

上り下りチャンネル容量割当てを考慮した TDD チャンネル無線 LAN の性能解析

正員 鈴木 隆宏[†] 正員 田坂 修二[†]

Performance Analysis of a Wireless Local Area Network with a TDD Channel Taking into Consideration Capacity Allocation between Uplink and Downlink Channels

Takahiro SUZUKI[†] and Shuji TASAKA[†], Members

あらまし 本論文では、複数のマイクロセルからなる無線 LAN の一つのセルを検討の対象とする。一つのセルは、一つの基地局と複数の無線端末からなる。ここでは、上り（端末-基地局方向）チャンネルと下り（基地局-端末方向）チャンネルとが時分割、すなわち、TDD (Time Division Duplex) によって割り当てられるとする。また、上りチャンネルの MAC プロトコルとしてアロハ形予約プロトコルを用いる。そして、TDD チャンネルを用いたアロハ形予約プロトコル (TDD アロハ形予約プロトコル) において、上り下りのチャンネル容量割当てを考慮してその性能を解析する。このプロトコルは、基地局による集中制御のプロトコルである。本論文では、まず、TDD アロハ形予約プロトコルのモデル化および解析を行う。ある端末で発生した送信メッセージと、そのメッセージに対する相手端末からの応答メッセージとが 1 対 1 に対応すると仮定して、このシステムの近似モデルを作成する。そして、平衡点解析の手法により、スループット、平均メッセージ遅延および平均応答時間を求める。次に、トラフィック条件を変化させて、上りおよび下りチャンネルの容量とシステム性能との関係を、解析およびシミュレーション結果により議論する。

キーワード 無線ローカルエリアネットワーク、TDD チャンネル、媒体アクセス制御プロトコル、アロハ形予約プロトコル、チャンネル容量割当て

1. まえがき

無線ローカルネットワーク (LAN) を利用すれば、有線 LAN では欠かせない配線に必要なコストや時間が不用となる。また、可搬型の端末も容易に収容することができる^{(1),(2)}。このような理由から、最近、無線 LAN に対する期待が高まってきており、既にいくつかのデータ系無線 LAN 製品も出荷されている。Motorola 社の無線 LAN 製品である“ALTAIR”は、18 GHz 帯を用いることにより、15 Mbit/s のデータ伝送速度を実現している^{(1),(2)}。

典型的な無線 LAN のシステム構成として、図 1 のような複数のマイクロセルからなる構成が考えられる⁽²⁾。本論文では、このタイプの無線 LAN の一つのマイクロセルに焦点を絞って考察する。一つのマイクロ

セルは、有線系ネットワークに接続された一つの基地局と、複数の無線端末からなる。一つのセル内の通信形態としては、端末同士が直接通信する方式も考えられる^{(3),(4)}。しかし、ここでは、文献(2)と同様に、各端末は基地局とのみ通信できるものとする。一つのセルには、一つの周波数帯域が割り当てられており、これを用いて、上り（端末-基地局）方向と下り（基地局-端末）方向との両方の通信が行われる。一つのセル内のすべての無線端末は、上りチャンネルを共有しており、このチャンネルを用いて基地局にパケットを送信する。

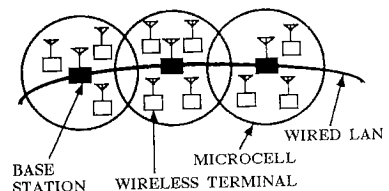


図 1 システム構成

Fig. 1 System configuration.

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科, 名古屋市 Faculty of Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466 Japan

一方、基地局は、下りチャンネルを用いて全端末にパケットを放送する。このような端末-基地局間のパケット転送に関しては、二つの問題が生じる。一つは、上りチャンネルと下りチャンネルとの容量割当ての問題であり、もう一つは、上りチャンネルで用いる MAC(媒体アクセス制御) プロトコル選択の問題である。

これらの問題に対してはさまざまな解決方法が考えられる^{(2),(4),(5)}。中でも ALTAIR では、上りチャンネルと下りチャンネルとを時分割によって割り当てる TDD (Time Division Duplex) 方式が用いられ、上りチャンネルの MAC プロトコルとしては、ランダムアクセス予約チャンネルを用いた予約プロトコルが採用されている⁽²⁾。

本論文でも、ALTAIR と同様に、上り下りチャンネルの容量割当てを TDD によって行う場合を取り扱う。上りチャンネルの MAC プロトコルとしては、アロハ形予約プロトコル⁽⁶⁾を採用する。このプロトコルは、スロット付きアロハ予約チャンネルを用いた予約プロトコルである。但し、ALTAIR のプロトコルでは、予約チャンネルの各スロットは CM (Control Module) の六つのアンテナごとに割り当てられており、どのアンテナを用いるかによって使用するスロットが限定される⁽²⁾。一方、アロハ形予約プロトコルの場合には、予約チャンネルのすべてのスロットが、予約要求の発生した端末によって使用される可能性がある。

TDD チャンネルを用いたアロハ形予約プロトコルは、以下の点で無線 LAN に適している。まず、TDD チャンネルを用いることにより、トラヒック環境に応じた上りチャンネルと下りチャンネルとの容量割当てが可能となる。また、アロハ形予約プロトコルは、単なるランダムアクセスプロトコルと比較して、中高負荷でも優れた性能を示す⁽⁷⁾。更に、アロハ形予約プロトコルでは、CSMA のような隠れ端末による性能劣下⁽⁸⁾が生じないという利点もある。

アロハ形予約プロトコルの性能評価の研究は、既に筆者らによって文献(6)、(9)、(10)で行われている。しかし、これらの研究では、TDD チャンネルを用いた場合の解析はなされていない。文献(6)、(9)は、衛星データ通信網を対象として、このプロトコルを解析したものである。また、文献(10)は、音声/データ統合型の無線 LAN を対象としたものであり、上りチャンネルと下りチャンネルとの容量割当てを周波数分割により行うと仮定している。これらの研究では、フレームの全期間がマルチプルアクセスで使用されている。また、

文献(2)に ALTAIR の性能に関する研究がわずかに見られるが、これはバックオフアルゴリズムの検討であり、シミュレーションによってのみ行われている。

そこで、本論文では、TDD チャンネルを用いたアロハ形予約プロトコルを、TDD アロハ形予約プロトコル (TDD ALOHA-Reservation protocol) と呼び、その性能を平衡点解析 (EPA)⁽⁷⁾ の手法を用いて解析する。TDD アロハ形予約プロトコルのモデル化の際、セル内の一つの端末が発生したメッセージと、それに対する相手端末からの応答メッセージとが 1対1 に対応するという仮定をおく。更に、トラヒック条件に適した上りチャンネルと下りチャンネルとの容量割当て問題を、解析およびシミュレーション結果を用いて議論する。

以下、2.で、TDD アロハ形予約プロトコルの動作を記述する。3.で、このプロトコルのモデル化と解析を行う。4.では、数値例により、TDD アロハ形予約プロトコルの性能を評価する。そして、5.で、結論および今後の課題について述べる。

2. TDD アロハ形予約プロトコル

本章では、TDD アロハ形予約プロトコルの動作を記述する。このプロトコルは、基地局による集中制御のプロトコルである。

TDD アロハ形予約プロトコルでは、図 2 のようなフレーム構成の TDD チャンネルが用いられる。一つのフレームは、上り制御サブフレーム、上りデータサブフレーム、下りデータサブフレーム、下り制御サブフレームの四つのサブフレームからなる。上りおよび下りデータサブフレームは、各々、 L 個、 N 個のスロットに分割されており、上りおよび下り制御サブフレームは、各々、 K 個、 C 個の小スロットに分割されている。各スロットの長さは、1 データパケット伝送時間に等しく、各小スロットの長さは、1 制御パケット伝送時間に等しい。制御パケットには、予約パケットとチャンネル割当てパケットの 2 種類がある。ここで、スロット長に対する小スロット長の比を η とし、一つの

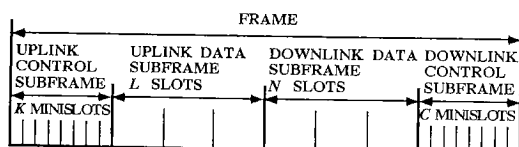


図 2 TDD アロハ形予約プロトコルのチャンネルフレーム構成

Fig.2 Channel frame structure of TDD ALOHA-Reservation.

フレームの長さを F スロットとすると、次の関係式が成立する。

$$F=(K+C)\eta+L+N \quad [\text{スロット}] \quad (1)$$

あるフレームでメッセージを発生した端末は、次のフレームからフレーム当たり一定の確率で予約パケットの送信を行う。予約パケットの送信は、上り制御サブフレームの K 個の小スロットの中から、等確率で一つの小スロットを選んで行われる。予約パケットには、メッセージの送信に必要なスロット数が記される。

あるフレームで端末が予約パケットの送信に成功すると、その端末は、基地局内の予約待ち行列に加わる。基地局は、待ち行列の先頭の端末から順に、以後のフレームの上りデータサブフレーム内のまだ割り当てていないスロットを、予約パケットに示されたスロット数だけ連続的に割り当てる。この処理は、上りおよび下りデータサブフレームの期間に行われる。そして、基地局は同じフレームの下り制御サブフレームの小スロットを用いて、該当端末にチャネル割当てパケットを送信する。一つの端末に対するチャネル割当てパケットの送信には、一つの小スロットが用いられる。

無線端末が、あるフレームの上り制御サブフレームで予約パケットを送信し、同じフレームの下り制御サブフレームでチャネル割当てパケットを受信した場合、その端末は、上り方向待ち行列に加わる。これは、上りデータサブフレームに対する仮想的な待ち行列であり、全端末に共通である。上り方向待ち行列に加わった端末は、割り当てられた上りデータサブフレーム内のスロットを用いてメッセージを送信する。

一つの端末が、あるフレームの上り制御サブフレームで予約パケットを送信したにもかかわらず、同じフレームで基地局からチャネル割当てパケットを受信できないのは、次の二つの場合がある。一つは、端末が送信した予約パケットが、他の端末の送信した予約パケットと衝突した場合である。そして、他方は、予約パケットの送信には成功したが、下り制御サブフレームの容量不足により、基地局が該当端末に対してチャネル割当てパケットを送信できなかった場合である。すなわち、一つのフレームで、下り制御サブフレーム内の小スロット数 C を超える予約パケットを基地局が受信した場合、基地局は、最初に到着した C 個の予約パケットに対するチャネル割当てパケットしか送信できない。本論文では、この場合、基地局は、残りの予約パケットに対するチャネル割当てパケットの送信を断念するものとする。これらの二つの場合に、該当

端末はランダム遅延を置いて以後のフレームで予約パケットの再送を行う。

端末で発生したメッセージのあて先は、同じセル内の端末である場合と他セルの端末である場合とがある。基地局が、同じセル内の端末に向けられたメッセージを受信し終えた場合、基地局は、そのメッセージを基地局内の下り方向待ち行列に加える。一方、基地局が、他のセルに向けられたメッセージを受信し終えた場合には、基地局は、そのメッセージを基地局内の外方向待ち行列に加える。この待ち行列に加えられたメッセージは、有線 LAN を用いて相手端末の所属するセルの基地局に送信される。

一方、基地局は、有線側で受信のアドレスフィルタリングを行い、自セルあてのメッセージのみを受け取る。受信処理後、そのメッセージが送信可能となると、基地局はそれを下り方向待ち行列に加える。この待ち行列に加わっているメッセージの送信には、下りデータサブフレームのスロットが用いられる。基地局は、下り方向待ち行列に加わっているメッセージを、先頭のメッセージから順に、あて先の端末に向けて送信する。

3. TDD アロハ形予約プロトコルの解析

3.1 モデル化のための仮定

TDD アロハ形予約プロトコルを解析する際に、次の仮定をおく。

- (A1) セル内の端末数を M とする。
- (A2) セル内の各端末は、フレーム当たり確率 α で、フレームの終了時点にメッセージを発生する。
- (A3) セル内の端末が発生する一つのメッセージは、1個以上のパケットからなり、その数は、平均 $h_c = 1/\gamma_c$ の幾何分布をなす。
- (A4) 一つのメッセージのあて先は、自セルの端末である場合と、他セルの端末である場合とがある。一つのメッセージが自セルの端末あてである確率を a 、他セルの端末あてである確率を $1-a$ とする。
- (A5) 無線チャネルの伝搬遅延時間は無視する。
- (A6) 衝突以外の伝送誤りは無視する。
- (A7) 上り制御サブフレームの小スロット数 K は、下り制御サブフレームの小スロット数 C と等しいとする。このとき、一つのフレームで、基地局がある端末からの予約パケットを正しく受信した場合、基地局は、その端末に対するチャネル割当てパケットを、必ずそのフレームの下り制御サブフレーム内の小スロ

トを用いて送信することができる（解析の簡単のために、この仮定をおいた）。

(A 8) あるフレームで一つのメッセージを発生した端末は、次のフレームからフレーム当り確率 β で予約パケットの送信を行う。

(A 9) あるフレームで予約パケットの送信に失敗した端末は、後のフレームにおいてフレーム当り確率 β で予約パケットの再送を行う。

(A 10) あるフレームで基地局が自セルの端末に向けられたメッセージを受信し終えた場合を考える。この場合、同じフレームの終了時点で、基地局によるそのメッセージの送信が可能となり、下り方向待ち行列にそれが加えられると仮定する。

(A 11) セル内の一つの端末が自分あてのメッセージを受信し終えた場合、その端末は、一つの応答メッセージを発生する。ここでは、応答メッセージの準備期間を考慮して、あるフレームで、端末が自分あてのメッセージを受信し終えると、その応答メッセージは、次のフレームの終了時点から送信可能となると仮定する。

(A 12) 自セルの端末が発生した応答メッセージの長さは、平均 $h_i = 1/\gamma_i$ の幾何分布に従う。

(A 13) 自端末で発生したメッセージの送信要求と相手端末からのメッセージに対する応答メッセージの返送要求が同時に発生した場合には、応答メッセージを最初に送信する（この仮定は、解析の簡単のためにおいた。シミュレーションでは、この仮定の代わりに、後述の仮定 S 13 を用いる）。

(A 14) 基地局が、あるフレームで他セルの端末に向けられたメッセージを受信し終えた場合を考える。この場合、基地局は、そのメッセージを相手端末の所属するセルの基地局を経由してあて先の端末に送信する。相手端末は、送信元端末からのメッセージを受信すると、一つの応答メッセージを返送する。そして、その応答メッセージは、送信元端末のあるセルの基地局を通じて、その端末に届けられる。このとき、基地局が他セルあてのメッセージを受信し終えたフレームの終了時点から、対応する応答メッセージを受け取り送信可能となるフレームの終了時点までの時間は、平均 $1/b$ フレームの幾何分布をなすものと仮定する。但し、送信可能となるのは、フレームの終了時点のみであるとする。

(A 15) 他セルの端末が発生した応答メッセージの長さは、平均 $h_o = 1/\gamma_o$ の幾何分布に従う（一般に、実

際のネットワーク上の各端末で発生するメッセージの長さは、通信サービスの種類 [FTP, Telnet 等] に依存し、更に、通信要求側端末 [クライアント端末] か応答サービス側端末 [サーバ端末] かによっても異なる。このため、必ずしも h_i と h_o とが等しくなるとは限らない）。

(A 16) 一つの端末は、一つのメッセージを発生すると、それに対応した応答メッセージを受信するフレームの終了時点まで、次のメッセージを発生しない。

(A 17) 一つの端末が、応答メッセージを待っているとき、その端末の状態を、相手端末が送信する応答メッセージの状態によって表現する（この仮定は、ACK 仮説⁹⁾と同様の考え方に基づいている）。

3.2 モデル図

以上のすべての条件のもとで作成した近似モデルを図 3 に示す。図 3 のモデルにおいては、モード間の遷移は、各フレームの開始時点でのみ起こる。このモデル図は、各フレームの開始時点（モード遷移が生じた直後）のシステムの状態に着目して作成している。モードの名称に U, D, C, R がある場合、これらは、各々、Uplink, Downlink, Command, Response を意味している。但し、D (delay) モードは除く。

図中のモードの意味は、次のとおりである。T モードは、端末が送信すべきメッセージをもっていない状態を表し、仮定 (A 2) に従う。TC モードは端末が送信すべきメッセージをもっているが、まだ、予約パケットの送信に成功していない状態を表し、仮定 (A 8)、(A 9) に従う。WUC モードは、メッセージを送信しようとしている端末が基地局から上りデータサブフレーム内のスロットを割り当てられている状態を表す。このモードにある端末は、仮定 (A 4) により、WDC または D モードに遷移する。D モードは、他セルの端末に向けられた一つのメッセージを基地局が受信し終えた

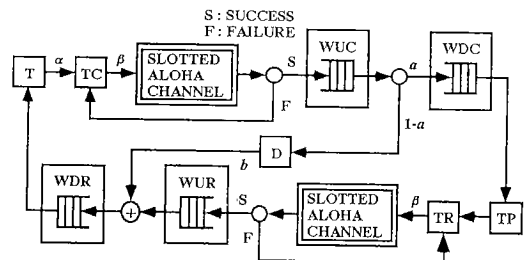


図 3 TDD アロハ予約プロトコルの近似モデル
Fig. 3 An approximate model of TDD ALOHA-Reservation.

が、まだ、それに対応して相手端末が返送した応答メッセージが基地局に到着していない状態を表す。このモードには、仮定(A 14)が用いられている。一方、WDC モードは、基地局が下りデータサブフレーム内のスロットを用いて、同じセル内に向けられたメッセージを送信しようとしている状態を表す。TP モードは、相手端末が応答メッセージ送信のための準備を行っている状態を意味している。このモードには、仮定(A 11), (A 17)が用いられている。TR, WUR, WDR の各モードは、応答メッセージが返送される様子を示したものであり、これらのモードにも、仮定(A 17)が用いられている。TR モードは、自端末の送信したメッセージに対する応答メッセージを相手端末が発生しているが、まだ、相手端末が予約パケットの送信に成功していない状態を表す。WUR モードは、応答メッセージを返送しようとしている相手端末が基地局から上りデータサブフレーム内のスロットを割り当てられている状態を表す。WDR モードは、基地局が自端末に応答メッセージを返送しようとしている状態を意味する。

3.3 平衡点解析

図3のモデルを、平衡点解析(EPA)⁽⁷⁾の手法により解析する。そのために、図3のモデルにおいて、TC, WUC, WDC, TP, TR, WUR, D, WDR の各モードにある端末数を表す確率変数を、各々、 $t_c, w_{uc}, w_{dc}, t_p, t_r, w_{ur}, d, w_{dr}$ と定義する。このとき、このシステムの状態ベクトル \mathbf{n} は、 $\mathbf{n} \triangleq (t_c, w_{uc}, w_{dc}, t_p, t_r, w_{ur}, d, w_{dr})$ と定義される。更に、平衡点を $\mathbf{n}_e \triangleq (t_{ce}, w_{uce}, w_{dce}, t_{pe}, t_{re}, w_{ure}, d_e, w_{dre})$ と表すことにする。

まず、システムが状態 \mathbf{n} にあるという条件のもとで、1フレーム当り予約パケットの送信に成功するTCモードにある端末の数の条件付き期待値とTRモードにある端末の数の条件付き期待値を、各々、 $f_c(\mathbf{n}), f_r(\mathbf{n})$ とする。次に、システムの状態が \mathbf{n} であるという条件のもとで、1フレーム当りWUCモードを出ていく端末の数の条件付き期待値を $X_c(\mathbf{n})$ とする。更に、WDC, WUR, WDR の各モードに関する同様の変数を各々、 $Y_c(\mathbf{n}), X_r(\mathbf{n}), Y_r(\mathbf{n})$ とする。

このとき、システムの状態が \mathbf{n} であるという条件のもとで、各モードにおける1フレーム当りの増加端末数の条件付き期待値を計算して0とおき、独立な式をまとめる(フローバランスの式を求める)。そして、それらの式を整理すると、次式が得られる。

$$Y_r(\mathbf{n}_e) = (M - t_{ce} - w_{uce} - w_{dce} - t_{pe} - t_{re} - w_{ure} - d_e - w_{dre})\alpha \quad (2)$$

$$aX_c(\mathbf{n}_e) = aY_r(\mathbf{n}_e) = af_c(\mathbf{n}_e) = X_r(\mathbf{n}_e) = Y_c(\mathbf{n}_e) = f_r(\mathbf{n}_e) = t_{re} \quad (3)$$

$$(1-a)X_c(\mathbf{n}_e) = bd_e \quad (4)$$

今、システムが状態 \mathbf{n} にあるとして、1フレーム当り予約パケットの送信に成功する端末の数の条件付き期待値を $f_A(\mathbf{n})$ とすると、これは、次のように書ける⁽⁶⁾。

$$f_A(\mathbf{n}) = (t_c + t_r)\beta(1 - \beta/K)^{t_c + t_r - 1} \quad (5)$$

このとき、 $f_A(\mathbf{n}) = f_c(\mathbf{n}) + f_r(\mathbf{n})$ が成り立つので、式(3)より次の関係が成立する。

$$af_c(\mathbf{n}_e) = f_r(\mathbf{n}_e) = af_A(\mathbf{n}_e)/(1+a) \quad (6)$$

ここで、 $f_c(\mathbf{n}_e)$ および $f_r(\mathbf{n}_e)$ を具体的に与えるために次の近似を行う。

$$f_c(\mathbf{n}_e)/f_r(\mathbf{n}_e) = t_{ce}\beta/t_{re}\beta \quad (7)$$

上式は、 $f_c(\mathbf{n}_e)$ と $f_r(\mathbf{n}_e)$ との比を、平衡点において、1フレーム当りに予約パケットの送信を行うTCモードの端末数と、TRモードの端末数との比で近似している。このとき、式(3), (7)より次の関係が成り立つ。

$$at_{ce} = t_{re} \quad (8)$$

従って、式(5), (6), (8)から次の式が成立する。

$$af_c(\mathbf{n}_e) = f_r(\mathbf{n}_e) = at_{ce}\beta(1 - \beta/K)^{(1+a)t_{ce} - 1} \quad (9)$$

また、WUCモードの端末とWURモードの端末は、実際には、同じ待ち行列(上り方向待ち行列)に加わっている。一方、WDCモードの端末とWDRモードの端末も、実際には、同じ待ち行列(下り方向待ち行列)に加わっている。ここで、上り方向および下り方向待ち行列に加わっている端末数を表す確率変数を各々 w_u, w_d とすると、次の式が成り立つ。

$$w_u \triangleq w_{uc} + w_{ur} \quad (10)$$

$$w_d \triangleq w_{dc} + w_{dr} \quad (11)$$

EPAでは、ある確率変数の期待値は、その確率変数の平衡点における値で近似される⁽⁷⁾。従って、式(10), (11)は平衡点 \mathbf{n}_e でも成り立つ。ここで、 w_{uce} と w_{ure} , w_{dce} と w_{dre} との比を具体的に計算することは困難であるので、式(7)と同様の次の近似をする。

$$w_{uce}/w_{ure} = X_c(\mathbf{n}_e)/X_r(\mathbf{n}_e) \quad (12)$$

$$w_{dce}/w_{dre} = Y_c(\mathbf{n}_e)/Y_r(\mathbf{n}_e) \quad (13)$$

このとき、式(3), (10)~(13)より次式が成立する。

$$aw_{uce} = w_{ure} = aw_{ue}/(1+a) \quad (14)$$

$$w_{dce} = aw_{dre} = aw_{de}/(1+a) \quad (15)$$

次に、上り方向待ち行列と下り方向待ち行列について考える。これらの待ち行列系は、フィードバックを伴った複雑な待ち行列系であり、これらを厳密に解析

することは困難である。そこで、文献(6)と同様に、上り方向および下り方向待ち行列を、各々、客がフレーム周期で集団到着する $D/G/1$ 待ち行列とみなす。

まず、上り方向あるいは下り方向待ち行列の一つの到着集団に含まれる客数については、各々、1フレーム当り WUC モードおよび WUR モードに入る端末数の和 $f_c(\mathbf{n}_e) + f_R(\mathbf{n}_e)$ 、1フレーム当り WDC モードおよび WDR モードに入る端末数の和 $aX_c(\mathbf{n}_e) + bde + X_R(\mathbf{n}_e)$ に等しいと仮定する。これらは、式(3)、(4)、(6)より、ともに $f_A(\mathbf{n}_e)$ と等しくなる。そして、上り方向および下り方向待ち行列の一つの到着集団に含まれる客数の分布を、ともに平均 $f_A(\mathbf{n}_e)$ のポアソン分布で近似する⁽⁶⁾。

続いて、サービス時間について考える。上り方向あるいは下り方向待ち行列に加わった端末に対するサービス時間が x スロットである確率を各々、 $P_U(x)$ 、 $P_D(x)$ とする。ここで、文献(11)と同様の議論を用いると、 $P_U(x)$ と $P_D(x)$ は、仮定(A3)、(A4)、(A12)、(A15)から、各々、次のように表される。

$$P_U(x) = \frac{\gamma_c(1-\gamma_c)^{x-1}}{1+a} + \frac{a\gamma_l(1-\gamma_l)^{x-1}}{1+a}$$

$$x=1, 2, 3, \dots \tag{16}$$

$$P_D(x) = \frac{a\gamma_c(1-\gamma_c)^{x-1}}{1+a} + \frac{a\gamma_l(1-\gamma_l)^{x-1}}{1+a} + \frac{(1-a)\gamma_o(1-\gamma_o)^{x-1}}{1+a}$$

$$x=1, 2, 3, \dots \tag{17}$$

ここでは、上りデータサブフレーム長を L スロット長、下りデータサブフレーム長を N スロット長としている。従って、上り方向あるいは下り方向待ち行列のサービス時間の平均を各々、 s_u, s_d 、変動係数を各々、 c_{su}, c_{sd} とすると、これらは次のように書ける。

$$s_u = \frac{a\gamma_c + \gamma_l}{L(1+a)\gamma_c\gamma_l} \quad [\text{フレーム}] \tag{18}$$

$$c_{su}^2 = \frac{2(1+a)\{a\gamma_c^2(1-\gamma_l) + (1-\gamma_c)\gamma_l^2\} + (1+a)(a\gamma_c + \gamma_l)\gamma_c\gamma_l - (a\gamma_c + \gamma_l)^2}{(a\gamma_c + \gamma_l)^2} \tag{19}$$

$$s_d = \frac{a(\gamma_c + \gamma_l)\gamma_o + (1-a)\gamma_c\gamma_l}{N(1+a)\gamma_c\gamma_l\gamma_o} \quad [\text{フレーム}] \tag{20}$$

$$c_{sd}^2 = \frac{(1+a)\{a\gamma_c^2\{(2-\gamma_c)\gamma_l^2 + \gamma_c^2(2-\gamma_l)\}\} + (1-a)\gamma_c^2\gamma_l^2(2-\gamma_o)}{\{a(\gamma_c + \gamma_l)\gamma_o + (1-a)\gamma_c\gamma_l\}^2} - 1 \tag{21}$$

ここで、1人の客が、 $GI/G/1$ 待ち行列内に留まる

平均時間に関して得られている近似式⁽¹²⁾ と、リトルの公式を利用すると、次の関係が成り立つ。

$$w_{ue} = \rho_u + \frac{\rho_u s_u \{1 - \exp(-\rho_u/s_u)\}(1 + c_{su}^2)}{2(1 - \rho_u)} \cdot \exp\left[\frac{-2(1 - \rho_u)\{1 - \exp(-\rho_u/s_u)\}}{3s_u(1 + c_{su}^2)}\right] + \rho_u^2/2s_u \tag{22}$$

$$w_{de} = \rho_d + \frac{\rho_d s_d \{1 - \exp(-\rho_d/s_d)\}(1 + c_{sd}^2)}{2(1 - \rho_d)} \cdot \exp\left[\frac{-2(1 - \rho_d)\{1 - \exp(-\rho_d/s_d)\}}{3s_d(1 + c_{sd}^2)}\right] + \rho_d^2/2s_d \tag{23}$$

上式で、 ρ_u と ρ_d は、各々、上り方向および下り方向待ち行列の窓口利用率を表しており、これらは式(18)、(20)より、各々、次のように表される。

$$\rho_u = f_A(\mathbf{n}_e) s_u = \frac{f_A(\mathbf{n}_e)(a\gamma_c + \gamma_l)}{L(1+a)\gamma_c\gamma_l} \tag{24}$$

$$\rho_d = f_A(\mathbf{n}_e) s_d = \frac{f_A(\mathbf{n}_e)\{a(\gamma_c + \gamma_l)\gamma_o + (1-a)\gamma_c\gamma_l\}}{N(1+a)\gamma_c\gamma_l\gamma_o} \tag{25}$$

ここで、式(24)、(25)より次の関係が成り立つ。

$$\frac{\rho_d}{\rho_u} = \frac{L\{a(\gamma_c + \gamma_l)\gamma_o + (1-a)\gamma_c\gamma_l\}}{N\gamma_o(a\gamma_c + \gamma_l)} \tag{26}$$

更に、式(4)と式(3)、(6)、(24)より

$$d_e = \frac{(1-a)L\rho_u\gamma_c\gamma_l}{b(a\gamma_c + \gamma_l)} \tag{27}$$

となる。また、式(2)を式(3)、(6)、(8)、(10)、(11)、(24)を用いて整理すると次の式を導出できる。

$$t_{ce} = \frac{1}{1+a} \left\{ M - w_{ue} - w_{de} - d_e - \frac{(a\alpha + 1)L\rho_u\gamma_c\gamma_l}{(a\gamma_c + \gamma_l)\alpha} \right\} \tag{28}$$

最後に、式(5)、(8)、(24)より次の関係式が成り立つ。

$$(1+a)t_{ce}\beta(1-\beta/K)^{(1+a)t_{ce}-1} = \frac{L\rho_u(1+a)\gamma_D\gamma_l}{a\gamma_c + \gamma_l} \tag{29}$$

式(18)~(23)、(26)~(29)は、 ρ_u に関して数値的に解くことができる。この根から、平衡点 \mathbf{n}_e を求めることができる(システムパラメータの値によっては、方程式が根をもたない領域がわずかに見られた。これは、解析の際、上り方向および下り方向待ち行列を $GI/G/1$ 待ち行列で近似したことが影響していると考えられるが、厳密な検討は行っていない)。

3.4 スループット、平均メッセージ遅延および平均応答時間

まず、スループットについて考える。ここでは、上

りスループット \bar{S}_U を、1パケット伝送時間当りに送信される上り(端末-基地局)方向のパケットの平均数、下りスループット \bar{S}_D を、1パケット伝送時間当りに送信される下り(基地局-端末)方向のパケットの平均数と定義する。文献(6)と同様の議論により、 \bar{S}_U および \bar{S}_D は、次のように表すことができる。

$$\bar{S}_U = L\rho_U/F \quad (30)$$

$$\bar{S}_D = N\rho_D/F \quad (31)$$

次に、平均メッセージ遅延と平均応答時間について考える。ここでは、上り平均メッセージ遅延 D_U を、端末でメッセージまたは応答メッセージが発生してから、それが基地局で完全に受信されるまでの平均スロット数と定義する。また、下り平均メッセージ遅延 D_D を、基地局でメッセージまたは応答メッセージが送信可能となってから、それが端末で完全に受信されるまでの平均スロット数と定義する。更に、自セルあてのメッセージに対する平均応答時間 D_I を、一つの端末が自セル内の他端末あてのメッセージが発生してからそれに対する応答メッセージを受信し終えるまでの平均スロット数、他セルあてのメッセージに対する平均応答時間 D_O を、一つの端末が他セルの端末あてのメッセージが発生してからそれに対する応答メッセージを受信し終えるまでの平均スロット数と定義する。これらは、文献(6)とほぼ同様の議論により、次のように表すことができる。

$$D_U = \frac{(a\gamma_C + \gamma_I)(t_{ce} + t_{re} + w_{uce} + w_{ure})}{(1+a)\bar{S}_U\gamma_C\gamma_I} + \frac{1-L-2N-2C\eta}{2} \quad [\text{スロット}] \quad (32)$$

$$D_D = \frac{\{a(\gamma_C + \gamma_I)\gamma_O + (1-a)\gamma_C\gamma_I\}(w_{dce} + w_{dre})}{(1+a)\bar{S}_D\gamma_C\gamma_I\gamma_O} + \frac{1+2K\eta+2L-N-2C\eta}{2} \quad [\text{スロット}] \quad (33)$$

$$D_I = \frac{\left[\bar{S}_D\gamma_O(a\gamma_C + \gamma_I)\{a(t_{ce} + w_{uce}) + t_{re} + w_{ure}\} + \bar{S}_U\{a(\gamma_C + \gamma_I)\gamma_O + (1-a)\gamma_C\gamma_I\}(w_{dce} + w_{dre}) \right]}{a\bar{S}_U\bar{S}_D\gamma_C\gamma_I\gamma_O} + \frac{1+2K\eta+2L+N}{2} \quad [\text{スロット}] \quad (34)$$

$$D_O = \frac{\left[\bar{S}_D\gamma_O(a\gamma_C + \gamma_I)(t_{ce} + w_{uce}) + \bar{S}_U\{a(\gamma_C + \gamma_I)\gamma_O + (1-a)\gamma_C\gamma_I\}w_{dre} \right]}{\bar{S}_U\bar{S}_D\gamma_C\gamma_I\gamma_O} + \frac{F}{b} + \frac{1-N-2C\eta}{2} \quad [\text{スロット}] \quad (35)$$

但し、式(33)の D_D を計算する際、 $(K\eta+L)$ を補正項として加算している。これは、下り方向待ち行列が休止期間を含む離散時間待ち行列であるにもかかわらず、式(23)は休止期間のない連続時間待ち行列の公式を用いて得られていることを考慮したものである。すなわち、端末が *WDC* または *WDR* モードに遷移するのは、フレームの開始時点であるにもかかわらず、実際には、そのフレームの下りデータサブフレームの開始時点まではパケットの送信ができないという休止期間を表現したものである。

4. 数値例

本章では、まず、EPA による解析結果の精度をシミュレーションにより調べる。そして、与えられたトラヒック条件のもとでの、 K, L, N, C の値とシステム性能との関係を議論する。以下の数値例においては、 $M=30, L+N=20, \eta=0.2$ (データパケット長を 1000 ビット、制御パケット長を 200 ビット) とし、無線チャンネルの伝送速度を 10 Mbit/s としている。この条件のもとでは、1スロット長は 0.1 ms となる。そして、以下の図における平均メッセージ遅延と平均応答時間とは、秒を単位として表されている。また、シミュレーションでは、仮定(A1)~(A12)および(A14)~(A16)のほか、更に次の仮定をおく。

(S13) 自端末で発生したメッセージの送信要求と、相手端末からのメッセージに対する応答メッセージの返送要求が同時に発生した場合には、先着順にメッセージまたは応答メッセージの送信を行う。

(S18) 端末で発生したメッセージのあて先が同じセル内の端末である場合、発生メッセージは、他のすべての端末の各々に対して等確率で向けられる。

(S19) 基地局において、自セルの端末から送信されたメッセージまたは応答メッセージと、他セルの端末から送信された応答メッセージとが同一フレームで送信可能となった場合、自セルの端末から送信されたメッセージまたは応答メッセージの送信を先に行う。

以下の図において、EPA による理論値およびシミュレーション値の表記法は、EPA の慣例⁽⁷⁾に従っている。まず、理論値は実線と破線で表されている。破線が現れている場合には、システムは双安定(不安定)になっている。このとき、スループットが大きい方の局所安定平衡点に対する理論値を破線で、スループットが小さい方のそれを実線で示している。また、シミュレーション結果は、○△□等の記号で示している。

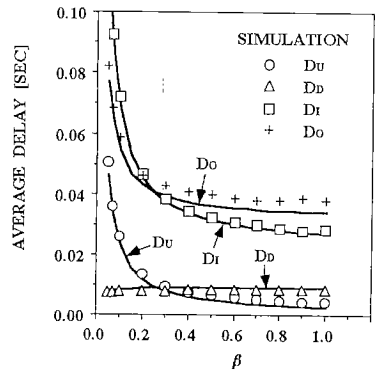
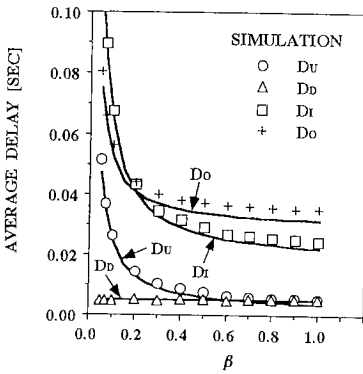
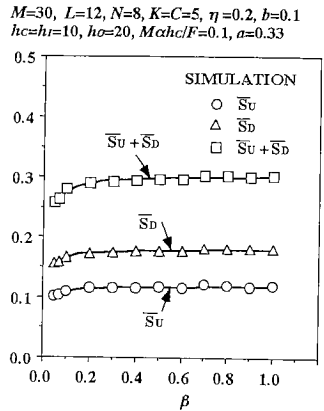
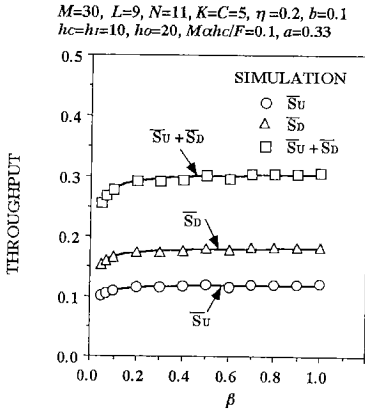


図4 スループットおよび平均遅延と β との関係(1)
 Fig. 4 Throughput and average delay vs. β (1).

図5 スループットおよび平均遅延と β との関係(2)
 Fig. 5 Throughput and average delay vs. β (2).

これらの記号において、黒く塗りつぶしてあるものとは、各々、シミュレーションの初期状態において、すべての端末が送信すべきメッセージをもっている場合と、もっていない場合を表す。また、シミュレーションランの長さは、55,000 フレームとし、95%信頼区間も求めている。但し、信頼区間は、ほとんどの場合、これらの記号の大きさより小さいため、以下の図では示していない。

図4～図7にスループットおよび平均遅延(平均メッセージ遅延または平均応答時間)と送信確率 β との関係を示す。図4および図5は、 $K=C=5, b=0.1, hc=h_t=10, h_o=20, Mahc/F=0.1, a=0.33$ の場合である。図4では、 $L=9, N=11$ 、図5では、 $L=12, N=8$ としている。また、図6は、 $L=N=10, K=C=5, hc=h_t=10, Mahc/F=0.15, a=1.0$ の場合である。図7では、 $L=N=10, K=C=2, hc=h_t=10, Mahc/F=0.05, a=1.0$ としている。

まず、これらの図において、理論値とシミュレーション

値とを比較する。図4～図7から、スループットと下り平均メッセージ遅延に関しては、理論値とシミュレーション値とはよく一致していることがわかる。また、上り平均メッセージ遅延と平均応答時間については、理論値とシミュレーション値との間にいく分の差が見られる場合がある。

一般に、ランダムアクセスプロトコルを用いたシステムでは、衝突によるチャネル飽和現象が起こり、システムが不安定になることがある。そこで、次に、図4～図7を用いて、この安定性の問題について議論する。図4～図6では、すべての β の値に対してシステムは安定となっている。しかし、図7ではシステムが不安定となる領域が見られる。この場合には、上り制御サブフレームの小スロット数が少ない。このため、 β の値を大きくしすぎると、衝突が頻繁に発生して、システムが不安定となる。また、図7においてシステムが不安定となる β のしきい値の理論値は、シミュレーション結果が示すものよりも小さくなっている。しか

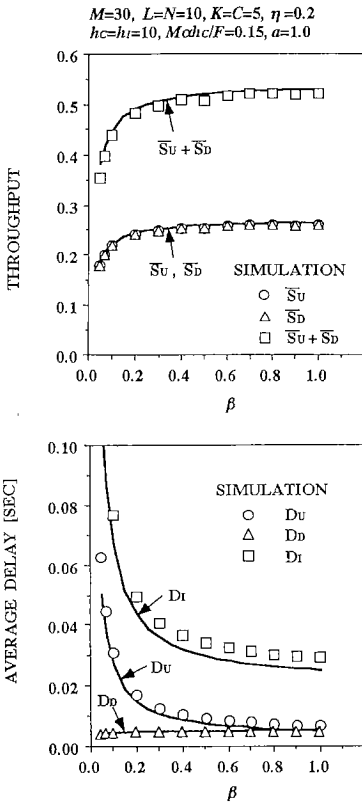


図 6 スループットおよび平均遅延と β との関係(3)
Fig.6 Throughput and average delay vs. β (3).

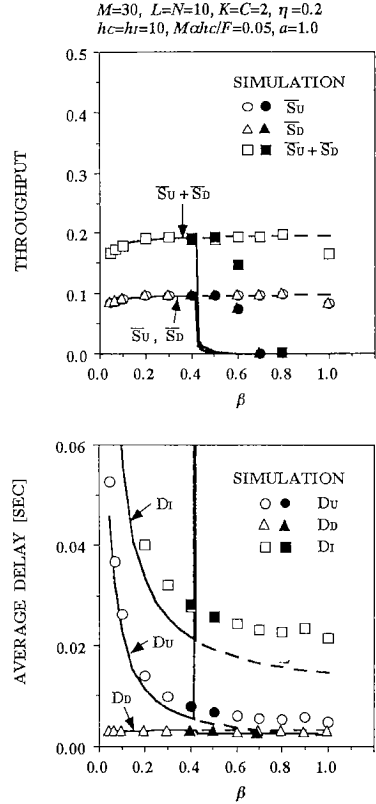


図 7 スループットおよび平均遅延と β との関係(4)
Fig.7 Throughput and average delay vs. β (4).

し、理論値から得られた β のしきい値付近においては、2種類のシミュレーションの結果から解釈すれば⁽⁷⁾、システムは安定となっている。従って、システム設計の観点からすれば、これは安全側の誤差である。この誤差は、上り方向および下り方向待ち行列を、GI/G/1待ち行列で近似したことが大きく影響していると考えられるが、厳密な検討は行っていない。

ここで、図7の不安定領域における理論値に注目する。まず、上り平均メッセージ遅延については、従来のEPAによる解析結果と同様の結果が得られている⁽⁷⁾。すなわち、二つの理論値のうち、破線で示されている方の理論値は、安定なシステムの理論値とほぼ同じ値となっているが、実線で示された方の理論値は、破線で示されているものよりもはるかに大きな値となっている。これは、システムが不安定になると、上り平均メッセージ遅延は急激に増加する可能性があることに対応している。このとき、上りスループットは0に近い値となる。一方、下り平均メッセージ遅延の場

合には、以前の解析では見られなかった結果が得られている。すなわち、二つの理論値のうち、実線で示された方の理論値は、破線で示されているものよりもやや小さな値となっている。不安定なシステムにおいて、上りスループットが0に近い値となった場合、基地局は、上りチャンネルからのメッセージをほとんど受信しなくなる。このとき、下りチャンネルへの入力率も極めて小さくなるため、下り平均メッセージ遅延の値も小さくなるのである。

次に、図4および図5より、 L および N の値を変化させたときのシステム性能への影響を検討する。これらの図から、 L の値を大きくし、 N の値を小さくするほど、上り平均メッセージ遅延の値は小さくなり、下り平均メッセージ遅延の値は大きくなることがわかる。ここで、このプロトコル設計の際問題となるのは、システム性能を最適にする L と N の比である。そこで、次にこの問題について検討する。

図8および図9に、最小平均応答時間の値を L の関

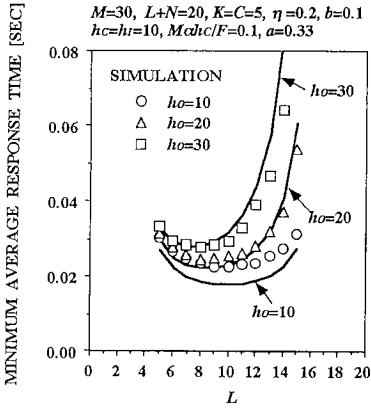


図 8 最小平均応答時間と L との関係 (1) : $a=0.33$
 Fig. 8 Minimum average response time vs. L (1) : $a=0.33$.

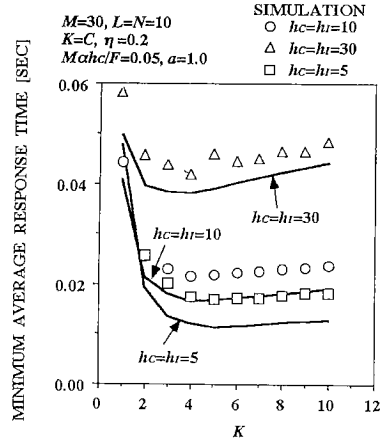


図 10 最小平均応答時間と K との関係
 Fig. 10 Minimum average response time vs. K .

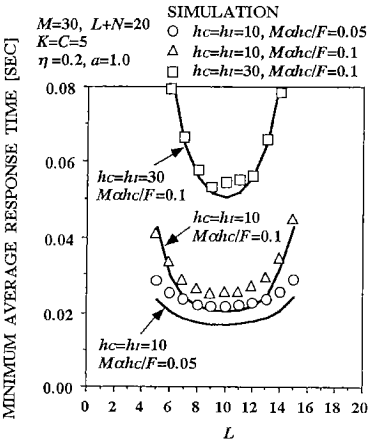


図 9 最小平均応答時間と L との関係 (2) : $a=1.0$
 Fig. 9 Minimum average response time vs. L (2) : $a=1.0$

数として示す。ここで、最小平均応答時間とは、システムが安定であるという条件のもとで、平均応答時間の値が最も小さくなるように β の値を選んだときの平均応答時間の値である。これらの図では、 $L+N=20$, $K=C=5$ としており、自セルあてのメッセージに対する平均応答時間 D_i の最小値を示している。

図 8 は、 $b=0.1$, $h_c=h_l=10$, $Mah_c/F=0.1$, $a=0.33$ とした場合であり、 h_o の値を 10, 20, 30 と変化させている。この図の理論値から、システム性能が最も良くなる L の値は、各々、10, 9, 7 であることがわかる。また、シミュレーション値においてもほぼ同じ結果が見られる。図 8 の条件のもとでは、 h_o の値が大きいか

ど、下りチャンネルのトラヒック量が上りチャンネルのトラヒック量と比較して大きくなる。従って、 h_o の値が大きいかほど、 N の値を大きくして、 L の値を小さくすべきであるということになる。

また、図 9 では $a=1.0$ としている。この図には、(1) $h_c=h_l=10$, $Mah_c/F=0.05$, (2) $h_c=h_l=10$, $Mah_c/F=0.1$, (3) $h_c=h_l=30$, $Mah_c/F=0.1$ の 3 通りの場合を示している。この図から、負荷が大きく平均メッセージ長が大きいかほど、 L の値を変化させたときのシステム性能への影響も大きくなることがわかる。

最後に、図 10 は、 $L=N=10$, $K=C$, $Mah_c/F=0.05$, $a=1.0$ としたときの K の値と最小平均応答時間との関係を示したものである。この図には、 $h_c=h_l=5$, $h_c=h_l=10$, $h_c=h_l=30$ の 3 通りの場合を示している。図 10 から、 K の値を小さくしすぎるとシステム性能は著しく劣下することがわかる。これは、上り制御サブフレームの容量が小さすぎると、予約パケットの衝突が頻繁に発生するからである。しかし、 K の値を大きくしすぎると、フレーム長が長くなるため性能が徐々に劣下する。

5. むすび

本論文では、まず、TDD アロハ形予約プロトコルを平衡点解析 (EPA) の手法により解析した。解析の際には、下り制御サブフレームの容量が上り制御サブフレームの容量と同じであるという条件を設けた。その結果、スループットや下り平均メッセージ遅延に関し

ては、理論値とシミュレーション値とはよく一致した。また、上り平均メッセージ遅延と平均応答時間については、理論値とシミュレーション値との間には、いく分差が見られた。

次に、上りデータサブフレームのスロット数 L および下りデータサブフレームのスロット数 N とシステム性能との関係を調べた。その結果、平均メッセージ長や負荷が大きいほど、 L や N の値がシステム性能に大きな影響を及ぼし、従って、これらの値を慎重に選択する必要があることがわかった。最後に、上り制御サブフレームの小スロット数 K のシステム性能への影響も調べた。

本論文で行った解析では、上りと下りの制御サブフレームの容量を同じと仮定した。しかし、上り制御サブフレームがセル内の全端末で共有されるのに対し、下り制御サブフレームを用いるのは基地局のみである。このため、下り制御サブフレームの容量は、上り制御サブフレームの容量よりも小さくてよいと考えられる。このため、今後の課題としては、まず、この仮定を取り除いて解析することが考えられる。また、本論文では、各サブフレーム長を固定として議論した。しかし、TDD チャンネルの特徴を活用するためには、トラフィック状況の変化に応じて、各サブフレームの容量を動的に変化させることが望ましい。更に、複数のセルを対象とした場合や、データトラフィックのみならず音声等も含めたマルチメディアトラフィックを考慮した場合のモデル化や解析を行うことも重要である。

謝辞 本研究は、高柳記念電子科学技術振興財団平成4年度研究助成金によって行われた。

文 献

- (1) Freeburg T. A.: "Enabling technologies for wireless in-building network communication-Four technical challenges, four solutions", IEEE Commun. Mag., 29, pp. 58-64 (April 1991).
- (2) Buchholz D., Odlyzko P., Taylor M. and White R.: "Wireless in-building network architecture and protocols", IEEE Network Mag., 5, pp. 31-38 (Nov. 1991).
- (3) 春山秀朗, 嘉村幸一郎, 矢野基光, 木ノ内孝, 小澤和義, 小林 浩: "高速無線 LAN におけるランダムパルス送出 CSMA/CA 方式の特性評価", 信学技報, IN 92-68 (1992-10).
- (4) 滝安美弘: "無線 LAN に適したアクセス制御方式の検討", 信学技法, RCS92-37 (1992-07).
- (5) 坂本雄児, 青木由直: "構内無線ネットワークの構成法に関する考察", 信学技報, CS91-5 (1991-05).
- (6) Tasaka S. and Ishibashi Y.: "A reservation protocol for satellite packet communication—A performance analysis and stability considerations", IEEE Trans. Commun., COM-32, pp. 920-927 (Aug. 1984).
- (7) Tasaka S.: "Performance Analysis of Multiple Access Protocols", MIT Press, Cambridge, MA (1986).
- (8) Tobagi F. A. and Kleinrock L.: "Packet switching in radio channels: Part II—The hidden terminal problem in carrier sense multiple access and the busy tone solution", IEEE Trans. Commun., COM-23, pp. 1417-1433 (Dec. 1975).
- (9) 田坂修二, 深谷和義: "アロハ形予約衛星パケット通信網におけるアクノリッジ方式の解析", 信学論(B), J70-B, 7, pp. 780-790 (1987-07).
- (10) Suzuki T. and Tasaka S.: "A performance comparison of ALOHA—Reservation and PRMA in integrated voice and data wireless local area networks", Proc. IEEE TENCON'92, pp. 754-758 (1992-11).
- (11) 鈴木隆宏, 田坂修二: "衛星パケット通信網における MAC および LLC プロトコル構成法の比較", 信学論(B-1), J75-B-1, 4, pp. 205-216 (1992-04).
- (12) Krämer W. and Langenbach-Belz M.: "Approximate formulae for general single server systems with single and batch arrivals", Angew. Inform., 20, pp. 396-402 (1978).

(平成5年1月7日受付, 5月14日再受付)

鈴木 隆宏



平1名工大・工・電気情報卒, 平3同大大学院博士前期課程了, 同大大学院博士後期課程在学中, ローカルエリアネットワークおよび衛星パケット通信網の研究に従事。

田坂 修二



昭46名工大・工・電気卒, 昭51東大大学院博士課程了, 工博, 同年, 名工大情報勤務, 現在, 電気情報教授, 昭59~60 UCLA 客員研究員, 情報ネットワークの性能評価, ネットワークプロトコルの研究に従事, IEEE, ACM, 情報処理学会各会員。