

先端ネットワーク利用研究に関するワークショップADVNET 2023, 2023年10月5日

衛星地上接続技術を活用した Beyond 5Gシステムの研究開発

金井 謙治¹⁾、鈴木 彩音¹⁾、福元 徳広²⁾、中尾 彰宏¹⁾²⁾

¹⁾東京大学 工学系研究科

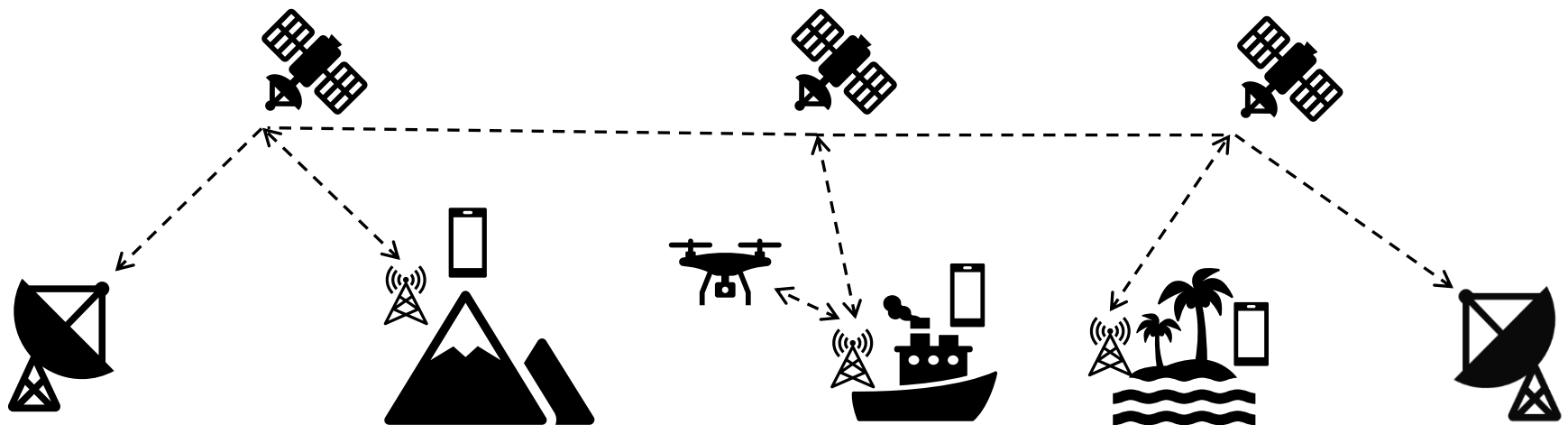
²⁾東京大学 情報学環・学際情報学府

もくじ

- 研究背景
- 令和5年度電波資源拡大のための研究開発
「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する研究開発」
 - ✓次世代ハイスループット衛星(HTS)通信システム「技術試験衛星9号機(ETS-9)」を活用した衛星通信システムと5G通信システムの接続に向けた検討
 - ✓移動車両型の迅速展開かつ広域通信可能な通信システム
 - ✓JGNを利用した衛星地上接続システムに向けたテストベッド
 - ✓低軌道衛星(LEO)通信システム(Starlink)における通信特性解析と改善に向けた検討

研究背景(1)

- 空、海、山岳を含む、**あらゆる活動領域**での高速・大容量な無線通信の需要の高まり
 - **深海・山岳**といった危険地帯における遠隔探査・監視への期待
- **地上系ネットワークと非地上系ネットワークの連携**による課題解決
 - Beyond 5Gでは、宇宙から地上までの3次元ネットワークを実現
- 衛星通信システムと5G通信システムの効果的な接続
 - **通信が未踏なエリアに対する5G通信が提供**
 - 大規模災害時における緊急通信システムとして利用



研究背景(2)

- **富士山**は地上系の通信が脆弱な地域等の一つ
 - 地理的には山頂・主要山道に、時期的には登山シーズンに限定
 - 富士山での死亡事故のうち、75%が登山シーズン以外に発生
 - 富士山景観配慮条例(平成28年6月24日施行)などの制約
 - 新たに大規模な通信設備を敷設することの敷居は高い
- 噴火・落石をはじめとした深刻な災害の危険性を持つことから情報通信システムの重要性は極めて高い
 - **リアルタイムでの遠隔監視**
 - **災害時の迅速な情報伝達**



迅速に展開かつ広域な通信が可能な通信システムへの期待



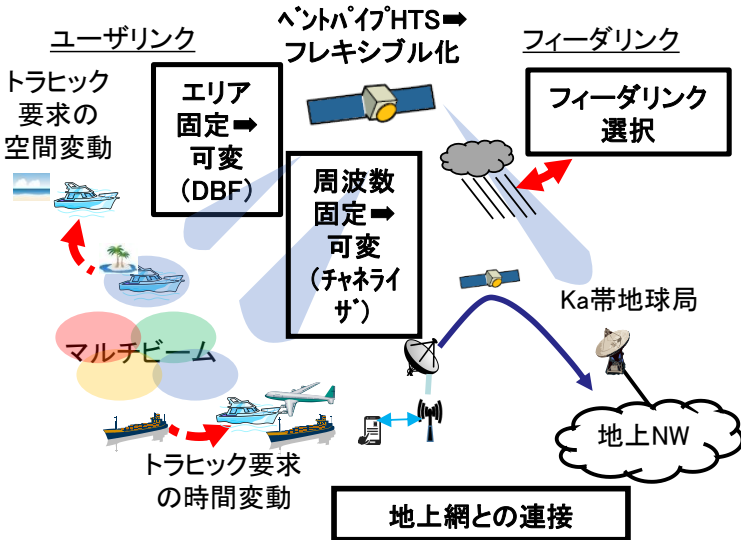
令和5年度電波資源拡大のための研究開発 「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御 に関する研究開発」

次世代のハイスループット衛星(HTS)通信システム「技術試験衛星9号機(ETS-9)」を活用した衛星通信システムと5G通信システムの接続に向けた検討

研究開発の目的と目標

- ・本研究開発は、技術試験衛星9号機(ETS-9)を利用した軌道上実証実験による総合評価を行うことを前提として、**衛星のリソース配分を最適化するための制御技術を確立**し、限られた周波数で多様なサービスへの対応や大容量通信を可能とすることを目的として実施する**地上システムの研究開発**
 - ・従来の**ベントパイプ型HTS衛星通信システムに比べ周波数利用効率を2倍へ改善**を目標として、衛星-地上接続技術や運用計画技術、衛星リソース制御技術の研究開発を実施
- HTS: High Throughput Satellite

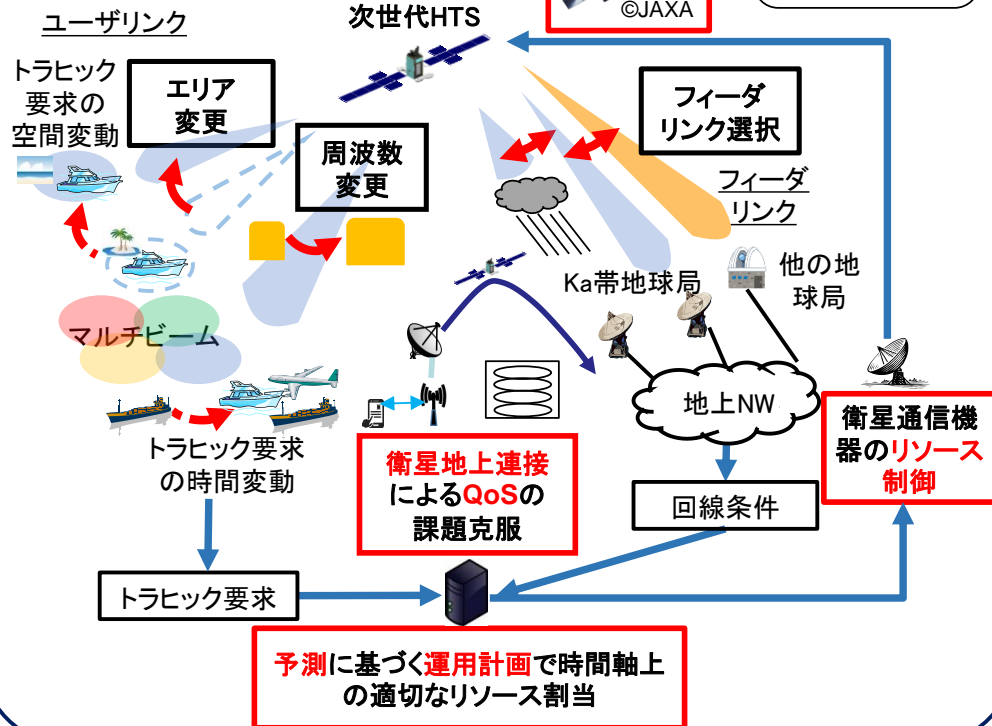
従来技術の課題 (ベントパイプHTS+衛星のフレキシブル化)



- ・トラフィック要求や回線条件は時々刻々と変化⇒適切に割り当てなければ呼損やリソースの余剰が発生
- ・地上網との性能差⇒QoSに課題

⇒限られた周波数を有効利用する衛星リソースの最適な制御技術が未確立

本研究開発実施後の成果 (フレキシブルHTSのためのリソース制御技術の確立)



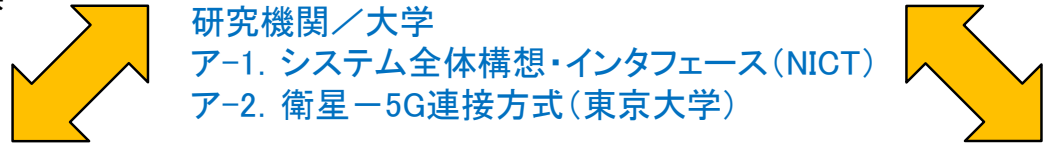
研究開発項目

NICTと東京大学が連携して実施

課題ア：
衛星通信システムにおける衛星－地上接続技術
 “衛星5G連携”
 ⇒ 衛星と地上の回線条件差によるQoSの課題を
5Gの新技术により克服

- 通信方式情報共有
- 運用計画のための
インタフェースの調整・提供
- 衛星運用計画の提供

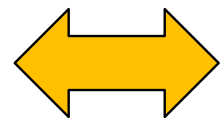
- 衛星－地上接続システムの最適化
- 評価のためのインタフェースの提供
- 総合評価への協力



研究機関／大学
 ア-1. システム全体構想・インタフェース(NICT)
 ア-2. 衛星－5G接続方式(東京大学)

課題イ：予測技術を活用した
衛星通信システムの運用計画作成技術
 変化する通信需要／回線条件に対応した
 衛星リソースの割当計画
 ⇒ AIを活用した予測で時間軸上で適切に割当て

課題ウ：衛星リソース制御技術及び総合評価
 衛星通信機器の制御＋課題アイウの有効性確認
 ⇒ ETS-9の制御・実証環境構築・実証



- 研究機関／大学／企業
- イ-1. 衛星リソース割当方式(NICT)
 - イ-2. 最適制御方式の理論検討(東北大学)
 - イ-3. 通信需要・回線条件の予測技術(天地人)
 - イ-4. 実装検討・開発及び評価(三菱電機)

- 運用計画のための
インタフェースの調整・提供
- 衛星運用計画の提供
- 衛星回線状態の授与
- 総合評価への協力

- 研究機関／企業
- ウ-1. 衛星リソース制御技術(NICT、三菱電機)
 - ウ-2. 衛星通信サブシステムの実証環境構築・
機器実証(NICT、三菱電機)
 - ウ-3. 総合評価(NICT)



フレキシビリティ機能を有するHTSのリソースの最適な制御技術の確立

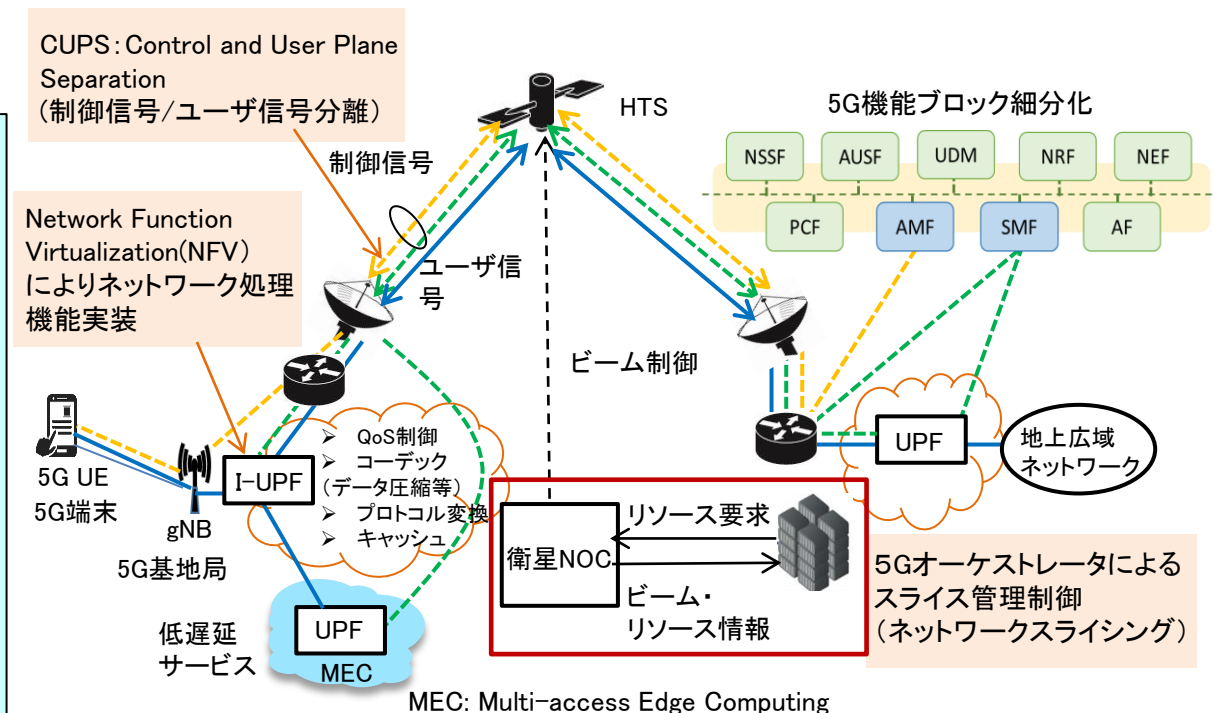
課題ア-2 衛星-5G接続方式検討及び開発

技術課題: 衛星と地上網の接続には、**衛星区間の遅延**(約500msec)、衛星と地上網の**伝送速度差**(約100倍)、**通信プロトコルの違い**によって、**実効伝送速度の低下や通信断**が発生する課題がある。

実現手法

5G新技術により課題を解決をする

- ① **CUPSと機能ブロックの細分化**
衛星と地上の高度なインテグレーションで、より柔軟なネットワーク設計を実現
- ② **ネットワーク仮想化機能(NFV)**
サービス・アプリケーションに応じ、データ圧縮、プロトコル変換、MEC機能を柔軟に適用
- ③ **ネットワークスライシング**
アプリケーションごとのリソース管理と適切なトラフィック制御の適用

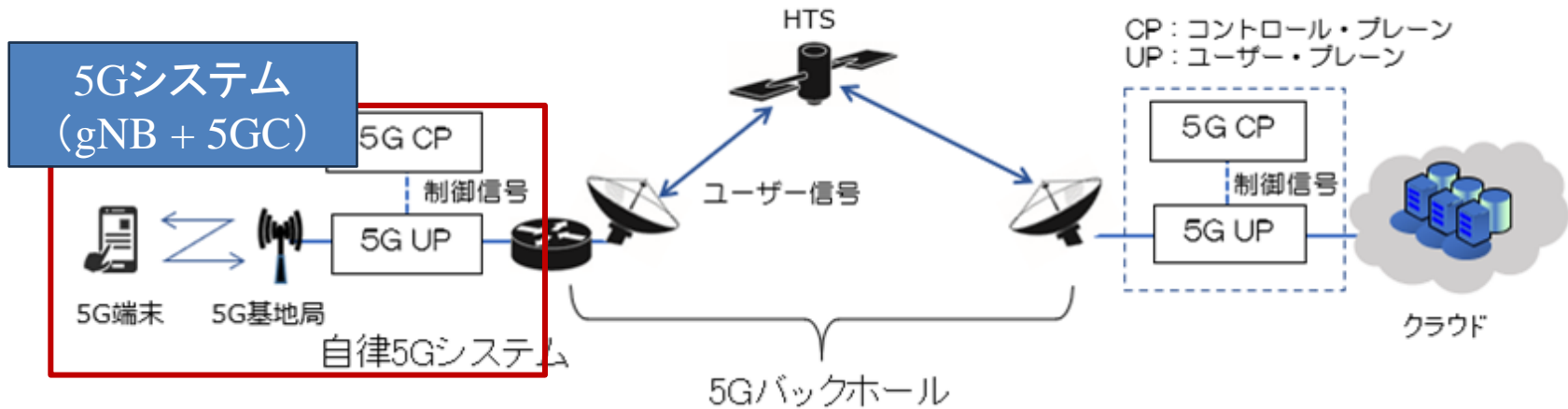


衛星-地上系連携接続の提案構成

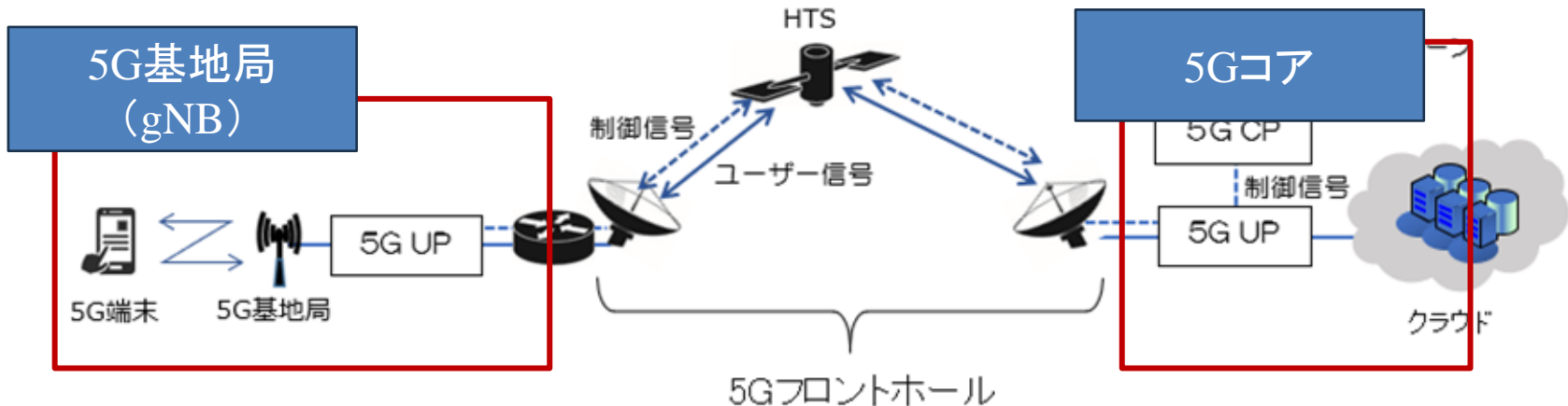
有効性: 5G新技術の適用により技術課題が解決・軽減され、多様なサービスの高効率なトラフィック収容と経済性の高いシステムの実現が可能となる。

5Gシステムと衛星通信システムの接続形態の検討例

- 衛星通信システムを**5Gバックホール**として使用する形態



- 衛星通信システムを**5Gフロントホール**として使用する形態



移動車両型の迅速展開かつ広域通信可能な通信システム

- ローカル5Gシステムと衛星通信システムの一体型システム
 - 山梨県との連携: 富士山で災害対策・減災活用を想定したローカル5Gシステムと衛星インターネットアクセスサービスを接続する技術実証に成功



小型ローカル5G実証機



衛星通信システム



移動車両型の迅速展開かつ広域通信可能な通信システム

- ローカル5Gシステムと衛星通信システムの一体型システム



<https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2022-11-25-002>

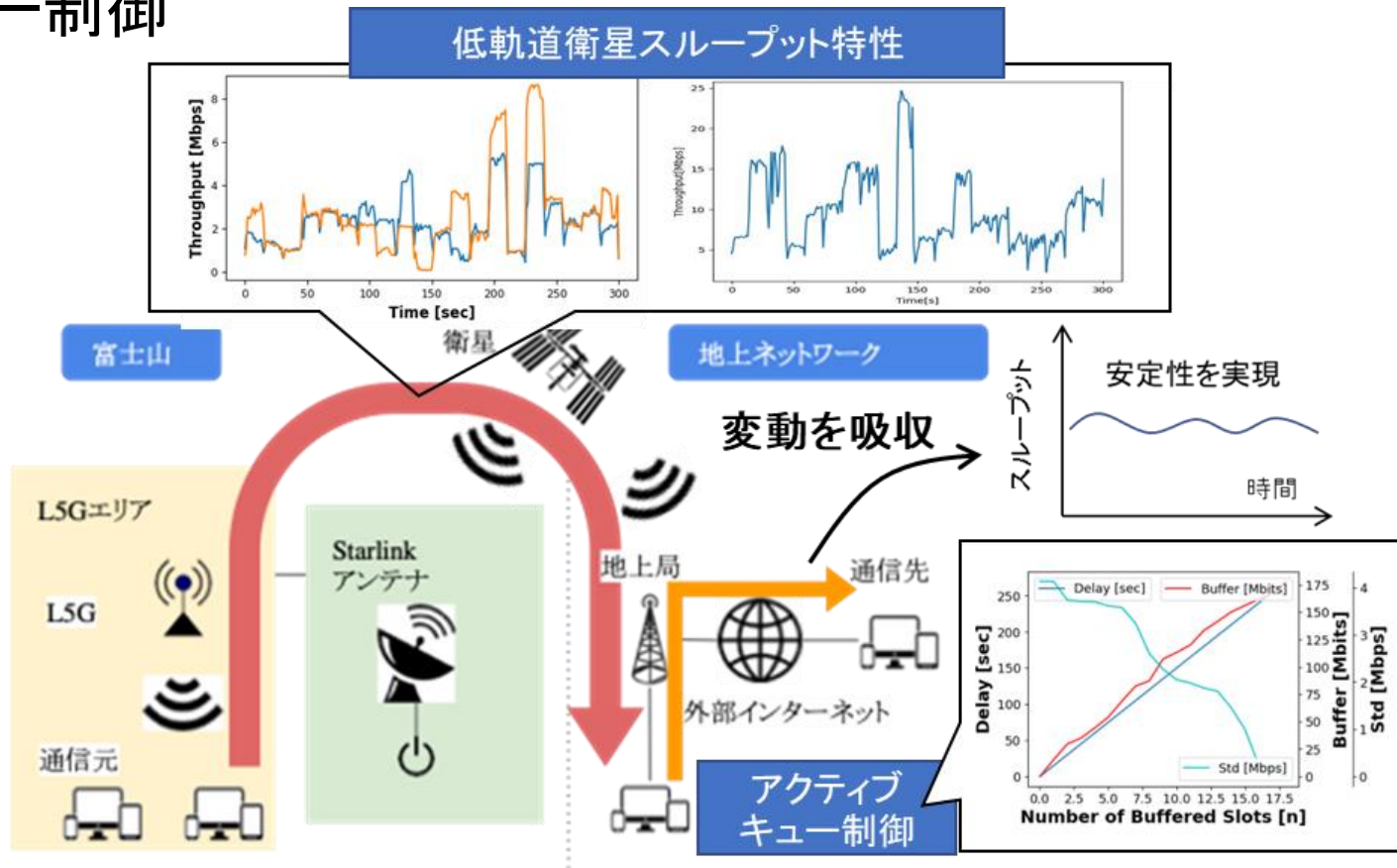
<https://businessnetwork.jp/article/11789/>

5Gシステムと衛星通信システムの効果的な 接続に向けた課題と目的

- **大きく異なる通信特性を持つ**5Gシステムと衛星通信システムによる実効伝送速度の低下や瞬断が発生する課題がある。
 - 伝送速度差(10 – 100倍)、通信遅延差(50 msec ~ 500 msec)
 - 静止衛星(GEO)、低軌道衛星(LEO)による通信特性差
- 多様なサービスの**高効率なトラフィック収容と経済性の高いシステム**を実現する
 - 検討内容の一例
 - 制御信号/ユーザ信号分離
 - MECを活用した柔軟なアプリケーション処理
 - 5Gと衛星通信区間のエンドツーエンドスライス(QoS、リソース制御)
 - GEO、LEOにおける通信特性把握(予測)
 - 転送効率化のための新たな通信プロトコル
 - GEOとLEOの適応選択(マルチオービット)

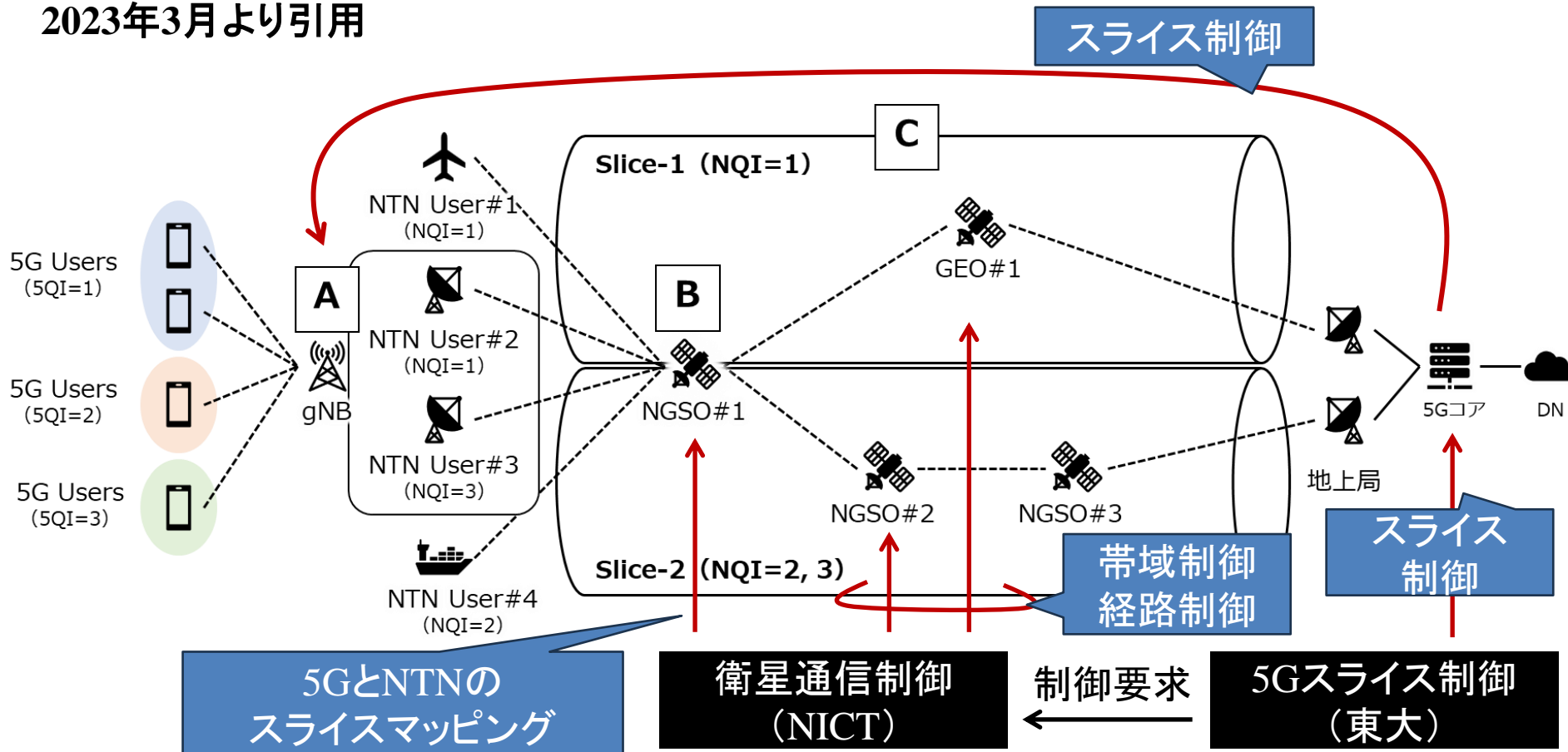
5Gシステムと衛星通信システムの効果的な接続

低軌道衛星通信の周期的通信品質変動などを補償するアクティブキュー制御



連携先のNICT側の取り組み ～衛星地上接続システムにおけるスライシング～

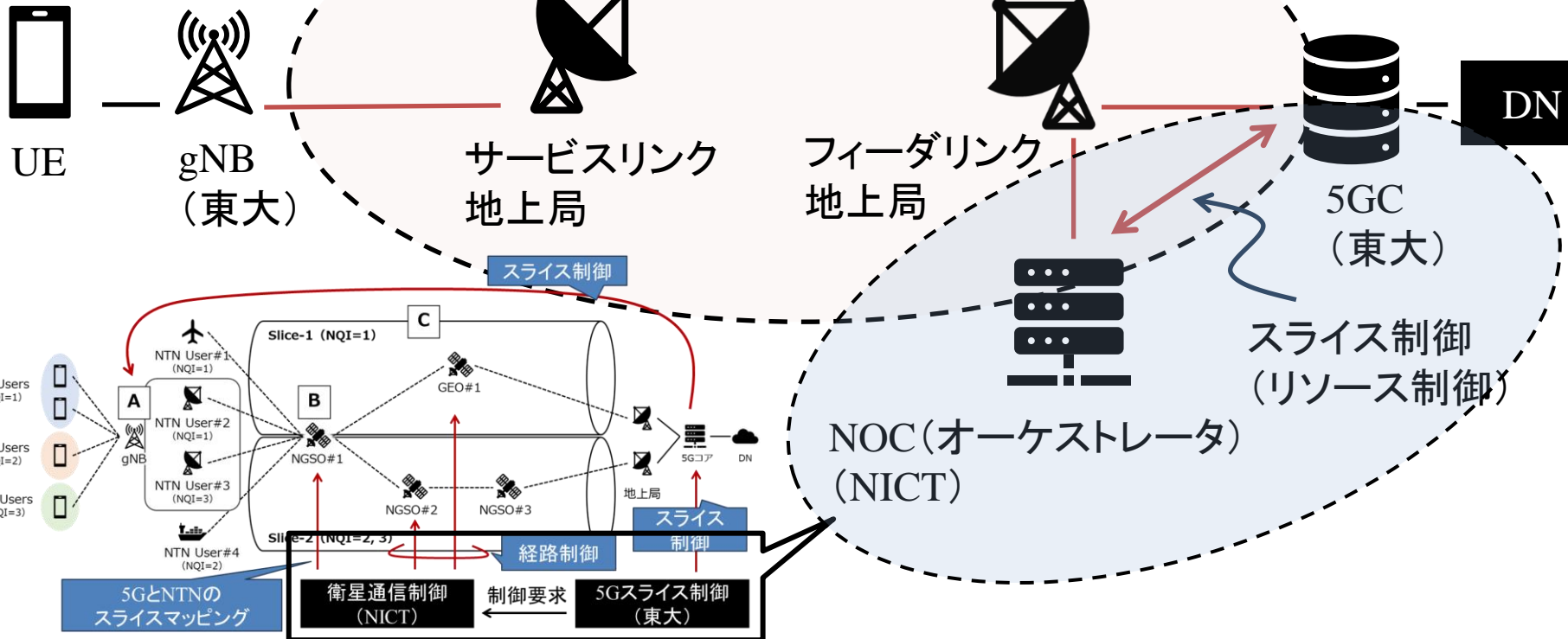
阿部, 関口, 三浦, “多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する
研究開発-衛星地上接続システムにおけるネットワークスライシングの検討-” 総合大会
2023年3月より引用



JGNを利用した衛星地上接続システムに向けたテストベッド

JGNを利用した
ETS-9テストベッド

ETS-9
模擬ノード



令和5年度電波資源拡大のための研究開発 「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御 に関する研究開発」

低軌道衛星(LEO)通信システム(Starlink)における通信 特性解析と改善に向けた検討

- 鈴木彩音、金井謙治、中尾彰宏、“富士山におけるローカル5Gとの接続に向けた低軌道衛星通信の通信品質評価” IN研究会 2023年8月
- 鈴木彩音、金井謙治、中尾彰宏、“低軌道衛星コンステレーションにおけるTCP通信品質解析と評価” NS研究会 2023年9月

研究課題① ~低軌道衛星(LEO)における通信品質の把握~

ローカル5G(L5G)とLEOを効果的に接続するためには、

双方の通信品質や制御の違いなどを考慮した通信品質制御(QoS制御)のため、

双方の品質特性の把握が必要だが、特に**LEO**における通信品質特性の把握は不十分

[先行研究]

- 評価地域を欧米と限定的
- 時系列分析などを含んだ詳細な通信品質特性を評価した例は少ない
- 所属する研究室での先行研究では富士山にてL5GシステムとStarlinkの接続性を検証したが、詳細な通信品質の評価・分析には至っていない[6]

研究課題② ~LEOにおけるTCPにおける通信品質の劣化~

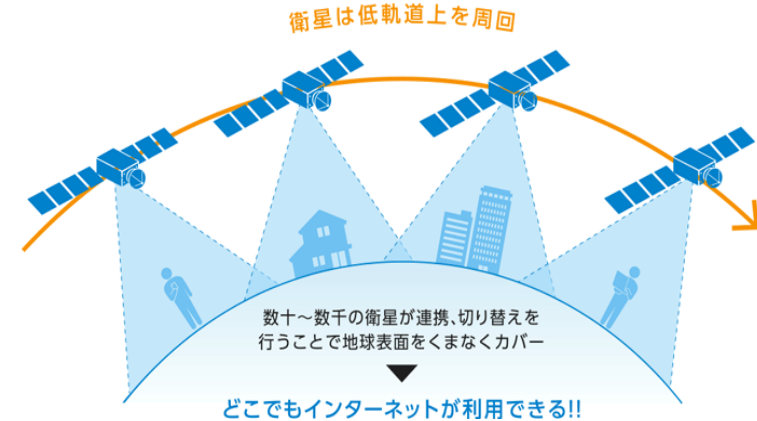
- LEO環境におけるTCP通信時に、UDPと比較して大きく通信性能を劣化させている点について、詳細な解析までは実施されていない。



- **TCP通信時**の詳細な特性評価は、地上通信・LEOの接続に向け重要である。
- 多くのアプリケーションは、TCP(特にCUBIC)上で動作している
- アプリケーションの変更は多大なコストが伴うことから、**TCPの最適化**を行う必要がある

研究目的

- LEOに代表されるStarlinkの通信品質評価を**短期間の周期性に着目した**詳細な分析を行い、その通信品質特性を明らかにする
- Starlink利用時の**CUBIC輻輳制御の課題点**を示す
- CUBIC輻輳制御の改善により期待される初期性能改善効果を示す
- QoS制御の一例として得られた通信品質特性に基づくバッファ制御の初期検討を行う
- 今後、上記にて明らかにしたCUBIC輻輳制御の課題点を解決可能な新たな輻輳制御を提案していく



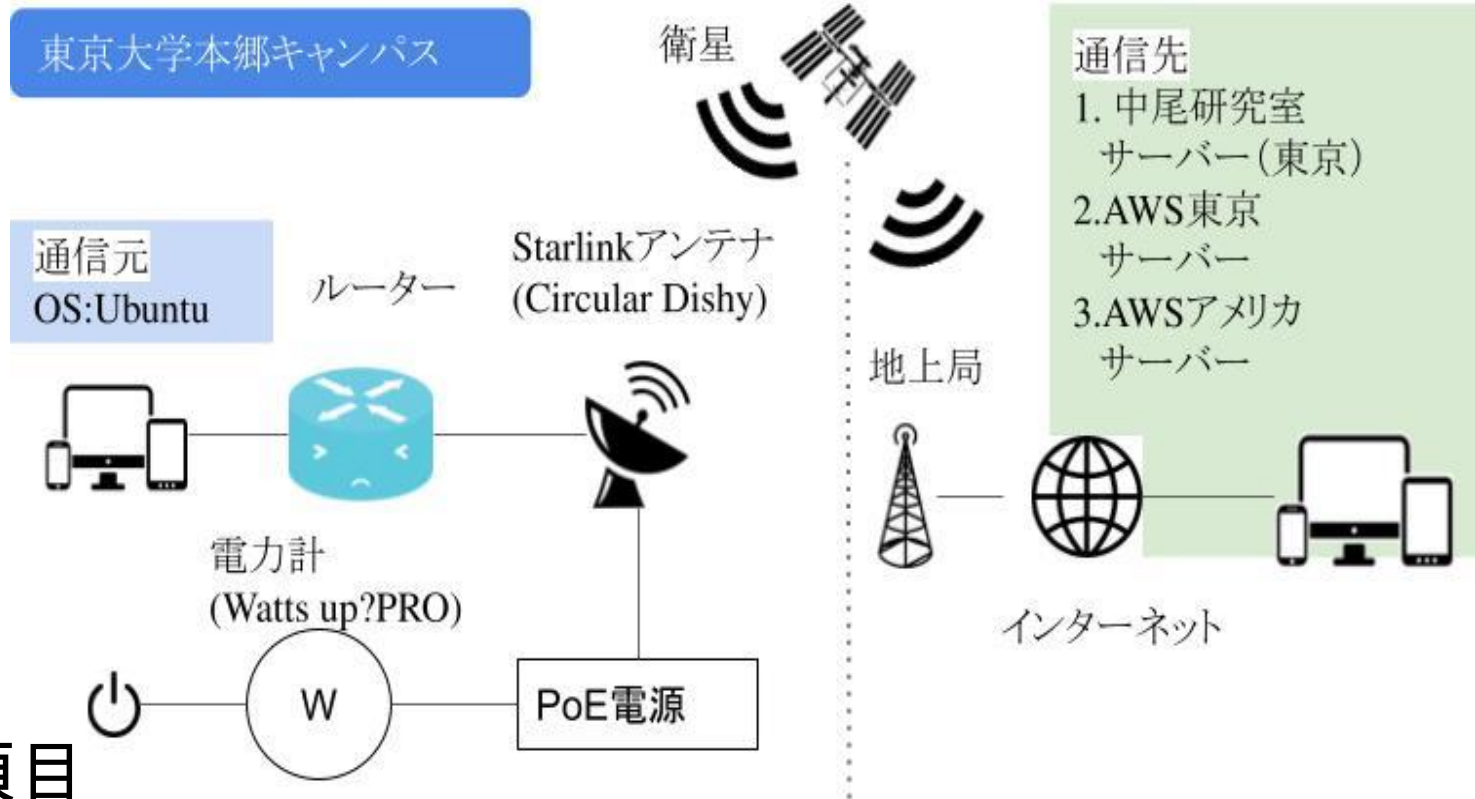
出典: TDSC「通信衛星の種類-低軌道衛星」
<https://www.planet-net.jp/blog/column0003/>

本研究の貢献

- Starlinkの通信品質特性が**15秒の周期性**で変動している点を明らかにする
- 上記の通信品質の**周期変動がTCP(特にCUBIC)へ与える課題**を示す
 - 周期境界にてRTTおよびパケットロスが増大する点
 - CUBIC輻輳制御が有効に機能しない点
- 通信品質の周期変動を考慮した初期**CUBIC改善手法による期待される改善効果**を定量評価する
- Starlink特有の通信品質変動の周期性に着目したバッファ制御を考案しL5Gと衛星通信の効果的な接続のためのQoS制御実現に向けた初期考察を示す

評価手法 ～評価実験と評価項目～

評価実験

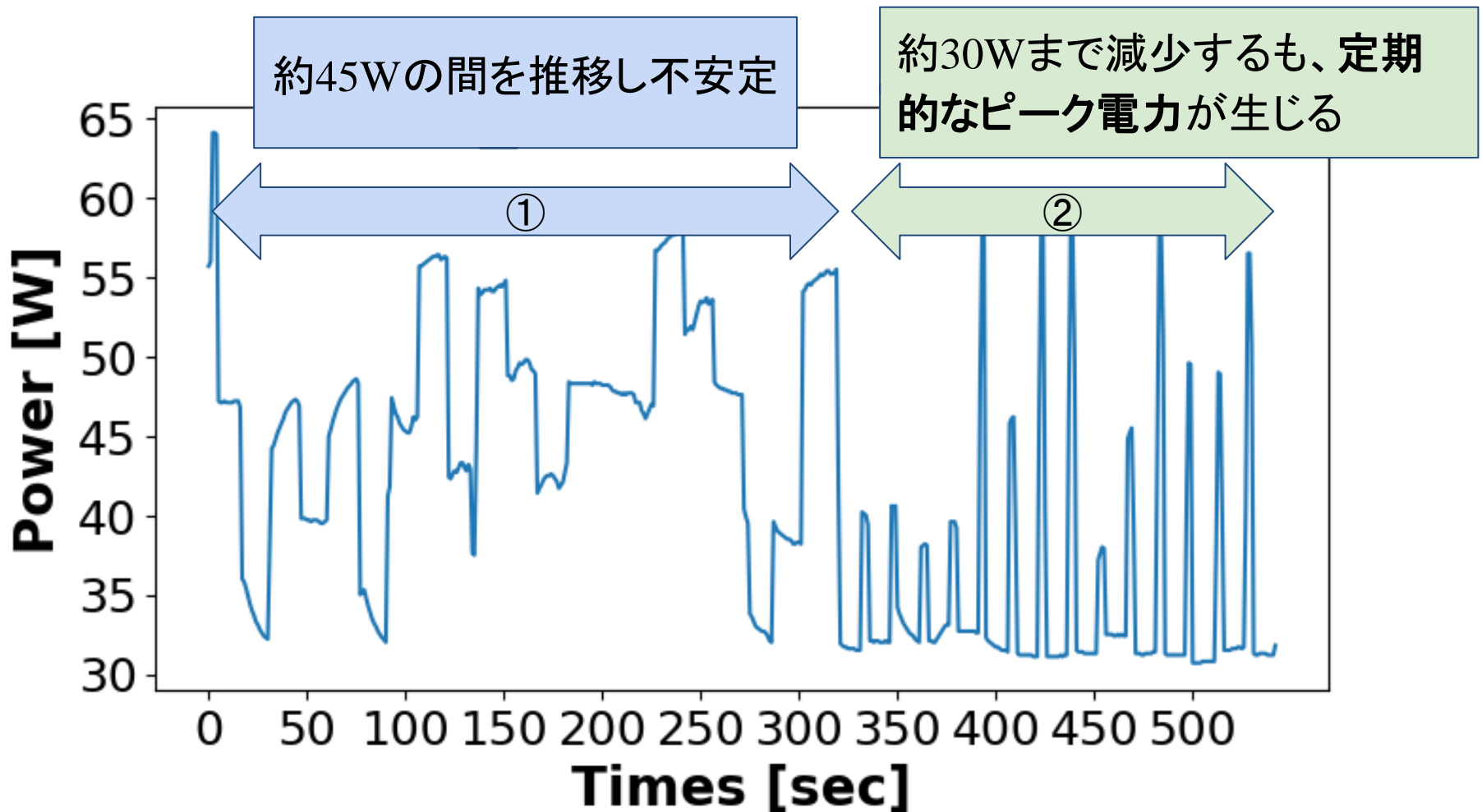


評価項目

- ・ pingによる往復遅延 (RTT)
- ・ 消費電力 (従量/定常電力)
- ・ iperf3による上下方向のTCP/UDPスループット

評価結果 ～定常電力特性～

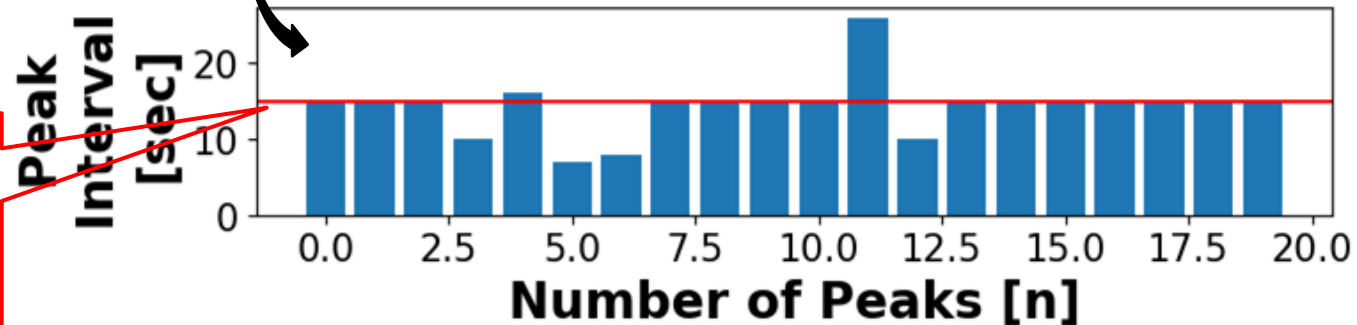
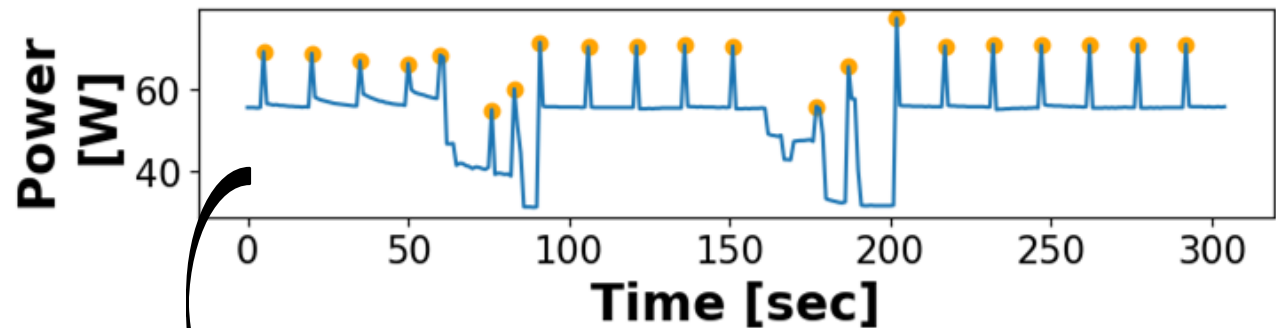
データ送受信以外の処理が定期的が発生



評価結果 ～定常電力特性～

ピーク電力から周期性を定量評価

1. ピークを抽出
2. その間隔を分析



大部分において、
ピーク間隔が15秒と
なる

Starlinkアンテナと衛星が通信を維持するための制御メッセージを定期的(15秒間隔)に送受信していることが推察される

評価結果 ～UDPスループット特性～

2つのアンテナのスループット変動タイミングが一致

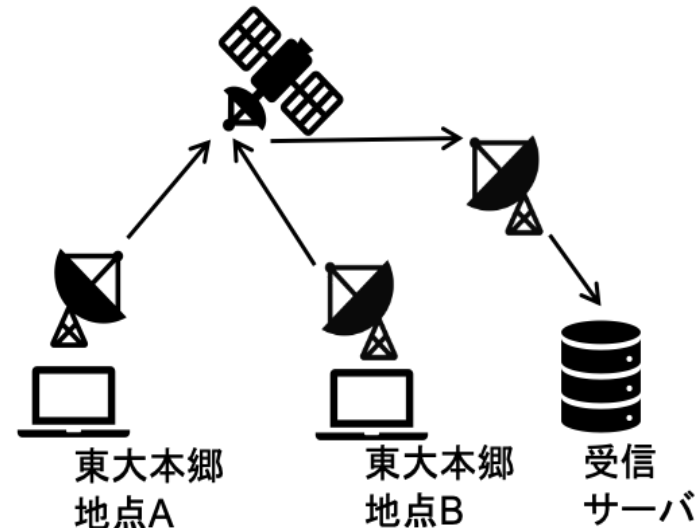
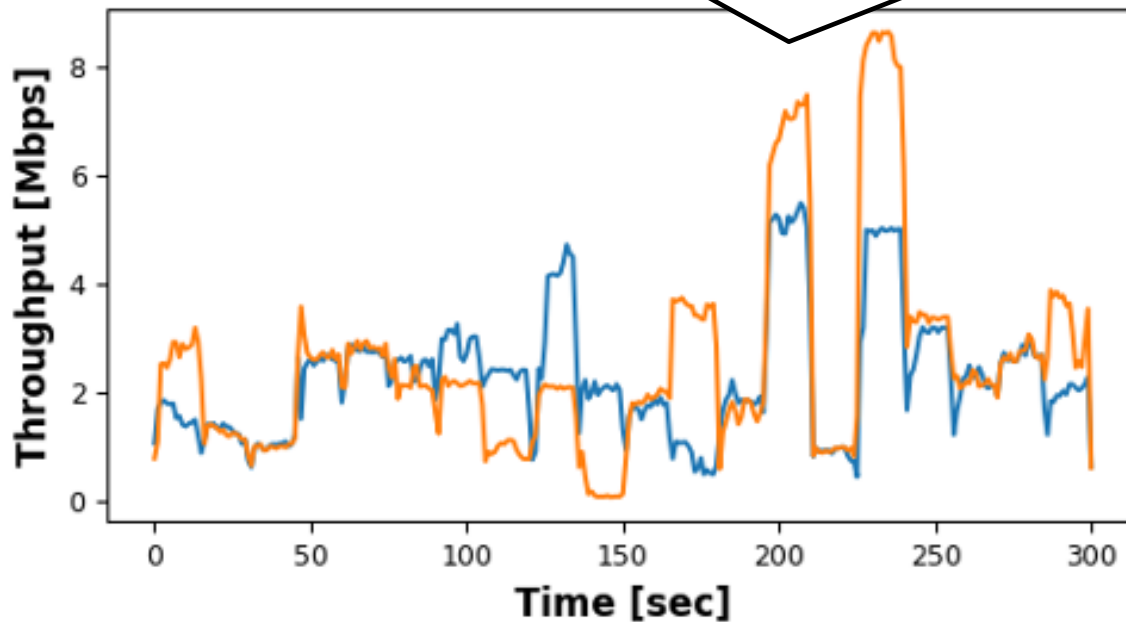
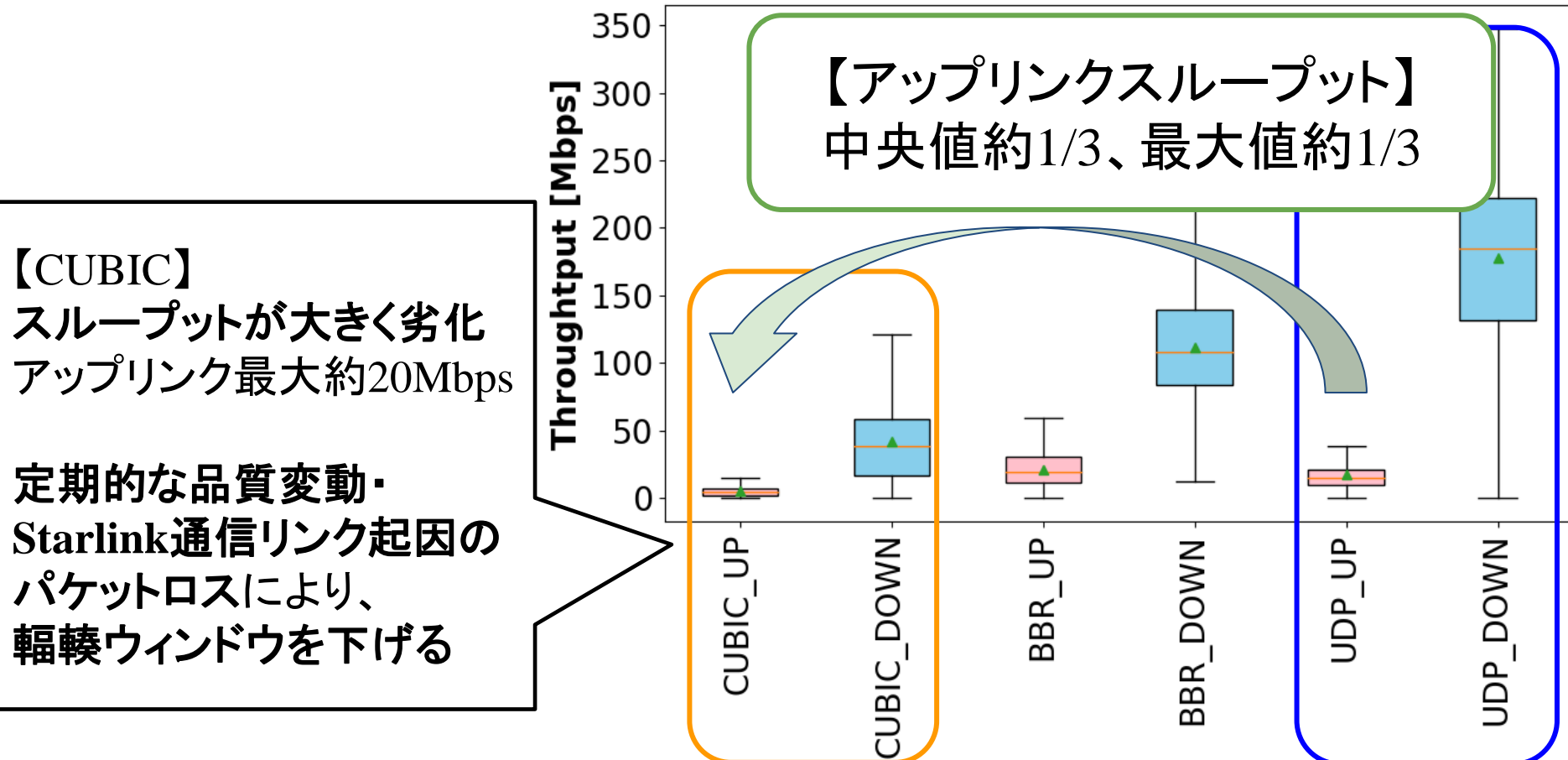


図 UDPスループット変動※輻輳制御・再送制御の影響を除外

- スループットは一定の周期性に従い、ステップ状に変動
- Starlinkの通信制御は一元的に同期されている

評価結果 ～スループット特性～ [5]

多くのアプリケーションが、TCP(特にCUBIC)通信であることから、CUBICの特性に注目する[5]

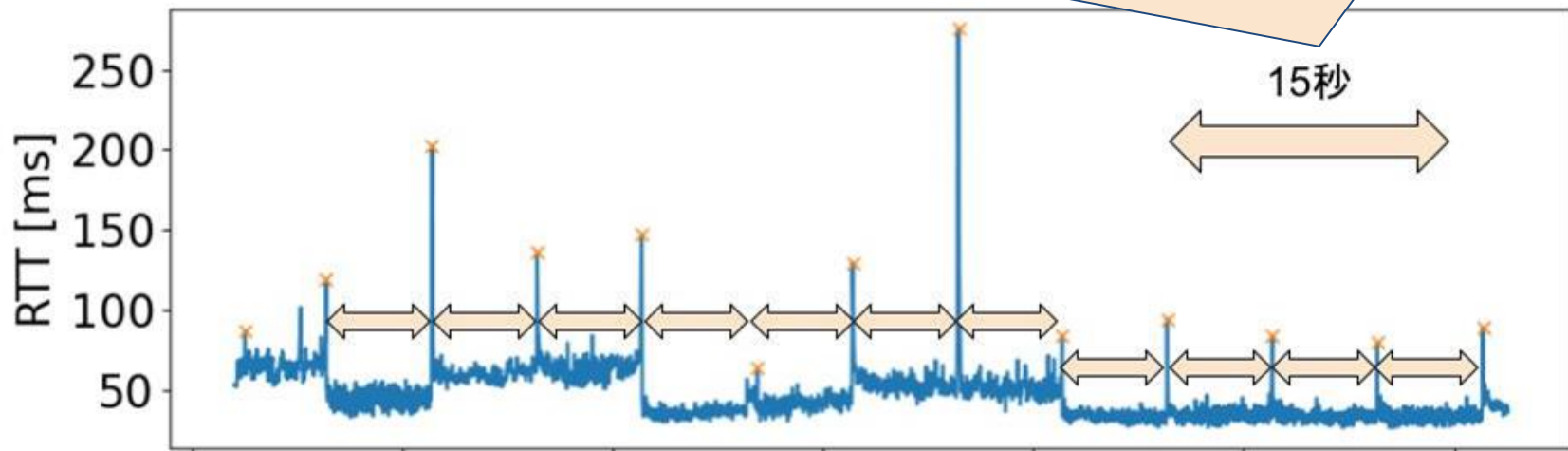


[5] 鈴木彩音, 金井謙治, 中尾彰宏, “富士山におけるローカル 5G との接続に向けた低軌道衛星通信の通信品質評価”, 信学技報, vol. 123, no.148, IN2023-26, pp. 52-57, 2023 年 8 月.

評価結果 ～遅延特性～

ピークが15秒の間隔で出現

※ 先行研究で明らかにしたStarlinkの通信品質特性の変動周期と一致[5]



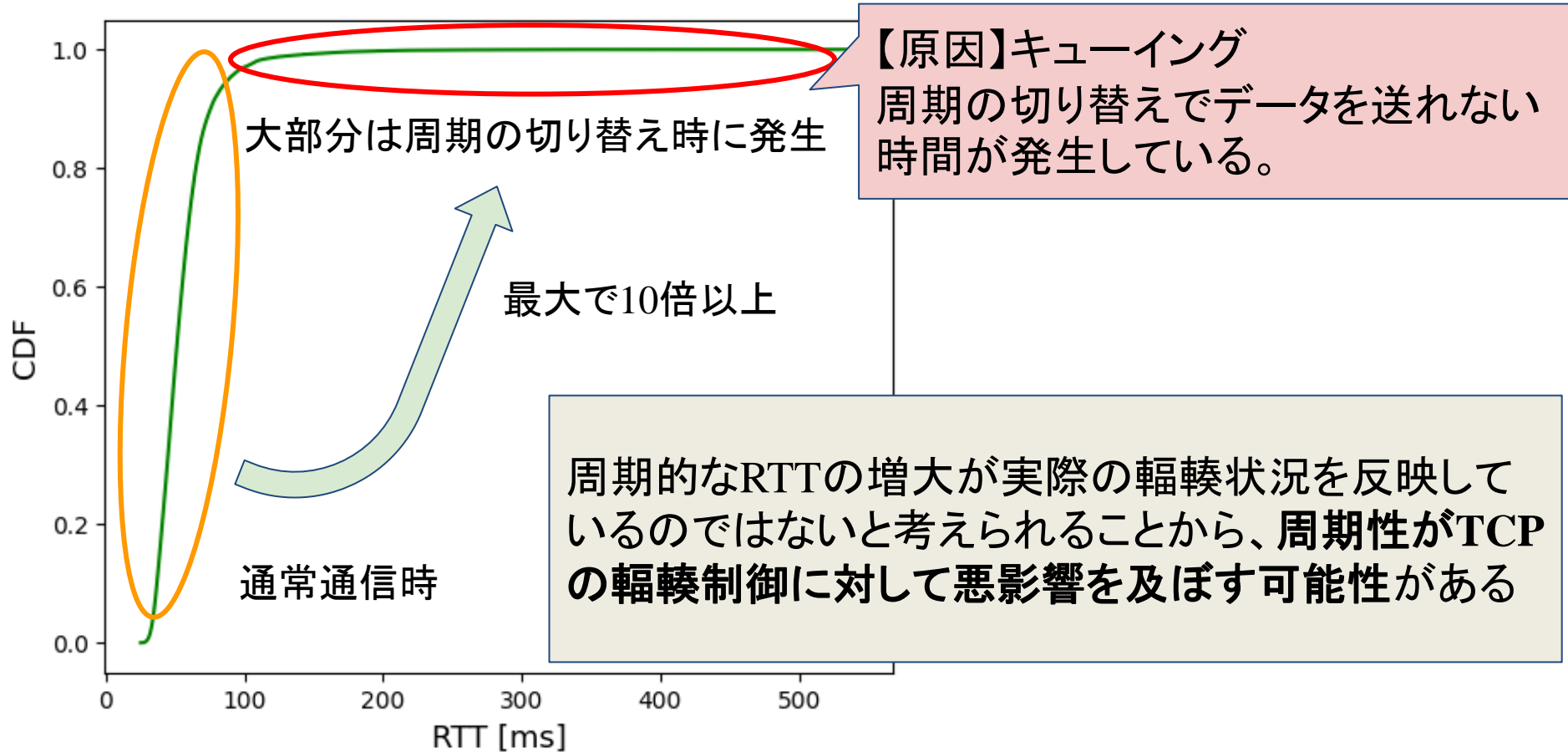
周期性に関して世界中で同様な結果[7]が明らかにされつつあり、大規模な観測が行われようとしている。

Starlinkの通信品質特性が持つ周期性は、普遍的な現象といえる。

[5] 鈴木彩音, 金井謙治, 中尾彰宏, “富士山における ローカル 5G との接続に向けた低軌道衛星通信の通信品質評価”, 信学技報, vol. 123, no.148, IN2023-26, pp. 52-57, 2023 年 8 月.

[7] J. Garcia, et al., “Multi-Timescale Evaluation of Starlink Throughput”, LEO-NET 23

評価結果 ～遅延特性～



CUBIC輻輳制御の解析 ～解析概要～

- ① Starlink特有の周期に着目することで、帯域を効率的に活用できていないことを明らかにする
- ② ①の解析に基づき、低軌道衛星コンステレーションにおけるCUBIC輻輳制御の課題を整理する
- ③ 周期境界の packet loss に対し、理想的にCUBIC輻輳制御が機能した際の改善効果を定量評価する
 - ※ 輻輳ウィンドウの減少が、全てStarlink起因であり、かつ競合フローが存在しないという仮定

CUBIC輻輳制御の解析 ～解析概要～

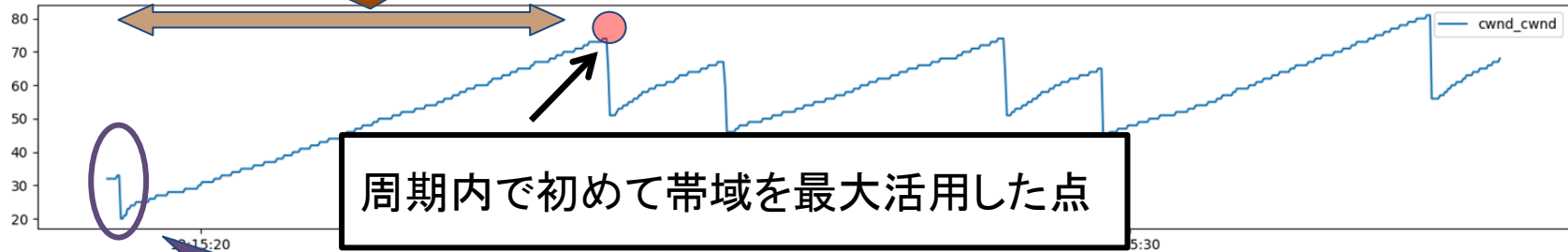
- ① Starlink特有の周期に着目することで、帯域を効率的に活用できていないことを明らかにする
- ② ①の解析に基づき、低軌道衛星コンステレーションにおけるCUBIC輻輳制御の課題を整理する
- ③ 周期境界の PACKET ロスに対し、理想的にCUBIC輻輳制御が機能した際の改善効果を定量評価する
 - ※ 輻輳ウィンドウの減少が、全てStarlink起因であり、かつ競合フローが存在しないという仮定

CUBIC輻輳制御の解析 ～解析手法～

【輻輳ウィンドウの増加特性】

周期内での帯域最大化に要する時間に着目

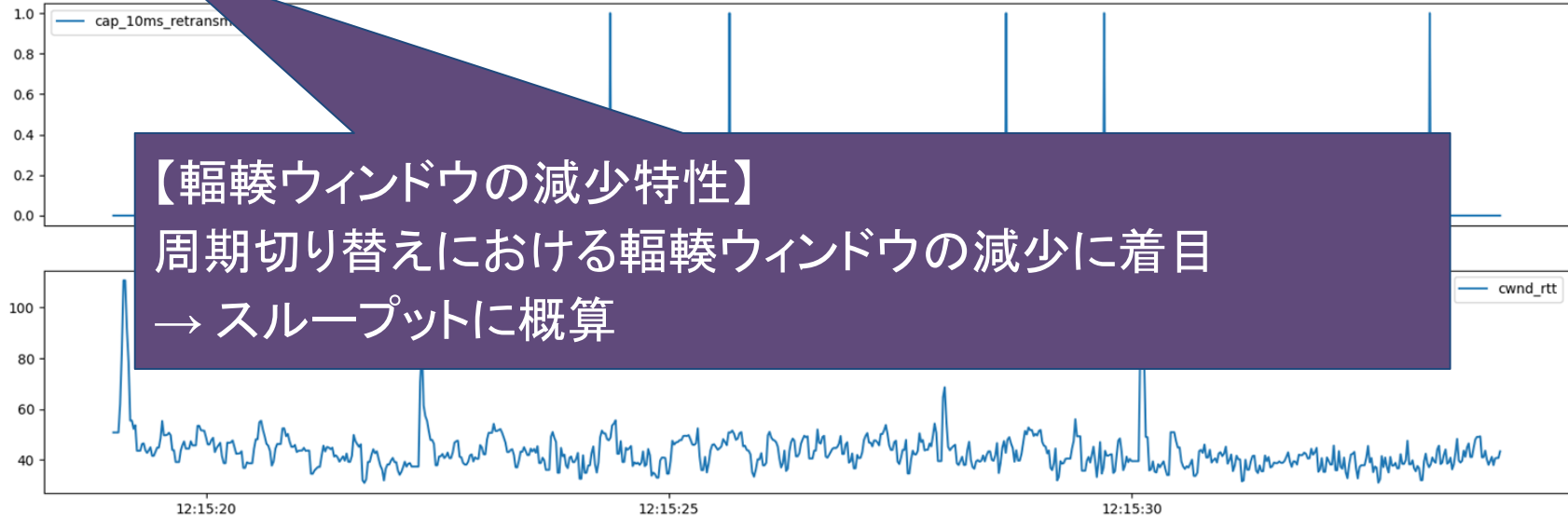
1スロット(15秒)



【輻輳ウィンドウの減少特性】

周期切り替えにおける輻輳ウィンドウの減少に着目

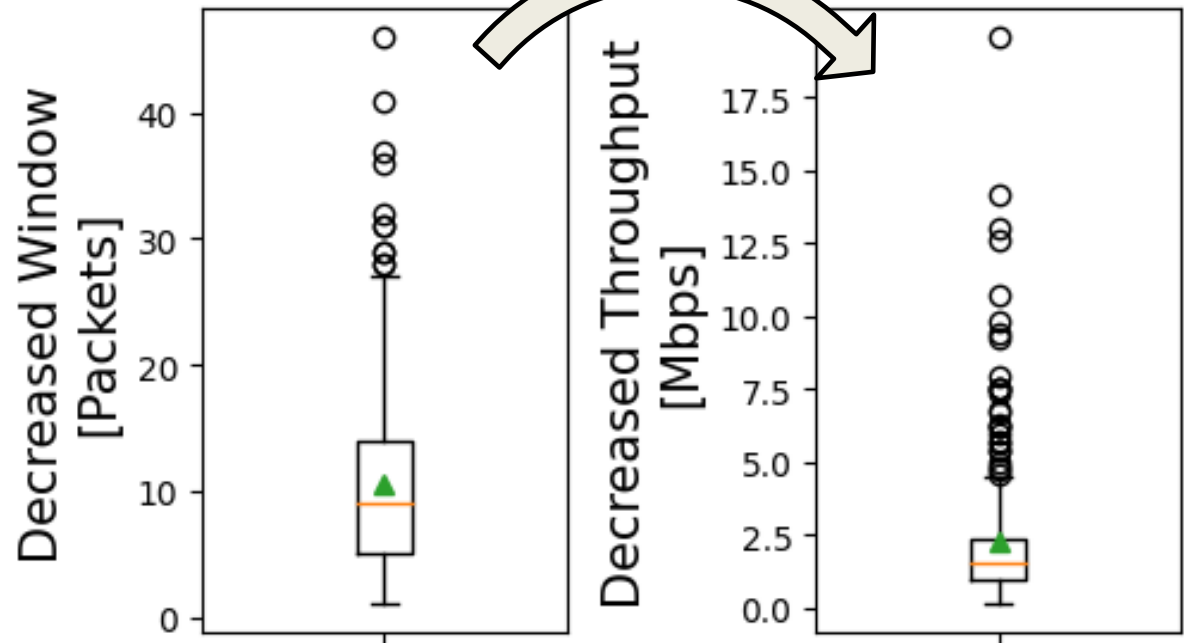
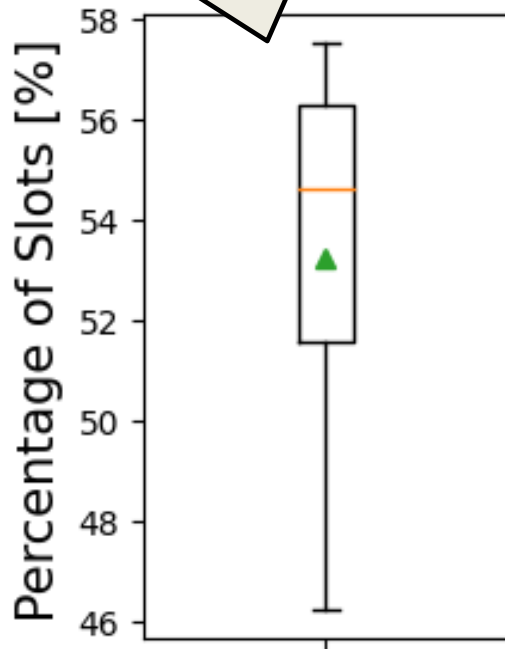
→ スループットに概算



輻輳ウィンドウの減少特性 ～評価結果～

5割以上のスロットにて、スロット切り替わり時に輻輳ウィンドウが減少

スループット損失の概算値は中央値2Mbps以上、最大値5Mbps以上
CUBICスループットの1/4以上に相当

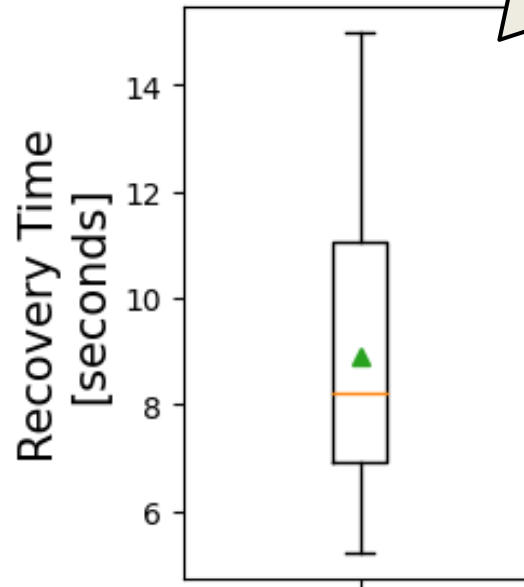
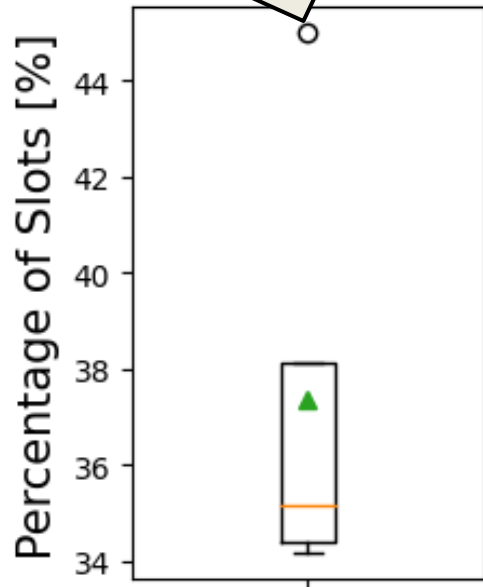


必要に応じて輻輳ウィンドウの減少を抑えることで、さらにスループットを向上させる余地がある

輻輳ウィンドウの増加特性 ～評価結果～

3割のロットにて、**5秒以上**の時間を要する

輻輳ウィンドウの最大化にかかる時間は、中央値**8秒以上**



可用帯域の利用効率が低い
(原因)

1. 周期の切り替えにおける輻輳ウィンドウの減少
1. 衛星リンク起因の packet loss
2. RTTが大きいことにより、輻輳ウィンドウの更新が遅い

CUBIC輻輳制御の解析 ～解析概要～

- ① Starlink特有の周期に着目することで、帯域を効率的に活用できていないことを明らかにする
- ② ①の解析に基づき、低軌道衛星コンステレーションにおけるCUBIC輻輳制御の課題を整理する
- ③ 周期境界の packet loss に対し、理想的にCUBIC輻輳制御が機能した際の改善効果を定量評価する
 - ※ 輻輳ウィンドウの減少が、全てStarlink起因であり、かつ競合フローが存在しないという仮定

LEOにおけるCUBIC輻輳制御の課題整理

輻輳ウィンドウの減少特性

- 5割以上のスロットにて、スロット切り替わり時に輻輳ウィンドウが減少
- CUBICスループットの1/4以上に相当するスループットを損失

輻輳ウィンドウの増加特性

- 3割のスロットにて、帯域最大化に5秒（スロットの1/3）以上を要し、その中央値は8秒以上

LEOにおけるCUBIC輻輳制御の課題整理

低軌道衛星コンステレーションにおける輻輳制御改善に向けた検討

- **通信品質モデル**の確立
 - 帯域幅・遅延・パケットロスなど
- 周期的に変動する**帯域の予測**
 - 周期ごとの帯域の増減など
- パケットロスの**発生要因の識別**による悪影響の抑制
 - 輻輳によるものか / 周期性に伴う品質変動によるものか
 - → 上記に基づき新たな輻輳制御戦略手法を検討中である
 - ex) 周期境界のパケットロスを意図的に無視する手法

CUBIC輻輳制御の解析 ～解析概要～

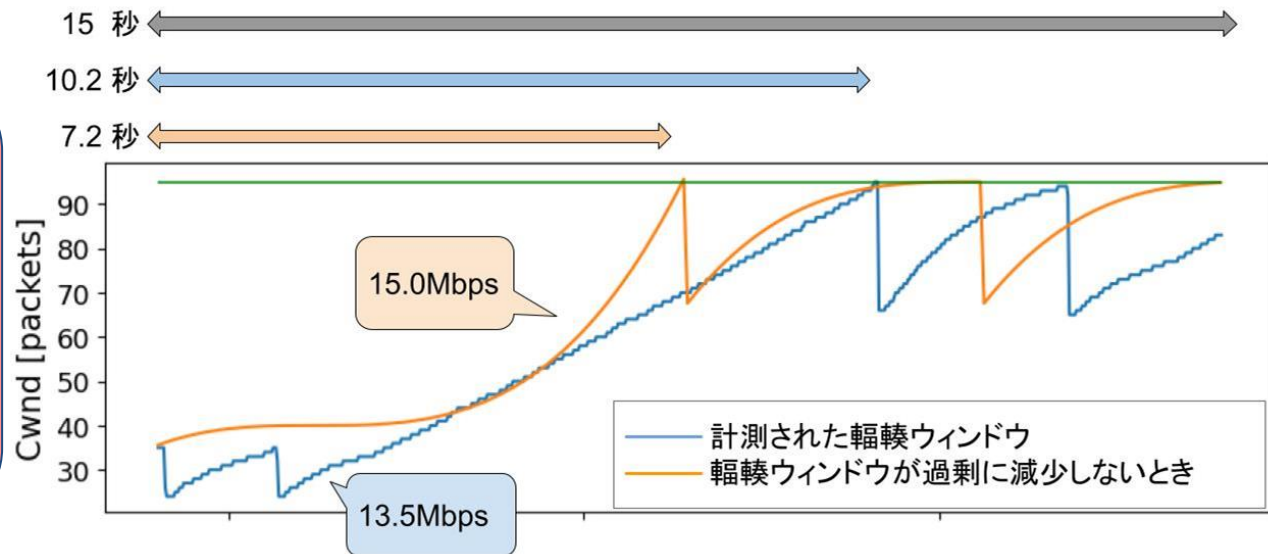
- ① Starlink特有の周期に着目することで、帯域を効率的に活用できていないことを明らかにする
- ② ①の解析に基づき、低軌道衛星コンステレーションにおけるCUBIC輻輳制御の課題を整理する
- ③ 周期境界の packet loss に対し、理想的にCUBIC輻輳制御が機能した際の改善効果を定量評価する
 - ※ 輻輳ウィンドウの減少が、全てStarlink起因であり、かつ競合フローが存在しないという仮定

CUBIC輻輳制御の改善に向けた検討

パケットロスの発生要因や周期境界を完全に識別できるという理想条件下にて、周期性に基づく通信品質特性の変化を考慮したCUBIC輻輳制御によって期待される改善効果を評価する

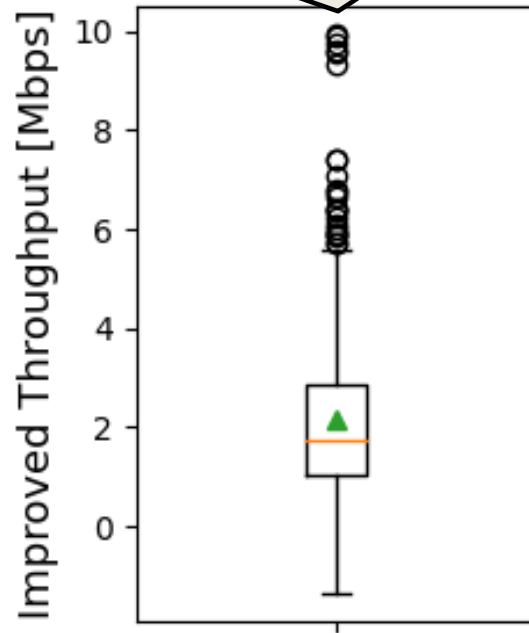
可用帯域の効率化

1. スループットの改善
2. 最大可用帯域到達までにかかる時間を短縮

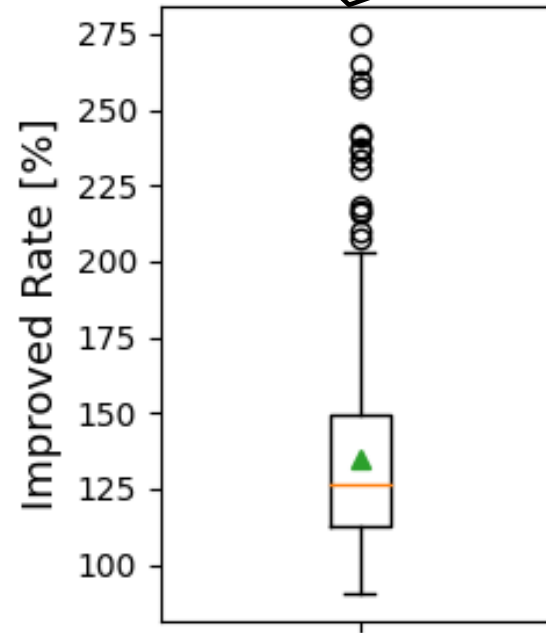


CUBIC輻輳制御の改善に向けた検討

中央値約2Mbps、**最大5Mbps以上**のスループット改善が見込める



改善率の中央値は**1.3倍以上**



通信品質の周期変動が確定的に把握できるという理想条件のもと、CUBIC輻輳制御に基づく理論算出によって、スループットの改善が期待できる

富士山研究所でのLEO通信品質測定環境



富士山研①



富士山研②



まとめと今後の予定

【まとめ】

- 令和5年度電波資源拡大のための研究開発
「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する研究開発」
 - 次世代ハイスループット衛星(HTS)通信システム「技術試験衛星9号機(ETS-9)」を活用した衛星通信システムと5G通信システムの接続に向けた検討
 - 低軌道衛星(LEO)通信システム(Starlink)における通信特性解析と改善に向けた検討

【今後の予定】

- JGNを利用した衛星地上接続システムに向けたテストベッドの構築および有用性を実証
- 富士山における衛星地上接続システムの実証

謝辞

本研究の一部は総務省電波資源拡大のための研究開発「多様なユースケースに対応するためのKa帯衛星の制御に関する研究開発」(JPJ000254) の助成を受けたものです。