

# マルチホップマルチレートネットワークにおける 公平なフロー品質実現のための通信制御

藤井 聡佳<sup>1</sup> 村瀬 勉<sup>2</sup> 小口 正人<sup>1</sup>

## 概要:

マルチホップマルチレートネットワークでは, ノード間でトラヒックをリレーすることにより, 近隣のアクセスポイント (AP) から所望の目的地に通信が可能であるが, その QoS(例えばスループット) は, 各ユーザの接続先選択方法に大きく依存する. 例えば, 無線 LAN の特徴と関連して, マルチレート通信による通信品質劣化の問題や, マルチホップ通信におけるホップ数増加にともなう通信品質劣化の問題がある. また, マルチホップ通信でのトラヒック中継時, 中継ノードは転送トラヒックだけでなく自身のトラヒックも送信する可能性が高いことや, 中継ノードに接続するユーザは, 状況に応じた制約内で接続先を選択可能であることが特徴として挙げられる. しかし, マルチホップ通信でのスケジューリングに着目した制御と, マルチレート通信における特性を考慮した接続先選択制御を同時に考慮した適切な接続先選択と, そのときのスループットとの関係は明らかになっていない. そこで本稿では, マルチホップマルチレートネットワークにおいて, 各ユーザが中継ノードの設定するスケジューリングに応じた適切な接続先選択をした場合の, スループットへの影響を評価した.

## Performance evaluation on terminal association to relay node with packet scheduling in multi-hop multi-rate network

SATOKA FUJII<sup>1</sup> TUTOMU MURASE<sup>2</sup> MASATO OGUCHI<sup>1</sup>

### 1. はじめに

近年, テザリングやモバイルルータなどの移動無線ノードの普及および Wi-Fi ダイレクトを用いた仮想マルチホップ網の構成技術などにより, マルチホップネットワークの実現性が高まってきた. 移動端末を用いたマルチホップネットワークでは, ノード間でトラヒックをリレーすることにより, 近隣のアクセスポイント (AP) から所望の目的地に通信が可能であるが, その QoS(例えばスループット) は, AP までの経路における接続先選択方法に大きく依存する. 接続先選択において, 無線 LAN の特徴と関連して二つの問題が挙げられる. 一つは, AP からの距離が遠くなるにつれてより低伝送レートでの通信となり, 通信性能

が劣化してしまうことである. これは無線 LAN において, ビットエラーレートあるいはフレームエラーレートを適切な値に維持するために複数の伝送レートを規定し, 高伝送レートを維持できない劣悪な電波環境下では低伝送レートへ切り替え, 反対に良好な電波環境下では高伝送レートへ切り替えるといったマルチレート制御が行われるためである. もう一つは, マルチホップ通信において, ホップ数増加にともなうスループットが大幅に低下してしまうことである. これは, リンク容量がリレー時に送信および受信のために 2 度使用されることが要因である. 例えば, エッジノードにおいては, 端末数  $n$  が増加し, リレー先が 1 カ所するとき, uplink 方向のスループットは  $O(1/n)$  で減少することが示されている [1].

また, マルチホップマルチレートネットワークにおいては, 次のような条件を考慮する必要がある. まず, マルチホップ通信でのトラヒック中継時, 中継ノードは転送トラヒックだけでなく自身のトラヒックも送信する可能性が高

<sup>1</sup> お茶の水女子大学  
Otsuka 2-1-1, Bunkyo-Ku, Tokyo 112-8610, Japan

<sup>2</sup> NEC  
1753 Shimonumabe, Nakahara-ku, Kawasaki, Kanagawa  
211-8666, Japan

い。さらに、中継ノードに接続するユーザは、状況に応じた制約内で接続先を選択することが可能である。このような条件において、マルチホップ通信でのスケジューリングに着目した制御 [2] [3] や、マルチレート通信における特性を考慮した接続先選択制御 [4] に関する研究がそれぞれ行われてきたが、これらを同時に考慮した適切な接続先選択と、そのときのスループットとの関係は明らかになっていない。そこで本稿では、マルチホップマルチレートネットワークにおいて、各ユーザが中継ノードの設定するスケジューリングに応じた適切な接続先選択をした場合の、スループットへの影響を評価する。

以下、2章でマルチホップマルチレートネットワークに関する従来研究での制御について述べ、3章ではマルチレート通信の特性とスケジューリングを考慮したモデルの評価について述べる。最後に、4章でまとめを述べる。

## 2. 従来研究

マルチホップあるいはメッシュネットワークにおける AP 選択方法は数多く検討されている [5] [6] [7]。さらに、マルチホップ無線ネットワークにおける制御として、中継ノードにおいて異なるフローのトラヒックに重みを付けて送出するスケジューリング技術も既に知られている。[3]では、自身のアップリンクトラヒックのパケットを一つ送信するたびに転送アップリンクトラヒックのパケットを一つ転送することで、基地局からのホップ数の異なるユーザ間のスループット差異を解消するスケジューリング方法を提案しているが、マルチレート通信における特性には言及していない。一方、マルチレート通信における特性を考慮した接続先選択制御として、[4]では、無線メッシュ網に接続するユーザが目的のサーバに到達するまでの経路上のマルチレート通信性能を考慮することで、最大のスループットを得られる AP 選択手法を提案しているが、スケジューリング方法には言及していない。しかしながら、これらスケジューリング方法と接続先選択制御を組み合わせた場合の通信特性は、より複雑なものとなる。なぜなら、スケジューリング方法により異なる接続先を選択する場合があります、それにともなって合計リンク容量が変化するという依存関係が存在するからである。

そこで本稿では、マルチホップマルチレートネットワークにおいて、これらを同時に考慮することで、各ユーザが中継ノードの設定するスケジューリングに応じた適切な接続先選択を明らかにし、そのときのスループットへの影響を評価する。

## 3. 接続先選択とスループット

### 3.1 マルチレートと Performance anomaly

無線 LAN では、フレーム受信状況に応じて適切な伝送を行うため、可変の伝送レートが用いられる。低伝送レートでは、高伝送レートと比較してフレーム送信に時間がかかる。しかし、CSMA/CA では、送信機はどの伝送レートに対しても均等である。そのため、既存の高伝送レート端末に対して低伝送レート端末が加わると、低伝送レート端末の送信終了を待つ時間が長くなり、高伝送レート端末および合計スループットが著しく低下する Performance anomaly と呼ばれる状況が生じる [8]。逆に、既存の低伝送レート端末に対して、高伝送レート端末が加わると、合計スループットが向上するスループット押し上げ効果と呼ばれる状況が生じる。Performance anomaly を考慮した、送信端末数  $n$  台、1 ホップの場合のマルチレートの端末 1 台あたりのスループットは、各端末の伝送レート  $v_i$  の調和平均  $\frac{1}{\sum_{i=1}^n v_i}$  によって、およそその値を求めることができる [4]。

### 3.2 評価モデル

本稿では、マルチホップマルチレートネットワークのユースケースとして図 1 のような状況を仮定する。例えば、C はあるカフェにあり、A、B もあまり離れていない場所にいる。C はカフェで公衆無線 LAN に接続可能な契約をしているが、A と B は契約していないために、この無線 LAN に直接接続することができない。しかし、A、B、C の 3 人は互いにマルチホップでの接続が可能であり、例えば A は、C を経由することで無線 LAN に接続可能となる。ここで A から C までの経路は、1 ホップあるいは、B を経由する 2 ホップのいずれかが考えられる。しかし前述のとおり、距離が離れると通信性能が劣化してしまうことから、A は、近くで高速な通信あるいは、遠くで低速な通信のいずれかを選択する必要がある。

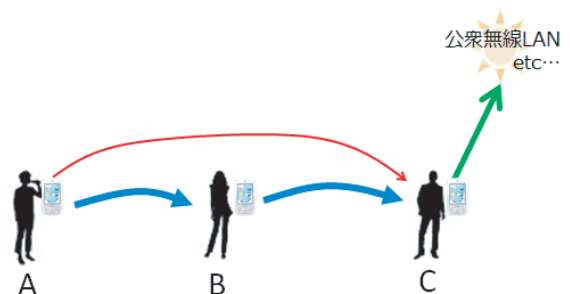


図 1 マルチホップマルチレートネットワークのユースケース

このような通信形態、すなわちマルチホップマルチレートネットワークにおける通信性能を図 2 に示すトポロジで評価した。図の点線部は無線 LAN 接続、実線部は有線接

続を指す．無線 LAN 内の全てのノードは，お互いに相手をキャリアセンスドメインに含む．また，全てのノードは同じチャネルを用いて通信を行う． $n \geq 1$  台の TE(テナントと呼ぶ) から中継ノード (オーナーと呼ぶ) と AP1 を経由し，有線受信端末へ向けて片方向の飽和 UDP フローを流すと同時に，オーナーも同方向に同様に自身のトラフィックを流す．ここで，テナントはオーナーに到達するまでのホップ数として 1 または 2 のいずれかを選択することができる．1 ホップの場合は距離が遠いと想定して低伝送レート，2 ホップの場合は距離が近いと想定して高伝送レートとし，オーナーと AP 間も高伝送レートで通信可能である．

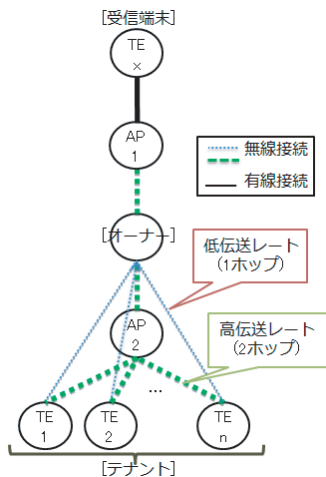


図 2 マルチホップマルチレートのトポロジ

前節で述べたように，異なる伝送レートが混在すると合計スループットが変動してしまうことから，オーナーは，自身のトラフィックおよび転送トラフィックに対してスケジューリングを行うことにより，ネットワーク内のスループットを制御する．スケジューリング方法を図 3 に示す．オーナー中継ノードにおいて受信したトラフィックを分類し，それぞれ重み付けして送信インタフェースに送るものとする．接続先選択結果や時間などによらず，オーナーは固定的なスケジューリングを決め，公開する．これに対して，テナントは次に述べる目的に応じた接続のみを行うものとする．接続のパターンには，全テナントが 1 ホップ接続，全テナントが 2 ホップ接続，異ホップ数混合接続がある．また，目的にもいくつかの候補があるが，ここでは，合計スループット ( $A$ ) 最大化，オーナーのスループット ( $O$ ) 最大化，テナントのスループット ( $T$ ) 最大化の三つを取り上げ，これに応じた最適な接続方法を明らかにする．

次に，スループット算出方法について説明する．本稿では，接続先選択およびスケジューリング設定によるスループット推移の影響のみを調査するため，先に述べた調和平均式を用いて数値計算による評価を行う．本計算はコリジョンを考慮していないため，算出スループットは実機実験やシミュレーションよりも高くなるが，それほどの誤差

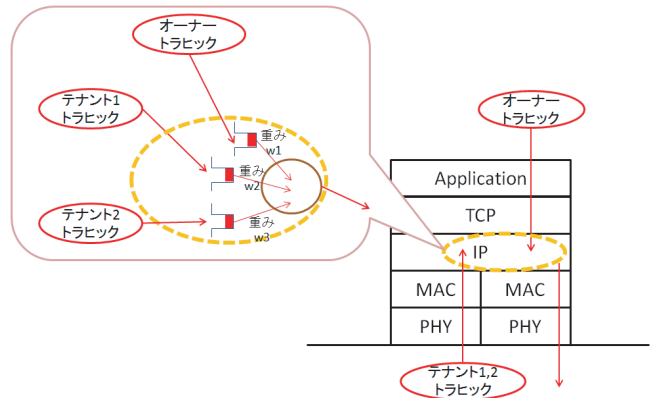


図 3 スケジューリング方法

は出ない．各テナント-オーナー間の伝送レートを  $v_{to}$ ，各テナント-AP2 間の伝送レートを  $v_{ta}$ ，AP2-オーナー間の伝送レートを  $v_{ao}$ ，オーナー-AP1 間の伝送レートを  $v_{oa}$ ， $n$  台のうち 1 ホップ接続のテナントの台数が  $s$ ，2 ホップ接続のテナントの台数が  $t$  のとき，合計スループット  $A$  を次式により求める．

$$A = \begin{cases} \frac{1}{s \cdot \frac{1}{v_{to}} + t \cdot \frac{1}{v_{ta}} + \frac{1}{v_{ao}} + \frac{1}{v_{oa}}} & (t \neq 0) \\ \frac{1}{s \cdot \frac{1}{v_{to}} + t \cdot \frac{1}{v_{ta}} + \frac{1}{v_{oa}}} & (t = 0) \end{cases}$$

ここで  $A$  の特性について述べる．高伝送レートと低伝送レートのレート差が大きくないときには，Performance anomaly よりもマルチホップ通信によるスループット低下影響が大きいため，全てのテナントが 2 ホップ接続することにより， $A$  の値を最大にすることができる．

次に，スケジューリングの重み設定と，そのときのスループット算出方法について説明する．テナントのスループット総量を規制するようなスケジューリングとして

$$\begin{aligned} & \text{オーナーの重み } W_o \cdot K \\ & = 1 \text{ ホップ低伝送レートテナントの重み合計} \\ & (W_{to_1} + W_{to_2} + \dots + W_{to_s}) \cdot p \\ & = 2 \text{ ホップ高伝送レートテナントの重み合計} \\ & (W_{ta_1} + W_{ta_2} + \dots + W_{ta_t}) \cdot (1 - p) \end{aligned}$$

と定める．ただし， $0 < p < 1$  とし，同伝送レートテナントの重みはすべて等しいものとする． $K$  を変化させることで，合計スループットにおけるオーナーとテナント間の重み付け比率を変化させることができる．また， $p$  を変化させることで，1 ホップテナントと 2 ホップテナント間の重み付け比率を変化させることができる．このときのオーナーのスループット  $O$  を次式により求める．

$$O = \begin{cases} \frac{A}{K(\frac{1}{K} + \frac{1}{1-p})} & (s=0) \\ \frac{A}{K(\frac{1}{K} + \frac{1}{p} + \frac{1}{1-p})} & (s, t \neq 0) \\ \frac{A}{K(\frac{1}{K} + \frac{1}{p})} & (t=0) \end{cases}$$

ここで  $O$  の特性について述べる．テナントのスループット総量を規制するようなスケジューリングにおいては， $p$  の値を大きくして1ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが1ホップ接続することで， $O$  の値を最大にすることができる．

また，このときの1ホップテナントのスループット  $T_1$  および2ホップテナントのスループット  $T_2$  は，次式により求める．

$$T_1 = O \cdot \frac{K}{p} \cdot \frac{1}{s}$$

$$T_2 = O \cdot \frac{K}{1-p} \cdot \frac{1}{t}$$

ここで  $T_1$  および  $T_2$  の特性について述べる． $p$  の値を小さくして2ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが1ホップ接続することで， $T_1$  の値を最大にすることができる．反対に， $p$  の値を大きくして1ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが2ホップ接続することで， $T_2$  の値を最大にすることができる．

### 3.3 評価結果

前節の評価モデルにおいて，テナント-オーナー間の距離は10m，テナント-AP2間およびAP2-オーナー間の距離は5mと想定し，[9]で用いられている数値より，低伝送レートには24Mbps，高伝送レートには54Mbpsを用いて評価を行った ( $v_{to} = 24$ ， $v_{ta} = 54$ ， $v_{ao} = 54$ ， $v_{oa} = 54$ )．また，オーナーのスループットをある程度確保するため， $K = 0.5$ とした．このときの合計スループットを図4に表す．ここでは，制御目的に沿った接続方法(後述)と，制御目的にかかわらず全テナントが同じホップ数の接続方法でのスループットを求めている．全テナント1ホップ接続の場合の値を実線，全テナント2ホップ接続の場合の値を点線で示している(図5-9も同様)．ホップ数混在の接続方法で最大値をとることはないため，ここではプロットしていない．高伝送レートと低伝送レートのレート差が大きくないときには，Performance anomalyよりもマルチホップ通信によるスループット低下影響が大きいため，全てのテナントが2ホップ接続することにより， $A$ の値を最大にすることができる．そのとき，1ホップの場合に比べて約1.75倍のスループットを得ることがある．また，テナント数が多いほど，接続方法によるスループットの差が大きい．

このときのオーナーのスループットを図5に表す． $p$ の

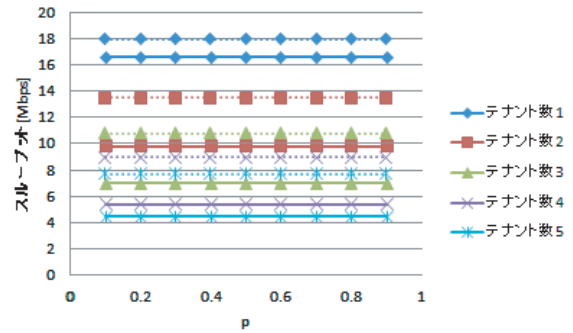


図4 合計スループット

値を大きくして1ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが1ホップ接続することで， $O$ の値を最大にすることができる．そのとき，2ホップの約3.5倍のスループットを得ることがある．反対に， $p$ の値を小さくして2ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが2ホップ接続することで， $O$ の値を最大にすることができる．また，テナント数が少ないほど，接続方法によるスループットの差が大きい．

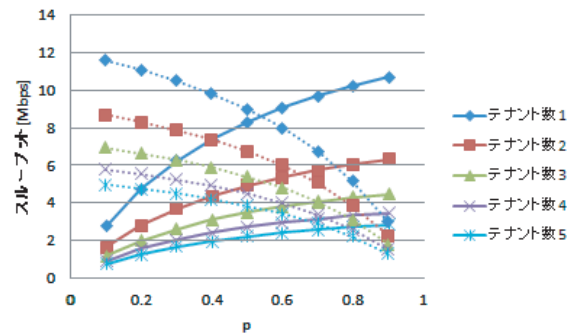


図5 オーナーのスループット

このときのテナントのスループットを図6に表す． $p$ の値を小さくして2ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが1ホップ接続することで， $T_1$ の値を最大にすることができる．反対に， $p$ の値を大きくして1ホップテナントのスループットを抑制するときには，全テナントが2ホップ接続することで， $T_2$ の値を最大にすることができる．また，テナント数が少ないほど，接続方法によるスループットの差が大きく，テナント数が増えると，接続方法によるスループットの差はほぼない．

ここで図4-6について， $n = 2$ の場合の値を取り出したグラフを図7-9に示す．合計スループットを最大化する接続方法を黄色の太線で，オーナーのスループットを最大化する接続方法を緑色の太線で，テナントのスループットを最大化する接続方法を青色の太線で表している．

図8および図9において， $0.4 \leq p \leq 0.6$ の範囲では，テナントが2ホップでの接続をすることで，オーナーおよびテナントのいずれのスループットも最大化できる．太線が垂直にありしている箇所では，全テナント1ホップの場合と

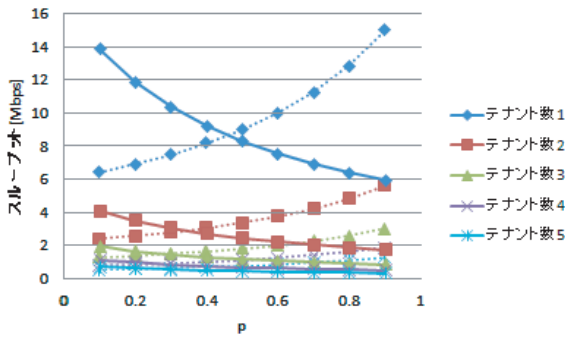


図 6 テナントのスループット

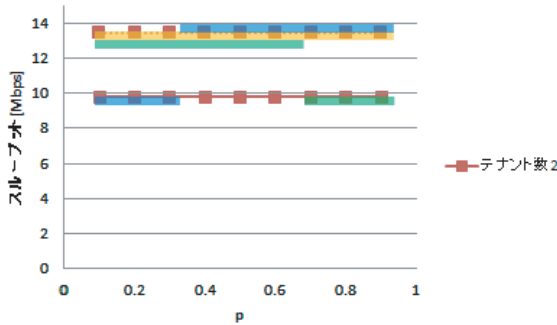


図 7 n=2 のときの合計スループット

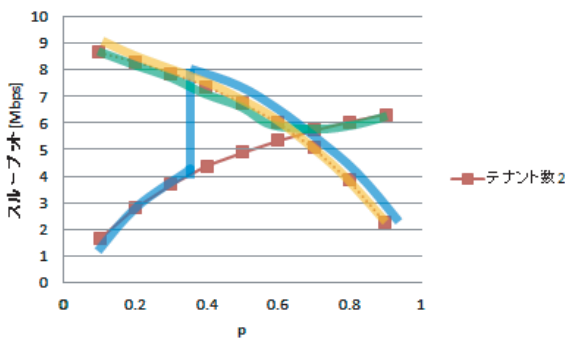


図 8 n=2 のときのオーナーのスループット

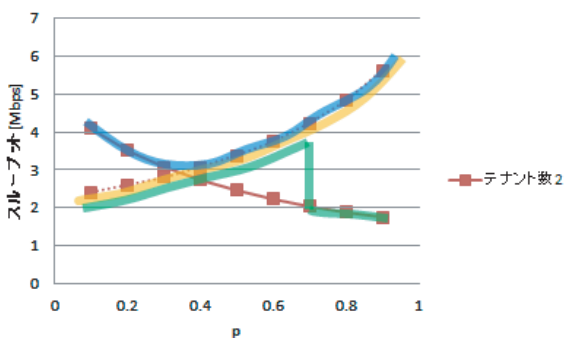


図 9 n=2 のときのテナントのスループット

全テナント 2 ホップの場合のスループットが等しくなる．  
 一般に，全テナント 1 ホップの場合の合計スループットを  $A_1$ ，全テナント 2 ホップの場合のスループットを  $A_2$  とすると，接続方法によらずテナントのスループットの値が等しくなる  $p_o$ (図 8 における実線と点線の交点) および  $p_t$ (図 9 における実線と点線の交点) は

$$p_o = \frac{-(A_2 + A_1)K + (A_2 - A_1)}{2(A_2 - A_1)} \pm \frac{\sqrt{(A_2 + A_1)^2 K^2 + (A_2 - A_1)^2 (2K + 1)}}{2(A_2 - A_1)}$$

$$p_t = \frac{(A_1 \cdot t - A_2 \cdot s)K + A_1 \cdot t}{A_2 \cdot s + A_1 \cdot t}$$

によって求まる．したがって， $p_t$  の値はオーナーの重み付け  $K$  に依存し，たとえ  $p$  の値が同じであっても，テナントが取るべき接続方法が異なる場合があり，これを図 10 に示す．縦軸は，(全テナント 2 ホップの場合のテナントスループット) - (全テナント 1 ホップの場合のテナントスループット) の値をとっている．例えば， $p = 0.3$  のとき， $K = 2$  であれば，全テナントが 2 ホップの通信を行うことで，テナントは最大スループットを得るが， $K = 0.5$  であれば，全テナントが 1 ホップの通信を行うことで，テナントは最大スループットを得る．また， $p = p_t$  においては，テナントはいずれの接続をとっても得られるスループットは等しいが，反対に，このときのオーナーのスループット差は最大となる．よって，オーナーの重み付け  $K$  を定めると，目的関数ごとに最適なテナントの重み付け  $p$  も一意に定まる．

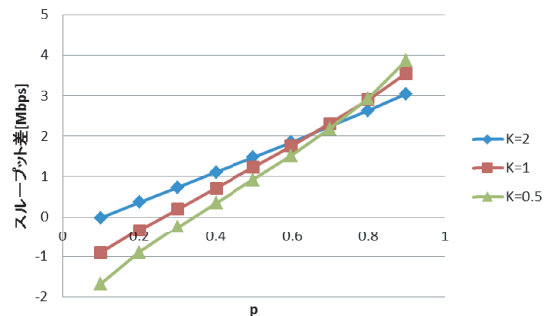


図 10 全テナント 2 ホップの場合と 1 ホップの場合のテナントのスループット差

#### 4. まとめ

複数のモバイル端末やモバイルルータがマルチホップネットワークを構成し，伝送レートが異なり，なおかつ経路ノード段数も異なる複数の経路が可能であるネットワークにおいて，中継ノード(オーナー)が TE(テナント)のトラフィックおよび自身の送信トラフィックに対して，あるスケジューリングを決める．このスケジューリングに応じて，合計スループット，オーナーのスループット，テナントのスループットのそれぞれの値を最大にすることを目的とするとき，適切なテナントの接続方法を明らかにした．

合計スループットを最大にするためには，全テナントがオーナーまで 2 ホップで接続するのが良く，1 ホップの場合と比較して 1.75 倍のスループットを得られることがあ

る。また、オーナーのスループットを最大にするためには、1ホップのテナント全体のスループットを抑制するスケジューリングでは、全テナントが1ホップで接続するのが良く、2ホップの場合と比較して3.5倍のスループットを得られることがある。逆に、テナントのスループットを最大にするためには、1ホップのテナント全体のスループットを抑制するスケジューリングでは、全テナントが2ホップで接続するのが良く、1ホップの場合と比較して2.5倍のスループットを得られることがある。これにより、スケジューリングのパラメータがある値の範囲においては、全テナントが2ホップで接続することで、上記3種のスループットいずれも最大値をとることが可能である。

とくに、スケジューリングにおいて、オーナーの重み付けを変化させると、たとえテナントの重み付けを変化させずとも、テナントがとるべき接続方法が異なることより、オーナーの重み付けを定めると、目的ごとに最適なテナントの重み付けも一意に定まることを示した。

#### 参考文献

- [1] Jun, J. and Sichertiu, M.L.: The Nominal Capacity of Wireless Mesh Networks, IEEE Wireless Communications, Vol.10, No.5, pp.8-14 (2003).
- [2] 泉川晴紀, 杉山敬三, 松本修一: マルチホップ無線ネットワークにおけるユーザ間の公平性を考慮したスケジューリング手法, 電子情報通信学会論文誌, Vol.J89-B, No.6, pp.897-908 (2006) .
- [3] Jun, J. and Sichertiu, M.L.: Fairness and QoS in Multi-hop Wireless Networks, IEEE VTC, Vol.5, pp.2936-2940 (2003).
- [4] 三木富美枝, 野林大起, 福田豊, 池永全志: 無線メッシュ網における経路特性を考慮した AP 選択手法, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2009-158, pp.85-90 (2010) .
- [5] Luo, L., Liu, H., Wu, M. and Li, D.: End-to-end performance aware association mechanism for wireless municipal mesh networks, Computer Communications, Vol.31, No.8, pp.1602-1614 (2008).
- [6] Gong, H., Nahm, K. and Kim, J.: Distributed fair access point selection for multi-rate IEEE 802.11 WLANs, IEEE TRANS. INF. & SYST., Vol.E91-D, No.4, pp.1193-1196 (2008).
- [7] Couto, D., Aguayo, D., Bicket, J. and Morris, R.: A High-Throughput Path Metric for Multi-Hop Wireless Routing, Proc. ACM/IEEE MOBICOM ' 03, pp.14-19 (2003).
- [8] Heusse, M., Rousseau, F., Berger-Sabbatel, G. and Duda, A.: Performance anomaly of 802.11b, Proc. of IEEE Inforcom, vol.2, pp.836-843 (2003).
- [9] 宮田純子, 村瀬勉, 山岡克式: ユーザ協力によりユーザ QoS とシステム最適を実現するアクセスポイント選択法の特性解析, 電子情報通信学会技術研究報告, IN2011-49, pp.23-28 (2011) .