

# ROUTING : Internet to Orbit

## ルーティング：インターネットを宇宙へ

宇宙におけるIPネットワーク技術の可能性を開拓する

—— ダニエル・フロリアーニ (Daniel Floreani) とロイド・ウッド (Lloyd Wood) による報告

2004年10月4日、バート・ルータン氏 (Burt Rutan) によるSpaceShipOneの歴史的な打ち上げが行われ、世界最初の民間有人宇宙船として高度100kmを越え、宇宙の入口に到達した(ちょうど70マイル強まで昇った)。Microsoft社の共同創業者であるポールG. アレン氏 (Paul G. Allen) のバックアップによってSpaceShipOneを建造した人たちは、コンテストを通じて民間の宇宙飛行における革新的なブレークスルーを後押しする非営利団体X Prize Foundation (xprizefoundation.com) が提供するAnsari X Prizeの賞金1000万ドルを獲得した。X Prize Foundationは、世界で最も才能のあるロケットの専門家と起業家の競争を通して、個人の宇宙飛行の活性化を加速させることを目指している。

かつての宇宙開発は、高価な特注部品やシステム中心の政府主導によるトップダウン型のベンチャーだった。しかし、紆余曲折を経た現在、自由市場での開発競争になりつつある。政府はもはや無制限に予算を認める能力や余裕を失っている。これに代わって、宇宙に熱中する新しい世代が宇宙技術とロケット推進力の原理をマスターし、商用市場が宇宙活動に関わるまでに成長してきたのである。

SpaceShipOneで賞金を獲得したポール・アレン氏のMojave Aerospace Ventures社の飛行士たちとチームを組んだバージン・グループのリチャード・ブランソン氏 (Richard Branson) も、そんな新世代の裕福な宇宙起業家の1人だ。彼はVirgin Galactic社を設立し、5隻のスペースライナーを建造、普通の(といっても、金持ちであるが……) 民間人を宇宙へ連れて行こうとしているのである。また、電子支払システムPayPalの共同創業者であるエロン・マスク氏 (Elon Musk) はSpaceX社を設立し、宇宙旅行のコスト削減と信頼性向上を目指して一

連の打ち上げロケット開発を進めている。SpaceXが設計する最初の2基の打ち上げロケットであるファルコン (Falcon) IとファルコンVは、それぞれ670kgと6020kgを搭載し、地球の低軌道(LEO: Low Earth Orbit)に打ち上げることができる。ファルコンIの打ち上げ1回あたりの価格は590万ドルで、これに積載重量によるコストと飛行距離に関連する料金が上乗せされることになり、この宇宙船の軌道までの飛行は極めてコスト効果が高いものとなりそうだ。

SpaceXのマスク氏は、打ち上げロケットのコストを削減するために、標準規格に立脚したネットワークの定番の世界に目を向けた。2003年のWired Newsの記事によれば、同氏は「打ち上げロケットでは、通信のために必要なシリアルケーブルを束ねると、人の腕ぐらいの太さになります。私たちはこれでは意味がないと考え、イーサネットシステムを導入したのです」と語っている。

マスク氏がX Prize Foundationの理事を務めているのは、決して偶然ではない。

### シスコと宇宙

シスコも以前から宇宙に着目してきた。2003年9月には、英・ギルフォードのサリー衛星技術会社 (SSTL: Surrey Satellite Technology Ltd.) が建造・運用するUK-DMC (Disaster Monitoring Consortium: 災害監視コンソーシアム) 衛星が、補助的な積載実験としてCisco 3251モバイルアクセスルータを搭載し、低軌道に打ち上げられた。UK-DMCは、国際的な災害の監視やさまざまな民間および商業で利用するため、地球環境の大きなマルチスペクトラムイメージを提供することができる5基のLEO衛星でできた“星座 (constellation)”の1つである。この衛星と地球局を合わせれば、世界

全体のIPネットワークが宇宙にまで広がることになる。

このプロジェクトは、市販ベースのシスコ製ハードウェアが初めて宇宙に送られ、テストされるという記録を作ったのである。シスコ・グローバル・スペース・イニシアティブ・グループのリック・サンフォード(Rick Sanford)によれば、このベンチャーの最終的な狙いは、人工衛星の建造コストを削減すると同時に、すでに地上では確立されているネットワーク、特にインターネット・ベースのコミュニケーションによって通信能力を改善することである。

彼はこう語る。

「一般に、人工衛星はゼロベースで製作されます。しかし、私たちはインターネット構築に使われているのと同じオープンスタンダードと、商用生産されている市販機器を応用することによって、衛星通信のコストを下げることができないだろうかというテーマに挑んだのです」

この新しい世代の衛星メーカーと打ち上げ会社がコストを削減し、プロジェクト期間を短縮、さらにハードウェアの柔軟性と能力を高めるためには、能力とインテリジェンスを増したオープンスタンダードを採用しなければならない。このような新しい衛星は、クラスで最高の市販品(COTS: Commercial-Off-The-Shelf)の技術とサブシステムを使う予定であり、人工衛星のインフラストラクチャを需要に応じてさらに迅速に実現するのに役立つと思われる。

### スタンダードベースの通信

標準に準拠したコミュニケーションは、衛星サービス市場を拡大する推進力として重要な要素となる。衛星上および衛星と地球局の間の通信における標準プロトコルとしてIPを使うことによって、宇宙における通信を地上ベースの通信の特徴に近づけることができる。衛星サービスプロバイダが独自のサービスとリンクを保持し、各リンクがページングや固定電話、携帯電話、テレビなど、それぞれ固有サービスの専用となっている現在の状況とは異なり、IPが相互のコンバージェンスを可能にしてくれる。サービスプロバイダは、1つのIPベースの接続を使って複数のサービスを提供し、多くの異なるアプリケーションをサポートすることができるようになる。たとえば、1つの宇宙ベースのインターネット接続がオー



UK-DMC: ラザフォード・アップルトン研究所で真空環境テストに入るUK-DMCとNigeriaSAT-1 DMCの衛星

ディオストリーミングや電話、データサービスを同時にサポートすることができるのだ。これによって、衛星ラジオ、テレビ、電話サービスのためにそれぞれ別のハードウェアを使う必要がなくなる。

IPベースのネットワークインフラは、サービスを利用する機能の簡素化をも実現し、劇的に市場を拡大するだろう。現在、衛星サービスプロバイダを選ぶプロセスは、煩雑かつ複雑なものとなっている。また、その主要ユーザは大企業や政府、または軍事組織であるが、選択の過程で以下のポイントを考慮しなければならない。

- カバー範囲: これはスポットビームに基づいており、小さいものは米国の1つの州(またはそれ以下)から、地球の3分の1をカバーする範囲まで拡大することができる。一般にはカバー範囲が広ければ広いほど、ユーザ1人あたりが利用できる共用リンクのキャパシティが小さくなる。
- サービスの要求: 通常、サービスは固定またはモバイルである。モバイルサービスには、携帯用すなわちモバイルデバイスが必要であり、サイズは1メートル以下のものが多い。固定の地球局はさらに大きく、デバイスのサイズは2.5メートルから8メートルに達するものも

## 回線中心の接続を使った伝統的な衛星通信

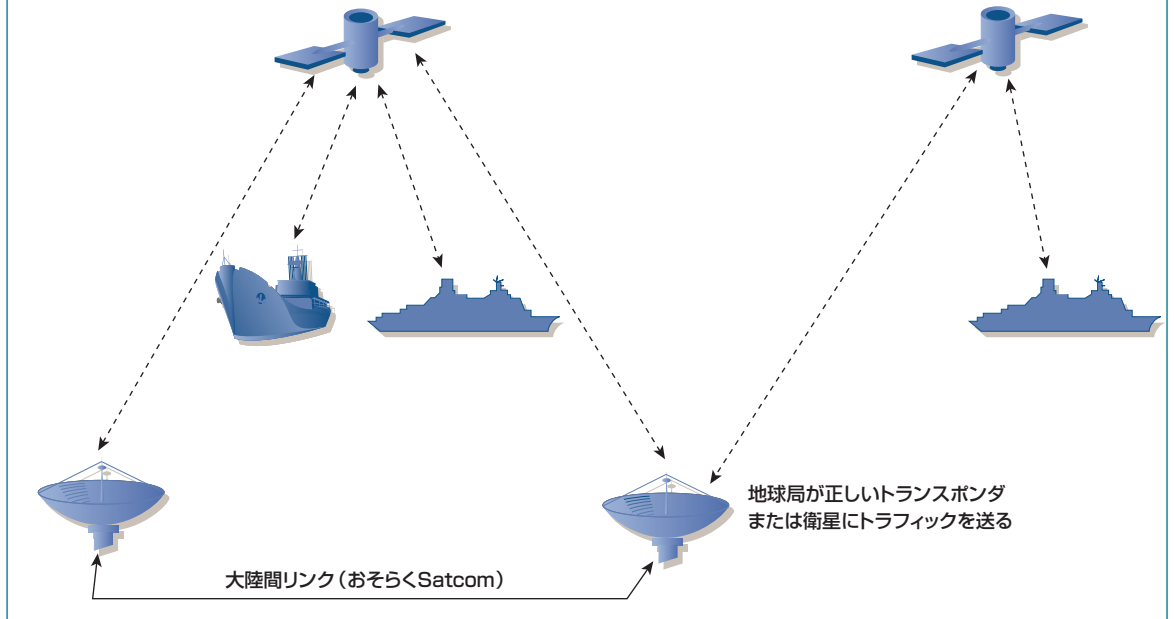


図1：“ベントパイプ (bentpipe)”アーキテクチャでは、トランスポンダのバンクがRF信号を受信し、それを増幅または再生成してから低周波数の信号を地球に送り返す

あり、設置と運用には数百万ドルレベルのコストが必要だ。十数年前から Very Small Aperture Terminal (VSAT) として知られているディッシュは、さらに小規模になる。サービス面で考慮すべきその他の点は、使用する周波数帯だ。いくつか列挙すればC、X、Ka、Ku、およびSバンドなどがある。各バンド帯は、降雨による影響や雲や木の葉を貫通する能力など、それぞれその物理特性が異なる。

- 使用可能な帯域：これは、使用する端末のサイズと無線周波数によって決まる。本当のモバイル端末（サイズが30cm以下）は、最新技術の活用により一般に双方向で64Kbpsのスピードを提供することができる。また携帯用VSAT端末は通常512Kbpsまで提供できるが、コスト面の理由から64～256Kbpsのものが圧倒的に多い。トレーラーを土台にした端末（2.5mのディッシュ

ユ）は1～2Mbpsを提供することができ、さらに大型の固定ディッシュの場合は8～60Mbps以上の提供も可能である。

- 無線周波数とメディアアクセスメカニズム：現在、衛星の共用リンクを最大限に活用するメディアアクセスメカニズムと周波数再利用のオプションはほとんどが専用のものであり、2社のプロバイダ間で装置を再利用する能力が低い。複数のプロバイダの装置が衛星リンクを共用できる可能性はほとんどないのが実情だ。また、現在のブロードキャストサービスは非対称型となっているが、データやビデオの返信を処理するために対称型のコミュニケーションを要求する衛星サービスを求める声が高まっており、その需要に応えるかたちで衛星リンクを最大限に活用するためには、キャパシティ再利用のためのさらに高度な配分メカニズムが必要になっている。

もちろん、衛星リンクの設定が容易でないことは明らかである。ユーザが地元のインターネットサービスプロバイダ (ISP) から適切な接続スピードを選択するインターネット・ベースのコネクティビティと、この過程を比べてみよう。衛星通信が地上のネットワークの利用と同様の容易性を獲得するためには、キーとなる課題を克服しなければならない。ここにおいて最も難しい関門

**ダニエル・フロリアーニ**は、シスコのグローバル・ディフェンス、スペースおよびセキュリティ・グループにあるスペース・チームのネットワーク・アーキテクトである。彼は、南オーストラリア大学の電気通信研究所からバケット無線の戦略的ネットワークのモデル構築で博士号を取得している。連絡先: daniel@csco.com

**ロイド・ウッド**は、グローバル・ディフェンス、スペースおよびセキュリティ・グループのスペース・イニシアティブ・マネージャで、軌道上にあるシスコで最初のルータの責任者である。英国のサリー大学通信システム研究センターから人工衛星群のインターネットワーキングで博士号を取得している。連絡先: lwood@csco.com



は、メディアアクセスと周波数に対する共通のスタンダードの欠如である。企業は、複数のシステムがシームレスに協働できるようなスタンダードベースのテクノロジーを構築するために協調して努力しなければならない。この標準化が達成できれば、衛星のユーザもアクセスのためにリンクの反対側にある地上端末をどのように設定するか、あるいはトラフィックがどこからどのように地球に戻ってくるのかという問題に悩まずに済むはずである。IPパケットは、宇宙でも地上と同じようにルーティングされ、正しい行き先に到達することができるだろう。

地上のインターネットがベストエフォート型のIPネットワークからパケットのQoS (Quality-of-Service) マーキングに基づいて、異なるクラスのサービスをサポートするネットワークへと移行しつつあるのと同様に、衛星ベースのネットワークも異なるサービスを望み通りに実行するのに必要な品質レベルを提供するためにQoSを要求している。これを実現するためには、衛星ネットワークも衛星端末と地上にあるその他のネットワーク機器との間でQoSに関して共通の理解を持たなければならない。衛星モデムはQoSを認識し、(優先キューイングおよびそのほかのQoS手法により)トラフィックに条件を付け、個々のパケットのQoSマーキングに基づいてトラフィックの優先順位を決めることができるように、フレームを送出する前にQoSをメディアアクセス機能にマッピングできるようにしなければならない。モデムとルーティングの機能の乖離および暗号化の使用は、QoSに関する共通の理解とマッピングの達成を難しくしている。

## 周波数の低下、伝送の高速化

衛星サービスのプロバイダは、地上中心の同業者がIPベースのコンバージドネットワークに移行するのを見て、これまで地上で経験してきたのと同じように帯域、管理、運用面の大きな節約を目指して、宇宙でのIPネットワークの利用に大きな関心を示し始めた。衛星インターネットのISPは、ケーブルISPが使っているのと同様に成熟したネットワーク管理ツールを使いたいと望んでいる。

旧来から、通信衛星は無線信号を受信し、増幅または再生成してから低周波数の信号を地上に送り返すトランスポンダのバンクをサポートするためのプラットフォーム

## 周波数の再利用とスポットビームによるマルチキャスト

人工衛星は、テレビ、あるいはXMやSirius Radio経由の衛星ラジオなどで幅広く使われている。このような放送サービスは、通常多くのユーザへのサービスを実現するために、大きな電波到達範囲をカバーするよう設計されている。もし1つの大きな電波到達範囲をリターンチャンネルのトラフィックの受信にも使うとしたら、データを送信するユーザの拡大に伴って共用チャンネルのアクセスにコンテンツンションが起こり、多くの端末を使うVSAT衛星ネットワークのパフォーマンスを制限してしまう可能性が高くなってしまふ。これは非常に大きな問題である。

この問題に対する解決策の1つが、スポットビームの利用である。地上のセルラーシステムに似て、スポットビームはもっと小さな範囲(米国の1つの州以下のサイズ)で、離れた地域用のスポットビームで使われている周波数帯でも使用可能なものを再利用することができるので、1ビームがサポートできるユーザ数やリターントラフィックの量が増える。スポットビームの導入は放送の本質を変え、ブロードキャストが衛星から個々のブロードキャストビームへと移ることになる。

また、マルチキャスト用にビームのキャパシティを効率よく利用することが挑戦課題になった。IPマルチキャストでは、特定のIPマルチキャストグループに登録されているアクティブなクライアントが存在するスポットビームだけにマルチキャストが送られるべきである。衛星がIPルーティング機能を備えることによって、個々のスポットビームに対し必要に応じて衛星上でパケットを複製し、スポットビーム間で直接トラフィックのスイッチングが可能になり、1つのグループを共有するクライアント間でコミュニケーションができるようになる。この方が、地上でパケットを複製してフィードバックへ打ち上げるよりも好ましい。

衛星上でのマルチキャストを可能にするルーティング機能のおかげで、スポットビームに対するパケットの複製が地上ではなく衛星上で処理できる。したがって、サービスプロバイダはキャパシティが限られたリンクからより多くの収益を得られるようになる。これは、フィードアップリンクのキャパシティを節約し、グループメンバー間のトラフィックをスイッチするために地上に戻す必要がないので、多対多のマルチキャストコミュニケーションで遅延も減ることになる。ただし、IPマルチキャストのためにこのような柔軟性を実現するには、IPとレイヤ2のスイッチングを衛星上で統合し、ルーティングとスイッチングの機能をスポットビームと組み合わせなければならない。

ームである。これは、よく知られた“ベントパイプ(bent-pipe)”アーキテクチャを作り出した(図1を参照)。

この例では、共同作戦を展開する2国の軍艦が互いに電話で通信している。ところが各船舶は、通信に自国専用の衛星(またはトランスポンダ)を使っているため、2つのゲートウェイの地球局間では間接的にしか接続することができない。信号が船から衛星へ、衛星から船へと直接伝わるのではなく、この信号は船から衛星へ上がり、地球局へ下り、大陸間リンクを通して別の地球局へ行き、そこから衛星に上がって、最終的に別の船に下りてくるという長い旅をするために遅延が生じ、キャパシティを消耗する。同様に、同じ衛星上の異なるトランスポンダ間のトラフィックでも地上でスイッチングしなければならない。

## 衛星間リンク (ISL) 全体にわたるルーティングを備えた将来の衛星通信

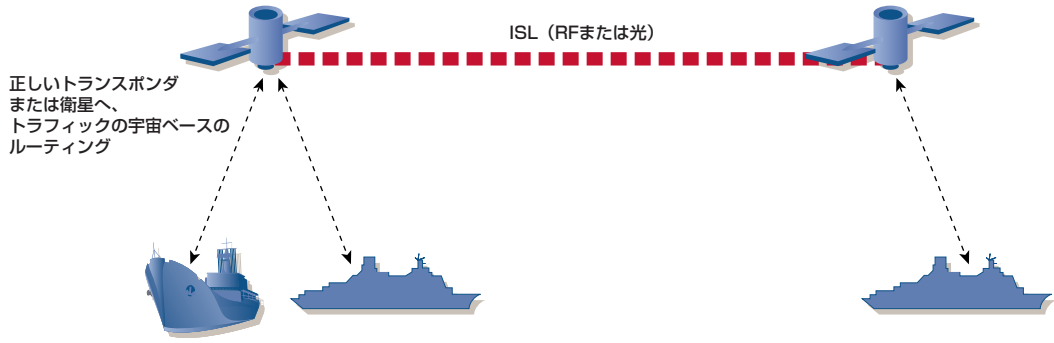


図2: すべての衛星にルーティング機能があり、衛星間の相互接続があれば、ネットワークの“群 (cloud)”に接続するために個々の地上ノードで必要なのは、最後のたった1ホップのコミュニケーションリンクだけである

標準化された衛星間リンク(ISL: InterSatellite Link)へのインターフェイスを備えた衛星上でルーティングとスイッチングの機能が展開できれば、VoIP(Voice-over-IP)トラフィックが1つの衛星から別の衛星へと宇宙で直接伝送できるようになり、余分なホップに関連する遅延やその他の負荷がなくなり、地上のインフラへの依存が少なくなる(図2)。

比較的新しい衛星は、スイッチングのために地上へ戻すことなく、あるトランスポンダから別のトランスポンダへ直接データフレームを送るスイッチファブリックをすでに搭載して建造されている。その例には、欧米でスペースセグメントキャパシティの大手サプライヤであるHispasat社の衛星AmerHisが含まれている。Intelsat 9シリーズの衛星は、全体的に柔軟性を高めるためにトランスポンダ間に再構成可能なスイッチングマトリクスを持っている。日本宇宙航空研究開発機構(JAXA: Japan Aerospace Exploration Agency)は、155Mbpsで運用可能なセルスイッチを衛星上に搭載した超高速インターネット衛星(WINDS: Wideband Inter-Networking engineering test and Demonstration Satellite)を建造中である。

しかし、これらのスイッチファブリックは今でも地上のコントローラが管理している。ルーティング機能が衛星上に取り込まれれば、衛星上および衛星間でも本格的なレイヤ3のIPルーティングまでスイッチングを拡大できるため、衛星は単なるクロスコネクトトランスポンダではなく、トランスポンダが運ぶ個々のIPトラフィックをアクティブに認識し、それに対応できるようになる。

最終的には衛星にさらに多くのコミュニケーションテ

クノロジーを備えることで、ISLを使って地理的に1つのクラスタを形成しながら飛ぶ、もっと小型で低コストの衛星を基礎に、衛星通信に対する新しいアーキテクチャのアプローチに進化することができる。いずれは、各クラスタに1基か2基ある“コア(core)”衛星が他のクラスタへのコネクティビリティを提供するようになるだろう。この“コア”衛星は、クラスタを互いに接続し、地上のインターネットにある光ファイバネットワークのように、地球上から見て停止した高速のフリースペースオプティカルリンクの“バックボーン(backbone)”リングを形成することができなければならない。

### IPとクラスタによる新しい可能性

IPの標準に準拠した衛星間リンクを使っている衛星クラスタの相互接続がもたらすメリットには、衛星上の機能によってパケットの内容に対するルーティングを決定する能力がある。また、それを可能たらしめる要素は以下の通りである。

- トランスポンダ、ローカルペイロード、相互接続されたほかの衛星や地球局に使えるコネクティビリティに関する知識。
- 宇宙ベースのネットワークのトポロジーとパケットのマーキング。
- リンクのコスト、遅延の許容範囲、セキュリティポリシーおよびService Level Agreements (SLA)を包括するポリシーと管理に関する意思決定。

このネットワークレベルで合意に達すれば、衛星上で異なる目的のためにあるペイロードやトランスポンダの異なるファミリーの間で相互接続が可能になる。すべて

のペイロードとトランスポンダの機能性や柔軟性は、軌道スロットにポジションを持っている静止衛星で相互接続されたペイロード全体で使えるようになるのである。これは、相互運用性の合意とポリシーレベルでのピアリング管理の合意目標に掲げられるべきものである。

### 1つの世界、1つのネットワーク

宇宙でスタンダードベースのインフラを開発することによって、ユーザやサービスプロバイダは地上にある機器が衛星を使って通信する方法を変えることができるようになり、データの格納、配布および利用の方法も革命的に変わるだろう。

衛星ベースのIPコミュニケーションネットワークは、世界のどの地域にいるユーザに対してもサービスの国際的拡大を提供するのに役立つ。これは、現在はブロードバンドインターネットへのアクセスができない地域に住む国民に、衛星技術を使って共通のサービスを提供することに関心を示す政府にとって非常に重要なメリットである。すでに全国規模で実施されている郵便や電力サービスの政府プログラムと同じように、生活の質

の地域格差平準化に役立つからだ。

いずれユーザは、宇宙のサービスをさらに手軽で安価に利用することができるようになる。自分のパケットが地球を回ってどのようにルーティングされているのかを知る必要もなく、また意識することさえなく、宇宙と地上が合体した新しいアーキテクチャが創造されることだろう。

いつの日か、有人および無人の宇宙船や航空機が、インターネットのアクティブノードを運ぶネットワークを築くこと——それが私たちのビジョンである。地上と宇宙をベースにしたコミュニケーションが結び付いて、シームレスな共通のサービスを形作る1つの世界、1つのネットワークが実現するのだ。

### 詳しい情報

- シスコのスペースネットワーキング (Cisco Space Networking) :  
[cisco.com/go/space](http://cisco.com/go/space)
- シスコのグローバル・ディフェンス、スペースおよびセキュリティ (GDSS : Cisco Global Defense, Space and Security)  
[cisco.com/go/gdss](http://cisco.com/go/gdss)
- 低軌道にあるシスコのルータ (Cisco Router in Low Earth Orbit) :  
[ftp://ftp-eng.cisco.com/lwood/cleo/README.html](http://ftp-eng.cisco.com/lwood/cleo/README.html)
- スニール・ラタン『ネットの異端者が宇宙に目を向ける』Wired News, 2003年4月22日 (Suneel Ratan, "Net Maverick Sets Sights on Space," Wired News, April 22, 2003.) :  
[wired.com/news/business/0,1367,58493,00.html](http://wired.com/news/business/0,1367,58493,00.html)
- ウィル・アイヴァンシクほか『宇宙にある資産の安全でネットワーク中心の運用 : 低軌道にあるシスコのルータ (CLEO) とバーチャル・ミッション・オペレーション・センター (VMOC)』、NASAテクニカルメモランダム2005-213556、2005年5月 (Will Ivancic et al., "Secure, Network-Centric Operations of a Space-Based Asset: Cisco Router in Low-Earth Orbit (CLEO) and Virtual Mission Operations Center (VMOC)," NASA Technical Memorandum 2005-213556, May 2005.)
- ケース・ホーギーほか『宇宙におけるスタンダードのインターネットプロトコルおよびアプリケーションの利用』、Computer Networks47 (2005) 603-650、エルゼビア出版 (Keith Hogie et al., "Using Standard Internet Protocols and Applications in Space," Computer Networks47 (2005) 603-650, Elsevier.)
- ロイド・ウッドほか『軌道上で利用するためにインターネットスタンダードを採用』、第19回AIAA/USU小型衛星会議発表論文SSC05-IV-03、ユタ州ローガン、2005年8月 (Lloyd Wood et al., "Adopting Internet Standards for Orbital Use," paper SSC05-IV-03, 19th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, Logan, Utah, August 2005.)
- ロイド・ウッドほか『スロット・クラウド : ネットワーキングによる軌道スロットの活用』、第54回国際宇宙航行会議発表論文IAC-03-U.4.07、ドイツのブレーメン、2003年10月 (Lloyd Wood et al., "Slot Clouds: Getting More from Orbital Slots with Networking," paper IAC-03-U.4.07, 54th International Astronautical Congress, Bremen, Germany, October 2003.)
- ジョアフ・ジャクソン、『惑星間インターネット』、IEEEスペクトラム、2005年8月 (Joab Jackson, "The Interplanetary Internet," IEEE Spectrum, August 2005.)  
[www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/aug05/0805inte.html](http://www.spectrum.ieee.org/WEBONLY/publicfeature/aug05/0805inte.html)
- Rate-Based Satellite Control Protocolに関する『Packet』誌の記事 (2005年第1四半期) (Packet article on Rate-Based Satellite Control Protocol (First Quarter 2005))  
[cisco.com/packet/173\\_5a1](http://cisco.com/packet/173_5a1)