

# IEICE Bplus

電子情報通信学会  
通信ソサイエティマガジン

春 2024-SPRING

No.68



[小特集]

## 宇宙ICTの基盤となる 宇宙通信技術のフロンティア

- 衛星搭載通信機器の技術動向
- 宇宙通信ビジネスの動向と今後の展望に関して
- Starlinkシステムと応用サービス例
- 宇宙天気の有線通信への影響
- 小形光通信システムSOLISSの開発と低軌道—地上間光通信実証
- 深宇宙通信への招待

Facebook, Twitter  
も見てね

電子情報通信学会通信ソサイエティマガジン



# 論文の書き方講座開催のお知らせ

一般社団法人 電子情報通信学会  
通信ソサイエティ

通信ソサイエティでは、論文の書き方について会員の皆様に広く深く御理解頂くために、2024年総合大会において、論文の書き方講座を下記のとおり開催致します。

この書き方講座は、2009年3月以来、総合大会／ソサイエティ大会において継続的に開催され、数多くの方に御参加頂き、大変御好評を頂いております。

通信ソサイエティ和文論文誌・英文論文誌の委員長／副委員長経験者が講師を務める講座ですので、論文執筆のポイントを聞ける貴重な機会となっております。大学あるいは企業において論文執筆に御興味をお持ちの方は是非御参加下さい。

論文の書き方について御質問をお持ちの方は、次のリンクから御質問の事前登録に御協力をお願い致します。

<https://forms.office.com/r/vGcCqG6GeL>



## 『論文の書き方講座』

- ① 日時：2024年3月6日(水) 9:45～11:30
- ② 場所：広島大学（東広島キャンパス）工学部116教室
- ③ プログラム：

(1) 論文の書き方	道下 尚文（防衛大学校）
(2) 英文論文の書き方のポイント	木下 和彦（徳島大学）
(3) 回答文の書き方・レターの書き方	張 裕淵（東京工業大学）
- ④ 定員：150名
- ⑤ 聴講費用：無料

# 宇宙 ICT の基盤となる 宇宙通信技術のフロンティア

「宇宙通信」は、文字どおり宇宙空間を介して行う通信を指しますが、衛星放送や衛星電話といった形で私たちの生活には既に浸透している感があります。特に、国土の多くが山間部であり、島国であることから水産業も盛んであり、更には地震などの災害も頻発する我が国では、宇宙通信は非常に重要度の高い技術であります。また、「はやぶさ」や「はやぶさ2」に夢中になった方も多くいらっしゃると思いますが、これら深宇宙を旅する探査機との通信も当然ながら宇宙通信です。つまり、宇宙通信は世界の起源の探求という活動も下支えしているのです。

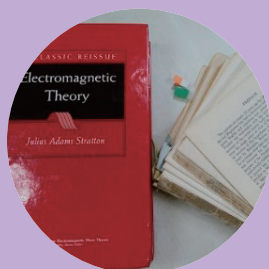
そんな宇宙通信を取り巻く状況は更に大きな転換点を迎えております。近年における IoT (Internet of Things) やリモートセンシングをはじめとする情報通信技術の高度化や、多数の小形衛星によるコンステレーションなどの衛星関連技術の発展を受けて、宇宙空間を含んで展開される情報通信技術、すなわち宇宙 ICT が注目を浴びています。宇宙 ICT により、これまで誰も見たことがなかった宇宙ビジネスが創出され、我々の生活はより豊かになっていくことでしょう。また、地上の通信網とも協調することで、陸という限られた二次元的領域を抜け出て、陸海空から宇宙に至る全ての領域をシームレスにカバーする無線通信網の展開も可能になります。このように宇宙 ICT 技術は、人類の活動領域をより拡大していくための足掛かりともなる技術であります。その基盤はやはり宇宙通信です。宇宙 ICT の進展に応じてネットワークが三次元的に拡充し、そこで大容量の情報がやり取りされるようになると、より高度な宇宙通信技術が求められるようになります。

このような背景を受け、本小特集では、宇宙通信技術利活用の最前線で活躍されている方々に興味深い解説論文・解説記事を御執筆頂きました。衛星搭載通信機器の最新技術動向や、宇宙通信による通信ビジネスの動向と展望、そして Starlink によるインターネット提供サービスの現状といった記事からは、技術やビジネスという様々な視点から宇宙通信技術の「いま」を知ることができます。また、レーザーによる宇宙ステーション-地上局間通信の実証や、地球圏以遠の探査機との通信を行う深宇宙通信の記事からは、最先端の研究開発を学んで頂けます。更に、宇宙無線通信の安定運用に欠かすことのできない、太陽フレアの監視に関する記事も御執筆頂きました。

本小特集を御覧になった研究者・技術者・学生の皆様から、この分野、宇宙通信のフロンティアに挑もうという方々が現れば、編集チームとしてはこれ以上の喜びはございません。最後になりましたが、本小特集の発行にあたり、お忙しい中貴重な時間を割いて御執筆して下さった筆者の皆様、そして、査読と校閲に御協力して下さった皆様に心からお礼を申し上げます。

小特集編集チーム

遠藤寛之, 太田真衣, 坂野寿和, 早馬道也, 松室堯之, 松本和人



341



348



369



372

## 【小特集】

# 宇宙ICTの基盤となる 宇宙通信技術のフロンティア

275

巻頭言

編集チームリーダー  
遠藤寛之

285

— 解説論文 —

### 衛星搭載通信機器の技術動向

石原秀樹 / 矢島雄三 / 谷重紀 / 安藤俊行

295

— 解説 —

### 宇宙通信ビジネスの動向と 今後の展望に関して

長谷川広太

301

— 解説 —

### Starlink システムと応用サービス例

福井裕介 / 長里天羽 / 伊藤直

308

— 解説論文 —

### 宇宙天気無線通信への影響

陣英克

316

— 解説論文 —

### 小形光通信システム SOLISS の開発と 低軌道—地上間光通信実証

小松宏光 / 太田伸二 / 山添弘晃 / 澤田弘崇 / 神田大樹 / 池田俊民 / 岩本匡平

330

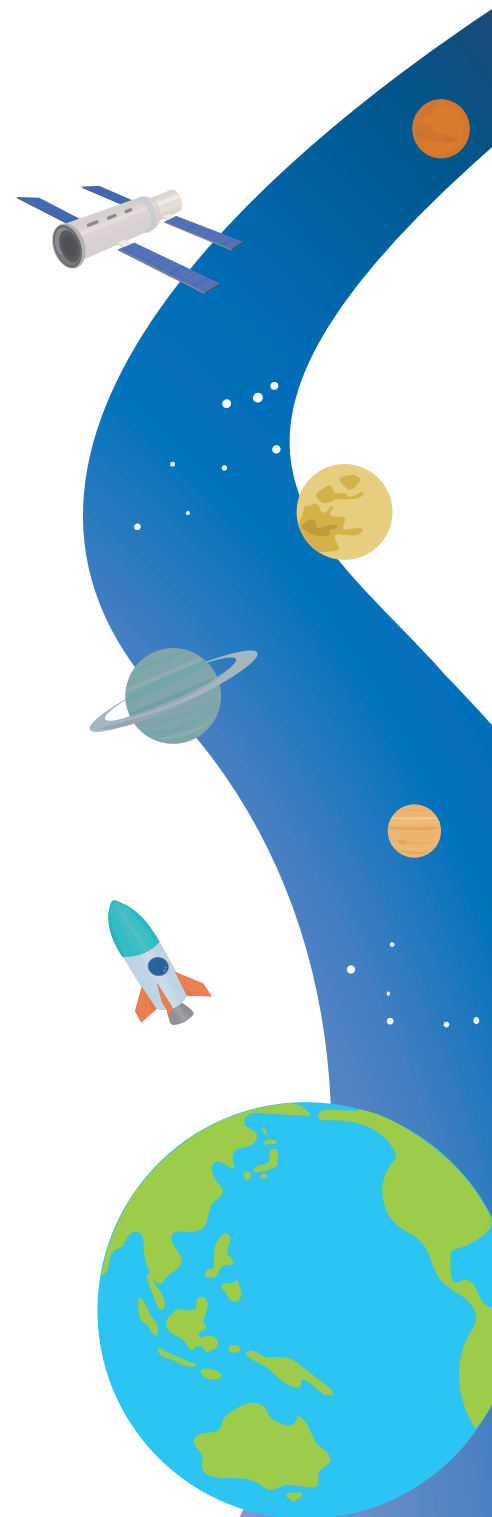
— 解説論文 —

### 深宇宙通信への招待

戸田知朗

- 278 －子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページ－  
**深宇宙探査機の軌道決定**  
竹内 央
- 281 －子どもに教えたい通信のしくみ：ジュニア会員向けページ－  
**生成AIのこれまでの変遷と展望**  
西崎博光
- 341 －私の研究者歴－  
**逆問題 インスパイアード計算電磁気学**  
宇野 亨
- 348 －街 plus 探訪－  
**自然と文化と食の街「広島」**  
高橋 賢
- 352 －開発物語－  
**Linux カーネルの開発**  
**世界最大のオープンソースプロジェクトでの経験**  
藤田智成
- 359 －解説論文 こんなツール、使っています－  
**SDNのプログラマブルデータプレーンによる**  
**ネットワーク主導型TCPフロー制御調和手法**  
妙中雄三／塚本和也
- 369 －若者よ、世界に出よう！－  
**英国における生活と研究**  
菊月達也
- 372 －科学館・博物館めぐり－  
**郵政博物館**  
遠藤寛之
- 375 －巻末言－  
**論文誌・レター誌の「品格」と採録率，オープンアクセス**  
通信ソサイエティ編集長  
太郎丸 真

- 376 編集後記



# 深宇宙探査機の軌道決定

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 竹内 央  
Hiroshi Takeuchi

## 1. はじめに

過去の任意の時刻における宇宙機の三次元の位置と速度（計6成分）を、計測と解析により再現するための処理を軌道決定と呼ぶ。軌道決定が正確になされれば、将来の軌道も正確に予測することができる。地球周回の人工衛星では、機上でGPS信号を受信することにより（カーナビと同様に）正確に軌道決定ができるが、GPS衛星の高度（20,000 km）よりも高い高度を飛行する宇宙機ではその手法は使えない。更に、地球の重力圏を脱して超長距離を飛行する深宇宙探査機の軌道を求める場合はより難易度が高く、それに特化した特別な計測手法が必要となる。本稿では「はやぶさ2」に代表される深宇宙探査機の軌道決定を行う上で必要となる計測技術について紹介する。

## 2. ドップラー計測

救急車が近づいてきているときにサイレンの音が高くなり、遠ざかるときに低くなるのと同様に、探査機から送信される電波のトーン信号（周波数が一定のピュアな正弦波）を地上の受信局で受信したときの受信周波数の微妙なずれを測定することにより、探査機と地球局間の相対速度を計測することができる。探査機上におけるトーン信号の送信周波数を $f_0$ 、地球局における受信周波数を $f_R$ 、探査機が地球局から遠ざかる方向を正とする視線速度を $v$ 、光速を $c$ とすると、 $f_R = f_0(1 - \frac{v}{c})$ の関係から $v$ を測定することができる。この計測手法を「1-way ドップラー計測」と呼ぶ。ただし、探査機に搭載可能な時計は地球局の高精度な時計に比べると精度が低く、温度変動や経年変化等に応じて周波数がふらついてしまう。仮に原子時計級の精度の高い時計を搭載できたとしても、その時計の歩度は探査機近傍の重力場の影響を受け変化するため、地球上で $f_0$ の最新の正確な値を知るこ

とはできない。そのため1-way ドップラーの計測精度は低く、深宇宙探査機の軌道決定で実用的に使用されることはほとんどない。

より精度が高い方法として、地球局の高精度な時計を用いて生成したトーン信号を、地球局→探査機→地球局と往復で折り返して周波数の変化を測定する手法が用いられる。送信した地球局と受信した地球局が同一の局の場合は「2-way ドップラー計測」、異なる場合には「3-way ドップラー計測」と呼ぶ。探査機内で電波を折り返す役割を持つ機器がトランスポンダ（電波中継器）である。深宇宙探査機は地球からの距離が遠いため、光速で進む電波であっても、往復時間は数十分～数時間にも及ぶ。深宇宙地球局の時計は、この往復時間と同程度のタイムスケールにおいて最高の精度を持つ水素メーザ原子時計が用いられる。（より長いタイムスケールにおいてより精度の高いセシウム原子時計は使用されない。）

2-way (3-way) ドップラー計測を行うためには、地球局から送られてきたアップリンクのトーン信号を宇宙機で受信し、トランスポンダ内でPLL (Phase-locked-loop, 位相同期回路) によりアップリンク信号と同期したコヒーレントな信号を生成し、地上にダウンリンク信号として送信する必要がある。アップリンク信号とダウンリンク信号の周波数帯が重なると両者の信号が干渉し合い、混信（クロストーク）が起きてしまうため、アップリンク信号と位相同期関係は保ちつつも、周波数通倍器により周波数に一定の整数比（トランスポンダ比）を掛けて周波数をずらしてダウンリンク信号を生成する必要がある。

表1に、深宇宙探査機の通信で使用されるアップリンクとダウンリンク周波数帯と、それらの周波数帯を選択したときに推奨されるトランスポンダ比の値を示す。これらの値は、比較的簡易な回路で実現でき、なおかつ、不要な高調波による干渉が最小になるような考慮がなされ、設定された推奨値である。地球局におけるトーン信

表 1 深宇宙探査機の通信で使用される周波数帯とトランスポンダ比の推奨値

	Sバンド (Downlink) 2,290-2,300 MHz	Xバンド (Downlink) 8,400-8,450 MHz	Kaバンド (Downlink) 31.8-32.3 GHz
Sバンド (Uplink) 2,110-2,120 MHz	$\frac{240}{221}$	$\frac{880}{221}$	N.A.
Xバンド (Uplink) 7,145-7,190 MHz	$\frac{240}{749}$	$\frac{880}{749}$	$\frac{3328}{749}$ , $\frac{3344}{749}$ , $\frac{3360}{749}$
Kaバンド (Uplink) 34.2-34.7 GHz	N.A.	N.A.	$\frac{3344}{3599}$ , $\frac{3360}{3599}$

号の送信周波数を  $f_T$ 、トランスポンダ比を  $R$  とすると、2-way ドップラー計測は  $f_R = Rf_T(1 - \frac{2v}{c})$  と定式化される。

### 3. レンジ計測

地球局から宇宙機に対し電波を送信し、機上で折り返して地球局に戻ってくるまでの往復時間を計測することにより、宇宙機と地球局の間の距離を測定する手法が「2-way レンジ計測」である。地球局では、アップリンクのキャリア信号やサブキャリア信号に対し、周期  $L$  で繰り返す  $\pm 1$  の 2 値の時系列から成る PN (Pseudo random Noise, 疑似ランダム) 符号列で位相変調を掛けたものを宇宙機に送信する。図 1 には、キャリア信号の位相を反転させることにより  $-1$  を表す BPSK (Binary Phase-Shift Keying) を用いて  $1, -1, 1, 1$  という符号列の情報を載せた変調信号の例を示している。PN 符号列を時間的に平行移動したものと元の PN 符号列との間の相関をとると、両者の時間差が  $L$  の整数倍になったときのみピーク値をとり、それ以外の場合には 0 に近い値をとるため、地球局に戻って来た信号と PN 符号列との間の相関をとることにより、探査機-地球局間の往復時間を  $L$  で割った余りの時間を計測することができる。

数式で表すと、局で受信した信号を  $f(t)$ 、PN 符号列から成る送信信号の模擬信号を  $s(t)$ 、それを時間的に平行移動する量  $\Delta$  を 0 から  $L$  の間で変化させて、相関値

$$\int_{t_0}^{t_0+T} f(t)s(t+\Delta)dt$$

を計算し、この値が最大となるような  $\Delta$  を探す処理がレンジ計測である。(実際には模擬信号にトランスポンダ比や 2way ドップラー分の周波数補正を加える必要があるため、もう少し複雑な式になる。)  $f(t)$  は探査機から地球局を伝搬してきた微弱な信号であり、元の PN 符号列は雑音 (ノイズ) に埋もれているが、十分に長い時間  $T$  にわたり積分をすることにより、正しい  $\Delta$  の位置にピークが見えてくる。レンジ計測値と実際の往復時間との間には、PN 符号列の周期  $L$  の整数倍の不定性

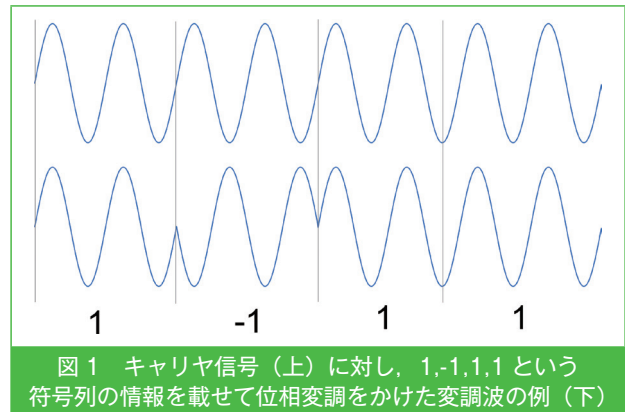


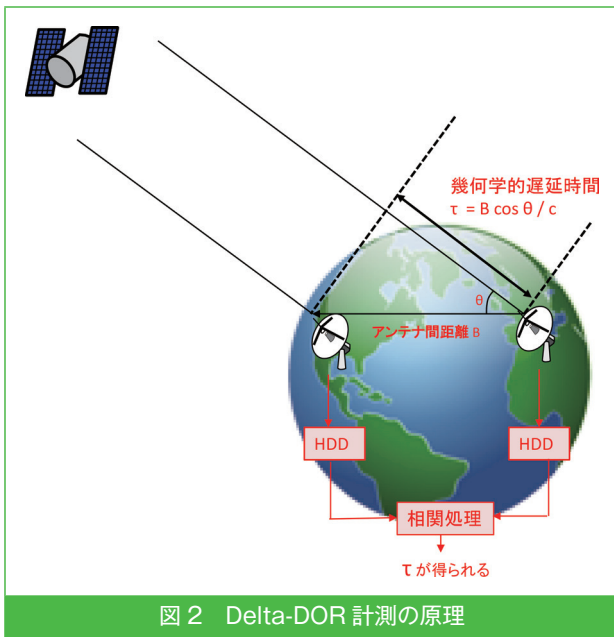
図 1 キャリア信号 (上) に対し、1,-1,1,1 という符号列の情報を載せて位相変調をかけた変調波の例 (下)

(ambiguity) が存在するが、計測前の時点で分かっている大まかな宇宙機の軌道から想定される往復時間の予測値の誤差に比べて  $L$  の値が十分に大きくなるように設定しておけば、整数値を一意に求めること (ambiguity resolution) ができる。

宇宙機でレンジ信号を折り返すときに、機上で捕捉されたアップリンクのキャリア信号に基づき、レンジ信号を含むアップリンクの帯域幅の信号全体を単純にそのままダウンリンク周波数帯に変換したものを地上に送信する方式を「非再生測距方式 (transparent ranging)」と呼ぶ。それに対し、アップリンク信号から、キャリア位相だけではなくレンジ信号の PN 符号列も復調し、それと同期するように (地球局で使用されたものと同じ) PN 符号列をトランスポンダ内で再生成し、ダウンリンク信号に位相変調をかける方式を「再生測距方式 (regenerative ranging)」と呼ぶ。非再生測距ではアップリンクで付加された熱雑音ノイズがそのままダウンリンクでも折り返されるため、計測の SN 比 (信号対雑音比) は  $1/r^4$  に比例する ( $r$  は地球局-宇宙機間距離) に対し、再生測距では機上でクリーンな信号が再生成されるため SN 比の距離依存性は  $1/r^2$  となり、はるかに高い雑音耐性が得られる。

### 4. Delta-DOR 計測

上述したドップラー・レンジ計測は、地球から宇宙機方向を見た視線方向の探査機位置は高精度で計測できる



が、視線方向と垂直な方向の（天球面上の）位置測定精度は悪い。この点を補うために、大陸間で遠く離れた2台の地上アンテナで同時に宇宙機からの電波を受信し、両局の間で信号の幾何学的遅延時間を計測することにより、天球面上の探査機位置を直接計測する手法が「Delta-DOR (Delta Differential One-way Ranging) 計測」である。図2に示すとおり、探査機から送られてきた電波を二つの地球局で同時に記録した後に、インターネット伝送でデータを1か所に集め、二つのデータの相関をとることにより遅延量 $\tau$ が計測される。アンテナ間距離を $B$ 、探査機の天球面上の位置を表す角度 $\theta$ とすると、 $\tau = B \cos \theta / c$ の関係から $\theta$ を知ることができる。

Delta-DOR 計測に用いられる信号は探査機上で生成される二つのトーン信号（トーン1及びトーン2、送信周波数は各々 $f_1, f_2$ とする）である。探査機信号の相関は、二つの地球局AとBにおいて共通受信時刻 $t$ に計測したトーン信号の波数 $\phi$ を用いて $\tau(t) = (\phi_{1A} + \phi_{2B} - \phi_{2A} - \phi_{1B}) / (f_1 - f_2)$ により計算される。ここで波数とは、各局で受信したトーン信号のRF周波数帯における波の数を計測開始時点からカウントした数であり、波の位相が $360^\circ$ 回転するごとに1増える量である。ここで示した $\tau$ を求める演算を「DOR計測」と呼ぶ。なお、ここで計測した $\tau$ には、各地球局における伝送路遅延や大気遅延などの誤差が含まれるため、純粋な幾何学的遅延量にはならず、このままでは軌道決定で使用することはできない。それらの誤差の影響を校正するために、天

球面上で宇宙機の近傍にあり位置（方向）がよく分かっている電波星と宇宙機とを5分間程度ごとに切り換えて交互に観測する。電波星を受信して記録した電波の相関処理により得られた遅延量と、探査機の遅延量 $\tau$ の差をとることにより、電波星を基準とする宇宙機の（天球面上の）相対的な位置を計測することができる。この電波星と探査機の遅延量の差をとる演算を「Delta-DOR計測」と呼ぶ。なお、Delta-DOR計測はドップラー計測とは異なり、精度の低い機上時計で生成されたトーン信号を用いても問題はなく、アップリンクを必要としない。機上時計に誤差がありふらついていたとしても、二つの地球局で計測した位相の引き算においてその誤差がキャンセルされるためである。Delta-DOR計測のより詳細な解説は、参考文献を参照せよ。

## 5. まとめ

本稿では、深宇宙探査機の軌道決定で用いられる3種類の電波計測手法を紹介した。数日間連続して計測したドップラーデータと、その期間の間に1日当り数時間程度ずつ計測したレンジデータ及びDelta-DORデータを全て利用して軌道決定を行うことにより、地球から1AU（太陽-地球間の距離）程度離れた場所で航行する深宇宙探査機の軌道を、数百m程度の精度で求めることができる。

### 参考文献

- (1) “小型ソーラー電力セイル実証機“IKAROS”を利用したVLBI実験,” RFワールド, no. 20, pp. 79-94, CQ出版社. <https://www.rf-world.jp/bn/RFW20/RFW20A.shtml>
- (2) 竹内 央, 堀内真司, 富木淳史, 鎌田幸男, 澤田弘崇, 山口智宏, 市川隆一, 岳藤一宏, 栗原 忍, C. Phillips, P. Edwards, J. Mccallum, S. Ellingsen, “IKAROSの工学実験機器: VLBI計測用マルチトーン送信器によるDelta-DOR実証実験,” 日本航空宇宙学会誌, vol. 62, no. 11, pp. 359-364, Nov. 2014.

### 竹内 央

2000 早大大学院理工学研究科物理学及応用物理学専攻博士課程了。同年早大・教育・助手。2003 NICT 専攻研究員。2006 JAXA 宇宙科学研究所助手。2016 同准教授。2022 同教授。この間深宇宙軌道決定技術の研究に従事。2012～2013 NASA JPL 客員研究員。2023～宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS) 日本代表。





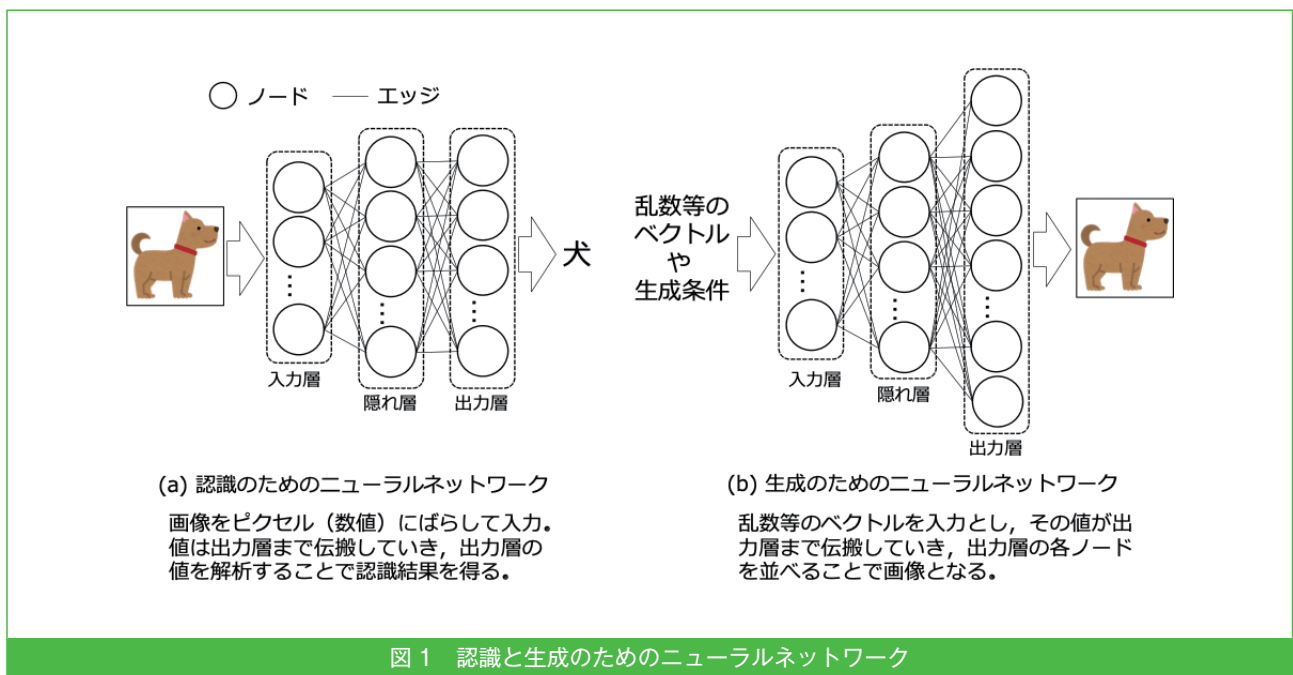
# 生成 AI のこれまでの変遷と展望

山梨大学 西崎博光  
Hiromitsu Nishizaki

## 1. 生成 AI とは？

最近、生成 AI という言葉をよく耳にするようになりました。生成 AI とは、コンピュータが新しいデータ（画像や音楽、テキスト等）を自動的に作り出す技術のことを言います。AI は人工知能（Artificial Intelligence）の頭文字を取ったもので、人間の知能を模倣するコンピュータのことです。人間のように、見たり聞いたりして学習したり問題を解決したりする能力をコンピュータに持たせるための技術（これを「機械学習」と呼びます。）が、今、活発に研究開発されています。この AI の中核を担っている技術が「ディープラーニング」と呼ばれている新しい学習方法です。今のほとんどの生成 AI ではディープラーニングが活用されています。

ディープラーニングは「ニューラルネットワーク」と呼ばれる人間の脳の仕組みからヒントを得た計算グラフを多層に重ねたモデル\*を使って、大量のデータから入力データの特徴やパターンを学習する技術です（図 1）。特徴やパターンを捉えることができるということは、データの認識や分類はもちろんのこと（図 1 (a)）、その逆である特徴を持ったデータを生成することもできるようになります（図 1 (b)）。これが「生成 AI」です。具体的な例として、特定の画像の特徴を入力すれば、それに関連する新しい画像を生成する、といったことができます。



\*モデル：機械学習においてデータから特徴やパターンを学習するための数学的な枠組みやアルゴリズムのことを言います。ニューラルネットワークには、幾つかの種類がありますが、シンプルなネットワークはノードとそれをつなぐエッジから構成されており、エッジは重み係数を持っています。ノードには数値が保存されていて、重み係数を乗じながら値が出力側に伝搬していきます。

## 2. 生成 AI の発展

生成 AI は、元々、画像生成を中心に研究が行われていました。「オートエンコーダ」(図 2) と呼ばれるニューラルネットワークで、入力画像と同じ画像を出力するようにニューラルネットワークを学習します。オートエンコーダでは、エンコーダ(符号器)によって入力データの特徴をよく表す低次元のベクトル(潜在ベクトル)を取り出し、そのベクトルを用いてデコーダ(復号器)が画像を復元します。この仕組みによって、入力データのサイズを削減したり、画像や音声に乗っている雑音(ノイズ)を取り除いたりすることができます。デコーダは潜在ベクトルからデータを復元する能力を持っているので、潜在ベクトルを適切に変えることで違うデータを生成することもできます。

そこで、2014年に生成 AI の歴史において大きな節目がありました。敵対的生成ネットワーク(GAN: Generative Adversarial Network)<sup>(1)</sup> の登場です。GAN は、データ生成器と生成された画像の真が判断を行う識別器という二つのニューラルネットワークから構成され、リアルな画像を生み出すことが可能になりました(図 3)。識別器は入力された画像が本物だと 1 を、フェイクだと 0 を出力するように学習し、生成器は識別器の出力が 1 になるように学習します。これにより、生成器と識別器を学習するときに互いに競争が起こり、リアルな画像を生成できるようになります。オートエンコーダとは違い、生成器には乱数を入力するので、(何が生成されるか予測はできませんが)新しいデータを生み出すことができます。この後、条件付き(生成したい画像をコントロールする。)GAN や、データのスタイル変換を行う CycleGAN<sup>(2)</sup>、StyleGAN<sup>(3)</sup> などが次々と発表されました。この StyleGAN は、特にその画質の高さにおいて注目を集めました。GAN の派生モデルは少なくとも 100 以上は提案されています。

画像生成では、ここ近年では、拡散モデル(Diffusion

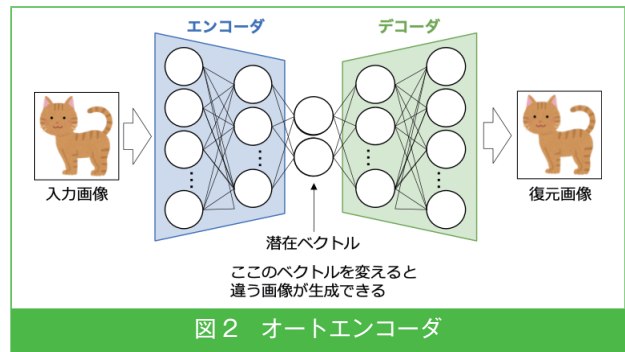


図 2 オートエンコーダ

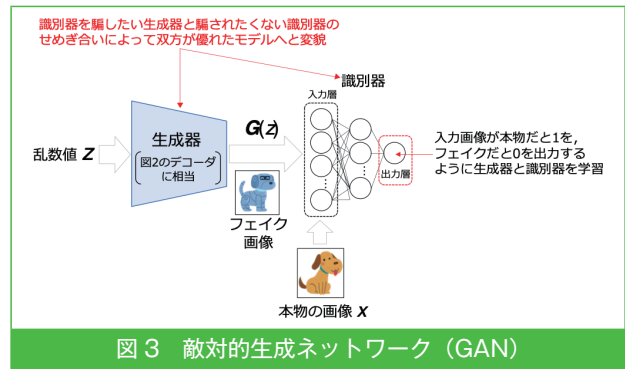


図 3 敵対的生成ネットワーク(GAN)

Model)<sup>(4)</sup> が注目されています。これは、入力データを段階的に雑音に変換していき、その逆のプロセス、すなわち雑音を加わる前の元のデータを予測するデノイズングモデルを用いるものです。これにより、新しいデータを生成する手法です(図 4)。最新の画像生成 AI では、CLIP(Contrastive Language-Image Pre-training)<sup>(5)</sup> という技術を用いることで、テキストで指定した詳細な描写を基に画像を生成できる技術も開発されています。

テキスト分野では、再帰的ニューラルネットワークや、Transformer<sup>(6)</sup> という注意機構(Attention Mechanism)という仕組みを備えた大規模言語モデル(Large Language Model)が開発され、これがテキスト生成 AI に大きな貢献をしています。2017年に発表された Transformer は生成 AI に大きな貢献をしています。Transformer には「自己注意機構」と呼ばれる仕組みが組み込まれています。これによって、単語(ある

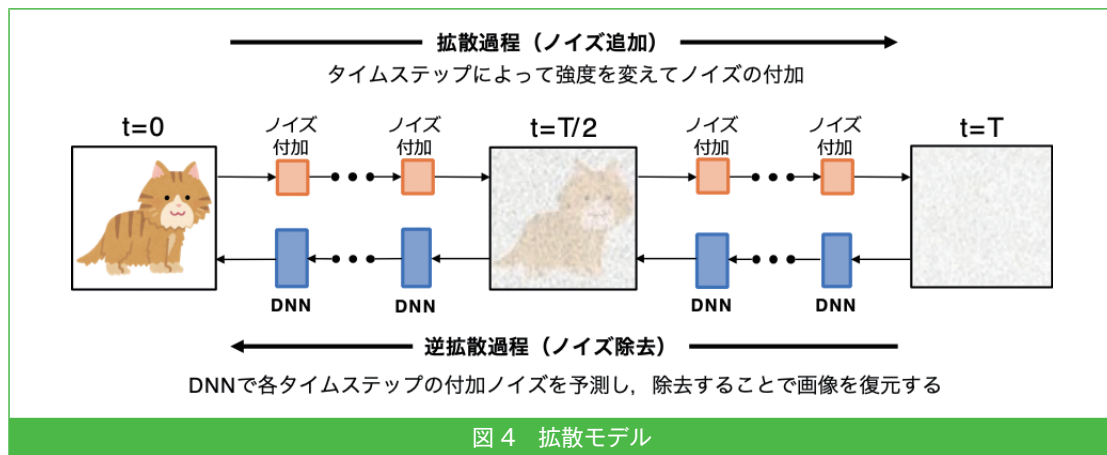
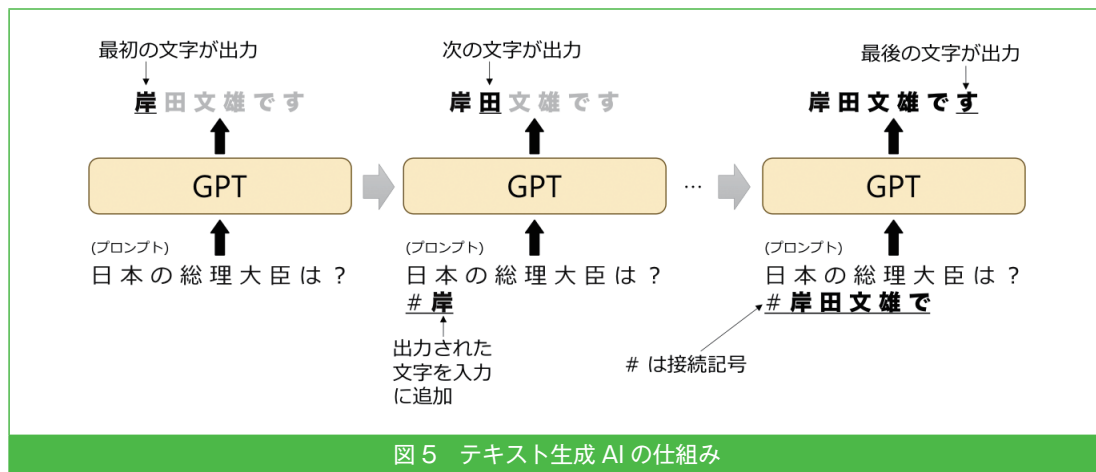


図 4 拡散モデル



いは文字) 同士の意味レベルでの関連付けを高精度で行うことができることから、高品質なテキスト解析ができるようになりました。そして、このTransformerを元に発展させたGPT (Generative Pre-trained Transformer) モデル<sup>(7)</sup>の誕生によって、自然なテキストの生成技術が飛躍的に向上しました。昨今、話題になっている「ChatGPT」もこの技術を利用しています。

図5はGPTを使ったシンプルなテキスト生成の仕組みを示しています。テキスト生成AI場合、処理はトークン単位(文字や単語、サブワードなど)で行われます。図5では文字単位のトークンとなっています。プロンプト(指示や質問のこと)を入力すると、GPTモデルは最初の文字を予測し、その予測した文字を次の入力に利用します。これを繰り返すことでテキストが生成されます。GPTモデルは、大量のテキストデータを使って、次のトークンを予測するタスクとして事前学習(Pre-training)しておきます。そして、プロンプトとそれに対して出力してほしいテキストの集合を使ってファインチューニング(あるタスクに関するデータを用いてモデルパラメータを再調整すること)を行い、目的のタスクが実行できるようにモデルの精度を高めます。このように学習されたGPTモデルは、高品質で一貫性のあるテキストを出力できるようになります。

### 3. 生成AIで何が生成できるのか

生成AIでできる代表的な生成タスクを紹介します。

#### (1) 画像の生成

生成AIは、存在しない人の顔、美しい景色、動物や車など特定の対象物の画像を新しく作り出すことができます。例えば、StyleGANは、多様な顔の特徴とスタイルを操作でき、リアルな高画質の顔画像を生成できます。

#### (2) 音声や音楽の生成

音声生成や音楽生成もディープラーニングの進歩のおかげで大きく変化しています。テキストを自然に読み上げる合成音声や、特定の人物の声を模倣したり、新しい音楽を作り出すことも可能です。ニュースの読み上げなどで既に実用化されています。代表的な音声合成技術がWaveNet<sup>(8)</sup>やTacoron<sup>(9)</sup>、音楽生成ならJukebox<sup>(10)</sup>などがあります。

#### (3) テキストの生成

質問応答やニュース記事など様々なテキストを自動生成することができます。これらのテキストはまるで人間が話した、若しくは書いたように自然です。代表的なアプリケーションとしてChatGPT<sup>(11)</sup>やClaude<sup>(12)</sup>などがあります。また、プログラミング支援での活用が始まっています。GitHub Copilot<sup>(13)</sup>は、AIが条件に合った最適なコードを提案し、プログラムのコーディング作業を支援するサービスです。

#### (4) スタイル変換

写真を著名な画家の画風の絵に変換したり、違う個人の音声に声を変換したりすることができます。画像のスタイル変換で有名なのがCycleGANで、普通の茶色い馬をシマウマに変換できます。また、Meta-StyleSpeech<sup>(14)</sup>は、任意の音声サンプルから話者の声のスタイルを学習し、別の話者の声に変換できます。

#### (5) テキストと画像の組合せ

テキストで指定した内容に基づいて新しい画像を生成することもできるようになっています。これにより、詳細な描写を含むシーンを表現する画像を作り出すことができます。例えば、DALL-E 3<sup>(15)</sup>などのサービスが有名です。(DALL-EはChatGPTのサービスの中で利用可能です。)

ほかにも、機械翻訳(例えば日本語を英語に変換する)も、生成AIの一種と言ってもよいでしょう。ここで紹介した技術はほんの一部であり、現在、数多くの生成AIが公開され、使えるようになっています。

#### 4. 生成 AI の課題と展望

生成 AI の発展により画像、音声・音楽、テキストなど、様々なデータを自動で生成できるようになり、デジタルコンテンツの創造に革命をもたらしています。この記事を通じて、生成 AI の基本概念、技術の変遷、応用例について概観しました。

生成 AI の背景には、ディープラーニングを用いたニューラルネットワークの技術があります。近年の生成 AI の発展は目覚ましく、自然なデータを作成できるレベルに到達しています。一方で、生成 AI にはフェイク情報を作り出すリスクもあります。生成された情報が正しいわけではありませんし、悪意があれば、人をだますコンテンツを作り出すこともできてしまいます。また、倫理的な配慮も必要で、暴力的または不適切なコンテンツの生成は避けなければなりません。AI が作り出す内容の取扱いについては、今後重要な課題となります。

また、生成 AI によって作られたコンテンツの著作権の扱いも課題となっています。例えば、違法にアップロードされた画像から学習された生成 AI は、画像の著作権者の権利を侵害してしまいますし、有名人の顔・姿や音声を使って新しい動画画像を作ると、その動画画像の権利は誰が持つのか、といった問題が生じてしまいます。生成 AI が発展していけばいくほど、著作権・肖像権などの知的財産権も配慮する必要があります。

生成 AI はまだ可能性の一端を見せている段階です。今後もより高度な新技術が生まれていくことは想像に難しくありません。生成 AI の活用は、私たちの生活を豊かにする可能性を大いに秘めています。生成 AI を使用することで生産性が向上する一方、これらの技術を使えない人々は、不利になる可能性もあり、技術力に大きな格差が生まれることとなります。今後、生成 AI を拒否することはできないでしょうから、生成 AI に関する教育プログラムを通じて、より多くの人々が生成 AI を活用できるような環境を整えることも重要な課題でしょう。

生成 AI については多くの課題が残されていますが、その進化と普及がもたらす利益は計り知れないものです。今後、生成 AI 技術とともに生きていく時代に入っていきます。この新たな時代の波に乗り遅れないように、新しい技術を受け入れ、適応していくことが求められていくことでしょう。

#### 参考文献

(1) I. J. Goodfellow, I. J. Good, J. Pouget-Abadie, M. Mirza, B. Xu, D. Warde-Farley, S. Ozair, A. Courville, and Y. Bengio, "Generative adversarial networks," Proc. NIPS 2014, June 2014.

(2) J.-Y. Zhu, T. Park, P. Isola, and A. A. Efros, "Unpaired image-to-image translation using cycle-consistent adversarial networks," Proc. 2017 IEEE International Conf. Comput. Vision, 2017, pp. 2242-2251, March 2017.

(3) T. Karras, S. Laine, and T. Aila, "A style-based generator architecture for generative adversarial networks," Proc. 2019 IEEE/CVF Conf. Comput. Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 4396-4405, 2019.

(4) J. Ho, A. Jain, and P. Abbeel, "Denoising diffusion probabilistic models," Proc. NIPS 2020, pp. 6840-6851, June 2020.

(5) A. Radford, J. W. Kim, C. Hallacy, A. Ramesh, G. Goh, S. Agarwal, G. Sastry, A. Askell, P. Mishkin, J. Clark, G. Krueger, and I. Sutskever, "Learning transferable visual models from natural language supervision," Proc. ICML 2021, Feb. 2021.

(6) A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, I. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Plosukhin, "Attention is all you need," Proc. NIPS 2017, June 2017.

(7) A. Radford, K. Narasimhan, T. Salimans, and I. Sutskever, "Improving language understanding by generative pre-training." [https://cdn.openai.com/research-covers/language-unsupervised/language\\_understanding\\_paper.pdf](https://cdn.openai.com/research-covers/language-unsupervised/language_understanding_paper.pdf)

(8) A. van den Oord, S. Dieleman, H. Zen, K. Simonyan, o. Vinyals, A. Graves, N. Kalchbrenner, A. Senior, and K. Kavukcuoglu, "WaveNet: A generative model for raw audio," arXiv:1609.03499, Sept. 2016.

(9) R. J. Weiss, et. al., "Tacotron: towards end-to-end speech synthesis," Proc. Interspeech 2017, pp.4006-4010, 2017.

(10) P. Dhariwal, H. Jun, C. Payne, J. W. Kim, A. Radford, and I. Sutskever, "Jukebox: a generative model for music," arXiv:2005.00341, 2020. <https://openai.com/research/jukebox>

(11) OpenAI: ChatGPT. <https://chat.openai.com>

(12) Anthropic: Claude. <https://claude.ai>

(13) GitHub, "GitHub copilot: your AI pair programmer." <https://github.com/features/copilot/>

(14) T. Park, et. al., "Meta-StyleSpeech: Multi-Speaker Adaptive Text-to-Speech Generation," Proc. of ICML 2021.

(15) DALL·E 3: Creating Images from Text Descriptions. <https://openai.com/dall-e-3>

#### 西崎博光 (正員：シニア会員)

2003 豊橋技科大大学院了。博士 (工学)。同年山梨大助教。2022 から同大学教授。専門は知覚情報処理。2023 から同大学国際化推進センター長として大学の国際化業務に携わりつつも、深層学習を利用したマルチメディア情報処理の研究に従事。近年はスマート農業の研究に力を入れている。



# 衛星搭載通信機器の技術動向

## Technological Trends of Satellite Communication Equipments

石原秀樹 Hideki Ishihara† 矢島雄三 Yuzo Yajima† 谷 重紀 Shigenori Tani† 安藤俊行 Toshiyuki Ando†

### Summary

地上網における通信技術やサービスの進展に伴い、人工衛星の役割は通信、観測、測位、探査と多岐にわたっている。近年は 5G/6G に代表されるように地上網と衛星網の連携が志向されるようになり、必然的に地上系の通信技術が衛星通信技術へ波及し始めている。一方で、衛星通信は宇宙空間に通信機器を搭載し地上網とは異なる環境で動作することが要求されることから、地上系の技術を衛星特有の技術に転化する必要がある。そこで、本稿では、人工衛星に搭載する通信機器に焦点を当て、各機器の通信技術について解説する。

### Key Words

TTC, デジタルペイロード, 光通信, オンボード処理

## 1 はじめに

人工衛星を用いた通信は広域性と安定性の利点を生かし、図 1 に示すように安心・安全の分野で広く用いられており、主に通信、観測、測位サービスを提供している。また、科学技術の進展を目的とした地球外の探査にも供される。衛星はバス機器とミッション機器に大別され、バス機器は衛星自体の推進や姿勢制御などをつかさどるものであり、バス機器に搭載される通信機器は TTC (Tracking, Telemetry and Command) と称し、地上の衛星管制局 (地球局) と通信して衛星自体を運用する。一方、ミッション機器は上述した通信、観測、測位サービスを提供するための機能群であり、衛星が提供するサービスによって搭載する通信機器が異なる。

バス機器の TTC は衛星自体の運用に供することから高信頼な通信が要求されるが、近年は衛星搭載機器の高機能化に伴う通信回線の高速化に加え、宇宙空間にも及ぶ干渉問題への対策技術が採用されてきている。また、従来はミッション機器の制御を kbit/s 級のバス TTC で実現していたが、ミッション機器のデジタル化・大容量化が進展するに伴い制御量が増大することから、ミッション機器専用の Mbit/s 級通信回線を提供し運用の柔軟性を向上する技術が開発されている。

ミッション機器のうち、通信衛星は航空機インターネットをはじめ NTN (Non Terrestrial Network) の進展に伴い大容量化に資する技術が進展

† 三菱電機株式会社, 鎌倉市  
Mitsubishi Electric Corporation, Kamakura-shi,  
247-8520 Japan

するのに加え、衛星の一般的な寿命である 15 年の運用期間中に社会情勢や市場の変化に伴い、衛星の機能を柔軟に変更可能な SDS (Software Defined Satellite) が注目されている<sup>(1)</sup>。

観測衛星はこれまで災害時の状況把握等に供されていたが、近年は AI (Artificial Intelligence) を活用したビッグデータ解析・ソリューション提供が可能となり、船舶や農業分野で活用が進んでいる。これらサービスを実現するためには高精細・高頻度に観測データを衛星から地上へ伝送するための高速化に加え、光学センサや合成開口レーダで取得した観測データを高効率に伝送するためのオンボードデータ処理技術が注目されている<sup>(2)</sup>。

本稿では、衛星が担うミッションやバスごとに、現状の通信システム設計・機器設計について説明し、想定される今後の動向について示す。

本稿の構成は以下のとおりである。2. では人工衛星が提供するサービスに応じた通信への要求事項を説明する。3. ではバスと各ミッションに用いられる通信技術について解説し、4. では各ミッション機器に共通した技術動向を説明する。最後に 5. でまとめを述べる。

また本稿で用いる専門用語について表 1 に示す。

## 2 衛星の役割と要求事項

図 2 に示すように衛星軌道は主に静止軌道、中軌道、低軌道の 3 種類存在する。静止軌道は赤道上の高度約 36,000 km で地球の自転周期と同期した軌道であり、その衛星と同緯度にある地域は常にその衛星の可視範囲にあることから、定常的なサービスを提供する通信放送衛星、気象衛星に用いられ



図1 衛星の利用例

表1 専門用語集

L/N	用語	意味・内容
1	NTN	地上以外の通信網を意図, 衛星通信網等
2	SDS	ソフトウェアで機能を有する衛星. 軌道上で機能変更可能な衛星.
3	離心率	準天頂衛星等, 衛星だ円軌道の離心率.
4	電離層	大気の上層. 大気中の分子が電離しており, 電子機器が放電しやすい.
5	FPGA	Field Programmable Gate Array, 衛星搭載用機器の主要機能を担う IC として採用される.
6	CCSDS	Consultative Committee for Space Data System. 1982年に各国の宇宙機関により設立された宇宙データ通信システムに関する国際標準化検討委員会.
7	TRL	Technical Readiness Level. 技術習熟度. 各国の宇宙開発機関で基準があり, ロケット・衛星等への搭載判断に用いる.
8	CAN	機器間通信用のシリアルバスシステム. 車載用に標準化されており, 衛星への適用も進んでいる.
9	Space Wire	衛星内で搭載機器間のデータ通信を行うための通信 I/F 及び通信プロトコルの仕様.
10	SEU	Single Event Upset. IC 内部のレジスタが放射線等の影響によりビット反転する事象. リセット処置等で復旧可能.
11	SEL	Single Event Latch-up. IC 内部が放射線により破壊される現象. 基本的に復旧不可能.

ている。静止軌道は特定の地球局からの距離が一定であることから固定的な自由空間伝搬損に加え、稼働率に応じた一定量の降雨減衰を想定し ITU-R P.618-11 に準じて回線設計を行う<sup>(3)</sup>。準天頂軌道は高度においては静止軌道に近いが、離心率を持たせ「8の字」軌道にすることで日本上空に長時間とどまることができるため、静止軌道と比較して仰角が高く山間部や都心部での GPS (Global Positioning System) の利用効率を改善することができる。

中軌道は高度約 10,000 km を衛星が地球上を周回する軌道であり、これまで GPS 以外に多くは利

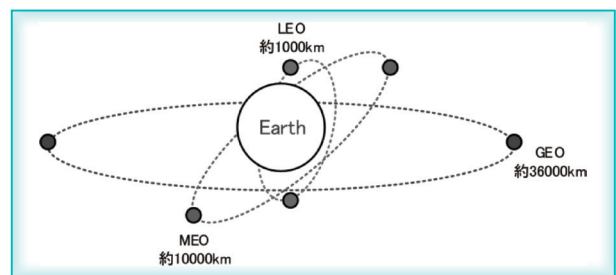


図2 衛星軌道

用されてこなかったが、近年は低緯度地域に限定した高速衛星通信サービスが開始されている<sup>(4)</sup>。

低軌道（太陽同期軌道）は高度 500~900 km で衛星の軌道面が地球の公転周期と一致しており、定期的（回帰日数）に同一地点に戻ってくる特徴があり、かつ任意の地点の上空を必ず一定の時刻（降交点通過時刻）に通過する特徴があることから観測衛星に用いられることが多い。更に、近年は静止軌道と比較して低遅延・大容量化を図れることから通信衛星にも適用されている。ただし、複数の時間帯で任意の地点と通信・観測したい場合は、異なる軌道面に複数の観測衛星を配置する必要が生じる。よって時間・面的カバレッジを確保するためには、衛星は同一軌道面若しくは異軌道面に複数の衛星を配置するようにコンステレーションを組む必要がある。また低軌道は特定の地球局に対して距離すなわち自由空間伝搬損が時変するのに加え、仰角に応じて雲の通過距離も変わるため、軌道位置に応じて時々刻々と電波伝搬環境が変動する。更に地球局と衛星間の距離が変動するため、ドップラー変動も発生する。

各軌道の電波伝搬環境の違いに加え、衛星特有の共通事項としてロケット打上げ時の振動耐性、太陽電池展開時の耐衝撃性、真空環境下での排熱性、宇宙空間での耐放射線性が要求され、寿命期間中の機能維持のため高い信頼性設計が必要とされる。ミッション用通信機器は電源オフでの打上げ（Cold Launch）が多いが、バス用の機器は電源オンで打ち上げる場合（Hot Launch）が多く、電離層通過時に放電して故障しないように機器設計する必要がある。

### 3 衛星搭載機器の通信技術

#### 3.1 バス TTC

衛星バスにおける TTC は地上と衛星間のテレメトリー・コマンド信号の通信を行う。TTC に広く採用される変調方式 PSK-PM (Phase Shift Keying-Phase Modulation)、PSK-FM (Phase Shift Keying-Frequency Modulation) は一次変調が PSK であるのに対して、二次変調として PM または FM を採用した変調方式である。PSK-PM、PSK-FM の被変調波は下記の式によって示すことができる。

$$y(t) = A \cos(2\pi f_c t + m d(t) \cos 2\pi f_s t) \quad (1)$$

$A$  は信号振幅、 $f_c$  はキャリア周波数、 $f_s$  はサブ

キャリア周波数、 $d(t)$  は下記の方形 BPSK 信号（サブキャリア周波数は BPSK 信号データ伝送速度の整数倍）を示す。

$$d(t) = \begin{cases} 1 & (kT_d \leq t \leq (k+1)T_d), \\ -1 & ((k-1)T_d \leq t \leq kT_d) \end{cases} \quad k = \dots -1, 0, 1, \dots \quad (2)$$

また PSK-FM における最大周波数偏移  $\Delta F$  は次式に示す。

$$m = \Delta F / f_s \quad (3)$$

PSK-PM 方式では変調指数は 0.4 や 0.7 等が採用され、パイロットキャリア（残留キャリア）を有する被変調波になる（図 3）。また、図 3 のスペクトルは通信する 2 点間を測距するためのレンジング信号を含んでいる。レンジング信号は CW (Continuous Wave) 性の信号である。

受信系ではパイロットキャリアで周波数同期（捕捉と追尾）を実施する処理を行うことが一般的である。そのため、本変調方式を採用した通信システムに対しては CW 性の干渉波に対して耐性が低いことが分かる。（通信帯域内に CW 性の干渉波があると誤って干渉波を捕捉する可能性がある。）また、PSK-FM 方式については変調指数が 25.0 程度のものが使用されるため、PSK-PM に比べてパイロットキャリアは大きく減衰して広帯域化される（図 4）。そのため CW 性の干渉に対しては PSK-PM より耐性を持つ。PSK-PM 方式は狭帯域 FM に相当し、PSK-FM は広帯域 FM に相当する。PSK-FM の受信系は FM 復調用の周波数弁別器（信号処理上は Arctan）を持つが、非線形処理になるため PSK-PM に対して受信感度が低くなることが課題であり（PSK-PM 変調において同期検波を実施した場合に対して）、また陸上移動体通信等で使用される SS (Spread Spectrum) や OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) と比較すると、干渉に対する耐性が低い方式である。昨今の TTC 用通信機器は従来の PSK-PM/PSK-FM に加えて、SS 等の通信方式に切換可能なマルチモード対応の通信機器も開発されている。

上記の背景からバス TTC 用通信機器はまず CW 性の干渉に対して耐性を持つことを優先する必要がある。SS は耐性を向上する一つの方法である。SS 方式でも DS (Direct Sequence, 直接拡散方式) においては、受信信号を捕捉するために、拡散処理に用いた PN (Pseudo Noise) コードのレプリカを受信側で生成して相関演算を実施し、その相関ピークを検出（捕捉）・追尾する必要がある。本方式において耐干渉性を向上させるには、陸上移動体

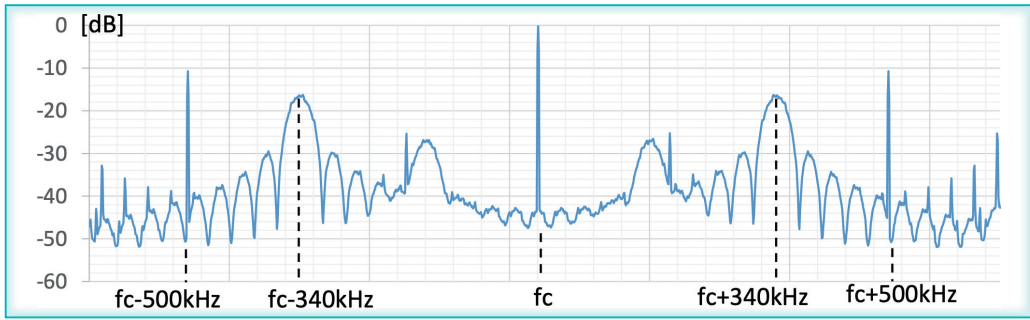


図3 PSK-PM 送信スペクトルの例 ( $f_s = 340\text{kHz}$ , レンズ信号 500kHz)

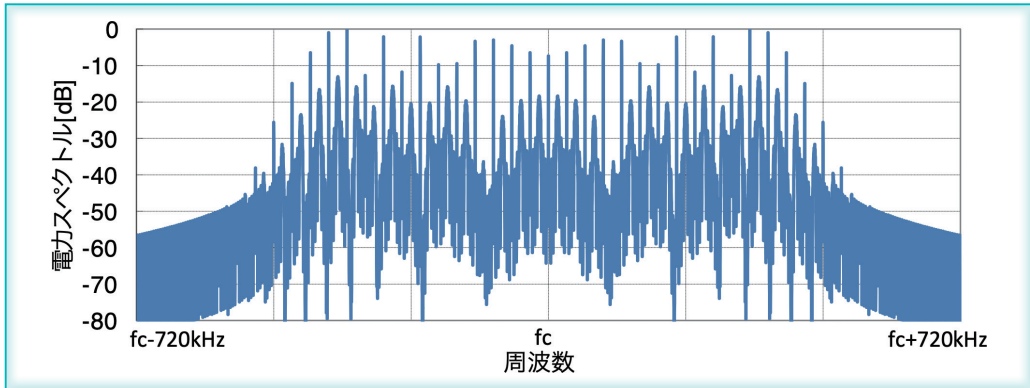


図4 PSK-PMとPSK-FMのスペクトル ( $f_s = 16\text{kHz}$ , レンズ信号なし.  $\Delta F = \pm 400\text{kHz}$ )

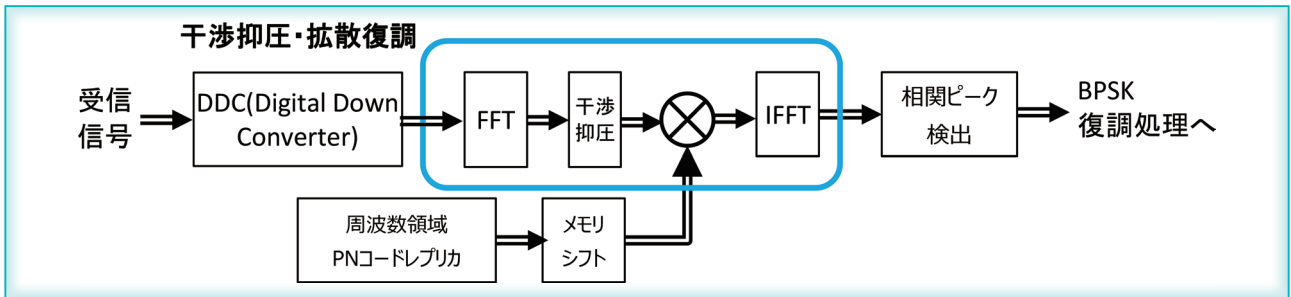


図5 TTC用デジタル受信系の機能ブロック図 (DS-SS方式)

通信で採用されているキャンセラ等も採用できるが、バスTTCは軌道上での信頼性要求により採用できるデバイス、回路規模に制限があり、大規模な信号処理の実装は困難な場合もある。(例えばFPGAに回路を実装する際は、放射線によるレジスタ値の化け(ビット反転)への対処として、レジスタを3重冗長構成にして多数決判定を実装する場合がある(TMR: Triple Modular Redundancy)一案として、信号捕捉を高速化するため、周波数領域で相関演算(逆拡散処理)を実施する方式がある<sup>(5)</sup>。受信信号を高速フーリエ変換した際にCW性の干渉波を検出して除去する等の方式も考えられる(図5)。

SSにはFH(Frequency Hopping)もあるが、周波数を高速に切り換えなくても、周波数切替は耐干渉性向上に有効である。(干渉が到来する周波数帯が分かれば、その周波数帯を回避さえできれば耐

干渉性が向上するため。)通信中に前述のキャンセラ等により干渉除去しても通信を確立できない場合(低SINR: Signal to Interference & Noise Ratioの状態)には、周波数を切り換える方法が考えられる。TTC用通信機器においても軌道上で柔軟に周波数切替可能なようにDAC/ADC(Digital to Analog Converter/Analog to Digital Converter)含むデジタルフロントエンドの広帯域化が重要と考えている。

今後も高信頼なバスTTCは必要であるが、TTC用通信機器をベースに、月面等の陸上移動体通信の通信環境に近い環境で通信可能な通信機器が期待される可能性がある。その場合、マルチパスフェージングに耐性を持つ通信方式が必要になり、地上の通信システムに広く採用されている通信方式(OFDM等)の適用も考えられる。



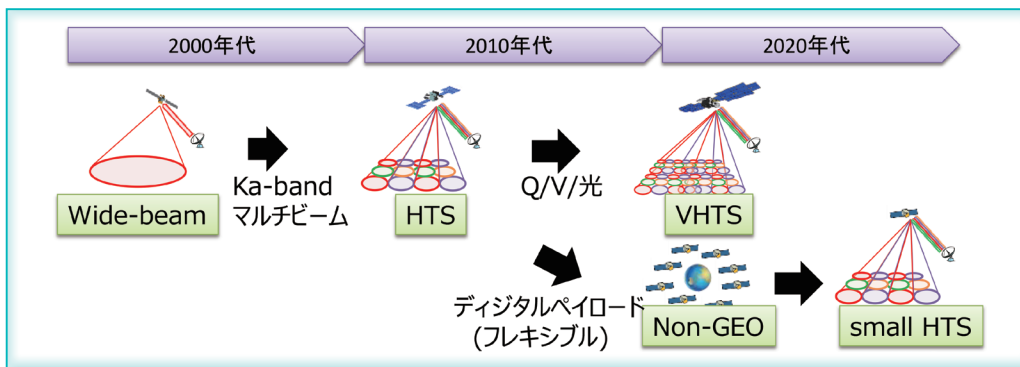


図6 通信ミッションの変遷

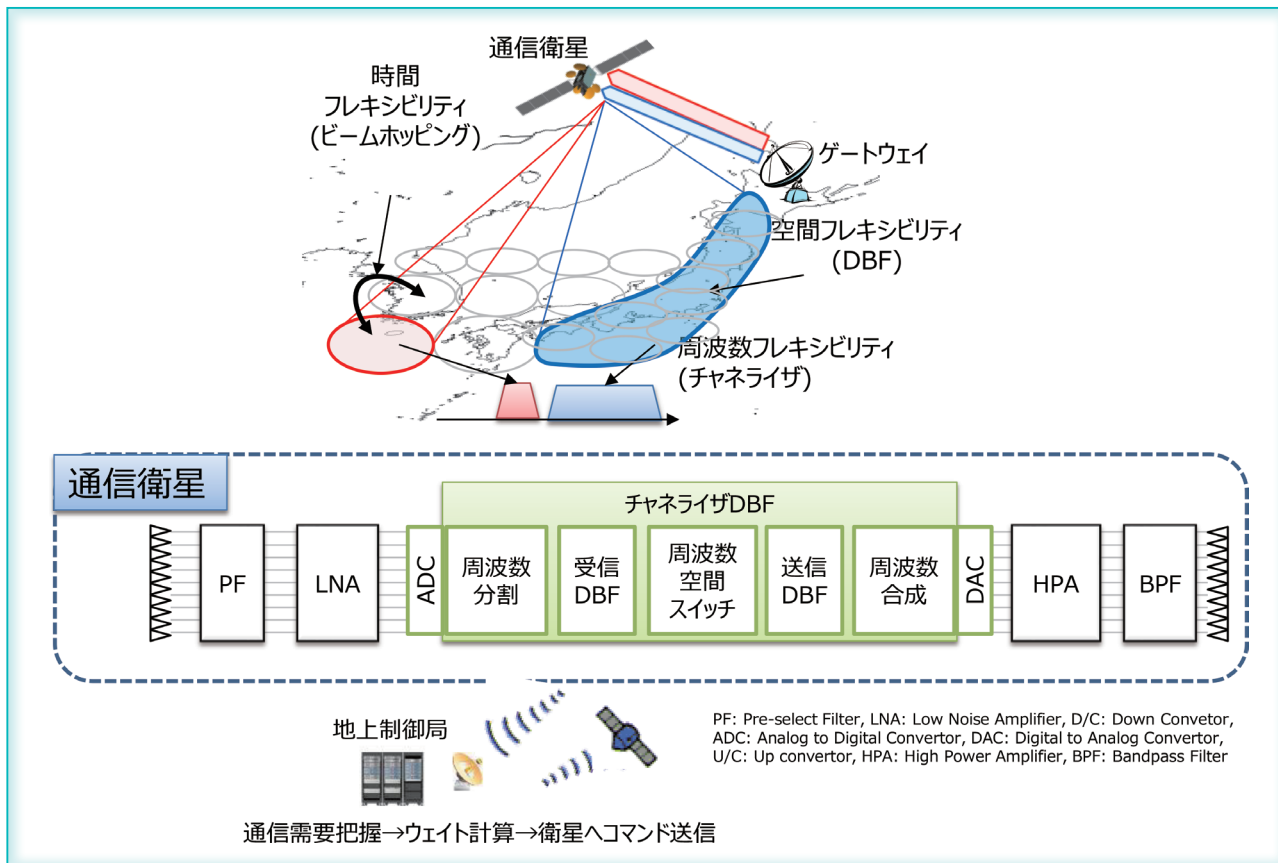


図7 チャネライザ DBF の構成

### 3.2 通信ミッション

通信衛星の主な役割は、地上のユーザが遠隔地にデータを伝送する要求に対して、衛星で中継して遠隔地に伝送することである。従来は広域を単一ビームで覆い、アナログフィルタ、ミキサ、アンプで構成するベントパイプ型の通信ペイロードが主流であった。これに対して近年は図6に示すような複数の小径ビームでカバレッジエリアを覆い、周波数繰返しにより大容量化するマルチビーム化に加え、衛星上で信号を中継する周波数やビームを切り換えるデジタルチャネライザや、カバレッジエリアを可変にするDBF (Digital Beam Forming) が要求される。また、TTCと同様に干渉対策としてDBF

を用いたヌリング技術や干渉源を特定するための標定技術が開発されている<sup>(6)</sup>。

図7に通信ミッションの主要素であるチャネライザDBFの構成を示す。受信フロントエンド部で受信した各素子信号はADCでデジタル化した後に、周波数分割部に搭載したマルチレートフィルタバンクによりサブキャリア信号に分波される。分波信号に対して受信DBF部で所望の励振係数を乗算することでビーム信号に変換され、スイッチ部でビーム(空間)・サブキャリア(周波数)領域のルーチングを行う。その後、送信DBFで改めて送信素子信号に変換し周波数合成部でサブキャリア信号を合波しDACを介して出力する。

ここで、チャネライザ DBF は Gbit/s 級の処理が可能で高速プロセッサを用いることで、従来必要とされていたダウンコンバータ、アップコンバータ、大量の機械スイッチが不要となり、装置の標準化が可能となっている。また、アンテナアレー化とデジタル化に伴い、空間・周波数領域での電力リソースを自由に設定することが可能となっている。

今後はデバイスプロセスの微細化に伴い、チャネライザ DBF は更なる広帯域化・多素子化が進展することが想定される。同時にフレキシブルな運用を行うためには、これらデジタル化したコンポーネントの制御量が飛躍的に増大することから高速 TTC 回線の検討が進んでいる<sup>(7)</sup>。

### 3.3 観測ミッション

図8に観測ミッションのシステム構成例を示す。観測衛星で取得したデータは地球局への直接伝送回線と観測衛星間やデータ中継衛星を介したデータ中継回線により送信される。

直接伝送回線は IOAG (Interagency Operation Advisory Group) が技術動向をまとめており、Kaバンドを利用することで伝送速度が向上し、衛星搭載センサの高精細化と広範囲な観測を可能にすることが示されている<sup>(8)</sup>。図9に示すように従来の8 GHz帯から広帯域化が可能で26 GHz帯を採用し、高速化に対しては DVB-S2X 規格に準じた高効率符号化 (LDPC 等) と多値化 (64APSK 等)、マルチキャリア化 (偏波多重含む) の検討が進んでいる。26 GHz帯は衛星間通信で既に利用されているが、直接データ伝送への適用は降雨減衰対策が必要であり、特に通信時間の35%以上を占める仰角5度から10度での通信品質改善が重要となる。本課題に対してはオープンループ型の VCM (Variable Coding and Modulation) とクローズドループ型の ACM (Adaptive Coding and Modulation) があり、VCMによる軌道上での有効性が報告されている<sup>(9)</sup>。また、複数の地球局で同一データを受信するサイトダイバーシチ技術により、降雨減衰によ

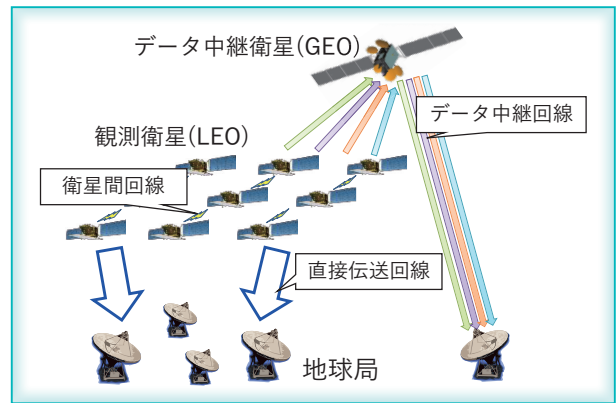


図8 観測ミッションのシステム構成例

る稼働率低減を改善する手法が検討されている。

また、観測衛星間やデータ中継衛星間的高速伝送を実現する手段として光空間通信が採用され始めている。光空間通信は国際的な周波数調整や免許が不要であり、宇宙空間では雲など遮蔽物の影響を受けないため地上よりも好適な条件と言える。また、レーザ光の波長は地上系の光通信で技術的に成熟した1,550 nm帯を採用したことで小形・低コスト化が進展している。

光衛星通信機器を搭載した静止軌道衛星を用いて観測データを迅速に中継するシステムは、欧州のEDRSが2016年に運用を開始<sup>(10)</sup>し、2019年からは2機体制で伝送速度1.8 Gbit/sでの光データ中継が運用されている。日本も2020年に打ち上げられたJDRSが地球局との間で動作確認が実施され、周回観測衛星の伝送速度1.8 Gbit/sでのデータ中継実証に向けて準備が進められている<sup>(11)</sup>。

米国ではLCRDが2021年に打ち上げられ、ISSに設置のILUMMA-Tとの間で光データ中継の1.25 Gbit/s実証を含めた初期実験が進められている<sup>(12)</sup>。また、商用ベースのデータ中継システムの構築に向け、静止軌道衛星を用いて伝送速度5 Gbit/s以上で大容量・準リアルタイム伝送するサービス<sup>(13)</sup>や、高度2,000 km程度の中軌道衛星を用いて伝送速度1 Gbit/sでのデータ中継の実証が計画されている<sup>(14)</sup>。

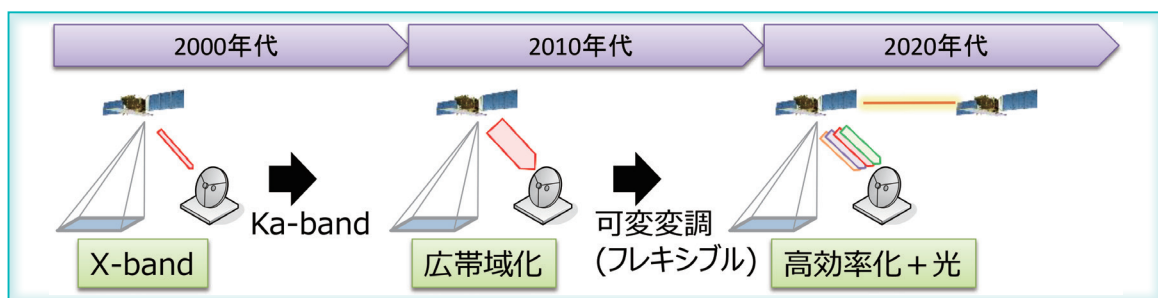


図9 観測ミッションの変遷

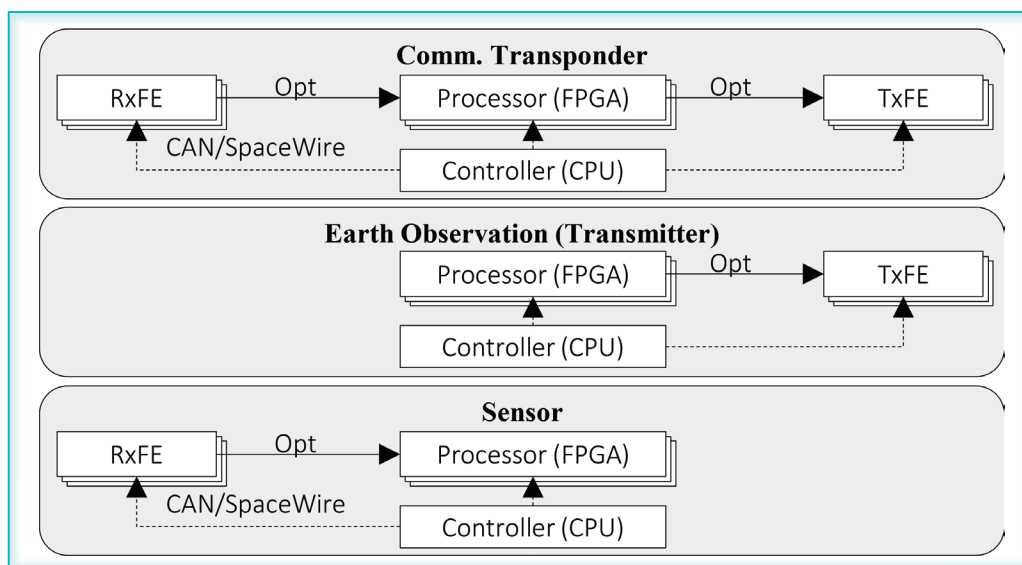


図 10 デジタルペイロードの構成例

### 3.4 探査ミッション

探査ミッション用の通信機器では、3.1に示した PSK-PM 方式がよく用いられており、バス TTC 用の通信機器が採用される。特に深宇宙探査用では、通信距離が非常に遠いため、10 bit/s 以下の速度で通信する場合もあり、回線設計上、受信電力が -150 dBm 以下になる場合もある。またレンジング機能において、バス TTC では受信したレンジング信号を、ほぼそのまま送信信号に加算する場合もあるが、低 SN 比 (Signal to Noise Ratio) 環境下では、レンジング信号の SN 改善のため、受信信号を検波して、その受信タイミングで送信用のレンジング信号を生成して送信する再生レンジング方式が採用される。特に深宇宙探査用では遠距離になるため、レンジング信号としてトーン信号 (CW) ではなく PN (Pseudo Noise) コードが採用される。PN コードの周期性により距離測定後に発生する波長 (PN コード長) 整数倍のアンビギュイティ除去が容易になる。

また、今後、月面等でのロボティクスでの活動が活発化することが想定されることから、地球-深宇宙間で大容量・高信頼な通信回線を確立する必要がある。ただし、探査ミッションでは長距離化に伴い通信遅延や通信ノード間の軌道位置関係などによる通信途絶が課題となる。そこで、遅延耐性ネットワーク (DTN: Delay Tolerant Network) の検討が進んでいる。深宇宙での DTN は有効ノード数 (通信可能な衛星間通信リンク数) が多いほど効率化が進むため、CCSDS 標準でのインタオペラビリティが検証されている。現在は実用化に向けた TRL を向上する必要があるが、遅延耐性を向上す

るためには大規模なメモリとオンボード処理のためのプロセッサが必要になり、民生部品技術の利活用が望まれる<sup>(15), (16)</sup>。

## 4 共通技術

本項ではミッション機器共通技術として、デジタル化と信頼性について解説する。

図 10 に衛星搭載機器のフレキシビリティとスケラビリティを実現する DPP (Digital Payload Processor) の全体コンセプトを示す<sup>(17)</sup>。DPP は主信号系を扱う受信フロントエンド (RxFE)、送信フロントエンド (TxFE)、信号処理部 (Processor, プロセッサ) を光ファイバ (Opt) で接続することで大容量通信に対応するとともに、衛星内配線に伴う伝送損を低減できることから機器レイアウトの柔軟性を向上させている。また、制御部 (Controller, コントローラ) から各主信号系の機能部に対しては CAN や SpaceWire のバス伝送で制御を行うことで RxFE、プロセッサ、TxFE のモジュール数を可変にでき、要求される処理量に応じたスケラブルな構成を可能としている。プロセッサは FPGA をベースとしたデザインにすることで通信、観測、センシングなどの用途に応じて信号処理及びフロントエンドの構成・機能を柔軟に変更できる。

フロントエンド部は大容量化に対応するため Ka バンドで約 3 GHz の通信帯域を処理する必要がある。また、DBF によるビーム形成精度向上のために素子数が増大する傾向にあることから、ミキサやフィルタなどの部品点数削減や小形化が重要となる。そこで、RxFE では Ka バンドから IF バンドへ

直接変換するため、図 11 に示すサンプルホールド回路を用いたダイレクト受信技術を採用している。

また、ベースバンドから Ka バンドへ直接変換するため、図 12 に示すような  $\Delta\Sigma$  変調を用いたダイレクト送信技術が検討されており、本回路は直交変調後に IIR と FIR フィルタによる  $\Delta\Sigma$  変調でノイズシェーピングを行い、FPGA に搭載される Gigabit Transceiver (トランシーバ) を用いてベースバンドから 20 GHz 帯へ 2.5 GHz 帯域を変換可能である。

信号処理部は、アンテナの多素子化、かつ広帯域信号処理に対応する必要があるが、宇宙用のデバイスは民生品 (COTS : Commercial Off The Shelf) と比較すると数年遅れでリリースされるのに加え、ラインナップに制約がある。その理由の一つに、特異な環境が挙げられる。人工衛星搭載用部品の代表的な宇宙環境を表 2 に示す。人工衛星は非修理系という特徴から、部品採用後の更新が不可能であり、環境耐性及び寿命を評価した上で部品採用を行うことからテクノロジーの更新が遅れることが多い。

宇宙用部品のリリースをベースとした開発ではニーズに応じた衛星性能の実現は困難であり、これらの解決方法として、FPGA に代表される COTS 部品を積極的に採用し、高密度パッケージ、COTS 技術の宇宙利活用による高速化・高機能化が進められている。

また、Rx/TxFE プロセッサ間を想定した 12 Gbit/s/lane の光伝送評価を行い、良好なアイパ

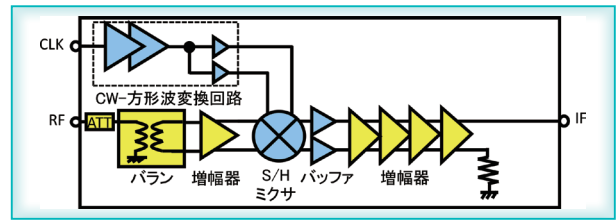


図 11 ダイレクト受信回路構成

ターン特性が得られることを確認している。

新たなシステム開発手法としてシステム性能からのフローダウンに基づき、部品の耐性に応じた対策をシステム設計レベルで講じることによりサブシステム・機器開発の検討も進んでいる。

昨今では、COTS 品を宇宙特有の環境に対応させるため、耐放射線技術、基板内・機器間高速伝送技術、高密度/高排熱実装技術の開発が進んでいる。一般的にテクノロジーノード (半導体製造プロセスとその設計ルール) が進むにつれ、コア電圧が低くなることから、低エネルギーの放射線で反応し、シングルイベントの発生確率は高くなる傾向にある。特に COTS FPGA の宇宙への利活用を目的にプロトン、重粒子、レーザーパルスを照射し、耐放射線アルゴリズムの有効性とラッチアップ特性について筆者らも評価している。

COTS FPGA 部品単体での評価結果から SEU (Single Event Upset) 及び SEL (Single Event Latch-up) が発生することが判明している。中でも SEL は部品の永久故障につながる。これらの課題に対して、筆者らは、システムレベルの信頼性対策として FMECA (Failure Mode, Effects and

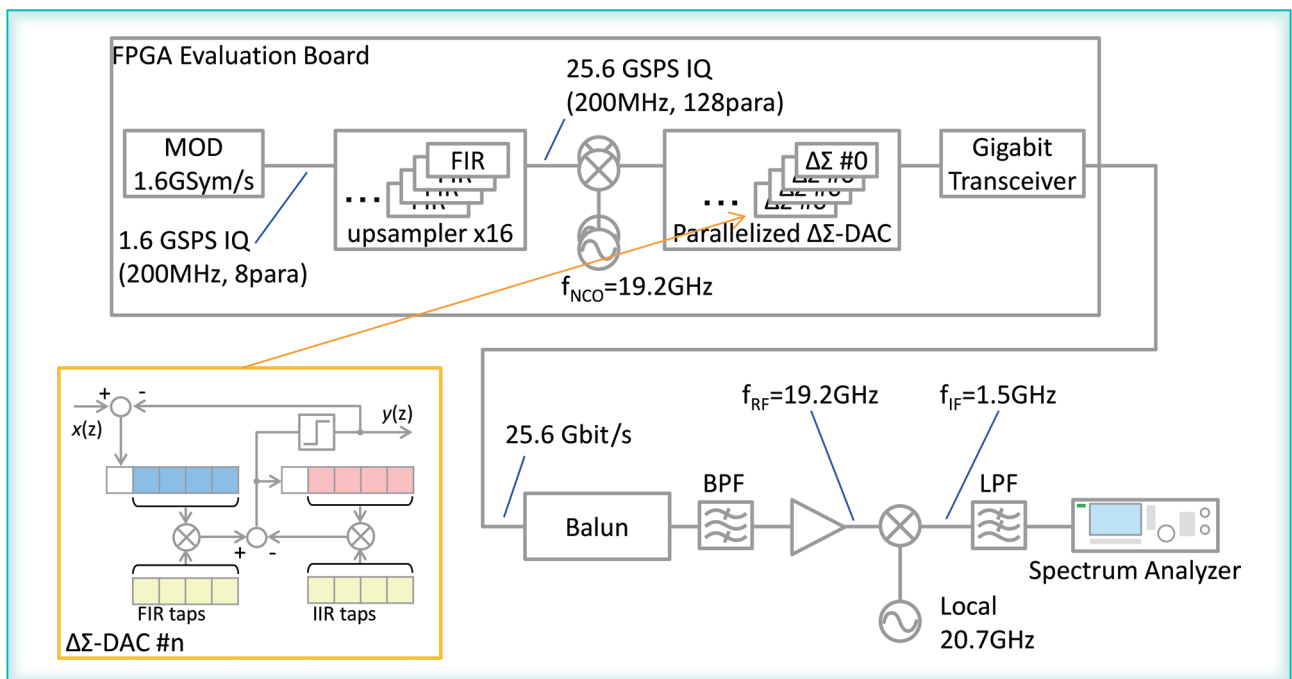


図 12 ダイレクト送信回路構成

表 2 代表的な環境条件 (搭載機器用部品向け)

項目	条件
寿命	15 年
熱サイクル数	130,000cyc
放射線	> 100krad (Si) (1,000Gy)
周囲環境	真空
交換頻度	非修理系

Criticality Analysis) に基づく設計により、放射線障害が発生してもミッションが継続可能なシステムを開発している。機器の回路レベルでの対策とシステム機器構成レベルでの対策が必要である。

衛星搭載用機器の主要機能を担う FPGA の耐放射線アルゴリズムは、TMR とスクラビング (FPGA 内部のプログラム書き直し処理)、電源ラインのモニタ/パワーサイクルである。プロトン/重粒子照射試験の結果 SEU 及び SEL に対する耐放射線アルゴリズムは有効であることを確認した。機器レベルの対策を行った設計結果を図 13 に示す。Power Supply に対してはカレントリミッタによる過電流検出と即時パワーサイクル回路レベルでの対策を施し、Config. RAM に対して FPGA 計算結果の常時モニタ回路の追加による対策を施した。部品動作の健全性を常時監視・リアルタイム対策する自動系の構築により、機器の動作率を劇的に上げることができる。

機器レベル及びシステムレベルでの対策により、①機器レベルでは永久故障の防止とデータ保全性のモニタ、②システムレベルでは光導波路の冗長化により、機器レベルでの障害を冗長構成とシステムレベルデータ保全により、性能向上とともにミッション継続性の劇的な向上につながった。

従来の部品レベルからの積上げによる開発では、COTS 部品の適用時に起こる宇宙環境に起因した事象に対してフレキシブルな対応が困難となり、結果として開発期間の長期化を招く。ボードレベル、コンポレベル、サブシステムレベルでの段階的な品質・信頼性の確保を行うコンセプトが今後拡大していく見込みである。

## 5 まとめ

様々な分野で宇宙利用が急速に進んでおり、人工衛星の通信系に対する要求も多様化している。本稿では、衛星が担うミッションや衛星内のサブシステ

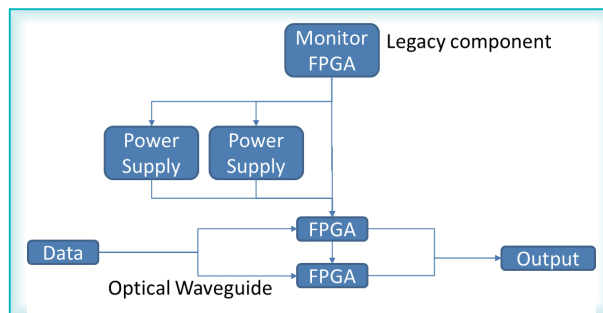


図 13 Unitレベルでの設計結果

ムごとに現状の通信システム設計・機器設計について説明し、想定される今後の動向について説明した。

今後は COTS 品の積極採用や高密度実装技術の進化により、多素子化による空間制御の自由度向上に加え、GPU や大規模記憶領域などニューラルネットワークに適した演算能力を衛星に具備することで、自律的な伝送制御や宇宙空間からのセンシング (オンボード処理) も進展すると考える。

## 文献

- (1) B. Feng, Y. Huang, A. Tian, H. Wang, H. Zhou, S. Yu, and H. Zhang, "DR-SDSN: An elastic differentiated routing framework for software-defined satellite networks," IEEE Wirel. Commun., vol. 29, no. 6, pp. 80-86, Dec. 2022.
- (2) A. D. George and C. M. Wilson, "Onboard processing with hybrid and reconfigurable computing on small satellites," Proc. IEEE, vol. 106, no. 3, pp. 458-470, March 2018.
- (3) ITU-R P.618-11, "Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems," Sept. 2013.
- (4) <https://www.nict.go.jp/global/ide9n2000000bmum-att/re2020.03.pdf>
- (5) S. Ahamed, G. Rao and L. Ganesh, "Fast acquisition of GPS signal using FFT decomposition," 4th International Conf. Recent Trends in Comput. Sci. & Eng., in Procedia Comput. Sci. 87, pp. 190-197, 2016.
- (6) C. Hao, D. Feng, Q. Zhang, and X. -G. Xia, "Interference geolocation in satellite communications systems: An overview," IEEE Vehicular Technol. Mag., vol. 16, no. 1, pp. 66-74, March 2021.
- (7) 小川 亮, 西城邦俊, 各務裕佳子, 深津 敦, 舟田雅彦, 宮崎幸一, 清原章公, 今井 慧, "フルデジタル通信ペイロードの開発," 第 66 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 1F14, 2022.
- (8) Interagency operation advisory group, "Low earth orbit (LEO) 26 GHz K-band study group final report," June 2013.
- (9) 高橋康之, 鳥海 強, 鰐淵健夫, 中村研悟, 立原裕司, 疋田怜奈, 金子 豊, 鈴木新一, 神代優季, 堀川真史, 澤山敬太, 村岡武晋, 亀谷幸一, "小型実証衛星 2 号機 (RAISE-2) の運用状況," 第 66 回宇宙

- 科学技術連合講演会予稿集, 3E02, 2022.
- (10) F. Heine, P. Martin-Pimentel, N. Höpcke, D. Hasler, C. Rochow, and H. Zech, "Status of Tesat Lasercomms activities," Proc. SPIE 11678, Free-Space Laser Commun. XXXIII, 116780C, March 2021.
  - (11) 佐藤洋平, 星 慎太郎, 板橋孝昌, 高野 裕, 山川史郎, 小竹秀昭, 阿部侑真, 高橋靖宏, 大倉拓也, 布施哲治, 豊嶋守生, "光衛星通信システム (LUCAS) の初期運用状況について," 第 66 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 3F15, 2022.
  - (12) D. J. Israel, B. L. Edwards, R. L. Butler, J. D. Moores, S. Piazzolla, N. Toit, and L. Braatz, "Early results from NASA's laser communications relay demonstration (LCRD) experiment program," Proc. SPIE 12413 Free-Space Laser Commun. XXXV, 1241303, 2023.
  - (13) 山下史洋, 堀 茂弘, "宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想の実現に向けた基盤技術の研究開発," 信学誌, vol. 106, pp. 376-381, May 2023.
  - (14) 園田健彦, 永田晃大, 木村洋平, 関 正徳, "中軌道光通信中継衛星を利用した観測・動作実証サブミッションの検討," 第 66 回宇宙科学技術連合講演会予稿集, 1C14, 2022.
  - (15) R. Lent, "Enabling cognitive bundle routing in NASA's high rate DTN," 2022 International Wireless Commun. and Mobile Computing (IWCMC), pp. 1323-1328, May 2022.
  - (16) R. Dudukovich, B. LaFuente, A. Hylton, B. Tomko, and J. Follo, "A distributed approach to high-rate delay tolerant networking within a virtualized environment," 2021 IEEE Cognitive Commun. for Aerospace Appl. Workshop (CCAAW), pp. 1-5, June 2021.
  - (17) 谷 重紀, 早馬道也, 江島二葉, 石原秀樹, 田中裕之, 粟野穰太, 谷島正信, "NTN を見据えた衛星搭載機器の研究開発動向," 信学技報, SAT2022-33, pp. 25-29, Aug. 2022.

(2023 年 9 月 4 日受付, 11 月 7 日再受付)

## 石原秀樹

2002 京大大学院情報学研究所修士課程了。同年三菱電機株式会社情報技術総合研究所入所。セルラ向け変復調技術, 衛星通信技術の開発に従事。2009 から同社鎌倉製作所にて衛星搭載用通信機器の開発に従事。



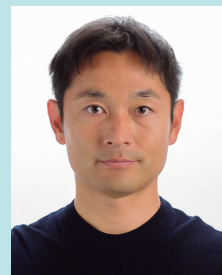
## 矢島雄三

2007 宇宙科学研究所研究員。2010 東海大大学院工学研究科航空宇宙学専攻修士課程了。2010 三菱電機株式会社鎌倉製作所入所。国内外向け衛星搭載用部品材料の耐環境性開発, システム信頼性開発に従事。



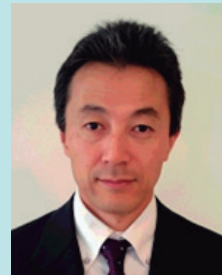
## 谷 重紀 (正員: シニア会員)

2005 千葉大大学院自然科学研究科修士課程了。2017 東北大大学院情報科学研究科博士後期課程了。2005 三菱電機株式会社入社。以来, セルラ基地局, 衛星搭載通信機器の研究開発に従事。博士(情報科学), PMP, IEEE シニア会員。



## 安藤俊行 (正員)

1996 阪大大学院工学研究科博士課程了。日本学術振興会特別研究員 (PD) を経て, 1998 三菱電機株式会社情報技術総合研究所入所。光衛星通信技術, レーザレーダ技術, 波面センサ技術の開発に従事。2009 からレーザ・光制御チームリーダー, 光・マイクロ波制御グループマネージャ, フォトニクス制御グループマネージャを経て, 2022 から同社鎌倉製作所にて衛星搭載用光学ミッション機器の開発に従事。博士(工学)。



# 宇宙通信ビジネスの動向と今後の展望に関して

長谷川 広大 Kodai Hasegawa スカパーJ S A T 株式会社 宇宙・防衛事業部

## 1 はじめに

スカパーJ S A Tは、アジア最大級の衛星通信事業者として2023年までの34年間、静止衛星の運用実績がある。だが近年では、スペースX社の台頭を筆頭に、様々な民間企業が人工衛星の打上げや運用に参入するようになり、超小形衛星をはじめとした低軌道衛星の運用及びそれらを通じた衛星ネットワークの構築が図られている。

本稿では、通信衛星の概要から宇宙通信業界の取組みについて、これまでの背景にも触れつつ紹介する。

## 2 通信衛星とその役割について

### 2.1 通信衛星とは何か

通信衛星とは、無線通信によるやり取りを目的とした人工衛星のことを指す。図1に通信衛星の基本構成を示す。通信衛星の基本構成は、受信アンテナ・中継器・送信アンテナとなっており、主に送信地球局から人工衛星局に対して電波を発信（一般的にアップリンクデータと呼ぶ）し、衛星に搭載された中継器で適切な周波数に変換された後、地球局へ送信される（一般的にダウンリンクデータと呼ぶ）仕組みを取っているのが特徴である。アップリンク信号をアンテナで受信した後、低雑音

増幅器（LNA：Low Noise Amplifier）で信号の低雑音化及び増幅処置をさせ、周波数変換器（FC：Frequency Converter）でダウンリンク用の周波数帯に変換させる。変換された電波は、入力マルチプレクサ（IMUX：Input Multiplexer）で複数のチャンネルに分離させ、アンプや進行波管増幅器（TWTA：Travelling Wave Tube Amplifier）で各チャンネルに対する利得の調節及び増幅処置を行う。その後出力マルチプレクサ（OMUX：Output Multiplexer）で複数のチャンネルを合成させ、再度送信用アンテナを経由して地球局へ電波が送信される。この一連の通信システムを、一般的に「衛星通信」と呼ぶ。

通信衛星の主な特徴として「広域性」、「同報性」、「耐災害性」、「多元接続性」がある。通信衛星は基本的に静止軌道上での運用となるのでカバーエリアが広く、エリア内に複数の地球局が存在すれば、同一周波数の共用で接続することが可能となる。加えて宇宙空間から通信を行うため、地震や台風などの自然災害にも強いことや、地上管制局を複数設置することで万が一の際、バックアップ体制が整備されている点も優位と言える。

### 2.2 静止軌道衛星と低軌道衛星の違い

ここでは、人工衛星を運用する際の軌道の違いについて紹介する。静止軌道とは、赤道上空の高度約35,786

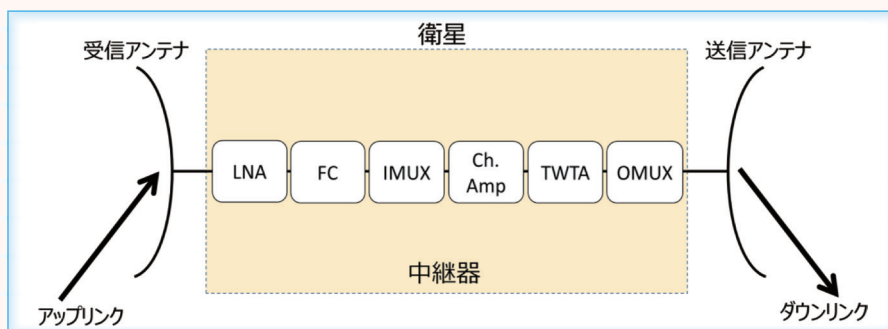


図1 通信衛星の基本構成

表 1 周波数帯と利用用途の関係

バンド名	周波数帯(GHz)	利用用途
Lバンド	1.215~1.71	GPS、船舶電話
Sバンド	1.71~2.70	気象衛星、衛星携帯電話
Cバンド	3.40~7.075	国際通信回線
Xバンド	7.075~8.50	軍事通信
Kuバンド	10.6~15.7	BS/CS放送、国内通信回線
Kaバンド	17.3~31.0	国内通信回線、衛星インターネット
Qバンド	37.5~42.5	軍事通信、実験衛星
Vバンド	42.5~75.0	

km 上の円軌道のことを指しており、地球静止軌道 (GEO : Geostationary Earth Orbit) とも呼ばれる。この高度上で運用するのは、地球の赤道半径 (約 6,378 km) と地表面からの高さを足し合わせた半径における円運動の周期と、地球の自転周期が一致するためである。そのため、地上から観測すれば、衛星は地上に対して相対的に静止しているように見える。基本的に静止軌道上で用いる衛星は、広域性に優れた固定通信や、常時観測可能な気象衛星に対して選定されることが多い。

一方、低軌道とは、地球表面に対し高度 400 km から 2,000 km の範囲の軌道を指しており、地球低軌道 (LEO : Low Earth Orbit) とも呼ばれる。静止軌道とは異なり、地上から観測すると衛星が動いているように見えるが、軌道周期が約 90~120 分と短く、静止衛星と比較しても運用高度が低いため、広域性に劣る側面を持つ。そのため、カバーエリアを拡大させるには多数の衛星との連携が必要となる (衛星コンステレーション)。

### 2.3 周波数と利用目的

衛星通信の際に使用される周波数帯及びその利用目的の概要を示す。基本的に周波数の増加に伴って指向性が増し、大容量で伝送することが可能となる一方、降雨による減衰の影響が大きくなる特性を持つ。参考までに、各周波数帯に対する指向性及び降雨による影響、利用用途の一覧を表 1 に示す。ただし、希望の周波数帯を自由に利用できるわけではないことに留意頂きたい。運用する衛星の数が多くなれば、衛星網や地上網に対して有害な干渉を与える可能性がある。それらの干渉を避けるため、一般的には無線通信規則に従って周波数の調整を実施する必要があり、これを「国際調整手続き」と呼ぶ。

今後利用したい周波数が①ほかの主管庁の無線通信業務に有害な干渉を与える可能性がある場合、②国際通

信に使用される場合、③調整手続きを行う必要がある場合、④国際的な認知を得たい場合などには、国際電気通信連合 (ITU : International Telecommunication Union) に対して周波数割当報告を行い、審査が実施される。影響を与えかねない関係国と事前に技術調整を実施し、周波数の規定や有害な干渉がないことを審査で確認できた段階で国際周波数登録原簿 (MIFR : Master International Frequency Register) に登録され、該当する周波数の利用が可能となる<sup>(1)</sup>。

### 2.4 衛星の運用方法

ここでは、静止衛星の運用方法について紹介する。地球の自転と同期しているために赤道上空で静止しているように見えるが、地球から生じる重力場や太陽からのふく射圧、太陽や月の引力作用の影響を受けることで地球から見た相対位置が変動する。そのため、地上管制局から衛星の軌道位置を制御する作業が必要となる。

基本的に静止衛星の運用の際には「テレメトリー」、「コマンド」、「レンジング」と呼ばれる三つの工程が実施される。宇宙通信業界では、これらのシステムを略して「TC&R 系」(Telemetry Command & Ranging) と呼ぶ。主に、人工衛星としての基本機能に必要な機器 (一般的に「衛星バス機器」と呼ぶ) の動作状況や姿勢状況、燃料状況などを地球局に対して送信することで静止衛星の状況を把握し (テレメトリー)、衛星からの情報を基に衛星の姿勢やバス機器の制御に必要な信号を衛星に送信する (コマンド)。また、衛星の軌道を決める際に必要なデータの収集はレンジングによって決定される。主に地球局から衛星に対してレンジング信号を送信し、送り返された際の信号の位相差を測定することで衛星との距離を算出することができる。



### 3 宇宙通信業界の動向について

#### 3.1 大容量化に伴い Ku バンドから Ka バンドへ

日本で一般的に多用されている衛星通信の周波数帯は Ku バンド及び C バンドである。ただ近年急速に通信需要が増大しており、高い解像度を持つカメラ画像など膨大な容量のミッションデータを送付することが必要となった。これにより、通信需要に比例した形で大容量通信が求められることになった。

日本で運用されている Ka バンドの中継器を搭載した衛星に着目すると、スカパー J S A T では 3 機（2023 年 8 月時点）、インマルサット社では 7 機（2023 年 8 月時点）を所有している<sup>(2)</sup>。

#### 3.2 ハイスループット衛星の活用

ハイスループット衛星（HTS：High Throughput Satellite）とは、利用可能な周波数を隣接するエリアで繰り返して利用できるように細分化することで、通信容量の大容量化を可能とした衛星通信システムのことを指す。先ほども解説したとおり、大容量のデータなどを送信する際には、Ka バンドのような指向性の高い周波数帯を利用する必要がある。ただ、単一ビームとなれば指向性が高い分、限られた範囲での利用となるため、図 2 のような多数のマルチスポットビームによる高効率的な運用形態により、大容量伝送を実現している。

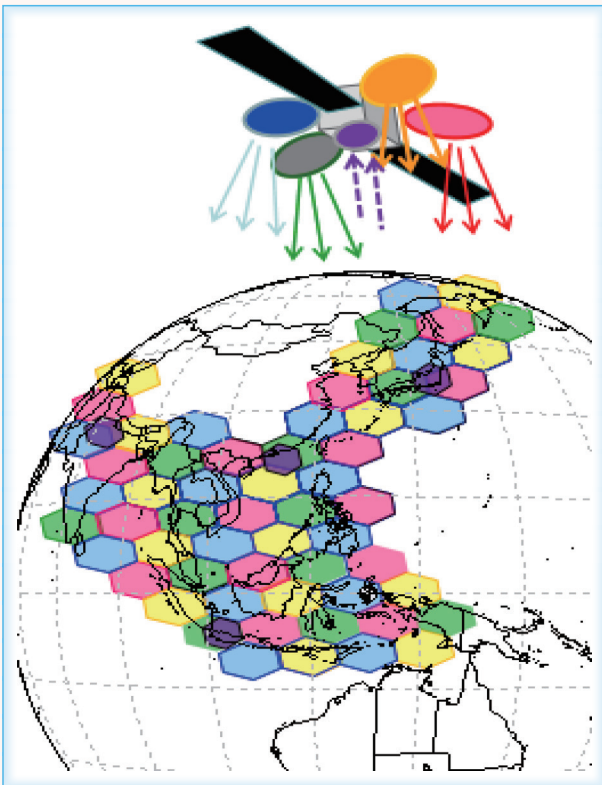


図 2 HTS の活用イメージ図

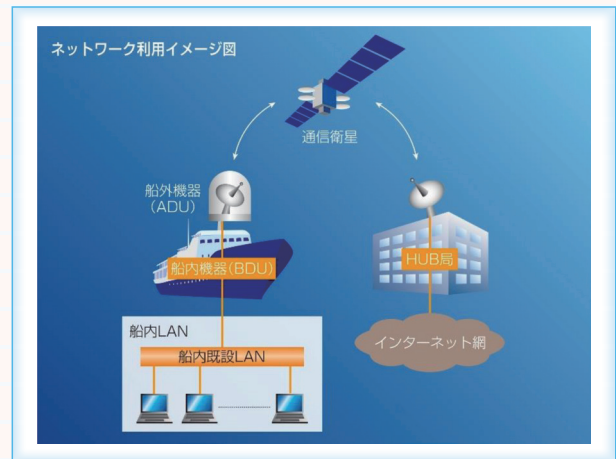


図 3 ネットワーク利用のイメージ図

現時点での HTS では、各ビームに対して割り当てられている通信容量が固定されているため、特定の地域に対して通信容量が最適化された運用ができておらず、顧客からの通信要求に対して柔軟な対応が求められている。

#### 3.3 拠点間通信から移動体通信へ

これまで、衛星と固定地球局間での拠点間通信が主流であったが、近年は図 3 のように衛星と船舶、衛星と航空機といった移動体との通信需要が高まっている。

移動体通信においては C バンド及び Ku バンドが主流として利用されており、C バンドについては VSAT (Very Small Aperture Terminal) を用いた陸上間通信、船上地球局 (ESV：Earth Stations on board Vessels) を用いた海上間通信に利用される。一方で Ku バンドについては、VSAT や移動体 SNG (Satellite News Gathering) などによる陸上間通信や ESV を用いた海上間通信に加え、ヘリコプターから通信衛星に対してデータを直接送信する「ヘリサット」による通信にも活用されている。また、最近では海事業界での IoT 化や現場向けの通信需要の高まりに応えるため、より指向性が高く大容量データの送信が可能な Ka バンドの活用や、HTS と組み合わせた海洋ブロードバンドサービスを展開している。

#### 3.4 中軌道・低軌道衛星への拡張

近年は宇宙ビジネスに対する政府支援の拡大やロケットの打上げコストの低減化、衛星の小形化及び性能向上による製造コストの低減化に伴い、新規参入による障壁が薄くなりつつある。これに伴って中軌道 (MEO：Medium Earth Orbit) 衛星や LEO 衛星による衛星コンステレーション網の構築が現実味を帯びてきており、スペース X 社の「Starlink 衛星」は言うまでもなく、

OneWeb社の「OneWeb衛星」や Amazon Web Services社の「Project Kuiper」なども多数の衛星を打ち上げてネットワークを構築している<sup>(3)</sup>。

一方で、こうしたMEO/LEO衛星の機数が増加すれば地球局不足の問題も発生しかねない。例えばパスコでは、連携先の国内外地球局をレンタルできるサービスを展開している。自社で地球局を保有しないサービス形態とすれば、地球局の新設コスト及び運用コストの抑制に加え、互いに協定を結ぶことで相互の連携強化や通信利用機会の増加にもつながるだろう。

## 4 今後の展望

### 4.1 ソフトウェア定義衛星について

ソフトウェア定義衛星とは、地上ネットワークやデータ処理などの機能に対する仮想化やソフトウェア定義ネットワーク（SDN：Software-defined Networking）などの技術を衛星に適用したものを指す。ソフトウェア定義衛星の特徴は図4のとおりで、搭載機器をデジタル化することでビーム径や帯域幅を需要に合わせて対応できるだけでなく、顧客先へのデータ提供や通信の割当作業を優先順位付けすることが可能となる。

日本では、「Superbird-9」と呼ばれるフルデジタル衛星が2027年から運用開始予定となっている。こちらも通信エリアや伝送容量などを、顧客の需要に基づいて軌道上でフレキシブルに変更することが可能であり、更なる高効率の運用に期待がかかる。

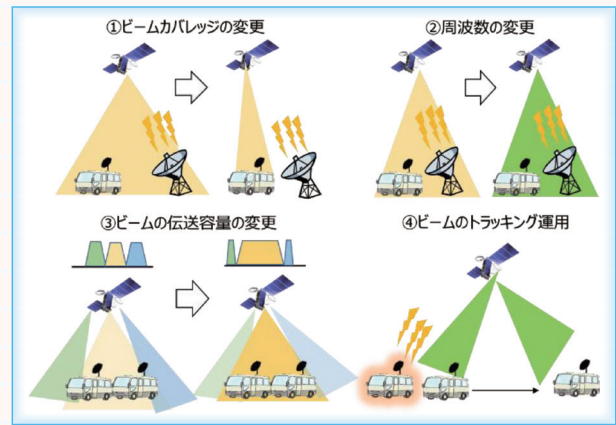


図4 ソフトウェア定義衛星の特徴

### 4.2 光通信技術の活用

近年は、光通信技術を駆使した光通信衛星によるサービス展開を目指している。LEO衛星の場合、GEO衛星と比べて高解像度のデータ及び画像提供が可能であるが、無線周波数（RF：Radio Frequency）による既存データ転送技術では数百Mbit/s級の伝送速度となるため、大容量のデータ転送が困難であった。一方で光通信技術を使えば、数Gbit/s級の伝送速度となることが期待されるため、大容量かつ準リアルタイムでのデータ及び画像伝送が可能となる。加えてGEO衛星を活用すれば、図5のイメージでLEO衛星から取得した大容量データ及び画像が広範囲に提供可能となる。

また、光通信技術の場合だとRFとは異なり、現状では電波法の規制を受けないため、国際周波数調整対応が不要となっている。これらのメリットが、光通信衛星の利用機会の拡大に拍車をかけている。

日本では現在、NTTと当社の合弁会社であるSpace

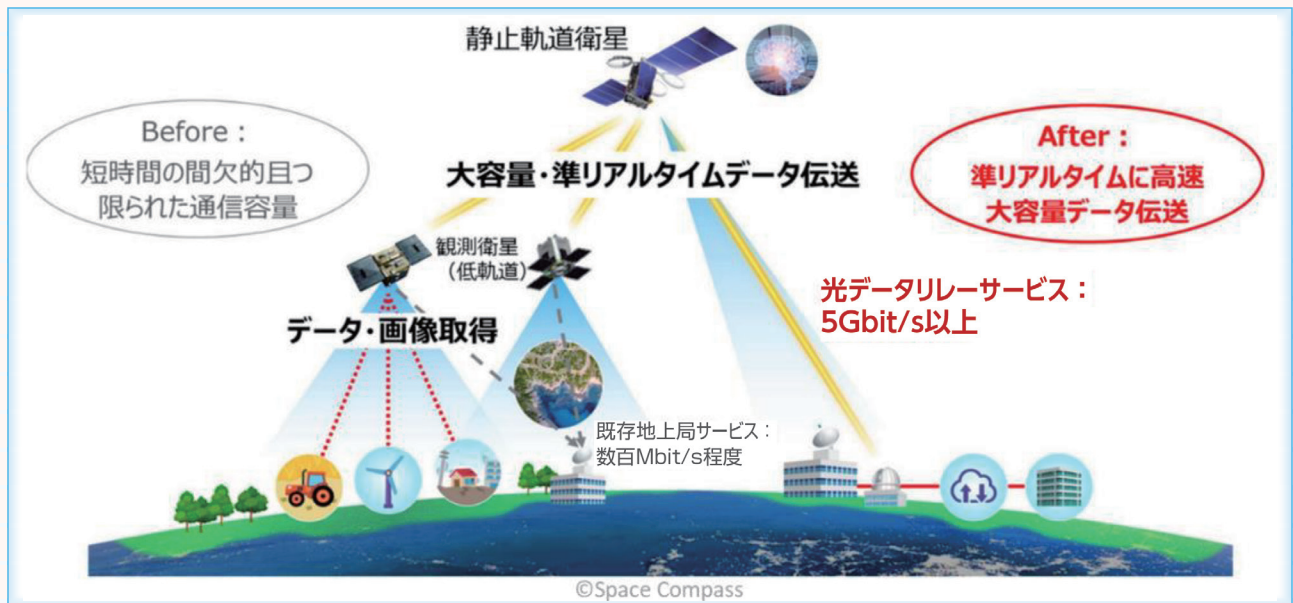


図5 光通信衛星を用いたデータ・画像伝送サービスのイメージ

Compass と、損害保険ジャパンなどが出資するワープスペースの2社が、光衛星を用いた衛星ネットワークの開発の先陣を切っている状況である。まず Space Compass では、GEO 衛星を介した光データ中継ネットワークの実現を目指している。低軌道上に位置する地球観測用衛星からの大容量データを、GEO 衛星を経由し、光地上局へ送信する仕組みである。衛星の発注も2023年1月に完了し、現時点では2024~2025年度の打上げを予定している。また、同社は2023年3月に国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)が公募した「経済安全保障重要技術育成プログラム」における「光通信などの衛星コンステレーション基盤技術の開発・実証」に採択され、2029年度までにLEO衛星による光通信の社会実証も行う計画も進めている。

一方、ワープスペースでは「WarpHub InterSat」と呼ばれるMEO衛星3機による衛星ネットワークの構築を目指している。衛星3機を中軌道に投入することで、高い伝送速度と広いカバーエリアの両面性が実現可能となる。ワープスペースでも同様、LEIHO (Laser Exploration Inter-sat Hub One) と呼ばれる衛星を、2024年を打上げ目標として開発が進められている<sup>(3)</sup>。

#### 4.3 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想

Space Compass では、図6のように地上から月までを光通信でつなぐ「宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想」を掲げている。本ネットワーク構想では、主に二つの大規模サービスの実現を目指している。

一つ目は先ほど解説したGEO衛星とLEO衛星間での光データ中継サービスの提供、二つ目はGEO衛星、LEO衛星、高高度プラットフォーム(HAPS: High Altitude Platform Station)による非地上系ネットワーク(NTN: Non-Terrestrial Network)の構築である。

特にNTNについては、「宇宙RAN(RAN: Radio Access Network)への取組み」と題し、モバイル基地局による通信の利便性及び利用価値の向上を目指している。

HAPSと呼ばれる高高度プラットフォームを高度約20kmに配置することで、従来のネットワークではカバーできないへき地や小さな島々、災害発生エリアなどへの低遅延サービスが可能となり、ネットワーク全体としての高効率運用が実現される<sup>(4)</sup>。以上のサービスを新たなインフラとして構築することで、世界の宇宙産業の発展と持続可能な社会の実現を目指している。

#### 4.4 量子暗号技術を用いた通信網の構築

近年は量子コンピュータの研究開発が急速に進んでおり、2030年代には実用化されることが期待されている。これに伴い、高い計算能力を持つ量子コンピュータによって秘匿性の高い情報が解読され、情報が第三者に漏えいする可能性がある。そのため、ますます情報を厳重かつ安全に管理可能とする仕組み作りが求められている。その対策として、量子力学の性質を利用した量子鍵配送(QKD: Quantum Key Distribution)が注目されている。

QKDとは、送信側で生成された乱数配列を光子に乗

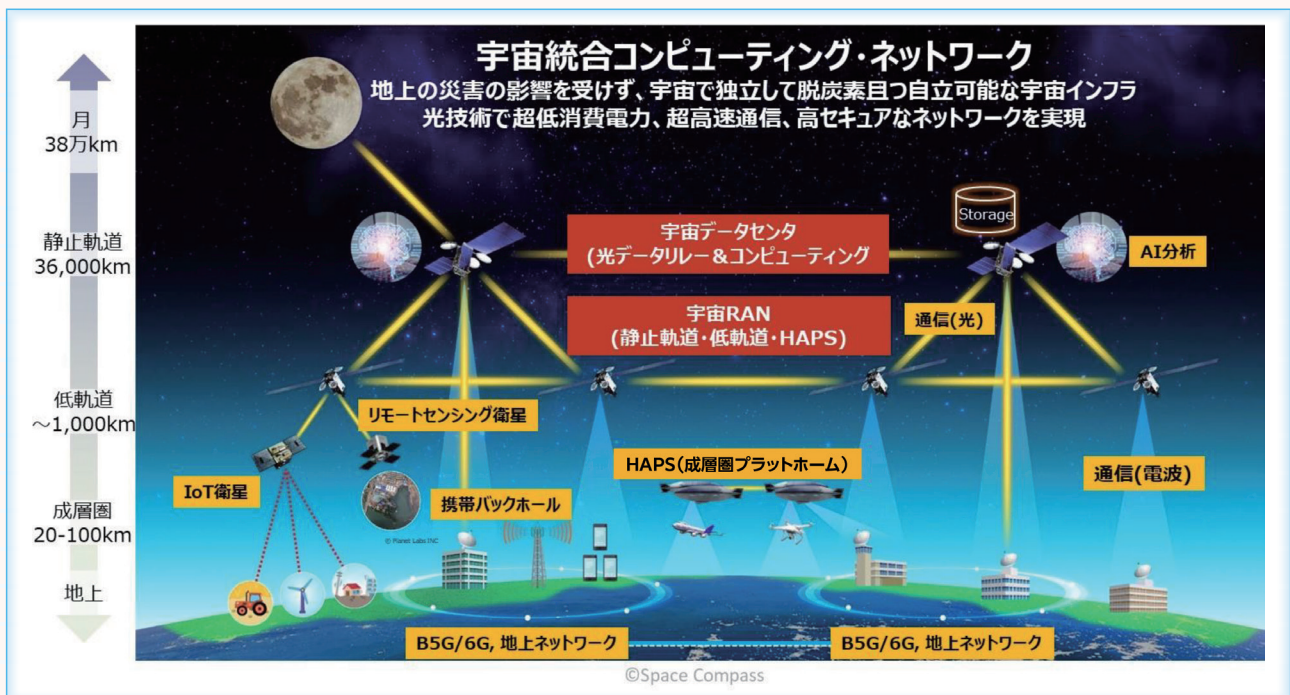


図6 宇宙統合コンピューティング・ネットワーク構想

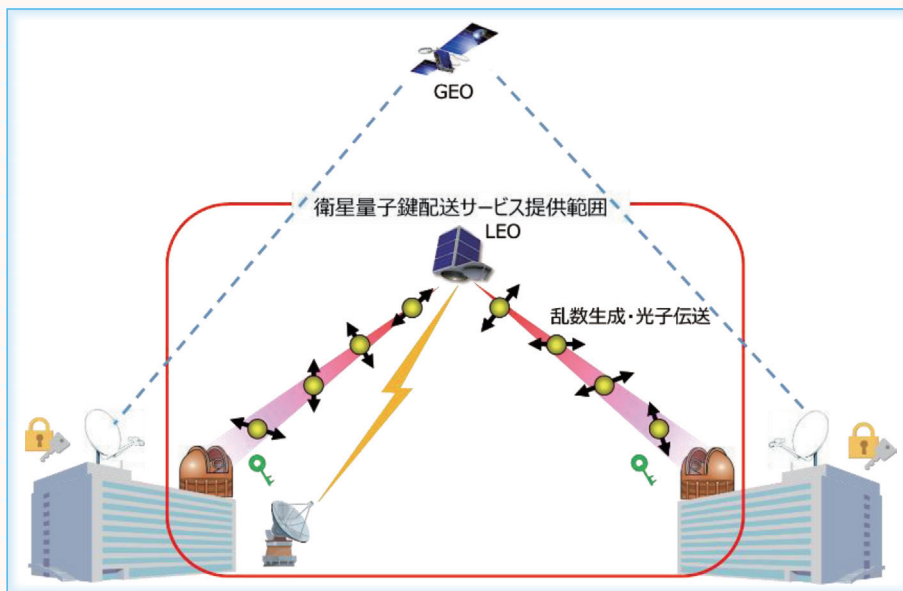


図7 LEO衛星による量子鍵配送サービスの利用イメージ

せて受信側に伝送することで、二者間で安全に暗号鍵を共有する技術のことを指す。この乱数配列の伝送手法としては、地上拠点間を光ファイバでつなぐ「地上 QKD」と、衛星と地上の間をつなぐ「衛星 QKD」の2種類が存在する。

実は地上 QKD に関しては、既に日本でも長らく実用化に向けた実証試験が進んでいる。ただ地上 QKD では、伝送路の寸断リスクや伝送距離が短いという課題がある。一方で衛星 QKD の場合、自然災害の影響を受けない「耐災害性」の強みがあり、かつ地上 QKD での課題を解消することができる。そのため、世界各国で急速に開発が進行している状況である。例えば中国では、2017 年に世界初の衛星 QKD の実証（「墨子号」）に成功しているほか、シンガポールや欧州においても積極的に衛星 QKD の開発が進められている。

日本でも近年、衛星 QKD の事業化に向けた研究開発が実施されている。スカパー J S A T では、総務省公募案件に参画する形で研究開発を実施しており、衛星に搭載する暗号生成装置や受信局の開発実証に加え、事業化に向けた検討をほかの共同研究機関とも連携しながら進めている。当社では現在、図7に示したように LEO 衛星を用いた QKD による事業化を目指している。ただ事業化に向けて、衛星の運用体制やエンドユーザの選定など、解決すべき課題は山積みである。まずは LEO 衛星を利用した QKD サービスの実証を着実に進めていき、将来的には衛星 QKD 及び地上 QKD を接続させた形で通信網の構築を目指していきたい。

本研究開発は、総務省の「ICT 重点技術の研究開発プロジェクト」(JPMI00316)のうち、「グローバル量子暗号通信網構築のための衛星量子暗号技術の研究開発」

(JPJ010277)並びに「衛星通信における量子暗号技術の研究開発」(JPJ007462)によって実施した成果を含む。

## 5 さいごに

スカパー J S A T では、これまでに培ってきた衛星通信事業者としての強みを生かしつつ、上記で紹介した事業の拡大及び新規事業の開拓を通して宇宙ビジネス全体を盛り上げていきたい。

### ■ 文献

- (1) 総務省，“小型衛星通信網の国際周波数調整手続きに関するマニュアル第3.2版,” pp. 2-6, April 2023.
- (2) 一瀬悦子，“BS と CS 各衛星の仕様一覧,” 衛星通信ガイドブック 2023, 田中絵美子, 加藤郁美 (編), pp. 28-29, サテマガ・ビー・アイ, 東京, 2023.
- (3) 一瀬悦子，“2023 年における世界の衛星通信業界の現状と動向,” 衛星通信ガイドブック 2023, 田中絵美子, 加藤郁美 (編), pp. 38-40, サテマガ・ビー・アイ, 東京, 2023.
- (4) 國分正哉，“光通信技術と革新的なネットワークで宇宙と地上をつなぐ大容量・高速通信,” 宇宙ビジネス最前線, 日本経済新聞出版 (編), pp. 42-43, 日経 BP, 日本経済新聞出版, 東京, 2023.

### 長谷川広大

2020 首都大東京大学院 (現都立大大学院) システムデザイン研究科航空宇宙システム工学域了。同年 (株) IHI に入社。航空宇宙防衛事業領域民間エンジン事業部技術部に配属、主に民間エンジン設計・開発に関わるプロジェクト管理業務に従事。2023 スカパー J S A T 株式会社に入社。現在は宇宙事業部門宇宙・衛星事業本部宇宙・防衛事業部に所属し、低軌道衛星地球局ビジネス等に従事。



# Starlink システムと 応用サービス例

福井裕介 Yusuke Fukui KDDI 株式会社  
長里天羽 Tenu Nagasato KDDI 株式会社  
伊藤 直 Naoki Ito KDDI 株式会社

## 1 はじめに

1990年代から低軌道衛星通信システム導入の機運が高まり、TeledesicやSkyBridge等の事業化が進められたが、衛星打上げ費用を含む資金確保等の問題から事業中断や事業譲渡等が行われてきた。その結果、現存する低軌道衛星通信システムのオペレータはIridium、Globalstar等限定的であった。しかし、近年の衛星搭載機器の小形・軽量化や衛星打上げ費用の低廉化により、小形の人工衛星の実用化が比較的容易になっており、中・低軌道に打ち上げた多数の小形衛星を連携させて一体的に運用する「衛星コンステレーション」を構築し、極域を含めた世界全体を対象として、緊急時・平時を問わず、ビジネス用途の高信頼・高速大容量通信等多様なサービスを提供することが可能となった。

これを受けて、中軌道（MEO：Medium Earth Orbit、高度2,000～36,000 km）または低軌道（LEO：Low Earth Orbit、2,000 kmまで）に投入される多数の小形衛星で衛星コンステレーションを構築する計画が複数検討されている。LEOについては既存の衛星オペレータによる現行衛星の高度化計画に加えて、新興の衛星オペレータによる計画が進んでいる。非静止軌道衛星通信システムは、静止軌道衛星通信システムに比較し低い高度を周回するため通信の遅延時間が短いこと、数多くの機数を運用することによる大容量通信が特徴的である。

## 2 Starlink（スターリンク）について

Starlinkシステムは、米国の民間企業SpaceX社（Space Exploration Technologies Corp.）が提供するLEO衛星コンステレーションサービスであり、約550

kmの高度に計4,408機の衛星を打ち上げる計画をITU（International Telecommunication Union）に申請している。2018年に打上げを開始して以降、既に執筆時点（2023年8月）で4,400機以上の衛星を打ち上げ、米国や日本を含む多くの国でサービスを開始している。

日本においては、電気通信技術審議会諮問第82号「非静止衛星を利用する移動衛星通信システムの技術的条件（平成7年9月25日）」のうち、「高度500 kmの軌道を利用する衛星コンステレーションによるKuバンド非静止衛星通信システムの技術的条件」として、総務省情報通信審議会情報通信技術分科会衛星通信システム委員会及び作業班においてその技術的条件を検討しており、その結果として、2021年8月20日に電波法施行規則等の一部が改正されている。

Starlinkシステムは、先述した衛星コンステレーションに加え、ユーザが利用する端末（移動・固定）、ゲートウェイ局、インターネットに接続するためのPoP（Point of Presence）という設備から成り立つ（図1）。ユーザ端末と衛星間の通信リンクをサービスリンクと呼び、サービスリンクはKuバンド（宇宙から地球：10.7-12.7 GHz、地球から宇宙：14-14.5 GHz）の周波数を用いる。また、ゲートウェイ局と衛星間の通信リンクをフィーダリンクと呼び、この区間はKaバンド（宇宙から地球：17.8-18.6 GHz及び18.8-19.3 GHz、地球から宇宙：27.5-29.1 GHz及び29.5-30.0 GHz）の周波数を用いる。1. で述べたIridium、Globalstar等はMSS（Mobile Satellite Service）に分配されたSバンド（2.5 GHz付近）をサービスリンクに利用する低軌道衛星通信システムである。一方でStarlinkシステムはFSS（Fixed Satellite Service）に分配されたKuバンドをサービスリンクに利用する低軌道衛星通信システムであり、そのシステムの利用形態、帯域幅、通信速度は両者で大きく異なる。ユーザ端末は、電気式

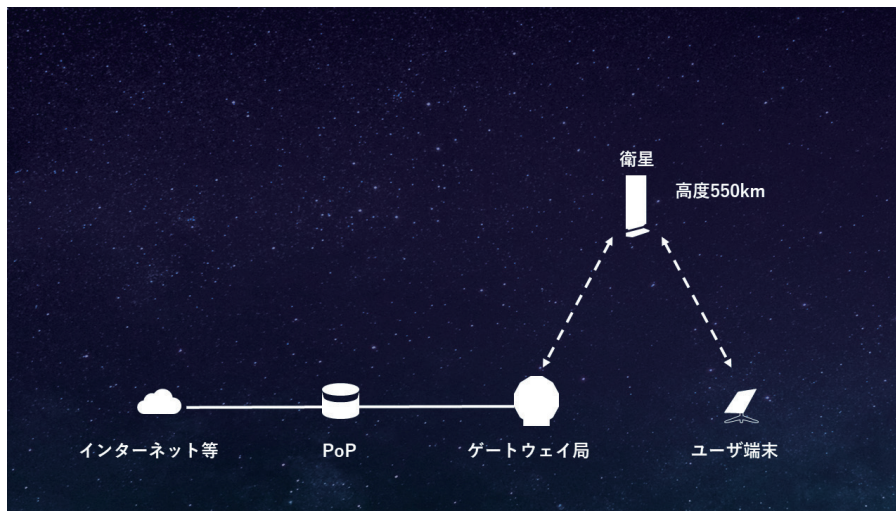


図1 Starlink システム接続イメージ

(フェイズドアレー型)のアンテナで、アンテナが物理的に駆動せずとも低軌道衛星を電子走査で追尾することができる点と、複数の衛星のハンドオーバ(切換)を物理駆動式のアンテナと比較し素早く行うことができる点が特徴的である(図2)。また、従来のパラボラアンテナタイプと比較しても構成がシンプルで、軽量であることやケーブルの本数も少ないこと、一般ユーザの方でも比較的容易に設置ができることも特筆すべきものである(表1)。

### 3 Starlink 活用の取組み

Starlinkは2020年に行った北米や欧州での試験運用を皮切りに本格的な商用サービスが開始され、現在では45か国以上でサービスが提供されている。特に災害で通信が途絶された地域や、ルーラル地域の学校へのサービス提供、遠隔医療に適用されている。

日本国内においては、KDDIが2021年9月からKDDIの提供する携帯通信事業においてau基地局のバックホール回線にStarlinkを利用する取組みを開始している。また、2022年10月には認定Starlinkインテグレートとして、日本国内の法人のユーザに対してStarlinkを再販するサービス(Starlink Business)を開始し、KDDIの独自技術と組み合わせたサービス提供に取り組んでいる。次章から各取組みを説明する。



図2 Starlink ユーザ端末

表1 従来のパラボラタイプアンテナとの比較

	パラボラタイプ	Starlink 端末
送受信機	外付け	内蔵
ケーブル	同軸ケーブル、電源ケーブル等、複数本	PoE ケーブル 1 本のみ
衛星追尾	手動/自動	自動
重量	比較的重量(数十kg)	軽量(10kg未滿)

## 4

携帯電話基地局の  
バックホール回線利用

KDDI の au 携帯電話基地局では、山間部や島しょ部等光ファイバ回線を敷設できないエリアの基地局のバックホール回線として静止軌道衛星通信を利用してきたが、これに加え Starlink をバックホール回線として用いることで、更なる通信品質の向上に取り組んでいる。この取組みにより、これまでサービス提供が困難とされていた山間部や島しょ部へのエリア拡大だけでなく、災害対策においても au の高速通信の利用が可能になる。今後、全国約 1,200 か所の基地局に順次導入する予定であり、この先駆けとして、2022 年 12 月 1 日に静岡県熱海市初島の au 基地局に Starlink が導入され、既に Starlink 経由の携帯通信サービスの提供が始まっている(図 3)。また、2023 年 8 月 26 日から、岐阜県高山市丹生川町の乗鞍岳畳平バスターミナルで、初の Starlink を au 通信網のバックホール回線として利用する 5G 基地局の運用を開始した<sup>(1)</sup>(図 4)。

更に、地震や台風等の自然災害の多い日本において、災害発生時は被災地域の通信をより迅速に復旧させることが求められていることから、Starlink をバックホール回線として利用した車載 au 基地局と可搬 au 基地局、

船舶 au 基地局を 2023 年 7 月から配備し、2023 年度末までに約 200 台を全国に展開していく<sup>(2)</sup>(図 5,6,7)。

昨今、従来のニュースサイト等だけではなく、ソーシャルメディアを通じた被災地域での情報取得や動画像等による情報発信の重要性は増してきていることから、Starlink 等の新たな技術の活用や設備の増強を通じて、被災地域の高速度・大容量・低遅延な通信環境を実現し、通信がつながる方々に安心・安全を提供していく。



図 5 Starlink を搭載した車載基地局



図 3 熱海市初島の Starlink を用いた au 基地局



図 6 Starlink を搭載した可搬基地局



図 4 乗鞍岳畳平バスターミナルでの Starlink アンテナ設置の様子



図 7 Starlink を搭載した船舶基地局



図8 KDDI が提供する Starlink サービス

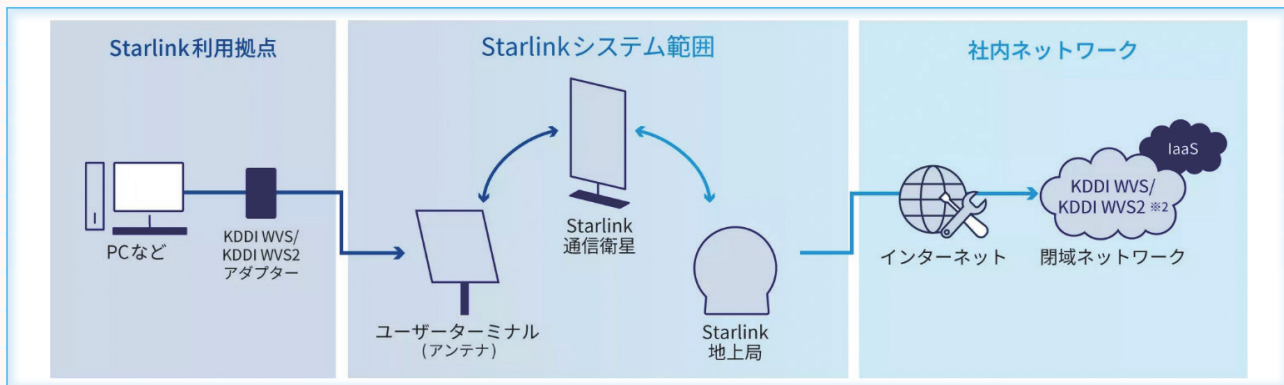


図9 社内ネットワークにセキュアに接続可能な接続構成

## 5 法人向け Starlink サービスの展開

KDDI は、再販サービス (Starlink Business) に加え、日本特有の課題に応じ、KDDI 独自技術と組み合わせた付加価値サービスの提供を開始している (図8)。

以下に具体的な取組み例について紹介する。

### 5.1 Starlink Business

単純再販に加え、マーケットニーズに応じたパッケージングサービスを提供している。特に国内のセキュリティ意識の高まりに対応すべく、社内ネットワークにセキュアに接続可能な「KDDI Wide Area Virtual Switch/Switch2」を付加したサービスを展開している<sup>(3)</sup> (図9)。

### 5.2 Satellite Mobile Link (SML)

2022年12月から国内の法人企業や自治体向けに Starlink をバックホール回線とした au 基地局を構築するソリューションサービスを提供している。

法人企業の導入事例として、SML による建設現場への通信環境提供の事例とドローン活用を掛け合わせた具体的な事例二つに触れる。

まずは、渡島トンネル (上二股) 工区 (発注者: JR TT, 施工者: 清水建設株式会社) の導入事例を紹介する。一般的に山間部の建設現場では、光ファイバ敷設に大規模工事が必要である。そのため、従来は通信環境の整備が困難であったが、当サービスを導入することにより、光ファイバを敷設しづらい地域でも携帯電話による音声通話・緊急通報が可能となった (図10)。また、建設現場と事務所、本支店間の進捗管理におけるタブ





図 10 北海道新幹線渡島トンネル（上二股）工区（JRTT 発注）工事現場の SML 利用

レット端末を利用した大容量データ伝送を、より高速かつ安定的に利用することも可能になった。このサービスにより情報伝達の効率性・即時性が向上するとともに、建設現場の DX 化や働き方の改革にもつながり、従業員満足度の向上に寄与している。なお、当現場は 2022 年 12 月から当サービスを導入しているが、北海道の過酷な冬の環境下でも、一度も通信環境が途切れることなく、安定したサービスを提供できている<sup>(4)</sup>。

次に、埼玉県秩父市における災害時のドローン物資輸送の事例について紹介する。秩父市中津川地内において 2022 年 9 月 13 日に発生した土砂崩落により、冬季期間、交通や物流が寸断された集落へドローンによる物資の定期配送を実施した（図 11, 12）。ドローンによる物資の配送先となる中津川地内へアクセスするには、緊急車両等の一部の車両のみ通行が許可されている、森林管理道金山志賀坂線を通行する必要があり、冬季は降雪や凍結のため、通行が非常に困難となっていた。また、当該地域の地形の特性上、モバイル通信が不安定な環境であるため、SML を活用して au のモバイル通信環境を確保し、ドローンの遠隔自律飛行による物資の配送を実現した。食品や日用品等、1 回のフライトにつき最大 4 kg の物資をドローンで配送し、中津川地内の住民の皆様へ安心して便利な暮らしをお届けした。本取組みは、災害等の有事において、ドローンにおける物資の定期配送を行った全国で初めての事例となった（2023 年 4 月時点）。

### 5.3 山小屋 Wi-Fi

電波の届きにくい山小屋の通信環境の改善を目的に Starlink をバックホール回線として活用した Wi-Fi サービスの提供を開始している（図 13）。2023 年 5 月には一般財団法人白馬村振興公社が運営する八方池山荘にて先行提供を開始し、今後は自治体や山小屋オーナーと協力し、日本百名山を中心に提供範囲を拡大し、全国 100 か所の導入を目指す。山小屋を含む登山道は地形や積雪等の理由から通信環境の整備が困難なエリアが多く、緊



図 11 ドローン輸送を実現した SML



図 12 モバイル通信による遠隔制御ドローン機体



図 13 剣岳真砂沢ロッジに設置した Starlink アンテナ

急時の連絡が難しい等の課題がある。当サービスの導入により、山小屋ユーザは家族や友人への安否連絡や気象情報の確認、ソーシャルメディアへの投稿が可能となり、山小屋オーナーは宿泊予約、防災情報や自然災害の情報収集等、デジタル活用による業務効率化だけでなく、新たなビジネスの創造につなげることができる。また、本サービスの提供とともに、山小屋への「au Pay」の導入を促進し、キャッシュレス決済に切り替えることで、山小屋オーナー、山小屋ユーザともにより快適な山岳体験を提供する<sup>(5)</sup>。

### 5.4 Fes Wi-Fi

大規模な野外イベントでは、多くの参加者が局所的に集中し、通信環境が不安定になることがある。KDDI も au ユーザへのトラヒック対策として車載基地局を設置し、混雑緩和の対応を行っている。しかし、近年電子チケットやキャッシュレス決済等の利用が急拡大し、混雑時に参加者の SNS 発信や同行者との連絡、電子決済等の利用に支障が出てしまうことが多く、これまでの対策だけでは不十分であることが課題とされていた。Fes Wi-Fi は Starlink アンテナと屋外用アクセスポイントのシンプルな構成のため、容易に、かつ任意の場所に Wi-Fi エリアを構築することが可能である。そのため、従来の車載 au 基地局の設置が難しかったイベントでも利用することができ、現場の混雑状況に応じてエリアの移設・構築が即時に可能となった。また、Starlink を通信回線として利用するため、モバイル回線設備への負担軽減と快適な通信環境の提供を実現できる。ロックン・オン・ジャパンが主催する日本最大の春の野外音楽フェスティバル「Japan Jam 2023」でも、局所的な人の集中・滞留が起きるグッズクロークや物販、飲食エリアで当サービスを導入することで、開催期間の5日間累計で29,452人が当該サービスを利用した。多くの人が集まる場所で、同行者との連絡や電子決済の利用等を快適に利用できる環境作りに貢献した(図14)。

### 5.5 Starlink Business (Maritime プラン)

2023年7月からStarlinkの海上利用向けサービスの提供も開始している(図15)。従来、海上における大容量通信の手段として静止軌道衛星を利用したサービスが利用されてきた。しかし、サービスの帯域不足により、PCやスマートフォン等の近年のデジタル機器の通信の高速化に対応できていなかったほか、昨今の気象情報や海洋情報はインターネット経由でやり取りされることが一般的であり、海上でリアルタイムに情報収集や発信が困難であったことが大きな課題となっていた。Starlinkの高速通信が海上でも利用できるようになるこ

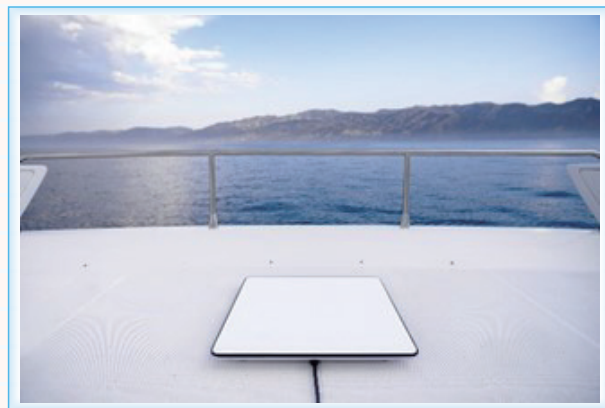


図15 海上で利用可能な Starlink アンテナ



図16 東海大学の海洋調査研修船「望星丸」

とで、リアルタイムの気象情報や海洋情報の取得や送信による安全な運行の支援、データを大量に取り扱う海洋研究のDX化や、船舶の自動航行等が実現可能になる。また、緊急時の連絡手段を確保できるほか、長期乗船という特殊な環境下で働く船員の福利厚生整備も可能となることで、満足度向上等の課題解決につながる。

日本におけるStarlinkの海上利用向け通信サービス導入第1号である東海大学望星丸(図16)では、当該サービスの導入により、航海に必要な情報の収集はもちろんのこと、調査研究を行う船上の学生に対して、オンライン授業の参加や、調査結果を活用したリアルタイムなミーティングの開催など乗船期間中の学習環境のDX化を実現した。また、災害医療の現場での「望星丸」の活用として、遠隔地の患者と都市部にいる医師とのオンラインによる診察や、画像データによる診断の実施等、高速通信による医療DX実現への期待が高まっている<sup>(6)</sup>。



図14 Japan Jam 2023での当サービス利用結果

## 6 おわりに

近年の衛星通信技術を取り巻く環境の変化により、Starlinkのような低遅延大容量の通信サービスが誕生し、全世界的に衛星通信分野は新たなステージに到達している。KDDIはStarlinkを用いた基地局バックホール回線や法人向けサービスの提供を推進し、持続的かつ

信頼ある通信サービスにより、この地球上から「つながらない場所をなくす」ため新たな挑戦を続けていく。

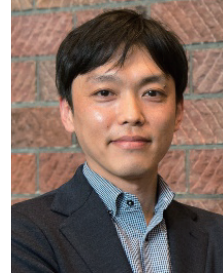
また、衛星通信を利用するユースケースとして、ドローンやコネクティッドカーへの期待も高い。これらの実運用においては、従来指標の人口カバー率だけでなく上空カバー率や道路カバー率の向上も重要な要素となるため、衛星通信の特徴である広域性が特に求められる。加えて、携帯電話で衛星通信を利用可能とする直接通信型のサービスも注目されている。このように今後、様々な衛星通信サービスが登場し、私たちの生活に新しい利便性をもたらすことが期待される。

#### ■ 文献

- (1) KDDI, “ニュースリリース (2021 年 9 月 13 日), SpaceX の「Starlink」を au 通信網で利用開始。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2021/09/13/5392.html> (参照 2023 年 9 月)
- (2) KDDI, “ニュースリリース (2023 年 3 月 2 日), Starlink を活用した車載・可搬型基地局を導入。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2023/03/02/6579.html> (参照 2023 年 9 月)
- (3) KDDI, “ニュースリリース (2022 年 10 月 12 日), スペース X の衛星ブロードバンド「Starlink」を法人・自治体向けに提供。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2022/10/12/6284.html> (参照 2023 年 9 月)
- (4) KDDI, “ニュースリリース (2022 年 12 月 5 日), 「Satellite Mobile Link」を清水建設が採用。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2022/12/05/6419.html> (参照 2023 年 9 月)
- (5) KDDI, “ニュースリリース (2023 年 5 月 29 日), Starlink を活用した「山小屋 Wi-Fi」提供開始。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2023/05/29/6753.html> (参照 2023 年 9 月)
- (6) KDDI, “ニュースリリース (2023 年 7 月 18 日), Starlink の海上利用向け通信サービス, 第 1 号として東海大学望星丸に搭載。” <https://news.kddi.com/kddi/corporate/newsrelease/2023/07/18/6845.html> (参照 2023 年 9 月)

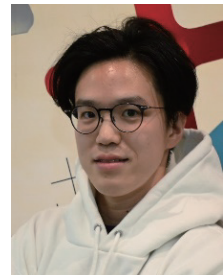
#### 福井裕介

平 18 静岡大・情報卒。平 20 同大学院情報学研究所修士課程了。同年 KDDI 株式会社入社。以来、衛星通信開発／運用／建設／制度化対応に従事。現在、同社グローバルインフラマネジメント部（標準化戦略部／宇宙・衛星技術企画室を兼務）エキスパート。



#### 長里天羽

平 27 慶大・環境情報卒。同年 KDDI 株式会社入社。au 事業の採算管理及び事業計画・中期計画策定を経験後、中国上海に赴任し、日系現地法人の DX 推進支援や現地パートナー企業開拓を経験。今 3 から現部署で Starlink 事業の立上げに従事。



#### 伊藤 直

平 27 京大・工・電気電子工卒。平 29 同大学院・情報学研究所修士課程了。同年 KDDI 株式会社入社。以来、同社山口衛星通信所の地球局設備保守を手掛け、現在、同社宇宙・衛星技術企画室で宇宙領域における新規事業検討に従事。



# 宇宙天気は無線通信への影響

## Impact of Space Weather on Wireless Communications

陣 英克 Hidekatsu Jin<sup>†</sup>

### Summary

近年、宇宙天気が社会にもたらすリスクに対する認識が国内外で広まりつつある。宇宙天気が通信・放送、衛星測位、衛星運用、航空運用、電力等の社会インフラに影響する事例も起きている。2022年に開催された総務省の「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」では、リスクのある社会経済分野として、通信・放送など5分野が特定され、予報・警報の基準などが議論された。本稿ではそのうちの通信・放送分野に関連し、無線通信に影響する宇宙天気現象について解説する。その現象の多くは地球電離圏のじょう乱を通じて、電波に影響を与えるものである。そのほかに太陽から届く電波が雑音（ノイズ）として影響するものや、通信衛星自体の運用に影響するものがある。本稿では、これらの各現象を基礎的な背景を含め、どのような無線通信に影響するか解説する。また、同検討会で議論された予報・警報の基準に関連し、各現象の規模と無線通信への影響度を対応させた分かりやすい指標について議論する。

### Key Words

宇宙天気、無線通信、太陽フレア、電離圏、電波伝搬

## 1 はじめに

近年、宇宙天気が社会にもたらすリスクに対する認識が国内外で広まりつつある。宇宙天気とは、太陽活動の影響が地球近傍の宇宙空間や上層大気に到来して発生する一連の現象や、地球上層大気内で発生する現象の状況を指す。宇宙天気が社会インフラに影響した最近の例として、2022年2月には衛星コンステレーションを構成するために低軌道に打ち上げられた数十機の通信衛星が、大気圏に再突入して失われる事例も起きている。これは太陽フレアの影響が地球に到来し、それによって発生した大気のじょう乱によるものである<sup>(1)</sup>。また、2019年11月から国際民間航空機関（ICAO）の規定により、宇宙天気が航空運航に必要な情報として取り入れられている<sup>(2)</sup>。これは、宇宙天気によって特に極域上空で放射線量が増加することや（直ちに人体に影響するほどではないが乗務員の被ばく量の管理に必要）、短波通信や衛星測位の利用に支障が生じ得るためである。

こうした宇宙天気が社会にもたらすリスクについて、2022年に開催された総務省の「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」では、関係する社会経済分野として通信・放送、衛星測位、衛星運用、航空運用、電力分野が特定され、予報・警報

の基準などが議論された。

本稿ではそのうちの通信・放送分野に関連し、無線通信に影響する宇宙天気現象について解説する。その現象の多くは地球電離圏のじょう乱を通じて、電波に影響を与えるものである。そのほかに太陽から届く電波が雑音（ノイズ）として影響するものや、本稿では扱わないが、前述のような通信衛星自体の運用に影響するものがある。**2.**では背景事項として電波の伝搬と関わる電離圏の基本的な性質を説明する。**3.**では無線通信に影響する様々な宇宙天気現象を紹介する。**4.**ではこれらの宇宙天気現象について現象の規模と無線通信への影響度との対応について解説する。

## 2 電離圏の基本的な性質

本章では前提として必要な電離圏の基本的な性質について述べる。

### 2.1 電離圏と太陽活動

まず、電離圏は地球上層大気が太陽から降り注ぐ紫外光のエネルギーを吸収し、電離した領域である。したがって、太陽紫外光の変動に強く依存する。図1は太陽活動の指標として太陽表面の黒点数の推移を示したものである。太陽大気から放射される太陽紫外光の強度もこれと似たような推移をたどる。太陽活動は約11年のサイクルを持ち、その極小期と極大期の違いは、図1の紫外光で見た太陽大気の様相に表れている。図2は地上約60 km

<sup>†</sup> 国立研究開発法人情報通信研究機構、小金井市  
National Institute of Information and  
Communications Technology, Koganei-shi, 184-  
8795 Japan

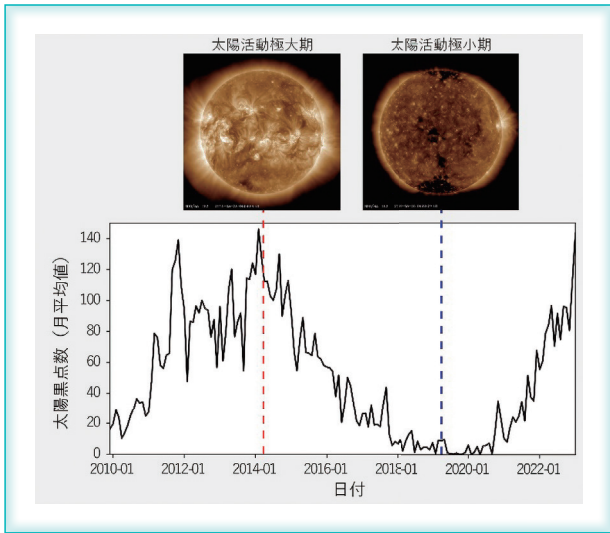


図1 太陽黒点数の推移

(太陽黒点数はベルギー王立天文台<sup>(3)</sup>及び太陽紫外線画像は NASA SDO 衛星による観測<sup>(4)</sup>)

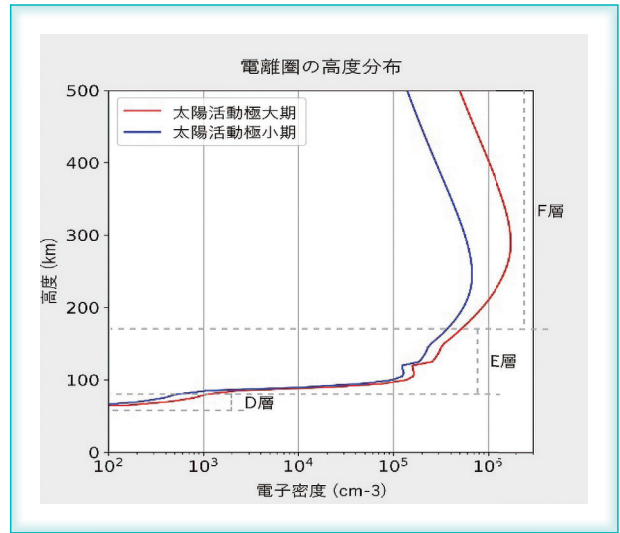


図2 電離圏の高度分布

(国際標準電離圏モデル<sup>(5)</sup>による東京上空の正午の電子密度分布。太陽活動極小・極大期は図1と同じ日付。)

から 1,000 km 以上にわたって存在する地球電離圏の高度分布を示す。イオン組成の違いなどから下から D 層, E 層, F 層と呼ばれる領域に区分される。各高度の電子密度は太陽紫外光の強度に対応して変動し、太陽活動の極小期と極大期では F 層のピーク付近で数倍程度の違いとなっている。

## 2.2 電離圏と電波の伝搬

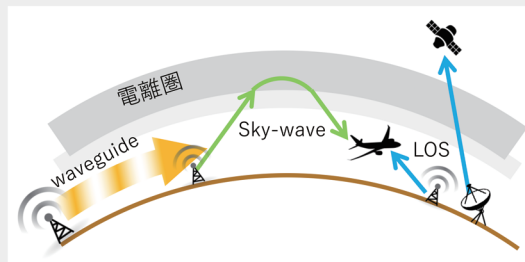
電離圏は荷電粒子の集まりであるため、そこに入射する電波と相互作用し、電波の屈折率を変える。この結果、電波の反射や遅延を引き起こす<sup>(6)</sup>。この作用は電子密度や電波の周波数に依存する。電子密度が濃いほど、より高い周波数の電波を反射する。したがって、D 層から F 層のピークにかけては高

度が上がるほど電子密度が濃く、より高い周波数の電波を反射する。一方、電波の周波数が F 層ピークで反射できる周波数を上回ると、その電波は電離圏を透過する。この場合でも電離圏を通過する際に電子密度に応じて電波の遅延が発生する。

表 1 は、電波の周波数帯ごとに、どのように伝搬し、どのような無線通信に利用されているかを示すものである。短波 (HF) 以下の周波数帯は電離圏で反射されるため、主に見通し範囲を越えた遠距離の無線通信に利用されている。一方、超短波 (VHF) 帯以上は、電波が電離圏を透過するため、人工衛星などとの通信や、近距離の無線通信に利用されている。

表 1 周波数ごとの電波伝搬と用途

電波 (周波数)	長波 LF (30-300kHz)	中波 MF (0.3-3MHz)	短波 HF (3-30MHz)	超短波 VHF (30-300MHz)	極超短波 UHF (0.3-3GHz)
主な利用 <sup>(7)</sup>	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶・航空機用ビーコン</li> <li>標準電波</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶通信</li> <li>中波放送</li> <li>船舶・航空機用ビーコン</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>船舶・航空機通信</li> <li>短波放送</li> <li>アマチュア無線</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>FM放送</li> <li>防災行政無線</li> <li>消防無線</li> <li>列車無線</li> <li>航空管制通信</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>携帯電話</li> <li>TV放送</li> <li>防災行政無線</li> <li>衛星通信</li> <li>GNSS</li> <li>列車無線</li> </ul>
電波伝搬の仕方 <sup>(8)</sup>	Waveguide mode (地表-電離圏間導波管伝搬)			Line-of-sight (見通し内伝搬)	
	Sky-wave (電離圏伝搬)				



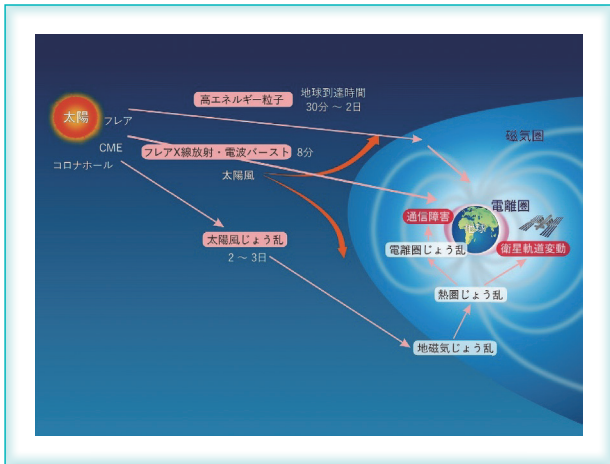


図3 太陽活動に起因する宇宙天気現象

### 3 無線通信に影響を与える宇宙天気現象

無線通信に影響する様々な宇宙天気現象について、太陽活動に起因するものと、地球大気内の要因で発生するものに分けて紹介する。

#### 3.1 太陽活動に起因する宇宙天気現象

太陽黒点の周辺は太陽の磁界が集中しており、上空の太陽大気を含めて活動的な状態である。そこでは蓄積された磁界エネルギーを爆発的に解放する太陽フレアなどの現象が起こる。図3に示されるように、太陽フレアが発生すると、X線から紫外線に及ぶ光の放射に加え、プロトンなどの高エネルギー粒子が惑星間空間に放出される。また、太陽フレア

の発生は、CME (Coronal Mass Ejection) と呼ばれるプラズマ塊の噴出を伴うこともある。活動領域以外にはコロナホールと呼ばれる高速なプラズマ流の吹出し口があり、CME と併せて太陽風のじょう乱源となっている。

これらの太陽から放出される電磁波や高エネルギー粒子、太陽風のじょう乱が地球近傍の宇宙空間(磁気圏)や上層大気(電離圏及び熱圏)に到達すると、無線通信に影響を与えるような現象が起きる。

#### 3.1.1 デリンジャー現象

宇宙天気現象の電波・機器への影響をまとめて示したものが図4である。その一つであるデリンジャー現象は、太陽フレアに伴うX線の影響により、主に短波帯の電波が電離圏D層に吸収される現象である。通常のD層は電子密度が薄いため短波やそれより高周波の伝搬に影響しない。一方、太陽X線によってD層が異常電離して電子密度が濃くなるとD層の荷電粒子が短波とともに振動する。すると、D層では背景の中性大気の数密度が濃いため、荷電粒子と電波の振動のエネルギーは中性大気に散逸し、電波の吸収が起きる。

本稿で扱う宇宙天気現象の発生の特徴と無線通信への影響を表2にまとめている。デリンジャー現象については、太陽フレアの発生から電磁波の届く約8分後に発生する。現象の継続時間はフレアの長さに依存し、8割近くが30分以内に収束するが、まれに3時間以上継続する場合もある<sup>(9)</sup>。現象

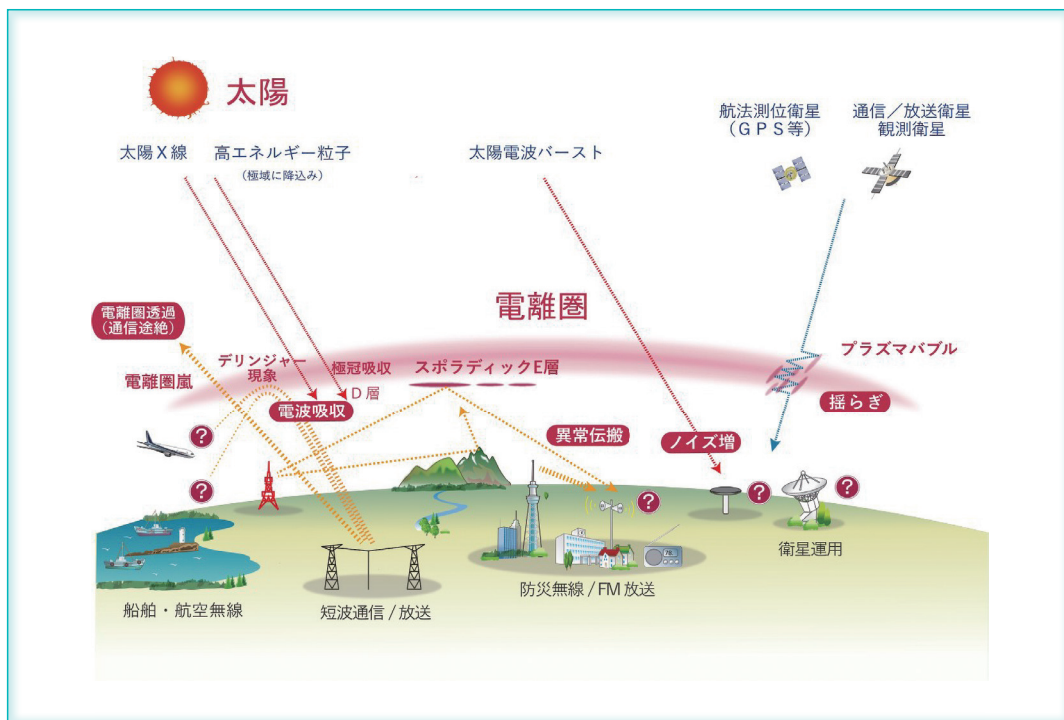


図4 宇宙天気現象と無線通信への影響

表2 無線通信に影響を与える宇宙天気現象のまとめ

現象	発生領域・タイミング・継続時間			無線通信への影響	
	領域	タイミング	継続時間	周波数	内容
デリンジャー現象	昼側	フレア発生から約8分後	30分-3時間	LF-HF	吸収
極冠吸収	極域	同3-20時間後	数時間-4日	LF-HF	吸収
電離圏嵐	中-高緯度域	同3.4日後	数時間-3日	HF	MUF減少
太陽電波バースト	昼側	同約8分後(タイプ依存)	数分-1時間	VHF-SHF	雑音増加
Sporadic E層	夏半球の中緯度域	主に昼、夕方	5分-数時間	VHF	異常伝搬
プラズマバブル	磁気赤道-低緯度	日没後	1-4時間	UHF	シンチレーション

の起きる領域は太陽を向いている昼側である。

### 3.1.2 極冠吸収

極冠吸収は、太陽フレアに伴う高エネルギー粒子が地球の磁力線に沿って極域の電離圏に降り込むことにより発生するものである。この現象もデリンジャー現象と同様にD層の異常電離を引き起こし、主に短波帯の電波の吸収が起きる。

極冠吸収は大抵の場合に太陽フレアが起きてから3~20時間後に発生し<sup>(10)</sup>、その継続時間は数時間から4日間程度に及ぶものがある<sup>(11)</sup>。現象が起きる領域は地球の緯度55度付近より高緯度側である。

極冠吸収が影響した実例として、極域を通過して運航している航空機が、極冠吸収の発生時に、通信を確保するため、航路を変更したことなどがある<sup>(12)</sup>。

### 3.1.3 電離圏嵐

電離圏嵐は、太陽風じょう乱が地球に到達した影響により、F層の電子密度が通常より顕著に増加あるいは減少する現象である。(じょう乱が磁気圏から電離圏に及ぶ過程の説明は文献(13)などを参照のこと。)増加の場合を正相嵐、減少の場合を負相嵐と呼ぶが、通信に影響が大きいのは負相嵐である。2.2で述べたように電離圏には電波を反射する作用があり、F層ピークで最も高い周波数の電波を反射する。したがって、負相嵐が発生すると、通常時に電離圏で反射されていた高周波数の電波が反射せずに電離圏を透過し、通信不可の状況が起こる(図4)。

負相嵐が発生するタイミングは、CMEなどの太陽風じょう乱が太陽から放出されてから3~4日後くらいであり、じょう乱の惑星間空間の移動や磁気圏・大気圏の応答の時間に相当する。負相嵐が発生した際には、多くの場合は日中を通して継続する。規模の大きい現象の場合には静穏の状態に戻るまでに数日を要することもある。負相嵐の発生領域については、高緯度に始まり、中緯度まで広がることもある。

### 3.1.4 太陽電波バースト

太陽電波バーストは、太陽フレアやCMEの発生に伴って、太陽から放射される電波の強度が短時間に強まる現象である。その周波数はMHz帯の短波から10GHz帯のマイクロ波に及び、携帯電話回線や測位衛星と受信機間の通信など様々な無線通信システムに雑音として影響し得る。

太陽電波バーストの携帯電話回線への影響を調べた研究例は少ないが、幾つか報告されている。文献(14)では、電波バーストによって支障が生じる可能性があるのは、周波数が2.6GHz未満または10GHz以上であって、更に基地局が日出または日没の時間帯にある場合としている。そのような条件下で電波バーストが発生すると、数分から1時間程度にわたって影響があり得る。太陽電波観測のデータベースから統計を取ると、雑音が通常の2倍以上になるような規模の電波バーストは、太陽電波フラックス(単位面積・時間に届く太陽電波のエネルギーフラックス)が $10^3$ sfu以上(sfuは太陽フラックス単位、solar flux unitを指し、1sfuは $10^{-22} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$ と定義される。)となる場合に相当する。そのような事象は太陽活動の極大期及び極小期に、地球全体でそれぞれ3.5日に1回及び18.5日に1回の頻度で発生している。基地局辺りでは影響時間帯(日出・日没)を考慮して、それぞれ42日に1回、222日に1回の頻度と見積もられる。

太陽電波バーストの測位衛星-受信機間の通信への影響については、搬送波対雑音比(CN比)の減少が報告されている。2006年12月6日に発生したX6.5フレア('X'や'M'などフレアのクラスについては4.1を参照)に伴う電波バーストでは、GPS(Global Positioning System)のL1信号(1.575GHz)に近い1.4GHzの周波数で $10^6$ sfuに達する非常に強力な電波バーストを観測し、これによりGPS受信機ではL1信号の搬送波対雑音比が最大17dB減少している<sup>(15)</sup>。また、2011年9月24日に発生したM7.1クラスの太陽フレアでも、

1.4 GHz にて  $1.1 \times 10^5$  sfu の電波バーストが発生し、GPS 受信機の L1 信号で 11 dB の減少が観測された<sup>(16)</sup>。このような搬送波対雑音比の減少が起きると、日中の広い範囲で測位に必要な衛星数を捕捉できない状態につながる。

### 3.2 地球大気内の要因で発生する宇宙天気現象

地球大気内の要因で発生し、無線通信に影響する宇宙天気現象として Sporadic E 層とプラズマバブルを紹介する。

#### 3.2.1 Sporadic E 層

Sporadic E 層は、規則的に形成・変動する通常の E 層 (図 2) と異なり、非定常的に高度 100~120 km 付近に現れる電子密度の濃い層である。水平方向の広がり数百 km 未満であり、影響範囲も局所的である。この現象が発生すると、通常時には電離圏を透過する超短波 (VHF) 帯の電波が、電離圏の反射により、見通し範囲を越えて伝搬する (異常伝搬)。そして、伝搬先の地域で同じ周波数帯を使用する無線通信に干渉することがある (図 4)。

Sporadic E 層の発生には季節的・地域的な偏りがあり、大雑把には夏季の中緯度帯で発生する傾向がある<sup>(17)</sup>。日本付近は比較的発生が多く、国内の観測からは 5~7 月にかけて最も多く発生し、1 日のうちでは昼付近と夕方付近に多く発生する傾向が見られる<sup>(18)</sup>。Sporadic E 層の発生や変動要因に関して、太陽活動との結び付きは余りなく、背景にある熱圏大気の流れとの関連が重要と考えられている。詳しい特徴や生成過程については文献 (19) などを参照頂きたい。

Sporadic E 層の無線通信への影響事例として、航空無線標識 (VOR) や無線航法システム (ILS) で使用される VHF 帯の航空無線について、Sporadic E 層による異常伝搬が別エリアの航空無線に干渉する可能性が報告されている<sup>(20)</sup>。

#### 3.2.2 プラズマバブル

プラズマバブルは磁気赤道域の日没後に発生する現象で、F 層下部の不安定性により、電子密度の薄い細かい構造が泡のように上昇して発達したじょう乱である<sup>(21)</sup>。この現象は、人工衛星から地上に信号を伝える極超短波 (UHF) 帯の電波に対して位相や振幅の乱れ (シンチレーション) を引き起こす (図 4)。

プラズマバブルが影響する領域や時期などは次のとおりである。磁気赤道面で発達したプラズマバ

ブルの不規則構造は、地球磁力線に沿って南北の低緯度地域に投影される。このため、プラズマバブルが磁気赤道で高い高度に発達すると、緯度方向にも範囲が拡大し、日本の南部にも到達する。日本南部でのプラズマバブルの発生を調べた例 (文献 (22) の 2.8.1.5. プラズマバブル) によると、太陽活動が活発なほどプラズマバブルの発生頻度が高く、また 1 年の中では春分と秋分で発生頻度が多い。多い時期には、沖縄で一月のうち 40 % 以上の日でプラズマバブルが観測されている。また、プラズマバブルの継続時間は 1 時間以内であることが多いが、まれに 4 時間以上続く場合もある。

プラズマバブルの無線通信への影響事例として、衛星通信回線で使われる L バンド (1.5 GHz) への影響が報告されている<sup>(23)</sup>。太陽活動極大期に一月の 30 % の日において、プラズマバブルによる 20 dB 以上のシンチレーションが観測されている。

## 4

### 社会影響度を考慮した現象規模の基準

宇宙天気現象が発生した際に、現象の強さ・大きさ等の規模を示す数値を知ったとしても、それだけでは重要度を理解しにくい。起きた現象の重要度を把握するためには、その現象規模がどれくらいの発生頻度に相当するか、また社会インフラに対する影響度がどれくらいかといった補足情報が必要である。文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」では、宇宙天気各現象について、その規模と発生頻度及び社会影響度の対応付けを検討しており、結果をハザードマップとして公開した<sup>(22)</sup>。更に、総務省「宇宙天気予報の高度化の在り方に関する検討会」(以下では「総務省検討会」と呼ぶ。) の中では、同ハザードマップも参考として現象規模を示す指標のしきい値を設定し、予警報の発令基準の検討が行われた。本章では、このような動きに関連し、3. で扱った各現象について、規模を示す指標のしきい値と発生頻度、無線通信に対する社会影響度の調査・検討状況を紹介する。なお、発生頻度については多くの宇宙天気現象 (表 2 のうち Sporadic E 層以外) で太陽活動に依存 (極大期でより多く発生) するため、太陽活動サイクル単位で記述する。

#### 4.1 デリリンジャー現象

3.1.1 で紹介したデリリンジャー現象の規模は、太陽フレアによって地球に届く X 線フラックスや、



表3 デリンジャー現象によって 30 dB 以上減衰が起きる電波の周波数範囲（発生頻度は 1 太陽活動サイクル当りの発生数）。各欄の色分けは周波数範囲を示す（無色は周波数の上限が 10 MHz 以下、薄灰色は 10 ~ 30 MHz、灰色は 30 MHz 以上）。

フレアの規模 (発生頻度)	M1 (2000)	M5 (350)	X1 (175)	X10 (8)
太陽高度角 30°	<3 MHz	<6 MHz	<10 MHz	<34 MHz
太陽高度角 60°	<5 MHz	<13 MHz	<18 MHz	<66 MHz

フレア発生時の地球上の位置すなわち太陽の高度角（地平線から測った太陽の角度）に依存する。直接的には D 層の電子密度の増加に依存するが、D 層は定常的に観測されておらず、現象規模を把握するための指標としては利用できない。国際的には、米国 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) や 英国 UKMO (United Kingdom Meteorological Office) などの各国の宇宙天気予報機関や ICAO は定常的に観測されている太陽フレアの規模をデリンジャー現象の規模の指標として用いており、ここでは国際標準に倣って紹介する。太陽フレアの規模は、地球静止軌道で計測された波長 0.1-0.8 nm の X 線フラックス量を段階で示したものである。(C, M, X はそれぞれ  $10^6$ ,  $10^5$ ,  $10^4$  Wm<sup>2</sup> を単位とし、数字はその何倍であるかを示す。)

表3 は太陽フレアの規模とその発生頻度（米国 NOAA の統計による<sup>(24)</sup>）、及び文献(9)から推定される電波の吸収量を対応付けたものである。電波の吸収量として、30 dB 以上の吸収が起きる電波の周波数範囲を示す。M1 クラスのフレアが発生すると、太陽高度角 30° 以下の領域では短波帯（3~30 MHz）の吸収は 30 dB に満たないが、太陽高度角 60° 以上では短波の低い周波数域で 30 dB 以上の吸収が起きる。つまり、太陽高度角が高い低緯度の正午付近でのみ短波の低い周波数で顕著な減衰が起きる。X クラス以上では正午・低緯度を中心に昼側の広い範囲において幅広い周波数域の短波が減衰して使えなくなる。米国 NOAA の R スケール (Radio Blackout) では M1, M5, X1, X10 クラスのフレアを、それぞれ ‘Minor’, ‘Moderate’, ‘Strong’, ‘Severe’ と位置付けている。総務省検討会では X1, X10 フレアをしきい値に設定している。

## 4.2 極冠吸収

3.1.2 で紹介した極冠吸収の現象規模は降り込む高エネルギー粒子フラックスに依存する。した

表4 極冠吸収によって 10dB または 30dB 以上減衰が起きる電波の周波数範囲（プロトンフラックスは静止軌道上で 10MeV 以上の粒子を計測したもの。発生頻度は文献(25)に基づく 1 太陽活動サイクルあたりの発生数）。各欄の色分けは表3と同じ。

プロトン量 (発生頻度)	10 pfu (57)	10 <sup>2</sup> pfu (26)	10 <sup>3</sup> pfu (10)	10 <sup>4</sup> pfu (2)
10dB 以上 減衰	<3.3MHz	<7.1MHz	<15MHz	<33MHz
30dB 以上 減衰	<1.6MHz	<3.4MHz	<7.3MHz	<16MHz

がって、静止軌道で定常的に観測されているプロトンフラックスは良い指標になる。表4 は米国の静止気象衛星シリーズ GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) が測定している 10 MeV 以上のプロトンフラックス（単位 pfu は cm<sup>2</sup>・sr<sup>-1</sup>・s<sup>-1</sup>）と、極冠吸収による極域昼側での短波の吸収量の対応を示す（文献(11)の計算式を使用）。表4 からプロトンフラックスが 10<sup>2</sup> pfu くらいから低い周波数の短波で減衰が起きる。10<sup>4</sup> pfu のプロトン現象が発生すると短波全域で減衰する。参考までにプロトンフラックスが 10, 10<sup>2</sup>, 10<sup>3</sup>, 10<sup>4</sup> pfu となる状況は、米国 NOAA の S スケール (Solar Radiation Storm)<sup>(24)</sup> の ‘Minor’, ‘Moderate’, ‘Strong’, ‘Severe’ に対応する。総務省検討会ではプロトンフラックスのしきい値を 10<sup>3</sup> 及び 10<sup>4</sup> pfu に設定している。

## 4.3 電離圏嵐

3.1.3 で紹介した電離圏嵐のうち、通信への影響が大きい負相嵐の規模、発生頻度、及び具体的な通信回線への影響を対応付けたものが表5である。負相嵐の規模として、ICAO と同様にイオノゾンド（鉛直電波伝搬による電離圏観測機）で観測される最大使用可能周波数 (MUF: Maximum Usable Frequency) の減少を用いている。通信回線への影響の評価に際して短波伝搬シミュレータ VOACAP<sup>(26)</sup> を使用し、東京と各地点を結ぶ短波通信回線について、使用可能な周波数域（最大使用可能周波数 - 最小使用可能周波数）及び 1 日の中で通信が可能な時間を調査した。通信先として、札幌（東京との距離 832 km）、鹿児島（同 965 km）、ロンドン（同 9,564 km）、シカゴ（同 10,135 km）を選択した。この結果から負相嵐で MUF が 30 % 減少すると、国内外との通信可能な周波数範囲が 2~4 割程度減少することが示唆される。更に、MUF が 50 % 減少のときは、通信可能な周波数範囲が 5~6 割程度減少し、通信可能な時間も 1~6

表 5 静穏時と電離圏嵐時 (MUF30 % 減, 50 % 減) における東京と各地点間の短波通信の使用可能周波数域を示す (1日の平均)。スラッシュ (/) に続く数字は1日のうちの通信可能時間を示す。電離圏嵐の発生頻度は1太陽活動サイクル当りの発生数を示す<sup>(27)</sup>。

電離圏嵐の規模 (発生頻度)	静穏時	MUF 30 % 減 (200)	MUF 50 % 減 (56)
東京 - 札幌	5.3 MHz /22 時間	4.0 MHz /24 時間	2.5 MHz /20 時間
東京 - 鹿児島	6.0 MHz /21 時間	4.0 MHz /19 時間	2.4 MHz /15 時間
東京 - ロンドン	1.7 MHz /6 時間	1.0 MHz /5 時間	0.7 MHz /4 時間
東京 - シカゴ	1.6 MHz /7 時間	1.1 MHz /7 時間	0.7 MHz /6 時間

時間程度減少することが示されている。参考までに、ICAO では MUF が 30 % 減少, 50 % 減少する状況について, ‘Moderate’, ‘Severe’ として扱っている。総務省検討会でも MUF の 30 % 及び 50 % 減少をしきい値に設定している。

#### 4.4 太陽電波バースト

3.1.4 では太陽電波バーストの影響として、携帯電話回線と衛星測位受信機の雑音増加の例を紹介した。前者についてはまだ報告例が少ないため、ここでは後者のみ考慮する。表 6 は太陽電波バーストの規模と発生頻度、及びそれがもたらす GPS の L1 信号の搬送波対雑音比の減少度の対応を示す。発生頻度は、米空軍のレーダデータの記録から推定したものであり<sup>(28)</sup>、L1 信号の周波数に近い 1.4 GHz の太陽電波フラックスについての数字である。米空軍データには漏れがかなりあると考えられるため、発生頻度は下限値である。GPS の L1 信号の搬送波対雑音比の減少については文献 (15) の計算式に基づく。なお、各国の宇宙天気予報機関や ICAO などで、太陽電波バーストの規模について定めたスケールは現状では存在しない。今後、太陽電波バーストについてしきい値を設定し、警報を発信するためには、定常的な太陽電波フラックスの観測と社会影響度の検証が必要である。また携帯電話回線への影響については、過去の報告例は現在の回線より周波数が低いため、現在の周波数に対応した新たな検証が必要である。

#### 4.5 Sporadic E 層

3.2.1 で紹介した Sporadic E 層については、何を指標として現象の規模を示すか、まだ検討する必要がある。前述のハザードマップ<sup>(22)</sup>では、東京・国分寺のイオノゾンデ観測の統計から一定距離を異

表 6 太陽電波バーストによる GPS の L1 信号の搬送波対雑音比の減少。括弧内は 10 年間での現象の発生数の推定を示す (下限値)。

太陽電波フラックス (発生頻度)	10 <sup>4</sup> sfu (12)	10 <sup>5</sup> sfu (1.9)	10 <sup>6</sup> sfu (0.3)
C/N0 の減少	1.8 dB	7.8 dB	17 dB

常伝搬する頻度を導いたが、実際の航空無線の異常伝搬はそれより多く観測されており<sup>(20)</sup>、異常伝搬を起こした Sporadic E 層の発生地点とイオノゾンデによる観測地点が必ずしも一致していないことを示唆している。したがって、今後、現象規模の指標としきい値を設定するにあたり、日本近傍の広域にわたって Sporadic E 層の発生を把握する必要がある。このためには、例えば情報通信研究機構が有する国内 4 か所のイオノゾンデから鉛直電波伝搬の観測だけでなく、斜め伝搬の観測の利用によって観測範囲を広げることや、モデルを使用して Sporadic E 層の発生範囲の推移を推定することなどが有用と考えられる。

#### 4.6 プラズマバブル

3.2.2 で紹介したプラズマバブルについても現象の規模を示す指標及びしきい値が未整備であり、今後の検討が必要である。前述のハザードマップ<sup>(22)</sup>では、国内南部でのプラズマバブルの検出にあたり、GPS 受信データから計算される ROTI (Rate of TEC Index) を使用した。一方、観測点の数は少ないが、Lバンドの電波についてセンチレーションの大きさ (S4 指標) を導出できる衛星測位受信機もある。したがって、こうした広域で測定できる ROTI や電波への影響を直接的に示す S4 の組合せにより、現象の規模やしきい値を設定することなどが考えられる。

## 5 おわりに

本稿では無線通信に影響する宇宙天気現象について解説した。具体的な現象として、デリンジャー現象、極冠吸収、電離圏嵐、太陽電波バースト、Sporadic E 層、プラズマバブルについて紹介し、それぞれの電波への影響を解説した。また、各現象の規模と無線通信への影響度の対応のうち、現時点で策定済みのものについて解説した。一部の現象については、規模の定義が未定であり、更なる検討が必要である。また、策定済みのしきい値についても、検証事例の追加や関係者からの意見などによ

り、適宜更新を図ることが望ましい。

## ■ 文献

- (1) R. Kataoka, D. Shiota, H. Fujiwara, H. Jin, C. Tao, H. Shinagawa, and Y. Miyoshi, “Unexpected space weather causing the reentry of 38 Starlink satellites in February 2022,” *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 12, no. 41, Dec. 2022.
- (2) 総務省, 国立研究開発法人情報通信研究機構, “国際民間航空機関 (ICAO) に対して宇宙天気情報の提供を開始。” <https://www.nict.go.jp/press/2019/11/07-2.html>
- (3) Solar Influences Data Analysis Center, Royal Observatory of Belgium. <https://www.sidc.be/>
- (4) Solar Dynamics, Observatory (SDO), National Aeronautics and Space Administration (NASA). <https://sdo.gsfc.nasa.gov/>
- (5) International Reference Ionosphere. <http://irmodel.org/>
- (6) 大塚雄一, 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, 2-4 電離圏変動 2-4-1 電離圏中の電波の伝搬, 名古屋大学, May 2021.
- (7) 総務省, “周波数帯ごとの主な用途と電波の特徴。” <https://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/summary/>
- (8) ITU-R handbook, Ionosphere and its effects on radiowave propagation, 1998.
- (9) C. Tao, M. Nishioka, S. Saito, D. Shiota, K. Watanabe, N. Nishizuka, T. Tsugawa, and M. Ishii, “Statistical analysis of short-wave fadeout for extreme space weather event estimation,” *Earth Planets and Space*, vol. 72, no.1, article id. 173, Dec. 2020.
- (10) V. Kurt, A. Belov, H. Mavromichalaki, and M. Gerontidou, “Statistical analysis of solar proton events,” *Ann. Geophys.*, vol. 22, no. 6, June 2004.
- (11) H. H. Sauer and D. C. Wilkinson, “Global mapping of ionospheric HF/VHF radio wave absorption due to solar energetic protons,” *Space Weather*, vol. 6, no. 12, Dec. 2008.
- (12) Committee on the Societal and Economic Impacts of Severe Space Weather Events, Severe Space Weather Events Understanding Societal and Economic Impacts, National Research Council, 2009.
- (13) 品川裕之, 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, 2-4 電離圏変動 2-4-3 磁気嵐による電離圏変動, 名古屋大学, May 2021.
- (14) D. E. Gary, L. J. Lanzerotti, G. M. Nita, and D. J. Thomson, “Effects of Solar Radio Bursts on Wireless Systems,” In *Effects of Space Weather on Technology Infrastructure*, I. A. Daglis, ed, NATO Science Series II: Mathematics, Physics and Chemistry, vol. 176, Springer, Dordrecht.
- (15) A. P. Cerruti, P. M. Kintner Jr., D. E. Gary, A. J. Mannucci, R. F. Meyer, P. Doherty, and A. J. Coster, “Effect of intense December 2006 solar radio bursts on GPS receivers,” *Space Weather*, vol. 6, no. 10, Oct. 2008.
- (16) V. Sreeja, M. Aquino, and K. de Jong, “Impact of the 24 September 2011 solar radio burst on the performance of GNSS receivers,” *Space Weather*, vol. 11, pp. 306–312, May 2013.
- (17) D. L. Wu, C. O. Ao, G. A. Haji, M. de la Torre Juarez, and A. J. Mannucci, “Sporadic E morphology from GPS-CHAMP radio occultation,” *J. Geophysical Research*, vol. 110, Jan. 2005.
- (18) 陣 英克, “宇宙天気入門 電離圏観測データの読み方編,” *CQ ham radio 誌*, CQ 出版社, 2015 年 3 月号.
- (19) 津田卓雄, 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, 2-4 電離圏変動 2-4-7 スポラディック E 層, 名古屋大学, May 2021.
- (20) J. Sakai, K. Hosokawa, I. Tomizawa, and S. Saito, “A statistical study of anomalous VHF propagation due to the sporadic-E layer in the air-navigation band,” *Radio Science*, vol. 54, no. 9, pp. 426–439, May 2019.
- (21) 大塚雄一, 2 太陽地球圏環境予測オープン・テキストブック, 2-4 電離圏変動 2-4-6 プラズマバブル, 名古屋大学, May 2019.
- (22) “科学提言のための宇宙天気現象の社会への影響評価,” 文部科学省新学術領域研究「太陽地球圏環境予測 (PSTEP)」(2015-2019) 報告書. <https://www2.nict.go.jp/spe/benchmark/>
- (23) S. Basu, E. MacKenzie, and S. Basu, “Ionospheric constraints on VHF/UHF communications links during solar maximum and minimum periods,” *Radio Sci.*, vol. 23, no. 3, pp. 363–378, May 1988.
- (24) NOAA Space Weather Scales, Space Weather Prediction Center, National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.swpc.noaa.gov/noaa-scales-explanation>
- (25) M. J. Birch and B. J. I. Bromage, “Sunspot numbers and proton events in solar cycles 19 to 24,” *J. Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, vol. 236, Sept. 2022.
- (26) Voice of America Coverage Analysis Program VOACAP. <https://www.voacap.com/>
- (27) R. A. D. Fiori, V. V. Kumar, D. H. Boteler, and M. B. Terkildsen, “Occurrence rate and duration of space weather impacts on high-frequency radio communication used by aviation,” *J. Space Weather Space Clim.*, vol. 12, no. 21, June 2022.
- (28) O. D. Giersch, J. Kennewell, and M. Lynch, “Solar radio burst statistics and implications for space weather effects,” *Space Weather*, vol. 15, no. 11, pp. 1511-1522, Nov. 2017.

(2023 年 9 月 5 日受付, 11 月 20 日再受付)

## 陣 英克

2004 東大大学院理学系研究科地球惑星科学科博士課程了。2004 独立行政法人情報通信研究機構有期研究員。2013 国立研究開発法人情報通信研究機構主任研究員。大気圏・電離圏シミュレーションモデルの構築に従事。

## 教育委員会



# 小形光通信システムSOLISSの開発と 低軌道一地上間光通信実証

The Development of the Small Optical Terminal, SOLISS and the Experimentation of the Optical Link between Low-orbit and the Ground

小松宏光 Hiromitsu Komatsu<sup>†</sup> 太田伸二 Shinji Ohta<sup>†</sup> 山添弘晃 Hiroaki Yamazoe<sup>†</sup> 澤田弘崇 Hirotaka Sawada<sup>††</sup>  
神田大樹 Daiki Koda<sup>††</sup> 池田俊民 Toshitami Ikeda<sup>††</sup> 岩本匡平 Kyohei Iwamoto<sup>†</sup>

## Summary

光による衛星間や地上との大容量リアルタイム通信を目的とし、ソニーコンピュータサイエンス研究所（ソニー CSL）と宇宙航空研究開発機構（JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency）が光ディスク技術の応用によって共同開発した小形光通信システム「SOLISS」は、2020年3月に超小形衛星搭載用の光通信機器としてEthernetによる双方向通信に世界で初めて成功した。本論文では、SOLISS（Small Optical Link for ISS）の開発、光地上局との光通信実証について解説する。

## Key Words

自由空間光通信, レーザ通信, 前方誤り訂正技術, 国際宇宙ステーション, 光ディスク技術

## 1 宇宙通信を取り巻く環境

現在の宇宙市場はこの10年間で急速に拡大しており、2023年現在、約50兆円以上の市場規模があるとされている<sup>(1)</sup>。特に衛星の小形化や打上げの低価格化を背景に、通信サービスや地球観測を目的とした低軌道での衛星コンステレーションの利用が加速しており、宇宙通信は非常に大きな盛り上がりを見せている市場である。図1に衛星通信のアプリケーション例を示す。

2020年頃からStarlink、OneWebなどの衛星インターネットサービスを提供する企業のメガコンステレーション衛星の打上げが爆発的に増加しており、2023年現在Starlinkは4,000機以上<sup>(2)</sup>、OneWebは600機以上<sup>(3)</sup>の衛星を打上げ済みで、Starlinkは既にサービスを100万人以上のユーザーに提供している<sup>(4)</sup>。また最新の統計によると、2022年の衛星の用途内訳は通信衛星が80%（うち75%がStarlinkとOneWeb）、リモートセンシング衛星が10%、技術開発用衛星が7%、科学ミッション衛星が1%、その他/不明が2%という内訳となっており<sup>(5)</sup>、通信衛星を使ったデータ通信事業や宇宙データの利活用の需要が大きいことが

分かる。

今後ますます打上げが見込まれる衛星だが、ここで問題となってくるのが通信に必要な無線周波数のひっ迫である。リモートセンシングに用いられるカメラ画像の高解像度化や大容量衛星インターネットサービスにより通信の大容量化の要求が見込まれるが、通信容量の比較的大きい周波数帯の申請、とりわけKuバンド・Kaバンドの周波数の割当において既存事業との周波数共用調整が容易ではない状況となっている<sup>(6)</sup>。また、今後更なる通信容量の増大が予想されるため、広帯域化による大容量通信が可能なQバンドやVバンドの利活用も検討されている<sup>(7)</sup>。日本国内においてもBeyond5G/6G構想が提唱され、非地上系ネットワーク（NTN: Non-Terrestrial Network）技術を用いた陸海空をシームレスにつなぐ通信カバレッジ拡張、10 Gbit/s以上の通信を実現する高速化・大容量化が求められている<sup>(8)</sup>。

そのような背景においてライセンス制限がなく、小形のアンテナで大容量通信が実現できる衛星用光通信への注目が高まっている。宇宙光通信はその広帯域性から大容量通信が可能である。例えば光通信波長帯のCバンド1,530-1,565 nmの帯域は約4,382 GHzである。

また、レーザー光の高い指向性により、送信先に高い効率で伝送できるため省電力化することが可能であり、発生電力の小さい200 kg以下のマイクロサット級の衛星にも搭載することができることが大

<sup>†</sup> ソニーコンピュータサイエンス研究所, 東京都 Sony Computer Science Laboratories, inc., Tokyo, 141-0022 Japan

<sup>††</sup> 宇宙航空研究開発機構, 調布市 Japan Aerospace Exploration Agency, Chofu-shi, 182-8522 Japan

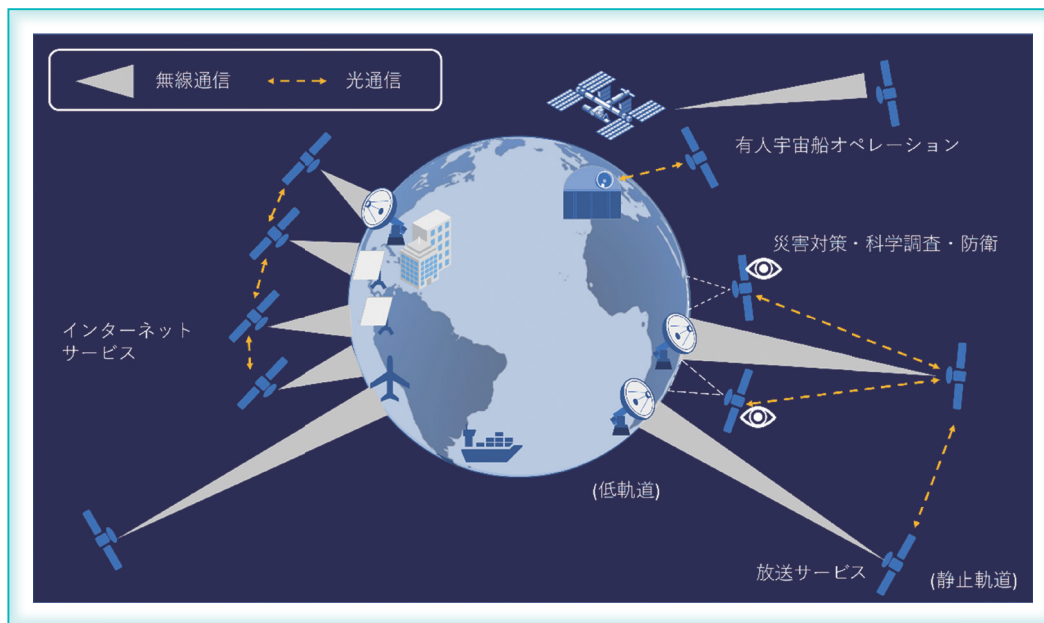


図1 様々な衛星通信のアプリケーション

きなメリットとなる。

宇宙光通信は日本が世界に先駆けて開発実証を行ってきた歴史がある。1994年に打ち上げられた技術試験衛星6型(ETS-VI: Engineering Test Satellite 6)に搭載された光通信端末(LCE: Laser Communication Equipment)が衛星-地上局間光通信に世界で初めて成功したのをはじめとし<sup>(9)</sup>、2005年に打ち上げられた光衛星間通信実験衛星「きらり」(OICETS: Optical Interorbit Communications Engineering Test Satellite)に搭載された光通信端末(LUCE: Laser Utilizing Communication Equipment)<sup>(10)</sup>は低軌道周回衛星と光地上局を結ぶ通信の実験や、世界で初めて双方向の光衛星間通信に成功した。また、2014年に打ち上げられた50 kg級超小形衛星(SOCRATES: Space Optical Communications Research Advanced Technology Satellite)に搭載された小形光通信機器(SOTA: Small Optical Transponder)は2017年に量子通信の実証実験に世界で初めて成功した<sup>(11)</sup>。今後は2020年11月に打ち上げられた光衛星間通信システム(LUCAS: Laser Utilizing Communication System)や<sup>(12)</sup>、2025年度に打上げ予定の技術試験衛星9号機(ETS-9: Engineering Test Satellite-9)の活用が期待されている<sup>(13),(14)</sup>。

海外においては米国航空宇宙局(NASA: National Aeronautics and Space Administration)のLaser Communications Relay Demonstration(LCRD)<sup>(15)</sup>や欧州宇宙機関(ESA: European Space Agency)のEuropean Data Relay Satellite System(EDRS)シリーズ<sup>(16)</sup>に代表される静止軌

道(GEO: Geostationary Earth Orbit)リレーシステムへの活用、米宇宙開発局(SDA: Space Development Agency)の軍事用低軌道衛星コンステレーション(PWSA: Proliferated Warfighter Space Architecture)計画では、数百機の衛星コンステレーションに光通信端末を採用したミサイル防衛システム構想が進められている<sup>(17)</sup>。また、NASA及びMITリンカーン研究所(MIT Lincoln Laboratory)は2022年にジンバル機構を持たないCubesatに搭載した光通信端末による光地上局への200 Gbit/sの通信レートでのデータダウンリンクを成功させた<sup>(18)</sup>。更にNASAの計画する次期月探査ミッションArtemis IIでは、有人月面飛行船Orionからのデータ送信にレーザ通信装置を搭載し、地上へハイビジョン映像を伝送する計画である<sup>(19)</sup>。

一方で宇宙光通信には図2に示すような課題もある。一番の大きな課題は指向精度要求の厳しさである。例えば高度400 kmの低軌道から地上にKaバンドで通信する場合、25 GHz、直径1.5 mのアンテナでは全角約5 mrad(約0.29度)の広がり角、地上でのフットプリントは約2 kmになるが、光通信の場合はビーム径2 cm、1.55 μmの波長のガウスビームを想定すると、ビームの広がり角は全角で約50 μrad(約1,000分の2.9度)、地上でのフットプリントは20 m程度となり、光は無線と比較して非常に厳しい指向精度を実現する必要がある。

また、低軌道-地上間のような大気が存在する通信路においては、温度変化により空気の屈折率が変

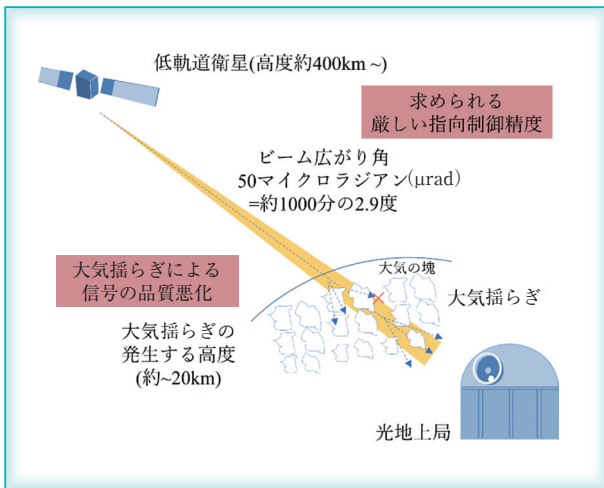


図2 宇宙光通信の課題

化することで大気揺らぎが発生し、光が経路中で吸収・散乱・屈折されることにより光の減衰や散乱、波面の乱れが発生する<sup>(20)</sup>。光の屈折が時間的・空間的に変化することによって、ダイナミックに強度変動が発生するシンチレーションと呼ばれる現象や、屈折による光の到来角の変動が起きることで受信機側においてビット誤りが発生し、通信の品質が悪化してしまう。そのような状況でも安定して大容量通信を成立させる技術の開発が望まれている。

## 2 ソニーの光ディスク技術

このような宇宙光通信を実現するための指向制御技術や信号処理技術といった要素技術は、CDやDVD、Blu-ray ディスクなど身近な存在としてなじ

み深い光ディスク装置にも採用されている。図3に光ディスク再生装置の構造を示す。光ディスク装置は、らせん状の溝を持つディスクをモータによって回転させた状態でレーザ光を照射し、その反射光を読み取ることで記録データを再生する機械である。この溝は案内溝(グループ)と呼ばれ、集光したレーザ光、すなわち光スポット位置がこれに沿うように制御することで、データを再生。このようにしてできたディスク1周をトラックと呼ぶ。光ディスク装置にディスク再生の指示を行うと、制御装置は回転制御系を通じてスピンドルモータを回転させる。ディスクの偏心や取付傾き等により、光ディスクの $\mu\text{m}$ オーダ、サブ $\mu\text{m}$ オーダで刻まれたトラック間隔よりも大きなトラック方向の変位やフォーカス方向の変位が起きる。そこで制御装置は光学ユニットに内蔵されたレーザを点灯させ、ディスクからの反射光の変化からこの変位量を読み取り、粗移動機構・精追尾機構を通じて光スポット位置制御を行うことで三次元的な位置のずれを補正しながら、トラック上に記録されているデータを再生する。一般的に販売されているディスクはカートリッジに覆われておらず、ほこりや傷による読み取り誤りが発生するため、誤り訂正の技術が必要となる。このように光ディスク技術と宇宙光通信技術には共通点が多い。例えば、ディスクの回転によって生じる三次元的な位置、角度ずれの補正は低軌道衛星間あるいは地上との光通信においては、衛星の姿勢誤差や大気による光の屈折による角度ずれの課題に対応する。また大気揺らぎによるビット誤りは

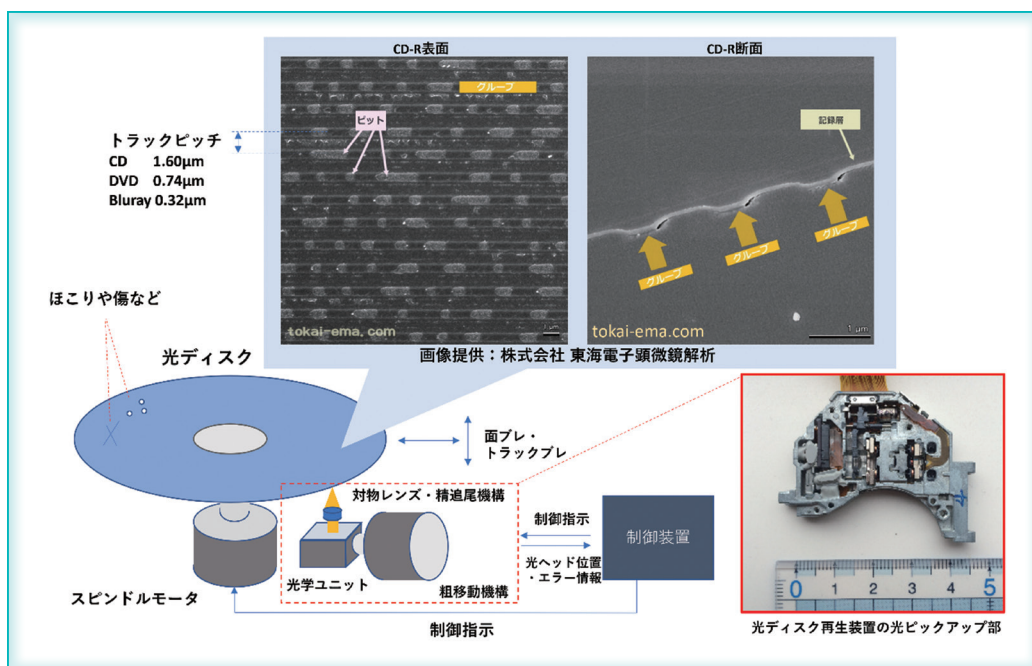


図3 光ディスク再生装置の構造

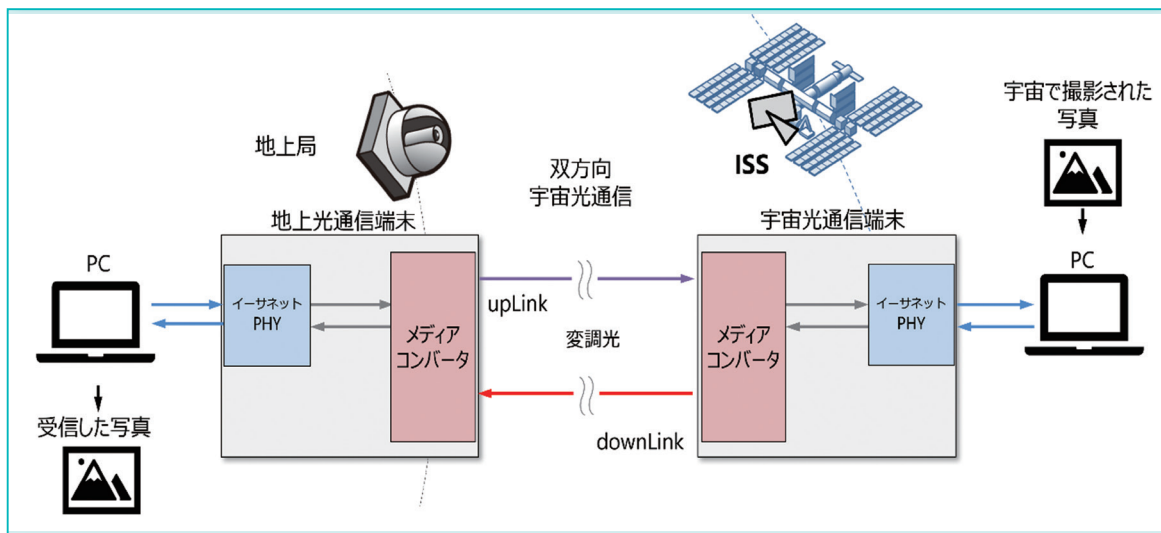


図4 宇宙光通信の技術実証の実験概要

ディスクのほこりや傷による読出し誤りと共通する課題となる。

特に、光ディスク技術を宇宙光通信に応用するメリットとして、光ディスク技術が大量生産を前提とした民生品ベースの技術であることが挙げられる。宇宙光通信の端末はこれまで主に各国の宇宙機関がそれぞれのミッションに応じて特注品として開発を行ってきた。一方でメガコンステレーション時代における通信衛星に求められる端末は量産可能な光通信端末である。そこで民生品技術をベースとした量産可能な宇宙光通信技術の確立を目指し、ソニー株式会社と JAXA 宇宙探査イノベーションハブは2016年から共同研究を開始した。翌2017年からはソニー CSL が長距離空間大容量データ通信を目的とする小形光通信システムを JAXA 宇宙探査イノベーションハブと共同開発し、国際宇宙ステーション (ISS: International Space Station) を用いて軌道上実証を行った。

アコンバータで電気信号に変換され、イーサネット通信データとして送信先の PC に届く。

ISS は秒速約 7.7 km で飛行しており、通信区間においては常に光地上局のある一点を狙い続ける必要がある。また地上と ISS の高度約 400 km の間には大気層があり、前述した大気揺らぎの影響を受ける。そのような状況下においても安定的なデータの送受信を実現することが本ミッションの目的である。本実証を実行するため、ソニー CSL と JAXA は共同で「SOLISS」と呼ばれる光通信端末を開発し、SOLISS を ISS の「きぼう」日本実験棟 (以下「きぼう」と称する。) の中形曝露実験アダプタ (i-SEEP: IVA-replaceable Small Exposed Experiment Platform) に接続して軌道上での実証を行った。SOLISS の外観と主要な諸元を図5、表1に示す。

SOLISS は直接変調 - 直接検波 (IM-DD:

### 3 小形光通信システム SOLISS

光ディスク技術をベースとした宇宙光通信の技術実証のコンセプトを図4に示す。光ディスク技術を搭載した光通信システムを ISS に搭載し、光地上局との双方向光通信により、それぞれに接続されている PC 間のイーサネットデータ通信を実現することで宇宙光通信端末のフィジビリティ検証を行う。各 PC のイーサネットデータは「メディアコンバータ」と呼ばれる光通信端末内の機能により一度変調光に変換され、地上と ISS の間 400~1,000 km の空間を伝搬して送信先に到達する。到達した光は送信先の光受信機を通して再び送信先のメデイ

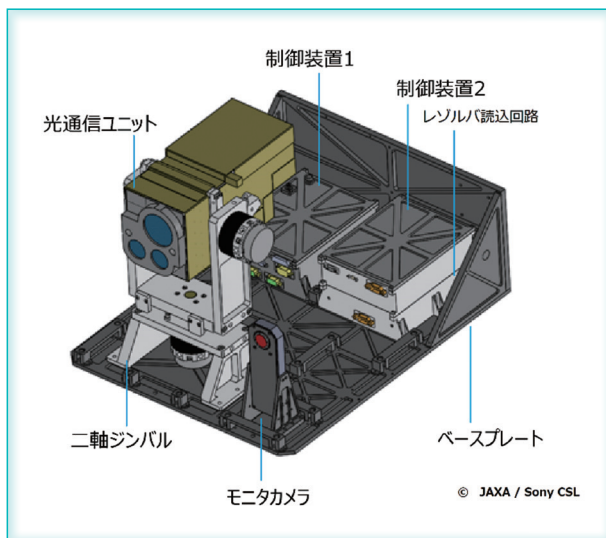


図5 SOLISS の外観と各モジュール名

表 1 SOLISS の主要諸元

項目	内容
データレート	チャンネルデータレート 150 Mbit/s ユーザデータレート 100 Mbit/s
ユーザデータプロトコル	イーサネット /100BASE-TX
変調方式	IM-DD/NRZ
波長	Tx 1,550 nm / Rx 1,565nm
平均出射パワー	最大 500 mW
質量	9.8 kg
寸法	295 × 356 × 436 mm
シンバル角度範囲	アジマス： + 45° ～ - 65° エレベーション： + 55° ～ - 65°
ポインティング精度	39.2 μrad

Intensity Modulation/ Direct Detection) 方式で光に変換された 100 Mbit/s のイーサネット信号を双方向で送受信可能な小形光通信システムである。SOLISS は光通信ユニット (OCU: Optical Communication Unit), 制御装置 1 (CU1: Control Unit 1), 制御装置 2 (CU2: Control Unit 2), 二軸ジンバル, モニタカメラ, それらを締結するベースプレートから構成されている。

SOLISS のシステム構成を図 6 に示す。OCU は IM/DD 方式で変調されたレーザ光の出射及び受信光のデコード処理, 捕捉追尾に必要なセンサのデータ処理を担う。CU1 はテレメトリー・コマンド通信及びレーザデバイスの制御を担う。CU2 は全天球撮影可能なモニタカメラの制御を担当し, 撮影コ

マンドをカメラコントローラに送信することで, 全天球カメラの撮影制御を行う。全天球カメラによって SOLISS の状態や宇宙での環境条件を広い視野で確認することが可能となる。また, CU2 に連結されているレゾルバ読み込み回路は二軸ジンバルの絶対角度を検出するレゾルバから送信される角度情報を取得する。

SOLISS は機能別に分類すると, レーザモジュール, メディアコンバータ, システム制御部, 指向制御機器, 光通信エンドポイントに区分けされる。

レーザモジュールは, CU1 に含まれる分布帰還形 (DFB: Distributed FeedBack) レーザ光源とファイバアンプ (EDFA: Er Doped Fiber Amplifier) により構成され, 波長 1,550 nm, 右回り円偏光の IM-DD 変調光をファイバアンプによって最大 500 mW まで増幅して出射制御を行う。メディアコンバータは, 通信データ受信のためのデータ受信光学ユニットと, 光通信ユニット内に配置されている信号処理部によって構築されている。

メディアコンバータは, 通信データ受信のためのアバランシフォトダイオード (APD: Avalanche PhotoDiode) と, OCU 内に配置されているイーサネット PHY, Signal Process FPGA によって構築され, 変調光とイーサネットデータの変換を行う。

また, システム制御部には System バス系 CPU として System Controller と Sub CPU の二つの CPU が配置され, 主に地上局とのコマンド・テレメトリーの通信処理, ミッション系 CPU

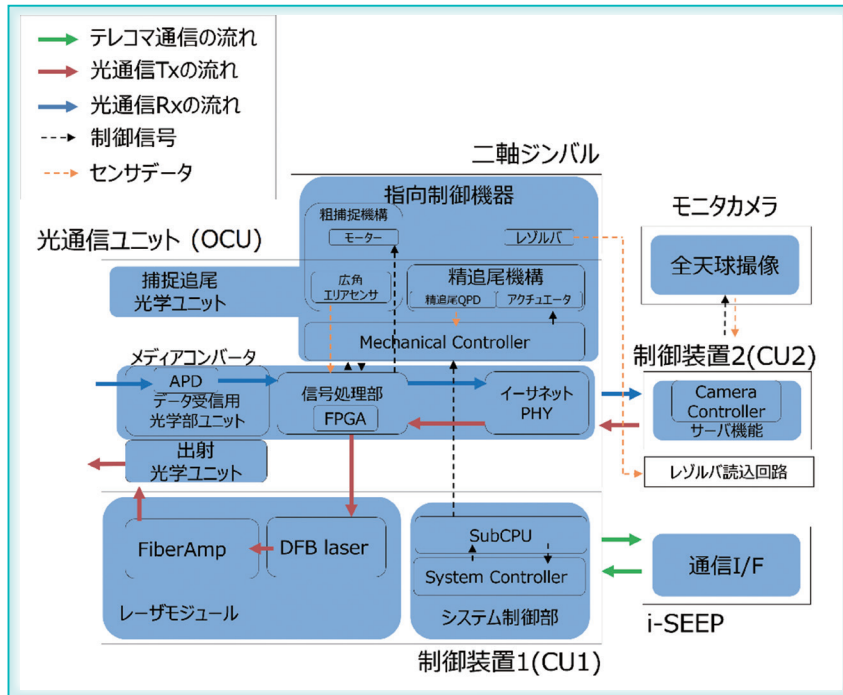


図 6 SOLISS のシステム構成



Mechanical Controller の制御，及び温度制御や加速度センサのセンシング等，機器全体のペリフェラルの管理処理を行う。

指向制御機器はアジマス角度範囲 110 度エレベーション角度範囲 120 度の広可動域と最大角速度 2 deg/s を持つ二軸ジンバルと，精追尾制御を行うためのアクチュエータ，指向制御用センサ，それらを制御する CPU 群により構成される。指向制御用センサはジンバルの絶対角度を検出する宇宙用レゾルバ，及びレゾルバ読み込み回路，光学センサとして OCU の各開口部の光軸上に配置されている広角エリアセンサ，精追尾 QPD (Quadramt Photodiode) によって構成される。また，指向制御用プロセッサとして Mechanical Control CPU，Signal Process FPGA，SubCPU が配置されており，SubCPU によるオープン制御と Mechanical Control CPU・指向制御用センサによるクローズ制御を組み合わせることで粗捕捉・精追尾制御を行う。

光通信エンドポイントは地上との光通信の通信先となるサーバであり，CU2 に含まれる Camera Controller がその役割を担う。Camera Controller は光-イーサネット系通信におけるサーバ機能の役割を果たすと同時にモニタカメラの制御を行う。

実証システムは SOLISS，筑波宇宙センターのコマンド・テレメトリー送受信装置，情報通信研究機構 (NICT: National Institute of Information and Communications Technology) の光地上局によって構成される。SOLISS は ISS の「きぼう」の i-SEEP が有する電力供給及び通信機能，排熱制御機構を利用し，システム運用される。SOLISS と JAXA つくば管制室間のコマンド送信及びテレメトリー受信は i-SEEP の通信機能及び「きぼう」のネットワーク網を介して JAXA / NASA が提供する無線帯 (RF) 通信網を利用して行われる。

光-イーサネット系通信では，SOLISS のメディアコンバータにはイーサネットケーブルを介して Camera Controller がサーバ端末として接続されており，NICT 光地上局望遠鏡にも同様にメディアコンバータがイーサネットケーブルを介してクライアント PC に接続されている。SOLISS の Camera Controller 及び光地上局のクライアント PC にはいずれも固定 IP アドレスが付与されている。光地上局のクライアント PC からメディアコンバータを介して Camera Controller にリクエストの IP パケットを送信し，その応答を受け取ることで，イーサネット光双方向通信の検証を行った。

図 8 に SOLISS のミッションシーケンスのダイアグラムを示す。ISS の位置，姿勢情報は「きぼう」内に設置されているサーバから筑波宇宙センターのコマンド・テレメトリー送受信装置を経由して，NICT 光地上局にあるサーバに転送される。NICT 光地上局は転送された軌道情報を用いて数分後の

## 4 SOLISS と地上間の通信シーケンスと捕捉追尾

SOLISS の実証システムの概要を図 7 に示す。

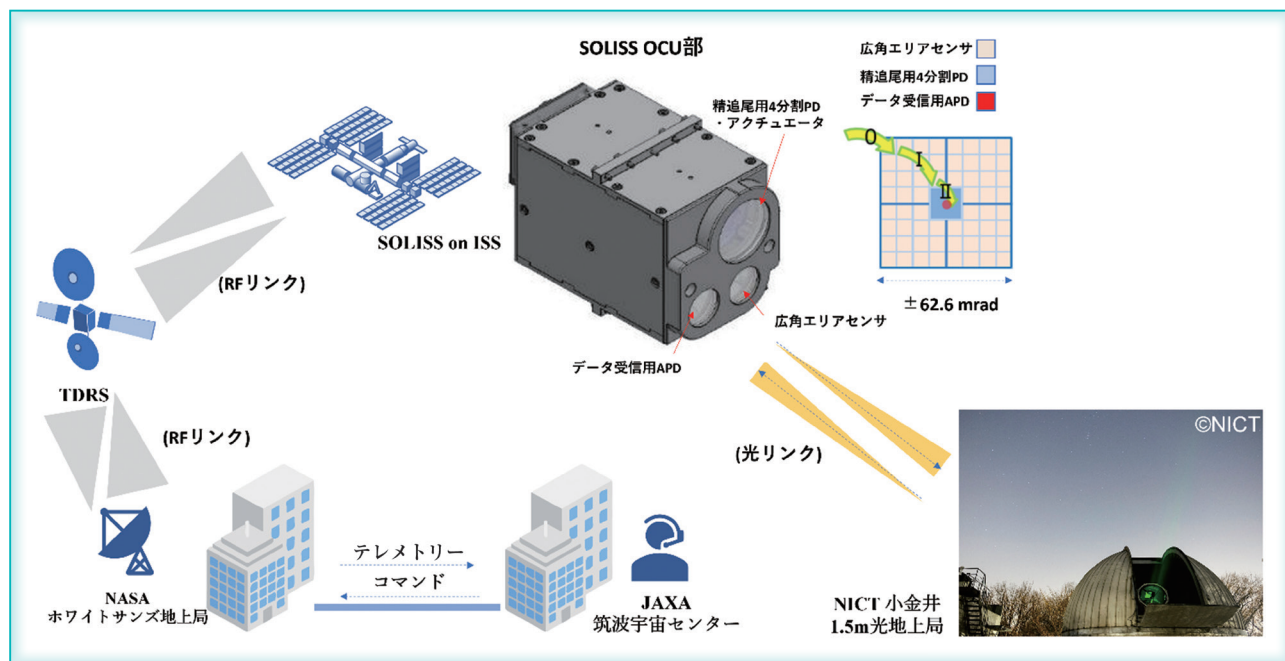


図 7 実証システムの概要

ISSの軌道を予測し、ISSを指向するための角度テーブルの計算を行うことでSOLISSの捕捉・追尾を実現する。同様にSOLISSも「きぼう」船内に設置されたサーバから得られたISSの位置・姿勢情報を用いて光地上局を指向するための角度テーブルの計算を行う。

ミッションの実行タイミングはISSが日本上空を飛来する時刻に合わせて設定される。光地上局が捕捉可能なISSとの距離と望遠鏡の仰角をあらかじめ計算し、光地上局がレーザ発光を行うタイミングを設定する。また、ISSクルーへの安全上の配慮からSOLISSからのレーザ光の出力には複数の制御コマンドが必要となり、オペレーションに時間を要するため、捕捉追尾開始よりも前に送信光を出力した状態にしておく。

SOLISSはミッション時刻になると計算された角度テーブルに従って捕捉オープン制御を開始し、光地上局からの送信光の受光を待つ。光地上局も軌道予測テーブルに基づいて捕捉オープン制御を開始し、望遠鏡が一定の仰角以上になると2台のEDFAから送信光の出射を開始する。光地上局の送受信制御装置には望遠鏡光軸に調整された平均5W出力のEDFAレーザが2台接続されており、いずれも望遠鏡の駆動系とは独立して光行差補正量を加えた制御が行えるよう、圧電素子によって微細な位置制御を可能にするピエゾステージ上に配置されている。また、光地上局望遠鏡には高度軸上のナスミス焦点位置に光学測定装置を設置するための荷台(ナスミス台)が付属されており、その上に受信光学系及び送受信制御装置が配置されている。

光地上局望遠鏡がSOLISSを追尾する一方、

SOLISSは光地上局から到来するレーザ光によって捕捉追尾制御を行う。SOLISSはまず $\pm 62.6$  mradの視野を持つ広角エリアセンサで地上からの受信光を捕捉する。SOLISSは捕捉した受信光をジンバルによるPID制御によってエリアセンサ中心に引き込むフィードバック制御を行い(フェーズ0)、 $\pm 1.5$  mradの視野を持つ精追尾QPD及びアクチュエータによって精追尾制御を行う(フェーズI)。エリアセンサ、精追尾QPDの中心には視野 $\pm 1$  mradのデータ受信用のAPDが設置されており、APDで受信した変調信号はメディアコンバータに伝送され、そこでデコードされたデータはイーサネット信号としてSOLISS内部のサーバに送信される(フェーズII)。同様に光地上局望遠鏡に入射したSOLISSからのレーザ光は受信光学系を通してメディアコンバータへ伝送され、SOLISSと同様にデコードされたデータをイーサネット信号としてクライアントPCに送信される。SOLISS、光地上局双方でリンクが確立するとイーサネット双方向通信が開始される。本実証ではイーサネット通信路において双方向のpingの送信、及び軌道上でモニタカメラが撮像した画像データをJPEGのRTP(Real-time Transport Protocol)ペイロードフォーマット(RFC2435)<sup>(21)</sup>形式で地上側クライアントPCに送信する。

## 5 SOLISSの前方誤り訂正と信号処理技術

光ディスクでは、ディスクに付着した汚れや傷により再生信号レベルが一時的に低下することで連続

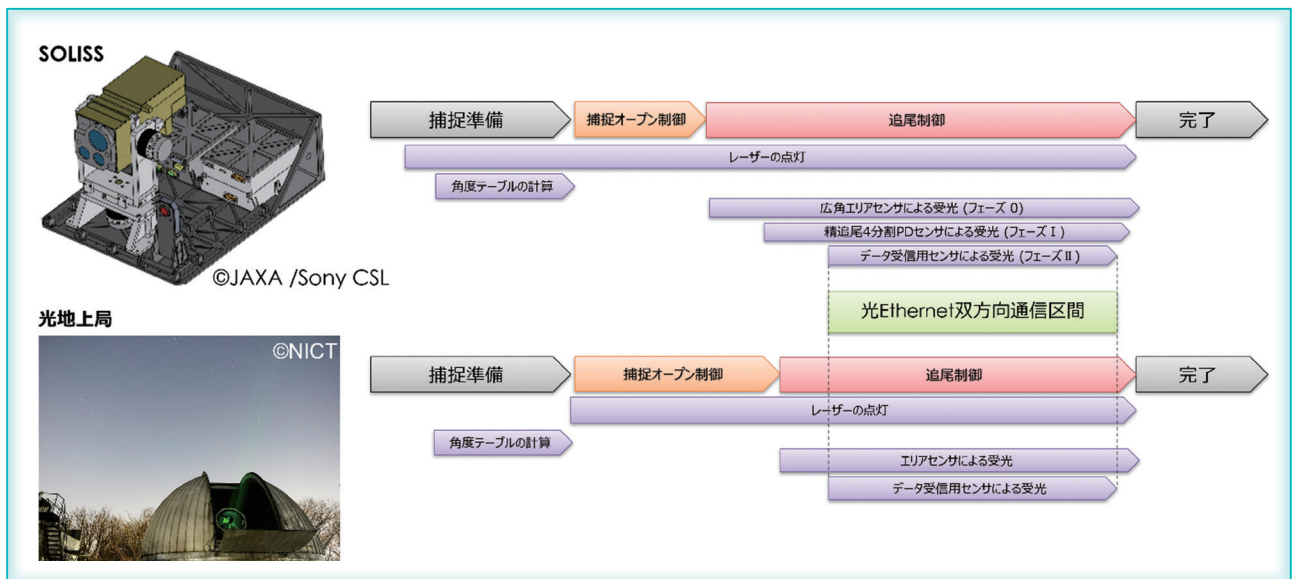


図8 ミッションシーケンスのダイアグラム

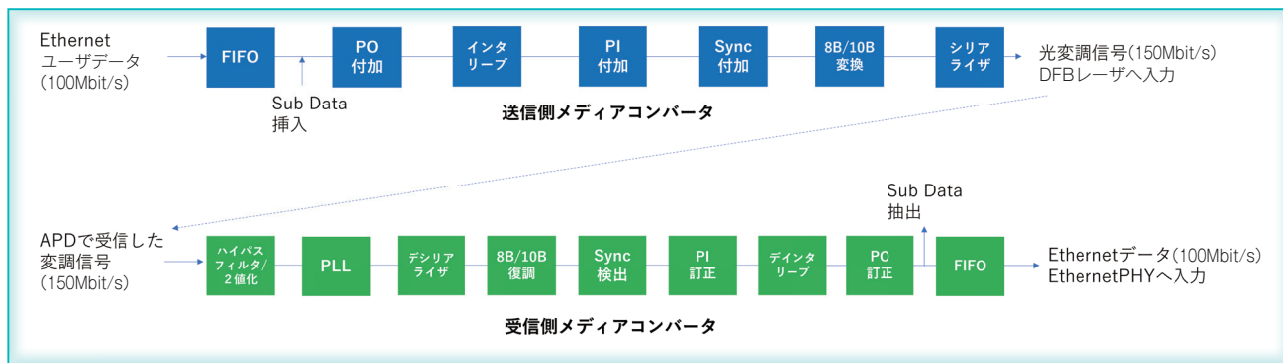


図9 メディアコンバータの処理フロー

した区間エラー状態となる、いわゆるバーストエラーが発生するが、自由空間通信においては大気揺らぎの影響によりバーストエラーが発生する。そこで SOLISS は DVD にも採用されているリード・ソロモン積符号 (RS-PC: Reed-Solomon Product Code) を誤り訂正方式として採用した<sup>(22)</sup>。RS-PC は高いバーストエラー訂正能力を持つと同時に、電力効率の良い復号器を構成できることを特長とする。

図9にRS-PCを用いたフレーム化・符号化回路のブロック構成、図10にSOLISSのRS-PCデータブロック構造を示す。送信側の処理では100Mbit/sのイーサネットユーザデータに、メディアコンバータ間の制御に利用するサブデータと呼ばれる制御用データを付加した後、リード・ソロモン符号で(符号シンボル長, 情報シンボル数) = (253, 221)の外符号パリティ (PO: Parity Outer) を付加する。その後、エラーを異なる符号語に分散化しバーストエラー訂正能力を高めるためにインタリーブ処理を行い、(238, 230)の内符号パリティ (PI: Parity Inner) と Sync データを付加する。0/1の出現確率を均衡にすることでDCバランスを確保し、受信側で復調しやすくするための8B/10B変調処理を行った後、シリアライズすることにより150Mbit/sのオンオフ変調された信号を生成する。

受信データ処理ではAPDの受信信号を高域フィルタに通して2値化した150Mbit/sのデータ列からPLL (Phase Locked Loop) 回路を使って同期クロックを抽出し、Sync検出することでインタリーブブロックの先頭を識別する。8B/10B変調と高域フィルタを組み合わせることにより、数十kHz以下の大気じょう乱成分の低周波成分を除去することが可能となる。8B/10B復調後のデータを内符号パリティでランダムエラーの訂正を行った後、デインタリーブ処理を行い、外符号パリティによる訂正処理を行う。最後にサブデータを分離し、

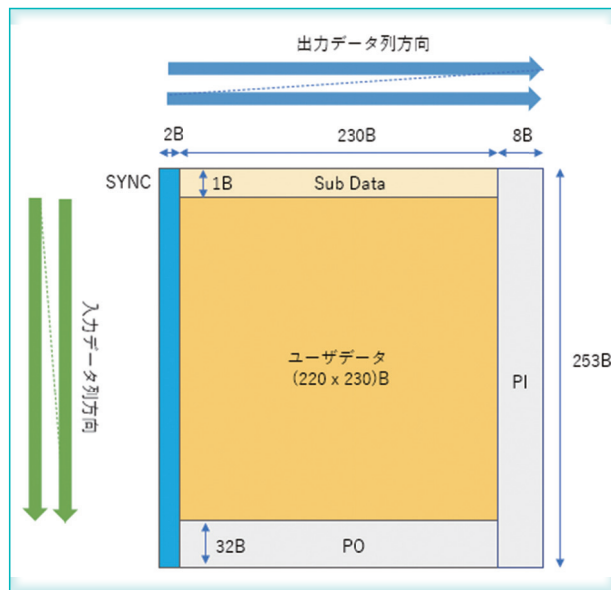


図10 SOLISSのRS-PCデータブロック構造

最終的にエラー訂正された100Mbit/sのイーサネット受信データを得て、受信側クライアント端末に転送する。

## 6 打上げと軌道上での実証概要

SOLISSは2019年9月25日にJAXA種子島宇宙センターからH-II Bロケット8号機に搭載の「こうのとりの」によってISSへ輸送された。打上げ時の写真を図11に示す。(当初H-II Bロケット8号機は9月11日の打上げを予定していたが、発射台の火災により中止、延期された。)

SOLISSはISS到着後、同年10月4日にi-SEEPへ取り付けられ、軌道上運用が開始された。図12にSOLISSのミッションイベントの年表を示す。SOLISS運用は最初の取り付けから翌2020年6月6日での取外し、「きぼう」船内で保管されるまでの第1期運用と、2021年4月1日のi-SEEPへの再取り付けから2021年9月22日の再取外しまでの第2期運用の二つの期間に分けてミッションが実施さ

れた。第1期運用ではi-SEEPに取り付けられたSOLISSは初期チェックアウトフェーズ完了後、光軸調整フェーズ、双方向通信実証フェーズの3フェーズによりNICTの小金井光地上局との通信実験が実施された。

## 7 初期チェックアウトフェーズ

SOLISSはi-SEEPの取付け後、軌道上チェックアウトが実施された。評価項目は主にテレメトリ・コマンド通信機能の確認、ジンバルやアクチュエータなど駆動系デバイスの確認、センサ類(レゾルバ、光学センサや温度センサ、加速度センサ)の性能評価、DFBレーザ・ファイバアンプ等のレーザデバイスの評価が行われた。2019年10月8日に実施された初期チェックアウト動作確認では、3軸加速度センサからi-SEEP上での振動条件は38.9[mG]の結果が得られ<sup>(23)</sup>(3軸各軸の二乗和平均平方根(RMS)値の二乗和平方根(RSS)の値)、振動が非常に小さく捕捉追尾へ影響を与えない環境であることが確認された。またレーザの光量についてもテレメトリデータから地上での評価と同等の光量が出力されていることを確認できた。



図11 H-II Bの打上げ時の写真

## 8 光軸調整フェーズ

初期チェックアウトが完了すると、SOLISSは初回の通信ミッション2019年10月26日において光地上局からのアップリンク光の捕捉、及びSOLISSからのダウンリンク光を光地上局で受信することに成功した。一方で光地上局に配置したアップリンク光の送信系は配置位置が望遠鏡の受信系と離れており、アップリンク光を安定的に受信するための送受の光軸調整が必要であった。その間、SOLISSにおいても捕捉追尾アルゴリズムの改良を行い、軌道上にてファームウェアアップデートを実施した。これら改善施策により、SOLISS及び光地上局は2020年2月に光軸調整を完了した。

## 9 通信実証フェーズ

SOLISS及び光地上局は2020年3月に双方向通信実証フェーズを開始した。2020年3月11日のミッションにおいてSOLISSはアップリンク光の安定的な受信に成功し、メディアコンバータによる光Ethernet通信がSOLISS・光地上局間において確立した結果、RTP/JPEGによる画像のダウンリンク転送に成功した。当日の天候は晴れ、気温10℃、風速4.4 m/sの良好な条件であった。図13にそのときのSOLISSのジンバルの駆動角度軌跡(a)、SOLISSのAPD受信光量(b)、光地上局(OGS)のAPD受信光量(c)、光地上局の仰角、SOLISSとの距離(d)、RTP/JPEGのUDPパケットのパケットIDとSOLISS及び光地上局の外符号パリティエラー数(e)の推移を示す。

図13(a)においてSOLISSの駆動角度軌跡は、実線が実際のジンバルの動作軌跡、破線が軌道予測により計算されたオープン制御の角度テーブルに基づく軌跡を示す。SOLISSは計算された角度テーブルに基づいてオープン制御を行った後、UTC13:21:47頃に光地上局のアップリンク光を視

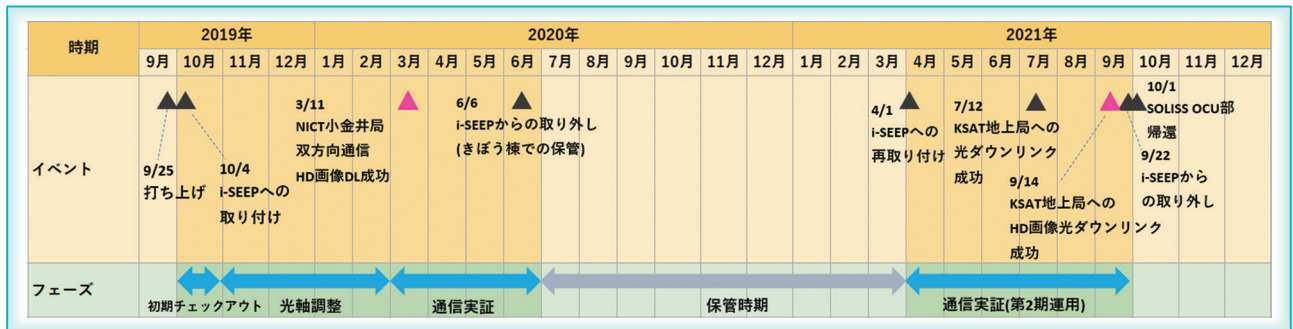


図12 SOLISS ミッションのイベント年表

野  $\pm 62.6$  mrad の広角エリアセンサで捉えて、クローズループによる角度補正から予定された軌跡とは異なる軌跡を描いていることが分かる。本ミッション時ではアジマス誤差 2.55 deg, エレベーション誤差 0.30 deg を補正した。その後 SOLISS はクローズループにより精追尾センサ及びアクチュエータの駆動を開始し、図 13 (b) において SOLISS の APD でのアップリンク光受信を開始した。それと同時に、精追尾機構による地上へのダウンリンク光が図 13 (c) において光地上局の APD で受光できていることを示している。SOLISS の APD 受信光量のしきい値は  $55 \text{ nW} \approx -42.6 \text{ dBm}$  程度であることが事前評価で確認されており、その光量しきい値

を超えるとイーサネット PHY が有効化されてイーサネットリンクの疎通開始となる。リンクが疎通すると、SOLISS の Camera Controller 内のサーバからの RTP/JPEG の UDP パケットの送信が開始される。図 13 (e) の udp packet id は IP ヘッダに含まれる Identification フィールド値を示しており、IP フラグメントされていない場合は送信されたパケット順にインクリメントされる。今回送信された IP パケットの単位サイズは 1,428 Byte であり、最大転送単位 (MTU: Maximum Transmission Unit) の 1500 Byte を下回るため IP フラグメントされず、どのタイミングでパケット紛失が発生したかが解析可能となる。図 13 (e) においてリ

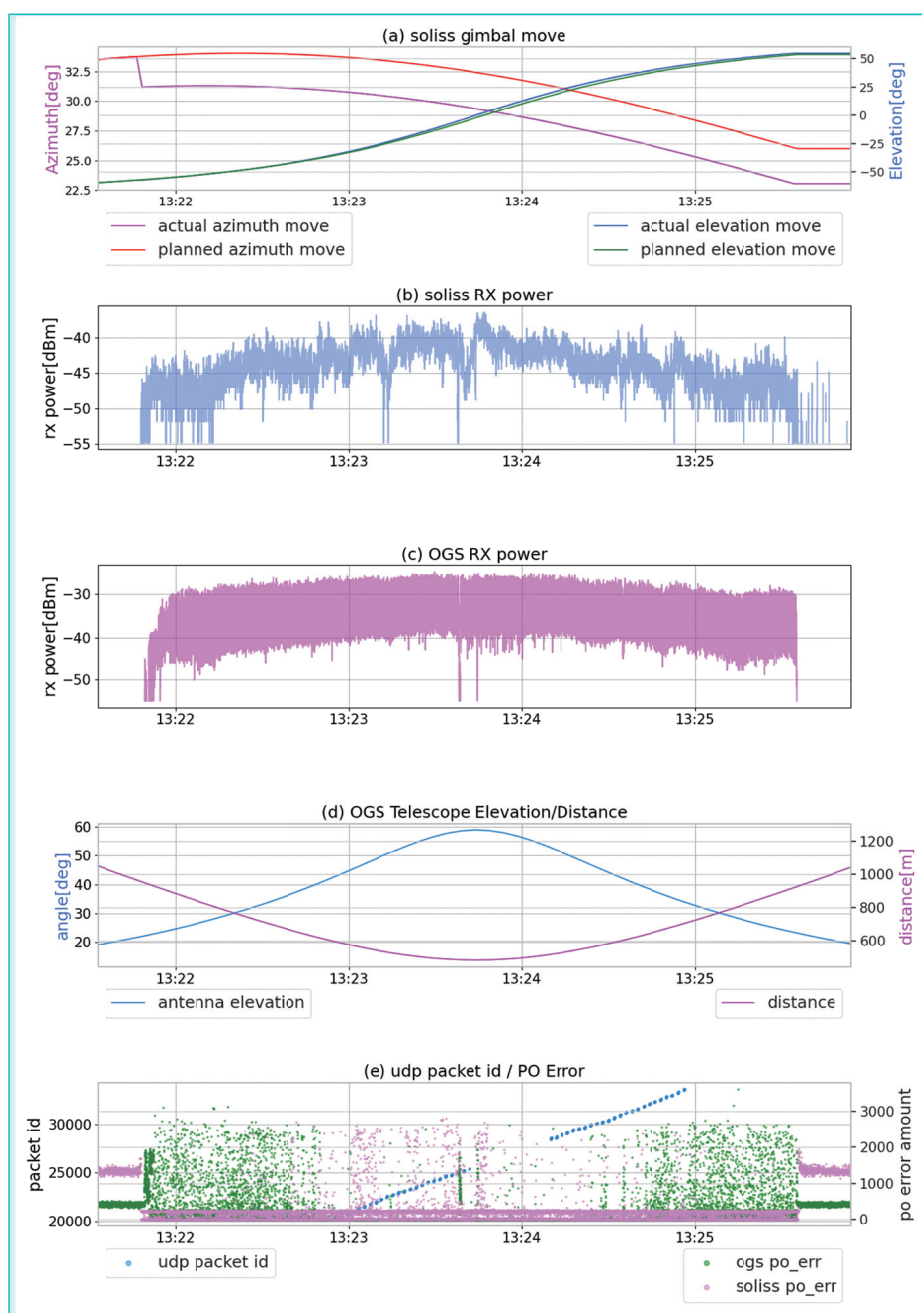


図 13 2020年3月11日ミッション時のデータ

ンク区間 UTC13:22:54 から UTC13:24:56 の約 2 分間のうち、UTC13:23:42 から UTC13:24:09 の 27 秒間はリンクが不通となっている。これは図 13 (d) における光地上局仰角が 50 度以上の領域において、光地上局の望遠鏡が ISS を安定して追尾することが難しいタイミングであった<sup>(24)</sup> が、その区間を除き安定して IP パケットを受信できていることが分かる。またその間も図 13 (e) に示すとおり、RS-PC のブロック単位ごとの SOLISS メディアコンバータの外符号パリティエラー数 (soliss\_po\_err)、光地上局メディアコンバータの外符号パリティエラー数 (ogs\_po\_err) を見てもそれぞれエラーが断続的に発生していることから、誤り訂正によって IP パケットが復元されたことが確認できる。本ミッションでダウンリンクしたイーサネットフレームの JPEG データから復元した JPEG 画像を図 14 に示す。この画像は SOLISS に取り付けられているモニタカメラによって撮影した 360 度画像である。

SOLISS は 2020 年 6 月 6 日に一度 i-SEEP から取り外され、第 2 期運用が開始される 2021 年 4 月 1 日までの間「きぼう」船内へ保管された。第 1 期運用では初期チェックアウトから通信実証フェーズまで通信実験を 22 回実施し、そのうちアップリンクの捕捉に 17 回、地上でのダウンリンクに 16 回、イーサネット双方向通信リンクに 2 回成功した。

## 10 第 2 期運用

2021 年 4 月 1 日から開始された第 2 期運用では Kongsberg Satellite Services (KSAT) の ギリシャ・ネメア光地上局との実証が行われた。KSAT 光地上局との実験では、アップリンク光の光量によ

る回線計算上、双方向通信が見込めないことから SOLISS と異なり双方向のイーサネット形式ではなく、データダウンリンクのみを行うコンフィギュレーションで実験が行われた。SOLISS と KSAT 光地上局との通信実験は 2021 年 9 月 22 日の i-SEEP からの取外しまで 19 回実施され、地上からのアップリンク光の捕捉に 14 回、地上での SOLISS 光のダウンリンク捕捉に 13 回、HD 画像データのダウンリンクに 2 回成功した。また、ダウンリンク成功時のビットエラーレート (BER) は  $10^{-3}$  以下であった<sup>(25)</sup>。更に第 2 期運用では KSAT 光地上局との実証と並行して、NICT 小金井 1 m 光地上局へのダウンリンク実験が実施され、1 m 望遠鏡の 40 cm のサブ開口から受光した光を精追尾機構によって多モードファイバに平均 5.45 dB の損失でカップリングできたことが NICT により確認された。また、多モードファイバの結合効率ヒストグラムはガンマ分布によく適合することが確認された<sup>(26)</sup>。

## 11 運用終了後の SOLISS

SOLISS は軌道上での運用終了後、OCU 部のみが 2021 年 10 月 1 日に SpaceX CRS-23 によって地球に帰還し、メキシコ湾沖にて回収され、JAXA 筑波宇宙センターでの引渡し及び外観チェック後にソニー CSL に保管された。図 15 に帰還した SOLISS の OCU 部の写真を示す。

## 12 今後の展望

ソニー CSL は SOLISS の実証成功を起点とし、様々な実証や事業展開に向けた活動を進めている。図 16 に現在ソニー CSL が計画を進めている通信実証を示す。総務省の委託研究「衛星通信における

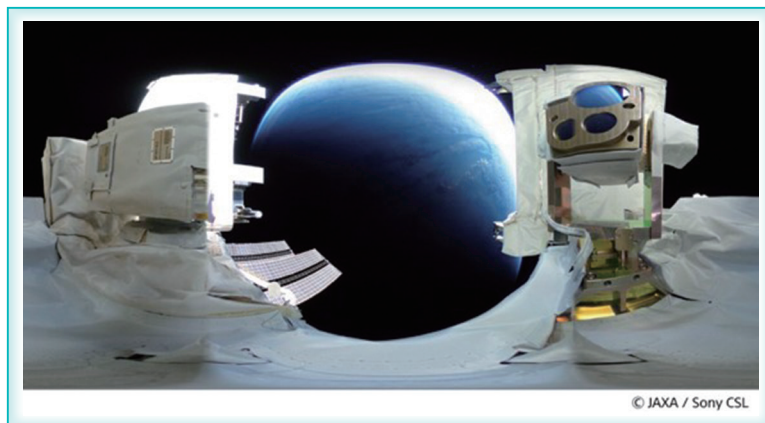


図 14 軌道上で撮影され、光地上局に送信されたデータを元に復元した写真

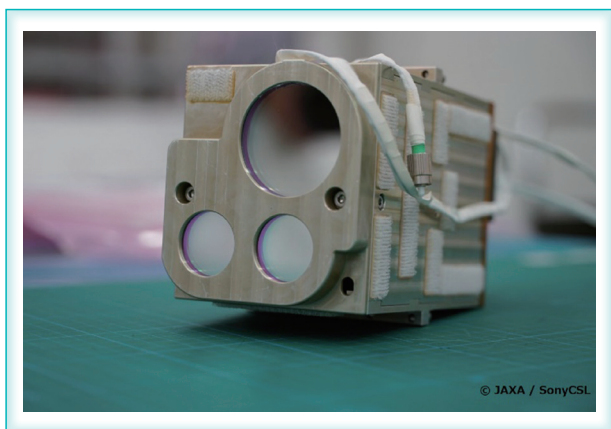


図 15 ISS から帰還した SOLISS OCU 部

量子暗号技術の研究開発」では NICT を含む各研究機関とともに、超小形衛星に搭載可能な量子暗号通信装置の共同開発及び ISS 搭載による宇宙実証を予定している。また、ISS と GEO 衛星に搭載された光通信機器との光通信実証を JAXA と共同で研究開発を進めている。要素技術開発では、SOLISS で用いた RS-PC 方式の 1 Gbit/s への対応及びエラー訂正・繰返し訂正機能への対応を行うことにより、エラー訂正能力の向上と高速化を実現し、その仕様は宇宙データシステム諮問委員会 (CCSDS: Consultative Committee for Space Data System) へ JAXA と共同で提案された<sup>(27)</sup>。また、そのエラー訂正機能実装は、JAXA が研究開発を進めている遅延途絶耐性ネットワーク技術 (DTN: Delay Tolerant Networking) との組合せによる通信の安定性実証が JAXA 宇宙イノベーション

ンパートナーシップ (J-SPARC: JAXA Space Innovation through Partnership and Co-creation) との「成層圏/低軌道光ネットワークサービス」<sup>(28)</sup> を目指した活動の一環として行われた。実証ではギガビットイーサネット回線に実験的に構築した自由空間光通信の符号誤り率を模擬した低品質で、一般的なインターネット通信による通信が不可能な通信環境において、446 Mbit/s の通信速度でデータ欠損のない完全なデータのファイル転送に成功した<sup>(29)</sup>。事業化について 2022 年 6 月には Sony Space Communications Corporation を米国に設立し<sup>(30)</sup>、低軌道の超小形衛星間の光通信を大容量・低消費電力で実現する衛星間通信サービスの提供を計画している。

## 13 むすび

光ディスク技術を宇宙光通信へ転用する可能性を実証するために開発された小形光通信システム SOLISS は、その指向制御性能及びエラー訂正機能により、NICT 小金井にある光地上局間及びギリシャ・ネメアにある KSAT 光地上局間との光通信を確立し、光ディスク技術の宇宙での有用性を確認した。我々は、今後ますます拡大が見込まれる宇宙光通信需要に対応するため、SOLISS で実証された技術の改良及び量産化を推し進め、国内外の市場のニーズに応じていきたいと考えている。

**謝辞** SOLISS 実証実験にあたり、JAXA 有人宇宙技術部門、JAXA 研究開発部門、NICT 宇宙通信

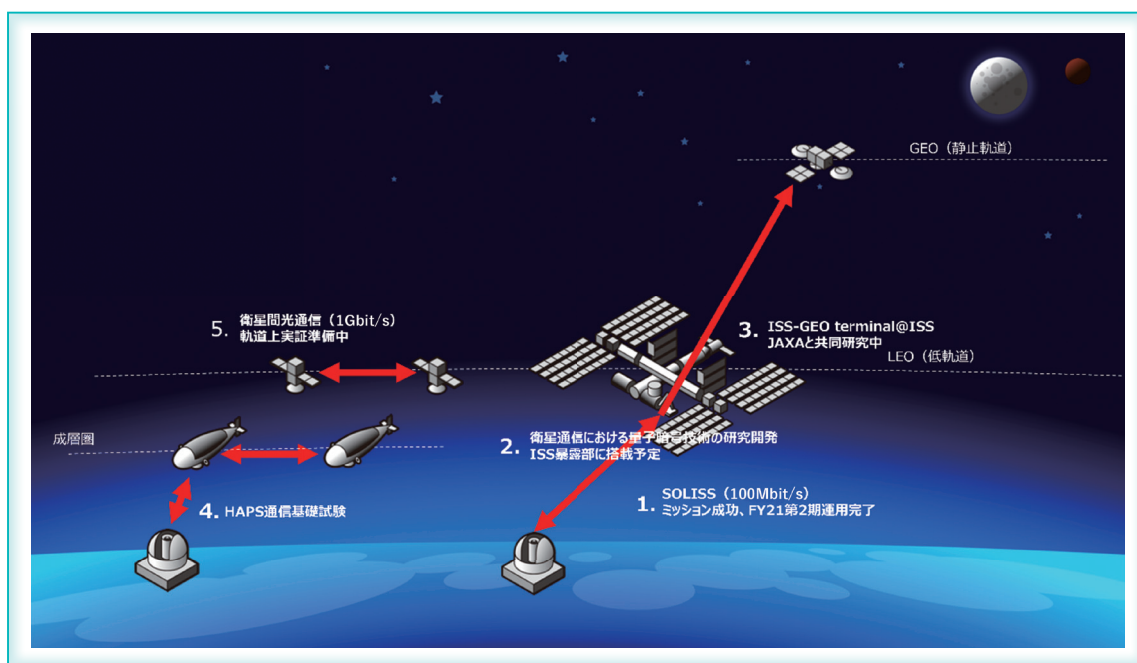


図 16 現在計画中の通信実証

システム研究室, KSAT Communications Department から多大なサポートを頂きました。また JAXA, NICT, (株) 東海電子顕微鏡解析には本稿で使用させて頂いた画像を御提供頂きました。御礼申し上げます。

## ■ 文献

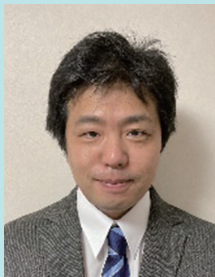
- (1) SIA 2022 Global Industry Revues.  
<https://sia.org/news-resources/state-of-the-satellite-industry-report/>
- (2) Starlink Statistics, Jonathan McDowell's Space Pages.  
<https://planet4589.org/space/con/star/stats.html>
- (3) ONEWEB Satellite Tracking.  
<https://orbit.ing-now.com/oneweb/>
- (4) CNBC Investing in Space.  
<https://www.cnbc.com/2023/05/18/investing-in-space-where-spacexs-starlink-is-growing-market-share.html>
- (5) Bryce TECH Smallsats by the Numbers 2023.  
<https://brycetech.com/reports>
- (6) 総務省衛星通信システム委員会, “Ku/Ka 帯を用いた非静止衛星システムの高度化に係る周波数共用技術に関する調査検討.”  
[https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000631389.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000631389.pdf)
- (7) 総務省, “令和4年度当初予算「Beyond 5G 研究開発促進事業(電波有効利用型)」に係る研究実施者の公募(第2回).”  
[https://www.soumu.go.jp/menu\\_news/s-news/01tsushin03\\_02000357.html](https://www.soumu.go.jp/menu_news/s-news/01tsushin03_02000357.html)
- (8) 情報通信研究機構, “Beyond 5G/6G White Paper 日本語 2.0 版,” NICT, 2023.  
[https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT\\_B5G6G\\_WhitePaperJP\\_v3\\_0.pdf](https://beyond5g.nict.go.jp/images/download/NICT_B5G6G_WhitePaperJP_v3_0.pdf)
- (9) 荒木賢一, 有本好徳, “光通信実験の概要,” 通信総合研究所季報, vol. 43, no. 3, pp. 493-520, Sept. 1997.
- (10) T. Jono, Y. Takayama, K. Shiratama, I. Mase, B. Demellenne, Z. Sodnikd, A. Birdd, M. Toyoshima, H. Kunimori, D. Giggenbach, N. Perlot, M. Knapek, and K. Arai, “Overview of the inter-orbit and the orbit-to-ground laser communication demonstration by OICETS,” Proc. Free Space Laser Commun. Technol. XIX Atmosph. Propag. Electromagn. Waves, vol. 6457, Art. no. 645702, March 2007.
- (11) H. Takenaka, A. Carrasco-Casado, M. Fujiwara, M. Kitamura, M. Sasaki, and M. Toyoshima, “Satellite-to-ground quantum-limited communication using a 50-kg-class microsatellite,” Nature Photonics, 11:502, July 2017.
- (12) 佐藤洋平, 星 慎太郎, 板橋孝昌, 高野 裕, 小竹秀明, 阿部侑真, 高橋靖宏, 大倉拓也, 布施哲治, 豊嶋守生, 山川史郎, “光衛星間通信システム(LUCAS)の初期運用状況について,” 信学技報, SAT2022-40, pp. 61-64, Aug. 2022.
- (13) T. Kubo-Oka, H. Kunimori, K. Suzuki, Y. Koyama, K. Shiratama, Y. Munemasa, H. Takenaka, D. Kolev, A. Carrasco Casado, T. Phuc, and M. Toyoshima, “Development of ‘HICALI’: High speed optical feeder link system between geo and ground,” Proc. ICSO, vol. 11180, Art. no. 1118060, July 2019.
- (14) NICT ワイヤレスネットワーク研究センター宇宙通信システム研究室, “ETS-9 衛星通信プロジェクト.”  
[https://www2.nict.go.jp/spacelab/pj\\_ets9.html](https://www2.nict.go.jp/spacelab/pj_ets9.html)
- (15) E. Luzhanskiy, B. Edwards, D. Israel, D. Cornwell, J. Staren, N. Cummings, T. Roberts, and R. Patschke, “Overview and status of the laser communication relay demonstration,” Proc. SPIE, vol. 9739, Art. no. 97390C, March 2016.
- (16) H. Hauschildt, N. Le Gallou, S. Mezzasoma, H. L. Moeller, J. P. Perdigués Armengol, M. Witting, J. Herrmann, and C. Carmona, “Global quasi-realtime-services back to Europe: EDRS Global,” Proc. International Conf. Space Opt., vol. 11180, pp. 353-357, Oct. 2018.
- (17) SDA Layered Network of Military Satellites Now Known as “Proliferated Warfighter Space Architecture.” <https://www.sda.mil/sda-layered-network-of-military-satellites-now-known-as-proliferated-warfighter-space-architecture/>
- (18) C. M. Schieler, K. M. Riesing, B. C. Bilyeu, J. S. Chang, A. S. Garg, N. J. Gilbert, A. J. Horvath, R. S. Reeve, B. S. Robinson, J. P. Wang, S. Piazzoll, W. T. Roberts, J. M. Kovalik, and B. Keer, “On-orbit demonstration of 200-gbps laser communication downlink from the third cubesat,” in Free-Space Laser Commun. XXXV, vol. 12413, p. 1241302, SPIE, 2023.
- (19) A. Seas, B. Robinson, T. Shih, F. Khatri, and M. Brumfield, “Optical communications systems for NASA’s human space flight missions,” International Conf. Space Opt. 2018, July 2019.
- (20) L. C. Andrews, R. L. Phillips, and C. Y. Hopen, “Laser beam scintillation with applications,” SPIE Optical Engineering Press, Bellingham, WA., USA, 2001.
- (21) P. Stewart, L. Berc, W. Fenner, R. Frederick, and S. McCane, “RTP payload format for JPEG-compressed video,” RFC 2435, Oct. 1998.  
<https://www.rfc-editor.org/info/rfc2435>
- (22) 太田伸二, 山添弘晃, 小松宏光, 久保 靖, 神保光, 伊藤大二, 宗正 康, 豊嶋守生, 神田大樹, 澤田弘崇, 池田俊民, 岩本匡平, “光ディスク技術を用いた小型光通信システムの低軌道-地上間の光伝搬に関する研究,” レーザー学会学術講演会第40回年次大会講演予稿集, 2020.
- (23) H. Komatsu, S. Ohta, H. Yamazoe, Y. Kudo, T. Nakao, T. Ito, D. Koda, H. Kunimori, T. Kubooka, M. Toyoshima, and K. Iwamoto, “The pointing performance of the optical communication terminal, SOLISS in the experimentation of bidirectional laser communication with an optical ground station,” Free-Space Laser Commun. XXXIII, H. Hemmati, and D. M. Boroson, eds., vol. 11678, International Soc. for Opt. and Photonics. SPIE, 2021, pp. 69 - 82, March 2021.
- (24) 山添弘晃, 岩本匡平, “光ディスク技術を用いた小型光通信システムの研究開発と実証実験,” 信学技報, SAT2022-34, pp. 30-35, Aug. 2022.
- (25) H. Yamazoe, H. Henniger, and K. Iwamoto, “The communication experiment result of smalloptical link for ISS (SOLISS) to the first commercial



- optical ground station in greece,” 2022 IEEE International Conf. Space Opt. Syst. and Appl. (ICSOS) , pp. 40-46, March 2022.
- (26) P. V. Trinh, D. R. Kolev, K. Shiratama, A. Carrasco-Casado, Y. Munemasa, H. Yamazoe, H. Komatsu, T. Kamata, T. Nakao, S. Ohta, K. Iwamoto, M. Fujiwara, H. Tsuji, and M. Toyoshima, “Experimental verification of fiber coupling characteristics for FSO downlinks from the International Space Station,” Opt. Express, vol. 31, no. 5, pp. 9081-9097, 2023.
- (27) H. Yamazoe, S. Ohta, H. Komatsu, K. Suzuki, E. Okamoto, and K. Iwamoto, “Evaluation of the forward error correction format for LEO-ground optical communication using Reed-Solomon product code,” Free-Space Laser Commun. XXXIII, H. Hemmati and D. M. Boroson, eds., vol. 11678, International Soc. for Optics and Photonics. SPIE, pp. 203-212, 2021.
- (28) JAXA J-SPARC PROJECTS.  
<https://aerospacebiz.jaxa.jp/solution/j-sparc/projects/sonyCSL/>
- (29) SonyCSL, プレスリリース “ソニー CSL と JAXA エラー発生環境下での完全なデータファイル転送の実証に成功.”  
<https://www.sonycsl.co.jp/news/12810/>
- (30) ソニーグループ, ニュースリリース “Sony Corporation of America 宇宙光通信事業を行う新会社 Sony Space Communications Corporation を設立.”  
<https://www.sony.com/ja/SonyInfo/News/Press/202206/22-023/>
- (2023年8月2日受付, 10月9日再受付)

### 小松宏光

平 17 早大大学院理工学研究科コンピュータ・ネットワーク工学科修士課程了。同年ソニー株式会社入社。業務用ネットワーク機器の開発設計、農業用 IoT センサシステムの開発設計を経て、平 29 (株) ソニーコンピュータサイエンス研究所に異動。平 30 から令 3 まで 宇宙航空研究開発機構宇宙探査イノベーションハブに。現在、ソニーグループ株式会社にて宇宙光通信システムの開発設計に従事。



### 太田伸二

平 3 新潟大・工・電子卒。同年ソニー株式会社入社。以来、光ディスクドライブ、ピコプロジェクターの開発設計に従事。現在、(株) ソニーコンピュータサイエンス研究所 TPDG・SOL プロジェクト研究員として光通信ターミナルの研究開発に従事。



### 山添弘晃

平 22 京大大学院情報学研究科修士課程了。同年ソニー株式会社入社。NAND フラッシュの制御ソフトウェア開発に従事。平 30 (株) ソニーコンピュータサイエンス研究所に異動。以来、同社の SOL Project にて、宇宙光通信システム等の研究開発に従事。



### 澤田弘崇

宇宙航空研究開発機構 (JAXA) 国際宇宙探査センター MMX プロジェクト。博士 (工学)。2004 東工大大学院理工学研究科機械宇宙システム専攻博士課程了。同年 JAXA 入社、2019 から MMX プロジェクトに所属。専門は宇宙ロボティクス、宇宙機システム。



### 神田大樹

平 29 東大大学院航空宇宙工学専攻博士課程了。同年プロジェクト研究員として JAXA に入社、小形光通信システム等の開発に従事。現在、技術試験衛星 9 号機 (ETS-9) プロジェクト研究開発員。ETS-9 に搭載する電気推進機の研究開発を主として衛星開発に従事。



### 池田俊民

平 8 早大大学院理工学研究科物理及び応用物理学専攻修士課程了。同年宇宙開発事業団 (現宇宙航空研究開発機構) に入社。国際宇宙ステーション「きぼう」日本実験棟の開発業務、利用推進業務などに従事。現在、有人宇宙技術センター「きぼう」システムインテグレーション技術領域主幹。



### 岩本匡平

平 10 阪大・工・応用物理卒、平 15 同大学院工学研究科物質生命工学専攻博士後期課程了。同年ソニー株式会社入社。空間光情報システムの研究開発、宇宙光通信技術の研究開発、及び技術戦略に従事。平 21 Palo Alto Research Center, 平 28 から令 3 まで宇宙航空研究開発機構を兼務。現在、Sony Space Communications Corporation, President。2020 年宇宙開発利用大賞内閣総理大臣賞、ISS Research Award 各受賞。博士 (工学)。



# 深宇宙通信への招待

## Invitation to Deep Space Communications

戸田知朗 Tomoaki Toda†

### Summary

HAYABUSA2 (はやぶさ2) が2020年12月に地球帰還を果たして3年近くたつ。HAYABUSA2は、新しい目標天体である1998KY6を目指し再び旅立った。2031年到着予定だから、打上げから16年余り、過酷な宇宙環境に耐えようという試練でもある。そのようなHAYABUSA2に着眼した深宇宙通信を一度紹介した<sup>(1)</sup>。このときは、HAYABUSA2に視点を固定してその技術を概観したのだが、今回はより広い読者へ向けて、深宇宙通信技術の成り立ちの方へ目を向けてみたい。深宇宙通信は、宇宙機の搭載技術と地球局の支援技術がかみ合って成り立っている。言わば宇宙機視点であった以前の記事に対しては相補的な内容となる。深宇宙通信とは何であるか、何ができるのか、どうやって使っていくべきか、今後どうなっていくのか、これらはネットの記事を拾い読みしてもなかなかつかみ所がないかもしれない。また、現代の深宇宙通信には、いわゆる定本という教科書がない。本稿がせめて導入になればと思う。

### Key Words

深宇宙, 通信, TT&amp;C, 探査機, 地球局

## 1 深宇宙通信技術とは

深宇宙通信と言っても、何か特殊な原理があって、それによりほかの通信技術と明確に区別されるわけではない。それは、共通の通信技術を基盤に置いて、深宇宙という舞台を志向した応用技術と言ってよい。大まかに宇宙機の技術と地球局の技術に大別できるが、通信能力は両者あいまって実現するものだから、どちらか一方の視点だけからは語れない。両者は置かれる環境の違いで枝分かれした技術である。宇宙機(宇宙機と呼んだり、探査機と呼んだりするが、宇宙機は探査機も含んで地球引力圏にとどまらずに活動する機体全般を指して用いることにする。)は限られたリソースで、宇宙という環境で決められた年限、定まった性能で正常に動作することが求められる。地球局の方は、限られた宇宙機側の能力を補完する立場であるから、小形軽量低消費電力の搭載通信システムと大形の地球局という役割分担になりやすい。今の深宇宙通信システムはどのように進化してきた。

便宜的には地表面から200万km以遠が深宇宙通信の領域である<sup>(1),(2)</sup>。だから、深宇宙通信技術は200万km以遠のための通信技術と言ってしまってよいだろう。また、200万kmも離すのは、表1の深宇宙通信の割当周波数帯域をほかから区別して特に保護する意図があり、この狭い周波数帯域で

深宇宙通信技術は通用している。これを狭義の深宇宙通信技術と呼んでおく。表1が示すように、深宇宙通信はSバンドからXバンド、そしてKaバンドへ、より高い周波数へ適応してきた歴史がある。今では地上の移動通信に隣接するSバンドは、地上サービスの保護のためにほとんど使うことができない。そのため、専らXバンドとKaバンドが深宇宙通信のより所である。

図1は、2026年に打上げを目指す火星衛星サンプリングミッション、MMX (Martian Moons Exploration) の深宇宙通信ネットワーク概念図である。深宇宙通信の設計は、まずこのような概念図から始まる。地球局との間で、表1のXバンドとKaバンドを使用する。図中のコマンド回線が表1のアップリンクに、テレメトリー回線がダウンリンクに当たる。したがって、MMXはXバンドアップリンク/Xバンドダウンリンク/Kaバンドダウンリンクを使用するミッションである。ところが、図1には深宇宙では使用できなくなったはずのSバンドもある。このSバンドは、しかも近地球通信のSバンドが使われる。このように、宇宙機と宇宙機を結ぶ通信(アップリンク、ダウンリンクと区別する意図で、フォワードリンク、リターンリンクと呼んだりする。)では、地上の通信サービスに影響がないことが明白であるなら、割当帯域外で使用可能な場合もある。本来は、このような宇宙機間の通信も深宇宙通信である。先ほど狭義と断った理由が、ここにある。深宇宙通信は、必ずしも宇宙機と地球局間に限らない。

† 国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構, 相模原市  
Japan Aerospace Exploration Agency,  
Sagamihara-shi, 252-5210 Japan

表 1 宇宙科学ミッションの代表的割当周波数帯域

	近地球ミッション		深宇宙ミッション	
	アップリンク	ダウンリンク	アップリンク	ダウンリンク
S バンド (MHz)	2,025 ~ 2,110	2,200 ~ 2,290	2,110 ~ 2,120	2,290 ~ 2,300
X バンド (MHz)	7,190 ~ 7,235	8,450 ~ 8,500	7,145 ~ 7,190	8,400 ~ 8,450
Ka バンド (MHz)	策定中	25,500 ~ 27,000	34,200 ~ 34,700	31,800 ~ 32,300

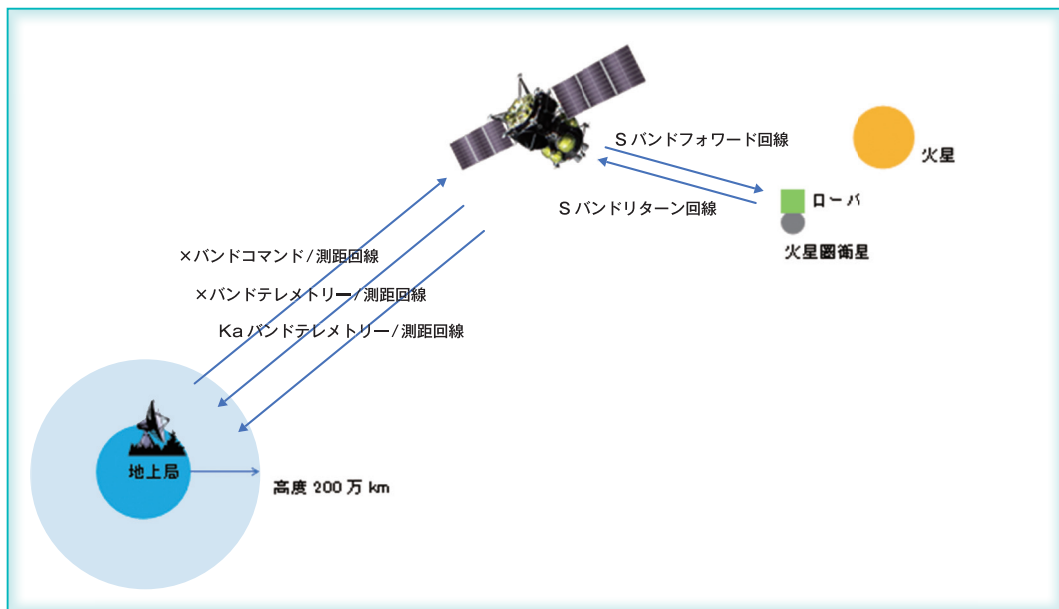


図 1 MMX (Martian Moons Exploration) の深宇宙通信ネットワーク概念図

また、200 万 km 未満の近地球通信には、月周縁 (38 万 km) や科学観測に適する地球の L2 点 (Sun-Erath Lagrange point 2, 150 万 km) が含まれる。表 1 から、X バンドの近地球用途と深宇宙用途の帯域は隣接している。そのため、深宇宙通信用の地球局で月や L2 点の領域を目指す宇宙機の通信を使用可能とするのは容易である。だから、これらのミッションに用いる通信技術は、地球局の観点からすると深宇宙通信技術とまとめてしまうことも多い。こうなると、これらも広義には深宇宙通信技術であって、200 万 km の境の意味すら曖昧である。このように、深宇宙通信技術の裾野は意外に広い。

この後は、専ら狭義の意味の深宇宙通信技術について取り上げる。

## 2 深宇宙通信技術の開発について

### 2.1 宇宙機搭載通信システム

今時の深宇宙通信技術がどのようなものか。まずはその標準的な道具立てを知るのがよい。図 2 は、文献 (1) でも紹介した HAYABUSA2 (はやぶさ 2) の通信システムである。深宇宙通信ネットワー

クとしては、MMX と同じく X バンドアップリンク / X バンドダウンリンク / Ka バンドダウンリンクに当てはまる。この図で特徴的なのは、アンテナの種類が多さであろう。高利得アンテナから低利得アンテナまで利得を段階的に切り換えて使う意図がある。地球を周回する低軌道衛星などには見られない構成である。大まかには、中利得アンテナを多用し、リスクの高い運用で安全確保優先に低利得アンテナへ切り換える、観測データなど大容量の通信は高利得アンテナに頼るといった使い方をする。通常の運用は低利得アンテナだけでしのご考えもあるから、中利得アンテナは省略される場合もある。いずれにせよ、目的に応じてアンテナを使い分ける必要があり、深宇宙通信では多種のアンテナを搭載する。それに伴ってアンテナ間をつないで切り換える経路も必要になるから、信頼性の高いスイッチマトリックスも必需品である。このように宇宙機ではフロントエンドが大きくなる傾向がある。当然ながら、アンテナと X バンドのコアになる機器 (トランスポンダ、増幅器) とは、できるだけ低損失に結ぶことが重要である。

こういった搭載システム技術の開発は、使用され

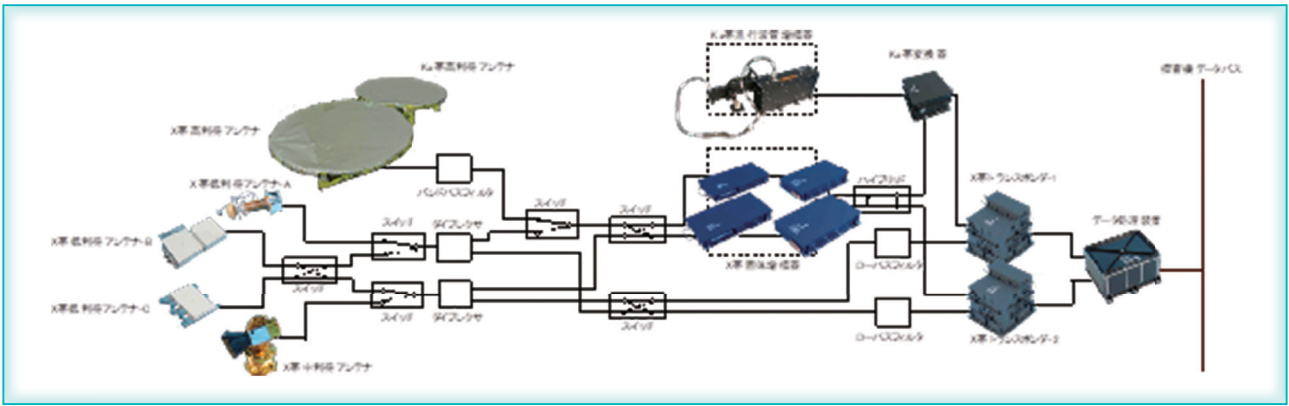


図2 HAYABUSA2のXバンドアップリンク／Xバンドダウンリンク／Kaバンドダウンリンク通信システム

る部品の入手性や技術のサイクルに合わせて進むことが多い。例えば、HAYABUSA2のトランスポンダは、2010年に打ち上げられた金星探査ミッションAKATSUKIで飛行実証されたモデルがベースになっていて<sup>(3)</sup>、今ではもう登場から14年が経過した。そのため、2025年に打上げ予定のDESTINY<sup>+</sup>では次期トランスポンダの開発が進行中である<sup>(4)</sup>。新しいトランスポンダは、深宇宙ミッションにも、月・L (Lagrange) 点ミッションにも対応可能で、1. の広義の深宇宙探査通信用に生まれ変わろうとしている。何しろDESTINY<sup>+</sup>は、小形のロケットでも深宇宙探査へ送り出せるように、低高度へ打ち上げられてから探査機自らイオンエンジンによって時間を掛けて増速し、最終目標天体へ自力で到達しようというミッションである。このようなミッションでは、運用初期に近地球通信の領域に長期滞在を余儀なくされるため、どちらのタイプの通信もできないと行き詰まってしまう。技術サイクルが要請する機器のアップデートがミッションに対して重要な役割を持つ一例と言える。

けれども、更新活動が活発ならばいいと言うわけでもない。更新サイクルの短い短命な機器は、汎用性が足りないか、異常が見つかったか、需要を見誤ったか、基本設計段階で何らかの問題を抱えてしまっていることがほとんどだ。それは、技術者としても不名誉な結果で、そうならずになるべく多くのミッションに自発的に使い続けてもらいたい。10年の持続性はその目安になる。

海外に目を転じると、NASA (National Aeronautics and Space Administration) のSDST (Small Deep Space Transponder) は1998年打上げの実験機DS1 (Deep Space 1) 以来、現役／第一線の地位を譲らずに今に続いている<sup>(5)</sup>、ESA (European Space Agency) は、2018年により本格的な深宇宙通信用トランスポンダDST (Deep Space

Transponder) をBCMPO (BepiColombo Mercury Polar Orbiter) から使用開始し、その後もDSTを採用した探査機が打ち上がっている<sup>(6)</sup>。このDSTは、MMXでもESAとの国際共同ミッションの一環として1台採用している。このように、トランスポンダは機関間でそのフラグシップの完成度を問われる機器であるので、各機関で独自に開発が行われてきた。

## 2.2 地球局通信システム

地球局としては、HAYABUSA2へ向けて建設された美笹54m地球局を取り上げる。ただし、図3は整備途上の54m地球局そのままではなく、内容をより一般的なものに改変してある。美笹54m地球局は、それまでの白田64m地球局を継ぐように、深宇宙探査用のXバンドアップリンク／Xバンドダウンリンク／Kaバンドダウンリンクに対応する地球局として建設された<sup>(7),(8)</sup>。2020年のHAYABUSA2帰還時は試運転の状況で、現在も本格利用開始へ向けて設備を補強する工事が続いている。図3(a)は地球局のアンテナ部位で、ビーム給電方式と呼ぶ多段ミラー伝送によって主鏡と機器室間に送受信電波を通し、フィードと呼ばれる給電部を介して送受信機と結合する構成を表している。この方式は、海外でも深宇宙通信用の地球局の主流である。図3でも、送受信機以下は別に描いているように、送受信機設備は規模が大きくなりやすい。特に、深宇宙通信のように、一方ではkW級の送信電力を送信し、他方では熱雑音の水準に近い信号を拾い出して受信するような設備を設置するには、広い場所が必要になる。アンテナからある程度切り離しても、送受信設備の設置場所を広く確保したい。この方式は、それを可能にする方法として受け入れられている。

ただ、海外の局は、送受信設備の収容をアンテナ

設備の内外で明確に区分しているのに対して、美笹 54 m 地球局では臼田 64 m 地球局同様、アンテナ直下に機器室を囲い込んで、そこに送受信設備を区別なく丸ごと収容する流儀が採用された。これは、アンテナの方位角（地面に垂直な軸周りの回転角度）の回転軸を、海外局のようにビーム給電系の中心にせず、重力などによるアンテナ主鏡のひずみを含めて指向補正する装置（「コリメーション装置」

と呼ぶ、図では割愛）が塞いでしまったことによる。機器室内に設置可能な設備総重量の制約が生じ、また外部からの設備へのアクセス性も悪くなることから、余り歓迎されない選択であったが、大口径のアンテナの指向性能確保のためには代え難く、この構成が温存された。将来の拡張性や発展性を阻害する要因であり、いずれ見直されるべきものと思っている。

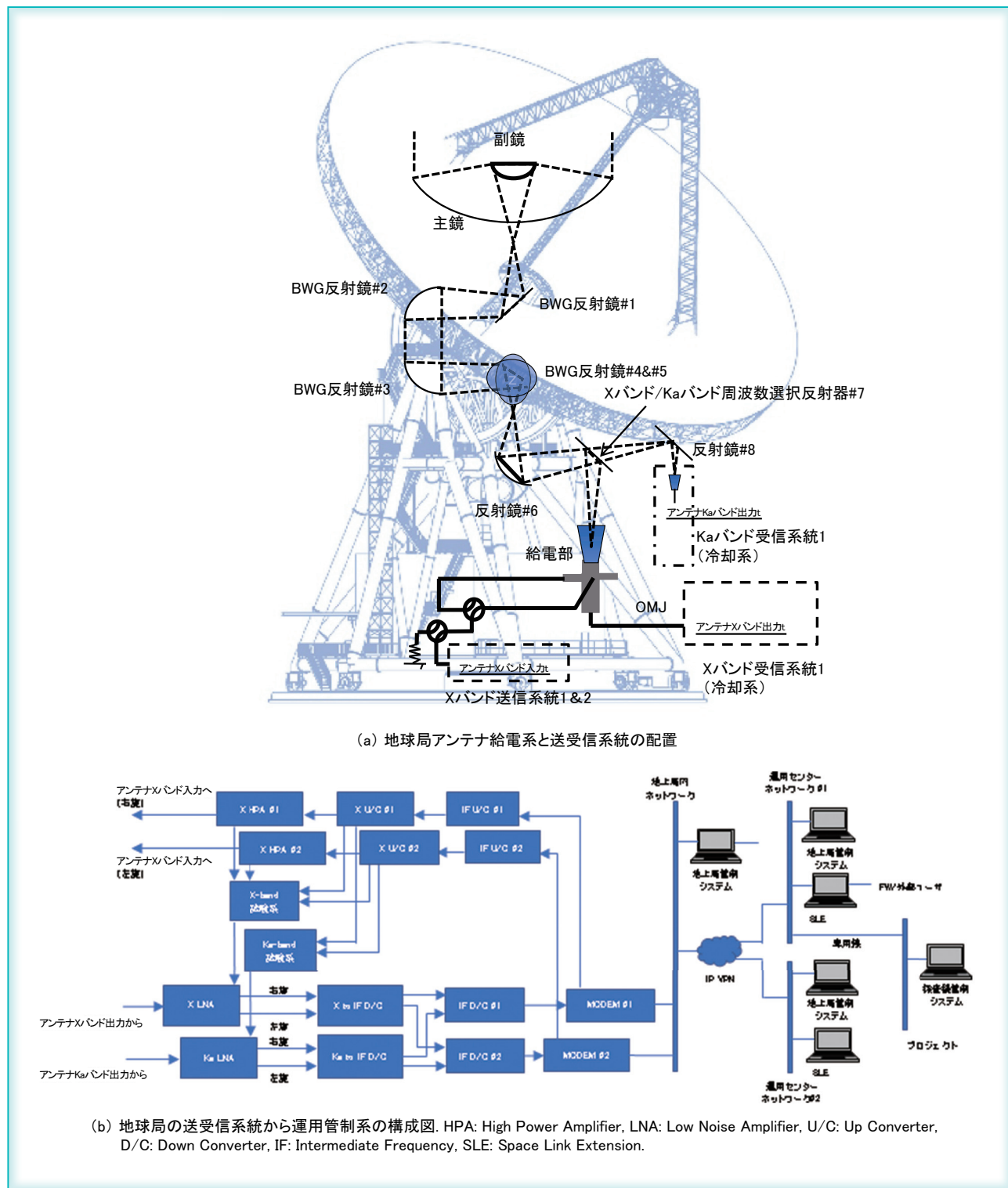


図3 地球局

図3 (b) は、前述の機器室に収容される送受信システムであり、Xバンドアップリンク／Xバンドダウンリンク／Kaバンドダウンリンクに対応する。アンテナ設備からHPA (High Power Amplifier) やLNA (Low Noise Amplifier) を経てMODEM (Modulator& Demodulator) まで、これら地球局の一まとまりがアンテナを除いた搭載通信システムの図2に相当する。図3 (b) に描き込めなかった基準信号系、時刻系、電源系といった設備もある。

地球局装置が、搭載通信システムと最も異なっているのは、表1の割当周波数帯域の特定の1周波数だけでなく、任意に決めた周波数に対してその深宇宙通信を支援する汎用性を備えねばならないという点であろう。深宇宙通信で支援すべき内容は、国際的な標準化の作業の下に定められており、それは機関をまたいだ相互協力のために自発的に取り組むべき内容となっている。割当周波数帯域で触れた文献(2)もそのような文書の一つである。美笹54m地球局でKaバンドダウンリンクに取り組んだのも、HAYABUSA2の実験支援のためもあったが、その先に海外の宇宙機支援に役立てるという重要な目的があった。地球局によるミッション支援は国際協力が当たり前となり、特定のミッションを選ばない汎用性をどのように確保するかが、地球局の価値に直接結び付く時代になっている。HAYABUSA2帰還からこの数年間でも海外の地球局は進歩しており、何もしないままでは美笹54m地球局もすぐに色あせてしまう。地球局技術は、搭載通信システムと違って日進月歩である。陳腐化させないことが常に求められている。この競争性もまた搭載通信システムとは時間スケールが大きく異なっており、10年待って置いては置いて行かれてしまう。

図3 (b) でネットワーク越しにつながっているシステムは管制制御のための装置群を表している。管制制御の対象は宇宙機と地球局にそれぞれあり、独立に行われる。それらを管制する機能は地理的に異なる場所にあってもよい(それゆえに、HAYABUSA2をNASA DSNから運用可能になる。)ので、アンテナや送受信機設備と区別して扱うことができる。ユーザと直に接してアップデートの頻度も高い部分なので、むしろ独立した一分野として構成する方が理にかなってきている。これらは、言わば計算機ソフトウェア技術であり、アンテナや送受信機設備のようなハードウェア中心の技術より柔軟性がある。

## 3 深宇宙通信の能力について

紹介してきた搭載と地上のシステムの性能を端的に表すのは、EIRP (Equivalent Isotropic Radiated Power) とG/T (Gain over Temperature) である。前者は送信能力を、後者は受信能力を代表する。回線性能を評価するには、EIRP とG/Tに、使用する波長と通信距離で決まる空間損を組み合わせるだけでよいことはよく知られている<sup>(9),(10)</sup>。ただし、空間損は次の理由で深宇宙通信の性能指標ではない。表1のように深宇宙通信で利用可能な周波数帯域はさほど広くない。だから、同じ周波数帯ならば、使用波長をどのように選んでもそれ自体は損失上有意な差を生まない。また、距離は探査機が自由に取得可能なパラメータである。したがって、通信能力として技術的に本質なのはEIRP とG/Tである。それぞれの限界がよく反映されるのがダウンリンクの場合であるので、その代表的な値<sup>(11)~(15)</sup>を表2に並べてみた。ダウンリンクであるから、EIRPは探査機に、G/Tは地球局に属する。特に、G/Tは地球局の性能として立地環境の影響も統計的に加味したeffective G/Tを選んでいる。このG/Tは、アンテナが建つ周辺環境や大気、降雨の影響が織り込まれる、より実際的な値で、地球局同士を比較するのに望ましい。G/Tは仰角によって変わるため、15度(調査した美笹54m地球局の参考値が、この仰角で与えられていただけの理由である。)を指定して選んである。

表2で探査機同士、地球局同士比較してみると、JAXA探査機は総じてEIRPが低いこと(dB表示であるから、真数では1桁近くも能力が違う。)、口径差にもかかわらず、G/Tでは臼田64m地球局や美笹54m地球局はNASA DSNやESAの34m級地球局と余り差がないことなどが分かる。NASA DSNの70m地球局と比べると随分水をあげられている。これらには、もちろん理由がある。まずEIRPであるが、表3に示すように、実はJAXA探査機とNASA探査機ではリソース(質量、大きさ)が全く違う。JAXA探査機がウェット重量(推進を含む重量)で500kg級なのに対して、NASAの探査機はton級である。500kg級は、一般に小形から中形に分類される探査機規模で、ton級は明らかに大形である。表3の通信システムの質量比そのままに通信システムへリソース配分が増えるわけではないが(多くは、観測機器などに配分される。)、それでも大口径の高利得アンテナを搭載可能になるなど、埋めがたい差があり、それが表2の送信能

表 2 探査機のダウンリンク能力 (EIRP (高利得アンテナ) と G/T)

探査機	AKATSUKI	HAYABUSA	HAYABUSA2	JUNO/CASSINI
EIRP (dBW)	45.5	47.2	46.4	58.2/58.9
地球局	UDSC64m	MDSS54m	NASA DSN 70m/34m	ESA35m
Effective G/T (dB/K) @EL=15°	53.35	53.35	59.2/52.6	51.8

表 3 探査機の通信システムリソース

	AKATSUKI	HAYABUSA	HAYABUSA2	JUNO/ CASSINI
通信システム質量比 (%)	5.1	4.1	4.9	2.3/2.4
通信システム質量 (kg)	26.583	21.127	29.86	83.2/139.9
探査機ウェット質量 (kg)	519.51	510.974	609.69	3625/5924

力の違いに現れている。G/Tの方は、この場合、口径が大きいのは JAXA 地球局の方であるから、探査機側で語ったのとは立場が反対である。それなのに優位に立てないのは、雑音を抑える受信システムの冷却の程度と、アンテナの立地環境が湿潤で降雨量も多く、JAXA 地球局にまだまだ不利だからである。

臼田 64 m 地球局と美笹 54 m 地球局の間にも口径差があるのに、両者で G/T が等しいことも一見不思議に思われるかも知れない。これは、海外局に及ばないながらも美笹 54 m 地球局で受信システムの改善がなされ、口径を縮小しても臼田 64 m 地球局と同等の性能が引き出せたということなのである。海外局との差を一層縮めるには、この努力を更に突き詰める必要がある。美笹 54 m 地球局検討時点で、国内の立地環境はどうしても湿潤で、乾燥して理想的な高地に建つ 70 m 地球局とは埋め難い差がある点は十分理解されていた。けれども、臼田 64 m 地球局を引き継いで探査機運用を継続させる目的から、国内に建てる地球局として美笹 54 m 地球局は計画されたのである。これ以上は、海外に理想的な立地を求めていくしかない。

## 4 深宇宙通信と探査の能力

搭載、地上システムを組み合わせるとどこまで通信が行えるか、それこそが深宇宙探査の一つの限界を決める。深宇宙通信は、その目的から図 1 のようにコマンド、テレメトリー、測距（より広くは航法誘導計測）という三つの回線に分けられる。このうち、特にライフラインとなるのがコマンド回線である。アンテナの使い方を思い出せば、低利得アンテナ

を使ったアップリンク回線が最重要とってよい。これが機能している限り、ほかの 2 回線は、探査機を健全な状態へ復帰させた後、再び利用可能になる。もっとも、これは無人探査機を誘導制御するようなミッションの場合である。有人ミッションの場合は人命が懸かっている、双方向を（つまり、コマンド回線もテレメトリー回線も）平等に重んじる必要がある。この点は重要で、従来の無人ミッション中心の深宇宙通信は地球局による補完の役割が大きく、アップリンク、ダウンリンクで過度に非対称な回線である。将来、有人の深宇宙ミッションの通信を論じる場合には、意識転換が必要である。

表 2 の HAYABUSA2 の EIRP (高利得アンテナだけでなく、中利得アンテナや低利得アンテナの EIRP も用意する。) と美笹 54 m 地球局の G/T に基づいて、JAXA の X バンドの通信能力（ひいては、探査機の運用能力と言ってもよい。）を評価してみると図 4 の結果を得る。文献 (1) においても同様の結果を示したが、それは HAYABUSA2 の仕様上の制限も反映したものであった。図 4 は、ミッション固有の制約を除いて表示してある。これは、MMX の搭載通信能力が仮に HAYABUSA2 と同じであった場合に、利用可能となる通信能力である。

無人ミッションを想定してライフラインであるコマンド回線から見ると、低利得アンテナで回線を維持できるのが 5 au (天文単位) くらいまでである。緊急時にも MGA を使用可能とする特段の策を講じなければ、HAYABUSA2 級のミッションの行動範囲はこの程度（木星圏までがやっと）と結論される。これは、文献 (1) で述べた結果と同じである。テレメトリーでは地球に近いところほどデータレートが向上するので、サンプルリターンを

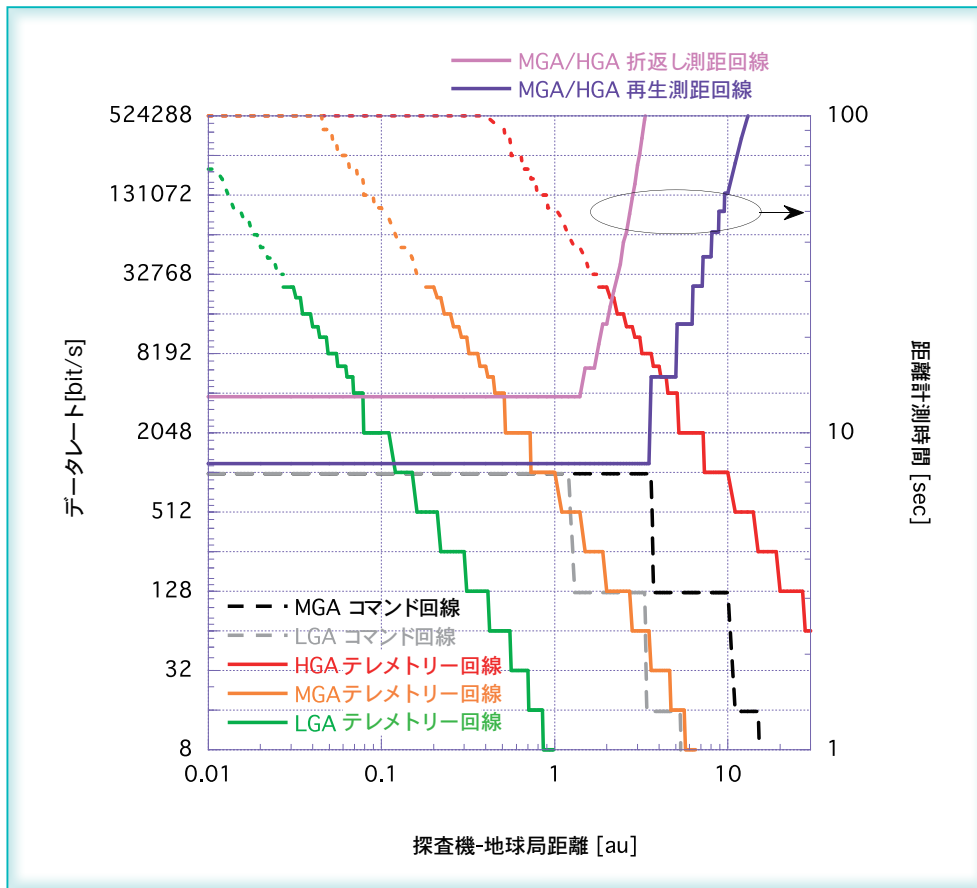


図4 JAXA 探査機の JAXA 地球局による JAXA ミッションのための深宇宙通信能力

コマンド回線 (破線: 左軸), テレメトリー回線 (実線, 点線: 左軸), 及び測距回線 (実線: 右軸). また, 図中 HGA (high gain antenna): 高利得アンテナ, MGA (medium gain antenna): 中利得アンテナ, 及び LGA (low gain antenna): 低利得アンテナである. テレメトリーの実線部分と点線部分は, それぞれ PCM-PSK-PM, Bi- $\phi$ -PM の異なる変調方式に対応する. 近距離でテレメトリー回線のデータレートが頭打ちなのは地球局受信機の制約による.

目的とするようなミッション (MMX は実際そうである.) では, 復路で地球に近づく期間を利用して一時的に保存した大量の観測データを下ろし切ることが考えられる. このようにミッションの事情を生かせば, 遠方の探査対象において回線速度が速くないからと諦めず, 高解像度, 高サンプリングレートのデータが地上で取得可能になる場合もある. 工夫によって, 中小形衛星であっても質で劣らないミッションを創出できるようになるだろう. 地球へ十分近づいてから観測結果を初めて確認することでよければ, 高利得アンテナを積まない小形ミッションであっても, 大形ミッションに対向する余地が出てくるように思われる. 予算, リソースの身の丈に合わせて探査機を設計するにしても, 工夫次第で成果を譲らない道はありそうである. 深宇宙通信の能力に限らないが, JAXA の探査ミッションは大概そのような性格であったと思われる.

測距 (距離計測) の回線については, 通信回線と違ってなじみが薄く少し説明が必要だろう. 深宇宙

探査の測距方式には現在 2 種類ある<sup>(16)</sup>. 図 5 にその動作原理を模式的に示した. どちらも測距信号を地球局と宇宙機間で往復させて, 送受測距信号間の位相差から距離を計測することに違いはない. ただし, 「折返し測距」と呼ぶ方式では, アップリンクで受信した測距信号をそのまま帯域制限だけをして再変調するのに対して, 「再生測距」と呼ぶ方式では測距信号を構成する PN 信号系列を正確に復元して折り返すのである. この際, 再生測距では単なる信号復元と異なって, ドップラー効果など含めて搬送波共々周波数がドリフトしていく様子まで正しく再生することが求められる. 割当帯域の狭い深宇宙通信では, 精度を上げるために単純にチップレートを上げるだけでは通用しない. そのため, 計測精度向上には長時間の位相比較を可能とする必要があり, 単に PN 信号系列を復元するだけでなく, 探査機の軌道運動も含めた丁寧な再生が必要なのである.

2 種類の測距方式の限界を図 4 に示した. 測距



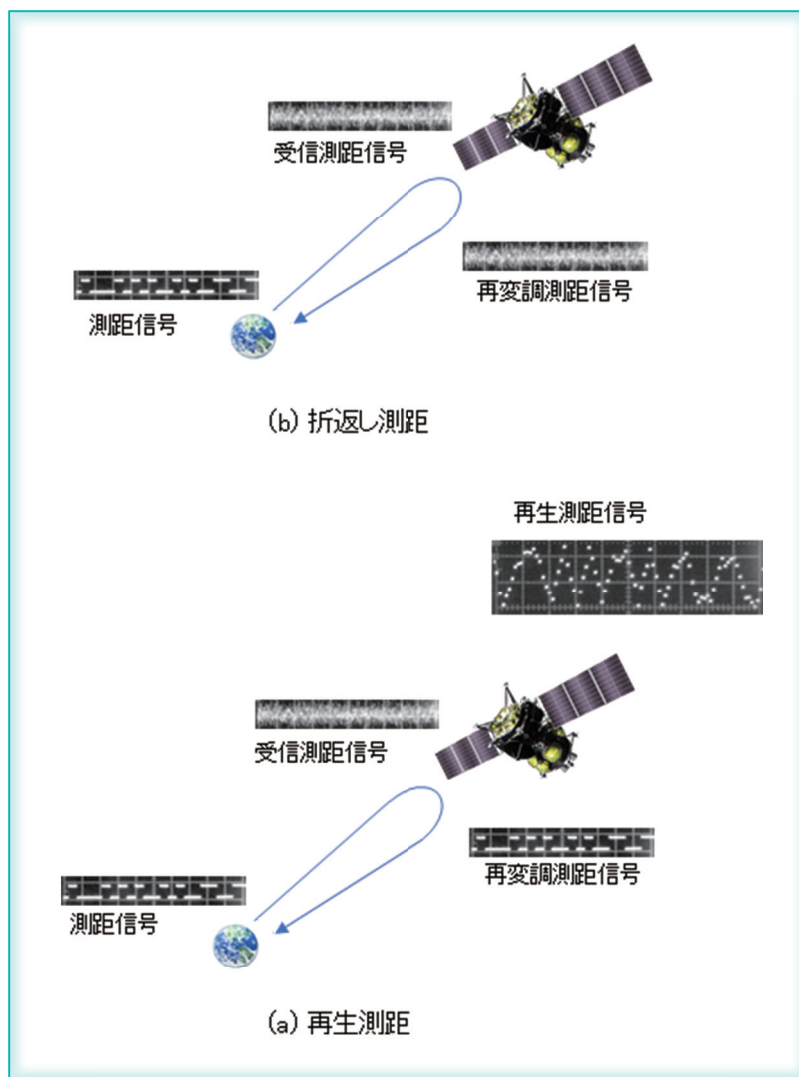


図 5 折返し測距と再生測距の模式的説明

距離計測での再生は PN 符号の 0/1 だけでなく、搬送波と測距信号への Doppler 変動まで考慮して両者のコヒーレントな関係を保全するように行われる。

は、搭載側でコヒーレントに（測距信号と周波数比が一定値になるようにして）折り返した搬送波が地上で捕捉される限り実施可能である。PN 信号系列は搬送波に周波数コヒーレントに繰り返して、基準信号の安定度が許す範囲で十分に長く積分可能である。したがって、測距の限界は、積分時間の設定が運用上どれくらい現実的かで判断することになる。ここでは、仮に 1 分に 1 点の頻度で計測可能ならよいとすると、折返し測距の限界は 2 au 程度にあり、それより遠くにあつては再生測距に頼る以外にない。実際、遠地点が 2.5 au ともなる HAYABUSA2 では再生測距が主に使われてきた。ただ、再生測距方式の目下の弱点は、それに対応する設備が必要になることで、どこでも実施できるわけではない。表 2 が表すように、JAXA 地球局と JAXA 探査機の回線能力は海外のそれらと比べて潤沢と言えないため、早くから再生測距方式の実用を

進め、世界に先駆けて使ってきたわけだが、後から標準化された PN 信号系列は JAXA が整備してきたものと信号系列が異なるという事情もあって、JAXA の方式は海外局へ普及しなかった<sup>(17)</sup>。ゆえに、海外局では折返し方式を使わざるを得ず、完全に置き換えるに至っていない。海外局での再生測距のためには、標準化された PN 測距信号系列に対応させることが必要で、次期トランスポンダで対応することになっている<sup>(4)</sup>。

上記で断りなく、“コヒーレント”という用語を使ったことに違和感が残ったかもしれない。深宇宙、近地球いずれの通信においても、アップリンク搬送波に同期してダウリンク搬送波を生成送信する場合を指し、トランシーバと呼ばずにトランスポンダと呼ぶのは、まさにこのための装置を指している。そして、深宇宙通信の測距は、このコヒーレントの条件で初めて実施できる。深宇宙通信と断った

表4 深宇宙通信のコヒーレント比と周波数チャンネル

なお、JPL/DSNではX/Ka及びKa/Kaについて下記を含み、指定された範囲からより自由に選んでよい。

	X/X	X/Ka	Ka/Ka
アップリンク / ダウンリンク周波数比	749/880	749/3328	3599/3344
		749/3344	3599/3360
		749/3360	

ように、近地球通信で行われる測距でそのような制限はない。では、深宇宙通信だとなぜそれを必要とするのか、それは深宇宙での測距に必須な長時間積分を、コヒーレントな関係に依拠して得る搬送波のドップラー効果の精密測定を利用して実現するというのが答えなのだが、これだけで「腑に落ちる」のは難しいかもしれない。同じ理由で、搬送波と測距信号のクロック周波数もコヒーレントな関係に置いて崩れないようにしている。再生測距方式の再生は、これを再生前後で保全する必要があったのである。なお、このコヒーレントという条件のために、深宇宙通信では表4のようにアップリンクとダウンリンクの比があらかじめ固定されている。搭載及び地上システムは、この比を前提にシステムを設計する。このように、アップリンクと対応付けられてダウンリンクチャンネルが決まってしまうため、深宇宙通信では、特に表1の帯域についてアップリンクとダウンリンクで使用する周波数の組を一定間隔で並べたものを周波数チャンネルと呼んで識別する傾向が強い。

## 5 深宇宙通信と周波数資源の共有

深宇宙ミッションは、表1の限られた周波数資源を共有している。トラブルを回避するため、各機関が共同で管理していく必要がある。さもなければ、深宇宙通信のダウンリンクなど、干渉によって容易に使用不可能になってしまう。1ミッションでも独り善がりな使用を許してしまえば、妨害が妨害を呼んで不毛な争いにつながるだろう。そのため、深宇宙通信の帯域の使用や他ユーザからの干渉について、各機関が自主的に尊重するべく定めたルールが公開されている。深宇宙通信の能力は、そのような相互の協力の中で生かされるものであらねばならない。SFCG (Space Frequency Coordination Group) や CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems) といった団体が、そういった内容を取りまとめる場になってきた。主だった宇宙機関のほとんどがこれらに参加している。ただ

し、これさえ守ればよいといった統一的な資料はなく、外部からは内容が分かりにくいのが難点かもしれない。それでも、周波数資源を共有し、持続的に利用していくために重要な活動であり、決してないがしろにすることがあってはならないものである。深宇宙通信は原則、これら共通ルールを遵守するよう設計されるものである。

例えば、SFCG 23-1R-3 という文書がある<sup>(18)</sup>。これは、深宇宙通信ユーザに対して、占有帯域の制限や深宇宙帯域内への不要な放射を防ぐよう求める内容を含んでいる。その内容には非常に厳しい条件もある。それは、深宇宙通信の地球局に対し、その雑音の水準を見掛け上、上げてしまいかねない干渉信号（不特定のスプリアスを含む。）を使用帯域外に振りまかないように求めるもので、その抑制水準が-255.1 dBW/(Hz・m<sup>2</sup>) にもなる。これはNASA DSNの70 m地球局で正対して受信したとして安全な基準であるから、不要信号を雑音水準よりはるかに下げるように求める内容と言ってよい。厳しい条件ではあるが、深宇宙探査機のほとんどは打上げからほどなくして十分遠方へ飛んでいくので、大抵、ウェーバー（適用免除）の対象にして解決できることがほとんどである。このため、これを大した問題とも思わないで、半知半解に処置してしまうことが多いのだが、実は不要信号を持っていると重大な運用制限へつながる懸念がまだ残っている。

図6のグラフ中に、搬送波と不要波の模式的な図を置いた。宇宙機の送信系で不要波が複数発生している様子で、占有帯域の外で不要波抑圧の程度、例えば、60 dBc（この想定は決して悪すぎるものではない。）を満たしている状況を想定する。前述のことから、不要波が雑音水準より下にあらねばならない状況では、搬送波のレベルは雑音水準に対して不要波抑圧量より高くし得ない制約が生まれてしまうことに容易に気づくと思われる。つまり、どれだけ探査機が遠方へ行こうとも、例で言えばC/Noが60 dBHzより高くなるような状態を作れない状況に陥ってしまう。これでは、わざわざ高利得アンテナを持っていく意味がないかもしれない。不要波

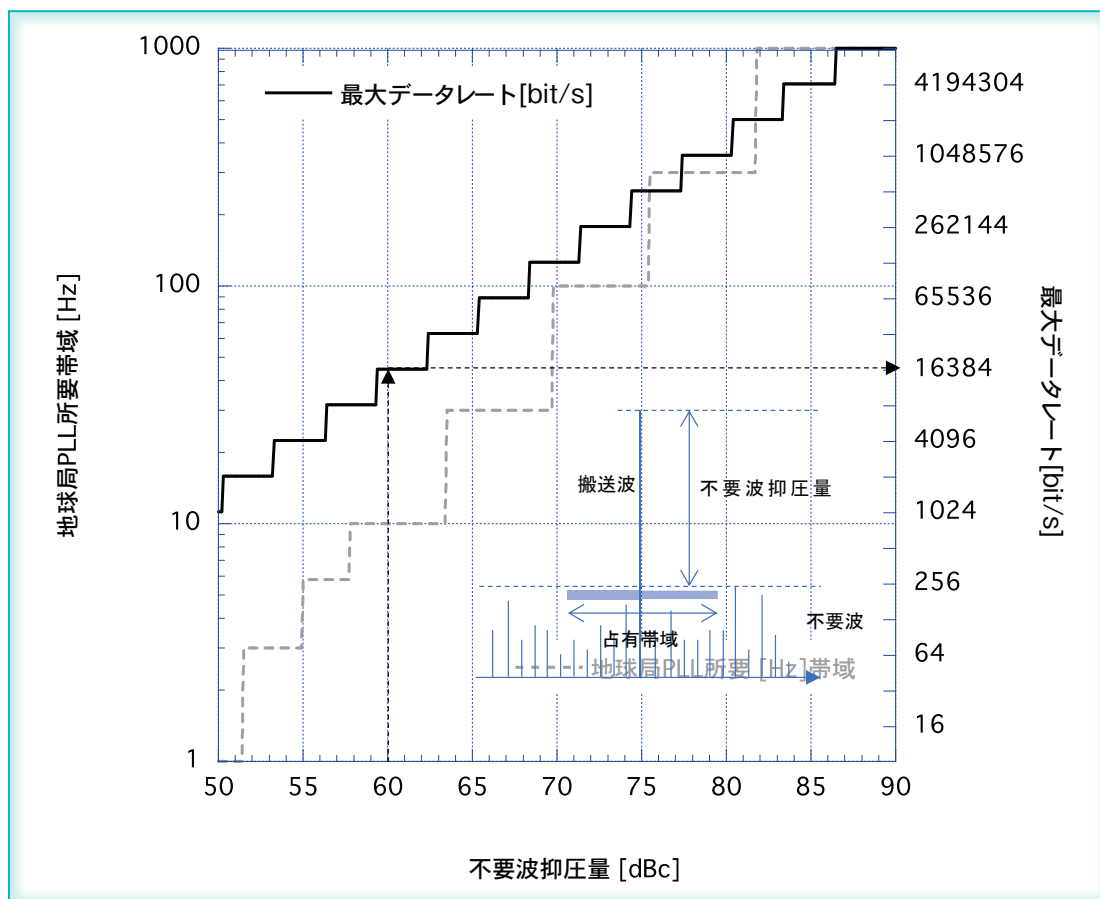


図6 不要波抑圧量の不足によって使用可能な最大データレートが制約されてしまう計算例。

搬送波捕捉の条件である地球局のPLL帯域幅指定(左軸), 最大データレート(右軸). PLL帯域幅は1 Hzを下限とした. 例えば, 60 dBcのとき, 矢印をたどると高々16 kbit/sしか許容されないことが分かる.

抑圧が更に足りなければ, 許されるC/Noが更に低下して利用可能な最大データレートへの制約はもっと強くなるだろう.

図6は, 不要波抑圧次第で利用可能な最大データレートがどうなるか簡易的に評価したものである. データレートを最大にしたいと思うと, データ成分へできるだけ電力を回す目的から, なるべく深い変調を掛ける戦略を取ることになる. このような場合, 搬送波捕捉の限界に気をつけながら最大送信可能なデータレートを探っていく. 結果によれば, 仮にPLL所要帯域下限を3 Hzと決めて, このような戦略で粘れるのは不要波抑圧が53 dBより高い場合で, それ以下だとそうならないように変調度を下げて対応するしかない上, 60 dBcを確保できたとしても送信可能なデータレートは高々16 kbit/s程度に抑えられてしまうというものである. 一般に, 深宇宙通信のトランスポンダは60 dBcを優に上回る抑圧を目指して設計されるが, それは本質的にこのような問題も防いでいる. 4. に述べたような往還機で復路に高速レートでデータを再生送信するにも, 不要波抑圧が不十分であれば画餅に終わっ

てしまうだろう. 小形のミッションだからといって, 分析抜きに安価に釣られて安易に地上製品を持ち込んでも, 深宇宙通信では独り善がりになってしまうことになりかねない. 不案内な場合は, 無知の知を意識することが大事である.

## 6 深宇宙通信の今後

深宇宙通信の今後を展望してまとめに代えよう. 深宇宙通信のパラダイムは, ずっと大容量通信であった. 距離減衰の主たる制限ゆえに地上サービスと比べて各段に低いデータレートを甘受してきたが, そうではあっても, 最新の科学観測装置を活用するには, 地上技術の進歩に合わせて技術向上していくことが深宇宙通信に求められてきた. そのため, Kaバンドであれ, 光であれ, 実用上使用制約が大きすぎると分かっているにもかかわらず, 試して乗り越えてみせなければならない必要に迫られてきたと言える. 今後, 有人による深宇宙探査の機会が増えてくると, まますますこの必要は高まってくるだろう. Kaバンドや光の扱いにくさは地球局を構えるがゆ

えの問題なので、今後は宇宙局中心に深宇宙通信ネットワークは完結して、ライフラインであった地上への回線がむしろ支線になる時代が来るかもしれない。そうなれば、まさに宇宙の時代である。

それとともに、宇宙における、より強い電波監視も持続的な発展のために必要になってくるかもしれない。今は、地上からはるか遠方にある世界は地上サービスとは無縁だとして、基本的に緩い監視で済んでいて比較的自由的な世界である。真の宇宙の時代には地球中心の考え方は見直され、電波や光はあらゆる方向に乱れ飛んでいるかもしれない。科学や社会のためには、それが無秩序であってはならないだろう。そのような時代には、本稿で述べた深宇宙通信への割当帯域の内での活動など今は昔になりそうである。時代錯誤の古き良き時代の思い出話に過ぎなくなるかもしれない。そう遠くない将来のことと楽しみにしたい。

## ■ 文献

- (1) 戸田知朗, 武井悠人, 藤井 淳, “HAYABUSA2 ミッションにおける深宇宙通信,” 信学誌, vol. 104, no. 10, pp. 1090-1097, Oct. 2021.
- (2) Recommended Standard CCSDS 401.0-B-32, “Radio frequency modulation systems, part 1, earth stations and spacecraft,” Oct. 2021.
- (3) T. Toda and N. Ishii, “In-flight validation of Akatsuki X-band deep space telecommunication technologies,” Selected Papers from 28th International Sympo. Space Technol. Sci., Tran. Jpn. Soc. for Aeronautical and Space Sci., Space Technology Japan, vol. 10, no. ists28, pp. To\_3\_7-To\_3\_12, 2012.
- (4) 戸田知朗, 高島 健, 西山和孝, 今村裕志, 岡田英人, 川崎絢介, 下奥あゆ美, “DESTINY+ 実証で先駆ける次世代搭載通信機の開発,” 第 65 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 4S15, Nov. 2021.
- (5) J. Taylor, M. M. Fernandez, A. I. Bolea Almanac, and K. M. Cheung, “Deep space 1 telecommunications,” DESCANSO Design and Performance Summary Series, Oct. 2001.
- (6) F. De Tiberis, L. Simone, D. Gelfusa, P. Simone, R. Viola, A. Santoni, O. Cocciolillo, M. Ziarelli, F. Barletta, N. Salerno, M. Maffei, and V. Nanni, “X/X/Ka-band deep space transponder for the BepiColombo mission to mercury,” Acta Astronautica, vol. 68, no. 5-6, pp. 591-598,

March 2011.

- (7) T. Toda, K. Numata, T. Uchimura, Y. Mizukami, K. Yuchi, M. Tsuboi, Y. Murata, T. Tomiki, F. Nonaka, and T. Onishi, “JAXA new deep space ground station for HAYABUSA2,” 7th ESA International Workshop TT&C Syst. for Space Appl., 2B-4, Sept. 2016.
- (8) 戸田知朗, 朝木義晴, “深宇宙探査と GREAT プロジェクト,” 第 62 回宇宙科学技術連合講演会論文集, 3C04, Oct. 2018.
- (9) 衛星通信, 飯田尚志 (編著), オーム社, 東京, 1997.
- (10) “Deep space telecommunication systems engineering, edited by J. H. Yuen, Plenum Press, 1983.
- (11) PLANET-C 飛翔実験計画書, SES-TD-09-003 (JAXA 内部文書) .
- (12) M-V-5/MUSES-C 飛翔実験計画書 (衛星編), SES-TD-02-006 (JAXA 内部文書) .
- (13) はやぶさ 2 飛翔計画書, PMY-014052 (JAXA 内部文書) .
- (14) J. Taylor, L. Sakamoto, and C. J. Wong, “Cassini orbiter/huygens probe telecommunications,” DESCANSO Design and Performance Summary Series, Jan. 2002.
- (15) R. Mukai, D. Hansen, A. Mittskus, J. Taylor, and M. Danos, “Juno telecommunications,” DESCANSO Design and Performance Summary Series, Oct. 2012.
- (16) T. Toda, “Experimental comparison between regenerative ranging and turn-around ranging,” Proc. 29th International Symposium on Space Technol. and Sci., ISTS 2013-j-19, June 2013.
- (17) Recommended Standard CCSDS 414.1-B-1, “Pseudo-Noise(PN) Ranging Systems.” March 2009.
- (18) Recommendation 231R-3, EFFICIENT SPECTRUM UTILIZATION FOR SPACE RESEARCH SERVICE, DEEP SPACE (CATEGORY B) , IN THE SPACE-TO-EARTH LINK.

(2023年8月1日受付, 10月13日再受付)

## 戸田知朗 (正員)

1994 東大・工・電子卒。1999 同大学院博士課程了。同年宇宙科学研究所着任。以来、光通信、深宇宙通信、深宇宙探査地上局の研究開発に従事。現在、JAXA 宇宙科学研究所准教授。工博。平 29 年度文部科学大臣表彰など受賞。



# 逆問題 インスパイアード 計算電磁気学

宇野 亨 (正員：フェロー)

1980東京農工大・工・電気卒。1985東北大学院工学研究科博士後期課程了。工博。1985東北大助手，1991同助教授。1998東京農工大教授，2022同大学名誉教授。現在，同大学産学連携研究員。電磁波における逆散乱問題，計算電磁気学などの研究に従事。2011-2012本会アンテナ・伝播研究専門委員会委員長，2004-2005 IEEE AP-S Japan Chapter Chair，2015-2021日本学術会議URSI-B小委員会委員長など。1981本会学術奨励賞，2008通信ソサイエティ論文賞など各受賞。著書「数値電磁界解析のためのFDTD法—基礎と実践—」，「電磁気学」，「メタマテリアルアンテナの基礎」（いずれもコロナ社）など。



東京農工大学名誉教授  
宇野 亨  
Toru Uno

## 1. はじめに

ただただ鑑賞するだけだったが，幼い頃は全くの漫画少年であった。1964年の東京オリンピックに前後して少年・少女漫画の名作が次々にテレビ放映されると，同世代の子供たちは皆テレビにくぎ付けになった。スポコン（スポーツ・根性）漫画に夢中になり，ロボット・ヒーロー物に心を奪われた。自らの意思で空を飛ぶロボットやサイボーグであったり，腕時計形の無線機が登場したりと，未来の技術をふんだんに取り入れた勧善懲悪のストーリーが子供の心をわしづかみにしたのであろう。その中で，主人公に的確なアドバイスをする図1のような科学者・技術者が登場することがあったが，大抵はコンピュータを背にして紙テープを読んでいる電子工学者であった。物理学者でも機械工学者でもなかったから，作者にとっても電子工学が未来を切り開く技術との認識があったのであろう。一方，筆者の生まれは茨城県の北部に位置する常陸太田市で，近くには日立製作所の広大な工場が威容を誇り，親戚の多くは日立やその関連会社に勤めていた。そして盆，正月になると，「これからは電気だ」というような話をよく聞かされた。このため私自身も将来は地元で電気に関する仕事に就くのであろうと漠然と想像していたと同時に，できるだけ早く電子工学関連の技術者になろうとも考えていた。茨城高専の電気工

学科を選んだのはこのような背景からであった。

茨城高専には恩師となる鈴木佐年先生がおられ，授業でつまらなそうにしている学生を集めては半強制的に洋書講読をさせていた。筆者も最初は複素関数論<sup>(1)</sup>，次にFeynman電磁気学<sup>(2)</sup>の輪講に参加し，4年生の後期には現在に至るまで読み続けることになるStratton<sup>(3)</sup>を紹介された。土曜の午後も含めて講義のない時間のほとんどを鈴木先生の部屋で過ごしたと言っても過言ではない。また大学進学を強く勧められて，最初に合格通知が来た東京農工大に

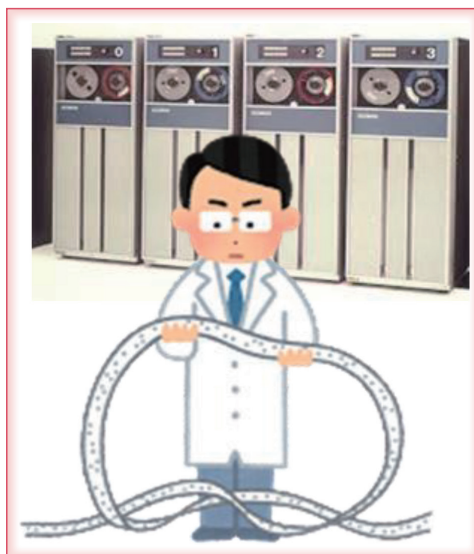


図1 矛盾を探してみてください  
(答えは「5. むすび」で)

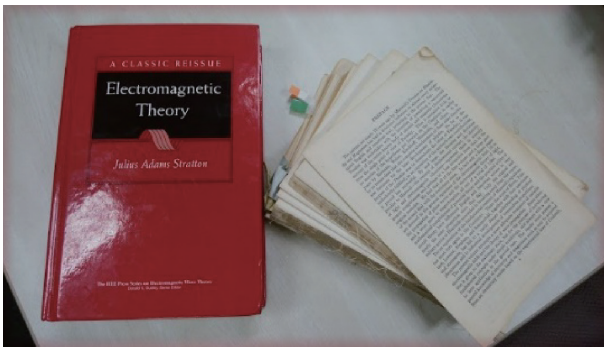


図2 2冊のStratton

編入学したが、その後も度々相談に乗って頂いていた。東北大学の大学院に進もうと考えたのも鈴木先生の影響が大きかったかもしれない。また、大学教員になることが決まったときには、「もし教授になるようなことがあったら電磁気学の教科書<sup>(4)</sup>を書くように」と命じられていた。鬼籍にお入りになる前に約束を果たせたことは何よりうれしい。なお、図2は今から数年前に撮った2冊目のStratton購入時の記念写真である。

本稿では、研究の詳細な内容というよりはむしろ研究の苦労や、筆者がそれをどのように乗り越えてきたかなどを、若かりし頃を中心に振り返ることにする。やや手前味噌的な表現があるかもしれないが、年齢によるものであると御容赦願いたい。



## 2. 最適化問題と逆問題

研究というものに本格的に向き合うことになったのは、修士課程の学生として安達三郎先生の研究室に所属してからである。修士論文のテーマは「宇宙衛星発電方式におけるマイクロ波電力伝送の最適化」で<sup>(5)</sup>、最初の課題は伝送効率を最大にする開口分布を正確に求めなさい、というものであった。当初は積分方程式という言葉さえ知らず、全くちんぷんかんぷんで取り付く島もないという状態であったが、考え続けると糸口は出てくるものである。ヒントになったのは当時週1回のペースで開催されていた虫明康人研究室・安達研究室の合同電波ゼミであった。虫明研究室の澤谷先生やドクターの学生から発表されたモーメント法を含むアンテナの数値解析及びその関連手法<sup>(6)</sup>が大いに参考になり、積分方程式を離散化して行列の固有値問題に帰着させることによって高精度な数値解を見つけることができた。うまくいったのは核関数が滑らかであったからである。これが最初の論文の一部分となったが<sup>(7)</sup>、数年後にグリーン関数を核とする積分方程式に応用した例を見つけた<sup>(8)</sup>。導関数が不連続である

ため誤差が大きいのであるが、そのようなコメントはなかった。これを先に読んでいたら、積分方程式の離散化という方法は採らなかったかもしれない。

次に与えられた課題は、漏れ電力密度やサイドロープレベルを一定値以下にして伝送効率を最大にする開口分布を求めなさい、というもので、制約条件付きの最適化問題である。離散化することによってベクトル空間の最適化問題に変換できたが、数学の教科書のように計算してもうまくいかず大分遠回りをした。SUMT (Sequential Unconstrained Minimization Technique)<sup>(9)</sup> という方法をたまたま立ち寄った仙台市内の書店で見つけて解決することができた。幸運であった。最近では市内の書店で理工系の本を見掛けることが少ないのは寂しい限りである。遠回りの原因は文献検索である。当時は、論文の引用文献、更にその文献の引用文献と次々調べてゆくか、あるいは図書館で関連の本を手当たり次第に調べる、ということしかできなかった。一時は経済学部図書室まで調べに行ったほどである。このことを経験するとGoogle検索の有難さが身に染みる。

修士論文の審査が終わると、安達先生からマイクロ波電力伝送の最適化は一段落ついた、と言われてほっとした。その半面、博士課程に進学したい旨を伝えていたので、テーマをどうするか迷った時期もあった。一方、最適化法を調べていると逆問題という言葉に出会うことが少なくない。恐る恐る最適化法を使った逆問題に挑戦してみたいと申し出ると「非常に難しいが挑戦する価値はある」とあっさり認めてくれた。逆問題を選んだのは「電気回路のインピーダンスを計算できるのは当たり前。インピーダンスから回路が組めるようになれば一人前」という鈴木先生の何気ない一言であったようにも思う。いつ言われたかは記憶にないが、いつまでも気になる一言であった。また、逆問題に取り掛かる一方で、修士論文の内容を学術論文<sup>(7)・(10)</sup>にまとめるように指示された。何度か原稿のやり取りがあったが、その度ごとに真っ赤に、それでも足りないときは青や緑で校正された原稿が返ってきた。原文の句読点ですら残っていない、というのが常であった。おかげで論文の書き方も覚えることができたし、個人的な文字もすらすら読めるようになった。

3年はあっという間で、安達先生の予想どおり非常に難しく、研究成果の一部は専門書で紹介されたものの<sup>(11)</sup>、期間中に学術論文にまとめることはできなかった。審査内容は知る由もないが「後で出せばよい」と言って頂いた。博士論文の内容は計算電

磁気学との関係を含めて次の節で簡単に説明する。

ここで学生時代の思い出を一つ紹介する。10年くらい後には30名を超える大所帯となるが、この当時はこじんまりした研究室で、昼食も夕食もみんな一緒に生協で取っていた。また、安達先生が研究室に現れるとクモの子を散らすように自分の机に向かうというのが常であった。そんな中、私の机にあったStrattonを見つけて「宇野君もStrattonを読むのだね、簡単だから丁度よいね」と言われたことを覚えている。実のところ、何度読んでもなかなか理解できないでいた。努力の賜物が図2なのであろう。凡人にとって「理解」とは「慣れ」の一種であるようだ。



### 3. 計算電磁気学

#### 3.1 逆問題から計算電磁気学へ

$x$  を電流分布、 $y$  を電磁界分布とすると、マクスウェルの方程式は  $y = Lx$  と書くことができる。ただし、 $L$  はマクスウェル方程式と境界条件を満足する積分演算子である。逆問題の解は形式的には  $x = L^{-1}y$  と書くことはできるが、このような逆演算子を一意的に定めることはできない。また具体的には、 $y$  は電界の観測値あるいはセンサの出力電圧となるため、必ず観測誤差が含まれる。博士論文では誘電体分布の逆問題を  $F(x) = ||y - Lx||$  を最小化する最適化問題に置き換えて、観測誤差が含まれても不安定にならないロバストな逆解法を探ることにした。 $x$  は離散化した誘電体分布である。目的関数  $F(x)$  の等高線を模式的に描くと図3のようになる。外側から順に標高が低くなっている。適当な初期値（白丸）から出発して  $F(x) \rightarrow 0$  となる方向を探索するのであるが、その方向と進み幅を適切に選ぶことによって観測誤差と同程度の誤差で解が求ま

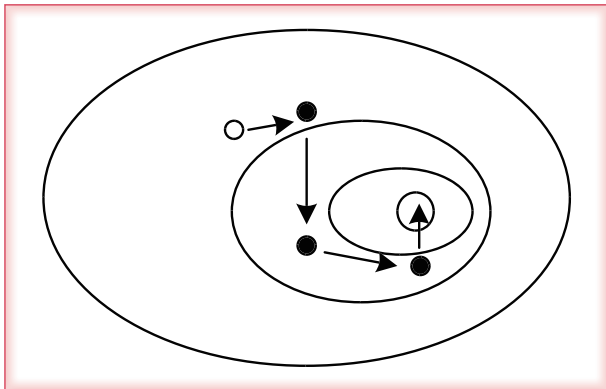


図3 目的関数  $F(x)$  の等高線(実線)と最小値の探索過程(白丸(初期値)と黒丸) 最急方向が必ずしも最良でないことが知られている

ることが分かった<sup>(12)</sup>。しかし、その影響を正確に調べるには誤差のない解、すなわち、マクスウェルの境界値問題(順問題)  $y = Lx$  を正確に計算できる手法が必要になる。解析的に解ける問題はほとんどないため、必然的に計算機を利用した数値解析となる。このためには、数値計算に適した電磁界解析手法の開発が必要である。この分野を総称して計算電磁気学といい、筆者が助手として勤務し始める頃からコンピュータの発達・普及とあいまって急速に発展した<sup>(13)</sup>。パソコンが本来の意味でパーソナルになってきたのもこの頃である。

計算電磁気学の進展も計算機の発展も逆問題の解法と無縁ではない。最近では三次元の連立積分方程式をモーメント法で離散化して最小二乗法で解を求めるという計算も比較的簡単に短時間でできるようになった<sup>(14)</sup>、<sup>(15)</sup>。実験的にもその有効性が示されており、やっとではあるが実用のレベルに達した感がある。

#### 3.2 計算電磁気学とFDTD法

図4は筆者が助手になりたての頃の写真で、机は多少広くなったものの学生と同じ部屋のままであった。また、虫明先生の退官に伴って澤谷先生が安達研に移ってこられ、少し後に助教授に昇進されたが、居室は変わらずに机も私の対面にあった。この頃から委託研究や共同研究が増えて澤谷先生と手分けしてこれらに当たっていたが、教わってばかりいたというのが実態に近い。研究内容は多岐にわたった。一部には実験を含んでいたものの、多くは理論解析を求めるものであった。本稿の後半でその一部を簡単に紹介する。一方、助手であったため講義はなかったが、学生の指導や共同研究などを通して多くのことを学んだ。この頃蓄えた資産がその後を支える全てであったと言っても過言ではない。助



図4 助手になりたての頃の筆者

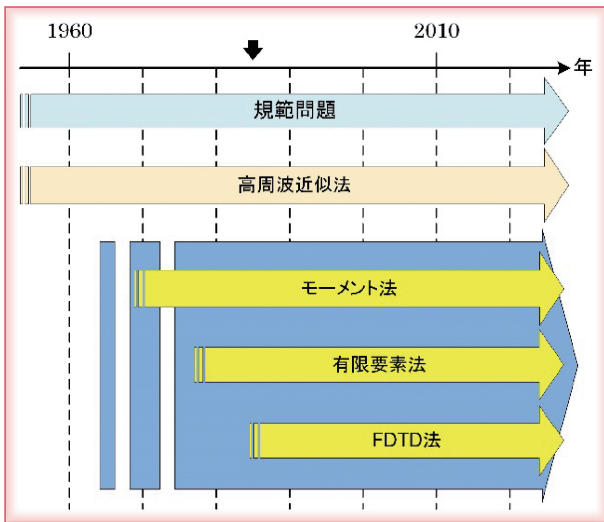


図5 主な電磁界解析手法の変遷

手の頃にもっと頑張っていれば、と何度も思ったものである。

図5は主な電磁界解析手法の変遷を示したもので、時間軸にある下向きの矢印は筆者が助手となった1985年である。この頃になると、国内でも海外でも電磁界やアンテナ解析の主流は数値解析に移りつつあった。また、モーメント法を使った線状アンテナ解析のシミュレータが現れ、有限要素法を用いた導波路解析の研究が盛んに行われるようになった。これに対してアイデア自体は既に知られていたものの<sup>(16)</sup>、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法はまだ一般には普及せず、一部の研究者がその可能性を探っているというような段階であった。これは有効性を確認するために必要な能力を持つ計算機がなかったためである。それではそれまでの理論計算や高周波近似法が全く廃れてしまったかというところではない。モーメント法も有限要素法もFDTD法も結局は小さな空間内の電磁界を正確に計算しておいて、それを積み上げてゆくという手法であるから、波長に比べて大きな空間の問題は不得意である。このため、どれだけ大きな問題を解けるかは計算機の実力次第である。これに対して、高校で学んだ幾何光学に代表される高周波近似法は遠方の電磁界を精度良く計算できる方法であるから、大きな空間の問題が得意である。その表現式を具体的に得るには規範問題の高周波近似解が利用される。一方、規範問題とは教科書にも載っているような問題であるから、容易に計算できそうであるが、計算法を工夫しないと正確な値は求まらない。例えば、 $\sin x$  は無限級数で定義されるが、 $x$  が大きいときに定義式どおりに計算しても、丸め誤差のため正しい値は求まらない。これが数値計算の難しさで

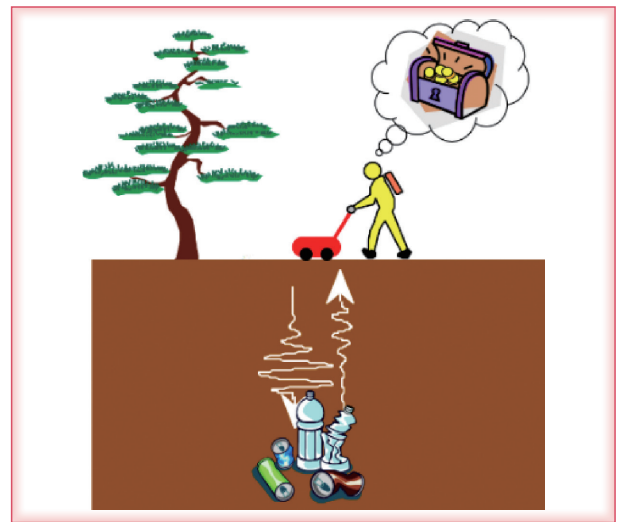


図6 地中探査・遺跡探査レーダ

もある。現在では、精度が保証されたライブラリがそろっているが、1985年当時はこれを作るのに大変苦労した。研究の大部分の時間がライブラリの作成に充てられるということもしばしばであった。

さてこの当時、図6のような地中探査用のパルスレーダに関連して埋設物からの過渡散乱界の解析を行っていた。単純なアンテナなら高精度の高周波近似解を見つけることができたが<sup>(17)</sup>、モーメント法を用いても当時実用されていたキャビティ付きのボウタイ(蝶ネクタイ)形のアンテナの解析は極めて困難であった。ところが、当時博士課程の学生であった何一偉君(現在阪電通大准教授)がFDTD法を使うと簡単にモデル化できて計算精度も高いことを実証してくれた<sup>(18)</sup>。しかも、コーディングは極めて簡単であったため、非常に感激した記憶がある。一方、澤谷先生はその頃新しいモーメント法の開発や計算の効率化・高精度化に取り組んでいたこともあり、安達先生からはFDTD法の高度化に取り組むよう命じられた。澤谷先生からはアルゴリズムが単純すぎるから「哲学を入れなさい」との注文があった。応えられないままに定年を迎えてしまったが、ここでは取り組んだ研究の中から2、3の例を紹介する。

1991年にペンシルベニア州立大のR. J. Luebbers教授がサバティカルで安達研究室に滞在すると、FDTD法の研究が更に進展した。滞在中に携帯電話用アンテナや非線形磁気シート、分散性媒質などへの適用方法を共同で研究し、その成果は学術論文にまとめられるとともにFDTD法の最初の著書にも加えられた<sup>(19)</sup>。また、ゼミ→研究会→国際会議と順を追って議論してから論文にする、という手順は、日本独特のものであることを知った。



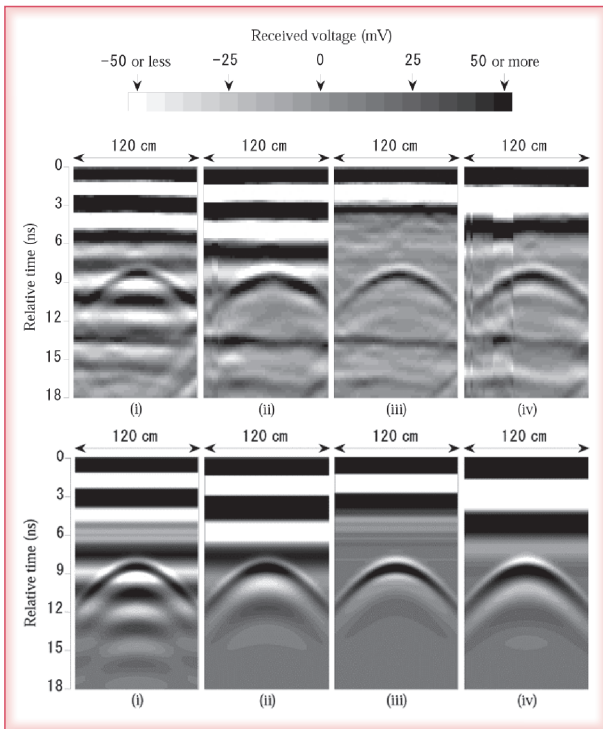


図7 4種類のレーダによる埋設管の過渡応答波形  
上は測定値，下は計算値  
(文献(21)から引用，©IEICE)

安達先生が退官されると同時に東京農工大に移動したが、その少し前から移動後の数年間は文部科学省科学研究費補助金重点領域研究（遺跡探査）に参画して、遺跡探査パルスレーダの設計開発とイメージング法の研究にあたった。図7は最初のドクターとなった西岡泰弘君（現在三菱電機勤務）が考えた4種類のレーダアンテナを送受信として並べ、地面を平行に移動しながら受信電圧の時間応答を記録したもので、上が実験値、下がFDTDによる計算値である。アンテナはフェライト内装キャビティ付きの抵抗装荷ボウタイアンテナで<sup>(20)</sup>、フェライトの有無、アンテナの形などを変えた4種類である<sup>(21)</sup>。初期の大きな信号（白黒の平行な帯）は送受信アンテナ間及び地表との相互作用によるもの、その後受信される山の形をした信号（双曲線状になることが知られている）が埋設管からの散乱波である。これがきれいに受信できているレーダがよい。実験は砂を満したタンクで行ったため、底面や側面からの反射が現れているが、実験値と測定値はよく合っていることが確かめられた。このため、その後のアンテナの最適化は専ら計算で行った。このアンテナをマルチスタティックレーダとして福島県郡山市大安場古墳<sup>(22)</sup>に持ち込んで探査実験している写真が図8である。実験では木の根っこばかりしか見えなくて芳しい結果は得られなかったのは残念である。苦労したのは電源がないことで、毎日



図8 大安場古墳レーダ探査の様子

30 m近い古墳の上まで発電機や測定器を運び上げたり、度々ガソリンを麓のスタンドまで補給に行かなければならなかった。

FDTD法の研究はその後も何一偉君や有馬卓司君（現在東京農工大教授）などのドクターの学生を中心とする研究室学生諸君の協力を得て、高精度化や電磁界と熱・回路結合解析、周期構造体の散乱・固有モード解析法などの研究を行った。細かな説明は省略して解説論文だけを挙げるが<sup>(23)~(25)</sup>、成果の一部は学術論文や2冊のFDTD法関連著書<sup>(26),(27)</sup>にまとめることができた、また、FDTD法汎用シミュレータMAGNA/TDM<sup>(28)</sup>の開発に携わることができたことも貴重な経験であった。

#### 4. その他の研究

逆問題と計算電磁気学以外で思い出に残る研究を簡単に紹介する。その一つは助手になって初めて携わった研究で、中波放送用のアンテナを山頂に設置した場合の特性を実験的に明らかにしようとするものであった<sup>(29)</sup>。当時はこれを数値計算する手法はなかったが現在なら可能かもしれない。図9は高さ3.75 mの人工の山の頂にアンテナを設置しようとしている筆者である。広い土地が必要だったため、宮城県・鳴子温泉近くにある農学部農場をお借りしたが、牧草も研究対象であるとのことから実験は晩秋以降となった。延べ一か月近く大学のセミナーハウスに泊まり込むことになったが、日暮れが早いので夜が非常に長く感じられた。一方、実験においては思わぬところにバグがあることや、その対処法を身をもって経験した。これらの経験は遺跡探査の野外実験に活かされている。



図9 山頂にアンテナを設置しようとする筆者

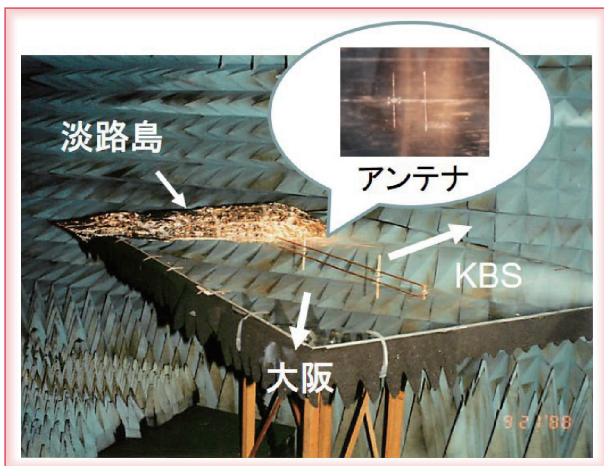


図10 モデル実験の様子

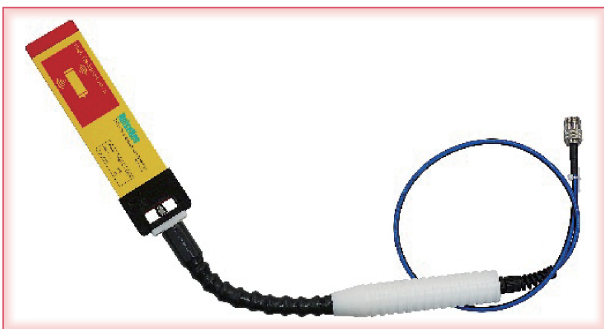


図11 電磁イミュニティ試験用スリーブアンテナ  
(株)ノイズ研究所提供

次に強く思い出に残っているのは、翌年に実施した明石海峡大橋による中波放送への影響予測である。理論計算は澤谷先生作のモーメント法を用いて行い、図10のようなモデル実験でその妥当性を検証した。橋の長さは約7波長でハンガやロープをモデル化するとモーメント法の行列は約900×900になったが、この頃になるとワークステーションでも難なく計算できるようになっていた。実験では地図データから淡路島のモデルも作ったが、アンテナが垂直偏波なのでほとんど影響がなく、計算と実験はほぼ完全に同じ結果となった。アンカロープ

はすだれ状に橋の両側にあり、その距離は波長に比べて数十分の一程度であるため、片側だけでも散乱特性は変わらないだろうと思っていたが、そうではなかったことに驚いた。

最後に、(株)ノイズ研究所との共同研究から生まれ、2021年10月に国際基準となった電磁イミュニティ試験用スリーブアンテナを紹介する<sup>(30), (31)</sup>。現在は幾つかの大手自動車メーカーで使用されていると聞いている。図11は700 MHzから3.2 GHz (VSWR < 2) で使用するアンテナで、このほかにも2.4-6 GHz用の相似形アンテナが国際基準になっている。非常に広帯域ではあるがそれに対応するバラがないため、フェライトコアでケーブルの不均衡電流を抑えている。アンテナの計算にはFDTD法を用いたが、シミュレーションによる検討が具体的に製品になり広く使われることになったのは、長らく計算電磁気学に携わっている筆者にとっても感慨深いことである。現在は更なる高性能化に向けた検討を行っている。

## 5. おわりに

電磁界の解析、特に数値シミュレーションで何ができるのか、何の役に立つのか、と聞かれることが少なからずある。多くは数値計算の経験のない方、あるいは浅い方であるから、「何度でも思考(試行)実験(計算)ができる」「測定できない量を観測できる」「物理現象が把握できる」「アイデアの具現化や製品開発に役立つ」などと答えることにしている。それなら、シミュレータの使い方さえ覚えれば誰でもできるかという、そう単純ではない。シミュレータの中ではプログラムに従って四則演算をしているにすぎないから、モデル化が間違っている、計算手法の適用範囲を超えていても、あるいは物理的にあり得なくても計算結果は出力される。そして、その結果が正しいかどうかを判断するのはシミュレータではなく、ユーザ自身であることは忘れてはならない。完全なシミュレータはないのである。このため、シミュレータの結果を盲目的に受け入れることは非常に危険で、電磁界や関連分野に関する知識と経験を基に計算結果を十分に吟味する必要がある。それでもバグを見落とすことはなくはない。

本稿は逆問題と計算電磁気学に関連する筆者の研究変遷をオムニバスの紹介してきたが、いずれの内容も完全には解決されているわけではなく、発展途中であると考えて頂きたい。一方、計算機の能力が飛躍的に向上したために、かなり複雑で大規模

な問題が解析できるようになってきたのは確かである。しかしながら、解析対象を忠実にモデル化することが最善であるとは限らない。例えば、図9に挙げた山頂アンテナを解析するのに地球全体をモデル化しては、問題をいたずらに複雑にしているだけで、たとえ計算できたとしても本質を見失うおそれが多分にある。つまり、計算機の能力に頼ってばかりいては駄目で、適切にモデル化をして初めて解析結果が有意義なものとなるのである。これができるためには基礎知識と経験を蓄えてセンスを磨いておく必要がある。もちろん新しい解析技術の開発もまた不可欠である。つまり、計算電磁気学とは単独には存在し得ない総合科学なのである。本稿がこれに挑戦する若い方の励みになれば幸いである。

最後に図1の答え：紙テープにはプログラムコードがせん孔されているにすぎない。出力結果ではないから、これだけを見てもアドバイスはできない。

#### 文献

- (1) Z. Hehari, Introduction to Complex Analysis, Maruzen Asian Edition., 東京, 1962.
- (2) R. P. Feynman, R. B. Leighton, and R. Sans, The Feynman Lectures on Physics, vol. II, Mainly Electromagnetism and Matter, Addison-Wesley Publ. Co., 1964.
- (3) J. A. Stratton, Electromagnetic Theory, IEEE Press, 2007.
- (4) 宇野 亨, 白井 宏, 電磁気学, コロナ社, 東京, 2010.
- (5) 宇宙太陽光発電, 篠原真毅 (監修), 電子情報通信学会 (編), 現代電子情報通信選書「知識の森」, 東京, 2012.
- (6) 澤谷邦男, “電磁界解析とその応用,” 信学通誌, vol. 13, no. 3, pp. 228-234, Dec. 2019.
- (7) 宇野 亨, 安達三郎, “伝送効率最大開口分布によるマイクロ波電力伝送の設計,” 信学論 (B), vol. J66-B, no. 8, pp. 1013-1018, Aug. 1983.
- (8) 近藤次郎, 積分方程式とその応用, コロナ社, 東京, 1977.
- (9) J. コワリック, M.R. オズボーン, 非線形最適化問題, 山本善之, 小山健夫 (訳), 培風館, 東京, 1970.
- (10) T. Uno and S. Adachi, “Optimization of aperture illumination for radio wave power transmission,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-32, no. 6, pp. 628-632, June 1984.
- (11) A. G. Tijhuis, Electromagnetic Inverse Profiling, -Theory and Numerical Implementation-, VNU Sci. Press, 1987.
- (12) T. Uno and S. Adachi, “Inverse scattering method for one-dimensional inhomogeneous layered media,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-35, no. 12, pp. 1456-1466, Dec. 1987.
- (13) 宇野 亨, “電磁界解析技術—アンテナ・設計解析へ貢献してきた電磁界解析法—,” 信学誌, vol. 99, no. 8, pp. 805-810, Aug. 2016.
- (14) S. Omi, T. Uno and T. Arima, “Reconstruction of internal field of dielectric objects for noninvasive SAR measurement using boundary integral equation,” IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. 61, no. 1, pp. 48-56, Feb. 2019.
- (15) R. H. M. Baharin, S. Omi, T. Uno, and T. Arima, “Internal electric field reconstruction and SAR estimation of in-body antenna using inverse equivalent current method,” IEEE Trans. Electromag. Compat., vol. 63, no. 5, pp. 1658-1666, Oct. 2021.
- (16) K. S. Yee, “Numerical solution of initial boundary problems involving maxwell’s equations in isotropic media,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-14, no. 4, pp. 302-307, May 1966.
- (17) Y. He, M. Maruyama, T. Uno, S. Adachi, and T. Mashiko, “Dipole antenna reception of transient electromagnetic fields refracted from a dipole antenna buried in a lossy half-space,” IEICE Trans. Electron., vol. E74-C, no. 9, pp. 2915-2921, Sept. 1991.
- (18) 何 一偉, 宇野 亨, 安達三郎, “FDTD法を用いた地中埋設無限長導体による円筒波の過渡散乱解析,” 信学論 (B-II), vol. J76-B-II, no. 4, pp. 253-259, April 1993.
- (19) K. S. Kunz and R. J. Luebbers, The Finite Difference Time Domain Method for Electromagnetics, CRC Press, 1993.
- (20) Y. Nishioka, O. Maeshima, T. Uno, and S. Adachi, “FDTD analysis of resistor-loaded bow-tie antenna covered with ferrite-coated conducting cavity for subsurface radar,” IEEE Trans. Antennas Propag., vol. 47, no. 6, pp. 970-977, June 1999.
- (21) 西岡泰弘, 宇野 亨, 井口岳仁, “地中探査パルスレーダ用キャビティ分離型および接続型ボウタイアンテナの特性,” 信学論 (B), vol. J83-B, no. 6, pp. 910-917, June 2000.
- (22) <https://www.city.koriyama.lg.jp/site/kosodate/1248.html>
- (23) 宇野 亨, “FDTD法を用いたアンテナ設計,” 信学論 (B), vol. J86-B, no. 9, pp. 1678-1693, Sept. 2003.
- (24) 宇野 亨, “メタマテリアル設計のための電磁界解析法,” 信学通誌, vol. 9, no. 1, pp. 12-19, June 2015.
- (25) 有馬卓司, 宇野 亨, “周波数分散性を持つメタマテリアルのFDTD解析について,” 信学論 (C), vol. J105-C, no. 2, pp. 65-73, Feb. 2022.
- (26) 宇野 亨, FDTD法による電磁界およびアンテナ解析, コロナ社, 東京, 1998.
- (27) 宇野 亨, 何 一偉, 有馬卓司, 数値電磁界解析のためのFDTD法—基礎と実践—, コロナ社, 東京, 2016.
- (28) [https://www.engineering-eye.com/MAGNA\\_TDM/](https://www.engineering-eye.com/MAGNA_TDM/)
- (29) 澤谷邦男, 土屋知久, 宇野 亨, 猪狩和久, 安達三郎, “中波山頂放送アンテナの野外実験,” テレビ誌, vol. 41, no. 6, pp. 556-561, June 1987.
- (30) 特許第625804号, アンテナ, 平成29年12月15日.
- (31) <https://www.noiseken.co.jp/products/rfsys/rf-products/3910/>

# 自然と文化と食の街 「広島」

街plus  
探訪



広島市立大学 高橋 賢 Satoshi Takahashi

## 1 はじめに

2023年5月に開催されたG7サミット（首脳会議）や、2024年3月に広島大で開催される総合大会によって、広島に興味を持たれる方もいらっしゃるでしょう。広島に住んで18年になる筆者が、広島の魅力を紹介します。

## 2 広島の世界遺産：原爆ドームと宮島

広島市内の主な見所、ホテル、繁華街は広島バスセンター周辺に集まっています。原爆ドーム（広島県産業奨励館）も、このバスセンター周辺にあります。JR広島駅からバスセンターへは、路面電車（「紙屋町東」電停または「紙屋町西」電停で下車）で効率的に移動できますが、徒歩移動も可能です。大通り沿いにある原爆ドーム（図1(a))から、平和記念公園内にある遊覧船乗り場や飲食店を見ながら歩いて行くと、広島平和記念資料館があります（図1(b))。広島市街から徒歩で、広島城、こども文化科学館、縮景園、広島県立美術館に行けます。また、路面電車を使えば、G7サミットの舞台にもなった広島港、広島市現代美術館や広島市まんが図書館などがある比治山（ひじやま）、台風体験や気象予報見学のできる広島市江波山（えばやま）気象館に行けます。アストラムラインを使えば、車・船・飛行機・自転車を深く学べる広島市交通科学館（ヌマジ交通ミュージアム）にも行けます。更に広

島市街には、ソースが特徴の「広島風お好み焼き」のお店が数多くあります。

宮島は、広島市の隣の廿日市（はつかいち）市にあります。宮島への最寄り駅は宮島口です。広島市街から宮島口へは、路面電車のみで景色を楽しみながら行く方法と、路面電車とJRを乗り継いでより早く着く方法とがあります。宮島口から宮島へはフェリーで渡ります。宮島栈橋に着くと、多くの「鹿さん」がお出迎えしてくれます（図2(a))。宮島の大鳥居は、海の中にあります。干潮時には徒歩で行けます。チャンスは限られているので、あらかじめ干潮時刻を調べておきましょう。

島内には水族館もあり、カワウソ、ペンギン、アシカがいます。運が良ければ、アザラシに触れることもできます。国宝・世界遺産の厳島（いつくしま）神社は必見でしょう。海に浮かぶ由緒正しき神社なのです。宮島内には、焼き牡蠣、穴子めし、もみじ饅頭を販売する飲食店街もあり、活気に満ちています。宮島のもう一つの観光地、弥山（みせん）山頂には麓からロープウェイでも行けますが、元気な方ならばハイキングコースの利用もお勧めです（図2(b))。山頂からは、広島市の街や海を見渡すことができます。かつて、この



(a) 原爆ドーム (b) 広島平和記念資料館

図1 広島市街



(a) 宮島の鹿さん (b) 弥山ハイキング

図2 宮島地区



図3 呉地区

山頂には多くのニホンザルがいましたが、現在はサルを見ることはなくなりました。

3

### 造船と平和の街「呉」

JR 広島駅から呉（くれ）線に30分ほど乗ると、呉駅に到着します。造船の街である呉には、二つの大きな博物館があります。

てつのくじら館（海上自衛隊呉資料館）は、かつて使用されていた本物の潜水艦に乗船できるところです（図3）。展示室では、戦後に機雷の除去に当たった掃海艇や、常に隠密に行動してきた潜水艦に関して、多くの実物展示により紹介されています。

大和ミュージアム（呉市海事歴史科学館）には、かつての戦艦や戦闘機などの解説があります。そこには、当時の最新技術で作られた戦艦「大和」の歴史や、1/10サイズの模型、「沖繩特攻」に際しての遺書などが展示されています。魚雷や特殊潜水艇の展示もあり、また、人間魚雷「回天」試作型の展示もあります。「人間兵器」として特攻を命ぜられた少年を思うと、悲しくなります。

4

### 美酒と歴史の街「東広島・竹原」

広島駅からJR山陽本線で40分ほどのところに西条（さいじょう）駅があります。ここは、良質な水があることから、酒蔵として栄えてきました（図4 (a)）。毎年10月になると、日本全国から様々な日本酒が集まる「酒まつり」が開催されます。かつては入場料を払えば幾らでも飲むことができましたが、現在はチケット制になり、やや残念です。酒まつりの際には、多くの人々がこの地を訪れます。

一方、竹原は広島駅からJR呉線で約1時間半のところにあります。この竹原には、古い町並みの保存地区



(a) 東広島酒蔵通り

(b) 竹原町並み保存地区



(c) 大久野島のウサギ

(d) 大久野島毒ガス資料館

図4 東広島・竹原地区

（図4 (b)）と造り酒屋があり、ニッカウキスキー創設者、竹鶴政孝の生家である小笹屋竹鶴酒造もあります。坂道を登った先にある西方寺からは、この「安芸（あき）の小京都」を一望できます。

竹原からJR呉線にて10分ほどのところに忠海（ただのうみ）があり、更に忠海港から船に15分ほど乗ると、ウサギがいっぱいいる大久野島（おおくのじま）に到着します。かつては、人の周りに餌を求めて多くのウサギが集まってきました。近年のオーバーツーリズムで、人々がウサギから見向きされなくなってしまったのは残念です。戦時中、大久野島には毒ガス工場があり、ウサギたちはその検査のために持ち込まれました。元々はシロウサギのみでしたが、飼えなくなったウサギが大久野島に持ち込まれ、現在では様々なウサギがいるようになったそうです（図4 (c)）。

「毒ガス資料館」（図4 (d)）には、軍需工場が当時の貧しい村に喜んで迎え入れられたこと、それが毒ガス工場と知り人々が落胆したこと、「お国のため」に苦悩しながらも職務を果たしてきたこと、自らも毒ガスに災して苦しんだこと、そして秘匿のために地図からその地が消されたことが、当時の道具とともに紹介されています。この資料館のそばにはビジターセンターがあり、大久野島の自然について学ぶことができます。島内には、戦後処理として火炎放射器で焼かれた毒ガス貯蔵庫跡、工場の電源を賄ってきた発電所跡もあります。また、大久野島には、かつての芸予（げいよ）要塞の跡が多数あり、徒歩やレンタサイクルで見回ることができます。大久野島唯一の宿泊施設である「休暇村」では、温泉やおいしい食事を楽しめます。

西条と竹原・忠海とは直接行き来することができず、



三原を経由するため、乗り継ぎを含めて1時間半程度かかるので、注意が必要です。

## 5 芸術と坂道の街「尾道」

この三原から山陽本線で10分ほどのところに尾道（おのみち）があります。尾道駅のそばには活気のある商店街があります。尾道の急な坂道（図5（a））を登っていくと、多くの「猫さん」たちが出迎えてくれます（図5（b））。その先にある千光寺公園内には、尾道市立美術館や展望台（図5（c））があり、尾道と愛媛県今治（いまばり）市を結ぶ自動車専用道路「しまなみ海道」を一望できます（図5（d））。この美しい街並みは「転校生」、「時をかける少女」、「さびしんぼう」など、多くの映画の舞台になってきました。

このしまなみ海道を自転車で走行することも可能です。元気いっぱいな方ならば、早朝にJRで広島から尾道まで行き、レンタサイクル（図5（e））でしまなみ海道（図5（f））を走行し、今治で自転車を返却し、JRで松山まで行って温泉に入り、松山観光港発のフェリー最終便で広島港に戻ってくることも可能です。

しかし、しまなみ海道は特に橋のところでは高低差が大きく、自転車での走行は結構、大変です。私は、余り体力がないために、上り坂で自転車を降り、自転



(a) 尾道の急な坂道

(b) 尾道の猫さんたち



(c) 展望台

(d) 展望台からの景色



(e) レンタサイクル

(f) しまなみ海道

図5 尾道地区

車を押して歩いていましたが、上述のコースでも何とか日帰りできました。とても元気な同僚は、「マイ自転車」で尾道から今治まで行き、更にその日のうちに尾道まで戻ってきたそうです。

しまなみ海道の途中で1泊すると、余裕を持って行動できます。途中の因島（いんのしま）には、因島水軍城本丸資料館があり、中世日本の瀬戸内海で活躍した村上水軍を知ることができます。また、途中で温泉につかり、塩で有名な愛媛県伯方（はかた）島でゆっくりすることもできるでしょう。

## 6 自動車があればもっと楽しい

万人には勧められませんが、自動車が使えると広島郊外に足を延ばすこともできます。

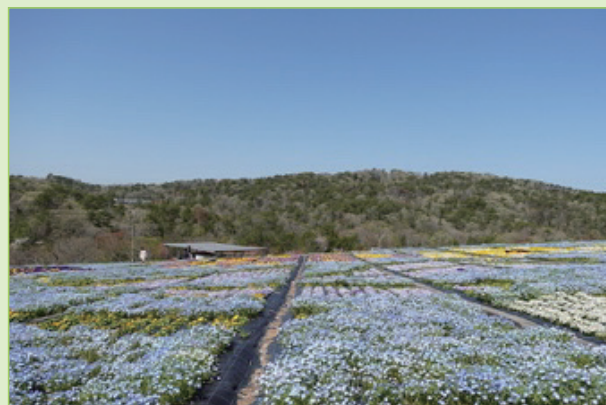
広島市安佐動物公園には、フラミンゴ、ペンギン、オオサンショウウオなど多くの動物がいて、お勧めです（図6（a））。5月には「ダルマガエルお目覚め見学会」もあり、楽しいです。

また、三段峡は広島府の著名な景勝地です。広島市西区の横川駅と安佐北区のあき亀山駅を結ぶJR可部線は、かつて横川から三段峡まで運行していました。しかし、三段峡駅は赤字路線区間の一部にあったために、国鉄分割民営化後に廃止されました。道路沿いには、かつての駅や橋の跡が残っています。三段峡には五大壮観と呼ばれる見所がありますが、その一つが猿飛（さ



(a) 広島市安佐動物公園

(b) 三段峡猿飛渡船



(c) 世羅高原

図6 広島郊外

るとび)です。三段峡入口の駐車場に車を止め、しばらく山道を歩くと、猿飛渡船(とせん)乗り場があります。ここでは、岩の間に張られたロープと人手により操船された船に乗る、貴重な体験ができます(図6(b))。この船着場にある二段滝は、高さが11 mもある豪快な滝です。

三段峡から車を走らせると、アーチ式としては黒部ダムに次ぐ156 mの高さの温井(ぬくい)ダムがあり、5月には放水イベントが行われます。また、江戸時代から続く日本庭園、吉水園(よしみずえん)は、6月と11月の休日に一般公開されます。特に6月の一般公開のときには、庭園の至るところに、天然記念物モリアオガエルの産卵が見られます。

広島県世羅(せら)郡には、大規模農園である、世羅高原農場、花夢(かむ)の里、花の森、せらふじ園があります(図6(c))。開花には季節性がありますが、いずれの季節でも、これらのどこかでは見所を迎えています。「道の駅世羅」の隣には、世界的なホテルグループが営業しています。現状では、自動車なしに、この地域を観光することは難しいと思いますが、これ

から更に発展してゆくでしょう。

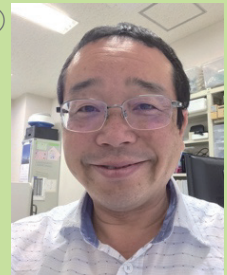
## 7 おわりに

広島には、多くの自然、文化施設、そしておいしい食べ物と美酒があります。広島にお越しの際には、是非、いろいろと体験して下さい。皆さんが住んでいる街にも、きっとたくさんすばらしいものがあるでしょう。

2024年3月には、広島大・東広島キャンパスで電子情報通信学会総合大会が開催されます。論文書いて広島に行こう!

### 高橋 賢 (正員：シニア会員)

1992 東京電機大大学院工学研究科修士課程了。同年、日立製作所入社。1996～1999 (株)ワイ・アール・ピー移動通信基盤技術研究所出向。1996～1997 通信総合研究所(現情報通信研究機構)高速移動通信研究室特別研究員。2002 通信総合研究所任期付研究員。2005 広島市大准教授。博士(工学)。



# Linuxカーネルの開発 世界最大のオープンソースプロジェクトでの経験

NTT 藤田智成 Tomonori Fujita

## 1. はじめに

Linuxは、最も使用されているオペレーティングシステムカーネルであり、世界最大のオープンソースソフトウェア（OSS）プロジェクトだろう。世界中の技術者のコラボレーションによる大規模なプロジェクトは、ほかのOSSプロジェクトや標準化団体などもあるが、Linuxカーネルプロジェクトは、新しい機能の提案、意思決定の方法など、ユニークな開発プロセスを採用している。本稿では、2005年から2010年頃まで、Linuxカーネルプロジェクトの一員として、筆者が直接関与したI/O機能の開発について振り返ってみたい。

## 2. 開発プロセス

Linuxカーネルプロジェクトの開発プロセスで、新しい機能を提案し、標準機能としてソースコードに追加されること（メインライン化）を目指すプロセスについて述べる。筆者が開発に関わっていた時期と現在で、開発プロセスに大きな変化はない。

最初に、Linuxカーネルプロジェクトに参加する必要がある。所属や名前などの参加者情報をWebサイトに登録する必要があるOSSプロジェクトもあるが、Linuxカーネルプロジェクトでは必要ない。開発に関する議論はメーリングリストで行われ、ここにメールを投稿すればよい。メーリングリストには、誰でも自由にメールを投稿することができる。Linuxカーネルのソースコードの変更に関わった開発者をプロジェクトのメンバーとするなら、2010年で3,000人弱であった<sup>(1)</sup>。

次に、プロジェクトに新しい機能を提案する。ソースコードを開発する前に、提案者が新機能を説明したドキュメントを用意し、議論するOSSプロジェクトもある。Linuxカーネルプロジェクトでは、カーネルのソースコードを入手し、新しい機能を実

装したソースコードの変更をメーリングリストに投稿するのが一般的なやり方である。Linuxは、図1に示すサブシステムと呼ばれる、機能単位でメーリングリストが用意されており、提案する機能によって適切なメーリングリストに投稿する必要がある。例えば、新しいイーサネットカードのドライバは、ネットワークサブシステムのメーリングリストに投稿される。

その後、提案された機能をメインライン化すべきかが判断される。バグ修正など、メインライン化後のメンテナンスコストに見合うメリットがあるかどうかが評価される。意思決定を開発者の投票で決定するOSSプロジェクトもあるが、Linuxカーネルプロジェクトでは、サブシステムの責任者であるメンテナが決定する。メインライン化すると判断された場合でも、提案されたコードの変更がそのまま受け入れられることはほとんどなく、提案者は、議論を重ね、設計について合意を取り付け、コードを修正する必要がある。OSSプロジェクトの中には、提案された機能について必ず審議するルールがあるプロジェクトもあるが、Linuxカーネルプロジェクトでは、メーリングリストへの提案が単純に無視されるというケースが非常に多い。現在、Linuxカー

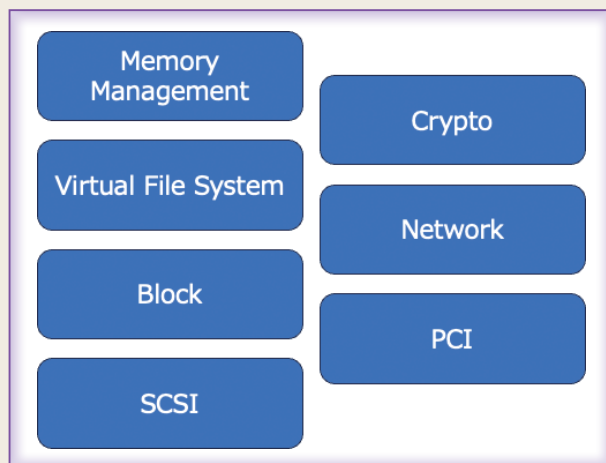


図1 Linuxカーネルサブシステム（一部）



ネルプロジェクトの主要メーリングリスト (linux-kernel) は、1日に1,000通以上のメールが投稿されている上、大部分の開発者は企業に所属しており、雇用主のための機能開発や問題修正の優先度が高く、他開発者の提案を議論する余裕がないことが多いためである。

Linuxカーネルプロジェクトのメンテナは、階層構造になっており、サブシステムのメンテナの配下に、そのサブシステムに含まれる機能のメンテナがいる。例えば、ネットワークサブシステムのメンテナの配下で、様々なネットワークインタフェースカードドライバのメンテナが活動している。サブシステムのメンテナをまとめるのが、Linuxカーネルプロジェクトの責任者のLinus Torvaldsである。責任者は選挙で選ばれる任期制を採用しているOSSプロジェクトもあるが、Linuxカーネルプロジェクトでは、メンテナの任期は無期限である。選び方は明文化されておらず、開発者がメンテナを続けられなくなった際に、次のメンテナを指名することが多い。

ほかのプロジェクトと比較すると、Linuxカーネルプロジェクトのメンテナの仕組みは、明文化されたルールがほとんどないため、状況に合わせて柔軟に判断できるというメリットがある。一方、投票のような調停の仕組みがないため、論争の激化に歯止めをかけられない場合もある。そのような論争がきっかけとなり、自らプロジェクトから離れる開発者もいる。複数のメンテナと関係が悪化したメンテナが、強制的にLinuxカーネルプロジェクトを辞めさせられた例もある。

### 3. 最初の挑戦

2000年、筆者が所属する組織の目標は、ネットワーク帯域を使用する企業向けの新しいニーズを創出することだった。多くの企業が自社内にサーバとストレージ装置を保持し、運用していたが、ストレージ装置は初期コストも運用コストも高いという課題があり、ネットワークを介してストレージリソースを安価に提供する技術の実現を目標とした。弊社独自のストレージ技術をグローバルに普及させるのは困難であると判断し、IBMがインターネットドラフトとしてIETFに提案していた、サーバとストレージ装置を汎用のイーサネットに接続するiSCSIプロトコル<sup>(2)</sup>に目をつけた。iSCSIプロトコ

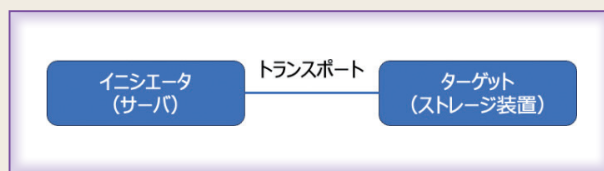


図2 SCSI アーキテクチャ

ルを使い、サーバとストレージ装置間を接続するストレージ専用技術であるファイバチャネルを汎用のイーサネットに置き換えることで、コストメリットが見込めた。

2004年に、iSCSIプロトコルはRFC 3720として標準化されたが、主要ストレージベンダから製品が販売されることもなく、普及していなかった。企業がiSCSIプロトコルを評価することができれば、普及を促進できると考えた。SCSIプロトコルは、図2に示すように、インシエータ機能（データ読み出しなどの命令を出す）と、ターゲット機能とそれらを接続するトランスポートプロトコルから構成されている。Linux用iSCSIインシエータは、Cisco社がOSSを開発していた。LinuxをiSCSIターゲット装置として動作させるソフトウェアがあれば、商用ストレージ装置を使わずにiSCSIプロトコルの評価が可能である。Linux用iSCSIターゲットは、大学が開発しているOSSなどがあったが、企業が期待するような品質ではなかったため、2004年に、iSCSIプロトコルの評価のために開発していたソフトウェアをOSSとして公開した(iSCSI Enterprise Target)。iSCSIターゲットはTCPコネクションを介して、SCSIコマンドのリクエストを受け取り、レスポンスを送るソフトウェアであり、ユーザ空間で動作するアプリケーションとして実装可能である。しかし、ハードウェアから最大の性能を引き出すため、インシエータとターゲットの認証が完了すると、カーネル空間で動作するように実装した。

1年程度で、iSCSI Enterprise Targetは多くのユーザに使われるようになったが、iSCSIプロトコルの普及は進んでいなかった。普及を加速させるため、iSCSI Enterprise Targetのメインライン化を目指した。メインライン化されるとこのソフトウェアは最初からLinuxカーネルに含まれている状態となり、ユーザは簡単にiSCSIターゲット機能を動作させることができ、Red Hat社などの企業から商用サポートも期待できる。

2005年3月に、SCSIサブシステムのメーリン

グリストに、iSCSI ターゲット機能を提案した。提案は無視されることなく議論されたが、iSCSI プロトコルだけでなく、ほかの SCSI トラnsポートプロトコルもサポートする設計であるべきという理由で却下された。また、SCSI サブシステムのメンテナから、カーネル空間で実装する機能は最小限にして、主要機能をユーザ空間で実装してほしいと要望された。Linux カーネルプロジェクトでは、メンテナンスコストを抑えるため、可能であれば、ユーザ空間で機能を実装するという方針がある。

提案機能に十分なメリットがないと、SCSI メンテナに判断されず、実装を修正すれば、採用される可能性はあった。メンテナの実装に関する判断に関して、複数のトラnsポートプロトコルへの対応は適切であると感じた。一方、機能の大半がユーザ空間で動作し、カーネル空間と密に連携する設計は、ユーザ空間と連携するコストによる性能の低下が予想されるため懐疑的だった。しかし、iSCSI ターゲット機能を Linux カーネルの標準の機能にすることが、iSCSI プロトコルの普及を加速させるために必須と考え、メンテナの判断に従い開発を進めることを決断した。懸念の性能に関しては、iSCSI プロトコルが普及すれば、大手ストレージベンダから高速な製品が販売されるため、Linux の iSCSI ターゲット機能が最高の性能を達成する必要はないと判断した。

iSCSI 以外のトラnsポートプロトコルのサポートのため、ファイバチャネルや RDMA 用ハードウェアを入手し、開発を進めた。また、ユーザ空間とカーネル空間が密に連携する設計に変更するため、iSCSI Enterprise Target の実装を捨て、ほぼゼロから開発をやり直した。

提案が却下された直後に、iSCSI イニシエータ機能の開発を主導していた Red Hat 社の開発者から連絡があり、共同で開発を進めることができた。また、複数のトラnsポートプロトコルをサポートしたことで、ファイバチャネルベンダの協力も得られた。約 1 年半後の 2006 年末には、図 3 に示す iSCSI プロトコルを含む、複数のトラnsポートプロトコルに対応した SCSI ターゲット機能<sup>(3)</sup>が Linux カーネルに採用され、メンテナに指名された。Red Hat 社の商用サポート対象にもなり、iSCSI プロトコルの普及に貢献できたと考えている。現在、iSCSI プロトコルは主要なストレージ技術の一つであり、AWS (Amazon Web Services) などのクラ

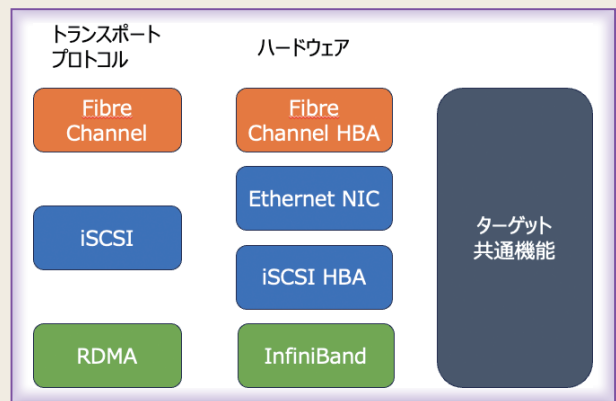


図 3 メインライン化された SCSI ターゲット機

ウドサービスでも活用されている。

## 4. 信頼を得る

筆者が提案した iSCSI ターゲット機能がメインライン化された最大の理由は、Red Hat 社など Linux 開発者を雇用する企業にとって、重要になる可能性が高い技術だったからだろう。提案が議論され、多くの開発者の協力を得るためには、その雇用主である企業にとって有用なものであることが必要だ。しかし、プロジェクトで活動するうちに、企業の意向だけでなく、提案する開発者がほかの開発者から二つの観点で信頼されていることも重要であると感じた。一つ目は、開発者が対象となる技術分野に深い知識があり、品質の高いソースコードを開発できるという技術的な信頼である。二つ目は、開発者が自ら開発したコードのバグに真摯に対応するなど、責任を負うという信頼である。提案した機能がメインライン化された後、メンテナンスを続ける最低期間などのルールはないが、すぐにメンテナンスを止める、バグを放置するなどの行為は信頼を失う。

iSCSI ターゲット機能のメインライン化では、ほかの技術者から信頼されていた Red Hat 社の開発者と一緒に開発できたことが大きな助けになった。

信頼を得るためには、開発したソースコードをほかの開発者に見てもらい、その議論で技術力の高さを示す必要がある。また、開発した機能をメインライン化し、バグに対応する姿勢を示す必要がある。筆者は、今後の開発を円滑に進めるために信頼される必要があるが、新しい機能の妥当性を示し、メインライン化を目指す開発は、信頼を得られる活動ができるまでに時間がかかり過ぎると考えた。そこで、海外で開催されるストレージ分野の開発者が集まる会議に参加し、ほかの開発者と議論すること

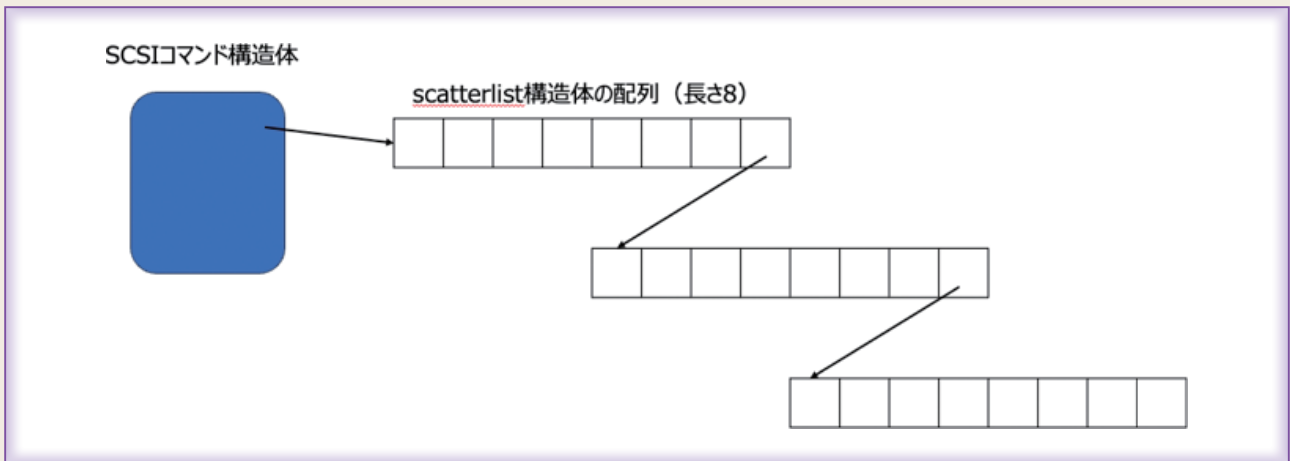


図4 Scatter Gather Chaining

で、I/O 関連の既存の課題を理解し、様々な開発に関わった。新機能の提案と異なり、ほかの開発者も解決したい課題であるため、提案したソースコードへの修正案が無視されることなく議論され、迅速にメインライン化されるため、信頼が得られる機会が多い。

2007年9月にリリースされたカーネルバージョン2.6.23では、ソースコードの変更数で、全開発者中10位だった<sup>(4)</sup>。そのように開発を続けた結果、2007年から2010年まで、毎年一度開催される、プロジェクトに参加する開発者の中から80人程度が集められるLinux Kernel Summitに招待された。この会議は、主要なサブシステムのメンテナなどの影響力が大きい開発者が、招待する開発者を決める。Linux Kernel Summitは、カーネルの様々な分野の開発者が参加するため、特定分野の詳細ではなく、多くの分野に影響するトピックが議論される。筆者が初めて参加した2007年の会議の議題の一つは、現在では広く普及しているコンテナ技術を実現するためのネットワーク、プロセス管理など複数の分野への変更だった。

筆者が関わった三つの開発を紹介する。

#### 4.1 I/Oサイズの拡大

エンタープライズマーケットでも、ストレージデバイスがハードディスクからSolid State Drive (SSD)などのメモリ技術を使ったデバイスへの移行が始まり、I/Oの高速化が求められた。ファイルシステムの改善など様々な取組みがされたが、その中の一つが、リクエストのI/Oサイズの上制限を取り除くものである。例えば、64 MByteのデータをデバイスから読み込む際に、1MByteの読み込み

のSCSIリクエストを64回実行するより、64 MByteの読み込みのSCSIリクエストを1回実行する方が高速である。当時、ブロックサブシステムとSCSIサブシステムの設計には、一つのリクエストのI/Oサイズの上限に制限があるという課題があった。

データ転送に使われるメモリ領域(セグメント)の情報を保持するデータ構造が、scatterlist構造体である。セグメントは、メモリアドレスと長さの組で表現される。通常、データ転送には、一つのセグメントではなく、複数のセグメントが使われるため、scatterlistは配列で使われる。scatterlistの配列は、I/O時に確保するのではなく、あらかじめ固定長で確保され、プールされている。オペレーティングシステムでは、メモリ不足による失敗が許されないI/O操作もあるため、I/Oに使われるデータ構造はあらかじめ確保される。したがって、大きなサイズのI/Oに対応するためには、長い配列を確保しなければならないが、大きなサイズのI/Oが発生しなければ、無駄にメモリが確保されるという欠点がある。そこで、ブロックサブシステムのメンテナが、図4に示すように、固定長の配列のscatterlistの最後のエントリを次のscatterlist配列へのポインタとすることで複数のscatterlist配列を連結させ、固定長以上の数のセグメントを扱い、大きなI/Oサイズを扱う仕組みを開発した(Scatter Gather chaining)。図4の例では、長さ8の固定長の配列を連携させることで、22個(7+7+8)のセグメントを扱うことが可能である。

Scatter Gather chainingの導入によって、単純なscatterlistの配列を想定して、セグメントをストレージデバイスへのDMAアドレスとその長さに

変換しているデバイスドライバの修正が必要である。筆者は、SCSI ドライバの修正案を提案したが、ほかの開発者から別の提案があり、メーリングリストで議論になった。SCSI メンテナの意向を取り入れながら、修正案の調整と再提案を何度も繰り返すことで、筆者の提案が採用された。SCSI サブシステムでは、サポートする数十種類の SCSI HBA ドライバのうち、ベンダがメンテナを割り当てているドライバは数種類しかなかった。筆者は、メンテナがアサインされていない全ての SCSI HBA ドライバの修正を実施したが、それらのドライバに対応するハードウェアを所持しておらず、テストできない上、バグがストレージに保存されたデータを破壊するなど致命的な障害につながる可能性もあり、慎重な修正が求められた。40 以上のドライバの修正に約 4 か月を要した。

#### 4.2 IOMMU と DMA API の修正

ネットワークインタフェースカードや SCSI HBA など DMA を実行するデバイスが、メモリの物理アドレスを DMA アドレスに変換するために使う API が DMA API である。物理アドレスと DMA アドレスの変換は静的な方法と動的な方法があり、後者の動的なマッピングは、図 5 に示す IOMMU (Input-Output Memory Management Unit) と呼ばれるハードウェアが使われる。IOMMU を使う利点の一つは、DMA アクセス可能なメモリを動的に管理することで、デバイスの誤動作からメモリを保護できることである。

IOMMU ドライバは、scatterlist の配列をたどり、それぞれのセグメントに対してマッピングを作るため、Scatter Gather chaining に対応するための修正が必要であった。当時、Linux の対応する CPU アーキテクチャのうち、X86\_64、Intel 社 IA64、DEC 社 Alpha、IBM 社 POWERPC、HP 社 PA-RISC、Sun Microsystems 社 SPARC が IOMMU ハードウェアをサポートしていた。そのうち、X86\_64 は 4 種類、PA-RISC は 2 種類の IOMMU ハードウェアをサポートしていた。また、ハードウェア IOMMU が搭載されていないマシンで、アクセスできるメモリアドレスに制限があるデバイスを扱うためのソフトウェアベースの IOMMU ドライバも使われていた。筆者が使用できたハードウェアは、X86\_64 の 2 種類、IA64 と POWERPC だけだったが、全ての IOMMU ドライバを修正した。

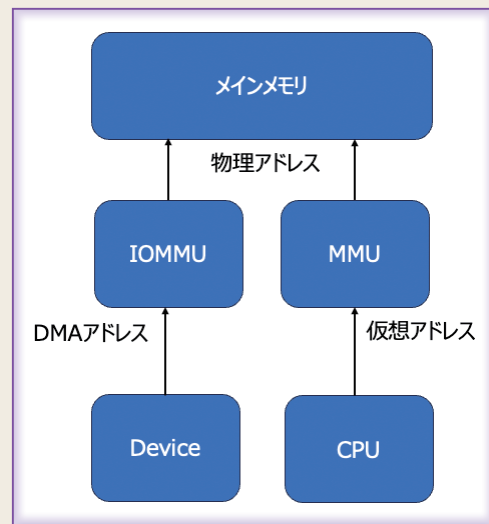


図 5 IOMMU と MMU

筆者が利用できなかったアーキテクチャでは、投稿した修正が想定どおりに動作せず、アーキテクチャのメンテナに実機で検証してもらいながら、何度も修正案を調整したこともあった。

IOMMU ドライバの修正に取り組んでいるうちに、デバイスの DMA 転送に関する制限を正しく扱えないバグがあることが分かった。多くの IOMMU ドライバは、I/O 性能向上のため、可能な場合、複数のセグメントを一つの DMA 仮想アドレスにまとめる。図 6 では、scatterlist 配列の三個のセグメントのうち、最初の二つのセグメントを連続した DMA メモリアドレス空間にマッピングして、二個のセグメントにしている。しかし、一部のデバイスは、DMA 転送に関して、セグメントに含まれるデータの長さやメモリアラインメントに制限がある。ブロックサブシステムはそれら制限を考慮して、セグメントを用意していたが、IOMMU ドライバが考慮せずにセグメントをまとめた結果、デバイスが扱えないセグメントになる問題があった。そのため、制限を持つデバイスは、IOMMU ドライバがまとめたセグメントを再び複数のセグメントに分離してから、DMA を実行していた。IOMMU ドライバがデバイスの制限を考慮して、セグメントをまとめるように修正し、様々なドライバの IOMMU ドライバのバグを回避するコードを削除した。

DMA API を使うデバイスドライバにも二つの問題が見つかり、多くのドライバを修正した。一つ目の問題は、多くのデバイスドライバが、物理アドレスから DMA アドレスの変換が常に成功すると想定していた点である。X86 や X86\_64 では IOMMU

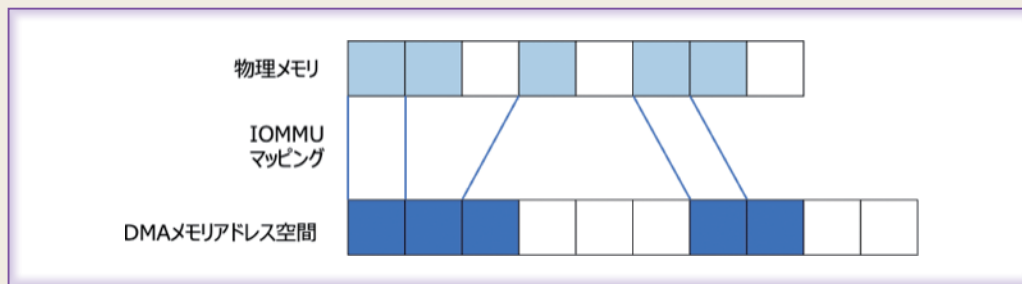


図6 IOMMUによるマッピング

がほとんど使われておらず、静的なアドレス変換は常に成功するため、問題とならなかった。しかし、仮想化技術が登場したことで、X86\_64でもIOMMUの普及が進み、動的なアドレス変換の失敗を一時的なエラーとして正しく扱わなければ、システム停止など障害を引き起こすようになった。二つ目の問題が、DMA APIが、PCIやSBUSなどバスの種類ごとに用意されており、複数の種類のバスに接続される可能性のあるデバイスは、接続されているバスの種類に応じてDMA APIを呼び出すという複雑な設計になっていた点である。そこで、DMA APIを再設計し、全てのドライバが接続されているバスの種類に関係ない汎用APIを呼び出すように修正し、汎用API内部でバスの種類に応じた適切な関数を実行するように実装した。

#### 4.3 BSG ドライバ

当時、SCSI デバイスに対して、SCSI コマンド以外の命令、管理用コマンドなどを実行したいという要求があった。ベンダが管理コマンドを実行する独自のツールを用意しているため、ユーザは使用しているSCSI HBAのベンダによってツールを使い分ける必要があり、利便性が低かった。

SCSI コマンドの実行に関しては、SCSI generic (sg) ドライバ<sup>(5)</sup>を利用することができた。sg ドライバは、アプリケーションからSCSI デバイスに対してSCSI コマンドを実行するためのインタフェースとして、CD-R/RWの書込みなどに使われていた。

関係する開発者の間では、sg ドライバの次のバージョンとして、全てのコマンドをサポートし、SCSI デバイスだけでなく、ブロックデバイス全般をサポートするドライバを実装するという大まかな方向性だけは合意できていたが、ブロックサブシステムのメンテナが実装したBSGドライバはSCSI コマンドの実行のみサポートしていた。

筆者は、関係者と議論を重ね、設計について合意を取り付け、BSGドライバを修正し、要件を満たすことができた。その後、ブロックサブシステムのメンテナから指名され、BSGドライバのメンテナとなった。

## 5. おわりに

2010年頃から、筆者はネットワークインフラのオープン化に取り組み始め、BGP (Border Gateway Protocol) のOSS実装であるGoBGPプロジェクト<sup>(6)</sup>の立上げ、開発などにより、Linuxカーネル開発に深く関わる余裕がなくなった。メンテナであった二つの機能のうち、SCSIターゲット機能に関しては、ハードウェアの性能を最大まで引き出せる設計にすべきという議論が持ち上がり、主要な機能をカーネル空間に実装する設計に置き換えられることになった。若干残念ではあったが、その頃には、主要なストレージベンダがiSCSI製品を販売しており、iSCSIプロトコルが普及したので、性能を改善させたいという次の段階になったのだと考えている。そのため、SCSIターゲット機能についてはメンテナを外れた。

現在、筆者はシステムソフトウェアの不具合やぜい弱性を削減する技術を検討しており、LinuxカーネルのRustプログラミング言語<sup>(7)</sup>のサポートに着目している。Linuxカーネルの機能は、C言語かアセンブラ言語で実装できたが、2022年にRust言語でも実装できるようになった。C言語は、ハードウェアの性能を引き出すことができるが、安全性、すなわち不具合やぜい弱性を起こす誤りを防ぐための開発者支援の仕組みを持たない。Rust言語は、C言語同等の性能だけでなく、メモリ安全性、安全な並行性を目指して設計された言語であり、Linuxカーネルがそのメリットを享受できることが期待される。今のところ、様々な課題もあり、

Rust で実装された機能はメインライン化されていない。サブシステムメンテナの間でも、「Rust という第三の言語をサポートするコストに見合う十分なメリットがあるか」という問いには意見が別れている。今後、Rust で実装された機能がメインライン化されるためには、不具合やせい弱性に関してメリットを示し、開発者の合意を形成する必要があると考える。

本稿が世界中の技術者との協業による開発の楽しさが伝えられることができているならば幸いである。

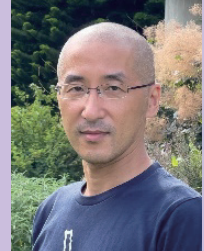
#### 文献

- (1) [https://www.linuxfoundation.jp/wp-content/uploads/2020/09/JA2\\_2020-Linux-Kernel-History-Report.pdf](https://www.linuxfoundation.jp/wp-content/uploads/2020/09/JA2_2020-Linux-Kernel-History-Report.pdf)
- (2) <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc7143>

- (3) 藤田智成, “Linux におけるストレージシステムフレームワークの実現,” 情処学論コンピューティングシステム (ACS), vol. 47, SIG12 (ACS15), pp. 411-419, Sept. 2006.
- (4) <https://lwn.net/Articles/247582/>
- (5) <https://sg.danny.cz/sg/>
- (6) <https://github.com/osrg/gobgp>
- (7) <https://www.rust-lang.org>

#### 藤田智成

2000 早大大学院理工学研究科修士課程了。同年日本電信電話株式会社入社。システムソフトウェアに関する研究に従事。





# SDN のプログラマブルデータプレーンによる ネットワーク主導型 TCP フロー制御調和手法

Network-driven TCP Harmonized Management Utilizing a Programmable SDN Data Plane

妙中雄三 Yuzo Taenaka<sup>†</sup> 塚本和也 Kazuya Tsukamoto<sup>††</sup>

## Summary

Software Defined Networking (SDN) 技術の一つであるプログラマブルデータプレーンによってネットワーク内で任意のパケット処理を実装できるようになった。ネットワーク内では、一つの端末では得られない、競合する通信フローの情報が容易に把握できるため、プログラマブルデータプレーンでその情報を活用して任意の新しいパケット制御を実現できれば、端末のみでは難しかった競合フローを直接的に意識した通信制御の実現が期待できる。本研究では、アプリ要求を意識した TCP フローの競合制御に着目する。一般的な TCP では、競合フローとのスループットの公平性のみを目指す、実際にはアプリ要求との不一致が生じる。つまり、競合フロー間でスループットが公平であっても、一方のアプリ要求には過剰、若しくは不足する、といった非効率な資源利用状態に陥る。この不一致解消には、アプリ要求と競合関係を理解し、スループットに意図的な傾斜を付ける制御が必要となる。本稿では、プログラマブルデータプレーンとその開発言語の P4 を解説し、上記の制御の実現に向けた初期検討として、競合する 2 フローの TCP スループットを事前に定義したアプリ要求に合わせて調和させる TCP フロー制御調和手法を試作する。

## Key Words

TCP フロー制御, 制御調和, P4, プログラマブルデータプレーン, Software Defined Networking

## 1 はじめに

ネットワークをソフトウェアで制御可能にする Software Defined Networking (SDN) が広く知られるようになった。一般的なネットワークは、ネットワークスイッチ（以降、「スイッチ」）を用いて、スイッチに事前実装された固定のネットワーク機能のみを用いて構成されている。これに対して、1990 年代からの任意の機能をネットワーク内機器に埋め込み、パケット転送途中で実行するアクティブネットワークの研究を起点に、スイッチの通信制御機能を分割・分離してそれぞれをプログラマブルにする SDN の研究が現在まで活発に行われている<sup>(1)</sup>。

近年用いられる SDN のスイッチの概念図を図 1 に示す。スイッチはコントロールプレーンとデータプレーンによって構成される。コントロールプレーンは IP 層の経路制御や、データリンク層の MAC アドレスの学習と

学習結果に基づく送信先の物理ポートの決定などの意思決定の役割を担い、データプレーンはコントロールプレーンからの指示に従って MAC アドレスの書換えや、物理ポートへのパケット送出等のパケット処理実行の役割を担う。従来のスイッチでは、このコントロールプレーンとデータプレーンはハードウェアに統合された上で専用機能として実装される。これに対して、SDN ではコントロールプレーンとデータプレーン間で情報や命令を交換する方法（インタフェース）を規定し、そのインタフェースに従う限り、コントロールプレーンとデータプレーンを自由に選択できるようになった。また SDN は、スイッチごとにコントロールプレーンを導入する分散形と、複数のコントロールプレーンを一つに集約して複数のデータプレーンを一括制御する集中形に分類される。SDN 技術の一つである OpenFlow<sup>(2)</sup> の登場により、集中形のコントロールプレーンが主に使われるようになった（図 1 右側）。データプレーンごとに独立して意思決定していた分散形に対して、集中形では複数のデータプレーン、つまりネットワーク全域で一貫した意思決定が可能となった。

OpenFlow ではコントロールプレーン／データプレーンのインタフェースと、そのインタフェースを介し

<sup>†</sup> 奈良先端科学技術大学院大学, 生駒市  
Nara Institute of Science and Technology, Ikoma-shi, 630-0192 Japan

<sup>††</sup> 九州工業大学, 飯塚市  
Kyushu Institute of Science and Technology,  
Iizuka-shi, 820-8502 Japan

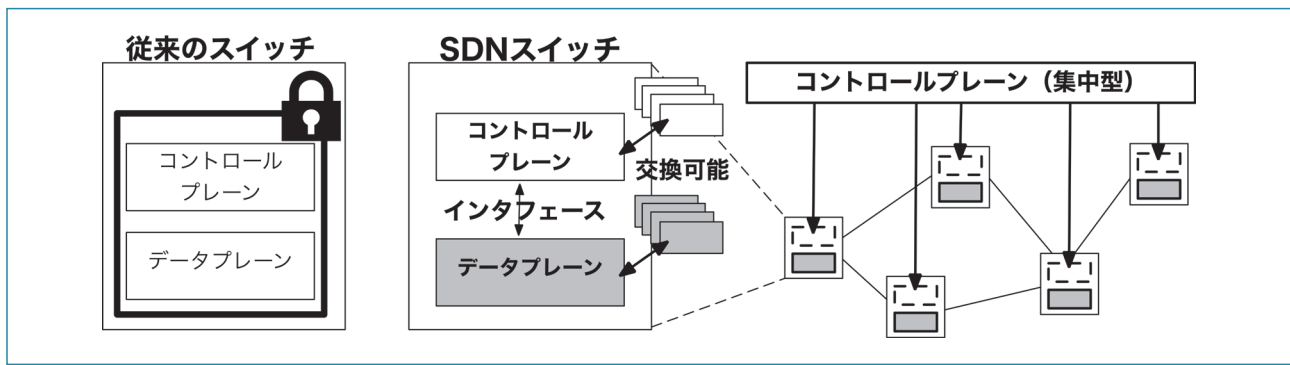


図 1 SDN の概念図

て交換するデータ形式が規定され、特に汎用的なパケット制御指示方法として「フロー単位のマッチ・アクション」が考案された。これはパケットヘッダに含まれる送信元や宛先などのマッチ条件にマッチしたパケットに対して、対応するアクションを実行する仕組みである。マッチ条件とアクションのペアは制御命令として十分な記述性を備えていたため、OpenFlowに限らずSDNの制御指示方法として広く普及した。ただし、OpenFlowは研究の概念実証を元にした技術であり、マッチ条件は一部のプロトコルのヘッダ情報のみを前提とし、アクションは事前定義された方法から選択するように設計されていたため、新しいプロトコルや任意のアクションを扱えない等の問題が残った。そこで、OpenFlowで得られた知見を基に任意のマッチ条件の指定と任意のアクションを実行できる仕組みを備えるスイッチのデータプレーンアーキテクチャと、そのデータプレーンでのパケット処理機能をプログラムする言語 P4 (Programming Protocol-Independent Packet Processors)<sup>(3)</sup> が提案された。

筆者らは、上記のプログラマブルなデータプレーン上でのパケット転送途中の処理に着目し、ネットワーク内部だからこそ実現できる「競合する複数の通信フローのTCPフロー制御を調和させる手法」に取り組んでいる。TCPは、一般的に端末が接続する無線LAN等の狭い帯域を保持するアクセスネットワーク(ボトルネックリンク)でのほかの競合TCPフローとの公平性を間接的に意識しながらパケット送信を制御するが、端末は、競合通信フローの存在や制御状況を把握して直接的に意識した制御はできない。つまり、競合フローを直接的に意識して制御するためには、複数フローの競合状況やTCPの制御状況を直接的に観測できるネットワーク内部での制御が欠かせない。加えて、近年では様々な種類のアプリ

りが利用され、アプリによるネットワークへの要求が多様化しているものの、端末のオペレーティングシステム(OS)が提供するTCP通信機能はアプリによらず共通の通信制御を提供する。つまり、複数の端末が生成する必要なスループット値(アプリ要求)が異なるフローが競合すると、TCPがスループットを公平となるように制御することで、アプリ要求を満たせないフローが現れてしまう。そこで、プログラマブルデータプレーンを活用して、ボトルネック区間の競合フローの存在や通信制御状況を直接的に観測し、観測結果とフローごとのアプリ要求に合わせて意図的に送信量を不均一にする競合フロー間の調和制御、例えば過剰なスループットのフローの packets 送信量を適切に抑制し、その抑制した分でスループットが不足する競合フローの packets 送信量をアプリ要求を満たすまで増やすことができれば、全てのアプリ要求を満たせる可能性がある。

P4を用いてTCP制御を扱う研究はこれまで多数提案されている<sup>(4)</sup>。本研究と同様にネットワーク内部からTCP制御する手法も多く提案されているが、制御対象とする一つのフローのTCPスループットを向上させる一般的なTCP制御の研究にとどまり、多様性が増すアプリ要求を満足するための調和制御手法は検討課題として残されている。したがって、本研究ではプログラマブルデータプレーンを用いてアプリ要求に応じたTCPフロー制御調和手法の実現可能性を示す。

## 2 プログラマブルデータプレーン

従来のスイッチはアーキテクチャ、ハードウェアとソフトウェアがスイッチごとに異なり、同一処理を実装する場合でもスイッチ単位の個別開発が必要であった。SDNではスイッチのアーキテクチャを共通化し、P4言



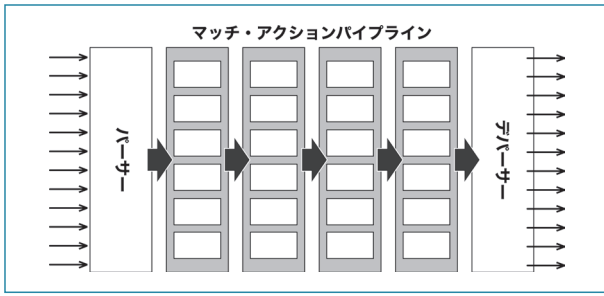


図2 PISAのパイプラインアーキテクチャ

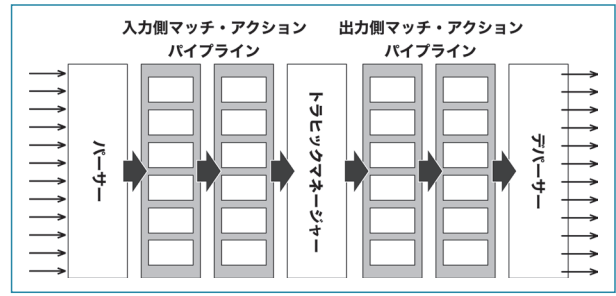


図3 V1Modelのアーキテクチャ

語で記述することで、共通のプログラムコードで多様なスイッチで同一処理を実行可能とした。3. で提案する調和制御手法の具体的な実装詳細の理解を助けるために、本章ではプログラマブルデータプレーンのアーキテクチャと、そのデータプレーンを高級言語でプログラミング可能なP4について解説する。

### 2.1 パイプラインアーキテクチャ

スイッチのデータプレーンでは複数のパケット処理を並列実行するための多数のパイプラインを持ち、マッチ・アクションを実行できるプログラマブルなパイプラインを備えたりファレンスアーキテクチャがProtocol Independent Switch Architecture (PISA) と呼ばれている。図2にPISAのアーキテクチャを示す。PISAは、パーサー、マッチ・アクションパイプライン、デパーサーの三つの要素で構成され、全てプログラマブルである。パーサーは、スイッチに入力されたパケットを開発者が作成したプログラムコードに従って解析して、以降のパイプラインに利用するための情報をパケットごとのメタデータとして格納する。マッチ・アクションパイプラインは、パケットのメタデータに基づいて、指定された条件にマッチするかパケットごとに検証し、マッチするパケットに対してプログラムしたアクション（パケット処理）を実行する。デパーサーは、メタデータからパケットのヘッダを再構成し、指定された物理ポートから処理済みのパケットを送出する。ただし、このアーキテクチャはP4言語が想定するパイプライン処理の概念モデルであるため、このモデルにのっとった実際のスイッチが必要である。

そこで、プログラマブルデータプレーンを実際に用いてネットワーク機能を試作・検証するために、PISAで示されたパイプラインを備えるV1Modelというアーキテクチャを採用したBehavioral Model version 2

(BMv2) と呼ばれるソフトウェアスイッチが開発・活用されている<sup>(5)</sup>。V1Modelのアーキテクチャを図3に示す。V1Modelでは、入力側と出力側でそれぞれマッチ・アクションパイプラインがあり、その間にトラヒックマネージャと呼ばれる固定機能が配置される。スイッチでは、パケットのコピーや送出先ポートへのパケットのキューイングなど、定型的なパケット処理が多数あるため、あらかじめトラヒックマネージャがそれらの処理機能を備えることで、入力側のマッチ・アクションではその実行指示のみをする構成となっている。マッチ・アクションパイプラインが入力側と出力側で分かれているのは、マルチキャストやブロードキャスト等のスイッチが受信した後に複製し、複数のポートへ送出するパケットについて、入力側でパケットを受信した時点で共通の処理を実行し、パケットを複製した後に出力側で送出先ごとに異なる処理を実行できるようにしているためである。

### 2.2 P4 : Programming Protocol-Independent Packet Processors

P4は2.1で説明したパイプラインアーキテクチャPISAにおいて、パケット処理をプログラムするための高級言語である。通常、スイッチはCPUやFPGA、ASICなどの複数のハードウェアを組み合わせられており、スイッチごとに適合する専用のプログラムを開発する必要があるが、P4ではプログラムコードにほとんど変更を加えることなく多様なハードウェアに対応可能となっている。例えば、C言語にも同様の機能が備わっており、CPUにはx64やarmv8等があるものの、gcc等でコンパイルするときに対象を指定するだけで、プログラムコードの改変なくハードウェアに合わせたバイナリコードを生成できる。この概念と同様に、スイッチのハードウェアの違いを考慮する必要がなく、共

```

#include <core.p4>
#include <v1model.p4> ← v1 model 用のヘッダ

struct headers {
    ethernet_t  ethernet;
    ipv4_t      ipv4;
}

        パーサー
parser MyParser(
    packet_in packet,
    out headers hdr,
    inout metadata meta,
    inout standard_metadata_t smeta) {
    ...
}

        チェックサム検証
control MyVerifyChecksum(
    in headers, hdr,
    inout metadata meta) {
    ...
}

        入力側のマッチ・アクション
control MyIngress(
    inout headers hdr,
    inout metadata meta,
    inout standard_metadata_t smeta) {
    ...
}

        出力側のマッチ・アクション
control MyEgress(
    inout headers hdr,
    inout metadata meta,
    inout standard_metadata_t smeta) {
    ...
}

        チェックサム更新
control MyComputeChecksum(
    inout headers, hdr,
    inout metadata meta) {
    ...
}

        デパーサー
parser MyDeparser(
    inout headers hdr,
    inout metadata meta) {
    ...
}

        main関数に相当
        V1Modelで定義された
        パイプラインに対応する
        プロシージャを指定
V1Switch(
    MyParser(),
    MyVerifyChecksum(),
    MyIngress(),
    MyEgress(),
    MyComputeChecksum(),
    MyDeparser()
) main;

```

図4 P4プログラムのテンプレート

```

struct standard_metadata_t {
    PortId_t  ingress_port;
    PortId_t  egress_spec;
    PortId_t  egress_port;
    bit<32>   instance_type;
    bit<32>   packet_length;
    bit<32>   enq_timestamp;
    bit<19>   enq_qdepth;
    bit<32>   deq_timedelta;
    bit<19>   deq_qdepth;
    bit<48>   ingress_global_timestamp;
    bit<48>   egress_global_timestamp;
    bit<16>   mcast_grp;
    bit<16>   egress_rid;
    bit<1>   checksum_error;
    error     parser_error;
    bit<3>   priority;
}

```

図5 standard\_metadataの定義

通の言語でデータプレーンのプログラムコードを作成できるのがP4の利点である。

図4にBMv2を対象としたP4プログラムのテンプレートを示す。詳しい記述方法はP4言語仕様<sup>(6)</sup>を参照されたい。ここでは詳細を省いた概念レベルで概説する。このプログラムコードはBMv2が採用するV1Modelを想定しているため、冒頭でV1Modelに対応するヘッダファイルv1model.p4<sup>(7)</sup>をインクルードしている。また、P4ではプロシージャをparserブロック（{ }で囲まれた範囲）やcontrolブロックで定義している。

図4の右の最下部のV1Switchを見ると、六つのプロシージャが並んでいる。V1SwitchはC言語のmain関数に相当し、図3にあるプログラマブルなパイプラインの順番（パーサー、入力側マッチ・アクション、出力側マッチ・アクション、デパーサー）に対応する処理

内容を記述したプロシージャを指定している。ただし、図3には明記していないが、V1Modelではチェックサムの検証（MyVerifyChecksum）がパーサーの後、チェックサム更新（MyComputeChecksum）がデパーサーの前にある。これはV1Model独自のパイプラインで、チェックサム検証・更新を実行するプロシージャを指定する。本稿ではこれらチェックサム処理の説明は省略する。

パケット処理の流れを説明する。パケットを受信する度に図3のパーサーに対応する、パーサーの処理を記述したプロシージャ（図4左側のMyParser）を実行する。パーサーでは受信したパケットを解析し、その結果はV1Modelではパケットごとに付与するメタデータとして、図5に示すstandard\_metadata\_t構造体に格納する。この構造体のメンバ変数には、解析結果以外にもトラヒックマネージャの制御内容（例えば、送出先ポー

トの番号など)を指定する変数が含まれている。ほかにもメンバ変数が複数あり、詳しい情報はBMv2のドキュメント<sup>(8)</sup>を参照されたいが、例えば、Ingressが付くメンバはパケット入力に関連する変数で、Egressが付くとパケット出力に関連する変数である。次に、パーサーの次は入力側のマッチ・アクションの処理内容が書かれた(図4左側下部のMyIngress)が実行される。ここではパケットに対して処理を実行する。例えば、standard\_metadata\_t 構造体のメンバ変数 ingress\_port からパケットが到着したスイッチの物理ポートの番号を把握し、egress\_spec にパケットを出力する物理ポートを指定できる。これによって、図3の入力側マッチ・アクションの次にある、トラヒックマネージャが指定された物理ポートのキューにパケットを挿入する。同様に出力側のマッチ・アクション(図4右側のMyEgress)を実行し、最終的にはデパーサー(図4のMyDeparser)がstandard\_metadata\_t 構造体のデータに基づいてパケットを再構築して送出する。このようにP4では、パーサーやパケット処理の内容を高級言語で記述し、各パイプラインに対応して実行させる構造となっている。

### 2.3 P4を用いたマッチ・アクションの実装

P4を用いてマッチ・アクションを実装する方法を解説する。本節では、P4のチュートリアルで紹介されているIPフォワードを行うL3スイッチ(Basic Forwarding<sup>(9)</sup>)の実装例であるbasic.p4を用いて説明する。

P4では、最初にマッチ条件で使うパケットのメタ情報をパーサーで抽出する。図6にパーサーのコードを示す。parserブロックは、startという状態から始まり、acceptかrejectの2種類の終了状態に到達するまでの状態遷移を記述する。その間に経る状態は、stateステートメントで任意に記述できる。図6ではイーサネットフレームの入力を前提として、start状態からparse\_ethernetへ遷移し、イーサネットヘッダの情報を抽出している。その後、EtherTypeフィールドに応じてaccept状態とするか、IPv4ヘッダの情報を抽出するparse\_ipv4へ遷移するかをC言語のswitch文に似た構文(select文)で分岐している。ここで抽出するヘッダ情報は図4上部で定義されるstruct headerの構造体

```

parser MyParser(packet_in packet,
  out headers hdr,
  inout metadata meta,
  inout standard_metadata_t standard_metadata) {
  state start { ← 初期状態
    transition parse_ethernet;
  }
  state parse_ethernet { ← 状態遷移
    packet.extract(hdr.ethernet); ← イーサネットヘッダの情報抽出
    transition select(hdr.ethernet.etherType) {
      TYPE_IPV4: parse_ipv4; ← EtherTypeの値で状態遷移先選択
      default: accept;
    }
  }
  state parse_ipv4 { ← 状態遷移
    packet.extract(hdr.ipv4); ← IPヘッダの情報抽出
    transition accept;
  }
}

```

図6 Basic Forwardingのパーサー

変数hdrに保存され、以降のパイプラインでも利用できる。

マッチ・アクションを実行するcontrolブロックを図7に示す。マッチ・アクションは、tableステートメントでマッチ条件とアクションの対応付けを保存できるフローテーブルの型を定義する。ここでは、フローのマッチ条件(フローテーブルのカラム名key)の型と、マッチしたパケットへのアクション(フローテーブルのカラム名actions)の選択肢を定義しており、テーブルの型定義のみではテーブル内には何の値も挿入されていない。

IPフォワードを実装する図7では、宛先のIPアドレスに基づいてパケットのフォワード先を決定するために、宛先IPアドレスをマッチ条件として定義している。ここでlpmはlongest prefix matchの略で、一般的な経路制御に用いられる最長一致検索を行うことを示している。

tableステートメントのactionsに一覧される処理は、actionステートメントを用いて、パケット処理内容をプログラムコードで記述する。IPフォワードを行うアクションのipv4\_forward(図7中「アクションipv4\_forwardの定義」参照)は、スイッチを経由するたびにイーサネットフレームの送信元・先のMACアドレスを書き換える処理(IPフォワードを実施するスイッチの一般的な動作)が記述されている。パケットを廃棄するdropはV1Model固有のメタデータstandard\_metadataに破棄フラグを追加している。(図7中「アクションdropの定義」参照。)この情報を基にトラヒックマ

```

control MyIngress(inout headers hdr,
  inout metadata meta,
  inout standard_metadata_t standard_metadata) {
  action drop() { ← アクションdropの定義
    mark_to_drop(standard_metadata);
  }
  action ipv4_forward(macAddr_t dstAddr, egressSpec_t port) { ← アクションipv4_forwardの定義
    standard_metadata.egress_spec = port;
    hdr.ethernet.srcAddr = hdr.ethernet.dstAddr;
    hdr.ethernet.dstAddr = dstAddr;
    hdr.ipv4.ttl = hdr.ipv4.ttl - 1;
  }
}

table ipv4_lpm { ← フローテーブルの定義
  key = {
    hdr.ipv4.dstAddr: lpm; ← マッチ条件：宛先IPアドレスを最長一致検索 (lpm)
  }
  actions = {
    ipv4_forward; ← アクションの選択肢
    drop;
    NoAction;
  }
  default_action = drop();
}

apply { ← フローテーブル
  if (hdr.ipv4.isValid()) {
    ipv4_lpm.apply();
  }
}

```

図7 Basic Forwarding のマッチ・アクション

ネーチャがパケットを破棄する。NoActionは予約語で、その名のとおりに、何も処理しないアクションである。デパーサーはここには掲載しないが、パケット処理の記述はなく、パケット送出のみ行う。

ここで定義したフローテーブルは、パケットが到着するたびに参照され、対象のパケットに対してテーブル内のデータ単位でマッチ条件を比較する。例えば、フローテーブルに「192.168.0.1, ipv4\_forward」というデータが挿入されていた場合、宛先IPアドレスが192.168.0.1のパケットに対して、ipv4\_forwardの処理が実行される。データが複数挿入されている場合には、パケットごとにテーブル内のデータと順番に比較し、マッチした場合には指定されたアクションを実行する。

上記のパーサーとマッチ・アクションで生成するフローテーブルの機能を使うことで最低限のIPフォワードを実現できる。本来は転送するパケット以外の処理、例えばARPの処理なども必要であるが、ここでは扱わない。

図7のコードでは、フローテーブルの型を定義するのみで、具体的な値、つまりマッチ条件とアクション指定の情報は挿入されていない。よって、具体的な宛先IPアドレスに対して、次ホップのMACアドレスとパケット送出する物理ポート番号を指定した、マッチ条件

とアクションのペア（フローテーブルに登録するデータ）自体はコントロールプレーンに登録する必要がある。BMv2ではRuntimeCLIと呼ぶコマンドラインツールがあり、手動でマッチ条件とアクションのペアを挿入し、データプレーンで実装した機能をテストできる。しかし、実ネットワークで利用する場合には、P4で記述したデータプレーンと通信して、P4で定義したフローテーブルにルールの追加・編集・削除するコントロールプレーンの実装のためのP4Runtimeが開発されている<sup>(10)</sup>。本稿はプログラマブルデータプレーンに着目しているため、コントロールプレーンの技術であるP4Run-timeの説明は省略する。

### 3 ネットワーク主導型 TCP フロー制御調和手法

本章では、2. で説明したプログラマブルデータプレーンを用いてネットワークが主導して複数の競合TCPフロー間の調和を図る制御手法について説明する。

#### 3.1 ネットワーク主導のTCPフロー制御調和

TCPのふくそう制御アルゴリズムは基本的には送信端末が、自身が送信したパケットに対する確認応答（ACKパケット）の受信に応じて送信量（ACKパケット受信前に連続送信可能なデータ量を表すウィンドウサイズ）を増減することで制御する。送信端末は、転送経路上の帯域が十分に利用可能な場合にはACKパケットを遅延やロスなく受信できるため、ウィンドウサイズを適応的に増やす。一方で、帯域不足によってデータ／ACKパケットの損失・遅延が起きた場合、送信端末はウィンドウサイズを減らす。結果として、ボトルネックリンクで競合するTCPフローは帯域を公平に分けるように送信量を制御する（図8）。これに対してアプリに着目すると、アプリの用途に応じて必要なスループットが異なる場合がある。例えばビデオ視聴が再生速度に必要なデータ量を転送できれば途切れないように、全データを一度にまとめて転送する必要がない等が挙げられる。このようにアプリ要求に差があっても、TCPは公平にボトルネック帯域を利用するため、差異のあるアプリ要求とTCP制御の結果得られる公平なスループットに不一致が生じ、アプリが真に必要なデータ転送に必要なネットワーク帯域を効果的に活用できない。

本研究では上記のような競合する TCP フロー間のアプリ要求とネットワーク帯域間の不一致を調和させるために、アプリ要求に対して過剰なスループットを提供している TCP フローのデータ送信量の調整を、プログラマブルデータプレーンを用いて実現する。TCP フローのスループットを制御する方法は既存技術で様々提案されている。端末の TCP 制御を拡張した場合には、前述のとおり、ネットワーク内部でフロー競合の存在や競合状況に応じて、フローそれぞれの要求を満足する調和が本質的に困難である。また、パケットをスイッチのキュー（記憶領域）に一時的に保存する手法や、キュー内のパケット順序制御や破棄する手法では、遅延や損失が増加する。更に、パケットを破棄した場合、送信端末の TCP 制御によって再送されるパケットによる帯域の消費や、ネットワーク内でのパケット順序の入れ替わりによってアプリ品質が低下（例えば、ビデオ視聴では帯

域を消費して届けたにもかかわらず映像が乱れる。）してしまう。

そこで本研究では、データプレーンを用いてネットワーク主導で従来のトラヒック制御を変更することなく、TCP 制御を誘導することでアプリ要求に合わせて端末のパケット送出を調整し、遅延や損失を抑えながらアプリが真に必要なパケットを効果的に宛先に届ける調和制御を実現する。

この目的を実現するために、ボトルネック区間に実装したプログラマブルデータプレーンを用いて、パケット送信量を抑制したい TCP フローの ACK パケットを編集して返送する方法を用いる。TCP では送信端末が送信量（ウィンドウサイズ）を ACK パケットの受信状況の観測結果に応じて増減する値（cwnd）と ACK パケットに含まれる advertised window（awnd）の小さい方の値に設定する。つまり、ボトルネックリンク上の競合フローの中でスループットを抑えたいフロー（アプリ要求 < 転送スループット）を対象に、ACK パケット中の awnd 値をプログラマブルデータプレーンを活用して動的に変更することで、ネットワーク主導で送信量を制御する。一方で、アプリ要求に対してスループットが不足しているフローは、通常の TCP 制御を継続することでスループットの向上を図る。このように、本研究ではネットワークがアプリ要求を考慮して複数フローの制御を調和させる。

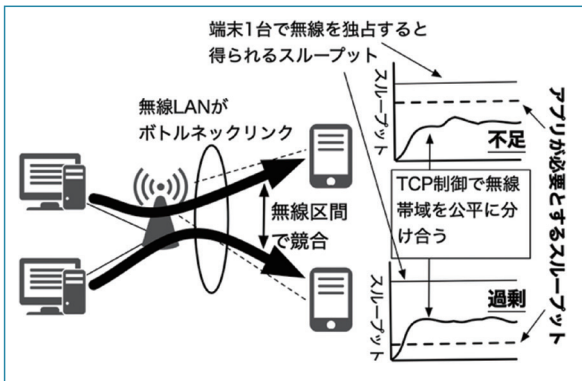


図 8 TCP 制御とアプリ要求の不一致

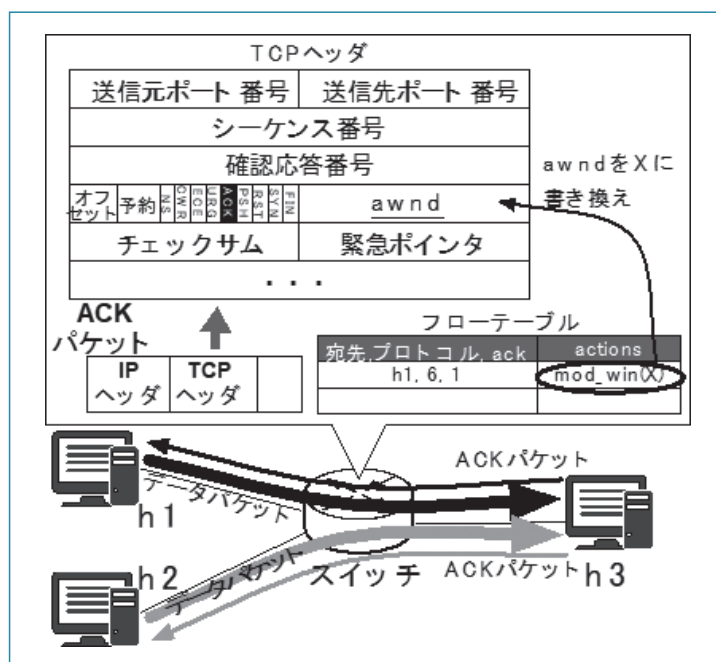


図 9 awnd 書換えの概念図

## 3.2 P4を用いたTCPフロー制御調和の実装詳細

3.1で説明した awnd 値を書き換えるパケット処理機能を、2.3で説明した Basic Forwarding に追加実装する。本稿では、試作したデータプレーンのTCPフロー制御の調和手法の機能検証のために、図9に示す二つの通信フローのみが転送され、ネットワーク環境に変動がないシンプルな有線ネットワークの構成を想定する。図9では、3台の端末が有線でスイッチに接続し、2台 (h1 と h2) が残りの1台 (h3) へ向けてTCPフ

ローを送信する。この場合、スイッチと h3 の区間がボトルネックとなり、通常のTCPふくそう制御によって公平に帯域を分け合うと、h1 がアプリ要求に対して過剰、h2 がアプリ要求に対して不足する状況を想定する。つまり、h1 と h3 間のTCPフローのスルーputを抑制する。

この仕組みを実現するために、図6と図7のプログラムコードに図10と図11を追加した。本研究では、ACKパケットにマッチさせてawndを書き換えるため、図10のTCPヘッダをマッチ条件に用いるために定義した。また、awndを書き換える際にTCPチェックサムの再計算が必要となる。そこで、チェックサム計算に用いる擬似ヘッダ用のTCPセグメントサイズもメタデータとして定義した。図11は、パーサーとマッチ・アクションの追加部分のみ抜粋した。図6のパーサーはIPヘッダの抽出のみであったが、TCPヘッダを抽出する parse\_tcp という状態を定義した。マッチ・アクションでは、対象フローのACKパケットにマッチする条件と、そのawndを変更するアクションである mod\_win を実行するフローテーブル (図9) の型を定義する。マッチ条件には、IPヘッダの宛先IPアドレスとプロトコル番号、TCPヘッダのACKフラグの三つを挿入できる構成で定義し、それらが完全一致した場合にアクションを実行する評価方法を指定した。今後、多数のフロー

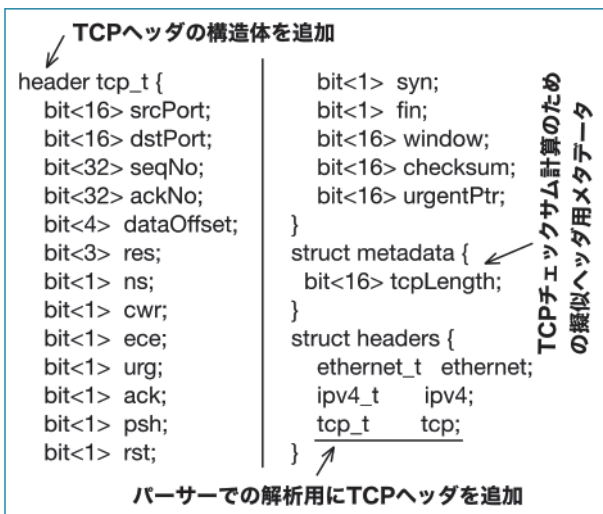


図10 定義の追加部分

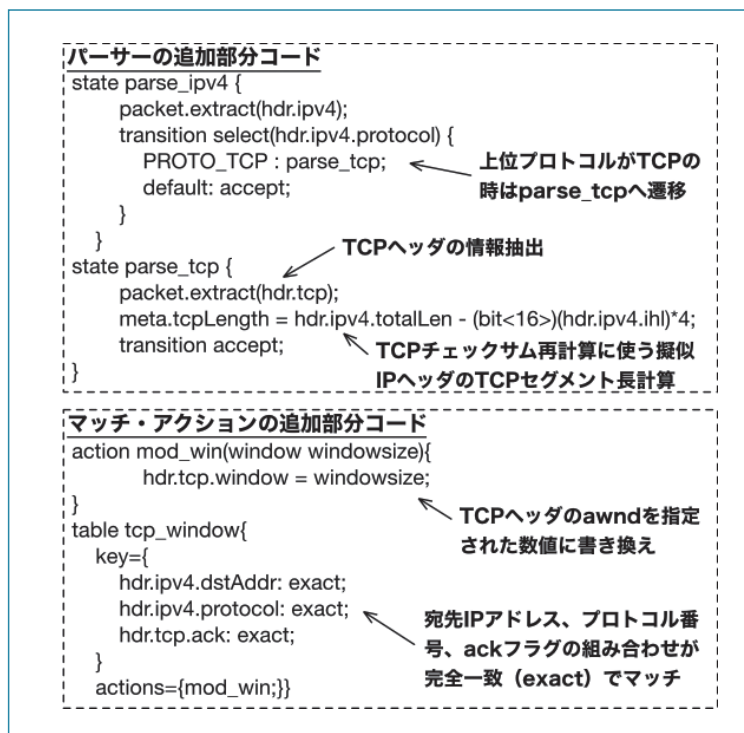


図11 パーサーとマッチ・アクションの追加部分

が流入する状況では TCP ポート番号も条件に含める等の工夫が必要である。アクションの内容を記載した mod\_win (図 11 下段, action mod\_win 参照) は TCP ヘッダ内の awnd フィールドを指定された値に置き換える。最後に、デパーサーで変更後の awnd を含む TCP ヘッダのチェックサムを再計算する。デパーサーの具体的な記述は省略する。

## 4 基礎実験

本章では、3. で実装したデータプレーンを用いて、実際にアプリ要求に応じたスループット調和が可能であることを実験を通じて確認する。

### 4.1 実験環境

実験環境は、日本 P4 ユーザ会が配布する「P4 チュートリアル用仮想マシン」を用い、その仮想マシン上に準備された mininet と BMv2 を組み合わせた環境で実験する。仮想マシンの中にあらかじめチュートリアルの実行環境が準備されており、本研究がベースとした Basic Forwarding のディレクトリでトポロジーを図 9 の構成に書き換えた。また、BMv2 のソフトウェア実装によって高速なパケット処理が困難なため、実験環境をスケールダウンして TCP フローを競合させるために図 9 の各リンクの伝送帯域を 10 Mbit/s、片方向遅延を 5 ms に設定した。

実験は、3.2 の環境と同じく、h1 と h2 が h3 へ TCP フローを送信する。ただし、h1 のアプリの要求スループットは 2 Mbit/s、h2 のアプリ要求は 8 Mbit/s として、競合区間で不均等なスループットを要求する状況を想定する。ここで 3. の実装を用いて、宛先が h1 の ACK パケットの awnd をフロー開始当初から 747 へ書き換える。この数値は、同一実験環境で ping を用いて事前に計測した RTT と上記のアプリ要求スループットから算出した。具体的には、要求スループット (bit/s) = ウィンドウサイズ (Byte) × 8/RTT (s) の関係式からウィンドウサイズを逆算した。実際のウィンドウサイズは、ACK パケットの awnd フィールドの値 × Window scale (本実験環境では 512) で計算されるため、awnd は 747 と算出される。

3.2 の実装では key と action を指定したフローテーブルの型を定義したが、フローの具体的なマッチ条件の

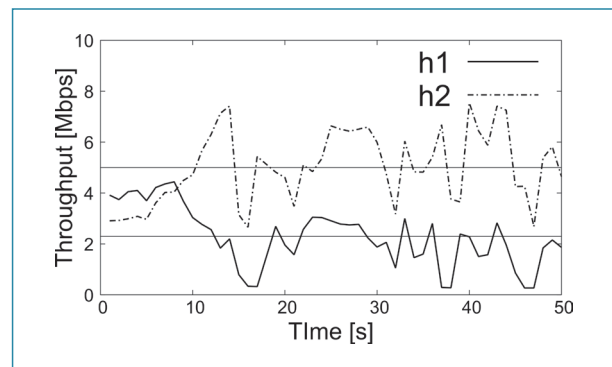


図 12 スループットの計測結果

値と処理内容のペアは登録していない。本稿の機能検証ではコマンドラインツールの runtimeCLI でマッチ条件とアクションのペアをあらかじめ手動で登録した。具体的には、runtimeCLI 実行後、待機状態になってから下記のコマンドを入力する。

```
RuntimeCmd: table_add MyIngress.tcp_window
MyIngress.mod_win [h1 の IP アドレス] 6 0b1 =>
747
```

ここで「=>」の左側はルールを追加するテーブル名と指定するアクション名、フローテーブルの key を順に指定しており、右側は action のプロシージャに渡す引数を指定する。今回は、3.2 で作成したフローテーブル tcp\_window でアクションとして mod\_win を設定し、マッチ条件として制御対象フローのデータ送信端末 (ACK の宛先) の IP アドレス (h1) とプロトコル番号 6 (TCP)、ack フラグが 0b1 (バイナリで 1) の組合せを指定した。また、図 11 のアクション mod\_win に対して、その引数となる window size として「=>」の右側に記載した数値 747 を指定する。これにより、key にマッチした ACK パケットの awnd フィールドは 747 に置換される。

### 4.2 実験結果

図 12 に TCP フロー開始から終了までの各フローのスループットの時系列グラフを示す。制御を全く行わない TCP フロー同士であればスループットはほぼ同等になるのに対し、提案手法を導入することで端末の制御を変更することなく h1 のスループットのみを想定する 2 Mbit/s 付近に抑制できた。一方、h3 は端末による TCP 制御に任せることで約 5 Mbit/s を獲得している。当初想定した 8 Mbit/s まで増えていないが、これは BMv2

のソフトウェア処理のボトルネックに起因することが判明しており、ボトルネック区間の上限スループットを獲得できたことを確認している。以上の結果より、本研究で実装したデータプレーンがアプリ要求を意識した競合フローの調和制御を実現可能な機能を備えていることを示した。

## 5 まとめ

本稿では、プログラマブルデータプレーンのアーキテクチャと、アーキテクチャに合わせてパケット処理をP4言語で記述する方法を解説した。また、P4言語を用いてデータプレーンに対してTCPヘッダ内のawndを書き換える、という従来のSDNには備わっていなかった機能を実装することで、ネットワーク内部でフローの競合状況に合わせて、競合する複数TCPフロー間のふくそう制御を調和させるための基礎技術が実現できることを示した。今後は、図8で示したような無線変動が生じる無線環境も考慮した調和制御や、フロー単位で適切なawndを決定する方法、及びフロー開始・終了に合わせて動的にマッチ条件とアクションのペアを管理するコントロールプレーン制御手法等を検討する必要がある。

**謝辞** 本研究は総務省SCOPE (JP235007003) とJSPS 科研費JP21H03430, 国立研究開発法人情報通信研究機構 (NICT) の委託研究 No.05501 の助成を受けた。

### 文献

- (1) N. Feamster, J. Rexford, and E. Zegura, "The road to SDN: an intellectual history of programmable networks," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 2, pp. 87-98, April 2014.
- (2) N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow: enabling innovation in campus networks," ACM SIGCOMM Comput.

Commun. Rev., vol. 38, no. 2, pp. 69-74, April 2008.

- (3) P. Bosshart, D. Daly, G. Gibb, M. Izzard, N. McKeown, J. Rexford, C. Schlesinger, D. Talayco, A. Vahdat, G. Varghese, and D. Walker, "P4: programming protocol-independent packet processors," ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev., vol. 44, no. 3, pp. 87-95, July 2014.
- (4) J. Gomez, E. F. Kfoury, J. Crichigno, and G. Srivastava, "A survey on TCP enhancements using P4-programmable devices," Comput. Networks, vol. 212, July 2022.
- (5) BEHAVIORAL MODEL (bmv2). <https://github.com/p4lang/behavioral-model>
- (6) P4\_16 Language Specification version 1.2.4 (2023-05-15). <https://staging.p4.org/p4-spec/docs/P4-16-v1.2.4.html>
- (7) GitHub - p4c/p4include/v1model.p4 at main. <https://github.com/p4lang/p4c/blob/main/p4include/v1model.p4>
- (8) The BMv2 Simple Switch target. [https://github.com/p4lang/behavioral-model/blob/main/docs/simple\\_switch.md](https://github.com/p4lang/behavioral-model/blob/main/docs/simple_switch.md)
- (9) p4lang/tutorials: P4 language tutorials. <https://github.com/p4lang/tutorials>
- (10) P4Runtime Specification version 1.3.0 (2020-12-01). <https://staging.p4.org/p4-spec/p4runtime/v1.3.0/P4Runtime-Spec.html>

(2023年9月30日受付, 12月15日再受付)

### 妙中雄三 (正員)

奈良先端大准教授。2010 奈良先端大で博士 (工学) 取得。東大情報基盤センター助教を経て、2018-04 から現職。サイバーセキュリティやネットワークを専門とする。



### 塚本和也 (正員)

九工大教授。2006 九工大で博士 (情報工学) 取得。その後、JSPS 特別研究員、米国 UCI 客員研究員を経て、2007 から九工大に勤務。2022-01 から現職。各種ネットワークにおける通信制御を専門とする。

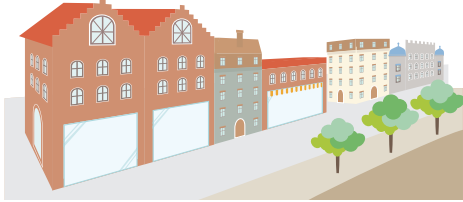




# 英国における生活と研究



若者よ、  
世界に  
出よう！



富士通 菊月達也 Tatsuya Kikuzuki

## 1 はじめに

私は、富士通で無線・ネットワークの研究開発に従事する研究者です。富士通には海外の大学で1年間研究に従事できる海外派遣制度があり、私はその制度を利用して英国 Surrey 大で1年間研究員を務めました。

海外派遣制度を利用することで先端的な研究に触れるので、研究者として成長も期待できますし、英語力向上も見込んでいました。しかし、実際に渡英してみると、予想もしていなかった苦労だけではなく、多様な文化に触れる経験など、思わぬ収穫がたくさんありました。これらの経験を通して文化や趣味などの世界観が広がり、私は海外で挑戦することに対して肯定的な意見を持つようになりました。

本稿では、少しでも海外に挑戦したいと思っている方の参考になればと思い、渡英までの苦労(2.)及び英国生活での苦労(3.)、研究生生活(4.)、そして多様な文化や考え方に触れられた経験(5.)を紹介し、最後に海外で挑戦することに対する私見を述べさせていただきます(6.)。

## 2 渡英までの苦労

富士通の海外派遣制度は、周囲のサポートはあるものの、研究室への訪問や交渉、査証(ビザ)の申請は自身で進めなければならず、渡英までに多くの困難を乗り越える必要がありました。

表1に渡英までの道のりをまとめました。(Surrey 大以外はA大、B大と名前を伏せています。)まず2019年に、英国のA大、フィンランドのB大から立て続けに訪問を断られました。いずれも、訪問を受け入れて頂く方向で交渉を進めていたのですが、訪問直前になって受入れ枠縮小や多忙などの理由で断りのメールが届きました。その直後に打診したのがSurrey 大の教授で、こちらは大学との交渉はうまくいきましたが、英国外務省からビザ申請を却下されてしまいま

した。2017年に英国を訪問した同僚と同様のビザカテゴリで申請しましたが、英国のビザシステムは細則(英語が堪能でも丸1日はかかる分量)が年に数回変更されるようで、最新版を読み込むとビザカテゴリの選択を誤っていたことが分かりました。その直後に発生したコロナ禍により渡航が保留され、一時は海外派遣を諦めかけました。

しかし、約2年後によく渡航許可が下り、満を持して2022年にビザの再申請をしました。ところが、ウクライナ情勢の影響からビザ審査が滞ってしまったため、出発可能日が後ろ倒しにされ、ビザ申請は許可されたものの滞在期間は希望していた1年間より少ない9か月間となってしまいました。本件について英国外務省に問い合わせても返信が遅く、滞在可能期間がどんどん減ってしまっていたので、翌月に半ば強引に渡英し英国生活をスタートさせました。英国在留中にビザを延長できたため問題はなかったのですが、英国外務省の対応の遅さには非常に苦労させられました。(返信をもらうのに約4か月かかりました。)

大学との交渉、ビザ申請、コロナ禍、ウクライナ情勢と、渡航前に約4年間も苦労し続けたのは筆者くらいかもしれません。不可抗力な事柄も多かったのですが、ビザ申請の細則は面倒でも全て読むべきだったと

表1 渡英までの道のり

年月	出来事
2018/9	A大の教授へ訪問打診
2019/2	訪問直前に、A大の人事から却下
2019/5	B大の教授へ訪問打診
2019/9	訪問直前に、B大の教授から却下
2019/10	Surrey 大の教授へ訪問打診
2019/12	英国外務省から英国ビザ申請が却下
~	コロナ禍を理由に渡航が保留
2022/7	ビザ再申請をするも、ウクライナ情勢の影響でビザ滞在許可期間が不足
2022/8	半ば強引に渡英 (2023/3にビザ延長申請が受理)



図1 ドアと干渉するひもスイッチを結束バンドで修正(左), 返送されそうな商品を FedEx ハブ倉庫で受領(右)

反省しています。また、コロナ禍により海外への渡航が保留され、挑戦をすること自体に心が折れかけましたが、今になって振り返ると諦めなくてよかったと思っています。

### 3 英国生活での苦勞

実感として、英国は日本と比べるとサービス・製品の質が落ちてしまい、生活面で多くの苦勞をしました。その一例を紹介します。

住居：家賃は数十万円／月と高額でしたが、築130年ということもあり快適とは言えませんでした。例えば、建て付けが悪いのか六つのドアが全て閉まらなかったり、照明のひもスイッチがドアに干渉する設計になっていたりしたため、入居直後に結束バンド等を用いて修正しました(図1左)。また断熱性が低いため冬は寒く、真冬の電気代は約20万円／月に達しました。

配送：数週間の遅延や荷物紛失が頻繁に起きました。一度、急ぎで受け取りたいのに「例外エラーが発生したので返送します」と通知が来て、問い合わせでも自動音声による対応のみだったので、ハブ倉庫まで行って強引に受領したこともあります(図1右)。作業員が荷物を積み忘れたために例外エラーになったと思われる、トラッキングや通知など配送システムはしっかり運用されているのに、肝心の現場の作業員がしっかりしていないな、と思いました。

交通：電車・バスは、時間どおりに動かないのはもちろんのこと、突然の運行停止やルート変更等も頻繁に起き、代替輸送もしてくれません。自力で何とかするしかないので、Google Mapが必須でした。

飲食店：オーダーしてから2時間近く頼んだものが来なかったり、席を予約しても忘れられたりするので、何度も確認することが重要でした。

英国に住む際には、トラブルに対して自分で考えて対処していく必要がある状況が多くありますが、そのような作業を楽しむくらいの気持ちがあった方がよいと思います。また、この在留期間中に行った欧州旅行でも、電車が突然来なくなるなど同様の経験をしたの



図2 Surrey大でのW杯観戦(上)、クリスマス会(下)

で、英国というより日本が特別なのだと思いました。海外で暮らすことで日本に対する理解を深めるきっかけにもなりました。

### 4 研究生活

研究生活は非常に楽しく、有意義なものでした。

研究所の雰囲気は、私が修士まで所属していた東大の研究所に比べ、よりフレンドリーであると感じました。普段気さくに話しかけてもらえるだけではなく、サッカーワールドカップ(W杯)観戦やクリスマス会(図2)といったイベントが毎月のように開催されました。英国人はほぼ見かけないくらい多国籍な研究環境であったため、自然とオープンにコミュニケーションを取り合う文化になっているようでした。

また企業の研究よりも技術志向が強いため、研究や技術習得に集中できる環境でした。技術力の向上を強く実感でき、論文投稿などの成果も出せたことは、Surrey大を訪問してよかったことの一つです。

### 5 多様な文化や考え方について

英国に住んでみて、日本とは文化・考え方がいろいろと違うことに気付かされました。また、英国人以外の人々に出会う機会も多く、多様な考え方に触れることもできました。その一部を紹介します。



図3 週末のサッカー

会計が全てキャッシュレスであったり、自動車のスピード違反・駐車違反の取締りが全てカメラ自動監視であるなど、IT導入が徹底しています。一方で、駐車しても駐車料金が引き落とされないなど、カメラの検出漏れも多いように感じました。多少の検出漏れよりも、IT導入による効率化の方が重視されていて、日本人との考え方の違いを感じました。

「顧客と従業員」そして「従業員と経営者」の人間関係がよりフラットだと感じました。例えば、日本では電車・バスの遅延時に「責任を取れ」など無理なクレームを言っている乗客を見掛けることもあります。英国もクレームはありますが、無理な要求は見たことがなく、一人の人間同士として尊重し合っているように思えました。また、賃金や働き方に不満があるとストライキなどの手法を用いて声高らかに主張する慣習であり、我慢しながら働く人が日本よりかなり少ないと感じました。そのように従業員が自由な雰囲気の中で働くと、仕事に対する責任感は日本と比べると弱く感じられ、それが3.に記載したようなサービスの質低下にもつながってしまっているのだと思います。

サッカー発祥の地である英国では、サッカーが暮らしに根付いており、サッカー観戦ではこれまで経験したことがない熱気が感じられました。それだけでなく、私が参加していた現地のアマチュアサッカー（図3）では、お年寄りを含め9軍までチームが編成されていたり、試合には数十人のOBが駆け付けて応援してくれたり、日本ではあり得ない光景を目にしました。また、今まで30年間趣味で続けてきた日本サッカーのスタイルとは異なり、技術よりも身体能力で勝負するような戦略が多く、これまでのサッカーに対する自分の認識が狭かったことに気づき、また驚きました。

英国ではいろいろな中国人や日本人にも出会いました。例えば、英会話教室で出会った中国人の方（図4）は、お金を少しでも多く稼ぐためにわざわざ英国まで来てビジネスをしていると言い、ハングリー精神の強さに驚きました。また、日本人にも様々な方がいて、私のような会社員以外にも、起業をしようとしている方・した方、プロサッカー選手を目指している方・選



図4 英会話教室のメンバー（右奥が私）

手になった方、Youtuberとして活動している方等、日本で会うことはなかったであろう様々な方とお話をする機会を得、多くの刺激をもらいました。

## 6 海外挑戦についての私見

英国のSurrey大への訪問研究を通じて、海外での挑戦に対し非常に肯定的な意見を持つようになりました。世界観が大きく広がったことが第1の理由で、それに比べると、英語力向上は副産物になると思います。

5.で触れたように、文化や考え方が国ごとに異なるため、日々刺激がある生活を送ることができ、楽しくもあります。それによって広がった世界観は今後の研究生活にもプラスに働くと確信しています。例えば、駐車違反の検出漏れと効率化の考え方に触れて、日本の研究・技術開発は安全寄りに傾き過ぎていると考えるようになり、サービスによっては参考にすべき点もあるように思いました。また、趣味（私の場合はサッカー）の分野での世界観が広がることは、人生の豊かさにもつながると思います。

しかしながら、生活面での苦勞(3.)を考えると、永住するなら日本がよいと個人的には思いました。ただ、自由な文化などが気に入って英国に永住することを決めた日本人にもたくさん会いました。海外生活を気に入るかは人それぞれだと思いますが、まずは挑戦することによって知識・世界観を広げることは誰にとっても大きなメリットになると思います。本稿が少しでもみなさまの海外挑戦へのきっかけや参考になれば幸いです。

### 菊月達也（正員）

2008 東大・工・物理工学卒。2010 同大学院・新領域了。同年富士通入社。入社以来、無線ネットワーク分析・制御技術の研究開発に従事。2022 英 Surrey 大客員研究員。





# 郵政博物館

遠藤寛之 Hiroyuki Endo 情報通信研究機構

## 1 はじめに

今回の「科学館・博物館めぐり」では、郵便及び通信をテーマとする郵政博物館（図1）を紹介します。郵政博物館は、日本最大となる33万種の切手展示をはじめとする、情報通信関係の収蔵品を紹介する博物館として知られています。東京スカイツリータウンに所在する商業施設である「東京ソラマチ」内にあるこの博物館は、2013年8月31日に閉館した通信総合博物館の一部を引き継いで設立されたものです。この通信総合博物館については本連載の前身となる記事で既に紹介しています<sup>(1)</sup>。そこで今回は、移転後より大きく変化した部分にフォーカスを当てていきたいと思います。

## 2 デジタル技術を多用した展示

郵政博物館の展示の特徴として、展示品へのアクセシビリティ向上のためにデジタル技術を積極的に活用している点が挙げられます。前身となる通信総合博物館から引き継いだ切手展示は、この博物館の誇る目玉展示品の一つです。その展示室（図2）は、日本を含む世界各国の切手などが貼り付けられ、スライド式に引き出すこ

とができるパネルを1,000枚以上もそろえる、正に圧巻の一言に尽きるものでありますが、いざ気に入った切手を見つけるとなると、非常に長い時間をかけなければなりません。

しかし、デジタル切手帳「Stamp Pond（スタンプポンド）」を使えば、コンソールからのタッチパネル操作で好みの切手を検索し、その場で閲覧することができます（図3）。「Pond」とは英語で「池」という意味で

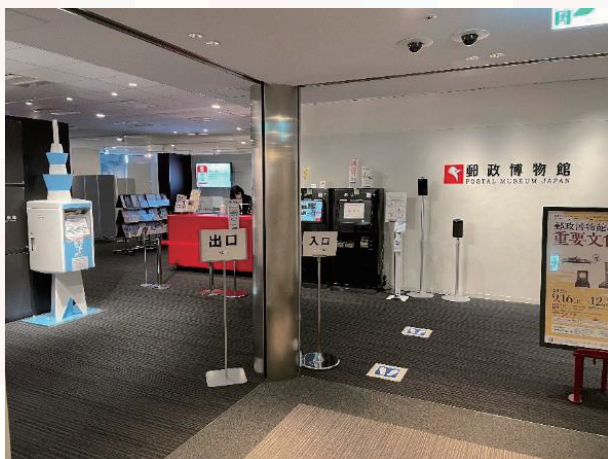


図1 郵政博物館のエントランス。スカイツリー風のポストが印象的。

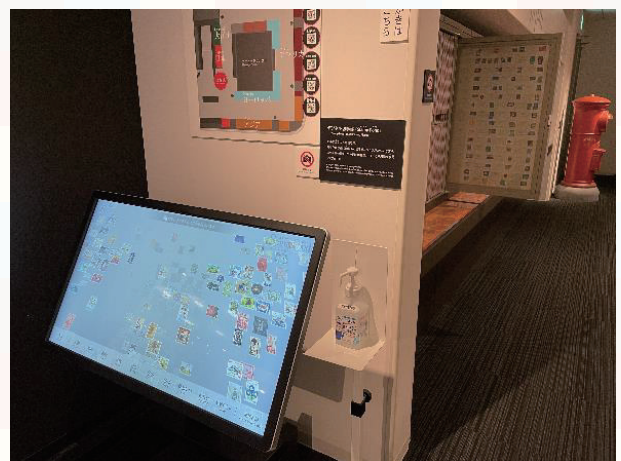


図2 切手展示室。奥側に見えるパネルに切手が貼り付けられている。写真では写しきれなかったが、展示室には更に多くのパネルがある。手前にあるのが「Stamp Pond」の操作コントロール。

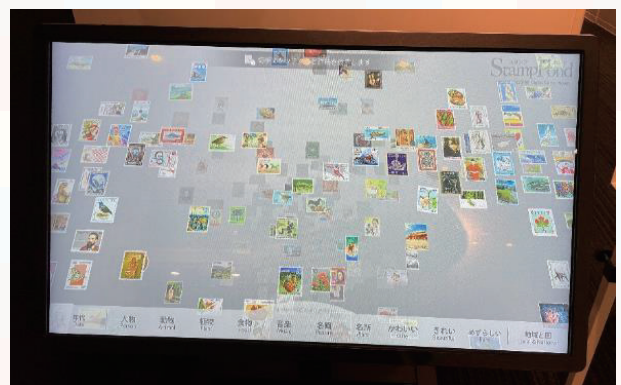


図3 「Stamp Pond」の操作画面。下部分に表示されているキーワードを選択すると、関連する切手が浮かび上がってくる。

すが、「花」「人物」「珍しい」「かわいい」などのキーワードをタッチすることで、そのキーワードのイメージに合う切手が、あたかも池から浮かび上がってくるかのように、幾つも画面上に表示されます。このシステムにより、デジタル機器の操作に不慣れであっても、簡単に楽しく、貴重な取藏品を探し出して触れることができるようになっていきます。

### 3 体験型の展示

郵政博物館は「閲覧」する展示だけでなく、「体験」する展示も多く備えています。その一つが郵便配達シミュレータの「Go! Go! ポストマン」(図4)です。これは、スクリーン上に映し出された、非接触型のセンサで読み取ったプレーヤの手の動きに連動するバイクを操作して、制限時間内に決められた数の手紙の配達を目指すシミュレーションゲームです。アクセルの加減や方向転換にある程度の繊細な操作が要求されるほか、難易度が異なるコースが3種類用意されているなど、十分なゲーム性も備えています。筆者は最初のコースでは全ての手紙を配り切ることができましたが、それ以外のステージでは散々でした。

体験型展示のもう一つの例が「ゆうちょ・かんぽアドベンチャー」です(図5)。主人公を操作して、途中で襲いくる様々な障害を回避しながら、就職や結婚などの



図4 「Go! Go! ポストマン」の画面。椅子に座って手を動かすと、画面上部にある非接触型センサがその動きを感知する。



図5 「ゆうちょ・かんぽアドベンチャー」の画面。画面をタッチして、「人生の選択」を進めていく。



図6 多色刷りワークショップの実例。異なる色のスタンプを重ねることで一番右側の絵が完成する。

ライフイベントをこなしていく、というゲームです。所持金が0になってしまうとゲームオーバーですが、それを防ぐために「ゆうちょ」や「かんぽ」を駆使する必要があります。大人にとっては当たり前のことですが、子供にとっては楽しく郵便局の扱う保険の役割を学ぶことができる仕組みとなっています。ちなみに、筆者はなんと初回プレイでゴール(=引退)を迎えることができました。

上に紹介したもののほかには、世界に一つだけのオリジナル絵はがきを作成する「絵葉書クリエイター」、いわゆる「音ゲー」風にラジオ体操を学ぶことができる「レッツエンジョイ ラジオ☆体操」といった展示もあります。更に、錦絵や版画の多色刷りの方法の解説(図6)などをはじめとした、学習のためのワークショップも不定期ではありますが開かれています。企画展に連動したワークショップですので、開催予定についてはホームページで確認するのがよいでしょう<sup>(2)</sup>。これらの体験型展示のほとんどはどちらかといえば子供向けのものではありませんが、大人にとっても歯応えがあり、親子で楽しむことができるものとなっています。

## 4 企画展

郵政博物館は一般的な博物館と同様、定期的に企画展を開催しています。筆者が訪れた日（2023年9月22日）には「郵政博物館の重要文化財展」が開催されていました。この企画展の期間中には、この博物館が収蔵する重要文化財が順次一般公開されていきます。筆者が見ることができたのはエンボッシング・モールス電信機（図7）でした。これは、黒船で日本に来航したペリー提督が、当時の米国大統領フィルモアから徳川幕府への献上品の一つとして持参した装置の実機であり、2台の電信機とそれぞれを収納する外箱の計4点が重要文化財として指定されています。企画展ではこの実機のほか、関連する資料や解説なども展示されています。このほか、平賀源内が制作したエレキテル装置や日本で最初の公衆通信業務（いわゆる電報サービス）に用いられたブレゲ指字電信機など、教科書にも載っているような貴重な重要文化財も、この企画展の期間中に見ることができるようでした。

残念ながら、本記事が公開される頃には本企画展は終了している予定ですが、これで見納めというわけではなく、また公開されるチャンスはあるようです。本記事を読んで興味を持たれた方は、定期的に郵政博物館のホームページ<sup>(2)</sup>を確認するとよいでしょう。

## 5 まとめ

本記事では郵政博物館を紹介しました。前身となる通信総合博物館と比較すると、デジタル技術を活用する展示が増えているのが特徴です。通信総合博物館を紹介された関屋先生の記事では、御子息と一緒に展示を見学した様子が紹介されていました。その後継となる郵政博物館は、このデジタル技術を活用した展示のおかげで、より一層親子で楽しめる博物館になっていると感じました。

なお、今回は紙幅の都合上、紹介しきれなかった重要

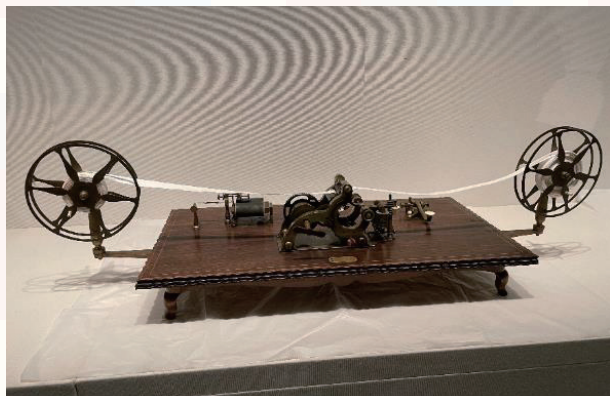


図7 エンボッシング・モールス電信機。テープに記号を刻んでいく仕組み。



図8 郵便配達員が使用した道具の展示。実は郵便配達員は日本で最初に拳銃の所持が許された職業だとのこと。郵政博物館に入っただけでこの展示を見ることができる。

な展示も非常に多くあります。例えば、明治時代の郵便配達員が使用していた様々な道具の実機が展示されていますが、その中には拳銃もありました（図8）。拳銃と郵便配達員とはなかなか結び付かないものですが、明治時代当時は郵便強盗が多かったことから、郵便配達員に拳銃の所持が許可されたとのことだそうです。

郵便という我々の社会を下支えしているシステムは、当たり前すぎてその仕組みや歴史を顧みることは日々の生活ではなかなかないかもしれません。しかし、郵政博物館は様々な年代の人々にとって親しみやすい方法で、郵便を見つめ直す機会を提供しています。日本随一の観光地である東京スカイツリーの直下という非常に恵まれた立地ですので、家族で遊びに行くのにも最適です。この記事を読まれた方がこの博物館に興味を持って頂いたら、筆者としては望外の喜びです。

本記事の執筆に当たり、郵政博物館学芸員の富永紀子様と本間与之様には博物館の案内と原稿のチェックを行って頂きました。この場を借りて深くお礼を申し上げます。

### ■文献

- (1) 関屋大雄，“通信総合博物館「ていばーく」訪問記，”信学通誌，vol. 7, no. 4, pp. 307-309, March 2014.
- (2) 郵政博物館ホームページ．<https://www.postal-museum.jp/>

### 遠藤寛之（正員）

2017 早大大学院先進理工学研究科博士後期課程了。博士（理学）。同年国立研究開発法人情報通信研究機構に採用。以来、衛星量子暗号をはじめとし、光空間通信における秘匿通信の研究開発などに従事。現在は量子 ICT 協創センターの研究マネージャーとして勤務。



## 論文誌・レター誌の「品格」と採録率，オープンアクセス

通信ソサイエティ編集長 太郎丸 真  
Makoto Taromaru

2022-2023年度の通信ソサイエティ編集長を拝命しました。これまで英文論文誌 B(以下 EB) の編集委員に始まり、ComEXの創刊のお手伝いなど、通ソの編集関係にはかれこれ 20年以上関わってきました。編集委員になった 2002年当時は、全分冊紙媒体のみ。編集委員割当てや査読依頼、判定報告こそメールでしたが、投稿や編集委員・査読委員への論文原稿は郵送でした。その後、査読管理システムができて原稿は PDFとなり、オンラインジャーナル ComEX創刊、全分冊が電子化されました。そして今回、EBと ComEXの IEEE Xplore(以下 Xplore)ホスティングが開始され、現在に至ります。

和文 B, EB や他分冊も含め、喫緊の問題は投稿数の減少です。2年ほど前の本誌巻末言(拙著)にも書きましたが、大げさに言えば本会論文誌・レター誌の「存続の危機」が数年以内に訪れそうな状況です。通ソ編集会議でも 2020年から、この問題の対応策の検討が前編集長の山里先生を中心になされ、非会員のみの方の投稿解禁に加え、EBと ComEXを Xploreでホスティングし、それ以降の掲載論文・レターをオープンアクセスとする方向性が打ち出されました。これは、どんなに質の良い論文が多く掲載され、それがオープンアクセスであっても世界の研究者から見つけられない、つまり検索されないからインパクトファクター(IF)が低迷し、論文誌の知名度も上がらず投稿数が減少している、との考えによります。

通ソ編集会議では Transactions Online や J-Stage へのネットからの「流入経路」や検索元のドメインの調査、Xplore や J-Stage などの利用状況調査を行い比較検討した結果、Xploreでのホスティングが EB, ComEXの visibility, circulation 向上に効果的との結論を得ました。この問題は通ソだけでなく本会理事の皆さんでも真剣に検討されていて、多言語翻訳プラットフォームによるオープンアクセスは、その結果の一つです。英文論文誌と Electronics Express (ELEX) を対象にトライアルがいよいよ始まりま

すが、このオープンアクセスが IF の計算の対象になる期間の論文に限られていることから、論文・レター誌の IF 対策が学会全体の動きとなっていることが分かります。

さて昨今の論文誌のトレンドは二つあると思います。一つはオープンアクセス化の流れ、もう一つは採録率と IF の微妙な関係です。前者は「論文は広く読んでもらえてこそ意味がある」ということです。一方、学会会員のメリットの一つであった「論文誌読み放題」が薄れ、「学会に入らなくても(少なくとも最近3年くらい)論文は読める」こととなります。前述のように非会員のみの方の投稿も可能です。学会は新たな会員サービスを考える必要があり、検討は始まっています。一方、後者は「論文誌の品格」に関わる問題です。いわゆる“ハゲタカジャーナル”は、採録率は大盤振舞い、掲載料は高く、オープンアクセス、というのが定番なわけですが、採録率が高いからといって IF が低いとか、論文誌の評判が悪いとは限りません。御承知のように IEEE Access しかりです。韓国の論文誌 JCN (Journal of Communications and Networks) の IF は 3 を超えています。採録率が低いとは考えにくいでしょう。

提案なのですが、和英論文誌・ComEXに、もう少し多くの論文を載せましょう！ 厳しすぎる査読は控え「迷ったら、採録や条件付き採録(ComEXは再投稿勧奨で返戻)」を基本に査読をお願いします。そもそも本会論文誌のポリシーは以前から「石を拾うことを恐れて玉(宝石)を拾い損なうな！」です。もし掲載論文に誤りがあっても、それは査読委員の責任ではなく筆者の責任です。「最終査読者」は「読者」です。「誌上討論」も「訂正」も投稿できます。特に和文の誌上討論は経験上、盛り上がります。掲載が増えれば学会の財政にもプラスです。学術出版物としての品格も下がらないでしょう。

以上、私見も交えて述べましたが、編集プロセスの見直しなど今後も諸施策を戦略的に講じていきます。会員各位の御理解とサポートを切にお願いします。

# NEXT ISSUE

2024年夏号（第69号）2024年6月1日発行

小特集

## 便利な世の中を支える 知られざる標準化の裏側

ジュニア会員向けページ：通信における標準化の目的と  
その役割

私の研究者歴：田中良明

若者よ、世界に出よう！：研究者になるきっかけとなった研究者の  
ところの研究者になってみて  
(前編)

街 plus 探訪：半導体で盛り上がる「熊本」

……他、御期待下さい

## Editors Note

「宇宙通信」を小特集のテーマとする本号では、レーザー光による宇宙通信、深宇宙通信や宇宙天気、更にはビジネスの話題まで、幅広いトピックをお届けしております。本特集号に携わって頂いた皆様に、この場を借りて御礼を申し上げます。(H.E.)

通信と一口に言っても、その技術は情報から電気回路、システム、伝搬環境、自然現象まで広い分野にまたがっています。本号の小特集を通じて、宇宙通信の奥深さと広さの一端を感じてもらえれば幸いです。(M.H.)

前任者からの引継ぎとして、本号で初めて編集委員を担当させて頂きました。ところで、昨年8月に第2子が誕生しました。5年前の子育てにはなかった「液体ミルク」の登場に驚き、ここにも地道な努力と技術発展があったのだらうと感じています。(T.M.)

今号から編集委員をさせて頂いています。本誌記事が読者を通じて若手研究者・技術者、学生、子供たちにまで伝わる（かもしれない）ことを意識して、専門外の人でも読みやすく楽しい誌面作りに協力できたらいいなと思っています。(K.S.)



2024年春号(第68号)  
2024年3月1日発行

## EDITORIAL COMMITTEE

編集委員長 関屋大雄

編集副委員長 平野拓一 山口実靖

### 編集委員

飯田裕之	磯崎裕臣	伊藤暢彦	内田大輔
遠藤寛之	太田真衣	金友大	木下雅之
小南大智	沢田健介	関裕太	竹村暢康
中西孝行	中野雄介	中村光貴	早馬道也
干川尚人	松室亮之	松本和人	水野修
村上靖宜	和田友孝		

本誌の愛称は「B-plus」、正式名称は「通信ソサイエティマガジン」、  
「IEICE Communications Society Magazine」です。  
本誌掲載論文を文献引用する際は、邦文略称「信学通誌」、英文略称  
「IEICE Commun. Mag.」を用いて下さい。

## 通信ソサイエティマガジン B-plus へのお問い合わせ

- ご意見、ご要望：b-plus@ieice.org
- ホームページ ▶ <https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/index.html>
- B-plus 冊子体購入のお申込みはこちら ▶ [https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order\\_y.html.utf8](https://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/order_y.html.utf8)

## 複製される方へ

一般社団法人電子情報通信学会は、本誌に掲載された著作物の複製複製に関する権利を一般社団法人学術著作権協会に委託しております。複製複製を御希望の方は、一般社団法人学術著作権協会 (<https://www.jaacc.org>) が提供している複製利用許諾システムを通じて申請して下さい。

なお、複製以外の許諾（著作物の転載、翻訳等）に関しては、委託しておりませんので、直接本会へお問い合わせ下さい。

〈問合せ先〉 一般社団法人電子情報通信学会  
TEL (03) 3433-6691 FAX (03) 3433-6659  
著作物利用許諾申請： <https://www.ieice.org/jpn/copyright/tensai.html>

発行人／白石 智

発行所／一般社団法人 電子情報通信学会 通信ソサイエティ  
〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館  
Tel：03-3433-6691（代表） 振替：00120-0-35300

制作／株式会社 太平印刷社  
東京都品川区東品川 1-6-16

© Copyright 2024 IEICE. All rights reserved.





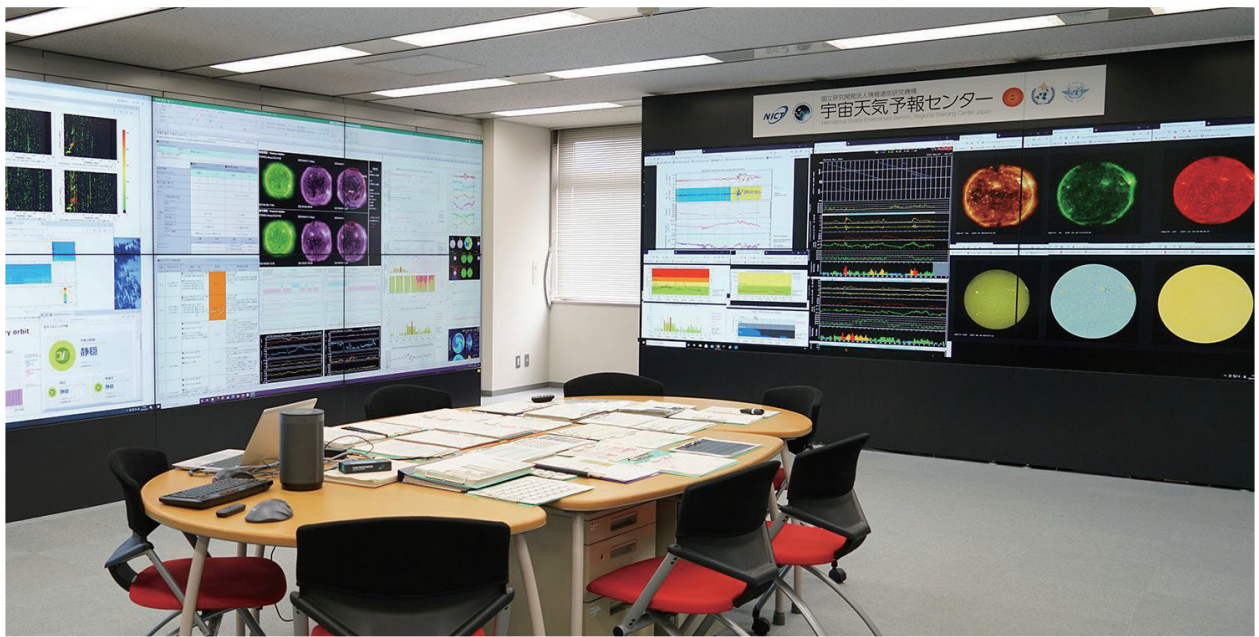
# 68

The photograph,  
Communication can be seen.

# 通信がみえる一枚の写真

## 宇宙天気予報

津川卓也（正員）



宇宙天気予報センター

太陽面での爆発現象である太陽フレアなどにより、地球の周りの宇宙環境は乱され、通信・放送、衛星測位、衛星運用、航空運用などが影響を受けます。このような社会システムに影響を与える宇宙環境の変動を「宇宙天気」と呼びます。

情報通信研究機構（NICT）では、宇宙天気予報センターにおいて24時間365日、休むことなく宇宙

天気の監視・予測をし、その情報を「宇宙天気予報」として発信しています (<https://swc.nict.go.jp/>)。NICTでは、より高度な情報通信技術の安定利用のため、こうした宇宙天気の監視・予測技術を高度化する研究開発やユーザの利便性を高めるための取組みを進めています。



## 写真を募集致します

マガジン編集委員会では、「通信がみえる一枚の写真」をテーマに写真（電子ファイル（jpeg）あるいはプリント）、タイトル、説明文（約300字）を募集致します。詳細は、通信ソサイエティマガジンHP（<http://www.ieice.org/~cs-edit/magazine/ieice/photo.html>）を御参照下さい。

送り先：

【郵 送】〒105-0011 東京都港区芝公園 3-5-8 機械振興会館内 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン担当

【メール】[b-plus@ieice.org](mailto:b-plus@ieice.org) までお送り下さい。

# 2024年2月

## IEEE Xplore

×

### 通ソ英文論文誌 オープンアクセス

### 公開開始!

### 是非, ご投稿を!!