

SLS搭載超小型探査機OMOTENASHI, EQUULEUSに搭載する通信システムの開発状況

鳥居航, 冨木淳史, 小林雄太, 伊藤大智, 吉光徹雄(JAXA), 中島晋太郎, 川端洋輔(東大), 小島要, 新家隆広(アドニクス), 羽賀俊行, 神田泰明, 石川雅澄(アンテナ技研), 大森義智(アルモテック), 船瀬龍(東大), 橋本樹明(JAXA), SLSプロジェクトチーム

ミッション概要

OMOTENASHI EQUULEUS

月遷移軌道から月衝突軌道へ軌道操作し、固体モータによる減速、エアバッグなどをを用いた衝撃吸収による月面セミハードランディング技術実証実験を行う。母船及び月面着陸機双方にUHF帯通信機を搭載し、アウトリーチの一環としてアマチュア無線活動も行う。

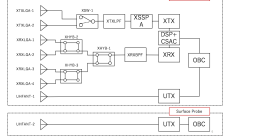
超小型深宇宙探査機バス実証機、及び超小型深宇宙探査機として世界初の地球・月圏での軌道操作技術実証を経て月の裏側にあるEML2点へ到達し(この間、月面小隕石フラックス観測や磁気圏プラズマ分布観測を行う)、その後は小惑星フライバイを目指す。



探査機本体が6U, 14kgと、前例のない超軽量科学衛星。短期開発経費削減のために、民生品を活用しつつ近地球から深宇宙距離まで通信が成立する超小型通信システムを共通ハードウェアで実現する。

通信システム

OMOTENASHI EQUULEUS



QBC	On Board Computer	XXR	X-band Receiver
XTX	X-band Transmitter	XXBPF	X-band band-pass Filter
DSP	Digital Signal Processor	XHYB	X-band Hybrid
CSACUS(O)	Chip Scale Atomic Clock	UTX	UHF-band Transmitter
XSSPA	X-band Amplifier	KaTX	Ka-band Transmitter
XTXLPF	X-band Low-pass Filter	XTX/LGA/XXR/LGA	X-band Low Gain ANT
XSW	X-band Switch	XXMGA	X-band Middle Gain ANT
ANT	Antenna	KaMGA	Ka-band Middle Gain ANT

通信諸元

Frequency band	OMOTENASHI		EQUULEUS	
	P-band	X-band, Category A	X-band, Category B	Ka-band, Category-B
U/L Freq.	435.31MHz	7.186GHz	7.230GHz	32.09GHz
D/L Freq.	437.31MHz, 437.41MHz	8.443GHz	8.494GHz	-
Coherent ratio	-	749/880	749/3344	-
Output power	1W	1W/0.02W	0.5W	-
Bitrate	-15000bps	15.625, 125, 1000bps	-	-
Bitrate (telemetry)	32bps, 31.25kbps	8bps-262.144kbps	8bps-262.144kbps	-
Max distance	40,000 km	40,000 km	150,000 km	150,000 km
Ranging	PN	R&R, DDOR	R&R, DDOR	-
Ground Stations	Amateur stations	UDSC64M, USC34M and DSN stations	DSN stations	-

OMOTENASHI アマチュア通信概要

Surface Probe: 457.41MHz

Transmitting UHF band signal during primary battery survive from separated after landing (It lasts for a few or several tens of minutes).

- Emitting PM-modulated radio wave. This is modulated with the measured acceleration of the impact on landing (red).
- After 1., transmit the recorded acceleration data by encoding to digital bits as long as battery survive.

Orbiting Module: 437.31MHz

Determination the transmitting schedule in view of the balance of total power consumption and the power GAP generated from OM separated by SLS rocket to separating SP.

開発スケジュール



OMOTENASHI, EQUULEUSの搭載通信系は共通部分が多く、開発はほぼ平行して行われている。EQUULEUSは今後FM品の単体試験及びインテグレーションへ、OMOTENASHIはEM品を用いたインテグレーション試験へ移行する

OMOTENASHI, EQUULEUSの設計・性能の比較

	OMOTENASHI	EQUULEUS
設計思想	近地球-深宇宙領域に対応。どちらも電力資源が30W未満のため通信機の出電力も限られるので、運用距離範囲にて、姿勢によらず双方通信可能なシステムを設計する。特にEQUULEUSは伝搬距離損失の大きさを、複数の姿勢を考慮しアンテナを配置。OMOTENASHIは近地球であることを活かし最小構成の通信システムを実現する。	近地球-深宇宙領域に対応。どちらも電力資源が30W未満のため通信機の出電力も限られるので、運用距離範囲にて、姿勢によらず双方通信可能なシステムを設計する。特にEQUULEUSは伝搬距離損失の大きさを、複数の姿勢を考慮しアンテナを配置。OMOTENASHIは近地球であることを活かし最小構成の通信システムを実現する。
通信距離	Category-A (< 2x10 ⁶ km): 近地球距離	Category-B (> 2x10 ⁶ km): 深宇宙距離
ループ帯域幅	Surface Probe分離時にスピンのよりドップラーシフトが発生。ループ帯域幅を最大1kHzに拡げ対応する。地上局も同様	2BL = 20Hzを想定
BPF構成	近地球のため損失よりも小型化を重視し、BPFはTRP内部搭載	BPFでの損失を抑えるために、外部に周波数調整を行なったBPFを設置
U/Lキャリア捕捉閾値	-133.4dBm (PROCYON: -149dBm)	-141.1dBm

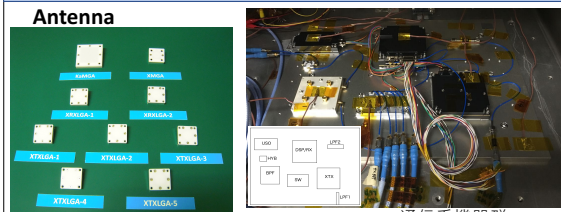
PROCYONとの比較

	EQUULEUS	PROCYON
受信電力	30.0	41.8
伝搬損失	-8.0	-2.2
受信アンテナ利得	7.0	0.0
SNR	29.0	39.6
システム雑音	3632.0	519
雑音電力密度	-163.0	-171.4

※X/LGAでの比較

・本通信システムの方がアンテナ利得は高い
・小型化に伴い大きくなった給電損失によって吸収され、EIRPには出力電力差が大きく反映
・雑音電力密度の上昇は給電損失の影響が大きい
(損失がPRO同様2.2dBの場合、-170.6dBm/Hz)

開発状況



EQUULEUS搭載全アンテナ

Antenna	XTX/LGA	XR/LGA	XMGA	KaMGA
Freq.	7.1GHz帯(EQU)	8.4GHz帯(EQU)	8.4GHz帯(OMT)	32GHz
Gain	7dBi	7dBi	10dBi	16dBi
Power half-width	60deg	60deg	60deg	15deg
Shape[mm ³]	30x30x7.5	30x30x7.5	30x30x7.5	50x50x7.8
Weight	20g以下	20g以下	20g以下	20g以下

EQUULEUS 通信系機器群

	7187MHz	7230MHz
Loss	< 0.65	< 0.65
VSWR	< 1.4	< 1.4
Out-of-band Attenuation	> 83 dB	> 82dB

内部構成はほぼ同一のTRPで、近地球/深宇宙に対応

XTRP

	EQUULEUS	OMOTENASHI
消費電力	< 13W	< 13W
形状(合計)	80x80x50 [mm ³]	80x80x56[mm ³]
重量	550g以下 (TX/RX/DSP/SW/USO)	450g以下 (XTX/XXR/DSP)
受信電力	-50 / -150dBm以上	-50 / -150dBm以上
出力電力	0dBm - 30dBm	PC/M-PSK/PM
変調方式	Tone, PN切替	
R&R	0.05F ₀ , 2.0F ₀	0.0125F ₀ , 0.5F ₀

60探査機では空間が少なく、通常の衛星やPROCYONで使われる高周波用ケーブル(SMA)を用いることが困難。このため、本通信システムでは、SMPMを採用した

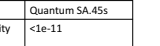
CSAC



Chip Type	Quantum SA.45s
1000s Short Term Stability (Allan Deviation)	<1e-11
Power (chip only)	<120mW
Operation Temperature	-10degC ~ +70degC
Measured Stability (5 samples)@JAXA	1.5e-11 (100sec) 6e-12 (1000sec)

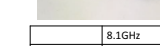
長期安定度の良い原子時計を用い、高精度軌道決定を実証する

XLFP



Loss	< 0.65
VSWR	< 1.3
Cutoff Freq.	> 9230MHz

GaN Amp



Loss	< 0.65
VSWR	< 1.3
Cutoff Freq.	> 9230MHz

従来のGaNアンプに比較し高効率で信号を増幅可能 (詳細は後日、論文化を予定)

XBPF



	7187MHz	7230MHz
Loss	< 0.65	< 0.65
VSWR	< 1.4	< 1.4
Out-of-band Attenuation	> 83 dB	> 82dB

XHYB



Loss	< 0.65
VSWR	< 1.3
Cutoff Freq.	> 9230MHz

従来は高周波用ケーブル(SMA)を用いることが困難。このため、本通信システムでは、SMPMを採用した

結論

- ・ SLS搭載超小型探査機OMOTENASHI, EQUULEUSの搭載通信系サブシステムに関する構成、及び各機器の開発状況を整理した。
- ・ 50kg級副衛星PROCYONで培った小型軽量化技術を発展させ、CubeSatながら通信系として、民生品を活用した新規ミッションを盛り込みつつ、課題であった**6U14kg級探査機の深宇宙・近地球双方にて成立する通信システムが実現可能**であることを示した。
- ・ 今回開発した超小型通信システムが既存の宇宙関連機関で閉じることなく、宇宙利用を目指す民間や企業が活用、改良を重ねることで、技術発達がより一層活発になると期待する。