

# Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ帯・ミリ波帯を用いた無線通信システムに関する研究

2023年5月31日(水)

株式会社KDDI総合研究所

先端技術研究所 無線部門 無線通信方式グループ

大関 武雄

## ■ 自己紹介、会社紹介

## ■ 研究紹介とMATLABを使った評価事例

- Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ帯・ミリ波帯の利用を目指した研究開発
- 中継通信端末を用いたミリ波帯の有効利用を目指した研究開発

# 自己紹介、会社紹介

■ 名前  
大関 武雄



■ 所属  
株式会社KDDI総合研究所  
先端技術研究所  
無線部門 無線通信方式グループ

■ 現在の職務内容

- Beyond 5G/6Gに向けた無線通信システムの研究開発
- 3GPP RAN working group 1での標準化活動

社名：株式会社KDDI総合研究所

設立：1998年4月1日

株主構成：KDDI株式会社、京セラ株式会社、トヨタ自動車株式会社

代表取締役所長：中村 元

## 沿革

### ・株式会社KDDI研究所

- 1953年 国際電信電話株式会社（KDD）の研究部として発足
- 1998年 KDDの改組に伴い、株式会社KDD研究所を設立
- 2001年 株式会社京セラDDI未来通信研究所と合併し、株式会社KDDI研究所に社名変更

### ・株式会社KDDI総研

- 1990年 KDDグループの総合的なシンクタンクとして、株式会社KDD総研を設立
- 2002年 株式会社KDDI総研に社名変更

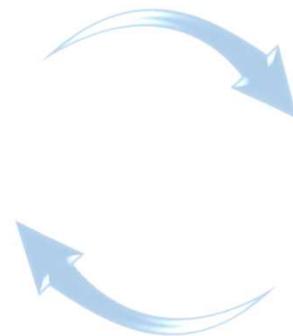


### 株式会社KDDI総合研究所

2016年 株式会社KDDI研究所、株式会社KDDI総研を合併し、株式会社KDDI総合研究所を設立

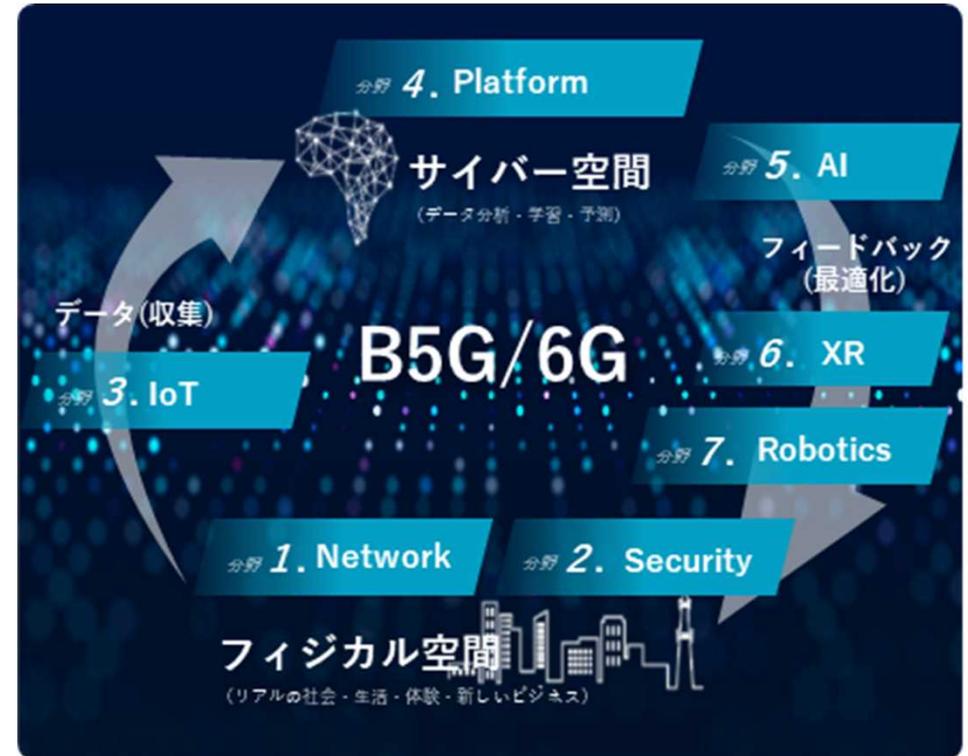
## KDDI research atelier

LXテクノロジーでパートナーと共に  
新しいライフスタイルとビジネスを創造



## 先端技術研究所

Beyond 5G/6G時代の  
先端テクノロジーで世界をリード





## ネットワーク（光）

Beyond 5G/6G時代を見据えた次世代光インフラ技術に関する研究開発



## ネットワーク（無線）

超高速・大容量、超低遅延、超多数同時接続を実現する、Beyond 5G/6G時代の無線通信技術に関わる研究開発



## ネットワーク（NW）

Beyond 5G/6G時代のコネクティッドサービスを収容するためのネットワーク制御・運用技術に関する研究開発



## AI

様々な社会課題の解決のために、フィジカル空間のヒト、モノ、コトを理解・予測し、それらの変容を促すAIに関する研究開発



## セキュリティ

AIや量子コンピュータ時代を見据えた次世代セキュリティに関する研究開発



## XR

フィジカル空間とサイバー空間の相互作用による、時空を超えた体験創出に関わる研究開発



## ■ KDDI総合研究所 HP

<https://www.kddi-research.jp/>



## ■ KDDI research atelier HP

<https://rp.kddi-research.jp/atelier/>

# Beyond 5G/6Gに向けたテラヘルツ帯・ミリ波帯の利用 を目指した研究開発

本パートでご説明する研究(一部除く)は、国立研究開発法人情報通信研究機構(NICT)の委託研究(00401)を実施したものです。

# Beyond 5G/6Gに向けた社会的要件

没入型メディア体験の実現に必要な、サイバー・フィジカル間の**双方向大容量通信**の実現  
 人手不足解消に寄与するロボットの操作を可能とする、**いつでも・どこでも**安定した通信の実現

## 双方向大容量通信のユースケース例



サイバー空間上での  
エンターテインメント



ホログラフィックコミュニケーション

出展) <https://about.fb.com/news/2021/10/facebook-company-is-now-meta/>

## いつでも・どこでも安定した通信を求めるユースケース例



駅構内ロボット

出展) 東京メトロ (駅構内ロボットの実証実験)



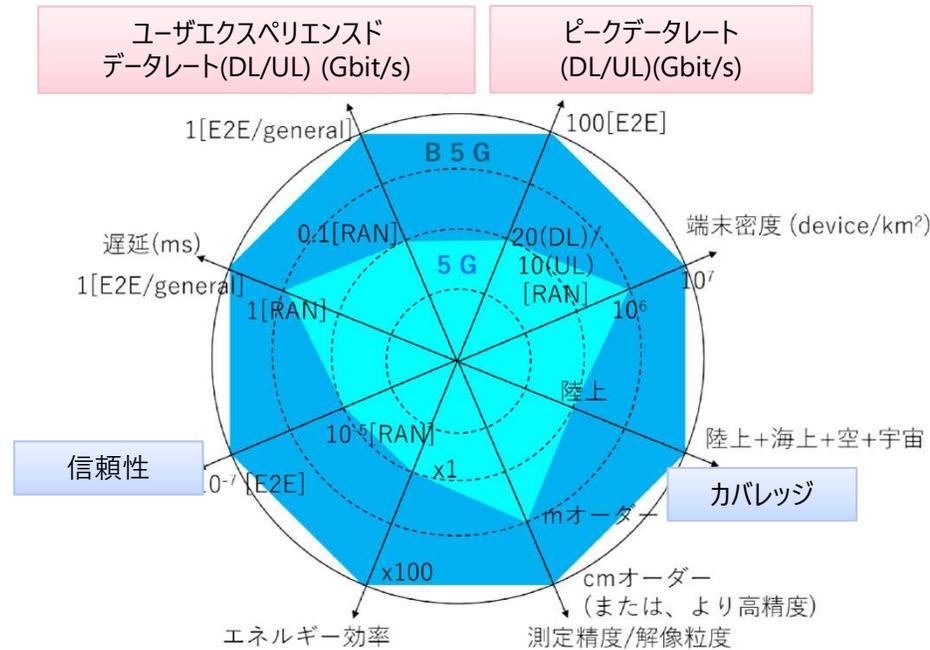
自動伐採作  
業車

自動  
集材機

自動走行  
フォワーダ

出展) 「林業イノベーション現場実装推進プログラム」林野庁  
から抜粋

### B5G KPI

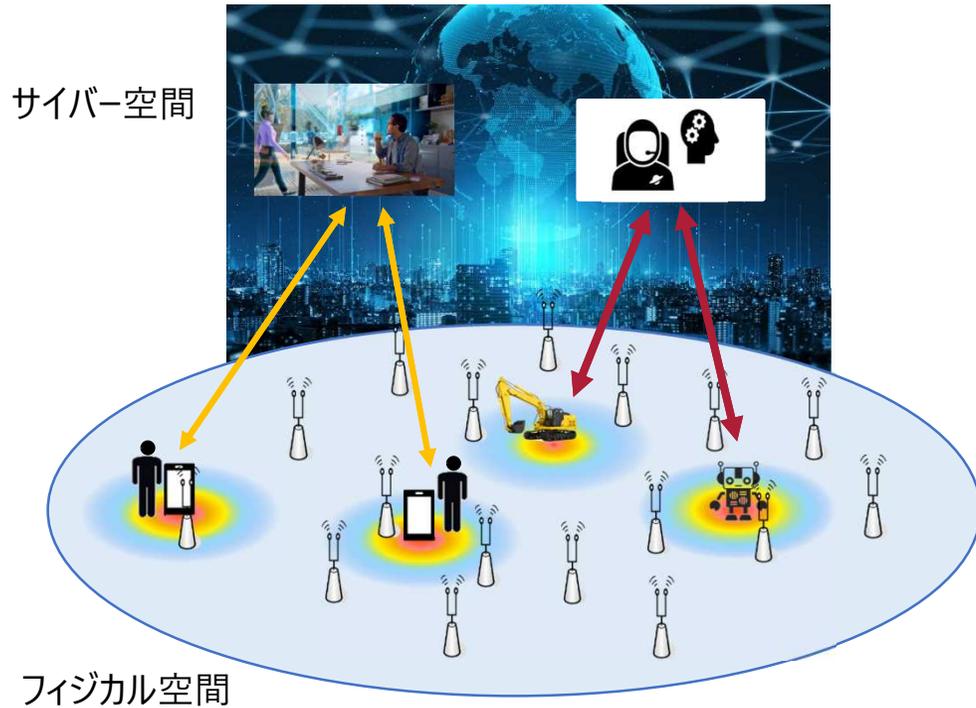


出展) Beyond 5G 推進コンソーシアム、白書(2022年9月)

Beyond 5Gでは、大量のデータをいつでも・どこでも双方向に送受信できる無線ネットワークが重要  
「セル境界での無線品質劣化」や「上りリンクの伝送速度不足」の克服が必要

## Beyond 5G/6G

いつでも・どこでも、大量のデータを双方向にやり取り



## 5G

### 問題点

- セル境界での無線品質劣化

### 要因

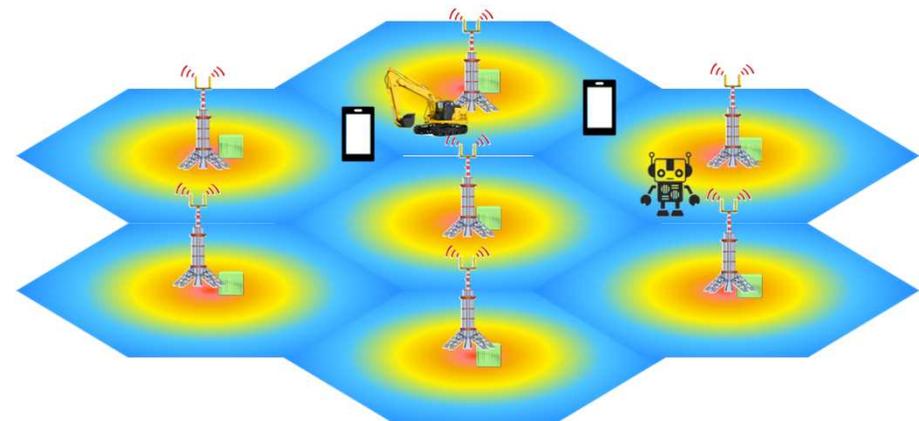
- 各基地局が独立してユーザ端末と通信

### 問題点

- 上りリンクの伝送速度が下りリンクより劣位

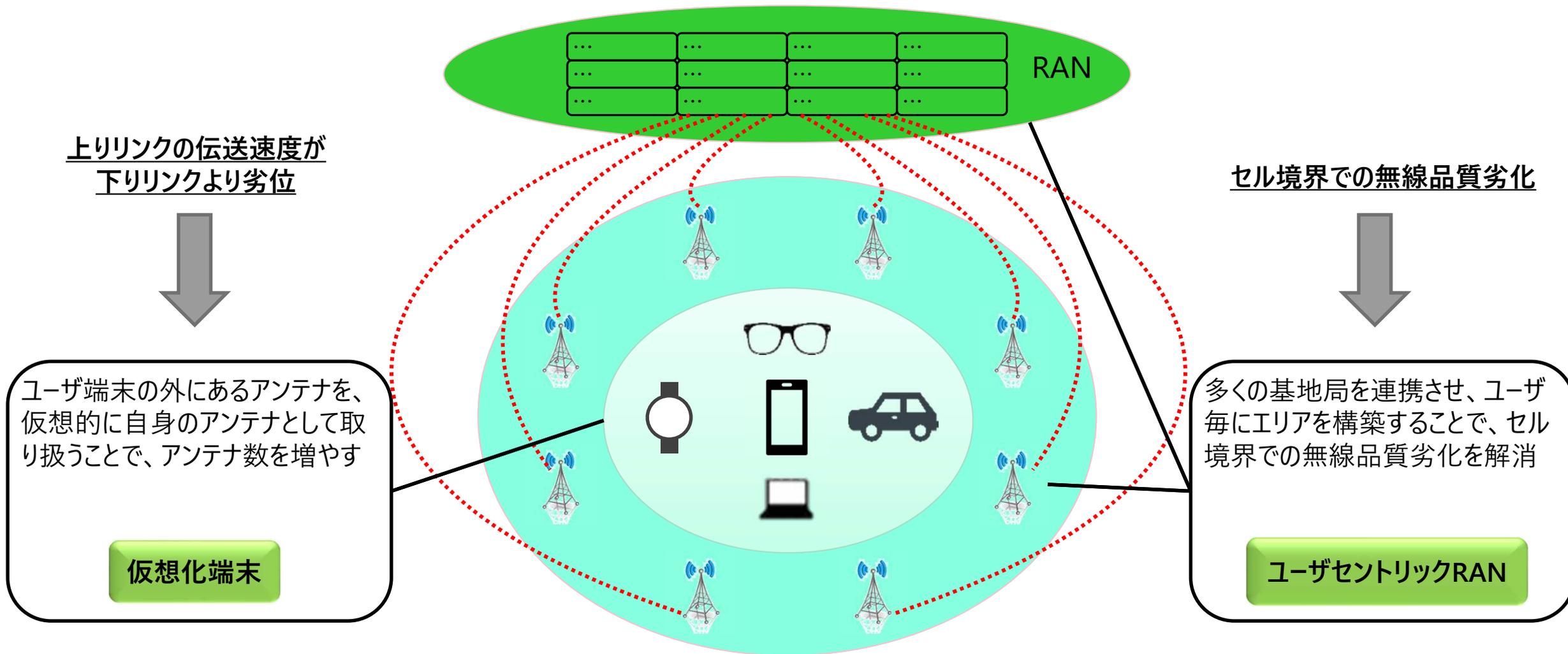
### 要因

- アンテナ数が少ない、、、



# Beyond 5Gを実現する「ユーザセントリックアーキテクチャ」

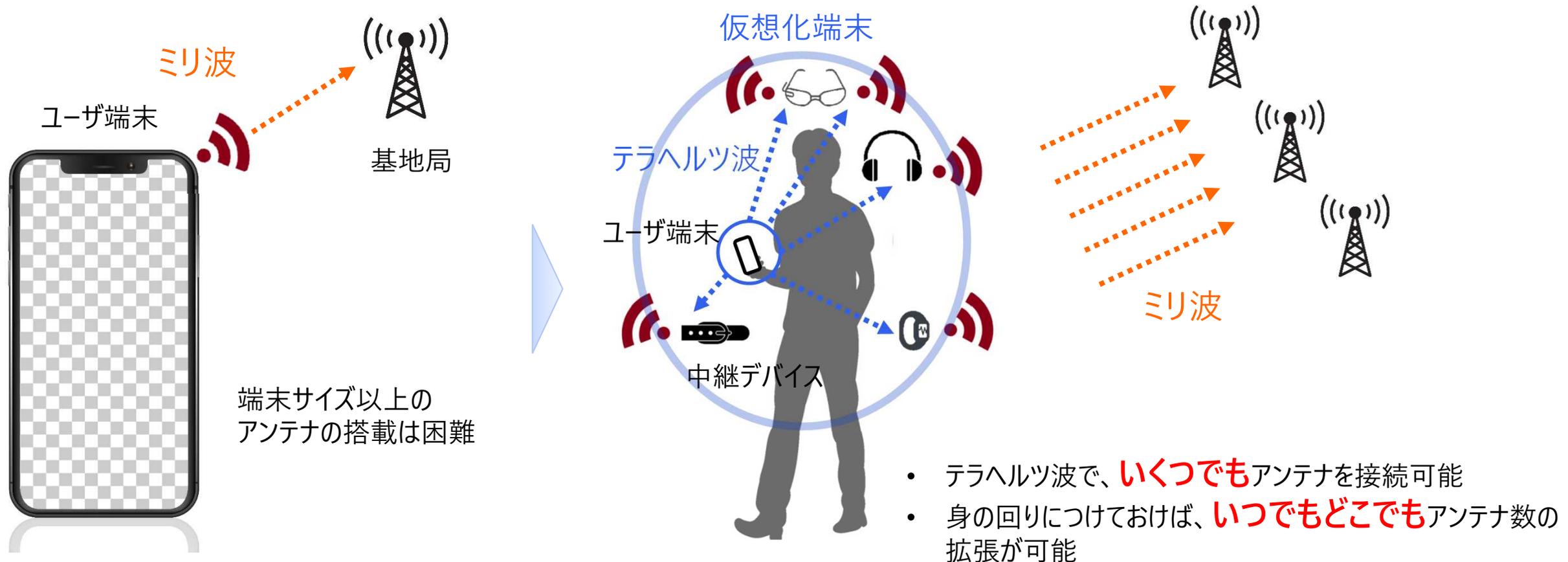
ユーザを取り巻く通信環境や、各ユーザの通信要求に適應して、  
ユーザが存在するあらゆる場所で高い通信性能を提供し続ける、ユーザ中心の無線通信システム



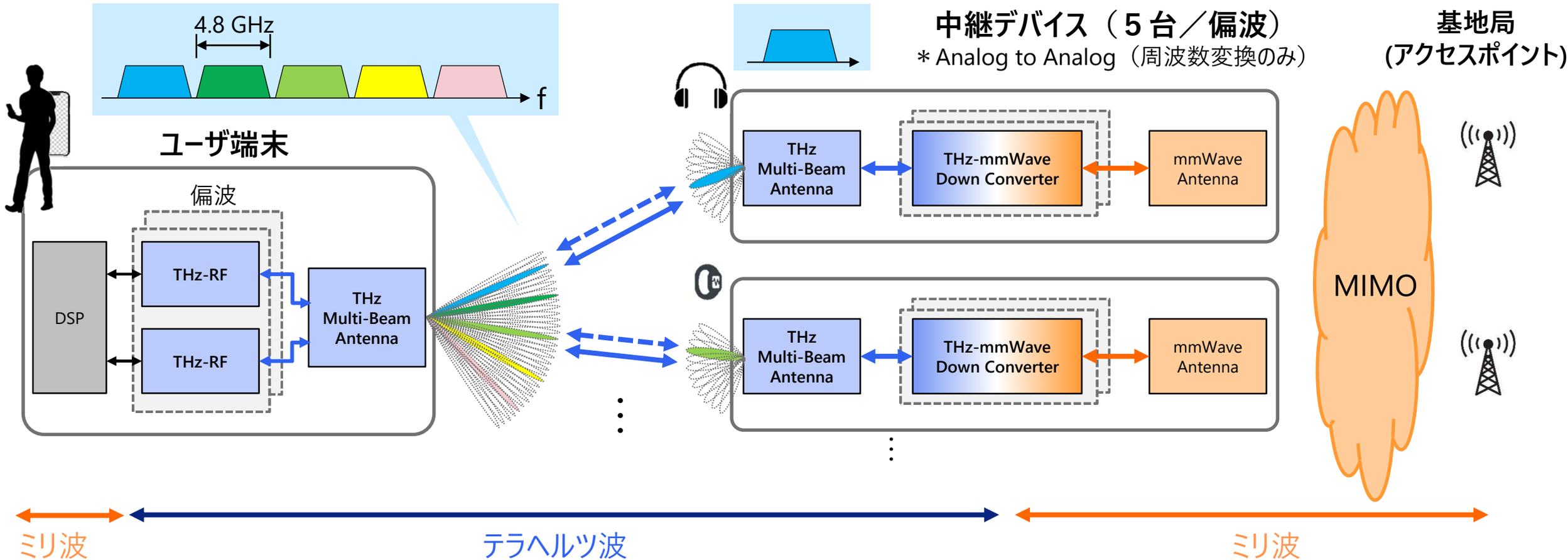
# 仮想化端末

# 仮想化端末とは？

ユーザ端末と、中継デバイス上のアンテナを無線（テラヘルツ波）接続  
 ユーザ端末で利用できるアンテナ数を大幅に拡張



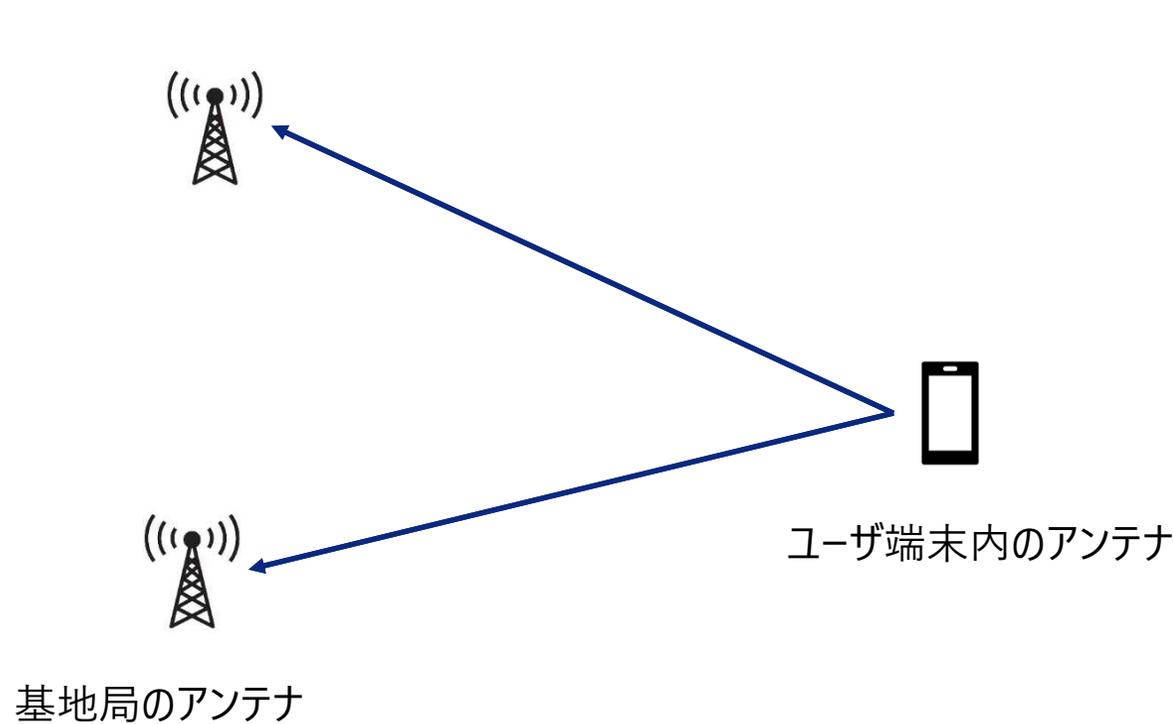
テラヘルツアンテナさえあれば、**中継デバイスの数だけ**アンテナ数を拡張できる  
⇒ 10多重まで拡張すれば、上り**96Gpbs**も達成可能！



## 分散した基地局アンテナと分散した仮想化端末の中継デバイスとの間での伝送速度を評価

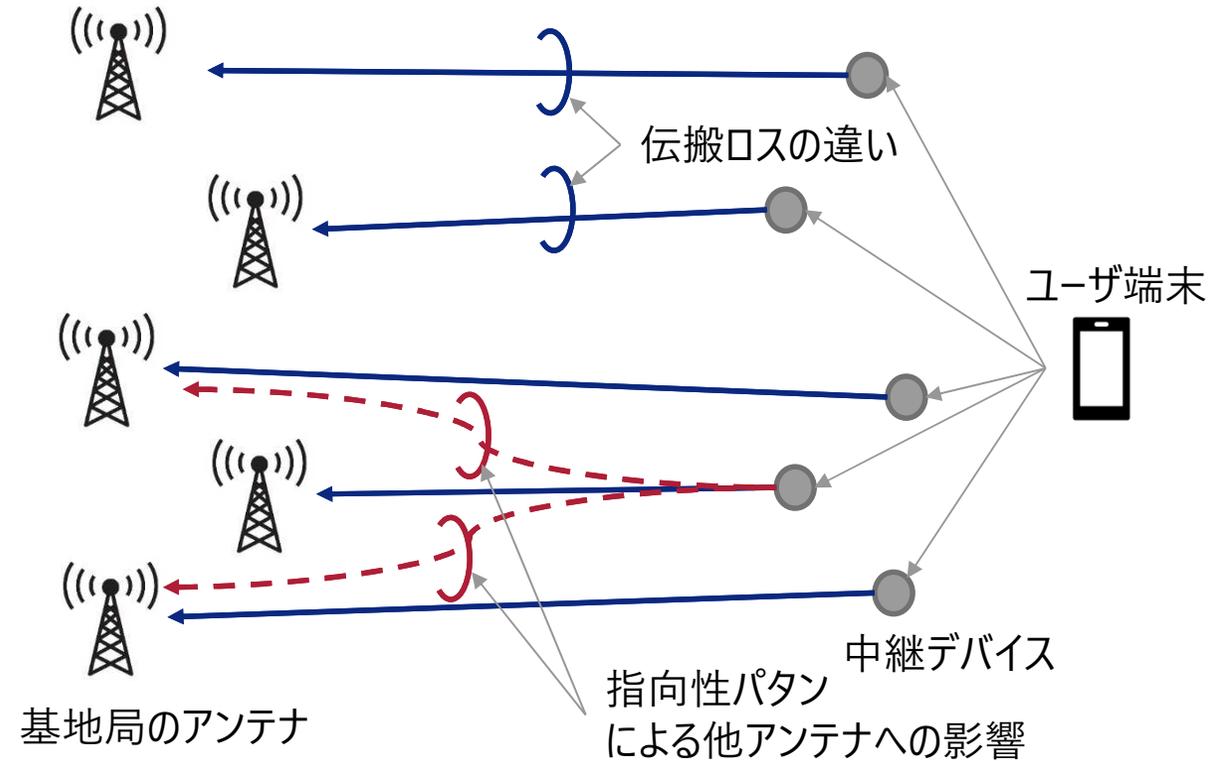
通常の移動通信の計算機シミュレーションでは考慮されない要素を包含する必要あり

### 通常の移動通信のシミュレーション



- アンテナが分散するとしても、それは基地局側
- ユーザ端末は同じ場所にアンテナがある想定

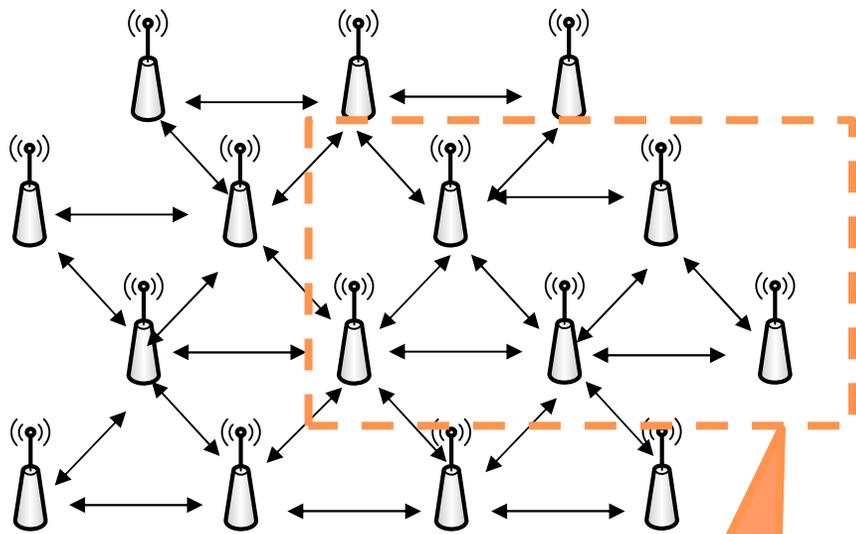
### 仮想化端末のシミュレーション



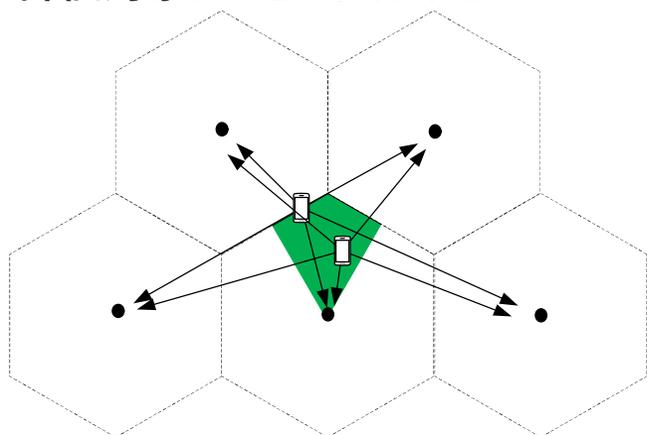
- 基地局側、ユーザ端末側ともアンテナが分散
- アンテナ間ごとの伝搬ロスや指向性パターンの考慮が必要

# 評価結果例: 仮想化端末の伝送速度の評価

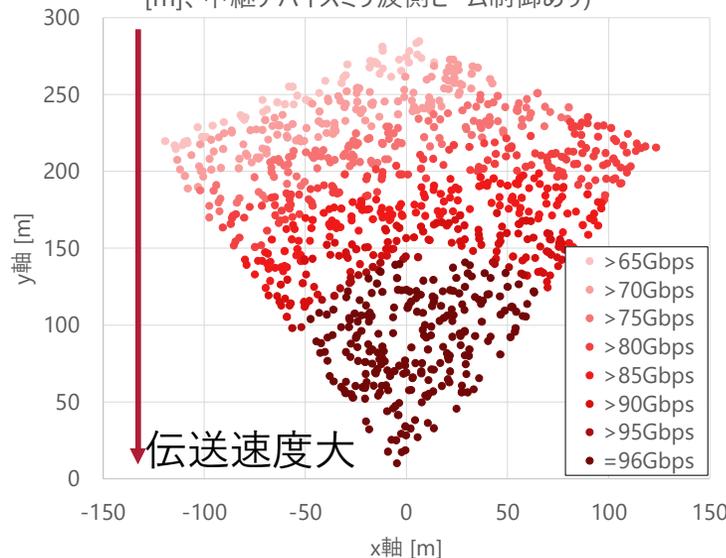
中継デバイスの指向性パタンの、エリア内での仮想化端末の伝送速度への影響を評価



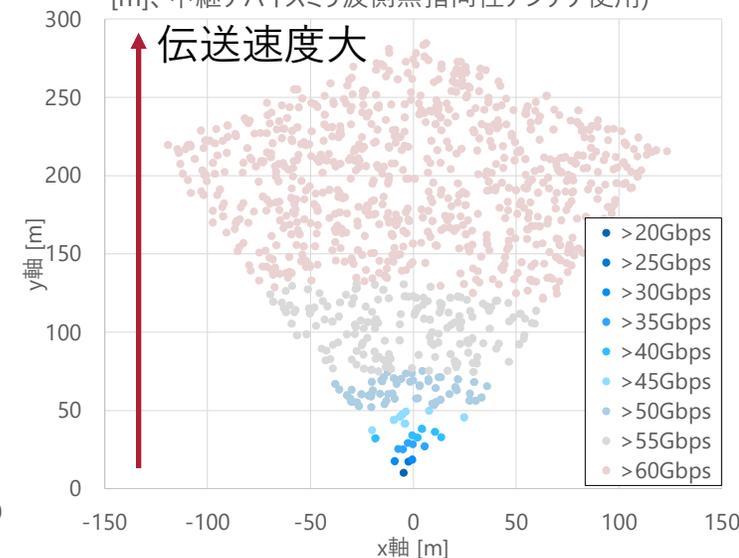
評価対象アクセスポイントとエリア



仮想化端末上りリンク伝送速度分布 (ISD=500 [m]、中継デバイスミリ波側ビーム制御あり)



仮想化端末上りリンク伝送速度分布 (ISD=500 [m]、中継デバイスミリ波側無指向性アンテナ使用)



- 「アンテナ間ごとの伝搬ロスや指向性パタンの考慮」を、3GPPチャンネルモデル TR 38.901 に準拠したMATLAB 5G toolboxのnrCDLChannelをベースとし、パラメタの一部外だしで実現

$$H_{u,s,n,m}^{\text{NLOS}}(t) = \sqrt{\frac{P_n}{M}} \begin{bmatrix} F_{rx,u,\theta}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \\ F_{rx,u,\phi}(\theta_{n,m,ZOA}, \phi_{n,m,AOA}) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\theta}) & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\theta\phi}) \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\theta}) & \exp(j\Phi_{n,m}^{\phi\phi}) \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} F_{tx,s,\theta}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \\ F_{tx,s,\phi}(\theta_{n,m,ZOD}, \phi_{n,m,AOD}) \end{bmatrix} \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{rx,n,m}^T \cdot \bar{d}_{rx,u}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{tx,n,m}^T \cdot \bar{d}_{tx,s}}{\lambda_0}\right) \exp\left(j2\pi \frac{\hat{r}_{rx,n,m}^T \cdot \bar{v}}{\lambda_0} t\right)$$

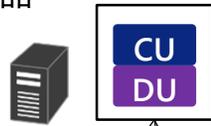
# ユーザセントリックRAN

## ネットワーク中心から**ユーザ中心**のRAN(**ユーザセントリックRAN**)に進化

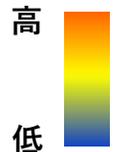
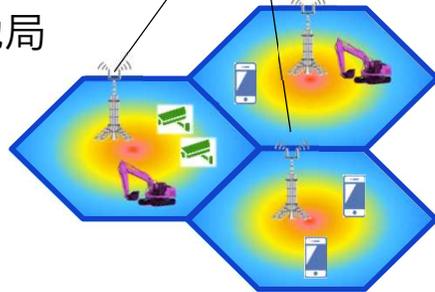
2020~ / 5G

ベストエフォート

専用機器



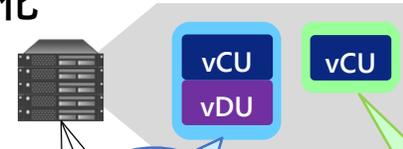
基地局



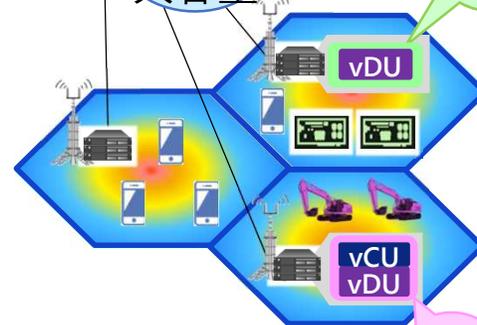
2025~ / 5G Advanced

サービス毎に最適化

仮想化



大容量



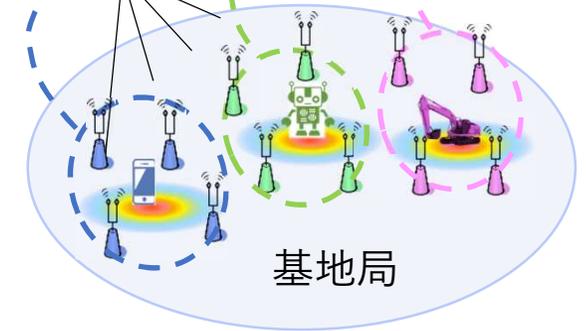
多接続

低遅延

2030~ / 6G

ユーザ毎に最適化

仮想化



基地局

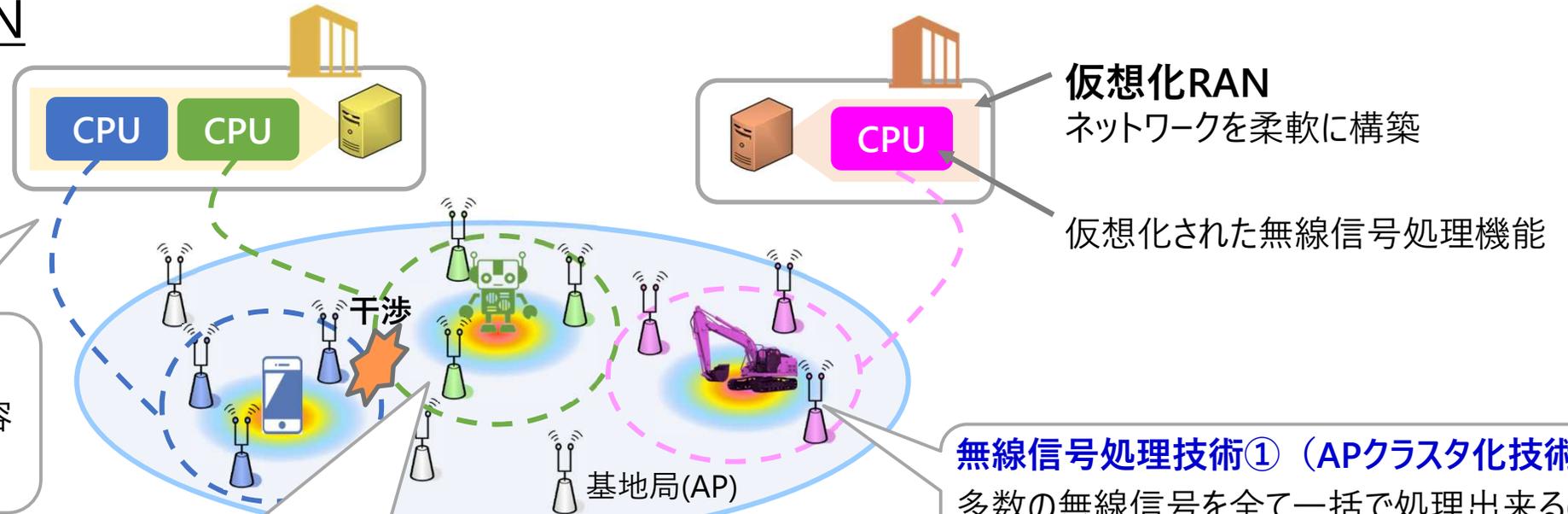
CU: Centralized Unit, DU: Distributed Unit, RU: Radio Unit, CPU: Central Processing Unit, AP: Access Point, vXX: Virtualized function of XX

# ユーザセントリックRAN実現に向けた課題

多数の分散配置されたアンテナを集中制御する

“Cell-Free massive MIMO”(\*)を用いたユーザセントリックRANの実現を目指して検討中

## ユーザセントリックRAN



### 基地局展開技術

多数の基地局アンテナをどう収容するのか？

### 無線信号処理技術② (CPU間連携技術)

クラスタをまたぐ基地局アンテナ間での干渉をどう除去するのか？

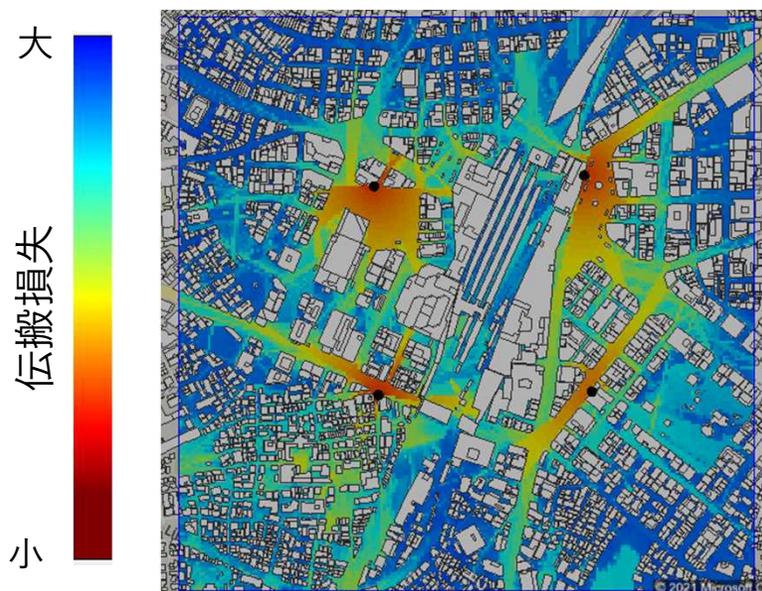
### 無線信号処理技術① (APクラスタ化技術)

多数の無線信号を全て一括で処理出来るのか？スケーラビリティをどう確保するのか？

(\*) E. Nayebi, A. Ashikhmin, T. L. Marzetta and H. Yang, "Cell-Free Massive MIMO systems," 2015 49th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2015, pp. 695-699, doi: 10.1109/ACSSC.2015.7421222.

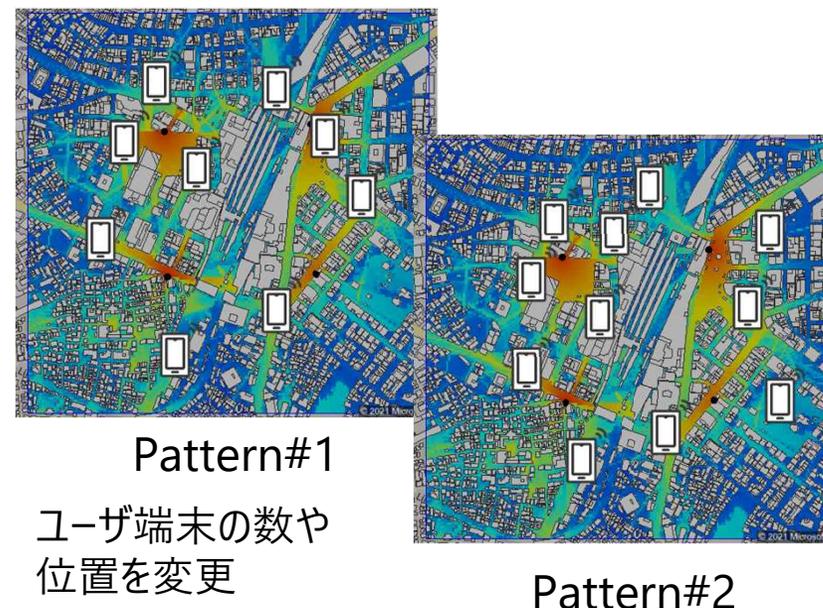
Cell-Free massive MIMO技術の基本性能やAPクラスタ化の評価を、  
実用的な電波伝搬モデル生成と、MATLABによるシステムレベルシミュレーションの連携で実施

## レイトレース電波伝搬シミュレーション (実測データを用いて特性をチューニング)



各地点の電波の  
パス情報

## Cell-Free massive MIMO システムレベルシミュレーション(MATLAB)



Pattern#1  
ユーザ端末の数や  
位置を変更

Pattern#2

評価環境	都市部 (池袋)
評価エリアのサイズ	狭域シナリオ (1Km四方)
周波数	28GHz

# 評価結果例: Cell-Free massive MIMO技術の効果の確認

Cellular



スループット [Mbps]

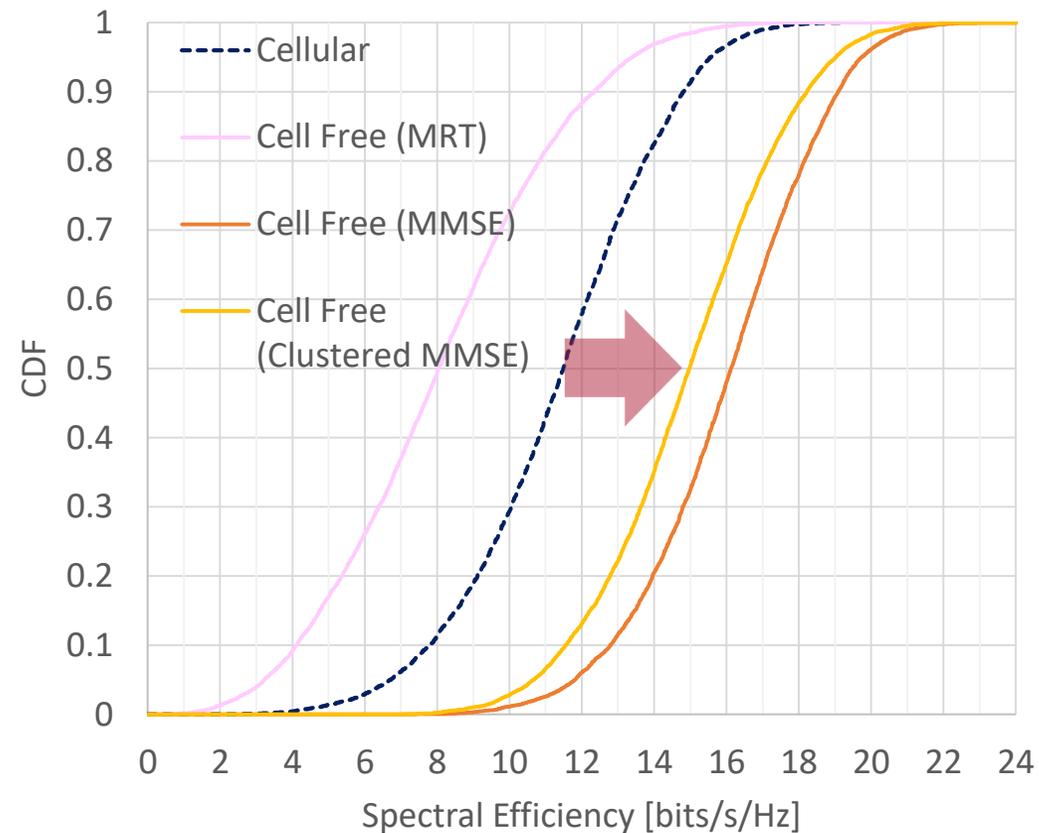
低



高

スループットを面的に改善

Cell-Free (Clustered MMSE)

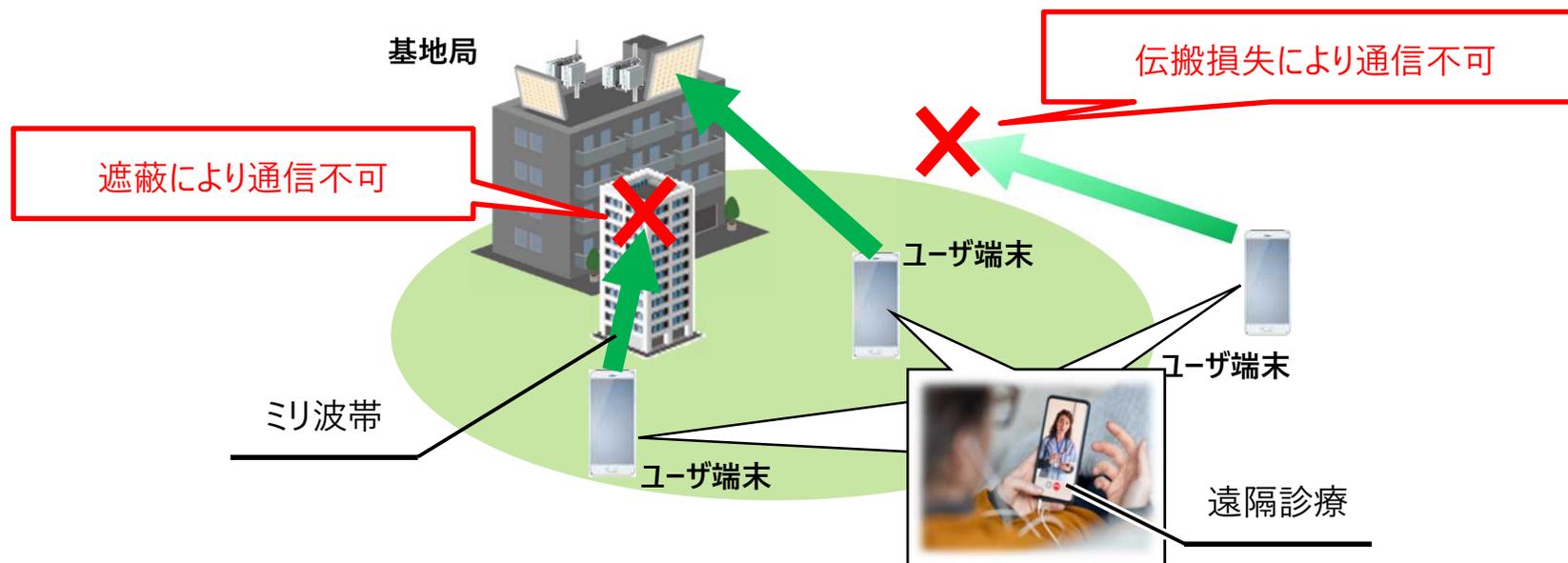


- Cell Free massive MIMOにより周波数利用効率の改善を確認
- レイトレースで模擬した無線環境上で、具体的な信号処理をMATLAB上で実装し差し替えるだけで、その性能差分を評価
  - 上記グラフからは、「APクラスタ化をして演算量を削減しても、MMSEに近い性能を達成できる」といった知見を実環境を模した環境で得られている

# 中継通信端末を用いたミリ波帯の有効利用を目指した 研究開発

本研究成果は総務省の「電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）」によって実施した結果を含みます。

- 従来の10倍以上の高速・大容量通信を実現可能な第5世代移動通信システム(5G)では、4K / 8K動画等の動画伝送の実現に寄与
- 2020年代後半には高精細な動画伝送を用いた遠隔リモート操作など**低遅延かつ大容量な無線通信サービス**の実現が期待される
- 大容量伝送のためには、5Gから利用が開始された広帯域なミリ波を使う必要があるが、**大容量通信できる一方で、遮蔽や伝搬損失により通信距離が短い**という課題あり



➡ **ミリ波といった高周波数帯における低遅延大容量中継技術を検討**

## ■ 以下の特徴を持つ周波数変換型の低遅延中継技術をベース

- 中継時に復調、再変調を行わず、受信した信号を電力増幅だけを行って再放射
- ユーザ端末-中継局と中継局-基地局で異なる周波数を適用

⇒ 低遅延化

⇒ 回り込み干渉を回避

## ■ 更に、以下の特徴を加えることで中継技術の大容量化を実現

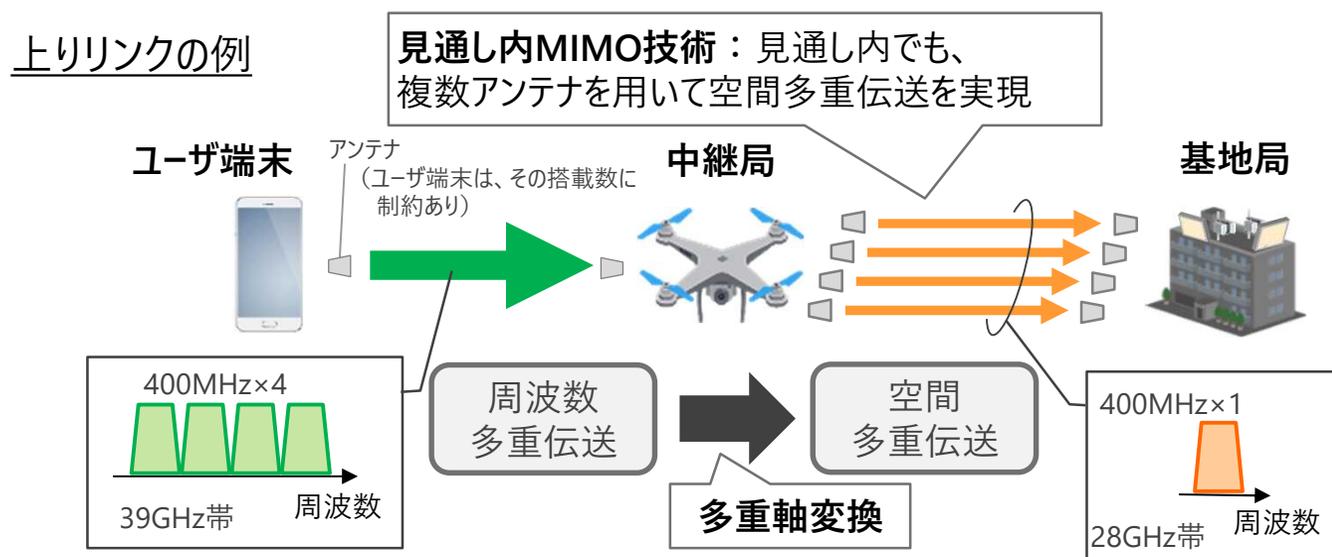
- 中継局-基地局間には見通し内MIMO(LoS-MIMO)技術を適用  
(見通し内環境を確保するために、中継局はドローン等の移動可能な装置に搭載)

⇒ 大容量化

- アナログ回路を用いた

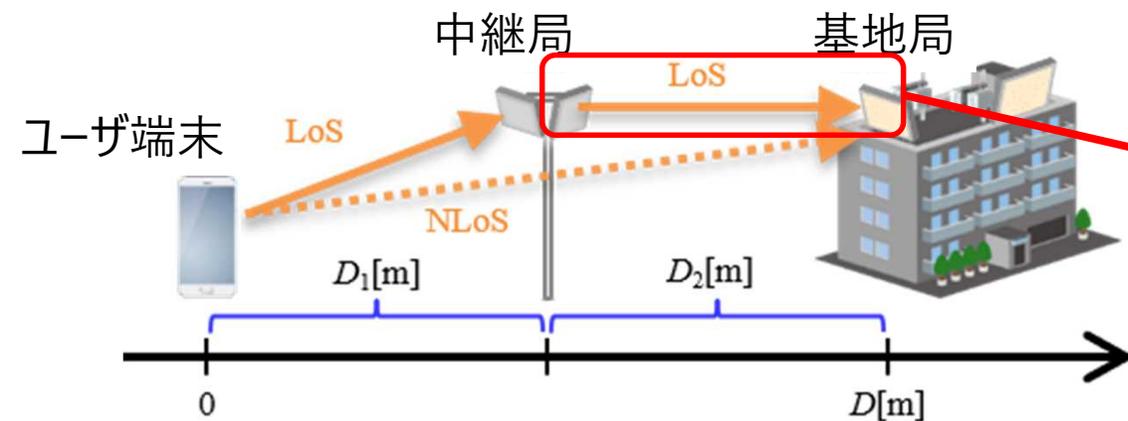
周波数多重(ユーザ端末-中継局間) ⇔ 空間多重(中継局-基地局間)の多重軸変換

⇒ ユーザ端末のアンテナは少なくて良い

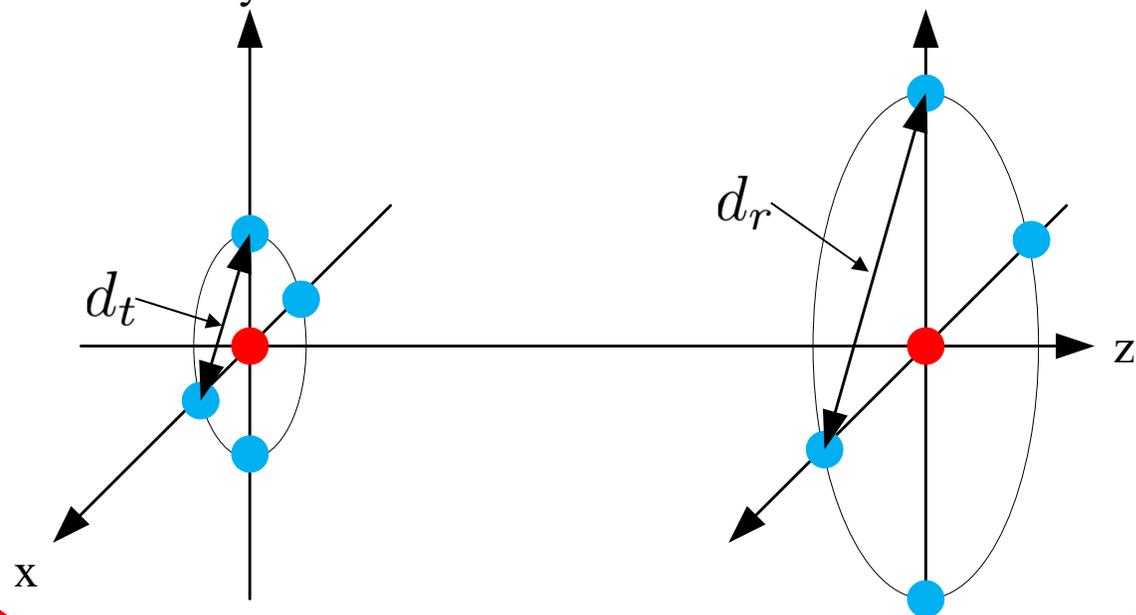


## ■ 下記のシミュレーション環境において、リンクレベルのスループット特性を評価

### シミュレーション環境



見通し内MIMO(LoS-MIMO)区間(中継局・基地局間)の送受信アンテナ配置

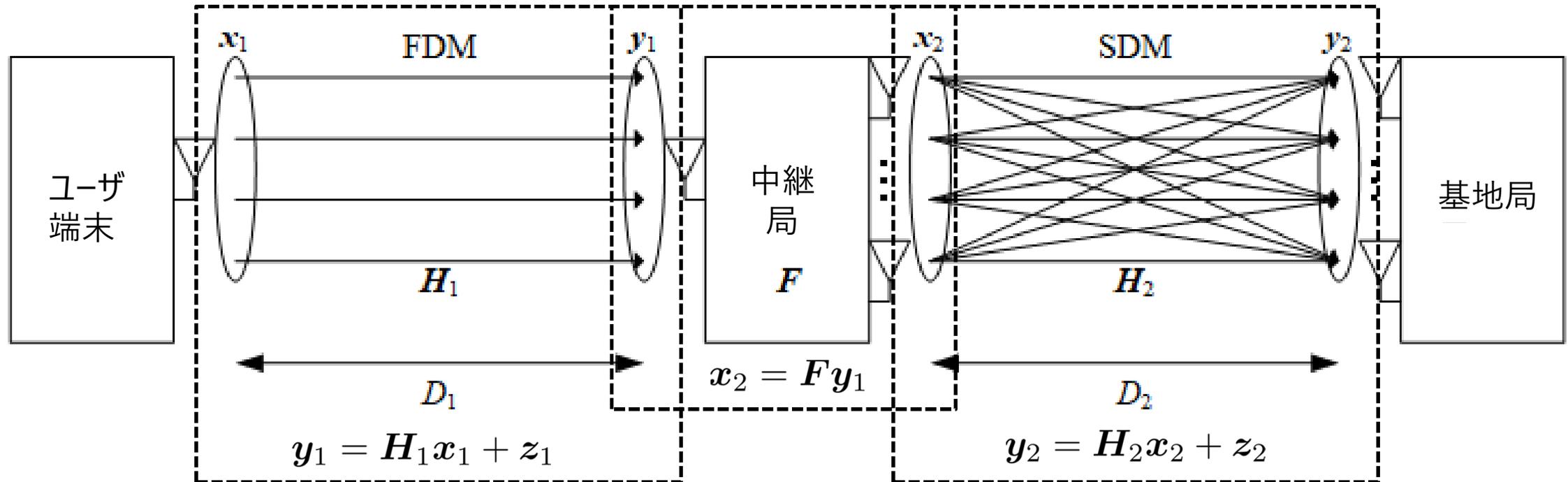


## ■ 伝搬路の実現方法

- MATLABの5G toolboxの関数nrTDLChannelで生成した伝搬路に、見通し内MIMO(LoS-MIMO)特有の伝搬路を独自に生成し、それらを乗算して実現

# L1中継方式：信号モデル

- 周波数多重(FDM)された送信信号 $x_1$ : 中継局で空間多重(SDM)に変換され、基地局へ転送
- 中継局で発生した雑音 $z_1$ : 中継局内で増幅され、基地局へ転送



システム全体の信号モデル

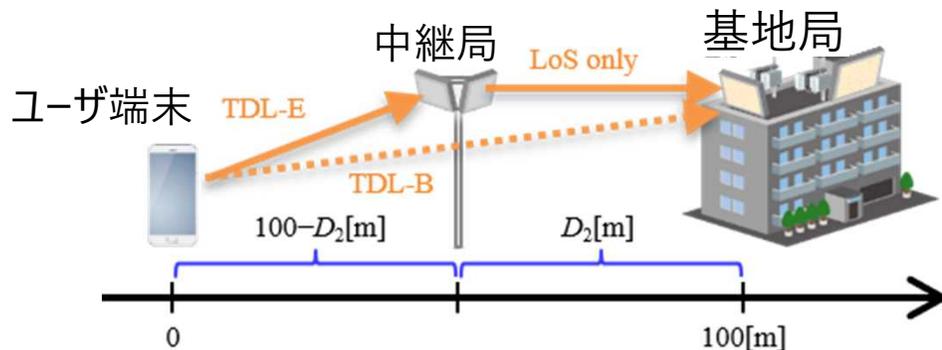
$$y_2 = H_2 F H_1 x_1 + H_2 F z_1 + z_2$$

$H_1$ : FDM部分のチャネル(nrTDLChannel)

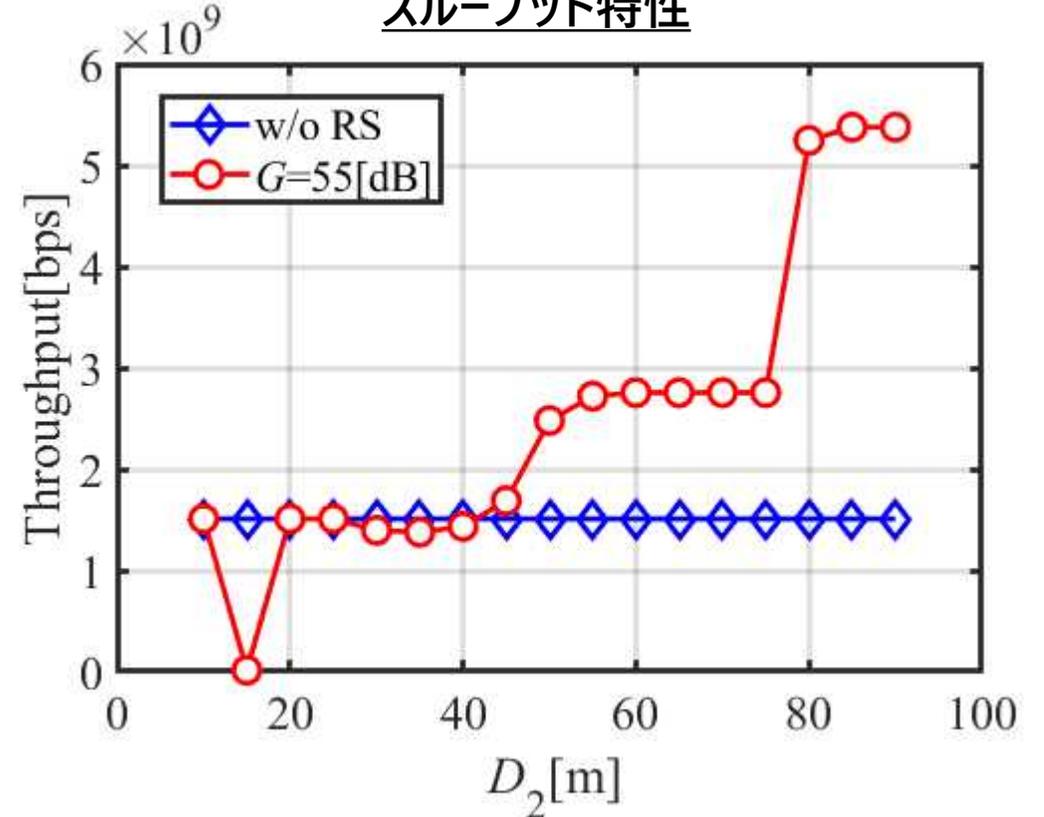
$H_2$ : LoS-MIMOチャネル(独自生成)

## シミュレーション諸元

	5G	L1	
		ユーザ端末- 中継局	中継局- 基地局
Channel model	TDL-B	TDL-E	LoS only
Modulation	OFDM		
MCS	0,4,5,10,11,19,20,27		
Channel coding	LDPC		
Channel estimation	Channel estimation using DM-RS		
Decoding	Message passing algorithm		
MIMO equalization	MMSE		



## スループット特性



### ■ 以下の知見を獲得

- 中継局を基地局から45[m]以上離れた条件で、中継局の導入効果を確認
- LOS-MIMO区間距離 $D_2$ が15[m]のとき、スループットが急激に低下  
⇒ 通信距離にロバストなアンテナ配置の検討などに発展

