

## (続) 衛星通信のしくみ

～新時代の通信衛星など～



国際商業衛星通信開始記念  
インテルサットII号衛星 (1967年)



国際宇宙年 (1992年)



2020年 12月

(株)A2A研究所 田代 務

# 目次

<b>1 衛星通信の新時代</b>		ソーラーパネル	21
宇宙新世紀の開拓者	3	バッテリー	22
世界の主要な衛星通信事業者	4	送信機	23
LEOコンステレーション	5	アンテナ	25
5G時代の衛星通信	6	MEV	27
3GPP NTNでの検討課題	7	宇宙光通信	28
		光フィーダーリンク	29
		光量子通信と量子暗号	30
<b>2 HTSとLEOコンステレーション</b>		Carrier in Carrier	31
Viasat-3	8	スイングバイ航法	32
O3b mPOWER	9	ソーラーセイル	33
Starlink	10	テレメトリー信号の変復調	34
Kuiper	11	スペースデブリ対策	35
<b>3 拡大する衛星通信サービス</b>			
期待される衛星通信分野	12	(参考)宇宙飛翔体の物理	
テレビ伝送	13	ロケット方程式	36
MNOバックホール回線	14	第1宇宙速度	37
旅客機むけ通信	15	第2宇宙速度	38
陸上移動体向け通信	16	第3宇宙速度	39
IoT (Internet of Things)	17	衛星の地球周回速度	40
		ホーマン変換	41
		ラグランジェポイント	42
<b>4 性能改善と新技術</b>			
衛星搭載機器の性能改善	18		
スラスタ	19		



## 1. 衛星通信の新時代

### 宇宙新世紀の開拓者

#### イーロン・マスクとジェフ・ベゾス

21世紀に入って、ロケットや衛星通信などの宇宙開発は新たな競争の時代を迎えている。それを先頭で牽引するのは、イーロン・マスクとジェフ・ベゾスの二人である。

マスクは一般には電気自動車テスラモーターズで有名だが、元々、宇宙への関心が高かった。マスクが率いるスペースX社が開発したロケットは長年の開発や闘争を経た後、NASA初の民間ロケットとして採用されることになる。また、スペースX社は4千基以上のLEO衛星を配置して全世界を覆う衛星通信網Starlinkの構築を進めている。

一方、ネット通販でスタートしたアマゾンの創業者ベゾスは新型ロケットの開発製造を行うブルーオリジン社を設立して、ニューシェパード等のロケットを開発する一方、スペースX社と同様、多数のLEO衛星を配置するKuiper計画を進めている。

また、クラウド上のコンピュータリソースを時間貸しするAWSの拡大を目指して、世界の12箇所に建設する衛星通信用地球局にAWSサーバーを設置し、これらを相互に連携する衛星/地上通信網の構築を始めている。

この二人の創造的破壊者はマスクはウサギ、ベゾスはカメに例えられることもあるが、その競争は始まったばかりである。

#### マスクとベゾスの年表



##### イーロン・マスク

1971	0歳	南アフリカ・プレトリアで出生
1983	12	対戦ゲームソフトを開発し販売
1986	15	母親母国カナダへ単身移住。その後、米ペンシルベニア大に入学
1995	24	スタンフォード大学院に進むが2日で退学し、ソフト会社Zipを創業
1999	28	金融IT会社を共同設立。その後、同社はPayPalになる
2002	31	スペースX社を設立
2004	33	テスラに出資後、会長に
2019	48	ファルコン9の初段の回収に成功
2019	48	Starlink衛星を約60基/月で打ち上げ開始
2020	49	テスラ株の時価総額がトヨタを抜く



##### ジェフ・ベゾス

1964	0歳	米ニューメキシコ州で出生
1986	22	プリンストン大卒。金融IT部門でトレーディング・システム構築
1994	30	インターネット書店を開業 翌年、Amazon.comとしてスタート
1998	34	設立直後のGoogleに25万\$を投資
2000	36	宇宙開発企業ブルーオリジン設立
2013	49	ワシントン・ポストを買収
2018	54	フォーブス世界長者番付で1位に
2019	55	世界12箇所にAWS地球局設置開始
2020	56	FCC, Kuiper衛星計画を認可

マスクとベゾスが先頭で牽引する新型ロケットや衛星通信網の新世紀が始まっている。



## 1. 衛星通信の新時代

### 世界の主要な衛星通信事業者

#### 世界の主要衛星通信事業者は多数のGEO衛星を配置

衛星通信の大半は地上36千km上空に配置されたGEO衛星で疎通されてきたが、近年は多数の小型衛星を高度500km～1400kmに配置して世界を覆う計画が進んでいる。

世界には人やモノとの通信が不可能な地域が未だ広く存在すること、衛星打ち上げコストが大幅に削減されるようになったことが背景にある。

ただし、GEO利用の衛星通信は、ニーズの存在するエリアに絞って通信回線を設定できること、地上から見て天空を移動するLEO網では必須である衛星の追尾機能や衛星間ハンドオーバーが不要であるなどから、今後とも衛星通信サービスの主流の地位は揺るがないだろう。

現在、世界の主な衛星事業者は多くのGEO衛星を配置して、大手の通信事業者や放送事業者、各国政府機関に通信回線を提供している。近年は、4K映像配信、モバイル事業者向けバックホール回線、航空機や大型商船向け回線などの需要が増加している。

近年のGEO衛星は、Ku・Kaの広い帯域を利用し、ビームの空間多重度を高めるなどにより1衛星の合計スループットが数百ギガ～1テラbpsに達するvHTS (very High Throughput Satellite), あるいはs(super)HTSと呼ばれる大型衛星の開発が進んでいる。

#### 世界の主な衛星通信事業者

独自調査に基づく

事業者	本拠	売上高(2019年)	衛星数 (軌道上GEO)	備考
SES	ルクセンブルク	19.8億ユーロ	40	別にO3b 20基
Intelsat	米 バージニア, McLean	20.6億ドル	50	
EcoStar	米 コロラド, Englewood	18.9億ドル	20	
Viasat	米カリフォルニア Carlsbad	21億ドル*1	3	*1 他の事業を含む
Eutelsat	仏 パリ	1278百万ユーロ	36	
SKY Perfect JSAT	日本 東京	1395億円	18	別にLEO 1基
Telesat	カナダ オタワ	911百万カナダドル	14	LEOコンステレーションを計画中
Inmarsat	英国 ロンドン	上半期:7.3億米ドル	12	

GEO衛星は今後とも衛星通信事業・サービスの本流であり続けるだろう。



## 1. 衛星通信の新時代

### LEOコンステレーション

#### 20年以上前にビル・ゲイツ等も目指した夢のプロジェクト

宇宙ベンチャー企業等により、数百～数千の小型衛星を約500～1400kmの上空に配置して、グローバルな衛星通信網であるLEOコンステレーションを建設する計画が進んでいる。(コンステレーションとは星座を意味する。) 但し、中には宇宙空間での権益確保のために綿密な市場分析なしにパイロット衛星を打ち上げ実験を開始するケースもあるようだ。

四半世紀前にもビル・ゲイツ提唱のTeledesic計画等による同様の動きがあったが、打ち上げコストが甚大であり実現しなかった。現在は新型ロケットの登場や多数衛星の同時打ち上げ、更には衛星機器の大量生産などによって衛星1基あたりのコストは飛躍的に低減した。

しかしながら、ニーズが存在する地域に向けて1基のみでサービス開始できるGEO衛星に比べLEOコンステレーションは、多数衛星の配置後に初めてサービス開始できる、システムは遥かに複雑で、ユーザ側の装置は天空を移動する衛星に常にアンテナを指向させる衛星追尾機能が必要であるため、通信ビジネスの成功には高いハードルがあるだろう。

そこで、LEOコンステレーションでは次のような方策が有効と考えられる。

- ・通信以外の地球観測等の他のサービスの提供
- ・更なる打ち上げコスト低減や長寿命化
- ・(GEO事業者を含む)競争事業者間の合併や協力

#### 主なLEOコンステレーション計画

名称	OneWeb	Starlink	Telesat LEO	Kuiper	LeoSat
推進者	OneWeb	Space X	Telesat Canada	Amazon	LeoSat
衛星軌道(地上高)	540-570km	550km,1110-1325km	1000-1248km	590-630km	1400km
衛星個数*1	4408	4409	1671	3236	78-108
周波数帯	Ku/Ka, V	Ku/Ka, V	Ka, V	Ka	Ka
備考	米国へのChapter11申請後、会社再建中	ISLあり。Falcon9で1回に約60基を打ち上げ	ISL具備でGW局数の低減とE2E遅延を削減	GW局にAWSエッジを設置し、相互に連携	ISL具備2019年11月に資金不足で活動停止

\*1) 2020年時点での計画数

LEOコンステレーションには大きな技術的リスクがあるのに加え、事業リスクも高い。

### 3GPPでのNTNの検討

携帯電話の世界統一規格(第3世代方式)を定めるために各国の通信事業者やメーカーによって設立された3GPP(3rd Generation Partnership Project)は、以後も引き続いて新規格の策定を行なっている。

その3GPPが仕様策定した最新の5G(第5世代)システムでは、人との通信に加えて、機械やモノの監視や制御といった産業分野への広範な活用を視野に入れている。


3GPPでは、このようなIoTサービスを地上モバイル網ではカバーできない地域でも提供できるように、地上系5Gシステムを衛星網で補完あるいは拡張するNTN(Non Terrestrial Network)の仕様策定を2021-22年頃の完了目途に検討している。

NTNでは、GEOやLEOの衛星に加え、成層圏通信プラットフォーム(HAPS:High Altitude Platform Station)も対象としている。


なお、衛星経由のIoTでは、すでにIridium等の衛星通信事業者が独自のサービス展開を行なっているほか、多数のスタートアップ企業や研究機関はLoRaWANやSigfox等のアンライセンス帯使用のLPWA(Low Power Wide Area)方式を小型衛星などで実験している。

3GPPでのNTN


- Integrated/hybrid terrestrial and NTN
- Multi-beam NTN
- Internet of Space Things
- Cognitive terrestrial-NTN




- SDN/NFV based NTN
- Network Slicing NTN
- Edge Computing based NTN
- NOMA based terrestrial-NTN




Urban



Rural



Remote



Isolated

“Non-Terrestrial Networks in 5G&Beyond: A Survey”, IEEE ACCES, Sept. 2020 より

携帯事業者はIoTを含むサービスのエリア拡大のため衛星通信への拡張を検討している。



## 1. 衛星通信の新時代

### 3GPP NTNでの検討課題

#### 遅延時間の増加やセルの移動などの影響への考慮が必要

NTNでは現在の地上モバイルの通信方式をベースに、衛星通信回線の特性を考慮した機能追加や仕様変更を行う方向で検討している。地上モバイル網の一部機能の変更のみでNTNユーザを収容できれば、顧客層の拡大が期待できるだろう。

そこで、NTNの無線方式は、LTEの次のような方式を前提としている。

- ・物理層 狭帯域のサブキャリアを周波数多重するOFDM/OFDMA  
物理チャネルとして ランダムアクセスチャネル、共有データチャネル、参照信号や制御・監視信号
- ・MAC層/リンク層  
リソースの割り当て要求からリソース割り当てまでの手順  
参照信号測定結果フィードバックを通じた変調方式・符号化率の適用制御  
HARQによるパケット再送制御、送信電力制御(ALC)  
ハンドオーバー処理 など

ただし、衛星回線では遅延時間が大きく、コマンドに対するレスポンスが遅れるため受信ウィンドウの拡大や手順の変更が必要である。また、特にLEOの場合、セルの移動に伴うセル間・衛星間のハンドオーバー等の手順が必要になる。

#### 3GPPでのNTN仕様の検討

3GPP Technical Report 38.811 Table 8.4.2-1 を元に作成

NTNの特徴	効果	影響のある仕様	検討事項
衛星/端末の移動	セルの移動	ハンドオーバー/ページング	手順の見直し
	遅延時間変動	TA	手順の見直し
	ドップラー	ダウンリンクでの初期同期	サブキャリア間隔見直しなど
高度:大	遅延時間:大	HARQ	HARQ停止を含む手順見直し
		物理層手順(ACM, TPC)	制御方法見直しなど
		MAC/RLC手順	タイマー数値見直しなど
セルサイズ:大	遅延時間の変動	ランダムアクセス応答でのTA	手順の見直し
衛星中継器の特性	送信機の非直線性	PAPR	低PAPR送信機
	位相雑音	PT-RS	低次変調方式の使用

TA: Timing Advance  
HARQ: Hybrid ARQ

ACM: Adaptive Code & Modulation  
TPC: Transmit Power Control

PAPR: Peak to Average Power Ratio  
PT-RS: Phase Tracking RS

NTNの物理層やMAC層ではLTE方式とは異なる手順や特性が必要となるだろう。

#### 約1千個のスポットビームを使用するvHTS

米国Viasat社はViasat-1, 2衛星を用いて、オフィスや家庭などに設置された小型地球局向けに高速インターネットアクセスサービス(Exede Internet)を提供している。

同社は高速通信などの需要増加に応えるため、合計3基の第3世代衛星Viasat-3を米大陸、欧州・中東・アフリカ、アジア太平洋の順に配置する計画である。コロナ禍の影響もあり衛星打ち上げに多少の遅延が生じているものの、2021年から22年に打ち上げるとしている。

Viasat-3はViasat-1,2と同様にKa帯を使用するとともに、1千以上のスポットビームを照射することで、最大1T bit/sの伝送容量を有する。

Viasat-3では、次のようなサービスを提供するとしている。

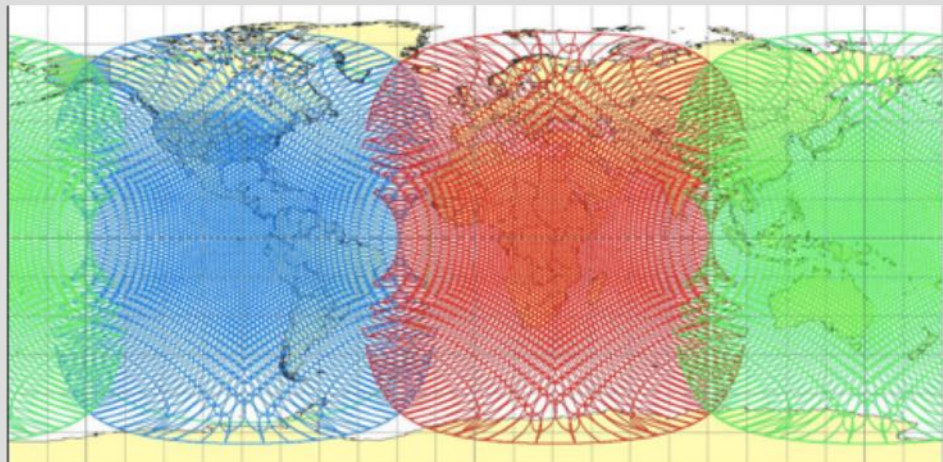
- ・企業ユーザに光ファイバー通信に比肩する1Gbit/sまでの高速通信
- ・通信インフラが未整備の新興市場に低廉な価格でのインターネットアクセス
- ・旅客機やビジネスジェット等の様々な航空機に数百Mbit/sまでのデータ通信
- ・一般家庭に100Mbit/s超の高速インターネットやVoIPサービス

Viasat-3は現在製造中の衛星では最大容量を有するが、計画中のHNS社のJupiter-3, Eutelsat社のConnectも同規模の衛星となる模様である。Viasat社では更にViasat-4の検討を開始している。

#### Viasat-3のビーム配置イメージ

フォワードリンクはTDM, 16-APSKまで、リターンリンクはMF-TDMA, 8-PSKまで

中継機の帯域幅は500MHz, 又は1GHzと広く、フォワードリンクでは、500MHz帯域幅のTDMキャリアを送信。



Viasat サイトより

Viasat-3はアジア太平洋地域にも配置され、未開発地域や航空機にもサービスを拡大。



#### Phased Arrayアンテナで合計3万の地点を照射

赤道の約8千km上空を6時間の周期で周回するMEO衛星であるO3b衛星は2021年時点で合計20基が運用中である。各衛星は12個のパラボラアンテナを搭載しており、うち10個はユーザ局との間のサービスリンク用、残りの2個はゲートウェイ局とのフィーダーリンク用となっている。

O3b衛星を所有するSES社はユーザ局数などの需要増に対応するため、同型衛星を順次追加するとしていたが、これに替わって次の性能を有する次世代衛星mPOWERを2021年以降に打ち上げる予定である。

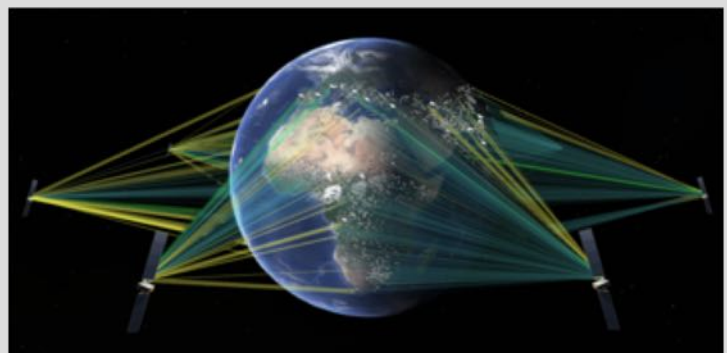
- ・Phased Array方式のアンテナによりビームを電子的に生成し、1基あたり5千以上、ネットワーク全体では最大で合計3万以上の異なった地点を照射する。
- ・地球局のアンテナもPhased Array方式を用いることで、衛星と地球局の両方で電子的にビームの追尾や衛星間のビーム切替を可能とする。

このために、各ユーザの地理的位置や通信速度等を所与に最適な衛星ビームの方向や形状を達成するPhased Array各素子の位相と電力を計算するシステム SDRM(System Dynamic Resource Management)を開発している。

#### O3b衛星とmPOWER衛星のイメージ



現在のO3b衛星のビーム  
(1衛星あたり10個)



mPOWER衛星のビームイメージ [SES社サイトより](#)

人口が多い低中緯度を照射するO3b衛星は、需要増加に応じて衛星を追加できるスケールビリティを有しており、次世代衛星ではビーム数の飛躍的増加が図られる。

#### 1440基を配置した時点で商用サービス開始を計画

Space X社が進めるLEOコンステレーションStarlinkは、合計1584基の衛星を地表面から550kmの上空の極軌道や傾斜軌道に配置し、2021年内に日本を含む世界全域でサービスを開始するとしている。また、1110-1325km上空にも合計2825基を配置するとしている。

使用周波数帯はサービスリンク(ユーザ局-衛星間)にKu帯、フィーダーリンク(ハブ局-衛星間)にKa帯を使用する。このうち、サービスリンクの周波数範囲は次である。

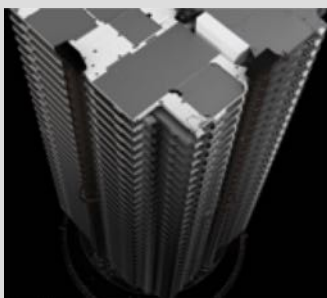
・サービスリンク周波数範囲： 上り 14.0-14.5GHz, 下り 10.7-12.7GHz

衛星側ではフェーズドアレイ方式の平面アンテナを用いて電氣的にビーム方向を制御して地表固定地点方向へのビーム追尾や照射セル切り替え時のビーム高速移動を行う。ユーザ局では直径50cm程度の円盤状基板に装着された多数の微小アクティブ素子がビームを生成するフェーズドアレイ方式が主として使用される模様である。

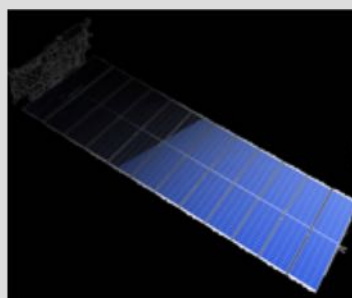
ユーザ局から見たLEO衛星方向は絶えず変化するため、静止衛星や他の非静止衛星との方向が近接する際にはこれらの衛星との間で電波干渉が生じる可能性がある。同社では、1)ビーム方向の制御 2)鋭い指向性のビーム 3)周波数再利用 によって他衛星への干渉回避が可能としている。

#### Space XのStarlink

Starlink サイトより



板状の機体が約60個積み重ねられて、ロケット先端に收容される。各々はphased arrayアンテナや全電子化によって薄くなっている。



折り畳まれた太陽電池パネルは本体片側の1枚が展開。クリプトンガスを燃料とするホールスラストで軌道位置を制御。スペースデブリを見つけ追跡するOptical Trackerも搭載する。



極軌道と傾斜軌道に数千の衛星を配置する。

パネルからの反射光による天文観測への支障軽減のため、サンバイザー取り付けを実験している。

Starlinkでは新技術の開発・実験を通じて、多くの難題を解決しようとしている。

#### LEOコンステレーションではStarlinkと類似

Amazon社が進めるLEOコンステレーションKuiperは、合計3236基の衛星を地表面から590km～630 kmの上空に配置する。Kuiperは海王星軌道の外にある小惑星が密集する帯状の領域Kuiper Belt(カイパーベルト)に由来する。

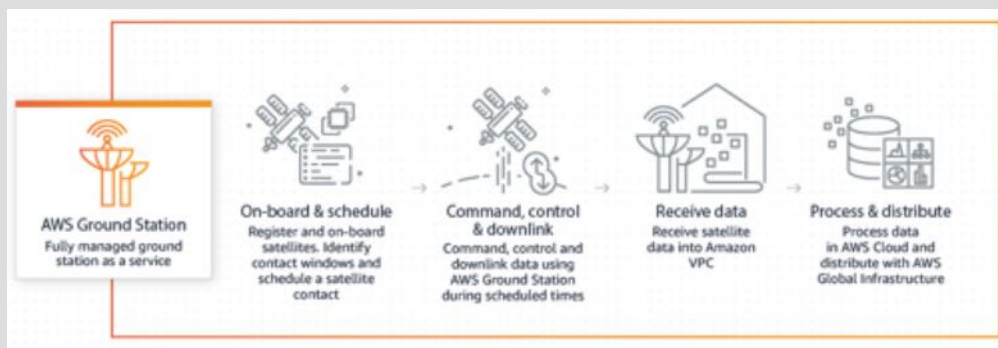
米国FCC(連邦通信委員会)は申請中の当該プロジェクトを他社プロジェクト同様の条件、すなわち、半数の衛星を5年以内(2026年まで)に打ち上げるなどの条件つきで2020年8月に認可した。

打ち上げロケットは公表されていないが、ベゾス設立のBlue Origin社製ロケットを使用するとみられる。

使用周波数帯はサービスリンク(ユーザ局-衛星間)、フィーダーリンク(ハブ局-衛星間)ともにKa帯を使用する。

Amazonはクラウド上にあるコンピュータ資源を時間貸しで利用できるAWSを世界各国で提供しているが、各種衛星が取得した画像等のデータ処理を効率的に行えるようにするため、2018年より世界の12箇所に地球局を開設し、ここにAWSサーバーを設置してデータの処理や蓄積を行う計画も進めている。

#### Kuiper以外のAmazon宇宙プロジェクト



Amazon, Blue Origin社サイトより



#### 【AWS Ground Station】

気象予報、地表画像撮影、通信・放送などでのデータ取得、処理、蓄積などをマネージド型サービスとして顧客に提供する。グローバル展開の地上ステーションも利用して、Amazon EC2のように実際に設備を使用した分だけ課金される。

#### 【Blue Origin社】

同社のNew Shepardロケットであり、有人飛行を目指した打ち上げ実験に成功している。

LEOコンステレーションでは最後発だが、地上網と組み合わせた総合力が強みになるか

#### 映像伝送や移動体向け通信需要が堅調

現在、固定地点間の通信サービスの大半は、光ケーブルや同軸ケーブルの地上回線経由で提供されている。1990年頃までは大半の国際通信はGEO衛星経由で疎通されていたが、光海底ケーブル方式の大容量化が進み、多数のシステムが敷設されたことで衛星経由での国際通信は一部の用途に限られるようになった。

現在も衛星通信が中心的な役割を果たしている分野は映像伝送や移動体向け通信である。衛星経由での映像伝送では、TV信号を広く分散した多数の受信局に一挙に配信できることから広域性や同報性という衛星通信の特徴を生かすことができるサービスである。

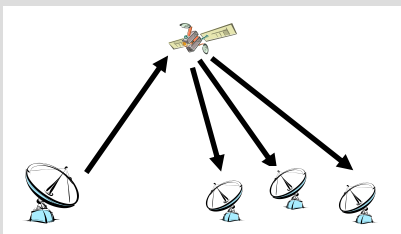
ここで、衛星通信利用のTV伝送には大別して次の3つがある。

1. 放送事業者やCATV事業者での局間伝送（エンド顧客には自身の地上網経由で配信）
2. 放送事業者から超小型アンテナ設置の加入者に直接配信（DBS: Direct Broadcast Service）
3. スポーツやイベントの現地からの素材伝送（アップリンク）

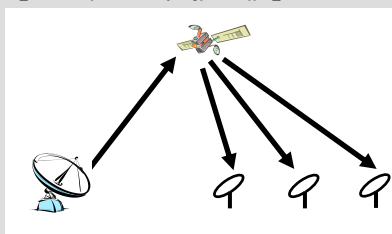
移動体向けでは、船舶、航空機、車両との通信や山岳部や島嶼等でのモバイル通信がある。また、MNOモバイル網のバックホール回線も増加が見込まれている。

#### 増加が期待される衛星通信分野

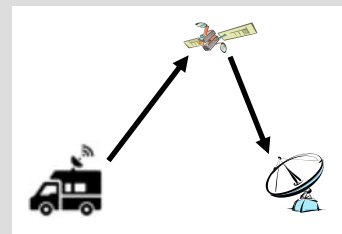
【放送局間の中継伝送】



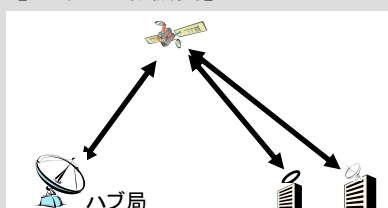
【加入者への直接配信】



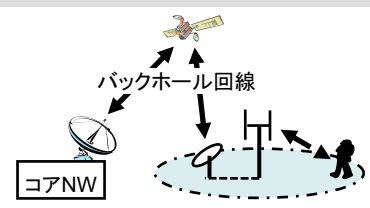
【現場からの素材伝送】



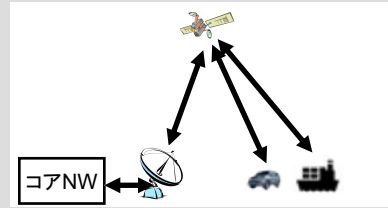
【企業・政府機関】



【MNOバックホール】



【移動体との通信】



映像伝送や移動体との通信は衛星通信の利用拡大が期待されている。



## 5. 衛星通信方式

### テレビ伝送

#### TV信号の伝送方式

衛星経由のTV伝送方式ではデジタル衛星放送向けに欧州の標準化機関ETSI が定めたDVB-S (Digital Video Broadcasting - Satellite), S2方式が広く普及している。

DVB-S2方式はDVB-Sの後継方式として2005年に発表された規格であり、高能率の誤り訂正符号(FEC)や32APSKまでの多値変調方式、伝送路状態に応じて放送品質を変えるVCM<sup>\*1</sup>や通信品質を変えるACM<sup>\*2</sup>の適用、複数の伝送ストリーム(TS: Transport Stream)への対応などにより、SD(標準解像度), HD(高精細度), 4K放送向けの信号を伝送できる。

現在のDVB-S2にはパート1,2があり、パート2のDVB-S2Xでは64/256APSK等のMODCODや低ロールオフ(5%, 10%)、最大3チャンネルまでのチャンネルボンディング等が規定されている。DVB-S2Xでは36MHz帯域の1中継器にて合計3チャンネルの4K信号が伝送でき、8Kでは1チャンネルが伝送できる。

(注)4K, 8K放送では、HDTV(2K)に比べて、4Kは縦横の解像度がそれぞれ2倍、8Kは4倍となるので、画素数は4倍、16倍となる。解像度だけでなく、速い動きを滑らかに再現するためフレームレートの増加や自然色の再現のための色域拡大が図られている。

\*1) VCM: Variable Coding & Modulation, \*2) ACM: Adaptive Coding & Modulation

#### 映像信号とDVB方式

		HD 2K	SHD 4K	UHD 8K
映像信号	解像度	1,920 x 1,080	3,480 x 2,160	7,680 x 4,320
	映像符号化方式	H.264/AVC	H.265/HEVC	H.265/HEVC

	DVB-S	DVB-S2	DVB-S2X
入力ストリーム	単一TS	複数TSとカプセル化	
符号化/変調モード	非可変	可変 (VCM, ACMの適用)	
FEC	リードソロモン符号 1/2~7/8	LDPC + BCH 1/4~9/10	
変調方式	QPSK	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK	QPSK, 8PSK, 16APSK, 32APSK 64/128/256APSK
帯域フィルタロールオフ(%)	20, 25, 35	20, 25, 35	5, 10, 15, 20, 25, 35

DVB-S2Xでは3チャンネルまでのボンディングにより36MHz帯域中継機で3チャンネルの4K映像の伝送が可能。8K映像では1チャンネル伝送が可能。

## 今後も衛星経由のバックホール回線需要増が見込まれる

世界各国のモバイル通信事業者(MNO: Mobile Network Operator)は端末(UE: User Equipment)と基地局間で送受される信号をバックホールと呼ぶ高速回線を介して、中央のIPパケット交換設備と接続している。

バックホールは通常、光ファイバーや同軸ケーブルの地上回線であるが、広大な国土を有する国々の一部地域や僻地では衛星回線が用いられている。

日本でも、島嶼等の一部地域にて衛星バックホール回線が常時利用されているほか、多くの基地局では大規模自然災害時に地上回線設備が被災した場合のバックアップ用として衛星バックホール回線を確保している。

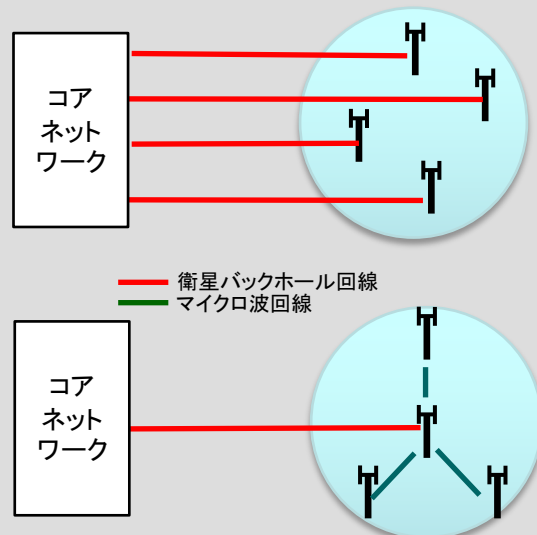
MNOによるモバイル通信は開発途上国でも日常生活や経済に不可欠となるにつれ、衛星バックホール回線需要が大きく拡大している。

Northern Sky Research社の調査では、2019年に衛星バックホール回線を使用する基地局は全世界の基地局のたった1.7%に過ぎないとのこと。未だに世界の総人口の約半分がモバイル通信が利用できないことから、その需要拡大とともに衛星バックホール回線が増加すると予測している。

### バックホール回線



衛星バックホール用地球局を設置した  
MNO基地局



基地局の配置状況によっては、いくつかの周辺基地局との間はマイクロ波回線等で接続し、それらを束ねて衛星バックホール回線でコアネットワークに接続するのがいい。

#### 薄型アンテナが必須

Ku帯やKa帯を使用した高速伝送は無線利用が不可欠な移動体との通信、ことに大洋間を航行する旅客機での機内通信サービス向けに普及している。多くの大型旅客機では機体上部や機内設置の通信装置がGEO衛星経由で地上インターネット網に接続されており、乗客は機内のWiFi装置経由でメールやWEBアクセスが可能である。

衛星回線は、3大洋や大陸の広大な地域を多数のKu, Ka帯のスポットビームでカバーしている Intelsat, Inmarsat, Viasat等が提供している。

航空機側では次のような企業が航空機向けVSATを設置し機内サービスを提供している。

- ・米国: Gogo, Global Eagle Entertainment (GEE), ViaSat
- ・日本: Panasonic
- ・フランス: Thales Group
- ・スイス: OnAir

旅客機向けVSAT設備では、機体上部に設置する薄型アンテナが最も重要である。当該アンテナは航行に伴い変化する衛星方向の追尾やビーム切替を行っており、飛行中の安全を保証するための厳しい環境試験に合格している。

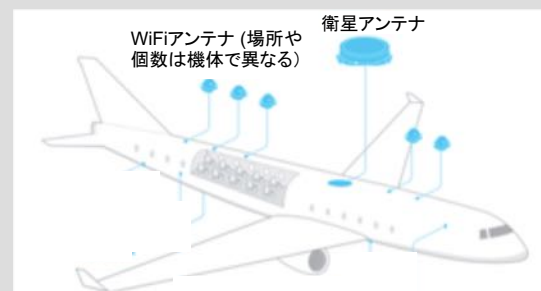
#### 旅客機用の航空地球局アンテナの例

衛星通信の送受信機はアンテナ設備近くに装備されている。

機内には、航空機の航行情報や衛星軌道情報をもとにアンテナ方向を制御する装置や、ストリーミング映像を配信する装置が設置されている。



Gogo社の航空機地球局2Kuのアンテナ Gogo社サイトより



長時間飛行を要する旅客機では旅客へのインターネットサービスが必須になりつつある。

#### MNO網圏外での通信

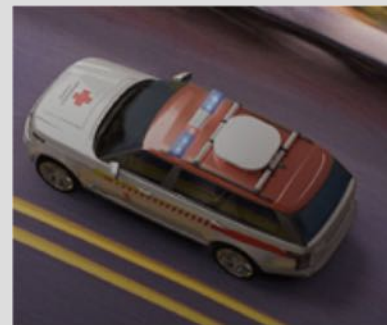
MNOの携帯電話は世界中で普及しているが、そのサービスエリアは人が住む地域とその周辺に限られる。国土の8割が山地であり、広大な周辺海域をもつ我が国では、地上携帯電話が利用できるエリア面積は国土全体に比べてわずかである。世界では高地、砂漠、極地や大洋は携帯不感エリアであり、そこでの通信には専ら衛星通信が利用されている。

洋上を航行する各種船舶は航行の安全や効率的な運航のために衛星通信が広く利用されている。近海を漁場とする小型漁船も漁場や市場情報をいち早く入手するため衛星通信が大きな武器になっている。

遭難通信や緊急安全通信(注)から、乗組員が家族と行う通信まで、インマルサット等の衛星経由の通信は長期にわたり航海を続ける船員の安全の確保や福利に役立っている。今後も自動航行技術など、更なるIT化の進展が期待される。

(注)1912年のタイタニック海難事故を契機に、船舶の安全確保のため制定されたSOLAS条約では船舶に設置義務のある無線通信設備などが規定されており、国際航海する船舶ではインマルサットやイリジウムの衛星通信設備や短波・中波無線設備の設置が義務付けられている。

#### 陸や海での衛星通信サービス利用場所



地上モバイル網のサービスエリア外ではインマルサット衛星等による衛星通信が広く利用されている。



### MNO網圏外での通信

広大な国土を有する国々や極地や大洋では、人との通信でなく、機械やモノとの通信であるIoTが新たな衛星通信サービス分野として期待されている。

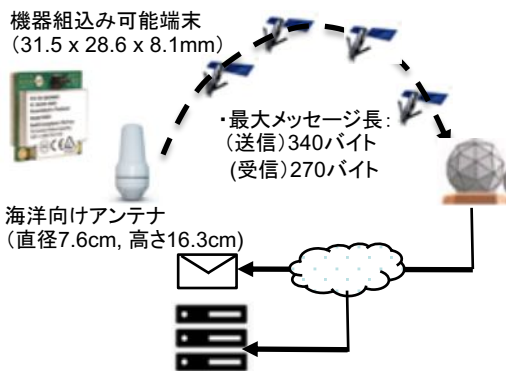
大洋を航行するコンテナ船舶でのコンテナ単位の情報管理や、海上ブイを用いた気象観測などの一部の分野ではすでに衛星IoTが普及している。

今後は、次のような衛星IoTの活用分野が拡大すると考えられる。

- ・LEOコンステレーションの活用による中高速データ通信  
大洋や航行時間の短縮が図れる北極海を運航する船舶、航空機、資源探査
- ・LPWAネットワークへのバックホール回線の提供  
米大陸などでは広大な農地での作物の生育状況や土壌の管理を各種センサーやアクチュエータを地上携帯網をバックホールとしたLPWAで行なっている。地上携帯網のサービスエリア外では衛星バックホール回線のニーズが高い。環境情報等の収集でもLPWAと衛星バックホールの組合せは有望であろう。

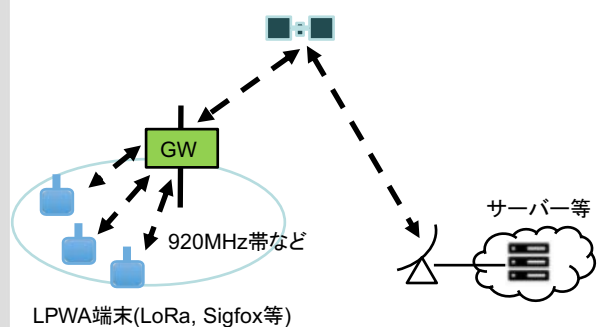
### 衛星通信利用IoTの例

#### イリジウムSBDでのデータ伝送イメージ



GW局で受信されたIoTデータは指定されたサーバーあるいはメールアドレスに送られる。

#### 衛星回線で中継されるLPWA網



ごく少量のセンサデータがGWから衛星経由でクラウド側サーバーに集められる。

アンライセンス帯使用のLoRa, SigfoxやMNOのNB-IoT, LTE-M等のLPWA網は衛星バックホールの利用で、農業や環境監視等の広い分野にIoTを拡大させるだろう。



#### 4. 性能改善や新技術

### 衛星搭載機器の性能改善

#### 日本メーカーも大きく貢献

1970年代に始まった商業衛星通信の発展は通信衛星、打ち上げロケット、地球局での技術革新が基礎になっている。このうち衛星本体では次のような条件が考慮されている。

- ・機器の重量・形状
- ・環境条件： 衛星打ち上げ時の振動や衝撃  
非常に大きな温度変化、宇宙線による被曝、真空環境
- ・信頼性や安全性： 故障した場合には修理できないことから高い信頼性、  
火災や停電、軌道位置保持不能などによる他の搭載機器等への影響

こうした厳しい条件を低コストで達成できるように、近年は工場での大量生産や電子化によって急速に性能向上が進んだ民生品の活用が進んでいる。同時に、上記のような衛星本体での厳しい条件設定は民生品の研究開発を先導・促進する効果を有している。

日本の電子機器メーカーは、衛星本体での部品や装置レベルで高い国際競争力を有している。

#### 通信衛星搭載機器の性能改善例

目的	装置	指標	1990年頃からの進歩
電子化による 長寿命化	スラスタ	比推力*1 (Isp)	300 ⇒ 1500
		推力電力比(mN/kW)	⇒ 50
通信容量の増加	太陽電池	効率*2 (%)	15 ⇒ 37
	バッテリー	容量 (Wh/Kg)	25 ⇒ 170
	TWT送信機	能率*3 (%)	25 ⇒ 65

\*1) 推進剤の噴射速度(v) 対 重力加速度(g)

\*2) 太陽光エネルギーに対する発電エネルギーの比

\*3) 電源電力に対する送信電力の比

小型軽量、高能率で長期間にわたって高い信頼性が求められる衛星搭載機器は性能向上が進んでいる。

軽い燃料を高速噴射できる

2003年打ち上げられた探査機「はやぶさ」が、数々の困難を乗り越えて深宇宙の小惑星「イトカワ」から微粒子を持ち帰り、2010年に無事帰還できたことは大きなニュースとなった。この「はやぶさ」大旅行の成功をもたらした理由の一つには、日本（宇宙科学研究所とNEC）が開発した高性能イオンエンジン $\mu$ 10（注）の存在がある。

宇宙空間の飛翔体の推進には、酸素がないためジェットエンジンは使えない。そこで考案されたのがイオンエンジンである。イオンエンジンではアルゴンやキセノン粒子を帯電（イオン化）させた後、電気によってイオンを加速し後方に噴射することで推進力を得る。

「はやぶさ」では、マイクロ波の照射によってキセノンガスをイオン化するという独自のマイクロ波放電式イオンエンジンを開発・搭載することで、累積4万時間という長期間運転に耐えることができた。マイクロ波放電式はイオン生成時に電極が不要となるため、従来方式に比べて単純・軽量・高信頼となる利点がある。

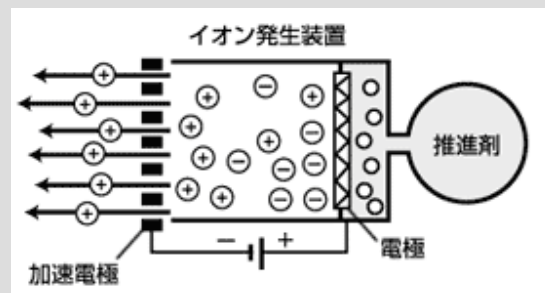
（注） $\mu$ 10の名称は直径10cmのマイクロ波放電式を用いた $\mu$ ロケット最上段モーターであることを示している。

イオンエンジン

【 $\mu$ 10エンジンの諸元】

項目	数値・諸元
型式	イオンエンジン/ 無電極プラズマ推進器
推進剤	キセノン
推力	10mN
比推力	1,700秒から3,400秒（可変）
重量	36kg
設計寿命	14,000時間

【イオンエンジンの原理】



出典: JAXAのサイトより

イオンエンジンは化学推進エンジンに比べ推力は低いですが、比推力が極めて高く、高寿命であるため、軌道上衛星の位置保持用スラスタや深宇宙航行エンジンなどに適している。

衛星の軌道変更や位置制御に使用が始まる

ホールスラストは、イオンエンジン同様、イオンを電極間で静電加速する方式である。イオンエンジンよりも比推力は多少劣るが、推力電力比が高く、スラスト断面積あたりの推力である推力密度(N/m<sup>2</sup>)が高いことから衛星の軌道変更や軌道位置制御に使用されるようになった。

ホールスラストではイオンエンジン同様、電極間の静電位差でイオンを加速する筒状のチャンネルがあり、加えてチャンネルの径方向に磁場をかけている。この磁場の影響でチャンネルを通過するイオン、電子は周方向に電界(E)と磁界(B)によるドリフトを生じる。

その旋回半径は電子とイオンで異なるため、スラストの寸法に対して適当な電磁界強度を選ぶと、イオンはスラスト外に発射されるが、電子はスラスト内で磁場に取り込まれた後、陽極に取り込まれる。

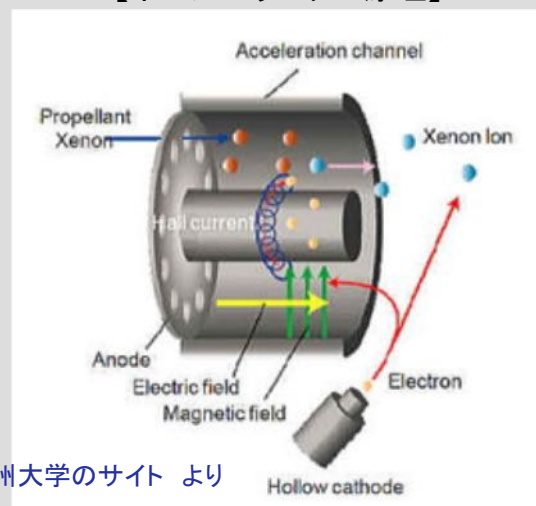
ホールスラストでは通常、電子を発射する陰極がチャンネルとは別にあり、そこから供給された電子の一部はイオンの中和に使われる。

ホールスラストでは磁場をかけることで、イオンや電子をスラスト内に閉じ込め高密度にすることで推力密度を上げているとも言えるだろう。

ホールスラスト

【ホールスラストの原理】

SpaceXのStarlink衛星ではクリプトンガスを燃料としたホールスラストで衛星軌道位置を制御する。クリプトンガスはキセノンガスに比べてスラスト効率は多少劣るが価格が安い。



九州大学のサイト より

ホールスラストの名称は電流に垂直に磁場をかけると電流と磁場の双方に直交した方向に起電力が生じるというホール効果に由来している。

光の吸収波長が異なる素材を重ねるなどで効率改善

シリコン(Si)やガリウムヒ素(GaAs)などの材質は、離散的な電子の励起状態間のエネルギー差(バンドギャップ)が光の波長に対応する。そこで、(太陽)光があたるとバンドギャップに相当するエネルギーを吸収して電子が励起される。その電子を電気回路で取り出すことで(太陽)電池となる。

衛星用の太陽電池には高効率、軽量、長寿命(高信頼性)の3つが求められる。このうち光エネルギーが電力に変換される割合である効率は、通常15-20%程度だが、衛星用では約40%に達するものもある。効率改善には材質変更の他、吸収波長の異なる素材の多層化などがある。

多層化の例であるシャープの化合物3接合型太陽電池では、InGaP(インジウム・ガリウム・リン)、GaAs(ガリウム・ヒ素)、Ge(ゲルマニウム)という3種類のセルを上中下の3層として接合し、各層が異なる波長の光を吸収することで37%の効率を達成している。

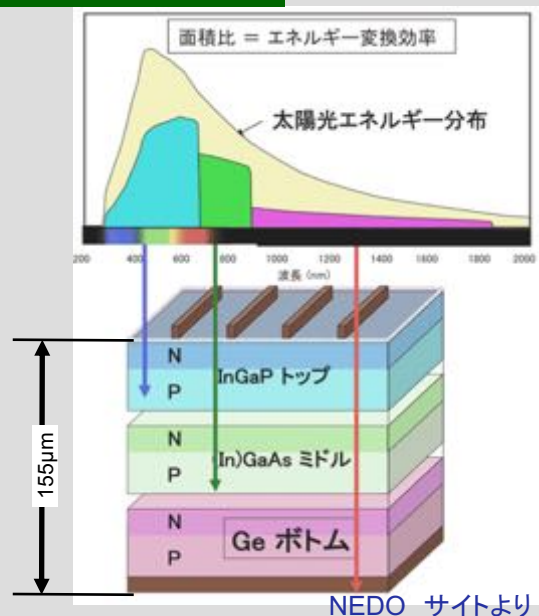
宇宙空間では太陽放射線による劣化から保護する保護膜を設けて長寿命化を図っている。またセル故障の影響軽減のためにセルを小型化し、セル同士に複数の接続をもたせている。多くのセルを数珠つなぎにした接続では、故障セル部分は電力を発生しないばかりか負荷になってしまうからである。

化合物3接合型太陽電池

InGaP, InGaAs, Geの3材料は光エネルギーの吸収波長がそれぞれ青、緑、赤色帯にあり、互いに異なっている。

そこで、これらの材料セルを3層に重ね合わせることで、太陽光のエネルギーを各層で吸収し電力として取り出すことで変換効率を高めることができる。

更に、シャープでは太陽電池の厚みを右図の155μmから27μmと薄くすることで質量を約1/14に低減したパネルを開発している。



衛星用の太陽電池には高効率、軽量、長寿命(高信頼性)が求められる。

スマホや自動車を高性能化するリチウムイオン電池が衛星にも

GEO衛星の場合、春分秋分の一時期には衛星が地球の影に入る衛星食が生じることからこの時間帯ではソーラーパネルによる発電ができない。そこで常時運用が必須である通信衛星の場合、衛星食の時間帯をバッテリーからの給電によって運用している。

低高度を周回するLEO衛星では、地球を周回する度に衛星食が生じることから、バッテリーの充放電サイクルは非常に大きくなる。例えば、高度500kmのLEOの衛星設計寿命を12年とした場合には約65000サイクルにもなる。

衛星用バッテリーとして、以前はニッケル-カドミウム(Ni-Cd)電池やニッケル水素(Ni-H)電池が用いられていたが、現在はリチウムイオン電池が主流である。

スマホから電気自動車までの民生品に広く用いられているリチウムイオン電池は衛星搭載機器として最重要な単位重量あたりの供給電力量(エネルギー密度)が圧倒的に高い。

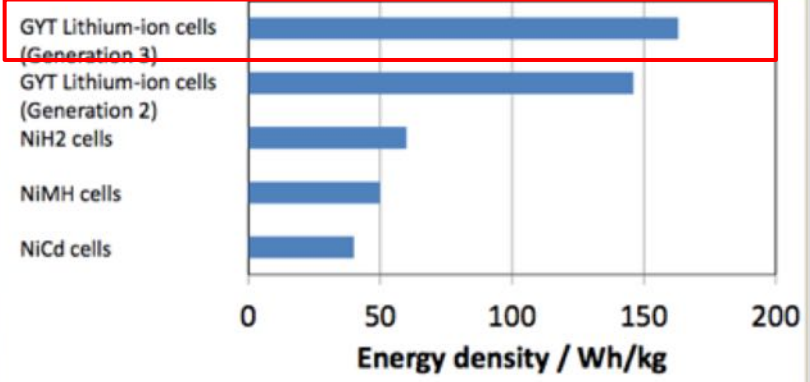
加えて、浅い充放電の繰り返しで起こる性能劣化(メモリー効果)がないのも長寿命化で優れる。

衛星搭載用リチウムイオン電池の例

リチウムイオン電池は従来のニッケルカドミウム電池やニッケル水素電池と比べてエネルギー密度が高い。



GSユアサ製の衛星搭載用リチウムイオン電池



GSユアサ製の衛星搭載用リチウムイオン電池は2017年までに百基以上の衛星に採用実績があり、国際市場シェアは35%以上になった。(第2回宇宙開発利用大賞 経済産業大臣賞 資料より)

リチウムイオン電池は大きな充放電サイクルがあるLEO衛星でも長期間使用できる。

窒化ガリウム素子の適用が進む

L帯からKu帯を使用するGEO通信衛星の送信機には最大出力が数十W程度の固体増幅器(SSPA: Solid State Power Amplifier)が多く使用されている。

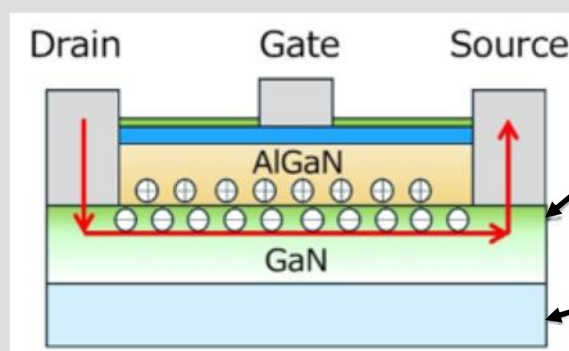
SSPAは電子管であるTWTAより信頼性が高く入出力直線性も優れているが、信号周波数が高くなるにつれて電源からの供給電力に対する出力電力の比である電力効率が低下する。この電力効率は光電子移動度トランジスタ<sup>1</sup>(HEMT: High Electron Mobility Transistor)に使用する素材のバンドギャップなどの特性に大きく依存している。

従来のSSPAにはシリコンやガリウムヒ素(GaAs)の素子が多く用いられていたが、近年は高い電圧を使用して高能率の増幅が可能になる窒化ガリウム(GaN) が用いられるようになった。

窒化ガリウム(GaN)は次の長所がある。

- ・熱伝導率が高く(放熱性に優れる)、高温での動作が可能である。
- ・電子移動度が高い。
- ・絶縁破壊電圧が高い。

高性能SSPAを実現するGaN HEMT



新電元のサイトより

AlGaNとGaNの接合面に電子が多く集まり、高移動度の層ができる。

基板

HEMTは電界効果トランジスタ(FET)の一種であり、ソース、ゲート、ドレインの3つの電極を使用する。中央は電子が走行する層、最上部は電子供給層。HEMTは富士通研究所により発明された。

なお、GaNのバンドギャップは波長365nmの紫外領域にあるが、これに微量のインジウムを加えたInGaNは可視領域の青色ダイオードの材料となることが日本人によって発明され、ノーベル賞を受賞している。

窒化ガリウムは青色LEDの材料として多く用いられているほか、パワー半導体やレーダー等の広い分野に利用が進んでいる。

広帯域性を有する電子管

放送衛星や一部の通信衛星では数十Wから数百Wの高い出力が必要であるので、電子管の一種である進行波管(TWT: Traveling Wave Tube) が広く使用されている。

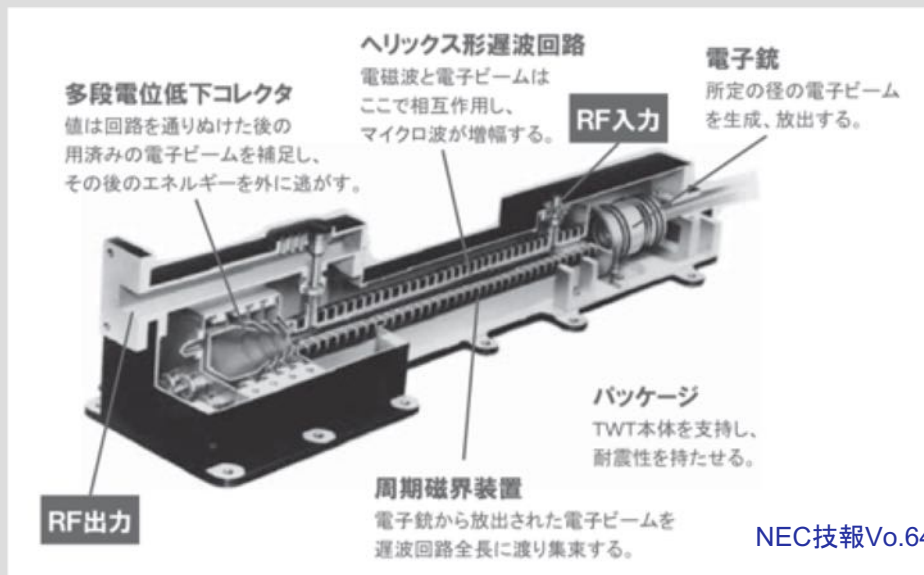
TWTAは最大出力電力が高いのに加え、L帯(1.5GHz帯)からV帯(60GHz帯)までの広い帯域で使用できる。

TWTAでは、電子銃から発射された電子流と、マイクロ波遅延回路内を伝搬する入力電磁波との間で生じる相互作用によって、電子の運動エネルギーが電磁波エネルギーに変換されて電磁波が増幅される。

TWTAでは振幅と位相の入出力特性非直線性に注意する必要がある。出力が最大(飽和)レベルに近づくと振幅、位相の非直線性の影響によって、混変調雑音や位相雑音が増加する。そこで、出力が飽和レベルより一定値(バックオフ)だけ下がる入力レベルを動作点として設定する。

TWTAを使用して15年といった長期に亘って、多数の中継器の運用を保証するために、m:n (n>m) の冗長構成を用いることが多い。ここで、mは運用チャンネル数、nはTWTA台数。

衛星搭載進行波管増幅器 ( TWTA) の例



広帯域性を有するTWTAは、L帯からV帯までをカバーできる。



成形ビームアンテナとマルチビームアンテナ

GEOの通信衛星にて大半のトラフィックを疎通しているC, Ku, Ka帯のアンテナでは、複雑な形状のサービスエリアや通信容量の拡大を図るため主に次の2つの方式が使用されている。

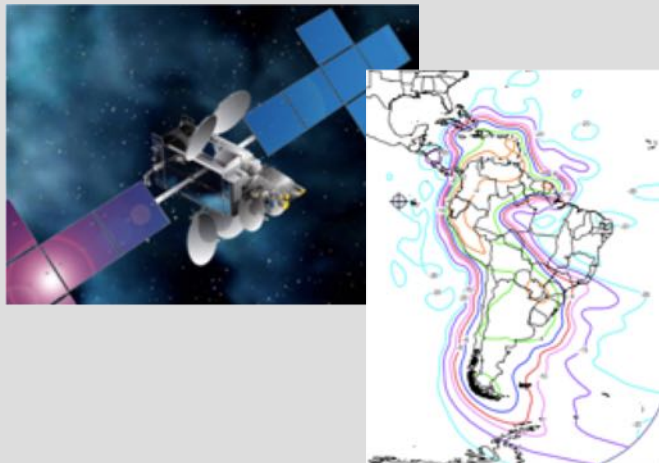
1. 成形ビームアンテナ：  
通信需要の多い地点をカバーするとともに他衛星との間の干渉を抑圧する。地理的に広く分散した多数の地球局に同一信号を送信するTV伝送などに適する。
2. マルチビームアンテナ：  
地上モバイル方式のように同じ周波数を空間的に繰り返し用いることで通信容量を高める。隣接するビームには異なった周波数や偏波を用いることでビーム間の相互干渉を防ぐ。

成形ビームの生成には、反射鏡面を放物面からわずかに変形させることで通常円形のビーム形状を変化させる方法と、多数の一次放射器を使用して、その合成波の遠方電界が複雑な所望の形状となるように各放射器の電力比と位相差を計算で求める方法とがある。

一方、マルチビームアンテナでは反射鏡の焦点近傍に置く多数の一次放射器のそれぞれに送信機/受信機が接続されている。一枚の反射鏡では多数ビームを十分に隣接できない場合には複数の反射鏡を用いることで照射エリアを互いに補完している。

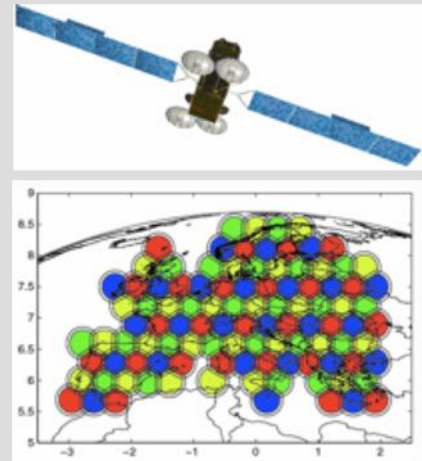
成形ビームアンテナとマルチビームアンテナ

【成形ビームアンテナの例】 Intelsat 30



多数の一次放射器を用いて生成するKu帯ダウンリンクフットプリントの例

【マルチビームアンテナの例】 KASAT



KASATでは4個のアンテナが4色のビームのそれぞれを担当する。1つの円形ビームは単一のホーン(一次放射器)に対応。各アンテナは送受で共用。

伝送容量を増加させるために、マルチスポットビームによる空間多重方式が使われる。

フェーズドアレイアンテナとメタマテリアルアンテナ

LEOやMEOの通信衛星では、地上のフットプリントが刻々変化することから、地球局では衛星追尾やハンドオーバーのためにビーム方向を移動させる必要がある。(GEO衛星でも、特に車両搭載アンテナの場合、右左折などではビーム方向の高速移動が必要である。)

LEOでは大きなリンクマージンがない場合、リンク品質の変動を抑えるためには衛星搭載アンテナ側でも、ビームを地上の定位置に指向させ続ける機能が求められる。鏡面アンテナのような場合には移動に伴って衛星本体全体を傾ける方法もあるが、StarlinkやmPOWER衛星ではフェーズドアレイアンテナのビーム方向を地上定位置方向に制御する模様である。

フェーズドアレイアンテナには多数のアンテナ素子があり、各素子を励振する電流の位相差を移相器で変えて指向方向を変化させる。その際、従来の送信アンテナでは各素子に電力を分配する分割器(Divider)での大きな電力損失が課題であった。

近年、TV液晶画面の製造技術を応用して、アンテナ素子と移相器の機能を微小な誘電体構造などで実現するメタマテリアルアンテナが登場し、消費電力の低減と薄型化が達成された。米国Kymeta社などによる当該アンテナの実用化を契機に、LEOコンステレーションの実現性が大いに高まることになった。

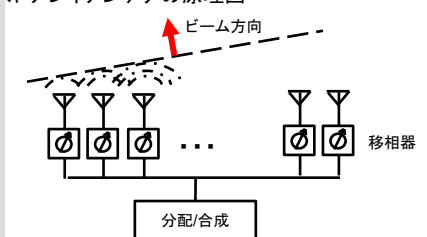
フェーズドアレイアンテナとメタマテリアルアンテナ

【フェーズドアレイアンテナ例】 SpaceX Starlink衛星



TESLARATIサイトより

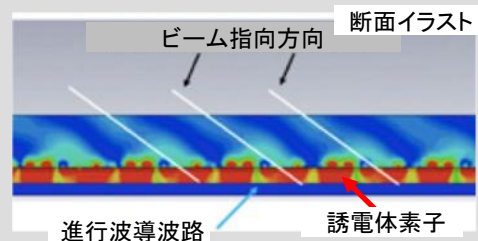
フェーズドアレイアンテナの原理図



【地球局向けメタマテリアルアンテナ例】



上面写真



断面イラスト

Kymeta社の資料より

LEOコンステレーションではアンテナビーム方向を電子的な制御で高速に変化できる。

#### スラスタ燃料不足で寿命に近くなった衛星を延命

MEVは衛星にドッキングして、軌道上の衛星寿命を延伸することを目的とした機体である。

静止衛星では衛星軌道位置を一定範囲内に保持するため定期的に小型エンジン(スラスタ)を噴射して位置修正を行うので、その燃料残量の低下が衛星寿命を決める最大要因である。

そこで、MEVは、ドッキングした衛星に代わって、自身が装備したスラスタを地上からのコマンドに従って噴射して衛星の位置修正を行う。

図では、MEV自身もミッションの電力を得るための太陽電池パネルを有しており、ドッキングした衛星のそれと直角方向として受光能率を高めている。

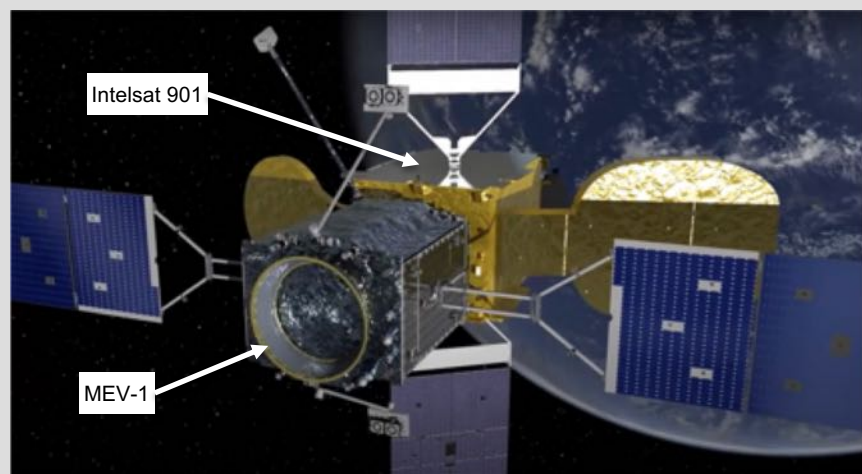
なお、地球から見た静止軌道位置は東西、南北および上下方向があり、東西および南北方向は $\pm 0.1^\circ$  内とする必要がある。ことに東西方向は、隣接する衛星との電波干渉を制限するため必須である。

衛星寿命は、スラスタ燃料残量の低下のほか、衛星食の時間帯の電力を賄うバッテリーの充放電サイクルによる性能低下、宇宙線からの被曝等による中継機の増幅器の故障など様々な機器故障や性能低下によっても短縮される。

#### MEVによる衛星寿命延長の例

ノースロップ・グラマン社のMEVミッション紹介映像より

Intelsat 901にドッキングしたMEV-1は所定の静止衛星軌道(西経 $18^\circ$ )での運用を5年間延伸する。



from: YouTube #NorthropGrumman MEV-1 Mission Profile

MEVは地上からのコマンドにより徐々に目的衛星に接近した後、ドッキングする。

#### 衛星間リンクで利用中

地上では固定地点間通信の主役である光通信は、宇宙でも多くの分野で利用されている。

光通信は小型装置で長距離地点間の(超)高速通信が可能である。何より帯域が極めて広い。例えば1530-1570nm帯は周波数に換算すると約5THzの帯域幅に相当する。レーザ光は高い直進性、即ち鋭いビームを有し、(そのため高精度のビーム送受信を要するが)電波のような干渉問題は当面生じない。一方、対流圏では雨や水蒸気による減衰が大きいなどのため現在は主に複数衛星間の通信(ISL: Inter Satellite Link)に利用されている。

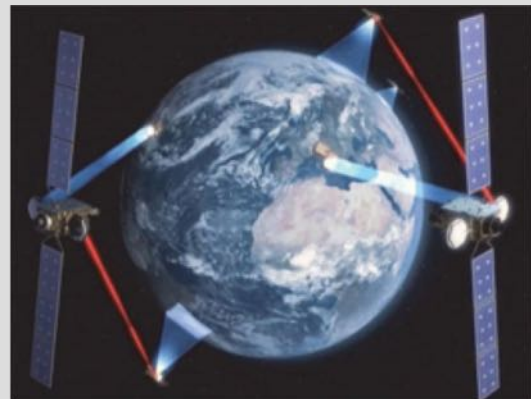
光ISLの一つは、GEO衛星間やLEO-GEO衛星間の伝送である。データ中継衛星(DRS: Data Relay Satellite)ではISLを利用することでデータを受信できる地上のサービスエリアを拡大している。例えば、ESAの欧州データ中継システム(EDRS)では、静止軌道上のEDRS衛星相互間やLEOである地球観測衛星との間を1.8Gbit/sの光ISLで結んでいる。

他の一つはLEO衛星間の多段中継に使用する光ISLである。LEO衛星1個のサービスエリアは狭いのでISL無しでグローバル展開するには多数のゲートウェイ局が必要となる。一方、ISLを用いるとゲートウェイ局数を削減できると同時にエンドツーエンドの伝送遅延時間も低減できる。SpaceXのStarlinkのような大規模LEO網では光ISLの使用を計画している。

#### 光ISLの利用イメージ



Starlink (SpaceXのサイトより)  
上の例では隣接する4衛星と光ISLを設定。衛星間の距離は数十km程度と比較的短い。



ESAのEDRS (ESAサイトより)  
地球観測用LEO衛星とGEO衛星であるEDRS間を光ISL(図で赤色)で結んでいる。地上との衛星間はKa帯を使用。

大気吸収による減衰が生じない大気圏外では、小型の装置で遠距離伝送が可能な光通信は衛星間リンクに適している。

#### ハブ局と衛星間は超広帯域の光伝送が有望に

Ku帯やKa帯サービスリンク(衛星—ユーザ地球局間)で多数のスポットビームを有するHTSでは、各ユーザの高速化ニーズがますます高まることから、フィーダーリンク(衛星—ハブ局間)の大容量化やハブ局の多数化が必要となる。

例えば、合計83個のスポットビームを有するKTSATでは、欧州各国に合わせて約10局のハブ局を設置している。

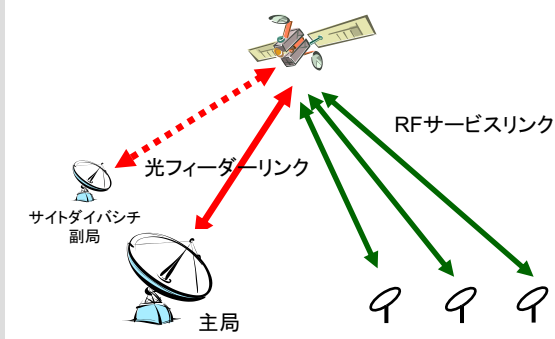
現在のHTSでは、フィーダーリンクに約2GHz幅の広い帯域が利用できるKa帯の利用が主流であるが、より高い周波数であるV帯(40-75GHz)や光通信に置き換えることで超広帯域化が期待できる。

その際、降雨や雲による伝搬障害が起こることから、複数局によるサイトダイバーシティ運用を行うなどの対策が必要である。

光フィーダーリンクの伝送方式では、地上の光ファイバーシステムで普及しているDWDM(Dense Wavelength Division Multiplex)などの波長多重方式が有望である。衛星中継器にエルビウムドープファイバー増幅器を用いるとWDM波を復調せず、光のまま増幅することができる。

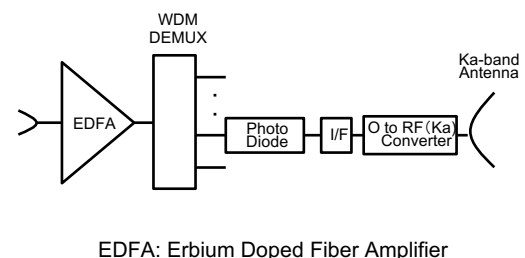
### 光フィーダーリンク

【ネットワーク構成イメージ】



降雨マージンを超えるような強雨時は、同時強雨の確率が少ない遠方の副局に切り替えて運用。

【フォワードリンク(GW→User)の中継器構成】



EDFA: Erbium Doped Fiber Amplifier

波長多重の光信号の増幅には光ケーブルで広く普及しているエルビウムドープ増幅器が利用できる。

光フィーダーリンクには大きな可能性があるが、装置や回線に高い信頼性と稼働率が求められる。

#### 原理的に盗聴不可能な量子暗号

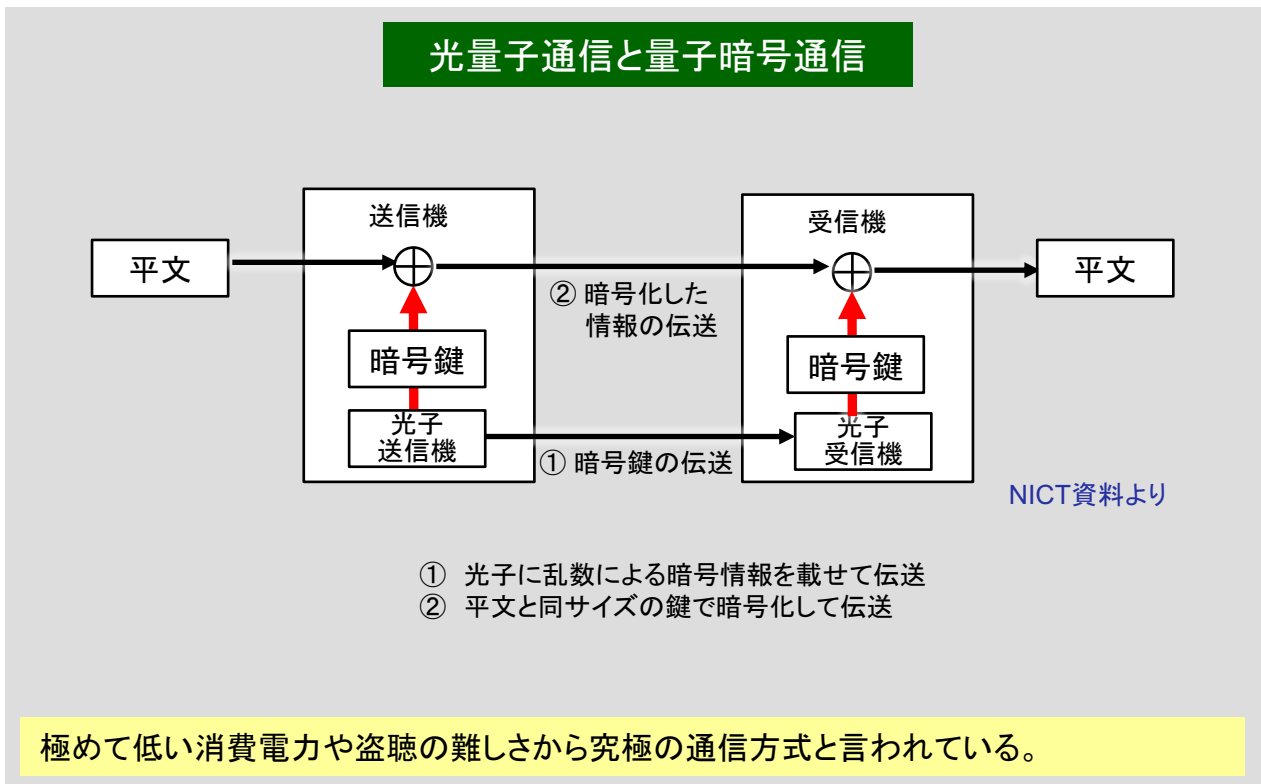
究極の通信方式と言える光量子通信や量子暗号の研究開発が各国で行われている。

光には波の性質とともに粒子(光子)の性質がある。光子の単位で”0”か”1”の情報を載せるのが量子通信であり、電磁波の位相などの波動状態に情報を載せる方式に比べてビットあたりのエネルギー(電力)は桁違いに少なくてすむ。

光子の不確定性理論に基づく性質を利用すると盗聴不可能な暗号通信も可能になる。下図がその方式であり、情報データを光子に載せて送信するとともに、データ送信側の暗号化と受信側の復号化に共通して用いる使い捨ての秘密鍵も別チャネルの光子で伝送する。仮にこの秘密鍵を送る光子が配送途中で盗聴された場合には盗聴されたことを示すノイズが発生するので受信側で盗聴有無が判定できる。その際は当該データを破棄して再送要求すればよい。

光ファイバー経由での量子暗号方式は近く商用化される見込みであり、東芝やNECなどの日本メーカーが世界の先頭集団にある。

一方、宇宙空間での量子暗号通信は日本のNICTや中国などでLEO衛星を用いた実証実験に成功している。



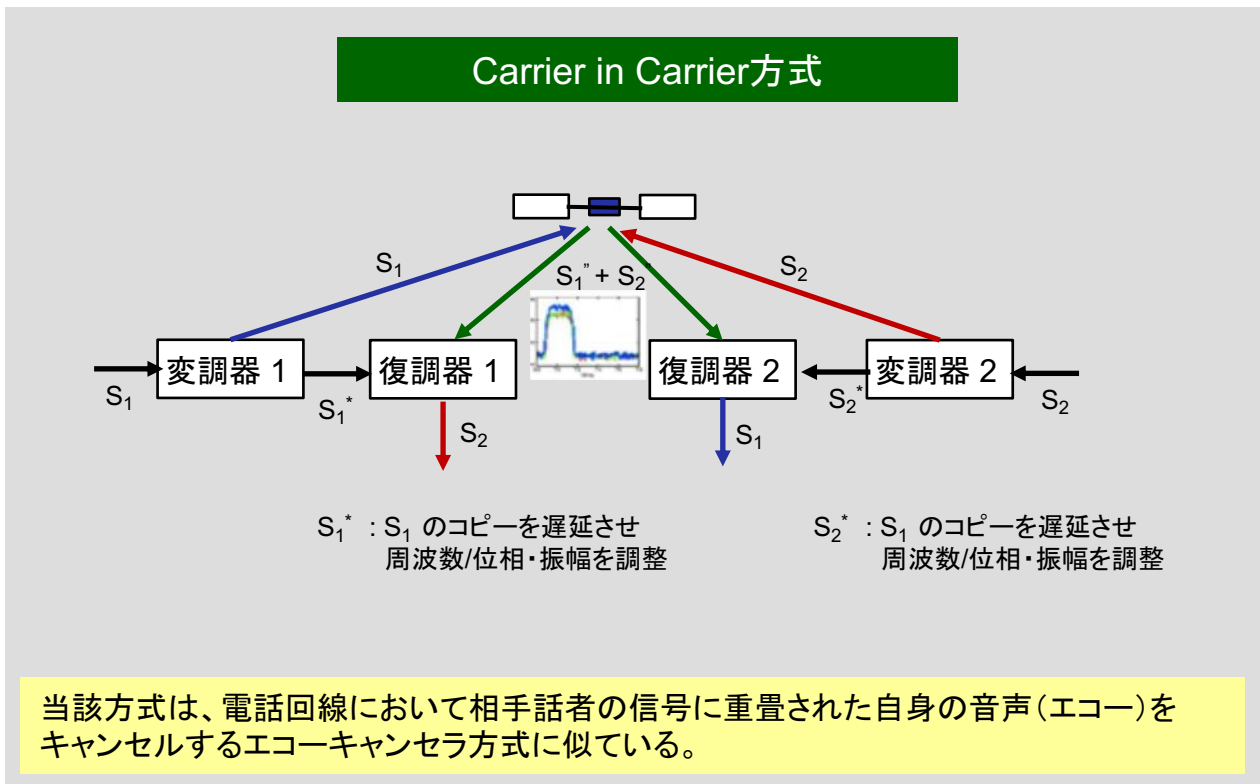
周波数帯域の節約と無線盗聴の防止が可能

電波を使用する衛星回線は有線回線に比べて盗聴のリスクがより高いといえる。そこで重要通信にはデータに暗号化を行うが、送受地球局でCarrier in Carrier方式を使うと無線区間での盗聴防止が可能になる。同時に周波数の有効利用も可能となる。

当該方式では両地球局より同じ周波数帯域を用いる搬送波を衛星に向け送信する。するとダウンリンクでは2つの送信波が合成された波形が両地球局にて受信される。この時、各受信側では自分が送信した信号は解っているため、その分を差し引くと相手側から送信された信号のみが取り出せる。この引き算のためには、自身の送信信号をしばし蓄積しておき衛星回線の遅延時間だけずらすとともに、その位相や振幅も合わせるようにする。

米国Comtech社が特許を有する当該方式を用いると、送受信者以外の第三者はキャンセル対象である元の信号を持たないから盗聴対象の信号を取り出すことができない。

当該方式は送信帯域の節約にもなる。近年の衛星通信では電力には余裕があるが、周波数帯域が不足する傾向が強く、特にKu帯で著しい。そこで、双方向回線で同じ帯域を共有する当該方式は有効である。ただし、両者地球局が自身の送信波の衛星折り返し波を相手送信波とともに受信できることが必要である。



#### 惑星引力を利用して省エネの深宇宙探査

スイングバイは惑星の重力を利用して探査機の色度や軌道を変更する航法である。JAXA宇宙科学研究所の探査機「はやぶさ」でお馴染みとなった。

スイングバイには惑星の公転方向と探査機の進入方向との関係から2種類ある。惑星の公転方向の反対側から惑星に接近して、惑星の重力圏内で大きく方向変換した後、惑星の公転方向に脱出する際は、探査機も惑星の重力圏内でその公転方向の力を受けるために脱出速度は進入速度より速くなる。これが「加速スイングバイ」である。

一方、探査機が惑星の公転方向に沿って惑星に接近した後、惑星の重力圏で方向を変えて脱出する場合は、脱出速度は進入速度より遅くなる「減速スイングバイ」となる。

太陽系の惑星間を航行する探査機では、複数の惑星の重力圏を次々に経路するルートで軌道変更と加速を繰り返すことで極めて省エネの深宇宙探査が可能になる。その先駆者である米国ボイジャー2号は、1977年の打ち上げ時には木星までの速度だったが、1979年の木星接近時にその重力で加速して1981年には土星に接近した。その後も飛行を続け、1986年には天王星、1989年には海王星に接近し撮影画像をはるか彼方の地球に送り届けた。ボイジャー2号は半世紀を経た今でも航行を続けているという。

### スイングバイ航法

宇宙空間に静止した天体の重力圏への進入速度と重力圏からの脱出速度は等しい。しかし、太陽を公転する惑星への接近の場合は、探査機の進行方向と惑星の公転方向との関係から、惑星の重力圏への進入速度より脱出速度が増加あるいは減少する。  
(前者が加速スイングバイ、後者が減速スイングバイ)

深宇宙探査では、惑星の重力圏を経路することで燃料消費なしで加速が可能となる。



## 太陽光の反射による微弱な反作用が推進力

ソーラーセイルは帆船が風の力を受けて航行するように、電磁エネルギーを有する光束あるいは光子がセイル面で反射することで受ける反作用を深宇宙での航行に利用するものである。

この電磁エネルギーは光源（太陽）からの距離の2乗に反比例して減衰するので非常に微弱なものである。しかし、深宇宙のような無重力空間では僅かな力でも推進力が得られる。

このソーラーセイルの宇宙空間での実験に世界で初めて成功したのは日本のJAXA宇宙科学研究所が2004年のイカロスだった。直径10m、厚さ7.5 $\mu\text{m}$ の超軽量薄膜を宇宙空間で展開し、光圧力で推進されることを実証した。

なお、ソーラーセイルが利用するのは、セイルの名称から時に混同される太陽風ではない。太陽風は太陽から吹き出される高温で電離した粒子（プラズマ）の流れである。太陽表面から放出される超高温で電子とイオンに分離されたプラズマ粒子は、軽量で高いエネルギーを有するので、太陽の重力でもつなぎとめられず、あたたかも風のように宇宙空間に放出されている。

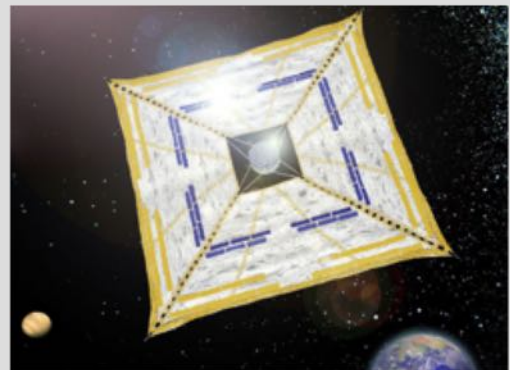
## ソーラーセイル実証機 (IKAROS)

光の圧力は光源からの距離の2乗に反比例して減衰する。

地球では太陽光線から受ける圧力は1平方メートルあたり、約 $4.6 \times 10^{-6}$  N（ニュートン）と極めて小さい。

（1Nは1kgの物体に $1\text{m/s}^2$ の加速度を生じさせる力）

無重力状態にある深宇宙では飛翔体の推進に有力であるが、極めて軽量で大面積の帆の製造や宇宙空間での展開は困難と見られていた。



JAXAサイトより

JAXA宇宙科学研究所のイカロスが世界で初めてソーラーセイルの効果を実証した。

#### 深宇宙通信では搬送波成分を残して搬送波再生を容易に

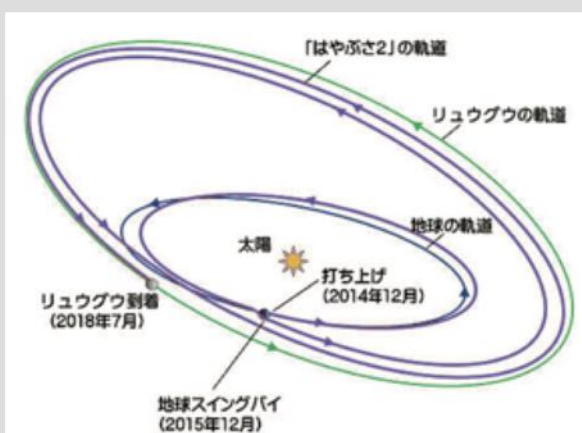
問題は地球と探査機間の距離である。地表面サンプルを取得時の小天体リュウグウと地球間距離は約3億kmとのこと。これは月と地球の距離(38万km)の約800倍にもなり、電波の速度(30万km/秒)でも片道1,000秒を要することになる。そこで、地球からのコマンド送信後、その応答信号を受信するまでには往復30分以上かかる。

このコマンド用にはX帯の周波数(7.1GHz)、テレメトリ用にはX帯(8.4GHz)とKa帯(32GHz)が使われている。その地上側設備は直径64mアンテナ(臼田局)などと大きいのが、探査機側はアンテナ直径がたかだか1m程度で送信電力も小さい。そこで、通信速度はコマンド用で15~1kbit/s、テレメトリ用で8~32kbit/sと極めて低い。

探査機向け変調方式は一般的なデジタル方式と多少異なり、PCM/PSK信号に $\pi/2$ ラジアンより小さい位相偏移を加えることで搬送波成分を残留させたPCM/PSK/PM方式を用いている。

探査機は地球との相対速度が最大約10km/sの高速で移動するため、搬送波の受信周波数はドップラー効果を受けて大きく偏移する。また、送信機非直線性に起因する雑音や、低速通信のため搬送波近傍での位相雑音の影響も大きい。そこで、搬送波成分を残すことでS/N特性は多少劣化するが受信側での搬送波再生を容易にしている。

#### はやぶさ2



リュウグウに接近するはやぶさ2のイラスト (JAXAサイトより)

はやぶさ2ではコマンド送信からレスポンス受信まで約30分もかかることも。

## 数万から数十万個の宇宙ゴミがLEO軌道帯などを超高速で周回

スペースデブリとは寿命となった、あるいは故障で機能停止や爆発した人工衛星やロケットの本体、部品、破片等の宇宙ゴミである。デブリ同士の衝突で生じた微小デブリも含まれる。

旧ソ連によるスプートニク1号以来、世界全体で約4千の衛星が打ち上げられ、その多くは大気圏に突入し燃え尽きたが、現時点で約4500トンものスペースデブリがあるという。

これらは毎秒数kmから10kmという超高速であるため、直径が数センチ以上のデブリが衛星や宇宙ステーションに衝突すると完全に破壊されてしまう。

2009年、イリジウム33号衛星が機能停止中のロシアの軍事衛星コスモス2251号と衝突し互いが粉々となる初の運用衛星衝突事故が起こり、合計で約2千個ものデブリが生じた。

このようなデブリによる重大事故を回避するため、現在、次のような対策が行われている。

- ・専門監視機関にて約10cm以上のスペースデブリの軌道を監視し、衝突危険がある運用衛星は自身の軌道をずらすことで衝突を回避する。
- ・配線部分のような重要箇所は保護用バンパーを装着することで1cm程度のデブリ衝突のダメージを軽減する。

なお、GEO衛星のような高高度衛星は役割終了時に、大気圏再突入より少ない燃料で移行できる墓場軌道（GEO軌道より数百km高い）に投入してスペースデブリ発生を防いでいる。

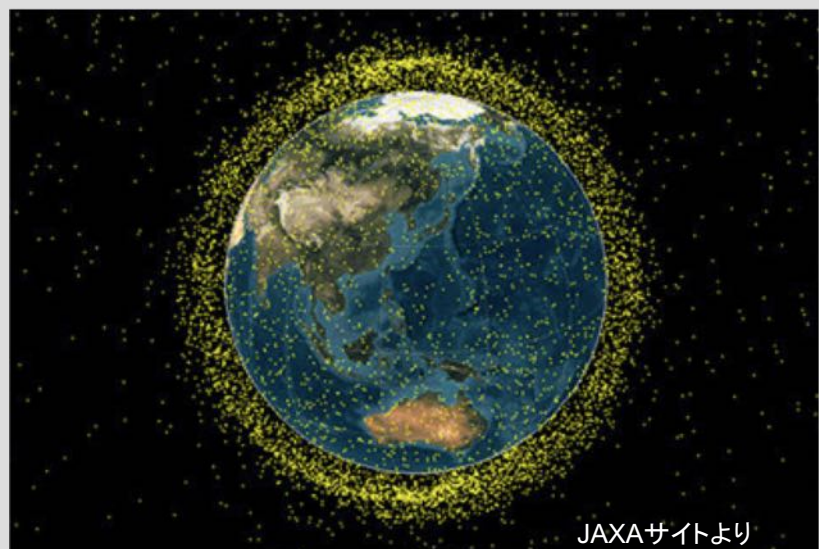
### スペースデブリ

地上高で約1000km付近は地球観測用などの衛星が多く配置されるなどのためデブリが最も多い。

約36000km上空の静止軌道の密度は少ない。

今後多数のLEOが配置される500-1000kmの軌道ではデブリ対策が重要な課題である。

衛星がデブリ衝突で破壊される連鎖が起こり、デブリが爆発的に増加して宇宙が利用できなくなる「ケスラー・シンドローム」を絶対に起こしてはならない。



JAXAサイトより

LEOコンステレーションでは、スペースデブリを発生させないように寿命に近くなった衛星の確実な退避と、デブリの衝突事故の回避対策が重要である。



作用反作用の運動量保存則から求まる

ロケットは、推進剤を後方に高速で噴射させる反動によって速度と高度を上げていく。このロケットの原理は、いわゆる作用反作用の法則、別の言葉では運動量保存法則にある。

今、質量 $m$ のロケットが $w$ (一定)の速度で推進剤を噴射し続けた時、 $T$ 時間後のロケット速度 $v$ は次式(ツィオルコフスキーの式)で与えられる。

$$v = w \ln (m_0/m_T)$$

ここで、 $m_0$ ,  $m_T$ は打ち上げ時および $T$ 時間後のロケットの質量、 $\ln$ は自然対数である。すなわちロケット速度 $v$ は噴射速度 $w$ が高いほど、質量比( $m_0/m_T$ )が大きいほど高くなる。

上式にて、 $w$ を比推力400秒に相当する  $w=4000$  (m/s)、 $v$ を第1宇宙速度(7.9km/s)とすると、質量比( $m_0/m_T$ )は7.4 と計算される。

すなわち、エネルギーロスが全くない理想的なロケットを地上すれすれの高度で周回させるには、最終重量の約7倍の重量をもつ推進剤が必要という計算になる。

ロケット方程式

微小時間 $\Delta t$ の間に $\Delta m$ の推進剤を速度 $w$ で噴射させることでロケット速度が $\Delta v$ だけ増加することを、運動量保存法則で示すと次式になる。ここで第1項は噴射された推進剤の運動量の変化分、第2項はロケットの運動量の変化分である。

$$w \Delta m + (m - \Delta m) \Delta v = 0$$

$\Delta m \Delta v$ は他に比べ小さいとして無視できるから、式を書き換えると次になる。

$$\Delta v = -w \Delta m/m$$

これを微分方程式とみて両辺を積分すると、

$$\int dv = -w \int 1/m dm$$

更にロケット初速度を0(静止), 初期質量を $m_0$ ,  $T$ 時間後の質量を $m_T$ として上式を解くと、

$$v = w \ln (m_0/m_T) \quad \text{となる。}$$

T時間後のロケット速度は、推進剤発射速度と質量比から求められる。

地球を回るには8km/秒以上の速度が必要

物体を上向きに発射する際、発射速度を高めるにつれて物体を遠くまで飛ばすことができる。この初速を秒速8kmまで高めると、地球表面に落下することなく、人工衛星となって地球周囲を回るようになる。

この時、円運動する人工衛星の遠心力( $m \cdot v^2/r$ )は地球引力( $G \cdot mM/r^2$ )と釣り合うので次式となる。ここで、 $m$ 、 $M$ は物体、地球の質量、 $v$ は速度、 $r$ は回転半径、 $G$ は万有引力定数である。

$$m \cdot v^2/r = G \cdot mM/r^2$$

上式より、 $v = \sqrt{GM/r}$  となる。

地球半径を $R$ 、地表面からの物体の高度を $h$ とし、 $G$ のかわりに地表面での重力 $g$ を用いると、

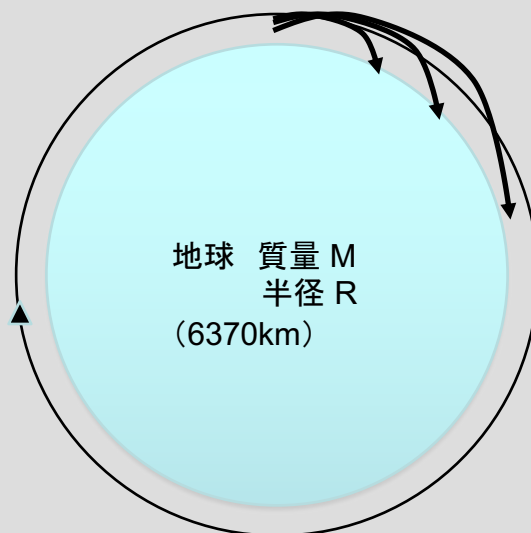
$$r = R + h$$

$$g = G \cdot M/R^2 \quad \text{より} \quad v = \sqrt{gR^2/(R+h)} \quad \text{と表される。}$$

上式より、 $h$ が高くなるにつれ、 $v$ は遅くなるのがわかる。地表すれすれに飛ぶ場合( $h=0$ )の速度 $v_1$ (第1宇宙速度)は  $v_1 = \sqrt{gR}$  となる。

これに、 $g=9.8 \text{ (m/s}^2\text{)}$ 、 $R=6370 \text{ (km)}$  を代入すると、 $v_1 = 7.9 \text{ (km/s)}$ と計算される。

第1宇宙速度



地球を周回する人工衛星となる第1宇宙速度は7.9km/sである。

地球引力を振り切るには11.2km/sが必要

ロケットの速度を第1宇宙速度から更に上げると、ロケットの軌道は地球から離れ太陽を回る大きな楕円になっていく。  
この時の速度が第2宇宙速度である。

第2宇宙速度は、位置エネルギー( $E_p$ )と運動エネルギー( $E_m$ )の和が常に等しいとした力学的エネルギー保存則から求められる。このうち前者は、物体に働く地球引力を距離に沿って積分した値であり、普通、無限遠点を0とした負数として表される。

$$E_p = -G \frac{Mm}{r} \quad E_m = \frac{mv^2}{2} \quad M, m \text{ は地球, 物体の質量, } r \text{ は地球中心と物体の距離, } v \text{ は物体の速度, } G \text{ は万有引力定数}$$

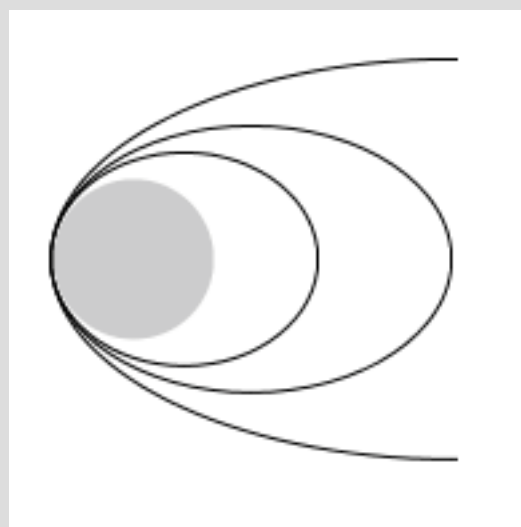
即ち、 $E_p + E_m = (\text{一定})$  であり、地球を回る衛星では $E_p + E_m$ が負数となる。  
一方、地球引力圏外に出る物体では前者は0になるので、 $E_p + E_m \geq 0$  となる。

ここで地表( $r = R$ )にて、 $E_p + E_m = 0$  となる速度 $v_2$ が第2宇宙速度であり、

$$G \frac{Mm}{R} = \frac{mv_2^2}{2} \quad \text{および } g = G \cdot M/R^2 \quad \text{から } v_2 = \sqrt{2GM/R} = \sqrt{2gR} = \sqrt{2} v_1 \quad \text{となる。}$$

第2宇宙速度

地球を周回する物体の速度を更に上げてゆくと、地球を回る楕円軌道が大きくなってゆき、やがては地球の引力に打ち勝って、放物線の軌道になる。



第2宇宙速度は第1宇宙速度の $\sqrt{2}$ 倍であり、11.2km/sとなる。

太陽重力を振り切るには16.7km/sが必要

ロケットの速度を第2宇宙速度から更に上げていくと、ロケットの軌道は太陽系軌道、すなわち太陽の公転軌道からも脱出することができる。この時の速度が第3宇宙速度である。

地球引力からの脱出速度である第2宇宙速度  $v_2 = \sqrt{2GM/R}$  でのM, Rはそれぞれ地球の質量と半径であるが、地球公転軌道付近における太陽引力からの脱出速度 $v_s$ は、同式のM, Rとして太陽の質量( $M_s$ ), 太陽と地球間の距離( $R_e$ )を用いて求められる。

すなわち、 $v_s = \sqrt{2GM_s/R_e}$

この $v_s$ は太陽から見た速度であるので、地球から見た速度( $V_E$ )は地球自身の公転速度( $v_e$ )を差し引く必要がある。 $v_e$ は地球の公転遠心力と太陽の引力とが釣り合う条件から、

$$M_e v_e^2 / R_e = GM_s M_e / R_e^2 \text{ より } v_e = \sqrt{GM_s / R_e}$$

そこで、 $V_E = v_s - v_e = (\sqrt{2} - 1) \sqrt{GM_s / R_e} = 12.3 \text{ km/s}$  となる。

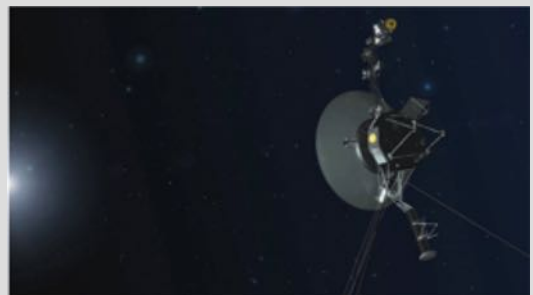
なお地表からの打ち上げでは、地球重力を振り切るため次の速度( $v_3$ )に増加する必要がある。

第3宇宙速度

質量mの物体を地表から打ち上げる時、地球重力を振り切った後の速度( $V_E$ )による運動エネルギーはエネルギー保存則より、地表面からの発射速度( $v_3$ )との間に次の関係がある。

$$\frac{mv_3^2}{2} - GM_e m / R_e = \frac{mV_E^2}{2}$$

$$\begin{aligned} \text{そこで、} v_3 &= \sqrt{2GM_e / R_e + V_E^2} \\ &= \sqrt{v_2^2 + V_E^2} \\ &= \sqrt{11.2^2 + 12.3^2} = 16.7 \text{ (km/s)} \end{aligned}$$



太陽系を脱出するボイジャー2号の想像イラスト (出典: NASA/JPL)

地表面から第3宇宙速度の16.7km/s以上で発射すると太陽系を脱出できる。2019年11月、ボイジャー2号は地球から約180億km離れたところで太陽圏外に出たと見られている。



衛星速度は周回半径の平方根に反比例して遅くなる

地球上の円軌道を周回する衛星の速度(v)は、地球重心に向かう引力(F<sub>in</sub>)と、反対方向の遠心力(F<sub>out</sub>)が釣り合うことから、次のようにして求められる。

ここで、mは衛星の質量、rは地球重心と物体の距離、μはケプラー一定数である。

$$F_{in} = m(\mu/r^2), \quad F_{out} = m(v^2/r), \quad \mu = 3.986 \times 10^5 \text{ (km}^3/\text{s}^2)$$

$$F_{in} = F_{out} \text{ から式を変形すると } v = (\mu/r)^{1/2}$$

また、周期(T)と衛星軌道半径(r<sub>s</sub>)の間には、ケプラー第3法則(惑星が太陽を回る公転周期の2乗は楕円長軸の3乗に比例する)での惑星を衛星に、太陽を地球に置き換え、ケプラー一定数(μ)を入れると次の関係がある。

$$r_s = [\mu/(4\pi^2)]^{1/3} T^{2/3}$$

ここで、r<sub>s</sub>は地球中心と衛星間の距離(km)、Tは衛星の公転周期(秒)であり、静止衛星のTは平均恒星日の23時間56分である。

衛星の公転周期と速度

回転数/日	周期(秒)	高度(km)	速度(km/s)
16	5390	260	7.75
10	8620	2710	6.63
8	10770	4160	6.15
4	21540	10350	4.88
2	43080	20180	3.87
1	86160	35790	3.07
0.5	172330	60550	2.44
0.25	344660	99870	1.94
0.1	861640	189330	1.43

地球を周回する衛星の速度は周回半径が大きくなるにつれ遅くなり、静止衛星では約3km/秒となる。



## パーキング軌道、トランスファ軌道を経由して静止軌道に到達

衛星を赤道上空36000kmの円軌道である静止軌道に配置するには、通常、次の手順をとる。ここで、軌道変更に使用するエンジンはアポジ(遠地点)モーターとも呼ばれている。

第1段階： 地上からロケットにて低高度の円軌道に打ち上げる。この軌道は一時的に停留する軌道であるので、パーキング軌道と呼ばれる。

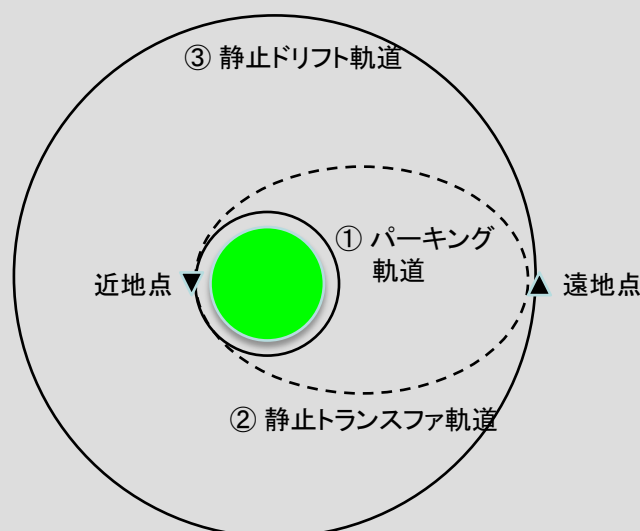
第2段階： 適切な時点でエンジンを一定時間噴射することで、地球から最も遠くなる地点(遠地点)が36000kmとなる楕円軌道(GTO:静止トランスファ軌道)に乗せる。

第3段階： GTO遠地点にて再度、エンジンを一定時間噴射して、高度36000kmの円軌道である静止ドリフト軌道に乗せる。

第4段階： 静止ドリフト軌道上にて衛星スラストにより衛星の経度を少しずつずらすことで所定の静止軌道位置まで移動させる。

第1～3段階による軌道変換はホーマン変換と呼ばれ、軌道高度の変換に要するエネルギーが最小で済むことが知られている。

### ホーマン変換による静止衛星の打ち上げ



遠地点が高度36000kmになる静止トランスファ軌道の遠地点でアポジモーターを噴射して高度36000kmの円軌道(静止ドリフト軌道)に移動させる。

## 2つの大きな天体からの引力が均衡する点

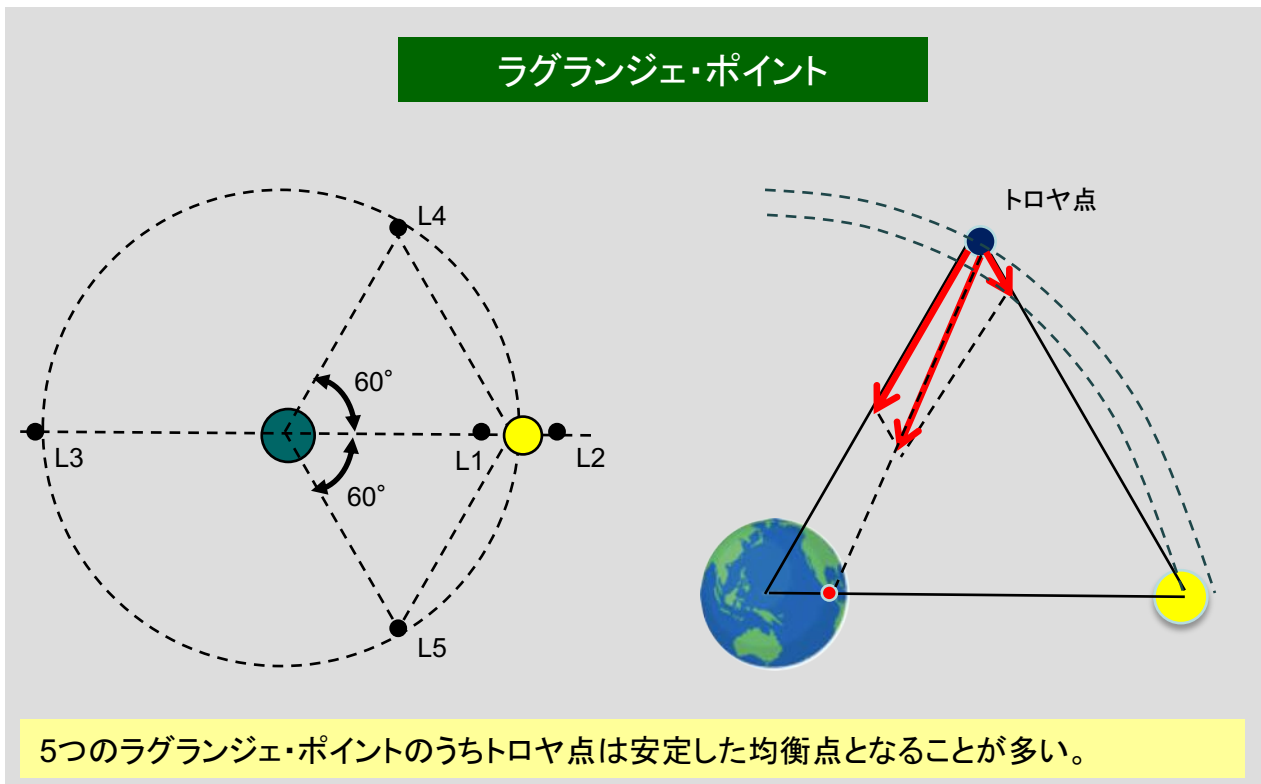
人工衛星のような小天体が、その質量が自身よりずっと大きい地球と月のような2つの天体（主星、伴星）の双方から引力を受ける時、小天体は2つの引力の合力と自身が主星の周りを回る際の遠心力とが釣り合う点に停留できる（即ち、伴星と同じ周期で公転し続ける）ことが知られており、この点をラグランジェ・ポイントと呼んでいる。

ラグランジェ・ポイントには図のように5つある。このうち、L1,L2,L3の3つの点は、主星と伴星を結ぶ直線上にあり、そこで引力と遠心力が釣り合うだろうことは理解しやすい。

一方、トロヤ点と呼ばれるL4, L5の2点は主星と伴星と小天体が正三角形を構成する位置にある。この地点にある小天体は、主星と伴星の2天体の重心を中心とする円軌道を描く。その軌道半径は主星と伴星間の距離より僅かに短く、伴星の軌道半径より僅かに長い。

このL4, L5で興味深いのは、主星と伴星の質量比が25倍以上ならば、L4,L5は重力ポテンシャルの底のような安定した均衡点になると計算されていることである。

ラグランジェポイントは僅かなエネルギーで長期に停留できることから天体観測等に適している。また、宇宙戦士ガンダムなどのSF小説に描かれているほか、本格的なスペースコロニーの設置場所としても科学研究が行われている。





【著者略歴】

田代 務

KDDIにて、衛星通信設備の設計や設備導入、研究開発計画の策定、人材育成、海外事業等に従事。ワシントン事務所長、KDDアメリカ副社長、IP事業企画部部長の後にKDDIを退職し、2003年に同僚と株式会社A2A研究所を設立。現在は、主に衛星通信やモバイル通信関係の調査や技術支援を行っている。東大工学部電子工学修士修了。静岡県出身。

主な著書 「どこでもワーク、いつでもラーニング」、「携帯電話の仕組み」、「衛星通信のしくみ」など。  
(以上、A2A研究所ウェブサイト [www.a2a.jp](http://www.a2a.jp) にて公開中)

