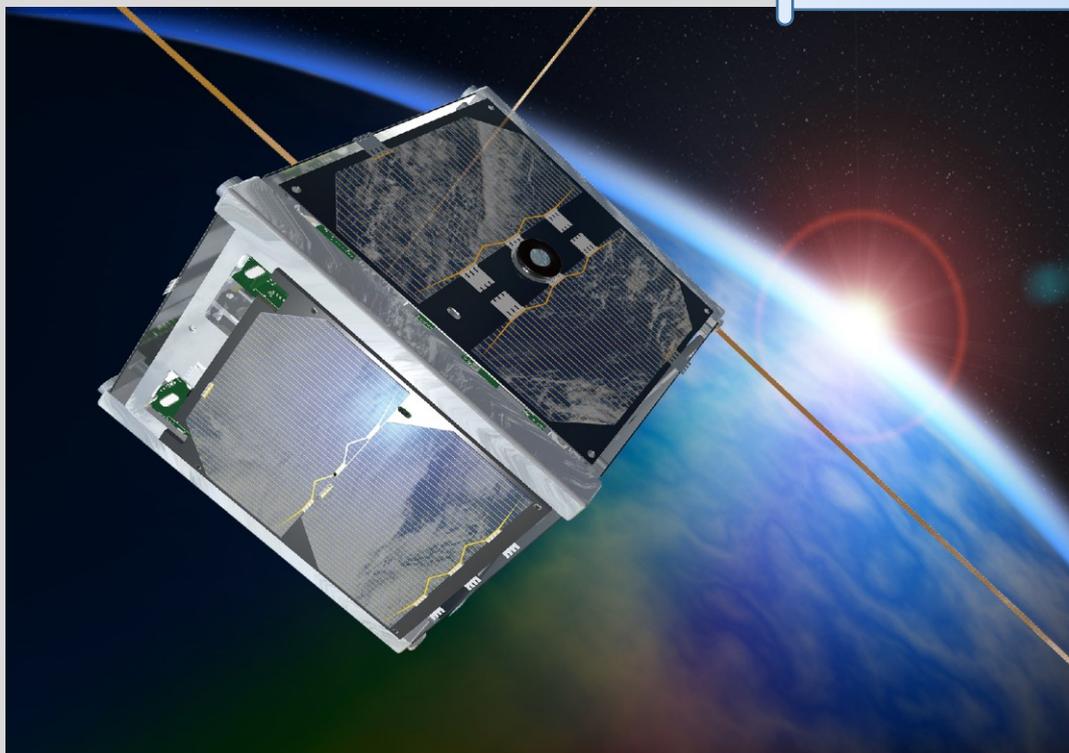


アマチュア通信技術実証衛星 NEXUSの成果報告

2021年3月20日(土) JAMSAT シンポジウム 2021



NEXUS プロジェクトチーム

日本大学

佐藤陸
中村壮児
中村涼太
藤井瞳
宮崎康行

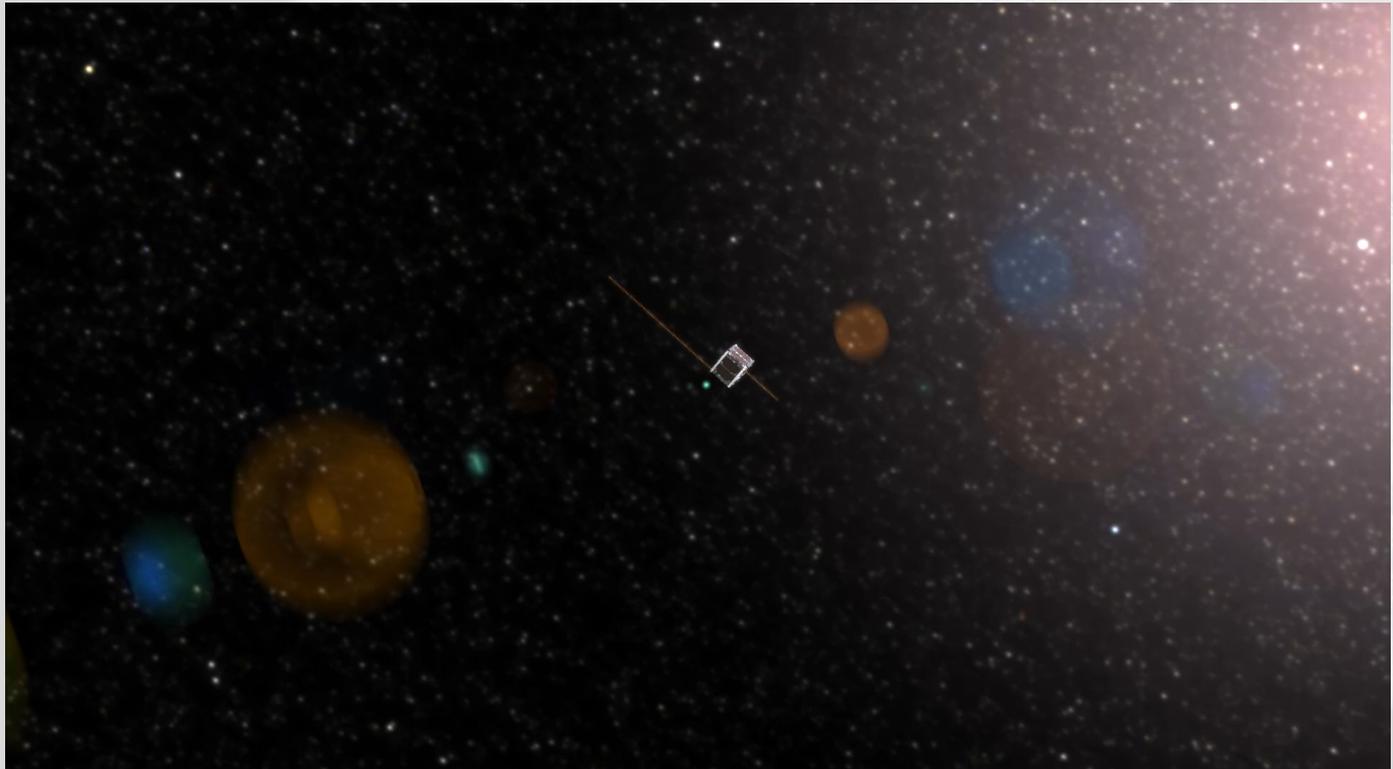
JAMSAT

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



目次

1. CubeSat「NEXUS」
 2. ミッション内容
 3. 成果
 4. 今後の展望
- おわりに



1. CubeSat「NEXUS」

◆NEXUS概要

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)

- **日本大学とJASMAT(日本アマチュア衛星通信協会)**が共同で開発したCubeSat
- JAXAの**革新的衛星技術実証1号機**に選定, イプシロンロケット4号機により2019年1月に打ち上げ
- 約10cm立方で質量約1.2kgの**1Uサイズ**
- 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る



1. CubeSat「NEXUS」

◆開発背景・目的

NEXUSの開発背景・目的は以下の通り.

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

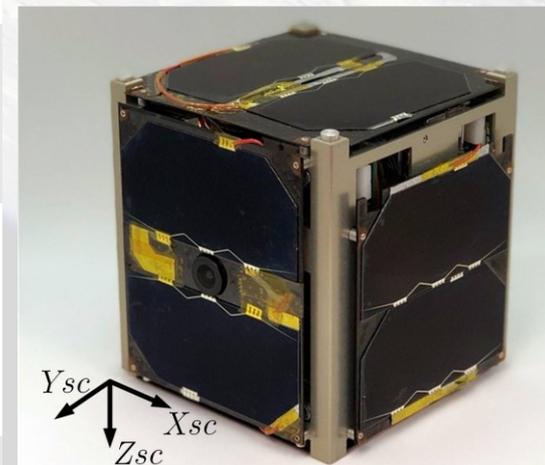
- ✓ トラポン運用により, アマチュア無線家の方々の通信技術の向上に貢献

1. CubeSat「NEXUS」

◆バス部基本諸元

NEXUSバス部基本諸元

項目	内容
投入軌道	太陽同期準回帰軌道(高度約500km)
ロケット	イプシロンロケット4号機 (革新的衛星技術実証1号機)
軌道寿命	約3年半(定常運用：2年，後期運用：1年半)
サイズ, 質量	105.0×105.0×113.5 mm (1U), 1.24 kg
電源系	バス電圧：5.0±0.1 V 二次電池：Li-ionバッテリー, 1直列4並列 太陽電池：GaAs太陽電池, 2直列6並列
通信系	・送信系(435MHz帯) CW：0.1W AFSK：0.8W,1200bps GMSK：0.8W,9600bps ・受信系(145MHz帯) AFSK：1200bps
構造系	主要構造部材：A7075-T7351
熱制御系	バッテリーのみ0°C以上に制御



NEXUSフライトモデル外観

1. CubeSat「NEXUS」

◆ ミッション機器概要

① $\pi/4$ shift QPSK送信機

- アマチュア衛星通信においてこれまで主流であった通信速度よりも高速な通信(38.4kbps)が可能
- 誤り訂正符号を有したCCSDSプロトコルの採用により、利得向上を図る



大きさ	80×40×10 mm	通信速度	38.4 kbps
重さ	15.5 g	送信周波数	435.900 MHz
動作電圧	3.33~3.5 V	送信電力	0.3 W
消費電流	680 mA	占有周波数帯域	25.890 kHz

② FSK送信機

- 通信速度が可変であり、受信環境に応じて適切な通信速度の設定が可能



大きさ	80×28×5 mm	通信速度	1.2, 2.4, 4.8, 9.6, 14.4, 19.2 kbps
重さ	6.5 g		
動作電圧	3.5±0.1 V	送信周波数	435.900 MHz
消費電流	600 mA	送信電力	0.4 W

1. CubeSat「NEXUS」

◆ ミッション機器概要

③ リニアトランスポンダ

- 145MHz帯でアップリンクされた音声を435MHz帯に変換し、ダウンリンク
- 145MHz帯の電界強度測定機能を有する

大きさ	80×86×10 mm	送信周波数	Up:145.930~145.900 MHz Down: 435.880~435.910MHz
重さ	64.6 g		
動作電圧	3.5±0.1 V	送信電力	0.5W
消費電流	930 mA	変調方式	CW, SSB



④ N-CAM (カメラシステム)

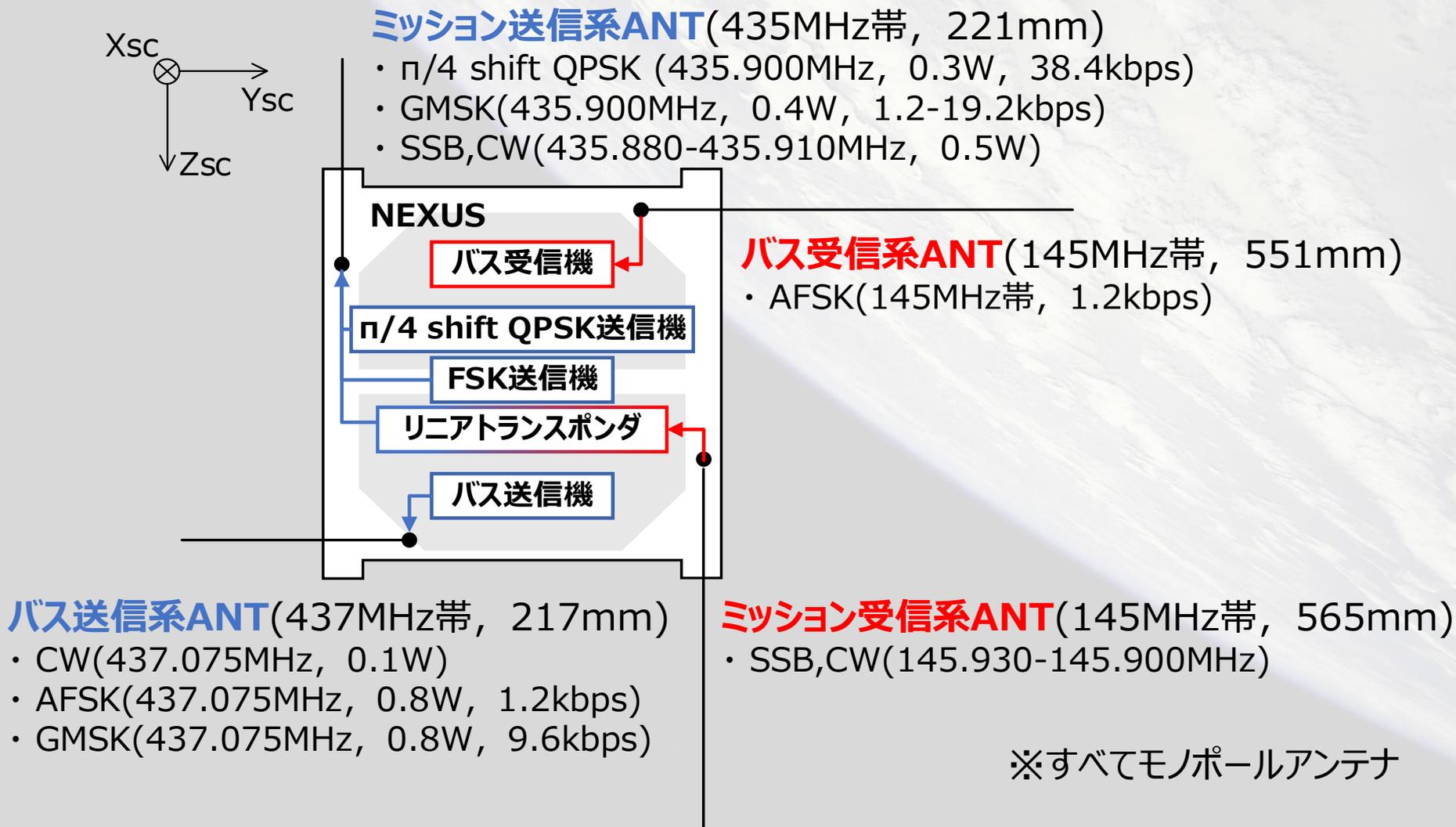
- 解像度や画像形式、画像効果などを細かく調整することが可能

大きさ(基板)	70×30×10 mm	画角	H:63, V:49,D:75 deg
大きさ(カメラ)	30×30×23 mm	解像度	QVGA, VGA, SVGA, HD, FullHD, max(2592×1944 px)
重さ	23 g		
動作電圧	5.0 ±0.2 V	フレームレート(動画)	3.75~16.88fps
消費電流	500 mA	ROM/RAM	32/16 MB



1. CubeSat「NEXUS」

◆NEXUS通信系



2. ミッション内容

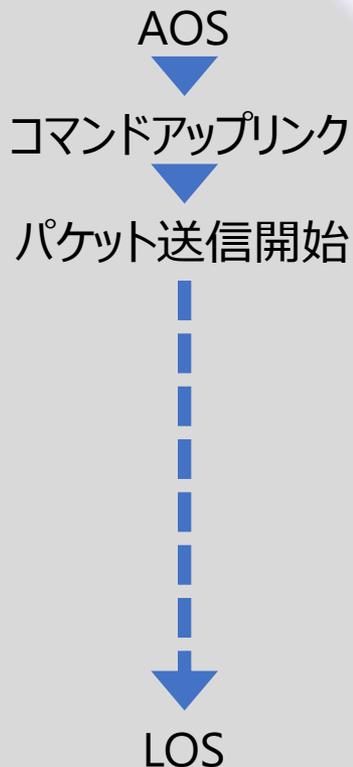
レベル	ミッション項目	達成日	達成率
Minimum Success	(1) $\pi/4$ shift QPSK送信機の動作実証 達成条件： $\pi/4$ shift QPSK送信機を用いた $\pi/4$ shift QPSK変調データの復調	2019 1/23	100%
	(2) FSK送信機の動作実証 達成条件：FSK送信機を用いたGMSK変調データの復調	2019 1/23	100%
Full Success	(3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認 達成条件：実行スループット*が従来の通信機(GMSK9600bps)の3倍以上であることを確認	2021 2/13	100%
	(4) FSK送信機の実用性確認 達成条件：実行スループット*が従来の通信機の1.5倍以上であること、各通信速度で通信可能であることを確認	2020 12/14	100%
	(5) リニアトランスポンダの動作実証 達成条件：日大地上局からアップリンクした音声を、リニアトランスポンダで中継し、他の地上局でダウンリンクできることを確認	2019 1/26	100%
	(6) N-CAMの実用性確認 達成条件：Full HDサイズ以上の画像を撮影・ダウンリンクし、画像に問題がないことを目視で確認	2019 2/14	100%
Extra Success	(7) 軌道高度約500kmにおける145MHz帯の電界強度マップの作成 達成条件：高度約500kmにおける145MHz帯の地球全体の電界強度マップの完成	-	60%

※復調できたダウンリンクデータの総量を通信時間(データ送信開始から地上局の可視範囲外に衛星が出るまで)で割ったもの

2. ミッション内容

◆ 実行スループットの算出方法

バス送信機, FSK送信機の例



取得パケット (AX.25プロトコル)

Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag
Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag
⋮					
Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag

NEXUSは回帰日数が約9日の太陽同期準回帰軌道を周回 (1日4~5パス)

➡ 9日間(約40パス分)で実効スループットの統計をとり, それぞれ比較

2. ミッション内容

◆ 実行スループットの算出方法

バス送信機, FSK送信機の例



$$\text{実効スループット [bps]} = \frac{\text{1パスに取得したInfo部データ総量}}{\text{通信時間}}$$

取得パケット (AX.25プロトコル)

Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag
Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag
⋮					
Preamble	Flag	Call sign +Control	Info	CRC	Flag

NEXUSは回帰日数が約9日の太陽同期準回帰軌道を周回 (1日4~5パス)

➡ 9日間(約40パス分)で実効スループットの統計をとり, それぞれ比較

2. ミッション内容

◆その他実施した運用・実験等

- 偏波ダイバーシティ受信性能評価

新設地上局に水平・垂直偏波を独立したプリアンプ、無線機、TNCで復調し、データを補完し合う**直線偏波ダイバーシティ方式**を導入

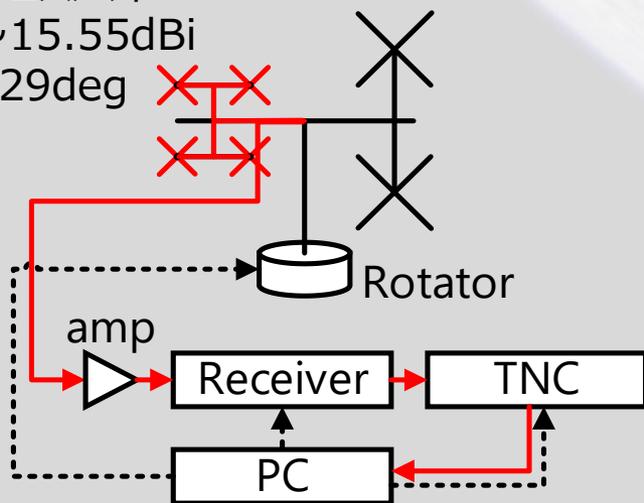
円偏波受信アンテナ x4

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

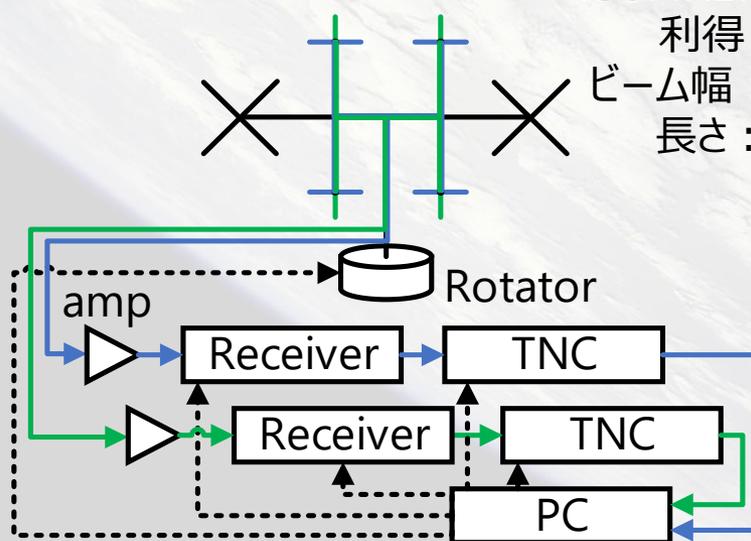
直線偏波受信アンテナ (水平 x4, 垂直 x4)

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

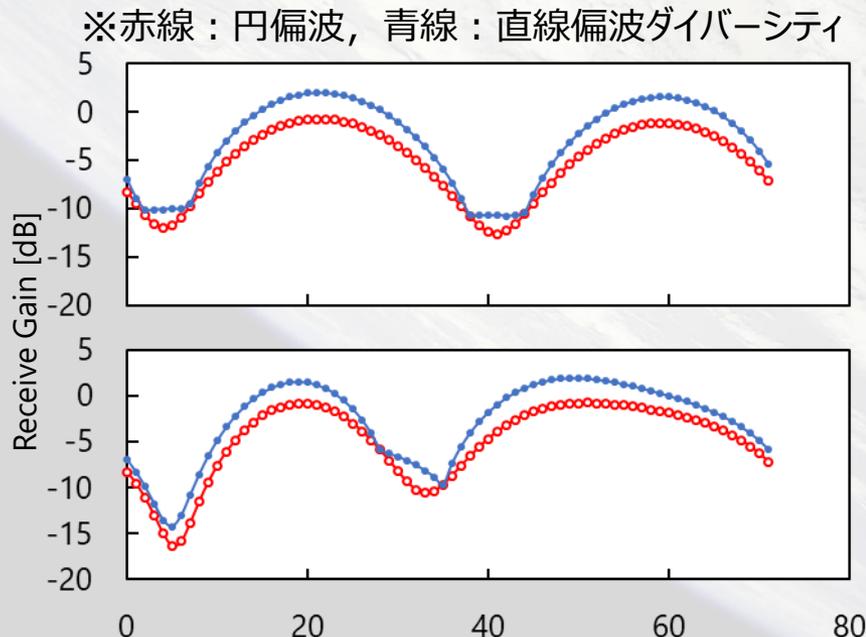
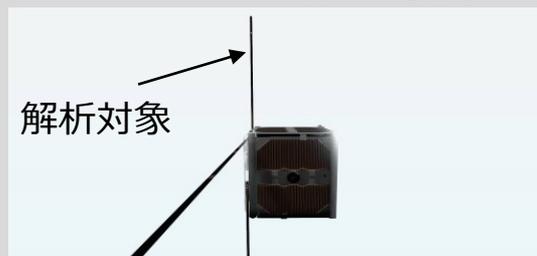
2. ミッション内容

◆その他実施した運用・実験等

- 偏波ダイバーシティ受信性能評価

新設地上局に水平・垂直偏波を独立したプリアンプ、無線機、TNCで復調し、データを補完し合う**直線偏波ダイバーシティ方式**を導入

地上局から見た衛星の姿勢



→実際の運用データから実行スループットを算出し、直線偏波ダイバーシティ方式の有効性を、従来の円偏波受信方式と比較することで示す。

→今後、新設される地上局の検討材料にしよう

2. ミッション内容

◆その他実施した運用・実験等

- AX.25プロトコル プリアンブル数・Info部データ量評価

AX.25プロトコル(1フレーム)



プリアンブル量 ↘ … スループット ↗ (?)

しかし、信号同期が取れずにパケットを落とす可能性がある

Info部データ量 ↗ … スループット ↗ (?)

しかし、1パケットのデータ量が大きくなる分、通信中にエラーが起きる確率が高くなり、パケットを落とす可能性がある

2. ミッション内容

◆その他実施した運用・実験等

- AX.25プロトコル プリアンブル数・Info部データ量評価

AX.25プロトコル(1フレーム)



NEXUSはプリアンブル量とInfo部データ量が可変

→軌道上で2つのパラメータを変化させて実効スループットを測定する実験を行う

→実験結果を評価し, CubeSat開発者・運用者にとって有益な情報を示す

→CubeSat通信のリアルな通信速度を公開し, 設計・運用の目安にもらう

2. ミッション内容

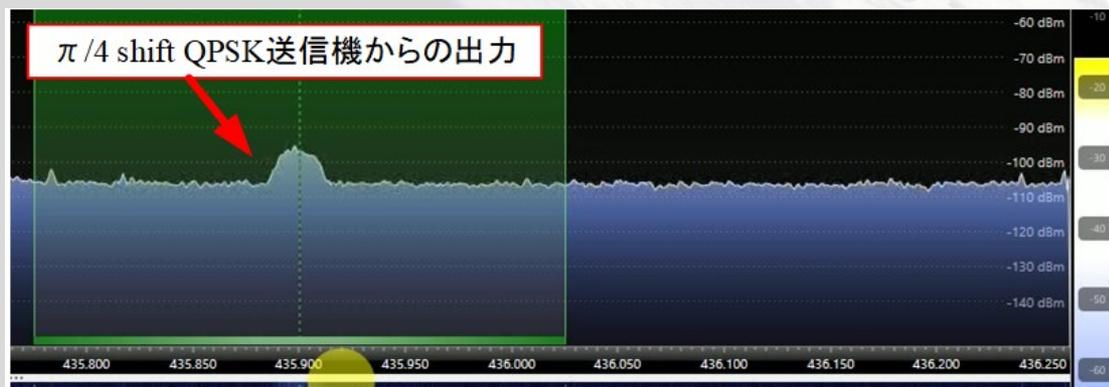
◆その他実施した運用・実験等

- アマチュア運用
 - トラポン運用, デジトーカー運用, SSTV運用等
 - アマチュア無線家の方々の通信技術の向上に貢献
- 衛星バス オープンソース化
 - 仕様書, 衛星構体CAD・図面, 基板データをHP上で公開
 - 今後の衛星開発, CubeSat開発に役立てていただくことが狙い

3. 成果

◆(1) $\pi/4$ shift QPSK送信機の動作実証

- $\pi/4$ shift QPSK変調で送信し，地上で復調を確認(2019/1/23, 夜運用)



ミッション(1) 達成

◆(2) FSK送信機の動作実証

- GMSK変調で送信し，地上で復調を確認(2019/1/23, 昼運用)

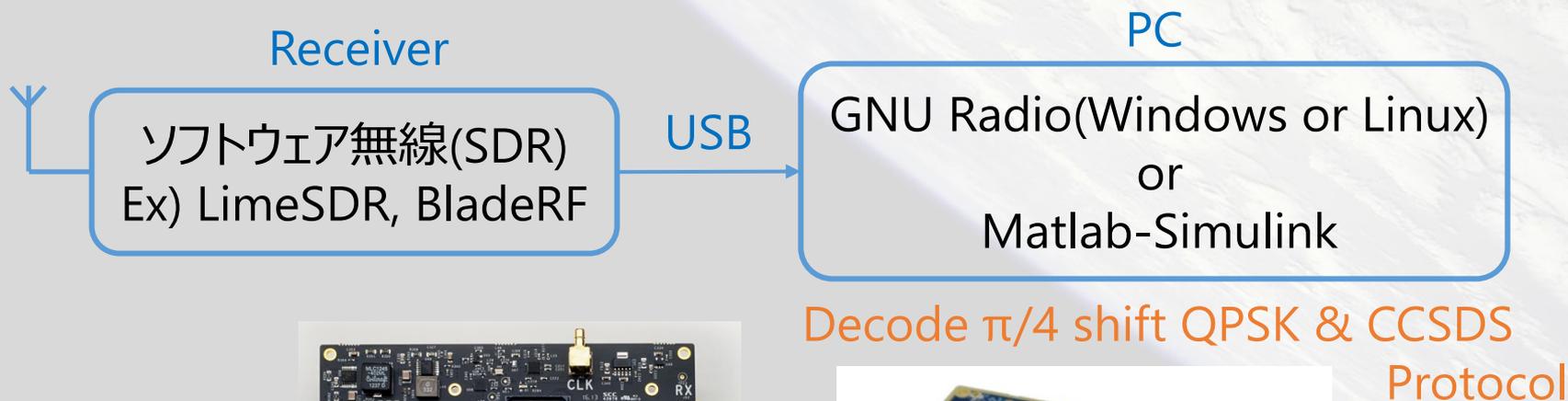


ミッション(2) 達成

3. 成果

◆(3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認

- 動作実証の際に用いた復調機はS/N比が悪いことが原因で、ダウンリンクデータを連続的に復調することが難しく、実行スループットが低かった。
- S/Nの改善を目指し、SDRを用いた安価で扱いやすい復調機を、日大独自で開発していた。



BladeRF



LimeSDR

3. 成果

◆(3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認

しかし、なかなか実行スループットが改善しなかったため、JAMSATの皆様やアマチュア無線家の方々にご協力いただき、以下のことを実施した。

- 地上局アンテナLNA移設・増設工事
 - アンテナタワー下に設置していたLNAを、アンテナの給電点直下に移設し、新たにLNAを追加し、2段のLNAで増幅
 - 総合NFと総合ゲインの改善 (NF:1.50dB→0.92dB, ゲイン:8.62dB→28.69dB)



3. 成果

◆(3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認

しかし、なかなか実行スループットが改善しなかったため、JAMSATの皆様やアマチュア無線家の方々にご協力いただき、以下のことを実施した。

- UZ7HO Andy様提供 Sound modemソフトの使用
- NEXUS開発チームがQPSK復調機制作に難航している中、JA0CAW 佐藤様経由で、Andy様に連絡いただき、QPSK復調ソフト(Sound modem)を提供していただいた。

QPSK復調の流れ



3. 成果

◆(3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認

- 従来通信機との実行スループットの比較

達成条件：実行スループットが従来通信機(バス送信機, GMSK9.6kbps)の**3倍**以上であることを確認

平均実効スループット

バス送信機	QPSK送信機
GMSK 9.6k [bps]	QPSK 38.4k [bps]
2279	12732

従来通信機に比べて **5.58** 倍

- 以上より, $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性を示すことができたと判断.
- 一般のアマチュア無線家の方々にもダウンリンクいただいている.
- 復調方法はJAMSAT NL300号にJA1OGZ金子様が掲載 (Sound modemについての問い合わせ先もNLに有り).

➡ ミッション(3) 達成

3. 成果

◆(4) FSK送信機の実用性確認

- 従来の通信機との実行スループットの比較

達成条件：実行スループットが従来通信機(バス送信機, GMSK9.6kbps)の**1.5倍**以上であることを確認

平均実効スループット

バス送信機	FSK送信機	
GMSK9.6k [bps]	GMSK9.6k [bps]	GMSK19.2k [bps]
2279	3465	6002

通信速度 9600bpsの場合

従来通信機に比べて **1.52** 倍

通信速度 19200bpsの場合

従来通信機に比べて **2.63** 倍

→従来通信機の**1.5倍**以上

→以上より、FSK送信機の実用性を示すことができたと判断。

→復調方法はHPにて公開しており、一般のアマチュア無線家の方々にもダウンリンクいただいている。

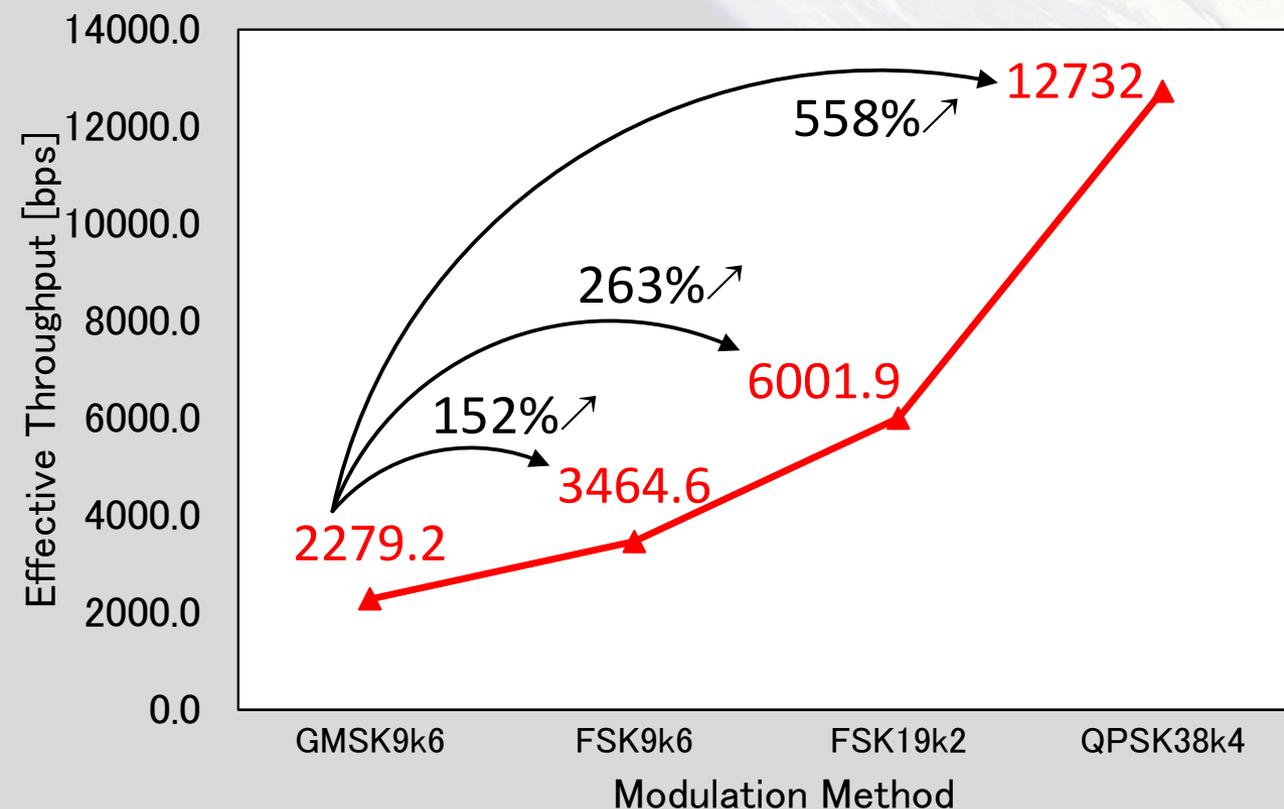
➡ ミッション(4) 達成

3. 成果

◆ (3) $\pi/4$ shift QPSK送信機の実用性確認

◆ (4) FSK送信機の実用性確認

- 従来の通信機との実行スループットの比較 (グラフ)



目標値

FSK : バス送信機(GMSK9.6k)に比べて**1.5倍**

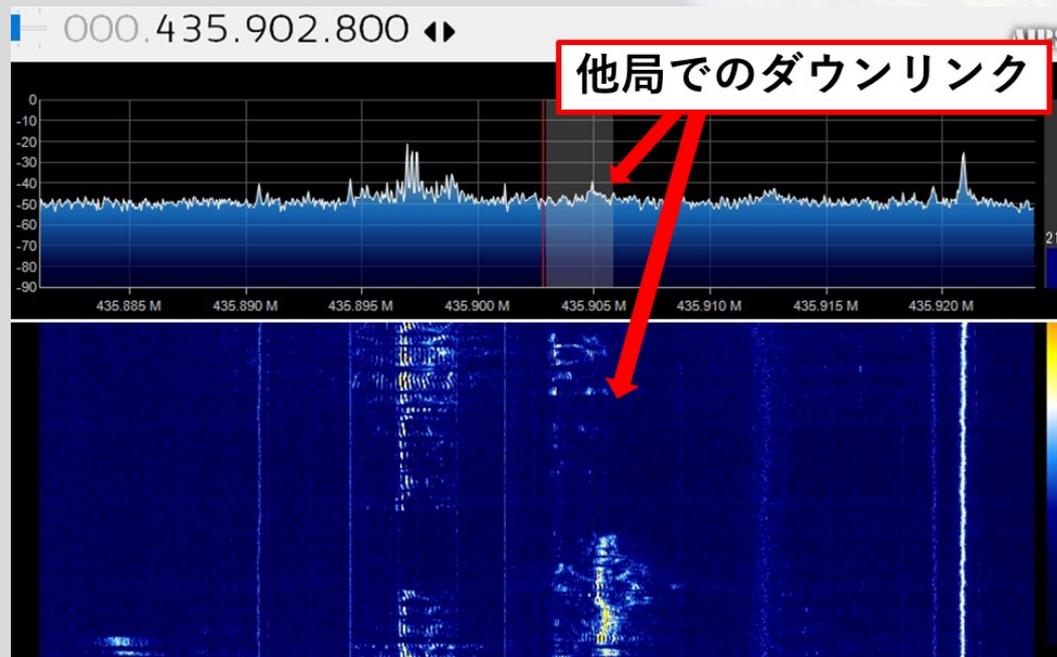
FSK : バス無線機(GMSK9.6k)に比べて**3倍**

→目標値を大きく上回る結果となった。

3. 成果

◆(5) リニアトランスポンダの動作実証

- 送信周波数145.915MHz, 送信出力10Wで, 日本大学地上局から音声をアップリンク(2019/1/26, 昼運用)
- その音声を他局にて435MHz帯でダウンリンク



➡ ミッション(5) 達成

JA1OGZ 金子様より提供

3. 成果

◆ (6) N-CAMの実用性確認

- **最高解像度(2592×1944px)**で地球撮影(2019/2/4)



日本列島南東の太平洋付近

フレームレート最大(16.88fps),
SVGA(800×600)で動画撮影
(2019/6/2)

圧縮率変更, 最高解像度
(2592×1944px)で撮影
(2019/5/5)

Full HD(1920×1080px)以上の
画像をダウンロード

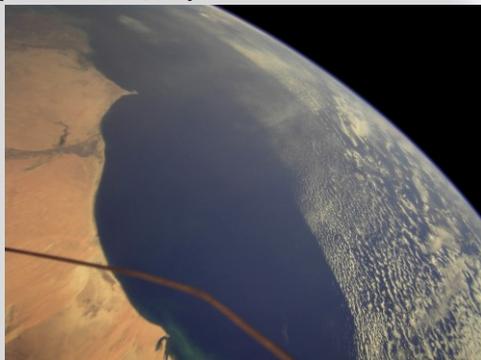


ミッション(6) 達成

1パス中にVGA(640×480)画
像を撮影し, FSK送信機を用
いてダウンロード(2020/2/24)



中国大陸上空



アフリカ大陸上空



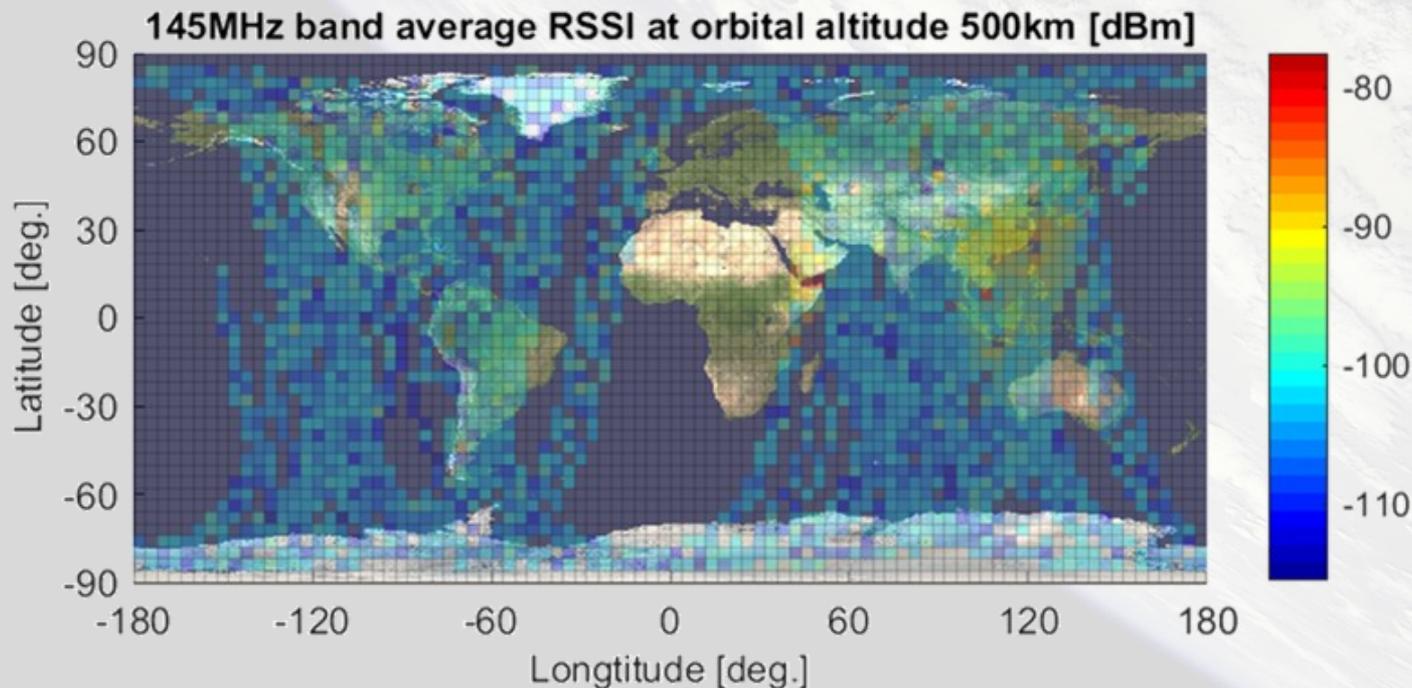
宇宙空間

→様々な解像度での画像・動画撮影, 1パスで撮影からダウンロードまで行うといったことも可能

3. 成果

◆(7) 電界強度マップの作成 (達成率60%)

- 電界強度マップ



- 全球の約60%の範囲の電界強度測定ができていたため、ミッション達成率は60%とした。
- 電界強度測定は、衛星内部のバグによりこれ以上のデータの取得が見込めないため、ここで終了とした。
- 衛星内部のバグの詳細については、近日HPで公開予定の開発報告書に記載。

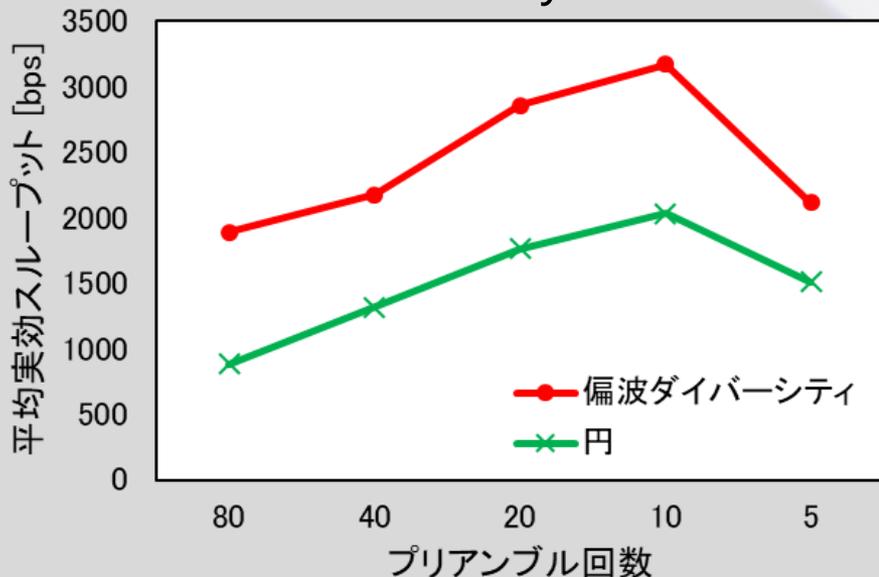
3. 成果

◆ 偏波ダイバーシティ受信性能評価

◆ AX.25プロトコル プリアンブル数・Info部データ量評価

- GMSKによる通信の場合、プリアンブルは0xEE(0b11101110)
- プリアンブル量は可変であり、コマンドにて0xEEを送る回数を指定可能
- FSK送信機 (RF出力0.4W, GMSK9600bps) にて評価を行う

Info部データ量を163bytes固定としたときの平均実効スループットは次の通り



プリアンブル回数	偏波DS [bps]	円 [bps]
80回	1890 (4107)	883 (2582)
40回	2176 (4418)	1318 (3091)
20回	2858 (5319)	1608 (3486)
10回	3169 (5724)	2790 (4229)
5回	2261 (3413)	1912 (2551)

※かっこ内の値は最大実効スループット

- ✓ プリアンブル10回の際に実効スループットが最大となる
- ✓ 円偏波受信に比べて偏波ダイバーシティ受信の方が実効スループットが大きい

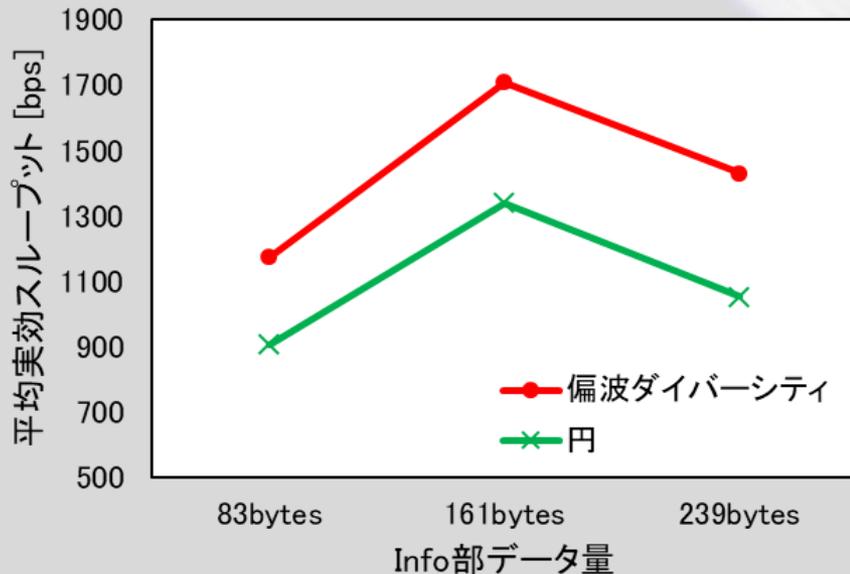
3. 成果

◆ 偏波ダイバーシティ受信性能評価

◆ AX.25プロトコルプリアンブル数・Info部データ量評価

- Info部データ長はコマンドにより, 83, 161, 239bytesから選択可能
- バス無線機 (RF出力0.8W, GMSK9600bps) にて評価を行う

プリアンブルを80回固定としたときの平均実効スループットは次の通り



Info部データ量	偏波DS [bps]	円 [bps]
83bytes	1174 (1828)	907 (1461)
161bytes	1709 (2592)	1341 (2167)
239bytes	1431 (2710)	1053 (1802)

※かっこ内の値は最大実効スループット

- ✓ Info部データ量が161bytesの時, 実効スループットが最大となる
- ✓ 円偏波受信に比べて偏波ダイバーシティ受信の方が実効スループットが大きい
- 偏波ダイバーシティの有効性, プリアンブル数・Info部データ量の目安を示した。

3. 成果

◆アマチュア運用

- TRP運用
- デジトーカー運用：予め録音してある音声データを受信
- SSTV運用：衛星から画像データを音声として送信，受信した音声データから画像を復元

→これらの運用で，全世界のアマチュア無線家の方々から**1100件**以上の受信報告をいただいております，国際貢献に寄与している。



SSTV画像



受信報告をいただいた場所・地域

3. 成果

◆衛星バス オープンソース化

- 仕様書, 衛星構体CAD・図面, 基板データをHP上で公開

NEX-003-4

4. バス部仕様

本章では、3節に示した機能を満たすよう開発したバスシステムのシステムダイアグラムと搭載部品一覧、サブシステムとのIFおよびコマンド一覧等を示す。搭載部品は抵抗、コンデンサ、コイル等の詳細な部品は省略し、システムダイアグラムに記載している部品のみを一覧表にして示す。なお、バスシステムの基板構成はEPS基板、CDH&SG基板、FMR&CW基板の3枚としており、それらをマザーボードで接続している。また、以降に示す各サブシステムのコマンドに関しては、9.3節「送信コマンドデータフォーマット」と一緒に確認されたい。

4.1. 電源系(EPS)

4.1.1. EPSシステムダイアグラム

EPSのシステムダイアグラムをFigure 4-1に示す。

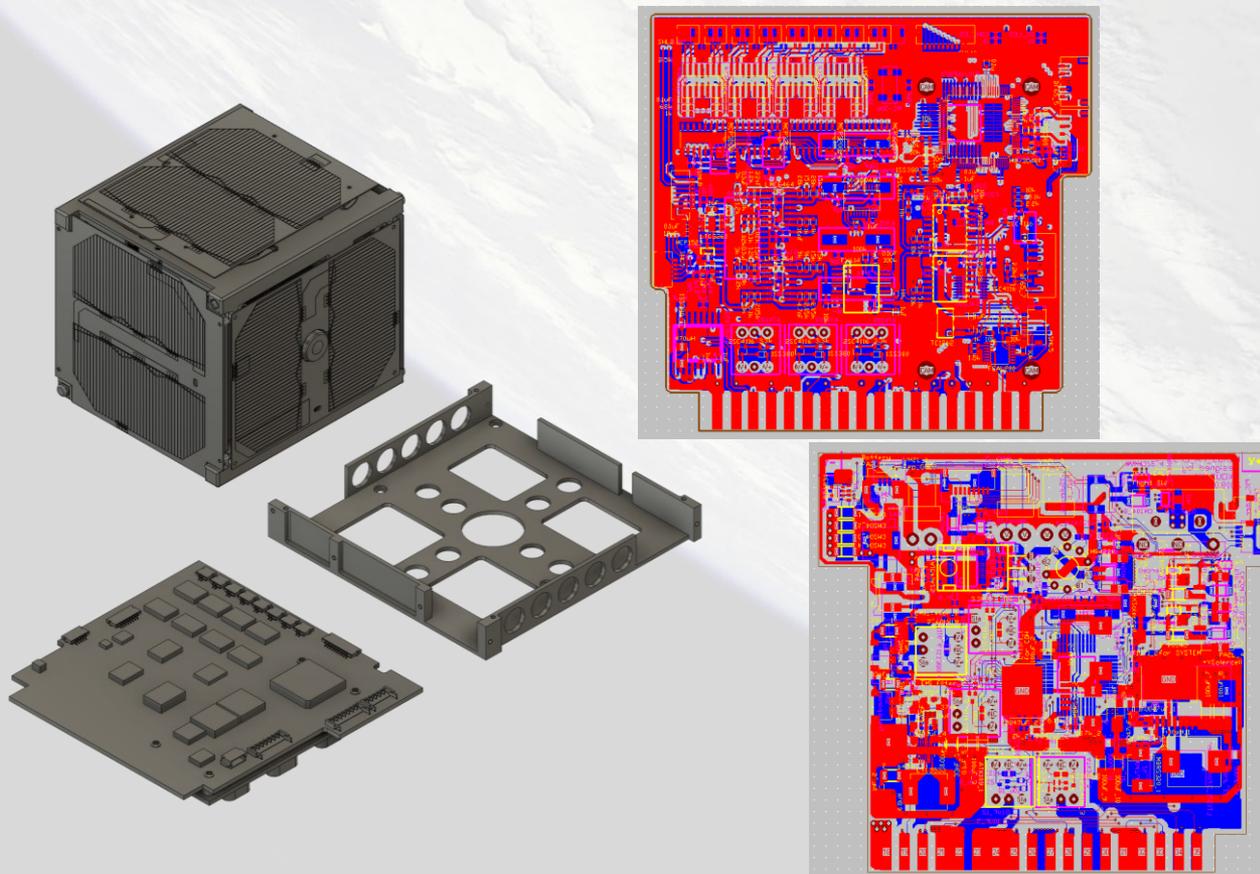
Figure 4-1 EPSシステムダイアグラム

4.1.2. EPS搭載部品

EPSの搭載部品一覧をTable 4-1に示す。なお、Galvanometer(電流計)はSGのコンポーネントとして、に記載している。

No.	名称	図	概要
1	バッテリー		衛星を動作させるためのバッテリー、4並列で搭載 ・メーカー Panasonic ・型番 NP120 (セル型番: UF103450P) ・容量 1880 mAh ・公称電圧 3.7V ・満充電電圧 4.2V ・寸法 9.95×33.95×49.6 mm ・選定理由 UN 動用品であること、SEEDS-IIおよびSPROUT 使用実績点
2	太陽電池セル		構体6面に張り付け、日照時に発電させ電力確保。2直列6並列の12枚を搭載。 ・メーカー AZUR SPACE ・型番 30% Triple Junction GaAs Solar Cell Assembly GaInP/GaAs/Ge on Ge substrate ・選定理由 SEEDS-IIおよびSPROUT で用いたEMCORE製の太陽電池セルと同様のスペックのものを選定

41



→今後の衛星開発, CubeSat開発に役立てていただくことを狙いとしている。

4. 今後の展望

◆ QPSK復調方法・ソフトの公開

- QPSKの復調方法(JAMSAT NL300号にJA1OGZ金子様が掲載されたもの), 日大独自開発ソフト・使用方法をHPで公開予定

◆ 仕様書の更新・オープンソース化・開発報告書の公開

- 現在HPで公開している, 仕様書を更新し, 公開(特にミッション無線機の部分)
- NEXUSの回路図も公開 (仕様書, CAD, 基板データは公開済み)
- NEXUSの開発報告書を新たに作成し, 公開予定

◆ 後期運用 (4月から)

- JS1YAW 移動局 からのコマンドアップリンクができるよう, 無線局申請やアップリンク用ソフトウェアの開発を行っている。
- JAMSAT運用メンバーの方々からのアップリンクにより, リニアトランスポンダ, デジトーカー, SSTV運用, FSK送信機・QPSK送信機による画像データダウンリンク, 及びこれらの海外運用を継続して行う。

おわりに

JAMSATの皆様，アマチュア無線家の皆様の
多大なるご支援・ご協力のおかげで
NEXUSはフルサクセスを達成することができました。

打ち上げから本日まで，本当にありがとうございました。

今後は，たくさんのアマチュア運用で皆様にお楽しみいただけるよう
準備を進めて参ります。

今後ともよろしく願いたします。

ご清聴ありがとうございました

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

Twitter : <https://twitter.com/gsnihonuniv>

「NEXUS 衛星」で検索していただければ、たくさんの情報をご覧いただけます。

