

# TCP Westwood との親和性を有する ワイヤレスマルチキャスト輻輳制御方式

山本 猛<sup>†</sup> 齋藤 健<sup>††</sup> 山本 幹<sup>†††</sup>

1 対多, 多対多通信への要求, ならびにモバイルネットワークの発展にともない, ワイヤレスマルチキャストに対する期待が高まっている. ワイヤレスマルチキャストの普及に向けては, 他のユーザとのネットワーク資源の公平利用を実現する輻輳制御の開発が必要不可欠である. 本稿では, 特にワイヤレス環境での有効性が認められている TCP Westwood に対してネットワーク資源の公平利用を実現し, さらにマルチキャスト通信としてのスケーラビリティに優れた方式の提案を行う. また, 計算機シミュレーションにより, 提案方式の有効性を明らかにする.

## Wireless Multicast Congestion Control with Friendliness of TCP Westwood

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

Wireless multicast communication is one of the most promising ways to disseminate the same information to potentially large number of users including mobile users. For deployment of wireless multicast, congestion control which achieves fair share of network resources with other users plays a very important role. In this paper, we propose a new wireless multicast congestion control which has friendliness with TCP Westwood, a TCP version working well in wireless environment, and good scalability.

### 1. ま え が き

近年, 移動体通信網の急激な広がりとともに, 移動体端末から無線ネットワークを介してインターネットにアクセスするモバイルインターネット環境が注目されている. モバイル環境の普及にともない, 1 対多もしくは多対多型アプリケーションがモバイル環境でも広がるのが考えられる. このようなアプリケーションをモバイル環境で効率良くサポートする通信技術として, ワイヤレスマルチキャストがある. インターネットにおけるマルチキャストプロトコルとして, IP マルチキャスト<sup>1)</sup> が存在する. IP マルチキャストでは, トランスポート層に UDP を用いているため, そのままの形で適用した場合には, ネットワーク輻輳に対して伝送レートを変更しない. ネットワーク輻輳に対して自らの伝送レートを下げる TCP と混在した状況で

は, マルチキャストトラフィックが帯域を大きく占有する状況が発生しかねないため, マルチキャスト通信の普及には, 輻輳制御技術の開発が必須である.

マルチキャスト輻輳制御の開発にあたっては, スケーラビリティと TCP 親和性が重要な技術課題となる. TCP のようなフィードバック型輻輳制御を用いた場合には, フィードバック情報が送信ノードに集中することによる性能劣化が発生する. この問題は, マルチキャストに参加する受信ノードの数が増えるに従い顕在化するため, スケーラビリティの問題としてとらえられる. この技術課題を解決する方法として, 最も輻輳状況の劣悪な受信ノードを代表ノードとして選択し, この代表ノードと送信ノードとの間だけでフィードバック情報の授受を行う方法が提案されている. この方法において, 送信ノードからの送出レートを, 送信ノードと代表ノードとの間で TCP を用いた場合の送出レートにあわせることで, TCP 親和性も実現する方法が提案されている.

マルチキャスト輻輳制御をワイヤレス環境において適用した場合には, ワイヤレス環境におけるパケットロス (以下ワイヤレスロス) と輻輳に起因するパケットロス (以下輻輳ロス) との識別が行えないためにス

<sup>†</sup> 大阪大学大学院情報科学研究科  
Graduate School of Information Science and Technology, Osaka University

<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

ループットが大幅に劣化するという問題点<sup>3)</sup>、受信ノードのワイヤレス受信状況が時々刻々と変化することにより代表ノードが変動することにもなるスループット劣化の問題<sup>4)</sup>、が発生する。前者に対しては、TCP を対象とした親和性を議論する場合には、TCP 自体も両者の区別がつかないことでスループットが劣化するため、問題とならない。ただし、後者の代表ノード変動問題については、なんらかの対策を施す必要がある。

一方、TCP においては無線環境に対応した輻輳制御方式として最近、TCP Westwood<sup>2)</sup> が提案されている。これは受信ノードから送られてくる ACK (Acknowledgement) の到着間隔から利用可能な帯域を推定し、パケットロス発生時にウィンドウサイズをこの利用可能帯域に対応する値までしか下げないという動作を行っている。この動作により、ワイヤレスロスもしくは輻輳ロスのいずれが発生したとしても、パケットロス発生時には推定したボトルネックリンクの公平利用可能帯域にあわせることで、過度の送信レートの抑制を回避している。

本稿では、TCP Westwood が普及した状況においてこの TCP Westwood との親和性を有するマルチキャスト輻輳制御方式の開発を目的とする。具体的には、TCP Westwood と同様の帯域推定を受信ノードで行い、この値をもとに送信ノードにおいて代表ノード選択を行う方法を提案する。さらに、送信ノードの送信レート制御アルゴリズムとして、TCP Westwood と同様のものを用いる方法を提案する。前者により、代表ノード変動問題の解決をはかり、後者により TCP Westwood との親和性をはかる。本稿では、計算機シミュレーションにより、提案方式が代表ノード変動問題を解決できていること、さらに TCP Westwood との親和性を実現できていることを検証する。

## 2. マルチキャスト輻輳制御

マルチキャストの輻輳制御はその方式から、大きく送信ノード駆動型<sup>5)~7)</sup> と受信ノード駆動型<sup>8)~10)</sup> に分類することができる。前者は送信ノードが受信ノードからのフィードバック情報に基づいて全受信ノードに送信するレートを調節する方式であり、後者は階層符号化により複数のマルチキャストグループに対してデータを送信し、受信ノードが自らの輻輳状況に合わせて受信するマルチキャストグループに参加・離脱する方式である。本稿では前者の送信ノード駆動型を対象としている。

送信ノード駆動型の輻輳制御においては受信ノードから送信ノードにフィードバック情報が送信される。

このとき受信ノードからはロス通知 (NAK: Negative Acknowledgement) が送信され、送信ノードがロス通知を受信したときに輻輳制御がはたらき、送信レートを減少させるのが主流となっている。しかし、マルチキャストに参加する受信ノードは非常に多い状況が一般的であるため、送信ノードは一度に多くのロス通知を受信する確率が高くなる。同一パケットに対して多くのロス通知を受け取ると送信レート抑制動作が多数はたらくことで送信レートを過度に抑制するという問題が生じ、その結果スループットが著しく低下する。この問題は LPM (Loss Path Multiplicity) 問題<sup>11),12)</sup> と呼ばれる。

この LPM 問題に対処する方式として代表ノードを用いる制御方式が提案されている。代表ノードとはマルチキャストに参加している受信ノードから選出され、送信ノードはこの代表ノードからのロス通知に対してのみ輻輳制御を行う。そのため適切に送信レートを調節することが可能となり LPM 問題を解決できる。また代表ノードは一般に最悪輻輳状態にある受信ノードが選出される。

この代表ノードを実現した輻輳制御方式に pgmcc<sup>5),6)</sup> や TFMCC<sup>7)</sup> がある。pgmcc においては受信ノードから送られてくるパケットロス率と往復伝搬遅延 (RTT: Round Trip Time) に関する情報に基づき以下の TCP のスループット式<sup>13),14)</sup> を用いて受信ノードの輻輳状況を推定し、最悪輻輳状態にある受信ノードを代表ノードとして選出する。

$$T = \frac{1}{R \times \sqrt{p} \times (1 + 32p^2)}$$

上式において  $R$  が往復伝搬遅延、 $p$  はパケットロス率である。

さらに代表ノードからの ACK に基づき TCP と同様のウィンドウ制御を行うことで TCP との親和性を実現している。こうすることでスケラビリティの問題をも解決している。

なお、この ACK は代表ノードが正しく受け取ったパケットを示すもので、輻輳制御に用いるフィードバック情報である。本稿はマルチキャスト輻輳制御のみに注目し特にアプリケーションは特定していないが、たとえば信頼性マルチキャストを対象とした場合には、上記の ACK 以外に信頼性マルチキャスト用のフィードバック情報を併用することになる。

このようなマルチキャスト輻輳制御方式をワイヤレス環境に適用した場合、ワイヤレス環境が持つ高いロス率特性とパケットロス率の時間的変動という特徴により、以下の 2 つの問題が顕在化する。

### [ 送信レートの過度の抑制 ]

有線環境においてはパケットロスのほとんどが輻輳によって発生するため、パケットロスの観測を輻輳の発生と見なし送信レートを減少させることで輻輳の解消を図る。一方、無線環境では伝送誤りによってパケットロスが発生する可能性が高く、パケットロスの観測を単純に輻輳の発生と見なすことはできない。しかしこれまでの輻輳制御ではワイヤレスロスと輻輳ロスを識別することができないため、伝送誤りによるパケットロスに対しても輻輳制御がはたらき、送信レートを不必要に減少させてしまいスループットが低下する。

### [ 代表ノード変動問題 ]

無線環境ではフェージングなどによって、ときに伝搬路が悪化するため、受信ノードはこのとき高いパケットロス率を観測する。代表ノードを用いた輻輳制御を行う場合、TCPのスループット式に基づいて代表ノードを選出するため、そのような一時的に伝搬路が悪化した受信ノードが逐次選択される。マルチキャスト輻輳制御は代表ノードに合わせて送信レートを決定するため、伝搬路が悪化した受信ノードが代表ノードに選択された場合、送信レートが低下する。また、受信ノード数が多くなり伝搬路の状況が悪い受信ノードの存在する確率が高くなると、特にこの問題は顕在化する。この問題は代表ノード変動問題と呼ばれる<sup>4)</sup>。

## 3. TCP Westwood<sup>2)</sup>

2章で述べたような伝送誤りによって過度に送信レートを抑制するという問題はTCPにおいても発生する。ところが最近TCP Westwoodという輻輳制御方式が提案され、無線環境でも高いスループットを実現するとされている。

送信ノードはACKを受信したとき、そのACKにより受信ノードにどれだけの量のデータが届いたのかということが分かる。送信ノードが受信ノードからのACKを時刻 $t_k$ に受け取り、それが受信ノードに新たに $d_k$ だけのデータが到着したと通知したとする。このとき一時的に算出される利用可能帯域 $b_k$ を $b_k = d_k / \Delta_k$ とする。ここで $\Delta_k = t_k - t_{k-1}$ である。次に一時的に算出される利用可能帯域 $b_k$ を、以下のようなローパスフィルタにより平均化することで算出している。

$$\hat{b}_k = \alpha_k \hat{b}_{k-1} + (1 - \alpha_k) \frac{b_k + b_{k-1}}{2}$$

$\hat{b}_k$ は時刻 $t_k$ における推定利用可能帯域であり、 $\alpha_k$ は $\alpha_k = (2\tau - \Delta_k) / (2\tau + \Delta_k)$ であり、 $1/\tau$ はローパスフィルタのカットオフ周波数

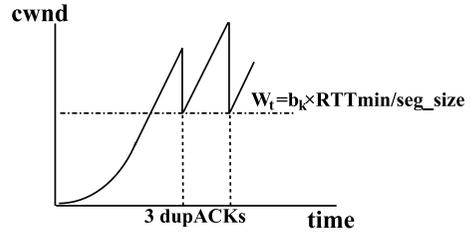


図 1 cwnd の変化

Fig. 1 Cwnd in TCP Westwood.

である。

次に3つの重複ACKを受信するなどパケットロスを検出した場合には、TCPのウィンドウ制御で用いられる閾値(推定した帯域に対応するウィンドウサイズ) $W_t$ とウィンドウサイズ $cwnd$ を次のように $cwnd > W_t$ の場合にのみ変更する。

$$W_t = BWE \times RTT_{min} / seg\_size$$

$$cwnd = W_t + ndup$$

ここで $ndup$ は重複ACK受信回数、 $BWE$ は推定利用可能帯域 $\hat{b}_k$ に対応する値であり、 $RTT_{min}$ はこのコネクションが持続している期間中に観測された中で最小のRTT(Round Trip Time)、 $seg\_size$ はパケットサイズである。

TCP Renoにおいては3つの重複ACKを受け取ったとき単純に $cwnd$ を半減させるのに対し、TCP Westwoodにおいては図1のように $cwnd < W_t$ の場合には輻輳制御を行わず、 $cwnd > W_t$ の場合に $cwnd$ を半減させるのではなく推定された帯域によって算出される閾値 $W_t$ に設定する。これにより、無線伝搬路のようなパケットロスが頻繁に発生する環境においても必要以上に $cwnd$ を低下させないため、高いスループットを得ることができる。

将来的にはこのTCP Westwoodのような無線環境に対応したTCPが普及すると思われる。

## 4. 提案方式

2章で述べたワイヤレスマルチキャストの技術課題を解決するため、TCP Westwoodの輻輳制御方式を応用したマルチキャスト輻輳制御方式を提案する。TCP Westwoodの帯域推定方法を各受信ノードに用いることでパケットロスに大きく影響されない利用可能帯域が算出でき、パケットロス率が時間とともに変化するワイヤレス環境において代表ノードが頻繁に変更される代表ノード変動問題を解決することが可能である。

### 4.1 代表ノード選出方法

TCP Westwoodでは帯域推定を送信ノードで行っ

ているが、マルチキャストでこの方法を用いた場合、全受信ノードからの ACK がフィードバック情報として必要となり、feedback implosion<sup>15)</sup> が起こりスケラビリティの面で問題がある。そこで、受信ノードで帯域推定を行うこととする。具体的には送信ノードから送られてくるパケットの到着間隔とパケットサイズから TCP Westwood と同様の帯域推定を行い、その推定された帯域に対応するウィンドウサイズを算出する。算出されたウィンドウサイズを送信ノードからデータパケットに付加して送られてくる現在の代表ノードのウィンドウサイズと次式で比較する。

$$C \times BWE_{now} > BWE_i$$

ここで、 $BWE_{now}$  は現在の代表ノードのウィンドウサイズ、 $BWE_i$  は受信ノードのウィンドウサイズである。 $C$  は頻繁な代表ノードの変更を抑えるために用いられる 1 より小さい正定数である。

この式が満たされた場合は代表ノードのウィンドウサイズよりこの受信ノード自身のウィンドウサイズが小さいことになり、代表ノードがこの受信ノードに変更される可能性がある。このときこの受信ノードは過去数十パケットの到着間隔を付加したフィードバックパケットを送信ノードに送信する。

以上の動作を全受信ノードが行い、送信ノードがこのフィードバックパケットを受信した場合は、付加された到着間隔をもとに再びその受信ノードに対する推定利用可能帯域とこの推定利用可能帯域に対応したウィンドウサイズを計算し、最終的にフィードバックパケットを送信した受信ノードを代表ノードにするべきか判断する。

#### 4.2 送信レート制御方法

選出された代表ノードと送信ノードの間で TCP Westwood とほぼ同様の動作を行う。具体的には代表ノード選出とは別に、送信ノードは代表ノードからの ACK 到着間隔をもとに帯域を推定し、ウィンドウサイズ  $W$ 、トークン  $T$  及び閾値  $W_t$  を次のように変更することで送信レートを制御する。ここでトークン  $T$  はネットワークに滞留するパケット数を制御するための値である。

- (1) セッションスタート時または再スタート時
  - $W = 1, T = 1$
- (2) データ送信時
  - $T = T - 1$
- (3) 代表ノードからの ACK 受信時
  - TCP Westwood と同様の帯域推定をし、
    - $W_t = BWE \times RTT_{min} / seg\_size$
    - $W = W + 1/W, T = T + 1 + 1/W$

#### (4) ロス検出時

- $W > W_t$  のときのみ
  - $T = T - (W - W_t), W = W_t$

#### 4.3 本方式の優位性

本方式は送信ノードと受信ノードのみに変更が必要であり、ネットワーク側からのフィードバックを必要としない。これまでに提案されているワイヤレスマルチキャスト輻輳制御方式には、ECN (Explicit Congestion Notification) などネットワーク側からのフィードバックを必要とするものがある。しかし、そのためにはネットワーク上のノードがそのようなフィードバックを返す機構に対応する必要があり、実現は困難と考えられる。その点、本方式はそのようなフィードバックを必要とせずエンドノードの変更のみで動作可能であるため、実現性という意味で優位性を持っている。

#### 5. 性能評価

本章ではワイヤレスマルチキャストにおける代表ノード変動問題の評価ならびに提案方式の性能評価を計算機シミュレーションを用いて行う。

##### 5.1 シミュレーションモデル

まず、2章であげた2つの問題に対する提案方式の有効性を評価するためのシミュレーションモデルを図2に示す。

次に TCP との親和性を評価するためのシミュレーションを行うモデルを図3に示す。ここでは TCP との親和性が重要であるため、1つの TCP セッションと  $n$  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同一ボトルネックリンクを共有している状況を想定している。

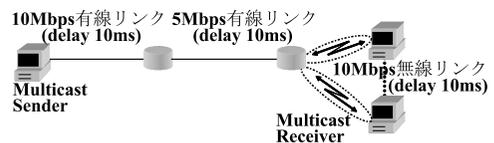


図2 提案方式の問題解決性能を評価するモデル

Fig.2 Simulation model for evaluation of our proposed method.

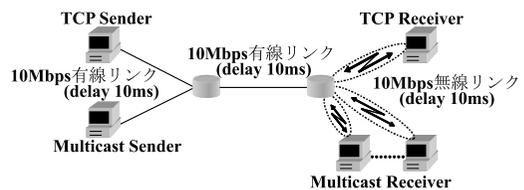


図3 TCP 親和性を評価するモデル

Fig.3 Simulation model for evaluation of TCP friendliness.

図2, 図3ともに無線部分でのパケットロスについては, フェージングによるバーストロス発生状況を勘案し, 文献16)で使用されている無線LANモデルを用いる. 具体的には, 10秒ごとの一定間隔で各無線リンクそれぞれにおいて, 0から与えられた平均パケットロス率の2倍の範囲のパケットロス率をランダムに設定する. なお, 無線部分でのパケットロスがワイヤレスマルチキャストに与える影響を考察するため, 有線部分においては輻輳以外の原因によるパケットロスは無いものとする. また, 比較対象としての既存マルチキャスト輻輳制御方式として pgmcc を用いている. また, 提案方式の代表ノード選出におけるパラメータ  $C$  は pgmcc の論文<sup>6)</sup> で用いている 0.75 とした.

計算機シミュレーションは1回につき1,000秒を40回行い, 後半の500秒間における平均スループットを用いて評価している.

## 5.2 評価結果

[提案方式のワイヤレス環境での有効性]

提案方式のワイヤレス環境での有効性を, 2章で述べた技術課題の2つに対する性能を評価し確認する.

### 送信レートの過度の抑制に対する効果

ワイヤレスロスに対して過度に送信レートが抑制される問題について評価を行った. この評価においては送信ノードと代表ノード間のレート制御メカニズムを評価することが目的であり, 複数の受信ノード間の影響を評価する必要はない. そこで, 図2のモデルにおいて受信ノード数を1として評価を行った. 図4に無線リンクでのロス率を変化させたときのスループット特性を示す.

なお pgmcc では送信ノードが受信ノードからのACKを用いてパケットロスを検知した際, 検知直後のウィンドウサイズの半分に相当するACKを無視している. すなわち, この無視されたACKにより本来パケットロスと検知する場合でも, これをパケットロスと認知しない方法をとっている. このため pgmcc 自体がワイヤレスロスに対する耐性のある程度持っており, 提案方式と pgmcc の差はTCP RenoとTCP Westwoodのスループット差<sup>2)</sup>に比べると小さくなっている. このような状況でも提案方式は pgmcc に比べある程度高いスループットを保持している.

### 代表ノード変動問題の抑制

次に提案方式が代表ノード変動問題を解決することを確かめた. 具体的には, 図2のシミュレーションモデルにおいて pgmcc と提案方式の受信ノード数を変化させたときのスループットを評価した(図5). 平均ロス率は1%としている.

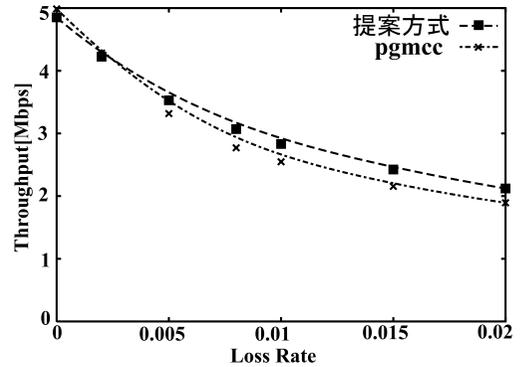


図4 ロス率とスループット

Fig. 4 Throughput vs. loss rate characteristics.

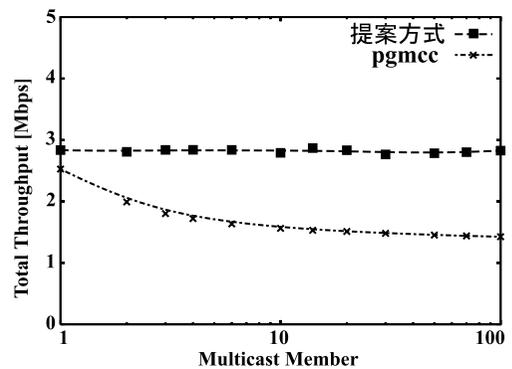


図5 受信ノード数とスループット

Fig. 5 Throughput vs. the number of multicast member.

pgmcc を用いた場合は受信ノード数が増加するとスループットも低下しているが, 提案方式を用いた場合にはスループットが変化せず代表ノード変動問題を解決できていることが分かる. このとき pgmcc では頻繁に代表ノードの変更が発生しているが, 提案方式を用いた場合には代表ノードの変更がほとんど見られなかった.

[TCP Westwood との親和性]

次に図3のシミュレーションモデルを用いてTCPとの親和性を評価した. 具体的には以下の3つの場合について, 平均ロス率を1%として受信ノード数を変化させた場合のTCPセッションのスループットとマルチキャストセッションのスループットのスループット比(図6)とスループットの合計(図7)を評価した.

- (1) TCP...TCP Reno, マルチキャスト...pgmcc
- (2) TCP...TCP Westwood, マルチキャスト...pgmcc
- (3) TCP...TCP Westwood, マルチキャスト...提案方式

図6, 図7よりまず, マルチキャスト輻輳制御方式

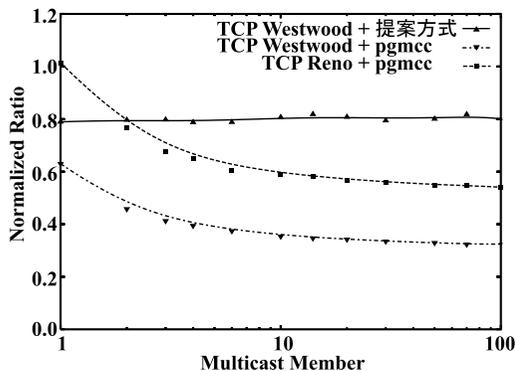


図 6 スループット比 (平均ロス率 1%)

Fig. 6 Throughput ratio of TCP and multicast sessions (Loss rate=1%).

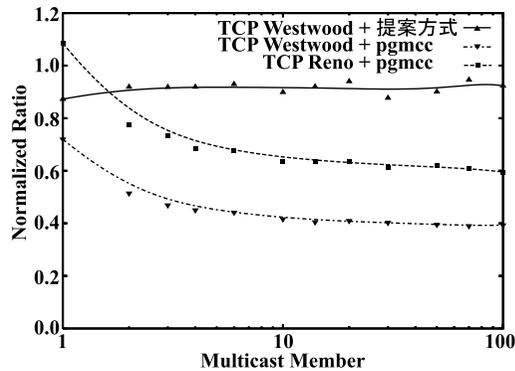


図 8 スループット比 (平均ロス率 3%)

Fig. 8 Throughput ratio of TCP and multicast sessions (Loss rate=3%).

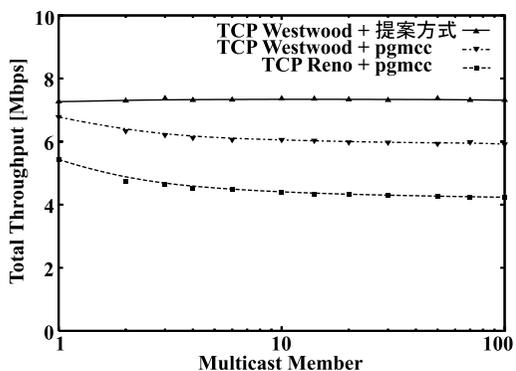


図 7 合計スループット (平均ロス率 1%)

Fig. 7 Total throughput characteristics (Loss rate=1%).

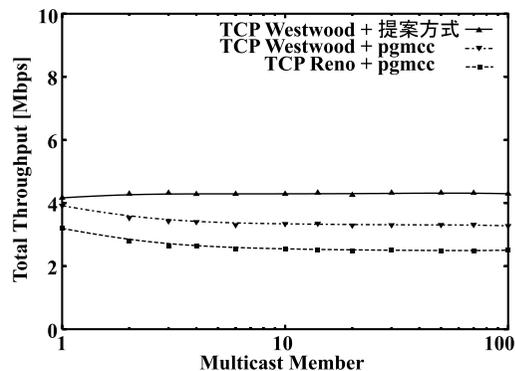


図 9 合計スループット (平均ロス率 3%)

Fig. 9 Total throughput characteristics (Loss rate=3%).

として pgmcc を用い、TCP に TCP Reno を用いる場合を見ると、pgmcc の受信ノード数が増加するに従いそのスループット比が低下しており、親和性が実現できていないことが分かる。pgmcc のスループット比が低下する原因は、TCP Reno のスループットはマルチキャストの受信ノード数に影響されない一方、マルチキャストは代表ノード変動問題によってスループットが低下しているためと考えられる。

また、マルチキャスト輻輳制御方式として pgmcc を用い、TCP に TCP Westwood を用いる場合を見ると、TCP が TCP Reno であった場合よりもスループット比が低下していることが分かる。TCP Westwood は無線環境に対応しているため無線環境でも高いスループットを実現するのにに対し、pgmcc は伝送誤りによる送信レートの低下や代表ノード変動問題でスループットが低下しているためであると考えられる。ここから、pgmcc は無線環境において TCP Westwood のような無線環境に対応した TCP との親和性を実現できないことが分かる。

最後に、マルチキャスト輻輳制御方式として提案方式を用い、TCP に TCP Westwood を用いる場合を見ると、マルチキャストセッションと TCP Westwood セッションが受信ノード数が増加したときにもほぼ近いスループットを実現しており、代表ノード変動問題を解決し、さらに TCP Westwood との親和性を実現していることが分かる。さらに親和性を実現しつつも高い合計スループットを示していることが分かり、ネットワークの利用効率も上昇しているといえる。

また、平均ロス率を 3% にして同様に TCP セッションのスループットとマルチキャストセッションのスループットのスループット比 (図 8) とスループットの合計 (図 9) を評価した。

図 8 と図 9 から、平均ロス率が 3% であっても、提案方式を用いた場合は pgmcc を用いた場合に比べ、TCP Westwood との親和性を実現しつつ高いスループットを実現していることが分かる。

## 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おいて、フェージングなどによる伝送誤りとそれによるパケットロスの時間変化がスループット・親和性に与える影響を考えた．マルチキャスト輻輳制御ではスケラビリティと TCP 親和性の観点から、最悪輻輳状態にあるノードを代表ノードとして選出しこの代表ノードと送信ノードの間でフィードバックを用いて輻輳制御を行う方法がある．しかし、この方式をそのままの形で無線環境に適用した場合には伝送誤りによるパケットロスに対して輻輳制御動作がはたらくことと、代表ノード変動問題によって親和性が実現できないことを明らかにした．また、将来的に TCP が無線環境に対応した TCP Westwood に置き換わった場合はさらに親和性が実現できないことも明らかにした．本稿では TCP Westwood を応用したマルチキャスト輻輳制御方式を提案し、これが無線環境において代表ノード変動問題を解決することで TCP Westwood との親和性が実現できることを明らかにした．

## 参 考 文 献

- 1) Deering, S.: Host Extensions for IP Multicast Extension to the Internet Protocol, RFC-1112 (Aug. 1989).
- 2) Casetti, C., Gerla, M., Mascolo, S., Sanadidi, M.Y. and Wang, R.: TCP Westwood: End-to-End Congestion Control for Wired/Wireless Networks, *Wireless Networks*, Vol.8, Issue 5, pp.467-479 (2002).
- 3) 山本 幹, 松田崇弘: [特別講演]無線 TCP の研究動向, 信学技報, MoMuc2003-58, IN2003-111, 電子情報通信学会 (Nov. 2003).
- 4) 斎藤 健, 山本和徳, 山本 幹: 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, 情報処理学会 DiCoMo (July 2003).
- 5) Rizzo, L.: pgmcc: A TCP-friendly Single-rate Multicast Congestion Control Scheme, *ACM SIGCOMM '00*, Stockholm, Sweden, August/September, pp.17-28 (2000).
- 6) Rizzo, L., Iannaccone, G., Vicisano, L. and Handley, M.: PGMCC Single Rate Multicast Congestion Control: Protocol Specification, draft-ietf-rmt-bb-pgmcc-03.ps (Jan. 2005).
- 7) Handley, M. and Floyd, S.: Strawman Specification for TCP Friendly (Reliable) Multicast Congestion Control (TFMCC), RM mailing list (Nov. 1998).
- 8) Byers, J., Frumin, M., Horn, G. and Luby, M.: FLID-DL: Congestion Control for Lay-

ered Multicast, NG2000, California, November, 2000, RM mailing list (Nov.2000). <http://www.cs.ucsb.edu/ngc2000/program136.ps>

- 9) Vicisano, L., Crowcroft, J. and Rizzo, L.: TCP-like Congestion Control for Layered Multicast Data Transfer, *IEEE INFOCOM '98*, San Francisco, USA, March/April, pp.996-1003 (1998).
- 10) Byers, J., Luby, M. and Mitzenmacher, M.: Fine-Grained Layered Multicast, *IEEE INFOCOM '01*, Anchorage, USA (Apr. 2001).
- 11) Whetten, B. and Conlan, J.: A Rate Based Congestion Control Scheme for Reliable Multicast, Technical Wite Paper, Global Cast Communications (Oct. 1998).
- 12) Bhattacharyya, S., Towsley, D. and Kurose, J.: The Loss Path Multiplicity Problem in Multicast Congestion Control, *IEEE INFOCOM '99*, New York, USA, March, pp.856-863 (1999).
- 13) Mathis, M., Semke, J., Mahdavi, J. and Ott, T.: The Macroscopic Behavior of the TCP Congestion Avoidance Algorithm, *ACM Computer Communication Review*, Vol.27, No.3, pp.67-82 (1997).
- 14) Padhye, J., Firoiu, B., Towsley, D. and Kurose, J.: Modeling TCP Throughput: A Simple Model and its Empirical Validation, *ACM SIGCOMM '98*, Vancouver, Canada, August/September, pp.303-314 (1998).
- 15) Yamamoto, M., Kurose, J.F., Towsley, D.F. and Ikeda, H.: A Delay Analysis of Sender-Initiated and Receiver-Initiated Reliable Multicast Protocols, *Proc. 1997 IEEE The Conference on Computer Communications (INFOCOM'97)*, 4C-4, Kobe (Apr. 1997).
- 16) Morimoto, Y. and Atumi, Y.: Improving the Efficiency of Reliable Multicast in Wireless Environment by Using Active Network Technology, *1st Int. Workshop on Active Network Technologies and Applications (ANTA)*, Tokyo (Mar. 2002).

(平成 17 年 11 月 21 日受付)

(平成 18 年 5 月 9 日採録)



山本 猛仁

平成 17 年大阪大学工学部通信工学科卒業．現在，同大学大学院情報科学研究科博士前期課程在学中．輻輳制御に関する研究に従事．



齋藤 健 (正会員)

平成 15 年大阪大学工学部通信工学科卒業。平成 17 年同大学大学院工学研究科博士前期課程修了。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科卒業。昭和 60 年同大学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。同大学助教授を経て、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 DiCoMo 優秀論文受賞。工学博士。IEEE, ACM, 電子情報通信学会各会員。

---