



ローカル5G×GEO/LEOバックホール統合の実証と評価： 高信頼・大容量の実現に向けて



スカパーJSAT
株式会社

おおうち
大内 夏子



スカパーJSAT
株式会社

みしま
三島 貴務



スカパーJSAT
株式会社

せとぐち
瀬戸口 喜幸

1. はじめに

近年、衛星通信技術は急速な進化を遂げており、その中でもLEO（低軌道：Low Earth Orbit）コンステレーションの成熟とそれに伴う複数軌道（マルチオービット）構成の採用など、衛星通信事業者が展開する通信インフラの高度化が進んでいる。

一方、日本国内ではローカル5Gの制度化に伴い、特定の地域や施設内で独自に5Gネットワークを構築することが可能となった。5Gは、高速大容量通信・低遅延通信・多数同時接続を実現できることから、工場や農業、災害対策、遠隔医療など幅広い分野での活用が期待されている。

我々は、衛星通信技術と5G通信技術を連携させることで新たな価値創出と社会課題の解決を目指している。NICTが実施する委託研究『Beyond 5Gにおける衛星-地上統合技術の研究開発（採択番号 21901）』において、ローカル5Gのバックホールとして、特性の異なる複数軌道の衛星通信を活用し、「QoS（Quality of Service）制御」と「経路制御」を組み合わせたネットワーク環境を構築し、回線状況に応じた動的な制御の有効性を実証した。実証の結果、LEO衛星による大容量データ伝送と、GEO（静止軌道：

Geostationary Earth Orbit）衛星による安定した帯域確保とを組み合わせることで、スループットの向上と通信の安定性の両立が可能であることを確認した。

本稿では、想定ユースケースと活用した5Gの制御技術、更に実証概要と結果について紹介し、最後に本実証結果の活用方法や今後のビジネス展望について述べる。

2. ローカル5Gとマルチオービット衛星通信のユースケース

ローカル5Gシステムのバックホールとしてマルチオービット衛星通信を利用するユースケースとして、島しょ部や山間部などのモバイルネットワークや固定網の敷設が困難な場所へのローカル5G基地局の展開が挙げられる。検討したユースケースとアプリケーション（Camera、BizApp、Internet）を図1に示す。本ユースケースでは、ローカル5GのバックホールにGEO衛星とLEO衛星を利用する。GEO、LEO衛星によるそれぞれの通信特性理解した上で、両衛星による通信の利点を活用する方法を検討した。各衛星通信の特性を以下に示す。

GEO衛星

高度約36,000kmの静止軌道にあり、地上から相対位置

監視カメラ映像(Camera)

- 地上回線がない地域でも中央拠点へ映像を送信
- 通信遅延時は画質/台数を下げつつも「最低限の監視を継続」
- ※最も高い優先度

業務用アプリケーション(BizApp)

- 業務データ送受信およびテレビ会議など低遅延が必要な通信
- 障害時も可能な限り継続するが、カメラより優先度は低い

インターネット通信(Internet)

- 衛星バックホールにより遠隔地でも利用可能
- 3つのアプリケーションの中で最も優先度が低い
- 空き帯域がある場合に利用可能

GEOバックホール

- 通常時：監視カメラ映像(Camera)のみ
- LEO切換時：全アプリケーション
- (アップリンクの優先制御は、Camera > BizApp > Internet)

LEOバックホール

- 通常時：業務用アプリケーション(BizApp)、インターネット通信(Internet)
- (アップリンクの優先制御は、BizApp > Internet)
- LEO切換時：GEOに切り替え

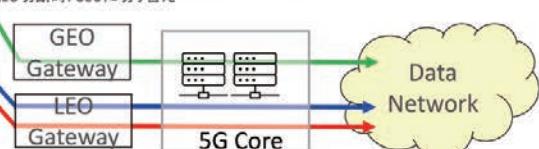


図1. ユースケースの概要



が変わらないため、地上局から衛星方向への見通しを確保しやすい。1台の衛星で広範囲に通信の提供が可能で、地球局設置場所の選択肢が広い。安定した伝送容量・RTT (Round Trip Time) を実現できる。

■LEO衛星

高度数百～数千kmを周回し、地上から見て相対位置が常に変化する。比較的小型な衛星が多く、メガコンステレーションを形成することでシステム全体として大きなキャパシティを達成できる。地球局は衛星を追尾しつつ、複数の衛星間で適切にハンドオーバーを行う必要がある。比較的高速かつ低遅延な通信が実現できる。

本ユースケースでは、3種類のアプリケーションを想定した。最も安定性が求められる監視カメラ映像は、常にGEO衛星バックホールを用いる。通信の優先度は監視カメラ映像より低いものの、低遅延や大容量が求められる業務用アプリケーション、インターネット通信は、通常時にはLEO衛星バックホールを用いる。LEO衛星の通信が途絶えた場合（短期的には運用機体数不足などによる一時的な通信不可状態、長期的にはインフラが損傷した場合）を想定し、LEO衛星通信途絶時にはGEO衛星を利用して最低限の通信機能を維持し、LEO衛星が復旧し次第経路を切り戻す。さらに、回線切替えの際にGEO衛星回線へトラフィックが集中する状況に対しても、QoS制御を行うことで各アプリケーションの帯域を動的に調整する。これらの制御により、通信の継続性と安定性を確保する。

3. 5G制御技術

2章で説明したユースケースを実現するために、5Gで高度化された技術を活用する。主要技術である「経路制御」及び「QoS制御」について説明する。

■経路制御

経路制御には、アクセスマッシュネットワークやコアネットワークなどの各ドメインや、プロトコル層ごとに多様な技術がある。本稿では、5Gコアネットワークで規定されたプロトコルを用いて、動的な経路切替えを行う方法を説明する。通信経路の設定・管理はSMF (Session Management Function) が担い、パケットのルーティングと転送を担うUPF (User Plane Function) にはPFCP (Packet Forwarding Control Protocol) で転送ルールを、gNB (gNodeB: 基地局) にはAMF (Access and Mobility Management Function) を介してNGAP (Next Generation Application Protocol) で通信設定を伝達する。これらはPDU (Protocol Data Unit)

セッションの確立時などに実行されるが、通信断などの異常検知と連動して同様の制御を行うことで、経路切替えを自動的に実行できる。

■QoS制御

5GのQoS制御は、QoS Flowを単位として行われ、QoS Flowにはビットレートを保証するGBR (Guaranteed Bit Rate) QoS Flowと、ビットレートを保証しないNon-GBR QoS Flowの2種類が存在する。3GPPでは複数の5QI (Quality of service class Identifier) 値が標準化されており、5QIごとに遅延、パケット損失、優先度 (Priority Level) などのQoS特性が定義されている。GBR QoS Flowは、GFBR (Guaranteed Flow Bit Rate: 保証ビットレート) とMFBR (Maximum Flow Bit Rate: 最大ビットレート) にてビットレートを制御する。

本実証では、各アプリケーションに対し、ネットワーク環境に応じてPriority Level、GBR/Non-GBRの選択、GFBR・MFBRの値を設計し、QoS制御を実施した。

4. 実証概要

2章に記載したユースケースに基づき、ローカル5GのバックホールとしてGEOとLEOによるマルチオービット衛星通信を利用した実証の内容を説明する。

システム構成の概略を図2に示す。本実証で用いた5GコアネットワークのUPFはQoS制御機能が未実装であったため、ダウンリンク方向の通信におけるQoS評価は対象外とした。これに対し、アップリンク方向の通信についてはgNBにQoS制御機能が実装されていることから、ローカル5Gの無線 (RAN: Radio Access Network) 区間においてQoS制御を適用した。

GEOバックホール回線は、アップリンクのスループット30Mbpsのエミュレーション環境を構築した。一方、LEOバックホール回線は、実回線 (Starlink) を使用した。なお、GEOエミュレーション環境の妥当性については、実際のGEO回線を用いた予備実験により、スループット/ジッター/RTTなどの指標において、実回線と比較して実効上差分がないことを確認している。

本ユースケースでは2つのQoS設定を設計し、通常時とLEO回線切断時でこれらを切り替えることとした。表1と表2に本実証でのQoS設計を示す。

通常時は、最も優先度が高く安定的な接続を必要とする、5G制御信号と「Camera」のみをGEO回線で利用する。LEO切断時は、これに加えて「BizApp」と「Internet」もGEO

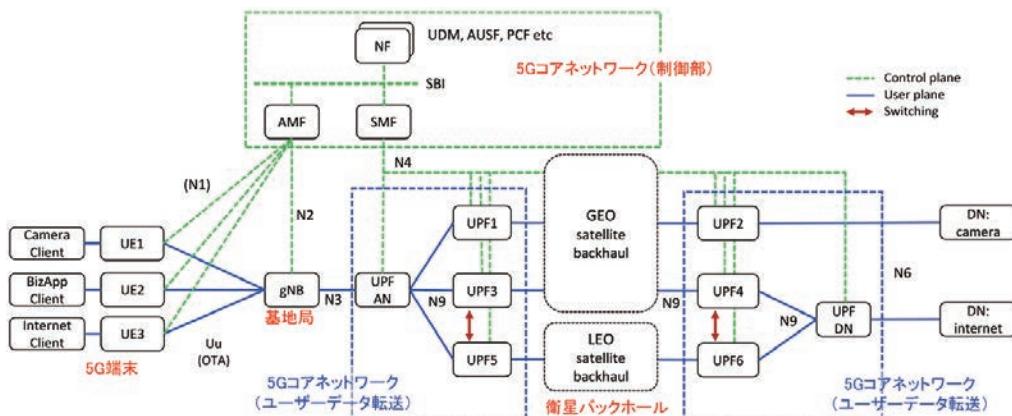


図2. システム構成

表1. QoS設計（通常時）

Application	5QI	Priority Level	GBR	GFBR (Mbps)	MFBR (Mbps)	Backhaul
Camera	4	50	GBR	15	29	GEO
BizApp	6	60	Non-GBR	--	--	LEO
Internet	9	90	Non-GBR	--	--	LEO

表2. QoS設計（LEO切断時）

Application	5QI	Priority Level	GBR	GFBR (Mbps)	MFBR (Mbps)	Backhaul
Camera	4	50	GBR	15	15	GEO
BizApp	4	50	GBR	8	10	GEO
Internet	4	50	GBR	3	4	GEO

回線を利用する。QoS設計により、「Camera」の上限帯域幅を半減させることで、「Camera」の最低限の品質を維持しつつ、「BizApp」と「Internet」の通信も継続することを目的としている。

5. 実証結果と考察

回線切替結果

図3は、各アプリケーションがGEO衛星バックホール及びLEO衛星バックホールのどちらを利用していったかを時間軸に沿って示した結果である。

「Camera」(●印)は、設計どおり常時GEO衛星を介して通信を行っており、図中の●印が時間軸全体にわたって一定であることから、通信が中断することなく安定して継続されていることが分かる。

「BizApp」(×印)と「Internet」(◆印)のアプリケーションは、通常時LEO衛星を介して通信を行う設計である。図中の×印/◆印がLEOの回線断の生じた時間帯でのみGEO衛星を利用していることから、LEO衛星が利用可能な場合にはLEO衛星を用い、LEO衛星が利用できない場合にはGEO衛星を用いることで、通信の継続性を維持できること

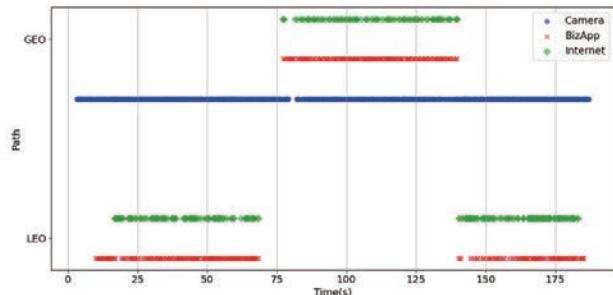


図3. バックホール種別

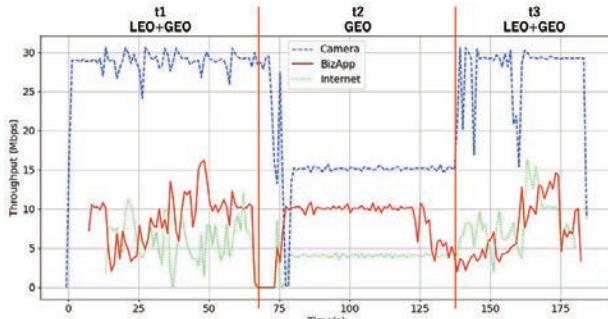


図4. UDPスループットの変動

が分かる。

QoS制御結果

UE (端末:User Equipment) からDN (Data Network)上のサーバまでのアップリンクスループットを計測し、QoS制御の有効性を実証した。UDPスループットの測定結果を図4に示す。グラフ縦軸はスループット、横軸は経過時間を表す。横軸は大きく3つの時間帯に分類できる：

- t1. GEO/LEO回線同時利用
- t2. GEO回線利用 (LEO回線が利用できない時間帯)
- t3. GEO/LEO回線同時利用 (LEO回線が復旧後)

t1, t3区間ではGEO/LEO回線を同時利用することによ



り全体として高いスループットを実現していることが分かる。また、「Camera」はGEO回線を占有しているため、リソースの競合は発生していない。一方で、「BizApp」と「Internet」間ではPriority Levelによる優先制御の効果が得られなかった。これはLEO回線のアップリンク帯域がgNB-UE間より狭いためであり、バックホール側でのQoS制御が不可欠である。また、LEO回線はスループットが変動しやすいため、IP層以上のQoS制御では帯域保証と広帯域活用のトレードオフを考慮する必要がある。

t2区間ではスループットが安定しており、GEO回線利用時、3つのアプリケーションにおける帯域制限が適切に運用されていることが確認された。各アプリケーション間でのリソース競合が最小化され、各アプリケーションの通信品質が維持されることを確認した。

なお、回線切替え時の断時間は3~5秒程度であった。切替え時間は回線の断・復旧判定とルート変更の合計であり、判定間隔や回数の設定によって調整可能である。

6. まとめと今後の展望

本研究では、ローカル5Gのバックホールにマルチオービット衛星通信を活用した新たなユースケースを検討し、5GのQoS制御と経路制御をネットワークの環境に応じて動的に変更することで、スループットの向上と通信の安定性の両立が可能であることを示した。以上の結果から、マルチオービット衛星と5G通信の連携は、地上インフラが不十分な地域や災害時においても高速・安定した通信基盤となり得ることが示唆される。

本実証の成果は、ローカル5Gのバックホールとして衛星回線を提供するサービスに活用できることはもちろんのこと、衛星通信を5GにおけるRAN区間に展開する5G NTNサー

ビスに適用可能である（図5参照）。

さらに、スカパーJSAT社はUniversal NTNへの適用を視野に入れている。Universal NTNは、3GPP標準技術に基づき、静止軌道衛星、非静止軌道衛星、高高度プラットフォーム（HAPS）などを組み合わせた多層ネットワークであり、地上ネットワークが届かない海洋や山岳地帯、災害時にも通信インフラとして機能し、「圏外のない社会」の実現を目指すものである^[1]。

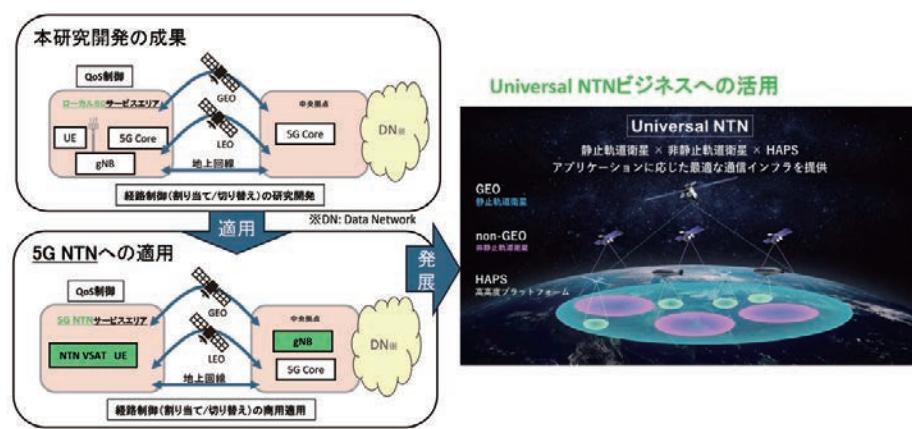
Universal NTNの実現には、本実証で得られた経路やQoSの柔軟な制御技術に加え、NTNインフラの性能向上、ネットワーク接続技術（ISL技術）、マルチアクセス・マルチバンド端末の開発、統合制御システムの開発など多くの課題がある。まずは本実証の成果を活用し、スカパーJSAT社の衛星インフラと地上通信システムの連携を進め、3GPP拡張仕様の普及に合わせて段階的な機能拡張を目指す。NTN標準化及び外部動向の状況から、複数のNTNインフラと地上通信システムからなる多層化ネットワークは2030年前後に実現すると考えられる。スカパーJSAT社は、これらの技術と事業モデルを先導し、持続可能な通信インフラの未来を切り拓いていく所存である。

謝辞

本研究は、NICTが実施する委託研究『Beyond 5Gにおける衛星-地上統合技術の研究開発（採択番号 21901）』の一環として実施されたものである。

参考文献

- [1] 八木橋 宏之、“非地上系ネットワーク（NTN）の動向とスカパーJSATの取組み 一圏外のない世界に向けてー”、ITUジャーナル Vol.55 No.8 (2025.8)



■図5. 本実証結果の活用とビジネス展望