

1F22 アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」の打ち上げ準備状況

○山田晃一郎, 日本大学 NEXUS 開発 Project チーム, 宮崎康行 (日本大学)

Preparation Status for Launch of Amateur Communication Technology Demonstration Satellite NEXUS
Koichiro Yamada, Nihon University NEXUS Development team and Yasuyuki Miyazaki (Nihon University)

Key Words: CubeSat, Amateur radio communication, Camera system

Abstract

The amateur communication technology demonstration satellite "NEXUS" is equipped with two types of communication devices ($\pi/4$ shift QPSK transmitter, FSK transmitter), which use an amateur radio band and have higher communication speed than before, a linear transponder, and a proprietary high general-purpose camera system, and demonstrates these operations as a mission. In this paper, we describe the outline of flight model of "NEXUS", the mission equipment and the ground station system, and the operational preparation status planned after launch.

1. 序論

アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」¹⁾²⁾(以下、NEXUS)では、従来のアマチュア無線機よりも、伝送速度が高速かつ低消費電力の 2 種類のアマチュア無線機($\pi/4$ shift QPSK 送信機及び FSK 送信機)と、独自開発した小型かつ高汎用性のカメラシステムである N-CAM システム、更にアマチュア無線従事者に人気の高いリニアトランスポンダをミッション機器として搭載し、それらの動作実証を行う。リニアトランスポンダは、音声データ中継器としてアマチュア無線従事者に開放する。また、開発時の技術情報をできる限り公開することで、新規衛星開発者やアマチュア無線従事者への情報提供を行う予定である。

本稿では、NEXUS のフライトモデルの仕様、各ミッション機器の仕様及びミッション概要、ミッションシーケンスを示すとともに、NEXUS の地上局システムの概要及び打ち上げ後の運用とその準備状況を示す。

2. フライトモデル仕様

本節では、NEXUS のフライトモデルの概要、衛星としての基本的な機能を述べる。NEXUS のフライトモデルの外観を図 1 に、基本諸元を表 1 に示す。ただし、各ミッション機器の諸元は 3 節で後述する。NEXUS は 1U サイズ(10cm 立方)の CubeSat であり、日本大学理工学部宮崎・山崎研究室で開発された 4 機目の超小型人工衛星である。JAXA の「革新的衛星技術実証プログラム³⁾」に採択され、イプシロンロケット 4 号機相乗りにて、2018 年度末に打ち上げられる予定である。

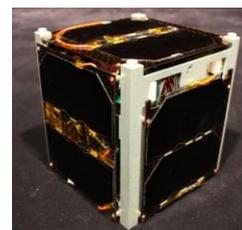


図 1 NEXUS FM 外観

表 1 NEXUS 基本諸元

投入軌道	太陽同期準回帰軌道 (軌道高度約 500 km)	
コールサイン	JS1YAV	
運用期間	定常運用	1 年
	後期運用	4 年
寸法(最外)	105 × 105 × 113.5 mm	
質量	1.24 kg	
電源系	バス電圧	5.0 V
	二次電池	3.7 V 1880 mAh
	太陽電池 (最大電力点)	2.4 V 502.9 mA
通信系	送信系 (435MHz 帯)	CW:0.1 W AFSK(1200 bps): 0.8 W GMSK(9600 bps): 0.8 W
	受信系 (145MHz 帯)	AFSK:1200 bps
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	
温度範囲 (熱解析より)	衛星外面	-30°C ~ +40 °C
	衛星内部	-20°C ~ +50 °C

NEXUS のシステムダイアグラムを以下の図 2 に示す。FMR(Flight Management Receiver), CW(Continuous Wave), EPS(Electric Power Supply), SG(Sensor Group), C&DH(Command & Data Handling) の 5 つのバスシステムと、 $\pi/4$ shift QPSK 送信機, FSK 送信機, リニアトランスポンダ, N-CAM の 4 つのミッションシステムから構成されており, 各システムが図 2 に示す通り接続され, 衛星としての機能を満足する。

NEXUS のフライトモデルに対しては, 各環境試験(振動試験, 真空試験等)を実施し, 打ち上げ時及び軌道上の環境下において, 正常に動作することが確認されている。

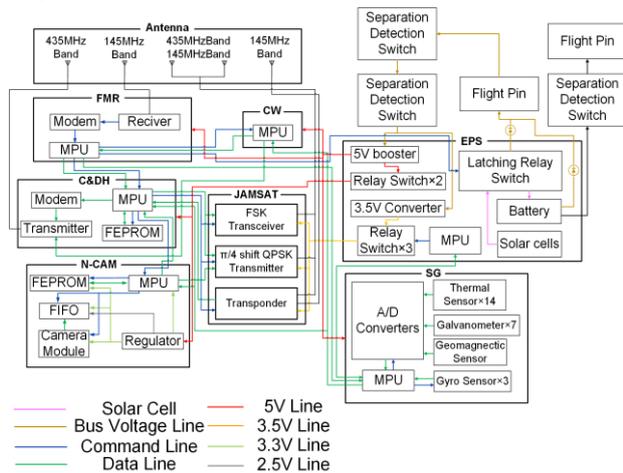


図 2 NEXUS システムダイアグラム

3. ミッション内容

NEXUS のミッションは以下の 7 つである。

- ① $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作を実証する
- ② FSK 送信機の動作を実証する
- ③ $\pi/4$ shift QPSK 送信機の実用性を示す
- ④ FSK 送信機の実用性を示す
- ⑤ リニアトランスポンダの動作を実証する
- ⑥ カメラシステム(N-CAM)の実用性を示す
- ⑦ 高度約 500km における 145MHz 帯の電界強度マップを作成する

打ち上げ後, 上記のミッションを 1 年間かけて行う。以下では, 各ミッション機器の仕様, 機能を示し, 上記の各ミッションについて具体的に述べる。

なお, 以下に示す 3 種類の通信機は, 著者らと日本アマチュア衛星通信協会(JAMSAT)との共同開発にて製作した。また, $\pi/4$ shift QPSK 送信機については, 株式会社アドニクスに製造を依頼し, 技術的支援をいただいた。

3.1. $\pi/4$ shift QPSK 送信機

$\pi/4$ shift QPSK 送信機の外観を図 3 に, 仕様を表 2 に示す。 $\pi/4$ shift QPSK 送信機は, 通信速度 38400bps での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の通信速度(AFSK:1200bps,

GMSK:9600bps)よりも高速な通信が可能となる。また, CW モード, GMSK モードでのデータ伝送も可能であり, コマンドによって動作モードの変更が可能なる仕様となっている。なお, $\pi/4$ shift QPSK 送信機と, FSK 送信機は同一のハウジングに搭載されている。

通信プロトコルには, アマチュア無線通信で一般に用いられている AX.25 に対して, 宇宙通信で標準的に用いられる CCSDS 準拠のリードソロモン符号化処理を付加したものを採用している。これにより, 誤り訂正機能を有しており, デコード率向上が見込める。



図 3 $\pi/4$ shift QPSK 送信機外観

表 2 $\pi/4$ shift QPSK 送信機仕様

送信周波数	435.900 MHz
占有周波数帯域幅	25.890 kHz
送信電力	0.4 W
消費電流(送信時)	750 mA
変調方式	$\pi/4$ shift QPSK GMSK
通信速度	38400 bps($\pi/4$ shift QPSK) 9600 bps(GMSK)
動作電源電圧	3.38~3.5 V
動作温度	-20~+60 °C
寸法	78.5×38.5×10 mm
質量	99.4 g(FSK 送信機含む)
通信プロトコル	CCSDS 準拠フレーム+AX.25

$\pi/4$ shift QPSK 送信機は, 上述のミッション①及び③を担う通信機であり, ①は $\pi/4$ shift QPSK 変調でプリアンプルを地上に送信し, デコードできた段階で達成とする。③は評価用画像データ(解像度: VGA, 形式: JPEG)を, $\pi/4$ shift QPSK 送信機を用いてダウンリンクし, 正味の通信速度が, バス通信機の通信速度(9600bps)に対して 3 倍程度速い速度であることを示せた段階で達成とする。ここで, 正味の通信速度とは, ダウンリンクデータ量を通信時間で割ったものことである。

3.2. FSK 送信機

FSK 送信機の外観を図 4 に, 仕様を表 3 に示す。FSK 送信機は, ダウンリンクの通信速度が 1200bps~19200bps の範囲で可変であるため, 受信環境が悪い場合は通信速度を遅く設定し, 必要なデータのみ確

実にダウンリンクし、受信環境が良好な場合は、通信速度を早く設定し、可能な限り多くのデータをダウンリンクする、といった柔軟な運用を可能にする。



図 4 FSK 送信機外観

表 3 FSK 送信機仕様

送信周波数	435.900 MHz
占有周波数帯域幅	21.020 kHz
送信電力	0.4 W
消費電流(送信時)	750 mA
変調方式	FSK
通信速度	1200,2400,4800,9600, 14400,19200 bps
動作電源電圧	3.5 V
動作温度	-40~+85 °C
寸法	79.0×28.0×0.75 mm
質量	99.4 g(QPSK 送信機含む)
通信プロトコル	AX.25

FSK 送信機は、上述のミッション②及び④を担う通信機であり、②については $\pi/4$ shift QPSK 送信機の際に用いたものと同様の評価用データを地上に送信し、デコードできた段階で達成とする。また、④については、表 3 に示した各通信速度で、評価用画像データがダウンリンク可能であることを確認し、正味の通信速度の最大が、バス通信機の通信速度(9600bps)に対して 1.5 倍程度速い速度であることを示せた段階で達成とする。

3.3. リニアトランスポンダ

リニアトランスポンダの外観を図 5 に、仕様を表 4 に示す。リニアトランスポンダは、145MHz 帯でアップリンクされた音声データを、435MHz 帯に変換し、ダウンリンクする音声データ中継器である。リニアトランスポンダは、アマチュア無線従事者に人気が高いが、現在国内にはリニアトランスポンダを搭載している CubeSat はないため、NEXUS に搭載し、広く利用してもらうことで、新規衛星通信利用者の獲得が見込める。今回搭載するリニアトランスポンダでは、音声データの中継が可能である。また、パワーアンプの電源 ON/OFF を切り替えることが可能な仕様となっており、不要な場合はパワーアンプの電源を OFF にしておくことで、大幅に消費電力を抑えることができる。



図 5 リニアトランスポンダ外観

表 4 リニアトランスポンダ仕様

送信周波数	435.880~435.910 MHz
受信周波数	145.900~145.930 MHz
占有周波数帯域幅	29.010 kHz
送信電力	0.5 W
消費電流	750 mA
動作電源電圧	3.5 V
動作温度	-40~85 °C
寸法	96.8×96.8×12.0 mm
質量	116.6 g

また、アマチュア無線帯を利用した CubeSat においては、衛星位置によって送受信でのデコード率が異なることが指摘されている。実際にドイツの CubeSat “UWE-3” は、に 430MHz 帯における電界強度を測定し、図 6 のように地球全体の電界強度マップを公開している⁴⁾(ただし図中、凡例の単位は dBm)。そこで、NEXUS ではリニアトランスポンダを用いて、最も人気の高いアマチュア無線帯である 145MHz 帯の電界強度を測定し、地球全体の電界強度マップを作成する。作成した電界強度マップは、一般に公開する予定であり、アマチュア無線従事者への情報提供を行う。

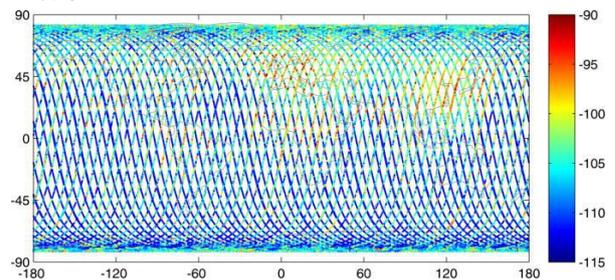


図 6 430MHz 帯電界強度マップ⁴⁾

リニアトランスポンダは、上述のミッション⑤及び⑦を担い、⑤については、日本大学の地上局からアップリンクしたデータを、リニアトランスポンダを介して他の地上局でダウンリンクされたことが確認された段階で達成とする。⑦については、NEXUS の軌道高度である、高度約 500km における 145MHz 帯の電界強度を測定しダウンリンクする。測定間隔は 10 秒若しくは 60 秒で設定可能である。10 秒間隔で

電力解析上限界まで電界強度測定を行った場合、約2500点の電界強度データを取得可能である。このデータをダウンリンクし、地球全体の電界強度マップを作成できた時点で、ミッション⑦を達成とする。

3.4. N-CAM

N-CAMの外観を図7に、仕様を表5に示す。N-CAMは、表5に示す通り、11種類の画像形式を選択して画像を撮影することが可能であるため、解像度を上げて鮮明な画像を取得することや、解像度を下げてデータ量を削減し、軌道上で撮影した画像をリアルタイムでダウンリンクすることも可能である。また、コマンドによってJPEG画像の圧縮率や、EV補正値も変更可能な仕様となっている。

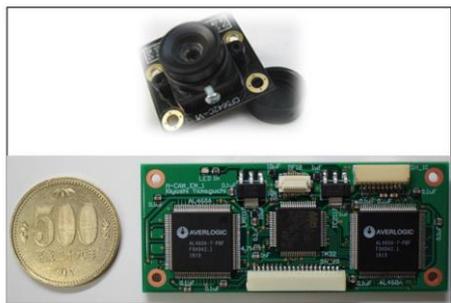


図7 N-CAM 外観

表5 N-CAM 仕様

イメージセンサ 製造業者	オムニビジョン・ テクノロジーズ	
イメージセンサ 型番	OV5642	
寸法	30×30×23 mm	
質量	23 g	
動作電圧	5.0 V	
消費電流	600 mA	
動作温度	-30~70 °C	
光学サイズ	1/4 inch	
焦点距離	3.0 mm	
画素数	2592×1944 ピクセル	
絞り	F/25	
画角	H:63,V:49,D:75 deg	
MPU	STM32F103RBT6	
ROM	32 Mbytes	
RAM	16 Mbytes	
画像形式 解像度	JPEG	QVGA,VGA, SVGA,HD, Full HD, Max(2592×1944)
	RGB565	QVGA,VGA, SVGA,HD, Max(1280×960)

また、N-CAMは通常の画像撮影の他、以下の2つの撮影モードを有しており、目的に応じて撮影モードを変更可能な仕様になっている。

(1) 動画撮影モード

コマンドによりフレームレートを設定して連続撮影を行うことにより、動画撮影をするモード。フレームレートは3.75~16.88fpsまで設定可能。

(2) 角速度による自動撮影モード

SGからの角速度データに応じて、シャッター間隔を調整し、自動でシャッターを切るモード。姿勢制御を行わなくても、確実に地球が写っている画像を撮影することが可能。

N-CAMは、上述のミッション⑥を担い、Full HDサイズ(1920×1080ピクセル)以上の画像をダウンリンクできた段階で、ミッション達成とする。

3.5. ミッションシーケンス

NEXUSのミッションシーケンスを以下の図8に示す。打ち上げ直後に、初期動作、アンテナ展開を行い、1か月以内に衛星バスシステムの動作確認を行う。その後、定常運用として、上述の各ミッションを打ち上げ後1年間以内に行い、各ミッション機器の実用性を示す。打ち上げから1年経過後、後期運用に移行する。アマチュア無線従事者に向けた後期運用については5節に後述する。



図8 ミッションシーケンス

4. 地上局システム

本節では、NEXUSの地上局システム及びその準備状況について述べる。

以下の図9に、地上局設備系統図を示す。日本大学理工学部には、既存の衛星運用のための衛星地球局が開設されている。しかし、日本では日本アマチュア無線連盟(JARL)以外にアマチュア無線の中継局の設置は認められておらず、NEXUSはトランスポンダの運用を行うため、JARLを免許人とした新たなアマチュア無線局を開局予定である。

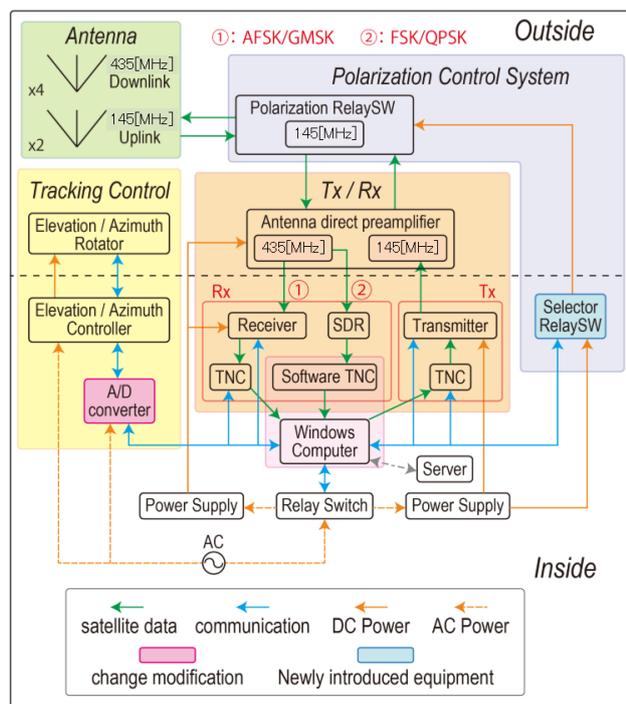


図9 地上局設備系統図

次に、NEXUSの地上局アンテナの外観を図10に、仕様を以下の表6及び表7に示す。本地上局のアンテナには、クロス八木アンテナを採用し、145MHz帯送信用アンテナ2スタック、435MHz帯受信用アンテナ4スタックを新たに建設した。

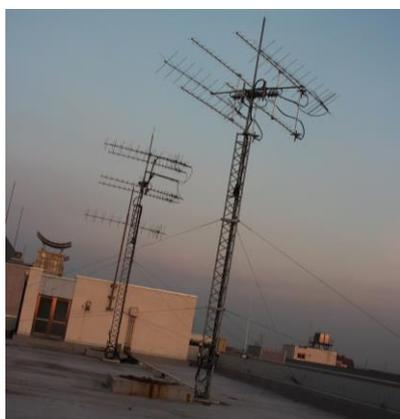


図10 地上局アンテナ外観

表6 送信用アンテナ仕様

アンテナタイプ	クロス八木アンテナ
周波数範囲	144~146 MHz
偏波	円偏波
利得	10~12 dB
半値角	33~35 deg
耐電力	50 W
F/B比	20.7~22.5 dB

表7 受信用アンテナ仕様

アンテナタイプ	クロス八木アンテナ
周波数範囲	430~435 MHz
偏波	円偏波
利得	24 dBi
半値角	14 deg
耐電力	50 W
F/B比	平均 25 dB

現在、NEXUSに搭載している各無線機と地上局との通信試験を行っており、回線マージンが確保できているかを確認している(図11)。また、今後NEXUSの地上局には運用コスト削減のため、自動運用機能を搭載する予定であり、現在自動運用に向けた地上局ソフトウェアの開発を行っている。

また、 $\pi/4$ shift QPSK 変調やFSK変調で地上に送信されたデータを受信可能なソフトウェア無線及び、復調可能なソフトウェアTNCを作成中である。完成後は一般に公開し、アマチュア無線従事者が広くNEXUSを利用できる体制を整える予定である。



図11 通信試験の様子

5. アマチュア無線運用及び準備状況

3節に示した各ミッションが達成され、ミッション機器の実用性が示された後、後期運用としてNEXUSをアマチュア無線従事者に開放し、様々な運用を行うことができるようになってきている。本節では、予定している運用及びその準備状況について述べる。

図12はNEXUSの通信概念図である。一般のアマチュア無線局では、リニアトランスポンダへのアップリンクの他、6種類のデータダウンリンクを行うことが可能である。

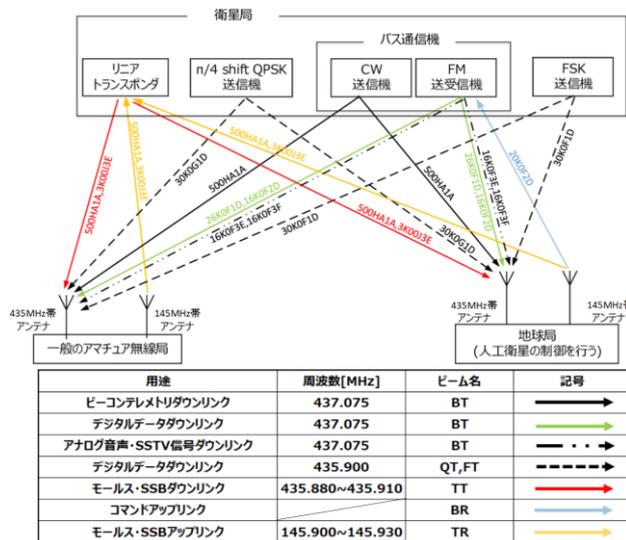


図 12 通信概念図

次に、アマチュア無線従事者に向けた NEXUS の運用について述べる。NEXUS では、以下の 5 種類の運用を用意しており、アマチュア無線従事者の衛星通信機会を提供する。

- リアルタイムデータダウンリンク**
AFSK, GMSK, FSK, $\pi/4$ shift QPSK 変調のいずれかを用い、SG が取得したセンシングデータや電界強度データを送信する。
- リアルタイム画像ダウンリンク**
FSK, $\pi/4$ shift QPSK 変調のいずれかを用い、N-CAM で撮影した画像を送信する。
- SSTV 画像ダウンリンク**
バス通信機を用いて SSTV 画像データを送信する。送信する SSTV 画像データ例を、以下の図 13 に示す。



図 13 SSTV 画像例

- デジトール音声ダウンリンク**
デジトール音声を、バス通信機を用いて送信する。
- リニアトランスポンダを用いた音声データ中継**
3.3 節に示したリニアトランスポンダに音声をアップリンクし、音声データ中継、ダウンリンクを行うことができる。

また、現在著者らは、3 節に示したミッション及び、上述の運用を行うための、衛星搭載ソフトウェアの動作確認、長期運用試験でのソフトウェアのデバッ

ク、電力収支の確認等を行っており、確実に各ミッションを達成できるソフトウェアを開発中である。加えて、運用体制の整備として、上述の運用についてアナウンスするためのホームページ (<http://sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/nexus/index.html>) も作成中である。

6. 今後の展望

本稿では、NEXUS のフライトモデル、ミッション、地上局システム並びに運用の概要について述べた。今後は、ロケット引渡しまでに、地上局の落成検査、NEXUS フライトモデルのバイクアウトを行う。その後、地上局ソフトウェアや運用体制の整備を行い、打ち上げに備える予定である。

3 節に示した NEXUS のミッション機器は、1U サイズに搭載することが可能であるため、省スペースであり、今後の CubeSat への応用が期待できる。NEXUS の各ミッション機器は、実用性が示された後、商用として販売する予定であり、広く社会に展開する。NEXUS で実証する各通信機やカメラシステムは、安価で開発可能であり、比較的高性能かつ様々な用途に対応した機能を有しているため、今後ますます高度化、複雑化するであろう CubeSat ミッションに用いられることを期待する。

謝辞

NEXUS は、日本アマチュア衛星通信協会 (JAMSAT) 及び、株式会社アドニクスと共同で開発を行っており、ミッション機器の技術的な支援を賜りました。また、通信機の実験測定の際には、日本アマチュア無線連盟 (JARL) の皆様に多大なご協力を賜りました。皆様に感謝致します。

参考文献

- Tomohiro Suzuki, Yasuyuki Miyazaki, Kan Fukai: Demonstration of amateur radio technology using a Cubesat, 7th Nano-Satellite symposium and 4th UNISEC-Global Meeting, pp.1-6, 2016
- 山口清, 鈴木智大, 宮崎康行: 次世代アマチュア衛星通信技術実証「NEXUS」, スペース・エンジニアリング・コンファレンス講演論集, 2016.5 巻, pp.1-5, 2016
- 高橋康之, 高井元, 遠藤美穂, 鷲谷正史, 香河英史: 革新的衛星技術実証 1 号機の概要, 第 61 回宇宙科学技術連合講演会, JSASS-2017-4492, pp. 1-6, 2017
- Stephan Busch, Philip Bangert, Slavi Domrovski, Klaus Schilling: UWE-3 IN-ORBIT PERFORMANCE AND LESSONS LEARNED OF A MODULAR AND FLEXIBLE SATELLITE BUS FOR FUTURE PICOSATELLITE FOAMATIONS, IAC-14.B4.6b.6, p.1-11, 2014