

宇宙航空研究開発機構特別資料

JAXA Special Publication

21GHz帯高度放送衛星システムに関する研究

日本放送協会・宇宙航空研究開発機構

2006年3月

宇宙航空研究開発機構

Japan Aerospace Exploration Agency

目次

| | | |
|-----|----------------------------------|-----|
| 第1章 | はじめに | 1 |
| 第2章 | 21GHz帯高度放送衛星ミッション | 4 |
| 2.1 | システム概要 | 4 |
| 2.2 | 21GHz帯衛星放送実現に向けた実験衛星打ち上げ提案の概要 | 7 |
| 2.3 | ミッション要求 | 9 |
| 第3章 | 実証ミッション機器 | 18 |
| 3.1 | 中継器の構成 | 18 |
| 3.2 | 21GHz帯フェーズドアレーアンテナ | 19 |
| 3.3 | 電力増幅器 | 24 |
| 3.4 | BFN | 28 |
| 3.5 | フィルタ | 28 |
| 3.6 | システム要求条件の検討 | 29 |
| 3.7 | テレメトリ・コマンド | 31 |
| 3.8 | ミッション機器の規模の概算 | 34 |
| 第4章 | 実験システム | 37 |
| 4.1 | 全体システム構想案 | 38 |
| 4.2 | 衛星システム構想案 | 39 |
| 4.3 | 地上システム構想案 | 44 |
| 4.4 | 打上げシステム構想案 | 48 |
| 4.5 | 衛星コンフィギュレーションの検討 | 51 |
| 4.6 | 衛星姿勢制御機能の検討 | 64 |
| 4.7 | 衛星TT&C機能の検討 | 67 |
| 4.8 | 実証ミッション機器の排熱 | 73 |
| 第5章 | DRTSによる降雨減衰データ取得・解析 | 82 |
| 5.1 | DRTSのテレメトリ電波を用いた衛星電波伝搬データの取得 | 82 |
| 5.2 | 実測された12GHz帯降雨減衰とITU-R法による推定結果の比較 | 86 |
| 5.3 | DRTSの実運用における降雨減衰の影響 | 104 |

第6章 まとめと課題 108

第7章 おわりに 111

付録

共同研究メンバー

第1章 はじめに

日本放送協会（以下、NHK）と宇宙航空研究開発機構（以下、JAXA）とは、平成16年10月13日から平成18年3月31日までの間、「21GHz帯高度放送衛星システムに関する研究」を共同で行った。

共同研究の課題は以下の通りである。

- ① 21GHz帯高度放送衛星ミッション要求条件の設定
- ② 21GHz帯高度放送衛星実証ミッション機器の設計検討
- ③ 21GHz帯高度放送衛星実証ミッション機器用衛星システムの設計検討
- ④ データ中継技術衛星（DRTS）による降雨減衰に係るデータ取得・解析

共同研究の目的は、超高精細映像や多チャンネルHDTV放送等次世代衛星放送の実現に向け、その実証システムを具体化することである。

共同研究の内容は、21GHz帯高度放送衛星のミッション及びシステムの成立性を踏まえ、事前実証システムの設計検討を行うこと、特に、新たなフェーズドアレイ方式によるビーム形成や降雨減衰補償等の技術開発課題を検討すること、また、基礎データとなるDRTSによる降雨減衰データの取得と解析を行うことである。

共同研究課題の作業分担を表1-1に示す。

表1-1 共同研究の作業分担

| 作業項目 | NHK | JAXA |
|---------------------------------------|-----|------|
| (1) 21GHz帯高度放送衛星ミッション要求条件の設定 | ◎ | ○ |
| (2) 21GHz帯高度放送衛星実証ミッション機器の設計検討 | ◎ | ○ |
| (3) 21GHz帯高度放送衛星実証ミッション機器用衛星システムの設計検討 | ○ | ◎ |
| (4) DRTSによる降雨減衰に係るデータ取得・解析 | ◎ | ◎ |

◎は主担当、○は副担当を示す。

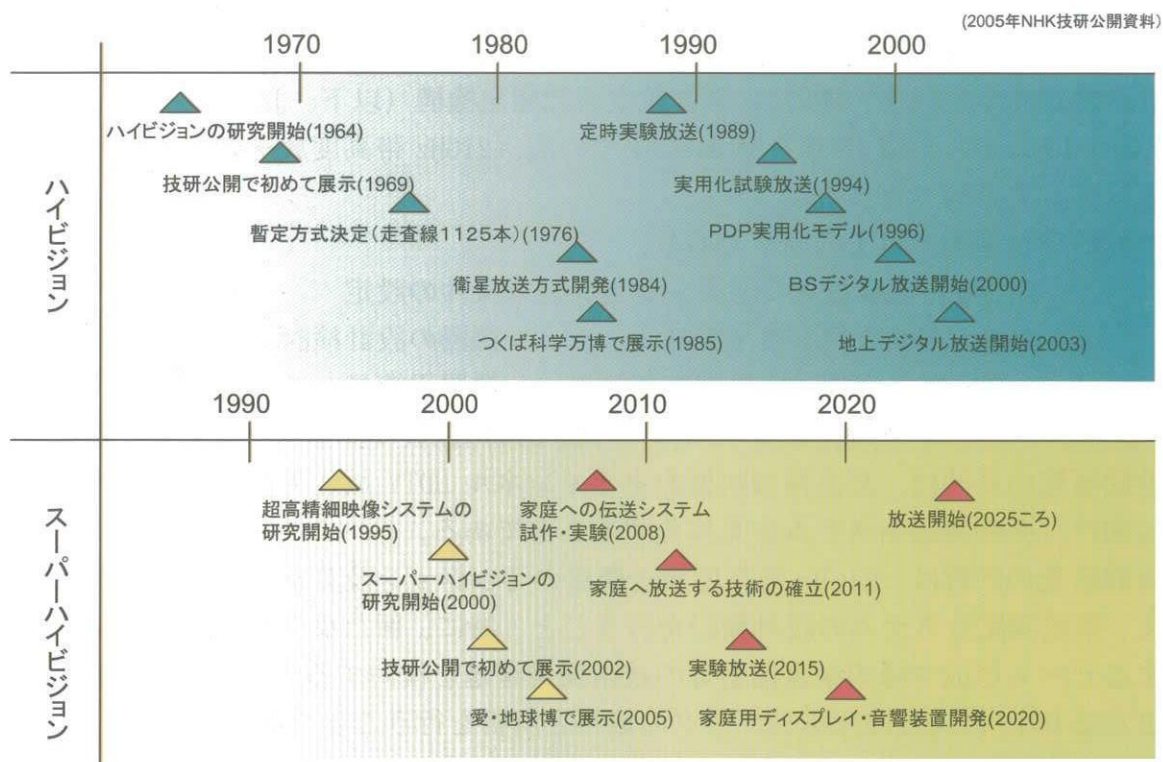


図 1-1 ハイビジョンの開発過程とスーパーハイビジョンの実現スケジュール

NHK では、次世代の映像メディアである広視野・大画面の超高精細映像システム（スーパーハイビジョン）を研究・開発している。スーパーハイビジョンは「究極の高臨場感システム」の実現を目的としており、その映像はハイビジョンの16倍の画素数を持っている。21GHz帯衛星放送システムは、スーパーハイビジョンを将来家庭へ配信するための有力な手段の一つである。図 1-1 に、NHK が想定するスーパーハイビジョンの実現スケジュールを、ハイビジョンの開発過程と対比して示している。このスケジュールによれば、2015年頃実験放送、2025年頃実用放送開始となっている。2015年頃に実験放送を開始するためには、2012年頃までに実験放送衛星が打ち上げられることが望まれる。

本報告書では、第2章で、21GHz帯高度放送衛星ミッションについて、システム概要とミッション要求を述べる。ミッション要求としては、200～400Mbps程度の情報レートをもつこと、放送衛星は全国ビームに加えて、増力ビームを有すること、増力ビームは13dB程度の降雨減衰を補償し、降雨域に応じて場所を変えられることなどである。

第3章で、実証ミッション機器について、機器構成（系統図など）、アンテナ（方式など）、TWT・BFN（ビームフォーミングネットワーク）・フィルタ（出力電力・効率など）、システム設計（回線設計など）、ミッション機器のパラメータ表を示す。(1) 反射鏡開口径3m、アレー32素子、(2) 反射鏡開口径5m、アレー64素子、(3) 反射鏡

開口径 4m、アレー188 素子の 3 ケースについて、衛星搭載受信アンテナ、受信機、ドライバアンプ、給電アレー部、送信アンテナ部、制御部、その他の項目ごとに、重量、消費電力、発熱量を算定した結果を示す。特に、4m、188 素子のケースでは、重量約 280kg、消費電力約 2kW、発熱量約 1.5kW となることを示す。

第 4 章で、21GHz 帯高度放送衛星実証ミッション機器用衛星システムの設計検討結果として、地上系/運用の観点等からの要求事項、ミッション機器に必要と考えられる TLM/CMD(テレメトリ/コマンド)の項目、データ量、送信頻度等について述べる。また、TLM/CMD(テレメトリ/コマンド)に関しては世界の宇宙開発機関の共通仕様である HK-TLM/CMD について述べる。

第 5 章で、DRTS(データ中継試験衛星)のビーコン電波 (19.845 GHz) を利用した降雨減衰データを示す。観測設備の受信ダイナミックレンジは約 30 dB であり、およそ年間時間率 0.01%程度までの降雨減衰の観測が可能である。BS(12GHz 帯)の降雨減衰と DRTS の降雨減衰を同発生確率値で対応させ、ITU-R による推定結果と比較を行った結果、概ね ITU-R の推定結果と観測結果は一致していることを述べる。また大気吸収による受信レベル低下、シンチレーションについて述べる。

第2章 21GHz 帯高度放送衛星ミッション

本章では、21GHz 帯高度放送衛星ミッションについて、システム概要とミッション要求を述べる。ミッション要求としては、200~400Mbps 程度の情報レートをもつこと、放送衛星は全国ビームに加えて、増力ビームを有すること、増力ビームは 13dB 程度の降雨減衰を補償し、降雨域に応じて場所を変えられることなどである。

2.1 システム概要

2.1.1 21GHz 帯放送衛星システムと研究課題

NHK 技研では、ポストハイビジョンとして、走査線数 4000 本を超える高精細度映像（スーパーハイビジョン）の研究を進めている。スーパーハイビジョンは映像が極めて高精細度であることに加えて、視聴者に高臨場感と没入感を与えるとともに、さらに、極薄型・軽量パーソナル画面での放送を提供することができる新しい次世代のメディアとして期待されている。このスーパーハイビジョン信号は、非圧縮のままでは 50Gbps 程度の伝送速度が必要であるが、符号化技術によりその伝送速度は 200~400Mbps 程度にまで圧縮できると予測されている。

しかし従来の放送用に割り当てられている周波数帯域では、このような高速な信号を伝送するための十分な帯域幅をもつチャンネルが確保できない。日本を含む ITU-R Region 3 地域には、21GHz 帯衛星放送用として、21.4~22.0GHz の周波数帯（帯域 600MHz）が割り当てられている。この周波数帯は広帯域のチャンネルを確保できる可能性がある。

衛星伝送に適した PSK 変調方式と誤り訂正方式により、200~400Mbps のスーパーハイビジョン信号は帯域 600MHz を用いて 2~3 チャンネルの放送が可能となる。

スーパーハイビジョン信号を衛星経由で放送局から家庭まで放送する場合の信号系統図を図 2.1-1 に示す。

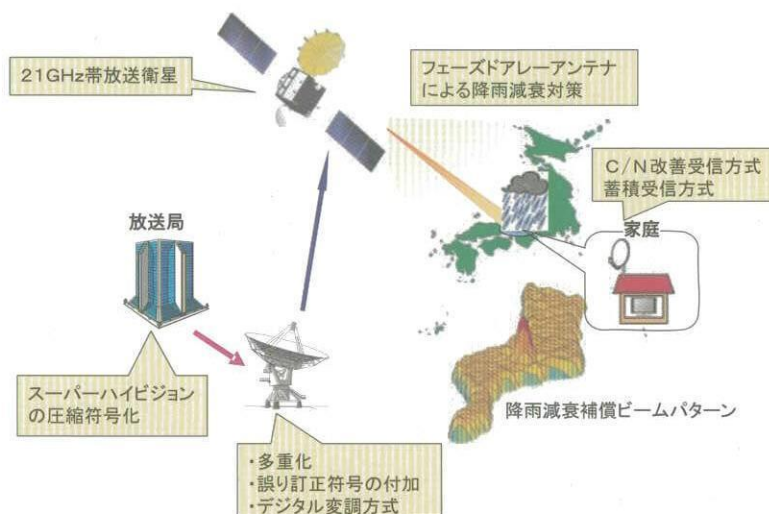


図 2.1-1 21GHz 帯放送衛星システムのイメージ

図 2.1-1 には、それぞれの区間における技術課題を示したが、21GHz 帯スーパーハイビジョン衛星放送を実現するための研究課題を、伝送技術ごとにまとめて表 2.1-1 に示す。

表 2.1-1 21GHz 帯衛星放送の研究課題

| 伝送技術 | 概要、課題、パラメータ例 |
|--------|---|
| 情報源符号化 | (1) スーパーハイビジョン信号の高圧縮化(200-400Mbps) |
| 伝送路符号化 | (1) 多重化 (2) 変調方式 (QPSK, 8PSK など) (3) 誤り訂正方式(RS, 畳み込み, トレリスコード, ターボ積符号) (4) インターリーブ (5) 蓄積受信放送用伝送方式 |
| 放送衛星 | (1) フェーズドアレイアンテナ (2) 中継器 (熱処理, モジュール化) (3) 増幅器の低コスト化 (4) 増力ビーム形成制御情報の生成 (5) 衛星間の周波数共用 (6) 不要発射の抑制(電波天文保護) (7) サービス時間率 (現行 BS デジタル放送と同等を目標) (8) 降雨減衰時間変化のモデル化 |
| 受信機 | (1) 広帯域受信機(帯域 200-300MHz 程度) (2) 蓄積型受信機(大容量蓄積デバイス搭載) (3) 低雑音化 (NF=1.5dB 以下) (4) スーパーハイビジョン用ディスプレイ |

21GHz 帯の降雨減衰量は 12GHz 帯のそれに比べ dB 値で約 3 倍と大きく、大きな降雨減衰の発生する頻度が増大する。降雨によるサービス時間率の低下を抑えて、家庭用小型受信アンテナによる 21GHz 帯衛星放送受信を可能にするためには、21GHz 帯降雨減衰対策が不可欠である。

ITU-R P618-8 の方法で算出した 21GHz 帯の降雨減衰量と時間率の関係を図 2.1-2 に示す。この図から、年間時間率 0.1%の降雨減衰量は 11.1dB である。これに、大気吸収および雲による吸収やシンチレーションを加えて、年間時間率 0.1%の減衰量を算出すると 13.9dB となる。

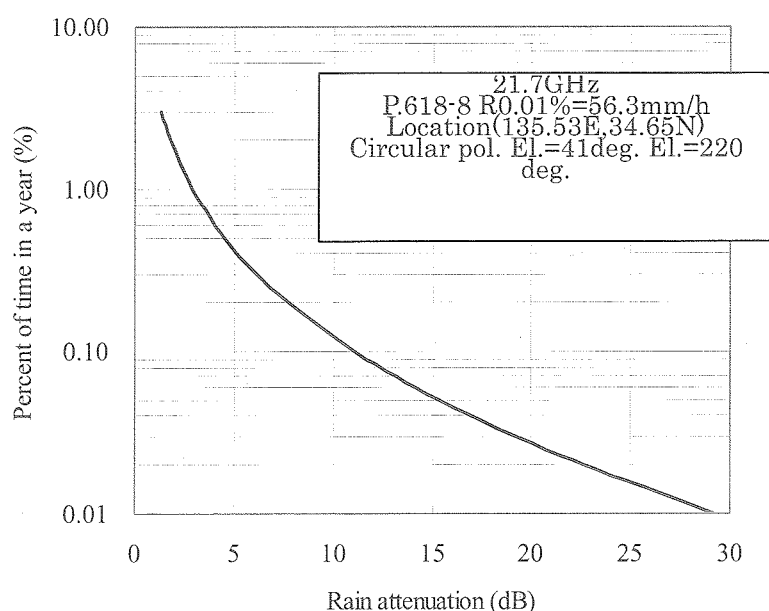


図 2.1-2 21GHz 帯の降雨減衰量と時間率の関係

降雨減衰補償技術として NHK 技研では、21GHz 帯における降雨減衰特性を分析すると共に、降雨地域のみ送信する電波の強さを増強するフェーズドアレーアンテナの研究・開発を進めている。また、蓄積受信に適した伝送方式や強力な誤り訂正方式ならびに多重化方式の研究も行っている。

2.1.2 21GHz 帯放送衛星搭載フェーズドアレーアンテナによる降雨減衰補償技術のコンセプト

21GHz 帯降雨減衰補償技術を開発するため、降雨の性質や降雨減衰特性に関する研究を進めている。全国規模で入手が可能な 10 分雨量データを用いて、1 時間雨量と最大 10 分雨量の関係を分析し、最大 10 分雨量の分布に地域差があること、また、同じ 1 時間雨量でも発生する降雨減衰の大きさに地域差があることなどが明らかになってきた。さらに、過去 20 年間のアメダス 1 時間雨量データを用いて、降雨減衰補償が必要な降雨エリアの大きさに関する検討を行い、補償が必要な降雨減衰発生時間の約 8 割の時間では、補償対象のエリアは全サービスエリアの 10%に満たないことがわかった。これは、降雨の発生が比較的狭い範囲で発生することを示している。

図 1 に示した衛星放送システムはこのような降雨の性質に着目して、大きな降雨減衰を生じている地域のみ放射電力を増強するもので、日本全国にほぼ均一に電力を放射(全国ビーム)した上で、さらに降雨減衰が激しい地域に向けて増力した細いビーム(増力ビーム)を放射するシステムである。晴天時は全国ビームのみであるが、増力ビームは降雨状況に応じて照射場所を移動し、また強さを変化させることも可能である。増力ビームを照射する地域が狭い場合には増力ビームをさらに増強しても、全国

ビームを含めた衛星送信電力の総量をほとんど変えることなく効率的に降雨減衰補償が可能であるという特徴を持っている。

2.2 21GHz 帯衛星放送実現に向けた実験衛星打ち上げ提案の概要

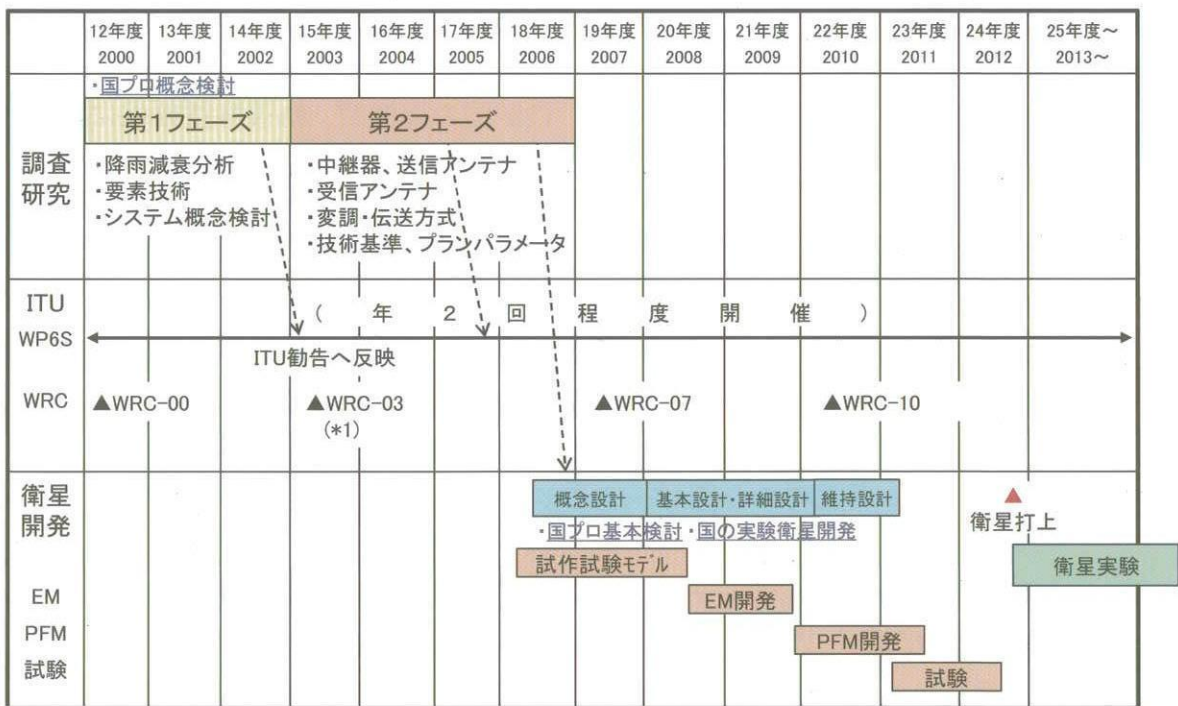
本節では、NHK におけるこれまでの研究成果を踏まえ、実験用放送衛星打ち上げに向けた提案を以下に述べる。

2.2.1 21GHz 帯放送衛星のマイルストーン

スーパーハイビジョンの実用放送開始を 2025 年頃、実験放送開始を 2015 年頃とするためには、2012 年頃の実験放送衛星打ち上げが望まれる。

21GHz 帯放送衛星実験までのマイルストーンを表 2.2-1 に示す。

表 2.2-1 21GHz 帯放送衛星実験までのマイルストーン



(*1) 21GHz帯放送衛星の研究をITUで行い、その結果をWRC-07に報告(議題6)。WRC-07において、WRC-10の議題とするか(プランか調整手続きか)を審議。

2.2.2 21GHz 帯放送実験衛星打ち上げで期待される効果

(1) 新しい放送メディアの開発の推進

- 21GHz 帯放送衛星の広帯域性、高速伝送を活かして、スーパーハイビジョンや立体ハイビジョンなどの新しい放送メディアの伝送として有効であることを示す。
- 衛星の最大の特長である広域性を活かして、情報格差のない衛星放送の実現

に資する。

- 伝送実験を行い、21GHz 帯衛星搭載フェーズドアレーアンテナによる降雨減衰補償機能の確認と実用衛星の開発に向けた検討資料とする。
- 大容量蓄積装置を想定したサービス（非リアルタイム放送）の基本パラメータを決定する（インターリーブ長、再送時間間隔など）。
- 21GHz 帯衛星放送の実用化につなげることで経済波及効果がある。

(2) 21GHz 帯放送衛星技術の実証

- 衛星搭載フェーズドアレーアンテナ技術や、降雨減衰分布を予測し、その空間的・時間的形状の変化に合わせてビームを制御する技術を確立する。
- この技術は他の衛星や無線アプリケーションに応用可能。

(3) 周波数使用条件に関する国際標準化への寄与

- 放送方式、衛星送信電力（地上電力束密度）、21GHz 帯電波伝搬モデル、周波数共用基準、アンテナパターンなどについて、ITU-R などの国際標準化に寄与できる。
- 21GHz 帯衛星放送を始めることで、わが国の周波数、軌道権益確保に貢献できる。

2.2.3 実験衛星による実証項目(案)

(1) フェーズドアレーとしての動作実験

21GHz 帯放送衛星のサービス時間率を確保するため、全国ビームを維持しつつ、降雨域に増力ビーム（1つ）を形成し、降雨減衰を補償する。増力ビームの位置は固定ではなく、国内の数ヶ所に向けられることを確認。

（増力ビーム形成時の全国ビームのレベルの変動、増力ビーム形状とシミュレーション結果の比較）

技術要素：衛星搭載フェーズドアレーアンテナ、高効率・高リニアリティ・小型・細径 TWT および TWT アレー、小型ビーム形成回路

(2) 降雨減衰補償システムを考慮した実験

放送衛星のビーム形成の制御を行うため、降雨減衰の生じた場所、降雨減衰の大きさをモニター、あるいは、予測し、放送衛星に情報を送る技術を開発する。

（降雨減衰予測 ⇒ ビーム形状の決定 ⇒ 衛星へのビーム形成命令 ⇒ ビーム形成 ⇒ 降雨減衰補償の流れを確認。）

技術要素：降雨減衰の面的・時間的分布予測、ビーム形状決定、ビーム形成技術

(3) 蓄積型放送システムを考慮した実験

長周期インターリーブ、タイムダイバーシティ（再送）の有効性を確認する。
技術要素：長周期インターリーブ、高効率・高速伝送方式

(4) 将来の放送サービスの実験

4000 本級超高精細映像や立体ハイビジョンが安定に伝送できることを確認する。

技術要素：広帯域伝送技術、高速信号処理技術、高効率圧縮符号化

(5) 周波数共用を考慮した実験

外国衛星や他の無線業務と共存が可能であることを確認する。

技術要素：低サイドローブアンテナ、帯域外発射抑止フィルタ

2.3 ミッション要求

21GHz 帯高度放送衛星システム開発のミッション構想、ミッション要求条件およびミッション機器搭載要求を整理した。

現時点では、実験放送から本放送までのシナリオを含め、放送サービスの規模や事業計画などの見通しが付かないため、打ち上げ時期や衛星の規模など未定の部分も含め実験衛星のミッション要求を中心に考慮すべき項目について整理した。

今回の検討にあたってシステム構成案の想定を行っているが、構想案の詳細は 4.1 節全体システム構想案を参照のこと。

2.3.1 ミッション構想案

(1) 目的

我が国における将来的な 21GHz 帯高度衛星放送サービスの実現を目指して、下記 2 項目を主目的とする実験運用を実施する。

- ▶ 実験衛星を用いた降雨減衰補償技術の実証。スーパーハイビジョン広帯域伝送技術の確立。
- ▶ 実験衛星を利用して全国エリアでのサービスの検証を行い、実用衛星システム構築のためのデータを蓄積する。

(2) 位置付け

本ミッションは、将来的な 21GHz 帯高度衛星放送サービス実施に先立つ実験運用段階と位置づけられる。

(a) 21GHz 帯高度衛星放送サービスの将来イメージ

本放送開始時のシステムイメージを下記に示す。

- ▶ 各家庭において、スーパーハイビジョン番組を視聴できる放送サービス。
- ▶ 同放送サービス用個別受信アンテナとして、直径 45cm サイズが利用可能。

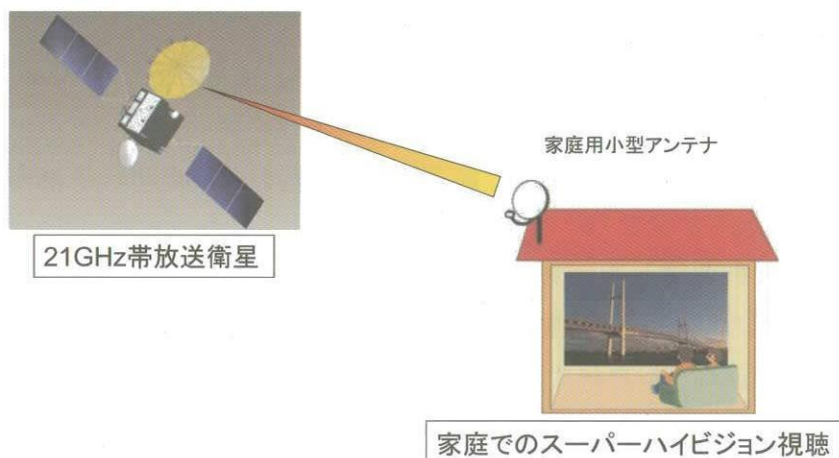


図 2.3-1 21GHz 帯衛星放送によるスーパーハイビジョンの家庭での受信イメージ

(b) 本放送用衛星の要求性能（機能要求項目）

以下の詳細については、現在検討中または未定である。

- ▶ 寿命
 - （現行 BS デジタル放送衛星の寿命は 10 年以上）
- ▶ 降雨補償エリアの大きさ（直径）
 - 放送アンテナの直径により補償エリアの最小直径が決まるが、今後の検討、実験結果に依存する。
- ▶ 降雨補償地域の数
 - 同上
- ▶ サービス時間率
 - 同上

(c) 21GHz 帯高度衛星放送サービスとの位置関係

実用放送衛星システムに対する実験衛星システムの位置関係を下記に示す。

- ▶ 機能要求について
 - ・実用放送衛星システム（2025 年頃の運用開始を想定）では、マルチチャンネル化やマルチ事業者による運用形態を採る可能性がある。
 - ・これに対して、実験衛星システムは基本機能の確認用モデルであり、上記要件（マルチチャンネル化、マルチ事業者）等への対応は想定しない。
- ▶ その他
 - ・ TBD

(3) 実施項目

本ミッションでは、下記項目を対象とした実験運用を実施する。

(a) 番組伝送技術

- 降雨減衰補償技術の実証。降雨情報に基づくビーム制御技術の確認
- スーパーハイビジョン広帯域伝送技術の確立
- 衛星伝送路特性の評価
- アンテナ熱歪検討

(b) 管制技術

- 地上管制局のダイバーシティー
- 運用技術
- 給電系情報（振幅・位相情報，TWT 出力など）の制御・監視

(c) 衛星電波の受信実験

- 個別受信
- 共同受信
- 日本各地での受信電界測定

(4) 運用期間

本ミッションでは、下記期間において実験運用を実施する。

(a) 打上時期

- 2012 年頃（2015 年：実験開始）

(b) 運用期間

- 5 年を想定

2.3.2 ミッション要求条件

(1) 実験衛星システム（21GHz 帯衛星放送用実験衛星システム）

(a) 基本要件

実験衛星システムに対する基本的な要求条件は下記のとおりである。

- 実証ミッション機器を搭載し、要求されたミッション運用が可能であること
- 地上システムとの RF 回線により、運用監視、制御が可能であること
- 打ち上げシステムを用いて、投入軌道（e. g. GT0）への打ち上げが可能であること

(b) 実証ミッション機器の搭載について

(ア) 概要

実証ミッション機器として現在、3 種類の反射鏡構成、開口径及び給電素子数

の組み合わせで搭載候補案が検討されている（詳細は3.2.1節「アンテナ構成」参照）。したがって、衛星システム側はこれら各候補案の衛星搭載インターフェース条件、衛星リソース要求、ミッション運用要求等に対応した、複数ケースの衛星システム設計が要求される。

(イ) 衛星搭載インターフェース条件

2.3.4節「衛星搭載インターフェース条件」参照

(ウ) 衛星リソース要求

2.3.5節「衛星リソース要求」参照

(エ) ミッション運用要求

2.3.6節「ミッション運用要求」参照

(2) 地上システム

(a) 基本要件

21GHz帯衛星放送用実験システムを構成する地上システムに対する基本的な要求条件は下記のとおりである。

- 実験衛星システムとのRF回線により、運用監視、制御が可能であること
- 実証ミッション機器とのRF回線により、ミッション運用が可能であること

(b) 既存地上システムの利用、機能分担について

地上システムの検討作業にあたって、整備、運用経費及び運用作業の合理化のため、下記のような既存地上システムの利用や機能分担を検討する必要がある。

- 現用衛星放送システムのフィーダーリンク局、追跡管制局等
- JAXAの衛星追跡管制ネットワーク（初期運用で利用する場合）等

(3) 打上げシステム

(a) 基本要件

実験衛星システムの軌道投入に用いる打上げシステムに対する基本的な要求条件は下記のとおりである。

- 実験システムが要求する打上げ(e.g. 時期、経費)が可能であること
- 実験衛星システムが要求する投入軌道(e.g. GT0)へ打上げ可能であること

(b) 打上げ手段の検討候補について

実験衛星システムの打上げ手段として、H-IIA等の我が国のロケットが検討ベースラインとなる。ただし、リスク管理等の観点から、諸外国の商業打上げ手段も

検討候補案となる。

2.3.3 ミッション機器搭載要求

ミッション機器搭載要求には、衛星搭載インターフェース条件、衛星リソース要求およびミッション運用要求がある。

2.3.3.1 衛星搭載インターフェース条件

(1) 機械的インターフェース

(a) 搭載質量

実証ミッション機器各候補案の搭載質量の詳細は、3.8節「ミッション機器の規模の概算」で検討する。(表 3.8-2 参照)

(b) 搭載位置及び寸法

実証ミッション機器の反射鏡と給電部の位置関係及び反射鏡寸法は、3.2.1 節「アンテナ構成」において検討する。

また、給電アレー部の形状案は3.3節「電力増幅器」において図3.3-5に示す。

(c) その他

上記以外の機械的インターフェースとして、今後、下記のような各要求事項の明確化が必要と考えられる。

➤ 視野要求

・ RF 機器（送受信アンテナ部、給電アレー部）の視野要求

➤ アライメント精度

・ 衛星バス及び各ミッション機器間のアライメント精度

(2) 熱的インターフェース

(a) 発熱量

実証ミッション機器各候補案の発熱量の詳細は、3.8節「ミッション機器の規模の概算」で検討する。この発熱量は、消費電力とともに「基本的な動作モード」時の値として検討する。(表 3.8-2 参照)

(b) 温度保持範囲

実証ミッション機器各候補案の内、給電アレー部増幅器 (TWTA、SSPA) の温度保持範囲に関する要求条件は、「従来の衛星搭載用 TWTA 及び SSPA と同様」である。

一例として下記の数値が想定される。

➤ 温度保持範囲 (ON 時)

- ・ 0～100℃
- 温度変動幅
- ・ ±25℃

(c) その他

上記以外の熱的インターフェースとして、今後、下記のような各要求事項の明確化が必要と考えられる。

- 温度安定性
 - ・ 給電アレー部増幅器の温度安定性 (e. g. 給電アレー部を構成する TWTA、SSPA 集合体全体の温度分布や時間変化)

(3) 電氣的インターフェース

(a) 一次電源

(7) 消費電力

実証ミッション機器各候補案の消費電力の詳細は、3.8節「ミッション機器の規模の概算」で検討する。この値は、発熱量と同じく、「基本的な動作モード」時の値として検討する。(表 3.8-2 参照)

(4) その他

上記以外の電源インターフェースとして、今後下記のような各要求事項の明確化が必要と考えられる。

- 供給電源
 - ・ 供給電源仕様 (e. g. 電圧幅、ON 時瞬時電流、姿勢喪失時対応)
- I/F 分岐点
 - ・ インターフェース分界点 (e. g. 電力分配機能、熱制御電力の所属)
- オードナンス制御
 - ・ 火工点 (e. g. アンテナ支持用) に対するオードナンス制御機能

(b) TLM/CMD 信号

詳細は、3.7節「テレメトリ・コマンド (TLM/CMD)」で検討する。

実証ミッション機器各候補案は多数の TWTA や SSPA を搭載して、その動作状態を準リアルタイム制御する。このため、TLM/CMD インターフェースに関する下記特有事項が想定される。

- 現用衛星に比べて、TLM 項目、取得頻度が増大
- 現用衛星に比べて、CMD 項目、配信頻度が増大。常時伝送を要求。

今後、この TLM/CMD インターフェースに関する、下記のような各要求事項の明確

化が必要と考えられる。

- TLM 要求
 - ・ 要求仕様 (e. g. タイプ、ch 数、レート) 及び対地上インターフェース
- CMD 要求
 - ・ 要求仕様 (e. g. タイプ、ch 数、レート) 及び対地上インターフェース
- その他
 - ・ オンボード機能 (e. g. TLM 監視、自動 CMD 送出) の必要性

(c) その他

電源や TLM/CMD 以外の電氣的インターフェースとして、必要に応じて、下記のようなオンボード情報の供給が想定される。

- 衛星姿勢情報として、姿勢状態 (e. g. 姿勢喪失把握)、制御誤差 (e. g. ビーム制御)、など
- その他、時刻情報、軌道情報、電源動作情報など

必要性があれば、今後、要求条件の明確化が必要と考えられる。

2.3.3.2 衛星リソース要求

(1) 供給電力

(a) 定常段階

下記に示す要求条件から、消費電力をもとに定常段階の電力要求 (最大供給電力及び平均供給電力) を求める。

- 定常段階のミッション運用デューティ
 - ・ 100%(食期間を含む)
- 実証ミッション機器の消費電力モード
 - ・ 1 種類

3.8 節「ミッション機器の規模の概算」で消費電力を検討するが、上記の条件とマージンを 0 (TBD) とすると、定常段階の最大供給電力と平均供給電力は 3.8 節の消費電力と同じ値となる。

(b) その他

衛星運用上派生する上記以外 (e. g. 初期段階、不具合発生時、軌道保持制御時) の電力要求について、今後、要求条件の明確化が必要である。

(2) TLM/CMD 伝送

今後、実証ミッション機器各候補案の TLM/CMD 信号仕様 (2.3.3.1 節(3)(b) 項)

が想定可能になった段階で、下記のような TLM/CMD 伝送要求を明確化する必要がある。

- 動作モード別 TLM/CMD 伝送要求 (e. g. 伝送レート、伝送デューティ)
- 通信回線別 TLM/CMD 伝送要求 (複数回線を用いて TLM/CMD 運用する場合)

(3) 姿勢指向

今後、実証ミッション機器各候補案の指向要求が明らかになった段階で、下記のような衛星姿勢要求を明確化する必要がある(下記(b)項はCOMETS、DRTS仕様値)。

(a) 姿勢指向モード

- 地球指向(三軸安定)

(b) 姿勢制御精度

- [定常モード] ロール ±0.05deg 以内
 ピッチ ±0.05deg 以内
 ヨー ±0.05deg 以内

(c) 必要に応じて、姿勢決定情報をオンボード配信する(ビーム制御用)

(4) 軌道保持

運用軌道に対する要求条件は下記のとおりとする。

- 運用軌道
 - ・静止軌道(東経 110 度：現用放送衛星と同位置)
- 軌道保持精度
 - ・未定

2.3.3.3 ミッション運用要求

ミッション運用要求に関して、本項では基本的な要求条件の記述に留める。

(1) 基本要件事項

下記に示すように、実証ミッション機器の機器運用は基本的に「休止期間なし」とし、動作時の運用モードも 1 種類とする。

- 運用制限時間
 - ・なし(食期間も継続的に運用)
- 運用デューティ
 - ・100%
- 運用モード
 - ・1 種類(動作時)

(2) その他

主に衛星運用上の制約により、今後、下記のような複数の運用モードの明確化が必要となる可能性がある。

➤ 動作モード

- ・ ミッション運用時の運用モード（今後、実験内容の詳細化や衛星システム設計の進捗に伴って複数モード化する可能性あり）。

➤ 休止モード

- ・ 初期段階や不具合発生時等における、実証ミッション機器の電力消費を抑えた運用モード（e. g. OFF モード、スタンバイモード）

第3章 実証ミッション機器

この章では、中継器構成、フェーズドアレーアンテナ、TWTA (Traveling Wave Tube Amplifier: 進行波管増幅器) のミッション機器についての詳細を述べる。また、システム設計を目的として、回線設計を行い、所要の送信電力を示す。これらを基に、重量、消費電力、発熱量などのミッション機器の規模を見積もった。

3.1 中継器の構成

21GHz 帯高度放送衛星システムの中継器構成例を図 3.1-1 に示す。通常の中継器と大きく異なる部分は、図中の BFN(Beam Forming Network)を含む送信アンテナ部で、多数の TWTA あるいは SSPA(Solid State Power Amplifier: 固体増幅器)、フィルター、ホーンアンテナ (アレー素子) および反射鏡から構成される。各放射素子にそれぞれ増幅器などの送信回路が接続されるアクティブアレー構成となっており、反射鏡と組み合わせてフェーズドアレーアンテナを構成する。

BFN は各放射素子に加える信号の振幅と位相を調整し、送信ビームの放射パターンを変えるための制御回路である。TWTA または SSPA は電力増幅器で、消費電力の節減と発熱量の低減のために高い電力効率が要求される。BPF(Band Path Filter)は隣接する帯域への不要発射を除去するために使用され、特に隣接する 22.21~22.5GHz の電波天文周波数帯への影響を配慮した設計が必要となる。

受信した放送用信号は、21GHz 帯に周波数変換された後、前置増幅部で所定の電力レベルまで増幅され、送信アンテナ部の各放射素子の給電回路に分配される。BFN で所望の放射パターンを形成する振幅および位相に調整され、放送に必要な電力レベルまで増幅後、送信アンテナ部の各放射素子から放射される。

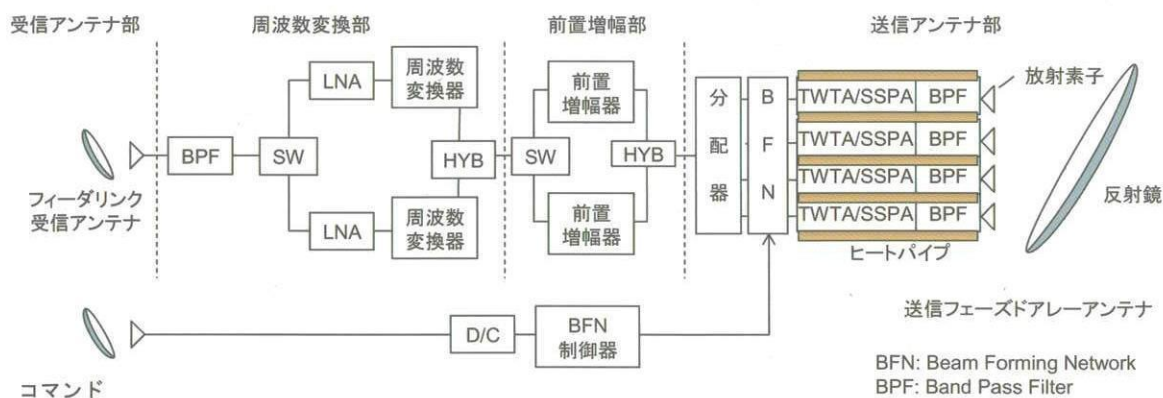


図 3.1-1 21GHz 帯高度放送衛星システムの中継器構成例

3.2 21GHz 帯フェーズドアレーアンテナ

21GHz 帯衛星搭載用フェーズドアレーアンテナとして、開口面上に放射素子を並べて構成する直接放射アレーアンテナ（図 3.2-1(a)）、および放射素子を複数個並べた給電アレーと反射鏡を組み合わせるアレー給電反射鏡アンテナがある（図 3.2-1(b),(c)）。アレー給電反射鏡アンテナは、小さな開口径の給電アレーで効率的にビーム形成が可能であるため、給電アレーの素子数が少なく給電回路が小規模で済むことから、ここでは、アレー給電反射鏡アンテナの検討を行った。

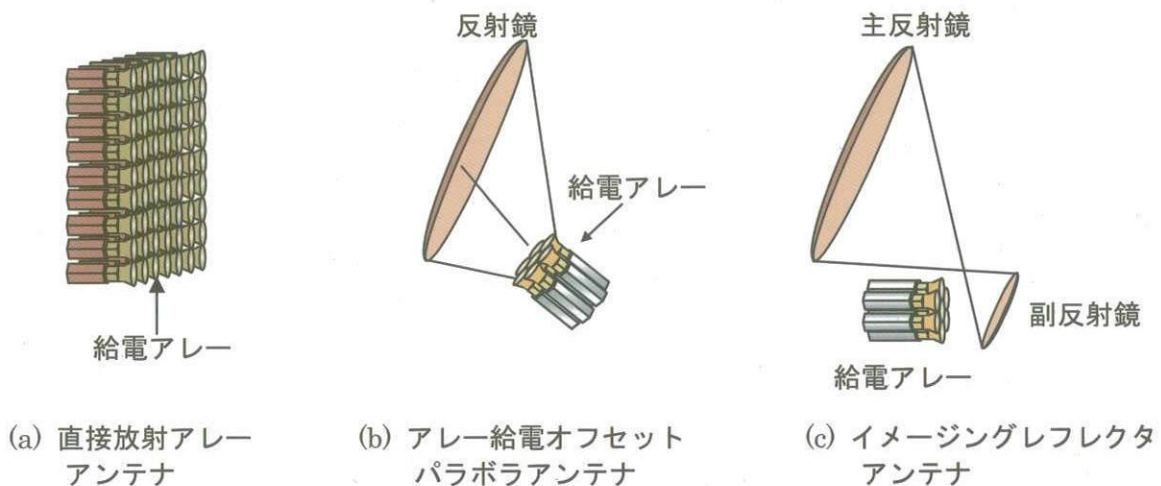


図 3.2-1 フェーズドアレーアンテナ

3.2.1 アンテナ構成

アレー給電反射鏡アンテナとして、表 3.2-1 に示す 3 通りの反射鏡構成、開口径および素子数の組み合わせについて検討を進めた。図 3.2-2 にアレー給電オフセットパラボラアンテナおよびイメージングレフレクタアンテナの構成を示す。図中の焦点距離 F 、反射鏡（主鏡）開口径 D 、全体長 l 、全体高 h 、の値を表 3.2-2～3.2-4 に示した。

表 3.2-1 検討したアンテナパラメータ

| 反射鏡構成 | 開口径 | 素子数 | 制御 |
|--------------------------|----------|-----|-------|
| アレー給電オフセットパラボラ (1 枚鏡) | 3 m | 32 | 振幅・位相 |
| | 5 m | 64 | 振幅・位相 |
| イメージングレフレクタ (2 枚鏡) | 4 m (主鏡) | 188 | 位相 |

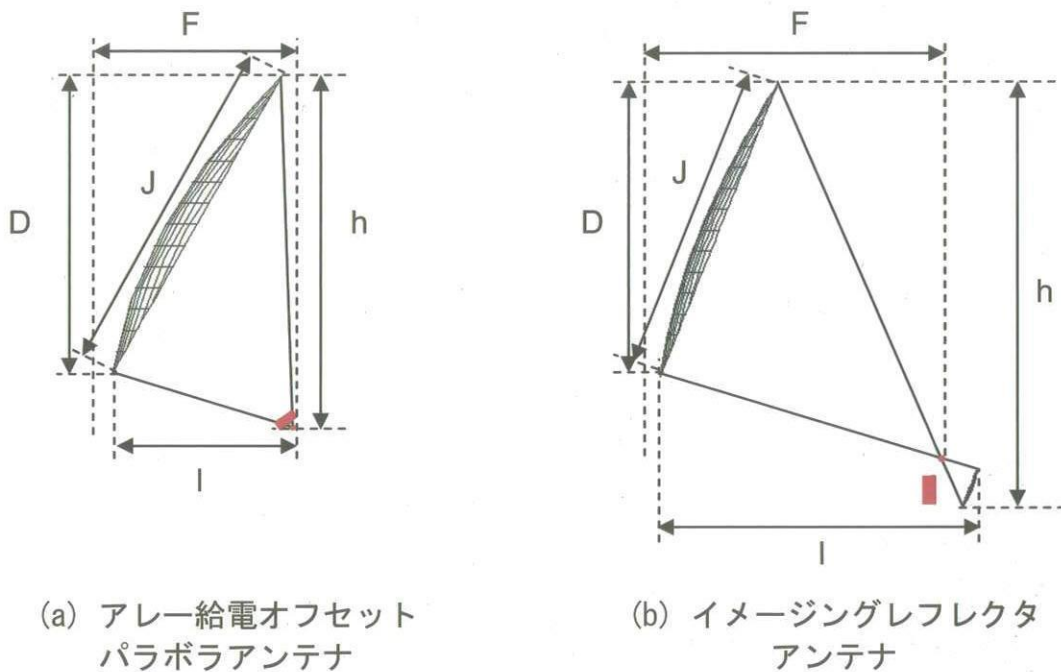


図 3.2-2 アンテナ各部寸法の参照図

表 3.2-2 開口径 3m アレー給電オフセットパラボラの各部寸法

| 焦点距離 F | 開口径 D | 全体長 l | 全体高 h | 反射鏡寸法(長軸) J |
|--------|-------|--------|--------|-------------|
| 1.8 m | 3 m | 1.76 m | 3.54 m | 3.45 m |

表 3.2-3 開口径 5m アレー給電オフセットパラボラの各部寸法

| 焦点距離 F | 開口径 D | 全体長 l | 全体高 h | 反射鏡寸法(長軸) J |
|--------|-------|--------|--------|-------------|
| 3 m | 5 m | 2.93 m | 5.91 m | 5.75 m |

表 3.2-4 開口径 4m イメージングレフレクタの各部寸法

| 焦点距離 F | 開口径 D | 全体長 l | 全体高 h | 反射鏡寸法(長軸) J |
|--------|-------|--------|--------|-------------|
| 4 m | 4 m | 4.31 m | 5.79 m | 4.31 m |

3.2.2 給電アレーの放射素子励振法

アレー給電オフセットパラボラアンテナを用いて増力ビームを任意の位置に形成するためには、振幅および位相の制御が必要である[3.2-1]。一方、イメージングレフレクタアンテナの場合は、あらかじめ振幅に重み付けして励振電力を固定とし、位相制御のみで放射パターン設計ができる[3.2-2]。

3.2.3 放射パターン形成例

ここでは、降雨減衰補償時の放射パターンの一例として、各アンテナ構成を用いて、東京に 10dB 増力した放射パターンを形成した計算結果を示す。表 3.2-5 に放射パターンの設計パラメータを示す。また、サービスエリアを、図 3.2-3 の拘束点で表し、その拘束点における利得を所望の値とするように給電アレーの励振係数を決定した。給電アレー用増幅器の定格電力分布および東京に 10dB 増力ビームを形成した場合の放射パターンを、図 3.2-4～図 3.2-6 に示す。図より、

- ・ 開口径 3m アレー給電オフセットパラボラアンテナの場合には、全国を 35.8dB 以上の利得で照射しつつ、48.5dB の増力ビームを形成することができた。
- ・ 開口径 5m アレー給電オフセットパラボラアンテナの場合には、全国を 39dB 以上の利得で照射しつつ、50.5dB の増力ビームを形成することができた。
- ・ 開口径 4m イメージングレフレクタアンテナの場合には、全国を 39.4dB 以上の利得で照射しつつ、50.6dB の増力ビームを形成することができた。

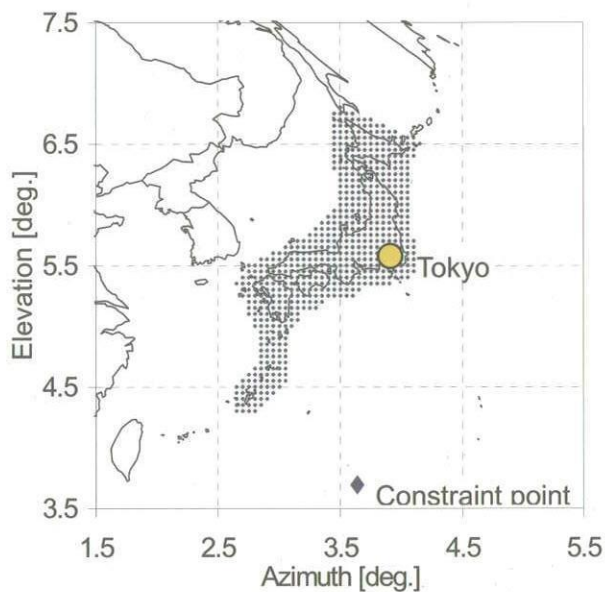


表 3.2-5 放射パターンの設計パラメーター

| | |
|--------|-------------------|
| 周波数 | 21.7 GHz |
| 増力値 | 10 dB |
| 偏波 | 直線偏波 |
| 衛星軌道位置 | 東経 110 度 静止軌道上 |

図 3.2-3 サービスエリアの形状および拘束点

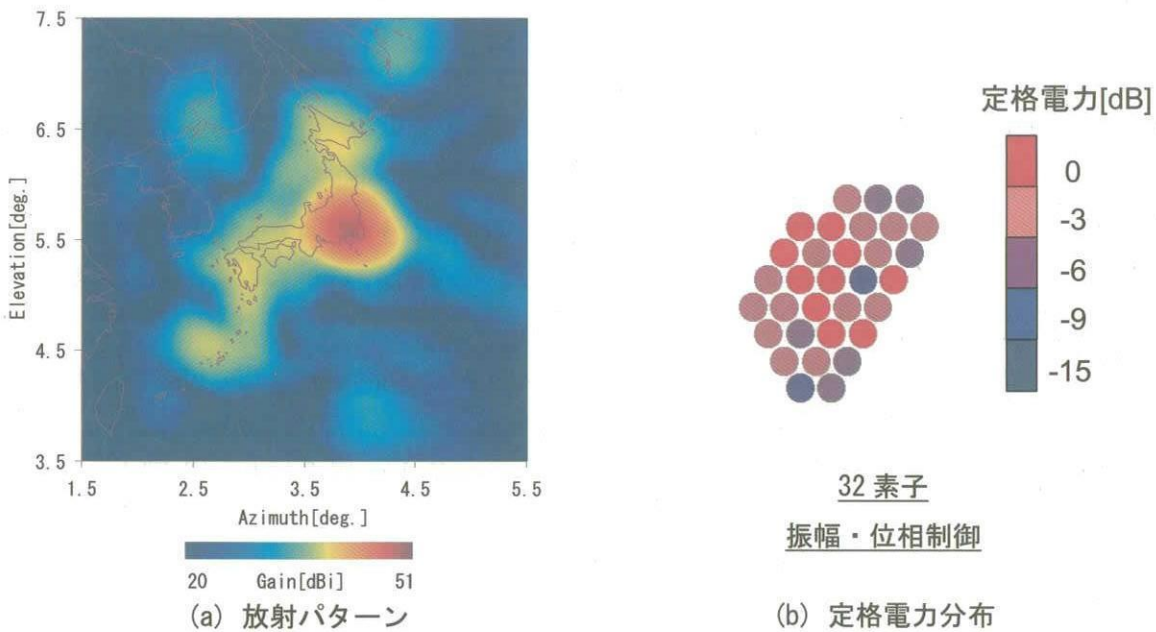


図 3.2-4 開口径 3m アレー給電オフセットパラボラアンテナの
給電アレーの定格電力および放射パターン

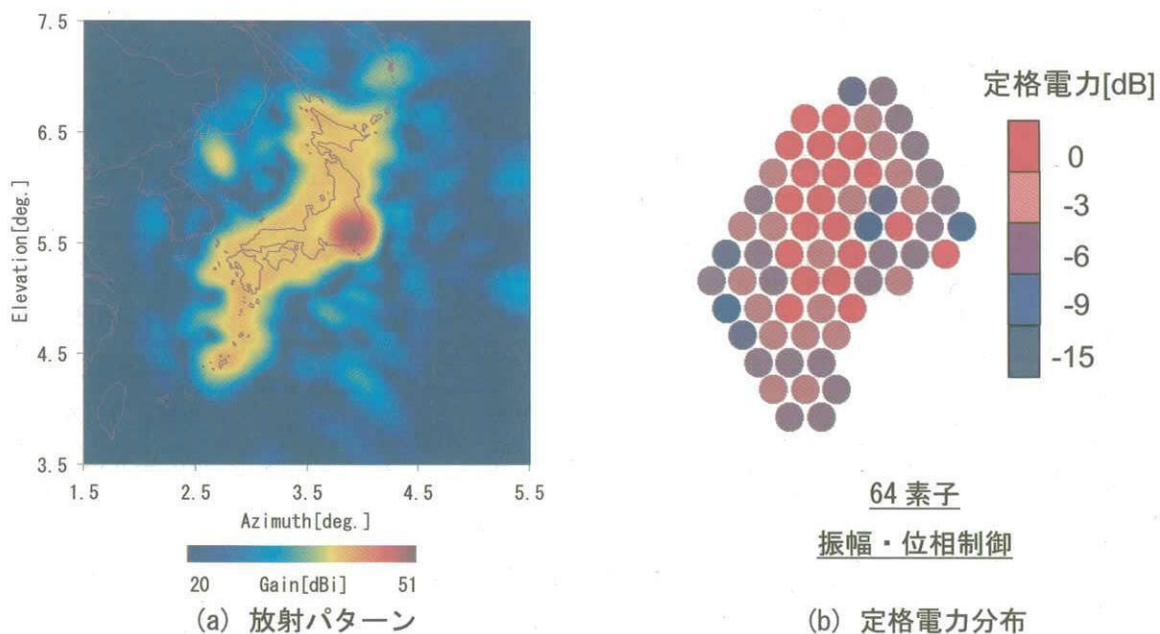


図 3.2-5 開口径 5m アレー給電オフセットパラボラアンテナの
給電アレーの定格電力および放射パターン

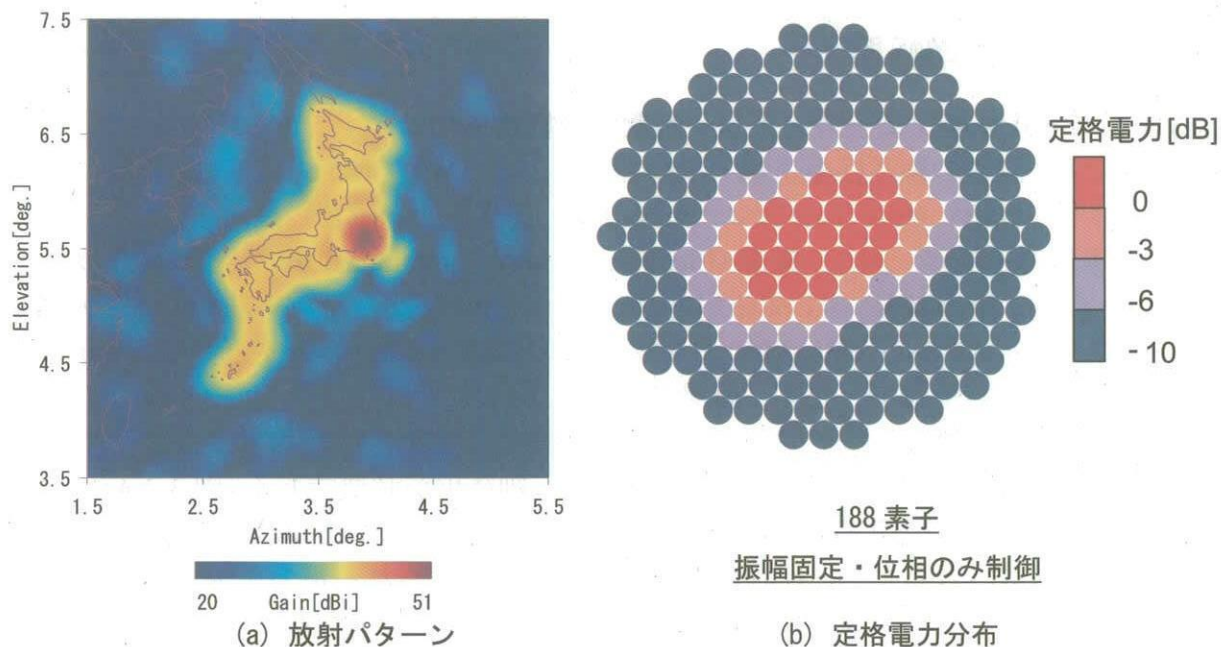


図 3.2-6 開口径 4m イメージングリフレクタアンテナ
給電アレーの定格電力および放射パターン

3.2.4 まとめ

21GHz 帯衛星搭載用送信フェーズドアレーアンテナとして、アレー給電反射鏡アンテナを適用した 3 種類のアンテナ構成を示した。また、開口径 3m・32 素子、開口径 5m・64 素子、開口径 4m・188 素子について放射パターンの計算を行い、降雨減衰補償時の放射パターンが形成できることを確認した。

参考文献

- [3.2-1] S. Tanaka and T. Murata: "Shaped Power Pattern Using an Onboard Array-fed Reflector Antenna for Advanced Direct Broadcasting Satellites," IEEE Int. Symposium on Phased Array Systems and Technology, pp.64-69, Boston, Oct. 2003.
- [3.2-2] 田中祥次, 横畑和典, 中澤進, 村田孝雄: 「21GHz 帯イメージングレフレクタアンテナの放射特性」 信学技報, AP2004-45, pp.25-30, 2004 年 7 月.

3.3 電力増幅器

3.3-1 21GHz 帯フェーズドアレー用電力増幅器

マイクロ波帯の衛星搭載用電力増幅器としては TWT (Traveling Wave Tube、進行波管) および SSPA (Solid State Power Amplifier、固体電力増幅器) がある。

TWT は電子管の一種で、電源 (Electronic Power Conditioner、EPC) と組み合わせて、TWTA (TWT Amplifier) として使用される。動作周波数は L 帯～V 帯と広く、高出力、高利得、高効率である一方、EPC より数 kV の高電圧の供給を必要とする。一方、SSPA は半導体電力増幅器で、小型、軽量である[3.3-1]。

21GHz 帯衛星搭載フェーズドアレーに TWT と SSPA とを適用する場合、給電アレーの放射素子間隔内に配置できるように小型・細径化が必要である。図 3.2-4～図 3.2-6 に示したように、給電アレーは、放射素子を 1.5 波長 (約 20mm) 程度の間隔で三角配列して構成されるため、各放射素子にそれぞれ接続される電力増幅器やフィルタなどの給電回路も断面の長さが 20mm 程度と小型化する必要がある。また、図 3.2-3～図 3.2-6 に示すように、給電アレーの励振電力レベルは、各放射素子において一定ではなく、10dB～15dB 程度の差があることから、増幅器の構成としては、TWT のみによる構成だけでなく、高い出力の増幅器には TWT を割り当て、低い出力の増幅器には SSPA を割り当てるなど TWT と SSPA とを組み合わせた構成についても検討を進めている。ただし、TWT と SSPA の通過位相特性が大きく異なる。一般的に、TWT では数万度、SSPA では数百度と、数千～数万度の位相差が生じることから、この補償が必要である。

3.3-2 小型・細径 TWT[3.3-2]

従来の TWT では断面寸法が大きく、20mm 程度の間隔で配置することができないため、TWT の高効率性を保ちつつ、電子銃、低速波回路、収束磁場部、コレクタ部、高周波入出力回路の小型化による TWT の小型・細径化を図った。試作した小型・細径 TWT の外観を図 3.3-1 に、主要諸元を表 3.3-1 に示す。TWT の断面寸法を 15.3mm × 20.0mm に抑えつつも、出力約 10W、総合効率 48.1%を達成した。

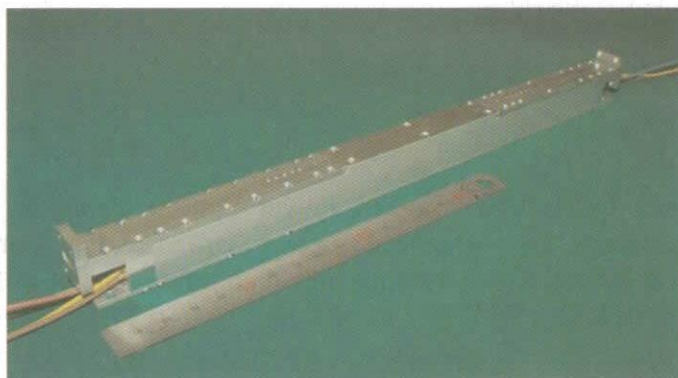


図 3.3-1 小型・細径 TWT の外観

表 3.3-1 小型・細径 TWT の主要諸元

| | |
|------|-------------------------|
| 周波数 | 21.7GHz |
| 入力電力 | 4.1dBm |
| 出力電力 | 10.8W |
| 利得 | 36.3dB |
| 総合効率 | 48.1% |
| 寸法 | 15.3mm × 20.0mm × 300mm |
| 重量 | 270g |

3.3-3 TWT アレー

給電アレーの電力増幅器として小型・細径 TWT を適用する場合の課題として、TWT の密集配置による磁気干渉の低減と排熱処理とがある。

隣接する TWT の電子ビーム集束用磁石による磁気干渉を低減する方法としては、TWT を磁気シールドで覆う方法がある。図 3.3-2 に 0.1mm 厚の磁気シールドを用いた TWT アレーを示す。断面寸法を図 3.3-3 に示す。また、表 3.3-2 に磁気シールドの有無による TWT の電気特性の比較を示す。磁気シールドを用いることにより、電気特性の劣化を 1%程度にとどめることができた。ただし、TWT は理想的な動作温度となるように、十分に排熱処理を行った。

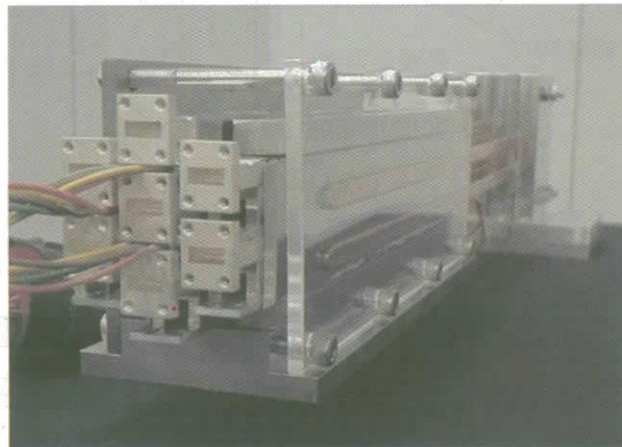


図 3.3-2 TWT アレー外観

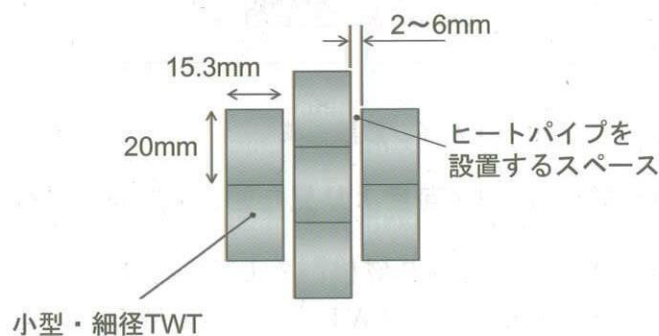
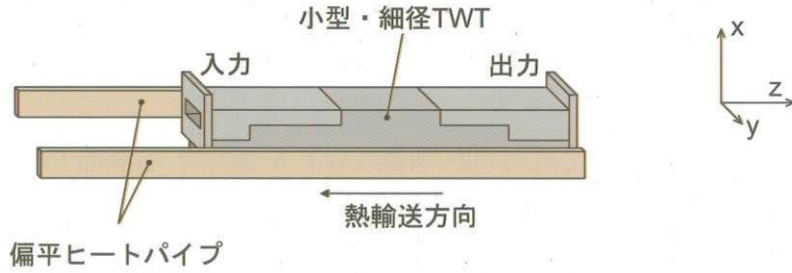


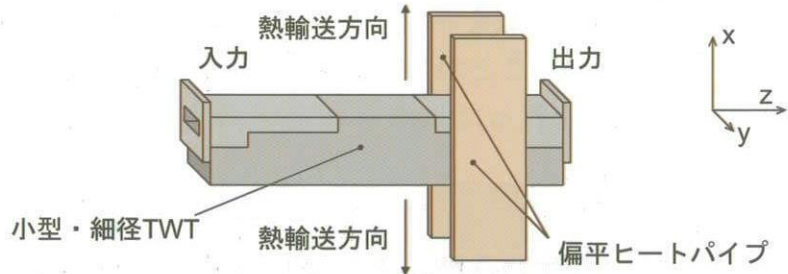
図 3.3-3 TWT アレー断面

表 3.3-2 磁気シールドの有無による TWT の電気特性の比較

| 構成 | 単体 | アレー | |
|----------|------|------|------|
| 磁気シールド | なし | なし | あり |
| 出力電力 (W) | 10.8 | 10.5 | 10.7 |
| 総合効率 (%) | 48.1 | 37.9 | 47.1 |



(a) $-z$ 向きに熱を輸送する場合



(b) x 方向に熱を輸送する場合

図 3.3-4 TWT の熱処理方式

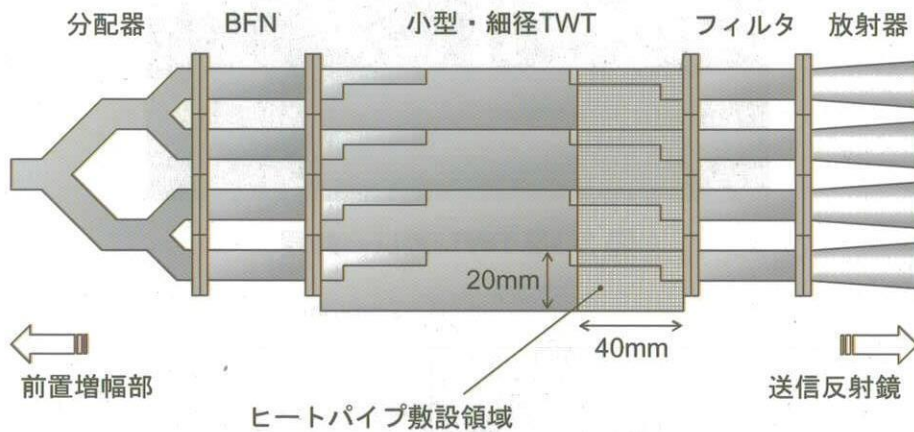


図 3.3-5 アレー給電部 (+y 向きより見た図、 x 方向に熱輸送する場合)

衛星搭載環境での排熱処理方法の基礎検討として、偏平ヒートパイプを、TWT に設置し、熱輸送する方法を適用した。TWT を 21GHz 帯の 1.5 波長、20mm 間隔で配置した場合、TWT 間には 2mm 程度の隙間しかないため、偏平ヒートパイプの断面寸

法は2mm×数mm～数cm程度にする必要がある。ヒートパイプによる排熱法の例を図3.3-4に示す。特にx方向に熱を輸送する場合にヒートパイプを敷設する部分を図3.3-5に示す。上述の磁気シールドと排熱法とを用いた場合のTWTアレーの電気特性を表3.3-3に示す。40%以上の総合効率が得られた。

表 3.3-3 アレー配置時の小型・細径 TWT の電気特性

| | |
|------|---------|
| 周波数 | 21.7GHz |
| 入力電力 | 3.8dBm |
| 出力電力 | 10.1W |
| 利得 | 36.3dB |
| 総合効率 | 42.7% |

3.3-4 EPC の検討

EPCは衛星バスから供給される低電圧を高電圧に変換して、TWTを駆動する。EPCの電力損失は、電圧変換により生じる損失以外に、EPC内部で発生する固定損がある。したがって、小型・細径TWTの場合、出力が10W程度と小さいため、結果的には、EPCの電力変換効率が低くなってしまふと考えられる。電力変換効率の改善方法の一つとして、一台のEPCで複数のTWTを駆動して、EPCの出力を上げる方法がある。また、質量の点からも、複数のTWTを駆動したほうが有利であると考えられるが、EPCが故障すると、そのEPCが電力供給するすべてのTWTに影響を及ぼすため、電力効率や質量と故障率とのトレードオフを検討する必要がある。

参考文献

- [3.3-1] 片上勘次：「衛星搭載 TWTA における性能向上と開発動向」信学技報、SPA2003-03 pp. 15-22, 2004.02.
- [3.3-2] 「NHK 技研 R&D」No. 85, 2004.05.

3.4 BFN

BFNは、所望の放射パターンとなるように、給電アレーの各放射素子を励振する信号の振幅と位相を制御するもので、通常は、可変減衰器と移相器で構成される。給電アレーは、電力効率の観点から、図3.1-1に示すように、アクティブアレー構成とし、BFNの可変減衰器と移相器を、各TWTやSSPAの前段に配置している。このため、①BFN回路の断面積も小型・細径TWTと同程度に小型化とする必要があること、②放射素子の数が200素子程度必要なので量産性のよいこと、などの観点からMMIC化が必要である。現状では、MMIC化されたKa帯デジタル制御の可変減衰器および移相器としては、5ビット制御のもの開発例がある。

3.5 フィルタ

21GHz帯衛星放送に割り当てられた周波数帯に隣接する22.21～22.5GHzを使用する電波天文宇宙研究業務の保護を目的として、21GHz帯放送衛星からの不要発射を放送帯域外で大きく減衰させる出力フィルタが必要となる。BFNと同様に、小型・細形化および量産性を考慮して、搭載環境での温度特性などを満足する製作技術の確立が課題である。

3.6 システムの要求条件の検討

ミッション機器に必要な電力や発生する熱量などの電氣的要求条件および重量などの機械的要求条件を検討するために、回線設計および想定されるミッション機器の規模の概算を行なった。

3.6-1 回線設計[3.6-1]

表 3.6-1 に 21GHz 帯放送衛星の回線設計例を示す。受信場所は東京とし、晴天時に必要となる電力束密度 (power flux density、pfd) および年間時間率 0.1%の降雨減衰による C/N 劣化を補償する場合に必要な pfd を示した。なお、pfd は地表面 1m² に対してナイキスト帯域幅 1MHz あたりの値を示した。変調方式は QPSK とし、符号化率 3/4 の畳み込み符号と短縮化リードソロモン(204,188)の誤り訂正方式を仮定した。晴天時には 123.1dB (W/m²/MHz) の所要 pfd に対して降雨時には約 12dB 高い-110.9dB (W/m²/MHz) の pfd が必要となる。

表 3.6-1 21GHz 帯放送衛星の回線設計例

| 受信地点 | | 東京 | |
|---------------|-------------------------|------------|--------|
| 変調方式 | | QPSK (3/4) | |
| 所要 C/N ※1 | dB | 7.5 | |
| 周波数 | GHz | 21.7 | |
| 気象条件 | | 晴天 | 雨 |
| 送信アンテナ利得 | dB _i | 38.3 | 47.2 |
| 衛星 EIRP | dBW/MHz | 39.4 | 51.7 |
| 自由空間損失 | dB | 210.8 | 210.8 |
| 伝播損失 ※2 | dB | 3.1 | 13.6 |
| 受信アンテナ利得 | dB _i | 37.7 | 37.7 |
| 受信キャリア電力 | dBW/MHz | -136.8 | -135.1 |
| ボルツマン定数 | dB _J /K/MHz | -168.6 | |
| 等価温度 | K | 119.6 | |
| アンテナ温度 | K | 147.1 | 277.6 |
| 等価雑音温度 ※3 | K | 266.8 | 397.2 |
| | dBK | 24.3 | 26.0 |
| 雑音電力 | dB/MHz | -144.3 | -142.6 |
| ダウンリンク C/N | dB | 7.6 | |
| アップリンク C/N ※4 | dB | 26.5 | |
| 総合 C/N | dB | 7.5 | |
| pfd | dBW/m ² /MHz | -123.1 | -110.9 |

※1 受信機の固定劣化を含む

※2 受信アンテナ開口径は 45cm、開口面効率 は 0.7

※3 受信機の雑音指数は 1.5dB

※4 アップリンク周波数は 17GHz 帯を仮定

表 3.6-2 21GHz 帯放送衛星の送信電力検討例

| | |
|-----------------|------------|
| チャンネル幅 | 197 MHz |
| 99%占有帯域幅 | 177 MHz |
| ナイキスト帯域幅 | 148 MHz |
| 情報レート | 201 Mbit/s |
| 送信電力 (QPSK 3/4) | 416 W |

表 3.6-2 に 21GHz 帯放送衛星の送信電力の検討例を示す。21GHz 帯放送衛星のガードバンドを 12GHz 帯放送衛星プランと同様に帯域幅の 5%とし、フィルタのロールオフ率を 0.35 とした。この結果から、送信電力が約 400W、チャンネル帯域幅が約 200MHz あれば、約 200Mbit/s の情報を送れることになる。

参考文献

- [3.6-1] 亀井雅、田中祥次、正源和義：「フェーズドアレーアンテナを用いた 21GHz 帯放送衛星システムの伝送容量と送信電力の関係」信学論 B, Vol. J-89B, No. 2 pp. 106-114, 2006.02.

3.7 テレメトリ・コマンド (TLM/CMD)

放送衛星では、通信系、アンテナ、電源系、太陽電池パドル、姿勢軌道制御系、推進系、熱制御系、テレメトリ・コマンド系などのサブシステムごとに、搭載機器の動作状態の監視や制御を目的として、テレメトリおよびコマンド信号を用いている。日本の通常の放送衛星では、テレメトリの項目は数百項目にのぼり、0.5～数 kbit/s 程度の速度で伝送されている。また、コマンドも数百項目あり、数百 bit/s 程度の速度で伝送されている。

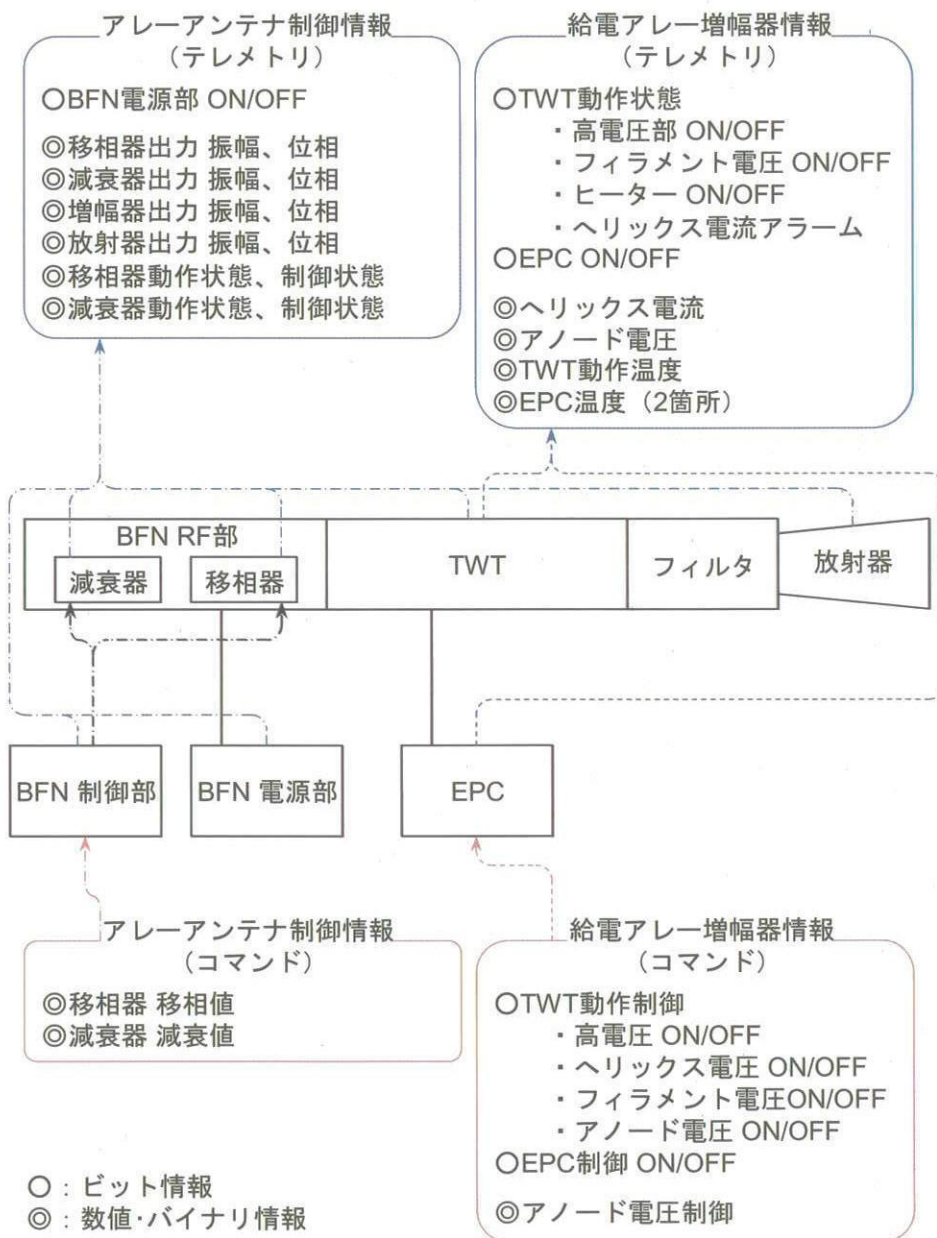


図 3.7-1 新たに必要となるテレメトリ・コマンド

21GHz 帯放送衛星では、通常のテレメトリ・コマンドに加え、アレーアンテナ制御情報と給電アレー増幅器情報などが新たに必要となる。

新たに必要となるテレメトリおよびコマンドを図 3.7-1 に示す。また以下に項目数の概算を見積もる。

アレーアンテナ制御情報（1 素子あたり）

(1) テレメトリ数 [動作情報 12 項目、ON/OFF 情報 1 項目]

- ・ 放射器入力端の振幅・位相情報、(2 項目)
- ・ 増幅器出力の振幅・位相情報 (2 項目)
- ・ BFN 出力の振幅・位相情報 (2 項目)
- ・ 移相器の動作情報・被制御情報 (2 項目)
- ・ 減衰器の動作情報・被制御情報 (2 項目)
- ・ BFN 部電源の ON/OFF 情報 (ON 状態か OFF 状態か) (1 項目)

(2) コマンド数 [動作制御 2 項目]

- ・ 放射素子の振幅・位相制御 (2 項目)

給電アレー増幅器情報（1 素子あたり）

(1) テレメトリ数 [動作情報 5 項目、ON/OFF 情報 5 項目]

- ・ TWTAON/OFF 情報 (4 項目)
 - 高電圧部 ON/OFF 状態
 - フィラメント電圧の ON/OFF 状態、
 - ヒーターの ON/OFF 状態
 - ヘリックスのアラーム ON/OFF 状態
- ・ TWTA 動作情報 (3 項目)
 - ヘリックス電流
 - アノード電圧
 - 動作温度
- ・ TWT 用電源 ON/OFF 情報 (1 項目)
- ・ TWTA 電源部温度情報 (2 箇所 2 項目)

(2) コマンド数 [動作制御 1 項目、ON/OFF 制御 8 項目]

- ・ TWTA 電源 ON/OFF 制御 (ON/OFF それぞれに 1 項目割り当て、計 2 項目)
- ・ 高電圧部 ON/OFF 制御 (2 項目)
- ・ ヘリックス電圧 ON/OFF (2 項目)
- ・ フィラメント電圧 ON/OFF (2 項目)
- ・ アノード電圧 ON/OFF (2 項目)
- ・ アノード電圧制御 (1 項目)

表 3.7-1 新たに必要となるテレメトリ・コマンド数

| アンテナ形式 | 開口径 3m 素子数 32 | 開口径 5m 素子数 64 | 開口径 4m 素子数 188 |
|----------------|------------------|------------------|-------------------|
| テレメトリ数 | 736 | 1472 | 4324 |
| テレメトリ情報量 (bit) | 4544 | 9088 | 26696 |
| コマンド数 | 416 | 832 | 2444 |
| コマンド情報量 (bit) | 1088 | 2176 | 6392 |
| 情報量の合計 (bit) | 5632 | 11264 | 33088 |

表 3.7-1 に、新たに必要となるテレメトリとコマンドについて、アンテナ構成ごとに想定される項目数と情報量を示した。情報量の計算では、動作情報および動作制御には1項目あたり8ビットを割り当て、ON/OFF 情報および ON/OFF 制御には1項目あたり1ビットを割り当てると仮定した。表 3.7-1 から、新たにテレメトリおよびコマンドに割り当てる情報量は両者をあわせて、放射素子 32 素子では約 6kbit、64 素子では 11kbit、188 素子では 33kbit 程度必要と見込まれる。

3.8 ミッション機器の規模の概算

重量、消費電力、発熱量などのミッション機器の規模の概算を見積もった。前節の回線計算では、所要送信電力は 416W であったが、ここでは計算の簡単化のために、表 3.8-1 に示すような定格出力の増幅器の組み合わせを仮定した。また、この概算では、20W、10W、5W の増幅器は TWTA、2.5W、1.25W、1W の増幅器は SSPA とし、TWT の飽和での電力効率を 40%、EPC の電力効率を 80%、電源を含む SSPA の電力効率を 23% とした。ミッション機器の規模の計算結果をアンテナ構成ごとに、表 3.8-2 に示す。

表 3.8-1 増幅器の定格出力

| アンテナ形式 | アレー給電オフセットパラボラアンテナ 開口径 3m 素子数 32 | アレー給電オフセットパラボラアンテナ 開口径 5m 素子数 64 | イメージングレフレクタアンテナ 開口径 4m 素子数 188 |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 増幅器の 定格出力 | 20W、10W、5W、2.5W | 20W、10W、5W、2.5W、1.25W | 10W、5W、2.5W、1W |

表 3.8-2 ミッション機器構成とリソース

| アンテナ | | オフセットパラボラアンテナ 開口径 3m 素子数 32 | | |
|--------------|---|-----------------------------|---------|----------|
| 項目 | 重量 (kg) | 消費電力 (W) | 発熱量 (W) | 送信電力 (W) |
| 受信アンテナ部 | 2.9 | - | - | - |
| 周波数変換部 | 4.13 | 10 | 10 | - |
| 前置増幅器 ※1 | 4.73 | - | - | - |
| 給電アレー部 ※2、※3 | 55 | 860 | 749 | 111 |
| 反射鏡 | 28 | - | - | - |
| BFN 制御器 | 1.73 | 5 | 5 | - |
| 合計 ※4、※5 | 97 | 875 | 764 | - |
| 備考 | QPSK・Turbo 符号 (符号化率 3/4)、受信アンテナ径 90cm のとき、サービス時間率 99.9%以上 | | | |

| アンテナ | | オフセットパラボラアンテナ 開口径 5m 素子数 64 | | |
|--------------|---|-----------------------------|---------|----------|
| 項目 | 重量 (kg) | 消費電力 (W) | 発熱量 (W) | 送信電力 (W) |
| 受信アンテナ部 | 2.9 | - | - | - |
| 周波数変換部 | 4.13 | 10 | 10 | - |
| 前置増幅器 ※1 | 4.73 | - | - | - |
| 給電アレー部 ※2、※3 | 97 | 1552 | 1336 | 216 |
| 反射鏡 | 50 | - | - | - |
| BFN 制御器 | 1.73 | 5 | 5 | - |
| 合計 ※4、※5 | 161 | 1567 | 1351 | - |
| 備考 | QPSK・Turbo 符号 (符号化率 3/4)、受信アンテナ径 60cm のとき、サービス時間率 99.9%以上 | | | |

| アンテナ | | イメージングリフレクタアンテナ 開口径 4m 素子数 188 | | |
|--------------|---|--------------------------------|---------|----------|
| 項目 | 重量 (kg) | 消費電力 (W) | 発熱量 (W) | 送信電力 (W) |
| 受信アンテナ部 | 2.9 | - | - | - |
| 周波数変換部 | 4.13 | 10 | 10 | - |
| 前置増幅器 ※1 | 4.73 | - | - | - |
| 給電アレー部 ※2、※3 | 233 | 1939 | 1459 | 480 |
| 反射鏡 | 32 | - | - | - |
| BFN 制御器 | 1.73 | 5 | 5 | - |
| 合計 ※4、※5 | 278 | 1954 | 1474 | - |
| 備考 | QPSK・Turbo 符号 (符号化率 3/4)、受信アンテナ径 45cm のとき、サービス時間率 99.9%以上 | | | |

- ※1 前置増幅器の消費電力、発熱量は詳細な検討が必要
- ※2 TWT、SSPA の電源部を含む
- ※3 定格電力 5W 以上の素子は TWT、5W 未満は SSPA を使用
- ※4 各項目の合計を丸めた
- ※5 計装系や各種配線などは含まない

検討の結果、以下のような見積もりを得た。

- ・ 開口径 3m、32 素子アレー給電オフセットパラボラアンテナ構成
重量 97kg、消費電力 875W、発熱量 764W
- ・ 開口径 5m、64 素子アレー給電オフセットパラボラアンテナ構成
重量 161kg、消費電力 1567W、発熱量 1351W
- ・ 開口径 4m、188 素子イメージングレフレクタアンテナ構成
重量 278kg、消費電力 1954W、発熱量 1474W

第4章 実験システム

本章では「21GHz帯高度放送衛星ミッション」に対するミッション要求、及び実証ミッション機器の仕様に基づく、「衛星システム」「地上システム」「打上げシステム」から構成される実験システム構想案について述べる。

4. 1 全体システム構想案

本節を含む4.1~4.4節では、第2章「21GHz帯高度放送衛星ミッション」及び第3章「実証ミッション機器」に基づく、「21GHz帯衛星放送用実験システム」のシステム構想案を示す。

4. 1. 1 実験システム構成

今回の検討作業にあたって想定した全体システム構成案を下記に示す。

- (1) 「実験システム(21GHz帯衛星放送用実験システム)」(図4.1-1参照)
「21GHz帯放送衛星実証ミッション機器」を用いた実験運用に必要な、衛星システム,地上システム,打上げシステム等から構成される全体システム。
- (2) 「実験衛星システム(21GHz帯衛星放送用実験衛星システム)」(図4.1-1参照)
上記(1)項の「実験システム」を構成する衛星システム。「21GHz帯放送衛星実証ミッション機器」を搭載して、静止軌道に打上げられる。
- (3) 「地上システム(21GHz帯衛星放送用実験地上システム)」(図4.1-1参照)
上記(1)項の「実験システム」を構成する地上システム。RF回線を介して「実験衛星システム」を用いた実験運用を行なう。
- (4) 「打上げシステム(21GHz帯衛星放送用実験衛星打上げシステム)」(図4.1-1参照)
上記(1)項の「実験システム」を構成する打上げシステム。既開発の打上げ手段を用いて、「実験衛星システム」を静止軌道に打上げる。
- (5) 「実用放送衛星システム(21GHz帯実用放送衛星システム)」
将来の「21GHz帯高度衛星放送サービス」に用いる、本放送用21GHz帯放送衛星システム。2025年頃の運用開始を想定。

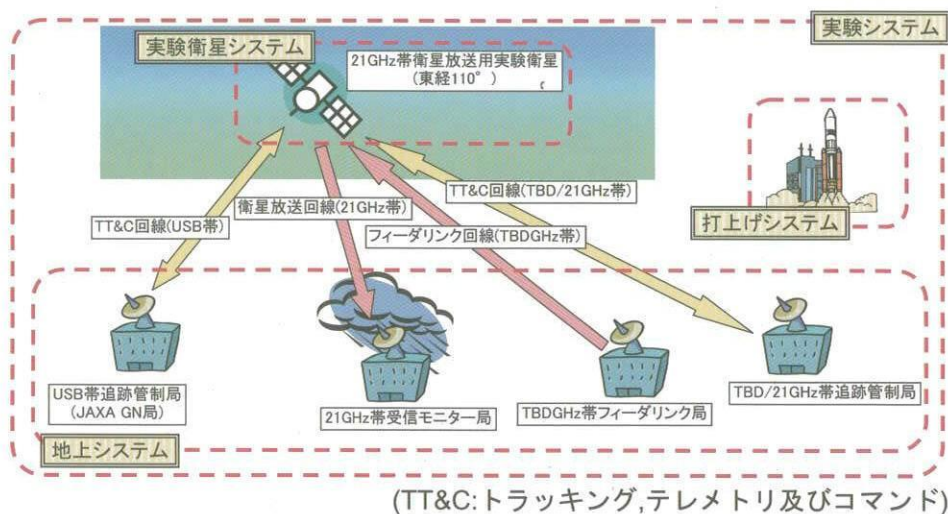


図4.1-1 21GHz帯衛星放送用実験システム構成案

4. 2 衛星システム構想案

本節では「衛星全体に関する仕様概要(規模,外観等)の0次案」を想定する。同0次案は衛星システム検討作業用の目安であり、今後の研究開発フェーズにおいて精度良く「衛星仕様」を求めるための仮仕様である。

今回、下記の実証ミッション機器・搭載候補案に対応した、3ケースの衛星システムを検討対象とした。

[21GHz帯放送衛星実証ミッション機器・搭載候補案]

- (a) 「開口径3m, 素子数32 アレー給電オフセットパラボラ」方式 (3mφAO)
- (b) 「開口径5m, 素子数64 アレー給電オフセットパラボラ」方式 (5mφAO)
- (c) 「開口径4m, 素子数188 イメージングリフレクタ」方式 (4mφIR)

4. 2. 1 衛星システム仕様

4. 2. 1. 1 質量配分

表3.8-2「ミッション機器構成とリソース」の値、及び表4.2-2の電力配分0次案の想定値に基づき、表4.2-1の様に衛星システムの「質量配分0次案」を想定した。同0次案の各数値には、±10%程度の誤差が見込まれる。

なお、本衛星システムの質量配分に関して、下記の様な変動要素が予想される(△：増加傾向、▽：減少傾向、△▽：増減傾向)。

- ・ミッション機器搭載用計装部品,I/F機器,熱制御機器の追加 : △
- ・ミッション機器搭載用二次構体の追加 : △
- ・衛星寿命の選択(今回は5年程度を想定) : △▽
- ・ミッション要求に基づく衛星リソース機能の選択 : △▽
- ・南北制御用電気推進エンジンの方式選択 : △▽
- ・打上げ時期による衛星バス機器の性能向上 : ▽

表4.2-1 衛星システム仕様・質量配分0次案(kg)[打上げ時]

| | 3mφ AO方式 | 5mφ AO方式 | 4mφ IR方式 | 備考 |
|----------|-------------|-------------|--------------|-------|
| ミッション機器 | 97 | 161 | 278 | |
| 衛星バス | 1095 | 1400 | 1615 | |
| 衛星ドライ質量 | 1192 | 1561 | 1893 | |
| 推進 | 1370 | 1800 | 2175 | AKF込み |
| マージン | 138 | 239 | 232 | 5%以上 |
| 全備質量 | 2700 | 3600 | 4300 | AKF込み |
| 打上げ手段(例) | H-2A202(4S) | H-2A202(5S) | H-2A2024(5S) | |

AKF込み：アポジキック用推進を含む

4. 2. 1. 2 電力配分

表3.8-2「ミッション機器構成とリソース」の値、及び表4.2-1の質量配分0次案の想定値に基づき、表4.2-2の様に衛星システムの「電力配分0次案(寿命末期の春/秋分)」を想定した。同0次案の各数値には、±20%程度の誤差が見込まれる。

なお、本衛星システムの電力配分に関して、下記の様な変動要素が予想される(△：増加傾向、▽：減少傾向、△▽：増減傾向)。

- ・ミッション機器搭載用I/F機器,能動型熱制御機器の追加 : △
- ・衛星寿命の選択(今回は5年程度を想定) : △▽
- ・ミッション要求に基づく衛星リソース機能の選択 : △▽
- ・南北制御用電気推進エンジンの方式選定 : △▽

表4.2-2 衛星システム仕様・電力配分0次案(W)[EOL,春/秋分]

| | 3mφ AO方式 | 5mφ AO方式 | 4mφ IR方式 | 備考 |
|---------|----------|----------|----------|-------|
| ミッション機器 | 875 | 1567 | 1954 | |
| 衛星バス | 1020 | 1320 | 1585 | |
| マージン | 105 | 213 | 261 | 5%以上 |
| 消費電力 | 2000 | 3100 | 3800 | |
| 充電電力 | 310 | 485 | 590 | |
| SPSマージン | 290 | 415 | 510 | 10%以上 |
| SPS発生電力 | 2600 | 4000 | 4900 | |

EOL : 衛星寿命末期
SPS : 太陽電池パドル系

4. 2. 2 衛星コンフィギュレーション

4. 2. 2. 1 概要

H-IIA/5S型フェアリング(図4.2-1参照)の包絡域に基づき、図4.2-2の様に「衛星コンフィギュレーション0次案」を想定した。なお、「3mφ AO方式」対応の衛星システムに限って、4S型フェアリングでも反射鏡を分割,変形せずに収納できる。

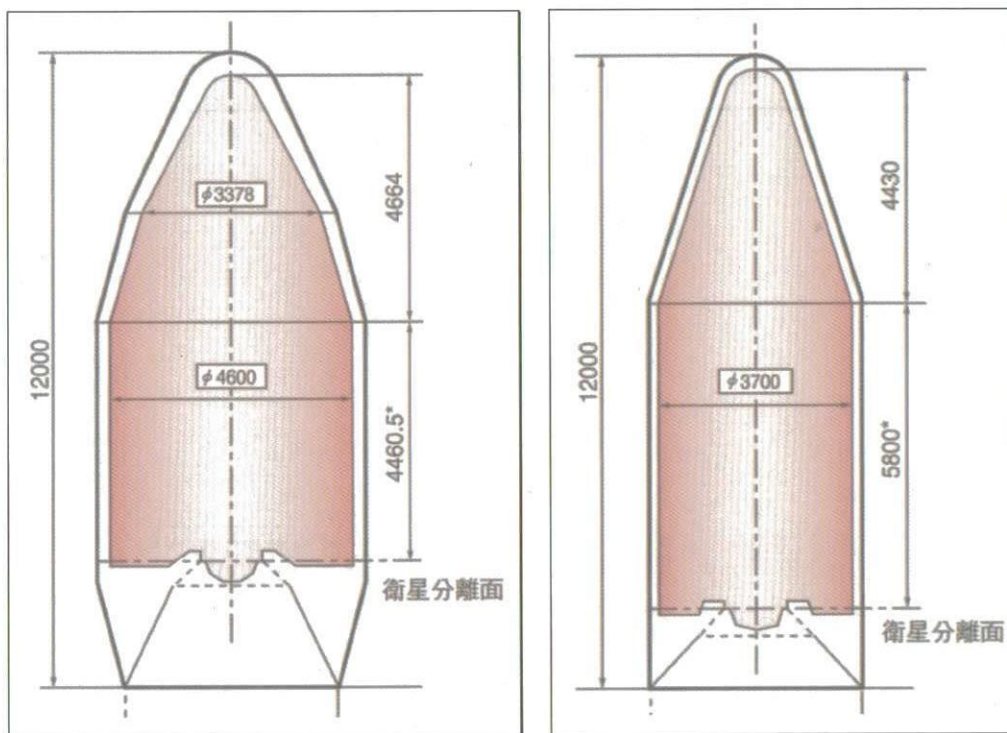


図4.2-1 5S型フェアリング(左)及び4S型フェアリング(右)の衛星包絡域
(公開資料「H-IIAシステム解説書(2001年12月)」より転載)

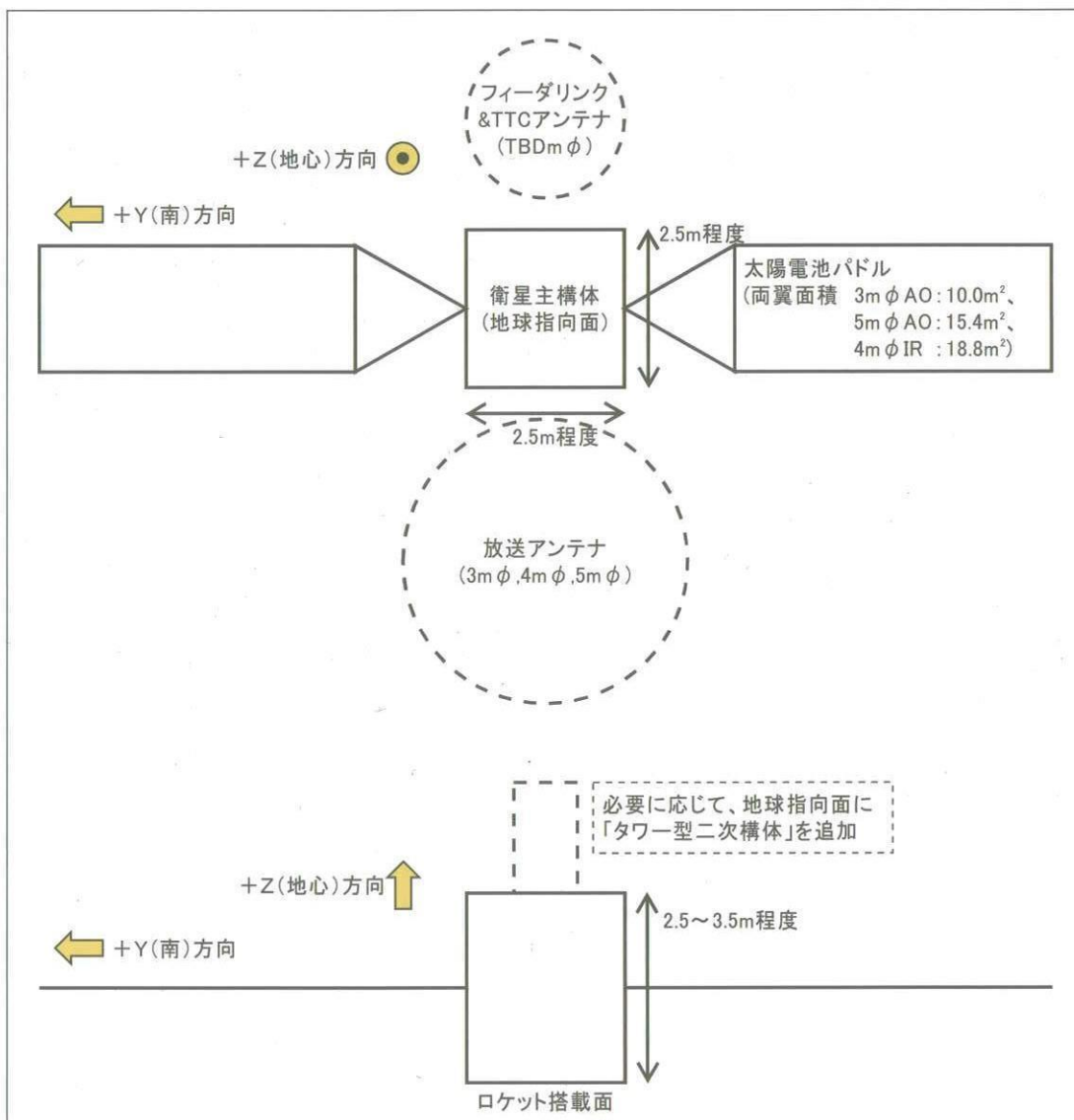


図4.2-2 衛星コンフィギュレーション0次案

4. 2. 2. 2 太陽電池パドル面積について

図4.2-2に示す太陽電池パドル面積は、太陽電池セル性能として「発電効率×実装効率：20%」程度を想定、下記式に同効率及び表4.2-2のSPS発生電力を代入して算出した。

$$\text{パドル面積} = \frac{\text{発生電力}}{(1300 \times \text{発電効率} \times \text{実装効率})}$$

4. 2. 2. 3 反射鏡及び給電アレー部の配置

「反射鏡及び給電アレー部配置0次案」を表4.2-3の様に想定した。また、同表の「主構体外搭載方式」を想定上のベースライン案とした。これは「給電アレー部を主構体の外側に搭載する方式」を意味しており、下記の様な特徴を備える。

- ・「給電アレー部からの放熱」にあたって、熱輸送効率の点で有利と考えられる。
- ・「給電アレー部-衛星バス」間の搭載インタフェース(機械的,熱的)が簡略化される。
- ・「給電アレー部」の搭載位置が、反射鏡の収納位置と干渉するケースがあり得る。

表4.2-3 衛星コンフィギュレーション・反射鏡&給電アレー部配置0次案

(本表は概念図を示し、相対位置や寸法等は実際の要求値と異なる)

| | 主構体外搭載方式(ベースライン案) [給電アレー部を主構体の外側に搭載] | 主構体内搭載方式(オプション案) [給電アレー部を主構体の内側に搭載] |
|----------|---|--|
| 3mφ AO方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>3mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>3mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 5mφ AO方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>5mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>5mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 4mφ IR方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>副鏡</p> <p>4mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>副鏡</p> <p>4mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 備考 | | 給電アレー部の発熱を衛星主構体の表面 (e.g.南北面) まで運ぶ必要がある。 |

三日月型の破線で示す反射鏡の位置は打上げ時の収納位置を示す。

4. 3 地上システム構想案

4. 3. 1 概要

実験衛星システムの運用に必要となる地上システムの構成要素として、図4.1-1の様に下記4種類の地上局が挙げられる。

- (1) 実験衛星用追跡管制局 (図4.1-1では「TBD/21GHz帯追跡管制局」)
- (2) 実験衛星用フィーダリンク局 (図4.1-1では「TBD GHz帯フィーダリンク局」)
- (3) 実験衛星用受信モニター局 (図4.1-1では「21GHz帯受信モニター局」)
- (4) 支援用追跡管制局 (図4.1-1では「USB帯追跡管制局」)

これら地上局は、(広義の)地上システムの中から実験衛星とのRF回線を持つフロントエンド部分を切り出したものである。

4. 3. 2 TLM/CMD運用形態について

4. 3. 2. 1 運用機能による区分

前節で述べた各地上局を運用機能により区分すると下記の様になる。

- (1) 21GHz帯実験衛星放送の運用：
実験衛星用フィーダリンク局、実験衛星用受信モニター局
- (2) 実証ミッション機器のTLM/CMD(テレメトリ/コマンド)運用：
実験衛星用追跡管制局
- (3) 衛星システムのTLM/CMD運用：
実験衛星用追跡管制局、支援用追跡管制局

この内、上記(2),(3)項が今回の実験システム特有の運用機能となる。

4. 3. 2. 2 従来の衛星放送システムの場合

21GHz帯衛星放送用実験システムとの比較のため、現行の放送衛星システムの運用形態を図4.3-1に示す。同図の様に、衛星管制センターが現行放送衛星とのTT&C回線を用いて、同衛星のTLM/CMD運用を行なっている。

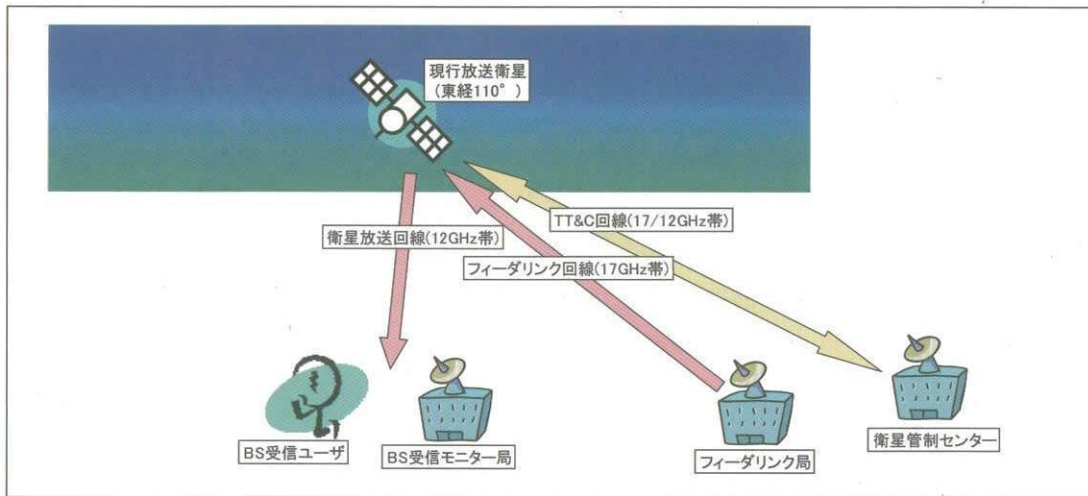


図4.3-1 現行放送衛星におけるTT&C回線形態

4. 3. 2. 3 21GHz帯衛星放送用実験システムの場合

(1) 回線形態

今回の実験システムに対して想定されるTT&C回線形態を図4.3-2に示す。同図は、図4.3-1の現行システムをベースに下記4要素を追加したものである。

- (a) 「支援用追跡管制局用TT&C回線」の付加。JAXA GN局(追跡管制ネットワーク)による打上げ～初期運用、定常段階のバックアップ運用を想定。
- (b) 上記(a)項の「支援用追跡管制局用TT&C回線」はHK(ハウスキーピング)専用とし、「実験衛星管制局用TT&C回線」はミッション/HK共用を想定。
- (c) 「ミッションTT&C回線」の用途として、実証ミッション機器の実験運用に必要な大容量TLM/CMD伝送を想定。
- (d) 「HK-TT&C回線」の用途として、現行衛星と同等のTLM/CMD伝送を想定。衛星バス及び実証ミッション機器のHK運用に用いる。

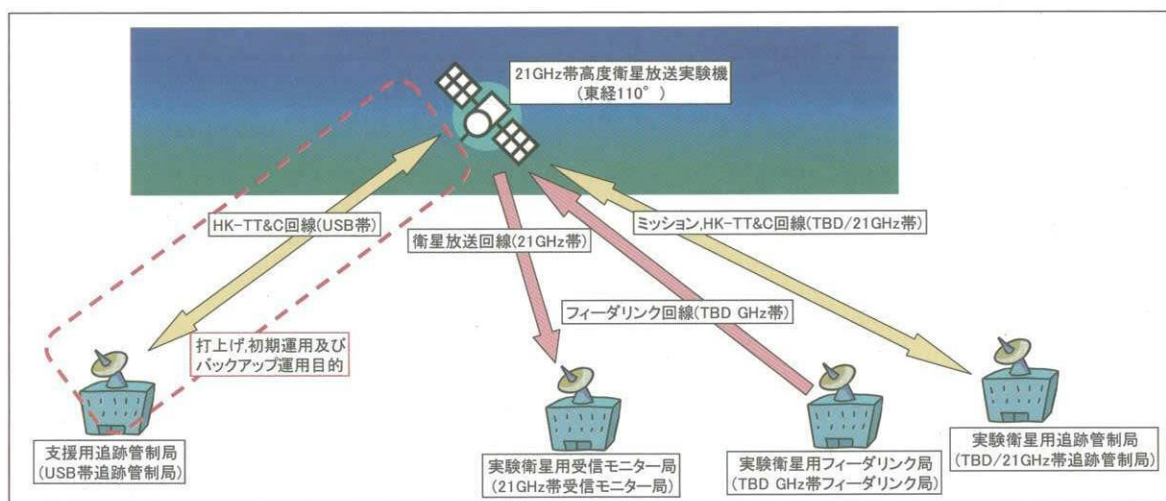


図4.3-2 実験システムに対して想定されるTT&C回線形態(例)

(2) 運用分担

前記(1)項の様に、今回の実験システムに対して3種類のTT&C回線が想定される(概念として3種類に分けたが、物理的な回線数は2~3本となろう)。これら各TT&C回線に対する運用分担の想定例を表4.3-1に示す。

表4.3-1 TT&C回線運用分担(例)

| | 打上げ~初期運用 | 定常段階 実験運用中 | 定常段階 実験運用休止中 |
|--------------------------------|----------|---------------|-----------------|
| ミッションTT&C回線 (衛星-実験衛星用追跡管制局) | 休止 | 運用 | 休止 |
| HK-TT&C回線 (衛星-実験衛星用追跡管制局) | バックアップ | 運用 | 運用 |
| HK-TT&C回線 (衛星-支援用追跡管制局) | 運用 | バックアップ | バックアップ |

(3) 回線仕様

ミッションTT&C回線の仕様検討にあたって、まず、回線帯域の候補案を表4.3-2の様に想定した。

表4.3-2 ミッションTT&C回線の帯域トレードオフ(例)

| ミッションTT&C回線 | 通信設備 | 評価 |
|--------------------------|-------------|--|
| TBD/21GHz帯 (高度衛星放送帯域) | 新設 | ◎ 設計の自由度及び放送回線との帯域共通化の観点から、今回の検討ベースライン案として妥当。 |
| 17/12GHz帯 (現行衛星放送帯域) | 既存設備 の流用 | ○ 「実用機が21GHz&12GHz放送共用」や「21GHz TLMの降雨減衰が問題」となる場合に有利。 |
| その他 | 新設 | △ メリットが少ない。 |

次に、表4.3-2の「TBD/21GHz帯(高度衛星放送帯域)」案を選択した場合の、TT&C回線仕様を表4.3-3に例示する。同表の様に、HK-TT&C回線の仕様(伝送帯域を除く)を現行衛星相当とし、ミッションTT&C回線のみ実証ミッション機器に合わせた新規仕様とするやり方が想定される。

表4.3-3 ミッション及びHK-TT&C回線仕様(例)

| 項目 | ミッションTT&C回線 (衛星-実験衛星用追跡管制局) | HK-TT&C回線 (衛星-実験衛星用追跡管制局) | HK-TT&C回線 (衛星-支援用追跡管制局) |
|-------|-----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 回線周波数 | TLM：高度衛星放送帯域 CMD：高度衛星放送帯域 | TLM：高度衛星放送帯域 CMD：高度衛星放送帯域 | TLM：USB CMD：USB |
| TLM諸元 | 変調方式：TBD ビットレート：90~530bps(TBD) | 変調方式：(現行衛星相当) ビットレート：(現行衛星相当) | 変調方式：(現行衛星相当) ビットレート：(現行衛星相当) |
| CMD諸元 | 変調方式：TBD ビットレート：30~170bps(TBD) | 変調方式：(現行衛星相当) ビットレート：(現行衛星相当) | 変調方式：(現行衛星相当) ビットレート：(現行衛星相当) |

ミッションTT&C回線のTLM/CMDビットレートは、表4.7-1の仮見積りに基づく。

4. 4 打上げシステム構想案

4. 4. 1 概要

今回の検討作業では、実験衛星システムの運用軌道として静止軌道(静止軌道位置の候補案：東経110度)が想定されている。また、同衛星の全備質量(GTO投入時)として、2~4t級が見込まれている。

このような衛星打上げは一般的に行なわれており、我が国の打上げ手段としてはH-2Aロケットが使用できる。また、国外の商業打上げサービスも利用可能である。

4. 4. 2 要求条件

打上げシステムに対する要求条件として、下記4項目が想定される。

- (1) 投入軌道： GTO(静止トランスファー軌道)
- (2) 投入質量： 表4.4-1参照
- (3) フェアリング寸法： 内径3.7mφ×直胴部5m以上
- (4) 打上げ時期： 2012年頃

表4.4-1 実験衛星システムの想定質量[打上げ時]

| | 3mφ AO方式 | 5mφ AO方式 | 4mφ IR方式 | 備考 |
|----------|----------|----------|----------|-------|
| 打上げ時衛星質量 | 2700kg | 3600kg | 4300kg | AKF込み |

上記各項目の内、「投入質量(打上げ時の衛星全備質量)」はあくまでも現時点の想定値であり、衛星設計の進捗に従って変化する可能性が大きい。また、「フェアリング寸法」は、実験衛星の放送アンテナ径に依存する(「5mφ AO方式」の場合、理想的には内径5mφ以上が望ましい)項目である。

4. 4. 3 候補案

4. 4. 3. 1 H-2A

実験衛星の打上げ手段候補として、我が国の基幹ロケットであるH-2Aの利用が想定可能である。

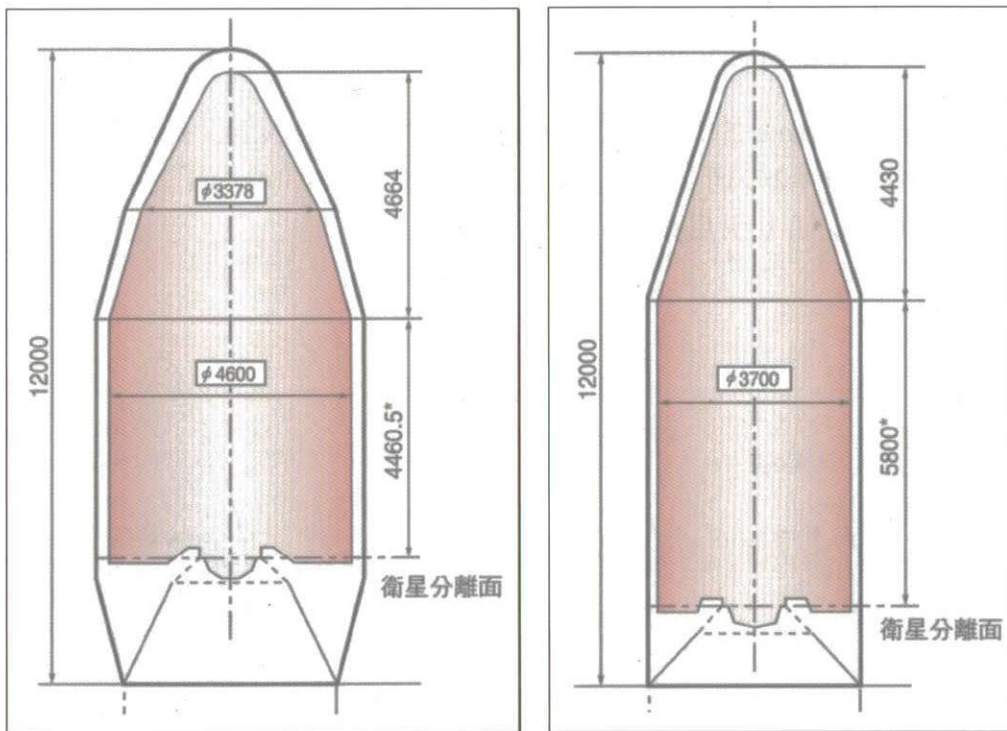


図4.4-1 H-2Aの5S型フェアリング(左)及び4S型フェアリング(右)の衛星包絡域
(公開資料「H-IIAシステム解説書(2001年12月)」より転載)

「H-IIAユーザーズマニュアル」を参考に検討した結果、実験衛星打上げに適合したH-2Aファミリーとして、表4.4-2の候補案が想定される。なお、H-2Aに「5mφ AO方式」の実験衛星システムを搭載する場合、5S型フェアリングを用いても放送アンテナの反射鏡が同フェアリングの包絡域と干渉するため、反射鏡の分割,変形収納が前提条件となる。

表4.4-2 実験衛星システムに適合したH-2A機種候補案[打上げ時]

| | 3mφ AO方式 | 5mφ AO方式 | 4mφ IR方式 | 備考 |
|----------|------------------------|------------------------|------------------------|-------|
| 打上げ時衛星質量 | 2700kg | 3600kg | 4300kg | AKF込み |
| 打上げ手段(例) | H-2A202 (4S型フェアリング) | H-2A202 (5S型フェアリング) | H-2A204 (5S型フェアリング) | |

4. 4. 3. 2 国外の商業打上げサービス

実験衛星の打上げ手段候補として、国外の商業打上げサービスの利用も想定可能である。欧米の打上げサービスを利用する場合、下記各ロケットが代表的な候補例となる。

- (1) Ariane 5 (e.g. A5ES, A5ECA)
- (2) Delta IV (e.g. Delta IV-M, -M+)
- (3) Atlas V (e.g. Atlas V 400 Series, 500 Series)

一例として、Ariane 5のGTO打上げ能力($i=7deg$)は8t以上、その典型的なフェアリング寸法は図4.4-2の通りである(「Ariane 5 User's Manual Issue 4 Revision 0 (November 2004)」より引用)。

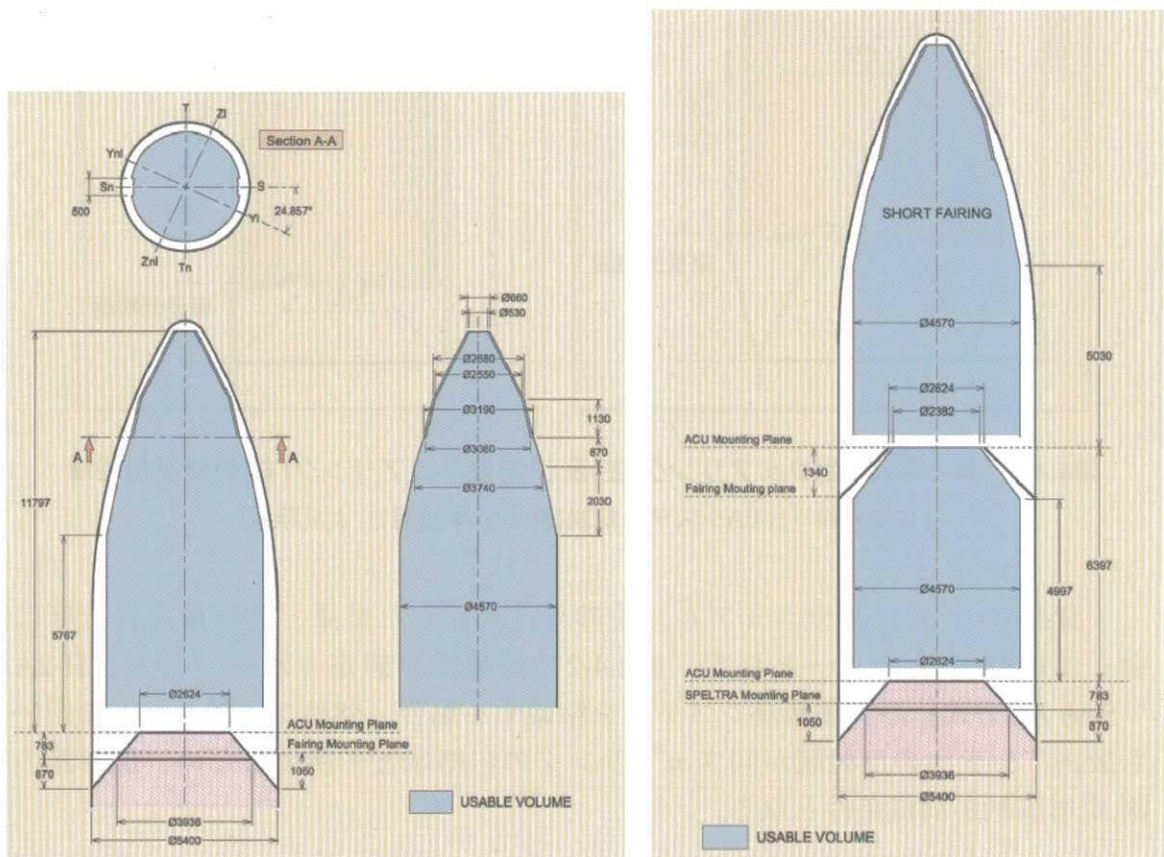


図4.4-2 Ariane 5のフェアリング例 シングルロッチ用フェアリング(short fairing)(左)とデュアルロッチ用フェアリング(SPELTRA 5660使用モデル)(右)

4. 5 衛星コンフィギュレーションの検討

本節では、「21GHz帯衛星放送用実験衛星システム」の衛星コンフィギュレーションについて、今回行なったシステム検討結果を述べる。

4. 5. 1 概要

4. 5. 1. 1 本検討の位置付け

「21GHz帯高度放送衛星システムに関する研究」の一環として、実験衛星システムのフェアリング収納性を検討した。これにより、下記に示す実証ミッション機器・搭載候補案の衛星搭載に関する適合性を予備検証した。

[21GHz帯放送衛星実証ミッション機器・搭載候補案]

- (a) 「開口径3m, 素子数32 アレー給電オフセットパラボラ」方式 (3mφAO)
- (b) 「開口径5m, 素子数64 アレー給電オフセットパラボラ」方式 (5mφAO)
- (c) 「開口径4m, 素子数188 イメージングリフレクタ」方式 (4mφIR)

4. 5. 1. 2 検討結果

今回の検討結果をまとめると、下記の様になる。

(1) 反射鏡のフェアリング収納性(表4.5-1参照)

- ・ 「3mφ AO方式」の場合、H-2A用4mφフェアリングに収納可能。
- ・ 「5mφ AO方式」の場合、H-2A用5mφフェアリングでも反射鏡の一部がはみ出るため、何らかの工夫(e.g.反射鏡の折畳み,はみ出し部分のカット)が必要。
- ・ 「4mφ IR方式」の場合、H-2A用5mφフェアリングに収納可能。

(2) 給電アレー部の搭載位置

- ・ 給電アレー部の搭載位置として、「主構体内搭載方式」と「主構体外搭載方式」の2案を検討したが、両案とも上記(1)項の検討結果に影響なし。
- ・ ただし、「主構体外搭載方式」は給電アレー部との接触を防ぐため反射鏡の収納位置が上がり、フェアリング収納性が若干劣化する(占有容積の増加)。

表4.5-1 実験衛星システムの衛星コンフィギュレーション検討結果(概要)

| 検討モデル案 | H-2A用4mφフェアリング (内径：3.7mφ,直胴部：5.5m) | H-2A用5mφフェアリング (内径：4.6mφ,直胴部：4.5m) |
|-----------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 「3mφAO方式」用衛星モデル | ○：大きい問題点は見当たらない。 | 未検討(恐らく○)。 |
| 「5mφAO方式」用衛星モデル | 未検討(恐らく×)。 | △：反射鏡収納の工夫が必要。 |
| 「4mφIR方式」用衛星モデル | 未検討(恐らく×)。 | ○：大きい問題点は見当たらない。 |

4. 5. 2 検討結果

4. 5. 2. 1 検討モデル案の概要

検討対象とした衛星システム・モデル案を表4.5-2(表4.2-3「反射鏡及び給電アレー部配置0次案」と同じ)に示す。同表の様に、「実証ミッション機器」3種類と「給電アレー部の搭載位置」各2案による計6種類のモデル案を想定した。

この様に、給電アレー部に関して「主構体外搭載方式」と「主構体内搭載方式」の2案を用意したのは、高発熱機器である給電アレー部の搭載位置によって、全体的な熱設計方針が下記の様になるためである。

- (1) 「主構体外搭載方式(給電アレー部を主構体の外側に搭載)」
→ 基本的に、給電アレー部の放熱は当該機器が独自に行なう。
- (2) 「主構体内搭載方式(給電アレー部を主構体の内側に搭載)」
→ 基本的に、給電アレー部の放熱も衛星バス部を介して行なう。

表4.5-2 検討対象とした衛星システム・モデル案
 (本表は概念図を示し、相対位置や寸法等は実際の要求値と異なる)

| | 主構体外搭載方式(ベースライン案) [給電アレー部を主構体の外側に搭載] | 主構体内搭載方式(オプション案) [給電アレー部を主構体の内側に搭載] |
|----------|---|--|
| 3mφ AO方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>3mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>3mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 5mφ AO方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>5mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>5mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 4mφ IR方式 | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体外面取付け)</p> <p>副鏡</p> <p>4mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> | <p>↑ +Z(地心)方向 ⊗ +Y(南)方向</p> <p>給電アレー部 (構体内埋込み)</p> <p>副鏡</p> <p>4mφ 反射鏡</p> <p>衛星主構体</p> |
| 備考 | | 給電アレー部の発熱を衛星主構体の表面 (e.g.南北面) まで運ぶ必要がある。 |

三日月型の破線で示す反射鏡の位置は打上げ時の収納位置を示す。

4. 5. 2. 2 「3mφ AO方式」用衛星モデル案のフェアリング収納性

(1) 前提条件

(1-1) 反射鏡形状及び配置

3.2.1節「アンテナ構成」に基づき、「3mφ AO方式」の反射鏡形状及び給電アレーとの相対位置を図4.5-1の様に想定した。

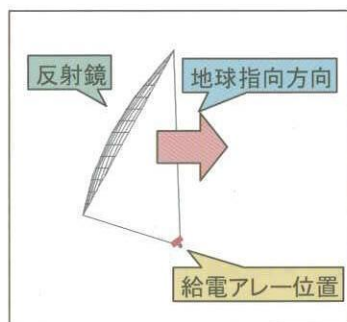


図4.5-1 「3mφ AO方式」の反射鏡形状及び配置(図3.2-2に加筆したもの)

(1-2) フェアリング包絡域

「H-IIAユーザーズマニュアル」より、典型的な「4S型フェアリング(図4.4-1の右図参照)」の衛星包絡域を検討に用いた。

(1-3) 検討作業の前提条件

検討作業にあたって、下記の前提条件を立てた。

- ・ 放送用送信アンテナの反射鏡を平らな楕円板(3m×3.5m)に見立てる。また、それ以外のアンテナ配置(フィーダリンクアンテナ等)は検討対象外とする。
- ・ 衛星構体の形状を2.5m×2.5m×2.5mの直方体とする。
- ・ フェアリング直胴部の長さを5.5mとし、デュアルロンチは検討対象外とする。

(2) 検討結果

(2-1) アンテナ配置の設定

今回、図4.5-2の様にアンテナ各部(反射鏡,給電アレー部)を配置した。同図を三次元化すると図4.5-3の様になる(反射鏡支持構造の図示は省略した)。

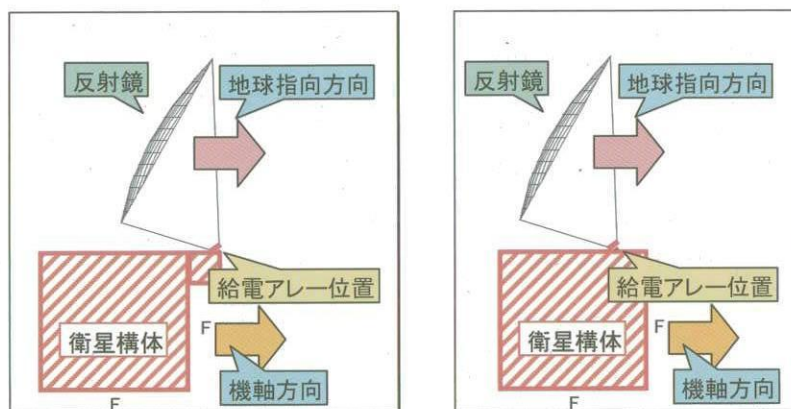


図4.5-2 「3mφ AO方式」用衛星モデル案の二次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

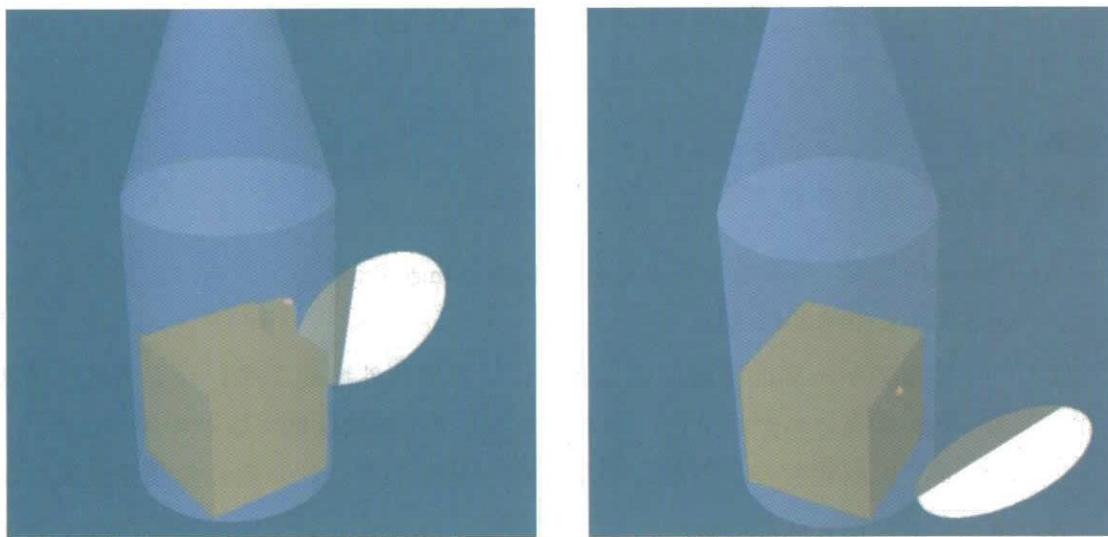


図4.5-3 「3mφ AO方式」用衛星モデル案の三次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(2-2) アンテナ収納状態

図4.5-3の衛星構体表面に回転軸を置き、そこを中心に反射鏡を回転させた様子を図4.5-4に示す。同図の様に、反射鏡はフェアリング包絡域に収まり、この状態で反射鏡をロンチロックできれば本衛星モデル案は収納可能と考えられる。

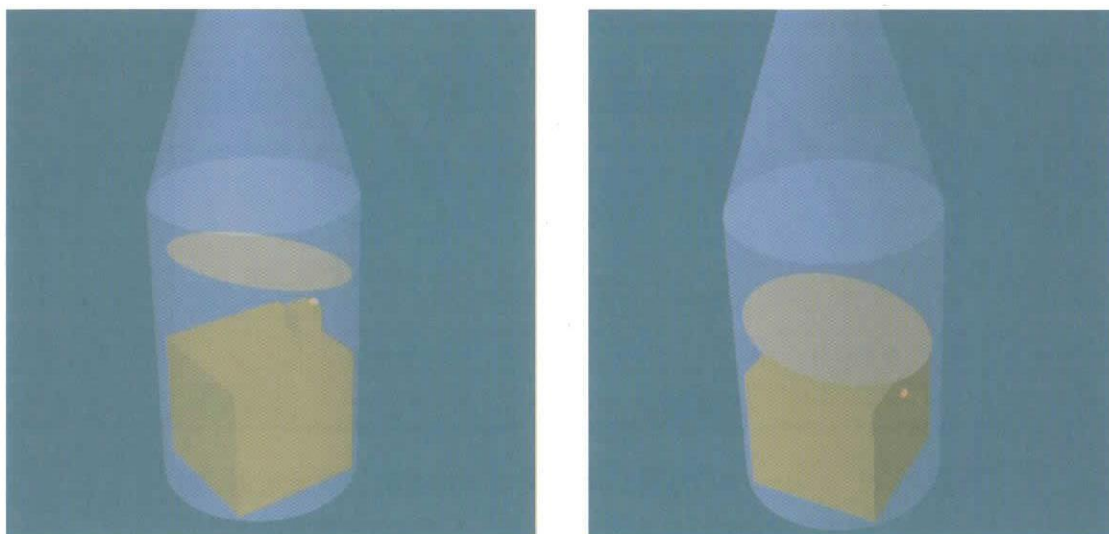


図4.5-4 「3mφ AO方式」用衛星モデル案の打上げ形態(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(3) 考察

本節の検討結果を考察すると下記の様になる。

- (a) 「3mφ AO方式」用衛星モデル案を、H-2A用4mφフェアリング内に収納する様子を例示できた(図4.5-4参照)。
 - ・ 給電アレー部の搭載位置として、「主構体外搭載方式」「主構体内搭載方式」両案とも例示でき、基本的に本モデル案は収納可能と判断される。
 - ・ また、収納時の反射鏡分割,変形は不要であり、この部分の開発要素はない。
- (b) なお、それ以外の反射鏡(フィーダリンク,TT&C用)の打上げ時収納場所として、図4.5-2に示す2箇所(F印の付いた衛星構体面)を想定できる。

4. 5. 2. 3 「5mφ AO方式」用衛星モデル案のフェアリング収納性

(1) 前提条件

(1-2) 反射鏡形状及び配置

3.2.1節「アンテナ構成」に基づき、「5mφ AO方式」の反射鏡形状及び給電アレーとの相対位置を図4.5-5の様に想定した。

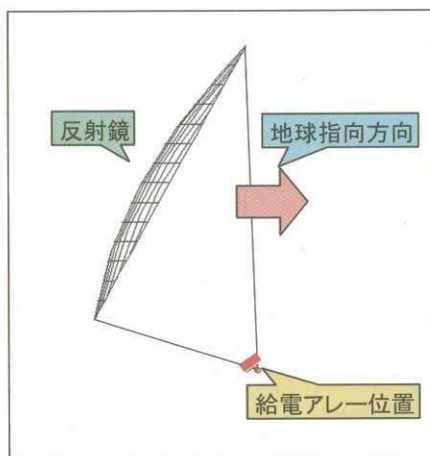


図4.5-5 「5mφ AO方式」の反射鏡形状及び配置(図3.2-2に加筆したもの)

(1-2) フェアリング包絡域

「H-IIAユーザーズマニュアル」より、典型的な「5S型フェアリング(図4.4-1の左図参照)」の衛星包絡域を検討に用いた。

(1-3) 検討作業の前提条件

検討作業にあたって、下記の前提条件を立てた。

- ・ 放送用送信アンテナの反射鏡を平らな楕円板(5m×5.7m)に見立てる。また、それ以外のアンテナ配置(フィーダリンクアンテナ等)は検討対象外とする。
- ・ 衛星構体の形状を2.5m×2.5m×2.5mの直方体とする。
- ・ フェアリング直胴部の長さを4.5mとする。

(2) 検討結果

(2-1) アンテナ配置の設定

今回、図4.5-6の様にアンテナ各部(反射鏡,給電アレー部)を配置した。同図を三次元化すると図4.5-7の様になる(反射鏡支持構造の図示は省略した)。

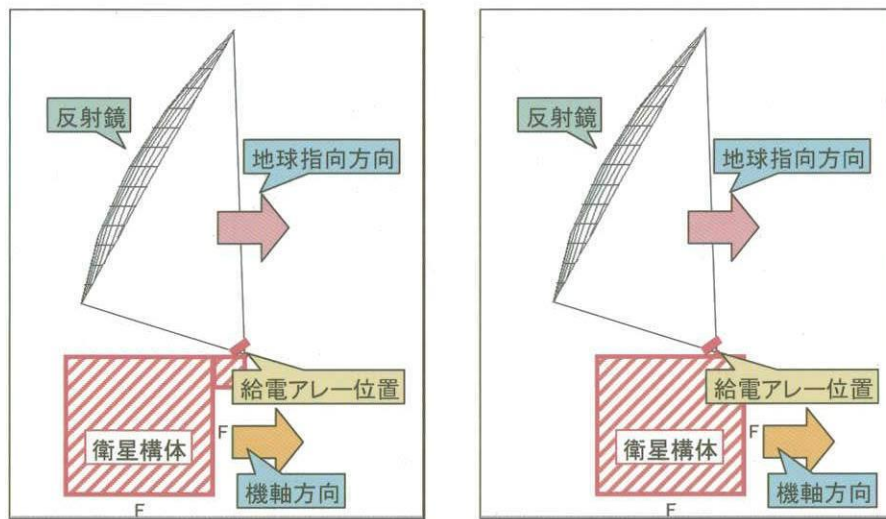


図4.5-6 「5mφ AO方式」用衛星モデル案の二次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

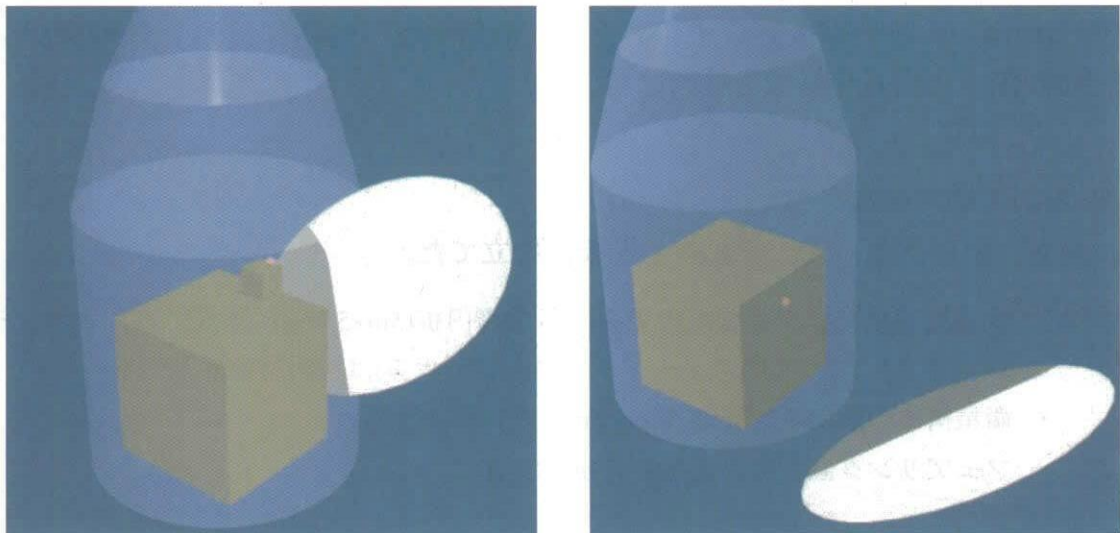


図4.5-7 「5mφ AO方式」用衛星モデル案の三次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(2-2) アンテナ収納状態

図4.5-7の衛星構体内部に回転軸を置き、そこを中心に反射鏡を回転させた様子を図4.5-8に示す。同図の様に、本衛星モデル案の反射鏡はフェアリング包絡域に収まらない。これは、包絡域の直径(4.6mφ)が反射鏡サイズより小さいためである。

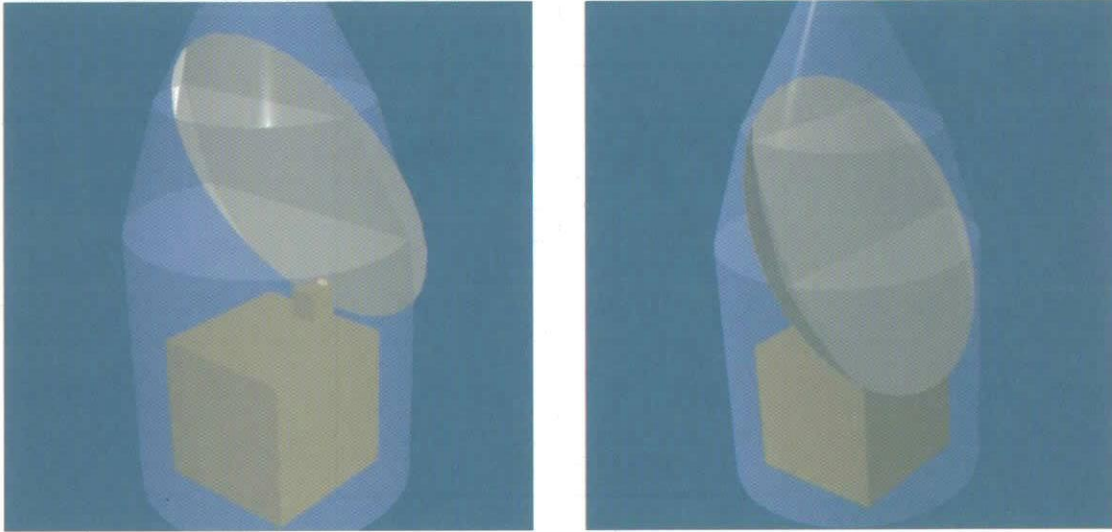


図4.5-8 「5mφ AO方式」用衛星モデル案の打上げ形態(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(3) 考察

本節の検討結果を考察すると下記の様になる。

- (a) 「5mφAO方式」用衛星モデル案をH-2A用5mφフェアリング内に収納する際、同包絡域から反射鏡の一部がはみ出ることを確認した(図4.5-8参照)。
 - ・ 給電アレー部の搭載位置が異なる「主構体外搭載方式」「主構体内搭載方式」両案とも同様な状況であった。
- (b) この様な「5mφAO方式」用衛星モデル案をフェアリング内に収納するための方策として、例えば下記2案が考えられる。
 - (案a) 反射鏡を「分割または変形化して収納→軌道上展開」構造にする。
 - (案b) 性能劣化が予想されるが、反射鏡の「はみ出し部分をカット」する。
- (c) なお、それ以外の反射鏡(フィーダリンク,TT&C用)の打上げ時収納場所として、図4.5-6に示す2箇所(F印の付いた衛星構体面)を想定できる。

4. 5. 2. 4 「4mφ IR方式」用衛星モデル案のフェアリング収納性

(1) 前提条件

(1-2) 反射鏡形状及び配置

3.2.1節「アンテナ構成」に基づき、「4mφ IR方式」の反射鏡形状及び給電アレーとの相対位置を図4.5-9の様に想定した。

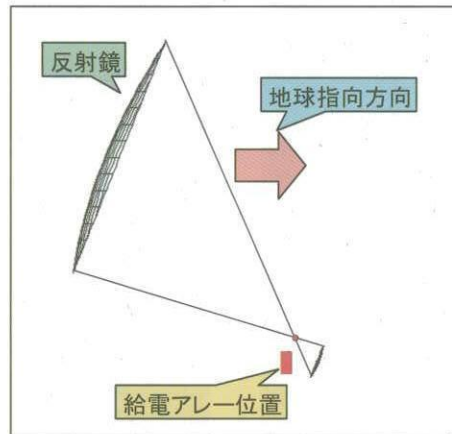


図4.5-9 「4mφ IR方式」の反射鏡形状及び配置(図3.2-2に加筆したもの)

(1-2) フェアリング包絡域

「H-IIAユーザーズマニュアル」より、典型的な「5S型フェアリング(図4.4-1の左図参照)」の衛星包絡域を検討に用いた。

(1-3) 検討作業の前提条件

検討作業にあたって、下記の前提条件を立てた。

- ・ 放送用送信アンテナの反射鏡を平らな楕円板(4m×4.3m)に見立てる。また、それ以外のアンテナ配置(フィーダリンクアンテナ等)は検討対象外とする。
- ・ 衛星構体の形状を2.5m×2.5m×2.5mの直方体とする。
- ・ フェアリング直胴部の長さを4.5mとする。

(2) 検討結果

(2-1) アンテナ配置の設定

今回、図4.5-10の様にアンテナ各部(反射鏡,給電アレー部)を配置した。同図を三次元化すると図4.5-11の様になる(反射鏡支持構造の図示は省略した)。

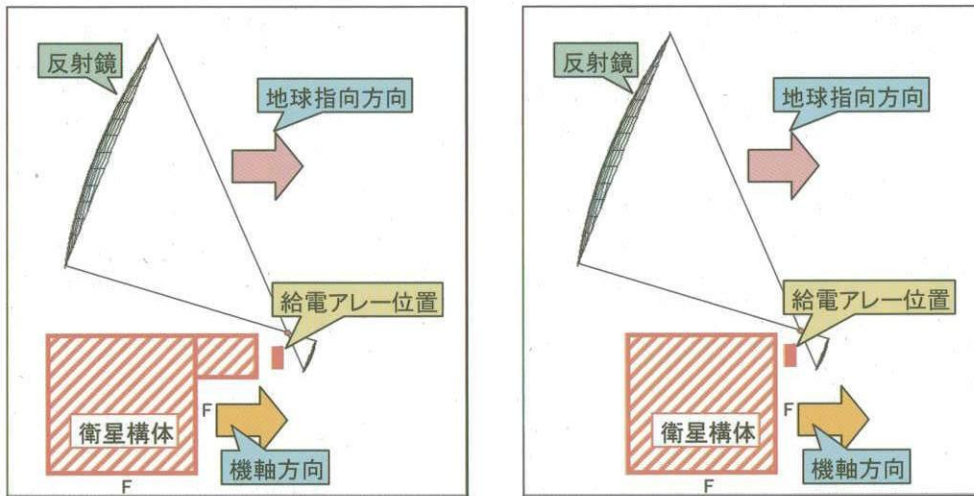


図4.5-10 「4mφ IR方式」用衛星モデル案の二次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

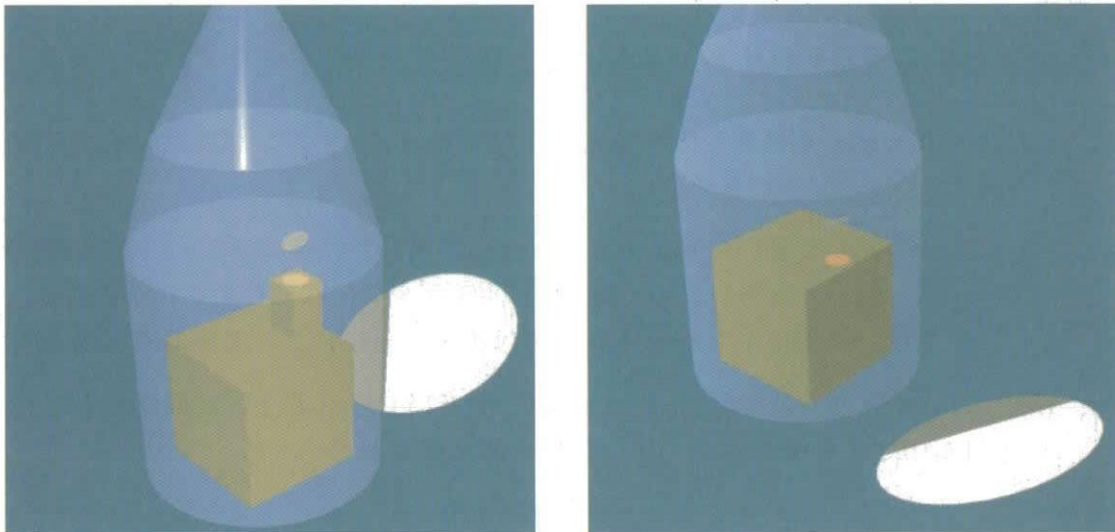


図4.5-11 「4mφ IR方式」用衛星モデル案の三次元配置(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(2-2) アンテナ収納状態

図4.5-11の衛星構体表面に回転軸を置き、そこを中心に反射鏡を回転させた様子を図4.5-12に示す。反射鏡はフェアリング包絡域に収まり、この状態で反射鏡をロンチロックできれば本衛星モデル案は収納可能と考えられる。

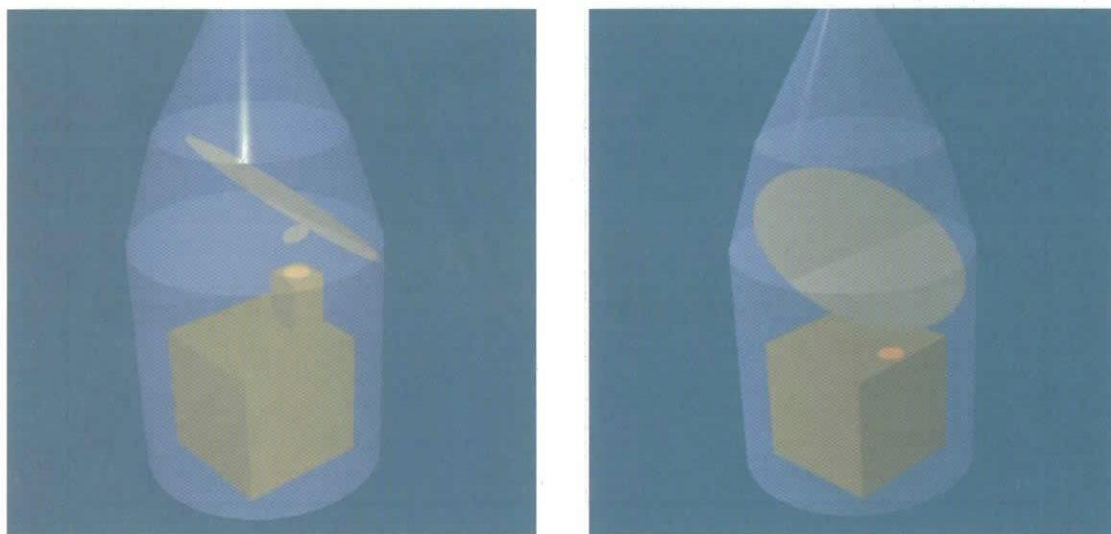


図4.5-12 「4mφ IR方式」用衛星モデル案の打上げ形態(例)

左図：主構体外搭載方式、右図：主構体内搭載方式

(3) 考察

本節の検討結果を考察すると下記の様になる。

- (a) 「4mφIR方式」用衛星モデル案を、H-2A用5mφフェアリング内に収納する様子を例示できた(図4.5-12参照)。
 - ・ 給電アレー部の搭載位置として、「主構体外搭載方式」「主構体内搭載方式」両案とも例示でき、基本的に本モデル案は収納可能と判断される。
 - ・ また、収納時の反射鏡分割、変形は不要であり、この部分の開発要素はない。
- (b) なお、それ以外の反射鏡(フィーダリンク,TT&C用)の打上げ時収納場所として、図4.5-10に示す2箇所(F印の付いた衛星構体面)を想定できる。

4. 5. 3 今後の検討課題

今後、実験衛星システムの設計検討を進める場合、衛星コンフィギュレーションに関する下記3項目の検討課題が挙げられる。

- (1) 今回、放送用送信アンテナの反射鏡を平らな楕円板に模した。
→ 今後、反射鏡の形状(分割,変形構造を含め)を正確に模擬した検討が必要。
- (2) 今回、大口径の放送用送信アンテナの検討に限定した。
→ 今後、TT&C用,フィーダリンク用アンテナの収納や、太陽電池パドル,姿勢センサ等の視野要求を含めた検討が必要。
- (3) 今回、アンテナ支持構造が未検討である。
→ 今後、反射鏡や支柱の強度、ロンチロック方式等を考慮した検討が必要。

4. 6 衛星姿勢制御機能の検討

本節では、「21GHz帯衛星放送用実験衛星システム」の衛星姿勢制御機能について、今回行なったシステム検討結果を述べる。

4. 6. 1 放送波指向方式に対応した衛星姿勢制御機能について

4. 6. 1. 1 現状認識

COMETS(平成9年11月打上げ,GTO投入失敗)、DRTS(平成14年9月打上げ)の衛星姿勢制御精度(仕様値)を下記に示す。実証ミッション機器の仕様から導かれる、実験衛星システムに対する精度要求がこれより緩ければ、「放送波指向方式に対応した衛星姿勢制御機能の新規開発」という検討課題は発生しない。

・姿勢制御精度(定常モード)

| | |
|-----|--------------|
| ロール | : ±0.05deg以内 |
| ピッチ | : ±0.05deg以内 |
| ヨー | : ±0.15deg以内 |

これに対して、実証ミッション機器の仕様を仮に「増力ビーム幅：0.1deg」とし、その10%の「指向精度：±0.01deg」程度を要求条件と想定するならば、上記仕様値では性能不足となる可能性がある。この場合、衛星姿勢制御精度をより高精度化させるか、それ以外の指向補正手段を付加する必要がある。

4. 6. 1. 2 放送波指向精度の向上策

前節で述べた従来の衛星姿勢制御精度では、実証ミッション機器が要求する指向精度を満足しない場合、同精度要求に対処する手段として、次頁の様な方策が考えられる(図4.6-1,表4.6-1参照)。

- (1) 衛星姿勢制御精度の高精度化が不要となるケース
- (a) 放送波指向精度の要求条件が厳しくない場合
放送波指向精度要求が、既開発衛星(e.g.DRTS)の「姿勢制御精度+取付けアライメント精度」より緩い場合、衛星姿勢制御精度の高精度化は不要である。
 - (b) 衛星バス系とは独立した放送波指向システムを採用する場合
実証ミッション機器や地上システムが独自に放送波の指向誤差を検出、放送波の指向補正を行なう様な場合、衛星姿勢制御精度の高精度化は不要である。
- (2) 衛星姿勢制御精度の高精度化が必要となるケース
- (a) 放送波指向制御に衛星の姿勢決定情報を用いる場合
衛星の姿勢制御系が生成する姿勢決定情報を用いて、実証ミッション機器が放送波の指向制御を行なう様な場合、姿勢制御系の姿勢決定精度向上が必要となる。
 - (b) 放送波指向精度が衛星の姿勢制御精度に全面依存する場合
実証ミッション機器や地上システムが放送波の指向補正機能を持たない様な場合、姿勢制御系の姿勢制御精度向上が必要となる。

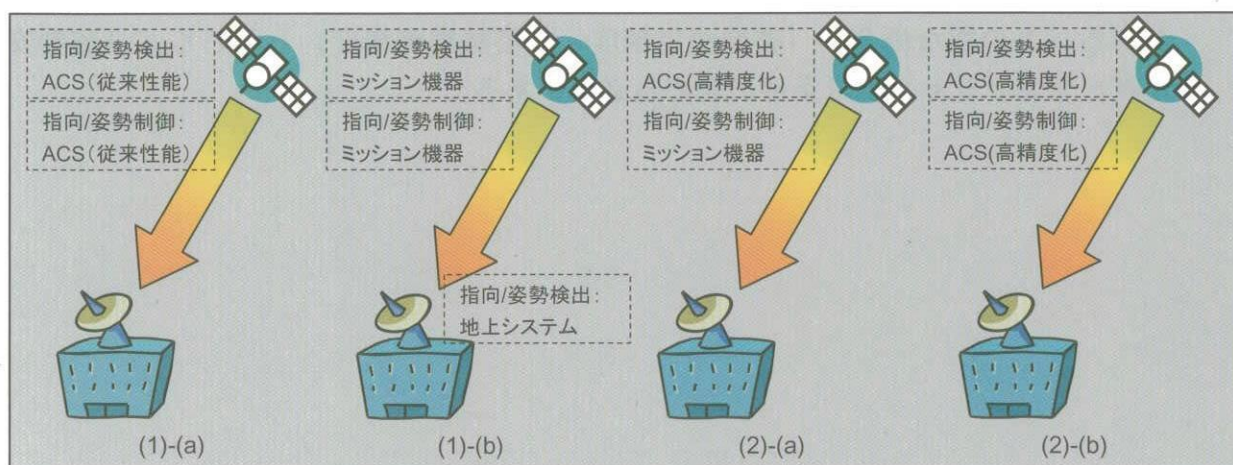


図4.6-1 放送波指向精度の向上策・概念図(ACS：姿勢制御系)

表4.6-1 放送波指向精度の向上策・比較表

| | (1)-(a) | (1)-(b) | (2)-(a) | (2)-(b) |
|---------|------------------|---------------------|--------------------|------------|
| 指向/姿勢検出 | 姿勢制御系 | ミッション機器または地上システム | 姿勢制御系 | 姿勢制御系 |
| 指向/姿勢制御 | 姿勢制御系 | ミッション機器 | ミッション機器 | 姿勢制御系 |
| ミッション機器 | 負担増:なし | 負担増:小~中? | 負担増:小? | 負担増:なし |
| 衛星システム | 負担増:なし | 負担増:なし | 負担増:小? | 負担増:大? |
| 地上システム | 負担増:なし | 負担増:中? | 負担増:なし | 負担増:なし |
| 備考 | 要求精度が既開発衛星の同程度以下 | ミッション機器と地上システムに全面依存 | 姿勢制御系とミッション機器が役割分担 | 姿勢制御系に全面依存 |

4. 6. 2 今後の検討課題

4. 6. 2. 1 概要

前節(2)-(a),(b)項の様な「放送波指向精度の向上策」を図る場合、姿勢制御系の負担が増え、その度合いによってはミッションクリティカル要素となる。従って、今後の検討課題として下記2項目が挙げられる。

- ・ 放送波の指向精度要求の明確化
- ・ 放送波の指向制御方式の検討

これにより、衛星の「姿勢決定精度」「姿勢制御精度」の機能向上が不可欠と判断される場合、姿勢制御系の高精度化が必要となる。

4. 6. 2. 2 姿勢安定度について

前節(1)-(b)項,(2)-(a)項の様に、姿勢/指向誤差情報に基づいて「実証ミッション機器」が指向補正する場合、衛星の「姿勢安定度」が悪いと補正困難となる恐れがある。この様な場合、「姿勢決定精度」「姿勢制御精度」と同じく、「姿勢安定度」もミッション要求条件に含める必要がある。

4. 7 衛星TT&C機能の検討

4. 7. 1 実証ミッション機器に対応した衛星TT&C機能について

4. 7. 1. 1 現状認識

TT&C(トラッキング,テレメトリ及びコマンド)機能は衛星主要機能の一つであり、静止衛星の場合、「TLM(テレメトリ)データ収集&送信」「CMD(コマンド)データ受信&配信」「レンジング信号の中継」等の通信&データ処理を行なう。また、従来の静止衛星に対して要求されるTT&C機能は、比較的簡易であった。例えば、DRTS(平成14年9月打上げ)に搭載されたTT&C系の主要諸元は下記の通りである。

- ・周波数帯域 USB(HK回線)、Ka-band(ミッション回線)
- ・回線レート(USB) TLM:512bps/2048bps、CMD:1000bps
- ・回線レート(Ka-band) TLM:2048bps、 CMD:1000bps
(HK:ハウスキーピング)

これに対して、「21GHz帯放送衛星実証ミッション機器」では従来にないTT&C機能要求が想定される。中でも、「給電アレー部(TWTA/SSPA:32~188本)」のTLM/CMD伝送レート要求が大きいと思われる。

4. 7. 1. 2 実証ミッション機器のTLM/CMDに関する予備検討

実証ミッション機器のTLM/CMDに関する下記の予備検討を行なった。

(1) 実証ミッション機器のTLM/CMD伝送レートへの対応

同機器の全TLM/CMD項目の内、その大部分を占めるとと思われる「給電アレー部」伝送レートについて、仮の要求値を想定した見積り結果を表4.7-1に示す。

実際の要求条件もこの程度ならば、TT&C機能(e.g.処理速度,伝送帯域幅)に対するインパクトは少ない。なお、今回はCCSDS(Consultative Committee for Space Data Systems)勧告準拠の packets 伝送形式を想定、CMD伝送効率の向上を図った。

表4.7-1 「給電アレー部」TLM/CMD伝送レートの仮見積り(例)

| | TLM | CMD | 備考 |
|-------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| TLM/CMD項目の割当て | TWTA・SSPA毎に18Byte | TWTA・SSPA毎に5Byte | 左記の割当て数は、表3.7-1に基づく想定 |
| TLM情報取得&パケット送信、CMDパケット受信&配信間隔 | 全TWTA・SSPA(32~188本)のTLM情報を、毎分1回 | 全TWTA・SSPA(32~188本)のCMD配信を、毎分1回 | 左記の処理間隔は、今回の仮の要求値 |
| TLM/CMDパケットのユーザデータ長、伝送効率 | ユーザデータ長:4608bit、パケット伝送効率:85%程度 | ユーザデータ長:1280bit、パケット伝送効率:75%程度 | |
| 給電アレー部のTLM/CMD伝送レート例 | 90~530bps程度 | 30~170bps程度 | 左記の見積り結果は、割当て数や処理間隔にほぼ比例 |

(2) 実証ミッション機器に対する連続CMD伝送への対応

今回の予備検討では、ミッション運用中の連続的なCMD伝送(表4.7-1の仮見積りでは「毎分1回」)を想定した。このような運用形態は現行の放送衛星と異なるが、一般的に衛星のCMD受信&配信機能は常時ONであることから、TT&C機能に対するインパクトは小さいと思われる(衛星運用面の方にインパクトが生じる)。

(3) TT&C回線(HK用,ミッション用)の構成例

実験衛星システムのTT&C回線形態として、表4.7-2に示す「TT&C回線の2本構成」方式が想定される。

表4.7-2 実験衛星システムにおける「TT&C回線の2本構成」(例)

| | |
|---------|---|
| HK回線 | <ul style="list-style-type: none"> ・打上げ～初期運用や定常段階のバックアップ運用に用いる。 ・衛星バスの全CMD/TLM、ミッション機器の主要CMD/TLMに対応。 ・JAXAの追跡管制網を用いる場合、同回線用にUSBトランスポンダを衛星搭載。 |
| ミッション回線 | <ul style="list-style-type: none"> ・ミッション運用時に用いる。 ・衛星バスの全CMD/TLM、ミッション機器の全CMD/TLMに対応。 ・同回線用高利得アンテナとフィーダリンクアンテナとの共用化の可能性あり。 |

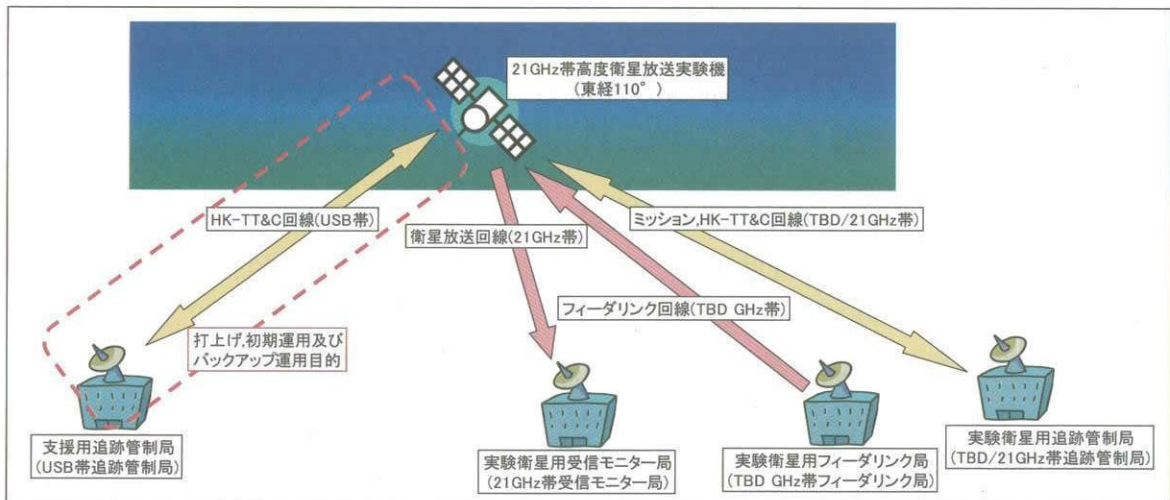


図4.7-1 実験衛星システムに対して想定されるTT&C回線形態(例)(前出)

4. 7. 2 今後の検討課題

4. 7. 2. 1 概要

前節の予備検討結果から、実験衛星システムのTT&C機能に関する今後の検討課題として、下記2項目が挙げられる。

- ・ 実証ミッション機器におけるTLM/CMD要求の明確化
- ・ 実験衛星システムのミッション運用形態に関する検討

これにより、具体的なTT&C機能の設計検討が可能となる。また、後述するミッション機器との部分共用化等の実現性を明らかにできる。

4. 7. 2. 2 ミッション機器との部分共用化について

現行の放送衛星の場合、TT&C回線帯域が衛星放送用帯域(17/12GHz帯)に隣接しているため、「放送用送受信アンテナ」と「TT&C用高利得アンテナ」の共用化が容易になっていると推測される。

実験衛星システムの場合でも、ミッションTT&C回線帯域が放送用帯域に近ければ(アンテナ回りの機器仕様に大きなインパクトが生じない範囲内ならば)、下記の様な共用化が考えられる。

- ・ 「フィーダリンク用アンテナ」と「TT&C用高利得アンテナ」の共用化

4. 7. 2. 3 CCSDS勧告準拠の packets 伝送形式について

前節の予備検討では、各国の宇宙機関間の相互運用を目的とするCCSDS勧告に準拠したTLM/CMD packets 伝送形式を想定した。実験衛星システムのミッション、HK-TT&C回線用に同伝送形式を採用する場合、予想されるメリット/デメリットとして下記3項目が挙げられる。

[メリット例]

- ・ JAXA追跡管制ネットワークの標準方式であり、支援用追跡管制局としてHK-TT&C回線を結ぶ場合に、同ネットワークの新規設備負担が抑えられる。
- ・ ミッションTT&C回線用としては伝送形態(e.g.データ長,形式,伝送順)や伝送頻度の制約が少なく、インタフェース調整や運用調整に有利である。

[デメリット例]

- ・ 現行放送衛星の地上設備仕様(詳細は不明であるが)との相違点が増える。

4. 7. 3 衛星TT&C系構成の具体例(参考)

4.7.2.1節で述べた「TLM/CMD要求や運用形態の明確化」の方が優先事項であるが、仮に衛星TT&C系の具体的構成案を検討・例示するならば下記のようになる。

4. 7. 3. 1 検討ベースライン案(例)

実験衛星システムのTT&C系構成例を図4.7-2に示す。その特徴は下記の通り。

- TLM/CMD処理機能1系統で、「K-band回線(ミッション&HK共用TLM/CMD信号)」と「USB回線(HK-TLM/CMD信号)」の両方のハンドリングを行なう。
- TLM/CMD処理装置の設計次第で、「実験衛星用追跡管制局のミッションTT&C運用」と「支援用追跡管制局のHK-TT&C運用」の同時運用が可能。

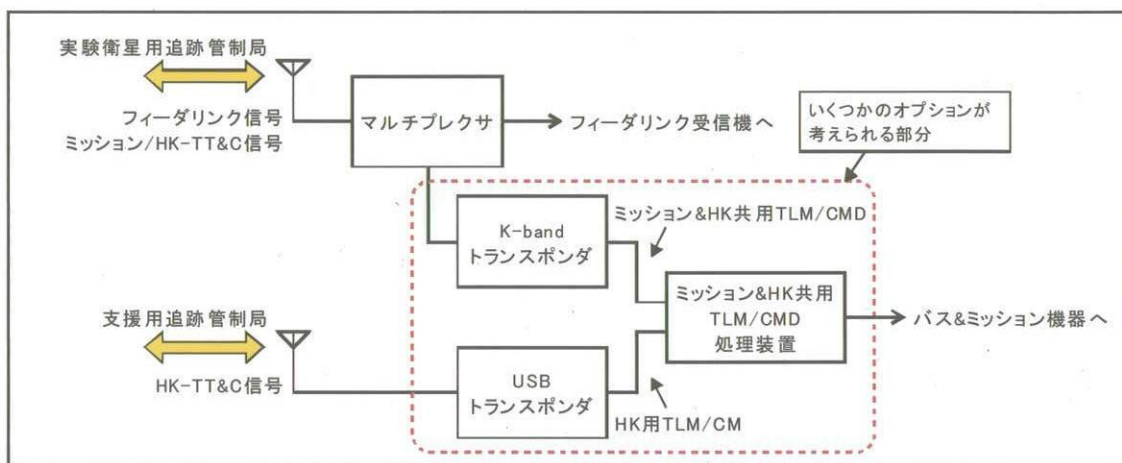


図4.7-2 TT&C系構成のベースライン案(例)

4. 7. 3. 2 オプション案(例1)

図4.7-2の様に構成を部分変更したオプション案(例1)を図4.7-3に示す。同案の特徴は下記の通り。

- K-bandトラポンの代わりにK/Sコンバータを置き、通信機能を簡易化。K-band回線とUSB回線とも「ミッション&HK共用TLM/CMD信号」となる点がデメリット。
- 基本的に、「実験衛星用追跡管制局のミッションTT&C運用」と「支援用追跡管制局のHK-TT&C運用」の同時運用は不可能。
- 「ミッション&HK共用TLM/CMD信号」の伝送レート要求が低く、同信号をK-band回線とUSB回線の両方に流す場合、検討ベースライン案より有利となる。

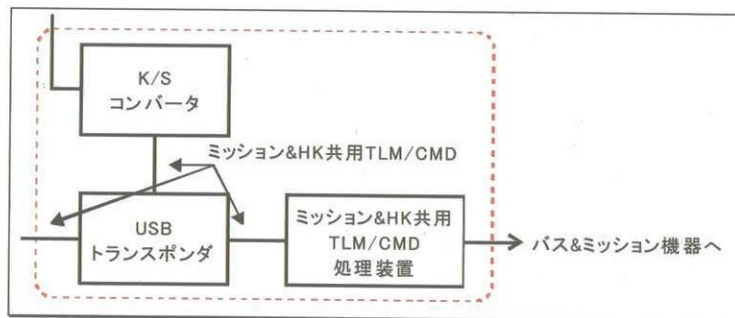


図4.7-3 TT&C系構成例(図4.7-2)のオプション案(例1)

4. 7. 3. 3 オプション案(例2)

もう一つのオプション案(例2)を図4.7-4に示す。その特徴は下記の通り。

- ・ 回線毎にTLM/CMD処理機能を分離。それに付随して、K-band回線では「ミッション用TLM/CMD信号」と「HK用TLM/CMD信号」の両chをRF的に多重伝送する。
- ・ 基本的に、「実験衛星用追跡管制局のミッションTT&C運用」と「支援用追跡管制局のHK-TT&C運用」の同時運用は可能。
- ・ 「ミッション&HK共用TLM/CMD信号」の伝送レート要求が高めで、TLM/CMD処理機能の1系統化が困難な場合、検討ベースライン案より有利となる。

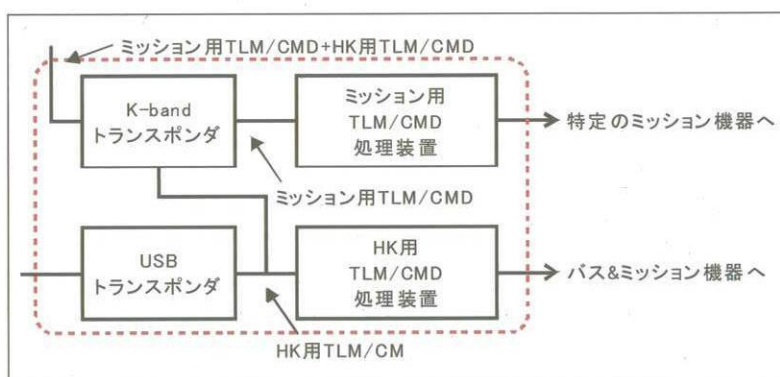


図4.7-4 TT&C系構成例(図4.7-2)のオプション案(例2)

4. 7. 3. 4 衛星TT&C系構成例のまとめ

衛星TT&C系構成例に関する検討結果をまとめると、表4.7-3の様になる。

表4.7-3 実験衛星システムのTT&C系構成例比較

| | 構成上の特徴 | 運用分担 | ベースライン案より有利となる条件 |
|------------|--|-------------------------------------|------------------------------------|
| 検討ベースライン案 | 2回線独立トランスポンダ +1系統TLM/CMD処理装置 | 「ミッションTT&C」「HK-TT&C」 同時運用:(条件付)可 | - |
| オプション案(例1) | USBトランスポンダ+K/Sコンバータ +1系統TLM/CMD処理装置 | 「ミッションTT&C」「HK-TT&C」 同時運用:不可 | 「ミッション&HK共用TLM/CMD信号」の伝送レート要求が低い場合 |
| オプション案(例2) | 2回線独立トランスポンダ +2系統TLM/CMD処理装置 | 「ミッションTT&C」「HK-TT&C」 同時運用:可 | TLM/CMD処理機能の1系統化が困難な場合 |

4.8 実証ミッション機器の排熱

4.8.1 給電アレー部排熱方式の検討

(1)温度要求

給電アレー部（TWT や SSPA 等から構成）での発生熱（500～1200W）を放熱面へ排熱し、温度保持範囲（ON 時：0～100℃）と温度変動幅（±25℃）の要求を満足させる必要がある。

(2)排熱方法

上記の温度要求を満足するため、2段階の熱輸送のステップが想定される。

(a)ステップ1：給電アレー部内部から側面への熱輸送

給電アレー部の中心部から側面へ発生熱 15W（最大）を 300mm 程度（最長）輸送する。（表 4.8-1 参照）熱輸送を担うデバイスとしては、平板型ヒートパイプ（厚さ 2～3mm）が有望である。しかしながら、平板型ヒートパイプの適用には、以下のような課題がある。

- 平板型ヒートパイプは、主に民生電子機器用として研究開発が行われてきた。民生用日本製品は世界最先端レベルにあるが、宇宙用としての平板型ヒートパイプ技術は未確立である。
- 宇宙で使用する場合は、耐宇宙環境性や熱輸送特性の観点から、アルミ製で、冷媒をアンモニアとする必要がある。（民生品は銅製・水冷媒）
- 宇宙用の設計・製造・評価を実施できる国内メーカーの選定・開発体制構築が必要となる。

表 4.8-1 イメージング・リフレクタの場合（最大発熱のケース）

| アレー素子（素子数 188） | 発熱量 |
|------------------------------|---------------|
| 出力 10W 素子（TWT:効率 40%）×21 本 | 315 W（15W/本） |
| 出力 5W 素子（TWT:効率 40%）×16 本 | 120 W（7.5W/本） |
| 出力 2.5W 素子（SSPA:効率 23%）×26 本 | 218 W（8.4W/本） |
| 出力 1W 素子（SSPA:効率 23%）×125 本 | 418 W（3.3W/本） |
| 合計 | 1071 W |

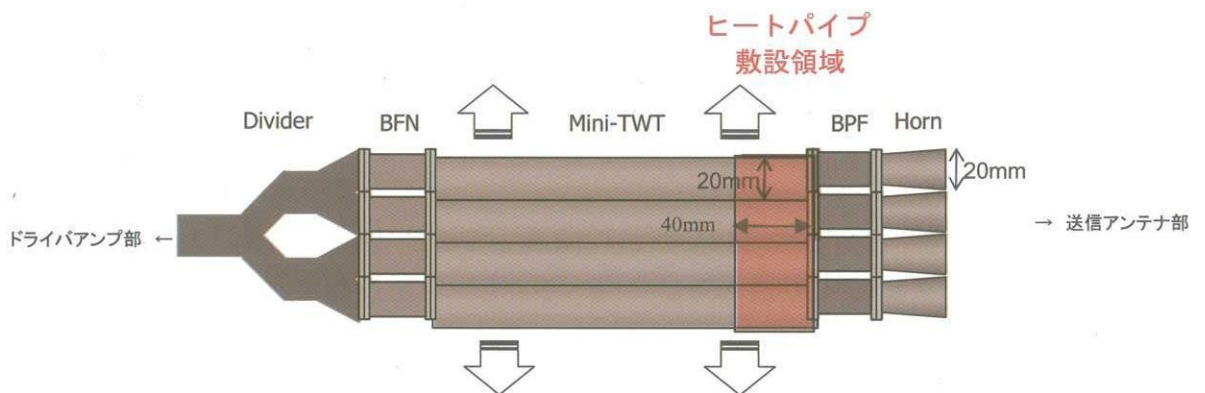


図 4.8-1 給電アレー部の構成

また、本ミッションにおいて平板型ヒートパイプを使用する際の検討事項としては、複数ヒートパイプの配置最適化（ヒートパイプの重ね合わせ）、吸排熱部以外の断熱設計、性能および信頼性評価などが挙げられる。（TWT の間隔は 6mm 以上が必要）

さらに、これらと平行して、給電アレー部ダミー供試体を使った真空環境下での熱的評価試験も必要である。（平成 18 年度の実施を検討中）

表 4.8-2 給電アレー部ダミー供試体の概要

| | |
|---------|---|
| TWT | アルミ角材：20mm×20mm×300mm×188 本（TBD） |
| コレクタ発熱部 | スキンヒータ（～15W） |
| 評価要素 | -平板型ヒートパイプ（最大 15W・300mm、厚さ 2～3mm） -断熱スペーサ（チタン、GFRP） -サーマルフィラー、接着剤 |

【参考技術情報：平板型ヒートパイプの国内民生品】

- 古河電気(株)^(4.8-1)：シート状「ペラフレックス」（厚さ 0.6～1mm、長さ：50～300mm、厚さ 1mm で数 10W の放熱可能）
- 日立電線(株)^(4.8-2)：径 3mm（最大熱輸送量 7W）or 厚さ 3mm、長さ 250mm（最大 400mm）
- (株)フジクラ^(4.8-3)：径 3mm（最大熱輸送量 13W）or 厚さ 3mm（最大熱輸送量 10W）、長さ 150mm
- ティーエス・ヒートロニクス(株)^(4.8-4)：振動流型ヒートパイプ（OHP）。製造技術と性能安定性に課題あり。
- 三菱電機(株)：宇宙用ヒートパイプ（衛星バス用従来型）を内製しており、フライト実績とアンモニア経験豊富。平板型（小型）の開発状況は不明。

(b) ステップ2：給電アレー部側面からバス放熱面への熱輸送

前項のステップ1によって給電アレー部内部から側面に運ばれた熱は、すべて側面に設置されたラジエータ面から宇宙空間に放熱されることが望ましいが、放熱面積や視野による制約から十分な放熱量が確保できない場合、衛星主構体のバス放熱面に熱を輸送する必要がある。熱輸送を担うデバイスとしては、既存技術である衛星バス用従来型ヒートパイプが最有力ではあるが、重量、配置、運用の自在性の観点から設計検討を行う必要がある。

【参考技術情報：衛星バス用従来型ヒートパイプ】

- 軸方向グループ型 FCHP (I字形とU字形を直列連結) とコールドリザーバ式 VCHP を用いたヒートパイプ埋込みパネル (ETS-V で実証済み)
- デュアルチャネルヒートパイプ (ETS-VIIIで実証予定)
- 連結南北面ヒートパイプ (ETS-VIIIで実証予定)
- 3次元ヒートパイプネットワーク (準天頂衛星で実証)

(3)今後の課題

- 調達の容易な民生用平板型ヒートパイプ (銅製・水冷媒) と給電アレー部ダミー供試体による評価試験と解析を実施
- アルミ製・アンモニア冷媒仕様の調達 (海外を含む) に関する調査検討
- ステップ1からステップ2へのI/F検討

4.8.2 簡易熱解析による検討

(1)概要

第3章や4.2節での記載内容をベースとして、衛星システムの簡易熱解析を実施した。ここでは、ケーススタディにより給電アレー部と衛星主構体の表面温度を算出し、熱設計の観点から概念検討を行った。

(2)解析条件

以下のような解析条件を仮定し、静止軌道上での定常熱解析を行った。(全日の平均温度を算出)

(a)発熱量

表 3.8-2 等をもとにして、衛星主構体および給電アレー部の発熱量を表 4.8-3 のように仮定する。

表 4.8-3 発熱量 (W)

| | 衛星主構体 | | | | 給電アレ一部 | | | |
|-------|-------|-----|-----|--------|--------|-----|-----|---------|
| | 総発熱量 | 南面 | 北面 | その他の4面 | 総発熱量 | 南面 | 北面 | 後部(給電側) |
| 3mφAO | 1020 | 400 | 400 | 55 | 764 | 250 | 250 | 264 |
| 5mφAO | 1320 | 500 | 500 | 80 | 1351 | 480 | 480 | 391 |
| 4mφIR | 1585 | 600 | 600 | 96.25 | 1474 | 535 | 535 | 404 |

(b)衛星主構体

- ・形状：2.5(m)×2.5(m)×2.5(m)
- ・厚さ：0.001 (m)
- ・材質：AL6063
- ・表面光学特性：南面・北面；OSR（放熱）、
その他4面；MLI（断熱）

(c)給電アレ一部

- ・形状（下記の4通りを仮定）
 - A型：0.2(m)×0.2(m)×1.4(m) (3mφAO方式)
0.3(m)×0.3(m)×1.4(m) (5mφAO方式、4mφIR方式)
 - B型：0.5(m)×0.5(m)×1.4(m) (3方式共通)
 - C型：本体0.5(m)×0.5(m)×1.4(m)+南北面0.75(m)×1.4(m) (3方式共通)
 - D型：本体0.5(m)×0.5(m)×1.4(m)+南北面1.5(m)×1.4(m) (3方式共通)
- ・厚さ：0.001 (m)
- ・材質：AL6063
- ・表面光学特性：南面・北面・前部（出力側）・後部（給電側）；OSR（放熱）
その他2面；MLI（断熱）

(d)太陽電池パドル (SAP)

SAPについては、下記の表 4.8-4 の仕様を仮定した。

表 4.8-4 太陽電池パドルの仕様

| | 両翼面積(m ²) | 片翼面積(m ²) | 幅(m) | 長さ(m) | 材質 | 表面特性(α/ε) | |
|-------|-----------------------|-----------------------|------|-------|--------|-----------|---------|
| | | | | | | 表 | 裏 |
| 3mφAO | 10 | 5.00 | 2.0 | 2.5 | AL6063 | 0.65/0.9 | 0.2/0.8 |
| 5mφAO | 15.4 | 7.70 | 2.0 | 3.85 | AL6063 | 0.65/0.9 | 0.2/0.8 |
| 4mφIR | 18.8 | 9.40 | 2.0 | 4.7 | AL6063 | 0.65/0.9 | 0.2/0.8 |

(e)軌道上熱環境

- ・アルベド：0.35
- ・地球赤外放射強度：221.484 W/m²
- ・太陽光強度；1354 W/m²

(3) 給電アレー部搭載方法の検討

(a) 熱数学モデル

アンテナの各方式に対して、給電アレー部の搭載方法を以下の 3 ケースについて解析を実施した。(給電アレー部の形状は A 型を使用)

- ①給電アレー部を衛星主構体外側に搭載した場合
(給電アレー部と衛星主構体は断熱)
- ②給電アレー部を衛星主構体外側に搭載した場合
(給電アレー部と衛星主構体は熱的に良結合)
- ③給電アレー部を衛星主構体内側に搭載した場合
(給電アレー部と衛星主構体は熱的に良結合。給電アレー部の表面からの放熱はなし)

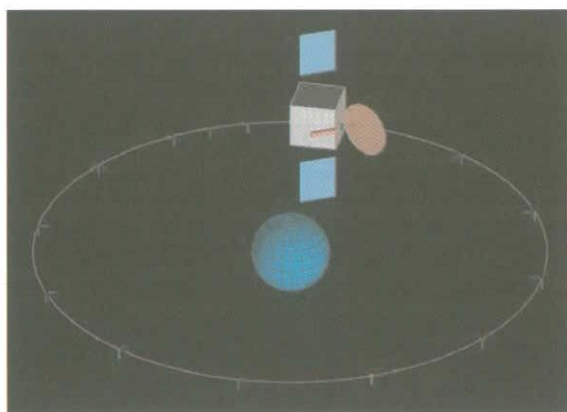


図 4.8-2 3m φ AO 方式
(衛星主構体外側へ搭載)

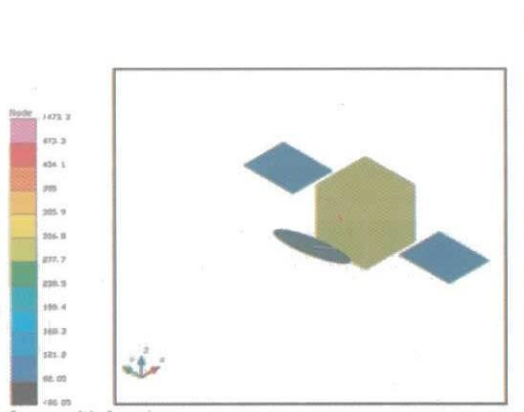


図 4.8-3 3m φ AO 方式
(衛星主構体内側へ搭載)

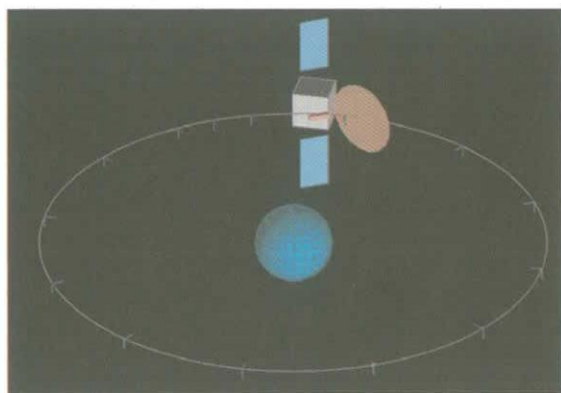


図 4.8-4 5m φ AO 方式
(衛星主構体外側へ搭載)

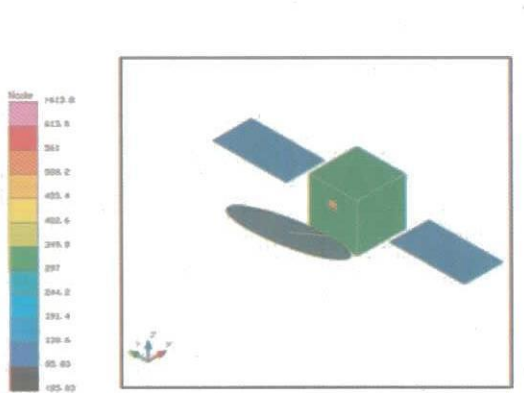


図 4.8-5 5m φ AO 方式
(衛星主構体内側へ搭載)

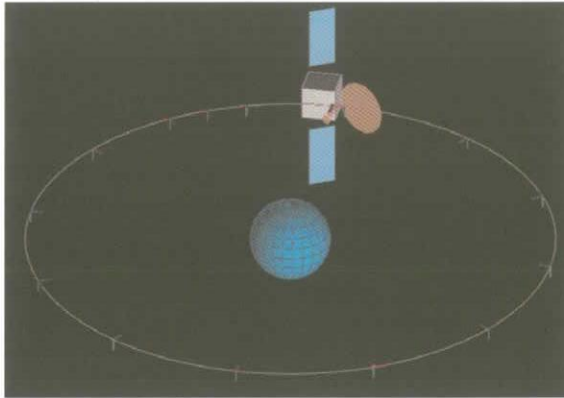


図 4.8-6 4m φ IR 方式
(衛星主構体外側へ搭載)

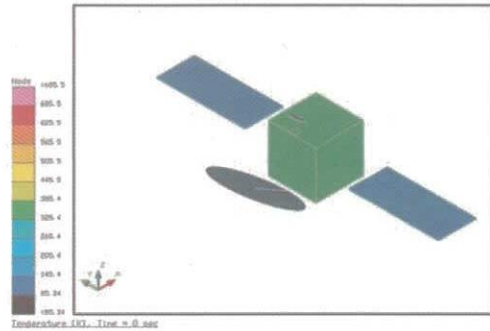


図 4.8-7 4m φ IR 方式
(衛星主構体内側へ搭載)

(b)結果

計算結果を表 4.8-5 に示す。

表 4.8-5 各面の温度 (給電アレー部形状 A 型の場合)

| | 3m φ AO | 3m φ AO | 3m φ AO | 5m φ AO | 5m φ AO | 5m φ AO | 4m φ IR | 4m φ IR | 4m φ IR |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ | ① | ② | ③ |
| 主鏡 | -3.310 | -3.630 | -5.240 | -1.640 | -2.310 | -1.970 | -2.460 | -2.730 | -3.520 |
| 副鏡 | - | - | - | - | - | - | -9.080 | -11.050 | -3.910 |
| 給電アレー部 側部北面 -Y | 226.460 | 126.510 | 200.650 | 246.290 | 181.930 | 327.270 | 245.010 | 192.120 | 404.320 |
| 給電アレー部 側部南面 +Y | 226.460 | 126.490 | 200.470 | 246.380 | 182.170 | 327.150 | 244.940 | 192.300 | 404.020 |
| 給電アレー部 側部 | 209.820 | 103.530 | 165.560 | 194.830 | 130.780 | 238.830 | 155.700 | 125.800 | 340.470 |
| 給電アレー部 側部 | 210.690 | 104.130 | 176.060 | 196.530 | 132.340 | 274.060 | 154.660 | 124.880 | 232.050 |
| 給電アレー部 後部(給電側) | 403.810 | 120.640 | 148.030 | 389.870 | 172.750 | 233.260 | 157.380 | 119.190 | 262.030 |
| 給電アレー部 前部(出力側) | 184.040 | 101.790 | 158.840 | 161.560 | 119.790 | 201.740 | 146.000 | 116.940 | 227.730 |
| 給電アレー部 側部北面 ヒータ | 226.460 | 126.520 | 200.660 | 246.300 | 181.930 | 327.280 | 245.020 | 192.120 | 404.320 |
| 給電アレー部 側部南面 ヒータ | 226.470 | 126.490 | 200.470 | 246.380 | 182.180 | 327.160 | 244.940 | 192.310 | 404.030 |
| 給電アレー部 後部 ヒータ | 403.810 | 120.640 | 148.030 | 389.880 | 172.750 | 233.270 | 157.390 | 119.190 | 262.040 |
| 給電アレー部 側部 MLI | 32.430 | 7.800 | 130.940 | 25.360 | 10.070 | 195.990 | 26.300 | 19.080 | 350.640 |
| 給電アレー部 側部 MLI | 42.280 | 15.060 | 173.690 | 40.410 | 23.930 | 275.620 | 17.050 | 10.830 | 36.710 |
| 衛星主構体 北面 -Y | -10.840 | 17.420 | 26.720 | 3.100 | 35.460 | 51.350 | 16.050 | 39.770 | 64.640 |
| 衛星主構体 南面 +Y | -10.580 | 17.550 | 26.580 | 3.290 | 35.470 | 51.450 | 16.180 | 39.810 | 64.600 |
| 衛星主構体 地球面 +Z | 27.720 | 30.180 | 29.760 | 43.360 | 45.750 | 44.500 | 152.550 | 116.500 | 53.070 |
| 衛星主構体 反地球面 -Z | 28.480 | 33.060 | 34.350 | 41.790 | 46.460 | 48.630 | 50.820 | 53.780 | 56.440 |
| 衛星主構体 東面 +X | 28.340 | 32.800 | 34.120 | 41.660 | 46.230 | 48.280 | 56.120 | 56.950 | 56.300 |
| 衛星主構体 西面 -X | 27.430 | 31.950 | 30.940 | 43.130 | 47.200 | 48.050 | 56.270 | 57.230 | 53.090 |
| 衛星主構体 北面 ヒータ | -10.840 | 17.430 | 26.730 | 3.110 | 35.460 | 51.350 | 16.060 | 39.780 | 64.640 |
| 衛星主構体 南面 ヒータ | -10.580 | 17.550 | 26.580 | 3.290 | 35.480 | 51.450 | 16.190 | 39.820 | 64.610 |
| 衛星主構体 地球面 ヒータ | 27.720 | 30.190 | 29.760 | 43.360 | 45.750 | 44.500 | 152.550 | 116.500 | 53.070 |
| 衛星主構体 反地球面 ヒータ | 28.480 | 33.070 | 34.350 | 41.790 | 46.460 | 48.630 | 50.820 | 53.790 | 56.440 |
| 衛星主構体 東面 ヒータ | 28.340 | 32.800 | 34.120 | 41.660 | 46.230 | 48.280 | 56.120 | 56.960 | 56.310 |
| 衛星主構体 西面 ヒータ | 27.430 | 31.950 | 30.940 | 43.130 | 47.200 | 48.060 | 56.270 | 57.240 | 53.090 |
| 衛星主構体 地球面 MLI | 3.620 | 0.110 | -3.050 | 9.210 | 5.360 | -1.430 | 22.140 | 13.310 | 0.720 |
| 衛星主構体 反地球面 MLI | 4.950 | 5.380 | 5.510 | 6.260 | 6.750 | 6.990 | 7.230 | 7.570 | 7.870 |
| 衛星主構体 東面 MLI | 4.660 | 5.080 | 5.210 | 5.970 | 6.450 | 6.680 | 7.560 | 7.660 | 7.590 |
| 衛星主構体 西面 MLI | 3.060 | 3.550 | -0.680 | 8.730 | 8.330 | 6.230 | 7.880 | 8.240 | 0.740 |
| 太陽電池パドル 南側 | 32.960 | 33.100 | 33.390 | 33.100 | 33.590 | 33.690 | 32.830 | 33.400 | 33.880 |
| 太陽電池パドル 北側 | 33.380 | 33.250 | 33.270 | 33.160 | 33.800 | 33.610 | 32.320 | 32.710 | 33.270 |
| 宇宙背景 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 |

※ 単位(°C)

これより、以下のような事柄が示唆される。

- 3方式とも給電アレー部を衛星主構体と断熱とすると、給電アレー部側部は200°Cを超過する。(3方式の①より)
- 3方式とも給電アレー部を衛星主構体内側へ搭載すると、給電アレー部側部は、200~400°Cの高温となる。(3方式の③より)
- 3方式のうち3mφAO方式が他方式と比べて最も低温となる。(発熱量が小さいため)
- 今回の解析ケースでは、給電アレー部の温度はいずれも高温超過となっており、熱的に成立する解は得られていない。よって、給電アレー部および衛星主構体の放熱面積をより多く確保する必要がある。

(4)給電アレー部形状の検討

(a) 熱数学モデル

給電アレー部の形状(A型~D型:(2)(c)参照)を変更し、その影響を調べた。なお、前項(3)での検討を踏まえ、給電アレー部の搭載方法は②(主構体外側搭載&主構体と良熱結合)を選択している。また、D'型は、D型と同じ給電アレー部形状を用いながら、さらに衛星主構体の地球面(給電アレー部搭載面)を放熱仕様(OSR)に変更し(デフォルトはMLI断熱仕様)、給電アレー部後部(給電側)と熱的に結合している。

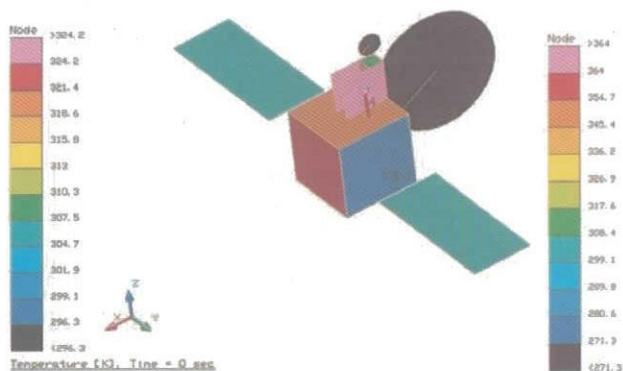


図 4.8-8 5mφAO方式
(搭載方法②、形状D'型)

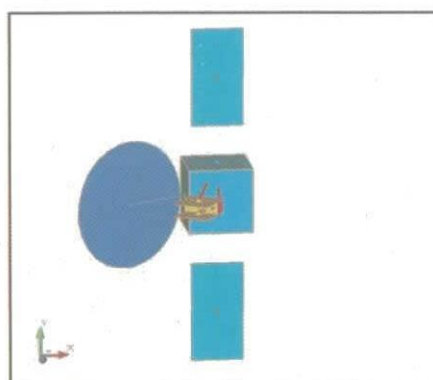


図 4.8-9 4mφIR方式
(搭載方法②、形状D'型)

(b)結果

計算結果を表 4.8-6 に示す。

表 4.8-6 各面の温度（給電アレー部の搭載方法②の場合）

| | 3mφAO(搭載方法②) | | | | | 5mφAO(搭載方法②) | | | | | 4mφIR(搭載方法②) | | | | |
|-----------------|--------------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D | D' | A | B | C | D | D' | A | B | C | D | D' |
| 主鏡 | -3.630 | -3.580 | -3.180 | -3.230 | -3.260 | -2.310 | -1.920 | -2.430 | -1.500 | -1.850 | -2.730 | -2.620 | -2.390 | -2.960 | -2.680 |
| 副鏡 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | -11.050 | -12.100 | -12.080 | -12.900 | -12.320 |
| 給電アレー部 側部北面 -Y | 126.510 | 78.960 | 59.990 | 26.250 | 23.880 | 181.930 | 122.970 | 98.940 | 57.950 | 55.610 | 192.120 | 153.410 | 126.040 | 81.410 | 78.530 |
| 給電アレー部 側部南面 +Y | 126.490 | 78.960 | 59.840 | 26.250 | 23.970 | 182.170 | 123.270 | 98.830 | 57.950 | 55.500 | 192.300 | 153.410 | 126.110 | 81.690 | 78.430 |
| 給電アレー部 側部 | 103.530 | 55.950 | 50.000 | 36.490 | 31.870 | 130.780 | 83.240 | 75.300 | 61.950 | 53.040 | 125.800 | 91.820 | 83.300 | 69.920 | 59.650 |
| 給電アレー部 側部 | 104.130 | 56.820 | 47.620 | 30.420 | 23.700 | 132.340 | 85.440 | 74.630 | 55.610 | 47.360 | 124.880 | 90.290 | 78.790 | 59.170 | 46.250 |
| 給電アレー部 後熱(給電側) | 120.640 | 91.410 | 81.460 | 80.380 | 64.120 | 172.750 | 139.540 | 135.210 | 127.740 | 90.830 | 119.190 | 113.330 | 111.110 | 108.070 | 47.700 |
| 給電アレー部 前熱(給電側) | 101.780 | 39.970 | 32.200 | 16.590 | 13.990 | 119.790 | 82.670 | 53.660 | 36.860 | 33.350 | 178.940 | 67.630 | 57.720 | 39.940 | 35.510 |
| 給電アレー部 側部北面 ヒータ | 126.520 | 78.970 | 59.990 | 26.250 | 23.880 | 181.930 | 122.980 | 98.850 | 57.950 | 55.610 | 192.120 | 153.410 | 126.040 | 81.410 | 78.540 |
| 給電アレー部 側部南面 ヒータ | 126.490 | 78.960 | 59.850 | 26.250 | 23.970 | 182.180 | 123.280 | 98.830 | 57.950 | 55.510 | 192.310 | 153.420 | 126.120 | 81.700 | 78.440 |
| 給電アレー部 後部 ヒータ | 120.640 | 91.410 | 87.470 | 80.380 | 54.130 | 172.750 | 139.540 | 135.220 | 127.740 | 90.830 | 119.190 | 113.330 | 111.110 | 108.070 | 47.710 |
| 給電アレー部 側部 MLI | 7.800 | 2.350 | 19.400 | 41.780 | 40.680 | 10.070 | 0.870 | 16.190 | 38.140 | 36.760 | 19.080 | 13.960 | 27.600 | 50.720 | 55.130 |
| 給電アレー部 側部 MLI | 15.060 | 7.760 | 6.820 | 4.840 | 3.340 | 23.930 | 14.440 | 13.600 | 9.880 | 9.650 | 10.830 | 4.530 | 2.130 | -1.500 | -2.020 |
| 衛星主構体 北面 -Y | 17.490 | 10.120 | 7.690 | 3.580 | 0.060 | 35.460 | 27.660 | 25.180 | 20.740 | 16.800 | 39.780 | 36.180 | 33.790 | 29.510 | 23.200 |
| 衛星主構体 南面 +Y | 17.550 | 10.090 | 7.780 | 3.610 | 0.180 | 35.480 | 27.740 | 25.070 | 20.780 | 16.730 | 39.820 | 36.160 | 33.760 | 29.790 | 23.250 |
| 衛星主構体 地球面 ヒータ | 30.190 | 29.590 | 29.180 | 28.240 | 5.930 | 45.750 | 44.390 | 44.040 | 42.970 | 16.100 | 116.500 | 112.440 | 110.270 | 107.310 | 46.270 |
| 衛星主構体 反地球面 ヒータ | 33.070 | 31.880 | 31.510 | 30.810 | 30.030 | 46.460 | 45.340 | 44.970 | 44.350 | 43.540 | 53.790 | 53.250 | 52.930 | 52.340 | 51.010 |
| 衛星主構体 東面 ヒータ | 32.800 | 31.650 | 31.260 | 30.570 | 28.440 | 46.230 | 45.100 | 44.720 | 44.060 | 41.760 | 56.960 | 56.260 | 55.830 | 55.140 | 50.620 |
| 衛星主構体 西面 ヒータ | 31.950 | 30.820 | 30.530 | 29.610 | 27.550 | 47.200 | 46.090 | 45.850 | 45.470 | 43.090 | 57.240 | 56.250 | 56.090 | 55.160 | 50.680 |
| 衛星主構体 地球面 MLI | 0.110 | 1.110 | 1.020 | 0.520 | - | 5.360 | 4.780 | 4.770 | 3.830 | - | 13.310 | 14.140 | 15.780 | 21.550 | - |
| 衛星主構体 反地球面 MLI | 5.380 | 5.270 | 5.240 | 5.170 | 5.100 | 6.750 | 6.630 | 6.590 | 6.530 | 6.440 | 7.570 | 7.500 | 7.470 | 7.400 | 7.250 |
| 衛星主構体 東面 MLI | 5.080 | 4.970 | 4.930 | 4.870 | 4.670 | 6.450 | 6.330 | 6.290 | 6.220 | 5.990 | 7.660 | 7.580 | 7.530 | 7.450 | 6.930 |
| 衛星主構体 西面 MLI | 3.550 | 3.480 | 3.620 | 3.150 | 3.090 | 8.330 | 8.250 | 8.460 | 8.920 | 8.480 | 8.240 | 7.550 | 8.050 | 7.480 | 7.050 |
| 太陽電池パドル 南側 | 33.100 | 33.320 | 33.200 | 33.470 | 34.140 | 33.590 | 33.520 | 33.630 | 33.040 | 33.530 | 33.400 | 33.620 | 33.900 | 33.000 | 33.340 |
| 太陽電池パドル 北側 | 33.250 | 33.050 | 33.050 | 33.330 | 33.400 | 33.800 | 33.080 | 33.140 | 32.840 | 33.440 | 32.710 | 33.300 | 33.120 | 33.180 | 32.970 |
| 宇宙背景 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 | -273.150 |

※ 単位(°C)

表 4.8-6 より、以下のような事柄が示唆される。

- 3方式とも、給電アレー部の放熱面積を拡大（A型→B型→C型→D型）することによって、給電アレー部および衛星主構体南北面の温度は低下する。
- 3方式とも、D型をD'型にすることで、衛星主構体および給電アレー部の温度が全体的に低下する。
- 3mφAO方式のD型およびD'型で熱的成立解が得られている。一方、5mφAO方式と4mφIR方式では、給電アレー部の内部での温度が表面よりも高くなること（ステップ1）を考慮すると、一層の低温化（放熱面積の拡大、高熱輸送デバイス）が必要である（ステップ2）。

(5)まとめ

21GHz 高度放送衛星実証ミッション用衛星システムについて、簡易熱数学モデルを用いて、アンテナ方式（3mφAO方式、5mφAO方式、4mφIR方式）、給電アレー部の搭載方法（主構体外側&断熱、主構体外側&良熱結合、主構体内側&良熱結合）、給電アレー部の形状（A、B、C、D、D'）をパラメータとしたケーススタディを行った。

今回の簡易解析の結果からは厳密な定量的考察は困難だが、熱設計の観点から、アンテナおよび給電アレー部のコンフィギュレーションに関して、以下のような定性的な知見が得られた。

- 熱的成立性の観点からは、小さいアンテナ（発熱量小）の方が熱設計は容易となる。
- 給電アレー部は衛星主構体外側に搭載し、給電アレー部と主構体は良熱結合とする。
- 給電アレー部には、積極的に放熱面（専用ラジエータ）を設ける必要がある。

今後、ミッションデザインの具体化に合わせて、熱数学モデルと設計検討の詳細化を進めていく必要がある。

<参考文献>

- [4.8-1] 佐々木、他「超薄型シート状ヒートパイプ『ペラフレックス』」、古河電工時報 115 号、p.16-20、2005
- [4.8-2] 日立電線(株) ヒートパイプ関連ホームページ、
<http://www.hitachi-cable.co.jp/copper/coppergoods/heatpipe/index.html>
- [4.8-3] (株)フジクラ ヒートパイプ関連ホームページ、
http://www.fujikura.co.jp/elect_material/ej1_130/ej1_130.html
- [4.8-4] ティーエス・ヒートロニクス(株) ホームページ、
http://www.tsheatronics.co.jp/products/al_ex/index.html

第5章 DRTSによる降雨減衰データ取得・解析

5.1. DRTSのテレメトリー電波を用いた衛星電波伝搬データの取得

21GHz帯衛星放送システムが実現すれば、大容量高速伝送が可能になり、スーパーハイビジョン放送の実現が期待できる。しかし一方で、21GHz帯は特に降雨による電波の減衰が大きく、12GHz帯の降雨減衰量に対して、ITU-R 勧告 P.618-8 による周波数スケール法を用いた推定では、dB 値の比較で約3倍の大きさになると言われている[5.1-1]。また大気シンチレーションによる変動も発生する。したがって、安定な21GHz帯衛星放送実現のためには、21GHz帯衛星電波伝搬特性を十分に把握した上での降雨減衰対策の実施が必須となる。21GHz帯降雨減衰の特性を把握するためには、実際に21GHz帯の衛星電波の降雨減衰を観測することが一番望ましいが、現在日本で受信できる21GHz帯の衛星電波は存在しない。例えば、21GHz帯衛星電波の観測の代替案として、太陽電波を用いた22GHz帯の降雨減衰観測があり、過去にその報告例がある[5.1-2]。しかし電波源が太陽であるため、日没後の夜間の測定が出来ず、衛星放送サービス時間率の検討に必要な、降雨減衰の年間時間率の統計的な検討は困難である。また精度の良い測定ダイナミックレンジが10dB程度と狭いという問題もあり[5.1-2]、21GHz帯の降雨減衰観測の代替方法としては充分とは言えず、他の方法を選択する必要がある。

この章では、21GHz帯降雨減衰観測の代替としてNHK放送技術研究所が開始した、データ中継技術衛星「こだま」のテレメトリー電波観測について述べる。

5.1.1 DRTS：データ中継技術衛星「こだま」のテレメトリー電波

宇宙航空研究機構(JAXA)は2002年9月に、図5.1-1に示すData Relay Test Satellite

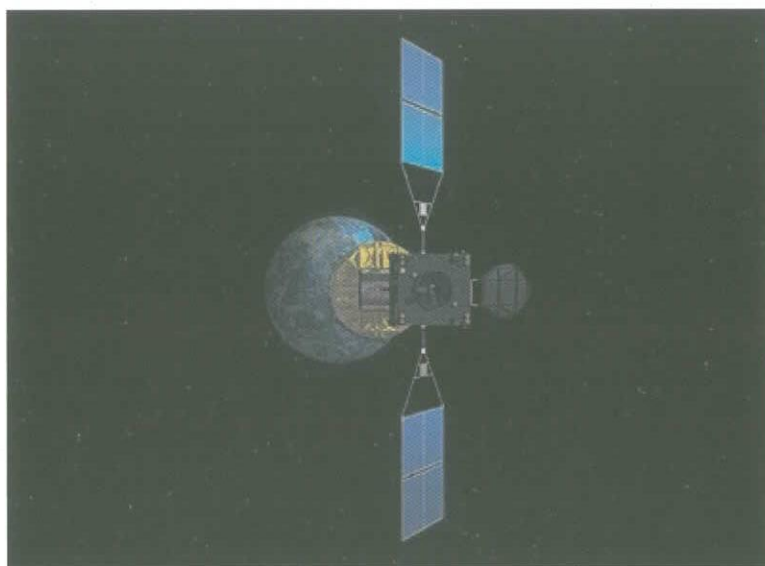


図 5.1-1 データ中継技術衛星「こだま」(DRTS) (Copy righted by JAXA)

(DRTS):データ中継技術衛星「こだま」を種子島より打ち上げ、東経 90.75 度の静止軌道上で、各種衛星伝送実験を行っている。DRTS は、衛星の状態を知らせるテレメトリーを周波数 19.845GHz の電波を使って日本の地球局へ連続送信している。衛星送信 e.i.r.p.は 23.2 dBW であり、テレメトリーデータの伝送レートは 2.048 kbps である。DRTS はまず、テレメトリーデータを変調信号として、256kHz のサブキャリアに BPSK 変調を施し、さらにこの BPSK 変調がかかったサブキャリアを用いて、19.845GHz の無変調キャリアに PM 変調を施している。PM 変調後の変調スペクトルの観測例を図 2 に示す。

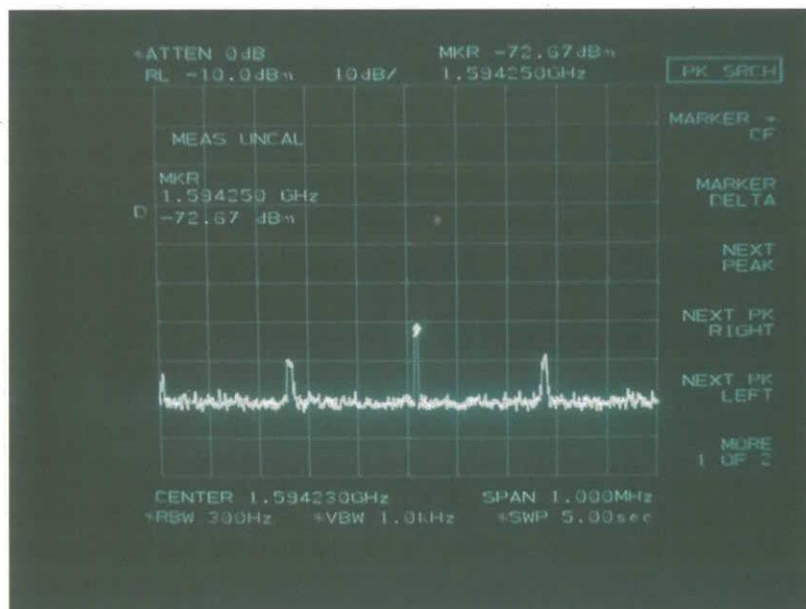


図 5.1-2 DRTS のテレメトリー受信波スペクトルの例

図 5.1-2 は、DRTS のテレメトリー電波をローカル周波数が約 18.25GHz の ODU を使って IF 帯に周波数変換した後の信号スペクトルを観測したものである。1.594GHz 付近のキャリアを中心として、両側波帯にテレメトリーの変調スペクトルが観察できる。この 1.594GHz のキャリア成分は 19.845GHz の無変調キャリアが残留したものであり、このキャリアスペクトルの大きさは、テレメトリー変調信号の影響を受けない。蝕期間中も DRTS のバッテリー運用によりテレメトリー電波は途切れることが無いため、この残留キャリアスペクトルを狭帯域受信し、高いダイナミックレンジで測定できれば、19.845GHz の衛星電波伝搬状況を連続して観測できることになる。19.845GHz という周波数は 21GHz 帯に非常に近いので、その降雨減衰特性も 21GHz 帯のそれに近いことが期待できる。そこで NHK 放送技術研究所では、21GHz 帯衛星電波の降雨減衰データ取得の代替として、この DRTS のテレメトリー電波の観測を 2005 年 1 月から正式にスタートした。この DRTS のテレメトリー電波の降雨減衰データの取得によ

り、例えば衛星放送サービス時間率の算出に必要な降雨減衰の時間率の実測結果と、広く用いられている ITU-R 勧告 P.618 の降雨減衰時間率推定結果との比較や、同勧告の降雨減衰の周波数スケーリング法の推定精度検証も可能になると考えられる。

5.1.2 DRTS テレメトリー電波の観測設備

図 5.1-3 に NHK 放送技術研究所における DRTS テレメトリー電波の観測設備を示す。図 5.1-4 に示す 2.4m のオフセットパラボラアンテナを用いて、東経 90 度方向に固定した。ODU (Lo.周波数:18.25GHz) で IF 周波数 (1.595GHz) に変換された信号は、リアルタイムスペクトラムアナライザで測定される。測定可能な降雨減衰量は最大で約 30dB 程度である。これは ITU-R による降雨減衰推定法 P.618-8 によれば、およそ年間時間率 0.01% の降雨減衰に相当している。リアルタイムスペクトラムアナライザで観測された信号電力は 2 秒毎にサンプリングされ、測定用 PC に送られた後、データベースに登録される。またこの観測とは並行して、65cm パラボラアンテナによる BS 電波 (11.84GHz) の観測と、降雨強度の観測も連続して行っている。

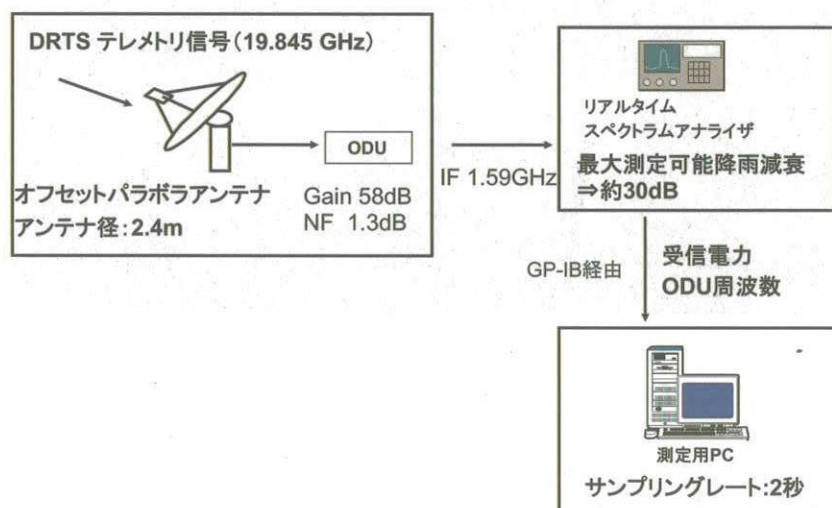


図 5.1-3 DRTS のテレメトリー観測設備

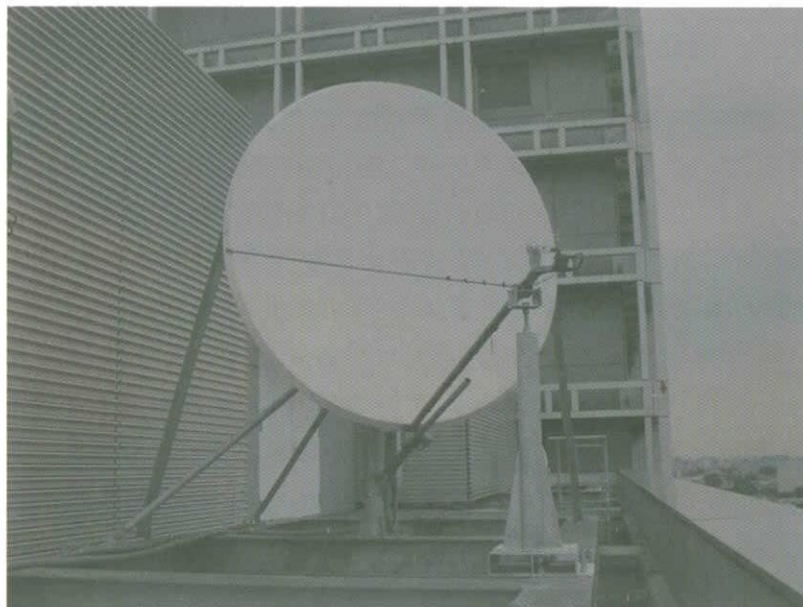


図 5.1-4 NHK 放送技術研究屋上に設置した 2.4mパラボラアンテナ

5.1.3 今後の課題

2005 年 1 月から連続観測を開始しており、様々な降雨減衰を含む DRTS テレメトリ電波の伝搬データの収集が来ているが、例えば降雨減衰の統計的な解析を実施するためにはさらなるデータの収集が必要である。収集された伝搬データを用いて今後行う予定である検討内容を以下にまとめておく。

- (1) 19.845GHz 衛星電波の降雨減衰時間率特性と ITU-R 勧告による降雨減衰時間率推定結果の比較
- (2) 11.84GHz 衛星電波の降雨減衰と 19.845GHz 衛星電波の降雨減衰実測結果から得られた降雨減衰比と ITU-R 勧告によって算出される降雨減衰比の比較
- (3) 大気シンチレーション、大気吸収の実測結果と ITU-R 勧告による推定結果の比較
- (4) 得られた降雨減衰時系列観測データを用いた降雨減衰時系列モデルの検討

参考文献

- [5.1-1] ITU-R 勧告 P.618-8, 2003
- [5.1-2] 伊藤 士郎：「22GHz 帯衛星放送回線における降雨時の降雨及び大気ガス吸収による減衰特性」1986 年信学論 B, Vol. 69, no. 11, pp1548-1555

5.2 実測された 12GHz 帯降雨減衰と ITU-R 法による推定結果の比較

東京において 2000 年から 2003 年の 4 年間にわたり、12GHz 帯の降雨減衰と 1 分間降雨強度の実測を行い、これら実測データの統計的な特徴を示した。東京と大阪で過去に記録された 1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値について比較を行った。さらに、東京と大阪における 12GHz 帯の降雨減衰の実測結果と ITU-R 法による降雨減衰推定結果の比較や、ITU-R 勧告 P.618 による降雨減衰推定結果の r.m.s. 誤差評価も行った。狭い範囲に強い降雨をもたらす対流性降雨セルの影響が降雨減衰と 1 分間降雨強度の散布図より認められた。しかしながら、この対流性降雨セルによる影響は P.618-8 の斜め伝搬通路長調整係数の設定に対して適切に考慮されていないことがわかった。P.618-8 の降雨減衰推定法をさらに信頼性の高いものとするためには、気象特性の地域性を考慮に入れた斜め伝搬通路長調整係数の修正が必要である。

5.2.1. はじめに

筆者らは、21GHz 帯衛星放送システムの検討をおこなっている[5.2-1]。システムに要求される降雨減衰マージンは、要求される放送サービス時間率により決定できる。21GHz 帯衛星放送の放送サービス時間率としては、現在行われている 12GHz 帯衛星放送のサービス時間率と同等程度を目指している。すなわち、12GHz 帯降雨減衰の年間時間率の精度の良い推定は、21GHz 帯衛星放送システムの設計に関わってくるだけでなく、周波数スケール法を用いた場合の 21GHz 帯降雨減衰推定に極めて重要である。

国際通信連合の無線セクター (ITU-R) は勧告 P.618-8 の中で、降雨減衰推定法を推奨している。この推定法は実際の衛星回線設計等に良く用いられている。一方、ここ近年の日本のいくつかの大都市では、通常では考えられない強雨が発生しており、それに伴い、大きな降雨減衰が観測されている。気象の専門家によれば、これらの異常な強雨はヒートアイランド現象によって引き起こされているとされている。したがって、最近の日本で観測された強雨時を含む降雨減衰観測結果と ITU-R 法による推定結果を比較することは非常に興味深いことである。そこでまず、第 5.2.2 章において、東京での 12GHz 帯降雨減衰と 1 分間降雨強度の統計解析結果について示し、さらに文献[5.2-2]で報告されている大阪で観測された 1 分間降雨強度と 12GHz 帯降雨減衰の統計結果についても示す。また、過去に報告された東京と大阪の 1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値についても比較を行う。第 5.2.3 章では、ITU-R によって示された降雨減衰推定法について、これまでの変遷を簡潔に紹介している。第 5.2.4 章では、東京と大阪における降雨減衰の実測結果と推定結果について精密な比較結果を示し、東京と大阪の降雨減衰の観測結果には、ITU-R 勧告 P.618 の古いバージョンである P.618-5 による推定結果が、最新のバージョンである P.618-8 の推定結果よりも良く合致することを示す。第 5.2.5 章では、P.618 のバージョンによって異なる斜め伝搬通路

長調整係数について実測データの統計結果による評価を行い、さらに雨滴層高度の降雨減衰推定に及ぼす影響についても評価を行う。第5.2.6章では本章のまとめを行う。

5.2.2. 降雨減衰と1分間降雨強度の測定

表 5.2-1 に、東京と大阪における降雨減衰の観測条件を示す。大阪における観測条件は、文献[5.2-3]を参照した。

表 5.2-1 降雨減衰の観測条件

| 観測地点 | 東京(世田谷) | 大阪(寝屋川)[3] |
|-------------|------------------|------------------|
| 緯度経度 | E139.64°N35.62° | E135.63°N34.76° |
| 仰角 | 38.0° | 41.4° |
| アジマス | 224.5° | 220.1° |
| アンテナ径 | 0.65m | 1.2m |
| 測定ダイナミックレンジ | 20 dB | 25 dB |
| サンプリングレート | 1 秒 | 1 分 |
| 観測期間 | 2000年4月-2003年12月 | 1988年1月-1995年12月 |

東京における降雨減衰観測は、2000年の4月から2003年の12月の4年間継続した。同期間中の1分間降雨強度計の実測には、保守の必要が少なく、かつ測定ダイナミックレンジが500mm/hと大きい、光学式降雨強度計 (ORG:Optical Rain Gauge) [5.2-4]を用いた。同観測期間中、従来の雨滴計数型降雨強度計 (RRG:Raindrop counting type Rain Gauge) では測定できなかった1分間降雨強度100mm/hを超える強雨も、光学式降雨強度計では測定することができた。1分間降雨強度 R_{l-min} mm/h は、ORGで観測される瞬時降雨強度 R を用いて、次式で計算した。

ここで、 $R(10k)$ は、1分間の中で1秒毎にサンプルされるORGの瞬時降雨強度を10秒毎に再サンプルしたものである。なお、RRGでは雨滴の計数により1分間雨量が

$$R_{l-min.} = \frac{1}{6} \sum_{k=0}^5 R(10k) \quad (1)$$

観測できるため、その値を60倍したものを1分間降雨強度とした。

図 5.2-1 は、ORGとRRGで実測された3年間の1分間降雨強度の観測結果であり、1分間降雨強度の条件付き時間率を対数正規確率紙にプロットしたものである。両者による結果は、1分間降雨強度100mm/h程度まで良く一致している。ORGによる観測結果は、1分間降雨強度200mm/h程度までは直線上に延びており、対数正規分布で良好に近似できることがわかる。それに対し、RRGによる観測結果は、測定ダイナミックレンジがORGと比較して狭いため100mm/h程度しか観測できていない。そこ

でこれ以降、検討に用いる 1 分間降雨強度データとしては ORG による観測結果を用いることとする。

衛星電波の観測結果には、降雨減衰以外に大気シンチレーションによる変動も含まれるため、東京における降雨減衰を正確に抽出するために、衛星から受信した信号強度の時系列データに、遮断周波数 0.025Hz の FIR フィルターで LPF 処理を施し、シンチレーション成分を除去した。

図 5.2-2 に東京で 4 年間に渡って観測された 1 分間降雨強度を、図 5.2-3 には、同期間中に測定された降雨減衰観測結果を示す。両者の分布は、ある降雨減衰あるいは、ある 1 分間降雨強度を超える年間時間率を表している。降雨減衰の測定ダイナミックレンジは約 20dB であり、各年の東京での観測では、およそ年間時間率 0.001% 程度まで降雨減衰測定ができています。年毎の分布の変動は明らかであり、特に 2003 年の観測結果は、他の年と比較して、かなり異なる分布となっている。大阪における 8 年間の降雨減衰統計結果については、文献[5.2-2]を参照することができる。

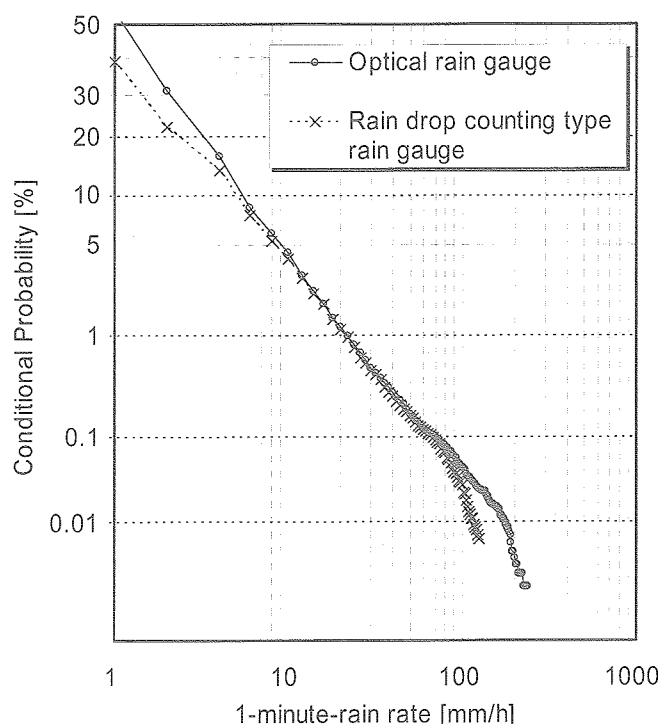


図 5.2-1 光学式降雨強度計と雨滴計数型降雨強度計における 1 分間降雨強度観測結果の比較

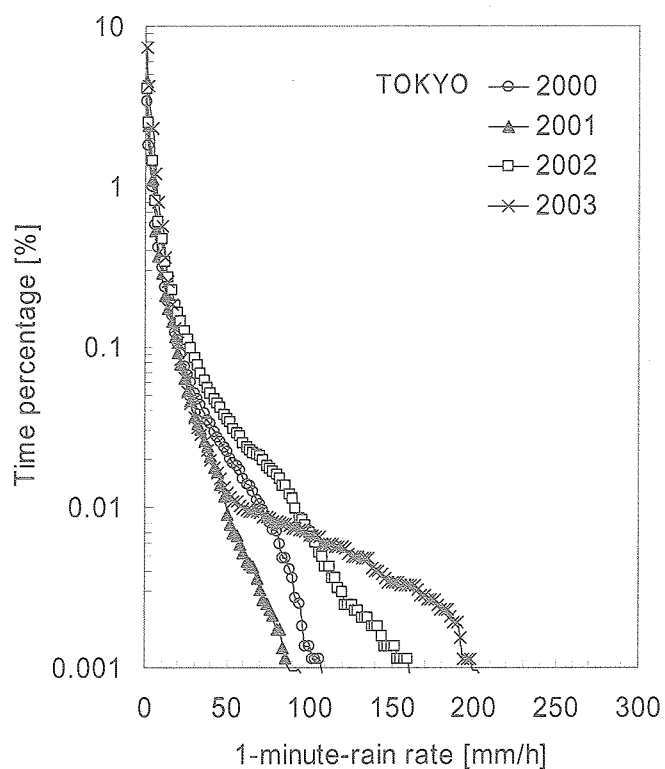


図 5.2-2 東京における 1 分間降雨強度の累積分布

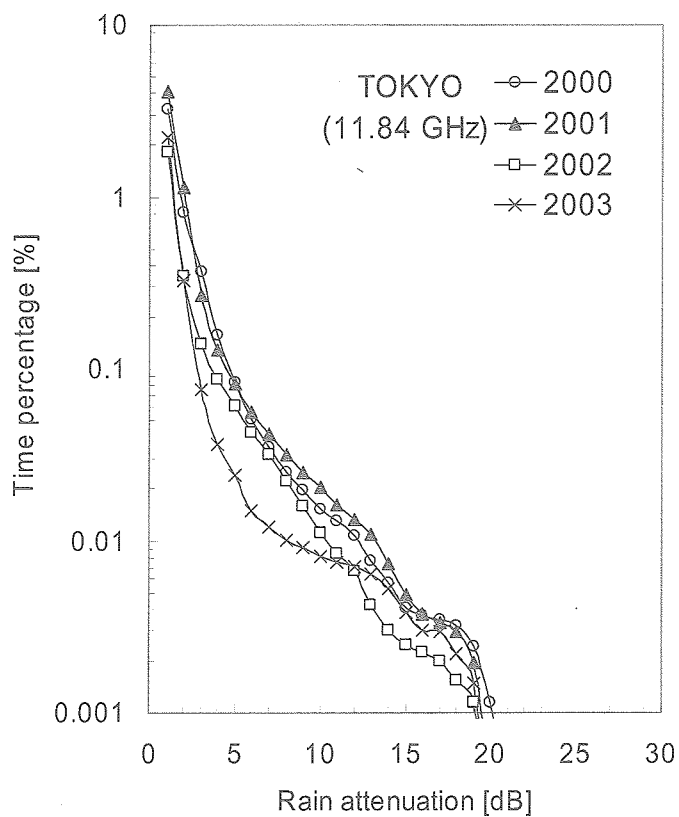


図 5.2-3 東京における降雨減衰の累積分布

1 分間降雨強度及び降雨減衰の条件付き時間率分布は、適切な年間の降雨発生確率 P_0 を仮定することにより、対数正規分布で近似できることが報告されている[5.2-5]。1 分間降雨強度あるいは降雨減衰 “ a ” が、ある値 “ A ” を超える時間率 $P(a \geq A)$ は、次式で示される。

ここで P_c は、条件付き確率を意味する。

$$P(a \geq A) = P_0 \cdot P_c(a \geq A) \quad (2)$$

対数正規分布は 2 つの変数 m, s を用いて、式(3) で示される確率密度関数で定義される。ここで、 m は、変数 a の対数変換値の平均、 s は、変数 a の対数変換値の標準偏差である。

図 5.2-4 は東京で観測された降雨減衰及び 1 分間降雨強度の条件付き累積分布を示

$$f(R) = \frac{K}{\sqrt{2\pi}sa} \exp \left[\frac{-(\log(a) - m)^2}{2s^2} \right] \quad (3)$$

ここで $K = \log(e) \doteq 0.4343$

したものである。それぞれの分布は、対数正規確率紙上にプロットしてある。降雨発生確率 P_0 は、10%と仮定した。この図から、降雨減衰及び、1 分間降雨強度の条件付き累積分布は、対数正規分布で良好に近似できることがわかる。表 5.2-2 に、最小二乗法により求めた、東京における降雨減衰及び 1 分間降雨強度の対数正規分布近似のパラメーター m, s を示す。大阪における同パラメーターの値[5.2-2]も同時に示した。これらの対数正規分布近似により、東京と大阪で推定される年間時間率 0.01% の降雨減衰量、及び 1 分間降雨強度 (以降、 $A_{0.01}, R_{0.01}$ とする) は、それぞれ、東京で 10.9dB、67.9mm/h、大阪で 9.8dB、47.7mm/h と推定された。

1975 年から 2003 年に報告された東京と大阪における 1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値についてまとめたものを表 5.2-3 に示す[5.2-2]-[5.2-10]。東京と大阪でのそれぞれの観測地点の緯度、経度については、極めてその差は小さいため無視する。それぞれ報告された値の統計期間は 4 年から 10 年である。表中、(A) に示されている値は、過去 10 年間に観測された 10 分間降雨データから推定されたものである[5.2-6]。(B)から(G)に示されている値は、実際に観測された 1 分間降雨強度から推定されたものである。ここ最近の東京における $R_{0.01}$ 値 (F と G) は、明らかにその他の過去における値 (A、B、C、D、E) と比較して大きくなっており、増大傾向があることが見られる。日本の他の地点における $R_{0.01}$ 値の増大傾向については、他の文献でも報告され

ており、強雨の発生確率が過去と比較して大きくなっていることが示唆されている [5.2-10]。以上の事実から、日本の各地における $R_{0.01}$ 値の改訂が必要だと思われる。

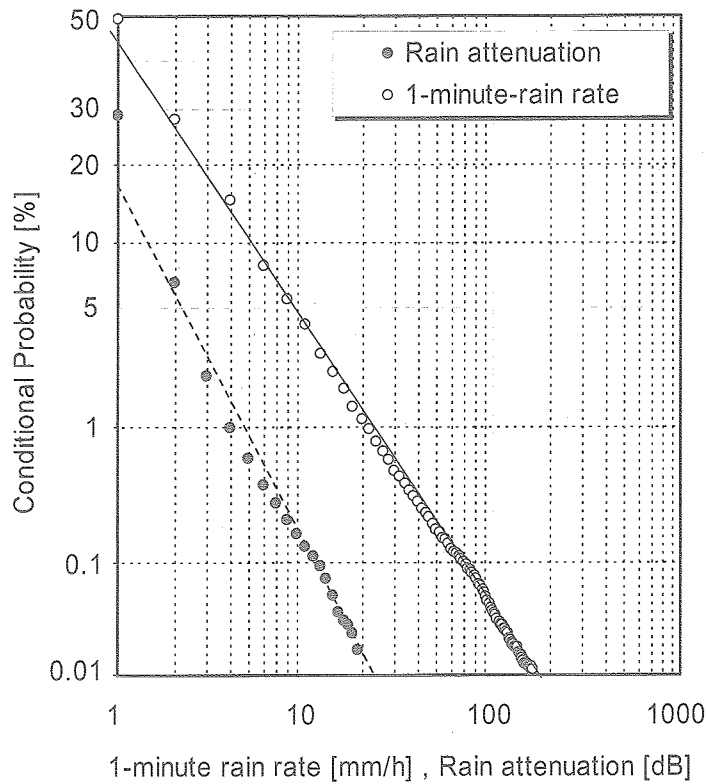


図 5.2-4 東京における降雨減衰と1分間降雨強度の条件付き累積分布

表 5.2-2 降雨減衰と1分間降雨強度分布の対数正規近似パラメーター

| | | 東京 (世田谷) | 大阪 (寝屋川) |
|-------------|--------|------------------|------------------|
| 周波数 | Freq. | 11.84 GHz | 11.84 GHz |
| 降雨減衰 | Period | 2000年4月-2003年12月 | 1988年1月-1995年12月 |
| | EL | 38.0° | 41.4° |
| | AZ | 224.5° | 220.1° |
| | m | -0.404 | -0.824 |
| | s | 0.466 | 0.587 |
| 1分間 降雨強度 | Period | 2000年4月-2003年12月 | 1988年1月-1995年12月 |
| | m | -0.0809 | -0.0555 |
| | s | 0.619 | 0.561 |

表 5.2-3 東京と大阪における 1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値

| | 東京 [mm/h] | 大阪 [mm/h] | 観測期間他 |
|---|--------------|--------------|--|
| A | 52.7 | 50.1 | 10 分間降雨強度で推定されたもの [5.2-6] |
| B | 45.5 | 48.9 | 5 年間 1975 年 4 月-1980 年 3 月 [5.2-7] |
| C | 52.0 | N/A | 10 年間 1971 年 1 月-1980 年 12 月 [5.2-8] |
| D | N/A | 47.7 | 8 年間 1988 年 4 月-1995 年 12 月 [5.2-2] |
| E | 50.4* | 50.3* | 5 年間/10 年間 1982 年 4 月-1986 年 11 月 1977 年 1 月-1986 年 12 月 [5.2-9] |
| F | 79.0** | N/A | 6 年間 1996 年 2 月-2001 年 12 月 [5.2-10] |
| G | 67.9*** | N/A | 4 年間 2000 年 4 月-2003 年 12 月 |

* 東京は 5 年統計、大阪は 10 年統計。

** この値は文献 [5.2-10] のグラフから読み取った。

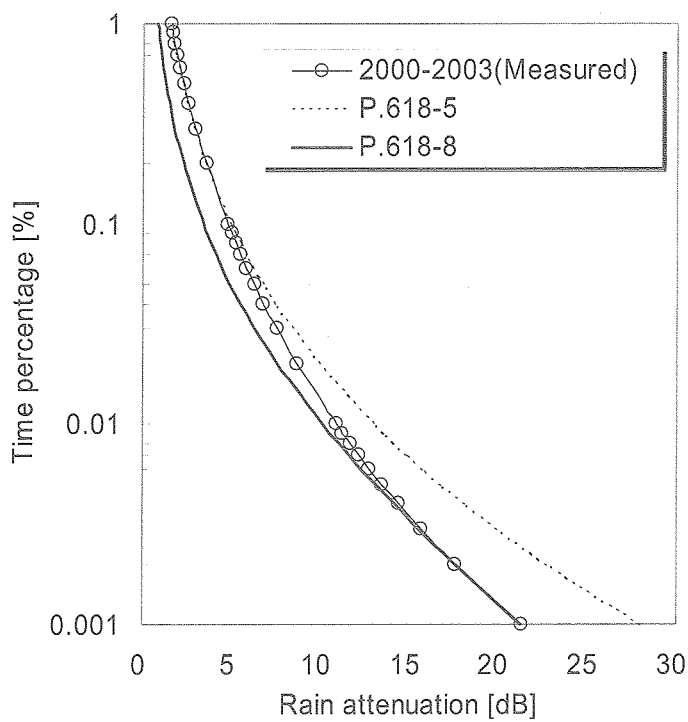
*** この値は筆者による測定

5.2.3. ITU-R 法による降雨減衰推定法

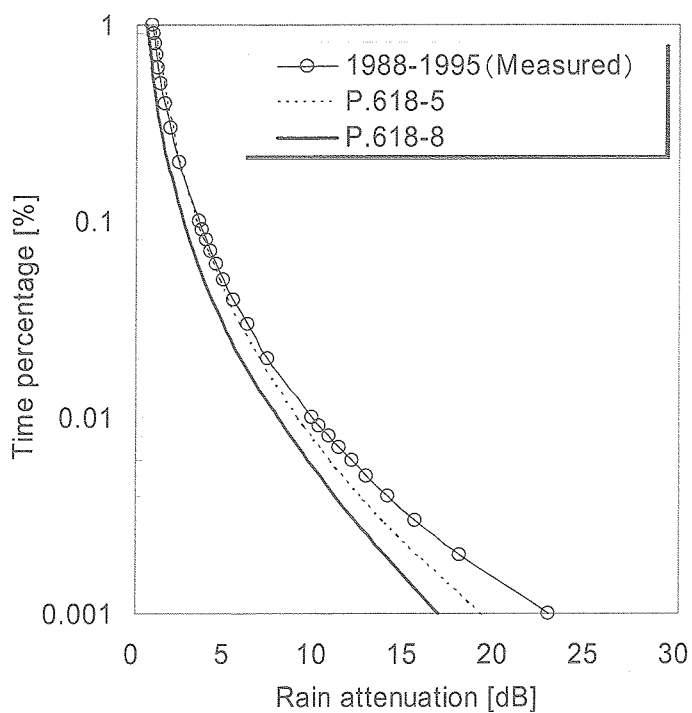
ITU-R 勧告 P.618 は、地球—宇宙間の通信システムにおける降雨減衰推定法を同勧告の 2.2.1.1 章にて述べている。この推定法は、1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値を用いて降雨減衰の年間時間率 p % 値を推定するものである。同勧告の最新バージョンは、P.618-8 [5.2-11] であり、2003 年から施行されている。この P.618-8 による推定法は、それより前のバージョンである P.618-5 [5.2-12] と比較すると、特に、斜め伝搬通路長調整係数の計算方法において大幅に異なっている。この調整係数に関して、P.618-8 では、水平方向及び垂直方向独立に異なる調整係数を設定しているのに対し、P.618-5 では、1 個の調整係数を用いている。

5.2.4. 観測された降雨減衰と推定値の比較

東京と大阪で観測された 12GHz 帯の降雨減衰分布を対数正規分布で近似したものと、ITU-R 勧告 P.618-8 と P.618-5 で推定される降雨減衰分布を比較した結果を図 5.2-5 に示す。大阪については、同図は文献 [5.2-2] に示される対数正規分布パラメーターを用



(a) 東京 (世田谷)



(b) 大阪 (寝屋川)

図 5.2-5 ITU-R 法による降雨減衰推定結果と実測結果の比較

いて描かれた。東京と大阪の降雨減衰及び1分間降雨強度の対数正規分布パラメータは表 5.2-2 に示されている。図 5.2-5 より、東京の観測データを用いて描かれた降雨減衰時間率の近似曲線は、時間率 0.1% から 1% の領域において、P.618-5 により求められる推定曲線に非常に近く、1% を超える領域では、P.618-8 による推定曲線に近づくことがわかる。一方、大阪の観測データを用いて描かれた降雨減衰時間率の近似曲線は、広い範囲で P.618-5 による推定曲線に良く一致していることがわかる。

一般に、ITU-R 勧告 P.311.11[5-2-13] で推奨されている対数誤差を用いた方法が、推定された降雨減衰と実測された降雨減衰を比較する際に用いられている。しかしながら、この方法では、信頼できる対数推定誤差の平均と標準偏差を求めるためには、推定された降雨減衰量を多数の無線リンクでの観測結果と共に用いられるべきである。そこで本検討では、推定曲線の全体のフィッティングを評価するために、パーセント推定誤差を基本にして測定データとの比較をおこなっている[5.2-15]。なぜならば、比較自体が東京と大阪のわずか2つの無線リンクに対して行われるからである。パーセント推定誤差は、次式で定義される。

ここで、 A_{pi} は、ITU-R 法で推定された降雨減衰量、そして A_{mi} は、実測データを対数

$$e_i = \frac{A_{pi} - A_{mi}}{A_{mi}} \times 100 \quad (4)$$

正規分布で近似したものから得られた降雨減衰量である。(両者の単位は dB である。) i は、時間率を示し、パーセント推定誤差は、各時間率に対して求められる。r.m.s. 誤差 e_{rms} [5.2-15] は、推定曲線の実測値から得られた近似曲線に対するフィッティングの程度を判定するための基準として用いられ、次式で定義される。

$$e_{rms} = \sqrt{\langle e_i^2 \rangle} \quad (5)$$

ここで、 $\langle \rangle$ は、平均を意味する。

比較の際用いた時間率は 1% から 0.001% の間で、各区間を 10 分割し、それぞれの時間率値を用いた。(例: 1 から 10% の間は 1, 2, 3... 10% というように 1% 刻みとする。) 東京と大阪における 12GHz 帯降雨減衰量の e_{rms} を図 5.2-6 に示す。この図より、P.618-5 では、東京に対して e_{rms} は、15.8%、大阪に対しては 11.9% であるのに対し、P.618-8 では、 e_{rms} は、28.7%、大阪に対しては 25.3% となり、推定曲線の実測値に対するカーブフィッティングの観点からは、P.618-5 の方が、P.618-8 と比較して良い推定結果を与えていることがわかる。

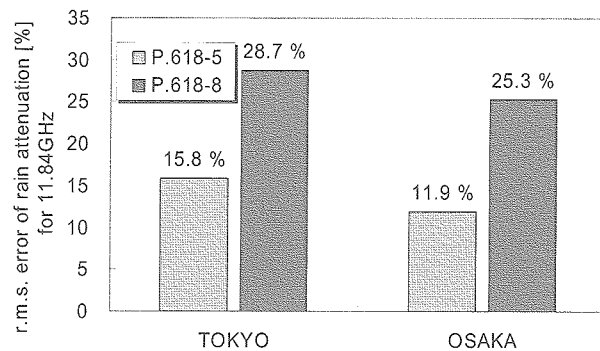


図 5.2-6 降雨減衰の実測結果に対する ITU-R 法による r.m.s.推定誤差の比較

5.2.5. 斜め伝搬通路長調整係数と雨滴層高度が ITU-R 法による推定に及ぼす影響

この章では、降雨減衰の推定結果と実測結果の不一致をもたらす原因を論ずるために、斜め伝搬通路長調整係数と雨滴層高度が ITU-R 法による推定結果に及ぼす影響について検討する。

5.2.5.1 斜め伝搬通路長調整係数の評価

i パーセントの時間率に対する降雨減衰量 $A_p(i)$ を推定するために、ITU-R 法では、次式の基本式を用いている。

$$A_p(i) = \kappa \times R(i)^\alpha \times L_s \times \eta(i) \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

ここで κ と α は、周波数に依存するパラメーターであり、ITU-R 勧告 P.838-2[5.2-16]で算出することができる。 $R(i)$ は、年間時間率 i % における 1 分間降雨強度である。本検討では、この $R(i)$ には、東京と大阪[5.2-2]で観測された 1 分間降雨強度の対数正規近似分布を用いて推定された値を用いた。 L_s は、仰角 θ と上空の大気温度 0°C の高度に相当する雨滴層高度 h_R 及び、地球局の海拔 h_s で決定される実際の斜め伝搬通路長であり、仰角 $\theta \geq 5^\circ$ の範囲では、 L_s は、次式で計算される。

$$L_s = \frac{(h_R - h_s)}{\sin \theta} \quad (\text{km}) \quad (7)$$

この式 (7) では、 h_R は、P.618-8 を適用する場合においては、P.839-3[5.2-19]によって求めることができる。P.618-5 を適用する場合においては、 h_R は、同 P.618-5 の中で指定されている計算式を用いて求めれば良い。 $\eta(i)$ は、時間率 $i\%$ に対する斜め伝搬通路長調整係数と定義され、この $\eta(i)$ は、各推定法で用いられている時間率 $i\%$ に対する降雨減衰量を推定する式を変形することで導かれる。

P.618-5 に対しては、

$$\eta(i)_{P.618-5} = \left[\frac{R_{0.01}}{R(i)} \right]^\alpha \times \eta_{0.01} \times 0.12 \times i^{-(0.546+0.043 \times \log(i))} \quad (8)$$

ここで、 $\eta_{0.01} = r_{0.01}$ であり、P.618-5 では低減係数と呼ばれている。その計算式は、文献[5.2-12]を参照すれば良い。

P.618-8 に対しては、

$$\eta(i)_{P.618-8} = \left[\frac{R_{0.01}}{R(i)} \right]^\alpha \times \eta_{0.01} \times \left(\frac{i}{0.01} \right)^{-\lambda}$$

$$\lambda = 0.655 + 0.033 \times \ln(i) - 0.045 \times \ln(A_{0.01}) - \beta(1-i) \sin \theta \quad (9)$$

$$\beta = -0.005(|\phi| - 36)$$

ここで、 $\eta_{0.01} = r_{0.01} \times v_{0.01}$ であり、 $r_{0.01}$ は、水平低減係数、 $v_{0.01}$ は垂直低減係数と呼ばれ [5.2-15]、その計算式は文献[5.2-11]で触れられている。 ϕ は受信点の緯度 ($< 36^\circ$) であり、 θ は仰角である ($\geq 25^\circ$)。この係数 $\eta(i)$ は、年間時間率 $i\%$ の降雨減衰を計算するために必要な実効的な斜め伝搬通路長を求めるために、実際の斜め伝搬通路長に掛けられることになる。

次に、各 ITU-R 推定法から導かれた斜め伝搬通路長調整係数と、実際に観測された降雨減衰量と1分間降雨強度の対数正規分布近似結果から導かれた斜め伝搬通路長調整係数の比較をおこなった。対数正規分布パラメーターは、表 5.2-2 に掲載されているものを用いた。実測データによる、斜め伝搬通路長調整係数 $\eta_m(i)$ は、

$$\eta(i)_m = \frac{A_m(i)}{\kappa R_m(i)^\alpha \times L_s} \quad (10)$$

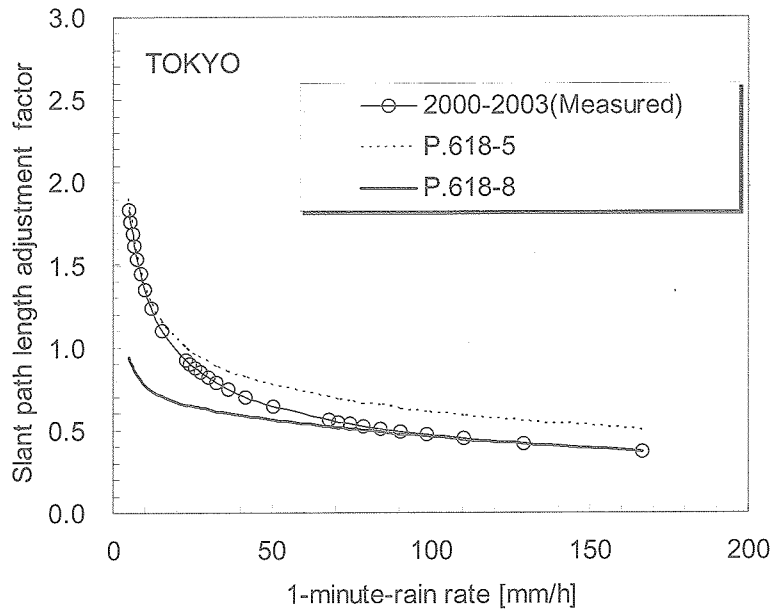
ここで、 $A_m(i)$ と $R_m(i)$ は、それぞれ、年間時間率 $i\%$ に相当する降雨減衰量及び、1 分間降雨強度である。また、 L_s は斜め伝搬路長であり、P.839-3 を用いることで求めることができる。

年間時間率 0.001% から 1% の範囲において、東京と大阪について式 (8) と (9) から得られたそれぞれ 2 つの斜め伝搬通路長調整係数について比較を行った。図 5.2-7 に、東京と大阪に対する、年間時間率 0.001% から 1% の範囲の斜め伝搬通路長調整係数と同じ年間時間率の 1 分間降雨強度の関係をプロットした結果を示す。同図より、1 分間降雨強度がある値以上となると、斜め伝搬通路長調整係数は 1 よりも小さくなることがわかる。これは、受信点での 1 分間降雨強度が大きい程、斜め伝搬通路長調整係数の不均一性が增大することを示唆している。

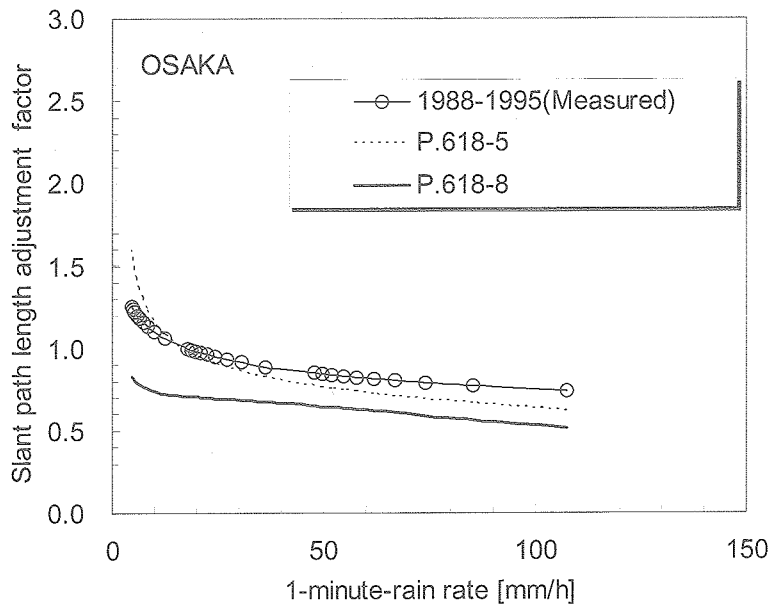
東京については、実測データから得られた斜め通路長調整係数は、1 分間降雨強度 20mm/h 程度までの範囲は、P.618-5 による斜め伝搬通路長調整係数に非常に近い。そして 1 分間降雨強度 50mm/h を超える範囲では、P.618-8 による斜め伝搬通路長調整係数に良く一致している。一方、大阪の実測データから得られた斜め伝搬通路長調整係数は、全体を通じて P.618-5 から得られた斜め伝搬通路長調整係数に良く合致している。しかし、P.618-8 から得られる斜め伝搬通路長調整係数は、今回比較した全ての時間率において、実測結果から得られた斜め伝搬通路長調整係数より小さい値となっている。

両都市において P.618-5 によって得られた斜め伝搬通路長調整係数は、1 分間降雨強度 20mm/h より小さい範囲で、すなわち、時間率がおよそ 0.1% を越える範囲で、その大きさが 1 を超えている。この斜め伝搬通路長調整係数が 1 を超えるというケースは、文献[5.2-14]の観測データによっても確認されており、統計的にも示されている[5.2-17]。これは、時間率が大きな場合には、斜め伝搬通路長に沿って積分された降雨強度は、受信点で観測された 1 分間降雨強度よりも、大きくなる傾向があることを示唆している。とりわけ、夏季においては、受信点では小さな降雨強度しか観測されていないにもかかわらず、大きな降雨減衰が観測される例がしばしば存在する。

図 5.2-8 に、東京で 4 年間に渡り観測された、12GHz 帯降雨減衰と 1 分間降雨強度の散布図を示す。図中に見られる直線は、 $\kappa R^\alpha \times L_s$ により描かれており、ここで κ は 0.0170、そして α は 1.2130、 L_s は 6.75 km である。1 分間降雨強度 20mm/h 以下の範囲では、全点の 67% が、その直線より上の領域に分布しており、20mm/h を越える範囲では、全点中、9% の点だけが、この直線より上の領域に存在している。この現象は、対流性降雨セルが局所的に強い雨を発生させる傾向を持っていることから、斜め伝搬通路長調整係数に、対流性降雨セルが出現することによって引き起こされると説明できる。一方、P.618-8 から得られる斜め伝搬通路長調整係数は、両方の都市において、評価した全ての時間率の範囲で 1 を下回っている。この結果より、P.618-8 で設定される斜め伝搬通路長調整係数には、1 分間降雨強度が小さい場合においては、対流性降雨セルの効果がうまく反映されていないと考えられる。



(a) 東京(世田谷)



(b) 大阪(寝屋川)

図 5.2-7 斜め伝搬通路長調整ファクターの比較

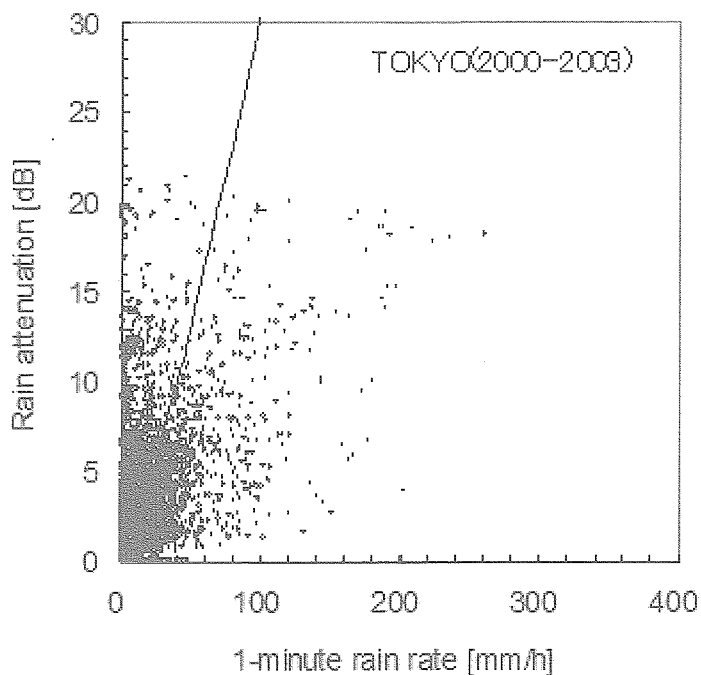


図 5.2-8 降雨減衰と 1 分間降雨強度の散布図

5.2.5.2 雨滴層高度の評価

ITU-R 勧告 P.618 では、雨滴層高度の計算において、いくつかの異なる方法が利用されている。P.618-8 では、P.839-3 に示される方法が持ちられている。また、いくつかの計算式が P.618-5 で定義されている[5.2-12]。P.618 で定義されている平均雨滴層高度を計算するためのいくつかの方法や、P.839 による手法は既に評価されているものの、雨滴層高度を求めるための最適な手法は求まっていない[5.2-14]。一方で、日本の高層気象データを用いて雨滴層高度を計算するいくつかの方法が紹介されている[5.2-18]。日本の高層気象データを用いていること、この方法は、また日本に限定した雨滴層高度の計算式となっていることから、これらの手法が、現状では日本における雨滴層高度を求める際にもっとも適した方法であると考えて良いであろう。

この章では、P.618-8 と P.618-5 で計算される雨滴層高度を、文献[5.2-18]で紹介されている手法で計算された雨滴層高度で置き換えた場合の、P.618-8 と P.618-5 による降雨減衰の推定誤差を、東京と大阪の場合で評価する。

以下に示す各式は、雨滴層高度 h_R を計算するものである。P.618-5 では、日本に対する h_R は、受信点の緯度 ϕ を用いて次式で計算される[5.2-12]。

$$h_R = 5 - 0.075(\phi - 23) \quad (\text{km}) \quad \text{for } \phi > 23^\circ \quad (11)$$

また P.618-8 では、P.839-3 が h_R を求めるために利用されている。P.839-3 では、 h_R は、

$$h_R = h_0 + 0.36 \quad (\text{km}) \quad (12)$$

ITU-R によって与えられている 0°C 等温高データ h_0 を用いて次式で計算されている。日本に限定した h_R は、次式を用いて計算される [5.2-18]。ここで L は、受信点の緯度である。

$$h_R = 3.66 + 0.140 \times L - 0.00342 \times L^2 \quad (\text{km}) \quad (13)$$

ここで、これらの計算式で得られる h_R は、実効的あるいは年間の平均的な雨滴層高度であることに注意する必要がある。雨滴層高度には、季節的変動があり、緯度が高くなるにつれて、その変動も大きくなることが報告されている[5.2-18]。式(11)から(13)から得られた異なる雨滴層高度 h_R をまとめた結果を表 5.2-4 に示す。

表 5.2-4 異なる手法によって計算された東京と大阪の雨滴層高度

| 都市 | h_R (P. 618-5) | h_R (P. 618-8) | h_R [5. 2-18] |
|----|------------------|------------------|-----------------|
| 東京 | 4.05 km | 4.23 km | 4.31 km |
| 大阪 | 4.12 km | 4.33 km | 4.39 km |

P.618-8 と P.618-5 による降雨減衰推定において、雨滴層高度を文献[5.2-18]で紹介されている(13)式で求めたものに置き換えた場合の推定誤差を図 5.2-9 に示す。図 5.2-6 と図 5.2-9 より、P.618-8 では 1%程、東京と大阪で推定誤差が小さくなっているが、逆に P.618-5 では、東京では約 4%、大阪では約 2%推定誤差が大きくなっている。以上の結果より、単に精度の良い年間平均雨滴層高度を当てはめただけでは、顕著な推定誤差の改善が達成できないことがわかる。雨滴層高度の点で、推定誤差の改善を図るためには、雨滴層高度の季節変動の統計的評価が検討されるべきである。例えば、文献[5.2-14]で示されている降雨減衰時間率に対する雨滴層高度の最適化する検討をさらに進めるべきである。

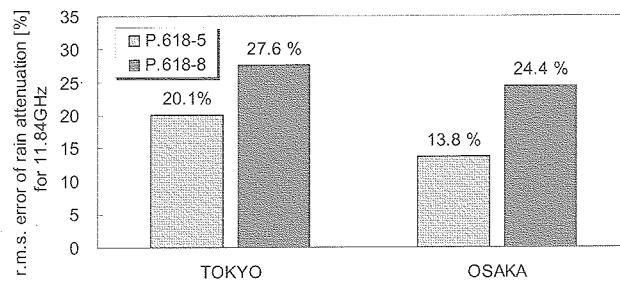


図 5.2-9 雨滴層高度のみを変更した場合の ITU-R 法による推定結果の実測値に対する r. m. s. 推定誤差の比較

5.2.6. 結論

本報告では、東京において 2000 年から 2003 年の 4 年間に渡り観測された 12GHz 帯降雨減衰、1 分間降雨強度の統計的特徴を示した。東京と大阪で観測された 12GHz 帯降雨減衰を ITU-R 法 (P.618-5 と P.618-8) を用いた降雨減衰推定結果と比較した。また観測結果から得られた斜め伝搬通路長調整係数についても ITU-R 法によって求められる斜め伝搬通路調整係数と比較した。

本章の主な結果と結論をについて、以下に要約して記す。

- 1) 降雨減衰及び 1 分間降雨強度の条件付き累積分布は、良好に対数正規分布で近似できる。
- 2) 東京における近年の 1 分間降雨強度の年間時間率 0.01% 値 ($R_{0.01}$) は 67.9mm/h であり、この値は、過去に推定された東京の $R_{0.01}$ より大きく、増加の傾向を示している。同様な増加傾向は大阪では認められない。
- 3) ITU-R 法による降雨減衰推定誤差を評価した結果、東京と大阪では古いバージョンである P.618-5 の方が、良い推定結果を与えることがわかった。
- 4) 観測結果から得られた斜め伝搬通路長調整係数は、1 分間降雨強度が 20mm/h より小さい領域で 1 を越える。これは、観測点での 1 分間降雨強度が 20mm/h より小さい場合、斜め伝搬通路上に沿って積分した降雨強度が、受信点で観測される 1 分間降雨強度よりも大きくなる傾向があることを示唆している。この現象は、斜め伝搬通路上における対流性降雨セルの出現によって説明できる。この対流性降雨セルは、局所的に強い雨を降らせる傾向がある。この対流性降雨セルの降雨減衰推定に対する影響はさらに今後詳細に検討する必要がある。
- 5) 精度の良い雨滴層高度の年間平均値を採用しただけでは、降雨減衰推定誤差の顕著な改善は達成できないことがわかった。推定誤差を改善する意味においては、雨滴層高度の季節変動を統計的に考慮する必要がある。

- 6) 降雨減衰を精度良く推定するためには、地域別の気象の特性を考慮に入れた上で、斜め伝搬通路調整係数に対する更なる検討が必要である。

今後も精力的に日本における降雨減衰の観測及び検討を継続し、21GHz 帯における信頼性の高いデジタル衛星放送実現に向けて努力していく。

参考文献

- [5. 2-1] F. Minematsu, S. Tanaka and H. Nakagawa, " Estimation of transitting power to compensate for rain attenuation for a broadcasting satellite system in the 21-GHz band," 53rd International Astronautics Congress, IAC-02-M. 5-04, Oct. 2002
- [5. 2-2] 前川 泰之, 吉川 治, 張 年錫, 小嶋 敏孝: 「Ku・Ka 帯衛星回線における降雨減衰統計の一検討」1996 年信学技報, A・P96-16
- [5. 2-3] 前川 泰之, 張 年錫, 宮崎 昭, 汐崎 陽 奥野 喜好: 「Ku 帯・Ka 帯衛星電波の降雨減衰特性の比較検討と交差偏波位相との関係」1993 年信学技報, A・P93-26, SAT93-9
- [5. 2-4] ORG-815 Optical Scientific Inc. ,
<http://www.opticalscientific.com>
- [5. 2-5] H. Fukuchi, T. Koz, K. Nakamura, J. Awaka, H. Inomata, and Y. Otsu. " Centimeter wave propagation experiments using the beacon signals of CS and BSE satellites," IEEE Trans. Antennas Propag. , vol. AP-31, no. 4, pp. 603-613, July 1983
- [5. 2-6] 森田 和夫: 「年間および強雨期における降雨強度分布の推定法」1978 年 NTT 研究実用化報告, 第 27 巻, 第 10 号, pp. 2249-2266
- [5. 2-7] 細谷 良雄: 「日本各地の 1 分雨量分布の一推定法」1998 年信学論誌, Vol. J71-B, No. 2, pp. 256-262
- [5. 2-8] 土井 重行: 「日本各地における 1 分間降雨強度の累積時間分布 (その 1)」 1998 年 テレビジョン学会技報 vol. 12, no. 47, pp. 13-17
- [5. 2-9] 入江 浩一「降雨減衰に対する 1 分間降雨強度の推定」1989 年信学論誌, vol. J72-B-II, no. 10, pp. 577-57
- [5. 2-10] 秋元 守, 原田 耕一, 渡邊 和, 市川 敬章: 「短時間降雨の経年変化と日本全国を対象とする 1 分間降雨強度分布の推定法への反映」2003 年信学論誌 B vol. J86-B no. 10, pp. 2166-2173
- [5. 2-11] ITU-R 勧告 P. 618-8, 2003
- [5. 2-12] ITU-R 勧告 P. 618-5, 2001
- [5. 2-13] ITU-R 勧告 P. 311-11, 2003

- [5.2-14] 伊藤 知恵子, 細谷 良雄, 柏 達也: 「ITU-R 衛星回線降雨減衰推定法における雨域高度の検討」 1999 年信学論誌 B 研究速報 vol. J82-B no. 4 pp. 687-690
- [5.2-15] A. Dissanayake, J. Allnutt, and F. Haidara, "A prediction model that combines rain attenuation and other propagation impairments along earth-satellite paths," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 45, no. 10, pp. 1546-1577, 1997
- [5.2-16] ITU-R 勧告 P. 838-2, 2003
- [5.2-17] 森田 和夫, 樋口 伊佐夫: 「降雨による電波の減衰量の推定に関する統計的研究」 1970 年 NTT 研究実用化報告, 第 19 巻, 第 1 号 pp. 97-150
- [5.2-18] 佐藤 孝平: 「降雨強度の空間相関および雨滴層高度についての検討」 1983 年信学論誌 vol. J66-B, no. 4, pp. 493-500
- [5.2-19] ITU-R 勧告 P. 839-3, 2001

5.3 DRTS の実運用における降雨減衰の影響

JAXA 宇宙基幹システム本部統合追跡ネットワーク技術部では、2002年9月10日打上げられた DRTS (Data Relay Test Satellite : データ中継技術衛星) の運用を行っている。その運用経験は既に3年を過ぎ、その間に ADEOS-II、OICETS の2衛星が DRTS のデータ中継機能を利用している。これら衛星の運用及び DRTS の衛星管制運用を行う中で降雨減衰の影響について知見を得たので以下に報告する。

表 5.3-1 は、ADEOS-II の衛星間通信運用実績を示したものである。ADEOS-II は、2002年12月14日に打上げられ初期機能確認フェーズで衛星間通信機能が確認された後 2003年4月15日から DRTS の利用を開始したが、太陽電池パドルの異常により、2003年10月24日に運用が不可能となった。

表中 PGT は、筑波宇宙センターに設置されたフィーダリンク局、HGT は地球観測センター (埼玉県鳩山町) に設置されたフィーダリンク局 (ミッションデータ受信主局) である。1991年~1995年の5年間のアメダスデータの分析から筑波地区と鳩山地区で1時間雨量値 15mm 以上の同時出現頻度は 0.1%^[5.3-1] であり、サイトダイバーシチ効果を期待した冗長構成となっている。しかし、どちらも関東地域で直線距離で約 70km しか離れていないこと、衛星配置が東経 90.75 度赤道上空であることから DRTS-フィーダリンク局間伝搬経路は図 5.3-1 に示すような位置関係にあり、期待したほどのサイトダイバーシチ効果は得られていない。

本システムには、降雨減衰補償機能として送信電力制御 (TPC : Transmitting Power Controller) が具備されているが対象期間中は未調整であり、2004年3月に調整を実施した結果、降雨による Kaバンドテレメトリ・コマンド運用の中止が 2003年度の26回から 2004年度6回に減り、大きな効果が得られた。

なお、OICETS に関しては、2005年8月から運用を行い、2005年11月末時点で約 140パスを運用しているが、降雨の影響による運用中止は発生していない。

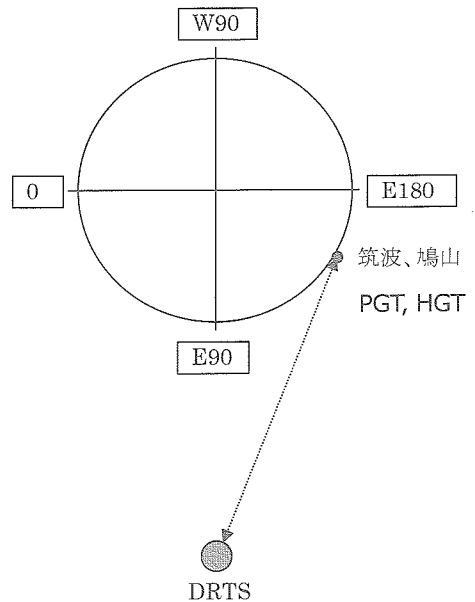


図 5.3-1 衛星とフィーダリンク局の位置関係

| PGT(パス数) | | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 合計 |
|------------------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 計画 | | 198 | 479 | 367 | 466 | 361 | 337 | 318 | 2526 |
| 実績 | | 198 | 476 | 357 | 461 | 336 | 334 | 318 | 2480 |
| 中止パス (欠損パス含む) | 降雨 | 0 | 3 | 0 | 2 | 12 | 2 | 0 | 19 |
| | 不具合 | 0 | 0 | 7 | 3 | 6 | 0 | 0 | 16 |
| | その他 | 0 | 0 | 3 | 0 | 7 | 1 | 0 | 11 |
| 達成率(%) | | 100.00 | 99.37 | 97.28 | 98.93 | 93.07 | 99.11 | 100.00 | 98.18 |

| HGT(パス数) | | 4月 | 5月 | 6月 | 7月 | 8月 | 9月 | 10月 | 合計 |
|------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| 計画 | | 192 | 480 | 369 | 378 | 344 | 281 | 164 | 2208 |
| 実績 | | 189 | 477 | 361 | 373 | 310 | 274 | 164 | 2148 |
| 中止パス (欠損パス含む) | 降雨 | 0 | 3 | 0 | 2 | 10 | 2 | 0 | 17 |
| | 不具合 | 3 | 0 | 6 | 3 | 3 | 3 | 0 | 18 |
| | その他 | 0 | 0 | 2 | 0 | 21 | 2 | 0 | 25 |
| 達成率(%) | | 98.44 | 99.38 | 97.83 | 98.68 | 90.12 | 97.51 | 100.00 | 97.28 |

表 5.3-1 衛星間通信実験実績：ADEOS-II 運用計画及び実績（2003年4月15日～10月24日）

図 5.3-2 に 2004 年（1 月～12 月）の PGT 降雨減衰率を示す。本図の縦軸は、降雨減衰によるテレメトリデータ受信レベルの低下量を、横軸はその発生率を示している。

DRTSとフィーダリンク局とのリンク確保^{注)}には、これまでの運用経験から地上側受信レベルで最低限-108dBm以上必要であることが分かっている。また、晴天時受信レベルが約-94dBm（通年での最良値）であることから、14dBの減衰でリンク確保が困難となる。14dBの減衰発生率は年間約 0.3%であり、約 26 時間（365 日×24 時間×0.3%）は降雨の影響によりKaバンドテレメトリコマンド運用ができないため、USB（Sバンド）によるDRTS衛星管制運用を行うことになる。なお、必ずしも 14dBの減衰で瞬時にUSBに切り替えるわけではなく、予測によるUSBへの切替え及び受信レベルが安定してからの復帰により、実際には、降雨による年間（H16年4月～平成17年3月）運用中止時間は 199 時間^[5.3-2]となっている。

注) コマンドアップリンク :29.690GHz
 パイロットアップリンク :30.360GHz
 テレメトリダウンリンク :19.845GHz

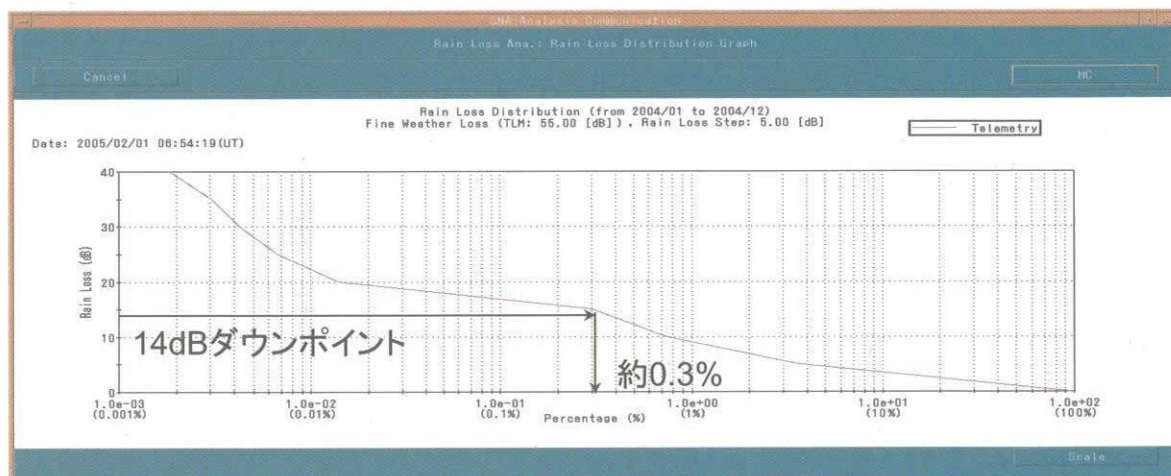


図 5.3-2 PGT 降雨減衰率（2004年1月～12月）

図 5.3-3 に PGT テレメトリ受信レベルと DRTS コマンド受信レベルの相関を示す。TPC プロファイルは、テレメトリ受信レベルの低下（降雨強度）に従いコマンド送信電力を増加するように設定、また、DRTS コマンド受信レベルはその結果として-104dBmの維持が期待できるように設定している。本図は、その設定プロファイルに従ってコマンド送信電力が増加していること、また、DRTS 衛星側のコマンド受信レベルはテレメトリ受信レベルが低下しても一定の値（-100~-104dBm）を維持していることを示している。

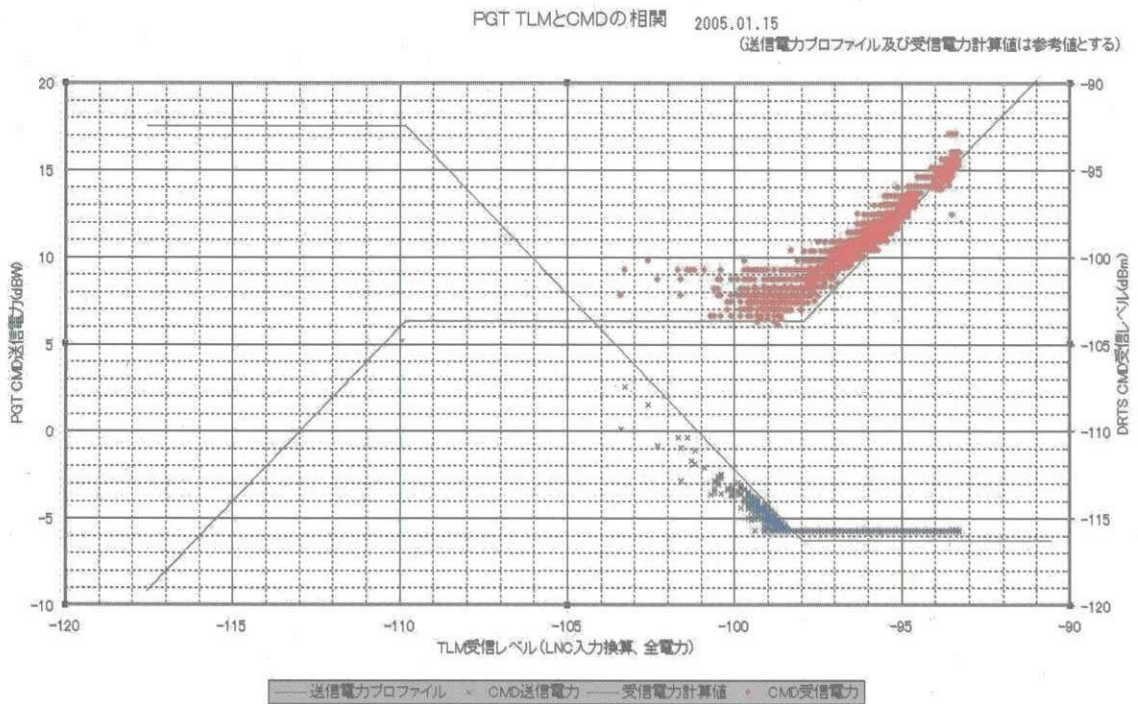


図 5.3-3 PGT テレメトリ受信レベルとコマンド受信レベルの相関

図 5.3-4 に PGT テレメトリ受信レベルとパイロット信号受信電力の相関を示す。TPC プロファイルは、テレメトリ受信レベルの低下（降雨強度）に従いパイロット信号送信電力を増加するように設定、また、DRTS パイロット信号受信レベルはその結果として-73dBmの維持が期待できるように設定している。本図は、その設定プロファイルに従ってパイロット信号送信電力が増加していること、また、DRTS 衛星側のパイロット信号受信レベルはテレメトリ受信レベルが低下しても一定の値（-72~-77dBm）を維持していることを示している。

PGT TLMとPILの相関 2005.01.15
(送信電力プロフィール及び受信電力計算値は参考値とする)

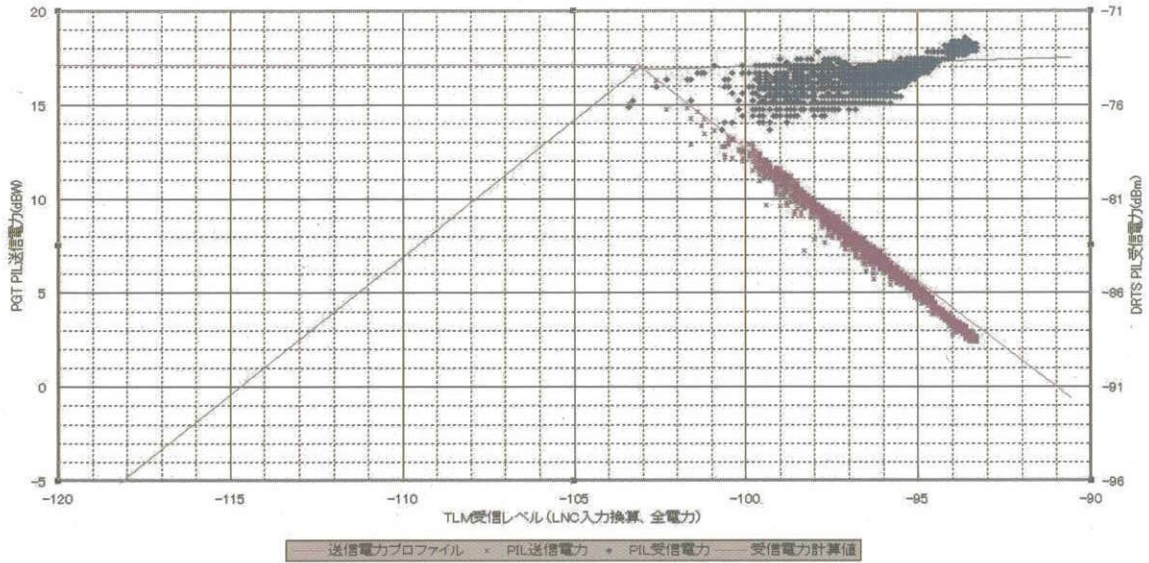


図 5.3.4 PGT テレメトリ受信レベルとパイロット信号受信レベルの相関

DRTS 打上げ以前に想定していたユーザ衛星の降雨不稼働率は 1%^[5.3-3]であり、ADEOS-II の降雨による運用中止は 0.8%と想定 の範囲内であった。DRTS のKaバンドテレメトリコマンド運用については降雨不稼働率 0.1%と想定していたが、確保するのは難しいことが分かった。

TPC の効果に関して、送信電力は設定プロフィールに沿った制御が行われ、衛星側受信電力についてもほぼ期待通りの強度が得られている。特にパイロット信号については、良好に制御されていることが分かる。

<参考文献>

- [5.3-1] 平成 8 年度 DRTS 地上システム概念設計用降雨データの調査 JAXA 業務委託成果報告書
- [5.3-2] 平成 16 年度 追跡管制運用業務委託成果報告書 JAXA 業務委託成果報告書
- [5.3-3] データ中継衛星システム (DRTSS) 回線設計のガイドライン JAXA 技術資料 QXX-960048

第6章 まとめと課題

第2章 21GHz 帯高度放送衛星ミッション

2025年のスーパーハイビジョン放送実用化を目指した21GHz帯放送衛星システムの概要と実験衛星による実証実験の提案内容について述べた。

21GHz帯衛星放送実現のためには、降雨減衰対策が重要な技術課題であり、放送衛星側で行う降雨減衰補償技術としてフェーズドアレーアンテナによる放送衛星システムが有効であることを示し、実験衛星による実証実験を提案した。

さらに、このミッションを実現するために、衛星システムの設計検討に要するミッション要求項目を洗い出した。ミッション達成の課題としては、衛星システムばかりでなく地上システムや打上げシステムに関して、今後明確にすべき項目が残されている。これらについては、さらに詳細な検討を進める必要がある。システム全体で総合的に検討していくことが重要である。

第3章 実証ミッション機器

(1) 中継器の構成

3.1節では、21GHz帯高度放送衛星システムの中継器構成の例として、電力増幅器として多数のTWTあるいはSSPAで構成する給電アレーとBFNから成るフェーズドアレーアンテナ構成を示した。課題としては、テレメトリ・コマンド用送受信機構成や冗長系などの詳細な検討が必要である。

(2) 21GHz帯フェーズドアレーアンテナ

3.2節では、実証実験用の21GHz帯衛星搭載用送信フェーズドアレーアンテナの放射パターンを検討した。アレー給電オフセットパラボラアンテナ構成では、開口径3m・素子数32のときに、全国を35.8dB以上の利得で照射しつつ、48.5dBの増力ビームを形成した。また、開口径5m・素子数64のときに、全国を36dB以上の利得で照射しつつ、50.5dBの増力ビームを形成した。一方、イメージングレフレクタアンテナ構成では、主鏡開口径4m・素子数188のときに、全国を39.4dB以上の利得で照射しつつ、50.6dBの増力ビームを形成した。以上、3種類のアンテナ構成について降雨減衰補償時の放射パターンが形成できることを確認した。課題としては、反射鏡アンテナの熱歪みの影響の検討を行う必要がある。

(3) 電力増幅器・BFN・フィルタ

3.3節～3.5節では、小型・細径TWTをはじめとした中継器を構成する各機器について概要を述べた。21GHz帯フェーズドアレー用電力増幅器として開発した小型・細

径 TWT は、断面寸法を 15.3mm×20.0mm に抑えつつも、出力約 10W、総合効率 48.1% を達成した。アレー構成時の課題として、隣接する TWT の磁気干渉の低減と、排熱処理があるが、磁気シールドによる磁気干渉の抑圧や扁平ヒートパイプによる熱輸送を利用した冷却法を検討し、アレー部分モデルを試作して有効性を確認した。また、電源の構成法として、一台の EPC で複数の TWT を駆動することによる高効率化を検討した。さらに、BFN、バンドパスフィルタに関しては課題抽出を行った。

3.6 節では、回線設計により所要の送信電力を見積もった。衛星搭載アンテナとして、開口径 4m、188 個の放射素子で構成するイメージングレフレクタアンテナを用いた場合は、送信電力が約 400W、チャンネル帯域幅が約 200MHz あれば、約 200Mbit/s の情報を送れることを示した。

3.7 節では、通常の放送衛星で用いられるテレメトリおよびコマンドに加え、衛星搭載フェーズドアレーを用いた降雨減衰補償を行うために、新たに必要となるテレメトリとコマンドについて検討し、アンテナ構成ごとに想定される項目数と情報量を示した。イメージングレフレクタアンテナを用いた場合に、新たに割り当てられる情報量は、テレメトリとコマンドをあわせて、33kbit 程度必要と見込まれる。

3.8 節では、回線設計を元に、想定されるミッション機器の規模の概算を行なった。アンテナ構成ごとに、ミッション機器に必要な電力や発生する熱量などの電気的要求条件および重量などの機械的要求条件を検討した。上述のイメージングレフレクタアンテナ構成では、ミッション機器の重量 278kg、消費電力 1954W、発熱量 1474W、送信電力 480W であった。

小型・細径 TWT などの中継器を構成する各機器に関しては以下の課題がある。給電アレーの電力増幅器に TWT と SSPA を組み合わせた場合、通過位相特性が大きく異なるため、これの補償が必要である。また、一台の EPC で複数の TWT を駆動する方法を採用した場合、電力効率や質量と故障率とのトレードオフを検討する必要がある。BFN は、小型・細形化、量産性の点から MMIC 化する必要がある。フィルタは、放送用周波数帯域外で大きな減衰特性をもつバンドパスフィルタの設計技術と、小型・細形化、量産性を考慮した製作技術を確立する必要がある。

ミッション機器規模の概算に関しては、今回の検討では考慮しなかったテレメトリ・コマンド用送受信機や計装系なども含めた詳細な積算が必要である。

第4章 実験システム

実証ミッション機器の搭載を想定した衛星システムを検討した結果、既存の静止衛星と同程度の衛星規模に納まる見込みが得られた。ただし、その実現にあたっては、下記に示す本ミッション特有の技術課題をクリアにする必要がある。

(1) 衛星コンフィギュレーションの成立性

5m φ 反射鏡の収納には同反射鏡の分割・展開化等の工夫を要する。

- (2) 衛星姿勢制御機能に対する要求性能
まずは、衛星姿勢制御機能に対する要求性能の明確化が必要である。
- (3) 衛星TT&C機能に対する要求性能と運用性
連続的なコマンド運用に対応した衛星設計及び運用体制が必要となる。
- (4) 実証ミッション機器の排熱
熱制御デバイスの評価検討と、衛星システムを含めた熱設計が必要となる。

第5章 DRTS による降雨減衰データ取得・解析

5.1 節では、21GHz 帯の降雨減衰の特性を推測するために、データ中継技術衛星 DRTS 「こだま」のテレメトリ電波（周波数 19.845GHz）の観測設備について示した。この設備を利用して、今後、DRTS のテレメトリ電波の長期観測を実施し、Ka 帯の降雨減衰特性明らかにしていく。

今後の課題は、DRTS の電波観測により得られた降雨減衰時間率値を用いて、放送サービス時間率評価を行う予定である。また、従来の降雨減衰推定法による推定値との比較も行なう。さらに、降雨減衰による放送遮断の評価のために、降雨減衰時系列モデルを構築する。

5.2 節では、東京と大阪における 12GHz 帯降雨減衰の実測結果と ITU-R の推定法による推定結果を比較し、ITU-R の推定法（ITU Rec P618-5）が最新の推定法（ITU Rec P 618-8）より、良い推定結果を与えることを確認した。今後の課題は、同様な比較を DRTS のテレメトリ電波の観測結果に対しても実施することである。

5.3 節では、DRTS を実際に運用している立場から衛星運用に与える降雨の影響について述べた。この中で、フィーダリンク局に対してサイトダイバーシチ効果を期待するためには各局の同時降水出現率は考慮に値するが、局間距離及び衛星との位置関係がより重要であることを示した。また、TPC 機能を適切に設定することにより、リンク確立にとって大きな効果があることを示した。

降雨減衰により Ka バンドでのリンク確立が困難となるのは年間約 30 時間であるが、USB に切替えて DRTS 衛星運用を行ったのは約 200 時間である。ユーザ衛星がない場合は、どうしても早めに USB へ切替えがちになることからこのような結果となっているが、ユーザ衛星である OICETS、ALOS の運用が始まることにより、この乖離は小さくなっていくと思われる。今後運用経験を積むことにより、より限界に近いポイントでの切替えが可能となり、Ka バンドでの運用中止時間をさらに短縮することができると考えている。

第7章 おわりに

平成16年12月から平成18年3月までの約1年半に渡る、NHK放送技術研究所と宇宙航空研究開発機構（JAXA）との共同研究を無事終了することができた。

共同研究締結前の平成16年8月27日の会合を皮切りに、6回に渡る検討を重ね、21GHz帯高度放送衛星ミッション要求条件の設定検討、実証ミッション機器の設計解析、実証衛星システムの概念検討を実施した。また、JAXAのデータ中継技術衛星（DRTS）のフィードリンクの降雨減衰実測値を基に、21GHz高度放送ミッション成立に対して重要な要素である降雨減衰について解析を行った。さらに、本ミッション構想に対してクリティカルと考えられている廃熱問題に対しても、技術的な解決案を示すことができた。

これら各課題に対する解析・検討結果、及び新たに抽出された課題については、前章までに示した通りであり、本ミッション構想の実現に向けて大きな前進になったと考える。表7-1に本共同研究に係る会合履歴を示す。

最後に、本報告書を作成するに至るまで、本共同研究メンバー各位が多大な労力を費やし、新たなミッション創出のために情熱を傾注してくれたことを申し添えたい。また、H-2Aロケットマニュアルの引用に関して、JAXA宇宙基幹システム本部のご支援を頂いたことをここに記す。

表7-1 会合履歴

| | | |
|-----|------------|------------------|
| 第1回 | 平成16年12月8日 | キックオフ |
| 第2回 | 平成17年3月10日 | 技術検討 |
| 第3回 | 平成17年7月22日 | 技術検討 |
| 第4回 | 平成17年12月1日 | 技術検討、及び 報告書のまとめ方 |
| 第5回 | 平成18年3月1日 | 報告書ドラフト |
| 第6回 | 平成18年3月27日 | 報告書最終推敲 |

付録

共同研究メンバー

| 氏名 | 所属 |
|-------|---|
| 野本 俊裕 | NHK放送技術研究所 無線伝送方式 部長 ~2005年6月 |
| 正源 和義 | 同 部長 |
| 今井 一夫 | 同 主任研究員 |
| 田中 祥次 | 同 主任研究員 |
| 峯松 史明 | 同 専任研究員 |
| 筋誠 久 | 同 専任研究員 |
| 亀井 雅 | 同 研究員 ~2005年7月 |
| 中澤 進 | 同 研究員 |
| 山形 和弘 | 同 研究員 |
| 山本 静夫 | JAXA宇宙利用推進本部 通信・測位利用推進センター 主任開発部員 ~2004年12月 |
| 杉浦 誠 | 同 主幹開発員 |
| 小川 眞司 | 同 主任開発員 ~2005年9月 |
| 霜田 俊郎 | 同 主任開発員 |
| 野田 篤司 | JAXAシステムズエンジニアリング推進室 主幹開発員 |
| 對木 淳夫 | 同 主任開発員 |
| 高田 昇 | JAXA総合技術研究本部 通信・データ処理技術グループ長 |
| 杉田 寛之 | 同 宇宙熱技術グループ 主任開発員 |
| 成田 兼章 | JAXA宇宙基幹システム本部 統合追跡ネットワーク技術部 主幹 |
| 野口 晴重 | 同 主幹開発員 |
| 竹内 博昭 | 同 主任開発員 |
| 石井 重吉 | 同 主任開発員 |
| 篠原 幸一 | 同 主任開発員 |
| 手塚 幸広 | 同 開発員 |
| 上嶋 博子 | 同 開発員 |

宇宙航空研究開発機構特別資料 JAXA-SP-05-031

発行 平成 18 年 3 月 31 日

編集・発行 宇宙航空研究開発機構

〒182-8522 東京都調布市深大寺東町 7-44-1

URL : <http://www.jaxa.jp/>

印刷・製本 (株) 東京プレス

本書及び内容についてのお問い合わせは、下記にお願いいたします。

宇宙航空研究開発機構 情報システム部 研究開発情報センター

〒305-8505 茨城県つくば市千現 2-1-1

TEL : 029-868-2079 FAX : 029-868-2956

© 2006 宇宙航空研究開発機構

※ 本書の一部または全部を無断複写・転載・電子媒体等に加工することを禁じます。

