

# 惑星間インターネットの実現に向けて

金子 洋介 ●IPNSIG President

インターネットの次なるフロンティア「宇宙」。まさに今、地球上のインターネットと同じような人類共通基盤を宇宙空間に築けるかが問われている。

## ■惑星間インターネット時代の幕開け

「惑星間インターネット」という言葉を耳にしたことがあるだろうか。SFや夢物語という印象を持つ人も多いだろう。しかし、この言葉がリアルなものとして語られる世界に変わろうとしている。

### ●アルテミス計画の始動

1960～1970年代のアポロ計画以来、今、再び月を目指す動きが世界的に活発化している。その大きな原動力となっているのが、米国発の「アルテミス計画」である。アルテミス計画は米国のトランプ前政権が打ち出した政策であり、月、そしてその先の火星を目指した国際宇宙探査計画である。この計画は月を探査するだけでなく、そこにインフラを展開し人を滞在させることで、月を科学や産業活動の場に発展させていく構想となっており、すでに日本、欧州、カナダなど、多くの国・地域が参加を表明している。

ではなぜ、アポロ計画以来、月が着目されているのか。

アポロ計画や日本の月周回衛星「かぐや」で取得された過去の月面探査のデータによれば、月面の南極付近には水、ヘリウム3、アルミニウム、シリコンといった鉱物資源が存在しているといわ

れている。もし、これら月の資源をうまく活用することができれば、月面での生活はもとより、より遠くの天体への探査ができるというわけだ。例えば月の南極で水を発見することができれば、それを抽出・ろ過して飲料水にできるかもしれないし、水を電気分解できれば水素や酸素を取り出すことだってできる。水素や酸素は現代のロケットの燃料源となっているので、うまくいけば月でロケットの燃料を作り出すことができるかもしれない。

つまり、月の資源をうまく活用することによって、より遠くに行く手段を人類は手にすることができるのだ。アルテミス計画では、まずは月の本格的な探査を行い、こういった資源がどのような状態でどれぐらい存在しているかを明らかにしていこうとしている。

ここで、アルテミス計画の特徴を述べておくと、アポロ計画とは2つの点で態様が異なっている。

一つは、月面での滞在時間だ。アポロ計画では、国家の威信をかけて旧ソ連と米国のどちらの国が先に月面に到達できるかという壮絶なバトル（いわゆる冷戦時代の宇宙開発競争（Space Race））の真ただ中であつたこともあり、とにかく月に行く、そして宇宙飛行士は月に数時間滞

在してサンプルを取得したらすぐに地球に帰還するといった運用が行われていた。その結果、米国がそのレースに勝った。しかし、アルテミス計画はそうではない。月面における滞在期間を飛躍的に延ばし、人類の宇宙での活動を広げていこうという構想になっている。

もう一つは、月への行き方である。アポロ計画では、先に述べたように、米国一国で月面に到達した。しかし、アルテミス計画では国際パートナーや産業界との連携を重視しており、力を合わせて一緒に月に行こうとしている。そして月に行った暁には、月でしっかりと技術を磨き、より遠くの天体へと人類の活動圏を拡大していこうという構想がある。

しかし、ここで考えてほしい。月面で人類活動を行うといっても、数多くの課題があるのではないか。例えば、人が安全に居住する空間をどのように確保するのか、それを建設するための建機をどうするのか、宇宙での活動を支えるエネルギー源はどのように確保するのか、人間が生きていくための食料はどのようにするのか、廃棄物の処理はどのようにするのか——といった具合である。米航空宇宙局 (NASA) や宇宙航空研究開発機構 (JAXA) などの宇宙機関では、地球で培った技術を最大限活用してこれらの課題に挑み、この計画を実現しようとしている。

#### ●人類の宇宙活動を支える惑星間インターネット

月での「通信」はどうなるのか。インターネットがそうであったように、宇宙でも通信は全ての人類活動を支えるものになることは間違いなく、通信が極めて重要なインフラとなることは容易に想像できる。例えば宇宙飛行士が地球と交信するため、あるいは月で取得される科学的データを伝送したり月で活動するロボットの監視やコントロールを行ったりと、ありとあらゆるシーンにお

いて通信は欠かせない存在となる。

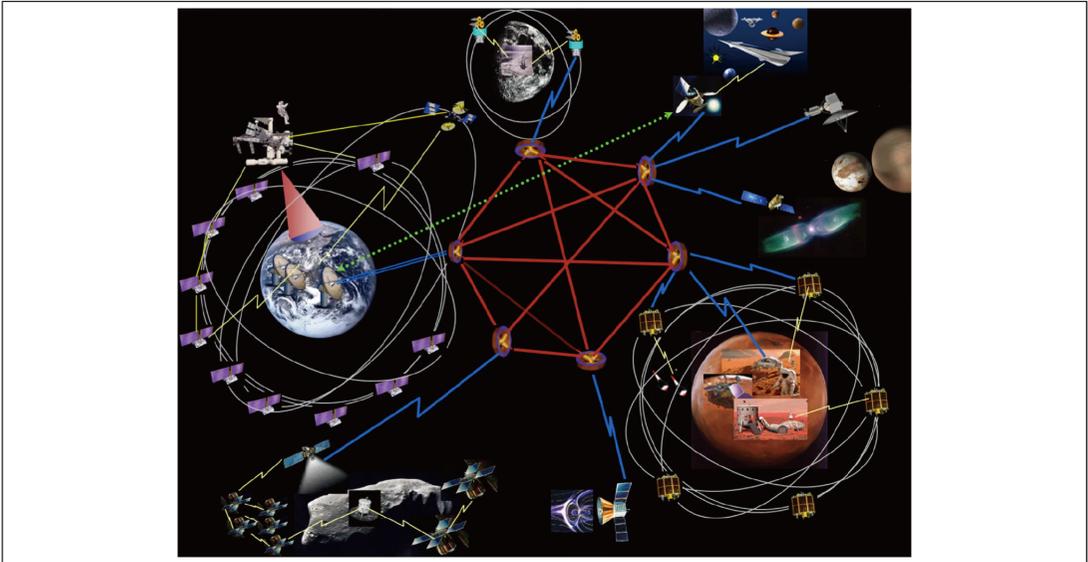
では、その宇宙での通信と、我々はどうのように向き合うのだろうか。インターネットが我々にもたらした世界観を思い起こしてほしい。地球上の社会経済生活に欠かせないインフラとなったことは言うまでもないし、空気、電気、水と同じように、インターネットへのアクセスは人権 (Human Rights) の一つとして語られる時代になり、まさに人類基盤そのものと認識されている。さらに、インターネットは新たな科学的発見・イノベーションを創出する動力源として、我々の未来を切り開く大きな力となっている。同じような世界を宇宙につくったら、どのような価値をもたらすことができるだろうか。惑星間インターネットは、こういった考え方を根底にして出てきた概念である。つまり、人類が地球上で築き上げた世界を宇宙にも展開できるか。これが今、我々人類に突き付けられた大きな命題なのである。

資料4-2-3は、惑星間インターネットのイメージ図である。地球・月・火星における通信衛星等がそれぞれつながり合い、宇宙空間にネットワークバックボーンを形成した姿を示している。

#### ■宇宙機関や民間企業の取り組み

NASA、欧州宇宙機関 (ESA)、JAXAなどの宇宙機関や民間企業は、惑星間インターネットに関してどのような取り組みを行っているのか。NASAでは月に「LunaNet」と呼ばれる通信インフラおよび月のGPSに相当する測位インフラを展開する動きがあるし、ESAも同様に通信・測位のインフラを展開する「Moonlight計画」を打ち出した。日本でも「スターダストプログラム」といった政府のプログラムを通じ、関係省庁、JAXA、国内企業を挙げて通信・測位のアーキテクチャ展開や光通信の研究に取り組んでいる。

いずれも、宇宙探査や月面商業活動を支えるた



出所：IPNSIG

めの基盤として整備を進めていくこととしているが、ここ最近では月にインターネット (internet)<sup>1</sup>をつくるための議論も出てきている。

こういった政府・宇宙機関主導の動きに加えて、民間でも宇宙通信に向けた動きが加速している。例えば LunaNet にはすでに世界中の企業に関心を示しているし、欧州においても2つの民間企業主体のコンソーシアムが構築され、Moonlight 計画の具体化が進められている。ノキアやKDDIなどの携帯通信事業者は月面で携帯網を展開しようとしているし、日本でも光通信技術の展開を目指した宇宙スタートアップ企業が登場している。

このように、政府、宇宙機関、民間企業のそれぞれが、いずれは惑星間インターネットを構成するサブネットワークを構築する動きが出てきているのだ。このようなサブネットワークが有機的に結合し、全体として統合されたネットワークを構築できれば、宇宙でも人類活動の持続性を飛躍的に高めることができるであろう。

## ■インターネットとのアナロジー

これから宇宙で起ころうとしていることは、実はインターネットの歴史においても経験してきた。さかのぼること1983年、ARPANET・SATNET・PRNETの3つの異種ネットワークがTCP/IPを用いて相互接続に初めて成功した。この歴史的なイベントのアナロジーとなるような動きが宇宙でも加速していくであろう。つまり、政府、宇宙機関、民間企業などの異なる独立したネットワークが、宇宙空間で相互に接続し、協調し、統合的なネットワークを形成する時代に入ることだ。

この実現のためには何が必要であろうか。もちろん、ネットワーク間の相互接続のための国際的な技術的標準（通信プロトコル）を作るといった技術的側面もあるが、インフラの利用方法を定めるポリシーメイキングのプロセスをどうするか、あるいは月でのデジタル資源（周波数やIPアドレスのような識別番号）の管理を誰がどのように

行うのかといったマネジメント・ガバナンス面も必要であろう。このような点では「インターネット」が歩んできた歴史、得られた教訓、構築してきたガバナンスモデルを「惑星間インターネット」にもしっかりと生かしていくことが重要となる。

## ■ IPNSIGが目指すビジョン

ここで IPNSIG (Interplanetary Networking Special Interest Group)<sup>2</sup>について紹介させてほしい。IPNSIGは1998年に、インターネットの父であるビント・サーフ (Vinton G. Cerf) 氏によって立ち上げられた米国のNPO団体である。立ち上げ当初からインターネットソサエティ (ISOC) に在籍し、長年スペシャル・インタレスト・グループ (SIG) として活動してきたが、2022年にISOC初の宇宙チャプター (Interplanetary Chapter) として認定を受け、現在に至る。会員は世界中から1000人を超え、筆者は2020年からIPNSIGのPresidentとして活動を牽引してきた。

IPNSIGのビジョンは「人類の共通基盤として惑星間インターネットを実現すること」であり、惑星間インターネットの将来のアーキテクチャ像や、先に述べたようなガバナンスの在り方を検討し、宇宙機関や民間企業に提言するといった活動を行っている。

## ■ 人類共通基盤としての惑星間インターネット、その実現に向けた課題は何か

IPNSIGでは、月・火星へと進展する惑星間インターネットを共通基盤として作り上げることを目指しており、アーキテクチャの観点そしてガバナンスの観点から、その在り方を検討している。2023年9月に「Solar System Internet Architecture and Governance – from the Moon to Mars and beyond」<sup>3</sup>というタイトルで今後の課題や提言をレポートにまとめたので、

ここに概要を紹介したい。

### ● テクノロジーとガバナンスの両面が重要

宇宙は広大であり、惑星間での通信を考えれば、超長距離の伝送は避けることはできない。月と地球間の場合、光の速度であればものの数秒で往復できてしまうが、火星の場合は最大40分ほどかかってしまう。さらに、宇宙機は常に軌道を周回していたり天体運動もあつたりするので、地球との通信が容易に中断してしまうことがある。つまり、この地球上のインターネットとは大きく異なる環境で通信を成立させるために、通信遅延や通信中断といったユニークな環境に対する新たな技術が必要となる。

TCP/IPの共同開発者であるサーフ氏は、エイドリアン・フック (Adrian Hooke) 氏らNASAジェット推進研究所の研究者とともにこの点に着目し、1990年代後半に惑星間インターネットへの適用を目指した「DTN」と呼ばれる通信プロトコルを提唱した。DTNとはDelay and Disruption Tolerant Networkingの略称であり、その名の通り遅延 (delay) と中断 (disruption) に対する耐性を持つプロトコルである。DTN技術は現在、Internet Engineering Task Force (IETF) のDTNWGにて標準化活動が行われている。さらに、CCSDS (Consultative Committee for Space Data Systems、宇宙データシステム諮問委員会) と呼ばれる、宇宙機関を中心とした標準化団体では、IETFの活動を参照しながら宇宙機に搭載するための通信プロトコルを規格化・標準化してきた。

月から始まる惑星間インターネットの構築においては、初期段階からDTNを適用していくことがさらに遠くに行くための足がかりとなり、非常に重要であろう。しかし、惑星間インターネットの実現のためには、こういったDTNのような技

術以外にもさまざまな技術開発そしてガバナンス上の課題がある。以下にいくつかの代表例を示したい。

### ●惑星間ルーティング技術

宇宙船、月面拠点、ロボットなどさまざまなノードへデータを伝送するためには、中継ノードを介したルーティング技術が必須となる。太陽系にノードが数個であればさほど問題にならないが、100、1000、1万と増えていくなればどうだろう。スタティックルートのように手動で経路を管理するには限界があるし、地上の動的ルーティングのように経路の自動学習技術も必要となろう。しかし、光の速度でも火星まで片道20分かかるような距離では、送信元が送った経路情報は受信元に届いた時点では陳腐化していることが考えられる。さらに、ルーティング情報を共有するにしても相手先の衛星がどこを飛行しているかを把握しておく必要があるし、常に運動を続ける衛星に正確にアンテナをポインティングする必要もある。

惑星間インターネットが提唱された初期の頃から、こういった諸制約がある中で自動的な経路学習やルーティング技術の確立は重要課題として認識されており、今後の技術開発が期待される領域となっている。

### ●月でのインターネット (internet) の展開

月にインターネットが構築されるという世界観を想像したことがあるだろうか。例えば、地球上で使われているTCP/IPの技術やアプリケーションをそのまま宇宙に持ち込むことができないかと検討を重ねている人がいる。なぜかといえば、TCP/IPはこの地球上で成熟してきた技術であるため信頼性が高いし、比較的アフォードブルな形で宇宙に持ち込むことができると考えられている

ためである。宇宙での放射線環境や真空環境に耐え得る形にパッケージ化してしまえば地球の技術をそのまま宇宙でも使えるのでは、ということである。つまり、月でのインターネットが誕生しても何ら不思議ではない時代に入ってきたのだ。

先に述べたDTNのような技術と、TCP/IPという異なるプロトコル技術が、地球・月・火星をつなげた通信アーキテクチャの中でどのように融合できるか。エンドツーエンドでのプロトコルスタックはどうあるべきか。こういった点を、宇宙機関、民間企業、アカデミア、技術標準団体などが協力して議論していく必要があるだろう。

### ●ガバナンス面でのチャレンジ

しかし、こういった技術的な側面を考えるだけでよいのだろうか。例えば月にインターネットを展開するならば、宇宙でのIPアドレス配分はどうすればいいだろう。月でも「networks of networks」の時代が訪れるなら、自律システム番号 (Autonomous System Number : ASN) やドメイン名 (Domain Name) の管理も必要となろう。現在のインターネットの構造では、ICANN (IANA) と5つのRIRによってこれらの資源の分散管理が行われているが、月でのIPアドレス、ASN、ドメイン名などの資源はどの機関が管理を行うのか。既存のRIRなのか、あるいはSpace RIRのようなものを新たに構築するべきか。また、宇宙というユニークな環境条件においてどのようなポリシーの下に配分を行っていくかといったことも決めていく必要がある。

さらに、最も重要なインターネットからの教訓は、その運用が「マルチステークホルダー」によって成り立っていることである。そして「マルチステークホルダー・ガバナンス」がインターネットの持続性を高めてきた大きな原動力であると筆者は考える。このアプローチを惑星間インターネッ

トにも反映していくことができれば、地上のインターネットと同じような共通基盤を目指すことができるだろう。

一方で、宇宙活動は1967年に国連で発効された「月その他の天体を含む宇宙空間の探査及び利用における国家活動を律する原則に関する条約」(通称・宇宙条約)に基づく活動が行われている。同条約では、宇宙での活動は民間活動であっても国家が国際的責任を有するとしている。つまり、宇宙空間での活動は国家活動であり、いわゆ

る「マルチラテラル(国家間活動)」な世界で動いているため、インターネットのマルチステークホルダー・ガバナンスとはアプローチが異なっている。ただし、今後、月での民間活動が活発化していく時代を迎えるに当たり、いずれ月はマルチステークホルダーの活動の場となるであろう。

惑星間インターネットを含め、月での運用・利用に関するガバナンスの在り方は注視が必要であり、今後も、国際宇宙探査の進展や惑星間インターネットの発展にぜひ注目してほしい。

- 
1. ここで、internetと小文字を用いたのは、地球上のThe Internetと区別するためである。
  2. IPNSIG  
<https://www.ipnsig.org/>
  3. IPNSIG, Solar System Internet Architecture and Governance - from the Moon to Mars and beyond -, Sep. 2023  
[https://drive.google.com/file/d/1anMcVEqXjNtk5gdo\\_qce28SowusXKkfi/view](https://drive.google.com/file/d/1anMcVEqXjNtk5gdo_qce28SowusXKkfi/view)



1996, 1997, 1998, 1999, 2000...

## [インターネット白書ARCHIVES] ご利用上の注意

このファイルは、株式会社インプレスR&Dおよび株式会社インプレスが1996年～2024年までに発行したインターネットの年鑑『インターネット白書』の誌面をPDF化し、「インターネット白書 ARCHIVES」として以下のウェブサイトで公開しているものです。

<https://IWParcives.jp/>

このファイルをご利用いただくにあたり、下記の注意事項を必ずお読みください。

- 記載されている内容(技術解説、データ、URL、名称など)は発行当時のものです。
- 収録されている内容は著作権法上の保護を受けています。著作権はそれぞれの記事の著作者(執筆者、写真・図の作成者、編集部など)が保持しています。
- 著作者から許諾が得られなかった著作物は掲載されていない場合があります。
- このファイルの内容を改変したり、商用目的として再利用したりすることはできません。あくまで個人や企業の非商用利用での閲覧、複製、送信に限られます。
- 収録されている内容を何らかの媒体に引用としてご利用される際は、出典として媒体名および年号、該当ページ番号、発行元などの情報をご明記ください。
- オリジナルの発行時点では、株式会社インプレスR&Dおよび株式会社インプレスと著作権者は内容が正確なものであるように最大限に努めましたが、すべての情報が完全に正確であることは保証できません。このファイルの内容に起因する直接のおよび間接的な損害に対して、一切の責任を負いません。お客様個人の責任においてご利用ください。

お問い合わせ先

インプレス・サステナブルラボ

✉ [iwp-info@impress.co.jp](mailto:iwp-info@impress.co.jp)