

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

2

■ 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り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

- 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。

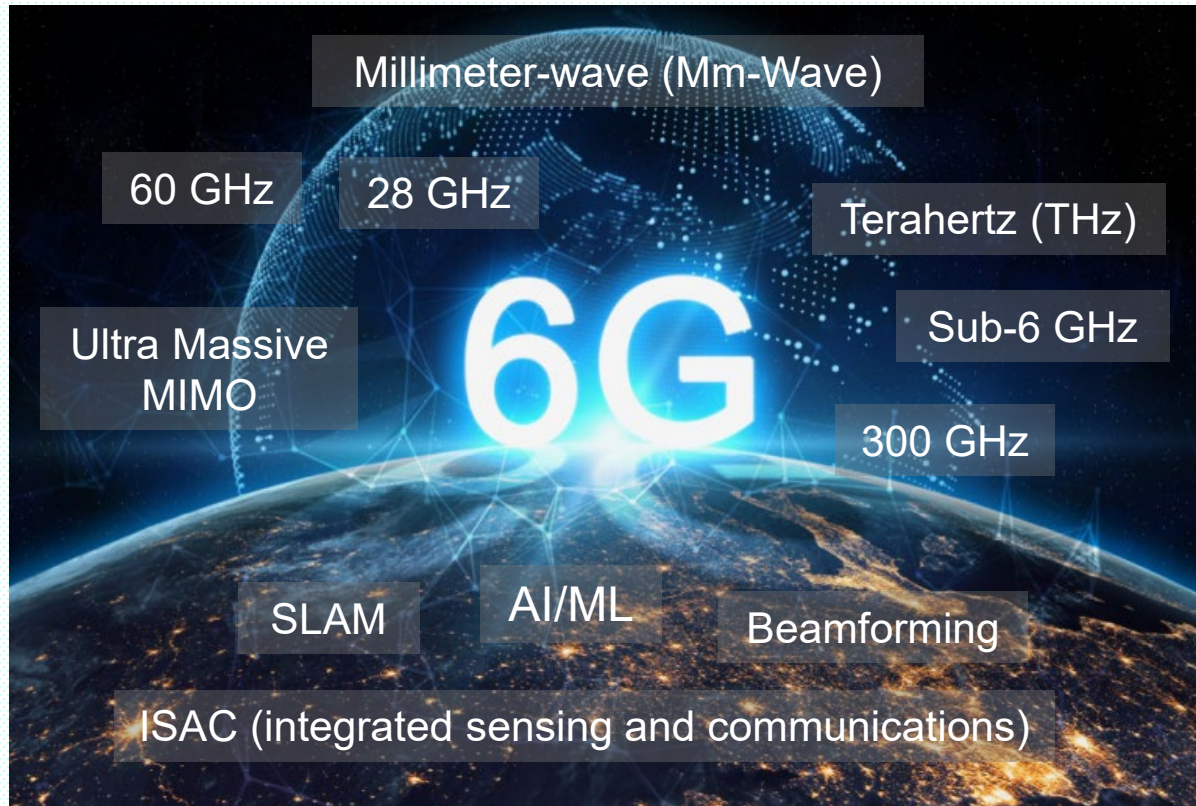
🏠 <http://radio.eng.niigata-u.ac.jp>



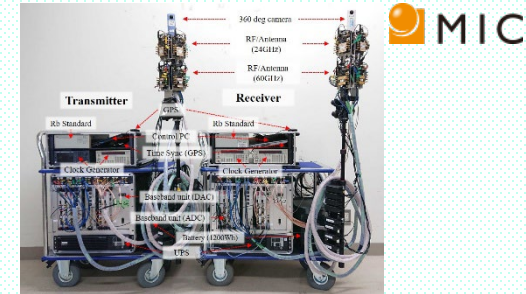
同級生ほぼ全員が
どこかで受賞！



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)



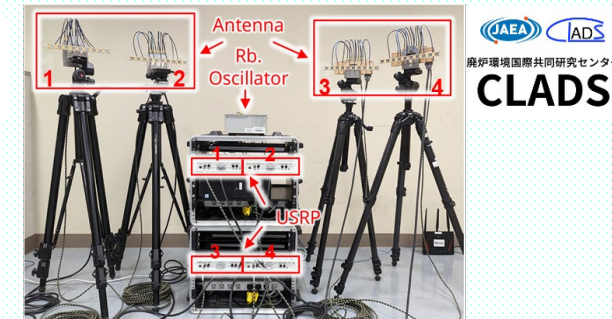
開発期間: 2022年度(約2千万円)
塚田君(M2), 鈴木君・高橋君(M1)

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)

■ 電波伝搬測定と解析

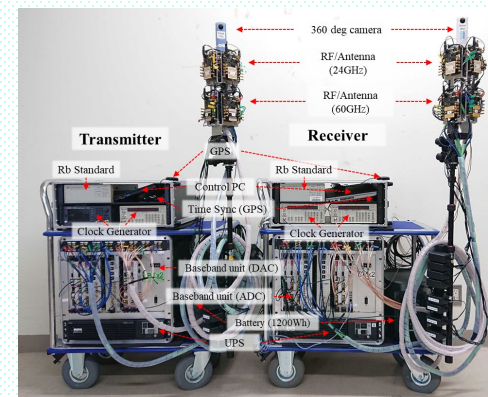
- 無線通信システムの設計・評価に必修
- 常に次世代無線通信システムを狙う
- 大手キャリアさんにとっては大事な課題
- 測定装置の開発に膨大な資金・ノウハウが必要である

■ 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

電波の伝わり方の見える化



電波によるモノの見える化

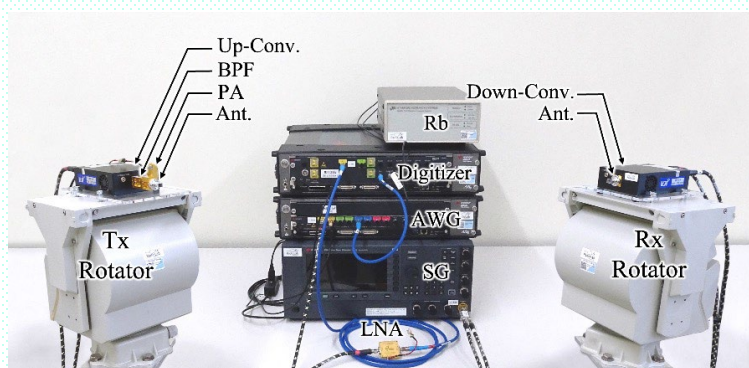


■ 政府系プロジェクト

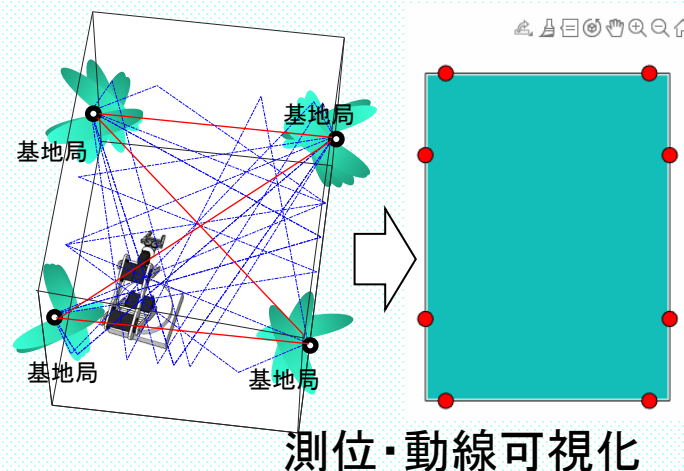
総務省



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

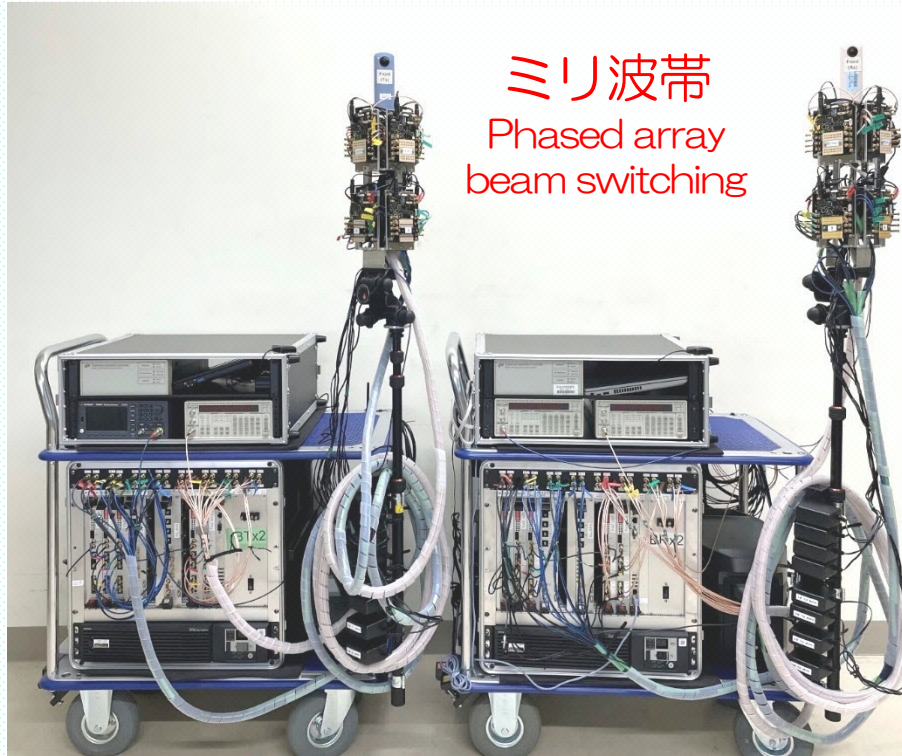
■ 共同研究

- 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

チャン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)

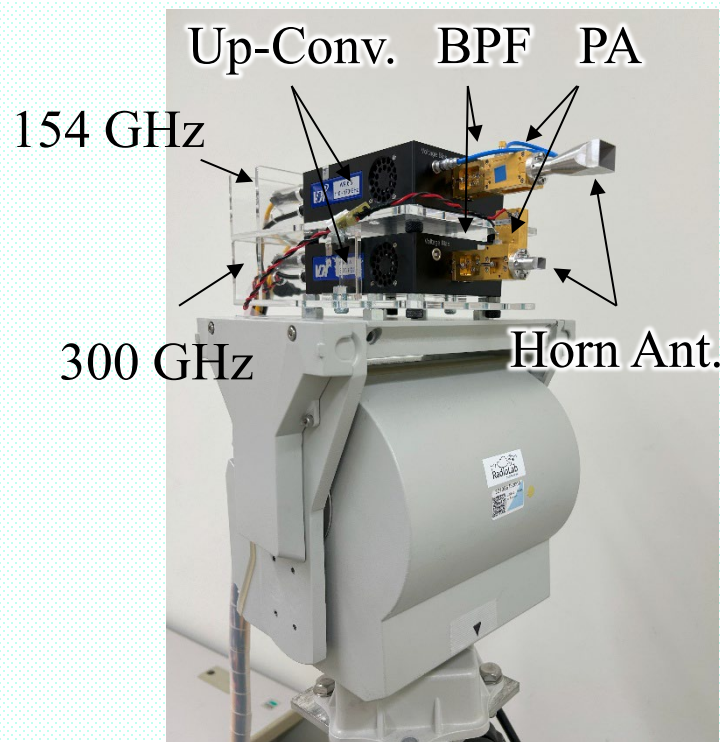


チャンネルサウンダの開発(2)

- 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

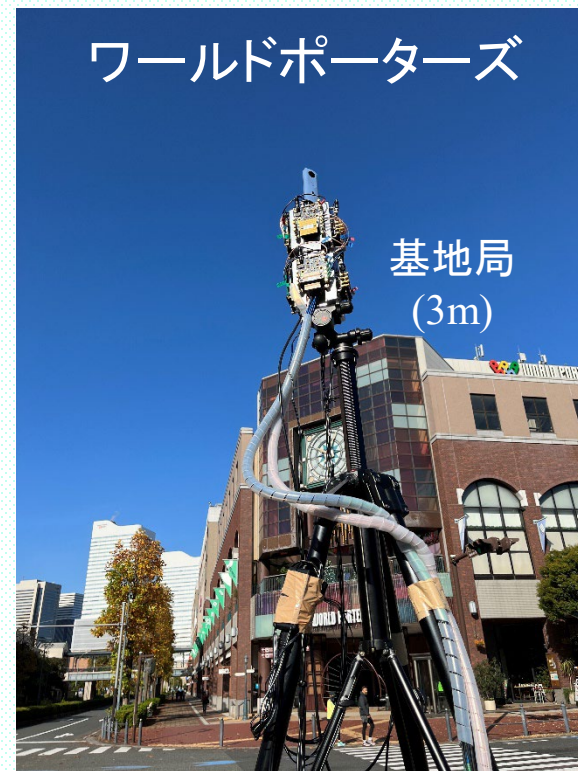
	154 GHz	300 GHz
Center freq.	154 GHz	300 GHz
Signal BW	4 GHz	8 GHz
Sounding signal	2,560 tones	5,120 tones
Delay resolution	250 ns	125 ps
Delay span	640 ns	
Tx Ant	Gain: 26 dBi, HPBW: 9°	
Rx Ant		
EIRP	21.5 dBm	16.5 dBm
Dynamic range	62 dB@1m 42 dB@10m 22 dB@100m	60 dB@1m 40 dB@10m 20 dB@100m

Dual-band Sounder



測定の様子(ミリ波帯)

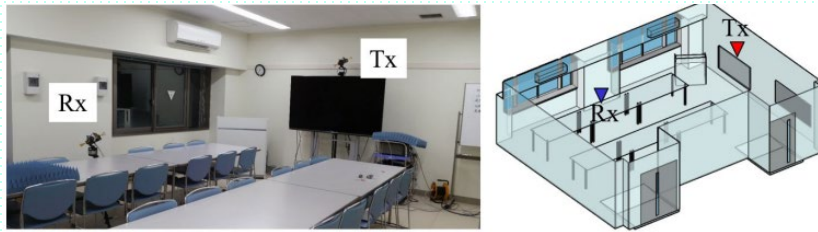
8



測定の様子(テラヘルツ波帯)

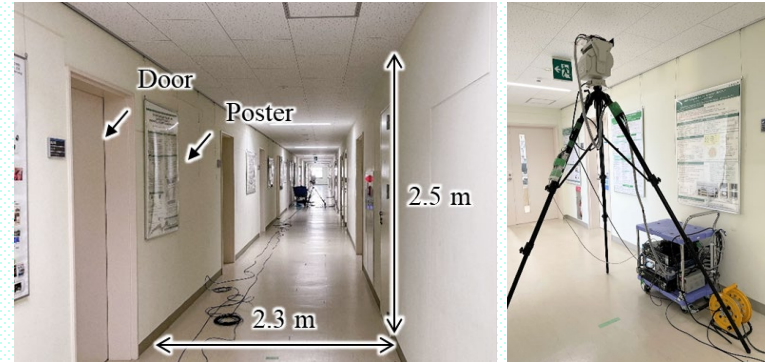
9

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

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.

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.

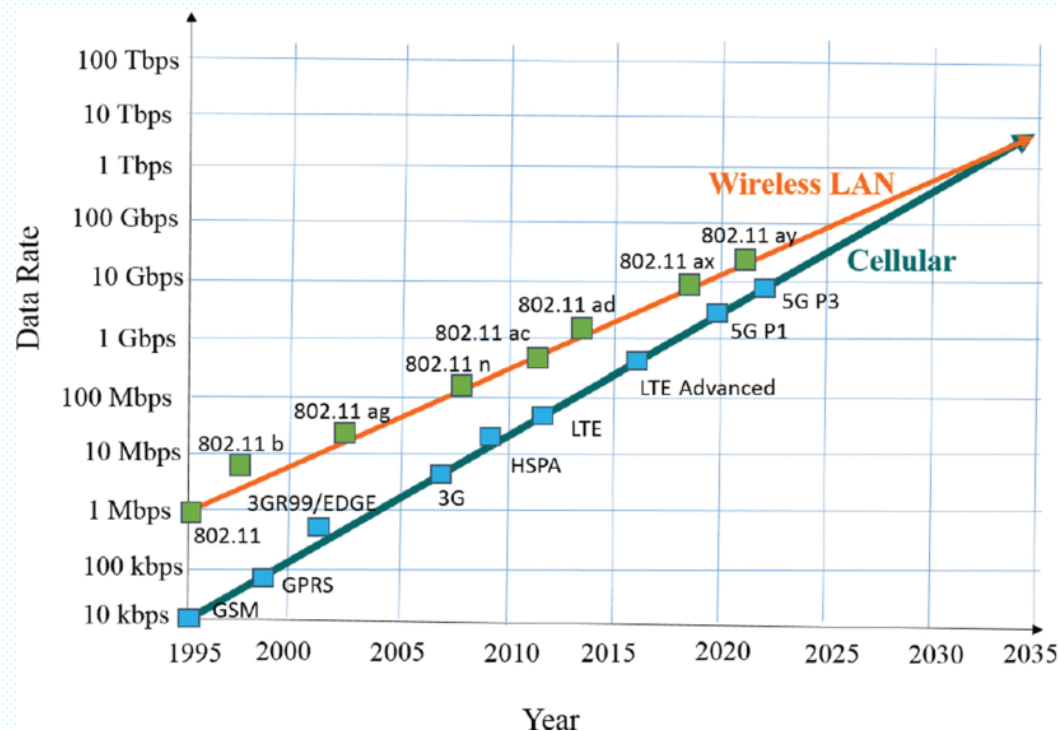
Open square (60m × 60m)



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.

- 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

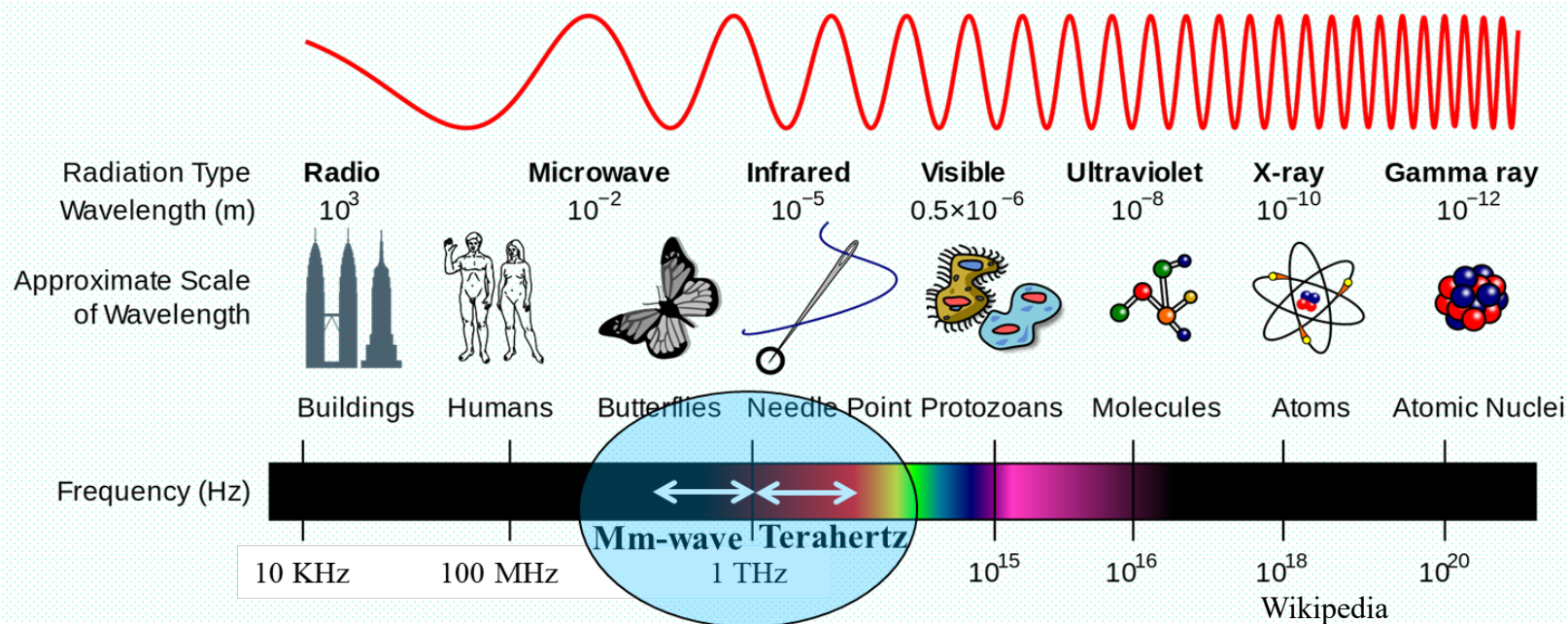
*Sub-THz波帯 (100 GHz ~ 300 GHz)



[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

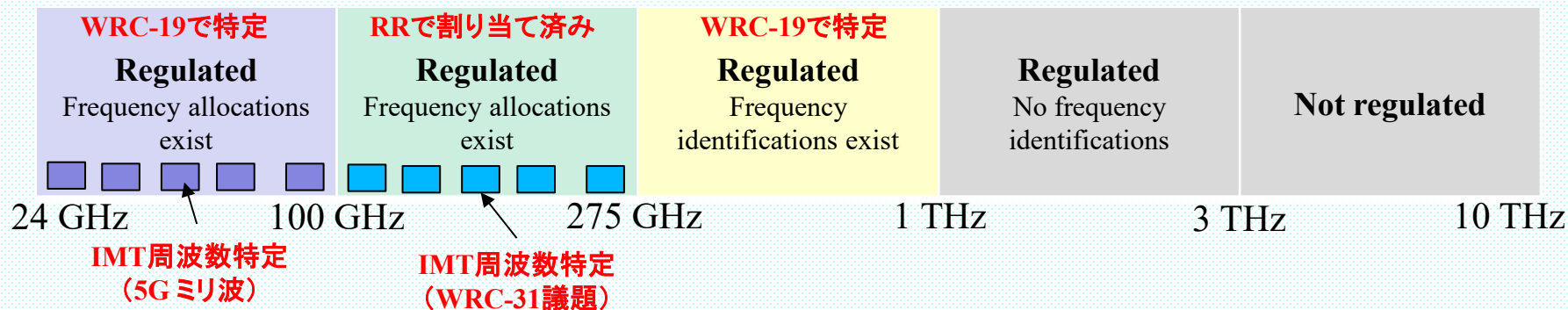
■ テラヘルツ帯の特徴

- 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



■ 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.

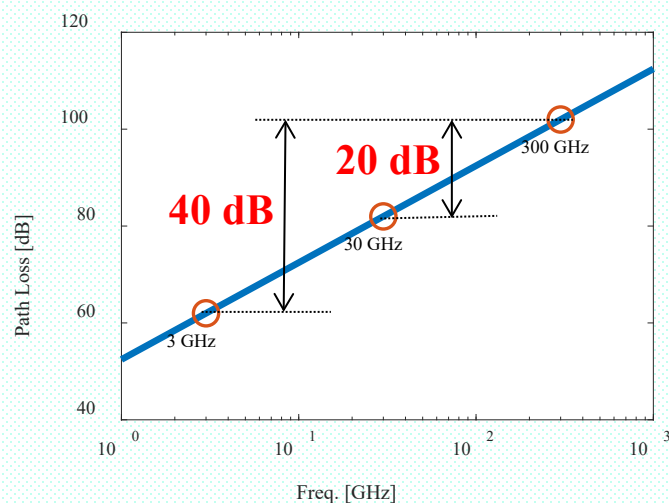
[**] ETSI GR THz 002 on Identification of frequency bands of interest for THz communication systems Apr. 2024.

■ 伝搬特性の周波数依存性

自由空間損失

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

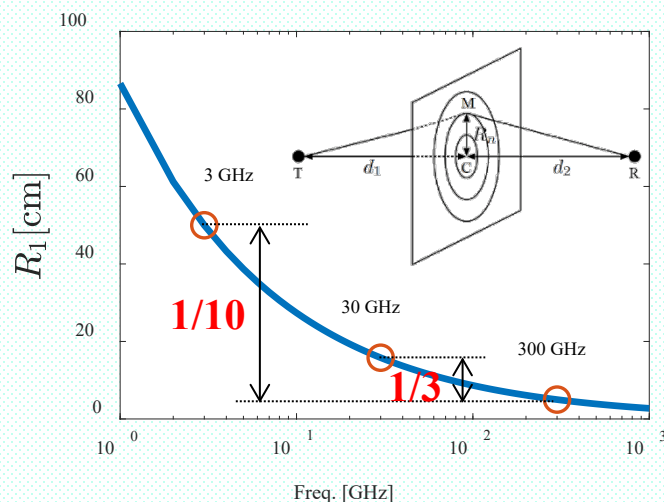
飛ばない



第1 Fresnelゾーン

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

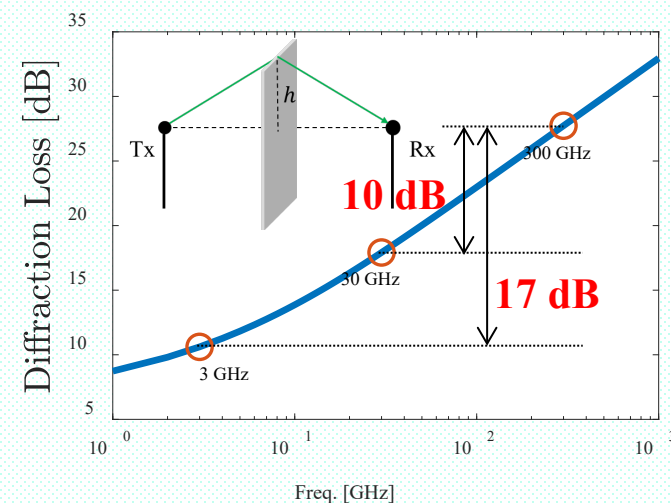
完全遮蔽



回折損失(Fresnel係数)

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

回り込まない

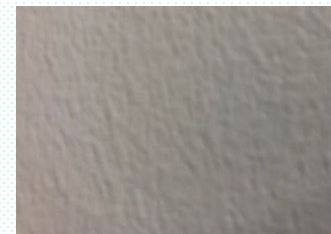


■ 反射特性

- 正規反射
- 粗面散乱

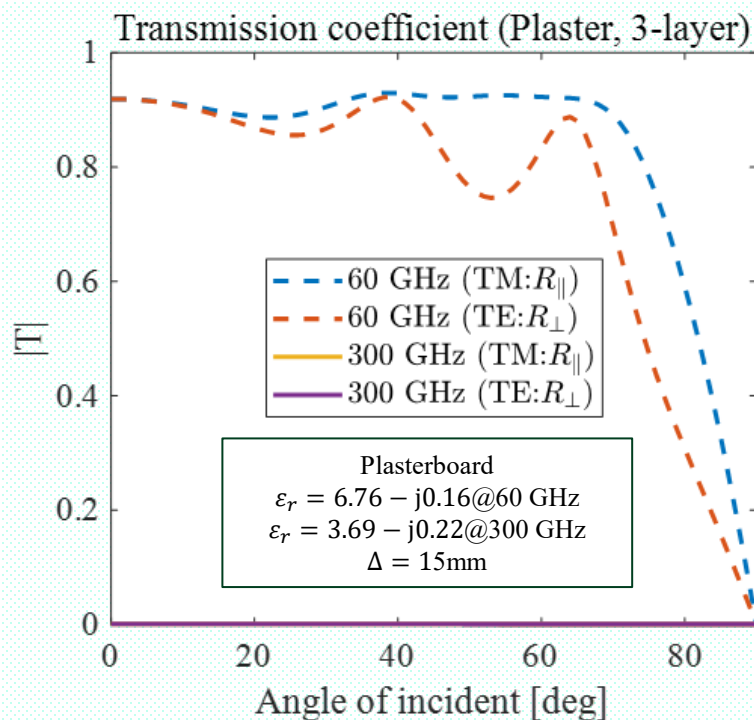
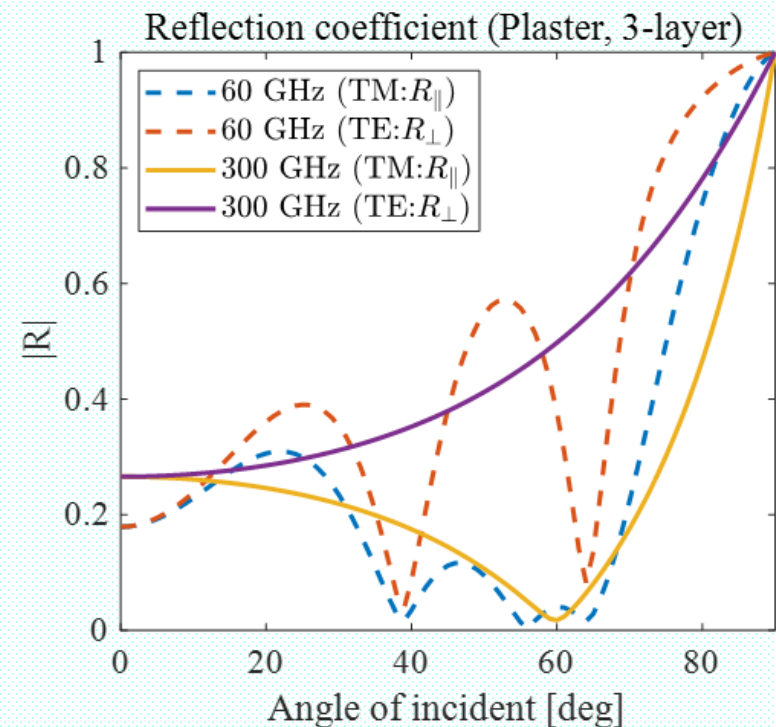
粗面散乱による損失

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

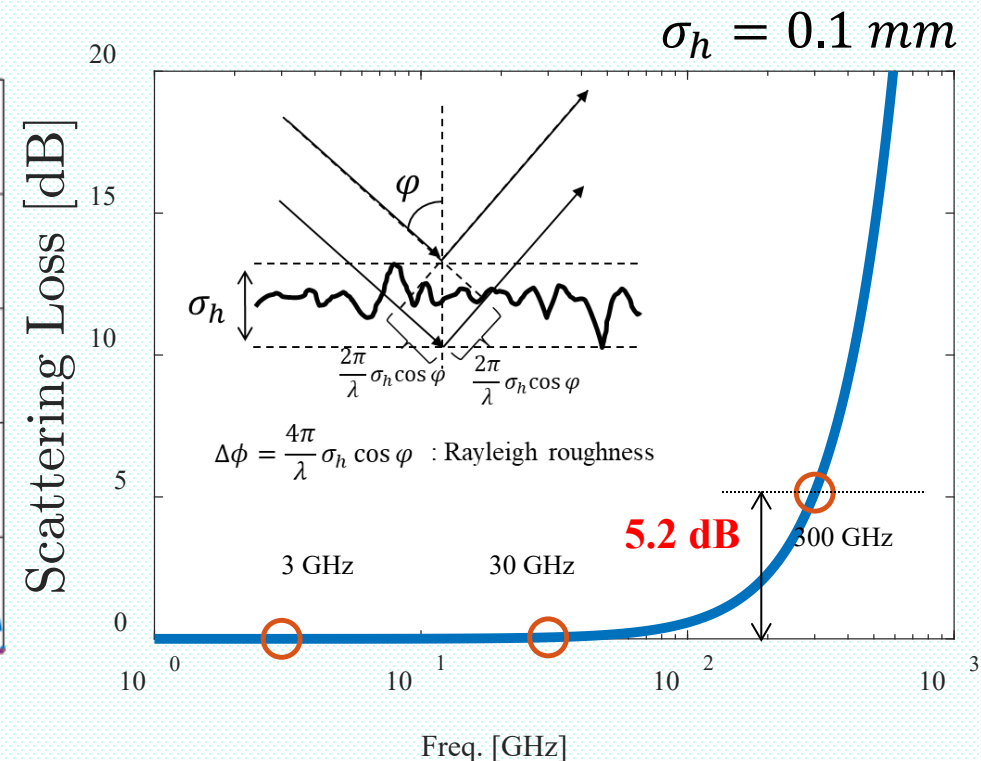


Rough surface
石膏壁

正規反射

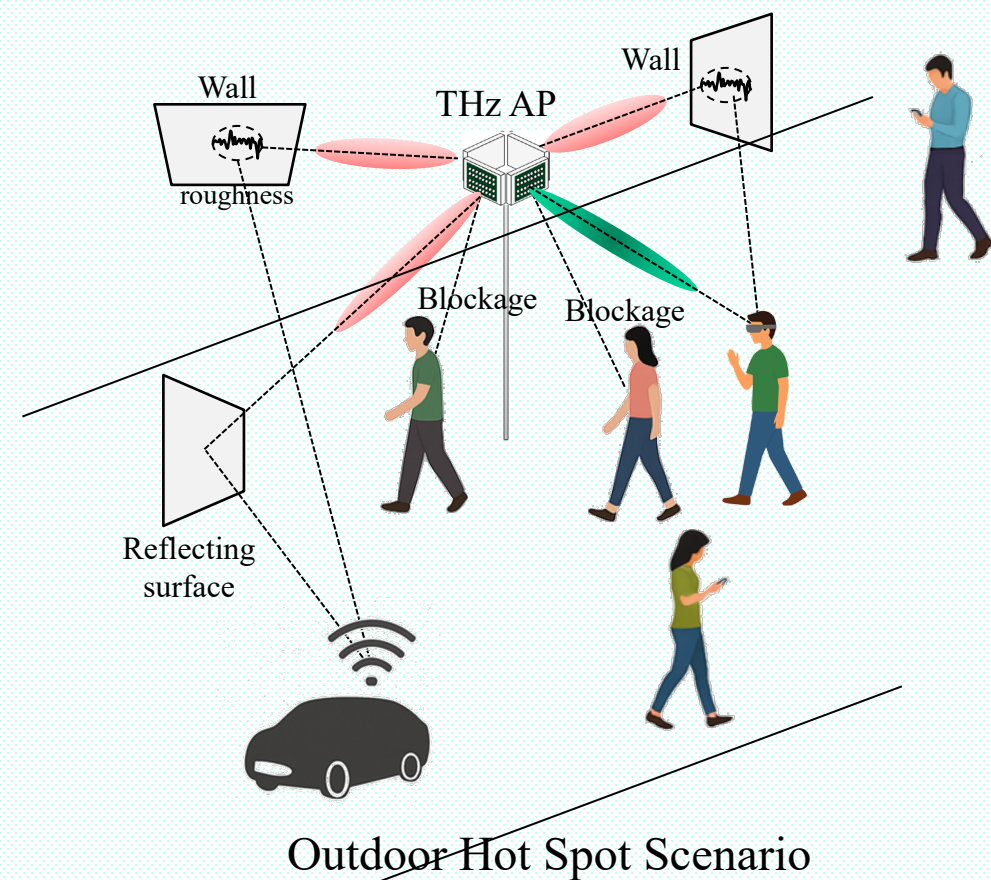
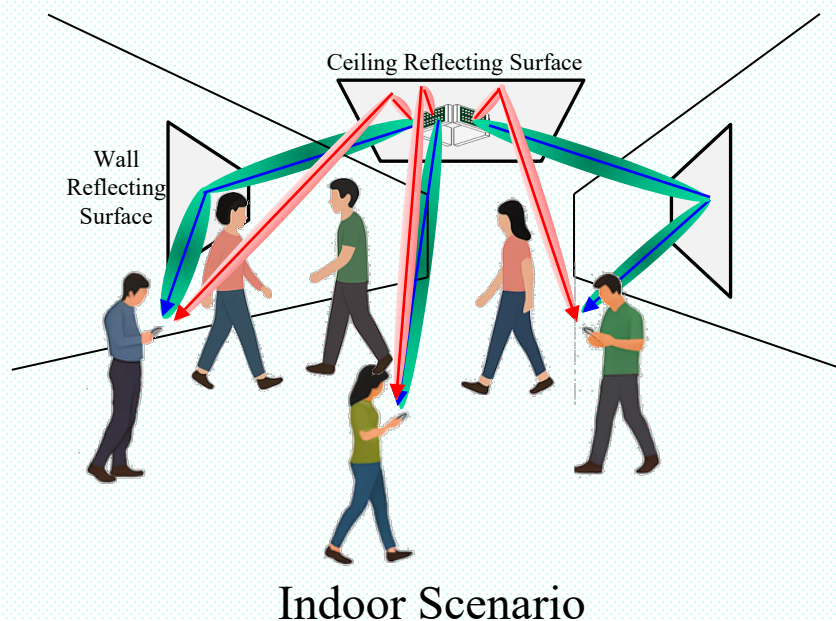


粗面散乱

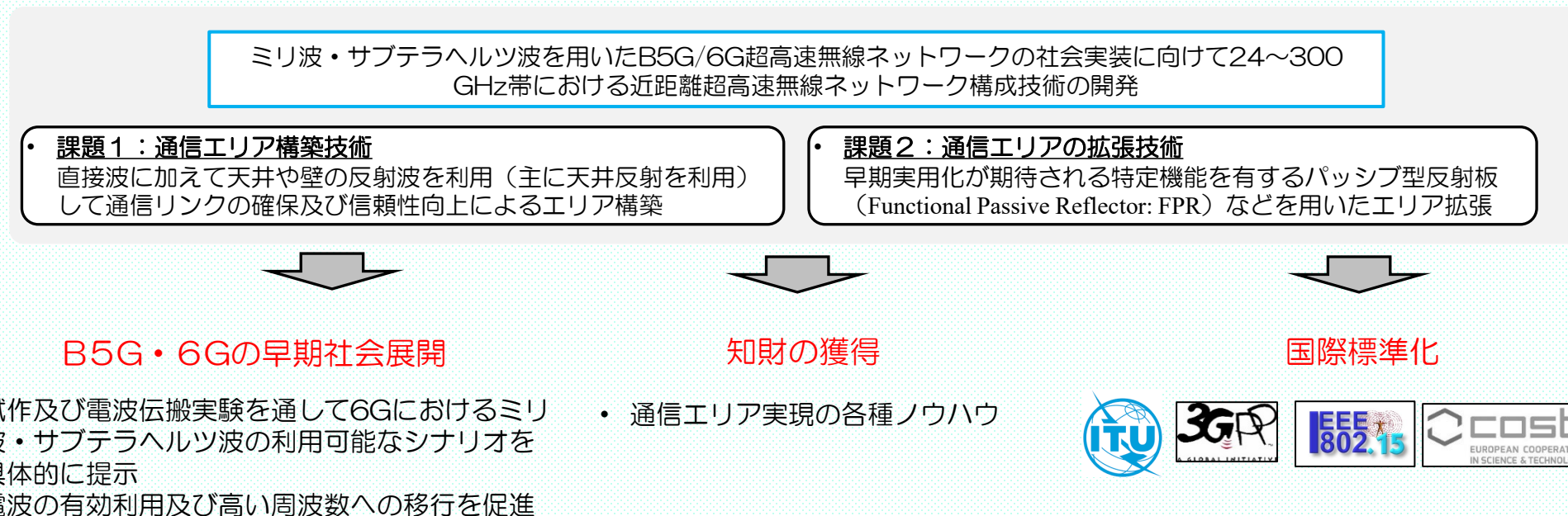


- 近距離屋内外移動接続 (~ 50 m)
 - 伝送レート: 数 Gbps (数 GHz帯域幅)
 - マルチビーム MIMO
- 空間多重・ダイバシティ
 - 人体遮蔽に対して動的リンク制御
 - 反射板 (Passive/Intelligent reflecting surfaces) の利用

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



Thank you for your attention !

18



mskim@eng.niigata-u.ac.jp



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

