

次期技術試験衛星に関する検討会報告書

平成28年5月

次期技術試験衛星に関する検討会

目次

1	背景	1
2	衛星通信市場・技術の動向	2
	(1) HTS 出現に伴う市場の変化	2
	(2) 研究開発動向から見た衛星通信技術の進展の方向性	4
	(3) 新たな技術（コンステレーション等）	5
3	将来衛星の構想と次期技術試験衛星	7
	(1) (2 を鑑みた) 市場要求に基づく将来衛星の構想	7
	ア (2 を鑑みた) 技術的な可能性と軌道実証の意義	10
	イ バスの基本構想	11
	ウ ミッションの基本構想	15
	エ 周波数ファイリング構想	19
	(2) (1) を実現するために必要な次期技術試験衛星の開発実証	21
	ア バスの基本構成	21
	イ ミッションの基本構成	23
	ウ 地上設備の基本構成	30
	エ ユーザー地球局の検討	34
4	今後の検討課題	35
5	将来への展望	37
	(1) 宇宙基本計画を参照した目標	37
	(2) 次期技術試験衛星自体への期待	38
	参考資料 1 次期技術試験衛星に関する検討会 委員名簿	39
	参考資料 2 検討会での検討状況	40

1 背景

2015年1月、宇宙開発戦略本部において、宇宙政策をめぐる環境変化や安全保障政策、産業界の投資の予見可能性を高め産業基盤を維持強化するという観点から、新たな宇宙基本計画が決定された。この中で新たな技術試験衛星についての記載が盛り込まれ、『通信・放送衛星に関する技術革新を進め、最先端の技術を獲得・保有していくことは、我が国の安全保障及び宇宙産業の国際競争力の強化の双方の観点から重要である。このため、今後の情報通信技術の動向やニーズを把握した上で我が国として開発すべきミッション技術や衛星バス技術等を明確化し、技術試験衛星の打ち上げから国際展開に至るロードマップ、国際競争力に関する目標設定や今後の技術開発の在り方について検討を行い、平成27年度中に結論を得る。これを踏まえた新たな技術試験衛星を平成33年度をめどに打ち上げることを目指す』として、産業・科学技術基盤の維持強化という観点から技術試験衛星の必要性とその工程が示された。

この宇宙基本計画における審議を受け、関係省庁や関係機関、学識経験者から構成される検討会を開催し、全電気推進技術やフレキシブルペイロード技術等の次期技術試験衛星に求められる要素技術や技術性能を盛り込んだ報告書を2015年4月に取りまとめた。

この前回報告書では、主にHTS等の通信放送衛星に関する世界情勢分析をはじめ、我が国の次期技術試験衛星開発を行うに当たっての技術的課題や到達目標を中心に分析を行った。そのうえで、衛星開発を国が行うべき政策的意義、バスやミッション分野ごとの財政出動を行うに当たっての優先順位、総務省をはじめ文部科学省、経済産業省、内閣府等の宇宙関係府省間における役割分担等を整理した。一方、衛星開発を行うに当たってのバスやミッション各分野での具体的な開発状況等の目標設定については、今後の国際的な衛星開発状況等を総合的に勘案し、関係機関等において、さらに詳細を検討することとされていた。

また、従来の静止衛星軌道での通信衛星システムに加え、OneWebやO3Bなどの新興衛星事業者等を中心として、非静止衛星による衛星コンステレーション^{*1}の活用による通信衛星システムの構想が登場している。これらのシステムは、通信の低遅延化、全球サービス等の網羅的なカバーエリア構築の容易さなどの利点がある一方、多数の衛星群の投入コスト、衛星群の協調運用のための複雑な管理手法等の課題も存在すると考えられる。この衛星コンステレーション等新たな衛星通信技術の動向を調査・分析し、これに対する形で静止衛星である技術試験衛星の利点を把握することは、その成果を実用化し、国際展開を図る観点からも重要であると考えられる。

このような次期技術試験衛星に対するさらなる検討課題をはじめ、新たな衛星技術動向や衛星市場を取り巻く新たな国際状況の市場変化等を踏まえ、次期技術試験衛星に求められるシステム像や技術性能等を明らかにすることにより、新たに必要となる開発要素を抽出するため、前回同様に関係機関や学識経験者等から構成される検討会を立ち上げ、以下の項目を中心に検討を行った。

^{*1} 衛星コンステレーション：静止に比較してより小型の衛星群を静止より低い周回軌道に投入し、多数の小型衛星の協調機能によりブロードバンド通信等を実現する協調型衛星システム

- ① 衛星コンステレーション等の新たな衛星技術の動向調査・分析
- ② 衛星市場を取り巻く国際的な動向の調査
- ③ 2020 年以降の衛星国際市場を見据えた次期技術試験衛星に求められる技術性能や要素技術等の検討

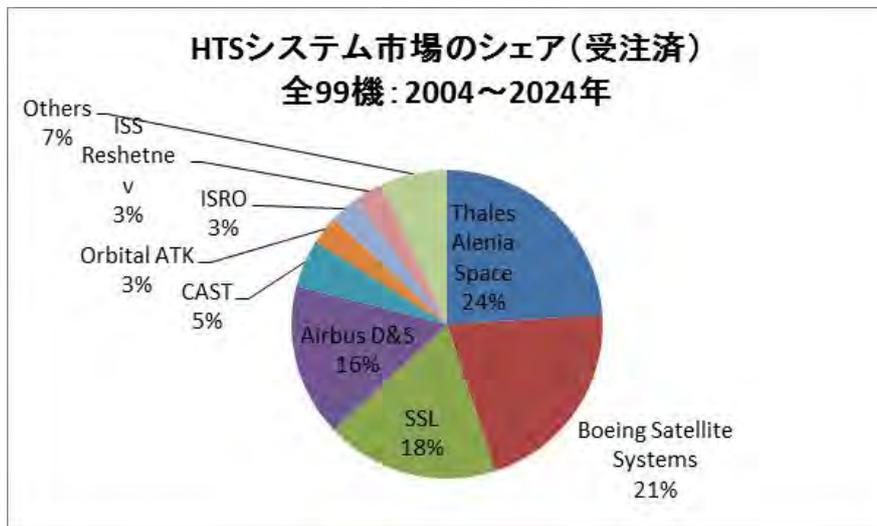
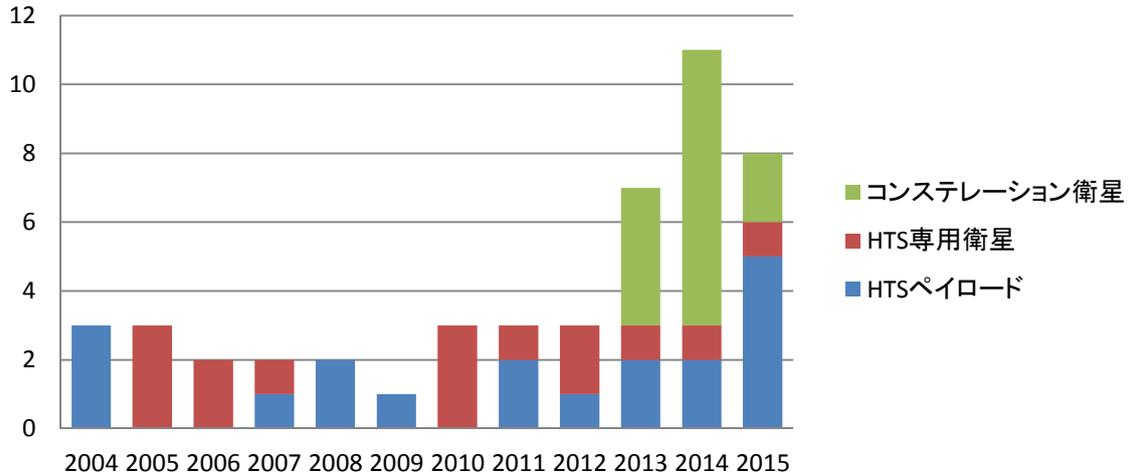
2 衛星通信市場・技術の動向

(1) HTS 出現に伴う市場の変化

米国の衛星産業協会（SIA：Satellite Industry Association）のレポート“2015 State of the Satellite Industry Report”（Sept. 2015）によると、世界の衛星産業全体の市場は①衛星を使った通信／放送等のサービスを提供する衛星サービス、②衛星製造、③打上げロケット製造及び打上げサービスからなる打上げ産業、④地球局、衛星通信管制電話設備、衛星携帯電話／GPS 端末からなる地上機器の 4 分野から構成されており、全体での市場規模は 2014 年で 2,030 億ドルであった。そのうち 6 割以上を占めるのが衛星サービス産業であるが、前年度からの伸び率は 4%に達しており、世界経済の低迷にもかかわらず、今後も衛星サービスの需要は新興国市場を中心に活発に推移していくものと考えられている。衛星サービス産業の 98%以上が通信放送関連のサービス（消費者向けサービス、固定衛星通信サービス、移動衛星通信サービス）であり、また衛星数で見ると 2014 年末に運用中の衛星 1,261 機のうち 50%以上が通信放送衛星となっていることから分かります。衛星産業において通信放送衛星の占める割合は非常に大きい。

近年では、従来の FSS（Fixed Satellite Services）衛星に対してスループットを大幅に向上させた高速大容量の HTS（High Throughput Satellite）が増加しつつあり、多くの衛星関連企業が Ka 帯衛星システムに積極的な投資を行っている。Euroconsult 社のレポート“High Throughput Satellites：Vertical Market Analysis & Forecasts”（March 2016）によると、2015 年までに打上げられた HTS の機数は全部で 48 機であり、2016 年～2024 年の間には、さらに 129 機の HTS が打上げられるという予測が立てられている。市場の価格でいえば、HTS 伝送容量の提供に伴う売上高は、2015 年の 11 億ドルから 2024 年には 49 億ドルに拡大し、この間の総額累計は 260 億ドルに達する見込みとなっている。また 2015 年末までの世界での累積供給 HTS 伝送容量は 680Gbps と推定されているが、2020 年には 3Tbps 程度に拡大すると予測されている。ただし、HTS の供給伝送量増大に伴い、通信サービスの単位情報量当たりの価格（例：\$ per Gbps）は低減傾向にある。

HTS機数(合計48機)



出典: “High Throughput Satellites : Vertical Market Analysis & Forecasts” A Euroconsult Executive Report (March 2016)

図1 2015年までに打上げられた累積HTS機数の内訳と受注済HTSの製造企業別内訳

注: 上記HTS機数表について、「HTS専用衛星」とは搭載ペイロード全てがHTS用途として使用されている衛星を指し、Viasat1やEchoStar 17等が該当。一方「HTSペイロード」とは、一部のペイロードをHTS用途として使用している衛星を指しており、たとえばDirecTV衛星やTelstar 12 VANTAGE等が該当する。「コンステレーション衛星」は、2013年及び2014年の12機は03b衛星であり、2015年の2機はInmarsat 5Fシリーズ(Global Xpress)である。

HTSを利用した主なサービスとしては、消費者向けブロードバンド、政府・企業ネットワーク、セルラーバックホール&トランキング、移動体(航空機・船舶)向けサービス等があるとされているが、近年では消費者向けブロードバンド接続サービスや移動体向け通信サービスのニーズが増加している。また、各国におけるデジタル格差を縮小するためのアクションプラン等が大きな成長促進因子になっており、政府主導型オペレータのHTSシステム導入

への興味が高まってきている。これらのサービスを成功させるためには、地上の光ファイバ網によるものと比較して速度や価格でより近づいたものを達成する必要があり、そのための衛星のコストダウンを図る全電気推進システムの採用や衛星長寿命化技術、大容量 HTS 技術の普及などが進展しているところである。また移動体向けサービスについては、HTS のカバレッジの拡張も進んでおり、今後は、ニーズに合わせて通信容量や利用地域を柔軟に変更可能とすることで、サービスの変化に柔軟かつ機動的に対応できるようなシステムの展開に大きく期待がかけられている。

(2) 研究開発動向から見た衛星通信技術の進展の方向性

欧州では ARTES (Advanced Research in Telecommunications Systems) プログラムに代表されるように、いくつかのプログラムで官民 (衛星通信に関わる欧州企業、通信オペレータ等) 一体で通信放送に関わる調査・検討、次世代衛星通信技術・通信衛星の開発・実証を継続的に実施している。それらのプログラムにおける衛星通信技術に関わる取組みを調査すると、ESA では HTS 分野における R&D の方向性として「スループットの向上」「システムコストの最適化」「衛星資源の柔軟性向上」を掲げて、Q/V 帯や光の利用、ユーザーターミナルのコスト低減、需要の多様性への対応技術 (新規市場への迅速な参入、リコンフィギュラブルなユーザリンク帯域/電力割り当て、ユーザービーム/ゲートウェイ間のリコンフィギュラブルな相互接続性) 等を重要な課題として示している。

また衛星製造企業や衛星通信事業者も衛星のコスト削減に向けた次世代の主要技術やコンポーネントを示している。Airbus Defence and Space 社は HTS のパフォーマンスを向上させるためには、さらに大容量伝送が可能となる Q/V 帯あるいは光リンクをファイダリンクに使用することが重要としている。Thales Alenia Space 社は、2020 年頃の第三代マルチビーム Ka 帯衛星では、直径 5m 級のディッシュアンテナやビーム間のフレキシブルな周波数帯域割り当て、ポインティング精度の改善等が将来技術として必要であると示している。また Eutelsat 社は、HTS のコストを現状の Ka-Sat (2011 年より運用開始、スループット容量: 90Gbps) の 4 百万ユーロ/Gbps から大幅に低減させることを目標としており、目標を達成するためのキー技術 (コンポーネント) としては、大規模アンテナリフレクタ、Q/V バンド等の高周波数帯の使用、GaN SSPA、光リンク等を掲げている。さらに SES 社は次世代衛星に向けての課題として、コンポーネント・部品の軽量化、ビームの有効活用によるスループットの向上、市場投入の迅速化の 3 つを掲げている。

欧州ではまた、次世代衛星産業の鍵を握るものとして、フレキシブルペイロードを実現するため、Quantum 技術の開発を行うことを決定し、ESA、Eutelsat、Airbus Defence and Space 社により開発が進められている。Quantum 技術を搭載する衛星は、中継可能域を決定するフェーズドアレイアンテナの形状、使用帯域、出力、周波数設定などを運用開始後でもソフトウェアで自由に変更可能であるという特徴を有する。この衛星は、2018~2019 年に打上げ予定となっている。

このように欧州では官民一体のプログラムにより次世代技術の開発・実証が進められる一

方、米国における衛星通信分野の技術開発への取組みは大きく異なり、衛星通信における R&D の大半は国防総省による防衛プログラムにより行われており、その後、防衛プログラムにより開発された技術成果を、研究開発を行った製造者等が商用衛星に転用するという市場展開の傾向を見せている。防衛プログラムであるため、詳細は明らかにされていないが、主な開発対象としては、高速通信、Ka バンド、X バンド機器、大型プラットフォーム等がある。

一方、衛星通信における地球局運用の動向をみると、衛星通信網と光ケーブル等による地上系ブロードバンド・インターネット網をつなぐハブとして機能しているテレポートが、近年多様な役割を担い始めている。また衛星を所有・運用していないデジタルメディア・サービスなどの大手企業が、世界の主要都市にテレポートを多数所有・運用し、衛星事業者がこれらのテレポートを共用したり賃貸したりするケースが増えてきている。さらに Avanti 社（サービス名：Hylas）や Eutelsat 社（サービス名：Tooway）のように、必要な地球局設備を、テレポートを所有する会社から借りて、自らの設備とテレポート設備を組み合わせ、付加価値をつけて独自の衛星通信サービスを提供するオペレータが増加してきている。

これらの地球局ネットワークのための製品とサービスを提供する代表的な企業としては、米国の Hughes Network 社、Viasat 社、VT iDirect 社、イスラエルの Gilat 社が挙げられる。各社とも、近年の HTS の進展を大きなビジネス機会と捉えているが、周波数帯、通信トラフィック容量、サービス形態等の多様なニーズにあわせた対応ができるサービスや製品を重視している。例えば、VT iDirect 社は、全ての周波数帯とアーキテクチャをサポートするようなユニバーサルな IP ハブやラインカード^{*2}、モジュール化した製品等の開発を積極的に行っている。

(3) 新たな技術（コンステレーション等）

前述のとおり、静止軌道においては HTS の展開が拡大しているが、近年、O3b、OneWeb に代表されるような中／低軌道におけるコンステレーションによる新たな周回型衛星ブロードバンド通信事業も一部はすでにサービスを開始するなどの進展を見せている。

O3b Networks 社は、地上の光ファイバ網の敷設ができない途上国に対して、遅延が少ない光ファイバ品質のバックボーンを構築する計画を立て、2013～14 年にかけて高度約 8,062km の軌道に Ka バンド通信衛星である O3b 衛星を 12 機打上げた。2014 年末から本格的なサービス提供を開始、初年度中に 31 カ国の 40 の顧客を獲得し、既に太平洋最大のインターネットサービスプロバイダへと成長している。2015 年 12 月には、第二世代の衛星 8 機を Thales Alenia Space 社に発注しており、2018 年半ばには 20 機体制のコンステレーションを構築する計画となっている。

一方 OneWeb 社は、高度 1,200km の低軌道に 648 機の Ku バンド超小型通信衛星（重量 150kg 以下）を配備し、全地球をカバーする計画である。すでに衛星製造から打上げ、利用客まで

^{*2} ラインカード：加入者線インタフェース回路を収容するパッケージ。差し替えをすることで提供サービス等の変更に対応可能である。

計画を固めており、またサービス提供に必要な周波数帯の権利も有しているとしている。衛星製造は Airbus Defence and Space 社が受注しており、2016年1月、OneWeb社と共同で設計・製造を行うジョイントベンチャーを立ち上げている。

この他、1990年代に莫大な初期投資を行ったものの、2000年代初めに事業清算に至った Iridium や Globalstar といった音声通信／データ通信を行う周回型移動体衛星通信も、近年では次世代システムの展開が進められている。Iridium ではすでに運用している 66 機の衛星コンステレーションを一新するため、2016 年以降、Iridium NEXT の打上げが計画されている。予備機も含め 81 機から構成されているが、全衛星について、他事業者や研究機関などの観測機器を搭載できる Hosted Payload 搭載スペースを設けていることが特徴である。また、Globalstar も第二世代の衛星コンステレーションを 2010 年より順次構築中である。

表 1：世界で構築及び計画されているコンステレーション（通信分野）

主要用途／サービス	衛星／プログラム名	国、機関	衛星質量(kg)	機数	備考
音声通信／データ通信	Iridium	米 Iridium Communications	657	66	1997年から2002年の間に全95機打上げ
〃	Iridium NEXT	〃	800	66+6(軌道上予備) 9(地上バックアップ)	2016年～2017年打上げ予定
〃	Globalstar	米 Globalstar Inc	第一世代:450 第二世代:700	48	第二世代衛星は24機打上げ済み。第一世代の8機と合わせて、現在32機運用中
ブロードバンド	O3b	UK O3b Networks	700	12	衛星数の拡大計画あり
〃	OneWeb	UK OneWeb	<150	648	ADS社に900機オーダー済 Soyuz、Ariane6との打上げ契約済み
〃	不明	米 Space X	数百	4000	2015年10月、構想段階であることを強調
〃	LeoSat	米 LeoSat Inc.	不明	78～108	現在はTAS社とチームを組み、フィジビリティスタディを実施中
〃	COMMStellation™	加 MSCI	不明	78+12(軌道上予備)	構想段階。2018年に展開予定
光データ通信	HALO	米 Laser Light Communications	不明	8+4(軌道上予備)	構想段階。Ball社が契約検討中。 2018年に展開予定、通信速度7.2Tb

周回型通信衛星コンステレーションの最大の長所は低遅延であること、多数の衛星が必要とはなるが全世界を継続的にカバーできることである。一方で、静止通信衛星との干渉問題（多くの衛星通信用周波数では、非静止衛星は静止衛星に劣後する権利しか有していない）、需要の少ない地域も含む広域をカバーすることによるシステム全体の利用効率の低下の問題、複数衛星の協調運用に伴う運用複雑化の問題等も抱えている。また、システムで事実上

周波数占有をしてしまう可能性が高く、静止衛星システムを含む他のシステムとの周波数共用が非常に困難であると推定されることから、多くの静止通信衛星オペレータが懸念を表明しているところであり、OneWeb では赤道近傍では既存の静止衛星との干渉回避のために送信出力を下げる等の対策を示している。静止衛星との干渉に厳しい周回型システムで新たに Ku 帯及び Ka 帯のライセンスを取得するのは相当の困難が伴うことが予想される。また、コンステレーションによる多数衛星の製造・打上げに際しては、大量生産による 1 機当りのコスト低減、まとめ打上げによるコスト低減が期待される一方で、衛星機数の増加によるシステム全体のコスト増や打上げ手段の確保、制約等に関わる問題も指摘されており、システム全体の利用効率の低下とあわせて考えると、総じてコスト増につながる可能性も考慮する必要があるほか、多数機の運用に伴いデブリ問題が深刻化する等の課題も抱えている。このように、コンステレーションによる周回型通信衛星システムについては解決すべき課題がまだ複数あること及びグローバルサービスで初期投資規模が静止に比べて大きいことを考慮し、次期技術試験衛星は静止衛星システムによる実現を目指すこととするが、コンステレーション通信衛星システムについては、引き続き動向を注視することとする。

3 将来衛星の構想と次期技術試験衛星

(1) (2 を鑑みた)市場要求に基づく将来衛星の構想

先に述べたとおり、HTS による供給伝送容量の増大は、衛星通信サービスの単位情報量当たりの価格（衛星の調達費を通信容量で割ったもの。以下、「ビット単価」と呼ぶ。）を低減させる傾向にある。今後もこの傾向は継続するものと考えられることから、先行する HTS に伍して国際競争力を有する衛星とするためには、衛星の大規模化・大容量化により衛星通信サービスのビット単価を低減させる必要がある。この場合、単なる大規模化や大量生産化による低コスト化では限界があり、低コスト化に向けた設計・開発工程を十分に検討する必要がある。

しかしながら、単純な大容量化のみを指向した場合、先行する HTS に対して競争力を有するだけの更なる衛星通信サービスのビット単価の低減を実現することは困難と想定される。また、通信衛星は黎明期の短期寿命から大きく改善され、近年では 15 年程度の寿命が一般的となっていることから、衛星の使用可能期間の中で周波数や照射ビームが固定されていると、マルチビームシステムの各ビーム間の通信需要の不均衡、照射ビーム全体で通信需要の大きな変化が生じた場合の無効容量の増加等対応が困難な課題が生じることになる。このような課題を解決するためには、大容量化に加えて、「フレキシビリティ」機能により周波数や照射ビームを柔軟に変更可能とすることで、ユーザのニーズに機動的に対応が可能になるという付加価値を加えることが求められる。

(i) 衛星の大規模・大容量化

衛星通信サービスにおけるビット単価の低減の一つの方向性として、マルチビームによる周波数繰り返し利用回数の極限までの拡大が挙げられる。一つの衛星でサービスす

るビーム数が多ければ多いほど、周波数の繰り返し利用効果により運用周波数帯域幅が広くなり、提供可能なビット量が増大する。このような単純な大容量化であれば、世界的な動向から見て、ビット単価として 0.1 円/bps 程度を目指す必要があるものと思われる。(例：数百ギガ～1 テラ bps を実現する Viasat シリーズは、過去数百億円程度で当該衛星を製造した実績があるとされている。)

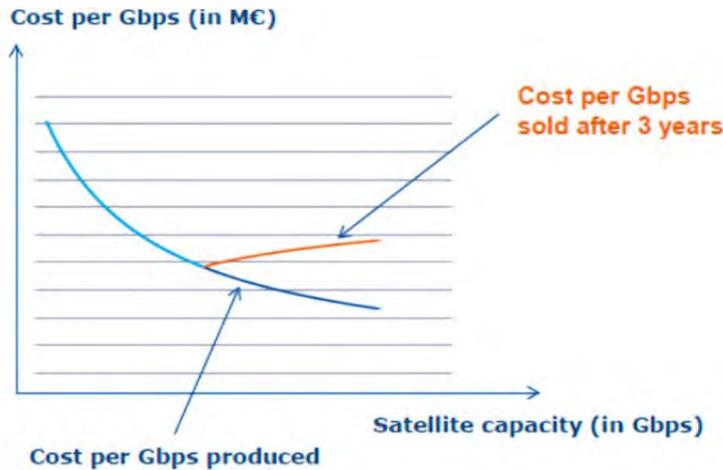
この時必要となる開発技術としては、①大規模マルチビームを実現する衛星搭載アンテナ給電系技術、②大規模マルチビームの安定運用を可能にする衛星姿勢の高精度化技術、③ミッション規模拡大に伴う衛星バスの大型化・大電力化技術、④衛星大型化に伴い上昇する打上げコストを低減するための電気推進による軽量化技術、⑤これらを支える要素技術及び衛星製造コスト削減化技術等が挙げられる。

また、ユーザへのサービスを行う帯域の拡大に伴い、フィーダリンク帯域の広帯域確保が大きな課題となってきている。広帯域フィーダリンクは、比較的広帯域を確保しやすいより高い周波数の利用が期待されている。なお、このマルチビーム数を増加するアプローチをとる場合、ビーム数の増加に伴いサービスエリアが広がることから、当該衛星により提供する通信サービスのビジネスモデルと整合しているか否かを検証する必要がある。

(ii) 衛星ペイロードのフレキシビリティ

(i)で述べた大容量化だけでは実効的なビット単価低減への寄与には限界がある。例えば、あるサービスエリアに広大な周波数帯域(＝利用可能ビット数)を割り当てた場合、当該エリアに割り当てた周波数帯域に見合うだけのユーザが存在しなければ、ユーザ不在となる周波数帯域が提供する容量は無効となり、結果として他のエリアの利用ユーザが無効容量分の費用を負担することになる。この状況は衛星通信事業者のビジネスモデル(サービス内容、サービス帯域、サービスエリア、課金等)に依存するため、現在のように固定ビーム・周波数割当ての衛星では、打上げ時に想定されるビジネスモデルに最も適合したシステム設計により衛星ペイロード仕様・構成が決定されることになる。

しかしながら近年、ユーザニーズの多様化や地上通信インフラとの競争激化等の要因により、このビジネスモデルは短期間で変更を余儀なくされる傾向にあり、打上げ時と同一の衛星ペイロード仕様・構成ではビット単価は劣化することが想定される。加えて衛星の長寿命化もあり、より実効的なビット単価低減のため、多様なビジネスモデルへの対応が可能な衛星ペイロードが求められている。



出典:Yohann Leroy (Eutelsat CTO) “TECHNOLOGY: ENHANCING GROWTH AND EFFICIENCY”

http://www.eutelsat.com/files/contributed/investors/pdf/Capital-Markets-Day-2015/Technology_enhancing%20growth%20and%20efficiency.pdf

図2 衛星の規模拡大によるビット単価の低減（リリース時）と3年後の変化 想定

この要望に応えるのが、衛星ペイロードのフレキシビリティ技術である。一般に、人口が密集しユーザが多いと考えられる都市部地域へより広い周波数帯域幅を割当て、地方地域には最小限度の帯域割当てに留めるとというのが通常考えられるモデルである。しかしながら、例えば利用ユーザが事業コストを低く抑えられる地方地域にデータセンタ等の拠点を設置する事例が近年増えており、このような事例が発生した場合、最小限度の割当てに留めていた帯域の拡大が必要となる。このように各地域のビームに割り当てる周波数帯域幅を自在に変えるためには、周波数フレキシビリティ技術が有効である。

周波数フレキシビリティ技術は、衛星打上げ時に決められたビーム照射地域での運用に対しては有効であるが、ビームロケーションフレキシビリティ技術の併用により、ビーム照射地域に拘束されることなく、衛星照射ビームの位置変更（「ビームの可動性」）やビーム形状変更（「ビームの可変性」）が実現できる。これらの技術の実現により、地震等の災害発生時における急激な利用ユーザ分布の変動に対応することが可能になると想定されることから、防災通信システムへの適用が期待される。また、長期的に見た場合、打上げ当初には衛星通信サービス適用を想定していなかった地域に対しても、追加で衛星を打上げることなくサービス提供が可能となる。さらに、仮に衛星軌道を変更した場合でもサービス地域の変更が容易であるため、当該衛星を購入した事業者にとっての利用価値は高くなり、衛星の資産価値向上にも貢献する。さらにビームの可変性は、他の衛星業務等との周波数干渉問題の回避手段という点でも期待されている。

また、大容量通信衛星の重要課題のひとつとして、利用可能な周波数の選択がある。一般に昨今の大容量通信衛星においては、Ka 帯を用いることが多い。従来の Ku、C 帯に対して降雨減衰が大きいなどの短所があるが、Ka 帯が使用される理由は比較的周波数帯域幅等のひっ迫度が少なく確保が容易であるからである。衛星通信の伝送容量の増大化に向けた制約としては、①衛星電力の制限、②周波数帯域の不足という2つの課題