



電 子 **392**

博士学位申請論文

マルチキャスト通信網構成に関する研究

指導教官： 坂内正夫 教授

平成 10 年 12 月 18 日提出

東京大学大学院 工学系研究科

電子工学専攻

67139

三好 匠

# 内容梗概

今、21世紀の到来を目前にして、高速広帯域通信網への期待が一段と高まっている。高速広帯域通信網が実現すれば、従来の1対1通信サービスのほかに、多種多様なサービスの展開が予想される。放送などのような動画像を伴うサービスは非常に広帯域であるため、通信網の効率的利用の観点からマルチキャスト通信が注目されている。

マルチキャスト通信では、同じ情報を2箇所以上の目的地に伝送する場合、途中までの経路が同じであれば、そこまでは一つの情報を伝送し、分岐点にて複製を作成する分岐接続が用いられる。これにより、伝送路上のトラヒックを大幅に減少させることができ、全体としての網資源の節約、伝送コストの低減が可能となる。しかし、分岐接続は従来の接続形態とは明らかに異なるため、従来どおりの網設計ではサービスの品質劣化や網構成にかかるコストが増大する恐れがある。

一方、通信網の最適構成に関する検討は非常に重要な課題であり、従来より多数の研究が行われている。しかし、これらは1対1通信を仮定したものがほとんどであり、マルチキャスト通信を考慮した通信網構成の研究は皆無である。そこで本論文では、マルチキャスト通信と1対1通信が混在する場合を想定し、高速広帯域マルチキャスト通信網の最適階層構成についての研究を行った。その結果、マルチキャスト通信トラヒックが増加した場合、最終的にはメッシュ-デルタスター構成が最適となることがわかった。また、下位層においては、マルチキャスト通信トラヒックの増加につれて、デルタスター構成の優位性が増大することもわかった。

我が国の現在の通信網トポロジーがメッシュ-スター構成であることを考慮すると、マルチキャスト通信が増加すれば、下位層は網形態を変更してデルタスター構成へ移行したほうが望ましいと考えられる。そこで、下位層において、現状トポロジーであるスター構成から最適とされるデルタスター構成へと移行するための手法を提案し、最終的に構成される通信網にどの程度の違いがあるかを検討した。その結果、伝送路長のみから計算できる比較的簡単なアルゴリズムを用いて伝送路増設順序を決定した場合でも、網構成コストを十分に低減できることがわかった。また、マルチキャスト通信トラヒックが著しく増加する時点、またはそれ以前までに、トポロジーの移行を完了しておくほうが望ましいことがわかった。

# 目次

<b>第 1 章 序論</b>	<b>1</b>
1.1 研究の背景	2
1.2 研究の目的	4
1.3 本論文の構成	6
<b>第 2 章 マルチキャスト通信技術</b>	<b>9</b>
2.1 まえがき	10
2.2 マルチキャスト通信	11
2.2.1 高速広帯域通信網への期待	11
2.2.2 マルチキャスト通信の特徴	12
2.3 B-ISDN におけるマルチキャスト通信技術	15
2.3.1 広帯域サービス総合デジタル網	15
2.3.2 ATM 伝送方式	17
2.3.3 ATM におけるマルチキャスト通信技術	21
2.4 インターネットにおけるマルチキャスト通信技術	26
2.4.1 インターネットの発展	26
2.4.2 インターネットの高速広帯域化	28
2.4.3 インターネットにおけるマルチキャスト通信技術	31
2.5 むすび	36
<b>第 3 章 大規模マルチキャスト通信網の最適階層構成</b>	<b>39</b>
3.1 まえがき	40
3.2 定量的評価のためのモデル	41
3.2.1 交換局配置モデル	41
3.2.2 人口分布モデル	42
3.2.3 サービスモデル	43
3.2.4 伝送路網トポロジー	45
3.2.5 局間交流トラヒックモデル	46

3.3	計算方法	47
3.3.1	マルチキャスト通信サービスの計算	47
3.3.2	1対1通信サービスの計算	49
3.3.3	伝送路容量の決定	50
3.3.4	階層構成計算	50
3.3.5	評価指標	52
3.4	定量的評価	54
3.4.1	パラメータの設定	54
3.4.2	特性評価	54
3.5	むすび	65
<b>第4章</b>	<b>新しい網形態を用いた大規模マルチキャスト通信網の最適階層構成</b>	<b>67</b>
4.1	まえがき	68
4.2	リング・スター複合構成	68
4.2.1	従来の伝送路網トポロジーの特徴	68
4.2.2	リング・スター複合構成の提案	70
4.3	定量的評価	70
4.3.1	パラメータの設定	70
4.3.2	伝送路敷設網トポロジー	71
4.3.3	伝送路優先敷設の場合の特性評価	72
4.3.4	スター構成敷設の場合の特性評価	79
4.3.5	リング構成敷設の場合の特性評価	88
4.4	むすび	96
<b>第5章</b>	<b>小規模マルチキャスト通信網の最適構成</b>	<b>99</b>
5.1	まえがき	100
5.2	定量的評価のためのモデル	101
5.2.1	計算領域モデル	101
5.2.2	サービスモデル	103
5.2.3	伝送路網トポロジー	104
5.2.4	経路選択	105
5.3	計算方法	108
5.3.1	マルチキャスト通信サービスの計算	108



5.3.2	1対1通信サービスの計算	109
5.3.3	伝送路容量の決定	110
5.3.4	評価指標	111
5.4	定量的評価	111
5.4.1	パラメータの設定	111
5.4.2	トラヒックモデル1の場合の特性評価	112
5.4.3	トラヒックモデル2の場合の特性評価	118
5.4.4	トラヒックモデル3の場合の特性評価	118
5.4.5	その他のモデルを用いた場合の特性評価	121
5.4.6	伝送路敷設網の特性評価	129
5.5	むすび	129
<b>第6章</b>	<b>マルチキャスト通信網増設法</b>	<b>131</b>
6.1	まえがき	132
6.2	定量的評価のためのモデル	132
6.2.1	計算領域モデル	134
6.2.2	サービスモデル	134
6.2.3	伝送路敷設網トポロジー	134
6.3	計算方法	135
6.3.1	伝送路容量の決定	135
6.3.2	評価指標	135
6.4	トラヒック変動に伴うトポロジー特性の変化	136
6.4.1	1対1通信トラヒック変動に伴う特性変化	136
6.4.2	マルチキャスト通信のサービス数変動に伴う特性変化	140
6.4.3	マルチキャスト通信の伝送帯域変動に伴う特性変化	143
6.5	マルチキャスト通信網増設法	146
6.5.1	トラヒック増加シナリオ	146
6.5.2	伝送路増設方法	149
6.6	定量的評価	152
6.6.1	シナリオ1の場合の特性評価	153
6.6.2	シナリオ2の場合の特性評価	158
6.6.3	トポロジーを一度に変更した場合の特性評価	163

6.7	むすび	167
第7章	結論	171
7.1	本論文の主たる結果	172
7.2	今後の展望	174
	謝辞	176
	参考文献	178
	発表文献	188
	図目次	192
	表目次	198

# 第 1 章

## 序論

## 1.1 研究の背景

19世紀 — それは通信にとって最も重要な時代である。1837年、サミュエル・モールス (Samuel Finley Breese Morse: 1791~1872, USA) により、モールス符号 (Morse Code) を用いた世界初の電信が行われた。1876年には、アレキサンダー・グラハム・ベル (Alexsander Graham Bell: 1842~1922, USA) により、音声を電気信号に変換して遠方に伝える電話が発明された。さらに、1895年には、電気信号を電波に変えて伝送する無線通信が、ググリエルモ・マルコーニ (Guglielmo Marconi: 1874~1937, Italy) によって発明された。それまで、声の届く範囲、または煙の見える範囲に留まっていた実時間におけるコミュニケーション技術は、こうして格段に成長し高速化した。

ベルによる電話の発明から122年、電話技術は、交換の自動化、ダイヤルによる自動通話、電気信号の増幅技術、多重化技術、デジタル化技術などにより進化してきた。そして今、通信技術は大きな変革のときを迎えている。

その中枢をなすのが、通信網の高速化・広帯域化である。従来、電気信号によって伝送されてきた通信は、光を利用した通信へと移行しつつある。光ファイバケーブルは銅線に比較して低価格であり、しかもノイズ耐性が強いいため、高速で長距離の通信を可能にした。さらに、近年の波長多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術<sup>(1,2)</sup>等により、従来の光通信に比して数十倍もの広帯域伝送が可能となった。また、光ファイバのガラス部分をプラスチックに置き換えたプラスチック光ファイバ (POF: Plastic Optical Fiber) の登場により、さらなる低価格化、利便性の向上を可能とし、一般家庭やオフィスなどでも光通信を用いた高速通信が実現できるようになった<sup>(3)</sup>。

そしてもう一つ、爆発的なコンピュータの普及が挙げられる。1965年、インテル (Intel Corporation, USA) 創始者の一人であるゴードン・ムーア (Gordon Moore: 1929~, USA) は、「新しく開発される集積回路 (IC: Integrated Circuit) の集積率、及び中央演算処理装置 (CPU: Central Processing Unit) 等の性能は、18~24カ月で約2倍になる」というムーアの法則を発表した<sup>(4)</sup>。この法則によると、コンピュータなどの集積技術を用いた機器は指数的に高機能化することになる。実際、インテル社製のCPUは、この24年間で2,300倍以上の集積率を達成しており\*、演算速度の面からも2年以内に2倍以上の速度向上を達成している<sup>(5)</sup>。

\* 1971年発表のIntel 4004マイクロプロセッサのトランジスタ数は2,300個、1995年発表のIntel

文書構成や表計算をはじめ、出版（DTP: Desktop Publishing）、コンピュータグラフィックス（CG: Computer Graphics）、音楽作成（DTM: Desktop Music）まで、「コンピュータにできないことは何もない」という時代となった。かつて大陸横断ミサイルの軌跡演算に用いられたコンピュータは、30,000cm<sup>2</sup>程度の小さな箱に入れられてどの家庭にも存在するほどに普及したのである。

また、コンピュータの普及とインターネット（The Internet）は、切っても切れない関係であろう。1969年にアメリカ合州国国防総省高等研究計画局（DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency）により生まれた国防、及び学術振興目的のネットワーク（ARPANET）技術は、現在インターネットとして広く世界中で利用されている。今から5～6年前までは、インターネットを利用するためにはそれなりの知識や技術が必要とされたため、企業の研究所や大学機関など特定の人々による利用に限られていた。1993年、インターネットに大革命を起こす技術が発表された。それが「World Wide Web（WWW）」である。WWWは、HTML（Hypertext Markup Language）と呼ばれる言語で書かれた文書をHTTP（Hypertext Transfer Protocol）により伝送するシステムであり、WWWを利用するためのアプリケーションを用いてURL（Uniform Resource Locator）と呼ばれるインターネットの住所（アドレス）を指定するだけで、そこにある情報を閲覧することが可能となった。WWWの登場により、コンピュータの専門的知識を有さない一般の人々も簡単に利用できるようになり、インターネットは爆発的に普及した。こうして、コンピュータと通信網は切っても切れない関係となった。

今、21世紀の到来を目前にして、高速広帯域通信網への期待が一段と高まっている。従来、通信といえば電話、ファクシミリ、データ通信などのような単一メディア（モノメディア）の通信が主流であった。ところが、コンピュータやインターネットの普及により、情報の複数メディア（マルチメディア）化がもたらされた。デジタル化されたデータは、電話音声、テレビ映像、絵画、文字データ、さらには音楽データまで、すべて0、または1の数字に変換される。すなわち、情報メディアがもともとどのような種類であったかは、もはや問題とならなくなった。いかなるメディアも、すべて同一のもの（デジタルデータ）として扱えるようになり、同じ通信手段を用いて伝送が可能になった。そして、文字データのみであった電子メールに音声を添付したり、サッカーのワールドカップを見ながら活躍してい

---

Pentium Pro プロセッサのトランジスタ数は550万個。

る選手の経歴を見たりといったマルチメディア通信が行われるようになった。このようなマルチメディア通信を十分満足できるほど高速に行うためには、より広帯域通信網が必要となる。

しかし、そのような高速広帯域通信網も夢ではなくなった。1993年、米国のアルバート・ゴア（Albert Gore, Jr.: 1948～, USA）副大統領（クリントン政権）により提唱された「情報スーパーハイウェイ（Information Superhighway）」構想を皮切りに、先進国を中心として各国から情報通信基盤整備計画が相次いで発表されている<sup>(6,7)</sup>。これらの計画によると、概ね2015年までに各家庭まで光ファイバを敷設するファイバ・ツー・ザ・ホーム（FTTH: Fiber To The Home）を実現し、高速情報通信網を構築する計画が掲げられている。我が国においても、情報通信基盤整備が脚光を浴びており、2010年までにFTTHを実現する計画がある<sup>(8)</sup>。このように、高速広帯域通信網はもはや現実のものとなりつつある。そして、広帯域通信網が実現すれば、マルチメディア通信はより高速広帯域化、高精細化し、未来の通信におけるメインストリームになるであろうと考えられる。

## 1.2 研究の目的

高速広帯域マルチメディア通信の実現を目前に控え、同じ情報を同時に複数の場所へ伝送する同報（マルチキャスト）形通信技術が注目を集めている。前述のように、高速広帯域マルチメディア通信が充実すれば、ハイビジョン放送（HDTV: High Definition TV）に代表されるような高画質動画像、サラウンドシステムに代表されるような高音質音声などの伝送が一般的になると考えられる。このようなマルチメディアサービスを通信網にて伝送することを考えると、従来とは比較にならないほど非常に大きな伝送帯域を必要とする。特に、放送のようにマルチメディア情報を複数の場所へ同報するサービスにおいて、従来 방식である1対1接続による通信\*\*を用いると、限られた通信網資源を浪費してしまうばかりか、膨大な通信コストが必要となる。また、このような通信を実現する通信網を構築するとなれば、莫大なコストがかかることになる。

このような同報形サービスの伝送を効率的にするために、マルチキャスト通信技術に関する研究が非常に盛んに行われている。マルチキャスト通信では、同じ情報を同時に複数の場所に伝送する際、途中までの経路が同じであればそこまで

\*\* サイマルキャスト（simulcast）と呼ばれることもある。

は一つの情報を伝送し、分岐点で情報の複製を作成して下流へ伝送するという分岐接続（またはマルチキャスト接続とも呼ばれる）技術が用いられる。分岐接続を用いれば、分岐点よりも上流側において、通信網上の通信トラヒックを大幅に減少させることが可能となる。よって、通信網資源の有効利用、通信コストの大幅な削減が期待される。同時に、通信網の構築に必要なコストは、前述の1対1通信を使った場合に比較して小さくなると考えられる。これらの理由により、将来のマルチメディア通信の多くは、マルチキャスト通信の形態をとるものと考えられる。

一方、新しい通信網インフラストラクチャの整備を行う場合、通信網の最適形態に関する検討は非常に重要な課題であり、従来より多くの研究が行われてきた。全国を一つの通信網にて階層的に構成する場合の研究では、我が国をモデルとした交換局配置モデルやトラヒック分布モデルを用い、最適な階層数や最適な形態（トポロジー）を求めている<sup>(9, 10)</sup>。また、非階層構成通信網の最適構成に関する研究では、あらかじめ与えられた交換局（またはルータ）集合、及び交流トラヒックに対し、網構成コストや通信コスト、または伝送遅延を最小にするように、伝送路集合を求めている<sup>(11, 12, 13, 14)</sup>。さらに、映像分配形サービス網の設計に関する研究<sup>(15, 16)</sup>や、論理網の最適設計に関する研究<sup>(17, 18, 19)</sup>も盛んに行われている。トラヒックの時間変動やサービス品質（QoS: Quality of Service）に応じて論理網を変化させることによって、より効果的な論理網設計を実現する手法の研究もある<sup>(20, 21, 22, 23)</sup>。これら多数の研究では、トラヒックとして従来の電話、ファクシミリなどのような1対1通信が仮定されている。前述の映像分配形サービス網設計の研究に関しても、ビデオオンデマンド（VOD）、すなわち、映像配信サービスの情報源（サーバ）と受信者が1対1接続される場合が想定されている<sup>(15, 16)</sup>。

しかし、マルチメディア通信、とりわけマルチキャスト通信が主流となる将来の高速広帯域通信網において、1対1接続を仮定した従来どおりの通信網設計理論を用いたらどうであろうか。マルチキャスト通信では分岐接続が用いられるため、1対1通信の接続形態とは大きく異なる。ということは、従来の理論に基づいて構成された通信網は、1対1通信に対しては適しているが、マルチキャスト通信に対して適しているとは限らないのである。例えば、通信網トポロジーや伝送路容量が不十分であるために、通信サービスの品質が劣化する可能性がある。また、十分なサービス品質を保証するあまり通信網が無駄に大きくなり、通信網構成にかかる費用が増大する恐れもある。

以上の理由により、マルチキャスト通信が主流となる将来の通信網、すなわちマルチキャスト通信網の設計に関する研究を行う必要があると考えられる。しかし、前述のとおり1対1通信が中心となる通信網構成の研究成果はたくさん存在するのに対し、マルチキャスト通信網構成に関する研究は未だにほとんど行われていないのが現状である。そこで本論文では、マルチキャスト通信が通信網内のメジャートラヒックとなった場合を想定し、マルチキャスト通信と1対1通信が混在するような高速広帯域通信網における最適網形態を明らかにする。

一般に、全国を覆うような広域大規模通信網では、あるルールに基づいて階層的に通信網を構成することが多い。すなわち、基本的な通信網トポロジーを用いて、これらを組み合わせることで通信網が構築されている。これは、階層構成を行うことにより、通信網構成を簡単にするだけでなく、制御等の観点からも有効であるためである。そこで、本論文で扱うマルチキャスト通信網は、階層的に構成される広域通信網であるとし、通信網全体から見た最適構成の研究を行う。また、現存する通信網を拡張することによりマルチキャスト通信網を構築する場合の伝送路増設手法、及びその特性についても検討する。

### 1.3 本論文の構成

本論文は全部で7章より構成される。大別して、第1章が序論、第2章から第6章が本論、第7章が結論という構成になっている。

第1章の序論に引き続き、第2章では、高速広帯域通信網の背景とマルチキャスト通信の特徴、及びマルチキャスト通信を可能にする技術や現状について述べる。

第3章では、全国を覆うような非常に広範囲にわたる大規模通信網の最適階層構成について論じる。まず、定量的評価を行うのに必要となる交換局配置モデルや人口分布モデル、通信サービス等について述べた後、評価の指標となる通信網構成コストの計算方法について詳しく論じる。さらに、これらのモデル、計算方法に基づいてマルチキャスト通信網の階層構成を行い、網構成コストの観点から最も適した通信網形態を求める。得られた結果を、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比、及び伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比をパラメータとしたときの最適領域グラフとして表示する。これにより得られた結果を基にし、第4章では、マルチキャスト通信サービス、及び1対1通信サービスの伝送に適していると考えられるリング・スター複合構成を提案し、第3章



と同様の特性評価を行う。

さらに、第5章では、階層構成通信網の最下位層をなす第1階層に焦点を絞り、一つのトポロジーにて通信網を構成した場合に最適となる形態について論じる。特に、デルタスター構成のマルチキャスト通信網への適用について検討を行う。第3章と同様に、交換局配置モデル、人口分布モデル、そして通信サービスの受信確率を設定し、網構成コストの観点から最も適した通信網トポロジーを明らかにする。計算領域を限定することにより、計算に要する時間を大幅に短縮することが可能となる。そこで第5章では、第3章よりも現実的なモデルを用い、より詳細な検討を行っている。

第3章～第5章における研究結果から、現状の網形態、特に階層構成下位層のスター構成はマルチキャスト通信網として最適でないことがわかる。そこで、第6章では、スター構成からデルタスター構成へ移行を行うための伝送路増設手法についての検討を行う。まず、伝送路増設手法として、比較的簡単な手法、及び発見的手法など4種類の手法について述べ、これらの手法を用いて通信網トポロジーの移行を徐々に行った場合の網構成コストの変化特性について論じる。通信トラヒックの増加シナリオとして、マルチキャスト通信が比較的早期に開始されて1対1通信と同時にトラヒックが増加する場合と、1対1通信トラヒックが十分に増加した後にマルチキャスト通信が開始される場合の二つのシナリオを用いる。また、スター構成からデルタスター構成へ一度に変化させた場合の特性についても検討を行う。

最後に第7章では、結論として、本論文の主たる結果をまとめる。さらに、通信網構成に関する研究が、今後どのように検討され、展開されるべきであるかについて記す。

ここで、本論文中の約束事について述べておく。

(1) 章、節、項は、次のような順序で大項目から小項目へと移る。

例：第3章，3.2，3.2.1

(2) 式、図、及び表は、章単位で通し番号をつける。図、表については、本論文の最後に目次を用意してある。

(3) 参考文献は、文章中、または図、表の見出しの右肩に(…)なる文献番号で示し、その一覧をまとめて最後に示す。

- (4) 単位としてのアーラン (erlang) は, “erl” と表記する.
- (5) 本論文では, 伝送速度単位として, 1 秒間に伝送できるデジタルビット数 (bps: bit per second) を用いる. また, “k”, “M”, “G”, “T” は, それぞれキロ (kilo,  $10^3$ ), メガ (Mega,  $10^6$ ), ギガ (Giga,  $10^9$ ), テラ (Tera,  $10^{12}$ ) を表す. 伝送速度を表記する場合には, これらを組み合わせた “kbps”, “Mbps” などを用いる.
- (6) 文献によっては, 「マルチキャスト」を表す語として「放送形」, 「ブロードキャスト (broadcast)」などの表現が用いられている. 本論文では, これらをすべて「マルチキャスト」として統一する. 同様に, 「1 対 1」通信に関しても「ユニキャスト (unicast)」, 「サイマルキャスト (simulcast)」などの用語が用いられているが, すべて「1 対 1」と表記する.
- (7) 本論文では, マルチキャスト通信と 1 対 1 通信が混在する次世代の通信網を「マルチキャスト通信網」と呼ぶ.
- (8) 「交換機能を有する機器」を表す用語として, 「交換機」, 「スイッチ (switch)」, 「ルータ (router)」などが使われる場合がある. 本論文では「交換機」を用いるが, インターネットに関する記述の場合には「ルータ」を用いることにする.
- (9) 通信網は, グラフ理論に置き換えられて検討されることが非常に多い. そのため, 「交換局 (またはルータ)」を「ノード (node)」または「節点 (vertex)」, 「伝送路」を「リンク (link)」または「枝 (edge)」とする文献もある. 本論文では, これらをそれぞれ「交換局 (またはルータ)」, 「伝送路」として統一するが, グラフ理論について論ずる場合に限り, 「節点」, 「枝」を用いることもある.

## 第 2 章

### マルチキャスト通信技術

## 2.1 まえがき

序論にて述べたとおり，高速広帯域通信網に寄せる期待は年々増加する傾向にある。なかでも，マルチメディア通信を効率的に実現するための手法として，マルチキャスト通信技術に研究者の注目が集まっている。

マルチキャスト通信は，同じ情報を複数の受信者に同時に伝送するとき，その効果を発揮する。受信者までの経路が途中まで同じであれば，そこまでは一つの情報を伝送し，分岐点で情報の複製を作成して伝送する（分岐接続）ことにより，通信網上のトラヒックを大幅に減少させることが可能となる。特に，伝送される情報量が多ければ多いほどその効果は絶大となる。このように，分岐接続はマルチキャスト通信の中核をなすものであり，マルチキャスト通信網の研究を行ううえで非常に重要な要素となる。そこで本章では，まずマルチキャスト通信について論じ，高速広帯域通信網の必要性，及びマルチキャスト通信の重要性，特徴について述べる。

マルチキャスト通信網となるべき高速広帯域通信網を実現するための技術として一番最初に挙げられるのが，非同期転送モード（ATM: Asynchronous Transfer Mode）であろう。ATM伝送方式の研究が始まったのは，今から約20年前である。そして1980年代後半から，ATM伝送方式を用いたマルチキャスト手法の研究が活発に行われ始めた。そして現在，既に基盤技術は成熟しつつあり，標準化団体による標準化作業も終盤を迎えていると言っても過言ではない。

また，インターネットにおいても，高速広帯域化の波が押し寄せている。開発当時，3 Mbpsの伝送速度であったイーサネット（Ethernet）は，100 Mbpsが一般的となり，そして1 Gbpsを実現するギガビット・イーサネット（Gigabit Ethernet）へと発展しつつある。また，高速広帯域化と同時に，マルチキャスト通信を実現する研究も盛んに行われている。実際にマルチキャスト通信を可能にする機器を用いて構築された実験網（MBone: Multicast Backbone）において，マルチキャスト通信の実験，検証が行われている。

このように，高速広帯域マルチキャスト通信網を実現するためには，交換機やルータの技術革新や，新しい通信技術の研究が不可欠である。そこで，2.3，2.4では，高速広帯域通信網としてB-ISDNとインターネットをとりあげ，マルチキャスト通信を実現する技術について論じる。

## 2.2 マルチキャスト通信

### 2.2.1 高速広帯域通信網への期待

近年、高速広帯域通信網への期待が一段と高まっている。従来、通信といえば電話、ファクシミリ、データ通信などのような単一メディア（モノメディア）の通信が主流であった。ところが、コンピュータやインターネットの普及により、情報のデジタル化、及び複数メディア（マルチメディア）化がもたらされた。デジタル化されたデータは、電話音声、テレビ映像、絵画、文字データ、さらには音楽データまで、すべてが0、または1の数字に変換されるため、これらの情報メディアがもともとどのような種類であったかは、もはや問題とならなくなった。いかなるメディアも、すべて同一のデジタルデータとして扱えるようになり、同じ通信手段を用いての伝送が期待されるようになった。従来文字データのみであった電子メールは、音声や動画像を添付することが可能となったし、野球やサッカーの試合中継を見ながら活躍している選手の経歴を見たりすることが可能となった。このように、マルチメディア通信は非常に身近なものになりつつある。

インターネットでは、既にマルチメディア通信の魁とも呼べるアプリケーションが多くの人々に利用されている。1993年に登場したWorld Wide Web（WWW）は、比較的簡単な言語であるHTML（Hypertext Markup Language）を用いて記述された文書や画像などを、HTTP（Hypertext Transfer Protocol）と呼ばれる通信方式で同時に伝送するシステムである。インターネット利用者は、Netscape Navigator<sup>(24)</sup>やMicrosoft Internet Explorer<sup>(25)</sup>などのブラウザと呼ばれるアプリケーションを用いて、HTMLで書かれた文書を閲覧することができる。近年では、文書のみならず、動画像や音楽なども同時に見たり聞いたりすることが可能となってきており、Shockwave<sup>(26)</sup>やJAVA<sup>(27)</sup>などの新技術を用いたマルチメディアコンテンツの開発も活発に行われている。さらには、動画像ストリーム伝送も実現されており、RealAudio、RealVideo<sup>(28)</sup>、StreamWorks<sup>(29)</sup>、VDOLive<sup>(30)</sup>などのアプリケーションが存在する<sup>(31, 32)</sup>。このように、WWWのマルチメディア化が進んでいる。

しかし、以上に挙げたマルチメディア通信を実際に利用してみると、画質や音質、転送速度に不満を感じることが多い。実際、ShockwaveやJAVAを用いた文書を閲覧しようとする、データの伝送に数十秒から数分を要することが多い。また、RealVideo、StreamWorksなどの動画像ストリームを受信するためのアプリケ

ーションでは、通信網の伝送速度がそれほど速くないことを考慮して、H.263<sup>(33)</sup>やMPEG1<sup>(34)</sup>などの圧縮手法が用いられているため、画質が犠牲になっている。十分に満足できるほど高速で高精細なマルチメディア通信を行うためには、現在よりも高速で広帯域な通信網が必要となる。

1993年、米国クリントン政権のアルバート・ゴア副大統領により、「情報スーパーハイウェイ (Information Superhighway)」構想が提唱された。それによると、米国では2015年までに各家庭まで光ファイバを敷設するファイバ・ツー・ザ・ホーム (FTTH: Fiber To The Home) を目標とし、米国全土の情報基盤 (NII: National Information Infrastructure) の構築を計画している。米国の計画に触発され、各国においても情報通信基盤整備計画が多数発表されているようである<sup>(6,7)</sup>。なお、これらを表 2.1 にまとめておく。我が国においても、情報通信基盤整備が脚光を浴びており、2010年までにFTTHを実現する計画が既に動き始めている<sup>(8)</sup>。光ファイバは、従来の銅線と比較して高速広帯域で低損失であるため、加入者系まで光ファイバで伝送することによって、これまでの通信速度をはるかに越える通信が実現されようとしている。まさに高速広帯域通信網の実現は目前である。

### 2.2.2 マルチキャスト通信の特徴

前述のとおり、マルチメディア通信は普及の一途を辿っており、将来のメジャートラヒックとなるであろう。また、情報スーパーハイウェイたる高速広帯域通信網が実現したならば、これらのマルチメディア通信はかなり広帯域な動画像を伴うようになると思われる。特に、動画像ストリーム形のサービスでは、この特徴が顕著に現れると思われる。

さて、動画像ストリーム形のアプリケーションでは、そのサービスの性質上、多数の利用者が同時に同じ情報にアクセスする傾向にある。例えば、スポーツの試合やコンサート、会議などの生中継を行う場合などが挙げられる。このように、同じ情報を同時に複数の場所へ伝送するサービスは、一般に同報形サービス、またはマルチキャスト形サービス (Multicast Service) と呼ばれている。マルチキャスト形サービスにおいて、複数の1対1通信接続を用いたとすると、限られた通信網資源を浪費してしまうばかりか、膨大な通信コストが必要となる。

一方、マルチキャスト形サービスでは、発信源からの経路が途中まで同じとなる情報受信者が存在する可能性があるという特徴がある。そこで、このような場合には、共有されている経路上は一つの情報を伝送し、それぞれの経路が分岐す

表 2.1 世界各国における情報通信基盤整備計画

国名	概要等
米国	<p><u>NII 構想</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2000 年までにすべての教室，すべての図書館，すべての病院，診療所を接続</li> <li>● NII 構想の実現に向け，インフラ整備，アプリケーション開発，研究開発を推進する計画に 10 億ドル余を措置（95 年度）</li> </ul>
欧州	<p><u>TEN 構想</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● EU 全域にまたがるネットワークインフラを構築</li> <li>● 94～99 年の 6 年間に EU 予算で約 6,500 億円を措置</li> </ul>
英国	<p><u>ブリティッシュテレコムの取り組み</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 1996 年以降，新規に建設されるすべての住宅地域に光ファイバを敷設</li> </ul>
フランス	<p><u>テリー報告</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2015 年までに全家庭に情報ハイウェイを整備</li> <li>● 情報ハイウェイ構築に向けた 170 のプロジェクトに対し，総額 40 億フラン投資予定</li> </ul>
ドイツ	<p><u>テレコム 2000 計画</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 1997 年までに旧東独の電気通信インフラを旧西独の水準に引き上げ</li> <li>● 総額 600 億マルク（約 4 兆 2000 億円）を投資予定</li> </ul>
韓国	<p><u>超高速情報通信網構築計画</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 公共機関を 2010 年までに，企業，一般家庭を 2015 年までに光ファイバ網で接続</li> <li>● 2015 年までにアプリケーション開発，技術開発に 45.2 兆ウォン（約 5 兆円）を措置</li> </ul>
シンガポール	<p><u>IT2000 計画</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2000 年までに同国をインテリジェント・アイランド化</li> <li>● アジア・太平洋地域におけるビジネス・ハブとしての発展を企図</li> </ul>
マレーシア	<p><u>電気通信に関する国家政策</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 2020 年を目標に高度情報化社会を確立し，世界の情報通信ハブを目指す</li> </ul>

る箇所において情報の複製を作成して下流へ伝送すれば、共有部分のトラヒックを削減することが可能である。同時に、共有部分の通信コストを複数の受信者分で分担できるため、通信コストの削減にもなる。このような接続形態は、分岐接続 (Branch Connection)、またはマルチキャスト接続 (Multicast Connection) と呼ばれ、マルチキャスト通信技術の中核をなすものである。

マルチキャスト形サービスを1対1通信接続を用いて伝送した場合と分岐接続を用いて伝送した場合の例を、図 2.1 に示す。図 2.1 では、交換局 (またはルータ) *B* を分岐点とする分岐接続を用いることで、交換局 (ルータ) *A*, *B* 間の伝送路上トラヒックを  $1/4$  に削減することが可能となる。また、分岐接続は何度でも行うことができるので、さらに交換局 (ルータ) *D* を分岐点とした分岐接続を用いて *B*, *D* 間の伝送路上トラヒックも  $1/2$  に削減することが可能である。このように、分岐接続を用いれば、分岐点よりも上流側において、通信網上の通信トラヒックを大幅に減少させることができ、受信者が多ければ多いほど効果がある。また、通信トラヒックの削減により、通信網資源の有効利用、通信コストの大幅な削減が期待される。同時に、通信網の構築に必要なコストも、1対1通信を使った場合に比較して小さくなると考えられる。このように、分岐接続はマルチキャスト通信の大きな特徴であり、1対1通信との違いでもある。

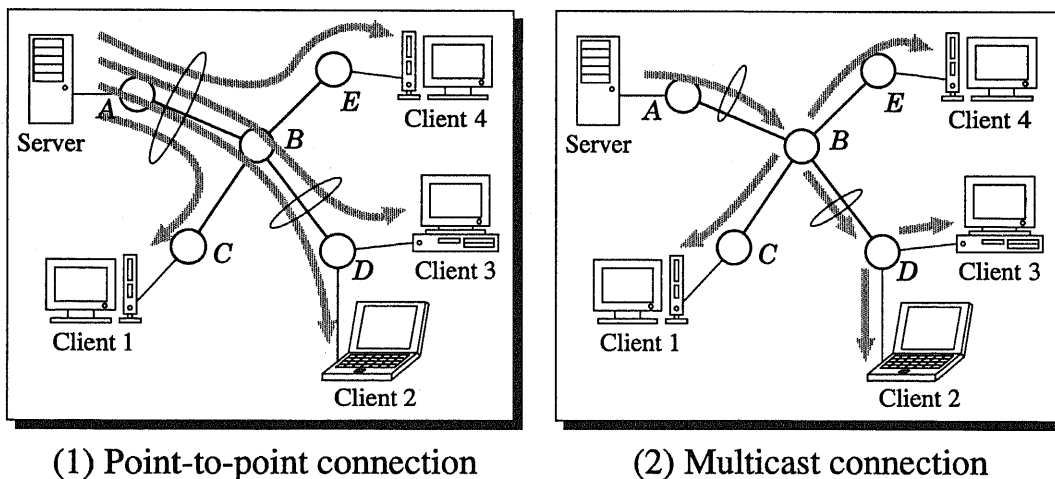


図 2.1 1対1通信接続とマルチキャスト接続の違い



## 2.3 B-ISDN におけるマルチキャスト通信技術

### 2.3.1 広帯域サービス総合デジタル網

#### (1) サービス総合デジタル網

サービス総合デジタル網 (ISDN: Integrated Service Digital Network) は、それまでサービス種別ごとに個別に構築されていた通信網を、すべてデジタル形式で統合し、いろいろなサービスを同じ通信網で、かつ一つの契約のもとに提供するものである。通信網業者にとっては、多様化するサービスを総合化して経済的に通信網を構築することが、利用者にとっては、利用者と通信網との間のインタフェースを国際的な規模で標準化し、多様なサービスを統一的に実現することが、ISDN のねらいである<sup>(35, 36)</sup>。

広範囲にわたる通信を行うためには、いくつかの通信網を相互に接続する必要があるが、そのためには世界的に提供できる標準 (standard) が必要となる。そこで、国際電気通信連合 (ITU: International Telecommunication Union) 下の国際電信電話諮問委員会 (CCITT: The International Telegraph and Telephone Consultative Committee) \*により、ISDN に関する標準化を先行して進めてきた<sup>(37)</sup>。ISDN のユーザ・網インタフェースは、CCITT I.400 シリーズにおいて標準化されており、複数の情報チャネル (Bチャネル) とこれらを制御する共通信号チャネル (Dチャネル) から構成される。基本インタフェースは、64 kbps の Bチャネル2個と 16 kbps の Dチャネルからなる 2B+D で構成されている。また、1.5 Mbps、ないしは 1.92 Mbps が1次群速度インタフェースとされている。

情報通信が社会生活や産業活動などの様々な分野で広く利用されるにしたがって、利用者の通信に対する要求はますます高度化している。例えば、ISDN の普及により、離れた支店間でテレビ会議を実施する企業が増加した。また、ISDN の高速性を生かして、専用線接続やダイヤルアップ接続によるコンピュータ通信も盛んに行われるようになった。しかし、これらの通信に満足できているかという点、必ずしもそうではないのである。筆者もこれらの両方を体験したことがあるが、テレビ会議の映像はまだフレームレート (1秒間に描写されるフレームの枚数) が低くコマ送りのように感じるうえ、極度の圧縮による劣化、とりわけブロッ

\* 1993年3月、ITUの組織改変によりCCITTはなくなり、以降ITU電気通信標準化セクタ (ITU-T: ITU-Telecommunication Sector) にて標準化作業が行われている。

ク歪みと呼ばれる画像の劣化\*\*が目立つ。コンピュータ通信に関しても、通常の電話網にモデムを用いて接続した場合よりも高速になったとはいえ、マルチメディアコンテンツへのアクセスや大きなファイルの転送などではかなりの時間を必要とする。そこで、より高速で広帯域な通信網実現への期待が膨らみはじめている。

## (2) 広帯域サービス総合デジタル網

広帯域 ISDN (B-ISDN: Broadband ISDN) は、従来の ISDN (B-ISDN に対して Narrowband ISDN, N-ISDN と呼ばれている) を広帯域に拡張したものであり、今後出現するであろう多種多様な通信形態、サービスを経済的に効率良く提供するための将来の通信サービスプラットフォームである。N-ISDN では 64 kbps であった基本速度が B-ISDN では 155.52 Mbps となり、約 2,400 倍に高速化されている。

通信トラフィックを伝送する際、伝送速度に応じて順次階層的に多重化されて伝送される。これを、デジタルハイアラーキ (Digital Hierarchy) と呼ぶが、N-ISDN ではその階層構造は世界的には統一されていなかった。例えば、N-ISDN の 1 次群速度は、日本や北米では 1.5 Mbps、欧州では 1.92 Mbps となっており、3 次群以上の速度では日本と北米の間でも違いがあった。これを、図 2.2 (a) に示す。このため、通信網の国際的な相互接続を行う場合には、多重化後の伝送帯域 (ビットレート) を少し高めに設定し、多重化時の原信号に余剰ビットを挿入して、その挿入の頻度を制御することによって各チャネルのビットレートを整合させる「スタッフ同期」と呼ばれる手法が用いられている。これは、非同期多重化であり、交換する場合には基本単位まで分解する必要がある、多重化処理の効率が悪くなる。

そこで、B-ISDN では、N-ISDN での苦い経験を再びしないように、1988 年に同期デジタルハイアラーキ (SDH: Synchronous Digital Hierarchy) インタフェースが CCITT G.707~709 として勧告化された。これを、図 2.2 (b) に示す。SDH の統一により、相互接続の際のデジタル同期が実現され、世界的に統一された。米国では、米国規格協会 (ANSI: American National Standard Institute) 標準となっている同期式光通信網 (SONET: Synchronous Optical Network) にこの SDH を採用し、SDH よりも細かく伝送速度を設定した。なお、SONET の基本速度は、世界で最初の光速度標準である 51.84 Mbps (SDH における STM-0) となっている。

\*\* 離散コサイン変換 (DCT) を用いる圧縮方式では、画像を小さな領域 (ブロック) に分割して処理を行うため、隣接する領域の間に境界線がくっきり出てしまう。

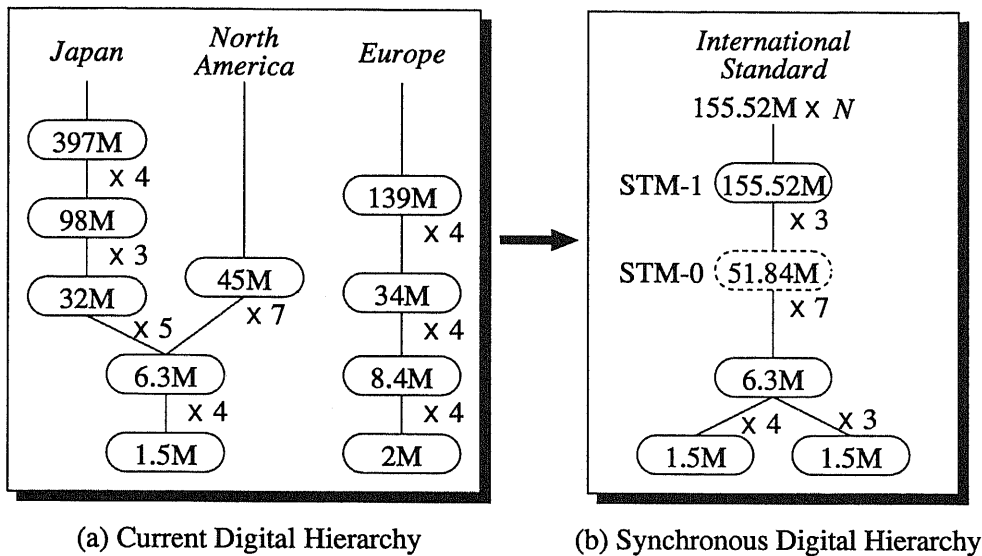


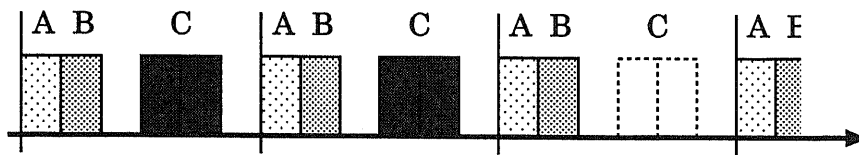
図 2.2 SDH によるデジタルハイアラキーの世界統一 (単位は bps)

このように、B-ISDN では、実際に通信網が構築される前にすべて標準化しておき、相互接続の際の壁をなくそうという動きがある。しかし、国際的標準の設定は、各国、各企業の思惑の相違により、時間がかかりすぎるといった問題がある。実際、ITU-Tにおける標準化勧告は、研究レベルよりも遅れをとっており、B-ISDNの実現を遅らせてきたと言っても過言ではない。そこで、現在では、最新技術を保持する各国の企業間で構成された ATM フォーラム (The ATM Forum)<sup>(38)</sup> という団体によって、標準化が進められている。

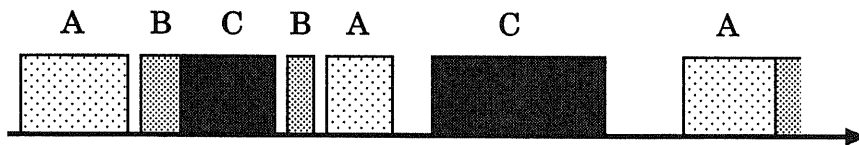
### 2.3.2 ATM 伝送方式

非同期転送モード (ATM: Asynchronous Transfer Mode) は、回線交換方式とパケット交換方式の両方の利点を合わせた方式で、B-ISDN の骨格を形成する技術である<sup>(39, 40)</sup>。回線交換方式は、時分割多重 (TDM: Time Division Multiplexing) 方式を用いた同期転送方式 (STM: Synchronous Transfer Mode) であり、情報は図 2.3 (a) のように周期的に配置されたタイムスロットに合わせて伝送される (位置多重)。交換機では、周期的に現れる信号を交換するので、ハードウェア的に処理することが可能である。一方、周期的に配置されたタイムスロットが割り当てられるため、通信中は伝送速度が固定されてしまい、バースト的に発生する情報に

(a) *STM*



(b) *Packet Switching*



(c) *ATM*

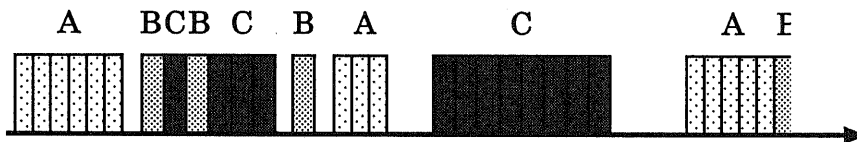


図 2.3 回線交換，パケット交換，ATM

対しては無駄が生じてしまう。

これに対し、パケット交換方式では、図 2.3 (b) のようにパケット長が任意であり、伝送路が空いているときには自由に情報の伝送を行うことが可能である。しかし、交換機にパケットが到着する時刻は周期的ではないため、またエンドツーエンドでの品質確保のために伝送誤り検査を行うなど、プロトコル処理が複雑であるため、ソフトウェアによる制御を行うのが通例である。従って、プロセッサ処理時間の点で限界があり、高速化が困難である。

パケット交換方式の弱点である高速化に対しては、回線交換方式は比較的容易に対応可能である。また回線交換方式の弱点であるバースト状に発生する情報の伝達に対しては、パケット交換方式は非常に適している。この 2 つの伝送方式の利点を生かすのが ATM 伝送方式である。ATM 伝送方式では、パケットと同様に、情報の発生に応じてラベルを格納したヘッダ付きのブロック（セル）を送出することにより、任意の通信速度に対応できる。また、セルを固定長（情報 48 Byte + ヘッダ 5 Byte）とすることにより、ヘッダがインタフェース上で周期的に出現す

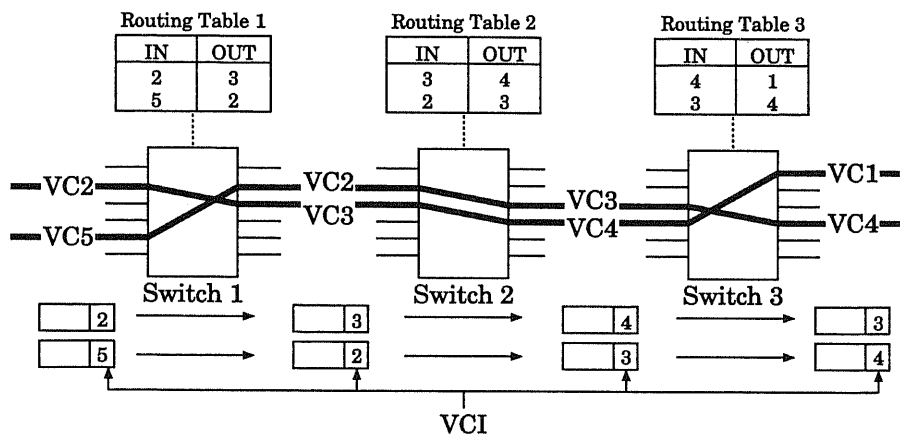


図 2.4 VC による交換

るため、ヘッダ位置の検出は回線交換方式と同様にハード的に処理できる。ATM の伝送路占有方式を、図 2.3 (c) に示す。

回線交換方式では、実際の回線が割り当てられるのに対し、ATM ではバーチャルチャネル (VC: Virtual Channel) と呼ばれる仮想回線が割り当てられる。個々の回線が実際に存在するのではなく、物理回線上に帯域が割り当てられており、これが仮想的に回線に見えるためである。VC は、回線交換方式における回線と同様に、呼ごとに割り当てられる。セルのヘッダには、VC 識別子 (VCI: VC Identifier) が記され、交換機では VCI を読み、交換機内部に保存されている経路選択テーブルに従って交換が行われる。この際、VCI の書き換えが必要となる。VC を用いた場合の交換の仕組みを、図 2.4 に示す。

規模の大きな ATM 網では、VC の数は非常に大きくなる。このような状況下で交換を行うと、呼の生起、終了ごとに各交換機で経路選択テーブルの書き換えが大量に生じるため、遅延が大きくなったり、交換機等の設備コストが増大してしまう。同時に、故障時の経路切替え等、該当する全ての VC ごとに行う必要があり、非常に複雑になる。そこで、回線交換のパスに相当する技術として提案されたのが、「バーチャルパス (VP: Virtual Path)」である<sup>(41, 42, 43, 44)</sup>。VP は、交換機間に張られた仮想パスで、数本の VC を束ねたものとして設定される。VP は、複数の交換局を経由するような経路にも設定することが可能である。交換機は、交換機能以外に回線編集機能 (クロスコネクト機能) を有する。これにより、中継局においては、VC 単位ではなく VP 単位で交換を行うことが可能となる。クロ

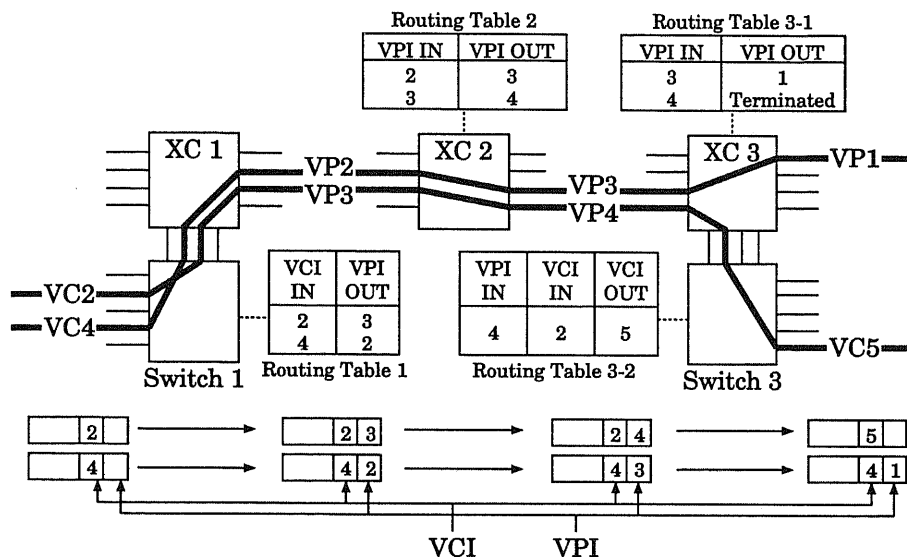


図 2.5 VP による交換

スコネクトでは、セルのヘッダに記された VP 識別子 (VPI: VP Identifier) を読み、クロスコネクトに保存されている経路選択テーブルに従って交換を行う。このとき、VCI は全く無視できるため、呼ごとの交換よりも比較的簡単になる。VP はあらかじめ設定された交換局間的高速パスであるので、呼の設定のたびに VPI 経路テーブルが書き換えられることはない。VP による交換の仕組みを、図 2.5 に示す。

VP は、回線交換方式のパスに相当する技術として提案されたが、実際には回線交換よりも柔軟である。回線交換における多重化では、タイムスロットによる識別を行うため、多重化装置が複雑となる。また、同速度回線の多重化のため、回線収容効率を 0.8 とした場合、5 回の多重を行うと (397 Mbps, 5 次群速度) 収容効率は  $0.8^5 = 0.328$  となり、多重化の度に効率が悪化する。一方、ATM VP の場合、セルを任意の場所にマッピングできるので、多重化装置が簡単になり、かつ任意の速度の多重化が可能であるので、回線収容効率を常に 0.8 に設定することが可能である。また、VP は容量が割り当てられているだけの仮想パスであるので、割り当て容量を自由自在に変化させることが可能である。

### 2.3.3 ATMにおけるマルチキャスト通信技術

本節では、ATM伝送方式においてマルチキャスト通信を実現する基盤技術として、マルチキャスト機能を有する交換機、及びマルチキャスト通信経路選択（マルチキャストルーチング）を取り上げ、その研究動向について述べる。マルチキャスト機能を有する交換機技術は、マルチキャスト通信の特徴である分岐接続を実現するために最も重要な技術であると思われる。また、マルチキャストルーチングについては、通信網の設計を行う上で必要となる。

なお、実際にマルチキャスト通信を実現するためには、非常に多くの技術が必要となる<sup>(40, 45)</sup>。例えば、マルチキャスト通信を行うための呼受付制御（CAC: Call Admission Control）などのシグナリングは最重要事項である<sup>(46, 47, 48)</sup>。これらの技術の多くは、前述のATMフォーラムやITU-Tにおいて既に標準化が行われている。

#### (1) マルチキャスト交換機

マルチキャスト通信において、2.2.2で述べたような分岐接続を可能にするためには、交換機にマルチキャスト機能（Multicast Function）が備わっている必要がある。ATMでは、1980年代半ばからセルフルーチングマルチキャスト交換機の研究が行われている。なお、セルフルーチングとは、交換機に入力される各セルのヘッダ情報を利用し、交換機内で自立分散的に出力回線（出線）を発見できる仕組みのことを指している。交換処理のほとんどをハードウェア的に行うことが可能で、ATMを用いた通信の高速広帯域性を実現することができる。

マルチキャストATM交換機は、コピーランクを用いた構成<sup>(49)</sup>、コピー網を用いた構成<sup>(50, 51)</sup>、完全バス接続構成<sup>(52)</sup>、そして1対1・マルチキャスト分離形構成<sup>(53, 54)</sup>の4種類に分類できる<sup>(55)</sup>。これらの交換機構成にはそれぞれ長所、短所があるが、最も問題となるのが加入者交換機として用いる場合のハードウェア量の増大であろう。加入者交換機では、中継系からの入力回線（入線）数 $N$ が小さく、加入者側への出線数 $M$ が非常に大きくなるため、非対称となる。このため、対称構成（入線数と出線数が等しい構成）の交換機を用いると、使われない回路網が存在し、無駄が生じることになる。そこで、加入者交換機として無駄の少ない交換機構成の研究が盛んに行われている<sup>(53, 56, 57)</sup>。非対称マルチキャスト交換機回路網の特徴は、図2.6に示すように、入線を適当な数に分割し、さらに集

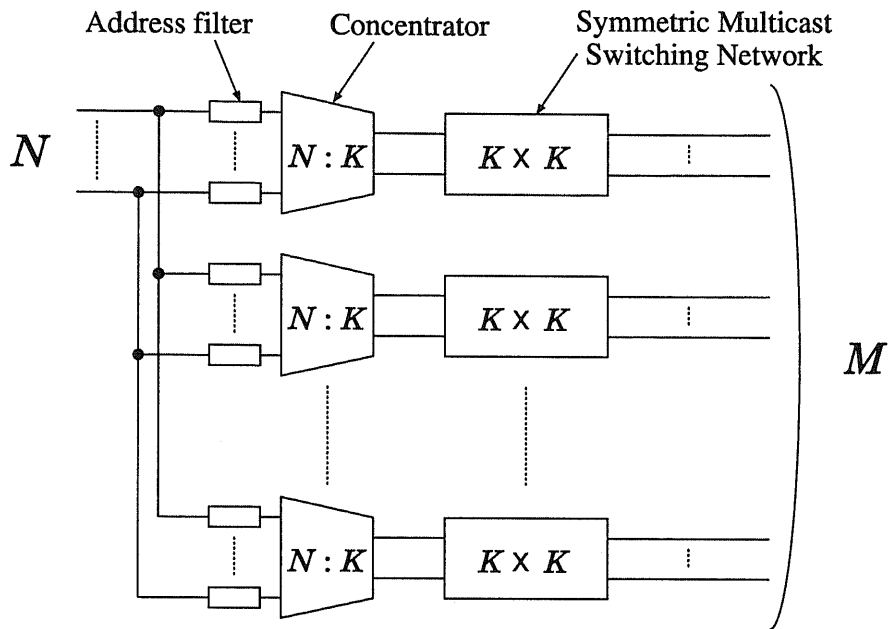


図 2.6 非対称マルチキャスト加入者交換機回路網構成

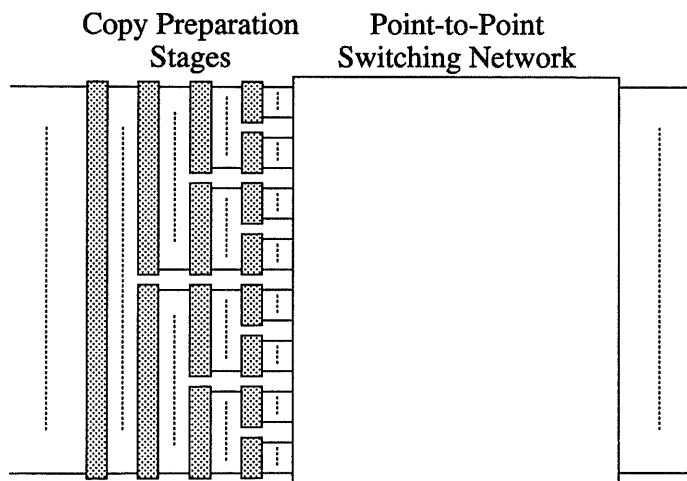


図 2.7 コピー準備網付き中継交換機回路網構成



線 (Concentrator) 機能を用いることで、マルチキャスト機能を有する対称形交換機回路網の大きさを小さくする点にある。本手法により、ハードウェア量を大幅に削減することが可能となる。

また、中継系ではマルチキャスト通信トラヒックが減少する特性を考慮して<sup>(58)</sup>、1対1交換機回路網を利用した中継交換機構成の研究も行われている<sup>(59, 60)</sup>。本構成では、図 2.7 に示すように、1対1交換機回路網の前に「コピー準備網 (Copy Preparation Stages)」と呼ばれる非常に簡単な回路網を数段設置して、中継系マルチキャスト通信トラヒックの交換を行うもので、低廃棄率の実現が可能となっている。交換機ハードウェアの増加量も 11~14 % と小さいため、非常に効果的な構成であると考えられる。

## (2) マルチキャストルーティング

効率的なマルチキャスト通信を行うためには、経路選択手法 (ルーティング) も重要な課題である。1対1通信の場合には、通信を行う2点間の経路を選択すれば十分であったが、マルチキャスト通信の場合には、複数の受信者間を接続する伝送経路 (経路木、マルチキャストツリーと呼ばれる) を構成する必要があり、最適となる解の探索が困難になる。本論文のように通信網を設計する場合においても、ルーティング手法によってとるべき伝送経路が変わるため、マルチキャストルーティングの検討がある程度必要となる。なお、マルチキャストルーティングは、B-ISDN、インターネットのいずれにも共通する技術であるが、ここで述べる研究とインターネットにおける研究では、アプローチの方法が異なる。そこで、ここではインターネットにおけるマルチキャストルーティングの研究に属さないと思われるものについて紹介する。なお、アプローチの違いについては、2.5にて述べる。

一般に、マルチキャスト通信における経路木の探索は、グラフ理論に置き換えて考えられることが多い。交換局 (ルータ) を節点 (vertex)、伝送路を枝 (edge) として得られるグラフ  $G(V, E)$  において、マルチキャスト通信の送信者、受信者で構成される集合  $S(V')$ 、 $V' \in V$  を考える。なお、この集合はマルチキャストグループ (Multicast Group) と呼ばれる。マルチキャスト通信が可能となるためには、 $S(V')$  に属する節点がすべて接続される必要がある。すなわち、 $G(V, E)$  内に  $S(V')$  を要素にもつ木 (Tree) を構成すればよい。

マルチキャスト通信の伝送において、網資源を節約し、通信コストを低くするためには、できるだけ経路木の総延長距離を短くする必要がある。すなわち、ス

タイナー木 (Steiner Tree) を求める必要があり, このような問題は静的マルチキャストルーティング問題 (Static Multicast Routing Problem), あるいはスタイナー木問題 (Steiner Tree Problem) として知られている. スタイナー木問題は NP 完全であるため, 最適解に近い近似解をできるだけ高速に求めることが重要となっている<sup>(61, 62, 63)</sup>.

会社の支店間でのテレビ会議のように, マルチキャストグループに属する交換局 (ルータ) があらかじめわかっている場合には, 前述のスタイナー木問題に帰属して考えることが可能である. しかし, 実際の通信網においては, マルチキャスト通信への参加, 離脱が動的に発生し, マルチキャストグループが動的に変化することも考えられる. 一般に, このような問題は動的マルチキャストルーティング問題 (Dynamic Multicast Routing Problem), あるいは動的スタイナー木問題 (Dynamic Steiner Tree Problem) と呼ばれており, 1988 年の B. M. Waxman による論文<sup>(64)</sup>以来, マルチキャストルーティングの研究の中心になっている.

動的マルチキャストルーティングは, 今現在マルチキャストグループに属していても, 将来的には離脱するかもしれないということが問題を複雑にしている. 例えば, グリーディ (Greedy) アルゴリズムでは, 新規参加交換局 (ルータ) を接続する際に, 経路木までの距離\*\*\*が最短となる経路を探索して接続する<sup>(64)</sup>. よって, 新しい経路木は, 図 2.8 (a-1) のようになる. しかし, ある時点で最適であっても, 次の時点では同図 (a-2) のように最適ではなくなることがある. 図 2.8 (b-1) のように一時的には無駄になると思われる経路木を選択しておく, 次の時点では同図 (b-2) のように最適経路木となる可能性もある. (a-1), (b-1) の状態がどの程度継続するか, また (a-2), (b-2) の状態がどの程度継続するかによって, (a), (b) のどちらの手法の特性が良くなるかが変動する. このように, 動的マルチキャストルーティングでは, それぞれの状態がどの程度の時間持続するかを考慮したうえで経路を選択する必要がある.

しかし, 将来のことを予測することは非常に困難である. そこで, 動的マルチキャストルーティングの研究では, マルチキャスト通信の情報源 (サーバ) からの距離を考慮してルーティングを行う手法が一般的で, 数多くのアルゴリズムが提案されている<sup>(64, 65, 66)</sup>. マルチキャスト通信の情報源に近い交換局 (ルータ) は, その下流で受信されていることを考慮すると, 比較的長時間にわたって経路木に含

\*\*\* 実際の距離を利用するだけでなく, 2点間の遅延時間, 伝送路帯域を利用することも可能である.

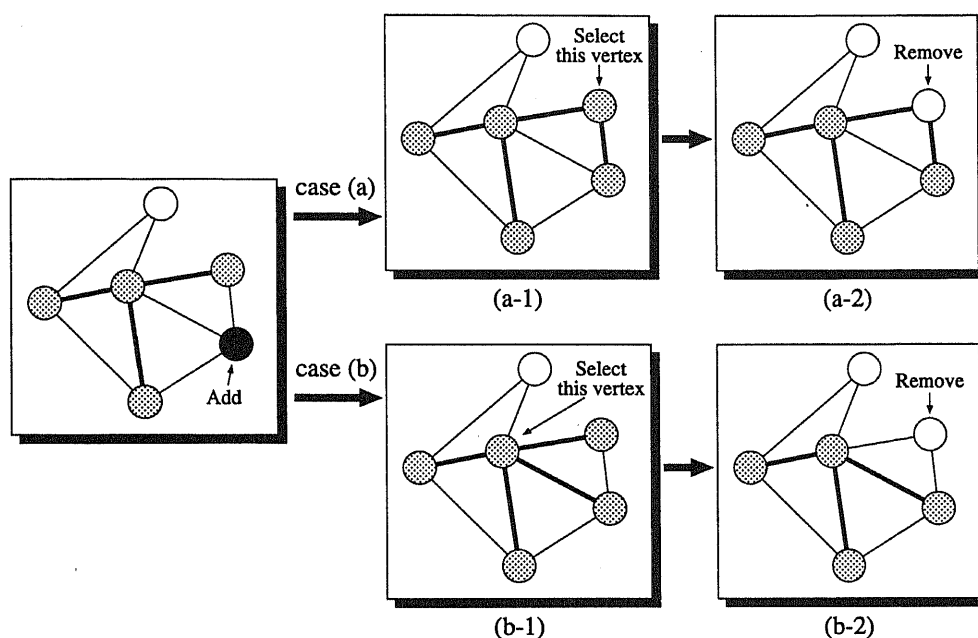


図 2.8 動的マルチキャストルーティング

まれている可能性が高い。本手法は、このような特徴を利用している。距離という要素のみを利用するため、実装が簡単であるという利点もある。また、VTDM (Virtual Trunk Dynamic Multicast) アルゴリズムのように、マルチキャスト通信を行う上で重要だと考えられる箇所を設定し、それらの箇所を接続する仮想回線 (Virtual Trunk) をあらかじめ決定しておく手法も提案されている<sup>(67)</sup>。

各交換局の加入者数 (サブネットワーク内のコンピュータ数)、マルチキャスト通信の受信者数などから将来の動向を予測して経路を選択するアルゴリズムもいくつか提案されている<sup>(68, 69)</sup>。さらには、近年脚光を浴びている階層符号化された情報のマルチキャストルーティングの研究も行われており<sup>(70, 71, 72, 73, 74)</sup>、より効果的な経路選択アルゴリズムを求めて研究が行われている。

## 2.4 インターネットにおけるマルチキャスト通信技術

### 2.4.1 インターネットの発展

冷戦時代の1969年、核ミサイル攻撃で軍のコンピュータ網が一撃で壊滅するのを恐れたアメリカ国防総省高等研究計画局（DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency）は、研究所のコンピュータを分散させて高速回線で接続するパケット交換技術の実用性試験を始めた。当初、この通信網は、UCLA（University of California Los Angeles）、UCSB（University of California Santa Barbara）、SRI（Stanford Research Institute International）、University of Utahの4箇所を接続したものだ。これが、インターネットの起源「ARPANET」の始まりである<sup>(75)</sup>。試験開始から約3年後の1972年には、ARPANET接続地点数は50以上に増え、パケット交換技術が実用に耐えうることが証明された。

実験を行っていく中で、ただ単に幹線でのパケット交換だけでなく、相手先のコンピュータとの間で信頼性の高い通信手段を提供できるような総合的な通信手順（プロトコル）の実験も行われた。そして、1975年にTCP/IP（Transmission Control Protocol / Internet Protocol）が開発され、1982年頃までには仕様が決定された<sup>(76, 77)</sup>。1983年には、ARPANETの正式接続手順としてTCP/IPが採用された。当時、大学や研究所などで、コンピュータのオペレーティングシステム（OS: Operating System）としてBSD UNIXが広く利用されていたが、このOSの内部にTCP/IPが実装されたことで、TCP/IPの普及を助けたと言える。1980年代は、LAN（Local Area Network）、UNIXワークステーション、TCP/IPの急速な普及が進んだ時代であるとともに、多数の大学や企業の研究所が続々とインターネットに接続された時代である。

1993年、インターネットに大革命を起こす技術が発表された。それが「World Wide Web（WWW）」である。WWWは、HTML（Hypertext Markup Language）と呼ばれる言語で書かれた文書をHTTP（Hypertext Transfer Protocol）により伝送するシステムであり、WWWを利用するためのアプリケーションを用いてURL（Uniform Resource Locator）と呼ばれるインターネットの住所（アドレス）を指定するだけで、そこにある情報を閲覧することが可能となった<sup>(78, 79)</sup>。WWWの登場により、コンピュータの専門的知識を有さない一般の人々も簡単に利用できるようになった。時期を同じくして、電話回線やISDN、専用線などにおける1対1通信プロトコル（PPP: Point-to-Point Protocol）<sup>(80)</sup>を利用してイン

ターネット接続サービスを行うプロバイダ（ISP: Internet Service Provider）が登場し、電話回線を用いたモデム経由のインターネット接続が可能となった。これにより、一般の人々が家庭からインターネットを利用できるようになり、インターネット利用者の爆発的増加をもたらした。インターネットに接続されている全世界のホストコンピュータ数は、1997年7月には2,000万台に迫り、カウントできないコンピュータも加えると1998年1月時点で約3,000万台となっている。なお、これらのコンピュータ数の推移を図2.9に示す<sup>(81)</sup>。

TCP/IPがこれほどまでに普及したのは、単にTCP/IPが優れていて使いやすいプロトコルであるといった理由ではなく、非常にオープンであったためであろう。TCP/IPに関する議論は、IETF（Internet Engineering Task Force）<sup>(82)</sup>で行われているが、このIETFにはだれでも参加することができる。また、IETFでの議論は、通常電子メールのメーリングリストを用いて行われている。このように、世界中のインターネット利用者は、だれでも、そしてどこからでも議論に参加できるのである。また、IETFでは、標準化しようとしているプロトコルをRFC（Request For Comments）と呼ばれる文書にして、インターネット上で無料で公

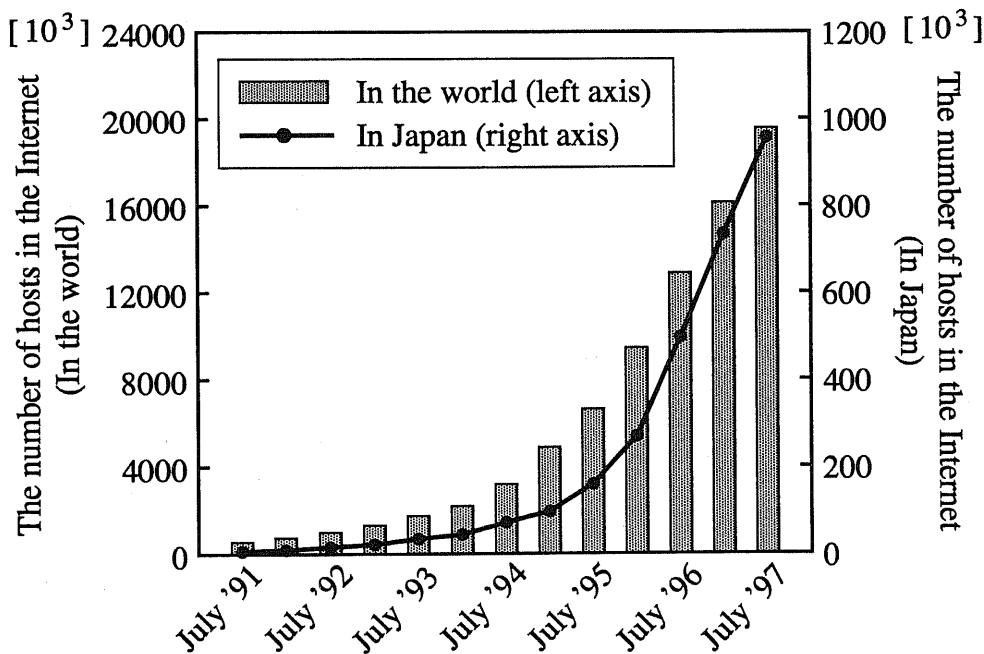


図 2.9 インターネットに接続されたホストコンピュータ数の推移

開している。ITU や ISO (International Organization for Standardization), ATM フォーラムによって標準化された文書が有料であることを考えると、インターネットのオープン性は非常に顕著である。

また、TCP/IP は「仕様を考えるよりも先にプログラムが開発された」と言われるほど、開発重視の姿勢でプロトコルが決定した。すなわち、プロトコルの仕様を決めることよりも、互いに通信できることを最優先に考えていたのである。このようなユニークな考え方は、現在でも維持されている。例えば、新しいプロトコルを作成する場合、仕様がだいたい決まったところで相互接続の実験が行われる。そして、問題があった場合には議論を行い、プログラムやプロトコル、文書を修正する作業を行う。これら一連の作業が何度も繰り返され、最終的に標準化されるのである。このように、インターネットにおける新技術の開発は「とりあえず実装して、それから問題点を修正する」といったスタンスで行われている。

このように、実装優先、電子メールを用いた議論、RFC の無料公開制度などにより、インターネットにおける技術は瞬く間に進化を遂げた。そして、今も止まることなく進化を続けているのである。

## 2.4.2 インターネットの高速広帯域化

### (1) ギガビット・イーサネット

大学の研究室や企業の研究所など、比較的小規模なコンピュータ通信網は LAN (Local Area Network) と呼ばれるが、LAN の構築にはデータリンク<sup>†</sup>としてイーサネット (Ethernet) が用いられることが多い。イーサネットは、1970 年代に米国ゼロックスパロアルト研究所 (Palo Alto Research Center, Xerox Corporation) で開発された<sup>(83)</sup>。開発当時のイーサネットは、3 Mbps の伝送速度をもっており、以下のような仕様であった。なお、以下の 2~4 の仕様は、CSMA/CD (Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection) と呼ばれており、現在のイーサネットにも共通する特徴である。

1. 複数の通信インタフェースが 1 本の同軸ケーブルを共有する。
2. 各インタフェースは、他のインタフェースが伝送路にデータを送信していないかを常時監視する (Carrier Sense)。

---

<sup>†</sup> 直接接続された機器間で通信するためのプロトコル。

3. 各インタフェースは、伝送路があていれば他のインタフェースにデータを送信できる (Multiple Access) .
4. 複数のインタフェースが同時にデータを送信して衝突が発生した場合、それを検知してデータを再送信する (Collision Detection) .

1985年に、LANの標準化機構であるIEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.) 802委員会において、802.3規格として標準化された。それから10年余りの間に、イーサネットは10Base 2, 10Base Tと進化し、LAN構築時の労力が軽減されただけでなく、伝送速度が100 Mbpsまで向上した100Base TXなどが規格化され、一般的に用いられるようになってきた。そして今、ギガビット・イーサネット (Gigabit Ethernet) が注目されている。

ギガビット・イーサネットは、1996年に複数の機器販売企業 (ベンダ) から構成されるギガビット・イーサネット同盟 (Gigabit Ethernet Alliance) によって提唱された。基本的な考え方は、物理層にファイバチャネル (Fiber Channel) を用いることにより、CSMA/CD方式を保持したまま伝送速度を1 Gbpsにするというものである。伝送媒体として光ファイバケーブル、あるいは平衡型シールドケーブル (Shielded Balanced Cable) を用いる規格は1000Base Xと呼ばれ、1998年6月にIEEE 802.3zとして標準化を終えた。また、既存のツイストペア (Unshielded Twisted-Pair) ケーブルを用いる1000Base Tについては、IEEE 802.3abとして標準化が進められている。

1000Base Xは、用いる光源の波長などの違いにより3種類に分類される。最大ケーブル長は、平衡型シールドケーブルを用いた場合 (1000Base CX) には25 mであるが、光ファイバケーブルならば、ファイバ径62.5  $\mu\text{m}$  のマルチモードファイバを用いた場合 (1000Base SX) で260 m、ファイバ径9  $\mu\text{m}$  のシングルモードファイバを用いた場合 (1000Base LX) で3 kmにまで伸びる<sup>(75)</sup>。よって、従来であればFDDI (Fiber Distributed Data Interface) やATMを用いて接続していた箇所、例えば比較的大きな研究所すべてを接続する場合などにも、ギガビット・イーサネットを用いることが可能となっている。しかも、ギガビット・イーサネットは、既存のイーサネットとの親和性もよく、なおかつFDDIやATMに比較して低価格で実現できるため、企業や大学などの研究機関の基幹網において今後多数採用されると考えられる。

## (2) 光インターネット

2.4.1 で述べたように、インターネットは急速に普及している。このため、基幹回線の容量増大に対する需要も著しく増大している。このような要求に答える手段が光通信であることに対しては、もはや疑う余地はない。さらに、近年の波長分割多重 (WDM: Wavelength Division Multiplexing) 技術により、さらなる高速化が期待されている<sup>(1, 2)</sup>。

現在のインターネット基幹回線では、ATMやSONET/SDHを利用する「IP over ATM」方式が用いられている (SONET, SDHについては、2.3.1を参照して頂きたい)。すなわち、データリンク層としてATMが、物理層としてSONET/SDHが用いられており、IPパケットはATMセルに分解され、ATMセルはSONETやSDHのハイアラキに基づいて光ファイバ上に多重化マッピングされている。よって、これらの基幹回線は既に光化が行われており、十分高速化しているといえる。しかし、ATM, SONET/SDHの技術は、元来音声トラヒックの伝送を前提としており、インターネットプロトコル (IP) との親和性が非常に悪い<sup>(84, 85)</sup>。

まず、IP over ATM方式であるが、ATMは接続確保形 (Connection Oriented) サービスを前提としているため、現在の利用方法は、固定帯域をもつ半永久VC (PVC: Permanent VC) を用いた1対1接続の形がとられている。複数のATM交換機間をPVCを用いて接続し、複数の経路をもたせようとする、それらの帯域は独立に割り当てられるため、PVC間での統計多重効果が得られない。これを回避するために、ATM上でIPのような接続非確保形 (Connection Less) サービスを実装しようとする、それなりのオーバーヘッドを必要とする。また、2.3.2で述べたように、ATMのセル (パケット) 長は53 Byteとしているが、このうちATMヘッダが5 Byteを占めているため、約10%の性能低下となる。物理層にSONET/SDHを用いて光ファイバへのマッピングを行うと、多重化によるオーバーヘッドが追加されてしまう<sup>††</sup>。さらに、IPの最小パケット長は64 Byteであるため、ATM転送を行うためには二つ以上のATMセルに分割する必要があるが、これらのいずれか一つでも欠落すれば、IPパケット全体を再送しなければならない。

ATMを介さずにIPパケットを直接SONET/SDHフレームにマッピングする「IP over SONET/SDH」ならば、上記の問題を比較的簡単に解消でき、通信効率を上げることが可能である<sup>(84, 86)</sup>。しかし、IP over SONET/SDHにも問題点は存在

<sup>††</sup> これら一連の問題は、セルタックス (Cell Tax) と呼ばれている。



する。まず、伝送路上を移動するすべてのデータがIPでなければならず、IP over SONET/SDHを利用する際の大きな欠点となる。また、SONET/SDHは時分割多重(TDM)による多重化を行うが、この際に付与されるヘッダの大きさが3%程度になってしまう。ギガビット、テラビット(Terabit)の基幹伝送を考えれば、このオーバヘッドは無視できない。

そこで、現在注目されているのが、「光インターネット(Optical Internet)」である。1998年2月、カナダ政府は5,500万米ドルを投じて世界初の光インターネットを構築すると発表した<sup>(87)</sup>。インターネット技術で先行する米国に対抗するために打ち出された「CA\*net 3」と呼ばれるこの光インターネットは、従来のATMやSONET/SDHを通じて光ファイバを利用するのではなく、IPを直接波長分割多重光信号にマッピングする「IP over WDM」技術を採用した次世代のインターネット基幹網である。但し、現在のところまだ企画段階であり、ネットワーク層のIPと仮想的な光パスを提供する(すなわち伝送媒体である)WDMの間のデータリンク層について言及されておらず、まだ課題が残されている。

我が国においても、「IP over Glass」と呼ばれるプロジェクトが進行している<sup>(85)</sup>。本プロジェクトは、IPを光ファイバ上で高速かつ効率的に伝送するためのプロトコルを開発、実装することを目的としている。本方式では、現行のIPバージョン4(IPv4)のみならず、IPバージョン6(IPv6)を始めとする各種プロトコルに対応する。また、WDMの利用を考えており、IPとWDMによる仮想的な光パスの間のデータリンク層伝送方式の開発が期待される。

なお、光ファイバを使うデータ通信は、OIF(Optical Internetworking Forum)と呼ばれる団体によって推進されている<sup>(88)</sup>。

### 2.4.3 インターネットにおけるマルチキャスト通信技術

#### (1) Multicast Backbone

IETFの会議模様をインターネット上でマルチキャストすることを機に、1992年よりMBone(Multicast Backbone)と呼ばれる仮想テストベッド上において、マルチキャスト通信に関する実験が開始された。現在、MBoneはマルチキャスト通信技術の開発と新しいアプリケーションの試験に利用されている。2.4.1で述べたように、インターネットの世界では標準化よりも実装が優先されるため、現時点で既にマルチキャスト通信が可能となっている<sup>(89)</sup>。なお、インターネットにお

けるマルチキャスト通信は、一般に「IP マルチキャスト」と呼ばれている。

MBone は、インターネット上に構築されたマルチキャスト通信可能な仮想通信網である。このため、マルチキャスト通信のためのパケットが IP マルチキャストをサポートしない機器を通過することがありうる。そこで、MBone ではトンネリング (Tunneling) と呼ばれる技術が用いられている<sup>(90)</sup>。すなわち、インターネットにおいて、IP マルチキャストをサポートした機器や LAN の間を、「トンネル」という仮想的な 1 対 1 通信パスで相互接続している。マルチキャスト通信用のパケットは、トンネルの入口で「IP in IP プロトコル」によりカプセル化され、通常の 1 対 1 通信パケットとしてトンネル、すなわちインターネット内を通過する。カプセル化されたパケットは、トンネルの出口、すなわち IP マルチキャストをサポートした機器や LAN に到達したところで、マルチキャストパケットに復元される。本手法により、MBone への参加は簡単になり、IP マルチキャストの普及は急速に進んだ。

## (2) IP マルチキャストグループ管理

コンピュータ A がマルチキャスト通信に参加していると仮定する。また、このマルチキャスト通信は、LAN (サブネットワーク) の外側との接続を必要とする と仮定する。サブネットワークの内側と外側を接続しているのがルータであるが、もしコンピュータ A がこのマルチキャストグループに含まれていることをルータが知らなければ、サブネットワークの外側から届いたマルチキャストパケットはコンピュータ A まで到達しないことになる。また、逆にコンピュータ A から送信されたマルチキャストパケットは、サブネットワークの外側へ出力されないことになる。このように、ルータは、管轄サブネットワーク内のどのコンピュータがマルチキャストグループに含まれているかを常に保持しておく必要がある。これが、マルチキャストグループ管理プロトコル (IGMP: Internet Group Management Protocol) である<sup>(91, 92, 94)</sup>。

IGMP では、サブネットワーク内に存在する IP マルチキャストに対応した 1 台のルータ (マルチキャストルータ) が問合せルータ (Querier) に選ばれる。問合せルータとなったルータは、直轄のサブネットワークにある全ホストコンピュータに対して、定期的に IGMP 問合せ (Query) メッセージをマルチキャスト送信する。各ホストコンピュータは、問合せメッセージを受信したら、自分が属するマルチキャストグループに対して、それぞれ一つの IGMP 報告 (Report) メッセージ

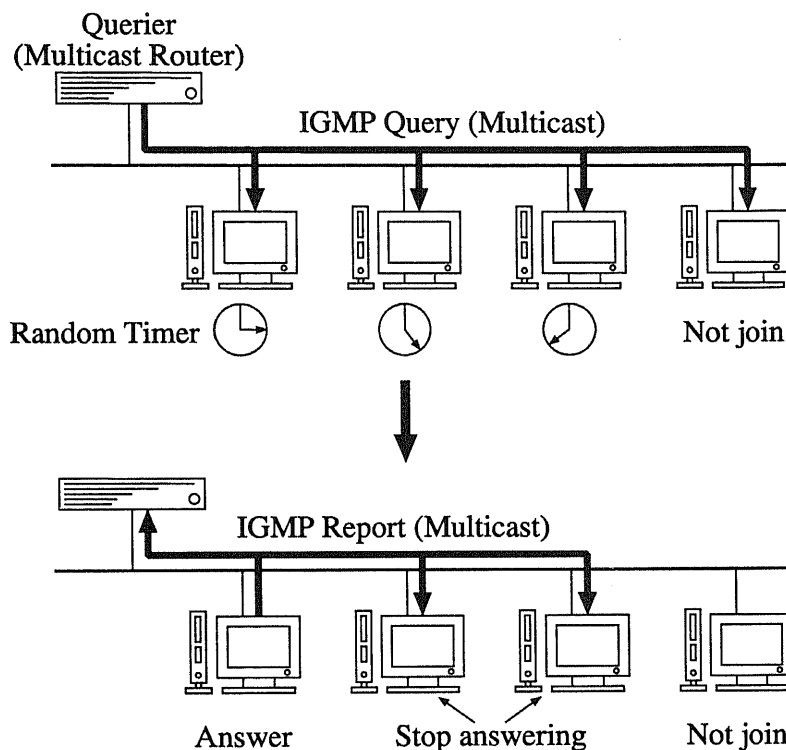


図 2.10 IGMP のメカニズム

を送信する。この際、一度に複数のコンピュータからの報告メッセージが送信されないように、ランダム時間だけ遅らせて送信する。また、報告メッセージは、マルチキャストパケットとして送信し、同一マルチキャストグループに属する他のコンピュータは、報告メッセージを受信したら自分自身のメッセージの送信をとりやめる。このようにすることで、網内の IGMP パケットを減少させている。なお、IGMP のメカニズムを図 2.10 に示す<sup>(93)</sup>。このように、IGMP は、ルータとその管轄内 LAN に存在するコンピュータの間においてマルチキャスト伝送を行うためのプロトコルである。

### (3) IP マルチキャストルーティング

(2) で述べた IGMP は、LAN 内におけるルータ—コンピュータ間のプロトコルであり、ルータ同士の通信には使えない。そのため、インターネット上のルータ—ルータ間の通信には、別途マルチキャストルーティングプロトコルが用いられる。

IPマルチキャストのためのルーティングプロトコルは、その用途によって「密モード (Dense Mode)」と「疎モード (Sparse Mode)」の2種類に分類される。密モードは、マルチキャストグループに属するコンピュータがインターネット上に密に分布していて、帯域も十分に確保されていることを仮定したプロトコルである。マルチキャストグループに属するコンピュータ数が多いほど、効果的に働く。一方、疎モードは、マルチキャストグループに属するコンピュータが広く疎らに存在している場合や通信帯域が細い場合に有効である。すなわち、より広範囲にわたるIPマルチキャストを可能にするためのプロトコルであると考えられる。

密モードのルーティングプロトコルとしては、DVMRP (Distance Vector Multicast Routing Protocol) <sup>(95)</sup>, MOSPF (Multicast Extensions to Open Shortest Path First) <sup>(96)</sup>, PIM-DM (Protocol Independent Multicast, Dense Mode) <sup>(97)</sup> などがある。DVMRPは、最初に開発されたIPマルチキャストを行うためのルーティングプロトコルで、MBoneで主として使われている。そこで、DVMRPを例にとって密モードプロトコルの動作概要を説明する。なお、MOSPFやPIM-DMでも、基本動作はほとんど同じである。

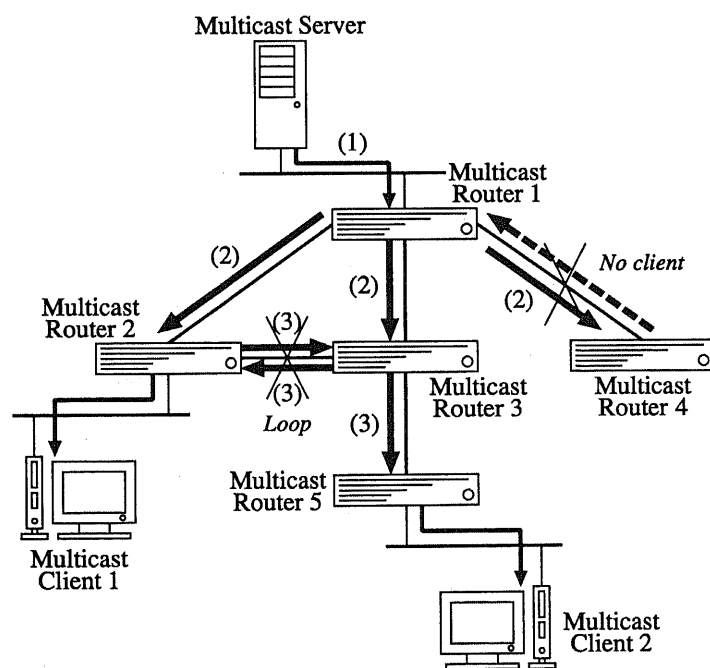


図 2.11 DVMRP の動作例

DVMRPは、接続されているマルチキャストルータすべてに情報を伝搬させ、不要な経路を切り取っていく手法をとる。具体的には、自分に情報を送ってきた上流のルータを除くすべての隣接ルータに対して、送信元のIPアドレスと宛先のマルチキャストIPアドレスを送出する。その情報を受信したルータは、同様に上流ルータ以外のすべての隣接ルータにこの情報を送る。このような情報の伝送リレーは、末端のマルチキャストルータにたどり着くまで続けられる。もし、末端のルータにマルチキャストグループに属しているコンピュータが存在しない場合や、ループが生じるような場合には、経路を無効化する。これを繰り返すことで、不必要な経路がすべて削除され、最終的にマルチキャスト経路木が形成される。なお、DVMRPの動作例を図2.11に示す。このように、DVMRPにより作成される経路木は、サーバと各受信コンピュータ間の最短経路により構成される(SPT: Shortest Path Tree)。

受信者の参加、離脱が発生する動的環境下では、定期的に経路木を構成しなおさなければならない。前述のDVMRPでは、そのたびに経路木作成用のトラヒックが発生し、通信網全体に及ぶため、帯域資源を浪費してしまう。そこで、受信者

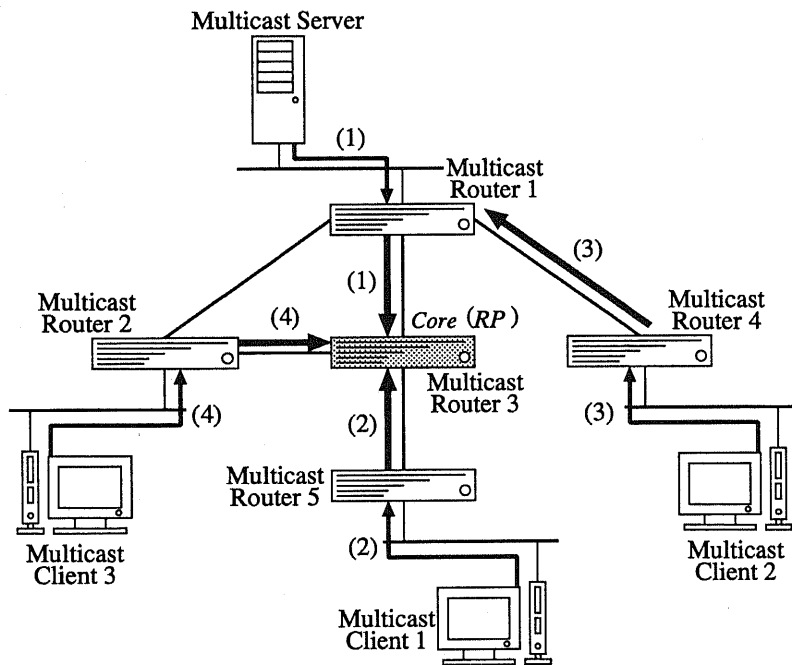


図 2.12 CBT の動作例

が広くまばらに存在している環境や、帯域が小さい環境で利用するプロトコルが必要となる。これが疎モードである。疎モードのルーチングプロトコルとしては、CBT (Core Based Tree) <sup>(98)</sup>, PIM-SM (PIM, Sparse Mode) <sup>(99)</sup>などがある<sup>(100)</sup>。

密モードのルーチングプロトコルは、サーバ側から経路を決定していくのに対し、疎モードは受信コンピュータ側から経路を決めていく。マルチキャストパケットを受信する必要があるルータは、あらかじめ設定されたルータに向けて経路を確立していく。なお、このあらかじめ設定されたルータを、CBTではコア (Core) と呼び、PIM-SMではランデブーポイント (RP: Rendezvous Point) と呼んでいる。コアへの経路の途中で、既に作成された経路木にぶつかった場合には、経路の確立をそこで中止し、中止するまでに確立した経路を使用する。さらに、PIM-SMの場合には、確立した経路をより短いほうへ接続しなおす機能も追加されている。なお、CBTの動作例を図2.12に示す。このように、送信側、受信側ともコアまでの経路を確立すれば、そのマルチキャストグループに参加している全受信コンピュータを一つの経路木で接続することが可能となる。また、経路木の定期的な更新が不要であるので、密モードのようなトラヒックの増加を防ぐことが可能である。

但し、現行のCBT (バージョン2)では、マルチキャストグループ一つについてコアは1個であるため<sup>†††</sup>、このルータへのトラヒック集中は避けられない。そこで、複数のコアを用いるCBT拡張プロトコル (Ordered CBT) などが提案されている<sup>(101)</sup>。コアを複数にすることで、負荷分散が実現されるだけでなく、故障時の影響を最小限に抑えることが可能である。

## 2.5 むすび

通信のマルチメディア化に伴い、高速広帯域通信網実現への期待が膨らんできた。同時に、そのような広帯域マルチメディア通信を効率的に伝送する技術として、マルチキャスト通信が注目されはじめた。そこで、本章では、高速広帯域通信網の必要性、及びマルチキャスト通信の重要性について、世界各国の政策等も織りこみながら論じた。また、広帯域マルチキャスト通信網を実現するための基盤技術について、現在の研究動向を述べた。

高速広帯域マルチキャスト通信網を実現するための技術として一番最初に挙げ

<sup>†††</sup> PIM-SMには、複数のRPを自動的に設定できる機能が既についている。

られるのは、やはり ATM 伝送方式であろう。2.3 では、ATM を用いたサービス総合網である B-ISDN について触れ、B-ISDN の背景、及びマルチキャスト通信を実現するための ATM 交換機技術やルーティングアルゴリズムの研究動向について述べた。また、近年のインターネットの普及に伴い、インターネットにおいても高速広帯域化の波が押し寄せている。そこで、2.4 では、インターネットの高速広帯域化技術、及びマルチキャスト通信技術の現状について述べた。これらの技術の中には、各社の交換機、ルータ製品に既に実装されているものもあり、マルチキャスト通信を実現する基盤技術は成熟しつつある。

B-ISDN は、各国の通信網を相互接続することに注目していたため、何よりも標準化を優先して研究開発が行われてきた。一方、インターネットは、「とりあえず利用できる」ことが最優先され、実装を中心に反映してきた。インターネット全盛である現在、B-ISDN は過去のものとなることが多いが、このような研究開発のポリシーの違いが明暗を分けたものと思われる。しかし、必ずしも現状のインターネットの技術が優れているとは思えない。例えば、マルチキャストルーティングプロトコルであるが、2.4.3 (3) で述べた DVMRP や CBT などによって作成される経路は、サーバと受信コンピュータ間の距離（遅延）を最小にする最短経路ベースの経路木である。これは、マルチキャストルーティングプロトコルが現在の 1 対 1 通信のルーティングプロトコルをベースに拡張されているためであると思われる。実装優先のインターネットでは、このような手法を用いざるを得ない。しかし、最短経路ベースの経路木では、木全体の通信コストが大きくなってしまいう傾向がある。一方、2.3.3 (2) で述べたように、B-ISDN の世界、すなわち実装上の問題はとりあえず無視できると仮定して検討されているルーティングアルゴリズムは、経路木全体の通信コストを最小化する方向で検討されている。これらの両方の技術、すなわち、経路木全体の通信コストを小さくし、なおかつ実装可能な技術の研究も存在する<sup>(74)</sup>が、まだまだこれからといった感がある。

いずれにせよ、高速広帯域マルチキャスト通信網実現に向け、一歩ずつ着実に進んでいることは疑う余地がない。次章からは、本論文の主題である効果的なマルチキャスト通信網構成について研究を進める。





## 第 3 章

# 大規模マルチキャスト通信網の 最適階層構成

### 3.1 まえがき

2.2.1 で述べたように、1993年の米国クリントン政権によるNII構想以来、情報通信の発展への期待は世界的規模で広がっており、高速広帯域通信網インフラストラクチャの整備が急務となっている。このような新しい通信網インフラを構築する際には、網形態の検討が不可欠であり、最適網形態に関する検討は従来より重要な課題となっている(9, 10, 12, 13, 14)。

現在の我が国のデジタル網は、1対1通信である電話トラフィックが対象であり、網構成コストや信頼性の面を考慮して、メッシュスター2階層構成となっている。一方、高速広帯域通信網が実現されると、その高速性を利用した種々の通信サービスの提供が予想され、従来の電話、ファクシミリなどのような1対1通信サービスのほかに、テレビ放送に代表されるようなマルチキャスト通信サービス等が開始されることになり、通信と放送が融合されると言われている<sup>(36)</sup>。マルチキャスト通信サービスの多くは映像を伴うものであり、これらのサービスは非常に広帯域であるため、マルチキャスト通信サービスが網内のトラフィックのかなりの部分を占めると考えられる。

マルチキャスト通信サービスの伝送において、情報源から受信者への1対1接続によって通信を行うと、限られた網資源を浪費してしまい、しかも膨大な通信コスト、網設備コストがかかることになるので、2.2.2 で述べた分岐接続が用いられる。しかし、マルチキャスト通信の接続形態は、従来の1対1通信の場合とは全く異なるものであり、従来どおりの網形態ではサービスの品質劣化や網構成にかかる費用が増大する恐れがある。よって、マルチキャスト通信トラフィックの特徴を十分考慮したうえで通信網インフラの構築を行う必要がある。そこで本章では、我が国を覆うような非常に広範囲にわたる大規模マルチキャスト通信網を構築する際の最適構成について検討を行う。

一般に、通信網の最適構成を求めることはNP完全であることが知られている。広帯域通信網構成の研究においても、遺伝アルゴリズム(GA: Genetic Algorithm)や焼きなましアルゴリズム(SA: Simulated Annealing)などの発見的手法を用いたものが多々存在する<sup>(14, 16, 20, 21, 102, 103)</sup>。一方、広域通信網では、通信網の運用や管理等の観点から、比較的簡単なトポロジーを組み合わせて構成されている場合が多い<sup>(9, 10, 35)</sup>。本論文における研究では、広域通信網の最適化にターゲットを限定し、比較的簡単な幾何学的トポロジーの組み合わせによる最適通信網構成につ

いて検討する。

また、昨今の技術の進歩は非常に速く、将来の交換機コスト、伝送路コスト等は大幅に変化することが予想される。当然、通信トラヒックも変化するであろう。これに伴い、経済的に最適な網構成も変化していくと考えられる。本章では、通信網の簡単な幾何学モデルを用いて、これらの価格関数やマルチキャスト通信サービスの割合が変化した場合の最適なマルチキャスト通信網の形態を明らかにする。

## 3.2 定量的評価のためのモデル

### 3.2.1 交換局配置モデル

日本列島の細長い形状にあった長方形の幾何学モデルを、以下のとおり設定する<sup>(9,10)</sup>。図 3.1 に階層構成のイメージ図を示す。

1. 交換局は現行のデジタル網に近い値をとり、1,800 局（縦 15 列，横 120 列）とする。
2. 交換局は座標系の格子点に配置し、交換局間の距離は 15 km とする。なお、長方形の幾何学モデル全体の面積は、405,000km<sup>2</sup> となる。
3. 通信網は階層的に構成することとし、各層は下位（加入者側）から第 1 階層（1st layer）、第 2 階層（2nd layer）、第 3 階層（3rd layer）と呼ぶ。また、それらの階層にある交換局を、それぞれ第 1 階層交換局、第 2 階層交換局、第 3 階層交換局とする。通信網が 2 階層構成となる場合には、単に下位層、上位層とし、それらの階層に属する交換局を下位局、上位局とする。
4. 第 2 階層交換局は第 1 階層交換局を下位層としてもつ。また、一つの第 2 階層交換局がもつ第 1 階層交換局数は可変である（15～75 局）。
5. 同様に、第 3 階層交換局は第 2 階層交換局を下位層としてもち、一つの第 3 階層交換局がもつ第 2 階層交換局数は可変である（1～60 局）。なお、この数が 1 局の場合には、事実上 2 階層構成となる。
6. 異なる階層の交換局が同位置にある場合には、両方の交換局が同一地点に存在すると考え、二つの交換局間の距離は 0 であるとする。

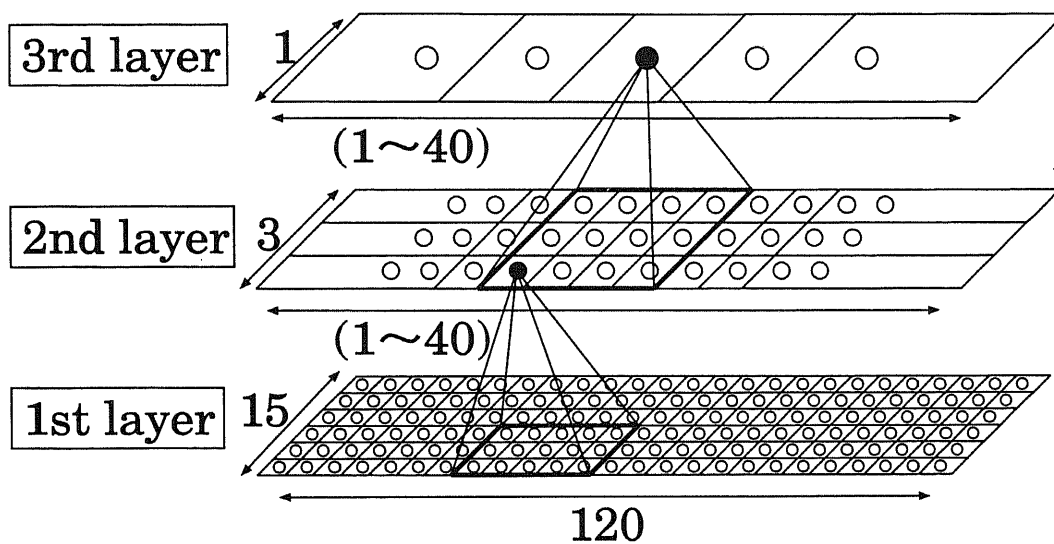


図 3.1 階層構成イメージ図

7. 異なる交換区域にある交換局どうしを接続する回線（斜め回線）は、存在しないと仮定する。

### 3.2.2 人口分布モデル

人口分布の違いが網構成に与える影響を調べるため、図 3.2 のような 3 通りの分布を考える<sup>(9, 10)</sup>。この際、計算を簡単にするために、 $y$  軸方向は一様分布であるとする。また、総人口が実際の我が国の人口になるようにする。

#### (1) 一様分布 (Flat)

我が国の総人口は約 126,000,000 人であるので、それらを一様に分布させ、交換局当りの収容人口を 70,000 人とする。これを図 3.2 (a) に示す。

#### (2) 1 極集中形 (Center concentrated)

図 3.2 (b) のように、中央に人口が集中している分布である。現在の我が国における人口密度比（関東地区と東北・北海道地区の比）を考慮し、最大収容人口と最小収容人口の比を 10.0 とする。

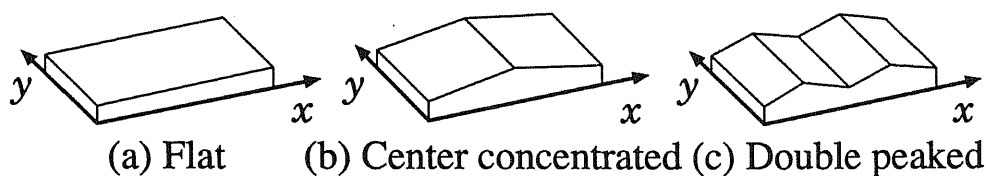


図 3.2 人口の地域的分布

### (3) 2 極集中形 (Double peaked)

図 3.2 (c) のように、2 点に人口が集中した形である。1 極集中形の場合と同様、最大収容人口と最小収容人口の比を 10.0 とする。

また、本章における検討では、2 人に 1 台の割合で受信端末が存在すると仮定する。

### 3.2.3 サービスモデル

将来の広帯域通信網においては、多種多様な通信サービスが現れることが予想される<sup>(104, 105, 106, 107)</sup>。テレビジョン放送のように情報を垂れ流し的に伝送するもの、ビデオオンデマンドのように加入者からの要請に従い伝送を行うもの、情報検索サービスやテレビショッピング等のように、対話形伝送を伴うもの等とさまざまである。このような多種多様なサービスを大きく分けると、マルチキャスト通信サービスと 1 対 1 通信サービスの二つに分類できると考えられる。なお、詳しい数値設定については、3.4.1 で述べる。

#### (1) マルチキャスト通信サービス

前述のとおり、マルチキャスト通信サービスでは、分岐接続機能により伝送路のトラフィックを大幅に減少させることができ、同時に伝送コストも削減することが可能である。よって、映像を伴うサービスのかなりの部分はマルチキャスト通信サービスになる考えられる。これらをさらに分類すると、次のようになる。

- 全国規模放送 (通信種別番号: 1)

全国規模の放送は将来的にも視聴 (受信) が集中することが予想される。また、従来のテレビジョン放送の視聴率を考慮すると、全国規模放送の各局の視聴確率

は、おおむね同じ程度になると思われる。そこで、現行放送局数を考慮し、サービス数を10、視聴分布を一様分布とする。

- その他のサービス（通信種別番号：2）

全国規模放送に属さないすべてのマルチキャスト通信サービスが、この分類に属する。そこで、これらのサービス数には制限をおかないことにする。一般に、各サービスの受信確率には偏りが生じると考えられるので、幾何分布により与える。すなわち、通信種別番号2が選択された場合にサービス番号 $j$  ( $j \geq 1$ )を受信する確率は、

$$p(j) = (1 - k_g) k_g^{j-1} \quad (3.1)$$

で与えられる。但し、 $k_g$ は幾何分布定数で、本章では0.90とする。

- ニアビデオオンデマンド（通信種別番号：3）

ニアビデオオンデマンド（NVOD: Near Video On Demand）は、ビデオオンデマンド（VOD: Video On Demand）に似たサービスであるが、伝送コストを低減するためにマルチキャスト形の接続を行うサービスである。NVODでは、同じ番組を開始時刻をずらして複数のチャンネルで繰り返し放送するので、視聴者は数分程度の待ち時間で最初から番組を視聴できる。チャンネルごとの視聴率は同番組であれば一定であり、VODのなかで特に視聴率の高いものがNVODに移行すると考えると、各番組、各チャンネルの視聴分布はほぼ一様であると考えられる。しかし、全国規模放送に属するサービスほどの視聴率はないと思われるので、独立の分類とする。番組数は、首都圏の映画館で新作として上映されている映画の数を参考にし、50とする。また、各番組8並列放送、視聴分布は一様分布とする。

- (2) 1対1通信サービス（通信種別番号：4）

広帯域の1対1通信サービスは、呼の数という意味ではマルチキャスト通信サービスに比して少ないと思われる。しかし、1対1通信では呼数分だけ伝送路を占有するため、通信帯域で考えた場合のトラヒックは非常に大きくなる。したがって、1対1通信サービスを無視することはできない。また、1対1通信サービスには従来からの狭帯域通信も含まれるが、これらとVOD等の広帯域通信では占有する帯域幅に大きな差異が存在する。これは、電話が必要とする伝送帯域とVODな

どの映像を伴うサービスが必要とする伝送帯域の間に 500 倍もの差があるためである\*。そこで、これらの 1 対 1 通信サービスを、すべて映像を伴う場合の通信帯域幅で正規化し、呼量の概念を導入する。つまり、1 対 1 通信サービス 1 erl とは、映像を伴うサービス 1 erl 分に相当するだけの呼が存在することを表す。

なお、端末当りの呼量は、最繁時に 2 台に 1 台の割合で受信端末が使用されていると仮定し、0.5 erl とする。

### 3.2.4 伝送路網トポロジ

本章の網構成に用いる伝送路網トポロジは、メッシュ構成、スター構成、リング構成の 3 種類とする。これらの伝送路網トポロジの特徴を以下に示す。

#### (1) メッシュ (Mesh) 構成

メッシュ構成は、図 3.3 (a) のように、すべての交換局が互いに直接接続されているので、信頼性が高い。しかし、トラヒックの集束率が低く統計的多重化効果が得られない、構成コストが大きくなる等の欠点がある。本章では、最上位層の第 3 階層でのみ用いる。

#### (2) スター (Star) 構成

スター構成は、図 3.3 (b) のように、上位局と下位局がそれぞれ直接接続され、構成が非常にシンプルなため、網構成が簡単で構成コストが小さくなる。しかし、地理的に非常に近い下位局どうしの呼も、一度上位局を中継して伝送されるので、伝送コストが高くなったり、ルーチングの自由度が低くなるという欠点がある。本章では、第 1 階層、第 2 階層で用い、最上位層では用いない。

#### (3) リング (Ring) 構成

リング構成は、図 3.3 (c) のように、すべての交換局を環の形に接続した構成で、総経路長が最短になる。また、上位局付近の伝送路を通過するトラヒックが大きくなるため、統計的多重化効果が大きいと期待できると同時に、同部分の故障が網全体に及ぼす被害は膨大なものになる。マルチキャスト通信サービスのような

\* 電話を 64 kbps、動画像サービスを 30 Mbps と仮定した場合。

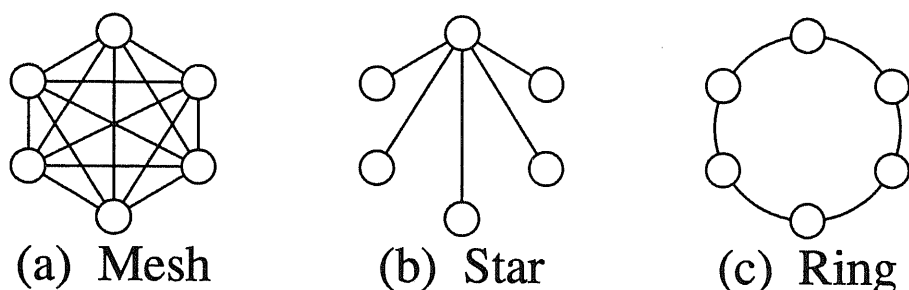


図 3.3 伝送路網トポロジー

分岐接続が多発するトラヒックでは、本構成が最も有利であると考えられる。本章では、すべての階層で用いる。

なお、2局間の経路が複数存在する場合には、最短経路を利用すると仮定する。

### 3.2.5 局間交流トラヒックモデル

一般に、本論文のような架空のモデルで1対1通信網を構成する場合、モデル上の呼の接続先は距離や人口分布によって定めるのが普通である。一方、マルチキャスト通信サービスの場合、サービス数は加入者と比べると非常に小さいので、あらかじめ各サーバの位置を定めるということも可能である。しかし、一般性を保つためには、やはりサーバを人口に対して比例配分したうえで計算を行ったほうが望ましい。そこで、次のようにサーバを分布させる。

1. マルチキャスト通信サービスでは、分岐接続による中継伝送路の共有が可能であり、通信料金を受信者で分担することが可能である。よって、同一サービスが全国各地で受信されると考え、呼の接続先であるサーバは交換局収容人口に比例してモデル全体に分配される。
2. 1対1通信サービスは、通信料金やその情報内容から近隣局への呼が集中すると考えられる。そこで、接続先である交換局は、交換局収容人口に比例し、かつ局間距離に対して減衰するように分配される。



### 3.3 計算方法

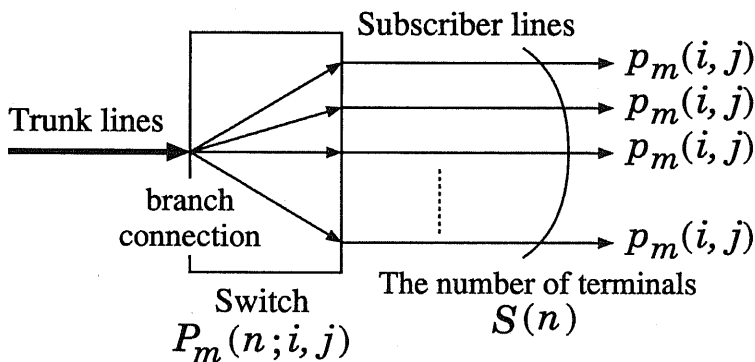
3.2 で述べたモデルを用いて、マルチキャスト通信網の最適構成について検討を行う。通信網最適化における指標は、網構成にかかるコストである。本節では、どのようにコスト計算を行うかについて述べる。

#### 3.3.1 マルチキャスト通信サービスの計算

##### (1) 交換局呼量

マルチキャスト通信サービスでは、ある交換局に収容されている二人以上の加入者が同一サービスを受信する場合、サーバ局から該当局までは一つの通信経路が設定され、その交換局で分岐接続される。すなわち、交換局内に同一サービス受信者が2人以上存在しても、伝送される情報は一つでよい。一方、数人の加入者が異なるサービスを受信しているときには、それぞれのサービスを伝送する必要があるため、この場合には各サービスの呼量の総和が交換局当りの呼量となる。このように、マルチキャスト通信サービスでは、各サービスの交換局当りの受信確率が重要となる。この様子を、図3.4に示す。

交換局  $n$  において、通信種別番号  $i$  に属する  $j$  番目のサービス（以下、サービス  $(i, j)$  と表す）を端末1台以上で受信している確率  $P_m(n; i, j)$  は、式(3.1)を用



$$P_m(n; i, j) = 1 - \{ 1 - p_m(i, j) \}^{S(n)}$$

図 3.4 交換局での分岐接続と交換局呼量

いて以下のように求めることができる。

$$P_m(n; i, j) = 1 - \{1 - p_m(i, j)\}^{S(n)} \quad (3.2)$$

但し,

$$p_m(i, j) = \begin{cases} c_0 \frac{p_g(i)}{n(i)} & (i = 1, 3) \\ c_0 (1 - k_g) k_g^{j-1} p_g(i) & (i = 2) \end{cases} \quad (3.3)$$

ここに、 $c_0$  は端末呼量を、 $p_g(i)$  は1台の端末が通信種別番号  $i$  に属しているサービスを選択する確率を、 $n(i)$  は通信種別番号  $i$  に属するサービス数を、 $k_g$  は幾何分布の定数を、 $S(n)$  は交換局  $n$  に収容されている端末数を、 $p_m(i, j)$  はサービス  $(i, j)$  を受信する端末1台当りの確率を表す。なお、このように求めた  $P_m(n; i, j)$  は、交換局当りのサービスごとの呼量であり、 $i, j$  に関する総和が交換局  $n$  におけるマルチキャスト通信サービスの総呼量となる。

## (2) 伝送路呼量

マルチキャスト通信では、サーバから端末へ分岐接続を行いながら伝送されるので、伝送路上の呼量は再計算が必要である。交換局  $n_s$  にサーバがある場合の一般例を、図 3.5 に示す。図のように、マルチキャスト通信の伝送路（経路木）が決定していれば、伝送路  $l$  を利用して配信を受ける交換局の集合  $N_m(n_s, l)$  を求めることが可能である。なお、3.2.4 で述べたように、経路木は最短距離で結ばれる。分岐接続のため、集合  $N_m(n_s, l)$  に属する一つ以上の交換局でサービスを受信すれば、伝送路  $l$  を利用することになる。よって、サービス  $(i, j)$  が伝送路  $l$  上を伝

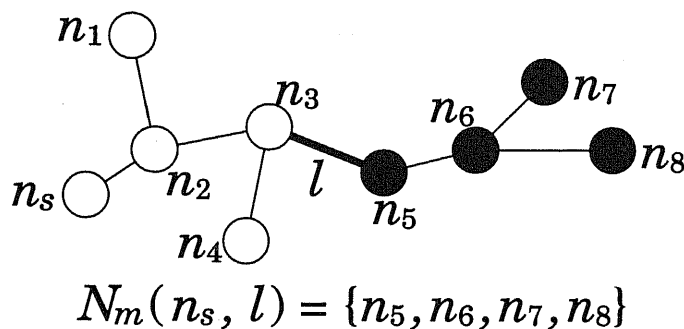


図 3.5 伝送路  $l$  を利用する交換局の集合  $N_m(n_s, l)$

送される確率  $P_{lm}(l; i, j)$  は,

$$P_{lm}(l; i, j) = \sum_{n_s} \frac{S(n_s)}{S_a} \left( 1 - \prod_{n \in N_m(n_s, l)} \{1 - P_m(n; i, j)\} \right) \quad (3.4)$$

となる。但し、 $S_a$  は全国の総端末数を表す。なお、3.2.5 で述べたように、マルチキャスト通信サービスのサーバは加入者数に比例して配置されているので、式(3.4)の  $S(n_s)/S_a$  はサービス  $(i, j)$  が交換局  $n_s$  に存在する確率を表す。

すべてのマルチキャスト通信サービスについて  $P_{lm}(l; i, j)$  を求め、その総和をとったものが、伝送路  $l$  上のマルチキャスト通信総呼量  $P_{ilm}(l)$  となる。

$$P_{ilm}(l) = \sum_{i, j} P_{lm}(l; i, j) \quad (3.5)$$

### 3.3.2 1対1通信サービスの計算

#### (1) 交換局呼量

1対1通信サービスの場合には、すべての呼が独立であるため、交換局呼量の計算は簡単である。交換局  $n$  当りの1対1通信サービス呼量  $P_p(n)$  は、1対1通信サービスの選択確率  $p_g(4)$  と局加入者数  $S(n)$  を用いて、以下のように表される。

$$P_p(n) = c_0 p_g(4) S(n) \quad (3.6)$$

#### (2) 伝送路呼量

3.2.5 で述べたように、1対1通信サービスは局加入者数に比例し、2局間距離に対し減衰する関数で与える。距離に対する関数として、従来からよく用いられている指数分布を用いる。交換局  $n$  の呼量  $P_p(n)$  のうち、交換局  $n'$  に向かう呼量  $P_{pi}(n, n')$  は、

$$P_{pi}(n, n') = A(n) S(n') e^{-k_d D(n, n')} P_p(n) \quad (3.7)$$

となる。但し、 $D(n, n')$  は交換局  $n, n'$  間の距離、 $k_d$  は距離定数である。 $A(n)$  は、確率の総和を1にするための定数で、次式を満たす。

$$A(n) = \frac{1}{\sum_{n'} S(n') e^{-k_d D(n, n')}} \quad (3.8)$$

3.2.4 で述べたように、経路の選択方法が決定しているので、どの伝送路を利用して伝送されるかがわかる。よって、伝送路  $l$  上の 1 対 1 通信総呼量  $P_{tlp}(l)$  は、

$$P_{tlp}(l) = \sum_{(n,n') \in N_p(n,n',l)} P_{pi}(n,n') \quad (3.9)$$

となる。但し、 $N_p(n,n',l)$  は、交換局  $n, n'$  間の経路に伝送路  $l$  を利用する必要がある局ペア  $(n,n')$  の集合である。

### 3.3.3 伝送路容量の決定

3.3.1, 3.3.2 で求めた伝送路呼量から、各伝送路の容量を求める。計算を簡単にするため、サービス受信分布はランダム生起、指数分布保留時間とし、アールン B 式の逆関数を用いて呼損率が 0.1 % 以下になるように回線数を求める<sup>(20, 21)</sup>。得られた回線数に、各サービスの伝送帯域を乗じることで、伝送路の必要容量を求めることができる。マルチキャスト通信、1 対 1 通信の各サービスに必要な伝送容量をそれぞれ  $C_m, C_p$ 、呼損率 0.1 % 以下となるアールン B 式逆関数を  $E^{-1}(x)$  とすると、伝送路  $l$  の伝送容量  $C(l)$  は次式で求められる。

$$C(l) = C_m E^{-1}(P_{tlm}(l)) + C_p E^{-1}(P_{tlp}(l)) \quad (3.10)$$

### 3.3.4 階層構成計算

以上のような計算は、各階層ごとに行われる。例えば、第 1 階層における計算は、一つの第 2 階層交換局と、その交換局の管理下にある第 1 階層交換局の間で計算が行われる。ここで、この領域を計算領域 (calculating area) と呼ぶ。本検討では、斜め回線を考慮しないので、計算領域内の交換局から計算領域外 (non-calculating area) にある交換局への呼は、すべて一度第 2 階層交換局を経由する。その先でどのように接続されるかは、第 2 階層における計算で求めればよく、第 1 階層における計算では経由交換局 (タンデム局) までを考慮すればよい。そこで、計算領域以外の全端末、全サーバが計算領域内のタンデム局である第 2 階層交換局に存在するとして計算を行うことが可能である。このようにすると、計算領域外への呼はすべてタンデム局に向かうようになるうえ、計算領域ごとに独立した計算を行うことができる。これらの第 2 階層を経由する呼量を求め、記憶しておく。この例を図 3.6 (a) に示す。

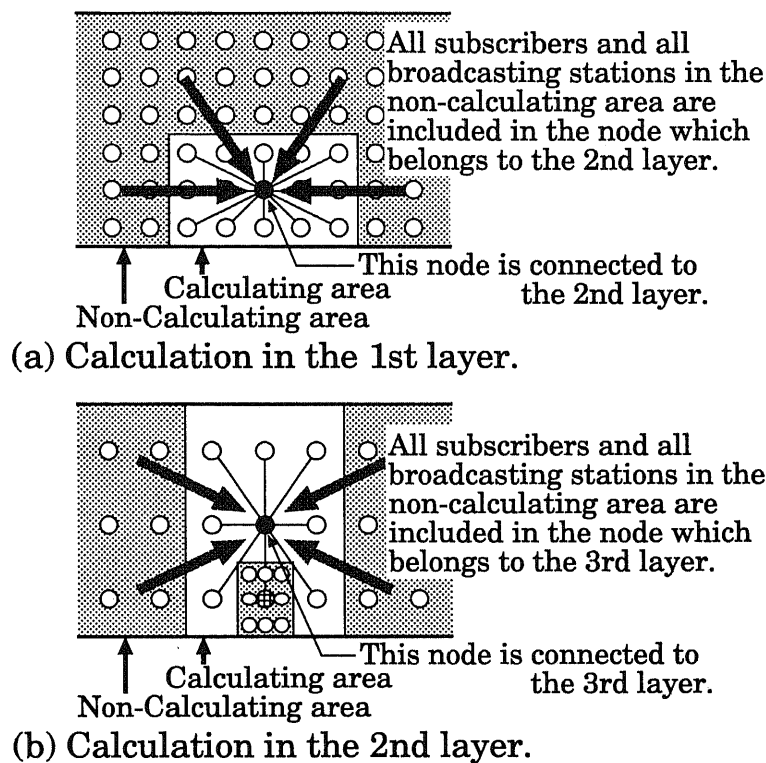


図 3.6 階層構成に基づく計算例

つぎに第2階層における計算であるが、これは一つの第3階層交換局とその交換局の管理下にある第2階層交換局の間で計算が行われる。この計算領域において、第1階層交換局から第2階層を経由する呼に関しては、第1階層における計算を行うときに記憶しておいた値を利用する。さらに、これらの呼のなかに第3階層を経由する呼が存在する。第3階層を経由する呼を求めるには、第1階層における計算の場合と同様に、計算領域外の全端末、全サーバが計算領域内のタンデム局である第3階層交換局に存在するとして計算を行うことができる。これらの第3階層を経由する呼量を求め、記憶しておく。この例を図3.6(b)に示す。

最後に、第3階層における計算を行う。第3階層では、第1階層交換局からの呼が第2階層を経由し、さらに第3階層へと経路してくるような長距離呼のための計算を行う。第2階層における計算の際に第3階層を経由する呼量を記憶してあるので、これを用いて第3階層での計算を行う。

### 3.3.5 評価指標

一般に、網構成コスト  $C$  は、次式 (3.11) で表されるように、伝送路  $l$  の伝送路容量  $C(l)$  と長さ  $L(l)$  の二つの変数による関数の形になる。

$$C = c_1 + c_2 \sum_l C(l) + c_3 \sum_l L(l) + c_4 \sum_l C(l) L(l) \quad (3.11)$$

ここで、 $c_1, c_2, c_3, c_4$  は定数である。 $c_1$  は例えば局舎のような建築物のコストであり、本論文の比較ではすべての場合において同等に含まれるものであるので、省略可能である。 $c_2 \sum_l C(l)$  は伝送路容量に比例するものである。交換機のコストは、入力容量にほぼ比例すると考えられるので、これは交換機コストを表している。3項目の  $c_3 \sum_l L(l)$  は距離に比例するもので、伝送路を敷設する際の工事にかかるコストを表す。最終項の  $c_4 \sum_l C(l) L(l)$  は伝送路容量と距離に比例するものであり、光ファイバ等の伝送路コストを表す。 $\sum_l C(l), \sum_l L(l), \sum_l C(l) L(l)$  は、人口分布やサービス選択確率、網形態等を与えることで一意的に決定するが、伝送路、交換機、伝送路敷設等のコストが将来的にどの程度になるか、現在のところは不明である。また、これらの値が変動すれば、最適構成も変化すると考えられる。そこで、式 (3.12) のように、網構成総コストを伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比  $c_2/c_4$ 、及び伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比  $c_3/c_4$  を用いて表現する。

$$C' = \frac{c_2}{c_4} \sum_l C(l) + \frac{c_3}{c_4} \sum_l L(l) + \sum_l C(l) L(l) \quad (3.12)$$

計算結果は、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比、伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比が変化した場合に、最適な網形態はどれであるかを表示する最適領域マップを用いて表示する。

ここで、最適領域マップの読み方を少し説明しておく。最適領域マップとは、ある領域において網構成コストが最も小さくなるトポロジー構成を示したグラフである。図中には“R-S-S”のような記述を行うが、これは3階層構成を意味し、第3階層-第2階層-第1階層の順に用いた伝送路網トポロジーを表す。なお、“M”がメッシュ構成、“S”がスター構成、“R”がリング構成を表している。これらの下側に添えられた“6,30”のような数字は、それぞれ第3階層交換局1局に接続されている第2階層交換局の数、第2階層交換局1局に接続されている第1階層交換局の数を表す。“M-S”のような記述の場合には、2階層構成を意味し、下側の

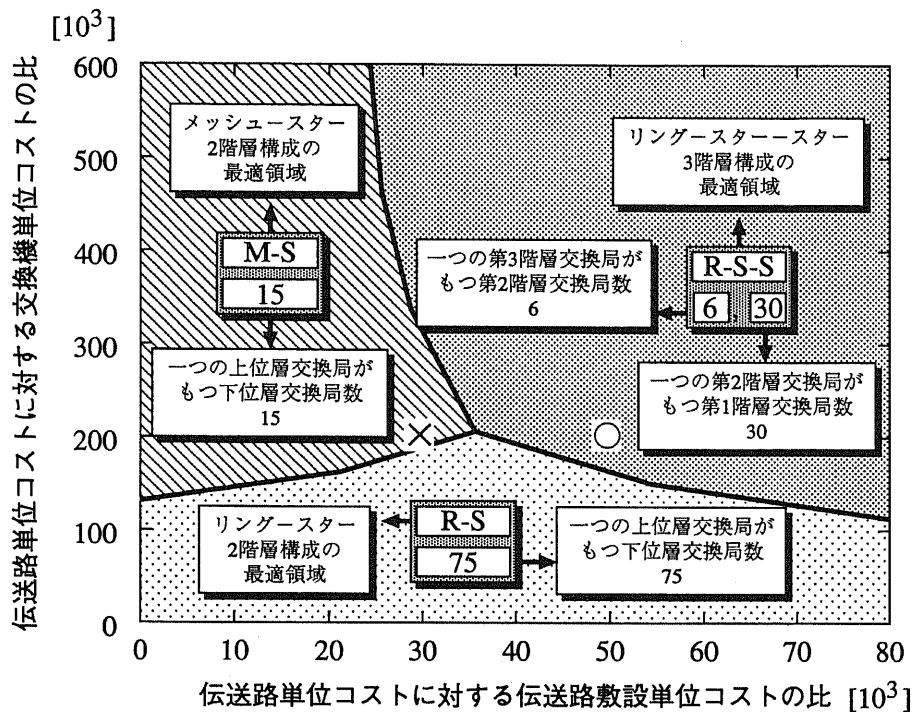


図 3.7 最適領域マップの表示規則

数字は上位層 1 局に接続されている下位層の局数を表している。図 3.7 の例では、三つの領域が存在しているが、前述のとおり、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比、伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比の二つの値が変動すると、同時に最適な網形態も変化する。例えば、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が 200,000、伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比が 30,000 の場合には、図中の“×”の点、すなわち、一つの上位層交換局が 15 局の下位層交換局をもつメッシュ-スター 2 階層構成が最適であることを表している。また、伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比が 50,000 になった場合には、図中の“○”の点、すなわち、一つの第 3 階層交換局が 6 局の第 2 階層交換局をもち、それぞれの第 2 階層交換局が 30 局の第 1 階層交換局をもつリング-スター-スター 3 階層構成が最適網形態になる。なお、最適構成の特徴が大きく変わる境界（例えば、“メッシュ-スター 2 階層構成”と“リング-スター-スター 3 階層構成”の境界のように、トポロジーが大きく変化する境界）には、少し太めの境界線を用いてわかりやすくしてある。

表 3.1 本章で用いるサービス選択確率

通信種別番号	通信種別	モデル 1	モデル 2	モデル 3	モデル 4
1	全国規模放送	0.65	0.70	0.75	0.80
2	その他のサービス	0.10	0.10	0.10	0.10
3	NVOD	0.05	0.05	0.05	0.05
4	1対1通信サービス	0.20	0.15	0.10	0.05

## 3.4 定量的評価

### 3.4.1 パラメータの設定

本章で用いるトラヒックパラメータを、表 3.1 に示す。広帯域通信網が実現された時代にどのようなサービスがどの程度普及するか、現段階で予測することは不可能であるので、一例としてこのような値に設定した。また、人口分布、サービス数、確率分布は、3.2 で述べたとおりである。また、マルチキャスト通信、1対1通信のサービス伝送帯域  $C_m$ 、 $C_p$  は、ともに 30 Mbps と仮定する。

3.2.1 で述べたように、一つの第2階層交換局がもつ第1階層交換局数、及び一つの第3階層交換局がもつ第2階層交換局数は可変である。そこで、用いる網形態の各階層における交換局数の組み合わせを、表 3.2、表 3.3 に示す。用いる網トポロジーについては、3.2.4 で述べたとおり、第1階層、第2階層にはスター、またリング構成、第3階層にはメッシュ、またはリング構成を用いる。表 3.2、表 3.3 から、交換局数の組み合わせは48通り存在し、トポロジーの組み合わせが8 ( $= 2 \times 2 \times 2$ ) 通り存在するので、計算される網構成の総組み合わせ数は384 ( $= 48 \times 8$ ) 通りとなる。最適領域マップでは、これら384通りの中から最も適した網形態が表示される。

さらに、伝送路が存在する局間に最短距離で敷設したのでは、伝送路敷設コストが膨大になってしまう。そこで、伝送路は格子状に敷設することにする。

### 3.4.2 特性評価

前述の各モデル、及び計算手順に基づいて、網構成に必要なコストを計算する。図 3.8 ~ 図 3.10 にトラヒックモデル1の場合、図 3.11 ~ 図 3.13 に同モデル2の



表 3.2 網形態の各階層における交換局数 (1)

第 3 階層 交換局数	第 2 階層 交換局数	第 3 階層交換局 1 局がもつ 第 2 階層交換局数	第 2 階層交換局 1 局がもつ 第 1 階層交換局数
120*	120	1	15
20	120	6	15
10	120	12	15
8	120	15	15
5	120	24	15
4	120	30	15
2	120	60	15
1*	120	120	15
90*	90	1	20
15	90	6	20
10	90	9	20
6	90	15	20
5	90	18	20
3	90	30	20
2	90	45	20
1*	90	90	20
72*	72	1	25
12	72	6	25
8	72	9	25
6	72	12	25
4	72	18	25
3	72	24	25
2	72	36	25
1*	72	72	25

“\*” は、事実上 2 階層構成になる場合である。

表 3.3 網形態の各階層における交換局数 (2)

第 3 階層 交換局数	第 2 階層 交換局数	第 3 階層交換局 1 局がもつ 第 2 階層交換局数	第 2 階層交換局 1 局がもつ 第 1 階層交換局数
60*	60	1	30
10	60	6	30
5	60	12	30
4	60	15	30
2	60	30	30
1*	60	60	30
45*	45	1	40
5	45	9	40
3	45	15	40
1*	45	45	40
36*	36	1	50
6	36	6	50
4	36	9	50
3	36	12	50
2	36	18	50
1*	36	36	50
30*	30	1	60
5	30	6	60
2	30	15	60
1*	30	30	60
24*	24	1	75
4	24	6	75
2	24	12	75
1*	24	24	75

“\*” は、事実上 2 階層構成になる場合である。

場合、図 3.14 ~ 図 3.16 に同モデル 3 の場合、図 3.17 ~ 図 3.19 に同モデル 4 の場合の計算結果を示す。図の縦軸は、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比（式 (3.12) における  $c_2/c_4$ ）を、横軸は伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比（式 (3.12) における  $c_3/c_4$ ）を表す。なお、伝送路単位コストは、156 Mbps の光ファイバ 1 m 当りのコスト、交換機の単位コストは、入力ポート 156 Mbps 当りのコスト、伝送路敷設単位コストは、伝送路敷設にかかる土木工事 1 m 当りのコストである。また、図 3.8, 図 3.11, 図 3.14, 図 3.17 は人口が一樣に分布する場合、図 3.9, 図 3.12, 図 3.15, 図 3.18 は人口が 1 極集中の場合、図 3.10, 図 3.13, 図 3.16, 図 3.19 は人口が 2 極集中の場合の計算結果である。前述のとおり、図中の“R-S-S”のような記述は、第 3 階層-第 2 階層-第 1 階層の順に用いる伝送路網トポロジーを示し、“M”がメッシュ構成、“S”がスター構成、“R”がリング構成を表している。これらの下側に添えられた“6,30”のような数字は、それぞれ第 3 階層交換局 1 局に接続されている第 2 階層交換局の数、第 2 階層交換局 1 局に接続されている第 1 階層交換局の数を表す。“M-S”のような記述の場合には、2 階層構成を意味し、下側の数字は上位層 1 局に接続されている下位層の局数を表している。

これらの最適領域マップを見ると、大きく分けて三つの最適領域が存在することがわかる。現状と同じ構成であるメッシュ-スター-2 階層構成、リング-スター-スター-3 階層構成、スター-スター-2 階層構成である。第 3 階層にはスター構成を用いないとしたが、表 3.2, 表 3.3 において第 3 階層交換局数が 1 となる場合には、第 1, 第 2 階層にスター構成を用いたトポロジーがスター-スター-2 階層構成となる。スター構成では、通信網敷設コストが最も小さいため、最適となる領域が存在すると考えられる。なお、最上位層にスター構成を用いることは、信頼性の観点からは不適當である。本論文における最適領域マップでは、参考のために表示してある。

まず、各トポロジー構成ごとの特徴を考察する。メッシュ-スター-2 階層構成の領域は、交換機単位コストが高く伝送路敷設単位コストが低い場合に現れる。また、そのなかでも伝送路単位コストが小さくなるにつれて、上位層交換局 1 局のもつ下位層の交換局数は増加する。つまり、上位層の交換局数が減少する方向に最適構成が変遷する。一方、第 3 階層にリング構成を用いたリング-スター-スター-3 階層構成は、交換機コストが低く伝送路敷設単位コストがある程度高い場合に現れる。この場合にも、伝送路単位コストが低くなるにつれて、第 2 階層交換

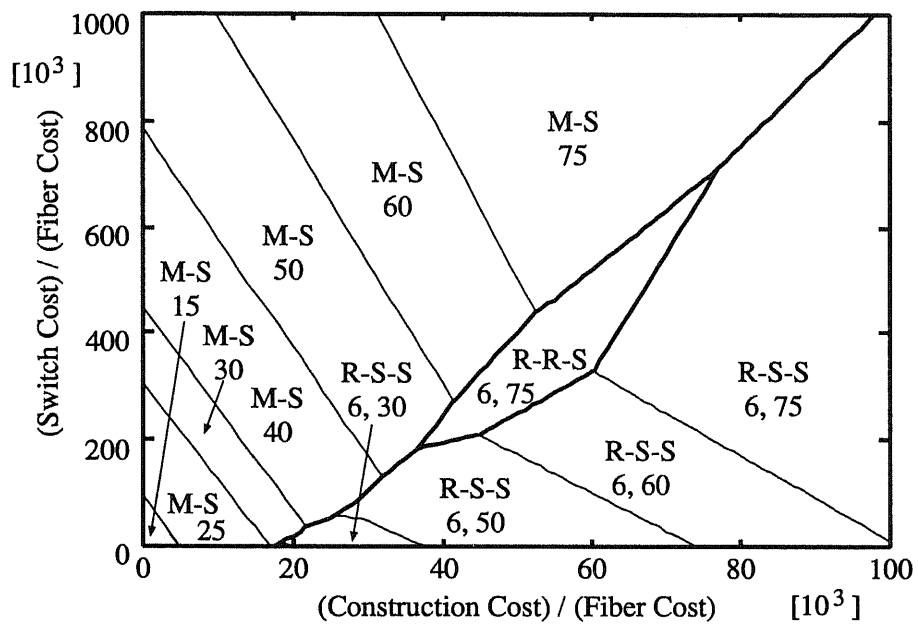


図 3.8 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口一様分布)

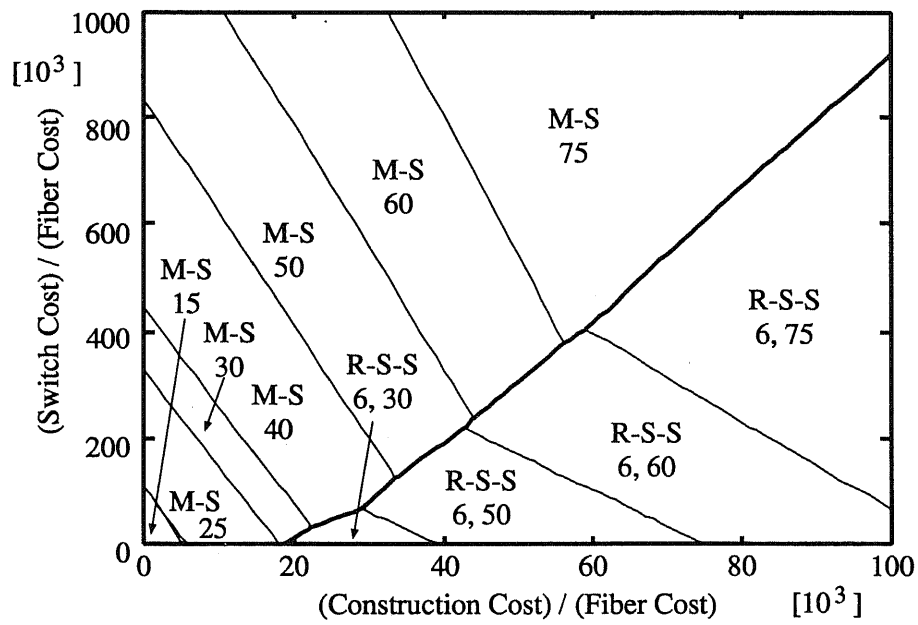


図 3.9 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口1極集中)

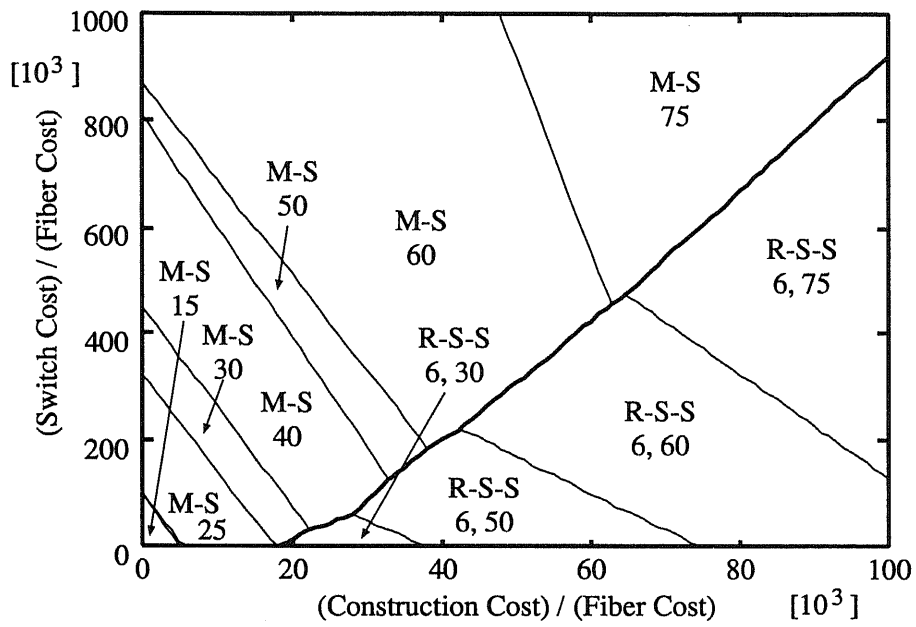


図 3.10 最適領域マップ (トラヒックモデル 1, 人口 2 極集中)

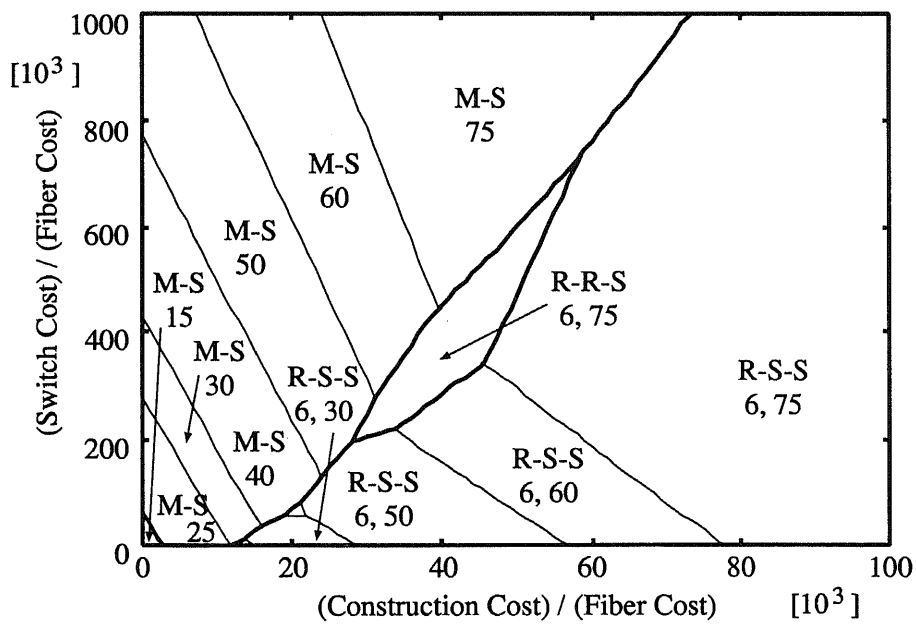


図 3.11 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口一様分布)

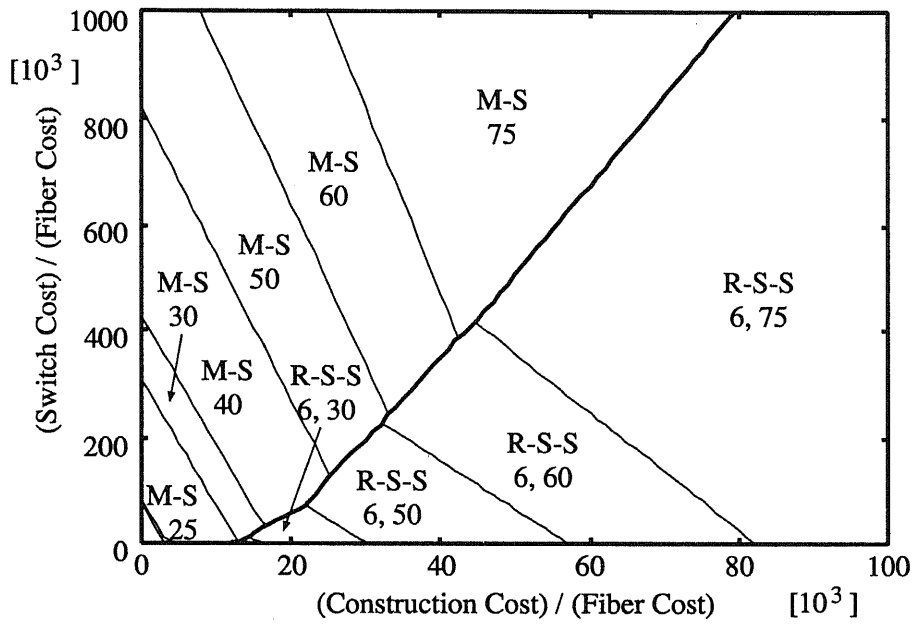


図 3.12 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 1 極集中)

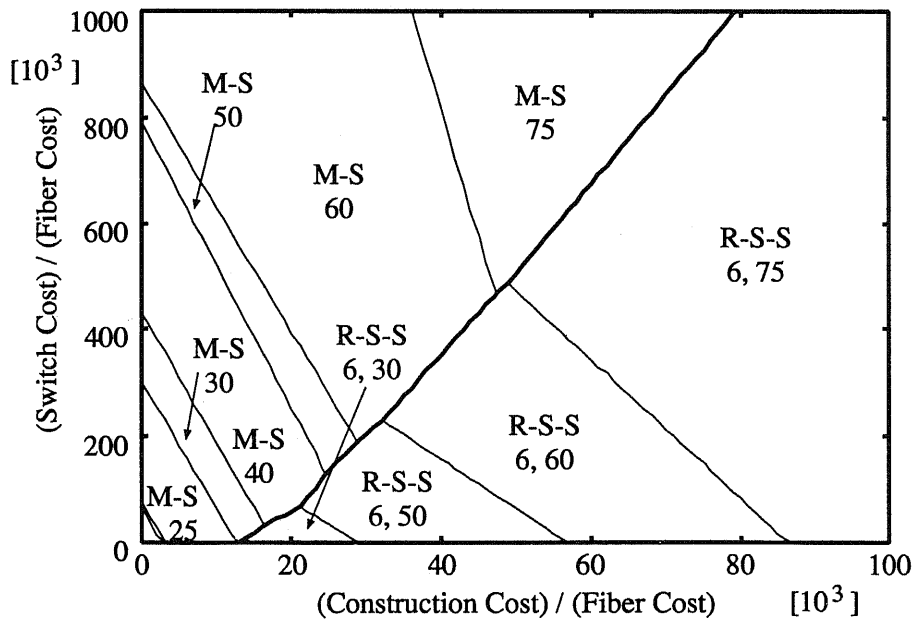


図 3.13 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 2 極集中)

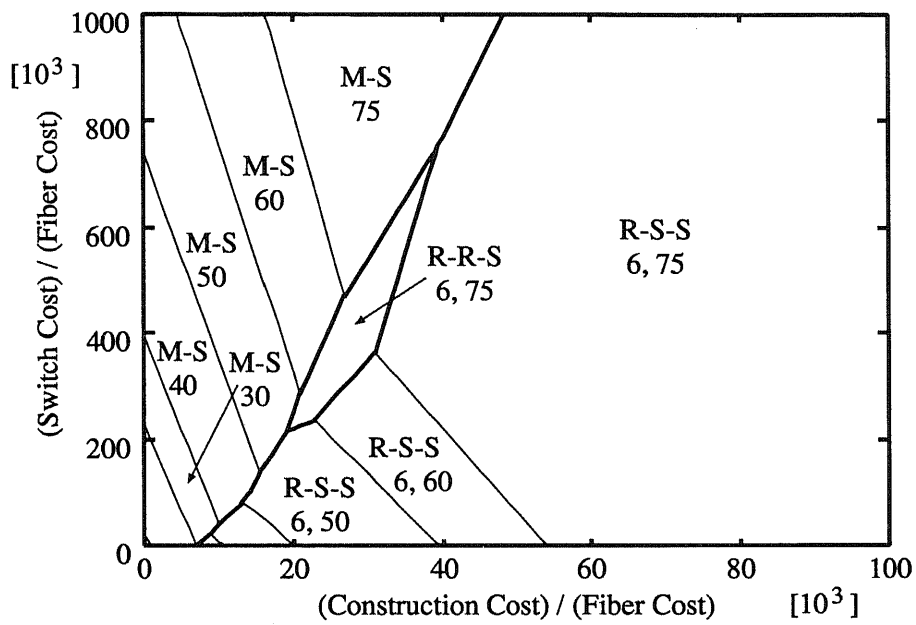


図 3.14 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口一様分布)

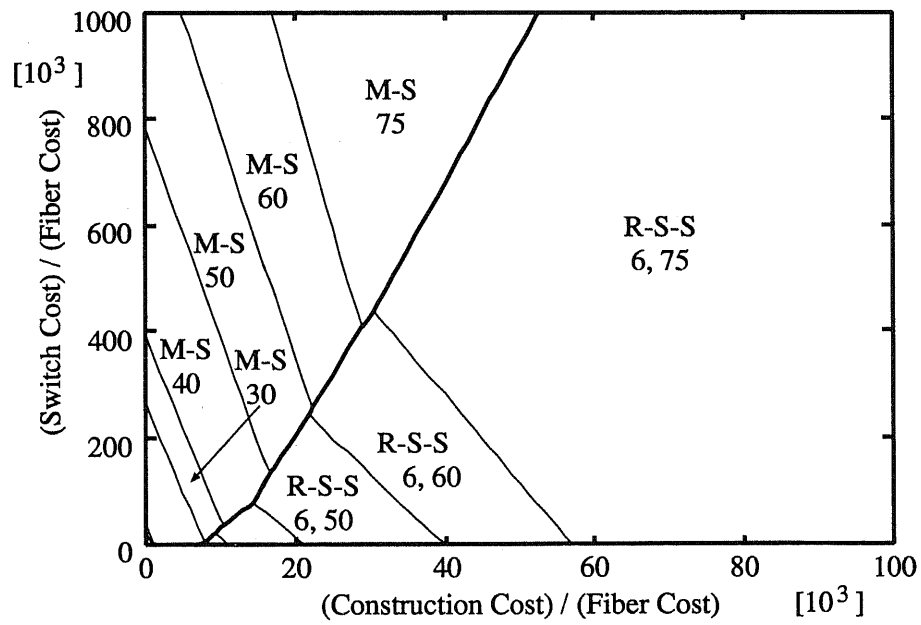


図 3.15 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口1極集中)

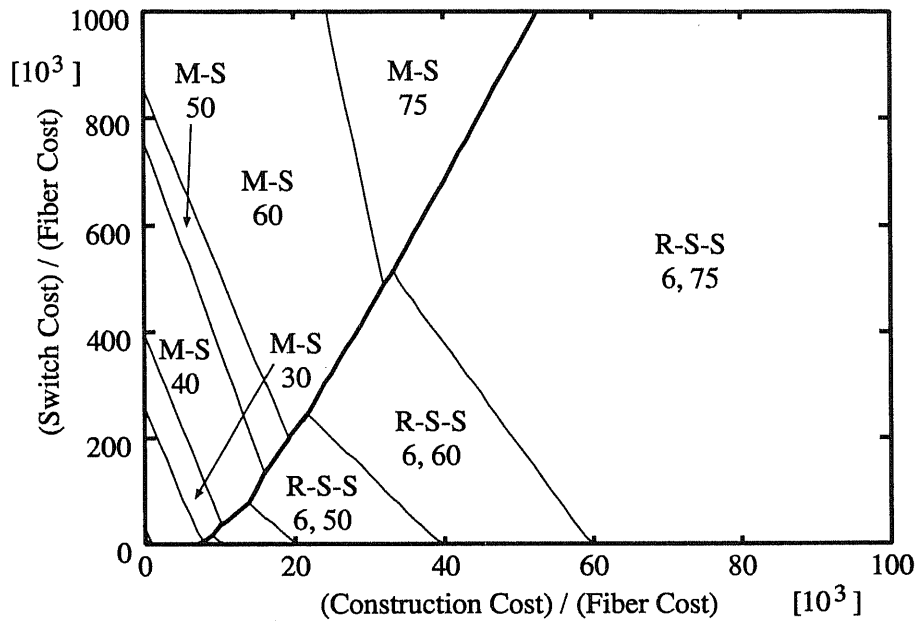


図 3.16 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 2 極集中)

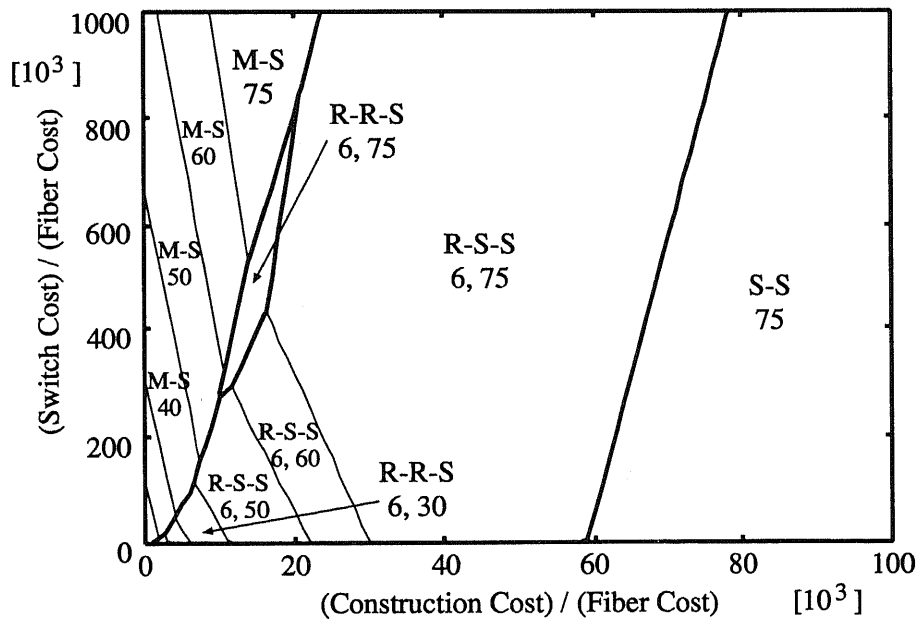


図 3.17 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口一様分布)



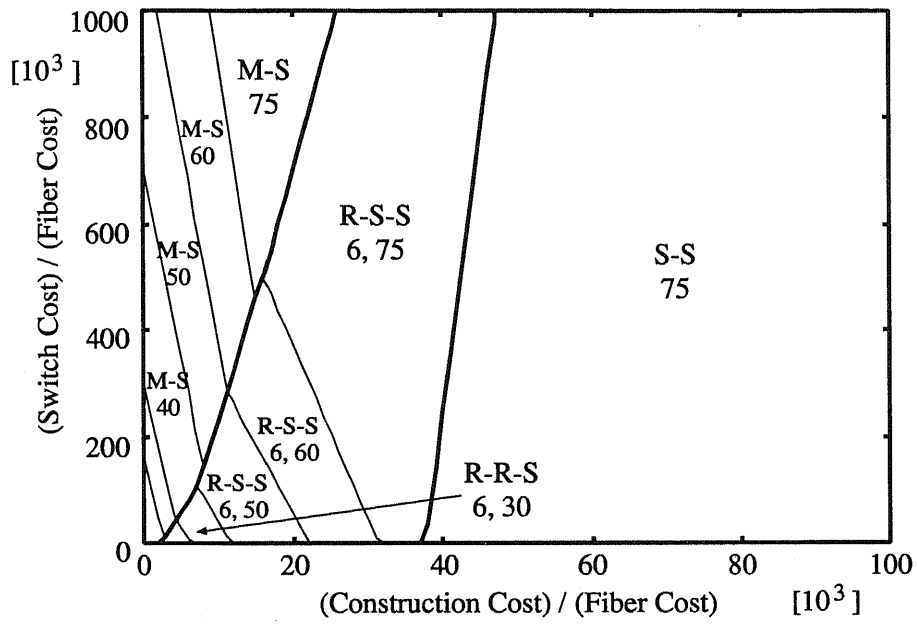


図 3.18 最適領域マップ (トラヒックモデル4, 人口1極集中)

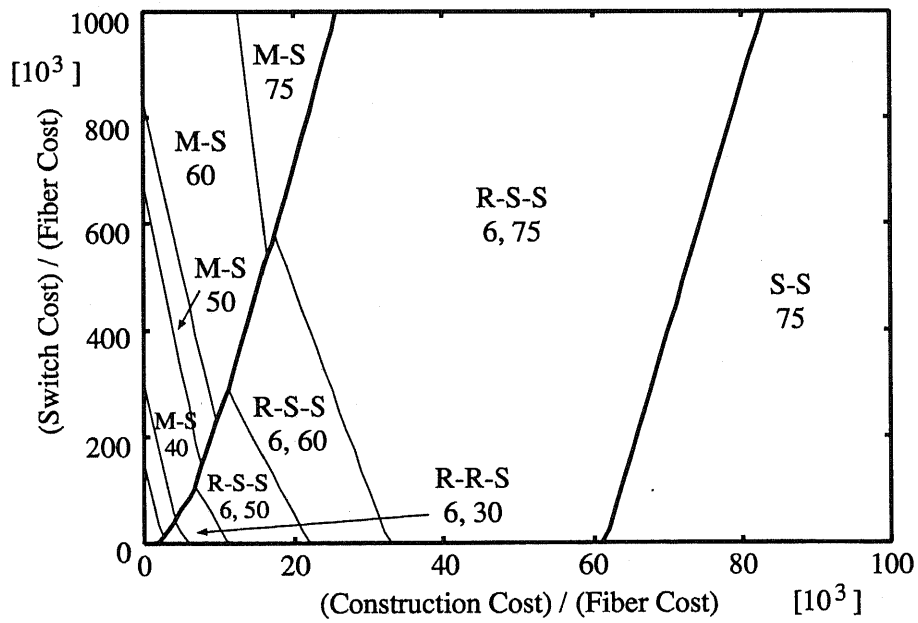


図 3.19 最適領域マップ (トラヒックモデル4, 人口2極集中)

局のもつ第1階層の交換局数が増加する、つまり、第2階層の交換局数が減少する方向に最適構成が変遷する。また、第3階層交換局がもつ第2階層の交換局数は6で一定であるので、第2階層の交換局数が減少すると同時に第3階層の交換局数も減少する。

つぎにサービス選択確率の違いから考察すると、マルチキャスト通信サービスの割合が大きくなるに従って、最適領域の分布が左方向に圧縮された形になっていく。すなわち、第3階層にリング構成を用いたリング-スター-スター構成の最適領域が明らかに広がっている。このことから、第3階層においては、総経路長が最も短いリング構成がマルチキャスト通信の場合に有利になることがわかる。マルチキャスト通信サービスの割合が最も大きくなるトラヒックモデル4では、最適領域は最も左方向へ押しつけられた形となるが、その際にスター-スター2階層構成の最適領域が現れる。これは、前述のとおり、スター構成では通信網敷設コストが最も小さいのが原因と考えられるが、最上位層にスター構成を用いることは信頼性の観点からは不適當である。

さらに、人口分布の違いから最適領域マップを見ると、人口分布が一様分布形の場合には、サービス選択確率によらずメッシュ-スター2階層構成とリング-スター-スター3階層構成の間の領域にリング-リング-スター3階層構成の最適領域が存在することがわかる。これは以下のように考えられる。3.2.5で述べたとおり、マルチキャスト通信サービスのサーバの所在は人口分布に比例するので、集中形人口分布の場合には、各局のマルチキャスト通信トラヒックの多くが人口の集中している局に向かう。つまり、第2階層から第3階層を経由して目的の地点まで伝送されるトラヒックが増加する。スター構成を用いると、スターの中央にある交換局が上位局（タンデム局）となるため、第3階層へ出ていくトラヒックを直通回線で伝送でき、効率的である。一方、人口が一様分布の場合には、同一計算領域への呼、つまり第3階層へ出ていく必要のない呼が多くなり、近隣局へのトラヒックが増加するため、リング構成を用いたほうがコストが小さくなると考えられる。

なお、このことは第1階層にもあてはまる。第1階層では人口分布、サービス選択確率、階層数によらず常にスター構成が最適となっているが、これは、トラヒックの多くが上位層を経由して他の地域に伝送されるため、上位局と直接接続されているスター構成を用いたほうがコストを低減できると考えられる。

人口分布が2極集中形の場合、メッシュ-スター2階層構成で、上位層交換局1

局に下位層交換局が60局接続されている“M-S 60”の領域が非常に広がっている。これは、以下のように説明できる。“M-S 60”の場合、上位層交換局数が30 ( $x$  軸方向に10局,  $y$  軸方向に3局)となり、これらを配置させると人口の集中地点とちょうど一致する局が存在する。人口の最も集中した場所は発生する呼の数が多く、呼の向かう先も集中するので、上位層を経由することなく接続が完了する呼の割合が多くなる。これに対し、“M-S 50” (上位層交換局数36,  $12 \times 3$ ) や“M-S 75” (上位層交換局数24,  $8 \times 3$ ) の場合、人口の集中地点をちょうど挟むような形でこれらの交換局が配置される。これらの交換局間の呼は上位層を経由することになるため、上位層のコストが増加してしまう。よって、人口の最も集中する地点に上位層交換局が配置される“M-S 60”のほうが網構成コストを低減でき、最適領域が広がると考えられる。

### 3.5 むすび

本章では、我が国の通信網を表す簡単な長方形幾何学モデルと、トラヒック分布である人口分布、呼量、サービス選択確率等を設定したうえで、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在する場合の大規模通信網の階層構成について検討した。将来の伝送路コストや交換機コスト、伝送路敷設コストの予測は困難であるので、これらの3変数はパラメータとして各階層構成の経済比較を行った。その結果、本章で設定した呼量においては、現行のメッシュ-スター2階層構成のほかに、リング-スター-スター3階層構成や、リング-リング-スター3階層構成のような第3階層にリング構成を用いた3階層構成が最適になる領域が確認された。また、マルチキャスト通信サービスの選択確率が増加した場合には、リング-スター-スター3階層構成の適用領域が広がることから、第3階層にリング構成を用いた構成がマルチキャスト通信網の場合に有利になることがわかった。さらに、第1階層では他の地域への呼が多くなるため、スター構成が適していること、人口の集中に合わせて上位局をうまく配置することで、コストをより低減できることもわかった。

マルチキャスト通信トラヒックが増加すると、第3階層にリング構成を用いた構成の最適領域が増加することから、リング構成はマルチキャスト通信に少なくとも適しているといえよう。そこで、次章では、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在する場合に適した新しい通信網トポロジーを提案し、そ

の適性を評価する。

また、本章では管路等の伝送路敷設網も新たに作成すると考え、伝送路トポロジーと同じ形（但し格子状）での敷設を行っている。しかし、実際に通信網を構成する際には、既に存在する伝送路敷設網を利用することもあり、伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーは必ずしも一致しない。また、伝送路敷設は、網構成総コストの中でも非常に大きい割合を占める要素であることから、メッシュ構成のような伝送路の数が非常に大きいトポロジーでは、伝送路敷設網の共有などを行って伝送路敷設コストを削減しているのが現実である。そこで、次章では伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーが異なる場合の検討も併せて行う。

## 第 4 章

# 新しい網形態を用いた大規模 マルチキャスト通信網の最適階層構成

## 4.1 まえがき

第3章では、メッシュ、スター、リングの各トポロジーを用いて、大規模マルチキャスト通信網を構築したときの経済比較を行った。その結果、スター構成はスターの中心にある交換局で上位層と直接接続されているため、上位層を経由して接続される下位層のトラヒックに対して非常に有効であるとの結論を得た。また、リング構成は、マルチキャスト通信に少なからず適していることもわかった。そこで本章では、第3章と同じ状況、すなわちマルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在する場合に適した新しい通信網トポロジーを提案し、特性評価を行う。

実際に通信網を構成する際には、既に存在する伝送路敷設網を利用することもあり、伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーは必ずしも一致しない。また、伝送路敷設は、網構成総コストの中でも非常に大きい割合を占める要素であることから、メッシュ構成のような伝送路の数が非常に大きいトポロジーでは、伝送路敷設網の共有などを行って伝送路敷設コストを削減しているのが現実である。そこで、伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーが異なる場合の特性評価も併せて行う。

## 4.2 リング・スター複合構成

### 4.2.1 従来の伝送路網トポロジーの特徴

3.4の特性評価において、マルチキャスト通信サービスの増大とともに、リング構成の適用領域が増加することから、マルチキャスト通信サービスにはリング構成が適していることがわかった。逆に考えれば、1対1通信サービスにはリング構成は適していないということになると考えられる。

リング構成において1対1通信トラヒックの伝送を行う場合には、2局間の経路をたどる際の経路長が長くなるだけでなく、中継交換局数(ホップ数<sup>\*</sup>)も大きくなるという問題点がある。例えば、リングを構成する交換局数を $N$ とすると、ホップ数は最大で $N/2$ ( $N$ が偶数の場合)、または $(N-1)/2$ ( $N$ が奇数の場合)となる。ホップ数が大きくなると、中継交換機の規模増大とともに交換機コスト

\* 実際には、(中継交換局数)+1となる。

表 4.1 リング構成の第1階層伝送路コスト  
(第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40, スター構成を1とする)

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	1.50	1.47	1.42	1.29
1極集中形	1.52	1.50	1.44	1.32
2極集中形	1.52	1.49	1.44	1.32

表 4.2 リング構成の第1階層交換機コスト  
(第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40, スター構成を1とする)

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	4.89	4.80	4.62	4.20
1極集中形	4.97	4.88	4.72	4.31
2極集中形	4.97	4.88	4.72	4.31

が増加する。マルチキャスト通信の場合には、分岐接続を行うためそれほど問題とはならないが、1対1通信ではそれぞれが独立経路を必要とするため、交換機コストの増加が避けられない。一方、スター構成では、同一計算領域内における任意の2局間経路のホップ数は、1ないし2なので、中継交換機のコストを抑えることができる。よって、スター構成は1対1通信に適していると考えられる。

例として、表3.3の中で、第2階層交換局1局のもつ第1階層交換局数が40となる場合における第1階層計算例を、表4.1、表4.2に示す。本例の場合、第2階層交換局数は45、すなわち第1階層の計算領域が45存在することになり、一つの第1階層領域がカバーするエリアは、おおよそ1都道府県程度になる。なお、表4.1は伝送路コストの比、表4.2は交換機コストの比である。このように、第1階層では、リング構成の伝送路コストはスター構成の約1.3倍以上、交換機コストは約4.3倍以上となる。また、マルチキャスト通信の割合が増加するにつれ、これらの値が小さくなっていることも観測できる。また、第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数を変更して計算を行ったところ、概ね同様の結果が得られた。以上のことから、マルチキャスト通信にはリング構成が、1対1通信にはスター構成が適していると結論できる。

## 4.2.2 リング・スター複合構成の提案

4.2.1 で述べたように、マルチキャスト通信にはリング構成が、1対1通信にはスター構成が適していることがわかった。そこで、伝送路網トポロジーとして、図4.1に示すようなリング・スター複合構成（Ring-Star Combined Topology）を提案する。リング・スター複合構成は、リング構成とスター構成を重ね合わせた形状をしている。マルチキャスト通信の伝送にはリング構成を、1対1通信の伝送にはスター構成を利用することで、リング構成、スター構成のそれぞれの利点のみを採り入れることが可能である。すなわち、マルチキャスト通信の伝送にリング構成を用いれば、経路木の総延長距離を小さくすることができるので、伝送路コストを削減することが可能である。また、1対1通信の伝送にスター構成を用いれば、各2局間経路のホップ数を小さく抑えることができるので、中継交換機のコスト増加を防ぐことが可能である。

なお、特性評価の際、本トポロジーはすべての階層にて用いる。

## 4.3 定量的評価

### 4.3.1 パラメータの設定

4.2.2 で提案したリング・スター複合構成の特性評価を行う。交換局配置モデル、人口分布モデル、サービスモデル、局間交流トラヒックモデルは、第3章で述べたものを用いる。交換局配置モデルについては3.2.1を、人口分布モデルについ

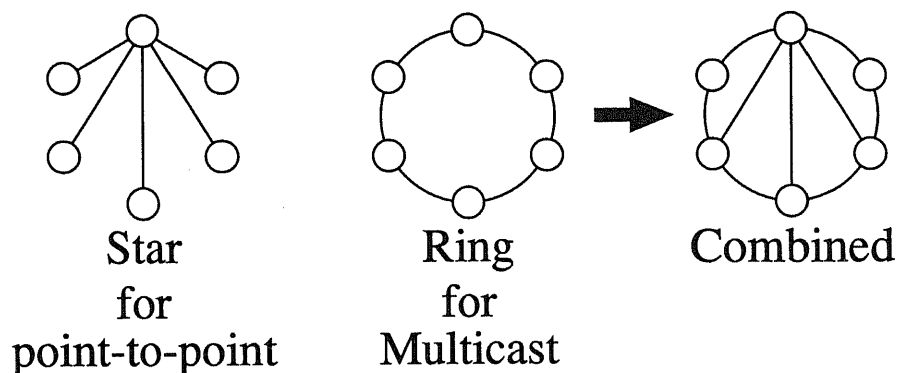


図 4.1 リング・スター複合構成



ては 3.2.2 を，サービスモデルについては 3.2.3 を御参照頂きたい。

伝送路網トポロジーマデルには，3.2.4 で述べたメッシュ，スター，リングの各トポロジーマデルと，リング・スター複合構成を用いる。なお，第3章と同様に，メッシュ構成は最上位層である第3階層でのみ用い，スター構成は第1階層，第2階層で用いる。リング構成，及びリング・スター複合構成は，すべての階層で用いる。

また，計算方法についても，3.3 で述べた方法を用い，トラヒックモデルとしては，3.4.1 の表 3.1 にて設定したサービス選択確率を用いる。

#### 4.3.2 伝送路敷設網トポロジーマデル

第3章では，管路等の伝送路敷設網を伝送路トポロジーマデルと同じ形で敷設するとして計算を行った。しかし，実際に通信網を構成するときには，既に存在する伝送路敷設網を利用することも考えられ，伝送路トポロジーマデルと伝送路敷設網トポロジーマデルは必ずしも一致しない。伝送路敷設にかかるコストは膨大であるため，むしろ伝送路敷設網をリング構成等に固定的に設定しておき，そこに伝送路網を埋め込む形で敷設するほうが現実的である。そこで，本章では，以下の3通りの伝送路敷設網トポロジーマデルを用いて評価を行う。なお，伝送路敷設網の存在しない場所には，物理伝送路の敷設を行うことはできない。このような場合には，伝送路を迂(う)回して敷設する。(以下，迂回敷設とする)。

1. 第3章と同様に，伝送路トポロジーマデルと同形の伝送路敷設網トポロジーマデルを用いる。すなわち，物理伝送路の設定されるところすべてに管路等を用いた敷設を行う(伝送路優先敷設)。
2. 伝送路敷設網をスター構成にする(スター構成敷設)。伝送路トポロジーマデルがスター構成以外の場合には，迂回敷設により遠回りの敷設が行われるため，伝送路コストが増大する。
3. 伝送路敷設網をリング構成にする(リング構成敷設)。伝送路トポロジーマデルがリング構成以外の場合には，迂回敷設により遠回りの敷設が行われるため，伝送路コストが増大する。

但し，いずれの場合も，第3章と同様に，伝送路敷設網は格子状に設定する。

### 4.3.3 伝送路優先敷設の場合の特性評価

伝送路トポロジーと同形の伝送路敷設網トポロジーを用いた場合、すなわち伝送路優先敷設の場合の計算結果を、図4.2～図4.13に示す。図4.2～図4.4はトラヒックモデル1の場合、図4.5～図4.7は同モデル2の場合、図4.8～図4.10は同モデル3の場合、図4.11～図4.13は同モデル4の場合の最適領域マップである。また、図4.2, 図4.5, 図4.8, 図4.11は人口分布が一様分布の場合、図4.3, 図4.6, 図4.9, 図4.12は1極集中形の場合、図4.4, 図4.7, 図4.10, 図4.13は2極集中形の場合の計算結果である。なお、図の縦軸は伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比、横軸は伝送路単位コストに対する伝送路敷設単位コストの比である。図中の記号については、3.3.5で述べたとおりであり、“M”、“S”、“R”はそれぞれメッシュ、スター、リング構成を表す。

これらのグラフと3.4.2の結果を比較してみると、得られた結果は図3.8～図3.19とまったく同形であり、提案したリング・スター複合構成の最適領域は存在しない。このような結果が得られる理由は、以下のように簡単に推測できる。リング・スター複合構成では、スター構成とリング構成の両方のトポロジーを重ねたものであるため、スター構成、リング構成のどちらと比較しても伝送路の総延長距離は長くなる。ここでは、伝送路優先敷設、すなわち伝送路のある場所に敷設施設を設置するため、伝送路の総延長距離の増加とともに伝送路敷設コストが増大する。この関係は、伝送路敷設単位コストによらず常に成立するため、リング・スター複合構成の最適領域は存在しないのであろう。

4.2.1と同様に、第2階層交換局1局のもつ第1階層交換局数が40の場合の第1階層計算例を表4.3, 表4.4に示す。これらの表は、リング・スター複合構成を用いた場合の計算結果であり、表4.3はスター構成を1とした場合の伝送路コストを、表4.4は同じくスター構成を1とした場合の交換機コストである。これらの表中の“モデル”とは、表3.1に示したトラヒックモデルのことを指す。なお、リング構成の場合には、表4.1, 表4.2と全く同じ結果となるので省略する。これらの表からもわかるように、リング・スター複合構成はスター構成と比して伝送路コストを5%から15%程度低減することが可能であり、交換機コストに関しては2%から7%の増加に留まっている。しかし、本節では伝送路優先敷設が条件であるため、伝送路数の多いリング・スター複合構成はスター構成よりも特性が悪くなる。

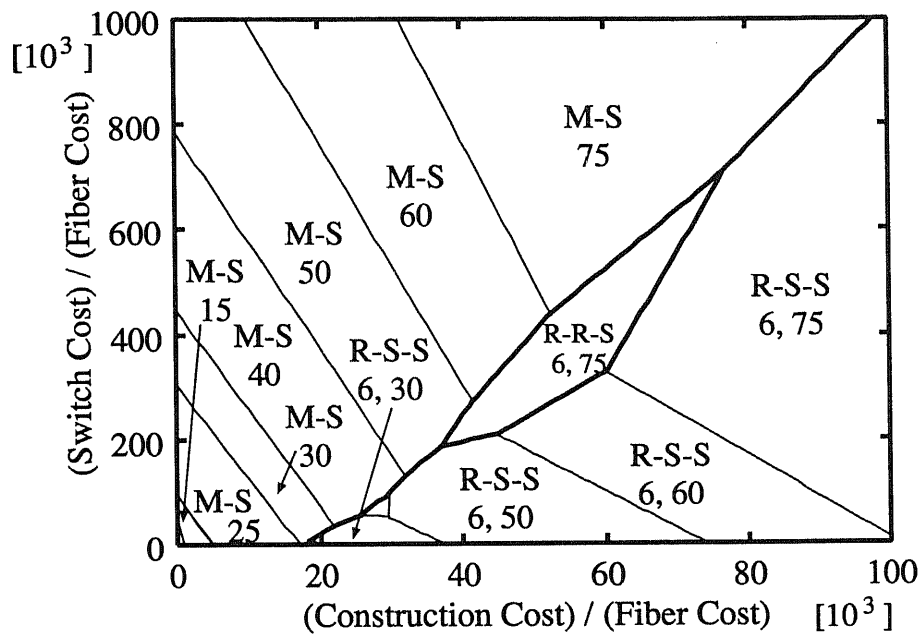


図 4.2 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口一様分布, 伝送路優先敷設)

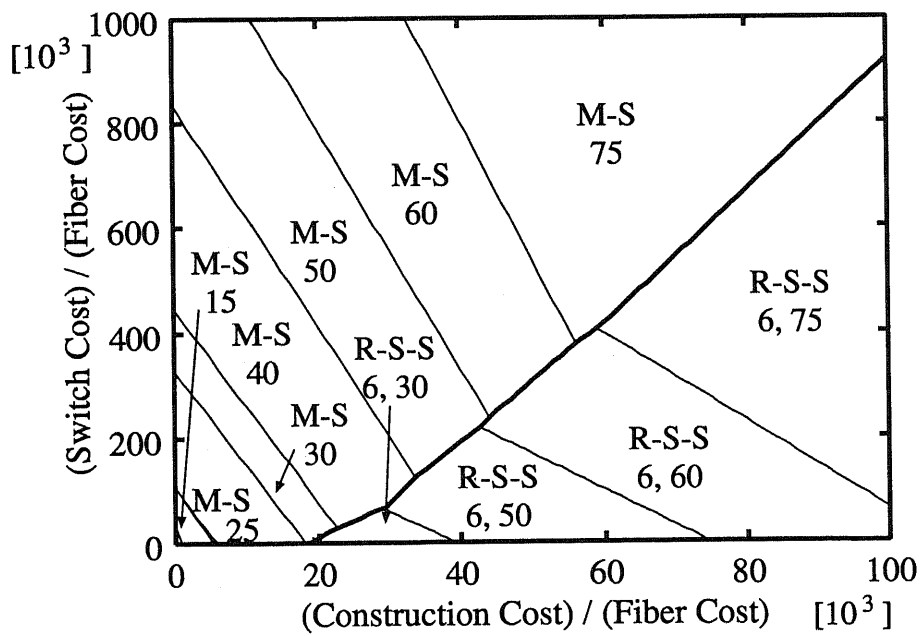


図 4.3 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口1極集中, 伝送路優先敷設)

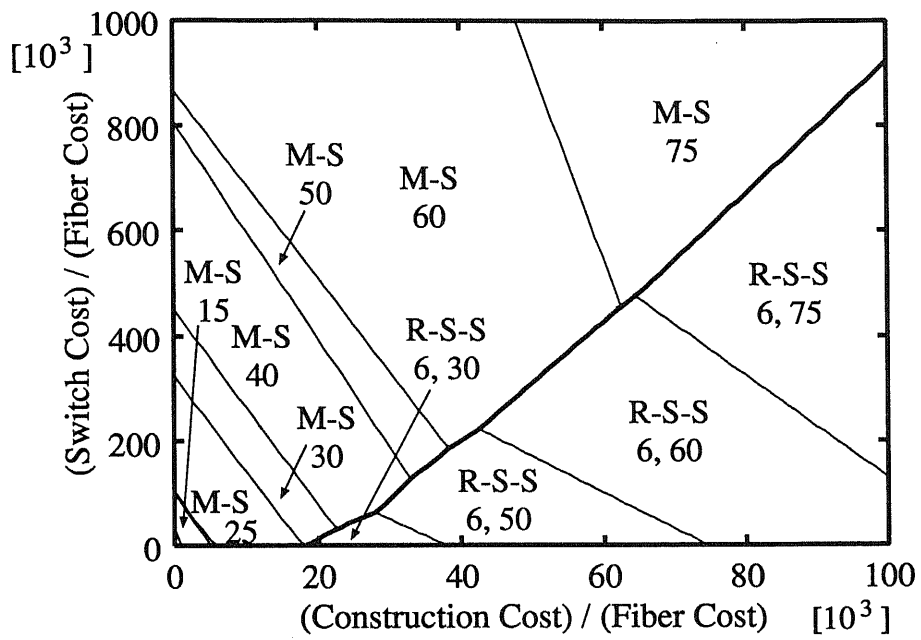


図 4.4 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口2極集中, 伝送路優先敷設)

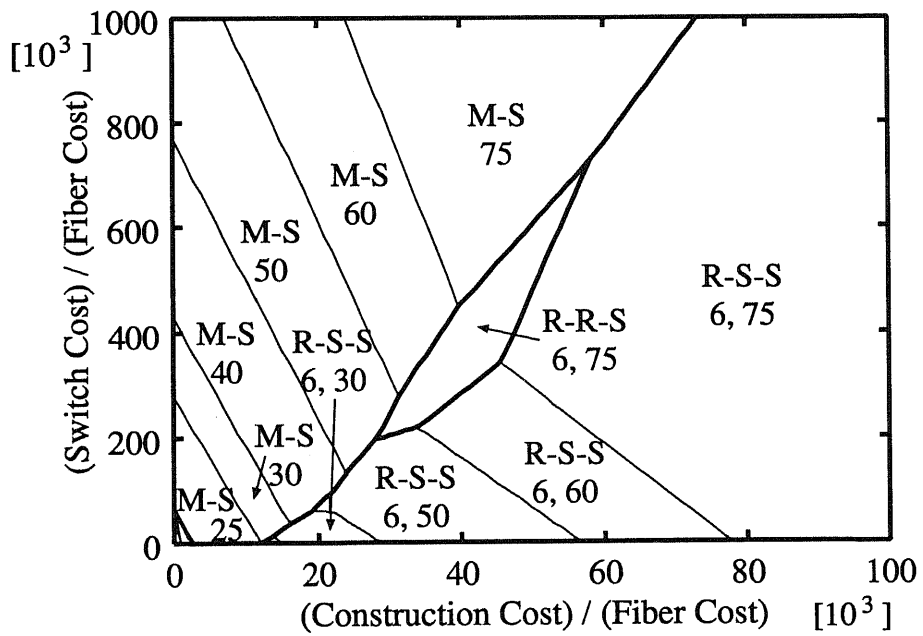


図 4.5 最適領域マップ (トラヒックモデル2, 人口一様分布, 伝送路優先敷設)

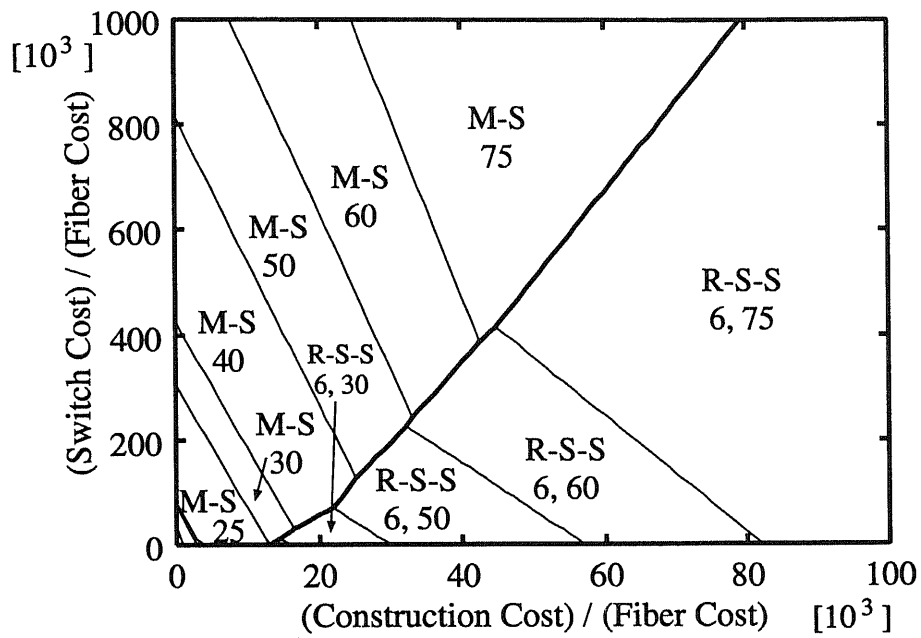


図 4.6 最適領域マップ (トラヒックモデル2, 人口1極集中, 伝送路優先敷設)

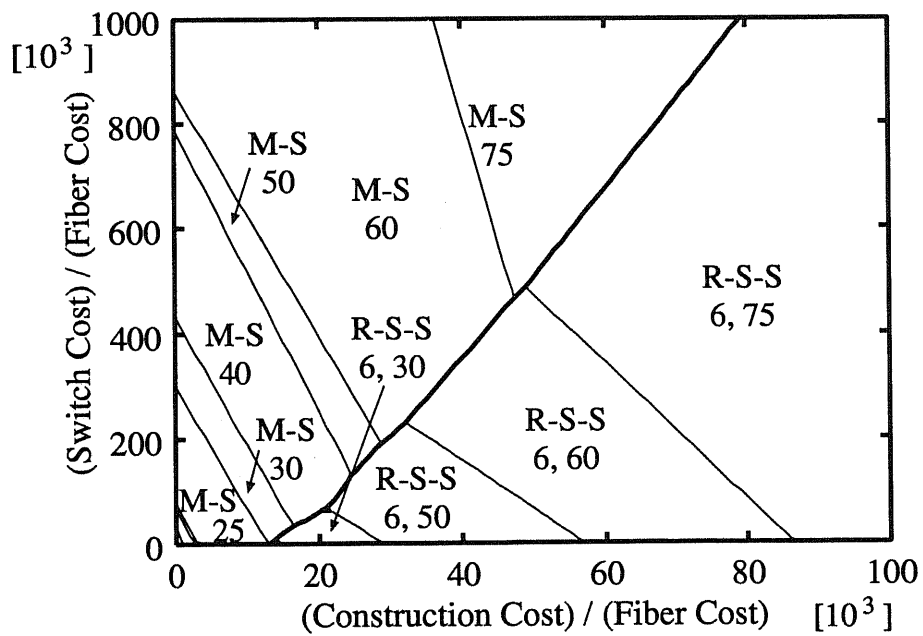


図 4.7 最適領域マップ (トラヒックモデル2, 人口2極集中, 伝送路優先敷設)

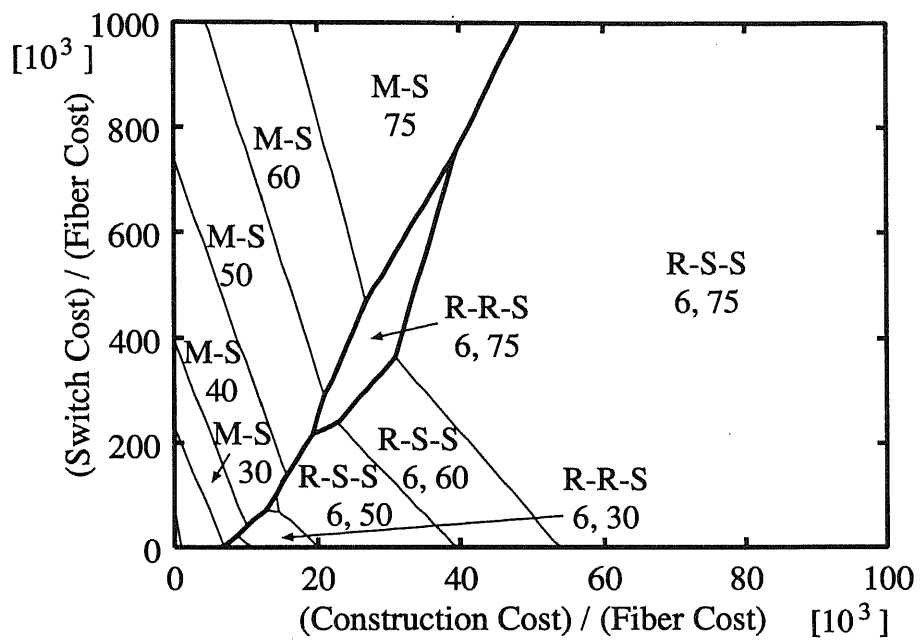


図 4.8 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口一様分布, 伝送路優先敷設)

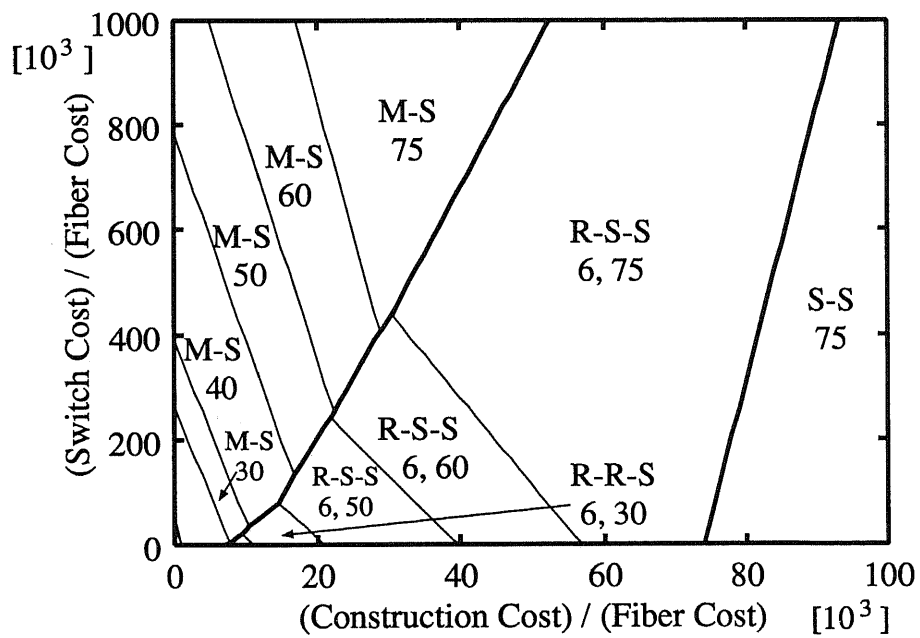


図 4.9 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 1 極集中, 伝送路優先敷設)

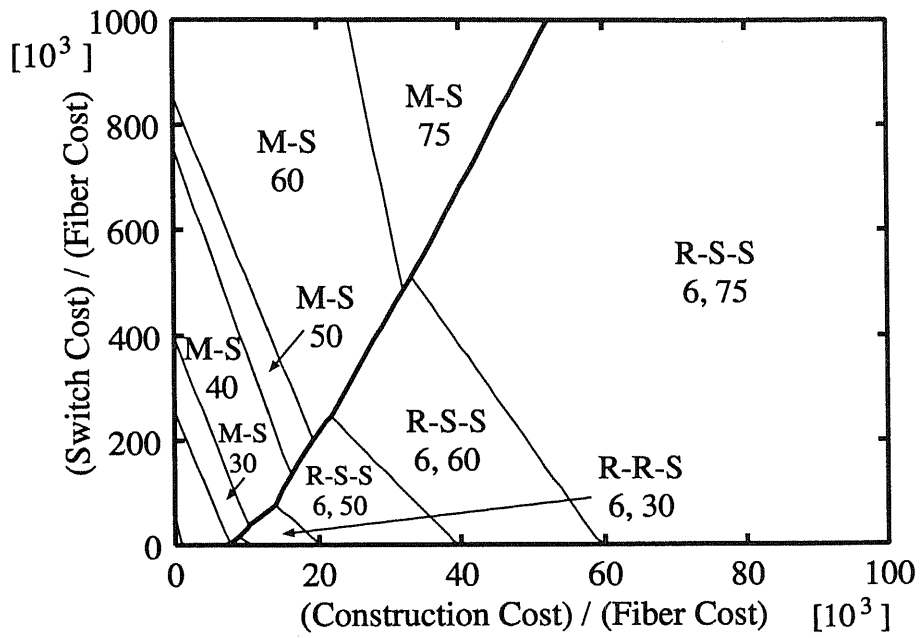


図 4.10 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 2 極集中, 伝送路優先敷設)

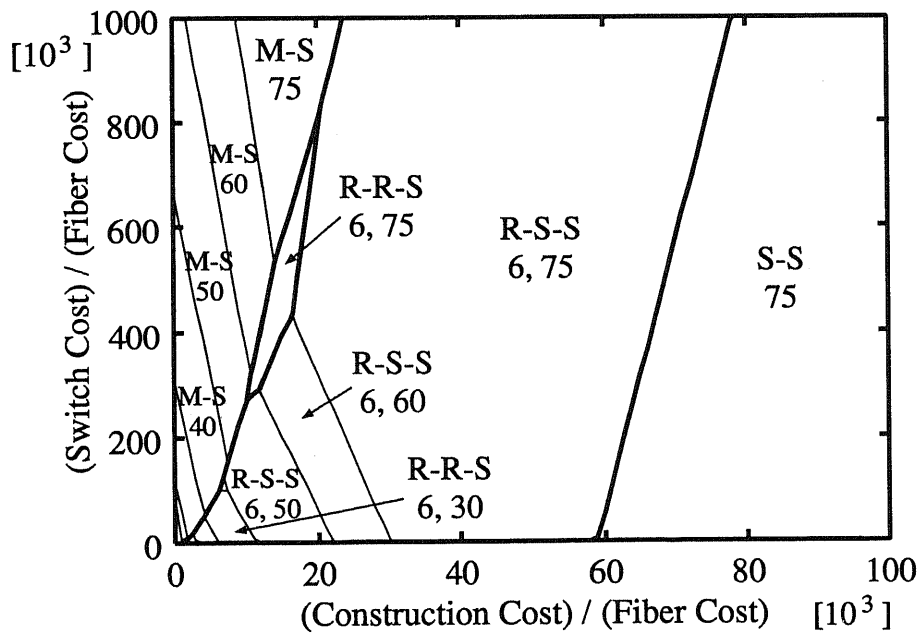


図 4.11 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口一様分布, 伝送路優先敷設)

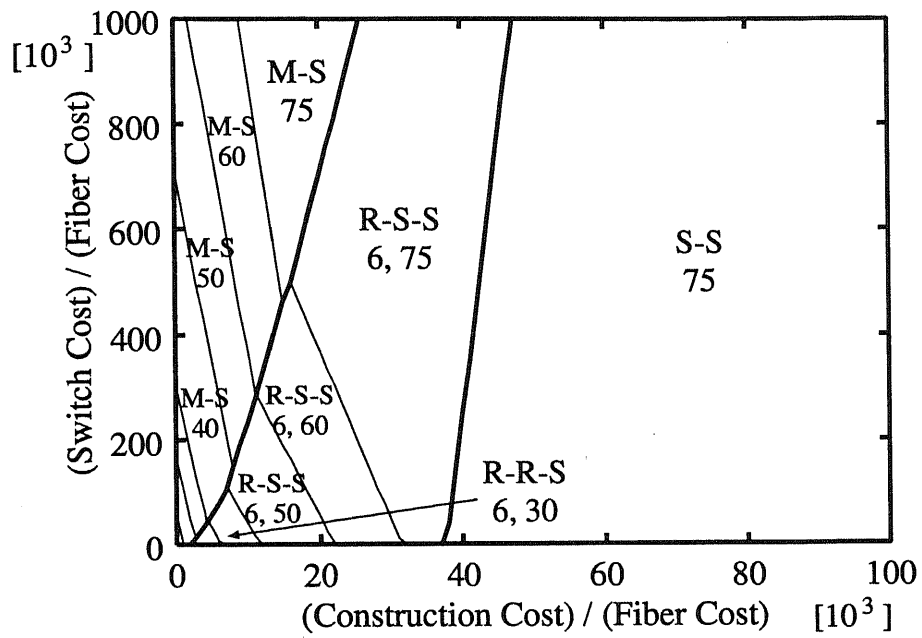


図 4.12 最適領域マップ (トラヒックモデル4, 人口1 極集中, 伝送路優先敷設)

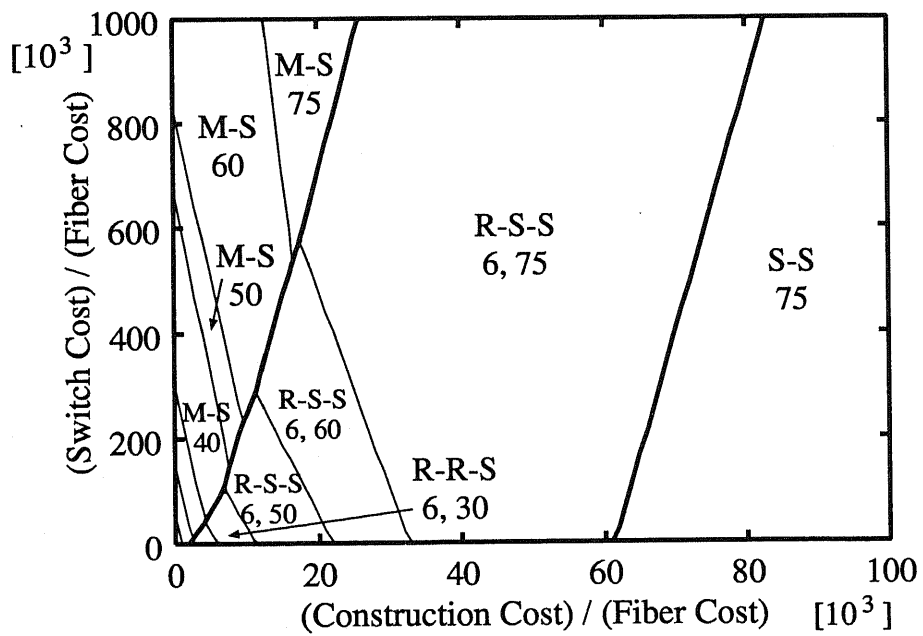


図 4.13 最適領域マップ (トラヒックモデル4, 人口2 極集中, 伝送路優先敷設)



表 4.3 リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト（伝送路優先敷設）  
（第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	0.96	0.95	0.92	0.86
1 極集中形	0.96	0.95	0.93	0.88
2 極集中形	0.96	0.95	0.93	0.88

表 4.4 リング・スター複合構成の第1階層交換機コスト（伝送路優先敷設）  
（第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	1.02	1.02	1.03	1.06
1 極集中形	1.02	1.03	1.04	1.07
2 極集中形	1.02	1.03	1.04	1.07

#### 4.3.4 スター構成敷設の場合の特性評価

伝送路敷設ネットポロジータスター構成の場合の計算結果を、図 4.14 ～ 図 4.25 に示す。図 4.14 ～ 図 4.16 はトラヒックモデル1の場合、図 4.17 ～ 図 4.19 は同モデル2の場合、図 4.20 ～ 図 4.22 は同モデル3の場合、図 4.23 ～ 図 4.25 は同モデル4の場合の最適領域マップである。また、図 4.14、図 4.17、図 4.20、図 4.23 は人口分布が一様分布の場合、図 4.15、図 4.18、図 4.21、図 4.24 は1極集中形の場合、図 4.16、図 4.19、図 4.22、図 4.25 は2極集中形の場合の計算結果である。なお、図の縦軸、横軸は、4.3.3 と同様である。なお、図中の“C”がリング・スター複合構成を表している。伝送路敷設網が存在しない場所には、物理伝送路は敷設できないため、メッシュ、リング、リング・スター複合構成では伝送路の迂回敷設が必要となる。

これらのグラフから、伝送路敷設網がスター構成の場合には、交換機単位コストが非常に小さい領域に限り、下位層にリング・スター複合構成を用いたメッシュ・リング・スター複合2階層構成の最適領域が現れる。また、どの領域においても、上位層にメッシュ構成を用いた2階層構成が最適となることもわかる。スター構成とリング・スター複合構成の違いは、マルチキャスト通信の伝送手法のみであ

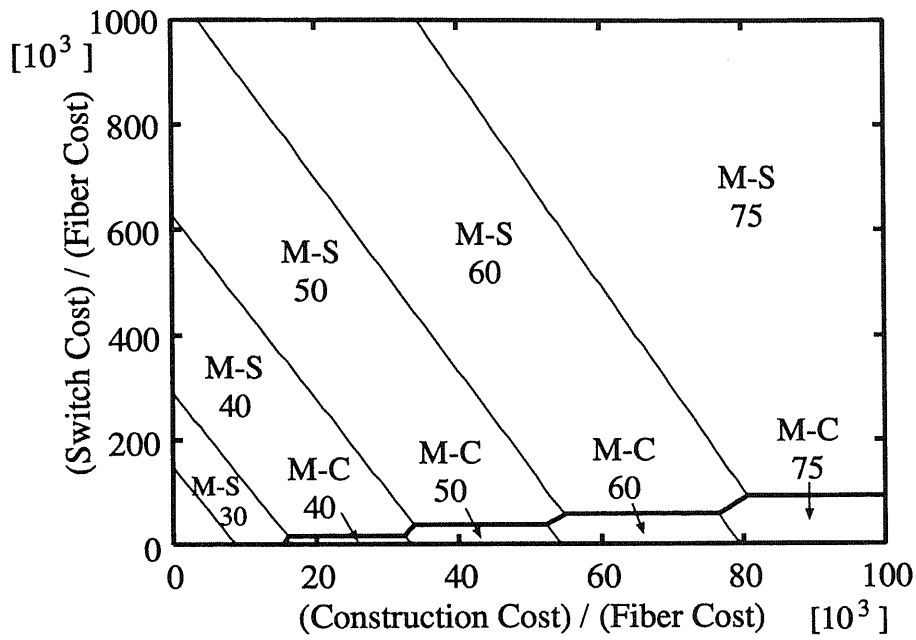


図 4.14 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口一様分布, スター構成敷設)

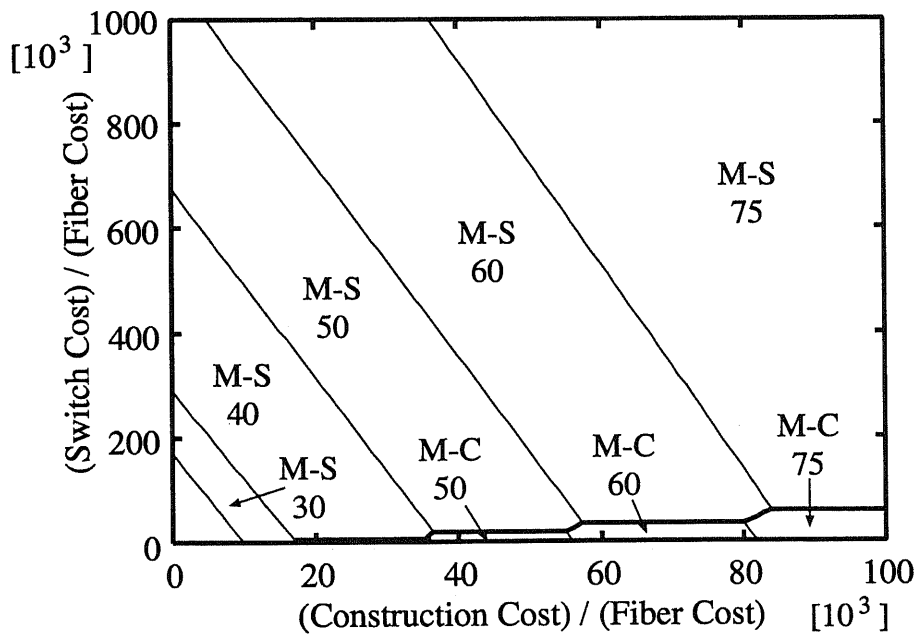


図 4.15 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口1極集中, スター構成敷設)

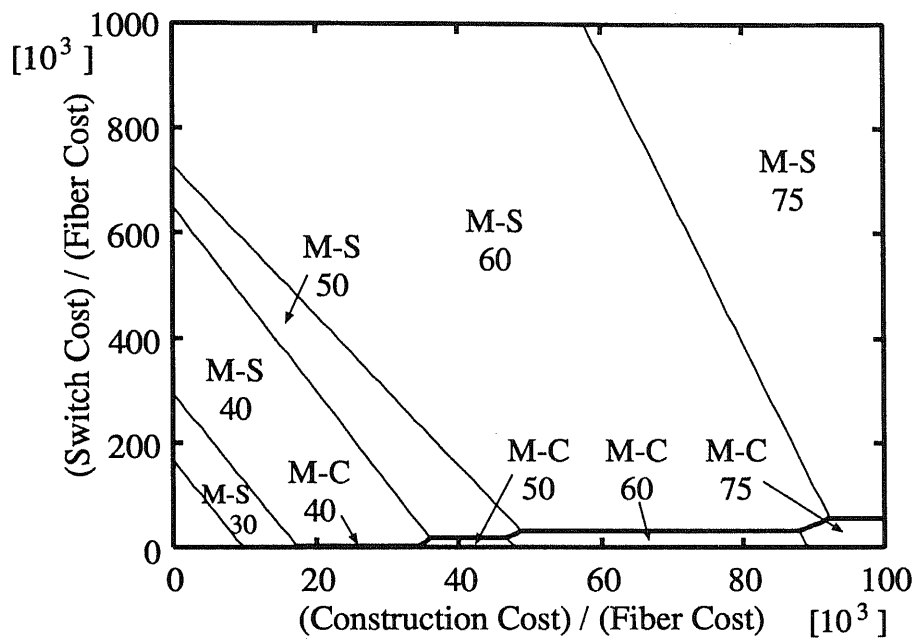


図 4.16 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口2極集中, スター構成敷設)

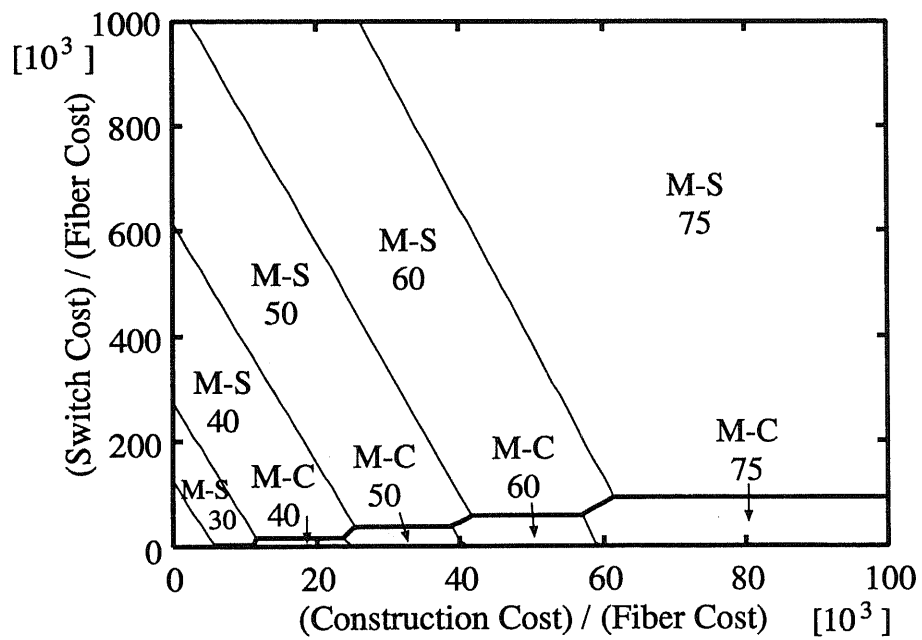


図 4.17 最適領域マップ (トラヒックモデル2, 人口一様分布, スター構成敷設)

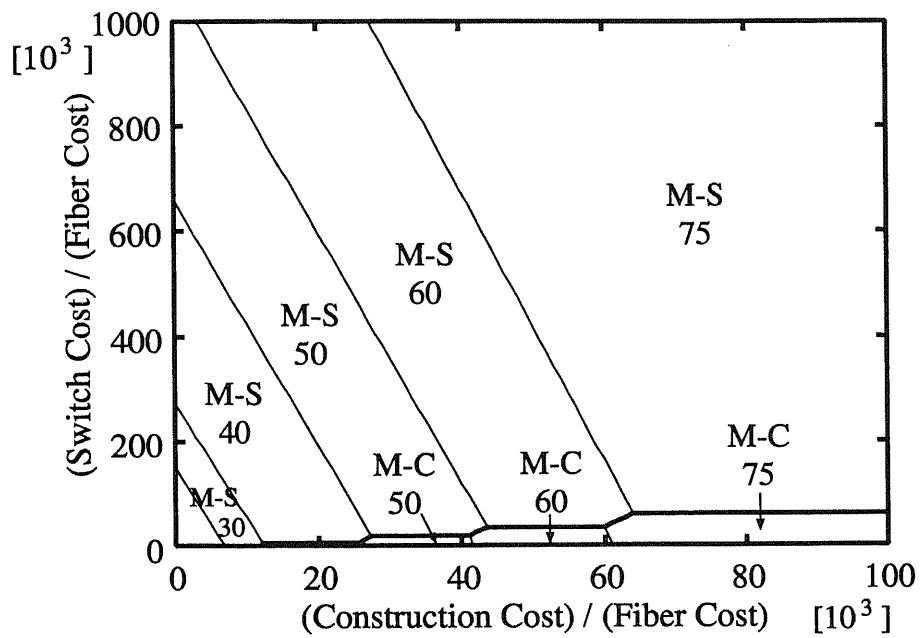


図 4.18 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 1 極集中, スター構成敷設)

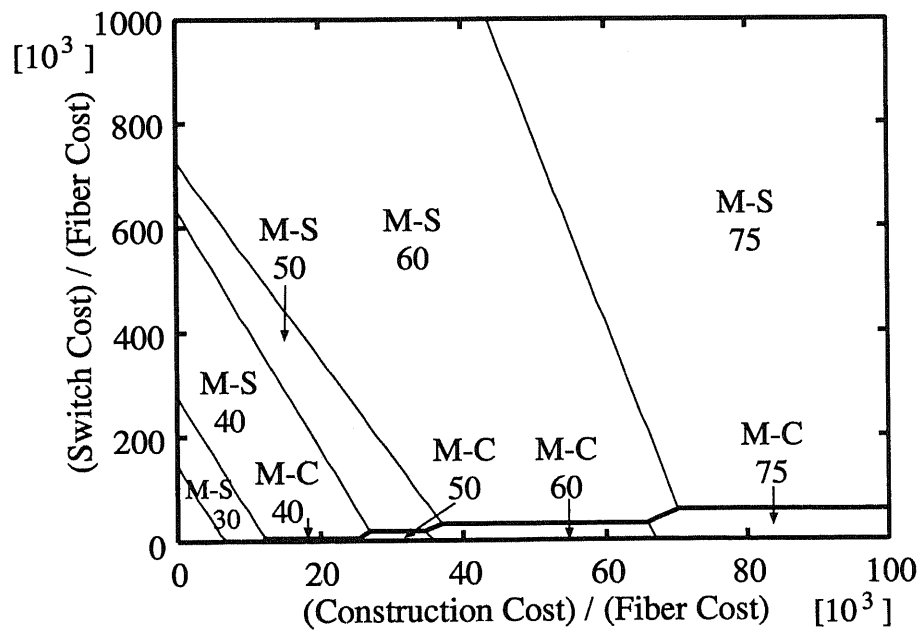


図 4.19 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 2 極集中, スター構成敷設)

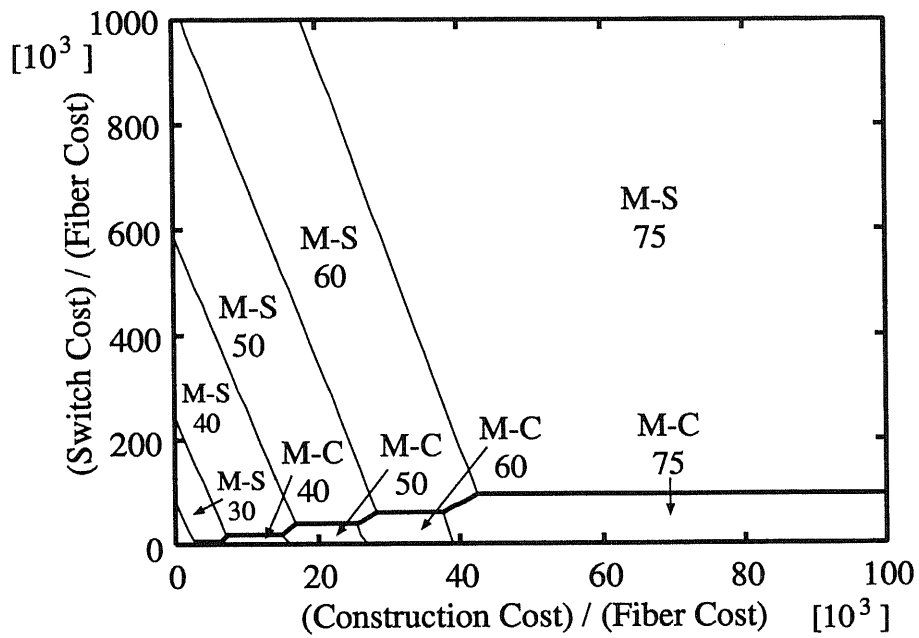


図 4.20 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口一様分布, スター構成敷設)

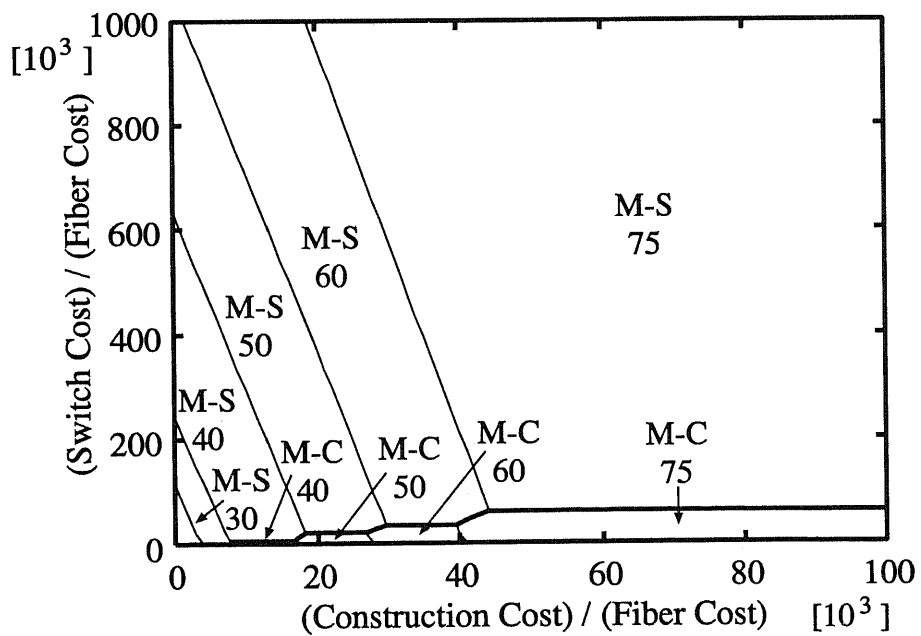


図 4.21 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 1 極集中, スター構成敷設)

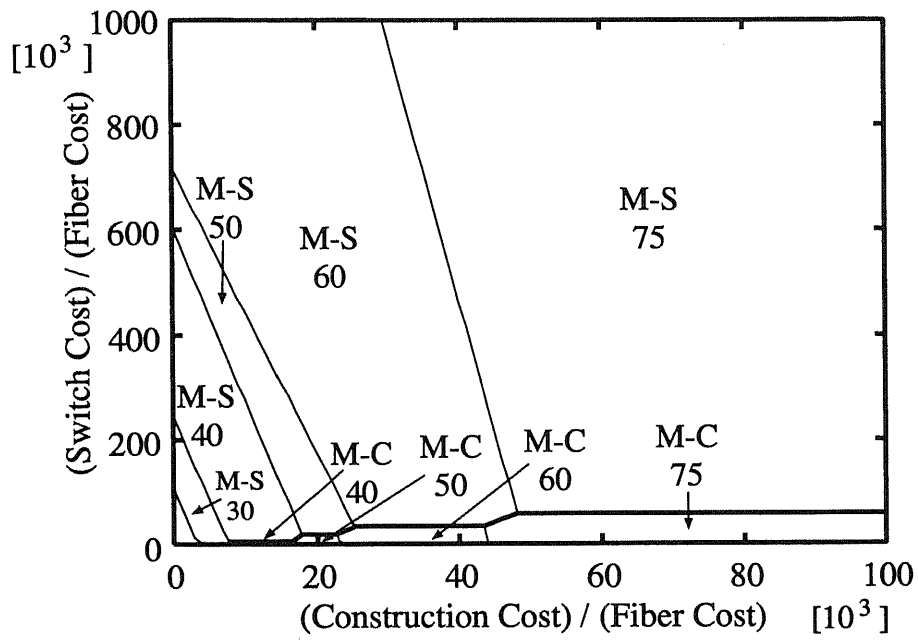


図 4.22 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 2 極集中, スター構成敷設)

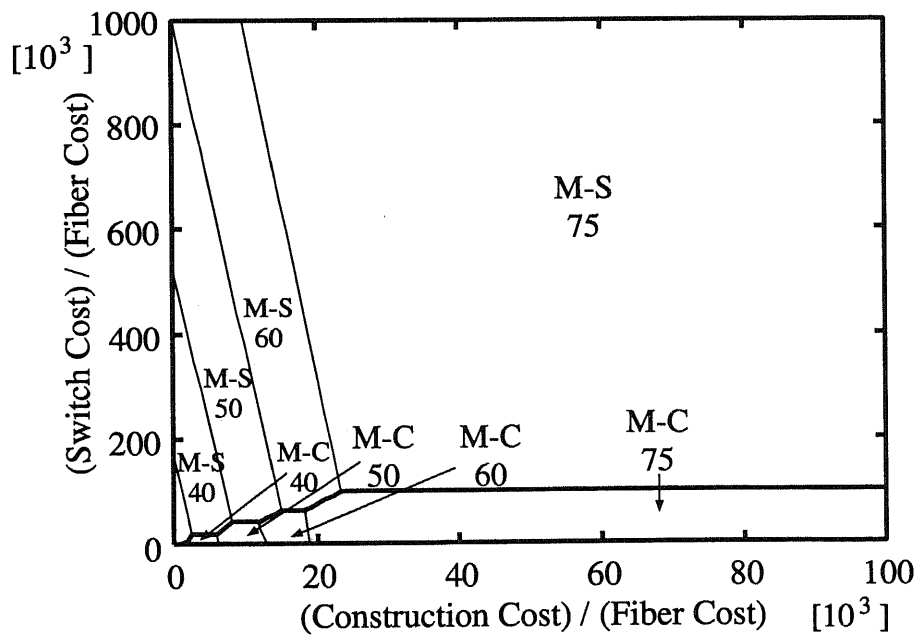


図 4.23 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口一様分布, スター構成敷設)

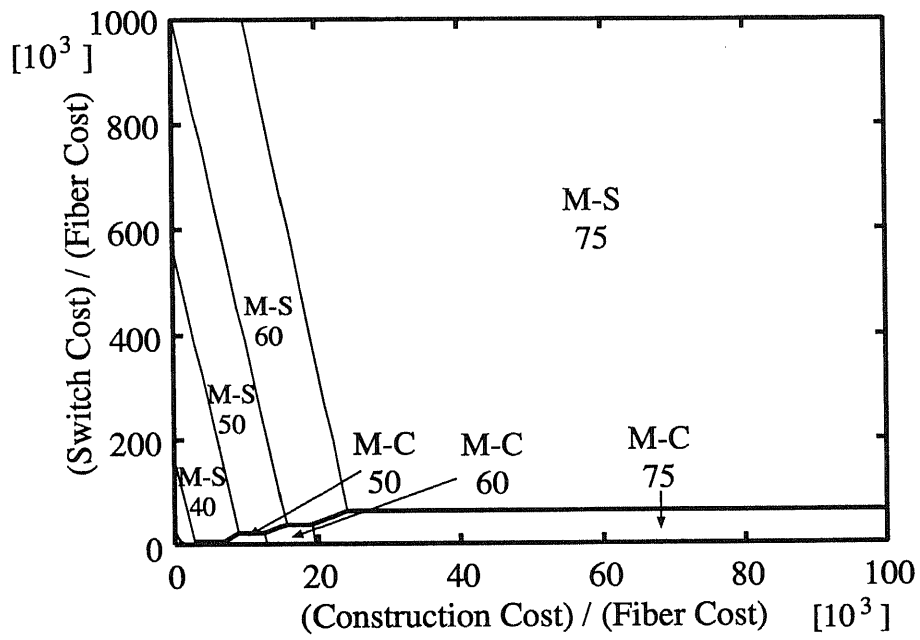


図 4.24 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口 1 極集中, スター構成敷設)

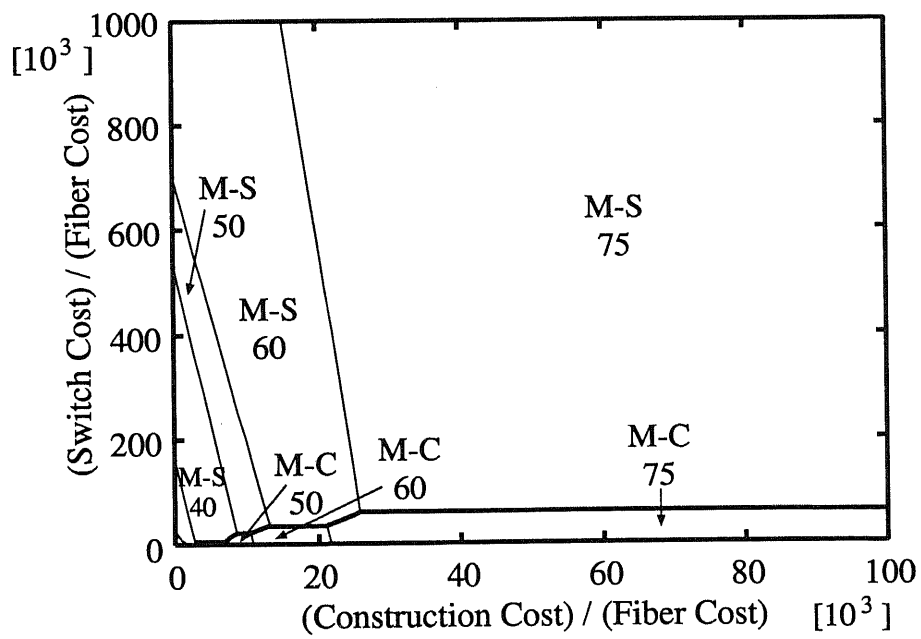


図 4.25 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口 2 極集中, スター構成敷設)

るので、この違いはマルチキャスト通信の伝送によるものと考えられ、以下のよう  
に説明できる。

マルチキャスト通信サービスのサーバは、人口分布にのみ比例して設置されて  
いるため、サーバが計算領域外にある確率は非常に高い。すなわち、上位層を経  
由して通信が行われることが多くなるため、第1階層の計算領域では、スターの  
中央となる交換局(タンデム局)からのマルチキャスト通信になる。スター構成で  
は、タンデム局との直通伝送路をもつため、スター構成の下位局が必要とする分  
だけの交換機資源を、各下位局とタンデム局に準備すれば十分である。一方、リ  
ング構成では、分岐接続を用いてマルチキャスト通信を実現するため、リングを  
構成する各局では自局で必要とする分よりも多くの交換機資源が必要となる。こ  
のような理由により、交換機コストに関しては、第1階層はスター構成のほうが  
有利であると考えられる。なお、交換機コストは伝送路敷設網には依存しないこ  
とから、以上の推測は表4.4によって裏付けされている。

但し、伝送路コストを考えると、スター構成よりもリング・スター複合構成の  
ほうが伝送路コストを小さくすることが可能である。これは結果からも読みとれ、  
交換機単位コストが小さくなれば第1階層でリング・スター複合構成が最適とな  
るのは、伝送路コストがスター構成よりも小さくなっているためである。

第1階層において各トポロジーを用いた場合の伝送路コストを、表4.5、表4.6  
に示す。表4.5はリング構成を用いた場合、表4.6はリング・スター複合構成を用  
いた場合の計算結果であり、ともにスター構成を1とした場合の伝送路コストを  
表している。なお、表中の“モデル”とは、表3.1に示したトラヒックモデルのこ  
とを指す。これらの表から、リング・スター複合構成の伝送路コストはスター構  
成よりも小さいとする前述の推測が正しいことがわかる。

次に、図4.2～図4.13と比較すると、伝送路優先敷設の場合には、リング-ス  
ター-スター3階層構成の最適領域が存在するが、スター構成敷設の場合にはなく  
なり、メッシュ-スター2階層構成、またはメッシュ-リング・スター複合2階層構  
成の最適領域となっている。メッシュ-スター2階層構成とリング-スター-スター  
3階層構成は、2階層構成の上位層メッシュをリング-スターに置き換えて3階層  
にするかどうかの違いであるので、ここではメッシュ構成とリング-スター構成を  
比較する。

図4.2～図4.13では、伝送路敷設単位コストが大きく、交換機単位コストが小  
さい場合に、リング-スター-スター構成が最適となっていた。すなわち、リング-



表 4.5 リング構成の第1階層伝送路コスト（スター構成敷設）  
 （第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	3.58	3.51	3.38	3.06
1 極集中形	3.63	3.57	3.45	3.15
2 極集中形	3.63	3.57	3.45	3.15

表 4.6 リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト（スター構成敷設）  
 （第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	0.99	0.99	0.99	0.98
1 極集中形	1.00	1.00*	1.00*	0.99
2 極集中形	1.00*	1.00*	1.00*	0.99

“\*” は実データが 0.995 以上 0.100 未満であったことを示す。

スター構成はメッシュ構成よりも伝送路敷設コストは小さいが、交換機コストは大きいことがわかる。スター構成敷設を条件とすると、伝送路敷設コストはトポロジー構成によらずほぼ同一となり、リング-スター構成の利点が圧縮されてしまう。このため、リング-スター-スター3階層構成の最適領域は消滅するものと考えられる。

メッシュ-スター2階層構成、及びメッシュ-リング・スター複合2階層構成ともに、伝送路単位コストが小さくなるにつれて、上位層交換局1局のもつ下位層の交換局数は増加する。すなわち、上位層の交換局数が減少する方向に最適構成が変遷する。また、マルチキャスト通信サービスの割合が大きくなるにつれて最適領域の分布が左方向に圧縮された形になる。これらは、3.4.2、及び4.3.3と同じ現象である。人口分布が2局集中形の場合に現れる特徴、すなわち“M-S 60”、“M-C 60”の最適領域が広がる点についても、3.4.2で述べた理由によるものだと考えられる。

### 4.3.5 リング構成敷設の場合の特性評価

伝送路敷設ネットポロジータリング構成の場合の計算結果を、図 4.26 ～ 図 4.37 に示す。図 4.26 ～ 図 4.28 はトラヒックモデル 1 の場合、図 4.29 ～ 図 4.31 は同モデル 2 の場合、図 4.32 ～ 図 4.34 は同モデル 3 の場合、図 4.35 ～ 図 4.37 は同モデル 4 の場合の最適領域マップである。また、図 4.26、図 4.29、図 4.32、図 4.35 は人口分布が一様分布の場合、図 4.27、図 4.30、図 4.33、図 4.36 は 1 極集中形の場合、図 4.28、図 4.31、図 4.34、図 4.37 は 2 極集中形の場合の計算結果である。なお、図の縦軸、横軸は、4.3.3、4.3.4 と同様である。伝送路敷設網が存在しない場所には、物理伝送路は敷設できないため、メッシュ、スター、リング・スター複合構成では伝送路の迂回敷設が必要となる。

これらの結果から、伝送路敷設網がリング構成の場合には得られる特性に大きな変化が現れることがわかる。まず、リング・スター複合構成を第 1 階層に用いた場合の最適領域が広がることわかるが、理由は明確である。4.3.4 での考察と同様、スター構成とリング・スター複合構成の違いは、マルチキャスト通信の伝送経路のみである。1対1通信の伝送経路はどちらの場合もスター構成であり、迂回敷設が行われるが、これによる伝送路コストの増分はともに同じである。マルチキャスト通信の伝送経路は、交換機コストを考えるとスター構成の特性がよいが、伝送路コストを考えるとリング構成のほうが有効である。伝送路敷設ネットポロジータリング構成となっているので、リング構成の伝送路は迂回することなく敷設可能であるのに対し、スター構成は迂回敷設を余儀なくされる。よって、リング構成の伝送路コスト特性はさらによくするため、マルチキャスト通信の伝送にリング構成を用いるリング・スター複合構成の最適領域が広がると考えられる。

前節と同様に、第 1 階層における各トポロジーの伝送路コストを、表 4.7、表 4.8 に示す。表 4.7 はリング構成を用いた場合、表 4.8 はリング・スター複合構成を用いた場合の計算結果であり、ともにスター構成を 1 とした場合の伝送路コストを表している。なお、表中の“モデル”とは、表 3.1 に示したトラヒックモデルのことを指す。このように、リング・スター複合構成の伝送路コストはスター構成よりも 5% から 19% も小さくなるため、その最適領域が大きく広がることが証明できる。リング構成では、最大約 60% の伝送路コスト低減が可能となるが、表 4.2 に示したとおり、交換機コストはスター構成の 4.2 倍以上となるため、リング構成の第 1 階層への適用は避けるべきである。

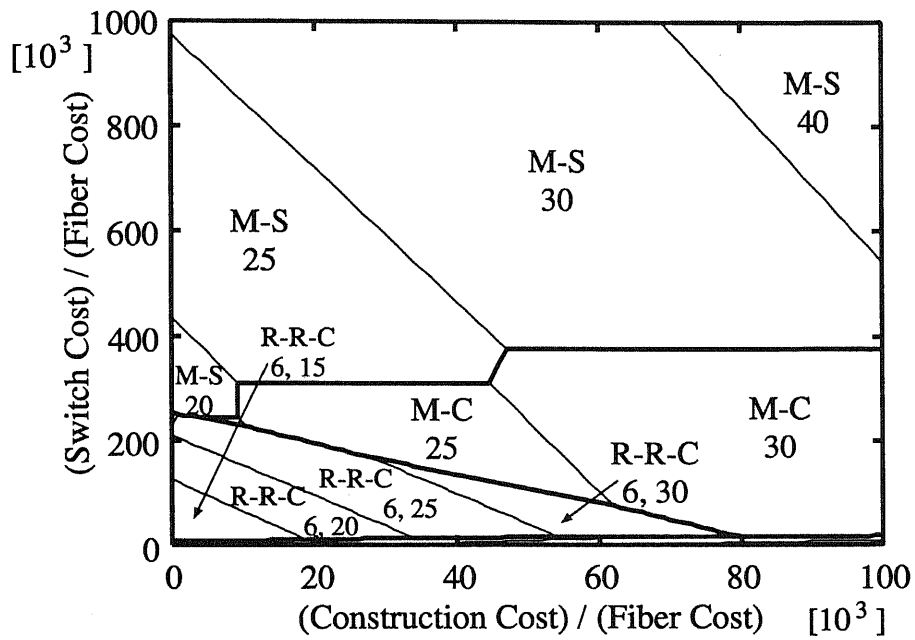


図 4.26 最適領域マップ (トラヒックモデル 1, 人口一様分布, リング構成敷設)

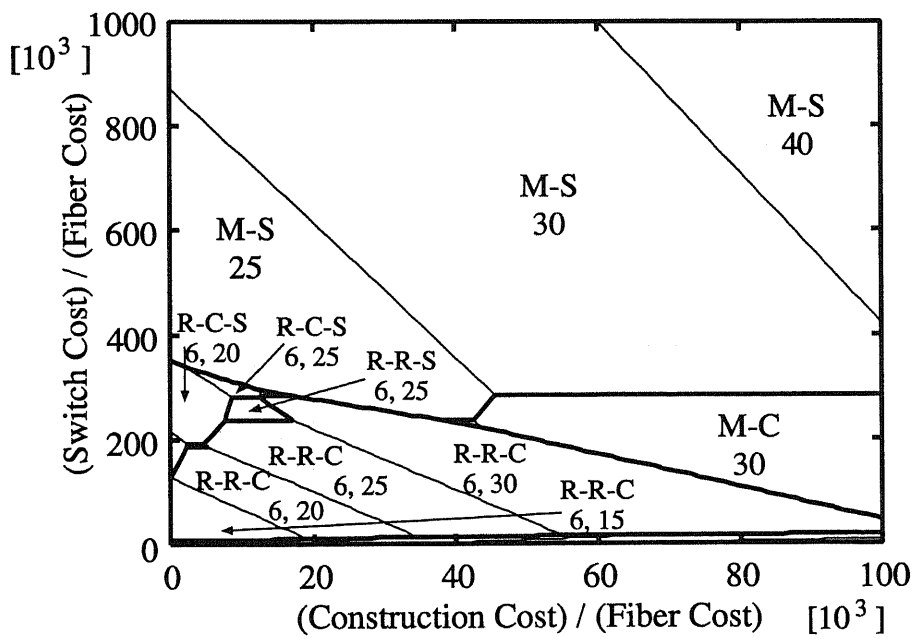


図 4.27 最適領域マップ (トラヒックモデル 1, 人口 1 極集中, リング構成敷設)

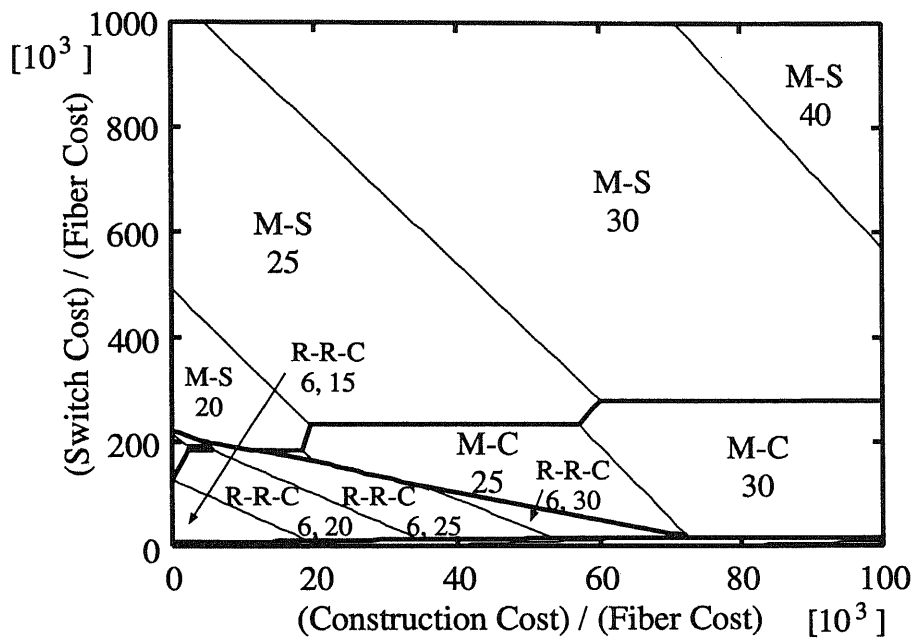


図 4.28 最適領域マップ (トラヒックモデル1, 人口2極集中, リング構成敷設)

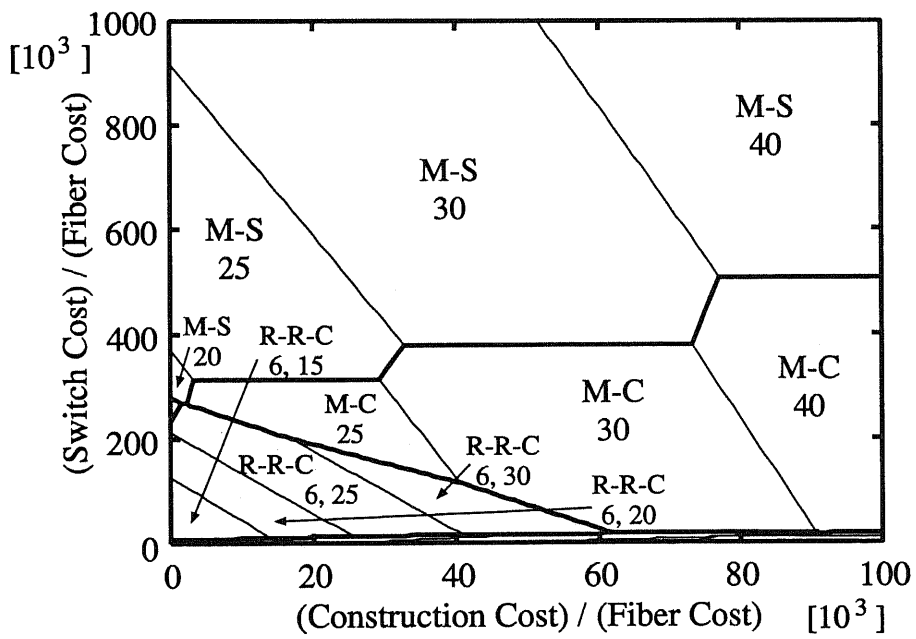


図 4.29 最適領域マップ (トラヒックモデル2, 人口一様分布, リング構成敷設)

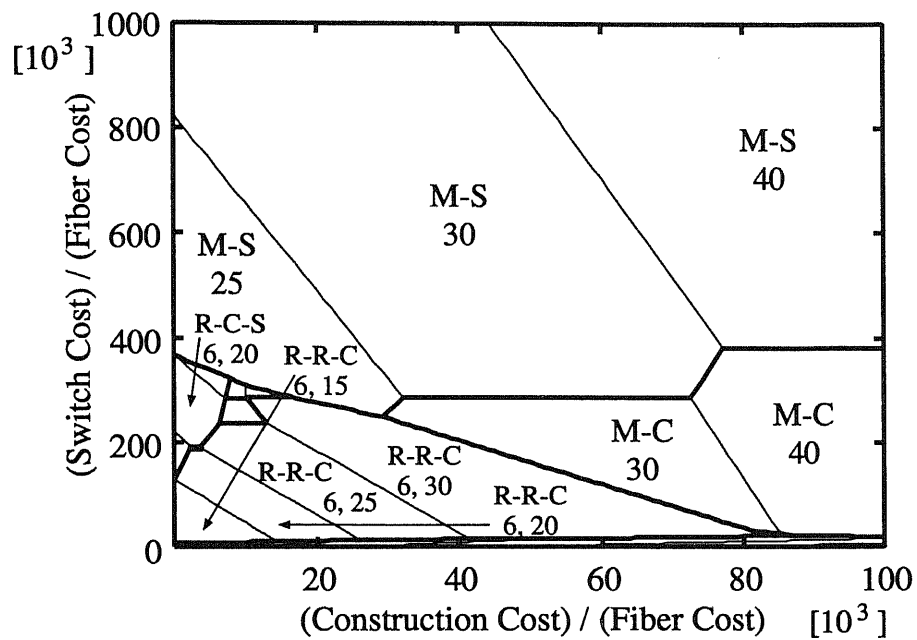


図 4.30 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 1 極集中, リング構成敷設)

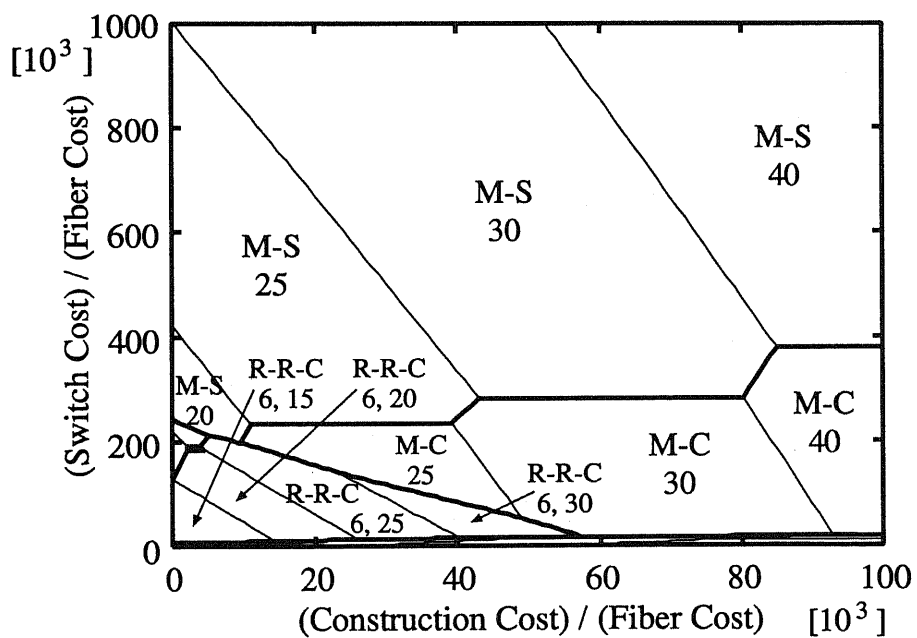


図 4.31 最適領域マップ (トラヒックモデル 2, 人口 2 極集中, リング構成敷設)

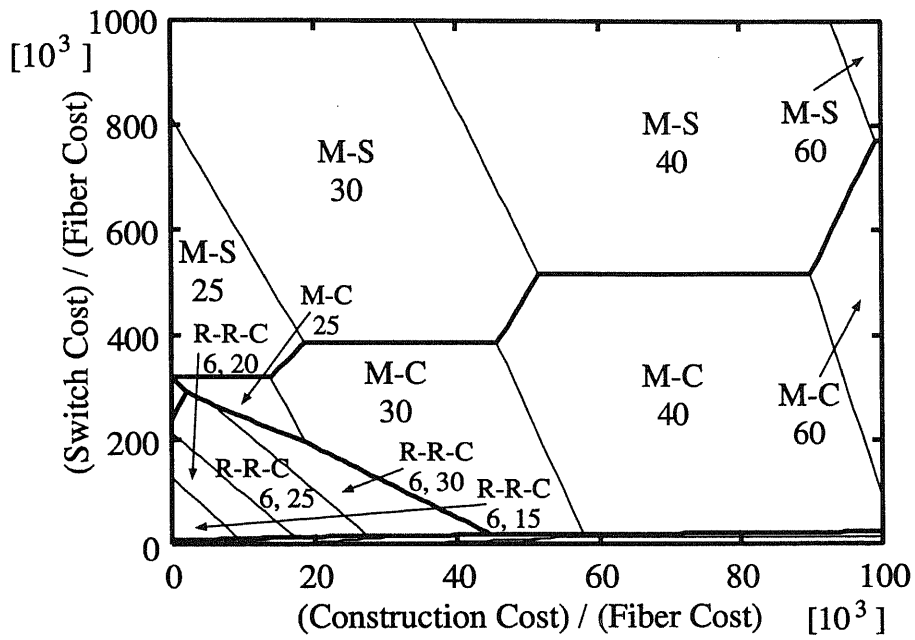


図 4.32 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口一様分布, リング構成敷設)

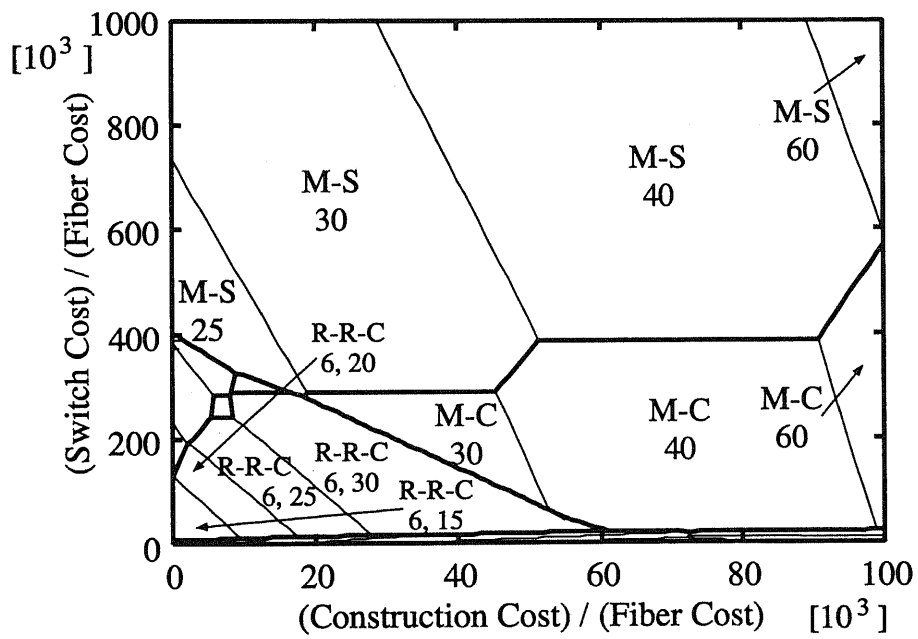


図 4.33 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 1 極集中, リング構成敷設)

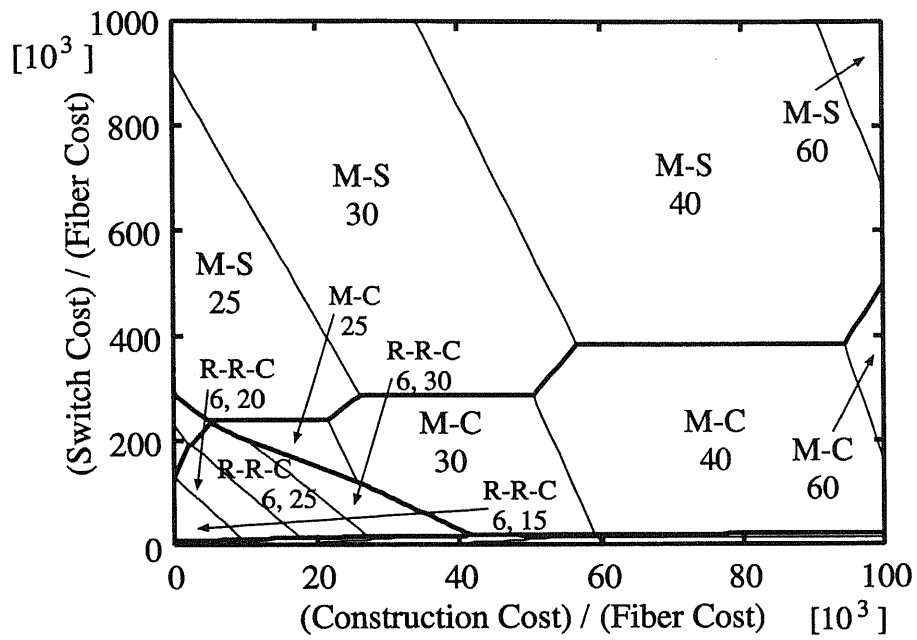


図 4.34 最適領域マップ (トラヒックモデル 3, 人口 2 極集中, リング構成敷設)

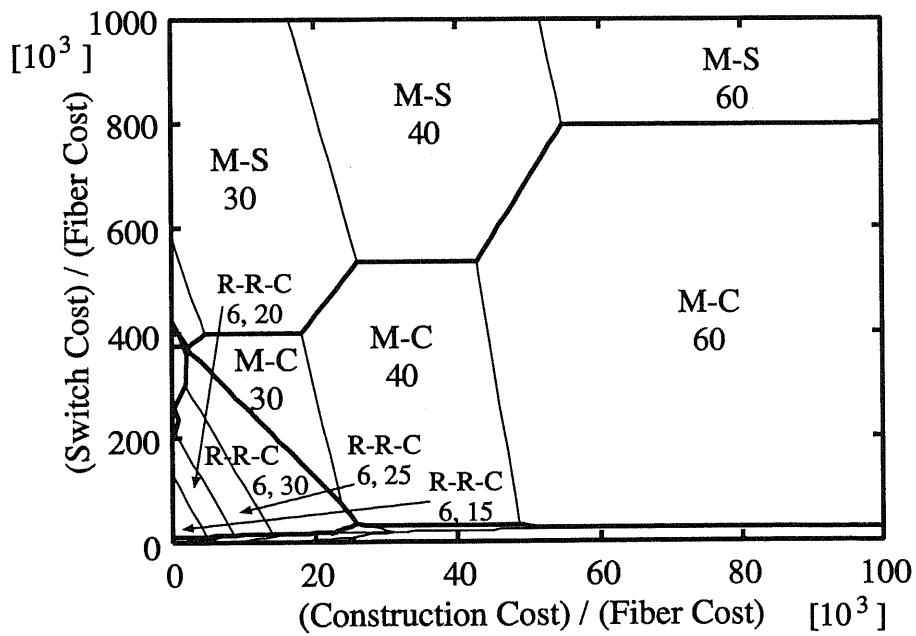


図 4.35 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口一様分布, リング構成敷設)

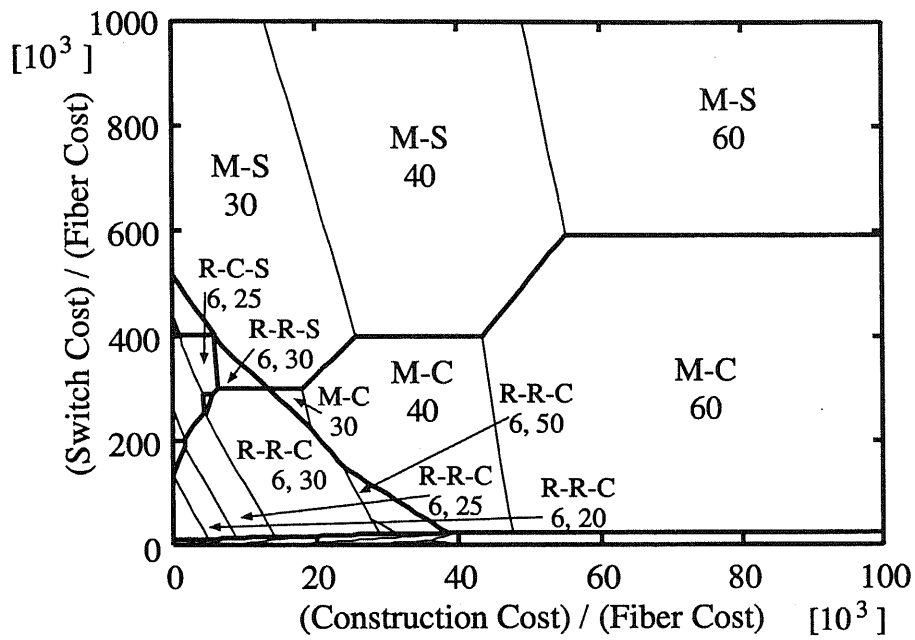


図 4.36 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口 1 極集中, リング構成敷設)

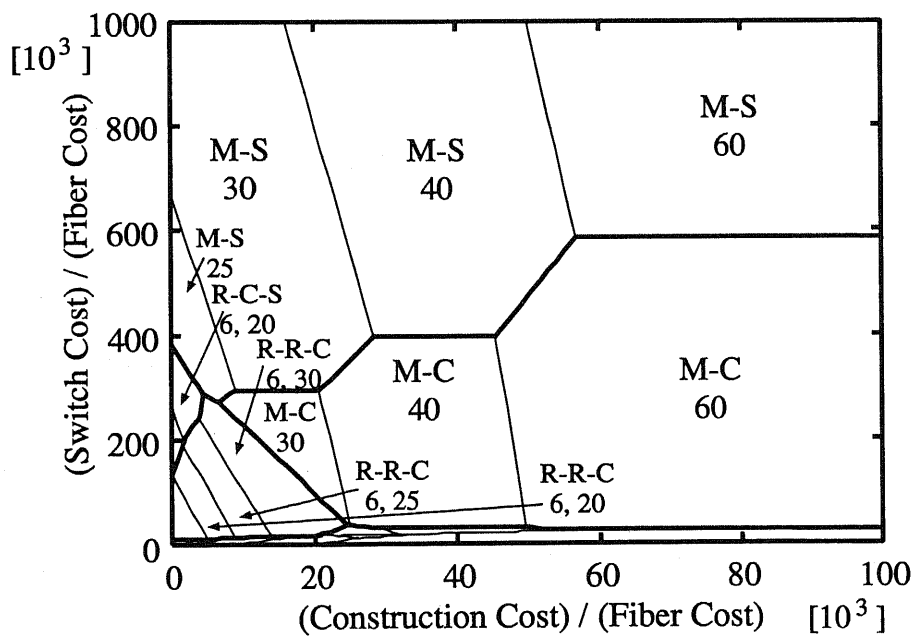


図 4.37 最適領域マップ (トラヒックモデル 4, 人口 2 極集中, リング構成敷設)



表 4.7 リング構成の第1階層伝送路コスト（リング構成敷設）  
 （第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	0.48	0.47	0.45	0.41
1 極集中形	0.48	0.48	0.46	0.42
2 極集中形	0.48	0.48	0.46	0.42

表 4.8 リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト（リング構成敷設）  
 （第2階層交換局1局がもつ第1階層交換局数40，スター構成を1とする）

人口分布	モデル1	モデル2	モデル3	モデル4
一様分布	0.94	0.92	0.89	0.81
1 極集中形	0.95	0.93	0.90	0.82
2 極集中形	0.95	0.93	0.90	0.82

次に、交換機単位コスト、伝送路敷設単位コストがともに小さくなるか、または伝送路単位コストが大きくなる領域、すなわちグラフの左下の領域では、第2、第3階層にリング構成を用いたリング-リング-リング・スター複合3階層構成等の最適領域が存在する。これは、伝送路トポロジ-と伝送路敷設網トポロジ-が一致し、伝送路の無駄な迂回が省かれるため、他のトポロジ-と比して伝送路コストが小さくなるためである。よって、伝送路単位コストが大きくなれば、第2、第3階層にリング構成を用いた構成が最適になるのであろう。

伝送路単位コストが比較的大きくなれば、メッシュ-スター2階層構成、またはメッシュ-リング-スター複合2階層構成の最適領域が広がる。これらのトポロジ-では、伝送路単位コストが小さくなるにつれて、上位層交換局1局のもつ下位層の交換局数は増加する。すなわち、上位層の交換局数が減少する方向に最適構成が変遷する。これは、3.4.2、4.3.3、4.3.4と同様の傾向である。また、マルチキャスト通信サービスの割合が大きくなるにつれて最適領域の分布が左方向に圧縮された形になること、人口分布が2極集中形の場合に“M-S 60”，“M-C 60”の最適領域が広がる点についても、3.4.2、及び4.3.3、4.3.4と同様の特徴である。

## 4.4 むすび

本章では、従来の伝送路網トポロジーの特徴を定性的、定量的に評価し、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在する場合に適した新しい通信網トポロジーであるリング・スター複合構成を提案し、特性評価を行った。また、実際に通信網を構成する際には、既に存在する管路等の伝送路敷設網を利用したり、伝送路敷設網の共有を行うこともあり、伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーは必ずしも一致しないと考えられるので、伝送路トポロジーと伝送路敷設網トポロジーが異なる場合の特性評価も行った。

提案したリング・スター複合構成は、マルチキャスト通信の伝送にリング構成を用い、1対1通信の伝送にスター構成を用いるという非常に簡単な構成であるが、伝送路敷設網がスター、またはリング構成であれば、交換機単位コストが比較的小さい領域において最適となることがわかった。また、マルチキャスト通信において、最下位層である第1階層にスター構成を用いれば、交換機コストを抑えることが可能であること、第1階層にリング構成を用いた場合には、伝送路コストを抑えることが可能であるが、交換機コストはスター構成よりも大きくなってしまふことなどがわかった。交換機コストは伝送路敷設網トポロジーに依存しないため、第1階層交換機コストがスター構成の4倍となるリング構成は、伝送路敷設網がどのようなトポロジーであってもほとんど適用不可能であることがわかった。一方、第1階層交換機コストがスター構成と比してわずか2~3%増となるリング・スター複合構成では、伝送路コストを低減できるため、伝送路敷設網によっては大幅にコストを削減でき、適用領域も広範囲に広がることがわかった。さらに、伝送路敷設網トポロジーをあらかじめスター構成やリング構成などに設定した場合には、上位層にメッシュ構成を用いた2階層構成がどの領域においてもほぼ最適となることもわかった。

第3章、及び本章のような大規模マルチキャスト通信網を想定した検討では、対象とする通信網が大規模であるため、計算が複雑になる。これを回避するために、交換局の配置が格子状であったり、人口分布が縦軸方向に一様分布していたりというように、非常に大きな仮定を必要とした。同時に、ミクロな視点からの考察が非常に困難である。すなわち、得られた結果は通信網全体としての最適構成であり、各階層の特性や、各トポロジーの特徴を見い出すのは難しいなどの問題点がある。また、前述のとおり、上位層をメッシュ構成にした2階層構成の最適領域

が非常に広範囲に広がることから、最下位層となる第1階層にターゲットを絞って、最適トポロジーの特性評価を行う必要があると考える。

そこで、次章では階層構成の一部である第1階層に着目し、1都道府県程度の小規模通信網の最適構成について検討する。



## 第 5 章

# 小規模マルチキャスト通信網の 最適構成

## 5.1 まえがき

第3章、第4章では、日本全国を覆うような非常に広範囲にわたる大規模マルチキャスト通信網の最適構成について検討を行った。その結果、どのような状況下でも上位層をメッシュ構成とした2階層構成が最適であり、交換機単位コストが大きい場合にはメッシュスター構成が、小さい場合にはメッシュリング・スター複合構成が最適であるとの結論を得た。また、伝送路単位コストが大きくなった場合にのみ、第2、第3階層にリング構成を用いたリング-リング-リング・スター複合構成の適用も可能であることがわかった。

通信網を階層的に構築する場合、全体が最適となるには各階層を最適にする必要がある。そこで本章では、階層構成の一部を取り出し、局所的な最適構成について検討を行う。なお、本章で対象とするのは、最も加入者側に近い第1階層である。

第1階層となる領域は、トラヒックの地域性や料金体系等の観点から、およそ1都道府県程度の大きさをもち、大規模階層構成の中に多数含まれることになる。このため、第1階層構成に必要なコストは、大規模階層構成全体のコストのかなりの部分を占めると考えられる。また、マルチキャスト通信は分岐接続により伝送されるため、通信網の上位にいくほど全トラヒックに占めるマルチキャスト通信トラヒックの割合は減少すると考えられる。すなわち、上位層ほど1対1通信の特色が大きく現れると考えられる。上位層では、1対1通信トラヒックは十分に集束されているうえ、信頼性の面からもメッシュ構成の適用が有効である。前述のとおり、実際に得られた結果からも、上位層にメッシュ構成を用いた2階層構成の適用領域が非常に広い。

このような理由から、階層構成の一部分とみなした比較的小さい領域（すなわち、第1階層計算領域）において、一つのトポロジーにて網を構成したときに最適となる形態を明らかにする。

また、本章では、基本網トポロジーとして、既に提案されているマルチリング、デルタスターの各構成を適用を行い、それぞれの特性を検討する。特に、デルタスター構成の適用性について評価する。

## 5.2 定量的評価のためのモデル

### 5.2.1 計算領域モデル

本章では、比較的小さい領域、すなわち階層構成における第1階層計算領域においてマルチキャスト通信網構成を行い、網構成にかかるコストを計算、特性評価を行う。第1階層となる領域は、トラヒックの地域性や料金体系等の観点から、およそ1都道府県程度の大きさをもつと考えられる。そこで、100 km 四方の計算領域モデルを仮定し、検討を行う。

#### (1) 人口分布モデル

前述の計算エリアモデルは階層構成の一部であるので、計算領域内の人口のみならず、計算領域外の人口も考慮する必要がある。本章では、計算領域内の人口を200万人とし、計算領域外を含めた総人口を1億人と仮定する。

実社会においては、人口は大都市に集中すると考えられる。そこで、計算領域の中心に人口が集中しているとし、中心から離れるにつれ小さくなるような人口密度分布を用いることとする。具体的には、中心からの距離に対し指数的に減少する関数を用い、最小人口密度に対する最大人口密度の比（人口集中度）を与え

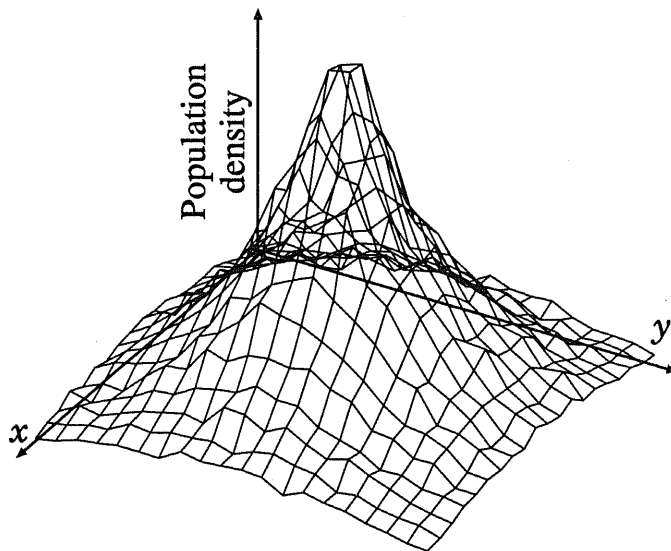


図 5.1 人口分布

ることで分布関数を決定する。なお、人口集中度は30.0と仮定する。この関数を確率密度関数と考え、乱数を用いて人口分布を決定する。本章で用いる人口分布を、図5.1に示す。

## (2) 交換局配置モデル

第3章、第4章の結果から、一計算領域内の最適な交換局数は、将来の伝送路コストや交換機コスト等により変化する。しかし、現時点でこれらを予測することは困難である。そこで、現在の我が国のデジタル網において、一つの下位層をなす局数が40局程度であることを参考にし、計算領域内の交換局数を40局とする。交換局はランダム配置とするが、人口が集中している地域では交換局もある程度集中していると考えられるので、若干の重みをつけて配置する。本章で用いる交換局配置を、図5.2に示す。人口の集中地点に最も近い交換局17がタンデム局であると仮定する。よって、計算領域内の交換局が領域外と通信する場合には、タンデム局までを考慮すればよい。

さらに、(1)で設定した人口、すなわち加入者は、最短距離にある交換局に収容されているとする。これにより、計算領域内の最小収容加入者数は交換局35で

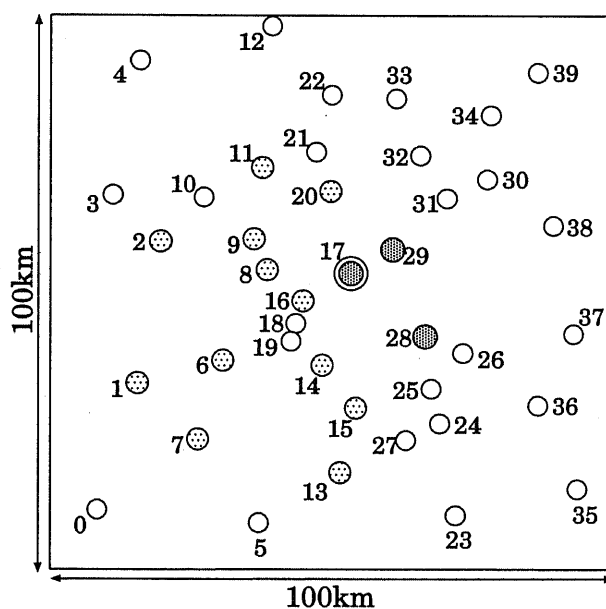


図 5.2 交換局配置モデル



19,002人、最大収容加入者数は、交換局17で122,043人となる。

今後は、マルチメディア端末が現在以上に普及すると考えられる。そこで本章では、サービスを利用するための端末は全加入者が所有しているものと仮定する。

## 5.2.2 サービスモデル

3.2.3では、通信サービスをマルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスに分類し、マルチキャスト通信サービスをさらに細かく3種類に分類した。しかし、マルチキャスト通信サービスを詳細に分類しても、異なるのはサービス選択確率のみであり、サービスの受信形態そのものは同じであるので、これらの分類が計算結果に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。そこで本章では、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスの二つに分類する。

### (1) マルチキャスト通信サービス

マルチキャスト通信サービスの場合、同じサービスであれば分岐接続を用いて伝送される。よって、3.2.3と同様に、サービス(チャンネル)ごとの選択確率を与える必要がある。一般に、テレビジョン放送等のサービス受信確率は、サービスごとに異なり、ある程度の偏りが生じると考えられる。そこで、幾何分布を用いて各サービスの選択確率を決定する。幾何分布定数を $k_g$  ( $0 < k_g < 1$ ) とすると、サービス番号 $i$ のマルチキャスト通信サービスを選択する確率 $p_m(i)$ は、

$$p_m(i) = (1 - k_g) k_g^{i-1} \quad (5.1)$$

となる。幾何分布は減少関数であるので、サービス番号 $i$ が大きくなるほど $p_m(i)$ は限りなく0に近づく。そこで、計算領域内外の総加入者1億人のうち、1人以上がサービスを受信している確率が0.1%未満になったところで計算を打ち切ることとする。確率がこれよりも小さいサービスは、もはやマルチキャスト通信ではなく、1対1通信であると考えられる。なお、マルチキャスト通信サービスの場合には通信料金を受信者で分担できるので、各サービスの受信確率は式(5.1)にのみ依存し、距離には依存しないとする。

マルチキャスト通信サービスは、サーバから端末へ分岐接続を繰り返しながら伝送される。よって、サーバがどの交換局に接続されているかを決定しておく必要がある。本章では、サーバは加入者数に比例して存在すると仮定し、あらかじめサーバの場所を乱数を用いて決定したうえで計算を行う。

## (2) 1対1通信サービス

3.2.3と同様の理由により、1対1通信トラヒックは、従来の網設計で用いられている方式、すなわち交換局当りの呼を各局に配分する方式にて決定する。また、局間トラヒックは、加入者数に比例し、局間距離に対して減少すると仮定する。

### 5.2.3 伝送路網トポロジー

本章では、3.2.4で述べたメッシュ、スター、リング構成のほかに、マルチリング構成とデルタスター構成の適用を試みる。

#### (1) マルチリング (Multi-Ring) 構成

リング構成を用いて図5.2の交換局を接続した場合、40局を一つのリングで接続するため、2局間のホップ数最大値は20となり、非現実的である。そこで、図5.2の計算領域を二つに分割し、それぞれ別のリングにより構成するマルチリング構成を用いる<sup>(108)</sup>。

#### (2) デルタスター (Delta-Star) 構成

デルタスター構成は、スター構成において隣接する下位局間を接続した構成である。本来、デルタスター構成は、1対1通信が中心の電話網において、網の信頼性を重視した場合に有効な構成として提案されたものである<sup>(109)</sup>。スター構成とデルタスター構成の違いを、図5.3に示す。

網の完全2重化を前提とした場合、スター構成では完全に2倍の伝送容量が必要となり、伝送路使用効率は0.5となる。リング構成では、逆廻りによる経路が確

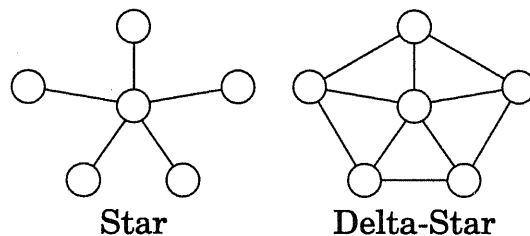


図 5.3 スター構成とデルタスター構成

保できるが、伝送路使用効率  $\gamma_R$  は交換局数を  $N$  とすると、

$$\gamma_R = \begin{cases} \frac{4N}{3N^2 + 4N + 1} & (N \text{が奇数の場合}) \\ \frac{4}{3N + 4} & (N \text{が偶数の場合}) \end{cases} \quad (5.2)$$

となる。なお、ここでは各交換局で必要とする伝送容量を一定としてある。このように、交換局数  $N$  が増加するに従って伝送路利用効率が低下し、交換局数 40 の場合で約 0.032 になってしまう。

一方、デルタスター構成では、スター構成の下位局をリング構成で接続することにより、通信網の 2 重化を実現している。また、デルタスター構成により増設される伝送路は、その両端局の迂回路として利用できるため、伝送路使用効率を高めることが可能となる。交換局を  $N$  とすると、伝送路使用効率  $\gamma_D$  は、

$$\gamma_D = \frac{2N - 1}{3N - 1} \quad (5.3)$$

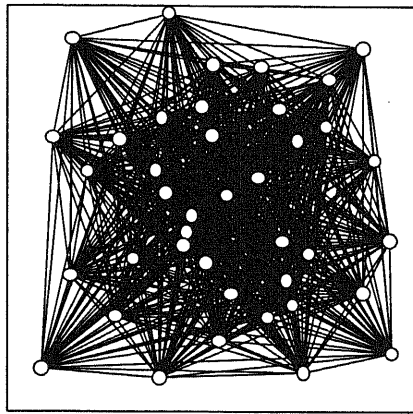
となり、交換局数 40 の場合で約 0.655 となる。このように、デルタスター構成は、スター構成やリング構成よりも優れた伝送路使用効率を得ることが可能となる。

デルタスター構成では、スター構成を基本としながらリング部ももち合わせているため、スター構成とリング構成の両方の特性をもっていると考えられる。伝送路コストの観点からは、スター構成は 1 対 1 通信に、リング構成はマルチキャスト通信に適していることから、マルチキャスト通信と 1 対 1 通信が混在する通信網においては、デルタスター構成が適していると考えられる。

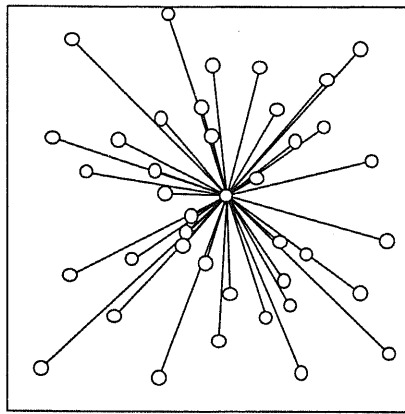
それぞれのトポロジーを計算領域に適用した場合の接続関係を、図 5.4 に示す。なお、リング、マルチリング、デルタスター構成ではリング部の最適化が必要であるが、ここでは簡単な発見的手法を用いて総延長距離が最小になるように設定する<sup>(110)</sup>。また、4.2.2 で提案したリング・スター複合構成はデルタスター構成に非常に似ているので、本章では検討の対象から除外する。

#### 5.2.4 経路選択

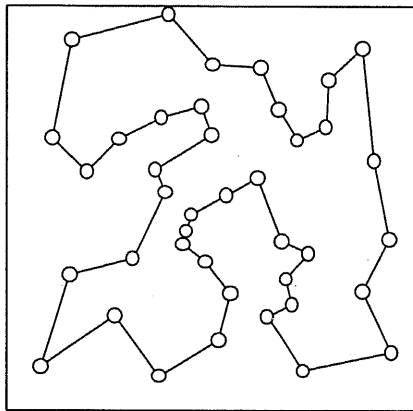
サービスを伝送する際、スター構成では伝送経路が一意に決定するので、特に経路を設定する必要はない。しかし、その他のトポロジーでは、2 局間の経路が 2 通り以上存在することがあり、経路のとり方によって網構成のコストが変化する



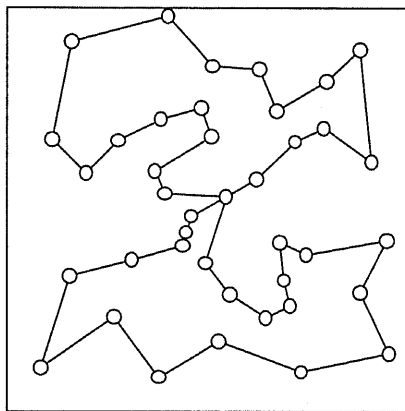
(1) Mesh



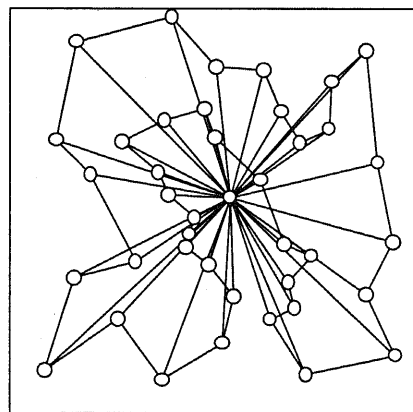
(2) Star



(3) Ring



(4) Multi-Ring



(5) Delta-Star

図 5.4 各トポロジー構成

と考えられる。第3章、第4章では、最短経路での伝送を仮定したが、本章ではより詳細なルールを設定してする。

### (1) マルチキャスト通信サービスの伝送経路

2.3.3 で述べたように、マルチキャスト通信サービスにおける経路木の作成法(マルチキャストルーチング)に関する研究は、従来より行われている。特に、あらかじめマルチキャスト通信に参加する交換局集合(マルチキャストグループ)が与えられた場合のマルチキャストルーチング問題(静的マルチキャストルーチング)は、グラフ理論のスタイナー木問題(Steiner Tree Problem)として扱うことができ、多くの研究成果が得られている<sup>(61, 62, 63)</sup>。一方、マルチキャスト通信に参加する交換局集合が時間的に変動する場合のマルチキャストルーチング問題は、動的マルチキャストルーチングと呼ばれ、近年盛んに研究が行われている分野である<sup>(64, 65, 68, 69, 66, 67)</sup>。本論文における研究では、通信網の設計に焦点を当てており、静的環境下におけるすべての交換局へのマルチキャスト木を用いれば十分であると考えられる。筆者もマルチキャストルーチングの研究、及び特性評価を行っているが、階層的に構成された通信網では、あらかじめ総延長距離が最小となるすべての交換局へのマルチキャスト経路木を準備しておき、それに沿ってマルチキャスト通信を行う方法で十分であることが確認されている(発表文献(1.2), 及び(3.6)参照)。この経路木はすべての交換局を含むので、グラフ理論でいうところの最小スパニング木(MST: Minimum Spanning Tree)である。本論文では、各伝送路網トポロジーに対しあらかじめMSTを構築しておき、その経路木に沿ってマルチキャスト通信サービスを伝送する。

### (2) 1対1通信サービスの伝送経路

1対1通信サービスの経路選択としては、最短距離で接続する方法や、最小ホップ数で接続する方法等が考えられる。将来的には、交換機コストよりも伝送路コストのほうが、より安価になりやすいと考えられる。すなわち、できるだけ交換機コストを削減するほうが望ましいと思われる。そこで、1対1通信サービスは、2局間のホップ数が常に最小になるように経路を選択する。なお、同一ホップ数の経路が複数存在する場合には、最小距離の経路を選択する。

## 5.3 計算方法

本章においても，第3章，第4章と同様に，網構成に必要となるコストを算出して比較する．よって，本章における計算方法も，3.3で述べた方法とほとんど同じである．ここでは，異なる部分のみ簡単に述べる．なお，計算を簡単にするために，各マルチキャスト通信サービスが必要とする伝送帯域は同一であるとし，各1対1通信サービスが必要とする伝送帯域も同一であるとする．

### 5.3.1 マルチキャスト通信サービスの計算

#### (1) 交換局呼量

交換局  $n$  において，1人以上の加入者がサービス番号  $i$  のマルチキャスト通信サービスを受信している確率を  $P_m(n; i)$  とすると，式(5.1)を用いて，

$$P_m(n; i) = 1 - \{1 - c_m p_m(i)\}^{S(n)} \quad (5.4)$$

となる．但し， $c_m$  は加入者当りのマルチキャスト通信サービス受信確率， $S(n)$  は交換局  $n$  の加入者数である．これが，交換局当りの各サービスの受信確率である．異なるサービス間では，分岐接続は発生しないので，式(5.4)の  $i$  に関する総和が交換局  $n$  におけるマルチキャスト通信サービスの総呼量となる．

また，計算領域外との通信は，必ずタンデム局を通過するので，計算領域外との通信とタンデム局との通信は計算的に同値である．そこで，計算領域外加入者はすべてタンデム局に収容され，計算領域外にあるサーバはすべてタンデム局にあると考えて計算を行えばよい．

#### (2) 伝送路呼量

マルチキャスト通信サービスの伝送には，5.2.4で述べたMST経路木が用いられる．よって，3.3.1(2)と同様の手法により，伝送路呼量を求めることが可能である．すなわち，マルチキャスト通信サービス  $i$  が伝送路  $l$  上を伝送される確率  $P_{lm}(l; i)$  は，式(5.4)を用いて，

$$P_{lm}(l; i) = 1 - \prod_{n \in N_m(n_s, l)} \{1 - P_m(n; i)\} \quad (5.5)$$

となる。但し、 $n_s$  はマルチキャスト通信サービス  $i$  が存在する交換局を、 $N_m(n_s, l)$  は交換局  $n_s$  にあるマルチキャスト通信サービスを受信するのに伝送路  $l$  を利用する必要がある交換局の集合を表す。なお、式 (3.4) と異なるのは、マルチキャスト通信サービスのサーバの場所をあらかじめ決定したうえで計算を行うためである。

伝送路  $l$  上のマルチキャスト通信総呼量  $P_{ilm}(l)$  は、式 (3.5) と同様に、以下のように求められる。

$$P_{ilm}(l) = \sum_i P_{lm}(l; i) \quad (5.6)$$

### 5.3.2 1対1通信サービスの計算

#### (1) 交換局呼量

交換局  $n$  当りの1対1通信サービス呼量  $P_p(n)$  は、3.3.2 (1) と同様に、加入者当りの1対1通信サービス受信確率  $c_p$  と局  $n$  の加入者数  $S(n)$  を用いて以下のように表される。

$$P_p(n) = c_p S(n) \quad (5.7)$$

#### (2) 伝送路呼量

本章では、計算領域外に関しては加入者数しか定義していないため、領域外へ向かう呼や領域外から入ってくる呼の決定が困難である。そこで、計算領域内交換局から発する呼量のうち、同領域内に着信する呼の割合  $r_i$ 、領域外に着信する呼の割合  $r_o$  を定義する。さらに、トラヒックの対称性を考慮し、計算領域外から計算領域内交換局への呼量は、計算領域内交換局から計算領域外へ発信する呼量と等しいと仮定する。

まず、計算領域内交換局  $n$  から同領域内交換局  $n'$  への呼量を求める。3.3.2 (2) と同様に、距離に対する関数として指数分布を用いる。交換局  $n$  の呼量  $P_p(n)$  のうち、交換局  $n'$  に向かう呼量  $P_{pi}(n, n')$  は、

$$P_{pi}(n, n') = A(n) S(n') e^{-k_d D(n, n')} r_i P_p(n) \quad (5.8)$$

となる。但し、 $S(n')$  は交換局  $n'$  の加入者数、 $D(n, n')$  は  $n$ 、 $n'$  間の距離、 $k_d$  は

距離定数である。  $A(n)$  は、確率の総和を 1 にするための定数で、次式を満たす。

$$A(n) = \frac{1}{\sum_{n'} S(n') e^{-k_d D(n, n')}} \quad (5.9)$$

なお、ここでは距離定数  $k_d$  を 0.016 と設定する。これにより、距離に依存する部分、すなわち  $e^{-k_d D(n, n')}$  に関しては、自局への呼量に対する 100 km 離れた交換局への呼量の比は約 0.2、同じく 141 km 離れた交換局への呼量の比は約 0.1 となる。

計算領域内交換局  $n$  から領域外への呼量  $P_{po}(n)$  は、 $r_o$  を用いて、

$$P_{po}(n) = r_o P_p(n) \quad (5.10)$$

となる。また、計算領域外から計算領域内交換局  $n$  への呼量は、前述のとおり、トラヒックの対称性から  $P_{po}(n)$  に等しいとする。

なお、計算領域内、計算領域外に着信する確率  $r_i$ 、 $r_o$  は、現在の電話トラヒックにおける同一都道府県内に終始する呼の割合をもとに、それぞれ 0.8、0.2 とする<sup>(111)</sup>。

5.2.4 で述べた通信経路により、各 2 局間呼の伝送経路が決定する。よって、伝送路  $l$  上の 1 対 1 通信総呼量  $P_{tlp}(l)$  は、

$$P_{tlp}(l) = \sum_{(n, n') \in N_{p1}(l)} P_{pi}(n, n') + 2 \sum_{n \in N_{p2}(l)} P_{po}(n) \quad (5.11)$$

となる。但し、 $N_{p1}(l)$  は交換局  $n$  から  $n'$  への呼の伝送に伝送路  $l$  を利用する必要がある局ペア  $(n, n')$  の集合、 $N_{p2}(l)$  は交換局  $n$  から計算領域外への呼の伝送に伝送路  $l$  を利用する必要がある局  $n$  の集合である。右辺第 2 項は、交換局  $n$  から計算領域外への呼量と、計算領域外から  $n$  への呼量を表しているため、2 を乗じてある。

### 5.3.3 伝送路容量の決定

3.3.3 と同様に、サービス受信分布にはランダム生起、指数分布保留時間を仮定する。マルチキャスト通信サービス、1 対 1 通信サービスのサービス伝送容量をそれぞれ  $C_m$ 、 $C_p$ 、呼損率 0.1 % 以下となるアーラン B 式逆関数を  $E^{-1}(x)$  とすると、伝送路  $l$  の伝送容量  $C(l)$  は次式で求められる。

$$C(l) = C_m E^{-1}(P_{tlm}(l)) + C_p E^{-1}(P_{tlp}(l)) \quad (5.12)$$



### 5.3.4 評価指標

第3章, 第3章と同様に, 評価指標として網構成に必要となるコストを求める。但し, 伝送路敷設ネットポロジをあらかじめ決定し, それに沿って伝送路を敷設した場合には, どの伝送路トポロジでもほぼ同じ伝送路敷設コストが必要と考えられる。そこで, 本章では伝送路敷設コストも省略し, 伝送路コスト, 交換機コストの2要素のみを考慮する。すなわち, 評価式(3.12)は次式のようなになる。

$$C' = R \sum_l C(l) + \sum_l C(l) L(l) \quad (5.13)$$

但し,  $R = c_2/c_4$ であり, 伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比を表す。

## 5.4 定量的評価

### 5.4.1 パラメータの設定

本稿で用いるトラヒックパラメータを, 表5.1に示す。将来, マルチキャスト通信サービスが普及し, マルチキャスト通信トラヒックは増大すると考えられる。そこで, 加入者当りのサービス受信確率は, マルチキャスト通信サービスの受信確率  $c_m$  を1対1通信サービスの受信確率  $c_p$  の5倍に設定し,  $c_m = 0.50$ ,  $c_p = 0.10$ とする。また, これらの値はトラヒックモデルによらず一定であるとする。

マルチキャスト通信に関しては, サービス当りの伝送帯域  $C_m$  をトラヒックモデルによらず30 Mbpsとする。但し, 受信のばらつきを決定する幾何分布定数  $k_g$  を

表 5.1 本章の評価に用いるトラヒックパラメータ

トラヒックモデル	1	2	3
マルチキャスト受信確率/加入者 $c_m$	0.50	0.50	0.50
マルチキャスト帯域 $C_m$ [Mbps]	30	30	30
幾何分布定数 $k_g$	0.90	0.99	0.90
マルチキャストサービス数	212	1993	212
1対1通信受信確率/加入者 $c_p$	0.10	0.10	0.10
1対1通信帯域 $C_p$ [Mbps]	1.5	1.5	6

0.90, 0.99 の 2 種類とする。5.2.2 で述べたように、計算領域内外の総加入者 1 億人のうち、1 人以上がサービスを受信している確率が 0.1 % 未満になったところで計算を打ち切るため、実際にはサービス数は有限となる。幾何分布定数が 0.90 の場合、サービス番号 213 でこの条件を満たさなくなるため、実際に計算するサービス数は 212 となる。これらのマルチキャスト通信サービスのサーバを加入者分布に比例するように配置すると、計算領域内には図 5.2 の交換局 17 に 2 サーバ、交換局 6, 12, 16, 31 に各 1 サーバとなる。 $k_g$  が 0.99 の場合には、幾何分布関数の減少率が緩やかになり、サービス数は 1993、計算領域内には 42 サーバが存在する。

マルチキャスト通信サービスの通信料金は、割勘に基づいて低く設定されるが、1 対 1 通信サービスの料金はそうならない。そこで、1 対 1 通信サービスの伝送帯域  $C_p$  はマルチキャスト通信サービスよりも小さくし、1.5 Mbps、または 6 Mbps とする。

なお、トラヒックモデル 1 を基準とすると、モデル 2 ではより多くのマルチキャスト通信サービスが送受信されるので、マルチキャスト通信トラヒックが基準より増大した場合と位置づけることができる。また、モデル 3 では 1 対 1 通信サービスの伝送帯域が増加するので、1 対 1 通信トラヒックが基準より増大した場合と位置づけることができる。

さらに、伝送路敷設網トポロジであるが、伝送路敷設網がメッシュ構成というのは非現実的である。そこで、伝送路敷設網トポロジには、スター、リング、マルチリング、デルタスターの各構成を用いる。これらのトポロジを実際に用いた場合の接続形態は、図 5.4 に示したとおりである。

#### 5.4.2 トラヒックモデル 1 の場合の特性評価

トラヒックモデル 1 を用いた場合の結果を、図 5.5 ~ 図 5.8 に示す。それぞれ、伝送路敷設網にスター、リング、マルチリング、デルタスターの各構成を用いた結果となっている。横軸は、式 (5.13) の  $R$ 、すなわち 156 Mbps の光ファイバ 1 m 当りのコストに対する入力ポート 156 Mbps 当りの交換機コストの比を表す。縦軸は、各トポロジにおける網構成コストのメッシュ構成を用いた場合に対する相対コストを表す。

まず、図 5.5 のスター構成敷設の場合には、 $R$  の値によらず常にスター構成が最適であることがわかる。また、デルタスター構成は、スター構成よりも相対コ

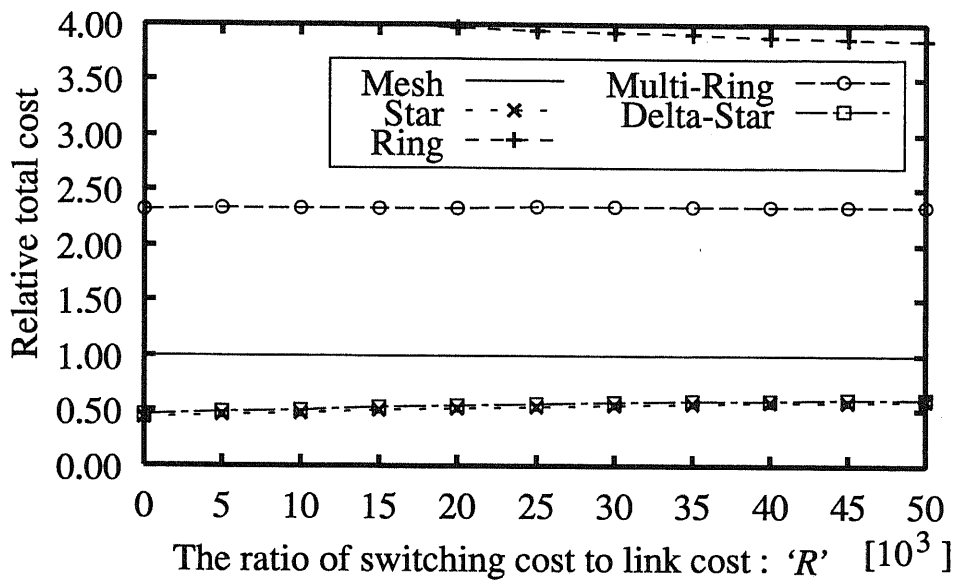


図 5.5 スター構成敷設の結果 (トラヒックモデル1)

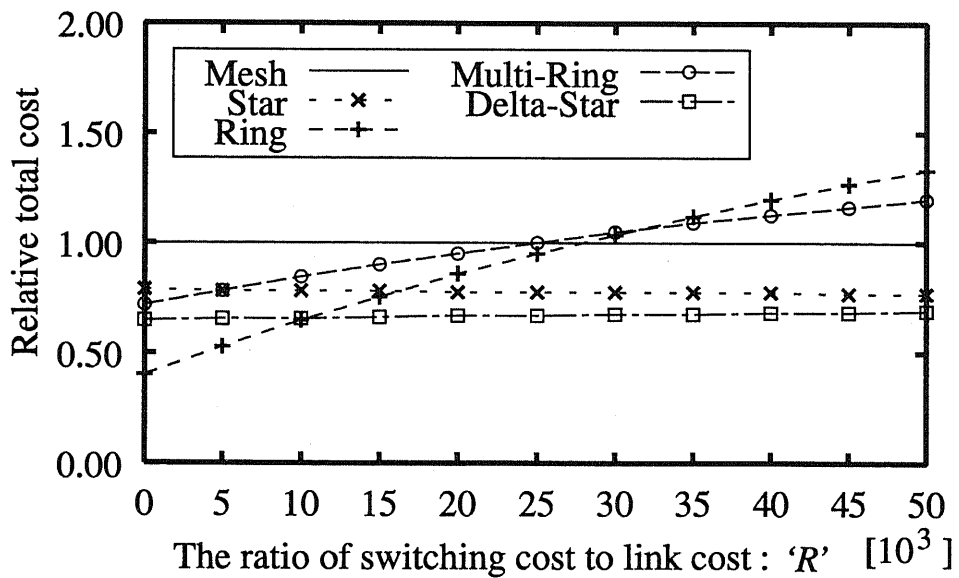


図 5.6 リング構成敷設の結果 (トラヒックモデル1)

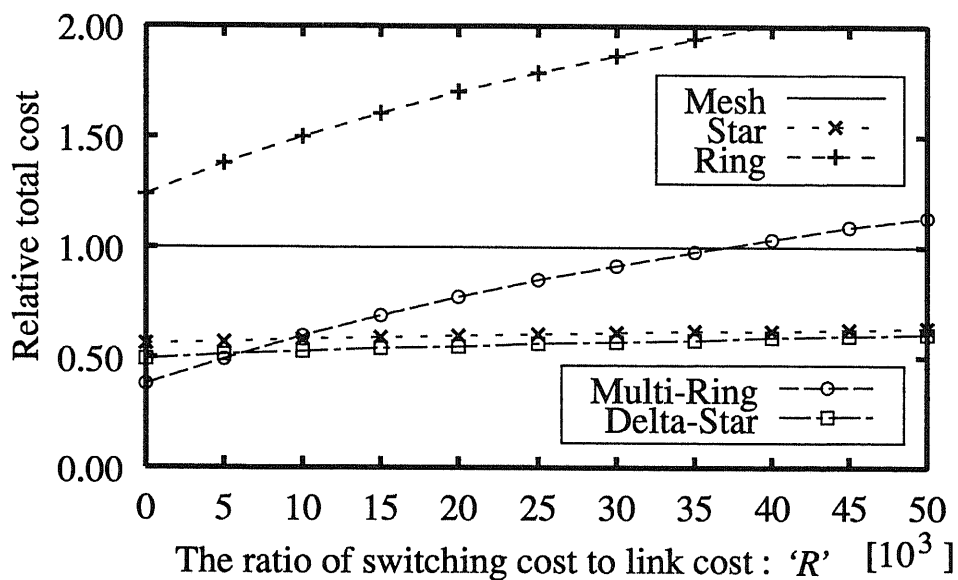


図 5.7 マルチリング構成敷設の結果 (トラヒックモデル1)

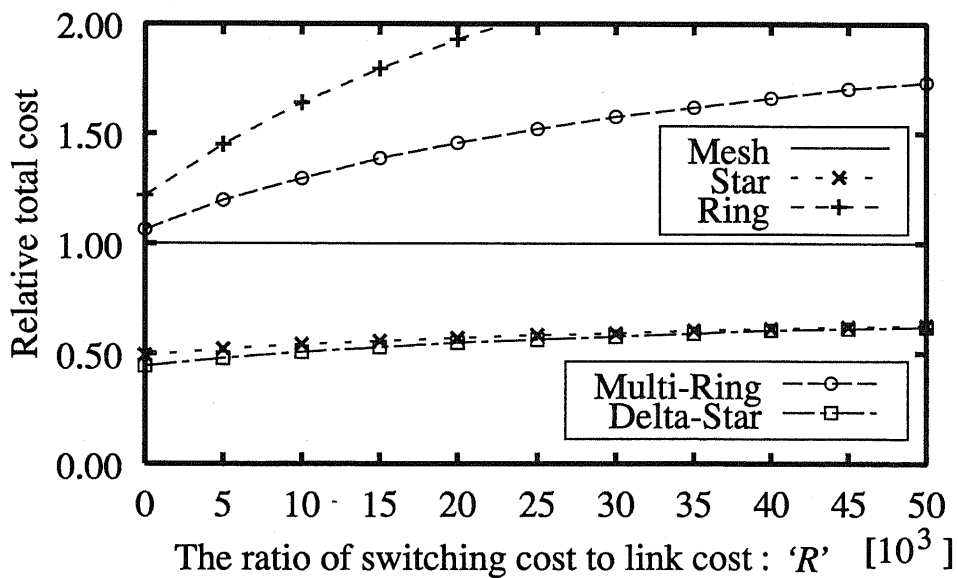


図 5.8 デルタスター構成敷設の結果 (トラヒックモデル1)

ストがわずかに大きくなるだけである。これに対し、リング構成やマルチリング構成の相対コストは、明らかに特性が悪い。伝送路にスター構成を用いると、伝送路敷設網と同一トポロジーとなるので、伝送路の迂回敷設は発生しない。これに対し、リング構成やマルチリング構成を用いると、ほとんどの伝送路を迂回敷設する必要があるため、伝送路コストが増大すると考えられる。デルタスター構成においても伝送路の迂回敷設が必要となるが、迂回しなければならないのはリング部だけであるので、それほど大きなコスト損失は発生しない。以上の理由から、スター構成敷設の場合には、伝送路をスター構成にしたのが最適となる。

次に、図 5.6、図 5.7 から、伝送路敷設網がリングやマルチリング構成の場合、 $R$  が小さい領域においては、伝送路トポロジーに伝送路敷設網と同一のものを選択することでコスト最小となることがわかる。前述のとおり、伝送路トポロジーが伝送路敷設網トポロジーと同一の場合には、伝送路の迂回敷設が不要であり、伝送路コストを低減できるためと考えられる。

一方、 $R$  がある程度大きくなった領域では、リングやマルチリング構成の特性が極端に特性が悪くなる。これは、以下のように説明できる。1対1通信の伝送にリング構成やマルチリング構成を用いると、ホップ数が大きくなり、交換機コストが増加してしまう。サービス受信確率と伝送帯域を考慮すると、マルチキャスト通信トラヒックに対する1対1通信トラヒックの比は、加入者当たり0.01程度と非常に小さいが、それでも1対1通信の場合の特徴が顕著に出てしまうため、リング、マルチリング構成の特性悪化をもたらしていると考えられる。将来的には、交換機コストよりも伝送路コストのほうがより安価になる、すなわち、 $R$  は大きくなると思われるので、この場合にはデルタスター構成が最も適した構成であるといえる。

図 5.8 から、伝送路敷設網がデルタスター構成の場合には、 $R$  によらず常にデルタスター構成が最適であることがわかる。これは、交換機コストが十分に小さいうえ、伝送路コストも低減されるためであると考えられる。

以上の結果から、伝送路敷設網がスター構成の場合には、伝送路もスター構成にすれば最適であり、伝送路敷設網がスター構成以外の場合には、伝送路にデルタスター構成を用いることで、ほぼ全域にわたり最適になると結論できる。なお、伝送路敷設網がスター構成の場合に、伝送路としてデルタスター構成を適用したとしても、構成コストの増加はわずかである。

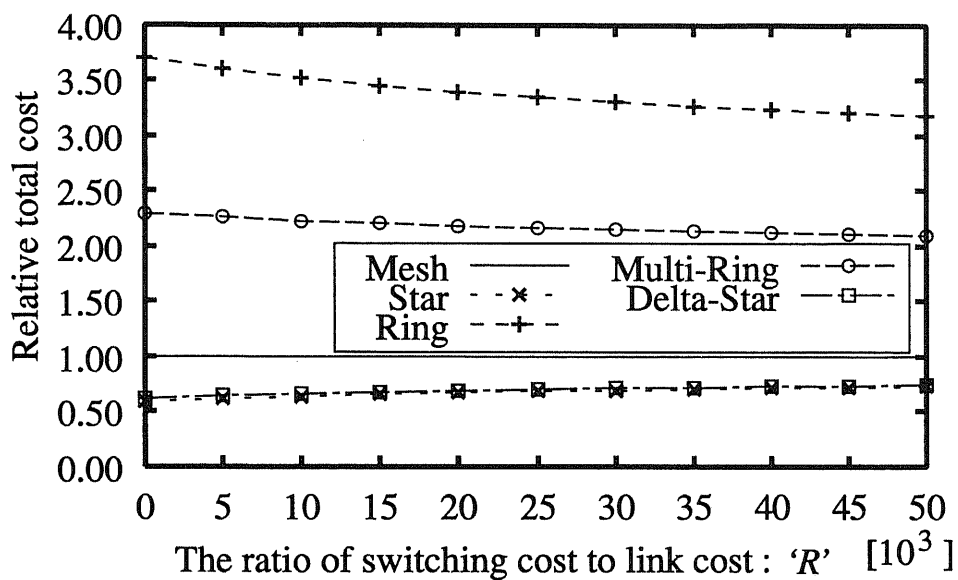


図 5.9 スター構成敷設の結果 (トラヒックモデル 2)

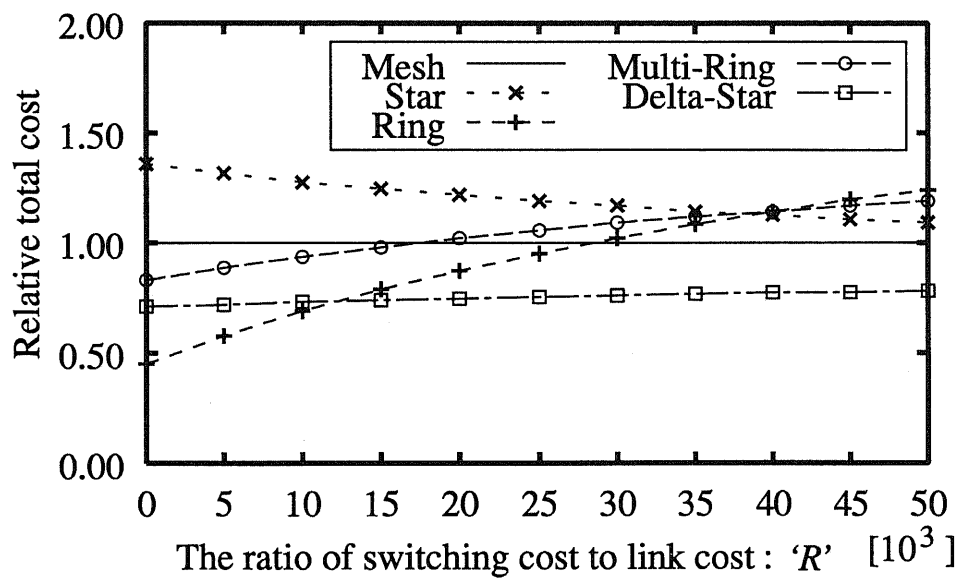


図 5.10 リング構成敷設の結果 (トラヒックモデル 2)

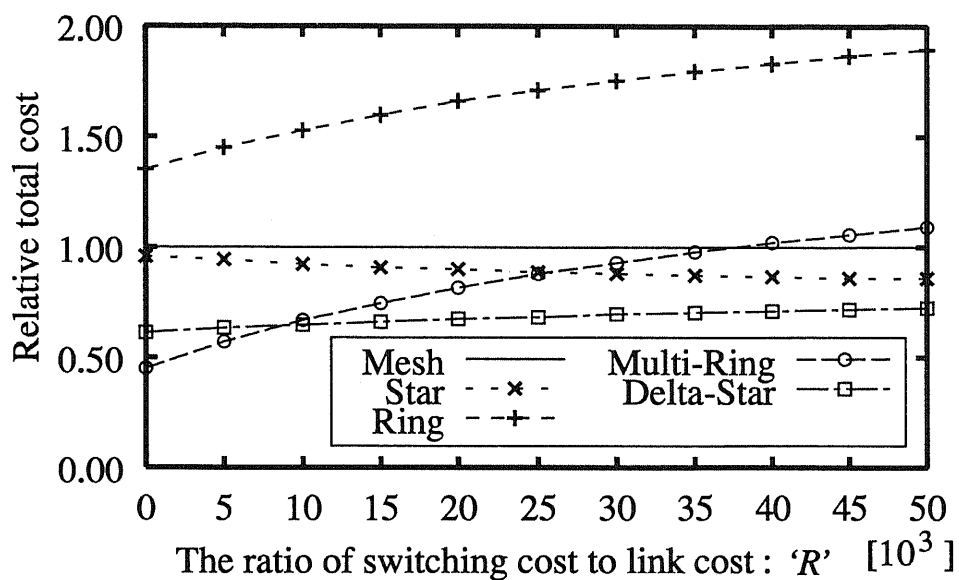


図 5.11 マルチリング構成敷設の結果 (トラヒックモデル 2)

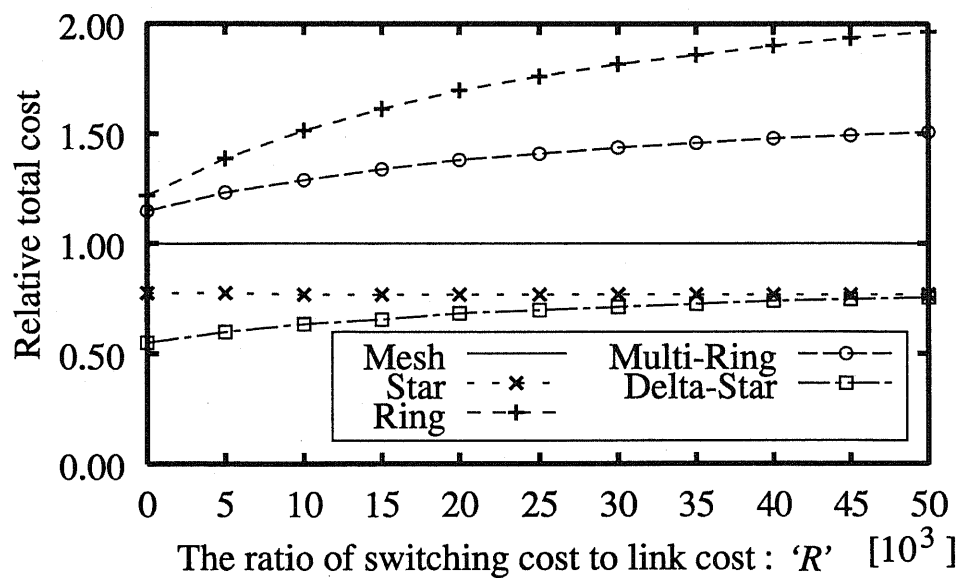


図 5.12 デルタスター構成敷設の結果 (トラヒックモデル 2)

### 5.4.3 トラヒックモデル2の場合の特性評価

トラヒックモデル2を用いた場合の結果を、図5.9～図5.12に示す。5.4.2と同様、伝送路敷設網にスター、リング、マルチリング、デルタスターの各構成を用いた結果である。

図5.9を見ると、スター構成敷設の場合には、トラヒックモデル1のときと同様の特性が得られる。すなわち、 $R$ によらずスター構成が最適、デルタスター構成ではわずかにコストが増え、リング、マルチリング構成は明らかに特性が悪くなる。これは、5.4.2で述べた理由によるものであると考えられる。また、図5.11、図5.12からわかるように、伝送路敷設網がマルチリング構成やデルタスター構成の場合も、トラヒックモデル1のときとほぼ同様の特性を示し、 $R$ が大きい領域においてはデルタスター構成が最適となっている。

図5.10のリング構成敷設の場合には、スター構成以外のトポロジーはトラヒックモデル1のときとほぼ同じ特性を示すが、スター構成では相対コストが増大し、1.0を上回る。これは、以下のように考えられる。トラヒックモデル2では、マルチキャストサービス数増加とともに、網全体のトラヒックが増加する。一方、伝送路敷設網がリング構成なので、スター構成ではほとんどすべての伝送路を迂回敷設する必要がある。すなわち、増加したトラヒックのほとんどが、迂回敷設された伝送路を通過するため、その分だけ伝送路コストが増大してしまうのであろう。スター構成以外のトポロジーでも、伝送路の迂回敷設は必要となる。しかし、これらのトポロジーでは、2局間の経路が二つ以上存在するため、伝送路敷設網に合わせた伝送経路が設定できる。よって、スター構成ほどコストは増加しないと考えられる。

以上から、マルチキャストサービスのトラヒックが増加したときにも、伝送路敷設網がスター構成の場合には、伝送路もスター構成にすれば最適であり、それ以外の場合には、伝送路にデルタスター構成を用いるのがよいと結論できる。

### 5.4.4 トラヒックモデル3の場合の特性評価

トラヒックモデル3を用いた場合の結果を、図5.13～図5.16に示す。これらから、1対1通信サービスのトラヒックが増加するトラヒックモデル3の場合にも、トラヒックモデル1、2の場合とほぼ同様の特徴が現れていることがわかる。すなわち、スター構成敷設のときには、 $R$ によらずスター構成が、デルタスター



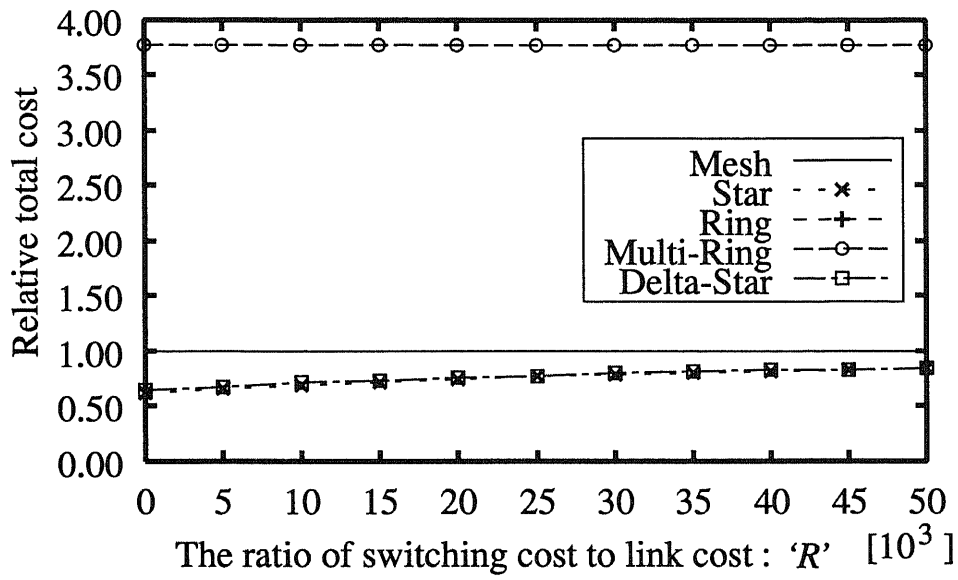


図 5.13 スター構成敷設の結果 (トラヒックモデル 3)

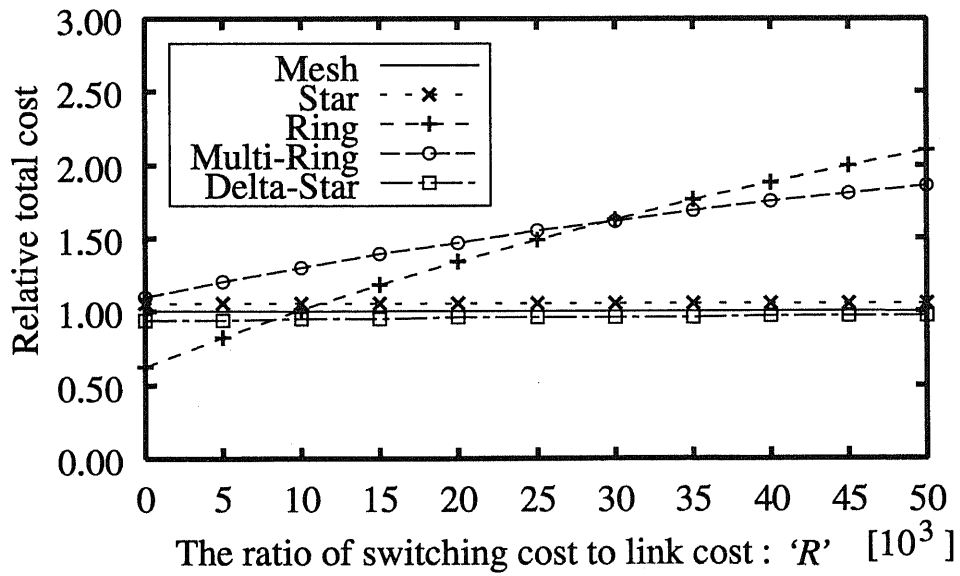


図 5.14 リング構成敷設の結果 (トラヒックモデル 3)

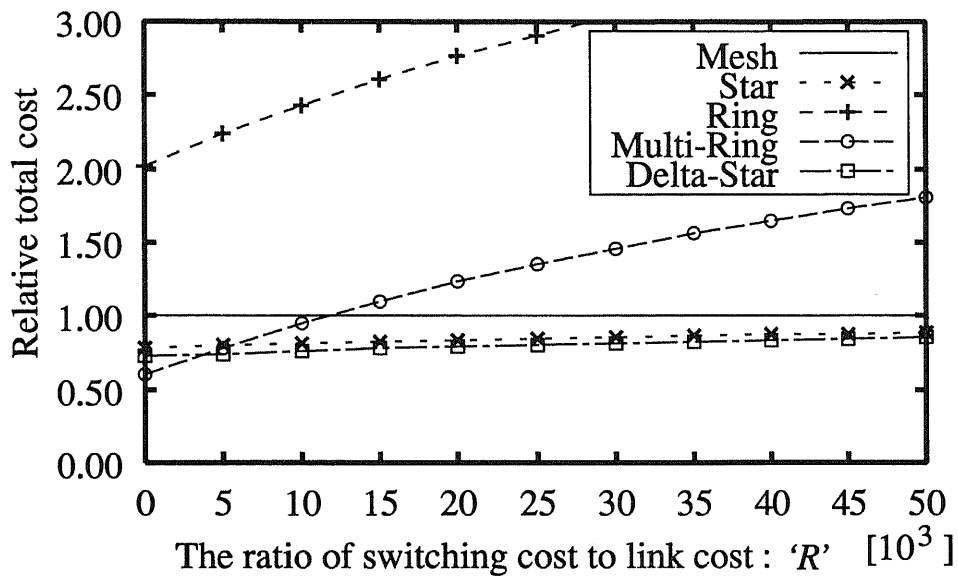


図 5.15 マルチリング構成敷設の結果 (トラヒックモデル 3)

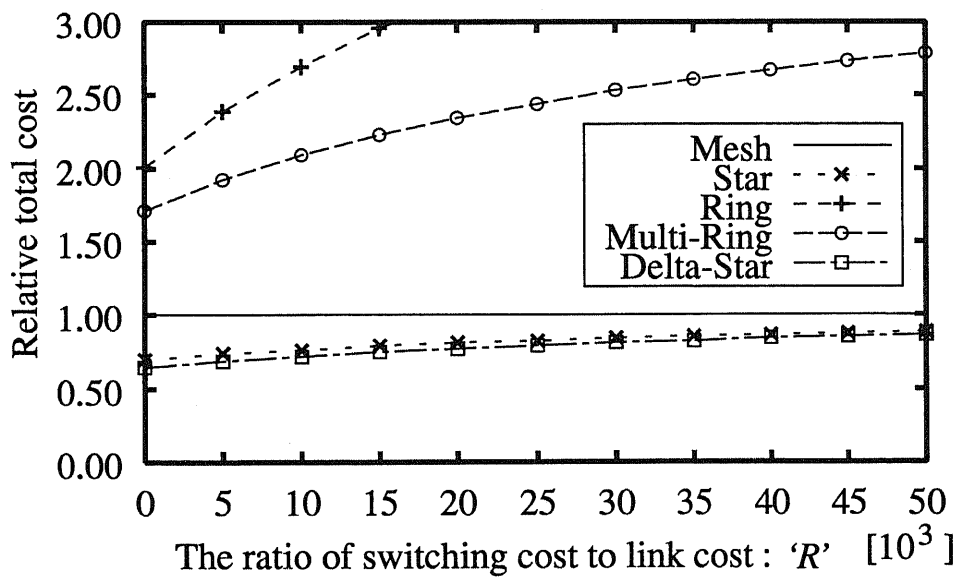


図 5.16 デルタスター構成敷設の結果 (トラヒックモデル 3)

構成敷設のときには、 $R$ によらずデルタスター構成が最適となる。また、リング構成敷設、マルチリング構成敷設のときには、 $R$ が小さくない領域ではデルタスター構成が最適となっている。

さらに、トラヒックモデル3では、トラヒックモデル1の結果と比して、メッシュ構成以外のすべてのトポロジーの相対コストが増大していることがわかる。メッシュ構成では、各2局間が直接接続されているため、すべての1対1通信サービスは直通伝送路のみを利用して伝送可能であるが、他の構成では中継伝送されるトラヒックが存在する。中継伝送が行われると、伝送経路が遠回りになったり、中継交換機の容量が大きくなるので、1対1通信にとってはできるだけ中継伝送しないほうが望ましい。1対1通信サービスのトラヒックが増大するトラヒックモデル3では、中継伝送のないメッシュ構成の利点が顕在化するため、他のトポロジーのメッシュ構成に対する相対コストが増加するものと考えられる。

#### 5.4.5 その他のモデルを用いた場合の特性評価

モデル依存性の問題を払拭するため、さまざまな状況下における特性評価を行った。

##### (1) マルチキャスト通信サービスの受信確率が一定分布の場合

まず、現実的ではないかもしれないが、マルチキャスト通信サービスの受信確率を一様分布に変更した場合の結果を、図5.17～図5.20に示す。これらは、表5.1のトラヒックモデル2で考慮される1993種類のマルチキャストサービスが、すべて一定確率にて受信されるとしたときの計算結果である。それぞれ、伝送路敷設網トポロジーがスター、リング、マルチリング、デルタスターの各構成の場合を表している。

これらの図から、伝送路敷設網トポロジーがスター構成の場合には、伝送路トポロジーにもスター構成を適用したものが最適であり、それ以外の場合には、伝送路トポロジーにデルタスター構成を用いるのが最適であることがわかる。これは、5.4.3と全く同じ特性である。しかし、図5.9～図5.12とこれらの図をよく比較してみると、スター構成敷設以外の場合においてスター構成の特性が悪化していることがわかる。これは、以下のように説明できる。マルチキャスト通信サービス数は、トラヒックモデル2と同じであるが、モデル2では受信確率を幾

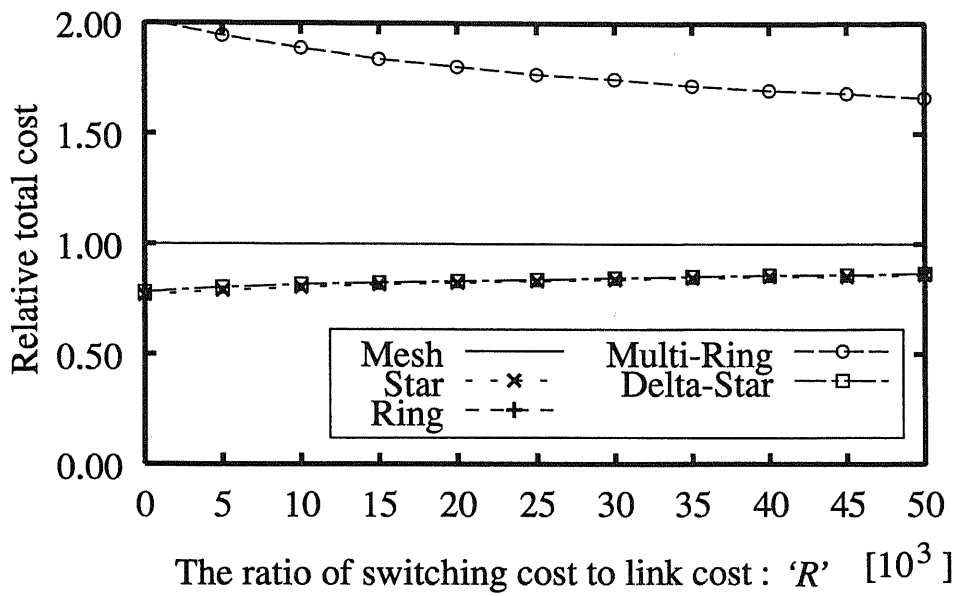


図 5.17 サービス受信確率が一様分布の場合の結果（スター構成敷設）

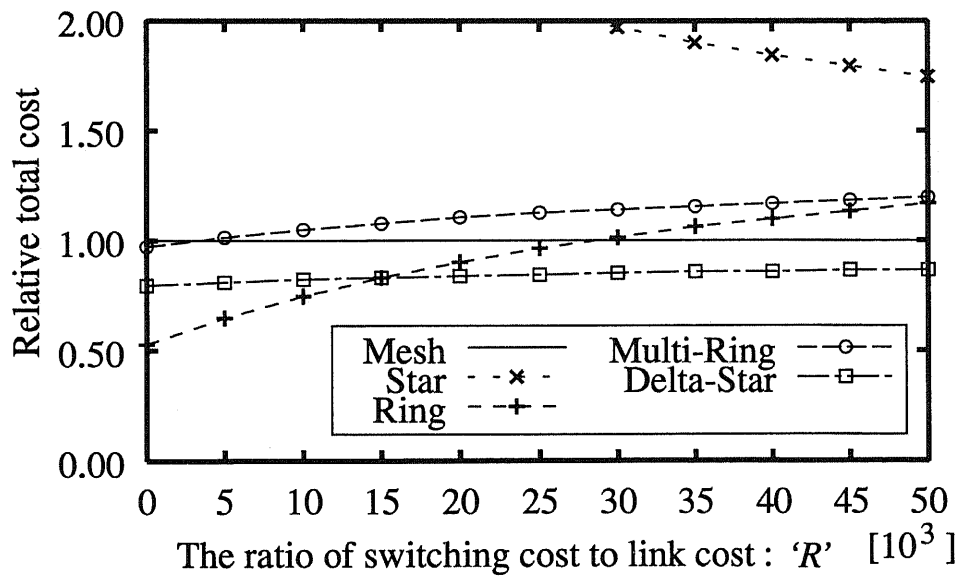


図 5.18 サービス受信確率が一様分布の場合の結果（リング構成敷設）

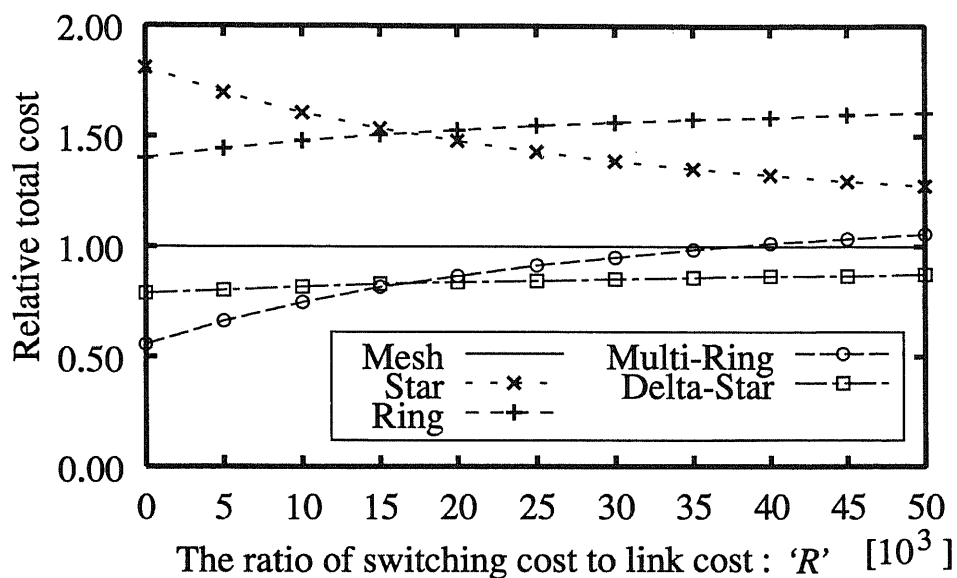


図 5.19 サービス受信確率が一様分布の場合の結果 (マルチリング構成敷設)

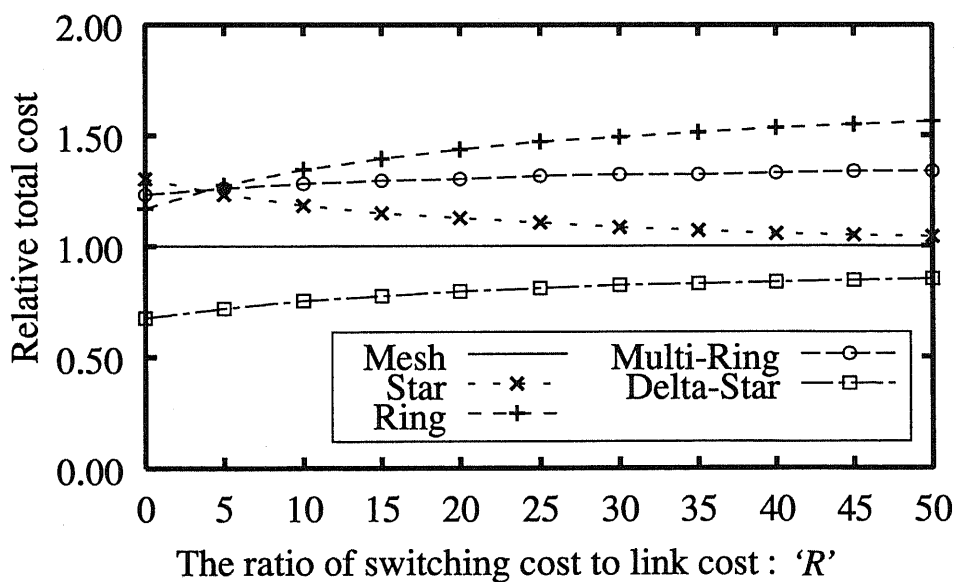


図 5.20 サービス受信確率が一様分布の場合の結果 (デルタスター構成敷設)

何分布により設定しているため、サービス番号が大きくなるにつれて受信確率が下がっていく。全加入者1億人のうち、1人以上が受信する確率が0.1%以上となる場合にマルチキャスト通信サービスとみなすので、1993番目のマルチキャスト通信サービスは、この条件をкаろうじて満たしたことになる。一方、受信確率を一様分布とすると、1993のサービス全部が同確率(1/1993)で受信される。計算領域内だけでも200万人の加入者がいるので、これらのサービスを1人以上が受信する確率は、かなり高くなっていると考えられる。すなわち、通信網を伝送されるマルチキャスト通信サービスの数は、トラヒックモデル2の場合よりも多くなるのである。伝送路敷設網トポロジーがスター構成以外の場合、スター構成はマルチキャスト通信サービスに対して迂回敷設による不利を被るため、このような結果が得られると考えられる。

## (2) 異なる伝送路敷設網トポロジーを用いた場合

次に、図5.21のように、伝送路敷設網が伝送路トポロジーのいずれとも異なる構成となっている場合の結果を図5.22～図5.24に示す。それぞれ、トラヒックモデル1, 2, 及び3を用いた場合の結果である。

図5.21の伝送路敷設網トポロジーは、どの伝送路トポロジーとも完全には一致しないため、迂回敷設される伝送路が必ず存在することになる。図5.22～図5.24から、このような場合にもデルタスター構成が有効であることがわかる。特に、マルチキャスト通信サービスの割合が増加するトラヒックモデル2において、

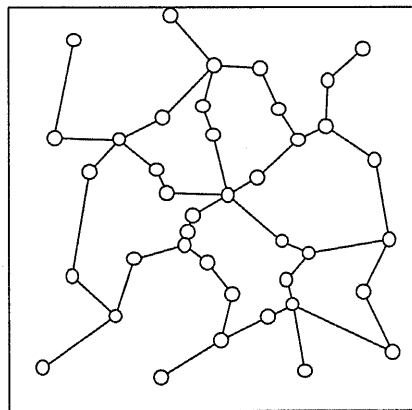


図 5.21 物理網とは異なる伝送路敷設網トポロジー

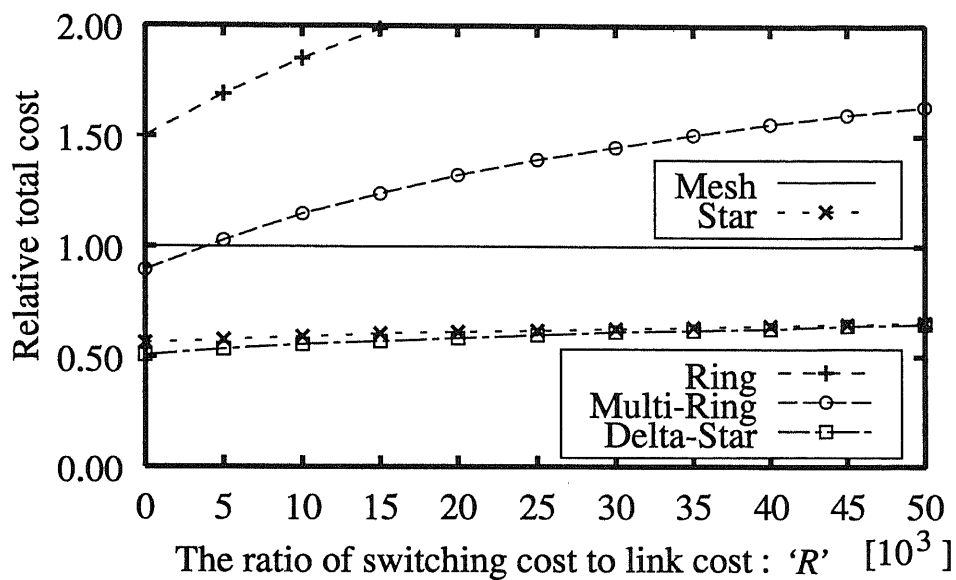


図 5.22 図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果 (トラヒックモデル 1)

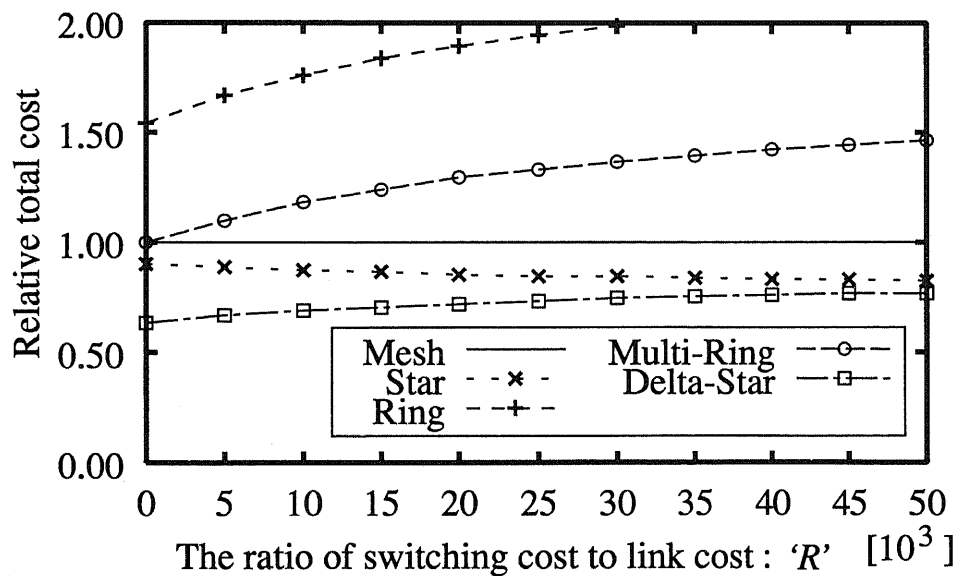


図 5.23 図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果 (トラヒックモデル 2)

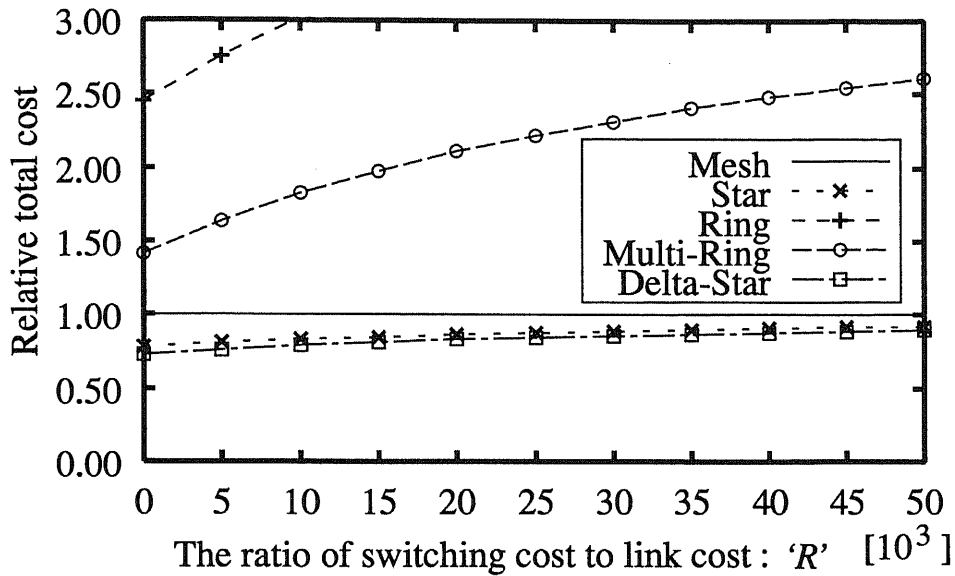


図 5.24 図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果 (トラヒックモデル 3)

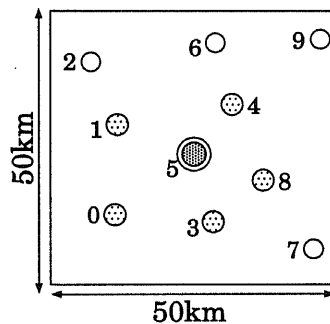


図 5.25 異なる交換局配置モデル

デルタスター構成の優位性が増幅していることがわかる。

(3) 異なる計算領域, 交換局配置モデルを用いた場合

さらに, 計算領域, 交換局配置モデルを図 5.25 のように変更した場合の結果の一例を, 図 5.26 ~ 図 5.29 に示す. 本例では, 計算領域を 50 km 四方, 交換局数を 10 局, エリア内人口を中心集中形で 50 万人とし, 集中度を 30.0 とした. 図はトラヒックモデル 1 の場合の結果で, それぞれ伝送路敷設網トポロジーにスター, リ



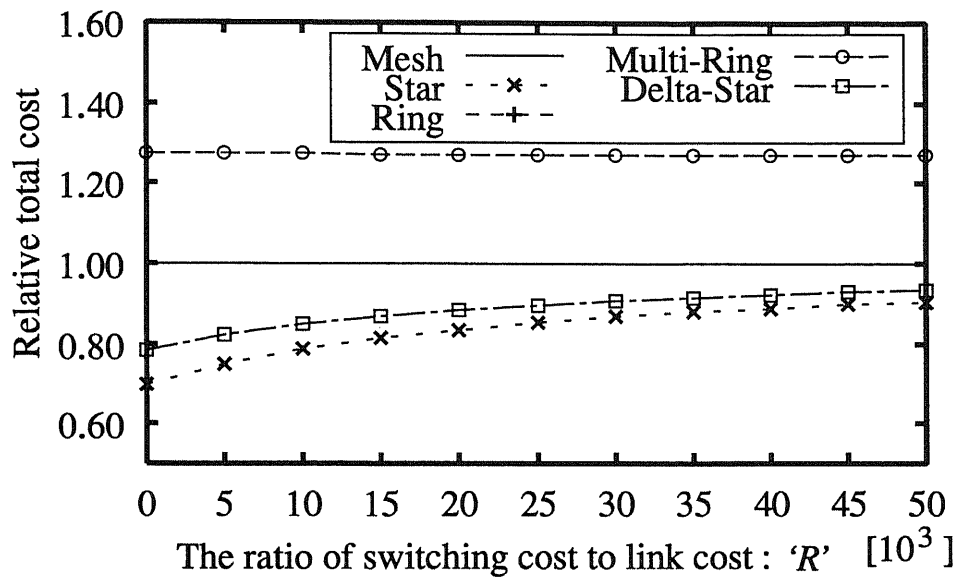


図 5.26 図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果 (スター構成敷設, トラヒックモデル1)

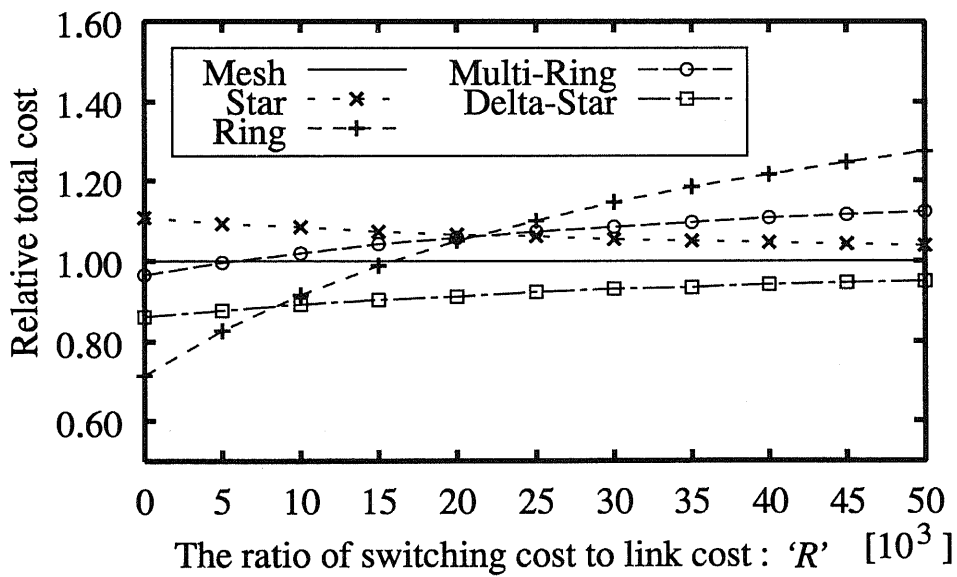


図 5.27 図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果 (リング構成敷設, トラヒックモデル1)

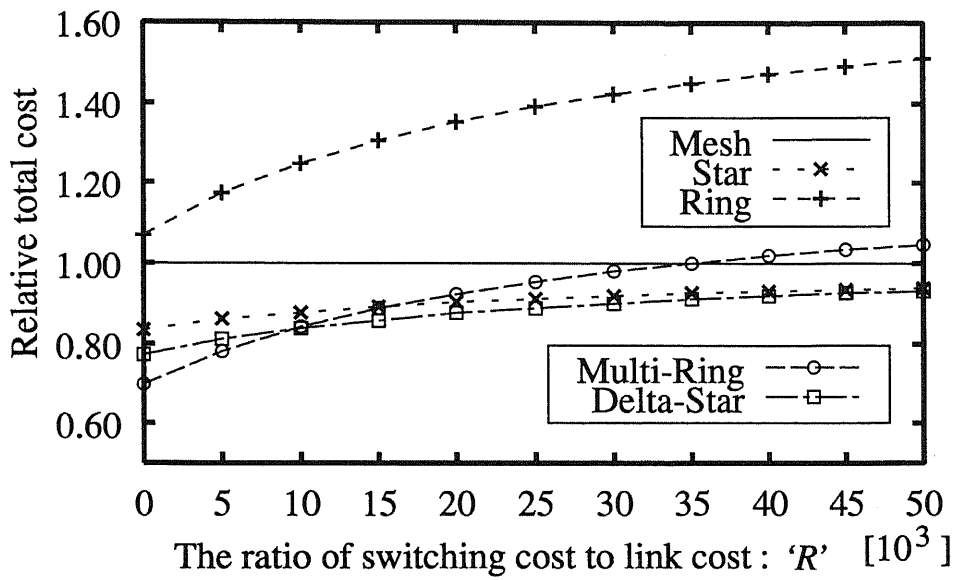


図 5.28 図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果 (マルチリング構成敷設, トラヒックモデル 1)

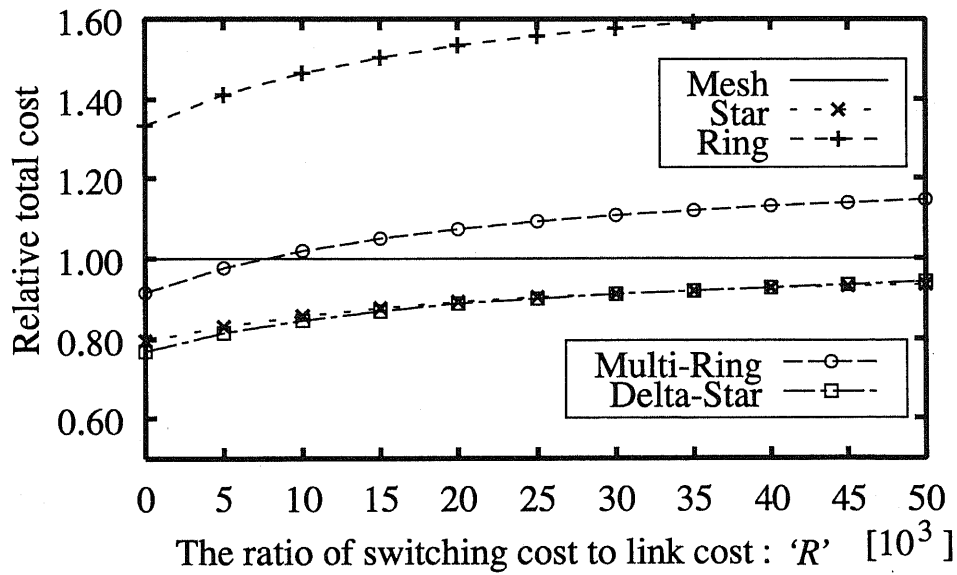


図 5.29 図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果 (デルタスター構成敷設, トラヒックモデル 1)

ング、マルチリング、デルタスター構成を用いた場合の計算結果である。これらの図からも、やはりデルタスター構成が広範囲において最適であることがわかる。

以上の結果から、デルタスター構成は、伝送路敷設網がスター構成以外であれば、トラヒックの変動や計算エリアの大きさによらず、ほとんどの場合において最適であると結論できる。

#### 5.4.6 伝送路敷設網の特性評価

5.4.2 ~ 5.4.5 の結果により、伝送路敷設網トポロジーがスター構成以外の場合には、多くの場合においてデルタスター構成が最適であることがわかった。

さて、伝送路敷設のための設備も新たに作成する場合のコスト比較を、定性的に考える。図 5.4 (2) ~ (5) に示したスター、リング、マルチリング、デルタスターの各構成における伝送路敷設網総延長距離は、それぞれ 1,284 km, 557 km, 589 km, 1,838 km となる。伝送路敷設網構成が変わっても、伝送すべきトラヒック容量が変化しなければ、交換機コストはそれほど変わらないのに対し、伝送路コストは、サービス伝送経路の変更や迂回敷設のために、かなり変化すると考えられる。一方、伝送路敷設にかかる土木工事コストは、伝送路自体のコストよりも非常に大きくなることは明らかである。よって、伝送路敷設網から新しく作成する場合には、伝送路敷設コストを抑えることができるリング、またはマルチリング構成を用い、伝送路トポロジーにデルタスター構成を用いるのが最適になると考えられる。

### 5.5 むすび

第 4 章の結果から、上位層をメッシュ構成とした 2 階層構成の最適領域が、非常に広範囲に広がることがわかった。そこで本章では、階層構成通信網の最下位層となる第 1 階層にターゲットを絞り、通信網の一部分とみなした比較的小さい領域において、一つのトポロジーで通信網を構成したときに最適となる形態を明らかにした。伝送路トポロジーには、一般的なメッシュ、スター、リングの各構成のほかに、マルチリング、デルタスター構成を用いた。その結果、マルチキャスト通信、1対1通信のトラヒック量によらず、伝送路敷設網がスター構成の場合には、伝送路にもスター構成を用いるのが最適であること、それ以外の敷設網トポ

ロジの場合には、伝送路にデルタスター構成を用いることで、ほとんどの場合において最適となることがわかった。また、マルチキャスト通信サービスの選択確率が一様分布になった場合や、どの伝送路トポロジとも一致しない伝送路敷設網トポロジを用いた場合、さらには、計算領域の大きさや交換局数が増えた場合の特性評価も行い、デルタスター構成の優位性を明らかにした。デルタスター構成は、従来の1対1通信網において、通信網の2重化を前提としたときに伝送路利用効率を高める構成として提案されているトポロジであるが、マルチキャスト通信網においても非常に有効なトポロジであることが明らかになった。

さて、ここまでの研究において、明らかになったことを簡単にまとめておきたい。マルチキャスト通信と1対1通信が混在するような通信網を構築する際、

1. 伝送路のある場所にすべて伝送路敷設設備を構築するのであれば、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が大きい場合にはメッシュスター2階層構成が最適である。逆に、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が小さい場合には、上位層のメッシュ構成をリング-リング構成に置き換えたリング-リング-スター3階層構成が最適である。
2. 伝送路敷設設備をスター、またはリング構成にて構築するのであれば、上位層にメッシュ構成を用いた2階層構成がほぼ最適である。
3. 最下位層となる第1階層では、伝送路敷設網トポロジがスター構成の場合には伝送路トポロジにもスター構成を用いるのが最適であり、それ以外の場合には伝送路トポロジにデルタスター構成を用いるのが最適である。

以上は、マルチキャスト通信網を新しく構築した場合の結論である。しかし、一般的には、既に何らかの通信網が存在している場合が多い。例えば、我が国では、メッシュスター2階層構成のデジタル通信網が存在している。このような場合、マルチキャスト通信網を新たに構築するというのは現実的ではない。今後のトラヒックの増加に伴って、既存の通信網を増設、または拡張することで、マルチキャスト通信網へと発展させていくと考えるのが妥当である。

そこで次章では、メッシュスター2階層構成の通信網が既に存在している場合に、どのように通信網を増設、または拡張することで、最終最適構成であるメッシュ-デルタスター構成へと変化させるべきであるかを検討する。

## 第 6 章

# マルチキャスト通信網増設法

## 6.1 まえがき

第3章、第4章、及び第5章では、マルチキャスト通信網の最適階層構成について検討を行った。具体的には、交換局配置モデル、トラヒックモデル等を与え、基本網トポロジーを用いて通信網を構成した場合の網構成コストによる比較を行った。その結果、マルチキャスト通信網では、上位層のメッシュ構成、下位層にデルタスター構成を適用した2階層構成がかなり広い範囲において最適であるとの結論を得た。

これらの結論は、マルチキャスト通信網を新しく構築した場合に適用することが可能である。しかし、一般的には、既に何らかの通信網が存在している場合が多い。このような場合、マルチキャスト通信網を新たに構築するというのは現実的ではなく、今後のトラヒックの増加に伴って、既存の通信網を増設、または拡張することで、マルチキャスト通信網へと発展させていくと考えるのが妥当である。

現在の我が国のデジタル網は、1対1通信である電話トラヒックが対象であり、網構成コストや信頼性の面を考慮して、メッシュ-スター2階層構成となっている。前述の結論から、上位層のメッシュ構成はマルチキャスト通信サービスが開始された後も有効であるが、下位層のスター構成はデルタスター構成へと変化させるほうが望ましい。スター構成では、上位層のタンデム局とそれ以外の下位層交換局がそれぞれ直接接続されているのみで他の伝送路が存在しないのに対し、デルタスター構成では、隣接する下位層交換局が相互接続されているため、信頼性の面からもデルタスター構成への移行が望ましいと考えられる。

そこで本章では、マルチキャスト通信サービスの増加が各トポロジー特性に与える影響を再調査し、現行のスター構成からどのようにしてデルタスター構成に移行すべきか、また伝送路増設手法により最終的にどの程度のコスト差が生じるかを検討する。

## 6.2 定量的評価のためのモデル

検討を始める前に、まず本章での評価に用いる計算領域モデル、通信サービスモデル、及び伝送路敷設網トポロジーについて説明する。

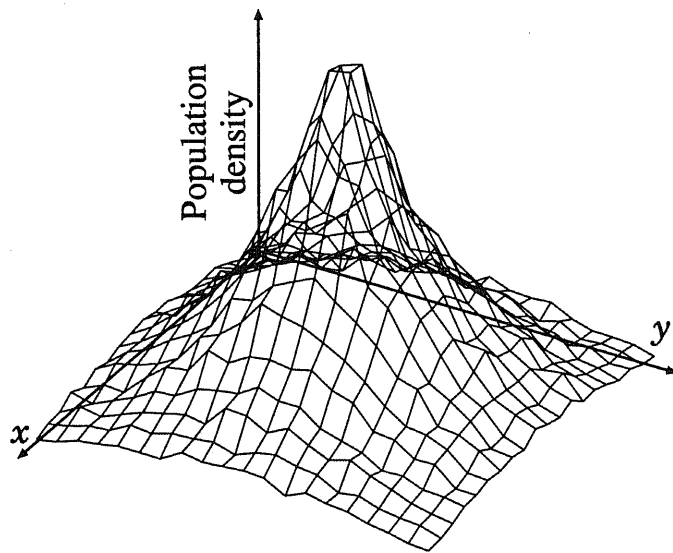


図 6.1 人口分布 (図 5.1 と同一)

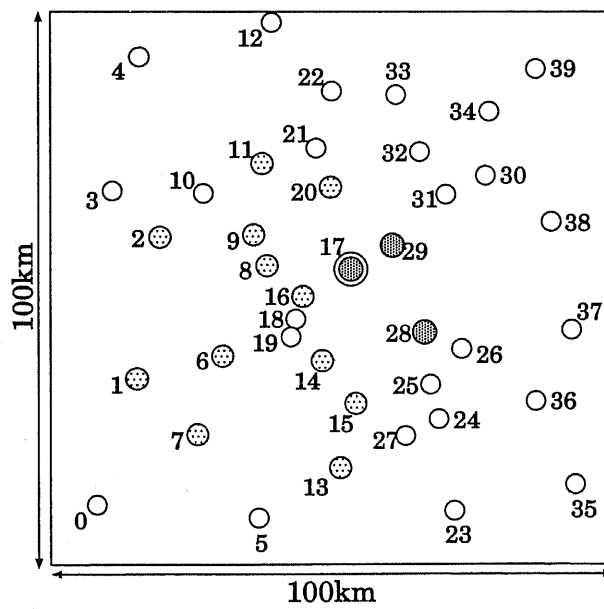


図 6.2 交換局配置モデル (図 5.2 と同一)

### 6.2.1 計算領域モデル

本章では、第5章において用いた計算領域モデルを再度利用する。すなわち、全国を覆う広域階層通信網の一部である第1階層に着目し、100 km 四方の計算領域に40の交換局が配置されているモデルを利用する。また、加入者分布についても、5.2.1(1)と同一の人口密度関数を用いる。加入者数はエリア内に200万人、エリア外を含めると1億人、端末は1人1台所有していると仮定する。

なお、本章で用いる人口分布モデル、交換局配置モデルを、それぞれ図6.1、図6.2に再掲する。

### 6.2.2 サービスモデル

本章で用いるサービスモデルも、1対1通信サービスとマルチキャスト通信サービスである。第5章と同様に、1対1通信サービスは交換局当りの呼を各局に配分する方式をとり、局間トラヒックは加入者数に比例、局間距離に対して指数的に減少すると仮定する。また、サービスの伝送には、中継交換局数(ホップ数)を最小にする経路を選択する。

マルチキャスト通信サービスについても同様で、サーバは加入者数に比例して存在すると仮定する。また、これらのサービスは、各トポロジーごとにあらかじめ準備しておいたMSTに沿って伝送する。

### 6.2.3 伝送路敷設網トポロジー

第5章では、伝送路敷設網トポロジーがスター、リング、マルチリング、デルタスター構成の場合について検討を行った。これは、マルチキャスト通信網を新規に構築する場合を扱ったためである。一方、本章では、既に存在している通信網を拡張、増設することに焦点を絞っているため、伝送路敷設網は既に存在していると考えて差し支えないと思われる。

そこで、実際の伝送路敷設網に最も近いと思われる5.4.5(2)で用いたトポロジーを利用する。この伝送路敷設網トポロジーを、図6.3に再掲する。伝送路で直接接続されている交換局間でも、伝送路敷設網が直接通じていない場合には迂回敷設する必要がある。但し、迂回経路が他の交換局を通過する場合でも、その交換局の交換機は介さないものとする。



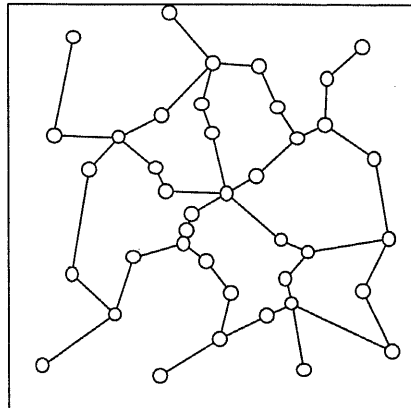


図 6.3 本章で用いる伝送路敷設ネットポロジ（5.21 と同一）

また，伝送路敷設網はこのままの形で利用し，伝送路敷設の新設，及び拡張は行わないものとする。

## 6.3 計算方法

### 6.3.1 伝送路容量の決定

通信網構成コストの計算手順も，3.3 や 5.3 で述べた方法とほとんど同じである。すなわち，

1. 与えられた伝送路ネットポロジ，及び伝送路敷設ネットポロジから，マルチキャスト通信サービス，1対1通信サービスのそれぞれの伝送経路を定める。
2. 各伝送路上のマルチキャスト通信の呼量を算出する。
3. 各伝送路上の1対1通信の呼量を算出する。
4. これらの呼量より，各伝送路の必要容量，各交換機の必要容量を算出する。

### 6.3.2 評価指標

3.3.5 で述べたとおり，一般に網構成コストは，伝送路コスト，交換機コスト，伝送路敷設コストの3要素から成る。伝送路敷設コストは，通信網の敷設，または増設に必要なコストであるが，伝送路敷設ネットポロジをあらかじめ設定して

おり、しかも伝送路敷設施設を新たに構築しないと仮定しているため、どの伝送路トポロジーにおいてもほぼ同等の敷設コストが必要であると考えられる。そこで本章では、第5章と同様に、網構成コストは伝送路、交換機の必要容量の2要素から成ると仮定する。

第5章では、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が変化した場合の網構成コストを評価指標とした。しかし、本章では、トラヒックの変動に伴う最適トポロジーの変化を調べることに研究の重点をおくため、このままでは変数が二つ（トラヒック、単位コスト比）となり、計算結果の表示が困難となる。そこで本章では、トラヒックが変動した場合の必要伝送路容量の変化と必要交換機容量の変化を、それぞれ別々に表示して比較することにする。

但し、実際に必要となる網構成コストは、やはり伝送路コストと交換機コストの和である。そこで、特徴的な点に関しては、第5章と同様に、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が変動した場合の最適トポロジーの変化を表示する。

## 6.4 トラヒック変動に伴うトポロジー特性の変化

本節では、1対1通信トラヒックが変動した場合、またはマルチキャスト通信トラヒックが変動した場合に、各トポロジーの特性がどのように変化するかを検討する。伝送路網トポロジーには、スター、リング、マルチリング、デルタスターの4種類を用いる。前章までの結果において、メッシュ構成を第1階層に適用する必要がないことがわかっているので、ここでは省略する。

### 6.4.1 1対1通信トラヒック変動に伴う特性変化

まずはじめに、マルチキャスト通信がまったく存在しないと仮定し、1対1通信トラヒックが変動した場合の各トポロジーの特性について検討する。具体的には、1対1通信トラヒックが現状（伝送帯域 64 kbps, 加入者当りの呼量約 0.01 erl）から大幅に増加したと仮定し、各トポロジーの伝送路必要容量、交換機必要容量特性がどのように変化するかを検討する。

計算に用いる1対1通信トラヒックは、各1対1通信サービスが必要とする伝送帯域を 64 kbps ~ 6 Mbps, 加入者当りの呼量を 0.01 ~ 0.10 erl とする。用いる

表 6.1 1対1通信トラヒック変動（マルチキャスト通信なし）

サービス伝送帯域 [bps]	加入者当り呼量 [erl]	加入者当り平均通信 トラヒック [bps]
64k	0.01	640
64k	0.03	1.92k
64k	0.05	3.2k
64k	0.10	6.4k
512k	0.01	5.12k
512k	0.03	15.36k
512k	0.05	25.6k
512k	0.10	51.2k
1.5M	0.01	15k
1.5M	0.03	45k
1.5M	0.05	75k
1.5M	0.10	150k
6M	0.01	60k
6M	0.03	180k
6M	0.05	300k
6M	0.10	600k

“加入者当り平均通信トラヒック”とは、サービス伝送帯域に加入者当り呼量を乗じたものである。

トラヒックパラメータを、表 6.1 に示す。なお、計算を簡単にするために、各サービスの伝送帯域は一定であると仮定する。

計算結果を、図 6.4、図 6.5 に示す。図 6.4 は各トポロジーを用いたときに必要となる伝送路容量の総和を、図 6.5 は同じく必要となる交換機容量の総和を示している。図の横軸は、加入者 1 人当りの平均通信トラヒックを表す。加入者 1 人当りの平均通信トラヒックとは、各サービスの伝送帯域に加入者当りの呼量を乗じたものである。図は両軸とも対数軸である。

これらの結果から、必要伝送路容量、必要交換機容量は加入者 1 人当りの平均通信トラヒックに対して直線的に増加していることがわかる。但し、両軸対数グ

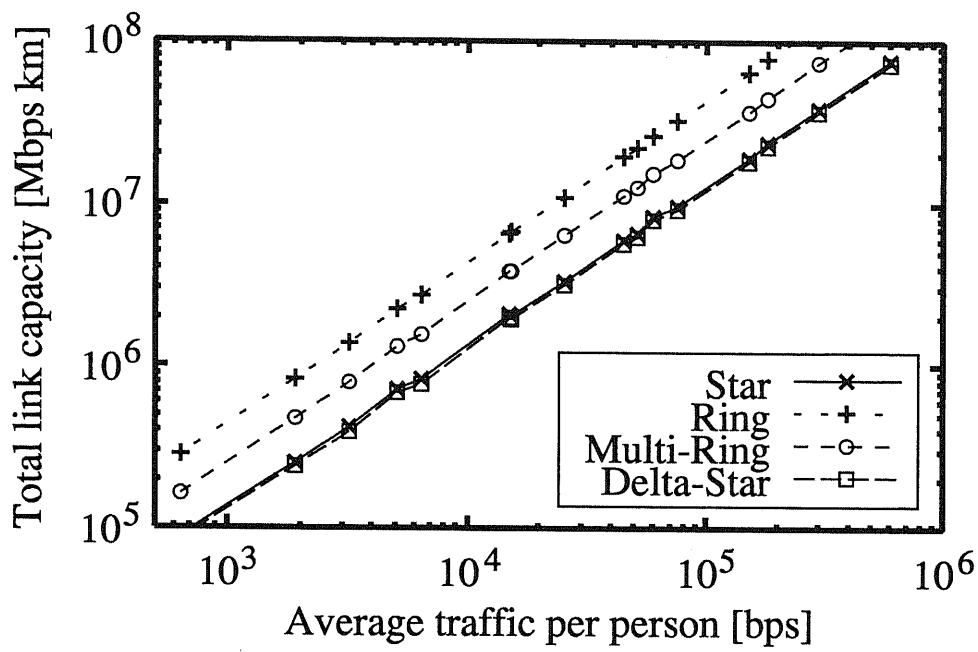


図 6.4 1対1通信増加に伴う必要伝送路容量変化

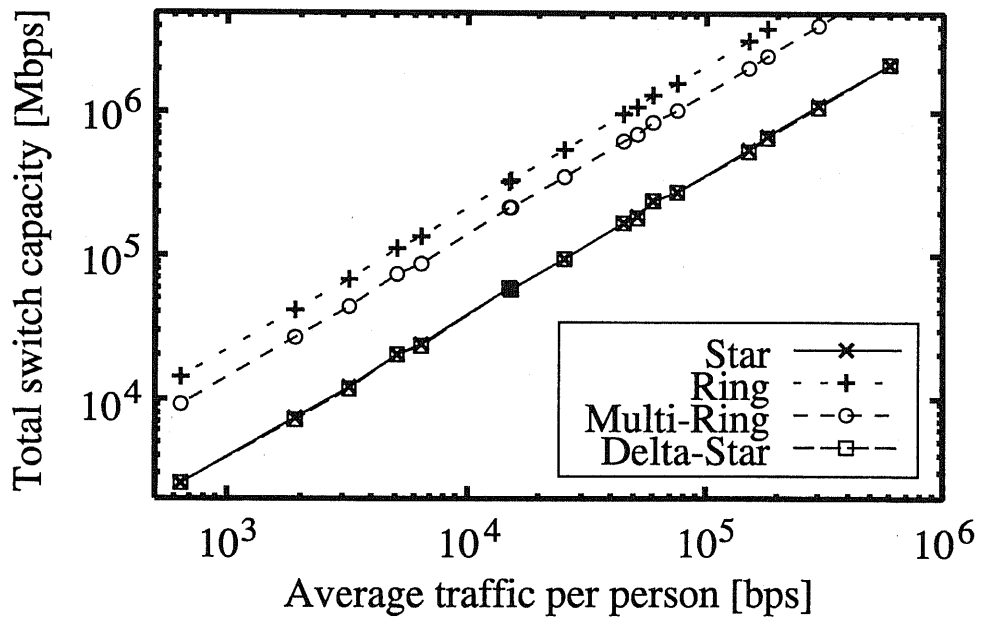


図 6.5 1対1通信増加に伴う必要交換機容量変化

表 6.2 1対1通信増加に伴う必要容量増加率

用いた トポロジー	必要伝送路容量 増加率 [Mbps·km]	必要交換機容量 増加率 [Mbps]
スター	128.29	3.69
リング	428.58	21.37
マルチリング	245.74	13.77
デルタスター	121.06	3.60

ラフであるので、各トポロジーを用いた場合の必要容量増加率（傾き）は必ずしも等しくない。そこで、表 6.2 に各トポロジーにおける増加率を示す。なお、必要伝送路容量増加率とは、加入者 1 人当りの 1 対 1 通信トラヒックが 1 bps 増加した場合に、通信網全体で必要となる（伝送路容量）×（距離）の増加分を表す。同様に、必要交換機容量増加率とは、加入者 1 人当りの 1 対 1 通信トラヒックが 1 bps 増加した場合に、通信網全体で必要となる交換機容量の増加分を表す。

表 6.2 によると、スター、及びデルタスター構成の必要容量増加率は、リング、及びマルチリング構成に比べて極端に小さいことがわかる。また、デルタスター構成の必要容量増加率は、スター構成に比して若干小さくなっており、必要伝送路容量で 5.6 %、必要交換機容量で 2.4 % にすぎない。図 6.4、図 6.5 から、デルタスター構成の優位性は見受けられない。実際、加入者 1 人当りの 1 対 1 通信トラヒックが 600 kbps になっても、デルタスター構成を用いたときの必要伝送路容量、必要交換機容量は、それぞれスター構成を用いた場合の約 5.6 % 減、約 2.2 % 減にとどまっている。このことから、1 対 1 通信サービスのみでマルチキャスト通信サービスが存在しない場合には、現状トポロジーであるスター構成を維持する形で容量増設を行えばほぼ十分であると結論できると思われる。

また、これらの図は、各サービスの伝送帯域と加入者 1 人当りの呼量を変化させた場合の計算結果であるが、実際には加入者 1 人当りの平均通信トラヒックにのみ依存することがわかる。すなわち、二つのパラメータ（サービス伝送帯域と加入者当り呼量）がそれぞれ独立に変化しても、これらの積が同じであれば伝送路、交換機の必要容量は等しくなると考えられる。

## 6.4.2 マルチキャスト通信のサービス数変動に伴う特性変化

次に、1対1通信トラフィックを固定して、マルチキャスト通信トラフィックが増加した場合に、各トポロジーの特性がどのように変化するかを検討する。1対1通信サービスの伝送帯域を1.5 Mbps、加入者1人当りの呼量を0.10 erlとし、マルチキャスト通信トラフィックを変化させる。

マルチキャスト通信サービスは分岐接続により伝送されるため、加入者1人当りの呼量変動ではなく通信網全体でみたマルチキャスト通信トラフィックの変動に対する特性を検討する必要がある。そこで、加入者1人当りのマルチキャスト通信呼量は0.50 erlで一定とし、網全体におけるマルチキャスト通信サービス数、およびマルチキャスト通信サービスの伝送帯域を変化させることにする。

なお、本小節では、マルチキャスト通信サービス数が増加した場合を扱い、マルチキャスト通信サービスの伝送帯域が増加した場合の特性評価は6.4.3にて述べる。

マルチキャスト通信サービス数を1から10,000まで変化させた場合の各トポロジー特性の変化を、図6.6、図6.7に示す。図6.6は各トポロジーを用いた場合に必要となる伝送路容量の総和を、図6.7は同じく必要となる交換機容量の総和を示しており、図の横軸はマルチキャスト通信サービス数を表す。図は両軸とも対数軸である。なお、ここでは各マルチキャスト通信サービスの受信確率は一様であるとし、各サービスの通信帯域は30 Mbpsであると仮定する。

図6.6の必要伝送路容量から、マルチキャスト通信サービス数の増加とともにスター構成の特性が悪化し、サービス数が2,000を越えると最悪となることがわかる。一方、デルタスター構成は、他のどのトポロジーと比較しても常に最適である。また、図6.7の必要交換機容量から、スター構成、デルタスター構成の特性はほぼ同じである。

また、これらの図から、伝送路、及び交換機の必要容量はマルチキャスト通信サービス数に対して直線的に増加するのではなく、立ち上がりは緩やかであることが読みとれる。マルチキャスト通信サービス数が100程度までは、必要容量に大きな変化はなく、100を越えた辺りから急激な増加が始まる。特に、図6.6の必要伝送路容量においてこの特徴が顕著に現れており、スター構成の特性が大きく悪化しはじめるのもマルチキャスト通信サービス数が約100を越えたところからである。マルチキャスト通信サービス数が比較的小さい場合、通信網内のトラフィック

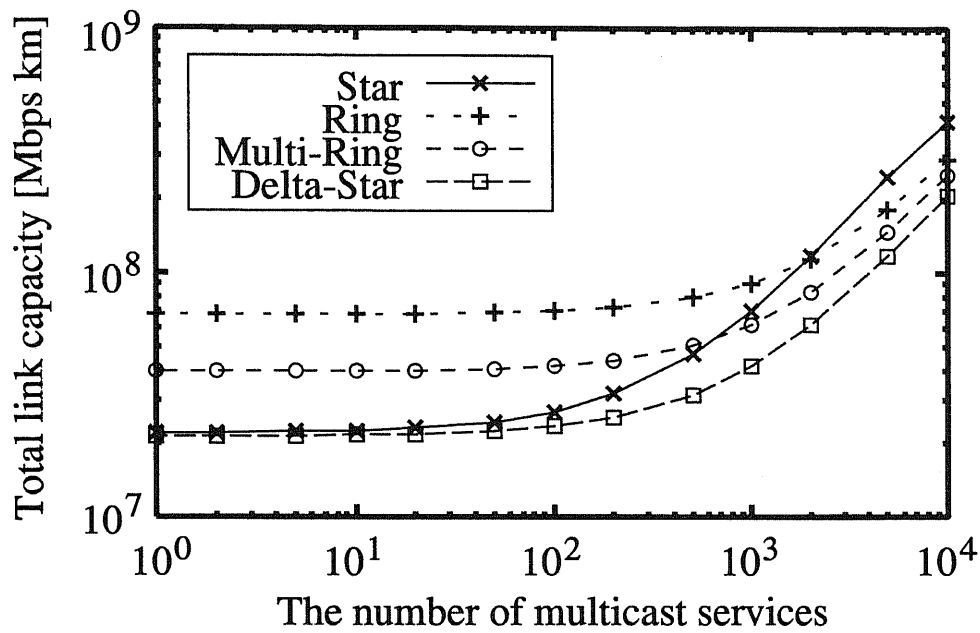


図 6.6 マルチキャスト通信サービス数増加に伴う必要伝送路容量変化

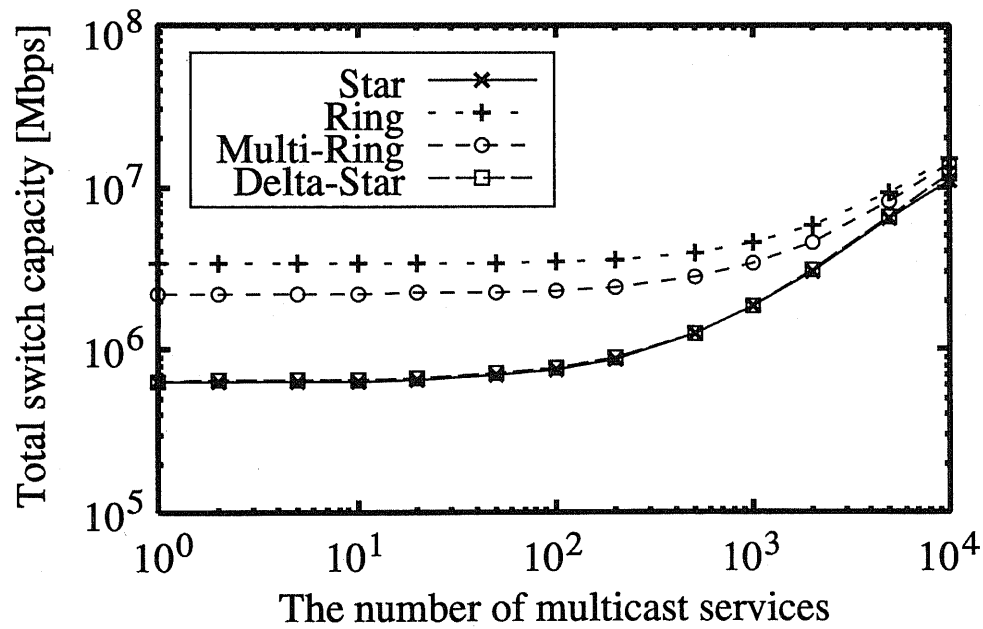


図 6.7 マルチキャスト通信サービス数増加に伴う必要交換機容量変化

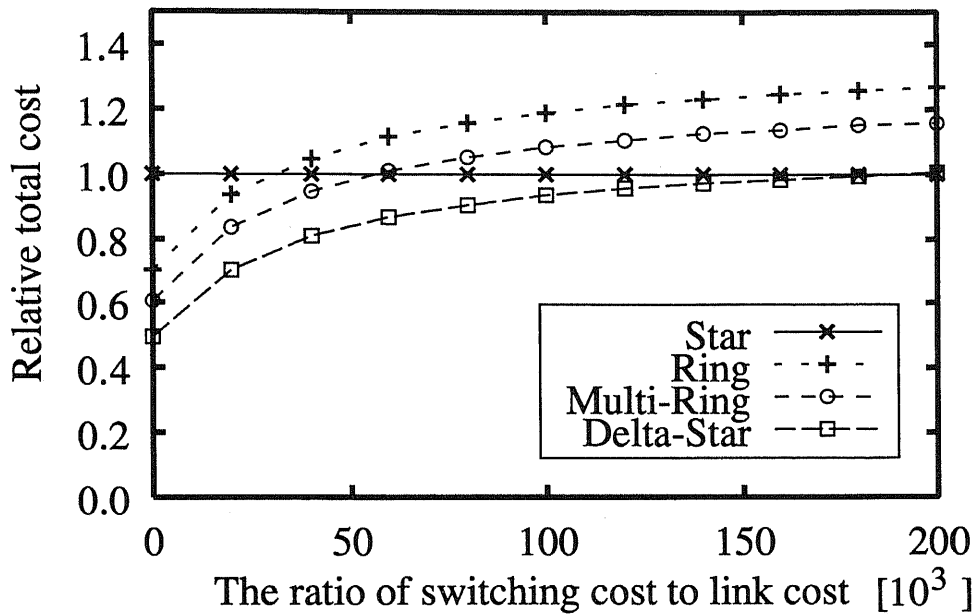


図 6.8 マルチキャスト通信サービス数が 10,000 の場合の相対網構成総コスト

の多くは 1 対 1 通信サービスが占めていると考えられる。このため、マルチキャスト通信サービスが開始された直後には、必要容量がそれほど変化しないのであろう。マルチキャスト通信サービス数が増加し、通信網内におけるメジャートラフィックとなりはじめると、必要容量は大きく増加し、それに伴ってデルタスター構成の優位性が現れ始める。

さらに、マルチキャスト通信サービス数が 10,000 となった場合に対して、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比と最適トポロジーの関係を図 6.8 に示す。図の横軸は、156 Mbps の伝送路 1 m 当りの単位コストに対する 156 Mbps ポート当りの交換機単位コスト比を表し、縦軸はリング、マルチリング、デルタスターの各トポロジーを用いた場合のスター構成に対する相対網構成総コストを表す。図 6.8 から、網構成総コストの観点からも、ほぼ全域にわたってデルタスター構成が最適となることがわかる。

以上の結果から、マルチキャスト通信サービス数の増加に伴って、デルタスター構成が優位になることが再確認された。



### 6.4.3 マルチキャスト通信の伝送帯域変動に伴う特性変化

マルチキャスト通信サービスの伝送帯域を、0 Mbps (マルチキャスト通信サービスなし) から 156 Mbps まで変化させた場合の各トポロジー特性の変化を、図 6.9, 図 6.10 に示す。図 6.9 は各トポロジーを用いた場合に必要となる伝送路容量の総和を、図 6.10 は同じく必要となる交換機容量の総和を示しており、図の横軸は各マルチキャスト通信サービスが必要とする伝送容量を表す。図は両軸とも通常の線形軸である。なお、ここでは各マルチキャスト通信サービスが必要とする伝送帯域は一定であるとし、また各サービスの受信確率は定数 0.99 の幾何分布に従うと仮定する。よって、5.4.1 で述べたトラヒックモデル 2 と同じパラメータとなり、マルチキャスト通信サービス数は 1,993 となる。

図 6.9 から、各トポロジーの必要伝送路容量はマルチキャスト通信サービス帯域に対して直線的に増加することがわかる。増加率 (傾き) は、デルタスター、マルチリング、リング、スターの順で大きくなる。また、図 6.10 の必要交換機容量では、スター構成の特性が最も優れており、増加率はスター、デルタスター、マルチリング、リングの順で大きくなっている。

ここで、6.4.1 と同様に、各トポロジーごとの必要容量増加率を表 6.3 に示す。必要伝送路容量増加率とは、マルチキャスト通信サービスの伝送帯域が 1 bps 増加した場合に、通信網全体で必要となる (伝送路容量) × (距離) の増加分を表す。同様に、必要交換機容量増加率とは、マルチキャスト通信サービスの伝送帯域が 1 bps 増加した場合に、通信網全体で必要となる交換機容量の増加分を表す。表 6.3 から、必要伝送路容量の増加率に関しては、スター構成はデルタスター構成の約 92 % 増となることがわかる。このように、必要伝送路容量ではスター構成の特性悪化は顕著である。一方、必要交換機容量増加率では、デルタスター構成はスター構成の約 17 % 増となっている。よって、交換機容量に関しては、スター構成のほうが有効であるといえる。実際に、マルチキャスト通信サービスの伝送帯域が 156 Mbps になった場合のデルタスター構成における必要伝送路容量、必要交換機容量は、それぞれスター構成の約 43.3 % 減、約 14.7 % 増となっており、伝送路に関してはデルタスター構成が、交換機に関してはスター構成が適していると結論できる。

しかし、マルチキャスト通信網を構成する場合には、伝送路コスト、交換機コストの両方を考慮する必要がある。そこで、マルチキャスト通信サービスの伝送帯

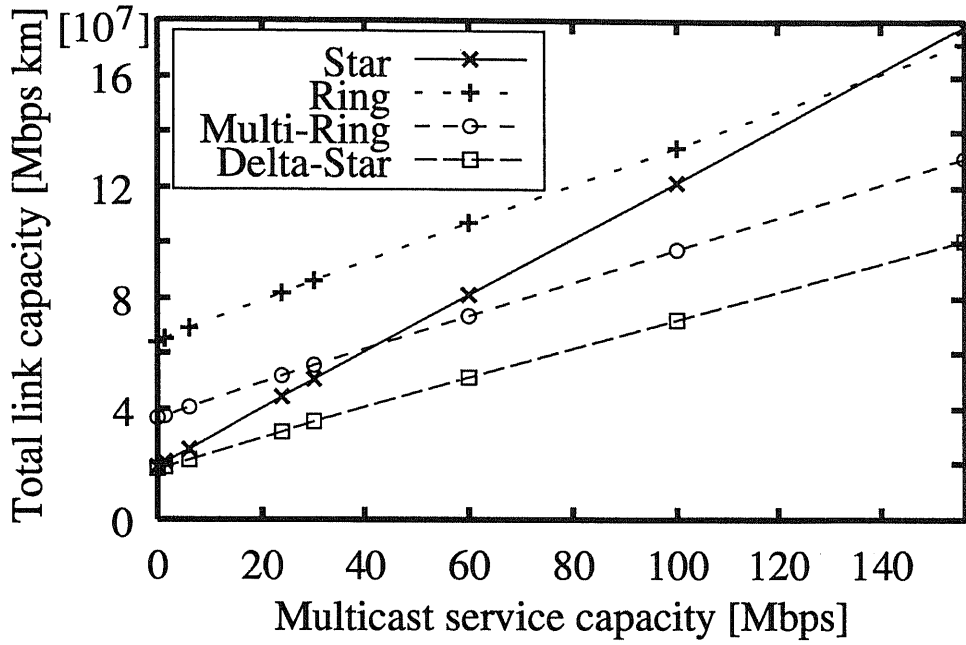


図 6.9 マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要伝送路容量変化

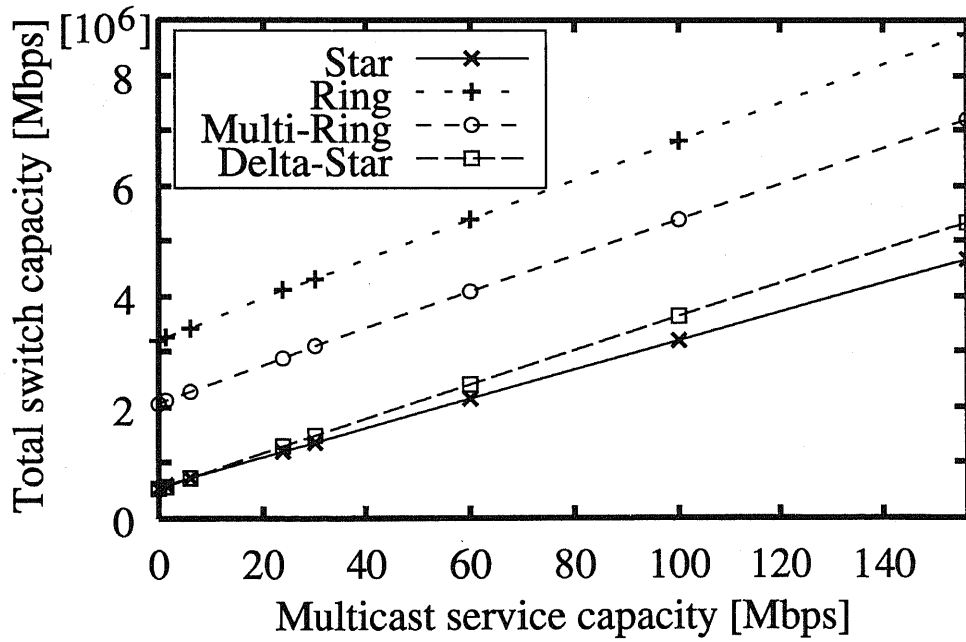


図 6.10 マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要交換機容量変化

表 6.3 マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要容量増加率

用いた トポロジー	必要伝送路容量 増加率 [kbps·km]	必要交換機容量 増加率 [kbps]
スター	1016.37	26.25
リング	690.91	35.61
マルチリング	600.70	32.91
デルタスター	529.76	30.71

域が 156 Mbps になった場合に対して、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比と最適トポロジーの関係を図 6.11 に示す。なお、図の横軸は 156 Mbps の伝送路 1 m 当りの単位コストに対する 156 Mbps ポート当りの交換機単位コスト比を、縦軸はリング、マルチリング、デルタスターの各トポロジーを用いた場合のスター構成に対する相対網構成総コストを表す。図 6.11 から、網構成総コスト

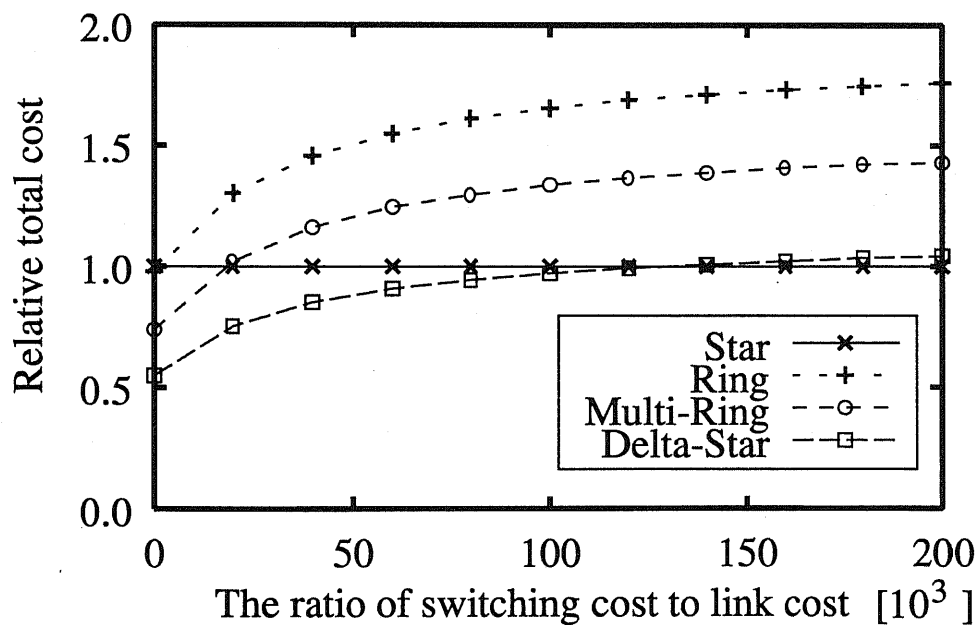


図 6.11 マルチキャスト通信サービス帯域が 156 Mbps の場合の相対網構成総コスト

の観点からも、伝送路単位コストに対する交換機単位コストの比が 130,000 程度までであれば、デルタスター構成が最適となり、かなり広い範囲においてデルタスター構成の最適領域が広がっていることを表している。

以上の結果から、マルチキャスト通信サービスの伝送帯域が増加した場合にも、デルタスター構成の優位性が確認されたと思われる。

## 6.5 マルチキャスト通信網増設法

6.4 では、1対1通信、マルチキャスト通信の各トラヒックが単独で増加した場合に、各トポロジーの特性がどのように変化するかを検討した。その結果、マルチキャスト通信トラヒックの増加とともに、デルタスター構成の優位性が高まることが確認された。そこで本節では、現状トポロジーであるスター構成からデルタスター構成へどのように移行を行うべきかを検討する。

### 6.5.1 トラヒック増加シナリオ

6.4 では、1対1通信、マルチキャスト通信のどちらか一方を固定しておき、他方を増加させた場合の特性評価を行った。しかし、現実のトラヒックはこのように増加するのではなく、1対1通信、マルチキャスト通信ともに呼量が増大し、なおかつ各サービスの伝送に必要な帯域も増加していこうと考えるのが妥当である。また、マルチキャスト通信においては、サービス数の増加とともに、それぞれのサービスを受信する確率にもばらつきが生じると考えられる。

そこで、現実的な通信トラヒックの増加シナリオとして、以下の2通りを考える。

1. 比較的近い将来にマルチキャスト通信サービスが開始される。そして、1対1通信トラヒックの増加とともにマルチキャスト通信トラヒックも増加する（シナリオ1）。
2. マルチキャスト通信の開始はシナリオ1よりも遅れる。そのため、1対1通信トラヒックが増加した後に、マルチキャスト通信サービスが開始され、増加する（シナリオ2）。

表 6.4 シナリオ 1 のトラヒック変動

ピリオド	1対1通信		マルチキャスト通信			
	伝送帯域	呼量	伝送帯域	呼量	幾何分布定数	サービス数
0	64k	0.01	—	—	—	0
1	64k	0.03	64k	0.01	—	10*
2	512k	0.03	512k	0.01	—	10*
3	512k	0.05	512k	0.05	—	30*
4	1.5M	0.05	1.5M	0.10	0.80	93
5	1.5M	0.07	1.5M	0.50	0.90	212
6	1.5M	0.09	6M	0.50	0.95	391
7	1.5M	0.10	6M	0.50	0.98	1026
8	1.5M	0.10	30M	0.50	0.99	1993
9	1.5M	0.10	30M	0.50	0.997	6266
10	1.5M	0.10	30M	0.50	0.999	17719

“\*”では、受信確率を一様分布にて与える。

これらのトラヒック変動に沿ったパラメータの変化を、表 6.4, 表 6.5 に示す。なお、これら二つのシナリオでは、“ピリオド”という言葉を使っているが、ピリオドとは“ある時点”のことを指している。トラヒックの予測は非常に困難であるため、「西暦 20XX 年にマルチキャスト通信が…」などという表現は避けた。よって、ピリオド間隔は必ずしも一定ではなく、ピリオド 1 から 2 まで変動するのに 2 年かかったとしても、ピリオド 2 から 3 までは半年かもしれない。このように、ピリオドとはそのときのトラヒック状況に応じた“時点”のみを表している。なお、表 6.4, 表 6.5 とも、ピリオド 0 は現在を意味している。

さて、シナリオ 1 では、ピリオド 1 からマルチキャスト通信サービスが開始され、ピリオドが進むたびに 1 対 1 通信トラヒック、マルチキャスト通信トラヒックともに増加する。一方、シナリオ 2 では、始めは 1 対 1 通信トラヒックの単独増加となり、ピリオド 5 で 1 対 1 通信の増加が完了する。ピリオド 6 からマルチキャスト通信サービスが開始され、その後増加する。シナリオ 2 では、シナリオ 1 と比較して、マルチキャスト通信が普及する速度を若干速めに設定してある。

これらの表の中に、マルチキャスト通信サービス数は設定されているが幾何分

表 6.5 シナリオ 2 のトラフィック変動

ピリオド	1 対 1 通信		マルチキャスト通信			
	伝送帯域	呼量	伝送帯域	呼量	幾何分布定数	サービス数
0	64k	0.01	—	—	—	0
1	64k	0.03	—	—	—	0
2	512k	0.03	—	—	—	0
3	512k	0.05	—	—	—	0
4	1.5M	0.05	—	—	—	0
5	1.5M	0.10	—	—	—	0
6	1.5M	0.10	1.5M	0.01	—	30*
7	1.5M	0.10	1.5M	0.05	0.80	93
8	1.5M	0.10	6M	0.10	0.90	193
9	1.5M	0.10	6M	0.50	0.95	391
10	1.5M	0.10	30M	0.50	0.98	1026
11	1.5M	0.10	30M	0.50	0.99	1993
12	1.5M	0.10	30M	0.50	0.997	6266
13	1.5M	0.10	30M	0.50	0.999	17719

“\*” では、受信確率を一様分布にて与える。

布定数が設定されていない箇所が存在する。表 6.4 のピリオド 1~3, 表 6.5 のピリオド 6 が該当する。マルチキャスト通信サービス数がそれほど大きくない場合、各サービスの受信確率に偏りが生じないか、または生じてもそれほど大きくはならないと考えられる。そこで、これらのピリオドでは、マルチキャスト通信の各サービス受信確率を一様分布にて与えるものとする。それ以外のピリオドでは偏りが生じるように、幾何分布を用いて受信確率を決定する。なお、幾何分布を用いた場合、5.2.2 (1) で述べたように、計算領域内外の総加入者 1 億人のうち、1 人以上がサービスを受信している確率が 0.1% 未満になったところで計算を打ち切ることとする。これにより、表に示したサービス数が考慮される。

## 6.5.2 伝送路増設方法

通信トラフィックの増加に伴い、伝送路容量、及び交換機容量の増設が必要となる。6.4の結果から、マルチキャスト通信サービスが開始され、マルチキャスト通信トラフィックが増加するのであれば、現状のスター構成からデルタスター構成へトポロジーの移行を行うべきである。そこで、ここでは伝送路増設を行う手法について検討する。すなわち、現状のトポロジーに含まれている伝送路集合を  $L_c$ 、最終トポロジーに含まれる伝送路集合を  $L_f$  とすると、最終トポロジーに含まれるが現状トポロジーには含まれない伝送路集合  $L_a = L_f - L_c$  (増設可能伝送路集合) をどのような順番で追加するかを決定するアルゴリズムを検討する。但し、計算開始トポロジーをスター構成を仮定し、最終トポロジーをデルタスター構成とする。なお、スター構成からデルタスター構成への移行の様子を、図 6.12 に示す。図中の実線が  $L_c$  に、一点鎖線が  $L_f$  に、破線が  $L_a$  に対応している。

トポロジーが変化すると、マルチキャスト通信、1対1通信ともに、トラフィックの伝送経路が変更になるため、各伝送路の必要容量、各交換機の必要容量が変化する。場合によっては、必要容量が減少することもありうる。本論文では、一度構成された伝送路、交換機設備は再利用ができないものと仮定する。よって、不

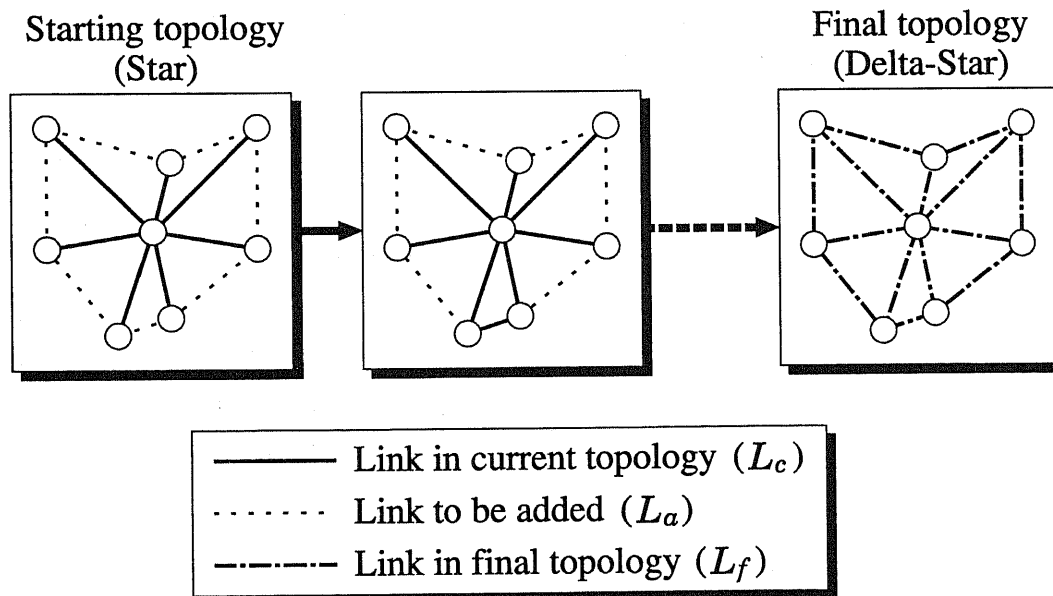


図 6.12 スター構成からデルタスター構成への移行

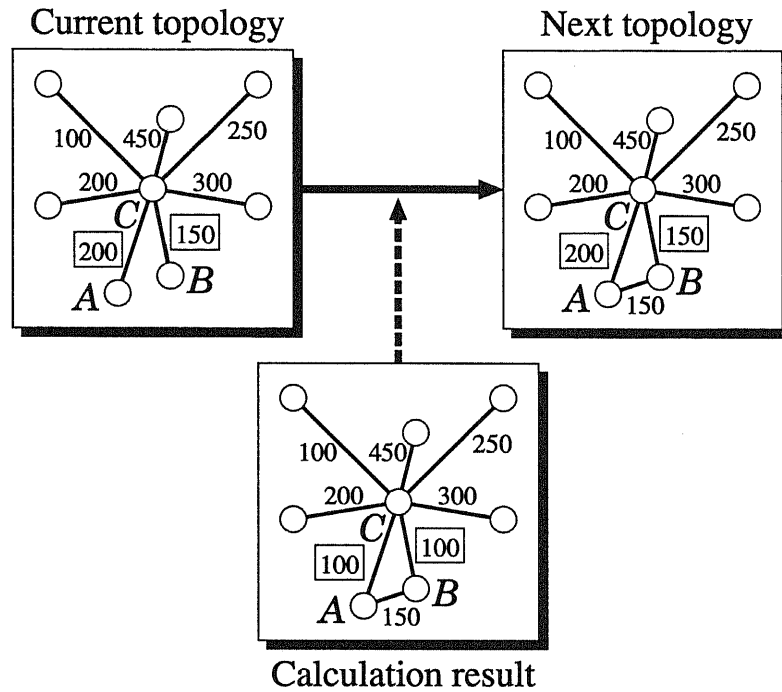


図 6.13 伝送路増設方法

要になった設備はすべて無駄となる。図 6.13 は、交換局 A, B 間に新しく伝送路を増設した場合における各伝送路必要容量の例である。トポロジーが変更されると、各伝送路の必要容量の計算が行われ、図の例では交換局 A, C 間、及び B, C 間の必要容量が減少することになる。しかし、前述のとおり一度構成された設備は再利用できないと仮定しているため、伝送路増設後のトポロジーにおける交換局 A, C 間、及び B, C 間の必要容量は、増設前から減少することはない。この例では、トラヒックが増加していないため、増設を行う分だけ無駄となるが、トラヒックが増加すれば伝送路増設の効果が現れる。

さて、デルタスター構成への移行を行う場合、ある時点において一度に完全なデルタスター構成へ移行する方法と、徐々に伝送路を追加していき最終的に完全なデルタスター構成を作成する方法がある。網形態を一度に変更する手法は、増設順序等の問題が省略できるため簡単であるが、膨大な設備投資コストを必要とするため現実的ではないと考えられる。一方、徐々に増設する方法では、その増設順序により最終的に構成される通信網が必ずしも最適になるとは限らない。よっ



て、伝送路の増設順序を定めるための何らかのアルゴリズムが必要となる。以下に、本論文で用いる伝送路増設手法を説明する。但し、図 6.6, 図 6.7, 及び 図 6.9, 図 6.10 から、スター構成とデルタスター構成の違いは、必要交換機容量よりもむしろ必要伝送路容量のほうで大きく現れるため、ここでは伝送路容量、すなわち伝送路距離を優先した手法を用いる。

#### (1) Nearest Node First (NNF)

増設可能伝送路集合  $L_a$  の中で、その両端局の直線距離が最小のものから順に増設を行う方法である。すなわち、交換局間距離が最短となる箇所から増設を行う方法である。よって、増設順序を決定するためには、交換局の地理的な座標、または交換局間距離を用いれば十分である。なお、以下では“NNF”と表記する。

#### (2) Shortest Link First (SLF)

増設可能伝送路集合  $L_a$  の中で、その伝送路長が最小のものから順に増設を行う方法である。伝送路敷設ネットポロジが物理ネットポロジと一致しない場合には、伝送路の迂回敷設がなされるため、(1)の NNF 法とは異なる順序になる。増設順序を決定するためには、交換局の地理的な座標（または交換局間距離）と伝送路敷設ネットポロジが必要となる。なお、以下では“SLF”と表記する。

#### (3) Most Link Length Change (MLC)

増設可能伝送路集合  $L_a$  に含まれる伝送路を追加することにより、その両端局の経路長が変化するが、この変化率の最も大きいものから順に増設を行う方法である。伝送路追加前にはスターの中心（タンデム局）を経由する経路がとられるが、追加後は直通となり経路長が短くなる。この変化率の大きい順に増設する。増設順序を決定するためには、交換局の地理的な座標（または交換局間距離）と伝送路敷設ネットポロジが必要となる。なお、以下では“MLC”と表記する。

#### (4) Greedy+ Algorithm (GPA)

発見的手法の一つであるグリーディアルゴリズム (Greedy Algorithm) を用いて増設伝送路を決定する方法である。グリーディアルゴリズムの中で、伝送路を増設する方向へ進むアルゴリズムを、特にグリーディプラスアルゴリズム (GPA:

Greedy+ Algorithm) と表記している論文も存在している<sup>(36, 112, 113)</sup>。本論文においても増設伝送路を検索するので、グリーディプラスアルゴリズムと呼ぶことにする。なお、以下ではグリーディプラスアルゴリズムを“GPA”と表記する。

増設可能伝送路集合  $L_a$  に含まれる伝送路を増設することにより、トポロジーが変化する。そこで、GPA では、考えうるすべての場合に対して網構成コスト計算を実行し、その中で最もコストが小さくなるものを選択する。具体的には、アルゴリズムは以下のように動作する。まず、増設可能伝送路集合  $L_a$  を、以下のよう

$$L_a = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}, \quad n = |L_a| \quad (6.1)$$

なお、 $l_1, l_2, \dots, l_n$  はそれぞれ増設可能伝送路を、 $n$  は増設可能伝送路数を表している。この集合の中から1本の伝送路  $l_i$  を選択して現状のトポロジーに追加し、これにより作成されたトポロジーを用いた場合の網構成コスト  $C_i$  を計算する。これを、すべての伝送路について実行し、最小の  $C_i$  を与える伝送路  $l_i$  を実際に増設し、増設可能伝送路集合  $L_a$  から削除する。以上の一連の動作を、増設可能伝送路集合  $L_a$  が空集合になるまで繰り返す。

なお、GPA では、伝送路を1本追加するごとに大量のコスト計算が発生するため、長時間の計算が必要となるが、ここで述べた4通りの手法の中では最も適した伝送路増設箇所を発見できると思われる。但し、増設順序を決定するために網構成コストの計算を行うので、交換局の地理的な座標（または交換局間距離）や伝送路敷設網トポロジー以外に、通信トラフィックパラメータが必要となる。トラフィックが増加した後で増設を行ったのでは、全トラフィックを伝送できない可能性があるため、実際にはトラフィック需要の伸びを予測して増設を行う必要がある。すなわち、実際にGPAによる運用を行うのであれば、正確なトラフィック予測が必要となる。

## 6.6 定量的評価

6.2 で述べた計算領域モデル、サービスモデル、及び伝送路敷設網トポロジーを用いて、必要伝送路容量、必要交換機容量の計算を行い、6.5.2 で述べたNNF, SLF, MLC, GPA の各伝送路増設手法の特性評価を行う。なお、伝送路の増設はマルチキャスト通信サービスが開始されてから実施するものとし、各ピリオドごとに5本ずつ伝送路を増設すると仮定する。よって、シナリオ1の場合にはピリ

オド 8 で、シナリオ 2 の場合にはピリオド 13 でデルタスター構成への移行が完全に終了することになる。新しい伝送路を増設し、トポロジーが変化した場合には、マルチキャスト通信、1対1通信ともにトラヒックの伝送経路が変更されるため、伝送路、及び交換機の必要容量を再計算する必要がある。このような場合には、6.3 で述べた計算方法を用いることとする。また、6.5.2 で述べたように、各伝送路、及び各交換機の必要容量が減少する可能性があるが、一度設置された設備が不要になった場合にも、それらを回収、または再利用することはできないものと仮定する。

### 6.6.1 シナリオ 1 の場合の特性評価

シナリオ 1 に従って通信トラヒックが増加した場合の計算結果を、図 6.14 ~ 図 6.17 に示す。図 6.14 は必要伝送路容量変化を、図 6.15 は必要交換機容量変化を表しており、図 6.16、図 6.17 はそれぞれスター構成を用いた場合に対する必要伝送路容量、必要交換機容量の相対値である。また、図の横軸はピリオド番号を表している。デルタスター構成の値は、現在（ピリオド 0）からデルタスター構成が存在していると仮定し、トポロジーを変更することなく伝送路、交換機の帯域増強を行った場合の計算結果である。現状はスター構成であると仮定しているため、デルタスター構成の値は目標値として表示してある。なお、前述のとおり、シナリオ 1 の場合にはピリオド 8 でデルタスター構成への移行が完全に終了することになる。

図 6.14 ~ 図 6.17 から、シナリオ 1 の場合には、どの増設手法を用いても、ピリオド 8 周辺でデルタスター構成とほぼ同じ必要伝送路容量、必要交換機容量に達していることがわかる。前述のとおり、ピリオド 8 は、デルタスター構成への移行が完全に終了する時点である。よって、シナリオ 1 の場合には増設手法によらず、通信網の増設に成功するといえる。

シナリオ 1 では、マルチキャスト通信トラヒックと同時に 1対1通信トラヒックも増加するが、これはマルチキャスト通信が比較的早期に開始されるためである。すなわち、マルチキャスト通信サービスが現れ、伝送路増設が開始されるのが比較的早期であるため、トポロジーの変化が及ぼす影響が少なく済むのであろうと考えられる。実際、図 6.14、図 6.15 に着目すると、ピリオド 7 まではスター構成とデルタスター構成の違いがほとんどない。ピリオド 7 では、既に 35 本の伝送路が新設され、どの増設手法を用いたとしても伝送路の増設はほとんど終了して

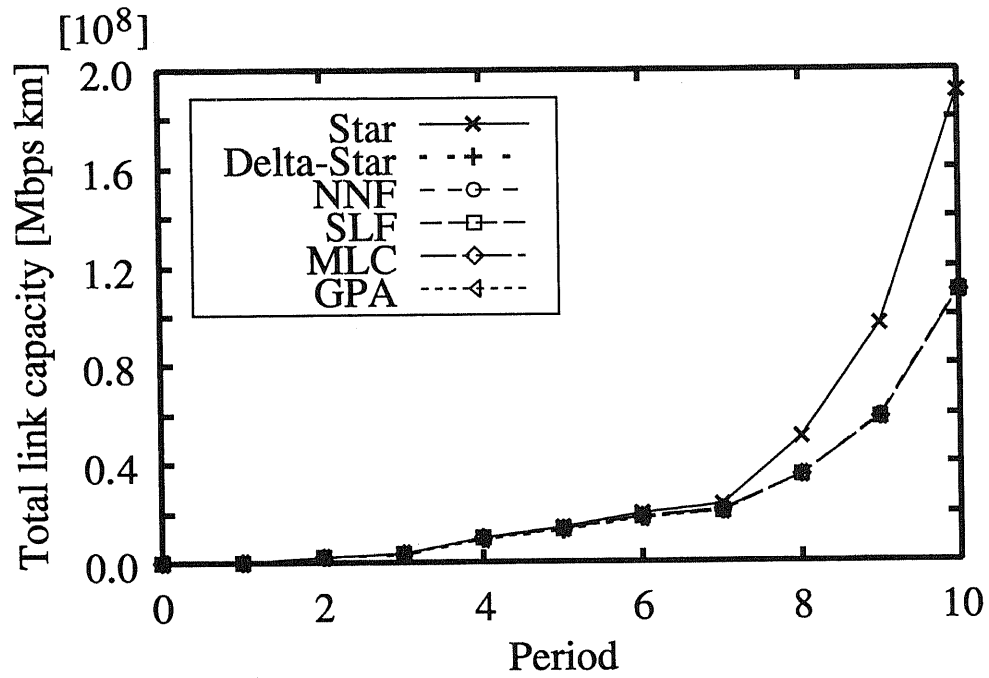


図 6.14 シナリオ 1 の必要伝送路容量変化

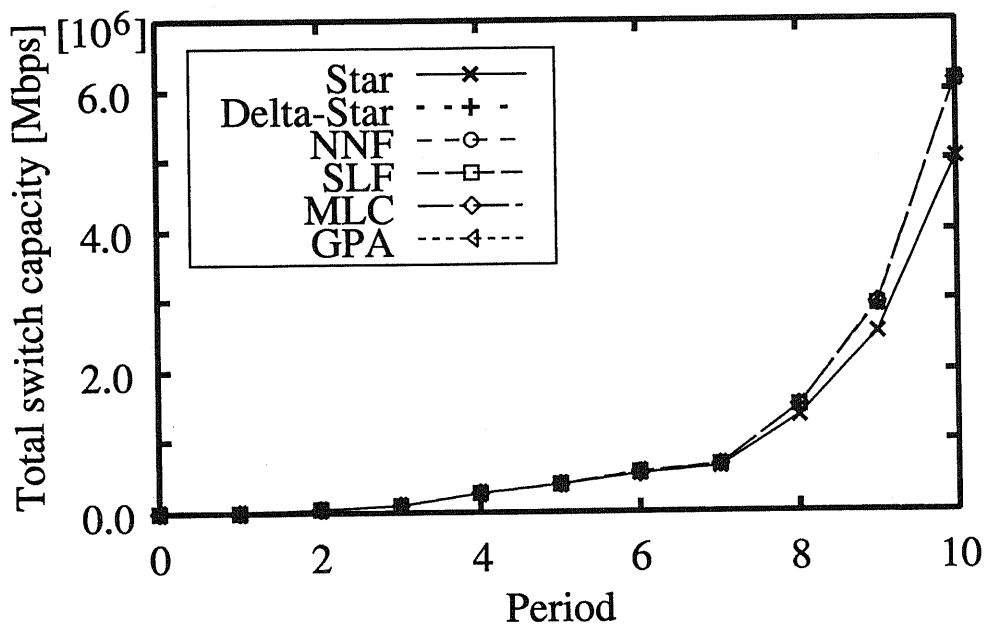


図 6.15 シナリオ 1 の必要交換機容量変化

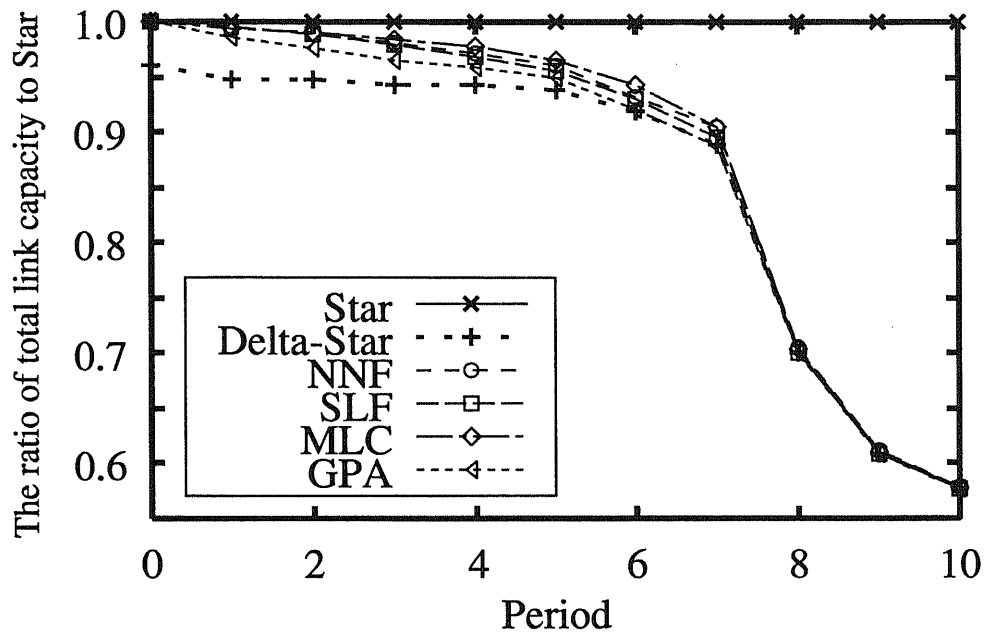


図 6.16 シナリオ 1 の必要伝送路容量変化 (スター構成に対する相対値)

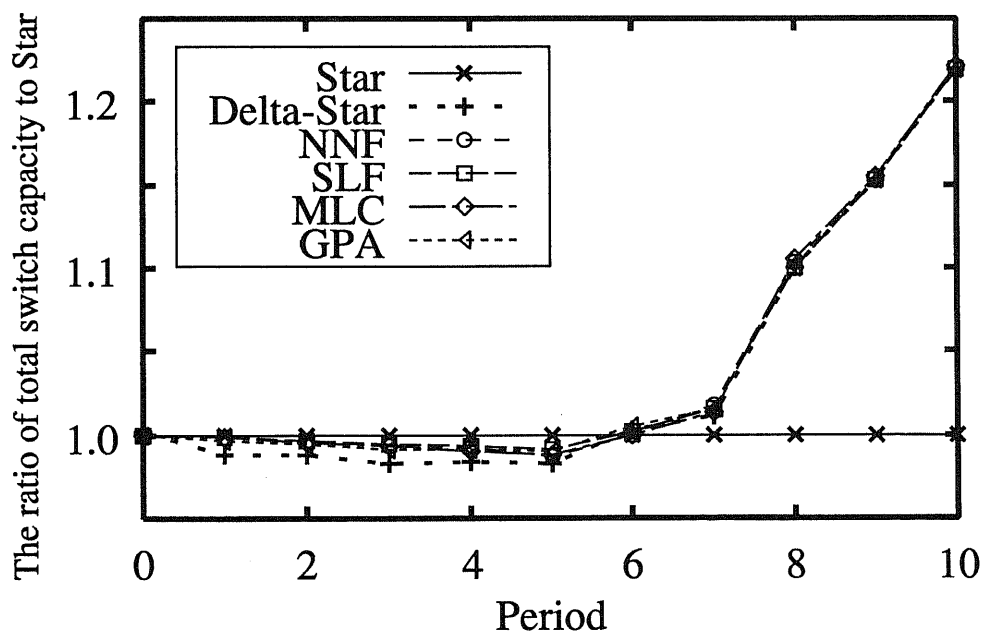


図 6.17 シナリオ 1 の必要交換機容量変化 (スター構成に対する相対値)

いる。ピリオド 8 以降でスター構成とデルタスター構成の特性に大きな違いが現れるが、この周辺では既に主要な伝送路の増設がほぼ終了しているため、トポロジーの変更が必要伝送路容量、及び必要交換機容量に与える影響を最小限に抑えることが可能となるのであろう。

次に、図 6.16 から増設手法による必要伝送路容量特性の違いを検討してみると、GPA を用いた場合の特性が最も良く、完全移行が終了する前の段階であっても最も小さい伝送路容量ですむようである。6.5.2 (4) で述べたように、GPA ではすべての増設可能伝送路に対して計算を行ったうえで、必要伝送路容量が最も小さくなるような伝送路を選択するため、このような結果が得られるのは当然である。GPA 以外の手法では、SLF が最も効率的であることがわかる。一方、図 6.17 からは交換機容量の特徴的な特性は得られない。これは、6.5.2 で述べたように、今回用いた増設手法がすべて距離のみを利用したアルゴリズムであるためと考えられる。

さらに、通信トラフィック増加中のピリオド 4, 8, 及び最終ピリオドであるピリオド 10 において、網構成全体にかかる総コストがどのような特性となっているかを、

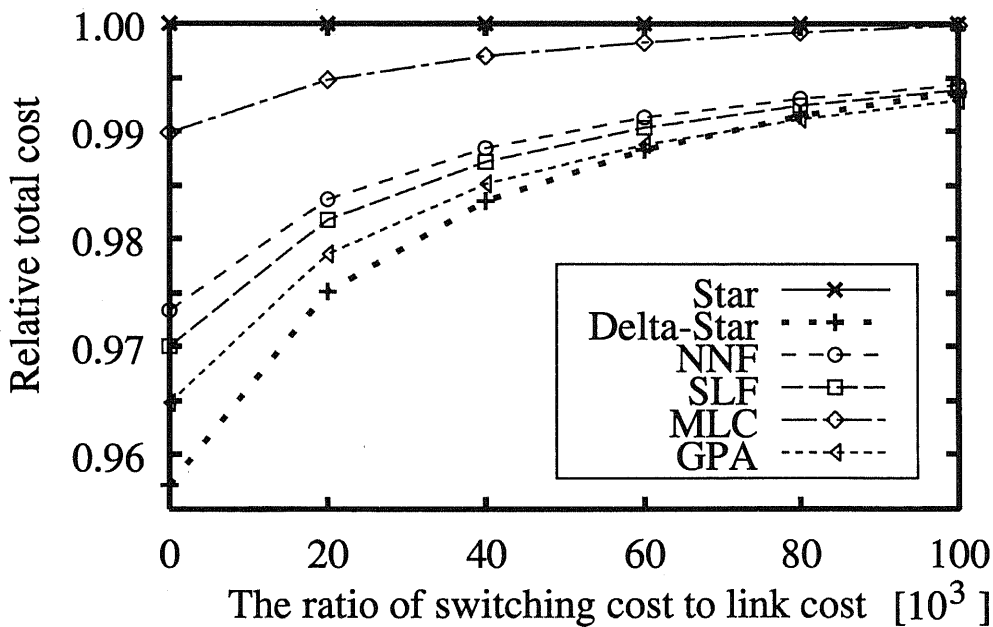


図 6.18 シナリオ 1, ピリオド 4 の相対網構成総コスト

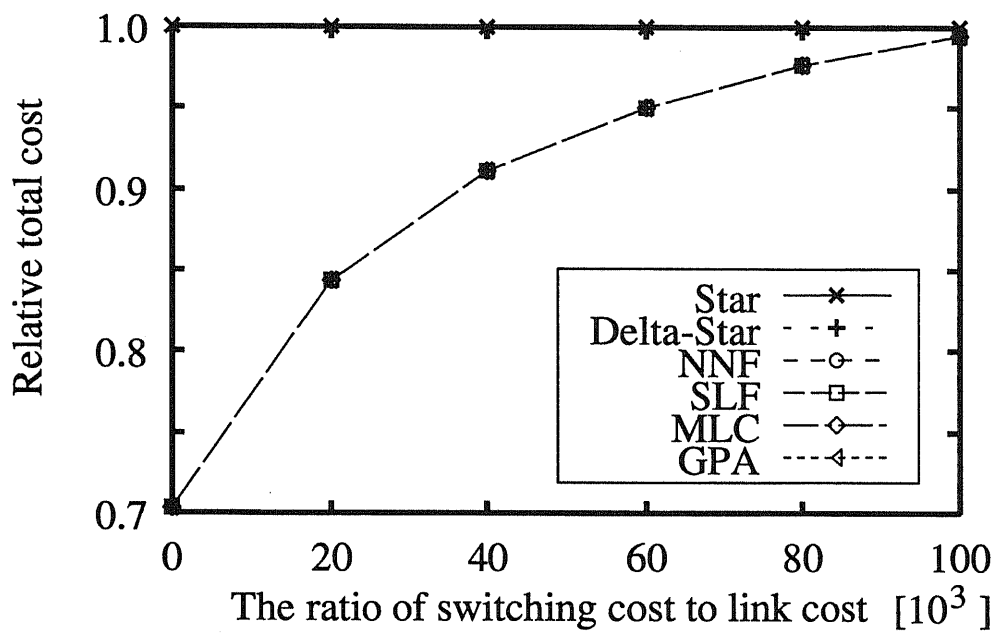


図 6.19 シナリオ 1, ピリオド 8 の相対網構成総コスト

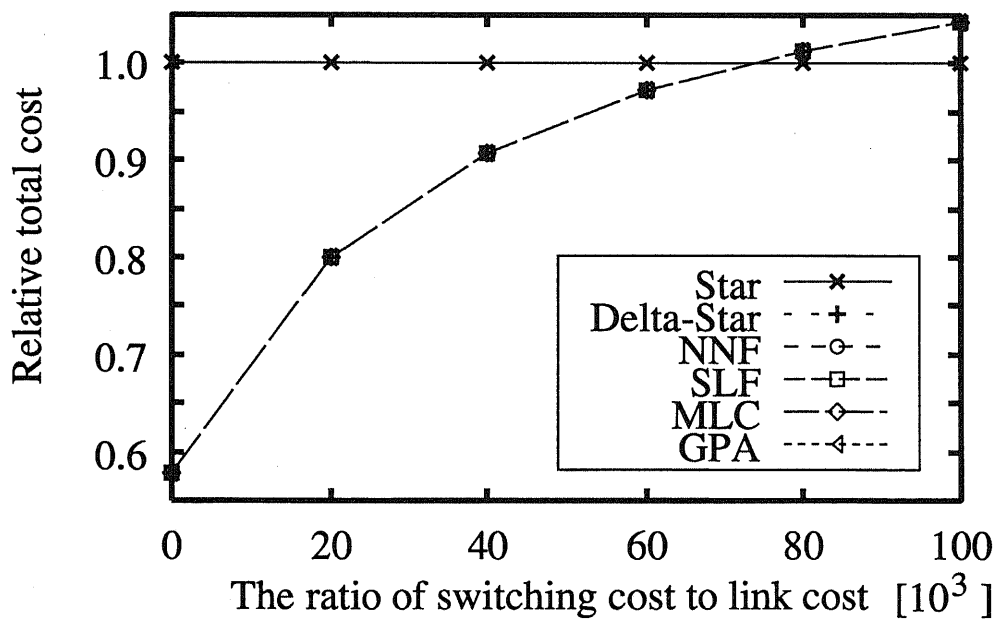


図 6.20 シナリオ 1, ピリオド 10 の相対網構成総コスト

それぞれ図 6.18, 図 6.19, 図 6.20 に示す. 図の横軸は 156 Mbps の伝送路 1 m 当りの単位コストに対する 156 Mbps ポート当りの交換機単位コスト比を, 縦軸はデルタスター構成, 及び 6.5.2 で述べた各手法を用いて増設を行ったトポロジー構成の網構成総コストであり, スター構成に対する相対値を表している. 図 6.18 は増設途中であるため, 増設手法による網構成コストの差が出ており, 必要伝送路容量特性の場合と同様に GPA の特性が最も良く, 次に SLF, NNF, MLC と続く. 前述のとおり, GPA はかなりの計算量を必要とするうえ, トラヒックの正確な予測も不可欠である. そういった意味からは, SLF による増設伝送路決定法が最も実用的であると考えられる. なお, 図 6.19, 図 6.20 から, ピリオド 8 以降ではどの伝送路増設法を用いてもデルタスター構成とほぼ同じ特性となることわかる.

但し, 通信トラヒックの増加がシナリオ 1 に完全に従うとは限らない. マルチキャスト通信の普及が, 途中のピリオドで停止する可能性もある. このため, トラヒック増加途中の段階で, できるだけ網構成総コストを小さくしておいたほうが望ましい. よって, 通信トラヒックの予測が正確に行えるのであれば GPA, そうでなければ SLF を用いるのが望ましいと結論できる.

## 6.6.2 シナリオ 2 の場合の特性評価

シナリオ 2 に従って通信トラヒックが増加した場合の計算結果を, 図 6.21 ~ 図 6.24 に示す. 図 6.21 は必要伝送路容量変化を, 図 6.22 は必要交換機容量変化を表しており, 図 6.23, 図 6.24 はそれぞれスター構成を用いた場合に対する必要伝送路容量, 必要交換機容量の相対値である. また, 図の横軸はピリオド番号を表している. なお, デルタスター構成の値は, 6.6.1 と同様に, 現在 (ピリオド 0) からデルタスター構成が存在していると仮定し, 伝送路, 交換機の帯域増強を行った場合の計算結果であり, 目標値として表示してある. なお, 前述のとおり, シナリオ 2 の場合にはピリオド 6 より増設を開始し, ピリオド 13 でデルタスター構成への移行が完全に終了することになる.

図 6.21 ~ 図 6.24 から, シナリオ 2 の場合には, トポロジーの移行が完全に終了するピリオド 13 においても, デルタスター構成目標値の特性に達することができず, 伝送路容量で 4~13 %, 交換機容量で 2~6 % のコスト増となる. 6.5.2 で述べたように, 伝送路の増設によりデルタスター構成への移行を始めると, トラヒックの伝送経路が変化するため, 今まで多くのトラヒックが通過していた箇所



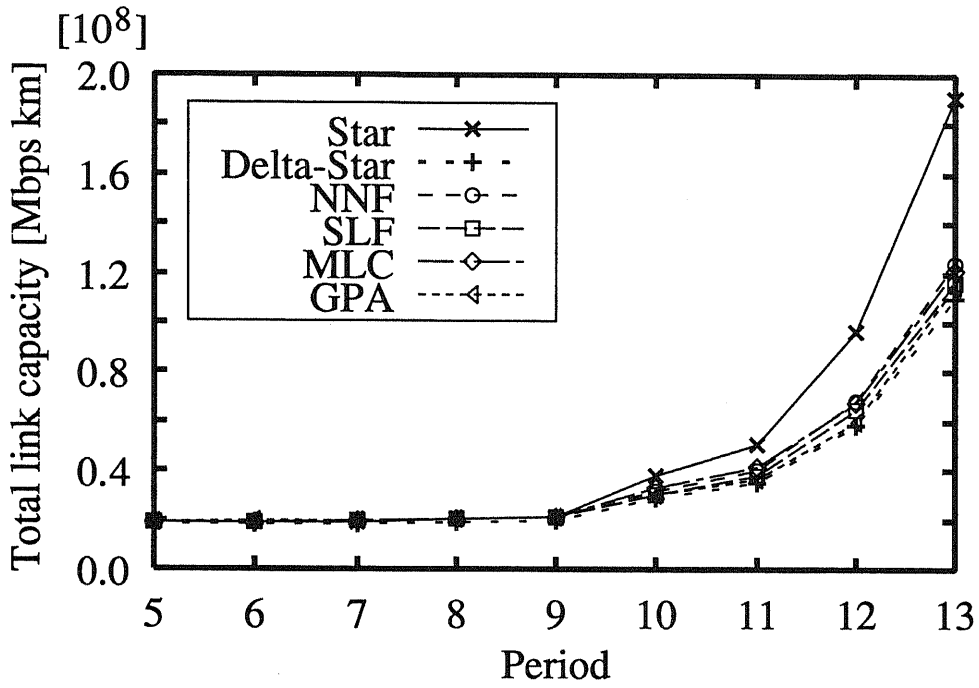


図 6.21 シナリオ 2 の必要伝送路容量変化

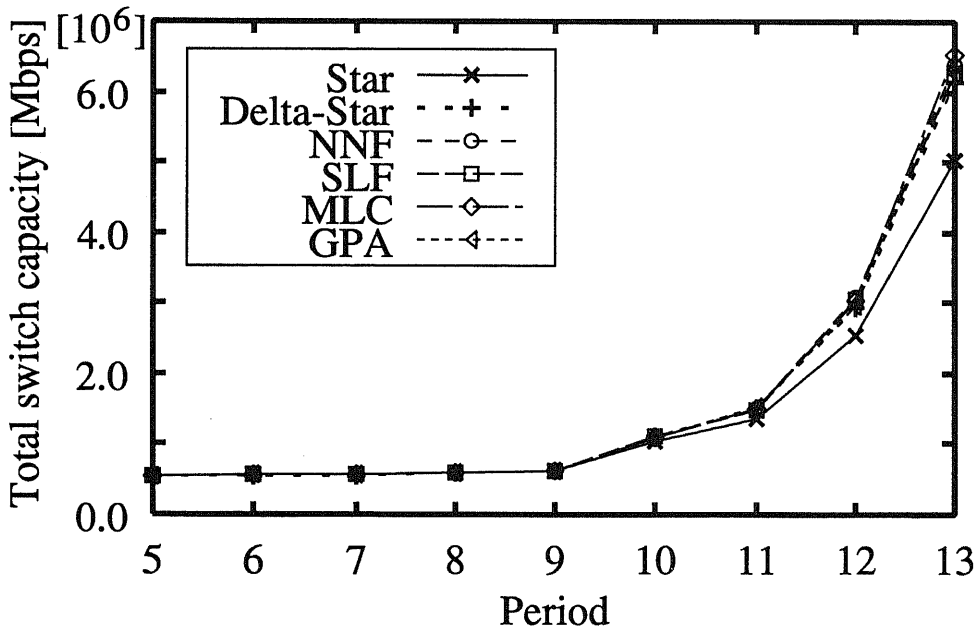


図 6.22 シナリオ 2 の必要交換機容量変化

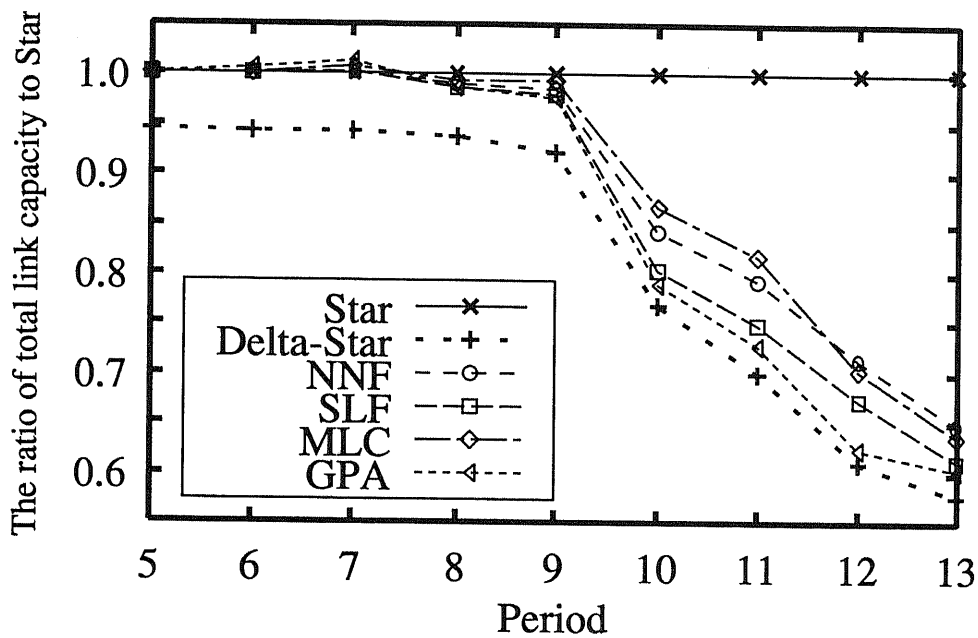


図 6.23 シナリオ 2 の必要伝送路容量変化 (スター構成に対する相対値)

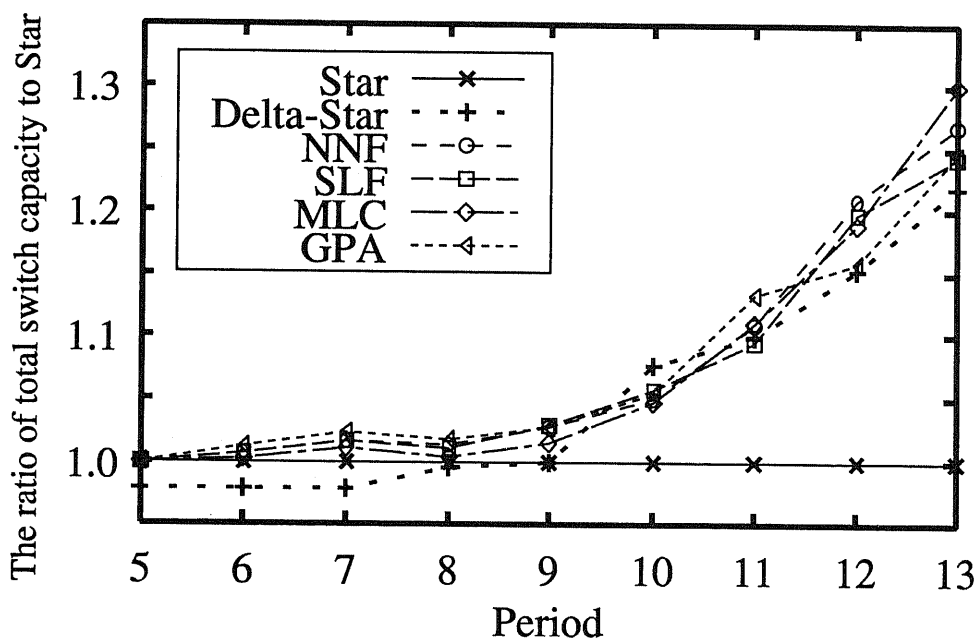


図 6.24 シナリオ 2 の必要交換機容量変化 (スター構成に対する相対値)

の必要容量が減少する可能性がある。特に、シナリオ2ではマルチキャスト通信サービスの開始が遅く、1対1通信トラフィックが十分に大きくなってから伝送路の増設が開始されるので、増設前の段階でスター構成に含まれる伝送路の容量、及び交換機容量が非常に大きくなっていると思われる。増設開始に伴い、これらの箇所の必要容量が大幅に減少するが、一度設置した施設の回収、再利用はできないため、必要容量の無駄が生じると考えられる。

次に、図 6.23 から増設手法による必要伝送路容量特性の違いを検討してみると、どのピリオドにおいても GPA を用いた場合の特性が最も良い。これは、6.6.1 と同様、GPA が最も計算量を要するので、当然の結果である。GPA 以外の手法では、SLF が比較的優れた特性を示している。NNF と MLC は、ピリオド番号が小さいときには NNF が、大きいときには MLC が適しているが、ほぼ同等といっよいであろう。このように、マルチキャスト通信サービスの開始が遅れた場合であっても、GPA、SLF の優位性は変わらない。

さらに、通信トラフィック増加中のピリオド 8, 10, 及び最終ピリオドであるピリオド 13 における網構成総コスト特性を、図 6.25 ~ 図 6.27 に示す。図の横軸は

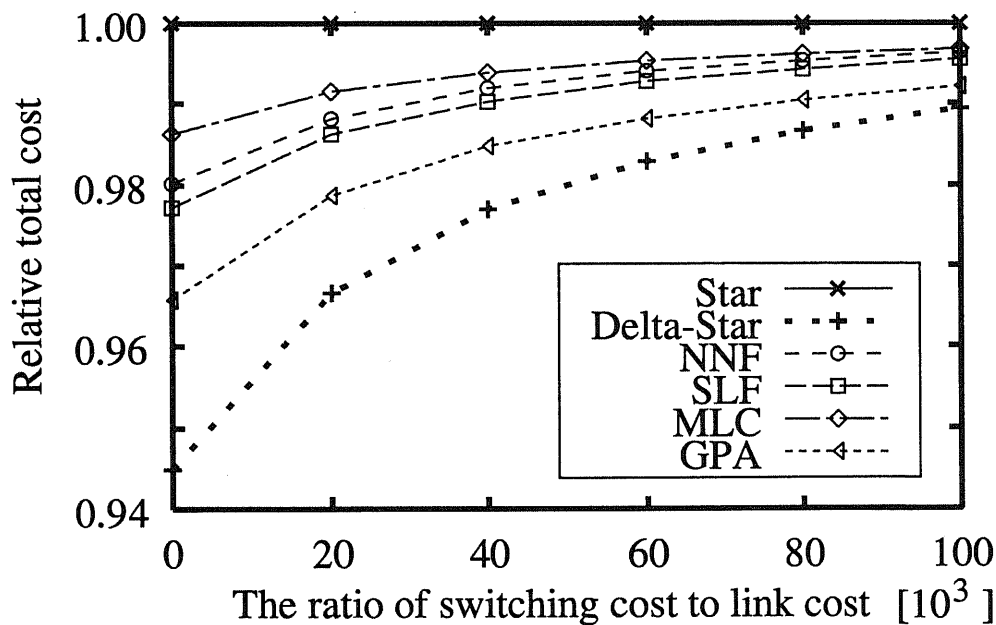


図 6.25 シナリオ 2, ピリオド 8 の相対網構成総コスト

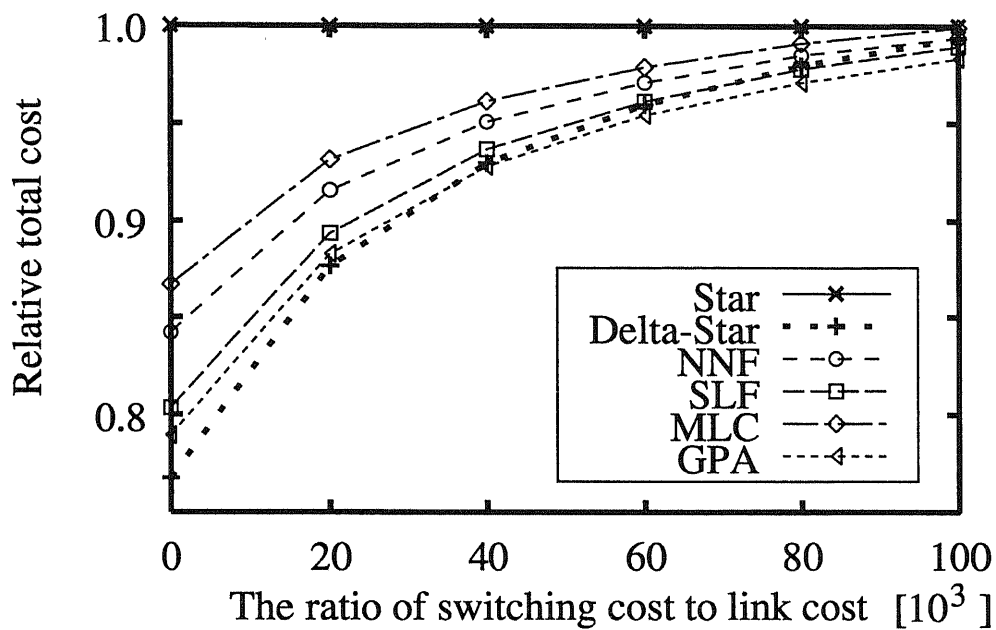


図 6.26 シナリオ 2, ピリオド 10 の相対網構成総コスト

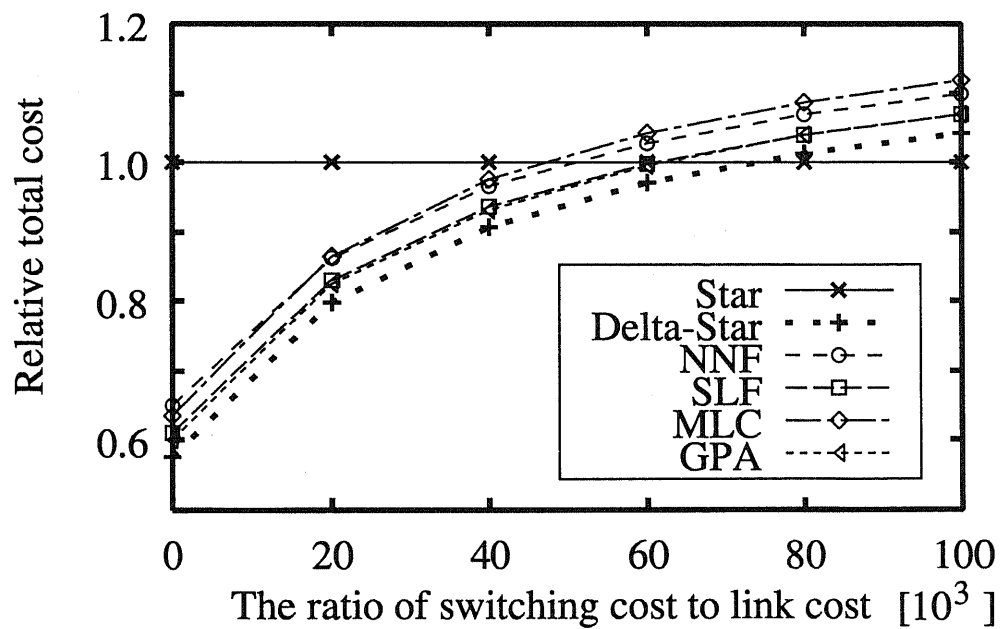


図 6.27 シナリオ 2, ピリオド 13 の相対網構成総コスト

156 Mbps の伝送路 1 m 当りの単位コストに対する 156 Mbps ポート当りの交換機単位コスト比を、縦軸はデルタスター構成、及び 6.5.2 で述べた各手法を用いて増設を行ったトポロジー構成の網構成総コストであり、スター構成に対する相対値を表している。図 6.25 ~ 図 6.27 から、ピリオドが進むにつれ、四つの増設手法の特性がデルタスター構成目標値に近づいていることがわかる。ピリオド 8 では、GPA の特性が非常に良く、ついで SLF, NNF, MLC の順になっている。一方、ピリオド 10 では、SLF の特性が GPA に近づき、ピリオド 13 でほぼ同等となっている。また、NNF, MLC の特性も徐々に GPA, SLF に近づいてきていることがわかる。しかし、実際の通信トラフィックの増加がシナリオ 2 に完全に従うとは限らず、マルチキャスト通信の普及が途中のピリオドで停止する可能性もあることを考慮すると、トラフィック増加途中の段階でできるだけ網構成総コストを小さくしておいたほうが望ましい。よって、通信トラフィックの予測が正確に行えるのであれば GPA、そうでなければ SLF を用いるのが望ましいと結論できる。

### 6.6.3 トポロジーを一度に変更した場合の特性評価

6.5.2 で述べたように、ある時点において一度に完全なデルタスター構成へ移行する方法は、設備コストの増大を招くため非現実的であると考えられるが、参考までにシナリオ 1、または 2 の各ピリオドにおいてトポロジーの変更を一度に行った場合の特性を、図 6.28 ~ 図 6.31 に示す。図 6.28, 図 6.29 はシナリオ 1, 図 6.30, 図 6.31 はシナリオ 2 の場合の計算結果であり、図 6.28, 図 6.30 は必要伝送路容量変化を、図 6.29, 図 6.31 は必要交換機容量変化を表している。また、図の横軸はピリオド番号を、縦軸はスター構成を用いた場合に対する相対値を表している。6.6.1, 6.6.2 と同様に、デルタスター構成の値は、現在 (ピリオド 0) からデルタスター構成が存在していると仮定して伝送路、交換機の帯域増強を行った場合の計算結果であり、目標値として表示してある。各図の凡例は、それぞれのピリオドにおいて変更を施したかを表示してある。但し、シナリオ 1 の場合にはピリオド 6 まで、シナリオ 2 の場合にはピリオド 7 までに変更すれば、最終的にデルタスター構成目標値と完全に一致するので、グラフの表示は省略した。

まず、図 6.28, 図 6.29 から、シナリオ 1 の場合にはピリオド 7 までにトポロジーを変更すれば、最終的な必要伝送路容量、必要交換機容量はデルタスター構成目標値と同じ値に収束することがわかる。また、ピリオド 8 でトポロジー変更を行った場合には、変更直後の必要交換機容量増加もそれほど大きくなく、最終

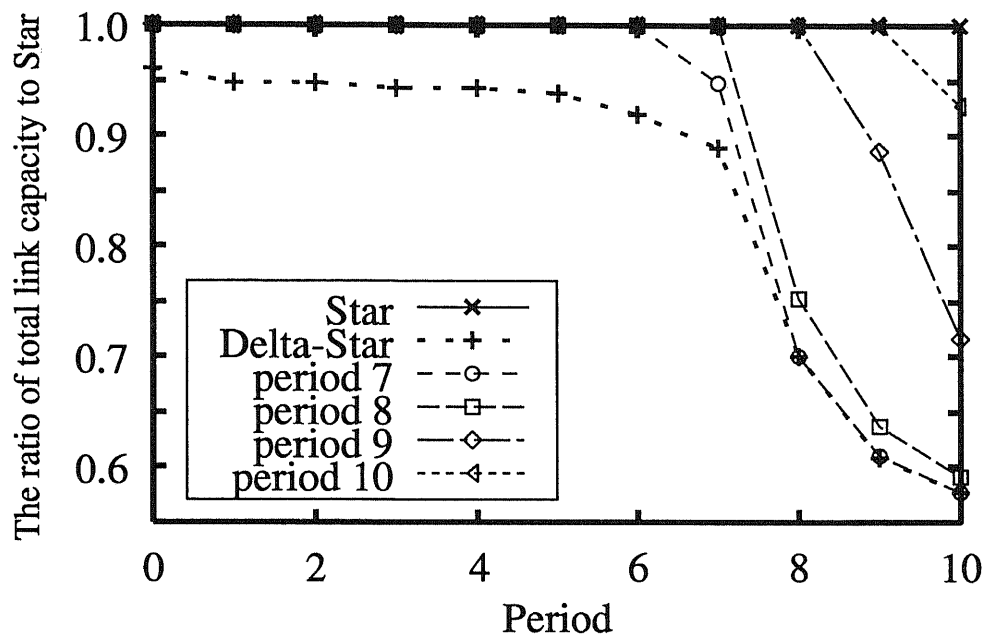


図 6.28 スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要伝送容量変化 (シナリオ 1)

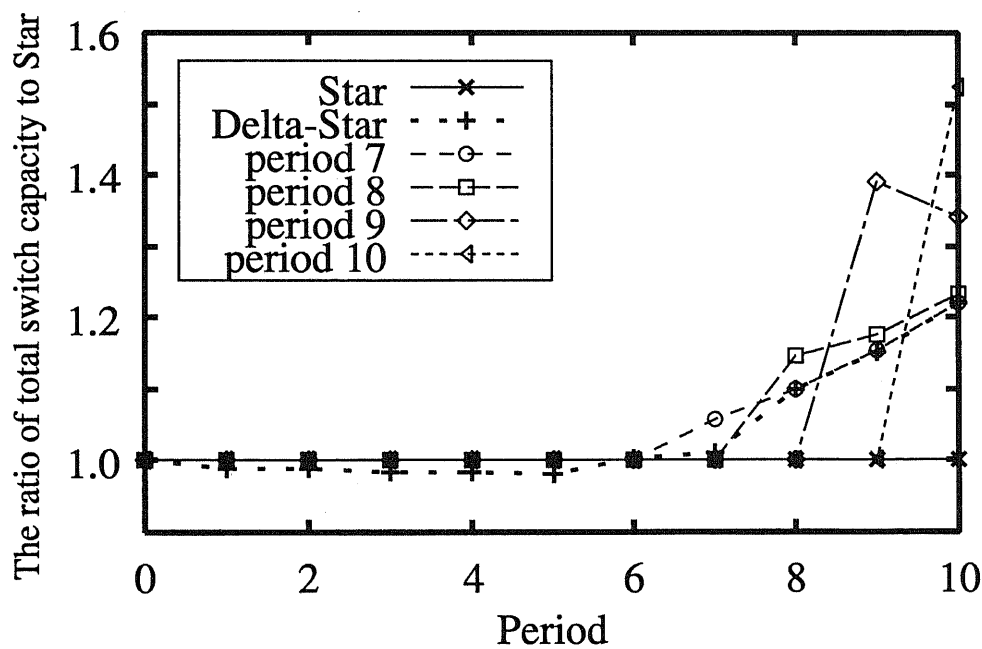


図 6.29 スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要交換機容量変化 (シナリオ 1)

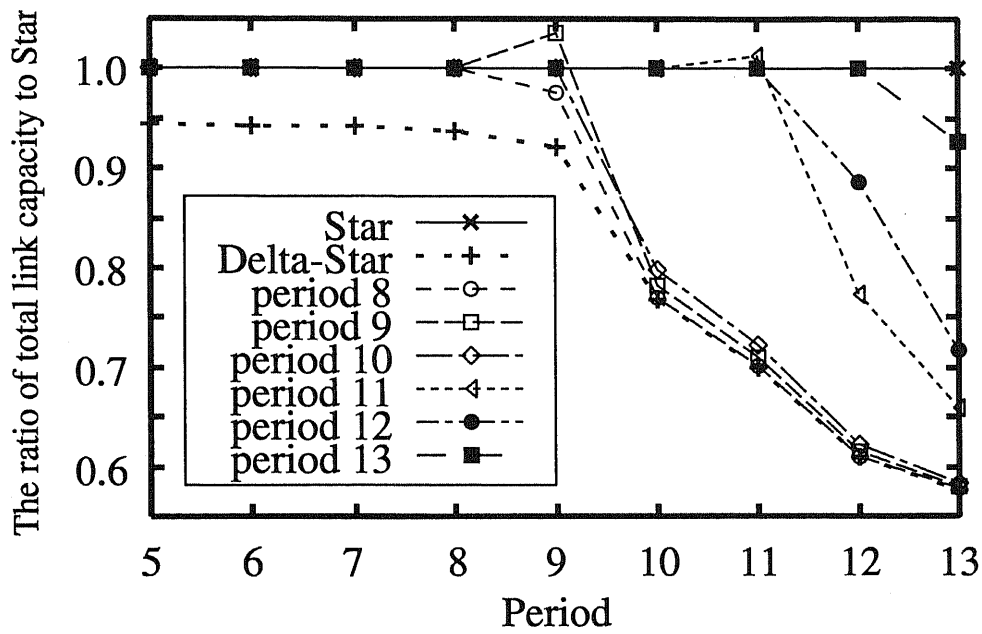


図 6.30 スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要伝送容量変化 (シナリオ 2)

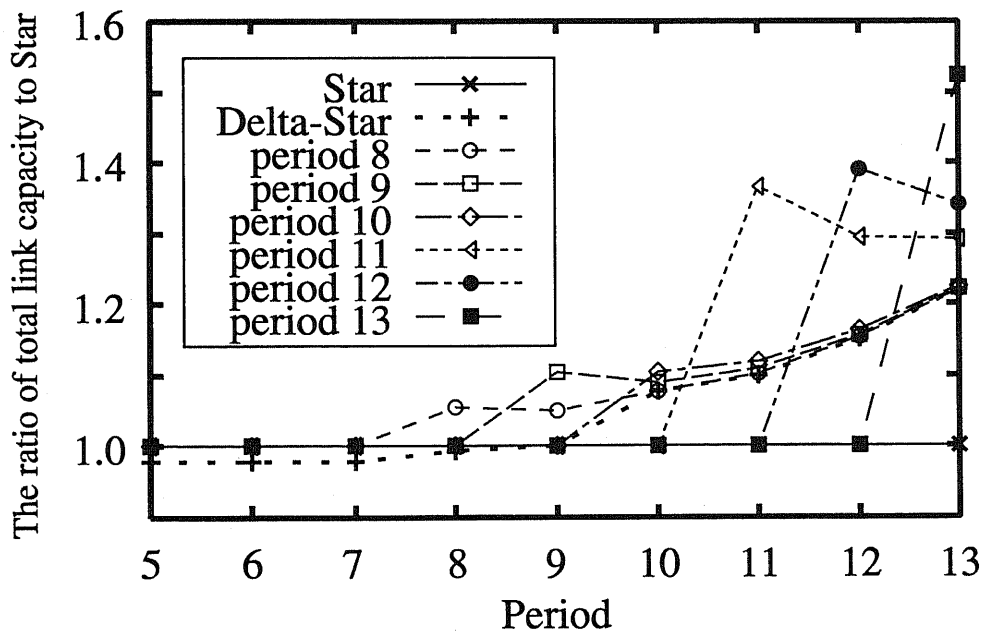


図 6.31 スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要交換機容量変化 (シナリオ 2)

的な必要容量もデルタスター構成目標値にかなり近い値になることがわかる。しかし、ピリオド 9 以降にデルタスター構成への移行を行った場合には、必要伝送路容量、必要交換機容量ともにデルタスター構成目標値よりも大きくなる。しかも移行直後の必要交換機容量は、スター構成と比較して 40 % 以上、デルタスター構成目標値と比較して 20 % 以上大きくなり、交換機資源に大量の無駄が生じることになる。表 6.4 に示したように、シナリオ 1 ではピリオド 8 以降でトラヒックの増加率が大きくなる。特に、ピリオド 7 から 8 へはマルチキャスト通信帯域が 5 倍になり、なおかつマルチキャスト通信サービス数が約 2 倍になる。ピリオド 9 以降でデルタスターへの移行を行う場合、すなわち、少なくともピリオド 8 まではスター構成を維持したまま伝送路、交換機の容量増強を行った場合には、スター構成に含まれる伝送路の容量、及び交換機容量が非常に大きくなっていると思われる。デルタスター構成への移行に伴い、これらの箇所の必要容量が大幅に減少するが、一度設置した施設の回収、再利用はできないため、必要容量の無駄が生じると考えられる。

次に、図 6.30、図 6.31 から、シナリオ 2 の場合にはピリオド 8 までに変更すれば、最終的な必要伝送路容量、必要交換機容量はデルタスター構成目標値と同じ値に収束することがわかる。また、ピリオド 9、10 でトポロジー変更を行った場合には、最終的にはデルタスター構成目標値にかなり近い値にまでたどり着くことが可能である。しかし、ピリオド 11 以降にデルタスター構成への移行を行った場合には、必要伝送路容量、必要交換機容量ともにデルタスター構成目標値よりも大きくなり、変更直後の必要交換機容量はスター構成と比較して 35 % 以上、デルタスター構成目標値と比較して 20 % 以上大きくなり、交換機資源の無駄が生じている。表 6.5 に示したように、シナリオ 2 の場合にはピリオド 10 以降でトラヒックの増加率が大きくなるが、特にピリオド 9 から 10 へはマルチキャスト通信帯域が 5 倍、マルチキャスト通信サービス数が約 2.5 倍になる。ピリオド 11 以降でデルタスターへの移行を行う場合、すなわち、少なくともピリオド 10 まではスター構成を維持したまま伝送路、交換機の容量増強を行った場合には、スター構成に含まれる伝送路の容量、及び交換機容量が非常に大きくなっている。デルタスター構成への移行により、これらの箇所の必要容量が大幅に減少しても、シナリオ 1 の場合と同様に一度設置した施設の回収、再利用はできないため、必要容量の無駄が生じると考えられる。

以上の結果を総合して考えると、もしスター構成からデルタスター構成への移



行を一度に行うとすれば、マルチキャスト通信が著しく増加するとき、またはそれ以前までに行わなければならないという結論に達する。この結論は、通信網トポロジーの移行を徐々に行った場合にも適用できる。すなわち、マルチキャスト通信が著しく増加するときまでには、トポロジーの移行をできるだけ完了しておかなければならないのである。実際、6.6.1のシナリオ1の場合には、ピリオド8でトポロジーの移行を完了するが、これはちょうどマルチキャスト通信トラヒックが著しく増加する時期と一致している。このため、どのような移行手法を用いても、最終的にデルタスター構成目標値に到達することができている。一方、6.6.2のシナリオ2の場合には、デルタスター構成への移行が完了するのはピリオド13で、マルチキャスト通信が著しく増加するピリオド10よりも後になってしまう。このため、どのような移行手法を用いても、最終的な必要容量はデルタスター構成目標値に達することができない。

実際の場面でも、シナリオ2のように通信網トポロジーの移行を開始するのが遅かったり、またはマルチキャスト通信トラヒックの増加速度が予想以上に速かったりすることが十分ありうる。そのような場合には、マルチキャスト通信トラヒックが著しく増加する時期に合わせてより多くの伝送路を増設し、できるだけデルタスター構成に近いトポロジーへ移行することが望まれる。

## 6.7 むすび

前章までの結果から、マルチキャスト通信には上位層にメッシュ構成、下位層にデルタスター構成を適用した通信網が適しているとの結論を得た。我が国の現状の通信網がメッシュスター構成であることを考慮すると、下位層はトポロジーの変更を行うほうが望ましいと考えられる。そこで本章では、通信トラヒックの増加が各トポロジー特性に与える影響をさらに詳しく検討し、現行のスター構成からどのようにしてデルタスター構成に移行すべきか、また伝送路増設手法により最終的にどの程度のコスト差が生じるかを検討した。

まず、通信トラヒックと各トポロジー特性の関係を検討したところ、マルチキャスト通信がまったく存在せず、1対1通信トラヒックのみが増加した場合には、各トポロジーのコスト特性にほとんど差異が見られないことがわかった。このことから、1対1通信のみの増加であれば、現状のスター構成を維持する形で伝送路容量、交換機容量の増設を行えば十分であるとの結論が得られた。また、マルチキャ

スト通信トラフィックが増加した場合には、デルタスター構成の優位性が高くなることがわかった。すなわち、マルチキャスト通信サービスの開始とともに、現状のスター構成からデルタスター構成への移行を行う必要があるとの結論を得た。

そこで、マルチキャスト通信トラフィックの増加とともに、通信網を増設してデルタスター構成へと移行するための手法を検討、特性評価を行い、それらの手法により最終的にどの程度のコスト差が生じるかを評価した。その結果、マルチキャスト通信サービスの開始が比較的早く、1対1通信とマルチキャスト通信のトラフィックがともに増加する場合には、どの増設手法を用いても最終的にはデルタスター構成の網構成コスト目標値にまで収束できることがわかった。一方、マルチキャスト通信サービスの開始が遅く、1対1通信トラフィックが増加した後にマルチキャスト通信トラフィックが増加する場合には、最終的な網構成コストに伝送路増設手法による違いが生じ、GPA、SLFの各手法が適していることがわかった。但し、各伝送路増設手法による最終的な特性にそれほど大きな違いは見られず、比較的簡単な増設手法でも十分対応できると考えられる。

しかし、実際の通信トラフィックは、本論文で用いたシナリオのとおり増加するとは限らず、マルチキャスト通信の普及が途中のピリオドで停止してしまう可能性も否めない。GPA、SLF法を用いれば、トラフィック増加途上のピリオドにおいても網構成コストをかなり小さくできることから、これらの手法は伝送路増設法として適していると結論できる。特に、GPA法では、伝送路増設を50%程度終えた時点でも十分な特性が得られた。但し、GPA法は伝送路増設箇所の検索に時間を要するばかりでなく、増加するトラフィックの的確な予測が必要となるのに対し、SLF法は伝送路距離、すなわち交換局配置と敷設ネットポロジーの2要素のみで伝送路増設順序を決定できる。こういった意味から、SLF法の適用度は非常に高いと考えられる。

さらに、スター構成からデルタスター構成へと一度に変更を行った場合の特性についても検討を行った。その結果、マルチキャスト通信トラフィックが著しく増加するとき、またはそれ以前までに、トポロジーの移行を行うべきであるとの結論を得た。この結論は、徐々にトポロジー移行を行う場合にも適用でき、マルチキャスト通信の著しい増加の前までには移行を完了しておいたほうが望ましいと考えられる。そこで、マルチキャスト通信網増設法としては、まずGPA法、またはSLF法を用いて緩やかなトポロジーの移行を開始し、マルチキャスト通信トラフィックの増加が予想を上回った際には、増設伝送路数を大きくして、デルタスター

構成にできるだけ近いトポロジーを得るのが良いと結論できる。



## 第 7 章

### 結論

## 7.1 本論文の主たる結果

高速広帯域通信網の実現を目前に控え、非常に多くの研究が行われている。このような通信網の利用が開始されると、従来の1対1通信サービスのほかに多種多様なサービスの展開が予想される。なかでも、同じ情報を多数の受信者に同時に伝送するマルチキャスト通信技術は、現在最も注目されており、将来の通信サービスの主流になると考えられている。そこで、本論文でもこのような流れに基づき、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在するマルチキャスト通信網において、最も適した通信網形態を明らかにすることを目的とし、研究を行った。

マルチキャスト通信の最も大きな特徴は、その接続形態にある。マルチキャスト通信サービスでは、同じ情報を多数の受信者に伝送するため、分岐接続という従来とは異なる接続形態になる。このため、従来と同じようなトポロジー形態を用いてマルチキャスト通信網を構築した場合、通信網の構築に必要な網構成コストや、サービスを伝送するために必要となる伝送コストに無駄が生じることになると考えられる。このような特性を考慮したうえで、第3章、及び4章では、マルチキャスト通信網の最適階層構成の検討を行った。具体的には、我が国をモデルとした交換局配置、加入者分布を用い、さまざまな通信トラヒックモデルに対する網構成コストを算出し、最も適した通信網形態を明らかにした。その結果、上位層にメッシュ構成を用いた階層数2の通信網形態が、非常に広範囲にわたって最適であることがわかった。また、2階層構成の下位層においては、1対1通信トラヒックに関しては現状と同じスター構成が、マルチキャスト通信トラヒックに関してはリング構成が適しており、これらを統合して構成されるリング・スター複合構成の優位性が明らかになった。

現在の我が国におけるデジタル網がメッシュ・スター構成によって構築されていることを考慮すると、階層構成上位層は現状と同じトポロジーを維持しながら、必要に応じて伝送路、及び交換機の容量を増強すれば十分である。すなわち、階層構成下位層について、より詳細に検討を行う必要があると考えられる。そこで、第5章では、第3章、第4章よりも詳細な交換局配置モデル、加入者分布モデルを用い、階層構成通信網の下位層にターゲットを絞って最適トポロジーの検討を行った。伝送路網トポロジーには、一般的なメッシュ、スター、リングの各構成のほかに、マルチリング、デルタスター構成を用いた。その結果、マルチキャスト通

信、1対1通信のトラヒック量によらず、伝送路敷設網がスター構成の場合には、伝送路にもスター構成を用いるのが最適であること、それ以外の伝送路敷設網トポロジーの場合には、伝送路にデルタスター構成を用いることでほとんどの場合において最適となることがわかった。また、マルチキャスト通信サービスの選択確率が一様分布になった場合や、どの伝送路トポロジーとも一致しない伝送路敷設網トポロジーを用いた場合、さらには、計算領域の大きさや交換局数が増加した場合の特性評価も行い、デルタスター構成の優位性を明らかにした。デルタスター構成は、従来の1対1通信網において、通信網の2重化を前提としたときに、伝送路利用効率を高める構成として提案されているトポロジーであるが、マルチキャスト通信網においても非常に有効なトポロジーであることが明らかになった。

以上の結果から、階層構成下位層においては、現状のスター構成からデルタスター構成へ、トポロジーの移行を行うほうが望ましいと考えられる。そこで第6章では、1対1通信サービス、マルチキャスト通信サービスがそれぞれ独立に増加した場合の各トポロジーの特性を明らかにしたうえで、通信網を増設してデルタスター構成へと移行するための手法を検討、特性評価を行った。まず、1対1通信サービスが独立に増加した場合には、各トポロジーの特性に大きな変化は見られなかった。すなわち、マルチキャスト通信サービスが存在せず、1対1通信サービスのみが増加するのであれば、現状のスター構成を維持したまま伝送路、及び交換機の容量増強を行えば十分であるとの結論に至った。一方、マルチキャスト通信サービスが増加した場合には、デルタスター構成の特性が良くなり、特に必要伝送路容量はスター構成の50%程度に抑えることが可能であることなどがわかった。これらの結果から、マルチキャスト通信サービスが開始されれば、デルタスター構成への移行を行うべきであるということが再確認された。

そこで、スター構成からデルタスター構成へ移行を行うための伝送路増設手法を四つ説明し、それらの手法の特性評価を行った。その結果、マルチキャスト通信の開始が比較的早く、1対1通信とマルチキャスト通信のトラヒックがともに増加する場合には、どの増設手法を用いても最終的にはデルタスター構成の構成コスト目標値にまで収束できること、マルチキャスト通信サービスの開始が遅く、1対1通信トラヒックが増加した後にマルチキャスト通信トラヒックが増加する場合には、最終的な網構成コストに伝送路増設手法による違いが生じ、Greedy+アルゴリズム(GPA)、またはShortest Path Fastアルゴリズム(SLF)が適していることがわかった。GPAでは、伝送路増設順序の検索に時間を要するばかりでなく、

増加するトラヒックの的確な予測が必要となるのに対し、SLF法は伝送路長のみで伝送路増設順序を決定できるので、SLF法の適用度は非常に高いとの結論を得た。さらに、トポロジーの移行を一度に行う場合の検討も行ったところ、マルチキャスト通信トラヒックが著しく増加するとき、またはそれ以前にトポロジーの移行を行うべきであるとの結論を得た。この結論は、徐々にトポロジー移行を行う場合にも適用でき、マルチキャスト通信の著しい増加の前までには移行を完了しておいたほうが望ましい。そこで、通信網増設手法としては、まずGPA法、またはSLF法を用いて緩やかなトポロジーの移行を開始し、マルチキャスト通信トラヒックの増加が予想を上回った際には、増設伝送路数を大きくして、デルタスター構成にできるだけ近いトポロジーを得るのが良いと結論できると思われる。

## 7.2 今後の展望

本論文では、来たるべきマルチキャスト通信網に向けて、マルチキャスト通信サービスと1対1通信サービスが混在する場合の最適な網形態の研究を行った。ここでは、通信網構成の研究が今後どのように進められるべきかを記す。

まず始めに、より詳細な通信トラヒックの需要予測が必要となるであろう。本論文はトラヒック予測を目的としたものではないため、通信トラヒックの増加シナリオとして、マルチキャスト通信が早期に開始されて1対1通信トラヒックと同時にマルチキャスト通信トラヒックが増加する場合と、1対1通信トラヒックが増加した後にマルチキャスト通信が開始される場合の2通りのモデルを用いて研究を進めた。しかし、将来の通信網構成に関する研究を行うためには、できるだけ正確な通信トラヒックの予測が必要とされる。

次に、非階層構成となる通信網の最適形態に関する研究が必要であろう。本論文では、非常に広範囲にわたる大規模通信網の最適構成の研究を行ったため、スター、リング、メッシュ、デルタスター構成などのようにあらかじめ幾何学的に特徴のあるトポロジーを用いて階層構成を行った場合の特性評価を行った。しかし、実際の通信網は、必ずしも大規模通信網であるとは限らない。比較的少ない交換局間を独自回線、または専用線を用いて接続するような通信網では、本論文のように階層的な構成を行わずに非階層構成となることが多い。このように、通信網が非階層構成となる場合には、本論文から得られた結論は必ずしも当てはまらないと考えられる。一般に、非階層構成通信網の最適化を行う場合には、とりうる



すべての解の中から完全な最適解を求めることが望まれる。しかし、交換局数が  $n$  の場合、考えうるトポロジーは、非連結となるトポロジーも含めると、 $2^{n(n-1)/2}$  通り存在する。これらの中から完全最適解を探索するための計算量は、交換局数の増加に伴って指数的に増加するため、実用的な計算時間で最適解を求めることは不可能である (NP 完全問題)。このため、発見的手法 (ヒューリスティックアルゴリズム) を用いた準最適解の探索が必要となるが、できるだけ少ない計算量で、できるだけ正確な準最適解を求める必要がある。この問題に関しては、早稲田大学理工学研究科電気工学専攻修士課程在学中である清水新太郎氏との共同研究を行っており、現在のところ既存のヒューリスティックアルゴリズムを用いた非階層構成通信網の最適化の検討を推し進めている。今後は、新しいヒューリスティックアルゴリズムの提案、そして階層構成通信網にも適用可能な幾何学的特徴をもつトポロジーの発見へと研究を拡張していく予定である。

21 世紀まであとわずか、高速広帯域通信網、及びマルチキャスト通信の実現は目前である。今後の通信技術の発展のために、さらなる研究が必要であると考えられる。微力ではあるが、今後も一研究者として尽力する所存である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、非常に多くの方々から御指導を頂きました。博士課程進学の前月に私の転属を快くお引受け頂き、非常に的確な御指導を賜りました東京大学生産技術研究所長の坂内正夫教授に心より御礼申し上げます。坂内教授の御意見は、研究のみならず心理的にも大きな励みになりました。

本研究の骨格は、私の修士課程在学時の研究が基になっております。学部4年の卒業研究から6年間、研究の構想段階からはじまり、その方向性に至るまで、懇切丁寧な御指導を賜りました早稲田大学国際情報通信研究センターの田中良明教授に厚く御礼申し上げます。また、平成9年4月には、田中教授御夫妻の御媒酌により結婚することができました。この場を借りて御礼申し上げます。

また、東京大学生産技術研究所概念情報工学研究センターの瀬崎薫助教授には、研究を進めるうえで大変貴重な御意見を頂戴致しましたと同時に、私の研究活動の拠点としての環境を与えて下さいました。心より御礼申し上げます。

さらに、日本電信電話マルチメディアネットワーク研究所兼通信・放送機構沖繩リサーチセンター研究フェローの朝香卓也氏には、マルチキャスト通信技術に関する基礎を御教授頂きました。研究経験豊富な朝香氏の御指導は、本研究のみならず、今後の私の研究の糧となるものであります。心より感謝し、御礼申し上げます。

常日頃から研究環境の整備のみならず、日常生活においても大変お世話になりました東京大学生産技術研究所瀬崎研究室の小松邦紀助手、同坂内研究室の佐藤秀技官に心より感謝致します。また、研究室のコンピュータ環境の整備をはじめ、研究室の雰囲気を楽しいものにして下さったNTT移動通信網株式会社の石川信能氏、曾瀬徹氏、川合裕之氏、国際電信電話の石原清輝氏、株式会社日立製作所の村上恭朗氏、株式会社エム・アール・システム研究所の小竹大輔氏、東京大学大学院工学系研究科電子情報工学専攻坂内研究室博士課程2年の谷田部智之氏、瀬崎研究室修士課程2年の遠藤秀和氏、桑子純一氏、同1年の服部良平太氏、同研究生の徐蘇鋼氏、黄楽平氏、早稲田大学理工学研究科電子・情報通信学専攻富永研究室修士課程2年の小島久史氏、高木真一氏、電気工学専攻田中研究室修士課程1年の清水新太郎氏、高橋英士氏、電子・情報通信学科安田研究室4年の福田

一郎氏，そして，励ましあつて頑張つてきた東京大学大学院工学系研究科電気系  
3専攻の博士課程3年の同期の皆様に心より感謝し，御礼申し上げます。

平成10年12月18日

三好 匠

## 参考文献

- (1) 三木哲也, “光波ネットワークの展望,” 信学論 (B-I), vol.J77-B-I, no.5, pp.251-258, May 1994.
- (2) 長田武士, 瀬崎 薫, 安田靖彦, “波長分割多重光スイッチングネットワークの構成法,” 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.3, pp.130-137, March 1997.
- (3) 三菱レイヨン (株), December 1998.  
<http://www.mrc.co.jp/dep/pofeska/comm/comm.htm>
- (4) Intel Corporation, December 1998.  
<http://www.intel.co.jp/jp/home/cpc/museum/hof/moore.htm>
- (5) Intel Corporation, December 1998.  
<http://www.intel.com/pressroom/kits/processors/quickref.htm>
- (6) 通信白書, “平成 10 年 通信に関する現状報告,” 郵政省, May 1998.
- (7) 電気通信審議会答申, “高度情報通信社会構築に向けた情報通信高度化目標及び推進方策—西暦 2000 年までの情報通信高度化中期計画—,” 郵政省, June 1996.
- (8) 電気通信審議会答申, “通信・放送融合時代におけるネットワークに関する技術的諸問題,” 郵政省, April 1996.
- (9) 山下幹夫, 秋山 稔, “通信網の階層構成,” 信学論 (B), vol.J64-B, no.4, pp.305-311, April 1981.
- (10) 秋山 稔, 田中良明, 鈴木教洋, “光ファイバ通信を用いた広域電話網の構成,” 信学論 (B), vol.J68-B, no.4, pp.460-467, April 1985.
- (11) 田中良明, 秋山 稔, ベングト ヴァルストレム, “高信頼非階層通信網のコスト最小化設計,” 信学論 (B-I), vol.J71-B, no.4, pp.483-489, April 1988.

- (12) 池内哲之, “回線交換網における新しい最適化アルゴリズム —NABALE—,” 信学論 (B-I), vol.J72-B-I, no.1, pp.14-25, January 1989.
- (13) A. Kershenbaum, P. Kermani, and G. A. Grover, “MENTOR: An Algorithm for Mesh Network Topological Optimization and Routing,” *IEEE Trans. Commun.*, vol.39, no.4, pp.503-513, April 1991.
- (14) 島本憲夫, “Genetic Algorithm を用いた網設計の検討,” 信学技報, IN91-135, January 1992.
- (15) J.-P. Nussbaumer, B. V. Patel, F. Schaffa, and J. P. G. Sterbenz, “Networking Requirements for Interactive Video on Demand,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.13, no.5, pp.779-787, June 1995.
- (16) Y. Tanaka and O. Berlage, “Application of Genetic Algorithms to VOD Network Topology Optimization,” *IEICE Trans. Commun.*, vol.E79-B, no.8, pp.1046-1053, August 1996.
- (17) M. Gerla, J. A. S. Monteiro, and R. Pazos, “Topology Design and Bandwidth Allocation in ATM Nets,” *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.7, no.8, pp.1253-1262, October 1989.
- (18) J. A. S. Monteiro and M. Gerla, “Topological Reconfiguration of ATM Networks,” in *Proc. IEEE INFOCOM'90*, pp.207-214, June 1990.
- (19) I. Chlamtac, A. Farago, and T. Zhang, “Optimizing the System of Virtual Paths,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.2, no.6, pp.581-587, December 1994.
- (20) D. Medhi, “Multi-Hour, Multi-Traffic Class Network Design for Virtual Path-Based Dynamically Reconfigurable Wide-Area ATM Networks,” *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol.3, no.6, pp.809-818, December 1995.
- (21) D. Medhi, “Models for Network Design, Servicing and Monitoring of ATM Networks Based on the Virtual Path Concept,” *Computer Networks and ISDN Systems*, vol.29, no.3, pp.373-386, March 1997.

- (22) E. Oki and N. Yamanaka, "An Optimum Logical ATM Network Design Method Guaranteeing Multimedia QoS Requirements," in *Proc. IEEE GLOBECOM'95*, pp.263-269, November 1995.
- (23) 山中直明, 大木英司, "フレキシブルマルチ QoS ATM ネットワーク (Full-Net)," *信学論 (B-I)*, vol.J79-B-I, no.6, pp.404-414, June 1996.
- (24) Netscape Communications Corporation, December 1998.  
<http://www.netscape.com/netscape/index.html>
- (25) Microsoft Corporation, December 1998.  
<http://www.microsoft.com/windows/ie/default.htm>
- (26) Macromedia Inc., December 1998.  
<http://www.macromedia.com/shockwave/>
- (27) Sun Microsystems Inc., December 1998.  
<http://java.sun.com/>
- (28) RealNetworks, December 1998.  
<http://www.real.com/>
- (29) Xing Technology Corporation, December 1998.  
<http://www.xingtech.com/products/swplayer/>
- (30) VDOnet Corporation, December 1998.  
<http://www.vdo.net/>
- (31) 宮地悟史, 松本修一, "インターネットビデオの動向," *信学技報*, IE98-69, October 1998.
- (32) 高田久靖, 笠原久嗣, "インターネットにおけるビデオストリーミング技術," *信学技報*, IE98-70, October 1998.
- (33) ITU-T Recommendation H.263, "Video Coding for Low Bit Rate Communication," March 1996.

- (34) ISO/IEC 11172-1/2/3, "Information Technology — Coding of Moving Pictures and Associated Audio for Digital Storage Media at up to about 1.5Mbit/s," International Standard, 1993.
- (35) 青木利晴, 中山俊彦, 木下研作, 相原憲一, 戸田 彰, "高速広帯域通信とネットワークング," 培風館, May 1994.
- (36) 田中良明, "通信放送統合網の基礎," オーム社, August 1995.
- (37) International Telecommunication Union (ITU), December 1998.  
<http://www.itu.int/>
- (38) The ATM Forum, December 1998.  
<http://www.atmforum.com/>
- (39) A. Thomas, J. P. Coudreuse, and M. Servel, "Asynchronous Time-division Techniques: An Experimental Packet Network Integrating Videocommunication," in *Proc. ISS '84*, Session 32 C, Paper 2, May 1984.
- (40) 富永英義, 石川 宏, "標準 ATM 教科書," アスキー, March 1995.
- (41) 佐藤健一, 太田 聡, 鶴沢郁男, "バーチャルパスの概念を用いた高速バースト多重伝送システムの検討," 信学技報, IN88-34, July 1987.
- (42) S. Ohata, K. Sato, and I. Tokizawa, "A Dynamically Controllable ATM Transport Network Based on the Virtual Path Concept," in *Proc. IEEE GLOBECOM '88*, pp.1272-1276, November 1988.
- (43) 佐藤健一, 太田 聡, 鶴沢郁男, "バーチャルパスの概念を用いた広帯域統合伝達網の構成," 信学論 (B-I), vol.J72-B-I, no.11, pp.904-916, November 1989.
- (44) K. Sato, S. Ohta, and I. Tokizawa, "Broad-Band ATM Network Architecture Based on Virtual Path," *IEEE Trans. Commun.*, vol.38, no.8, pp.1212-1222, August 1990.
- (45) 加納貞彦, 栗林伸一, "やさしい ATM ネットワーク信号方式—マルチメディア通信のための新しい信号方式—," 電気通信協会, May 1996.

- (46) The ATM Forum, "ATM UNI Signalling Specification Version 4.0," af-sig-0061.000, July 1996.
- (47) ITU-T SG11, Q.2971, 1995.
- (48) ITU-T SG11, Q.2963.1, 1996.
- (49) 栗本 崇, 源田浩一, 山中直明, 松村常夫, "コピートランク型マルチキャスト ATM スイッチ," 信学技報, SSE95-97, October 1995.
- (50) J. S. Turner, "Design of a Broadcast Packet Switching Network," in *Proc. IEEE INFOCOM'86*, pp.667-675, November 1986.
- (51) T. T. Lee, "Nonblocking Copy Networks for Multicast Packet Switching," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.6, no. 9, pp.1455-1467, December 1988.
- (52) Y. S. Yeh, M. G. Hluchyj, and A. S. Acampora, "The Knockout Switch: a Simple, Modular Architecture for High-Performance Packet Switching," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.5, no. 8, pp.1274-1283, December 1988.
- (53) 田中良明, 曾瀬 徹, "一対一・放送分離形 ATM スイッチ回路網," 信学技報, SSE96-24, May 1996.
- (54) 遠藤俊樹, 厩橋正樹, 塩川茂樹, 笹瀬 巖, "同報セル/非同報セル分離入力型 ATM マルチキャスト交換機," 信学論 (B-I), vol.J80-B-I, no.10, pp.701-708, October 1997.
- (55) 曾瀬 徹, "マルチキャスト ATM スイッチ回路網の研究," 東京大学工学系研究科電子工学専攻修士論文, February 1997.
- (56) 田中良明, 土谷浩史, "集線網を用いた非対称放送形 ATM スイッチ回路網," 信学論 (B-I), vol.J76-B-I, no.8, pp.601-609, August 1993.
- (57) 田中良明, 清水 修, 三宅 篤, "出力バッファ形非対称放送形 ATM スイッチ回路網," 信学論 (B-I), vol.J79-B-I, no.9, pp.624-632, September 1996.
- (58) 三好 匠, "放送形通信網の階層構成," 東京大学工学系研究科電子工学専攻修士論文, February 1996.



- (59) S. Takagi, Y. Tanaka, and H. Tominaga, "Batcher Banyan Network with Cell Copy Preparation Stages for Multicast Switching," in *Proc. '98 IEEE Int'l Conf. on ATM (ICATM'98)*, pp.155-161, June 1998.
- (60) 高木真一, 田中良明, 富永英義, "コピー準備網付きバッチャ・バンヤンスイッチ回路網におけるコピーセル分割方法の検討," 信学技報, SSE98-60, August 1998.
- (61) P. Winter, "Steiner Problem in Networks: A Survey," *Networks*, vol.17, pp.129-167, 1987.
- (62) V. J. Rayward-Smith and A. Clare, "On Finding Steiner Vertices," *Networks*, vol.16, pp.283-294, 1986.
- (63) M. Karpinski and A. Zelikovsky, "New Approximation Algorithms for the Steiner Tree Problems," *J. Combinational Optimization* 1, pp.47-66, 1997.
- (64) B. M. Waxman, "Routing of Multipoint Connections," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.6, no.9, pp.1617-1622, December 1988.
- (65) B. M. Waxman, "Performance Evaluation of Multipoint Routing Algorithms," in *Proc. IEEE INFOCOM'93*, pp.980-986, March 1993.
- (66) E. Aharoni and R. Cohen, "Restricted Dynamic Steiner Trees for Scalable Multicast in Datagram Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM'97*, pp.876-883, April 1997.
- (67) H.-C. Lin and S.-C. Lai, "VTDM — A Dynamic Multicast Routing Algorithm," in *Proc. IEEE INFOCOM'98*, pp.1426-1432, March 1998.
- (68) Y. Tanaka and P. C. Huang, "Multiple Destination Routing Algorithms," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E76-B, no.5, pp.544-552, May 1993.
- (69) P. C. Huang and Y. Tanaka, "Multicast Routing Based on Predicted Traffic Statistics," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E77-B, no.10, pp.1188-1193, October 1994.

- (70) K. Sebayashi and H. Uose, "ATM Multicast Communications Method with Receiver-initiated QoS Guarantee," *3rd Int'l Symposium on Interworking (INTERWORKING'96)*, October 1996.
- (71) N. Shacham, "Multicast Communication by Hierarchically Encoded Data," in *Proc. INFOCOM'92*, pp.2107-2114, May 1992.
- (72) N. Shacham, "Multicast Routing of Hierarchical Data," in *Proc. '92 IEEE Int'l Conf. on Commun. (ICC'92)*, pp.1217-1221, June 1992.
- (73) M. Faloutsos, R. Pankaj, and K. C. Sevcik, "Multicast Routing with Heterogeneous Quality," in *Proc. 4th IEEE Workshop on the Architecture and Implementation of High Performance Commun. Sys. (HPCS'97)*, June 1997.
- (74) 荻野長生, "ダイナミックマルチストリームマルチキャストルーティング," 信学技報, IN97-81, September 1997.
- (75) 竹下隆史, 村山公保, 荒井 透, 荻田幸雄, "マスタリング TCP/IP 入門編 第2版," オーム社, May 1998.
- (76) J. Postel, "Internet Protocol," RFC 791, IETF, September 1981.
- (77) J. Postel, "Transmission Control Protocol," RFC 793, IETF, September 1981.
- (78) T. Berners-Lee and D. Connolly, "Hypertext Markup Language - 2.0," RFC 1866, IETF, November 1995.
- (79) R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, and T. Berners-Lee, "Hypertext Transfer Protocol — HTTP/1.1," RFC 2068, IETF, January 1997.
- (80) W. Simpson, "The Point-to-Point Protocol (PPP)," RFC 1661, IETF, July 1994.
- (81) Network Wizards, December 1998.  
<http://www.nw.com/>
- (82) Internet Engineering Task Force (IETF), December 1998.  
<http://www.ietf.org/>

- (83) Palo Alto Research Center (PARC), Xerox Corporation, December 1998.  
<http://www.parc.xerox.com/history.html>
- (84) J. Manchester, J. Anderson, B. Doshi, and S. Dravida, "IP over SONET,"  
*IEEE Commun. Mag.*, vol.36, no.5, pp.136-142, May 1998.
- (85) IP over Glass プロジェクト, December 1998.  
[http://www.jain.ad.jp/itrc\\_ip.html](http://www.jain.ad.jp/itrc_ip.html)
- (86) E. C. Rosen, A. Viswanathan, and R. Callon, "Multiprotocol Label Switching  
Architecture," Internet Draft, IETF, July 1998.  
<ftp://ftp.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-mpls-arch-02.txt>
- (87) CANARIE Inc., December 1998.  
<http://www.canarie.ca/eng/networks/optical/opticmain.html>
- (88) Optical Internetworking Forum (OIF), December 1998.  
<http://www.oiforum.com/>
- (89) Internet Initiative Japan Inc., December 1998.  
<http://help.iiij4u.or.jp/Multicast/>
- (90) W. Simpson, "IP in IP Tunneling," RFC 1853, IETF, October 1995.
- (91) S. Deering, "Host Extensions for IP Multicasting," RFC 1112, IETF, August  
1989.
- (92) W. Fenner, "Internet Group Management Protocol, Version 2," RFC 2236,  
IETF, November 1997.
- (93) 勝村幸博, "活用期に入るマルチキャスト," 日経インターネットテクノロ  
ジー, 日経 BP 社, pp.76-97, January 1998.
- (94) B. Cain, S. Deering, A. Thyagarajan, "Internet Group Management Protocol,  
Version 3," Internet Draft, IETF, November 1997.  
<ftp://ftp.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-idmr-igmp-v3-00.txt>
- (95) D. Waitzman, C. Partridge, and S. Deering, "Distance Vector Multicast Rout-  
ing Protocol," RFC 1075, IETF, November 1988.

- (96) J. Moy, "Multicast Extensions to OSPF," RFC 1584, IETF, March 1994.
- (97) S. Deering, D. Estrin, D. Farinacci, V. Jacobson, A. Helmy, D. Meyer, and L. Wei, "Protocol Independent Multicast Version 2 Dense Mode Specification," Internet Draft, IETF, November 1998.  
<ftp://ftp.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-v2-dm-01.txt>
- (98) A. Ballardie, "Core Based Trees (CBT) Version 2 Multicast Routing — Protocol Specification—," RFC 2189, IETF, September 1997.
- (99) D. Estrin, D. Farinacci, A. Helmy, D. Thaler, S. Deering, M. Handley, V. Jacobson, C. Liu, P. Sharma, and L. Wei, "Protocol Independent Multicast — Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification," RFC 2362, IETF, June 1998.
- (100) T. Billhartz, J. B. Cain, E. Farrey-Goudreau, D. Fieg, and S. G. Batsell, "Performance and Resource Cost Comparisons for the CBT and PIM Multicast Routing Protocols," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol.15, no.3, pp.304–315, April 1997.
- (101) C. Shields and J. J. Garcia-Luna-Aceves, "The Ordered Core Based Tree Protocol," in *Proc. INFOCOM'97*, pp.884-891, April 1997.
- (102) C. Ersoy and S. S. Panwar, "Topological Design of Interconnected LAN-MAN Networks," in *Proc. IEEE INFOCOM'92*, pp.2260–2269, May 1992.
- (103) B. Mukherjee, S. Ramamurthy, D. Banerjee, and A. Mukherjee, "Some Principles for Designing a Wide-Area Optical Network," in *Proc. IEEE INFOCOM '94*, pp.110–119, June 1994.
- (104) M. Hopkins, G. Louth, H. Bailey, R. Yellon, A. Ajibulu, and M. Niva, "A Multi-Faceted Approach to Forecasting Broadband Demand and Traffic," *IEEE Commun. Mag.*, vol.33, no.2, pp.36–42, February 1995.
- (105) K. Stordahl and E. Murphy, "Forecasting Long-Term Demand for Services in the Residential Market," *IEEE Commun. Mag.*, vol.33, no.2, pp.50–57, February 1995.

- (106) O. J. Wasem, A. M. Gross, and G. A. Tlapa, "Forecasting Broadband Demand Between Geographic Areas," *IEEE Commun. Mag.*, vol.33, no.2, pp.50-57, February 1995.
- (107) 田中良明, 曾瀬 徹, "放送形トラヒックのシミュレーション解析," 信学技報, IN95-21, July 1995.
- (108) 杉本 悟, 前川英二, "市内転送系におけるネットポロジの検討," 信学論 (B-I), vol.J75-B-I, no.11, pp.704-713, November 1992.
- (109) 三鬼準基, 林 一博, "光加入者市内転送系構成法の一検討," 信学技報, CS89-58, July 1989.
- (110) 中井弘亮, 田中良明, "放送形通信網におけるリングトポロジの最適化," '96 信学総大, B-831, March 1995.
- (111) 木村順吾, 山崎 健, 今川拓郎, "日本の通信トラヒックの特性分析," 郵政研究所調査月報, pp.10-31, April 1992.
- (112) Y. Tanaka and O. Berlage, "Storage Allocation policies in Distribution Networks for a Video-on-demand Service," in *Proc. 7th Korea-Japan Joint Conf. on Commun., Networks, and Switching Sys.*, pp.181-186, July 1994.
- (113) Y. Tanaka and O. Berlage, "A Fast Dynamic Algorithm for Storage Allocation in Telecommunication Networks," *IEICE Trans. Commun.*, vol.E78-B, no.7, pp.1025-1032, July 1995.

# 発表文献

## 1. 学会論文

- (1.1) 三好 匠, 田中良明, “放送形通信網の最適階層構成,” 信学論 (B-I), vol.J81-B-I, no.2, pp.41-48, February 1998.
- (1.2) 小島久史, 三好 匠, 田中良明, 富永英義, “ATM 網におけるマルチキャストルーチング,” 信学論 (B-I), vol.J81-B-I, no.6, pp.362-370, June 1998.
- (1.3) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “デルタスター構成のマルチキャスト通信網への適用,” 信学論 (B-I), vol.J81-B-I, no. 12, pp.827-838, December 1998.

## 2. 国際会議

- (2.1) T. Miyoshi, Y. Tanaka, and K. Sezaki, “Optimal Topology Design of the Integrated Telecommunication and Broadcast Network,” in *Proc. '97 Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommun. Tech. (APSITT '97)*, pp.13.3.1-13.3.5, March 1997.
- (2.2) T. Miyoshi, Y. Tanaka, and K. Sezaki, “Optimal Hierarchical Structure of Nationwide Multicast Network,” in *Proc. 3rd Asia-Pacific Conf. on Commun. (APCC '97)*, pp.105-109, December 1997.

## 3. 研究会

- (3.1) 田中良明, 三好 匠, “視聴者数適応形放送ルーチング,” 信学技報, SSE94-50, May 1994.
- (3.2) 田中良明, 三好 匠, “B-ISDN における網トポロジーの検討,” 信学技報, IN95-22, July 1995.
- (3.3) 田中良明, 三好 匠, “放送形通信網の階層構成,” 信学技報, IN95-96, January 1996.

- (3.4) 三好 匠, 田中良明, “放送形通信網の最適階層構成,” 信学技報, SSE96-59, September 1996.
- (3.5) 石原清輝, 三好 匠, 瀬崎 薫, “分散データベース網システムにおける動的データ配置法に関する一考察,” 信学技報, CQ97-7, May 1997.
- (3.6) 小島久史, 三好 匠, 田中良明, 富永英義, “階層構成 ATM 網におけるマルチキャストルーチング,” 信学技報, SSE97-33, June 1997.
- (3.7) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “小エリアにおけるマルチキャスト通信網構成,” 信学技報, SSE98-3, April 1998.
- (3.8) 清水新太郎, 三好 匠, 田中良明, “ヒューリスティックアルゴリズムによるマルチキャスト通信網設計,” 信学技報, SSE98-153, December 1998.
- (3.9) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “マルチキャスト通信網増設法の検討,” 信学技報, IN98-147, January 1999.

#### 4. 全国大会

- (4.1) 田中良明, 三好 匠, “視聴者数適応形放送ルーチング,” '94 信学ソ大, B-690, September 1994.
- (4.2) 田中良明, 三好 匠, “B-ISDN 用ネットポロジの検討,” '95 信学総大, B-804, March 1995.
- (4.3) 田中良明, 三好 匠, “放送形通信ネットポロジの検討,” '95 信学ソ大, B-465, September 1995.
- (4.4) 田中良明, 三好 匠, “放送形通信網の階層構成,” '96 信学総大, B-830, March 1996.
- (4.5) 三好 匠, 田中良明, “放送形通信網の最適階層構成,” '96 信学ソ大, B-789, September 1996.
- (4.6) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “新しい網形態を用いた放送形通信網の階層構成,” '97 信学総大, B-7-63, March 1997.

- (4.7) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “放送形通信網構成法に関する一検討,” ’97 信学ソ大, B-7-10, September 1997.
- (4.8) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “小エリアにおけるマルチキャスト通信網構成,” ’98 信学総大, B-7-131, March 1998.
- (4.9) 三好 匠, 清水新太郎, 田中良明, 瀬崎 薫, “マルチキャスト通信網トポロジー構成法の検討,” ’98 信学ソ大, B-7-104, September 1998.
- (4.10) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “異種 QoS を考慮した動的マルチキャストルーチングの検討,” ’98 信学ソ大, B-7-102, September 1998.
- (4.11) 三好 匠, 田中良明, 瀬崎 薫, “マルチキャスト通信網増設法の検討,” ’99 信学総大, 投稿中, March 1999.
- (4.12) 清水新太郎, 三好 匠, 田中良明, “ヒューリスティックアルゴリズムによるマルチキャスト通信網構成の検討,” ’99 信学総大, 投稿中, March 1999.
- (4.13) 朝香卓也, 三好 匠, 田中良明, “衛星・地上統合ネットワークのための動的マルチキャストルーチング,” ’99 信学総大, 投稿中, March 1999.
- (4.14) 遠藤秀和, 三好 匠, 瀬崎 薫, “分岐数抑制マルチキャストルーチング手法の一検討,” ’99 信学総大, 投稿中, March 1999.
- (4.15) 服部良平太, 三好 匠, 瀬崎 薫, “分散環境における階層化伝送に関する検討,” ’99 信学総大, 投稿中, March 1999.

## 5. その他

- (5.1) T. Miyoshi and Y. Tanaka, “Optimal Hierarchical Structure of Broadcast Network,” *Electronics and Commun. in Japan*, Part 1, vol.82, no.2, pp.48-56, Translated from above (1.1), February 1999.
- (5.2) H. Kojima, T. Miyoshi, Y. Tanaka, and H. Tominaga, “Multicast Routing in ATM Network,” to appear in *Electronics and Commun. in Japan*, Part 1, vol.83, no.6, Translated from above (1.2), June 1999.





# 目次

2.1	1対1通信接続とマルチキャスト接続の違い	14
2.2	SDHによるデジタルハイアラーキの世界統一(単位はbps)	17
2.3	回線交換, パケット交換, ATM	18
2.4	VCによる交換	19
2.5	VPによる交換	20
2.6	非対称マルチキャスト加入者交換機回路網構成	22
2.7	コピー準備網付き中継交換機回路網構成	22
2.8	動的マルチキャストルーチング	25
2.9	インターネットに接続されたホストコンピュータ数の推移	27
2.10	IGMPのメカニズム	33
2.11	DVMRPの動作例	34
2.12	CBTの動作例	35
3.1	階層構成イメージ図	42
3.2	人口の地域的分布	43
3.3	伝送路網トポロジー	46
3.4	交換局での分岐接続と交換局呼量	47
3.5	伝送路 $l$ を利用する交換局の集合 $N_m(n_s, l)$	48
3.6	階層構成に基づく計算例	51
3.7	最適領域マップの表示規則	53
3.8	最適領域マップ(トラヒックモデル1, 人口一様分布)	58
3.9	最適領域マップ(トラヒックモデル1, 人口1極集中)	58
3.10	最適領域マップ(トラヒックモデル1, 人口2極集中)	59
3.11	最適領域マップ(トラヒックモデル2, 人口一様分布)	59
3.12	最適領域マップ(トラヒックモデル2, 人口1極集中)	60
3.13	最適領域マップ(トラヒックモデル2, 人口2極集中)	60
3.14	最適領域マップ(トラヒックモデル3, 人口一様分布)	61
3.15	最適領域マップ(トラヒックモデル3, 人口1極集中)	61
3.16	最適領域マップ(トラヒックモデル3, 人口2極集中)	62

3.17	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口一様分布）	62
3.18	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口1極集中）	63
3.19	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口2極集中）	63
4.1	リング・スター複合構成	70
4.2	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口一様分布，伝送路優先敷設）	73
4.3	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口1極集中，伝送路優先敷設）	73
4.4	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口2極集中，伝送路優先敷設）	74
4.5	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口一様分布，伝送路優先敷設）	74
4.6	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口1極集中，伝送路優先敷設）	75
4.7	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口2極集中，伝送路優先敷設）	75
4.8	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口一様分布，伝送路優先敷設）	76
4.9	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口1極集中，伝送路優先敷設）	76
4.10	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口2極集中，伝送路優先敷設）	77
4.11	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口一様分布，伝送路優先敷設）	77
4.12	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口1極集中，伝送路優先敷設）	78
4.13	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口2極集中，伝送路優先敷設）	78
4.14	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口一様分布，スター構成敷設）	80

4.15	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口1極集中，スター構成敷設）	80
4.16	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口2極集中，スター構成敷設）	81
4.17	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口一様分布，スター構成敷設）	81
4.18	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口1極集中，スター構成敷設）	82
4.19	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口2極集中，スター構成敷設）	82
4.20	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口一様分布，スター構成敷設）	83
4.21	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口1極集中，スター構成敷設）	83
4.22	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口2極集中，スター構成敷設）	84
4.23	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口一様分布，スター構成敷設）	84
4.24	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口1極集中，スター構成敷設）	85
4.25	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口2極集中，スター構成敷設）	85
4.26	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口一様分布，リング構成敷設）	89
4.27	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口1極集中，リング構成敷設）	89
4.28	最適領域マップ（トラヒックモデル1，人口2極集中，リング構成敷設）	90
4.29	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口一様分布，リング構成敷設）	90
4.30	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口1極集中，リング構成敷設）	91

4.31	最適領域マップ（トラヒックモデル2，人口2極集中，リング構成敷設）	91
4.32	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口一様分布，リング構成敷設）	92
4.33	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口1極集中，リング構成敷設）	92
4.34	最適領域マップ（トラヒックモデル3，人口2極集中，リング構成敷設）	93
4.35	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口一様分布，リング構成敷設）	93
4.36	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口1極集中，リング構成敷設）	94
4.37	最適領域マップ（トラヒックモデル4，人口2極集中，リング構成敷設）	94
5.1	人口分布	101
5.2	交換局配置モデル	102
5.3	スター構成とデルタスター構成	104
5.4	各トポロジー構成	106
5.5	スター構成敷設の結果（トラヒックモデル1）	113
5.6	リング構成敷設の結果（トラヒックモデル1）	113
5.7	マルチリング構成敷設の結果（トラヒックモデル1）	114
5.8	デルタスター構成敷設の結果（トラヒックモデル1）	114
5.9	スター構成敷設の結果（トラヒックモデル2）	116
5.10	リング構成敷設の結果（トラヒックモデル2）	116
5.11	マルチリング構成敷設の結果（トラヒックモデル2）	117
5.12	デルタスター構成敷設の結果（トラヒックモデル2）	117
5.13	スター構成敷設の結果（トラヒックモデル3）	119
5.14	リング構成敷設の結果（トラヒックモデル3）	119
5.15	マルチリング構成敷設の結果（トラヒックモデル3）	120
5.16	デルタスター構成敷設の結果（トラヒックモデル3）	120
5.17	サービス受信確率が一様分布の場合の結果（スター構成敷設）	122

5.18	サービス受信確率が一様分布の場合の結果（リング構成敷設）	122
5.19	サービス受信確率が一様分布の場合の結果（マルチリング構成敷設）	123
5.20	サービス受信確率が一様分布の場合の結果（デルタスター構成敷設）	123
5.21	物理網とは異なる伝送路敷設ネットポロジ	124
5.22	図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果（トラヒックモデル 1）	125
5.23	図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果（トラヒックモデル 2）	125
5.24	図 5.21 の伝送路敷設網を用いた場合の結果（トラヒックモデル 3）	126
5.25	異なる交換局配置モデル	126
5.26	図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果（スター構成敷設，トラヒックモデル 1）	127
5.27	図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果（リング構成敷設，トラヒックモデル 1）	127
5.28	図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果（マルチリング構成敷設，トラヒックモデル 1）	128
5.29	図 5.25 の交換局配置モデルを用いた場合の結果（デルタスター構成敷設，トラヒックモデル 1）	128
6.1	人口分布（図 5.1 と同一）	133
6.2	交換局配置モデル（図 5.2 と同一）	133
6.3	本章で用いる伝送路敷設ネットポロジ（5.21 と同一）	135
6.4	1 対 1 通信増加に伴う必要伝送路容量変化	138
6.5	1 対 1 通信増加に伴う必要交換機容量変化	138
6.6	マルチキャスト通信サービス数増加に伴う必要伝送路容量変化	141
6.7	マルチキャスト通信サービス数増加に伴う必要交換機容量変化	141
6.8	マルチキャスト通信サービス数が 10,000 の場合の相対網構成総コスト	142
6.9	マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要伝送路容量変化	144
6.10	マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要交換機容量変化	144
6.11	マルチキャスト通信サービス帯域が 156 Mbps の場合の相対網構成総コスト	145

6.12	スター構成からデルタスター構成への移行	149
6.13	伝送路増設方法	150
6.14	シナリオ1の必要伝送路容量変化	154
6.15	シナリオ1の必要交換機容量変化	154
6.16	シナリオ1の必要伝送路容量変化(スター構成に対する相対値)	155
6.17	シナリオ1の必要交換機容量変化(スター構成に対する相対値)	155
6.18	シナリオ1, ピリオド4の相対網構成総コスト	156
6.19	シナリオ1, ピリオド8の相対網構成総コスト	157
6.20	シナリオ1, ピリオド10の相対網構成総コスト	157
6.21	シナリオ2の必要伝送路容量変化	159
6.22	シナリオ2の必要交換機容量変化	159
6.23	シナリオ2の必要伝送路容量変化(スター構成に対する相対値)	160
6.24	シナリオ2の必要交換機容量変化(スター構成に対する相対値)	160
6.25	シナリオ2, ピリオド8の相対網構成総コスト	161
6.26	シナリオ2, ピリオド10の相対網構成総コスト	162
6.27	シナリオ2, ピリオド13の相対網構成総コスト	162
6.28	スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要伝送容量変化(シナリオ1)	164
6.29	スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要交換機容量変化(シナリオ1)	164
6.30	スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要伝送容量変化(シナリオ2)	165
6.31	スター構成からデルタスター構成へ一度に移行した場合の必要交換機容量変化(シナリオ2)	165

# 表 目 次

2.1	世界各国における情報通信基盤整備計画 . . . . .	13
3.1	本章で用いるサービス選択確率 . . . . .	54
3.2	網形態の各階層における交換局数 (1) . . . . .	55
3.3	網形態の各階層における交換局数 (2) . . . . .	56
4.1	リング構成の第1階層伝送路コスト . . . . .	69
4.2	リング構成の第1階層交換機コスト . . . . .	69
4.3	リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト (伝送路優先敷設)	79
4.4	リング・スター複合構成の第1階層交換機コスト (伝送路優先敷設)	79
4.5	リング構成の第1階層伝送路コスト (スター構成敷設) . . . . .	87
4.6	リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト (スター構成敷設)	87
4.7	リング構成の第1階層伝送路コスト (リング構成敷設) . . . . .	95
4.8	リング・スター複合構成の第1階層伝送路コスト (リング構成敷設)	95
5.1	本章の評価に用いるトラフィックパラメータ . . . . .	111
6.1	1対1通信トラフィック変動 (マルチキャスト通信なし) . . . . .	137
6.2	1対1通信増加に伴う必要容量増加率 . . . . .	139
6.3	マルチキャスト通信サービス帯域増加に伴う必要容量増加率 . . .	145
6.4	シナリオ1のトラフィック変動 . . . . .	147
6.5	シナリオ2のトラフィック変動 . . . . .	148



