

## 隠れ端末問題を考慮した新MAC二方式の評価

重野 寛      荒井 要      大西 祥浩  
横山 光男      松下 温

慶応大学理工学部

無線LANのMAC方式について考察する。無線データ通信特有の「隠れ端末問題」に焦点をあてて、代表的なMAC方式であるCSMA方式の性能に及ぼす影響を示す。さらに、この問題を解決するために、新MAC方式；CTMA (Channel Tone Multiple Access) 及びCRMA (Channel Reservation Multiple Access) を提案し、計算機シミュレーションによる評価を行った。その結果、両方式とも隠れ端末が存在しない場合のCSMA方式と同等かそれ以上の性能を示すことが判った。

## Performance Evaluation of New MAC Schemes as a Solution of the Hidden Terminal Problem

Hiroshi SHIGENO Kaname ARAI Yoshihiro OHNISHI  
Teruo YOKOYAMA Yutaka MATSUSHITA

Faculty of Science and Technology, Keio University

The existence of "hidden terminals" significantly degrades the performance of CSMA. First we discuss how it affects the performance of CSMA. Then, we propose both the Channel Tone Multiple Access (CTMA) and the Channel Reservation Multiple Access (CRMA) as a Media Access Control (MAC) for Wireless LAN to resolve the hidden terminal problem. Furthermore the above two MAC schemes are evaluated through computer simulations. The results show that both schemes outperform CSMA with no hidden terminals.

## 1. はじめに

有線LANのケーブリングの問題、つまり、困難なケーブリング計画や煩雑な接続作業、端末移動の自由度の低さとそのコストといった問題に対する一つの解答として、無線LAN[1][4][10]が注目されている。米国では1990年11月にIEEE802.11(Wireless LAN Working Group)[2][3]が設立され、その標準化作業に着手した。日本においても通産省や郵政省を中心にその実用化を探っている。

無線LANの伝送媒体として、準ミリ波帯電波、準マイクロ波帯電波、赤外線等が考えられる。媒体アクセス制御(MAC)方式は、これらの伝送媒体の特徴を考慮して設計されなければならないが、現在標準化されているMAC方式は何れも有線媒体をターゲットとしていると考えられる。

本稿では、無線LANのMAC方式に関して考察を加える。特に無線特有の問題である「隠れ端末問題」に焦点をあて、CSMA方式の性能に及ぼす影響について検討する。さらに、隠れ端末問題を考慮した新MAC方式としてCTMA方式及びCRMA方式の二方式を提案し、計算機シミュレーションによる性能評価の結果について報告する。

## 2. 隠れ端末問題とCSMA方式

無線チャンネルは、フェージングによる回線品質の劣化や受信強度の変動が生じ、理想的なチャンネルに比べて、複雑でダイナミックな特性を示す。理想的なチャンネルではすべての端末はお互いの通信を最大伝搬遅延以内にセンスできるという前提にあったが、無線チャンネルでは、端末間の距離が遠く電波が到達不可能であったり、途中で障害物があったりして互いに通信できないとき、お互いの通信が受信できない状態になることがある。それらの端末を互いに隠れ端末(hidden terminal)[4][6]であるという。Fig.1に示すように、無線ゾーンが中央局を中心に半径 $R$ の円形に広がっており、各無線端末が一つの無線チャンネルを共有しており、各無線端末からの通信到達範囲が $r$  ( $r \geq R$ ) であるとする。無線ゾーン内の全ての無線端末は中央局にとって通信可能な範囲内に存在しているため、中央局からは「見える端末」である。これに対して、無線ゾーン内の任意の二無線端末に着目したとき

- 無線端末間の距離 $d$ が、 $d > r$ である
  - 無線端末間に電波伝搬上の障害物がある
- などの理由で電波が到達しないとき、これらの無線端末は互いに隠れ端末の関係になる。

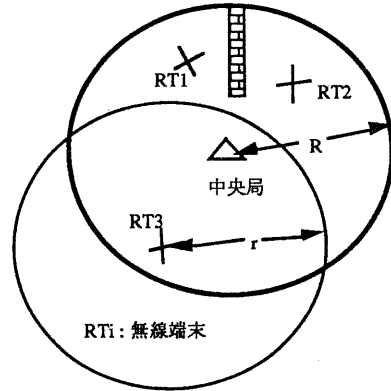


Fig.1 無線ゾーンと隠れ端末の概念

代表的なアクセス方式であるCSMA(Carrier Sense Multiple Access)方式[5][6]をこのような無線ゾーンに適用した場合、隠れ端末の関係にある無線端末間で互いに搬送波が検知できないので、パケットの衝突が増え、特性が劣化する。

隠れ端末の存在しない状態で、あるパケットの通信が成功する条件は、そのパケットがチャンネルに送出され始めた時刻 $t_{trans}$ から、最大伝搬遅延 $\tau$ 後まで他のパケットが送出されないことである。また、衝突によって、チャンネルが無駄に使用される時間は、パケット長を $T$ とすると、最大で $2\tau + T$ である(Fig.2 a)。

これに対して、隠れ端末が存在する状態では送信開始時刻 $t_{trans}$ から $\tau$ 経過した後でも、隠れ端末にはその通信が到達せず、パケットが送信される可能性がある。従って、あるパケットの通信が成功する条件は、 $t_{trans}$ から $\tau + T$ 後まで他のパケットが送出されないことである。また、二つパケットの衝突により、チャンネルが無駄に使用される時間は、最大で $2\tau + 2T$ である(Fig.2 b)。厳密には、この二つの通信をセンスすることのできない隠れ端末も存在し得るので、二つ以上のパケット間での衝突も考慮すると、この値は更に増加することになる。

つまり、隠れ端末の存在は、衝突の確率を増加させるばかりでなく、衝突によってチャンネルが無駄に使用される時間を増大させ、CSMA方式の特性を

かなり劣化させる。

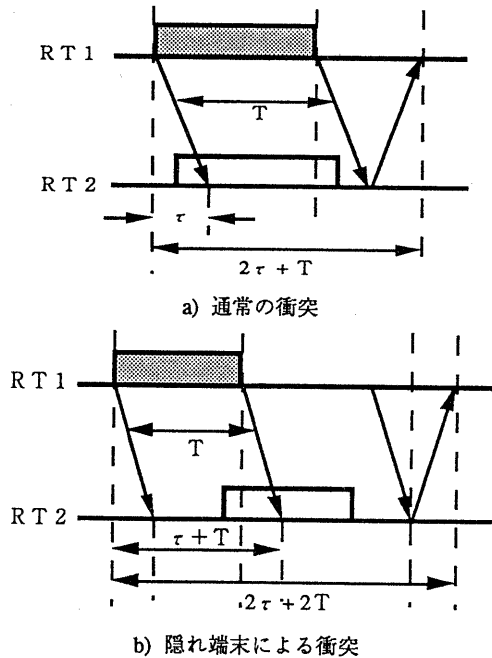


Fig.2 CSMA方式の packets 衝突と隠れ端末の影響

### 3. 隠れ端末問題を考慮したMAC方式

隠れ端末の存在を許容するか否かは、無線LANの構成に大きく影響する。隠れ端末を許さない場合、全無線端末が、お互いに受信できる範囲にあり、最大伝送遅延時間  $\tau$  以内にチャンネルの状況を把握できるので、無線チャンネルを一種のバス型とみなすことができ、有線系のMAC方式を最低限の変更で使用できかもしれない。反面、各無線端末の通信到達範囲  $r$  と無線ゾーン半径  $R$  の関係は  $R \leq r/2$  となり、相対的に狭い無線ゾーンしか確保できない(Fig.1参照)。また、無線ゾーン半径に対してゾーン内通信の影響範囲(干渉領域)が広いため、マルチゾーンを構成した場合チャンネル数が数多く必要となる。さらに無線端末を移動するときは、常に全ての無線端末に対して隠れ端末になっていないことをチェックする必要があり、無線LANの最大のメリットである端末移動の自由度を制限する結果につながりかねない。

一方、隠れ端末を許容するとすると無線ゾーン半径  $R$  は通信到達範囲  $r$  と同じにすることができる。無

線ゾーン半径に対して干渉範囲が相対的に狭いので、マルチゾーン構成をとった場合でも、チャンネル数は少なく済む。この場合は、送信が届いていない無線端末がゾーン中に存在するので、ときにはそれらの無線端末に通信を中継する必要があるかもしれない。しかし、このようなゾーン構成をとった場合は中央局が積極的に通信を制御できるため、問題とならないと考えられる。何よりも無線端末の移動に対して制約が少なく、無線ゾーン内に自由に端末を設置できることが最大のメリットであろう。ただし、CSMA方式にかわるMAC方式を検討する必要があることは言うまでもない。

### 3.1 CTMA(Channel Tone Multiple Access)方式

隠れ端末による性能劣化が無いようなMAC方式としてChannel Tone Multiple Access(CTMA)方式[12]を提案する。CTMA方式は、チャンネルトーンの有無からメッセージチャンネルの状態を判断して、メッセージの衝突を避ける方式である。

本方式では利用周波数帯域をデータ伝送用のメッセージチャンネルと通信の有無や衝突を知らせるチャンネルトーン上り及びチャンネルトーン下りの3つに分割する。チャンネルトーンの利用帯域に占める割合は小さいが、無線ゾーン内の無線端末が確実に受信できるものとする。

本方式は以下に述べるように動作する。

1. 無線端末はデータパケットの伝送前に、チャンネルトーンをセンスする。チャンネルトーンが(上下ともに)センスされなければメッセージチャンネルがアイドル(空き状態)と判断できる。この状態でまずチャンネルトーン上りに信号を送出する。
2. チャンネルトーン上りを受信した中央局は、同じ信号をチャンネルトーン下りに送る。ただし、中央局が衝突と判断した場合は、ジャム信号をチャンネルトーン下りに送る。
3. チャンネルトーンを送出した無線端末は、自局の送出したチャンネルトーンがチャンネルトーン下りに返ってきたことを確認し、メッセージチャンネルにパケットの送出を開始する。もし、自局の送出したチャンネルトーン以外の信号が返ってきた場合、パケットの送信を控え、バックオフに入る。

この様な動作では、チャネルトーンの衝突のタイミングによって、3つの場合が考えられる。

case 1: 衝突が起こらない場合(Fig.3参照)

無線端末RT1によって送出されたチャネルトーン上り信号は最大伝搬遅延時間(ここでは、無線端末と中央局間を信号が伝搬する最大時間)を $\tau$ とすると、 $2\tau$ 以内に中央局との間を往復する。従って、RT1の通信範囲(半径 $r$ )内の無線端末(見える端末)は $\tau$ 以内に、隠れ端末も最悪で $2\tau$ 以内には、メッセージチャネルにパケットが送出されることを知る。これ以後、RT1の通信が終了するまで、全ての無線端末で送信開始が抑制されることになる。RT1は、チャネルトーン上りの送出開始から最大で $2\tau$ 後にチャネルトーン下りを受信し、さらに検出時間 $z$ 後( $0 < z < \tau$ である定数)に、メッセージチャネルにデータパケットの送信を開始する。端末はチャネルトーンを送信開始時刻から $Tf$ (パケット長)の間送出し続ける。つまり、この間は他の無線端末からの送信は控えられるため、メッセージチャネルに送信されたパケットは、衝突することはない。

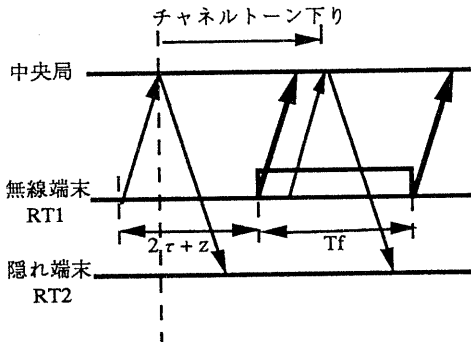


Fig.3 CTMA方式の動作1  
(チャネルトーンの衝突が無い場合)

case 2: チャネルトーンの衝突1(最初の通信が成功する場合)

RT1がチャネルトーン上り信号を送信開始してから $2\tau$ の間は、全ての無線端末がその信号の存在を知るわけではないので、他の無線端末がチャネルトーン信号を送出する可能性がある。この時、チャネルトーンは互いに衝突する。ここでは、RT2がチャネルトーン送出を開始したとする。中央局は衝突を検出し、ジャム信号をチャネルトーン下りに送信する。

RT1のチャネルトーンが中央局に到着してから $Z$ 以後に、RT2チャネルトーンが中央局に到着したとする(Fig.4参照)。RT1はチャネルトーン下りを衝突なしとして受け取るので、メッセージチャネルにパケットを送出する。RT2がチャネルトーン下りを評価する時点では、ジャム信号が受信されるので、RT2は衝突を避けるためにメッセージチャネルにパケットを送出する事を見送り、バックオフに入る。ただし、RT1は既に送信を開始しているので、このジャム信号を無視して送信を継続する。つまり、この場合は、チャネルトーンの衝突は発生するが、メッセージチャネル上の衝突は避けられ、最初の通信が成功する。

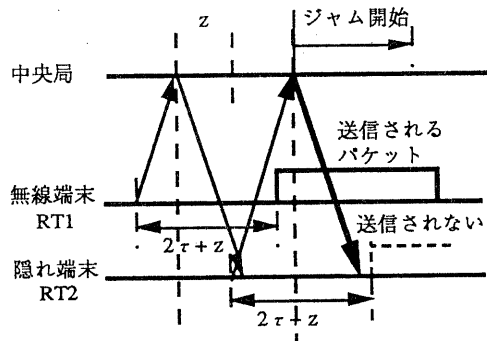


Fig.4 CTMA方式の動作2 (チャネルトーンが衝突するが最初の通信は成功する)

case 3: チャネルトーンの衝突2(全ての通信の見送り)

RT1のチャネルトーン送出中にRT2のチャネルトーンが送出され、RT1のチャネルトーンが中央局に到着してから $Z$ 以内に、RT2のチャネルトーンが中央局に到着したとする(Fig.5参照)。case2と同様に、中央局は衝突を検出しジャム信号をチャネルトーン下りに送出する。RT1とRT2はそれぞれチャネルトーン送出開始から $2\tau + Z$ の時刻でチャネルトーンを評価するが、この場合は両無線端末ともジャム信号を受信し、メッセージチャネルへのパケットの送信を見送り、バックオフに入る。チャネルトーンの衝突が発生し、メッセージチャネルへのパケットの送出は起こらない。

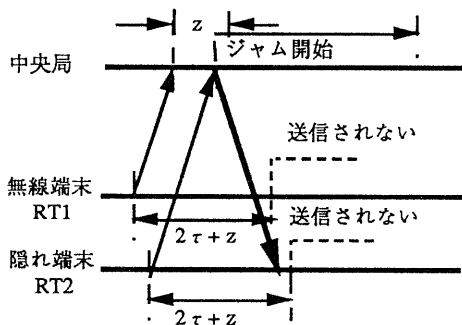


Fig.5 CTMA方式の動作3(チャネルトーンが衝突し、全ての通信が見送られる。)

以上に述べたCTMA方式の動作概要から以下のことが考えられる。前述のとおり、CSMA方式の性能は隠れ端末の存在によりかなり劣化するが、CTMA方式では、端末が送出したチャネルトーンを中央局が仲介することによりゾーン内のすべての端末にパケット送信を試みようとしている端末(隠れ端末からの通信を含む)の存在を知らせることができる。このため、CSMA方式に見られるような隠れ端末による性能の劣化を極力抑えることができると考えることができる。また、CTMA方式で、チャネルトーン上で衝突が意味を持つのは中央局で $z$ 時間内に着信した場合に限られる。なぜなら、それ以外での衝突では、先にチャネルトーンを送信した無線端末のデータ伝送が優先される。さらに、メッセージチャネル上の衝突はないので伝搬遅延時間が無視できるくらい小さいような場合は、そのスループット特性は1に近づくものと考えられる。

無線LANにおいては、中央局が制御の中心となりその負担がかなり重くなり中央局中心制御となりがちであるが、このCTMA方式では、主にチャネルトーンのリピータとして働くため中央局の負担を軽くすることができると考えられる。

### 3.2 CRMA(Channel Reservation Multiple Access)方式

隠れ端末が存在しない状態でのCSMA方式は、データパケットの伝送がそのままチャネルの使用権の保有を意味している。つまり、データパケットの送出開始から最大伝搬遅延 $\tau$ 後までに他の端末が送信を開始しなければ、その後は他の無線端末に通信の存在を知らしめたことを意味する。しか

し、隠れ端末の存在する状態では、その使用権の保有を認識しない端末があるので、急激にその特性が劣化することは、前述の通りである。

そこで、CRMA方式ではメッセージチャネルの使用権と実際にそのチャネルを使用することを明確に分けることにした。つまり、使用権は競合によって獲得され、その獲得競合によって無駄に使用される伝送量をできるだけ小さくすることで帯域を有効に使用しようとするものである。

本方式では利用周波数帯域をデータ伝送用のメッセージチャネルとメッセージチャネルの使用権を中央局に対して要求するための制御チャネル(上り下り)の3つに分割する。制御チャネルへのアクセスは通常のCSMA方式である。

本方式は以下に述べるように動作する(Fig.6参照)。

1. 無線端末はデータパケットの伝送前に、リクエストパケットを制御チャネル上りに送信する。このリクエストパケットには、無線端末のIDの他に送信要求の生成時刻も含まれている。
2. リクエストパケットを受信した中央局はリクエストパケット中のデータ(生成時刻)や現在のメッセージチャネルの予約状況を考慮して、メッセージチャネルへの送信をスケジュールする。さらにその結果を制御チャネル下りを用いて、無線端末に知らせる。
3. 全ての無線端末は、制御チャネル下りを受信する。従って、既に予約を完了し、メッセージチャネルへの送信送信待ちの状態にある無線端末は予約の変更を知ることができる。
4. 無線端末は中央局が指示した予約状況に従って、メッセージパケットを送信する。

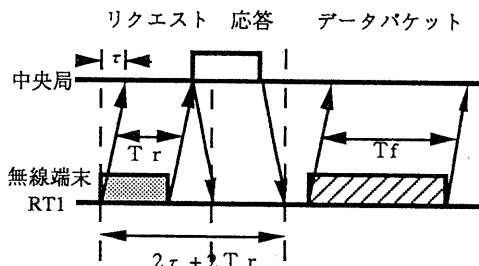


Fig. 6 CRMA方式の動作

制御チャネルへのアクセス方式は、CSMA方式に基づいているので、通常の衝突の他に隠れ端末による衝突も生じる。つまり、本方式は基本的に隠れ端末の影響を受ける。しかし、リクエストパケット長 $T_r$ をデータパケット長 $T_f$ に対して十分短くすることで、衝突の際、無駄になる伝送を極力小さくすることができる。一般に、CSMA方式で最大伝搬遅延に対してパケット長を短くすると特性が悪化する。しかし、この場合は、どのようなパケット長を選択したとしても、隠れ端末の影響が支配的である。そこで、ここでは、リクエストパケット長を思い切って短くし、リクエストの再送間隔を短くすることで解決する。

#### 4. 計算機シミュレーションによる性能評価

隠れ端末がCSMA方式の性能に及ぼす影響とCTMA方式の性能を評価するために計算機シミュレーションを行った。

##### 4.1 シミュレーションモデル

本シミュレーションでは、シングルゾーンを対象とした。無線ゾーンに一つの中央局があり、Fig.1に示されるように中央局を中心として半径 $R=50[m]$ の円内が無線ゾーンであるとした。その円内にランダムに100端末を配置するものとした。各端末が発した電波は、その端末を中心に円形に伝わるものとし、伝搬距離(確実に他の端末が受信できる距離) $r[m]$

Table.1 シミュレーションの主要なパラメータ

無線ゾーン半径	$R$	50[m]
通信可能範囲半径	$r$	$R < r < 2R$
端末数	$N$	100
伝送速度		10Mbps
伝搬遅延	$\tau$	22.5 $\mu$ sec
正規化遅延	$a$	可変
パケット長	$T_f$	$\tau / a$
スロットサイズ	$T_{sl}$	$T_f + \tau$

を変化させることで、無線ゾーン内の隠れ端末の割合を変化させた。 $r=100[m]$ のとき、この無線ゾーン内の無線端末はお互いに確実に見える関係にある。隠れ端末の存在する状態は $r=R=50[m]$ であるとした。この場合、ある無線端末に対して平均30~40%程度が隠れ端末となる。細かいパラメータはEthernet[8][9]に準拠した。各シミュレーションパラメータをTable.1に示す。なお、このシミュレーションでは、端末から中央局への通信のみを考える。

##### 4.2 シミュレーション結果

隠れ端末の存在がCSMA方式のスループット特性にどのように影響するか示したのが、Fig.7である。隠れ端末が無い状態では正規化伝搬遅延 $a$ の影響が支配的であるが、隠れ端末が多い状態では、隠れ端末の割合が支配的になる。これは、隠れ端末が増加するとキャリアセンスによる衝突回避がうまく機能しないことが原因である。すべての端末がお互いに隠れ端末となると、結局ALOHA方式の特性に近づくことは容易に予想できる。

隠れ端末の増加はわずかでもCSMA方式の特性に影響があり、正規化伝搬遅延より隠れ端末の影響が支配的になる。正規化伝搬遅延はシステム設計時に固定されるが、無線LANのように端末が移設、移動される状況で隠れ端末の割合が特定できない。従って、この場合には、単にスループットや平均伝送遅延特性が悪化するばかりでなく、システムの特性が安定しないことも考えられる。

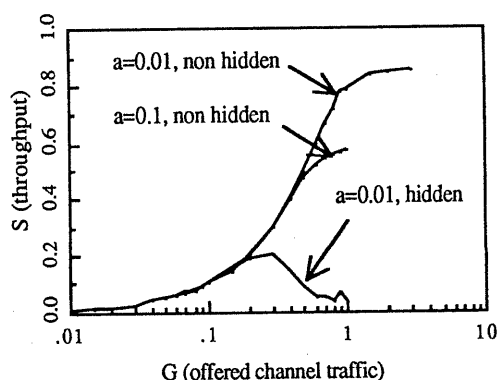


Fig.7 隠れ端末のCSMA方式の性能に対する影響

CTMA方式とCSMA方式の比較をFig.8に示す。トラフィック-スループット特性では、CTMAはCSMAか同等かそれ以上の特性を示す。特に正規化伝搬遅延が小さいとき( $a = 0.01$ )、CTMA方式は最大スループットで優る。低トラフィック時には、CSMA、CTMA方式ともほぼ同等であるといえる。

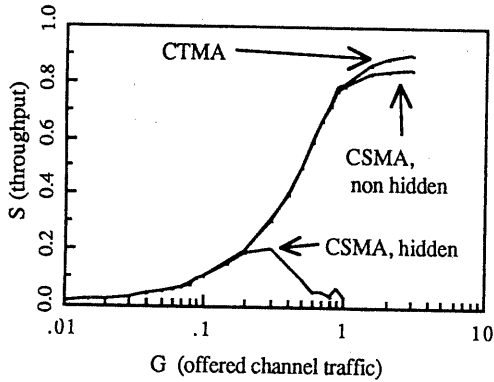


Fig.8 CTMA方式とCSMA方式比較  
トラフィック-スループット特性

CRMA方式とCSMA方式の比較をFig.9に示す。Fig.9中に示されるCRMA方式は、リクエストパケット長のデータパケット長に対する比が0.3の時のものである。先に指摘したように隠れ端末の影響があることがわかる。しかし、リクエストパケット長のデータパケット長に対して0.2以下になると隠れ端末の影響は殆ど受けなくなり、Fig.9中の隠れ端末のない場合の性能とほぼ同等になる。このことから、CRMA方式はリクエストパケット長をデータパケットに対して十分短くすることで、隠れ端末のない場合のCSMAに最大スループットで優ると言える。

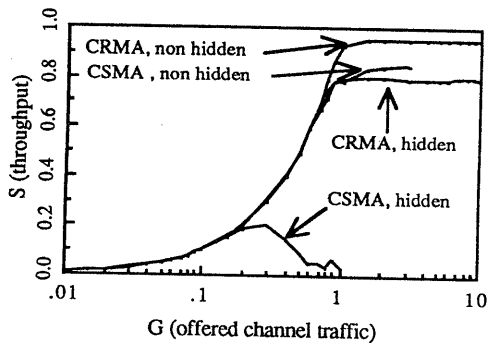


Fig.9 CRMAとCSMAの比較  
トラフィック-スループット特性

各方式のスループット-平均伝送遅延特性をFig.10に示す。正規化伝搬遅延が小さいときCTMA方式は隠れ端末の存在しない環境でのCSMA方式と同等の性能を示す。Fig中のCRMA方式はリクエストパケット長とデータパケット長の比が0.2のときのもので、高スループット時に良い特性を示すことが判る。Fig.10からは、読み取れないが、トラフィックが小さい領域( $S < 0.2$ )では、CSMA方式が他の全ての方式に優る。これは、衝突がほとんど起こらないような状態では、CTMA方式がチャネルトーンのやりとりに、CRMA方式は予約に、時間が余計にかかる為である。

トラフィック-スループット特性、スループット-正規化遅延のどちらの特性をとってみても、CTMA方式とCRMA方式は隠れ端末のある場合のCSMA方式とは比較にならないほど良い特性を示す。CTMA方式では、チャネルトーンが無線ゾーン全体をカバーして、隠れ端末にもメッセージチャネルの状態を知らせるため、チャネルトーンをセンスできる全ての端末は、お互いに隠れ端末であっても問題なく通信が行えるといえる。CRMA方式では、制御チャネルを通してメッセージ通信の予約するのに、隠れ端末の影響を受けるものの、リクエストパケットを十分に短くすることで、隠れ端末の影響を事実上受けまいにすることができることを示している。

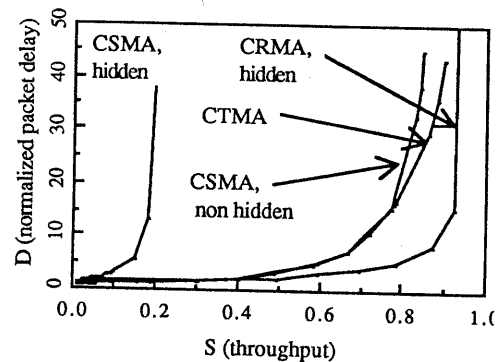


Fig.10 各方式の正規化遅延による比較

以上のことから、CTMA方式は、隠れ端末問題の影響を全く受けない方式であるといえる。CSMA方式に比べ、正規化伝搬遅延に敏感であるので、無線LANのように伝搬遅延の小さい環境に適

しているといえる。CRMA方式は、基本的に隠れ端末の影響を受けるが、リクエストパケットを十分に短くすることで、隠れ端末の影響を事実上受けないまでに行うことができることを示している。

## 5. 結論

本稿では、無線LANのためのMAC方式に関して考察を加えた。とくに無線特有の問題である「隠れ端末問題」に焦点をあて、CSMA方式に及ぼす影響について検討した。隠れ端末の存在がCSMA方式の性能に大きく影響することを計算機シミュレーションにより示した。さらに、隠れ端末問題の対策としてCTMA方式とCRMA方式の二方式を提案し、計算機シミュレーションによって性能評価をおこなった。その結果、両方式とも隠れ端末が存在しない場合のCSMA方式と同等かそれ以上の性能を示し、隠れ端末問題の解決案となり得るとともに、示すことが判った。

## 参考文献

- [1] 財団法人ニューメディア開発協会: 「平成2年度 情報化未来都市システムの調査・開発 無線LANシステムに関する調査研究報告書」, 1991
- [2] 小林 浩、矢幡 明樹: 「無線LANの標準化活動とその課題」, Proc. of The Fourth KARUIZAWA Workshop on Circuits and Systems, Apr.1991
- [3] Victor Hayes, "Standardization Efforts for Wireless LANs," IEEE Network Magazine, pp.19-p.20, Nov. 1991
- [4] Kaveh Pahlavan, "Tutorial 1: Wireless Networks," Tutorial Note, IEEE The 16th Conference on Local Computer Networks, 1991
- [5] L.Kleinrock and F.A.Tobagi, "Packet Switching in Radio Channels : Part1---Carrier Sense Multiple-Access Modes and Their Throughput--Delay Characteristics," IEEE Trans. on Commun., Vol.COM-23, No.12, pp.1400--1416, Dec. 1975
- [6] F.A.Tobagi and Kleinrock, "Paket Switching in Radio Channels : Part2---the Hidden Terminal Problem in Carrier Sense Multiple-acces and the Busytone Solution," IEEE Trans.on Commun., Vol.COM-23, no.12, pp.1417-1433, Dec. 1975
- [7] Cheng-shong Wu and Victor O. K. Li, "Receiver-Initiated Busy-Tone Multiple Access in Packet Radio Networks", Computer Communication Review Vol.17, No.5, pp.336-342, 1987.
- [8] F.A.Tobagi, "Performance Analysis of Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection," Proc. LACN Symposium, pp.217-244, May 1979
- [9] R. M. Metcalfe and D. R. Boggs, "Ethernet: Distributed Packet Switching for Local Computer Networks", Communications of the ACM, Vol. 19, No. 7, pp. 395-404, 1976.
- [10] Hiroshi Shigeno, Chisato Ohira, Teruo Yokoyama, Yutaka Matsushita, "Dynamic Channel Assignment in A Hybrid Indoor Radio Network with Radio and Wire", IEEE Proceedings of 15th Conference on Local Computer Networking, 1990.
- [11] Hiroshi Shigeno, Kaname Arai, Teruo Yokoyama, Yutaka Matsushita, "A hybrid Indoor Radio Data Network with Radio and Wire-Radio Propagation Measurements and Performance Evaluation in a Rayleigh Channel", IEEE Proceedings of 16th Conference on Local Computer Networking, 1991.
- [12] 大西 祥浩、重野 寛、荒井 要、陳 建和、横山 光男、松下 御、"CTMA: Channel Tone Multiple Access方式による隠れ端末問題の解決," 情報処理学会第44会(平成4年前期)全国大会, Mar. 1992