

無線通信・電波信号処理研究室

Radio Signal Processing Lab

~ Essence of Wireless Communications ~  
Toward Beyond 5G/6G



Minseok Kim 金ミンソク  
Assoc. Professor 准教授  
mskim@eng.niigata-u.ac.jp

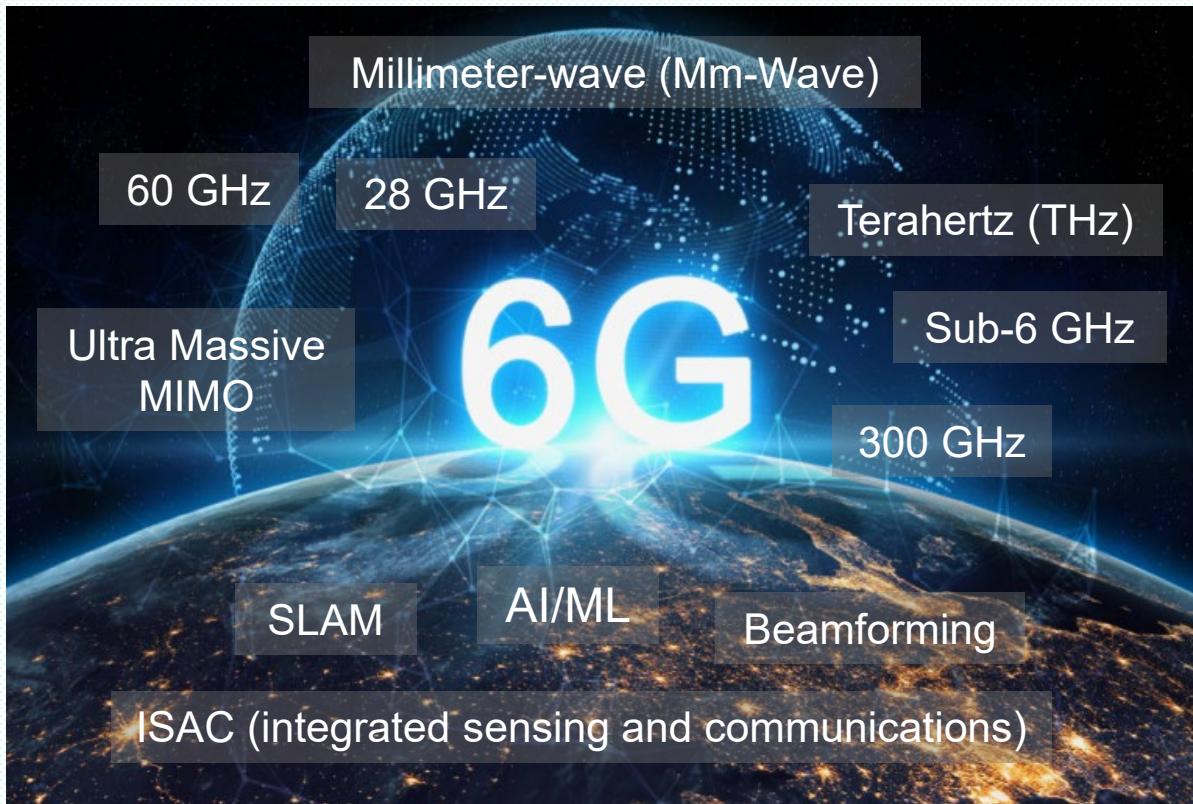
# 見学を歓迎します

- アピールポイント
  - 最先端通信分野の研究ができる⇒ 実力アップ
    - AIの駆使力
    - ハードウェア・ソフトウェア開発を経験
    - 高度なデータ処理・解析スキルの習得
    - ITU-RやIEEEなど国際標準化の経験
    - 英語論文を筆頭著者になれる
  - 大型プロジェクトに関わリアルバイトができる
    - 年間学費以上稼げる
  - 英語が話せます！
    - 外国人～約半数
    - 国際会議1回以上参加
- 見学・オープンラボー
  - 2月中実施随時開催
  - 居室:工学部A棟 520号室
  - mskim@eng.niigata-u.ac.jp までご連絡ください。

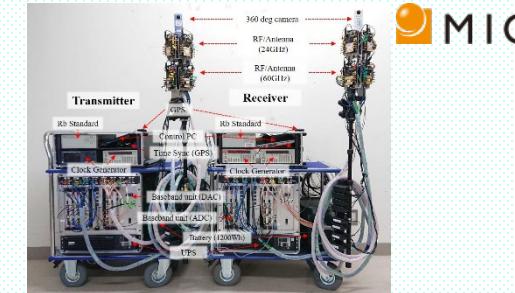
【2025年の実績】Q1/Q2 8編  
M2筆頭著者のQ1ジャーナル:2編  
D2筆頭著者のQ2ジャーナル:1編



# 6Gへ向けた最先端電波伝搬研究の日本代表・世界トップ 3



24・60GHz ミリ波伝搬測定装置  
(総務省プロジェクト)



開発期間:2020-21年度(約2千万円)  
熊倉君(M2), 塚田君(M1), 鈴木君・  
高橋君(B4)

Sub-6 GHz MIMO測定装置  
(総務省プロジェクト)



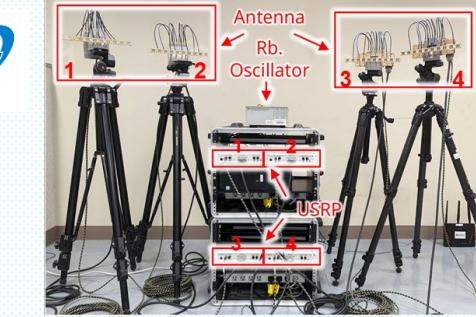
開発期間:2022年度(約2千万円)  
塚田君(M2), 鈴木君・高橋君(M1)

154・300 GHz THz伝搬測定装置  
情報通信研究機構(NICT)プロジェクト



開発期間:2022-2023年度(約1億4千万円)  
高橋君(M1~M2)

Sub-6 GHzマルチリンクMIMOチャネル測定装置  
日本原子力研究開発機構(JAEA)プロジェクト



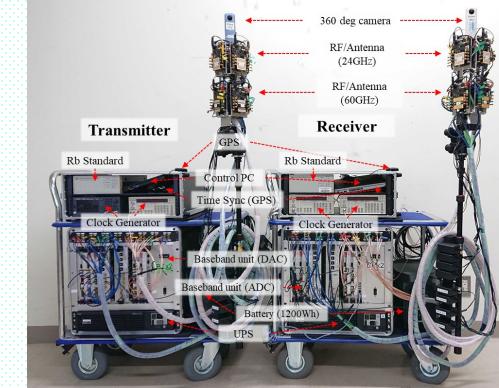
開発期間:2022-2023年度(約1.5千万円)  
池上君(M1~M2)

# 研究内容

## ■ 電波伝搬測定と解析

- 無線通信システムの設計・評価に必修
- 常に次世代無線通信システムを狙う
- 大手キャリアさんにとって大事な課題
- 測定装置の開発に膨大な資金・ノウハウが必要である

## 電波の伝わり方の見える化

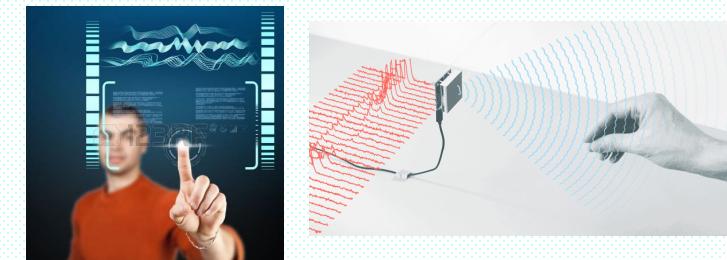


## ■ アレーアンテナ・適応信号処理

- 電波到来方向推定
- レーダ信号処理・イメージング
- 測位・状態センシング
- 生体信号センシング

IoT, AI技術を取り入れている

## 電波によるモノの見える化



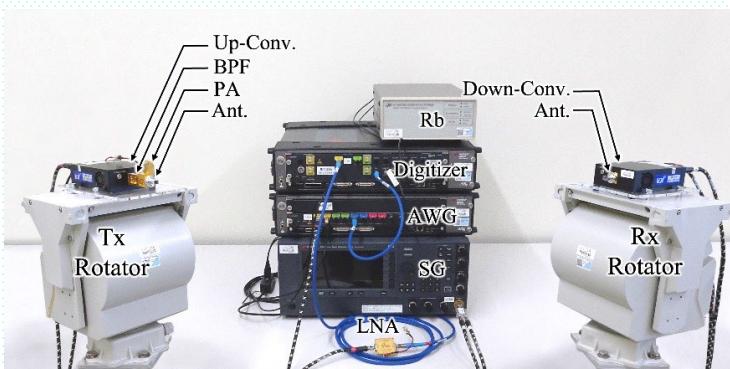
# 研究活動

## ■ 政府系プロジェクト

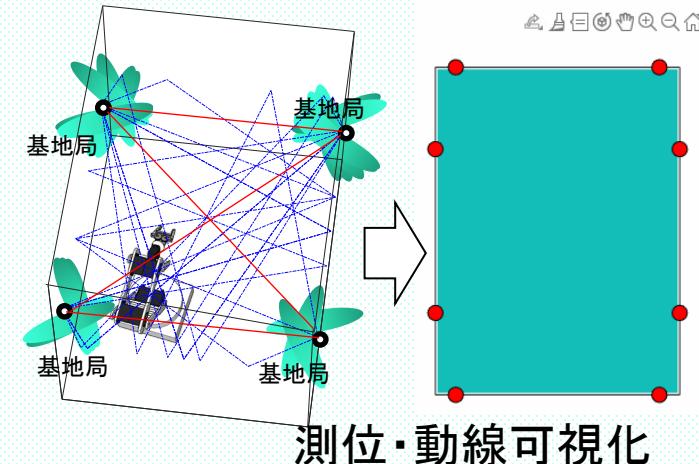
総務省



情報通信機構



原子力研究開発機構



総務省

フォーメーションフライトによる地上端末と  
の高速衛星通信技術の確立



日本発スター・リンク

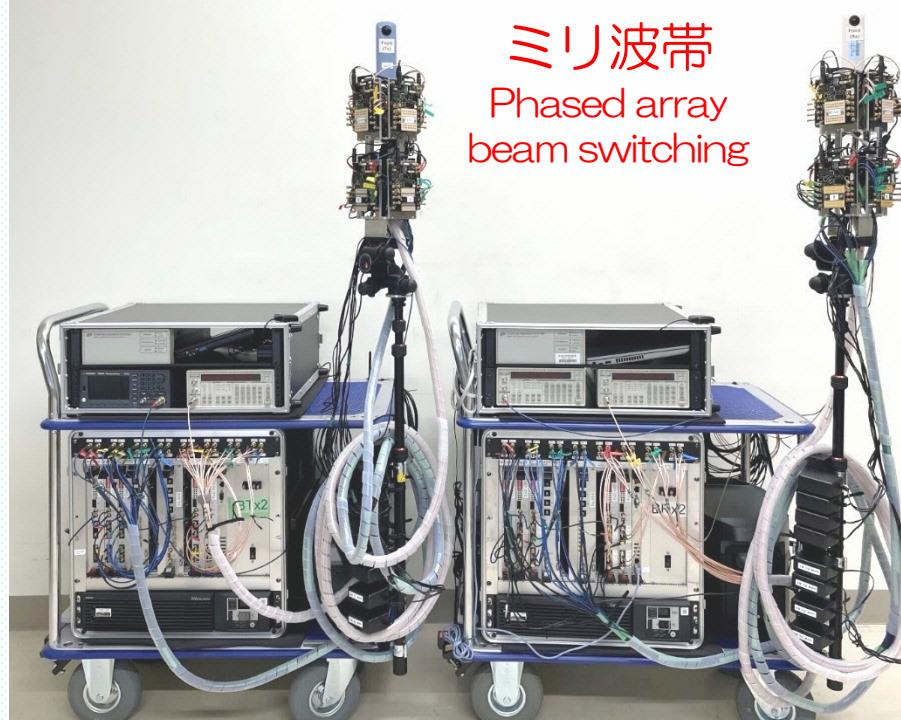
## ■ 共同研究

- 東京科学大, 横浜国大, 名工大, など
- インターステラテクノロジーズ, NTTドコモ, KDDI, 矢崎総業, など
- Ilmenau工科大学(ドイツ), 北京交通大学(中国), Univ. Twente(オランダ), NIT(インド), Kyunghee大学(韓国), POSTECH(韓国)など

# チャネルサウンダの開発

周波数帯	中心周波数	占有帯域幅	空中線電力
24 GHz (B5G)	24.15 GHz	200 MHz	100 mW (20 dBm) EIRP: 32 dBm
60 GHz (B5G)	58.32 GHz	400 MHz	160 mW (22 dBm) EIRP: 41 dBm

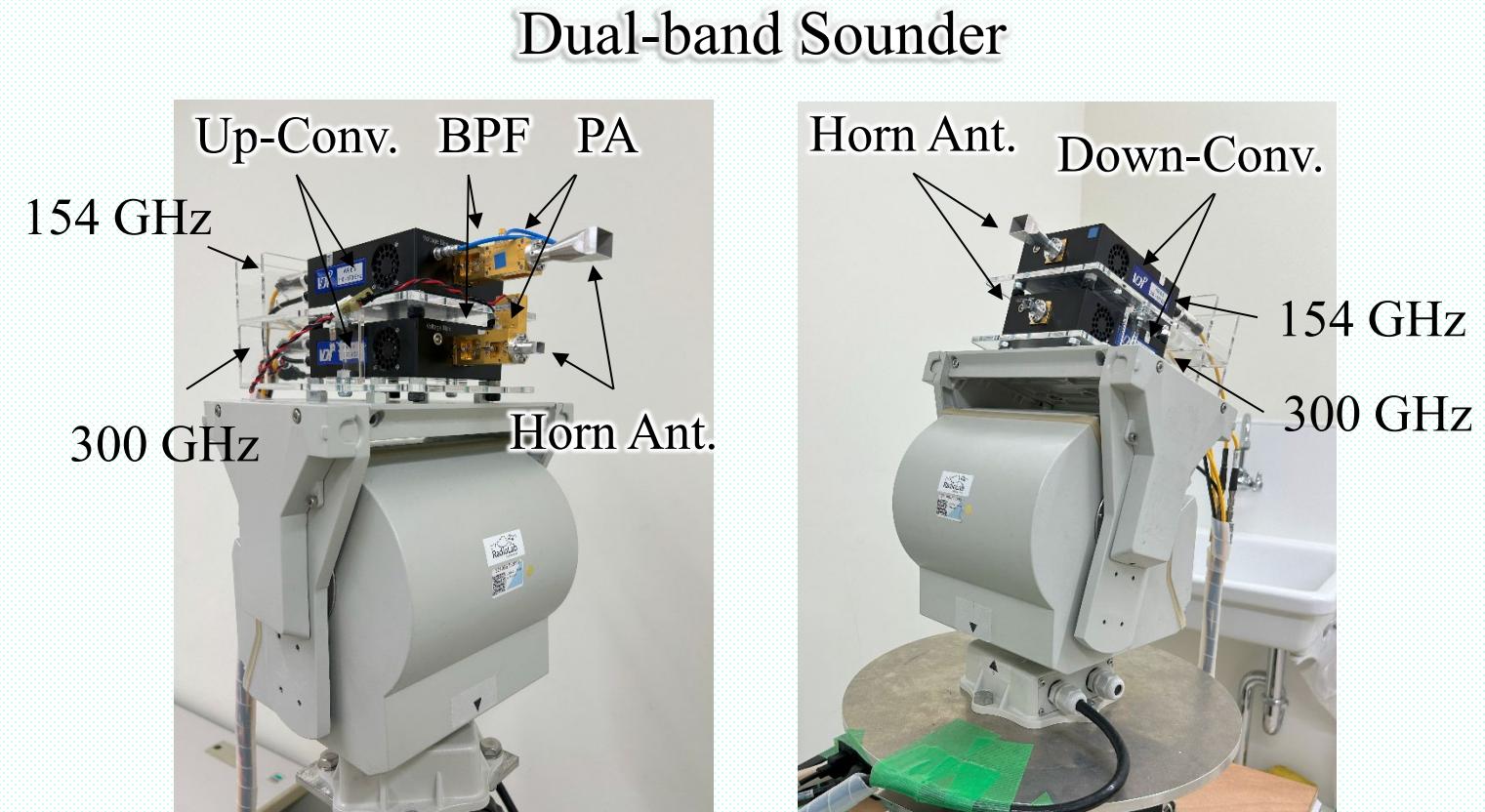
周波数帯	中心周波数	占有帯域幅	空中線電力
2.45 GHz (スマートメータ)	2462 MHz	40 MHz	200 mW (23 dBm)
4.85 GHz (B5G)	4850.01 MHz	99.9 MHz	400 mW (26 dBm)



# チャネルサウンダの開発(2)

- 6Gに向けたテラヘルツ波帯の開拓
- 154・300 GHz 二周波数同時測定

	154 GHz	300 GHz
Center freq.	154 GHz	300 GHz
Signal BW	4 GHz	8 GHz
Sounding signal	2,560 tones	5,120 tones
Delay resolution	250 ns	125 ps
Delay span		640 ns
Tx Ant	Gain: 26 dBi, HPBW: 9°	
Rx Ant		
EIRP	21.5 dBm	16.5 dBm
Dynamic range	62 dB@1m 42 dB@10m 22 dB@100m	60 dB@1m 40 dB@10m 20 dB@100m

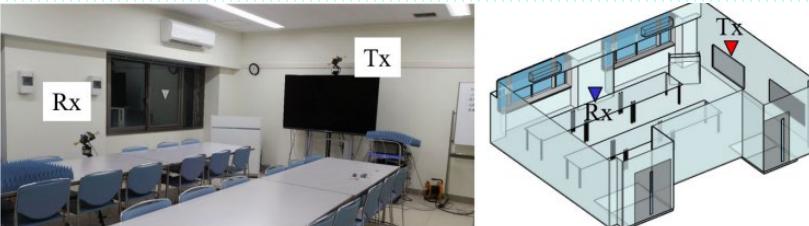


# 測定の様子(ミリ波帯)



# 測定の様子(テラヘルツ波帯)

Medium Conference Room (6m × 8m)



M. Kim, A. Ghosh, R. Takahashi, K. Shibata, "Indoor Channel Measurement at 300 GHz and Comparison of Signal Propagation with 60 GHz," *IEEE Access*, Vol.11, Nov 2023  
 A. Ghosh, R. Takahashi, M. Kim, "Comparison of Clustering Techniques using an Indoor Measurement at 300 GHz," *IEEE Trans. Terahertz Sci. Technol.* Vol.13, No. 6, Sept. 2023

Large Conference Room (12m × 14m)



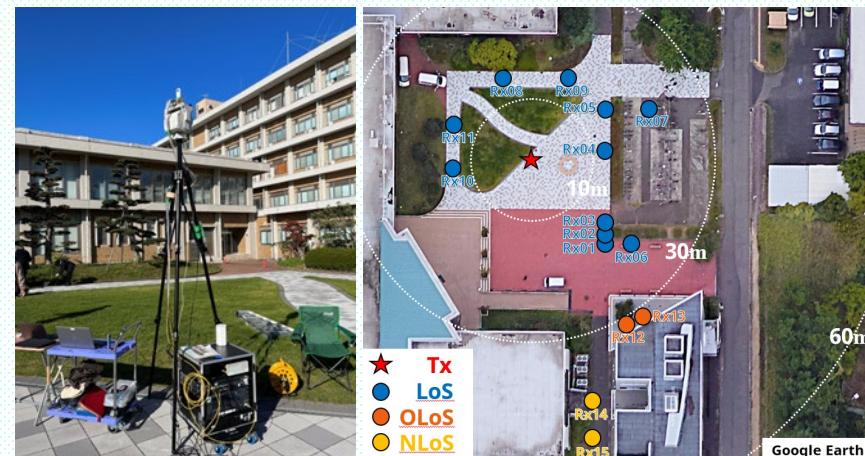
Minghe Mao, Minseok Kim, "Indoor Sub-THz Channel Characterization at 154 and 300 GHz in a Conference Room Scenario," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, 2026.

Corridor



Riku Takahashi, Anirban Ghosh, Minghe Mao, Minseok Kim, "Channel Modeling and Characterization of Access, D2D and Backhaul Links in a Corridor Environment at 300 GHz," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, Vol. 72, Sept., 2024.

Open square (60m × 60m)



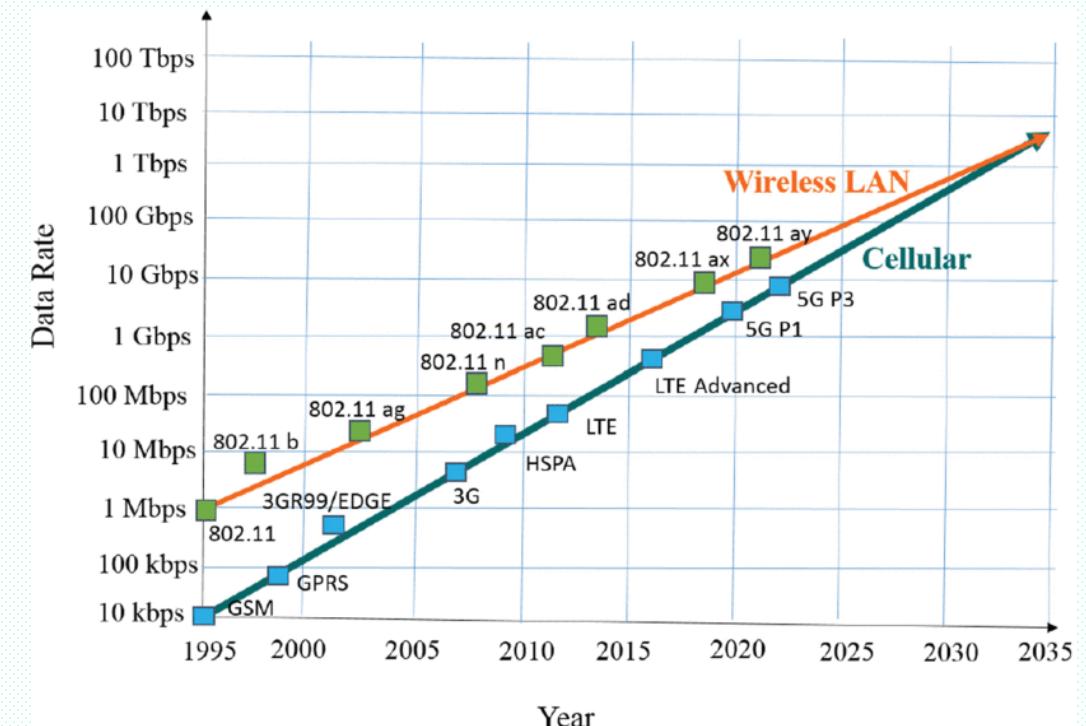
Minghe Mao, Anirban Ghosh, Riku Takahashi, Minseok Kim, "MIMO Channel Capacity Measurement in Open Square Hot Spot Access Scenarios at 300 GHz," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, Vol. 13, Jul. 2024.

# 6G THz波帯の開拓

- 2030年実用化を目指す6Gモバイルネットワーク
  - 超高速データレートの需要: 約100 Gbps (5Gよりさらに10倍以上)
  - 5Gでは10 GHz以上の広帯域幅が確保できない
- THz波帯(100 GHz~10 THz)の開拓
  - 数~数十GHzの大きなチャネル帯域幅が確保可能
  - 5G周波数の約5~10倍の約100~300 GHzが注目

\*Sub-THz波帯 ( 100 GHz ~ 300 GHz )

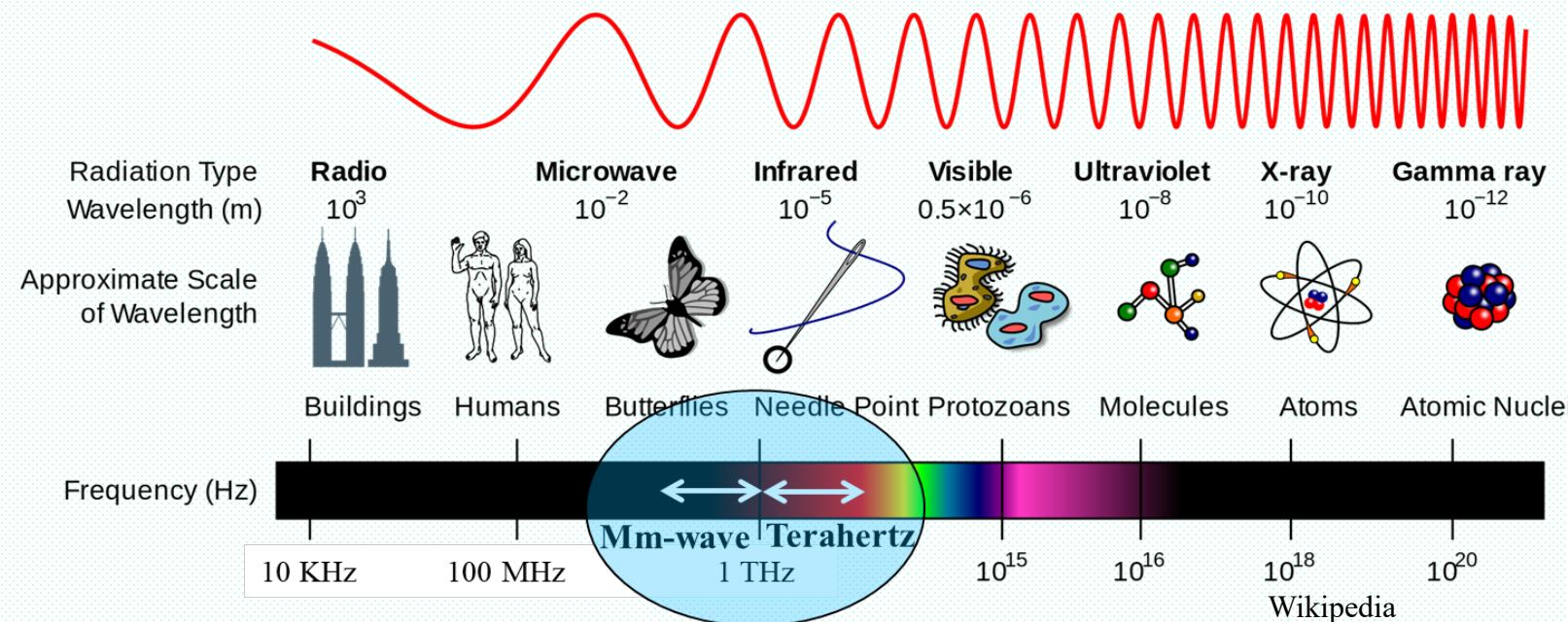
[1] H. Elayan, O. Amin, B. Shihada, R. M. Shubair and M. -S. Alouini,  
 "Terahertz Band: The Last Piece of RF Spectrum Puzzle for Communication  
 Systems," in *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1, 2020



# テラヘルツ帯の開拓

## ■ テラヘルツ帯の特徴

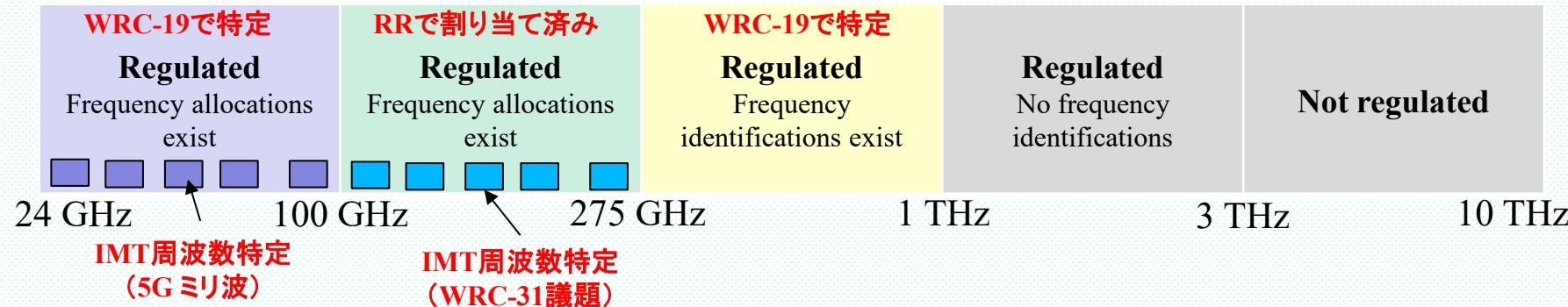
- より広い帯域幅 ⇒ 10~100 GHz帯域幅が確保可能
- より小さいハードウェア ⇒ アンテナ・回路の集積、小型化
- 他システムとの共存に有利 ⇒ 電波伝搬特性
- テラヘルツギャップ  
(Terahertz Technology Gap) ⇒ ElectronicsとPhotonics技術の境界  
⇒ High Powerデバイスの入手が困難



# THz波帯の活用に向けた動き

## ■ 周波数割り当て状況 [\*\*]

[\*\*] ETSI GR THz 002 on Identification of frequency bands of interest for THz communication systems Apr. 2024.



- WRC-19 6Gに向けた100 Gbps級の超高速通信の実現のために、275~450 GHz 中137 GHzにおける陸上移動及び固定業務での使用が検討
- WRC-23 102~109.5 GHz, 151.5~164 GHz, 167~174.8 GHz, 209~226 GHz, 252~275 GHz帯を次世代移動通信システムのための周波数帯域(IMT周波数)として指定する案件 → WRC-31 予備議題として承認
- ITU-R Study Group (SG)
  - ITU-R M.[IMT.ABOVE 100 GHz] ⇒ 96 GHz以上の周波数を利用を検討
  - ITU-R P.1238/P.1411 ⇒ 伝搬モデルの450 GHzまで拡張 (Release 13)

## ■ 欧州電気通信標準化機構(ETSI) ISG THz

- 近距離移動アクセスを含めた様々な応用への拡大が検討
  - アプリケーションとユースケースを整理 [\*]
  - 移動通信への活用可能性の高い周波数帯の検討 [\*\*]

## ■ アプリケーション

- XR (eXtended Reality)
- Robotics
- Environmental awareness
- Local area collaboration
- Ultra-high data rate transmission
- Industrial control and management
- Wire/cable/fibre replacement
- Health, wellbeing, education
- Digital twin

### ユースケース

- In-airplane or train cabin entertainment
- Remote education
- Fixed point to point wireless applications
- Mobile wireless X-haul transport
- Wireless data centres
- Grand events with ultra-high throughput
- Ultra-high throughput for indoor users
- Intra-device communications
- Local area collaboration for fixed or low mobility applications
- Local area collaboration for vehicular applications

[\*] ETSI GR THz 001 on Identification of use cases for THz communication systems, Apr. 2024.

[\*\*] ETSI GR THz 002 on Identification of frequency bands of interest for THz communication systems Apr. 2024.

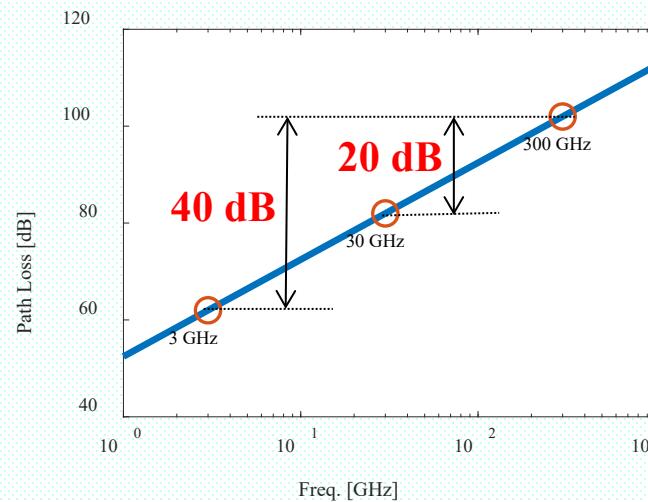
# THz帯への挑戦

## ■ 伝搬特性の周波数依存性

**自由空間損失**

$$PL = \left( \frac{4\pi d f}{c} \right)^2$$

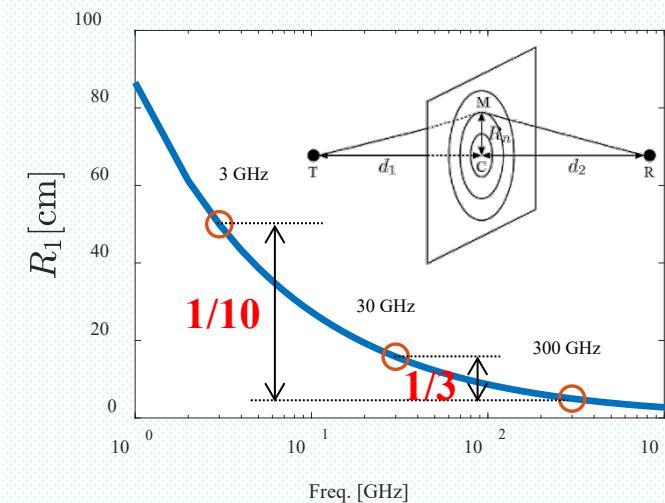
飛ばない



**第1 Fresnelゾーン**

$$R_1 = \sqrt{\frac{cd_1d_2}{(d_1 + d_2)f}}$$

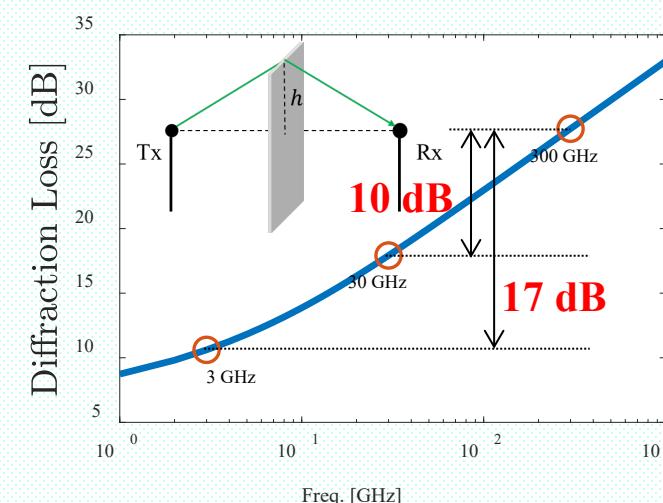
完全遮蔽



**回折損失(Fresnel係数)**

$$\nu_F \sim \sqrt{f}$$

回り込まない



# THz帯への挑戦(2)

- 反射特性
  - 正規反射
  - 粗面散乱

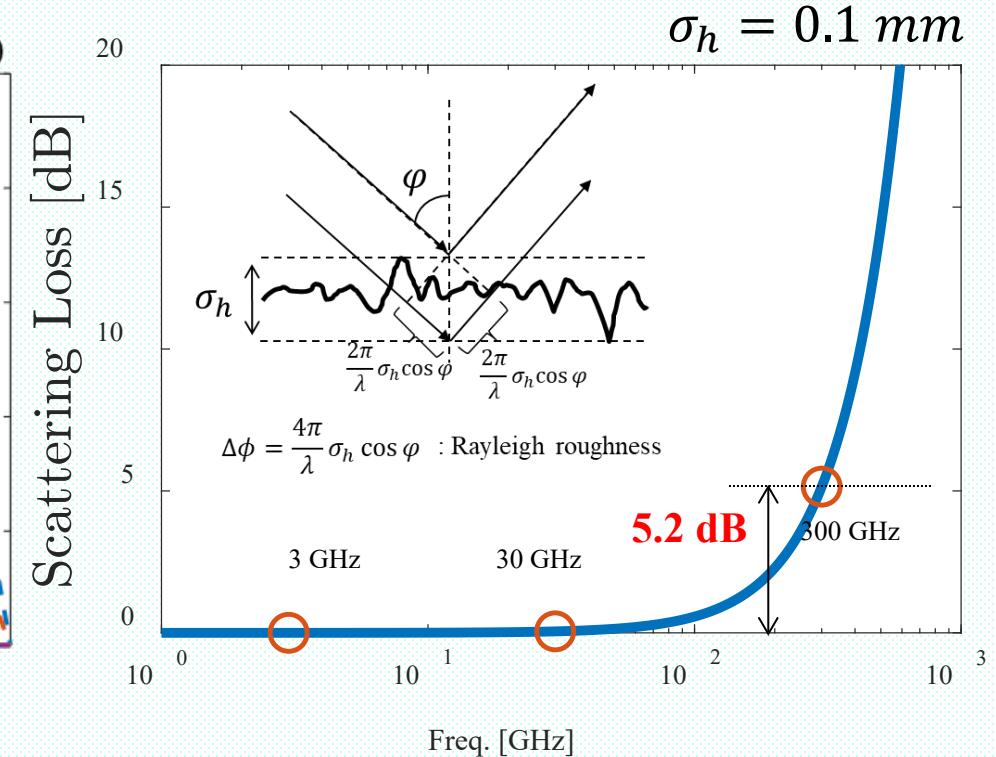
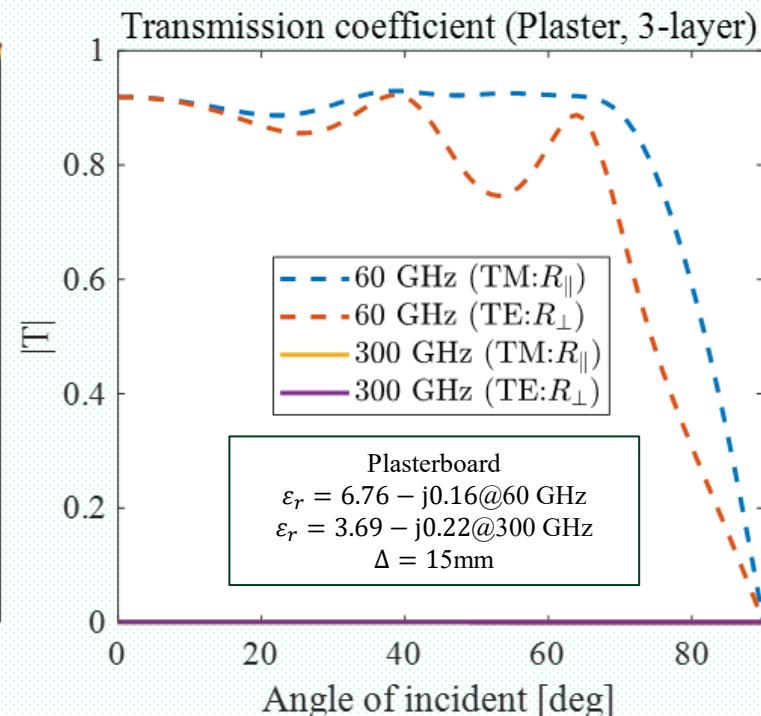
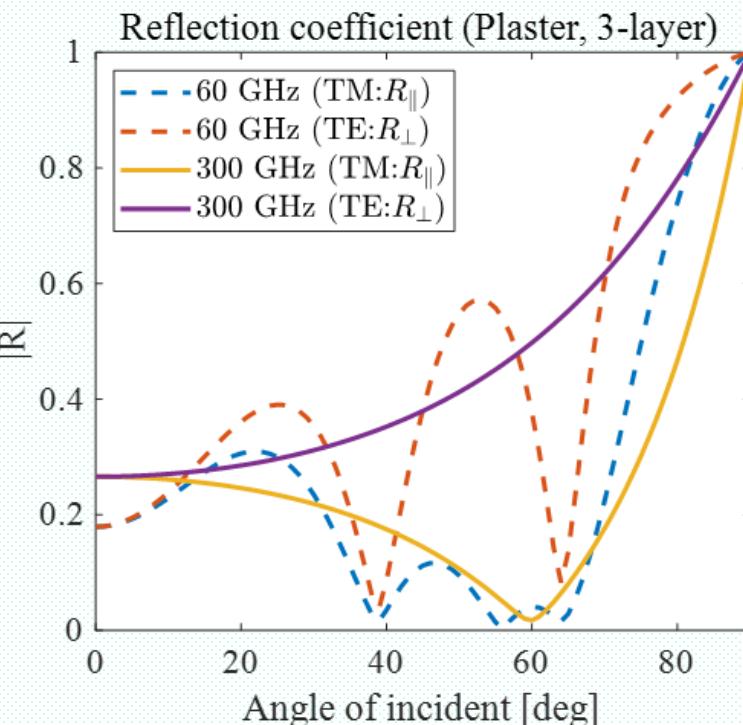
粗面散乱による損失

$$\rho_s = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(4\pi \frac{\sigma_h}{c} f \cos \varphi\right)^2\right)$$

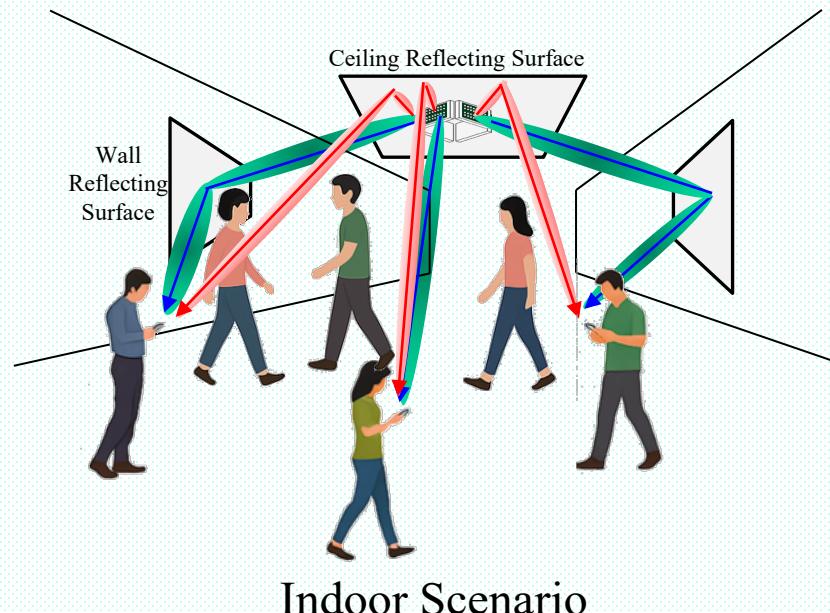


Rough surface  
石膏壁

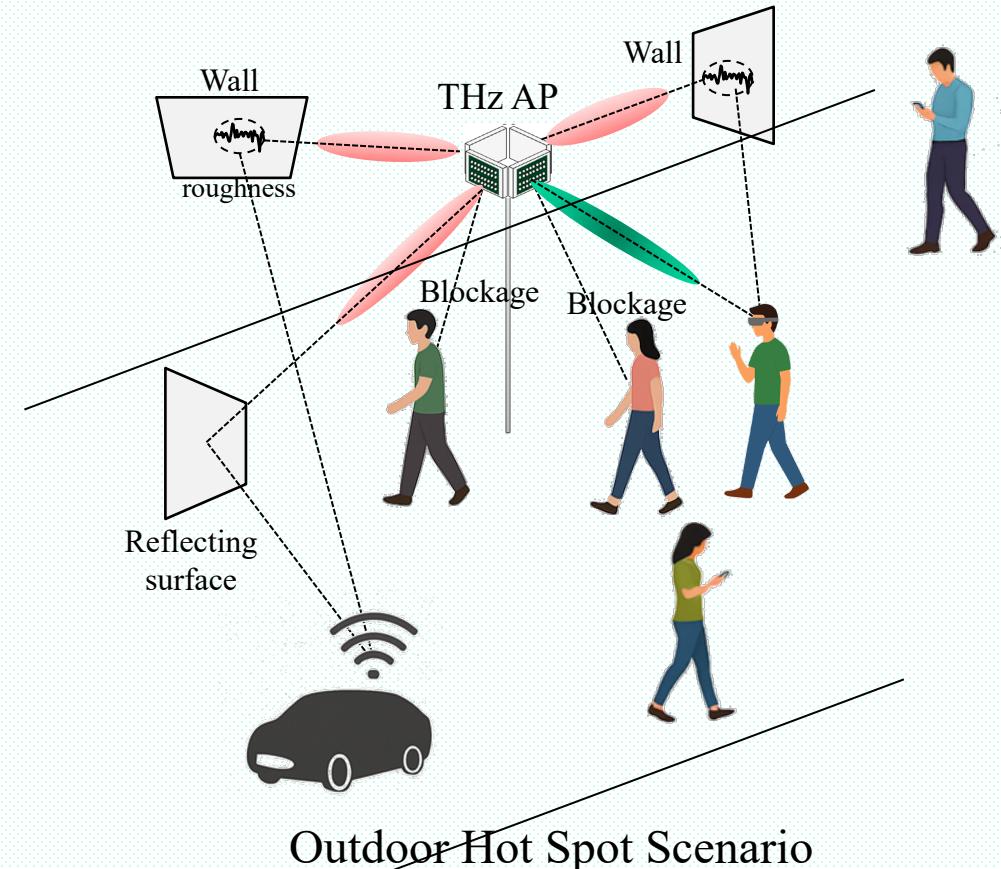
## 正規反射



- 近距離屋内外移動接続 (~ 50 m)
  - 伝送レート: 数 Gbps (数 GHz帯域幅)
  - マルチビーム MIMO
- 空間多重・ダイバシティ
  - 人体遮蔽に対して動的リンク制御
  - 反射板(Passive/Intelligent reflecting surfaces)の利用



Minseok Kim, Jun-ichi Takada, Minghe Mao, Che Chia Kang, Xin Du, and Anirban Ghosh, "THz Channels for Short-Range Mobile Networks: Multipath Channel Behavior and Human Body Shadowing Effects," IEEE Commun. Mag., Vol. 64, No. 1, pp. 138-144, Jan, 2026

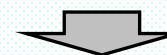


- B5G/6Gにおけるミリ波・サブテラヘルツ波の活用
  - 極めて大きい伝搬損失から通信距離が大きく制限
  - 人体による遮蔽の影響で無線リンクが容易に途切
  - ⇒ 実際に通信エリアを構築するためには、アプリケーションシナリオ(基地局設置場所)に応じて電波伝搬特性(静特性)や人体遮蔽(動特性)を考慮した適応的な無線リンクの設計が必須
- ターゲット

ミリ波・サブテラヘルツ波を用いたB5G/6G超高速無線ネットワークの社会実装に向けて24～300GHz帯における近距離超高速無線ネットワーク構成技術の開発

- 課題1：通信エリア構築技術  
直接波に加えて天井や壁の反射波を利用（主に天井反射を利用）して通信リンクの確保及び信頼性向上によるエリア構築

- 課題2：通信エリアの拡張技術  
早期実用化が期待される特定機能を有するパッシブ型反射板（Functional Passive Reflector: FPR）などを用いたエリア拡張



## B5G・6Gの早期社会展開

- 試作及び電波伝搬実験を通して6Gにおけるミリ波・サブテラヘルツ波の利用可能なシナリオを具体的に提示
- 電波の有効利用及び高い周波数への移行を促進

## 知財の獲得

- 通信エリア実現の各種ノウハウ

## 国際標準化



# Thank you for your attention !

18



mskim@eng.niigata-u.ac.jp



<http://radio.eng.niigata-u.ac.jp>

