

修士論文の和文要旨

研究科・専攻	大学院 情報システム学研究科 情報ネットワークシステム学専攻 博士前期課程		
氏名	林 晶	学籍番号	1252035
論文題目	TDMA に基づくアドホックネットワークにおける QoS 通信の実現方式に関する研究		
要旨	<p>近年、より多くのスマート、小型・高性能コンピューティングデバイスは、日常生活の中に導入されている。このようなデバイスを使用し、ネットワーク配線やインフラなしで、その場で独立したネットワークを構成し、シームレスな方法で通信させる必要性が高まっている。そのため、モバイルアドホックネットワーク(MANET)が注目されている。CPU パワー、メモリ、転送速度、ストレージなどのモバイルデバイスの通信容量が大幅に進歩することにより、MANET において、ベストエフォートのデータ通信に加え、マルチメディアおよびリアルタイムデータ通信をサポートすることが期待されている。このようなリアルタイムデータ通信をサポートするためには、帯域や遅延などの通信品質(Quality of Service : QoS)を保証する必要性が出てくる。しかし、MANET では無線 LAN のアクセスポイントのような集中管理者が存在しないため、QoS を保証することは簡単ではない。</p> <p>本研究では、メディアアクセス制御(MAC)層における QoS 通信制御方式を検討する。</p> <p>現在、無線 LAN において QoS を保証する規格が IEEE802.11e である。IEEE802.11e の EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)では、データに優先度を付け、優先度の高いデータを優先的に送信することにより、QoS 通信を保証する。しかし、この方式ではリアルタイムデータが増加すると、パケットロスと遅延を発生する確率は高くなるため、帯域と遅延時間を保証することが難しくなる。</p> <p>そこで、本研究では、無線アドホックネットワークにおいてマルチメディアデータの転送のために QoS 通信を保証する MAC 制御方式として、アドミッション制御により保証できる QoS フローを選択し、ベストエフォート通信期間と QoS 通信期間を分け、さらに QoS 期間では分散的なタイムスロット割り当て方法を用いた TDMA (Time Division Multiple Access)により複数の通信端末で干渉を起こさず同時送受信すること可能とする方式を提案した。</p> <p>また、提案方式の性能をネットワークシミュレータ QualNet を用いて評価する。その結果、提案方式を用いることで QoS 通信の遅延が減少すること、データ到達率が増加することを示す。</p>		

平成25年度修士論文

TDMAに基づくアドホックネットワークにおける
QoS通信の実現方式に関する研究

大学院情報システム学研究科
情報ネットワークシステム学専攻
ネットワークアーキテクチャ講座

学籍番号： 1252035

氏名： 林 晶

主任指導教員： 加藤 聰彦 教授

指導教員： 大坐 晶 智 准教授

指導教員： 入江 英嗣 准教授

提出年月日：平成26年2月21日(金)

目次

1. はじめに	1
1.1 研究背景.....	1
1.2 研究目的.....	2
1.3 論文の構成	3
2. 無線アドホックネットワークと関連技術	5
2.1 無線アドホックネットワークの概要.....	5
2.2 IEEE 802.11 MAC の概要	6
2.2.1 DCF.....	6
2.2.2 PCF.....	8
2.2.3 IEEE 802.11e MAC の概要	9
2.2.3.1 EDCA.....	10
2.2.3.2 HCCA.....	11
2.3 OLSR ルーティングプロトコルの概要	13
2.4 無線アドホックネットワークにおける QoS の関連研究.....	15
2.4.1 データ優先度に基づく QoS 保証.....	15
2.4.2 アドミッション制御に関連する研究	16
3. 提案方式	18
3.1 提案方式の概要	18
3.1.1 QoS とベストエフォートの期間分け.....	18
3.1.2 アドミッション制御	19
3.1.3 タイムスロット割り当て	20
3.2 詳細設計.....	21
3.2.1 同時送信の判断条件	21
3.2.2 タイムスロット割り当てアルゴリズム.....	23
3.2.3 QoS 期間とベストエフォート期間の割り当て	27
3.2.4 制御メッセージ	28
3.2.5 タイムスロットテーブル	31
4. 提案方式の実装.....	32
4.1 実装.....	32
4.2 TDMA モジュールの実装方法	33
4.3 DCF モジュールの実装方法.....	34
5. シミュレーション実験と性能評価	36
5.1 シミュレーション条件とシナリオ	36
5.1.1 シミュレーション条件.....	36

5.1.2	トポロジ.....	36
5.1.3	評価項目	37
5.2	予備実験.....	38
5.3	実装した TDMA プロトコルの性能評価.....	40
5.5	提案方式の総合評価	44
6.	まとめと今後の課題.....	49
6.1	まとめ.....	49
6.2	今後の課題.....	50
	謝辞.....	51
	参考文献.....	52

図番号

図 2.1	インフラストラクチャモードとアドホックモード	5
図 2.2	基本アクセス方式—DCF プロトコル	7
図 2.3	AP と STA 間のポーリング	8
図 2.4	EDCA における AC 制御	11
図 2.5	トポロジテーブル	14
図 3.1	QoS 期間とベストエフォートの期間分け(例)	18
図 3.2	アドミッション制御	20
図 3.3	タイムスロット割り当ての例	21
図 3.4	MANET における干渉パターン	22
図 3.5	同時送信の判断条件	22
図 3.6	802.11A の同時送信パターン(例)	23
図 3.7	タイムスロット割り当てアルゴリズム	25
図 3.8	タイムスロット割り当ての例	26
図 3.9	802.11A のデータフレーム構成	27
図 3.10	QoS 期間とベストエフォート期間割り当ての例	28
図 3.11	QoSREQUEST(QREQ)メッセージの構成	29
図 3.12	QoSREPLY(QREP)メッセージの構成	29
図 3.13	QoSREFUSE(QREF)メッセージの構成	30
図 3.14	QoSSYN(QSYN) メッセージの構成	30
図 3.15	QoSRELEASE(QREL)メッセージの構成	31
図 3.16	タイムスロットテーブルの例	31
図 4.1	QUALNET でのイベント処理	32
図 4.2	キュー制御	34
図 4.3	タイムスロットベースの DCF 実装	35
図 5.1	シミュレーショントポロジ	37
図 5.2	10→15 と 1→3 タイムスロット割り当て	38
図 5.3	TDMA プロトコルの性能評価のタイムフレーム	40
図 5.4	QoS フロー1→3 の遅延	42
図 5.5	QoS フロー1→3 のデータ到達率	42
図 5.6	QoS フロー10→15 の遅延	43
図 5.7	QoS フロー10→15 のデータ到達率	43
図 5.8	総合評価のタイムフレーム	44
図 5.9	QoS フロー10→15 の遅延	46
図 5.10	QoS フロー10→15 のデータ到達率	46
図 5.11	ベストエフォートフロー1→3 の遅延	47
図 5.12	ベストエフォートフロー1→3 のデータ到達率	47

図 5.13	ベストエフォートフロー13→5の遅延.....	48
図 5.14	ベストエフォートフロー13→5のデータ到達率.....	48

表目次

表 2.1	データ転送優先度.....	10
表 2.2	OLSR INFORMATION REPOSITORIES [4]	14
表 4.1	ネットワーク層のための MAC 層 API.....	33
表 4.2	物理層のための MAC 層 API.....	33
表 4.3	DCF の各種パラメータ	35
表 5.1	シミュレーション条件.....	36
表 5.2	OLSR により収集した情報の一例	39

1. はじめに

1.1 研究背景

近年、多くの小型・高性能コンピューティングデバイスが、日常生活の中に導入されている。特に、IEEE802.11 規格の無線端末は安価に入手できる。このようなデバイスが、既存ネットワークのアクセス回線やバックボーンを使用することなく、IEEE 802.11a/b/g/n 規格の無線端末を利用して、その場で独立したネットワークを構成し、相互通信を行うモバイルアドホックネットワーク(MANET)技術が、注目されている。MANET を利用することにより、大地震の災害現場や、基地局のない山の中などの地域内でネットワークを容易に構築できる。MANET の通信は、ベストエフォート通信とリアルタイムデータ通信の二つに大きく分類することができる。ウェブアクセス、メールなどのベストエフォート通信に対して、リアルタイムデータ通信は生放送、VoIP などのデータを運び、転送速度や遅延を要求する。CPU パワーやメモリ容量などのモバイルデバイスの能力や、無線 LAN などの通信速度が向上することにより、MANET において、ベストエフォートのデータ通信のみでなく、リアルタイムデータ通信をサポートすることが期待されている。このようなリアルタイムデータ通信をサポートするためには、伝送速度や遅延などの通信品質(Quality of Service : QoS)を保証する必要性が出てくる。そのため、MANET における QoS 通信の保証方式が多く研究されている[1]。

無線 LAN のメディアアクセス制御(MAC)層において QoS 通信をサポートするため、IEEE802.11 を拡張した標準プロトコル IEEE802.11e が定められている[2]。IEEE802.11e の EDCA (Enhanced Distributed Channel Access)では、リアルタイムデータに優先度を付け、優先度の高いデータを優先的に送信することにより、QoS 通信を保証する。この方式を MANET に適用すると、マルチホップ通信を行う場合に、リアルタイムデータ同士が衝突を起こし、データの到達率が低下することが予測される。また、シングルホップの通信を行った場合も、リアルタイムデータが増加すると、パケットロスと遅延を発生する確率は高くなり、QoS を保証することが難しくなる。さらに、キャリアセンス範囲の外のノードは、隠れ端末の問題があるため、データ衝突の問題を回避できない。

MANET での通信端末の通信範囲が限られているため、ソースと宛先間の通信は、多くの場合、マルチホップで行う。専用のルータが存在しないため、ネットワークの一部である通信端末は、宛先に向かって互いのパケットを中継するため、相互に協力する必要がある。通信端末は、ランダムに移動する可能性があって、ネットワークに自由に加入または脱離することにより、ネットワークのトポロジは動的に変化する。このように、MANET は他のネットワークと異なるユニークな特徴を持てるため、他のネットワークの既存 QoS 通信方式はそのまま適用することは難しい。そのため、MANET に適用できる QoS 通信品質の保証方式が求められている。

1.2 研究目的

本研究では、端末通信移動しないまた通信チャネルが一つのみと仮定する MANET において、リアルタイムデータ通信をサポートするために、TDMA(Time Division Multiple Access)を用いて QoS 通信を実現する方式の提案を行う。

ネットワークの帯域幅を満たさない QoS トラフィックはこのネットワークでの通信保証ができないため、アドミッション制御を利用することにより、その QoS トラフィックの通信を拒否する。QoS 通信を行う時、バックオフメカニズムの原因でランダムな待ち時間を回避するため、通信時間帯を QoS 期間とベストエフォート期間に分け、QoS 期間では時分割多重的な方式(TDMA)を採用する。QoS 期間では、OLSR(Optimized Link State Routing)のネイバー情報とルーティング情報に基づき、電波干渉を起こさないノードがなるべく同時に送信または受信するように、各ノードに独立したタイムスロットを割り当てる。

方式の提案・実装のあたり、タイムスロット割り当て方式を検討する必要がある。また、QoS 通信に関する遅延、到達率などのパラメータを評価する必要がある。

本研究では、提案方式の性能はネットワークシミュレータ QualNet を用いて評価する。その結果、提案方式を用いることで、QoS 通信の遅延を減少できること、データ到達率を増加できるなどの有効性を示す。

1.3 論文の構成

第 1 章では、背景について説明し、研究目的を述べた。第 2 章では、MANET とそのネットワークを支える IEEE 802.11 MAC 方式及び OLSR ルーティングプロトコルの概要について説明し、QoS を保証するために行われてきた研究の一部も挙げる。第 3 章では、TDMA に基づく MANET 上で QoS 通信を実現する提案方式を示す。第 4 章では、提案方式の実装とネットワークシミュレータ QualNet での動作を示す。第 5 章では、提案した QoS 通信方式を適応した通信の例により、QualNet を用いて、提案方式を評価する。最後に、第 6 章で本論文のまとめと今後の課題について述べる。

2. 無線アドホックネットワークと関連技術

2.1 無線アドホックネットワークの概要

通常の無線 LAN では、すべての通信端末がアクセスポイント(AP: Access Point)と呼ばれるインフラを経由して無線によりデータを転送するインフラストラクチャモードを用いている(図 2.1a)。これに対して、AP のようなインフラを使用せず、通信端末間が直接相互通信を行うアドホックモードを用い、直接通信できない宛先は途中のノードがデータを中継するマルチホップ通信を行うネットワークは無線アドホックネットワーク(Mobile Adhoc Network, MANET)と呼ばれる(図 2.1b)。

MANET の定義より、このネットワークは下記のような特徴を持つ：

- ① AP のようなインフラが存在しない、つまり集中管理者のようなものが存在しない
- ② 通信端末がランダムに移動し、ネットワークに自由に加入または離脱することにより、ネットワークのトポロジが動的に変化する
- ③ 通信メディアは無線であるため、フェージング、マルチパス通信、時間変化などの要因に影響される。

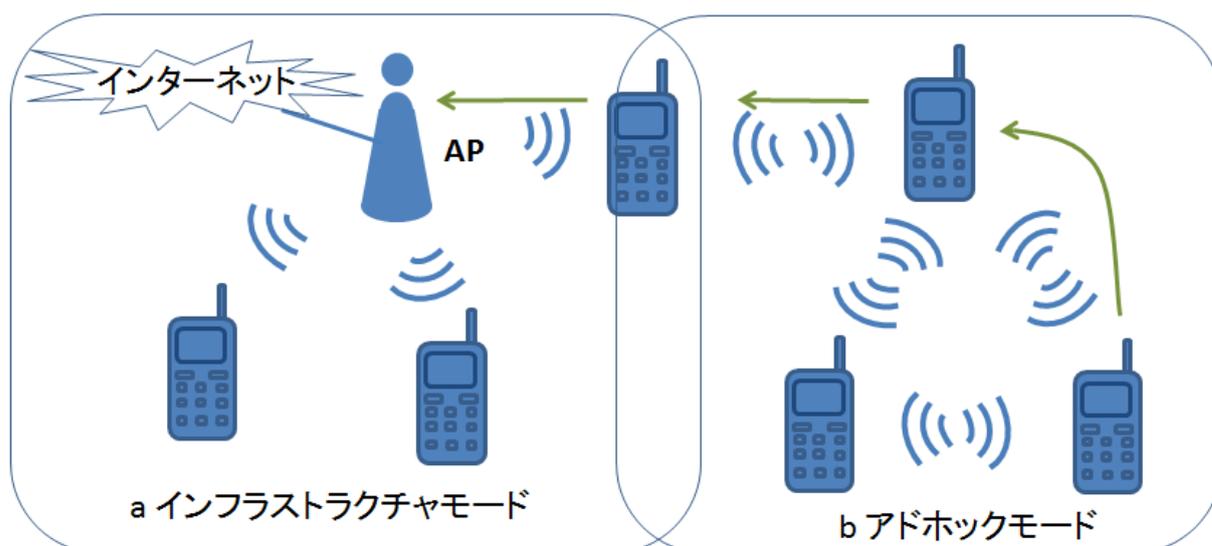


図 2.1 インフラストラクチャモードとアドホックモード

2.2 IEEE 802.11 MAC の概要

IEEE 802.11 [3]はブロードバンドワイヤレスアクセスのため、物理層(Physical Layer: PHY)と MAC 層(Media Access Control)の規格として広く使用されている。物理層の規格については、802.11b は 2.4 GHz で ISM バンドを使用して最大 11Mbit/s のデータ転送速度を提供し、802.11a は、5 GHz 帯域で OFDM 変調技術を使用して最大 54Mbit/s のデータ転送速度を達成することができる。IEEE 802.11 の MAC 層では、二つの異なるアクセスメカニズムを介して共有無線メディアへの公平なアクセスを提供する。一つは、自律分散制御(DCF: Distributed Coordination Function)と呼ばれ、搬送波感知多重アクセス/衝突回避方式(CSMA/CA)が基本アクセス方式として採用される。もう一つは、ポイントコーディネーション機能(PCF: Point Coordination Function)と呼ばれるプロトコルであり、競合のないアクセス機能を提供する。

しかし、IEEE 802.11 のプロトコルでは、スループットや遅延を保証するための QoS サポート機能を提供していない。そこで 802.11e の MAC プロトコルが開発された。802.11 でデータトラフィックのすべてのタイプが同等に扱われないのに対し、802.11e は QoS 要件に基づいて異なる優先度のデータトラフィックを割り当てることによって、QoS 通信をサポートする。

2.2.1 DCF

IEEE 802.11 の自律分散制御 DCF プロトコルは、複数の通信端末が同一の無線チャネルを共有するとき、衝突を前提としたアクセス制御方式である。

図 2.2 に示されるように、通信端末は、送信しようとする前にメディアがアイドルであることを保証しなければならない。しかし、二つ通信端末が同時にメディアのアイドル状態を検出する場合は、衝突が発生する。802.11 は、このような衝突の確率を低減する衝突回避(CA)のメカニズムを提供する。CA の一部として、送信を開始する前に、通信端末は、バックオフ手順を実行する。コンテンションウィンドウ(CW: Contention Window)サイズより小さい、一様分布に基づいてランダムバックオフ時間を選択する：

$$\text{Backoff_time} = \text{rand}[0; \text{CW}], \quad \text{CW}_{\min} < \text{CW} < \text{CW}_{\max}$$

メディアがアイドル状態であるタイムスロットを経過する場合のみ、バックオフ時間を減少させる。媒体がビジーであると判断された場合、通信端末は、現在の伝送が終了するまで、そのバックオフ時間を減少しない。毎回メディアがアイドル状態になると、通信端末は DIFS 期間(DCF Interframe Space, 802.11a は 43us)待つてから、バックオフ時間を減少する。バックオフタイマーがゼロに達すると、追加のランダムな時間(802.11a では 9us)を待つ間、アイドル状態のままである場合のみ、通信端末が媒体へのアクセスが許可される。各通信端末は、送信前に待たなければならないスロット回数を決定するために使用されている CW を保持している。毎回送信が成功したあと、CW は、初期値(固定最小値)CW_{min} にリセットされる。

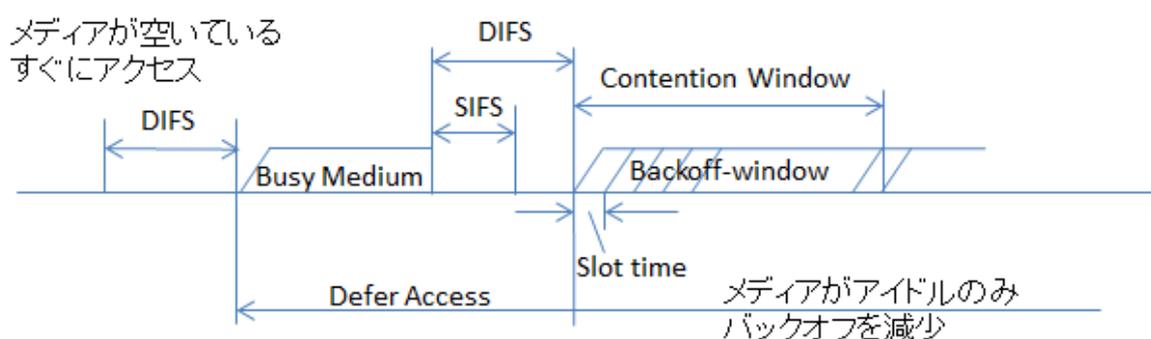


図 2.2 基本アクセス方式—DCF プロトコル

フレームの各受信成功の場合は、受信端末は直ちに応答フレーム(ACK)を送信することにより、フレーム受信を認める。確認応答の送信は、一つ前のフレームの受信終了後の SIFS (Short InterFrame Space)に等しい間隔で開始される。SIFS が DIFS より小さく、通信端末は、確認応答を送信する前に、メディア検知をする必要がない。肯定応答が受信されない場合、送信端末は、送信されたフレームを失ったと判断し、再送信を行うため、再びバックオフ手順に入る。衝突が発生した後は、衝突の確率を減少させるために、バックオフ手順を開始する時点で、CW の値を倍にする。コンテンションウィンドウサイズは最大値 CW_{max} に達する

時、リセットされるまでそのまま CW_{max} を使用する。バックオフタイマーが再びゼロに達したときに再送を試みる。最大伝送失敗回数に到達した場合、再送を停止し、 CW を CW_{min} にリセットし、パケットは廃棄される。

NAV (Network Allocation Vector)は、MAC 仮想キャリアセンシングのために使用され、他の通信端末の送信期間の値で更新される。NAV を使用することにより、通信端末は現在の送信終了時刻とチャンネルがアイドル状態になる時刻を知ることができる。

2.2.2 PCF

リアルタイム通信をサポートするため、PCF (Point Coordination Function)プロトコルはIEEE 802.11 でオプションとして提供されている。PCF プロトコルは、通信端末の送信権を割り当てるために、AP を PC (point coordinator)として利用することで集中制御を行う。具体的には、チャンネルアクセス時間は、CP (Contention Period)と CFP (Contention-Free Period)で構成されたビーコン間隔(beacon interval)で周期的な間隔に分割される。図 2.3 のように AP はポーリングリストに基づき、順番に問い合わせ信号を送信する。この信号を受信した端末のみ送信権が与えられる。

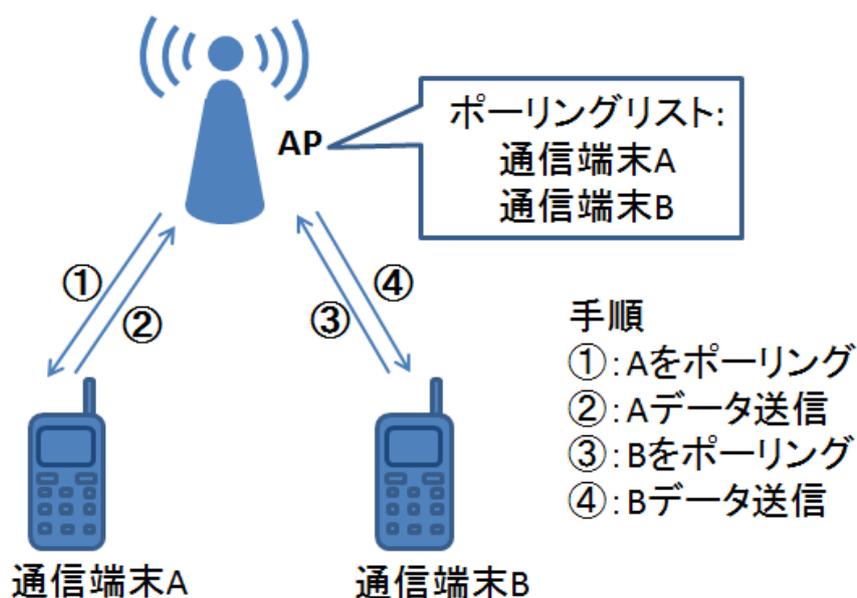


図 2.3 AP と STA 間のポーリング

PC はまず PIFS (PCF InterFrame Space) でチャネルを検知してから、ビーコン信号をブロードキャストすることにより、CFP を開始する。PIFS は DIFS よりも短いため、AP が DCF モードから制御を取得する時、PCF モードの動作が DCF 通信端末に中断されることはない。CFP の間に、通信端末自体でメディア制御を取る事を防止するため、すべて通信端末は、NAV に CFPmaxduration (競合期間の最大可能期間) を追加する。その後、リアルタイムの packets ストリームを持つアクティブ通信端末は、定期的に PC からポーリングされる。PC は、CF-End というパケットを送信することにより、いつでも、CFP を終了することができる。

このように、PCF では、AP が各端末の送信権をコントロールしているため、DCF のように送信パケット同士が衝突することはない。

DCF は、利用者の数が限られている家庭などのシナリオで十分な性能を提供できるが、より混雑したシナリオでは、DCF は遅延に敏感なアプリケーションの要件を満たすことができない。これらのシナリオでは、PCF は、より厳密に QoS 通信をサポートできるため、実行可能なプロトコルの選択肢となる。802.11e の仕様で拡張された DCF では、カテゴリに優先順をつけることにより QoS サポートを提供するが、遅延に関する保証はされていない。公衆無線ホットスポットと音声およびビデオストリーミングアプリケーションがユビキタスになるにつれて、PCF のような厳密に QoS 通信をサポートできる MAC 層のプロトコルがより重要になると考えられる。

2.2.3 IEEE 802.11e MAC の概要

IEEE 802.11 の DCF と PCF はサービスの差別化のメカニズムを提供しないため、IEEE 802.11e が設計された。ここでは、802.11 規格のようにすべてのタイプデータトラフィックが同等に扱わず、その代わりに、QoS 通信要件に基づき、異なる優先度のデータトラフィックを割り当てることによって、サービスの差別化を提供する。IEEE 802.11e の MAC 層は EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) と HCCA (Hybrid coordination function Controlled Channel Access) を導入する。

2.2.3.1 EDCA

EDCA は、異なる優先順位のフレームのために、コンテンションベースの分散チャネルアクセス制御を提供するように設計され、DCF を増強するプロトコルである。EDCA では、QoS サポートを実現するためのアクセスカテゴリ(AC)の概念を導入する。AC では、バックグラウンド、ベストエフォート、ビデオおよび音声データトラフィックのために、AC_BK, AC_BE, AC_VI と AC_VO の 4 種類を定めている(図 2.4)。その中で、AC_BK は一番低い優先順位であり、AC_VO は一番高い優先順位である。図 2.7 のように、すべての通信端末は、各 AC のための 4 つの送信キューを維持する。優先順位の割り当ては、上位レイヤで実装する。MAC 層では、特定の優先度を有するフレームがさらに AC にマッピングされる。

表 2.1 データ転送優先度

Priority	Priority	Access Category	Designation
Lowest	1	AC_BK	Background
-	2	AC_BK	Background
-	0	AC_BE	Best Effort
-	3	AC_BE	Best Effort
-	4	AC_VI	Video
-	5	AC_VI	Video
-	6	AC_VO	Voice
Highest	7	AC_VO	Voice

各 AC はそれぞれ各自の MAC キューとバックオフタイマーを持っている。メディアがアイドル状態になった後、各 AC によって指定された AIFS (Arbitration Inter-Frame Space)を待つと、バックオフタイマー開始する。優先順位の高い AC は優先度の低い AC より短い AIFS を持つ。AIFS を待ってから、それぞれのバックオフは $[1, CW+1]$ から取り出し乱数でタイマーを設定する。最小サイズの CW ($CW_{min}[AC]$)は、AC によるパラメータである。AIFS,

CWmin[AC]および CWmax[AC]の値が EDCA パラメータと呼ばれ、AP によってビーコンフレームを介して通知される。AP は、ネットワーク条件に応じてこれらのパラメータを動的に調整することができる。これらのパラメータは、異なる優先度のトラフィックのチャネルアクセスを区別するために使用される。

IEEE802.11e は、TXOP (transmission opportunity)を特定の通信端末が送信権を有する時間間隔として定義する。EDCA の他のパラメータと同時に、AP はビーコンフレーム各 AC のための TXOPLimit[AC]を通知する

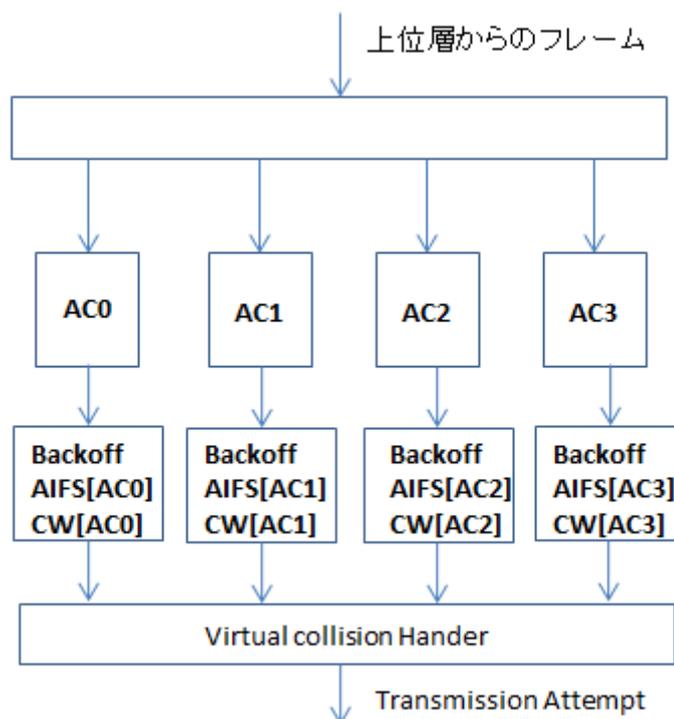


図 2.4 EDCA における AC 制御

2.2.3.2 HCCA

PCF を拡張したプロトコル HCCA は、QoS を保証するために別のアプローチを使用している。バックオフメカニズムを使用して送信のためのアイドル時間を待つ代わりに、AP での集中管理メカニズムにより、各接続している端末の送信タイミングを調整する。このため AP は HC (Hybrid Coordinator)として稼働する。すべてのステーションは、AP からの許可を得るため、要求を送信する。この要求は、ステーションの要求する QoS のトラフィック仕様を含む。

AP は、要求された QoS 要件をサポートできるかどうかを判断し、要求を拒否または許可する。許可されたステーションが送信中は、他のステーションのアクセスが拒否され、それにより QoS 通信が保証される。また、登録しているすべてのステーションの QoS 要件を用いて、集中管理用スケジュールを維持する。ステーションが無線メディアへの送信権を有すると、AP から通知される。このスケジューリングは、集中制御であるため、アクセスがコンテンツフリーであることが保証できる。全ての QoS 要件が AP に登録されているため、HCCA は帯域、遅延など、マルチメディア環境において保証困難なパラメータの保証が可能である。

HCCA は、PCF のポーリング方式の拡張である。PCF と同じように、CP と CFP で構成されたスーパービーコンを使用する。CP の期間中、メディアアクセスは EDCA を使用して制御される。CFP の期間では、各 TXOP の開始時刻と最大期間は、CF-Poll フレームを用いて、HC によって指定される。ステーションは、CFP の期間中で独自にメディアへのアクセスを取得しようとしなない。CF-Poll フレームにより TXOP を与えることは HC のみが可能となっている。CFP は、ビーコンフレームで通知される時刻や HC からの CF-End フレームによって終了する。通信端末は CF-Poll フレームを受信した場合、DIFS よりも小さい SIFS (Short Inter-Frame Space) 内にデータ伝送を開始する。そうではない場合、HC は、PIFS の後に制御を再開し、通信端末に新しい CF-Poll を割り当てる。

PCF と HCCA の違いは、HC が無線 LAN 内での他のすべての通信端末より優先していることである。PIFS は DIFS と AIFS よりも短いため、HC はメディアアクセスを競争する必要がなく、HCCA が常時、開始可能である。したがって、通信端末は、予測可能な送信時間を保証することができる。

しかし、HCCA の実装にはいくつかの問題がある。最も大きな問題は、HCCA が隣接する従来のネットワークと連携する能力を欠いていることである。HCCA の AP は、従来のネットワークで CFP と CP 期間中、最も高い優先メディアアクセス権利を持つため、HCCA をサポートしていない従来のネットワークに悪影響を与える。

2.3 OLSR ルーティングプロトコルの概要

OLSR (optimized link state routing)プロトコル[4]は, MANET のためのプロアクティブ型のルーティングプロトコルである. MPR (multi-point relay)ノードを選択することで, OLSR はネットワークでの全体的なフラッディングメッセージを減少する. フラッディングメッセージを転送するために, 1つの以上1ホップネイバーノードによって選択されたノードは, MPR ノードと呼ばれる. 各ノードは, そのノードの MPR セットと MPR セレクタセットを維持する. MPR ノードのコレクションは, バックボーンを形成し, MPR ノードは転送メッセージを中継する唯一のノードとなる.

OLSR では, 各ノードは定期的に1ホップネイバーノードのリストを含む HELLO メッセージをブロードキャストすることにより, ネイバーノードを検出する. これにより各ノードは, 2ホップネイバーノード情報を取得することになる. このように, OLSR は1ホップネイバーノードと2ホップネイバーノードの情報を集める.

さらに, 定期的に TC メッセージを交換し, 各ノードにあるネットワーク全体のトポロジを保存するトポロジテーブルを作成する. 図 2.5 のように, トポロジテーブルでは, ネットワークにおける目的地へのリンク情報が記録される. そのリンク情報は, 目的地のアドレスと目的地へのラストノードのアドレスから構成される.

また, ネイバーノード, 2ホップネイバーノードとトポロジテーブルに基づき, 各ノードは各自で Dijkstra アルゴリズムを使用して各目的地への最短経路を生成し, ルーティングテーブルを作成する. 作成したルーティングテーブルを使用することで, 各ノードは各目的地に自由にデータ転送できる状態になる.

現在, OLSR については多くの研究が行われ, MANET における異なるルーティングプロトコルと比較する研究[6]も行われている. この研究の結果, AODV, DSDV, DSR と比べると, OLSR は, データパケット到達率, スループット, 遅延とルーティングのオーバーヘッドなどで良好な性能を提供できると言える. また, OLSR から生成する情報(表 2-2)は, スケジューリングアルゴリズムの使用のために容易に利用可能である.

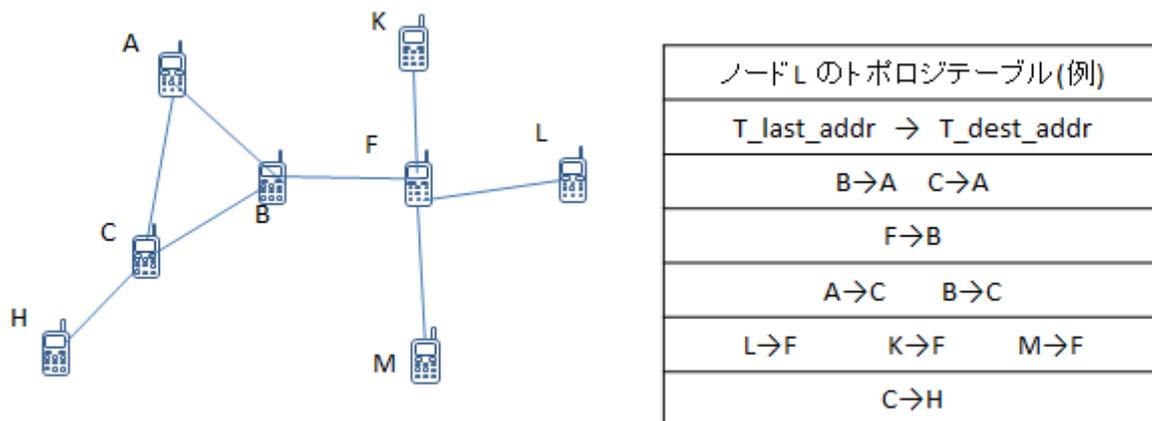


図 2.5 トポロジテーブル

表 2.2 OLSR Information Repositories [4]

Information Repositories	Description
Neighbor Set	A set of "neighbor tuples" (N_neighbor_main_addr, N_status, N_willingness), describing neighbors.
2-hop Neighbor Set	A set of "2-hop tuples" (N_neighbor_main_addr, N_2hop_addr, N_time), describing symmetric links between its neighbors and the symmetric 2-hop neighborhood
MPR Set	A set of neighbors which are selected as MPR
MPR Selector Set	A set MPR-selector tuples (MS_main_addr, MS_time), describing the neighbors which have selected this node as a MPR
Topology Information Base	This information is acquired from TC-messages and is used for routing table calculations
Routing Table	Based on the information contained in the local link information base and the topology set.

2.4 関連研究

本節では、MANET において QoS 通信を保証することを目的とした関連研究について述べる。MANET における QoS 通信の研究としては、データ優先度に基づき、優先度の高い QoS データを優先的に送信する研究と、帯域幅などの計算に基づくアドミッションコントロールに関する研究が挙げられる。最後に、TDMA のタイムスロット割り当ての関連研究について述べる。

2.4.1 データ優先度に基づく QoS 保証

無線 LAN の MAC 層において QoS 通信をサポートするため、IEEE802.11 を拡張した標準プロトコル IEEE802.11e が定められている。IEEE802.11e の EDCA では、データに優先度を付け、優先度の高いリアルタイムデータを優先的に送信することにより、QoS 通信を保証する。EDCA の問題点としては、優先度すべきトラフィックが増加する場合、パケットロスや遅延が発生することにより、QoS 通信品質が悪くなることがある。また、QoS データにより小さい CW を割り当てるため、QoS 通信端末が増加する場合、同ネットワーク内の衝突確率が高くなるという問題も考えられる。

802.11e の HCCA では、QoS 要件に基づき、各通信端末に優先権を割り当てることにより QoS 通信を保証する。この方式では、帯域の過剰割り当ての可能性もある。その理由は、SI が短くなると、パケット転送レートの変動が大きくなることにより、すべてのパケットを送信するのはより多くの帯域が必要となる。このため、HCAA のスループットは EDCA より低くなる可能性がある。さらに、短い SI を使用すると、一定期間中により多くのポーリングを引き起こす可能性があり、ポーリングのオーバーヘッドが増えることが考えられる。

MAC 層では、QoS 通信を保証するため、CSMA / CA および IEEE802.11e の既存方式があるが、送信ノードは、バックオフメカニズムの原因でランダムな時間を待つ必要がある。また、キャリアセンス範囲内のネイバーノードは、隠れ端末とさらし端末の問題があるため、同時に送信することはできない。また、ソースから宛先へのパスにある中継ノードは、同時に送信することができないので、経路の有効帯域幅は、初期に使用可能なリンクの帯域幅よ

りも小さい。例えば、初期に使用可能なリンクの帯域幅が 6Mbps であった場合、干渉がある場合、帯域幅 3Mbps となる可能性がある。

2.4.2 アドミッション制御に関連する研究

ネットワークトラフィックに対して制御しない場合は、トラフィック量が大幅に増加した時、ネットワークパフォーマンスが著しく低下することが指摘されている。この問題を解決するためにはアドミッション制御を導入する必要がある。アドミッション制御は、ネットワークの現在の状態と新たなフローに関する情報に基づき、新しいフローを開始するためのリソースは十分であると判断し、新しいフローの通信要求を許可するかを決定するものである。

アドミッション制御方式 CACP (Contention-aware Admission Control Protocol)が、[8]に提案されている。CACP はシングルチャネル MANET におけるフローごとのアドミッション制御を提供する。この方式では、DSR を利用し、新しいフローが隣接ノード上に対する影響とローカルリソースの情報に基づき、ルートディスカバリーとアドミッション制御を組み合わせ、QoS 要件に満たすルートを算出する。このプロトコルは、リアルタイムアプリケーションをサポートすることができるが、ネットワークオーバーヘッドが増加する、または正確なアドミッション制御を達成するために複雑なプロセスを必要とするという問題点がある。

[9]では、QoS アドミッション制御ルーティングプロトコル QACRP (QoS admission control routing protocol)が提案されている。AODV の RREQ と HELLO メッセージを少しだけ修正することに基づき、QACRP では、ルートを確立する際に各リンクの使用帯域を予約する。QACRP は単純なルーティングディスカバリープロセスによって、正確なアドミッション制御を提供することができる。CACP などに比べてオーバーヘッドが小さいことを特徴とする。しかし、QACRP と CACP は両方とも TDMA を想定しない。

2.4.3 TDMA のタイムスロット割り当てに関する研究

MANET に特化した TDMA 方式のタイムスロット割り当ての関連研究について述べる。

[10]では、トラフィック負荷情報を交換して、それに基づきタイムスロット数を決定する方法が提案されている。提案手法では、1タイムフレームは $2n$ 個のタイムスロットで構成、スロットが不足すると、フレームを倍にして補充する。

[11]では、通信開始時に経路に沿って、1ホップネイバーにスロット要求メッセージをブロードキャストし、要求メッセージを受信したすべての通信端末から許可が返ってきた場合にタイムスロットを使用する方式が提案されている。

[12]の提案方式では、ルーティングプロトコルの OLSR において、Hello メッセージを交換し、MPR (Multipoint Relay) を選択する時点で、各ノードが送信に使用するタイムスロットを決定する。各ノードはそのタイムスロットにデータを送信することにより、データフレーム送信の衝突を回避する。

QoS トラフィックとベストエフォートトラフィックが混在する場合、QoS トラフィックのみに必要な帯域を持つ排他的な仮想的なパスを提供すべきである。しかし、[10],[11],[12]の方式は、すべてのトラフィックにタイムスロットを割り当てており、本来のネットワークの運用ではない。本方式は、3ホップネイバーの関係のリンクで、無線の干渉がないと考えられるものには、同じタイムスロットを割り当てることにより、効率的なタイムスロット割り当てを行う。OLSR のネイバー情報とルーティング情報を用い、さらにタイムスロット情報もすべての MPR ノードを共有させ、新たなフローのアドミッション制御/タイムスロットの割り当てを効率的に行っている。従って、提案方式は[11]や[12]に比べて優れている。

3. 提案方式

本研究では、端末通信移動しないまた通信が一つチャンネルのみ利用と仮定する MANET において、TDMA を用いた QoS 通信の保証方式を提案する。通信時間帯を QoS 期間とベストエフォート期間に分ける。アドミッション制御を行った上で、許可された QoS トラフィックのみ QoS 期間で転送される。QoS 期間では、電波干渉を起こさない端末が同時に送信または受信するように、通信端末に独立したタイムスロットを割り当てる。

3.1 提案方式の概要

本研究で提案する QoS 通信の実現方式においては、以下の機能を持つ。

3.1.1 QoS とベストエフォートの期間分け

QoS データフローとベストエフォートデータフローの衝突を回避するため、また QoS 通信とベストエフォート通信が異なる方式を用いるため、提案方式では、図 3.1 のように通信時間帯を QoS トラフィックのための QoS 期間とのベストエフォートデータのためのベストエフォート期間に分ける。ベストエフォート期間では、既存の 802.11 DCF の方式でデータを転送する。QoS 期間では、QoS 通信を保証するため、各ノードの間で厳密な時刻同期を行わせ、ノードごとに独占的なタイムスロットを用いた TDMA 方式を採用する。独占的なタイムスロットを使用することにより、衝突のない QoS 通信を実現する。また、QoS 期間で転送する QoS データはネットワークの帯域がその通信要件に満たすデータのみである。

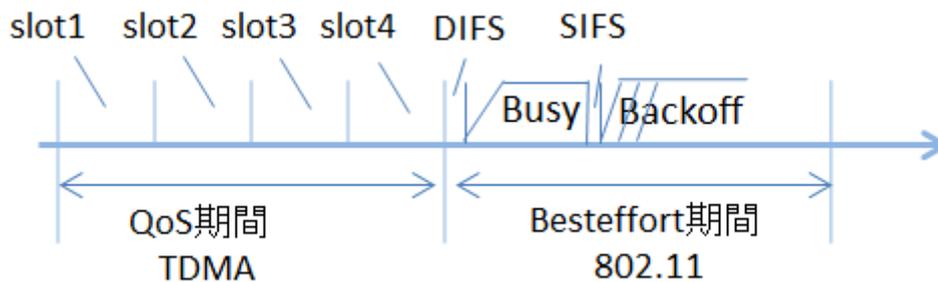


図 3.1 QoS 期間とベストエフォートの期間分け(例)

3.1.2 アドミッション制御

QoS トラフィックの量がネットワークの許容量を超えると、QoS 通信保証するのは難しくなる。提案方式では、アドミッション制御を採用することで、ネットワークの現在の状況に応じて、保証できる QoS データのみの通信を許可する。

図 3.2 に示すように、QoS 通信を開始しようとするとき、ソースノードは自身と次のノード間にあるリンクの帯域を確認する。リンクの帯域が QoS 要件に満たさない場合、ソースノードは QoS 通信を拒否する。QoS 通信要件をサポートできる場合、ソースノードは QoS REQuest(QREQ)メッセージを生成し、OLSR で決めたルートの次のノードに転送する。QREQ メッセージはフローID、帯域要件、ソースノードアドレス、宛先ノードアドレスとタイムスロットフィールドから構成される。QREQ メッセージを転送する前に、ソースノードは次のノードと通信するための候補となるタイムスロットを選択する。その候補のタイムスロットセットは QREQ メッセージのタイムスロットフィールドの一部となる。

QREQ メッセージを受信した経由ノードは QoS 通信に要求される帯域が提供できる場合のみ、QREQ メッセージを転送する。QREQ メッセージを転送する前に、経由ノードは候補のタイムスロットセットの再選択を行い、前のリンクのためのタイムスロットを決定する。その後、次のリンクの候補のタイムスロットセットを作成する。前のリンクのための決定スロットと次のリンクの候補のタイムスロットセットを QREQ メッセージにあるタイムスロットフィールドに追加しながら、QREQ メッセージを転送してゆく。しかし、要求される帯域を満たさない場合、QoS REFuse(QREF)メッセージで返信することでこの QoS 通信を拒否する。

最終的に、宛先ノードが QREQ メッセージを受信する時には、タイムスロットフィールドにおいてソースノードから宛先ノードまでのタイムスロットの予約が完成する。予約したタイムスロットは QoS REPlY (QREP)メッセージで QREQ メッセージからのルートに沿って返信される。QREP メッセージを受信したノードは、タイムスロットフィールドに含まれている自身のタイムスロットを確認してから QREP メッセージを次のノードに転送する。また、各ノードは割り当てられたタイムスロットを QSYN (QoS time slot SYNchronization)メッセ

ージを用いて、ネットワーク全体に通知する。ソースノードは QoS REPLY (QREP)メッセージを受信することにより、QoS 通信フローが許可されることが分かり、QoS データの転送を開始する。

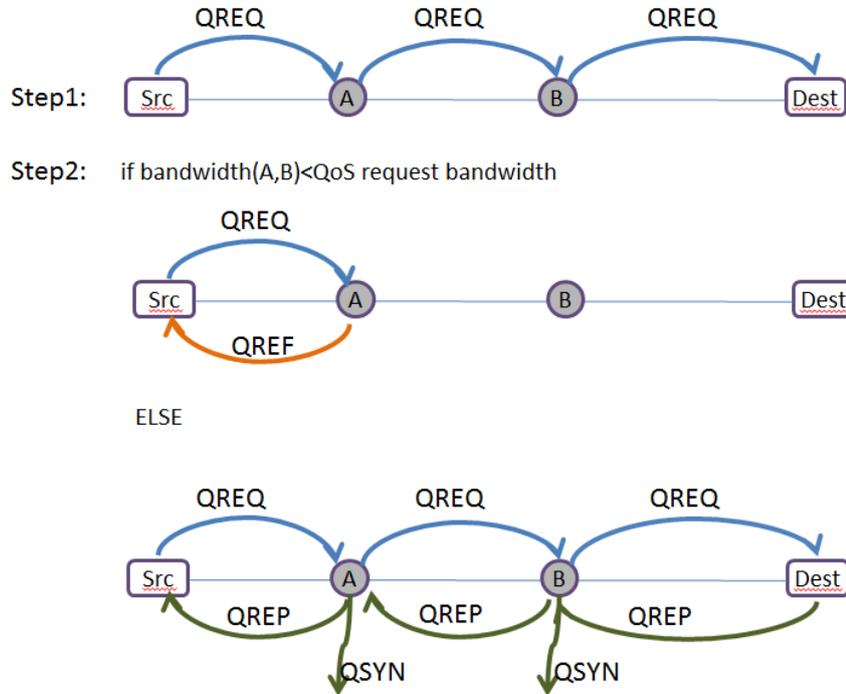


図 3.2 アドミッション制御

3.1.3 タイムスロット割り当て

本研究では、端末移動しない環境の MANET において、各ノードは OLSR の 1-hop ネイバーセットに含まれるノードまでは電波が届くが、それ他のノードは通信範囲及び干渉範囲以外にあると仮定する。

タイムスロットの割り当ては OLSR のネイバーセット情報を利用して計算してから各ノードにタイムスロットテーブルを追加する。QoS 通信を開始する前、通信フローのソースノードから宛先ノードまでのアドミッション制御を実行しながら、電波干渉を起こさないノードができる限り同時に送信または受信するように、各ノードに独立したタイムスロットを割り当てる。具体的には図 3.3 のように一列に並ぶ 5 つの通信端末が QoS 通信(ACK があると想定する)を行う場合は、①から④までの 4 つのタイムスロットを割り当てることになる。

QoS 通信を終了すると、その通信フローのためのタイムスロットをすべて解放する。それ

によって、タイムスロットの割り当ては動的に効率よく変動される。タイムスロットの解放手順としては、各通信ノードは通信終了した後、一定の時間間隔でこのタイムスロットを使用することがないと確認する。タイムスロットが解放可能であるなら、QoSRelease(QREL)を用いて、ネットワーク全体に通知する。また、データ転送している間、もし衝突が発生したら、タイムスロットの再割り当てを行う。

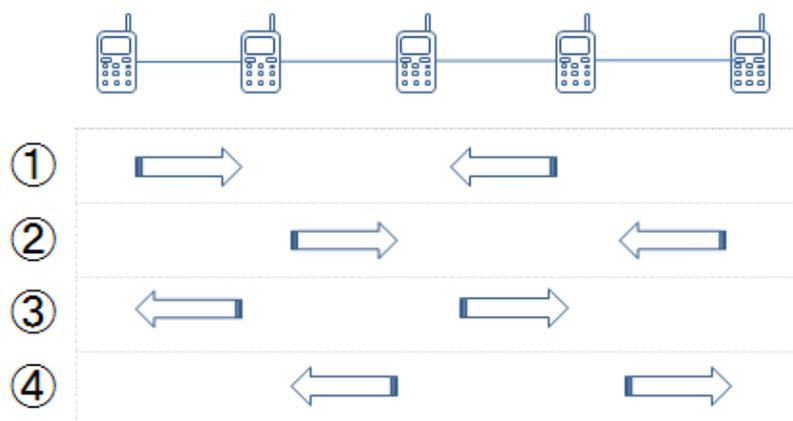


図 3.3 タイムスロット割り当ての例

3.2 詳細設計

3.2.1 同時送信の判断条件

無線ネットワークでは、互いの電波伝送範囲に存在する複数の端末が同じタイミングで同じチャネルを利用して送信しようとする時、電波干渉が発生するため、通信ができなくなる。本提案方式では、通信チャネルが一つのみであり、一つの通信端末は同時に送信と受信ができないと仮定するため、図 3.4 に示すような二つの干渉パターンが存在する。すなわち、通信範囲にある端末は同時に相手に送信すると、衝突が発生する(図 3.4 ①)。また、受信端末が複数の送信端末からのパケットを受信すると、衝突が発生する(図 3.4 ②)。

図 3.4 ①のような干渉を回避するため、まず厳密な時刻同期を行わせた上、各通信端末の送受信タイムスロット情報をネットワーク全体で共有し、干渉範囲に存在する通信端末が相手に同時に送信しないようにする。また、図 3.4 ②のような干渉を回避するため、同時送信の判断条件を決定する。同時送信の判断条件としては、送信端末の電波は同時通信を行う他

のフローの受信端末まで届かないことである。本研究では、各ノードの電波は OLSR の 1-hop ネイバーセットに含まれるノードまでしか届かないと仮定する。すなわち、送信端末の 2-hop ネイバーセットに同時通信を行う他のフローの受信端末が含まれないとする。

例としては、図 3.5 のように、端末 A が端末 B に送信していると同時に端末 C が端末 D に送信していると想定する。端末 C が端末 D に送信できる条件は、端末 A と端末 C が 2-hop 以上離れ、かつ端末 D と端末 B が 2-hop 以上離れることである。

上記述べた同時送信の判断条件により、二次元の環境で IEEE 802.11a 規格の物理層において、5-hop 内の端末の同時送信パターンは図 3.6 に示すように 5 つの例がある。図の中に縦方向または横方向に隣接する端末のみは電波がお互いに届いていると仮定する(斜め方向に隣接する端末間に対しては電波が届く範囲以外とする)。

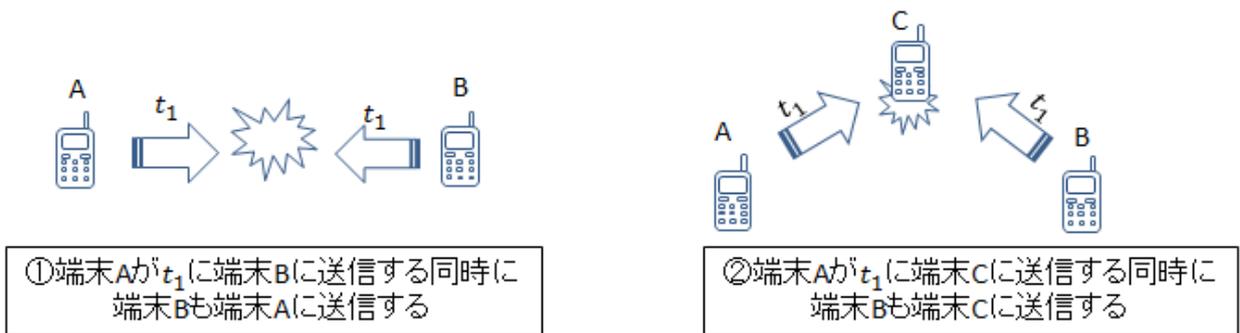


図 3.4 MANET における干渉パターン

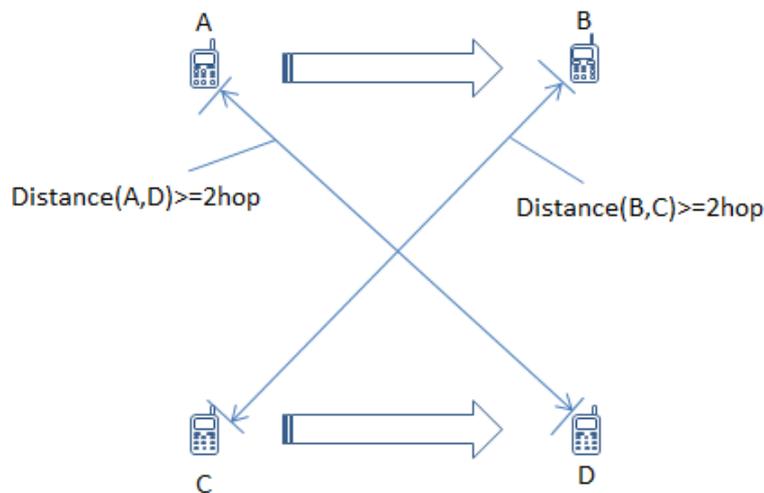


図 3.5 同時送信の判断条件

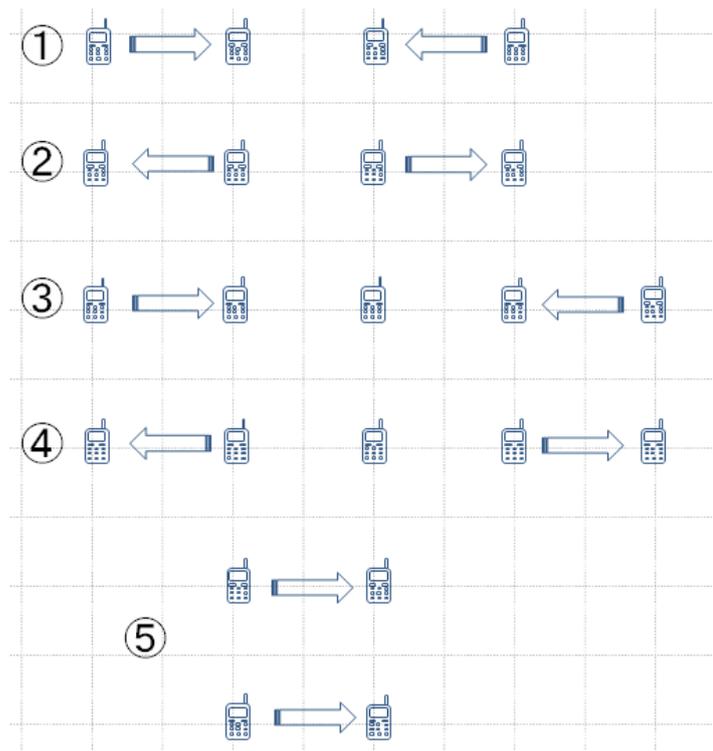


図 3.6 802.11a の同時送信パターン(例)

3.2.2 タイムスロット割り当てアルゴリズム

アドミッション制御の段階で、経路ノードは QoS 通信に要求される帯域を提供できる場合、通信ノードは 3.2.1 節で説明する同時送信の判断条件に基づいて、独自でタイムスロットを計算し、予約する。

本提案方式では、OLSR のトポロジテーブルが完成したと ACK パケットのない QoS 通信を行うと仮定し、分散的なタイムスロット割り当て手法を採用する。タイムスロットを取ろうとする送信ノードとそれに対する受信ノードは、以下に示す動作によって、送信ノード(s)と受信ノード(r)が合同でそのリンクのスロット割り当てを行う(図 3.10 を参照)。

- (a) まず、送信ノード(s)は、そのノードと 2 ホップ以上離れるノードが持つタイムスロットで候補タイムスロットリストを作成する。その後、同時送信の判断条件により、候補タイムスロットリストを絞る。具体的には、これらのタイムスロットを使用している受信ノードが送信ノード(s)の 1 ホップネイバーに含まれているかどうかを確認する。1 ホップネイバーであるなら、そのタイムスロットは候補タイムスロットリストから削除する。

この候補タイムスロットリストは **QREQ** メッセージのタイムフィールドに追加する。

候補となるタイムスロットが存在しない場合、送信ノード(**s**)は新規タイムスロットを候補タイムスロットリストに入れる。

- (b) 次、受信ノード(**r**)は、**QREQ** メッセージを受信すると、タイムフィールドから候補タイムスロットリストを取り出す。その後、候補タイムスロットリストにあるすべてのタイムスロットに対して同時送信の判断条件により再選択を行う。具体的には、タイムスロットの送信ノードが受信ノード(**r**)の1ホップネイバーに含まれているかどうかを確認する。1ホップネイバーであるなら、そのタイムスロットは候補タイムスロットリストから削除する。このように、候補タイムスロットの再選択を行い、残ったタイムスロットがなければ、新規タイムスロットを使用する。再選択した候補タイムスロットが複数あれば、受信ノード(**r**)と一番離れた送信ノードを持つタイムスロットを選択する。受信ノード(**r**)との距離送信ノードを持つタイムスロットが複数ある場合、ランダムで選択する。最後に、選択したタイムスロットを決定タイムスロットとして、**QREQ** メッセージのタイムフィールドを更新し、**QREQ** メッセージが次のノードに転送する。宛先ノード(**d**)の場合、その決定したタイムスロットを **QREP** メッセージのタイムフィールドを使用して返信する。

- (c) 最後に、送信ノード(**s**)は **QREP** メッセージを受信すると、受信ノード(**r**)における再選択したタイムスロットを確認して、**QSYN** メッセージを用いてネットワーク全体に通知する。

このように(図 3.7), **QREQ** メッセージと **QREP** メッセージを転送する間に、**QoS** 通信フローのすべての経由ノードにタイムスロットが割り当てられる。図 3.8 の例に、ノード **s** はノード **d** に **QoS** データを送信しようとする場合(またすべてのノードの帯域が十分大きいと仮定する)、ノード **s** →ノード **r** のタイムスロットと、ノード **r** →ノード **d** のタイムスロットを取得する流れを示す。

```

For Sender(S)
-----
For 2-hop node to n-hop node DO
  IF Slot[n] exists THEN
    IF Receiver @ Slot[n]  $\notin$  1-hop neighbor of S THEN
      Reserved Slot List{}  $\leftarrow$  Slot[n];
    END IF
  END IF
END DO
IF Reserved Slot List{} = 0 THEN
  Reserved Slot List{}  $\leftarrow$  New Slot;
END IF

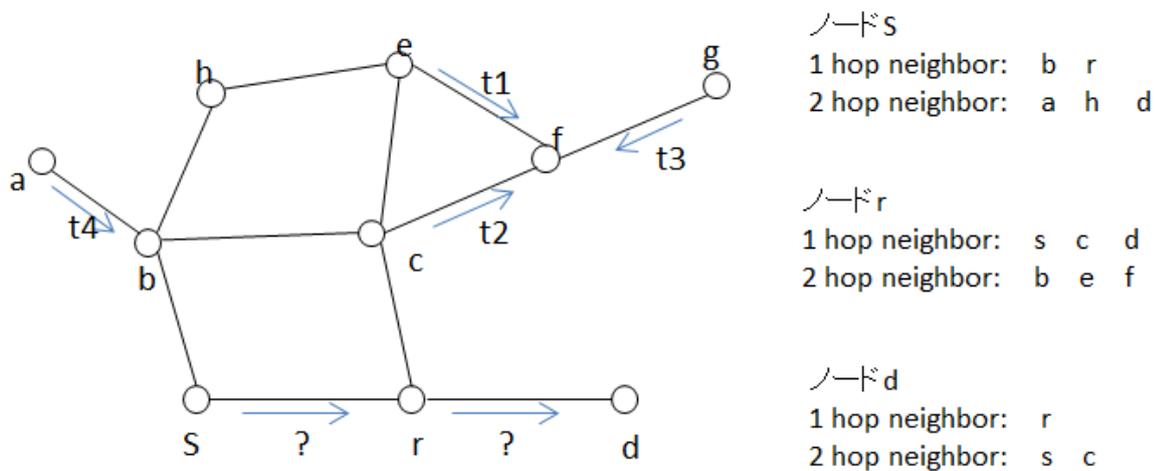
```

```

For Receiver(R)
-----
For each Slot[m] of Reserved Slot List{} DO
  IF Sender @ Slot[m]  $\in$  1-hop neighbor of R THEN
    Delete Slot[m];
  END IF
END DO
IF Reserved Slot List{} = 0 THEN
  Slot for S $\rightarrow$ R  $\leftarrow$  New Slot;
IF Reserved Slot List{} = 1 THEN
  Slot for S $\rightarrow$ R  $\leftarrow$  Reserved Slot List{};
IF Reserved Slot List{} > 1 THEN
  Dis = 0;
  For each Slot[x] of Reserved Slot List{} DO
    IF route distance(Sender @ Slot[x], R) > Dis THEN
      Dis = route distance(Sender @ Slot[x], R);
    ELSE
      Delete Slot[x];
    END IF
  END DO
IF Reserved Slot List{} > 1 DO
  Slot for S $\rightarrow$ R  $\leftarrow$  Random of Reserved Slot List{};
ELSE
  Slot for S $\rightarrow$ R  $\leftarrow$  Reserved Slot List{};

```

図 3.7 タイムスロット割り当てアルゴリズム



step1: SはS→rの候補タイムスロットを選択: {t1, t2, t3}

S→r{t1, t2, t3}をQREQに追加

QREQをrに送信

step2: rはQREQを受信

S→rの候補タイムスロットを再選択: {t1, t3}

gとrの距離はeより長いため、t3を選択

rはr→dの候補タイムスロットを選択: {t1, t2, t4}

S→r{t3}, r→d{t1, t2, t4}をQREQに追加

QREQをdに送信

step3: dはQREQを受信

r→dの候補タイムスロットを再選択: {t1, t2, t4}

aとdの距離はより長いため、t4を選択

S→r{t3}, r→d{t4}をQREPに追加

QREPをrに送信

step5: rはQREPを受信

r→dのタイムスロットt4を確定、QSYN送信

QREPをsに送信

step6: rはQREPを受信

S→rのタイムスロットt3を確定、QSYN送信

QoS通信開始

図 3.8 タイムスロット割り当ての例

3.2.3 QoS 期間とベストエフォート期間の割り当て

3.1.1 節で述べたように、通信時間帯を QoS 期間とベストエフォート期間に分ける。

一般的に、音楽を MP3 にエンコードするとき、192kbps～320kbps の CBR (Constant Bit rate) を使用に対して、ストリーミングでは 384 kbps～480kbps の CBR を利用する。ここで、QoS 通信がパケットサイズ 512bytes、レート 1Mbps の単方向 CBR であると仮定する。512bytes のパケットを 1Mbps の通信で転送しようとする、下記の式で転送時間を計算する。

$$512 \times 8 \div (1 \times 1024 \times 10^3) = 0.004 \text{ (s)}$$

すなわち、4 ms の間隔で 1 パケットを送出することになる。

また、物理層では、IEEE802.11a 規格を使用し、伝送速度が 6 Mbps と想定する。図 3.9[13] に示すように、512bytes のパケットを転送しようすると、データフレームの先頭には、PHCP ヘッダ、IP ヘッダなどの付加情報がつき、最後にフレームに誤りがないかどうかをチェックする FCS が付いている。PLCP 部分とも 6Mbps の速度で転送されるとき、1 パケットを送出する必要時間は 756 us となる。これにガードタイムを付加して、1 つの 512bytes のパケットを送るために 800 us が必要であるとする。すなわち、タイムスロットの長さは 800 us となる。

PLCP Header	MAC Header	LLC Header	IP Header	UDP Header	Data Frame	FCS
24bit	26bytes	8bytes	20bytes	8bytes	512bytes	4bytes
4μs	34μs	10μs	26μs	10μs	667μs	5μs

PLCP: Physical Layer Convergence Protocol

LLC: Logical Link Control

FCS: Frame Check Sequence

図 3.9 802.11a のデータフレーム構成

QoS 期間とベストエフォート期間を割り当てるため、まず、25ms のタイムフレームで時間帯を区切ると仮定する。タイムフレームは、QoS 期間とその後ろに付くベストエフォート期間から構成される。タイムフレームは 25ms 周期で繰り返し、使用される。また、QoS 期間とベストエフォート期間も順に繰り返し、使用される。QoS 期間の長さは QoS フロー所要のタイムスロットの数により決定される。QoS 期間を除いて、残りのタイムフレームスペースはベストエフォート期間である。図 3.10 のように、使用されたタイムスロットの数が 4 の場合、QoS 期間は

$$800 \times 4 = 3200 \mu\text{s}$$

で計算される。ベストエフォート期間は 25 ms から 3200 us を引くと、21.8 ms となる。

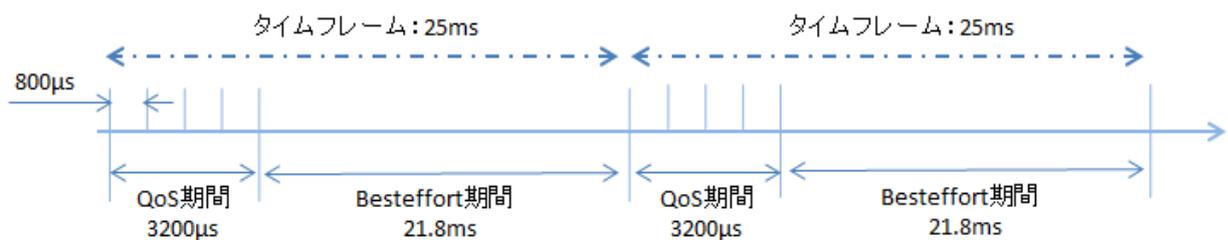


図 3.10 QoS 期間とベストエフォート期間割り当ての例

3.2.4 制御メッセージ

本提案方式では、アドミッション制御とタイムスロット情報共有するため、次のように 5 つの制御メッセージが設計される。

1. QoSRequest(QREQ)メッセージ: ソースノードからの QoS 要求メッセージである。

QREQ メッセージは図 3.11 のような QoS フロー ID、パケットレート、フローの持続時間、ソースノードアドレス、宛先ノードアドレスとタイムスロットフィールドから構成される。

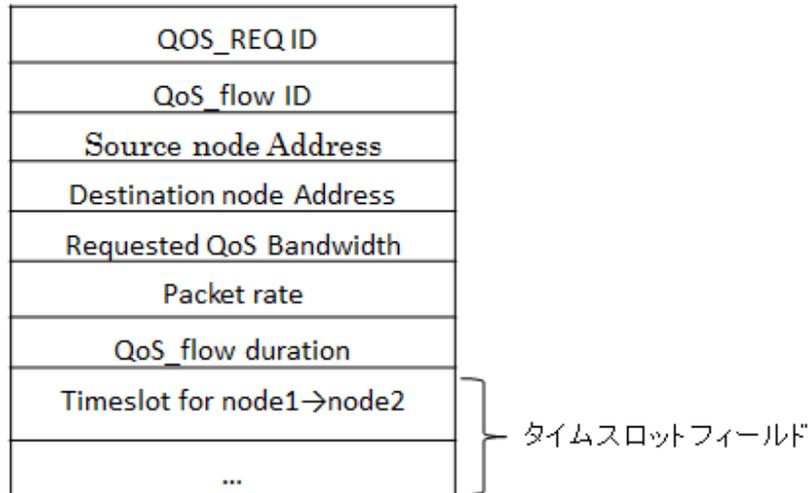


図 3.11 QosREQuest(QREQ)メッセージの構成

2. QosREPLY(QREP)メッセージ：宛先ノードからの QoS 許可メッセージである。QREP メッセージは図 3.12 のように、タイムスロットフィールドを含み、ソースノードアドレス(Src Add)、宛先ノードアドレス(Des Add)及びメッセージ ID から構成される。

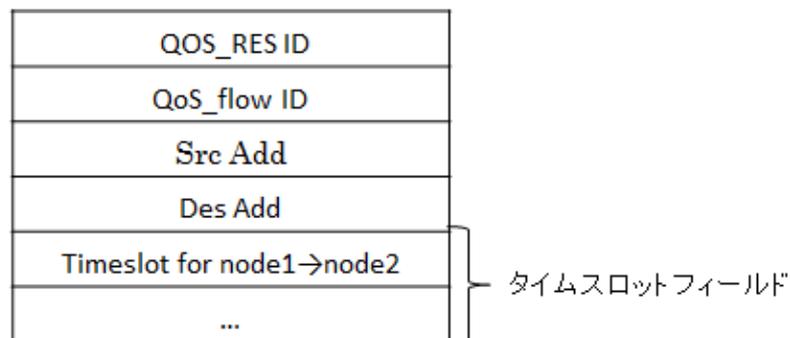


図 3.12 QosREPLY(QREP)メッセージの構成

3. QosREFuse(QREF)メッセージ：要求された帯域を満たさない場合の拒否メッセージである。その構成は図 3.13 のように、主にソースノードアドレス、宛先ノードアドレスとメッセージ ID を含む。

QOS_REF ID
QoS_flow ID
Src Add
Des Add
...

図 3.13 QosREFuse(QREF)メッセージの構成

4. QosSYN(QSYN) メッセージ： タイムスロット情報をネットワーク全体に知らせるためのメッセージである。図 3.14 のように、このメッセージのタイムスロットフィールドは主に他のノードに通知すべきタイムスロットから構成される。

QOS_SYN ID
QoS_flow ID
Advertised Timeslot for node1→node2
Advertised Timeslot for node2→node3
...

図 3.14 QosSYN(QSYN) メッセージの構成

5. QoSRELEASE(QREL)メッセージ：使用済みのタイムスロットを解放するためのメッセージである。図 3.15 のように、主に解放したいタイムスロットを含むタイムスロットフィールドとメッセージ ID、フローID から構成される。

QOS_REL ID
QoS_flow ID
Released Timeslot for node1→node2
Released Timeslot for node2→node3
...

図 3.15 QoSRelease(QREL)メッセージの構成

3.2.5 タイムスロットテーブル

同ネットワークにあるすべてのノードはネットワークにあるタイムスロット情報を共有するため、図 3.16 のようなタイムスロットテーブルを維持する。タイムスロットテーブルは主にスロット ID とこのスロット ID を持つ送受信端末セット及びこのスロット ID を使用するフローID から構成される。タイムスロットテーブルは QSYN メッセージにより作成または更新される。

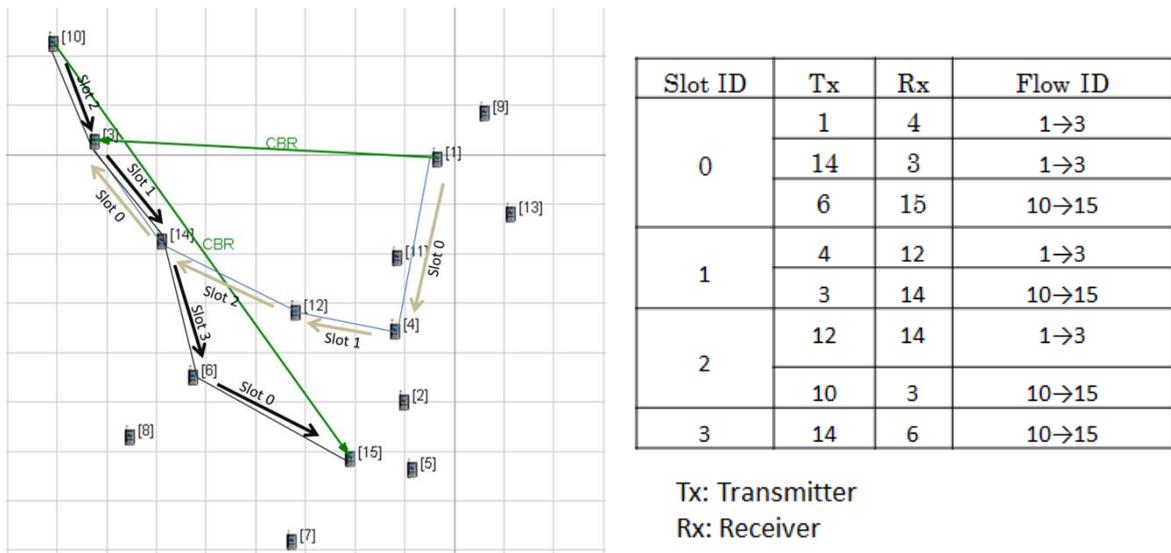


図 3.16 タイムスロットテーブルの例

4. 提案方式の実装

4.1 実装

提案方式の MAC 層部分をネットワークシミュレータ QualNet 6.1 上に実装した。QualNet シミュレータは離散イベント駆動型である。これは、イベントとその開始時刻を含む時間メッセージを、順番にイベントハンドルに含ませ、図 4.1[14]に示すように、イベントを処理する。

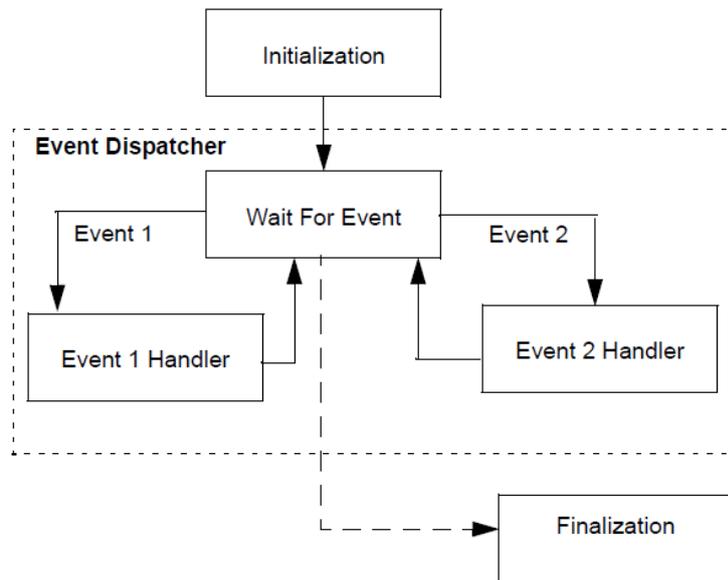


図 4.1 QualNet でのイベント処理

QualNet のプロトコルスタック [14] は、TCP/IP プロトコルスタックと同様であり、アプリケーション層、トランスポート層、ネットワーク層、MAC 層、物理層の 5 つの層から構成される。ネットワーク層と物理層の間にある MAC 層は、メディアアクセス制御サービスを提供する。QualNet でネットワーク層と通信するために MAC 層で使用される API は表 4-1 で示す。

QualNet で物理層と通信するために MAC 層で使用される API は表 4.2 で示す。これらの API を使用して、QualNet で実装した TDMA プロトコルに基づき、提案方式の実装を行った。

表 4.1 ネットワーク層のための MAC 層 API

MAC_OutputQueueIsEmpty
MAC_OutputQueueDequeuePacket
MAC_OutputQueueTopPacket
MAC_OutputQueueDequeuePacketForAPriority
MAC_HandOffSuccessfullyReceivedPacket
MAC_MacLayerAcknowledgement
MAC_NotificationOfPacketDrop

表 4.2 物理層のための MAC 層 API

PHY_StartTransmittingSignal
PHY_StartListeningToChannel
PHY_StopListeningToChannel
PHY_SetTransmissionChannel

4.2 TDMA モジュールの実装方法

QualNet で実装した既存の TDMA モジュールのデフォルトでは、タイムスロットはラウンドロビン方式ですべてのノードに割り当てられる。また、タイムスロット割り当てファイルを利用して、手動で割り当てできる。しかし、既存の TDMA モジュールを使うと、高いデータ損失率を得る可能性がある。その原因は、既存の TDMA モジュールが FIFO (First In, First Out)の方法で各ノードのキューを制御するためである。今回の実装では、図 4.2 のように、各ノードはタイムスロットで指定した受信ノードと同じ宛先を持つパケットをそのタイムスロットに出力するように既存の TDMA を変更した。

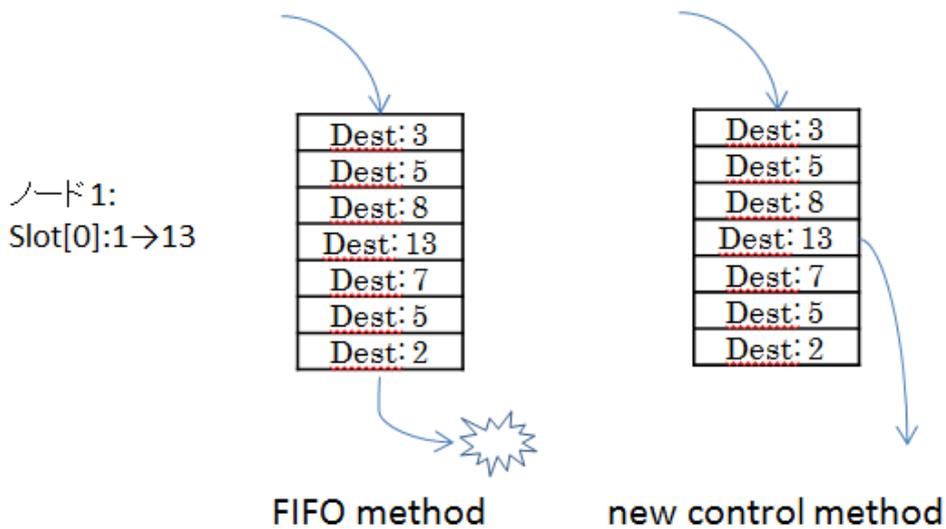


図 4.2 キュー制御

4.3 DCF モジュールの実装方法

本提案方式では，ベストエフォート通信のため，ベストエフォート期間では IEEE 802.11 の DCF 方式を採用する．今回の実験は主に小規模な無線ネットワークを用いるため，実装した DCF はネットワーク全体の通信状況が把握する前提で，オリジナルの DCF の衝突回避方式を近似するプログラムを実装した．具体的には，DCF 方式でのタイムスロットを用いて，図 4.3 のように DCF 通信時間帯を区切りする．仮想衝突回避のためのパラメータと DCF のバックオフ時間(Backoff)の計算式は下記の通りで実装する[7]．

$$\text{Backoff} = \text{Random}() \times \text{timeslot}$$

random()は，[0, CW]範囲の一様分布の乱数である．バックオフを使用するタイムスロットの数として，CW はオリジナルの方式と同じ値で扱う．その他のパラメータも規格に近似する値を使用する．例としては，802.11a における DCF の各種パラメータ[7]は表 4.3 で示す．タイムスロットを 10 μ s とすると，DIFS, PIFS はそれぞれ40 μ s と 30 μ s となる．また，今回の実装は確認応答である ACK を使用しないため，SIFS 期間は実装していない．

表 4.3 DCF の各種パラメータ

パラメータ	802.11a 値	実装値
タイムスロット	9 μ s	10 μ s
SIFS	16 μ s	なし
PIFS	25 μ s	30 μ s
DIFS	34 μ s	40 μ s
CW サイズ	15~1023	15~1023

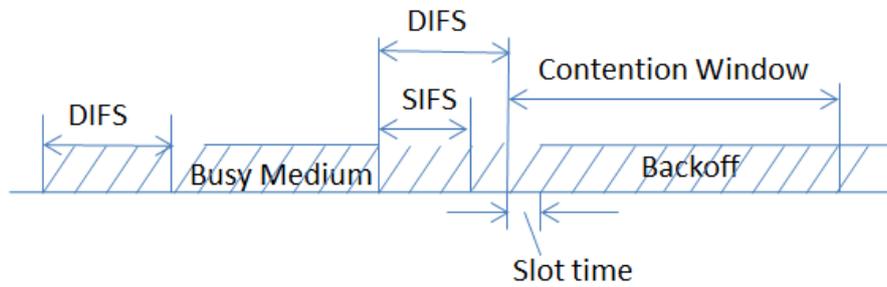


図 4.3 タイムスロットベースの DCF 実装

5. シミュレーション実験と性能評価

3章で提案した MANET における QoS 通信の保証方式について性能評価を行った結果を示す。既存の QoS 制御機能を持つ IEEE 802.11e EDCA 方式と提案方式でシミュレーション実験を行う。

5.1 シミュレーション条件とシナリオ

5.1.1 シミュレーション条件

表 5.1 の条件においてシミュレーションを行った。

表 5.1 シミュレーション条件

使用シミュレータ	Qualnet6.1
MAC プロトコル	IEEE802.11e/提案方式/IEEE802.11
シミュレーション時間	25sec
物理層	802.11a
ルーティングプロトコル	OLSR/固定ルート
無線リンク帯域	6Mbps
電波到達範囲	半径 380m
アプリケーション	CBR
パケットサイズ	512byte
通信期間	0s ~ 25s

5.1.2 トポロジ

図 5.1 のように、1100m × 1100m の領域に 15 ノードをランダムで配置したアドホックネットワークポロジでシミュレーションを行った。マルチメディアコンテンツの配信で頻繁に使用されるため、トラヒックは主に CBR(固定ビットレート)アプリケーションを使用する。CBR に優先度パラメータ(precedence)を設定することより、QoS 通信とベストエフォート通信を区別する。

シミュレーションのシナリオは以下の通りである。

- (1) OLSR のルーティングプロトコルを使用する。
- (2) 固定ルートで通信を行うシナリオ
 - a. 実装した TDMA 方式における QoS 通信
 - b. 実装した 802.11 DCF 方式におけるベストエフォート通信
 - c. 既存 802.11 DCF におけるベストエフォート通信と QoS 通信
 - d. IEEE 802.11e EDCA 方式におけるベストエフォートと QoS 通信
 - e. 提案方式におけるベストエフォート通信と QoS 通信

5.1.3 評価項目

提案方式を評価するため、評価項目は以下のとおりである。

- (1) パケット到達率 (PDR : Packet Delivery Ratio)
- (2) 遅延(Delay)

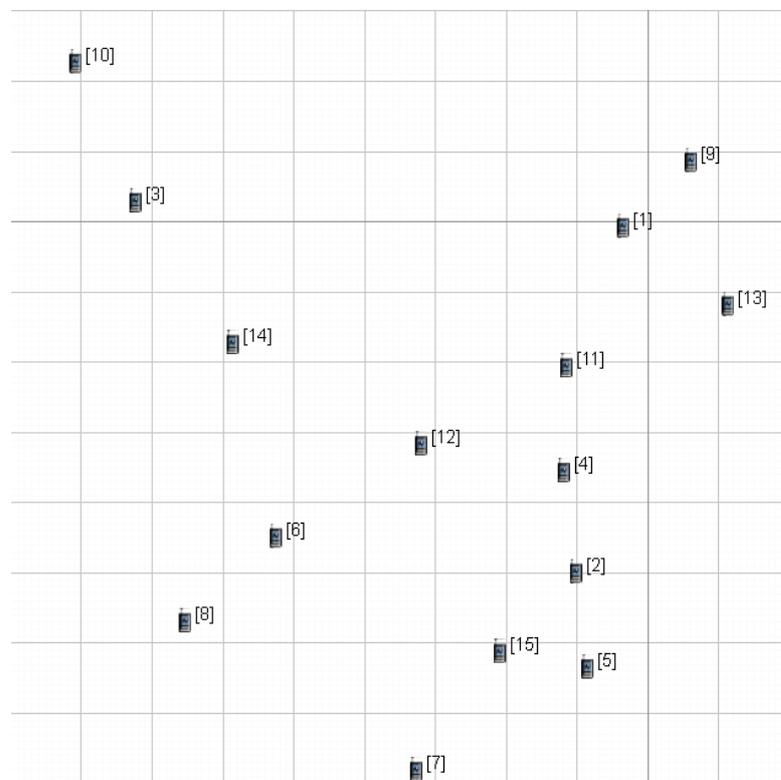


図 5.1 シミュレーショントポロジ

5.2 予備実験

本研究では、タイムスロットの割り当てアルゴリズムは未実装であるため、予備実験で、OLSR ルーティングプロトコルを使用し、OLSR のメッセージを十分交換し、表 5.2 に示すような情報を OLSR により収集した。それにより、QoS 通信フローのためのタイムスロットテーブルと各ノードに固定なルーティングテーブルを作成した。

また、ノード 1 からノード 3 までとノード 10 からノード 15 までの QoS 通信を行う前に、3.2.3 節で述べたタイムスロット割り当てアルゴリズムにより、図 5.2 のように、各経路ノードにタイムスロットを割り当てた。ノード 1 からノード 3 でのフローはより先に発生すると仮定する。

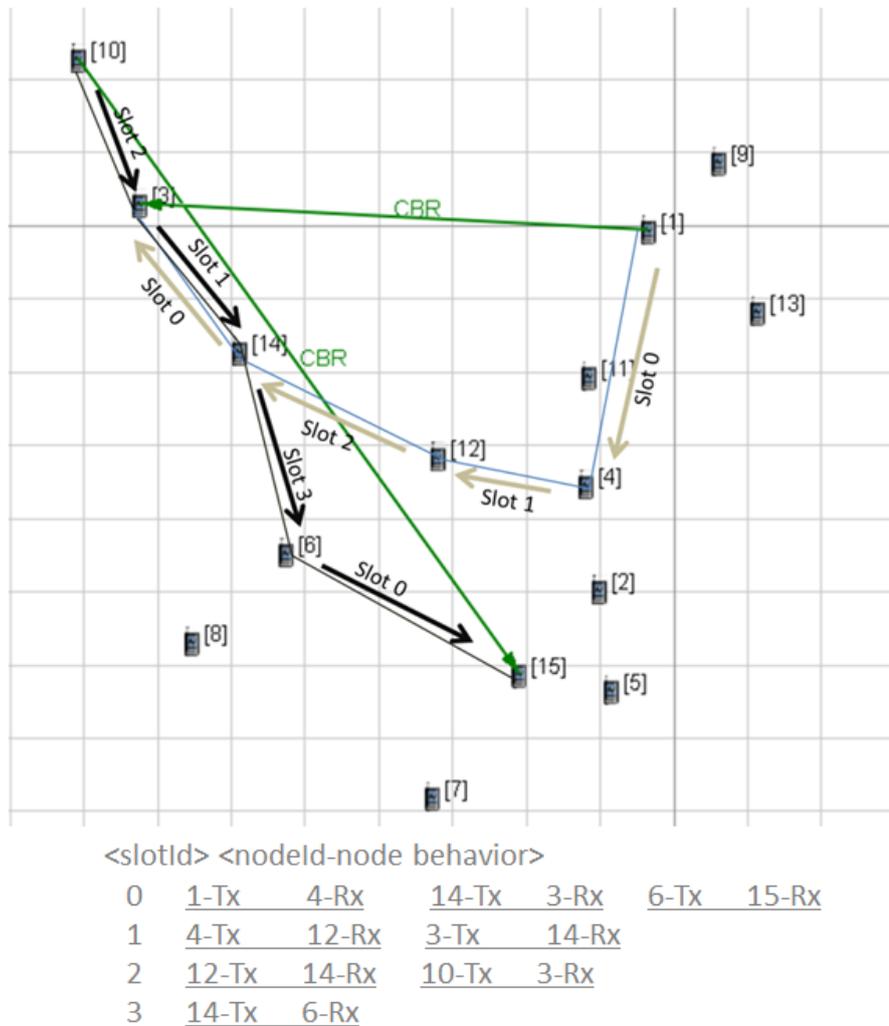


図 5.2 10→15 と 1→3 タイムスロット割り当て

表 5.2 OLSR により収集した情報

```

***** Node 15 *****
Neighbor List:
169.0.0.2      1 [2 hop neighbor: 169.0.0.5 169.0.0.7 169.0.0.4 169.0.0.11 169.0.0.12 ]
169.0.0.4      1 [2 hop neighbor: 169.0.0.11 169.0.0.5 169.0.0.1 169.0.0.13 169.0.0.2
                  169.0.0.12 ]
169.0.0.5      1 [2 hop neighbor: 169.0.0.7 169.0.0.2 169.0.0.4 ]
169.0.0.6      1 [2 hop neighbor: 169.0.0.12 169.0.0.8 169.0.0.14 ]
169.0.0.7      1 [2 hop neighbor: 169.0.0.5 169.0.0.2 ]
169.0.0.12     1 [2 hop neighbor: 169.0.0.2 169.0.0.11 169.0.0.6 169.0.0.4 169.0.0.14 ]
Mpr Selector Table: [169.0.0.5 169.0.0.6 169.0.0.7 ]
Topology Table:
169.0.0.1      : [last_hop_of: 169.0.0.4 ]
169.0.0.2      : [last_hop_of: 169.0.0.12 169.0.0.11 169.0.0.7 169.0.0.4 ]
169.0.0.3      : [last_hop_of: 169.0.0.14 169.0.0.10 ]
169.0.0.4      : [last_hop_of: 169.0.0.13 169.0.0.5 169.0.0.1 ]
169.0.0.6      : [last_hop_of: 169.0.0.14 169.0.0.12 169.0.0.8 ]
169.0.0.11     : [last_hop_of: 169.0.0.12 169.0.0.9 169.0.0.2 ]
169.0.0.12     : [last_hop_of: 169.0.0.14 169.0.0.11 169.0.0.6 169.0.0.4 169.0.0.2 ]
169.0.0.14     : [last_hop_of: 169.0.0.12 169.0.0.6 169.0.0.3 ]
Routing Table:
Dest           NextHop        Intf Distance
169.0.0.1     169.0.0.4     0    2
169.0.0.2     169.0.0.2     0    1
169.0.0.3     169.0.0.6     0    3
169.0.0.4     169.0.0.4     0    1
169.0.0.5     169.0.0.5     0    1
169.0.0.6     169.0.0.6     0    1
169.0.0.7     169.0.0.7     0    1
169.0.0.8     169.0.0.6     0    2
169.0.0.9     169.0.0.2     0    3
169.0.0.10    169.0.0.6     0    4
169.0.0.11    169.0.0.2     0    2
169.0.0.12    169.0.0.12    0    1

```

5.3 実装した TDMA プロトコルの性能評価

実装した TDMA プロトコルを適用した QoS 通信フローについて考察する。比較対象として、QualNet のオリジナル IEEE 802.11 の DCF 方式を扱う。

図 5.1 に示すシミュレーショントポロジに、QoS 通信として、2 つの CBR フローを加える。一つはノード 1 からノード 3 までの通信フロー(1→3)で、このフローが開始した後、もう一つのノード 10 からノード 15 までフロー(10→15)も通信を開始する。この二つのフローは同じタイミングであり、かつ同じ CBR レートでパケット転送を行うように設定される。時間帯の割り当ては QoS 期間のみとする。TDMA プロトコルにおいて、フローごとの必要なタイムスロットは、5.2 節の図 5.2 のように割り当てられる。割り当ての結果により、この二つのフローは全部で 4 つのタイムスロットが必要である。一つのタイムスロットで 512 k バイトのパケットを一つ転送すると、タイムスロットの長さは 800 us であるため、4 つのタイムスロットから構成する QoS 期間の長さは 3200 us である(図 5.3)。

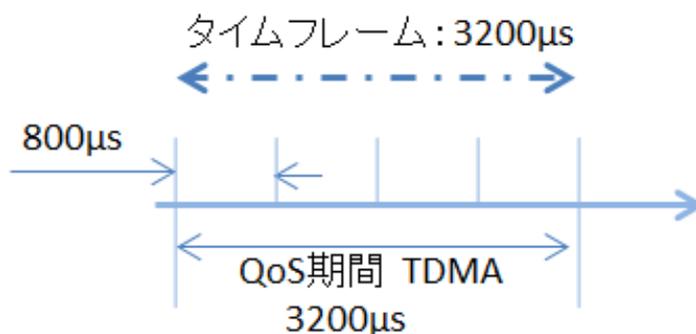


図 5.3 TDMA プロトコルの性能評価のタイムフレーム

図 5.4 と図 5.6 にフロー1→3 とフロー10→15 の遅延をそれぞれ示す。CBR フローは CBR レートの増加するにつれて、遅延が大きくなっていくことがわかる。実装した TDMA 方式では、CBR レートが 1280kbps まではほぼ遅延なく通信できる。512kbps まで遅延なく通信する IEEE802.11 の DCF 方式と比較すると、実装した TDMA 方式の有効性があると考えられる。その原因は、TDMA 方式は DCF 方式の DIFS と衝突する場合に倍になるバックオフのような待ち時間が存在しないためである。また、1280kbps より大きい CBR レートに対して

は、CBR レートを徐々に増やすと、受信成功のパケットの量がネットワーク帯域制限の原因で固定の最大値となる。そのため、送信パケットがそれ以上超えると、到達パケットの遅延がほぼ同じになる。

図 5.5 と図 5.7 にフロー1→3 とフロー10→15 それぞれのデータ到達率を示す。ネットワーク帯域が限られているため、データ到達率は遅延と同じように、CBR レートの増加につれて、悪くなっていく傾向がある。また、256kbps の CBR レートからパケットロスが起こる DCF 方式に対して、実装した TDMA 方式では、CBR レートが 1580kbps までは 100%のデータ到達率が提供できる。1580kbps より大きい CBR レートに対しては、受信成功のパケットの固定最大値が限られているため、送信パケットがそれ以上超えると、パケット到達率が低下していく傾向がある。

また、フロー1→3 とフロー10→15 の遅延と到達率のほぼ同じ曲線から見ると、実装した TDMA は IEEE802.11 より公平なサービスを提供していることがわかる。それは、ホップの数が同じである二つのフローは同じ数のタイムスロットを持つためである。

このように、実装した TDMA は 1280kbps までの CBR レートでほぼ遅延なく、高いデータ到達率が達成できることにより、1280kbps までの CBR レートの QoS 通信を保証できると考えられる。また、パケットが制御されないまま、増加させた場合に、ネットワークパフォーマンスが著しく低下することが示されている。そのため、QoS トラフィックを制御できるアドミッション制御が必要だと考えられる。

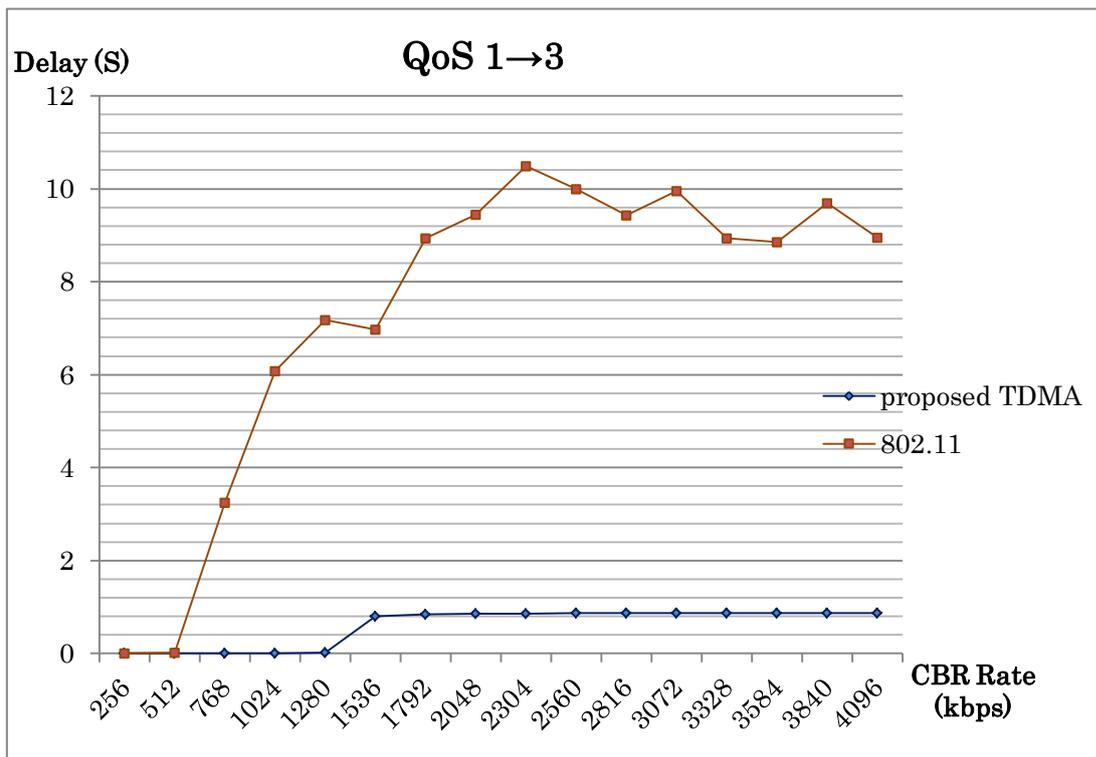


図 5.4 QoS フロー1→3 の遅延

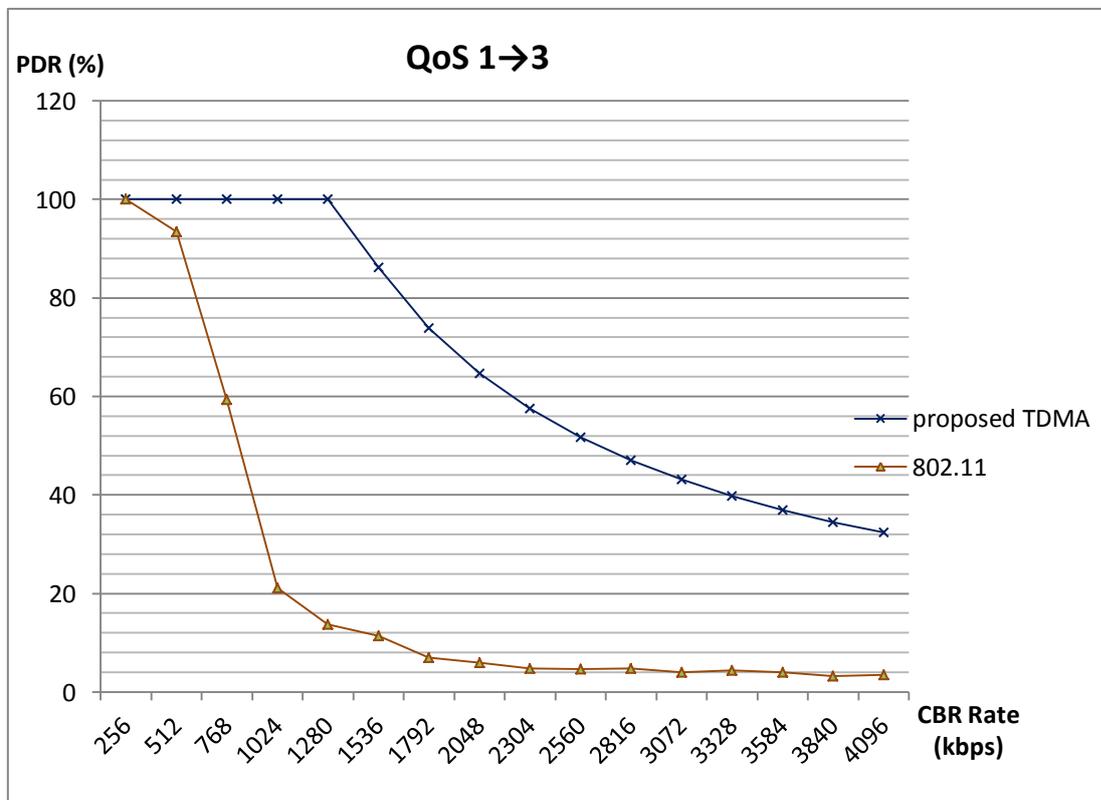


図 5.5 QoS フロー1→3 のデータ到達率

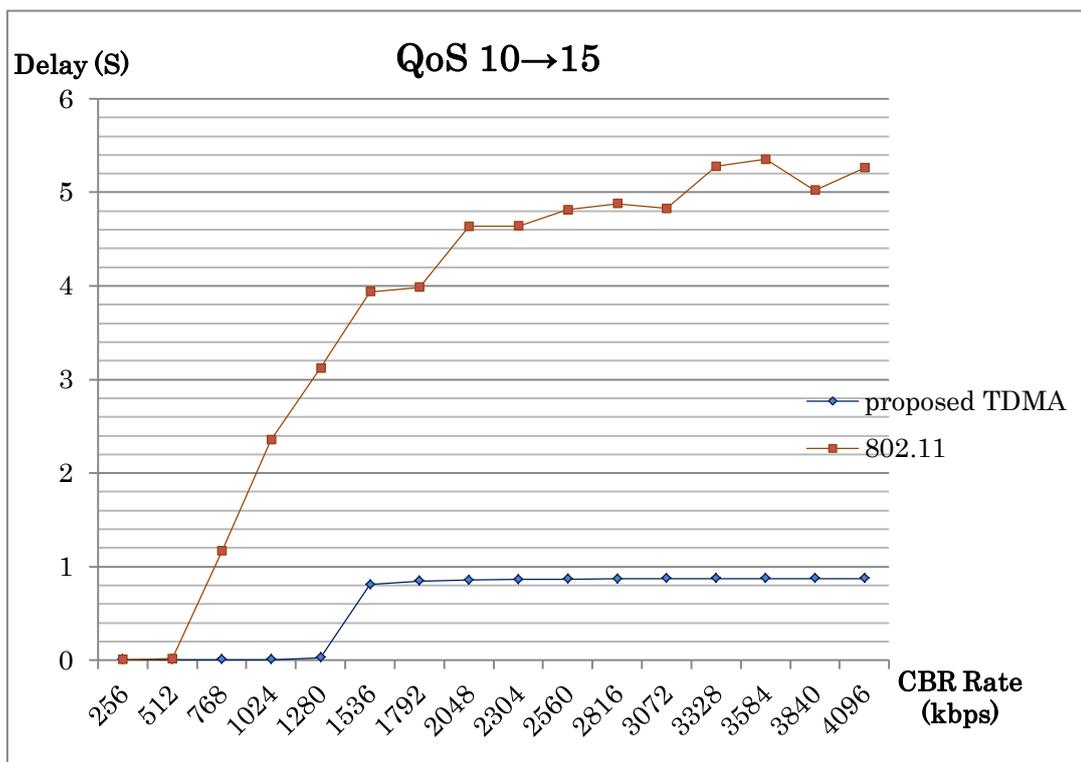


図 5.6 QoS フロー10→15 の遅延

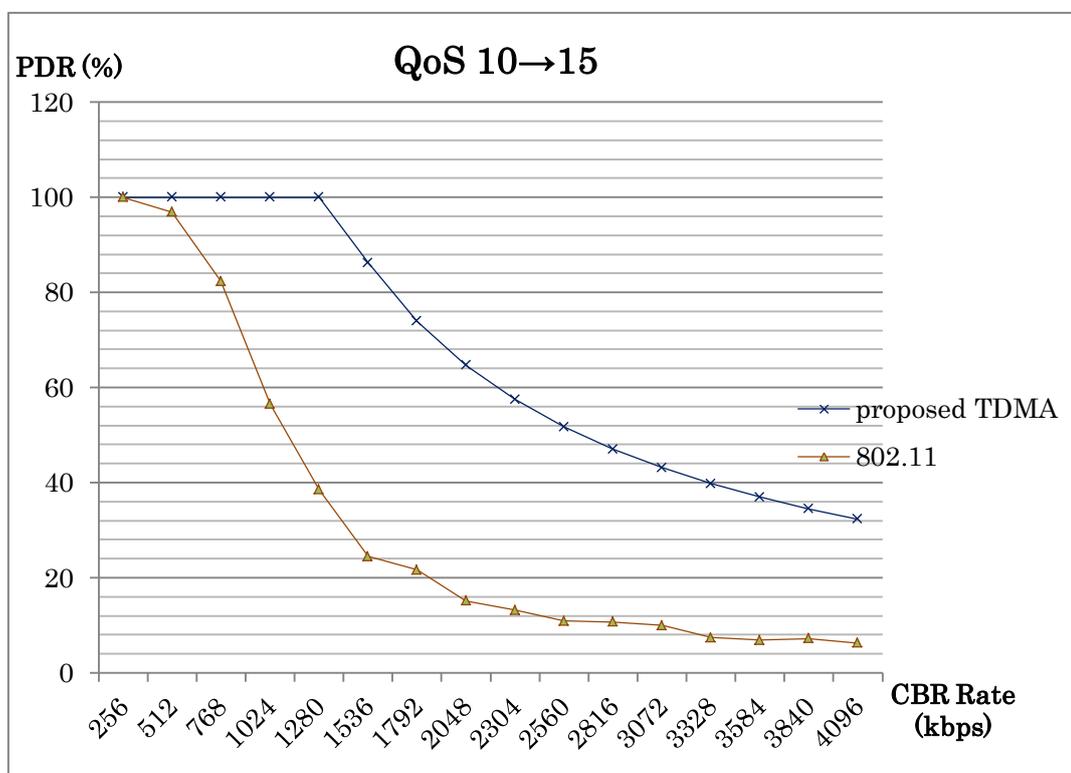


図 5.7 QoS フロー10→15 のデータ到達率

5.5 提案方式の総合評価

ベストエフォート通信フローと QoS 通信フローの混在環境における提案方式の性能を評価する。QoS 制御機能を持つ規格 IEEE 802.11e EDCA を比較対象として扱う。

図 5.1 に示すシミュレーショントポロジに、3つの通信フローを生成する。ノード 10 からノード 15 までのフロー 10→15 は QoS 通信を行うのに対して、ノード 1 からノード 3 までのフロー 1→3 とノード 13 からノード 5 までのフロー 13→5 はベストエフォート通信フローとなる。

フロー 10→15 の通信では TDMA を用いる。タイムスロットは 5.2 節の図 5.2 のフロー 10→15 と同じように割り当てられる。すなわち、ノード 10 がノード 3 に送信すると同時に、ノード 6 はノード 15 にデータ転送を行うように 4 つのタイムスロットが割り当てられる。800 us のタイムスロットで 512 k バイトの packets を一つ転送すると、QoS 期間は 2400 us となる。QoS 期間と同じ長さ(2400 us)のベストエフォート期間が、QoS 期間の後ろに付くように設定する。このように、図 5.12 のように、一つのタイムフレームは QoS 期間とベストエフォート期間から構成され、4800us の長さを持つ。

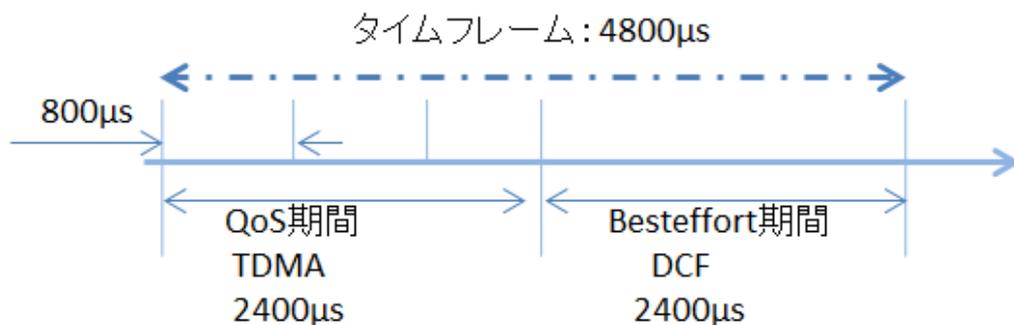


図 5.8 総合評価のタイムフレーム

図 5.13 と図 5.14 は QoS フロー 10→15 の遅延とデータ到達率を示す。通信帯域が一定であるため、提案方式と IEEE802.11e の EDCA は同じように、CBR レートの増加するにつれて、遅延が大きくなり、パケット到達率が低くなる。IEEE802.11e EDCA では、QoS 通信はベストエフォート通信との衝突が発生するため、100%のデータ到達率が保証できない。それ

に対して、提案方式は 1580kbps の CBR レートまでは 100%のデータ到達率をサポートすることができる。それは QoS 通信とベストエフォート通信がそれぞれ異なる期間で行うためである。つまり、通信期間分けの有効性があると言える。

QoS フローの遅延について、1024kbps まで CBR レートに対して、提案方式と IEEE802.11e の EDCA はほぼ同じ性能を持っている。1024kbps より大きい CBR レートに対しては、QoS トラヒックの量がネットワーク許容量を超えるため、データ到達率と遅延の両方が悪くなっている。この状況はアドミッション制御によって制御することができるが、今回は実装していない。しかし、提案方式の曲線は EDCA よりスムーズであるため、提案方式は一定の時間間隔の固定遅延で固定数のパケット転送を保証できることが示されている。

ベストエフォート通信と想定するフロー1→3 とフロー13→5 の遅延とデータ到達率はそれぞれ図 5.15, 図 5.16, 図 5.17 と図 5.18 に示す。ベストエフォート通信は実装した DCF 方式で行う。提案方式のベストエフォート通信は、768kbps までの CBR レートで EDCA とほぼ同じ性能をもつと考えられる。

以上の考察によると、提案方式の QoS 通信は EDCA より高い性能をもつ、提案方式のベストエフォート通信は 768kbps までの CBR レートで EDCA とほぼ同じ特徴であることが示され、提案方式の有効性があるという結論が得られた。

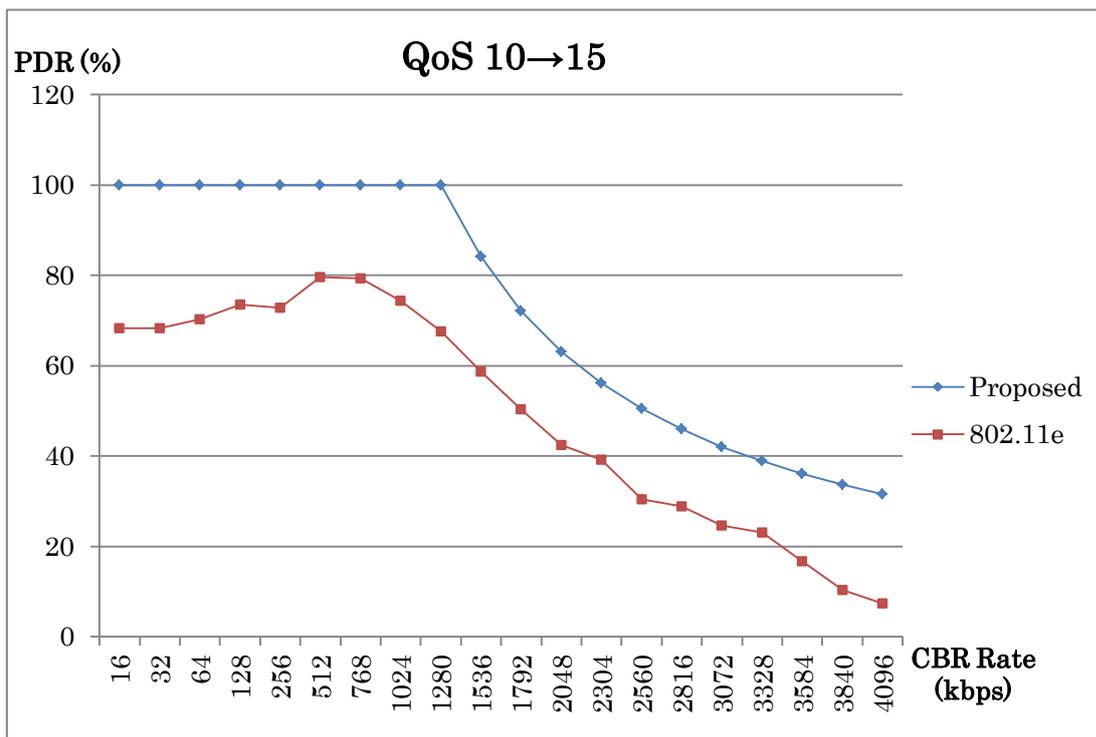


図 5.9 QoS フロー10→15 の遅延

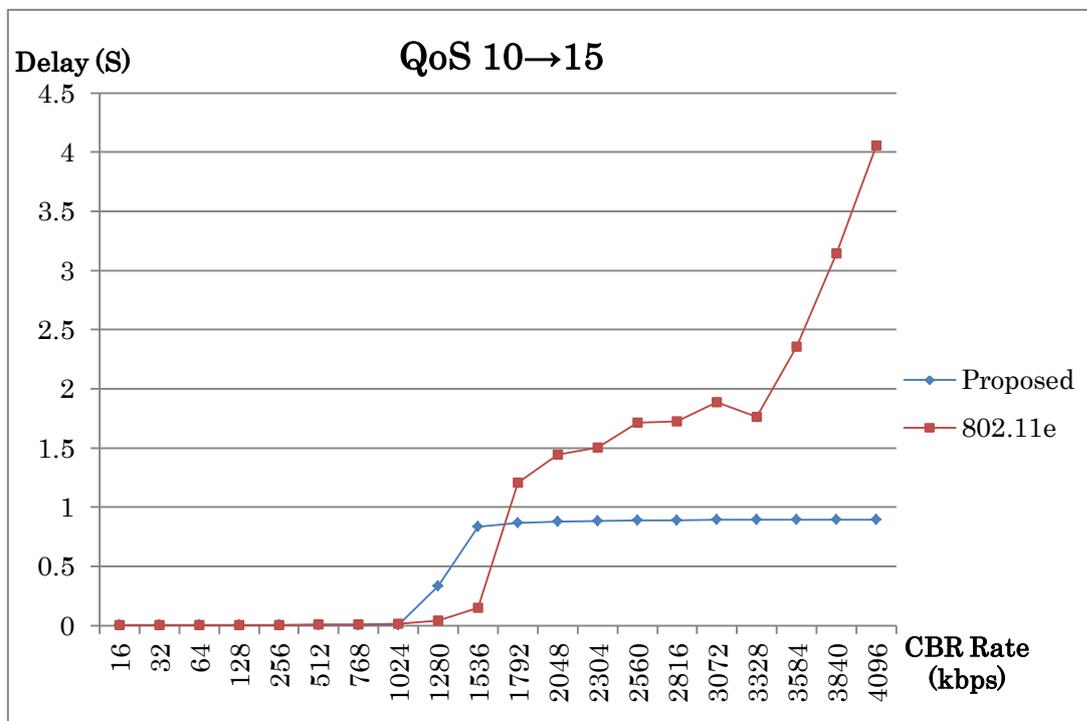


図 5.10 QoS フロー10→15 のデータ到達率

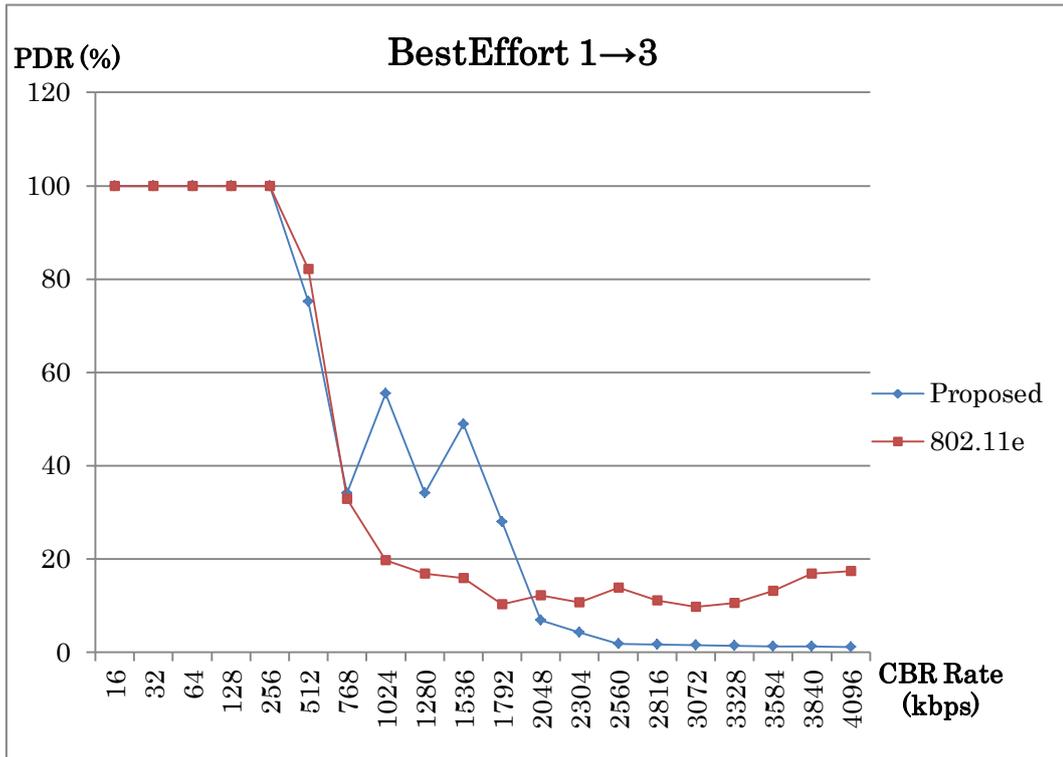


図 5.11 ベストエフォートフロー1→3の遅延

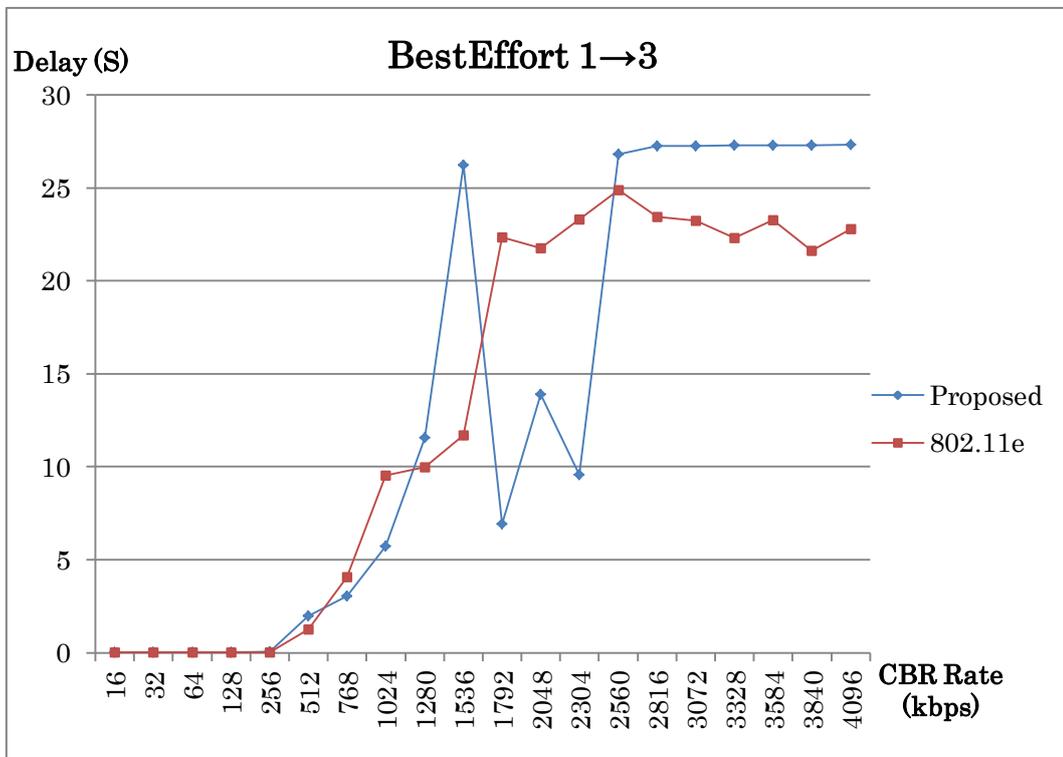


図 5.12 ベストエフォートフロー1→3のデータ到達率

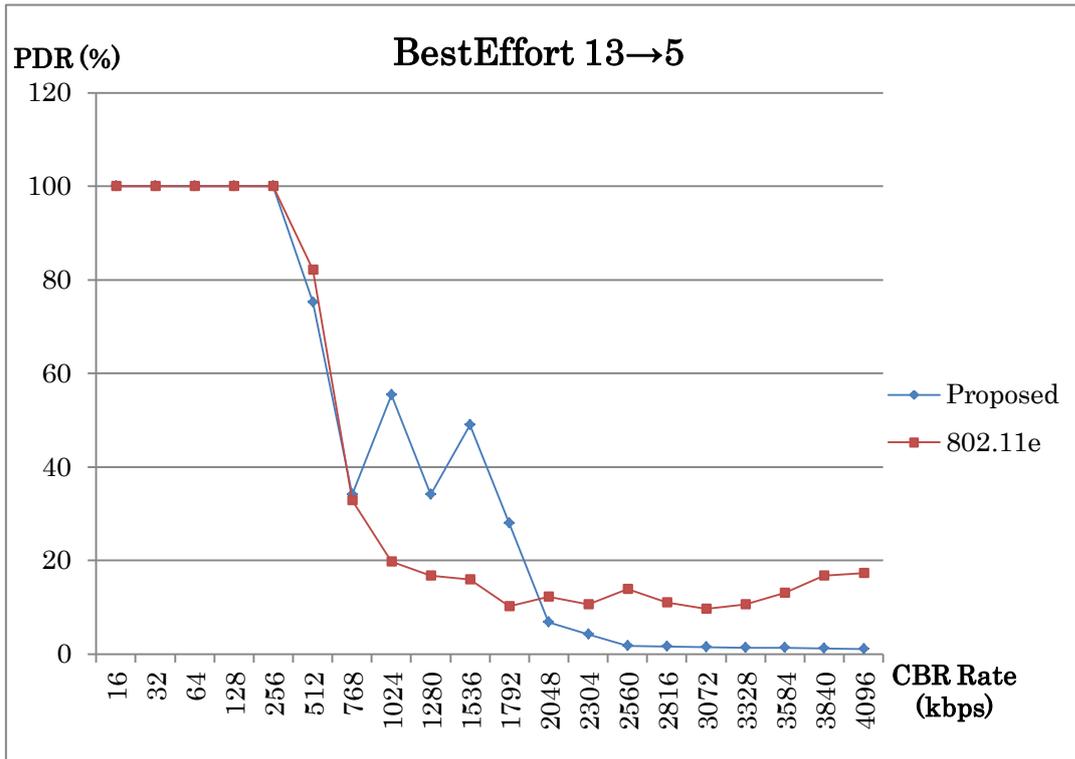


図 5.13 ベストエフォートフロー13→5 の遅延

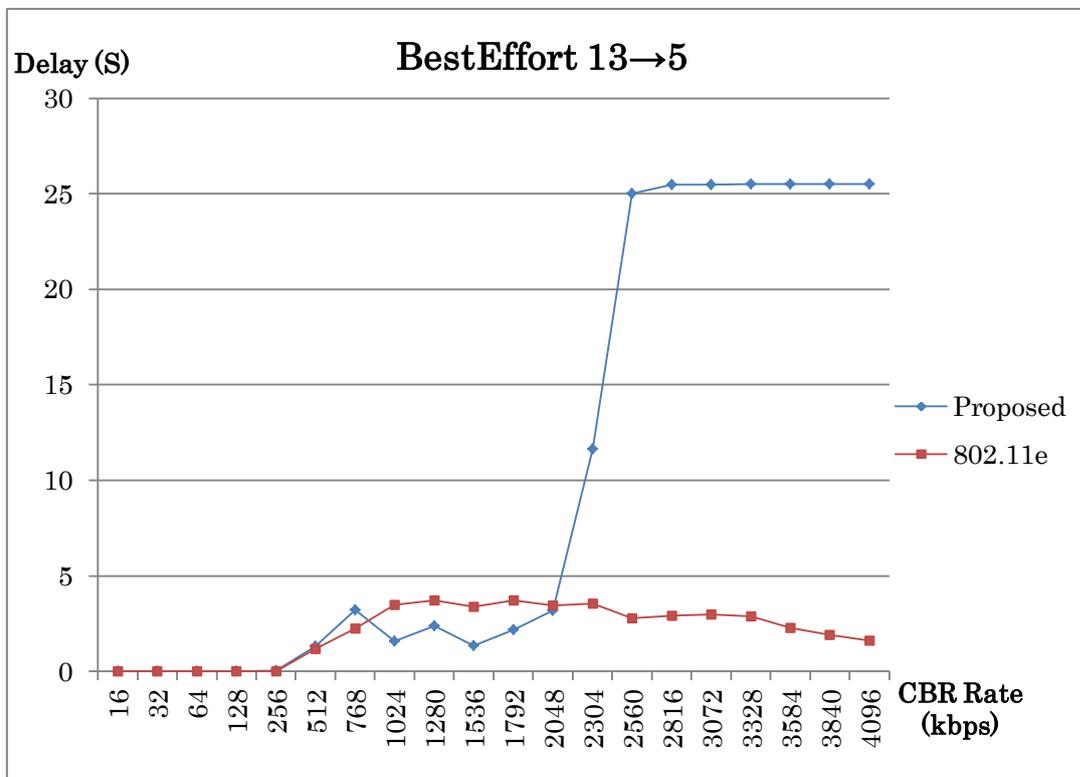


図 5.14 ベストエフォートフロー13→5 のデータ到達率

6. まとめと今後の課題

6.1 まとめ

本論文では、無線アドホックネットワークにおいてマルチメディアデータを転送するために、QoS 通信を保証する MAC 制御方式として、アドミッション制御により保証できる QoS フローを選択し、ベストエフォート通信期間と QoS 通信を分け、さらに QoS 期間では分散的なタイムスロット割り当て方法で干渉を起こさない複数の通信端末で同時送信または受信することにより通信保証を行う方式を提案した。

従来の QoS 通信方式 IEEE802.11e の EDCA 方式では、リアルタイムデータに優先度を付け、優先度の高いデータを優先的に送信することにより、QoS 通信を保証する。この方式では、リアルタイムデータが増加すると、パケットロスと遅延を発生する確率は高くなるため、帯域と遅延時間を保証することが難しいと言える。また、無線アドホックネットワークでは、無線 LAN のアクセスポイントのような集中管理者が存在しない。したがって、従来の無線 LAN での QoS 方式が適用できないため、QoS 通信品質を保証することが課題となっている。

提案方式では、アドミッション制御を採用することで、ネットワークの帯域によりネットワークに流入する QoS トラフィックの量を制御する。また、アドミッション制御が行われると同時に、各ノードは QoS 通信のための独立した送信タイミングを決定する。QoS 期間とベストエフォート期間という形で完全に帯域を分割することで QoS フローとベストエフォートフローが互いに全く異なった無線チャネルで通信するような状態を作成することによって、QoS フローとベストエフォートフローの衝突を回避することを可能としている。また、提案方式では、QoS 期間では各ノードが TDMA 方式を採用する。TDMA 方式では独立した送信タイミングを使用することにより、QoS データフレームの衝突が発生しない。

本研究では、方式の提案・実装により、シミュレーション実験を用いて従来の IEEE 802.11e の EDCA 方式と提案方式を比較した。シミュレーション実験の結果より、提案方式は QoS 通信を保証しつつ、ベストエフォート通信に大きいな影響を与えないことを示した。従って、提案方式は従来の EDCA 方式と比べ、有効性があると考えられる。

6.2 今後の課題

本論文における評価実験では、提案方式と 802.11e の EDCA の比較を行ったが、その評価は不十分であると考えられる。なぜなら、1Mbps 以上の CBR レートのベストエフォート通信の評価結果では、実装した DCF 方式は不安定であるため、プログラムの改善も必要である。また、評価実験でのベストエフォート通信フロー、QoS 通信フローの数、分布などをより現実にする必要がある。従って、現実的な環境では、提案方式がどのように機能するのかを評価する必要がある。次に、QoS 期間とベストエフォート期間の割合、タイムフレームの長さなどはさらに検討する必要がある。その他、TCP によるデータフローを用いる評価も必要である。さらに、動的な環境での評価、54Mbps 帯域の評価などの検討も挙げられる。

タイムスロットの割り当て方式にも改善が必要と考える。まず、TDMA 期間の時間同期の方法を検討する必要がある。また、OLSR の MPR ノードを利用することにより、各ノード間の電波干渉状況を精確に把握することで、方式が改善される可能性があると考えられる。次に、再割り当て手順が必要である。特に、動的な環境では、無線状況の変化や移動のため、同時送信条件が変化する事により通信不可能な場合、その手順が必要である。再割り当て手順以外には、タイムスロットの解放に関するアルゴリズムの検討も考えられる。また、本研究では ACK のない QoS 通信と仮定したため、ACK のある場合のタイムスロットの割り当てを考慮する必要がある。その他にも、同時送信帯域が異なる場合、タイムスロットの長さなども調整する必要がある。これらの実装と評価を行うことも今後の課題となる。

また今後はアドミッション制御を実装し、そのネットワーク品質に対する影響などを明らかにすることが必要である。さらに、アドミッション制御方式で用いる帯域計算アルゴリズムなどについての検討も挙げられる。

謝辞

研究を進めるにあたり、多くの方々のご指導とご助言を賜りました事をここに深く感謝の意を表したいと思います。

本研究の主任指導教員である電気通信大学大学院情報システム学研究科ネットワークアーキテクチャ学講座の加藤聰彦教授には、研究方針に関して多大なご指導を頂くと同時に、充実した研究活動ができる環境を提供していただいたことに心より感謝いたします。

同じく電気通信大学大学院情報システム学研究科ネットワークアーキテクチャ学講座の大坐島智准教授と策力木格助教には、講座ゼミを通じて多くのご助言をいただくと同時に、プログラムやネットワークシミュレータに関する疑問点等について解消していただきました。

指導教員であるネットワークコンピューティング講座の入江英嗣准教授には研究に関してご指導・ご助言を戴きました。深く感謝いたします。

電気通信大学大学院情報システム学研究科ネットワークアーキテクチャ学講座の皆様には、日頃よりお世話になりました。

以上のように、研究を進めるにあたり多くの方々に非常にお世話になりました。心からの感謝を申し上げます。

最後に、就学の機会を与えてくれた家族に感謝致します。

参考文献

- [1]. Ash Mohammad Abbas, Oivind Kure, Quality of Service in mobile ad hoc networks: a survey, International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing archive Volume 6 Issue 2, July 2010 pp.75-98.
- [2]. IEEE 802.11e/D13.0, Draft Supplement to Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements. January 2005.
- [3]. IEEE Std. 802.11, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. 1999.
- [4]. T. Clausen, P. Jacquet, Optimized link state routing protocol (OLSR): RFC 3626, in: IETF Internet Draft. <http://www.ietf.org/rfc/rfc3626.txt>.
- [5]. J. Chen, Y. Lee, D. Maniezzo, M. Gerla, Performance comparison of AODV and OLSR in wireless mesh networks, in: Proceedings of the IFIP Med-Hoc-Net Conference, 2006, pp. 14.17.
- [6]. B.R. Arun Kumar, L. Reddy, P. Hiremath, Performance comparison of wireless mobile ad-hoc network routing protocols, International Journal of Computer Science and Network Security 8 (6) (2008) 337.
- [7]. 守倉正博, 久保田周治, 802.11 高速無線 LAN 教科書, インプレス. R&D, 2008.
- [8]. Yaling Yang, Robin Kravets, "Contention-Aware Admission Control for Ad Hoc Networks", IEEE TRANSACTIONS ON MOBILE COMPUTING, VOL. 4, NO. 4, JULY/AUGUST 2005.
- [9]. S. Su, et. al., "A Novel QoS Admission Control for Ad Hoc Networks," in Proc. of IEEE WCNC 2007, 2007.
- [10]. A.Kanzaki, et. al., "On a TDMA Slot Assignment Considering the Amount of Traffic in Wireless Sensor Networks," in Proc. of IEEE International Conference on Advanced

Information Networking and Applications Workshops, 2009.

[11]. I.Rhee, et. al., “DRAND: Distributed Randomized TDMA Scheduling For Wireless Ad-hoc Networks,” in Proc. of MobiHoc ’06, May 2006.

[12]. M. Kas, et. al., “OLSR-Aware Distributed Channel Access Scheduling for Wireless Mesh Networks,” in Proc. of IEEE WCNC 2009, 2009.

[13]. 梅原大祐, “IEEE 802.11a の MAC フレーム構成”,

[http:// www.ice.is.kit.ac.jp/~umehara/misc/study/doc/20090930.pdf](http://www.ice.is.kit.ac.jp/~umehara/misc/study/doc/20090930.pdf).

[14]. “QualNet-6.1-Programmer’s Guide ”, Scalable Network Technologies.