

第7部

特集7 Interplanetary Network (IPN)

植原 啓介、石原 知洋、内田 祥喜

第1章 はじめに

WIDEプロジェクトでは、2023年度より惑星間ネットワーク(IPN)の研究プロジェクトを開始している。国際宇宙探査協力グループ(ISECG)では2027年、2028年、2030年における探査シナリオに関する情報[63]が示されており、近い将来における月面探査や宇宙への連携について述べられており、地球と月面、およびその他の惑星との通信については現在においてはごく近い将来の課題として認識されている。また、米国のアルテミス計画[64]では、月の南極に有人基地を建設することに焦点が当てられ、技術開発や資源利用の研究が行われている。加えてJAXAでは、月極域探査機(Lupex)プロジェクト[65]や有人圧ローバー[66]の開発が計画されており、宇宙探査や通信ネットワークの需要に期待が高まっている状態である。

WIDEプロジェクトでは、宇宙空間におけるインターネットアーキテクチャを研究開発する目的で新たにspace-wgの立ち上げをおこない、惑星間インターネットのアーキテクチャの議論や、要素技術である遅延耐性ネットワーク(DTN)の検証・実証実験、DTN上でのアプリケーションの開発を進めている。2023年度の成果としては、1) 惑星間インターネットの全体アーキテクチャの議論 2) Interop Tokyo 2023でのInternet x Space Summitの開催 3) WIDEプロジェクト2023年秋合宿における地球-月間の通信のデモンストレーションが挙げられる。

第2章 惑星間インターネットの全体アーキテクチャの議論

space-wgの立ち上げに先立ち、8/5～8/7の日程でJAXAからIPNSIGチェアでもある金子氏と鈴木氏を招いて現在の宇宙開発における通信環境と、DTNの標準化に関する勉強会を開催した。

2.1 宇宙開発の現状と探査ロードマップの紹介

まず、金子氏より宇宙開発の現状と、近い将来のロードマップについて共有があった。ISECGが公開している国際宇宙探査ロードマップ(Global Exploration Roadmap:GER)は、2018年公開より2020年、2022年で内容が更新されており、最新の内容では人間とロボットの月面ミッション、火星への準備活動、月の科学的優先順位に関する最新のミッションシナリオとアーキテクチャを記述している。このロードマップでは3つの探査フェーズが定義されており、それに対して12の月探査目的が各フェーズに割り当てられている。それぞれのフェーズはPhase1: Boots on the Moon(月への有人到達) Phase2: Expanding and Building(拡張と建設) Phase3: Sustained Lunar Opportunities(持続可能な月での開発機会)となっており、ロボットによる一連のミッションに続いて、この10年間で月における有人探査を再度実施する計画を反映している。大容量の月面への輸送システムの段階的な開発、月面での移動システム、およびそれらを支えるインフラを描いており、実現されるより高頻度かつ低コストのミッションによって宇宙開発の加速を目指している。また、これらの開発目標は月面での活動のみならず、将来的な火星での有人のミッションでの利用も視野に入れている。これらの探査活動は、宇宙セクターへの民間投資の惹起も起こすと見られている。

以上から、従来の宇宙探査における通信では、環境の特殊性と各宇宙ミッションの特異性からミッションごとにそれを遂行するための必要十分な通信ネットワークを専用に作り上げていたことに対し、今日および将来の宇宙探査においては、より汎用的な、持続性があり拡張性・規模性を備える通信インフラの開発・構築が必要となっている。

2.2 既存のDTNプロトコル

上記に続けて、現在までに標準化されているDTNの各プロトコルについて解説があった。現在のDTNプロトコルはIETFを中心に標準化されており、DTNを構成するさまざまな構成要素についてのプロトコルがそれぞれRFCとなっている。IPNでは既存の一般的なインターネットで想定されている環境とは大きく異なり、通信路の遅延と損失は大きく、また惑星・衛星の自転や公転により常時接続されているとは限らない。そのため、既存のインターネットで利用されているプロトコルやルーティングをそのまま適用することは困難である。DTNはそのような環境での利用を想定して規格化がされている。

基本的なメッセージ転送は、ストアアンドフォワードを基本とした仮想的なネットワーク上でのメッセージ転送によっておこなう。このストアアンドフォワードのデー

タ転送は既存のインターネットのように即時的な転送には限らず、宇宙環境でありうる断続的な接続性へ対処するために、ネットワークのノード上で一定時間保存した上で次のノードへの接続機会が訪れた際に転送を行う。転送については場合により冗長性を確保するため複数のノードに対して同じメッセージをコピーして送信する。また、ストアしたデータは軌道上での衛星の移動などの“物理的”移動も考慮する。このネットワークは仮想的なオーバーレイネットワークとなり、その上で定義されるエンドポイント識別子は状況に応じて下位レイヤへバインディングされる。下位レイヤは持続的・断続的問わず様々な通信方式を想定している。これらのストアアンドフォワードの通信方式はBundle Protocol (BP) Version 7としてRFC9171で規定されている。BPはアプリケーション層のプロトコルであり、下位レイヤは収束層 (Convergence Layer: CL) と呼び、ノード上にあるBundle層と収束層を媒介するConvergence Layer Agent (CLA) によりコントロールされる。また、BPではセキュリティとプライバシー保護のための対策についてもRFC9172、RFC9173などで提案されており、セキュリティメカニズムやデータ保護プロトコルを含んでいる。

IPNによる経路制御は、IPNで利用されるリンクが遅延と損失が大きいことに加えて、リンクの接続性が間欠的

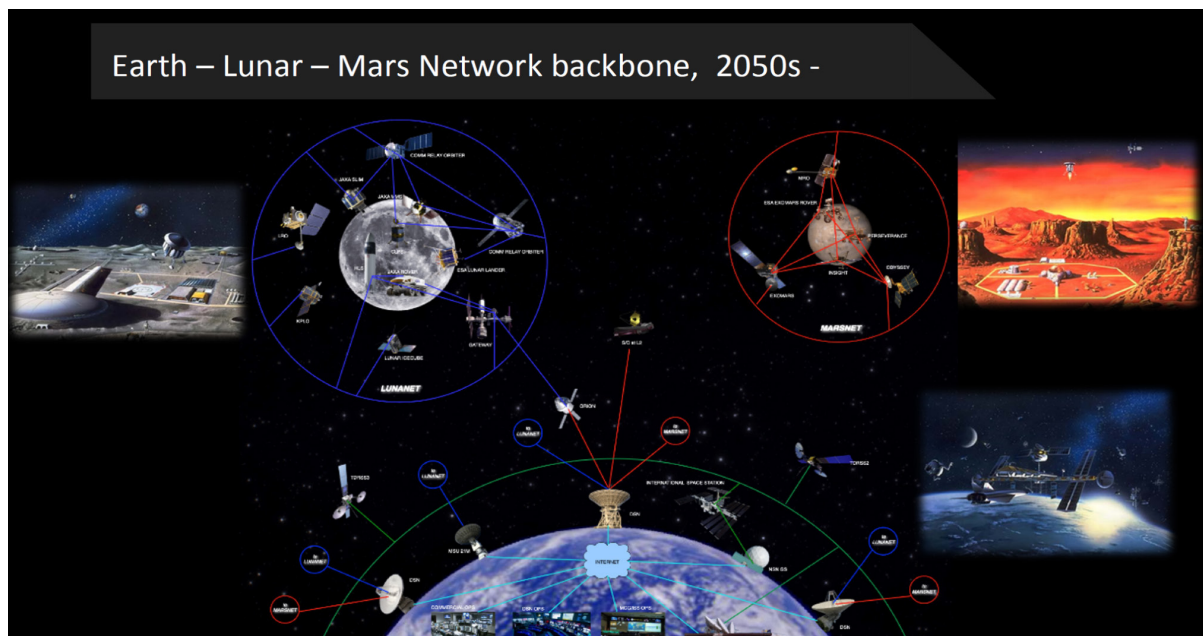


図1 2050年以降の惑星間ネットワーク

であるため、従来の常時接続を前提とした経路制御技術をそのまま適用することはできない。また、その間欠的な接続性が(軌道計算などで)あらかじめ予測できることから、Contact Graph Routing (CGR)という、スケジュールされた通信リンクの時間で変動するトポロジーを通じて経路を計算する動的な経路制御技術を用いる。これは、コンタクトグラフという時間軸での接続性の予定表を使用してメッセージをルーティングするための技術であり、経路制御アルゴリズムは、衛星間の通信リンクの可用性を考慮しつつメッセージがネットワークを通過する最適な経路を決定する。基本的な経路選択アルゴリズムはDijkstraのアルゴリズムを使用するが、時間で変動するグラフを都度検索することで経路選択を行う。CGRは、DTNベースの宇宙ネットワークにおいて、データ転送経路の動的選択を可能にするように設計されている。

DTNプロトコルについて、現在はいくつかの組織が開発した実装が複数存在している。

● ION(Interplanetary Overlay Network):

IONはNASAによって開発されており、宇宙ミッションでの使用を想定して設計されている。IONはCGRの経路制御、フロー制御、およびエラー処理機能を備え、極めて厳しい宇宙環境での信頼性の高い通信を提供することを目的としている。

● DTN7

DTNはダルムシュタット大学で開発されており、Go言語で実装されている。DTN7は、BP ver.7で規定されたより新しい機能をいくつか実装している。これらは、DTNアプリケーションの開発を容易にする高い抽象化レベルとAPIの提供に重点を置いており、WebアプリケーションやモバイルデバイスでのDTNの使用を意識した設計がなされている。

● μ D3TN

μ D3TNは、POSIXおよびSTM32マイクロコントローラ上で動作する、シンプルなDTNプロトコル実装である。分散型遅延耐性ネットワーク(D3TN)の一部として設計されており、遅延や中断のある環境での信頼性の高い通信プロトコルを提供することを

目的としている。 μ D3TNは、通信条件が厳しい宇宙ミッションなどのアプリケーションに適している。

2.3 DTN検証テストベッドについての議論

以上の現状を踏まえて、WIDEプロジェクトのアクションアイテムとしてDTNの検証可能なテストベッドの開発・構築・運用について議論をおこなった。

WIDEプロジェクトで開発を行うテストベッドは、以下の2つの形態を考慮している。

1) 惑星間ネットワークの環境を簡易的に模倣し、その上でさまざまなアーキテクチャを実装し検証することができるシミュレータ

2) 定常的に運用し、実験を行いたい参加者が相互接続できる惑星間ネットワークを模倣した実ネットワーク

1)については、ローカル環境で実行可能なポータブルなIPNシミュレータとして開発を行い、利用者が手元のシミュレーション環境においてさまざまなIPN用のプロトコルやアプリケーションなどを開発や検証できるものを目指す。2)については、WIDEインターネット上にオーバーレイネットワークの形で定常的なIPN環境として構築し、IPN用プロトコルの検証や相互接続性試験、IPN環境の全体的なアーキテクチャの開発および検証、運用知見の蓄積などを目的として開発・運用を行う。

2.4 IPNの全体的なアーキテクチャについての議論

惑星間ネットワークの全体的なアーキテクチャの議論をおこなった。アーキテクチャ議論において、トピックとなったのは下記の通りである。

● 既存の地上インターネットに対する独立性・互換性・相互運用性

既存の地球基盤の通信システムに対する独立性と互換性に関して。黎明期においては、惑星間ネットワークシステムは、インフラ部分の一部を地球上の既存のインターネットに依存する形で成立することが考えられる。そのため、既存インフラとシームレスに連携することが求められる。また相互運用について

は、惑星間ネットワークのステージによって異なる変換技術等が必要になると考えられる。将来的には、惑星間インターネットは既存のインターネットに依存しない形で構築することも考えられるため、既存システムへの依存度を減らすことのバランスを取る必要がある。

● ガバナンス

ネットワークの管理と運営に関するガバナンスの枠組みに関して。現在のインターネットではICANNなどのマルチステークホルダーモデルに基づいた組織によって資源管理がされているが、現在の惑星間インターネットは主に政府機関によってインフラが整備されているため、今後の民間レベルでのインフラへの投資・参加を見越して、どのようなモデルで惑星間ネットワークをガバナンスするか、というのは大きな課題となる。ガバナンスのモデルは、効率性、公平性、透明性を考慮に入れる必要があり、また、既存のインターネットにおけるガバナンスモデルと相互にどのような関係を築くかも考慮する必要がある。

● アカウント・認証

ユーザー認証とアクセス・リソース管理の手法について。惑星間ネットワークは、通信や中継ノードなどのリソースが既存のインターネットに対して大幅に限られているため、どのようにしてユーザーが適切な権限を持ってネットワークを利用するかが課題となる。また、惑星間通信においては、既存のSAML認証などの常時接続を前提とした認証システムを動かすことは困難である。そのため、分散・隔離した環境で正しく動作する認証アーキテクチャを考慮することが必要となる。

● 資源コスト

リソースの消費と最適化についての議論。惑星間インターネットにおいては、通信帯域・機材・エネルギーなどが地上のインターネットと比べて大きく制限される。宇宙に運ぶペイロードについては僅かな重さが大きなコストとして跳ね返って来るため、機材のコンピュータ資源も地上のように潤沢

に使用できるわけではない。そのため、限られたリソースでどのように惑星間ネットワークを構築・運用するかは大きな課題となり、アーキテクチャを考慮する上でもこの制限下を前提におかなければ現実的なシステムを構築することはできない。地上のネットワークで考慮しなければいけない通信路やスイッチング能力およびバッファなどのリソースに加えて、DTNのアーキテクチャでは転送データを一時保存するためのストレージも必須リソースとして議論の対象となる。

● サービスモデル

惑星間ネットワークサービスの提供モデルとビジネスについての議論。どのように通信サービスが設計され、提供されるか、またそのビジネスモデルはどのような形となるかなど。

これらの議論は、宇宙通信システムの将来の設計と運用の方向性を定義するための基盤を形成しており、各セクションの課題についてWIDEプロジェクトは惑星間インターネットに対して継続的に研究・開発についてコミットを続けていく。

第3章 WIDEプロジェクト2023年秋合宿における地球-月間の通信デモンストレーション

WIDEプロジェクト2023年秋合宿において、地球と月の間での通信環境を模倣する実験を行った。この実験では、地球から月への通信の特性を模倣するために、既存のインターネット接続上で往復2.6秒の遅延を挿入し、それが通信に与える影響を検証するとともに、参加者に対して地球-月面間の通信を体験してもらった。2.6秒の遅延は、地球と月の間の平均距離に基づいた通信遅延である。

本実験の構成図を図(実験の構成図)に示す。実験は、合宿ネットワークの実験用セグメント(downstream側)と、対外接続(upstream側)の間に遅延を発生させるルータ(図中のubuntu server)を挿入することで実施した。ネットワーク遅延はLinuxシステムのtc(トラフィックコントロール)コマンドを使用して挿入した。tcコマンドは、

Linuxカーネルのパケットスケジューラを制御し、ネットワークトラフィックの制御と管理を可能にするツールであり、通信速度、遅延、パケット損失などのエミュレーションが可能である。

この実験は、地球と月の間の通信を模倣するために、意図的にネットワーク遅延を作り出すことに重点を置いており、実際の宇宙空間で発生し得る地上のインターネットより高いパケット損失は考慮されていない。それにもかかわらず、現在の一般的なwebページを表示させる際に、2.6秒より長い著しい遅延や、webページを構成する内容の欠損などが見られた。これは、現在使われているHTTPSでは、通信開始時にTCP (Transmission Control Protocol)やTLS (Transport Layer Security)のハンドシェイクをそれぞれ行うため、webページを表示する際にはトランザクションの分だけ遅延が影響するためだと考えられる。

宇宙空間では、通信遅延だけでなく、パケットの損失や断続的な接続といった問題も起こり得るため、地上でのインターネット通信のような連続性や信頼性は期待できない。そのため、これらの要因が相まって、宇宙での通信は極めて困難なものとなり、既存のインターネットと異なるアーキテクチャのネットワークが必要となり、この実験でそれを再確認することができた。この実験

を通して、惑星間インターネットにおけるDTN (Delay/Disruption Tolerant Networking)技術の重要性がより一層明らかになった。DTNは、長い遅延や不安定なネットワーク接続を特徴とする環境での通信を可能にするために開発された技術であり、宇宙空間での効果的なデータ伝送には不可欠である。この技術は、パケット損失や断続的な接続に対応し、データをより信頼性高く送受信するための手段を提供する。この実験は、地球と宇宙の間でのデータ通信を効率的かつ信頼性高く行うためには、従来のインターネットプロトコルだけでなく、DTNのような新しい技術やアプローチの採用が必要であることを示唆している。

第4章 Internet × Space Summit

2023年6月14日から16日に開催されたInterop Tokyo 2023において、展示として「Internet × Space Summit ～宇宙に広がるインターネット市場～」が開催された。また、Interopの基調講演の中でIPNSIGのChairpersonである金子氏とWIDE Project Founderの村井氏による「The Interplanetary Internet - 宇宙へ広がるインターネット市場 -」が開催された。本節ではこれらのイベントについて報告する。

Moon WiFi architecture

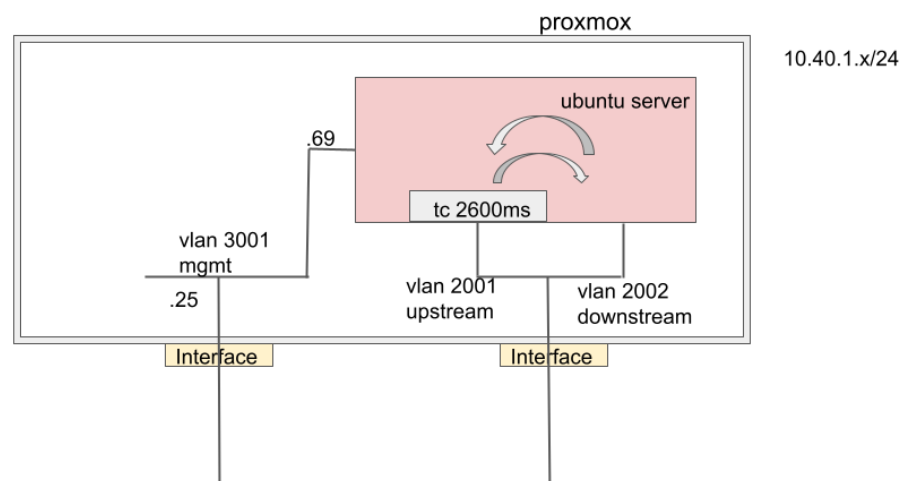


図2 実験の構成図

4.1 基調講演「The Interplanetary Internet - 宇宙へ広がるインターネット市場-」

6月15日にInteropの基調講演の1つとしてIPNSIGのChairpersonである金子氏とWIDE Project Founderの村井氏による「The Interplanetary Internet - 宇宙へ広がるインターネット市場-」が開催された。基調講演では、Vint Cerf氏もビデオメッセージを寄せ、インターネットの黎明期の話を引き合いにだし、これからの宇宙インターネットの発展への期待を表明した。

金子氏からはISOC IPNSIG (Internet-Planetary Network Special Interest Group)の議長として、現在の宇宙インターネットを取り巻く状況について説明があった。近年、米国のアルテミス計画を始めとして、月や火星への進出が現実味を帯びている。宇宙の資源はビジネス的にも魅力的で、資源開発企業やそれらにインフラを提供する企業、すなわち建設工事、食料、交通、通信などに携わる企業が宇宙への進出を検討している状況が説明された。一方で、通信分野においては月面の表面のモバイル通信のようなものは通信会社によって検討されているが、宇宙インターネット全体のアーキテクチャについては未だ明確なビジョンがなく、インターネット業界のコントリビューションが期待されているとのことであった。

これを受けて、村井氏からはInteropに参加している企業・個人の協力が呼びかけられた。既に一部の企業においては宇宙への進出が真剣に検討されている中、全体のアーキテクチャの検討は急務である。今回のInternet × Space Summitを宇宙インターネット元年と位置づけて、様々な仕掛けをして研究・実用の両面から盛り上げていく必要があるであろう。

4.2 Internet × Space Summitブースにおける講演会

また、Interopの展示会場では約50席のオープンスペースを用意して、3日間にわたって講演会が開催された。講演の演目は下記のとおりであった。一部は複数回開催されている。

- Internet x Space Summit 開幕あいさつ
- JAXAの宇宙通信分野の取り組み — 全体像 —
- 国際宇宙探査の概要と月探査のための通信・測位

アーキテクチャの検討状況

- Beyond 5G/6Gを実現する衛星光通信技術と非地上系ネットワーク (NTN)
- 宇宙通信事業にむけた安全安心な宇宙空間の確保に向けて
- 光衛星間通信システム (LUCAS) の初期運用状況について
- Delay and Disruption Tolerant Networking (DTN) Platform, by Spatiam
- Reactive Routing
- 宇宙インターネット通信がもたらす地上経済へのインパクト
- Interplanetary Internet と Delay/Disruption Tolerant Networking - 惑星間でのユビキタスネットワーク実現に向けて -
- 衛星通信の進化、月探査に向けたあくなき挑戦
- Space Compassが目指す地上 (TN) ・非地上 (NTN) のインフラ統合 ～宇宙統合コンピューティングネットワークに向けた取組の紹介～
- IPNSIG Project developments and DTN demonstration
- D3TN: From Space to Underwater Networks
- 身体拡張による人類の宇宙への進出
- J-SPARC (JAXA宇宙イノベーションパートナーシップ) と情報通信
- JAXAと企業・大学等が実現する宇宙探査に向けたオープンイノベーション研究

講演の内容は、宇宙開発の概要を紹介するもの、宇宙における最新の通信プロジェクトの紹介、人工衛星を使った非地上系ネットワークに関するもの、宇宙における通信プロトコルの開発上長、宇宙におけるビジネスの可能性など多岐にわたるものであった。

いずれの講演にも多数の来場者があった。一部は立ち見が出るほどであり、Interop来場者の宇宙インターネットへの関心の高さを示していた。