

## アドホックネットワーク

間瀬 憲一\*・中野 敬介\*・仙石 正和\*・篠田 庄司\*\*

**ABSTRACT** Ad hoc networks do not require base stations nor wired fixed networks. It is a distributed-controlled autonomous network composed of mobile terminals. Development of ad hoc networks is expected as an information infrastructure in twenty-first century. Packet radio and wireless circuit connection technologies can be used for realizing wireless multihop communication, which is a basic feature for ad hoc networks. There are a number of technologies and issues in areas such as routing and multicast for efficient communication and information sharing using wireless multihopping. Applications on ad hoc networks include information sharing at conference sites, sensor networks, and realization of convenient and comfortable local communities.

## 1. はじめに

21世紀の社会において快適な移動通信へのニーズはますます多様化・高度化すると予想される。従来型の移動通信技術のさらなる技術革新はもちろん必要であるが、それだけで移動通信への多様なニーズに対応するには限界もあろう。ひとつのアプローチとして、従来の移動通信ネットワークとは根本的に異なる無線あるいは移動アドホックネットワークと呼ばれるコンセプトの利用が考えられる。アドホックネットワークは従来のネットワークが対応できない新たなコミュニケーション環境の実現手段として、大きな潜在的可能性を有し、今後の急速な発展が期待できる分野である。

本文では、アドホックネットワークが今何故関心を集めているのか、今後どのような発展が考えられるか、どのような技術が必要になるか、どのようなサービスが考えられるか、等の諸点について解説を行う。

## 2. アドホックネットワークとは

アドホックネットワークは、①従来の移動通信ネットワークの構成に不可欠な要素である基地局とそれらを結ぶ有線網に依存しない、②端末（以下では、ノードと呼ぶ）は互いに対等で自律分散的にふるまう、③ノード同士が無線通信により、直接情報を交換する、

④電波が届かず直接情報を交換できないノード同士も、途中のノードが中継すること（無線マルチホップ通信）により、情報交換が可能である、等の特徴を持つ。この場合、ノードさえあれば、どのようなエリアでも即席にネットワークを形成できることから、アドホックネットワークの名がある。このようなネットワークでは、ノード移動に伴うネットワークトポロジーや伝送品質の急激な変化、利用可能な無線周波数帯域の限界、バッテリーに依存するノードの電力消費の制約といった厳しい条件がある。このため、(a)ルーティングやチャネルアクセスの制御、(b)周波数帯域の有効利用、(c)ノードの電力消費の節約等、多くの課題がある。

アドホックネットワークに関する研究の歴史は長い。1970年代に ARPA プロジェクトの一環として軍事利用の観点から研究が開始された。近年、インターネットの技術標準化を行う組織である IETF では、アドホックネットワークに関するワーキング・グループ (MANET) が活動している<sup>1)</sup>。特に、ルーティング、マルチキャストに関して各種の方式が提案されている。一方、アドホックネットワーク実現の別の形態として、PHS の子機間通信を利用するものがあり、近年、研究開発が行われている。

近年のインターネット、移動通信技術の発展により、アドホックネットワークに関する研究開発は活発化する状況にある。しかし、これまでのところアドホックネットワークの利用分野は比較的限定されており、主に軍事、災害、イベント、個別サービス等が想定されてきた。言い換えれば、一時的な利用のための

Ad Hoc Networks. By Kenichi Mase, Keisuke Nakano, Masakazu Sengoku (Niigata University) and Shoji Shinoda (Chuo University).

\*新潟大学工学部情報工学科

\*\*中央大学理工学部電気電子情報通信工学科

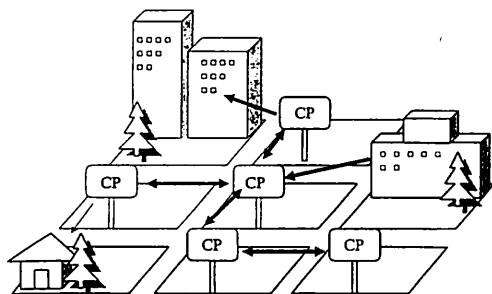


図1 無線マルチホップを利用したネットワークの構成例  
地域コミュニティにコミュニケーション・ポート  
(CP)を配置し、情報共有に利用する。

即席のネットワーク、特定の利用目的のために、特定の仲間うちで使う閉鎖的なネットワークという位置付けであったと言える。

21世紀には家庭、オフィス、街路等のあらゆる機器にもコンピュータが埋め込まれ、これらがインターネットに接続することが考えられる。いわゆる IP on Everything の時代である。このような環境に対応するため、移動通信においても新たなコンセプトが要求され、無線マルチホップやアドホックネットワークがその鍵を握る可能性がある。このような時代には従来形のアドホックネットワークとは別に、不特定多数が使えるようなオープンなアドホックネットワークや特定の目的ではなく、汎用の目的で使用されるアドホックネットワークが登場することが望まれる。アドホックネットワークがセルラ形のネットワークと並んで、一種のインフラになることが想定されるのである<sup>2~4)</sup>。(この意味ではアドホックネットワークという呼称も適切ではないかもしれない。) 図1は無線マルチホップを利用したコミュニティ・ネットワーク(オープン・コミュニティ・ネットワーク)のイメージ図である。次章ではアドホックネットワークのネットワークレベルの課題を中心にいくつかの技術課題と解決へのアプローチを紹介する。

### 3. 無線マルチホップ通信の実現手段

パケット無線方式と無線回線接続方式が考えられる。MANETでは、パケット無線方式を前提として、ルーティングプロトコルの検討が進められている。パケット無線方式の具体例としては、IEEE802.11(伝送速度が最大2Mビット/秒)、802.11b(伝送速度が最大11Mビット/秒)等の無線LAN仕様の標準規格が利用できる。アドホック・モードでノード間を接続

し、ノードがルータの役割を果たすことにより、マルチホップを実現する。一方、無線回線接続方式では、隣接ノード間で回線確立、情報転送、回線切断を行う。これにより、情報が1ホップ移動する。これを目的のノードまで繰り返す。具体例としてはPHSの子機間通信機能を用いることが考えられる。

パケット無線方式の場合、周辺の電波が届く範囲(通信範囲)に複数のノードがあるとき、1回のパケット送信でそれらの全ノードにブロードキャスト的に情報転送を行うことが可能である。もちろん、相手を指定すれば、ユニキャスト形の通信も可能である。これに対して、無線回線接続形では、1回の送信でひとつのノードに情報転送される。ひとつのノードに無線回線接続形の通信装置を複数装備させる構成も可能である。これにより、情報の送受信を複数のノードと同時並行的に行うことが可能になり、通信性能の向上が考えられる。現在のところ、無線パケット形と回線接続形の利用に関しては、それぞれ検討が進められているが、両者の利点を併せ持つ複合形の利用価値も今後は注目に値するであろう。Bluetoothはパケット無線方式と無線回線接続方式の両方をサポートできる新たな規格であり、アドホックネットワークでの利用が期待される。

### 4. パケット無線形アドホックネットワークにおける情報配信方式

#### 4.1 ルーティング方式

ルーティング・プロトコルは大きくはテーブル駆動方式とオンデマンド方式に分類される(図2)。紙面の都合により、詳細は割愛するが、いくつかのプロトコルの概要と課題等を以下に紹介する。

##### (1) テーブル駆動方式

各ノードはパケットの宛先と次ホップノードを対応させるルーティングテーブルを維持する。このテーブルは制御パケットにより、周期的に更新される。ノードはパケットの宛先からルーティングテーブルを用いて、次ホップノードを決定する。距離ベクトル経路制御方式を採用する場合、制御パケットにより転送されるルート情報の新鮮さを識別する必要があり、DSDV<sup>5)</sup>では、シークエンス番号を使用している。また、WRP<sup>6)</sup>では、宛先ノードへの距離と最短ルート情報を維持することにより、無限カウントやループ発生を防止するメカニズムを採用している。

ノードが隣接ノードとハローパケットを交換することにより、自律分散的にクラスタ(ノードのグループ)

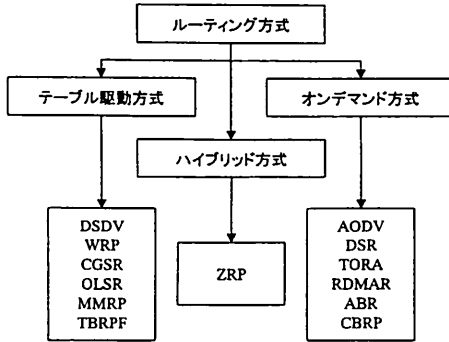


図2 パケット無線形アドホックネットワークにおけるルーティング方式の分類。

ノードの移動速度が低く、活動度が高い場合にはテーブル駆動方式が、その逆の場合にはオンデマンド方式が有利になる。

を構成し、クラスタを管理するノード（クラスタヘッド）がチャンネル割当、ルーティング等を制御することが考えられる<sup>7)</sup>。CGSR<sup>8)</sup>はクラスタを基盤とし、DSDVを利用するルーティング方式である。

リンク状態経路制御方式を採用するものとしては、OLSR<sup>9)</sup>、MMRP<sup>10)</sup>、TBRPF<sup>11)</sup>がある。これらの方式では、各ノードがネットワークトポロジーに関する情報を他ノードにブロードキャストする際、フラッディングするノードを限定したり、遠方になるほど情報の転送周期を長くする。これにより、単純にすべてのノードがフラッディングする場合に比べて、制御パケットによるオーバーヘッドの削減を図っている。

## (2) オンデマンド方式

情報の発生源のノード（ソース）がパケット転送の要求発生時に宛先ノードへのルート発見を行う方式である。まず、ソースは問合せパケットをフラッディング方式により、すべてのノードに転送する。この際、各ノードはソースへの逆向きのルートを学習する（バックワード・ラーニング）。問合せパケットを受信した宛先ノードがソースに応答する。このようにして発見されたルートにより、ソースから宛先ノードへパケット転送を行う。ノードの移動等により、ルートが使用できなかった場合には局所的なフラッディングにより、ルートの再構築を行う。ルート情報を短時間保持するため、キャッシングが使用される場合もある。

AODV<sup>12)</sup>はDSDVと同様、シークエンス番号を利用して、ループフリーとルートの最新性を保証する。DSR<sup>13)</sup>はソースから宛先ノードまでの中継ノードのリスト（ルート情報）をパケットのヘッダに載せてルー

ティングする方式、TORA<sup>14)</sup>は宛先に向けて複数のルートを維持することにより、トポロジー変化に対するルート再構成のオーバーヘッドを削減する方式である。また、RDMAR<sup>15)</sup>は、ソースと宛先ノードの相対距離推定値に基づき、問合せパケットのフラッディングの範囲を限定することにより、オーバーヘッド削減を図る方式である。これらの方式では、基本的にはソースと宛先ノード間の最短ルートが選択される。ノードの移動を考慮すると、最短ルートの選択がよいとは限らず、寿命の長いルートの方が好都合の場合もある。ABR<sup>16)</sup>は、各ノードが周期的に発信するビーコン信号をもとに、ソースからの問合せを受信した宛先ノードが複数のルートの中から最も安定なルートを選択する方式である。CBRP<sup>17)</sup>はクラスタを利用して問合せパケットの削減を図る方式である。

ノードの移動速度が低く、活動度が高い場合にはテーブル駆動方式が、その逆の場合にはオンデマンド方式が有利になる。そこで、両者の長を併せもつハイブリッド方式も考えられる<sup>18)</sup>。その他にも種々の特徴をもつ方式が提案されているが、紙面の都合で省略する。

## 4.2 マルチキャスト・ルーティング

1対多の情報転送を目的とするマルチキャスト・ルーティングには、ルーティング方式の場合と同様にテーブル駆動かオンデマンドかといった分類が可能であるが、さらに、マルチキャストそのものの特徴として、発ノードから複数のノードにどのような経路で情報パケットを送るか、という問題があり、各種の方式が検討されている。いくつかのプロトコルの概要と課題等を以下に紹介する。

### (1) ソースを根とする木を利用する方式

最も単純な方式はソースを根とする木を構成し、この木に従ってパケットを分配するものである。具体的にはDVMRPがある。DVMRPはインターネット(MBone)で使用されており、無線アドホックネットワークに拡張されている<sup>19)</sup>。

### (2) コアを根とする木を利用する方式

DVMRPではソースごとに木が構成される。複数のマルチキャストグループに所属するノードは個々のグループに対するエントリを維持する必要があるため、拡張性に限界がある。そこで、CBT、PIMはソースごとに木を構成するのではなく、共有木を利用するものである<sup>20,21)</sup>。この場合、コアと呼ばれるいくつかのノードを維持する必要がある。ソースから宛先ノードまで最短経路をとるとは限らない。

### (3) マルチキャストメッシュを用いる方式

木に基づく方法はマルチキャストグループのノード間に最小の接続性を提供するだけであり、リンクのひとつが切れると、グループが分割され、木の再構成が必要になる。CAMP<sup>22)</sup>は、コア方式をベースに、木よりも接続性の高いグラフ(マルチキャストメッシュ)を構成し、しかもループを防止する方式として提案されている。基盤となるユニキャスト・ルーティングプロトコルの利用を前提とする方式である。

### (4) フォワーディング・グループを利用する方式

ODMRP<sup>23)</sup>は、コアや木に依存せず、マルチキャスト・パケットの転送に責任をもつノードのグループ(フォワーディング・グループ)を利用して、最短経路でマルチキャスト・パケットを転送する方式である。ソースのマルチキャスト広告に対し、参加ノードが加入パケットをフラディングすることにより、フォワーディング・グループが構成される。

### (5) 位置情報に基づくマルチキャスト・ルーティング

ある領域に位置するすべてのノードに情報配信するものであり、Geo Castとも呼ばれる。ソースの位置と対象の領域(マルチキャスト領域)に基づき、転送領域が設定され、転送領域に位置するノードのみがパケット転送を行う<sup>24,25)</sup>。これにより、フラディングの範囲が限定される。

## 5. 無線回線接続形アドホックネットワークにおける情報配信方式

### 5.1 ルーティング方式

無線回線接続形の場合、パケット無線形と異なり、回線接続・切断の処理がオーバーヘッドとなる。従って、比較的短い制御情報を単独で送ると、回線の保留時間も短くなり効率が悪い。このため、短周期での制御情報の転送は困難であり、制御情報を本来送信する情報に相乗りさせて転送することが考えられる。また、パケット無線方式とは異なり、問合せを周囲のノードに簡単にブロードキャストすることは困難である。これは相手ノードの番号を知り、個々に回線接続する必要があるためである。このように、パケット無線方式に比べて厳しい条件を考慮するとオンデマンド方式はルート発見時間が長くなるため採用困難であり、テーブル駆動方式が基本になると考えられる。比較的小規模でノードの移動速度が少ないネットワークを対象にソースから宛先ノード、中継ノードに、試行錯誤的な接続を繰り返し、バックワード・ラーニング

により、ルーティングテーブルを構成する方法が提案されている<sup>26)</sup>。

### 5.2 マルチキャスト方式

#### (1) ソースがひとつの場合

各ノードがひとつの回線接続形通信装置を装備することを前提とすると、1回にひとつのノードにしか、情報を転送できない。その後はふたつのノードが同一の情報をもつので、並列的に他のノードへの情報転送が可能になる。ソースがネットワーク内のノードの接続関係(ノード間の無線リンクの有無)を知っていることを前提とすれば、ソースから全ノードに情報を最短時間で配信するため、ソースが情報の配信ルートを決め、配信ルート情報を送信情報と一緒に転送することにより、ソースの指定したルートで情報配信ことが考えられる(ソース・ルーティング)。

今、二つのノードが相互に通信可能範囲にある場合にそれらの間を線で結んで作ったグラフを考えると、そのグラフが完全グラフまたは木グラフとなっている場合、最短時間の配信ルートを検出するアルゴリズムが知られているが、一般グラフの場合には発見的な手法が必要になる<sup>27,28)</sup>。また、ソースがそのようなネットワークのトポロジーを如何に認識するかも課題である。

各ノードが隣接ノードとの接続関係を把握している場合、ノードが配送完了リストを交換することにより、ネットワークのトポロジー情報を使用せずに情報配信する方法も可能である<sup>29)</sup>。

#### (2) ソースが複数の場合

##### (i) 個別接続方式

情報転送の要求の都度、ソースが接続を開始するものである。ソースが複数の場合には、接続相手のノードが話中の状態が頻発することになる。このような場合には、各ソースが独立に最短ルートを選択して配信したとしても、ネットワーク内にボトルネックが生じる可能性がある。また、かけ直しがさらに衝突しないようにランダム遅延を与えることが考えられるが、遅延時間の範囲をどのように選択するかが課題である。ノードが複数の通信装置を装備することにより、話中の低減が可能である<sup>30)</sup>。

##### (ii) 周期的接続方式

個別接続方式は送る情報量が少ない場合には回線の保留時間が短く、効率が悪い。また、上述したような話中の頻発による呼損率増大の問題もある。そこで、各ノードは周期的に回線接続を行い、そのときに発着ノードがそれぞれ所有する情報を交換することが考え

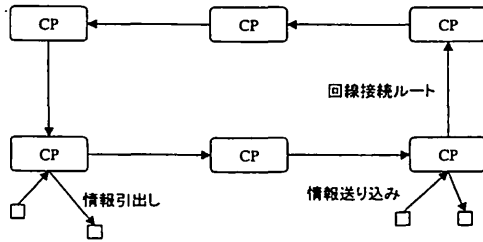


図3 無線回線接続方式を用いたネットワーク構成のイメージ。  
コミュニケーション・ポート (CP) 間で周期的に回線接続を行い、各CPに最新の情報を維持する。

られる<sup>3)</sup>。これを周期的接続方式と呼ぶ(図3)。本方式では、情報転送の開始に時間遅れが生ずるが、話中の減少により、個別接続方式に比べて効率的な情報交換が可能になる。

## 6. アドホックネットワークの利用分野

アドホックネットワークの利用に関して、いくつかの例を示す。

(1) 教室、会議場等での資料配布・共同作業支援  
紙を使用せず、効率的な資料配布・交換が可能である。

(2) 地域密着形の情報案内

駅等の公共的な場所での案内、商店街で道行く人々へのセールス情報伝達、駐車場の空き情報の案内、住宅街への訪問販売のための御用聞き等に活用する。スピーカが不要になり、静かな生活環境を維持できる。

(3) 安全・快適なコミュニティ

信号機や電柱にセンサーを埋め込み、周囲の歩行者や運転者にその情報を流せば、交通事故は激減する。高齢者・障害者の行動支援も考えられる。

(4) ITS との連携

事故や警戒信号を後続車や歩行者へ連絡する。

(5) ホームネットワークとしての活用

外出、帰宅等に伴い、セキュリティシステム、照明、エアコン、オーディオ機器等の自動制御を行う。

(6) センサーネットワーク(図4)

自然現象、産業、生活等あらゆる分野で異常や障害を早期に検出し、対応することは重要である。このような監視を行うため、温度、化学物質、振動等を検知する超小型センサーを各種設備に組み込んだり、空気中、水中に漂わせ、情報収集する。

(7) 災害時対応

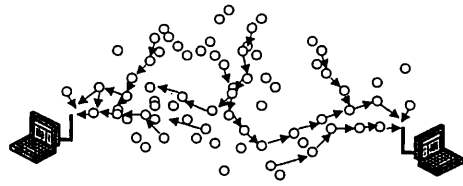


図4 無線アドホックネットワークの応用分野。  
通信機能を持つ超小型センサによる情報収集を行う。この場合、センサの省電力化のためにマルチホップ通信は有効である。

緊急時の避難誘導、災害救援等の状況では、被災者と救援者、救援者間の情報通信に威力を発揮する。

## 7. まとめ

アドホックネットワークが注目される背景、位置付けを述べた。アドホックネットワークに特徴的な無線マルチホップ通信を実現するため、パケット無線方式と回線接続方式のふたつのアプローチを示した。無線マルチホップ通信を用いて、情報通信・情報流通を効率的に行うため、ルーティング、マルチキャストに関する技術開発の現状を紹介した。最後に、アドホックネットワークの様々な応用分野を示した。アドホックネットワークの実装に関する問題、セキュリティ上の課題等に関しては、機会をあらためて述べることにしたい。21世紀の情報通信基盤に不可欠な要素として、アドホックネットワークに関する研究開発の進展が期待される。

## 参考文献

- 1) <http://www.ietf.org/html.charters/manet-charter.html>
- 2) 間瀬憲一、中野敬介、仙石正和、篠田庄司：次世代アドホックネットワークの動向と課題—ユニバーサルネットワークの提案—、信学技報、IN2000-7、37/42(2000)
- 3) Kenichi Mase, Ritsuko Noto, Keisuke Nakano, Naoyuki Karasawa, Masakazu Sengoku: A PHS-based Multihop Wireless Infrastructure for Local Communities, The Third International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC'00), 2000
- 4) K. Mase, M. Sengoku and S. Shinoda: A perspective on next-generation ad hoc networks —a proposal for an open community network—, IEICE, E84-A-1 (2001)
- 5) C. E. Perkins and P. Bhagwat: Highly dynamic destination-sequenced distance-vector routing (DSDV) for mobile computers, Computer Communications Rev, 234/244 (1994)
- 6) S. Murthy and J. J. Garcia-Luna-Aceves: An efficient routing protocol for wireless networks, ACM MONET Journal,

- 183/197 (1996)
- 7) A. Ephremides, J. Wieselthier and D. Baker: A design concept for reliable mobile radio networks with frequency hopping signaling, *Proc. IEEE*, 75-1, 56/73 (1987)
  - 8) C.-C. Chiang, H.-K. Wu, W. Liu and M. Gerla: Routing in clustered multihop, mobile wireless networks with fading channel, In *Proceedings of IEEE Singapore International Conference on Networks (SICON '97)*, (1997)
  - 9) P. Jacquet, P. Muhlethaler, A. Qayyum, A. Laouiti, L. Viennot and T. Clausen: Optimized link state routing protocol, *Internet-draft, draft-ietf-manet-olsr-02.txt* (2000)
  - 10) K. Grace: Mobile mesh routing protocol, *Internet-draft* (2000)
  - 11) B. Bellur, R. G. Ogier and F. L. Templin: Topology broadcast based on reverse-path forwarding (TBRPF), *Internet-draft* (2000)
  - 12) C. E. Perkins and E. M. Royer: Ad hoc on-demand distance vector routing, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> IEEE Workshop on Mobile Computing Systems and Applications*, 90/100 (1999) <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-aodv-01.txt>.
  - 13) D. B. Johnson and D. A. Maltz: Dynamic source routing in ad hoc wireless networks, *Mobile Computing*, Kluwer Publishers, Chapter 5, 153/181.
  - 14) V. D. Park and M. S. Corson: A highly adaptive distributed routing algorithm for mobile wireless networks, *INFOCOM '97* (1997)
  - 15) G. Aggelou and R. Tafazolli: RDMAR: A bandwidth-efficient routing protocol for mobile ad hoc networks, In *Proceedings of the Second ACM International Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM)*, (1999)
  - 16) C.-K. Toh: Associativity-based routing for ad-hoc mobile networks, *Wireless Personal Communications Journal*, 4-2, 103/139 (1997)
  - 17) M. Jiang, J. Li and Y. C. Tay: Cluster based routing protocol (CBRP), *Internet-draft* (1999)
  - 18) Z. J. Haas: The zone routing protocol (ZRP) for ad hoc networks, *<draft-ietf-manet-zone-zrp-02.txt>*, (1999)
  - 19) C.-C. Chiang, M. Gerla, and L. Zhang: Forwarding Group Multicast Protocol (FGMP) for Multihop, *Mobile Wireless Networks*, Baltzer Cluster Computing, 1-2, 187/196 (1998)
  - 20) A. Ballardie, P. Francis and J. Crowcroft: Core based trees (CBT): an architecture for scalable inter-domain multicast routing, *Proc. ACM SIGCOMM '93*, 85/95 (1993)
  - 21) S. Deering, D. Estrin, D. Farnacci, V. Jacobson, C. G. Liu and L. Wei: The PIM architecture for wide-area multicast routing, *IEEE/ACM Tran. on Networking*, 4, 153/162 (1996)
  - 22) J. J. Garcia-Luna-Aceves: The core-assisted mesh protocol, *IEEE JSAC*, 17-8, 1380/1394 (1999)
  - 23) C.-C. Chiang and M. Gerla: On-demand multicast in mobile wireless networks, *Proceedings of IEEE ICNP '98* (1998)
  - 24) Y.-B. Ko and N. H. Vaidya: Using location information in wireless ad hoc networks, *VTC*, 1952/1956 (1999)
  - 25) S. Basagni, I. Chlamtac and V. R. Syrotiuk: Geographic messaging in wireless ad hoc networks, *VTC*, 157/1961 (1999)
  - 26) 藤田義弘, 中野敬介, 仙石正和: マルチホップ移動通信網に関する基礎研究, *信学会総合大会*, B-5-149 (1998)
  - 27) 近藤 靖, 名倉武之, 田中利憲: PHS-WRAN のファイル配送特性, *信学総大*, B-5-147 (1998)
  - 28) 角田智之, 田村 裕, 仙石正和, 間瀬憲一, 篠田庄司: ユニバーサルネットワークの検討—木状ネットワークに対する情報配信アルゴリズム—, *信学総大* (2000)
  - 29) 高杉耕一, 近藤 靖, 大塚裕幸, 田中利憲: 無線アドホック通信ネットワークにおけるマルチキャスト配送方式, *信学総大*, B-5-70 (1998)
  - 30) 能登利津子, 間瀬憲一, 柄沢直之, 中野敬介, 仙石正和: ユニバーサルネットワークの検討—PHS 2 台を装備する端末を用いた情報配信実験—, *信学技報*, IN2000-5, 25/30 (2000)