

## Pc.09

# 低高度周回衛星からの世界最高通信速度3.3Gbit/secの 実証実験結果と今後の計画

○齋藤 宏文, 田中 孝治, 三田 信, 金子 智喜

### 要旨

JAXA**革新小型衛星RAPIS-1衛星**で行った低高度周回衛星からのX帯ダウンリンク通信の実証実験の結果を紹介する。X帯周波数帯域幅315MHzを用いて、シンボルレート300Msymbol/sec, 256APSK変調、左右円偏波2チャンネルの通信システムにて、**最大3.3Gbit/secの世界最高通信速度**を実証した。地上での受信データは中間周波数領域で記録蓄積され、オフラインのソフトウェア復調を行った。

# 衛星からのデータ伝送

多数の小型衛星によるコンスタレーションミッション

地球観測ミッション事業

光学観測

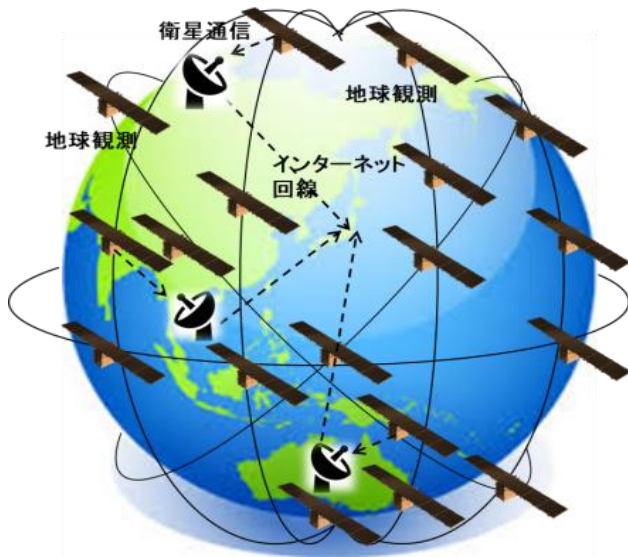
Planet-Lab (Dove)

レーダー観測

Iceye(Finland),

Synspective(Japan)

本実証実験の成果一部を利用



衛星からのデータ伝送の  
高性能化がホット

非静止衛星通信事業計画

Starlink (Space X)

1万機の小型通信衛星

アフリカ等、

デジタル・デバイド解消

高速インターネット網

# Synspective社の実証衛星1号 Strix-α

**SPACE NEWS** 30+ YEARS

Japanese SAR startup Synspective reaches \$100 million in funding  
(26<sup>th</sup> July 2019)

by Caleb Henry — July 26, 2019



Synspective is planning a constellation of around 25 SAR satellites for global imaging. Credit: Synspective.

Synspective社  
2018年2月設立。  
民間から100億円調達  
6機の低分解能小型レーダ衛星打  
ち上げ、運用、データ解析  
地盤変動トレンド、東南アジア  
**1号機は2021.12.15に打ち上げ  
られた。**

**本実証実験の成果の一部を利用  
している**

From SpaceNews Web Page on July 26<sup>th</sup> 2019

# 低中高度地球周回 高速衛星通信の動向

- 宇宙機関の地球観測衛星 (米NASA, 日本JAXA, 独DLR etc) :  
約1Gbit/sec X 帯 (8GHz) 現在  
> 4Gbit/sec Ka帯 (26GHz) を2020年代中期に計画
- 商用の小型地球観測衛星群 (コンスタレーション)  
Dove (Cube Sat) : 1.6Gbit/sec X 帯、2019年段階での最高速度  
**本実験は2019年12月に最高速度を塗り替えた。3.3Gbit/sec**
- 非静止通信衛星コンステレーション (SpaceX Starlink、Amazon Kuiper)  
Ka帯 通信衛星

Radiowave Data Downlink Summary

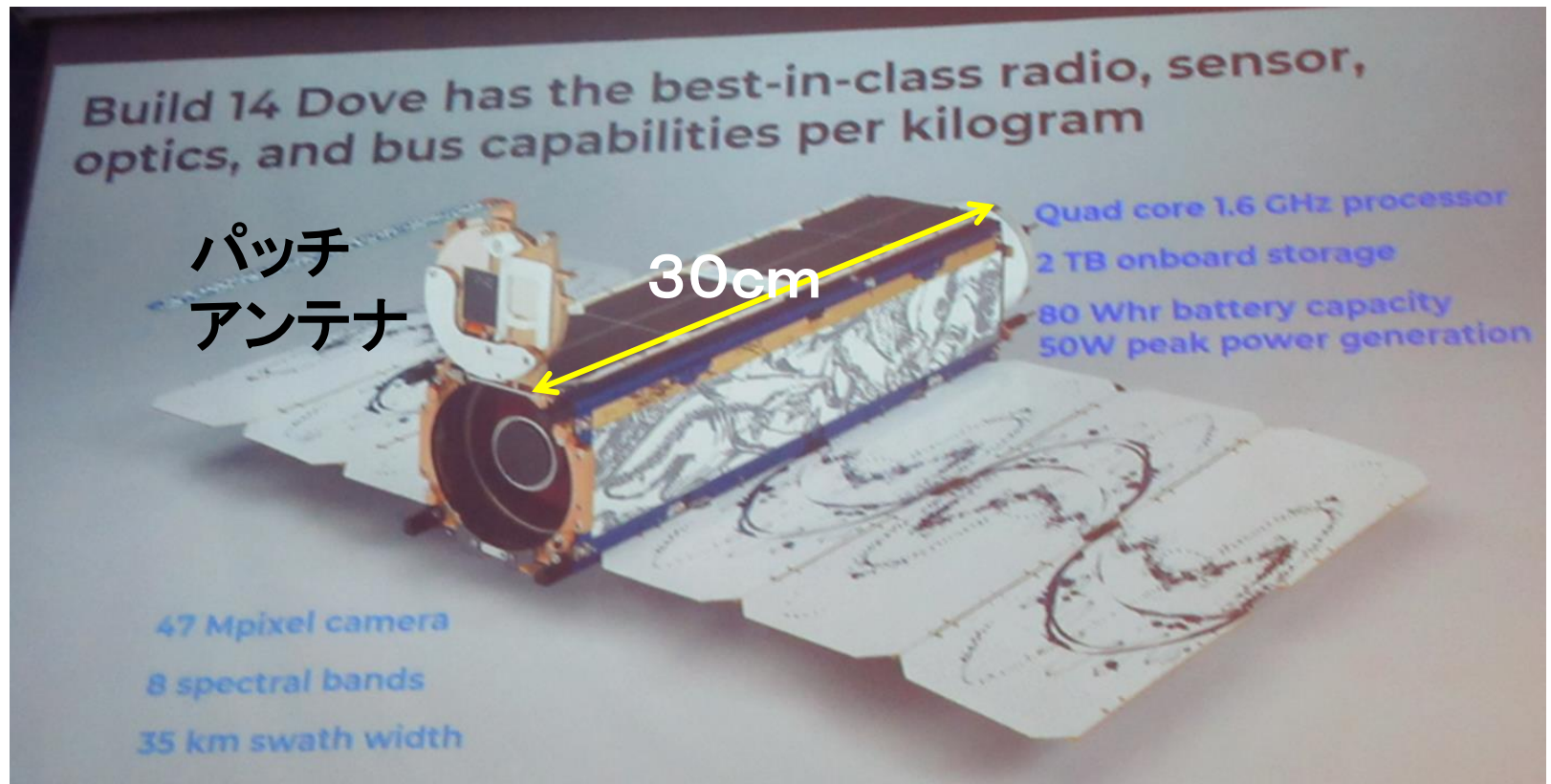
| Satellite  | Ref. & Year      | Frequency Band | Bandwidth (MHz) | Multiplexing             | Modulation | Data Rate (Gbps) | Frequency Efficiency (bps/Hz) |
|------------|------------------|----------------|-----------------|--------------------------|------------|------------------|-------------------------------|
| WorldView3 | [2] 2014         | X              | 375             | Polarization             | 8PSK       | 1.2              | 3.2                           |
| ALOS-2     | [3] 2014         | X              | 375             | None                     | 16QAM      | 0.8              | 2.13                          |
| Dove       | [5] 2019         | X              | 288             | Polarization & Frequency | 32APSK     | 1.6              | 5.56                          |
| RAPIS-1    | 2019             | X              | 315             | Polarization             | 64/256APSK | 2.65/3.3         | 8.4/10.8                      |
| NISAR      | [4] planned 2022 | Ka             | 1500            | Polarization             | QPSK       | 4                | 2.7                           |

# CubeSat 光学コンステレーション衛星Dove (Planet 社)

## 1.6Gbpsダウンリンク

ユタ小型衛星会議2019

大型地球観測衛星を含めて2019夏段階での最高ダウンリンク速度  
⇒ 本実験は2019年12月に最高速度を塗り替えた。3.3Gbps



# 帯域制限のある通信路での高速化

周波数帯域  $\Delta f = \text{シンボルレート} \times \text{ロールオフ係数}$

データレート = シンボルレート  $\times$  変調次数  $k$

2.65.Gbps (64APSK)

300Msps

$\times$  符号化率

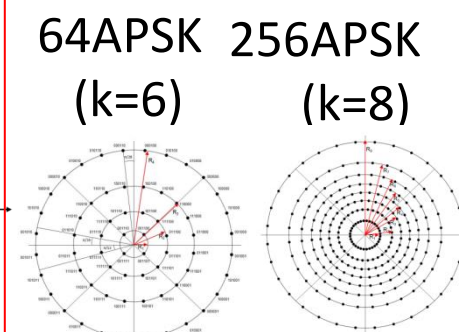
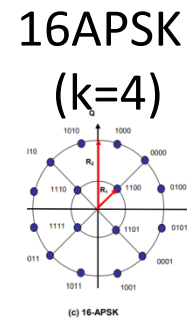
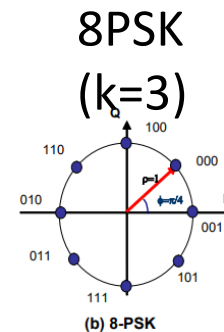
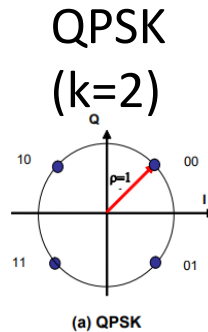
3.3Gbps (256APSK)

$\times$  偏波多重度

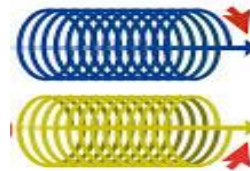
$K=6,8$

$p=2$

変調次数  $k$



偏波多重度  $p=1$  or  $2$

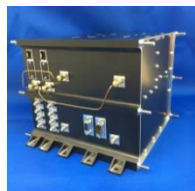


# 3. 3Gbps X帯通信システム、 革新小型衛星Rapis-1 実証実験

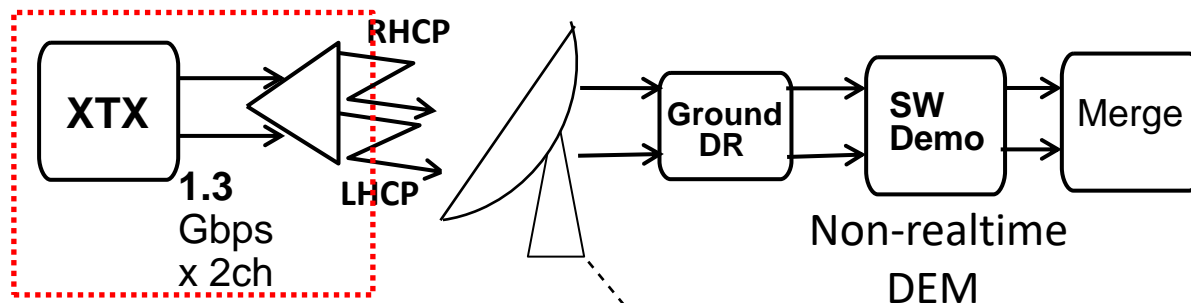
Table 1 Downlink System Parameter

|        |                   |                    |
|--------|-------------------|--------------------|
| System | Frequency         | 8025-8340MHz       |
|        | Freq. Width       | 315MHz             |
|        | Symbol Rate       | 300Msample/s       |
|        | Modulation        | QPSK,16,64,256APSK |
|        | Data Rate         | max 3.3Gbps/2ch    |
|        | Freq.Utilization  | max 10.8bit/s/Hz   |
|        | Efficiency        |                    |
|        | Roll-off $\alpha$ | 0.05               |
|        | Polarization      | RHCP. LHCP 2ch     |
|        | Protcol           | DVB-S2X            |
| TX     | TX Power          | 1W/ch              |
|        | Ant Type          | Corrugate Horn     |
|        | Ant Gain          | 17dBi              |
|        | Ant XPD           | >37dB              |
| RX     | Ant Type          | 10m Parabola       |
|        | System Tem        | 58K (EL=90)        |
|        | Ant G/T           | 39dB/K(EL=90)      |
|        | Ant XPD           | >37dB              |
|        | Demodulation      | Stored/SW Dem.     |

on-board TX      on-board ANT  
XPD >37dB



High Speed X band **2.65,3.3 Gbps**  
Demonstrated In 2019-20  
by Rapis-1 satellite.



JAXA satellite  
RAPIS-1

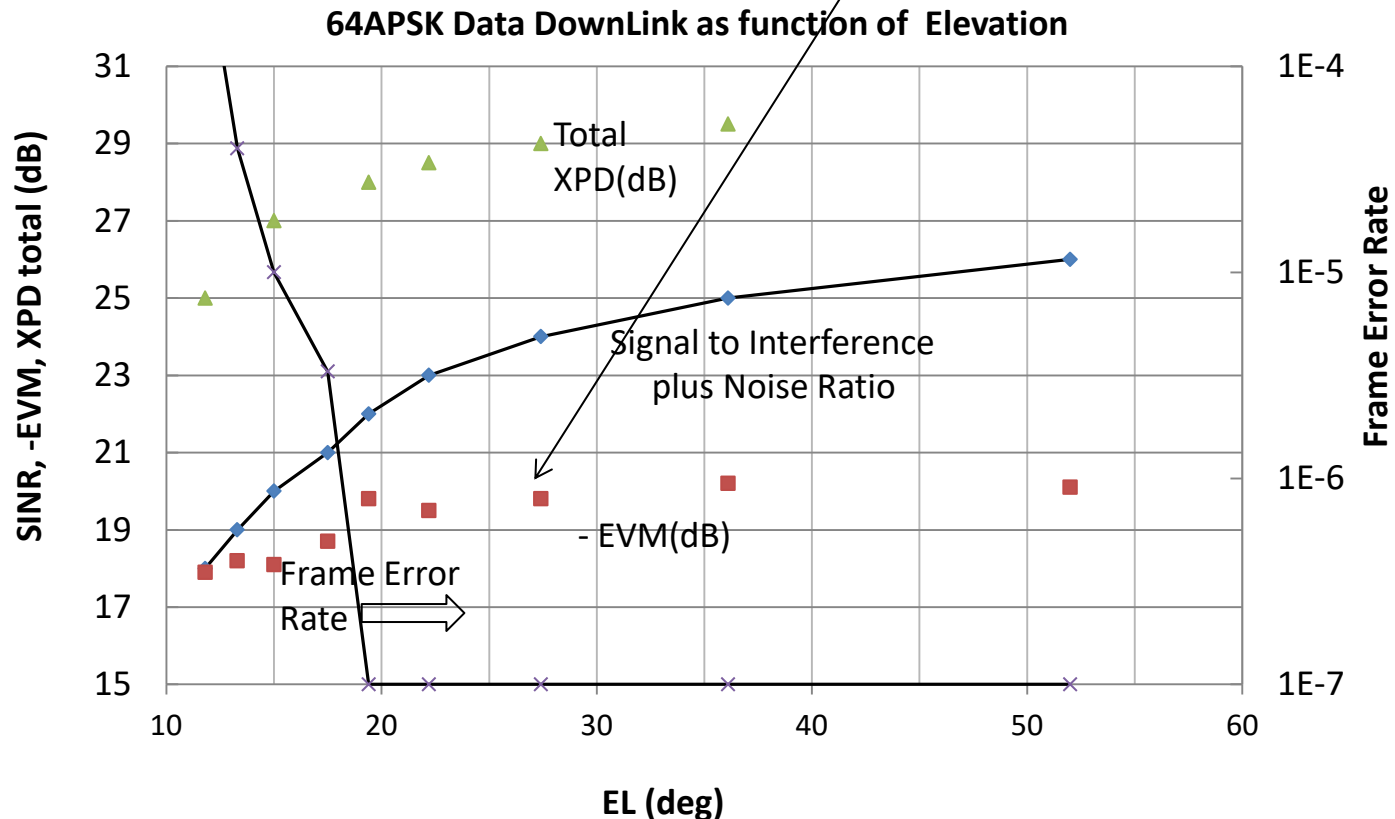
JAXA Usuda  
10m ANT



# 64APSK, 2.65Gbps Rapis-1衛星からの ダウンリンク実験2019.6.23

低仰角領域： 信号は低レベル、ドップラー変化率も低い  
高仰角領域： 信号は高レベル、ドップラー変化率も高い

EVMはSINRが増加しても飽和気味だが、復調性能には影響なし

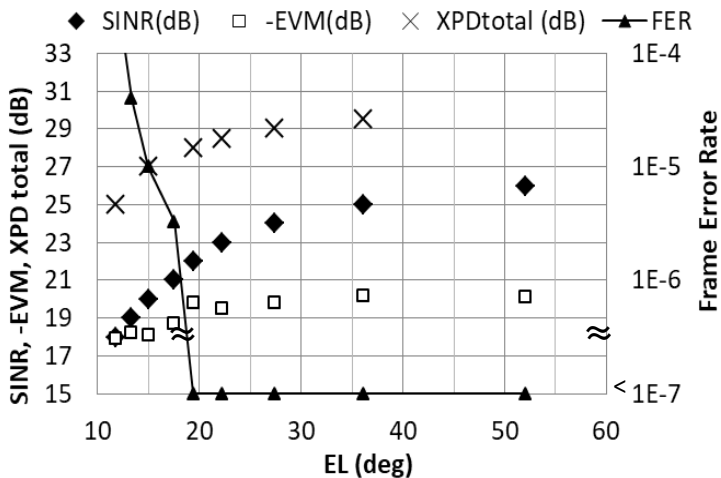




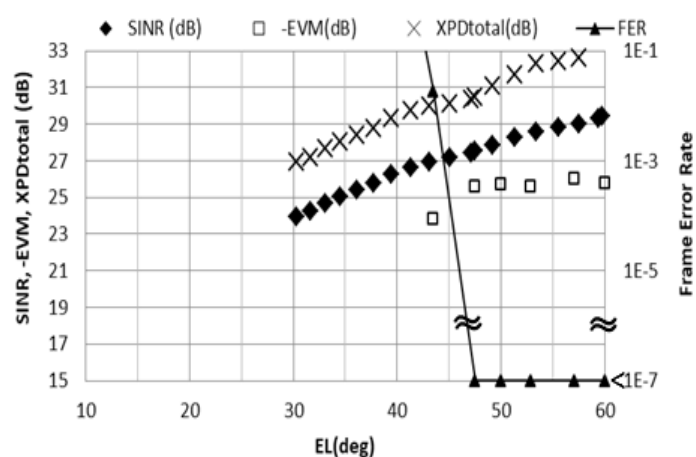
# 64APSK(2.65Gbps)及び256APSK(3.3Gbps) 回線状態の仰角依存性

SINR: Singal-to-Intereferenece plus noise ratio、信号電力/(交差偏波干渉+熱雑音)  
 EVM: Error Vector Magnitude、復調コンステレーションの広がり  
 PD: Cross Polarization Discrimination、主偏波電力/交差偏波混入電力  
 FER: Frame Error Ratio、フレーム誤り率

64APSK変調通信、2.65Gbps,6月23日



256APSK変調通信、3.3Gbps,12月25日



# 復調されたIQコンスタレーション

- 64,256APSKの信号識別のために、  
歪の少ない通信チャンネルが必要

1シンボルで6 or 8ビットを伝送

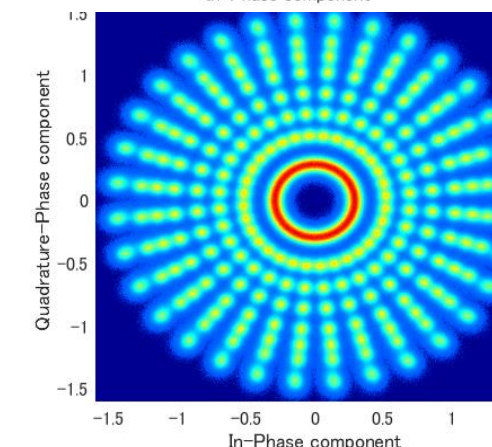
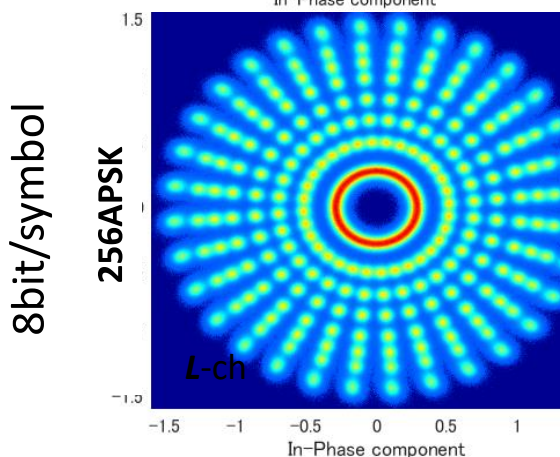
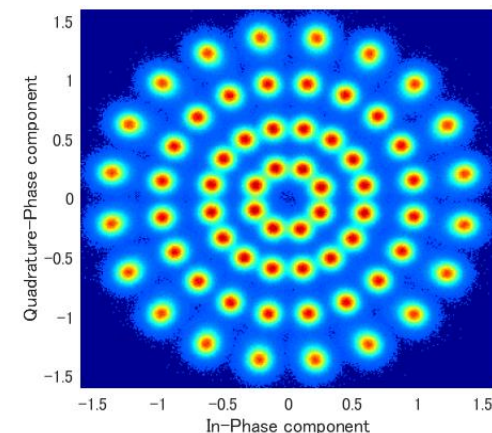
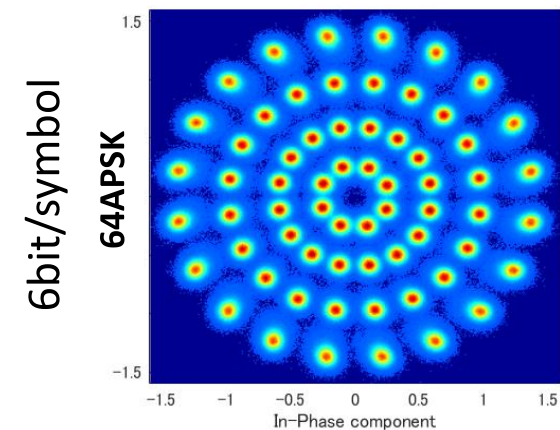
左旋円偏波チャンネル

右旋円偏波チャンネル

- 送信器の電力増幅器の歪  
GaN 29.5dBm,  
送信EVM=-29dB

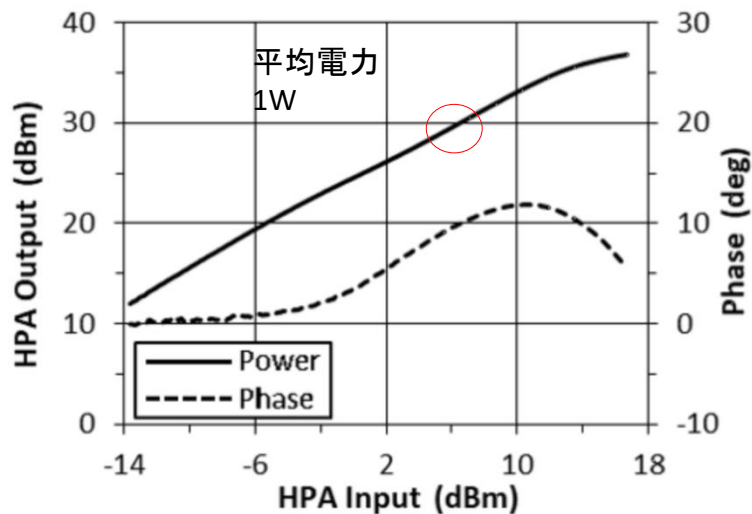
- 送受アンテナのXPD  
> 37dB

- ソフトウェア復調での  
ドップラー周波数追尾

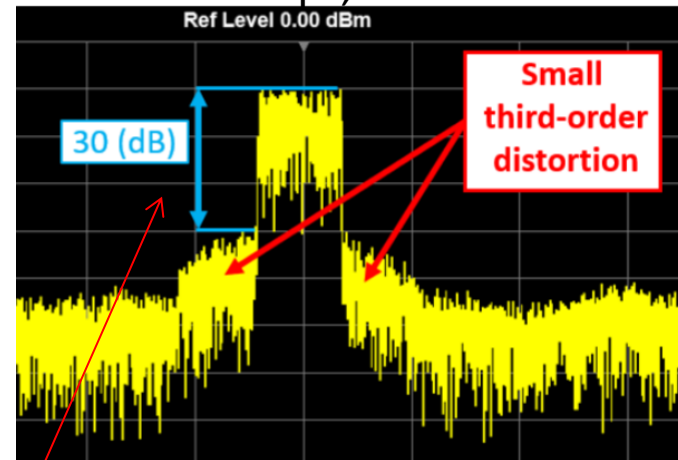


# 非線形3次歪の小さい X帯GaN電力増幅器

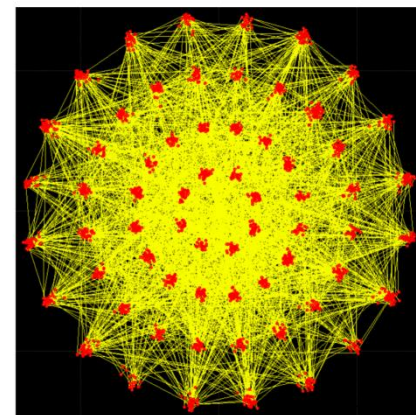
GaNHEMT2段増幅器  
バイアス状態を最適化  
AM-AM, AM-PM特性  
1W平均、



64APSK変調スペクトル  
300Mpsps,  $\alpha=0.05$



送信機出力を直接復調した  
64APSKのコンステレーション



変調スペクトル非線形3次歪  
送信系EVM(Error Vector Magnitude)

-30dB  
-29dB

# 交差偏波によるクロストーク

- 交差偏波干渉発生は、送信アンテナ、大気中の雲、氷、および受信アンテナ

- 本研究では、 $XPD > 37\text{dB}$  のセプタム型ポラライザを開発、送受アンテナに使用。

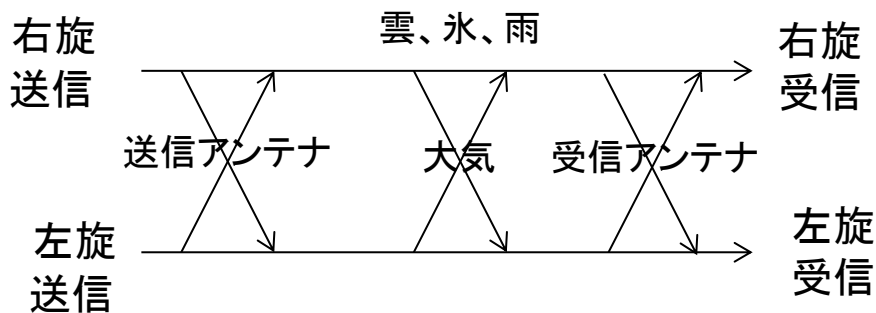
- 大気中のXPDはITUモデルでは、右図点線のような。

- 低仰角では大気、高仰角では送受アンテナがXPDを支配する

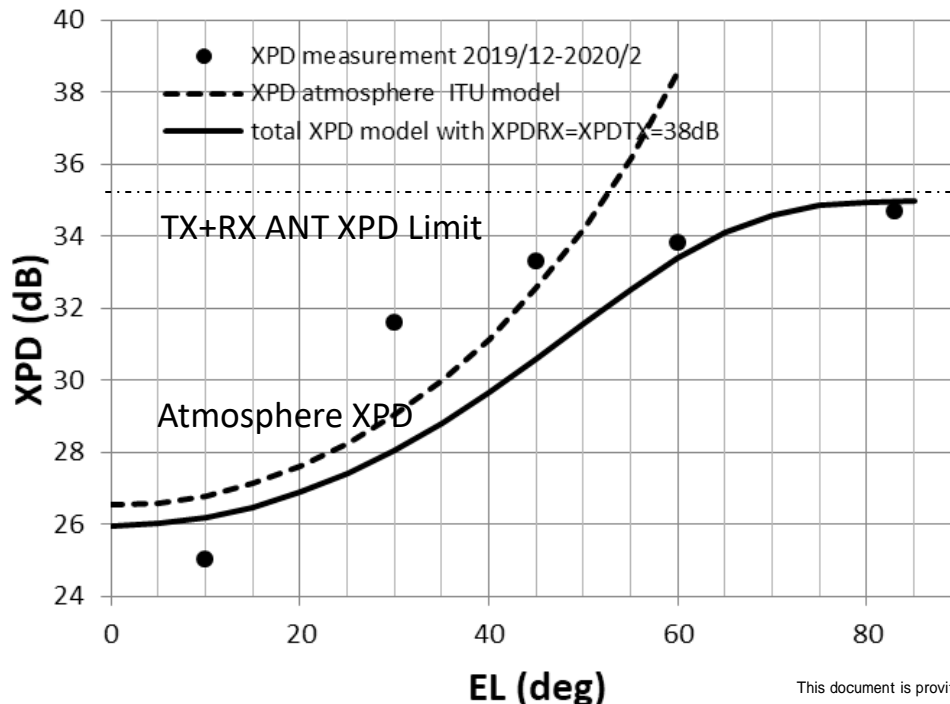
- $XPD_{\text{total}} =$   
 $32\text{dB}$  (EL=30deg)  
 $34\text{dB}$  (EL=60deg)

$$XPD = \frac{\text{Main Signal } S}{\text{Cross Polarization Interference } I}$$

$$XPD_{\text{total}}^{-1} = XPD_{\text{txant}}^{-1} + XPD_{\text{atmo}}^{-1} + XPD_{\text{rxant}}^{-1}$$



XPD as function of EL



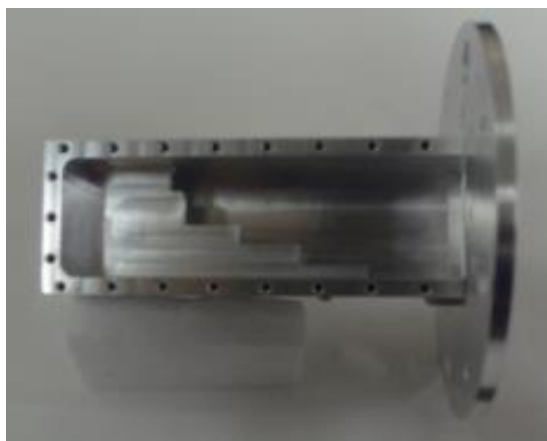
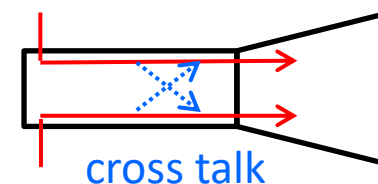
# XPD>37dBの左右円偏波共用アンテナ

## XPD: 交差偏波識別度

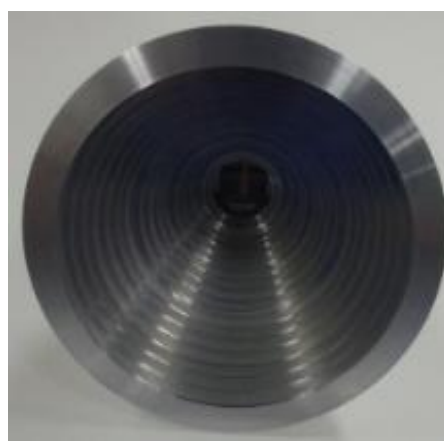
### セプタムポラライザ + コルゲートホーンアンテナ

セプタム構造のポラライザ  
同軸入力、正方形導波管出力

インハウス設計  
XPD>37dB



Polarizer



Corrugated horn antenna



Dual polarized wave antenna

# まとめ

1. 低高度小型衛星からのX帯高速ダウンリンク通信を実証  
64APSK x 2 polarization: 2.65Gbps. (8.4bps/Hz)  
256APSK x 2 polarization: 3.3Gbps. (10.8bps/Hz)  
現時点での無線データ伝送の最高速度(中継通信を除く)  
ただし、事後のソフトウェア復調、実験的運用
2. キー技術：  
電力増幅器の非線形ひずみの抑制  
交差偏波識別度の高い送受アンテナ(ポラライザ)  
復調系でのドップラー周波数追尾

# 今後の課題

1. 本実験は実証実験。  
アンテナ10m, 極低温LNA
2. 小型衛星コンステレーション用に使いやすい実用システム開発  
(搭載パッチアンテナ、4m地上アンテナ, 常温LNA.)が望ましい。  
2Gbps程度が可能。(Doveを超える)
3. 搭載送信機はCubeSatサイズに
4. 安価な実時間復調器の開発・・・JAXA探査ハブ資金で開始
5. 今後のKa帯利用を考慮して、X帯、Ka帯共用のシステムに。  
(周波数変換部を置き換えて)

謝辞：

本研究に当たり、内閣府ImPACTプログラム、JAXARapis-1プロジェクト、JAXA追跡本部、宇宙研工学委員会に感謝いたします。本研究は一部総務省SCOPE資金の支援を受けています。

# 研究発表

[1]T,Kaneko, H,Saito et.al,“2.65 Gbps downlink communications with polarization multiplexing in X-band for small earth observation satellite,” to be published in IEICE Trans Communications to be published in Vol.E104-B,No.1,Jan. 2021.

齋藤宏文,金子智喜,河野宜幸,村上圭司,國井喜則,友田孝久,田中孝治,平子敬一,中須賀真一,白坂成功,“低高度地球周回衛星からのX帯偏波多重2.65及び3.3Gbpsデータ通信の実証実験”,革新的衛星技術実証ワークショップ 2020,2020年11月5日

齋藤宏文,金子智喜,河野宜幸,村上圭司,國井喜則,友田孝久,田中孝治,平子敬一,中須賀真一,白坂成功,“低高度地球周回衛星からのX帯偏波多重2.65及び3.3Gbpsデータ通信の実証実験”電子情報通信学会ソサエティ大会,BS-2-6,2020年9月16日



# 新聞発表

プレスリリース 東大、慶応大 20200807

[https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws\\_202008071031036724913159.html](https://www.t.u-tokyo.ac.jp/soe/press/setnws_202008071031036724913159.html)

日経産業新聞 20201031

日本経済新聞 20200907

日本経済新聞

2020年(令和2年)9月7日(月曜日)

■早稲田大学 斎藤安文客員教授や東京大学の中須賀真一教授らは地球観測衛星から8ギガ(約10億)帯の電波を使って、1秒あたり3.3ギガのデータを地上に送る実験に成功した。衛星からの無線データ伝送では最高速だという。低コストの無線システムで済み、防災や農業など様々な分野で衛星画像を活用するの役に立つという。

データの信号を細かく制御できる高性能の送信機を搭載した宇宙航空研究開発機構

## 衛星からデータ伝送 8ギガ帯使い最高速

造の線維ができた。

(JAXA)の小型衛星を使った。信号の厳密な制御によって、送信できるデータの量が約2倍になった。電波を干渉しないようにし、限られた帯域幅を有効活用した。

8ギガ帯の電波は、通信衛星などが使う25・5ギガ帯に比べて通信速度は遅いが、雨や雲の影響を受けにくく、通信システムを安価に作る事ができる。

今後は帯域幅の利用効率を高める。2年後をメドに実用化を目指す。

Next Tech 2030

## マイクロ衛星データは特大

衛星からのデータ伝送に関する主な動き

|       |  |
|-------|--|
| 2014年 | 米企業が打ち上げた大型衛星が毎秒1.2ギガビットのデータを地上に伝送                           |
| 19年   | 米スタートアップが打ち上げた超小型衛星が毎秒1.6ギガビットのデータを地上に伝送                     |
| 20年   | 東京音響工学の研究チームが開発した送信機を搭載したJAXAの小型衛星が世界最高速の毎秒3.3ギガビットのデータ伝送に成功 |
| 22年   | NASAが25.5ギガ〜27ギガヘルツ帯を使い、衛星からのデータ伝送を開始                        |
| 23年   | 高橋客員教授らが大容量の通信が可能で、超小型衛星に搭載できる8センチメートル角の送信機を開発               |
| 30年   | 多数の衛星が通信できる衛星通信網の利用が企業で普及                                    |

## 高速通信、汎用部品使い低コスト

電波と光の併用が重要

衛星からのデータ伝送に関する主な動き

衛星からのデータ伝送に関する主な動き

# 日経産業新聞20201201

これは大抵に左右されにくい周波数の電界最高速で送信する実験に成功。宇宙雑音機（JAXA）などは衛星間で光通信する開発を進める。拡大する宇宙ヒリルになる」と期待される。

心大、JAXA  
星からX帯と  
波を使って高  
を地上に送る  
△を開発。高  
「X」の低軌道  
衛星から毎秒  
の高速で送信  
成功した。X  
度としては従  
はり、インタ  
と地上からの  
継する通信衛  
衛星からのデ  
しては最高速  
回する衛星を  
インターネット  
相次いでいる  
にサービスの  
帯という周波  
れる。高速・  
ータ通信に適  
らた。ただK  
は雲や雨に弱  
大候が悪いと  
くなる。これ  
帯の電波は天  
れにくいのが  
リストすむ  
のる。  
△はX帯を高  
めに偏波多重  
を使った。右  
と左回りの電

## 星データ、迅速・大量に

Startup  
Innovation  
Science

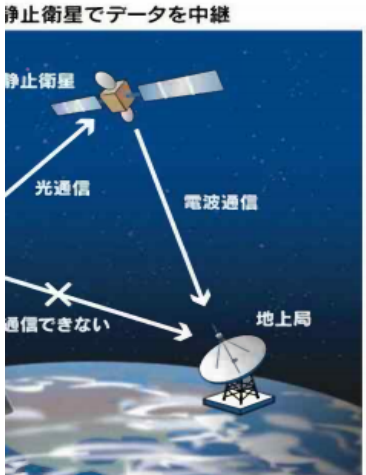
速の通信可能な衛星の打ち上げが予定されるが、現時点ではKa帯を上回る。

実験に使った送信機は  
一辺20cmの立方体で重  
さは7g。アンテナは重  
さは20g。2019年  
1月に打ち上げられた小  
型実証衛星1号機（ラピ  
イザーという部品が鍵を  
握る。「担当した学生が  
からの電波はJAXA日  
根気よくコミュニケーション  
して、左右の電波を効  
率よく分離できるよう最  
適な条件を決めた」と開  
発にあたった斎藤宏文J  
AXA名誉教授は説明す  
る。

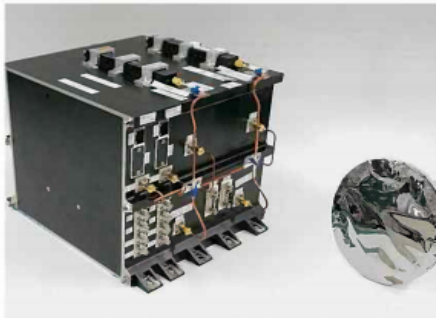
しかった。開発では左右  
の電波を区別するボラ  
イザーという部品が鍵を  
握る。「担当した学生が  
からの電波はJAXA日  
根気よくコミュニケーション  
して、左右の電波を効  
率よく分離できるよう最  
適な条件を決めた」と開  
発にあたった斎藤宏文J  
AXA名誉教授は説明す  
る。

偏波多重に加えて信号  
を変換する変調方式には  
256APSKと64APSKとい  
う高度な方式をこのX帯  
の通信は、主に衛星から  
地球を観測するデータ  
を送る。

### 東大など世界最高速



## 宇宙産業に活用期待



©ImPACTプログラム 慶應義塾大学/東京大学/宇宙科学  
世界最高速を達成したX帯通信用の送信機とアン

ために使う。今回の実験だ。宇宙空間には雲なども合成開口レーダー（SAR）で観測したデータで、衛星間で大量のデータの送信を想定したものを高速に送れる。

JAXAによると低軌道衛星を地球を観測する人工衛星から地上局にデータを送れる時間は1回につき10分以内、1日合計でも1時間以内、1日合計でも1時間以内、ひとつの地上局との通信がいつでも可能な静止衛星で中継が発生して一刻も早くデータがほしいときに、衛星通信が可能になるとして星からデータを受信できる。

低軌道の小型衛星を打ち上げることも起こりうる。そこで低軌道衛星から高速でデータを観測し、データを防災受け取って中継する衛星やマーケティングなどに間通信の開発も進められている。

JAXAは光を使ったひとつと期待している通信システムを搭載した静止衛星を11月29日に種子島宇宙センターから打ち上げた。2021年度データを活用する上で重要な