論　文

蓄積メディアストリーミング技術の性能比較

布目　敏郎[†*]　　田坂　修二[†]　　石橋　豊[†]

A Performance Comparison of Stored Media Streaming Techniques

Toshiro NUNOME[†*], Shuji TASAKA[†], and Yutaka ISHIBASHI[†]

あらまし　本論文では，インターネット上で使用されているストリーミング技術におけるメディア転送方式として，タイムスタンプ方式，ファイル転送方式，切換方式の3種類を取り上げて実装実験を行っている．特に，蓄積メディア転送方式の違いが転送性能やメディア同期品質に及ぼす影響を定量的に調べている．実験では，メディア送信元に蓄積された音声とMPEGビデオを，メディア出力先に転送した．これらのメディアは，メディア出力先において，メディア同期制御の後に出力された．また，本論文では，TCPのSACKオプションやUDPによる転送時のアプリケーションレベルでの再送制御機能が性能に及ぼす影響についても検討している．

キーワード　蓄積メディア，転送方式，ストリーミング技術，メディア同期，SACK，再送制御

1. まえがき

マルチメディア通信サービスの一つとして，オンデマンド型の蓄積ビデオ転送サービスが注目されている．これまで，このようなサービスは，VOD（Video on Demand）専用のネットワークやATM（Asynchronous Transfer Mode）ネットワークなどQoS（Quality of Service）が保証されるネットワーク上で主に提供されてきた．しかし，インターネットの急速な普及や計算機の処理性能の向上等により，インターネットを介してのビデオ転送サービスへの要求が高まっている．ただし，インターネットはベストエフォート型のネットワークであるため，VOD専用のネットワークなどとは異なりQoSが保証されない．そのため，大きなネットワーク遅延揺らぎやパケット欠落などが発生する．これらは，連続メディアの時間関係を乱してしまう．したがって，メディアの時間関係を維持するメディア同期制御[1]やパケット欠落から回復するための誤り回復機構，高効率なメディア転送方式などが必要とされる．

インターネットでは，メディア出力先において，ビデオ情報全体のダウンロードを待たずに再生可能とするストリーミング技術による蓄積ビデオ転送プログラムが開発され，広く利用されている[2]．また，ストリーミング技術のためのプロトコルとしてRTSP（Real Time Streaming Protocol）[3]が標準化されている．しかし，このプロトコルは，配送要求の処理や特殊再生への対応などの配送制御を行うためのものであり，メディア転送時に用いられる転送方式については規定していない．このため，各プログラムが用いている転送方式はそれぞれ独自のものとなっている．そこで，本論文では，インターネットに代表されるQoS非保証ネットワーク上で，代表的な蓄積メディア転送方式の性能を測定し，各々の特徴と相互の関係を明らかにする．

蓄積メディアの転送では，メディア出力先での出力品質は重視されるが，送信から出力までの遅延に関する制約はライブメディアの場合ほどは厳しくない．また，蓄積メディアはファイルとしてメディア送信元に蓄積されているので，メディアユニット（メディア同期のための転送の単位であり，MUと略記する．例えばビデオフレームなどが相当する）の発生時刻を表すタイムスタンプ等の情報を事前に得ることが可能である．これらの性質から，様々な転送方式が考えられる．

蓄積メディアの転送方式に関する従来の研究としては次のようなものがある．MPEG（Moving Picture Experts Group）[4]などの符号化方式では，可変長符号や双方向予測符号化などを用いるため，ビデオ情報の発生ビットレートがバースト的に変動する．そこで，

[†] 名古屋工業大学工学部電気情報工学科，名古屋市
Department of Electrical and Computer Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya-shi, 466–8555 Japan
[*] 現在，パイオニア（株）

ネットワークを介してそのようなビデオ情報を転送する際，ビットレートの変動を平滑化して転送することで，サーバやネットワークの資源管理を簡単化する手法について検討されている [5]〜[8]．文献 [5] では，可変ビットレートのビデオ情報を一定レートで転送するために必要となる，送信ビットレートと出力開始待ち時間との基本的な関係を明らかにしている．更に，転送に要する期間を複数の一定長の区間に分け，その区間ごとに適切な送信レートを設定する方式を提案している．文献 [6], [7] では，受信バッファサイズが固定された場合に対する転送レート制御アルゴリズムを提案している．これらのアルゴリズムでは，転送レートの変更回数及びその変動を最小化する．また，文献 [8] では，このような帯域平滑化アルゴリズムについて，いくつかの性能測定基準による比較を行っている．

上記のすべての研究では，対象となるメディアはビデオのみであるうえ，メディアの時間的構造についてはほとんど考慮されていない．更に，これらのアルゴリズムは，QoS が保証されるネットワークでの使用を前提としている．このため，大きな遅延揺らぎやパケット欠落などによる性能劣化についてはほとんど考慮されていない．そこで，本論文では，QoS 非保証ネットワーク上で，音声及びビデオを同時に転送し出力する場合に，メディア同期品質も含めた性能を評価することによって，適切な転送方式を明らかにする．

ストリーミング技術を用いたプログラムでは，トランスポートプロトコルとして TCP（Transmission Control Protocol）または UDP（User Datagram Protocol）を使用している．トランスポートプロトコルには，これらのほかに，RTP（Real-Time Transport Protocol）[9] がある．RTP は，主に UDP 上に実装されるものであり，連続メディアの転送に適した設計がなされている．RTP と併用される RTCP（RTP Control Protocol）を利用した動的解像度制御 [10] などにより，メディアの転送効率を向上させることも可能である．しかし，本論文では，TCP，UDP のそれぞれがもつ基本的な特性を確認することを優先し，これら二つのプロトコルのみを扱う．

インターネット上のビデオ転送では，転送効率や遅延の面から UDP を用いるのが一般的とされる．しかし，企業内 LAN 等では，外部からの不正アクセスを防ぐためにファイアウォールが設置されている．この場合，UDP を用いたビデオ転送はできない．しかし，WWW（World Wide Web）へのアクセスのために HTTP（Hyper Text Transfer Protocol）による転送は可能である場合が多い．このため，TCP 上のプロトコルである HTTP を用いてビデオ転送を行うプログラムもある．

TCP については，Reno 版や Tahoe 版などの実装が広く用いられている．しかし，これらの版では，一つのウインドウから複数のパケットが欠落した場合に転送性能が大きく劣化する．そこで，この性能劣化を回避する方法の一つとして，SACK（Selective Acknowledgment）オプション [11] が提案されている．これにより，受信端末は不連続なデータに対する ACK を送信することが可能となる．そして，送信端末は必要なデータのみを再送することができるため，転送効率が向上する．

一方，UDP では，通信の信頼性を保証する機構を何ら提供しないため，転送時にデータの欠落が発生する．特に MPEG ビデオでは，一つのフレームの欠落が複数のフレームの出力に影響することから，メディアの出力品質が著しく低下する．このため，欠落から回復するための機構が必要とされる．その一つとして，リアルタイム性を考慮したアプリケーションレベルでの再送制御が考えられる．

しかし，注意すべきは，TCP や再送制御を備えた UDP による転送では，再送トラヒックによりネットワーク遅延の揺らぎが更に増大することである．このことは，メディア同期品質を劣化させる．したがって，これらによる転送時には，メディア同期の問題に相当な注意を払うべきである．しかし，これまでに，再送制御や TCP の実装の違いがメディア同期品質に及ぼす影響については明らかにされていない．

以上の考察に基づき，本論文では，まず，インターネット上で実際に使用されているストリーミング技術におけるメディア転送方式を分類整理する．すなわち，これらのメディア転送方式を 3 種類（タイムスタンプ方式，ファイル転送方式，切換方式）に分類する．そして，実験により，それらの転送方式について，転送効率とメディア同期品質の定量的な比較を行う．このとき，TCP の SACK オプション及び UDP におけるアプリケーションレベルでの再送制御機能が性能に及ぼす影響についても調査する．

以下では，**2.** で三つのメディア転送方式について概説する．次に，**3.** で再送制御方式について述べる．そして，**4.** で実験環境について説明し，**5.** で実験結果と考察を示す．

2. メディア転送方式

本論文では，ディジタルネットワークを介して，一つのメディア送信元から一つのメディア出力先に，蓄積されている MPEG ビデオと音声を転送する場合を想定する．音声とビデオは別個のトランスポートストリームとして転送される．また，個々のビデオフレームをビデオ MU と定義し，音声 MU は一定長の音声データから構成されるものとする(注1)．

インターネット上では，ストリーミング技術を取り入れたビデオ転送プログラムが多く使用されている．そのうち，一般的によく用いられている五つのプログラム（RealPlayer [12]，VDO Live [13]，NetShow [14]，StreamWorks [15]，Vivo Active [16]）の符号化方式，トランスポートプロトコル，バッファリング時間，転送方式等を比較した（詳細は，文献 [17] を参照されたい）．比較の結果，まず，多くのプログラムにおいて，再生開始時に数秒間のバッファリングを行っていることがわかった．トランスポートプロトコルとしては，UDP が広く用いられており，アプリケーションレベルでの再送制御機能を備えるものもある．一方で，TCP もいくつかのプログラムで採用されている．転送方式は，タイムスタンプに従いデータを転送する方式，ファイルとして転送する方式，ネットワーク状況に応じて適応制御する方式の 3 種類に分類することができる．そこで，本論文では，これら 3 種類の方式を扱うこととし，それぞれ，タイムスタンプ方式（timestamp scheme），ファイル転送方式（file transfer scheme），切換方式（switching scheme）と呼ぶ．

タイムスタンプ方式では，メディア送信元は，タイムスタンプに従いビデオ及び音声 MU を転送する [18]．本論文では，この方式のトランスポートプロトコルとして TCP または UDP を用いる．この方式では，バッファリング時間が小さい場合には，ネットワーク遅延の揺らぎを吸収できなくなるため，メディアの出力品質が劣化する．一方，転送に必要となるネットワーク資源を少なくできる．

ファイル転送方式では，ビデオ，音声を二つのファイルとして転送する．そして，各メディアの出力は，ファイルのダウンロードの完了を待つことなく開始される．本論文では，この方式に，トランスポートプロトコルとして TCP を用いる．TCP を用いることで，受信バッファに空きがあるときには，一度に複数の MU を転送することができる．このため，ネットワーク遅延の揺らぎをバッファリングにより吸収し，メディアの出力品質を向上させることができる．しかし，一度に多くのデータを転送しようとするため，高負荷時にはデータの欠落，再送が発生しやすい．欠落が生じた場合には，TCP のスロースタート機構により送信されるデータ量が低く抑えられる．このため，MU の到着が遅れ，メディアの出力品質が劣化する．

切換方式は，図 1 に示すように，ネットワークの負荷状況に応じてファイル転送方式とタイムスタンプ方式とを切り換える方式である．すなわち，ネットワークが軽負荷であるときには，ファイル転送方式により転送することで，多くの MU をバッファリングする．一方，ネットワークがふくそうしているときには，タイムスタンプ方式による転送を行うことで，それを回避する．本論文では，トランスポートプロトコルとして TCP を採用し，転送開始時にタイムスタンプ方式を用いる切換方式を扱う(注2)．

本論文における切換方式の実装では，メディア出力先において，ビデオ MU の受信間隔の変動係数及び音声 MU のそれがともにしきい値 T_{ht} を下回ったときに，タイムスタンプ方式からファイル転送方式へ切り換える．このとき，ネットワーク状況の判断に受信間隔の変動係数を用いる理由は次のとおりである．軽負荷時にタイムスタンプ方式では，タイムスタンプに従うほぼ周期的な間隔で MU が到着する．そのため，受信間隔の変動係数は小さな値となる．したがって，

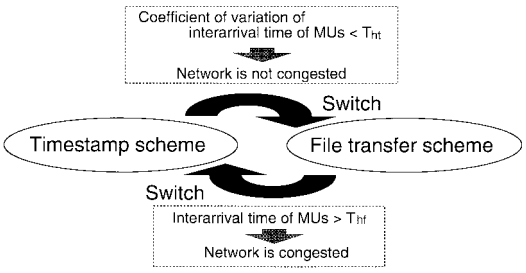

図 1　切換方式
Fig. 1　The switching scheme.

(注1)：したがって，本論文では，MU は周期的に発生するものとする．
(注2)：転送開始時にファイル転送方式を用いる切換方式についても実験を行った．しかし，その性能は転送開始時にタイムスタンプ方式を用いる方式に比べて劣っていた．これは，転送開始時に用いるファイル転送方式が性能に大きく影響するためである．したがって，本論文ではこの方式を扱わない．

これをネットワークが軽負荷であると推定するのに使用できる．本論文における切換方式の実装では，連続する n 個の MU の受信時刻から求めた変動係数を用いる．

また，ファイル転送方式からタイムスタンプ方式への切換えは，メディア出力先において，いずれかのメディアの連続した MU の受信間隔がしきい値 T_{hf} を超えたときに行う(注3)．ネットワークの混雑時には，MU を短い間隔で送信できなくなるため，MU 間隔が大きくなる．このため，一つの受信間隔の値から混雑を検出可能である．このような単一の値による判断は十分でない可能性があるが，この判断は安全側であるといえる．

メディア出力先では，転送方式にかかわらず，VTR（Virtual-Time Rendering）メディア同期アルゴリズム [19], [20] によるメディア同期制御を行う．VTR アルゴリズムでは，MU をある程度バッファリングしてから出力を開始する．各メディアの出力開始時刻は，ネットワーク遅延の最大値の見積もり値 $\Delta_{\max}$ と各メディアの最初の MU の到着時刻により決定される．したがって，$\Delta_{\max}$ の値を変えることにより，MU の受信から出力までの時間（バッファリング時間）を変更することができる．

3. 再送制御方式

本論文では，UDP を用いたタイムスタンプ方式にアプリケーションレベルでの再送制御を適用する(注4)．

メディア出力先は，メディア情報の欠落を検出した場合に，メディア送信元に対して欠落した情報の再送を要求する．本論文では，この欠落検出と，再送要求が適用される送信単位の違いによる二つの方式を考える．それらを，MU 単位再送方式（retransmission in units of MU）とスライス単位再送方式（retransmission in units of slice）と呼ぶ．前者は欠落検出と再送要求を MU を単位として行う．本論文で用いる MPEG ビデオでは，ピクチャの種類により MU サイズが大きく異なる．情報量の大きな I ピクチャは他のピクチャに比べサイズが大きく，欠落する確率が高い．大きな MU の欠落時には再送される情報量も大きくなるため，更なる欠落を招く可能性がある．一方，後者では，MPEG の各ビデオフレームは複数のスライスから構成されていることを利用する．つまり，ビデオ MU を，スライスを分割点とした複数のパケットに分割して転送する(注5)．本論文では，一つの MU 当りのスライスの数を 10 とし，MU サイズ及びピクチャタイプから図 2 に示すように分割する(注6)．そして，欠落検出と再送要求をこのパケットを単位として行う．これにより，再送トラヒックを減らすことができるため，ネットワーク資源を有効に利用できる．しかし，メディア出力先での順序制御が複雑になる．

どちらの方式とも，メディア出力先は，これから出力すべき MU が到着していない場合，メディア同期制御により決定される目標出力時刻 [19] まで（これを最大待ち時間とする）その到着を待つ．そして，最大待ち時間までに到着しなかった場合には，タイムアウトと判定し，その MU の出力をスキップする．

次に，MU 単位再送方式における具体的な欠落検出と再送要求の手順について述べる．本論文では，各端末のクロックとして，グローバルクロックを想定している．これは，効率的に再送を行うためである．なお，スライス単位再送方式では，転送単位は異なるものの，それ以外は MU 単位再送方式と同様の手順を用いる．

3.1 メディア出力先での制御

メディア出力先では，受信した MU をいったんバッ

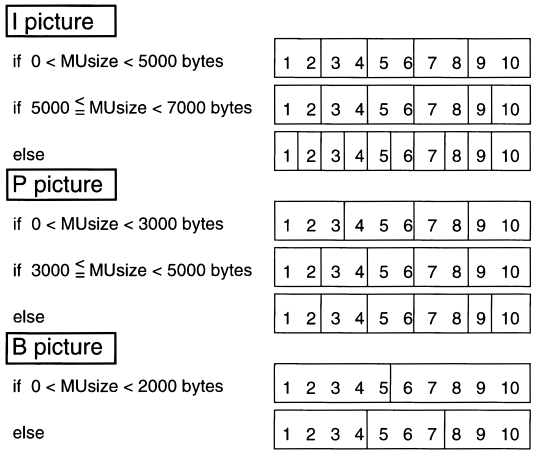

図 2　スライス単位再送方式における MU の分割
Fig. 2　Division of an MU for retransmission in units of slice.

(注3)：頻繁な切換えを抑制するため，二度目以降の切換えはしきい値 T_{hf} を二度上回ったときに行うものとする．
(注4)：これは，他の転送方式に比べて再送制御の実装が容易なためである．
(注5)：なお，音声については MU を単位として転送する．これは，音声 MU はビデオ MU に比べて十分に小さいためである．
(注6)：ここで，ピクチャヘッダは 1 番目のスライスとともに転送される．

ファに格納する．このバッファは，新しく送信されたMUのための待ち行列と，再送されたMUのための待ち行列から構成される．メディア出力先は，MUを受信すると，どちらかの待ち行列にそれを格納する．また，それが新しく送信されたMUである場合にはシーケンス番号を記憶する．

再送要求の手順は，新しく送信されたMUと再送されたMUで異なる．まず，新しく送信されたMUに対する手順を述べ，次に再送MUに対する処理を示す．

新しく送信されたMUの待ち行列に入った最新のMUのシーケンス番号を m，その直前に受信した新しく送信されたMUのシーケンス番号を k $(m > k)$ とする．ここで，$m \neq k+1$ であったときに，$k+1$ 番目から $m-1$ 番目のMUが欠落したと判断する．m 番目のMUを受信する直前に出力されたMUのシーケンス番号を h $(h \leqq k)$，m 番目のMUのメディア送信元からの送信時刻(注7)を P_m とする．また，h 番目のMUのタイムスタンプを T_h，h 番目のMUの目標出力時刻を t_h とする．ただし，T_h は，T_1 が最初のMUの送信時刻となるように計算し直されているものとする．このとき，メディア出力先は，欠落したMUのシーケンス番号（$k+1$ から $m-1$），既に出力された最新のMUの目標出力時刻とタイムスタンプとの差 $t_h - T_h$，及び P_m を情報として含む再送要求パケットをメディア送信元に送信する．

また，メディア出力先では，再送要求を行うたびにその送信順を記録する．再送MUが到着したときに，再送MUの到着順と再送要求の順序とを比較し，不一致が生じた場合には，再度，到着していないMUの再送を要求する．この再送要求は，新しく送信されたMUについての場合と同様の形式で行う．なお，再送MUを受信する直前に出力されたMUのシーケンス番号よりも前のMUに対しては再送要求を行わない．

3.2 メディア送信元での制御

メディア送信元は，メディア出力先からの再送要求を受け取ると，蓄積ファイルから再送を要求されたMUを読み出す．

ここで，メディア出力先への再送MUの到着が，明らかにその出力に間に合わない場合には再送を行うべきではない．これは，再送MUが新しく送信されるMUに対する干渉トラヒックとなってしまうためである．このため，メディア送信元では，再送要求に含まれる情報を用いて，再送MUの目標出力時刻を推定する．そして，再送MUの到着が目標出力時刻に間に合うと予想される場合にのみ再送を行う．

前節で用いた $k+1$ 番目のMUを再送する場合を考える．このMUの目標出力時刻の推定値は $T_{k+1} + (t_h - T_h)$ で与えられる．また，P_m と現在時刻 C_{time} から，2端末間のラウンドトリップ時間 RTT は，$RTT = C_{\text{time}} - P_m$ と計算される．これらから，メディア送信元は，再送要求されたMUの目標出力時刻までにその到着が間に合うかどうかの推定を行う．つまり，

$$T_{k+1} + (t_h - T_h) > C_{\text{time}} + \frac{RTT}{2} \qquad (1)$$

を満足する場合にのみMUの再送を行う．

4. 実験環境

蓄積メディア転送方式の違いや，SACKオプション，再送制御が転送効率やメディア同期品質に及ぼす影響を明らかにするため，音声とビデオを転送し，同期出力する実験を行った．

4.1 実験システム

近年のネットワークの多様化の傾向を考慮して，本論文では，図3に示すような実験システムを構築した．これは，イーサネットと無線LANの2種類のLANをシリアル回線により相互接続したものである．LAN環境においては，配線の複雑さの解消のために無線LANが普及してきており，幹線ネットワークには有線，支線ネットワークには無線を使用する形態が増えてきている．そこで，本論文では，MAC（Media Access Control）によるアクセス制御機能をもつネッ

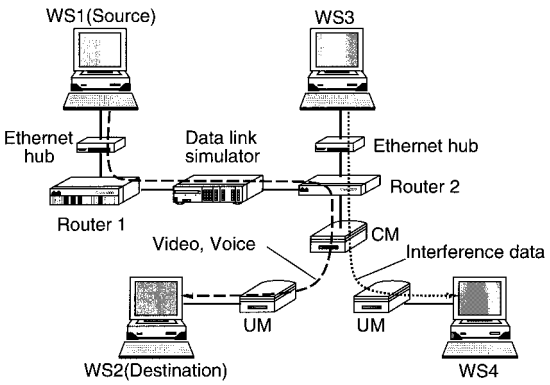

図3 実験システム
Fig. 3 Configuration of the experimental system.

(注7)：これはメディア送信元でMUに付与される．

トワークの一例として無線 LAN を使用する．これにより，伝送遅延の揺らぎの大きなネットワーク環境としている．

無線 LAN としては Motorola の ALTAIR J [21] を用いる．ALTAIR は，一つのコントロールモジュール（CM）と，複数のユーザモジュール（UM）とからなり，CM を基地局として通信を行う．CM と UM 間の送受信は同じ周波数で行われ，15 Mbps の伝送容量を TDD（Time Division Duplex）で使用する．無線 MAC プロトコルとしては，スロット付きアロハ予約チャネルを用いた予約プロトコルが採用されている．最大スループットは約 5.7 Mbps である．

実験には 4 台のワークステーション（以下，WS と略記）を使用する．WS1，WS2 は Sun Ultra30（CPU クロック周波数 296 MHz，メインメモリ容量 512 Mbyte）であり，WS3，WS4 は Sun Ultra2（CPU クロック周波数 200 MHz，メインメモリ容量 128 Mbyte）である．WS3 は Solaris2.5.1 で動作しており，そのほかの WS は Solaris2.6 で動作している．

WS1 はイーサネットハブ（10 Base-T）を介してルータ 1（Cisco 4700-M）に接続されている．ルータ 1，2 間は，データリンクシミュレータ（ADTECH SX/12）を介して，V.35 規格のシリアル回線により接続されている．このシリアル回線の伝送速度は 4 Mbps である．WAN 環境を模擬的に実現するため，データリンクシミュレータを用いて一定の伝搬遅延を発生させる．ルータ 2（Cisco 2514）は，二つのイーサネットポートをもつ．一方のポートに ALTAIR 無線 LAN の CM を接続し，他方のポートにはイーサネットハブ（10 Base-T）を介して WS3 を接続している．また，ALTAIR 無線 LAN の 2 台の UM にそれぞれ WS2 と WS4 を接続している．

メディア送信元の WS1 に蓄積されている MPEG ビデオと音声を，前述した転送方式のいずれかを用いて，メディア出力先の WS2 へ転送する．これらのメディアの仕様を表 1 に示す．ビデオの各 MU は長さが可変であり，音声 MU は 1,000 バイトの固定長としている．また，MPEG ビデオの符号化パターンは IBBPBBPBBPBBPBB とし，一つのピクチャフレーム当りのスライスの数は 10 とする．

メディア出力先の WS2 では，ビデオと音声をメディア同期制御の後に出力する．実験では，音声をマスタメディア，ビデオをスレーブメディアとする．メディア同期制御のしきい値やパラメータ値には，$\Delta_{\max}$ を除き，文献 [18] と同一の値を用いる．なお，同期外れからの回復には急激な回復 [18] を採用する．

表 1　音声とビデオの仕様
Table 1　Specifications of the voice and video.

項目	音声	ビデオ
符号化方式	ITU-T 勧告 G.711 μ-law	MPEG1 符号化圧縮方式
表示サイズ（ピクセル）	—	320 × 240
平均 MU サイズ（バイト）	1,000	2,553
平均 MU レート（MU/s）	8.0	15.0
平均 MU 間隔（ms）	125.0	66.7
平均ビットレート（kbps）	64.0	306.6
記録時間（秒）	299.9	

切換方式において，しきい値 T_{hf}，T_{ht} 及び n は，それぞれ 750 ms，0.1，20 MU に設定する．これらのしきい値は予備実験の結果に基づき設定された．T_{hf} については，まず，ファイル転送方式における MU の受信間隔の時間変動を測定した．そして，それを参考に 3 種類のしきい値（500，750，1,000 ms）を選び，予備実験を行った．その結果，$T_{hf} = 1{,}000$ ms では切換えの反応が遅く，$T_{hf} = 500$ ms では切換えが頻繁に発生する傾向があった．これらを考慮して，$T_{hf} = 750$ ms と設定した．また，T_{ht}，n についても同様に，初めにタイムスタンプ方式における MU の受信間隔の変動係数を測定した．そして，それを参考にして予備実験を行った結果，$T_{ht} = 0.1$，$n = 20$ MU とした場合の性能が優れていることがわかった．したがって，これらのしきい値を設定した．

実験では，TCP の実装として，Reno 版とそれに SACK オプションを適用したものの 2 種類を扱う．これらは，Solaris2.6 向けの実験パッチに含まれるものである [22]．また，ストリーム当りの送信ソケットバッファサイズは 20,000 バイトとし，受信ソケットバッファサイズは 51,200 バイトとする．また，メディア出力先には，ソケットバッファのほかに受信バッファを設ける．この大きさは，TCP による転送時には 300 キロバイトとする．一方，UDP による転送時には，簡単のためバッファサイズの制限は設けていない(注 8)．

ビデオ・音声の干渉トラヒックとして，WS3，WS4 間で負荷データの転送を行う．この送信には UDP を用い，固定長（1,472 バイト）のメッセージを指数分布に従う間隔で送信する．この指数分布の平均を変化させることにより負荷の量を調節する．

（注 8）：UDP による転送時にはタイムスタンプ方式を用いることから，極端にバッファが大きくなることはないことに注意されたい．

4.2 評価尺度

メディア転送方式の性能を評価するためには，転送効率とメディア同期品質の観点から調べる必要がある．

転送効率の評価には，平均 MU レートと総出力時間を用いる．平均 MU レートは，端末で単位時間［秒］当りに出力される MU 数の平均のことである．また，総出力時間はメディア出力先でビデオ・音声の出力に要した時間である．これは，ネットワーク遅延の影響や目標出力時刻の変更によって，必ずしも記録時間とは一致しない．

メディア同期品質の評価には，出力間隔の変動係数及びメディア間の平均 2 乗誤差を用いる．出力間隔の変動係数は，出力間隔の標準偏差を平均値で割ったものと定義される．この値が小さいほど出力が滑らかであり，メディア内同期の品質が高いといえる．

メディア間の平均 2 乗誤差は，スレーブメディアの MU の出力時刻と，これに対応するマスタメディアの MU の出力時刻との差から，それぞれのタイムスタンプの差を引いた値の 2 乗を平均したものである(注9)．文献 [23] の結果から，この値が 6,400($=80^2$) ms^2 以下のとき，メディア間同期の品質は高いといえ，この値が 25,600($=160^2$) ms^2 を超えると同期外れであるといえる．

更に，各実験において，必要に応じて主観評価も行った．

5. 実験結果と考察

本章では，まず，TCP を用いた場合の実験結果を示す．これにより，メディア転送方式及び SACK が性能に及ぼす影響について考察する．次に，TCP を用いる転送方式と UDP に再送制御を適用した転送方式との比較実験の結果を示し，これらの間の定量的な関係を考察する．

5.1 TCP を用いる転送方式間の性能比較

本節では，トランスポートプロトコルとして TCP を用い，転送方式間の定量的な関係及び SACK の有効性を明らかにする．そのために，SACK の有無とメディア転送方式との組合せから次の 6 種類の方式を考え，それらの間で性能比較を行う．

- SACK なしタイムスタンプ方式（timestamp scheme）
- SACK ありタイムスタンプ方式（timestamp scheme with SACK）
- SACK なしファイル転送方式（file transfer scheme）
- SACK ありファイル転送方式（file transfer scheme with SACK）
- SACK なし切換方式（switching scheme）
- SACK あり切換方式（switching scheme with SACK）

また，ネットワーク遅延の大きさが性能に及ぼす影響を調べるために，データリンクシミュレータにより付加する遅延を 10 ms 及び 50 ms とした場合の結果を示す．なお，本節における実験では，Δ_{max} を 100 ms としている．これは，各転送方式間の性能差がより明確となるように設定された値である．

（1） 付加遅延を 10 ms とした場合

平均負荷に対する音声，ビデオの出力間隔の変動係数をそれぞれ図 4，図 5 に示し，メディア間平均 2 乗誤差を図 6 に示す．また，平均負荷に対するビデオの総出力時間を図 7 に示す．ただし，平均負荷とは，送信された負荷データの総ビット数を送信にかかった時間で割ったものである．

図 4 では，平均負荷が約 4.4 Mbps を超えると，SACK なしファイル転送方式の出力間隔の変動係数が急激に大きくなり始めている．平均負荷が 5.0 Mbps 程度以上になると，SACK ありファイル転送方式についても同様である．また，図 5 から，平均負荷が約 4.4 Mbps から 5.0 Mbps 程度までの範囲において，

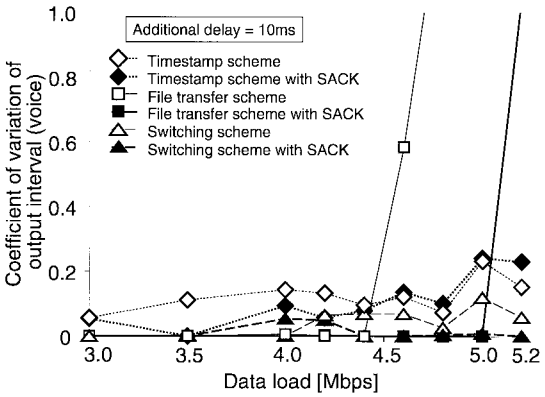

図 4 音声出力間隔の変動係数（TCP）
Fig. 4 Coefficient of variation of output interval for voice (TCP).

(注9)：欠落やスキップにより，スレーブメディアの MU 若しくは対応するマスタメディアのそれが出力されなかった場合，その MU の組は 2 乗誤差の計算から除外する．

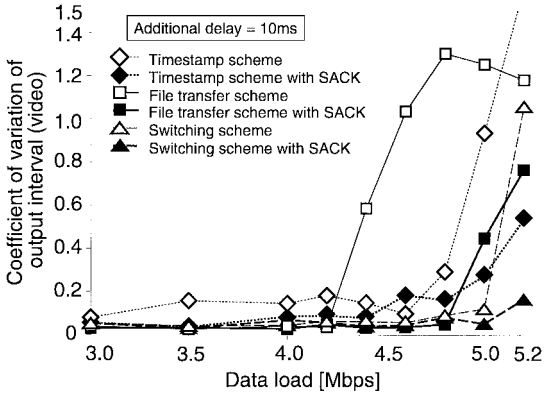

図 5　ビデオ出力間隔の変動係数（TCP）
Fig. 5　Coefficient of variation of output interval for video (TCP).

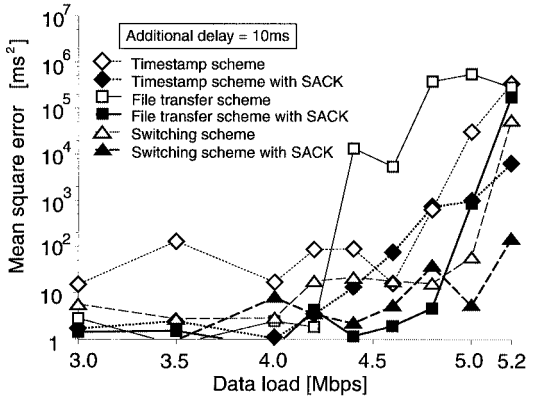

図 6　メディア間平均 2 乗誤差（TCP）
Fig. 6　Mean square error of inter-stream synchronization (TCP).

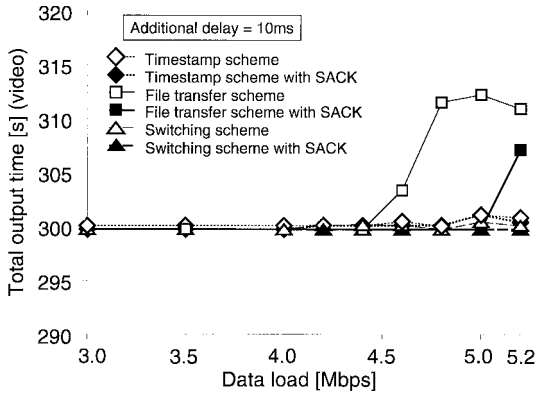

図 7　ビデオ総出力時間（TCP）
Fig. 7　Total output time for video (TCP).

SACK なしファイル転送方式のビデオの出力間隔の変動係数が他方式のそれに比べて大きくなっていることがわかる．これらの理由は次のとおりである．ファイル転送方式では，TCP のスロースタート機構の影響から転送開始直後に大きなポーズが発生する．一方，他の 2 方式では，転送開始時にタイムスタンプ方式を用いる．この方式では，スロースタート機構の影響を受けにくいため，ファイル転送方式に比べて転送開始直後のメディアの出力品質が優れる．

更に，図 4，図 5 より，今回調べたすべての負荷の範囲で，SACK なしタイムスタンプ方式の音声及びビデオの変動係数は，SACK なし切換方式のそれらに比べて大きいといえる．これは，軽負荷時に切換方式では，タイムスタンプ方式に比べてより多くのデータをバッファにためることができるからである．

また，図 5 からは，SACK ありの三つの転送方式の変動係数が，SACK なしのそれぞれの方式における変動係数に比べて小さくなっていることがわかる．なかでも，ほとんどすべての負荷の範囲において，SACK あり切換方式の変動係数が，他方式のそれと同等あるいは最も小さくなっている．このことから，ビデオの出力品質は，SACK あり切換方式が最も優れているといえる．

一方，図 4 を見ると，特にタイムスタンプ方式では，SACK の有無による音声の変動係数の差がほとんどないことがわかる．これは，音声はビデオに比べて情報量が少ないため，音声では，ビデオに比べてデータ欠落が少ないことによる．SACK の有無による差はデータ欠落時の処理にあることから，データ欠落の少ないタイムスタンプ方式の音声では SACK の効果が小さくなる．

図 6 から，平均負荷が約 4.8 Mbps 以上の領域で，SACK なし切換方式のメディア間平均 2 乗誤差が，他の SACK なしの方式のそれに比べて小さくなっていることがわかる．これは変動係数の場合と同様の理由による．更に，平均負荷が 4.4 Mbps 程度から 5.0 Mbps あたりまでの領域で，SACK の有無によるメディア間平均 2 乗誤差の差は，タイムスタンプ方式よりもファイル転送方式のほうが大きい．このことから，SACK はファイル転送方式による転送時に，より効果的であるといえる．

図 7 から，平均負荷が 4.6 Mbps 程度を超えると，SACK なしファイル転送方式のビデオの総出力時間が，メディアの記録時間である 300 秒よりも大きくな

り始めることがわかる．また，本論文では示していないが，音声の総出力時間についても，いずれの方式ともビデオのそれとほぼ同等であった．これらは，ネットワークのふくそうによる MU の到着の遅れ及びそれに伴う VTR アルゴリズムによる目標出力時刻の変更のためである．

実験時に，SACK なし切換方式では，負荷が約 3.5 Mbps を下回る領域において，転送開始から 5 秒程度でファイル転送方式に切り換わり，ファイル転送方式のまま転送を終了していた．一方，負荷が 4.0 Mbps 程度以上となると，負荷が大きくなるにつれて，最初のファイル転送方式への切換えの発生が遅くなった．また，転送途中には数回の切換えが発生するようになった．この切換えの回数は，負荷の増加とともに増えたが，4.6 Mbps 程度を超える負荷では，負荷の増加とともに切換回数は減少していった．これは，タイムスタンプ方式からファイル転送方式への切換えが発生しにくくなるためである．また，高負荷時に，SACK あり切換方式では，SACK なし切換方式に比べて最初の切換えが早い時間に行われる傾向があった．

主観評価において，SACK なしファイル転送方式では，高負荷時に出力開始直後のメディアの出力品質が大きく低下していた．一方，他の方式においては，平均負荷が 5.0 Mbps 程度までの領域では，出力開始直後のメディアの出力品質は大きくは劣化していなかった．

（2） 付加遅延を 50 ms とした場合

この場合における，平均負荷に対するビデオの出力間隔の変動係数を図 8 に示し，メディア間平均 2 乗誤差を図 9 に示す．

図 5 と図 8 を比べると，平均負荷が 5.0 Mbps 程度以上の領域では，すべての転送方式で，データリンクシミュレータの遅延を 50 ms とした場合のビデオの出力間隔の変動係数が，データリンクシミュレータの遅延を 10 ms とした場合のそれに比べて大きくなっていることがわかる．そして，その傾向は，特に SACK なしの方式に顕著である．また，図 8 からは，遅延を 50 ms とした場合においても，SACK あり切換方式のビデオの変動係数が，他方式のそれに比べて小さくなっていることがわかる．このことから，遅延の大きな環境においても，SACK あり切換方式はビデオの出力品質の向上に効果的であるといえる．

図 9 では，SACK ありファイル転送方式と SACK あり切換方式のメディア間平均 2 乗誤差が，平均負荷が約 5.0 Mbps 以下の範囲で 6,400 ms^2 を下回っている．このため，これらの方式のメディア間同期品質は高いといえる．一方，SACK なしファイル転送方式や SACK なしタイムスタンプ方式では，平均負荷が 4.6 Mbps 程度で，メディア間平均 2 乗誤差が同期外れを意味する 25,600 ms^2 あたりの値となっており，メディア間同期品質が低いといえる．

主観評価においても，高負荷時に，SACK を用いない方式では，データリンクシミュレータでの遅延を 10 ms とした場合に比べてメディアの出力品質が低く感じられた．特にタイムスタンプ方式ではその劣化が顕著であった．一方，SACK あり切換方式や SACK ありファイル転送方式では，データリンクシミュレータでの遅延を 10 ms とした場合と遜色のない品質を

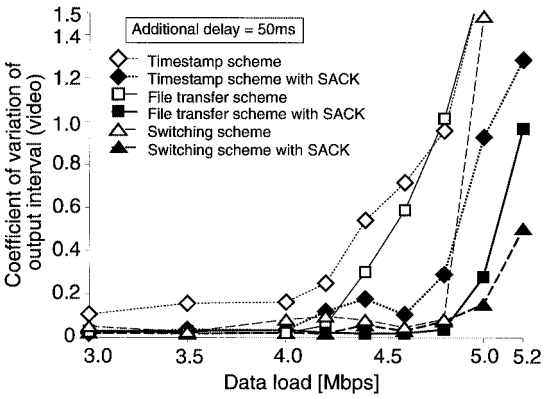

図 8 ビデオ出力間隔の変動係数（TCP：付加遅延 50 ms）
Fig. 8 Coefficient of variation of output interval for video (TCP: additional delay = 50 ms).

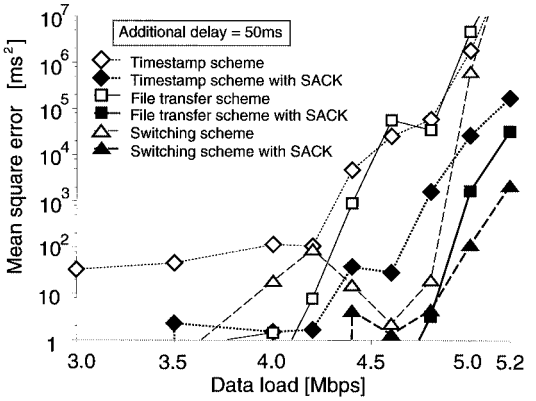

図 9 メディア間平均 2 乗誤差（TCP：付加遅延 50 ms）
Fig. 9 Mean square error of inter-stream synchronization (TCP: additional delay = 50 ms).

保っていた．

なお，切換方式の振舞いについては，データリンクシミュレータの遅延を 10 ms とした場合と同様の傾向となっていた．これは，本論文で用いている切換方式の実装では，ネットワーク状況の判断に MU の受信間隔，若しくはその変動係数を使用しているため，データリンクシミュレータによる遅延が直接的には影響しないからである．

5.2 UDP に再送制御を適用した方式の性能評価

本節では，UDP を用いたタイムスタンプ方式に再送制御を適用した二つの方式の性能について考察する．比較対象として，前節において高性能であることが示された切換方式を扱う．切換方式については，SACK ありの場合となしの場合の二つの実験結果を示す．

前節までの結果から，TCP を用いた転送方式の性能は，付加遅延が大きくなるほど劣化することがわかった．また，再送制御を有効に動作させるには，再送要求パケット及び再送パケットの転送にかかる時間を許容するのに十分な大きさのバッファリング時間が必要である．したがって，これらの性質を考慮して，本節の実験結果では，データリンクシミュレータによる付加遅延の値を 100 ms とし，$\Delta_{\max} = 1{,}000$ ms としている．これらは，混雑したインターネット上での使用を想定した値である．

図 10 に，平均負荷に対するビデオの出力間隔の変動係数を示す．図 11 は，平均負荷に対するメディア間平均 2 乗誤差を表している．また，平均負荷に対するビデオの平均 MU レートを図 12 に示し，ビデオの総出力時間を図 13 に示す．

図 10 から，平均負荷が約 4.8 Mbps を超える領域では，スライス単位再送方式のビデオの出力間隔の変動係数が，MU 単位再送方式のそれに比べて小さくなっていることがわかる．これは，より小さな処理の単位で再送を行うことにより，不必要な再送が抑えられ，MU の欠落を少なくできるためである．しかし，この図において，平均負荷が 4.9 Mbps 程度までの範囲では，UDP を用いる 2 方式のビデオの変動係数は，SACK あり切換方式のそれと同等若しくはそれより大きい値をとっている．これは，SACK あり切換方式では，SACK により TCP の再送タイムアウトによるス

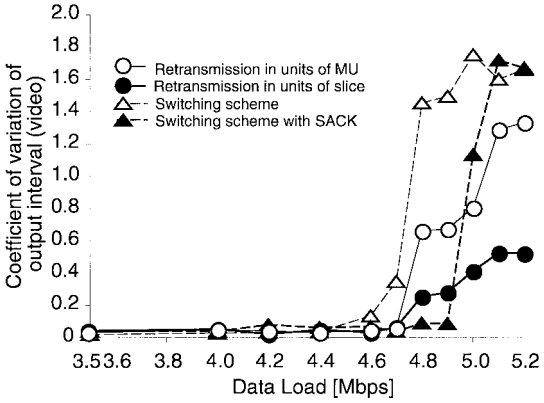

図 10 ビデオ出力間隔の変動係数（TCP と再送付き UDP）
Fig. 10 Coefficient of variation of output interval for video (TCP and UDP with retransmission).

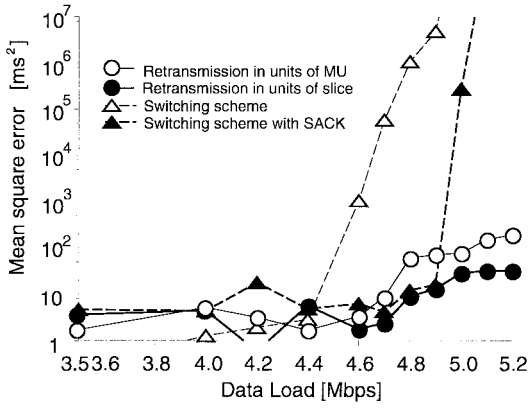

図 11 メディア間平均 2 乗誤差（TCP と再送付き UDP）
Fig. 11 Mean square error of inter-stream synchronization (TCP and UDP with retransmission).

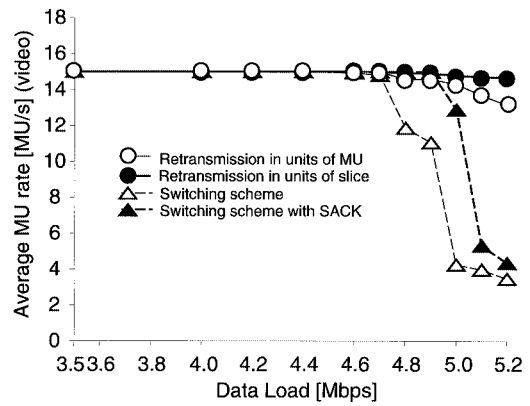

図 12 ビデオ平均 MU レート（TCP と再送付き UDP）
Fig. 12 Average MU rate for video (TCP and UDP with retransmission).

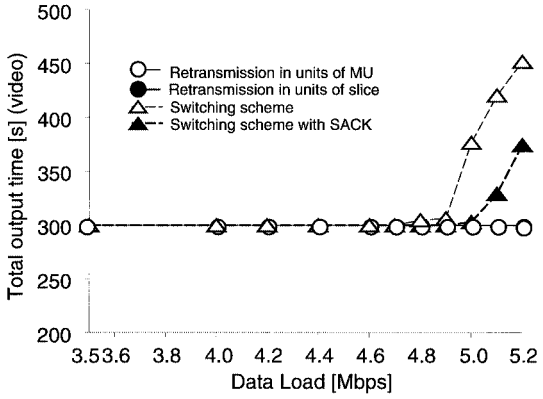

図 13 ビデオ総出力時間（TCP と再送付き UDP）
Fig. 13 Total output time for video (TCP and UDP with retransmission).

ロースタートの発生を抑え，高い転送品質を得られるからである．

図 11 から，今回調べたすべての負荷の範囲で，UDP を用いる 2 方式のメディア間平均 2 乗誤差はいずれも 6,400 ms^2 を下回っていることがわかる．このことから，再送制御を適用した UDP による転送では，メディア間同期品質を常に高く保つことができるといえる．

図 12 では，平均負荷が約 5.0 Mbps 以上になると，SACK を用いた場合でも，切換方式のビデオの平均 MU レートは，UDP を用いた二つの方式のそれに比べて低くなっている．これは，このような高負荷状況下では，SACK を用いたとしても再送タイマのタイムアウトを避けられなくなるためである．一方，UDP を用いた 2 方式では，データの欠落は発生するが，再送制御によりその多くを救うことができるため，TCP を用いた転送に比べて平均 MU レートが高くなる．

図 13 から，今回調べたすべての負荷の範囲で，UDP を用いる 2 方式のビデオの総出力時間は，メディアの記録時間である 300 秒程度の値となっていることがわかる．これは，本論文で用いた再送制御の実装では，目標出力時刻までに到着しなかった MU の出力をスキップするためである．一方，TCP を用いる方式では，目標出力時刻を超えて MU の到着を待つことから，負荷が高くなるにつれて総出力時間が大きくなる．なお，音声の総出力時間については，いずれの方式とも，今回調べたすべての負荷の範囲でメディアの記録時間にほぼ一致していた．これは，音声の情報量はビデオに比べて小さいことと，バッファリング時間が大きめであることから，ネットワークふくそうの影響を受けにくいためである．

主観的には，高負荷時に，スライス単位再送方式は，他の 3 方式に比べてビデオの出力が滑らかであった．また，高負荷時に，SACK なし切換方式では，それ以外の方式に比べてビデオの出力がぎこちなく，音声とビデオとの出力のずれが気になった．しかし，SACK あり切換方式では，平均負荷が 4.9 Mbps 程度までは，出力のポーズがほとんど発生せず，低負荷時と同等の性能であった．

6. むすび

本論文では，まず，ストリーミング技術で用いられているメディア転送方式を，タイムスタンプ方式，ファイル転送方式，切換方式の 3 種類に分類した．そして，これら三つの転送方式が転送性能やメディア同期品質に及ぼす影響を実験により調査した．

まず，トランスポートプロトコルとして TCP を使用し，SACK の有無とメディア転送方式により分類される 6 種類の方式について比較を行った．その結果，SACK を適用した TCP による切換方式の性能が他方式に比べて優れていることがわかった．また，ネットワーク遅延の大きな環境においても，この方式の性能は他方式に比べて優れていた．

次に，TCP を用いた切換方式と，UDP を用いたタイムスタンプ方式に再送制御を適用した方式との比較を行った．その結果，負荷の非常に高い状況では，再送制御を適用した UDP を用いて転送するのが得策であることがわかった．また，再送制御をより小さな処理単位で行うことにより，ビデオの出力品質を向上させられることもわかった．

今後の課題としては，次のようなものがある．まず，種々のネットワーク環境において，切換方式及び二つの再送制御方式のしきい値やパラメータが性能に及ぼす影響について詳しく調査する必要がある．また，UDP による転送時のアプリケーションレベルでの再送制御をタイムスタンプ方式以外の転送方式に適用することが考えられる．更に，RTP/UDP を用いた転送に再送制御を適用した方式との比較実験やマルチキャスト通信への拡張も今後の課題である．

文　献

[1] G. Blakowski and R. Steinmetz, “A media synchronization survey: Reference model, specification, and case studies,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14,

no.1, pp.5–35, Jan. 1996.
[2] J. Alvear, Web Developer.com Guide to Streaming Multimedia, John Wiley & Sons, Inc, 1998.
[3] H. Schulzrinne, A. Rao, and R. Lanphier, “Real Time Streaming Protocol (RTSP),” RFC 2326, April 1998.
[4] D. Le Gall, “MPEG: A video compression standard for multimedia appricationss,” Commun. ACM, vol.34, no.4, pp.46–58, April 1991.
[5] J.M. McManus and K.W. Ross, “Video-on-demand over ATM: constant-rate transmission and transport,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14, no.6, pp.1087–1098, Aug. 1996.
[6] W. Feng, F. Jahanian, and S. Sechrest, “An optimal bandwidth allocation strategy for the delivery of compressed prerecorded video,” ACM/Springer-Verlag Multimedia Syst. J., vol.5, no.5, pp.297–309, Sept. 1997.
[7] J.D. Salehi, Z. Zhang, J. Kurose, and D. Towsley, “Supporting stored video: Reducing rate variability and end-to-end resource requirements through optimal smoothing,” IEEE/ACM Trans. Networking., vol.6, no.4, pp.397–410, Aug. 1998.
[8] W. Feng and J. Rexford, “A comparison of bandwidth smoothing techniques for the transmission of prerecorded compressed video,” Conf. Rec. IEEE GLOBECOM ’97, pp.58–66, April 1997.
[9] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, and V. Jacobson, “RTP: A transport protocol for real-time applications,” RFC 1889, Jan. 1996.
[10] S. Tasaka and Y. Ishibashi, “A performance comparison of single-stream and multi-stream approaches to live media synchronization,” IEICE Trans. Commun., vol.E81–B, no.11, pp.1988–1997, Nov. 1998.
[11] M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, and A. Romanow, “TCP selective acknowledgment options,” RFC 2018, Oct. 1996.
[12] “RealNetworks - The home of streaming media,” http://www.real.com/.
[13] “VDOLive3.0,” http://www.vdo.co.jp/live3/.
[14] “Streaming media services,” http://www.microsoft.com/ntserver/mediaserv/.
[15] “Xing technology corporation,” http://www.xingtech.com/.
[16] “Vivo software, inc - Home page,” http://www.vivo.com/.
[17] 布目敏郎，田坂修二，石橋　豊，“蓄積メディア転送方式の性能比較,” 信学技報，CQ98–72, Dec. 1998.
[18] Y. Ishibashi, S. Tasaka, and E. Minami, “Performance measurement of a stored media synchronization mechanism: Quick recovery scheme,” Conf. Rec. IEEE GLOBECOM ’95, pp.811–817, Nov.1995.
[19] Y. Ishibashi and S. Tasaka, “A synchronization mechanism for continuous media in multimedia communications,” Proc. IEEE INFOCOM ’95, pp.1010–1019, April 1995.
[20] 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.
[21] D. Buchholz, P. Odlyzko, M. Taylor, and R. White, “Wireless in-building network architecture and protocols,” IEEE Network, vol.5, pp.31–38, Nov.1991.
[22] “Experimental TCP selective acknowledgment implementations,” http://www.psc.edu/networking/all_sack.html.
[23] R. Steinmetz, “Human perception of jitter and media synchronization,” IEEE J. Sel. Areas Commun., vol.14, no.1, pp.61–72, Jan. 1996.

（平成 11 年 10 月 29 日受付，12 年 1 月 11 日再受付）

布目　敏郎　（学生員）

平 10 名工大・工・電気情報卒．現在，同大大学院博士前期課程了．在学中，マルチメディア転送方式の研究に従事．現在，パイオニア（株）勤務．

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 59〜60 UCLA 客員研究員．工博．マルチメディア通信，無線ネットワークの研究に従事．IEEE，ACM，情報処理学会各会員．

石橋　　豊　（正員）

昭 56 名工大・工・情報卒．昭 58 同大大学院修士課程了．同年日本電信電話公社入社．NTT ヒューマンインタフェース研究所主任研究員を経て，平 5 より名工大・電気情報助教授．工博．メディア同期方式，マルチメディア通信プロトコルの研究に従事．IEEE，ACM，情報処理学会，映像情報メディア学会各会員．