

## ケーブルモデム用通信プロトコルのための プロトコルシミュレータの開発

三宅 優

加藤 聰彦

国際電信電話(株) 研究所

双方向で大容量といった特徴を持つCATVネットワークを、インターネット接続に利用するための試みが進められている。この接続には、通信機器としてケーブルモデムが必要であるが、ケーブルモデムで使用される通信プロトコルは、回線を複数の加入者で共有するための機構や、CATVネットワーク特有の流合雑音への対策が必要とされ、プロトコル仕様や実装方法により通信性能が大きく影響すると考えられる。そこで筆者らは、ケーブルモデムのためのプロトコルシミュレータを開発し、DAVICにおいて議論されているケーブルモデム用通信プロトコルの実装を行ない、その上でのTCP/IP通信の性能評価を行なった。本稿ではこれらの結果について報告する。

## Development of Protocol Simulator for Cable Modem Communication Protocol

Yutaka Miyake

Toshihiko Kato

R&D Laboratories  
Kokusai Denshin Denwa Co., Ltd.

CATV network, which provides bi-directional and high speed communication, is ready to be used for internet access using cable modem. Communication protocol for cable modem has the procedure to share upstream data link, the compensation for flow-in noise, et al. Therefore the protocol specification and its implementation will be important for the performance of data communication over CATV network. In order to evaluate cable modem protocol, we have developed a protocol simulator, and implemented DAVIC cable modem protocol. In this paper, we explain this protocol simulator and the result of performance evaluation of TCP/IP over CATV network.

### 1 はじめに

近年、インターネットへの新しいアクセス方法として、既存のケーブルテレビ(CATV)ネットワークの利用が検討されている。この方法は、従来の電話回線やISDN回線によるアクセス方法と比べると、伝送速度が高速で、常時接続が可能であるという利

点があり、今後広く普及することが期待されている。

CATVネットワークでTCP/IP等によるデータ通信を行なうには、加入者側にケーブルモデム、センター側にヘッドエンド装置が必要となる。これらの装置は、CATVネットワークに対応した物理層およびメディアアクセス制御(MAC)層の通信プロト

コル(ケーブルモデム用通信プロトコル)を持つ。このプロトコルには、加入者側からセンター側への上り回線を複数のユーザで共有するための手順や、上り回線での流合雑音への対処などの、CATV ネットワークに固有の機能が含まれている。

ケーブルモデムおよびヘッドエンド装置は、現在までに複数の通信機器メーカーから発表されているが、独自仕様に基づいたプロトコルを採用している。また、DAVIC (Digital Audio-Visual Council) [1]、IEEE 802.14 [2]、MCNS (Multimedia Cable Network System) [3] 等において、ケーブルモデム用通信プロトコルの標準化が進められている。

ケーブルモデム用通信プロトコルの仕様や実装の仕方には、CATV ネットワーク上でのデータ通信の性能に影響することが予想される。このため、筆者らは、ケーブルモデム用通信プロトコルを評価するためのプロトコルシミュレータを開発した。開発においては、アリゾナ大学が開発した  $\alpha$ -Sim [4] に、ケーブルモデム用通信プロトコルを実装することとし、早期に仕様が確定した標準プロトコルである、DAVIC が定めたケーブルモデム用通信プロトコルを対象とした。本稿では、作成したケーブルモデム用プロトコルシミュレータの構成と、DAVIC による通信プロトコル上で TCP/IP による通信を行なった場合の性能評価結果について述べる。

## 2 DAVIC 仕様のケーブルモデム用通信プロトコルの概要

DAVIC では、ビデオ・オン・デマンド等のマルチメディアサービスを実現するための各種プロトコルを作成しており、CATV ネットワークを想定した同軸ケーブル上でデータ通信を行なうための、物理層および MAC 層の仕様も定められている。今回作成したケーブルモデム用通信プロトコルのシミュレーションプログラムは、本仕様をベースとしている。以下に、CATV ネットワークを利用したデータ通信と、DAVIC のケーブルモデム部分のプロトコル仕様の概要を述べる。

### 2.1 CATV ネットワークでのデータ通信

図 1 に、CATV ネットワーク上でデータ通信を行なった場合の構成を示す。日本における双方向の CATV ネットワークでは、60MHz 付近の周波数帯域を境として、低い方の周波数帯 (~42MHz) を、加入者からセンター方向に使用される上り回線に、高い方の周波数帯 (90MHz~) を、センターから加入者方向に使用される下り回線に割り当てている。データ通信も、この規則に従い、上り回線の特定の周波

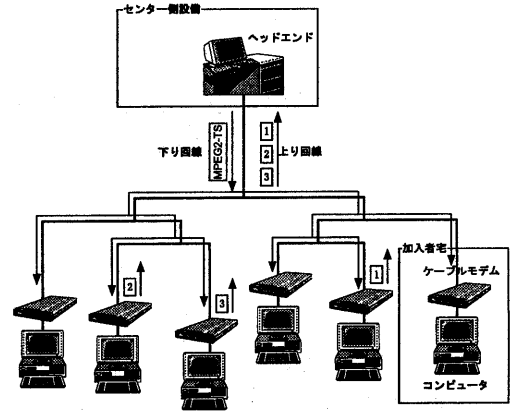


図 1: CATV ネットワークを利用したデータ通信

数帯を使用して、加入者宅のケーブルモデムからセンター側にあるヘッドエンドへ、また、下り回線の特定の周波数帯を使用して、ヘッドエンドからケーブルモデムへ、データの送信が行なわれる。

下り回線では、送信者がヘッドエンドのみであるため、送信データがある時には随時送信可能であるが、上り回線では、複数のケーブルモデムがデータを送信することになるため、同時に送信することにより衝突が発生した場合に対処し、衝突の発生回数を減らすための手順が必要である。また、上り回線は、各加入者側からの雑音が集積される流合雑音があるため、これに対応するために、FEC (Forward Error Correction) の適用や、雑音の多い周波数帯を自動的に避ける手順が含まれている。

### 2.2 DAVIC によるケーブルモデム用通信プロトコル仕様の概要

#### 2.2.1 下り回線の物理層仕様

下り回線では、MPEG2-Transport Stream (TS) パケットに基づいた物理層フレーム構造が使用される。ここでは、188 バイトの MPEG2-TS パケットに対して、Reed-Solomon 符号化による FEC のためのパリティ情報が付け加えられ、204 バイトの長さのフレームが繰り返し転送される。MPEG2-TS パケットには、ATM セルまたは MAC 層の制御情報である MAC メッセージがマッピングされる。この内、ATM セルをマッピングする場合は、2つの MPEG2-TS パケットに 7つの ATM セルが格納される。また、伝送には、6MHz の帯域を使用しており、速度は、19.4Mbit/sec (16QAM)、29.2Mbit/sec (64QAM)、38.9Mbit/sec (256QAM) のいずれかとなる。

### 2.2.2 上り回線の物理層仕様

上り回線は、TDMA によりスロット化されており、1つスロットは、1つの ATM セルおよび 4 バイトのユニークワード、Reed-Solomon 符号化による FEC のための 6 バイトのパリティ情報、1 バイトのガードバンドが格納され、64 バイトの長さを有する。スロットは、送信用のスロットが予約されていない場合に使用される Contention スロットや、特定のケーブルモデムの使用が予約された Reservation スロットなどの種別を持つ。また、スロットの割り当ては、3 ミリ秒を単位に行なわれる。変調方式は QPSK を使用しており、伝送速度は、1.544Mbit/sec (1MHz 帯域を使用) または 3.088Mbit/sec (2MHz 帯域を使用) である。1.544Mbit/sec と 3.088Mbit/sec の場合には、3 ミリ秒の間に、それぞれ、9 個または 18 個のスロットが存在する。

### 2.2.3 MAC 層仕様

ケーブルモデムが上り回線にデータを転送するためには、ヘッドエンドから Reservation スロットを割り当ててもらう必要がある。MAC 層において、以下の手順を用いて、ケーブルモデムとヘッドエンドの間で Reservation スロットの割り当てを行なう。

1. 送信しなければならない ATM セルを有するケーブルモデムは、上り回線の Contention スロットを利用して、MAC メッセージ (Reservation Request Message) をヘッドエンドに対して送信し、Reservation スロットの要求を行なう。
2. 要求を受け取ったヘッドエンドは、ケーブルモデムに対して、そのケーブルモデムが占有的に使用可能な Reservation スロットの番号を、MAC メッセージ (Reservation Grant Message) を利用して通知する。
3. 連続して送信すべき ATM セルが存在する場合は、新たな Reservation スロットを要求する Reservation Request Message を、既に割り当てられている Reservation スロットを用いて送信することも可能である。これにより、衝突なしでスロットの要求を行なうことができる。

Contention スロットは、競合制御されていないスロットであるため、複数のケーブルモデムが同じスロットに送信する場合がある。衝突が発生した場合、下り回線で送られる MAC メッセージにより、ヘッドエンドで受信できなかったという通知が届くため、各ケーブルモデムは送信が失敗したとの判断をすることができる。しかし、衝突後の再送手順に関しては、特に規定されていない。そこで、今回の実装で

は、再送時の衝突を減らすために、衝突を検知した直後に再送するのではなく、0~N までの中からランダムに M を選択し、M 番目の Contention スロットを使って再送することとした。

### 2.2.4 データ転送の手順

あるケーブルモデムから、別のケーブルモデムへデータを転送するときの手順は、以下の通りである。

1. ケーブルモデムは、ヘッドエンドに対して、Reservation スロットを要求する。
2. 与えられた Reservation スロットに対して、データが含まれている ATM セルを送信する。
3. ヘッドエンドは、ATM セルを受信し、下り回線に送信するための MPEG2-TS パケットを組み立てて、送信する。
4. すべてのケーブルモデムは、ヘッドエンドから送信されたパケットを受信し、自分宛の ATM セルを取り出して、上位層に受け渡す。

## 3 プロトコルシミュレータの実装

### 3.1 x-Sim について

筆者らが使用した x-Sim は、プロトコル実装のプラットフォームを提供する x-Kernel [5] をベースにして、プロトコルのシミュレーション機能を実装したものであり、アリゾナ大学から FTP サーバを通じて配布されている x-Kernel のパッケージに含まれている。

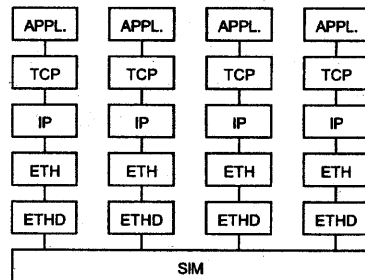


図 2: x-Sim におけるシミュレーション動作時の構成

図 2 に、シミュレーション動作時の x-Sim の構成を示す。この図に示すように、各ホストで動作するイーサネットドライバ (ETHD)、イーサネット (ETH)、TCP/IP、アプリケーションのプロトコルモジュールと、ネットワークを模擬する SIM と呼ばれるプロトコルモジュールが起動される。ホストで動作する TCP/IP などのプロトコルモジュールは、x-Kernel で動作しているものをベースにしているため、各プロトコルの動作を忠実に再現している。また、SIM においては、イーサネットやシリアルラインのネッ

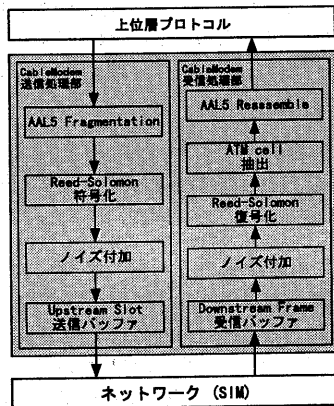


図 3: ケーブルモデム部のプログラム構成

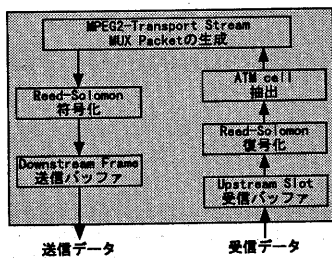


図 4: ヘッドエンド部のプログラム構成

トワーク機能、ネットワークの伝送速度の管理、ルータ機能等を提供している。

### 3.2 作成したプロトコルのプログラムの構成

x-Sim上でCATVネットワーク上のデータ通信のシミュレーションを行なうために、イーサネット部分のプロトコルをケーブルモデム用通信プロトコルに置き換え、ヘッドエンドの機能をSIMに直接組み込んだ。図3に、ケーブルモデム部のプロトコルモジュールの、図4に、ヘッドエンド部のプログラム構成を示す。

ケーブルモデム部の送信処理においては、DAVICの定めるプロトコル仕様に従って、AALタイプ5の処理、ATMセルへの分割、Reed-Solomon符号化などの処理を行ない、送出可能となったデータをUpstream Slot送信バッファに格納する。前述のように、上り回線のスロットの割り当ては、3ミリ秒単位で行なわれているため、Upstream Slot送信バッファからの送信処理は、3ミリ秒を1サイクルとして実現している。1サイクル内で、1つ前のサイクルでヘッドエンドからの送られてきたMACメッセージの内容に従って、ContentionスロットとReservationスロットの識別を行ない、ContentionスロットとReservationスロットへ、それぞれ送信すべきデータを送信するとともに、その時点でDownstream Frame受信バッ

ファ内に存在するMACメッセージを取り出し、2つ前のサイクルで送信したデータに対して、ヘッドエンドで正常に受信できたかどうかを確認する。

また、ケーブルモデム部の受信処理においては、受信したデータに対して、Reed-Solomon復号化、ATMセルの抽出、上位層プロトコルのデータに対するAALタイプ5に従った組み立て、受信MACメッセージの抽出などを行なう。

さらに、ケーブルモデム毎に異なる値のビット誤り率でエラーを発生できるように、各ケーブルモデムの送受信部分にノイズ付加機能を組み込んだ。

一方、ヘッドエンド部では、3ミリ秒のサイクル内でケーブルモデムから送出されたすべてのメッセージを受信し、同一スロットで転送されたデータやFECで訂正不可能なデータを破棄して、残りのATMセルをMPEG2-TSパケットに変換し、下り回線への送出処理を行なう。また、正常に受信できたスロットの番号、次の3ミリ秒でのContentionスロット/Reservationスロットの配置、各ケーブルモデムへのReservationスロットの割り当て等の情報をケーブルモデムに対して送信する。

## 4 TCP/IP通信の性能測定結果と考察

### 4.1 通信スループットの測定

作成したケーブルモデム用プロトコルシミュレータを使用して、CATVネットワーク上での通信スループットを計測した。計測は、x-Simのパッケージに含まれているmegtest (Megabyte Stream Test)を使用し、1つのサーバに対して複数のクライアントが同時にデータ転送を行なった場合の、各クライアントでのスループットを計測した。プロトコルスタックは、下位層から、ケーブルモデム用通信プロトコル、IP、TCP、megtestの順となる。計測に使用したパラメータは、以下の通りである。

下り回線速度	38.9 Mbit/sec
上り回線速度	3.044 Mbit/sec
ケーブルモデム送受信バッファ	10Kバイト
送受信ソケットバッファサイズ	16Kバイト
同時コネクション数	1~13

図5に、測定結果を示す。横軸は、スループット計測のために同時に確立したコネクション数、縦軸は通信スループットである。計測により得られた各コネクションのスループットを[+]で、各コネクションで得られたスループットの総計を[○]で示している。

図6は、インターネット上の典型的なトラフィックをモデル化したtcplib [6]を使用しているtraffic (Background Internet Traffic)プログラムにより、ネットワーク上にFTP、SMTP、TELNET、NNTP

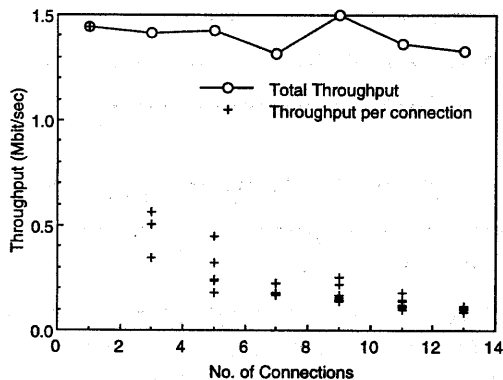


図 5: CATV ネットワーク上での通信スループット

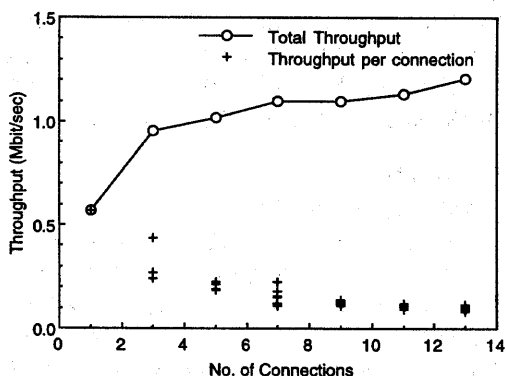


図 6: CATV ネットワーク上での通信スループット (トラフィックあり)

のトラフィックを発生させた場合の通信スループット結果である。

他のトラフィックが存在しない場合の結果より、全体のスループットは約 1.5Mbit/sec となった。ボトルネックとなる上り回線の伝送速度は約 3.0Mbit/sec であるが、ATM セルのヘッダや、FEC による冗長データのオーバーヘッドがあり、さらに、全スロットの 10% 程度を Contention スロットに割り当てているため、理論的な最大帯域は、約 2Mbit/sec である。したがって、回線の 75% 程度を使用できている。

#### 4.2 ノイズの影響について

ノイズに関しては、上りおよび下り回線の両方に、ビット誤り率が  $1.0 \times 10^{-4}$  のランダム誤りを付加したが、Reed-Solomon による FEC によりすべてのビットが訂正された。従って、ランダム誤りに関しては、FEC でほぼ解決できることが確認できた。

#### 4.3 スロットの使用状況について

Reservation スロットの要求におけるスロットの利用状況を調べるために、1 台のケーブルモデムに対して他の 13 台が同時にデータ送信を行なった場

表 1: Reservation スロットの要求回数と Contention スロットでの衝突回数

	Cont.	衝突回数	Resv.
受信側	177	6	324
送信側 1	13	0	75
送信側 2	15	3	75
送信側 3	13	1	68
送信側 4	11	3	68
送信側 5	10	3	58
送信側 6	12	6	58
送信側 7	12	1	50
送信側 8	11	1	58
送信側 9	8	0	56
送信側 10	8	0	58
送信側 11	6	0	57
送信側 12	10	0	53
送信側 13	6	0	60

表 2: telnet 利用時の応答時間

megtest の コネクション数	往復遅延時間 (msec)	
	平均	最大
0	107.9	4106
1	210.5	4012
3	336.3	3099
5	436.5	4451
7	665.5	8018
9	511.6	3762
11	864.0	4416
13	562.2	3054

合の、Contention スロットを利用したスロットの要求回数 (Cont.)、Contention スロットでの衝突回数、Reservation スロットを利用したスロットの要求回数 (Resv.) を、各ケーブルモデム毎に通信開始から 20 秒間計測した。なお、13 台のケーブルモデムは、時間を 100 ミリ秒づつずらしらしてから通信を開始することとした。その結果を、表 1 に示す。

受信側のケーブルモデムが送信するデータは、TCP の ACK のみであるが、通信相手が 13 台あり、Reservation スロットの要求回数が多い。送信側のケーブルモデムは、一旦 Reservation スロットを確保すると、そのスロットを使用して再度 Reservation スロットを要求できるため、Contention スロットの利用回数は少ない。また、送受信側の双方で衝突回数は少なく、効率良くスロットが使用されているといえる。

#### 4.4 応答時間について

traffic プログラムでは、telnet での往復遅延時間を計測できる。そこで、traffic プログラムによるコネクションに加えて、データ転送を行なうコネクションを 0 本から 13 本確立した場合の往復遅延時間を計測した。その結果を表 2 に示す。

ケーブルモデムの場合、データを送信する時に、

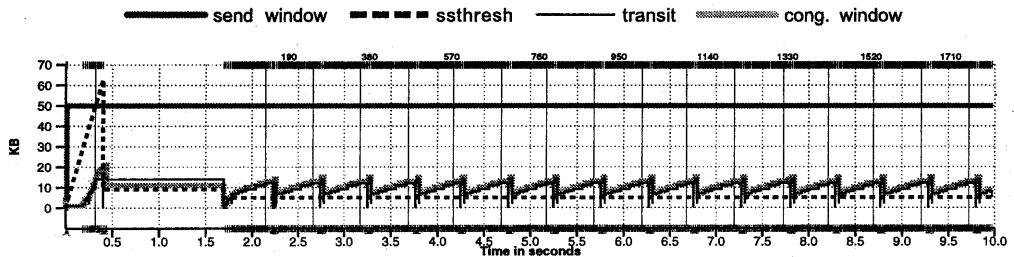


図 7: 通信中の TCP の状態変化 (トラフィック無し)

ヘッドエンドからのスロット割り当てを待ってからでないと送信できず、スロット要求時も、他のケーブルモデムとの競合により、スロット割り当てまで時間がかかる場合がある。したがって、コネクション数が多いときには、著しく応答時間が長くなってしまったと考えられる。

#### 4.5 通信中の TCP の動作について

通信中の TCP の各パラメータをグラフ化した。図 7 は、通信開始から 10 秒間の、スループット計測用のコネクションを 1 本使用した場合の送信側における TCP の各種パラメータの変化を示している。以下に、このグラフの説明を示す。

1. グラフ横軸(時間軸)上にある短い縦線は、ACK を受信したことを示す。
2. グラフ横軸の上部にある短い縦線は、TCP のセグメントが送信されたことを示す。
3. グラフの上部にある数字は、その時点までに送信されたデータ量をキロバイトで示す。
4. グラフ上にある長い縦線は、その時点で送信したセグメントに対して再送が行われたことを示す。
5. グラフ上のラインは、図の上部に示すように、それぞれ、送信ウィンドウサイズ (send window)、Slow-Start threshold (ssthresh)、確認応答がなされていないデータの量 (transit)、輻輳ウィンドウサイズ (cong. window) を示す。

図 7 では、Slow-Start によりデータ転送を開始しているが、急激に輻輳ウィンドウサイズが大きくなったために、バッファ溢れによるパケットロスが 2 回発生した。これにより、0.4~1.6 秒の間は送信が不可能な状態となり、タイムアウトにより送信を再開している。その後は、Slow-Start threshold が切り下げられたために、輻輳ウィンドウサイズは適切な値付近で徐々に大きくなるように調整される。輻輳ウィンドウサイズが大きくなりすぎると、セグメントの紛失が発生して、Fast Retransmit により 1 セグメントを再送すると同時に、輻輳ウィンドウサイ

ズの調整が行なわれる。定期的にセグメントの紛失が発生しているものの、最初の部分を除いて、一定の速度でデータ転送が行なわれている。

この計測において、往復遅延時間の平均値は 41 ミリ秒となった。TCP の動作自体は、ケーブルモデム上の通信であっても特に問題ないと言えるが、遅延時間が比較的大きいため、最大ウィンドウサイズの調整等が必要になる場合があると考えられる。

## 5 おわりに

本稿では、DAVIC 仕様のケーブルモデム用通信プロトコルに従ったデータ通信の性能を評価するプロトコルシミュレータを開発し、TCP/IP を CATV ネットワーク上で動作させたときの通信スループットの計測や、ケーブルモデム内の動作を解析した結果を示した。最後に、日頃御指導頂く KDD 村上取締役、KDD 研究所 鈴木副所長に感謝します。

## 参考文献

- [1] "DAVIC 1.1 Specification Part 08: Lower Layer Protocols And Physical Interfaces," Digital Audio-Visual Council, 1996.
- [2] "IEEE Project 802.14/a Draft 2 Revision 1 (Cable-TV access method and physical layer specification)," IEEE Standards Department, July 1997.
- [3] "Data-Over-Cable Interface Specifications, Radio Frequency Interface Specification," SP-RFII01-970326, MCNS Holdings, L.P., March 1997.
- [4] L. S. Brakmo, A. C. Bavier, L. L. Peterson and V. Raghavan, "x-Sim User's Manual (Version 1.0)," University of Arizona, July 1997.
- [5] N. C. Hutchinson and L. L. Peterson, "The x-Kernel: An architecture for implementing network protocols," IEEE Transactions on Software Engineering, pp64-76, January 1991.
- [6] P. Danzig and S. Jamin, "tcplib: A Library of TCP Internetwork Traffic Characteristics," Technical Report CS-SYS-91-495, Computer Science Department, USC, 1991.