

2K06 アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」のミッション進捗状況

○藤井瞳, NEXUS 開発チーム, 宮崎康行(日本大学)

Mission Progress of Amateur Communication Technology Demonstration Satellite “NEXUS”
Hitomi Fujii, 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 communication devices ($\pi/4$ 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. And the main mission of this satellite is demonstration of these devices. In this paper, we describe the progress of each mission at current stage, about half a year after launch.

1. 序論

アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」^{1),2)}は① $\pi/4$ shift QPSK 送信機, ②FSK 送信機, ③リニアトランスポンダ, ④小型カメラシステム(N-CAM)の宇宙実証を行う。そして従来の CubeSat 搭載用の通信機より高速な通信が可能であることやカメラシステムの実用性を示す。また CubeSat の多くはアマチュア無線帯を使用しているため, CubeSat 開発者もアマチュア無線家の方々や衛星通信技術の発展に貢献すべきという思想の下, リニアトランスポンダの開放や通信に関するデータ解析結果の公開を行う。さらには衛星開発新規参加者への情報提供のため, 開発及び運用についての情報を可能な限り公開する。

本稿では, 本衛星のミッション内容及び各ミッションの進捗状況を述べるとともに, アマチュア無線家に向けた運用の実施状況について述べる。

2. 衛星概要

NEXUS は JAXA の「革新的技術実証プログラム」に採択され, 2019 年 1 月 18 日にイプシロンロケット 4 号機にて打ち上げられた。1U サイズ(10 cm 立方)の CubeSat であり, 著者らの研究室で開発された 4 機目の衛星である。

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。

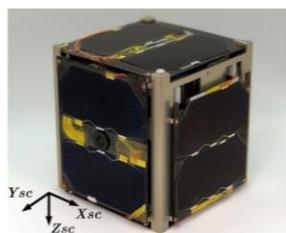


図 1 NEXUS 外観

表 1 NEXUS 基本諸元

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 : 1 年, 後期運用 : 3 年
寸法	105.0×105.0×113.5 mm(最外)
質量	1.24 kg
電源系	・ バス電圧 : 5.0 ± 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) : Vmp = 2.4 V, Imp = 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

2.2.1. $\pi/4$ shift QPSK 送信機

$\pi/4$ shift QPSK 送信機の通信速度は 38400 bps であり, これまで多くの CubeSat に搭載されてきた送信機(AFSK 変調 : 1200 bps, GMSK 変調 : 9600 bps)よりも高速な通信が可能である。通信プロトコルは, 誤り訂正符号の一種で訂正能力が高いとされるリードソロモン符号を含む CCSDS 準拠フレームであり, 符号化利得が見込める。 $\pi/4$ shift QPSK 送信機の外観を図 2 に, 基本諸元を表 2 に示す。



図 2 $\pi/4$ shift QPSK 送信機外観

表 2 $\pi/4$ shift QPSK 送信機基本諸元

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

FSK 送信機の通信速度は、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、基本諸元を表 3 に示す。



図 3 FSK 送信機外観

表 3 FSK 送信機基本諸元

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, 19800 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。またこの通信機には電界強度測定機能が搭載されており、軌道上の 145MHz 帯の通信環境を把握することができる。測定間隔は 10 秒もしくは 60 秒である。リニアトランスポンダの外観を図 4 に、基本諸元を表 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

2.2.4. N-CAM

N-CAM は、超小型人工衛星に搭載されることを前提としたものであり、サイズ・重さは小さく抑えつつも、解像度や画像形式・画像効果について様々な値を設定することが可能である。N-CAM はカメラモジュールと画像処理基板の 2 つから構成されており、カメラモジュールは市販されている OV5642(オムニビジョン製)を用い、画像処理基板は新規開発した。N-CAM の外観を図 5 に示す。また基本諸元を表 5 に、N-CAM の撮影モードを表 6 に示す。



図 5 N-CAM 外観(左:カメラモジュール, 右:FM 基板)

表 5 N-CAM 基本諸元

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

表 6 N-CAM の撮影モード

静止画撮影	解像度：QVGA, VGA, SVGA, HD, FHD, MAX(2592×1944)
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、1回転する間に等間隔のタイミングで撮影を行う。

3. 地上局システム

著者らの研究室では、受信感度を少しでも高めるために直線偏波による偏波ダイバーシティ方式を試験的に導入することとした。本来、八木アンテナは取得した水平・垂直偏波を合成することで円偏波を作り出しているが、これらの直線 2 系統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偏波ダイバーシティを採用し、直線偏波 2 系統を独立して出力可能な特殊な八木アンテナを設立した。また、著者らの研究室には、既存の衛星運用のための衛星地球局が開設されているが、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いない。そこで、JARL を免許人とした新たなアマチュア無線局を開局し、本衛星搭載の中継器である TRP の運用を行うこととした。地上局の受信アンテナの基本諸元を表 7 に示す。また旧アンテナ含む地上局システムダイアグラムを図 6 に、新アンテナを含む地上局のシステムダイアグラムを図 7 に示す。

表 7 地上局受信アンテナの基本諸元

偏波の種類	円	水平・垂直
周波数範囲 [MHz]	430~440	430~440
利得 [dBi]	14.65~15.55	24
電圧定在波比(VSMR)	1.1~1.5	1.0~1.5
前方対後方比(F/B) [dB]	16.5~18.3	25
ビーム幅 [deg]	27~29	14
インピーダンス [Ω]	50	50
耐電力 [W]	50	50
長さ [m]	3.68	4.22
回転半径 [m]	2.6	2.0

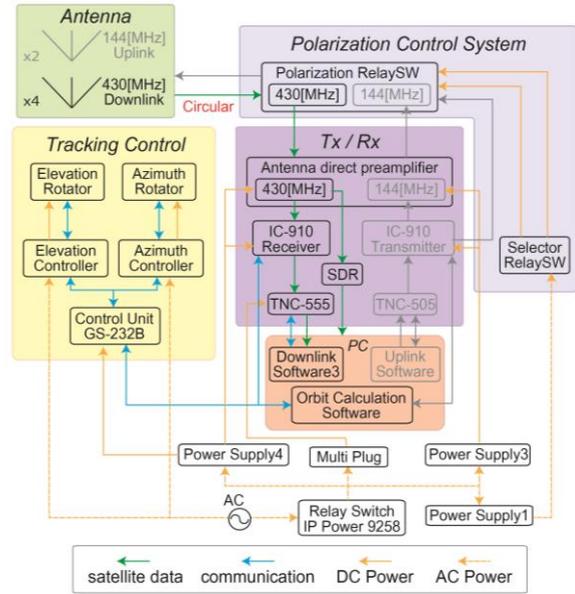


図 6 地上局システムダイアグラム(旧アンテナ)

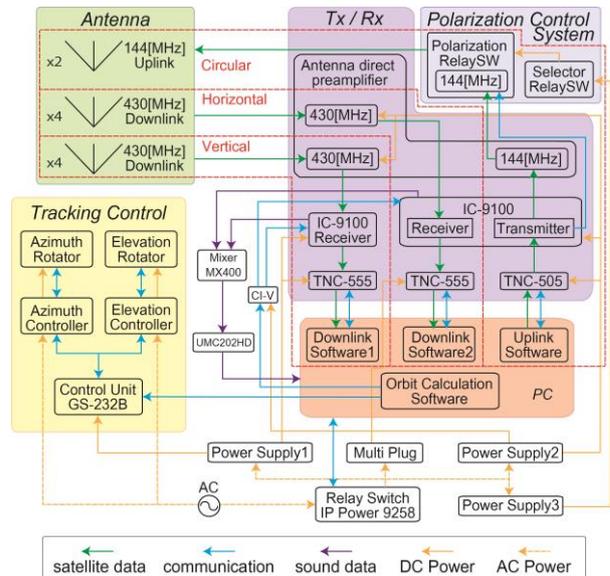


図 7 地上局システムダイアグラム(新アンテナ)

4. ミッション内容

本衛星のミッションは7つある。表 8 にミッション一覧を示す。

ミッション(1)は、 $\pi/4$ shift QPSK 送信機を用いて $\pi/4$ shift QPSK 変調にて送信を行い、地上で復調できた段階で達成とする。ミッション(2)も同様に FSK 送信機を用いて GMSK 変調にて送信を行い、地上で復調できた段階で達成とする。

ミッション(3)では $\pi/4$ shift QPSK 送信機を用いてダウンリンクを行い、従来の通信機(GMSK9600bps)と比較して正味の通信速度が 300%以上であることを示す。ミッション(4)も同様に FSK 送信機を用いて表 3 の各通信速度でダウンリンクが可能であることを確認し、従来の通信機(GMSK9600bps)と比較して正味の通信速度が 150%以上であることを示す。ここ

で正味の通信速度とは、デコードできたダウンリンクデータを通信時間(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。

ミッション(5)は日本大学の地上局から 145MHz 帯にてアップリンクを行い、リニアトランスポンダを中継して、そのデータを他の地上局で 435MHz 帯にてダウンリンクすることができた段階で達成とする。

ミッション(6)は N-CAM を用いて Full HD サイズ (1920×1080 px)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。

ミッション(7)はリニアトランスポンダを用いて軌道高度 500km における 145MHz 帯の電界強度を測定し、地球全体の電界強度マップが作成できた段階で達成とする。

表 8 ミッション一覧

Minimum Success	(1) $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作実証
	(2) FSK 送信機の動作実証
Full Success	(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
	(5) リニアトランスポンダの動作実証
	(6) N-CAM の実用性確認
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

5. ミッション進捗状況

まず、各ミッションの達成率を表 9 に示す。各ミッションの詳細な進捗状況については次節以降で述べる。

表 9 ミッション達成率

ミッション番号	達成率[%]
(1)	100
(2)	100
(3)	30
(4)	30
(5)	100
(6)	100
(7)	50

5.1. $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作実証

ミッション(1)は 2019 年 1 月 23 日の夜運用の際に達成した。地上局では八木アンテナで受信し、電波を 2 段階で増幅後、SDR(Blade RF x115)に入力することで復調を行った。このときアンプは川越無線のプリアンプ(32dB)と広帯域アンプ(30dB)を使用した。復調時の電波状態を図 8 に示す。



図 8 復調時の電波状態($\pi/4$ shift QPSK 送信機)

この運用で、 $\pi/4$ shift QPSK 変調で 1 パケットをダウンリンクした。従って、 $\pi/4$ shift QPSK 送信機が正常に動作していることが確認できたため、ミッション(1)は達成できたと判断した。

5.2. FSK 送信機の動作実証

ミッション(2)は 2019 年 1 月 23 日の昼運用の際に達成した。地上局では八木アンテナで受信し、電波を川越無線のプリアンプにて増幅後、受信機(アイコム製、IC-9100)に入力した。その後、ハードウェア TNC(タスコ製、TNC-555)にて A/D 変換を行い、その出力を PC に入力している。復調時の電波状態を図 9 に示す。



図 9 復調時の電波状態(FSK 送信機)

この運用で、FSK 送信機を用いて GMSK 変調で 206 パケットをダウンリンクした。従って、FSK 送信機が正常に動作していることが確認できたため、ミッション(2)が達成できたと判断した。

5.3. $\pi/4$ shift QPSK 送信機の実用性確認

5.1 節で述べたように $\pi/4$ shift QPSK 送信機の動作確認は完了したが、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なかった。従って S/N を改善するため、株式会社 AOR の AR2300 という無線機を用いて受信を行うことにした。

現在は新無線機に合わせた復調ソフトを Matlab-Simulink を用いて開発中である。数パケットの復調には成功しているがまだ実用的なソフトに至っていないこと、またリードソロモン符号を用いた誤り訂正機能も実装が完了していないことを踏まえて、達成度は 30%とした。復調機の完成は 2019 年秋頃を予定している。

5.4. FSK 送信機の実用性確認

5.2 節で述べたように、FSK 送信機の動作確認は完了している。また通信速度 9600bps のデータについては本衛星の地上局で使用している TNC-555 にて復調が可能であるため、正味の通信速度を算出することができた。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	円	平均
バス通信機[bps]	1634	1935	1013	1527
FSK 送信機[bps]	2863	2743	1498	2368

偏波面によって差はあるが、平均しても FSK 送信機はバス通信機と比べて正味の通信速度が約 155% であることがわかる。従って正味の通信速度 150% 以上を満たしているため、9600bps に関して言えばミッション(4)は達成できている。しかし受信環境によって通信速度を変化させるには、19200bps での復調及びより低い通信速度での復調を確認する必要があるため、ミッション達成率は 30% としている。9600bps 以外の通信速度については現在復調機を開発中であるため、完成次第 9600bps 以外の通信速度でのダウンリンクを実施する。

5.5. リニアトランスポンダの動作実証

ミッション(5)については 2019 年 1 月 26 日の昼運用の際に達成した。送信周波数は 145.915MHz で固定し、送信出力約 10W で、日本大学地上局から音声(LSB)を衛星に向けアップリンクした。同時に、アップリンクした音声を他局にて 435MHz 帯でダウンリンクした。他局での音声受信時の 435MHz 帯の電波状態を図 10 に示す。



図 10 435MHz 帯の電波状態(JA1OGZ 様より提供)

この運用で、日本大学地上局にて 145MHz 帯で送信した音声を他局にて 435MHz 帯でダウンリンクした。従って、リニアトランスポンダが正常に動作していることが確認できたため、ミッション(5)が達成できたと判断した。

5.6. N-CAM の実用性確認

ミッション(6)については 2019 年 2 月 4 日に最高解像度(2592×1944px)での撮影を行った際に達成することができた。撮影画像を図 11 に示す。撮影場所は、日本列島南東の太平洋付近である。



図 11 2019 年 2 月 4 日撮影画像(最高解像度)

図 11 の右側の画像左下に写り込んでいるものは本衛星の命令受信用アンテナである。収納時に弾性域を超える曲率でアンテナを曲げていたため、

通信には問題ないが塑性変形することは予想していた。しかしコマンド受信用アンテナが衛星を取り囲む方向に塑性変形したため、N-CAM の画角内に入り込む形となった。図 11 の左側の画像にアンテナが見られないのは、露出調整が地球に合っており、アンテナが黒つぶれしたためである。

この運用で、N-CAM を用いて Full HD(1920×1080 px)以上の画像をダウンリンクした。従って、N-CAM は正常に動作しており、かつ高解像度の画像取得が可能であることが確認できたため、ミッション(6)が達成できたと判断した。

その後も N-CAM を用いて VGA など他の解像度の画像撮影や動画撮影を行っている。2019 年 6 月 2 日にはフレームレート最大(16.88fps)、SVGA での動画撮影を行った。撮影場所は中国大陸上空である。その際の取得画像を一部抜粋して図 12 に示す。

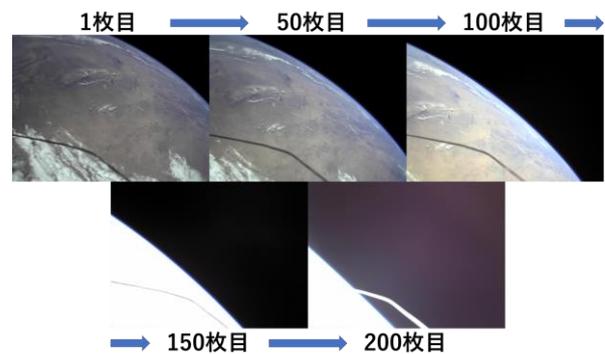


図 12 2019 年 6 月 2 日撮影画像(動画、一部抜粋)

また N-CAM は露出や JPEG の圧縮率などの設定をコマンドによって変更することができる。圧縮率は 0(圧縮なし)から 30 までの 31 段階で設定することができ、デフォルトでは 8 が設定されている。2019 年 4 月 26 日、5 月 5 日には圧縮率をデフォルトの半分値である 4 に設定して撮影を行った。撮影画像を図 13 に示す。

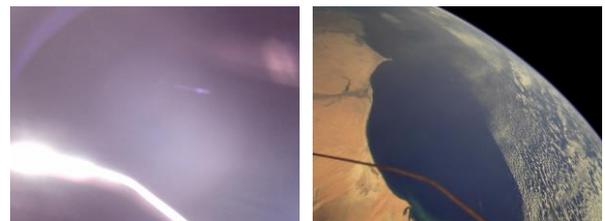


図 13 左:2019 年 4 月 26 日撮影画像、
右:2019 年 5 月 5 日撮影画像(圧縮率変更)

図 13 の左はオーストラリア上空、右はアフリカ大陸上空で撮影された画像である。右図にはセネガル、モーリタニア付近が写っている。どちらも最高解像度かつ圧縮率が低い状態での撮影であるため、現時点で最も高精細な画像となっている。

5.7. 電界強度マップの作成

まずリニアトランスポンダの電界強度測定機能の確認のため、2019 年 4 月 5 日に地上局の可視範囲内で音声入力を行った。その結果を図 14 に示す。

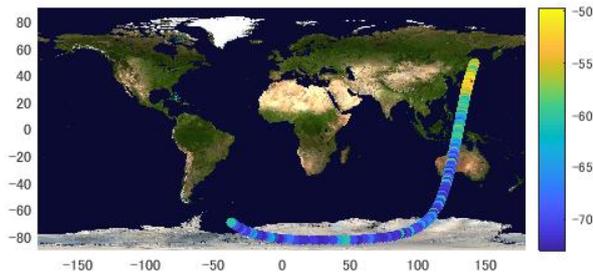


図 14 2019 年 4 月 5 日の電界強度測定結果

このとき測定間隔は 10 秒，測定時間は約 40 分である．図 14 より，日本付近で測定点の色に変化があること，測定値の範囲が概ね正常であることから，電界強度測定の機能は正常に動作していることが確認できた．

電界強度測定では，リニアトランスポンダ基板上で測定した受信信号強度が電圧値として出力されるため，ダウンリンクした電圧値を地上にて受信信号強度に変換する必要がある．その際地上試験で得られた校正関数を用いるが，以前得られた校正関数を用いて 4 月 5 日の電界強度を算出したところ，全体的に高めの値となった．従って校正関数に若干のずれがあると考えられるため，今後再度地上試験を行い校正関数を決定する．その後電界強度マップ作成のため測定を行う．達成度については，マップの完成には至っていないが，測定機能の確認は完了しているため 50%とした．

6. アマチュア運用

本衛星では毎週末アマチュア無線家に向けた活動の一貫としてアマチュア運用を行っている．本節ではその実施状況について述べる．

6.1. デジトーカ及び SSTV 運用

デジトーカ運用とは，本衛星に予め録音してある音声データをダウンリンクする運用である．

また SSTV 運用とは画像データを音声として送信し，地上でダウンリンクした音声データから専用ソフトを用いることで画像に復元する運用のことである．画像データは，衛星搭載メモリに予め格納してある 4 種類の固定画像データと，N-CAM で撮影した QVGA サイズの画像データを設定することができる．日本大学地上局で SSTV 運用にてダウンリンクした固定画像及び N-CAM 撮影画像を図 15 に示す．

これらの運用で，多くのアマチュア無線家の方から受信した音声や画像を受信報告として頂いている．

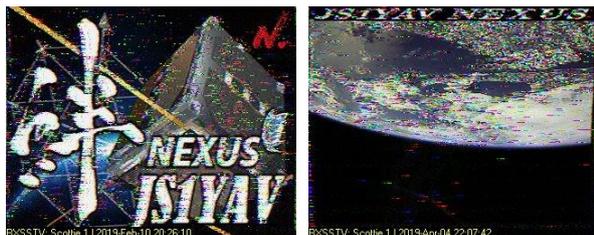


図 15 左:固定画像，右:N-CAM 撮影画像

6.2. 海外運用

本衛星はアマチュア無線に特化した衛星であり，特にリニアトランスポンダを搭載しているため，世界中のアマチュア無線家からの関心が強い．これまで日本では主に毎週日曜の昼運用時にリニアトランスポンダの一般開放を行ってきたが，多くの要望に答えるため海外でもアマチュア運用を行った．

2019 年 6 月 22 日，23 日にはタイ及びバンコクでリニアトランスポンダを開放し，海外のアマチュア局の交信の様子が確認できた．またアマチュア運用の内容と実施場所についてアンケートを取り，回答結果から 7 月 20 日に中国で SSTV 運用を，7 月 27 日にアメリカとヨーロッパでリニアトランスポンダ運用を実施した．これらの運用によりアマチュア無線家の方々から大きな反響があったため，衛星に興味を持って頂くためにもアマチュア運用は必要であると再認識した．今後も継続して海外運用を行う．

7. 今後の展望

本稿では本衛星のミッション進捗状況について詳細に述べた．またアマチュア無線衛星としてアマチュア運用の大切さにも触れた．

ミッション達成のためには $\pi/4$ shift QPSK 復調機及び FSK 復調機の開発が当面の課題である．また現在様々な条件下での正味の通信速度を算出することで通信機の特性を評価する運用を行っている．復調機が完成次第，それを用いた運用を行うことでミッション評価につなげる．アマチュア運用に関しては，アマチュア衛星通信に貢献するため，そして NEXUS の認知のためにも積極的に行っていく．

謝辞

本衛星は日本アマチュア衛星通信協会(JAMSAT)の皆様と共同で開発いたしました．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について丁寧にご指導いただきました．

また，日頃本衛星に興味関心を持ってくださる皆様に感謝申し上げます．皆様からの反応がメンバーにとっての励みとなっております．また世界中のアマチュア無線家の方々からいただいた受信協力は，本衛星の状態把握に役立っております．

皆様に深く感謝いたします．

参考文献

- 1) 山口清，宮崎康行，NEXUS 開発チーム：アマチュア通信技術実証衛星「NEXUS」の初期運用結果，9th UNISEC Space Takumi Conference Paper, pp. 1-25, 2019.
- 2) Ryota Nakamura, NEXUS Development Team, and Yasuyuki Miyazaki : Initial Operation Result of Amateur Satellite Communication Technology Demonstration Satellite NEXUS, International Symposium on Space Technology and Science, 2019-f-24, pp. 1-10, 2019.