

実時間動画配信実験とその技術的背景

－月食中継をInternetへ向けて－

小林 孝史

要 旨

Internetの利用が一般化するに従って、さまざまな情報がどこでも発信できる環境が整ってきた。このような環境においては、利用者はあらゆる情報をどこからでもいつでも発信できる。これまで情報の発信側が常時Internetに接続された状態であったが、現在では情報の受信側、つまり利用者側も常時Internetに接続できるインフラストラクチャが整いつつある。

本稿では、Internetへ向けた実時間コンテンツの発信・ストリーミングと実現するための技術的背景について報告するものである。実時間コンテンツは商用ソフトウェアと高性能コンピュータによって配信される。これらのコンピュータとネットワークの性能測定の結果と比較実験から、比較的性能の低い環境でも十分な品質の動画像を受信することが可能であることが分かった。

検討課題としては、コンテンツを提供する時の時間差の解消、コンテンツの品質とサーバ上の資源の関連、双方向性の実現等である。これらの課題を解決することで、より良い実時間コンテンツの配信ができることが期待される。

Experiments on Real-time Streaming of Moving Images and its Technical Background

－ Streaming the Lunar Eclipse for the Internet －

Takashi KOBAYASHI

Abstract

As the use of the Internet becomes popular, an environment for broadcasting any type of information must be prepared. Under this environment, the users, including the system managers, can broadcast any information to anywhere at anytime. Until now, the servers of information were connected to the Internet at all times, but now the infrastructure that allows clients of the information to connect at any time begins to be ready.

In this paper, I report on the broadcasting or streaming of realtime contents for theInternet and its technical background. The realtime contents are broadcasted by commercial software products and high performance computers. As a result of measuring the

performance of computers and networks and comparative experiments, it is concluded that realtime contents can be broadcasted on relatively low performance resources. Topics concerning streaming included broadcast delays, the relationship between the quality of the contents and the resources of the server, and the methods to realize bi-directional communication. Broadcasting realtime contents will be improved by solving these problems.

1. はじめに

Internet利用の普及に伴い、さまざまな情報をさまざまな場所からいつでも発信できるような時代がやってきた。従来では情報の発信側が常時Internetに接続された状態であったのが、情報の受信側も常時接続できるインフラが整いつつある。

近年では、サイバー関西プロジェクトによる夏の全国高校野球選手権大会の実時間中継等に見られるように、Internetで提供される「情報」自体の大容量化・実時間化が進んできている。従来では考えられなかった利用環境が急速に充実してきていることと、利用者のニーズが高まってきていることが挙げられる。

今後のコンテンツのあるべき姿は、時代の要求、利用者の要求が確実に「静」から「動」へと向かっていることも考慮に入れなければならない。

このような実時間情報提供システムを構成するには、①情報を作成する、②情報を配信する、③情報を受信する、という3つの基本的な要素が必要不可欠であり、それぞれが協調しなければならない。また、情報の作成と配信はもちろんコンピュータによる自動処理を行なうが、同じコンピュータで行なうことは稀であり、それぞれ適当なコンピュータを必要とし、かつそれらのコンピュータは高速なネットワークで接続されていなければならない。配信する役割を持ったコンピュータはサーバとして稼働し、ほぼ24時間稼働し続ける。情報を受信する側のコンピュータは利用者側と位置付けられ、上で触れたように利用者側も常時ネットワークに接続している状況が現実のものとなっている。このような実時間情報を提供する意義としては、常時Internet接続されている大学の持つ情報・知識を、高度情報の先進的利用や地域との双方向の連携、高度教育利用、生涯教育などさまざまな利用形態を通して、実時間で共有することを実現できる可能性があることである。すでに、静的コンテンツ、代表的なものとしてHTTPプロトコルを用いたHTMLドキュメントという形での情報発信は一般的なものとなり、今後の要求として動的コンテンツが増えていくことは間違いないであろう。

このような情報「超」過密時代に入った今世紀最後の年、7月16日夕刻～7月17日未明の間、今世紀最大の月食が見られた。この月食をリアルタイム中継しようという動きが国内でも数箇所であり、この被写体を対象に実時間中継システムを構築し、「Internet月食中継」としてInternetへ向けて発信した。今後はこのような利用方法が増えてくることは間違いなく、そのための実現方法等の実験的検証を行なった。本稿では、この実時間中継システムの概要、ネットワークの利用状況の計測とモニター、サーバシステムとの関係などについての調査等について報告する。

2. 実時間中継システム

今回構築した実時間中継システムは、映像・音声データという非常に大量のデータがネットワーク上を通過するものである。このため、すでに運用中のネットワークに対して急激な負荷をかけないようにするため、基幹ネットワークとしてATMスイッチ網を採用している関西大学高槻キ

キャンパスのネットワーク上に実時間中継システムを構築した。

以下、ネットワーク構成と機器構成を順次説明する。

2.1 ネットワーク構成

この実験に用いるネットワークは、関西大学高槻キャンパスに設置されているATM (Asynchronous Transfer Mode) ネットワークであり、図1に示す構成をもつ。ATMネットワークはマルチメディアデータの転送に優れた性能を発揮するネットワークであるといわれている。

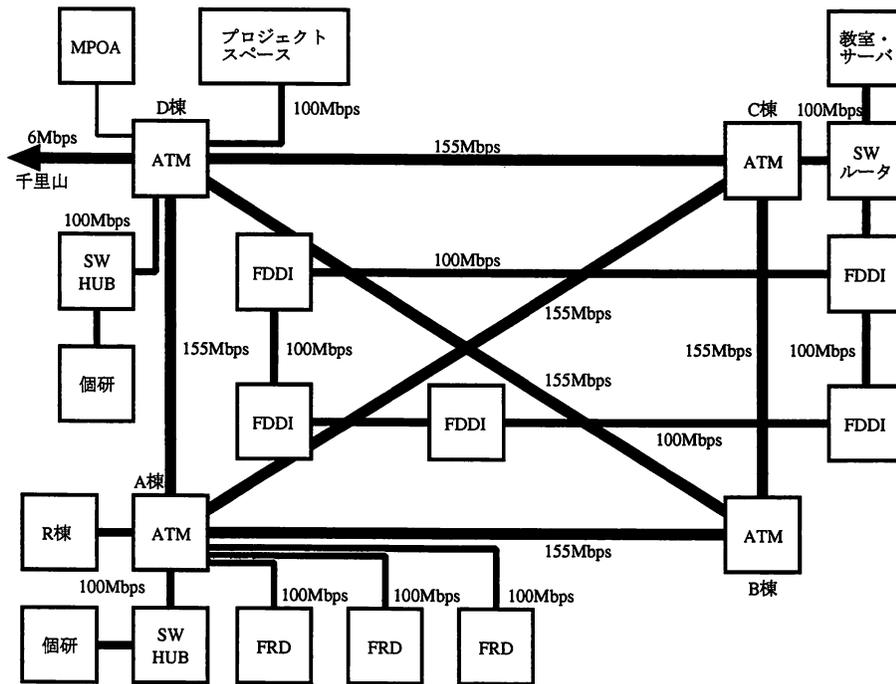


図1. ネットワーク構成

現在はATMスイッチ群のネットワークでブロードキャストドメインをエミュレート (LANE : LAN Emulation) し、さらにMPOA (Multi-Protocol Over ATM) で複数のLANEのATMネットワーク上の経路情報を交換することによって、TCP/IPネットワークとして稼働している。もちろんATMセルと呼ばれるパケット単位でのデータ転送も可能であり、学内の一部のネットワークではこの方式での利用も開始されている。LANEはOSI基本参照モデル7階層のMAC層そのものではなく「機能」をエミュレートするため、Ethernetのコリジョンが存在しない。つまり、データの塊であるパケットの衝突がないため、データ転送がスムーズに行なわれる。従って、通信経路全体としてのスループットが向上し、高速な情報交換を行なうことができる^{[1][2]}。

このネットワークは、一部に光ファイバケーブルによるFDDI (Fiber Distributed Data Interface) ネットワークが残っているものの、基幹ネットワークはATMスイッチを網目状に配

置している。各ATMスイッチ間は155Mbpsで接続されており、各ATMスイッチからサブネットワークへ分岐している構成である。ATMとFDDIの混在している構成からATMのみのネットワークへ順次移行しており、将来的にはGiga-bit Ethernetも含めた超高速ネットワークへの拡張も計画されている。このATMネットワークはD棟ATMスイッチを経由して千里山キャンパスネットワークや外部ネットワークへ接続されており、その接続速度は6Mbpsである。

このネットワーク上において、配信試験はA棟ATMスイッチから分岐したサブネットワークであるR棟に設置されているパーソナルコンピュータからA棟に設置されているサーバへの転送という条件で行なった。本番の実時間中継実験では、D棟ATMスイッチから分岐したサブネットワークからA棟ATMスイッチに直接接続されているサーバへのコンテンツ転送を行なう。図1によると、サーバの場所はA棟よりもD棟の方が望ましいと考えられるが、この時点ですでにA棟にサーバが設置されていたため、また、実時間中継システムの設置場所としてもD棟が最も良い場所であったため、今回の実験はこの構成をそのまま利用して行なった。

機器についての詳細は後程触れるが、リアルタイム・エンコード用のパーソナルコンピュータは100Mbpsで、A棟に設置されているサーバは155Mbps（実効帯域135Mbps）で接続されている。

2.2 機器構成

システム全体の構成を図2に簡単に示す。この図ではATMメッシュをループ状に省略し、それぞれの機器に接続されているスイッチングハブも図の上から省略した。

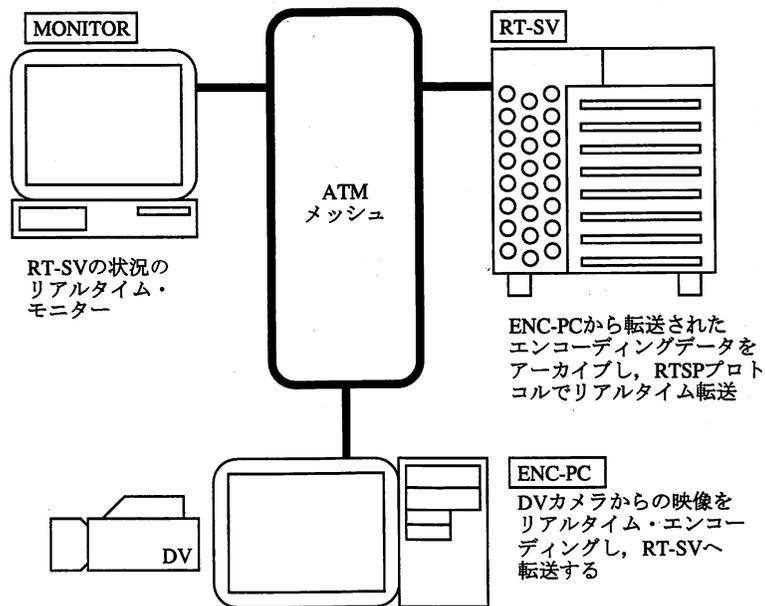


図2. システム全体の構成

実時間配信を行うサーバ（以下RT-SV）は、A棟FRD室(2)に設置されたUNIXワークステーション（OS: Solaris 2.6）である。このUNIXワークステーションはA棟のATMスイッチに光ケーブルによって直結されており、実効帯域は135Mbpsである。記憶領域はFibreChannel接続されているソフトウェアRAIDによるディスクアレイで、約33GBの容量を持つ。

RT-SVは実時間配信を行うと同時に、自身の記憶領域にアーカイブデータを蓄積する。このアーカイブデータは実時間中継の終了後も個別のファイルとして参照できるものである。これらのアーカイブデータを指定することで、仮想的な「再放送」を行なうことも可能である。これらの機能を持つサーバ・ソフトウェアとして、RealNetworks社のRealServer Basic 7.0 を使用した。このソフトウェアはさまざまなプラットフォームで動作するものであり、クライアント・ソフトウェアと通信を行ないながら、現在の転送状況に見合った品質の映像・音声を提供する機能を持つ。また、Webブラウザを用いた管理作業を行なうことが可能で、サーバの稼働状況のモニター機能も持ち合わせている。図3はそのサンプル画面である。この画面は、2つのクライアントが接続している時の様子である。なお、このサーバは「Basic」サーバのため、接続クライアント数が最大25に制限されている。

実時間エンコーディングを行うパーソナルコンピュータ（以下ENC-PC）は、Pentium III（600MHz）を搭載したものである。OSは Windows98 Second Edition、ビデオキャプチャ・デバイスとして3dfx Interactive社のVoodoo3 3500 TV、エンコーディングソフトウェアは

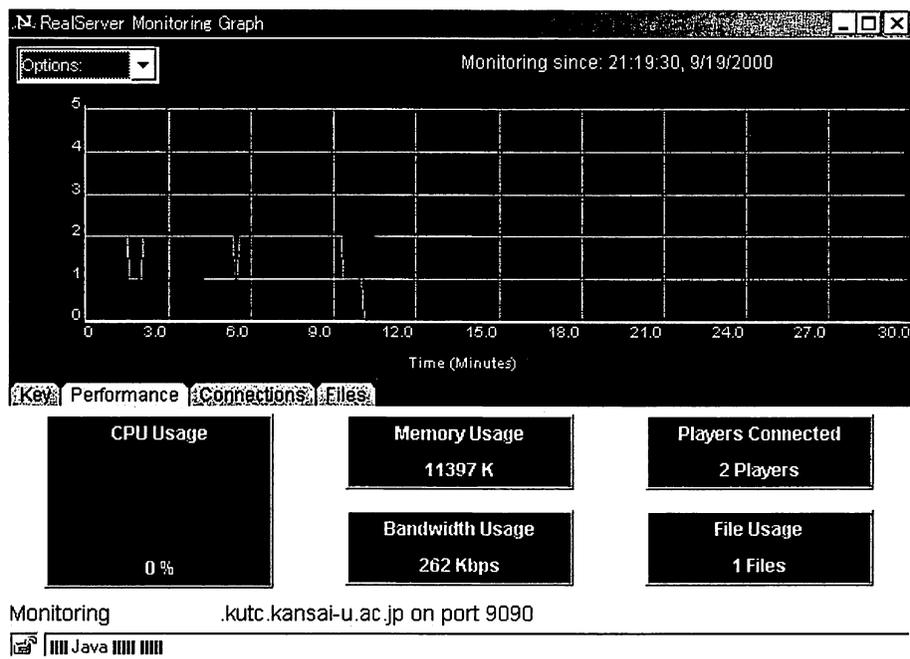


図3. RealServerモニター画面

RealNetworks社のRealProducer G2 plusを使用した。撮影に用いたSony製デジタルビデオカメラDCR-VX1000からコンポジット入力を使ってVoodoo3でビデオ画像をキャプチャーし、RealProducerによって実時間エンコードする方式を取った。DCR-VX1000にはiLink (IEEE 1394規格のSony独自の呼称) 端子が付属しているが、この端子を使ったイメージ形式をエンコーディングソフトウェアであるRealProducerが対応できなかったため、今回はデジタルーデジタルでのエンコーディングは見送った。

このENC-PCでエンコードされたデータはリアルタイムでRT-SVに転送され、実時間中継用のデータRealMediaに変換される。エンコーディングされたデータはさまざまな帯域幅に対応しており、クライアントソフトウェアと組み合わせることにより、ネットワークの帯域幅、混雑具合に対応したコンテンツを自動的に提供することができるのが特徴である。準備できる帯域幅としては、28.8Kbpsモデムの帯域から512Kbps DSL/ケーブルモデム、10Mbps LANまでのものを準備できる。本実験ではこれらすべての帯域幅のコンテンツを用意して、実時間中継に臨んだ。

クライアント側では、サーバなどと同様にRealNetworks社のRealPlayer Basicを用いる。視聴者はあらかじめWebページに設定された URI (Uniform Resource Identifier) のリンクによってコンテンツを選択することにより、映像、音声を聴取できるものである。図4にサンプル画面を示す。コンテンツの定義にはSMIL (Synchronized Multimedia Integration Language) を用い、ブラウザや映像再生ソフトウェアで利用することができるようになっている^[3]。



図4. クライアント・ソフトウェアのサンプル画面

SMILは独立したマルチメディアオブジェクトを1つの同期マルチメディア表現に統合することを可能にし¹⁴⁾、このSMILを使ってコンテンツの制作者は、①表現の時間的な挙動を記述する、②表現のスクリーン上のレイアウトを記述する、③ハイパーリンクをマルチメディアオブジェクトと結びつける、といったことが可能になる。

XML (eXtensible Markup Language) をベースとしたSMILはHTML文書のような記述方法を持つ。具体的なSMILファイルの内容は次のようになる。

```
<smil>
  <head> </head>
  <body>
    <video src="first.rm"/>
    <video src="second.rm"/>
    <video src="third.rm"/>
  </body>
</smil>
```

<body>, </body>で囲まれた部分が本文領域, <head>, </head>で囲まれた部分が補足的なヘッダ領域である。本文領域は必須であり、ヘッダ領域はオプション扱いである。<video/>のように、各マルチメディアオブジェクトを指定するタグの終了前に必ず“/”が必要である。上の例のような記述では、videoクリップを3つ指定し、それらを順番に再生することになる。SMILファイルの本文領域で配置するマルチメディアオブジェクトの場所を指定するが、その指定にはクリップの型とその属性という形式を用いる。

```
<audio src="rtsp://any.where.com/audio/first.rm"/>
```

上の例では、“audio”がクリップの型、‘src’がその属性(場所)である。属性にはそのマルチメディアオブジェクトの場所であるURIを指定する。配置するすべてのマルチメディアオブジェクトの場所に同じURIを使う場合には、オプション扱いのヘッダ領域でその場所を指定することもできる。利用できるクリップの型を表1に示す。

今回使用したSMILのタグは、実時間中継時にはオブジェクトの指定を行なうタグを用い、再放送時には複数のオブジェクトを連続的に再生するためにタグを用いた。

通常のハイパーリンクでは1つのマルチメディアオブジェクトしか再生することはできないが、SMILによるマルチメディアオブジェクトの連続再生機能を利用することで、クライアントが指定されたSMILファイルを解釈し、SMILファイルに含まれている複数のマルチメディアオブジェクトを連続的に自動的に呼び出す機能を実現できる。

表 1. SMILのクリップ型とそのクリップの種類

クリップ型	利用できるソースクリップ
animation	Flash with RealSystem G2で利用されるShockwave Flush (.swf) ようなアニメーションクリップ
audio	RealAudio (.rm) のようなオーディオクリップ
img	JPEG (.jpg) またはGIF (.gif) イメージ
ref	RealPixファイル (.rp) のような他の属性で対応できないようなクリップ
text	テキストクリップ (.txt)
textstream	RealTextクリップ (.rt)
video	RealVideo (.rm) のようなビデオまたは連続した動きを表示するクリップ

2.3 実時間中継コンテンツ

今回の実時間中継実験に用いたコンテンツは、2000年7月16日夕刻～7月16日未明に起きた月食である。タイムテーブル（推定時間）は表2の通りであった。

表 2. 月食のタイムテーブル

部分食開始	20:57(JST)
皆既食開始	20:02(JST)
最大食	22:56(JST)
皆既食終了	23:49(JST)
部分食終了	24:54(JST)

この月食の特徴は、

- ・皆既食の時間が非常に長い。

この皆既食の時間を越える月食は1787年後にしか見ることができない。ただし、この皆既食に匹敵する長さの月食は11年後に見ることはできる。

- ・月食の開始時間が比較的早い。

部分食開始が午後9時頃であるため、比較的多くの人が見ることができる。

ということであった。この月食は国内でもいくつかのプロジェクト^{[5][6][7]}が実時間中継を行っており、それに乘じた形で、実時間中継実験を実施した。

この月食の映像は、動画としては比較的被写体の運動量が少ないものである。従って、変換されたRealMediaのデータ量は比較的小さく、クライアントでの視聴状況は比較的良い状態を維持できることが予想される。事後のエンコード結果(録画したDVテープからRealMediaへの変換)では、すべての帯域に対応させて1時間の内容が約160MBで収まっている。

3. ネットワーク・トラフィックの測定

本実験に関係したネットワークの負荷を把握するため、ネットワークのトラフィック（転送さ

れたデータ量)を計測するソフトウェアパッケージ, MRTG (Multi Router Traffic Grapher) ^[8]を用いた。MRTGは、ネットワーク間の接続点に当たるルーターが持つ統計情報 (MIB: Management Information Base) を定期的に収集し、このうちネットワークの負荷に関するデータをまとめてグラフの作成, HTMLページの作成を自動で行なうことのできるソフトウェアパッケージである。

以下の節で示すグラフは、5分ごとにMRTGを稼働して生成したグラフそのものである。数値は5分間の平均値を表している。

3.1 エンコーディング試験時

まず、試験環境のトラフィック状況に着目し、実時間エンコーディングを行なうことでどの程度のネットワーク負荷が発生するのか計測を行なった。そのトラフィックモニター結果を図5に示す。この図において塗りつぶされた部分はテスト環境から発生した外部への転送状況を表している。黒線の部分が外部ネットワークからテスト環境への転送状況を示している。

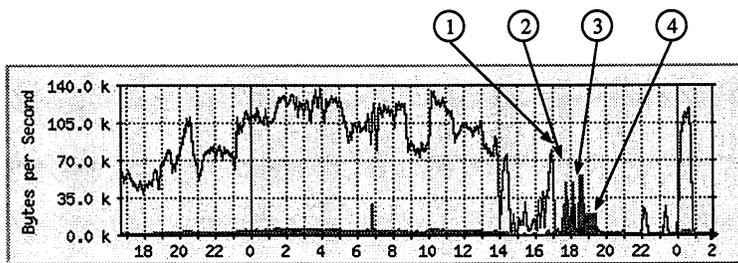


図5. 試験環境のトラフィック状況

図中の数字はそれぞれ次のイベントを示す。

- ① 今回の実験に支障となるような余分なネットワーク・トラフィックを排除する。この時点でネットワーク負荷はほぼ0となる。
- ② 1回目のエンコーディング試験を開始した。しかし、このエンコーディングは、機器のトラブルにより一時中断した。そのため次の2回目のエンコーディング試験を行なった。
- ③ 2回目のエンコーディング試験を開始した。この試験のときには機器のトラブルは発生せず、順調にエンコード、サーバへの転送を行なうことができた。
- ④ 試験を終了し、本番の場所へ機器の移設を開始した。

図5において、縦軸は転送速度(単位: KBytes/秒)、横軸は時刻である。このグラフは5分間に転送されたデータ量の平均値を表している。

この試験に用いたネットワークの接続速度は100Mbpsである。このエンコーディング試験において、転送速度の最大値は約60KBytes/秒(約480Kbps)である。この速度は、TCPヘッダ情報を含めたとしても、テスト環境のネットワーク転送速度100Mbpsの約0.5%であり、ネットワー

クにほとんど負荷がかかっていないことが分かる。

また、リアルタイム・エンコーディングの場合、受信側で約15秒の遅延が生じた。この遅延については、本実験での配信時にも同様の遅延が生じたため、ネットワークに原因があるものではないと考えられる。

3.2 月食の実時間中継時

次に、実時間中継時の各統計データを紹介する。中継時の接続数等のデータを表3に示す。「同時接続数」はリアルタイム中継中に接続していたクライアントの最大多重度である。今回の実験の場合、25クライアントが限界値となる。「総接続数」はクライアントが接続した延べ回数である。この回数にはクライアントの重複も含んでいる。「オープンファイル数」は、リアルタイム・ストリーム、アーカイブを含めた、サーバのオープンしたファイルの数である。「最大使用帯域幅」はサーバのモニター上に表示された帯域幅の最大値である。

表3. 接続数等のデータ

同時接続数：	最大9件
総接続数：	87件
オープンファイル数：	最大5ファイル
最大使用帯域幅：	512Kbps

実時間中継中の対外接続のネットワーク・トラフィックに注目するため、関西大学内ルータのネットワーク・トラフィックを図6に示す。図中の数字は次の各イベントを示す。

- ① 月食の実時間中継を開始する。
- ② エンコーディング用パソコンに不具合があり、再起動する。
- ③ 皆既月食の状態に入る。この直前からネットワークトラフィック、接続クライアント数は減少傾向にあった。
- ④ 皆既状態から回復し、部分月食に移行し始める。

塗りつぶされた部分が外部ネットワークより転送された、つまり、大学内ネットワークにダウンロードしてきたものである。黒線の部分が外部ネットワークへ転送されたものである。外部ネ

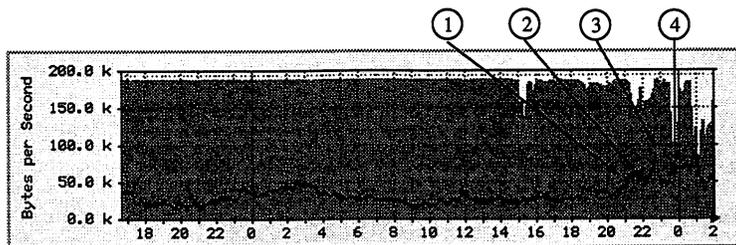


図6. 関西大学ルータのトラフィック状況

ットワークの接続速度が1.5Mbpsであるため、このグラフの最大値は187.5KBytes/秒となる¹⁾。リアルタイム中継を開始するまでにすでに外部ネットワークへの回線の帯域のうち約50KBytes/秒(約400Kbps)を使用中であり、グラフから読みとるとリアルタイム中継サーバへの接続はおよそ40~50KBytes/秒(約320Kbps~400Kbps)程度の帯域を使用していたものと推測される。

4. サーバ機種を変更した場合との比較

リアルタイム中継時には高性能UNIXワークステーションをコンテンツ配信サーバとして利用した。サーバ機種の違いによってどの程度のパフォーマンスの違いを生じるのか比較実験を行なった。この実験は、仮想的な「再放送」機能を用いて再度、仮想的なリアルタイム・ストリーミングを実現して行なった。クライアントとしては実習教室のパソコンを使って行なった。RealPlayerの帯域設定は「10Mbps LAN」に固定した設定で実施した。

まず、100Mbpsで接続されたサーバを用意し、そこで「再放送」を行ないネットワーク上のデータ等を計測、モニターした。使用したサーバのトラフィック状況を図7に、この再試験中のモニター画面を図8に示す。実施した時間帯は、図7のグラフ左側、12時30分頃~13時30分頃の区間である。

各クライアントは150Kbpsの帯域を使用してコンテンツを再生しており、非常に安定した再生画面であった。モニター画面のBandwidth Usageはクライアントが1台増える毎に150Kbpsずつ増えていった。CPU Usageの値は常に0%であり、サーバにはコンテンツを配信するための負担がかかっていない状態であった。最高9台のクライアントを接続したが、使用帯域幅は1350Kbpsであり、サーバ側の全帯域の1%程度の使用率であった²⁾。図8の使用帯域幅の数値は、図7のトラフィックデータと一致していることが分かる。

参考までに、図7のグラフ右側、21時30分頃~23時30分頃の区間のトラフィック状況は、ケーブルインターネットで接続した2つのクライアント(学外からのアクセス)によるトラフィックを示している³⁾。

なお、このサーバはPC-UNIXベースのシステムであり、現在のCPUの主流であるPentium IIIではなく、MMX Pentium 200MHzクラスのCPUを採用したシステムである。月食のリアルタイム中継では、UltraSPARC II 400MHzのCPUを2個搭載した高性能UNIXワークステーションでサーバを稼働させたが、このような現在では非力とも思われるサーバでさえこの程度のパフォーマンスを維持できることは、サーバの再構築等でコストの削減を期待できるものと考えられる。

これらのことを総合すると、サーバ機能としてはPC-UNIXベースのシステムでも要求を満たす

1) 塗りつぶされた部分の平らな部分(グラフ左半分)がこの最大値に相当する。ネットワーク負荷が最大値に達してしまうのは、尋常なことではない。

2) もちろんこの帯域での学外への発信は不可能である。

3) この時のクライアントの使用帯域は2つとも150Kbpsであった。

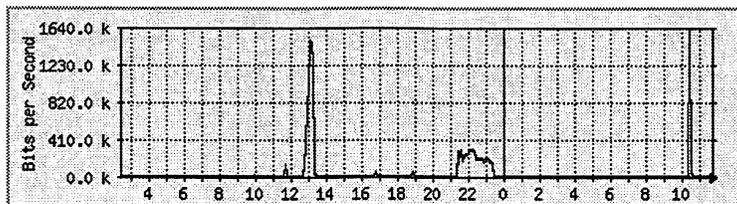


図7. 使用したサーバのトラフィック状況

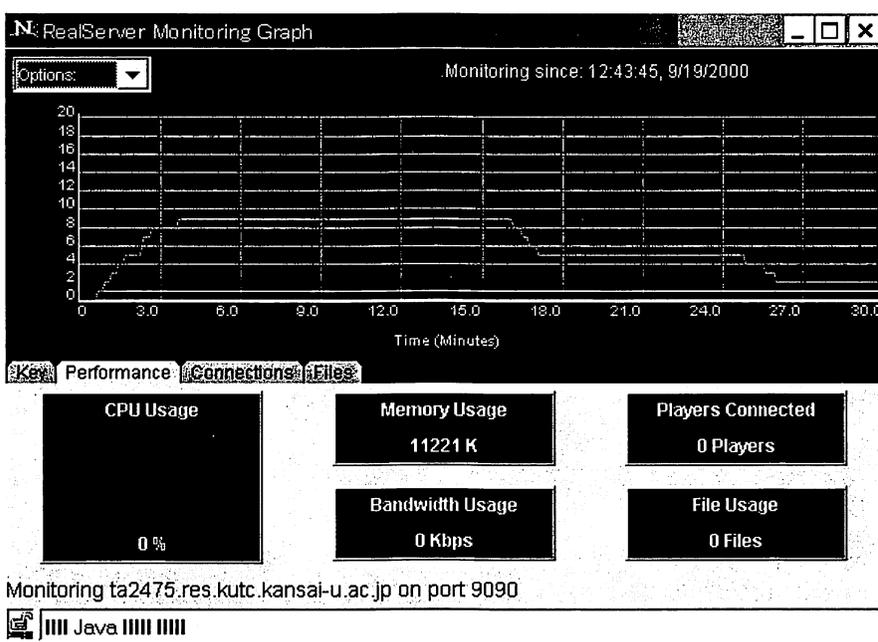


図8. 100Mbps接続のサーバのモニター画面

ことのできるシステムを構築でき、キャンパス内の高速ネットワークシステム等のバックボーンがあれば、すべてのクライアントが最高の品質で映像を取得できることが分かる。

5. 今後の検討課題

このリアルタイム・コンテンツの配信実験の検討課題は次の3点である。

- ・試験, 本実験で発生している約15秒のタイムラグ

約15秒のタイムラグについては、配信用サーバソフトウェア、リアルタイム・エンコーディングソフトウェアなどの影響が考えられる。「再放送」時にも同様の現象(すべてのコンテンツの配信が終了したにも関わらず、アーカイブが終了していない)が発生しており、アーカイブに関係した遅延であると考えられることもできる。

- ・コンテンツの品質

コンテンツの品質は、サーバに蓄積できるサイズとのトレードオフが存在する。サーバの資源が無限大であればすべての帯域用のエンコーディングを行なった上でリアルタイム中継やアーカイブを行なうことができるが、現実問題としては、サーバの資源は限界があり、その資源の必要量は中継するコンテンツによってさまざまに変化し、現段階ではtry & errorで行なっているのが現状である。

- ・一方向（GET型）の情報提供方法

今回構築した中継システムでは、一方向のみの通信、つまり、サーバが配信しているものをクライアントが受け取るだけのものである。この辺りは従来のWWWなどと比較して目新しいものではない。双方向性を実現するためには相互に相手の所在情報を知る必要があり、現在のシステムではその実現の可能性は低い。

6. おわりに

今回行なった実時間配信実験では、内部のネットワークのみを使ったクライアントに対しては、非常に良好な状態でコンテンツを提供することができている。しかしながら、クライアントの要求によるサーバから一方向の情報提供であるため、クライアントからサーバへの情報提供、クライアント間の情報提供ができていないのが現状である。これらのサポートのためには別のソフトウェアを利用する必要があり、場合によっては、別のシステムを構築する必要がある。

配信実験用ネットワークの敷設に関して、ATMスイッチ系統の利用の便宜を図っていただきました関西大学高槻キャンパス事務局ネットワークセンターの皆様がこの場をもって感謝いたします。

参考文献

- [1] ATM Forum Technical Committee, LAN Emulation Over ATM Version 1.0, <ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-lane-0021.000.pdf>.
- [2] ATM Forum Technical Committee, LAN Emulation Over ATM Version 2.0, <ftp://ftp.atmforum.com/pub/approved-specs/af-lane-0084.000.pdf>.
- [3] Synchronized Multimedia. <http://www.w3c.org/Audio Video/>.
- [4] W3C Recommendation, Synchronized Multimedia Integration Language (SMIL) 1.0 Specification. <http://www.w3c.org/TR/REC-smil>.
【邦訳: SMIL 1.0日本語版. <http://www.doraneke.org/misc/smil10/smil10.html>.】
- [5] Live! Eclipse Lunar 2000. <http://www.live-eclipse.org/eclipse/lunar00/index-ja.html>.
- [6] 全国高校生月食観測会. <http://www.astro-hs.net/luna2000/jp/index.html>.
- [7] 国立天文台皆既月食情報. <http://www.nao.ac.jp/pio/information/20000716.html>.
- [8] Multi Router Traffic Grapher. <http://www.ee-staff.ethz.ch/~oetiker/webtools/mrtg/mrtg.html>.
- [9] 安田 浩他, マルチメディア符合理化技術の動向, 情報処理, Vol. 40, No. 2, pp.107-133, 1999.