

# 無線メッシュネットワークにおける セッション分配方式の検討と評価

水上 剛宏

AP(Access Point)間をアドホックネットワークによって接続する無線メッシュネットワークに注目が集まっている。無線メッシュネットワークにおいてインターネットなど外部ネットワークと通信を行う際に、GW(Gateway)付近でボトルネックが発生するという課題がある。これを回避するため、トラフィックを複数のGWにセッション単位で分配する方式を提案する。

## Researches on the Session Distribution Method in Wireless Mesh Network and Its Evaluation

Takahiro Mizukami

Attention gathers in the radio mesh network connected between AP(Access Point) by an ad hoc network. When the Internet communicates with an outside network in a Wireless Mesh network, there is a problem that a bottleneck occurs in the vicinity of GW (Gateway). I propose by a method to distribute traffic between a session units in plural GW to evade this.

### 1. はじめに

無線 LAN は配線が不要であり、端末の移動や設置が容易という点から今後の普及が期待されている。無線 LAN の構築方法としてはインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 つの方法がある。インフラストラクチャモードは一般的に利用されている方式であり、AP(Access Point)間を有線によって接続し、端末は必ず AP を介して通信を行う。アドホックモードは電波の届く端末どうしで直接端末どうしの通信を行う。

アドホックモードの応用として直接電波の届かない端末に対し、途中の端末を中継することで通信を可能とするアドホックネットワークがある。しかし、アドホックネットワークはユーザの意図に反して端末を利用してしまふことや中継端末の移動により経路が安定しないことから研究段階に留まっている。

そこで近年では AP 間をアドホックネットワークによって接続する無線メッシュネット

ワークに注目が集まっている。AP と無線端末はインフラストラクチャモードであり、一般端末が接続できる。メッシュネットワークは AP 設置の自由度が向上し、容易に無線ネットワークのエリアを拡張することができる。AP が中継装置となるため、端末のリソースを勝手に利用してしまうことがなく、経路も比較的安定している。利用用途としては、公共無線ネットワーク、災害やイベント時における臨時ネットワーク、ローカルな地方へのブロードバンド提供などが期待されている。無線メッシュネットワークは様々な研究機関により試作運用が行われており、IEEE802.11s により標準化が進められている<sup>[8]</sup>。

無線メッシュネットワークを実運用しようとした場合、インターネットなど外部ネットワークと頻繁に通信を行うことが想定される。この時、有線との境界に設置される GW(Gateway)付近においてボトルネックが発生するという課題がある。また、端末の所属する AP から GW までのホップ数が多くなる

と通信スループットが大きく低下することが知られている。これを回避するため、無線メッシュネットワークと外部ネットワークの間に複数の GW を設置し、トラフィックをパケットごとに分配するパケット分配方式が検討されている<sup>[11]</sup>。しかし、パケット分配方式では TCP 通信においてパケット到着順序に揺らぎが生じ TCP 通信のスループットを低下させてしまう。そこで本稿ではトラフィックを複数の GW に対して、セッション単位で分配するセッション分配方式を提案する。シミュレーションの結果 TCP 通信のスループットが既存方式と比較して大幅に向上することを示した。

以下、2章で既存技術と課題について、3章で提案方式の説明をする。4章でシミュレーションによる評価を述べ、5章でまとめる。

## 2. 既存技術とその課題

無線メッシュネットワークにおける既存の GW 選択方法には複数の GW の中から最適な GW を 1 つだけ選択する単一 GW 選択方式と複数の GW を同時に選択する複数 GW 選択方式がある。

### 2.1 単一 GW 選択方式

単一 GW 選択方式の代表として AP が最もホップ数の少ない GW を選択する方式がある<sup>[9][10][11]</sup>。この方式では端末の分布が特定の GW 付近に集中してしまうと、その GW の帯域を使い切る一方で他の GW は帯域を余らせてしまうという課題がある。そこで端末の分布に対して効率的な GW の設置場所を選定することにより、スループットの向上を試みる方法がある<sup>[3]</sup>。しかし、実環境では GW の設置場所には制限があることが考えられ、効果が期待できない場合がある。

### 2.2 複数 GW 選択方式

単一 GW 選択方式における課題を解決するため、1つの AP が複数の GW を同時に利用し

トラフィックを分配する方式が検討されている。文献[11]ではパケット単位でトラフィックの分配を行っているためこの方式を以後パケット分配方式と呼ぶ。パケット分配方式の概要を図 1 に示す。AP は各 GW までのホップ数とトラフィックを元に各 GW のスループット期待値を計算し、各 GW に対する転送比率を決定する。AP が端末からパケットを受け取ると、シーケンス番号を付加し、転送比率に従って各 GW へパケットを分配し転送する。各 GW は MGW(MasterGateway)へ向けてパケットを転送し、外部ネットワークへ転送する。パケット集約時に MGW は異なる GW から転送されてきたパケットをバッファリングし、シーケンス番号を元に順序制御を行った後、外部ネットワークへ転送する。各 GW と MGW は有線で接続されているためこの部分はボトルネックにはなりにくい。外部からアクセスが開始される場合、MGW はパケットを受け取ると、無線メッシュネットワーク内の AP に対して各 GW への転送比率を求めるメッセージをフラッディングする。対象となる端末が配下に存在する AP は各 GW に対する転送比率を応答する。この応答を受けた MGW は転送比率に従って各 GW へパケットを分配し転送する。AP は異なる GW から転送されてきたパケットをバッファリングし、シーケンス番号を元に順序制御を行った後、端末へ転送する。この分配方式ではセッションに関係なくパケット単位で異なる GW を利用するため、MGW での集約時に同一セッション内のパケット到達順序に乱れが生じる。UDP では大きな問題が発生しないが、TCP の場合、パケット到着順序が乱れるとパケットロスが発生していなくてもロスが発生したと判断し TCP の輻輳制御が働く。この機能によりウィンドウサイズを小さくし通信効率を低下させてしまうという課題がある。

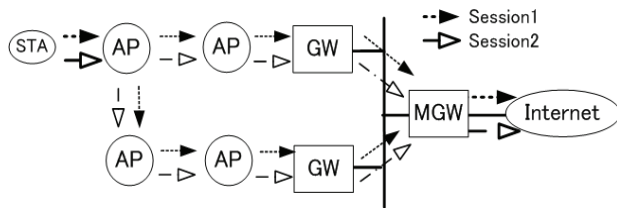


図 1：パケット分配方式の概要

また、パケットの転送遅延が異なる場合、転送遅延の小さい経路から転送されたパケットに待ちが生じ、結局スループットは転送遅延の大きい経路に大きく依存することになる。

### 3. 提案方式

パケット分配方式の課題を解決するためトラフィックの分配を送信元 IP アドレスやプロトコル番号、ポート番号などの通信識別子を元にセッション単位で行う。これにより MGW での集約時に同一セッション内でのパケット到達順序が乱れるのを避け、TCP の輻輳制御によるウィンドウサイズの低下を抑えることができる。セッション単位で分配を行うこの方式を以後、セッション分配方式と呼ぶ。

セッション分配方式の概要を図 2 に示す。GW は常に自身の周辺トラフィックを測定しており、各 GW は無線メッシュネットワーク内の AP に自身との間のホップ数、自身のトラフィック状況を知らせるためのメッセージを定期的にフラッディングする。ホップ数は各 AP を中継する毎にインクリメントしていく。このメッセージにより、各 AP はシステム内に複数存在する GW までのホップ数とその GW 周辺トラフィック状況を把握する。

内部の端末から外部ネットワークへ通信を行う場合、AP は配下端末からパケットを受け取ると、各 GW 付近のトラフィックとホップ数から各 GW のスループット期待値を計算し、その値が最も高い GW を最適な GW として 1 つ選択する。

AP はセッションと選択した GW の関係を記憶し、以後同一セッションのパケットは同一

の GW へ転送する。GW は受け取ったパケットを MGW へ転送する。MGW はセッションと転送元となる GW との関係を記憶し外部ネットワークへ転送する。逆方向からのパケットは MGW が記憶した内容に従って同一経路で宛先ノードまで転送する。このようにして同一セッションのパケットは同一の通信経路を通る。新たに別のセッションが開始される場合は、セッションごとにその時点での最適 GW が新たに選択される。

外部ネットワークから内部に通信が開始される場合、MGW がパケットを受信後、システム内の全 AP に対して最適な GW を求めるメッセージをフラッディングする。目的の端末が所属する AP は選択した最適な GW の IP アドレスを応答する。応答を受けた MGW はセッションと GW の関係を記憶することにより経路が確定する。

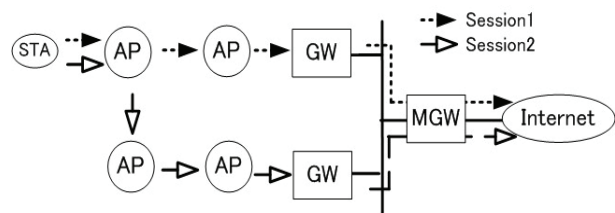


図 2：セッション分配方式の概要

### 4. シミュレーション

提案方式の有効性を示すためにネットワークシミュレータ ns-2(network simulator-2)を用いてシミュレーションを実施した。各方式を用いたシミュレーションを行うための改造を施した ns-2 を用い、パケット分配方式とセッション分配方式の比較評価を行った。

#### 4.1 シミュレータの実装

ns-2 は研究機関などで一般的に利用されているフリーソフトである。しかし、ns-2 はインフラストラクチャモードの機能が充実しておらず、そのままでは無線メッシュネットワークのシミュレーションを実施することができない。そこで、ns-2 に以下の改造を施し、シミュレータを構築した。ns-2 の IEEE802.11

機能実行モジュールにインフラストラクチャモードの機能(電波強度により AP を選択する機能, AP 離脱・参入機能)を追加した。また, 無線メッシュネットワークはインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 種類の無線インタフェースが必要となる。そこで各インタフェースを持つノードの内部モジュール間のインタフェースを ns-2 内で直接接続することにより実現した。GW 機能を有する AP はアドホックモードと有線の内部モジュール間のインタフェースどうしを直接接続して実現した。さらに, 2 章と 3 章で述べたパケット分配方式とセッション分配方式の機能を実装した。

#### 4.2 予備シミュレーション

AP が端末から受け取ったパケットを各 GW へ分配する際, パケット分配方式であれば GW への転送比率をどう決定すべきか, セッション分配方式であればどの GW を最適な GW にすべきか判断する方法が必要になる。例えば, ホップ数の少ない GW のトラフィック輻輳状態にある場合は帯域に余裕のある別の

表 1: シミュレーションパラメータ

電波到達距離	100m
AP 間の距離	80m
AP の台数	37 台
有線帯域	100Mbps
有線遅延	20ms
MAC プロトコル	IEEE802.11g
アドホックルーティング プロトコル	OLSR

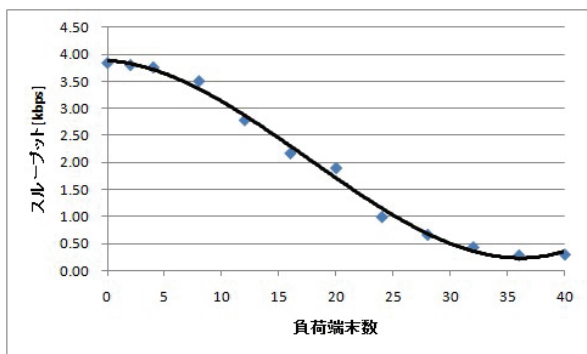


図 4: GW 周辺トラフィックと TCP スループットの関係(UDP 通信・3 ホップ)

GW を選択するのがよい場合も考えられる。しかし, この判断は困難で適切な方式が確立しているわけではない。文献[15][16]では TCP 通信におけるスループットの計算式を求める手法として, RTT(Round Trip Time)やパケットロス率などを利用する方法も提案されており, この手法をスループット期待値として利用する事も考えられる。しかし, 無線メッシュネットワークでは制御メッセージなどによるトラフィックが大きく影響するため, RTT やパケットロス率をリアルタイムに取得することは困難である。

そこで本稿では予備シミュレーションを実施し, AP と GW 間のホップ数と GW 周辺トラフィックをパラメータとし, TCP 通信におけるスループットの判別式を求めることとした。この判別式を元に各 GW のスループット期待値を算出し, GW の選択を行う。

判別式を導くために使用したシミュレーションパラメータを表 1 に, シミュレーションフィールドを図 3 に示す。

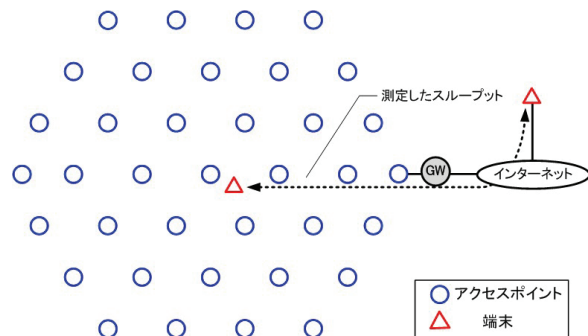


図 3: 予備シミュレーションフィールド

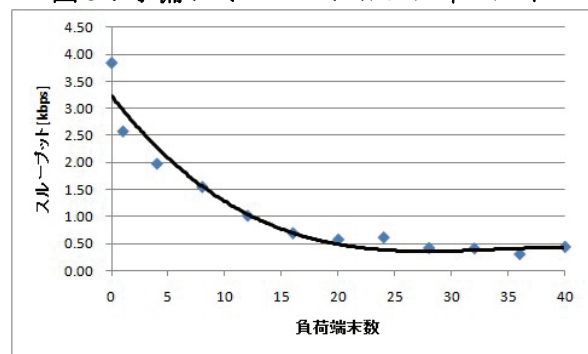


図 4: GW 周辺トラフィックと TCP スループットの関係(TCP 通信・3 ホップ)

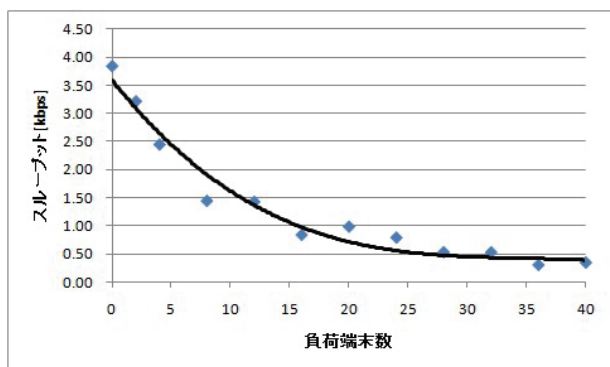


図 6 : GW 周辺トラフィックと TCP スループットの関係(UDP&TCP 通信・3 ホップ)

表 3 : スループット判別式(TCP 通信)

ホップ数	判別式
1	$y = -0.04x^3 + 5.1x^2 - 219x + 3776$
2	$y = -0.06x^3 + 7x^2 - 257x + 3620$
3	$y = -0.03x^3 + 4x^2 - 169x + 2633$
4	$y = -0.03x^3 + 3.1x^2 - 102x + 1013$
5	$y = -0.03x^3 + 3.7x^2 - 117x + 1045$
6	$y = -0.03x^3 + 2.9x^2 - 94.5x + 852$

AP の台数は 37 台とし、AP 間の距離は等間隔の 80m で近隣の AP が六角形を作るように配置した。外部のネットワークはインターネットを想定し、帯域を 100Mbps、遅延を 20ms とした。背景負荷を発生させるための端末を無線メッシュネットワーク内にランダムに設置した。背景負荷は全て外部ネットワークとの通信とした。背景負荷端末の台数を増加させていき、通信状況を変化させた。背景負荷用端末が発生する通信は UDP 通信の場合、TCP 通信の場合、UDP と TCP が混在する通信の 3 パターンにてホップ数を変化させシミュレーションを実施した。UDP の場合は VoIP を想定し、パケットサイズ 200、送信間隔 20ms とした。このように様々な環境下にてシミュレーションを実施することにより、限定的ではない評価が出来ると思った。予備シミュレーションでは GW を 1 台としたが、ホップ数と GW トラフィックの関係から判別式を作るには十分である。

図 4~6 に予備シミュレーションによって得られた特定端末の TCP スループットと負荷端

表 2 : スループット判別式(UDP 通信)

ホップ数	判別式
1	$y = 0.04x^3 - 2.9x^2 + 15.8x + 4005$
2	$y = 0.06x^3 - 4.2x^2 - 8.3x + 4012$
3	$y = 0.02x^3 - 0.3x^2 - 119x + 4.099$
4	$y = -0.02x^3 + 3.4x^2 - 195x + 3549$
5	$y = -0.02x^3 + 3.4x^2 - 187x + 3259$
6	$y = -0.02x^3 + 2.9x^2 - 167x + 3013$

表 4 : スループット判別式(UDP&TCP 通信)

ホップ数	判別式
1	$y = -0.03x^3 + 4.7x^2 - 226x + 4417$
2	$y = -0.03x^3 + 4.3x^2 - 200x + 3633$
3	$y = -0.04x^3 + 4.7x^2 - 200x + 3239$
4	$y = -0.05x^3 + 5.4x^2 - 182x + 1795$
5	$y = -0.03x^3 + 3.5x^2 - 122x + 1283$
6	$y = -0.03x^3 + 3.4x^2 - 114x + 1164$

末の関係を示す。GW と特定端末が所属する AP との間のホップ数が 3 の場合を例にとり示す(図 3 中の△印)。図 4 は背景負荷が全て UDP 通信の場合、図 5 は背景負荷が全て TCP 通信の場合、図 6 は UDP 通信と TCP 通信のセッション数が 1 対 1 で混在する場合である。

図中の値は 5 回のシミュレーション結果の平均値である。これらの結果から 3 次式の近似曲線を求め、判別式を導いた。このようにして得られた判別式を表 2~4 に示す。ここで x は負荷用端末台数、y はスループット期待値である。図 5 と図 6 の結果は同じようなグラフとなっている。これはセッション数が少なくても TCP 通信が 1 つでも含まれると GW の帯域を限界まで仕様してしまう事からこのような結果になったと考えられる。

以上の予備シミュレーションにより GW トラフィックとホップ数により TCP 通信のスループット期待値を判断する指標が求められた。以後、性能評価を行うシミュレーションでは、ここで得た判別式を使用する。即ち、パケッ

ト分配方式では各 GW への転送比率，セッション分配方式では GW の選択を決定する。

### 4.3 主シミュレーション

図 7 に示すようなシミュレーションフィールドにてパケット分配方式とセッション分配方式の比較評価を行った。GW は 3 台設置し，その上位に MGW を配置した。各 GW を接続する有線ネットワークは同一のネットワークアドレスを持つことを想定し，帯域を 100Mbps，遅延を  $20\mu s$  とした。予備シミュレーションと同様に，既に背景負荷となる通信が発生している状態で，無線メッシュネットワーク内における特定端末 1 台が外部に対し TCP 通信を開始するシナリオを作成した。特定端末の位置を図 7 の A 付近から I 付近に順次配置し，各位置においてスループットの測定を 5 回試行した。背景負荷となる通信は予備シミュレーションと同様に UDP 通信，TCP 通信，UDP と TCP が混在する通信の 3 パターンとした。負荷用端末台数を増加させ特定端末となる TCP 通信のスループット測定をパケット分配方式とセッション分配方式を適用した場合で行い平均値を比較した。

図 8，図 9 に背景負荷が UDP 通信の場合の両方式を比較した結果を示す。図中のプロットは実際に得られたスループットの値を示し，曲線はスループットの平均値である。図 8,9 のプロットに注目すると，セッション分配方式ではスループットに違いが生じやすい。これは特定端末の位置を変化させていることから GW までの距離が異なってくるためと考えられる。図 10、図 11 に背景負荷が全て TCP 通信の場合，UDP 通信と TCP 通信のセッション数が 1 対 1 で混在する場合シミュレーション結果をそれぞれ示す。ここでは見やすくするため平均値のみを同一のグラフに示した。

背景負荷用端末の条件がいずれの場合においても，セッション分配方式の方がパケット

分配方式に対して大幅に高いスループットを実現できている事がわかる。パケット分配方式では特に背景負荷用の端末台数が増加してくると高スループットを維持する事が難しい。これはトラフィックの増加により，順序不整合の発生が多くなる事が原因と考えられる。TCP 通信におけるスループットを維持するには 1 つのセッションを複数の経路に分配しないことが重要であることがわかる。

また，無線メッシュネットワーク全体の総合スループットを測定するため，図 7 のシミュレーションフィールドを用い，UDP と TCP が混在する通信状況にてシミュレーションを行った。図 12 にパケット分配方式，図 13 にセッション分配方式における総合スループットを示す。曲線は総合スループットの平均値を示したものである。パケット分配方式における総合スループットの平均値は約 4.4Mbps となり，セッション分配方式における総合スループットの平均値は約 18Mbps となった。セッション分配方式では端末数が増加するに従い総合スループットも高くなる。これは特定端末以外においても高スループットを維持することができるためと考えられる。このようにセッション分配方式は特定端末だけでなく，無線メッシュネットワーク内全体のスループットを大幅に向上させることができるといえる。

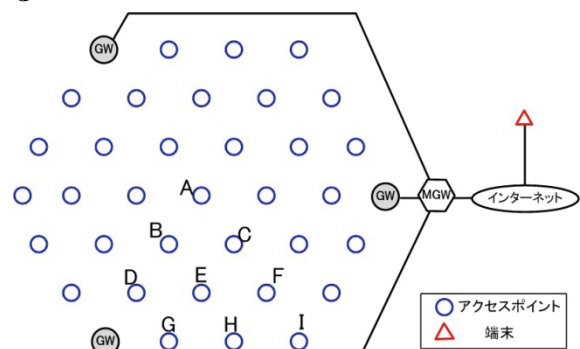


図 7：主シミュレーションフィールド

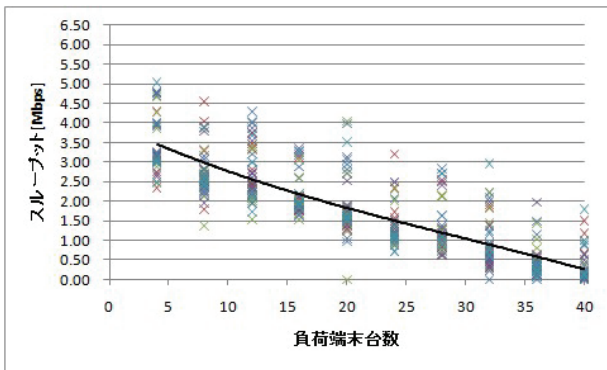


図 8 : パケット分配方式におけるスループット  
(背景負荷通信 : UDP)

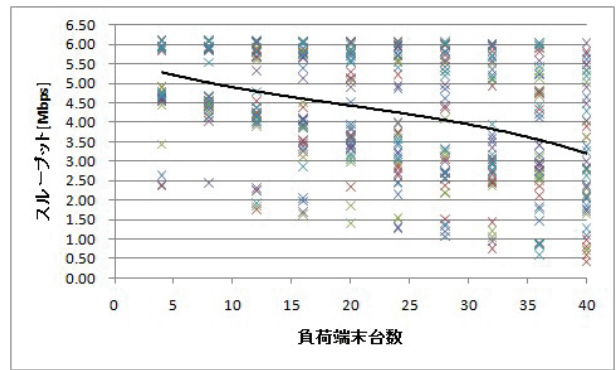


図 9 : セッション分配方式におけるスループット  
(背景負荷通信 : UDP)

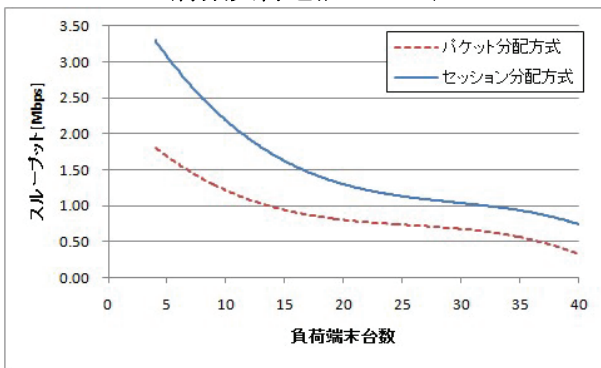


図 10 : TCP スループットの比較  
(背景負荷通信 : TCP)

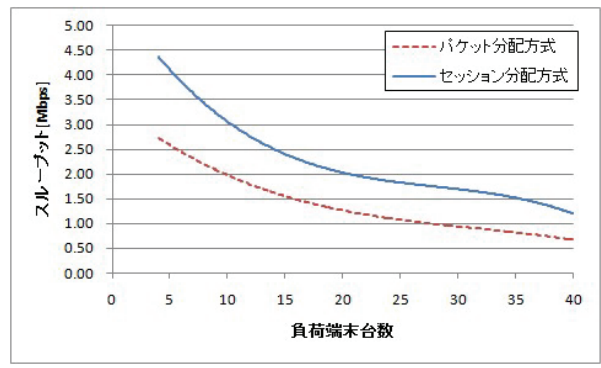


図 11 : TCP スループットの比較  
(背景負荷通信 : UDP&TCP)

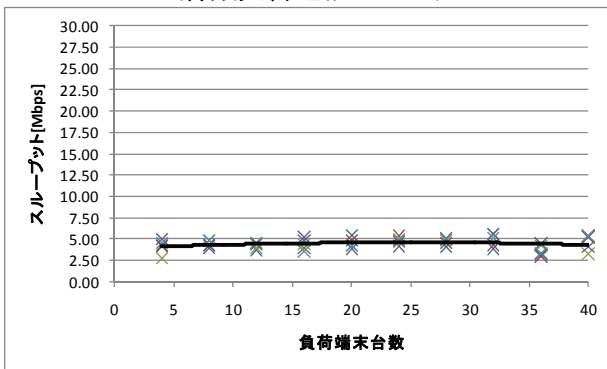


図 12 : パケット分配方式における  
総合スループット

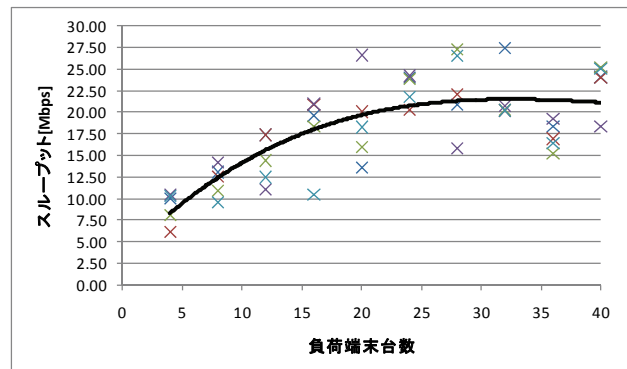


図 13 : セッション分配方式における  
総合スループット

#### 4.4 トラフィック公平性

セッション分配方式では、パケット分配方式よりも分配の単位が粗いため、内部に流れるトラフィックに偏りが生じてしまうことが考えられる。そこで無線メッシュネットワーク内部に流れるトラフィック分布の公平性を評価した。ここでの公平性は各 AP に流れる

トラフィックの量がどれほど公平かを示す。シミュレーションフィールドは主シミュレーションと同様に図 7 を利用し、発生させるトラフィックは UDP 通信と TCP 通信が混在する状況を想定した。この状態で、パケット分配方式とセッション分配方式を適用した場合の比較を行った。各 AP に流れるトラフィックの公平性の評価には以下の式を利用した<sup>[17]</sup>。

$$FI = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i)^2}$$

FI(Fairness Index)の値は 1 に近いほど公平性が高い。n は全 AP の台数、 $x_i$  は  $AP_i$  のトラフィックを示す。

図 14 にパケット分配方式とセッション分配方式における FI のグラフを示す。パケット分配方式における FI の平均値は約 0.37、セッション分配方式における FI の平均値は 0.21 となりパケット分配方式が優勢という結果が得られた。ここでの結果と 4.3 節のシミュレーション結果からスループットと公平性はトレードオフの関係にあると考えられる。そのためセッション分配方式ではパケット分配に比べ無線メッシュネットワーク内に偏りが生じやすいが、その代わりに大幅なスループット向上を得ているといえる。

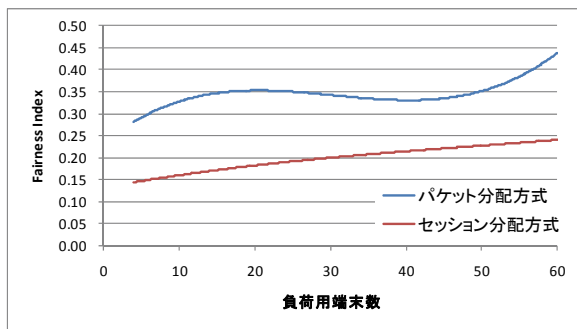


図 14 : 各分配方式における FI の比較

## 5. むすび

無線メッシュネットワーク内に GW を複数配置し、トラフィックをセッション単位で分配することで有線との境界にて発生するボトルネックを回避し、TCP 通信におけるスループットの低下を防ぐ方式を提案した。

シミュレーションによりパケット分配方式とセッション分配方式の比較評価を行った。

その結果、セッション分配方式はパケット分配方式に比べ公平性が低くなることは否めないが TCP 通信において高いスループットを実現できることがわかり、提案方式の有用性が証明された。

## 参考文献

- [1] 伊藤将志, 鹿間敏弘, 渡邊晃: 無線メッシュネットワーク” WAPL” の提案とシミュレーション評価, 情報処理学会論文誌, Vol.49, No.6, pp.-, Jun.2008
- [2] 伊藤将志, 鹿間敏弘, 渡邊晃: 無線メッシュネットワークにおけるゲートウェイ分散方式の提案と評価, DICOMO シンポジウム論文集, Vol.2008, No.1, pp.1873-1879, Jul.2008.
- [3] 野村洋平, 新田友里子, 田島滋人, 船曳信生, 中西透: 無線メッシュネットワークのアクセスポイント間通信での優先度制御に関する一検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.106, No.418, pp.9-12 (2006).
- [4] 大和田泰伯, 照井宏康, 間瀬憲一, 今井博英: マルチホップ無線 LAN の提案と実装, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.11, pp.2092-2102(2006).
- [5] Packethop: <http://www.packethop.com/>.
- [6] MetroMesh: <http://www.tropos.com/>.
- [7] MeshCruzer: <http://www.thinktube.com/>.
- [8] IEEE802.11: <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>.
- [9] Wakikawa, R., Malinen, J. T., Perkins, C. E., Nilsson, A. and Tuominen, A. J.: Global connectivity for IPv6 Mobile Ad Hoc Networks, draft-wakikawa-manet-globalv6-05 (2006).
- [10] Jelger, C., Noel, T. and Frey, A.: Gateway and address autoconfiguration for IPv6 ad hoc networks, draft-jelger-manet-gateway-autoconf-v6-02 (2004).
- [11] Ruffino, S. and Stupar, P.: Automatic configuration of IPv6 addresses for MANET with multiple, draft-ruffino-manet-autoconf-ultigw-03(2006).
- [12] Amir, Y., Danilov, C., Hilsdale, M. et al.: Fast Handoff for Seamless Wireless Mesh Networks, ACM MobiSys (2006).
- [13] Navda, V., Kashyap, A. and Das, S. R.: Design and evaluation of iMesh: an infrastructure mode wireless mesh network, World of Wireless Mobile and Multimedia Networks, pp.164-170 (2005).
- [14] Lakshmanan, S., Sundaresan, K. and Sivakumar, R.: On Multi-Gateway Association in Wireless Mesh Networks, WiMesh 2006; Second IEEE



Workshop on Wireless Mesh Networks, pp.64–730 (2006).

- [15] S. Floyd and K. Fall. Promoting the use of end-to-end congestion control in the internet. *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, 7:458–472, 1999.
- [16] J. Padhye, V. Firoiu, D. Towsley, and J. Kurose. Modeling tcp throughput: a simple model and its empirical validation. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 28:303–314, 1998.
- [17] Jain, R.: The art of computer systems performance analysis, *John Wiley Sons* (1991).