

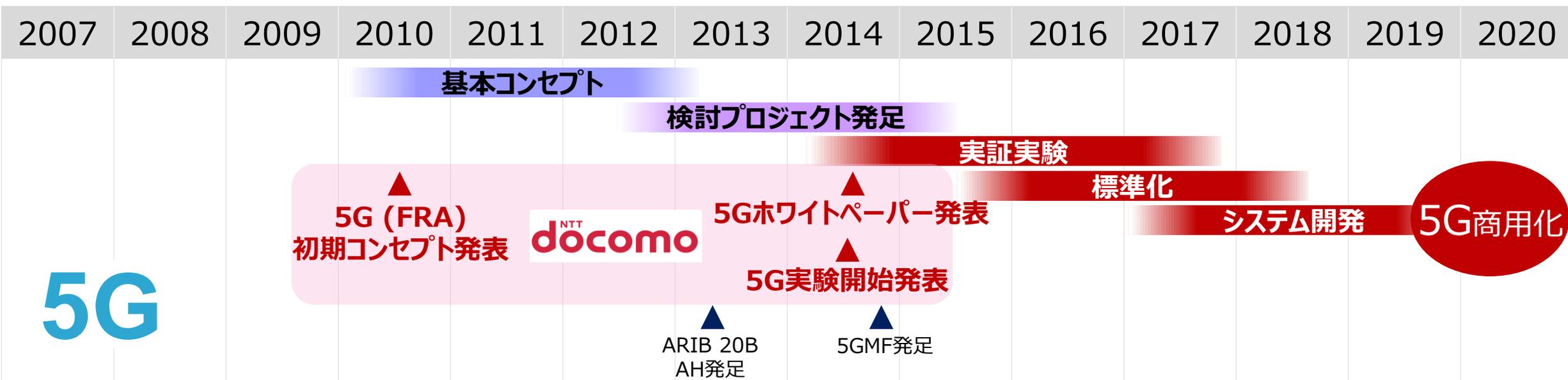
6Gに向けた無線を中心とする システムエミュレータの研究開発

富永 貴大, 須山 聡, 北尾 光司郎

株式会社NTTドコモ
6Gネットワークイノベーション部

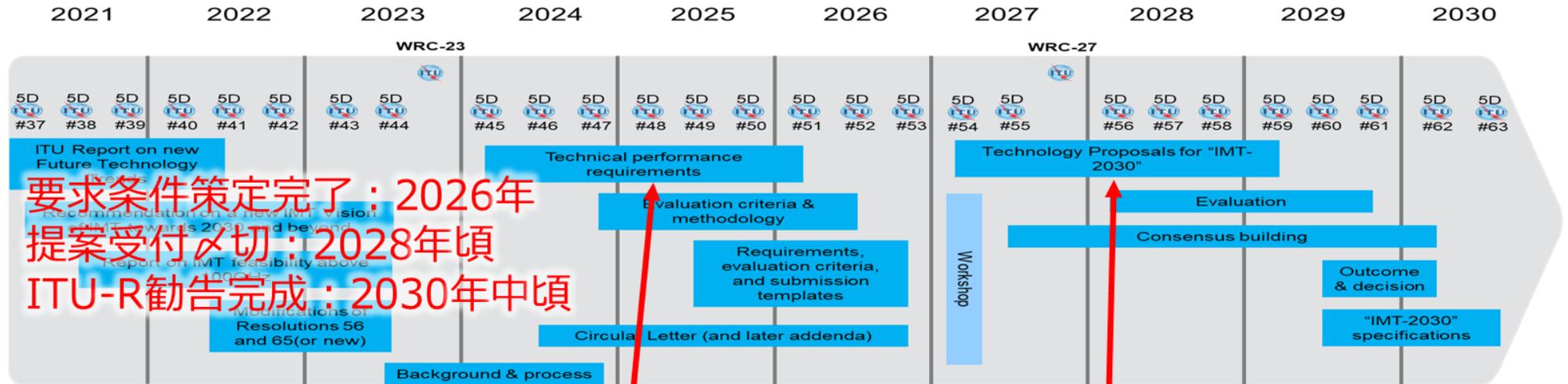


5G開発経緯と6Gスケジュール展望



6Gに向けた標準化スケジュール

- ITU-R WP5Dにおいて6Gに関するスケジュールが合意
- 3GPPにおける標準化もITU-Rに合わせて各リリースでの検討が進められる

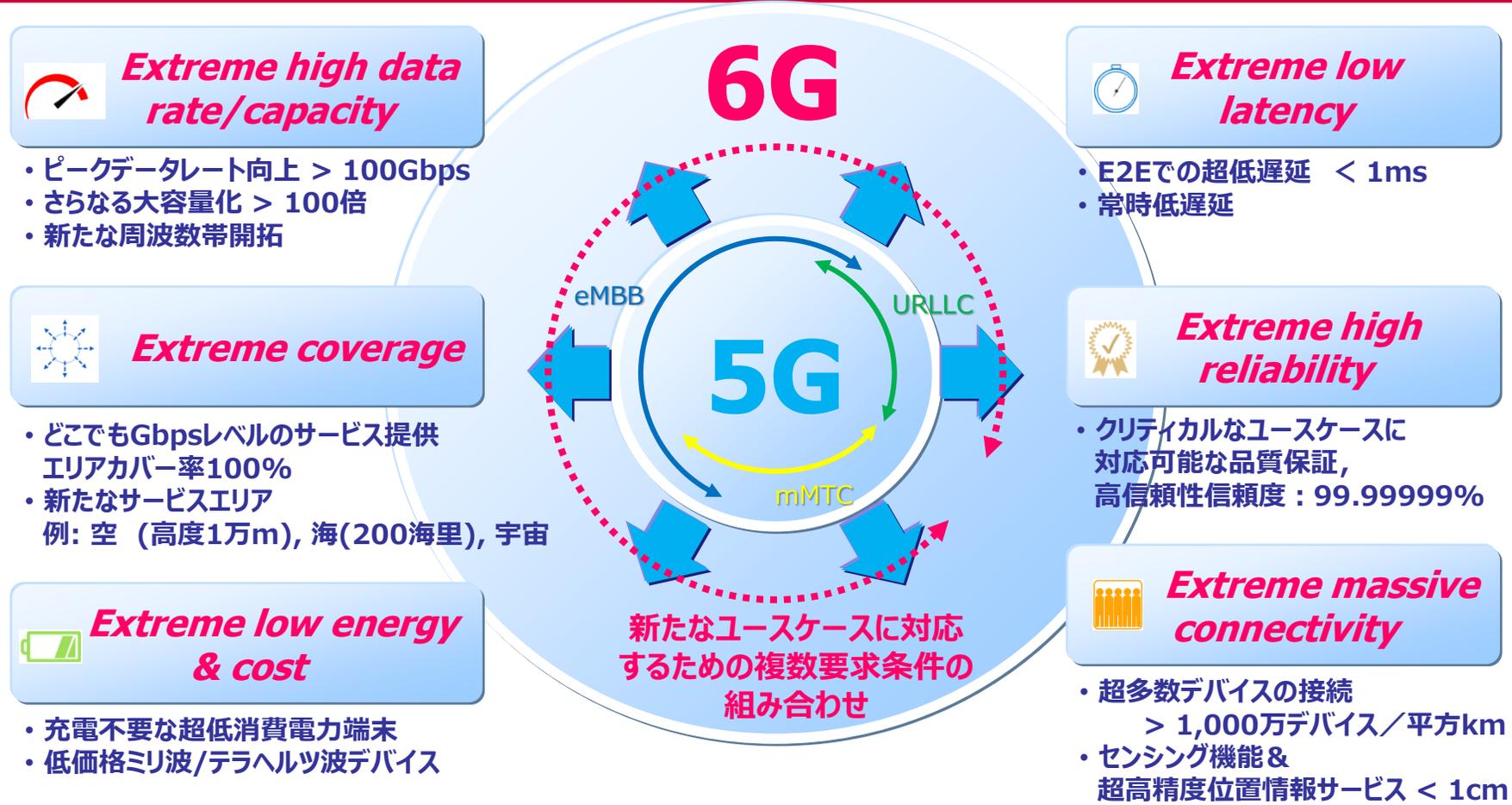


要求条件策定完了：2026年
 提案受付〆切：2028年頃
 ITU-R勧告完成：2030年中頃

Note 1: Meeting 5D#59 will additionally organize a workshop involving the Proponents and registered IEGs to support the evaluation process
 Note 2: While not expected to change, details may be adjusted if warranted. Content of deliverables to be defined by responsible WP 5D groups

出典：ITU-R WP5D 第41回
 会合議長報告 Chapter 6

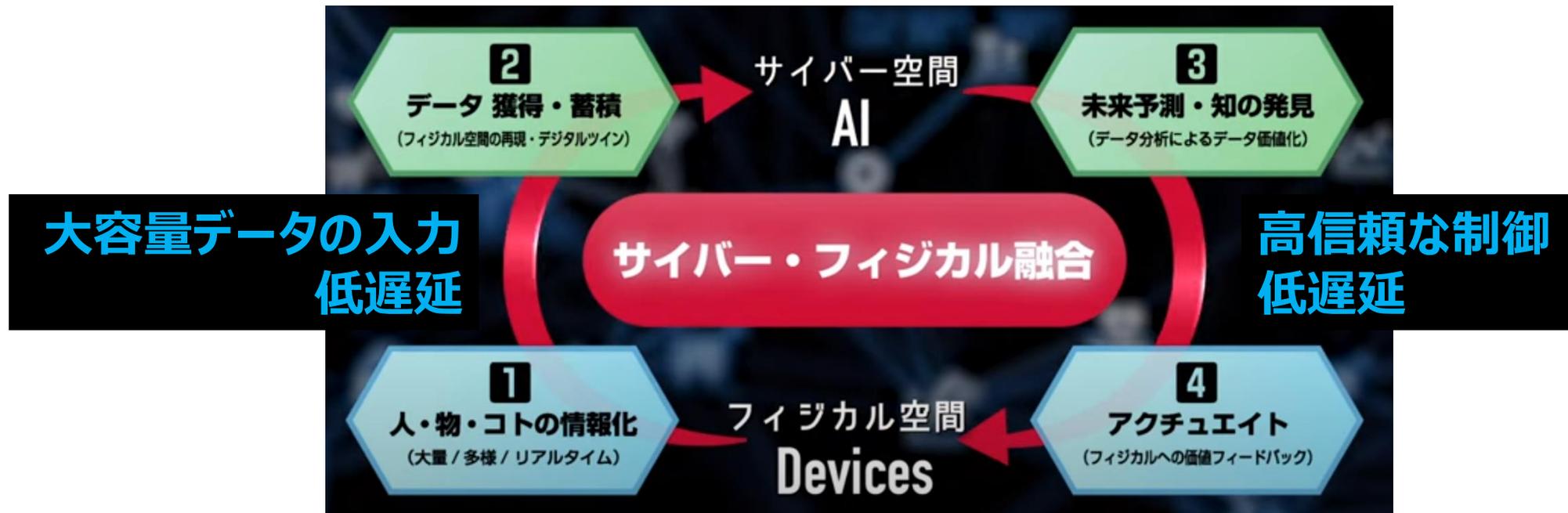




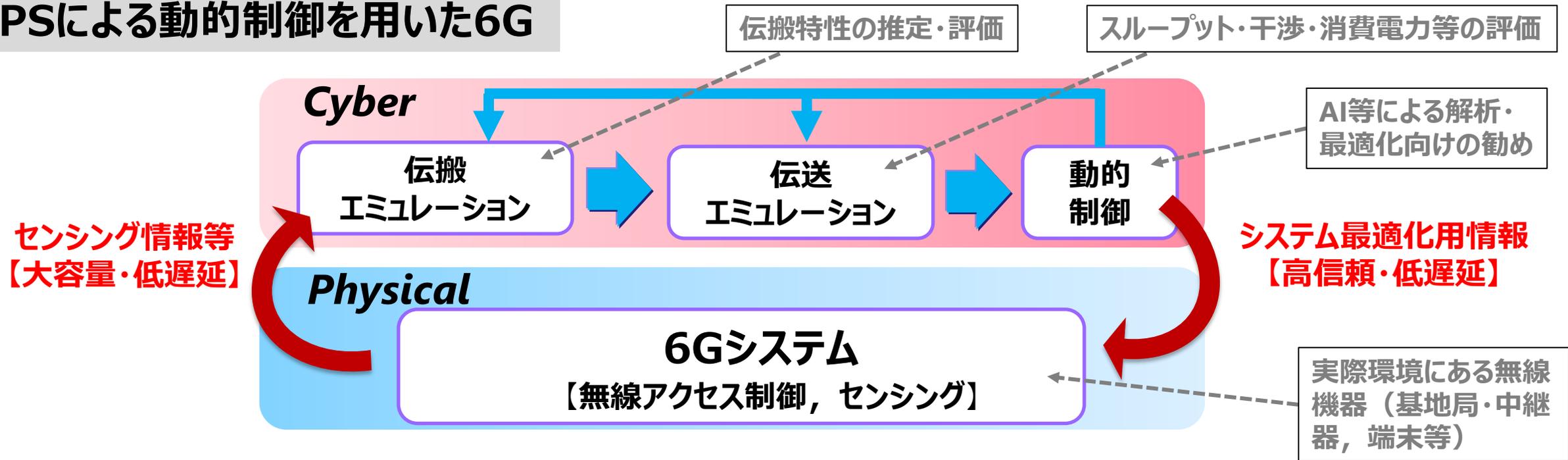
- 6Gではシステムのあらゆる領域においてAI技術が活用される
- 6Gにおいては通信用電波をセンシング用途に利活用する無線センシング技術により, 誤差センチメートル以下の高精度な端末の測位や周辺の物体検知等が可能

6Gが実現するCPSの高度化

- 2030年代における高度なサイバー・フィジカル融合では、AIが実世界をサイバー空間上に再現し（デジタルツイン）、実世界の制約を超えてエミュレートすることで「未来予測」や「新たな知」を発見することが可能
- これを実世界へのサービスへ活用することで、社会問題の解決等、様々な価値やソリューションの提供を実現
- 6Gの役割としては、実世界の映像やセンシング情報等の大容量かつ低遅延な伝送、高信頼かつ低遅延な制御信号伝送による実世界へのフィードバック（アクチュエイト）が想定され、高度なサイバー・フィジカル融合を実現する上では超高性能な無線通信が必要不可欠



CPSによる動的制御を用いた6G



- 6Gにおいても、システム性能の最大化、通信品質の担保、効率的なシステム運用のため、CPSによるシステム制御・最適化が導入されると考えられる
- 6Gの無線処理をリアルタイムにエミュレーションする「**6G無線システムエミュレータ**」の研究開発が必要であり、ドコモでは下記の研究開発を進めている
 - ・ **6Gシステムレベルシミュレータ**
 - ・ **高速伝搬シミュレーション技術**

6Gシステムレベルシミュレータ 「6Gシミュレータ」

6Gシステムレベルシミュレータの研究開発

6Gシミュレータのコンセプト

- 6Gシミュレータは弊社のホワイトペーパーが記載された6G技術コンセプトをリアルタイムシミュレータで可視化
- 6Gキーテクノロジーの性能評価や効果促進のためのツールとして活用
- 将来的には、サイバー空間における6G向けのシステム最適化ソフトウェアとして開発

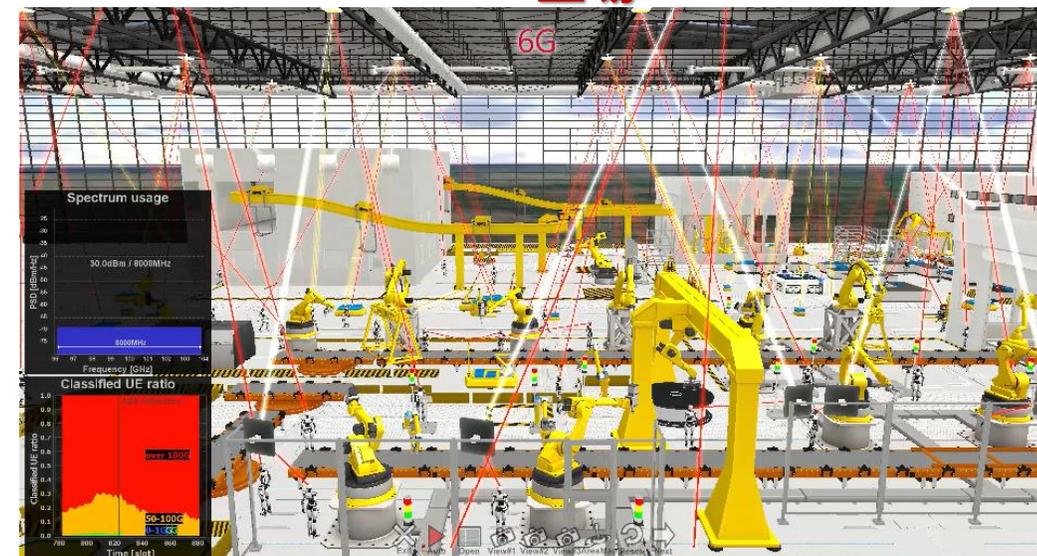
6Gシミュレータの概要

- 6Gの100Gbps超高速通信を実現するシナリオとし、ショッピングモール、工場における6Gの性能を評価
- システムレベルのシミュレータ
- Sub-THzの周波数帯及びMassive MIMO技術を利用し、ユーザあたりの通信速度100Gbps超を実現

ショッピングモール



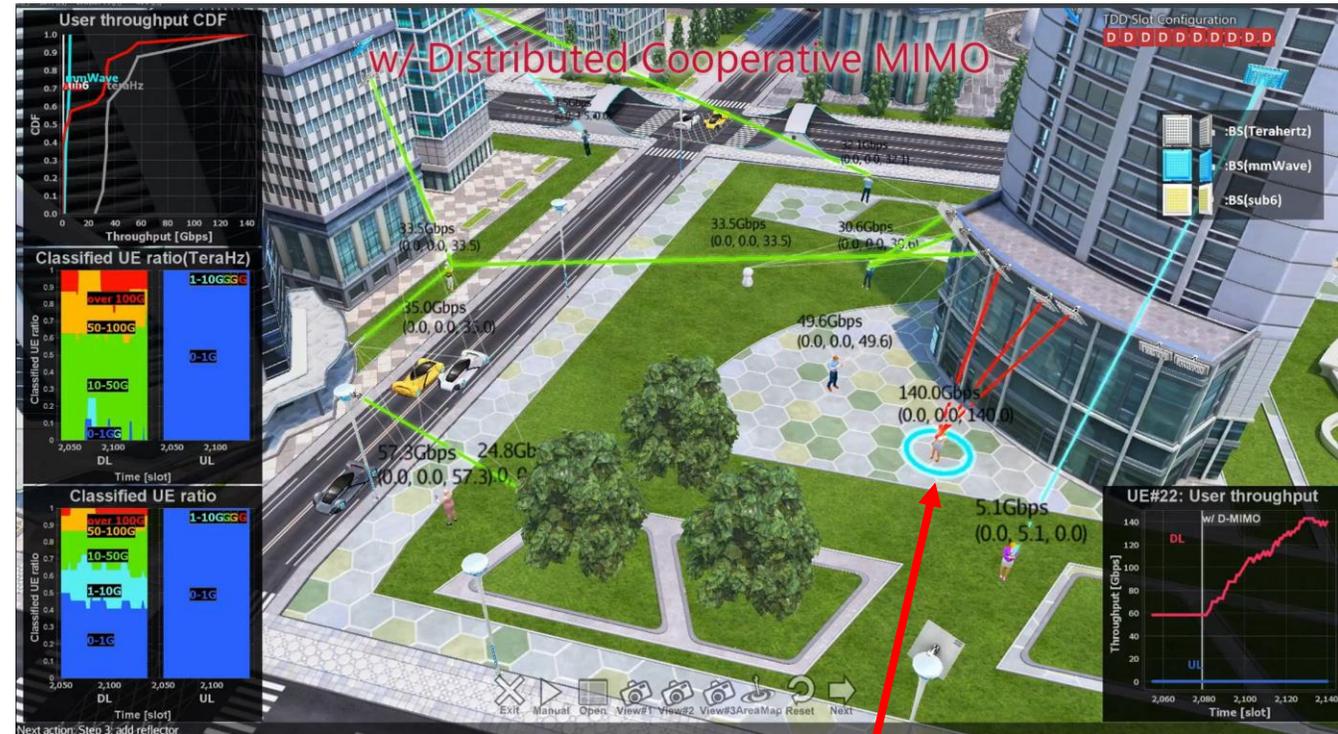
工場



屋外における6G性能の評価: 6Gシミュレータ最新版

- Sub-6, ミリ波, Sub-THzの周波数帯のBSを設置
- MSは全周波数帯を利用可能
- 受信電力が最大のBSと通信を確立

	Sub-6 (4.7 GHz)	ミリ波 (28 GHz)	Sub-THz (100 GHz)
帯域幅	400 MHz	400 MHz	8000 MHz
BS素子数 / サブアレー	16 (V:H = 4:4)	256 (V:H = 16:16)	1024 (V:H = 32:32)
BS局数	3	17	10
BSサブアレー数		9	
BSビーム数		9	
MS素子数 / サブアレー		16 (V:H = 4:4)	
MSサブアレー数		9	
MSビーム数		9	
ストリーム数 / MS		1, 2, 3, 4, 8 (4以上で100 Gbps)	



ユーザスループットは100Gbps以上達成

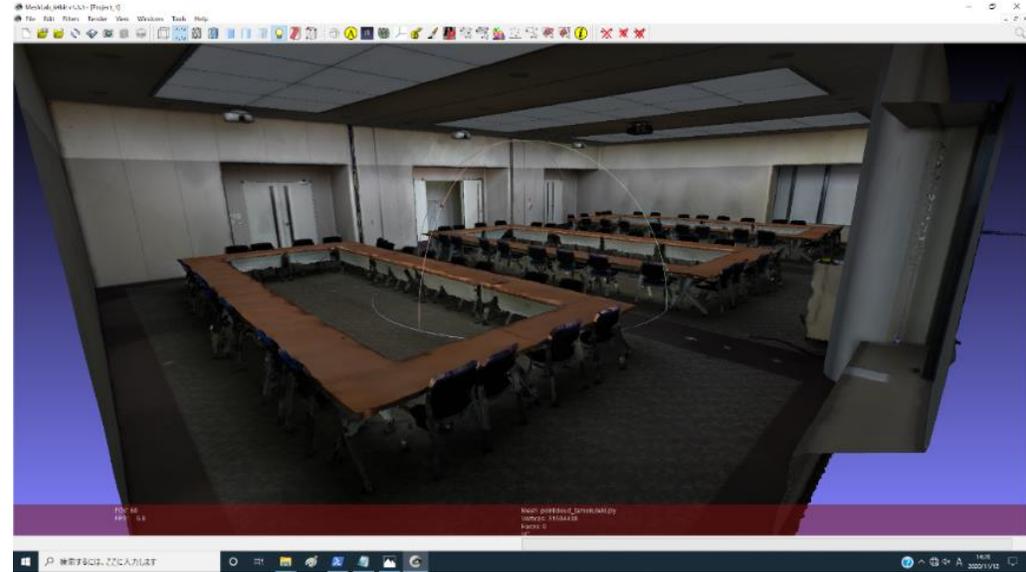
- ✓ Sub-THz (100 GHz) に対応したBSに対して分散MIMO技術（同時に複数のBSから信号送信）を適用した場合の屋外環境でのスループットを評価
- ✓ 本シミュレータでは分散MIMOにより最大3BSと接続でき、THzの課題である電波の直進性の強さに対して複数BSからの見通し波を活用してスループットを大きく向上

点群データに基づく実環境モデルを用いた6Gシミュレータ

オフィス環境



点群データ

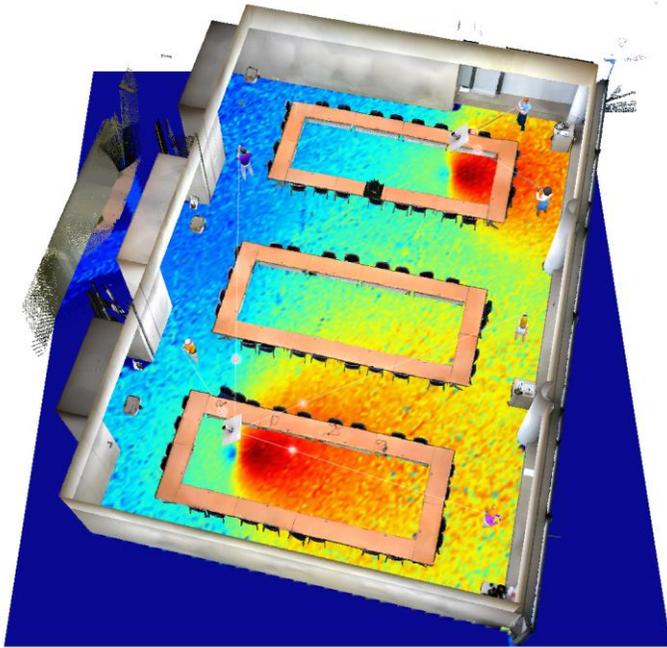


ポリゴンモデル
(レイトレーシング計算用)

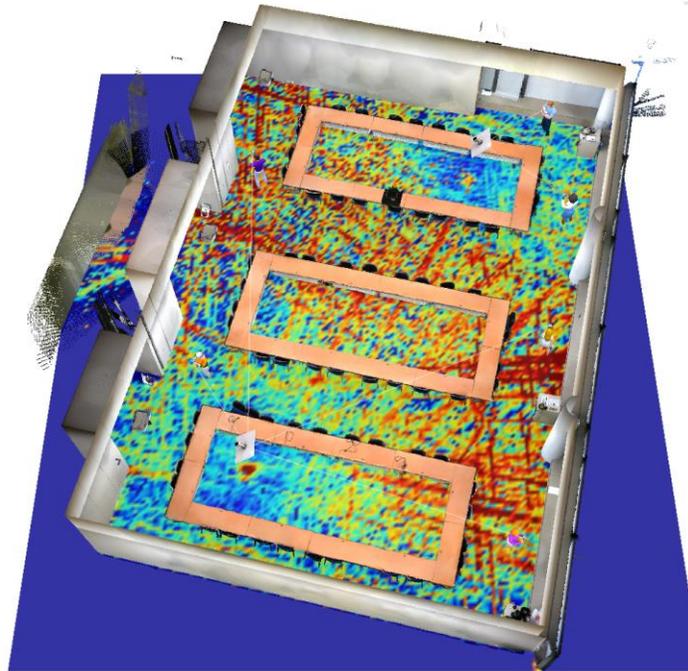


100 GHzにおける伝搬特性のカラーマップ

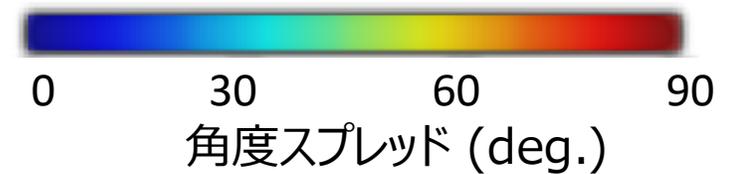
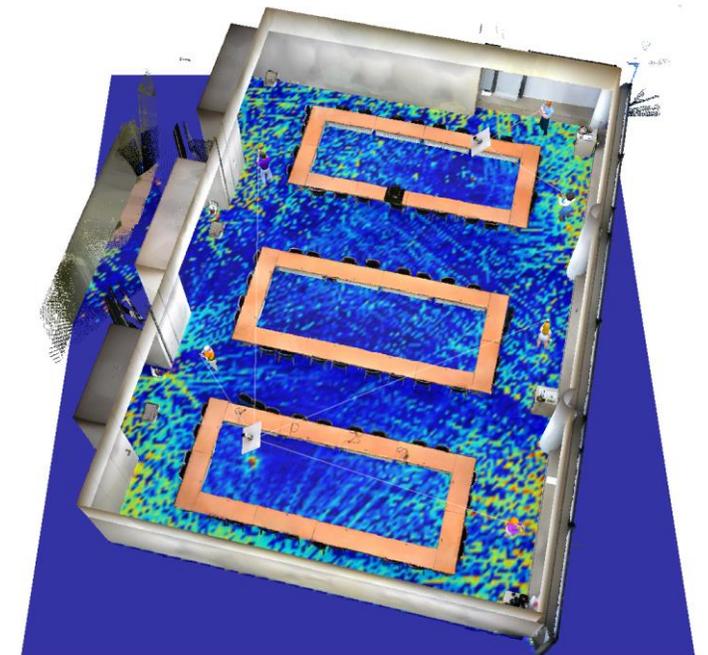
受信レベル



遅延スプレッド



MS側水平面内の角度スプレッド

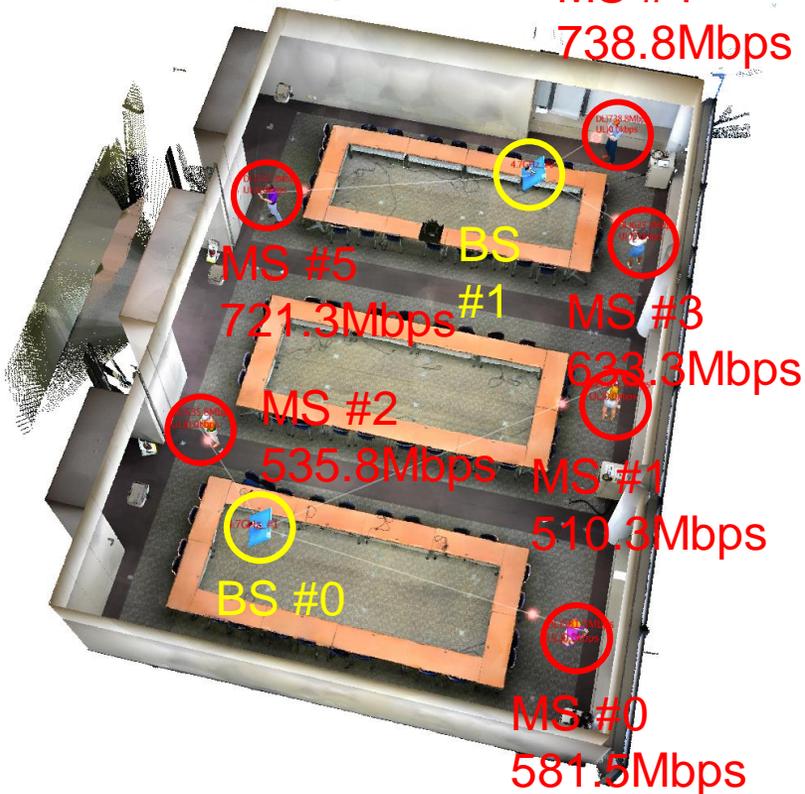


- BS付近の受信レベルが高い。
- 反射の影響により、会議室の壁面付近において角度スプレッドが大きい。

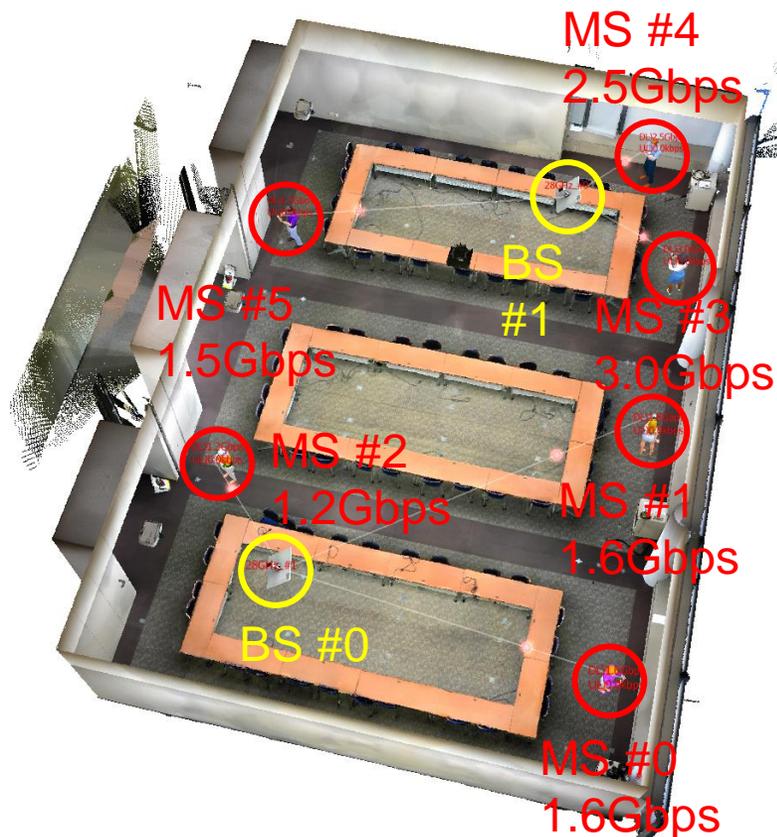
点群データに基づく実環境モデルを用いた6Gシミュレータ

DLのユーザスループット

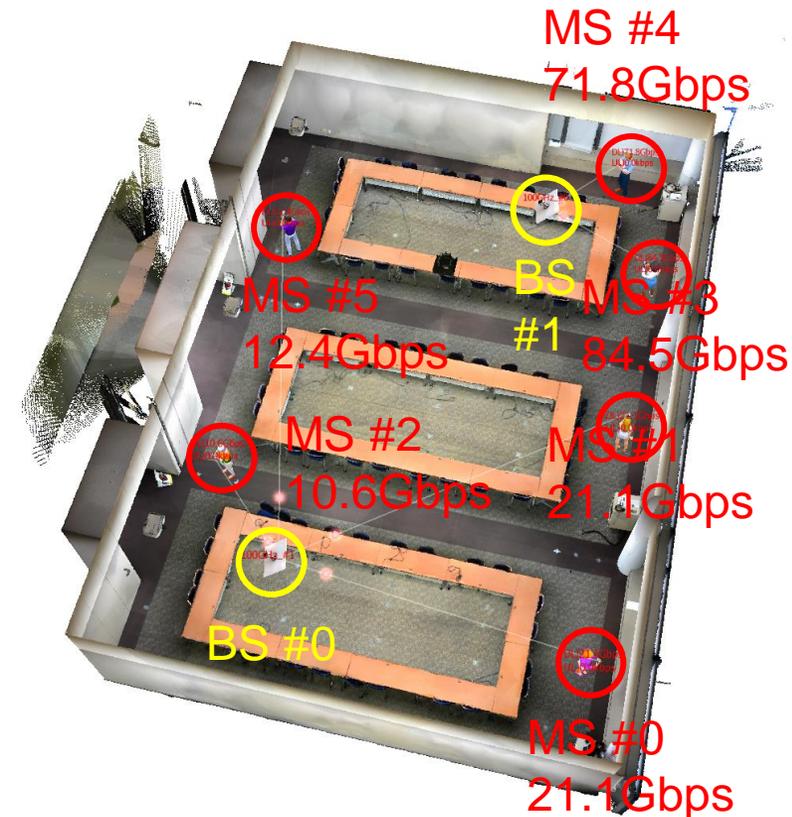
4.7 GHz



28 GHz



100 GHz



- 受信レベルが高く、角度スプレッドが大きいエリアに存在するMS#3やMS#4が、比較的高いスループットを達成
- 4.7, 28, 100 GHzにおける6台のMSのスループット平均値は、それぞれ0.62, 1.9, 37 Gbps程度であり、高い周波数帯を利用することで、広帯域化の効果によりスループットが向上することを確認。



- 6Gシミュレータでは、評価ターゲットとした無線アクセス技術のみの一部のリンクレベルシミュレーション（LLS）機能しか実装されていない。全てのLLSをリアルタイムに動作させることは現状での計算性能では難しい
- 伝搬シミュレーション部も地物による遮蔽は考慮しているが、詳細なモデリングは入っていない（過去にはレイトレーシング法で生成した伝搬チャネルをストレージに保存して活用していたバージョンもあり）
- 研究者がオープンに活用できるようなプラットフォームに実装し、研究対象となる技術のみに関して評価できるようにすべき
- すでに開始している国内外の主要ベンダとの6G実証実験もトレースしたい
- ユースケースに対応して無線技術だけでなく上位のレイヤも含めてシミュレーションができるべき

高速伝搬シミュレーション技術 「カラーイメージ法」

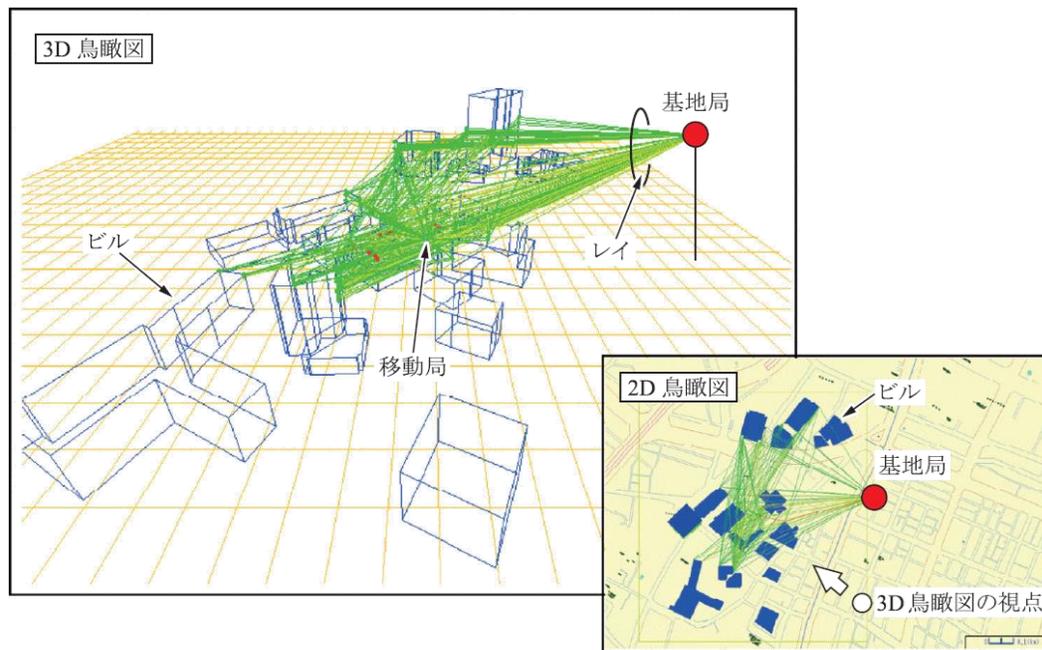
- **建物データベースを活用したモデルベースのレイトレーシング法**

レイトレーシング法はモデルが複雑になると計算時間がかかるため、置局設計等の静的な高精度シミュレーションに適しており、リアルタイムまでの高速化は難しい

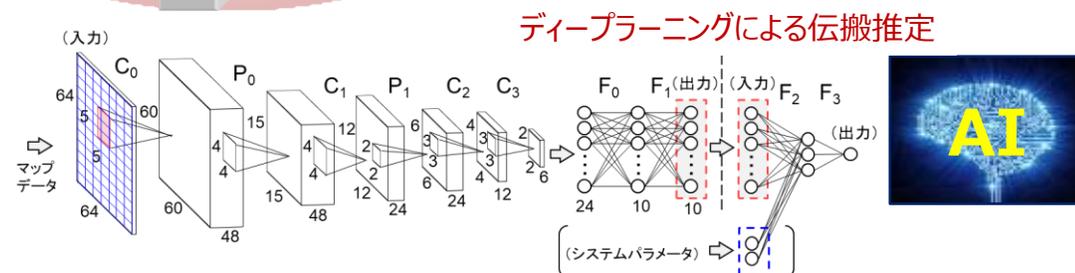
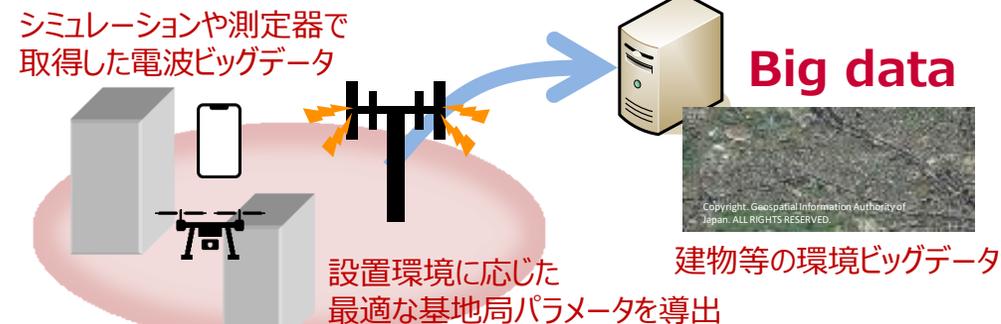
- **AIによる伝搬シミュレーション**

サービスを提供している基地局や端末で測定された伝搬データと高精度位置情報をネットワークに吸い上げ、それらをビッグデータとして機械学習に用いることで、AIにより各位置での伝搬特性を推定
学習に時間はかかるものの、学習が完了すれば、高速処理が可能

レイトレーシング法 (RTM)



AIによる伝搬シミュレーション



提案する高速伝搬シミュレーション法：カラーイメージ法

- 直接波及び散乱波を考慮
- 散乱波の探索及び計算のため、すべての建物の壁面に識別色（例:RGB）を割り当てた上で、これらの壁面を送受信点から見たイメージに変換し、両イメージからお互いの色コードが一致する壁面を散乱壁面として一括抽出
- 散乱壁面の色のピクセル数及び係数の乗算で、散乱波の受信電力を計算

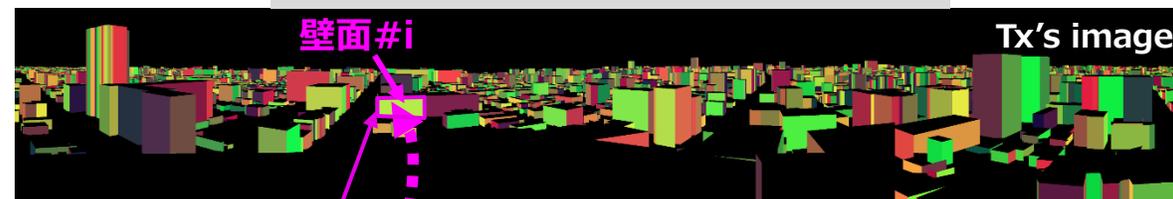
$$P_R = \sum_i k(i) \cdot N_{P,T}(i) \cdot N_{P,R}(i)$$

$k(i)$: 係数で、壁面の反射係数や入射角, 反射角, 周波数等に依存

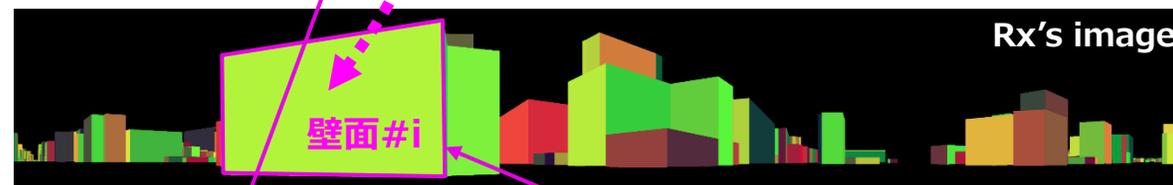
性能

- ✓ 従来のレイトレーシング法と比較して、評価環境にも依存するが、数百～数千倍以上の高速化が可能
- ✓ 散乱壁面の面積（ピクセル数）を用いた受信電力計算によりレイトレーシング法より高精度な推定が可能

送受信点から見たカラーイメージ

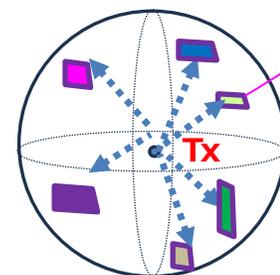


送受信で同一色の壁面を一括探索



ピクセル数: $N_{P,T}(i)$

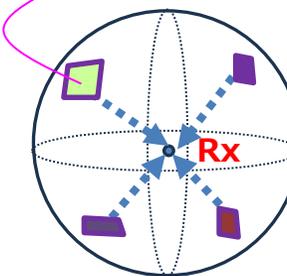
面積: $S'_T(i)$



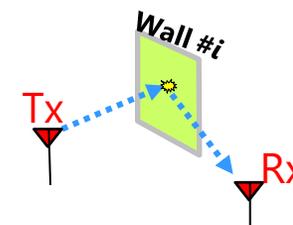
単位球面: Tx送信球

ピクセル数: $N_{P,R}(i)$

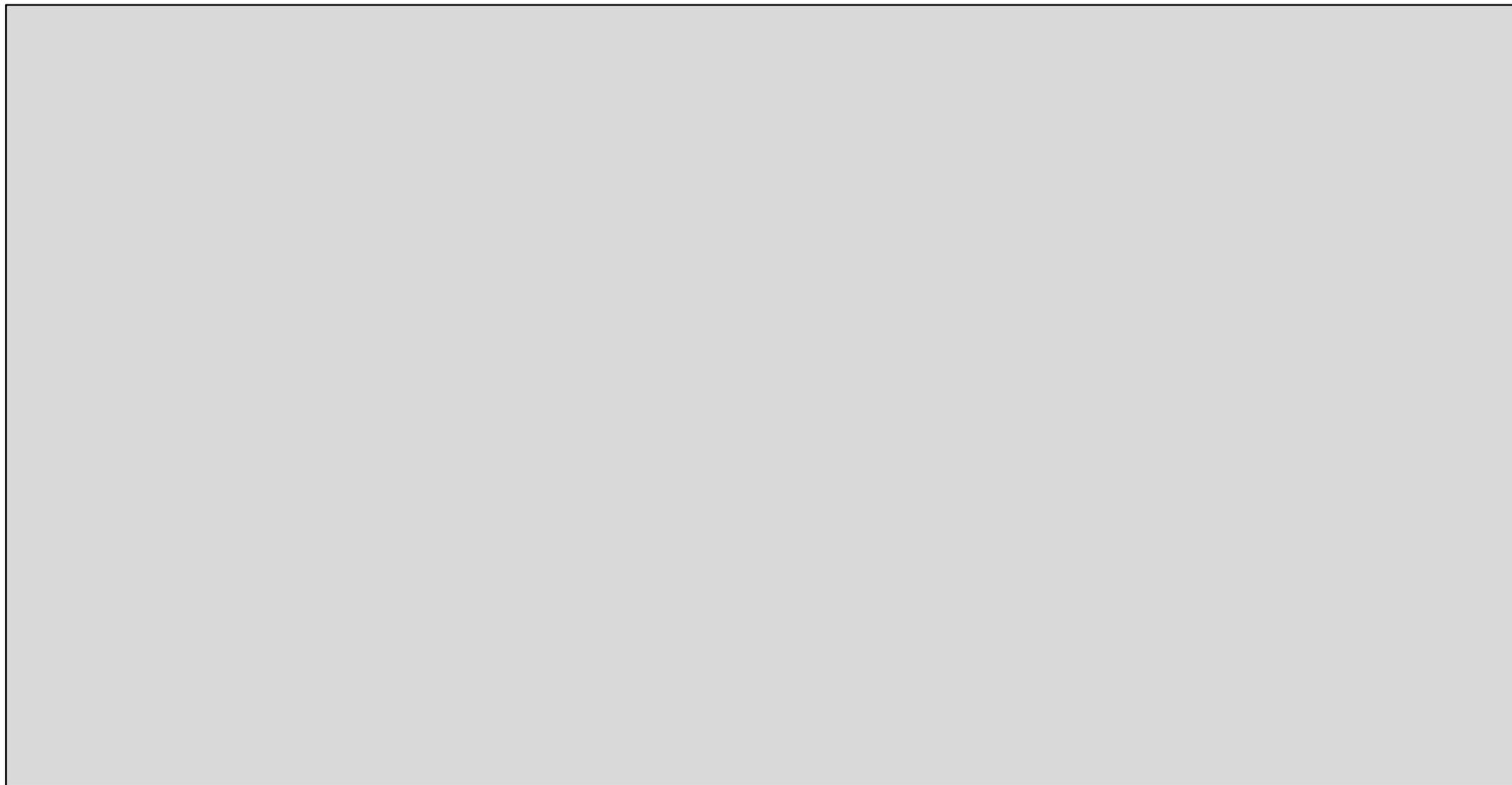
面積: $S'_R(i)$



単位球面: Rx受信球



カラーイメージ法を用いたエリア推定ツール【動画】



- カラーイメージ法は従来法と比較して高速・高精度に伝搬シミュレーションが行えているが、リアルタイム性や精度の点で十分でない。ただし、システムからの要求性能やカラーイメージ法で実現できる性能限界も見極める必要がある
- より高精度に計算を行うためには、点群データなどを活用した高精度なモデリングが必要。モデル化されていない実世界の移動物体等のモデリングは6Gの無線センシング技術とLiDARや画像解析等の組み合わせが重要
- CPSでの伝搬エミュレーションでは、サイバー空間において将来の伝搬チャネルを端末の移動速度・方向や環境の変化に合わせて高精度に予測する必要がある
- モデルベースの推定に加えて、機械学習等のAIによる推定を組み合わせることで、より柔軟でかつ外乱に対して耐性を持った伝搬エミュレーションが可能

- 弊社が考える6Gが実現するCPSの高度化とそれに必要な6Gの性能について紹介
- CPSが実現する6Gの最適化とそのため6G無線システムエミュレータの研究開発の必要性について説明
- 弊社が開発した6Gシミュレータ及びその課題について紹介
 - サブテラヘルツ帯を活用することでユーザあたり100Gbps超のスループットを達成可能
- 弊社が提案するカラーイメージ法について計算方法とその性能を紹介。また、高速伝搬シミュレーション技術の課題についても説明
 - レイトレーシング法より高速（数百～数千倍以上）かつ高精度な伝搬推定が可能

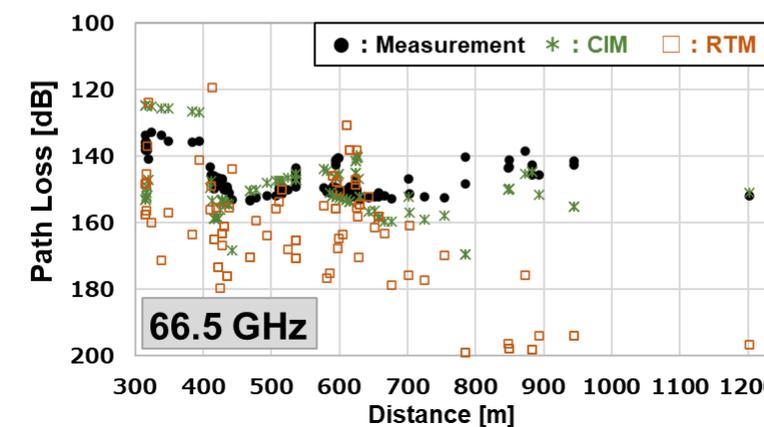
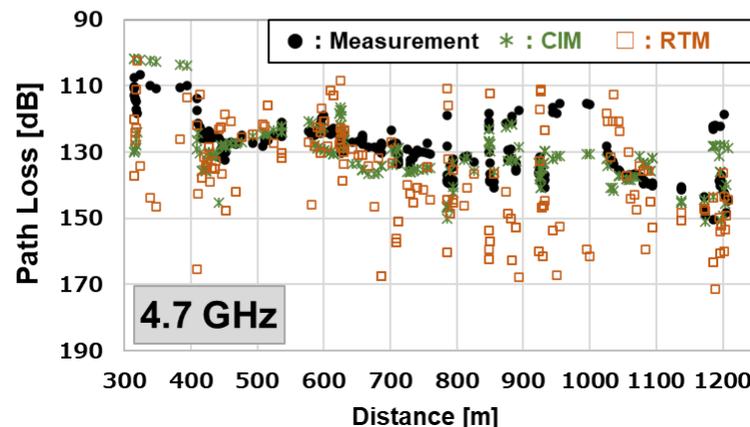
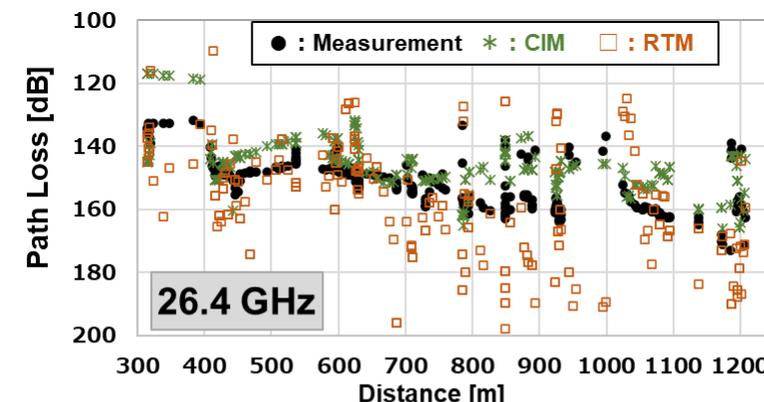
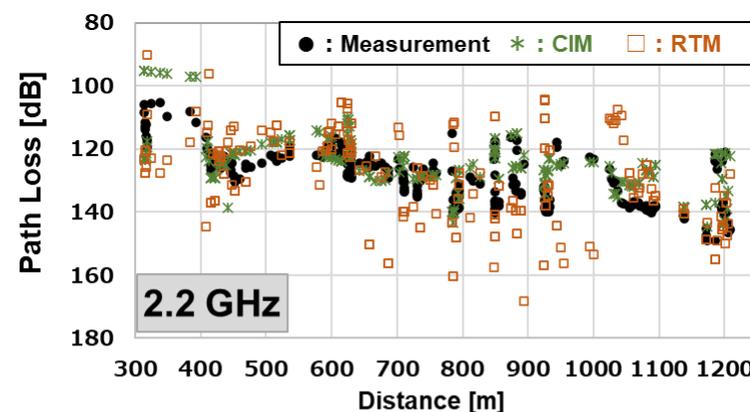
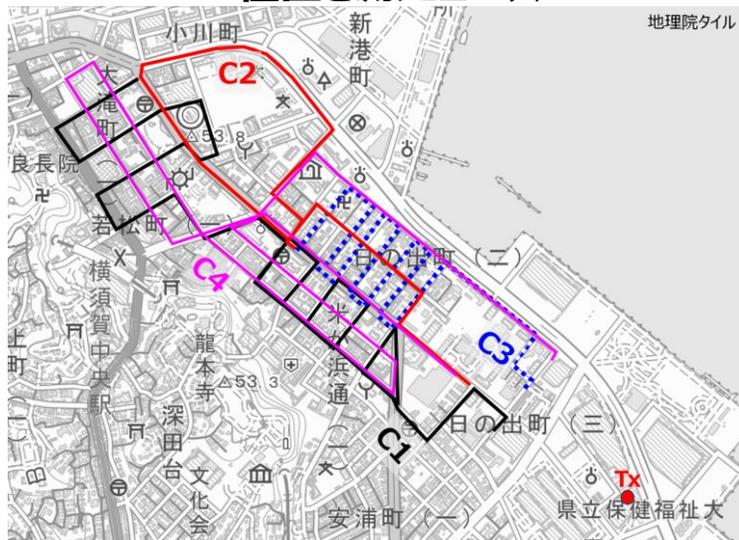
カラーイメージ法の推定精度 (参考資料)

伝搬測定環境と条件

測定環境	神奈川県横須賀市の市街地環境	
周波数	2.2, 4.7, 26.4, 66.5 GHz	
送信局 (Tx) の高さ	26 m	
受信局 (Rx) の高さ	2.5 m	
送信局アンテナの3dBビーム幅	60 deg.	2.2, 4.7, 26.4GHz
	30 deg.	66.5 GHz
受信局アンテナの3dBビーム幅	360 deg. (オムニ)	
建物の平均高	20 m	
短区間長	10 m	

- カラーイメージ法 (CIM)は実測値とよく一致。
- レイトレーシング法(RTM)は実測値に対し, 大きな差分あり

Tx位置と測定コース



5G Evolution & 6G

Technologies that enrich human life

Thanks!

Changing worlds with you.

^{NTT}
docomo