

無線メッシュネットワークの通信品質を向上させる  
アクセスポイント選択方式の検討

083430029

樋口 豊章

# 目次

概要	ii
1 はじめに	1
2 端末のネットワーク参入方法	3
2.1 無線メッシュネットワーク .....	3
2.2 端末の参入 .....	3
2.3 既存の解決方法 .....	5
3 提案方式	6
3.1 提案システムの概要と構成 .....	6
3.2 提案システムの動作 .....	6
4 評価	8
4.1 ns-2 による WAPL の実現 .....	8
4.2 ns-2 による提案方式の実現 .....	8
4.3 シミュレーション環境の構築 .....	9
4.4 端末間におけるスループットの比較 .....	10
5 むすび	13
謝辞	14
参考文献	15
研究業績	17

## 概要

無線 LAN を通信インフラとして用いるサービスが注目されている。しかし、既存の無線 LAN のアクセスポイント (AP) 間 は有線で接続されることが一般的であり、AP の設置に多大なコストを要する。この問題の解決策として、無線メッシュネットワークがある。本論文では、無線メッシュネットワークにおいて AP がアドホックネットワーク側の通信量を把握し、そのトラフィックに応じてネットワークに新規参入する端末、又は移動する端末に適切な AP を選択させることにより、ネットワークの通信品質を向上させる方法を提案する。また、シミュレーションにて提案方式がネットワーク全体のスループットを改善できる事を示した。

## 1 はじめに

近年、ノートパソコンや PDA といった情報端末だけではなく、携帯電話やゲーム機にも WiFi の技術が用いられるなど、無線 LAN を通信インフラとして用いるサービスが注目されている。しかし、無線 LAN の AP (Access Point) 間は、有線で接続されることが一般的であり、AP の設置場所が制限されたり、配線に多大なコストを要する。

この問題の解決策として、無線 LAN の AP 間をアドホックネットワークで接続する無線メッシュネットワークが提案されている。無線メッシュネットワークにおける端末/AP 間の通信はインフラストラクチャモードのため、既存の端末が容易にネットワークに参加することが可能である。そのため、イベントや災害時における臨時的、或いは有線の維持費を捻出できない土地における通信インフラとして運用が期待されている。

無線メッシュネットワークは、様々な研究機関で研究され、IEEE802.11 Task Group S(IEEE802.11s) [10]において標準化が進められている。しかし、多くの無線メッシュネットワークでは AP 間の通信は同一チャネル上でマルチホップ通信を行うため、パケットの衝突がおきやすく、スループットが低下しやすいなどの課題がある。

スループットの低下を避ける既存の研究として、ビジートーンと呼ばれる単一周波数を用いてパケットの衝突を回避する研究 [1] [2]、混雑している AP への接続を回避することによりパケットが衝突する可能性を低減させる研究 [3] [4]などがある。

文献[1] [2]は、各ノードが RTS/CTS を発する際にビジートーンを発信し、ビジートーンを受信したノードが RTS/CTS の発信を控えることで衝突を回避する。ビジートーンは、RTS/CTS と異なり単一周波数における信号なので、RTS/CTS より素早く受信処理が行えるという特徴がある。しかし、ビジートーンを用いるには新たなインタフェースが必要であったり、MAC プロトコルを変更する必要がある。

文献[3] [4]は、AP がビーコン信号やプローブ応答信号に自身の通信状況の情報を付加し、最適な AP を端末を選択させる。しかし、既存の端末に改造を加えなければシステムを利用できないという課題がある。

本論文では、無線メッシュネットワークにおいて、ネットワーク全体の通信品質向上のため、AP の輻輳を改善する方法について提案する。通信品質を向上させることで、イベントや災害時など帯域の混雑が予想される環境でも、より多くの人が、より快適にネットワークを利用できるようにする事を目的とする。

具体的には、AP が通信量に応じてプローブ応答の電波強度を調節することにより、ネットワークに新規参入する端末や移動してきた端末が、負荷の少ない AP を選択することが可能となる。提案方式では、AP が自身の輻輳状態に応じてプローブ応答の電波強度を調整し、端末が輻輳している AP に可能な限り接続しないようにする。この方法により、AP の輻輳状態を考慮して接続関係を確立することができ、ネットワークのスループットの低下を防

ることができる。提案方式は端末に機能を追加する必要がないという利点がある。

WAPL (Wireless Access Point Link) を用いて ns-2 によるシミュレーションを行い、スループットが改善されることを示した。また、提案方式は WAPL だけではなく、一般の無線メッシュネットワークに適用可能である。

以下、2 章では既存技術とその課題について明らかにする。3 章では提案システムについて説明し、4 章ではシミュレーションによる評価と考察について述べ、最後に 5 章でまとめる。

## 2 端末のネットワーク参入方法

### 2.1 無線メッシュネットワーク

無線 LAN の通信方式には、インフラストラクチャモードとアドホックモードがある。

インフラストラクチャモードは、AP を中継点として各端末が通信を行う通信方式で、一般的に利用されている。しかし、AP 間は有線で接続されているため、AP の設置場所が制限されたり、配線に多大なコストを要する。

アドホックモードは、中継装置を介さず各端末が直接通信を行う通信方式である。電波が直接届かない端末に対しては、バケツリレーのように他の端末を中継することで通信を行うアドホックネットワークを構築することにより通信が可能である。全ての端末間の通信が無線で行われるため、配線コストは不要だが、以下の理由から、まだ一般に普及していない。すなわち、ネットワークに参加する全ての端末が、同一のアドホックネットワークの実現方式を実装している必要がある事や、他者の通信を中継する事により、自らの意図とは別にバッテリーを消耗してしまう事などの理由が挙げられる。

インフラストラクチャモードとアドホックネットワークの利点を組み合わせたものとして、無線メッシュネットワークが提案されている。無線メッシュネットワークは、図 1 に示すように無線 LAN の AP 間をアドホックネットワークで接続したものである。既存の AP と同様に端末/AP 間の通信はインフラストラクチャモードで行うため、既存の端末が容易にネットワークに参加することができる。無線メッシュネットワークでは、インフラストラクチャモード側は同一のネットワークアドレスを用い、端末からは全体で LAN を形成しているように見える。従って、端末が無線メッシュネットワーク内を移動しても IP アドレスが変化することはない。

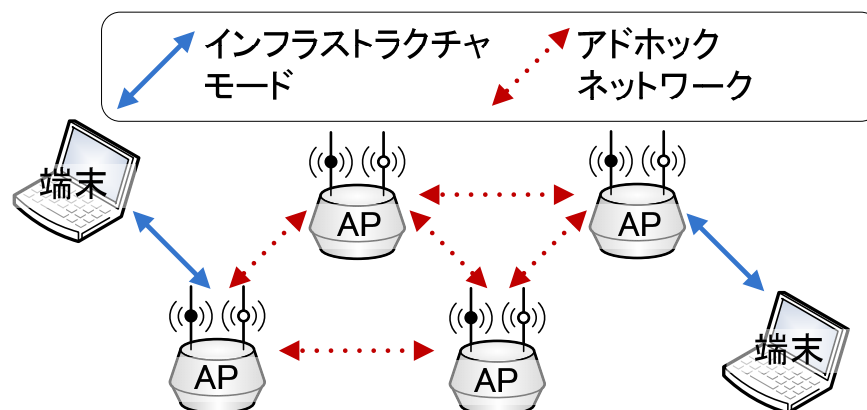


図 1：無線メッシュネットワーク

### 2.2 端末の参入

図 1 に、端末がネットワークに参入する際の AP と端末の動作のシーケンス図を示す。

IEEE802.11 では、一般的に端末が AP を認識するためにアクティブスキャンが行われて

いる。アクティブスキャンとは、図2に示すように、端末とAPがプローブ要求信号とプローブ応答信号をやり取りすることによって接続確立に必要な情報を得る方法である。端末はネットワークに参入する際に、チャンネルを変えながらアクティブスキャンを行い、チャンネルが一致したAPと情報をやり取りする事で、端末の周囲に存在するチャンネルの異なる複数のAPを認識することができる。

以上の処理に対して、基本的に端末は受信したプローブ応答信号の受信電波強度が最も強いAPと接続関係を確立する。例えば、図2に示すようなトポロジーにおいて、AP\_1とAP\_2の送信電波強度が等しい状況で、AP\_1よりAP\_2の方がより端末に近い場合、端末における受信電波強度はAP\_2の方が強くなるので、端末はAP\_2と接続関係を確立する。このとき、AP\_2のアドホックネットワーク側の通信状態が悪化していたとしても、必ず端末によって選択されるため、一層通信状態を悪化させてしまう。

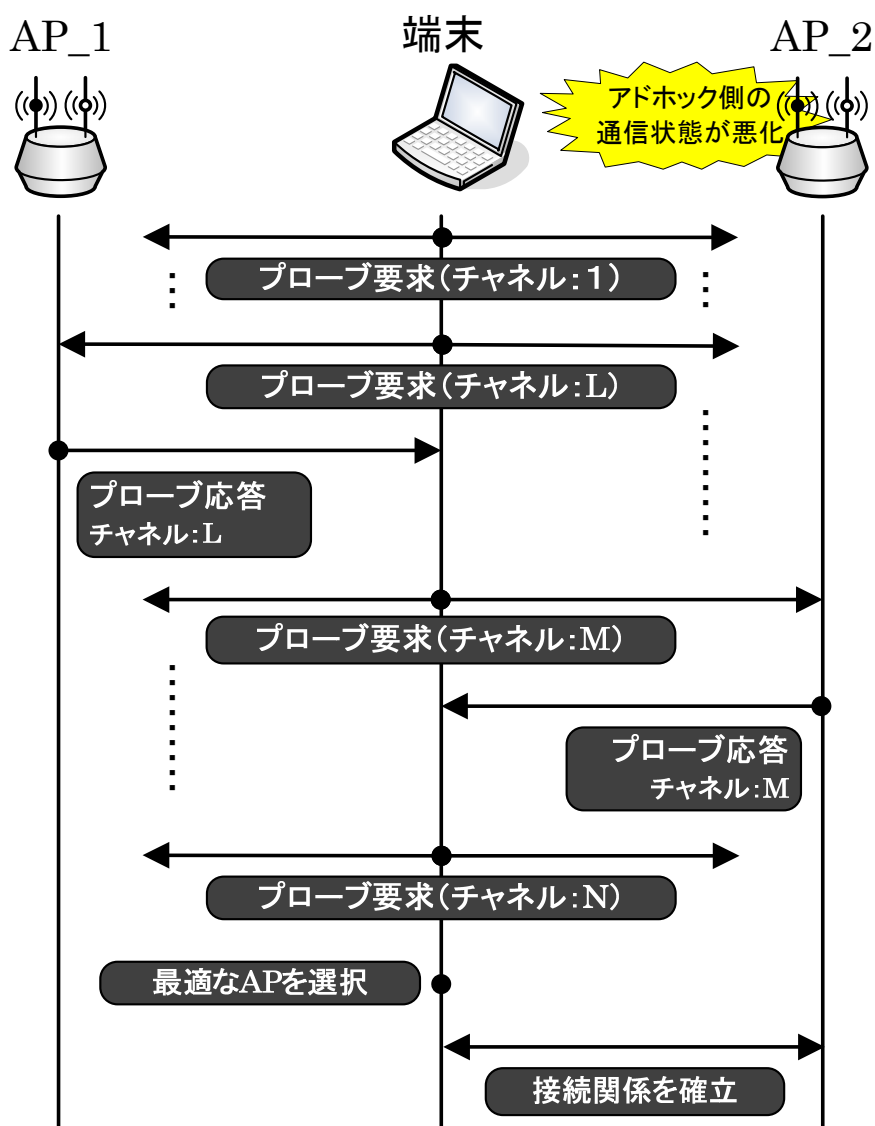


図2: APと端末の動作シーケンス

## 2.3 既存の解決方法

図 3 に Maximizing Local Throughput (MLT) [3]による解決策を示す。MLT では、ビーコン/プローブ応答に含まれる接続端末数とパケットエラーレート (PER: Packet Error Rate) から AP のスループットを推測することにより、端末が接続先 AP を決定する。また、接続関係確立後も端末が周辺 AP のビーコンフレームを取得することにより、常に自身の予想スループットが最大となる AP を選択する。しかし、この方法では AP を頻繁に変更してしまう可能性があり、また端末に改造を加えなければシステムを利用できないという課題がある。

ビーコン・プローブ応答信号拡張方式[4]では、同様にしてビーコンフレームやプローブ応答を拡張し、そこに AP が定期的にモニタリングした各配下端末の送受信スループットや、受信電波強度、パケットエラーレートといった情報を格納することにより、端末がスループットを推定し、最適な AP を選択する。この方法では、MLT において発生する不要な AP 変更は避ける事ができるものの、MLT と同様に端末側にも改造を加える必要があり、既存の端末では接続関係を確立することができない。

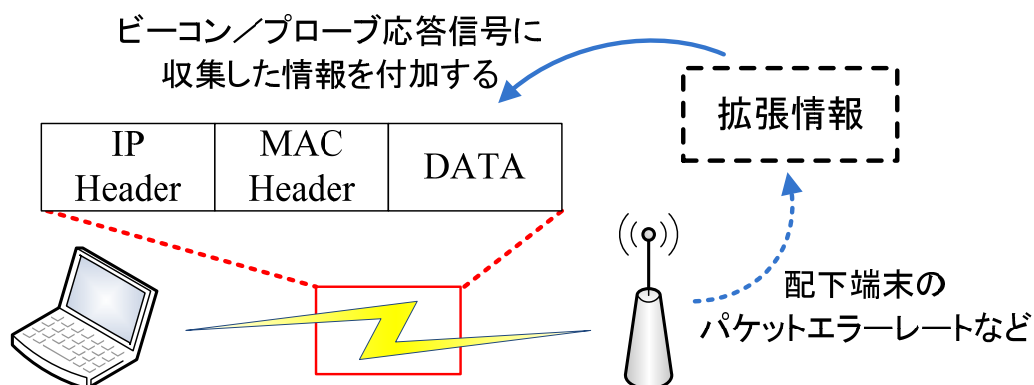


図 3 : MLT による解決策



### 3 提案システム

本論文では、端末に改造を加えることなく、より通信状態の良い AP を端末が選択できる手法を提案する。

#### 3.1 提案システムの概要と構成

図 4 に提案システムの構成を示す。通信状態が良好な AP\_1 と輻輳状態となっている AP\_2 の間に、ネットワークへの参入を試みる端末が存在する。ここでは、端末がネットワークへの新規参入、又は AP を介した通信中に移動し、新しい AP を探す場合の動作を示している。図中における実線は AP\_1 からの電波到達可能範囲を示している。2 種類の破線において内側の円を描く破線は AP\_2 から発せられたプローブ応答信号の、外側の円を描く破線はプローブ応答信号以外の信号の電波到達可能範囲を示している。

AP は、プローブ要求を受け取った時のアドホックモード側のトラフィックやパケットロス率などの情報を基にプローブ応答の電波強度を調整する。

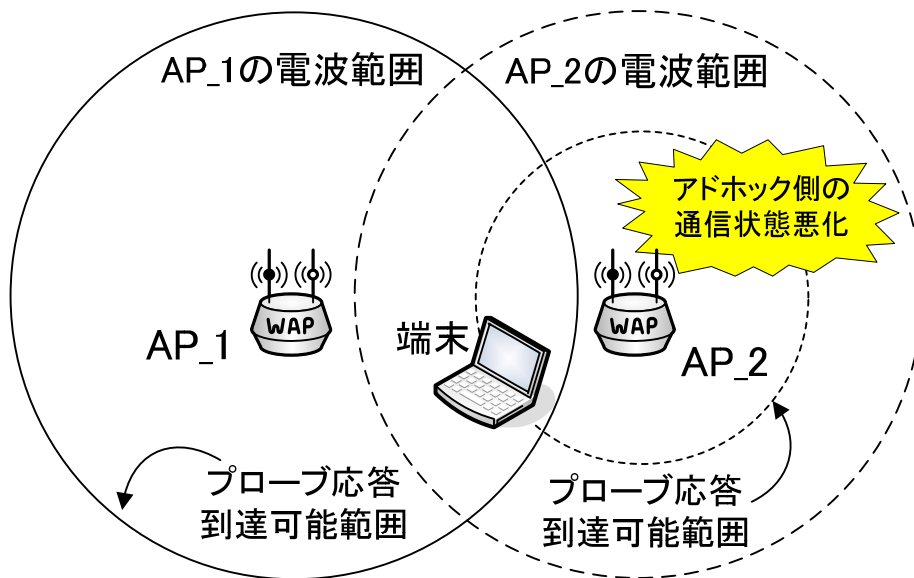


図 4：プローブ応答の電波到達可能範囲

#### 3.2 提案システムの動作

提案システムにおいて、各 AP は端末からプローブ要求が届くと、通信状態が良好な場合は通常の電波強度でプローブ応答を返す。トラフィックとパケットロス率が高くなり輻輳している場合は新たな端末が参入することを防ぐため、プローブ応答の電波強度を弱める。この方法により、端末は輻輳していない AP と接続を確立する可能性が高くなり、スループットの改善が期待できる。図 4 に示す環境において提案システムを適用すると、移動端末は AP1 と AP2 の両方からプローブ応答を受け取るが、AP1 の方が AP2 より電波が強いた

め、AP1 と接続関係を確立することになる。この方法で AP の輻輳状態が平均化され、ネットワーク全体のスループット改善を図ることができる。

図 5 に AP の輻輳状態と電波強度の関係を示す。AP のアドホックモード側の帯域利用率が増加して輻輳状態が悪化すると、AP は図中の実線が示すようにプローブ応答の電波強度を輻輳状態に対し反比例するように弱める。しかし、プローブ応答の電波強度を極端に弱めてしまうと、新規・移動端末がネットワークに参入できない領域ができることがある。そこで電波強度の変化範囲に下限を設けて、端末が必ずプローブ応答を受信できるよう設定する。

TCP 通信ではセッション数が少なくても帯域利用率が高くなるので、輻輳状態を検出するのにトラフィックのみを指標とするのは不十分である。そこで、理想的には TCP セッション数、UDP トラフィック量、パケットロス率などを統合的に判断する必要があるが、本研究ではトラフィック量を指標として用い、プローブ応答の電波強度を定めた。プローブ応答の電波強度を弱めている AP は、自身の輻輳状態が改善されるに従い、プローブ応答の電波強度を元の電波強度まで戻していく。以上の動作により、端末はトラフィックの少ない AP と接続関係を確立することができ、スループットが改善される。例えば、図 2 に示したケースに提案方式を適用すると、アドホックモード側の通信が混雑している AP\_2 のプローブ応答信号の電波強度が弱まる。そのため、端末が AP\_1 を選択する可能性が高まる。

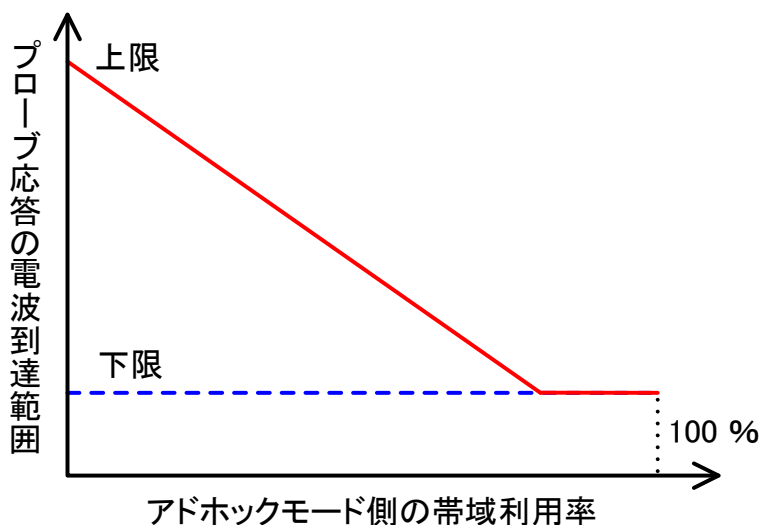


図 5：輻輳状態と電波到達可能範囲の関係

## 4 評価

提案システムの有効性を示すため、ネットワークシミュレータ **ns-2** を用いて、提案システムを無線メッシュネットワークに実装し、提案機能を適用した場合とそうではない場合の比較評価を行った。

無線メッシュネットワークには、メッシュネットワークの実現方法の一つとして本研究室が提案している WAPL (Wireless Access Point Link) [4]を用いる。WAPL で用いられる AP を以降、WAP (Wireless Access Point) と呼称する。

評価項目は端末間におけるスループットとした。なお、今回は輻輳状態を図る指標にトラフィック情報のみを用いた。

### 4.1 ns-2 による WAPL の実現

シミュレーション比較を行うために **ns-2** の機能に追加・変更を行った。図 6 に **ns-2** の構造を示す。無線メッシュネットワークでは、AP にインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 種類のインタフェースが必要である。**ns-2** はバージョン 2.33 より無線 LAN インフラストラクチャモードが実装されたが、WAPL の機能を実装したバージョン 2.23 には、無線 LAN インフラストラクチャモードの機能がなかった。そこで AP と端末の接続には IEEE802.11 モジュールにビーコンの発信、電波強度による AP 離脱と再参入の判断、離脱・参入処理を行う機能を独自に追加した。また、WAP にインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 種類のインタフェースを持たせるために、それぞれのインタフェースをもつ 2 つのノードの内部モジュールを直接リンクすることによって、シミュレーション環境を実現した。

### 4.2 ns-2 による提案方式の実現

図 6 に提案方式の機能を実現するために **ns-2** に追加・変更箇所を斜線部分に示す。プローブ機能を実現するため、図中に示す①の MAC モジュールに「プローブ要求を発する機能」と「最適な WAP を選択する機能」を実装し、②の MAC モジュールには「プローブ応答を発する機能」を実装した。そして、提案システムを実現するため、③の MAC モジュールに「トラフィック計測機能」を実装し、インフラストラクチャモード側ノードの物理層には「電波強度の調節機能」を追加した。ここでのトラフィックとは、単位時間あたりにノードに到達した DATA・RTS・CTS・ARP の各パケットサイズの合計値である。

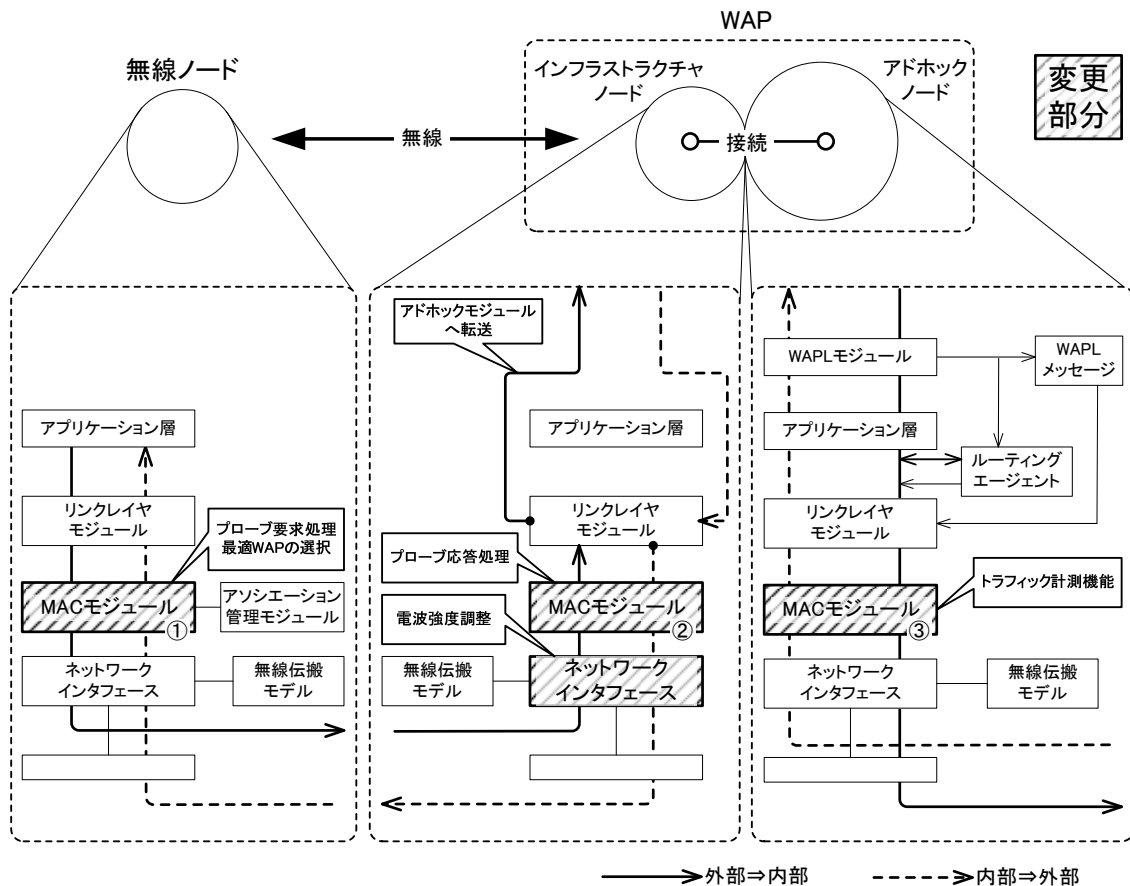


図 6 : ns-2 の構造

### 4.3 シミュレーション環境の構築

図 7 に提案システムにおいて想定する WAP の配置を示す. 各 WAP は, 自身の電波が届く距離にある WAP に対し等間隔に 6 角形になるよう配置する. また, WAP のインフラストラクチャモード側とアドホックモード側の電波強度は等しく, 全 WAP の電波強度は一定であり, 固定された 6 個の WAP に電波が届くものとする. これに対し, 移動端末はバッテリーで駆動するケースが多く, 電力消費を抑えるため, 電波強度が低く設定されることがある. そのため, 提案システムにおいて想定する端末の電波強度は, WAP の電波強度より低い, 必ず 1 個以上の WAP に信号が届く強度であるものと仮定する. 具体的には, 図 7 に示すように WAP と端末の電波到達可能範囲を, それぞれ 100m と 50m, 各 WAP 間の距離を 80m とする.

アドホックネットワーク側は原理上, 同一チャネルを用いているが, インフラストラクチャモード側はアドホックネットワーク側と異なるチャネルを WAP 毎に選択可能である. ただし, 今回のシミュレーションでは, インフラストラクチャモード側で用いるチャネルは, アドホックネットワーク側と異なるチャネルで全て同一とした.

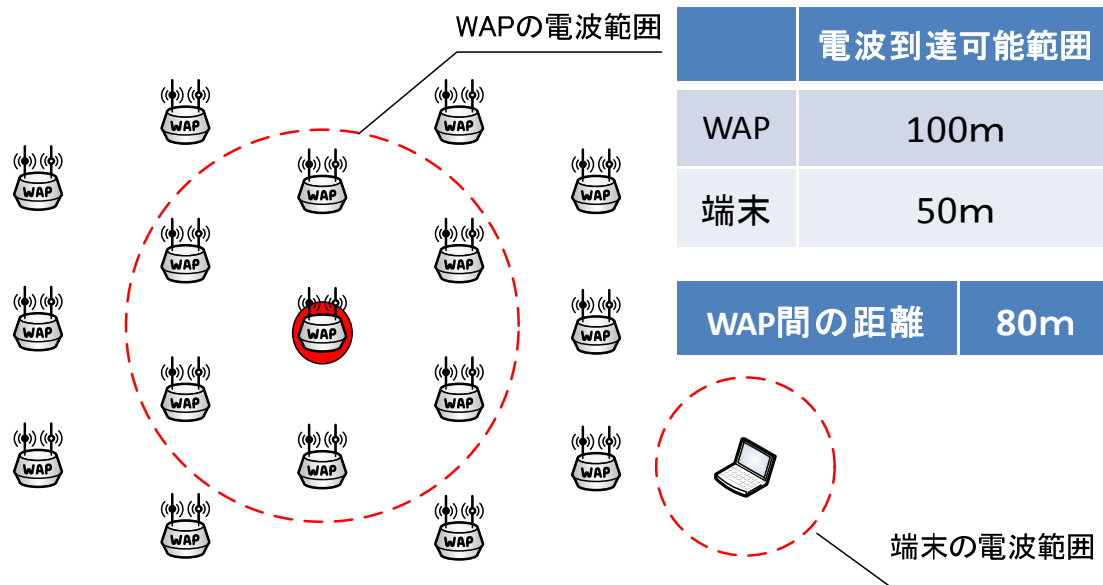


図 7 : WAP の配置

#### 4.4 端末間におけるスループットの比較

図 8 に示すようなネットワーク構成で提案システムを適用した場合と提案システムを適用しなかった場合（以下、既存システム）の比較評価を行った。フィールド上には、WAP を等間隔に 6 台配置し、背景負荷として通信経路が WAP\_E と F を中継するような配置で 2 台の端末（端末 C と D）に TCP 通信を行わせる。その上で、スループット測定用に設置した 2 台の端末（端末 A と B）に 10 秒間の TCP 通信をさせ、そのスループットを計測した。なお、端末 A は WAP\_A と C の間のやや WAP\_C に近い場所に配置した。シミュレーション諸元は表 1 の通りである。

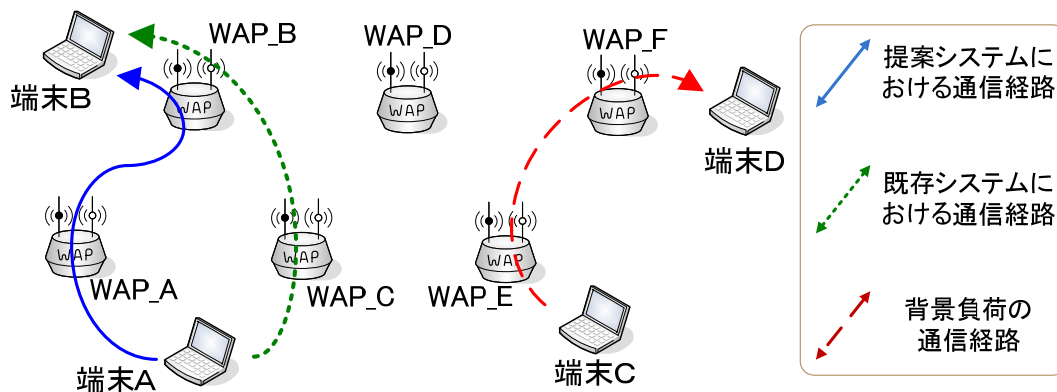


図 8 : 端末間スループット比較におけるシミュレーションのネットワーク構成

表 1 : ns-2 におけるシミュレーション諸元

端末数 (固定)	4 (台)
WAP 数 (固定)	6 (台)
フィールド	500 x 500 (m)
電波到達範囲 (WAP)	100 (m)
電波到達範囲 (端末)	50 (m)
チャンネルアクセス方式	CSMA/CA
無線帯域	54M
チャンネルタイプ	WirelessChannel
伝搬方式	TwoRayGround
アンテナタイプ	OmniAntenna
最大キュー長	120(pkts)
MAC	802.11
アドホック ルーティングプロトコル	OLSR
トランスポート層	TCP
アプリケーション層	FTP
パケットサイズ	1000(byte)

図 9 にスループットの比較を示す。既存システムのスループットが約 2.5Mbps であったのに対し、提案システムのスループットは約 4.2Mbps であった。既存システムのスループットが低いのは、WAP\_C が端末 C と D の通信経路上にある WAP\_E から発せられる電波の影響を受けた事が原因である。つまり、既存システムでは、よりプローブ応答の電波強度が強い WAP と接続関係を確立するため、端末 A は近距離にある WAP\_C と接続関係を確立してしまい、端末 A・B と端末 C・D の通信が WAP\_C と E によって互いに干渉しながら通信を行う。これに対し、提案システムでは WAP\_C が発するプローブ応答の電波強度が弱くなるため、よりプローブ応答の電波強度が強い WAP\_A と接続関係を確立し、端末 A・B の通信と端末 C・D の通信は互いに干渉することなく行われる。

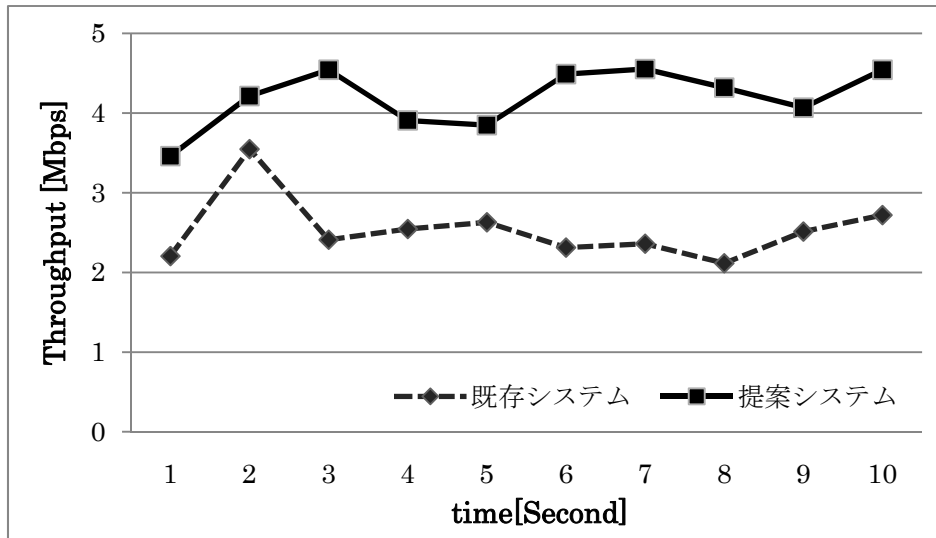


図 9 : スループット比較

## 5 むすび

AP が常に自身のアドホックモード側のトラフィックを把握し、プローブ要求を受け取った時の自身のトラフィックの状態に応じて、プローブ応答の電波強度を調整することにより輻輳を改善し、ネットワークのスループットの低下を防ぐ方法を提案した。

プローブ応答の電波強度が弱まると端末に選択される可能性が低くなるため、輻輳が大きい AP は電波強度を弱めてプローブ応答を返すことにより、輻輳が大きい AP が端末に選択される可能性が低くなる。そのため、AP の輻輳状態が平均化され、ネットワーク全体のスループット改善を図ることができる。

シミュレーションにより簡単なネットワーク構成においては提案システムが有用であることを示した。今後は、大規模なネットワーク構成において移動端末による通信を行った場合などの評価を行う予定である。

また、パケットロス率、トラフィック情報、TCP セッション数、UDP トラフィックなどを輻輳状態の指標とした、最も効率の良い電波強度の決定のアルゴリズムを検討する。



## 謝辞

本研究に関して、研究の方向や進め方など終始にわたり御指導、御助言を賜りました指導教官の渡邊晃教授に心より厚く御礼申し上げます。

論文作成にあたり、副査の高橋友一教授には貴重なコメントや至らないところを指摘していただき深く感謝致します。

論文作成にあたり、副査の宇佐見庄五准教授には貴重なコメントや至らないところを指摘していただき深く感謝致します。

論文作成にあたり、副査の旭健作助教授には貴重なコメントや至らないところを指摘していただき深く感謝致します。

論文作成にあたり、共同研究者の伊藤将志氏には多くの御助言や度々の御相談に応じていただき深く感謝を致します。

最後に、本研究を行うにあたり、本研究室の皆様にも多くの方々から多大な助言と協力を承り、深く感謝しております。

## 参考文献

- [1] Deng, J.and Hass,Z,J. : Dual Busy Tone Multiple Access (DBTMA) : A Multiple Access Control Scheme for Ad Hoc Networks, IEEE Trans. Communications, Vol.50, No.6, pp.975-985 (2002).
- [2] Masaki Bandai, Iwao Sasase, : Performance Analysis of a Medium Access Control Protocol with Busy Tones in Wireless Ad Hoc Networks, IEICE technical report. Communication systems 101(54) pp.7-12 (2001)
- [3] 福田豊, 藤原暁宏, 鶴正人, 尾家祐二: 無線 LAN における AP 選択戦略に関する検討, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.104, No.433, pp. 1-4, Nov, 2004.
- [4] 福田豊, 福田淳平, 尾家祐二: 無線 LAN における自律的なアクセスポイント選択方式-浸透性と強靱性の検証-, 電子情報通信学会技術研究報告, Vol.103, No.689, pp. 155-160, Feb, 2004.
- [5] 平田千浩, 渡辺浩文, 大島勝志, 鈴木健二: 無線 LAN における最適なアクセスポイント選択手法, マルチメディア, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム論文集, 情報処理学会シンポジウム, Vol.2008, No.1.
- [6] 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.
- [7] 加藤佳之, 伊藤将司, 渡邊晃: 無線アクセスポイントリンク “WAPL” の提案と評価, “マルチメディア, マルチメディア, 分散, 協調とモバイル(DICOMO2007) シンポジウム論文集”, 情報処理学会シンポジウム, Vol.2007, No.1.
- [8] 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
- [9] 阪田史郎, 青木秀憲, 間瀬憲一: アドホックネットワークと無線 LAN メッシュネットワーク, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J89-B, No.6, pp.811-823
- [10] 高橋ひとみ, 斉藤匡人, 間博人, 戸辺義人, 徳田英幸: MANET における TCP スループット推定による経路選択機構の実環境評価, 情報処理学会論文誌, Vol.46, No.12, pp.2857-2870, Dec.2005.
- [11] MeshNetworks,  
<http://www.motolora.com>
- [12] IEEE802.11,  
<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
- [13] Packethop  
<http://www.packethop.com>
- [14] Metro Mesh

- <http://www.tropos.com/>
- [15] MeshCruzer  
<http://www.thinktube.com/>
- [16] 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.
- [17] Aoki, H., Chari, N., Chu, L. et al.: 802.11 TGs Simple Efficient Extensible Mesh (SEE-Mesh) Proposal (2005).
- [18] Chen, J. and Chen, Y.-D.: AMNP: Ad Hoc Multichannel Negotiation Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks, IEEE International Conference on Communication (2004).
- [19] A.Yair, et al., "Fast Handoff for Seamless Wireless Mesh Networks", MobiSys' 06, June 19-22, 2006.
- [20] N.Vishnu, et al., "Design and Evaluation of iMesh: an Infrastructure-mode Wireless Mesh Network", WoWMoM2005, 13-16 June 2005.
- [21] Michael Bahr, "Proposed Routing for IEEE 802.11s WLAN Mesh Networks", WICON' 06, Aug 2-5, 2006.

## 研究業績

### 1. 学術論文

なし

### 2. 国際会議

1. Toyoaki Higuchi, Masashi Ito and Akira Watanabe, "Proposal for a new method to alleviate traffic congestion in Wireless Mesh Network", Proceedings of the IEEE International Region 10 Conference 2009 (TENCON2009), Oct.2009.

### 3. 口頭発表

1. 無線メッシュネットワークにおける通信品質の向上  
マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2009) シンポジウム論文集, Vol.2009, No.1, pp.808-814, Jul.2009.
2. 無線メッシュネットワークにおける通信品質向上の提案と評価  
情報処理学会研究報告, 2009-MBL-48, Vol.2009, Jan.2009.
3. 無線メッシュネットワークにおける輻輳改善の提案  
情報学ワークショップ 2008 (WiNF2008) 論文集, Vol.6, pp.157-160, Sep.2008.
4. 無線メッシュネットワークにおける輻輳改善の提案  
マルチメディア, 分散, 協調とモバイル (DICOMO2008) シンポジウム論文集, Vol.2008, No.1, pp.108-111, Jul.2008.
5. ns-2 による無線 LAN インフラストラクチャモードのシミュレーション  
情報処理学会第 70 回全国大会講演論文集, Mar.2008.
6. NS-2 による無線 LAN インフラストラクチャモードのシミュレーションの検討  
平成 19 年度電気関係学会東海支部連合大会論文集, Sep.2007.