

## 再送を伴う無線区間を持つインターネットでの動画転送時のバッファ制御

山内長承\*, 串田高幸\*\*, 富田アルベルト\*\*, 尾上裕子\*\*\*, 渥美幸雄\*\*\*

- \* ) 東邦大学理学部情報科学科<sup>1</sup>
- \*\* ) 日本アイ・ビー・エム株式会社東京基礎研究所
- \*\*\* ) 株式会社 NTTドコモ マルチメディア研究所

### 概要

本研究では、WCDMA のパケット通信を介したインターネットによるリアルタイム動画転送を対象として、その転送時のバッファ制御について論ずる。WCDMA パケット通信は光ファイバなどの回線とは異なる性質を持つので、リアルタイム転送を前提としたトランスポート層の制御は工夫を要する。特に、無線区間での帯域管理に起因する大きな伝送帯域の切り替え、無線区間の比較的大きい遅延、無線区間での再送 (ARQ) によるデータ回復に起因する帯域変動と大きな転送遅延変動が、動画等のリアルタイム転送に対してバッファ制御の工夫を必要とする。ここでは上記の変動要因を分析、モデル化し、それに対応するバッファ制御を検討する。

キーワード WCDMA パケット通信、リアルタイム動画転送、バッファ制御

### Buffer control for multimedia stream transfer over WCDMA packet mode with ARQ

Nagatsugu Yamanouchi\*,  
Takayuki Kushida\*\*, Alberto Tomita\*\*,  
Yuko Onoe\*\*\*, Yukio Atsumi\*\*\*\*

- \* ) Dept. Information Science, Toho University
- \*\* ) IBM Research, Tokyo Research Laboratory
- \*\*\* ) Multimedia Laboratories, NTT DoCoMo, Inc.

This report discusses the buffer control scheme for realtime multimedia transfer over the WCDMA packet mode transfer. The WCDMA packet mode has rather different properties from those of commonly used internet links, which implies a different control scheme for packet transfer. Among them the link capacity changes due to the wireless bandwidth management, a relatively large delay along the wireless link, link data transfer rate changes and large delay variances due to the ARQ mechanism on the wireless link are the major reasons for re-designing the buffer control scheme for realtime multimedia transmission. In this paper we analyze these causes of variances and discuss possible models, and finally re-design the buffer control scheme.

#### 1. はじめに

WCDMA による第3世代の携帯電話サービスが始まろうとしている。この新しい携帯電話サービス、特にパケットモードサービスをインターネットのリンクとして見ると、既存のインターネットリンクとは異なるいくつかの性質が見られ、それらがデータ転送効率に影響する。WCDMA のパケットモードの性質に適合した転送制御方法の工夫については、TCPの場合について研究さ

れている[1]が、本報告では動画などのマルチメディアデータのリアルタイム転送(ストリーム転送)を対象として、流量制御に影響する要因について分析し、適した流量制御法を検討する。

#### 2. WCDMA のパケット通信

サーバから WCDMA 端末へのストリーム動画の配信を考える場合、サーバからインターネットを介して携帯電話サービスのコアネットワークに入り、無線基地局から WCDMA の無線区間を介

<sup>1</sup>〒274-8510 船橋市三山 2-2-1. Phone: +81-47-472-1176. E-mail: yamanouc@HyperResearch.com

して端末に到達する経路が想定されるが、本報告ではインターネットや将来IPが使われるであろうコアネットワーク部分の動態とWCDMAの無線区間の動態を組み合わせる分析には至らず、第1段階として無線区間のみ、すなわち送出サーバを無線基地局と直接接続した形態を対象とする。ストリームデータはサーバからIP/UDPパケットとして送出され、WCDMAの無線区間を経由して受信端末に到着し、受信端末でUDPパケットとして受信アプリケーションに渡される(図1)。

流量制御のモデルとして、途中の無線リンクの帯域の変動に合わせて送信側サーバで流量を加減することとし、それによってパケットのあふれによる損失を回避する。図1の点線で示すようにフィードバックを用いて流量を適応的に制御する機構を想定し、送出サーバでは、1)IP/UDPレベルでパケット送信間隔を加減することにより送出流量を制御すると同時に、2)ビデオ等のストリームを再エンコード(トランスコード)してビデオデータレート(ビデオの再生レート)を加減する。受信端末でのビデオデータバッファでは、ストリームデータが1)で制御される流量に従って流入し、2)で制御されるビデオデータレートによって定まる再生速度で流出する(図2)。なお、既存のUDP/IPによるストリーム転送では帯域変動があつたばあい、流量を削減しなければ転送路上であふれによりパケット損失が発生し、帯域変動に伴って流量を削減した場合でもビデオデータレートを削減しないので受信側でデータの到着が間に合わずバッファが枯渇し、いずれも再生に支障をきたす。筆者らは[2][3][4]にて、両者の連携により一定のサービス品質低減を前提にして円滑なビデオ配信サービスを継続するアーキテクチャを提案している。

本報告では流量の制御に関する技術的な問題について議論する。なお、動画ストリームのデータレートを加減するための再エンコード(トランスコード)の手法については、たとえば情報間引きによる帯域削減を行うことを想定するが、この報告の範囲外とする。

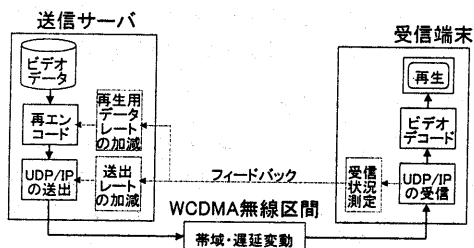


図1 ストリーム転送に対する流量制御フィードバック

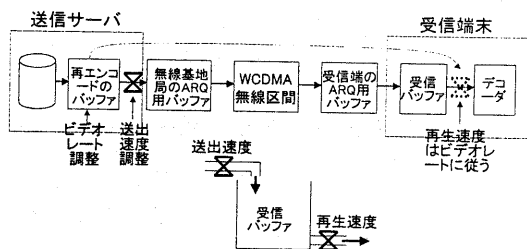


図2 バッファと流量制御の関係

フィードバックによる流量制御は、途中回線の実効的な転送帯域の変動に適應するために必要である。流量制御を設計し、性能評価するために、対象とするWCDMA無線リンクのパケットモードについて転送帯域変動の性質を検討する。以下では、帯域変動に関して、4つの顕著な特徴を取り上げる。

第1の性質として、転送帯域がかなり大きく変動することがある。無線区間を利用するユーザの利用混雑度に応じて384Kbpsから64Kbpsの間で利用帯域が変動する<sup>2</sup>[5]。この変動幅は大きいので、ビデオのストリーム転送を対象とするときの影響は大きい。

第2の性質として、無線区間遅延が光ファイバ等の有線リンクのインターネットに比較してかなり大きいと予想される。これは無線区間の両端でのバッファリングや無線区間での再送制御に起因して発生すると思われる、具体的な値としては条件によるが数百msに及ぶと予想されている。特に無線区間に送り込まれる流量と無線区間の転送容量が拮抗し、無線区間の送信側のバッファにパケットが大量に滞留している場合、そのバッファ上のキューの通過時間がかなり長くなる可能性がある。WCDMAの無線区間ではパケットモードの場合、転送されるデータユニット(PDU)が雑音等の影響で失われた時にそれを再送(ARQ)によって回復する機構が備えられている[6]。図2のWCDMA無線区間の両端にあるARQ用バッファは、損失が検出され再送が完了するまでPDUを保持するためのものである。仮に無線区間のPDU往復時間(RTT)が200msとした場合、それを5回程度繰り返したときの遅延分のPDUを保持できるためのバッファを用意するとその量は48Kバイトとなるが、この環境では最後尾に到着したデータが無線区間に送り出されるまでの待ち時間は1秒となる。これ以上のデータはバッファあふれを生

<sup>2</sup> WCDMAは最大2Mbpsまでの転送を定義しているが、[4]などに示されている当面のサービスでは384Kbpsまでを対象としている。

じるので滞留することができない。基地局の設計上、無線の1チャンネルごとに48Kバイト程度のバッファを持つことは無理のない量と推測されるので、この程度のバッファは用意される可能性がある。なお、次に検討するように無線区間の転送帯域はPDUの再送によって実効的に2割程度減少するが、その場合遅延は実効帯域に反比例して大きくなる。

第3の性質として、無線区間での再送(ARQ)によるデータ回復に起因する遅延変動がある。PDUレベルでの再送・回復は、IP層には損失検出・再転送に伴う到着遅延として見える。再送PDUは優先度高く送られるので送出待ち時間は小さいと予想され、その待ち時間を無視した場合、無線転送のPDU往復時間(RTT)分の遅延、たとえば200ms程度と推定される遅延が発生する。つまり、IP層で見ると、PDU損失が発生すると見かけ上IPパケットは正しく到着するが大きな遅延が発生する。

さらに、WCDMAの再送(ARQ)機構は、データを生成順に整えて受信側のIP層に渡すので、再送により回復したIPパケットの到着が遅れると、それ以降のデータを運ぶPDUが先に到着しても上位層に渡さず受信側バッファに保管し、再送パケットの到着後、順番に、かつ受信機がIPパケットを受信アプリケーションに送出することができる最大の速度で、送り出される。たとえば受信機と受信アプリケーションの間を10MbpsのEthernetで接続する場合、IPパケット長が1000バイトであると、1000バイトのデータを10MbpsのEthernetリンクを介して転送する時間、つまり約0.8msの間隔で送り出される。無線区間をIPのペイロード1000バイトのパケットが22ms間隔で送られている(約300Kbpsに相当する)とすると、遅延は1パケットにつき(22-0.8)ms短縮される。上に述べたように1回ARQによる遅延が200ms増加すると、この遅延短縮プロセスにより200ms/20.2ms=約10パケットかかって元のレベルに回復する。

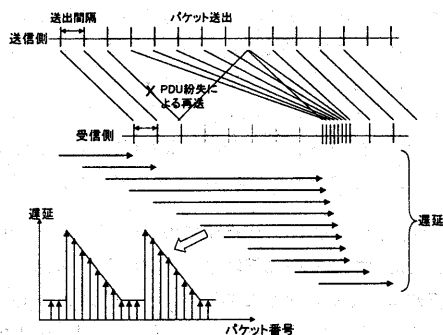


図3 PDUの再送による遅延変動

なお、回復の途中でPDU損失/再送が発生すると、その時点での遅延に200ms程度が追加される。従って、損失発生頻度が10パケットより大きいと遅延が回復できないまま徐々に追加され一方的に増加する。この遅延に相当するデータが送信バッファに滞留しているはずであるから、一定回数後にはバッファの上限に達し、それ以降はバッファのテールから溢れてゆく。

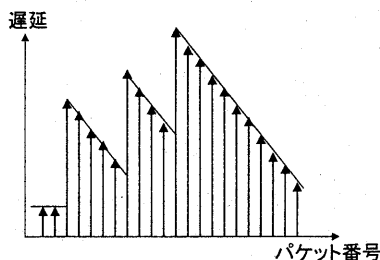


図4 PDU再送が続いて起る場合の遅延

第4の性質は、PDU損失率が高くなると、再送による遅延のためデータが送信側のバッファに滞留し、実効的に転送帯域容量が減少したように見えることである。具体的には、再送の発生間隔が遅延回復時間を超えると遅延が一方的に増加し、バッファあふれを生じて大きなパケット損失が発生するので、超えない必要がある。発生間隔  $d$  はパケットの損失発生率  $l$  の逆数  $1/l$  とパケットの送出間隔  $f$  の積であり、パケットの送出間隔  $f$  は定パケット長  $n$  (ビット)、実効帯域  $b$  とすれば  $f=n/b$  なので、 $d = f/l = n/(b \cdot l)$  となる。遅延回復時間  $R$  は1回の再送による遅延増加  $A=100\text{ms}$ 、出力側Ethernetの転送時間  $E=0.8\text{ms}$  のとき、 $R=(A \cdot (n/b)) / ((n/b) - E)$  となる。送出間隔が遅延回復を超えない条件は、 $d=n/(l \cdot b) < R=(A \cdot (n/b)) / ((n/b) - E)$  と書くことができる。これを変形すると、

$$l > (n - b \cdot E) / (b \cdot A) \text{ もしくは } b > n / (E + l \cdot A)$$

を得る。 $E=0.0008$ ,  $n=8000$ ,  $A=0.20$  の値を代入すると次のような関係を得る。

$$b > 8000 / (0.0008 + l \cdot 0.20)$$

図5はこの不等式の右辺をプロットしたものである。ただし図中横軸はPDUの損失率ではなく、PDU損失による再送遅延発生率である。

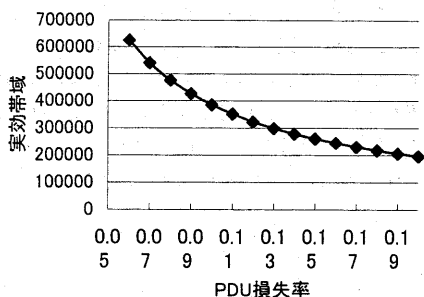


図 5 PDU 損失による実効帯域の減少

以上の 4 つの点が、既存の地上インターネット回線での実効帯域変動と大きく異なると考え、これらに対応する流量制御の手法を検討したい。

### 3. PDU 損失/再送による遅延変動の発生率

前節で触れたように、PDU の損失により再送 (ARQ) が発生し、遅延が増加するがそのあと受信端バッファの内容を吐き出すために徐々に遅延が回復する。この様子を遅延ののこぎり波状の変動と呼ぶことにする。こののこぎり波状の遅延変動の発生頻度は、前節の第 4 項の帯域決定に影響する。本報告では再送発生をランダムと仮定しポアソン発生モデルを適用する。なお、のこぎり波状変動の発生、発生頻度と発生間隔分布、のこぎり波の高さ分布などについては、実際の無線環境を用いて無線区間の遅延を測定して確認する必要がある。

再送による遅延ののこぎり波の発生をポアソン到着でモデルすると、発生間隔の分布は指数分布  $f(x) = \lambda / \exp(-\lambda x)$  となる [7]。指数分布は間隔 0 に対して最大頻度となるが、間隔が 0 ということは同時に重なって 2 つ (以上) の再送が発生し遅延が重なることになると考えられ、これが現実の WCDMA 無線区間で発生するとは考えにくいところもある。測定結果を見た上で、たとえばアーラン分布  $f(x) = (\lambda k)^k x^{k-1} / ((k-1)!) \exp(-\lambda kx)$  (ただし degree  $k$ ) [7] 等の、発生間隔 0 に対して頻度が 0 になるような分布の適用を考えなければならない可能性がある。

指数分布の形状は平均値=標準偏差=1/λ (但し λ は発生率) で規定される。λ は実用的な範囲として 1% から 10% 程度を想定する。

### 4. 帯域変動の検出方法

第 2 節で挙げた 4 つの特徴は、転送帯域の観点から見ると次のように整理することが出来る。まず、変動幅は 2 種類の変動が

あり、1 つは 384Kbps から 64Kbps までという非常に大きな変化であり、もう 1 つは同じ 384Kbps などを利用しているときに電波状態の変動により PDU 再送発生率が変動するために実行転送帯域が 350Kbps 程度から 300Kbps まで変動するような小さな変化である。大きな変動は発生頻度が推測しにくい、多くとも数秒から数十秒程度に 1 回であることが予想される。一方小さい変動は電波状態の変動であるから、わずかに移動するだけで変動する可能性があり短い時間で変動すると考えられる。

次に、受信側で受け取る IP パケットの様子から途中経路の転送容量を推定し、送信側にフィードバックし無線リンク区間でのオーバーフローを防ぐように送出流量を制御することを考える。一般にパケットの転送遅延が大きいと、安定なフィードバック制御は難しく、オーバーシュートが大きくなりその期間大きなパケット損失を招いて実効転送帯域を圧迫する。たとえば TCP の流量制御方式 [8] を援用する場合、転送路容量が送出流量より小さくなったことをパケット損失が発生したことにより判定し送出量を削減することになるが、IP パケット損失発生は経路上のバッファを使い尽くすまで発生しないので、転送路容量の減少からパケット損失発生検出までの遅延は大きく、輻輳時に相当量のパケット損失が避けられない。帯域の変動をなるべく早い時点で検知し、送信サーバの送出流量を調整する機構を考える必要がある。

WCDMA の無線区間では先述のように、ベアラ帯域の切り替えに伴う大きな帯域変動と、無線 PDU の損失率変動による実効的な帯域変動が起こる可能性がある。これらを早期に検出する方法として、1) 送信基地局等にロジックを追加し何らかのインターフェースでユーザ (ストリーム送出サーバおよび受信端末) に通知する、2) 受信端の観測により、帯域変動の兆候を早くつかむ、の 2 つの方向が考えられる。1) の方法は、確実かつ即座に帯域変更を検知し送出アプリケーションに伝えることが出来る可能性があるが、新たな UNI (User-Network Interface) を追加することになりすでに標準が整備されている現在では実現が難しい。2) は WCDMA のシステムに変更を必要としないため実現性が高いが、受信端での検出の遅れや送信サーバへの通知の遅れが大きいという問題がある。ここでは 2) を用いるが、なるべく早い時点で検出するため、パケット損失が起こってから検知するのではなく予兆を検出して流量削減の信号とする。

ベアラ帯域割り当ての変更は、受信端でのデータ到着レートの変動によって検出する。一般に帯域割り当て制御で選択できる帯域の選択肢は少数の離散値であり、また変動周期が長いと予想される。他方それに重畳される PDU 損失率変動・再送頻度変動による帯域変動の振幅は、割り当てられた帯域の 2 割

程度で限定的であり変動周期が短く遅延変動のパターンが分かっているため、受信端におけるデータ到着レートによる選択肢間の判別は容易であると期待される。具体的には受信端において受信アプリケーションに渡されるIPパケットのデータ流量を測定し、その値によってベアラに割り当てられている帯域を推定する。ストリームのパケット長を1Kバイトとするとパケット間隔は384Kbps帯域の時は約21mS、64Kbpsでは約128mSとなり、この上に再送によるのこぎり波状の変動が重畳される。PDU再送時に発生する瞬間的な遅延変動幅はRTTの200mS程度であり上記パケット間隔に比べてかなり大きい、のこぎり状の形が見られるので、その遅延回復部分の傾斜を測定するとベアラ割り当て帯域変更とPDU再送による変動を判別できる。つまり1パケット区間での遅延回復量は(受信パケット間隔-受信バッファからアプリケーションへの転送間隔)であり、前提として無線区間の転送速度に比較して受信端末からアプリケーションへの転送速度(ここでは10Mbps Ethernetを仮定)が十分大きいとすれば、回復量はほとんど受信パケット間隔となる。

判定所要時間は、受信端でのデータ到着レートの測定時間になる。測定の安定のためには多数のパケットの平均をとることが望ましいが、実際はのこぎり波状の形状を仮定するので、5-6パケットを観察すれば判定できると考えられる。

次に無線区間PDU損失の再送・回復に伴う実効帯域の変動については、到着遅延パターンを測定することによって推定できる。PDU再送によるのこぎり波状の遅延増加に注目し、こののこぎり波の発生間隔を測定する。第2節で検討したようにPDU再送の発生間隔から実効転送帯域が計算できるので、実測値をもとに帯域  $b = n / (E + A)$ 、(nはパケット長、Eは受信バッファからの取り出し経路の帯域、IはPDU再送の発生率、Aは1回の再送での遅延増加)を推定できる。

判定所要時間はPDU再送の発生間隔に依存するが、発生間隔が非常に長い場合は発生頻度が低いことになるので発生を無視できる。具体的にはのこぎり波の回復時間が200mS程度と予測されるので、たとえば500mS程度の期間で判定できるものとする。なお、無線区間損失に起因する帯域変動は、無線状況の変動を反映するので短い時定数で変動すると予想され、その速度には十分に追従できない可能性が高いが、変動幅は比較的小さいので変動を吸収できるバッファを準備することで回避できる。具体的には2割程度の変動を1秒間保持すると仮定すると、バッファ容量は384Kbpsに対して9.2Kバイトとなり、バッファ通過時間による遅延は0.2秒ということになる。

## 5. 流量制御方法の検討

前節で検討した帯域変動検出から得られる信号を、図6に示すようにWCDMA上り回線によって送信サーバにフィードバックし、それに基づいて送出データ量とビデオデータレート(再生速度)を制御する方法を検討する。再生途切れが起らないように受信端末内でデータをバッファするが、遅延低減のためバッファ内の滞留量を最小にしながら、転送帯域変動の中で送出データ量やビデオレートを最大にする流量制御方法を求めたい。

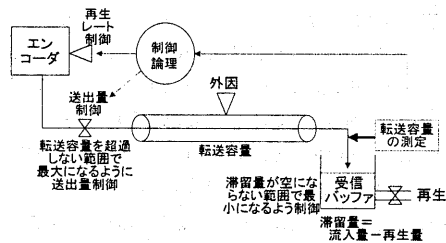


図6 流量制御

受信バッファの入力流量は実効的な到着データレートに従うが、これに対して無線区間でのIPパケット損失の影響は小さい。その根拠は、1)PDU損失が再送回復される範囲で利用することを想定するのでIPパケットのレベルでは損失はない、2)無線基地局のPDU再送用バッファのあふれによる損失は、発生しない流量範囲に制御するため一時的に発生することがあっても大きく影響する量とはならない、という考察による。サーバの送出データ量は、パケット長を固定すると送出間隔を変更することによって調整される。受信バッファで観測する入力流量は、転送路途中のバッファによる遅延を経るのでサーバでの送出間隔の変更から転送遅延時間の後に変化する。この入力流量は、転送路の帯域変動に応じてフィードバック制御される。

受信バッファの出力流量は、現在再生しているビデオデータの再生レートに従う。ビデオ再生レートはそのビデオデータが再エンコードされた時点での値になるので、データが無線区間を転送され受信バッファに蓄積されて通過する時間だけ遅れる。

エンコーダに対する再生レートの変更とサーバの送出レートの変更は、新しい再生レートのデータが新しい送出レートで送り出されるのが望ましい。なぜなら受信バッファの滞留量は送出量で決まる流入量と再生レートで決まる流出量の差であるからである。詳細に見ると再生に伴う流出量はバッファの出口にあるデータの再生レートに従うことになるので、データが受信バッファ内に滞留していると流入量の変化より遅れて変化する。しか

しながら、滞留するデータの再生時間の総和、つまり時間で表した滞留量は変わっていない。したがってバッファ滞留によるレート変更の遅れは、時間で評価すれば問題にならない。

これらを第4節の測定遅延の評価と併せると次のような遅延のモデルを得る。ペアラ帯域切り替えによる大きな帯域変化は5パケット程度(送出データ量 340Kbps 時に 110mS、58Kbps 時に 660mS と想定)で検出され、混雑していない上り回線であれば遅延 100-200mS 程度で送信サーバに到着し、直ちに再エンコードのビデオレートとパケット出力の送出データ量を変更する。この流量が下り回線の遅延 100mS-1 秒を経て受信バッファに到達する。従ってたとえば 384Kbps から 64Kbps へ変化した場合は 384Kbps のレベルの送出レート(実質はPDU再送による帯域削減により 340Kbps 程度)で 300-1300mS の期間受信バッファに到着しつづけ、その後 64Kbps のレベルに減少する。バッファのオーバーシュートは  $384\text{Kbps} \times 1300\text{mS} = 62\text{K}$  バイト程度となる。逆に 64Kbps から 384Kbps に増加する場合は、早い再生レートでエンコードされたデータが受信バッファに詰まってから再生されるので、バッファの内容が枯渇することはない。

PDU 再送による実効的な帯域変動は、検出にのこぎり波の発生間隔を測定するとして 500mS 程度を要し、その後の情報伝達の遅延はペアラ切り替えと同じで、全体では 700-1800mS 程度になり 384Kbps に対して2割の変動があったときはオーバーシュートは  $384\text{Kbps} \times 0.2 \times 1800\text{mS} = 17\text{K}$  バイト程度になる。

これらは、全体に遅延が大きいのでオーバーシュートも大きい傾向にあるが、他の方法たとえば TCP のようにパケット損失の発生を検出する方法に比べるとかなり遅延が短い。具体的には、パケット損失による検出は無線基地局の PDU 再送用のバッファがあふれたときに初めて発生するので(再送バッファ容量)/(帯域の変動、たとえば 384Kbps から 64Kbps ならば 320Kbps)の時間だけ通知の発生が遅れる上、更にこのパケット損失が下り無線回線を経て受信側に届いて受信端が損失を検出できる。検出通知が上り回線を経て戻るための遅延は同じであるから、無線基地局のバッファを埋めてあふれるまでの時間(たとえば数百 mS)と損失が下り回線で受信端に届くまでの時間(100mS-PDU 再送時は 500mS)との合計となるが、これと我々の検出法の所要時間(110mS)との差が、オーバーシュートの差となる。

## 6. まとめ

本報告では、WCDMA パケット通信を用いて IP/UDP を介した動画等のリアルタイム(ストリーム)転送を行う場合について、WCDMA 無線区間固有の性質であるペアラ帯域の切り替えによ

る転送帯域変動、無線区間 PDU の再送回復による遅延変動、再送に伴う実効帯域変動などの影響を検討した。特にストリーム転送時のフィードバックによる流量制御を考える際、これらの変動をどのように検出しフィードバックすることが出来るかについて検討し、遅延変動のこぎり波モデルに基づいて帯域を推定する方法について議論した。

今後は、WCDMA の試験サービスが始まるのでその回線等を用いた遅延変動の実測を行い、本報告の議論に用いたモデルや値を実測値に置き換えていかなければならない。また、受信バッファのデータ流量・再生レートの変動に伴う水位の変化を模擬するシミュレーションを試みつつあるので、実環境での測定結果に基づくモデルを組み込んでいろいろなフィードバック法を用いたときの水位変化を検討したい。

## 参考文献

- [1] Inamura, H., et al.: TCP over 2.5G and 3G Wireless Networks. IETF Draft draft-ietf-pilc-2.5g3g-00. Internet Society. (2001/2/22)
- [2] Yamanouchi, N., Kushida, T., Kawachiya, K.: An Experimental Dynamic QoS Control System over Internet. InterWorking 96. (In "Global Information Infrastructure Evolution", Ed. S. Rao et al, IOS Press), Oct 1996.
- [3] 安木成比古、渥美幸雄、高橋修、尾上裕子、黒川雅人、串田高幸、富田アルベルト、山内長承: モバイルストリーミングのためのQoS制御フレームワーク。(DiCoMo2001 発表予定)
- [4] 串田高幸、富田アルベルト、黒川雅人、山内長承、高橋修、渥美幸雄、安木成比古、尾上裕子: モバイルマルチメディア QoS の構成方式。(DiCoMo2001 発表予定)
- [5] NTTドコモ ニュースリリース「第三世代移動通信システムのサービスブランド名を決定」(2000.11.30). <http://www.nttdocomo.co.jp/new/contents/00/whatnew1130a.htm>
- [6] 3GPP Technical Specification: RLC protocol specification. TS 25.322 V3.6.0 (2001-03)
- [7] 森村英典、大前義次: 応用待ち行列理論. 日科技連. 1975.
- [8] Postel, J.: Transmission Control Protocol. RFC 793, Internet Society. (1981).