

## MobileIP ネットワークにおける動的遅延 ACK 制御機構

尾上裕子<sup>i</sup> ii 渥美幸雄<sup>i</sup> 佐藤文明<sup>iii</sup> 水野忠則<sup>iii</sup>

MobileIP ネットワーク上で移動端末が TCP/IP 通信を行う場合、MobileIP の経路最適化機能に起因する TCP シーケンス番号順序逆転問題が発生する。そこで、本稿ではこの問題に対処するための動的遅延 ACK 制御機能を提案する。この機能では、ワイヤレスリンクの状態を監視するワイヤレスリンク状態管理部が、基地局ハンドオーバーの発生を上位の TCP/IP レイヤに通知する。TCP/IP レイヤでは、ハードタイマとソフトタイマの 2 レベルのタイマ処理を行って動的遅延 ACK を応答する。動的遅延 ACK 制御機能を適用した MobileIP ネットワークでのシミュレーション結果では、スループット向上の効果が示された。

## Dynamic delayed ACK control on MobileIP networks

Yuko Onoe<sup>i</sup> ii Yukio Atsumi<sup>i</sup> Fumiaki Sato<sup>iii</sup> Tadanori Mizuno<sup>iii</sup>

In the case of TCP/IP communications on MobileIP networks for mobile terminals, problems of out-of-order of TCP sequence numbers will occur caused by MobileIP routing optimization functions. For this, we propose dynamic delayed ACK control to cope with this problem. In this control, a wireless link-state management part monitoring link-state notifies basestation handover to the upper TCP/IP layer. At the TCP/IP layer dynamic delayed ACK are responded by using two level timer processing of hard-timer and soft-timer. The simulation results of a dynamic delayed ACK control applied to MobileIP networks show average throughput is higher.

### 1. はじめに

近年、モバイルコンピューティング環境においては、モバイルインターネットアプリケーションが普及し、インターネット接続性が不可欠となっている。さらに今後も、モバイル端末上での Web ブラウジングやメールサービスなどの利用が増大するとともに、Java 環境上でのゲームや DTP(Desk Top Publishing)などの新しいモバイルアプリケーションの出現が予想される。このため、次世代のモバイル通信環境では、TCP/IP プロトコルの効率的な利用をサポートしなくてはならない。しかしながら、TCP/IP プロトコルレイヤではワイヤレスリンクの特徴を加味した制御がなされず、ワイヤレスリンクと TCP/IP レイヤが独立に動作している。その結果、ルーティ

ングエラーやパケットロスを引き起こし、通信全体のスループットが低下する。そこで本研究では、ワイヤレスリンクの状態を TCP/IP レイヤに透過とし、両者が協調的に動作することにより通信全体の効率向上を目指す。

### 2. 既存方式の問題点

ワイヤレス環境においては、基地局ハンドオーバーやフェージング、電波障害などワイヤレスリンク品質悪化によるパケットロスが多い。しかし、TCP ではこのようなパケットロスの中継路の輻輳に起因すると解釈し、輻輳ウィンドウを縮小させて転送量を低下させる。このとき低速高遅延なワイヤレス環境では、一旦輻輳ウィンドウが縮小してしまうと回復するのに時

i NTTドコモ マルチメディア研究所 第4世代インターネット方式研究室

NTTDoCoMo, Multimedia Labs, Fourth Generation Internet Lab

ii 静岡大学大学院理工学研究科

Shizuoka University, Graduate School of Science and Engineering

iii 静岡大学情報学部情報科学科

Shizuoka University, Faculty of Information

間がかかるという問題が挙げられる。そこで、ワイヤレスリンク特有の要因によるパケットロスを回避するために、各種制御方式が提案されている。[6]

さらに MobileIP[1]ネットワーク上に TCP を動作させたときの問題点として、パケットの順序逆転問題が挙げられる。ここで MobileIP では、送信側から移動端末側へ転送されたパケットは常に HA を経由するため、経路の冗長性やホームエージェントの負荷などが問題となっていた。このため、送信ノードで移動先アドレスをキャッシュし、トンネリングにより直接移動先にパケットが転送される経路最適化が有効とされている[2]。しかし、移動先アドレスを送信ノードに通知するバインディング更新メッセージは、セキュリティ上の理由により HA が移動ノードから登録要求を受信した後、HA から送信ノードに転送される。このためキャッシュにより新規の移動先アドレスへ転送されるようになるまでに遅延が生じ、その間移動前のアドレスへ転送され、パケットルーティングエラーによるパケットロスの原因となる。

この問題を解決するために、MobileIP 経路最適化機能として、移動先 FA から移動前 FA へ移動先アドレスを通知する機能がある。これにより、バインディングキャッシュの更新遅延により移動前アドレス宛てに送信されたパケットは、移動前 FA から移動先 FA へ再トンネリングされることにより移動先へ届けられる。

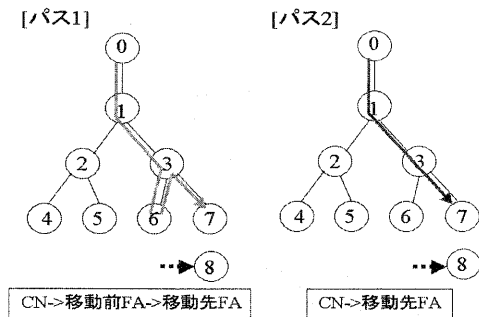


図 1: 経路最適化機能によるルーティングパス

図 1 は、MobileIP ネットワーク構造を示し、ノード 0 は送信ノード、ノード 4,5,6,7 は基地局、ノード 8 は移動および受信ノ

ードを示す。この経路最適化機能を用いて TCP 通信を行った場合、基地局ハンドオーバーにより移動ノードが FA を切り替えたときに、前 FA 通知機能により送信ノード→移動前 FA →移動先 FA→移動ノード[パス 1]と、送信ノード→移動先 FA→移動ノード[パス 2]の二種類の経路が一時的に発生する。このため、後者の経路をたどる TCP パケットが、前者の経路のパケットを追い越して移動ノードに先に到着するという TCP シーケンス番号の順序逆転現象が見られた。このとき TCP は、後者の移動先 FA へ直接転送された TCP パケットを受信すると、未だ移動前 FA から再転送中の TCP パケットをロスしたと解釈し、重複 ACK を送信側へ応答する。送信側ではこの重複 ACK を 3 パケット受信すると、高速再転送アルゴリズムによりロスしたと思われるパケットを再転送する。

表 1: ハンドオーバー時の各 TCP 実装の再送パケット数・再送期間

TCP 実装	逆転パケット数	逆転期間 (sec)	再送パケット数	再送期間 (sec)
Tahoe	29	0.1725	76	0.4612
Reno	29	0.1725	4	0.5120
NewReno	29	0.1725	63	0.6597
Vegas	9	0.0769	1	0
Sack	29	0.1725	1	0.2288

表 1 に TCP 実装として Tahoe, Reno, NewReno, Vegas, Sack を用いた場合の、図 1 の MobileIP ネットワーク構造上でのシミュレーションによる、順序逆転発生時の再送パケット数および再送期間の比較を示す。各リンク遅延は、50msec に設定している。表 1 に示すように、全ての場合で順序逆転が発生し、再送によるスループット低下が見られた。このうち、Sack の再送時間の 200msec は、ネットワークの RTT と一致する。このように順序逆転に対しては他と比較して Sack のアルゴリズムの方が再送パケット数、再送期間に関して優位であると言える。さらに順序逆転問題の対処としては、パケット数またはある一定時間遅延させる遅延 ACK アルゴリズムの適用が考えられる。この遅延 ACK アルゴリズムは、主に非対称ネットワーク上において ACK の転送量を減少させることによりネ

ネットワーク負荷を減らす効果がある。しかし、ACK 受信によって送信量を倍に増加させるスロースタートフェーズにおいては、ACK が遅れると最大値に達するのに時間がかかること、また ACK の縮退により一時的にバースト転送が発生することなどから全通信への適用には不向きであることが示されている[5]。さらに、SACK では抜けを埋めるための ACK は直ちに応答する必要があるため、SACK アルゴリズムと遅延 ACK の併用は難しいことが述べられている。これらを踏まえ本研究では、特に MobileIP の経路最適化時の二重化ルーティングを要因とする順序逆転に着目し、その対処のための動的遅延 ACK 方式を提案する。以後 3 章で提案方式、4 章で評価、5 章でまとめと今後の課題について述べる。

### 3. 提案方式

本章では、提案方式の基本原則とレイヤリングモデルについて述べる。次に、提案する動的遅延 ACK 制御機構方式について述べる。最後に、機能の詳細設計と処理手順について述べる。

#### 3.1 基本原則

本研究では、TCP/IP レイヤのためのワイヤレスリンク状態通知機能および制御機構(図 2)を基本原則とする。例えば、SNR(シグナル対ノイズ比)や転送レートを上位のネットワーク・トランスポートレイヤに透過とする。データリンクレイヤでの基地局切り替わりを上位レイヤに通知し、新規アドレスの割り当てや移動エージェントの切り替え契機とする。さらに新規に認識された基地局の電波強度の弱いうちから、その基地局上の移動エージェントに関する情報を取得する。トランスポートレイヤに対しては、電波状況に応じて広告ウィンドウサイズを操作することにより、一時的に TCP 通信を中断させる。本制御により、パケットロスおよびスループットの低下が回避できると同時に、転送の非効率性やトラフィック輻輳状況に対処した、多様な移動制御を提供することが可能となる。

#### 3.2 提案方式

本章では、ワイヤレスリンク状態を加味した動的遅延 ACK 制御機構とその処理手順を示す。

##### ワイヤレスリンク状態通知機構

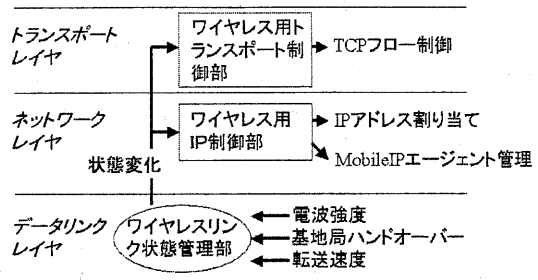


図 2: ワイヤレスリンク状態通知制御レイヤリングモデル

データリンクレイヤでは、各基地局から定期的に送信されるビーコンを受信し、基地局リストとして保持する。この基地局リストの情報を常に監視し、最適な基地局の切り替わりや新規の基地局の認識など、基地局リストに関する状態変化を上位レイヤに通知する。これにより、上位レイヤでは、状態変化に応じた制御処理を起動する。

##### 動的遅延 ACK 制御機構

ワイヤレスリンク状態通知機能により基地局ハンドオーバーの通知を受けると、一時的に MobileIP のルーティングパスの二重化による TCP シーケンス番号の順序逆転現象が起こり得る。このため、基地局ハンドオーバー直後は受信したパケットのシーケンス番号に不連続が生じても ACK を応答せず、遅延 ACK 状態に入る。ここで本方式では、遅延 ACK を応答するタイミングとして、ハードタイマとソフトタイマの二レベルのタイムアウトを設けた(図 3)。予想される順序逆転期間の終了時刻をハードタイマの期限とし、この時点で未受信のパケットはロスしたものと見なされる。一方、ハードタイマによるタイムアウトまで ACK 応答を遅延させると、TCP の送信側がタイムアウトしてしまう可能性が出てくるために、ソフトタイマにより定期的に受信シーケンス番号を応答する。さらに、連続する受信シーケンス番号が最大受信シーケンス番号まで揃ったら、ソフト・ハードタイマをキャンセルし、その時点での ACK を応答して動的遅延 ACK 応答期間を終了する。このように、ワイヤレスリンクの状態変化に基づく二レベルの動的遅延 ACK 制御を提供することにより、基地局ハンドオーバー後一時的に遅延 ACK 応答を行って受信シーケンス番

号の不連続性を許容する。このときハードタイマ(順序逆転期間終了)時に未受信の packets についてはパケットロスと見なす。一方、ソフトタイマにより連続受信シーケンスに対しては定期的に ACK を送信することにより、送信ノード側のタイムアウト防止が可能となる。

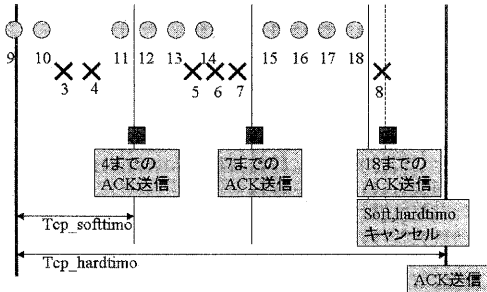


図 3: 2 レベルタイマ処理による動的遅延 ACK 応答処理

図3は、シーケンス番号9から18は移動先へ直接ルーティングされたパケットで、3から8は移動前から移動先へ迂回してきたパケット、直線がハードタイマ処理、点線がソフトタイマ処理のタイミングを示す。一、二回目のソフトタイマ処理では、連続したシーケンス番号の最大値である 4, 7を応答し、三回目は連続したシーケンス番号を受信しなかったため応答を見送り、その後シーケンス番号8を受信したところで、ソフト・ハードタイマをキャンセルし、最大受信シーケンス番号18を応答する。

### 3.3 詳細機能

次に、動的遅延 ACK 制御機構の詳細機能とアルゴリズム(図 4, 5)について説明する。

#### (1) ワイヤレスリンク状態監視・通知機能

ワイヤレスリンクの状態を監視して状態変化を上位レイヤの該当する制御部に通知する。

#### (2) 遅延 ACK 期間指定機能

リンク状態検査処理部から基地局ハンドオーバーが起こったことを通知されると遅延 ACK 期間を開始し、遅延 ACK 制御のためのソフトタイマとハードタイマの二つのタイマ処理を起動し、一定時間後に遅延 ACK 期間を終了してタイマ処理

を停止する。

#### (3) 遅延 ACK 検査処理機能

TCP パケットを受信すると遅延 ACK 期間かどうかを遅延 ACK 開始・終了指定部に問い合わせ、遅延 ACK 期間内であれば遅延 ACK 制御処理に入り、期間外であれば通常の ACK 送信を行う。

#### (4) 受信シーケンス番号検査機能

受信シーケンス番号が次に受信すべきシーケンス番号であるかまたは最大受信シーケンス番号であるかどうかを検査し、次に受信すべきシーケンス番号・最大受信シーケンス番号を更新する。

#### (5) 動的遅延 ACK 制御タイマ機能

動的遅延 ACK 期間中であり受信シーケンス番号と次に受信すべきシーケンス番号が一致しない場合、ハードタイマとソフトタイマを設定する。この場合、さらに受信シーケンス番号と最大受信シーケンス番号が一致したらハードタイマとソフトタイマを解除し、規定時間にハードタイマ処理またはソフトタイマ処理を実行する。また、遅延 ACK 期間中受信シーケンス番号と次に受信すべきシーケンス番号が一致したら、TCP の遅延 ACK フラグを設定する。

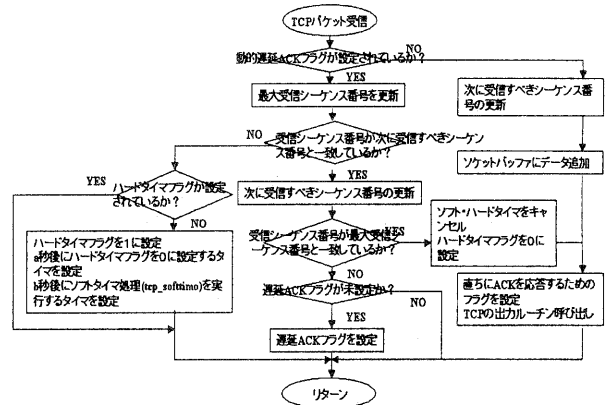


図 4: 動的遅延 ACK 制御アルゴリズム(1)

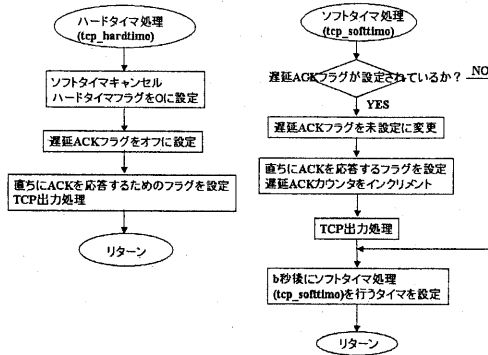


図5:動的遅延 ACK 制御アルゴリズム(2)

### 3.4 その他の前提となる機能

その他補足事項として、バッファリング機能を追加した。このバッファリング機能では、基地局でも各移動端末とのワイヤレスリンクの状態を監視し、悪化したら該当端末専用のバッファにパケットをキューイングする。同時にインタフェースキューには該当端末宛てのダミーパケットを一定間隔でキューイングし、状態の回復を検知する。また、このときハンドオーバーが起こったら、端末バッファをトンネリング転送する。これにより、リンク状態が悪化するとハンドオーバーに備えて端末バッファを生成し、ハンドオーバー時にはインタフェースキューには該当端末宛てのパケット数を少なくすることでパケットロス回避の効果がある。こちらの検討結果は、別途報告する。

## 4. 評価

### 4.1 評価方式

本研究で提案する動的遅延 ACK 制御方式を、UCB/LBL/VINT プロジェクトが開発した ns-2 シミュレータ (ns-2.1b6[3]) 上に実装した。

階層的ネットワーク構造(図6)を構築し、移動ホストは4つの基地局を切り替えながら時速約 70km で移動している。無線区間は IEEE802.11 をシミュレーションしている。ノード 0 は ftp サーバ、ノード 1 はインターネットと移動網とのゲートウェイノード、ノード 4, 5, 6, 7 は基地局かつ訪問先エージェント、ノード 8 は移動ホストかつ ftp 受信ホストを表す。

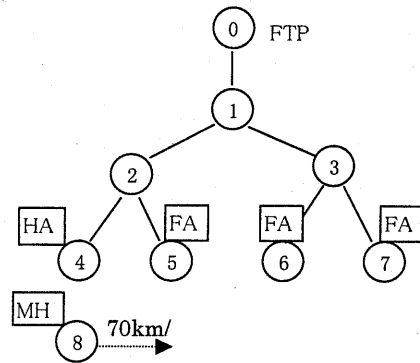


図6:シミュレーションのネットワーク構造

## 4.2 評価結果

### 4.2.1 TCP の振る舞い

順序逆転現象が発生したときの、TCP の振る舞いを図に示す。

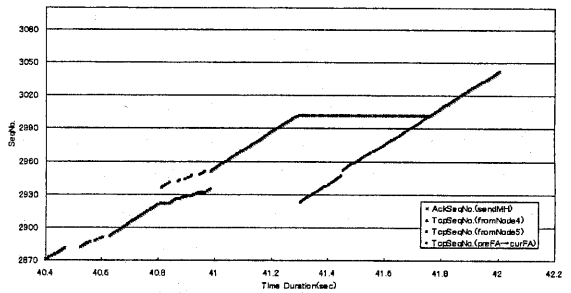


図7:移動端末の受信・ACK パケットシーケンス番号の時間変化(Tahoe)

図7は、移動端末が基地局ハンドオーバーを行った時点のパケット受信時刻と受信シーケンス番号、応答 ACK 番号を示す。TCP 実装のうち Tahoe を使用している。40.8 秒から 41.0 秒まで受信シーケンス番号に散らばりが見られ、41.0 秒で受信シーケンス番号が連続的になり、その後は受信シーケンス番号と応答 ACK 番号が一致している。しかし、40.8 秒から 41.0 秒の間、シーケンス番号の順序逆転が起こり、3 パケット以上の重複 ACK(シーケンス番号 2923)を応答して

いる。このため、送信ノードはパケットロスと解釈し、パケット（シーケンス番号 2923）を再送した。さらに Tahoe 実装では重複 ACK を複数検出すると、以後再送のやり直しを行う。このため、41.3 秒から 41.8 秒までは、移動ノードが一度受信済みのパケットを再度受信し、その度に受信済みパケットの最大シーケンス番号（シーケンス番号 3003）の ACK 応答を繰り返している。

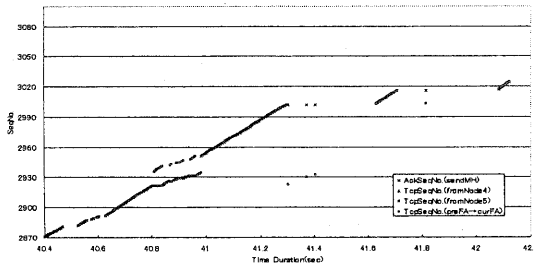


図 8: 移動端末の受信・ACK パケットシーケンス番号の時間変化(Reno)

図 8 は、TCP 実装のうち Reno を使用した場合を示す。40.8 秒から 41.0 秒までは Tahoe 実装と同様に受信シーケンス番号の散らばりが見られる。その間送信ノードでは重複 ACK が 3 回検出されたためパケットを再送し、41.3 秒から 41.4 秒付近で移動ノードが再送パケットを受信している。しかし、このときすでにシーケンス番号 3003 番までのパケットを受信しているために、再送パケットを受信した移動ノードは、3003 番の重複 ACK を応答することになり、再び送信ノードが重複 ACK を検出することになる。それへの再送を 41.8 秒付近で移動ノードが受信している。このように、Reno 実装では重複して受信するパケット数は少ないものの、重複 ACK の検出を再帰的に何度も繰り返すため、回復に時間がかかる。

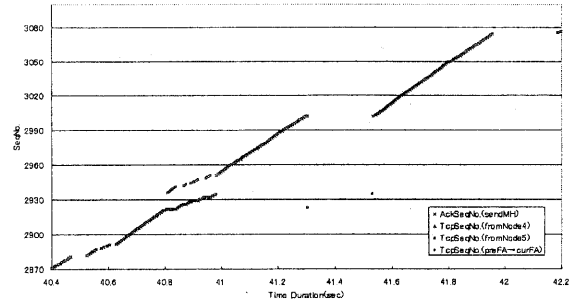
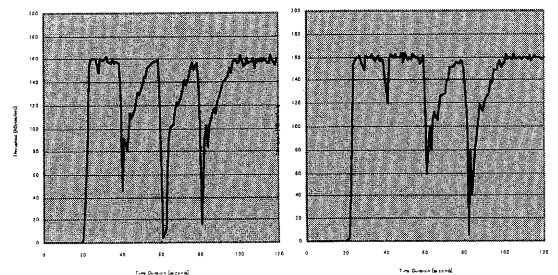


図 9: 移動端末の受信・ACK パケットシーケンス番号の時間変化(Sack)

図 9 は、Sack を使用した場合を示す。他のアルゴリズムと同様に重複 ACK を検出すると、ssthresh, cwnd 共に半分を設定して高速再転送モードに入り、ACK で要求されたパケットを再送する。他のアルゴリズムとの違いは、Sack 拡張オプションにより、迂回せずに直接受信した追い越しパケットの情報を応答していることである。さらに、回復期間において ACK 受信時のパケット転送量に制限（パイプ処理）を付けているため、再送パケットに対する ACK を受信しても次のパケットは再送しない。パケット転送量が制限以下になったら、Sack オプション中に抜けがあればそのパケットを再送し、無かったらパイプの値が cwnd 値以上になるまで新規のパケットを再送する。高速再転送モード中は、1 パケット受信毎にパイプを 2 ずつ減少させるため、2 パケットずつ再送する。そして、高速再転送モードに入る時点で送信した最大シーケンス番号の ACK を受信したところで高速再転送モードは終了し、通常の転送を続行する。

#### 4.2.2 Tahoe のスループット時間変化の方式比較



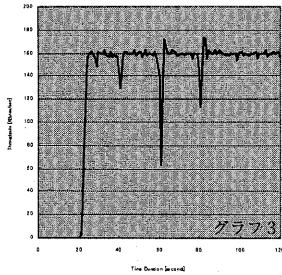


図 10: Tahoe 実装のスループット時間変化 (グラフ1: MobileIP のみ、グラフ2: MobileIP とバッファリング機能、グラフ3: MobileIP とバッファリング、動的遅延 ACK 制御機能)

図 10 は、ハンドオーバーしながら移動中の移動端末におけるスループットの時間変化を示す。40 秒、60 秒、80 秒付近にハンドオーバーが発生している。Tahoe 実装において、グラフ1は通常の MobileIP を用いた場合、グラフ2は MobileIP に基地局でのバッファリング機能を追加した場合、グラフ3はバッファリングと動的遅延 ACK 制御の両機能を追加した場合を示す。グラフ1においては、ハンドオーバー時に MobileIP の経路最適化機能により前の FA から次の FA へパケットがトンネリング転送され、位置登録遅延によるパケットロスがある程度回避されている。しかし、新規の位置登録処理より以前に移動前の FA ノードにてルーティング処理が終了し、無線リンクのインターフェースのキュー内に溜められたパケットは MobileIP のトンネリング転送の対象にはならない。その結果、ハンドオーバー後もインターフェースキューにパケットが残ってしまいパケットロスの原因となっている。この問題に対処するためグラフ2では基地局でのバッファリング機能を追加している。さらに動的遅延 ACK 制御機能を追加した場合(グラフ3)には、バッファリング機能によりパケットロスを回避した上で動的遅延 ACK 制御機能により TCP シーケンス番号順序逆転に対処を行った。その結果、パケットロスを回避した状態では、効果があることがわかった。

#### 4.2.3 提案方式の各実装のスループット比較

図 11,12,13 に、階層的ネットワーク構造のリンク遅延パターン

ン(表2)を複数用意し同様に移動端末のスループットを測定した場合の各実装毎の平均値を示す。各実装(Tahoe, Reno, NewReno, Vegas, Sack)毎に、MobileIP のみ(左)、MobileIP とバッファリング機能(中)、MobileIP とバッファリング機能と動的遅延 ACK 機能(右)を示す。遅延パターン1はノード4,5,6,7-8間すなわち無線区間の遅延時間が大きい場合、パターン2は各リンク遅延が等しい場合、パターン3はノード0-1間すなわちインターネット側の遅延時間が大きい場合を想定している。

表2: リンク遅延パターン

遅延パターン	リンク遅延時間(msec)		
	0-1	1-2/2-4	4-8
パターン1	10	5	100
パターン2	50	50	50
パターン3	100	5	10

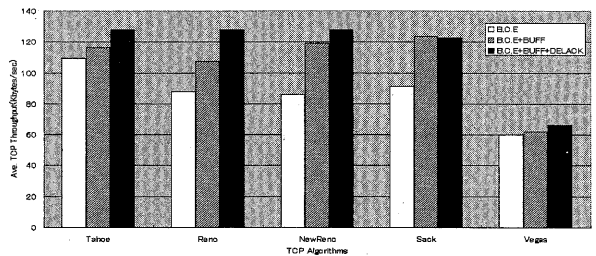


図 11: 遅延パターン1の条件下での各実装のスループットの平均値

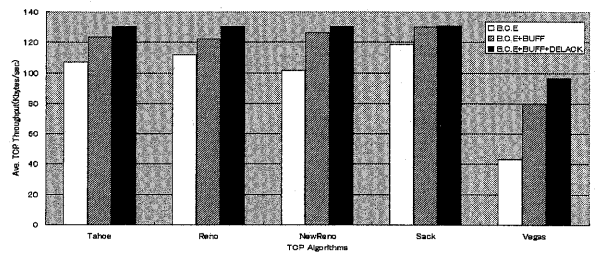


図 12: 遅延パターン2の条件下での各実装のスループットの

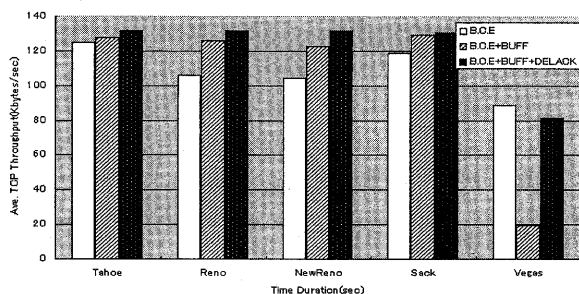


図 13: 遅延パターン3の条件下での各実装のスループットの平均値

図 11,12,13 に示されるように、表のリンク遅延パターンのいずれの場合も、バッファリング機能と動的遅延 ACK 制御機能を適用した場合に最もスループットが向上している。

図 11,12,13 に示すように、MobileIP のみの場合と MobileIP にバッファリング機能を追加した場合とのスループットの差は、リンク状態に応じた端末バッファによるパケットロス回避の効果である。しかし、前述の順序逆転問題が発生するため、さらに動的遅延 ACK 制御機能を追加した場合のスループットの差として順序制御の効果が表れている。ここで、パターン 1 (図 11) のスループットは他のパターン (図 12,13) と比較してバッファリング機能の場合とバッファリング・動的遅延 ACK 制御機能の場合との差が大きい。これは、パターン 2,3 はバッファリング機能によりかなりのスループット向上が見られたのに対し、パターン 1 では他のパターンよりも順序逆転が頻繁に発生し、バッファリング機能のみではスループット改善が及ばなかったことを意味している。遅延パターン 1 は、無線区間の遅延が長く有線区間の遅延が短い。まず、無線区間の遅延が長いために前の基地局のインタフェースキューからのパケット取り出しが遅くなる。さらに有線区間の遅延が短いことにより、前の基地局でのインタフェースキューからのパケットが取り出し切る前に、迂回してきたトンネリングパケットが到着してしまうため、順序逆転が発生しやすい。

## 5. まとめと今後の課題

MobileIP ネットワーク上で移動端末が TCP/IP 通信を行う場合、MobileIP の経路最適化機能に起因する TCP シーケンス番号順序逆転問題が発生する。そこで、本稿ではこの問題に対処するための動的遅延 ACK 制御機能を提案する。この機能では、ワイヤレスリンクの状態を監視するワイヤレスリンク状態管理部が基地局ハンドオーバーの発生を上位の TCP/IP レイヤに通知する。TCP/IP レイヤでは、ハードタイマとソフトタイマの 2 レベルのタイマ処理を行って動的遅延 ACK を応答する。動的遅延 ACK 制御機能を適用した MobileIP ネットワークでのシミュレーション結果では、スループット向上の効果があることが示された。今後は、IETF で提案されている MobileIP のいろいろな機能を、実際の携帯網の環境により近い状況で評価していく。

## 参考文献

- [1] C.Perkins. IP Mobility Support for IPv4. revised, Draft RFC. Jan.2000.
- [2] C.Perkins,D.Johnson.draft-ietf-mobileip-optim-10.txt. INTERNET-DRAFT, November 2000.
- [3] ns Notes and Documents. VINT Project, Feb.25<sup>th</sup>, 2000.<http://www-mash.CS.Berkeley.EDU/ns/ns-documentation.html>.
- [4] K.Fall, S.Floyd. Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP. Computer Communications Review, July 1996.
- [5] M.Allman. On the Generation and Use of TCP Acknowledgements. ACM Computer Communication Review, October 1998.
- [6] A.Bakre, B.R.Badrinath. I-TCP: Indirect TCP for Mobile Hosts. In Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Distributed Computing Systems(ICDCS), May 1995.