

N-STAR cと 衛星管制システムの開発

ドコモでは、衛星移動通信サービス「WideStar (ワイドスター)®」^{*1}を提供しているが、2002年新たに通信衛星N-STAR cを打ち上げ、その運用を開始した。これにより、衛星通信システムのさらなる信頼性の向上を図ることが可能となった。

N-STAR cとそれを支える管制システムに対する要求条件、および技術的課題と対策について解説する。

やすい よしつぐ 安井 良次	こばやし おさむ 小林 理	やまもと かずいち 山本 員市
あんどう かずひで 安藤 和秀	ほりかわ こうじ 堀川 浩二	

1. まえがき

ドコモでは、1996年よりN-STAR a/bの2機の衛星を用いて、日本および近海(約200海里)をサービスエリアとして、移動衛星通信サービス(MSS: Mobile Satellite Service)を提供している[1]~[3]。N-STAR a/bは、MSSに用いるS帯のほかに、固定衛星サービス用のC帯、Ku帯、Ka帯^{*2}といった多くの種類の中継器を搭載したマルチ・ミッションの衛星であり、ドコモはそのうちサービスリンク(衛星~移動機間のリンク)用にS帯、フィーダーリンク(衛星~基地局間のリンク)用にC帯の中継器の一部を所有し、MSSを提供してきた[4]。

N-STAR cは、1995年および1996年に打ち上げられたN-STAR a/bによるサービスのうち、ドコモの専用ミッションであるS帯MSS部分のみを継承・強化するものである。サービスの拡大に対応できるだけでなく、万が一、N-STAR a/bのいずれかに不測の事態が生じても、お客さまに影響を与えない冗長性と信頼性を確保できる。N-STAR cは、2002年7月に南米仏領ギアナから打ち上げられた[5]。そして、N-STAR bのMSSミッションと置き換えて、同9月より、N-STAR cを用いてのサービスが開始された。衛星と緊密なインタフェースを有する衛星管制システムも、衛星と並行して開発を進めた。

本稿では、2章でN-STAR cに対する要求条件、3章で技術課題と対策、4章で衛星管制システム、5章で軌道上試験について述べる。

2. N-STAR cに対する要求条件

N-STAR cは、以下の実現を目指して開発された。

- ① これまで移動衛星通信サービスを提供してきたN-

STAR aまたはN-STAR bのいずれにも代替可能とする(MSSのみ)。

- ② 現在の移動衛星通信システム用地球局設備や移動機の継続利用を可能とする。
- ③ N-STAR a/bでは衛星の電力容量から通信性能が規定されていたが、送受信能力の向上を図ることによって、通信容量の増大や通信品質の向上あるいは新規サービスの提供に対応する。

N-STAR cの主目的が信頼性向上であることから、打上げ費用を含めた衛星コストを抑えながら、できる限り衛星の通信性能の向上を図るために、衛星バス³ならびに搭載システムの技術動向を総合的に勘案し、N-STAR cに要求する通信性能を決定した。

(1) 衛星バス

1990年代後半の衛星開発は、衛星の大型化や通信容量の大容量化が開発の趨勢であり、多数のC/Ku帯中継器を搭載した地域通信衛星/直接放送衛星や、グローバルなエリアをカバレッジとする、移動通信衛星に代表されるようなハイパワーの通信衛星が開発され、衛星電力は設計に対する制約条件ではなくなりつつあった。しかしながら、このような衛星バスを適用する場合には、重量の増大に伴い打上げ費用が増加する傾向にあった。そこで、衛星の規模(重量)を決定する上で支配的要因となる中継器の消費電力をN-STAR a/bの搭載移動通信用中継器と同程度とし、搭載アンテナの利得の増大による通信性能の向上を検討した。

(2) 通信系

標準的なロケットを用いて衛星を打ち上げる場合は、衛星に搭載する大型アンテナはコンパクトに折りたたみ収納することが不可欠である。このようなアンテナを適用するためには、鏡面をメッシュで構成した展開アンテナが選択肢となる。商用の実用衛星では、すでに開口径が10mクラスの展開メッシュアンテナは実用化されつつあったことや基礎的な特性を把握する試作や試験が行われていることから[6]、展開メッシュアンテナの採用に関しての開発リスクは大きくないと想定した。また、同等サイズのソリッド鏡面のアンテナより格段に軽量化した大型のアンテナが搭載できるため、衛星の重量の増加を伴わずに通信性能向上を図ることができるとの見通しを得た。

N-STAR a/bでは、サービスエリアを4つのビームで覆っている[1]。アンテナ利得増大のために単純にアンテナの開口径を大きくしたのではビーム径が絞られるため、N-STAR a/bと代替可能なようにサービスエリアを4

ビームでは覆うことができなくなる。そこで、小径のいくつかのビームを合成し、サービスエリアに適合するビームを形成することが必要になる。また、中継器の消費電力を同程度とするためには、N-STAR a/b搭載中継器と同様に、ビーム間のトラヒックに応じて中継器出力を柔軟に各ビームに配分することで、衛星電力を有効利用できる機能を有する必要がある。大型の展開メッシュアンテナを用いて、N-STAR a/bにも搭載しているマルチポート増幅器(MPA: Multi-Port Amplifier)⁴を使用してクラスター給電によりビームを形成する構成あるいは、アクティブフェーズドアレー給電によりビームを合成する構成が考えられるが、そのいずれかで、衛星の電力増加や重量増加を伴わずに、所定のカバレッジのe.i.r.p.(Equivalent Isotropically Radiated Power)やG/T(Gain over Temperature)⁵の高性能化を図ることができる。

以上を踏まえ、N-STAR cの要求性能条件を決定した。表1に、N-STAR cの主要通信性能をN-STAR a/bと比較して示す。また、図1に、衛星の重量と搭載アンテナ径を指標としたときの移動通信衛星におけるN-STAR cの位置づけを示す。N-STAR cは、小型な衛星ではあるが、従来の移動通信衛星より大型のアンテナを搭載していることが分かる。

3. N-STAR cの技術課題と対策

衛星の開発は、1機ごとにそれぞれ個別の要求を満足する単品製造、すなわち開発過程を伴う。そのため、一般に衛星システムの開発および設計は要求仕様に基づいて、システム設計からサブシステム設計へとブレイクダウンしていくトップダウンの手法で行う。また、製造や試験はサブシステムレベルからシステムへと積み上げて実施と確認をしていくボトムアップの手法が取られ、電気的および機械的に複雑に融合するシステムを構築する。さらに、打ち上げられるまでに地上で十分な試験・評価を実施するのが特徴である。図2に衛星システムの開発フローの一例を示す。

ドコモの要求条件を実現するためにはいくつかの技術的課題があるが、本フローの適切なポイントで、設計の妥当性および性能・信頼性を確保するために必要な処置や特性試験・環境試験の検討と確認を行った。以下では、搭載中継系、アンテナ系、バス系の各々について説明する。なお、衛星の外観を図3に示す。

3.1 衛星搭載通信系

N-STAR cに搭載された通信系サブシステムは、開口径5.1mφの展開メッシュアンテナと中継器から構成される。

表1 N-STAR cとN-STAR a/bの主要通信性能の比較

項目	N-STAR c	N-STAR a/b	N-STAR cの性能アップ分	
S帯照射エリア／ビーム数	日本および近海（約200海里）／4ビーム			
C帯照射エリア	関東エリア	本州エリア（エリア3）		
偏波	S帯送信	右旋円偏波		
	S帯受信	右旋円偏波		
	C帯送信	左旋円偏波	右旋円偏波	
	C帯受信	右旋円偏波	左旋円偏波	
G/T (dB/K)	C-to-S	13	1（エリア3）	+12dB
	S-to-C	10	3	+7dB
e.i.r.p. (dBW)	C-to-S	59	52	+7dB
	S-to-C	49	36（エリア3）	+13dB
IFD (dBW/m ²)	C-to-S	-104~-98	-99	
	S-to-C	-122~-116	-121	
NPR (dB)	C-to-S	18	18	
	S-to-C	21	21	
変換周波数	a号機とb号機の帯域の切替可能	a号機とb号機で個々		
周波数帯域	15MHz（ビーム1, 2） 12MHz（ビーム3, 4） a号機とb号機の帯域の切替可能	15MHz（ビーム1, 2） 12MHz（ビーム3, 4）		

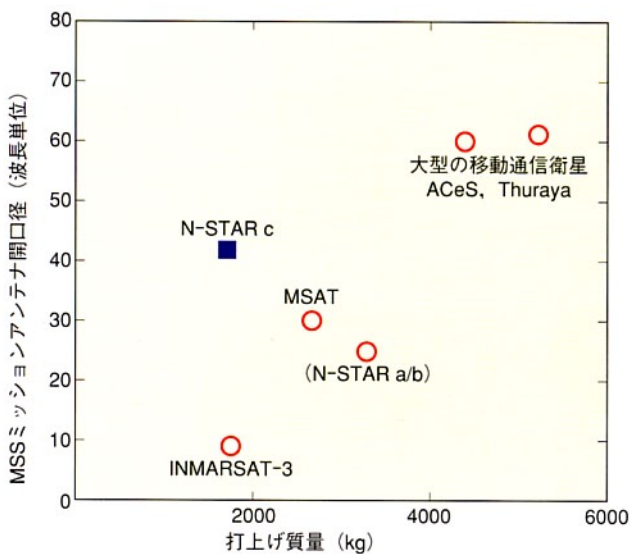


図1 各種移動通信衛星におけるN-STAR cの位置付け

アンテナは、C帯フィーダーリンクとS帯サービスリンクで共用する。4つのS帯ビームを形成するビーム形成回路（BFN：Beam Forming Network）を送信用と受信用にそれぞれ設け、S帯フィードとBFN間に増幅器を配置したアクティブアレーアンテナの構成をとっている。中継器は、図4に示すように、基地局から移動機への信号中継に使用するフォワードリンク部と移動機から基地局への信号中継に使用するリターンリンク部から構成される。

フォワードリンク部では基地局からのC帯フィーダーリンクを受信し、S帯信号に周波数変換した後に、チャンネルフィルタにより各S帯ビームに割り当てられた通信帯域の

信号だけを通過させる。4つのビームに対応して設けられたチャンネルフィルタを通過したS帯信号を、送信用BFNにより振幅・位相の重み付けをした後、高出力増幅器で電力増幅して、所望のS帯送信ビームを形成してS帯送信信号としてアンテナから放射する。

N-STAR a/bでは、チャンネルフィルタリングが容易な中間周波数帯にいったん周波数変換する構成（ダブルコンバージョン構成）を採っていたが、マイクロ波帯の狭帯域フィルタ技術が向上したため、S帯での直接チャンネルフィルタリングが可能となり、N-STAR cではシングルコンバージョンによる構成を実現している。

衛星電力を有効利用するため、S帯高出力増幅器としてMPAを3セット搭載し、3セットのMPAの出力電力を送信BFNによりさらに空間合成して送信ビームを形成する。ビームごとのトラヒックに応じてMPAの出力電力を柔軟に各ビームに分配することも、極端な場合には3セットのMPAの合計した出力電力を1つのビームに集中して出力することもできる。

リターンリンク部ではサービスエリア内の移動機からの信号を複数のフィード素子で受信し、低雑音増幅した後に、受信BFNにより振幅・位相の重み付け合成して、所望のS帯受信ビームを形成する。チャンネルフィルタにより通信帯域の信号だけを通過させた後、C帯信号に周波数変換し、高出力増幅器で電力増幅してC帯フィーダーリンク信号としてアンテナから基地局に向けて放射する。

N-STAR衛星移動通信システムではサービスリンクにS

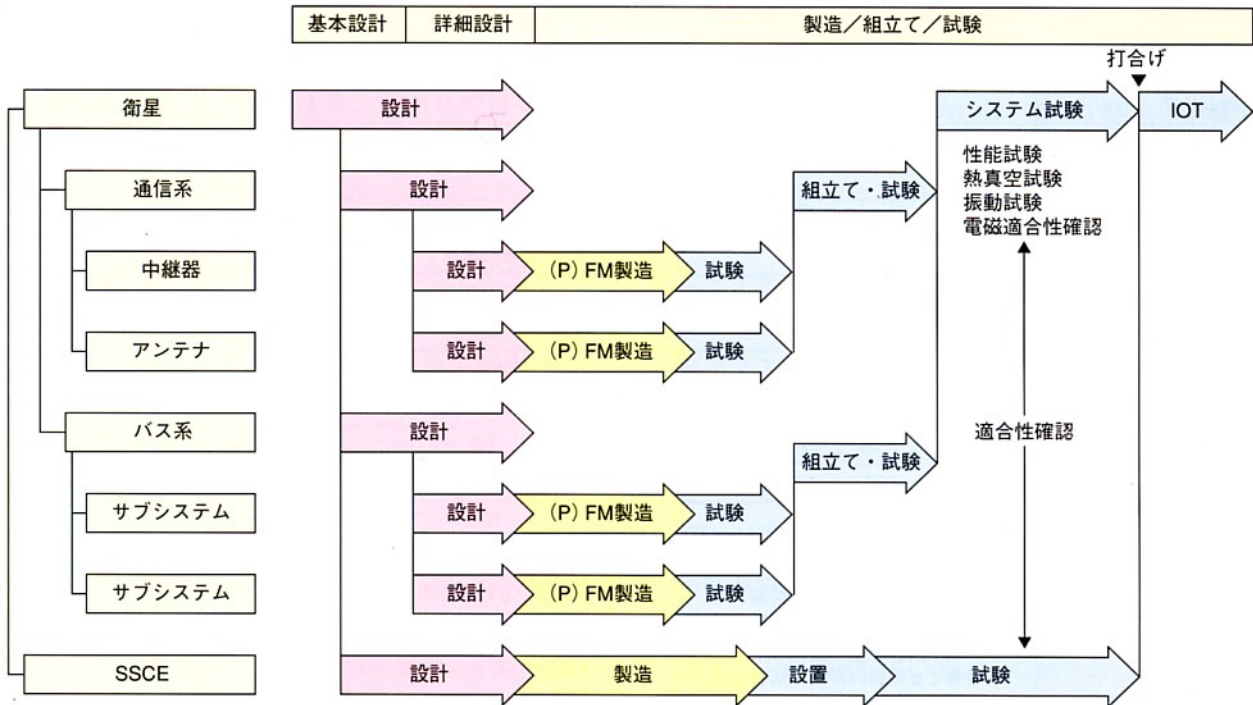


図2 衛星システムの開発フローの一例

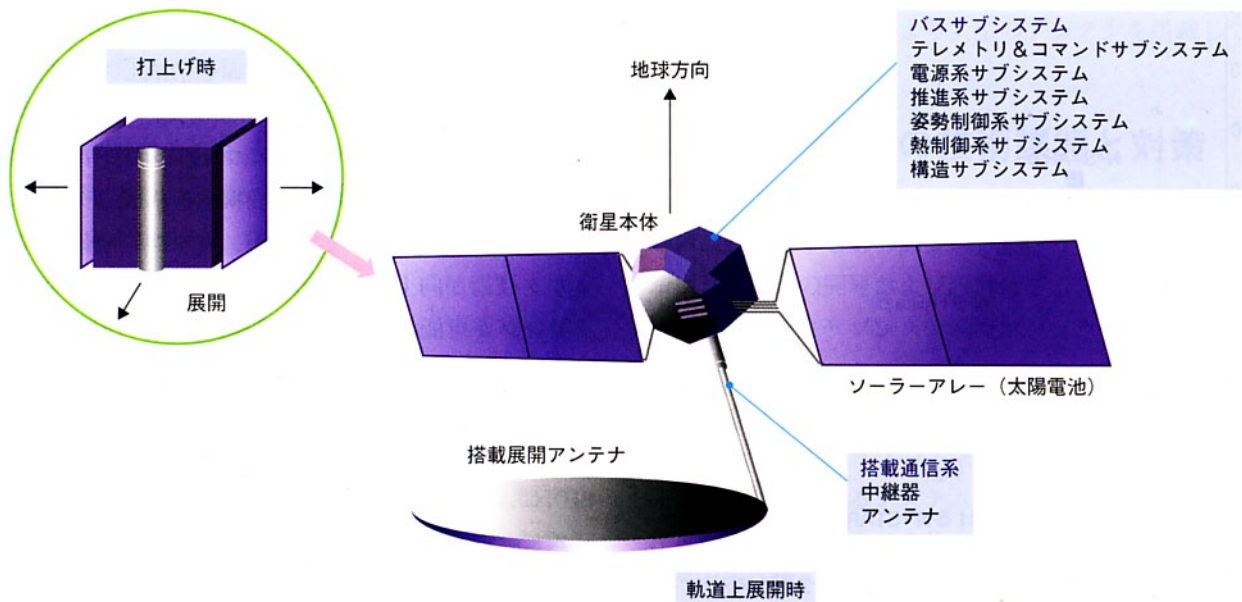


図3 衛星の外観

帯周波数の30MHzの帯域を使用しており、N-STAR a/bの2機がそれぞれ15MHzをカバーしている。N-STAR cには、N-STAR a軌道（東経132°）もしくはN-STAR b軌道（東経136°）の両方で運用できることを要求している。これについては、新規開発を伴わずに、既存技術を適用するか、それを基にN-STAR c用にカスタマイズすることで容易に実現できる内容であることを検証し、設計に展開した。具体的には、変換周波数の切替え（周波数変換器に外部から

供給する局部発振信号の周波数の設定を変更する）と、チャネルフィルタの切替え（通過帯域の異なるチャネルフィルタをスイッチにより切り替える）による構成とした。

開発にあたっては、エンド・エンドでの諸特性を実現するために、中継器を構成するコンポーネントへの性能配分の妥当性、実現性、バス系とのインターフェースの整合性を、コンポーネントの設計段階から確認した。コンポーネントの製造・試験段階以降に発生したいくつかの不具合につい

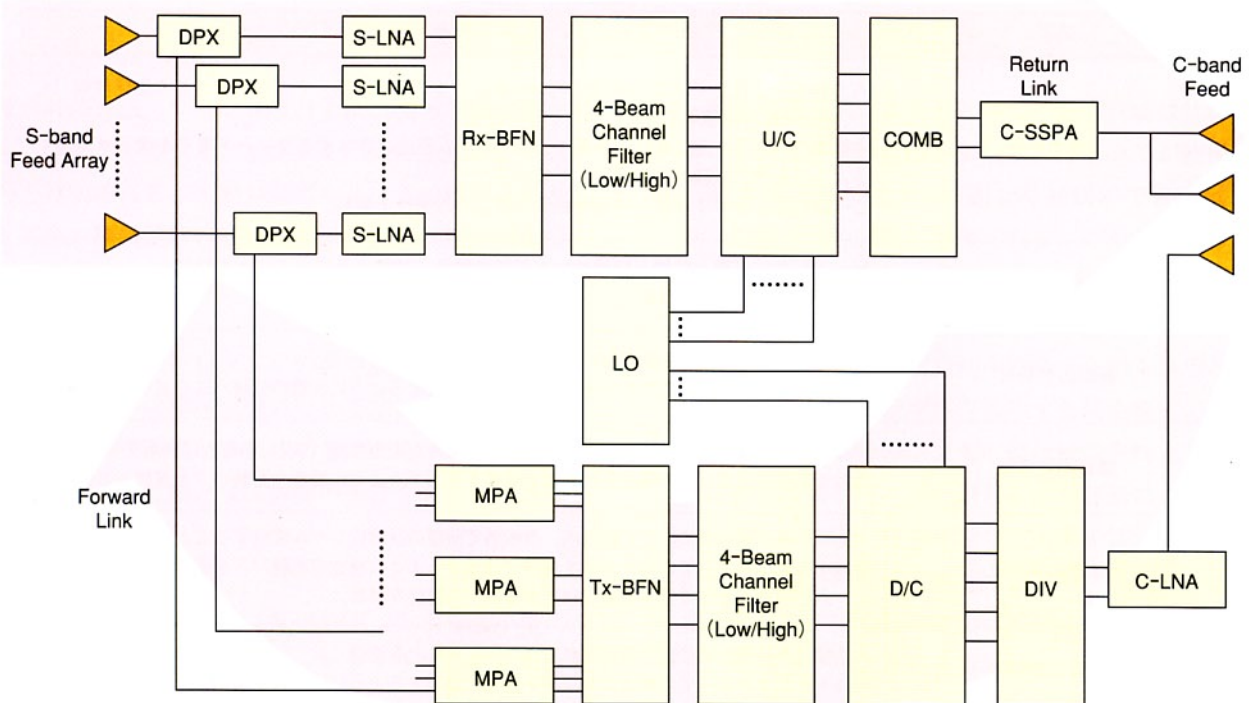


図4 N-STAR cの中継器構成

ては原因究明を行い、適切な対処・処置をとり、性能と信頼性が確保されていることを確認した。また、アクティブアレーアンテナの構成とすることに伴い、BFNを含めたビーム合成後の特性が宇宙環境下でも所望の性能を確保していることを確認するために、どのような試験項目、試験方法、試験パスについて性能確認試験を実施する必要があるかを検討し、詳細な試験計画を策定した。表2に中継器の主な試験の概要を示す。この試験計画に従って実施した試験結果を評価し、アンテナを含めた通信系としての所望性能が得られることを確認した。

3.2 衛星搭載アンテナ系

N-STAR cでは送受別、サービスリンクとフィーダーリンク別にアンテナを用意するのではなく、S帯送受、C帯送受で1枚のアンテナを共用する構成をとり、衛星をコンパクトに仕上げています。しかしながら、送受共用とすることにより、パッシブ・インターモジュレーション (PIM: Passive Inter-Modulation)^{*)} に対する評価・試験・検証が重要な課題となった。搭載アンテナ系に関しては電気設計だけでなく機械設計の観点からの評価も重要で、大型アンテナを採用することによるバスへのインパクトや、アンテナポインティング性能の確認評価を行った。

(1) パッシブ・インターモジュレーション (PIM)

大電力出力の衛星においては、PIMに関して細心の注

意を払う必要があるが、今回も同様である。PIMは送信信号の伝送経路中の受動素子にわずかな非線形性があると発生する混変調で、それが受信帯域に規定のレベル以上で表れると通信性能に影響をおよぼす。移動通信衛星は、大電力の信号を送信し、かつ受信機の感度も非常に高いためPIMの問題が顕在化しやすい。また、その発生も安定したものではないため、寿命期間中にわたっての耐性を担保することが重要となる。そこで、次の指針で開発を進めた。

- ① 当初から潜在的にPIM発生要因となるコンポーネントや部位を洗い出し、それぞれに許容されるPIMレベルを適切に配分し、系全体だけでなく各コンポーネントに対し設計目標を明確にする。
- ② 特にPIMが発生した場合の影響が大きいコンポーネントに対しては、常温にとどまらず軌道上で想定される温度での環境下でもPIM試験を実施する。
- ③ 軌道上運用状態にできるだけ近い組立て状態でのPIM試験を実施する。

上記の通り、コンポーネントからシステム組立てにいたるまで、PIMに関して継続的な検討と試験を行うことにより、最終的には通信性能に影響を与えるものではないことを確認した。

(2) 衛星搭載アンテナの構造と展開機構

大型の展開メッシュアンテナは打上げ前は折りたた

表2 中継器の主な試験の概要

項目	概要
入出力特性	入力レベルに対して所望の出力レベルが得られることを確認。アンテナを含めた送信性能 (e. i. r. p.) の解析に使用する。 中継器の設定を一定に保った状態で、S帯ビーム形成に寄与するフィード素子を信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。 ビーム形成に寄与する素子の測定結果からビーム特性を解析。
振幅・位相バランス特性	ビーム形成に必要な振幅・位相特性が所望の範囲に設定されていることを確認。 S帯送信およびS帯受信のビーム形成を行う箇所について実施。
振幅線形特性	所定の出力時に所望の振幅線形性が得られることを確認。 性能を支配するすべての高出力増幅器を信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。
雑音指数特性	中継器で発生する熱雑音量を確認。アンテナを含めた受信性能 (G/T) の解析に使用する。 性能を支配するすべての低雑音増幅器を信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。
周波数応答特性	出力レベルが周波数に応じて帯域内、帯域外で所望の状態にレベル変化することを確認。 性能を支配するすべてのフィルタを信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。 ビーム形成に寄与する素子の測定結果からビーム特性を解析。
変換周波数特性	入力信号が所望の周波数に変換されて出力されることを確認。 性能を支配するすべての周波数変換器を信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。
スプリアス特性	所望の出力信号以外に不要なスプリアスが発生しないことを確認。 スプリアスの発生要因となるすべての周波数変換器を信号が通過するように複数の試験パスを選択して実施。

れて衛星に取り付けられるが、軌道上で複雑な機構で展開されるため、展開動作の信頼性の確保やメッシュ構造による鏡面精度の実現性についての評価が重要である(図3)。具体的には、展開を阻止する要因を精査すること、製造されたメッシュアンテナに対して実施される地上での展開試験が軌道上での実際の展開シミュレーションになっていること、その結果により、軌道上での実際の展開に対して十分なマージンがあることを確認する。鏡面精度に関しては、地上で測定する重力下でのアンテナ鏡面の形状から軌道上の無重力下での形状を推定する手順が妥当であること、宇宙環境下でその精度が保持されることを確認する。これらの事項を重要課題として、評価・確認を行った。

(3) アンテナポインティング性能

安定した通信を実現するために、衛星搭載アンテナはサービスエリアを常に高精度で指向している必要がある。本衛星で採用したような大型の展開メッシュアンテナでは、軌道上で受ける熱の入力に対してどのような変形をし、それがアンテナビームの指向方向の誤差として、どの程度の影響があるかを明確にしなければならない。単に展開メッシュアンテナの熱変形だけではなく、支持構造やアンテナのフィードを含めた全体系での評価と、季節変動、日変動、センサの特性を含め指向誤差が

最悪になる状態を正確に抽出することが重要である。全体系のモデリングおよび最悪状態の抽出を中心に検討・評価した。

3.3 衛星バス系

衛星のバスシステムは、通信性能の実現を補助するものである。そのため、仕様には性能を直接的に規定するのは少ないが、バスの問題は一度起これば衛星全体の生死にかかわる。軌道上での運用性能の確認と信頼性の最大限の確保を目的として、試験仕様と品質保証仕様を規定し、各バスサブシステムについて設計審査と試験確認を実施した。また、試験段階で発見されたすべての不具合の原因を究明し、対処と必要な追加試験などによる確認作業を実施した。

N-STAR cは打上げ重量で約1.6トンの衛星であり、既存小型バスを改良したものが使用された。このため、特に構造、姿勢制御系、電源系について、軌道上の実運用実績などに照らし合わせ、設計に関して新規に確認を要する項目と内容、試験の項目と内容、性能の安定性・信頼性評価を考慮した。その上で、設計や製造、試験方法を確定し、開発を実施した。

(1) 構造

本衛星は機械的な観点からは新規設計と分類される部

分もあり、その不確定要素に関する確認に重点をおいた。特にプログラム末期の不適切な試験における不具合や打上げ時での問題発生を避けるため、初期段階から、機械設計の方法、マージン設計手法、機械試験の確認方法を、コンポーネント/サブシステムの試験シーケンスにわたり明確にし、主要コンポーネントの機械試験およびシステム機械試験の試験手順に関する個別の技術会合や実試験の立会いを行い、性能に関して問題が発生しないように期した。

特に、主構造や燃料タンクの荷重試験やソーラーアレー（太陽電池）の機械試験については、新規の認定試験である設計要求が満たされていることをマージンがあることで証明する試験とほぼ同様の条件を課しての試験を実施した。

(2) 姿勢制御系

N-STAR cの衛星本体はN-STAR a/bよりも小型になる一方で、大型の展開メッシュアンテナを衛星から離れた位置に据え付ける構造となっている。そのため衛星は、軽量であるが大きな慣性モーメントを持ち、アンテナ系の持つ固有振動数が低くなる、という特徴を有することとなる。このアンテナ構造を含めた機械特性が、姿勢制御系の制御特性上の問題となってはならない。さらに、軽量で大型のアンテナを持つ衛星が受ける太陽輻射圧による軌道制御への影響、外乱トルクによる姿勢制御への影響、それらを考慮した制御系の精度、軌道制御に

必要となる推進薬などの点について、評価、検討、確認を実施した。

(3) 通信系とバス系の電磁適合性

衛星の通信系システムとしての要求性能は仕様書に規定してある。その性能を満足すればドコモが使用する地上系通信設備を用いて問題なく通信ができるはずであり、電磁適合性試験も実施される。しかしながら、解析上予測が困難なバス系からの通信信号への干渉が、バス系と組み合わせた衛星の総合性能に問題ないことをいかにして確認するかが開発初期段階から懸案事項としてあった。そこで、不確実性を排除する最も確実で直接的な方法として、実際のドコモの通信機器を地上レベルで衛星に直接接続して、通信信号の品質評価により通信システムとしての安定性を確認する方法を採用した。ドコモの通信設備（移動機と基地局装置のテストセット）を衛星製造工場に持ち込んで実衛星経由の通信リンクを構築し、軌道上で想定される実際のバスシステムの動作をすべて網羅的に実施して、いずれの動作も通信システムに対して影響をおよぼさないことを確認した。

4. 衛星管制システム

衛星を寿命期間にわたって良好な状態に保つためには、常に衛星の状態を監視し、必要に応じて適切な制御を行う必要がある。衛星管制システムは、この目的を達成するためのシステムである。

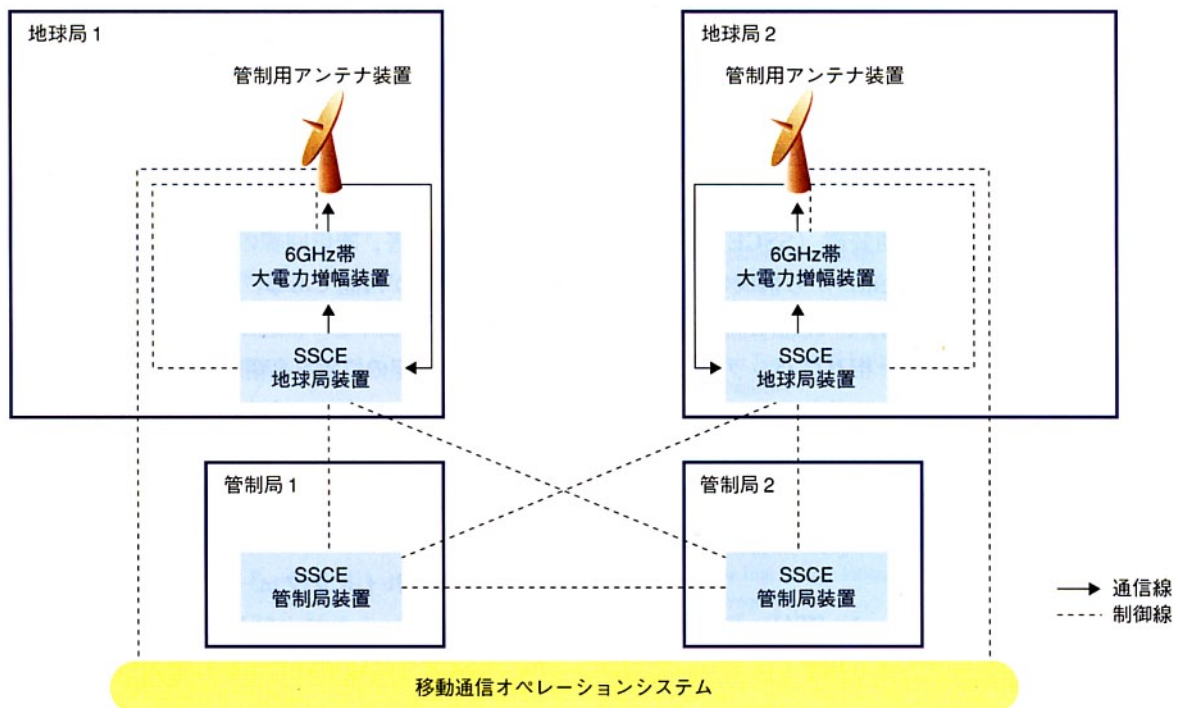


図5 N-STAR c衛星管制システムの構成

表3 N-STAR c衛星管制システムの機能概要

装置		機能	
地球局 RF送受信装置	管制用アンテナ装置	テレメトリ・コマンド送受信機能	衛星へのコマンド・測距信号の送信 衛星からのテレメトリ・測距信号の受信
		測角機能	衛星方向の方位角および仰角の測定
	低雑音増幅器	テレメトリ信号増幅機能	テレメトリ信号（4GHz帯）を低雑音で増幅し、アンテナ装置とともに、テレメトリ受信に必要な受信G/Tを得る
	コマンド送信機	コマンド信号送信機能	コマンド信号（6GHz帯）を所要レベルに増幅し、アンテナ装置とともにコマンド送信に必要な送信e.i.r.p.を得る
衛星管制装置 (SSCE)	SSCE地球局装置	テレメトリ受信復調機能	地球局RF装置で受信増幅されたテレメトリ信号を復調し、管制局装置が処理可能なフォーマットに変換、管制局装置に転送
		コマンド符号化変調機能	管制局が送るコマンドデータを衛星が受信できるようにフォーマット化し、変調する
		測距機能	衛星の軌道決定を行うために必要な地球局／衛星間の距離を測距トーン信号の送受信により測定 地球局装置内での信号折り返しにより、地球局内の装置により発生するバイアス誤差の補正が可能
		地球局装置制御機能	SSCEおよび地球局RF送受信装置の状態監視および制御
	SSCE管制局装置	テレメトリ処理機能	テレメトリデータの工学値変換を行い、表示・記録
		コマンド処理機能	衛星および衛星搭載機器の状態を制御するためのコマンドデータの生成、送出および送出したコマンドの実行確認 あらかじめ作成、検証したコマンドを送出することにより、安全な運用を行うことが可能
		データ蓄積／解析機能	地球局装置から送られたテレメトリデータの運用者が認識できる形式への変換、表示、蓄積 テレメトリデータの統計処理、相関解析
		軌道決定機能	地球局で測定した測距・測角データから衛星の軌道を計算 地球・月による食の予測 地球センサなどへの太陽、月による干渉の予測
		マヌーバ計画・評価機能	軌道決定機能により得られた軌道データをもとに、衛星を規定された軌道位置範囲に保持するために必要なマヌーバの実施時期および所要噴射量を決定 マヌーバ実施結果を評価
		地球局装置制御機能	SSCE地球局装置および地球局RF送受信装置の状態監視および制御

図5に、N-STAR c衛星管制システムの構成を示す。本システムは、機能的にコマンド／テレメトリ信号の送受信を行う地球局のRF（Radio Frequency）送受信装置と、コマンドの生成・変調、テレメトリの復調およびコマンド／テレメトリの処理を行う衛星管制装置（SSCE：Satellite Supervising and Control Equipment）から構成されている。災害などによる運用への影響を防ぐため、2局の地球局および2局の管制局を配置し、各々相互にバックアップ可能な構成としている。N-STAR c衛星管制システムは、設備の保守管理における容易さ、衛星管制と通信系とのアンテナ共用を考慮し、既存の通信用地球局設備の基地局に設置した。表3に衛星管制システムの各構成要素の機能概要をまとめる。

N-STAR c衛星管制システムは、N-STAR cの管制運用を高信頼かつ効率よく実施できるよう構築しており、特徴は以下の通りである。

① SSCE地球局装置、SSCE管制局装置は、それぞれの

局に同一構成の装置を設置しており、さらに、各装置についても二重化を図っている。また、地球局／管制局間の通信回線のたすきがけ接続、管制局間の相互接続により冗長通信回線を設けた。これにより、装置故障や災害、通信回線の断などの発生に対しても安定した運用が可能である。

② 衛星は所定の軌道保持範囲で運用する必要があるため、衛星の位置を高精度で計測する必要がある。本管制システムでは、トーン信号による距離測定と高次モードトラッキング方式を採用した高精度測角アンテナを用いた角度測定により衛星の軌道決定を実施している。

③ 管制用アンテナの通信系との共用を実現するため、それぞれインタフェースの異なる地球局RF送受信装置（アンテナおよびRF送受信装置）の監視制御を、SSCE管制局装置および移動通信オペレーションシステム（MOS：Mobile communication Operation System）の双方のシステムから実施可能な構成とした。

5. 軌道上試験

軌道上試験 (IOT: In-Orbit Test) は、ロケットによる衛星打上げ後に、搭載された機器が正常に動作するか、また地上試験で確認された性能からの劣化がないかを確認するための試験である。衛星バス系は主に静止化前の遷移軌道上で衛星からのテレメトリ信号により確認し、衛星搭載通信系は、静止軌道上でIOT地球局からRF信号をアップリンクし、中継器を経由しダウンリンクされたRF信号を観測して確認する。また、衛星自体の確認と合わせて、IOT期間中に実際のN-STAR cを管制対象とすることで、衛星管制システムの最終確認も行う。

IOTは、すでにサービスを提供しているN-STAR衛星通信システムとの信号の相互干渉による影響を最小限とすること、および既設の地球局設備を利用して試験を効率的に行うことを条件に、以下のような方法で実施した。

- ① トラフィックが少ない時間帯に、お客さまをすべてN-STAR aに収容した状態で、N-STAR bと同一の軌道位置で、N-STAR bの搭載中継器 (MSS用) をオフにしてIOTを行う。
- ② 衛星上の受信電力テレメトリと衛星上のIOT用S帯ビーコン信号を使用して、地球局1局だけで、S帯のサービスエリアを覆う4つのビームすべてのアンテナパターンを測定する。
- ③ 2つの異なるS帯で共通に使用するコンポーネントに関する特性については、N-STAR bと同一のS帯を使用して、地上試験で確認された性能からの劣化がないことを重点的に確認する。
- ④ N-STAR aと同一のS帯だけに使用するコンポーネントに関する特性については、N-STAR aで継続するサービスとの干渉を避けるために特定の周波数チャンネルスロットをIOT測定専用として割り当て、小信号入力による必要最小限の特性確認とする。

打上げ後、静止軌道に投入されてから約1カ月をかけて搭載通信系のIOTを実施し、衛星が正常であることを確認した。IOT終了後にフィールド試験を実施し、すべてのビームにおいて音声、FAX、パケットなどの現行サービスがN-STAR cを使用して提供可能であることを確認した。試験終了後、N-STAR bに搭載するドコモのMSSはN-STAR cに切り替えられ、2002年9月よりc号を用いてのサービスが開始された。

6. あとがき

2002年にドコモ専用の衛星として打ち上げられたN-

STAR cと、その衛星管制システムにおける技術開発について述べた。衛星開発の背景、設計・製造・試験の過程において課題となった搭載通信系やバス系の技術、運用中のシステムがあるなかで実施したIOTについても述べた。

N-STAR cの実現によって、既存の衛星との補完により衛星通信システムのさらなる信頼性向上を図ることが可能となった。新衛星は、2005～2006年頃に寿命を迎える既存の衛星の後継機でもあり、衛星性能のさらなる向上が図られている。それを活かした移動衛星通信サービスの新たな展開が期待できる。

文 献

- [1] 上野, ほか: “N-STAR衛星通信システムの概要”, 本誌, Vol.4, No.2, pp.6-9, Jul.1996.
- [2] 中川, ほか: “衛星パケット通信サービス特集”, 本誌, Vol.8, No.2, pp.6-30, Jul.2000.
- [3] 林, ほか: “衛星航空機電話特集”, 本誌, Vol.9, No.2, pp.47-59, Jul.2001.
- [4] 中川, 林, 田中: “マルチメディア衛星通信を支える衛星技術 N-STARの概要”, NTT技術ジャーナル, Vol.7, No.7, pp.45-51, Jul.1995.
- [5] 福田, ほか: “N-STAR c号機打上げ成功—衛星移動通信サービスのさらなる信頼性向上—”, 本誌, Vol.10, No.3, pp.67, Oct.2002.
- [6] K.Ando, A.Miyasaka, H.Ishikawa and M.Watanabe, “The Modular Mesh Reflector developed at NTT”, Proc. of International Mobile Satellite Conference (IMSC 99), pp.234-239, Jun.1999.

用語一覽

BFN: Beam Forming Network (ビーム形成回路)
C-LNA: C-band Low Noise Amplifier (C帯低雑音増幅装置)
C-SSPA: C-band Solid State Power Amplifier
COMB: COMBiner
D/C: Down Converter
DIV: DIVider
DPX: DiPleXer
e.i.r.p.: Equivalent Isotropically Radiated Power (等価等方放射電力)
FM: Flight Model (フライト品)
G/T: Gain over Temperature (利得対雑音温度比)
IFD: Input Flux Density (入力電力束密度)
IOT: In-Orbit Test (軌道上試験)
LO: Local Oscillator
MOS: Mobile communication Operation System (移動通信オペレーションシステム)
MPA: Multi-Port Amplifier (マルチポート増幅器)
MSS: Mobile Satellite Service (移動衛星通信サービス)
NPR: Noise Power Ratio
PFM: Proto-Flight Model (プロトフライト品)
PIM: Passive Inter-Modulation (パッシブ・インターモジュレーション)
RF: Radio Frequency
Rx-BFN: Receive Beam Forming Network
S-LNA: S-band Low Noise Amplifier (S帯低雑音増幅装置)
SSCE: Satellite Supervising and Control Equipment (衛星管制装置)
Tx-BFN: Transmit Beam Forming Network
U/C: Up Converter

用語解説

* 1 「WideStar / ワイドスター」はドコモの登録商標。

* 2 S帯, C帯, Ku帯, Ka帯
電波の周波数帯について慣用的に用いられる名称で、衛星通信の場合ではS帯は2.5/2.6GHz帯、C帯は4/6GHz帯、Ku帯は12/14GHz帯、Ka帯は20/30GHz帯の周波数帯のことを指す。

* 3 衛星のバスシステム
衛星のバスシステムは右表のバスサブシステムから構成され、ロケットから分離した後の静止軌道への投入、静止化後の軌道位置や姿勢の維持、ミッション機器への電力の供給、最適な熱環境の維持などにより、軌道上での通信性能を寿命期間中安定して実現する役割を担う。

* 4 Multi-Port Amplifier (MPA)

Multi-Port Amplifier (MPA) は、分配回路、並列に配置された複数の電力増幅器、合成回路より構成され、複数の入力ポートからの信号を一括増幅する増幅器である。ある入力ポートに与えられた信号は、分配回路により全部の増幅器に分配され、各増幅器で増幅された後、合成回路にて合成され、分配回路と合成回路の特徴的な振幅・位相設定により入力ポートに対応した出力ポートにだけ表れる。いくつかの電力増幅器の故障でも出力断とならない冗長性を備え、複数の増幅器の総合出力を各入力ポートに与えられる信号レベルに応じて出力ポートに配分できる特長を有し、移動衛星通信をミッションとする衛星用の大電力増幅器として採用される例が見られる。NTTにて開発・実用化された。

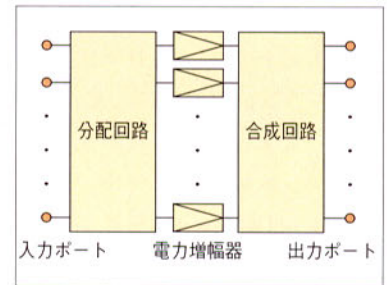
* 5 e.i.r.p.とG/Tは、衛星の通信性能を示す基本的なパラメータとして用いられる。e.i.r.p.は送信性能を表すもので、数値が大きいほど強力なRF信号を送信できる。G/Tは受信性能を表すもので、数値が大きいほど微弱な電波を受信できることを意味する。

* 6 Passive Inter-Modulation (PIM)
非線形性がある信号伝送路や伝搬路を信号が通過するとき、混

バスサブシステムの機能

サブシステム	機能
テレメトリ&コマンドサブシステム	地上からのコマンド信号を受信して実行するとともに、衛星および搭載機器の状態を収集してテレメトリ信号として地上に送信する。
電源系サブシステム	ソーラーアレイで発生する電力の供給の制御と搭載機器に対して電力を分配する役割や、バッテリーの充放電を管理することによりミッション期間を通して必要な電力を安定的に確保する。
推進系サブシステム	ロケットからの分離後、数回のアポジエンジンの噴射により衛星を静止軌道に移し、静止化後はスラスタの噴射による南北制御、東西制御により所定の軌道位置を保つ。
姿勢制御系サブシステム	地球センサ、太陽センサ、慣性基準装置からの情報により衛星自身の姿勢を把握し、ホイールおよびスラスタによって姿勢を制御し、ミッション遂行に要求される姿勢を維持する。
熱制御系サブシステム	日照の有無による温度差が激しく劣悪な熱環境である宇宙空間において、多層断熱材、ヒータ、ヒートパイプ、熱放射板などの熱制御機構により、システム全体を熱的に保護し搭載機器の温度を適切な範囲に保つ。
構造サブシステム	衛星の「本体」で、主構造、搭載機器やバス機器を据付けるパネル、燃料タンクの支持構造などより構成される。打上げ時に受ける大きな荷重を支持する必要がある。打上げ・軌道上環境を通して、搭載機器の適正な支持と、センサ、スラスタ、アンテナなどの正確なアライメントを維持する。

変調歪みが発生する（例えば、周波数が f_1 、 f_2 の信号が通過するとき、周波数 $|n \times f_1 \pm m \times f_2|$ (m, n は整数)の混変調歪みが生ずる)。増幅器やミキサーなどの能動素子での発生以外に、受動素子でも異種金属の接触、金属と金属のルーズな接触、マイクロギャップ、サビ、ミクロなダイオード構造などが非線形性を示すことで同様な混変調歪みが発生し、これをPIMという。大電力の送信信号により発生するPIMの周波数が受信帯域に合致すると通信品質を劣化させる。移動衛星通信ミッションのように衛星の送受信性能が優れる場合には、わずかに発生するPIMのレベルが受信信号レベルと比べて無視できなくなるため、衛星搭載機器では綿密な設計や製造、十分な試験を通しPIMの発生レベルを十分小さく抑えることが必要になる。



マルチポート増幅器