

# 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<sup>†</sup> 山本 幹<sup>††</sup>

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、筆者らはすでに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しているが、従来の TCP との親和性を実現するために、ワイヤレス環境でのロスに対してもあえて転送レートを下げる方法を用いた。近年 TCP にもネットワーク支援技術を適用して、無線環境におけるパケットロスなどの要因がもたらす性能劣化を改善する方式が提案されている。本稿では、このようなネットワーク支援型 TCP を対象とした場合の新しい 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する。そして、これを実現するマルチキャスト輻輳制御方式として、上記のパケットロス発生要因識別結果を輻輳制御にも積極的に利用し、ワイヤレス環境でのロスに対して転送レートの抑制を行わない新しい方式の提案を行う。

## Wireless Multicast Congestion Control with Network Support

TAKESHI SAITO<sup>†</sup> and MIKI YAMAMOTO<sup>††</sup>

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. In this paper, we use network support approach to resolve this representative fluctuation problem. For TCP, a network support approach which prevents performance degradation due to wireless environment has been also proposed. In this paper, we propose a newly-defined TCP friendliness, "network support TCP friendliness", which means a network supported multicast congestion control should fairly share a bottleneck link with network-supported TCP. We also propose a multicast congestion control which achieves this network support TCP friendliness.

### 1. はじめに

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 1 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<sup>1)</sup>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、輻輳制御がまったく規定されていない。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送信レートをまったく制御しないため、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

<sup>†</sup> 大阪大学大学院工学研究科  
Graduate School of Engineering, Osaka University

<sup>††</sup> 関西大学工学部  
Faculty of Engineering, Kansai University

ルチキャストがボトルネックを共有した場合、TCP トラヒックは輻輳発生時に送信レートを抑制するのに対し、マルチキャストは送信レートをまったく抑制しないため、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<sup>2)</sup>。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<sup>3)</sup>。

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收容するため、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<sup>4)</sup> 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。したがって、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<sup>5),6)</sup>。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。たとえば、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持つため、輻

輳制御の本来の目的からいえば、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まったくない。このように、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、結果的にワイヤレスマルチキャストのスループットを不当に低く設定することになる問題を、代表ノード変動問題（Wireless-caused Representative Fluctuation Problem）と呼ぶ<sup>7)</sup>。

この代表ノード変動問題を解決する 1 つの方法として、筆者らは文献 7) において、ネットワーク支援を用いた方法を提案した。この方法は、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により発生したロス（以下輻輳ロスと呼ぶ）との区別情報を、代表ノード選択時に考慮する方法である。すなわち、代表ノード選択時に、ワイヤレスロスは無視し輻輳ロスのみ考慮することで、無線伝送路の通信品質の変動に過剰に反応することなく、代表ノード変動問題を解決する。文献 7) で提案した方法では、代表ノード選択にのみロス識別情報を用いており、送信レートの制御にはこの情報を用いていない。つまり、ワイヤレスロスに対しても送信レートを下げるといって輻輳制御が動作する方式となっている。その理由は、送信レートの制御にもロス識別情報を用いた場合には、マルチキャスト輻輳制御方式自体のスループット向上は期待できるが、従来の TCP がワイヤレスロスに対してもその送信レートを下げるため、TCP 親和性の実現が難しくなるからである。

輻輳制御という観点では、輻輳ロスに対してのみ送信レートを抑制すべきであり、TCP に対してネットワーク支援技術を用いてワイヤレスロスに対して送信レートを減少させない仕組みを取り入れた方式がいくつか提案されている<sup>11)</sup>。このようなネットワーク支援 TCP がある程度普及した段階では、マルチキャスト輻輳制御が公平に資源共有を行うべき対象、すなわち TCP 親和性の対象もこのようなネットワーク支援型 TCP に移行することが考えられる。そこで、本稿ではネットワーク支援型 TCP を対象とした TCP 親和性の概念として、新しく“ネットワーク支援 TCP 親和性”の概念を提唱する。さらに、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方式として、ワイヤレスロスと輻輳ロスの識別情報を代表ノード選択にのみ用いるのではなく、輻輳制御にも積極的に適用する方式を新しく提案する。本提案方式により、マルチキャスト輻輳制御においてもワイヤレスロスに起因するスループット低下が改善され、ネッ

トワーク支援型 TCP と同等のスループットを得ることで、ネットワーク支援 TCP 親和性を実現することが期待できる。

## 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2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う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が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<sup>8)</sup>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ィ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<sup>8)</sup>。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う動作が回避され、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<sup>5)</sup> や pgmcc<sup>6)</sup> 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<sup>9)</sup> 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、代表ノードは送信ノードへ向けて 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

### 3.1 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<sup>10)</sup>、その性能を大きく劣化させる<sup>11)</sup>。たとえば、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する必要はない。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ともな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パ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。したがって、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ともない顕在化する問題であり、スケラビリティに関する技術課題の1つととらえることができる。

筆者らは、この現象を代表ノード変動問題と呼び、その解決手法としてネットワーク支援を利用する方法を文献7)で提案している。次節では、この方式について説明する。

### 3.2 代表ノード選択にネットワーク支援を用いた方式

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の差異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。

筆者らは、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に示す方法を提案している。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、未受信のパケットがあれば、それは有線部分でのパケットロスであり、輻

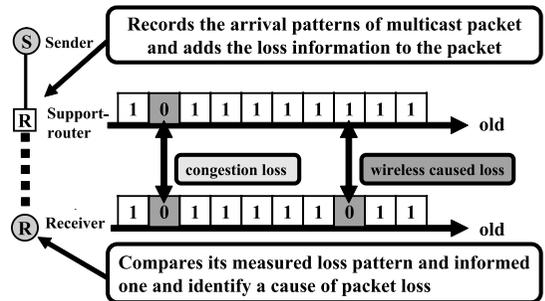


図1 ネットワーク支援を用いたパケットロス要因の識別  
Fig. 1 Wireless-caused packet loss detection with network support.

輻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、たと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パケット履歴を比較する。この両者に差分が生じた場合には、その差分に該当するパケットロスは、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ロスの正確な把握が可能となる。なお、図1では簡単のためにパケット番号を用いて説明しているが、受信パケット(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る舞うため、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、パケット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ロス情報を、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ロス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ロス情報をもとに、輻輳ロス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が解決できる。具体的には、たとえば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。

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

上式は、パケットサイズ  $s$ 、平均往復伝播遅延  $R$ 、受信ノードで観測されるパケットロス率  $p$  が与えられたときの TCP スループットを与える式である<sup>9)</sup>。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。この式(1)の算出に用いられるパケットロス率  $p$  に対し、ワイヤレスロスはカウントせず、輻輳ロス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ロスの影響を排除することが可能である。

なお、このワイヤレスロスの識別を、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、従来の TCP を対象に TCP 親和性を論じた場合、公平性を議論する対象である TCP がワイヤレスロス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ロス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1つに、TCP 親和性の実現があるので、文献7)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ている。

#### 4. 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方式

TCP においては、ワイヤレスロスの影響により、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<sup>11)</sup>。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<sup>12),13)</sup>。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ロス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、ネットワーク支援型 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が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、ネットワーク支援型 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、前章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ロス識別情報を使用する必要がある。たとえば、ネットワーク支援型 TCP の1つの例である I-TCP<sup>12)</sup>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ロスがまったく隠蔽される。このため、送信側 TCP にはワイヤレスロスによる送信レートの抑制がまったく働かず、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。したがって、このようなネットワーク支援型 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、式(1)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あたっては、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。

このモデルにおいては、 $n$  個の受信ノードを持つワイヤレスマルチキャストセッションが1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。このことによりマルチキャストの代表ノードは Link1, Link2 双方から選択され、ネットワーク支援 TCP 親和性の評価は Link1 での双方のスループットを用いて行うことができる。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パースト的パケットロスの発生を考慮して、文献14)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

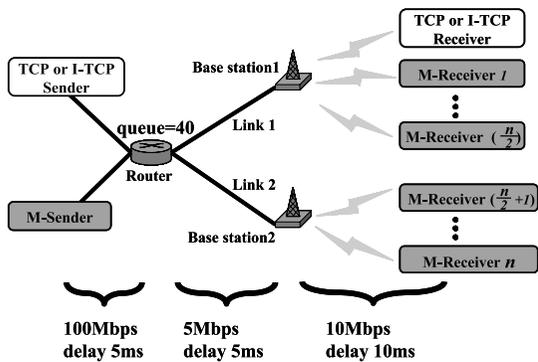


図 2 シミュレーションモデル  
Fig. 2 Simulation model.

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。

シミュレーションは、C++言語を用いてイベントドリブン型シミュレータを開発した。その他の条件として、パケットサイズは 1,000 Byte とし、スループットの計測はシミュレーション開始から 500 秒後から 1,000 秒の間の平均値をとった。マルチキャストに参加するメンバ数はパラメータとし、具体的には 2, 4, 6, 10, 14, 20, 30, 50, 70, 100 とした。

なお、本稿ではネットワーク支援 TCP 親和性の評価指標として、Fairness Index 値<sup>15)</sup>を用いる。具体的には、以下の式に基づき評価を行う。

$$FairnessIndex = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n * \sum_{i=1}^n x_i^2} \quad (2)$$

上式においては、 $x_i$  は TCP もしくはマルチキャストセッションそれぞれのスループットである。Fairness Index は 0 から 1 の間の値をとり、1 に近づくほど TCP とマルチキャストセッションの間で公平性が実現されており、ネットワーク支援 TCP 親和性が高いと判断できる。

5.2 代表ノード変動問題とネットワーク支援による解決

図 3 に、TCP Reno と TFMCC 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ともない、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、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ともない顕在化する問題であるこ

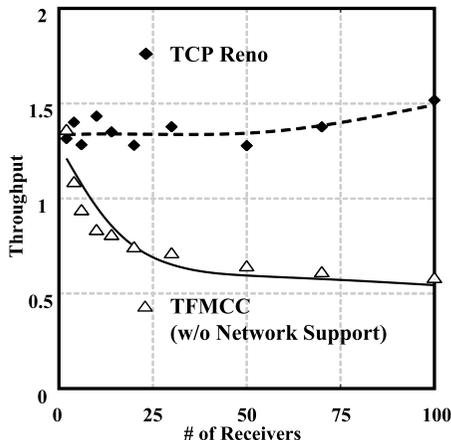


図 3 代表ノード変動問題による劣化  
Fig. 3 Performance degradation due to representative fluctuation problem.

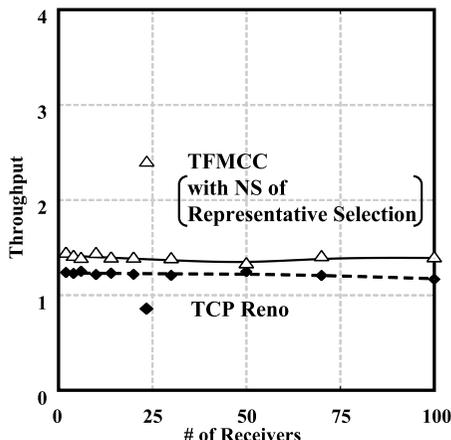


図 4 ネットワーク支援による代表ノード変動問題の解決  
Fig. 4 Performance improvement by network support for representative fluctuation problem.

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 1 つであるといえる。

図 4 に、文献 7) 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）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。

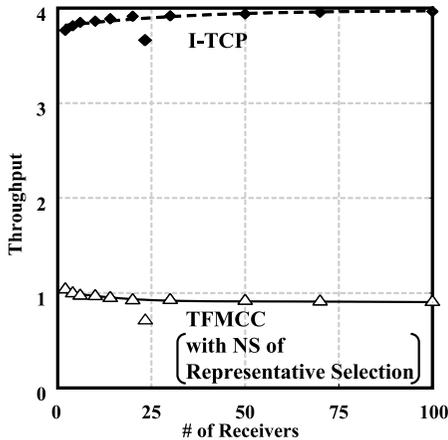


図 5 I-TCP との共存

Fig. 5 Performance of multicast congestion control with I-TCP.

### 5.3 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方式の評価

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、ネットワーク支援型 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。今回ネットワーク支援型 TCP として I-TCP を用いたのは、文献 11) にあるように、I-TCP はワイヤレスロスに対応する方式として早くから提案された代表的なものであること、またそれ以降に提案されたワイヤレスロスに対応する方式は、I-TCP の持つエンドエンドでのセマンティックが満たされないなどの欠点を改良するものであり、特にスループットが I-TCP に比べ改善されるものではないことから、I-TCP のスループット性能はワイヤレスロス対応 TCP として十分高いこと、の 2 つの理由からである。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まったく隠蔽されており、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、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、すなわち本稿での提案方式を適用した場合（以下ネットワーク支

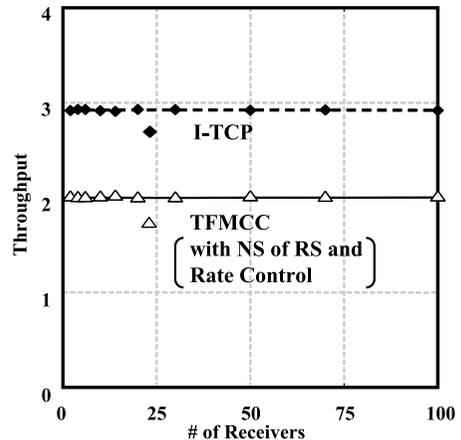


図 6 ネットワーク支援 TCP 親和性の実現

Fig. 6 Multicast congestion control achieving network support TCP friendly.

援 II) 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、代表ノード選択だけでなく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、ネットワーク支援型 TCP である I-TCP とほぼ等しいスループットを得ている。

また、マルチキャスト受信ノード数が増加しても、提案方式のスループットがまったく劣化しないことから、前述の代表ノード変動問題の解決も図られていることが分かる。

ここで、ネットワーク支援 II を行わない場合、行った場合のそれぞれを Fairness Index により評価を行うと、図 7 となる。図 7 から、本稿の提案した方式によりネットワーク支援 TCP 親和性が向上していることが確認できる。

さらに、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ふ（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、両セッションが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。

なお、本稿の提案方式を用いた場合、TFMCC セッションのスループットが I-TCP のそれに比べ多少低くなっている。この理由は、I-TCP がセッションを有線/無線区間のセッションを分割することで、双方区間でラウンドトリップタイム（往復伝播遅延）が減少しているためである。つまり、TFMCC にネットワー

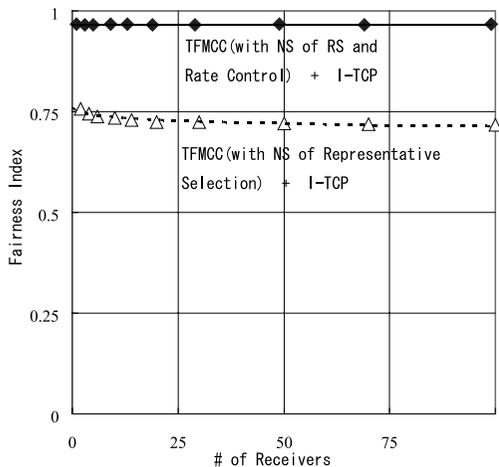


図7 Fairness Index によるネットワーク支援 TCP 親和性の評価

Fig. 7 Fairness index.

ク支援を導入した場合、ワイヤレス区間でのパケットロスによる過度のスループット減少は回避できるものの、ラウンドトリップタイムの減少分までは補償できないことに起因する。

## 6. ま と め

本稿では、ワイヤレスマルチキャスト輻輳制御に対し、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、ネットワーク支援型 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、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識別情報を、代表ノード選択処理だけでなく、送信ノードにおける送信レート制御メカニズムにも利用する方法を提案した。本提案方式が、ネットワーク支援型 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) Deering, S.: Host Extensions for IP Multicasting, RFC 1112, IETF (Aug. 1989).
- 2) Mahdavi, J. and Floyd, S.: TCP-Friendly Unicast Rate-based Flow Control, Technical Note sent to the end2end-internet mailing list (Jan. 1997).
- 3) Yamamoto, M.: Multicast Communications - Present and Future, *IEICE Trans. Communica-*

*tions*, Vol.E-86-B, No.6, pp.1754-1767 (2003).

- 4) Yamamoto, M., Kurose, J., Towsley, D. and Ikeda, H.: A Delay Analysis of Sender-Initiated and Receiver-Initiated Reliable Multicast Protocols, *Proc. IEEE INFOCOM'97*, Kobe, Japan, pp.480-488 (Apr. 1997).
- 5) Handley, M. and Floyd, S.: Strawman Specification for TCP Friendly (Reliable) Multicast Congestion Control (TFMCC), RM Mailing list (Nov. 1998).
- 6) Rizzo, L.: pgmcc: A TCP-friendly Single-Rate Multicast Congestion Control Scheme, *Proc. ACM SIGCOMM 2000*, Stockholm, Sweden, pp.17-28 (Aug. 2000).
- 7) Saito, T. and Yamamoto, M.: Wireless-caused Representative Selection Fluctuation Problem in Wireless Multicast Congestion Control, *IEICE Trans. Communications*, No.7, Vol.E89-B, pp.2819-2825 (2005).
- 8) Bhattacharyya, S., Towsley, D. and Kurose, J.: The Loss Path Multiplicity Problem in Multicast Congestion Control, *Proc. IEEE INFOCOM'99*, New York, U.S.A., pp.856-863 (Mar. 1999).
- 9) Padhye, J., Firoiu, V., Towsley, D. and Kurose, J.: Modeling TCP Throughput: A Simple Model and Its Empirical Validation, *Proc. ACM SIGCOMM'98*, Vancouver, Canada, pp.303-314 (Aug. 1998).
- 10) Pentikousis, K.: TCP in Wired-cum-Wireless Environment, *IEEE Communications Surveys*, Vol.3, No.4 (4th Quarter, 2000).
- 11) 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 (Nov. 2003).
- 12) Bakre, A. and Badrinath, B.: I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts, *Proc. 15th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS'95)*, Vancouver, Canada, pp.136-143 (May 1995).
- 13) Balakrishnan, H., Seshan, S. and Katz, R.: Improving Reliable Transport and Handoff Performance in Cellular Wireless Networks, *ACM Wireless Networks*, Vol.1, No.4, pp.469-481 (Feb. 1995).
- 14) Morimoto, Y. and Atsumi, Y.: Improving the Efficiency of Reliable Multicast in Wireless Environment by Using Active Network Technology, *Proc. 1st Workshop on Active Network Technologies and Applications (ANTA 2002)*, Tokyo, pp.81-86 (Mar. 2002).
- 15) Chiu, D. and Jain, R.: Analysis of the increase and decrease algorithms for congestion avoidance in computer networks, *Computer*

*Networks and ISDN Systems*, Vol.17, pp.1-14 (1989).

(平成 18 年 3 月 31 日受付)

(平成 18 年 10 月 3 日採録)



齋藤 健

平成 15 年大阪大学工学部卒業。平成 17 年同大学院工学研究科修了。現在, NTT 西日本勤務。大阪大学在学中は, 無線マルチキャスト通信, 輻輳制御ならびにネットワーク支援技

術の研究に従事。



山本 幹 (正会員)

昭和 58 年大阪大学工学部通信工学専攻卒業。昭和 60 年同大学院博士前期課程修了。昭和 63 年同博士後期課程修了。同年大阪大学工学部助手。同大助教授を経て, 平成 17

年関西大学工学部教授。マルチキャスト通信, トラヒック制御, ネットワークの高機能化の研究に従事。平成 7~8 年マサチューセッツ州立大学 Visiting Professor (文部省在外研究員)。平成 14 年電子情報通信学会ネットワークシステム研究賞, 平成 17 年情報処理学会 DI-COMO 優秀論文受賞。工博。IEEE, ACM, 電子情報通信学会会員。