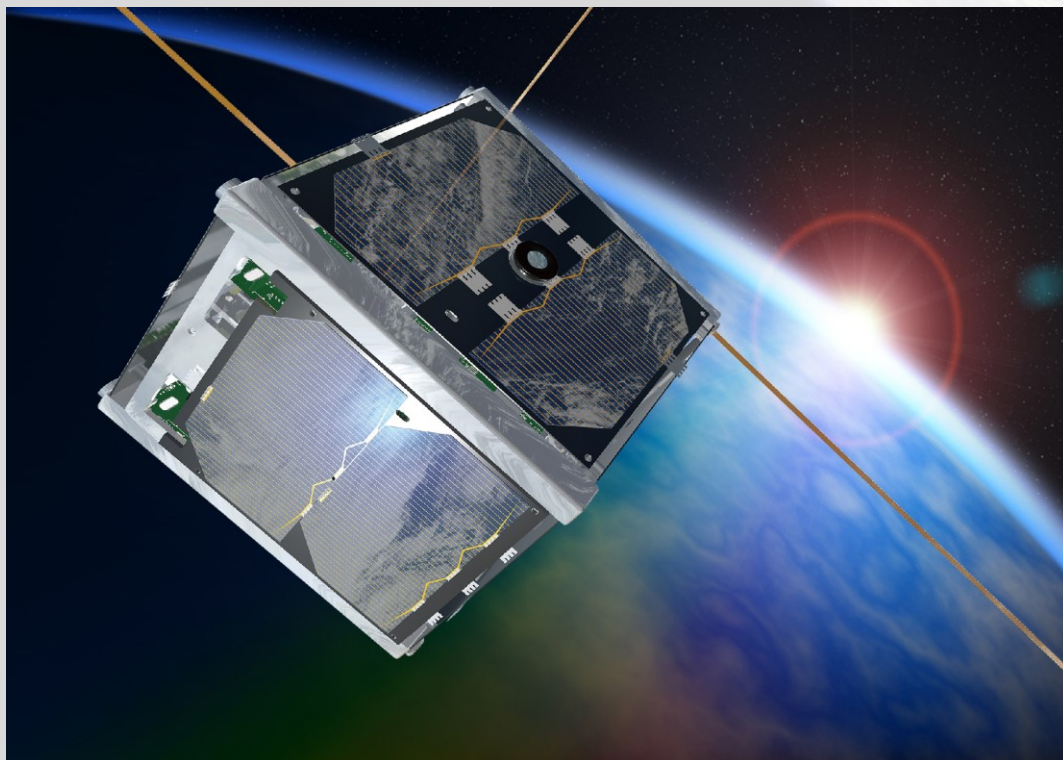


日本大学のCubeSatとアマチュア衛星通信

2020/02/16 ちばハムの集い2020 @四街道市文化センター



NEXUS Project Team

日本大学

山田晃一郎
佐藤陸
中村壮児
中村涼太
藤井瞳
宮崎康行

JAMSAT

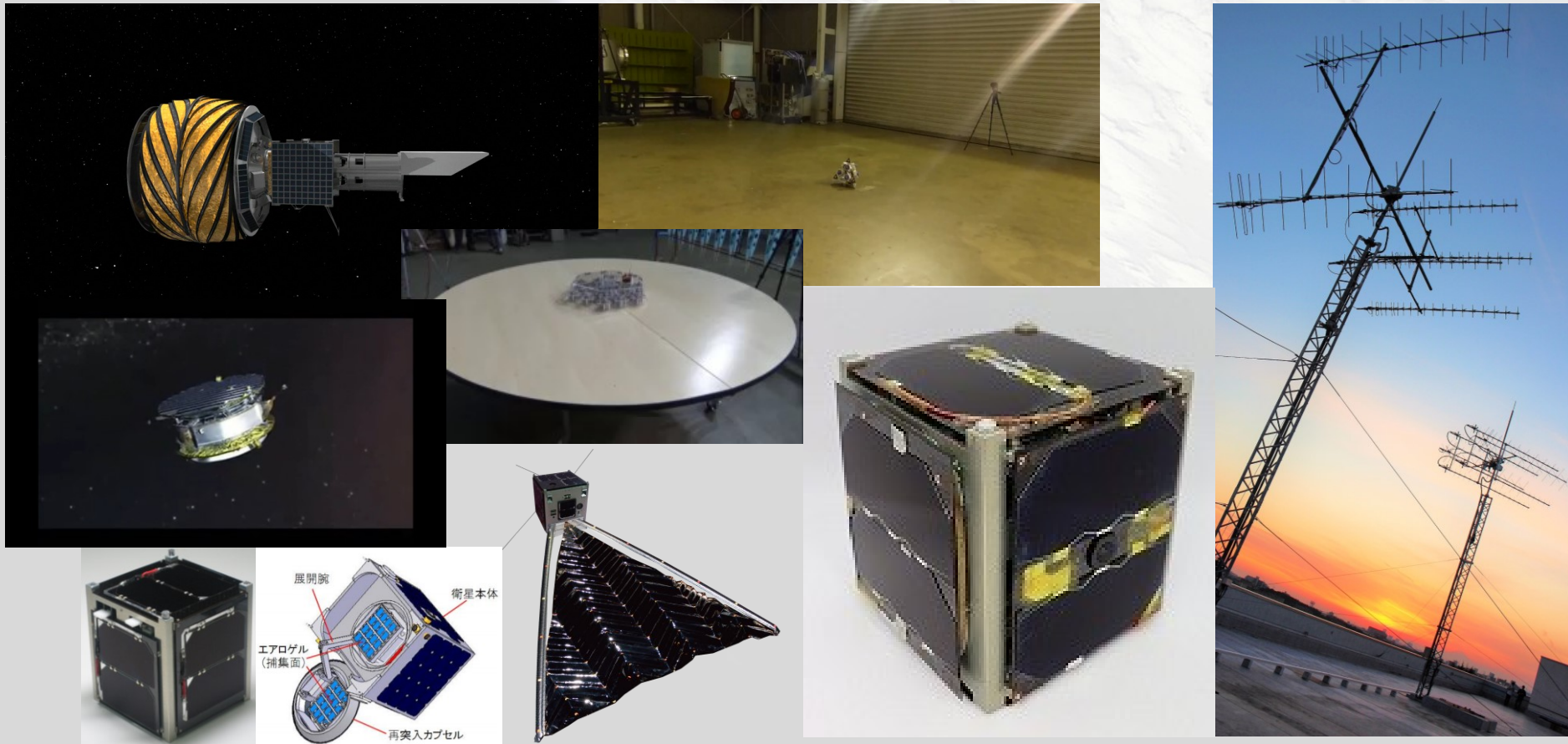
今村謙之
上田穂積
小黒常隆
金子明
小内米太郎
後藤直
辻政信
深井貫
横田一弘



自己紹介

中村壮児

日本大学大学院 理工学研究科 航空宇宙工学専攻 修士1年
宇宙構造物システム研究室 所属



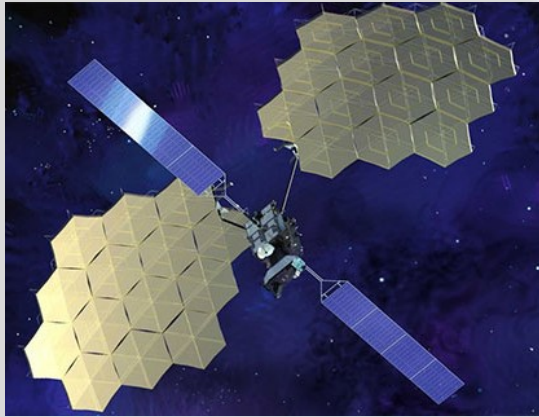
講演内容

本日は以下の内容をお話させていただきます。

- CubeSatとは?
- CubeSatとアマチュア無線帯
- 日本大学のCubeSat
- CubeSat「NEXUS」
- 衛星通信に関して
- NEXUSの通信系
- 日大地上局の紹介
- NEXUSのアマチュア衛星運用

CubeSatとは?

人工衛星をサイズで分類すると...



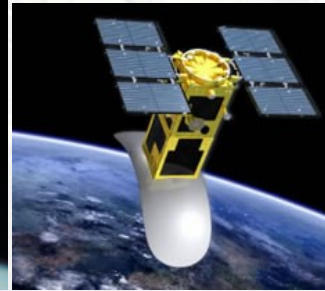
きく8号

2.5x2.5x8m³
2800kg



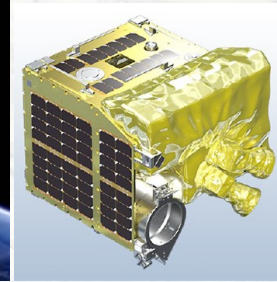
いぶき (GOSAT)

2.4x2.6x3.7m³
1750kg



ASNARO-2

1.5x1.5x3.9m³
570kg



ALE-1

60x60x80cm³
60kg



CubeSat

XI-IV

10x10x10cm³
1kg

サイズ・質量・コスト

大型衛星

300億円~

中型衛星

100億円

小型衛星

10億円

超小型衛星

3億円

~0.3億円

小

- 10cm単位で外形寸法が標準化された、おおよそ50kg以下の人工衛星を **CubeSat** と呼んでいます。

CubeSatとは？

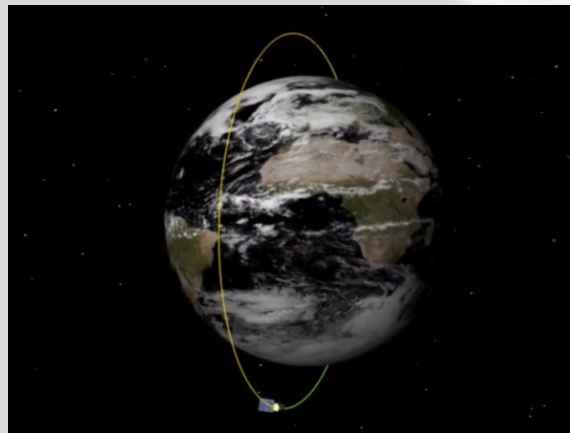
CubeSatでなにができるか？

→衛星単体の機能を制限し、コストと開発期間を劇的に低減

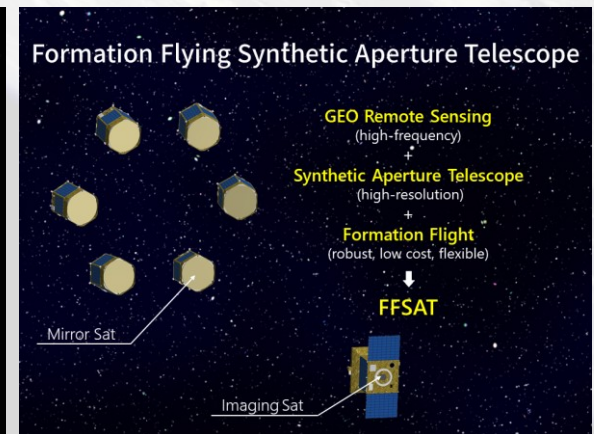
- ① コンステレーション：地球規模で衛星を分散配置，観測範囲の拡張
- ② フォーメーションフライト：近くを飛ぶ複数機による共同ミッション
- ③ 新技術の実証，本格的・大型ミッションの事前実験，挑戦的なミッション
- ④ 宇宙開発に大学や民間企業が参入，教育やビジネスの場を広げる



コンステレーションによる多点同時観測



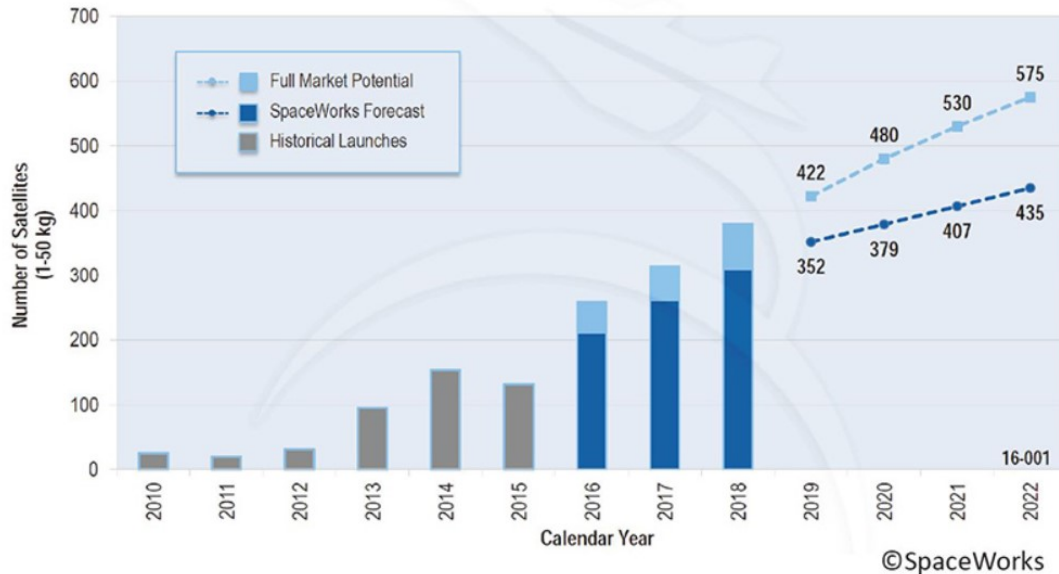
フォーメーションフライト



複数衛星による合成開口望遠鏡

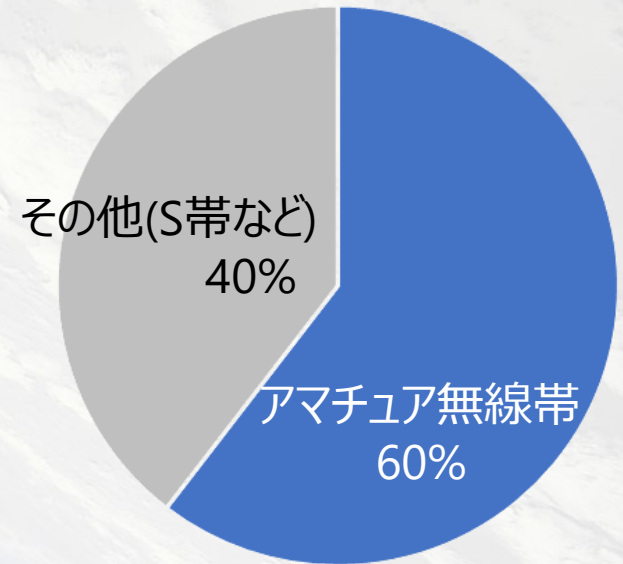
CubeSatとは?

利用拡大と使用周波数帯



50kg以下(CubeSat含む)の超小型衛星の打ち上げ実績

- 近年CubeSatの利用拡大が進んでおり、今後も打ち上げ数は増加していくものと予想されます。
- 衛星との唯一のコミュニケーション手段である通信について、多くのCubeSatがアマチュア無線帯を採用しています。



超小型衛星(CubeSat含む)の使用周波数比率

日本の小型・超小型衛星の足跡（顛末/異常・故障）

http://www.2s.biglobe.ne.jp/~gshirako/j_ssat_trend.pdf

CubeSatとアマチュア無線帯

衛星通信における重要な問題：どの周波数帯を用いるか

- これまで開発されたCubeSatの多くは**アマチュア無線帯**を用いています。その理由は以下の通りであると考えています。
 - アマチュア無線帯の通信機器は、S帯などに比べて設置が容易で安価であること
 - アマチュア無線家の方々が、衛星通信のノウハウや運用ソフトを本やネットで公開して下さっており、勉強がしやすいこと
 - アマチュア無線家の方々に受信を協力していただけること



衛星追尾ソフト Calsat



アマチュア無線機 IC-9100



アンテナ

CubeSatとアマチュア無線帯

「アマチュア衛星」としての役割

アマチュア衛星局の開設にあたってその目的は

金銭上の利益のためでなく、もっぱら個人的な無線技術の
興味によっておこなう自己訓練、通信および技術的研究

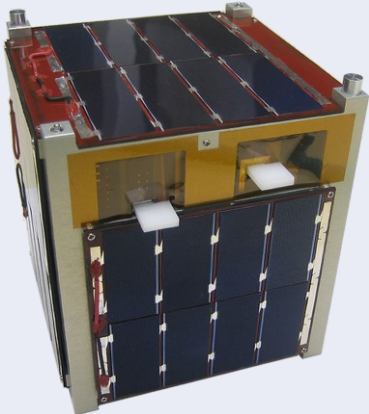
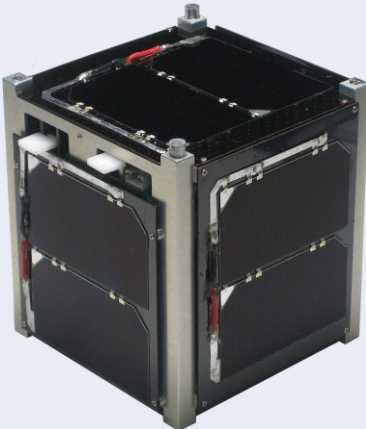
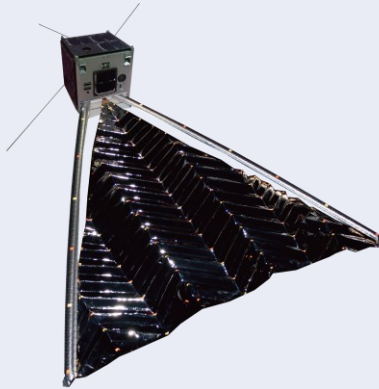
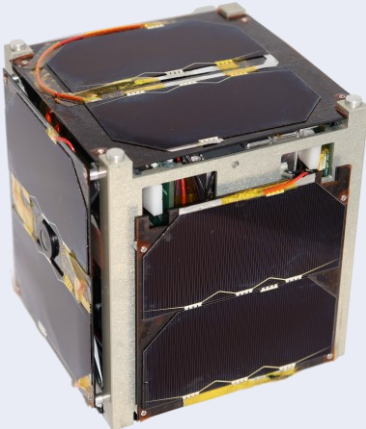
と電波法で定められています。



- アマチュア衛星は上記の“アマチュア業務”に則したものでなければなりません。
- アマチュア無線帯という公共の電波を使わせていただく以上、**アマチュア無線の維持・発展に貢献できるものでなければならない**と考えています。
- そこで、日本大学ではアマチュア無線家の方々へ衛星通信技術を磨いていただく機会を提供するため「**アマチュア衛星運用**」を行ってきました。

日本大学のCubeSat

これまで4機のCubeSatを設計・開発し、以下のアマチュア運用を行ってきました。

外観				
名称	SEEDS	SEEDS-II	SPROUT	NEXUS
目的	衛星バス技術獲得 教育	衛星バス技術獲得 教育	複合膜面構造 宇宙実証	高速無線機 小型カメラシステム 宇宙実証
アマチュア 運用	LV打ち上げ失敗 軌道不到達	CW(モールス信号) FMパケット デジトーカ SSTV		左記に加え トランスポンダ運用

CubeSat「NEXUS」

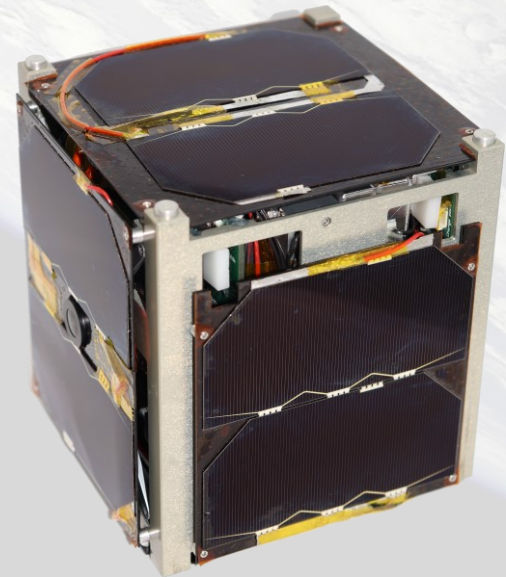
NEXUSとはどんな衛星か

NExt generation **X**(cross) **U**nique **S**atellite
次世代アマチュア衛星通信技術の実証



NEXUS(絆, つながり)

- SEEDS, SPROUTに次ぐ, 日本大学のCubeSat
- 約10cm立方で質量約1.3kg
- **JAMSAT**(日本アマチュア衛星通信協会)と共同で開発しました.
- 新規開発した**3種類の無線機**と, **CubeSat用カメラシステム**の宇宙実証をメインミッションとしています.



CubeSat「NEXUS」

NEXUSの概要については
プロモーションビデオをご覧ください。

CubeSat「NEXUS」

開発背景・目的

以下の様な背景と目的からNEXUSは開発されました。

1 : Cubesatミッションの高度化に伴う, 取得データの増加

- ✓ 高速無線機の需要大
- ✓ アマチュア無線帯で使われている**従来の無線機よりも高速な通信機を宇宙実証**し, これらを今後広く普及させる

2 : CubeSatの多くに搭載されているコンポーネント : カメラ

- ✓ 従来のものは画像形式, 解像度等が固定で低性能
- ✓ **汎用性が高く, 高解像度でかつ1UのCubeSatに収まるコンパクトなカメラシステムを宇宙実証**し, CubeSatを開発するうえでの選択肢のひとつとしてもらう

3 : アマチュア無線家の方々からのトランスポンドの要望

- ✓ トランポン運用により, アマチュア無線家の方々の通信技術の向上に貢献

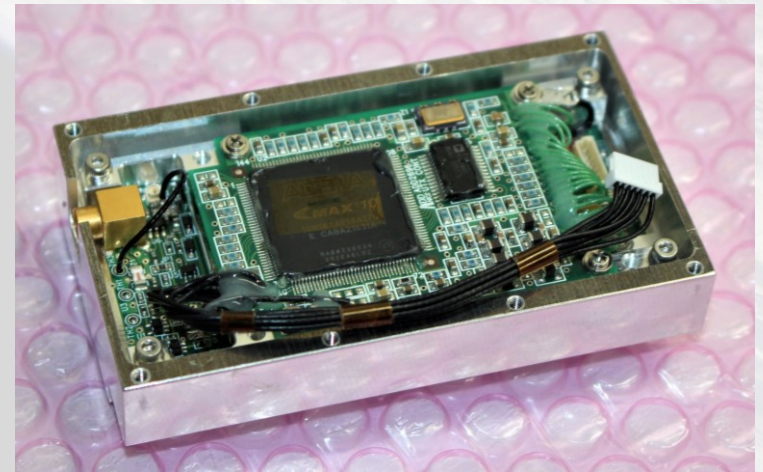
CubeSat「NEXUS」

これらの目的を達成する為、以下に示す3種類の無線機とカメラシステムの計4つのミッション機器を開発し、NEXUSに搭載しました。

1. $\pi/4$ shift QPSK送信機

通信速度**38400bps**でデータ伝送が可能であり、従来のCubeSatに搭載されている送信機(GMSK9600bps)に比べ、**約4倍**の速さでの通信が可能です。

送信周波数	435.900 MHz
送信電力	0.3 W
消費電流(送信時)	680 mA
通信速度	38400 bps
寸法	78.5×38.5×10.0 mm
質量	99.4 g



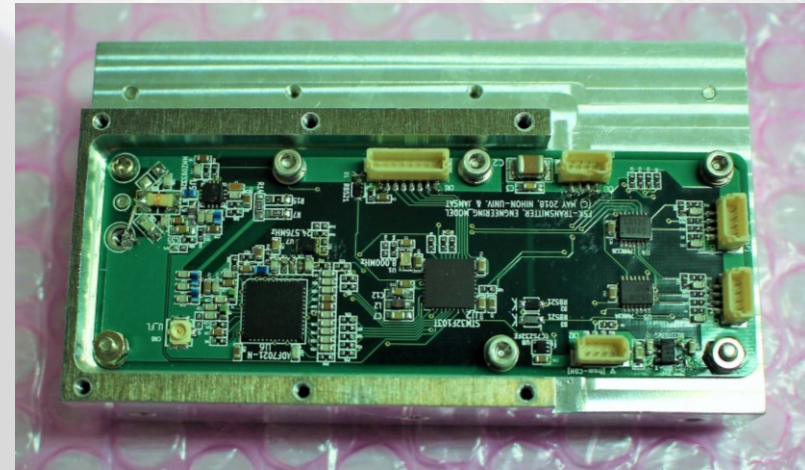
CubeSat「NEXUS」

これらの目的を達成する為、以下に示す3種類の無線機とカメラシステムの計4つのミッション機器を開発し、NEXUSに搭載しました。

2. FSK送信機

送信速度が**1200bps～19200bpsの範囲で可変**です。受信環境に応じて送信速度を設定することができ、それによって柔軟な運用を可能にします。

送信周波数	435.900 MHz
送信電力	0.4 W
消費電流(送信時)	600 mA
通信速度	1200 ~ 19200 bps
寸法	79.0×28.0×0.75 mm
質量	99.4 g



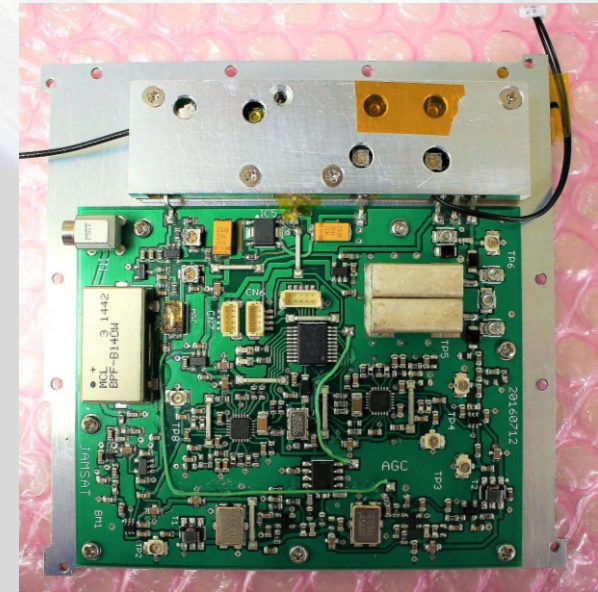
CubeSat「NEXUS」

これらの目的を達成する為、以下に示す3種類の無線機とカメラシステムの計4つのミッション機器を開発し、NEXUSに搭載しました。

3. リニアトランスポンダ

145MHz帯で受信した音声データを、**435MHz帯**に変換し送信する**音声データ中継器**です。NEXUSは、日本の衛星では**約20年振りにトランスポンダを搭載した人工衛星**となります。

送信周波数	435.880 ~ 435.910 MHz
受信周波数	145.900 ~ 145.930 MHz
送信電力	0.5 W
消費電流(送信時)	930 mA
寸法	96.8×96.8×12.0 mm
質量	116.6 kg



CubeSat「NEXUS」

これらの目的を達成する為、以下に示す3種類の無線機とカメラシステムの計4つのミッション機器を開発し、NEXUSに搭載しました。

4. カメラシステム

CubeSat用に独自開発した、高汎用性のカメラシステムです。11種類の画像形式を選択可能であり、コマンドによりJPEG画像圧縮率や、EV補正值等も変更可能です。

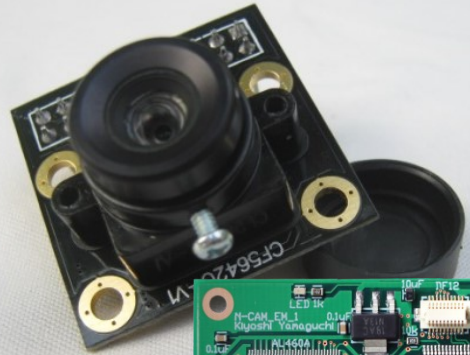
選択可能な画像形式

JPEG

QVGA
VGA
SVGA
HD
Full HD
Max(2592×1944)

RGB565

QVGA
VGA
SVGA
HD
Max(1280×960)



CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

サクセス レベル	ミッション内容	達成率 [%]
Minimum	① $\pi/4$ shift QPSK送信機の動作を実証する	100
	②FSK送信機の動作を実証する	100
Full	③ $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性を示す	30
	④FSK送信機の実用性を示す	50
	⑤リニアトランスポンダの動作を実証する	100
	⑥カメラシステムの実用性を示す	100
Extra	⑦高度約500kmにおける145MHz帯の電界強度マップを作成する	50

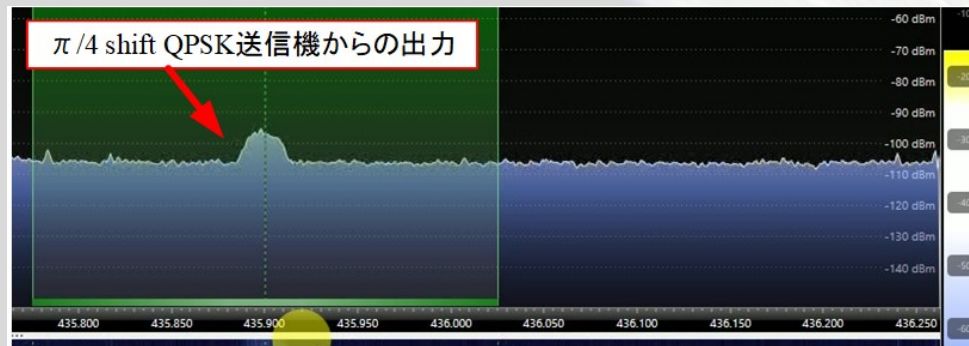
CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

① $\pi/4$ shift QPSK送信機の動作を実証する

達成条件： $\pi/4$ shift QPSK送信機を用いて 38400bps の送信レートによりデータをダウンリンクする

2019年1月23日の夜運用の際に $\pi/4$ shift QPSK送信機を用いたデータダウンリンク(38400bps)を実施しました。



復調時の電波状態

合計1パケットの取得が確認出来たため、ミッション達成と判断しました。

CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

② FSK送信機の動作を実証する

達成条件：FSK送信機を用いて 1200～19200bps の間で指定した送信レートによりデータをダウンリンクする

2019年1月23日の昼運用の際にFSK送信機を用いたデータダウンリンク(9600bps)を実施しました。



復調時の電波状態

合計206パケットの取得が確認出来たため、ミッション達成と判断しました。

CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

③ $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性を示す

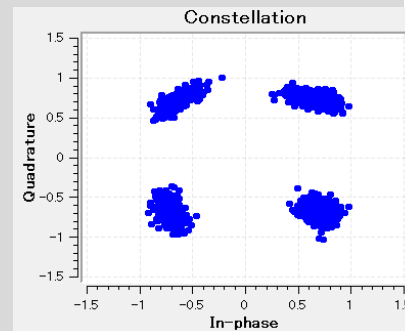
達成条件： $\pi/4$ shift QPSK 送信機を用いてデータをダウンリンクし、正味の通信速度が従来の通信機よりも300%以上であること

QPSKの復調を行ったSDR(Blade RF)はS/Nが低いため、1パケットしか復調することができませんでした。

→ S/N を上げる為に、現在 LimeSDR と GNU Radio を用いた復調機を開発中です。



↑Blade RF



↑LimeSDR

←受信信号コンステレーション

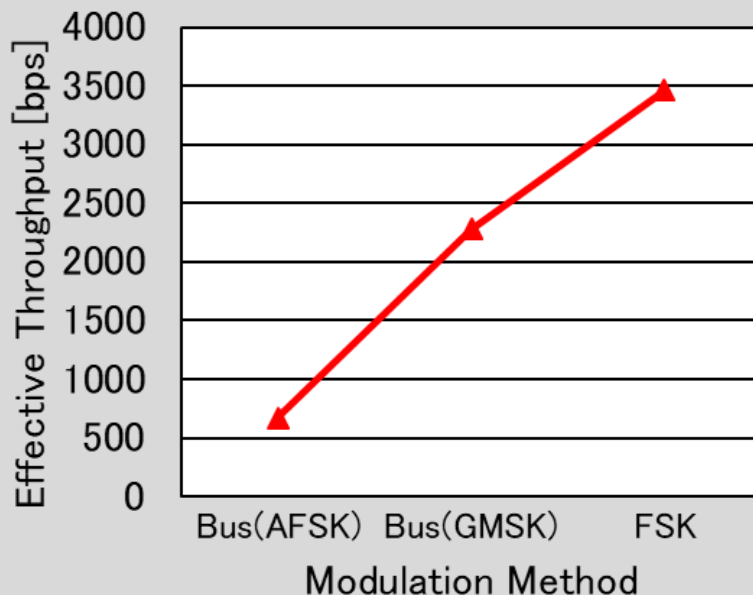
CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

④ FSK送信機の実用性を示す

達成条件：FSK 送信機を用いてデータをダウンリンクし、正味の通信速度が従来の通信機よりも150%以上であること

GMSK9.6kbpsにおけるFSK送信機とバス無線機の正味の通信速度は以下の通りです。



バス送信機 (GMSK9.6k)	2279 bps
FSK送信機 (GMSK9.6k)	3465 bps

152%

9.6kbpsについては達成
→ 現在、19.2kbpsでの評価を進めています。

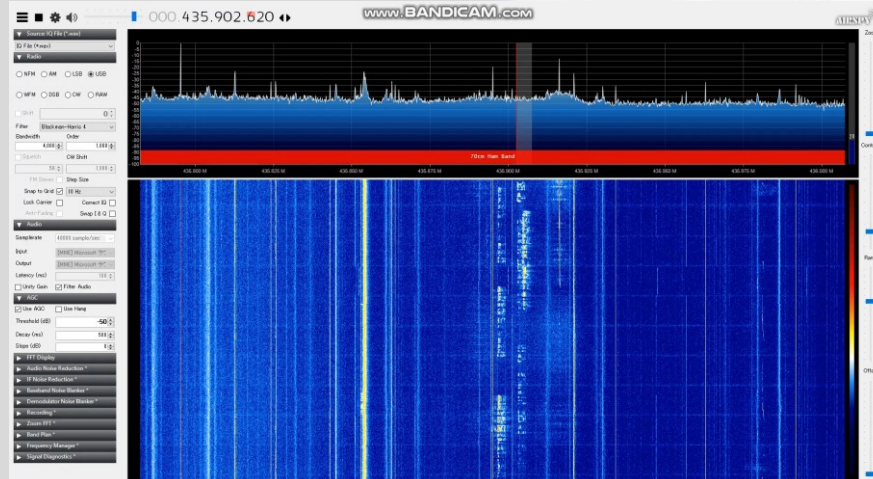
CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

⑤ リニアトランスポンダの動作を実証する

達成条件：リニアトランスポンダにより音声データを中継する

2019年1月26日の昼運用の際にリニアトランスポンダの動作実証を行うため、日大局からCW及びSSBによる音声データをリニアトランスポンダに向けて送信しました。



※JA1OGZ様提供

JA0FKM/1局，JA1OGZ局にて，CW及びSSBの受信が確認出来たため，ミッション達成と判断しました。

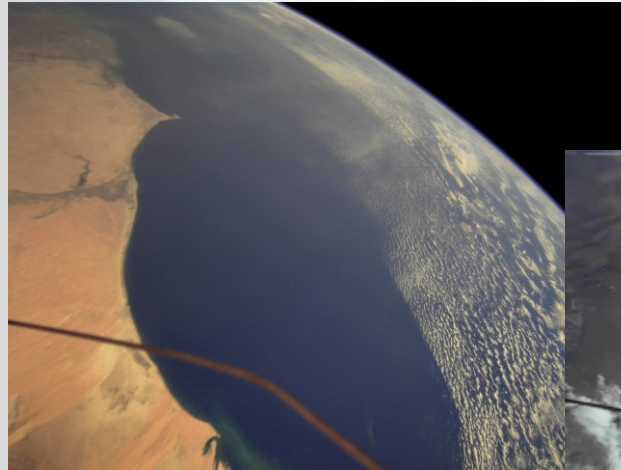
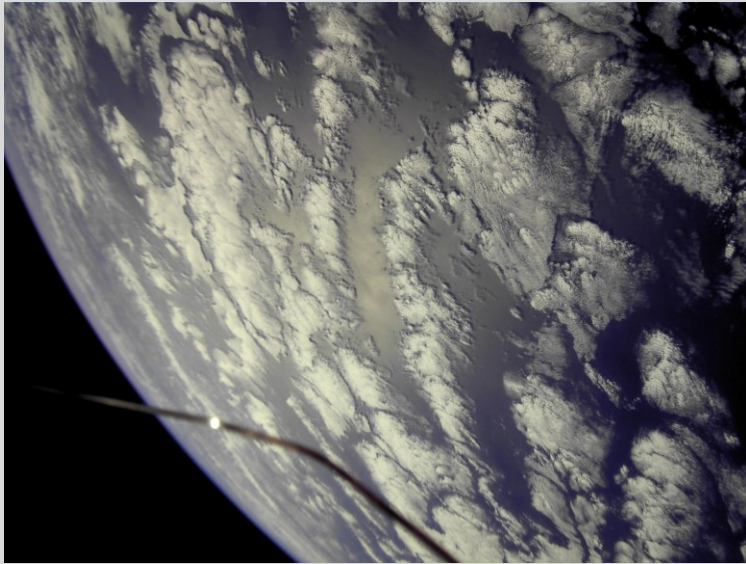
CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

⑥ カメラシステムの実用性を示す

達成条件：Full HD の地球画像撮影を行い、画像を取得する

2019年2月4日に解像度(2592×1944pix)での写真撮影を日本列島南東の太平洋上空にて行い、衛星から2月12日に画像を取得しました。



2019年5月5日撮影
JPEG圧縮率変更



2019年6月2日撮影、動画

以上の取得画像からミッション達成と判断しました(CubeSat史上最高解像度です)。

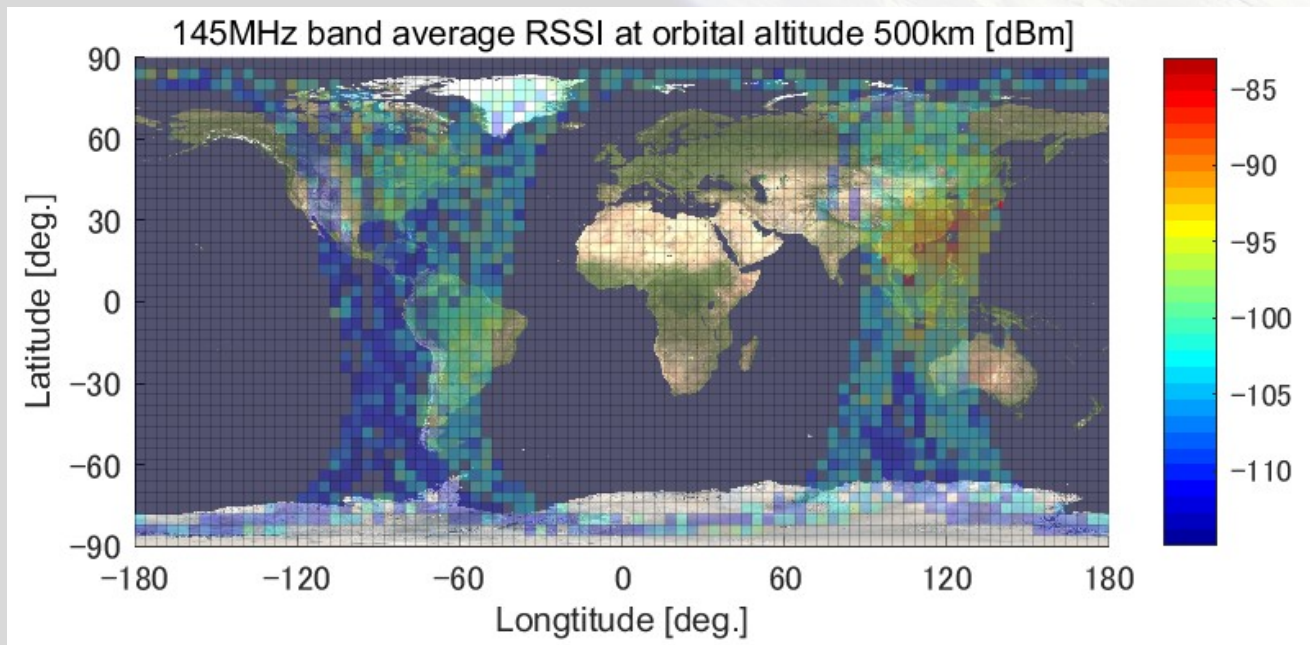
CubeSat「NEXUS」

NEXUSは以下に示す7つのミッションの内、4つのミッションを達成しています。(2020年2月16日現在)

⑦ 高度約500kmにおける145MHz帯の電界強度マップを作成する

達成条件：リニアトランスポンダを用いて軌道上の電界強度を測定し、高度約500km付近における145MHz帯の電界強度マップを作成する

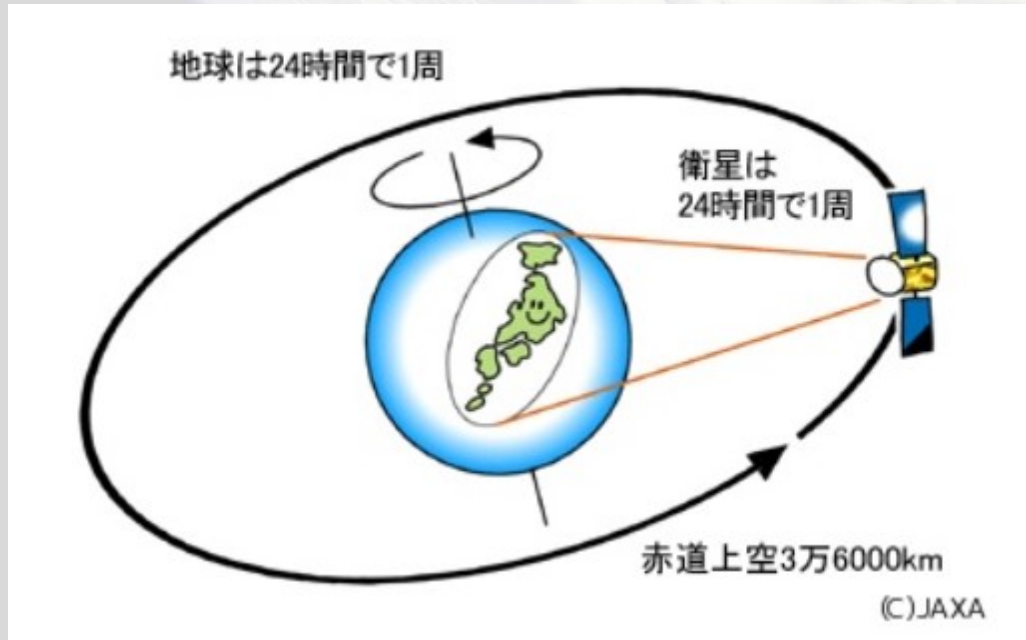
2020年2月16日現在までに以下のマップが得られています。



衛星通信に関して

衛星との唯一のコミュニケーション手段：通信

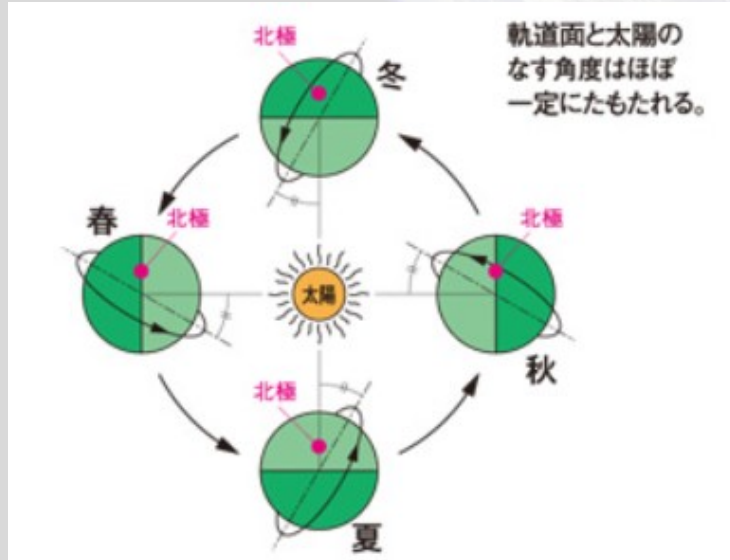
例：静止衛星における通信



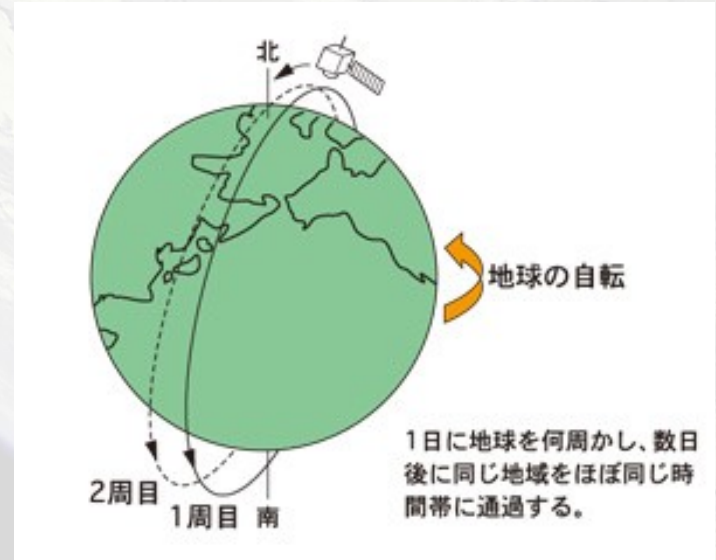
- 静止衛星は、地球の自転周期と同じ周期で公転します。
- 空のある一点に静止しているように見えるため、管制局はいつでも衛星と通信ができます。
- このような衛星の軌道を**静止軌道**といいます。

衛星通信に関して

NEXUSの軌道：太陽同期準回帰軌道



太陽同期軌道



準回帰軌道

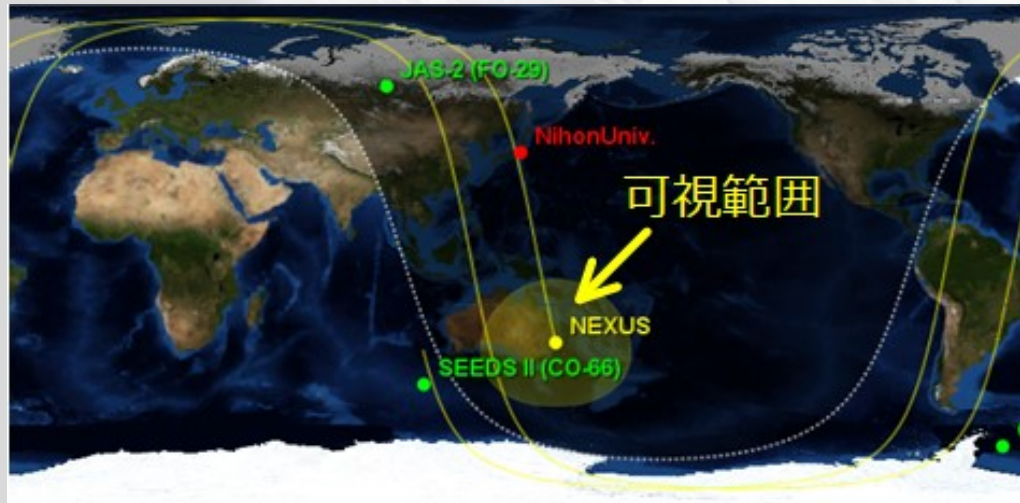
- この軌道は、太陽から見た場合は同じ位置を周回していますが、地球から見た場合は、地球の自転によって右図のような地上軌跡を描きます。



衛星通信に関して

衛星の可視時間 : AOSとLOS

太陽同期準回帰軌道を周回するNEXUSは、静止衛星のように好きな時にいつでも通信できるわけではありません。



管制局が衛星の可視範囲に入り、通信ができる時間を**可視時間**といい、

可視範囲に入ることを **AOS**(Acquisition Of Signal)

可視範囲から出ることを **LOS**(Loss Of Signal)

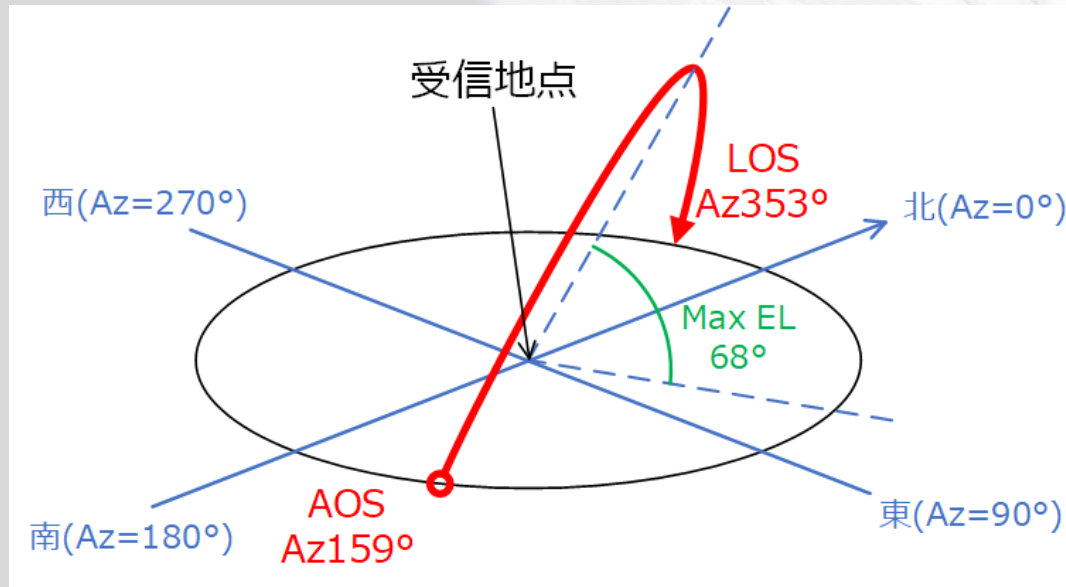
といいます。

衛星通信に関して

衛星の位置表現：方位角(Azimuth,AZ)と仰角(Elevation,EL)

衛星の位置は，北を0度とする方位角AZと，地平線を0度とする仰角ELにより表されます。

例えば，AOSがAZ159度，LOSがAZ353度，最大ELが68度の軌道は以下の通りとなります。



これらは，衛星の軌道情報を表す **TLE** から計算することができます。

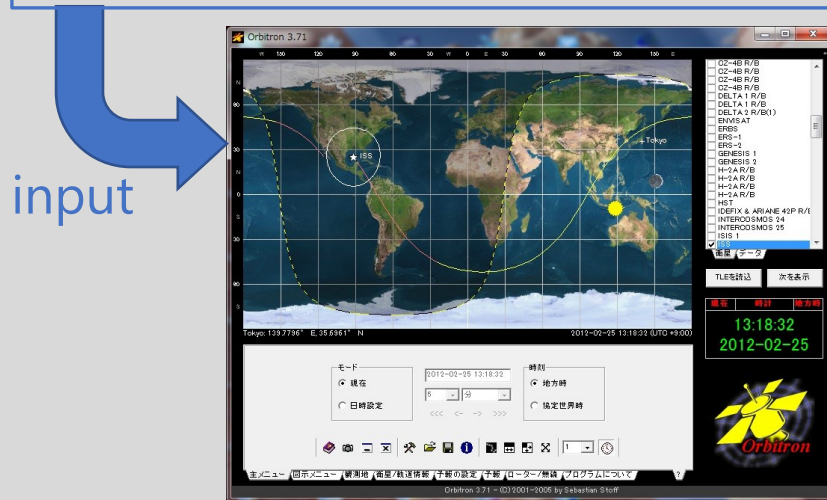
衛星通信に関して

TLE(Two-Line Elements)と軌道計算ソフト

TLEは日本語で2行軌道要素形式ともよばれ、**人工衛星の軌道を表すフォーマット**のひとつです。インターネットで簡単に取得可能です。

NEXUSのTLEは以下の通りです(2019年3月20日11時15分時点)。

```
1 43937U 19003F 19078.72632008 .00001541 00000-0 67261-4 0 9999
2 43937 97.2892 139.2924 0025720 36.6840 58.1783 15.23328199 9237
```



軌道計算ソフトにTLEを入力することで以下の情報が得られます。

- AOS, LOS時間
- 軌道情報(方位角, 最大仰角)
- 周波数ドップラーシフト量 etc...

軌道計算ソフト

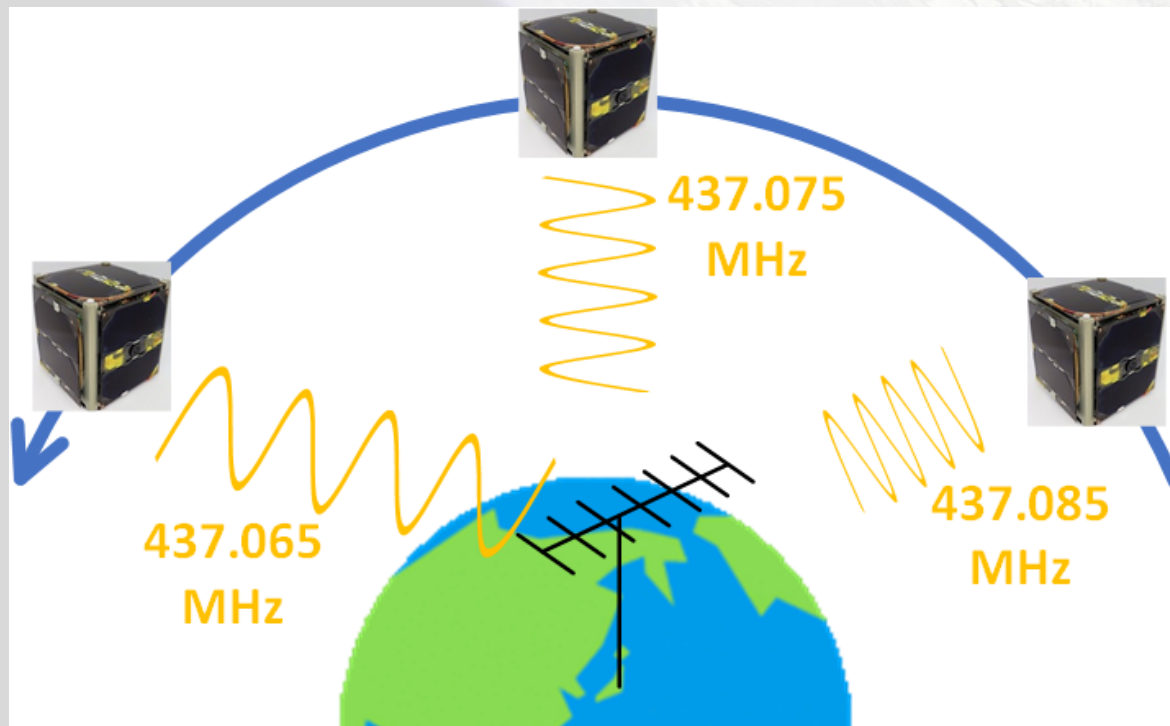
※これもネットで入手可能です

衛星通信に関して

周波数のドップラーシフト

地球局に対して衛星が動く為、ドップラーシフトにより**AOSから天頂までは周波数が高め**に、**天頂からLOSまでは低め**になります。

天頂付近ではドップラーシフトはゼロになりますが、周波数の変化率は最大となります。

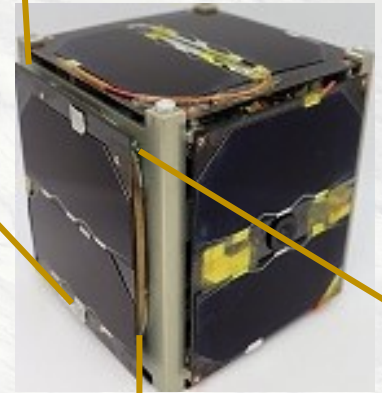


衛星通信に関して

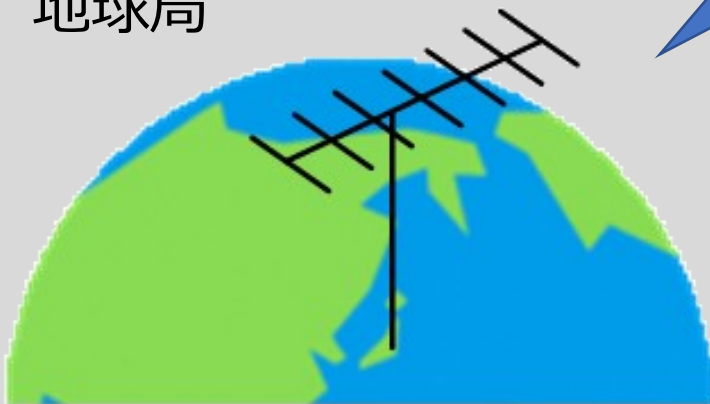
アップリンクとダウンリンク

地球局から衛星局へのコマンド送信を「**アップリンク**」といいます。
NEXUSのアップリンク周波数は145MHz帯です。

衛星局



地球局



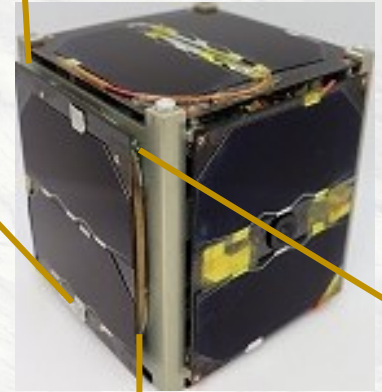
アップリンクにより衛星に写真撮影やデータ取得、データ送信を指令します。

衛星通信に関して

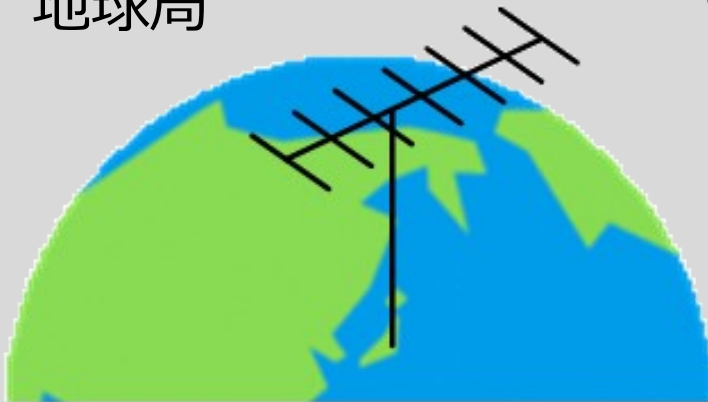
アップリンクとダウンリンク

衛星局から地球局へのデータ送信を「**ダウンリンク**」といいます。
NEXUSのダウンリンク周波数は430MHz帯です。

衛星局



地球局



アップリンクしたコマンドに従って、
衛星データがCWビーコンやFMパ
ケットとしてダウンリンクされます。

衛星通信に関して

NEXUSにおける1日の通信時間

管制局が衛星の可視時間に入るのは**1日4~5回**で、**1回あたり約10分**と通信できる時間はかなり限られています。

この約10分間で、アップリンクやダウンリンク運用を行います。これを**パス**と呼びます。

2020年2月9日のNEXUS運用は、朝から夜にかけて4パス行われ、通信時間は以下の通りでした。

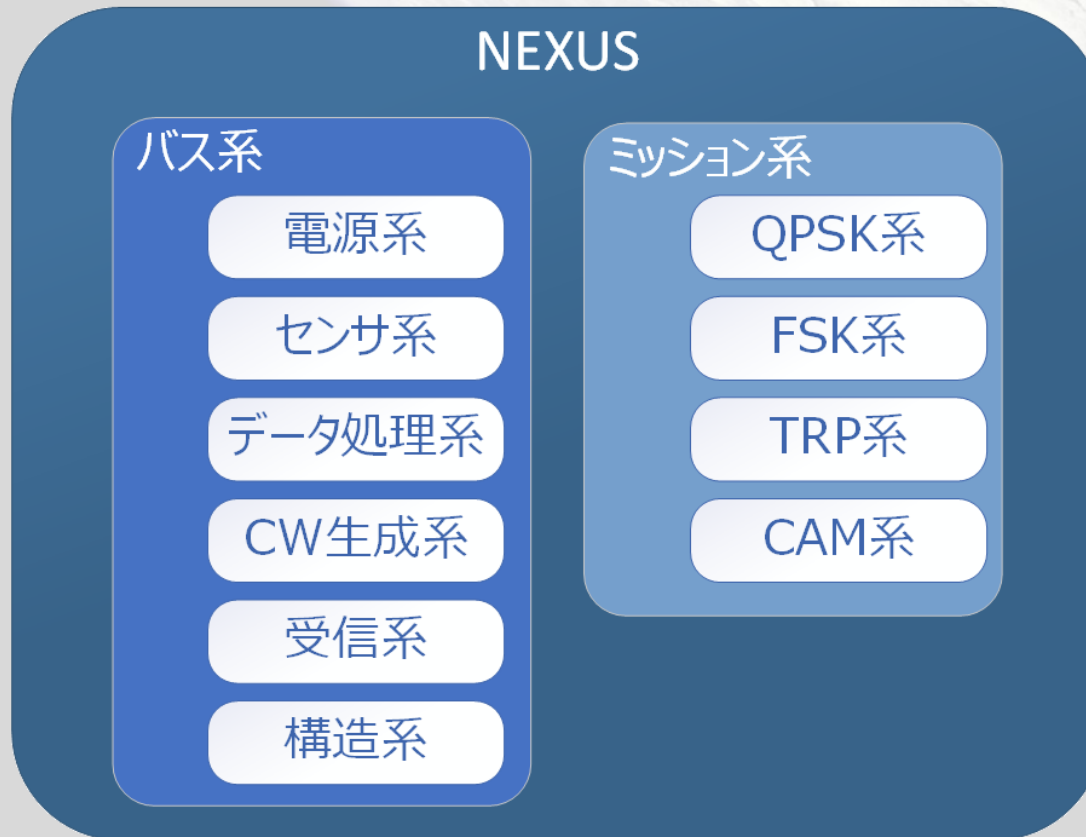
1stパス : AOS 08:44:07 ~ LOS 08:55:37	11分30秒間
2ndパス : AOS 10:18:40 ~ LOS 10:27:21	08分41秒間
3rdパス : AOS 19:19:20 ~ LOS 19:28:49	09分29秒間
4thパス : AOS 20:51:58 ~ LOS 21:02:52	10分54秒間

計40分34秒間

NEXUSの通信系

NEXUSは衛星の基本的な機能を維持するバス系と、衛星ミッションを行うミッション系から成ります。

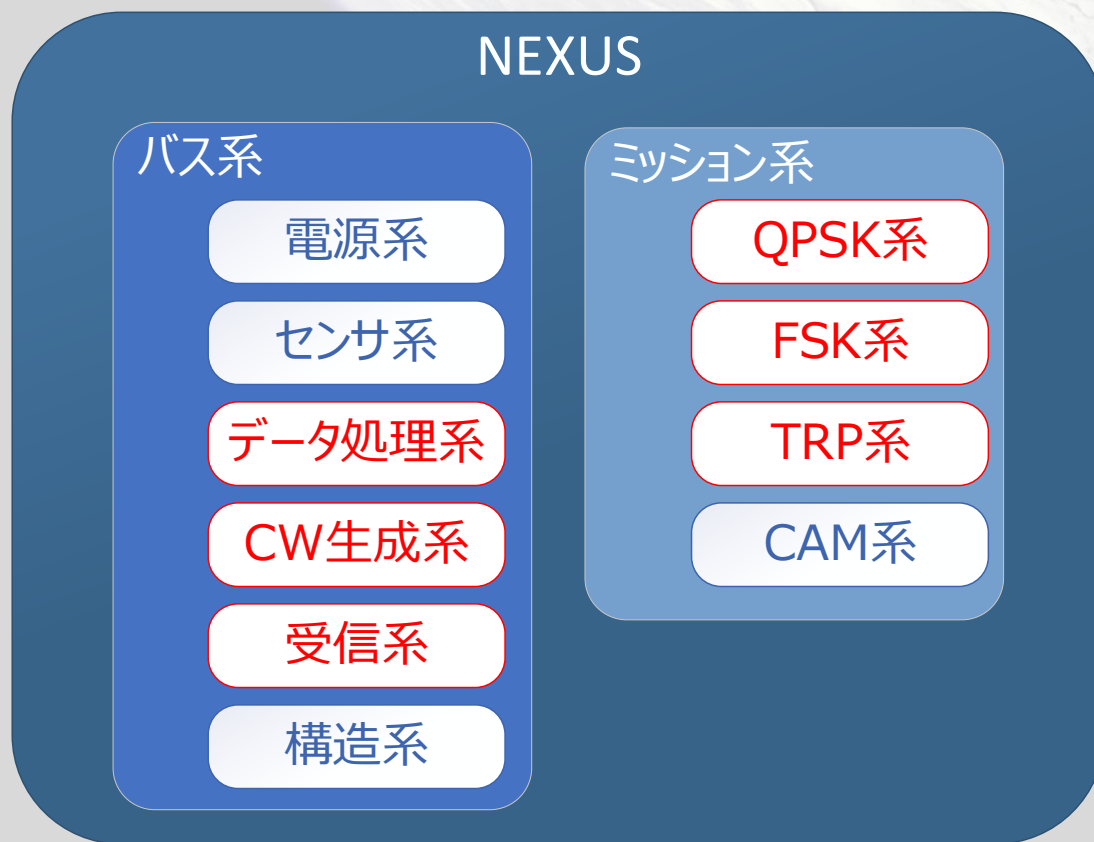
バス、ミッション系はそれぞれ以下の様に複数のサブシステムに分かれています。



NEXUSの通信系

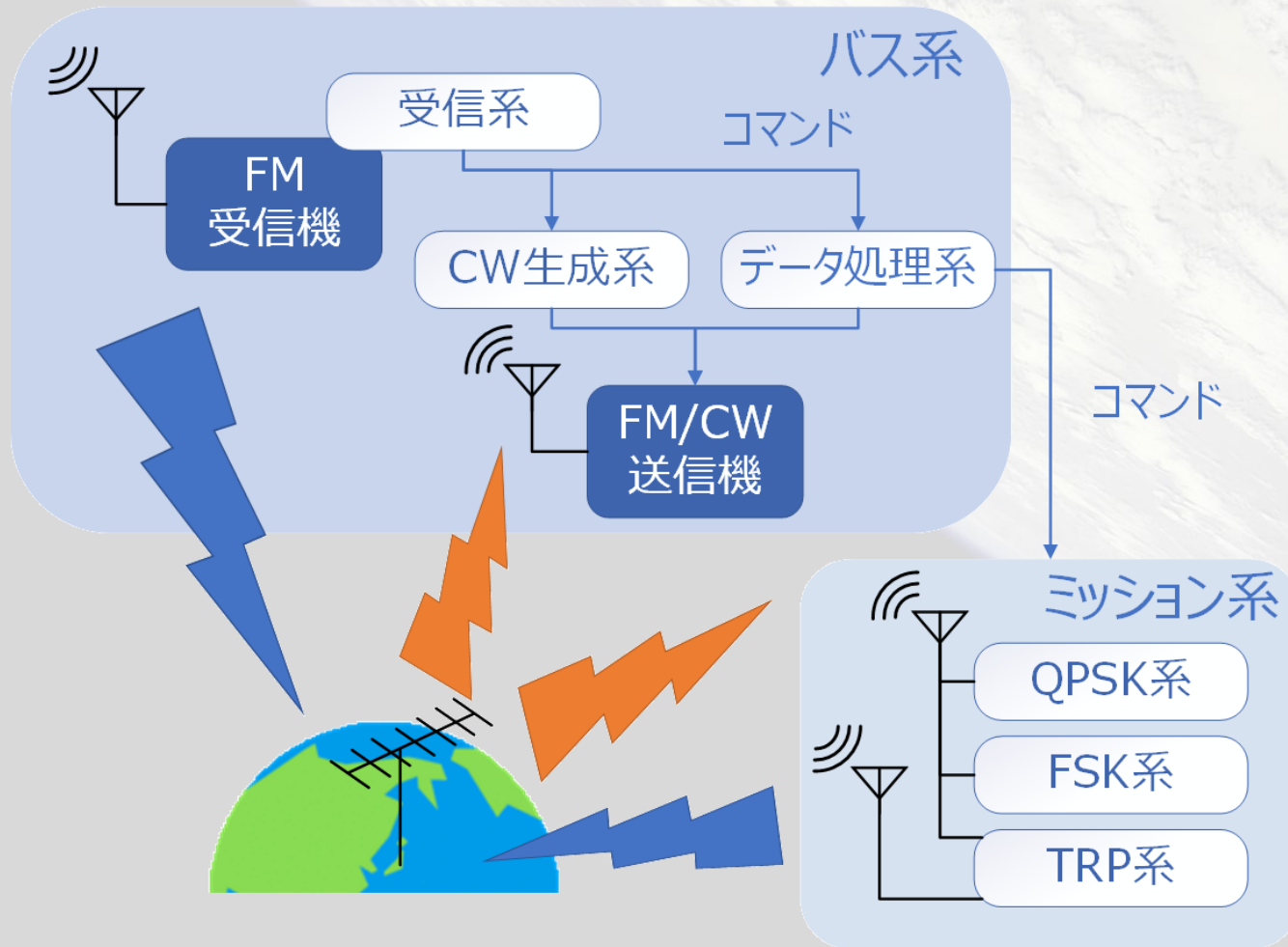
NEXUSは衛星の基本的な機能を維持するバス系と、衛星ミッションを行うミッション系から成ります。

この中で通信を担うサブシステムは、以下で赤く示したサブシステムです。



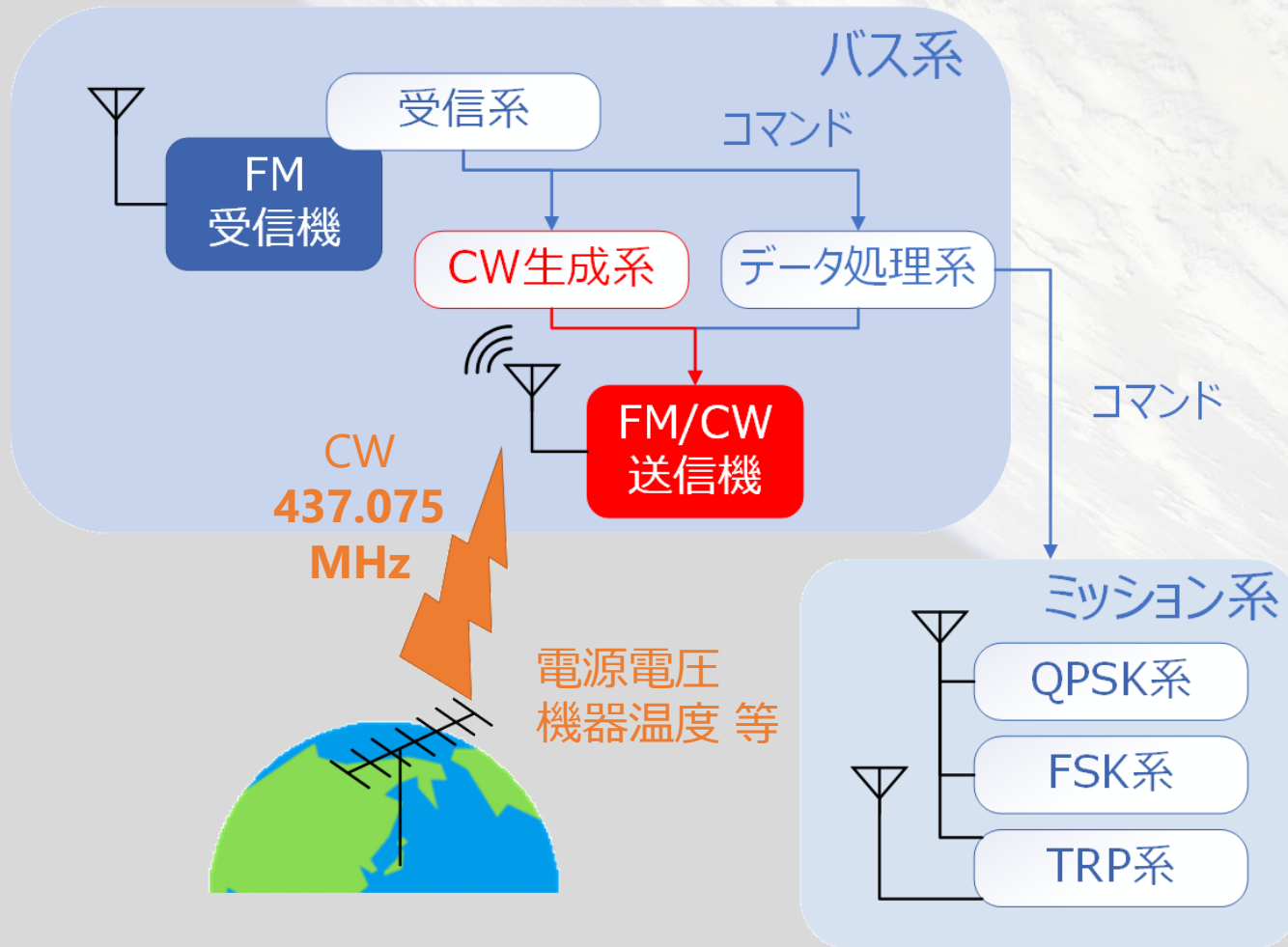
NEXUSの通信系

NEXUSの通信系は全てアマチュア無線帯を使っており、概略は以下の通りです。



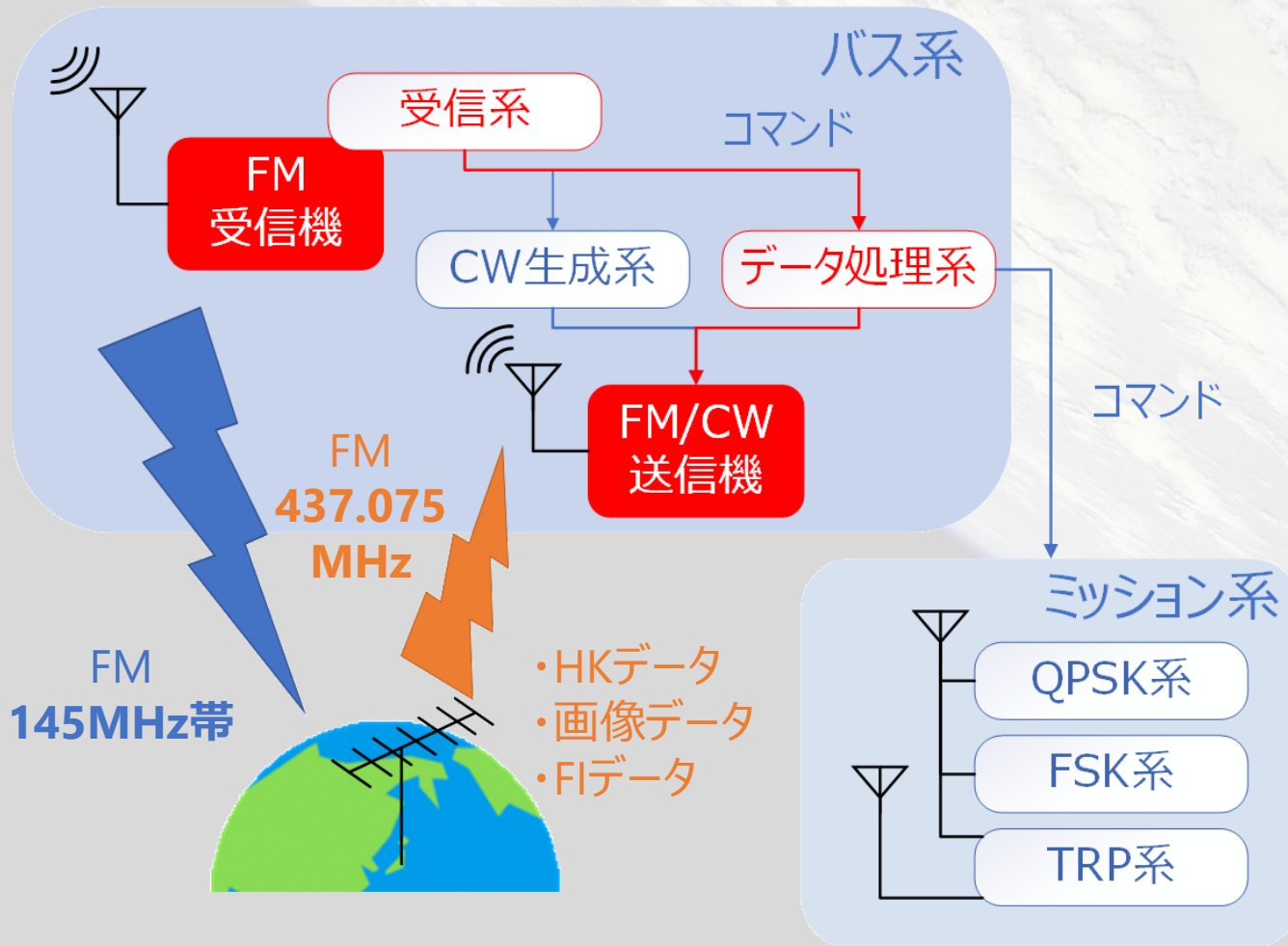
NEXUSの通信系

このうち、CWに関しては衛星捕捉のため、常時送信しています。



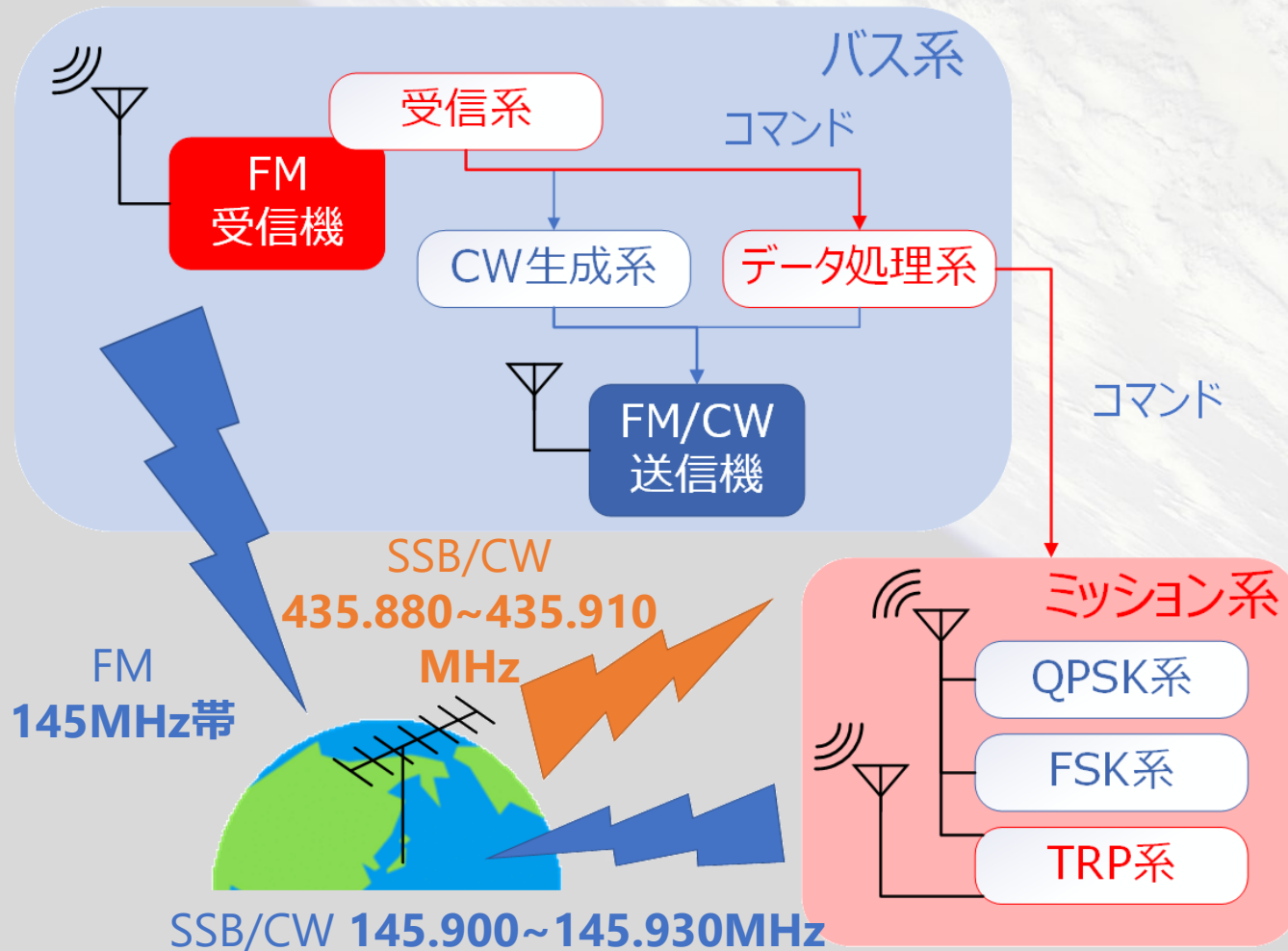
NEXUSの通信系

バス系のFM送信機を用いる場合、以下の通りの流れでダウンリンクします。



NEXUSの通信系

トランスポンダは以下の様な流れで運用を行います。



日大地上局の紹介

JARL局として地上局を新設

NEXUSはリニアトランスポンダを搭載しているため、JARL名義の地上局を新設する必要がありました。

新設にあたって、**直線偏波ダイバーシティ方式**を採用しました。

受信アンテナ諸元

	旧アンテナ	新アンテナ
偏波方式	円偏波	水平・垂直偏波 ダイバーシティ
利得	18.1 dBi	24 dBi
半値角	27~29 deg	14 deg

受信アンテナ→



日大地上局の紹介

日大地上局(受信系)の設備

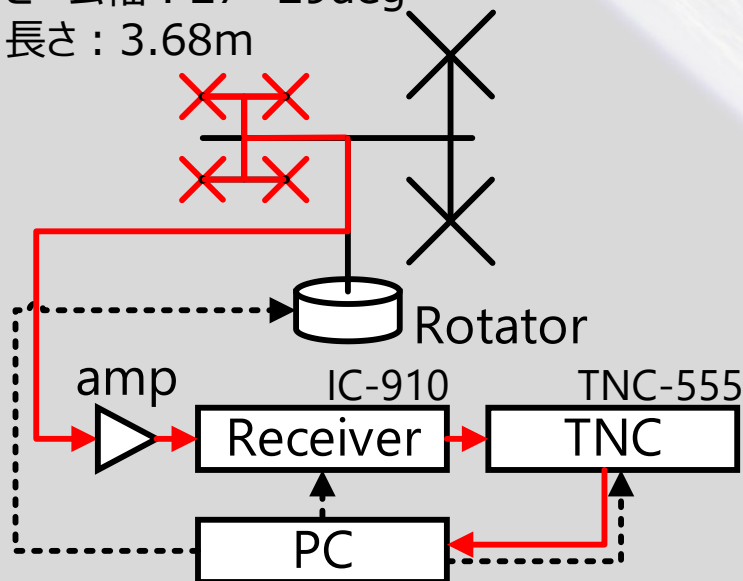
円偏波受信アンテナ x4

430MHz帯, クロス八木

利得: 14.65~15.55dBi

ビーム幅: 27~29deg

長さ: 3.68m



円偏波受信
旧アンテナシステム

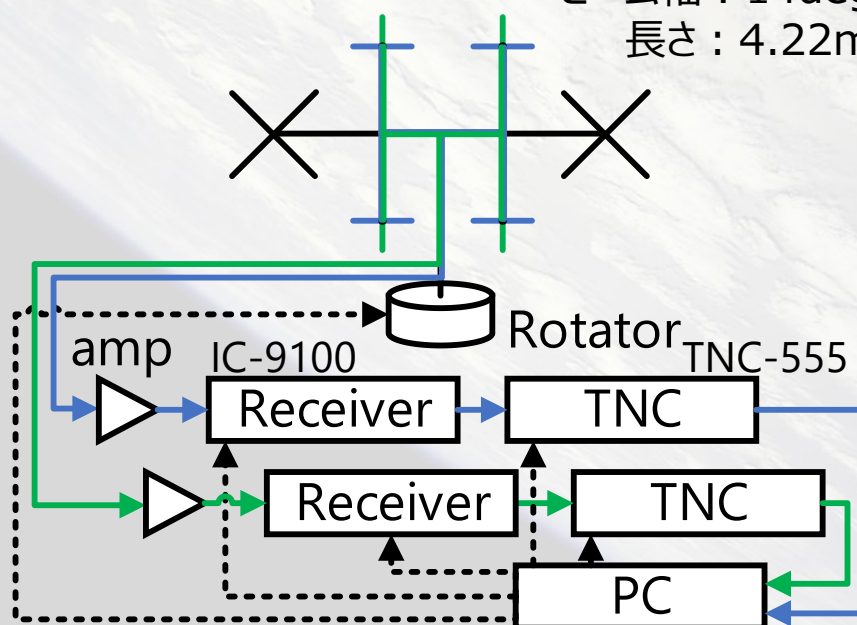
直線偏波受信アンテナ (水平 x4, 垂直 x4)

430MHz帯, 八木

利得: 24dBi

ビーム幅: 14deg

長さ: 4.22m



偏波ダイバーシティ受信
新アンテナシステム

---> コマンドライン -> 円偏波受信ライン -> 水平偏波受信ライン -> 垂直偏波受信ライン

NEXUSのアマチュア衛星運用

NEXUSはミッション機器の宇宙実証と並行して以下のアマチュア衛星運用を行います。

- 1 HKデータ, 地球撮影データ, 電界強度データのダウンリンク
- 2 SSTV画像のダウンリンク
- 3 デジトーカ音声のダウンリンク
- 4 $\pi/4$ shift QPSK送信機を用いた地球撮影データのリアルタイムダウンリンク
- 5 FSK送信機を用いた地球撮影画像のリアルタイムダウンリンク
- 6 リニアトランスポンダへの音声データのアップリンクによる音声データ中継

NEXUSのアマチュア衛星運用

現在CWで送信しているデータ

NEXUSが送信しているCWのデータフォーマットは以下の通りです。
(2020年2月9日現在)

コールサイン, 衛星名	0.5sで1カウント	サブシステム		リセット回数情報	衛星の各軸角速度	
11文字	8文字	10文字		12文字		
JS1YAV	CW	衛星	スイッチ	リセット	バス	角速度
NEXUS	モード	時間	情報	情報	電圧	
CW送信モード		サブシステム		バス系電圧		
2文字		電源ON/OFF状況		4文字		
		2文字				

CW送信周波数は **437.075 MHz** です。受信していただいた方にはQSLカードを差し上げています。

NEXUSのアマチュア衛星運用

リニアトランスポンダ運用

毎週日曜日の午前中に行っています。

モードは SSB / CW で、周波数は以下の通りです。

送信 [MHz]	145.900	145.915	145.930
受信 [MHz]	435.910	435.895	435.880

ドップラーシフトによって以下の様に周波数が遷移します。

送信固定(145.915MHz)の場合、

AOS 435.901 → TCA 435.895 → LOS 435.889



受信固定(435.901MHz)の場合

AOS 145.915 → TCA 145.909 → LOS 145.903



NEXUSのアマチュア衛星運用

トラポン海外運用

トラポン運用は日本国内だけでなく海外でも行っており，世界各国でQSO報告をいただいています．



トラポンQSO報告場所

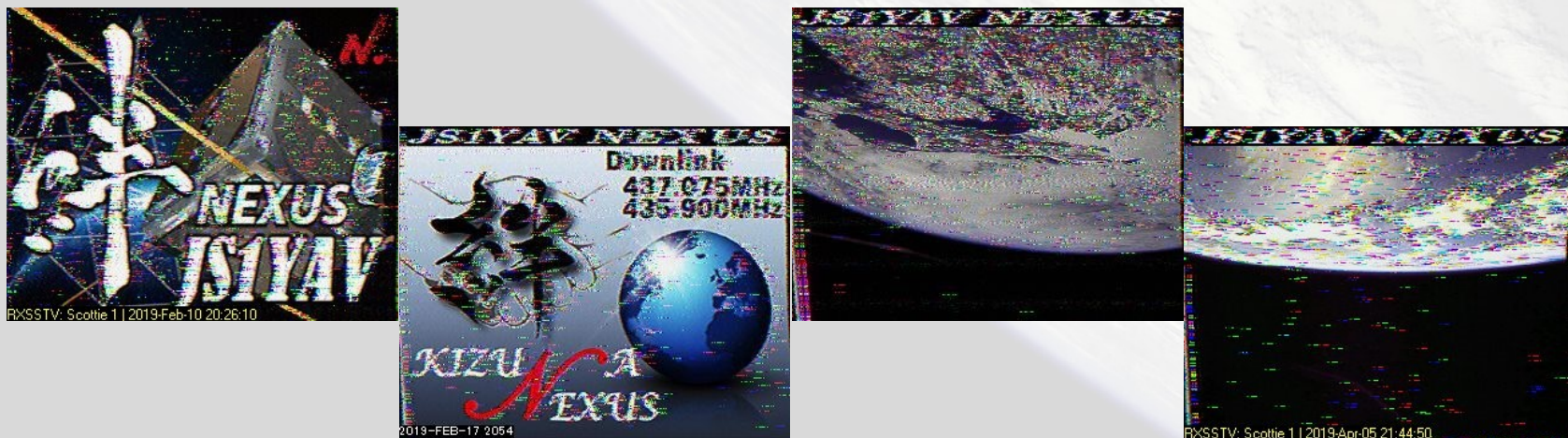
- 日本から衛星を介して，アジア地域の方々との交信も可能です．

NEXUSのアマチュア衛星運用

SSTV, デジトーカ運用

毎週日曜日の午後に行っています。

SSTV運用では、あらかじめ衛星内に保存しておいた画像の他に、カメラで撮影した画像をSSTV信号として送信します。



↑SSTV画像例

デジトーカ運用では、あらかじめ衛星内に保存しておいた音声データを送信します。

送信周波数は **437.075 MHz / FM** です。これも受信していただいた方にはQSLカードを差し上げています。

NEXUSのアマチュア衛星運用

運用情報

運用情報はNEXUSのTwitter, 運用情報ページ, ホームページ等で公開しています.

ご興味のある方は, 「NEXUS 衛星」で検索していただければ, 運用情報だけでなくNEXUSに関する様々な情報が得られます.

※ホームページリンク

http://sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/nexus/0_Top.html

※Twitterリンク

<https://twitter.com/gsnihonuniv>

※運用情報ページリンク

<http://nexusoperation.seesaa.net/>

ご清聴ありがとうございました

