

## 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

阪田 史郎<sup>†a)</sup> 青木 秀憲<sup>††b)</sup> 間瀬 憲一<sup>†††c)</sup>

## Mobile Ad Hoc Networks and Wireless LAN Mesh Networks

Shiro SAKATA<sup>†a)</sup>, Hidenori AOKI<sup>††b)</sup>, and Kenichi MASE<sup>†††c)</sup>

あらまし インターネットや携帯電話網などの従来のネットワークにはない無線マルチホップの新しい形態で通信を行うアドホックネットワークは、ユビキタスシステムにおける重要なネットワークとして、特に1990年代末以降活発な研究がなされてきた。2003~2004年にはユニキャストルーチングについて、IETF (Internet Engineering Task Force) のMANET (Mobile Ad hoc NETwork) WGにおいて三つのプロトコルがExperimental RFCになり、現在Standard TrackのRFCに向けた作業が進展している。また、大規模なテストベッドの構築が進展し、実用化への期待が高まっている。本論文では、アドホックネットワークについて、これまでの研究、標準化の動向を述べた後、MAC層でのアドホック(無線マルチホップ)ネットワークの実現技術として、2004年5月に検討が開始されたIEEE802.11sにおける無線LANメッシュネットワークに関する標準化状況、研究内容、アドホックネットワークの今後の進展を展望する。

キーワード アドホックネットワーク、メッシュネットワーク、ルーチングプロトコル、ユニキャスト、マルチキャスト、無線LAN、IEEE802.11s

## 1. ま え が き

アドホックネットワークの研究は、米国のDARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) において、1972年に開始されたPacket Radio Networks (PRNET) と呼ぶ研究プロジェクトに端を発する。その後約20数年間は、軍事目的の研究が中心であったが[1]、1990年代半ば以降公共的なサービスとして災害現場での利用などを想定した民間での研究が開始された。

アドホックネットワークの定義については、後述するユニキャストルーチングアルゴリズムの一つであるDSR (Dynamic Source Routing) を1994年に提案した、当時米国のRice大学のDavid B. Johnson

が、"An ad hoc network is a collection of wireless mobile hosts forming a temporary network without the aid of any established infrastructure or centralized administration." [2], すなわち移動端末によって一時的に形成され、固定的なインフラや集中管理機構がない無線ネットワークとしている。その後の議論でも、

- 固定的なネットワークインフラが存在しない
- 集中管理機構がない
- ネットワークトポロジーが動的に変化(移動環境が前提)

無線マルチホップネットワークの各要件がアドホックネットワークを定義づける特徴となっている。

固定的なインフラがないということで、インターネットや携帯電話網には依存せず、独立に存在可能である。集中管理機構がないということでは、クライアント・サーバ型に加えて、自律分散、ピアツーピア(Peer-to-Peer)型の通信が重要になる。

アドホックネットワークは、ユビキタスシステム実現のための重要なネットワーク形態として、特に1990年代末以降国内外を問わず活発に研究がなされてきた。しかし、従来の研究の大部分は、具体的な応用

<sup>†</sup> 千葉大学大学院自然科学研究科, 千葉市

Graduate School of Science and Technology, Chiba University, 1-33 Yayoi-cho, Inage, Chiba-shi, 263-8522 Japan

<sup>††</sup> (株) NTT ドコモ ワイヤレス研究所, 横須賀市

Wireless Laboratories, NTT DoCoMo, Inc., 3-5 Hikarinooka, Yokosuka-shi, 239-8536 Japan

<sup>†††</sup> 新潟大学大学院自然科学研究科, 新潟市

Graduate School of Science and Technology, Niigata University, 8050 Ikarashi 2-nomachi, Niigata-shi, 950-2181 Japan

a) E-mail: sakata@faculty.chiba-u.jp

b) E-mail: aokihid@nttdocomo.co.jp

c) E-mail: mase@ie.niigata-u.ac.jp

が明示されず、対象も実用ネットワークではなく机上の解析やシミュレーションによる評価にとどまっていた [1], [3]~[7]. 2004 年以降、徐々に実応用を想定し、また大規模なテストベッドを用いて現実の利用環境に即した精度の高い評価を行う研究へと移りつつある [8]~[10].

アドホックネットワークと同様、2003 年以降急速に研究が活発化しているネットワークとして、センサネットワークがある。複数のセンサ群を無線ネットワークで接続したセンサネットワークは、必ずしも上記の“アドホック”な形態で通信するとは限らないが、防犯・防災、環境計測・保全、医療・介護、農作物の栽培、ビル管理・制御など各種センサの機能を有効に利用した、より具体的な応用を想定した研究が進められている [11], [12].

アドホックネットワークの標準化については、2003 年から 2004 年にかけて、インターネットの標準化機関である IETF の MANET WG において、ユニキャストルーティングに関する三つのプロトコルが Experimental RFC になった。現在 Standard Track の RFC に向けた作業が進展している。2004 年 5 月に発足した IEEE802.11s における無線 LAN のメッシュネットワーク (アドホックネットワークに対応)、ZigBee Alliance が推進するセンサネットワーク ZigBee (物理層、MAC 層は IEEE802.15.4) では、MANET の AODV (Ad hoc On-demand Distance Vector) を採用する方向である [12].

アドホックネットワークについては、物理層から MAC 層、アプリケーション層に至るすべての層において未解決の多くの技術課題がある [1], [4]. 本論文では、アドホックネットワークの想定応用例を挙げた後、2003 年以降に特に急速に進展した MANET におけるユニキャストルーティングプロトコルの標準化動向、及び今後重要性が増すマルチキャストプロトコルに関する研究動向を述べる。更に、MAC 層でのアドホックネットワークの実現技術として 2004 年 5 月に発足した、IEEE802.11s メッシュネットワークに関する検討状況を紹介し、関連する研究動向、今後の進展を展望する。

## 2. アドホックネットワークの応用分野と利用形態

アドホックネットワークの軍事目的以外の応用としては、公共的サービスをねらいとした災害時における

ライフラインとしての応用が想起される。大規模な地震、津波、台風、洪水、火災などの発生時に、既設の有線ネットワークのバックアップとして、警察や消防等による捜索、救出、被災者の避難誘導、安否確認、被災状況の収集・連絡、復旧活動支援などを行うために、一時的な通信手段を確保するという利用が考えられる [1], [6]~[8]. 各国において、国家プロジェクトの一環としても研究が進められている応用である。

今後、民間のビジネスの立上げに向けた応用として、インターネット接続が挙げられる。更に、アドホックネットワークならではの応用としては、商品倉庫の管理 (ロボットを活用した商品の入出庫、移動、トレース管理など)、建築工事現場における遠隔制御、農場における遠隔栽培、イベント会場や会議場、ショッピングモールなどにおける利用者の携帯端末への会場案内や、会議資料、広告情報の配信、ITS (Intelligent Transport System, 高度道路交通システム) における車車間あるいは路車間通信による様々な状況情報の配信、地域 (コミュニティ) における様々な目的の情報通信などが考えられている [6], [10].

IEEE802.11s では、企業ネットワークや公共スペースのネットワークに加え、家庭における情報家電ネットワークとしてのアドホックネットワークの有効性についても検討が進められている。

また、アドホックネットワークの利用形態としては、上記の各応用に対応したスタンドアロン型、携帯電話網や無線 LAN などの他のインフラにおいて通信ができない部分を補う形で利用するインフラ補完型、これらのインフラと一時的あるいは永続的に接続して利用するインフラ共存型、アドホックネットワーク内のいくつかのノードを固定ノードにして設置するインフラ内蔵型などがある [6].

しかし、各種の応用に関して、携帯電話網や他のシングルホップのネットワークに対するアドホックネットワークの優位性が明確にならない限り、アドホックネットワークが広く展開されることはない。5. の技術課題を含め実用化には多くの課題を解決する必要がある。実用化、応用化に向けた課題と対策については以下が考えられる。

(1) 従来のネットワークは主としてネットワーク事業者が構築・運用するものであったが、アドホックネットワークはユーザ自身が構築・運用する使い方が中心であり、管理の複雑さが課題となる。この課題に対し、運用自動化の方式を確立する。

(2) ネットワーク事業者が運用する場合は、アドホックネットワークの特徴に基づく SLA (Service Level Agreement) とビジネスモデルを構築する。

(3) アドホックネットワークではネットワークの分割などが起こるため信頼性が低いという課題があるが、一方、たまたま近くにあるノード同士が通信できることにより様々なサービスの実現も考えられる。そのようなアドホックネットワークの特徴を生かしたアプリケーションの開発を進める。

(4) セキュリティの課題に対し、制御メッセージの認証技術確立などにより、無線 LAN と同程度のセキュリティ (例えば、IEEE802.11i や IEEE802.1x) 強度を確保する。

(5) 携帯端末をアドホックネットワークにおける中継ノードとして使用する場合、電池切れによるネットワークの分割の頻度が高まるという課題があるが、この課題に対し大容量・軽量なバッテリーを開発する。

### 3. アドホックネットワークのルーティングプロトコル

#### 3.1 ユニキャストルーティングプロトコル

IETF ではルーティング制御をネットワーク層に位置づけている。既に論文等により 50 以上のユニキャストプロトコルが提案されている [3], [13], [14]。

アドホックネットワークを構成する各端末として、固定端末に比べて消費電力が小さく、処理能力が低いセンサや超小型の移動端末が考えられるため、ルーティングにおける評価尺度としては、通信品質 (スループット, 伝送遅延, パケット損失率など) に加え、省電力 (ノードにおける電力消費や使用帯域を抑制するための制御メッセージ削減, 通信出力抑制, メモリ量削減など), 高信頼化 (通信切断頻度の最小化, ルートの持続時間最長化, 迂回路の設定など) が特に重要となる。これらの項目は互いにトレードオフの関係にあるものもある。例えば、省電力化に寄与するための制御メッセージ数削減はネットワークにおける利用帯域を増やして通信品質を向上させることになるが、制御メッセージを減らせば減らすほど、ネットワーク切断時の新しい経路発見は困難になり、信頼性を低下させる可能性がある。

しかし、各プロトコルには、ネットワークの特性に応じて一長一短があり、あらゆる利用環境で最適というプロトコルはない。利用環境に応じて最適なプロトコルを選択し、利用環境が大きく変化したときに、可

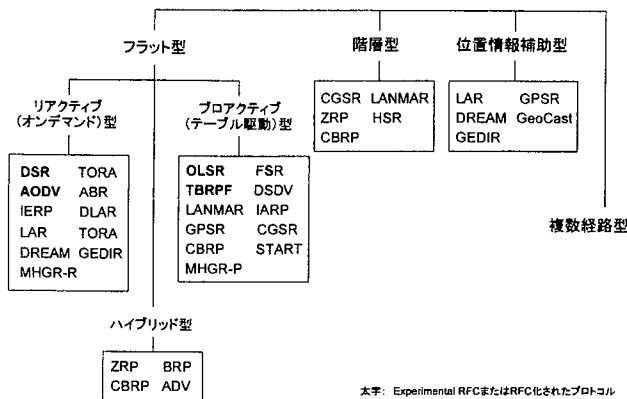


図 1 アドホックネットワーク向けルーティング制御プロトコルの分類

Fig. 1 Classification of ad hoc unicast routing protocols.

能であれば新しい環境での最適な別のプロトコルに切り換えるなどの工夫が必要となる。

ユニキャストルーティングプロトコルについては、図 1 のように、その構造的な特徴からフラット型、階層型、位置情報補助型、複数経路型などに分類することが一般的である [14]~[16]。標準化が進んだのはフラット型で、フラット型のプロトコルには、通信要求が発生した時点でオンデマンドに通信経路を探索するリアクティブ (オンデマンド) 型プロトコル、インターネットと同様通信要求に先立ってあらかじめルーティングテーブルを作成しておくプロアクティブ (テーブル駆動) 型プロトコル、これらを組み合わせたハイブリッド型プロトコルがある。

リアクティブ型プロトコルでは、データ転送が行われないときには制御メッセージが流れないが、通信を行う際に経路探索のための遅延が生じる。プロアクティブ型プロトコルは逆に、データ通信要求が発生するとすぐに通信を開始できるが、データ転送が行われていなくてもルーティングテーブル作成のため制御メッセージが通信される。プロアクティブ型プロトコルでは、すべてのノードがネットワーク全体のトポロジーを把握し、トポロジー情報に基づいて、インターネットのリンクステート型ルーティングプロトコル OSPF (Open Shortest Path First) と同様、Dijkstra のアルゴリズムを用いてエンドノード間の最短経路を決定する。

表 1 に主なプロトコルの特徴、図 2 にリアクティブ型プロトコルとプロアクティブ型プロトコルの適用領域を示す。リアクティブ型プロトコルは、ネットワークトポロジーの変化が大きく通信の発生頻度が少ない

表 1 主なユニキャストルーティングプロトコルの特徴  
Table 1 Major ad hoc unicast routing protocols.

プロトコル	提案機関・大学	概要
リアクティブ (オンデマンド) 型	AODV Nokia	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ルーティングテーブルに基づいてデータを転送。</li> <li>・送信元ノードはRREQをフラッディング、RREQを受信した各ノードは隣接ノードにRREQを転送、宛先ノードが発見されるまで繰り返す。宛先ノードはRREPを送信元ノードに返答、中継ノードはそのやりとりの中でルーティングテーブルを作成。</li> <li>・シーケンス番号を使ってループを回避し、最新の経路情報を保持。</li> <li>・プリカーサリスト(自身を宛先ノードへの次ホップとするノードのリスト)を用いて通信障害時の処理を効率化。</li> </ul>
	DSR Rice大、 CMU	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ソースルーティング(データパケットに中継ノード列を挿入、各ノードはルーティングテーブルを保持せず、中継ノード列の情報により転送)。</li> <li>・送信元ノードはRREQをフラッディング、RREQを受信した各ノードはRREQに自分のIDを追加、RREQにはどのノードを経由してきたかが順に記録される。RREQを受信した宛先ノードは、中継ノード列を含むRREPを送信元ノードに返す。</li> <li>・経路のキャッシングにより、経路探索回数を低減、経路発見を高速化、電力消費を節約。</li> <li>・中継ホップ数の制限によりRREQの拡散を抑制。</li> </ul>
プロアクティブ (テーブル駆動) 型	OLSR INRIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・MPR集合(隣接ノード集合の1ホップ先に存在するすべてのノードにパケットを転送するための最小数の隣接ノード集合)の設定によりフラッディングを効率化。</li> <li>・所望の隣接ノード集合を求める準最適アルゴリズム(グラフにおけるNP完全クラスの問題)と各ノードの許容度(willingness)を組合せてMPR集合を選択。</li> </ul>
	TBRPF SRI International	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ネットワークポロジ変化時の各ノードのルーティングテーブル更新に要する処理を抑えるため、安定したリンクの選択とポロジの差分情報を利用。</li> <li>・経路などの情報を定期的に更新せず、追加・削除に関する必要最小限の情報を利用。</li> </ul>
	FSR UCLA	<ul style="list-style-type: none"> <li>・大規模ネットワーク向き。各ノードは、近くのノードほど頻繁にトポロジ情報を交換して正確な経路を維持し、遠くのノードとの情報交換頻度は抑制。</li> </ul>
ハイブリッド型	ZRP Cornell大	<ul style="list-style-type: none"> <li>・自ノードを中心にそこからあるホップ数以下のノードを含む領域をゾーン定義し、ゾーン内はプロアクティブ型、ゾーン外はリアクティブ型を利用。</li> </ul>

RREQ: Route REQuest (経路を探索するために送信元ノードから宛先ノードの方に送信される制御パケット)  
 RREP: Route REsponse (探索された経路を通知するために宛先ノードから送信元ノードの方に返される制御パケット)      MPR: MultiPoint Relay  
 AODV: Ad hoc On-demand Distance Vector algorithm      DSR: Dynamic Source Routing      OLSR: Optimized Link State Routing protocol  
 TBRPF: Topology Broadcast based on Reverse Path Forwarding routing protocol      FSR: Fisheye State Routing Protocol      ZRP: Zone Routing Protocol

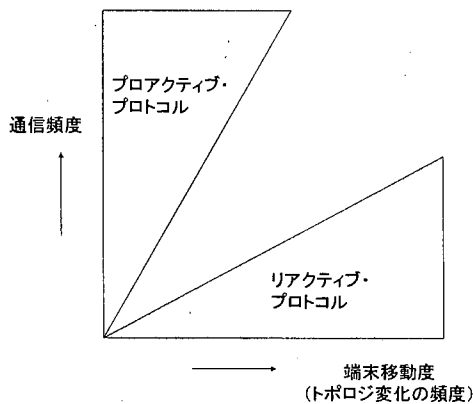


図 2 リアクティブプロトコルとプロアクティブプロトコルの適用領域

Fig. 2 Applied domain of reactive protocols and proactive protocols.

ときに有効であり、プロアクティブ型プロトコルは、ネットワークポロジの変化が小さく通信の発生頻度が多いときに有効である [14]~[16].

2005年10月現在、リアクティブ型のDSR [2]とAODV (RFC3561) [17], プロアクティブ型のOLSR (RFC3626) [18]とTBRPF (RFC3684) [19]のうち

DSRを除く三つのプロトコルが Experimental RFC になっている。なお、DSRについてはIESG審議の状態である。DSR, AODV, OLSRについては省電力化、高信頼化などに関して改善策を提案した論文が数多く発表されている [13], [14].

MANET WGでは、上記4プロトコルの評価をベースに、リアクティブ型、プロアクティブ型のそれぞれについてプロトコルを一本化する議論も進められ2005年になり標準化作業が本格化している。リアクティブ型のDYMO (DYnamic MANET On-demand routing) [20], プロアクティブ型のOLSRv2 [21]である。以下、それぞれについての概要について紹介する。

(1) DYMO

DYMOはAODVとDSRの設計思想を引き継ぐもので、特にAODVをベースとする方式である。AODVでは経路探索時にRREQメッセージをMANET全体に配布し、終点または終点への経路をもつ途中のノードがRREPメッセージを始点ノードへユニキャストする。これに対してDYMOではプロトコルの単純化のため、終点ノードのみがRREPを返すようにしている。DYMOの大きな特徴はオプションとしてRREQ,

RREP メッセージの転送時、途中のノードが自分自身のノード情報（ノードのアドレス、シーケンス番号、インターネットへのゲートウェイか否か、など）をこれらの制御メッセージの内容に追加できるようにしたことである。DSR には同様の機能が含まれているので、それを取り込んだ機能追加といえる。これにより制御メッセージを受け取った他のノードがそのノードへの経路を構築できることになり、経路探索の発動頻度を削減することが期待できる。また、基本的な仕様に将来の機能追加が可能となるように、エレメントと呼ぶ汎用的なメッセージ形式を採用しており、機能追加をサポートしないノードが混在しても制御メッセージの読み飛ばし処理などを導入して相互運用性を高めている。

## (2) OLSRv2

OLSRv2 は、Experimental RFC の OLSR（以下ではこれを OLSRv1 と呼ぶ）と基本的には同様のコンセプトにより構成される。すなわち、Hello メッセージに隣接ノードの情報を含めることにより各ノードが 2 ホップ先までのノードを把握する隣接ノードリンク検知方式、フラッディングオーバーヘッドを削減するため各ノードが隣接ノードの中から MPR (Multipoint Relay) と呼ばれるノードを選択する方式、リンク情報を MPR フラッディングと呼ばれる方法によりネットワーク全体へ効率的に配布する方式などは共通である。リンクの安定性の判断指標である Link Hysteresis の機能については、ルーチングプロトコルに共通した機能であるとして、OLSRv2 からは除かれている。

OLSRv1 との主な相違として以下の点がある。OLSRv1 では、機能ごとに固有のメッセージフォーマットを使用していたが、OLSRv2 ではメッセージフォーマットを一般的に記述し、メッセージヘッダに必要な数のアドレスブロック（複数のアドレス情報）が連なる形になっている。メッセージ全体と各アドレスブロックには TLV (Type Length Value) ブロックを付与する。TLV ブロックは TLV を必要なだけ並べたものである。これにより既存メッセージに機能を追加したり、新たなメッセージを追加したりすることが容易になる。また未知の TLV を読み飛ばすことで相互運用性を保つことができる。一例ではあるが、OLSRv1 で使用されていた MANET 外へのインタフェースを広告する HNA メッセージを、OLSRv2 では TC メッセージで代用するなど、メッセージ機能の一般化も検討されている。アドレスブロックでは、IP アドレス

をヘッダ部分とテール部分に分け、同一ヘッダの複数アドレスはヘッダ部分をはじめに記述し残りはテール部分のみを並べて記述する。Hell や TC メッセージは複数の IP アドレスを運ぶ必要がありメッセージサイズが増大する。アドレスブロックによりこれらのメッセージサイズの削減を図っている。

## 3.2 マルチキャストルーチングプロトコル

災害現場における被災者への緊急通報、商品倉庫における管理端末への一斉通報、ショッピングモールにおける来場者への広告配信など、アドホックネットワークにおけるマルチキャストも重要となる [10], [14]。

既に 30 以上のプロトコルが論文等により提案されているが [13], [14], [22], [23], ユニキャストがまだ Standard Track RFC 標準化に向けて作業を進めている段階であることから、マルチキャスト標準化に関しては本格的な議論には至っていない。現在 MANET WG に提案されているのはマルチキャストの一種である MANET 全体へのブロードキャスト型の情報配信を行うプロトコルである。3.1 に述べたように、ユニキャストに関してリアクティブ、プロアクティブそれぞれのルーチングプロトコルの標準化が進展しており、そのいずれにもフラッディングプロトコルを基本とする MANET 全体への制御メッセージの配信機能が含まれている。しかし、これらはネットワーク層で行われるわけではなく、上位層の関与が必要である。また、他のアプリケーションが利用できるものでもない。そこでアプリケーションデータを対象として、フラッディングをネットワーク層で行うプロトコル [24]、更に MPR などを利用する効率的なフラッディングプロトコルに関する標準化提案 [25], [26] が提出されている段階である。

マルチキャストでは、ユニキャストに比べてプロトコルの良否を決定づける要因の分類軸が多く、様々なトレードオフがあり、より多面的な評価が必要となる。リアクティブ型かプロアクティブ型か以外にも主な分類軸として下記が挙げられる。これら以外にも、アドホックネットワーク特有の LBM (Location-Based Multicast) [27], GEOCAST [28] などの位置情報補助型のプロトコルもある。

### (1) トポロジー：トリー型/メッシュ型

インターネットにおける ALM (Application Level Multicast) と同様、マルチキャストのトポロジーに関して、トリー型とメッシュ型がある。伝送効率あるいは伝送遅延については、冗長性を排除するトリー型の

表 2 主なマルチキャストプロトコルの比較  
Table 2 Comparison of major ad hoc multicast protocols.

特性	AMRIS	CAMP	ODMRP	ABAM	DDM	AMRoute	PAST-DM	MAODV
トポロジ	共有木	送信元木	グループベースメッシュ	送信元木	送信元木	メッシュ上の共有木	メッシュ上の送信元木	共有木
ループ	なし	なし	なし	なし	なし	あり	あり	なし
制御パケットオーバーヘッド	フラッディング	なし	周期的フラッディング	ツリーの生成と修復	周期的フラッディング	フラッディング	フラッディング	フラッディング
ルーティング制御のタイミング	プロアクティブ(テーブル駆動)	プロアクティブ(テーブル駆動)	リアクティブ(オンデマンド)	リアクティブ(オンデマンド)	リアクティブ(オンデマンド)	プロアクティブ(テーブル駆動)	プロアクティブ(テーブル駆動)	リアクティブ(オンデマンド)
ユニキャストルーティングプロトコルへの依存性	なし	あり	なし	なし	あり	なし	なし	なし
周期的メッセージ	あり	なし	あり	なし	あり	あり	あり	あり
スケラビリティ	あり	あり	中間	なし	なし	なし	なし	あり
セッションの初期起動	送信側	送信側/受信側	送信側	送信側	受信側	送信側/受信側	送信側/受信側	受信側
トポロジのメンテナンス	ハードステート	ハードステート	ソフトステート	ハードステート	ソフトステート	ソフトステート	ソフトステート	ハードステート
実現レイヤ	ネットワーク層	ネットワーク層	ネットワーク層	ネットワーク層	ネットワーク層	アプリケーション層(オーバーレイ)	アプリケーション層(オーバーレイ)	ネットワーク層

AMRIS: Ad hoc Multicast Routing protocol utilizing Increasing id-numberS

CAMP: Core-Assisted Mesh Protocol

ODMRP: On-Demand Multicast Routing Protocol

ABAM: Associativity-Based Ad hoc Multicast

DDM: Differential Destination Multicast

AMRoute: Ad hoc Multicast Routing protocol

PAST-DM: Progressively Adaptive Subtree in Dynamic Mesh

MAODV: Multicast Ad hoc On-Demand Distance Vector routing

方が勝っている。トリー型は、データの配信がトリー上で一意に行えるため制御が容易、ループを回避できる等の利点があるが、経路切断時の回復処理が煩雑という欠点がある。メッシュ型は逆に、トリー型に比べて制御が複雑、ループを生成しやすいという欠点があるが、迂回路の設定が容易なため通信の高信頼化が図れるという利点がある。

また、トリー型には IP マルチキャストと同様、マルチキャストグループの各ノードを送信元とする最短経路木を用いる送信元木による方式と、生成される木は最短経路木にならないが特定の中心的なノード(コアノード, Rendezvous Point などと呼ぶ)をルートノードとする共有木による方式がある。前者は後者に比べて、トラフィックの高負荷時においても高い性能を示すが、スケラビリティに欠ける。

(2) プロトコルの実現レイヤ: ネットワーク層/アプリケーション層(オーバーレイマルチキャスト)

MANET WG では、ユニキャスト、マルチキャストいずれもネットワーク層におけるルーティングを想定している。しかし、マルチキャストについては、インターネットにおけるマルチキャストと同様、通信効率を犠牲にしても、制御の複雑さを抑え、スケラビ

リティを高めるため、ネットワーク層ではなくアプリケーション層によるオーバーレイマルチキャストの研究も盛んに行われている [22], [23], [29]。

オーバーレイマルチキャストについては、共有木における AMRoute [30], AMRoute における共有木が最短経路でないため低効率という欠点を送信元木にすることによって解決する PAST-DM [31], 更に性能向上を図った ALMA (Application Layer Multicast Algorithm) [32] が代表的である。

(3) トポロジーのメンテナンス: ハードステート/ソフトステート

ハードステートでは、リンクが切断した場合のみ経路発見のための制御パケットを送出する。ソフトステートでは、最新の経路情報を保持するため、制御オーバーヘッドを犠牲にして制御パケットを周期的にフラッディングする。したがって通常は、ハードステートよりもソフトステートの方が、パケット到達率が高い。

表 2 に他の方式パラメータを加えた主なマルチキャストプロトコルの比較を示す [14], [30]~[38]。

本章では、アドホックネットワークにおけるルーティングプロトコルに関する標準化動向、技術動向を述べた。これらの動向に基づくアドホックネットワークの

商用利用に関しては、今のところ監視ネットワークなどの個別システム、特定サービスでの利用にとどまっているが、関連技術、標準化の進展とともに、応用・普及が広がることが期待される。特定グループ内のメンバ間通信のための専用のアドホックネットワークはセキュリティ、ビジネスモデル上の問題が少なく、より早期に実現する可能性がある。センサネットワーク、メッシュネットワーク、車車間通信などはこの延長線上にある。大規模災害、テロなどインフラが利用できない状況ではアドホックネットワーク技術に基づく臨時通信システムが有効であり、国策として取り組む必要もあると考えられる。このように、アドホックネットワークは利便性の向上だけでなく、安全・安心な社会実現のキーとなる技術として様々な可能性と期待があり、今後の技術開発、標準化の進展とともに、利用面の開拓が望まれる。

#### 4. 無線 LAN メッシュネットワーク技術と IEEE802.11s 標準化動向

##### 4.1 無線 LAN メッシュネットワークの概要

IEEE802.11 の標準規格 [39] では、無線 LAN AP (Access Point: アクセスポイント) 間でデータパケットの交換を行うため、四つのアドレスフィールドを有する WDS (Wireless Distribution System) フレームフォーマットを規定している。しかし、マルチホップ構成の無線 LAN メッシュネットワークにおいて、WDS フレームを用いてデータを所望のあて先に転送するために必要なルーチングプロトコル等の技術については、規定されていない。このような背景より、マルチホップ構成の無線 LAN を用いてブロードキャストネットワークである IEEE802 LAN を実現する無線 LAN メッシュネットワーク技術は、各社製品に実装されている独自方式が中心であり、相互接続性が確保されていなかった。無線 LAN の標準化団体である IEEE802.11 ワーキンググループは、相互接続性と拡張性のあるフレームワークを確立するため、無線 LAN メッシュネットワーク技術の標準化作業を 2004 年 5 月に開始した。

無線 LAN を実装した機器は既に市場に普及しているが、現在でも無線 LAN の更なる高度化技術が検討されている。例えば、物理層の高速化技術を検討している IEEE802.11n では、最大無線伝送速度が 600 Mbit/s を超える無線方式の標準化作業を進めている。これらの無線 LAN 技術を実装したハードウエ

アを有効に活用する上でも、下位の MAC 層に与える影響を十分考慮する必要がある。

無線 LAN メッシュネットワークは、通信距離短縮による高速化、周波数の空間的再利用によるネットワーク容量の増大、ネットワークの自動構築、冗長構成による信頼性の向上等の利点を有する。一方、無線 LAN メッシュネットワークの代表的な課題として隠れ端末や晒し端末問題によるスループット特性の劣化、ふくそう制御、QoS 等が挙げられる。これらの課題を解決し、無線 LAN メッシュネットワークの利点を生かすには、ルーチングプロトコルと、MAC 層に実装されている無線リソース管理機能、無線制御機能等の主要機能が、リアルタイムに連携して動作することが重要である [40]。

IEEE802.11s では、ルーチングプロトコルを無線 LAN の MAC 層に実装することを想定している。各主要機能のリアルタイムの連携と、無線 LAN ハードウェアへの影響を考慮すると、通常ソフトウェアドライバで構成され、無線リソースへ直接アクセスすることが可能な MAC 層でメッシュネットワーク技術を実現することが有効である。

以下に、無線 LAN メッシュネットワークの標準化を行っている IEEE802.11s の動向を紹介し、主要技術の概要について説明する:

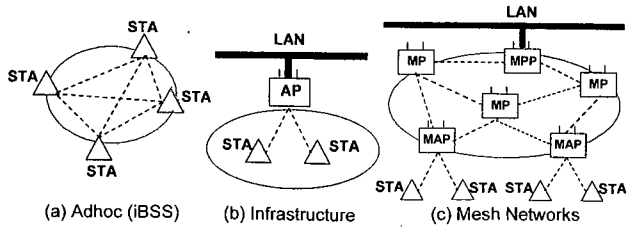
##### 4.2 IEEE802.11s 標準化動向

IEEE802.11 Standard Association は、2004 年 5 月に無線 LAN メッシュネットワークを構築する上で必要となる技術の標準化作業を行う、新たなタスクグループ IEEE802.11s の設立を承認した。その後、方式選定に必要な利用モデル、要求条件、選定手順の作成が行われた。2005 年 1 月に発行された CFP (Call For Proposal: 提案募集) には、15 件の提案が提出された。

IEEE802.11s への提案内容は、ルーチングプロトコル、MAC 高度化技術、セキュリティ技術等の単体技術の部分提案と、無線 LAN メッシュネットワークを構成する上で必要なすべての機能を網羅した全体提案の 2 種類に分類される。最終的には一つの全体提案のみが標準仕様草案として採択される。2005 年 9 月時点では、4 件の提案が議論されており、標準仕様草案の初版発行は 2006 年 3 月、標準化作業の終了は 2008 年 6 月が予定されている。

##### (1) デバイスの種類とネットワーク構成

IEEE802.11 標準規格では、二つのオペレーション



AP: Access Point, MP: Mesh Point, MAP: Mesh Access Point, MPP: Mesh Portal

図3 IEEE802.11 無線 LAN メッシュネットワークの構成

Fig. 3 IEEE802.11 WLAN mesh network configurations.

モードである iBSS モードとインフラストラクチャモードを規定している。図 3 (a) に示すように、iBSS モードでは直接通信できる端末間で 1 ホップのアドホックネットワークを構成する。インフラストラクチャモードでは図 3 (b) に示すように、端末が AP を経由してデータを転送する 2 ホップのネットワークを構成する。IEEE802.11s で規定する無線 LAN メッシュネットワークは、図 3 (c) に示すように、複数の装置が相互に接続してマルチホップの無線ネットワークを構成する。このとき、装置間のデータは WDS フレームを用いて交換される。

無線 LAN メッシュネットワークは以下の 4 種類の装置で構成される。

- Mesh Point (MP)

無線 LAN メッシュネットワークを構成するために必要なメッシュ機能を実装した装置。

- Mesh Access Point (MAP)

メッシュ機能と AP の機能を実装した装置。MAP は、無線 LAN メッシュネットワークを構築するだけでなく、メッシュ機能を実装していない無線 LAN 端末である Station からの接続を收容するサービスも提供する。

- Mesh Portal

メッシュ機能と、無線 LAN メッシュネットワークから他のネットワーク（他の無線 LAN メッシュネットワークも含む）へ相互接続するためのゲートウェイ機能を実装した装置。

- Station (STA)

メッシュ機能を有さない従来の無線 LAN 端末装置。

## (2) 利用モデル

IEEE802.11s では、32 台程度の MP (MAP を含む) で構成される小-中規模の無線 LAN メッシュネットワークを想定している。実際には各 MP に Station が接続するため、ネットワーク全体の收容端末数は数

百台規模となる。また、複数の無線 LAN メッシュネットワークが有線ネットワークを経由、若しくは MAP 同士が相互に接続することにより、無線 LAN メッシュネットワークの規模を拡大することが可能である。

無線 LAN メッシュネットワーク技術は様々な利用環境での適用が想定される。一般的に、それぞれの利用環境により最適なルーティングプロトコルは異なる。そのため、IEEE802.11s では提案技術を評価する上でホームネットワーク、オフィスネットワーク、キャンパス/公衆アクセスネットワーク、公共安全ネットワーク、軍事ネットワークの五つの利用モデルに分類している [41]。以下に、主に検討対象とされている三つのネットワークの特徴について説明する。

- ホームネットワーク

ホームネットワークは、家庭内のデジタル家電、PC、AP 等を相互に結ぶネットワークである。家庭内では、ビデオ配信など高スループットを要求するアプリケーションに対応する低コストのネットワーク構築が必要である。また、ネットワーク管理者が存在しないため、自律的なネットワークの構築及び維持が要求される。

- オフィスネットワーク

小規模から大規模の企業内 LAN を対象とする。小規模オフィスではネットワーク管理者が存在しないため、ホームネットワークと同様に自律的なネットワークの構築及び維持が要求される。また、大規模ネットワークではネットワーク管理者がネットワーク全体を管理するため、集中的な管理機構が必要となる。

- キャンパス/公衆アクセスネットワーク

大学のキャンパスや商業地域での展開を想定しており、屋外を含む広域なサービスエリアを提供するネットワークである。

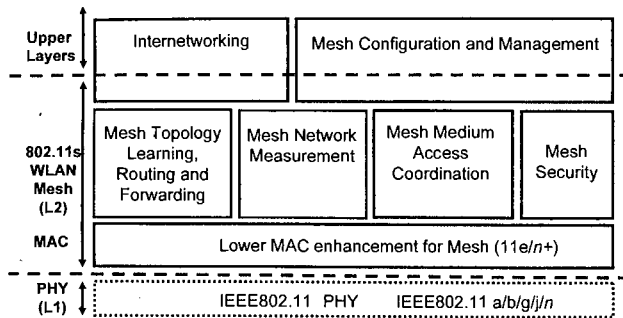
## (3) システムの基本構成と要求条件

IEEE802.11s で想定される無線 LAN メッシュネットワークのシステム構成を図 4 に示す。同図に基づき各機能の概要、要求条件、IEEE802.11s の検討対象領域を下記に説明する [42]。

- Mesh Topology Learning, Routing, and Forwarding

同一メッシュネットワークに参加する近隣ノードの発見機能、無線リンクの品質情報を取得する機能、MAC アドレスを識別子としてユニキャスト/マルチキャスト/ブロードキャストパケットを所望のあて先まで転送するためのルーティングプロトコル、及びパケット転





W.S. Conner and H. Aoki, "Propose Extensible Approach for WLAN Mesh Standardization," IEEE802.11 document 05/0165r1, March 2005. より引用

図4 IEEE802.11s アーキテクチャ  
Fig.4 IEEE802.11s architecture.

送機能を提供する。ルーチングプロトコルは、単一の無線チャンネルで構成されるネットワークにおいて最低限の動作を保証する必要があるが、複数の無線チャンネルを同時に利用することによる高度化も可能である。また、ネットワークの規模は少なくとも 32 台の MP の収容が要求される。

- Mesh Measurement

ルーチングプロトコルに利用される無線メトリック、及びチャンネル選択やメトリック計算等に用いられる無線 LAN メッシュネットワーク内の無線状況を測定する機能を提供する。ルーチングプロトコルは様々なメトリックに対応することが可能であるが、無線情報を反映した無線メトリックを少なくとも一つ実装する必要がある。

- Mesh Medium Access Coordination

隠れ端末や晒し端末による性能劣化を回避する機能、優先制御、ふくそう制御、受付制御、周波数の空間的再利用を実現する機能等を提供する。しかし、物理層に対する変更、指向性アンテナの動的制御は検討対象外である。

- Mesh Security

無線 LAN メッシュネットワーク上で転送されるデータフレームと、ルーチングプロトコル等の制御機能に用いられるマネジメントフレームを保護するセキュリティ機能を提供する。本機能は、無線 LAN のセキュリティ方式を規定している IEEE802.11i [43] の利用を想定している。ただし、論理的な単一の管理エンティティに制御されないセキュリティ方式、DOS (Denial Of Service) 攻撃、不正な MP の検出は検討対象外である。

- Interworking

無線 LAN メッシュネットワークは、他ネットワークとの相互接続及び上位層に対するインタフェースを提供する。他ネットワークとの接続時の整合性を保証するため、無線 LAN メッシュネットワークは上位層に対して、ブロードキャストの IEEE802 LAN セグメントとして動作することが要求される。

- Mesh Configuration and Management

無線 LAN メッシュネットワーク内の各 MP における RF パラメータの自動設定、チャンネル選択、送信電力制御、QoS ポリシの管理、MP 間の時間同期等に利用されるインタフェースが提供される。ただし、指向性アンテナ制御のアルゴリズム、IP アドレス付与等の上位層にかかる技術は検討対象外である。

その他の要求条件として、無線 LAN メッシュネットワークの発見及び登録処理機能、既存の無線 LAN とのサービス整合性の保証、WDS 若しくはその拡張フレームフォーマットの利用がある。また、IEEE802.11r で規定するハンドオフ技術、IEEE802.11e で規定する DLP (Direct Link Protocol) [44] など、AP と STA 間の処理を対象とする技術に対する変更は検討対象外である。

### 4.3 無線 LAN メッシュネットワークを構成する主要技術

ここでは、標準化会合や学会で議論されている無線 LAN メッシュネットワークを構成する主要技術の一例を紹介する。

#### (1) 経路制御技術

ルーチングプロトコル及びメトリックは、無線 LAN メッシュネットワークの性能を決定する最も重要な要素の一つである。前章で説明したように多数のルーチングプロトコルやメトリック [45], [46] が提案されており、異なる企業から提供された機器間の相互接続性の確保は重要な課題である。また、最適なルーチングプロトコルやメトリックは利用モデルにより異なる。更に、将来の高度化技術や、各企業独自プロトコルの実装も想定される。

このような背景から、相互接続性を確保するためにすべての機器に実装が義務づけられる必須規定のルーチングプロトコルとメトリックを定義し、オプション規定や各社独自の様々なルーチングプロトコルとメトリックの実装を可能にする拡張性のあるフレームワークの提案が行われている [47]。

- 拡張性のあるフレームワーク

ルーチングプロトコルと無線メトリックの組合せは

プロファイルとして定義され、各 MP により選択されたプロファイルは Beacon 若しくは Probe response フレームに挿入される Information Element を用いて、近隣 MP に通知される。各 MP は利用用途に応じて必須規定以外のプロトコルも独自の判断で選択することが可能である。各無線 LAN メッシュネットワークでは、異なるプロファイルを選択する可能性はあるが、特定の無線 LAN メッシュネットワークに属するすべての MP は、同一のプロファイルを選択する必要がある。

- 必須規定のルーチングプロトコル

無線 LAN メッシュネットワークを実現する MP の機能は、PC, CE デバイス, AP, 携帯端末等の様々な種類の機器に実装される。また、構築するネットワークはスタンドアロン型やインフラ型等の異なる形態を有する。このため、相互接続の確保に必要な必須規定のルーチングプロトコルは、様々なネットワーク形態において十分な性能を発揮するとともに実装が軽量なプロトコルが望まれる。

このような要求条件を満たすプロトコルとして、オンデマンド型のルーチングプロトコルである AODV を改良した Radio Metric AODV (RM-AODV) に、プロアクティブ型の要素を追加した Hybrid Wireless Mesh Protocol (HWMP) が提案されている [48]。

RM-AODV は周期的に隣接ノードとの間の無線状態を観測し、その結果に基づいて、より安定的で、かつ無線メトリックを最小化する経路を選択する。また、RM-AODV は、無線装置が複数の無線 LAN インタフェースを有する場合にそれらを並列に使用し、あて先ごとに、より周波数利用率の低い無線 LAN インタフェースを使用する機能をもつ、これらの機能より、動的に変化する無線状態に応じてシステム容量を最大化する経路の選択が可能となる。

HWMP の基本動作は RM-AODV である。ただし、インフラ型の固定的なネットワーク構築時において Mesh Portal がルートノードとして設定された場合のみ、Mesh Portal を元木とするトリー型のパスを事前に確立する機能を提供する。

- 必須規定の無線メトリック

ルーチングプロトコルと合わせて重要になるのが、無線メトリックである。無線 LAN メッシュネットワークの品質に影響する基本的な特性は、無線品質、干渉と無線資源の利用率である。これらすべての状況を反映し、実装が容易な無線メトリックとして Airtime が

表 3 無線メトリック固定値  
Table 3 Radio metric constant value.

Parameter	Value (802.11a)	Value (802.11b)	Description
$O_{ca}$	75 $\mu$ s	335 $\mu$ s	Channel access overhead
$O_p$	110 $\mu$ s	364 $\mu$ s	Protocol overhead
$B_t$	8224	8224	Number of bits in test frame

提案されている。Airtime メトリックの算出方法を下記に示す [47]。

$$c_a = \left[ O_{ca} + O_p + \frac{B_t}{r} \right] \frac{1}{1 - e_{pt}}$$

上式中の  $O_{ca}$ ,  $O_p$ ,  $B_t$  は表 3 に示すチャネルアクセスに必要なオーバーヘッド、プロトコルオーバーヘッド、フレームエラー率取得に利用するテストパケットのフレーム長を示す。 $r$  は伝送速度、 $e_{pt}$  はフレームエラー率を示す。

## (2) MAC 高度化技術

IEEE802.11s では、高いパラメータ設定の自由度を有する Enhanced Distributed Coordination Access (EDCA) [44], [49] を基本とした以下の機能拡張方式が提案されている。

- MAC レベルふくそう制御

MP 間でのパケット転送が前提となる無線メッシュネットワークでは、中継 MP におけるパケットの滞留が伝送遅延やスループット低下を引き起こす要因となる。このパケット滞留の問題を、下位の MAC 層の仕様に対する修正を最小限に抑えながら効率的に回避するため、MP 間でのシグナリングにより送信レートを調整する Congestion Control 技術が提案されている。Congestion Control 技術により中継ノードにおけるふくそうを回避し、End to End スループットを大幅に向上させることができる [50]。

- パワーセーブ技術

iBSS におけるパワーセーブ方式や IEEE802.11e にて規定されている Automatic Power Save Delivery (APSD) を、無線 LAN メッシュネットワーク向けに拡張し、自律分散的に消費電力を低減する技術が提案されている [51]。

## (3) セキュリティ

IEEE802.11i RSNA (Robust Security Network Association) iBSS モードのセキュリティ方式を適用することにより、無線 LAN メッシュネットワーク内のデータフレームに対する秘匿、認証、完全性を保証す

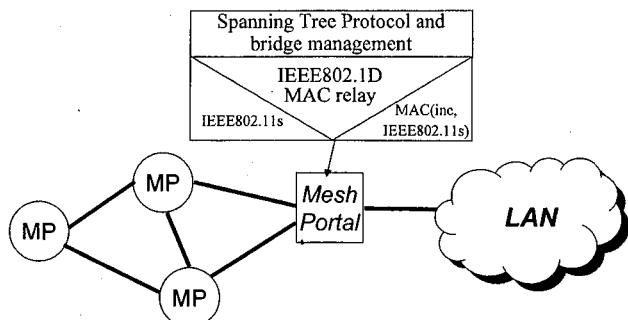


図 5 Mesh Portal の構成  
Fig. 5 Mesh Portal configuration.

ることが可能である。しかし、ルーチングプロトコル等が用いる制御情報はマネージメントフレームで転送される。マネージメントフレームに対するセキュリティは IEEE802.11i の適用対象外であるため、IEEE802.11w で標準化が進められている Protected Management Frame の技術を適用する必要がある [52]。

#### (4) 相互接続

無線 LAN メッシュネットワークは、IP ネットワークや IEEE802 LAN 等の他のネットワークとの相互接続を保証するために、全体で単一のループフリーのブロードキャスト LAN として動作する必要がある。この動作は図 5 に示すように Mesh Portal に IEEE802.1D [53] のブリッジ機能を実装することにより実現できる。また、複数の Mesh Portal が IEEE802LAN と接続する可能性がある。この場合、ネットワークをまたがるパケットのループが問題となる。各 Mesh Portal が Spanning Tree Protocol を実行することにより、無線 LAN メッシュネットワークは IEEE802LAN の一部のネットワークとして動作し、パケットの無限ループ問題を回避することができる [54]。

#### (5) チャンネル設定

各 MP は複数の無線インタフェースを有することが想定される。周波数の空間的再利用によるネットワーク容量の増大、隠れ端末やさらし端末問題の解決 [55] を実現する上で、無線 LAN メッシュネットワーク内の各無線リンクに対するチャンネル割当方法は重要な課題である。この課題に対し、無線 LAN メッシュネットワークにおいて、自律的に各 MP が隣接 MP を発見し、確実に接続するためのすべての MP に共通のチャンネルを選択する機構、及び、一部の隣接 MP 間で共通のチャンネルとは異なるチャンネルを動的に選択することにより、スループット向上が可能となる高度化技術が提案されている [56]。

本章では、アドホックネットワークの一実現例である無線 LAN メッシュネットワークに関して、その標準化動向を述べた。無線 LAN メッシュネットワークは、今後無線 PAN (Personal Area Network) や無線 MAN (Metropolitan Area Network) 等のネットワーク規模の異なるメッシュネットワークの仕様に影響を与えると同時に、これらのネットワークともゲートウェイを経由して接続することにより、相互に協調して発展していくと思われる。また、センサネットワークとしての実用化が始まりつつある Zigbee においても、ルーチングプロトコルの一つとして無線 LAN メッシュネットワークと同様に AODV を採用しており、比較的小規模なアドホックネットワークにおけるルーチングプロトコルとしては、AODV を中心に検討が進められると予測される。

## 5. むすび

本論文では、アドホックネットワークについて、これまでの研究、標準化の動向、更に MAC 層でのアドホック (無線マルチホップ) ネットワークの実現技術として、標準化の議論が進展している IEEE802.11s における無線 LAN メッシュネットワークに関する状況、研究内容について述べた。

今後アドホックネットワークのルーチングプロトコル、無線 LAN メッシュネットワークの標準化の進展、アドホック通信用ノードの研究開発進展などが進み、これと並行して新しいサービスや P2P アプリケーションなどの実用化進展が期待される。

また、導入が開始された ZigBee などのセンサネットワークへのアドホックネットワーク技術の適用、大規模なテストベッドを用いたアドホックネットワークの有効性の実証などを推進することが重要となる。IEEE802.11s の主要課題になっているチャンネル割当、ルーチング、QoS 制御、セキュリティに加え、センサネットワーク特有といえる高精度な測位と位置情報の管理、時刻同期、様々な規格の ID とネットワークアドレスの関連づけなどの問題を解決することが期待される。

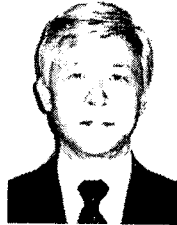
## 文 献

- [1] 間瀬憲一, 中野敬介, 仙石正和, 篠田庄司, “アドホックネットワーク,” 信学誌, vol.84, no.2, pp.127-134, Feb. 2001.
- [2] D.B. Johnson, D.A. Maltz, and J. Brock, “The dynamic source routing protocol for mobile ad hoc networks (DSR),” Internet Draft, July 2004.

- [3] C.K. Toh, *Ad Hoc Mobile Wireless Networks — Protocols and Systems*, Pearson Education, 2002.
- [4] 蓮池和夫, S. Bandyopadhyay, 植田哲郎, “アドホックネットワークの技術的課題,” 信学論 (B), vol.J85-B, no.12, pp.2007–2014, Dec. 2002.
- [5] 中野浩嗣, 山下雅史, “無線通信プロトコルの理論的研究の現状,” 信学誌, vol.87, no.4, pp.342–344, April 2004.
- [6] 小牧省三, 間瀬憲一, 松江英明, 守倉正博, 無線 LAN とユビキタスネットワーク, 丸善, 2004.
- [7] 阪田史郎 (編著), *ワイヤレス・ユビキタス*, 秀和システム, 2004.
- [8] Y. Owada, Y. Takahashi, T. Suda, and K. Mase, “A large-scale wireless mobile ad hoc network testbed,” 62nd Vehicular Technology Conference (VTC2005-Fall), pp.165–172, Oct. 2005.
- [9] 阪田史郎, “ワイヤレスブロードバンドユビキタスネットワーク,” 信学技報, CQ2004-97, MoMuC2004-71, Oct. 2004.
- [10] 阪田史郎, “アドホックセンサネットワークとマネジメント,” 信学技報, TMW2005-4, March 2005.
- [11] 安藤 繁, 田村陽介, 南 正輝, 戸辺義人 (編著), *センサネットワーク技術*, 東京電機大学出版局, 2005.
- [12] 阪田史郎 (編著), *ZigBee センサネットワーク*, 秀和システム, July 2005.
- [13] M. Abolhasan, T. Wysocki, and E.A. Dutkiewicz, “A review of routing protocols for mobile ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks*, vol.2, no.1, pp.1–22, Jan. 2004.
- [14] C.S.R. Murthy and B.S. Manoj, *Ad hoc Wireless Networks*, Prentice-Hall, 2004.
- [15] 小菅昌克, 板谷聡子, P. Davis, 梅田英和, “アドホックネットワークが開く新しい世界,” 情処学誌, vol.44, no.10, pp.1052–1055, Oct. 2003.
- [16] 阪田史郎, “IEEE802 (無線 PAN・無線 LAN・無線 MAN) における QoS 制御,” 信学第 3 回 QoS ワークショップ「インターネット QoS の実態と計測・評価最新技術」, Nov. 2005.
- [17] C.E. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das, “Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing,” IETF RFC 3561, July 2003.
- [18] T. Clausen and P. Jacquet, “Optimized link state routing protocol (OLSR),” IETF RFC3626, Oct. 2003.
- [19] R.G. Ogier, F. Templin, and M. Lewis, “Topology dissemination based on reverse-path forwarding (TBRPF),” IETF RFC3684, Nov. 2003.
- [20] I. Chakeres, E. Belding-Royer, and C. Perkins, “Dynamic MANET on-demand (DYMO) routing,” IETF Internet-Draft, draft-ietf-manet-dymo-02, June 2005 (work in progress).
- [21] T. Clausen, “The optimized link-state routing protocol version 2,” IETF Internet-Draft, draft-clausen-manet-olsrv2-01-0001, Aug. 2005 (work in progress).
- [22] C. de M. Cordeiro, H. Gossain, and D.P. Agrawal, “Multicast over wireless mobile ad hoc networks: Present and future directions,” *IEEE Network*, vol.17, no.1, pp.52–59, Jan./Feb. 2003.
- [23] C. Gui and P. Mohapatra, “Scalable multicasting for mobile ad hoc networks,” *Proc. IEEE INFOCOM*, pp.342–352, March 2004.
- [24] C.E. Perkins, “IP flooding in ad hoc mobile networks,” IETF Internet-Draft, draft-perkins-manet-bcast-03.txt, June 2005 (work in progress).
- [25] J. Macker, “Simplified multicast forwarding for MANET,” IETF Internet-Draft, draft-ietf-manet-smf-00.txt, June 2005 (work in progress).
- [26] C.E. Perkins, T. Clausen, and P. Jacquet, “Multicast with minimal congestion using connected dominating sets,” IETF Internet-Draft, draft-perkins-manet-smurf-00.txt, July 2005 (work in progress).
- [27] Y.B. Ko and N.H. Vaidya, “Geocasting in mobile ad hoc networks: Location-based multicast (LBM) algorithms,” *Proc. IEEE WMCSA*, pp.101–110, Feb. 1999.
- [28] A. Bachir and A. Benslimane, “A multicast protocol in ad hoc networks inter-vehicle geocast,” *IEEE VTC*, pp.2456–2460, 2003.
- [29] S. Shi and J.S. Turner, “Routing in overlay multicast networks,” *IEEE INFOCOM*, pp.67–72, June 2002.
- [30] E. Bommaiah, M. Liu, and R. Talpade, “Ad hoc multicast routing protocol (AMRoute),” Internet draft, Aug. 1998.
- [31] C. Gui and P. Mohapatra, “Efficient overlay multicast for mobile ad hoc networks (PAST-DM),” *Proc. IEEE WCNC*, pp.1118–1123, March 2003.
- [32] M.G. Srikanth, V. Krishnamurthy, and M. Faloutsos, “Overlay multicasting for ad hoc networks (ALMA),” *Proc. Med-Hoc-Net*, pp.131–143, June 2004.
- [33] C.W. Wu, Y.C. Tay, and C.K. Toh, “Ad hoc multicast routing protocol utilizing Increasing id-numberS (AMRIS),” Internet draft, Nov. 1998.
- [34] J.J. Garcia-Luna-Aceves and E.L. Madruga, “The core-assisted mesh protocol (CAMP),” *IEEE J.SAC*, vol.17, no.8, pp.1380–1394, Aug. 1999.
- [35] S.J. Lee, M. Gerla, and C.C. Chiang, “On-demand multicast routing protocol (ODMRP),” *Proc. IEEE WCNC*, pp.1298–1302, Sept. 1999.
- [36] C.K. Toh, G. Guichala, and S. Bunchua, “Associativity-based ad hoc multicast routing for ad hoc mobile networks (ABAM),” *Proc. IEEE VTC*, pp.987–993, Sept. 2000.
- [37] L. Ji and M.S. Corson, “Differential destination multicast (DDM) specification,” Internet draft, July 2000.
- [38] E.M. Royer and C.E. Perkins, “Multicast ad hoc on-demand distance vector routing (MAODV),” Internet draft, July 2000.
- [39] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications*, IEEE Std 802.11®-1999 (Reaff 2003).

- [40] 青木秀憲, 大前浩司, 松本洋一, "Proposal of IEEE802.11s layer-2 mesh network architecture," 信学技報, RCS2005-56, July 2005.
- [41] W.S. Conner, "IEEE 802.11 TGs usage models," IEEE802.11 document 04/662r16, Jan. 2005.
- [42] W.S. Conner, "IEEE 802.11 TGs functional requirements and scope," IEEE802.11 document 04/1174r13, Jan. 2005.
- [43] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Amendment 6: Medium Access Control (MAC) Security Enhancements, IEEE Std 802.11i<sup>TM</sup>-2004.
- [44] Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service Enhancements, IEEE P802.11e/D13.0, Jan. 2005.
- [45] R. Draves, J. Padhye, and B. Zill, "Routing in multi-radio, multi-hop wireless mesh networks," ACM MobiCom, Sept. 2004.
- [46] A. Adya, P. Bahl, J. Padhye, A. Wolman, and L. Zhou, "A multi-radio unification protocol for IEEE 802.11 wireless networks," IEEE BroadNets, 2004.
- [47] H. Aoki, N. Chari, L. Chu, W.S. Connor, S.M. Faccin, D. Gurevich, V. Hastay, J. Jetcheva, S. Kangude, S. Saito, and R. Taori, "802.11 TGs Simple Efficient Extensible Mesh (SEEMesh) Proposal," IEEE802.11 document 05/0562r0, July 2005.
- [48] 竹田真二, 柳生健吾, 青木秀憲, 松本洋一, "Multi-interface oriented radio metric on-demand routing protocol for layer-2 mesh networks," 信学技報, RCS2004-58, July 2005.
- [49] 藤原 淳, 山田 暁, 松本洋一, "EDCA parameter optimization for layer-2 mesh network throughput," 信学技報, RCS2004-60, July 2005.
- [50] A. Yamada, A. Fujiwara, B. Sadeghi, and L. Yang, "Simulation results for SEEMesh congestion control protocol," IEEE802.11-05/0568r0, June 2005.
- [51] S.M. Faccin, C. Wijting, J. Knecht, and A. Damle, "802.11 TGs mesh networking proposal," IEEE802.11-05/0196r3, March 2005.
- [52] J. Chhabra, A.R. Prasad, J. Walker, and H. Aoki, "802.11s security concept," IEEE802.11 document 05/1115r2, Sept. 2004.
- [53] IEEE Standard for Local and metropolitan area networks: Media Access Control (MAC) Bridges, IEEE Std 802.1D<sup>TM</sup>-2004.
- [54] W.S. Conner and H. Aoki, "Propose extensible approach for WLAN mesh standardization," IEEE802.11 document 05/0165r1, March 2005.
- [55] A. Fujiwara and Y. Matsumoto, "Centralized channel allocation technique to alleviate exposed terminal problem in CSMA/CA-based mesh networks," IEICE Trans. Commun., vol.E88-B, no.3, pp.958-964, March 2005.
- [56] 柳生健吾, 藤原 淳, 竹田真二, 大前浩司, 青木秀憲, 松本洋一, "Topology and traffic aware channel assignment for layer-2 mesh networks," 信学技報, RCS2004-61, July 2005.  
(平成 17 年 10 月 21 日受付, 12 月 19 日再受付)

## 阪田 史郎 (正員)



昭 47 早大・理工・電子通信卒。昭 49 同大大学院修士課程了。同年 NEC (日本電気) 入社。以来、同社中央研究所にてインターネット、マルチメディア通信、モバイルコンピューティング、ユビキタスシステム等の研究に従事。工博。平 9 同社パーソナル C&C 研究所所長, 平 11 同社インターネットシステム研究所所長。平 9~11 奈良先端科学技術大学院大学客員教授, 平 9~11 情報処理学会理事。平 13 情報処理学会フェロー。平 15~17 本会企画理事。平 16~18 情報処理学会監事。平 16 より千葉大学大学院教授。「マルチメディアシステム」(昭晃堂), 「モバイルコンピューティング」(アスキー出版), 「インターネットと QoS 制御」(裳華房), 「インターネット・プロトコル」, 「ユビキタス技術無線 LAN」, 「センサネットワーク」(オーム社), 「ワイヤレス・ユビキタス」, 「SIP/UPnP 情報家電プロトコル」, 「ZigBee センサネットワーク」(秀和システム), 「ワイヤレス USB/UWB 技術」(インプレス) ほか共・著書 30 余。

## 青木 秀憲 (正員)



平 9 早大・理工・電子情報通信卒。平 11 同大大学院修士課程了。同年 NTT DoCoMo 入社。以来、無線 LAN 及びメッシュネットワークに関する研究開発, IEEE802.11s 標準化活動に従事。

## 間瀬 憲一 (正員:フェロー)



昭 45 早大・理工・電気通信卒。昭 47 同大大学院修士課程了。同年電電公社武蔵野電気通信研究所入所。以来、通信網構成法, ダイナミックルーティング, ネットワーク設計法, 通信品質, コンピュータネットワーク, マルチホップ無線ネットワーク等の研究に従事。昭 53~54 米国コロンビア大客員研究員。平 6 NTT 通信網研究所・通信品質研究部長。平 8 NTT マルチメディアネットワーク研究所・情報通信アセスメント研究部長。平 11 より新潟大学工学部情報工学科教授。平 16 より新潟大学大学院自然科学研究科教授。同大学コア・ステーション自然科学系附置国際情報通信研究センター長。同超越研究機構プロジェクトリーダー。工博。平 5 本会論文賞。平 9 第 13 回電気通信普及財団テレコムシステム技術賞受賞。IEEE フェロー。著書「マルチメディアネットワークとコミュニケーション品質」(共著), 「無線 LAN とユビキタスネットワーク」(共著) など。