

指向性 MAC プロトコルの Deafness に関する実験について

河村 直哉[†] 高田 昌忠[‡] 萬代 雅希[†] 渡辺 尚^{*}

[†] 静岡大学情報学部 [‡] 静岡大学大学院理工学研究科 ^{*} 静岡大学創造科学技術大学院

〒432-8011 浜松市城北 3-5-1

Email: {koumura, takata, bandai, watanabe}@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

あらまし 近年、無線アドホックネットワークにおいて指向性アンテナの使用を想定した指向性 MAC プロトコルが提案されている。指向性 MAC プロトコルでは、通信したい相手がビジーであることを知らず通信しようと試みるが、受信者が自身のビームを他の方向に向けているために失敗する Deafness 問題が発生する。Deafness 問題はネットワークの性能に大きく影響を与える。本稿では Deafness の問題の分析及びテストベッドを用いて評価実験を実施し、実環境において Deafness 問題がスループット低下の原因となることを示す。

キーワード アドホックネットワーク、指向性 MAC プロトコル、Deafness、テストベッド

On the Experiment of the Deafness Problem in Directional MAC Protocol

Naoya KOUMURA[†] Masanori TAKATA[‡] Masaki BANDAI[†] and Takashi WATANABE^{*}

[†] Faculty of informatics, Shizuoka University

[‡] Graduate School of Science and Engineering, Shizuoka University

^{*} Graduate School of Science and Technology, Shizuoka University

3-5-1 Jouhoku, Hamamatsu-shi, Shizuoka, 432-8002 Japan

Email: {koumura, takata, bandai, watanabe}@aurum.cs.inf.shizuoka.ac.jp

Abstract Recently, several MAC protocols using directional antennas, typically referred to as directional MAC protocols, have been proposed for wireless ad hoc networks. In directional MAC protocols, deafness problem is one of the major problems, which are caused by a transmitter repeatedly attempts to communicate with its intended receiver, but it fails because the receiver has its beam pointed away from the transmitter. In this paper, we analyze the deafness problem. In addition, we experiment with the effects of deafness using the testbed. The experimental results show that the deafness problem deteriorates the throughput performance.

Keyword Ad hoc networks, Directional MAC protocol, Deafness, Testbed

1. はじめに

近年、無線アドホックネットワーク [1] が注目されている。無線アドホックネットワークは、

固定インフラを必要とせず、無線端末のみで構成される一時的なネットワークである。全ての端末が無線チャネルを共有する無線アドホックネッ

トワークでは、無線媒体の効率的な利用が重要課題である。従来研究では、全方位に同じ利得を持つ無指向性アンテナの使用が想定されてきた。無指向性アンテナは一組の通信が多く空間を占有し、周囲の端末の通信を妨げる。そのため、無指向性アンテナの使用を想定した MAC プロトコルである IEEE 802.11 DCF (Distributed Coordination Function) [2] は高スループットの実現が困難である [3]。そこで電子制御によりアンテナの指向性が制御可能な指向性アンテナが注目されている。指向性アンテナは特定の方位のみ指向性を制御することができるため、空間利用効率が向上し、通信距離が拡張することによりスループットの向上が期待できる。近年はこの指向性アンテナの使用を想定した指向性 MAC プロトコルが提案されている。

しかし指向性 MAC プロトコルには、指向性通信であるために生じる問題がある [4]。その一つが Deafness である。Deafness は通信したい相手がビジーであることを知らないために起こり、パケットを送信しても通信相手が受信できないために送信側は再送を繰り返す。これによりパケット廃棄、無線チャネルの浪費等を招き、ネットワークの性能に大きく影響を及ぼす。本稿では実環境を考慮した Deafness に関して問題の分析を行い、無線 MAC プロトコルのテストベッド [5] を用いて指向性 MAC プロトコルを実装し、Deafness の評価実験を行う。

2. 関連研究

2.1. IEEE 802.11 DCF

IEEE 802.11 DCF [2] は無指向性アンテナの使用を想定した MAC プロトコルである。RTS (Request To Send), CTS (Clear To Send) 制御フレームを送信し、周辺端末に NAV (Network Allocation Vector) を設定させることにより、隠れ端末問題に対処している。しかし、無指向性アンテナでは一組の通信が広範囲に及ぶ空間を占有し、周囲の端末の通信を妨げる。空間利用が効率的ではなく、高スループットの実現は困難である。

2.2. 指向性 MAC プロトコル

近年、指向性アンテナを用いることで空間利用効率の向上、通信距離の拡張を可能とする指向性

MAC プロトコルが提案されている。DMAC (Directional MAC) [4] は IEEE 802.11 DCF をベースとして、全てのフレームを指向性ビームで送信する。RTS, CTS を受信した周辺端末は、RTS, CTS を受信した方向へ DNAV (Directional NAV) を設定する。DNAV を設定した方向への送信を延期し、それ以外の方向への送信を許可する。これにより空間利用効率が向上する。

MMAC (Multi-hop RTS MAC) [4] は DMAC の拡張方式で、指向性アンテナの通信距離の拡張の特徴を生かしたプロトコルである。マルチホップ RTS を用いてより遠くにいる端末との直接通信を可能にしている。

2.3. Deafness 問題

図 1 は Deafness が発生する状況を示している。ここで指向性 MAC プロトコルとして全てのフレームが指向性で送受信される DMAC を用いる。図 1 において、A は B-C 間の信号を受信することができないため、B と C が通信をしていることに気づかない。ここで A が B に通信開始を試みようとするが、B は自身のビームを C 方向に向けているために、B は A からの送信要求を受信できない。つまりこのときの B は A に対して聞こえない状態にある。本稿ではこれ以降、Deafness に影響されるノード (ここでは A) を Deafness ノードと呼ぶ。A は一定時間内に B からの応答がこないため、バックオフと送信要求を繰り返す。B から C へのパケット転送が終了しても、次のパケットを転送する際のバックオフ期間中、B は自身のビームを C 方向に向けたままであるため、A は依然 Deafness となる。Deafness ノードの A は再送回数の閾値まで到達し、パケットは廃棄される。MAC 層はルーティング層にリンクエラーを通知し、ルートの再構築が必要となる。

Deafness のもうひとつの問題は、無線チャネルの浪費である。図 2 において B-C 間の通信が終了し、B は A からの送信を受信する準備ができているにもかかわらず、A は即座に B に通信を開始することができない。これは IEEE 802.11 と同じように再送する度に Contention Window が 2 倍になり、バックオフを行っている期間が長くなるためである。そのため図 2 のように、その間はチャネルが有効に使われないことになる。

Deafness によってバックオフが長くなり、これは遅延の増加にもつながる。

このように Deafness はパケット衝突とはならないが、パケット再送による過度のパケット廃棄、遅延が増加する、チャネルが有効活用されない、チャネルアクセスに不公平が生じる等の問題を引き起こし、ネットワークの性能に大きな影響を及ぼす。

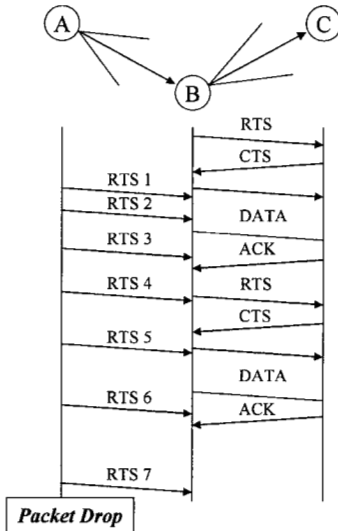


図 1 Deafness が生じる状況

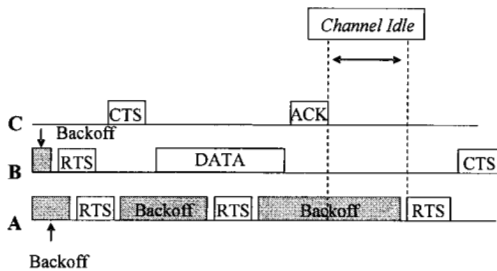


図 2 チャネル割り当ての様子

2.4. Deafness に対処する MAC プロトコル

Deafness に対処するプロトコルとして 文献 [6-14] が提案されている。文献 [6-7] では RTS と CTS は無指向性で送信し、DATA, ACK は指向性で送信する。また、文献 [8-9] では宛先端末の位置情報を得るために RTS を無指向性で送信す

る。無指向性で RTS/CTS を送信し、近隣端末にこれから始まる通信を通知することは Deafness を解決する基本的な方法の一つである。しかし、これらのプロトコルは少なくとも一度の無指向性送信を採用しているため、指向性通信の特徴を生かしきれていない。

Circular RTS MAC (CRM) [10] は、近隣に RTS を指向性で巡回送信する方式である。送信端末の近隣端末にこれから始まる通信を通知することで送信端末の近隣で生じる Deafness に対処しているが、依然として受信端末の近隣では Deafness が生じる。Circular RTS and CTS MAC (CRCM) [11] は CRM と同様に CTS フレームも指向性で巡回送信する方式で受信端末の近隣で生じる Deafness に対応している。しかし、指向性巡回送信は遅延と制御オーバーヘッドが増加する問題がある。MDA (MAC Protocol for Directional Antennas) [12] は CRM を拡張した方式で、指向性巡回 RTS/CTS 送信を送受信端末同時に、事前に取得した近隣端末の位置情報に基づいて、端末がいるセクタのみに送信することで制御オーバーヘッドを削減している。しかし、巡回送信をするのは通信端末の 180 度方向までであり、ビーム幅が狭くなるにつれてカバーしきれない領域が多くなり、Deafness が発生するエリアが増大する。

DMAC/DA (Directional MAC with Deafness Avoidance) [13] は MDA を改良したもので、制御メッセージ数の削減と Deafness ノードの削減を目的としている。DMAC/DA では RTS/CTS の交換が終了した後、送信端末・受信端末は、過去の通信記録を基に送信端末がいるセクタのみ WTS (Wait To Send) を送信する。WTS を受信した近隣端末は、WTS 送信端末が通信している間その端末への送信を延期する。過去の通信記録を用いるのは過去に送信した端末は後に送信してくる可能性が高いためである。しかし、すでにその端末宛のパケットを保持していない可能性があり、その場合には WTS は無駄となる。

前述のようにこれから行う通信を通知することによって Deafness を事前に対処する方法と、後から対処する方法がある。後者の方法として RI-DMAC (Receiver-Initiated Directional MAC) [14] が提案されている。RI-DMAC はポーリング方式を用いている。通信終了後、各自が管理して

いるポーリングテーブルを基に Deafness ノードになっている可能性のある端末に RTR (Ready To Receive) を送信し、自身が受信準備できたことを通知する。RTR を受信した端末はバックオフを凍結し、即座に通信を開始する。これにより無駄なバックオフ期間を防ぐことができる。

3. 実アンテナを用いた場合の Deaf Zone

Deaf Zone とは通信制御フレームが届かない領域、つまり通信端末間の通信を把握できない領域と定義される。ある端末がこの Deaf Zone に位置すれば、Deafness が発生する。図 3 において、点線の円は端末 S、D が指向性で通信可能な範囲、斜線の部分は Deaf Zone を表している。図 3、4 はそれぞれ理想アンテナ、実アンテナを使用したときの Deaf Zone の様子を示している。実アンテナを用いた場合、メインローブ以外にサイドローブ、バックローブが発生するため、理想アンテナよりも Deaf Zone が小さいと考えられる。また、実アンテナを用いた場合は Deaf Zone が小さくなるだけでなく、Deafness ノードからの送信をバックローブ、サイドローブで受信できる可能性がある。このように実アンテナを用いた場合、理想アンテナを用いた場合よりも Deafness による影響は少ないと考えられる。しかし、制御フレームがカバーできない大部分のエリアが Deaf Zone となる。

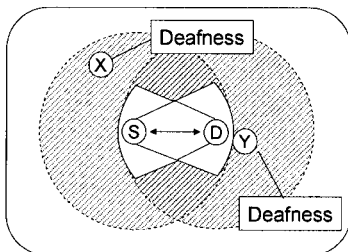


図 3 理想アンテナでの Deaf Zone

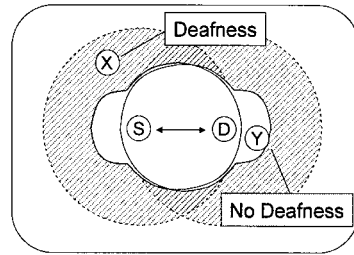


図 4 実アンテナでの Deaf Zone

4 評価実験

これまで議論されてきた Deafness の多くは、計算機シミュレーションを用いて評価されたものである。計算機シミュレーションでは、指向性のアンテナパターンや電波伝播環境が理想化されており、実環境での知見が十分に得られていない。そこで本稿では無線 MAC プロトコルのテストベッド [5] を用いて、指向性 MAC プロトコルを実装し、Deafness の評価実験を行う。

4.1 無線 MAC プロトコルのテストベッド

本稿で使用するテストベッドは物理層に IEEE 802.15.4 TM [15]、アンテナに送受信ビームの指向性が制御可能な ESPAR (Electronically Steerable Passive Array Radiator) アンテナ [16] を搭載している。ESPAR アンテナを図 5 に示す。ESPAR アンテナは 1 つの通信アンテナ (図 5 の #0) と 6 つの制御アンテナ (図 5 の #1-6) を持つ。制御アンテナにかける電圧を制御することで指向性を制御する。ESPAR アンテナのビームパターンを図 6 に示す。MAC 層を独自に実装し、マイコンによって制御する。テストベッドの概観を図 7 に示す。

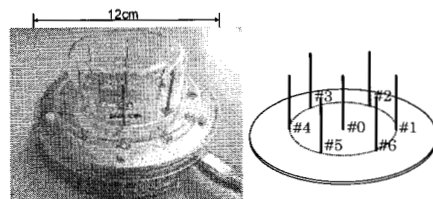
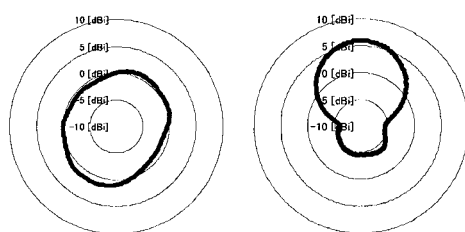


図 5 テストベッドのアンテナ部



Omni-directional beam form Directional beam form

図 6 ESPAR のビームパターン

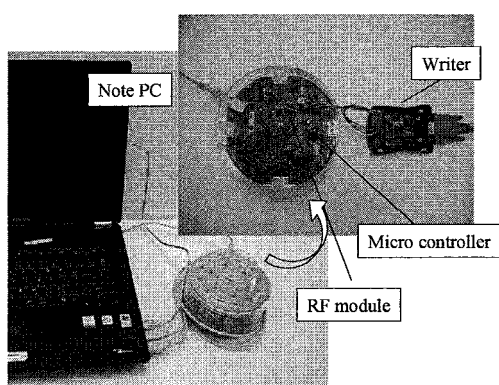


図 7 テストベッドの概観

4.2. 基礎評価実験

はじめに DMAC と IEEE 802.11 の基礎評価を行った。DMAC は指向性制御に必要な位置情報は予め与えられていると仮定しているため、本実験では位置情報は取得済みとする。実験はグラウンドで行った。実験の様子を図 8 に示す。実験に用いたパラメータを表 1 に示す。トポロジは図 9 のように 2 つの端末で、ノード 1 からノード 2 へのフローを仮定する。端末間の距離を変化させたときのスループット特性、RTS 失敗率を評価する。



図 8 実験の様子

Deafness の影響を調べるためには無指向性と指向性の通信距離を同じにする必要がある。指向性ビームの利得は、無指向性ビームの利得に比べ、高くなるが、送信電力制御により指向性通信と無指向性通信の通信距離を一致させる。理論値では無指向性と指向性の利得差は 4 [dBi] である。図 10 にデータ発生レートを 125 [kbps] とした場合のスループット性能を、図 11 に RTS 失敗率を示す。図 10, 11 において、 $P_t = -25$, $P_t = -22.5$, $P_t = -20$ はそれぞれ送信電力 -25 [dBm], -22.5 [dBm], -20 [dBm] を表している。指向性の送信電力を最小にし、無指向性の送信電力を変化させた結果、スループットでは指向性と無指向性に差が生じる結果となった。これは無指向性が周囲の影響を受ける割合が高くなるためであると考えられる。しかし、図 11 の RTS 失敗率の観点からすると送信電力が -22.5 [dBm] のときに指向性の RTS 失敗率が一番近い値を示した。よって以後の実験では無指向性の送信電力として -22.5 [dBm] を用いる。実環境では結果のばらつきが大きいため、実験結果は 3 回の試行の平均とする。

表 1 実験のパラメータ等

データ発生	CBR 50, 125 [kbps]
データサイズ	512 [bytes]
slot time	340 [μ s]
DIFS	850 [μ s]
SIFS	170 [μ s]
最小受信感度	-92 [dBm]
キャリアセンス閾値	-77 [dBm]
送信電力 指向性	-25 [dBm]
無指向性	-25, -22.5, -20 [dBm]
データレート	250 [kbps]
実験時間	62 [sec]
気温 / 湿度	8°C / 54%

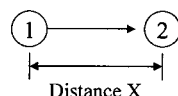


図 9 評価トポロジ 1

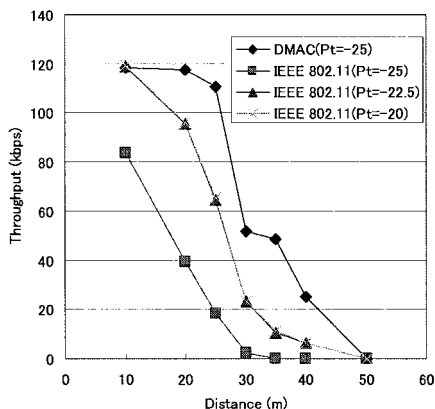


図 10 スループット性能

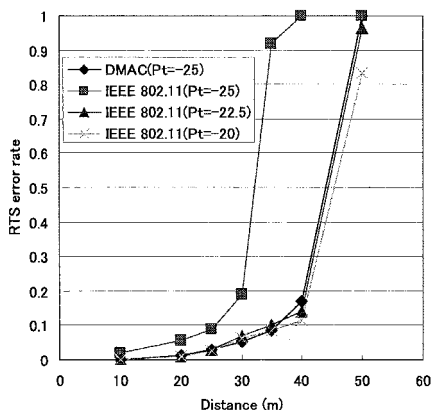


図 11 RTS 失敗率

4.3. Deafness の評価実験

図 12 に評価トポロジを示す。ノード 1 からノード 2、ノード 3 からノード 1 の 2 つのフローを考える。ノード 1 と 2 が通信している間、ノード 3 は Deafness ノードとなる。この実験では図 12 に示すように、ノード 1-2 間の距離を 30m に固定し、ノード 3-1 間の距離を変化させた場合の変動を評価する。なお、図 12 のノード 1 のように送信端末と受信端末を両方兼ねる端末は、負荷が高くなるにつれて、プロセッシング遅延等の理由からノード間のスループットに不公平さが生じることが確認済みである。この実験ではデータ発生レートを 50 [kbps] とする。スループット性能を図 13 に示す。IEEE 802.11, DMAC とともに 1-2

間のスループットに比べて 3-1 間のスループットが低いことがわかる。3-1 間に注目すると DMAC は IEEE 802.11 より低下していることがわかる。この原因として IEEE 802.11 ではノード 3 は 1-2 間の通信を知り NAV を設定できているが、DMAC ではノード 3 はノード 1 のサイドローブからの信号が受信できないため、1-2 間の通信に気づかなくなり、RTS 再送によりスループットが低下していると考えられる。

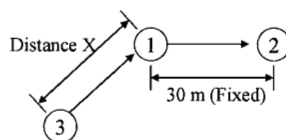


図 12 評価トポロジ 2

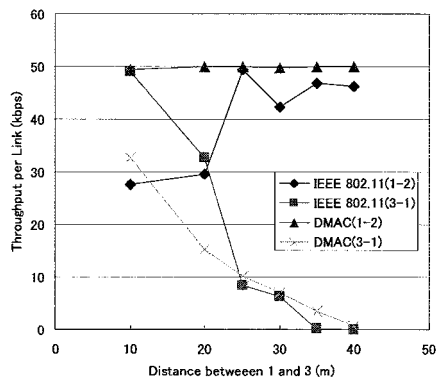


図 13 スループット性能

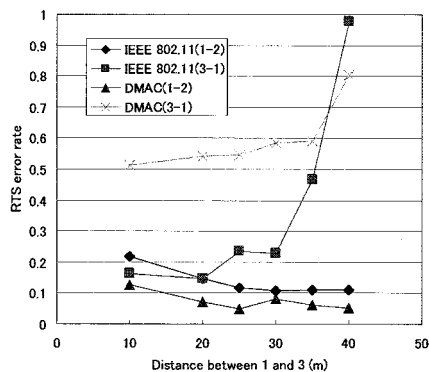


図 14 RTS 失敗率

図 14 に RTS 失敗率を示す。DMAC の Deafness の影響を受ける 3-1 間の RTS 失敗率が IEEE 802.11 と比べて著しく高いことがわかる。DMAC ではノード 3 が 1-2 間の通信を受信できないため、RTS 再送が繰り返されていることがわかる。これは Deafness の影響が顕著になって表れていることを示している。

4 おわりに

本稿では、既存の指向性 MAC プロトコルで生じる Deafness 問題についての分析とテストベッドを用いた実験を行った。実験において DMAC と IEEE 802.11 を比較し、Deafness の影響が表れていることを示した。今後は異なるトポロジ、フローでの Deafness の評価実験を行った上で、提案されている Deafness 問題に対処するプロトコルを実装し、その有効性を示す。

謝辞

本研究は文部科学省科学研究費基盤研究 A(17200003)の助成を受けて行った。

参考文献

- [1] R. Jurdak, C. V. Lopes and P. Baldi, "A Survey, Classification and Comparative Analysis of Medium Access Control Protocols for Ad hoc Wireless Networks," *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, Vol.6, No.1, First Quarter 2004.
- [2] ANSI/IEEE Std 802.11, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications," 1999.
- [3] S. Xu and T. Saadawi, "Does the IEEE 802.11 MAC Protocol Work Well in Multihop Wireless Ad Hoc Networks?," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.39, No.6, pp.130-137, June 2001.
- [4] R. R. Choudhury, X. Yang, R. Ramanathan and N. H. Vaidya, "Using Directional Antennas for Medium Access Control in Ad Hoc Networks," *Proc. ACM International Conference on Mobile Computing and Networking (MobiCom)*, pp.59-70, Sep. 2002.
- [5] 三觜輝, 渡辺正浩, 小花貞夫, 萬代雅希, 渡辺尚, "無線アドホックネットワークにおける MAC プロトコルのテストベッドについて", 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 強調とモバイル (DICOMO 2006) シンポジウム論文集(Ⅱ) pp.565-568, July 2006.
- [6] N. S. Fahmy, T. D. Todd and V.Kezys, "Ad Hoc Networks with Smart Antennas using IEEE 802.11-Based Protocols," *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, pp.3144-3148, April 2002.
- [7] T. Ueda, S. Tanaka, D. Saha, S. Roy and S. Bandyopodhyay, "Location-Aware Power-Efficient Directional MAC Protocol in Ad Hoc Networks Using Directional Antenna," *IEICE Trans. Commun.*, Vol.E88-B, No.3, pp.1169-1181, March 2005.
- [8] A. Nasipuri, K. Li, and U. R. Sappidi, "Power Consumption and Throughput in Mobile Ad Hoc Networks using Directional Antennas," *Proc. IEEE International Conference on Computer Communications and Networking (ICCCN)*, pp.620-626, Oct. 2002.
- [9] M. Takai, J. Martin, A. Ren, and R. Bagrodia, "Directional Virtual Carrier Sensing for Directional Antennas in Mobile Ad Hoc Networks," *Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp.183-193, June 2002.
- [10] T. Korakis, G. Jakllari, L. Tassiulas, "A MAC protocol for full exploitation of Directional Antennas in Ad-hoc Wireless Networks," *Proc. ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc)*, pp.98-107, June 2003.
- [11] G. Jakllari, I. Broustis, T. Korakis, S. V. Krishnamurthy and L. Tassiulas, "Handling Asymmetry in Gain in Directional Antenna Equipped Ad Hoc Networks," *Proc. IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Sep. 2005.
- [12] H. Gossain, C. Cordeiro and D. P. Agrawal, "MDA: An Efficient Directional MAC scheme for Wireless Ad Hoc Networks," *Proc. IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Nov. 2005.

- [13] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe, “On a MAC Protocol with Directional Antennas for Deafness Problems in Ad Hoc Networks”, 情報処理学会 マルチメディア, 分散, 強調とモバイル (DICO MO 2006) シンポジウム論文集 (Ⅱ) pp.553-556, July 2006.
- [14] M. Takata, M. Bandai, and T. Watanabe, “A Receiver-Initiated Directional MAC Protocol for Handling Deafness in Ad Hoc Networks”, *Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC)*, June 2006.
- [15] Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks, IEEE Std 802.15.4™-2003.
- [16] S. Chandran (Ed), “Adaptive Antenna Arrays Trends and Applications,” Springer, pp.184-204, 2004.