

# シームレスハンドオーバーを実現する無線メッシュネットワークの提案とシミュレーション評価

伊藤 将志<sup>†</sup> 鹿間 敏弘<sup>††</sup> 渡邊 晃<sup>†</sup>

無線メッシュネットワークは有線 LAN で接続していたアクセスポイント間の接続をアドホックネットワークで接続することによりバックボーンインフラを容易に構築することができる。しかし、無線メッシュネットワークには、シームレスハンドオーバーの実現方法、通信帯域の確保、最適なルーティングプロトコルの選定などが課題として残されている。本稿で提案する WAPL(Wireless Access Point Link) は、シームレスハンドオーバーを確実に行うことができる、制御メッセージがトラフィックに与える影響が少ない、アドホックルーティングプロトコルが自由に選択できるといった特徴を持つ。シームレスハンドオーバーを実現するため、WAPL では通信の経路を常時把握しておき、ユニキャストでハンドオーバー通知を行う。また、制御メッセージを抑えるため端末情報の交換をオンデマンドで行う。さらに、AP と端末のマッピング情報を生成させる機能をアドホックルーティングプロトコルから完全に独立させた。本稿では既存方式と WAPL を ns-2 のモジュールとして実装し比較を行った。その結果、WAPL の特徴を定量的に示すことができた。

## Proposal and Simulation Results of Wireless Mesh Network that Realizes Seamless Handover

MASASHI ITO,<sup>†</sup> SHIKAMA TOSHIHIRO<sup>††</sup> and AKIRA WATANABE<sup>†</sup>

Wireless Mesh network can build a backbone infrastructure easy by connecting between each access points that connected wired until now, with a routing protocol of ad-hoc network. However, Wireless Mesh network has several problems that are realization of seamless hand-off, keeping quality of wireless band, selecting a suitable routing protocol. In this paper, we propose WAPL(Wireless Access Point Link) with feature of enable the certain seamless handover, influence that control message gives traffic, enable the selection of a routing protocol responding to the use environment. In WAPL, the certainty seamless handover is improved by grasping route of communication that tries to handover and using unicast for the handover information. And, the terminal information is exchanged by a demand to hold traffic. And, the function of generating mapping information of the terminal and the access point was made to be independent of function of ad-hoc routing completely. In this paper, We implemented an existing method and WAPL into ns-2 as a modules of ns-2, and compared two methods. As a result, the feature of WAPL is shown quantitatively.

### 1. はじめに

これまで有線 LAN で接続していた無線 LAN の AP(Access Point) 間をアドホックネットワークで接続し、バックボーンインフラを容易に構築する無線メッシュネットワークの研究に注目が集まっている。無線メッシュネットワークは様々な機関で研究・開発が進

められていたが<sup>1) ~ 4)</sup>、いずれも独自の方式であり互換性がない。そこで、IEEE では 802.11 のタスクグループ s によって標準化が進められている<sup>5)</sup>。

無線メッシュネットワークは基本的に AP 同士をアドホックネットワークで接続し、AP と端末はインフラストラクチャモードで接続する。AP は通信相手の端末がどの AP の配下に存在するかというマッピング情報(以下、AP・端末マッピング情報)を何らかの方法で知っている必要がある。ある端末から他の AP 配下に存在する端末へ送信されたパケットはこのマッピング情報を元に複数の AP を経由して転送され相手端末へ届けられる。しかし、無線メッシュネットワークには、有線ほど安定した通信ができないこと、利用

<sup>†</sup> 名城大学大学院理工学研究科

Graduate School of Science and Technology, Meijo University

<sup>††</sup> 福井工業大学電気電子工学科

Electrical and Electronic Engineering, Fukui University of Technology

環境によっては適切なアドホックルーティングプロトコルが異なること、シームレスなハンドオーバの実現が困難であることなど様々な課題が残されている。安定な通信ができないというのは、AP間をアドホックネットワークで接続したことに起因しており、フラッディングが正しく届かなかつたり、隠れ端末やさらし端末の影響でスループットが低下したりすることを指している。また、既存の無線メッシュネットワークはアドホックネットワークのルーティングプロトコルとAP・端末マッピング情報の管理を一体化しているものが多く、ルーティングプロトコルを変更できない。そのため、利用環境に適切に応じることができないという制約がある。さらに、AP間を移動する際に通話の寸断を避けるシームレスなハンドオーバを実現することは重要であるが、IEEE802.11sではハンドオーバについては未検討の状態である<sup>(6)(7)</sup>。シームレスハンドオーバを実現する無線メッシュネットワークの研究としてはSMesh<sup>(8)</sup>とiMesh<sup>(9)</sup>がある。SMeshではハンドオーバ時にパケットの経路を二重化するが、端末もアドホックモードで動作する必要があり、一般のAPを用いた無線ネットワークとの互換性がない。iMeshでは移動時にパケットをAPでバッファリングするが、ハンドオーバの通知が失敗する可能性が高いという課題がある。国内における無線メッシュネットワークの研究としてはM-WLAN<sup>(1)</sup>があるが、ルーティングプロトコルはOLSRに限定されており、ハンドオーバ時にもロスが発生が避けられないという課題が残されている。

そこで我々はこれらの課題を解決するため、独自の無線メッシュネットワークWAPL(Wireless Access Point Link)を提案する。WAPLではAPに相当する装置が近隣1ホップの通信を常時監視し、通信ペアの端末と各端末が所属するAPを把握する。この情報により端末のハンドオーバ時にユニキャストで確実に経路情報を更新し、ハンドオーバの失敗を防止することができる。また、AP・端末マッピング情報はオンデマンドで生成し、トラフィックへの負担を軽減する。さらにAP・端末マッピング情報の交換を行うモジュールをアドホックルーティングモジュールと独立させることによって、ルーティングプロトコルを用途に応じて自由に選択することができる。本稿ではシミュレーションによってWAPLが確実性の高いシームレスハンドオーバを実現できること、および、制御メッセージがトラフィックへ与える影響が小さいことを明らかにした。以下では2章で無線メッシュネットワークの代表的な既存方式であるIEEE802.11sとシームレスハ

ンドオーバを実現するiMeshの概要とその課題を説明し、3章でWAPLの概要を説明する。4章ではシミュレーションの結果と考察を述べ、5章でまとめとする。

## 2. 既存技術

IEEE802.11ではタスクグループ<sub>s</sub>を設け、メッシュネットワークの標準化を進めている。しかし、IEEE802.11sはシームレスハンドオーバについては未検討の状態である。シームレスハンドオーバを実現する技術としてはiMeshとSMeshがある。しかし、SMeshは端末がアドホックモードである必要があり、本論文の主旨と反する。そこで、本章ではWAPLとの比較のため、IEEE802.11sとiMeshの概要と課題を説明する。

### 2.1 IEEE802.11s

IEEE802.11sでは無線接続されたAPをMAP(Mesh Access Point)と呼ぶ。IEEE802.11sではMAP間のルーティングテーブル生成とMAP・端末マッピング情報の生成にHWMP(Hybrid Wireless Mesh Protocol)を利用する。HWMPはMAC層に実装されており、IPアドレスのかわりにMACアドレスを用いて、アドホックルーティングプロトコルと同様の動作を行う。

HWMPは基本的にはRM-AODV(Radio Metric AODV)によるリアクティブ型のルーティングを行うが、固定的なネットワークを形成する場合に限り、ツリー型のパスを事前に形成し、プロアクティブ型のルーティングを行う。RM-AODVでは、端末が通信を開始すると、MAPが端末の代理で経路要求メッセージを他のMAPに対して広告する。目的の端末とアソシエーションを張っているMAPは代理でメッセージを受け取り応答メッセージを返信する。以上のやり取りにより、端末から端末への経路が確立し、データパケットはMAPを介して転送される。

端末が通信中に移動した際は、AODVと同様に再度経路探索が行われるが、経路が正しく再形成されるまでの間に送信されたパケットをどう扱うかなどは検討されていない。ハンドオーバの手法については別途IEEE802.21<sup>(10)</sup>で検討されている。しかし、IEEE802.21ではAP間がアドホックネットワークの場合については検討の範囲外である。

### 2.2 iMesh

iMeshはAP・端末マッピング情報を生成する方法としてOLSR<sup>(12)</sup>をベースに改造を施す方法をとっている。端末がAPに参入すると、APは拡張HNAメッ

セージをフラッディングする。拡張 HNA メッセージには端末のアドレス情報が含まれており、このメッセージを受け取った AP は AP・端末マッピング情報を生成する。ハンドオーバー時にも同様の処理が実行される。図 1 に iMesh のハンドオーバー時のシーケンスを示す。ここで、移動端末が移動前に所属していた AP を旧 AP、移動後に所属する AP を新 AP、パケットの送信元の端末が所属している AP を送信元 AP と呼ぶ。端末は AP を移動する際、旧 AP と離脱のやり取り、新 AP と再参入のやり取りを行う。参入メッセージを受けた新 AP は拡張 HNA メッセージをフラッディングする。パケットの送信元 AP に拡張 HNA メッセージが届くと通信経路が新 AP 宛に更新される。この間、送信元端末から送信されたパケットは旧 AP でバッファリングされ、拡張 HNA メッセージを受信したときに、新 AP へ転送される。この方式により全てのパケットは移動端末へ届く。しかし、フラッディングはメッセージがネットワーク全体に行き渡るように MAC ブロードキャストの転送を繰り返すものであり、MAC ブロードキャストは RTS/CTS 制御を行わない。従って、ブロードキャスト送信中であることを知らない周囲の AP が送信を開始しようとするとブロードキャストパケットは破壊される。そのため、背景トラヒックのあるような状態ではブロードキャストの消滅率が高く、ハンドオーバーを失敗することがある。この場合を救済するため、AP への参入を完了した後も数秒の間隔で定期的にメッセージのフラッディングを繰り返すが、通信の回復に所定の時間がかかる。よって、旧 AP への拡張 HNA メッセージが不到達となった場合は、旧 AP でバッファリングしていたパケットは転送先が不確定のまま蓄積される。また、送信元 AP への拡張 HNA メッセージが不到達となった場合は、旧 AP 経由で新 AP に転送され続けることになり、転送効率が悪くなる。また、定期的なフラッディングはシステム規模が大きくなるとトラヒックに与える影響が無視できないという課題がある。

### 3. WAPL の提案

#### 3.1 WAPL の基本動作

WAPL では無線化した AP を WAP(Wireless Access Point) と呼ぶ。WAPL では通信開始時に WAP・端末マッピング情報を生成するオンデマンドな方式を採用する。無線メッシュネットワーク環境では、通信をせずに WAP に接続しているだけの端末が多く存在することが想定できるため、WAPL で採用するオンデマンド方式はトラヒックの削減効果がある。WAP

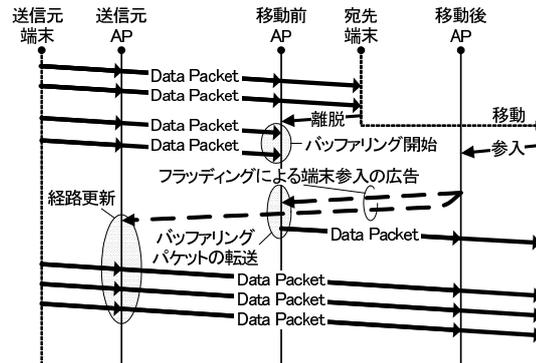


図 1 iMesh のハンドオーバーシーケンス  
Fig.1 The sequence of handoff process of iMesh.

間の経路生成はアドホックルーティングプロトコルをそのまま採用する。WAPL における WAP・端末マッピング情報は、ルーティングテーブルとは独立させ、LT(Link Table) と呼ぶ独自のテーブルとして保持する。LT は端末が通信を開始する際の ARP 処理をトリガとして更新される。LT の生成シーケンスを図 2 に示す。WAP は端末からの ARP 要求を受信すると、他の WAP へ LT 生成要求メッセージをフラッディングにより広告する。これはアドホックルーティングとは独立しており、LT 生成モジュールによりブロードキャストを繰り返すことにより実現する。LT 生成要求メッセージには探索端末の IP アドレスと送信元端末の IP アドレスと MAC アドレスが記載されている。LT 生成要求メッセージを受信した全ての WAP は自身の LT に送信元端末と WAP の IP アドレスの対応関係を記述する。配下に目的の端末が存在することを検出した WAP は、ユニキャストで送信元 WAP に LT 応答メッセージを返す。LT 応答メッセージには探索端末と送信元端末の IP アドレスと MAC アドレスが記載されており、LT 生成要求メッセージの送信元 WAP は LT 応答メッセージを受信すると宛先端末と WAP のアドレスの関係を LT に記述する。以上の動作により互いの WAP に相手端末へのマッピング情報が生成され、以後のデータパケットは WAP 間のアドレスにより IP カプセルングされて中継される。通信がなくなれば一定時間後に LT の内容は削除される。

#### 3.2 シームレスハンドオーバーの実現

##### (1) 近隣 WAP 通信の把握

WAPL では端末移動時のハンドオーバー通知を確実にを行うために、旧 WAP と送信元 WAP に対してユニキャストでハンドオーバーを通知する。各 WAP では予め近隣で通信中の端末と WAP の IP アドレスを関連付けるテーブルと端末の MAC アドレスと IP アドレスを

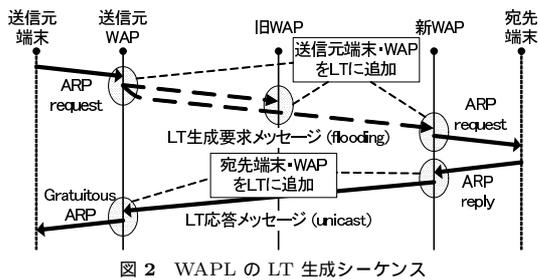


図 2 WAPL の LT 生成シーケンス  
Fig. 2 The sequence of LT generation process of WAPL.

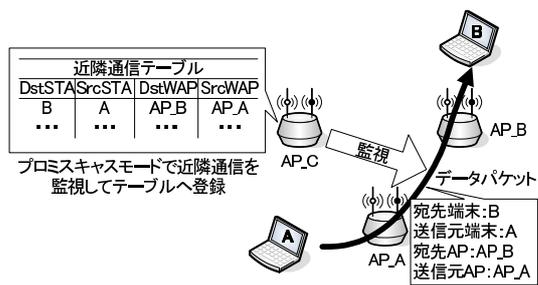


図 3 近隣通信の把握方法  
Fig. 3 The method of grasping neighbor communication.

関連付けるテーブルを作成しておく。これらのテーブルをそれぞれ近隣通信テーブルとMI (MAC-IP) テーブルと呼ぶ。近隣通信テーブルの生成方法を図 3 に示す。WAP はプロミスキャスモードで近隣の WAP が送信する通信パケットを常時モニタする。WAP は自身宛以外のパケットの IP ヘッダから宛先 WAP, 送信元 WAP, カプセル化された IP ヘッダから宛先端末, 送信元端末の IP アドレスを取得し近隣通信テーブルに記録する。一定時間パケットの送信がなければ, その情報をテーブルから削除する。近隣通信テーブルは LT 生成要求・LT 応答メッセージからも生成する。LT 生成要求・LT 応答メッセージは 1 度だけであるため, 削除タイマの間隔を長くしておく。以上の方法により, WAP は近隣 WAP の通信状態とその経路を把握することができる。

### (2) MI テーブル

WAP は端末が移動して再参入する時点で端末の MAC アドレスを取得できるが, そのままでは IP アドレスを取得することはできない。そのため, 移動端末の MAC アドレスと IP アドレスを関連付ける MI テーブルを保持する。MI テーブルは LT 生成要求メッセージと LT 応答メッセージのやりとりの際に生成される。送信元の MAC アドレスと IP アドレスは LT 生成要求メッセージによってフラディングされ, 各 WAP で MI テーブルが生成される。宛先端末の MAC アド

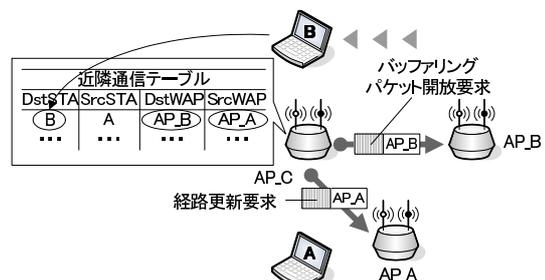


図 4 ハンドオーバー通知  
Fig. 4 Handoff inform.

レスと IP アドレスは LT 応答メッセージに記述されているが, LT 応答メッセージはユニキャストであるため, メッセージが到達するのは宛先 WAP のみである。そのため, 他の WAP は LT 応答メッセージをプロミスキャスモードで監視することにより, MI テーブルを作成しておく。

### (3) ハンドオーバーの通知

端末が移動した際のハンドオーバー通知の動作を図 4 に示す。旧 WAP は端末と離脱のやり取りを行うとパケットのバッファリングを開始する。新 WAP は端末から再参入メッセージを受信すると, 端末の MAC アドレスから MI テーブルを参照し, 移動端末の IP アドレスを取得する。WAP はこの IP アドレスから近隣通信テーブルを参照し, 再参入してきた端末の IP アドレスを持つレコードが存在すれば通信中であると判断し, ハンドオーバー処理を開始する。WAP は近隣通信テーブルから端末の旧 WAP と送信元 WAP の IP アドレスを参照し, 旧 WAP にはバッファリングパケット開放要求メッセージ, 送信元 WAP には経路更新要求メッセージを送信する。旧 WAP と新 WAP は受信したメッセージに対して応答メッセージを返す。一定時間の間に応答メッセージが返ってこない場合は再送処理を行う。旧 WAP はバッファリングパケット開放メッセージを受け取るとバッファリングしていたパケットを新 WAP に転送する。送信元 WAP は経路更新要求メッセージを受け取ると LT を書き換えることによりパケットの経路を更新し, ハンドオーバーが完了する。WAPL では端末が移動した際, 制御メッセージをユニキャストで通知するため, パケット到達の信頼性が高い。また, 通信相手を特定しているため再送制御も行える。

### 3.3 WAPL のアーキテクチャとルーティングプロトコルの選択

WAPL のアーキテクチャを図 5 に示す。WAPL は AP と端末の対応情報を制御するモジュールとアドホックルーティングのモジュールを完全に独立させており,

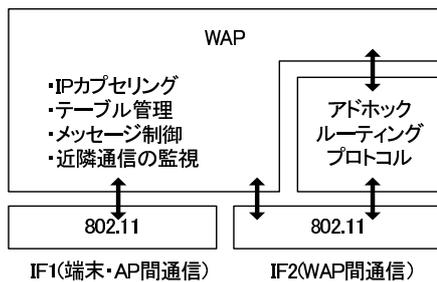


図 5 WAPL のアーキテクチャ

Fig. 5 Architecture of WAPL.

アドホックルーティングプロトコルを自由に選択することができる。これにより、端末の接続状態の性質と AP 間の接続状態の性質を分けて考えることができ、利用環境に応じて効率の良いメッシュネットワークを構築することができる。無線メッシュネットワークではネットワークに参加しているが通信をしていない端末も多数存在することが予想できる。そのため、AP・端末マッピング情報を定期的な広告により交換すると、制御メッセージが膨大になる恐れがある。そのため、AP・端末マッピング情報の交換にはオンデマンド方式が適している。一方、AP 間のルーティング方式は利用環境によって有利となる方式が異なる。利用環境としては公共通信網に使用するような恒常的な通信網を構築する場合と、災害発生時や工事現場、イベント会場などに一時的に通信網を構築する場合が考えられる。公共通信網では AP の変動はなく、電源も供給できる。それに対し一時的な通信網では AP が移動する場合が考えられ、電源供給もできるとは限らない。WAPL ではこれらの条件に適したアドホックルーティングプロトコルの選択が可能である。また、今後更に新しいルーティング方式が提案される場合や、同一プロトコルのバージョンアップが行われた場合には、そのプロトコルをそのまま WAPL に適用することができるという利点がある。

#### 4. 評価

WAPL の有効性を示すため、ネットワークシミュレータ ns-2 を利用して WAPL の比較評価を行った。シームレスハンドオーバー方式の効果を示すため、iMesh のハンドオーバー方式と比較した。評価項目は (1) ハンドオーバー通知の不到達率、(2) iMesh の拡張 HNA メッセージがトラヒックへ与える影響、(3) 通信開始メッセージがトラヒックへ与える影響とした。

ns-2 は現時点では無線 LAN インフラストラクチャモードの機能がないため、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・参入処理を追加することによって実現した。無線メッシュネットワークでは AP がインフラストラクチャモードとアドホックモードの 2 つのインタフェースをもつ必要があるが、それぞれのインタフェースを持つ 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りシミュレーション環境を実現した。端末側のチャンネルは今回のシミュレーションでは全て同一とした。また、今回のシミュレーションは全て公共通信網として利用することを想定し、WAP は移動することなく等間隔に配置されており、WAPL のアドホックルーティングプロトコルには OLSR を採用した。

##### 4.1 ハンドオーバー通知の不到達率の比較

ハンドオーバー時に旧 AP と送信元 AP に送信される制御メッセージの不到達率を WAPL 方式と iMesh 方式のそれぞれでシミュレーションした。制御メッセージは iMesh 方式はフラッディング、WAPL 方式はユニキャストである点が大きく異なる。フィールド上に AP を 24 台設置し、2 台の端末に双方向通信をさせながら、一方の端末は固定し、もう一方の端末は 2 つの AP 間を繰り返し移動させる。通信は VoIP を想定して、両端末は UDP で 172Byte のパケットを 1 秒に 50 回の間隔で送信する。異なる背景負荷における不到達率を評価するため、フィールド上に背景トラヒック生成用端末をランダムに複数台設置し、双方向の UDP 通信を行わせた。端末の位置と通信ペアはランダムとし、一定期間ごとに変更した。背景負荷の条件を変えするためにデータサイズを 500Byte に固定し、送信間隔を変えることにより背景トラヒックを調節した。送信元 AP から宛先 AP までのホップ数の影響も評価するために、固定端末の位置をずらして移動端末とのホップ数が 1~4 となるように条件を変えた。約 1000 回のハンドオーバーを行い不到達率を測定した。また、背景負荷を一定に固定し、ハンドオーバー開始から経路が更新されるまでの遅延を測定した。

旧 AP へのハンドオーバー通知の不到達率を図 6、送信元 AP への不到達率を図 7 に示す。横軸の背景トラヒックは背景トラヒック生成用の端末 1 台が送信したトラヒック量を bps に変換して表している。iMesh 方式の旧 AP への不到達率は背景トラヒックとともに上昇し、背景負荷用端末のトラヒックが 1.25Mbps の時には 10% 程度まで達する。送信元 AP への不到達率はホップ数によって差があり、4 ホップでは背景負荷 1.25Mbps の時は不到達率が約 13% になる。背景トラヒックが 0 のとき、iMesh 方式の不到達率が

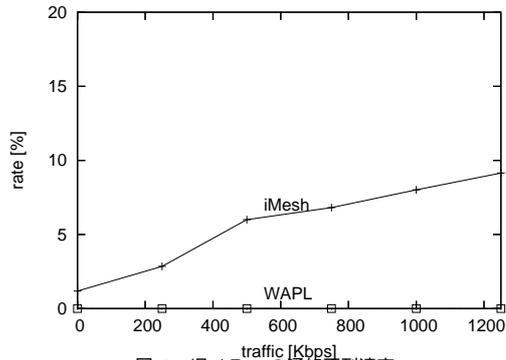


図 6 旧 AP への通知不到達率  
Fig. 6 Non-arrival rates to the old AP.

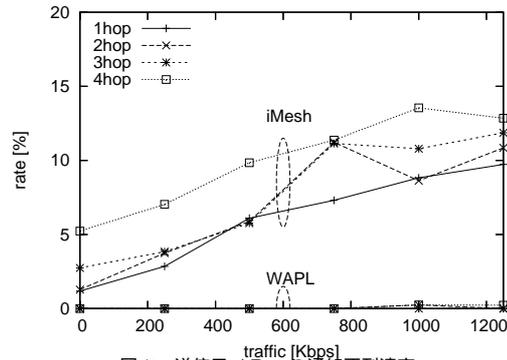


図 7 送信元 AP への通知不到達率  
Fig. 7 Non-arrival rates to the source AP.

0%にならないのは、移動端末自身が行っている双方向のUDP通信により、ブロードキャストパケットが破壊されるためである。移動端末自身の通信は送信元と宛先が経路変更要求と同一であるため、背景負荷のパケットよりも影響が強いものと考えられる。また、ホップ数が多くなれば、送信元APへ拡張HNAメッセージが届くまでにパケットの衝突する機会が多くなり、不到達率が高くなる。これに対してWAPLではユニキャストを用いることによる効果で不到達率がほぼ0%になっており、iMeshにおける課題が改善されていることがわかる。

次に、ハンドオーバー開始から経路が更新されるまでの遅延時間を図8に示す。これは背景負荷用端末のトラフィックが750Kbpsに固定した場合の、端末が新APに再参入してから送信元APの経路が新APに変更するまでの平均時間である。縦軸が遅延、横軸はAP間のホップ数を表している。WAPLでは4ホップの場合でも0.02sec程度に留まっているが、iMeshでは拡張HNAメッセージの間隔が5secのときには0.6sec程度となる。これは、制御メッセージが不到達となった場合に大きな遅延が発生することが原因である。また、拡張HNAメッセージはOLSRのメッセージ転送ルールに従うので、他のメッセージと相乗りさせるため、すぐに転送されないことも平均遅延時間を上昇させる原因となっている。

#### 4.2 iMeshの拡張HNAメッセージがトラフィックへ与える影響

iMesh方式では各APがシステム全体のAP・端末マッピング情報を生成するために、拡張HNAメッセージを定期的にフラッディングする。このフラッディングには通信を行っていない端末の情報も含まれている。通信をしていない端末がネットワークに多数存在することは十分想定できることであり、このフラッディン

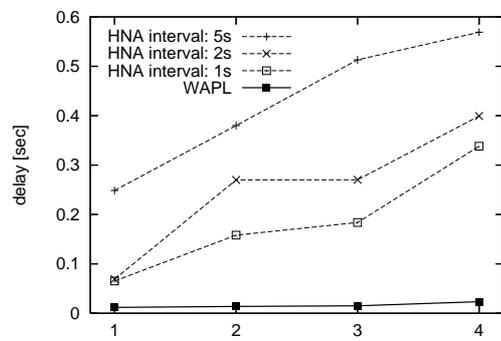


図 8 ハンドオーバー開始から経路が更新されるまでの遅延時間  
Fig. 8 Delay from handoff initiation to route update.

グが一般の通信スループットに与える影響を評価した。フィールド上にはAPを等間隔に複数配置し、通信を行わない端末を複数台ランダムに配置する。その上で、スループット測定用に設置した2台の端末に100秒間FTP通信をさせ、そのスループットを計測した。APの台数、端末の台数、ホップ数、拡張HNAメッセージの送信間隔などの条件を変化させた。それぞれの条件はAPの台数を38, 52台、AP1台に対する端末の台数を0, 4, 8, 12台、ホップ数を1~4ホップ、拡張HNAメッセージの間隔を1, 2, 5秒とした。拡張HNAメッセージの間隔はハンドオーバーに失敗した時の復旧時間と関連するため、間隔が狭い場合も評価した。

図9にAP38台時のスループットを、図10にAP52台時のスループットを示す。拡張HNAメッセージの間隔が大きく、APあたりの端末密度が小さいときは端末が0台の時と比べてスループットの差は明確ではないが、拡張HNAメッセージの間隔が短く、端末の密度が大きいと一般通信のスループットの低下率が高くなることがわかる。図10よりAP52台でHNA送

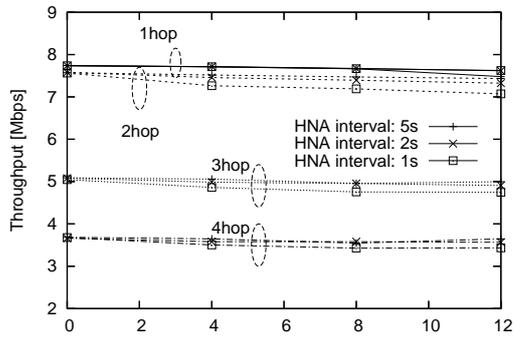


図 9 AP38 台時のスループット

Fig. 9 Throughput in 38 access points.

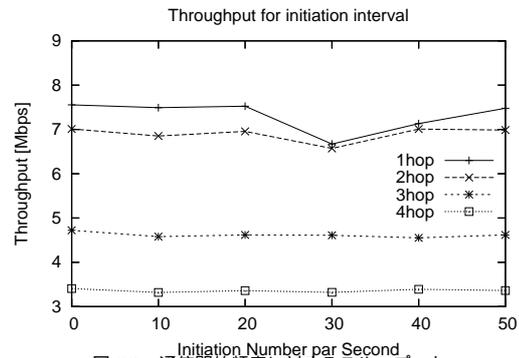


図 11 通信開始頻度に対するスループット

Fig. 11 Throughput for frequency of communication.

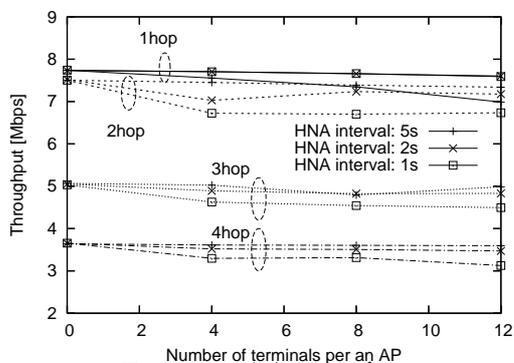


図 10 AP52 台時のスループット

Fig. 10 Throughput in 52 access points

信間隔が 1 秒、端末間が 2 ホップの場合では、AP1 台あたりの端末が 0 台のときに比べて 12 台のときではスループットが約 10% 劣化している。これらの影響はメッセージのデータサイズとパケット数に起因している。AP に従属する端末の数が多くなれば、拡張 HNA メッセージのデータサイズは長くなり、拡張 HNA メッセージの送信間隔が短くなればパケット数は増加する。また、AP の数が多くなれば拡張 HNA メッセージの発生元が多くなるため、ネットワーク全体の HNA メッセージ数も多くなる。このことから iMesh 方式ではネットワークの規模、接続する端末の数に制限が出る可能性がある。

#### 4.3 WAPL の LT 生成要求メッセージがトラヒックに与える影響

WAPL では端末間の通信開始時に LT 生成のためのフラッシングが実行されるため、通信開始頻度が高いと制御メッセージがネットワークの負荷となる可能性がある。そこで、ネットワーク上に発生する通信頻度を変化させ、一般の通信スループットにどれだけ影響を与えるかをシミュレーションにより評価した。

フィールド上に 52 台の AP を等間隔に設置し、端末はランダムに 200 台設置した。通信を行う端末を一定時間ごとにランダムで変更していき、通信開始を繰り返させることで通信開始メッセージによるトラヒックを発生させた。通信開始後、両端末は双方向に 172Byte の UDP パケットを 1 秒間に 50 回送信した。常にセッションの数は一定になるようにセッションを一度切断してから新しいセッションを張ることにした。

通信開始頻度が 1 秒間に 50 回とすると、各端末は 4 秒に 1 度セッションの切替を行うことになり、通信開始の頻度として十分厳しい条件である。このような条件のもと、スループット測定用に設置した 2 台の端末に 100 秒間 FTP による通信をさせ、そのスループットを計測した。2 台のうちの 1 台の位置をずらすことで、異なるホップ数ごとのシミュレーションを行った。

図 11 にシミュレーションの結果を示す。どのホップ数の場合においても、通信開始頻度 0 回から 50 回まで、スループットがほとんど変動していないことがわかる。このことからオンデマンドで LT を生成する WAPL の方式は一般通信に影響を与えることはほとんどないといえる。

#### 5. パケット監視によるオーバヘッドの評価

WAPL では近隣の通信を把握するために、常にパケットを監視し、IP アドレス情報を近隣通信テーブルへ格納する。この処理がパケットの転送処理に及ぼす影響を調査するため、実機を用いて実験を行った。実験ネットワークの構成を図 12 に示す。本実験は有線ネットワーク上で行った。これは無線環境では帯域が不安定で測定値の再現性が低く、正確な比較評価を行うのが困難なためである。実験ネットワークは監視モジュールを実装した転送装置、転送速度評価ソフト (Netperf<sup>11</sup>) を実装したサーバとクライアント、背景

表 1 転送装置の仕様

Table 1 Specifications of the router.

CPU	Intel Pentium4 2.8GHz
メモリ	512MB
NIC	Broadcom Tigon3 100BASE-TX
OS	linux2.6.11 FC4

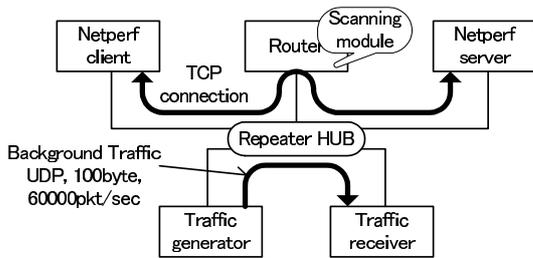


図 12 実験ネットワーク構成

Fig. 12 Network sturcture of experiment.

表 2 スループットの比較

Table 2 Comparison of Throughput.

Scanning module	Throughput
off	6.34 Mbps
on	6.30 Mbps

トラフィック生成ソフト (D-ITG<sup>13</sup>) を実装したサーバとクライアントからなり、これらを 100BASE のリピータハブに接続した。転送装置の使用を表 1 に示す。実験では、トラフィック生成装置により 100Byte の UDP パケットを 1 秒間に 60000 回発生させた上で、転送装置の監視モジュールを有効にした場合と無効にした場合で転送速度の比較を行った。転送速度の測定には Netperf を使った。Netperf は 1 回の測定につき TCP 通信を 10 秒間行いスループットを算出した。これを監視モジュールが有効な場合と無効な場合で 30 回ずつ繰り返し、平均を求めた。スループットの比較結果を表 2 に示す。監視モジュールを無効にした場合に対して、有効にした場合では転送速度が若干低下したが、0.6% 程度の劣化あり、性能にはほとんど影響がないことがわかった。

## 6. まとめ

無線メッシュネットワークの一方式として WAPL を提案した。WAPL ではハンドオーバー通知メッセージをユニキャストにすることにより、ハンドオーバー通知の不到達率をほぼ 0% に抑えることができる。AP・端末マッピング情報の交換は通信開始時とハンドオーバー時のみであるためトラフィックへの影響がほとんどない。また、WAPL はアドホックルーティングプロトコルと WAP・端末マッピング生成機能が完全に独立し

ている。そのため、利用条件に適したアドホックルーティングの選択ができる。また、アドホックルーティングプロトコルのバージョンアップに容易に対応できる。シミュレーションにより、WAPL がシームレスハンドオーバーを実現できることを示した。また、WAPL の制御メッセージが通信スループットに影響をほとんど与えないことを示した。

今後は WAPL を災害通信への応用など様々な条件下でのシミュレーションを行い、条件に応じたアドホックルーティングの選定などを行っていく。また、実機によってテストベッドを構築・運用し、評価を実施する予定である。

## 参考文献

- 1) 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
- 2) Metro Mesh  
<http://www.tropos.com/>
- 3) MeshCruzer  
<http://www.thinktube.com/>
- 4) Packethop  
<http://www.packethop.com>
- 5) IEEE 802.11  
<http://grouper.ieee.org/groups/802/11/>
- 6) Michael Bahr, “Proposed Routing for IEEE 802.11s WLAN Mesh Networks”, WICON’06, Aug 2-5, 2006.
- 7) 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
- 8) A.Yair, et al., “Fast Handoff for Seamless Wireless Mesh Networks”, MobiSys’06, June 19-22, 2006.
- 9) N.Vishnu, et al., “Design and Evaluation of iMesh: an Infrastructure-mode Wireless Mesh Network”, WoWMoM2005, 13-16 June 2005.
- 10) IEEE 802.21  
<http://grouper.ieee.org/groups/802/21/>
- 11) The Network Simulator ns-2  
<http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- 12) T.Clausen P.jacquet, “Optimized Link State Routing Protocol” (OLSR) RFC3626 October 2003
- 13) Netperf  
<http://www.netperf.org/netperf/>
- 14) D-ITG  
<http://www.grid.unina.it/software/ITG/>

# シームレスハンドオーバを実現する 無線メッシュネットワークの提案と シミュレーション評価



伊藤 将志 †

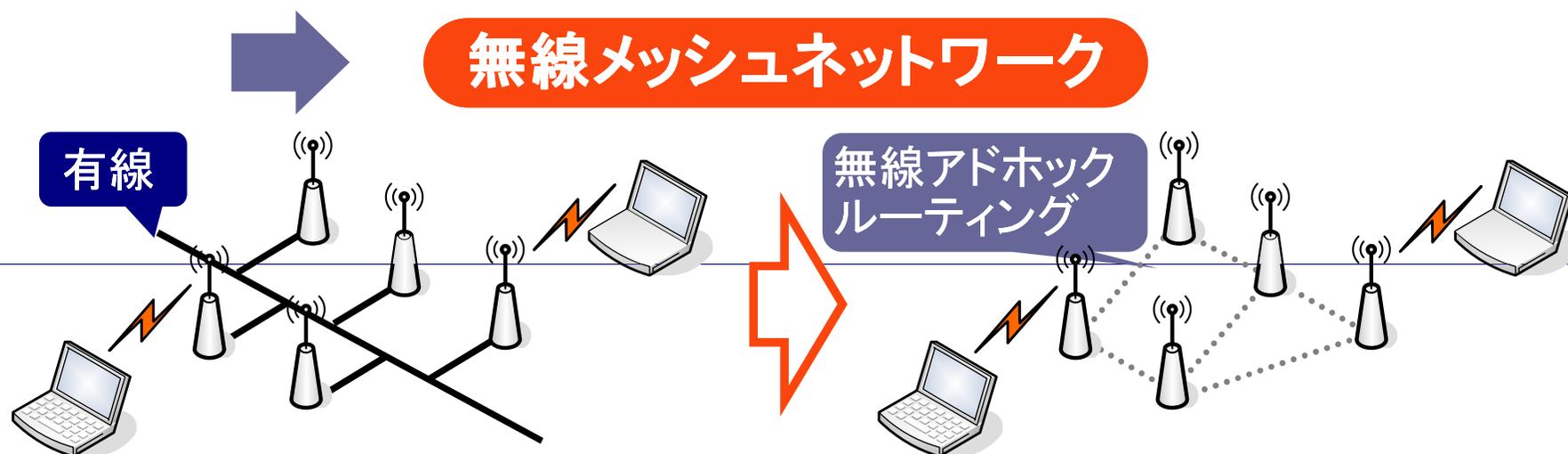
鹿間 敏弘 ††

渡邊 晃 †

† 名城大学 †† 福井工業大学

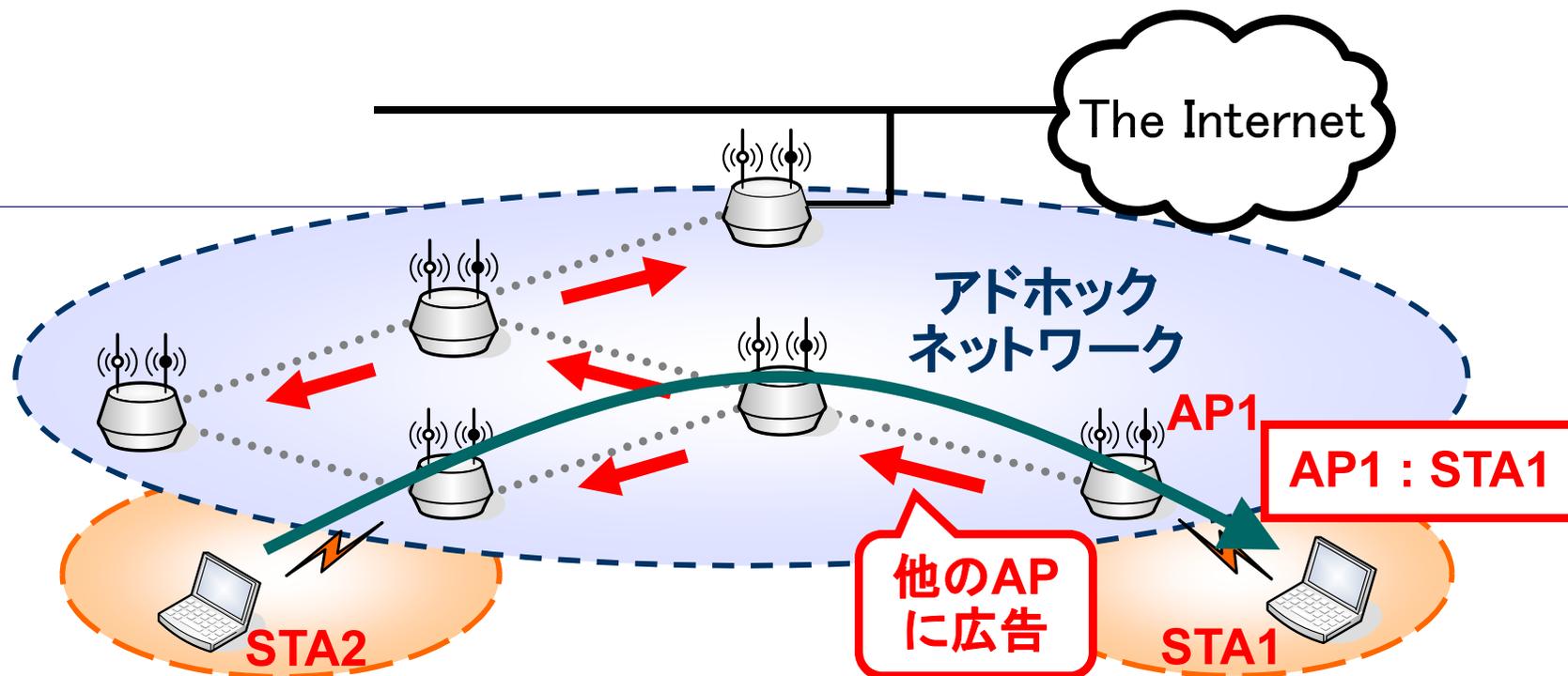
# はじめに

- 無線LANの普及
  - 配線を除去でき, 自由なレイアウトにできる
  - 移動性がある
- 更なる通信範囲拡大の要求
- 有線では採算があわない地域にもブロードバンドを提供



AP (Access Point)間をアドホックルーティングで繋ぐことによって, 容易かつスケーラブルな無線ネットワークの構築が可能

# 無線メッシュネットワーク概要



- AP間はアドホックネットワーク
- APと端末間はインフラストラクチャモード
- 端末/APマッピング情報(端末とAPの対応関係)による経路決定

# 無線メッシュネットワークの課題

- アドホックルーティングプロトコルの選定
  - MANETにおける様々なプロトコルの定義
  - 既存のメッシュネットワークは1つのプロトコルに依存
  - ➡ 無線メッシュネットワークにすべてのMANETプロトコルを自由に適応できると有益
- 端末/APマッピング情報の交換の効率化
  - 既存のインフラストラクチャモードの端末が参加できるため、多くの端末が参加することが想定される
  - ➡ 膨大な端末収容数に対応できる制御方法
- シームレス(ロスレス)ハンドオーバーの実現
  - ➡ 確実なハンドオーバー通知が必要

# 既存技術

	アドホックプロトコルの選択	端末/APマッピング情報交換方式	シームレスハンドオーバー
M-WLAN	拡張OLSR	定期更新	×
iMesh	拡張OLSR	定期更新	△(失敗する場合がある)
Smesh	独自プロトコル	定期更新	△(端末側もアドホックが前提)
IEEE802.11s	少数の独自規格	定期更新/ オンデマンド	△(別のタスクグループで規格)

## その他プロプライエタリな技術

Metro Mesh, Mesh Cruiser, Packethop, etc.

# IEEE802.11sの概要と課題

## ● 無線メッシュプロトコル

- オンデマンド型のRM-AODVを利用
- 固定的ネットワークであれば定期更新に切り替え可能

独自プロトコル

## ● RM-AODV

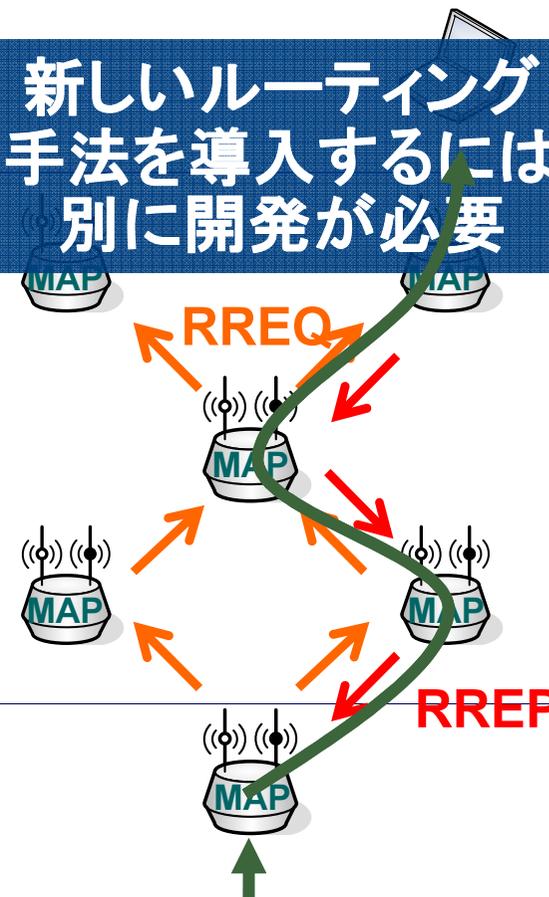
- 端末がパケットを送信するとMAPは代理でRREQをフラッディングし、宛先端末への経路を探索する
- 宛先端末を配下に持つMAPはRREPをユニキャストで返す
- 各MAPは両端末へのパスを確立

## ● ハンドオーバ

- 802.11F, 802.11r, 802.21などの技術を利用

AP間が有線用の規格

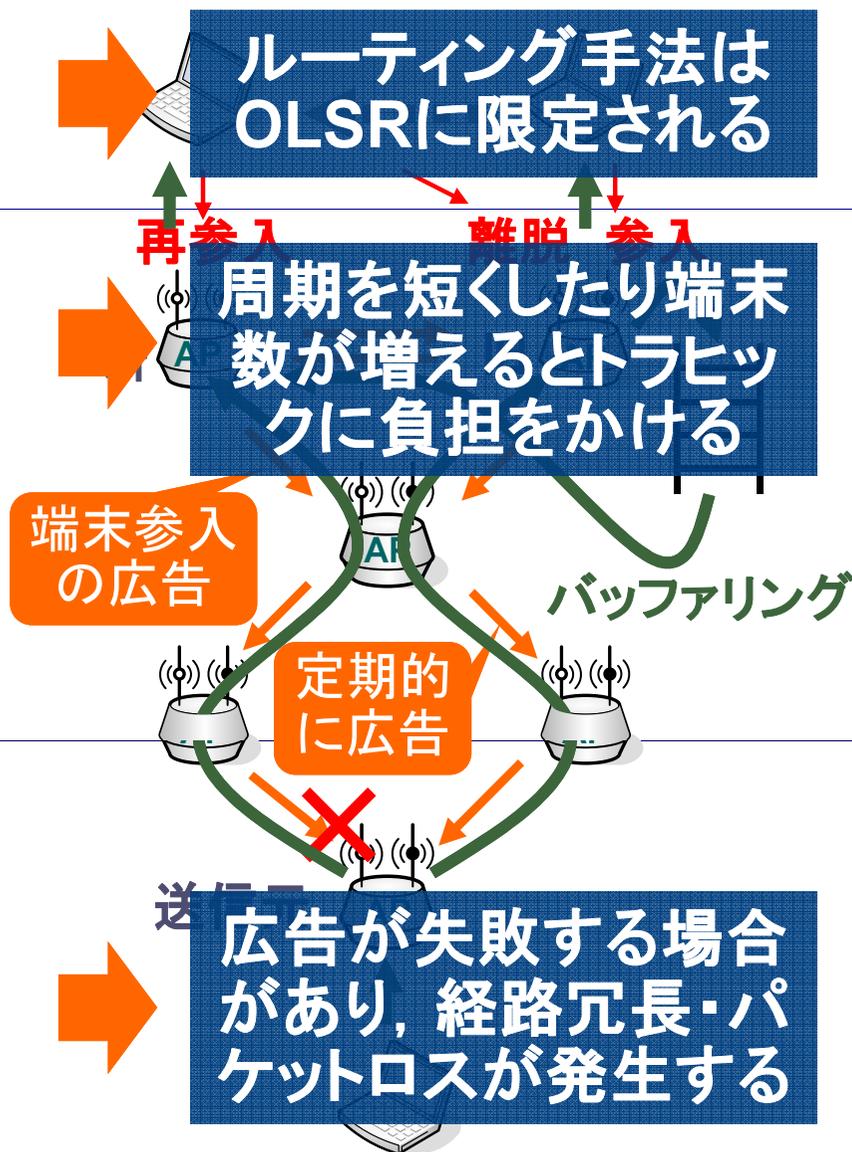
新しいルーティング手法を導入するには別に開発が必要



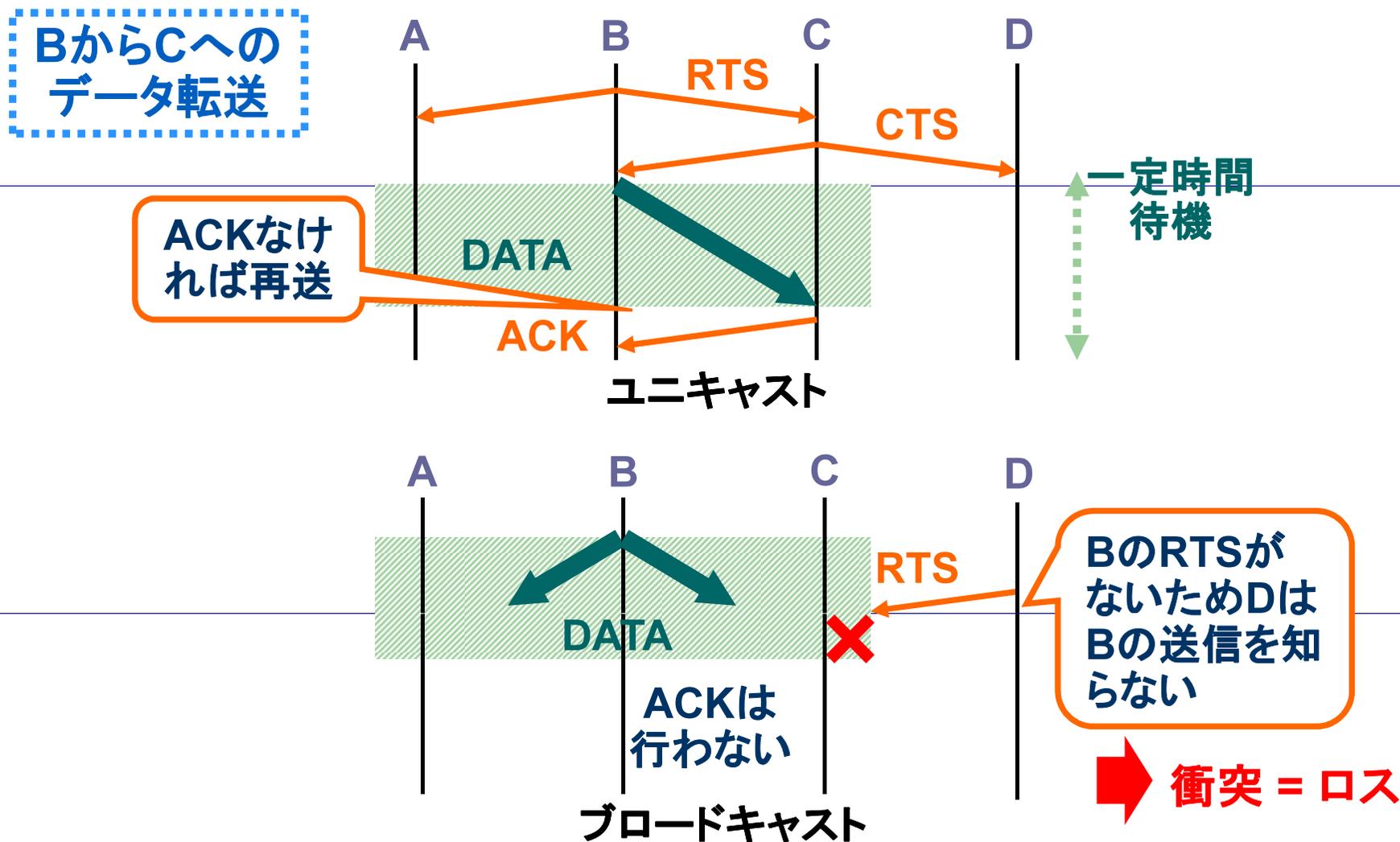
媒体が無線メッシュの場合の考慮はない

# iMeshの概要と課題

- 無線メッシュプロトコル
  - OLSRを拡張 OLSRに依存
- ルーティング
  - APは端末/APマッピング情報を定期的に広告 **全端末の情報を常に広告**
  - 広告を受けた各APは端末へのパスを確立
- ハンドオーバー
  - 端末が離脱すると、APは転送中のパケットをバッファリング
  - 端末が新APに再参入すると、新APはマッピング情報を広告
  - 旧APはパケットを新APへ転送
  - 各APのパスは新APへ更新



# フラッディング(広告)の消滅



ブロードキャストの繰り返しであるフラッディングはロスする可能性が高い

# WAPL

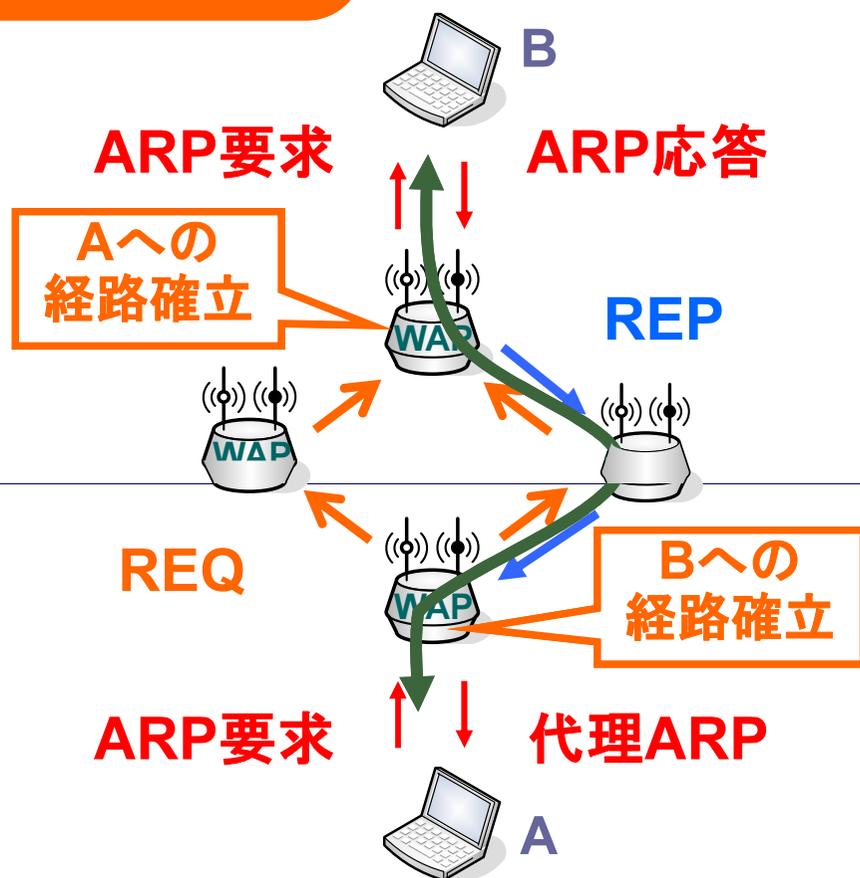
## Wireless Access Point Link

- MANETの全てのアドホックルーティングプロトコルの自由な選択
- オンデマンドな端末/APマッピング情報の交換による効率化
- より確実なシームレスハンドオーバ

# WAPLにおける端末情報の通知

- 端末/APマッピング情報を交換するのは通信開始時とハンドオーバー時のみ

通信開始時

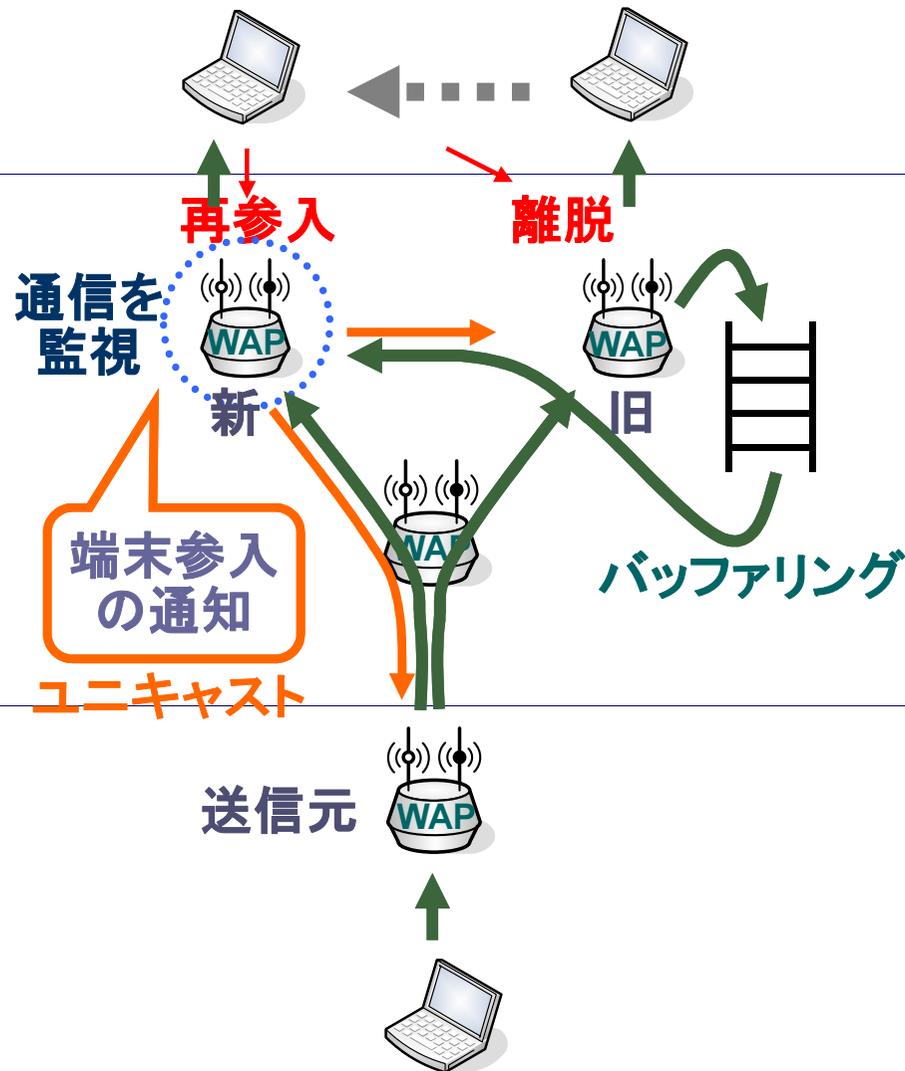


AP間の経路生成プロセスとは独立したプロセス

- WAPはARP要求を受けると、その情報をフラッディングする
- フラッディングを受けたWAPはAへの経路表を作り、端末側へARP要求を流す
- ARP応答を受けるとWAPはユニキャストで応答を返す
- AのWAPはBへの経路表を作り端末側へ代理ARPを流す

オンデマンドにすることで端末の数に影響を受けない

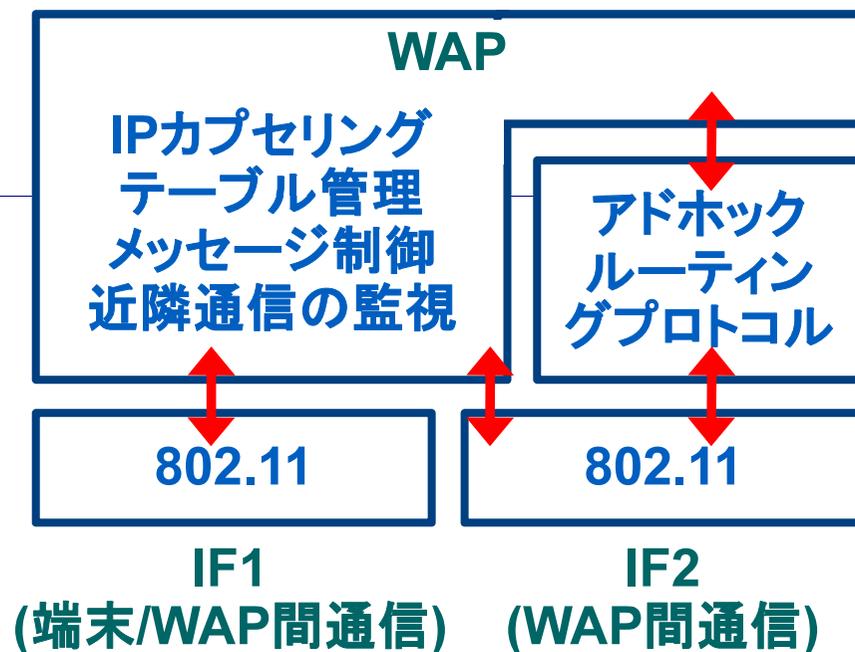
# WAPLにおけるハンドオーバー



- WAPは周りの通信を**プロミスキュース**で**監視**し通信中の端末とWAPの情報を把握
- 端末が新WAPに再参入すると、新WAPは先に得た情報から**旧WAP**と**送信元WAP**を特定
- それぞれに**ユニキャスト**でハンドオーバーを通知

ユニキャストで通知できるため信頼性が高い

# WAPLのアーキテクチャ



- アドホックルーティングと完全に独立した構造

- ➡ MANETのプロトコルが自由に選択可能
- ➡ 端末/APとAP間の接続状態の性質を分けてメッシュを構築できる

IEEE802.11sと異なる

- 端末/APマッピング部
  - 多数の端末がネットワークに参加
  - オンデマンドな制御
- アドホックルーティング部 (AP間)
  - 一時的通信網 (電源なし, 移動性あり)      リアクティブ型
  - 公共通信網 (電源あり, 移動性なし)      プロアクティブ型

# ns-2によるWAPLとiMeshのシミュレーション

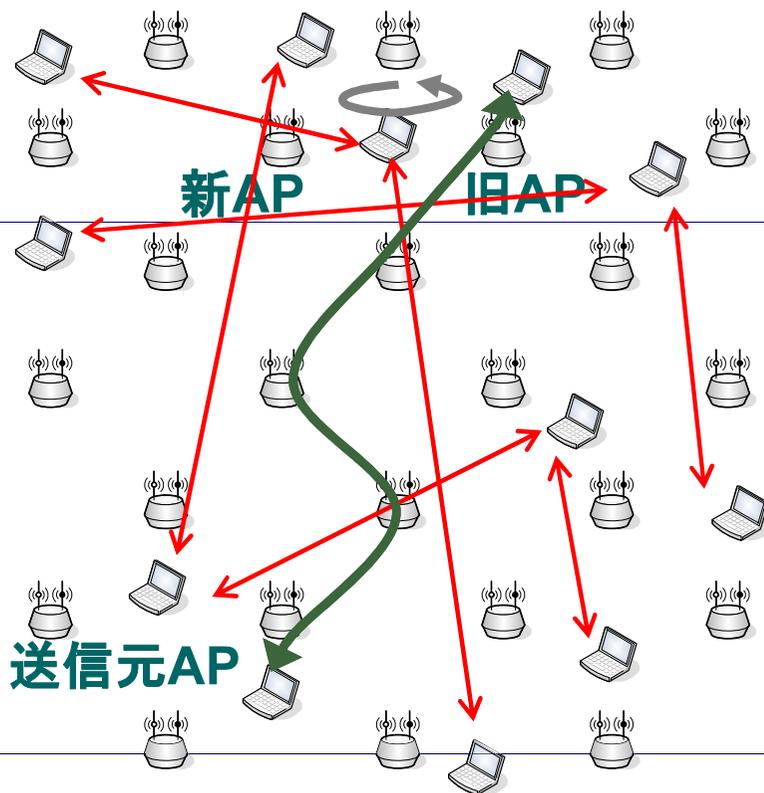
## ● ns-2の改造

- APへの離脱・参入処理の追加
- 最適なAP選出機能の追加
- WAPにはインフラモードとアドホックモードの2チャンネルを実装
- WAPLとiMeshの方式を実装

## ● 評価シミュレーション

- ハンドオーバー通知の不到達率
- iMeshの定期的な広告がトラフィックへ与える負荷
- WAPLの通信開始メッセージがトラフィックへ与える負荷

# ハンドオーバ通知の不到達率



## ハンドオーバ端末

台数	1ペア
通信タイプ	UDP, 20ms間隔, 172byte
ホップ数(AP間)	1, 2, 3, 4

## 背景負荷端末

台数	10
セッション数	10
1セッションのトラフィック	250, 500, 750, 1000, 1250 kbps(UDP)
設置位置	ランダム

## メッシュネットワーク

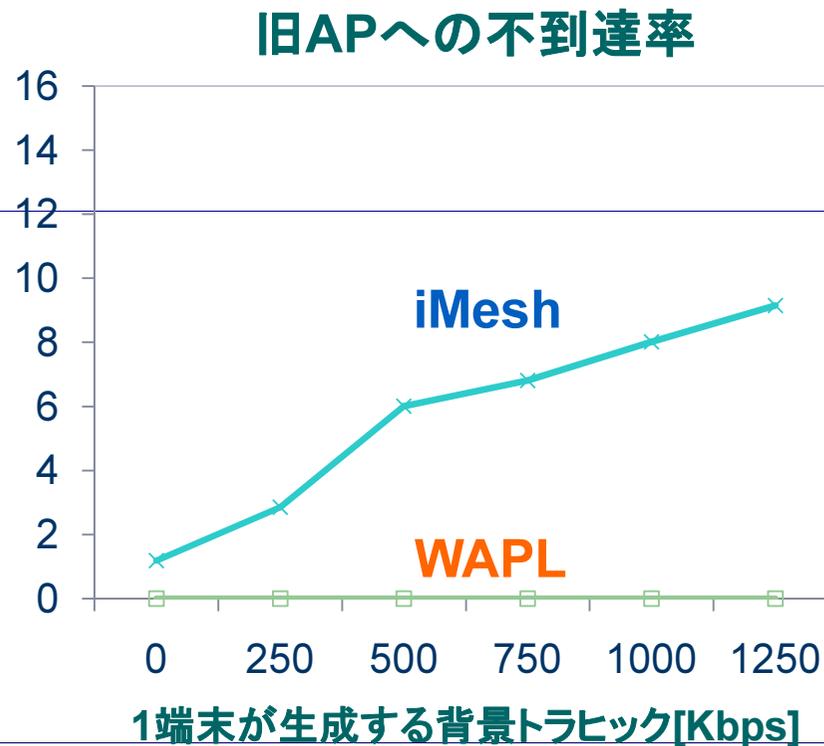
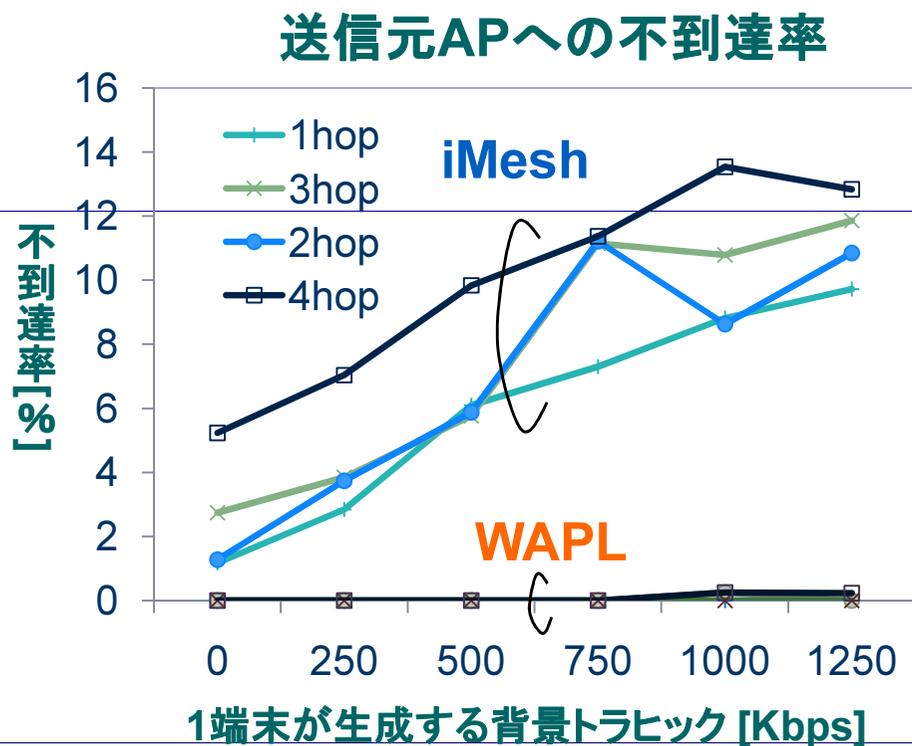
AP台数	24台
プロトコル	iMesh, WAPL on OLSR

- 端末は左右へ交互に移動し、ハンドオーバを繰り返す
- 背景負荷としてランダムに設置した複数の端末がセッションを生成



新APから旧APのハンドオーバ通知の失敗率, 新APから送信元APのハンドオーバ通知の失敗率をそれぞれ計測

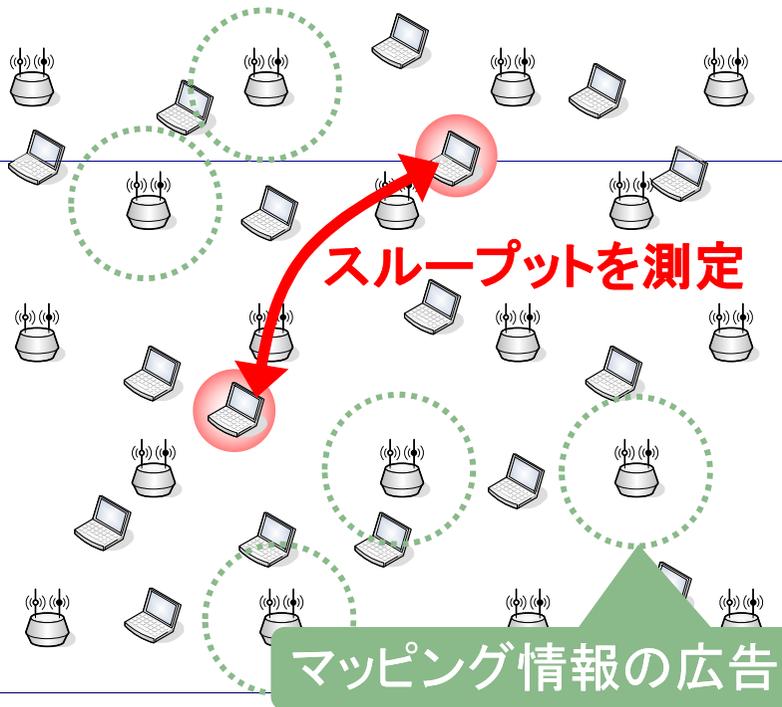
# ハンドオーバー通知の不到達率



- 送信元APへの不到達率 — iMeshは14%程度, WAPLはほぼ0%
- 旧APへの不到達率 — iMeshは10%程度, WAPLは0%

➡ ユニキャストによる効果は明確

# iMeshの定期的な広告がトラフィックに与える負荷



## スループット測定用端末

台数	1ペア
通信タイプ	FTP(100秒間)
ホップ数(AP間)	1,2,3,4

## 背景負荷端末

AP1台辺りの台数	0,4,8,12
通信	なし
定期的な広告の間隔	1,2,5秒

## メッシュネットワーク

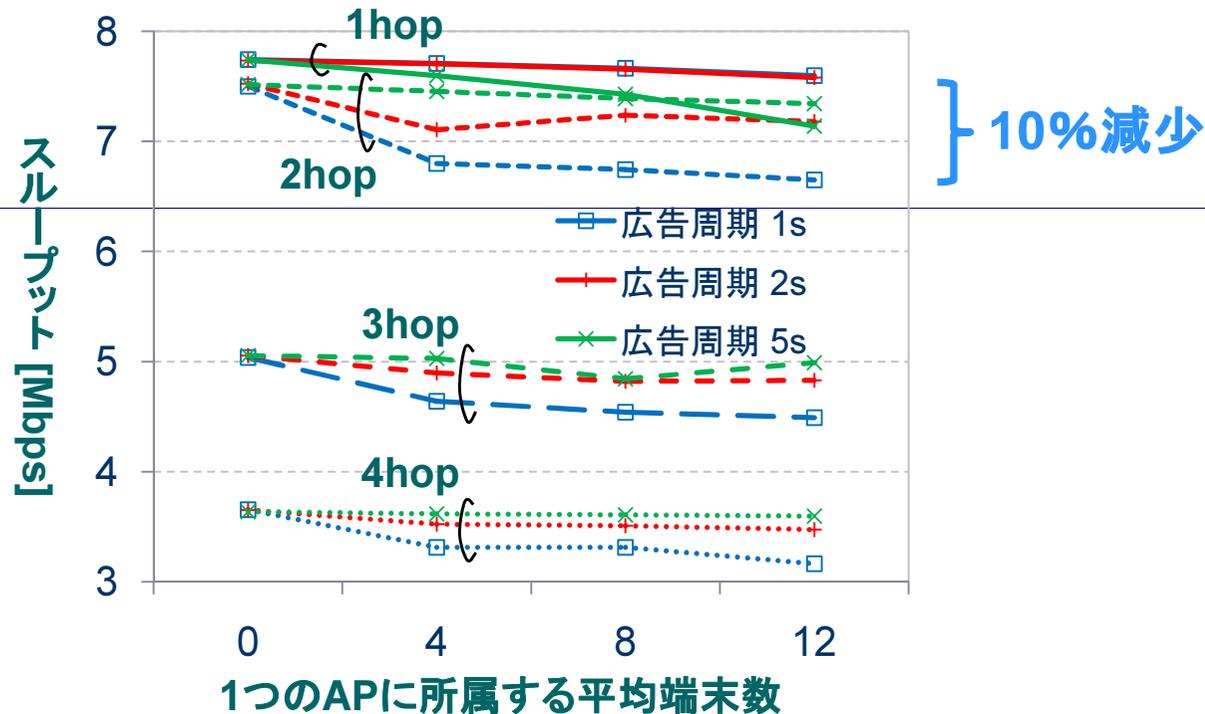
AP台数	52台
プロトコル	iMesh

- 端末を複数設置してAPにマッピング情報を広告させる
- 1ペアの端末がTCP通信を実行してスループットを測定



それぞれの条件の背景負荷のもとにTCPのスループットを測定し、定期的な広告がトラフィックに与える影響を評価

# iMeshの定期的な広告がトラフィックに与える負荷



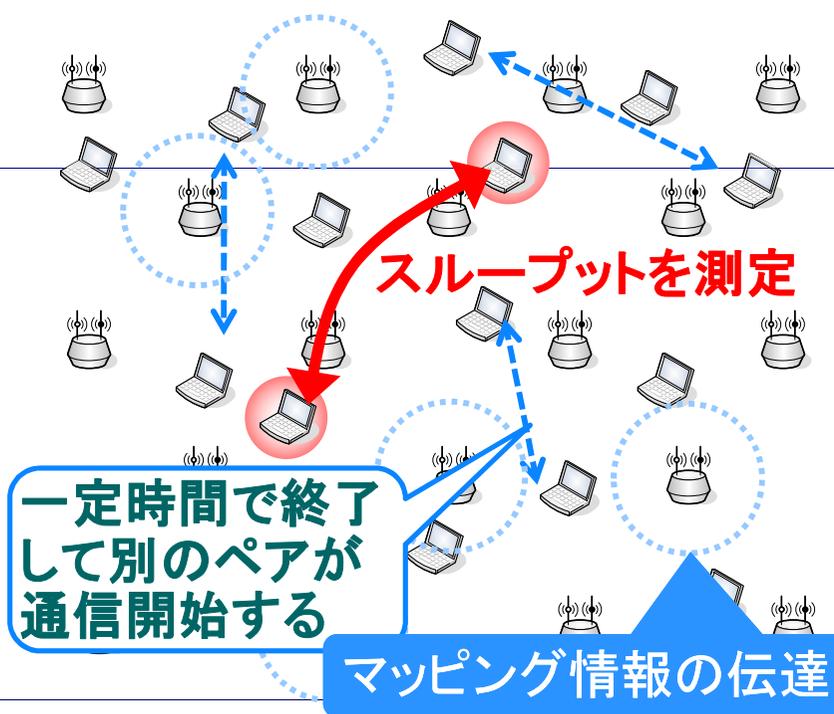
- 広告のロスを補うため間隔が狭くする
- ネットワークの参加端末が増える



ネットワーク  
トラフィックを圧迫

iMeshではネットワーク規模、参加端末の数を制限する、もしくはハンドオーバをあきらめ周期を十分に長くする必要がある

# WAPLの通信開始メッセージがトラヒックに与える負荷



## スループット測定用端末

台数	1ペア
通信タイプ	FTP(100秒間)
ホップ数(AP間)	1,2,3,4

## 背景負荷端末

台数	200台
通信タイプ	UDP,172byte
セッション数	常に3になるよう切替える
1秒辺りのメッセージが発生頻度	0,10,20,30,40,50回

## メッシュネットワーク

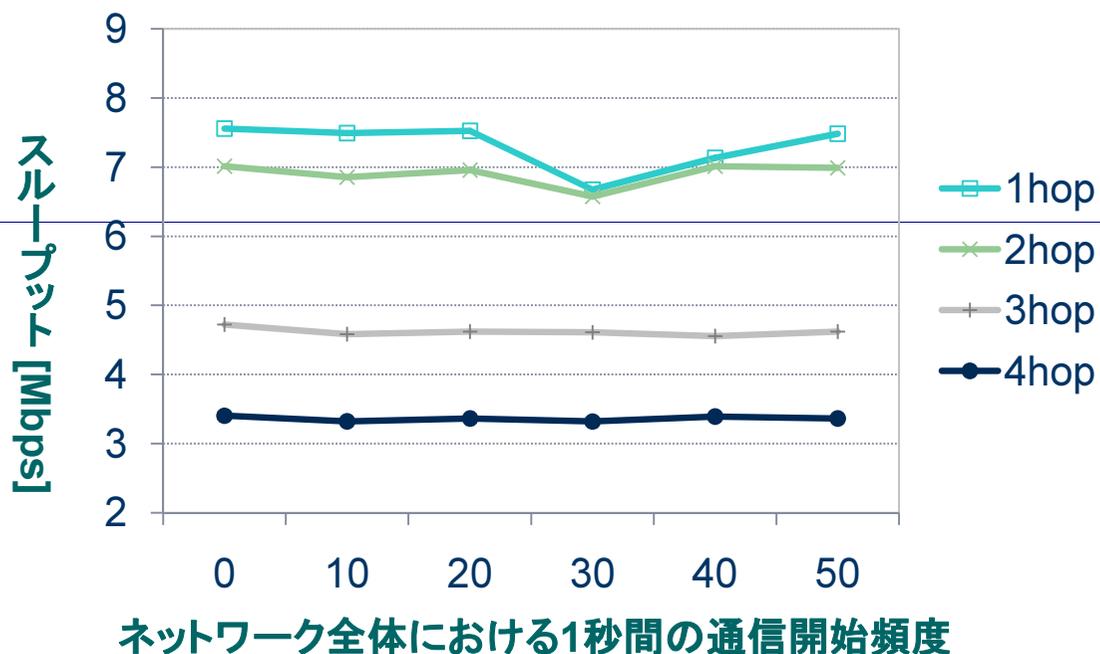
AP台数	52台
プロトコル	WAPL on OLSR

- 背景負荷用端末は通信開始を繰り返し続ける
- 1ペアの端末がTCP通信を実行してスループットを測定



通信開始頻度ごとの通信開始メッセージがトラヒックに与える影響を測定

# WAPLの通信開始メッセージがトラヒックに与える負荷



- 通信開始頻度0回のおときから50回のおときまでほとんどスループットが低下していない
- ネットワーク全体で1秒に50回の通信開始頻度は十分な負荷



WAPLの通信開始制御による負担は小さいと言える

# まとめ

## ● WAPL

- オンデマンドな端末/APマッピング情報の交換による効率化
- MANETの全てのアドホックルーティングプロトコルの自由な選択
- より確実なシームレスハンドオーバ

## ● シミュレーションによる評価結果

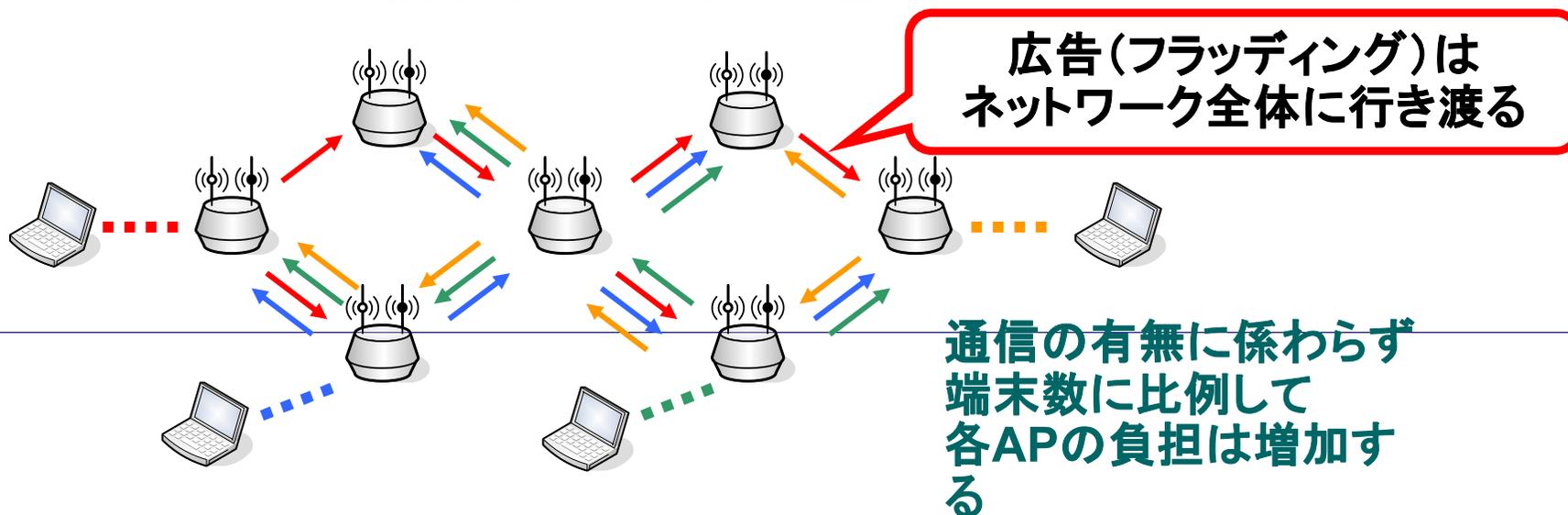
- ハンドオーバ通知の失敗率をほぼ0%に抑えた
- オンデマンドによる端末/APマッピング情報の交換の方がネットワークに影響を与えない

## ● 今後

- 実機によるテストベッドの構築など

## 補足2: 拡張HNAメッセージの負担

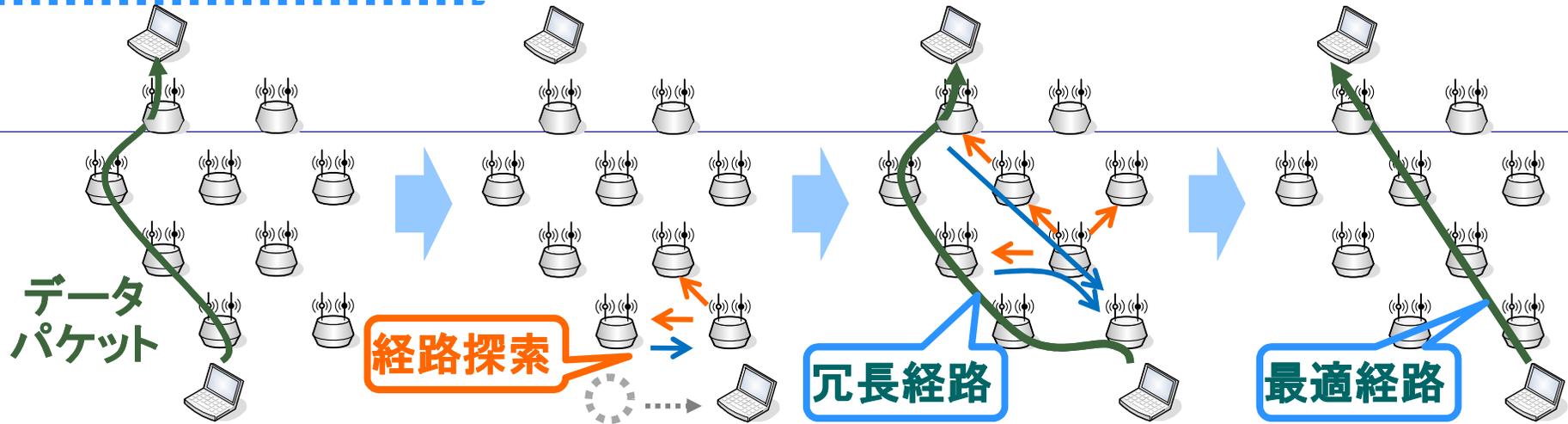
- ネットワーク規模が大きくなると、端末情報の広告によるトラヒックがネットワークの負担になる
  - iMeshはハンドオーバー後も常に定期的に広告を行うことで、端末情報伝達の失敗を修正する



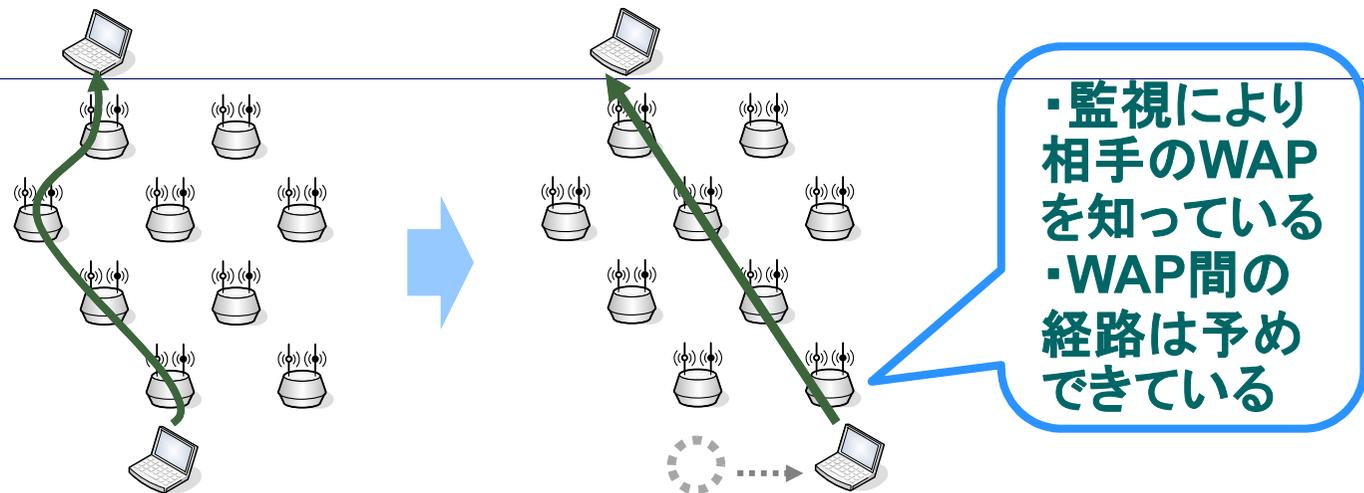
➡ システムの信頼性を維持しつつ、広告によるトラヒックは最小限に抑えるべき

# 補足3: RM-AODVとWAPL over OLSR

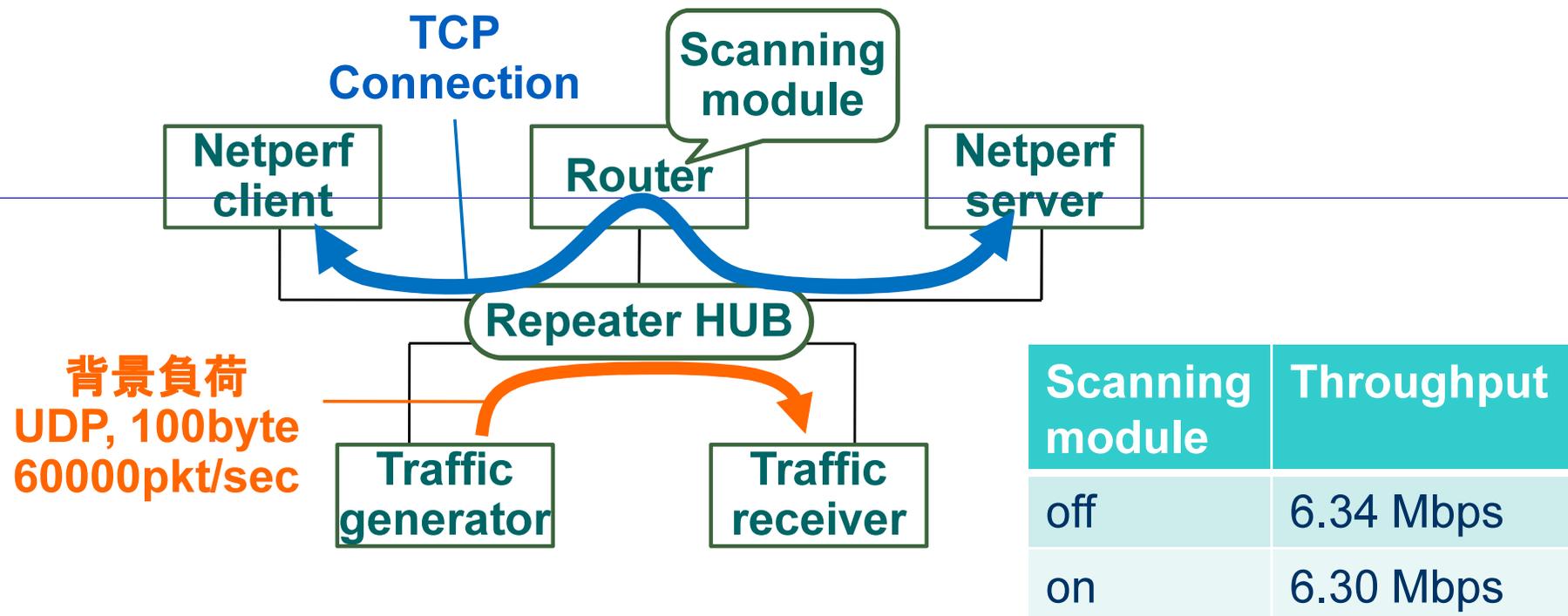
## RM-AODV (802.11s)



## WAPL over OLSR



# 補足4: パケット監視によるオーバヘッド

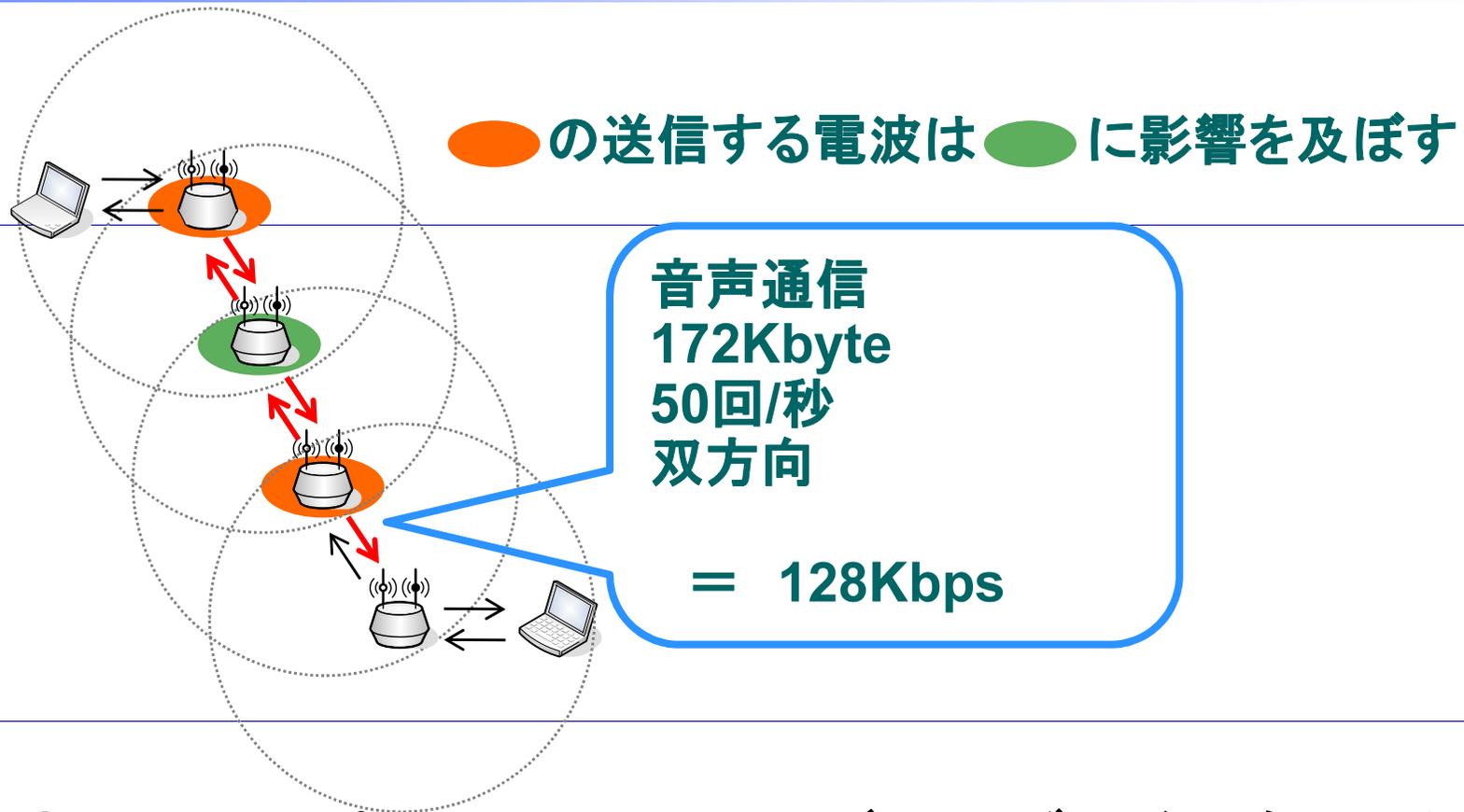


- ルータにパケット監視とテーブル生成機能を付け十分な背景負荷をかける
- 機能がオン/オフの場合でスループットを比較



0.6%程度の劣化, パケット転送性能にはほとんど影響しない

# 補足5: 音声通信がHNAに及ぼす影響



- 端末からのパケットはフラッディングの経路に重なる可能性が高い
- 両隣のAPの発生する電波は全て影響する

# 補足6: MANETのマルチチャネル研究

- C. Jenhui and C. Yen-Da, “AMNP: Ad Hoc Multichannel Negotiation Protocol for Multihop Mobile Wireless Networks”, ICC2004
- N. Jain, etc., “A Multichannel CSMA MAC Protocol with Receiver-Based Channel Selection for Multihop Wireless Networks”, IC3N2001
- Shih-Lin Wu, etc., “A New Multi-Channel MAC Protocol with On-Demand Channel Assignment for Multi-Hop Mobile Ad Hoc Networks”, ISPAN2000
- H. Wing-Chung, etc., “A Dynamic Multi-Channel MAC for Ad Hoc LAN”, in 21st Biennial Symposium on Communications
- A. Atul, etc., “A Multi-Radio Unification Protocol for IEEE 802.11 Wireless Networks” in *IEEE International Conference on Broadband Networks*
- *Etc...*

# 補足7. IEEE802.11sとその課題

- ルーティング

- AODVをベースにしたRM-AODVを採用

- 定期的な情報交換で予め経路を形成することも可能

- ➡ その他のMANETのルーティングプロトコルは利用できない

- シームレスハンドオーバ

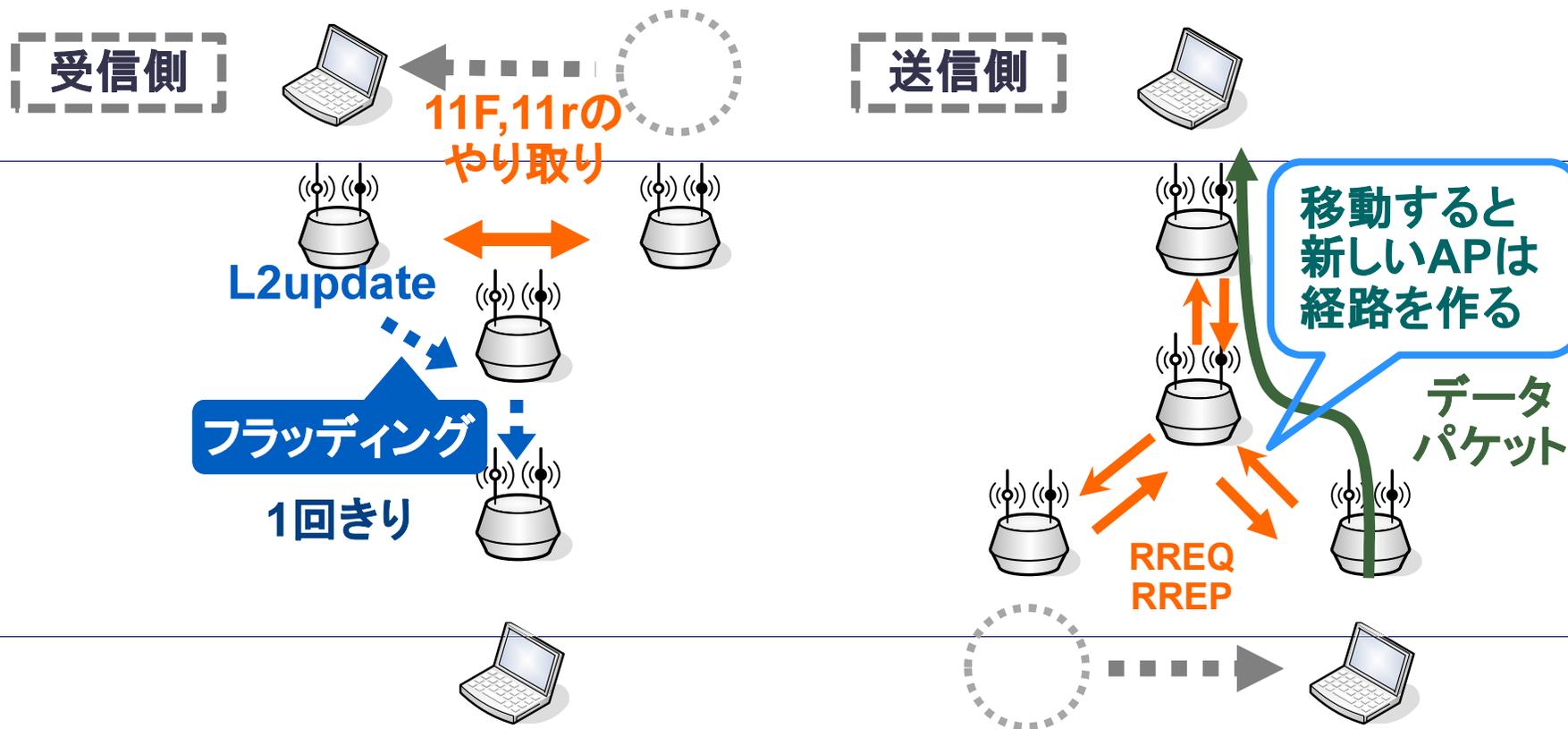
- 802.21 ( 802.11F, 802.11r) の規格を利用

ハンドオーバ時にL2updateメッセージのブロードキャストによってDS中のスイッチの経路を更新

- ➡ 無線メッシュではブロードキャストはフラッディングとなるためiMeshと同様の問題が発生する

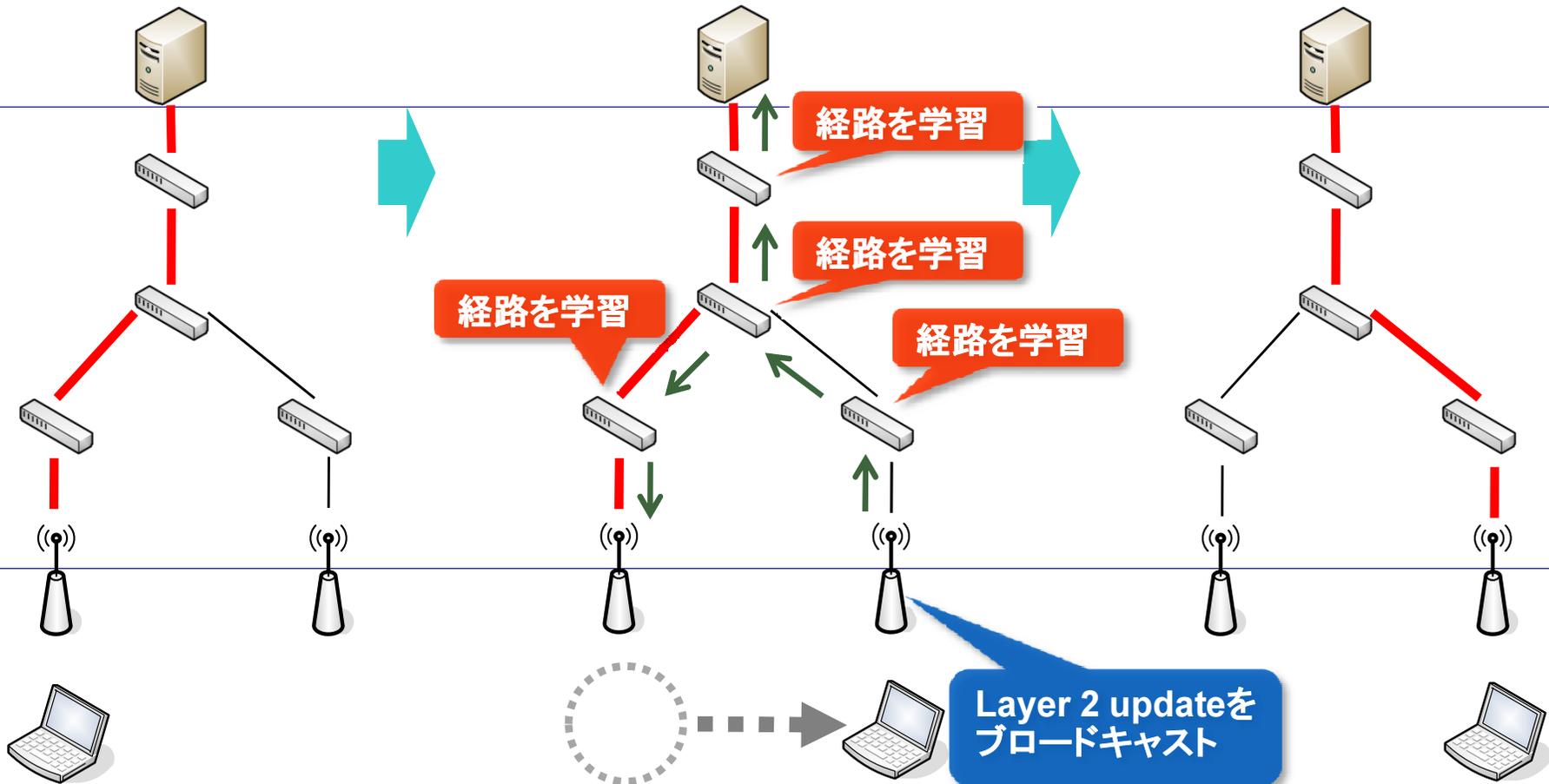
- ➡ 端末に機能を追加する必要がある(11r, 21の機能)

# 補足8. IEEE802.11sの概要と課題

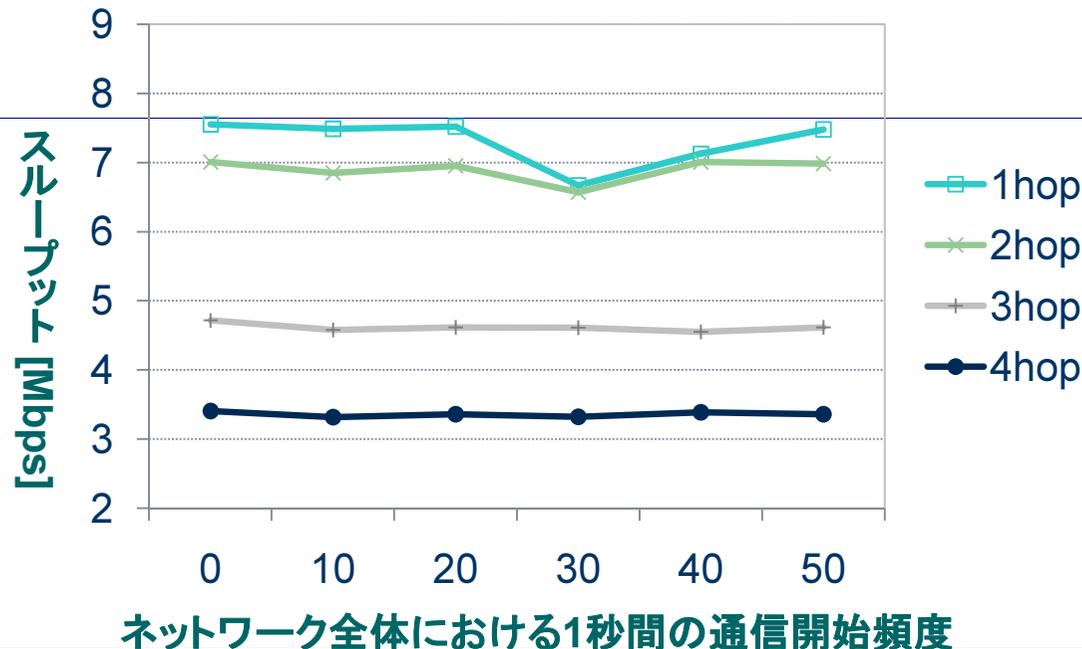


- iMesh同様、フラッディングが失敗する危険がある
- 送信側では移動時に遅延が発生する
- 独自に企画したルーティングプロトコルしか使えない

# 補足9. Layer 2 update



# 補足10. 通信開始シミュレーションについて



12端末/APのとき  
iMesh・・・10%の劣化



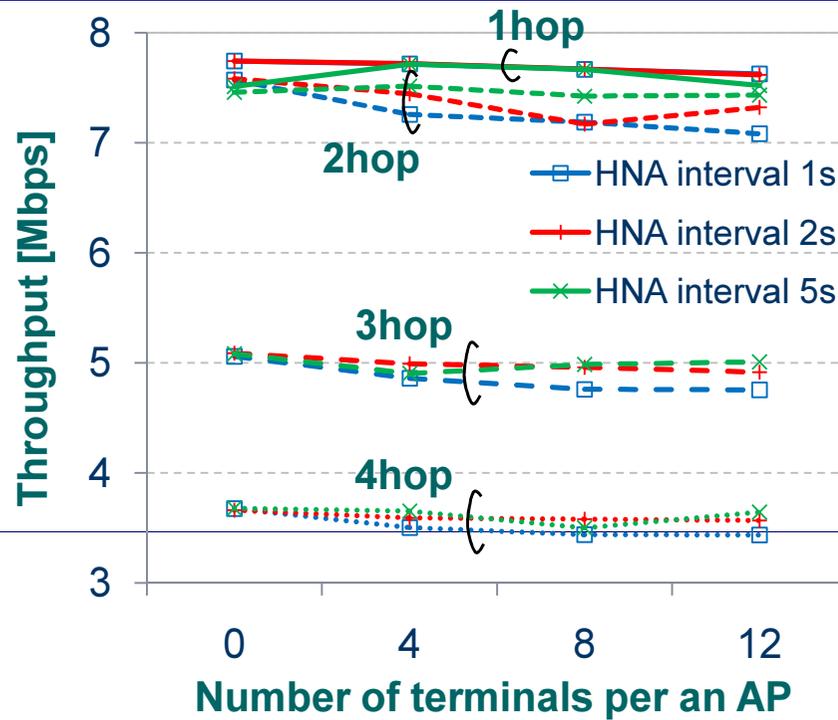
WAPLにおいて、12端末/AP  
のときでも端末1台あたり十分  
な通信開始頻度であればよい

APが52台で12端末/APなら  
全体の参加端末数は624台  
ネットワーク全体で1秒間に  
50回通信開始が起こる場合  
50回 ÷ 624端末  
= 1端末1秒間に0.08回  
= 1端末あたり12.5秒に1回  
通信開始

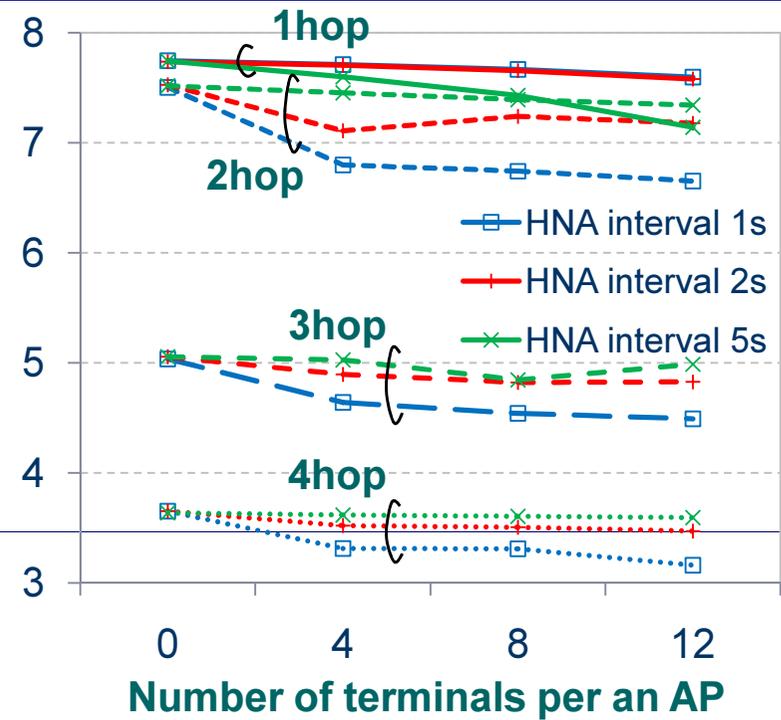
- 12.5秒に1回なら十分(得に外部ネットワークへの通信は常にDGW宛てになるため情報交換の省略が可能)
- 12.5秒に1回はiMeshの周期よりも短い
- WAPLのメッセージは通信する端末の情報のみ含まれるのに対し、iMeshはAPに所属するすべての端末の情報を広告する

# 補足11. 広告シミュレーションでAP38台のとき

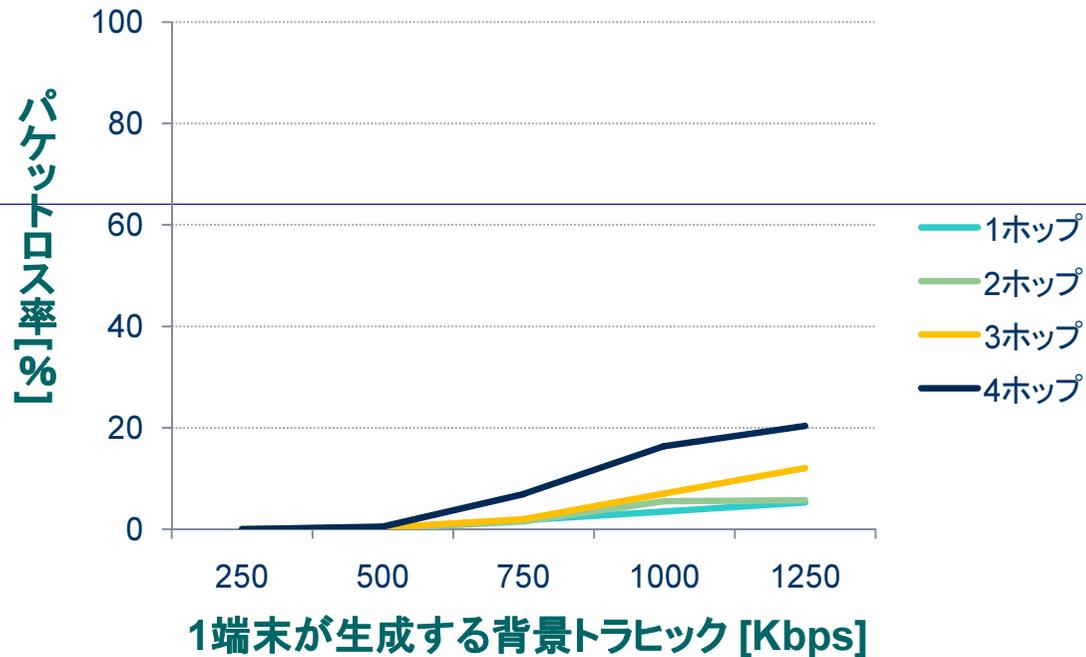
## AP38台時のスループット



## AP52台時のスループット



# 補足12. ロスシュミレーションの一般通信

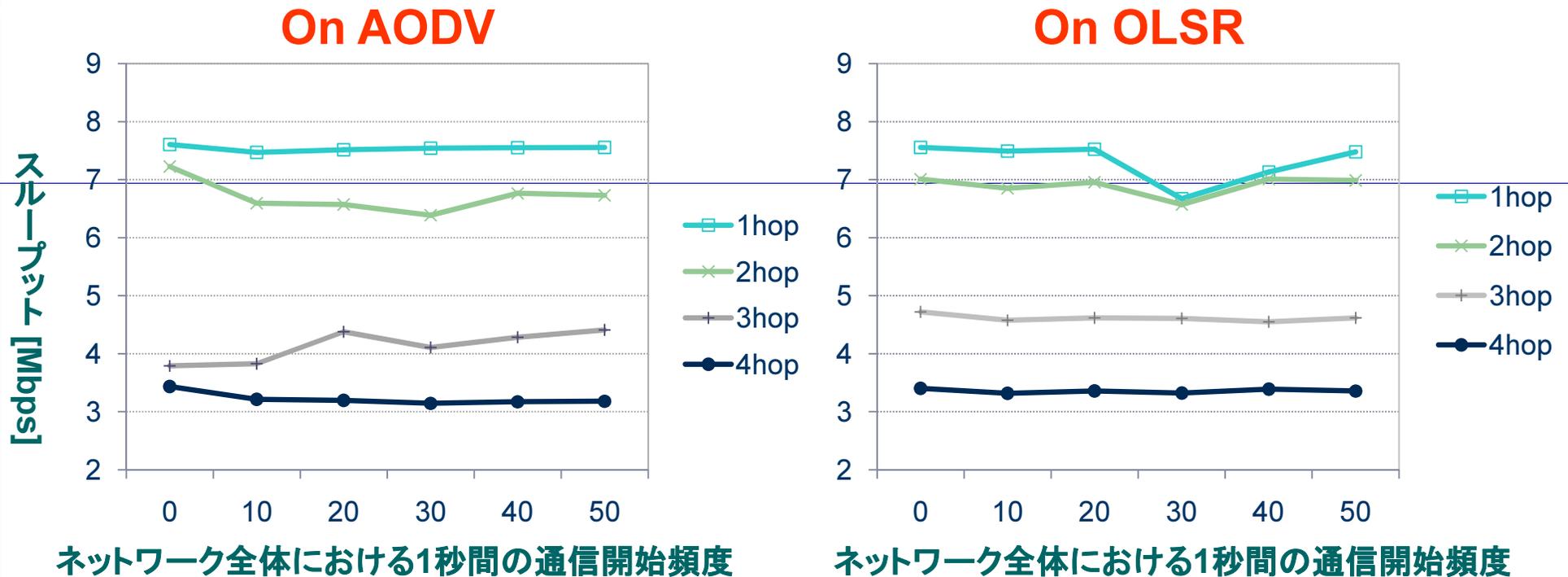


- 同じ背景トラヒックでVoIPの packet loss rate を測定



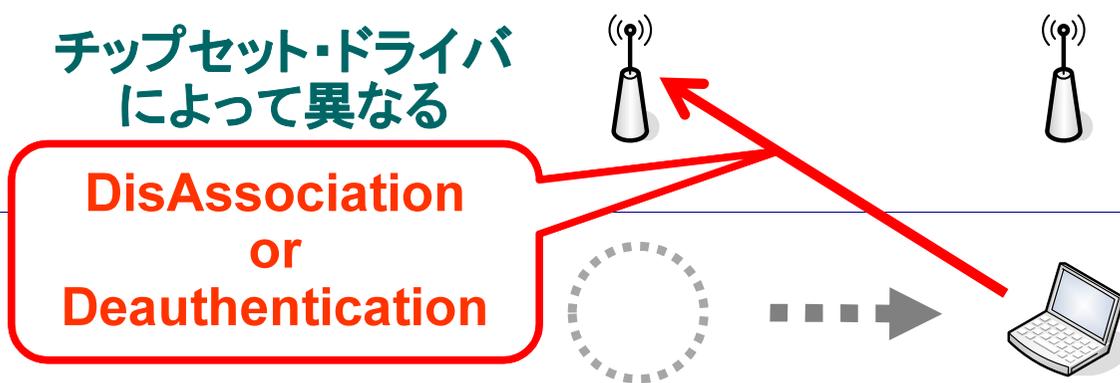
- 750Kbps程度からVoIPとしては不適切な量の背景負荷となる (QoS制御なし)

# 補足13. 通信開始の負荷 on AODV



- 誤差が大きいののでサンプル数を増やすべき
- OLSRとだいたい同じスルーパット
- 50のときでもスルーパットは低下していないのでWAPL on AODVでも十分通信開始の負荷は小さい

# 補足14. 離脱処理について



	ESSIDが異なる場合	ESSIDが同じ場合
WinXP(AtherosWNA)	Deauthentication	未検証
WinXP(Intel2945,3945)	なし	なし
Linux(ipw2945)	Disassociation	Disassociation
Linux(ipw3945)	なし	なし
Linux(MADWIFI)	Disassociation	Disassociation
Linux(orinoco_cs)	なし	なし
ICOM無線携帯電話	Deauthentication	Deauthentication

# 補足15. その他ハンドオーバー技術

- FMIP

- Mobile IPに依存
- 予め移動先がわかる機能が端末に必要
- 三角経路

- MISP

- 端末への機能追加が必要
- 三角経路