

ロバストな QoS 保証に向けた 動的 Multi-RAT 接続制御の評価

関澤 和希¹, 篠原 笑子², 中平 俊朗², 福島 健², 浅井 裕介², 山内 雅明³, 大下 裕一³, 下西 英之³

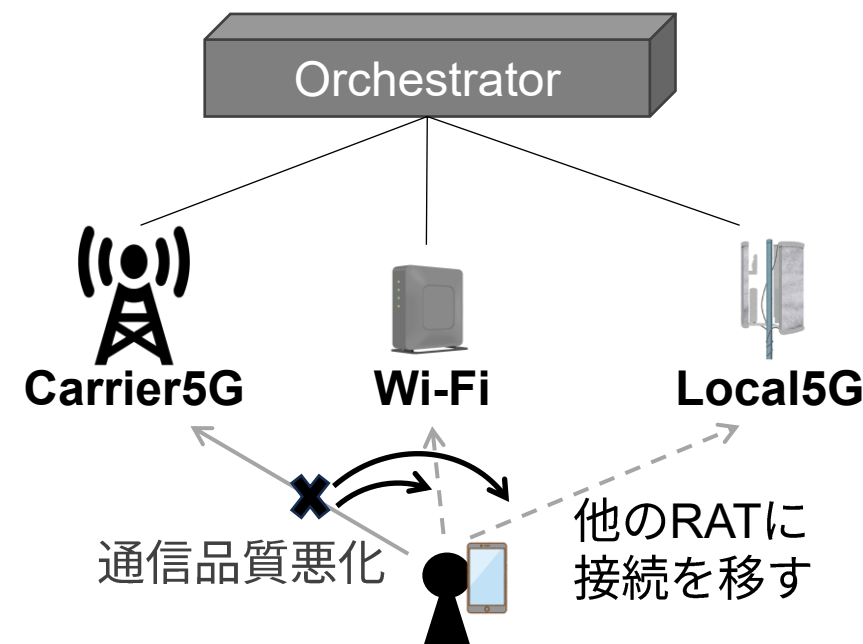
¹大阪大学 大学院情報科学研究科

²NTT株式会社 アクセスサービスシステム研究所

³大阪大学 D3センター



- 各ユーザ端末 (UE) のロバストなアプリケーション品質保証が重要
 - ・ 一時的な通信品質劣化がサービスに深刻な影響を及ぼす
 - ・ 例：ロボット制御・動画配信
- 異種無線アクセス技術 (multi-RAT) の活用
 - ・ セルラー・Wi-Fi・ミリ波基地局などを利用
 - ・ 適切なRAT選択により、単一RATでは困難な品質保証を実現

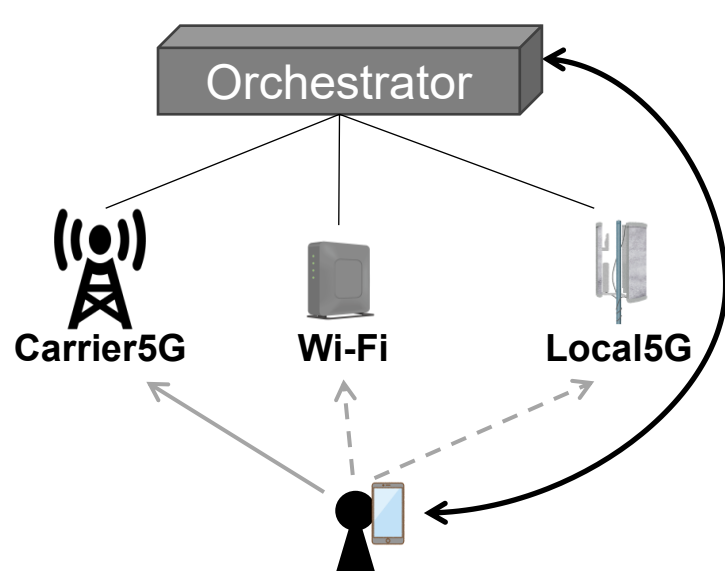


Multi-RATを活用し、ロバストなアプリケーション品質保証を目指す

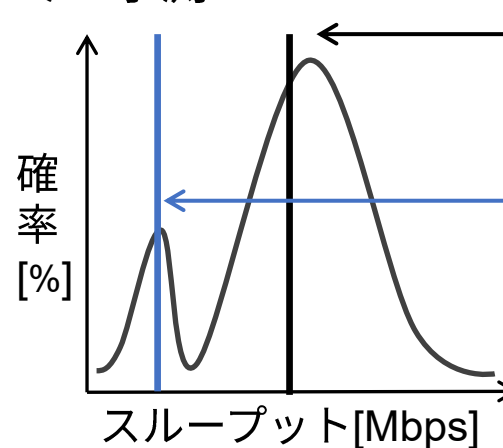
Multi-RATにおける接続指標

- 電波品質と サービス品質 (QoS) の関係は各RATにより異なる[1]
 - ・ 特性の違い：電波伝搬特性・上位層の制御
 - 接続後のQoS保証には、各RATの QoS 指標に基づく制御が必要
- QoSの観測には実トラフィックが必要
 - ・ 問題：品質劣化に後追い・パケット送信による帯域圧迫
 - QoS予測に基づく接続制御が必要

- 無線環境の不確実性により、期待値のQoS予測では品質保証が困難
 - ・ 不確実性：電波の干渉・障害物・UE位置推測の誤差・負荷・上位層の挙動
 - ・ 期待QoSが要求値以上でも、実際はQoSが低下するケースが発生



QoS予測



期待QoS > 要求QoS

悪い側のQoS < 要求QoS

- ・ 無線環境の不確実性でQoSは低下し得る

不確実な無線環境でも、ロバストに通信品質を保証する制御が必要

アプローチと本発表のスコープ

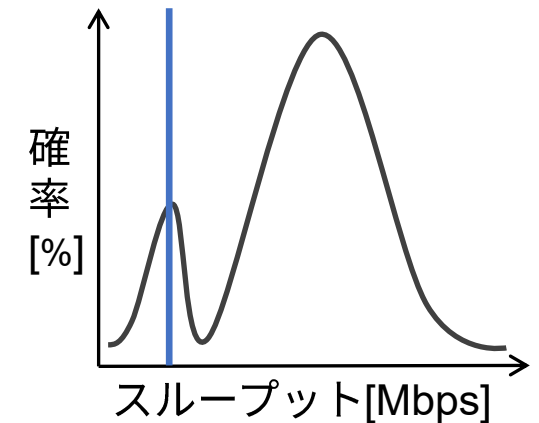
● 研究目的

- 無線環境の不確実性下で、アプリケーションのQoS要件をロバストに保証するMulti-RAT接続制御の実現

● アプローチ

- 電波品質とUE位置の確率モデルから、QoSを確率分布として予測
- ロバストなサービス品質保証 (SLA) の定義
 - 予測QoS分布から、QoS低下リスクを考慮
- 確率計画法を用いてSLAを保証する接続先を決定

QoS予測



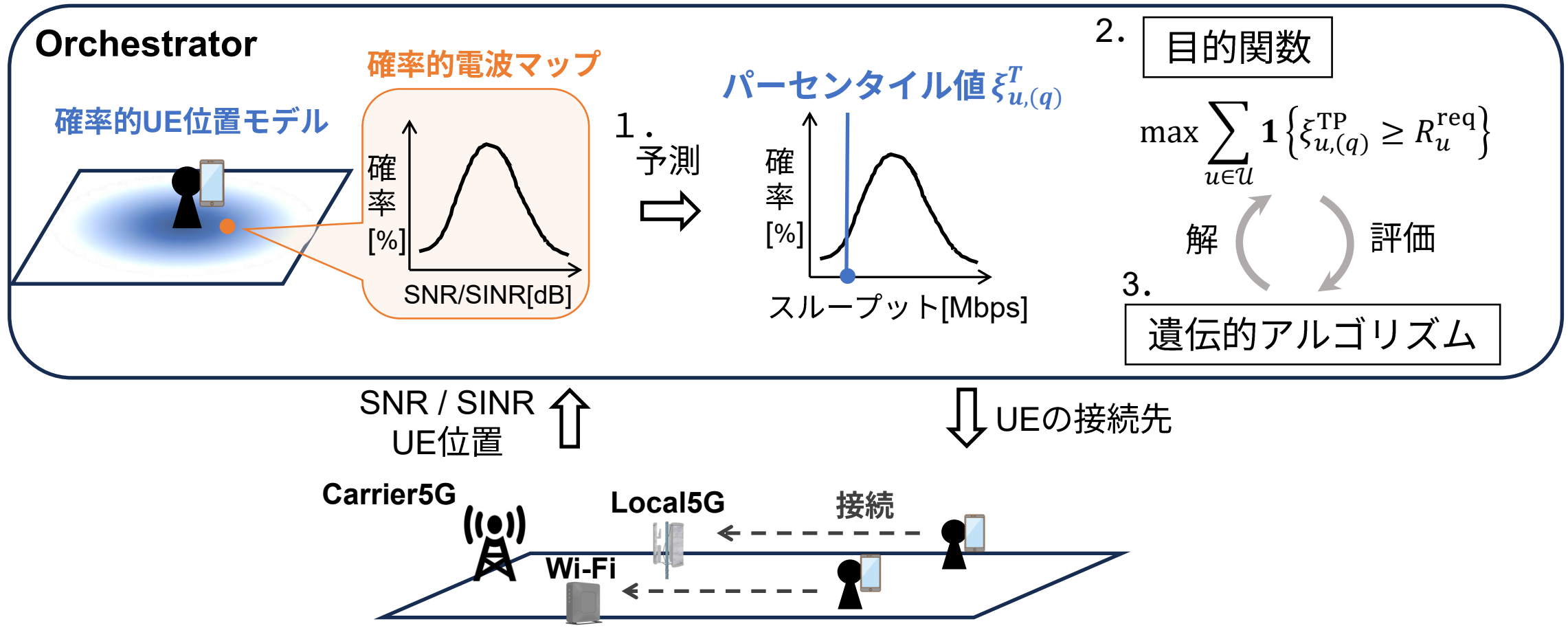
悪い側のQoS > 要求QoS

● 本発表のスコープ

- 動的環境下でSLAを保証する接続制御が可能か、接続制御挙動を検証

提案手法の全体像

1. 確率的UE位置モデル + 確率的電波マップからQoS分布を予測
2. 確率計画法によりQoS低下リスク (QoS分布の下裾野) を制御判断に組み込む
3. 遺伝的アルゴリズムを用いて、接続先を動的に決定



- 共通モデル

- 正規分布を仮定

$$\xi_{g,b}^{\text{SINR}} \sim \mathcal{N} \left(\mu^{\{\text{Wi-Fi}, \text{C5G}\}}, \left(\sigma^{\{\text{Wi-Fi}, \text{C5G}\}} \right)^2 \right).$$

- Carrier5G (Sub6帯)

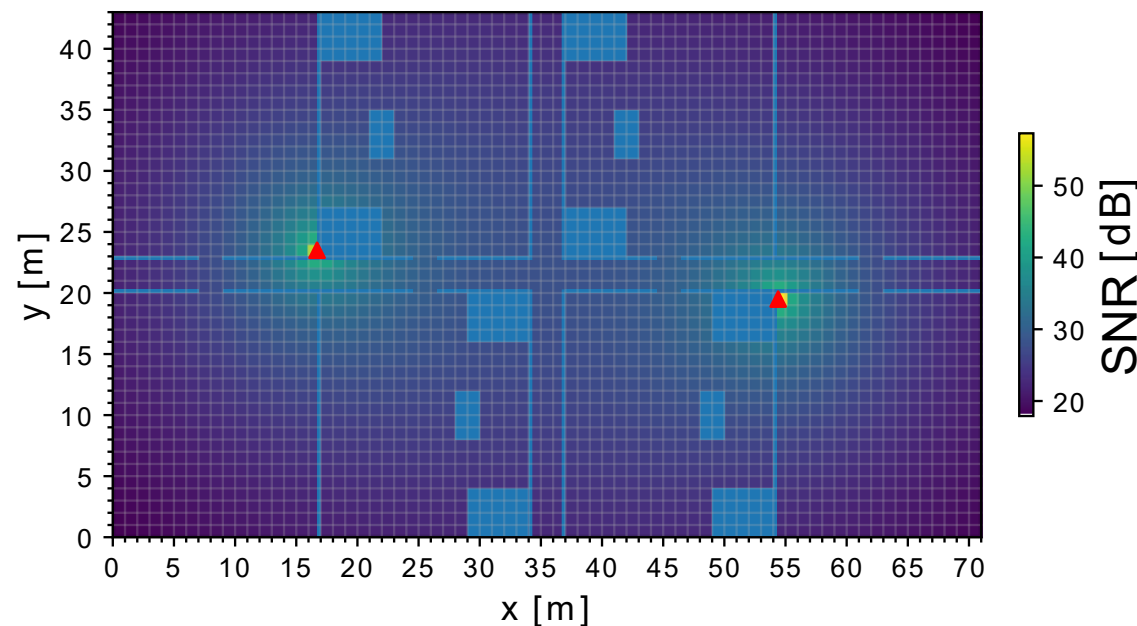
- マップ全体で同一の分布を仮定 ($\mu^{\text{C5G}}, \sigma^{\text{C5G}}$ は共に固定)

- Wi-Fi (2.4/5GHz帯)

- AP間でチャネル重複せず、干渉は発生しない
- 距離減衰を考慮して平均SNR $\mu^{\text{Wi-Fi}}$ を決定

$$\mu^{\text{Wi-Fi}} = P_b^{\text{tx}} - L_0 - 10\delta \log_{10} d_{g,b} - N_0.$$

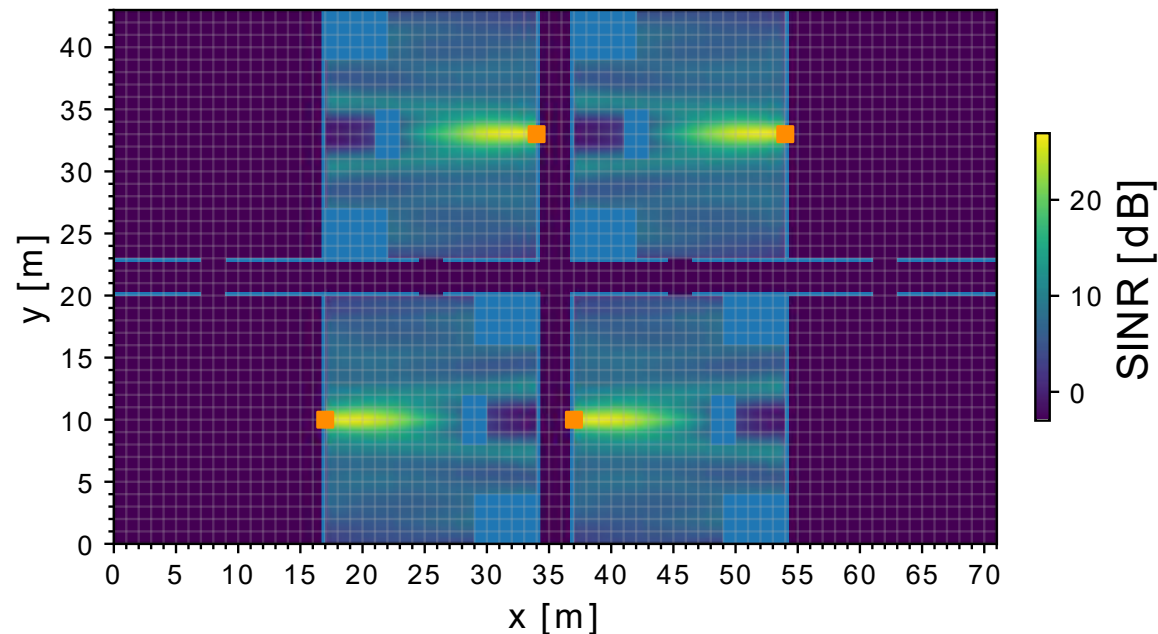
変数	内容
P_b^{tx}	送信電力
L_0	基準損失
δ	パスロス指数
$d_{g,b}$	基地局-グリッド間距離
N_0	雑音電力



- Local 5G (28GHz)

- 実測データから予測した RSRP 確率分布が定義されている [2]
- RSRP 確率分布から SINR 確率分布を算出

$$\xi_{g,b}^{\text{SINR},(k)} = 10 \log_{10} \left\{ S_{g,b}^{(k)} / \sum_{b_s \in \mathcal{B}^{\text{L5G}}, b_s \neq b} S_{g,b_s}^{(k)} + N_1 \right\}, \quad S_{g,b}^{(k)} = 10^{\xi_{g,b}^{\text{RSRP},(k)} / 10}.$$



UEの確率位置モデルと電波品質

● 確率的UE位置モデル

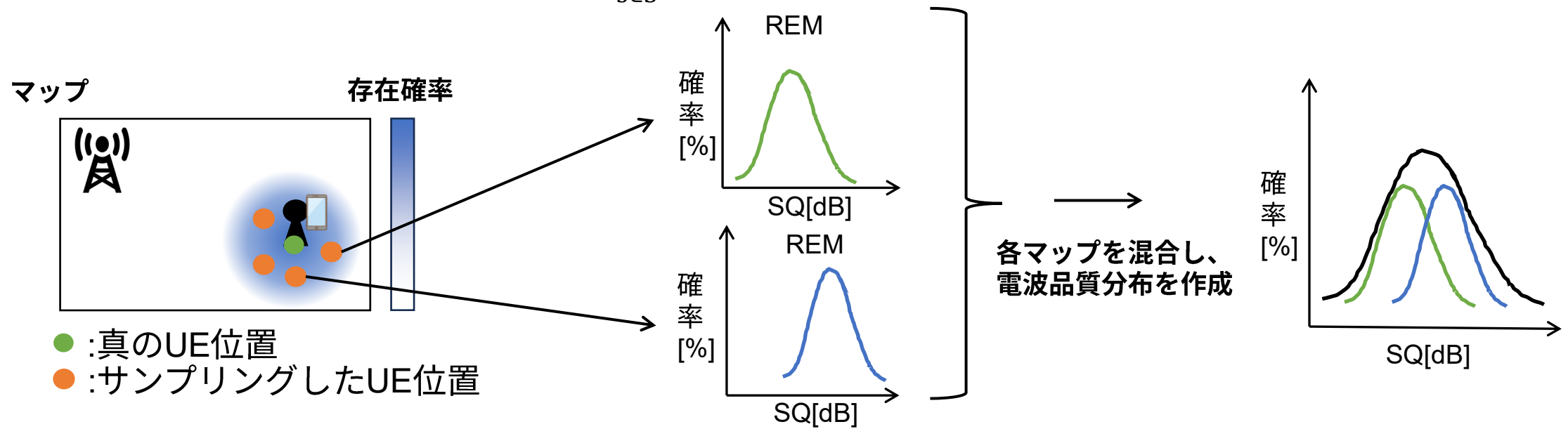
- 観測位置 l_u には、真の位置 z_u に対して測定誤差 ε_u が含まれる

$$l_u = z_u + \varepsilon_u, \quad \varepsilon_u \sim \mathcal{N}(0, \Sigma_u).$$

● 各UEの電波品質 $\xi_{u,b}^{\text{SQ}}$ を算出

- 各観測位置上に定義された電波品質分布の混合分布として定義

$$\mathcal{D}_{u,b}^{\text{SQ}} \sim \sum_{s \in S} \frac{1}{|S|} \mathcal{D}_{g(s),b}^{\text{SQ}}, \quad \xi_{u,b}^{\text{SQ}} \sim \mathcal{D}_{u,b}^{\text{SQ}}.$$



スループット確率分布の予測

- 各UE u のスループット確率変数 ξ_u^{TP} を算出
 - $x_{u,b}$: 決定変数 (UE u が基地局 b に接続する場合に1、それ以外の場合に0)
 - $\alpha_{u,b}$: 帯域割当率 (接続する各UEの要求スループットに比例して割当)
 - W_b : 基地局 b の総帯域幅

$$\xi_u^{TP} = \sum_{b \in \mathcal{B}} x_{u,b} \alpha_{u,b} W_b \log_2(1 + 10^{\xi_{u,b}^{SQ}/10}).$$

- 実効スループットを予測
 - 過度なHOを抑制するため、HOによるスループット損失を考慮
 - $h_u^{(t_c)}$: 前回制御時からHOが発生していた場合に1、それ以外の場合に0
 - t_H : HOによって生じる通信中断時間

$$\xi_u^{\widehat{TP}} = \frac{t_s - h_u^{(t_c)} t_H}{t_s} \xi_u^{TP}.$$

問題設定とソルバ

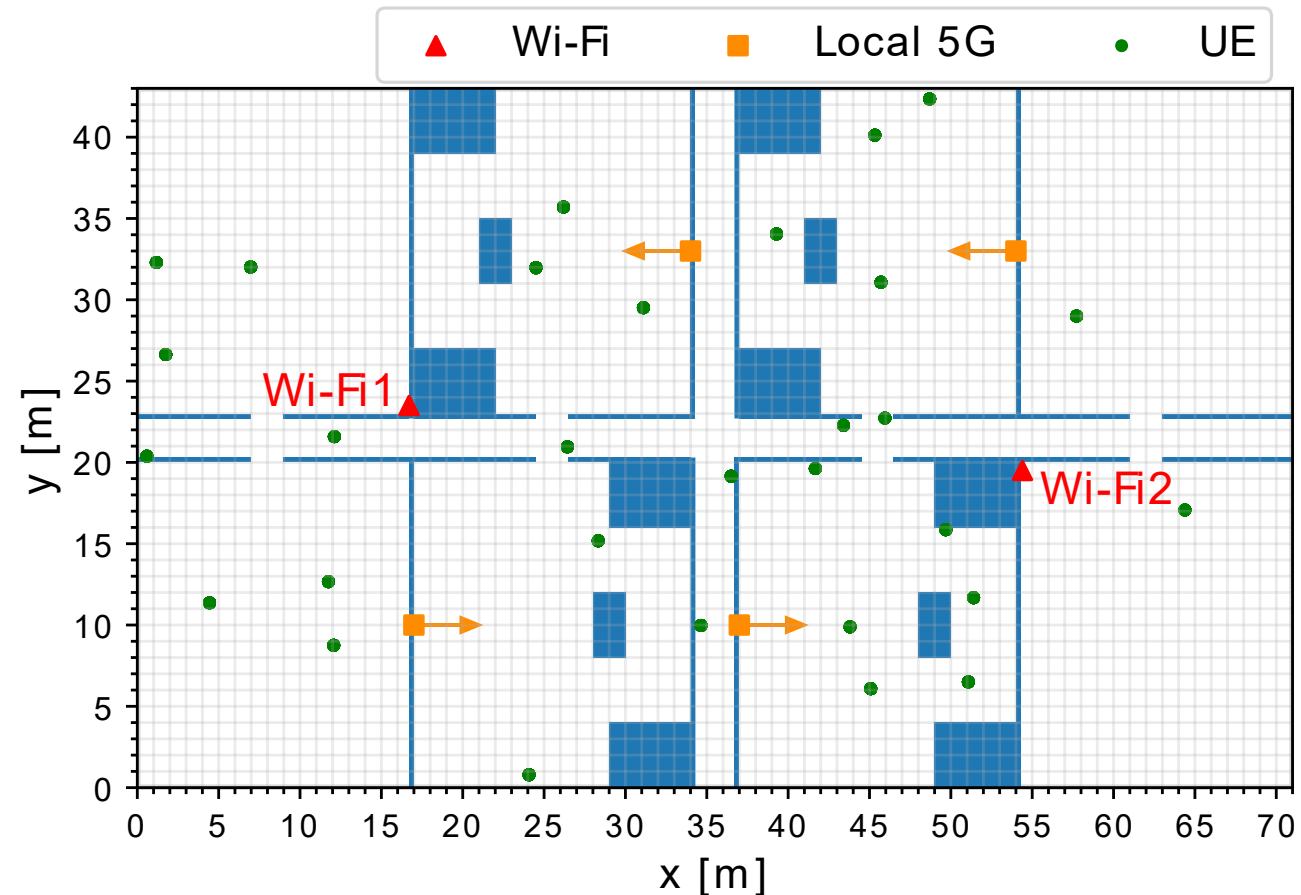
- SLA：QoSを確率 $1 - q$ 以上の時間割合で達成するという契約
 - ・ アプリケーションが QoS (スループット) を要求
 - ・ 高画質ストリーミングを想定し $R_u^{req} = 20[\text{Mbps}]$ と設定

- 目的関数：SLAを満たすUE数の最大化

$$\max \sum_{u \in \mathcal{U}} \mathbf{1} \left\{ \xi_{u,(q)}^{\widehat{TP}} \geq R_u^{\text{req}} \right\}$$

- 制約条件
 - ・ 各UEは1つの基地局に接続
 - ・ 各UEは期待 SNR/SINR が0より大きい基地局に接続
- ソルバ：遺伝的アルゴリズム (GA)
 - ・ 遺伝子： $[0, 1, 2, 3] \Leftrightarrow [\text{Local5G}, \text{Wi-Fi1}, \text{Wi-Fi2}, \text{Carrier5G}]$
 - ・ トーナメント/エリート選択(4体/5体) ・ 一様交差(確率0.6) ・ 突然変異(確率0.01)

- 仮想屋内マップ (71m × 43m)
 - ・ 構成要素：8部屋・廊下・障害物 (青色部)
- 基地局配置
 - ・ Wi-Fi: 2台
 - ・ マップ全体を最大限カバーする配置
 - ・ Local5G: 4台
 - ・ 中央4部屋に1台ずつ配置
 - ・ 黄色矢印の向きにビームを放出
- シミュレータ設定
 - ・ 1 time slot : 10ms
 - ・ 制御間隔 : 50ms
 - ・ GAによる導出時間 : 50ms



- 提案手法の制御挙動を分析し、**SLAを保証する制御が可能か**評価

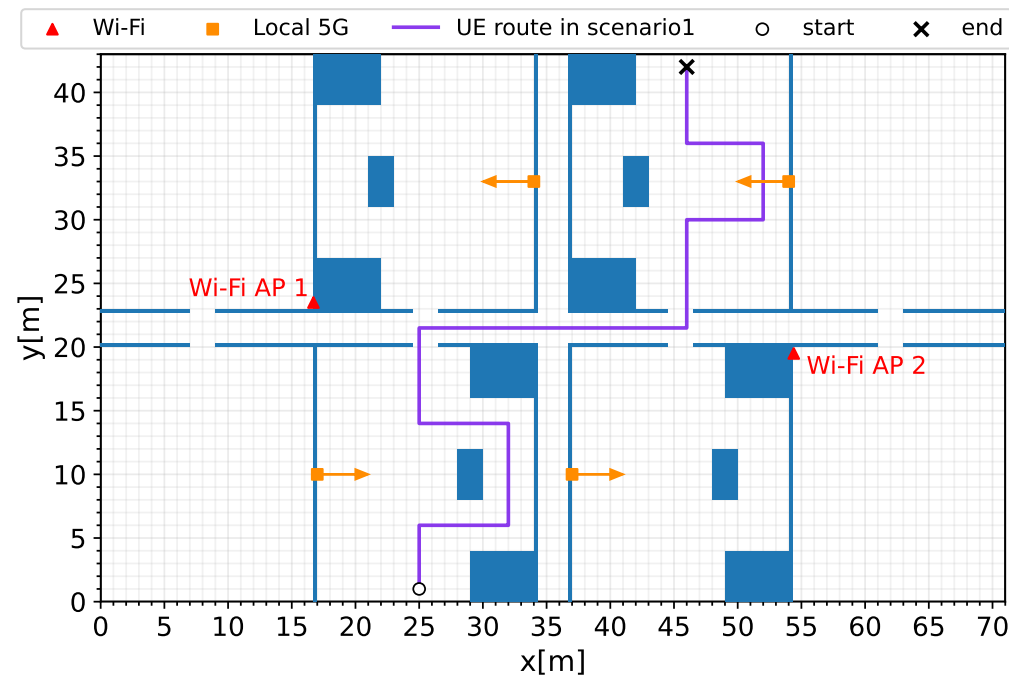
- シナリオ1

- 目的：セルエッジで、SLA保証可能なハンドオーバ (HO) が可能か
- 内容：セルエッジを通る固定経路 (右下図) を1台のUEが移動
- 補足：単一基地局への常時接続を避けるため、各RATに負荷を事前設定

- シナリオ2

- 目的：高負荷環境における各UEのSLA保証性能
- 内容：同経路を50台のUEが移動

※評価は予測スループット ξ_u^{TP} に基づいている
実トラフィックでの評価は今後の課題



シナリオ1の移動経路

- MAX-SQ

- 各UEは、期待 SNR/SINR が最大となる基地局を選択

- Proportional-Fairness (PF)

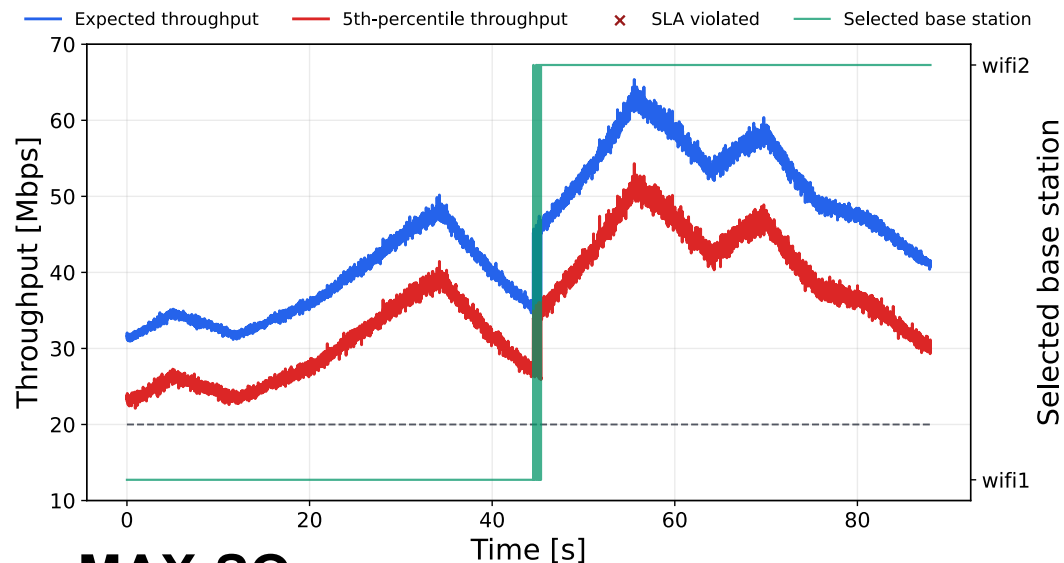
- UE間の実効スループットが公平となる基地局を選択
 - 目的関数： $\max \sum_{u \in \mathcal{U}} \log \left(\mathbb{E} \left[\xi_u^{\widetilde{TP}} \right] / R_u^{\text{req}} \right)$.

- 提案手法

- 実効スループット分布の下位パーセンタイル値を基に基地局を選択
 - 目的関数： $\max \sum_{u \in \mathcal{U}} \mathbf{1} \left\{ \xi_{u,(q)}^{\widetilde{TP}} \geq R_u^{\text{req}} \right\}$

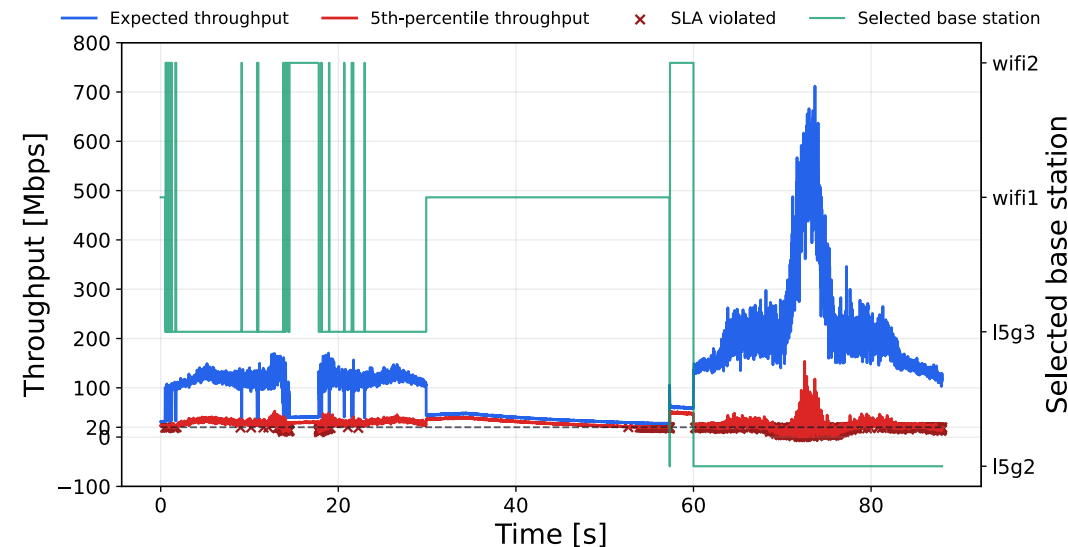
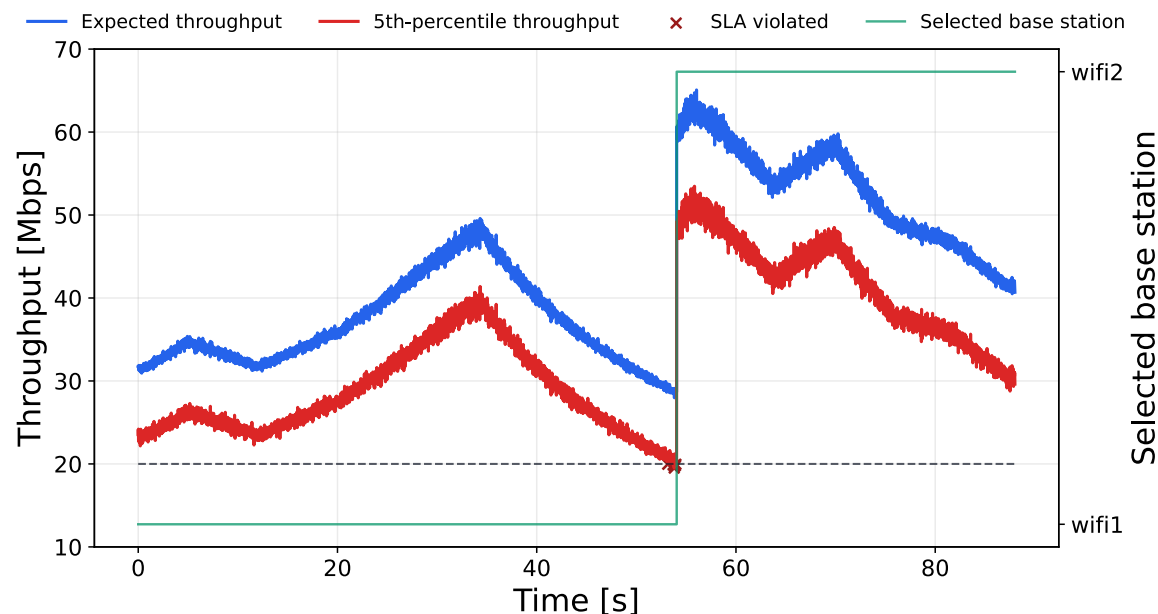
結果 (シナリオ1): スループットと接続基地局の推移

15



MAX-SQ

- 理想的なHOが可能



Proportional-Fairness

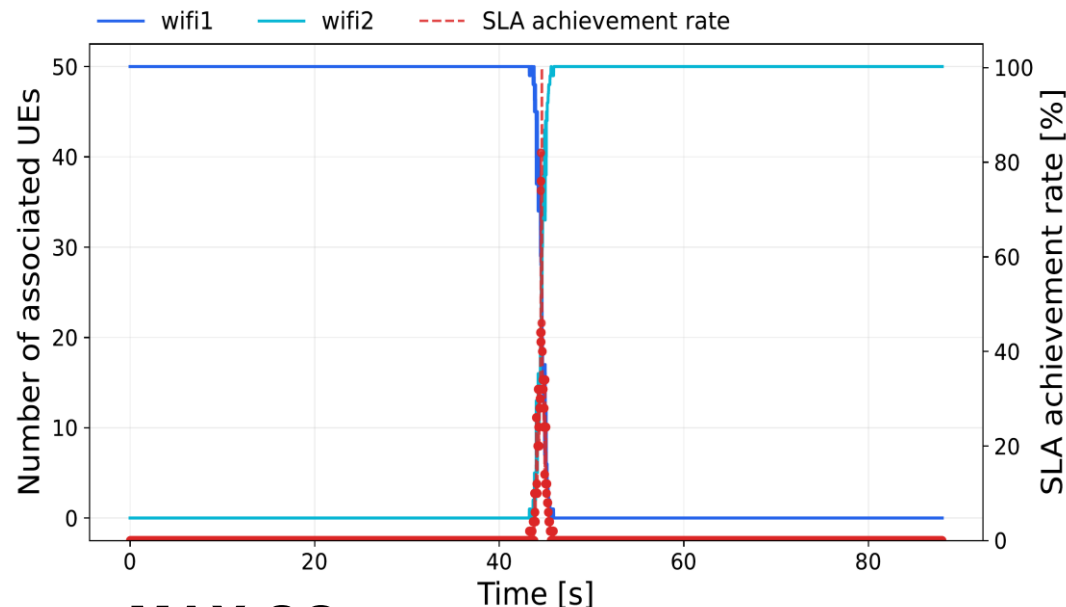
- Local5Gに接続する傾向
- 期待スループットは高いが不安定

提案手法

- SLA違反を回避するHOが可能
- 制御周期内ではSLA違反が発生

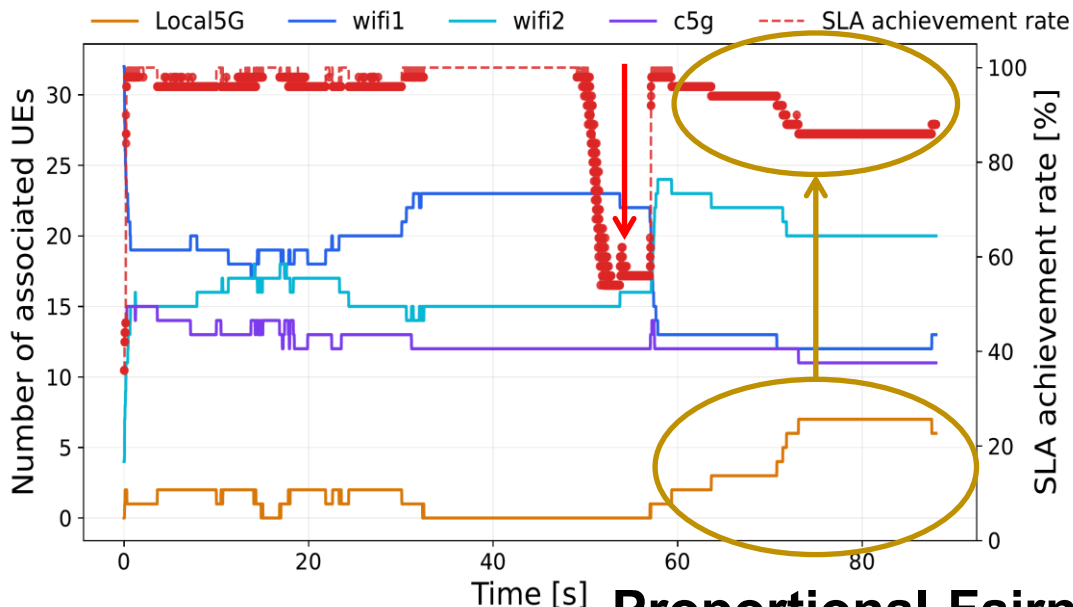
結果 (シナリオ2): 各基地局の接続数とSLA達成率の推移

16



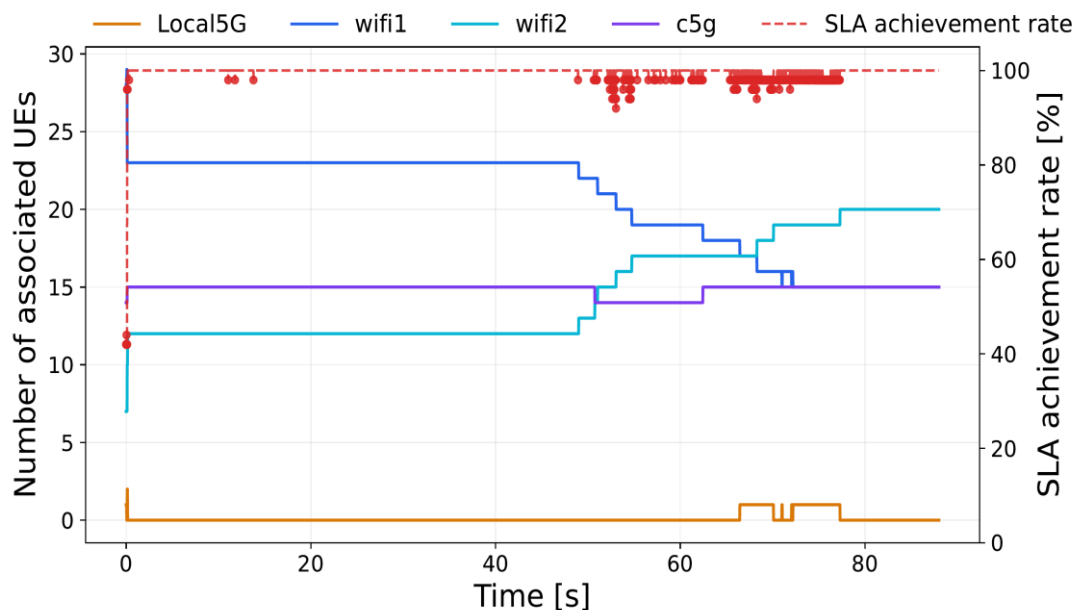
MAX-SQ

- Wi-Fiに
負荷が集中



Proportional-Fairness

- 負荷分散の遅れ
- 不安定な基地局への接続

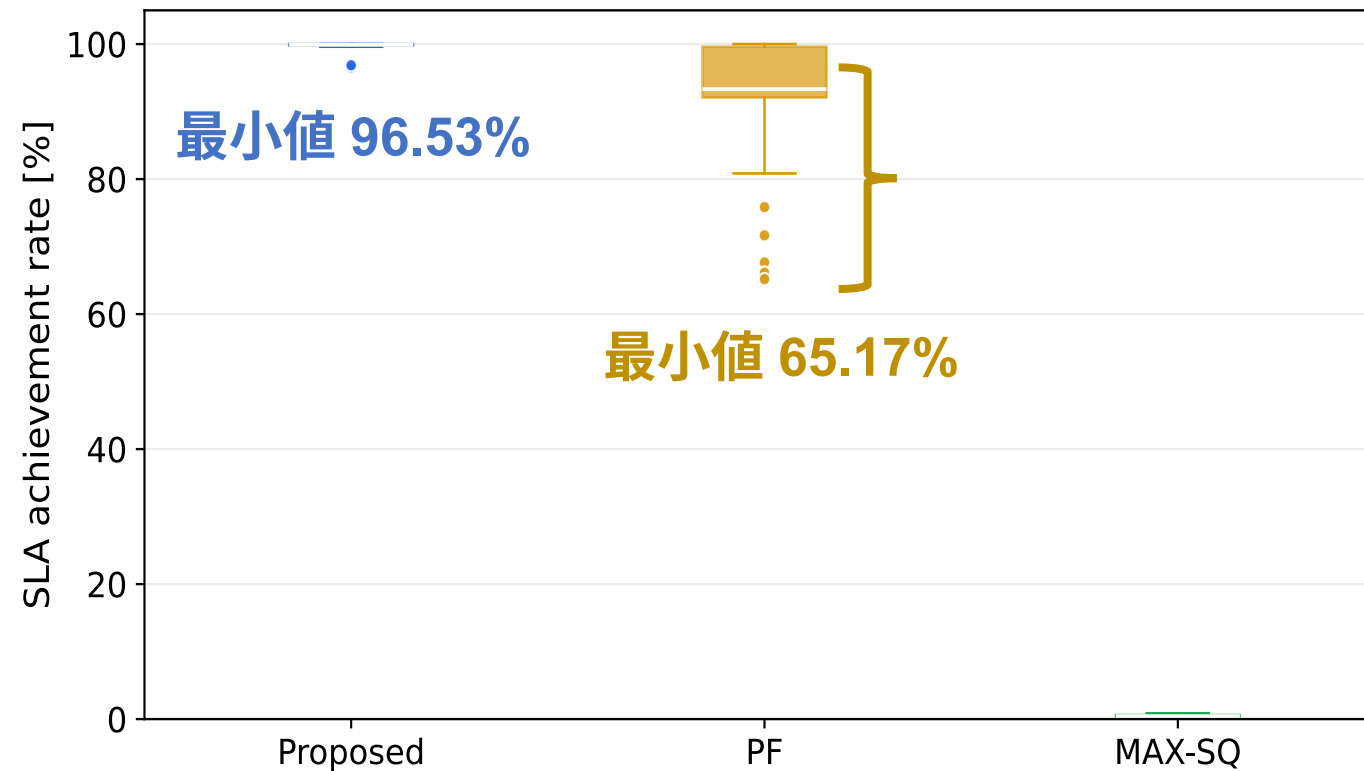


提案手法

- 高負荷環境において高信頼に
SLA保証できる制御が可能

結果 (シナリオ2): 各UEのSLA達成の時間割合

- 提案手法は、**各UEのSLAをロバストに保証**できる
 - ・ 期待値ベースの負荷分散手法は、特定のUEを犠牲にする傾向がある



各UEのSLA達成率分布(シナリオ2).
丸は四分位範囲の1.5倍より外にある値を示す.

まとめ・今後の課題

- ロバストな QoS 保証に向けた Multi-RAT 接続制御の提案
 - 無線環境の不確実性によるQoS低下リスクを考慮したSLAを定義
 - 各UEに対して、SLA保証可能な接続制御が可能

UE数	評価対象	評価結果
1UE	セルエッジ	SLA違反を回避するHO制御
50UE	高負荷環境	各UEのロバストなSLA保証

- 今後の課題
 - パケットレベルのシミュレータへの拡張・評価