

■5 群 (通信・放送) - 7 編 (衛星通信)

1 章 衛星通信サービス

【本章の構成】

本章では以下について解説する.

- 1-1 固定衛星通信サービス
- 1-2 移動体衛星通信サービス
- 1-3 測位サービス

■5群-7編-1章

1-1 固定衛星通信サービス

1-1-1 インフラ衛星通信サービス

(執筆者：山下史洋) [2018年12月受領]

一般に、衛星通信サービスの特徴は、①地上の災害による影響を受けにくい(高信頼性)、②1つの衛星で広範囲をカバーできる(サービスエリアの広域性)、③地球局を設置すれば直ちに回線が作成できる(迅速性)、の3つが挙げられる。近年、世界的には携帯電話やスマートフォンが普及し、地上ネットワークがないエリアに対して電話サービスやインターネットサービスを提供する際のバックホールとしての衛星通信の需要が堅調に伸びている。また、船舶や航空機などの移動体では、衛星通信が唯一の通信手段であるため、携帯電話やスマートフォンの普及に伴い、衛星通信に対する需要がやはり伸びている。このような衛星通信に対する需要の増加から、近年100ビーム級のHTS(High Throughput Satellite)衛星や数百機の低軌道衛星を用いた衛星コンスタレーションが次々と実用化され、グローバル通信インフラを衛星ネットワークで迅速に構築する流れがある。

一方で、日本においては船舶や航空機などの移動体衛星通信サービスについては諸外国と同様に一定の需要があるが、地上については光ファイバや携帯電話などネットワークインフラ環境が充実しているため、衛星通信が必要とされる利用シーンに限られている。したがって、現在日本では海底光ケーブルの敷設が困難な離島エリアに対する通信サービスや、災害発生時やイベント時の臨時通信サービスなどで利用されている。以上、衛星通信は固定衛星通信と移動体衛星通信に大別されるが、本節は固定衛星通信サービスのなかのインフラ通信サービスとして、離島衛星通信と災害対策衛星通信について照会する。

まず、離島衛星通信について説明する。小笠原諸島や沖縄・九州地方に多く存在する日本近海の離島地域については、近年、海底光ケーブルやマイクロ波通信環境が整備され、衛星通信を利用せずとも離島に対して通信サービスを提供できるようになってきた。しかしながら、今なお地上ネットワークでの通信が困難ないくつかの離島地域については、通信事業者が衛星を介して固定電話・専用線などの通信サービスを提供している。固定電話・専用線はサービス約款に規定された厳しいサービス品質を遵守する必要がある。したがって、通信環境の特別な事情で衛星を介して離島地域にサービスを提供する場合においても、地上-衛星間を電波が往復する約250 msecの物理的な伝搬遅延以外は、高い品質規定を満たす必要があると考えられている。例えば、固定電話・専用線サービスに利用される固定衛星通信の周波数帯は、降雨減衰の影響を受けるKu帯(14/12 GHz帯)ではなくC帯(6/4 GHz帯)が用いられている。これは、サービスカバレッジエリアがC帯の方が広いことと、Ku帯は降雨の影響を受けてサービス断になると、固定電話と専用線サービスが所定の品質を満たさないことに配慮してのことである。一方で、C帯はKu帯と比較して周波数も低いいため、十分なアンテナ利得を得るためにはアンテナ径を大きくする必要がある。その結果、離島通信では10 m級の大型パラボラアンテナを用いて地上局設備を構築することもある。また、衛星を介して固定電話・専用線サービスを提供する場合、衛星回線が一時的に太陽雑音の影響を受けて品質が著しく劣化するサントランジットを考慮する必要がある。サントランジットを回避するには、異なる軌道に存在する

2機の衛星を用い、2衛星を切り替えてサービス提供する手法が有効である。

更に、近年、離島地域においても携帯電話・スマートフォンの利用要望が大きく、モバイル事業者が固定衛星回線をバックホールとして離島ユーザに対して携帯電話・インターネットを提供するサービスも開始されている。ただし、第4世代携帯電話サービスやインターネット接続は広帯域を必要とするのに対し、衛星回線は利用可能な帯域は限られており、衛星回線をバックホールとして利用する場合、同時に接続できるエンドユーザ数に制限が生じる。

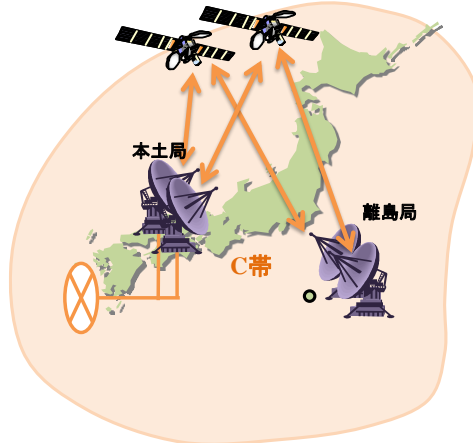


図 1・1 離島衛星通信システム

次に、災害対策衛星通信について説明する。災害発生時や故障発生時に地上回線を使用できない場合、衛星回線に迂回してサービスを継続する BCP (Business Continuity Plan) 用途で衛星システムを保有する企業も少なくない。通信事業者においても、災害対策衛星通信は被災地の避難所などで災害時用公衆電話や災害伝言板サービスを提供するもので、重要なライフラインとして位置付けられている。

一般に災害対策で利用される衛星通信の周波数は、災害時の可搬性を意識してアンテナをできるだけ小さくするため、現在は比較的高い周波数である Ku 帯を用いているケースが多い。Ku 帯は降雨減衰の影響を受けるが、非常時の通信確保を目的としているため、通常の地上ネットワークで提供するサービスほどの高い品質は求められておらず、IP ベースでサービス提供されている。通信事業者が開発した可搬型衛星地球局の一例を示す。

アンテナ鏡面開口径は 75 cm であり、自動車などで運搬できないような被災地に対しても複数の運用者が手で持ち運ぶことができる。工具を必要としないことから 2名の要員にて、およそ 5 分間で組み立てを完了することができる。更に、衛星自動捕捉機能を具備しており、設営者は特殊なスキルを有する必要がなく、ボタン操作一つで所望の衛星を 2 分程度で確実に捕捉することができる。電波送出遠隔試験ツールとの組合せにより、遠隔操作による UAT (Uplink Access Test) を行うことができ、現地に無線スキルなどを有する作業でなくとも、15 分程度で設営から運用開始まで行うことができる。

また、同時に開発された災対用車載型地球局の一例を示す。自動車のルーフ上に搭載して使用するタイプのアンテナであり、自動車で行くことができる被災地で使用する用途での使用に適する。普通、自動車にも搭載できるようアンテナ開口径を 60 cm 程度にまで小型化されている。衛星を自動捕捉する機能に加え、走行時も常に衛星を自動追尾する機能を有している。そのため、被災地への移動中に衛星を追尾しておけば、被災地到着時に衛星見通しのある場所を即時に把握することができ、また、現地での組み立て作業が不要であるため、可搬型アンテナを用いた場合よりも、より迅速に運用開始することができる。

更に、近年携帯電話やスマートフォンの普及に伴い、災害発生時に地上セルラーネットワークが影響を受けたとき、一時的に衛星回線をバックホールとして、車載型の臨時移動基地局を用いた携帯電話サービスが提供されている。衛星を介することで絶対的な回線の遅延時間は増加するが、地上ネットワーク設備が完全復旧までには時間を要するため、被災地における迅速な携帯電話・通信環境の整備に大きく貢献している。

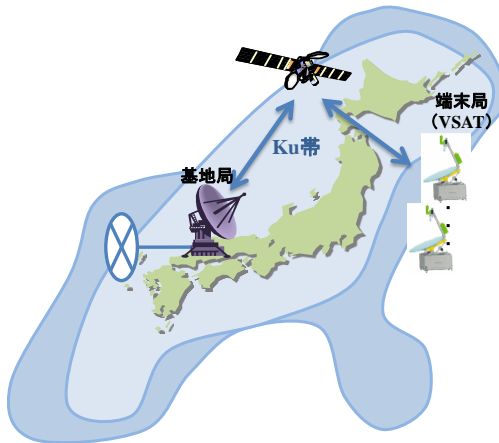


図 1・2 災害対策衛星通信システム

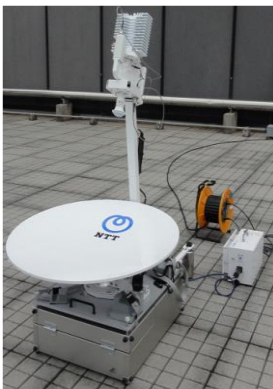


図 1・3 可搬型衛星地球局



図 1・4 車載型衛星地球局

■参考文献

(1) 天野博史：“アクセスネットワークのすべて,” 電気通信協会, 2017.

1-1-2 コンシューマ向けサービス

(執筆者：名古屋翼) [2014年12月受領]

従来、日本における衛星放送は、BS (Broadcasting Satellite) 放送と、CS (Communication Satellite) 放送により区分されていた。BS 放送は、ITU (International Telecommunication Union) により国ごとに優先的に割り当てられているプランバンドで放送されている。このプランバンドで割り当てられた衛星軌道、周波数については基本的には、関係各国との調整は不要である。日本には、東経 110 度/右旋円偏波、12 GHz 帯である 11.7~12.2 GHz の 12 の周波数チャンネルが割り当てられている。

一方、CS 放送は軌道位置と周波数は先着順に割り当てられるノンプランバンドで放送されている。この軌道位置と周波数は、国ごとの優先権のなくその利用にあたっては衛星の打ち上げに遡って関係諸国との軌道位置と周波数の調整が必要である。調整の結果により使用できる周波数や出力に制限を受けることもあるが割当を増やすことは BS に比べれば容易である。

現在、日本には東経 110 度/右偏波、東経 124 度・128 度/垂直・水平偏波、12 GHz 帯である

表 1・1 衛星放送の概要

制度	衛星基幹放送		衛星一般放送			
放送サービスの区分	BSデジタル放送	東経110度 CSデジタル放送	東経124/128度等 CSデジタル放送	-		
制度上の立場	衛星事業者 放送事業者	基幹放送局提供事業者 認定基幹放送事業者	電気通信事業者 登録一般放送事業者 (衛星一般放送)			
衛星	区分	放送衛星 (BS)	通信衛星 (CS)			
	周波数	11.7GHz~12.2GHz	12.2GHz~12.75GHz			
	周波数帯域	34.5MHz		27MHz		
	偏波	右旋円偏波		直線偏波 (水平/垂直)		
	軌道位置	東経110度		東経124度	東経128度	東経144度 東経154度
	衛星	BSAT-3a BSAT-3b BSAT-3c	N-SAT-110 JCSAT-110R	JCSAT-4B	JCSAT-3A	Superbird-C2 JCSAT-2A
	衛星事業者	株式会社 放送衛星システム (B-SAT)	スカパー-JSAT株式会社			
技術	標準方式	標準テレビジョン放送等のうちデジタル放送に関する送信の標準方式 (総務省令第八十七号)				
	※現在放送中のもの	広帯域伝送方式 (省令第五章第二節)	広帯域伝送方式 (省令第六章第三節)	狭帯域伝送方式 (省令第六章第二節)		
				高度狭帯域伝送方式 (省令第六章第三節)		
	技術規格	ARIB-STD		ARIB-STD/独自	ARIB-STD/独自	
	運用規定	ARIB-TR		独自	独自	
限定受信方式	ARIB-STD		独自	独自		
(参考)	WOWOW	スカパー!	スカパー!プレミアムサービス	musicAirBe e (USEN)	SPACE DiVA	
有料放送サービス呼称例	スカパー!	(旧「スカパー! e2」)	(旧「スカパー!、スカパー! HD)	HOP TV 他		

12.2～12.7 GHz で放送が行われている。2002年に放送開始された東経110度CS放送はアンテナ・受信機ともBS放送と共用可能なものがほとんどであったため、2009年2月に放送法施行規則が改正され、BS放送と東経110度CS放送を特別衛星放送として統合された。また、それ以外の衛星放送は一般衛星放送と定義された。

2011年6月には、放送法改正により、特別衛星放送は衛星基幹放送へ、一般衛星放送は衛星一般放送へと移行している。

現在、放送されている国内の衛星放送の概要を表1・1に示す。また、衛星放送のこれまでの歴史を表1・2に示す。

表1・2 衛星放送のこれまでの歴史

		平成																																			
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26										
衛星 基幹 放送	BS 放送	アナログ放送											デジタル放送															23年7月 放送終了									
	110 度 CS 放送	元年6月 放送開始											12年12月 放送開始											デジタル放送													
衛星 一般 放送	124 / 228 CS 放送	4年4月 放送開始				アナログ放送					10年9月 放送終了											デジタル放送															
		8年6月 放送開始																																			

(1) 衛星基幹放送の概要

衛星基幹放送のうち、BS放送は現在すべてデジタル化されており、BSAT-3a/BSAT-3b/BSAT-3cの3衛星で放送されている（BSAT-3cはJCSAT-110Rの区分所有）。衛星の管制は、主局が川口衛星管制センターであり、副局が君津衛星管制センターで光ファイバにより接続されている。BSデジタル放送の送信地球局は、主局（東京都渋谷区）、副局（埼玉県久喜市菖蒲町）という構成になっている。これは地球局・衛星間のフィードリンクにおける降雨減衰の回避、地球局冗長性確保のためである。現在、中継器12基、テレビHD：28番組、SD：1番組、ラジオ：1番組、データ：1番組が放送中である。

110度CS放送（スカパー！）は、N-SAT110またはJCSAT-110Rで放送されている。衛星の管制は、主局が横浜衛星管制センターであり、副局が茨城ネットワーク管制センターで光ファイバにより接続されている。110度CSデジタル放送の送信地球局は、東京都江東区に設置されている。現在、中継器12基、テレビHD：21番組、SD：33番組が放送中である（いずれも平成26年10月のデータ）。

BSデジタル放送と、110度CS放送の中継器配列を図1・5示す。

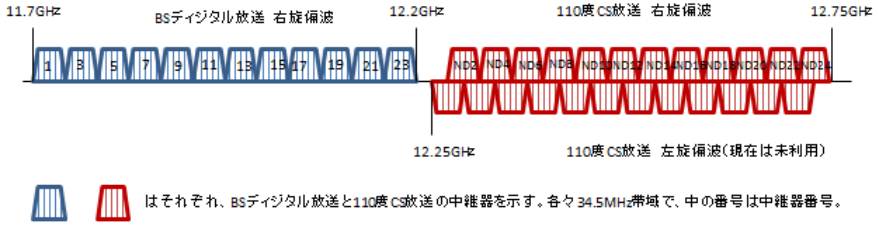
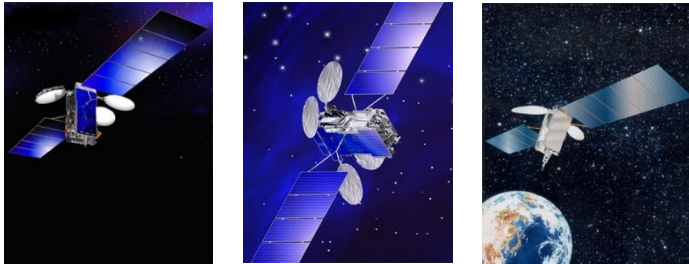


図 1・5 110 度 CS 放送の中継器配列 (ダウンリンク 衛星→地上)

(2) 衛星一般放送の概要

124/128 CS 放送 (スカパー！プレミアムサービス) は、1996 年の放送開始当初は MPEG2 方式で開始され、現在はほぼ全チャンネルが H.264 方式に移行している。衛星は JCSAT-3A (東経 128 度)/4B (東経 124 度) の 2 衛星を利用している。これらの衛星は、BS デジタル放送で用いられている円偏波ではなく、垂直/水平といった直線偏波を用いていることが特徴となっている。表 1・3 に衛星の基本的な仕様を示す。

表 1・3 124/128 CS 放送で用いる衛星の基本的な仕様



衛星	JCSAT-3A	JCSAT-4B	N-SAT-110 (参考)
軌道位置	東経128度	東経124度	東経110度
打ち上げ日	2006年8月12日	2012年5月16日	2000年10月7日
打ち上げロケット	アリアン5	アリアン5ECA	アリアン4
衛星バス	A2100AX	A2100AX	A2100AX
設計寿命	15年	15年	15年
周波数帯	Kuバンド Cバンド	Kuバンド	Kuバンド
中継器本数	Ku: 27MHz x 18	27MHzx44	36MHzx24
	36MHz x 12		
	C:36MHz x 12		
増幅器出力	Ku: 127W C: 48W	150w	120W
形状及び寸法	南北: 26.9m	南北: (略)	南北: 26.4m
	東西: 8.6m	東西: (略)	東西: 8.3m

Copyright ©スカパーJSAT 株式会社 http://www.sptvjsat.com/satellite_index

衛星の管制は、主局が横浜衛星管制センターであり、副局が茨城ネットワーク管制センターで光ファイバにより接続されている。124/128 CS 放送の送信地球局は、東京都江東区に設置されている。現在、中継器 35 基で、テレビ 4K : 1 番組，HD : 158 番組，SD : 2 番組，ラジオ : 100 番組が放送中である（平成 26 年 10 月のデータ）。

(3) 衛星基幹放送と衛星一般放送の伝送路の比較

(a) BS デジタル放送/110 CS デジタル放送の特徴

- ・ BS デジタル放送の伝送方式は ISDB-S（広帯域伝送方式）と呼ばれ，1 中継器を 48 スロットに分割し，1 スロット単位で別々の変調方式の TS を時分割多重できる方式となっている。伝送路の制御は TMCC 信号（Transmission & Multiplexing Configuration Control）により行われる。
- ・ 110 度 CS は，受信機器共通化の観点で BS デジタルと同じ伝送方式が採用された。
- ・ BS は TC8PSK だが，CS は送信出力の制約から，QPSK (3/4) である。
- ・ BS は，放送事業者の独立性と，CATV 6 MHz 伝送路での再送信を考慮し，1 中継器を複数の TS（例：24 スロット×2，16 スロット×3）に分割して運用しているが，110 度 CS は，帯域有効活用のため 1 中継器 1 TS である。
- ・ 広帯域伝送方式をより大容量・高機能化した，高度広帯域伝送方式が規格化されており，4K/8K を中心とした次世代の放送で利用されることが検討されている。
- ・ 限定受信方式は BCAS 方式を採用。

(b) 124 度/128 度 CS デジタル放送の特徴

- ・ 国内最初の CS デジタル放送の伝送路符号化方式として，DVB-S（欧州のデジタル衛星放送規格）が採用された（狭帯域伝送方式）。
- ・ 2008 年には多値位相変調，高能率誤り訂正符号の採用などにより大容量化を実現した DVB-S2 が新たに追加された（高度狭帯域伝送方式）。
- ・ DVB-S2 と H.264 MPEG4-AVC の組合せにより，多チャンネルの HDTV 放送を実現してい

表 1・4 衛星基幹放送と衛星一般放送の伝送路の比較

	BSデジタル放送	東経110度 CSデジタル放送	東経124度/128度 CSデジタル放送	
標準方式	広帯域伝送方式		狭帯域伝送方式	高度狭帯域伝送方式
周波数帯域	34.5MHz		27MHz	
偏波	右旋円偏波		直線偏波(水平/垂直)	
伝送速度	28.86Mbaud		21.096Mbaud	23.3037Mbaud
伝送路符号化方式	ISDB-S		DVB-S	DVB-S2
搬送波	シングルキャリア		シングルキャリア	
伝送主信号の変調方式	TC8PSK	QPSK	QPSK	8PSK
誤り訂正内符号	トレリス	畳み込み	畳み込み	LDPC
誤り訂正内符号符号化率	2/3	3/4	3/4	3/5
誤り訂正外符号	リードソロモン		リードソロモン	BCH
情報レート (1中継器あたり)	52.17Mbps	39.1275Mbps	29.162Mbps	40.538Mbps

(注) 狭帯域伝送方式は，ほぼ 2014 年 5 月に高度狭帯域伝送方式に移行した。

る。

衛星基幹放送と衛星一般放送の伝送路の比較を表 1・4 に示す。

(4) 4K/8K 化への動き

地上・衛星系の放送がデジタル化され、より高度な放送サービスを提供できる基盤が形成された。これに伴いさらなる高精細な画像へのニーズが高まり、現行の HDTV を超える画素数の 4K/8K への展開が期待されている。4K とは、画素数が 3840×2160(横, 縦)の高解像放送(UHD)であり、8K の画素数は 7680×4320 で、横方向の画素数を指して 4K/8K (K は 1000 を示す)と呼んでいる(ちなみに、現在の HDTV は 2K と呼ばれる)。

総務省は、昨年、放送サービスの高度化検討会で、4K・8K のロードマップを策定し、その推進主体として 2013 年 6 月に NexTV-フォーラムが設立され、2014/6/2 より、124/128 度 CS において 4K テレビ放送の Channel 4K が試験放送されている。総務省は本ロードマップの更なる具体化、加速化及び課題解決のための具体的方策の検討を進めており、その検討結果として 2014 年 9 月に公表されたロードマップの衛星部分を抜粋する。

2014 年	124/128 度 CS において、4K 試験放送を開始 (6 月)
2015 年	124/128 度 CS において、4K 実用放送を開始 (3 月)
2016 年	衛星セイフティネット終了後の空き周波数帯域 (BS) において 4K 試験放送 (最大 3 チャンネル) 及び 8K 試験放送 (1 チャンネル) を開始 (4K と 8K を時分割で放送)
2018 年	BS などにおいて 4K 及び 8K の実用放送開始 (2018 年までに可能な限り早期に開始)

Copyright 平成 26 年 9 月 9 日総務省資料“4K・8K ロードマップに関するフォローアップ会合 中間報告”より抜粋 http://www.soumu.go.jp/main_content/000312825.pdf

1-1-3 ビジネス向けサービス

(執筆者：名古屋翼) [2014 年 12 月 受領]

(1) VSAT サービス

VSAT (Very Small Aperture Terminal : 超小型地球局) サービスとは、事業者が運用する共用 HUB (VSAT 制御局) による制御を受けた VSAT と呼ばれる小型地球局により、安価に衛星通信のサービスを受けられるもので、通常 VSAT 設備そのものはユーザの買取りもしくはリースまたはそれに準じた形式での提供となる (VSAT は電波法無線設備規則第 54 条の三で定義されるものである)。典型的な VSAT の構成を図 1・6 に示す。

VSAT は主としてアンテナ部・ODU (Out Door Unit) ・IDU (In Door Unit) から構成される。アンテナは無線設備規則よりアンテナ利得が 50 dBi 以下 (Ku バンドでは 2.4 m φ 相当) と決められているが、通常主に用いられるものは 1.8 m φ ~ 75 cm φ である。ODU は主に BUC (Block Up-Converter) と LNB (Low Noise Block down converter) からなり、それぞれ、衛星向けに周波数変換を行い電波の増幅を行うと共に、衛星からの微弱な電波を受け取り増幅する機能を受け持つ。IDU は衛星用のモデム機能を持つもので、近年の IDU のインタフェースは、PC 側がイーサネット、ODU 側は同軸ケーブルで 1 GHz 帯の信号周波数を伝送するものが多い。

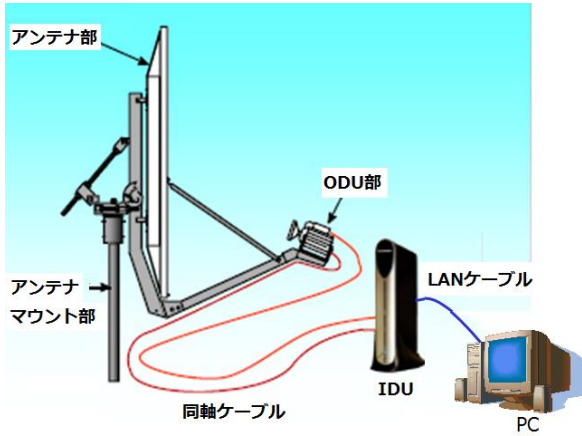


図 1・6 典型的な VSAT の構成

VSAT サービスのネットワークトポロジーとして、スター型 (図 1・7) とメッシュ型 (図 1・8) がある。

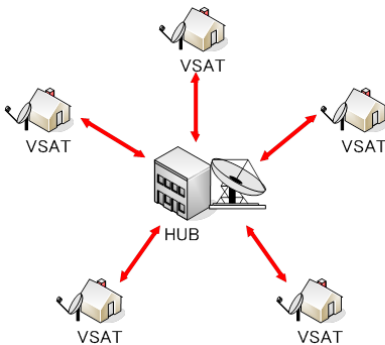


図 1・7 スター型ネットワーク

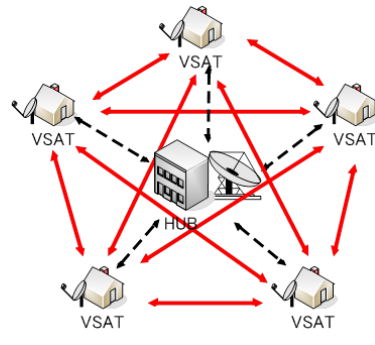


図 1・8 メッシュ型ネットワーク

スター型ネットワークの特徴は、VSAT の通信相手はネットワークを管理する HUB であることである。HUB 局は通常 4.5 m φ 以上のアンテナ径を持つことが多いことから、衛星の回線設計上 VSAT 側のアンテナ径を小型化することができる (通常、75 cm φ ~ 1.2 m φ クラスのものが多い)。一方で、VSAT 間の通信はすべて HUB 局経由のダブルホップとなることから、衛星の遅延を 2 往復分受けるため^{*1}、音声通信であれば若干の違和感が、感じられる。したがって、このタイプは HUB から地上回線を通して接続するような、インターネット接続型のサービスに適している。このタイプのサービスには、日本ではスカパーJSAT 社が運営する ExBird

^{*1} 静止衛星は赤道上空 36000 km 上空にある。このため、電波が衛星まで 1 往復するのに約 0.25 秒かかる。ワンホップの場合、通信を行ってから返答が戻ってくるまで約 0.5 秒かかるが、ダブルホップの場合、約倍の 1 秒かかる計算になる。

サービス、タイの **Thaicom** 社が運営する **IPSTAR** がある。

メッシュ型ネットワークの特徴は、HUB 局からの制御部分はメッシュタイプであるが、VSAT 間の通信は直接通信となる。この場合、回線設計上若干アンテナの大きさは大きくなるがその分衛星の遅延はワンホップで済むため、音声通信などに向いている。このタイプのサービスには、スカパーJSAT 社が運営する **EsBird** サービスがある。また、財団法人自治体衛星通信機構の VSAT もこのタイプである。

VSAT は比較的小さなアンテナと小規模な設備で通信が構成されるため、非常災害時の通信に有用である。東日本大震災時でも、復旧時の臨時回線として VSAT が用いられている（**図 1・9**、**図 1・10**）。



図 1・9 東日本大震災時の VSAT の展開模様 (1)



図 1・10 東日本大震災時の VSAT の展開模様 (2)

(2) 移動体向けサービス

Ku 帯を用いた移動体サービスは従来、あまり一般的でなく TV 局で用いられている移動体 SNG のような例があるのみであった。近年、航空機や船舶で時として地上無線と交信することが困難な場合でも、インターネット接続の要望が増えたため、衛星を用いた **Ku** 帯での移動体向けのサービスが広がってきている。

航空機向けの衛星インターネットサービスとしては、現在 JAL の国際線では、PANASONIC AVIONICS 社のサービスを、国内線では GOGO 社のサービスを採用している。ANA の国際線では INMARSAT の SwiftBroadBand を利用した OnAir 社のサービスを採用している。こちらは、**L** 帯を用いたものである。

船舶向けのサービスとして、スカパーJSAT 社の **OceanBB** サービスがある。**OceanBB** サービスは、船上に設置した船舶用衛星通信システムと陸上のビジネス拠点を、通信衛星及びスカパーJSAT 社の提供する HUB 局を介して接続するもので、下り（拠点→船）の回線速度は最大 1 Mbps、上り（船→拠点）の回線速度は最大 512 kbps と従来の船舶通信に比べ高速な回線となっている。**OceanBB** サービスの概要を **図 1・11** に示す。

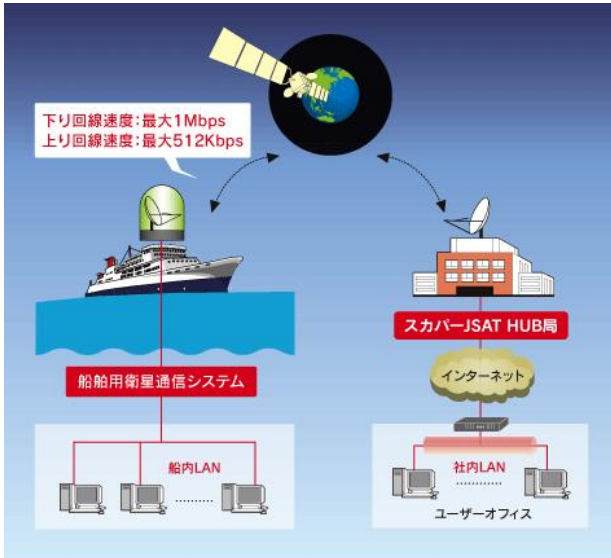


図 1・11 OceanBB のサービスの概要

OceanBB では、スカパーJSAT 社の衛星がカバーするインド洋、アジア、オセアニア海域に加え海外事業者（米国 KVH Industries, Inc 社）との連携により、太平洋、地中海、カリブ海などの海域でのローミング接続を提供しており、グローバルなサービスエリアを実現している（図 1・12）。

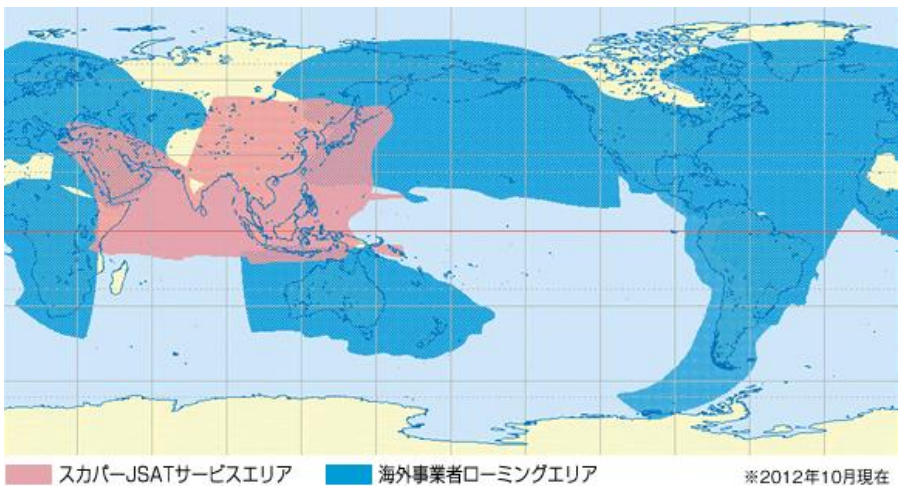


図 1・12 ローミングエリアを含めたサービスエリア

(3) 同報サービス

衛星を用いた、映像あるいは IP データの一斉同報は、衛星の同報性を生かした最も効率的なサービスの一つである。ここでいう映像の同報は、衛星放送が広く一般に放送されるものであるのに対して、ある限定した集団に対して限定的に同報される閉じたネットワークである。衛星を用いた同報サービスとして、スカパーJSAT 社の SkyAccess サービスがある。図 1・13 にこのサービスの概要を示す。このサービスでは、サービスの分界点はスカパーJSAT 社の提供する衛星へのアップリンク設備への入力点となっており、ユーザは映像或いは IP データといったコンテンツを地上回線を通じて、アップリンク設備に接続する。

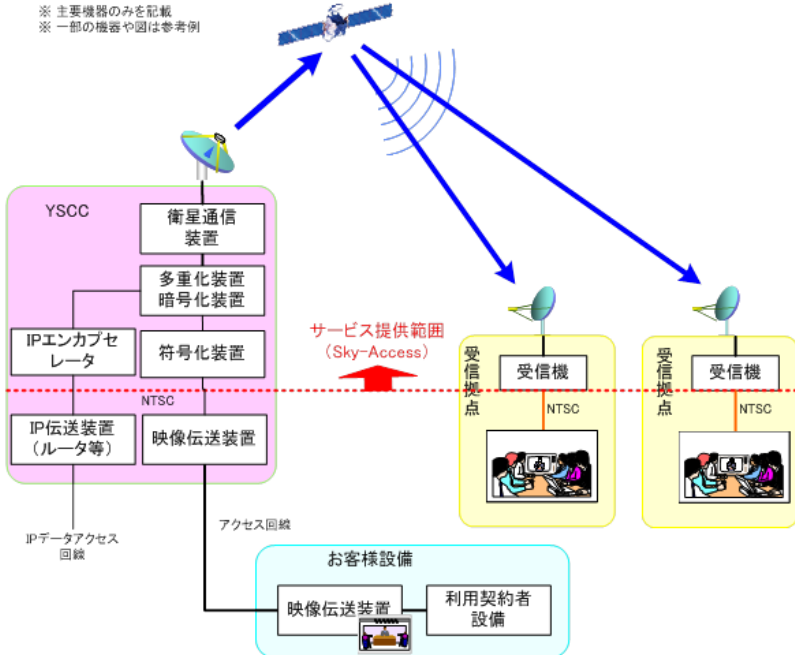


図 1・13 SkyAccess サービスの概要

SkyAccess サービスでは、映像も IP データも DVB のプラットフォーム上で多重し、1 本の回線としている。ユーザは所要の DVB のチャンネルを選択することにより、映像であるとか IP のデータを受信することができる。また、各々のストリームは、スカパーJSAT 社が提供する CAS (Conditional Access System) により暗号化されており、視聴権のないストリームは見ることができない。

SkyAccess サービス上では、IP データも映像チャンネルとして扱われる (図 1・14)。ユーザから入力された IP パケットは、IP エンカプセレータにより、DVB の TS パケット上のパイロード上に分割配置され、伝送される。受信器側では、専用の IP データ受信機により、TS パケットから IP パケットが抽出され、再構成された後 LAN 側に出力される。SkyAccess サービス

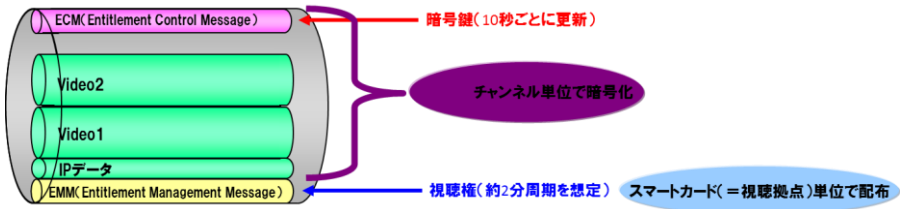


図 1・14 SkyAccess サービスの伝送イメージ

の代表的な利用用途は以下の通りである。

- ・気象情報提供者による、雷・気象・地震情報の日本全国に 24 時間 365 日配信
- ・本社からの社内放送に Sky-Access を利用 (幹部メッセージ, 広報コンテンツ, 研修など). 東日本大震災後はテレビ会議と連動しての会議中継や全社への連絡手段としても利用の例もある.
- ・東日本大震災直後, 被災地に向けて衛星から音楽を配信. コミュニティ FM 局に受信アンテナを設置し, 音楽配信 (現在は終了).

1-1-4 SNG

(執筆者: 亀井 雅) [2014 年 12 月 受領]

通信衛星を介して, ニュース素材を放送局に伝送するシステムを SNG (Satellite News Gathering) と呼ぶ (図 1・15). SNG は, 日本全国をサービスエリアとする通信衛星を使用することで, 全国に広がっている放送局間のみならず, 取材・中継現場で収集した映像・音声素材の即時伝送が可能となるため, 特に災害や事件, 事故などの緊急情報を迅速に提供する放送事業者においては不可欠のシステムである.

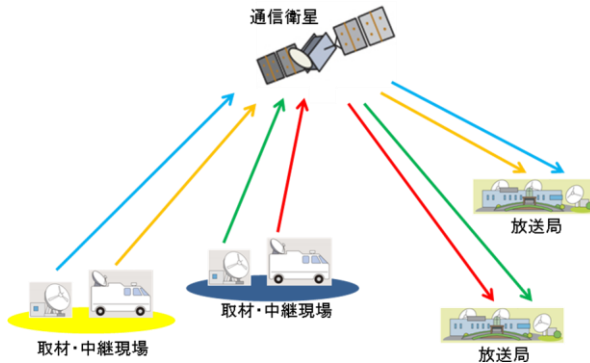


図 1・15 SNG 伝送システムの構成

SNG は, 1989 年頃からアナログ方式で運用が開始され, 伝送方式及び映像・音声素材ならびに圧縮方式のデジタル化の進展に伴い, 現在ではハイビジョン (HDTV) の狭帯域伝送を

実現している。複数の放送事業者が同一の通信衛星を使用するシステムであるため、日本国内では、Ku 帯通信衛星を使用する HDTV デジタル SNG 伝送システムに関して、必要最低限の共通技術仕様を規定することで、優れた運用性と効率的な伝送を確保している¹⁾。

ここでは、HDTV デジタル SNG 伝送システムを中心に、伝送システムの技術概要及び送受信地球局の設備概要を説明する。

(1) 伝送システムの技術概要

変調方式としては、1999 年に欧州で規格化された DVB-DSNG (Digital Video Broadcasting - Digital Satellite News Gathering) のうち、TC8PSK 及び QPSK を使用する²⁾。なお、通常の伝送では TC8PSK、降雨減衰を考慮し回線維持率を優先する場合には QPSK を使用することで、柔軟な運用を可能としている。近年では、2005 年に欧州で規格化された DVB-S2 (second generation) を使用しており、32APSK、16APSK、8PSK 及び QPSK が選択できる (図 1・16)。誤り訂正方式としては、外符号に BCH 符号、内符号に LDPC を使用している。ロールオフ率は 0.2、0.25 及び 0.35 から選択できる³⁾。

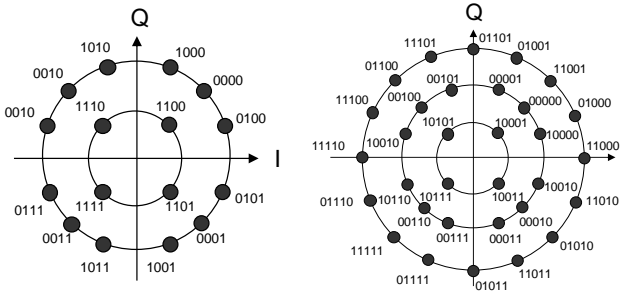


図 1・16 SNG で使用する変調方式の信号点配置 (左: 16APSK, 右: 32APSK)

映像の圧縮方式としては、1995 年に ISO/IEC で規格化された MPEG-2 を使用していたが、近年では、より高い圧縮効率が得られるため、2003 年に規格化された MPEG-4 AVC/H.264 を使用している。

表 1・5 SNG 伝送システムの伝送パラメータ例

項目	1/4 トラポーン使用例 ⁴⁾	1/8 トラポーン使用例 ⁵⁾
帯域幅	9 MHz	4.5 MHz
占有帯域幅	8.43 MHz	4.075 MHz
シンボルレート	7.458 Mbaud	3.606 Mbaud
変調方式	16APSK	32APSK
符号化率	3/4	3/4
ロールオフ率	0.2	0.2
情報レート	20.8 Mbps	13.1 Mbps
所要 C/N	11.3 dB	15.2 dB

周波数配置としては、帯域幅 27 もしくは 36 MHz のトランスポンダを、周波数分割して使用することにより、複数の伝送を可能としている。表 1・5 に伝送パラメータの例を示す。

特に、SNG として使用できる周波数帯域は限りがあるため、周波数の有効利用が求められる。例えば、変調方式として、ロールオフ率を 0.05 まで低減した伝送実験例がある。占有帯域幅を同一とした場合、0.02 のロールオフ率に対してシンボルレートを約 14 %拡張している⁶⁾。

(2) 送受信地球局の設備概要

SNG は、放送局もしくは取材・中継現場から送信し、放送局で受信するという伝送システムである。送信地球局としては、大口径アンテナを放送局に設置する固定型、高い機動性を有する車載型、更に航空機などによる持ち運びも可能となる可搬型に分けられる。表 1・6 に 14.0 ~ 14.5 GHz を使用する送信地球局の代表的な諸元を示す。

表 1・6 14.0~14.5 GHz を使用する送信地球局の代表的な諸元⁵⁾

種類	固定型	車載型	可搬型
アンテナ形式	カセグレン	オフセットグレゴリアン	オフセットパラボラ
アンテナ直径	4.5 m	1.4 m	75 cm
アンテナ利得	54.5 dBi	44.5 dBi	38.7 dBi
送信 HPA 飽和出力	300 W×2 合成	125 W	350 W
HPA 種類	TWT	TWT	TWT

受信地球局としては、大口径アンテナを放送局に設置する固定型が使用される。特に、車載型、可搬型の送信地球局では、使用可能となる容量や重量などに制限があるため、設備の小型化が求められる。例えば、可搬型の Ku 帯アンテナとして、反射鏡鏡面を金属メッシュで形成する展開型メッシュ反射鏡アンテナの開発事例がある(図 1・17)。収納時には航空機での輸送が可能となる容量を確保しながら、開口径 90 cm のオフセットパラボラを実現することで、40.8 dBi のアンテナ利得を得ている⁷⁾。可搬型の Ku 帯 HPA として、GaN 素子を使用する小型 SSPA (Solid State Power Amplifier) の開発事例がある。電源部と増幅部を分離可能とする構造とし、



図 1・17 展開型メッシュ反射鏡アンテナの開発事例 (左: 展開時, 右: 収納時)

航空機での輸送が可能となる容量を確保している。出力 80 W，利得 60 dB 以上の電気性能を得ている⁴⁾。

■参考文献

- 1) “HDTV デジタル SNG 伝送システム,” ARIB STD-B26 2.0 版, 電波産業会, 2008.
- 2) “Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and other contribution applications by satellite,” EN 301 210 V1.1.1, ETSI, 1999.
- 3) “Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications,” EN 302 307 V1.3.1, ETSI, 2013.
- 4) 石堂祐司, 根岸 聡, 望月 亮, 山田良男: “Ku 帯衛星通信向け屋外用小型 SSPA の開発及び衛星実通試験,” 2010 年映像情報メディア学会年次大会, 9-5, 2010.
- 5) “衛星通信年報,” 平成 24 年度版, KDDI 財団, 2013.
- 6) 大槻喜洋, 牧野鉄雄, 三浦勝志, 朝比奈朋宏, 辻 直樹: “SNG 5%ロールオフ率伝送実験,” 映像情報メディア学会技術報告, BCT2013-82, 2013.
- 7) 中澤 進, 長坂正史, 田中祥次, 石堂祐司, 近藤宏行: “オフセット型 SNG 用メッシュ反射鏡アンテナの電気特性,” 2011 年映像情報メディア学会年次大会, 13-2, 2011.

1-1-5 グローバルサービス

(執筆者: 山本和良) [2014 年 12 月 受領]

(1) ESV (Earth Stations on board Vessels, 船上地球局)

(a) 概要

海上における更なる高速通信の要望に対応するため, 2003 年の世界無線通信会議(WRC-03)において, 固定衛星業務(FSS)用帯域である C: 6/4GHz 帯, Ku: 14/12 GHz 帯(各 500 MHz 帯域)を船舶用に使用可能とする決議がなされて以来, 海上ブロードバンドサービスの導入が活発化している。

本システムは船舶 VSAT または船上地球局(ESV: Earth Station onboard Vessels)と呼ばれ, 日本においても平成 18 年 1 月に制度整備が行われた。

(b) ESV (船上地球局) 及びサービス

ESV の概要を図 1・18 に示す。ESV は業務用途(入港申請, 航路情報や気象情報入手, 業務用メールなど), 福利厚生(乗組員のウェブアクセス, 電子メール, IP 電話など), 客船では乗客へのインターネット接続サービスなどに利用されている。アンテナ径は C 帯用で 2.4~3.0 m 程度, Ku 帯用で 0.6~1.2 m 程度である。L 帯や S 帯の通信サービスと比べてアンテナはやや大きい, 最大で数 Mbps の通信速度を得ることができるほか, 以前は陸上でしか利用できなかった周波数を海上の移動通信で利用できるということが最大の特徴である。

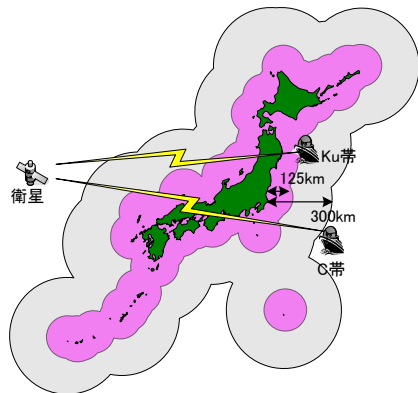



図 1・18 ESV の概要

ESV は特定の衛星を使うのではなく, 国

内外の固定衛星を選択して利用可能である。よって、衛星サービスプロバイダごとに使用する衛星が異なるほか、衛星アンテナや通信モデムも異なる。表 1・7 に ESV アンテナの一例を示す²⁾。ESV は固定衛星業務 (FSS) で運用するため、いずれのアンテナとも ITU-R 決議 902 に従い 0.2 度以内の追尾性能を有する必要がある。

表 1・7 船舶 VSAT アンテナ (Ku 帯) の一例

機種名, 外観	 KNS 製 SuperTrack Z12mk2	 Intellian Technologies 製 V60	 KVH Industries 製 TracPhone V11
アンテナ径	1.2 m	60 cm	1.1 m
重量	142 kg	59.5 kg	109 kg

(出典：KNS 社ホームページ・Intellian 社ホームページ・KVH 社ホームページ)

ESV で使用する C 帯及び Ku 帯は、陸上固定通信 (マイクロ回線など) と周波数共用しているため、上記 ITU-R 決議により利用できる海域やアンテナ最小口径に制限がある。具体的には、C 帯は沿岸国から 300 km 以遠、Ku 帯は 125 km 以遠において運用が許可されている。ただし、各主管庁の周波数割り当て状況により、上記制限を適用しない場合がある。例えば、日本周辺では Ku 帯の一部の周波数において制限海域はないほか、日本との間で二国間合意のある国々 (アジア、中近東を中心に 20 か国程度) では Ku 帯の制限海域が適応されない。

今後、アンテナ径の小型化や高速度化により一層の利活用が期待されるシステムである。

(c) ESV の技術基準における比較

2003 年に策定された WRC-03 決議 902 が、ESV における最も基本となる技術基準である。その第 1 附属書には ESV の規制上及び運用上の規定、第 2 附属書には ESV に適用される技術上の制限が示されている。

以下に、国内においては最も多く利用されている Ku 帯の技術基準についての比較を、ITU における規定内容と国内法において示す。

1) 水平線方向の電力

最大輻射電力密度	12.5 dBW/MHz 以下
最大輻射電力	16.3 dBW 以下

* RESOLUTION902 (WRC-03)

* 電波法施工規則 第 32 条 8 の 2

(14.0 GHz を越え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合)

2) 追尾制度

±0.2° 以内 (Peak-to-Peak)

* RESOLUTION902 (WRC-03)

* 電波法施工規則 第 32 条 8 の 2

(14.0 GHz を越え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合)

3) 軸外輻射電力

主輻射の方向からの離角 (θ)	最大輻射電力 (dBW/40 kHz)
2° 以上 7° 以下	33~25 $\log_{10} \theta$ 以下
7° 超え 9.2° 以下	12 以下
9.2° 超え 48° 以下	36~25 $\log_{10} \theta$ 以下
48° 超え 180° 以下	-6 以下

* RESOLUTION902 (WRC-03)

* 無線設備規則 第 49 条 24 の 2

(14.0 GHz を越え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合)

4) 交差偏波電力

ITU において交差偏波電力は規定されていない。

主輻射の方向からの離角 (θ)	最大輻射電力 (dBW/40 kHz)
2° 以上 7° 以下	23~25 $\log_{10} \theta$ 以下
7° 超え 9.2° 以下	2 以下

* 無線設備規則 第 49 条 24 の 2

(14.0 GHz を越え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合)

5) 空中線の大きさ

1.2m (条件により, 直径 0.6m まで小さくしたアンテナの設置を認可する場合がある。ただしその場合でも, 前述の水平線方向の電力, 追尾精度, 軸外輻射電力などは順守しなければならない)

* RESOLUTION902 (WRC-03)

直径 0.6 m 以上

* 無線設備規則 第 49 条 24 の 2

(14.0 GHz を越え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合)

6) 離隔距離など

沿岸国より公的に認知された低潮線からの最小距離は 125 km である。最小距離内においては, 関連主管庁による事前合意を条件とする

* RESOLUTION902 (WRC-03)

以下に掲げる海域において電波を発射してはならない。

区 別	海 域
14.0 GHz を超え 14.4 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合	本邦以外の沿岸国の低潮線から 125 km 以内の海域
14.4 GHz を超え 14.5 GHz 以下の周波数の電波を使用する場合	すべての沿岸国の低潮線から 125 km 以内の海域

* 無線局運用規則 第 262 条の 2

(2) 国際衛星

(a) 国際衛星回線

国際衛星回線は、衛星を介して複数の国の地球局を接続する回線をいい、音声、データ、映像などの伝送に用いられる。需要の多寡にかかわらず、内陸圏を含めて回線を容易に設定できる利点を有し、多対地伝送にも適している。ただし、伝送遅延の影響を避けるため、通常2衛星を経由する2ホップ以上の使用は行わない。

伝送方式は、デジタル多重化ハイアラキーに従って時分割多重した複数チャンネルを主に位相変調で伝送するデジタル伝送が主流である。回線の形態としては、従来の大型アンテナを有する関門地球局間の接続のほか、衛星回線の設定柔軟性を生かし外国側に設置された VSAT (Very Small Aperture Terminal : アンテナ口径 2.4 m~7 m 程度) との間の接続にも利用されている。

衛星中継器の多元接続技術には、周波数の異なる搬送波を配列する周波数分劇多元接続 (FDMA : Frequency Division Multiple Access) と、同一の周波数を時分割で使用する時分割多元接続 (TDMA : Time Division Multiple Access) などがある。TDMA 方式は大きな衛星中継器容量が得られるメリットがあるが、反面大規模な地球局設備が必要となり、近年の国際衛星回線では、地球局設備が簡易となる FDMA 方式が主流となっている。

変調方式としては、従来から広く国際衛星回線で用いられてきた4相 PSK (Phase Shift Keying) に加え、近年は8相 PSK (16 QAM (Quadrature Amplitude Modulation)) などの多値変調や強力な誤り訂正符号を導入して、地球局の小型化や衛星中継器当たりの容量の増大を図っている。

表 1・8 に代表的な衛星伝送方式を示す。

表 1・8 主要衛星伝送方式

	IDR 方式	IDR/TCM 方式	16QAM 方式
標準	IESS-308	IESS-310	IESS-316
伝送速度	64 kbps~44.736 Mbps	64 kbps~44.736 Mbps	1.5 Mbps~44.736 Mbps
変調方式	QPSK	8PSK	16QAM
誤り訂正	畳み込み符号, ビタビ復号	トレリス符号 (TCM)	畳み込み符号, ビタビ復号
符号化率	3/4	2/3	3/4, 7/8

(b) 国際衛星システム

国際商業通信衛星システムは、1960年代から、インテルサットやインマルサットのような政府間組織のもとで国際協力事業として建設、運用が行われてきた。1980年代に入り、米国民間企業から国際衛星通信システムの建設計画が発表され、米連邦通信委員会 (FCC) に事業化申請が提出された。米政府は、国際機構以外の衛星システム (別個衛星システム) に国際市場を開放して競争原理を導入することで、市場を活性化できるという自由競争促進の政策に沿って、別個衛星システムの参入を認めた (1988年にベンチャー企業のパンナムサットが大西洋地域において事業を開始)。その後、多くの国際衛星システムが参入し運用している。また、インテルサットやインマルサットは各々2001年、1999年に民営化されている。

(c) 衛星における通信技術の動向

近年における動向としてはスポットビームの高度化が挙げられる。ビーム半径が小さい（密度の高い）スポットビーム衛星は、L帯のインマルサット衛星のみであったが、2005年にThaicomがThaicom-4に100近いスポットビーム衛星を投入し、高周波数帯でのスポットビーム化が促進されたことにより、衛星容量も45 Gbpsと格段に向上し、High Throughput Satellite (HTS)の時代に突入した。近年では、インテルサット社がEPICと呼ばれるHTSの配備を発表するなど、更なる衛星の高度化が促進されている。

また、スポットビームによる周波数再利用技術の向上による衛星容量向上のみならず、無線通信技術の向上も促進され、1 MHzで送信可能なビットレートの向上も大幅に進んでいる。誤り訂正機能であるFEC (Forward Error Collection)には、LDPC (Low Density Parity Check)が登場し多値変調の導入を容易にしたほか、2点間で同一周波数を利用し周波数の効率的な利用を可能とするキャリア抑圧技術の導入やRoll-off低減によるガードバンド周波数の削減なども進められている。

■参考文献

- 1) 総務省電波利用ホームページ：衛星移動通信・ESV（船上地球局）の導入，<http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/system/satellit/move/index.htm#4000384>
- 2) (株)三菱総合研究所：平成24年度災害対策用衛星通信システムの高度化に関する調査検討報告書，平成25年3月。
- 3) 電波法無線局運用規則第二百六十二条の二。
- 4) 総務省告示102号「第二百六十二条の二の表下欄に掲げる海域において同条の規定を適用しない場合」。
- 5) 中国総合通信局：災害時における携帯電話基地局の船上開設に向けた調査検討報告書，平成25年3月。

■5 群-7 編-1 章

1-2 移動体衛星通信サービス

1-2-1 国内サービス

(執筆者：中須賀好典) [2014 年 12 月 受領]

移動体衛星通信サービスは、衛星通信の特徴である同報性、広域性を生かし地上インフラが利用できないエリア補間に加え、耐災害性を活かし地上インフラが利用できない時間帯においてその有効性が顕著である。国内に限定したサービスとしては NTT ドコモが提供しており、以下のそのシステムについて述べる。

(1) システム概要

NTT ドコモが提供する移動体衛星通信サービスは、日本全土を含む日本近海（沿岸約 200 海里）を半径約 600 km の 4 つのビームでカバーし、陸上及び海上における音声/データ通信サービスを提供している。

本移動体衛星通信サービスは、ワイドスターサービス¹⁾として 1996 年 3 月より提供が開始された。本システムは 2 機の衛星 (N-STARa, b) と 2 地点 (群馬, 茨城) の衛星基地局を介して、NTT ドコモの PDC 網に接続されるシステム構成であった。サービスは音声、ファクシミリ及び 4.8 kbps のデータ通信を提供しており、2000 年 3 月より下り最大 64 kbps の衛星パケット通信サービス²⁾を追加している。その後、IMS などの汎用 IP 技術を取り入れ、上り最大 144 kbps、下り最大 384 kbps にデータ通信速度を高速化したワイドスター II サービス³⁾の提供が 2010 年 4 月より開始された。ワイドスターサービスは並行してサービス提供されていたが、2014 年 3 月をもってサービス終了している。

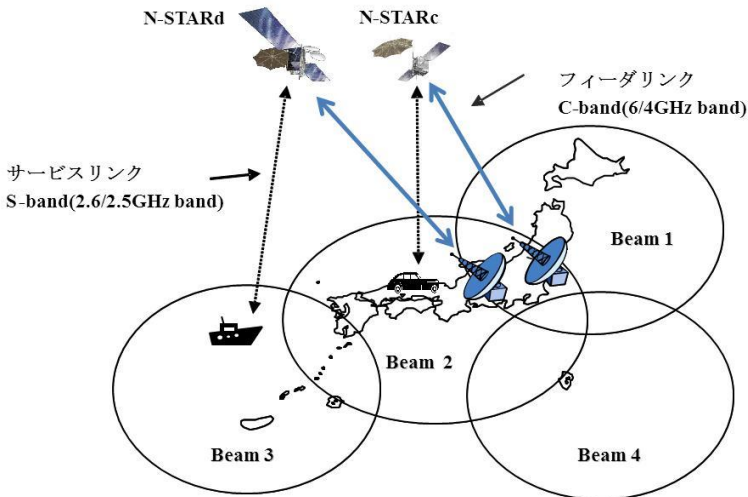


図 2・1 ワイドスターシステム構成概要

また、本サービスに利用されていた通信衛星 N-STAR は、3 軸姿勢制御の静止衛星であり、現在は、N-STARa, b 衛星の後継である N-STARc 及び N-STARd により運用中である。これら 2 衛星の主要緒元を表 2・1 に示す。S 帯送信機には、マルチポート増幅器が採用されており、衛星電力の効率的な利用を図るとともに、ビーム間のトラフィック変動に柔軟に対応できる構成となっている。また、a/b 号機に比べ c 号機は 5 倍、d 号機は約 10 倍に能力向上が図られている。

表 2・1 N-STAR 概要

衛星名	N-STARc	N-STARd
軌道位置	東経136度	東経132度
打上げ時期	2002年7月	2006年4月
搭載通信機器	S帯移動体通信機器	S帯移動体通信機器 C帯固定通信機器 Ku帯固定通信機器
搭載アンテナ (移動体通信用)	5.1 mφ アンテナ	5.1 mφ アンテナ
衛星高度	36000 km (静止)	36000 km (静止)

(2) ネットワーク構成

ワイドスターにおいて、回線交換通信系は、衛星用回線交換機を介してドコモ PDC 網で構成され、パケット交換通信系は、衛星パケット加入者系処理装置を経て、ドコモ PDC-P (PDC 移動パケット通信システム) 網に接続されていた。

表 2・2 サービス概要

		ワイドスター	ワイドスター II
通信衛星		N-STAR a/b, N-STAR c/d	N-STAR c/d
システム		PDC 回線交換, PDC パケット交換	IMT-2000 パケット交換, IMS(CS-IP)
サービス概要	音声	・ハーフレート音声 (PSI-CELP)	・高品質音声 (G.729a)
	データ	・パケット通信サービス 上り: 4.8 kbps, 下り: 最大 64 kbps	・パケット通信サービス (ベストエフォート型) 上り: 最大 144 kbps 下り: 最大 384 kbps
		・非電話データモデム通信 (上下ともに 4.8 kbps)	・64 k データ通信サービス (速度保証型)
独自サービス		・G3 FAX (モデム利用), PC FAX	・FAX ゲートウェイサービス (G3 FAX 接続サービス)

ワイドスター II では、新規開発した衛星基地局装置や衛星移動機に加えて、3G ベースのコアノード装置に移動体衛星通信に必要な機能を追加したコアノード装置 IMS をはじめとする汎用 IP 系の技術を利用したネットワークから構成される。また、パケット交換 (PS) ドメインのみで音声通信サービスとデータ通信サービスを実現しており、音声セッション制御に SIP

を採用するとともに、音声メディア伝送に RTP を使用している。

ワイドスターII サービスでは、ワイドスターサービスを継承しつつ、高速化に対応させ多彩な衛星コミュニケーションを実現している (表 2・2)。

(3) 無線方式諸元

ワイドスター、及びワイドスターII システムの主要諸元を表 2・3 に示す。周波数帯としては衛星移動機～衛星間のサービスリンクには S 帯 (2.6/2.5 GHz)、衛星基地局～衛星間のフィードリンクには C 帯 (6/4 GHz) を利用している。特に S 帯は、降雨減衰の影響が少ない周波数帯であり、天候による回線品質への影響を低減できる。また、変復調方式として $\pi/4$ シフト QPSK、同期検波方式を採用し、更に符号化利得の大きい誤り訂正方式を採用することによって、低 C/N での安定動作を実現している。ワイドスターでは畳み込み符号化ビタビ復号方式を採用し、ワイドスターII では Turbo 符号や複数の符号化率の適用によって高速化を実現している。

音声コーデックはワイドスターでは 5.6 kbit/s の PSI-CELP であったが、ワイドスターII では衛星性能の向上から IP 電話で汎用な 8 kbit/s の G.729a を採用している。また、衛星移動機間の

表 2・3 無線方式諸元

	ワイドスター	ワイドスターII
周波数帯	サービスリンク：2.6/2.5 GHz 帯 (2660～2690 MHz/2505～2535 MHz) フィードリンク：6/4 GHz 帯 (6345～6425 MHz/4120～4200 MHz)	
変復調方式	$\pi/4$ シフト QPSK	
アクセス方式	上り：FDMA 下り：TDM	上り：FDMA 下り：FDM (音声・速度保証)/TDM (ベストエフォート)
シンボルレート	7 ksps (音声通信) 77 ksps (BE パケット通信下りチャネル)	11 ksps (音声通信) 60.5 ksps (64 k 一定速度型パケット通信) 30.25/60.5/121 ksps (BE パケット通信上りチャネル) 242 ksps (BE パケット通信下りチャネル)
ロールオフ率	0.5	0.2
キャリア 周波数間隔	12.5 kHz 150 kHz (BE パケット通信下りチャネル)	15 kHz 75 kHz (64 k 一定速度型パケット通信) 37.5/75/150 kHz (BE パケット通信上りチャネル) 300 kHz (BE パケット通信下りチャネル)
誤り訂正	畳み込み符号化/ビタビ復号	畳み込み符号化/ビタビ復号 Turbo 符号化・復号 (64 k 一定速度型, BE パケット通信用チャネル)
音声符号化方式	5.6 kbit/s PSI-CELP	8 kbit/s G.729a

音声通話ではネットワーク側でコーデック変換処理を行わず衛星移動機での処理のみとして音質向上を図っている。他網との通話の場合は、コアノードにてコーデック変換処理が行われる。

ワイドスターII のデータ通信ではユーザニーズに合わせて 64 k データ通信用とベストエフォートのパケット通信用の 2 種類の回線を提供している。

(4) ワイドスターII の特徴的な技術

(a) 無線回線利用効率の向上技術

ワイドスターII では高速化と同時にシステム容量を確保するため、利用効率の向上を合わせて図っている。

① 音声通信

音声情報の RTP パケットと SIP 信号は、無線回線区間では IP ヘッダなどの冗長データを取り除き、それぞれ音声メディア情報と SIP メッセージのみが伝送される。また、SIP 信号はメッセージを圧縮することにより無線区間の伝送効率を上げている。

② データ通信

データ通信においては、できるだけ多くのユーザデータを効率的に伝送するため、無線通信状態を制御して無線リソース利用効率の向上が図られている。通信状態において、衛星移動機は送信データが一定時間なくなると上りチャンネルを解放し、連続受信状態から間欠受信状態へ遷移する。新たにデータが発生すると上りチャンネルを要求し、連続受信状態へ遷移してデータを伝送する。データがない場合、しばらくはパケット用 PDP プリザベーション状態で待っているため、データ発生に合わせて速やかにデータ通信が開始できる。

(b) 接続時間の短縮技術

静止衛星を利用した衛星通信は伝搬遅延が大きいため、接続時間の短縮が望まれる。

① 音声待受け状態管理

PS ドメインでの音声通信サービスでは、呼接続制御信号の送受信回数を削減することが接続時間の短縮に有効である。そこで、衛星移動機の電源 on 状態の場合は常に音声用 PDP コンテキストを保持し、プリザベーション状態で待受けする。これにより、PDP コンテキストのプリザベーション状態からアクティブ状態へ遷移するだけで SIP 呼制御を開始可能であるので、ワイドスターの回線交換方式と同等の音声接続遅延品質を達成している。

② メッセージ相乗り技術

衛星基地局は、レイヤ 3 において衛星基地局と衛星移動機間、及びコアノードと衛星移動機間のメッセージを相乗りさせることによって、待合せ遅延と呼接続制御信号の送受信回数を削減している。また、レイヤ 2 において複数コネクションのメッセージを相乗りさせることで無線回線リソースの有効活用を図ると共に遅延低減を図っている。

③ レイヤ 1 制御技術

パケット通信の高速化と同時接続数の確保のため、通信中のベストエフォート型パケット信号のチャンネル割当及びレート変更機能を有している。レイヤ 1 制御フレームでリソース割当制御と速度指定を合わせて実施する手順により、制御メッセージの往復に伴う伝搬遅延の影響を最小限に留めている。

■参考文献

- 1) 上野, 歌野, 山本, 西: “N-STAR 衛星通信システムの概要,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol.4, no.2, pp.6-9, Jul. 1996.
- 2) 中川, 藤谷, 小野, 中村: “衛星パケット通信サービス特集 システム概要,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol.8, no.2, pp.6-10, Jul. 2000.
- 3) 山本, 古川, 佐藤, 西, 堀川: “ワイドスターII衛星移動通信システム・サービス概要,” NTT DOCOMO テクニカル・ジャーナル, vol.18, no.2, pp.37-42, Jul. 2010.

1-2-2 グローバルサービス

(執筆: 木村佳史) [2014年12月 受領]

グローバルな移動体衛星通信サービスの代表として、インマルサットとイリジウムについて記載する。インマルサットは、「海上通信を改善するために必要な宇宙部分を提供し、これにより、海上における遭難及び人命にかかる通信、船舶の効率及び管理、海事公衆通信業務並びに無線測位能力の改善に貢献すること」を目的に1979年7月に設立された国際機関（国際海事衛星通信機構：International Maritime Satellite Organization）である。インマルサットは、1976年から運用を開始していた米国の商用海事通信衛星システム（マリサットシステム）を引き継ぐ形で1982年2月に船舶などを対象とした国際海事衛星通信サービスを開始した。1985年には、航空衛星通信を提供できるように条約と運用協定を改正した。更に、1989年1月に開催された総会において、船舶及び航空機に対する衛星通信サービスの提供に加えて、陸上移動体への衛星通信サービスの提供を加えるべく条約と運用協定の改正を行い採択され、条約は1997年に発効した。また、インマルサットは、1994年に国際海事衛星機構から国際移動通信衛星機構（International Mobile Satellite Organization）に名称変更をし、1999年4月にイギリス会社法に基づく一般商業会社に移行し民営化された。

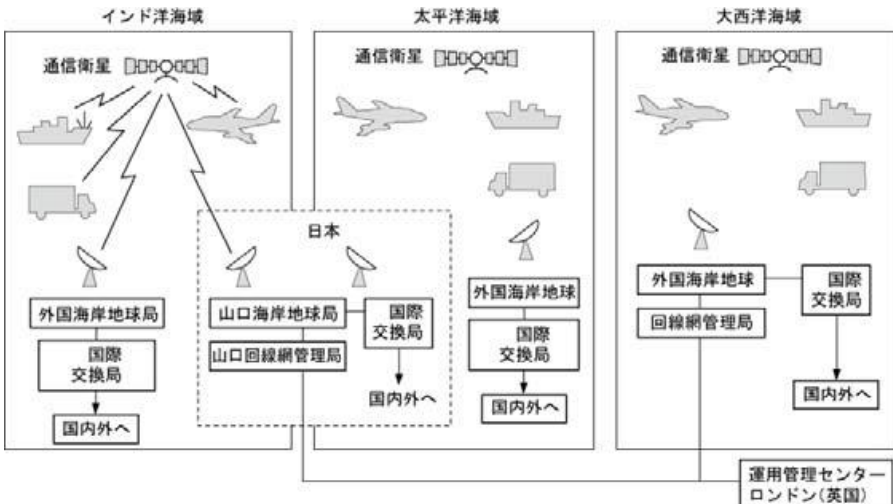


図 2・2 インマルサットシステムの構成

インマルサットシステムは、第3世代衛星または第4世代衛星を利用する2種類のネットワークに大別できる。インマルサットシステムは基本的に宇宙部分と地上部分から構成され、第3世代衛星を利用するシステム構成は図2・2に示すとおりである。

宇宙部分は、衛星、衛星の監視制御を行う追跡管制局 (TT&C : Tracking, Telemetry and Control station) 及び衛星の運用管理を行う衛星管制センター (SCC : Satellite Control Center) から構成される。地上部分は、船舶などに搭載される移動地球局 (MES : Mobile Earth Station)、陸上に設置された公衆網と移動地球局との接続を行う陸上地球局 (LES : Land Earth Station)、回線の割当制御を集中的に行う通信網管理局 (NCS : Network Coordination Station) 及びシステム全体の運用を統括する通信網運用センター (NOC : Network Operations Center) から構成される。

第4世代衛星を利用するシステムでは、SAS (Satellite Access Station) と呼ばれる地球局が上記 LES の代わりに用いられる。使用周波数帯としては、移動地球局と衛星間のサービスリンクは L バンド (1.6/1.5 GHz) を、陸上地球局と衛星間のフィードリンクは C バンド (6/4 GHz 帯) を使用している。第3世代衛星のインマルサットシステムは、図2・3に示すように、太平洋、インド洋、大西洋の東と西の海域をカバーする4海域構成となっている。現在運用中の衛星は1996年から1997年にかけて打ち上げられたインマルサットが所有するスポットビームアンテナを搭載した第3世代衛星と2005年から2008年にかけて打ち上げられた第4世代衛星 (3機)、予備衛星は第2世代衛星及び予備用の第3世代衛星となっている。

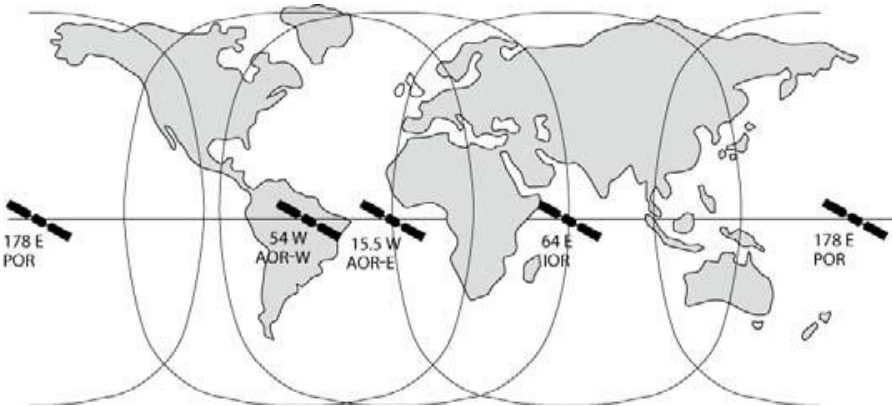


図2・3 インマルサットの衛星カバレッジ

移動地球局は、船舶、航空機、自動車などに設置される地球局であり、設置形態に応じて船舶地球局 (SES : Ship Earth Station)、航空機地球局 (AES : Aeronautical Earth Station) 及び陸上移動地球局 (LMES : Land Mobile Earth Station) に分類されているが、可搬形地球局としての利用も増加している。提供システムの内、インマルサット設立当初から船舶への音声、テレックス、ファクシミリ通信として利用されてきたアナログ FM 方式の A システムが2007年12月に廃止となったが、A システムのデジタル版として開発された B システム、小型船舶などへの搭載を目的に開発された双方向低速データ通信の C システム、航空衛星通信サービスのための

Aero システム，ポータブルな船舶，陸上用地球局で音声，データ通信のための M システムは 1990 年代初めに打ち上げられた第 2 世代衛星の時代から運用されている。M システムを小型・軽量化したミニ M システムは，1990 年代半ばに打上げられた第 3 世代衛星に搭載されたスポットビームを利用したシステムであり，可搬端末，船舶及び航空機に活用されている。2000 年初には，ミニ M システムを改良し 64 kbps のデータ伝送速度を可能とする M4 (multi media mini M) システムが開発され，電子メールなどに利用されている。M4 システムの応用システムとして，船舶へ搭載するシステム (F77, F55, F33) 及び航空機に搭載するシステム (Swift 64) も導入されている。なお，ミニ M (可搬型) と M4 は，2014 年 9 月，M は 12 月に廃止となった。また，2005 年末には第 4 世代衛星に搭載されたナローズポットビームによる BGAN (Broadband Global Area Network) サービスが可搬端末により開始され，ベストエフォート方式による最大 492 kbps のデータ通信が可能となっている。本システムの応用として，船舶用 (Fleet Broadband) システムと航空機用 (Swift Broadband) システムも 2007 年に導入されている。2007 年には，インマルサットは ACeS を買収し，ハンドヘルドタイプの端末である IsatPhone サービスを開始した。2010 年には，IsatPhone の改良版である IsatPhone Pro によりグローバルなサービスを開始した。

イリジウムシステムは 1987 年に米国モトローラ社により提唱されたグローバル通信システムである。米国のイリジウム社 (Iridium, Inc.) がイリジウムシステムの開発，製造を約 34 億ドルでモトローラ社に委託し，地上制御局 3 局，及び，TTAC (Telemetry, Tracking And Control) 地球局の建設を行った。電話サービスが 1998 年 11 月に開始されたが，初期投資が過大であったことや加入者数が当初計画より伸びなかったことなどにより，銀行への返済が滞りほどなく米国イリジウム社は破産状態となり，2000 年 3 月にサービス停止に至った。その後，2001 年に Iridium Satellite LLC 社としてサービスを再開した。

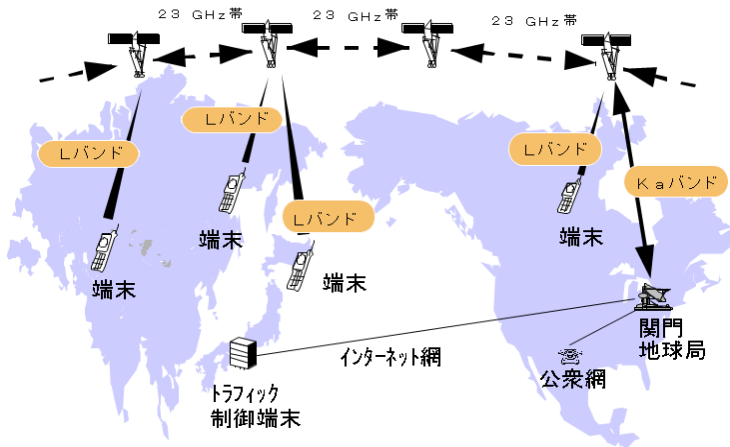


図 2・4 イリジウムシステムの構成

図 2・4 にイリジウムシステムの構成を示す。イリジウムは約 780 km の低軌道の上に，軌道傾斜角 86.6 度の円軌道 6 面に 11 機ずつ，計 66 機の衛星を周回させている。地上設備は，メイン

制御局 (MCF: Main Control Facility), バックアップ制御局, 閘門局, 携帯電話, 及び簡易固定局などの設備から構成される。更に衛星系は, 66 基の衛星のほかに予備衛星を含み構成される。衛星は, 携帯端末, 閘門局との間で通信を行い, 中継交換機を搭載することによりトラヒック情報, 呼制御情報を伝送する機能を持つ。更に, 衛星間中継リンクにより, 66 基の衛星はネットワークを構成しており, この衛星ネットワークにより音声信号及び必要なデータが伝送されることとなる。

メイン制御局は北米に設置され, その機能は衛星姿勢制御などの衛星系の制御及びテレメトリ情報による衛星系の監視制御, 衛星ネットワーク系の監視, 制御を行う。端末としては, 旅行・ビジネスなどで使用する小型携帯端末, 自動車・航空機・船舶などに搭載する可搬形端末が利用されている。イリジウムシステムの無線リンクは, フィーダリンク (衛星・閘門局), ユーザリンク (衛星・ユーザ端末), 衛星間リンク (衛星・衛星) からなる。また, 各回線における使用周波数帯域は, 上りフィーダリンクが 29.1~29.3 GHz, 下りフィーダリンクが 19.4~19.6 GHz, ユーザリンクが上り, 下りとも 1621.35~1626.5 MHz, 衛星間リンクが 23.18~23.38 GHz である。ユーザリンクの多元接続方式として, TDMA (time division multiple access) 方式が採用されている。イリジウムシステムの特徴の一つはユーザリンクの回線マージンが 16 dB と大きくとっていることであり, これにより通話品質の向上を図っている。また, これまで衛星と通信を行うためには, 衛星が見通せる場所にいることが絶対条件であったが, 回線マージンを 16 dB としたことによりこの条件をある程度緩和し, 多少の障害物があっても通信を可能とした。

衛星の物理的イメージを図 2・5 に示す。衛星には, 送受信機, 中継交換機のほか, ユーザリンク用アンテナとして, 1 面で 16 ビームを照射するフェーズドアレーアンテナを 3 面搭載している。フェーズドアレーアンテナにより, ビームの照射位置を機械装置によらず電磁波の位相合成による電氣的制御で行うことを可能としている。1 衛星で 48 スポットビームを照射し, 1 ビームは直径 400 km の地域をカバーし, 1 衛星のカバー範囲は直径約 4500 km の円内にある。衛星には, その他, フィーダリンク用アンテナを 4 台, 衛星間通信用アンテナを 4 台搭載している。

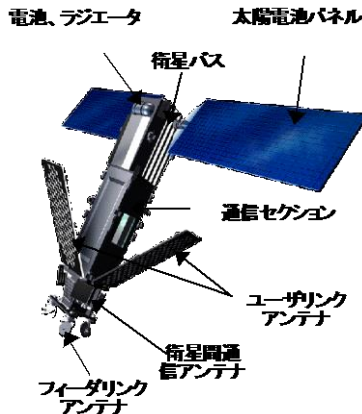


図 2・5 衛星の物理的イメージ

関門局は、フィードリンク用のアンテナ及び送受信機を含む地球局3局、呼制御及び位置登録を行う移動通信交換機（MSC：Mobile Switching Center）など及び移動通信交換機と地上網とのインタフェースをとる中継交換機から構成され、衛星を介して端末を監視し、制御を行うことにより、端末と端末あるいは端末と地上網の電話端末の接続を行う。

小型携帯端末 ISU（Iridium Subscriber Unit）の平均出力は0.3 W程度であり、衛星追尾を必要としないよう無指向性のアンテナが用いられている。音声コーデックには、2.4 kbpsの AMBE（Advanced Multi-Band Excitation）方式が用いられている。

2001年6月にデータ通信サービスが開始されるとともに、2002年9月には、SBD（Short Burst Data）と呼ばれるパケット型の小容量データ伝送（端末送信：1960 バイトまで、端末受信：1890 バイトまで）サービスが開始され、モジュール型の端末による航空機などの位置情報の管理などに応用されている。更に、2003年6月にはSMS（Short Message Service）が開始され、応用範囲が広がっている。2008年には、OpenPort と呼ばれる最大128 kbpsまでのデータ通信が可能な船舶用端末によるサービスが開始された。

最後に、インマルサットとイリジウム以外の主な移動体衛星通信サービスを表2・4にまとめる。

表2・4 その他の衛星移動通信システムの主要諸元

	LightSquared	Thuraya	Globalstar	Orbcomm
開始時期	1996年	2001年	2000年	1995年
衛星軌道 衛星数	GSO 3基	GSO 3基	LEO 高度1414 km 軌道傾斜角52° 8面計32基	LEO 高度800 km 軌道傾斜角45° 4面計30基 ^{(*)2}
衛星諸元	打上重量 2850 kg/5390 kg 三軸制御 発生電力 3 kW/12 kW 寿命10年/15年	打上重量5250 kg 三軸制御 ^{(*)1} 発生電力11 kW 寿命12年	重量450 kg 三軸制御 発生電力1.1 kW 寿命7.5年	重量38.5 kg 三軸制御 発生電力160 W 寿命4年
周波数 [MHz] サービスリンク	上り1631.5-1660.5 下り1530-1559	上り1626.5-1660.5 下り1525-1559	上り1610-1621.35 下り2483.5-2500	上り148-150.05 下り137-138
アクセス方式 サービスリンク	FDMA/SCPC	TDMA/FDMA	CDMA/FDMA	FDMA
主要サービス	音声、ファクシミリ、データ（～4.8 kbps）、ショートメッセージ	音声、ファクシミリ、データ（～444 kbps）、ショートメッセージ	音声、ファクシミリ、データ（～9.6 kbps）、ショートメッセージ	双方向メッセージ データ、測位 下り4.8 kbps 上り2.4 kbps
ユーザ端末	B5～ブリーフケースサイズ（アンテナ利得8～12 dBi）	携帯電話型 可搬型	携帯電話型 モジュール型	データモジュール型が主流

備考 (*1) 大型反射鏡アンテナ（12×16 m）×2面搭載

(*2) この他極軌道に1基

■参考文献

- 1) 衛星通信年報編集委員会：“衛星通信年報 2007 年度版,” 2007.
- 2) T. Mizuno：“Present Status and Future Outlook of Mobile Satellite Communications,” MJISAT2007, Nov. 2007.
- 3) 下世古, 飯田：“世界の非静止衛星通信,” 電波新聞社, 1994.
- 4) (財)国際通信経済研究所：“S 帯を利用した移動体衛星通信システム技術の調査検討報告書,” 2005.
- 5) Thuraya Satellite Telecommunications URL <http://www.thuraya.com/>
- 6) Globalstar URL <http://www.globalstar.com/>
- 7) Orbcomm URL <http://www.orbcomm.com/>
- 8) LightSquared URL <http://www.lightsquared.com/>

■5 群-7 編-1 章

1-3 測位サービス

(執筆著者：岸本統久，村上滋希) [2015年2月 受領]

衛星測位システムはユーザが衛星からの信号を受信することで地球上のどの位置にいるかを知るための仕組みである。今日では船舶の航行や測量，カーナビゲーションシステムに加え，受信機の小型化・低電力化に伴いスマートフォンを初めとするポータブル端末においても衛星測位の利用が可能となった。ユーザ位置が簡単に取得できることで，様々な位置情報を活用したサービスが発展し，私たちの生活をより豊かにしたことは広く知られている。

2014年現在，衛星測位システムはアメリカの GPS (Global Positioning System)，ロシアの GLONASS (Global Navigation Satellite System)，欧州の Galileo，中国の Beidou，インドの IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) が整備，運用されている。我が国においても2010年9月11日に準天頂衛星システム (QZSS : Quasi-Zenith Satellite System) の初号機「みちびき (QZS-1)」が打上げられ，2010年12月15日に技術実証を開始，2011年6月22日に測位信号の提供を開始した。多くの測位衛星が地球を周回し，測位信号を送信することで，世界中で衛星測位サービスを楽しむことが可能になっている。

本節では衛星測位システム全般を述べるために 1-3-1 項において衛星測位の基本的な仕組みや測位手法を述べる。また 1-3-2 項では，現在日本で JAXA や関連機関が運用・実証する準天頂衛星初号機システムを例に，衛星や地上システムの構成，特徴を述べる。1-3-3 項では各国の衛星測位システムの運用状況や整備計画を述べ，将来の衛星測位の展望を述べる。

1-3-1 衛星測位の仕組み

本項では衛星測位システムを利用したユーザの位置算出手法やその過程で発生する誤差とその低減手法，そして高精度測位の手法を述べる。本項では主に文献 1), 2) を参考にした。

(1) ユーザによる測位の仕組み

ユーザ受信機の位置 (x_r, y_r, z_r) を求める場合，衛星測位では基準となる複数の衛星位置及び，それらの衛星と受信機間の距離が必要になる。ある衛星 i の位置 (x_s^i, y_s^i, z_s^i) は衛星の測位信号に重量され送信される航法メッセージ³⁾ を元に算出する。衛星 i と受信機間の距離は衛星における信号送信時の時刻 t_s^i と受信機における信号受信時の時刻 t_r の差で表される信号の伝送時間 τ に光速 c を乗じ距離を算出する。この距離を一般的に擬似距離と呼ぶ。以下にユーザ受信機で擬似距離を算出する手法を整理する。

衛星 i は PRN コード (Pseudo Random Noise : 擬似雑音コード) と呼ばれる (+1, -1) のいずれかの値をとる一定周期内で統計的にランダムな性質を持つコードが割り当てられ，このコードを元に測位信号を変調し，ユーザに送信している。受信機は受信したい衛星の PRN コードと同じパターンのレプリカ信号を用い，復調された PRN コードに対して時間差 t_0 を与えながら相互相関係数を計算する。図 3・1 に示すように PRN コードは統計的にランダムであるため，受信した PRN コードとレプリカが一致しない場合は，相互相関係数は 0 付近の値となり一致した場合には最大値 1 となる。この性質を利用して受信した PRN コードとレプリカの相互相関係数が最大値 1 となるときに与えた時間差 t_0 が信号の伝送時間 τ となる。また，ほかの衛星からの信号は，レプリカと PRN コードが異なるため相互相関係数は常に 0 付近の値となるた

め目的衛星のみのコードを選択して受信できる。このときに擬似距離を正確に計測するために、測位衛星及びユーザ受信機の時計の正確な時刻が必要となる。各衛星測位システムは、基準となる時系と各衛星に内蔵している原子時計の時刻には差があるため、この差に対して時刻補正値を算出し、航法メッセージに格納しユーザに送信している。ユーザ受信機は送信されるこの時刻補正値を用い、衛星の正確な時刻を知ることができる。一方で、ユーザ受信機側が備える時計は、原子時計のように安定度の高い時計ではないことが多く、基準となる時刻に対して受信機時計誤差 d_r を持つ。

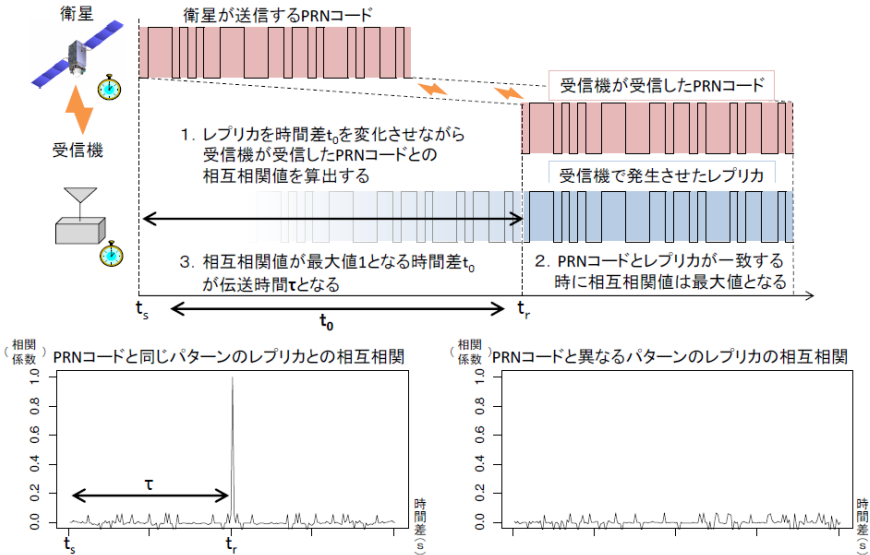


図 3・1 伝送時間の算出

以上より衛星 i とユーザ受信機間の擬似距離 ρ_i は、式(3・1)のように表現することができる。

$$\rho_i = \sqrt{(x_s^i - x_r)^2 + (y_s^i - y_r)^2 + (z_s^i - z_r)^2} + cd_r \quad (3 \cdot 1)$$

式(3・1)は4つの未知数 (x_r , y_r , z_r , d_r) を含む方程式となる。したがって、4基以上の衛星から信号を同時に受信することができれば方程式の解が定まり、ユーザ受信機の位置が定まる。また同時に受信機時計誤差 d_r も定まるため正確な時刻も求められる。実際は観測において様々な誤差が発生するため、一般的には5基以上の衛星から信号を受信し最小二乗法を用いて位置を算出する。このPRNコードを用いた測位手法はコード測位と呼ばれている。

また、衛星と受信機間の幾何学的な距離 r は、衛星から信号が送信されたときの搬送波の位相 ϕ_s と受信機で信号を受信したときの搬送波の位相 ϕ_r 、衛星と受信機間にある搬送波の波の数 N 、搬送波の波長 λ を用いて $r = (N + \phi_r - \phi_s) \lambda$ と表現することができる。搬送波の位相は精度よく計測できる一方で、波の数 N は観測できず不定となる。このときの N は整数アンビギュイティと呼ばれ、これを算出することができれば精密に衛星と受信機間の距離を算出するこ

とが可能になる。この搬送波の位相を利用した測位手法は搬送波位相測位と呼ばれる。現在では整数アンビギュイティ N を推定し、高精度に測位を行う手法が実現されている。

(2) 衛星測位の誤差要因と誤差低減手法

衛星測位において発生する誤差は、衛星時計誤差、衛星軌道誤差に代表される衛星測位システムが起因となって発生する誤差、電離層遅延誤差や対流圏遅延誤差に代表される信号が大気中を通過する際に発生する誤差、受信機ノイズ、干渉波、マルチパスの影響など受信機及び測位環境によって発生する誤差が挙げられる。衛星測位における誤差要因を図 3・2 に示し、以下に誤差の詳細とその軽減手法を整理する。

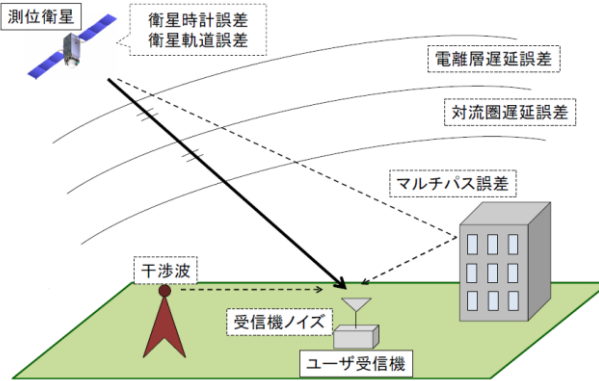


図 3・2 衛星測位の誤差要因

衛星時計誤差とは衛星時計と基準となる時系との実際の時刻差と航法メッセージから送信される時刻補正値の差異によって生じる誤差である。衛星時計誤差は擬似距離に換算して1ナノ秒当たり約30cmの誤差となるため無視できない誤差要因である。衛星軌道誤差とは実際の衛星位置と航法メッセージに格納されている軌道予報値との差異によって生じる誤差である。これらの誤差は測位サービスの提供側が時刻補正値や軌道予報値の精度を向上させることで、誤差を低減することが可能となる。

大気中の電波伝搬において発生する誤差は主に電離層遅延誤差と対流圏遅延誤差である。電離層遅延誤差は信号が電離層を通過する際に発生する誤差である。電離層内の信号の伝搬速度は経路における総電子数に依存しており、昼夜間での変動や緯度に依存した変動、太陽活動による地磁気の擾乱の影響を受け、変動する。天頂方向の遅延量はおおむね2m~10mである。電離層内での信号の速度は搬送波の周波数の2乗に反比例する性質から、複数周波数帯の信号を受信できる端末を用い電離層遅延誤差の除去が可能となる。また、1周波数帯の信号のみ受信可能な端末の場合は電離層遅延量のモデルを用い誤差の低減が可能である。代表的に利用されるモデルとして経験的なモデルを元に作られたクロバッチャモデルがあり、航法メッセージに含まれるパラメータを元に電離層遅延量を推定し、遅延量による誤差を1m~5m程度に低減することが可能である。また、対流圏遅延誤差は信号が対流圏を通過する際に発生する誤差であり、大気中の窒素や酸素、水蒸気などの影響による遅延誤差である。海面上での天頂方向

の遅延量はおおむね 2.3 m～2.5 m である。対流圏遅延誤差は対流圏遅延量のモデルを用いて誤差低減が可能であり、代表的なモデルとして気体の法則に基づいて生成されたザースタモイネンモデルや実験によって求められた観測値と水蒸気を含まない大気の屈折指数の関係によって生成されたホップフィールドモデルなどが利用され、遅延量における誤差を 0.1 m～1 m 程度に低減することが可能である。

受信機内で発生するノイズや干渉波の影響による信号雑音比の低下はアンテナの感度の向上やフィルタによる帯域の選択により誤差低減が可能である。マルチパス誤差は地表や水面、山岳、建物などの影響で生じる反射波や回折波などが遅れて受信機に到達することにより発生する。マルチパス低減アンテナの利用や信号処理手法の利用で低減が可能となる。

誤差を含む観測量を用いて測位を行う場合、測位演算に利用する衛星の幾何学的配置も重要になる。図 3・3 に示すように、衛星からの誤差範囲が同じでも衛星の幾何学配置によって、算出される測位結果の範囲が大きく異なる。

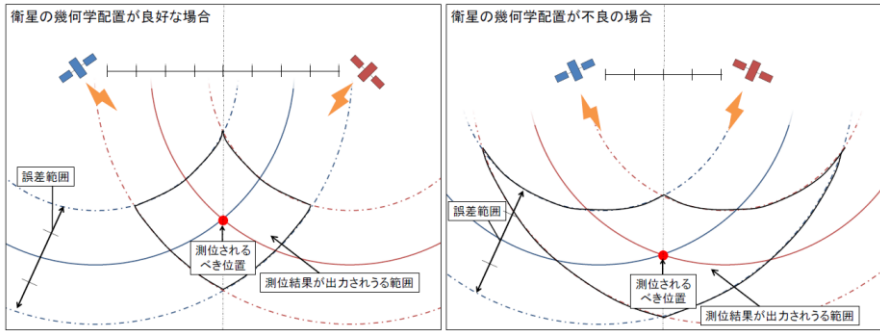


図 3・3 衛星の幾何学配置による誤差範囲の変化 (模式図)

(3) 高精度測位の手法

ここまで述べた測位手法や誤差軽減手法に加え、より高精度な測位を実現するための手法が考案されている。ここでは DGPS (Differential GPS) 方式、RTK (Real Time Kinematic) 方式、PPP (Precise Point Positioning) 方式について述べる。

DGPS 方式は位置が既知の基準局を用い測位誤差量を基準局の位置と測位演算結果の差から算出できることを利用した測位手法である。算出された測位誤差量を通信などで基準局からユーザ受信機に伝送することで、ユーザ受信機で誤差成分を取り除くことができ、高精度に位置を算出することができる。また、RTK 方式は搬送波位相測位を利用し、位置が既知の基準点の観測情報を用い、基準点からの基線ベクトルを得ることでユーザ位置を得る手法である。観測量の差分を利用することで、誤差成分を取り除くことができ、搬送波位相測位におけるアンビギュイティを解くことが可能になる。搬送波位相測位が可能な受信機を用い、通信などを経由し基準点の観測データを随時に受信することで、リアルタイムに高精度な測位が可能となる。

また、基準点を複数利用し、ユーザの付近に仮想的な基準点を生成し、その基準点から RTK を行う方式をネットワーク RTK と呼ぶ。DGPS や RTK に代表されるユーザ受信機のほかに位

置が既知の基準点を用いた測位手法を相対測位と呼ぶ。衛星時刻や衛星軌道、電離層遅延、対流圏遅延による誤差は時間的、空間的に相関する傾向があるため、相対測位では基準点からの距離が離れるほど、また基準点からのデータが遅延するほど精度が劣化する。1 周波数帯のみを利用したコード測位の DGPS 方式では誤差約 1 m、搬送波位相測位を用いた RTK 方式では誤差約数 cm の精度で測位が可能である。

一方で、基準局を用いずユーザー受信機単独で測位する手法を相対測位に対して単独測位と呼ぶ。単独測位において高精度な測位を実現する手法として PPP 方式が挙げられる。PPP 方式は高精度な衛星軌道、時計情報などの補強情報を用い、搬送波位相測位を単独で実施する測位手法である。搬送波位相測位が可能な受信機を用い、補強情報を得られれば、場所を問わず測位が可能な方式である。PPP 方式では搬送波位相測位において不確定要素となる整数アンビギュイティ N を推定する際に、 N を整数値ではなく実数値として推定する。この場合約 10 cm の精度で測位が可能となる。また PPP-AR 方式 (Ambiguity Resolution) はアンビギュイティ N を整数値として推定する方式であり、数 cm の精度で測位が可能となる。必要な精度や利用可能な受信機の種類、基準点からの観測情報の有無など利用状況に応じて様々な測位手法を選択することができる。

1-3-2 準天頂衛星システムの構成と特徴

2014 年現在、我が国では JAXA や関連研究機関が開発実証した準天頂衛星初号機「みちびき」1 基が準天頂軌道を周回し測位サービスを提供している。また内閣府により実用準天頂衛星システムの整備が進められ、今後 2017 年までに新たに 3 基の衛星が打上げられ、「みちびき」を加えて 2018 年に 4 基体制で実用サービスを開始する予定である。これらの衛星測位サービスを実現するためには、軌道上を周回する測位衛星の開発・運用に加えて、軌道予報値や時刻補正値の算出、航法メッセージ生成など衛星測位に必要な様々なシステムの整備が必要である。

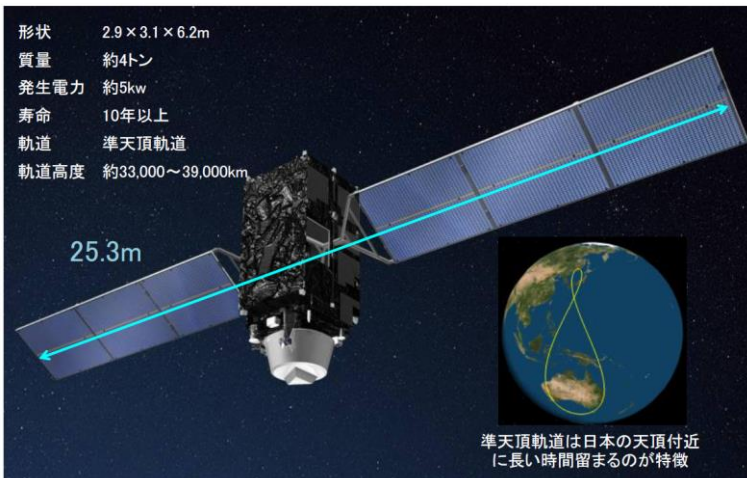


図 3・4 みちびきの諸元

本項では現在、JAXA や関連研究機関が運用・実証している準天頂衛星初号機「みちびき」システムを例に準天頂衛星システムの構成や特徴を述べる。

(1) 衛星諸元と軌道

準天頂衛星初号機「みちびき」は2010年9月11日に打上げられ、2014年現在、1基体制で運用されている。送信される信号は中心周波数1575.42 MHzのL1C/A、L1-SAIF、L1C、1227.60 MHzのL2C、1176.45 MHzのL5、1278.75 MHzのLEXで構成される4周波数6信号のL帯測位信号である。2011年6月22日にL1C/A及びL2C信号、同7月14日にL5及びL1C信号測位信号の提供を開始した。L1C/A、L1C、L2C、L5信号は民生用の測位サービスで利用され、L1-SAIF、LEX信号は実証実験用の信号として利用されている。

「みちびき」の諸元を図3・4に示す。「みちびき」の軌道は対地同期軌道の1種である準天頂軌道であり、地表面では日本やインドネシア、パプアニューギニア、オーストラリアの上空を8の字を描くように通過する軌道である。軌道周期は約23時間56分であり、日本の天頂付近に長時間滞在するように、日本上空では最も高度が高く、地表からの見掛けの速度が最も遅くなるように軌道が設定されている。

(2) 地上システムの構成

準天頂衛星システムの地上システムの構成を図3・5、測位モニタ実験局の配置を図3・6に示す。衛星測位システムの主な役割の一つは衛星の軌道推定による軌道予報値の生成や衛星時計の時刻補正値の算出による航法メッセージの生成である。各地に配置された測位モニタ実験局は測位衛星からの信号を観測し、観測情報は地上回線を通じてマスターコントロール実験局に集約される。マスターコントロール実験局は、観測情報を元に、衛星の軌道推定による軌道予報値の生成、衛星時計の時刻補正値の算出、信号の品質、軌道予報値、時刻補正値、衛星のヘルス状態などを評価し、航法メッセージを生成する。また、評価の際に、軌道予報値や時刻補正値の精度悪化や信号の品質悪化を検出した場合は航法メッセージにアラートフラグが付与され、ユーザに測位信号が利用できない旨を通知する。航法メッセージは準天頂衛星追跡管制局を経由して衛星にアップロードされ、測位信号に重畳されユーザに送信される。

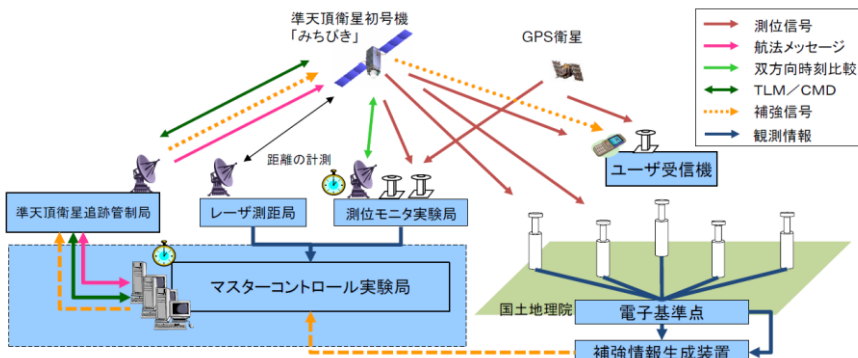


図3・5 準天頂衛星システムの地上システムの構成

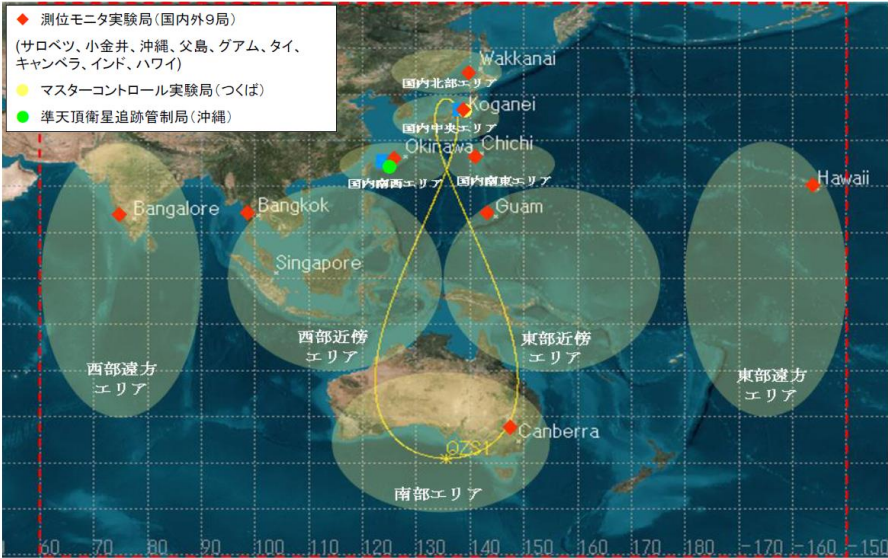


図 3・6 測位モニタ実験局の配置

(3) 準天頂衛星システムの特徴

準天頂衛星システムの大きな特徴として補完効果と補強効果が挙げられる。補完効果では常時天頂から他国の衛星測位システムと相互運用性のある信号が送信されることでビル街や山間部など受信環境が悪い場合でも利用可能な衛星数が増え、アベイラビリティ²⁾が向上する。補強効果では衛星から送信される高精度軌道・時刻情報や電子基準点における観測データを用いた生成した補強信号を用いた測位手法が技術実証され、精度やインテグリティ³⁾が向上する。現在はデータレート 250 bps の L1-SAIF 信号³⁾ を利用したサブメータ級補強信号実験やデータレート 2000 bps の LEX 信号³⁾ を利用した cm 級補強信号実験が実施されている。

1-3-3 各国の衛星測位システムの開発・運用状況

各国で運用されている衛星測位システムのなかで、全世界にサービスを提供している衛星測位システムを GNSS (Global Navigation Satellite System) と呼ぶ。アメリカの GPS、ロシアの GLONASS、欧州の Galileo、中国の BeiDou が GNSS として衛星測位システムを計画・開発・運用している。一方で日本の準天頂衛星システムやインドの IRNSS といった傾斜対地同期軌道や静止軌道を用い、地域を限定してサービスを行うものを RNSS (Regional Navigation Satellite System) と呼ぶ。また、SBAS⁴⁾ (Satellite-Based Augmentation System) と呼ばれる広域 DGPS のための補強信号のサービスも運用されている。本項では GNSS や RNSS、SBAS の計画、開発状況を述べ今後の衛星測位サービスの展望を述べる。

²⁾ アベイラビリティ：衛星測位システムが利用できる時間率で示される性能指標。

³⁾ インテグリティ：測位結果の信頼性に係る性能指標（測位結果が信頼できない場合においてそれを検知しユーザに対して警報を通知する能力を含む）。

(1) GNSS・RNSS の開発・運用状況

2014 年時点における各国の GNSS, RNSS の開発状況⁵⁾を整理する。表 3・1 に各国の衛星測位システムの計画, 最初の衛星の打上げ月及び現在の運用状況を示す。アメリカが開発, 運用する GPS では予備基を含む 39 基の衛星が軌道に打上げられ測位サービスが運用されている。GPS は現在, 衛星の近代化として旧型衛星のサービスを停止し新たな衛星への入れ替えが進められている。現在では GPSIII 衛星が開発され 2016 年より随時打上げが予定されている。衛星の設計寿命の向上やアベイラビリティやインテグリティの向上が図られ民生用信号の L1C/A, L1C, L2C, L5 信号, 軍用のコードとして精度の高い L1P(Y), L2P(Y), L1M, L2M 信号が送信予定である。

ロシアの GLONASS では衛星の更新が実施され, GLONASS-M 衛星に加え, 新型衛星の GLONASS-K の打上げが開始された。衛星の設計寿命の向上が図られ, 相互運用性の向上のために FDMA 方式の信号に加え CDMA 方式の信号の追加が予定されている。欧州の Galileo は現在 6 基打上げられ 2018 年を目途に全衛星が配備される予定である。また, 測位サービス以外にも衛星で船舶や航空機, 個人端末からのビーコンを受信しレスキューセンターに位置情報を集約, 救援活動に役立てるサーチアンドレスキューサービスが整備, 運用される予定である。2012 年に地域限定でサービスを開始した中国の Beidou では, 補強信号の配信やショートメッセージサービスを含めたグローバルサービスを 2020 年を目途に開始する予定である。

日本の準天頂衛星システム (QZSS) は 2018 年より 4 基体制でサービスを開始され, また宇宙基本計画⁶⁾では 2023 年度を目途に 7 基体制でサービスの運用が実施される予定である。インドの IRNSS は 2013 年に最初の衛星が打上げられ, 現在では 3 基でのインド周辺諸国に対しサービスを提供している。2015 年末に 7 基の衛星が配備される予定である。

表 3・1 各国の衛星測位システムの計画・運用状況

開発国	米国	ロシア	欧州	中国	日本	インド	
運用主体	アメリカ国防総省	ロシア連邦宇宙局	欧州委員会	中国国家航天局	内閣府・QSS (2014年現在ではJAXAが運用)	インド 宇宙研究機関	
分類	GNSS			RNSS			
システム名	GPS	GLONASS	Galileo	Beidou	QZSS	IRNSS	
運用状況	運用中	運用中	整備中	整備中	整備中	整備中	
接続方式	CDMA	FDMA (CDMA信号の追加が予定されている。)	CDMA	CDMA	CDMA	CDMA	
最初の衛星の打上月	1978年2月	1982年10月	2005年12月	2007年4月	2010年9月	2013年7月	
2014年末時点での軌道ごとの衛星数	合計	39基	28基	6基	14基	1基	3基
	MEO	39基	28基	6基	4基	-	-
	GEO	-	-	-	5基	-	1基
	ISGO	-	-	-	5基	1基	2基
備考	予備6基と軌道上テスト中1基を含む	テスト中2基, 予備2基を含む					
計画上の2020年頃の軌道ごとの衛星数	合計	24基+3基	24基	30基+3基	35基	4基	7基
	MEO	27基	24基	27基	27基	-	-
	GEO	-	-	-	5基	1基	3基
	ISGO	-	-	-	3基	3基	4基
備考	3基は予備		3基は予備				

Geo : 静止軌道 MEO : 中高度軌道 ISGO : 傾斜対地同期軌道 (準天頂軌道はISGOの一部である)

(2) SBASの開発・運用状況

SBASは航空管制の効率化を目的に開発された広域DGPS補強情報を配信するシステムである。地上の監視局における信号の監視により測位精度や信号品質を検証し測位誤差の補正情報やインテグリティ情報の生成、配信を行う。2014年現在、アメリカのWAAS(Wide Area Augmentation Service)、日本のMSAS(MTSAT Satellite Augmentation Service)、欧州のEGNOS(European Geostationary Navigation Overlay Service)、インドのGAGAN(GPS Aided Geo Augmented Navigation)が運用され、ロシアのSDCM(System of Differential Correction and Monitoring)は開発中である。航空分野では測位・航法システムが実際に担保できる精度やインテグリティに応じて認証レベルが存在する。航空機が航行する各フェーズに対して、測位・航法システムがサービス提供可能であることを示す非精密進入(NPA)、垂直誘導付進入(APV-1)、精密進入(CAT-IまたはLPV200)などの認証レベルが設定⁷⁾されている。2003年に運用が開始されたアメリカのWAAS⁵⁾は現在、静止軌道上3基で運用され、CAT-Iまでのサービスを提供している。2007年に運用開始された、日本のMSAS⁷⁾は現在、静止軌道上に2基で運用され、NPAまでのサービスを提供している。2009年にサービスを開始した、欧州のEGNOS⁵⁾は現在、静止軌道上に3基で運用され、APV-1までのサービスを提供している。インドのGAGAN⁵⁾は2012年に承認テストを終了し2014年2月にNPAまでのサービスを開始した。2015年以内にAPV-1サービスの提供を予定している。ロシアのSDCM⁵⁾は現在開発、試験中である。今後SBASはエリアの拡大や複数周波数の活用が予定されている。

(3) 衛星測位サービスの展望

各衛星測位システムにおいてメッセージ仕様の共通化、中心周波数やスペクトラムの共通化により相互運用性を高める取り組みがなされている。図3-7に各衛星測位システムが利用する信号の周波数配置を示す。現在、International Committee on GNSSでの議論を通じて、L1帯と

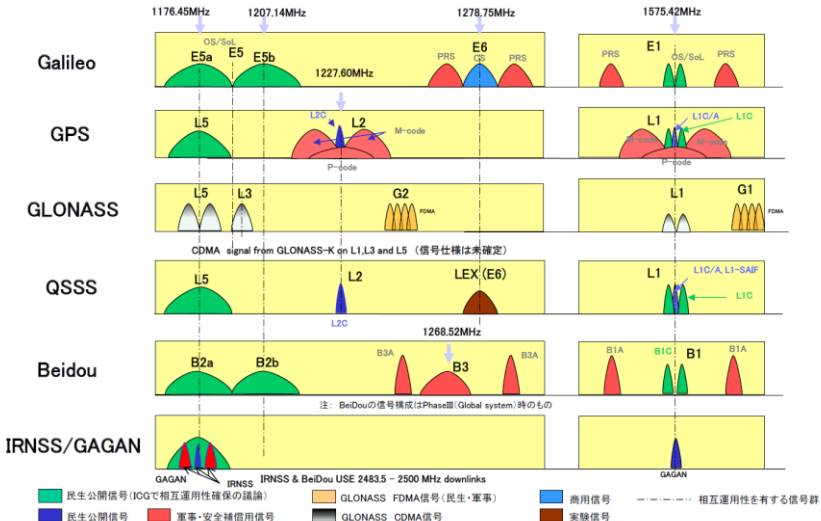


図3-7 各衛星測位システムの送信信号の周波数配置

L5帯において相互運用性を高めるための国際協調が図られている。2020年に計画されている衛星コンステレーションが配備された場合の可視衛星数を図3・8に示す。測位環境が悪い場所でも常時10基以上の衛星から測位信号を受信できるようになり、世界中のどこにおいても、より高精度な衛星測位が可能になる。特にアジア地域ではその傾向が顕著である。各GNSS・RNSS間における相互運用性の向上や新たな衛星の打上による衛星数の増加により、複数のGNSS・RNSSより簡便に組み合わせて利用できれば、測位精度の向上や測位サービスの継続性、アベイラビリティの向上が加速し、新たなアプリケーションの創出が今後期待される。

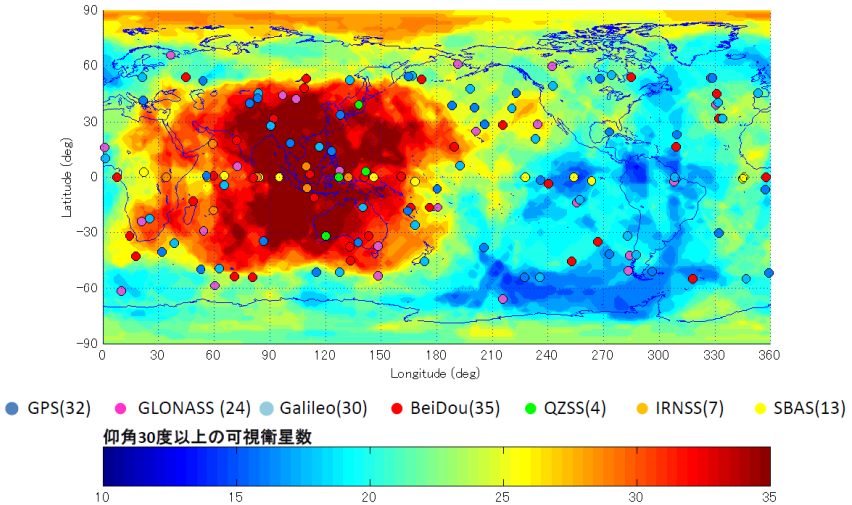


図3・8 2020年における仰角30度以上の可視衛星数予測

1-3-4 まとめ

本節では1-3-1項において衛星測位の仕組みについて述べた。衛星測位の仕組みや誤差要因、高精度測位を実現するための手法について示した。1-3-2項では日本が開発・運用している準天頂衛星システムを例に衛星測位システムの仕組みや構成を述べ、準天頂衛星システムの特徴である補完と補強の2つの効果について述べた。1-3-3項では各国のGNSS、RNSSやSBASの計画や現在の運用状況を述べた。今日では測位衛星の増加や高性能化、相互利用性の拡大に向けた検討がなされ、測位精度やサービスの継続性、アベイラビリティの向上が期待できることを述べた。

衛星測位分野では現在、測位精度の向上や受信機の小型化、複数周波対応化、複数GNSS対応化、屋内外におけるシームレスな測位手法の開発、測位信号の詐称への対応など様々な技術開発、実用化が進められている。衛星測位システムが提供する高精度な測位や位置情報を利用した車両、農業機械、ロボットなどの自律走行、建物の健全性モニタ、測量や地殻変動の観測など様々な分野においてサービスが創出されている。社会的な課題を解決するための研究も進められている。また今後、衛星測位の発展が社会が抱える問題の解決に寄与し、より豊かな社会が実現されていくことを期待する。

■参考文献

- 1) P. Misra and P. Enge, 日本航海学会 GPS 研究会(訳)：“精説 GPS 基本概念・測位原理・信号と受信機,” (社)日本航海学会 GPS 研究会, 2014.
- 2) 坂井丈泰：“A.1 GPS/GNSS の基礎知識,” GPS/GNSS シンポジウム 2007, 2007.
- 3) 宇宙航空研究開発機構：“準天頂衛星システム ユーザインタフェース仕様書 1.6 版 (IS-QZSS 1.6)”
- 4) アメリカ連邦航空局：“Global SBAS Status,” Satellite Based Augmentation System (SBAS) Interoperability Working Group (IWG), Jun. 2014.
- 5) International Committee on GNSS (2014), Providers Forum, 2014.
- 6) 内閣府：“宇宙基本計画,” (平成 27 年 1 月 9 日宇宙開発戦略本部決定).
- 7) 坂井丈泰, 松永圭左, 吉原貴之, 伊藤 実, 星野尾一明：“MSAS の性能向上について(2),” 第 9 回電子航法研究所研究発表, 2009.