

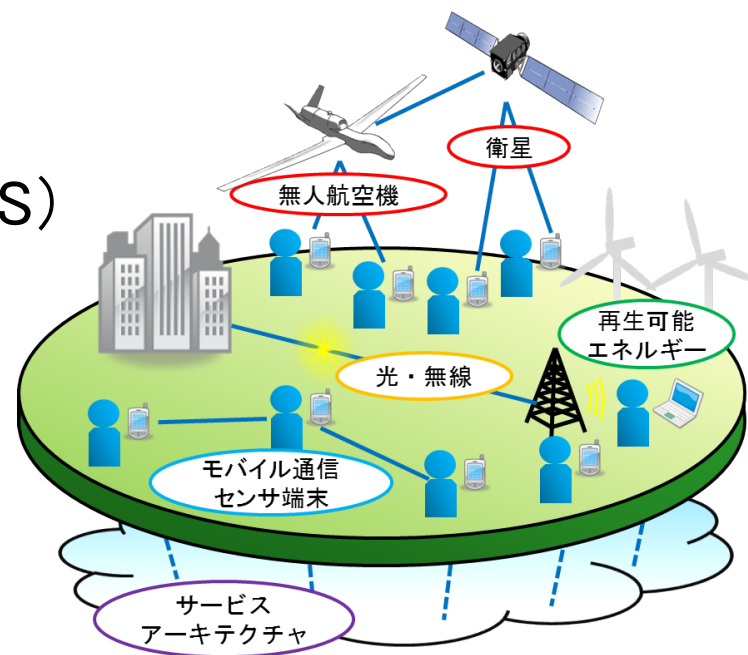


Beyond 5G 時代の 宇宙統合ネットワーク実現に向けた 研究開発の取り組み

東北大学 大学院情報科学研究科
川本 雄一

自己紹介

- 氏名：川本雄一
- 所属：東北大学 大学院情報科学研究科
- 役職：准教授
- 専門：情報通信技術（主に無線通信）
 - 衛星通信
 - 無人航空機
 - Intelligent Reflecting Surface (IRS)
 - アドホックネットワーク
 - etc.



全空間ユビキタス社会の到来

- 近年、世界的にICTの利活用が拡大
 - ➔ 発展途上国におけるネットワーク市場獲得を目指す企業が台頭
 - 全世界に地上通信網を設置するコストは莫大

安価に通信インフラの設置が可能な低軌道衛星コンステレーションに注目

- ◆ 低軌道に打ち上げた多数の小型衛星を連携させて運用する方式
 - 数百～数万機の衛星により通信インフラを設置
 - 地上通信網よりも安価に通信インフラの設置が期待
 - ➔ 極域を含めた世界全域を対象に高信頼・高速大容量通信の提供が可能
- ◆ 空域：HAPSやUAVによるネットワーク構築
 - ◆ 空飛ぶ車などの新たな通信対象も登場

近年の大規模衛星ネットワーク

- インターネットにアクセスできない“Other three billions”のための環境構築 → 長期的な収入源となる見込み
- 事業展開を目指す主な企業

会社名	衛星機数	サービス
Viasat	20	インターネット衛星通信
Kepler	140	IoT通信
LeoSat [操業停止]	108	高速ブロードバンド
SpaceX	30000+	インターネット通信
Telesat	117+	インターネット通信
OneWeb [破産]	648	インターネット通信
SES(O3b)	42	インターネット通信
Audacy [操業停止]	12	インターネット通信
Space Norway	11	北極圏インターネット
Boeing	1396~2956	インターネット通信
Theia Holdings	112	通信と地球観測
Amazon	3000+	インターネット通信

GAFA等もビジネスチャンスとして
低軌道衛星コンステに出資や
衛星事業の立ち上げを進めている

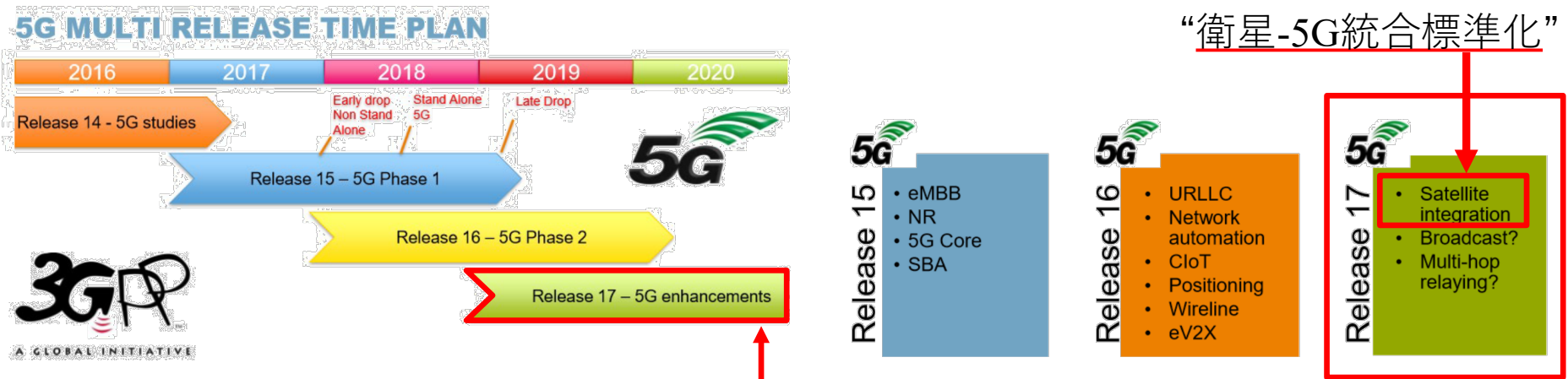
GAFAによる出資、事業展開

- Google
 - SpaceXへの出資、HAPS事業の立ち上げ
- Apple
 - iPhoneの常時接続化に向けて通信衛星の技術を開発中
- Facebook
 - 子会社にて人工衛星「Athena」を開発
 - SpaceXのStarlinkよりも10倍高速なインターネット環境を提供
- Amazon
 - Kuiper Systems
 - 高度590キロメートルに784機、610キロメートルに1296機、630キロメートルに1156機と3段階の低軌道に3236機の衛星
 - AWS Ground Station
 - 自然災害発生時に映像データ解析による救助活動
 - 船舶、航空機等が利用できる正確な天気予報の提供
 - 物流パターンを利用したビジネストレンド査定

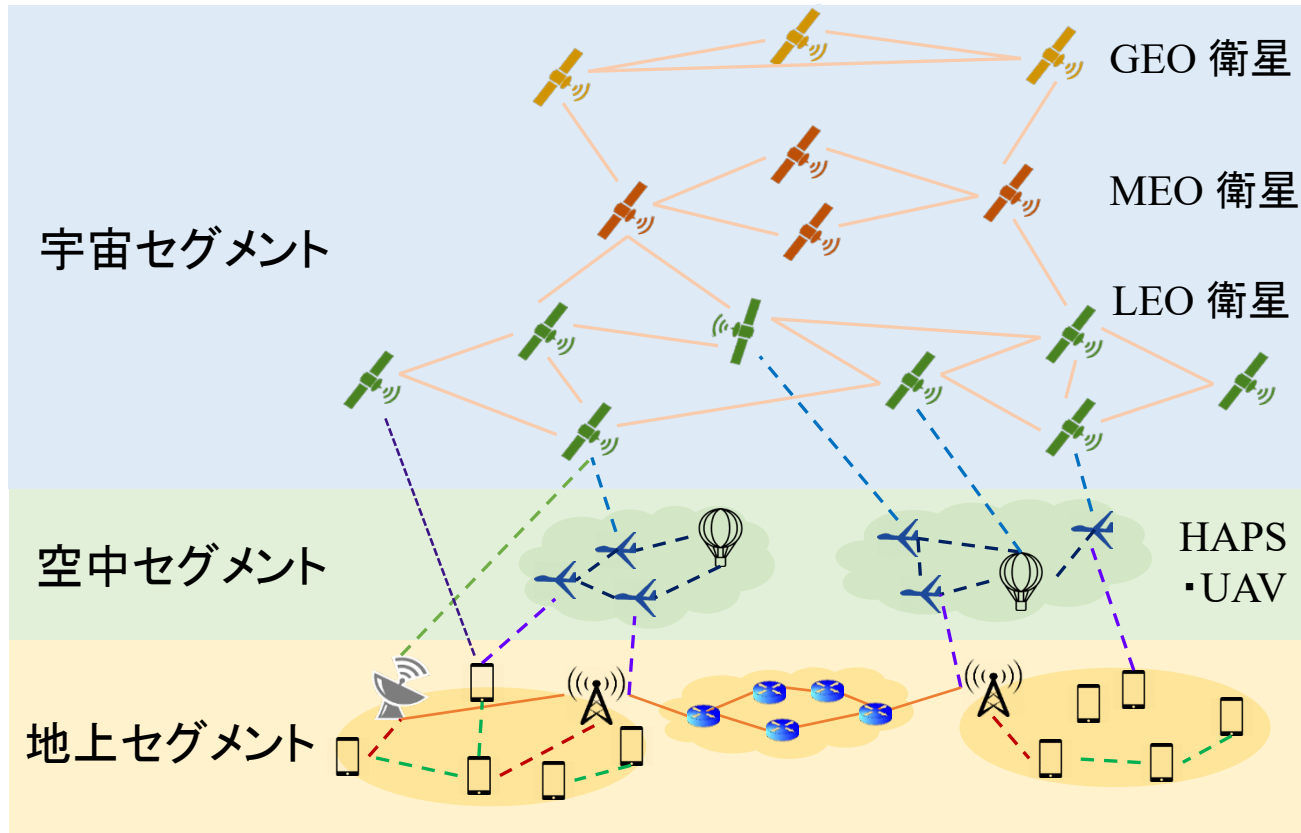
衛星通信と5Gの連携について(3GPP)

- 3GPP: 移動通信システムの国際標準仕様を策定する標準化プロジェクト
→ 2017年3月に衛星と5Gの連携に向けた標準化検討を開始
 - 衛星 (GEO, MEO, LEO) や成層圏プラットフォーム (HAPS) 等を統合させたネットワークを非地上系ネットワーク(NTN)とし, ユースケースやサービス要求, 接続アーキテクチャなどの様々な観点で標準化が進行中

今後, 衛星通信と5G・B5Gの連携は加速する見通し



■ 宇宙・空中・地上の3層で構成されるネットワーク



Jiajia Liu, Yongpeng Shi, Yongpeng Shi, Zubair Md. Fadlullah, and Nei Kato, "Space-Air-Ground Integrated Network: A Survey," IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 20, no. 4, pp. 2714-2741, Oct. 2018.

- 階層型衛星ネットワークというコンセプト
(1990年代に研究論文もすでにあった)
 - 輻輳回避のためのルーティング研究など
 - 別途HAPSのワードも

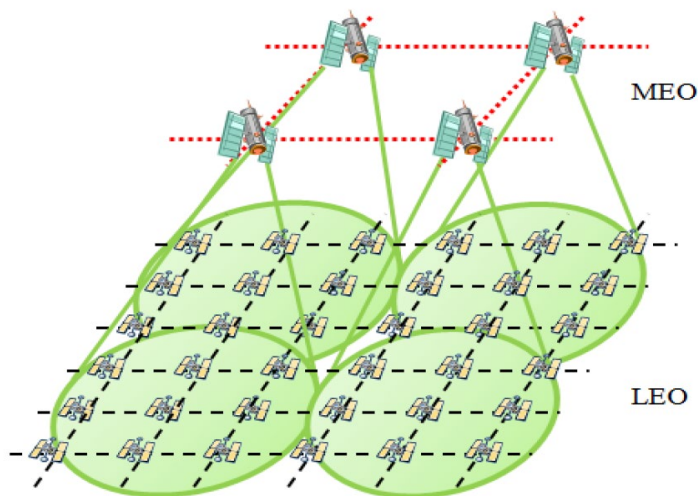


図1 階層型衛星ネットワーク

Yuichi Kawamoto, Hiroki Nishiyama, Naoko Yoshimura, and Nei Kato, "階層型衛星ネットワークの構成と通信遅延の関係に関する一考察," 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 111, no. 24, SAT2011-7, pp. 33-38, 2011年5月.

- その後, 無人航空機(UAV)ネットワークが注目され, 衛星との融合, 宇宙-空-地上への流れ

SAGIN実現に必要な技術と課題

■ SAGINの特徴

多層構造

複数システムの
連携

広い
カバレッジ

■ SAGINの実現に必要な技術

モビリティ
管理

ルーティング
制御

ネットワーク
制御

ハンドオーバ
制御

資源割当
スケジューリ
ング

エネルギー
管理

周波数帯域
管理

セキュリティ
保証

■ 実現のための課題

- モビリティ: どうやって動的なリソースの追跡を行うか
- ルーティング制御: どのアルゴリズム, 手順を選択するか
- 資源割当スケジューリング: どのリソースをいつ利用するか
- ハンドオーバ管理: どのリソースにハンドオーバを行うか

誰が？

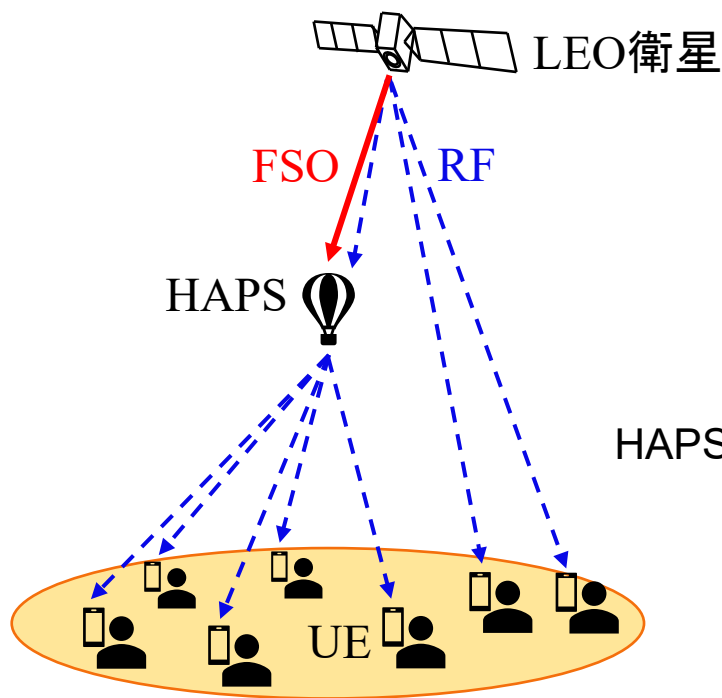
本日はご紹介する研究事例

- SAGINを構成する要素毎の研究
 - LEO衛星とHAPSのカバーエリア制御
 - 衛星間光通信における交差軌道間接続
 - LEO衛星 × IRS × 周波数プリズムによるマルチビーム制御
 - 光衛星通信 × 分散型グリーンデータセンタシステム



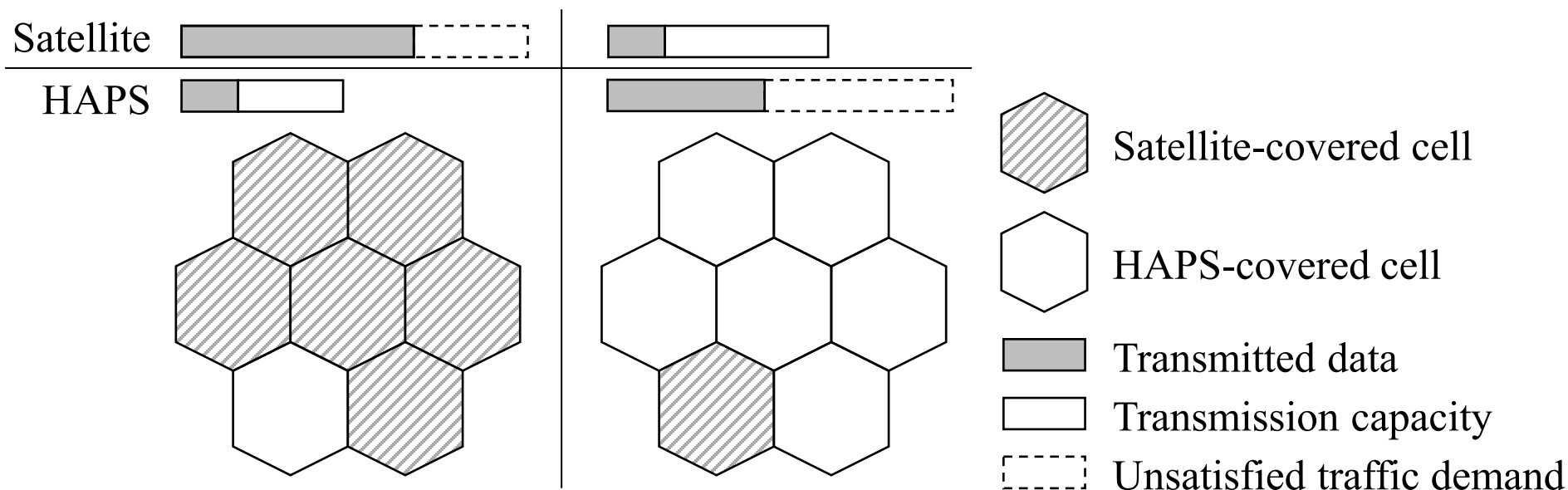
LEO衛星とHAPSの カバーエリア制御手法に関する検討

- HAPSを用いた宇宙-空-地上統合ネットワーク
 - FSO通信とRF通信の併用
 - 地上UEへのダウンリンクシナリオを想定



HAPS: High-Altitude Platform Station
FSO: Free-Space Optical
RF: Radio Frequency
UE: User Equipment
LEO: Low-Earth Orbit

- 複数UEへのダウンリンク経路選択
 - 既存研究では衛星から単一地上受信点までの経路に注目
 - エンドユーザである複数UEまでの経路決定手法は未構築
 - カバーエリアの偏りによる周波数利用効率の低下



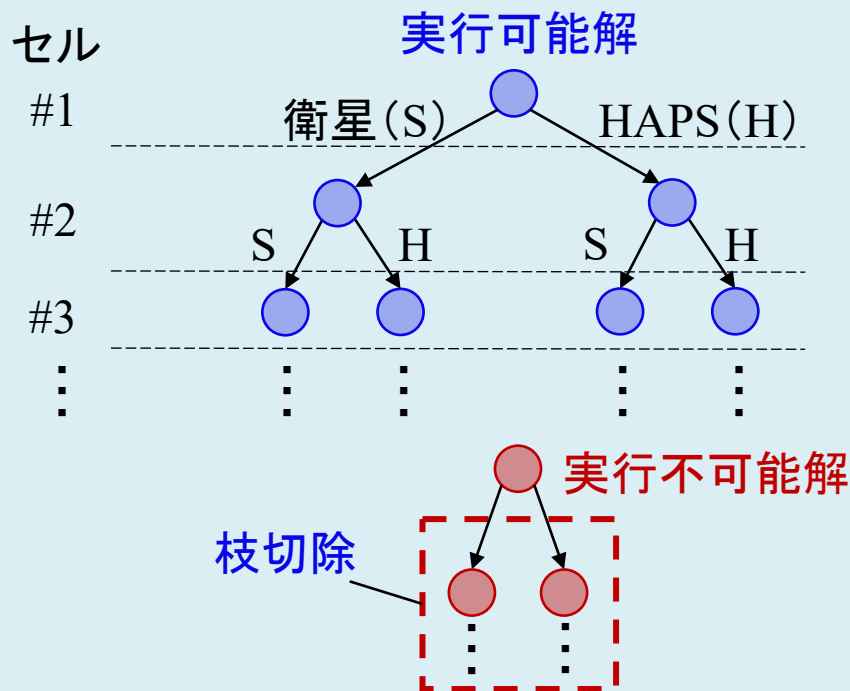
- LEO衛星/HAPSのカバーエリア制御手法
 - 周波数利用効率を最大化する制御パラメータの導出
 - 分枝限定法に基づく効率的な最適解探索手法

最適化問題の定式化

$$\mathbb{C}^{\text{opt}} = \arg \max_{\mathbb{C}} SE$$

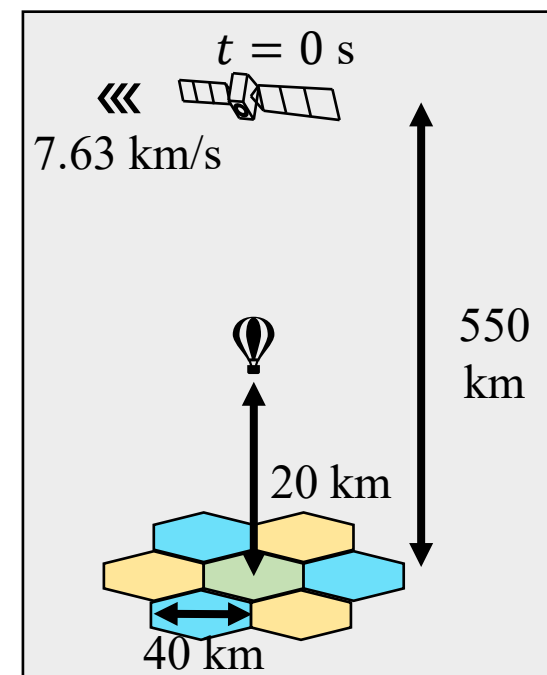
SE : 周波数利用効率
 $\mathbb{C}$: 各セルへの送信ノードと
割当帯域幅の組

解探索アルゴリズム



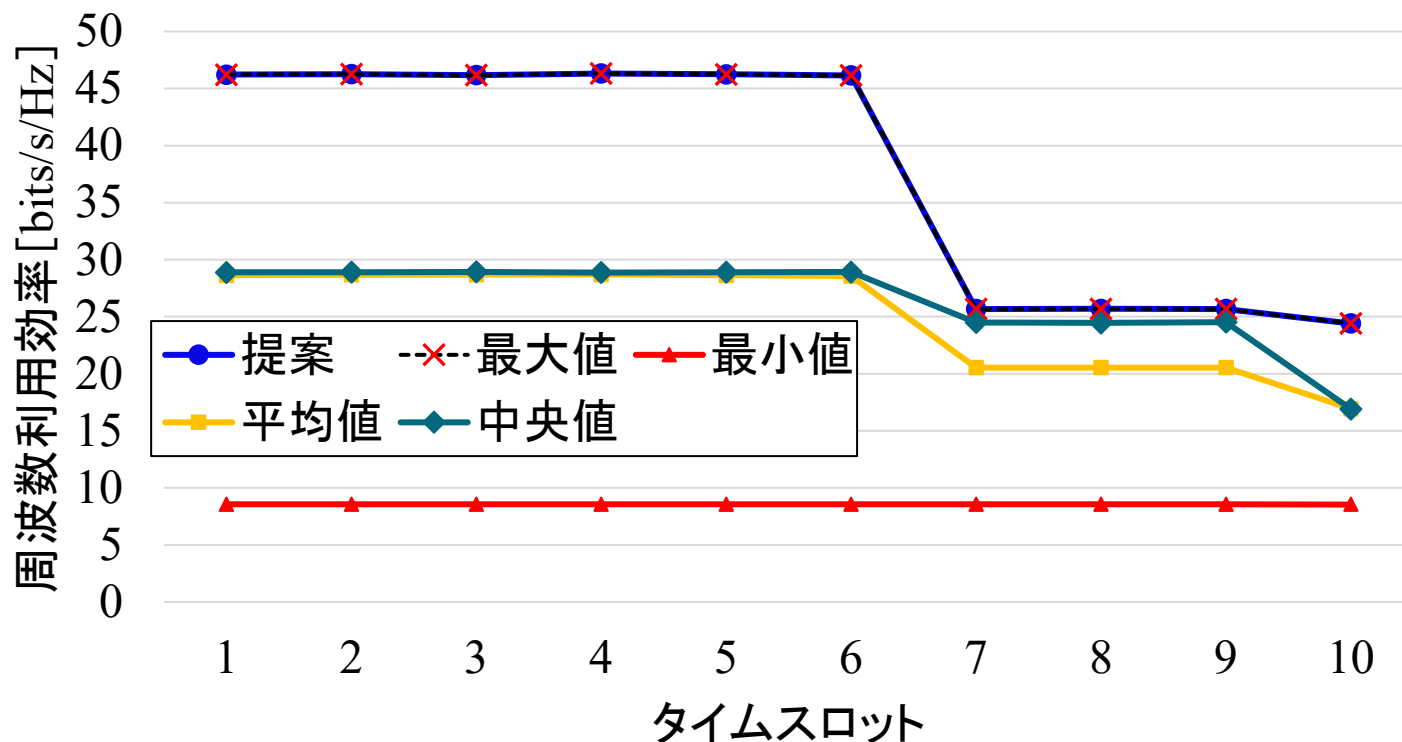
- 評価項目
 - カバーエリア制御による周波数利用効率への影響
- 評価環境
 - UEの位置とトラフィック要求量は一様分布
 - LEO衛星の初期位置はHAPS直上
 - 1タイムスロット(50秒)ごとに制御を実施
- 主要パラメータ

パラメータ	値
周波数	193THz(FSO), 2GHz(RF)
帯域幅	1GHz(FSO), 120MHz(RF)
トラフィック要求量	10-100Mbps/UE (一様分布)



評価結果

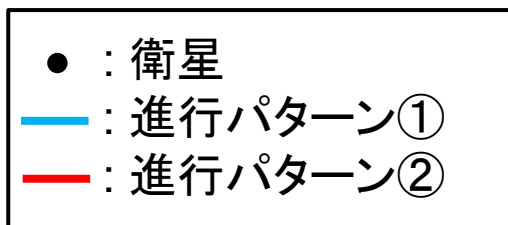
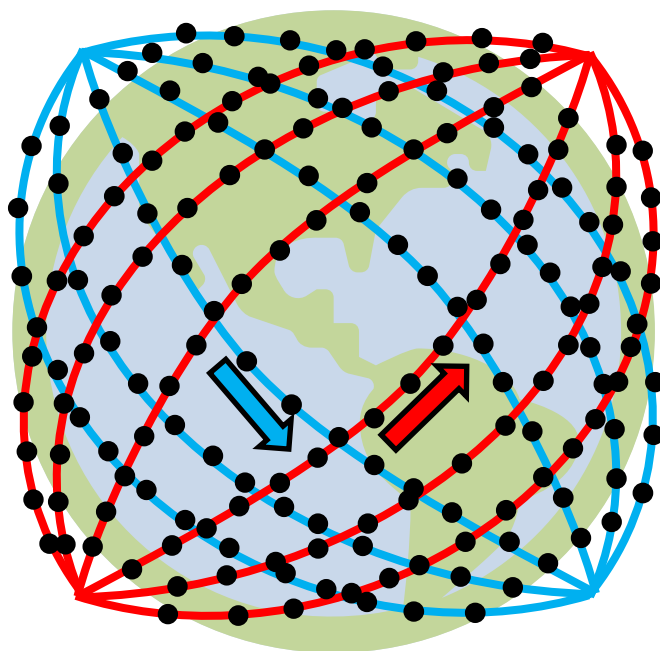
- LEO衛星1基, HAPS1基, UE100台のケースで評価
 - 提案手法により**最大の周波数利用効率を達成**
 - 衛星-HAPS間距離の増大に伴うFSO/RFリンクの性能低下を確認





衛星間光通信における ポインティングエラー発生確率に基づいた 交差軌道間接続選択に関する検討

- 多数のLEO衛星で構成したコンステレーションを想定
 - 衛星の高度は550km
 - 2種類の方向で構成されるメッシュネットワークを構築
 - 衛星間は波長 $1.5\mu\text{m}$ の自由空間光通信によって接続

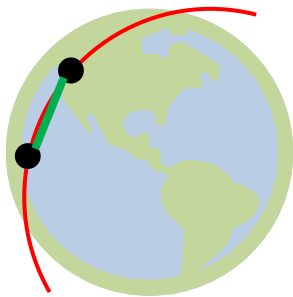


LEO: Low Earth Orbit

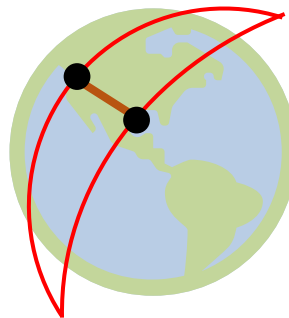
想定する衛星間接続パターン

- 同軌道間接続
 - 切断がなく, 衛星間の距離・相対速度が一定
- 隣接軌道間接続
 - 切断はないが, 衛星間の距離・相対速度が変動
- **交差軌道間接続** (本研究で注目する接続方法)
 - 瞬時的にしか接続不可能
 - 衛星間の距離・相対速度の変動大

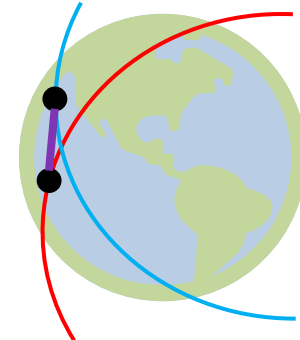
同軌道間接続



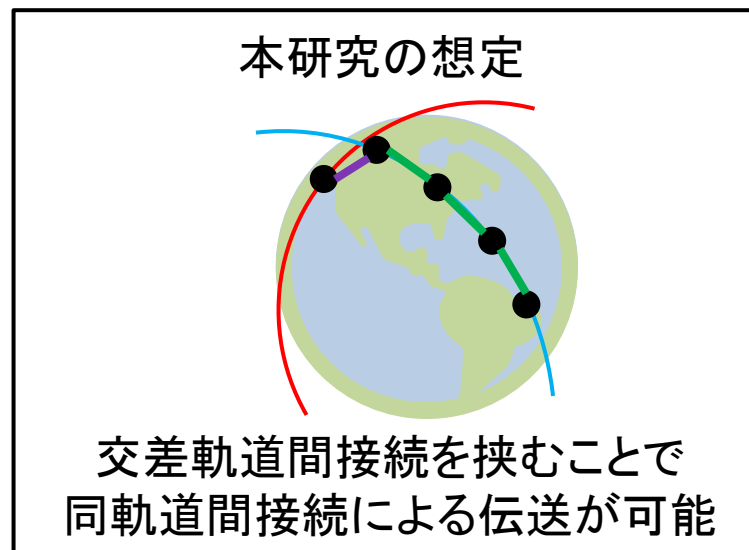
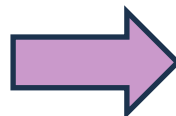
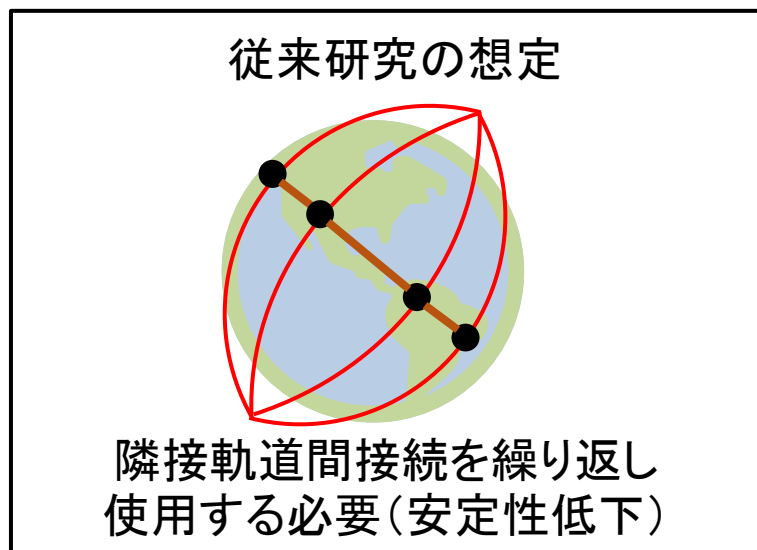
隣接軌道間接続



交差軌道間接続



- 隣接軌道間接続が続く経路では交差軌道間接続を利用して同軌道間接続の経路に切り替えを実行
 - 経路切り替えによって安定した接続を行える可能性あり



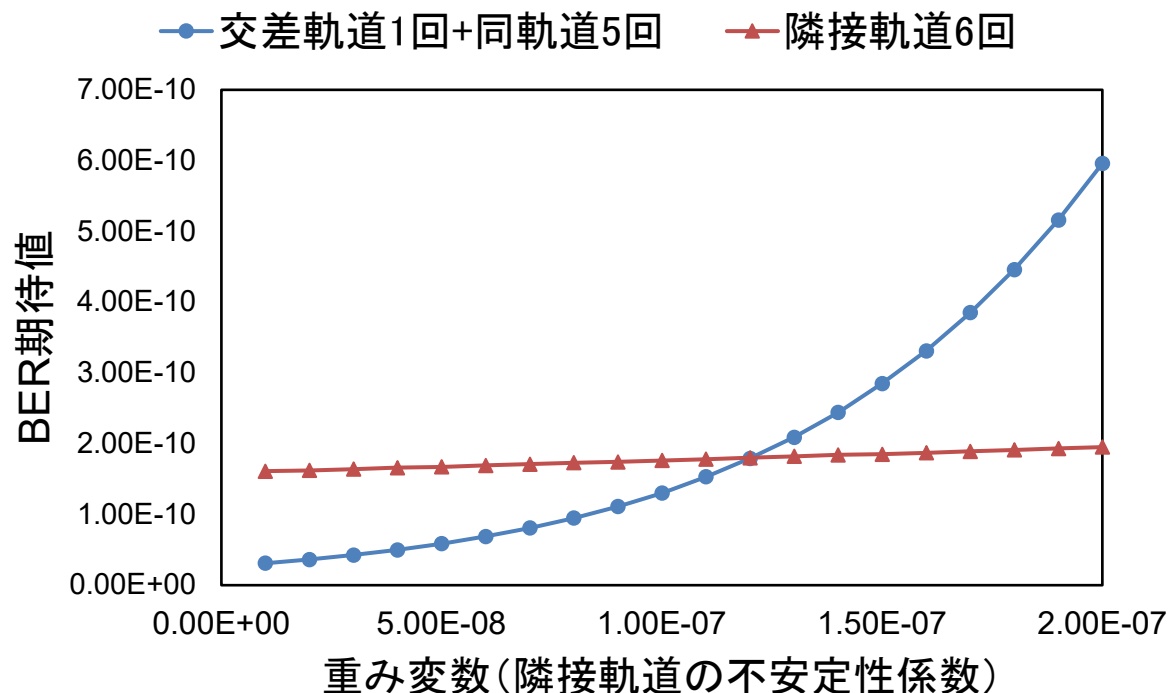
➔ 検証によって経路切り替えの有効性を評価

- 検証目的
 - 経路切り替えが有効な範囲を確認する
- 評価指標
 - BER(Bit Error Rate)期待値
- 使用パラメータ

パラメータ	数値	パラメータ	数値
コンステレーションの軌道数	24個	Y方向の平均値 μ_{Y0}	0.53946 μ rad
軌道内の衛星数	66基	X方向の分散 σ_X	0.28927 μ rad
軌道傾斜	53°	Y方向の分散 σ_Y	0.53946 μ rad
角速度	$\frac{\pi}{2700}$ rad/s	測定時間	90min
X方向の平均値 μ_{X0}	0.36258 μ rad	測定間隔 m	1s

• 2つの接続パターンのBER期待値を比較

- 経路切り替え実行パターン(交差軌道間接続1回+同軌道間接続5回)
- 従来通りの接続パターン(隣接軌道間接続6回)



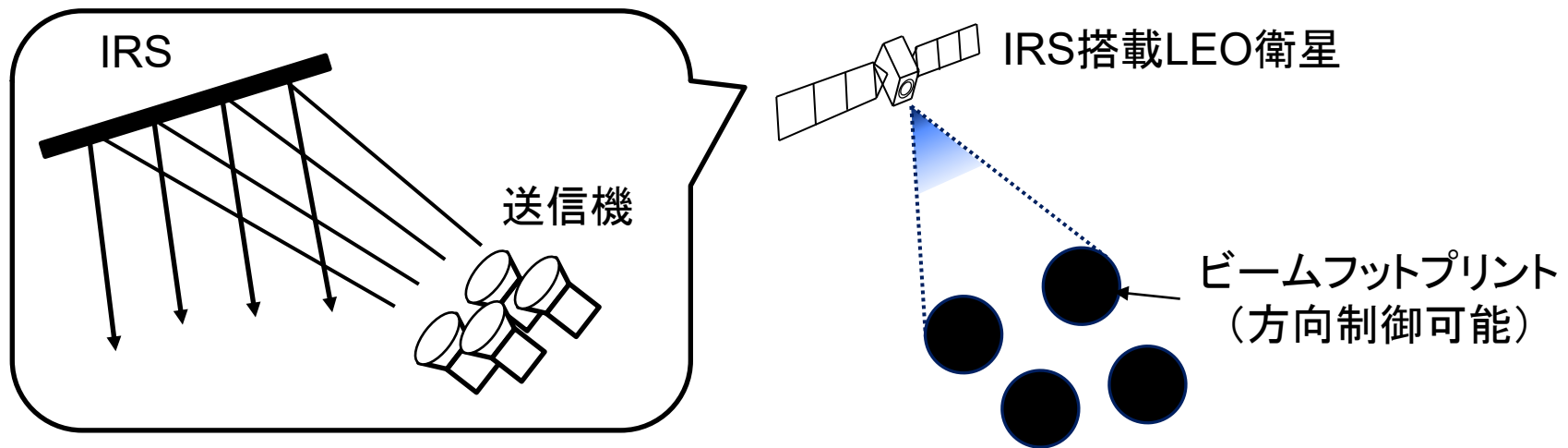
重み変数の数値次第で、経路切り替えが有効となるケースが存在することを確認



LEO衛星通信システムにおける Intelligent Reflecting Surfaceを用いた アンテナ構成による周波数プリズムで のマルチビーム制御

想定システム

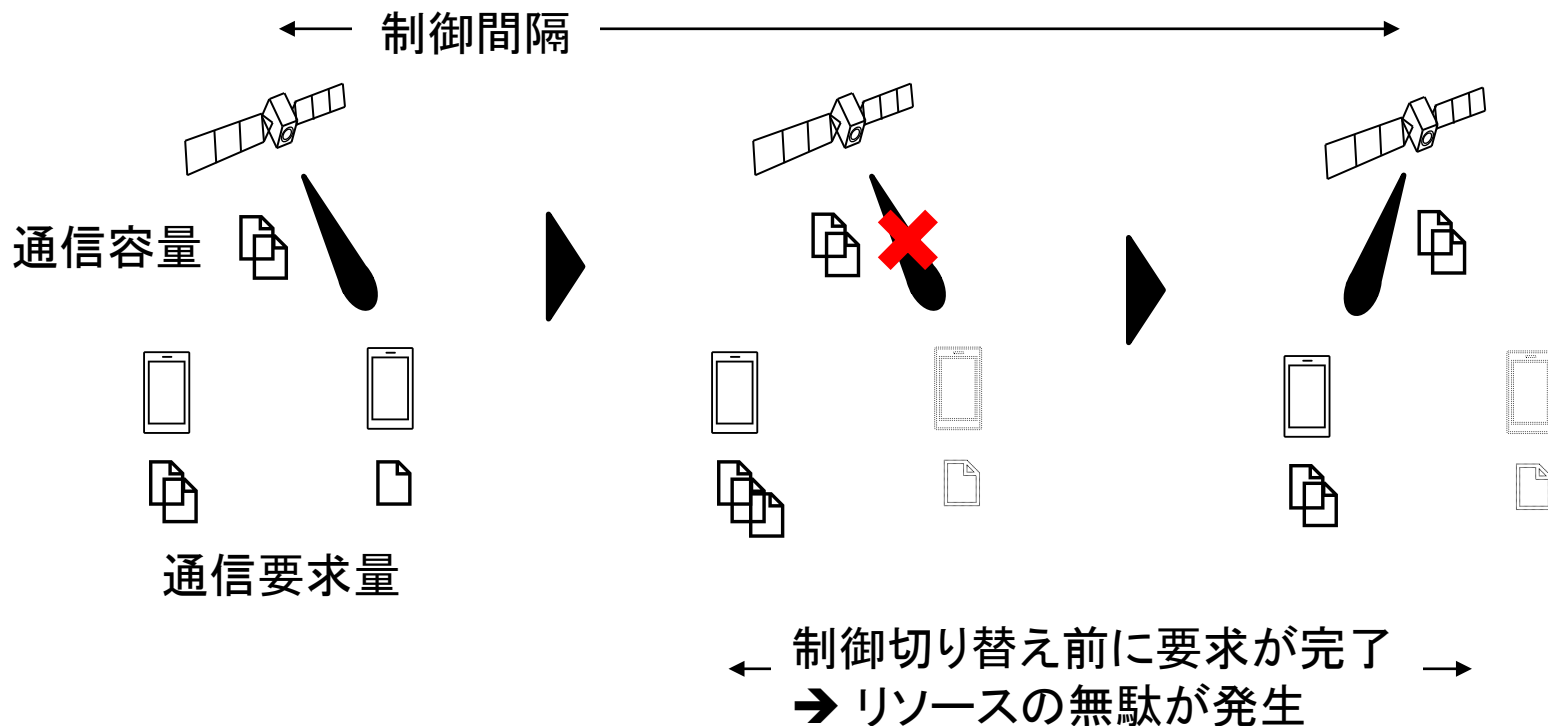
- IRSと送信機を利用したアンテナ搭載LEO衛星通信
 - 複数送信機から電波を放射し、IRSでビームフォーミング
 - 電波の反射方向や指向性の制御により高いパスロスを補償可能
 - 信号をデジタル処理するよりも低損失で高利得を実現可能



消費電力を抑えて高い利得を実現可能

想定システムでの課題

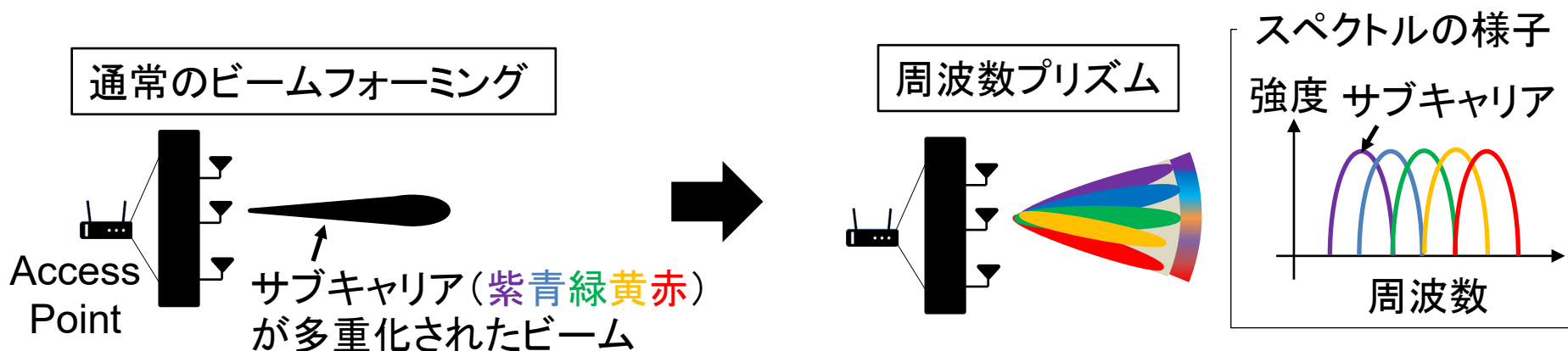
- ・ シングルビーム制御の限界
 - 頻繁なビーム制御更新で通信遅延が増大
 - リソースが過剰で周波数利用効率が悪化



遅延を低下させ、周波数利用効率を向上させるために、周波数プリズムを利用

周波数プリズムによるマルチビーム形成

- 多重化サブキャリアのビーム方向を分散させる技術
 - 1送信機でマルチビームを形成可能
 - 消費電力を抑制し、周波数利用効率が向上

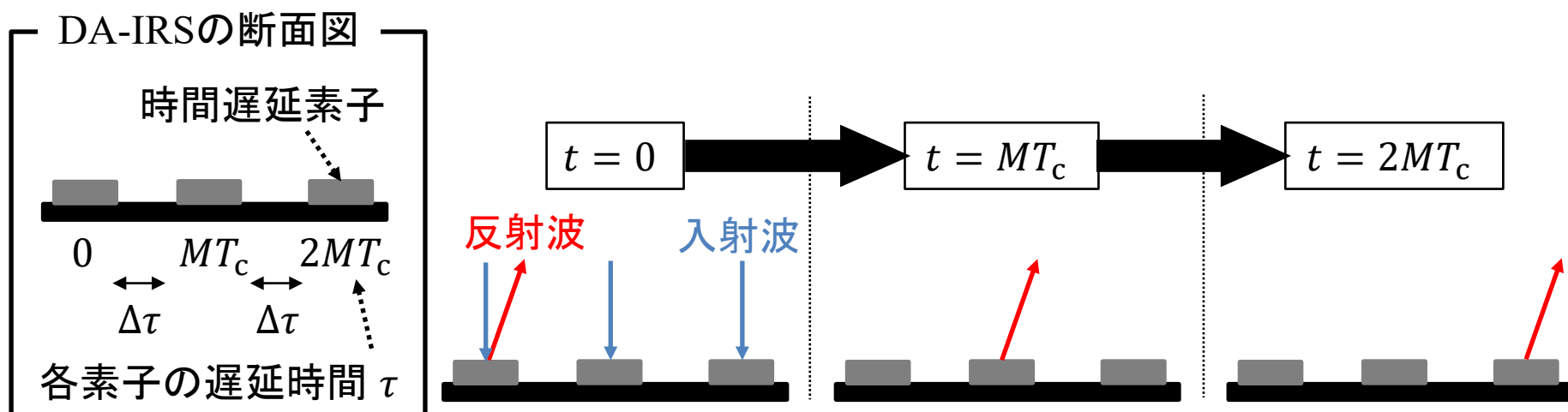


- アンテナ素子ごとに時間をずらして電波を放射
 - 素子間で周波数ごとに位相差が発生

IRSで周波数プリズムを実現するために遅延素子を導入

提案手法(1/2)

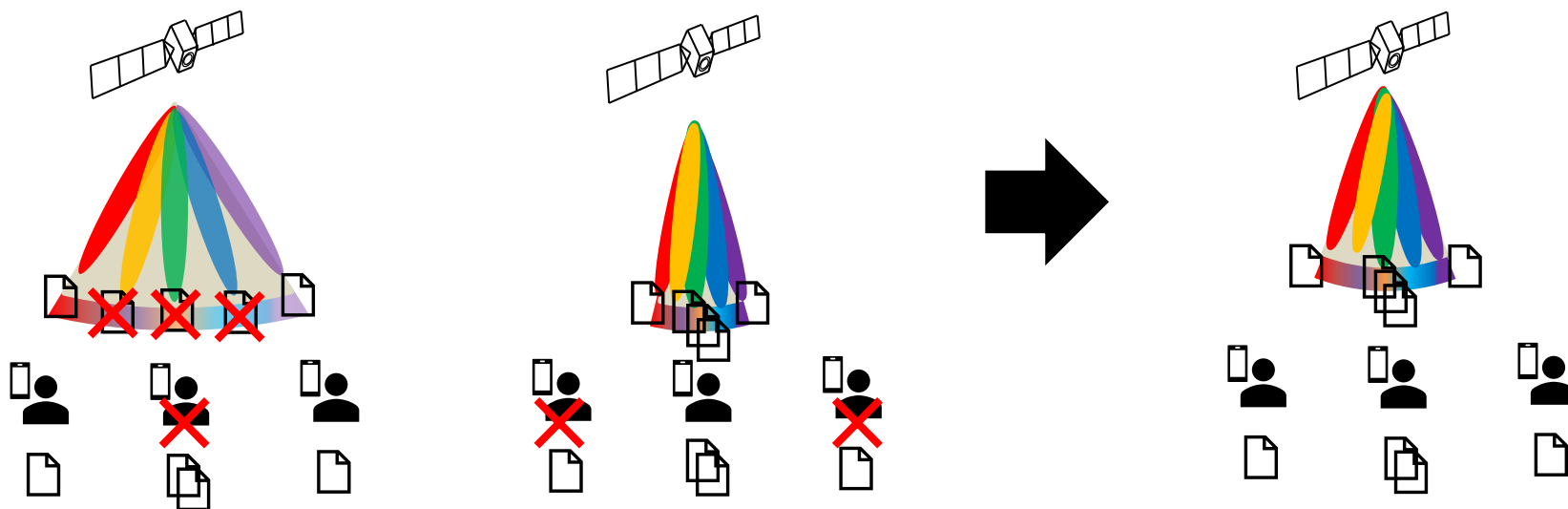
- 遅延素子を導入したDA-IRSで周波数プリズムを実現
 - 各遅延素子は入射波が反射するまでの遅延時間を制御
 - 遅延時間量 $\Delta\tau$ によって各サブキャリアの分散幅が変化



周波数利用効率が最大となるDA-IRSの各遅延素子の遅延時間の制御が必要

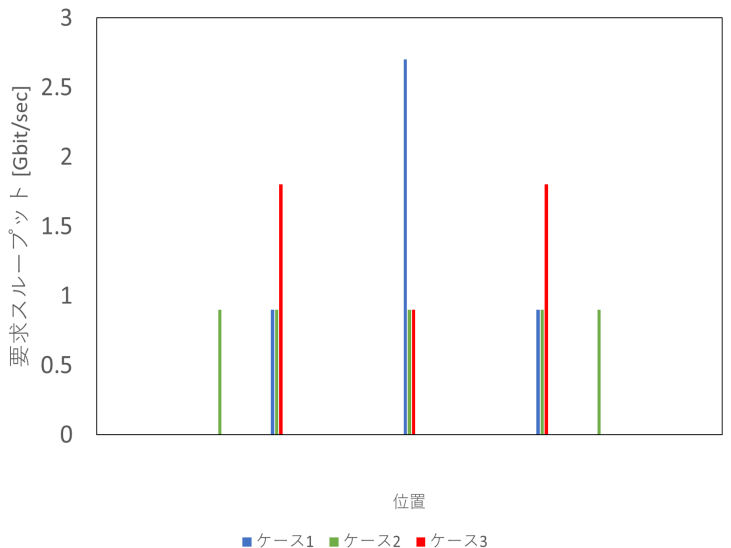
※DA-IRS: Delay Adjustable-IRS

- 周波数利用効率最大となる周波数プリズム制御
 - 3つの制御を総当たりで決定
 - 中心サブキャリアの反射方向(緑のサブキャリア)
 - ビームの広げ幅(DA-IRSの素子間の遅延時間差)
 - 各サブキャリアの各エリアへの割り当て方



評価方法

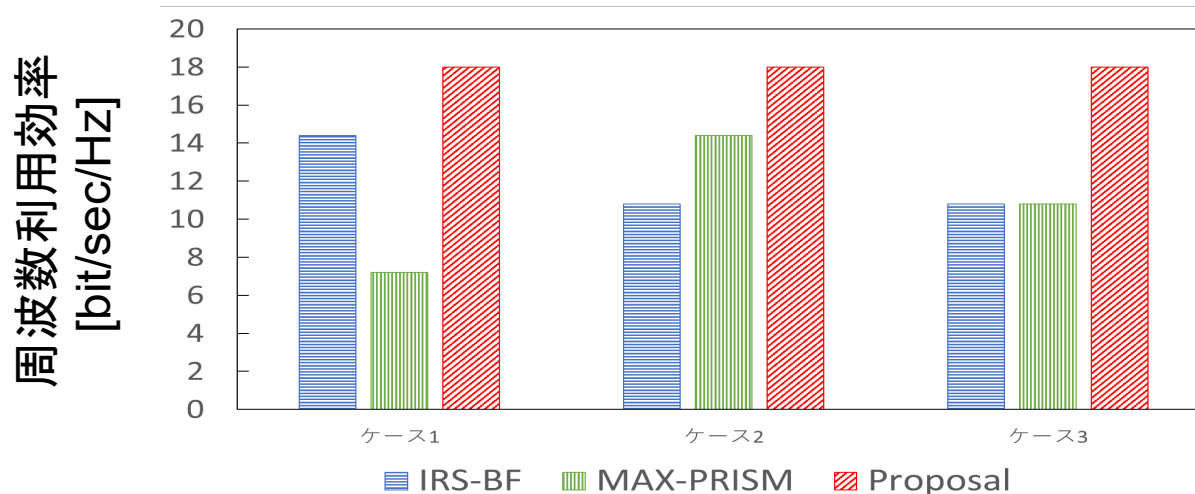
- 評価指標
 - 複数の通信要求と通信する際の周波数利用効率
- 比較手法
 - 全サブキャリアのビーム方向を真下に集約 (IRS-BF)
 - カバレッジ全体を覆うような周波数プリズム (MAX-PRISM)



Parameter	Definition
Transmit power	20 dB
Noise power	-100 dB
Center frequency	10.5 GHz
Bandwidth	0.25 GHz
DA-IRS element spacing	28.55 mm
Number of DA-IRS elements	1024
Radius of the Earth	6371 km
Altitude of a satellite	800 km
Coverage length of a satellite	330 km
Path loss exponent	2
Distances from the transmitter to the DA-IRS	1 m
Incident angle from the transmitter to the DA-IRS	45°
Reflection angle from the DA-IRS to ground	45°
Antenna gain for the transmitter and receiver	21 dB
Size of each DA-IRS elements along the x-axis and y-axis	0.01 m
Rainfall rate	31.119
Mean 0° isotherm height above mean sea level	2.53 km
Latitude	41 °N

評価結果

- 全ケースで提案手法の周波数利用効率が最大
 - ケース1: MAX-PRISMで効率が低下
 - 要求が真ん中に集中しているため
 - ケース2: IRS-BFで効率が低下
 - 要求が全体に分散しているため
 - ケース3: 比較手法のどちらも効率が低下
 - 2つの要求集中地域を同時にカバーできなかったため





光衛星通信を用いた 分散型グリーンデータセンタシステム におけるタスク割当手法

想定システム

- 構成要素

- LEO衛星

- 地球低軌道を周回する衛星

- 分散型グリーンデータセンタ

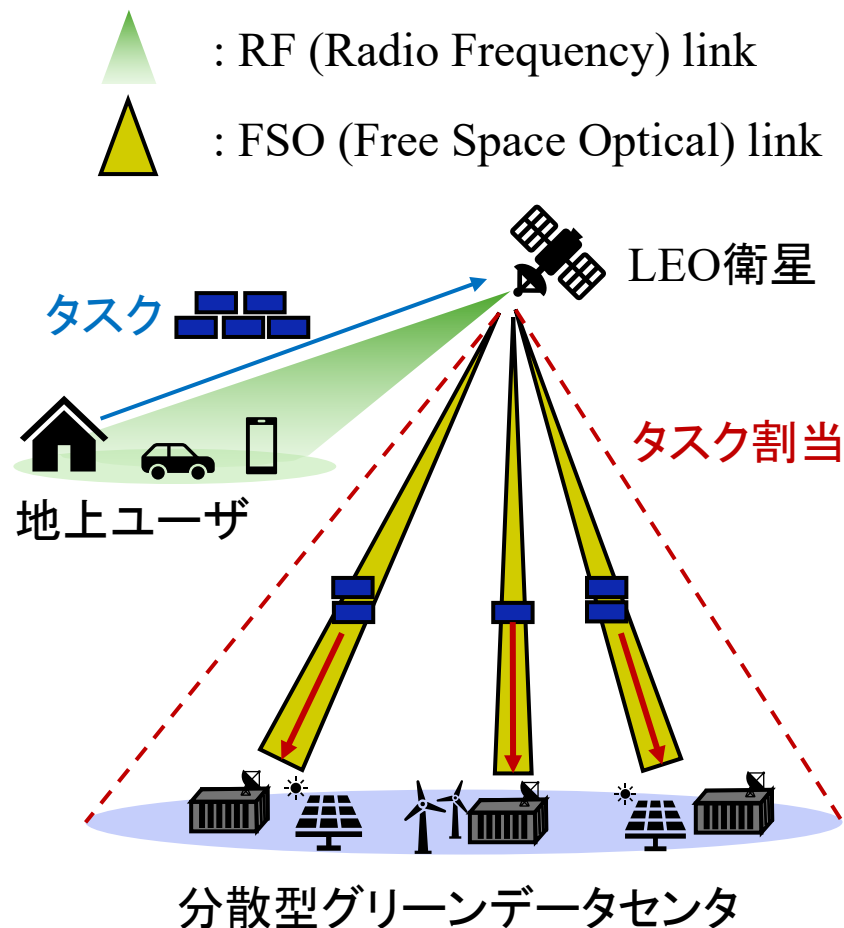
- 衛星とのFSOリンクによる通信
 - 再生可能エネルギーによる発電
 - 蓄電池による蓄電

- 地上ユーザ

- データセンタへのタスク要求

- 想定する通信

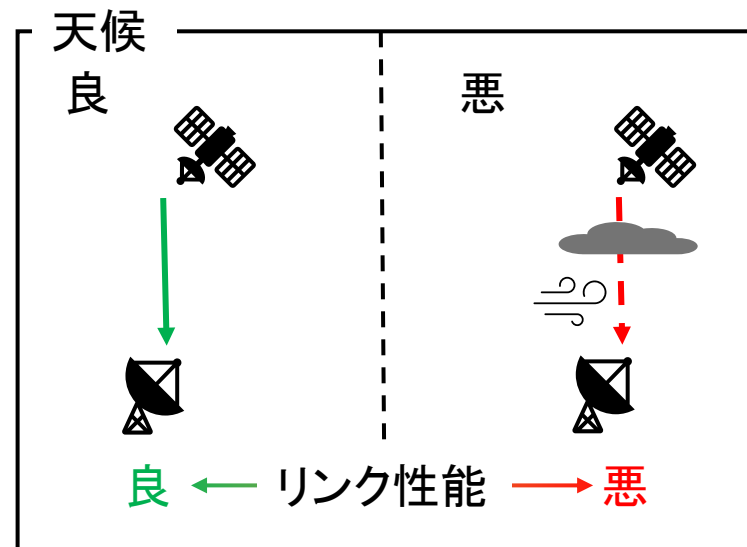
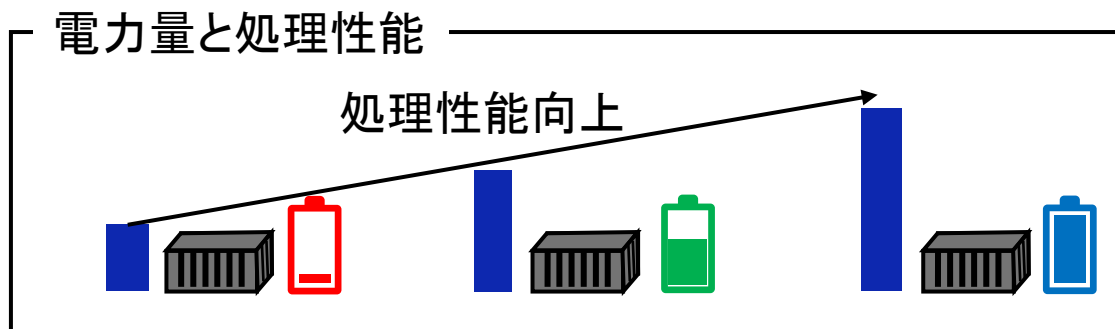
- 衛星からデータセンタへのFSOリンクを用いたタスク割当



LEO : Low Earth Orbit

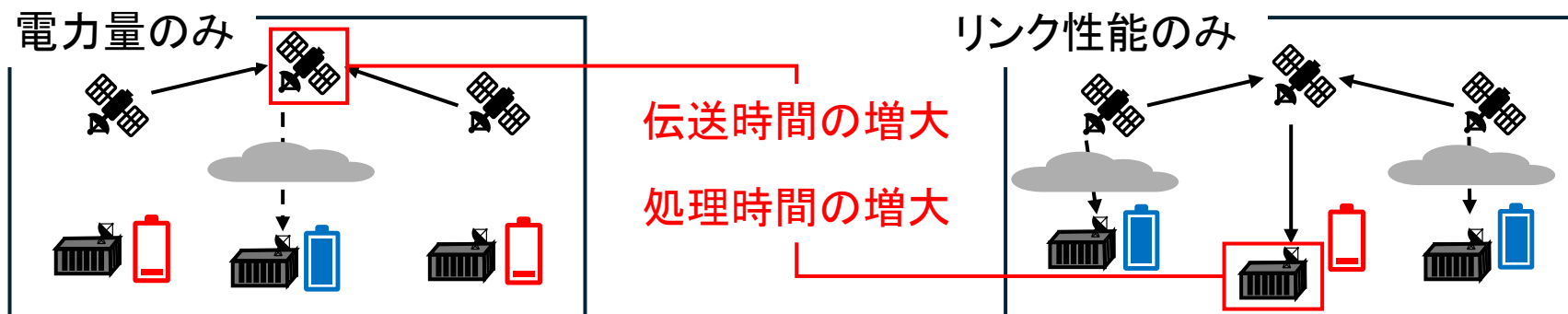
タスク完了時間に影響を及ぼす要因

- 蓄電量の変動
 - 天候による発電量と消費電力量によって蓄電量が変化
→ 蓄電量に処理性能が変化し**処理時間**に影響
- 衛星-地上間のダウンリンク性能の変動
 - 天候（雲・風）によってリンク性能が変化
→ リンク性能によってタスクを送る際の**伝送時間**に影響



想定システムにおける課題

- 蓄電量のみを考慮した場合
 - 性能が低下したリンクへのタスク集中により**伝送時間増大**
- リンク性能のみを考慮した場合
 - 蓄電量低下に伴い処理能力が低下したデータセンタへタスクが集中することにより**処理時間増大**



両方の要素を考慮したタスク割当手法が必要

提案手法の概要

- 目的
 - タスク到来時に利用可能電力量・リンク性能を考慮して到来タスクの完了時間が最短になるようにタスク割当
- 手法
 - 最適化問題を定式化

$$\min\{\max(T_1, T_2, \dots, T_k)\}$$

$T_i, i \in (1, 2, \dots, k)$: データセンタ*i*におけるタスク完了時間

- 最適化問題の解に基づき割当を決定

$$T_i = \text{タスク数} \times \text{タスク1つ当たりの完了時間}$$

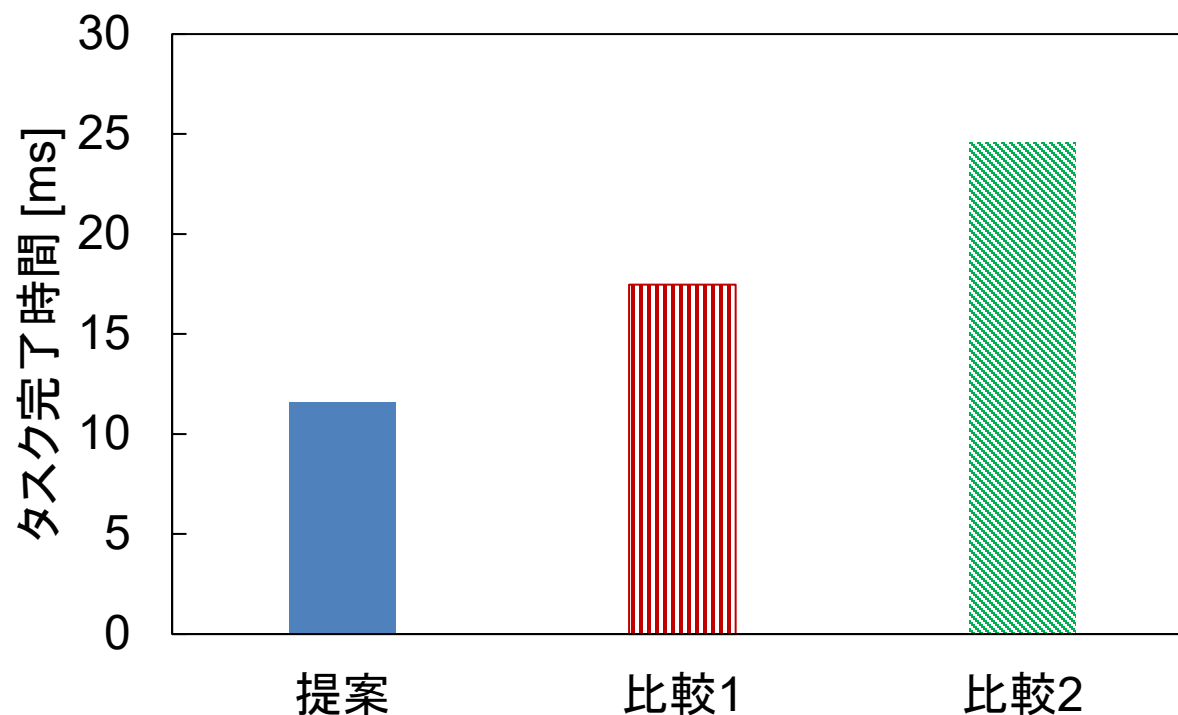
タスク一つ当たりの完了時間を求めることで
最適化問題の解をもとに割当可能

性能評価概要

- 評価指標
 - タスク到来ごとのタスク完了時間
- 比較手法
 - 電力量のみを考慮する手法
 - リンク性能のみを考慮する手法

パラメータ	値	パラメータ	値
LEO衛星高度	550km	太陽光による最大発電量	2000J/min
衛星の送信電力	10W	データセンタの標高	1.2km
帯域幅	1GHz	評価期間	1日間
屈折率構造パラメータ	$10^{-14}\text{m}^{-2/3}$	波長	1550nm
雑音電力密度	$3.128 \times 10^{-21}\text{A/Hz}$	天頂角	90deg
液体分水量	$3.128 \times 10^{-4}\text{cm}^3$	乱流の影響を受ける高度	20km

- 到来タスク数がランダム (50 ~ 250) で変化する際の性能評価
 - 比較1：電力量のみ考慮
 - 比較2：リンク性能のみ考慮



おわりに～今後への期待～

- 空中にある通信媒体が増加する
- ニーズやコストを踏まえた通信の選択肢の多様化が進む
(ユーザ目線では選択する必要が無いのが理想?)
 - ➔ 濃淡付けつつシームレスな3次元ネットワーク = NTN+地上系の構築を目指す
- 日本はどこで勝負?
 - 衛星コンステ構築に真っ向から、は厳しい?(メガベンチャーが主導)
 - ➔ どの技術に注力? 3GPPには?
- マーケットを研究者がつくっていく意識

