

## ベストエフォート型無線回線による連続メディア伝送時のトラフィック制御方式性能評価

加藤 正美<sup>†</sup>      田中 靖浩<sup>††</sup>      田坂 修二<sup>††</sup>

Performance Evaluation of a Traffic Control Scheme for Continuous Media Transmission over a Best-Effort Radio Channel

Masami KATO<sup>†</sup>, Yasuhiro TANAKA<sup>††</sup>, and Shuji TASAKA<sup>††</sup>

あらまし 本論文では、回線交換サービスであっても、ネットワークの状況に応じて回線容量が切り換わるベストエフォート型無線回線を検討対象とする。そして、その回線を用いたインターネットアクセスにおいて、連続メディアをライブ伝送する場合を考える。このとき、回線容量に応じて送信レートを適切に制御しなければ、回線容量の減少時には遅延の増加やデータの欠落が発生したり、回線容量の増加時には割り当てられた回線容量が有効に利用されない可能性がある。そこで本論文では、ベストエフォート型無線回線の回線容量の変化に対応したトラフィック制御方式を提案する。そして、PHSベストエフォート型ベアラサービスを利用した実験システムを構築し、提案方式の性能を評価する。特に、同じ基地局内で意図的に回線容量を変更できる実験システムを構築し、メディア同期品質を含む性能評価尺度により提案方式の有効性を示す。

キーワード トラフィック制御、ベストエフォート型、連続メディア、メディア同期、PHS

### 1. ま え が き

移動体通信とインターネットの融合が急速に進展し、移動体通信網がインターネットへの無線アクセス網として重要な役割を担ってきている[1]。移動体通信では、インターネットアクセスを実現するために、回線交換サービスやパケット交換サービスを提供している。パケット交換サービスでは、複数のユーザが一つの無線回線を共有し、統計多重効果によりこれを有効に活用している。一方、回線交換サービスでは、ある1人のユーザが一つの無線回線を占有するものの、高速で低遅延の通信サービスを提供している。更に最近では、回線交換サービスであっても、状況に応じて回線容量を切り換えるベストエフォート型の無線回線制御が注目を集めている。

例えばPHS (Personal Handy Phone System) [2]では、ベストエフォート型ベアラサービスを提供している。

すなわち、ハンドオーバー時などでは、無線回線の状況に応じて、回線容量が64 kb/sと32 kb/sとの間で動的に切り換わる。また、データリンクレベルのプロトコルとして、伝送誤りだけでなく回線容量の切換えにも対応したPIAFS (PHS Internet Access Forum Standard) Ver.2.1[3]を適用すれば、高品質な無線インターネットアクセスが可能になる。このようなベストエフォート型の無線回線制御は、回線容量が有限の移動体通信において無線接続を維持するための重要な手法の一つである。

本論文では、ベストエフォート型無線回線を利用したインターネットアクセスにより、ビデオや音声などの連続メディアを伝送する場合を考える。特に、ベストエフォート型無線回線として、PHSベストエフォート型ベアラサービスの利用を考える。このとき、回線容量に応じて送信レートを適切に制御しなければ、例えば回線容量が減少すると、回線上のトラフィック量が急激に増加し、遅延の増加やデータの欠落が発生する。特に、欠落はメディアの品質に大きな影響を及ぼす。一方、回線容量が増加する場合、割り当てられた回線容量が有効に利用されない可能性がある。したがって、ベストエフォート型ベアラサービスで連続メディアを

<sup>†</sup> 三洋電機株式会社ハイパーメディア研究所, 岐阜県  
Hypermedia Research Center, SANYO Electric Co., Ltd., Gifu-ken, 503-0195 Japan

<sup>††</sup> 名古屋工業大学電気情報工学科, 名古屋市  
Department of Electrical and Computer Engineering, NAGOYA Institute of Technology, Nagoya-shi, 466-8555 Japan

伝送する場合、回線容量の切換えに対応したトラヒック制御の適用が必要になる。

また、PIAFSはSR-ARQ ( Selective Repeat Automatic Repeat reQuest ) による再送機能を有しており、再送による遅延時間の増加や揺らぎが連続メディアの時間的構造 ( メディア同期 ) [4] を乱してしまう。特に、回線容量の切換え時には、一時的に通信が中断するため、再送による遅延が増加するとともにメディア同期も乱れる。したがって、メディア同期制御の適用も重要になる。

これまでに筆者らは、蓄積された連続メディアをPHSインターネットアクセスにより伝送する場合において、PIAFSの再送がメディア同期品質に及ぼす影響を実験により評価した[5], [6]。特に、メディア同期制御方式としてスライド制御[7]を提案し、その有効性を示した。またライブ伝送においても、改良したスライド制御[8]とともにトラヒック制御を適用し、その有効性を示した。特にライブ伝送では、遅延時間を減少し、かつ、データの欠落を回避するためにトラヒック制御の適用が不可欠であることを示した[8], [9]。しかし、これらの研究は回線容量が保証されたベアラサービス ( 以下、ギャランティ型ベアラサービスと呼ぶ ) を対象としていた。また、ライブ伝送に適用したトラヒック制御方式は、遅延揺らぎの測定値からネットワークの状態を推定し、ビデオの時間的・空間的解像度を制御するものの、回線容量の切換わりには対応していなかった。

また文献[10]では、PHSの回線容量が32 kb/sから384 kb/sの範囲で切換可能な実験システムを構築し、回線容量変化時におけるFTPのスループット特性を示している。しかし、連続メディア伝送時の性能評価や、回線容量の切換えに対応したトラヒック制御の適用は検討されていない。

ところで、PHSの回線容量の切換えはハンドオーバー時に発生することが多い。ハンドオーバー時には二つの基地局間で有線網側の切換処理も行うため、同じ基地局内で回線容量のみを切り換えるときよりも通信の中断時間が大きくなり、PIAFSの再送により大きな遅延が発生する。更にハンドオーバー直前では、無線通信環境が悪化していることが多く、遅延が更に増加してしまう。そのため、回線容量の切換わりに対応したトラヒック制御は、ハンドオーバー時においても有効でなければならない。

これまでに筆者らは、ギャランティ型ベアラサービ

スにおけるハンドオーバー時の蓄積メディア同期品質を、PHSの公衆サービスを利用した実験により評価した[11]。しかし、ベストエフォート型ベアラサービスにおけるハンドオーバー時の性能評価、特に、トラヒック制御の適用が不可欠なライブメディア伝送において、回線容量の切換えやハンドオーバーにも対応したトラヒック制御については、十分な検討がなされていない。

そこで本論文では、ベストエフォート型無線回線を用いたインターネットアクセスにより連続メディアをライブ伝送する場合において、回線容量の変化に対処できるトラヒック制御方式を提案する。そして、PHSベストエフォート型ベアラサービスを利用した実験システムを構築し、提案方式の性能を実験により評価する。まず、同じ基地局内で意図的に回線容量を変更できる実験システムを構築する。そして、提案するトラヒック制御方式とともに、メディア同期制御方式 ( スライド制御 ) を実装し、メディア同期品質を含む性能評価尺度により、提案方式の有効性を示す。更に、基地局間のハンドオーバーにより回線容量を変更できる実験システムをPHS公衆サービスを利用して構築し、ハンドオーバー時においても提案方式が有効であることを示す。

本論文の以下の構成は次のとおりである。2. ではトラヒック制御方式について、3. では実験システムについて述べる。4. では測定結果と性能評価を報告する。

## 2. トラヒック制御方式

本章では、PHSベストエフォート型ベアラサービスにおける回線容量の切換わり動作について述べる。そして、回線容量の変化に対応したトラヒック制御方式を提案する。

### 2.1 PHSベストエフォート型ベアラサービス

PHSでは、32 kb/sと64 kb/sの非制限デジタルベアラサービスを提供している。これらはTDMA/TDD ( Time Division Multiple Access / Time Division Duplex ) フレームの一つのタイムスロットを使用して32 kb/s、二つのそれを使用して64 kb/sのベアラ速度を実現している。

64 kb/s非制限デジタルベアラサービスには、ギャランティ型ベアラサービスとベストエフォート型ベアラサービスの二方式が規定されている。ギャランティ型ベアラサービスは、通信開始時に確保した64 kb/sの回線容量を常に保証する方式である。ただし、ハンドオーバー時に64 kb/sの回線容量が確保できなければ、通

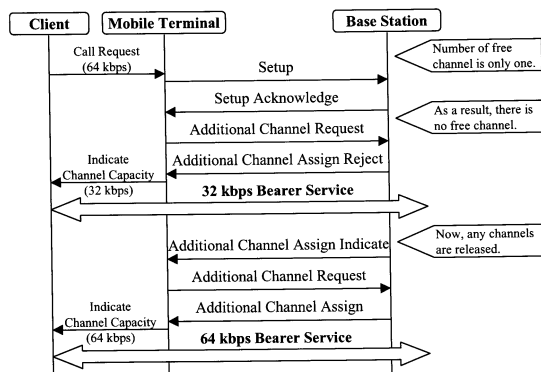


図 1 回線容量切替時の制御シーケンス例

Fig. 1 An example of the control sequence during the transition of capacity.

信を終了してしまう。一方、ベストエフォート型ベアラサービスは、通信開始時やハンドオーバー時に 64 kb/s の回線容量が確保できなくても、必ずしも通信を終了しない。すなわち、32 kb/s の回線容量が確保できれば一時的に 32 kb/s で通信を行い、64 kb/s の回線容量が確保できた時点で 64 kb/s に切り換える。

図 1 に回線容量切替時の制御シーケンス例を示す。通信開始時やハンドオーバー時において移動局は、まず、新しい通信チャンネルの一つ確保する。更に移動局は、基地局に通信チャンネル追加要求を送信する。このとき、通信チャンネルの空きがなければ追加拒否が移動局に返送され、32 kb/s で通信を行う。その後、通信チャンネルが空けば、基地局から移動局に通信チャンネル追加要求が指示される。これを受けて移動局が追加要求を行うと、新たな通信チャンネルが割り当てられ、64 kb/s での通信に切り換わる。なお、確保した通信チャンネルは、電波状況の悪化に伴う通信の切断やハンドオーバーの発生により、解放されることがある。

また、端末と移動局間のインターフェースでは、制御情報が交換される。この制御情報の一つに回線容量変化情報がある。これは、回線容量が増減したときに、無線区間で確保しているタイムスロット数を移動局から端末に通知するものである。

## 2.2 回線容量の変化に対応したトラフィック制御方式

本論文では、PHS ベストエフォート型ベアラサービスを利用したインターネットアクセスにより、連続メディアを送信する場合を考える。特に、インターネット上のメディア発生源（サーバ）から移動局に接続された端末（クライアント）にライブ伝送する場合において、回線容量の変化に対処できるトラフィック制御方

式を提案する。なお、サーバからクライアントへの通信を下り、逆方向を上りとする。また各メディアは、その出力単位であるメディアユニット (MU) から構成され、MU 単位で送受信されるものとする。

提案方式では、上り下り両方向の片道遅延時間、及び、回線容量変化情報を利用してネットワークの状態を推定し、ビデオの符号発生量を制御する。ビデオの符号発生量は、目標符号発生レート  $r$  を設定し、量子化特性の変更による空間的解像度制御や、フレームをスキップする時間的解像度制御により制御される。ここでは、回線容量  $c$  ( $c = 32$  は 32 kb/s,  $c = 64$  は 64 kb/s) に応じて、 $r$  の下限値  $r_{\min}^{(c)}$ 、及び上限値  $r_{\max}^{(c)}$  を定め、その範囲内で  $r$  を制御する。

また提案方式では、クライアントが周期的にフィードバック情報をサーバに送信する。フィードバック情報には、その送信時刻、回線容量の変化情報、及び、下り方向の片道遅延に基づく制御情報が含まれる。サーバは、受信したフィードバック情報の内容、及び、その受信タイムアウトによりネットワークの状態を推定し、以下のようにビデオの符号発生量を制御する。なお、音声にはトラフィック制御を適用しない。

### (1) 上り方向の片道遅延の利用

回線容量の変化情報は、回線容量が切り換わった後に通知される。しかし、通信の中断時間が長いため、回線容量の変化情報だけでは、通信の中断を迅速に検出できない。そこで、クライアントが周期的にフィードバック情報をサーバに送信し、サーバにおける受信タイムアウトの発生により、通信の中断を検出することを考える。なお、 $j$  はフィードバック情報のシリアル番号、 $\delta$  はフィードバック情報の送信間隔の最大許容時間、 $\phi_{j-1}$  は  $j-1$  番目までのフィードバック情報の片道遅延の最小値、 $\eta$  は通信状態が良好な場合における片道遅延の揺らぎの大きさを表すものとする。

クライアントは、サーバからビデオ MU が到着すること、及び到着後  $\delta$  が経過しても次のビデオ MU が到着しなければ、その送信時刻を含むフィードバック情報をサーバに送信する。サーバでは、 $j-1$  番目のフィードバック情報を受信した場合、それに含まれる送信時刻に、 $\delta$ 、 $\phi_{j-1}$ 、及び  $\eta$  を加算した時刻を、 $j$  番目のフィードバック情報のタイムアウト時刻に設定する。

タイムアウトが発生した場合、サーバは通信の中断が発生したものと判断し、 $r = r_{\min}^{(c)}$  とするとともに、通信が再開（すなわち、新たなフィードバック情報が到着）するまでの間、ビデオのフレームスキップを行う。

### (2) 回線容量変化情報の利用

回線容量が変化したとき、移動局からクライアントに回線容量変化情報が通知される。クライアントは、この回線容量変化情報をフィードバック情報に含めてサーバに通知する。サーバは、通知された回線容量  $c$  に応じて、使用する  $r$  の下限値、上限値を変更し、 $r = r_{\max}^{(c)}$  とする。ただし、フィードバック情報がタイムアウト時刻後に到着した場合は制御を保留し、引き続き受信するフィードバック情報がタイムアウト時刻以内に到着するのを待って制御を行う。

### (3) 下り方向の片道遅延の利用

PHSは全二重通信であるため、上り方向の片道遅延の揺らぎだけでは、下り方向の回線状態を通信の中断以外、十分に表すことはできない。そこで、下り回線の通信状態に応じてトラヒック制御を行うことを考える。すなわち、クライアントは、ビデオMUを受信するたびに下り方向の片道遅延を測定し、それに基づく制御情報をフィードバック情報に含めてサーバに送信する。サーバは、この情報をもとに目標符号発生レート  $r$  の変更、及びフレームスキップを行う。この制御情報は、クライアントにおいて下り方向の片道遅延の揺らぎと二つのしきい値  $T_{hA}$ 、 $T_{hB}$  ( $0 < T_{hA} < T_{hB}$ ) を比較することにより、次のように求める。なお、 $n$  はビデオMUのシリアル番号、 $\psi_n$  は  $n$  番目のビデオMUの下り方向の片道遅延、 $\Psi_{n-1}$  は  $n-1$  番目までのビデオMUの片道遅延の最小値とする。

#### (i) $\psi_n - \Psi_{n-1} < T_{hA}$ の場合

送信側での符号発生レートと受信側でのスループットの差が小さく、無線通信品質が安定した状態にあると考えられる。そこで、 $r$  の値を  $\Delta r$  (固定値) だけ大きく設定する。

#### (ii) $T_{hA} < \psi_n - \Psi_{n-1} < T_{hB}$ の場合

送信側での符号発生レートに比べ受信側でのスループットが低下し、ネットワークがふくそうし始めていると考えられる。そこで、ふくそうを緩和するために  $r = r_{\min}^{(c)}$  とする。

#### (iii) $T_{hB} < \psi_n - \Psi_{n-1}$ の場合

無線環境の悪化により、受信側でのスループットが非常に低下し、ネットワークがふくそうしていると考えられる。そこで、ふくそうを回避するために  $r = r_{\min}^{(c)}$  とするとともに、 $\psi_n - \Psi_{n-1}$  時間分だけフレームスキップ数を増やす。

### 2.3 メディア同期制御方式

本論文では、メディア同期制御方式として、筆者ら

が既提案のスライド制御[7]、[8]を適用する。これはVTR (Virtual-Time Rendering) アルゴリズム[12]、[13]に基づいている。

ここで、メディア発生源  $i$  における  $n$  番目のMUの発生時刻を  $T_n^{(i)}$ 、メディアの出力先におけるメディア  $i$  の  $n$  番目のMUの目標出力時刻を  $t_n^{(i)}$ 、到着時刻を  $A_n^{(i)}$ 、実際の出力時刻を  $D_n^{(i)}$  と定義する。なお、 $i=1$  はビデオ、 $i=2$  は音声を示す。このとき、メディア内同期は、単一メディア  $i$  を構成するMU間の発生間隔  $T_n^{(i)} - T_{n-1}^{(i)}$  を、メディアの出力先においても出力間隔として維持することである。更に、メディア間同期は、メディア1の  $n$  番目のMUと、これに対応するメディア2の  $m$  番目のMUとの発生間隔  $T_n^{(1)} - T_m^{(2)}$  を、メディアの出力先において同様に維持することである。スライド制御では  $A_n^{(i)} - t_n^{(i)}$  の値をしきい値と比較し、その関係に応じて  $t_n^{(i)}$  を意図的に変更を行い、メディア同期品質の維持を図る。

## 3. 実験システム

本論文では、提案したトラヒック制御方式の有効性を確認するために、2種類の実験システムを構築し、性能評価実験を行った。まず、回線容量のみが変化する場合の性能を評価するために、疑似電波伝搬環境を使用し、同じ基地局内で意図的に回線容量の切換えが可能な屋内実験システムを構築した。更に、回線容量の変化に加えて、無線通信環境の悪化や有線網側の切換えの影響を受けるハンドオーバー時の性能を評価するために、PHSの公衆サービスを利用した実験システムを構築した。

### 3.1 実験システムの構成

2種類の実験システムの構成を以下に示す。

(1) 回線容量のみが変化する場合の性能評価実験  
図2に実験システムの構成を示す。クライアント (MMX Pentium II 300 MHz, Windows98) 側の移動局は、PHSの無線通信環境をシミュレートする疑似電波伝搬環境を介して実験用基地局と接続される。実験用基地局は、ISDN疑似交換機を介してダイヤルアップルータ (SII社製 NS-2482-30) と接続される。更に、ダイヤルアップルータは、Ethernet (10BASE-T) を介してサーバ (Sun Ultra 30, Solaris 2.6) とつながる。サーバは、ビデオ情報と音声情報をリアルタイムに生成し、MU単位でクライアントに送信する。このときに適用するプロトコルの構成を図3に示す。クライアントとダイヤルアップルータ間のデータリンクレベルのプロトコ

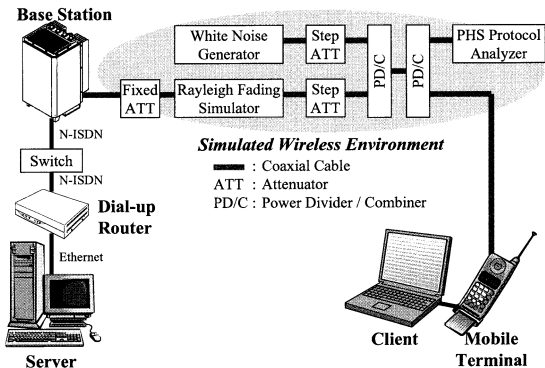


図2 疑似電波伝搬環境による実験システム

Fig. 2 Experimental system with a simulated wireless environment.

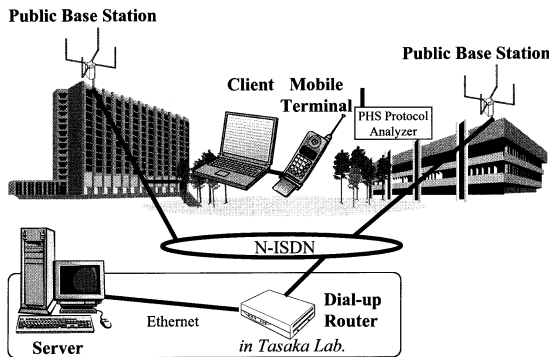


図4 公衆基地局を利用した実験システム

Fig. 4 Experimental system with public base stations.

	Server	Dial-up Router	Client
Transport layer	UDP		UDP
Network layer	IP	IP	IP
Data link layer		NCP	NCP
		LCP	LCP
		PIAFS	PIAFS
Physical layer	Internet	N-ISDN	RCR STD28

図3 プロトコルスタック

Fig. 3 Protocol stack.

ルとしてPIAFS, 更に, その上位にPPP (Point-to-Point Protocol) を適用する. また, クライアントとサーバ間のトランスポートレベルのプロトコルとしてUDPを使用する. なお, クライアントからサーバに送信するフィードバック情報もUDPを使用する.

疑似電波伝搬環境では, 移動局と実験用基地局を同軸ケーブルで接続する. また, レイリーフェージング・シミュレータにより疑似的にフェージングを付加できる. 更に, 可変減衰器により無線キャリアの伝送路損失, 及び白色雑音発生器に内蔵された可変減衰器により白色雑音の出力レベルを変更できる. 移動局における無線キャリアの受信レベル及び白色雑音の受信レベルは, PHS プロトコルアナライザのスペクトラムアナライザ機能により測定する. そして, これらの測定値から  $CNR$  (Carrier to Noise Ratio) を算出する. なお, 実験に際しては, 移動局内の熱雑音の影響が無視できるように, すなわち, 無線キャリアの受信レベルが十分大きくなるように, 可変減衰器の値を選択した. なお, 実験用基地局の送信出力は500 mW, PHS移動局のそれは10 mWである.

また本実験では, 回線容量の切替時におけるトラフィック制御の有効性を確認するために, 意図的に回線容量の変更を行う. そのために, クライアントと移動

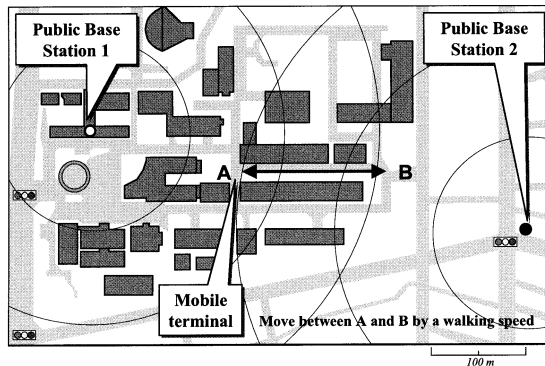


図5 公衆基地局の設置位置

Fig. 5 Location of public base stations.

局間のインタフェースにおける制御情報を利用する. すなわち, クライアントは, 回線容量変更要求 (制御情報の一つとして規定されている) を移動局に送信することで, 任意のタイミングで回線容量を変更できる. また, その制御結果は, 移動局から返送される回線容量変化情報により確認できる.

## (2) ハンドオーバー時の性能評価実験

ハンドオーバー時の性能を評価するために, 図4に示す実験システムを構築した. クライアント側の移動局は, 実際の公衆基地局やISDN網を介して, 研究室に設置したダイヤルアップルータにPPP接続し, サーバと通信を行う. 実験には, 名古屋工業大学のキャンパス周辺に設置された公衆基地局を使用した. その設置状況を図5に示す. 実験では, まず, A地点にいる移動局が, 基地局1を介して連続メディアの受信を開始する. その後, ハンドオーバーを発生させるために, B地点へと歩行速度で移動を行う.

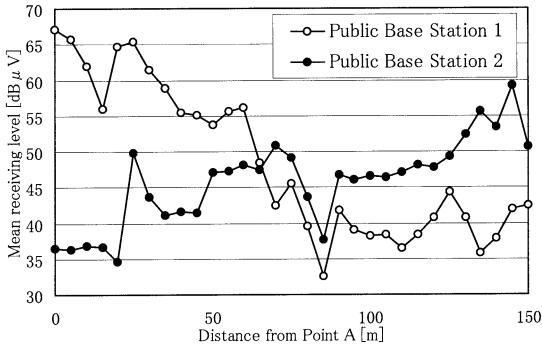


図6 電波の受信レベルと位置の関係  
Fig. 6 Relation between receiving level of radio and position.

図6にA地点からB地点における各基地局の受信レベルの変化を示す。各値はPHSの制御チャンネルの受信レベルを40回測定し、その平均値を求めたものである。A地点において、基地局1からの電波の受信レベルは、距離が近く障害となる建物もないため非常に高い。一方、基地局2からの電波の受信レベルは、A地点との間の建物が障害となり、電波が遮られるため低い。そして、A地点からB地点へ65m以上移動すると、基地局1からの電波の受信レベルは、建物に遮られ、急激に低下する。これに対し、基地局2の電波の受信レベルは、基地局に近付くため高くなっていく。

ハンドオーバーにより回線容量を64 kb/sから32 kb/sに減少させる実験では、まず、A地点で基地局1と64 kb/sでの接続を確立する。そして、PHSプロトコルアナライザにより基地局2の通信チャンネルの空きが一つであることを確認し、その状態でB地点へ移動を行い、基地局2へのハンドオーバーを発生させる。

一方、32 kb/sから64 kb/sに増加させる実験では、逆方向に移動する。まず、基地局2の通信チャンネルの空きが一つであることを確認した後、B地点で基地局2に64 kb/sでの接続を要求する。このとき、通信チャンネルの空きが一つなので、32 kb/sでの接続を確立する。そして、基地局1の通信チャンネルの空きが二つ以上であることを確認し、その状態でA地点へ移動を行い、基地局1へのハンドオーバーを発生させる。

### 3.2 メディアの仮定

本実験で使用するビデオと音声は、サーバにおいてリアルタイムに生成され、MU単位で送信される。メディアの生成に関し、以下の仮定を置く。

(A1) 音声は符号発生レートが16 kb/sのG.726により符号化され、100 byteの情報量をもって1音声MUと

する。したがって音声のMUレートは20 MU/sとなる。

(A2) ビデオはH.263により符号化され、1ビデオフレームを1ビデオMUとする。

(A3) トラフィック制御によりビデオの目標符号発生レート $r$ を制御する。実験では目標MUレートを15 MU/sとし、 $r_{\min}^{(32)} = 10$  kb/s、 $r_{\max}^{(32)} = 10$  kb/s、 $r_{\min}^{(64)} = 10$  kb/s、 $r_{\max}^{(64)} = 32$  kb/s、 $\Delta r = 4$  kb/sとする。これらの値は32 kb/s及び64 kb/sの回線容量の大きさ、及び、音声の符号発生レート、UDPやPPPによるオーバーヘッドを考慮して選択した。なお、トラフィック制御を適用しない実験を行う場合、 $r = r_{\max}^{(64)}$ とする。これは、通常は64 kb/sの回線容量での通信を想定しており、32 kb/sの回線容量での通信は一時的なものと考えられるためである。

(A4) 生成する連続メディアの諸元は以下のとおりである。

- ・メディアソース：人の上半身の画像
- ・画像サイズ： sub-QCIF (128 × 96 ピクセル)
- ・取り込み時間： 120 s

### 3.3 トラフィック制御のパラメータ

トラフィック制御方式の各パラメータの値は、 $\delta = 100$  ms、 $\eta = 50$  ms、 $T_{ha} = 150$  ms、 $T_{hb} = 200$  msとする。 $\delta$ は通信の中断を迅速に検出できるように100 msを選択した。また、 $\eta$ は上り方向の片道遅延の揺らぎの大きさを予備実験により確認し、50 msとした。同様に $T_{ha}$ は下り方向の片道遅延の揺らぎの大きさを予備実験により確認し、150 msとした。 $T_{hb}$ は通信状態の悪化に迅速に対応できるように、 $T_{ha}$ より50 ms大きい200 msを選択した。

### 3.4 評価尺度

本論文では評価尺度として、平均MU出力レート、MU欠落率、平均MU遅延、メディア間同期の平均2乗誤差を用いる。平均MU出力レートは受信側で単位時間当りに出力したMU数の平均値、MU欠落率は単位時間当りに欠落したMU数の割合を示す。また、平均MU遅延は各MUの $D_n^{(i)} - T_n^{(i)}$ の値の平均値である。メディア間同期の平均2乗誤差は、 $n$ 番目のビデオMUと、それに対応する $m$ 番目の音声MUの出力間隔( $D_n^{(1)} - D_m^{(2)}$ )と発生間隔( $T_n^{(1)} - T_m^{(2)}$ )の差の2乗平均である。

## 4. 実験結果

本論文では、ベストエフォート型無線回線を用いた連続メディア伝送において、提案したトラフィック制御方式が回線容量の切換えに有効であることを実験によ

り明らかにする．そのために，回線容量のみが変化するときの性能評価実験，更に，ハンドオーバー時の性能評価実験を行う．特に，トラフィック制御方式を適用する場合（TC: Traffic Control）と，適用しない場合（NC: No Control）との間で性能比較を行う．なお，メディア同期制御方式として，両者にスライド制御[7], [8]を適用する．

実験では，回線容量の切り替わりによる影響を調べるために，回線容量の切り替わり終了時刻の前後30秒間を5秒ごとの12区間に分割し，各区間に出力したMUを対象にして，区間ごとの性能評価を行う．測定はTC及びNCとも各10回行い，区間ごとの平均値を求める．なお，以後に示す各グラフにおいて，横軸は，回線容量の切り替わり終了時刻を0秒とした場合の相対時間を示す．

#### 4.1 回線容量のみが変化するときの性能評価

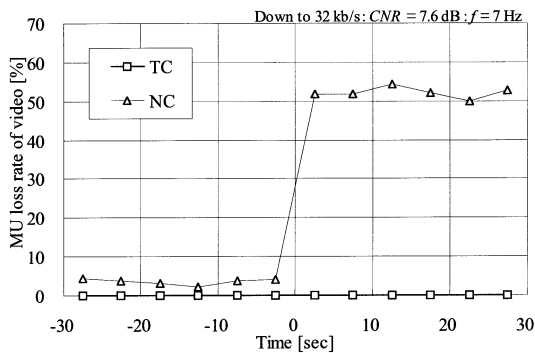
回線容量のみが変化するときの性能を評価するために，同じ基地局内で意図的に回線容量の切り替えが可能

な実験システムを使用し，回線容量が減少する場合，及び増加する場合のそれぞれにおいて実験を行った．なお，実験では特に指定がない場合，フェージング周波数 $f$ を7 Hz（4 km/hによる移動に相当），CNRを7.6 dBとした．

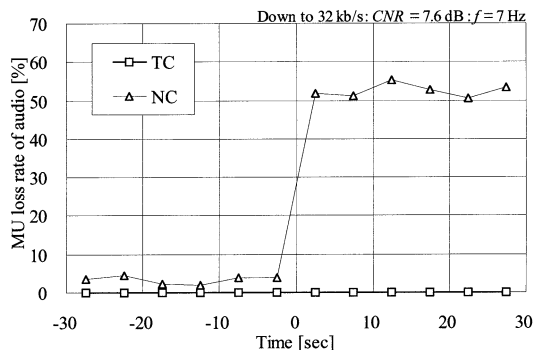
##### 4.1.1 回線容量が減少する場合

最初に，回線容量が64 kb/sから32 kb/sに減少する場合の実験結果を示す．

図7にビデオと音声のMU欠落率の時間的変化，図8にビデオと音声の平均MU出力レートの時間的変化を示す．なお，TCの場合を□印，NCの場合を△印で示す．図7によれば，NCのMU欠落率は，ビデオ及び音声とも回線容量減少後に50%以上に増加している．しかしTCでは，回線容量減少後においてもビデオ及び音声とも欠落は発生していない．これは，TCでは次のようなトラフィック制御の実行により，ダイアルアップルータでのバッファあふれを回避できたためである．すなわち，サーバは回線容量の切り替えに伴う通信の中

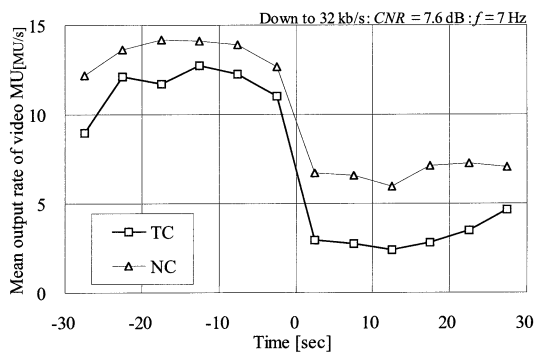


(a) Video

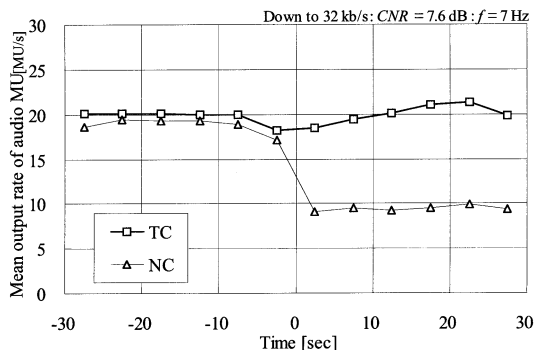


(b) Audio

図7 MU欠落率の時間的変化（減少時）  
Fig. 7 Progress of MU loss rate (down to 32 kb/s).



(a) Video



(b) Audio

図8 平均MU出力レートの時間的変化（減少時）  
Fig. 8 Progress of average MU rate (down to 32 kb/s).

断をフィードバック情報の受信タイムアウトにより迅速に検出し、中断期間中におけるビデオのフレームスキップ、及び、目標符号発生レートの $r_{\min}^{(64)}$ への変更を行う。通信再開後、サーバは回線容量変化情報を含むフィードバック情報を受信し、目標符号発生レートを $r_{\max}^{(32)}$ に設定する(注1)。更に、サーバは通信の中断や回線容量の減少に伴い下り方向の片道遅延が大きくなったことをフィードバック情報により検出し、2.2(3)下り方向の片道遅延の利用における条件(iii)により適宜、フレームスキップを行う。実際に図8によれば、ビデオの平均MU出力レートは回線容量減少後にNCよりもTCのほうが低下していることがわかる。

また、音声の平均MU出力レートは、TCでは回線容量減少後においても、変化前と同程度の出力レートを維持していることがわかる(図8)。これは、ビデオの符号発生量を削減するという、いわばビデオを犠牲にすることで、音声MUの欠落を回避したためである。なお、回線容量切換え時に値が少し低下しているのは、回線容量の切換えに伴う通信の中断(約700ms(注2))により、音声MUの到着が一時的に中断したためである。

主観評価においても、NCでは回線容量減少後に音声の途切れが非常に目立ち、内容を聞き取れないほどであったが、TCでは十分聞き取れる品質であった。一方、ビデオにおいても、NCではMUの欠落により画像が大きく乱れたが、TCでは出力レートが低下するものの大きな画像の乱れは発生しなかった。

次に、図9に、音声の平均MU遅延の時間的変化を示す。回線容量が64 kb/sのとき、TCはNCよりMU遅延が小さく保たれている。これはPIAFSの再送などにより大きな遅延が発生しても、サーバがフィードバック情報により下り方向の片道遅延の状況を検出し、フレームスキップなどにより符号発生量を調整するためである。また、回線容量減少時に遅延が増加するのは、MUがダイヤルアップルータにバッファリングされている時間が増加するためである。しかしTCでは、トラフィック制御により回線容量に応じた符号発生量に切り換わるため、NCに比べ遅延の増加が低くおさえられている。ただし、TCでも遅延時間が1秒前後になっており、ライブ伝送に十分な値とはいえない。ビデオの符号発生量を更に削減する、若しくは、音声にもトラフィック制御[14]を適用するなどの改良が必要である。なお、回線容量減少後、徐々に遅延が減少するのは、ダイヤルアップルータにバッファリングされている情報量が、トラフィック制御により徐々に削減されていくた

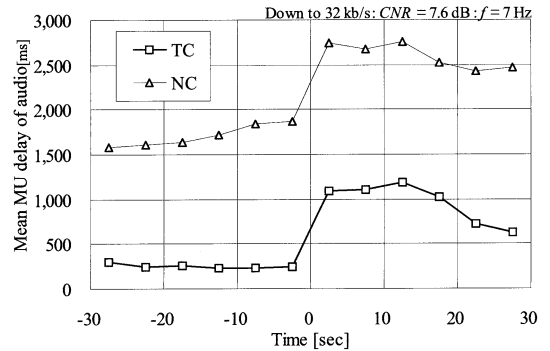


図9 音声の平均MU遅延の時間的変化(減少時)

Fig. 9 Progress of mean MU delay for audio (down to 32 kb/s).

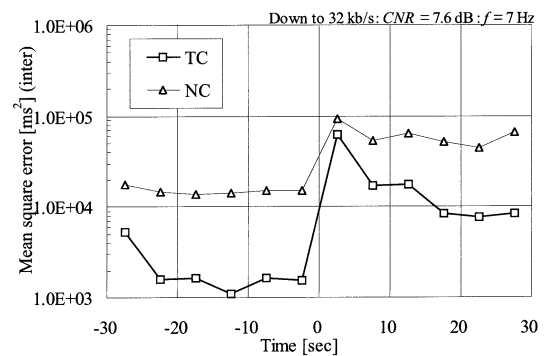


図10 メディア間同期の平均2乗誤差の時間的変化(減少時)  
Fig. 10 Progress of mean square error of inter-stream (down to 32kb/s).

めである。また、ビデオにおいても同様の傾向を確認している。

図10に、メディア間同期の平均2乗誤差の時間的変化を示す。これによれば、回線容量の減少時には、TC及びNCとも誤差が非常に大きくなるが、その後、TCはNCよりも値が低くおさえられていることがわかる。文献[15]では、平均2乗誤差が6,400 ms<sup>2</sup>以内であればメディア間同期は良好な状態であり、25,600 ms<sup>2</sup>以上であれば同期外れの状態であると報告している。この値を用いて評価すれば、NCでは回線容量減少後に同期外れとなる。しかし、TCでは回線容量減少直後を除き、同期外れになることはない。すなわち、トラフィック制御は、回線容量減少時においてもメディア間同期の同期品質の改善に有効であるといえる。

(注1): 実験では $r_{\max}^{(32)}$ と $r_{\min}^{(64)}$ と同じ値に設定しているため、目標符号発生レートの変化はない。

(注2): 通信の中断時間には、PIAFSの再同期処理時間を含む。



4.1.2 回線容量が増加する場合

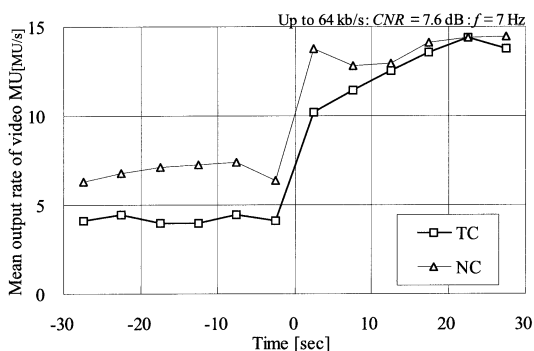
次に、回線容量が 32 kb/s から 64 kb/s に増加する場合の実験結果を示す。

図 11 にビデオと音声の平均 MU 出力レートの時間的変化、図 12 に音声の平均 MU 遅延の時間的変化を示す。

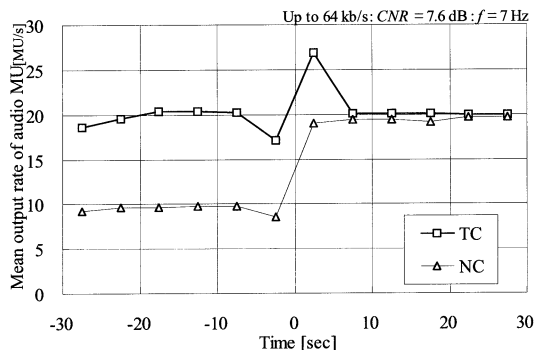
まず、ビデオの平均 MU 出力レートは、TC 及び NC とも回線容量の増加に伴い増加している。これは、ダイヤルアップルータに滞留していた MU が次々にクライアントに到着するようになったためである。TC では、サーバは回線容量の切換えに伴う通信の中断をフィードバック情報の受信タイムアウトにより迅速に検出し、中断期間中におけるビデオのフレームスキップ、及び、目標符号発生レートの  $r_{min}^{(32)}$  への変更を行う。更に、通信再開後、サーバは回線容量変化情報を含むフィードバック情報を受信し、目標符号発生レートを  $r_{max}^{(64)}$  に増加させる。しかしながら、TC の平均 MU 出力レートの増加は、NC のそれに比べ緩やかである。これは、回線容量増加後にダイヤルアップルータのバッ

ファに滞留していた MU がクライアントに到着すると、片道遅延が大きいことを示すフィードバック情報をサーバに送信し、トラフィック制御の条件 (iii) によりサーバがフレームスキップを行ったためである。なお、TC では、ビデオ MU の欠落が発生しないことを確認している。

一方、音声の平均 MU 出力レートは、TC の場合、回線容量の増加前後で変化が見られるものの、ほぼ同程度の出力レートを維持している。なお、TC では、音声 MU の欠落が発生しないことを確認している。また、回線容量増加前に値が少し低下しているのは、回線容量の切換えに伴う通信の中断により、音声 MU の到着が一時的に遅れるためである。更に、回線容量の増加後に値がいったん増加している。これは、ダイヤルアップルータに滞留していた MU が次々にクライアントに到着すると、到着時刻が目標出力時刻より大きく遅れているために、欠落なく到着した MU を直ちに出力するためである。これより音声の MU 遅延は、回線容量



(a) Video



(b) Audio

図 11 平均 MU 出力レートの時間的変化 (増加時)  
Fig. 11 Progress of average MU rate (up to 64 kb/s).

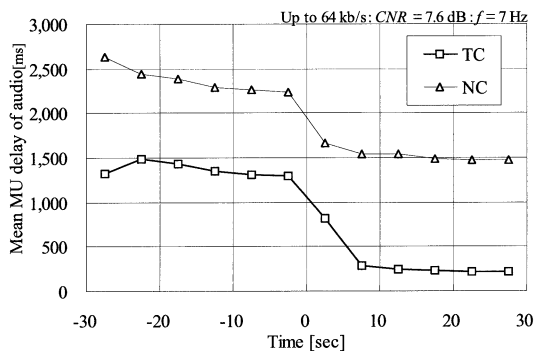


図 12 音声の平均 MU 遅延の時間的変化 (増加時)  
Fig. 12 Progress of mean MU delay for audio (up to 64 kb/s).

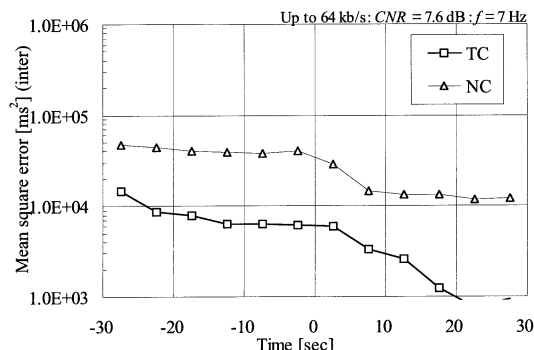


図 13 メディア間同期の平均 2 乗誤差の時間的変化 (増加時)  
Fig. 13 Progress of mean square error of inter-stream (up to 64 kb/s).

の増加に伴い、小さくなっているのがわかる(図12)。なお、NCでは、MUが欠落するために、このような一時的な増加は発生しなかった。

図13にメディア間同期の平均2乗誤差の時間的変化を示す。これによれば、トラヒック制御は回線容量が増加する場合においても、メディア間同期品質の改善に有効であるといえる。特に、回線容量の減少時に見られた一時的な同期外れは、発生していない。

4.1.3 CNRやフェージング周波数の影響

次に、CNRやフェージング周波数 $f$ の値が異なる無線通信環境において、トラヒック制御の性能評価実験を行った。

まず、トラヒック制御を適用し、CNRの値が15.5, 7.6, 5.1 dB(それぞれ, , xでプロット)の各場合において、回線容量減少時の平均MU出力レートの時間的変化を図14に、メディア間同期の平均2乗誤差の時間的変化を図15に示す。なお、いずれの場合も $f=7$  Hzとする。

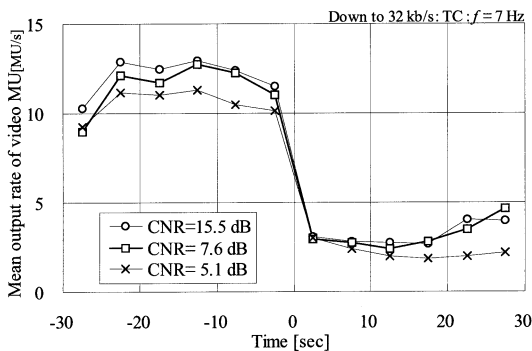


図14 ビデオの平均MU出力レートの時間的変化とCNRとの関係  
Fig. 14 Relation between progress of average MU rate for video and CNR.

これによれば、平均MU出力レート、及びメディア間同期の平均2乗誤差とも、CNRの値により性能が少し変化することがわかる。特に、CNR = 5.1 dBの場合には、その傾向が顕著である。これは、PIAFSの再送が多く発生したことにより片道遅延が増加し、トラヒック制御により多くのビデオフレームがスキップされたためである。この場合には、回線容量減少後、ダイヤルアップルータでのバッファあふれにより約5%のMU欠落が発生した。

次に、トラヒック制御を適用し、 $f$ の値が7, 40, 70 Hz(それぞれ, , xでプロット)の各場合において、回線容量減少時の平均MU出力レートの時間的変化を図16に、メディア間同期の平均2乗誤差の時間的変化を図17に示す。なお、いずれの場合もCNR = 7.6 dBとする。

これによれば、平均MU出力レート、及びメディア間同期の平均2乗誤差とも、 $f$ の値が大きくなるほど性能が低下することがわかる。これは、 $f$ の値が大きいか

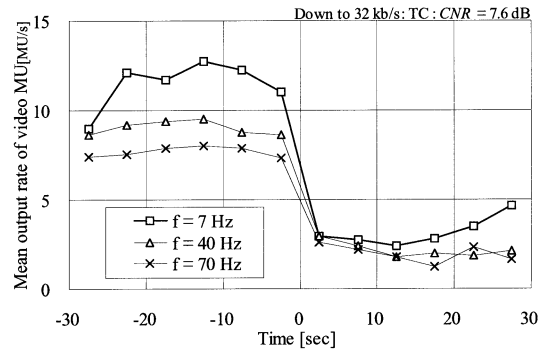


図16 ビデオの平均MU出力レートの時間的変化と $f$ との関係  
Fig. 16 Relation between progress of average MU rate for video and  $f$ .

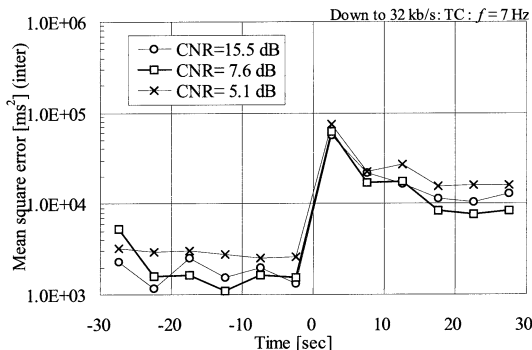


図15 平均2乗誤差の時間的変化とCNRとの関係  
Fig. 15 Relation between progress of mean square error and CNR.

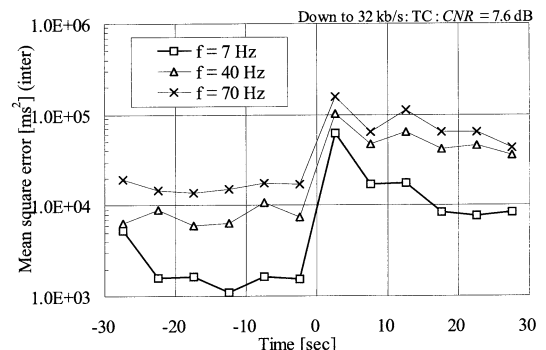


図17 平均2乗誤差の時間的変化と $f$ との関係  
Fig. 17 Relation between progress of mean square error and  $f$ .

どPIAFSの再送が頻繁に発生して片道遅延が大きくなり、トラヒック制御により多くのフレームがスキップされたためである。なお、 $f = 40, 70$  Hzの場合、回線容量減少後に、ダイヤルアップルータでのバッファあふれにより20 ~ 30%のMU欠落が発生した。

更に、回線容量が増加する場合においても、同様の傾向を確認している。また、無線通信環境が大きく悪化した場合においても欠落を回避するには、ビデオの符号発生量をより大きく削減する、若しくは、音声にもトラヒック制御を適用するなどの改良が必要である。

#### 4.2 ハンドオーバーによる回線容量変化時の性能評価

次に、ハンドオーバー時におけるトラヒック制御方式の有効性を確認するために、PHSの公衆サービスを利用して実験を行った。

##### 4.2.1 回線容量が減少する場合

ハンドオーバーにより回線容量が減少する場合において、ビデオMU欠落率の変化、ビデオの平均MU出力レートの変化、メディア間同期の平均2乗誤差の変化を、それぞれ図18 ~ 図20に示す。

これらによれば、ハンドオーバーにより回線容量が減少する場合においても、トラヒック制御を適用すれば、平均MU出力レートが低下するものの(図19)、MUの欠落を大きく減少できるとともに(図18)、メディア間同期品質も改善できることがわかる(図20)。ただし、TCにおいても、ハンドオーバー直後に5%程度の欠落が発生している。これは、ハンドオーバーに伴う通信の中断時間が約2sと、回線容量のみを切り換えるとき(約700ms)よりも大きいためである。したがって、ハンドオーバー直後においては、平均MU出力レートが極端に小さくなるとともに、メディア間同期の平均2乗誤差も極めて大きな値になる。特に、ハンドオーバーに伴って回線容量も減少するために、通信の中断の影響がより顕著に表れている。

また、ハンドオーバー発生前では、時間の経過とともに各評価尺度の値が徐々に悪くなっている。これは、移動局と基地局間の距離が大きくなるにつれて、無線通信環境が徐々に悪化し、PIAFSによる再送が頻繁に発生したためである。

##### 4.2.2 回線容量が増加する場合

ハンドオーバーにより回線容量が増加する場合において、ビデオMU欠落率の変化、ビデオの平均MU出力レートの変化、メディア間同期の平均2乗誤差の変化を、それぞれ図21 ~ 図23に示す。

これらによれば、ハンドオーバーにより回線容量が増

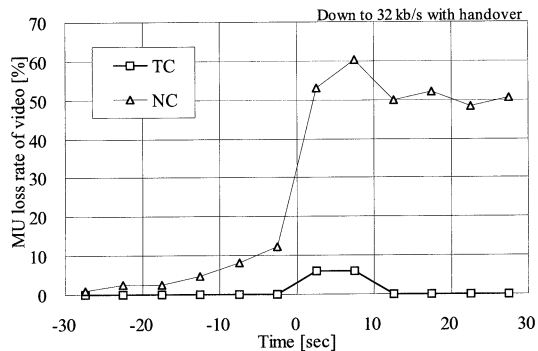


図18 ビデオMU欠落率のハンドオーバーによる変化(減少時)  
Fig. 18 Progress of MU loss rate for video during handover (down to 32 kb/s).

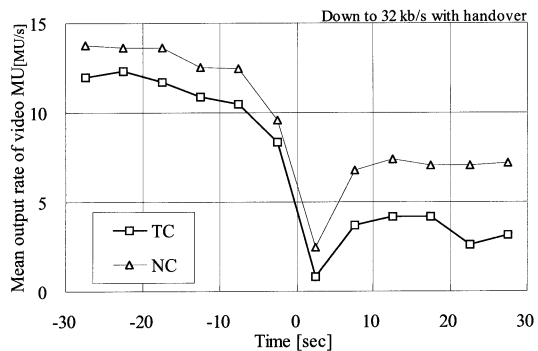


図19 ビデオの平均MU出力レートのハンドオーバーによる変化(減少時)  
Fig. 19 Progress of average MU rate for video during handover (down to 32 kb/s).

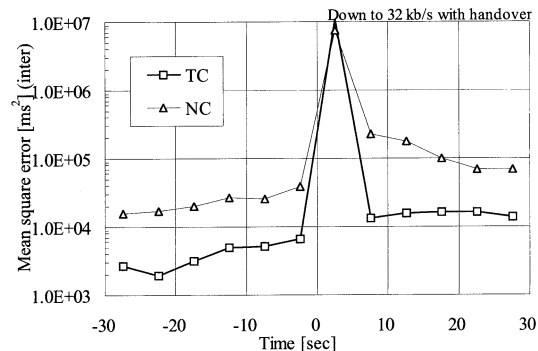


図20 メディア間同期の平均2乗誤差のハンドオーバーによる変化(減少時)  
Fig. 20 Progress of mean square error of inter-stream during handover (down to 32 kb/s).

加する場合においても、減少する場合と同様にトラヒック制御が有効であることがわかる。

ハンドオーバー発生前では、回線容量が少なく、しか

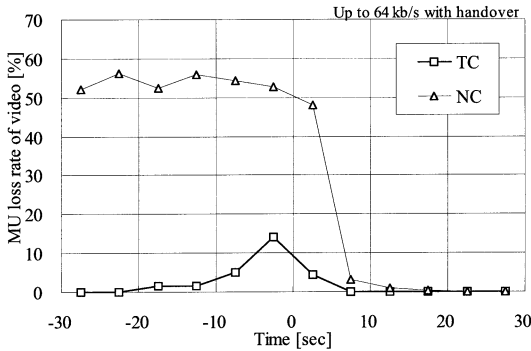


図 21 ビデオ MU 欠落率のハンドオーバーによる変化 (増加時)  
Fig. 21 Progress of MU loss rate for video during handover (up to 64 kb/s).

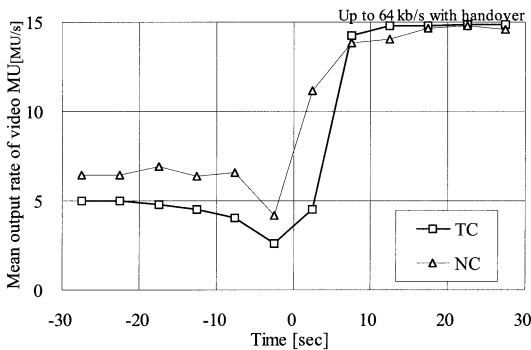


図 22 ビデオの平均 MU 出力レートのハンドオーバーによる変化 (増加時)  
Fig. 22 Progress of average MU rate for video during handover (up to 64 kb/s).

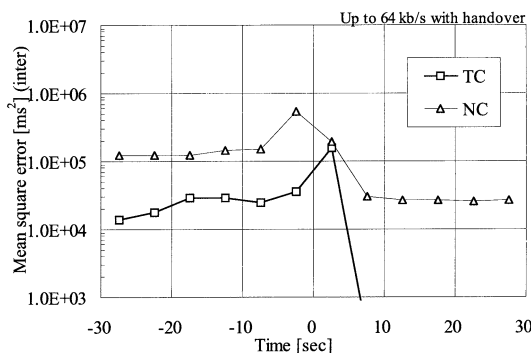


図 23 メディア間同期の平均 2 乗誤差のハンドオーバーによる変化 (増加時)  
Fig. 23 Progress of mean square error of inter-stream during handover (up to 64 kb/s).

も、無線通信環境が徐々に悪化するため、TCにおいても欠落が発生している。一方、ハンドオーバー発生後では、約 2 s 間の大きな通信の中断が発生したにもかかわらず、

回線容量が増加し、かつ、無線通信環境が良好になるために、急激に性能が改善している。

### 5. む す び

本論文では、ベストエフォート型無線回線を用いたインターネットアクセスにより連続メディアをライブ伝送する場合において、回線容量の変化に対処できるトラヒック制御方式を提案した。そして、PHS ベストエフォート型ペアラサーサービスを利用した 2 種類の実験システムを構築し、回線容量の変化時におけるトラヒック制御方式の有効性を、メディア同期品質とともに実験により評価した。

同じ基地局内で意図的に回線容量を変更できる実験システムによる実験の結果、トラヒック制御を適用すれば、回線容量の変化や、それに伴う通信の中断に応じて適切にビデオの符号発生量が調整され、MU の欠落が大きく削減できるといえる。特に、ビデオの符号発生量を削減するという、いわばビデオを犠牲にすることで、音声の欠落を回避できる。また、トラヒック制御の適用により、ビデオの平均 MU 出力レートは低下するものの、平均 MU 遅延やメディア間同期品質は改善できる。

更に、PHS 公衆サービスを利用し、基地局間のハンドオーバーにより回線容量を変更する場合についても、性能評価実験を行った。その結果、ハンドオーバーによる回線容量変化時においても、トラヒック制御が有効であることを確認した。ただし、回線容量が減少する場合においては、ハンドオーバーに伴う通信の中断時間が大きい場合、ハンドオーバー直後に欠落が発生し、性能が大きく劣化する場合がある。ハンドオーバー時の更なる性能の改善は、今後の課題の一つである。

実験では、トラヒック制御を適用した場合においても、遅延時間が 1 秒前後になる場合があった。これはライブ伝送に十分な値とはいえない。ビデオの符号発生量を更に削減する、若しくは、音声にもトラヒック制御[14]を適用するなどの改良を加えることが今後の課題である。

謝辞 本研究は、科学研究費補助金基盤研究(B)(2) (課題番号 1255109)によって行われた。関係各位に感謝する。また、本研究の初期において、活発な議論と多大なる御協力を頂いた加藤修吾氏に感謝する。

### 文 献

[1] 藤谷 宏, "移動体通信ネットワークと IP 通信技術," 信学誌, vol.83, no.4, pp.327-333, April 2000.

- [2] 社団法人電波産業会, 第二世代コードレス電話システム標準規格, 第3.3版, RCR STD-28, March 2000.
- [3] PHS インターネットアクセスフォーラム, PHS Internet Access Forum Standard (PIAFS)仕様書, 第2.1版, March 1999.
- [4] G. Blakowski and R. Steinmetz, "A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies," IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol.14, no.1, pp. 5-35, Jan. 1996.
- [5] 加藤正美, 中村耕太郎, 田坂修二, "PHS回線による蓄積メディア同期実験," 信学論(B-I), vol.J81-B-I, no.11, pp.709-719, Nov. 1998.
- [6] S. Tasaka, M. Kato, and K. Nakamura, "TCP versus UDP for media synchronization in PHS internet access," IEICE Trans. Commun., vol.E83-B, no.3, pp.713-720, March 2000.
- [7] 加藤正美, 臼井憲義, 田坂修二, "PHSによる蓄積メディア伝送時のメディア同期性能評価," 信学論(B-II), vol.J80-B-II, no.9, pp.749-759, Sept. 1997.
- [8] 加藤正美, 臼井憲義, 田坂修二, "PHSによるライブメディア伝送時のメディア同期性能評価," 信学論(B-II), vol.J81-B-II, no.8, pp.762-772, Aug. 1998.
- [9] 加藤修吾, 加藤正美, 田坂修二, "PHSによるライブメディアUDP伝送へのトラヒック制御の適用," 1999信学ソ大, B-11-6, Sept. 1999.
- [10] Y. Kamio, F. Kojima, and M. Fijise, "Implementation and performance evaluation of 384 kbit/s-PHS experimental system," IEICE Trans. Commun., vol.E83-B, no.8, pp.1844-1853, Aug. 2000.
- [11] 加藤正美, 田坂修二, "ハンドオーバー時におけるPHS蓄積メディア同期品質の測定," 信学技報, CQ98-88, Feb. 1999.
- [12] S. Tasaka, H. Nakanishi, and Y. Ishibashi, "Dynamic resolution control and media synchronization of MPEG in wireless LANs," Conf. Rec. IEEE GLOBECOM '97, pp.138-144, Nov. 1997.
- [13] Y. Ishibashi and S. Tasaka, "A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications," Proc. IEEE INFOCOM '95, pp.1010-1019, April 1995.
- [14] 加藤修吾, 加藤正美, 田坂修二, "PHSによるライブ音声UDP伝送への無音区間検出によるトラヒック制御の適用," 1999信学総大, B-5-213, March 1999.
- [15] R. Steinmetz, "Human perception of jitter and media synchronization," IEEE J. Sel. Areas in Commun., vol.14, no.1, pp.61-72, Jan. 1996.

(平成13年3月19日受付, 6月25日再受付)



田中 靖浩 (学生員)

平12名工大・工・電気情報卒.現在,同大学院博士前期課程 在学中 無線ネットワークの研究に従事.



田坂 修二 (正員)

昭46名工大・工・電気卒.昭51東大大学院博士課程了.同年名工大・情報勤務.現在,同大・電気情報教授.昭59~60UCLA客員研究員.マルチメディア通信,無線ネットワークの研究に従事.工博.IEEE,ACM,情報処理学会各会員.



加藤 正美 (正員)

昭59名大・理・物理卒.同年三洋電機(株)入社.現在,同社ハイパーメディア研究所主管研究員.工博.モバイルマルチメディア通信の研究に従事.