

## W-CDMA 向け TCP プロファイル

石川 太朗† 稲村 浩† 高橋 修†  
NTT DoCoMo マルチメディア研究所

モバイルマルチメディア時代の次世代移動通信システムとして W-CDMA が期待されている。W-CDMA では、最大 384kbps の伝送速度を実現するインターネットアクセスが可能となり、従来のアクセス回線と比較して、広帯域な回線を提供することが可能である。一方、W-CDMA では、伝送速度の高速化とチャネル利用効率の向上を実現すべく、強力な誤り訂正、誤り再送技術を利用するため、有線などと比較すると遅延が大きくなる。

本論文では、従来のアクセス回線と比較して、広帯域でかつ比較的高遅延という特徴がある W-CDMA において、回線性能を十分に引き出すことが可能な TCP のプロファイルを提案し、本 TCP プロファイルの各要素(バッファサイズの拡大、初期輻輳ウィンドウ拡大、MTU サイズの拡大、セレクトティブアクノレジメント方式の採用)に対する評価を述べ、W-CDMA の回線性能を十分に引き出すことが可能であることを示す。

## A TCP profile for W-CDMA

Taro Ishikawa†, Hiroshi Inamura†, Osamu Takahashi†  
NTT DoCoMo Multimedia Laboratory

W-CDMA (Wideband CDMA) will be allowing users to take full advantage of the potential of Multimedia applications. W-CDMA packet service will provide 384kbps at maximum bandwidth for Internet access, which is much faster than usual access lines for consumer market. Due to the strong error recovery including error correction and re-transmission techniques for higher data rate and better channel efficiency, the delay can be larger than wire line networks.

In this paper, we propose a TCP profile to achieve better line utilization for wireless characteristic of high bandwidth-delay product. We report the evaluation for each element of the TCP profile (large TCP buffersize, increased initial congestion window, choice of larger MTU and use of selective acknowledgment) and conclude the profile can improve the TCP performance over W-CDMA packet network.

### 1. はじめに

近年、インターネットの普及と共に、インターネットアクセスのためのアクセス回線が多様化している。特に携帯電話、PHS 等の無線回線を利用したインターネットアクセスは爆発的に増加している。モバイルマルチメディア時代の次世代移動通信システムとして W-CDMA が期待されている。W-CDMA では最大 384kbps の伝送速度を実現するインターネットアクセスが可能となり、従来のアクセス回線と比較して広帯域な回線となる。

W-CDMA では無線特有の伝送誤りがある環境において、伝送速度の高速化とチャネル利用効率の向上のため、強力な誤り訂正技術を利用する。そのため、誤り訂正符号化、復号化のための演算や誤り再送を行うため、有線回線と比較すると遅延が大きくなる。

TCP は有線のような従来型の回線でのインターネットアクセスを前提としているため、従来型の回線と比較して広帯域、比較的高遅延等の特徴がある W-CDMA において、従来のアクセス回線向けに設定された TCP をそのまま適用すると回線性能を十分に引き出せない恐れがある。

無線回線と有線回線の特徴差に起因する TCP の問題を解決するために、無線区間と有線区間の TCP コネクションを分割する Split TCP や Performance-Enhancing Proxy(PEP)といった解決方法が提案されているが[1,2,3]、エンドエンドの通信モデルが崩れてしまうという欠点がある。

本研究では TCP が本来持っているエンドエンドによる通信モデルを崩すことなく、従来の TCP との通信ができることを主眼をおき、既存の RFC 化された TCP の拡張技術を用いて W-CDMA の回線性能を引き出す TCP プロファイルを提案する。さらにその TCP プロファイルの各要素(バッファサイズの拡大、初期輻輳ウィンドウ拡大、MTU サイズの拡大、セレクトティブアクノレジメント

†株式会社 NTTドコモ マルチメディア研究所  
NTT DoCoMo, Inc. Multimedia Laboratories  
3-5, Hikarinooka, Yokosuka, Kanagawa, 239-8536, Japan  
{taro.inamura, osamu}@mml.yrp.nttdocomo.co.jp

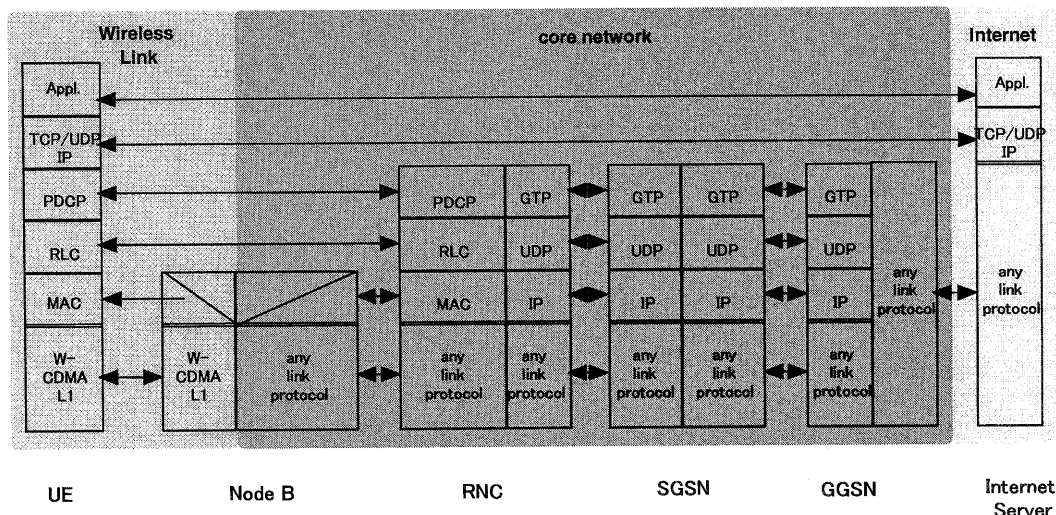


図 1 W-CDMAパケットサービスプロトコルスタック

ントの採用)の有効性を、W-CDMA ネットワークシミュレータにて検証した結果を報告する。

## 2. W-CDMA パケット IP サービス

### 2.1. ネットワークアーキテクチャ

3gpp(3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project)[4]で規定されている、W-CDMA パケットサービスのプロトコルスタックを図 1 に示す。W-CDMA パケットサービスは、UE(User Equipment)と GGSN(Gateway GPRS Supported Node)間に透過的なネットワークを提供し、エンドエンドの IP パケット通信を提供する。W-CDMA パケットサービスに用いるネットワークは IP パケットをトンネリングし、インターネットから見える IP ノードは UE だけである。W-CDMA パケットサービスネットワークはデータリンクレイヤ相当の機能のみを提供し、UE からインターネット、ISP、企業 LAN へ接続するパイプとなる。

GGSN から RNC(Radio Network Controller)までの有線区間では、GTP(GPRS Tunneling protocol)/UDP/IP で IP パケットをカプセルリングし網内ルーティングを行う。RNC から UE までの無線区間でも、IP パケットのカプセルリングを行い、データ圧縮機能をサポートする以外に、RLC プロトコルと呼ばれる無線区間の誤り再送を行っている点が特徴的である。

### 2.2. RLC プロトコル

RLC プロトコルは 3gpp にて標準化された W-CDMA

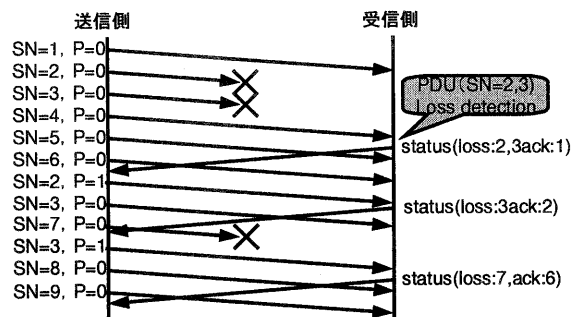


図 2 RLCプロトコルの再送方式

無線インターフェースレイヤ 2 の再送プロトコルである [5]。RLC プロトコルは上位層から受け取った IP パケットに相当する SDU(Service Data Unit)を数十オクテット程度の PDU(Protocol Data Unit)に分割し PDU 単位で再送を行う。再送は Polling/Status Report を用いた Selective Repeat 方式を採用している。

図 2 に RLC プロトコルの再送方式の概略図を示す。送信側は、通常送信する PDU のヘッダに含まれる P(Poll)ビットを立てることによって、受信側の PDU 受信状況報告を要求することができる。受信側は以下の 2 つの要因により PDU の受信状況を STATUS PDU として返信する。

- ① 新たなシーケンス番号の抜けを検出した場合 (新たな PDU ロスを検出した場合)
- ② P ビットが立った PDU を受信した場合

送信側は受信側が作成した STATUS PDU を基に PDU の再送を行う。

RLCプロトコルは組み立て可能なSDUをすぐに上位プロトコルに渡さない。最も古いSDUを組み立て上げるために、PDUの再送を行いSDUの順序保証をする。そのため、上位プロトコルにはPDUロスがIPパケット単位の遅延として見えることになる。

### 3. W-CDMA における TCP の問題点

W-CDMAパケットサービスはlong thin networkに分類することができる。

W-CDMAパケットサービスは最大384kbpsのインターネットアクセス回線を提供可能であり、インターネットアクセス回線としては高速な部類である。しかし、インターネット全体を見渡すと、ギガビットイーサネット、SONETなどのIP向け大容量回線が普及しており、最大384kbpsのアクセス回線を提供するW-CDMAもインターネット全体から見ると、細い(thin)回線といえる。

一方、W-CDMAでは、誤り符号化、誤り再送を用いて無線誤りを克服するが、その結果パケット遅延を引き起こすこととなる。無線誤り以外にもコアネットワーク部での伝送遅延、各ノードでのパケット送信待ち合わせがパケット遅延を引き起こす。W-CDMAパケットサービスにおいてはUE-GGSN間のラウンドトリップタイムが数百ms程度になると予想され、インターネット全体からみると遅延量が大きい(long)回線といえる。

Long thin networkにおいてTCPを利用した場合の問題点をトラフィック種別毎に検討する。

TCP上のトラフィックは2つに大別される。一方はtelnetや小さいコンテンツサイズのWebブラウジングに代表されるトランザクション型、他方はFTP、Webを用いたコンテンツダウンロード等に代表されるバルク転送型である。

トランザクション型アプリケーションにおいて求められる性能は、反応速度である。Long thin networkにおける反応速度はlongであればあるほど遅くなる。この原因は2つ考えられる。

1つはアプリケーション自身のトランザクション処理に起因する。Telnetでは1文字分のパケットに対するエラーバックを行うため、TCPのウィンドウサイズによってパケット送出が制限されることはない。このような場合、ネットワーク自身の遅延を小さくするか、アプリケーション層にて複数のトランザクション処理をバッチ処理することによってしか性能向上は望めず、TCP層での改善は難しい。Webブラウジングにおいては、単一コネクション

上ではリクエストに対するリプライがないと次のリクエストが送出できないが、リクエストパイプライン[6]を用いることにより、トランザクション処理をバッチ型処理にすると可能である。

もう1つはコネクション開始時に適用されるスロースタートによって、コネクション開始時のウィンドウが通常1セグメント分に制限されてしまうことに起因する。数kbytesのWebブラウジングでは、コンテンツのACKを待つためTCPセグメントが送信できない状態が発生し、広帯域なネットワークでも、遅延が大きいと反応が遅くみえる。この問題を解決するには、コネクション開始時のウィンドウを大きくすればよい。

バルク転送型アプリケーションに求められる性能は、スループットである。Long thin networkで従来のアクセス回線向けに設定されたTCPを用いた場合スループットが十分に得られない場合がある。これは、回線容量がパケットで埋め尽くされていないということと等価である。この要因は2つある。1つはTCPコネクション開始時に適用されるスロースタート期間がネットワークの遅延分だけ長くなり、実効的なウィンドウサイズが制限されてしまうことに起因する。もう1つはスロースタート後においても回線容量、すなわち帯域幅遅延積に対してウィンドウが十分にでないことに起因する。スループットを向上するには、この2つの要因を解決すればよい。

以上をまとめると、以下の3つについてTCPの設定を行うことにより、TCP上のアプリケーションの性能を向上することが出来る。

- コネクション開始時のウィンドウを大きくする
- スロースタート期間を短くする
- ウィンドウを大きくする

### 4. W-CDMA 向け TCP プロファイル

無線リンクを含むLong thin networkでのTCP適用についてはIETF(Internet Engineering Task Force)等で活発に議論されており、様々な解決方法が提案されている[7]。提案されている解決法の中には無線リンクと有線リンクでTCPコネクションを分割し、無線リンクにおいては最適化したTCPを適用するPEPと呼ばれる手法も含まれている。しかしこのような解決方法はTCPが本来持っているエンドエンドによる通信モデルが崩れてしまうという新たな問題が発生する。

本論文では、TCPが持っているエンドエンドによる通信モデルを崩すことなく、市場にあるTCP実装に対

するインパクトを最小限にとどめる解決方法を採用する。

#### 4.1. TCP バッファサイズの拡大

先に述べたように、W-CDMA パケットサービスにおける UE-GGSN 間のラウンドトリップタイムは数百 ms となる。

さらに考慮すべきは、TCP のコネクションが張られるエンド間には、移動通信網以外のネットワークも含まれるため、エンド間の遅延は更に大きいということ、UE-RNC 間には RLC プロトコルが存在するので、PDU のロス状況によっては IP パケットが RLC プロトコル層にバッファリングされ、一時的に遅延が増加する可能性があるという点である。

表1に示すように各 OS の広告ウィンドウサイズのデフォルト値は、W-CDMA パケットサービスの帯域幅遅延積に対して十分でない実装もあり、パケットが回線容量を埋め尽くすことができない。パイプのキャパシティを十分埋めつくには TCP のウィンドウサイズを十分大きくする必要がある。

| OS            | 広告ウィンドウサイズ   |
|---------------|--------------|
| Windows98     | 8460[bytes]  |
| FreeBSD 2.2.8 | 16384[bytes] |
| Linux         | 32120[bytes] |
| Solaris8      | 26280[bytes] |

表 1 広告ウィンドウサイズのデフォルト値

#### 4.2. 初期ウィンドウサイズの拡大

TCP のフロー制御は受信側の広告ウィンドウ以外に送信側の輻輳ウィンドウを使用する。TCP ではスロースタートと呼ばれるアルゴリズムによって、新たなコネクションが確立されると、送信側の輻輳ウィンドウをセグメント1つ分に初期化する。送信側の輻輳ウィンドウは ACK を受け取るたびにセグメント1つ分ずつ増えてゆく。この様子を図 1 に示す。パケットロスがなければ最終的にフロー制御は送信側の輻輳ウィンドウベースのものから、受信側の広告ウィンドウベースのものに切り替わる。フロー制御が受信側の広告ウィンドウベースのものに切り替わるまでがスロースタート期間である。スロースタート期間は実効的なウィンドウが小さいので、パケットがパイプのキャパシティを十分埋め尽くせていない期間となる。また、遅延が大きいネットワークでは、送信セグメ

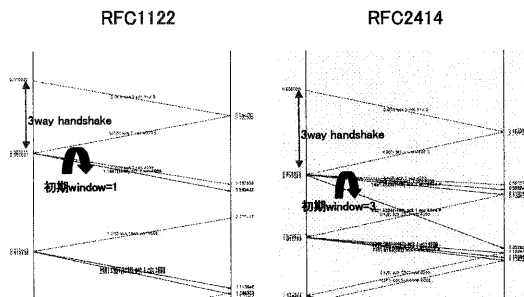


図3 初期輻輳ウィンドウサイズ

ントに対する ACK を受け取る時間が長いので、輻輳ウィンドウの増加に時間がかかりスロースタート期間が長くなる。

初期輻輳ウィンドウを1セグメント分ではなく、更に多くすることによってスロースタート期間を短くすることが可能となり、コネクション開始時におけるスループット向上を実現する。通常の TCP 実装は RFC1122[8]にしたがって初期の輻輳ウィンドウは 1 セグメント分に初期化するが、RFC2581[9]に従うと、初期ウィンドウサイズは 2 セグメントに設定することが出来る。さらに RFC2414[10]では以下の式に従い、初期の輻輳ウィンドウを幾分か大きくすることを許している。

$$\min(4 * MSS, \max(2 * MSS, 4380)) [\text{bytes}]$$

図 3 は RFC1122 に従った場合と RFC2414 に従った場合のセグメント転送の違いを示している。RFC1122 ではコネクション確立後に送信しているセグメントは1つのみである。RFC2414 ではコネクション確立後、ACK なしに 3 つのセグメントを送信している。なお、RFC2414 の IETF における標準化の位置付けは experimental であることを付記しておく。

#### 4.3. MTU サイズの拡大

スロースタート期間における送信側の輻輳ウィンドウはセグメント単位で増加する。そのため、TCP のセグメントサイズが小さいほど輻輳ウィンドウの増加率は小さくなり、送信側の輻輳ウィンドウが受信側の広告ウィンドウの値に達するまでの期間が長くなり、結果的にスロースタート期間は長くなる。TCP のセグメントサイズはコネクション確立時に通知する最大セグメントサイズ(MSS)によって決定される。通知する MSS は送信インターフェースの MTU から固定長の TCP および IP ヘッダの大きさを差し引いた値を上限とし、TCP 層で特別に指定しない限りこの上限値を用いることになる。PPP での MTU

が運用実績のある中で最大の 1500[bytes]であることが望まれる。

#### 4.4. セレクティブアキュレジメント

スロースタートアルゴリズムは、コネクションの開始時だけでなく再転送タイマがタイムアウトした場合にも適用される。タイムアウト後のスロースタートは本来ネットワークの輻輳回避のために行うが、4.2 で述べたように W-CDMA においては、

- 大きな TCP ウィンドウが必要である
- ネットワークの遅延が大きい

という 2 つの理由によってスロースタートが著しいスループットの低下を引き起こす。W-CDMA パケットサービスは、無線区間の誤りを RLC プロトコルによって補償するので著しいパケットロスは発生しないが、コアネットワーク内のノードでのバッファあふれ、PDU の最大再送回数の制限による IP パケットの廃棄等によるパケットロスが発生する場合もある。

最近の OS ではほとんどの場合 fast retransmit/fast recovery[9]というアルゴリズムを実装しているので、3 つ以上の重複 ACK によってパケットロスを認識し、タイムアウトを待たずにパケットの再送を行うことができる。再送後の輻輳回避はスロースタートを行わず、輻輳ウィンドウを半分にすることによって実現する。しかし fast retransmit/fast recovery は重複 ACK のみでパケットロスを判断するため、1 つのパケットロスしか認識することができない。複数のパケットロスが発生した場合には、旧来の TCP 同様に再転送タイマがタイムアウト後にスロースタートを行いながら再送することになる。

RFC2018[11,12]で規定されているセレクティブアキュレジメントは、このような複数のパケットロスが発生した場合に効果を発揮する。図 4 にセレクティブアキュレジメント(SACK)を用いた場合と用いなかった場合のロス通知の違いを示す。TCP コネクションを開始する際にネゴシエーションしたノード同士が TCP のオプションフィールドを使って、明示的にパケットロスを通知することができ、この情報を用いてスロースタートなしに再送が可能になる。W-CDMA 上の TCP においてはスロースタートによるスループットの減少が著しいため、スロースタートを伴わずに再送が可能なセレクティブアキュレジメントは、効果がある。

## 5. 評価実験

ここでは、4 章で述べた TCP プロファイルの各要素

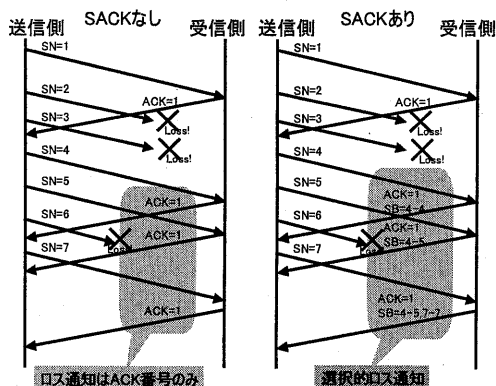


図 4 セレクティブアキュレジメントのロス通知

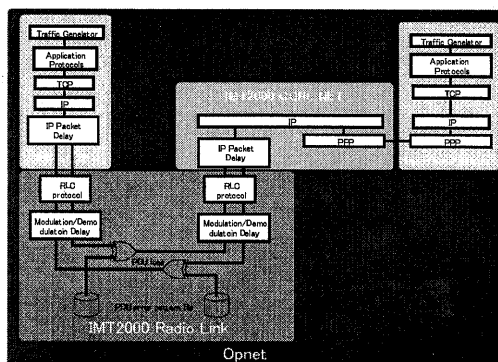


図 5 シミュレーション概略図

について評価を行う。

### 5.1. シミュレーション環境

シミュレーションには OPNET Technologies 社の opnet[13]を使用した。図 5 に opnet におけるシミュレーション概略図を示す。opnet 上に RLC プロトコルを実装し、PDU 単位でロスを発生させるエラーパターンにより W-CDMA の無線伝送を模擬している。各装置での処理遅延は PDU 単位および IP パケット単位の固定遅延を挿入することによって実現している。

TCP の実装は 4.4BSDlite に準拠しており、セレクティブアキュレジメントもサポートしている。

### 5.2. TCP バッファサイズの拡大

TCP のウィンドウサイズを変化させて、サーバからクライアントに 1M[bytes]のバルク転送を行った結果を図 6 に示す。グラフ中の縦軸はスループットを示し、横軸

は無線区間の PDU ロス率を示している。各プロットは、TCP バッファサイズの違いを表す。参考のため RLC プロトコルのみでのペイロードの最大スループットシミュレーション値(maximum limit)もプロットしている。

シミュレーションモデルはコアネットワーク内における各ノードのバッファを無限大に設定しているため、IP パケットのロスが発生しない。

64k[bytes]までは、TCP バッファサイズを大きくするほどスループットが増加していることがわかる。128[Kbytes]のスループットは 64[Kbytes]の場合とほぼ同じ値を示している。よって最適な TCP バッファサイズは 64[Kbytes]程度であることがわかる。

### 5.3. 初期ウィンドウサイズの拡大

初期の輻輳ウィンドウサイズを変化させて、サーバからクライアントにバルク転送を行った結果を図 7 に示す。横軸は転送データ量を示し、縦軸は転送データの送信にかかった時間を示している。各プロットは初期の輻輳ウィンドウサイズの違いを表す。RFC2414 に従った場合、同じ量のデータを転送する時間は通常の TCP に比べて常に短い。転送データ量にかかわらず、ほぼ 1 秒程度の転送時間を短縮していることがわかる。これより初期ウィンドウサイズの拡大は FTP のような大きなファイル転送では効果が見えにくい、Web ブラウジングのような比較短いバルク転送には効果が発揮される。コンテンツサイズが 100[kbytes]の Web ページをブラウジングした場合、通常の TCP では 5 秒かかるところが、RFC2414 を用いると 4 秒で転送が完了する。

### 5.4. MTU サイズの拡大

MTU を変化させて、サーバからクライアントにバルク転送を行った結果を図 8 に示す。グラフ中の横軸は時間、縦軸は転送データサイズを示している。各プロットは MTU の違いを表している。

同一時間における転送データサイズは常に MTU が大きいほど多い。MTU が 1500[bytes]の場合 6 秒以降はプロットが直線的になっており、スロースタートが終了しているのがわかる。MTU が 256[bytes]の場合には 10 秒時点でもプロットが直線的にはなっていないので未だスロースタートが終了していない。MTU が小さいほど実効的にウィンドウサイズが小さく制限され転送開始時からスロースタート終了までのスループットが減少している。

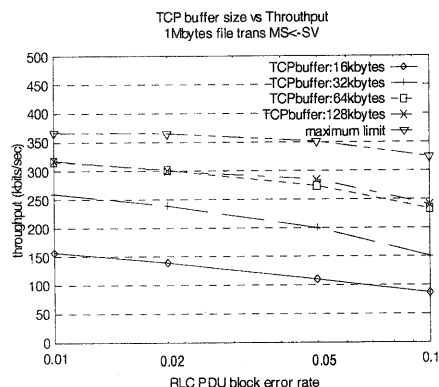


図 6 TCPバッファサイズの拡大の効果

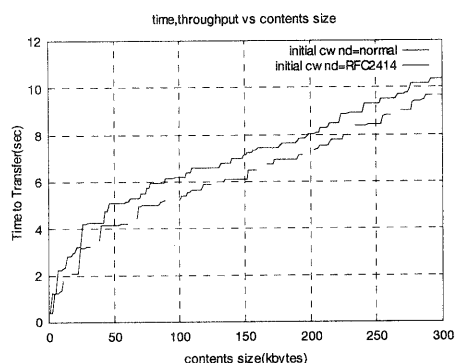


図 7 初期ウィンドウサイズ拡大の効果

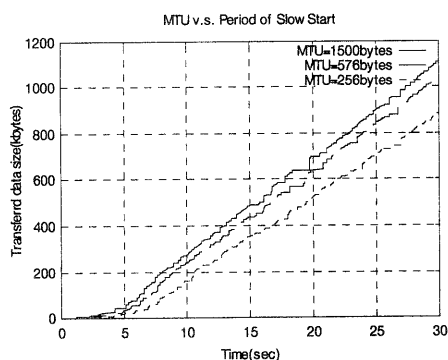


図 8 MTU拡大の効果

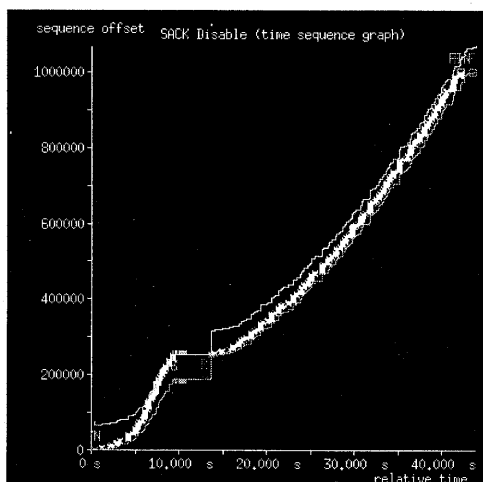


図 9 タイムシーケンスグラフSACKなし

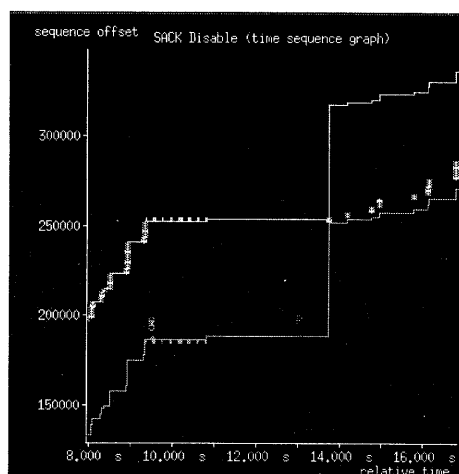


図 11 タイムシーケンスグラフSACKなし[拡大]

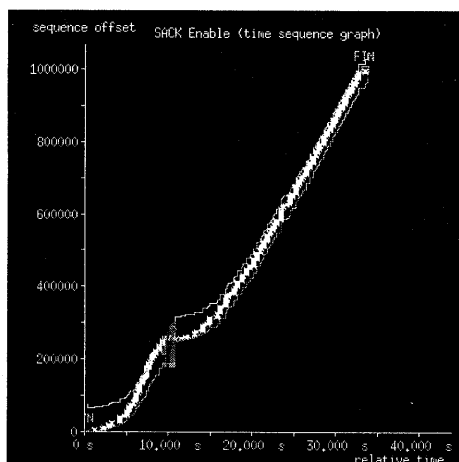


図 10 タイムシーケンスグラフSACKあり

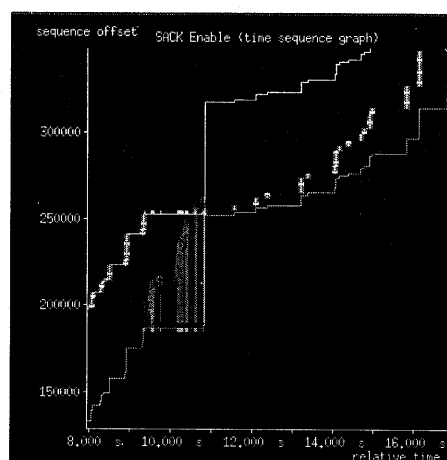


図 12 タイムシーケンスグラフSACKあり[拡大]

スロースタート終了後のプロットが直線的になっているところにおいては MTU が小さくなるほど傾きが小さい。IP、TCP のヘッダは MTU の違いにかかわらず同じサイズであるため、MTU が小さいほど IP、TCP のヘッダオーバーヘッドが大きくなっているためである。MTU サイズの拡大は、データ転送量に依存せず常に効果がある。

### 5.5. セレクティブアキュノレジメント

GGSN 相当のノードのバッファ量を制限したシミュレーションモデルにおいて、サーバからクライアントに 1[Mbytes]のパルク転送を行った結果を図 9～12 に示

す。これはキュー資源の枯渇という輻輳の1つのモデルである。グラフ中の横軸は時間を示し、縦軸は転送データ量を示している。図 9、図 11 はセレクティブアキュノレジメントを使用しない場合の結果、図 10、図 12 はセレクティブアキュノレジメントを使用した場合結果である。どちらも 10 秒付近で複数のパケットロスが発生している。SACK なしでは、重複 ACK を 3 つ受信した時点で fast retransmit/fast recovery を行っているが、複数のパケットロスが発生しているために最終的に再転送タイムアウトによってスロースタートしている。SACK ありの場合では複数のパケットロスに対してもスロースタートなしに再転送を行っている。そのため 1M[bytes]のファイル転送を

SACK なしと比較して 10 秒程度早く完了している。

## 6. おわりに

本研究では、アクセス回線としては比較的広帯域で高遅延という伝送特性をもつ W-CDMA パケットサービスにおいて、既存の TCP 実装へのインパクトが少なく、回線性能を十分に引き出すことが可能な TCP プロファイルを提案し、各要素の効果をシミュレーションによって検証した。バルク転送において TCP バッファサイズを 64[kbytes]に拡大することによってスループットが最大になり、例えば TCP バッファサイズが 16[kbytes]の場合に対して 2 倍のスループットを実現可能である。初期ウィンドウサイズの拡大は Web ブラウジングのようなトランザクション型のデータ転送で効果があることがわかった。また MTU の拡大はトランザクション型、バルク型を問わず効果があり、セレクティブアキュレジメントを用いることによって、パケットロスによるスループットの低下を抑制できることがわかった。

提案した TCP プロファイルを用いることにより、トランザクション型、バルク型のほとんどのトラフィックにおいて性能が改善し、W-CDMA の回線性能を引き出すことが可能であることを示した。今後、提案した TCP プロファイルを実ネットワークに適用して検証する予定である。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力頂いた、大菅大吉氏並びに青木領氏に感謝いたします。

## 参考文献

- [1] Kojo, M., Raatikainen, K., Liljeberg, M., Kiiskinen, J., Alanko, T., "An Efficient Transport Service for Slow Wireless Telephone Links," in IEEE Journal on Selected Areas of Communication, volume 15, number 7, September 1997.
- [2] Bakre, A., Badrinath, B.R., "Handoff and Systems Support for Indirect TCP/IP. In Proceedings of the Second USENIX Symposium on Mobile and Location-Independent Computing, Ann Arbor, Michigan, April 10- 11, 1995.
- [3] Yavatkar, R., Bhagawat, N., "Improving End-to-End Performance of TCP over Mobile Internetworks," Proc. Workshop on Mobile Computing Systems and Applications,

IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, California, 1994.

- [4] <http://www.3gpp.org/>
- [5] 3G TS 25.322 v.3.3.0: "RLC Protocol Specification", 2000
- [6] 関口, 鶴巻, 北口, 高橋, "モバイルインターネットアクセスにおけるリクエストパイプラインニングの有効性", MBL/ITS 合同研究会, Nov. 2000
- [7] G. Montenegro, S. Dawkins, M. Kojo, V. Magret, N. Vaidya, "Long Thin Networks" RFC 2757, January 2000
- [8] Braden, R., "Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers", STD 3, RFC 1122, October 1989.
- [9] M. Allman, V. Paxson, W. Stevens, "TCP Congestion Control", RFC 2581, April 1999
- [10] Allman, M., Floyd, S. and C. Partridge. "Increasing TCP's Initial Window", RFC 2414, September 1998.
- [11] Mathis, M., Mahdavi, J., Floyd, S. and A. Romanow, "TCP Selective Acknowledgment Options", RFC 1818, October 1996
- [12] K. Fall, S. Floyd, "Simulation-based Comparisons of Tahoe, Reno, and SACK TCP," Computer Communication Review, 26(3), July 1996..
- [13] <http://www.opnet.com/>