, Vol.E-86-B, No.6, pp.1754-1767, June 2003.
- [4] M.Yamamoto, J.Kurose, D.Towsley and H.Ikeda, "A Delay Analysis of Sencer-Initiated and Receiver-Initiated Reliable Multicast Protocols," Proc. of IEEE INFOCOM'97, pp.480-488, Kobe, Japan, April 1997.
- [5] M.Handley and S.Floyd, "Strawman Specification for TCP Friendly (Reliable) Multicast Congestion Control(TFMCC)," RM Mailing list, Nov. 1998.
- [6] L.Rizzo, "pgmcc: A TCP-friendly Single-Rate Multicast Congestion Control Scheme," Proc. of ACM SIGCOMM 2000, pp.17-28, Stockholm, Sweden, Aug. 2000.
- [7] S.Bhattacharyya, D.Towsley and J.Kurose, "The Loss Path Multiplicity Problem in Multicast Congestion Control," Proc. of IEEE INFOCOM'99, pp.856-863, New York, U.S.A., March 1999.
- [8] J.Padhye, V.Firoiu, D.Towsley and J.Kurose, "Modeling TCP Throughput: A Simple Model and Its Empirical Validation," Proc. of ACM SIGCOMM'98, pp.303-314, Vancouver, Canada, August 1998.
- [9] K.Pentikousis, "TCP in Wired-cum-Wireless Environment," IEEE Communications Surveys, Vol.3, No.4, 4<sup>th</sup> Quarter, 2000.
- [10] 山本 幹, 松田崇弘, "無線 TCP の研究動向 (特別講演)," 電子情報通信学会モバイルマルチメディア研究会, MoMuC2003-58, 2003年11月.
- [11] A.Bakre and B.Badrinath, "I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts," Proc. of 15<sup>th</sup> IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'95),pp.136-143, Vancouver,Canada, May 1995.
- [12] H.Balakrishnan, S.Seshan and R.Katz, "Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks," ACM Wireless Networks, Vol.1, No.4, pp.469-481, Feb. 1995.
- [13] Y.Morimoto and Y.Atsumi, "Improving the Efficiency of Reliable Multicast in Wireless Environment by Using Active Network Technology," Proc. of 1<sup>st</sup> Workshop on Active Network Technologies and Applications(ANTA 2002), pp.81-86, Tokyo, March 2002.