

# 3C09 アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」の運用成果報告

○佐藤陸, NEXUS 開発チーム, 宮崎康行 (日本大学)

Operation Results of Amateur Communication Technology Demonstration Satellite “NEXUS”  
Riku Sato, NEXUS Development team, Yasuyuki Miyazaki (Nihon University)

Key Words: CubeSat, Amateur Radio, SDR

## Abstract

The amateur communication technology demonstration satellite “NEXUS” is equipped with a  $\pi/4$  shift QPSK transmitter, FSK transmitter which can communicate at higher speed than before, a linear transponder, and a camera system capable of high-resolution imaging. The main mission of this satellite is demonstration of these devices. The operation results obtained so far are reported in this paper.

## 1. 序論

CubeSat には, アマチュア無線帯を使用した通信機が搭載されることが多い. これは, アマチュア無線帯は通信機や通信技術に関する情報が多く, 新規開発参入者でも利用しやすいという利点があるためである. また, 全世界のアマチュア無線家の方々に受信協力を仰げることも利点である. しかし, CubeSat の大きさや熱に関する制約から, 搭載機器には低消費電力であることが求められる. それゆえ, 通信機の送信電力は小さくならざるを得ず, 結果として, 地上局がデータを受信する際の正味の通信速度が遅くなってしまふという課題がある. 一方で, 近年, ミッションの多様化や高度化に伴い, CubeSat においても, ミッション達成に必要なデータを大量に受信することが求められるようになった. これにより, 従来の通信機より性能が高い通信機に対する需要が高まっている. そこで, アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」は, ① $\pi/4$  shift QPSK 送信機, ②FSK 送信機, ③リニアトランスポンダの宇宙実証をするとともに, 画像ダウンリンクによるこれらの送信機の性能評価もかねて, ④小型カメラシステム(N-CAM)の宇宙実証を行う. そして, 運用を通じて, これらの機器の実用性を示すことを主なミッションとしている. また, リニアトランスポンダについては, 国内外のアマチュア無線家の方々に広く使っていただいている. さらに, 衛星新規開発者への技術提供のため, 開発情報や運用情報を可能な限り公開している.

本稿では, 昨年の本講演会以降の状況を中心に本衛星のミッションの進捗状況を述べるとともに, 運用から得られた成果を報告する.

## 2. 衛星概要<sup>1)</sup>

### 2.1. バス部概要

本衛星の外観を図 1 に, 基本諸元を表 1 に示す. ここで, 座標系右下の sc は衛星座標系 (Satellite coordinate) であることを示す.

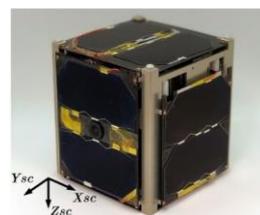


図 1 NEXUS 外観

表 1 NEXUS バス部諸元

打上げ日	2019年1月18日
投入軌道	太陽同期準回帰軌道 (軌道高度約 500 km)
軌道寿命	約 4 年
運用期間	定常運用: 2 年, 後期運用: 2 年
寸法	105.0×105.0×113.5 mm (包絡域)
質量	1.24 kg
電源系	・ バス電圧: $5.0 \pm 0.1$ V ・ 二次電池(1 直列 4 並列): Li-ion バッテリ, 3.7 V, 1880 mAh ・ 太陽電池(2 直列 6 並列): $V_{mp} = 2.4$ V, $I_{mp} = 502.9$ mA
通信系	・ 送信系(435MHz 帯): CW(437.075 MHz, 0.1 W) AFSK(437.075 MHz, 0.8 W, 1200 bps) GMSK(437.075 MHz, 0.8 W, 9600 bps) ・ 受信系(145 MHz 帯): AFSK(145.xxx MHz, 1200 bps)
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

## 2.2. ミッション機器概要<sup>1)</sup>

### 2.2.1. $\pi/4$ shift QPSK 送信機

通信速度は 38400bps であり、アマチュア無線帯を利用する多くの CubeSat に搭載されている送信機 (AFSK1200bps, GMSK9600bps) より高速な通信が可能である。通信プロトコルはリードソロモン符号を付加した CCSDS 準拠フレームであり、誤り訂正能力が高いとされている。そのため、従来の通信機より高利得が見込める。しかし、QPSK 変調のデータは一般のアマチュア無線機では復調できないので、現在、ソフトウェア無線機(SDR)とソフトウェア TNC を用いた新たな復調機を開発している。送信機の外観を図 2 に、諸元を表 2 に示す。



図 2  $\pi/4$  shift QPSK 送信機外観

表 2  $\pi/4$  shift QPSK 送信機諸元

寸法	80×40×10 mm
質量	15.5 g
動作電圧	3.33~3.50 V
消費電流	680 mA
通信速度	38400 bps
変調方式	$\pi/4$ shift QPSK
送信周波数	435.900 MHz
送信電力	0.3 W
通信プロトコル	CCSDS
占有周波数幅	25.890 kHz

### 2.2.2. FSK 送信機

通信速度は、1200~19200 bps の範囲で段階的に可変である。通信速度が可変であるため、受信環境が悪い場合には通信速度を落として確実にデータをダウンリンクし、受信環境が良い場合には通信速度を上げて多くのデータをダウンリンクするといった運用を行うことができる。これにより、同程度の通信速度を持つ通信機(バス無線機)よりも、効率的にデータをダウンリンクすることが可能になる。FSK 送信機の外観を図 3 に、諸元を表 3 に示す。



図 3 FSK 送信機外観

表 3 FSK 送信機諸元

寸法	80×28×5 mm
質量	6.5 g
動作電圧	3.5±0.1 V
消費電流	600 mA
通信速度	1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200 bps
変調方式	GMSK
送信周波数	435.900 MHz
送信電力	0.4 W
通信プロトコル	AX.25

### 2.2.3. リニアトランスポンダ

リニアトランスポンダは、145MHz 帯でアップリンクした音声を 435MHz 帯でダウンリンクする中継機である。リニアトランスポンダには電界強度を測定する機能が搭載されているため、145MHz 帯の通信環境を把握することができる。リニアトランスポンダの外観を図 4 に、諸元を表 4 に示す。



図 4 リニアトランスポンダ外観

表 4 リニアトランスポンダ基本諸元

寸法	80×86×10 mm
質量	64.6 g
動作電圧	3.5±0.1 V
消費電流	930 mA
変調方式	CW, SSB
送信周波数	Up:145.930~145.900 MHz Down:435.880~435.910 MHz
送信電力	0.5 W
占有周波数幅	29.010 kHz
電界強度測定間隔	10,60s

### 2.2.4. N-CAM

N-CAM は CubeSat に搭載されることを想定して作られた小型のカメラシステムである。解像度や画像形式、画像効果を様々な値に設定することが可能である。そのため、画像の圧縮率を下げた鮮明な画像を撮影することや、圧縮率を上げてデータ量を削減し、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。外観を図 5 に、諸元を表 5 に、撮影モードを表 6 に示す。

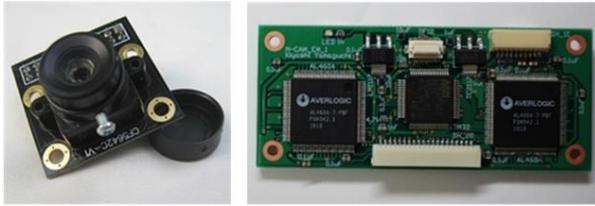


図 5 N-CAM 外観

表 5 N-CAM 諸元

寸法(基板)	70×30×10 mm	
寸法(カメラ)	30×30×23 mm	
質量	23 g	
動作電圧	5.0±0.2 V	
消費電流	500 mA	
光学サイズ	30×30×23 mm	
焦点距離	3.0 mm	
画素数	2592×1944 px	
絞り	F/2.5	
画角	H:63, V:49, D:75 deg	
ROM/RAM	32/16 MB	
画像形式	JPEG	QVGA,VGA,SVGA,HD, Full HD,MAX(2544×1944px)
	RGB	QVGA,VGA,SVGA,HD, MAX(1260×960px)

表 6 N-CAM 撮影モード

静止画撮影	静止画の撮影を行う
動画撮影	フレームレート：3.75～16.88 fps
こま撮り撮影	撮影間隔：0.5～30 s
自動撮影	ジャイロセンサの角速度をもとに、衛星が1回転する間に等間隔のタイミングで撮影を行う。

### 3. 地上局概要

従来の衛星通信用アンテナには、円偏波アンテナが採用されることが多い。筆者らの研究室では、従来の円偏波受信とは別に、直線偏波による偏波ダイバーシティ方式による受信系を導入した。本来、八木アンテナは水平、垂直偏波を合成して円偏波方式を実現しているが、偏波ダイバーシティ方式とは、これらの直線偏波 2 系統を独立した復調機で復調し、データを補完しあう方式のことである。模式図を図 6 に示す。

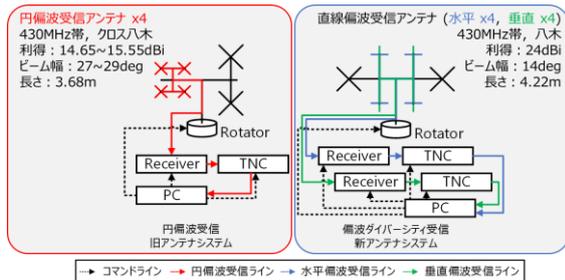


図 6 地上局受信システム模式図

本稿では受信方式によるデータ量の比較を行い、

円偏波受信よりも偏波ダイバーシティ方式を用いた受信が有効であることを示す。

### 4. ミッション内容

NEXUS のミッションは 7 つある。表 7 にミッションの一覧と現段階での達成率を示す。

表 7 ミッションの一覧と達成率

Success criteria	ミッション内容	達成率[%]
Minimum Success	(1) $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作実証	100
	(2) FSK 送信機の動作実証	100
Full Success	(3) $\pi/4$ shift QPSK 送信機の実用性確認	30
	(4) FSK 送信機の実用性確認	70
	(5) リニアトランスポンダの動作実証	100
	(6) N-CAM の実用性確認	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	60

各ミッションの詳細な進捗状況や成果は、以降の節で述べる。また、各ミッションの達成方法を表 8 に示す。

表 8 ミッションの達成方法

No.	達成方法
(1)	$\pi/4$ shift QPSK 送信機を用いた $\pi/4$ shift QPSK 変調のデータの復調
(2)	FSK 送信機を用いた GMSK 変調のデータの復調
(3)	$\pi/4$ shift QPSK 送信機の実効スループットが従来の通信機(GMSK9600bps)の 3 倍以上であること
(4)	FSK 送信機の実効スループットが従来の通信機(GMSK9600bps)の 1.5 倍以上であること
(5)	145MHz 帯でアップリンクした音声 が 435MHz 帯でダウンリンクできること
(6)	Full HD サイズ以上の画像のダウンリンク
(7)	地球全体の 145MHz 帯の電界強度マップの完成

ここで、実効スループットとは、復調できたダウンリンクデータの総量を通信時間(送信機の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)で割ったものである。

### 5. 運用成果

#### 5.1. ミッションの達成状況

##### ○ ミッション(1) $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作実証

2019 年 1 月 23 日の夜運用時にデータを受信し、動作を実証できている<sup>1)</sup>。

○ ミッション(2) FSK 送信機の動作実証

これも、2019年1月23日の昼運用時にデータを受信し、動作を実証できている<sup>1)</sup>。

○ ミッション(3)  $\pi/4$  shift QPSK 送信機の実用性確認

ミッション(1)で使用した復調機は、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困難な状況となっている。現在は、より性能が良い復調機を開発している段階である。ミッション(1)を達成した際の復調機は、SDRにBladeRFを、ソフトにMatlab-simulinkを使用していたが、今後は別のSDRの使用も視野に入れ、S/N比の改善を目指す。その際、Matlab-simulinkでは動作しないSDRもあることと、復調ソフトを一般公開することを想定して、フリーソフトを用いた新しい復調ソフトの開発も併せて行っている段階である。今後は、復調機に使用するSDRと復調ソフトの選定を行い、復調機を9月中旬までに開発し、地上で通信試験を行った後、10月中旬までに $\pi/4$  shift QPSK送信機の通信評価を完了する予定である。現在、使用するSDRとソフトウェアの組み合わせを決定して、ソフトウェアの開発に取り掛かっているため、ミッションの達成状況は30%とした。

○ ミッション(4) FSK 送信機の実用性確認

通信速度9600bpsの場合は、TNC-555を用いて復調可能であるので、正味の通信速度を算出することができた。円偏波アンテナと直線偏波アンテナを用いて受信した時の、バス通信機(GMSK9600bps)と比較した正味の通信速度を表9に示す。

表9 正味の通信速度の比較

	水平	垂直	円	平均
バス通信機[bps]	1634	1935	1013	1527
FSK送信機[bps]	2863	2743	1498	2368

平均値を見ると、FSK送信機はバス通信機と比べて正味の通信速度が約1.55倍であることが分かる。つまり、正味の通信速度が1.5倍以上という条件を満たしており、9600bpsに関しては実用性を示すことができたと判断した。

次に、19200bpsについては、TNC-555が通信速度19200bpsに対応しておらず、復調を行うことができないため、地上局にソフトウェアTNC(High-Speed Sound Modem)を、受信機にIC-9100ではなくSDR(Lime SDR)を導入し、復調している。実際に直線偏波アンテナを用いて受信した時の、バス通信機(GMSK9600bps)と比較した正味の通信速度を表10に示す。

表10 正味の通信速度の比較

	水平	垂直	平均
バス通信機[bps]	1634	1935	1784
FSK送信機[bps]	4876	4625	4750

なお、円偏波アンテナは、アンテナ修理後の調整ができていないことと、covid-19対応による衛星運用者の不足により、現在は使用していない。表10の平均値を見ると、FSK送信機はバス通信機と比べて正味の通信速度が約2.66倍であることが分かる。つまり、正味の通信速度が従来の通信機(GMSK9600bps)の1.5倍以上という条件を満たしており、19200bpsに関しても実用性を示すことができたと判断した。

以上より、FSK送信機の実用性を示すことができたと判断した。今後は、9600bpsより遅い通信速度での通信評価やFSK送信機の各通信速度における円偏波アンテナを用いた通信評価、および復調方法の公開の準備を進める予定であるため、ミッションの達成状況は70%とした。

○ ミッション(5) リニアトランスポンダの動作実証

2019年1月26日の昼運用時に音声のアップリンクおよび他局でのダウンリンクを実施し、動作を実証できている<sup>1)</sup>。

○ ミッション(6) N-CAMの実用性実証

2019年2月4日の昼運用時に撮影した最高解像度(2592×1944px)の画像をダウンリンクすることで、ミッション(6)が達成できたと判断した<sup>1)</sup>。また、今後のアマチュア無線家によるカメラ撮影・画像ダウンリンク運用に向けて、2020年2月24日(月)に、FSK送信機を用いて、リアルタイム画像ダウンリンク運用を実施した。これは、1パス中に、解像度がVGAである画像データを撮影し、画像データを全てダウンリンクして、地上局にて画像を復元する運用である。図7に、リアルタイム画像ダウンリンク運用で取得した画像を示す(カメラが深宇宙方向を向いていたため、溶断されたテグスが付いたアンテナの先端部だけしか写っていない)。



図7 リアルタイムでダウンリンクされた画像

○ ミッション(7) 軌道高度約500kmにおける145MHz帯の電界強度マップの作成

電界強度は、軌道上での受信信号強度を表している。その地域上空にある電波の強さが強いほど、電界強度の値が大きくなる。電界強度を事前に把握して

おくことで、リニアトランスポンダの運用を行う際、混信が少ない場所で実施することができる。現在、図 8 に示すような電界強度マップが作成できている。

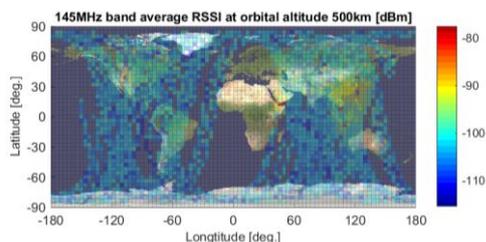


図 8 現在作成中の電界強度マップ

現在、全球の約 60%の範囲の電界強度が測定できているので、ミッション(7)の達成率は 60%とした。今後も引き続きデータの収集を行う予定である。

## 5.2. 通信評価

アマチュア衛星通信において、パケット通信の通信プロトコルは AX.25 プロトコルを採用している<sup>2)</sup>。パケット 1 フレームの構成を図 9 に示す。

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

図 9 AX.25 プロトコルを用いたパケットの構成

パケットの頭にプリアンブル(TNC が信号の同期をとるための 0/1 の連続パターン)が付き、その後ろにパケットの始まりを示すフラグが付く。連続する 6 つの 1 をフラグとしており、このフラグがパケットの始まりと終わりに付加される。フラグで挟まれた間のデータは、コールサインと衛星名の後に、Info 部と呼ばれる実質的なデータ(画像データや HK データ)が付き、その後 CRC (誤り検出符号)が付く。もし、フラグ以外の場所に連続する 1 が 6 つ存在する場合は、送信の際、連続する 5 つの 1 の後に 0 を挿入するという処理を行う。アマチュア衛星通信において、プリアンブルの量と Info 部の量をどれくらいの値に設定するのが適切かについては、著者らの知る限り、明確な指針はなかった。そこで、本衛星では、プリアンブルと Info 部の長さを段階的に可変とし、その 2 つのパラメータを変更した時の、実効スループットとパケット誤り率(PER)を測定する実験を行った。ここで、パケット誤り率とは、送信した総パケット数の内、誤って復調されたパケット数の割合を示す量である。この実験結果から、最も実効スループットが高くなるパラメータを見つけることができるとともに、アマチュア無線帯を使用する CubeSat の開発において有益な情報を示すことができる。また、本節では偏波ダイバーシティ方式のアンテナの有効性も併せて示す。本衛星は回帰日数が約 9 日であるため、9 日間(36 パス分)で実効スループットと

PER の統計を取り、それぞれ比較する。

### 5.2.1. 偏波ダイバーシティ方式の有効性

バス無線機と FSK 送信機(プリアンブル回数:80, Info 部の長さ:168byte)を用いて、円偏波アンテナと直線偏波アンテナで受信した時の実効スループット及び PER を図 10 に示す。

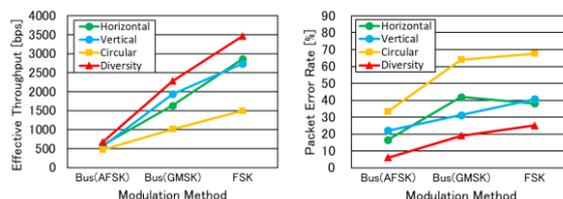


図 10 偏波方式と実効スループットと PER

図 10 から、偏波ダイバーシティ方式について、いずれの変調方式においても実効スループットが最も大きく、PER が最も小さいということが分かる。このことから、直線偏波アンテナの方が円偏波アンテナより性能が高いことが分かる。バス通信機(GMSK)と FSK 送信機は共に通信速度 9600bps だが、FSK 送信機に搭載されているマイコンがバス無線機より演算速度が速いため、データの送信間隔が狭まっているため、FSK 送信機の方が、実効スループットが大きくなったと考えられる。

### 5.2.2. プリアンブル量と実効スループットの関係

FSK 送信機(GMSK9600bps,Info 部の長さ:168byte)を用いてダウンリンクした時のプリアンブル量と実効スループット及び PER の関係を図 11 に示す。

図 11 から、プリアンブル数が 10 の時、直線偏波アンテナについて実効スループットが最大になり、PER が最小となることが分かった。プリアンブルが少なすぎると復調機との同期がとれず、実効スループットが大幅に下がり、PER が大幅に上昇してしまうと考えられる。

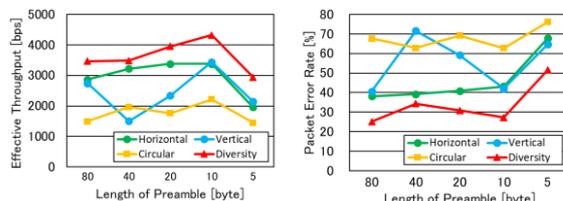


図 11 プリアンブル量と実効スループットと PER

### 5.2.3. Info 部の長さの実効スループットの関係

バス無線機(GMSK9600bps,プリアンブル回数:80)を用いて HK データをダウンリンクした時の Info 部の長さの実効スループット及び PER の関係を図 12 に示す。

図 12 から、Info 部の長さが 161byte の時、各偏波方式について実効スループットが最大になり、PER が最小になることが分かった。

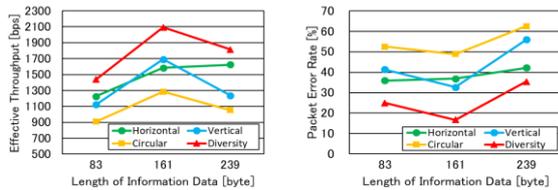


図 12 Info 部の長さとお効スループットと PER

### 5.3. アマチュア運用について

本衛星は、アマチュア無線家の方々に技術鍛錬の場を提供するために、デジトーカーや SSTV, リニアトランスポンダ運用といったアマチュア運用を行っている。また、現在 850 件を超える受信協力を世界中のアマチュア無線家の方々に頂いている。さらに、アマチュア運用は国内だけでなく、海外でも行っている。図 13 に、現在までに海外でアマチュア運用を行った地域を赤点で示す。



図 13 海外運用実施場所

また、本衛星はミッションが終了次第、後期運用に移行する。後期運用では、本衛星の地上局を移動局として、全国のアマチュア無線家の方々が様々な場所から自由にコマンドをアップリンクできるようにすることを計画している。これにより、好きなタイミングに好きな場所でトランスポンダを使用したり、画像を撮影してダウンリンクしたりするといったことが可能になる。既に移動局免許は取得できており、移動局運用の準備を進めているところである。

### 5.4. 開発データの公開

ホームページ上で、衛星の仕様書や CAD, 基板データを公開している<sup>3)</sup>。また、これまでの運用で取得した本衛星の HK データの推移や N-CAM で撮影した写真や動画も公開している。これらの情報が、衛星開発新規参入者の助けになれば幸いである。

## 6. 結論

本稿で報告した成果から、アマチュア無線帯において、従来よりも性能が良い通信機の実用性を示すことができた。そこで、今後のアマチュア帯の CubeSat にこれらの通信機が搭載されるよう、これらの通信機の製品化の準備を進めている。また、現時点では、日本で開発された衛星に搭載された、アマチュア無線用のリニアトランスポンダで稼働しているものはないため、より多くの方々にリニアトランス

ポンダを利用させていただきたいと考えている。その意味でも、移動局運用は早期に実現したいと考えている。さらに、宇宙で安定した動作をしている本衛星の仕様を公開することで、CubeSat の短期開発化や低コスト化に貢献できれば幸いである。

## 7. 今後の展望

今後は、 $\pi/4$  shift QPSK の復調機の開発を主に進める予定である。残りのミッションが完了次第、後期運用に移行する。また、ミッション機器の販売に向けて、製造販売を受託する会社を選定する。

## 謝辞

本衛星および地上局は日本アマチュア衛星通信協会 (JAMSAT) および日本アマチュア無線連盟 (JARL) の方々と共同で開発したものである。両団体の方々には運用でも多大なご協力をいただいております。特にリニアトランスポンダの運用技術や移動局申請、 $\pi/4$  shift QPSK 復調機の開発について丁寧にご指導いただいている。また、全世界のアマチュア無線家の方々に頂いた受信報告は、衛星の健康状態の把握に活用させていただいている。これらの方々には深く感謝する次第である。

## 参考文献

- 1) 藤井瞳, NEXUS 開発チーム, 宮崎康行: アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」のミッション進捗状況, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, 2K06, 2019 年 11 月 7 日
- 2) 中村壮児, 宮崎康行, 他: CubeSat 「NEXUS」によるアマチュア衛星通信評価, 電気情報通信学会ソサイエティ大会, 2019 年 9 月 11 日
- 3) NEXUS ホームページ: <http://sat.aero.cst.nihon-u.ac.jp/nexus/>