

慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科  
2001年度(平成13年度)秋学期 修士論文

# インターネットを用いた 衛星通信回線制御機構の構築

学籍番号: 80032500

渡部 陽仁

# インターネットを用いた 衛星通信回線制御機構の構築

本論文では、衛星通信回線を、動的に必要帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際に必要となる、動的帯域制御機構・地球局制御機構の設計と実装について述べる。

衛星通信回線は、均質の接続性を地理的に広い範囲に、効率的に提供できる通信路である。近年、このような特徴を持った衛星通信回線を、インターネットをはじめ様々な通信の通信媒体として利用する動きが活発となってきた。広域性という特徴を持つ衛星通信回線は、広域に分散している多地点間を接続するのに適している。

衛星通信回線は、限られた帯域を複数に分割して、各地球局に割り当てて通信を行う。そして、通常は帯域幅を固定して通信を行う。インターネットのような通信に用いた場合、混雑した帯域と、利用率が低い帯域が混在してしまう。回線全体の利用効率を上げるには、利用率に応じて動的に帯域を割り当てる機構が必要である。

また、動的に帯域を割り当てるには、広域に分散する地球局を遠隔操作するための機構が必要となる。

本論文では、衛星通信回線を、動的に必要帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際に発生する問題の解決を行う。インターネットを用いて、分散する地球局を遠隔操作する機構を設計し実装する。また、回線の利用率に応じて動的に帯域を再配置する機構を設計し実装する。テストベッド・ネットワークを構築し本手法の評価を行い、本手法が有効であることを検証する。

本論文で提案する手法により、衛星通信回線を、動的に必要帯域幅が変化するインターネットのような通信に利用する際の回線利用効率の向上と、地球局の管理コストの削減が可能となる。

キーワード

1 衛星通信    2 インターネット    3 地球局制御    4 動的帯域制御

慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科

渡部 陽仁

# The Design and Implementation of Satellite Communication Architecture using the Internet

In this thesis we design and implement a dynamic bandwidth assignment and an earth station control system for the Internet-like satellite-based communication, which may require different link speed at different time.

Satellite communication can provide connectivity to wide area. Recently, data communication activities like the Internet using satellite link are becoming more popular. Satellite communication, which can reach wide area geographically, is good to connect many different places.

Satellite links have limited bandwidth, for satellite communications to work we have to assign a certain bandwidth to each earth station. Currently, we use satellite links with fixed bandwidth assignment. If we use satellite link for communications like the Internet, some channels might experience congestion while some channels do not. To improve the usage of all channels we need a dynamic bandwidth assignment function based on the traffic.

Furthermore, to enable dynamic bandwidth assignment, we need to remotely control earth station.

In this thesis we solve the problems that arise when we want to use dynamic bandwidth assignment for the Internet-like satellite-based communication. We design and implement a system to perform earth station remote control through the Internet. Also we design and implement a dynamic bandwidth assignment based on the real-time traffic. We evaluate this system using a test bed network.

Using the system proposed in this thesis we can improve the usage of satellite channels and reduce the administration cost of earth stations.

## Key Words

1. satellite communication
2. the Internet
3. earth station control
4. dynamic bandwidth assignment

# 目次

<b>第1章 序論</b> .....	<b>1</b>
1.1 はじめに .....	1
1.2 本論文の構成 .....	2
<b>第2章 衛星通信回線の特徴</b> .....	<b>3</b>
2.1 衛星通信回線の長所 .....	3
2.2 衛星通信回線のトポロジー .....	3
2.3 帯域分割方式.....	5
2.4 本論文で取り扱う衛星通信回線.....	7
<b>第3章 問題点と関連研究</b> .....	<b>8</b>
3.1 衛星通信回線の問題点.....	8
3.1.1 地球局の遠隔制御.....	8
3.1.2 帯域の効率的な割り当て.....	9
3.2 関連研究と関連技術 .....	9
3.2.1 ALOHANET .....	9
3.2.2 DAMA 通信方式.....	10
3.2.3 (社)電波産業会が提案する遠隔制御方式.....	10
3.2.4 登坂氏が提案する遠隔制御方式.....	10
<b>第4章 解決手法</b> .....	<b>13</b>
4.1 提案する手法の前提.....	13
4.2 地球局遠隔制御の手法.....	13
4.3 最適な帯域割当ての手法.....	15

<b>第5章 設計</b> .....	<b>16</b>
5.1 システムの構成.....	16
5.2 トラフィック測定モジュールの設計.....	18
5.3 帯域配分モジュールの設計.....	19
5.3.1 基本動作.....	19
5.3.2 制限つき帯域配分.....	21
5.3.3 通信路異常時の対応.....	21
5.4 モデム制御モジュールの設計.....	22
5.4.1 前提とする地球局の構成.....	22
5.4.2 本モジュールの設計.....	22
5.5 遠隔操作モジュールの設計.....	23
5.5.1 基本動作.....	24
5.5.2 エラー発生時の動作.....	27
5.5.3 状態遷移.....	28
5.6 電波状態取得モジュール.....	30
<b>第6章 実装</b> .....	<b>31</b>
6.1 実装環境.....	31
6.2 トラフィック測定モジュールの実装.....	31
6.2.1 トラフィック測定部.....	31
6.2.2 測定結果送信部.....	32
6.2.3 設定.....	32
6.3 帯域配分モジュールの実装.....	33
6.4 モデム制御モジュールの実装.....	34
6.5 遠隔操作モジュールの実装.....	35
6.6 電波状態取得モジュールの実装.....	36
<b>第7章 評価</b> .....	<b>37</b>
7.1 評価環境.....	37
7.1.1 スター型トポロジーの評価環境.....	37
7.1.2 Point to Multipoint 型トポロジーの評価環境.....	39
7.2 無障害時の動作の評価.....	40
7.2.1 制限なし帯域配分.....	40

7.2.2	最低帯域保証つき帯域配分 .....	42
7.3	障害発生時の動作の評価 .....	43
7.3.1	Keep Alive 断絶時の動作 .....	43
7.3.2	設定変更に失敗した場合の動作.....	45
7.4	Point to Multipoint 型通信路における動作の評価.....	47
7.5	まとめ .....	48
第8章	結論と今後の課題 .....	49
8.1	結論 .....	49
8.2	今後の課題.....	50

# 目次

図 2-1 Point to Multipoint 型のトポロジー	4
図 2-2 Point to Point 型のトポロジー	5
図 2-3 スター型のトポロジー	5
図 2-4 周波数分割方式の概念図	6
図 2-5 時分割方式の概念	7
図 3-1 登坂モジュールが前提とするトポロジー	12
図 3-2 登坂モジュールの無線機制御部	12
図 4-1 モデムと PC の接続	14
図 5-1 提案する機構の全体像	17
図 5-2 トラフィック量通知メッセージのフォーマット	18
図 5-3 帯域の割り当て例	19
図 5-4 帯域配分通知のメッセージフォーマット	20
図 5-5 地球局の構成	22
図 5-6 モデム制御 PC の接続	22
図 5-7 遠隔操作モジュールの位置づけ	23
図 5-8 ハブ局からルータへのメッセージフォーマット	25
図 5-9 制御側・モデム側のメッセージ交換図	26
図 5-10 制御側の状態遷移図	28
図 5-11 モデム側の状態遷移図	29
図 7-1 テストベッドネットワーク・トポロジー図	38
図 7-2 実験結果1	41
図 7-3 実験結果2	43
図 7-4 実験結果3	45

# 表目次

表 6-1	追加した ioctl 値.....	32
表 6-2	トラフィック測定モジュールの設定ファイル例 .....	32
表 6-3	帯域配分モジュールの設定ファイル例.....	33
表 6-4	モデム制御モジュールの設定ファイル例.....	34
表 6-5	遠隔制御モジュールの設定ファイル例1 .....	35
表 6-6	遠隔制御モジュールの設定ファイル例2 .....	35
表 7-1	実験ネットワークのチャンネル一覧.....	38

# 第1章

## 序論

### 1.1 はじめに

本論文では、インターネットを用いて衛星通信回線を自動制御、遠隔制御するシステムを構築する。

インターネットは、誕生以来、地上の有線通信技術の発達とともに成長してきた。そして、現在、インターネットは社会に必要不可欠なインフラストラクチャの一つとなった。情報流通の手段として、World Wide Web や電子メールが一般化し、インターネット利用者が急増している。近年、インターネットの普及とともに、インターネットに対する要求も多様化してきた。そして、有線通信だけでは満たせない要求に応えるため、様々な通信媒体をインターネット上の通信路として利用する動きが活発となってきた。このような状況下で、衛星通信回線に対する関心が高まっている。衛星通信回線は、均質の接続性を地理的に広い範囲に、効率的に提供できる通信路である。高品質なネットワークを広域に、かつ、均質に提供する媒体として注目されている。

WIDE Project [1] では、アジア地域に高品質な広域インターネットバックボーンを構築するため、前述の特徴を持った衛星通信回線を利用した。1995年にアジア各国の研究機関、および JSAT 株式会社と共同で、AI3 (Asian Internet Interconnection Initiatives) Project [2] を発足させた。現在、AI3 Project では、衛星通信回線をインターネット上の通信媒体として利用した際に発生する諸問題について、研究が行われている。

AI3 Project の衛星ネットワークの運用開始後、表面化してきた問題点の一つに、帯域の制御問題がある。衛星ネットワークでは、限られた帯域を分割し、各局間の通信に使用するが、現在は、各局に割り当てる帯域を固定している。そのため、しばしば実際のトラフィック状態と、割り当て帯域に不釣り合いが生じ、ネットワーク全体の利用効率低下を招いている。利用効率を向上させるためには、必要に応じて帯域の再配分をする必要がある。

衛星通信回線の長所の一つとして、回線設定の柔軟性が挙げられる。地上の有線回線とは異なり、無線設備の設定を変更するだけで、帯域幅や通信相手を変えられる。必要に応じて回線設定を変更すれば、ネットワークの利用効率を大きく向上できる。しかし、現在は、一度設定した回線を変更することは、ほとんどない。

帯域再配分作業の障害となっている原因に、各地球局の制御についての問題がある。衛星通信回線の設定変更を行うためには、自局・相手局双方の無線設備の設定を一致させる必要がある。衛星通信設備の中には、両局が自動的に制御情報を交換し、回線の設定を行う機能を有するものがある。ところが、この機能を備えた設備は、複雑で高価なものになる。しかも、この機能は、もともと音声通信向けに設計されたため、インターネットのように必要帯域が変化する通信には適していない。そのため AI3 Project では、このような設備は利用せず、オペレータにより手動で運用を行っている。手動運用でリアルタイムに制御を行うことは、管理コストが非常に大きく、非現実的である。結果として、衛星通信回線の長所である、回線設定の柔軟性が生かせていない。もし、現在の安価な設備を改変することなく、地球局相互の制御が可能となれば、大きな設備コスト・人的コストの削減につながる。そして、回線設定の柔軟性を生かした、衛星通信回線の運用が可能となる。

本論文では、これらの問題を解決するため、インターネットを利用した地球局制御機構を提案する。また、この地球局制御機構上で動作する、帯域の自動再配置機構を提案する。これらに必要な要件について論じ、設計ならびに実装を行う。また、本論文で提案する手法が有効であることを示すため、テストベッド・ネットワークを構築し、本手法の評価を行う。

本研究により、衛星通信回線の管理コスト削減と、衛星通信回線をインターネット上の通信路として利用した場合の帯域利用効率向上が実現される。そして、インターネットのような動的に必要な帯域が変化する通信路における、衛星通信回線の利用促進への貢献が期待できる。

## 1.2 本論文の構成

第2章では、本論文で取り扱う衛星通信回線の特徴について述べる。第3章では、衛星通信回線の問題点と、関連研究について述べる。第4章では、衛星通信回線をインターネットの通信路として利用する際に発生する問題の解決手法について、その設計の概要を述べる。第5章では、衛星通信回線制御機構の設計について述べる。第6章では、本論文で提案する機構の実装について述べる。第7章では、本機構の評価について述べる。第8章では、結論と今後の課題について述べる。

## 第2章

# 衛星通信回線の特徴

本章では、衛星通信回線の長所と、本論文で提案する機構が前提とする衛星ネットワークについて述べる。

### 2.1 衛星通信回線の長所

現在、世界で運用されている通信衛星のほとんどは、赤道上空約36,000kmの静止軌道に配置されている静止型の通信衛星である。静止衛星はその可視域が一定なため常時通信が可能である。

衛星通信システムには、広域性、同報性および回線設定の柔軟性など、地上系通信システムには無い特徴がある。この特徴を活かした利用形態として、報道機関のニュースの取材に活躍するSNG (Satellite News Gathering)がある。また、衛星通信は地上の災害の影響を受けないため、国・地方公共団体等の防災行政無線、あるいは地上通信系障害時の代替回線に利用されている。

近年、これらの特長を持つ衛星通信回線を、インターネットの通信媒体として利用する動きが活発となってきた。

### 2.2 衛星通信回線のトポロジー

本節では、インターネットで利用されている、代表的な衛星通信回線のトポロジーについて述べる。衛星通信回線は、衛星に搭載された中継器(以下、トランスポンダと呼ぶ)を介して設定される通信回線である。電波を発信するノード(以下、送信地球局と呼ぶ)から発信された信号は、トランスポンダで中継され、電波を受信するノード(以下、受信地球局と呼ぶ)により受信される。また、電波の発信・受信の両機能を有するノードを、単に地球局と呼ぶこととする。

## Point to Multipoint 型

この方式は、図 2-1に示すように、送信地球局からの信号をトランスポンダ経由にて、受信地球局に伝送するものである。衛星放送のトポロジーが、この方式である。同一の情報を、広範囲に大量に、かつ同時に送信できるという、同報性に優れたトポロジーである。ただし、送信地球局から受信局への片方向通信となるので、インターネットの通信路として利用するには、工夫が必要となる。

現在、AI3 Project では、UDLR [3] 技術を用いて、この形式のネットワークをインターネットの通信路として利用している。マルチキャスト伝送に適したトポロジーである。

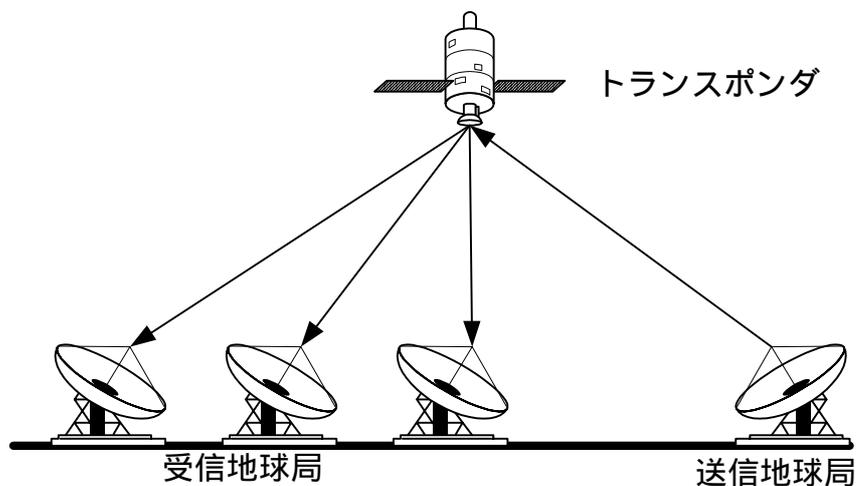


図 2-1 Point to Multipoint 型のトポロジー

## Point to Point 型

この方式は、図 2-2に示すように、二つの地球局が、トランスポンダを介して、直接1対1で直接通信するものである。地上の電話回線と類似した方式である。

### スター型

この方式は、図 2-3に示すように、の Point to Point 型を複数組み合わせたものである。ハブ局となる地球局を設置し、その他の局との間に、Point to Point のリンクを設定する。ハブ局以外の地球局同士の通信は、ハブ局の中継により行われる。

すべての地球局同士が、互いに Point to Point 型のネットワークを構築する場合、地球局の数を  $n$  とすると、必要なチャネル数は  $n \times (n-1)$  となる。それと比べて、スター型の場合は、 $(n-1) \times 2$  で済むため、複数の地球局が双方向通信を行う場合に、適したトポロジーである。

そのため、AI3 Project のネットワークでは、地球局同士の通信にスター型トポロ

ジーを用いている。スター型は、インターネットバックボーンのような、多地点間の相互接続に適したトポロジーと言える。

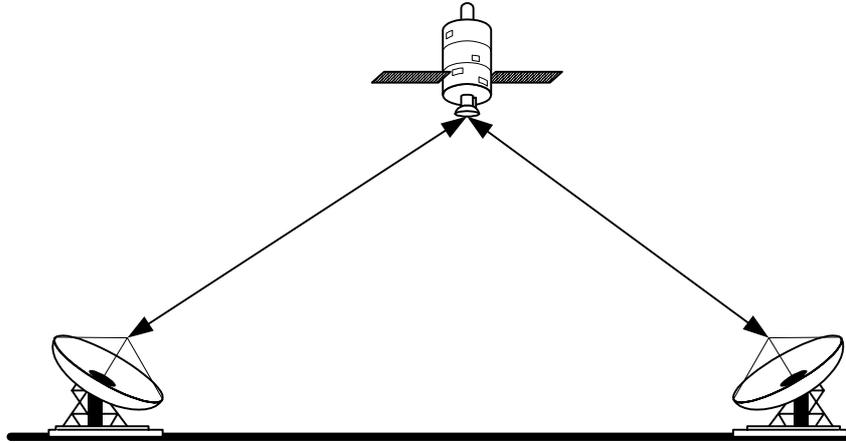


図 2-2 Point to Point 型のトポロジー

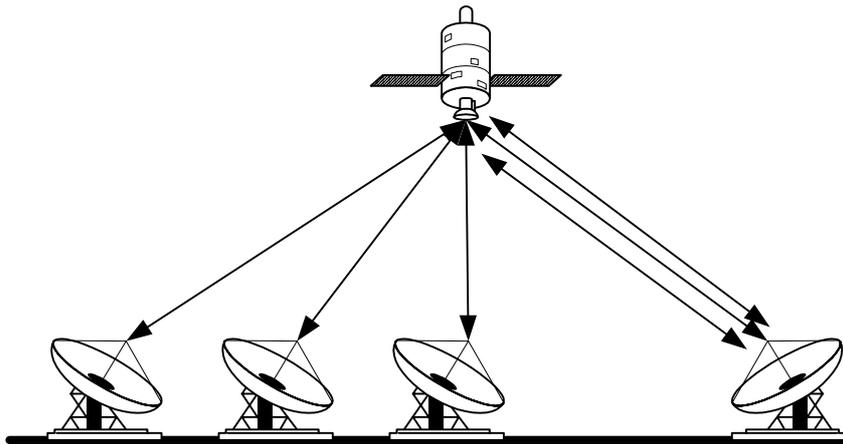


図 2-3 スター型のトポロジー

## 2.3 帯域分割方式

トランスポンダは、ある一定の中継可能な帯域を有している。地球局間に衛星通信回線を設定する際には、この帯域を一つ以上の複数個に分割して、それぞれの回線に割り当てる。分割された個々の帯域をチャンネルと呼ぶ。チャンネルの数および帯域は、全チャンネルの合計帯域がトランスポンダの帯域を上まわらない範囲で、自由に設定できる。

代表的な帯域の分割方式に、下記の二つがある。

### 周波数分割方式

トランスポンダの帯域を周波数で分割する方式である。各送信地球局は、トランスポンダに向けて、自局に割り当てられた指定周波数で信号を送出する。受信地球局は、トランスポンダからの全受信信号から、周波数により送信元を識別する。本方式の概念図を図 2-4に示す。

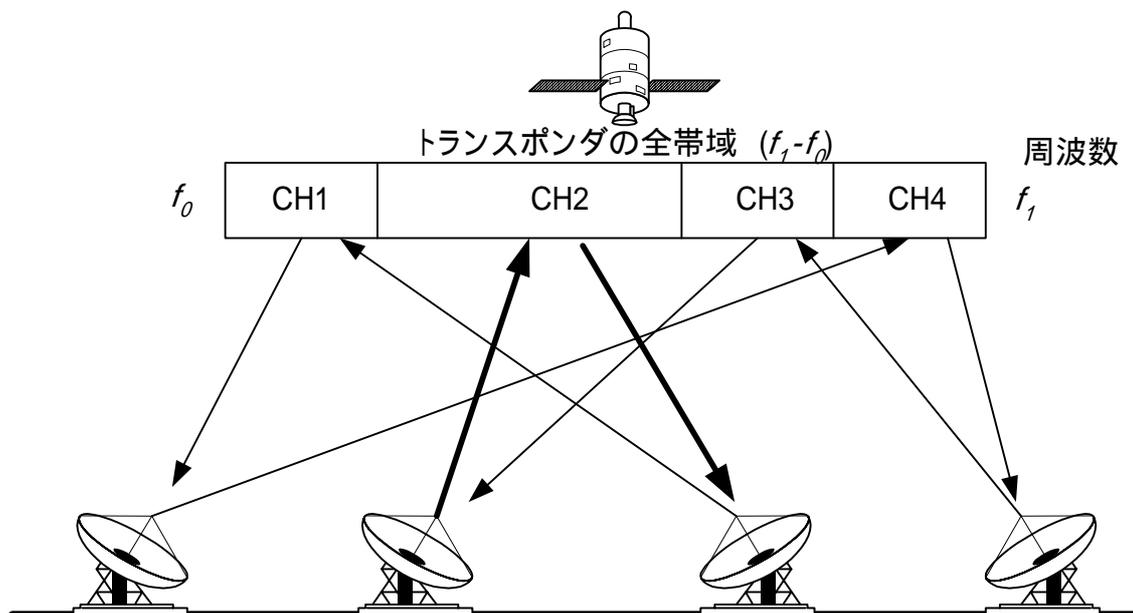


図 2-4 周波数分割方式の概念図

## 時分割方式

トランスポンダの帯域を、時間で分割する方式である。各送信地球局は、同一の周波数で、時間的に信号が重ならないように、割り当てられた時間幅内で信号を断続的に送出する。受信地球局は、トランスポンダからの全受信信号から、時間位置により送信元を識別する。この方式の概念図を、図 2-5に示す。図中の実線は信号の送出を、破線は停止を表す。

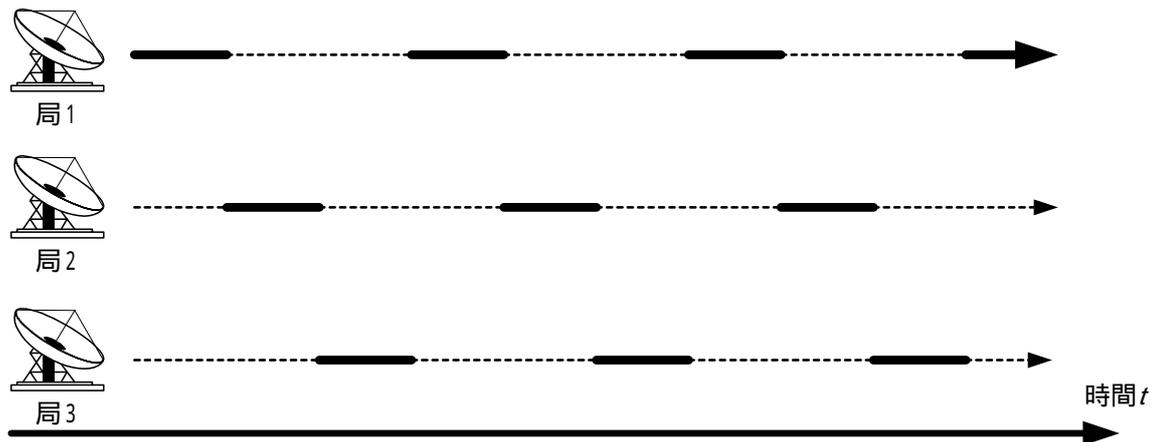


図 2-5 時分割方式の概念

周波数分割方式は、時分割方式と比較して、設備が単純で安価であるという特徴があり、衛星通信で最もよく利用されている。AI3 Project でも、周波数分割方式を採用している。

## 2.4 本論文で取り扱う衛星通信回線

本論文で提案する機構は、スター型トポロジーと Point to Multipoint 型トポロジーを対象として設計・実装されている。これは、AI3 Project で実際に利用可能な機構の実装を目的としたためである。

## 第3章

# 問題点と関連研究

本章では、前章で述べた衛星通信回線の特徴を踏まえた上で、衛星通信回線をインターネット上の通信路として利用する際の問題点について論ずる。また、既存の技術、既存の研究と、それぞれの手法の問題点について論ずる。

### 3.1 衛星通信回線の問題点

本節では、衛星通信回線をインターネット上の通信路として利用する際の問題点について論じる。

#### 3.1.1 地球局の遠隔制御

2.1で、衛星通信回線の長所を挙げた。これらの長所のうち、衛星通信回線をインターネット上の通信路として利用する際に、生かすことが困難であるのは、回線設定の柔軟性である。

回線設定の柔軟性の活用を妨げている原因の一つに、地球局の遠隔制御問題がある。衛星通信回線の設定を変更する際は、送信地球局と受信地球局両方の設定を変更する必要がある。双方のチャンネルの設定が一致しない場合は、通信不能となる。

音声回線以外に用いる衛星通信設備の場合、一般的に、地球局の遠隔制御は不可能な場合が多い。遠隔制御が不可能な場合、チャンネルの設定変更は、送信地球局と受信地球局双方のオペレータが、手動で行う。電話などで連絡を取り合いながら、設定の変更内容や、変更時刻を打ち合わせ、作業を行う。

回線設定の柔軟性を生かすためには、必要なときに、簡単に地球局の制御ができるシステムが必要である。短い間隔でのチャンネルの設定変更を、現状のように手動で行う場合は、オペレータが地球局に常駐し、常に連絡を取り合わなければならない。そのため、莫大な人的コストがかかる。

衛星通信回線の頻繁な設定変更を可能とするには、遠隔操作機構を持った地球局

設備が必要である。

### 3.1.2 帯域の効率的な割り当て

0で述べた通り、各送信地球局のチャンネルへの帯域割り当ては、トランスポンダの帯域の範囲内で自由に設定できる。しかし、実際には、あらかじめ帯域配分を決め、その値に固定したまま運用している。帯域の固定は、回線全体の利用効率を低下させている。状況によっては、混雑している帯域の狭いチャンネルが存在する一方で、まったく通信が行われていない帯域の広いチャンネルが存在してしまう。

この問題は、トラフィック量に応じて帯域を配分する機構が存在しないために発生している。インターネットは、従来の音声通信回線と異なり、必要帯域幅がダイナミックに変化する。衛星通信回線の利用効率向上のためには、トラフィック量に応じて各チャンネルの帯域を調節する機構が必要である。

## 3.2 関連研究と関連技術

本節では、3.1で述べた問題点の解決を目的とした、既存の関連研究、および既存の技術について述べる。また、既存の手法の問題点について論じる。

### 3.2.1 ALOHANET

ALOCHANET [4][5] は、1970年代にハワイ大学で開発された、帯域割当て問題をデータリンク層レベルで解決する手法である。この手法は、衛星通信回線ではなく、地上の無線通信回線を対象として開発されたものである。しかし、「無線通信回線において、帯域割当て問題を解決する」という目的が、本論文の目的と一致するため、関連研究として取り上げる。

この手法では、複数の送信局が単一のチャンネルを用いて送信を行う。データリンクプロトコルに、衝突検知・再送の機能が実装されており、衝突の際には自動的に再送を行う。帯域を複数のチャンネルに分割しないため、不適切な帯域配分によるチャンネル利用効率の低下が発生しない。また、チャンネル割り当ての際に必要な、送信局・受信局の設定変更も不要となる。

この手法の欠点は、衝突が頻繁に発生した場合に、性能低下が起こることである。各送信局が自由なタイミングで送信を行うため、通信回線の利用率が高い場合は、再送の繰り返しにより実質通信速度が低下する。特に、衛星通信回線は遅延が非常に大きいデータリンクであるため、本手法を利用した場合、衝突検知・再送に時間がかかると考えられる。利用率が高い衛星通信回線では、送信地球局ごとに別々のチャンネルを割り当て、衝突が発生しないようにする方が効果的と考えられる。

### 3.2.2 DAMA 通信方式

DAMA (Dynamic Assigned Multiple Access 要求時割付多元接続) 通信方式は、決められた衛星通信回線の帯域を効率的に活用するために、データの送信要求が発生するたびに、各地球局にチャンネルを割り当てる方式である。通信が終われば、チャンネルは開放される。ネットワーク内に、チャンネルの割り当て・開放・状態監視を行う回線制御局があり、各地球局を制御する。

この方式では、通信が必要なとき以外は帯域を使用しないため、衛星通信回線の効率的な利用が可能である。

この方式の欠点は、音声通話回線用に開発されたため、動的に割り当て・開放を行うチャンネルの帯域幅が、固定されている点である。音声通信のように、通信に必要な帯域幅が毎回同じである場合には有効だが、インターネットの通信のように必要帯域幅が動的に変化する通信には、不向きである。

### 3.2.3 (社)電波産業会が提案する遠隔制御方式

前項で述べた DAMA 通信方式の欠点を改善するため、社団法人電波産業会が、2001年3月に新たな DAMA 通信方式 [6] を提案した。この方式は、既存の DAMA 方式と異なり、各地球局に様々な帯域幅のチャンネルを割り当てられる。

この方式は、まだ提案段階であるが、実用化されれば、インターネットのような通信にも適用可能と考えられる。

この方式の欠点は、既存の無線局で利用できない点である。実用化された後、この方式で通信を行う場合は、地球局の設備をこの方式に対応したものに变更しなくてはならない。

### 3.2.4 登坂氏が提案する遠隔制御方式

登坂章弘氏が、1995年度慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科の修士論文 [7] にて提案した手法の中に、3.1.1で述べた遠隔制御問題の解決を目的としたモジュール(以下、登坂モジュール)が含まれている。

登坂モジュールは、図 3-1に示すトポロジーにおいて、送信地球局を遠隔操作で切り替えることを目的としている。地球局の制御は、図中の制御端末から、地上回線のインターネットを通して、各局に命令を送信することにより行う。使用するチャンネルは、一つだけであり、複数の送信地球局が同時に送信をすることはない。

例えば、ネットワーク1からネットワーク2・3宛に、大量のマルチキャストのトラフィックが発生した場合、オペレータは地球局1に対して送信命令を、地球局2・3に対して受信命令を送る。これにより、地上のインターネットを利用するよりも、効率的なマルチキャストデ

一夕の配送が行える。

登坂モジュールは、PC上で動作するソフトウェアとして実装されているため、既存の地球局設備を改変することなく導入可能である。図 3-2に、地球局制御部の概念図を示す。この手法により、低コストでの遠隔操作機構の導入が可能となる。

登坂モジュールの欠点として、各地球局が地上の回線でインターネットに接続されているトポロジーが前提となっている点が挙げられる。この手法では、全ての制御命令が地上線を通るため、衛星通信回線のみでインターネットに接続されている地球局は制御不可能である。災害時に地上の回線が被災した場合の利用や、地上の回線がない場所での利用が不可能である。

適用可能なトポロジーを増やすには、制御命令を衛星通信回線経由で送信可能にする必要がある。

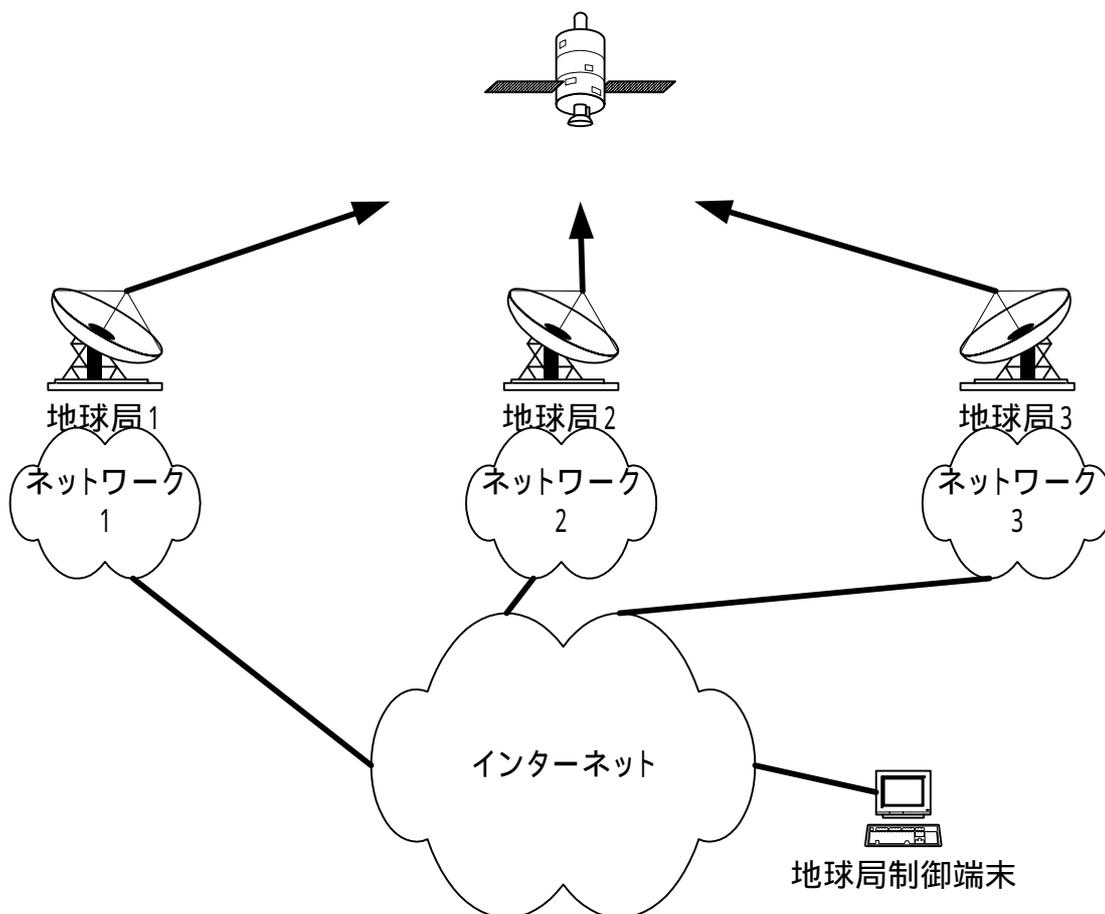


図 3-1 登坂モジュールが前提とするトポロジー

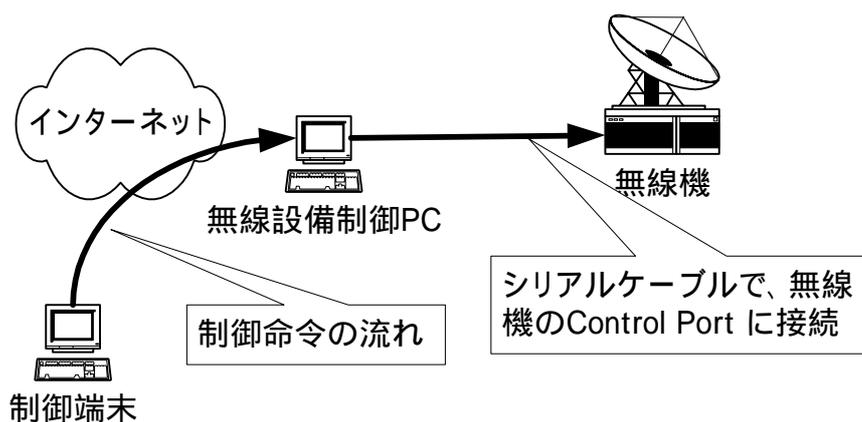


図 3-2 登坂モジュールの無線機制御部

# 第4章

## 解決手法

本章では、前章まで述べてきた、衛星通信回線をインターネット上の通信路として用いる際の、問題点の解決手法について述べる。

### 4.1 提案する手法の前提

本章で提案する手法は、以下のような前提に基づいている。

- スター型トポロジーと Point to Multipoint 型トポロジー  
2.4で述べた通り、ハブ局を中心としたスター型トポロジーと、Point to Multipoint 型トポロジーにより多地点間接続を形成するネットワークを対象とする。
- 無線設備を改変しない  
本システムは、既存の地球局設備に手を加えることなく実装される。

### 4.2 地球局遠隔制御の手法

本節では、3.1.1で述べた問題を解決するための手法を述べる。

地球局の遠隔制御を実現するには、下記のような機構が必要となる。

- 信頼できる制御命令の伝達機構
- 各地球局に伝達された制御命令に基づいて無線設備を制御する機構
- 無線設備の制御が正しく行われたことを確認する機構
- 命令伝達や無線設備制御に失敗した場合の復旧機構

以下、それぞれの機構について述べる。

- 信頼できる制御命令伝達機構  
オペレータ、または、4.3で述べる帯域配分機構により決定された各チャンネルの設

定を、各地球局に確実に伝達するための機構が必要である。本手法では、各地球局の設備をインターネットに接続し、IP [8] を用いてデータ転送を行う。

衛星通信回線は、各地球局のチャンネルの設定が一致しないと通信が不可能となる。そのため、データ転送が確実に行われる必要がある。通信に TCP [9] を用いる場合は、自動的にエラー訂正を行うが、安全のために別のチェック機構も併せて利用する必要がある。

また、Point to Multipoint 型トポロジの場合、地球局の数が帯域幅の制約を受けないため、多数の受信地球局を設置できる。そのため、多数の受信地球局を確実に制御できるよう、規模性を考慮した設計が必要である。

- 無線設備を制御する機構

無線設備(モデム)は OSI7層モデルにおける物理層・データリンク層の機器である。従って、IP で送信されてくる制御命令をそのまま実行することはできない。無線設備を IP に対応させるには、設備の改造が必要であり、コストがかかる。ただし、多くの場合、モデムには制御用のシリアルインタフェースが搭載されている。本手法では、このインタフェースを利用する。

この問題を解決するためには、地球局内に IP を扱える機器(PC)を設置し、モデムのシリアルインタフェースと接続する。IP で送られてきた制御命令は、この PC で受信する。PC には、IP で送られてきた制御命令を、モデムの制御コマンドに変換し、シリアルインタフェースを通してモデムに送信するソフトウェアを搭載する。

PC とモデムの接続、および制御命令の流れを、図 4-1 に示す。

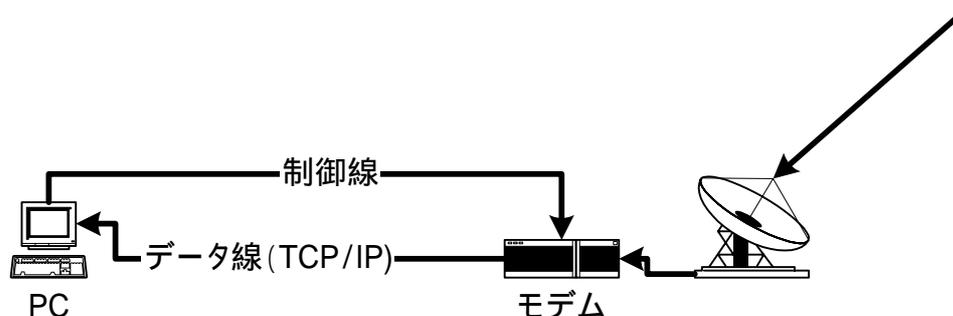


図 4-1 モデムと PC の接続

- 制御結果を確認する機構

無線設備の遠隔制御を行った後、正しく制御が行われたことを確認する機構が必要である。結果の確認は、電波の状態と、インターネットの接続状態の2項目について行う必要がある。

電波の状態を観測するためには、スペクトラムアナライザを用いる。無線局内に PC と接続されたスペクトラムアナライザを設置し、実際に送出している電波の周波数、

電力、帯域幅の情報を観測する。スペクトラムアナライザに接続した PC から、観測データを取得する。

インターネットの接続状態は、衛星通信回線を介して接続している PC 間の IP による通信状態で判断する。

- 制御に失敗した場合の復旧機構

何らかの理由により、万が一、チャンネルの制御に失敗した場合は、衛星通信回線がダウンし通信不能となる。当該地球局に接続しているインターネットが、衛星通信回線経由のみの場合、それ以降の遠隔制御が不能となる。本手法は地球局の無人制御を目標としているので、制御に失敗した場合に自動的に復旧させる機構が必要となる。

### 4.3 最適な帯域割当ての手法

本節では、3.1.2で述べた問題を解決するための手法を述べる。

トラフィック量に応じた帯域の割り当てを実現するためには、次のような処理が必要となる。

- 各チャンネルのトラフィック量の測定

各チャンネルのトラフィック量の測定は、各地球局において行う必要がある。各地球局に設置されているルータ(PC)またはモデムから、衛星通信回線向けのトラフィック量データを取得する。

- 測定したデータの転送

測定したデータを、何らかの方法を用いて一ヶ所に集める必要がある。本手法では、各地球局がインターネットに接続している点に注目し、データ転送に IP を用いる。

- 収集したデータによる帯域配分の計算

収集したデータを基に、帯域配分を計算する機構が必要である。トランスポンダの帯域幅を上まわらないよう、また、割り当て帯域が虫食い状にならないよう、最適な帯域配分を決定しなくてはならない。

以上の事項をまとめると、下記のようになる。

1. 各地球局でトラフィック量を測定
2. データを衛星回線経由で IP の形で帯域配分計算機構に転送
3. 最適な帯域配分の決定

# 第5章

## 設計

前章までの議論をふまえ、本章では、インターネットを用いた衛星通信回線制御機構の設計について述べる。

### 5.1 システムの構成

本機構は、トラフィック測定モジュール・帯域配分モジュール・モデム制御モジュール・遠隔操作モジュール・電波状態取得モジュールの5つから成る。

本章で述べる機構の概要を、図 5-1に示す。

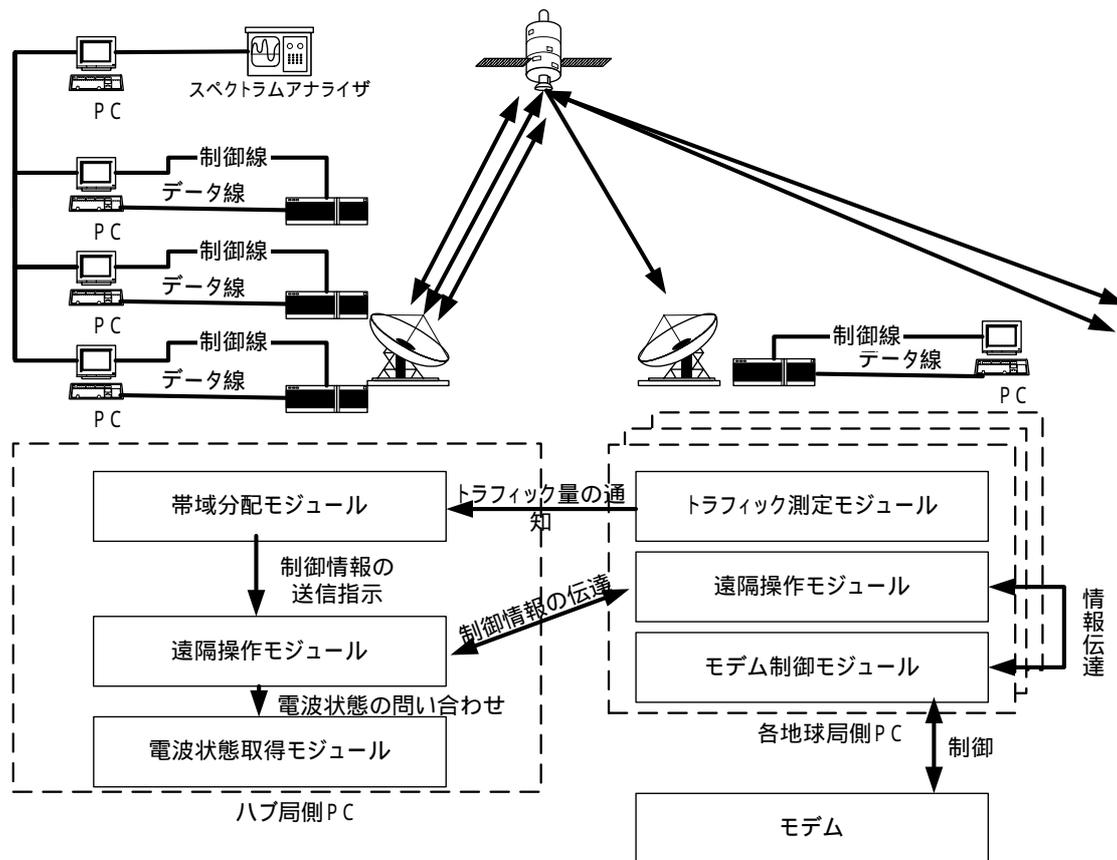


図 5-1 提案する機構の全体像

## 5.2 トラフィック測定モジュールの設計

本モジュールは、各地球局(ハブ局を含む。以下同じ。)に設置されているルータ PC に組み込まれ、単位時間当たりのチャネルのトラフィックを計測する。そして、測定結果をインターネットを使用して、ハブ局の帯域分配モジュールに通知する。

図 5-2に、帯域分配モジュールに送信するメッセージのフォーマットを示す

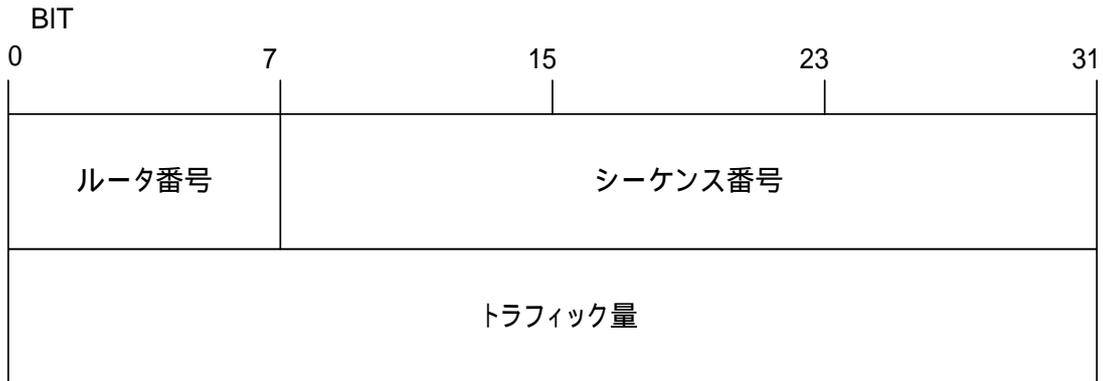


図 5-2 トラフィック量通知メッセージのフォーマット

- ルータ番号 (0 ~ 255)  
本機構では、衛星通信回線に接続している各ルータにルータ番号を付与する。このフィールドには、パケット送信元のルータ番号が設定される。
- シーケンス番号 (0 ~ 16777215)  
パケットのシーケンス番号である。0 から始まり、16777215まで1ずつ加算される。16777215を越えた場合は、また0に戻る。帯域配分モジュールがパケットの欠損を検出するために利用する。
- トラフィック量  
前回のパケット送出後より、今回のパケット送出までの間に衛星通信回線に向けて送信されたトラフィックの量が設定される。単位は byte である。

## 5.3 帯域配分モジュールの設計

本モジュールは、ハブ局に設置される制御 PC 上で動作する。各トラフィック測定モジュールから、各チャンネルのトラフィックの通知を受け、最適な帯域配分を計算する。そして、算出された帯域配分に基づいて、帯域・周波数など、各地球局のチャンネルの設定値を導き出す。このモジュールで決定したチャンネルの設定は、後述する遠隔操作モジュールに渡り、各地球局に通知される。

### 5.3.1 基本動作

本モジュールは、あらかじめ指定した単位時間ごとに、トラフィック量の集計と帯域割り当ての再配置を行う。単位時間内に受信したトラフィック量データを、チャンネルごとに集計し、その結果をもとに帯域を比例配分する。そして、結果を同一 PC 内の遠隔操作モジュールに引き渡す。

帯域配分を決定する際は、図 5-3に示すように、各チャンネルが連続した帯域を持つようにする。

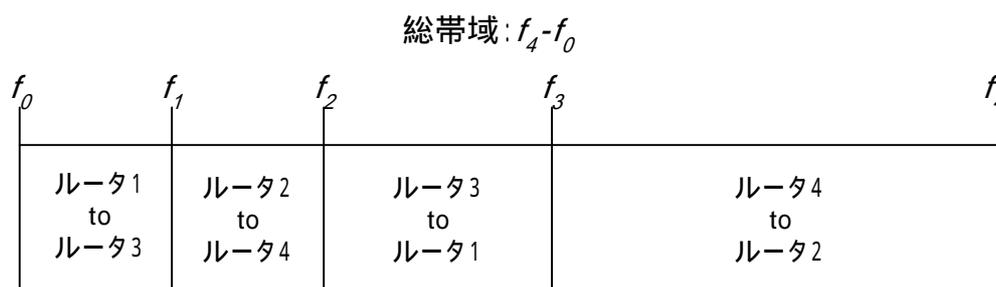


図 5-3 帯域の割り当て例

なお、本モジュールには、あらかじめ Point to Point リンク、または Point to Multipoint リンクを形成するルータ対の IP アドレスの対を与えておく必要がある。

図 5-4に、遠隔操作モジュールに送るメッセージのフォーマットを示す。

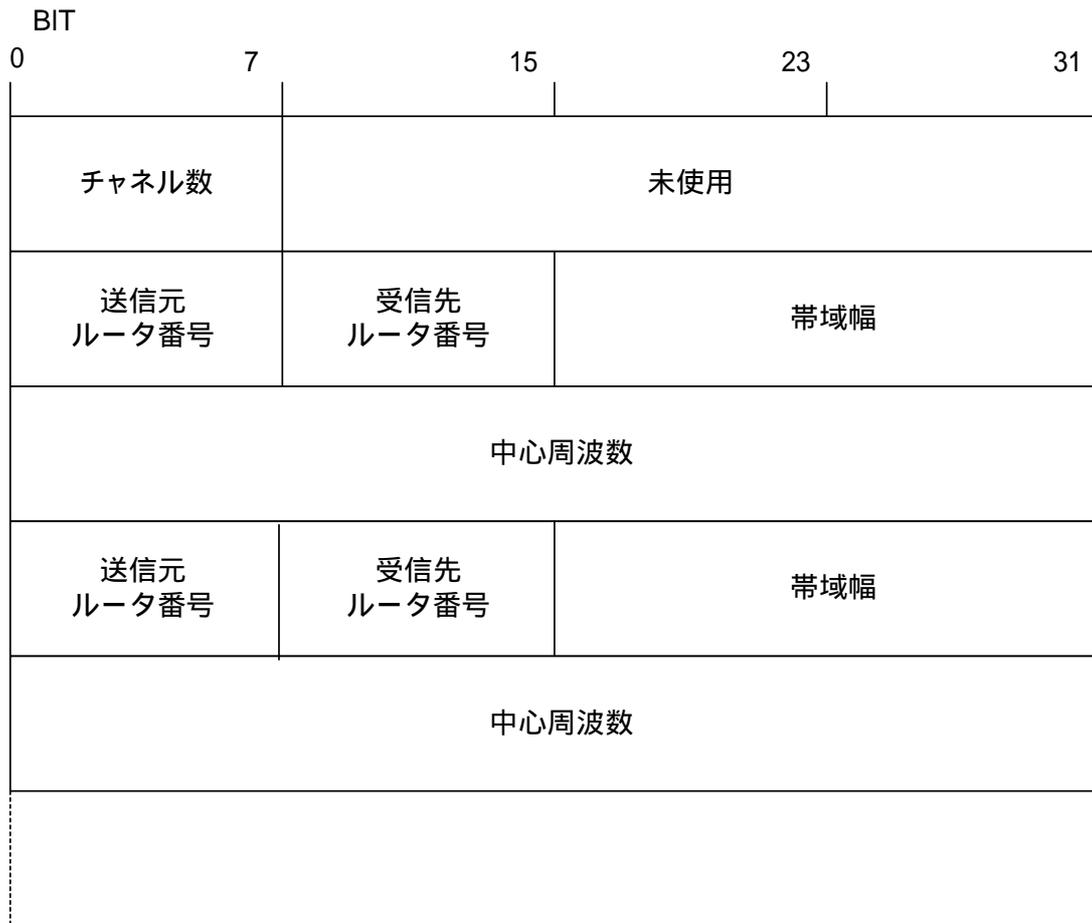


図 5-4 帯域配分通知のメッセージフォーマット

- チャンネル数  
このメッセージは、チャンネル数に応じた可変長となっている。この値は、メッセージ中に含まれるチャンネル数を表す。
- 送信元・受信先ルータ番号 (0 ~ 255)  
それぞれ、各チャンネルの始点ルータ番号と終点ルータ番号である。なお、Point to Multipoint リンクに利用するチャンネルの場合は、終点ルータ番号の代わりに、終点ルータグループ番号となる。
- 帯域幅  
チャンネルに割り当てられた帯域幅である。単位は kHz である。
- 中心周波数  
チャンネルの中心周波数である。単位は kHz である。

### 5.3.2 制限つき帯域配分

本モジュールは、次のような要求に応えるため、制限つき配分機能を有する。

- 最低保証帯域の確保

自動配分機能は、トラフィック量の比例分配により、各チャンネルに帯域を配分する。この方式では、あるチャンネルのトラフィック量が他と比較して極端に多い場合、特定のチャンネルに大部分の帯域が割り当てられてしまう。その結果、他チャンネルの帯域が異常に狭くなる可能性がある。

この問題を回避するため、本モジュールには、一定の帯域を必ず割り当てる機能を持つ。帯域の自動配分を行う際に、指定されたチャンネルごとの最低帯域を確保した上で、余裕帯域をトラフィック量に応じて配分する。

- チャンネルの手動設定

特定のチャンネルの設定をオペレータが手動で設定する場合の機能である。手動設定を行うチャンネルについて、帯域幅および中心周波数のデータを、オペレータが手動で設定できる。

自動設定されるチャンネルについては、手動設定で予約された帯域を避けながら帯域配分が行われる。

### 5.3.3 通信路異常時の対応

本節では、Point to Point 型の特定の通信路に異常が発生した際の動作について述べる。

5.2および5.3.1で述べた通り、各地球局のルータからは、一定時間ごとにトラフィック量通知メッセージが送られてくる。本モジュールでは、このメッセージを keep alive に利用している。一定時間、通知パケットが全く受信されない場合は、当該通信路に異常が発生したと見なす。

通信路に異常が発生した場合、当該通信路を介して接続されている地球局には、チャンネル設定変更の制御命令が到達しない可能性が高い。そのため、復旧までの間、当該通信路の両端のルータの設定が変更されないよう固定する。

障害が発生しているチャンネルの設定変更を行うと、両端のうちハブ局のモデムの設定だけが変更されてしまう。両端のモデムの設定に食い違いが生じた場合、通信路が復旧しても通信が行えなくなる。

トラフィック量通知メッセージが再び受信できた場合は、通信路が復旧したとみなし、固定状態を解除する。

なお、Point to Multipoint 型の通信路では、この動作は行わない。4.2で述べたと

おり、Point to Multipoint 型の通信路には、多数の受信地球局が接続される可能性がある。個別の異常に逐一对応すると、規模性を損なうことになる。

そのため、Point to Multipoint 型通信路で異常が発生しても、これに関わらず帯域の変更を行う。そして、異常が発生している受信地球局については、個別に地上のインターネット経由を経由して、状態の把握と復旧を試みる。

## 5.4 モデム制御モジュールの設計

### 5.4.1 前提とする地球局の構成

図 5-5に示すように、本手法が対象とする地球局は、PC(ルータ)・モデム・アンテナから成る。この中で、衛星通信回線のチャンネルを制御するのは、モデムである。モデムを操作することにより、通信速度や周波数を変更する。モデムの操作法には、コンソールを直接操作する方法と、外部機器から制御インタフェースを通して操作する方法の二通りがある。

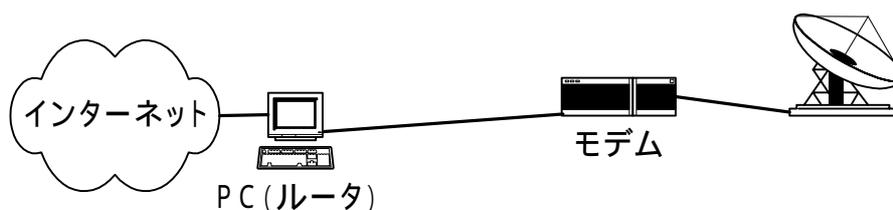


図 5-5 地球局の構成

### 5.4.2 本モジュールの設計

本モジュールは、PC からモデムを制御する機能を有し、各地球局内のモデム制御 PC に組み込まれる。モデムの制御ポートに制御 PC を接続し、制御する。

また、図 5-6に示すように、同一の PC がルータ PC とモデム制御 PC を兼ねることも可能である。

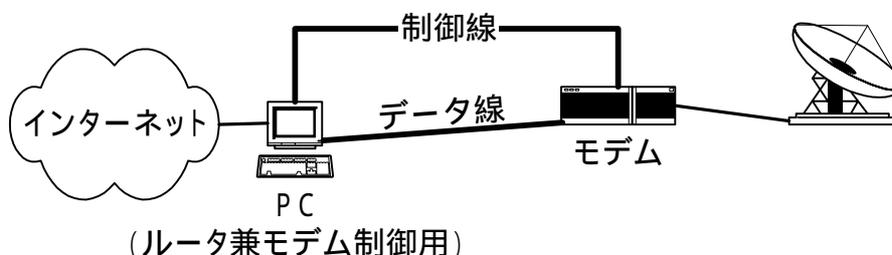


図 5-6 モデム制御 PC の接続

同一のモデム制御 PC 内で動作している遠隔操作モジュールから、モデム設定変更

の命令を受け、モデムを制御する。

本モジュールは、次のような機能を持つ。

- モデム制御コマンド生成

遠隔操作モジュールから受けた帯域幅・中心周波数の情報の通りにチャンネルを設定するための、モデム制御コマンドを生成する。モデム制御コマンドは、機種により異なるため、モデムの種類に応じて実装を変える必要がある。

- 空中線電力情報の管理

衛星通信では、チャンネルの帯域により送信空中線電力を調節する必要がある。送信に必要な空中線電力は、地球局ごとに異なるため、各局で保持する必要がある。帯域変更の際には、保持している空中線電力情報を参照し、モデムに設定する。

本モジュールが、サポートする必要があるモデム制御コマンドを、以下に示す。

- 送信・停波
- 受信帯域幅設定・送信帯域幅設定
- 受信周波数設定・送信周波数設定
- 送信空中線電力設定

## 5.5 遠隔操作モジュールの設計

本モジュールは、ハブ局の帯域配分モジュールが決定したチャンネルの設定情報を、各地球局のモデム制御モジュールへ伝達する。これを、図 5-7に示す。図中の矢印は、制御情報の流れを表す。

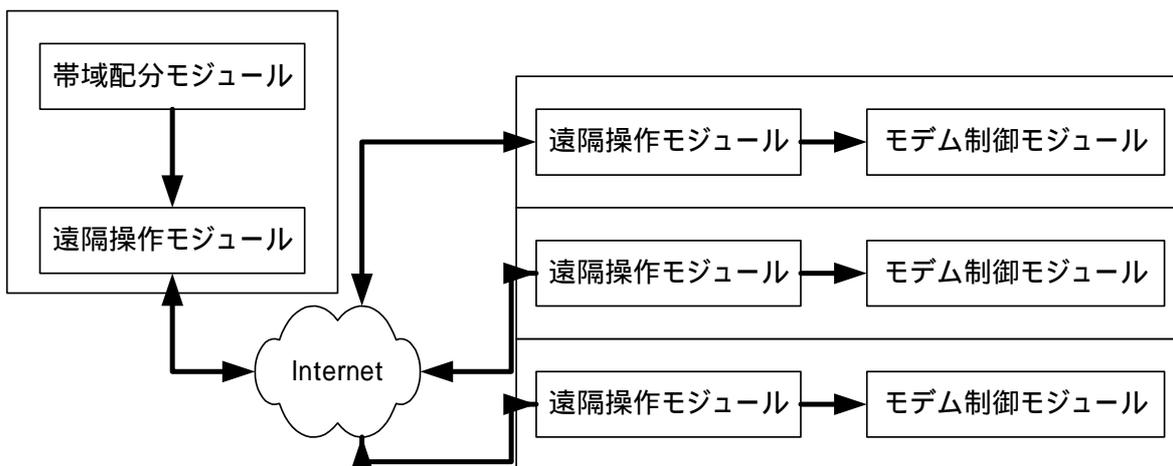


図 5-7 遠隔操作モジュールの位置づけ

### 5.5.1 基本動作

帯域配分モジュールと接続している本モジュール(以下、本節中では制御側と呼ぶ)は、帯域配分モジュールから図 5-4で示した帯域配分通知メッセージを受け取ると、前回のメッセージと比較し、設定の変更が生じたチャンネルを選び出す。そして、そのチャンネルの両端のモデム制御モジュールと接続している本モジュール(以下、本節中ではモデム側と呼ぶ)に対し、設定の変更情報を送信する。

制御側からモデム側に送信される、設定変更メッセージのフォーマットを、図 5-8に示す。当該チャンネルの送信側に対しては、「処理の種別」に1(送信設定変更)を、受信側に対しては2(受信設定変更)をそれぞれ設定し、メッセージを送信する。

メッセージを受信したモデム側は、メッセージが自分宛であることを確認する。また、正常に到着したことを制御側へ知らせるため、受信したメッセージをそのまま返信する。

制御側は、自分が送信したメッセージと同一のメッセージが、全てのモデム側から返信されてくることを確認した後、設定実行メッセージを送信する。図 5-8に示すメッセージの「処理の種別」に3(設定実行)を設定したものを使用する。

なお、規模性を考慮し、Point to Multipoint 型通信路では、モデム側からの返信を待たずに設定実行メッセージを送信する。返信が無いモデム側については、地上のインターネットを経由して個別に対処する。

モデム側は、設定実行メッセージを受信すると、モデム制御モジュールに対して設定変更を命令する。そして、チャンネルの設定が変更される。

制御側は、設定変更後、通信路が安定するまで指定時間待機した後、モデム側に完了確認メッセージを送信する。図 5-8に示すメッセージの「処理の種別」に4(完了確認)を設定したものを使用する。

メッセージを受信したモデム側は、メッセージが自分宛であることを確認する。また、正常に到着したことを制御側へ知らせるため、受信したメッセージをそのまま返信する。

制御側は、自分が送信したメッセージと同一のメッセージが、全てのモデム側から返信されてくることを確認する。また、5.6で述べる電波状態取得モジュールに対して、電波状態の問い合わせを行い、意図したとおりの電波が各地球国から送出されていることを確認する。

全てのモデムからの返信を受信し、かつ、電波状態を確認した時点で、全体の変更作業が完了したと見なす。なお、設定実行メッセージの際と同様、Point to Multipoint 型通信路では、モデム側からの返信の有無にかかわらず、作業が完了したと見なす。

これらの一連のメッセージ交換を、図 5-9に図で示す。

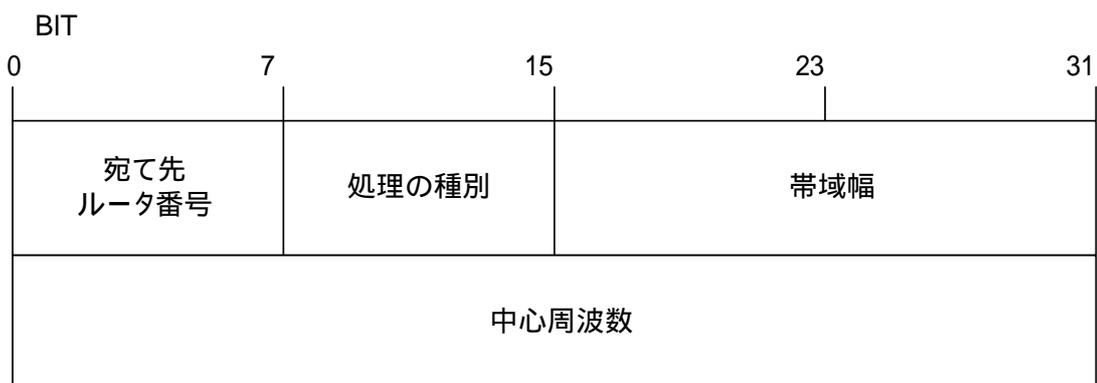


図 5-8 ハブ局からルータへのメッセージフォーマット

- 宛て先ルータ番号  
このメッセージが、どのルータ宛であるかを示す。
- 処理の種別
  1. 送信設定変更
  2. 受信設定変更
  3. 設定実行
  4. 完了確認
  5. 変更取消
- 帯域幅  
チャンネルに割り当てられた帯域幅である。単位は kHz である。処理の種別が1または2の場合に使用される。それ以外の場合は、0を設定する。
- 中心周波数  
チャンネルの中心周波数である。単位は kHz である。処理の種別が1または2の場合に使用される。それ以外の場合は、0を設定する。

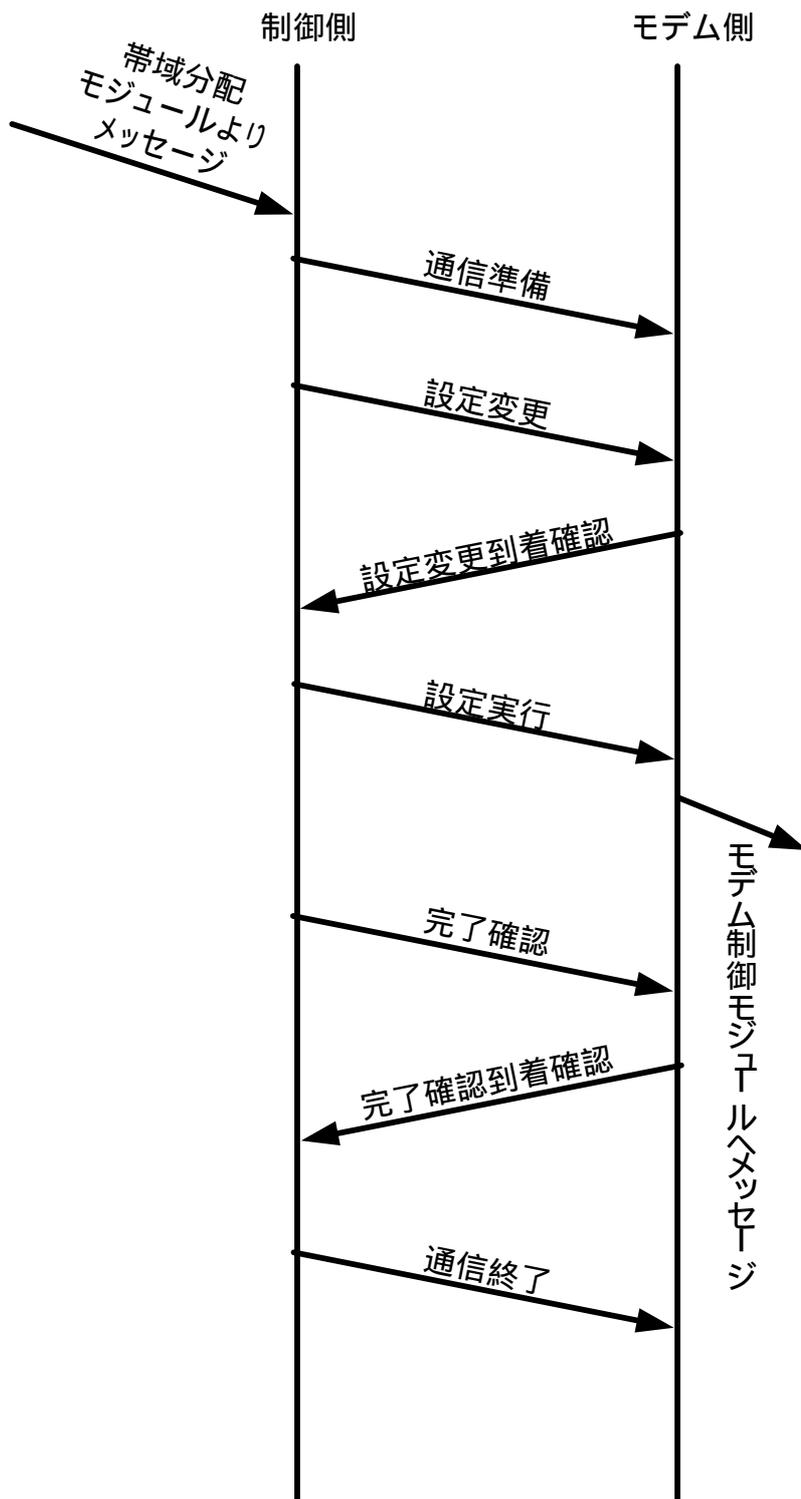


図 5-9 制御側・モデム側のメッセージ交換図

### 5.5.2 エラー発生時の動作

ここでは、動作の各段階においてエラーが発生した場合の対応について述べる。

- 送信設定変更 / 受信設定変更メッセージ伝達失敗の場合

制御側から設定変更メッセージを送信した後、モデム側から確認応答が返らない場合は、伝達に失敗したと見なして設定変更メッセージを再送する。また、確認応答が返ったものの、制御側から送信した内容と異なる応答が返った場合も、メッセージの再送を行う。

- 完了確認メッセージの交換に失敗した場合

制御側から完了確認メッセージを送信した後、モデム側から確認応答が返らない場合は、チャンネルの設定変更に失敗したと疑う。そして、応答を返さないモデム側に対して、数回再送を試みる。再送を行っても、確認応答が返らない場合は、設定変更失敗したと見なす。

この場合、制御側は、全てのチャンネルの設定を変更前の設定に戻す作業を行う。確認応答を正常に返したモデム側に対し、制御側は、図 5-8で示したメッセージを送信する。「処理の種別」には、5(変更取消)が設定される。

制御側からの確認完了メッセージに応答しない、変更作業に失敗したモデム側は、IP の接続性を失い孤立する。そのため、自力で復帰する機能を備えている。設定変更後、一定時間制御側からの完了確認メッセージを受信できない場合は、自分が設定変更失敗したと見なす。そして、変更前の状態に自動的に復帰する。

### 5.5.3 状態遷移

制御側とモデム側それぞれについて、図 5-10および図 5-11に状態遷移のフローチャートを示す。

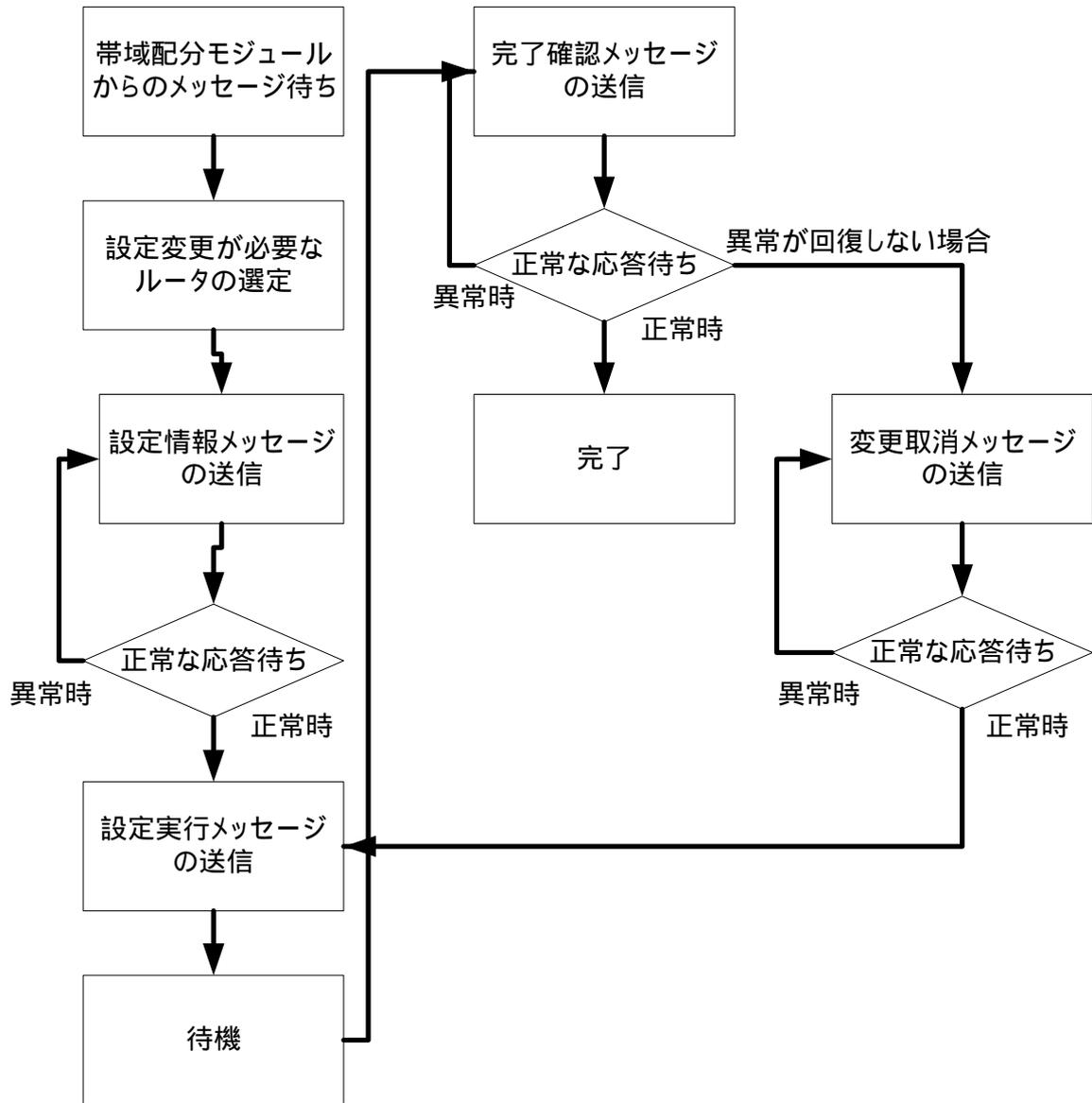


図 5-10 制御側の状態遷移図

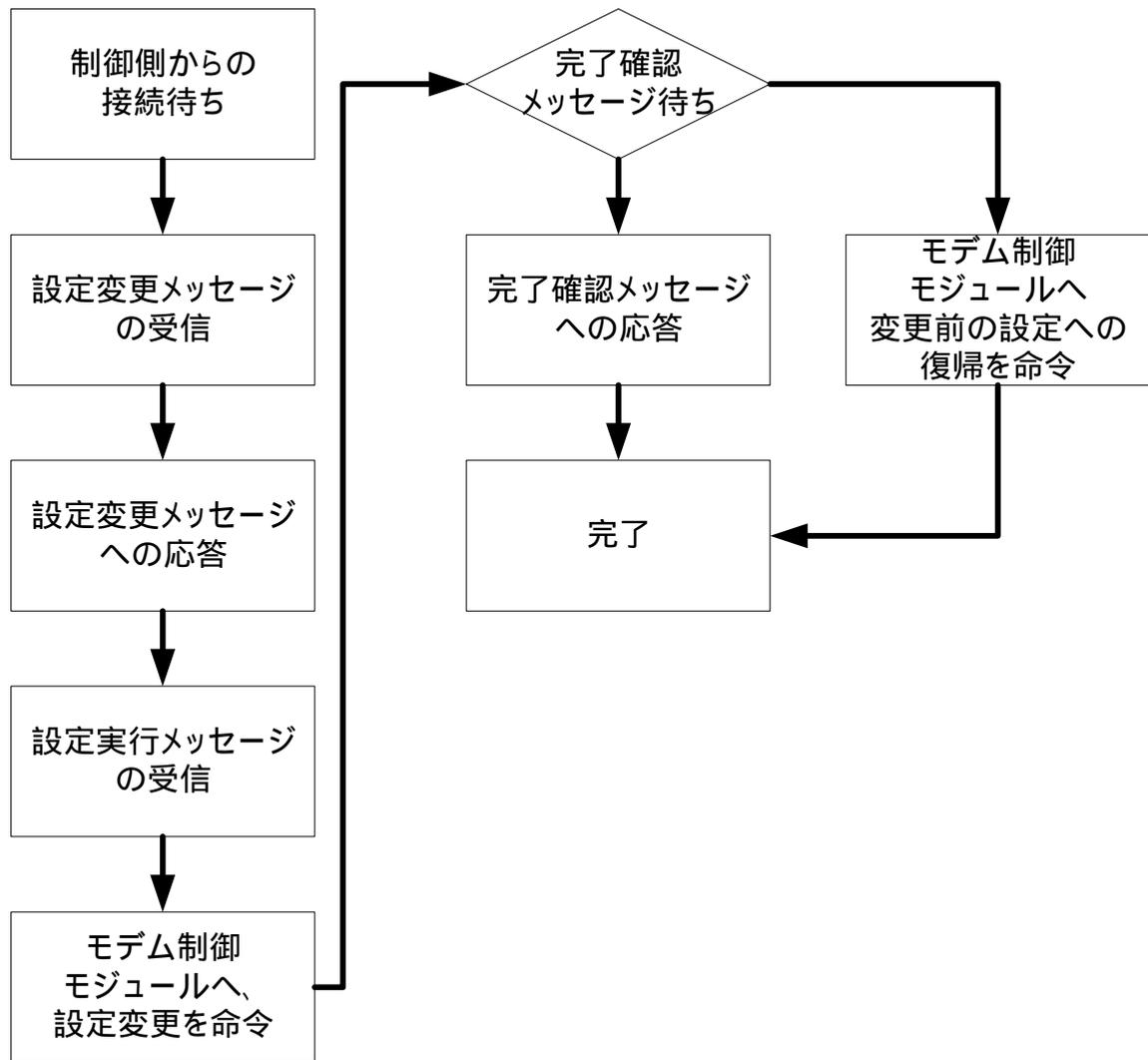


図 5-11 モデム側の状態遷移図

## 5.6 電波状態取得モジュール

本モジュールは、PC からスペクトラムアナライザを制御する機能を有し、ハブ局内に設置される PC に組み込まれる。GPIB インタフェースカードを持った PC と、スペクトラムアナライザの GPIB ポートを接続し、データの交換を行う。PC とスペクトラムアナライザの接続を、図 5-12 に示す。

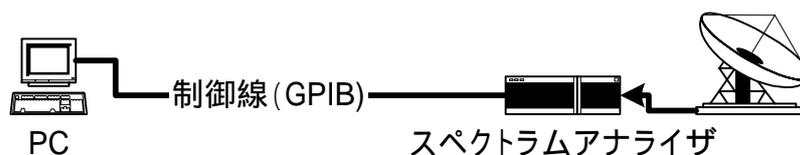


図 5-12 モデムとスペクトラムアナライザの接続

PC はインターネットに接続されており、5.5 で述べた同じハブ局内の遠隔操作モジュールから、電波状態の問い合わせを受信する。そして、GPIB ポートを通してスペクトラムアナライザからデータを取得し、遠隔操作モジュールに通知する。

# 第6章

## 実装

本章では、第5章で述べた衛星通信回線制御機構の実装について述べる。

### 6.1 実装環境

実装は、FessBSD 4.3-RELEASE [10]、および、Windows Me [11] 上で行った。電波状態取得モジュールのみ Windows Me 上で実装し、その他のモジュールは FreeBSD 上で実装した。

また、実際の衛星通信回線の代わりに、Ethernet で構築したエミュレート環境を使用した。

### 6.2 トラフィック測定モジュールの実装

本モジュールは、各地球局のルータ PC で動作するソフトウェアであり、トラフィック測定部と測定結果送信部の二つの部分から成る。トラフィック測定部は、FreeBSD カーネルのデータリンク層ルーチンを改造することによって実装した。測定結果送信部は、ユーザ空間で実装した。

#### 6.2.1 トラフィック測定部

トラフィック測定部は、カーネル内で実装した。

カーネル内でインタフェースの情報を保持している `ifnet` 構造体と、このデータの操作を行うための `ifreq` 構造体に、トラフィック量を保持するための変数を追加した。そして、インタフェース `output` 関数の最後の部分を、`queue` に入るパケットのサイズをこの変数に加算するよう改造した。また、衛星回線エミュレート環境で動作させるため、`net/if_ethersubr.c` の `ether_output` 関数の改造を行った。

また、`ifnet` 構造体に格納されるトラフィック量データの読み出し、およびリセットのた

めに、`ioctl` ルーチンを利用した。このため、`sys/sockio.h` に制御用のメッセージを追加した。これを表 6-1に示す。`SIOCSHOGE` は、変数を0にリセットするために利用し、`SIOCGHOGE` は、変数の値を取得するのに利用する。また、`net/if.c` の `ifioctl` 関数を改造した。

表 6-1 追加した `ioctl` 値

<code>#define SIOCSHOGE</code>	<code>_IOW('i', 57, struct ifreq)</code>
<code>#define SIOCGHOGE</code>	<code>_IOWR('i', 58, struct ifreq)</code>

### 6.2.2 測定結果送信部

測定結果送信部は、ユーザ空間に実装した。

30秒おきに、トラフィック計測の対象とするインタフェースの、トラフィック量格納変数からデータを取得する。そして、変数を0にリセットする。取得したデータは、図 5-2で示したメッセージフォーマットにより、ハブ局側 PC の帯域配分モジュールに送信される。

また、実際の計測結果と異なる任意のトラフィック量情報を、帯域配分モジュールに送信する機能も実装した。この機能は、第7章で述べる評価の際に利用する。

### 6.2.3 設定

本モジュールの設定は、設定ファイルに情報を記述することにより行われる。本モジュールは、次に挙げる項目を設定できる。設定ファイルの例を表 6-2に示す。

- 自分のルータ番号 (`MY_ID`)
- トラフィック測定の対象とするインタフェース (`IF`)  
ここで、`DEBUG` と指定すると、ファイルから偽の測定結果を読み込み、送信する。
- 情報送信先の IP アドレス (`DESTINATION`)

表 6-2 トラフィック測定モジュールの設定ファイル例

<code>MY_ID=1</code>
<code>IF=ed0</code>
<code>DESTINATION=192.168.1.1</code>

## 6.3 帯域配分モジュールの実装

本モジュールは、ハブ局の制御 PC で動作するソフトウェアとして実装した。

本モジュールの設定は、設定ファイルに情報を記述することにより行われる。本モジュールは、次に挙げる項目を設定できる。設定ファイルの例を表 6-3に示す。

- 帯域配分を行う間隔(分) (INTERVAL)
- 配分可能な帯域の上限周波数と下限周波数(kHz) (FREQ)
- トラフィック量通知メッセージが一定時間検出されなかった場合、通信路に異常が発生したと見なすまでの時間(分) (EXPIRE)
- チャンネル番号 ([CHANNEL])

CHANNEL 行から、次の CHANNEL 行の間に、チャンネルごとの設定を記述する。

- 送信側モデム制御 PC の IP アドレスおよびルータ番号 (TX)
- 受信側モデム制御 PC の IP アドレスおよびルータ番号 (RX)

ただし、Point to Multipoint 型リンクの受信側の場合は、IP アドレスにマルチキャストアドレスを指定する。そのアドレスには、複数の受信側モデム制御 PC が参加する。この場合、1つのルータ番号で、複数の受信側モデム制御 PC を表す。

- チャンネルの最低帯域(kHz) (MIN)
- 手動設定の場合の中心周波数(kHz) (CENTER)
- 手動設定の場合の帯域幅(kHz) (RATE)

表 6-3 帯域配分モジュールの設定ファイル例

```
INTERVAL=1440
FREQ=70000-50000
EXPIRE=5
[CHANNEL=1]
TX=1-192.168.1.1
RX=2-192.168.1.2
MIN=64
[CHANNEL=2]
TX=3-192.168.1.5
RX=4-192.168.1.6
CENTER=55000
RATE=100000
```

## 6.4 モデム制御モジュールの実装

本モジュールは、各地球局のモデム制御 PC で動作するソフトウェアとして実装した。

本モジュールの設定は、設定ファイルに情報を記述することにより行われる。本モジュールは、5.4.2で述べた通り、送信帯域幅と空中線電力の組み合わせを設定できる。設定ファイルの例を表 6-3に示す。等号の左辺が帯域幅 (kHz)、右辺が空中線電力 (dBm)である。

また、本モジュールは、Comtech EF Data 社 [12] 製のモデムである SDM-300A と SDM-2020 を制御の対象として実装した。

表 6-4 モデム制御モジュールの設定ファイル例

```
64=-25
1536=-14
5000=-11
```

## 6.5 遠隔操作モジュールの実装

本モジュールは、5.5.1で述べた通り、制御PCで動作する部分と、ルータPCで動作する部分に分かれている。

**Point to Point** 型リンクの場合は两部分間の通信に TCP を利用した。また、**Point to Multipoint** 型リンクの場合は、制御 PC から受信側ルータ PC への通信には UDP のマルチキャストを、受信側ルータ PC から制御 PC への通信には TCP 使用した。

**Point to Multipoint** 型リンクでマルチキャストを利用したのは、規模性を確保するためである。**Point to Multipoint** 型リンクの場合、受信局が増加しても必要帯域幅は変わらないため、受信局を大量に設置できる。多数の受信局に対して、同一の制御情報を送信するには、マルチキャストを用いると効率が良い。

本モジュールの設定は、設定ファイルに情報を記述することにより行われる。

### ● 制御 PC 側の設定

制御 PC 側で設定できる項目は、ルータ番号と IP アドレスの組み合わせである。**Point to Multipoint** 型リンクの場合は、IP アドレスにマルチキャストアドレスを指定する。

設定ファイルの例を表 6-5に示す。

表 6-5 遠隔制御モジュールの設定ファイル例1

```
1=192.168.1.1  
2=192.168.1.2
```

### ● ルータ PC 側の設定

ルータ PC 側で設定できる項目は、制御 PC の IP アドレスと、自分のルータ番号である。**Point to Multipoint** 型リンクの場合は、ルータ番号の代わりに、自分が所属するルータグループの番号を指定する。

設定ファイルの例を、表 6-6に示す。

表 6-6 遠隔制御モジュールの設定ファイル例2

```
MY_ID=1  
PARTNER_IP=192.168.0.1
```

## 6.6 電波状態取得モジュールの実装

本モジュールは、ハブ局に設置する、スペクトラムアナライザを接続した PC 上で動作するソフトウェアとして実装した。6.1で述べたとおり、OS には Windows Me を用いた。これは、PC の GPIB インタフェースカードのデバイスドライバ、および、開発用ライブラリが、Microsoft Windows 用しか発売元から提供されていないためである。

GPIB ポート経由で、スペクトラムアナライザを制御するライブラリ関数を用いて、スペクトラムアナライザから電波の状態を取得する。そして、同じハブ局内の遠隔操作モジュールからの問い合わせに応じて、取得したデータをインターネット経由で送信する。

# 第7章

## 評価

本章では、第5章・第6章で述べた衛星通信回線制御機構の評価について述べる。

### 7.1 評価環境

本機構の評価のため、図 7-1および図 7-2に示すネットワークを構築した。評価項目に応じて、使い分けをした。

#### 7.1.1 スター型トポロジーの評価環境

図 7-1のネットワークは、スター型の衛星通信回線をエミュレートする実験環境である。PC0がハブ局のルータ、PC1・2がその他の地球局のルータ、PC3はハブ局の制御 PC の役割を、それぞれ持つ。

PC0と PC1・PC2間は、モデムを経由して接続してある。また、ルータ PC とモデムの間は、データ回線の他に、モデム制御用として RS232C でも接続してある。PC0と PC1・2間は、netmask が30bit のネットワークとなっており、Point to Point 型の接続をエミュレートしている。PC0と PC3は、Ethernet で接続されている。

各 PC の OS には、FreeBSD 4.3-RELEASE を用いた。

この評価環境と、実際のネットワークとの相違点は、衛星利用の有無である。この実験環境では、衛星通信回線を用いず、ハブ局のモデムと他の地球局のモデムを同軸ケーブルで直結した。

以下、各 PC の役割を述べる。

- PC0

ハブ局をエミュレートしている。図 5-1で示したネットワークにおける、ハブ局側のルータ PC2台・モデム2台の役割を受け持つ。

トラフィック測定モジュール×2、遠隔操作モジュール×2、モデム制御モジュール×2、モデムエミュレータ×2が組み込まれる。

- PC1・2

ハブ局以外の地球局をエミュレートしている。図 5-1で示したネットワークにおける、地球局側のルータ PC・モデムの役割を受け持つ。

トラフィック測定モジュール、遠隔操作モジュール、モデム制御モジュール、モデムエミュレータが、それぞれ一つずつ組み込まれる。

- PC3

ハブ局の帯域配分用制御 PC をエミュレートしている。  
遠隔操作モジュール、帯域配分モジュールが組み込まれる。

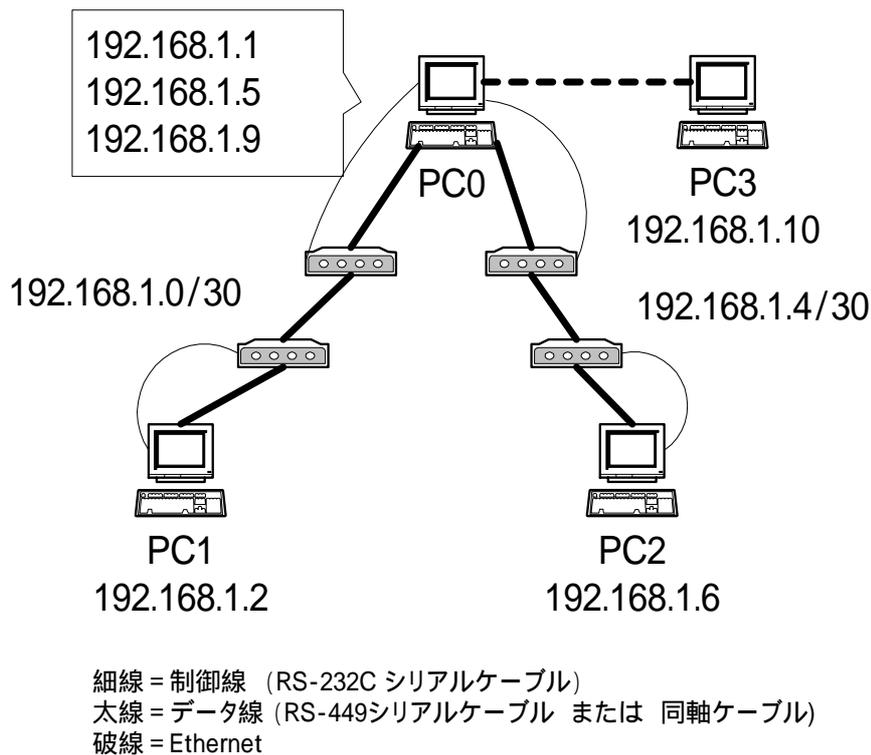


図 7-1 Point to Point 型テストベッドネットワーク・トポロジー図

以下、本ネットワークで使われるチャンネルの定義を表 7-1に示す。

表 7-1 実験ネットワークのチャンネル一覧

チャンネル名	始点	終点
チャンネル1	PC0 (192.168.1.1)	PC1 (192.168.1.2)
チャンネル2	PC0 (192.168.1.5)	PC2 (192.168.1.6)
チャンネル3	PC1 (192.168.1.2)	PC0 (192.168.1.1)
チャンネル4	PC2 (192.168.1.6)	PC0 (192.168.1.5)

### 7.1.2 Point to Multipoint 型トポロジーの評価環境

図 7-2のネットワークは、Point to Multipoint 型衛星通信回線の実験環境である。各 PC の役割は、7.1.1の環境と同じである。

PC0とPC1・PC2間は、衛星通信回線と ethernet の2通りの経路で接続されている。モデムおよび JCSAT3号衛星を経由して接続してある。また、ルータ PC とモデムの間は、データ回線の他に、モデム制御用として RS232C でも接続してある。PC0・1・2の衛星回線部分は、netmask が29bitのネットワークとなっており、Point to Multipoint 型の接続となっている。PC0とPC3は、Ethernet で接続されている。

なお、衛星通信回線部分は PC0から PC1・2への片方向通信路であるが、UDLR 技術 [3] を用いて、双方向回線をエミュレートした。

各 PC の OS には、FreeBSD 3.5-RELEASE を用いた。

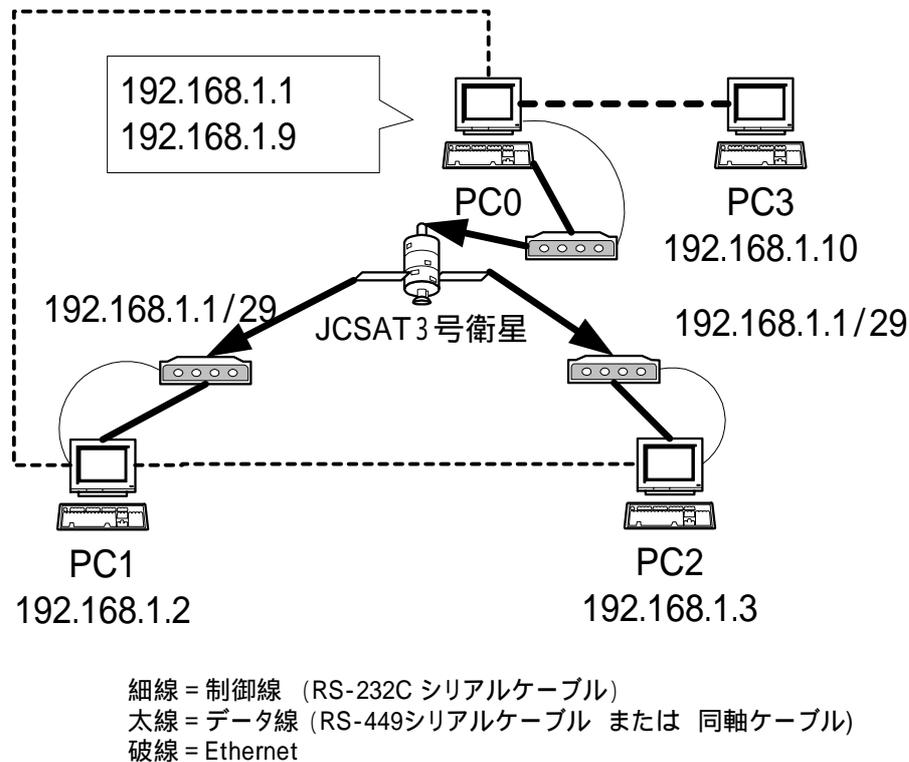


図 7-2 Point to Multipoint 型ネットワークテストベットポロジー図

## 7.2 無障害時の動作の評価

図 7-1で示したネットワーク上で、本機構が正しく動作することを検証した。

### 7.2.1 制限なし帯域配分

帯域配分に制限を設けない場合の動作を検証した。実験手順を、次に示す。

- ネットワークの全帯域を、20MHz とした。そして、初期状態では、各チャンネルに5 MHz ずつ帯域が割り当てられているものとした。
- 帯域配分間隔を10分に設定し、その間、PC1からPC2へ、ftpを用いてファイル転送を行った。転送が終了したら、PC2のファイルを削除し、再びPC1から送りなおした。
- 10分後、チャンネルの設定の変化を調べた。

次に、結果を示す。PC0・1・2に、それぞれ接続されているモデムの状態を示す。

- **PC0 (192.168.1.1)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 72.5MHz	TX Center: 70.001MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 0.002MHz
RX Center: 77.5MHz	RX Center: 75.001MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.998MHz

- **PC0 (192.168.1.5)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 82.5MHz	TX Center: 84.999MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.998MHz
RX Center: 87.5MHz	RX Center: 89.999MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 0.002MHz

- **PC1 (192.168.1.2)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 77.5MHz	TX Center: 75.001MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.998MHz
RX Center: 72.5MHz	RX Center: 70.001MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 0.002MHz

● PC2 (192.168.1.6)

実験開始時	10分経過後
TX Center: 87.5MHz	TX Center: 89.999MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 0.002MHz
RX Center: 82.5MHz	RX Center: 84.999MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.998MHz

上記の結果を、図で表すと、図 7-3のようになる。

モデムの状態、および、IP の通信状態から、チャンネル両端のモデムの設定が一致していることが確認できた。また、帯域配分に制限をかけていないため、CH1・CH4の帯域が、ほとんど無くなったことが確認できた。

しかし、CH1・CH4の帯域が0となることはなかった。これは、TCP の ACK パケットの影響と考えられる。

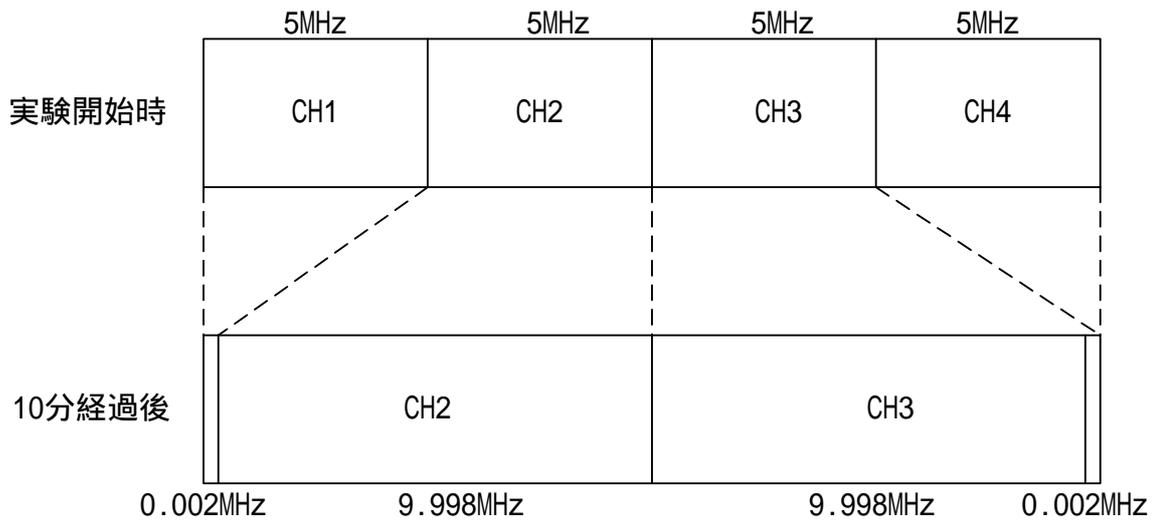


図 7-3 実験結果1

## 7.2.2 最低帯域保証つき帯域配分

5.3.2で述べた、最低帯域保証を設けた場合の動作を検証した。実験手順は、7.2.1の制限なし帯域配分の時と同じである。

今回は、各チャンネルに1MHzの最低保証帯域を設定した。

次に、結果を示す。PC0・1・2に、それぞれ接続されているモデムの状態を示す。

### ● PC0 (192.168.1.1)

実験開始時	10分経過後
TX Center: 72.5MHz	TX Center: 70.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 77.5MHz	RX Center: 75.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.0MHz

### ● PC0 (192.168.1.5)

実験開始時	10分経過後
TX Center: 82.5MHz	TX Center: 84.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.0MHz
RX Center: 87.5MHz	RX Center: 89.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

### ● PC1 (192.168.1.2)

実験開始時	10分経過後
TX Center: 77.5MHz	TX Center: 75.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.0MHz
RX Center: 72.5MHz	RX Center: 70.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

### ● PC2 (192.168.1.6)

実験開始時	10分経過後
TX Center: 87.5MHz	TX Center: 89.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 82.5MHz	RX Center: 84.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.0MHz

結果を、図で表すと、図 7-4のようになる。

今回は、最低帯域幅に制限を設けたため、CH1・CH4の帯域が1MHz 以下になることはなかった。最低帯域保証機能が正常に作動したことが確認された。

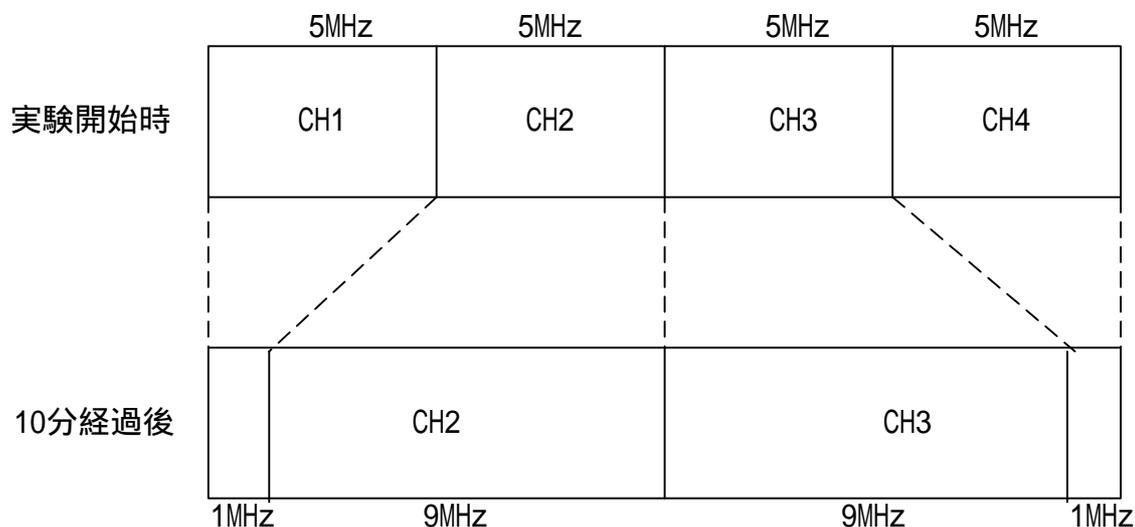


図 7-4 実験結果2

### 7.3 障害発生時の動作の評価

図 7-1で示したネットワーク上で、本機構が正しく動作することを検証した。

#### 7.3.1 Keep Alive 断絶時の動作

5.3.3で述べた、通信路に障害が発生し、keep alive が断絶した場合の動作を検証した。実験手順を、次に示す。

- ネットワークの全帯域を、20MHz とした。そして、初期状態では、各チャンネルに5 MHz ずつ帯域が割り当てられているものとした。
- 各チャンネルの最低保証帯域は1MHz とした。
- Keep Alive が3分間検出されない場合に、障害発生と見なすよう設定した。
- 帯域配分間隔を10分に設定し、その間、PC0から PC1へ、ftp を用いてファイル転送を行った。転送が終了したら、PC1のファイルを削除し、再び PC1から送りなおした。
- 5分後、PC0とPC2のネットワークの接続性を物理的に遮断した。
- 10分後、チャンネルの設定の変化を調べた。
- 15分後、PC0とPC2のネットワークの接続性を復旧させた。
- 20分後、チャンネル設定の変化を調べた。

次に、結果を示す。PC0・1・2に、それぞれ接続されているモデムの状態を示す。

● PC0 (192.168.1.1)

実験開始時	10分経過後	20分経過後
TX Center: 72.5MHz	TX Center: 74.5MHz	TX Center: 78.5MHz
TX Rate: 5.5MHz	TX Rate: 9.0MHz	TX Rate: 17.0MHz
RX Center: 77.5MHz	RX Center: 70.5MHz	RX Center: 87.5MHz
RX Rate: 5.5MHz	RX Rate: 1.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

● PC0 (192.168.1.5)

実験開始時	10分経過後	20分経過後
TX Center: 82.5MHz	TX Center: 82.5MHz	TX Center: 88.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 87.5MHz	RX Center: 87.5MHz	RX Center: 89.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

● PC1 (192.168.1.2)

実験開始時	10分経過後	20分経過後
TX Center: 77.5MHz	TX Center: 70.5MHz	TX Center: 87.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 72.5MHz	RX Center: 74.5MHz	RX Center: 78.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.0MHz	RX Rate: 17.0MHz

● PC2 (192.168.1.6)

実験開始時	10分経過後	20分経過後
TX Center: 87.5MHz	TX Center: 87.5MHz	TX Center: 89.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 82.5MHz	RX Center: 82.5MHz	RX Center: 88.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

結果を、図で表すと、図 7-5のようになる。

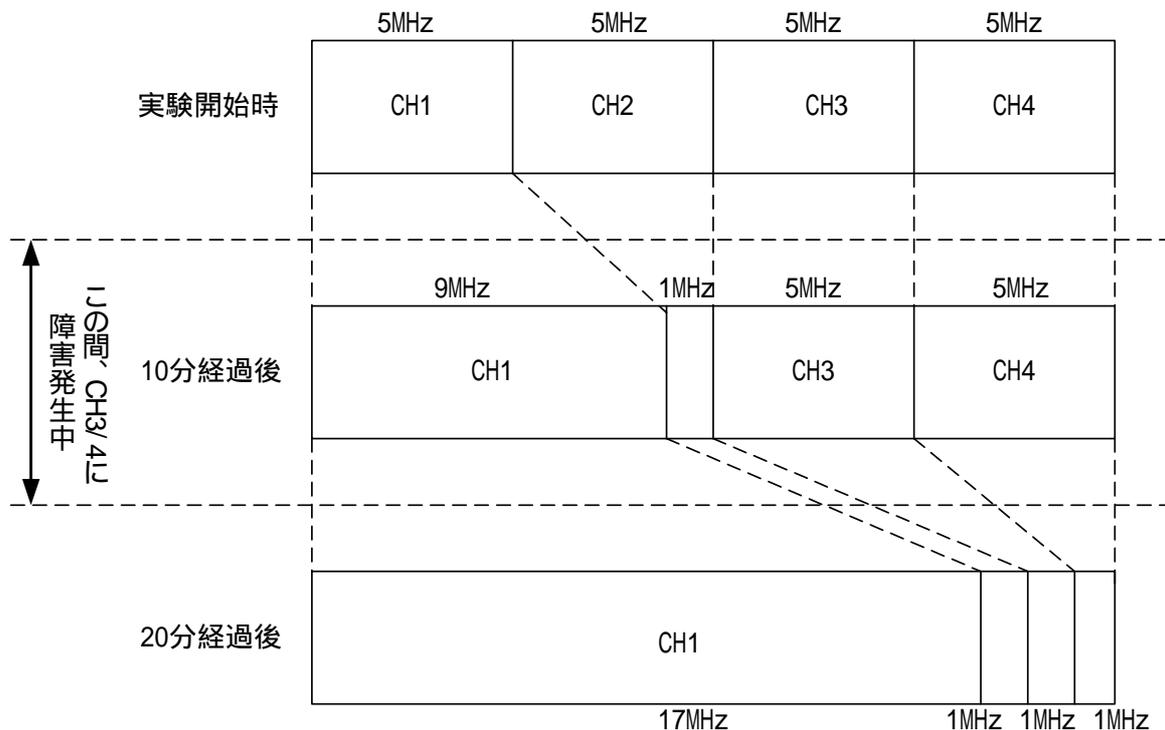


図 7-5 実験結果3

今回の実験では、5分～10分にかけて、CH4の keep alive が断絶する。CH4の障害を検知した帯域配分モジュールは、CH4の両端のルータである192.168.1.5および192.168.1.6の設定変更を見送る。そのため、CH4およびCH3の設定は変更されない。

15分経過後、通信路が復旧する。復旧後は、通常の設定変更が、CH3・CH4に対して行われたことが確認された。

今回の実験では、通信路の異常時に5.3.3で述べた通りの動作が行われたことを確認した。

### 7.3.2 設定変更に失敗した場合の動作

5.5.2で述べた、完了確認メッセージの交換に失敗した場合の動作を検証した。今回の実験では、PC2の遠隔操作モジュールに、完了確認メッセージを無視するよう、改造を施した。

7.2.2と同様に、PC1からPC2へ、ftpを行い、10分間待機した。その結果、下記の通り設定が変更された。

- **PC0 (192.168.1.1)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 72.5MHz	TX Center: 70.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 77.5MHz	RX Center: 75.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.0MHz

- **PC0 (192.168.1.5)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 82.5MHz	TX Center: 84.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.0MHz
RX Center: 87.5MHz	RX Center: 89.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

- **PC1 (192.168.1.2)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 77.5MHz	TX Center: 75.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 9.0MHz
RX Center: 72.5MHz	RX Center: 70.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 1.0MHz

- **PC2 (192.168.1.6)**

実験開始時	10分経過後
TX Center: 87.5MHz	TX Center: 89.5MHz
TX Rate: 5.0MHz	TX Rate: 1.0MHz
RX Center: 82.5MHz	RX Center: 84.5MHz
RX Rate: 5.0MHz	RX Rate: 9.0MHz

ここまでは、7.2.2の結果と同様である。しかし、PC2は完了確認メッセージを無視するため、帯域制御 PC である PC3は、PC2からの応答を受信できない。そして、PC3はPC2の設定変更が失敗したと判断し、PC0と PC1に対して、以前の設定に戻すよう通知した。

また、PC2も、完了確認メッセージを受信できないため、自ら設定に失敗したと判断し、以前の設定に戻った。

その結果、15分後には、全ての設定が実験開始時のものに戻った。

今回の実験では、設定変更失敗した際に、5.5.2で述べた通り、自動的に全チャンネルが変更前の設定に戻ることが確認された。

## 7.4 Point to Multipoint 型通信路における動作の評価

5.5で述べた遠隔操作モジュールの機能のうち、Point to Multipoint 型通信路において障害が発生した際の動作について、図 7-2で示したネットワーク上で検証した。実験手順を、次に示す。

- 6MHz の帯域幅で、PC0から PC1・2への送信を開始した。
- PC2が接続しているモデムを、アンテナから切り離した。これにより、PC2は、PC3から送信される制御情報を、衛星通信回線経由で受信不可能な状態となった。
- 5分後、帯域幅を4MHz に変更し、チャンネルの設定の変化を調べた。
- 6分後、もう一度チャンネルの設定の変化を調べた。
- その後、PC2をアンテナに接続し、受信状態を調べた。

次に、結果を示す。PC0・1・2に、それぞれ接続されているモデムの状態を示す。

### ● PC0 (192.168.1.1)

実験開始時	5分経過後	6分経過後
TX Center: 70.0MHz	TX Center: 70.0MHz	TX Center: 70.0MHz
TX Rate: 6.0MHz	TX Rate: 4.0MHz	TX Rate: 4.0MHz

### ● PC1 (192.168.1.2)

実験開始時	5分経過後	6分経過後
RX Center: 70.0MHz	RX Center: 70.0MHz	RX Center: 70.0MHz
RX Rate: 6.0MHz	RX Rate: 4.0MHz	RX Rate: 4.0MHz

### ● PC2 (192.168.1.3)

実験開始時	5分経過後	6分経過後
RX Center: 70.0MHz	RX Center: 70.0MHz	RX Center: 70.0Hz
RX Rate: 6.0MHz	RX Rate: 6.0MHz	RX Rate: 4.0MHz

5分経過後、PC3から、PC0・1・2に対して設定変更メッセージが送信されると、メッセージが到達可能である PC0・1の設定が変更された。PC2には、設定変更メッセージが到達しないため、設定変更到着確認メッセージが送信されない。5.5.1で述べたとおり、これを無視して PC0・1の設定が変更されたことが確認された。

6分経過後、アンテナから切り離されているにもかかわらず、PC2の設定が変更された。その後、PC2が接続しているモデムを、アンテナに接続すると、PC0との通信が正常に行われた。このことにより、衛星通信回線に障害が発生した際に、地上のインターネットを経由して制御情報の交換が行われることが確認された。

## 7.5 まとめ

本章の実験を通して、第5章で述べた設計が、正しく動作することが確認された。

7.1.1で述べたエミュレーション環境と実際の環境の大きな違いは、設定変更後の通信断絶である。エミュレーション環境では、モデム同士を同軸ケーブルで直接接続しているため、設定変更後すぐに通信状態が安定する。しかし、衛星通信回線では、設定変更後、回線状態が安定するまでに数秒かかる場合がある。もし、帯域の再配置間隔を1分に設定すると、60秒のうち数秒もの間、通信が断絶することになる。実際の衛星通信回線で本機構を利用する場合、再配置間隔時間の設定は、あまり短くしないよう留意する必要がある。

# 第8章

## 結論と今後の課題

本章では、本論文の結論と今後の課題について述べる。

### 8.1 結論

本論文では、衛星通信回線の特徴を示し、衛星通信回線が広域に分散した多地点間の接続、災害時のバックアップ回線として有用であることを述べた。

衛星通信回線をインターネット上の通信路に利用した場合に発生する問題点について論じた。地球局の遠隔操作、帯域制御の問題について述べ、この解決手法を示した。

そして、この手法の実現に必要な機構の設計を示し、実装を行った。本論文で提案する手法が有効であることを検証するため、テストベッドを構築し、評価を行った。これにより、提案する手法が有効であることを実証できた。

本論文では、インターネットを利用した地球局の遠隔制御、および、インターネット上のトラフィック量に応じた動的帯域配分を提案した。この機構を実現することによって、衛星通信回線をインターネット上の通信路に利用した場合の、帯域利用効率の改善と管理コストの削減が可能となった。本機構のうち地球局の遠隔制御については、インターネット上の通信路としての衛星通信回線以外にも、衛星通信全般に適用でき、管理コストの削減が可能である。また、無線設備の改造をすることなく導入可能なため、低コストでの導入可能である。

この手法を用いることにより、衛星通信回線を利用したインターネットにおいて、回線利用効率の向上と管理コストの削減が実現できる。

## 8.2 今後の課題

今後の課題として、下記の点が挙げられる。

- 本論文では、ユーザ認証やメッセージの暗号化など、セキュリティについては一切考慮していない。不正アクセスによる電波の誤発射などの事故は、絶対に発生させてはならない。本機構を実用化するためには、今後、セキュリティも十分に考慮した設計を行う必要がある。
- 本機構の全ての評価は、AI3 Project のネットワークに導入し、実際の衛星通信回線を用いて行う予定であった。しかし、一部の地球局の設備に不具合が見つかったため、本論文の執筆には導入が間に合わなかった。今後、AI3 Project で実際に利用し、評価と改善を進めていく。
- 本機構を実用化し、日常の運用に利用するためには、無線局免許状を取得する必要がある。そのためには、総務省および第1種電気通信事業者に、本機構が信頼できる衛星通信回線制御機構であることを承認してもらう必要がある。今後、総務省の免許担当部署、および JSAT 株式会社と話し合いを進め、免許状の正式取得を目指していく。

# 謝辞

本研究を進めるにあたりご指導を賜りました慶應義塾大学環境情報学部教授村井純博士、同学部助教授楠本博之博士、奈良先端科学技術大学院大学情報科学研究科教授山口英博士に深く感謝いたします。また、絶えず貴重なご助言とご指導を頂きました慶應義塾大学環境情報学部助教授中村修博士、JSAT株式会社開発本部技術開発部課長役泉山英孝氏に心より御礼申し上げます。

本研究を進める多くの段階におきまして終始貴重なご助言を頂きました慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科後期博士課程の西田視磨氏に深く感謝いたします。

また、本論文の執筆に当たりまして常に励ましとご協力を頂きました慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科モバイル広域ネットワークプロジェクト、JSAT株式会社、Asian Internet Interconnection Initiatives Project、WIDE Project の皆様に感謝いたします。

# 参考文献

- [1] WIDE Project ホームページ: <http://www.wide.ad.jp/>
- [2] Asian Internet Interconnection Initiatives Project ホームページ:  
<http://www.ai3.net/>
- [3] E. Duros, W. Dabbous, H. Izumiyama, N. Fujii, Y. Zhang. "A Link-Layer Tunneling Mechanism for Unidirectional Links", RFC3077, March 2001.
- [4] Norman Abramson, "Development of the ALOHANET", IEEE Trans. On Inform. Theory, vol.IT-31, pp.119-123, March 1985.
- [5] ALOHA Networks, Inc. ホームページ: <http://www.alohonet.com/>
- [6] 社団法人電波産業会 「衛星通信における可変利用帯域制御技術を利用した周波数有効利用技術に関する調査報告書」、2001年3月
- [7] 登坂章弘 「インターネットのための衛星通信制御機構の構築」、慶應義塾大学大学院政策・メディア研究科修士論文、1996年1月
- [8] Postel, J. "Internet Protocol", RFC 791, September 1981.
- [9] Postel, J. "Transmission Control Protocol", RFC 793, September 1981.
- [10] FreeBSD ホームページ: <http://www.freebsd.org/>
- [11] Microsoft Windows ホームページ: <http://www.microsoft.com/windows/>
- [12] Comtech EF Data 社 ホームページ: <http://www.comtechefdata.com/>