The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	マルチキャスト通信に適したATM網の構成に関する研究
Author(s)	杉園, 幸司
Citation	大阪大学, 2002, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://hdl.handle.net/11094/24954
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

マルチキャスト通信に適した
ATM網の構成に関する研究

杉園 幸司
大阪大学大学院
工学研究科通信工学専攻

平成 14 年 1 月

内容梗概

本論文は，筆者が大阪大学大学院工学研究科 (通信工学専攻) 在学中に行った，マルチキャスト通信に適した ATM 網の構成に関する研究の成果を 6 章に分けてまとめたものである．

第 1 章では，本研究の背景となる ATM 網，ならびにマルチキャスト通信について概説し，本論文の位置付け並びに目的を明確にする．

第 2 章では，マルチキャスト通信の特徴と，その実現法について述べる．次にマルチキャスト通信を用いるアプリケーションがネットワークに要求する条件をアプリケーションごとに検証する．最後にマルチキャスト通信をサポートするプロトコルを説明し，それらの技術ならびに研究動向について述べる．特に現在マルチキャストをサポートするプロトコルとして事実上標準となっている IP Multicast について詳しく述べる．

第 3 章では，ATM におけるマルチキャスト通信の実現方法について述べる．次に IP Multicast を ATM 上で実現する技術である IP Multicast over ATM について，実現方法と必要な技術を述べる．

第 4 章では，ストリーミングサービスを実現する最適なネットワーク構成法について論じている．ATM ではコネクション設定の際，受信者の ATM アドレスを必要とする．これを実現する機構としてアドレス解決がある．この機構が円滑に動作するためには，多数の制御メッセージが必要となる．ストリーミングサービスでは，視聴番組選択の際，制御メッセージが頻発し，ネットワーク資源を消費する．そこで，番組選択の際に発生する制御メッセージ量を解析的に導出し，それに基づいてメッセージ量を抑制するネットワーク構成法を提案する．

第 5 章では，対話型アプリケーションを実現する際に使用される VC 設定法に注目し，データ転送遅延削減に有効である複数 VC サーバ方式を提案する．IP multicast over ATM における VC 設定方式として，メッシュ方式とサーバ方式がある．まず，これらの方式の対話型アプリケーション導入時における問題点を明らかにする．次に複数 VC サーバ方式の動作，ならびに特徴を述べる．シミュレーションを用いて，提案方式が従来の VC 設定法に比べ，データ転送遅延改善に有効であることを示す．

第 6 章では，本論文で得られた諸結果を総括するとともに，その意義，および今後の課題について述べる．

謝辞

本論文は，筆者が大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻博士前期課程において行った「マルチキャスト通信に適した ATM 網の構成に関する研究」の成果をまとめたものである．本研究を遂行するにあたり，全過程を通じて懇切丁寧なる御指導，御鞭撻を賜わった大阪大学大学院工学研究科通信工学専攻 池田 博昌 元教授に深甚なる感謝の意を表す.

大阪大学大学院工学研究科において，御指導，御教授を賜った同大学院工学研究科通信工学専攻 森永 規彦 教授，小牧 省三 教授，前田 肇 元教授，河崎 善一郎 教授，児玉 裕治 元教授, 塩澤 俊之 教授，倉薗 貞夫 元教授，大阪大学産業科学研究所 元田 浩 教授，大阪大学大学院電子情報エネルギー工学専攻 北山 研一 教授 長谷川 晃 元教授 を始め，各教官の方々に衷心より御礼申し上げる.

本研究を遂行するにあたり，終始一貫して直接御指導頂いた 通信網工学領域の 山本 幹 助教授に深甚なる感謝の意を表す.

池田研究室に配属以来，本研究室の松田 崇弘 助手，戸出 英樹 元助手 (現大阪大学大学院工学研究科情報システム工学専攻　助教授)，並びに後藤 嘉代子 技官には，公私にわたり御厚意溢れる御助言と御支援を戴いた．ここに厚く御礼申し上げる.

本研究を遂行するにあたり，企業の方々にも多大な御指導，御協力を賜った．特に，NTT で御指導頂いた NTT 情報流通プラットフォーム研究所の安部 敦史氏には，格別なる御助言，御協力を賜った．電力中央研究所情報研究所の土井 博生氏には格別なる御協力を賜った．ここに心より感謝の意を表す.

博士後期課程に在学する萩原達也君や山本和徳君をはじめとする、通信網工学領域の諸兄には，日頃より多くの御助言，御協力を戴き，種々の面でお世話になった．ここに深謝申し上げる.

最後に在学中に経済的、ならびに精神的に支援して頂いた両親に対し心より感謝の意を表す。

ここに記して，以上の方々に深甚なる感謝の意を捧げる.

目 次

内容梗概 **i**

謝辞 **ii**

目次 **iv**

第 1 章　緒論 **1**

第 2 章　マルチキャスト通信 **7**
2.1　緒言 7
2.2　マルチキャスト通信の概要 7
2.3　マルチキャスト通信への要求 10
2.4　マルチキャスト通信の実現 12
2.5　結言 16

第 3 章　ATM 上でのマルチキャスト通信の実現 **17**
3.1　緒言 17
3.2　ATM マルチキャスト 17
3.3　IP Multicast over ATM 20
3.4　必須技術 27
3.4.1　アドレス解決技術 27
3.4.2　VC 設定方式 29
3.5　結言 33

第 4 章　ストリーミングサービスに適したネットワーク構成法 **35**
4.1　緒言 35
4.2　対象ネットワーク 35
4.3　制御情報量の理論解析 39
4.3.1　過渡状態における解析 40
4.3.2　放送終了開始区間の更新頻度 43
4.3.3　更新情報の集約率 46
4.4　ネットワーク構成法 47
4.5　結言 48

第 5 章　対話型アプリケーションに適した VC 設定方式　51
5.1　緒言 51
5.2　対象ネットワーク 51
5.3　既存の VC 設定方式における問題点 53
5.4　複数 VC サーバ方式 56
5.4.1　基本概念 56
5.4.2　動作説明 58
5.5　性能評価 61
5.6　結言 67

第 6 章　結論　69

参考文献　72

本論文に関する原著論文　77

図 目 次

2.1 ユニキャストによる 1 対多通信の実現 8
2.2 マルチキャスト通信 9
2.3 ストリーミング 11
2.4 ストリーミングサービスの実現形態 12
2.5 対話型アプリケーション 13
2.6 マルチキャストの実現法 13
2.7 IGMP の概要 15
2.8 マルチキャストルーチング 16

3.1 一般的な ATM ネットワークのモデル 18
3.2 point-to-multipoint VC の設定法 19
3.3 インターネットのモデル 21
3.4 IP Multicast over ATM における LIS の概念 22
3.5 データ転送におけるレイヤ構造 22
3.6 ATMARP 23
3.7 AAL 層でのカプセリング 25
3.8 ATM ヘッダ 26
3.9 AAL5 のフォーマット 27
3.10 Multicast Address Resolution Server 28
3.11 メッシュ方式 30
3.12 サーバ方式 31
3.13 マルチキャストサーバにおける AAL_SDU の再構築 32

4.1 ネットワークモデル 36
4.2 Multicast Address Resolution Server 37
4.3 グループ参加動作 38
4.4 グループ離脱動作 39
4.5 参加・離脱モデル 40
4.6 状態遷移図 (エッジルータ配下の参加メンバ数) 41
4.7 MARS の管理情報更新頻度 44
4.8 定常状態における更新頻度 45

5.1 ネットワークモデル 52

5.2 ネットワークのレイヤ構成 53
5.3 サーバでの待機 55
5.4 複数 VC サーバ方式 56
5.5 セルの流れ 57
5.6 複数 VC サーバの VC 設定動作 59
5.7 VC セットアップ動作の流れ 59
5.8 データの送信者の識別 60
5.9 VC セットアップ遅延時間 62
5.10 データ転送遅延 (絶対評価) 63
5.11 データ転送遅延 (相対評価) 64
5.12 データ転送遅延の要因 64
5.13 ホスト数に対する設定 VC 数 65
5.14 ABR レート制御導入時のデータ転送遅延 66

第1章　緒論

近年，通信の分野では光ファイバやデジタル交換機の性能がめざましく発達しており，大量のデータも短時間で転送できるようになっている．他方，コンピュータの分野でも，CPU や記憶媒体の発達により，より高度な作業を高速に処理できるようになっている．これらの流れを受けて，様々なメディアを統合し，それらを同一網で管理するマルチメディア通信が実現されつつある．これはインターネットの発達に伴い，様々なサービスをデジタル情報として扱い，コンピュータで一元管理したいという要求を受けた形で発達して来た．このような流れによってテレビなどの放送型サービスなどの音声や動画を扱うサービスをコンピュータネットワーク上で実現する動きがでてきた．

コンピュータネットワーク上でデータ通信を行う際には，インターネットで使用され現在多くの OS に実装されている TCP/IP をネットワーク層以上で用いるのが一般的となっている．TCP/IP は 1975 年にインターネットの前身である ARPANET での通信プロトコルとして開発された．その当時大学や研究所などで広く利用されていたオペレーティングシステム (OS) である UNIX BSD に実装されることとなり広く普及し，現在では UNIX 以外の OS にも実装されるデファクトスタンダードとして広く用いられている [1].

TCP/IP を利用した通信では 1 対 1 通信が基本である．通常特定多数の受信者に対しデータを配送する放送型アプリケーションを 1 対 1 通信で実現すると，送信者は受信者の数だけデータを送信する必要があり，ネットワーク資源の無駄使いとなる．これを解決する技術としてマルチキャスト通信がある．これは送信されたデータを途中のルータで複数個にコピーしながら多数の受信者へ送る通信形態で，特定多数の受信者へデータを転送するのに適している．もとは分散処理の基盤技術研究の過程から生まれて来た概念であるが，その研究の過程で，端末間の通信プロトコルに TCP/IP を利用することになり，TCP/IP 上でマルチキャストを行う必要性が生じた．この流れを受けて，TCP/IP 上でマルチキャストを実現するプロトコルが数多く考案された [2]．マルチキャスト通信では特定多数の受信者をグループという概念を用いて管理を行う．グループに属する受信者は参加したいグループを動的に変更することが認められている．グループの管理を行うネットワーク中のノードは方式により異なる．一般に，送信者でグループの管理を行うマルチキャスト通信を送信者ベースのマルチキャスト通信といい，ネットワーク中に配置されるルータにおいて行う方式を受信者ベースのマルチキャスト通信

という．大規模ネットワークに適用する場合，送信者でグループのメンバを集中管理する方法は，広範囲に散在するホストから情報を得る必要があるため実現が困難である．よって各ルータにおいて分散管理する受信者ベースのマルチキャスト通信の方が実現は容易である．よってインターネットのような大規模ネットワークで適用される IP はマルチキャスト通信をサポートするため，受信者ベースのマルチキャスト通信を採用した．これよりインターネットにおけるマルチキャスト通信の適用が本格的に検討されるようになった．これがこれが IP Multicast の始まりである．その後，IP Multicast は RFC966[3],RFC1112[4] により標準化される．これを利用することで特定多数にデータを送信するサービスが実現できると考えられるようになった．

マルチキャスト通信をネットワーク上で実現する際に考慮すべき点としてマルチキャスト通信を使用するアプリケーションの特徴が挙げられる．特定多数の受信者にデータを送信するアプリケーションは多く存在するが，その目的に応じてネットワークに要求する品質条件は異なる．一般にマルチメディア通信は通常のデータ通信と比較して，遅延や遅延揺らぎなどの許容条件が厳しい [2]．また，受信グループのメンバ構成の変更頻度に伴い，メンバの管理に必要な制御メッセージの発生頻度が異なり，それがネットワーク内における輻輳等の発生に影響を与える．そこで，マルチキャスト通信を円滑に実現するためには，マルチキャスト通信に適したネットワークを構築する必要がある．

他方，マルチメディア通信の実現に向けて音声やデータの統合多重化スイッチング技術や回線交換方式とパケット交換方式を統合した交換方式などに関する研究が 1970 年代の後半から各国で行われるようになった．この流れの中で，従来のパケット交換処理を簡略化することにより，ノードのスループットの向上をはかり，統合型ネットワークを構築する高速パケットスイッチングの提案がなされた．これらの流れを受けて情報を固定長の伝送単位であるセルに分割し，他の情報と非同期的に多重化する方式が考えられた．それを 1985 年に CCITT(現 ITU-T) で次世代の統合型サービスである Broadband-Integrated Service Digital Network(B-ISDN) のための新しい転送技術として提案したのが ATM の始まりである．そして 1990 年に最初の世界標準が勧告化された ([11] pp.899)．ATM では，情報の長さを固定することにより，スイッチング処理をハードウェア化することに成功しており，そのためデータの高速転送が可能になっている．この流れを受けてコンピュータネットワークの分野でも増大するトラヒック量に対応するため，データリンク層に ATM を利用してマルチメディア通信を実現する動きが生じて来た．このためインターネットが普及したことによりデファクトスタンダードとなった IP をネットワーク層におき，データリンク層には高速網である ATM を利用してコンピュータネットワーク上で高速転送を実現する IP over ATM 技術 [12][13][14] が必然的に必要とされるに至った．そしてマルチメディア通信における主要なアプ

リケーションである，放送型アプリケーションやTV会議など特定多数の人に情報を提供するマルチキャスト機能をIP over ATM技術の延長線上で実現するために考え出されたのがIP Multicast over ATM[17][18]である．

本研究では，ストリーミングサービスや対話型アプリケーションなど，マルチメディア通信に焦点をあて，その特徴を考慮したATMにおけるネットワーク構成法を検討する．これらのアプリケーションを実現するためには転送遅延や，ネットワーク内でのサーバやルータの処理負荷を軽減する必要がある．そこで，本研究ではIP Multicast over ATMの実現機構に着目し，それらを改良することでネットワーク内における遅延やノードの処理負荷を軽減することを目的とした．

IP Multicast over ATMを実現するためには，まずATM上でIPを実現する必要があるが，そのためには様々な問題が存在する．その中で最も重要な問題としてコネクションに対する考え方の違いがある．IPは機能の簡略化と高速化のため，受信者までの経路を予め設定しないコネクションレス型の通信となっている．すなわち送信したいときに即座に送信を行う．それに対しATMは回線交換方式から発達したものであり，データ転送における信頼性を高めるため仮想的なコネクションであるVirtual Channel(VC)を設定する必要がある．このため，VCの設定のためにIPアドレスからATMアドレスを知る必要があり，それを実現する方法を考える必要がある．また，VC設定時間の影響を最小限にするためにデータ転送時にVCの設定時間がデータ転送時間に占める割合をいかに小さくし，なおかつデータ転送時間を短縮するかという問題が生じる．

IP over ATMではATMアドレスを知るための機構として従来のIP通信でデータリンク層のMACアドレスを知るために使われていたAddress Resolution Protocol(ARP)をATM用に改良したATM ARPが用いられる[12][14]．またデータ転送は受信者へ直接VCを設定することで行われる．

IP Multicast over ATMにおいてはアドレス解決の問題以外に，マルチキャストグループのメンバの管理をIPとATMでマッチングさせるという問題が生じる．IP Multicast通信ではマルチキャストグループの参加離脱は受信者側で決定する．そして，Internet Group Management Protocol(IGMP)[4]を利用して他のホストに自分のマルチキャストグループの参加状況を知らせる．それに対し，ATMでは特定多数の受信者に対してデータを転送するために送信者を根とし，受信者を葉とする木構造の経路に沿ってVCを設定するpoint-to-multipoint VCが設定できる．マルチキャスト通信を実現するときはこのpoint-to-multipoint VCを用いる．しかし，point-to-multipoint VCの枝の操作は送信者側でしか行えないため，枝を操作する必要のある受信者は送信者にそのことを伝える必要がある．このため，受信者がマルチキャストグループへの参加離脱を決定する場合，送信者へその意志を伝える必要がある．これを実現するにはATMARPにおけるARPサーバを改良する必要があ

る．これを受けて ATM ARP サーバをマルチキャスト用に拡張した Multicast Address Resolution Server(MARS)[17] が考案された．MARS では IP マルチキャストアドレスに対応するグループのメンバの ATM アドレスを管理しており，マルチキャストグループのメンバ構成変更の際，該当するホストからグループへの参加離脱要求メッセージを受け取ることで管理情報を更新する．メンバ構成の変更が頻繁に起こるアプリケーションでは，MARS に到着するメッセージ量は非常に多くなる．このとき，MARS が被る処理負荷は非常に大きくなるため，制御メッセージの削減が必要となる．そのようなアプリケーションの代表例として，視聴番組の選択に伴い，グループメンバの参加状況が変化するストリーミングサービスが挙げられる．

また，データ転送用の VC をどのように設定すべきかという問題がある．MARS によるアドレス解決終了後，MARS からの情報を基に VC を設定し転送を行う．設定される VC の経路や形状により，実現されるサービスの遅延特性は大きく変化する．マルチメディア通信，特に自然な会話の実現を目的とする対話型アプリケーションは，ネットワークに要求する遅延条件が非常に厳しい．これらのアプリケーションの実現の際には，可能な限り小さい遅延を実現する VC 設定法が要求される．IP Multicast over ATM では VC の設定法が異なる 2 つのデータ転送方式が提案されている．それが送信者から直接 VC をマルチキャストグループのメンバへと設定し，その後データ転送を行うメッシュ方式 [17] と一度データをマルチキャストサーバと呼ばれるサーバへと転送し，マルチキャストグループのメンバへはマルチキャストサーバから転送し直すというサーバ方式 [17][19] である．メッシュ方式は，データを ATM セルの形のままマルチキャストグループのメンバへと転送ができるため，冗長な作業が転送時に存在しないという長所があるが，各送信者毎に VC を設定するため平均的な VC 設定時間が長くなるという短所が存在する．そしてサーバ方式では送信者側では転送用 VC をして送信者からマルチキャストサーバまでの VC のみを設定すればよく，マルチキャストサーバからマルチキャストグループへの VC は全ての送信者で共用するため平均的な VC 設定時間が短くなるという長所がある．VC 設定時間がデータ転送時間に占める割合は非常に大きいため，サーバ方式のように複数の送信者で VC を共有する方式を用いた場合，データ転送時間は短縮する．しかし，IP over ATM ならびに IP Multicast over ATM ではデータ転送の高速化のため AAL 層に AAL5 を採用しており，正しく受信するためには同一の AAL の Service Data Unit(SDU) から分割されたセルは同一 VC 上を連続して到着させる必要がある．この条件を満たすためにサーバ方式ではマルチキャストサーバサーバでセルを一度 AAL SDU の形にして，構築が終了したものから送信する．これにより転送の過程でセルを AAL SDU へと再構築するという冗長な作業が介在する．このように両方式とも遅延に関する課題を持っており，マルチメディア通信を実現するには不十分な遅延特性を提供するため，より小さい遅延を

実現する方式を考案する必要がある．

本研究ではこれらのアプリケーションの特徴により発生する問題に対し，問題点の要因を明らかにし，有効な解決法を提案する．まず，第 2 章ではマルチキャスト通信のなりたち，ならびにマルチキャスト通信を利用するアプリケーションの特徴を述べる．そしてマルチキャスト通信を実現するプロトコルを紹介し，現在多くのネットワークに採用されている IP Multicast について述べる．第 3 章では ATM ネットワークについて述べる．そして ATM 上でマルチキャスト通信を実現する方法を紹介し，現在注目を集めている IP Multicast over ATM 技術について述べる．最後に IP Multicast over ATM を実現するための必須技術を紹介する．第 4 章では，ストリーミングサービス実現時に発生する制御情報の増加問題に注目し，ネットワーク内に存在するホスト数と制御情報量の関係を解析的に導出する．その結果を用いて制御情報量を軽減するネットワーク構成法を提案する．第 5 章では，対話型アプリケーションを円滑に実現するための ATM におけるコネクション設定法に着目し，従来方式の遅延に関する問題点を解決する方式を提案する．最後に第 6 章で本研究で得られた成果を総括し，結論としている．

第2章　マルチキャスト通信

2.1　緒言

近年，インターネットに代表される通信ネットワークが発達していく中で，注目を集めている通信形態として特定多数の受信者にデータを配送する 1 対多通信，もしくは多対多通信が存在する．近年のマルチメディア通信の発達により，増加するトラヒックに対応するため，ネットワーク資源は有効に利用される必要がある．この資源の有効利用を達成する通信方式としてマルチキャスト通信の重要性が認識されている．

本章では 1 (多) 対多通信を用いるアプリケーションの特徴，ならびにその実現法について述べる．そして，これらのアプリケーションに対するマルチキャスト通信の有効性を述べ，マルチキャスト通信を実現するプロトコルについて述べる．

2.2 では 1 (多) 対多通信の実現方法とマルチキャスト通信の有効性について述べる．

2.3 では 1 (多) 対多通信を用いるアプリケーションがマルチキャスト通信に対する要求条件を検証し，実現するために必要な技術を明らかにする．

2.4 ではマルチキャスト通信を実現するプロトコルを技術的な特徴別に整理する．そして現在の主流である IP Multicast について，その動作や特徴を詳しく述べる．

2.2　マルチキャスト通信の概要

コンピュータネットワークの分野は，アメリカ軍の軍用ネットワークである ARPANET が民間に払い下げられたことから始まり，現在全世界に広がっているインターネットを代表に近年飛躍的に発展している．インターネットが開発された当初，転送する情報は主に文書であったが，コンピュータが発達するにつれ，コンピュータ上で個人が簡単に画像や音声を扱えるようになってきた．この流れを受けて，本来無線で行われていた動画や音声の配送サービスのネットワーク上での実現が要望されるようになった．これを受けて考え出されたアプリケーションとして視聴番組を受信者に配送するストリーミングサービスや，テレビ会議等の対話型アプリケーションが存在する．これらのアプリケーションの特徴として特定多数の受信者がデータを受信するこ

とが挙げられる．この通信形態は 1 対多通信，もしくは多対多通信と呼ばれる．1 対多，ならびに多対多通信では同一情報の受信者にデータを配送とすることを目的とするもので，他には分散データベースの同期やソフトウェア配布などがアプリケーションとして挙げられる．

コンピュータネットワーク上でデータ通信を行う際には，インターネットで使用され現在多くの OS に実装されている TCP/IP[1] をネットワーク層以上で用いるのが一般的となっている．TCP/IP を利用した通信では 1 対 1 通信が基本である．これより，特定多数の受信者にデータを配送する方法として，最初に 1 対 1(ユニキャスト) 通信を利用したユニキャスト主体の方式が考案された．その概念図を図 2.1 に示す．

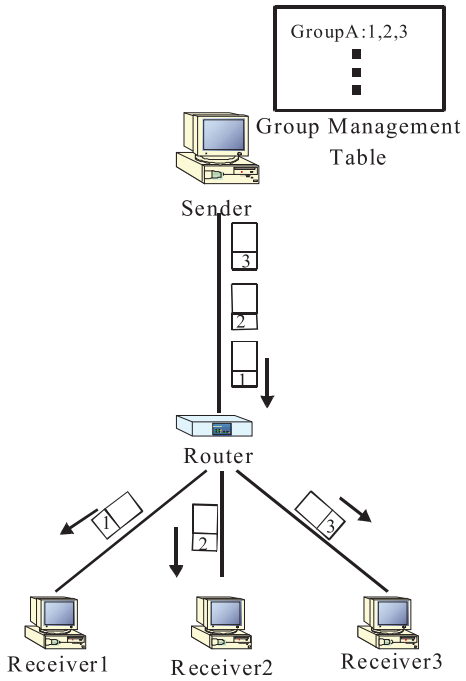

図 2.1: ユニキャストによる 1 対多通信の実現

ユニキャスト主体の方式では，送信者が受信者毎に用意したデータを，直接受信者のもとへ送信する．この方式では，同一データを受信者の数だけ複製した後，データを転送する．送信者付近のリンク帯域使用率は受信者の数だけ増加するため，ネットワーク資源の消費は受信者数に比例する．1 対多通信では動画や音声などファイルサイズの大きいデータが主に転送されるため，ネットワーク資源の消費量は膨大なものとなる．そこで，送信されるデータ量を削減する方法として，送信者と各受信者との間に設定される経路のうち，重複する区間が存在する点に着目した方法が考案された．転送経路の形状が送信者を根とした木構造をとるため，受信者へのデータ配布は経路の分岐点

でデータをコピーし，それぞれの経路に対し配送することで実現される．これより，送信者側で受信者数分データを用意することを避け，ネットワーク帯域使用量の削減を実現する．これがマルチキャスト通信の原理である [2][4].

マルチキャスト通信の概要図を図 2.2 に示す．マルチキャスト通信ではマル

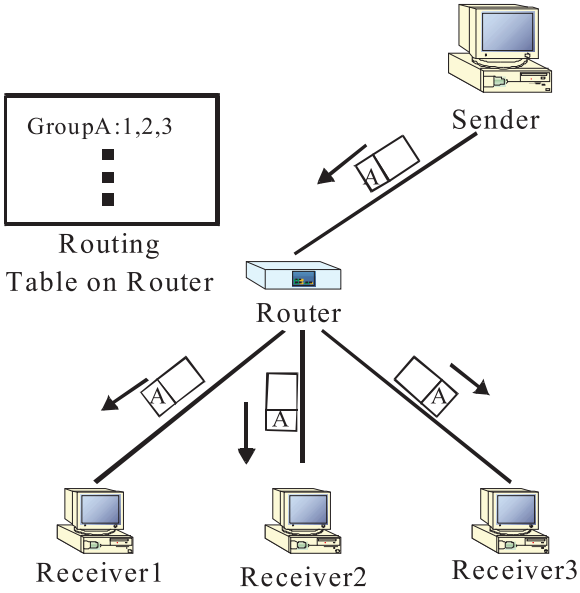

図 2.2: マルチキャスト通信

チキャストグループと呼ばれる受信者グループにデータを転送する．グループの識別方法としてはマルチキャストアドレスと呼ばれるアドレスを用いる方法と，グループに属する前面場のアドレスを用いる方法がある．送信者はマルチキャストグループに対しデータを送信する．データはあらかじめ計算された木構造をもつ転送経路上を流れる．転送経路の分岐点に相当するルータは，それぞれの下流に存在する受信者にデータを転送するため，下流に延びる枝の数だけデータをコピーする．これより，送信者側では 1 人の受信者にデータを転送する時と同じデータ量で特定多数の受信者にデータを転送することが可能である．マルチキャストグループ宛てに送信されるデータの受信を希望するホストは受信要求をネットワークに伝えることで受信動作を実現する．逆に，データの受信が不要となった場合，受信者は該当グループからの離脱要求をネットワークに伝える．これらの動作によりマルチキャストグループのメンバ構成は動的に変化する．よって，マルチキャスト通信を実現するための重要な課題として，マルチキャストグループに属する受信者の管理が挙げられる．現状ではネットワーク中に存在するルータが配下の受信者のメンバ参加状況を検知し，ルータ間でそれらの情報を交換する方式を用いて実現するのが一般的であるが，マルチキャストをサポートするプロトコ

ルにより動作は異なる．

2.3　マルチキャスト通信への要求

マルチキャスト通信は特定多数の受信者に対しデータを転送するときに使用される．現在インターネット上で実現されるアプリケーションにおいて特定多数の受信者にデータを転送するものとしては以下のようなものが挙げられる [2].

- ストリーミングサービス
- 対話型アプリケーション
- ソフトウェア配布
- 株式情報などの情報配信

これらのアプリケーションは特徴，ならびに実現に必要な品質条件が異なる．通常，品質条件は送信するデータの種類やネットワークにおける輻輳遅延等，ネットワークの形状が影響を与える要因に依存する．このため，ネットワーク構成を考える上で，実現されるアプリケーションの特徴を考慮することは重要である．そこで，アプリケーションの特徴を転送遅延や送信データの種類について整理した表を表 2.1 に示す.

表 2.1: マルチキャストアプリケーションの特徴

	リアルタイム 遅延条件厳しい	非リアルタイム 遅延条件緩い
マルチメディア	対話型アプリケーション	ストリーミングサービス
データのみ	株式情報などの情報配信	ソフトウェア配布

各アプリケーションは，実現の際に要求する遅延条件という観点に注目した場合，遅延条件の厳しいリアルタイム型のアプリケーションと遅延条件の緩い非リアルタイム型のアプリケーションにわかれる．テレビ会議などの対話型アプリケーションに代表されるリアルタイムアプリケーションは，人間同士の会話をネットワーク上で実現するために開発されたアプリケーションである．通常の会話をする際，相手の会話に対する返答は比較的短い時間で行われる．相手からの返答に多くの時間を費やすと，会話を行う際に生理的な違和感を感じる．これより，リアルタイムアプリケーションを実現する際には非常に小さい転送遅延をネットワーク上で実現することが重要となる．他方非リアルタイム型のアプリケーションでは短い転送遅延を実現することが望ましいが，リアルタイム型のアプリケーションと比較すると要求される転送遅延の条件は緩くなる．

また，各アプリケーションが扱う情報の種類という観点に着目した場合，動画や音声を伴うマルチメディア通信と，含まないデータ通信にわけられる．ネットワーク上で音声や動画等のマルチメディアデータを配布する方法として，マルチメディアデータを一度フレームと呼ばれる単体で再生可能な小さいファイルに分割した後送信し，受信者は受け取ったフレームを逐次再生していく方法が用いられる．このような転送方法をストリーミングと呼ぶ (図 2.3)．この方式において，フレームは同一時間間隔に再生された場合，元の画

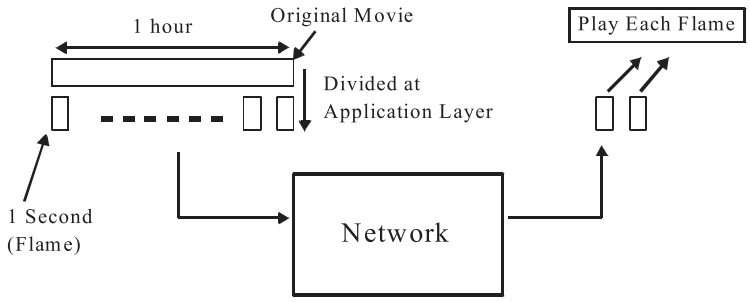

図 2.3: ストリーミング

像と同じものが再生されるよう分割される．受信者においてフレームの到着間隔がずれる場合，必要な再生情報が遅れて到着するため，画像に乱れが生じる．フレームの到着間隔のずれは主にネットワーク中で発生するトラヒック輻輳が原因となる．よって，マルチメディア通信を実現する際にはネットワーク中に輻輳を防ぐ機構が必要となる．データ通信では，到着間隔のずれに関する問題は影響しないため，マルチメディア通信にくらべ，遅延揺らぎに関する条件は緩やかなものとなる．

マルチキャスト通信に適したネットワークを構成するためには，これらのアプリケーションが要求する遅延等の条件を考慮する必要がある．遅延条件の厳しいアプリケーションに焦点を当てることで，多くのマルチキャスト通信を利用するアプリケーションの通信品質は満足される．よって，本研究では特に遅延条件が厳しいマルチメディア通信に注目し，その特徴を考慮したネットワーク構成法を考案する．

まず，非リアルタイム型マルチメディア通信の代表としてあげられる．ストリーミングサービスについてその実現形態を述べる．ストリーミングサービスはビデオサーバと呼ばれるサーバに蓄積される音声動画データをインターネット中に存在する受信者に対し配送するサービスである (図 2.4)．送信者はビデオサーバのみであるため，このサービスは 1 対多通信の形態をとる．データを要求する受信者は複数国内，もしくは全世界に存在するため，非常に大きなマルチキャスト転送経路が形成される．また，サービスが提供する放映番組は多くの種類が存在する．受信者は視聴を所望する番組を選択し，該当

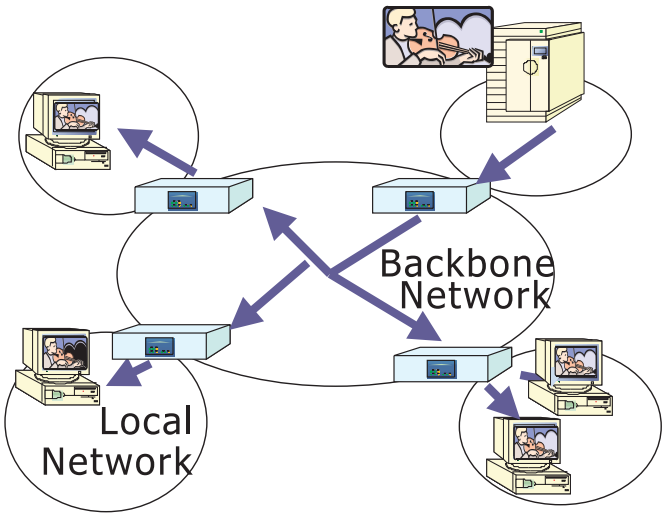

図 2.4: ストリーミングサービスの実現形態

するデータを受信する．ここで，番組の選択動作をマルチキャスト通信の概念と関連させる．番組を視聴する動作は該当する番組に相当するマルチキャストグループに参加することで実現される．逆に他の番組に変える，もしくは視聴を終了する動作は該当する番組に相当するマルチキャストグループから離脱することに相当する．よって，ストリーミングサービスを実現するためには大規模なネットワークにおけるデータ転送，ならびに番組を視聴する受信グループのメンバ管理を実現するための機構が必要となる．

リアルタイム型マルチメディアアプリケーションにおける代表アプリケーションとして，テレビ会議等の対話型アプリケーションが挙げられる (図 2.5)．送信者は会話に参加する全ての利用者であるため，このサービスは多対多通信の形態をとる．多数の人間が互いに話し合う状況は発生しにくいため，参加者数はストリーミングサービスとは異なり比較的少数である．実現をサポートするネットワークの規模は同一団体，もしくは同一国内程度と，比較的小さなものとなるため，ネットワーク上での実現は比較的容易である．しかし，会話を実現させるため非常に厳しい転送遅延条件を要求するため，ネットワーク中で転送遅延を抑圧する機構が必要となる．

2.4　マルチキャスト通信の実現

通常マルチキャスト通信は送信者から受信者へデータを転送することを目的とするネットワーク層で実現される．実現の際に必要な機構としてはマルチキャスト通信におけるマルチキャストグループの管理，ならびに経路設定動作を実現するプロトコルが挙げられる．マルチキャスト通信を実現するプ

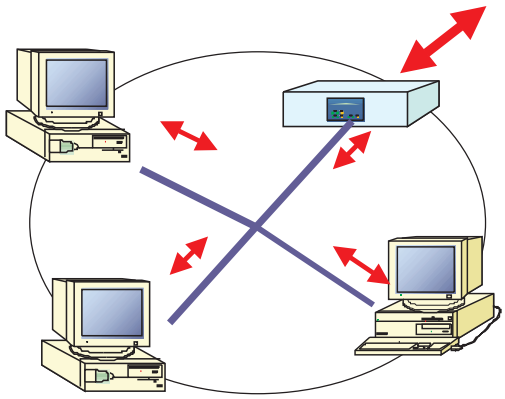

図 2.5: 対話型アプリケーション

ロトコルはグループのメンバ管理を行う場所の違いにより以下の 2 つに分けられる (図 2.6).

- 送信者ベース (図 2.6(a))
- 受信者ベース (図 2.6(b))

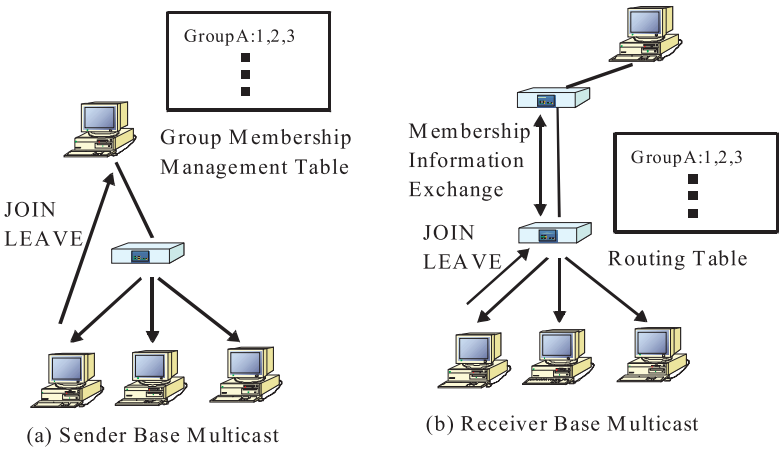

図 2.6: マルチキャストの実現法

送信者ベースのプロトコルでは送信者が送信対象となるグループに属する全メンバの情報を管理する．その情報をもとに，マルチキャスト用の転送経路は設定される．グループのメンバ構成に変更が生じた場合，送信者はメンバ変更を検知し，変更後の情報を新たに入手する必要がある．送信者ベースのプロトコルには代表的なものとして，Stream Protocol Version II(ST-II)[5]，Express

Transport Protocol(XTP)，ならびにMulticast Transport Protocol(MTP)[6]が挙げられる．

受信者ベースのプロトコルでは，受信グループのメンバはネットワーク中に存在するルータで分散管理される．これより，大規模なネットワークでも円滑に動作することが期待される．転送経路は各ルータにおいて自律的に計算される．転送経路の変更は，グループメンバの構成の変更をルータが検知し，隣接ルータ間で情報を交換することで実現される．現在インターネット上でのネットワーク層のデファクトスタンダードとなっているIPは，大規模ネットワーク上で動作するため，マルチキャスト通信をサポートする方式として受信者ベースのプロトコルを採用した．これより，受信者ベースのプロトコルがマルチキャスト通信を実現するプロトコルの主流を占めることとなった．これがIP Multicast[4]である．

IP Multicastの特徴を以下に述べる．送信されるデータはネットワーク内ではIPアドレスをもとに転送されるため，データをマルチキャストする際，全受信者を指定するアドレスが必要となる．IPマルチキャストではグループ単位でアドレスを用意し，該当グループにデータを送信する場合，グループに相当するアドレスをデータに添付することで全受信者にデータを転送する．このアドレスをIPマルチキャストアドレスと呼ぶ．

受信者のグループへの参加動作は隣接するルータに参加の意思を申告することで実現される．また，ルータは自身より下流にマルチキャストグループのメンバが存在する間，マルチキャストデータをメンバに向けて転送する必要がある．よって，メンバの所在情報を隣接ルータ間で互いに通知する必要がある．この動作はマルチキャストのグループ管理プロトコルであるInternet Group Management Protocol(IGMP)[4][7]で実現される(図2.7)．IGMPでは，ルータはIGMP Host Membership Queryを定期的に隣接する全ホストへ送信する．それを受け取ったノードがホストであれば，自分が属するグループのアドレスを返答する．また，属するグループが複数存在する場合，それぞれのグループに対する返答を返す．ルータである場合は，下流にメンバの存在するグループのアドレスを返答する．また，そのようなグループが複数存在する場合は，そのグループごとに返答を返す．その返答先としては返答対象となるマルチキャストグループのアドレスが使用される．隣接ノードにのみ到達するよう返答メッセージの有効期間は1ホップと設定されている．これより，隣接するグループのメンバ全員に返答メッセージは到達する．複数回Queryを送信したが，返事が返らない場合はグループのメンバは存在しないと想定する．これより，ホストのグループへの参加動作は，Queryに対し返答することで実現される．逆に離脱するためにはQueryに対し返答を返さないことで実現される．IGMPは，メンバの所在を確認するためのプロトコルであるため，1グループに対して送信されたQueryの返事は1つ存在すれば，IGMPの目的は達成される．このため，自分が属するグループへの返答

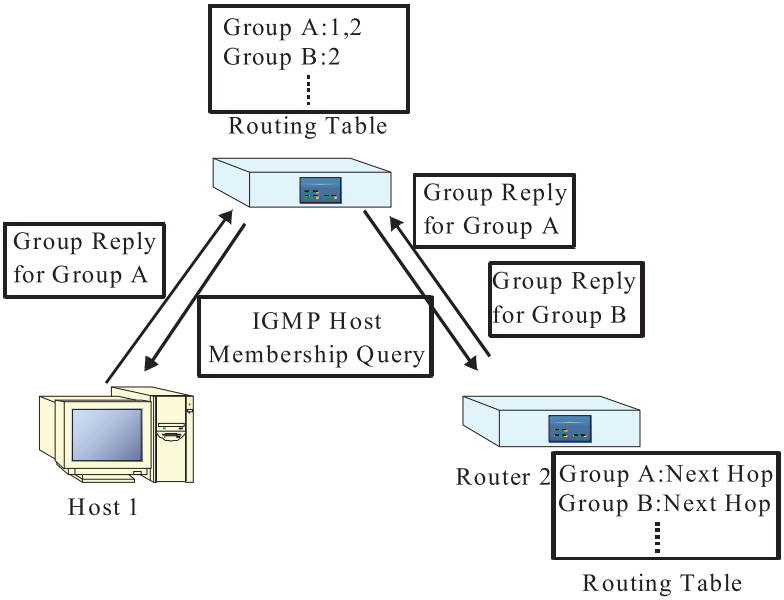

図 2.7: IGMP の概要

メッセージを他のホストから送信された場合，返答メッセージの送信を控えることでネットワーク中に不要な返答メッセージを送信することを防ぐ．

受信側ベースのマルチキャストにおいて，ルータはグループメンバの管理責任があるだけでなく，マルチキャストデータを転送する役割を担う．よって，ルータは申告された情報をもとに転送用の経路を設定する．この設定動作を実現するのがマルチキャストルーチングプロトコル [8][9][10] である (図 2.8)．これは IGMP から得られた情報を用いて，次の転送経路を決定することを目的としたプロトコルである．決定された情報は各ルータが保持するルーチングテーブルに記載される (表 2.2)．各ルータに到着したマルチキャスト

表 2.2: ルーチングテーブル

Destination Group	Source	Upstream Interface	Downstream Interface	TTL
224.1.1.1	128.1.0.2	1	2,3	5
224.1.1.1	128.4.1.2	1	2,3	2
224.1.1.1	128.5.2.2	1	2,3	3
224.2.2.2	128.2.0.3	2	3	7

データは，マルチキャストアドレスやデータの入力ポートをルーチングテーブルと比較することで次の経路へと転送される．マルチキャストにおいて注

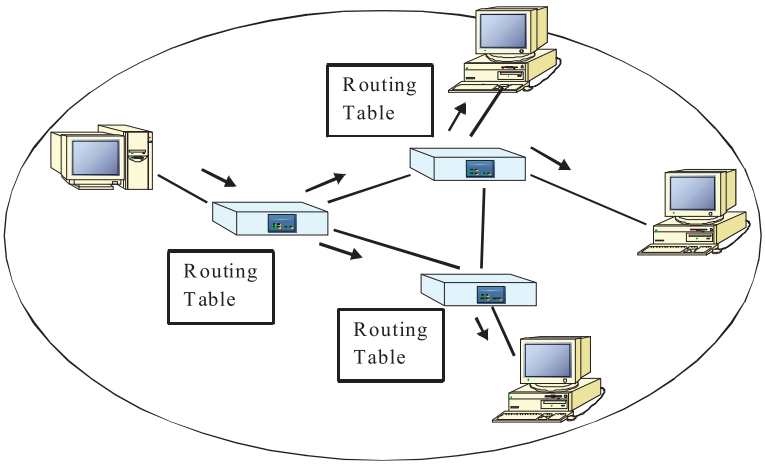

図 2.8: マルチキャストルーチング

意すべき点として宛先となるホストが動的に変化する点があげられる．これはホストがマルチキャストグループに動的に参加，離脱動作を行うことより発生する．これにともない，グループのメンバが動的に変化するごとに，マルチキャストトラヒックの転送用経路も変更する必要がある．よって，マルチキャストルーチングプロトコルでは，転送用経路の維持が重要な役割となる．規模が大きいネットワークでは，経路変更情報の伝播に時間がかかるため，迅速な情報伝達が重要な課題となる．

2.5　結言

本章では，まず 2.2 で 1 対多通信について，その重要性を示した．そして 1 対多通信をネットワーク資源を節約する点で有効なマルチキャスト通信について，その概要を示した．

2.3 ではマルチキャスト通信を用いるようなアプリケーションを紹介し，それぞれがネットワークに要求する品質条件について述べた．そして，品質条件の厳しいマルチメディア通信における代表的なアプリケーションを紹介し，その特徴を述べた．

2.4 ではマルチキャスト通信の実現方法を紹介した．そして，現在のマルチキャスト通信の主流である IP Multicast についてその概要を述べた．

次章では，本研究で扱うデータリンク層の技術である ATM について，その概要を述べる．そして，ATM 上でマルチキャスト通信を実現する際に必要な技術について紹介する．

第3章　ATM上でのマルチキャスト通信の実現

3.1　緒言

次世代の統合型通信サービスを提供するものとして B-ISDN が発達しており，その中心的な技術として ATM 技術が発達している．近年のマルチメディア通信の発達により増加するトラヒックに対応するために，高速網である ATM 網でマルチキャスト通信を実現する ATM マルチキャスト通信が検討されている．インターネットを経由してデータを転送するためには非 ATM 網を経由してきたデータも転送する必要があるため，ATM 上でデータリンク層の技術に依存しないマルチキャスト通信を実現する必要がある．この流れを受けて，現在のマルチキャスト通信の主流である IP Multicast を ATM 上で実現する IP Multicast over ATM の重要性が認識されている．

本章では ATM 技術の概要，ならびに ATM におけるマルチキャスト通信の実現法について述べる．その後，ATM 上で IP Multicast を実現する IP Multicast over ATM について述べる．

3.2 では ATM の概要と ATM におけるマルチキャスト通信実現法について述べる．

3.3 では IP Multicast over ATM の概要について述べる．

3.4 では IP Multicast over ATM を実現する上での必須技術として，アドレス解決と ATM における Virtual Connection(VC) の設定法を紹介し，詳細を述べる．

3.2　ATMマルチキャスト

コンピュータの性能向上に伴い，インターネットを利用する人口が増え，各利用者へとネットワークを拡張する必要が生じてきた．各利用者が個別にネットワークを運営すれば容易にインターネットを利用できるが，ネットワークを運営するには多くの費用がかかり，ネットワークを管理運営できない個人や小規模団体では利用できないことになる．これを受けて注目されたのがすでに各家庭にまで敷設されている電話線を利用する方法である．

それまでの電話は音声のみのサービスを行なっていたが，コンピュータネットワークを行なう上で画像，動画，ファイル等も転送する必要がでてきた．

これらの転送情報はそれぞれトラヒック特性や転送レートも違うため，別々のネットワークを構成していたが，情報をデジタル化することで一括して扱うことができるようになった．これが統合型サービス網 Integrated Service Digital Network(ISDN) である．これにより，多くの人がコンピュータネットワーキングを行なえるようになったが，転送する情報が年々大きくなっているため，このままではデータ転送時間が大きくなり，ネットワーク内でも頻繁に輻輳が起こる危険性がでてきた．

このため，次世代の統合型通信サービスとして広帯域 ISDN(B-ISDN) を開発する事となった．その中心的技術となるのが高速転送技術である ATM(Asynchronous Transfer Mode) である．これは CCITT(現 ITU-T) において標準化が進められている．また，正式な標準化団体ではないが，デファクトスタンダードを決める企業連合団体として ATM Forum が発足し，ATM の標準化に大きな影響を与えている．

ATM ネットワークの一般的なモデルを図 3.1 に示す．

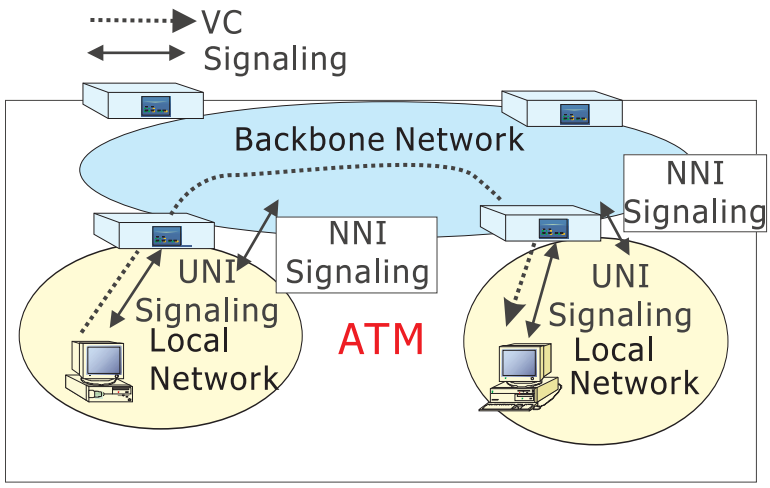

図 3.1: 一般的な ATM ネットワークのモデル

図 3.1 のように，ユーザは User Network Interface(UNI) を用いて ATM 網に接続し，ATM 網同士は Network-Network Interface(NNI) を用いてシグナリング処理を行う．このように，複数の ATM 網が集まって大規模な ATM 網を構成している．ATM は回線交換方式が基礎になっているためデータ送信は受信者の ATM アドレスを知った後，受信者までの VC を設定し，それを利用することで行なわれる．よって特徴は以下のようになる．

- 受信者までの経路を予め確保 (コネクションオリエンテッド通信)
- ATM セルの中に記入されているパスの ID(VCI，VPI) をもとに転送

マルチキャスト通信においても同様の特徴をもつ．マルチキャスト通信を実現するために ATM では point-to-multipoint VC を設定することが認められている．これは送信者から特定多数の受信者へとデータを転送するために設定される．point-to-multipoint VC の設定法 [32] を図 3.2 に示す．ATM で

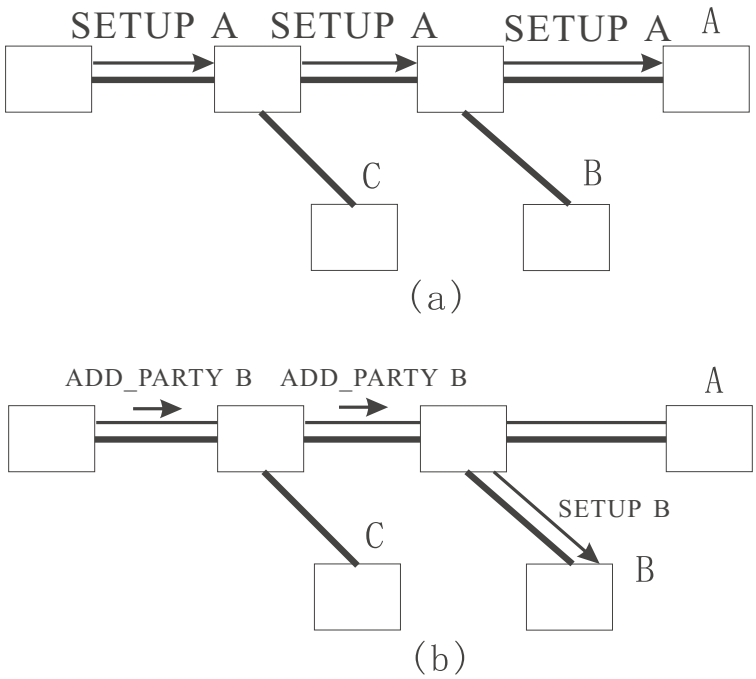

図 3.2: point-to-multipointVC の設定法

は転送用の VC の設定権限は送信者が持つ．そこで VC 設定における送信者の具体的な手順としては次のようになる．

1. VC を設定する特定多数の受信者のうち，任意の一人の受信者へと SETUP メッセージを用いて point-to-pointVC を設定 (a)
2. 残りの受信者を 1 人づつ ADD_PARTY メッセージを用いて VC の枝を追加 (b)

また，point-to-multipoint VC から受信者を外すときは DROP_PARTY メッセージを用いて VC の枝を取り除く．枝の追加，ならびに切断は 1 受信者ごとに行うため，VC の設定，ならびに切断に要する時間は受信者の数に比例する．

これらの動作は対象となるホストの ATM アドレスを用いて実現される．これより，送信者は送信対象である特定多数のホストの ATM アドレスを全て知る必要がある．データ通信における階層化の概念より，ネットワーク層にお

ける経路を基にデータリンク層で経路が設定されるため，ネットワーク層の宛先であるアドレスとATMアドレスを対応させる機構が必要となる．これを実現するのがアドレス解決機構である．後ほど説明するIP Multicast over ATMでは，Multicast Address Resolution Server(MARS)を用いてこの動作を実現する．

3.3 IP Multicast over ATM

ATMマルチキャストはATM網内でマルチキャスト通信を実現する技術である．このため，インターネット中でデータ転送を行うためには非ATM網におけるデータ転送も実現するため，ネットワーク層のプロトコルと協調する必要がある．2章で述べたようにネットワーク層におけるマルチキャスト通信は主にIP Multicastを用いて実現される．そこで，ATM上でIP Multicast通信を実現しようとする動きが生じてきた．また，IP Multicastにおいても，マルチメディア通信の実現の為には広帯域な回線が必要である．ATMをデータリンク層の技術として採用することはテレビ会議や情報配信サービスなど，マルチメディア通信の一角をなすアプリケーションを実現するために必要である．よって，ATM上でIP Multicast通信を実現しようとする流れは必然的に生じて来る．そのため，IP Multicast over ATMへの期待が近年高まって来ている．

IPを利用した代表的なネットワークであるインターネットのモデルを図3.3に示す．インターネットではWANを中心に，LANやMANが相互接続することで構成されている．それぞれのネットワーク間にはIPルータが接続されており，IPルータでデータを次のネットワークに送信すべきかを決定する．IPではコネクションレス通信が行なわれており，受信者側でデータを受信すべきかを決定する．IPではパケット交換方式が基礎になっているため，コネクションというものを設定せずに，自由な経路をとってデータは転送される．よって特徴は次のようになる．

- IPデータグラムに送信者と受信者のアドレスを記入してネットワークへと転送
- 経路を予め確保せず，ルーチングテーブルをもとにデータを転送 (コネクションレス通信)

これらの特徴が示すように，IPとATMでは，通信方法に対する考えにおいて違いが現れる．このためATMの上にIPプロトコルを用いる場合には，コネクションレス通信とコネクションオリエンテッド通信をマッチングさせる必要があり，それを実現する技術がIP Multicast over ATMである．

また，従来のIP網では物理回線の違い，そして管理団体の違いによって，ネットワークを複数のサブネットワークに分けて管理していた．IP Multicast

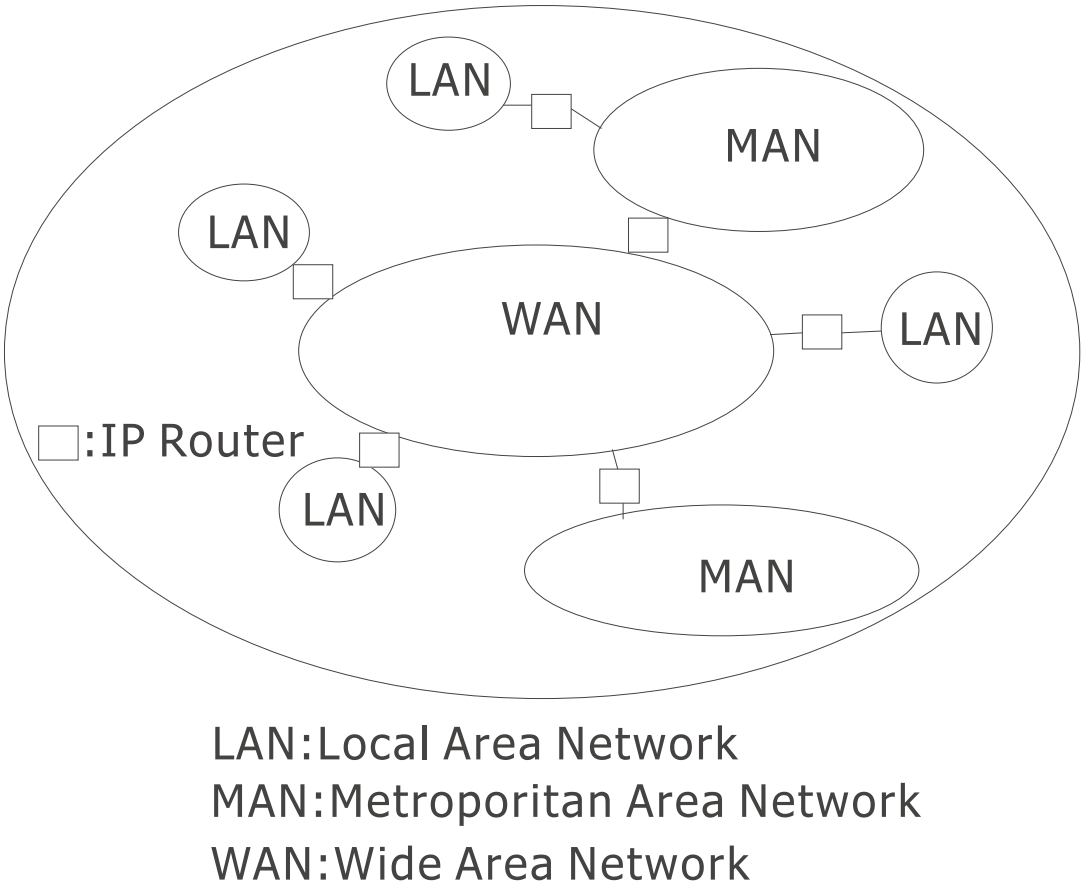

図 3.3: インターネットのモデル

over ATM でもこの従来の考え方を踏襲して，大規模な ATM 網を複数のサブネットに分けるよう決められている．これを Logical IP Subnet(LIS)[18][32] と呼ぶ．概念的な図を図 3.4 に示す．

LIS が満たすべき条件としては次のようなものがある．

- ATM 網に接続している IP ホストはいずれかの LIS に属する
- LIS は従来のサブネットと同様の方法で管理する
- IP ホストは従来の方法でルーチングを行う．すなわち，同一の LIS に属するホストへデータを送信するときは直接送信し，異なる LIS 間同士で通信するときは IP ルータへ送信を行う．
- 異なる LIS 間には IP ルータを設置し，LIS 間通信は必ずその IP ルータを経由する必要がある．

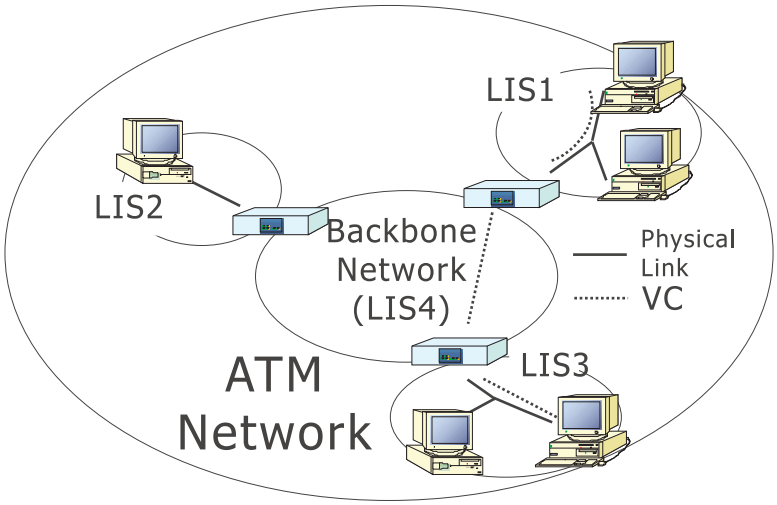

図 3.4: IP Multicast over ATM における LIS の概念

このように LIS という概念を導入した背景として，今までの LAN と同じように管理したいという要求のため，管理範囲を手頃なものとするため，そして IP ルータを経由させることでセキュリティ管理をしやすくするためなどの理由があげられる．

LIS という概念を導入することで，図 3.5 のようなレイヤ構造をとってデータ転送が行なわれることになる．

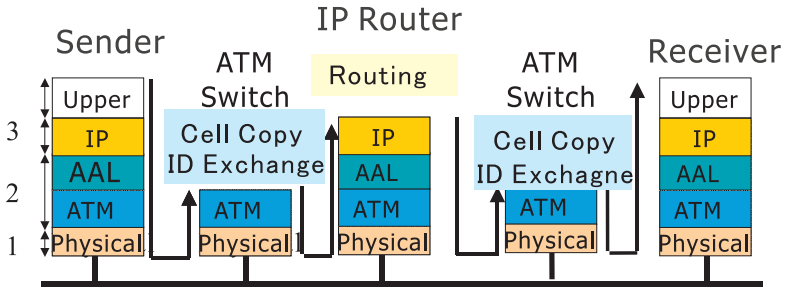

図 3.5: データ転送におけるレイヤ構造

IP と ATM のコネクションに関する考え方の違いから，次のような不具合が生じる．

- 経路設定のため受信者の ATM アドレスを知る必要がある
- ATM におけるデータ転送経路の設定時間が必要

従来データリンク層で使用されていた Ethernet や FDDI 等では受信者の MAC アドレスを用いて転送が行なわれるため，受信者の MAC アドレスを知る必

要がある．IP ではその作業を Address Resolution Protocol(ARP) が行なっていたが，IP Multicast over ATM にも VC 設定のため受信者の ATM アドレスを知る必要があるため，同様のプロトコルが必要である．それを実現するプロトコルが Multicast Address Resolution Server(MARS) を用いた方式である．その動作を理解するために MARS の元となる ATMARP について説明する．ATMARP はユニキャスト通信を実現するときにアドレス解決機構として使用される．ATMARP を用いて送信者は IP アドレスから受信者の ATM アドレスを知ることになるが，その情報を管理しているのが ATMARP サーバである．

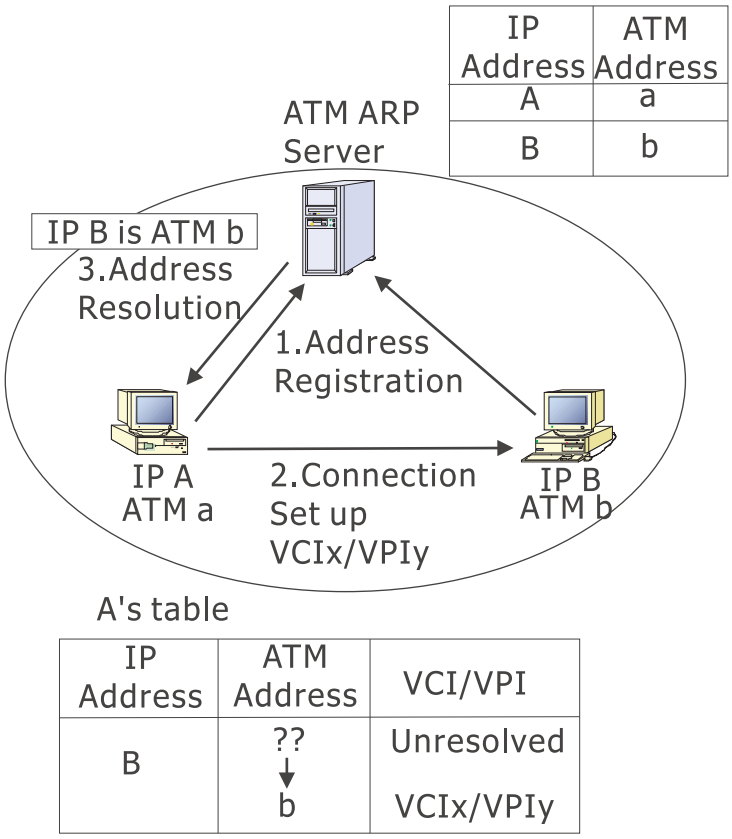

図 3.6: ATMARP

各 LIS に少なくとも 1 つ ATMARP サーバを用意し，LIS 内の ATM ホストは自分の LIS 内にある ATMARP サーバを利用する．ATMARP サーバにおいて次のような処理を行なう．

- アドレス登録
- コネクション有無確認

- アドレス解決
- コネクション設定
- ARP テーブル更新

まず ATM 端末が ATM-LAN に接続されるとき，ATMARP サーバに端末の IP アドレスと ATM アドレスを登録する．この動作は次の 2 つの動作からなる．

- 端末から ATMARP サーバへと VC を設定 (メッセージセルに端末の ATM アドレスが記載)
- ATMARP サーバから端末へ Inverse ARP 要求を出し，端末の IP アドレスを教えてもらう (Inverse ARP:ATM アドレスに相当する端末に IP アドレスを教えてもらうプロトコル)

これらの動作を経て，端末の IP アドレスと ATM アドレスが登録される．

次に送信者が受信者にデータを転送する場合は，まず送信者が持っているコネクションの管理テーブルを参照し，受信者までの VC が設定している場合はそれを利用してデータを転送するが，VC が設定されていない場合は ATMARP サーバへとアドレス解決要求を出す．ATMARP サーバはそれを受けて受信者の ATM アドレスを返し，その情報をもとに送信者は受信者へと VC を設定するのである．

ATMARP サーバでは古い情報を消去するために，定期的に管理テーブルの更新を行なう．これはテーブルの有効時間が満了した時に端末へと IP アドレスの問い合わせを行ない，返事がくればその端末の情報をテーブル内に残し，なければ情報を消去することで実現する．

このアドレス解決モデルでマルチキャスト通信をサポートするためには，以下のような動作をサポートする必要がある．

- グループに参加するメンバ全員の ATM アドレス
- グループを構成するメンバの動的な入れ替えに伴う管理情報の変更

これらの動作を実現するため ATMARP を拡張したものが MARS である．MARS に関しては次節で詳しく説明する．

アドレス解決を終えて送信を行なうとき，データリンク層に ATM を利用するため，AAL 層に何を使用するかという問題が存在するが，IP Multicast over ATM ではデータ通信で用いられる AAL5 を使用している．AAL は上位レイヤからのデータを図 3.7 のようにカプセル化し，ATM セルへと分割する役割を持つ．ここで ATM セルのヘッダのフォーマットを図 3.8 に示す．

なお，Payload type におけるビットが示す意味を表 3.1 に示す．

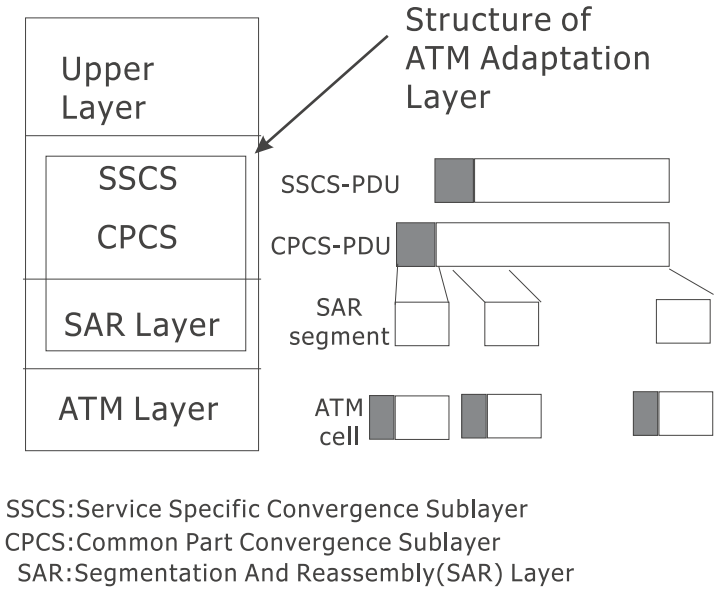

図 3.7: AAL 層でのカプセリング

ペイロードタイプを示すビットのうち，一番右のビットはそのセルが AAL_SDU を構成する最後尾のセルであることを示す．このビットは AAL5 以外では基本的には使用されない．これらを踏まえた上で AAL5 のフォーマットを図 3.9 に示す．

AAL5 はデータ長とチェックサムのみを上位レイヤのデータに付加することによって，冗長なデータを転送することを防ぎ，それにともないデータ転送速度を向上させる目的で考案された．セルの順序を示すシーケンスナンバや，セルの送信者のアドレス等が添付されていないため，AAL5 でデータ転送を行う際は，次のような前提が必要となる．

- 同一の AAL_SDU から分割されたセルは同一 VC 上を連続して転送する．

この前提がない場合，データ転送中に他のセッションのデータが混在すると，ATM レベルで送信者を特定できないために受信側でデータの再構築ができなくなるという問題が生じてくる．IP Multicast over ATM では送信者毎，そしてセッション毎に point-to-pointVC を設定するため上記の決まりは必然的に守られるが，IP Multicast over ATM では同一の VC に複数のセッションのデータが混在するという状況が発生し得るので，この前提を如何にして守るかということが問題となる．このため，設定する VC の形状に応じてセルの転送機構を変更する必要がある．よって，VC 設定機構を検討することは IP Multicast over ATM を実現する上で重要な課題となる．

最後に VC を設定するために生じる影響であるが，ATM では転送経路を

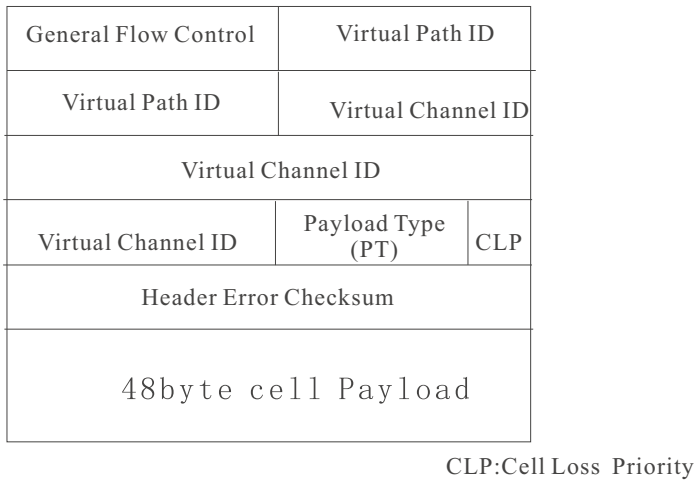

図 3.8: ATM ヘッダ

表 3.1: ペイロードタイプ

PT	意味
000	ユーザ情報セル，網輻輳無，SDU タイプ＝ 0
001	ユーザ情報セル，網輻輳無，SDU タイプ＝ 1 (最終セル)
010	ユーザ情報セル，網輻輳有，SDU タイプ＝ 0
011	ユーザ情報セル，網輻輳有，SDU タイプ＝ 1 (最終セル)
100	制御管理用セル:OAM cell(セグメント対応 F5 フロー)
101	制御用管理セル:OAM cell(エンドエンド対応 F5 フロー)
110	リソース管理セル
111	予備

予め設定する必要があるため，その設定時間がデータ転送時間におけるボトルネックとなる．よって通常の ATM 通信のように通信終了後すぐに VC の解放を行なうと性能が悪化する．このため，IP Multicast over ATM では，

- データ転送終了後，すぐに VC を解放しない

ということを行っている．これにより頻繁に VC をセットアップすることを防止している．VC の解放時期はデータ転送終了後，一定時間 T が経過したときであり，この時間 T を VC の保留時間，VC ライフタイムと呼ぶ．

今まで述べてきた IP Multicast over ATM を通常 Classical IP Multicast over ATM と呼ぶが，Classical IP Multicast over ATM では必ず IP ルータを経由し，そこでデータを一度 IP データグラムへと再構築するため，転送遅延を被るという問題が発生する．この問題を解決するために様々な方法が考案され

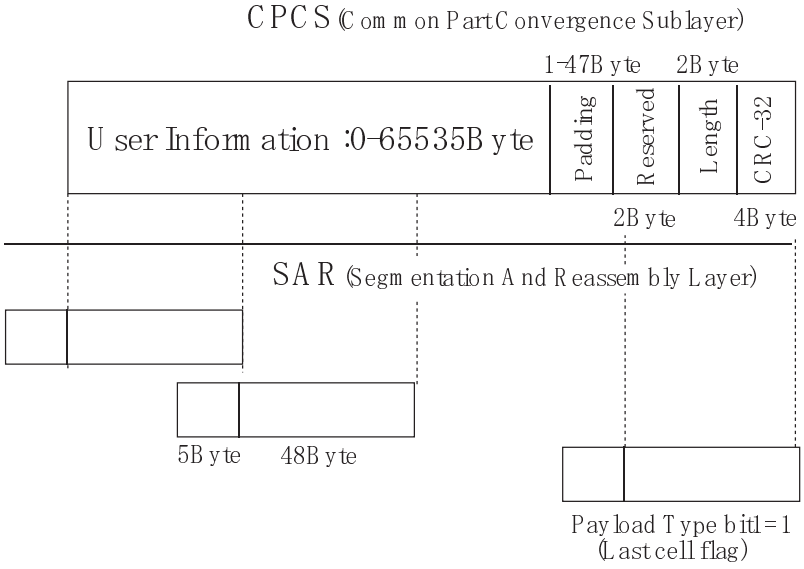

図 3.9: AAL5 のフォーマット

ているが，その中でも代表的なものに Next Hop Routing Protocol(NHRP)[33] や Multiple Protocol Label Switch(MPLS)[34] がある．NHRP は LIS 間通信においても受信者，または受信者に最も近い ATM 端末までのアドレス解決を行うことを目的としたものであり，MPLS は IP ルータで ATM スイッチのようにセル単位でスイッチングすることで IP データグラムの再構築作業を削除することを目的としたものである．

3.4 必須技術

本節では IP Multicast over ATM を実現する上で必要な技術である，アドレス解決技術と ATM における VC の設定法について説明する．

3.4.1 アドレス解決技術

IP はコネクションレス通信，ATM はコネクションオリエンテッド通信であるため，経路設定に対する考え方が異なる．それがマルチキャスト通信になるとさらに次のような問題が生じる．

- ATM では IP における IP マルチキャストアドレスのようなマルチキャストグループ全体を指し示すアドレス体系をサポートしていない．

このため，マルチキャストをサポートするために外的な機構を必要とする．

IP マルチキャストを ATM 上で実現するための外的な機構として代表的なものに IP over ATM での ARP サーバを発展させた MARS(Multicast Address Resolution Server)[17](図 3.10) が存在する．

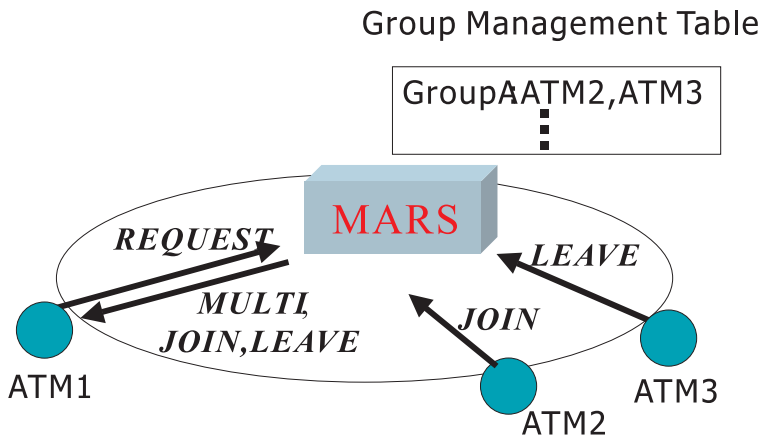

図 3.10: Multicast Address Resolution Server

MARS は ATM ARP サーバを発展させたものであるため，アドレス解決のために使用される．MARS で管理されている情報は以下のものとなる．

- クラス D の IP アドレス X(IP マルチキャストアドレス)
- アドレス X のマルチキャストグループに属している ATM ホスト全員の ATM アドレス

である．そして，一つの MARS が管理しているホスト群をクラスタと呼称し，クラスタに属するホストをクライアントと呼称する．MARS とクライアントとの間には Cluster Control VC(CCVC) と呼ばれる PVC が設定され，制御情報は CCVC 上に転送される．そして情報の交換プロトコルは IP 層に属する．

ここで MARS の動作概要について述べる．送信者はマルチキャストグループのメンバへとデータを転送するとき，VC を設定するために送信したいマルチキャストグループを示す IP アドレスからマルチキャストグループのメンバ全員の ATM アドレスを知る必要がある．その手順は以下のようなものとなる．なお，MARS とクライアントとの間の情報交換は先程述べたように CCVC を用いて行われる．

1. 送信者は MARS へと MARS_REQUEST メッセージを転送
2. MARS は管理テーブルから REQUEST メッセージに記載されていたマルチキャストグループのメンバの ATM アドレスを MARS_MULTI メッセージを使用して転送

3. 送信者は送られて来たMARS_MULTIメッセージの情報を使用してマルチキャストグループのメンバへとpoint-to-multipoint VCを設定

IPマルチキャストではマルチキャストグループの参加，離脱は受信者側で行い，送信者に知らせる必要がないという特徴が存在するが，ATMでは送信者がマルチキャストグループへと設定されているpoint-to-multipoint VCの枝の追加，削除を行うため，参加離脱要求の発生毎に送信者へ参加者の状況に変化が生じたことを知らせる必要がある．MARSを使用したモデルでは参加状況を知らせる役割をMARSが担当する．

受信者がグループへの参加，離脱時に使用するメッセージとしては次のようなものが存在する．

- MARS_JOIN:マルチキャストグループへの参加時に使用
- MARS_LEAVE:マルチキャストグループからの離脱時に使用

これらのメッセージをグループへの参加，離脱時に次のように使用する．

- グループへの参加時
  1. 新たに設定したVCを用いてMARSへMARS_JOINメッセージを送信し，マルチキャストグループに参加することを表明
  2. MARS_JOINを受け取ると，その情報を基にMARSの管理テーブルを変更
  3. CCVCを用いてクラスタ内のホスト全員に先程受け取ったMARS_JOINメッセージを配布
- グループへの離脱時
  - 新たに設定したVCを用いてMARSへMARS_LEAVEメッセージを送信し，マルチキャストグループに参加することを表明
  - MARS_LEAVEを受け取ると，その情報を基にMARSの管理テーブルを変更
  - CCVCを用いてクラスタ内のホスト全員に先程受け取ったMARS_LEAVEメッセージを配布

3.4.2 VC設定方式

現在IETFで提案されているLIS内でのVC設定方式のうち代表的なものを挙げる．

メッシュ方式

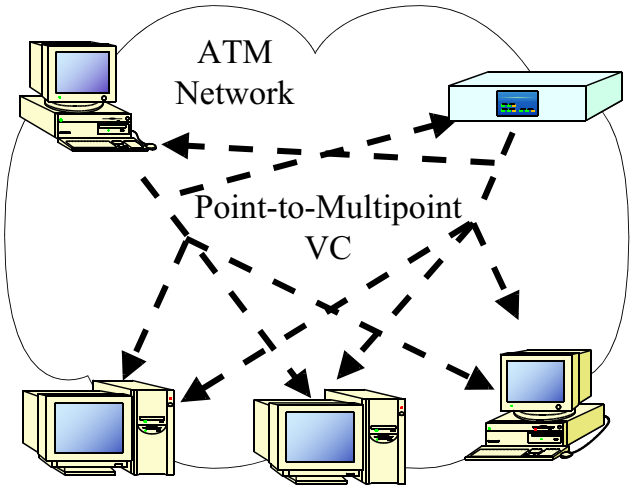

図 3.11: メッシュ方式

現在 IETF で提案されているデータ転送方式としては大きく分けて 2 つ存在するが，そのうちの一つが送信者から直接マルチキャストグループに対して point-to-multipoint VC を設定し，データを転送するメッシュ方式 [17][18] (図 3.11) である．

これは送信者は直接受信グループのメンバへと point-to-multipoint VC を設定し，データを転送する方式である．

データ転送の流れは以下のようになる．

- MARS にマルチキャストグループのメンバ全員の ATM アドレスを問い合わせ，MARS から送られた情報をもとにマルチキャストグループのメンバへ point-to-multipoint VC を設定
- データを転送

この方式では，ATM 網内ではセルスイッチングを行ってデータを転送する．ATM が有するハードウェアスイッチングによる高速性を有効に利用する方式である．

サーバ方式

IP Multicast over ATM を実現するもうひとつの方式が，マルチキャストサーバと呼ばれるサーバを使用するサーバ方式 [17][18][19](図 3.12) である．

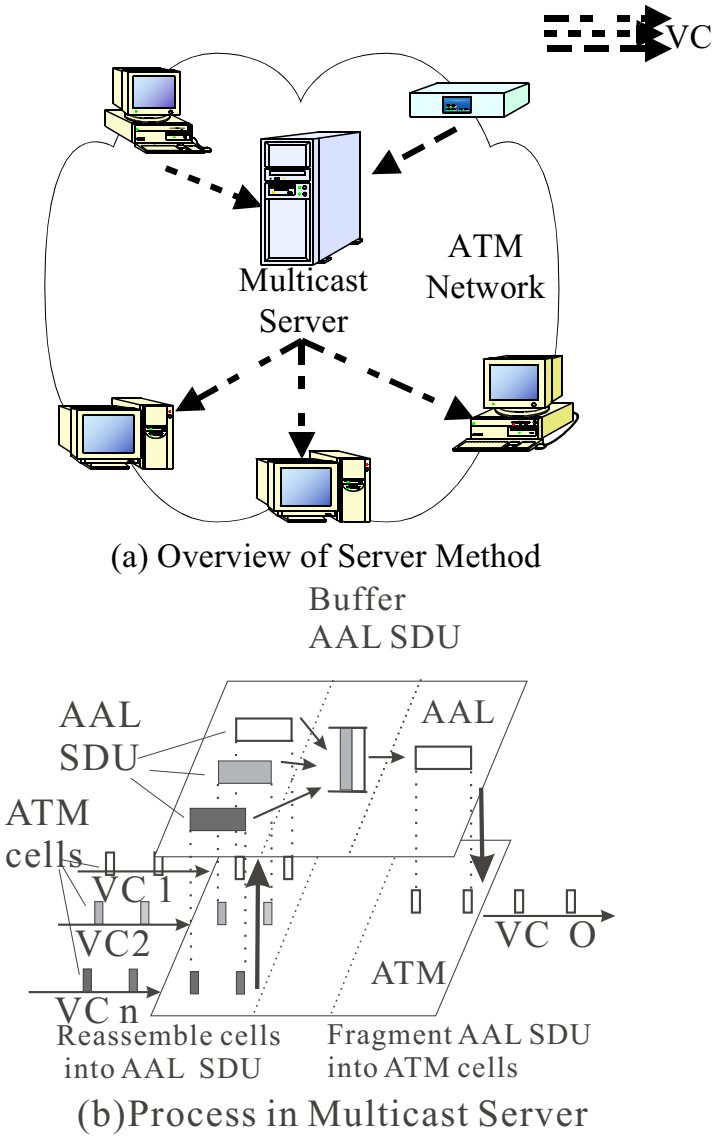

図 3.12: サーバ方式

この方式は一度データをマルチキャストサーバへと転送し，サーバからマルチキャストグループへとデータを送り直す方式である．このため，サーバからマルチキャストグループのメンバへの VC は複数の送信者に共同利用さ

れる．マルチキャストサーバのみをマルチキャストグループのメンバとみせかけることで，送信者からの VC セットアップ動作を簡単にしているという特徴がある．IP Multicast over ATM ではデータ転送の高速化をはかるため，AAL 層に AAL5 を採用している．この方式では，データの送信者を VC の VCI や VPI を用いて区別し，同じデータグラムから生成された ATM セルは連続して受信者まで到達することを前提としてデータ転送を行っている．サーバ方式では送信者からの VC は一度マルチキャストサーバで終端され，マルチキャストサーバからマルチキャストグループへと VC を設定し直すという形をとっている．従って ATM レベルでは，全てのデータの送信者はマルチキャストサーバであると解釈され，マルチキャストサーバから来たデータを AAL5 の受信手順に従って，データセルを AAL5 の SDU へと組み立て直す．すなわち，複数の送信者が送り出したデータが同時にマルチキャストサーバへと送り出されたとき，マルチキャストサーバで一度 AAL5 の SDU の形に揃うまでデータ転送を待たねば，図 3.13(a) に示すように異なる送信者 A と B から到着したセルがサーバにおいて混ざり合った形でマルチキャストグループへと送信される．このとき，AAL5 では元の SDU に戻すことができず，正しく転送されないことになる．この問題に対処するため，サーバ方式においては，図 3.13(b) に示すようにサーバにおいて一旦 SDU に組み立てるという動作を行っている．

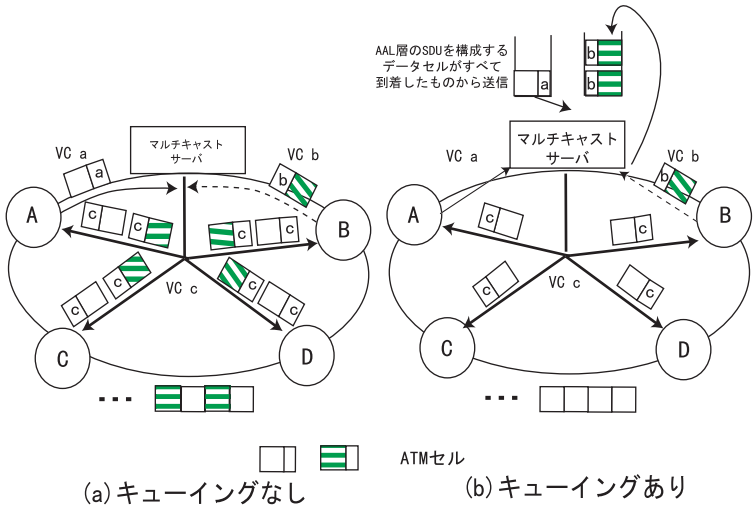

図 3.13: マルチキャストサーバにおける AAL_SDU の再構築

3.5 結言

本章では，まず 3.2 で ATM がサポートするマルチキャスト通信の概要を示した．

3.3 ではマルチキャスト通信の実現する際に最もよく用いられる IP Multicast を ATM 上で実現する IP Multicast over ATM についてその概要を示した．また，その実現において使用する ATM の機構について述べた．

3.4 では IP Multicast over ATM を実現するために必要な技術として，アドレス解決機構と VC 設定方式を紹介した．また，それぞれの技術における課題を述べた．

第4章　ストリーミングサービスに適したネットワーク構成法

4.1　緒言

本章ではストリーミングサービスに焦点をあてる．ストリーミングサービスでは受信者は複数の番組から所望の番組を選択することが可能である．ストリーミングサービスにおける番組選択は，ネットワーク層におけるホストのマルチキャストグループに対する参加・離脱動作を伴う．すなわち，該当する番組を見たい場合，ホストはその番組に該当するグループに参加し，番組を変えたい場合ホストはその番組に相当するグループから離脱する．IP Multicast over ATM では，動的に変化するマルチキャストグループのメンバ管理を MARS が行う．MARS の管理情報は，ホストから送られる，グループへの参加・離脱要求メッセージを基に更新される．ストリーミングサービスのように受信者が極めて多いサービスでは，このメッセージが MARS へと到着する頻度が大きくなると予想される．

本章では，ストリーミングサービス提供時に発生する制御用のトラヒックを対象とし，ホストのマルチキャストグループへの参加・離脱に伴う MARS の管理情報の更新頻度を解析的手法で導出する．そしてこの解析結果から，更新頻度を抑制するネットワーク設計法を提案する．

4.2 節では本研究で対象とするネットワークのモデルを紹介する．

4.3 節では MARS の管理情報の更新動作を説明し，情報更新の契機について述べる．そして，ネットワーク内に存在するホストのグループに対する参加離脱動作をマルコフ過程で近似した場合の情報更新頻度を数学的に導出する．

4.4 節では，4.3 節で導出した情報更新頻度を示す式を用いて，制御情報量の減少を実現するネットワーク構成法を提案する．

4.2　対象ネットワーク

ストリーミングサービスでは，一般に特定のビットレートで転送することが前提となっているため，必要な帯域を確保できない場合は音声の途切れや画像の動きの停止等品質が著しく劣化する．このため，ストリーミングサービスではネットワークの最低帯域を保証することが品質上重要な要素となる．このような要求を満たすために，次世代の総合網である B-ISDN の中心技術

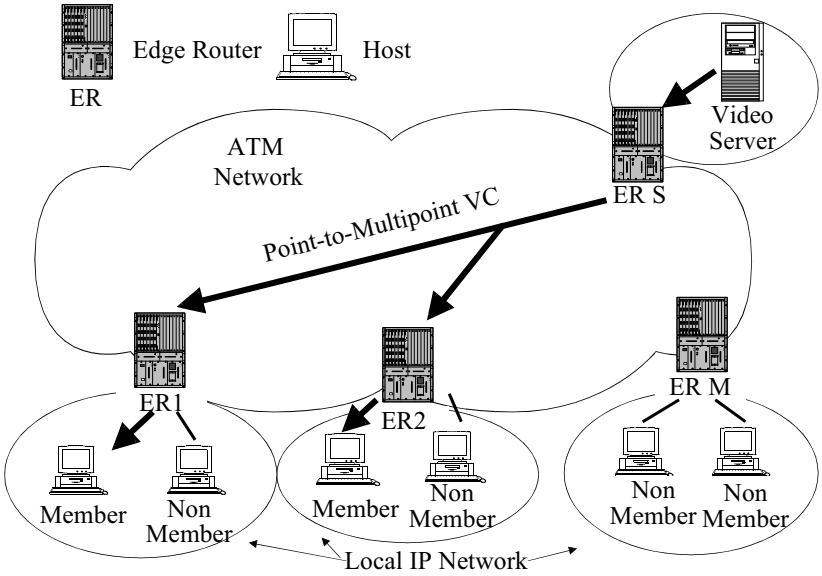

図 4.1: ネットワークモデル

である ATM をバックボーンネットワークに適用し，バックボーンネットワークの広帯域化をはかる技術的動向がある．TCP/IP プロトコルは現在広くホストに採用されており，デファクトスタンダードとして普及している．このことから，ローカルネットワークとして IP ネットワークを配し，バックボーンネットワークに ATM 技術を適用するネットワーク構成が提案されている [20][21].

本論文ではこのような技術動向を踏まえて，ビデオサーバとホストはローカル IP ネットワーク内に収容されており，それぞれのローカル IP ネットワークを ATM エッジルータで接続するネットワークを対象とする．ローカルネットワークとバックボーンネットワークの間は IP ルータを配置し，バックボーンネットワークを通過するデータは IP ルータを経由する．ローカルネットワーク内では IP マルチキャストを標準的にサポートしている．バックボーンネットワーク内では IP ルータ間で point-to-multipoint VC を設定することで，マルチキャスト転送をサポートする [32][42]．IP ルータを配することで，ユーザにバックボーンネットワークの ATM インターフェースを隠蔽し，エンド・エンドでの IP の透過性を確保できる．また，バックボーンネットワークに ATM 技術を用いることで，大量のトラヒックが流入するバックボーンネットワークにおいて，ストリーミングサービスに要求される高品質な通信を実現できる．

このようなネットワーク構成をとった場合，本ネットワークが収容するユーザ，すなわちホストに対し，どのようにエッジルータを配置し，ホスト収容を

実現するかという点がネットワーク設計における重要な設計指針となる．つまり，ネットワーク内の全ユーザのエッジルータへの配分，すなわちネットワーク内に用意するエッジルータ数の決定が重要な設計パラメータとなる．

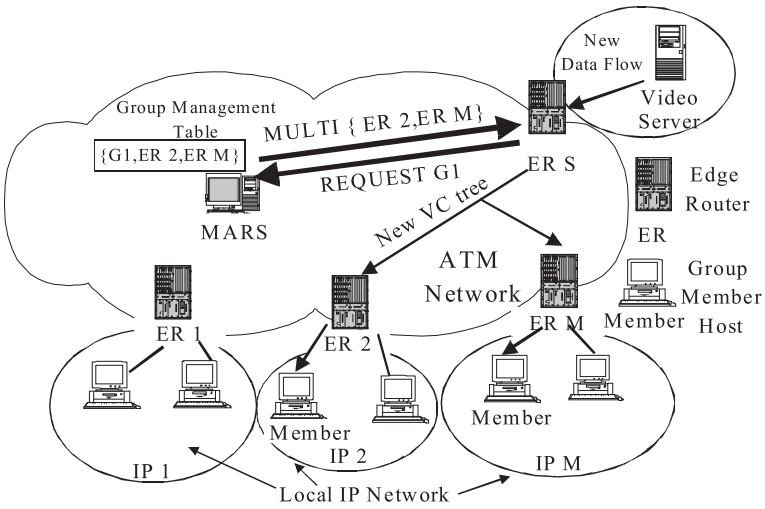

図 4.2: Multicast Address Resolution Server

MARS はアドレス解決のためにマルチキャストグループのメンバ情報を持っており，グループとそのメンバの関係を {IP マルチキャストグループアドレス,ATM アドレス 1,$\cdots$,ATM アドレス N} の形で管理している．一般には，MARS が管理する ATM アドレスは，ホストのアドレスである．ただし，本論文で扱う図 4.1 のようなネットワーク構成では，ATM ネットワークの末端部にエッジルータが位置するため，MARS が管理する ATM アドレスはエッジルータのアドレスである．これらの情報は送信者側のエッジルータに送られ，それぞれの VC の管理に使用される．MARS の管理情報の参照，更新には以下に示すメッセージが使用される．

- REQUEST : MARS へアドレス解決の要求を行う
- MULTI : MARS がクライアントへアドレスを通知
- JOIN : マルチキャストグループへの参加・要求
- LEAVE : マルチキャストグループからの離脱要求

これらのメッセージを用いて，マルチキャストグループへの情報伝送は以下のように実現される．

ビデオサーバが一日の最初の番組を開始する状況を想定する (図 4.2)．ローカル IP ネットワーク内に新たなマルチキャストフローを検知した送信側エッ

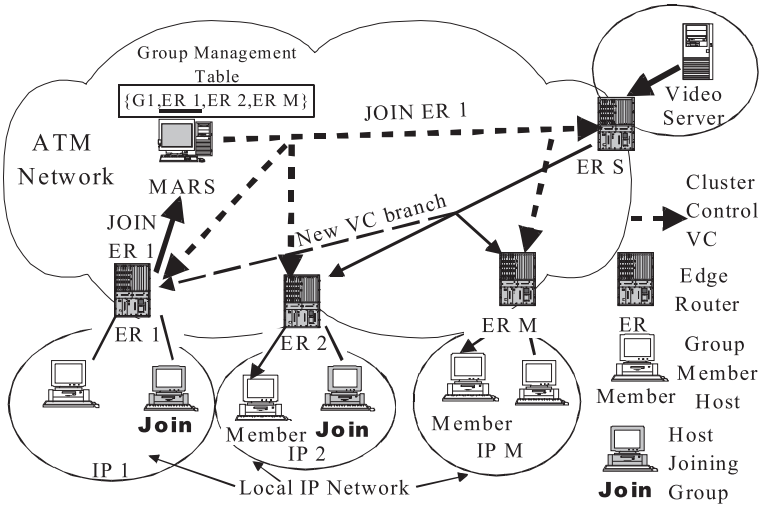

図 4.3: グループ参加動作

ジルータは MARS へ REQUEST メッセージを送信し，該当マルチキャストグループに属するホストを収容するエッジルータの ATM アドレスを MARS へ問い合わせる．該当するエッジルータがあれば，MARS は MULTI メッセージを用いてそのエッジルータの ATM アドレスを送信側エッジルータへ通知する．送信側エッジルータは，受け取った ATM アドレスを用いて自らを起点とする point-to-multipoint VC を設定し，ビデオサーバからのデータをマルチキャストグループのメンバへと転送する．

次に受信者が番組変更，すなわちマルチキャストグループに対する参加離脱動作を行う状況を想定する．あるマルチキャストグループに参加したいホストがローカル IP ネットワーク内に現れた場合 (図 4.3)，受信側エッジルータにおいては，図中における ER 2 のように既に該当するマルチキャストグループの VC が設定されている時，すなわちエッジルータ配下にマルチキャストグループのメンバが存在する時は何も動作を起こさない．ER 1 のように該当するマルチキャストグループの VC が送信側エッジルータから設定されていない時，すなわち参加要求を出すホスト以外のホストがすべて該当グループのメンバでない時，MARS へ JOIN メッセージを送信し，該当マルチキャストグループ VC の設定を要求する．マルチキャストグループから離脱したいホストがローカル IP ネットワーク内に現れた場合 (図 4.4)，図中における ER 2 のように他に該当するマルチキャストグループの情報受信を行うホストがローカル IP ネットワーク内に存在している状況では，受信側エッジルータは何も動作を起こさない．ER 1 のように他に該当マルチキャストグループに属するホストが存在せず，離脱するホストをもってローカル IP ネットワーク内にマルチキャストグループに属するホストがなくなる場合には，

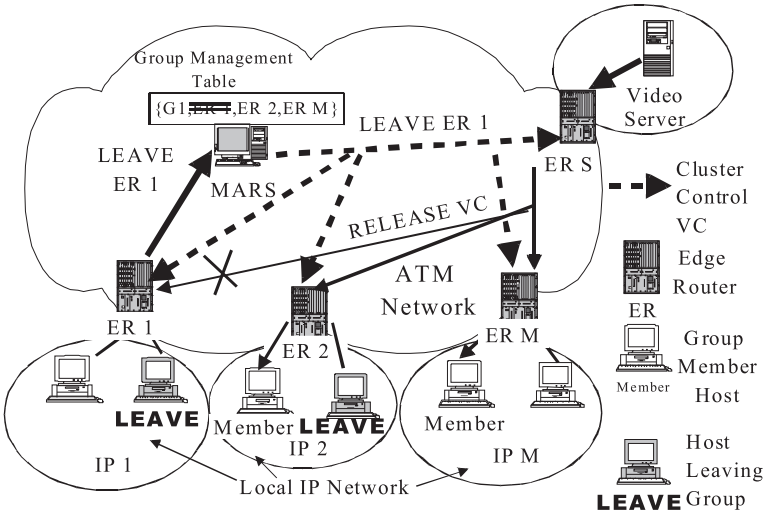

図 4.4: グループ離脱動作

受信側エッジルータは MARS に LEAVE メッセージを送信する．

UNI3.0/3.1 では ATM における送信者のみが VC の枝の設定，削除を行うことができる [15]．適切なマルチキャストツリーを構成するために，送信側エッジルータはグループの参加状況を調査し，必要に応じて VC の枝を設定，切断する必要がある．MARS は到着した JOIN，LEAVE メッセージを MARS とルータとの間に予め設定された Cluster Control VC(CCVC) を用いてバックボーンネットワーク内の全ルータへ通知する．送信側のエッジルータはこれらのメッセージを参照してそれぞれの VC を管理する．

4.3 制御情報量の理論解析

前節で MARS が受け取る 3 つのメッセージ (JOIN，LEAVE，REQUEST) について述べた．ストリーミングサービスでは送信ホストは絶えずデータを転送し続ける．送信ホストは最初の放送の開始時のみ VC の設定を行うため，MARS が REQUEST メッセージを受け取る頻度は JOIN,LEAVE メッセージに比べ非常に小さい．以下 MARS への負荷の主な要因として JOIN,LEAVE メッセージを対象とし，これらによりもたらされる MARS の負荷を解析する．JOIN,LEAVE メッセージの到着後 MARS が行う作業はともに管理情報の書き換えとバックボーンネットワーク内のルータへのメンバ変更の通知のみなので，両メッセージが MARS に与える負荷は等しいものと仮定する．つまり，JOIN，LEAVE メッセージが到着する頻度をもって，MARS にかかる負荷の評価が可能である．対象とするネットワークのパラメータを以下に示す．

- １エッジルータあたりの配下のホスト数:N
- 配下のマルチキャストグループ参加者:k (k$\leq$ N)
- ホスト１台あたりのグループ参加率:$\lambda(t)$
- ホスト１台あたりのグループ離脱率:$\mu(t)$

4.3.1 過渡状態における解析

通常 TV 放送の視聴者は番組放送開始時ならびに終了時に視聴したい番組を再選択する傾向がある．よって，番組の放送終了開始時のグループへの参加・離脱率は番組の途中の参加・離脱率より大きいと仮定する．到着頻度の解析式を導出するにあたり，参加・離脱率の値を簡略化する．すなわち，ホストからのマルチキャストグループへの参加・離脱要求の発生間隔は参加・離脱率が以下に示す値である指数分布に従うものと仮定する (図 4.5).

$$(\lambda(t), \mu(t)) = \begin{cases} (\lambda_1, \mu_1) & (wd - \frac{\tau}{2} \leq t \leq wd + \frac{\tau}{2})) \\ (\lambda_2, \mu_2) & \text{その他} \end{cases} \tag{4.1}$$

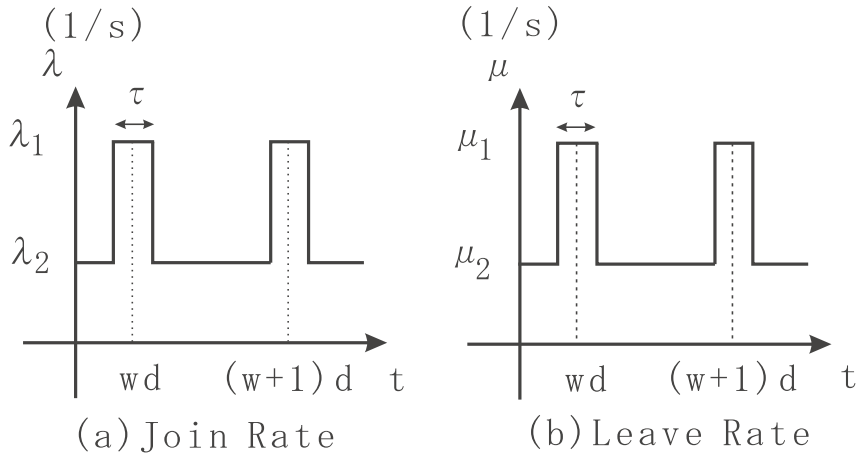

図 4.5: 参加・離脱モデル

ここで，d は１番組の放映時間に相当し，τ は番組放映終了及び開始時の番組選択時期, 即ちマルチキャストグループの参加・離脱の多い時間区間に相当する．また，w は任意の整数を表す．各エッジルータ配下に存在するマルチキャストグループのメンバ数 k を状態変数とすると，エッジルータ配下のホ

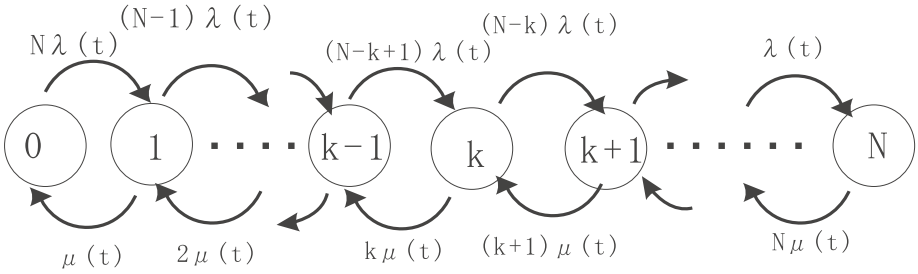

図 4.6: 状態遷移図 (エッジルータ配下の参加メンバ数)

スト群の振る舞いは M(N)/M/N に従う [43][44]．すなわちこの確率過程の状態遷移図は図 4.6 の様に記述される．
$P_k(t)$ を時刻 t において参加者が k 人である確率であるとすると，状態遷移方程式は次のように記述される．

$$\frac{d}{dt}\mathbf{P(t)} = \mathbf{T(t)P(t)} \tag{4.2}$$

ここで，

$$\mathbf{P(t)} = \{P_0(t), \ldots, P_N(t)\}^T \tag{4.3}$$

$$\mathbf{T(t)} = \{T_{m,n}(t)\} \quad (0 \le m, n \le N) \tag{4.4}$$

$$T_{m,n}(t) = \begin{cases} -N\lambda(t) & (n = m = 0) \\ -N\mu(t) & (n = m = N) \\ (N-m+1)\lambda(t) & (n = m-1) \\ -\{(N-m)\lambda(t) + m\mu(t)\} & (n = m \neq 0, N) \\ (m+1)\mu(t) & (n = m+1) \\ 0 & \text{その他} \end{cases} \tag{4.5}$$

エッジルータが JOIN メッセージを MARS へ送出する動作は，ローカル IP ネットワーク内においてマルチキャストグループに属するホスト数が 0 から 1 に変化する時点で発生する．また，エッジルータが LEAVE メッセージを MARS へ送出する動作はローカル IP ネットワーク内におけるマルチキャストグループに属するホスト数が 1 から 0 に変化する時点において発生する．これらの関係を解析し，MARS における管理情報更新頻度を導出する．MARS に到着する JOIN/LEAVE メッセージの累積数を解析するために，確率 $P_k(t)$ を $P_{i,k}(t)$ へと拡張する．パラメータ i は時刻 0 から t までの間に MARS が受け取った JOIN，LEAVE メッセージの累積数を示す．k の数が 0 から 1，1 から 0 となるときメッセージの受信累積数が増えるので，$P_{i,k}(t)$ に関する状態遷移方程式は以下のようになる．

$$P_{i,0}(t) = -N\lambda(t)P_{i,0}(t) + \mu(t)P_{i-1,1}(t) \tag{4.6}$$

$$P_{i,1}(t) = N\lambda(t)P_{i-1,0}(t)$$

$$
\begin{aligned}
& -\{(N-1)\lambda(t)+\mu(t)\}P_{i,1}(t) \\
& +2\mu(t)P_{i,2}(t) \qquad (4.7) \\
P_{i,k}(t) &= (N-k+1)\lambda(t)P_{i,k-1}(t) \\
& -\{(N-k)\lambda(t)+k\mu(t)\}P_{i,k}(t) \\
& +(k+1)\mu(t)P_{i,k+1}(t) \\
& (2 \le k \le N-1) \qquad (4.8) \\
P_{i,N}(t) &= \lambda(t)P_{i,N-1}(t) - N\mu(t)P_{i,N}(t) \qquad (4.9)
\end{aligned}
$$

この式を i について Z 変換し，両辺を z について微分した後 $z=1$ を代入すると，時刻 t にグループ参加ホスト数が k 人である状態において，$(0,t)$ 間の受信累積数 $R_k(t)$ の関係式が次のように得られる．

$$
\frac{d}{dt}\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \begin{pmatrix} \mu(t)P_1(t) \\ N\lambda(t)P_0(t) \\ 0 \\ \vdots \end{pmatrix} + \mathbf{T}(\mathbf{t})\mathbf{R}(\mathbf{t}) \qquad (4.10)
$$

ここで，

$$
\mathbf{R}(\mathbf{t}) = \{R_0(t),\ldots,R_N(t)\}^T \qquad (4.11)
$$

これらの式より，JOIN メッセージ，LEAVE メッセージによる管理情報更新頻度 $S_r(t)$ は次の式で表される．

$$
\begin{aligned}
S_r(t) &= \frac{d}{dt}(\mathbf{R}(\mathbf{t})\cdot\mathbf{P}(\mathbf{t})) \\
&= (N\lambda(t)+\mu(t))P_0(t)P_1(t) \\
& +(\mathbf{T}(\mathbf{t})\mathbf{P}(\mathbf{t}))\cdot\mathbf{R}(\mathbf{t}) \\
& +(\mathbf{T}(\mathbf{t})\mathbf{R}(\mathbf{t}))\cdot\mathbf{P}(\mathbf{t}) \qquad (4.12)
\end{aligned}
$$

$\lambda(t),\mu(t)$ がそれぞれの項の係数となっているため，S は $\lambda(t)$ と $\mu(t)$ の形に大きく依存することが予想される．以上の計算では単一のエッジルータに関して式を導出したが，エッジルータが複数存在する場合でも，各々のエッジルータの配下に存在するホストは他のホストと独立に参加・離脱要求をだすため，それぞれのエッジルータにおける $S_r(t)$ の和を取ることでネットワーク全体の情報更新頻度を導出できる．

MARS の管理情報の更新頻度を数値例を用いて検討する．本論文での解析において対象とするストリーミングサービスは以下のものとする．

- 放送局は 1 局のみ (マルチキャストグループは 1 つ)
- MARS は ATM ネットワークに存在する全てのエッジルータを管理する．

次にエッジルータ配下のホストの参加・離脱過程に関するパラメータを示す．家庭のすぐそばまで ATM ネットワークが導入されている状況を想定した数値例を示す．

- 配下のホスト数 $N = 100$
- ホストのグループへの参加・離脱は，参加率， 離脱率が時変である指数分布に従う．
- グループへの参加率，離脱率は図 4.5, 式 4.1 に従う．
- １番組あたりの放映時間 $d = 500(s) \simeq 8(min)$
- 番組選択期間 $\tau = 50(s) = \frac{d}{10}$

グループへの参加・離脱率に関するパラメータを以下に示す．本研究では視聴率 $a = 1\%$ の番組を各受信者が平均して 2 番組視聴した後，番組の最後に他のチャンネルを選択する状況を想定する．参加率は後述の式 4.15 に各時間における離脱率 $\mu(t)$, 視聴率 a を代入することで得られた値を使用する．

- $\lambda_1 = 1.0 \times 10^{-5}, \lambda_2 = 1.0 \times 10^{-6} = \frac{\lambda_1}{10}$,
  $\mu_1 = 1.0 \times 10^{-3} = \frac{1}{2d}, \mu_2 = 1.0 \times 10^{-4} = \frac{\mu_1}{10}$
  $a = 0.01$

MARS の情報更新頻度の数値結果を示す．
図 4.7 は $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2$ を変化させた場合の情報更新頻度の過渡解を示している．なおこのグラフは更新頻度が初期状態に依存しない程時間が経過したときの結果を示す．この結果は，情報更新頻度が $\lambda(t)$ や $\mu(t)$ の形に依存することを示している．即ち番組の終了・開始時に更新頻度はステップ状に増大する．つまり，ネットワーク設計に当たっては，MARS における情報更新頻度が大きくなる番組終了及び開始区間での振る舞いをもとに設計すればよい．このような観点から，次節では番組開始及び終了区間の参加・離脱率を用いた定常状態解析により，設計問題を考察する．

4.3.2 放送終了開始区間の更新頻度

本節では，番組の開始及び終了区間という MARS の情報更新頻度が極端に増加する区間を対象に，MARS にかかる負荷を評価する．このため，番組，すなわちマルチキャストグループへの参加･離脱率が $\lambda = \max_t \lambda(t), \mu = \max_t \mu(t)$ と一定である状況を考え，定常状態確率を求める．通常，TV 放送等において，それぞれの番組は視聴率という形で評価される．そこで本研究ではこの視聴率と言う番組の特性をパラメータとして考える．IP ネットワーク内における番組の視聴率は該当ネットワーク内に存在するマルチキャストグループ

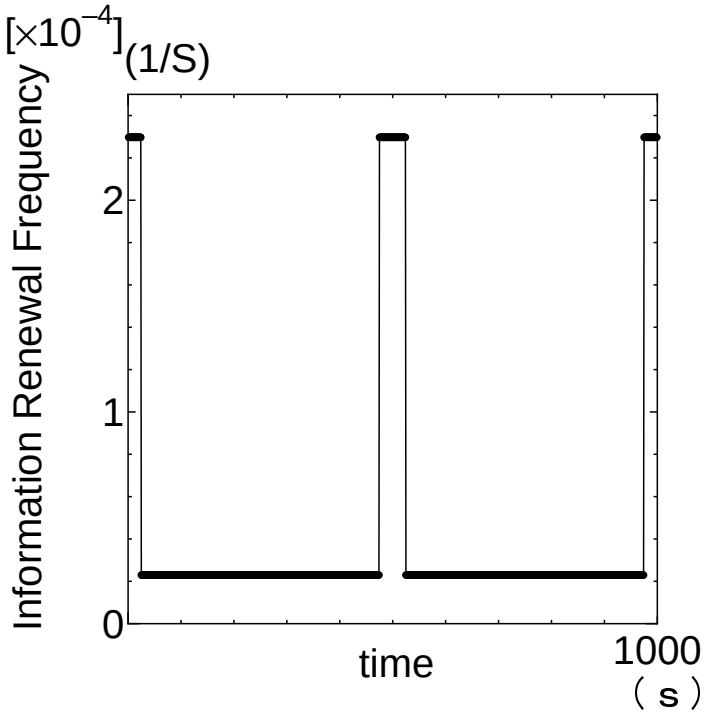

図 4.7: MARS の管理情報更新頻度

の平均メンバ数を該当ネットワーク全体に存在するホスト数で割ったものに相当する．マルチキャストグループへの参加・離脱率が一定の場合，該当ネットワーク内に存在するグループの平均メンバ数は次のように示される．

$$E[k] = \frac{N\rho}{1+\rho} \tag{4.13}$$

ここで，

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} \tag{4.14}$$

よって，視聴率 a は次のように記述される．

$$a = \frac{\rho}{\rho+1} \tag{4.15}$$

ここで再び MARS の情報更新頻度を表す式 4.12 を考える．

$$\begin{aligned} S_r(t) &= \frac{d}{dt}(\mathbf{R}(t)\cdot\mathbf{P}(t)) \\ &= \mathbf{P}(t)\cdot\frac{d}{dt}\mathbf{R}(t) + \mathbf{R}(t)\cdot\frac{d}{dt}\mathbf{P}(t) \end{aligned} \tag{4.16}$$

ホストのグループへの参加・離脱率は時間に対し一定と仮定されているため，$t \to \infty$ では $\mathbf{P}$(t) は定常状態となる．すなわち $\lim_{t\to\infty}\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}$ となる．これ

より $\lim_{t\to\infty}\frac{d}{dt}\mathbf{P}(t)=0$ が導出される．よって式 4.16 より次式が得られる．

$$\begin{aligned} S_r &= \lim_{t\to\infty} S_r(t) \\ &= \lim_{t\to\infty} \mathbf{P}(t)\frac{d}{dt}\mathbf{R}(t) \end{aligned} \tag{4.17}$$

$X_k(x)$ を，定数項を含まず係数が k に依存する n 次多項式とする．n は 1 以上の整数とする．平均更新頻度 $\mathbf{R}(t)$ はこのとき，式 4.18 のように導出される．

$$\begin{aligned} \mathbf{R}(t) &= \{R_k(t)\} \quad (0 \le k \le N) \\ R_k(t) &= \frac{2N\ {}_NC_k\ \lambda^{k+1}\mu^{2N-k}}{(\lambda+\mu)^{2N}}t + X_k(e^{-t}) \\ &= 2N\ {}_NC_k\ \mu a^{k+1}(1-a)^{2N-k-1}t \\ &\quad + X_k(e^{-t}) \end{aligned} \tag{4.18}$$

$\lim_{t\to\infty} X_k(e^{-t})=0$ より，MARS の情報更新頻度は次のように示される．

$$\begin{aligned} S_r &= \lim_{t\to\infty} \mathbf{P}(t)\frac{d}{dt}\mathbf{R}(t) \\ &= \sum_{k=0}^{N} 2N({}_NC_k)^2\mu a^{2k+1}(1-a)^{3N-2k-1} \end{aligned} \tag{4.19}$$

図 4.8 に定常状態における情報更新頻度を示す．ローカル IP ネットワーク

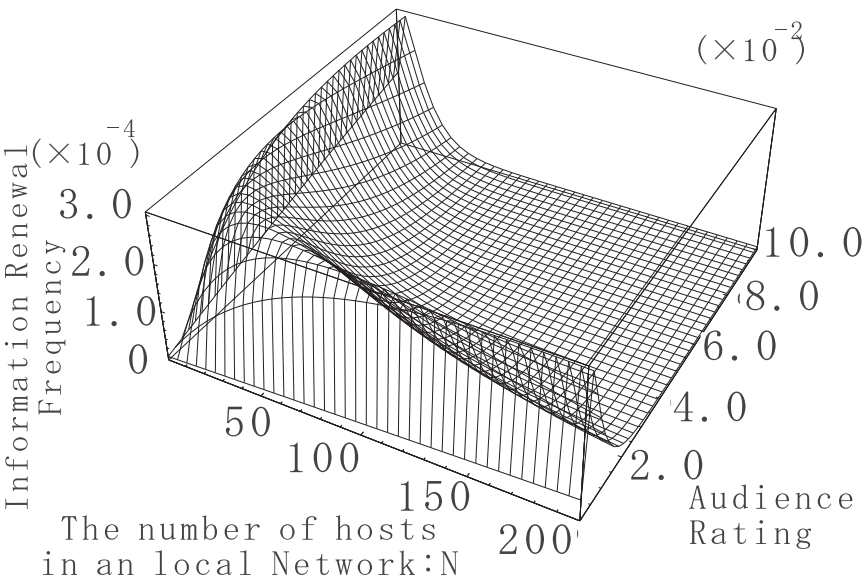

図 4.8: 定常状態における更新頻度

のホスト数 N と番組の視聴率 a を変数とし，$\mu=1.0\times10^{-3}$ としている．図

4.8 より，ローカル IP ネットワーク内のホスト数 N が大きくなるに連れて更新頻度は小さくなることがわかる．視聴率が一定の場合，ネットワーク内に存在するホストの数が大きくなるにつれてネットワーク内に存在する該当グループの平均メンバ数は増加する．JOIN・LEAVE メッセージの送信は前述のようにメンバ数が 0 から 1，もしくは 1 から 0 へ変化するときに生じるためホスト数が増大するにつれて送信頻度は減少する．また，視聴率 a がある値で与えられた場合，更新頻度が極値となるホスト数 N が存在することがわかる．ネットワーク内のホスト数 N が一定である場合に対する視聴率 a と更新頻度間の関係は，視聴率 a が一定である場合のホスト数 N と更新頻度間の関係と同様の傾向を示す．該当するグループの平均メンバ数が 0 に近づく場合，グループに参加するホストがほとんどいなくなるため，メッセージの送信頻度は減少する．更新頻度が極値となるホスト数の存在は，平均メンバ数とメッセージ送信タイミングの関係から得られたものである．

4.3.3 更新情報の集約率

本研究で対象とする図 3.10 のようなネットワークモデルでは，ホストの参加・離脱情報をエッジルータで集約して必要な時に MARS へとメッセージを送信している．この集約効果について解析的に検討する．ここで，時刻 t において状態変数であるグループのメンバ数が k であるときのホストからの参加・離脱要求の平均累積発生回数 $H_k(t)$ を導出する．エッジルータ配下のホストの振る舞いとしては先程と同様に式 4.2 に従う．参加・離脱要求の平均累積発生回数を解析的に導出するため，確率 $P_k(t)$ を $Q_{j,k}(t)$ へと拡張する．パラメータ j は時刻 t におけるホストからの参加・離脱要求の累積発生回数を示す．ホストからの参加・離脱要求の発生回数はマルチキャストグループのメンバ数が変化する毎に増加するので，$Q_{j,k}(t)$ に関する状態方程式は以下のようになる．

$$
\begin{aligned}
Q_{j,0}(t) &= -N\lambda(t)Q_{j,0}(t) + \mu(t)Q_{j-1,1}(t) && (4.20)\\
Q_{j,k}(t) &= (N-k+1)\lambda(t)Q_{j-1,k-1}(t) \\
&\quad -\{(N-k)\lambda(t) + k\mu(t)\}Q_{j,k}(t) \\
&\quad +(k+1)\mu(t)Q_{j-1,k+1}(t) \\
&\quad (1 \le k \le N-1) && (4.21)\\
Q_{j,N}(t) &= \lambda(t)Q_{j-1,N-1}(t) \\
&\quad -N\mu(t)Q_{j,N}(t) && (4.22)
\end{aligned}
$$

これらの式を j について Z 変換し，両辺を z について微分した後，$z=1$ を代入すると，$H_k(t)$ が次のように導出される．

$$
\frac{d}{dt}\mathbf{H(t)} = \mathbf{A(t)P(t)} + \mathbf{T(t)H(t)} \qquad (4.23)
$$

ここで，$\mathbf{H(t)}$,$\mathbf{A(t)}$ は，

$$\begin{aligned}\mathbf{H(t)} &= \{H_0(t),\ldots,H_N(t)\}^T \qquad (4.24)\\ \mathbf{A(t)} &= \{A_{m,n}(t)\} \quad (0 \le m,n \le N)\\ A_{m,n}(t) &= \begin{cases}(N-m+1)\lambda(t) & (n=m-1)\\ (m+1)\mu(t) & (n=m+1)\\ 0 & \text{その他}\end{cases}\end{aligned} \qquad (4.25)$$

これより，ホストからのマルチキャストグループへの参加・離脱要求頻度 $S_h(t)$ は，

$$\begin{aligned}S_h(t) &= \frac{d}{dt}(\mathbf{H(t)}\cdot\mathbf{P(t)})\\ &= (\mathbf{A(t)P(t)})\cdot\mathbf{P(t)}+(\mathbf{T(t)H(t)})\cdot\mathbf{P(t)}\\ &\quad +(\mathbf{T(t)P(t)})\cdot\mathbf{H(t)}\end{aligned} \qquad (4.26)$$

となる．よって $S_r(t)/S_h(t)$ を調べることにより，ホストからの要求がエッジルータで情報集約される割合が求められる，以下これを集約率と呼ぶ．

表 4.1 に，エッジルータにおける参加・要求情報の集約効果について解析結果を示す． 表 4.1 より，情報更新頻度が高い視聴率 1%の場合は，ホストからの情報は約半分に抑えられて MARS へ送信される．情報更新頻度が低い場合に関しては非常に多くの情報がエッジルータで集約されている．このことより，中間にエッジルータを配置することで MARS に到着する情報を大きく削減することができることがわかった．

表 4.1: エッジルータにおける集約率

Audience Rating	Summerizing ratio of join/leave information	Information Renewal Frequency
1%	3.734×10^{-1}	2.297×10^{-4}
10%	7.982×10^{-5}	1.430×10^{-7}

4.4 ネットワーク構成法

本節では前節までの情報更新頻度に対する解析結果をもとに，MARS への制御トラヒックの抑制という観点から見たネットワーク設計指針について考察する．式 4.19 より，MARS の情報更新頻度は番組の視聴率により大きく変化する．ここである番組 l の視聴率を a_l とおき，放送番組の集合を G とおくと，全番組に対する MARS の情報更新頻度 S_{r-all} は次のように表される．

$$S_{r-all}(N) = \sum_{l\in G} S_r(N,a_l) \qquad (4.27)$$

図 4.8 よりエッジルータ配下のホスト数 N が大きくなるにつれ S_{r-all} は 0 に近付くことがわかる．また，マルチキャストトラヒックのホスト当たりの負荷はホスト数が増加するにつれ減少する [40]．このことから，ストリーミングサービスのみを考慮すれば，エッジルータ配下のホスト数をできるだけ多くすることで，MARS にかかる負荷を低減できる．

現実には，ストリーミングサービスに代表されるマルチキャストトラヒックのみならず，1 対 1 通信，すなわちユニキャストトラヒックもサポートされる．ユニキャストトラヒックに対しては，エッジルータのフォワーディングに要する処理負荷は，配下に擁するホスト数の増大にほぼ比例して増大する [40]．このため，ストリーミングサービスのみを考慮して，エッジルータ配下のホスト数をいたずらに増加させるのは得策ではない．

以上の点を考慮して，以下のネットワーク設計手法を提案する．ネットワーク管理者は，提供する番組の視聴率 $a_l(l \in G)$ を予測した上で，式 4.19 により，エッジルータ配下のホスト数 N に対する情報更新頻度を見積もる．全番組に対し，図 4.8 におけるグラフの裾野の部分に情報更新頻度の値が来る N を選択する．この時，N の値は，エッジルータにおけるユニキャストフローの収容能力に余裕が生じる程度に大きい値を選択する．このネットワーク設計手法を適用することで，ストリーミングサービスにおける MARS の負荷の低減と，ユニキャストトラヒックによるエッジルータの処理負荷の低減を満足する構成をとることが可能である．

4.5　結言

本研究では，バックボーンネットワークに ATM，ローカルネットワークに IP を適用したネットワーク構成における，ストリーミングサービスに適したネットワーク設計法を提案した．このようなネットワーク構成においてストリーミングサービスを提供する場合，番組への参加・離脱に伴い発生する MARS での管理情報更新による処理負荷が問題となる．この問題を解析するため，制御用メッセージの到着に伴う MARS の管理情報更新の頻度を解析的に求めた．この解析過程で各ローカルネットワーク内に存在するホスト数，ならびに放送番組の視聴率と MARS の情報更新頻度の関係を明らかにし，その関係式を導出した．数値例をもとに，MARS での管理情報の更新頻度は，視聴率，ローカル IP ネットワーク内のホスト数のそれぞれの増加に対して，一旦極値をもった後に単調に減少することを示した．その結果，ストリーミングサービスのみを考慮した場合は，ローカル IP ネットワーク内のホスト数を出来るだけ大きくすることが望ましいことがわかった．ただし，1 対 1 通信トラヒックについてはホスト数の増加に伴いエッジルータのフォワーディング負荷が増大することから，番組の視聴率をもとに MARS の管理情報更新頻度が小さい値をとる範囲で，ローカル IP ネットワーク内のホスト数を決定

する方法が有効であることを示した.

第5章　対話型アプリケーションに適したVC設定方式

5.1　緒言

近年のマルチメディア通信の発達の中，注目を集めているアプリケーションとして，テレビ会議や分散シミュレーション，ネットワークゲームなどのグループ対話型アプリケーションがある．このアプリケーションは特定多数のホスト同士で会話や与えられた仮想空間の共有を行う．このアプリケーションの実現には多対多通信を提供する環境が必要である．グループ対話型アプリケーションでは，動画や音声などデータ転送遅延や遅延ゆらぎにより大きな影響を受けるデータを多く転送する．高品質なデータを提供する場合，単位時間当たりの情報量が大きくなるため，遅延等の影響は拡大する．本研究では VC 設定方式に焦点をあて，グループ対話型アプリケーションにおける，データ転送の高速化を実現することを目的とする．VC セットアップ時間の短いサーバ方式を基とし，サーバ方式において発生する遅延を短縮する新しいデータ転送方式としてサーバから複数の point-to-multipoint VC を用意する方式を提案する．本研究では提案方式を複数 VC サーバ方式と呼ぶ．

5.2 では対話型アプリケーションが実現されるネットワークモデルについて説明する．

5.3 ではサーバ方式を改良した複数 VC サーバ方式を提案し，その動作について説明する．

5.4 では計算機シミュレーションによるメッシュ方式，サーバ方式，複数 VC サーバ方式のデータ転送遅延特性の性能評価を行い，複数 VC サーバ方式の有効性を示す．

5.2　対象ネットワーク

対象とするネットワークについて述べる (図 5.1)．ネットワーク層に IP，データリンク層に ATM を適用する．データは図 5.2 のようにそれぞれの層で IP データグラム，AAL SDU，ATM セルに分割される．ネットワーク内では送信者は現在広く使用されている UNI3.0/3.1[15] に従ってマルチキャスト通信用の VC を設定する．UNI3.0/3.1 におけるマルチキャスト通信用の VC としては point-to-multipoint VC のみが設定可能である．対話型アプリケーショ

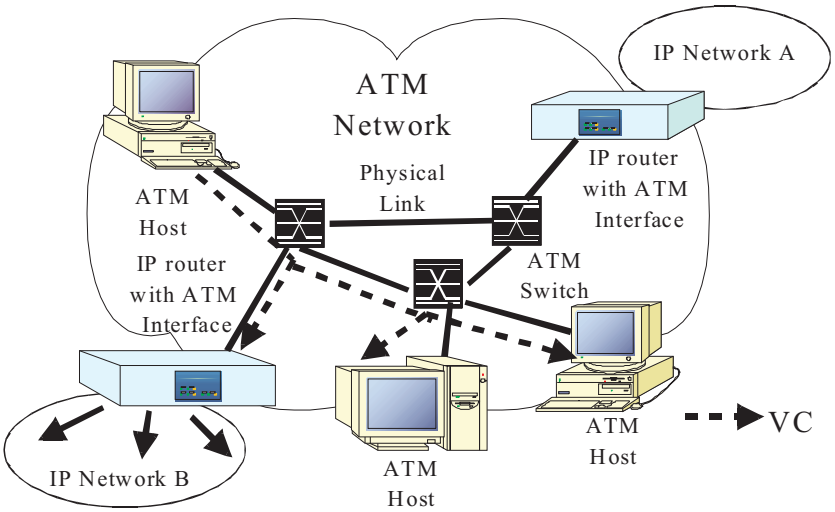

図 5.1: ネットワークモデル

ンは複数のホストを端末として互いに会話することを目的として開発された．このため，多対多通信を実現する必要がある．本研究で扱う多対多通信は，各メンバが他のメンバへ向けて point-to-multipoint VC を設定することで実現される．送信者は任意の 1 受信者のもとに point-to-point VC を設定した後，1 本づつ残りの受信者への VC の枝を追加することで point-to-multipoint VC を設定する．VC 設定後に生じるグループの受信者構成の変化に対応するため，変更が生じる毎に送信者は point-to-multipoint VC の対地を変更する [17][15]．バースト的なデータトラヒックに対応するため，設定された VC はデータ転送後すぐには解放せず，ライフタイムと呼ばれる期間を経過した後解放する．ATM ではインターネットにおける IP マルチキャストアドレスに相当するマルチキャストグループを指定するアドレスが存在しないため，IP マルチキャストアドレスからマルチキャストグループのメンバ全員の ATM アドレスを知る必要がある．この問題を解決する一般的な方法として Multicast Address Resolution Server(MARS)[18][17] を用いた方法がある．この方法は AAL に AAL5 を採用している場合を対象として提案されている．アドレス解決後に設定するデータ転送用 VC の設定法として，メッシュ方式とサーバ方式の 2 つの方法を 3 章で紹介した．次節でそれぞれの特徴を遅延という観点から検証する．

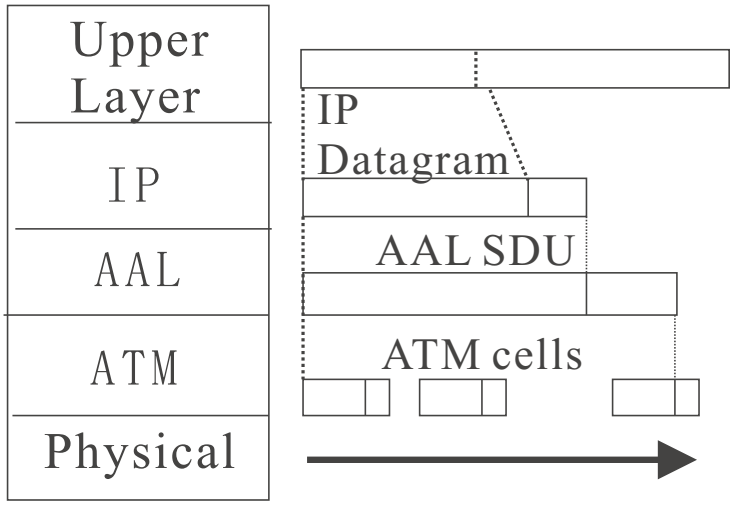

図 5.2: ネットワークのレイヤ構成

5.3 既存の VC 設定方式における問題点

対話型アプリケーションでは，データ転送遅延がサービス品質に大きな影響を及ぼす．遅延が大きくなるのに伴い音声の再生が遅れるため，会話をする際に違和感を生じるためである．3.4 において，メッシュ方式とサーバ方式を示した．両方式には遅延という観点では次のような問題点を生じる．

- メッシュ方式
  - 設定すべき VC の枝の本数が送信者の増加とともに大幅に増加する
- サーバ方式
  - サーバで一度セルを AAL SDU へ再構築する必要がある

まず，VC 設定時間について考える．VC を設定する際には，各スイッチにおいて約 45.5ms の VC 設定遅延を被ることが報告されている [38]．そして，point-to-multipoint VC は各受信者への枝を 1 本づつ設定する必要があるため，VC の設定時間は送信者から受信者への距離が遠い程，またマルチキャストグループのメンバの人数が多い程大きくなる．また，ATM においては高速な伝送速度がサポートされるため，データ転送遅延時間に占める VC 設定時間の割合は相対的に大きくなる．よって，メッシュ方式のように全ての送信者がマルチキャストグループのメンバへと VC を設定するとデータ転送遅延時間が大きくなるという問題が生じる．これに対し，サーバ方式では送信者側からはマルチキャストサーバまでの point-to-point VC の設定のみでよく，マルチキャストグループへの VC はマルチキャストサーバから 1 本の

point-to-multipoint VCのみを設定するため，平均的なVC設定時間は短くなる．VC設定時間のデータ転送時間に占める割合は非常に大きいことから，VC設定時間を含めたデータ転送時間の低減をはかるにはサーバ方式が適している．このことから本研究ではサーバ方式を対象とする．サーバ方式では，AAL5におけるSDU識別手法に適合させるため，サーバでのAAL SDUの再構築作業を行う必要がある．AAL5ではデータ転送の高速化のため，ATMセルに送信者の情報を付加しない．このためATM層では送信者を区別できず，SDUを構成する境界セルに識別子を書き込むことでSDUの区切りを認識する．よって受信者へ正しく送信するには同一のAAL SDUから分割されたセルを同一VCを用いて連続して送信する必要がある．つまり，受信を行うとき他のAAL SDUから分割されたセルが該当SDUの連続セルの中に混入すると受信者は正しくデータを受信できない．AAL SDUの最後のセルであることを示すビットが(図3.8と表3.1参照) 1になったセルを受信するまでに他のセルが混入しなければ，データは正しく受信される．IP Multicast over ATMにおけるサーバ方式の場合，複数の送信者がサーバからのpoint-to-multipoint VCを共有するため異なるSDUに属するセルの混入を防ぐ必要がある．これを実現するためにサーバ方式ではAAL SDUを一度再構築し，その後マルチキャストグループのメンバへ送信する．これにより同一のAAL SDUから分割されたセルを連続して送出する．

この再構築のため次のような問題が発生する．

- 再構築のために同一のAAL SDUを構成していたセルが全て揃うまでサーバで待機する必要がある

また，複数の送信者が同時にサーバへとデータを転送する場合，次のような問題が発生する．

- サーバがあるAAL SDUに属するATMセルをpoint-to-multipoint VC上へと転送している間，サーバに到着した他のAAL SDUの属するATMセルは該当AAL SDUに属するATMセル全てが伝送されるまで待機する必要がある．

このことを図5.3に示す．

図5.3ではA,B,Cというそれぞれ異なった送信者から送信されてきたAAL SDUが示されている．まず，時刻t_1にAAL SDU Aが，t_2にAAL SDU Bが，t_4にAAL SDU Cがそれぞれサーバに最初のセルが到着したとする($t_1 < t_2 < t_4$)．そして，t_3にAAL SDU Aの最後のセルが到着したとする．AAL SDUを構成する全てのセルが到着したためt_3にAAL SDU Aを受信グループへと転送し始める．そして，t_5にAAL SDU Bの最後のセルが到着するが，AAL SDU Aの送信が終わるまでマルチキャストグループのメンバへ転送できない．よってAAL SDU Aの送信が終わるt_6までAAL SDU B

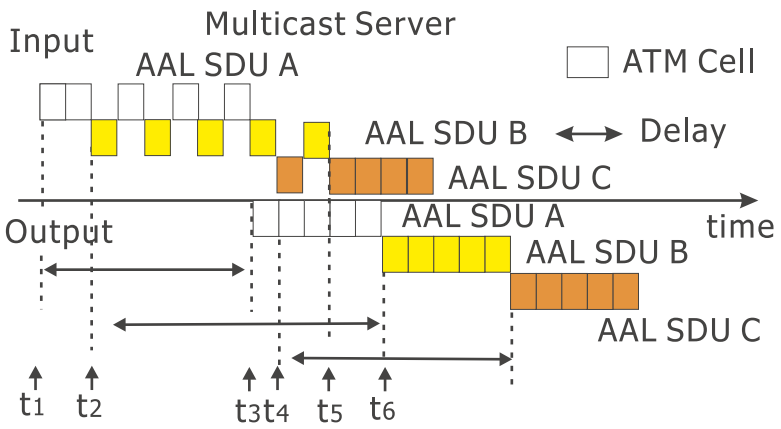

図 5.3: サーバでの待機

はサーバで待機する必要がある．AAL SDU についても同様である．このため，データがサーバで待機する時間が 1 つの AAL SDU しか到着しないときに比べて長くなる．これはサーバに到着するデータ量が増えるにつれて深刻な問題となる．

よって，本研究ではサーバ方式の短所である，サーバでのデータの再構築による遅延時間を削減する方式を提案する．

5.4　複数 VC サーバ方式

5.4.1　基本概念

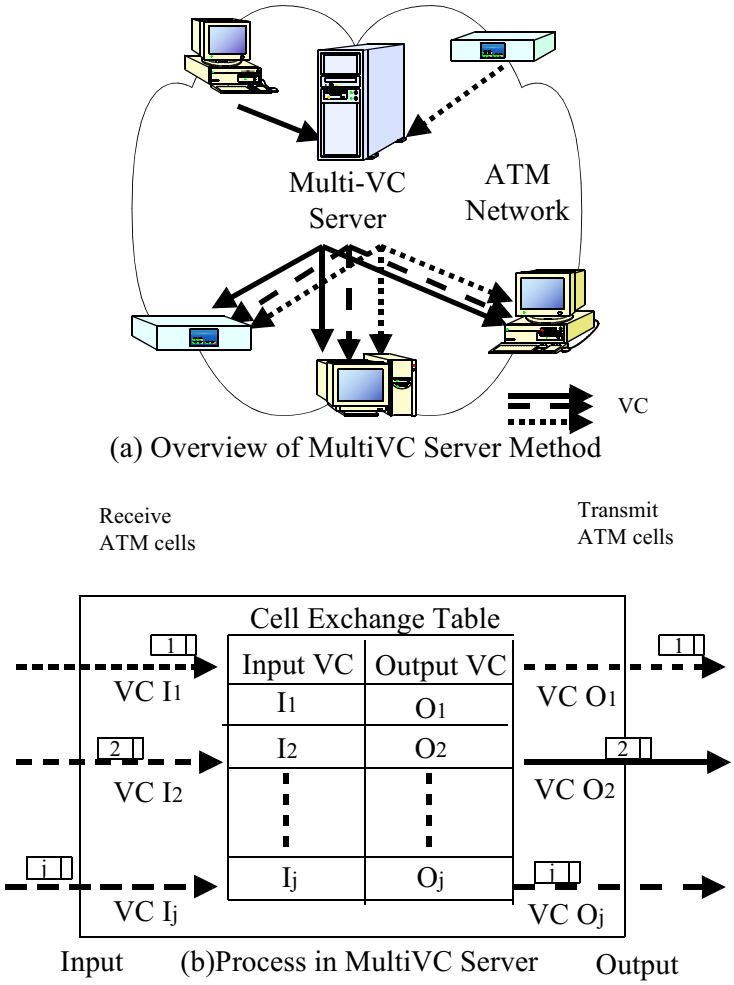

図 5.4: 複数 VC サーバ方式

サーバ方式では一度サーバでデータを AAL SDU に再構築してデータ転送を行う．このため，AAL SDU が構築できるまで，そのデータセルはサーバから送信できないことになり，これがデータ転送遅延時間に影響を及ぼしている．よってデータ転送の高速化のために AAL SDU の再構築作業に要する遅延の削減が望まれるが，この場合再構築の主目的である SDU の識別を他の方法で補う必要がある．本研究ではサーバが複数 VC を設定することを認め，

その VCI からセルの所属 SDU を区別する方法を提案する．本方式をその特徴から複数 VC サーバ方式 (Multi-VC Server Method) と呼び，本方式を実現するマルチキャストサーバを複数 VC サーバ (Multi-VC Server) と呼ぶ．

AAL5 を採用した場合セルの送受信に当り，同一の AAL SDU から分割されたセルは，同一 VC から連続して受信者に到着する必要がある．複数 VC サーバ方式ではサーバからの VC を複数設定し，AAL SDU 単位でそれらの VC を割り当てることでこの条件を満足する．このため，サーバは到着したセルを該当する VC へ即座に転送しても受信者側にはデータが正確に転送されることになる．このことを図 5.4 に示す．図 5.4 の場合，異なる送信者からのデータは，異なった VCI によって区別される事となる．そしてサーバに到着したセルは即座にマルチキャストグループのメンバへと送信される．複数の VC を利用することで受信者側で正しくデータを受信でき，なおかつサーバはデータセルが到着すると即座にマルチキャストグループのメンバへと転送できる．このようにサーバの処理を行うことで同一の AAL SDU を形成していた ATM セルがすべて到着するまで待機する必要がなく，すぐにデータを転送できるためサーバ方式における AAL SDU の再構築時間は削減されていることが予想される．複数 VC サーバとマルチキャストサーバでのセルの処理の違いを図 5.5 に示す．複数 VC サーバでは到着したセルから順にマルチ

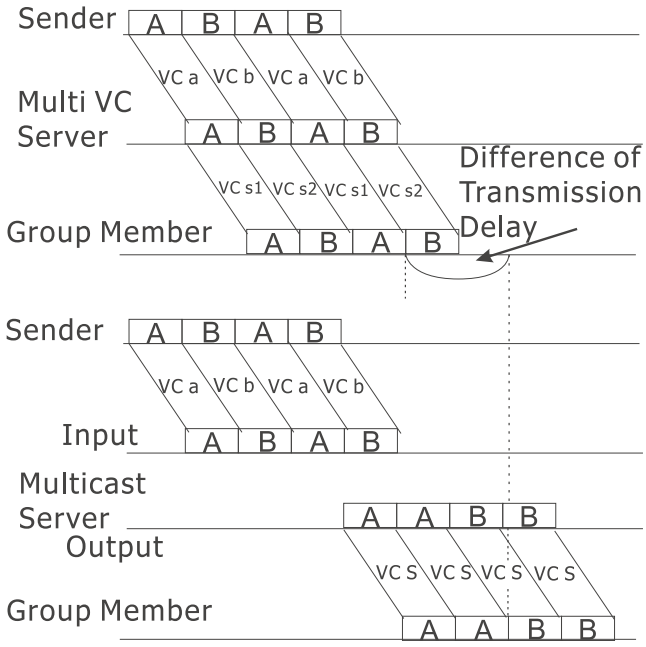

図 5.5: セルの流れ

キャストグループへと転送している．対してマルチキャストサーバでは AAL SDU A を構成していたセルが全て到着した後に転送を開始する．よって両者

を比較すると全てのセルが受信グループへ到着する時刻に差が生じることが図よりわかる.

5.4.2 動作説明

実際にこの複数 VC サーバが行う動作について述べる.

1. 送信者は MARS に受信グループのメンバ全員の ATM アドレスを知らせるように要求
2. MARS は複数 VC サーバの ATM アドレスを返送
3. MARS からの情報を基に送信者はデータを送信するため複数 VC サーバとの間に point-point VC を設定する.
4. 複数 VC サーバは送信者からの VC SETUP メッセージを確認した後，自身が設定している VC のうち，使用されていない VC が存在するか確認.
   - 使用されていない VC が存在するときは送信者からのデータセルが到着するとすぐにセルの VCI，VPI フィールドを使用されていない VC のものに書き換え，マルチキャストグループへと転送.
   - 使用されていない VC が存在しないとき，新たにマルチキャストグループへの point-to-multipoint VC を設定する．設定中にマルチキャストグループへの VC が空いた場合，空いた VC を利用し，設定中の VC は他の利用者のために設定作業を続ける.
5. ペイロードタイプを示すビットのうち，AAL SDU の最後尾のセルであることを示すビットが 1 のセルを送信後，VC を他の送信者が使えるような状態 (空き状態) にする.

この方式はサーバ方式と同様に送信者から見えるマルチキャストグループのメンバが複数 VC サーバしかいないように見せかける事で送信者側の VC 設定の時間を減らし，サーバからの VC を複数の送信者で共有することで送信開始時に必要となるサーバからの point-to-multipoint VC の設定遅延を削減している．この様子を図 5.6 に示す.

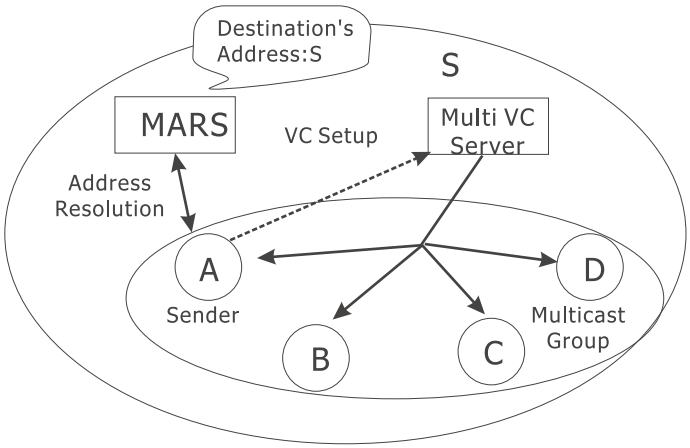

図 5.6: 複数 VC サーバの VC 設定動作

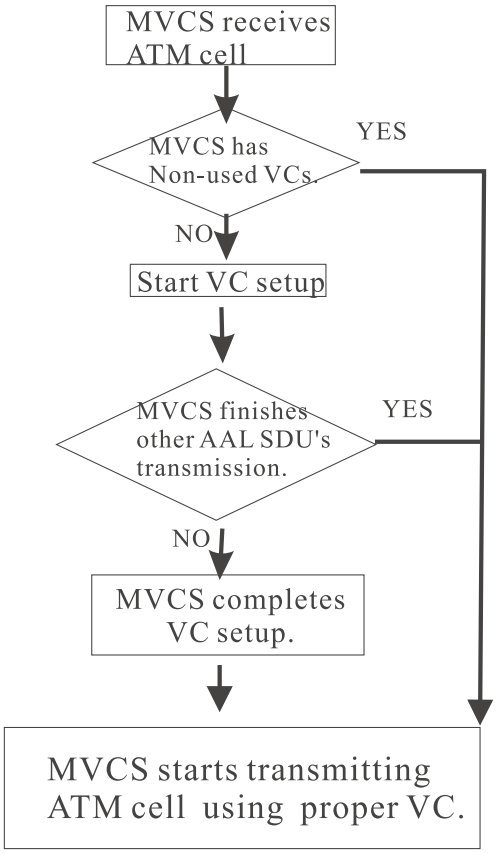

図 5.7: VC セットアップ動作の流れ

図 5.6 では，送信者 A がマルチキャストグループのメンバの ATM アドレスを MARS に問い合わせている．MARS は複数 VC サーバが存在することを知っているため，マルチキャストグループのメンバの代わりに複数 VC サーバのアドレスを返す．このため，送信者 A は複数 VC サーバにのみ VC を設定する．

送信者がデータを転送する際に，複数 VC サーバから設定されている複数の point-to-multipoint VC のうち，空き VC があればこれを利用できるようにする．また，空き VC が存在しない場合には，新たに VC を設定するが，この場合例えば全ての送信者が同時にデータ転送を開始すれば，送信者からサーバまでの VC とサーバから受信者までの VC がそれぞれ送信者の数だけ設定される．このように設定された VC を以後発生する SDU 送出要求に対しランダムに割り当てた場合，多くの VC が設定されたままの状態が続き，VC 資源を無駄に使用することになる．よって空き状態にある特定の VC を優先的に利用することで，余分な VC をライフタイムを利用して解放する．

本方式では空いている VC を利用して AAL SDU の転送を行っているため，同一セッションに含まれる AAL SDU が別々の VC から送信されてくる状況が発生する．しかし，AAL SDU 内の情報を上位層に渡し，IP 層で IP データグラムに構成すると IP データグラム内のマルチキャストアドレスにより送信者ならびに宛先マルチキャストアドレスを認識でき，異なる VC からのセルでも正しくマルチキャストグループへと送出できる．このことを示す図が図 5.8 である．

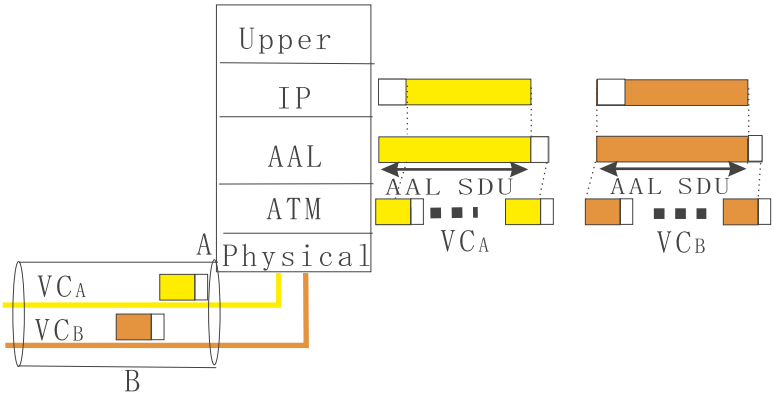

図 5.8: データの送信者の識別

この図では同一のセッションに属する 2 つの異なる AAL SDU である A と B が異なる VC を通って受信者へと到着している．しかし，同一のセッションに属するためデータが IP 層へ渡された時，送信者の IP アドレスから同一の送信者から送られたものであることがわかる．ただし，複数 VC を用いるため，SDU レベル，すなわち IP データグラムレベルでの到着順序が逆転す

る可能性は存在する．

これらの動作を行うことで複数 VC サーバ方式はメッシュ方式における長所であるネットワーク内での AAL SDU の再構築を行わないという特徴とサーバ方式の長所である VC 設定時間が短いという特徴を継承した形となっている．

5.5 性能評価

本節では，本研究で提案する複数 VC データサーバ方式の性能評価を行う．提案方式による性能改善は，複数 VC を異なる送信ノード間で共有することによる VC セットアップ時間の減少と，複数 VC サーバ方式によるカットスルー効果にある．複数のマルチキャストグループ間の干渉がない状況で，これらの改善効果が期待できることから，本節では単一マルチキャストグループの振る舞いに着目する．

ネットワーク構成に関して以下の仮定を設けた．

- ネットワークのトポロジはランダムグラフ．
- スイッチ数は 10 個．
- リンク容量は全て 1.5Mbps．
- リンクの伝搬遅延は無視できるものとする．
- VC セットアップにおける 1 スイッチでの処理時間は 45.5(ms)[38]．
- ホストは全て送信者となりうる．
- 初期状態でホスト，サーバ，複数 VC サーバがデータ転送用に設定している VC 数は 0
- 各 VC のライフタイムは 60(s)

データの発生過程に関するパラメータを示す．本研究ではアプリケーション層のデータを発生させた後，それを IP データグラム，ATM セルに分割し，ATM セルがネットワーク内に送信されるようシミュレータを作成している．

- アプリケーション層のデータの平均データ長は $15KByte$ の指数分布に従う．
- アプリケーション層のデータは平均送出間隔 $10(s)$ の指数分布に従って発生．

- IP データグラムの最大長は，データリンク
  層に ATM を使用した場合の最大データ長
  (MTU) である 9180Byte[39].

データ転送開始時に行う VC セットアップ遅延時間，VC セットアップ終了後の送信者と受信者の間のデータ転送遅延時間，ならびに複数 VC サーバが設定する VC 数について考察する．

メッシュ方式，サーバ方式，複数 VC サーバ方式の送信者と受信者の間の VC セットアップ遅延時間のシミュレーション結果を図 5.9 に示す．

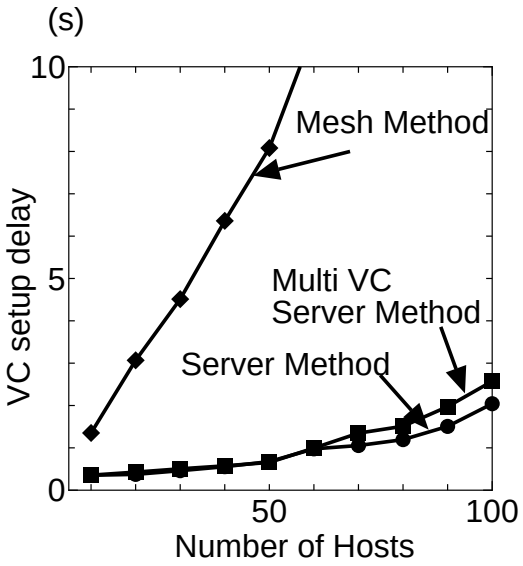

図 5.9: VC セットアップ遅延時間

図 5.9 より，サーバ方式，複数 VC サーバ方式に比べメッシュ方式での VC セットアップ遅延時間が長い事がわかる．これは，メッシュ方式ではそれぞれの送信者がマルチキャストグループへと VC を設定するためである．これに対し，サーバ方式，複数 VC サーバ方式は両者ともサーバから VC が設定されている場合，送信者からサーバまでの point-to-point VC の設定のみでよいので，平均的な VC セットアップ遅延時間は短くなる．

図 5.9 と送信者と受信者の間の転送遅延を示す図 5.10 を比較することで，VC セットアップ遅延時間がデータ転送遅延時間に大きな影響を及ぼすことがわかる．メッシュ方式は他の 2 方式に比べ VC セットアップ遅延時間が大きくなるため，送信者が単発的にデータを送信し，VC セットアップが頻繁に起こるような場合には向かないことがわかる．よって次節以降は複数 VC サーバ方式とサーバ方式のみ評価を行う．

図 5.10(a) にデータ転送遅延時間の絶対値，図 5.10(b) に複数 VC サーバ

方式-サーバ方式の転送遅延の比を示す．図 5.10(b) より，ホスト数が 60(リンク利用率 50%に相当) のところで転送遅延の比の値が極値をとることがわかる．よって中負荷領域で, 複数 VC サーバ方式は有効である．この要因を詳しく調べるために，図 5.12 に送信者と受信者の間の転送遅延の主な構成要素である，送信者とサーバの間の転送遅延と，データのサーバ滞在時間を示す．複数 VC サーバ方式では，サーバでのデータ滞在時間の削減を複数 VC を用いて実現する．図 5.12 より，ホスト数の増加に伴い，複数 VC サーバでのデータ滞在時間はマルチキャストサーバでの滞在時間と比較して大きく削減されている．しかし，ホスト数の増加に伴い，ネットワーク内に輻輳が生じていることがわかる．ホスト数が大きい状況では，この輻輳による送信者とサーバの間の転送遅延の影響が大きくなるため，複数 VC サーバ方式の遅延削減効果は小さくなる．しかし，テレビ会議などを考慮すると，グループ対話型アプリケーションでは遅延を抑えるため，リンク利用率が小さくなるよう VC を設定する．そのような状況下では，複数 VC サーバ方式が転送遅延削減に有効である．

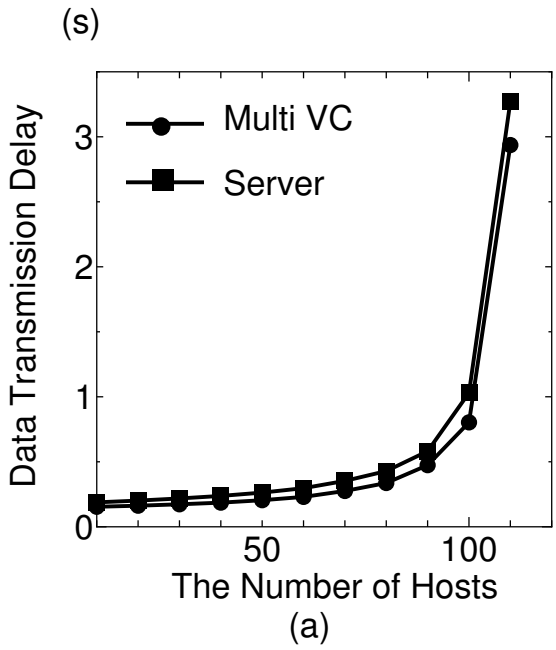

図 5.10: データ転送遅延 (絶対評価)

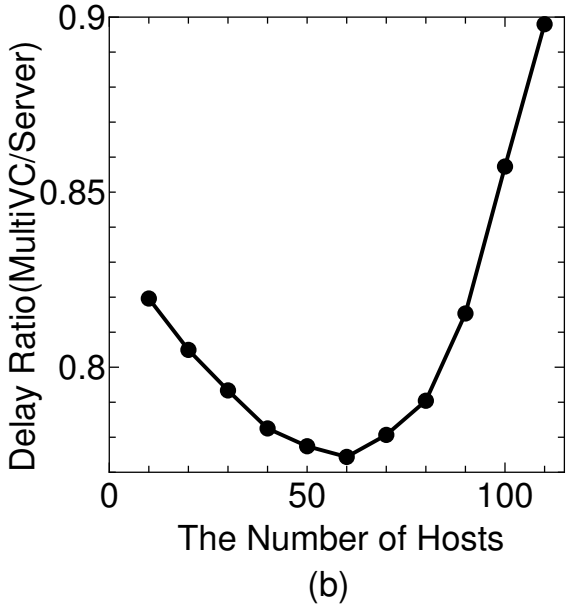

図 5.11: データ転送遅延 (相対評価)

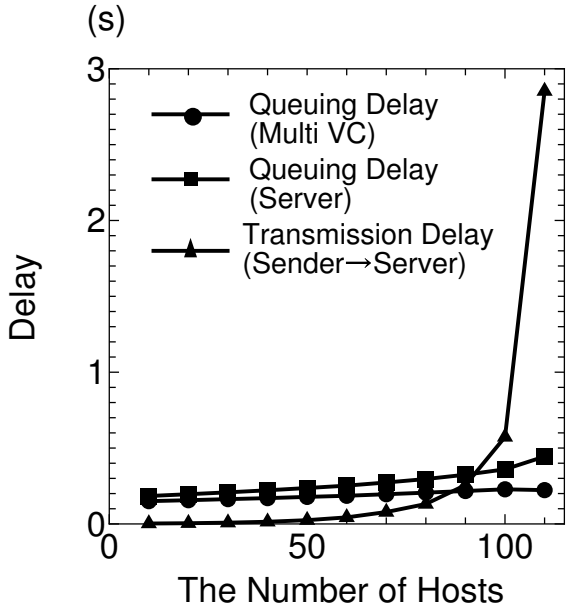

図 5.12: データ転送遅延の要因

図 5.13 に複数 VC サーバがネットワーク中に設定する VC と実際に使用される VC の数を示す．時間変化を示す．複数 VC サーバ方式では同時送信者数に応じて設定する VC 数を変化させる．図 5.13 より，同時送信者数に応じて VC の本数を動的に変化させていることがわかる．また設定された VC のうち実際に利用されている VC の本数を見ることで，設定された VC はデータ転送に有効に利用されていることがわかる．また，設定 VC 数はホスト数が多いところでも 8 程度ですむため，少ない VC 数で本方式の改善効果は期待できることが示された．

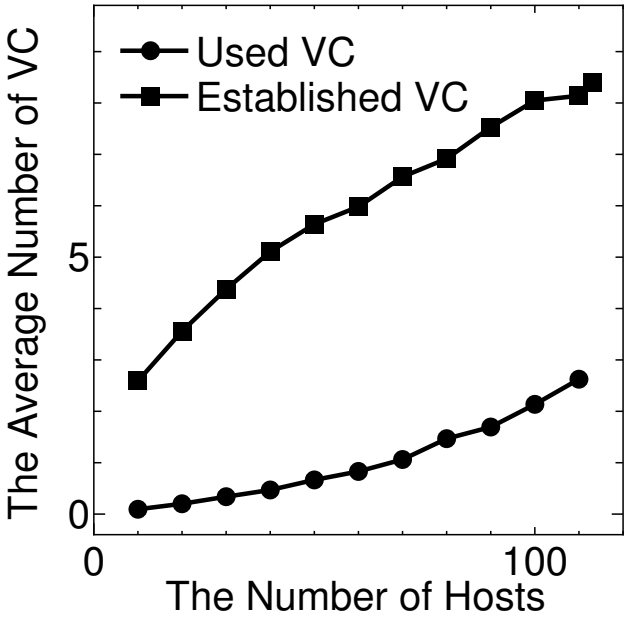

図 5.13: ホスト数に対する設定 VC 数

グループ対話型アプリケーションのうち，遅延条件が動画ほど厳しくないが多少リアルタイム性を要するためベストエフォートよりは品質保証が必要なアプリケーションに対しては ATM のサービスクラスとして Available Bit Rate(ABR) を適用することが考えられる．このようなアプリケーションはネットワークゲームが相当する．ABR では送信者側でレート制御を行うことで，ネットワーク内での輻輳回避を実現する．送信レートはデータ転送経路上のトラヒックの状況に依存する．転送経路上に他のトラヒックが存在する場合，マルチキャストデータの送信レートは抑圧される．ABR のレート制御導入時の影響を見るため，想定ネットワーク中のトラヒック状況を動的に変化させる．ネットワーク内の特定のリンクをボトルネックリンクとし，そのリンク上にはマルチキャストデータとは別にユニキャストデータが転送され

る状況を想定する．各ボトルネックリンクにはユニキャストフローを形成する送信者 — 受信者対が 10 個存在し，それぞれマルチキャストデータの発生過程と同様に発生すると仮定する．ボトルネックリンクはネットワーク中にランダムに配置する．ボトルネックリンク数が大きい場合，いずれかのボトルネックリンクがマルチキャストデータの送信レートを制限する状況になる．

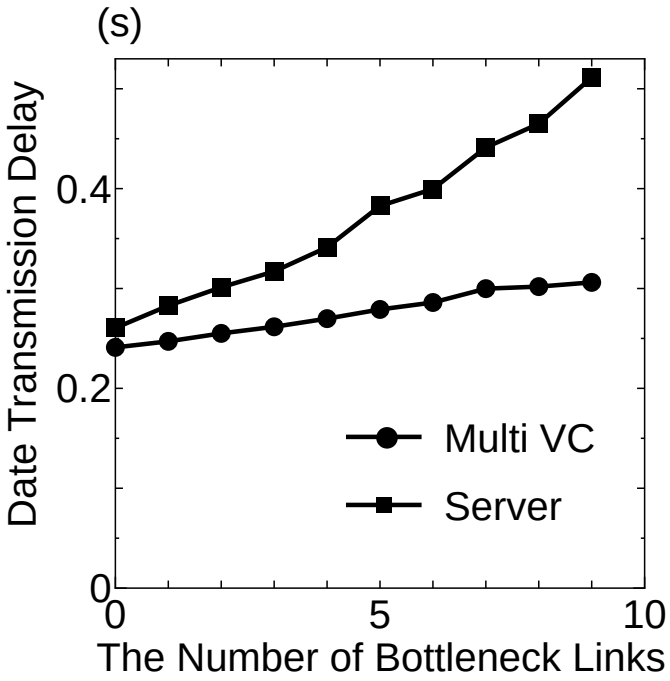

図 5.14: ABR レート制御導入時のデータ転送遅延

図 5.14 にホスト数が 50 の時のボトルネックリンク数に対する転送遅延を示す．サーバ方式と複数 VC サーバ方式の転送遅延の差は，ボトルネックリンク数に比例して増加することがわかる．これは ABR の適用によって，送信レートが複数 VC サーバ方式より制限されるためである．全てのマルチキャストデータが同一 VC 上で転送されるサーバ方式に比べ，複数 VC サーバ方式はサーバから設定される複数の VC 上に各々異なったデータを転送できる．この結果，複数 VC サーバからの転送レートは，単一 VC を持つマルチキャストサーバからの転送レートより大きくなる．これより複数 VC サーバ方式は ABR 適用時においてもネットワーク内の輻輳状況の変化に影響されないことがわかった．

5.6 結言

本章では，IP Multicast over ATM におけるデータ転送方式について，サーバ方式の技術的問題点を解決する新しい方式の提案を行った．複数 VC サーバ方式は，サーバ方式の性能劣化の要因である，サーバでの ATM セルから AAL 5 SDU への再構築をなくすことを目的に，サーバからマルチキャストグループへの point-to-multipoint VC を複数用意し，各送信者からのセルに対しては異なる point-to-multipoint VC を用いる．これにより，短い VC セットアップ遅延時間というサーバ方式の長所を活かしつつ，転送待ち時間をなくすことを可能にしている．解析と計算機シミュレーションにより，提案方式と，既存方式であるサーバ方式，メッシュ方式の性能比較を行い，複数 VC サーバ方式が最も小さいデータ転送遅延時間を実現するという点で優れた方式であることを検証した．

第6章　結論

本論文は，筆者が大阪大学大学院工学研究科 (通信工学専攻) 在学中に行ったマルチキャスト通信に適した ATM 網の構成に関する研究成果をまとめたものである．以下では本研究で得られた成果を総括して述べる．

近年のインターネットに代表されるコンピュータネットワークの発達に伴い，様々な情報を統合化して通信を行うマルチメディア通信に注目が集まっている．中でも動画や音声を配送するストリーミングサービスや，テレビ会議などの対話型アプリケーションのように特定多数の受信者へデータを配送するサービスが注目を集めている．これらのサービスを実現するための通信形態としてマルチキャスト通信が存在する．そして，コンピュータネットワークでのネットワーク相違上でのプロトコルとしてデファクトスタンダードとなっている TCP/IP においてマルチキャスト通信を実現する IP Multicast 通信が特に注目を集めている．マルチキャスト通信を使用するアプリケーションは様々な特徴を有し，ネットワークに要求する品質条件もアプリケーションによって異なる．音声や動画などのデータを配送するマルチメディア通信は，画質等のデータ品質を向上させる必要があるため，品質条件は通常のデータ通信に比べ厳しいものを要求する．マルチメディア通信の中にも，実現形態や目的の違いにより，様々な種類が存在する．その例として，広範囲に散在する受信者にデータを配送するストリーミングサービスと，比較的狭い範囲内に存在する参加者同士で互いに会話する対話型アプリケーションが挙げられる．本研究では，これらのアプリケーションの特徴を整理し，マルチキャスト通信に要求される条件をまとめた．ストリーミングサービスは番組選択にともなうマルチキャストグループの変更が頻発するため，グループメンバの管理を行う機構が重要であることを示した．対話型アプリケーションでは，遅延条件が特に厳しくなるため，遅延に大きく影響を及ぼす転送経路の設定機構を改善する必要があることを示した．

マルチメディア通信では，一般的に送信するデータのサイズは大きなものとなる．データ転送の高速化に対する要求を受けて，CCITT(現 ITU-T) で開発されている ATM 技術をデータリンク層に採用する動きが生じた．ATM は次世代の統合型サービスである B-ISDN の中心技術であり，データの高速転送を可能にしている．この流れはマルチキャスト通信にもあてはまる．そこで ATM 上でマルチキャスト通信を実現するプロトコルのうち，現在の主流となっている IP Multicast 通信を実現する技術として，IP Multicast over

ATM が注目を集めている．IP Multicast over ATM を実現する際に注意すべき点は IP と ATM でのコネクションに対する考えの違いである．このため，IP マルチキャストアドレスから全受信者の ATM アドレスを調べる MARS を用いた ARP や ATM レベルでの VC の設定法が検討されている．

MARS をもちいた ARP では，MARS が同一ネットワーク中に存在するマルチキャストグループのメンバや，マルチキャスト転送経路の経由点にあたるルータのアドレスを管理する．グループメンバの変更に応じて MARS の管理情報は更新される．情報更新にはグループへの参加や離脱を要求する制御メッセージが用いられる．ストリーミングサービスのようなグループへの参加離脱要求が頻発するアプリケーションではこのメッセージが大量発生すると予想される．本研究では，ローカルネットワークとバックボーンネットワークという階層構造をとるネットワークを対象とし，ローカルネットワーク内に存在するホスト数と，バックボーンネットワーク内の MARS に到達する情報更新メッセージの発生頻度との関係を導出した．導出結果から次のような結論を得た．

- メッセージの発生頻度はローカルネットワーク内に存在するホスト数と，番組自体の視聴率に依存し，それぞれ値が高いほど発生頻度は低下する．
- 発生頻度には極値が存在し，その値はホスト数や視聴率が比較的小さい領域に存在する．

この結果を用いてメッセージの発生頻度を抑制するネットワーク構成法を提案した．その要旨は以下のとおりである．

- ひとつのローカルネットワーク内にできるだけ多くのホストを収容する．ただし，ローカルネットワークとバックボーンネットワークという階層構造をとる以上，バックボーンネットワークの入り口にあたるエッジルータにトラヒックが集中するため，エッジルータの負荷を考慮してホストを配置する必要がある．

これにより，ストリーミングサービスに適したネットワークが設計される．

また，ATM における VC 設定法としては IETF において 2 つの方式が検討されている．送信者から直接マルチキャストグループのメンバへ VC を設定するメッシュ方式と送信者から一度マルチキャストサーバと呼ばれるサーバへ転送し，マルチキャストグループのメンバへはサーバから転送するサーバ方式が存在する．対話型アプリケーションにおいては遅延の改善が大きな課題となる．先程述べたメッシュ方式やサーバ方式には遅延に関する次のような問題点が存在する．

メッシュ方式 送信者毎にマルチキャストグループのメンバへ VC を設定するため，平均的な VC 設定時間が長くなる

サーバ方式 AAL 層に AAL5 を採用しているため，データを正しく送信するためには一度サーバで到着セルを AAL SDU に再構築する必要がある．このためセルの再構築遅延ならびに他の AAL SDU を送信することによるサーバでの送信待機時間が必要となる．

これらの問題を解決する方法として，サーバ方式を基盤として，サーバにおける到着セルを即座にマルチキャストグループのメンバへ転送するマルチ VC サーバ方式を提案した．これはサーバ方式で 1 本だけ設定していたサーバからマルチキャストグループのメンバへの VC を複数設定することを認めた方式である．そして，異なった AAL SDU には異なった VC を割り当てることでサーバ方式における AAL SDU の再構築の必要性を失わせている．

これらの方式に対し，データ転送時間に与える影響を評価したところ次のような結果を得た．

- サーバを用いた方式を利用すると VC 設定時間が短くなる．

  サーバを用いた方式はマルチキャストグループへの point-to-multipoint VC を複数の送信者で共有するため多くの VC を設定する必要がない．よってメッシュ方式より VC 設定時間が短くなる

- 複数 VC サーバ方式を適用した場合，サーバ方式と比べてサーバでの待機による遅延が改善される．また，その改善効果はネットワーク帯域の不均一性の影響を受けない．

  到着する AAL SDU に異なる VC を割り当てる事でセルがサーバに到着した後，即座にマルチキャストグループに転送する事を実現した．このため他の AAL SDU の影響を受けずに転送できる．これが待機時間の改善につながると考えられる．

これらを総合した結果を以下に示す．

- VC 設定時間がサーバ方式とほぼ同じ
- サーバ方式における AAL SDU の再構築遅延時間を削減
- 他の AAL SDU の転送によるサーバでの待機時間を被らない．

よって，複数 VC サーバ方式を適用する事でサーバ方式からの性能改善が見られ，全体としてデータ転送時間が短縮されていることがわかり，提案方式の有効性が示された．

本論文で提案した方式を ATM ネットワークの構成に利用することで，マルチキャスト通信を利用するアプリーケーションが要求する品質条件を満足することが期待される．このことをもって本論文の結論とする．

参考文献

[1] 竹下隆史, 村山公保他, “マスタリング TCP/IP 入門編第２版”, オーム社, ISBN4-274-06257-0

[2] Dave Kosiur,” マスタリング TCP/IP IP マルチキャスト編”, オーム社, ISBN4-274-06338-0

[3] S.E.Deering,D.R.Cheriton, “Host Groups:A Multicast Extension to the Internet Protocol”, RFC966,December 1985

[4] S.E.Deering, “Host Extension for IP Multicasting”, RFC 1112,August 1989

[5] CIP Working Group,”Experimental Internet Stream Protocol, Version 2(ST-II)“,RFC 1190, October 1190

[6] S.Armstrong, A.Freier, K. Marzullo,”Multicast Transport Protocol”,RFC1301,February 1992

[7] B. Haberman, J.Martin,”IGMPv3 and Multicast Routing Protocol Interaction”,Internet Draft¡draft-ietf-idmr-igmpv3-and-routing-01.txt¿, July 2001

[8] D.Waitzman, C.Partridge, S.Deering,”Distance Vector Multicast Routing Protocol”, RFC 1075, November 1988

[9] J.Moy, “Multicast EXtensions to OSPF”,RFC 1584, 1994

[10] D.Estrin, D.Farinacci, A.Helmy, D.Thaler, S.Deering, V.Jacobson, C.Liu, S.Sharma, L.Wei,”Protocol Independent Multicast-Sparse Mode(PIM-SM):Protocol Specification”,RFC 2362, June 1998

[11] 電子情報通信学会編, “電子情報通信ハンドブック”, オーム社,ISBN4-274-03514-X

[12] M.Laubach, ”Classical IP and ARP over ATM”,Hewlett-Packard Lab., RFC 1577, January 1994

[13] M.Perez,et al., “ATM Signaling Support for IP over ATM”, RFC1755,February 1995.

[14] M.Laubach, “Classical IP and ARP over ATM”, Com21, Inc., RFC 2225, April 1998.

[15] ATM Forum, “ATM User-Network Interface (UNI) Signalling Specification, Version 3.1”, ISBN 0-13-393828-X, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, Jun. 1995.

[16] ATM Forum,“ATM User-Network Interface (UNI) Signalling Specification,Version 4.0”, af-sig-0061.000, Jul. 1996.

[17] G.Armitage, “Support for Multicast over UNI 3.0/3.1 based ATM Networks”,Bellcore, Morristown, NJ, RFC 2022, Nov. 1996.

[18] G.Armitage, “IP Multicast over ATM Network”, *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.15, No.3, pp. 445-457, Apr. 1997.

[19] R.Talpade,M.Ammar, “Multicast Server Architectures for MARS-based ATM multicasting”,Georgia Institute of Technology, RFC 2149, May 1997.

[20] 原 博之, 久々津 直哉, 林 一博, 豊島 鑑, 市川 弘幸, 伊東 匡, 前田 洋一, 堤 俊介, “次世代コンピュータネットワークのアクセス系・エッジノード構成法”, NTT R&D, Vol.47, pp.425-434, 1998.

[21] 渡部 直也, 市川 弘幸, 新籾 純, 谷川 真樹, 原 博之, 加藤 愼一, 北爪 秀雄, 村山純一 “次世代コンピュータネットワークのバックボーン系構成法”, NTT R&D, Vol.47, pp.435-444, 1998.

[22] T.Anker,D.Breitgand,D.Dolve,Z.Levy, “IMSS,IP Multicast Shortcut Service”,IETF Internet Draft<draft-anker-congress-01.txt>, Jul. 1997

[23] Yong Xie,Myung J.Lee, Trek and NJ.Saadawi, “Multicasting over ATM Using Connection Server”,in Proc. *IEEE International Conference on Communications (ICC'97)*, Montoreal, Quebec, Canada, pp.1376-1380, 1997.

[24] 杉園 幸司, 山本 幹, 池田博昌:”IP Multicast over ATM におけるストリーミングサービスに適したネットワーク設計法”, 電子情報通信学会論文誌 vol.J-84-B, no.5, pp.893-901, 2001 年 5 月

[25] Koji Sugisono, Miki Yamamoto, Hiromasa Ikeda : ”MARS Load Analysis of Streaming Service on IP Multicast over ATM”,in proc. 19th IEEE

International Performance, Computing, and Communications Conference(IPCCC 2000), pp. 158-163, Phoenix, USA, February 2000

[26] Koji Sugisono, Miki Yamamoto, Hiromasa Ikeda:"Multicast Server Method Using Multiple VCs for IP Multicast over ATM",in proc. 6th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC 2000), pp.477-481, Seoul, South Korea, October 2000

[27] 杉園 幸司, 山本 幹, 池田 博昌:"マルチキャストサーバにおけるデータ転送方式の検討", 信学技報 IN98-104 ,1998 年 10 月

[28] 杉園 幸司, 山本 幹, 池田博昌:"IP Multicast over ATM におけるストリーミングサービスに適したネットワーク構成法の検討", 信学技報 IN99-81, 1999 年 11 月

[29] 小野田哲也，杉園幸司，山本幹，池田博昌:"IP Multicast over ATM における広域アドレス解決に関する研究",2000 年電子情報通信学会通信ソサエティ大会,B-6-5, 2000 年 9 月

[30] 杉園幸司，山本幹:"IP Multicast over ATM における VC 間 ABR レート制御の検討",2000 年電子情報通信学会通信ソサエティ大会,B-6-6, 2000 年 9 月

[31] 播口 陽一, "ATM:LAN Emulation (LANE)" , UNIX Magazine 1 月号,pp.29-40,1998.

[32] 清水 洋，鈴木 洋，"ATM-LAN", ソフト・リサーチ・センター,ISBN4-915779-48-7.

[33] J.Luciani,et al., "NBMA Next Hop Resolution Protocol (NHRP)", RFC2332,April 1998.

[34] R.Callon,P.Doolan,et al., "A Framework for Multiprotocol Label Switching", IETF Internet Draft<draft-ietf-mpls-framework-02.txt>,November 1998.

[35] B.Davie,Y.Rekhter,et al., "MPLS using ATM VC Switching", IETF Internet Draft<draft-ietf-mpls-atm-01.txt>,November 1998.

[36] P.Newman,R.Hinden,et al., "Ipsilon Flow Management Protocol Specification for IPv4 Version 1.0", Ipsilon,RFC1953,May 1996.

[37] Y.Rekhter,D.Latz,et al., "Cisco Systems' Tag Switching Architecture Overview", Cisco Systems Inc.,RFC2105,February 1997.

[38] Abdella Battou, “Performance Benchmarking of Signaling in ATM Networks”, *IEEE Conmmunication Magazine*, pp.134-143, Aug. 1997.

[39] R.Atkinson,“Defalut IP MTU for use over ATM AAL”, Naval Research Lab., RFC 1626, May 1994.

[40] Christophe Diot, Brian Neil Levine, Bryan Lyles, Hassan Kassem, Doug Balensiefen,”Deployment Issues for the IP Multicast Service and Archetecture”,*IEEE Network Magazine*,pp.78-88, Jan. 2000.

[41] Uyless Black,”MPLS and Label Switching Network”,PRENTICE HALL,ISBN0-13-015823-2.

[42] Hartmut Brandt, Christian Hapke,”ATM Signaling:Protocols and Practice”,JOHN WILEY & SONS,LTD, ISBN0-471-62382-2

[43] 秋丸春夫, 池田博昌, “現代交換システム工学”, オーム社,ISBN4-274-12848-2

[44] L.Kleinrock 著, 手塚慶一訳,” 待ち行列システム理論 (上下)”, マグロウヒル好学社

本論文に関する原著論文

I 学会論文

1. 杉園 幸司，山本 幹，池田博昌:"IP Multicast over ATM におけるストリーミングサービスに適したネットワーク設計法", 電子情報通信学会論文誌 vol.J-84-B, no.5, pp.893-901, 2001 年 5 月

2. 杉園 幸司，山本 幹，池田博昌:" IP Multicast over ATM における複数 VC サーバを用いたデータ転送方式", 電子情報通信学会論文誌 (採録決定済: 2002 年 3 月掲載予定)

II 国際会議

1. Koji Sugisono, Miki Yamamoto, Hiromasa Ikeda : "MARS Load Analysis of Streaming Service on IP Multicast over ATM",in proc. 19th IEEE International Performance, Computing, and Communications Conference(IPCCC 2000), pp. 158-163, Phoenix, USA, February 2000

2. Koji Sugisono, Miki Yamamoto, Hiromasa Ikeda:"Multicast Server Method Using Multiple VCs for IP Multicast over ATM",in proc. 6th Asia-Pacific Conference on Communications(APCC 2000), pp.477-481, Seoul, South Korea, October 2000

III 研究会発表

1. 杉園 幸司, 山本 幹, 池田 博昌:"マルチキャストサーバにおけるデータ転送方式の検討", 信学技報 IN98-104 ,1998 年 10 月

2. 杉園 幸司, 山本 幹, 池田博昌:"IP Multicast over ATM におけるストリーミングサービスに適したネットワーク構成法の検討", 信学技報 IN99-81, 1999 年 11 月

IV 全国大会発表

1. 小野田哲也，杉園幸司，山本幹，池田博昌:”IP Multicast over ATM における広域アドレス解決に関する研究”,2000 年電子情報通信学会通信ソサエティ大会,B-6-5, 2000 年 9 月

2. 杉園幸司，山本幹:”IP Multicast over ATM における VC 間 ABR レート制御の検討”,2000 年電子情報通信学会通信ソサエティ大会,B-6-6, 2000 年 9 月