

令和6年度電波利活用セミナー

# サイバーフィジカルシステムを利用した ワイヤレスエミュレータによる電波ビジネスの拡大

京都大学 大学院情報学研究科 教授  
原田博司



京都大学  
KYOTO UNIVERSITY

© 2025 Kyoto University and NICT. All Rights Reserved.



## □ 背景

◆ Society5.0、Beyond 5G時代は、これまで以上に多くの機器が通信を行う

- ▷ Beyond 5Gでは数百万～数千万台/km<sup>2</sup>を想定
- ▷ 通信量の増大による周波数逼迫
- ▷ 相互干渉による周波数利用効率の劣化



**様々な問題が発生**

◆ 新しい電波システムのデザイン、評価・検証を低コストかつ短時間で実現することが困難

- ▷ 利用する周波数は現状よりも高周波数帯 多数の無線機の調達が困難
- ▷ 多くの機器を設置する場所の確保が困難、設置コストが増大



**実無線機のみでの評価の限界**

サイバー空間上で電波システムを模擬することにより  
低コスト、短時間で次世代システムを評価・検証

### フィジカル空間

利用シーンに応じた  
電波伝搬特性  
実無線機による  
電波システムの実現

サイバー(仮想)空間で実時間動作できるようにモデル化

実無線機をソフトウェアにより実現

### サイバー(仮想)空間

電波伝搬を仮想空間上で高精度に模擬  
任意の電波システムを仮想空間上で高精度に模擬



# 仮想空間における電波模擬システム：ワイヤレスエミュレータ

- 様々な電波システムを、仮想空間上で高精度かつリアルタイムにエミュレーション可能な電波模擬システムを開発
- 無線通信に関わる多様な事業者が、インフラ/システム/プラットフォーム/アプリケーション/サービスなどのデザイン、評価、検証が可能となるテストベッドを提供



# エミュレータ vs シミュレータ

項目	エミュレータ	シミュレータ
仮想空間での無線機（仮想無線機）の構成	実機に搭載しても実動作するレベルの信号処理、通信処理を実現するソフトウェアモジュールで構成	全ての無線機の機能を実現する必要性はなく簡略した機能が中心
評価環境	実際の地理空間情報を仮想空間で再現無線機を三次元で配置	実空間の地理情報をいれる必要性はなく、モデル化したものが中心
電波伝搬モデル	実験データによって検証をされた、評価環境、端末の位置に応じた電波伝搬特性を模擬	過去の研究等でモデル化されたものを利用。統計的な観点では検証済
評価時のクロックの考え方	エミュレータ内がもつ時計（クロック）で時事刻々と動作し、実運用状態に近い形で評価	計算を早くするために、評価時間を限定、省略等も可能
アプリケーション	アプリケーションも搭載可能	基本アプリケーションの搭載は想定せず。限定された機能の評価
実無線機との連携動作	実無線機の許容範囲でほぼリアルタイムで連携動作可能	リアルタイムでは不可能

# ワイヤレスエミュレータの基本コンセプト

- **汎用的なプラットフォーム、処理エンジン**を用いて構築されていること
  - ◆ プログラミングが行いやすい、他の用途にも開発事例がある（例えばゲーム）
  - ◆ 多くの既開発の資産が利活用できる
- **3D地図、地形データを建物の材質等も含め取り込む**ことができること
  - ◆ 市販、公共データとして入手可能な3D地図データ
  - ◆ 自身が測定した3D点群データ
- **実環境に近い電波伝搬環境がエミュレーション**できること
  - ◆ 測定データをモデル化したものが搭載できること
  - ◆ 地図や地形データを基に電波伝搬特性が精度よく模擬できること
  - ◆ オブジェクトの位置、移動速度に合わせて電波伝搬環境が**研究開発者の満足できる範囲**で模擬できること
- **実無線システムで採用されている無線通信システムがエミュレーション**できること
  - ◆ 物理層、データリンク層（例：MAC層）、ネットワーク層のみならず、各種アプリケーションも利用可能
  - ◆ 各種評価（データ誤り率、伝送特性、キャパシティ、各種干渉推定）を行うことができる
  - ◆ オブジェクトの位置、移動速度に合わせて無線システムが**研究開発者の満足できる範囲**で模擬できること
- **実無線機と連携・協調動作**できること
  - ◆ 研究開発者が自身の実無線機をワイヤレスエミュレータに接続し、実環境・仮想環境協調評価を行うことが可能

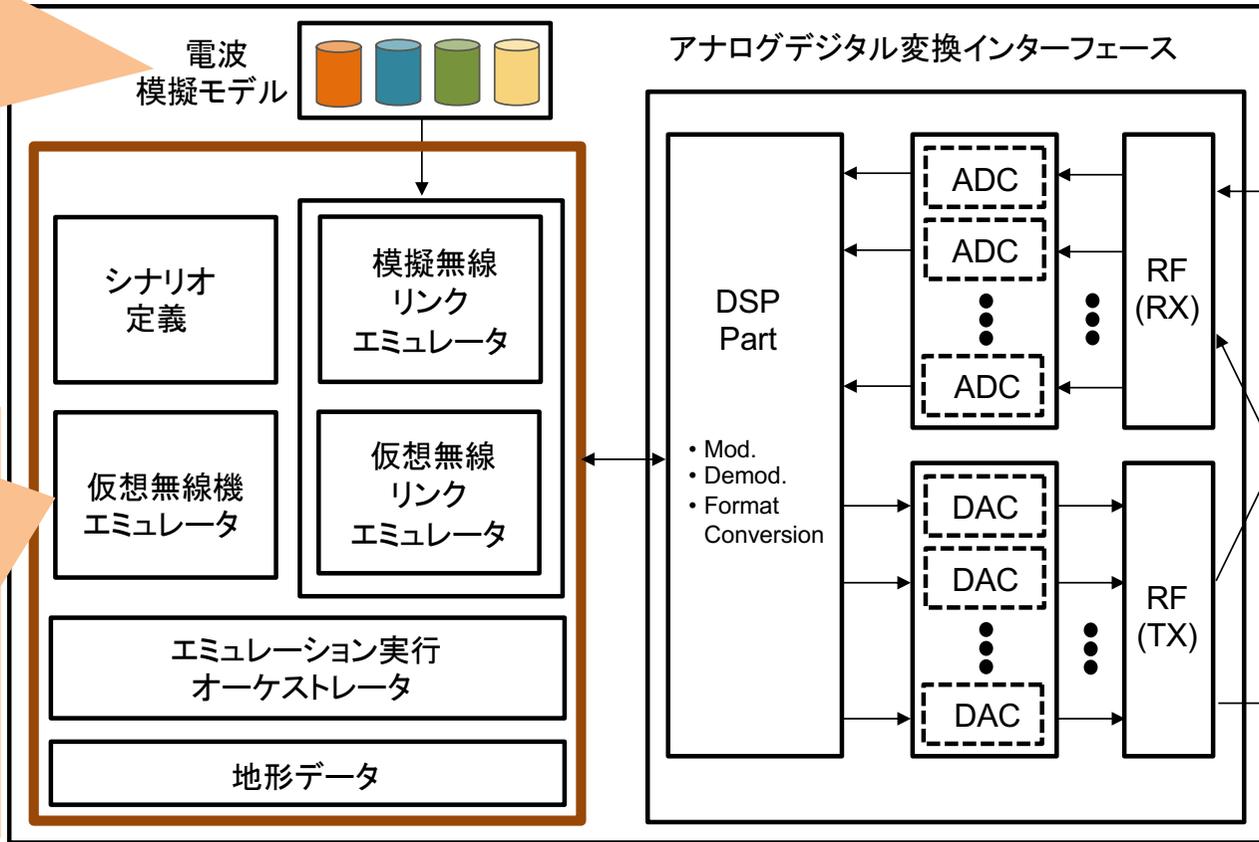




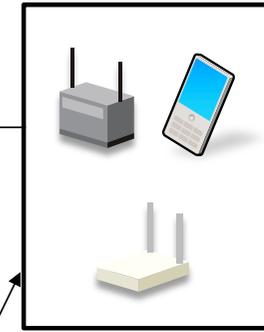
## 大規模仮想環境検証基盤(ワイヤレスエミュレータ)

決められたユースケース、無線パラメータにおいて、各位置における電波伝搬特性がモデル化

仮想無線機、実無線機、地形データ、電波模擬モデルを用いて無線通信システムの評価を実施



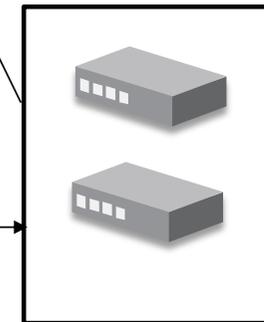
実無線機



利用者が開発した実無線機

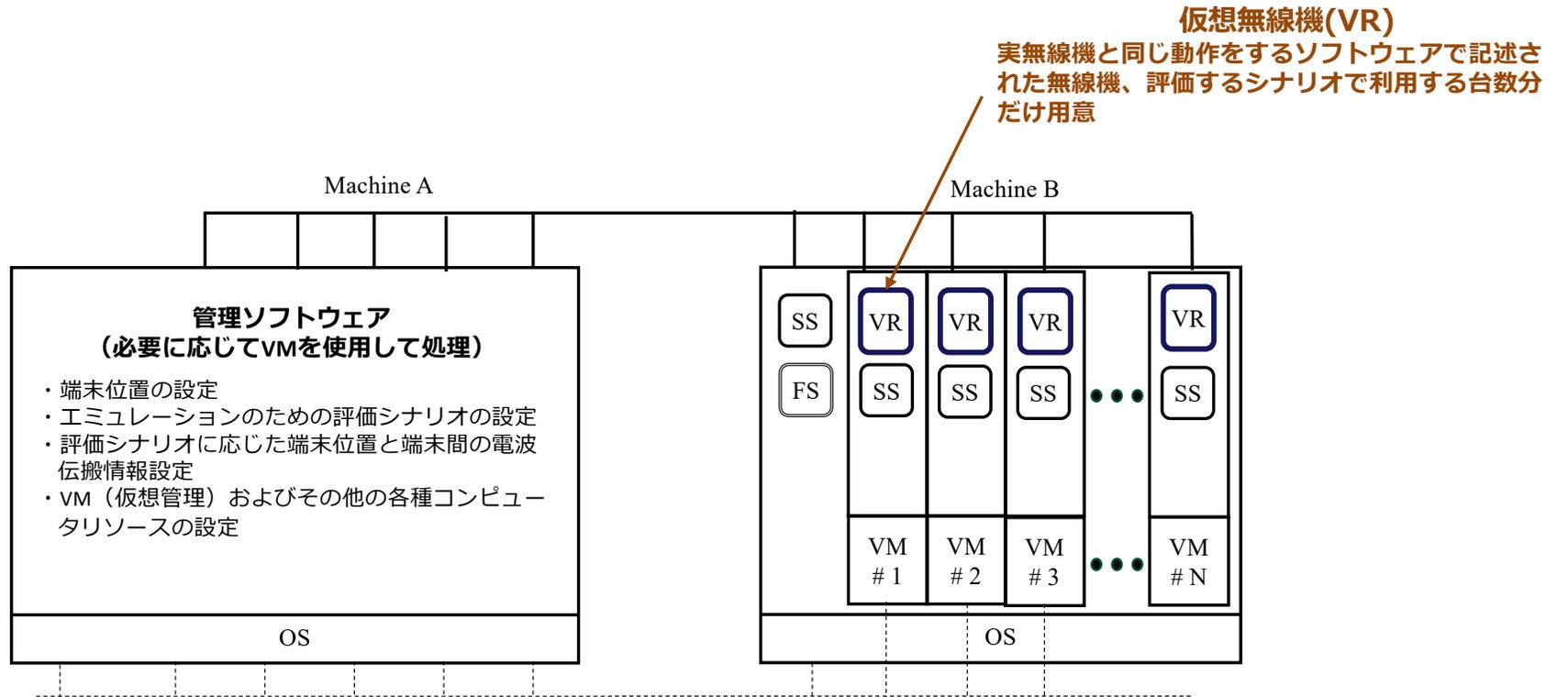
エミュレータ上の仮想無線機と連携・協調動作可能

疑似無線機



通信方式・無線パラメータを変更可能な無線機

研究成果を実無線機開発前に反映可能



VR: Virtual Radio  
 SS: System Software  
 FS: File Storage / Database

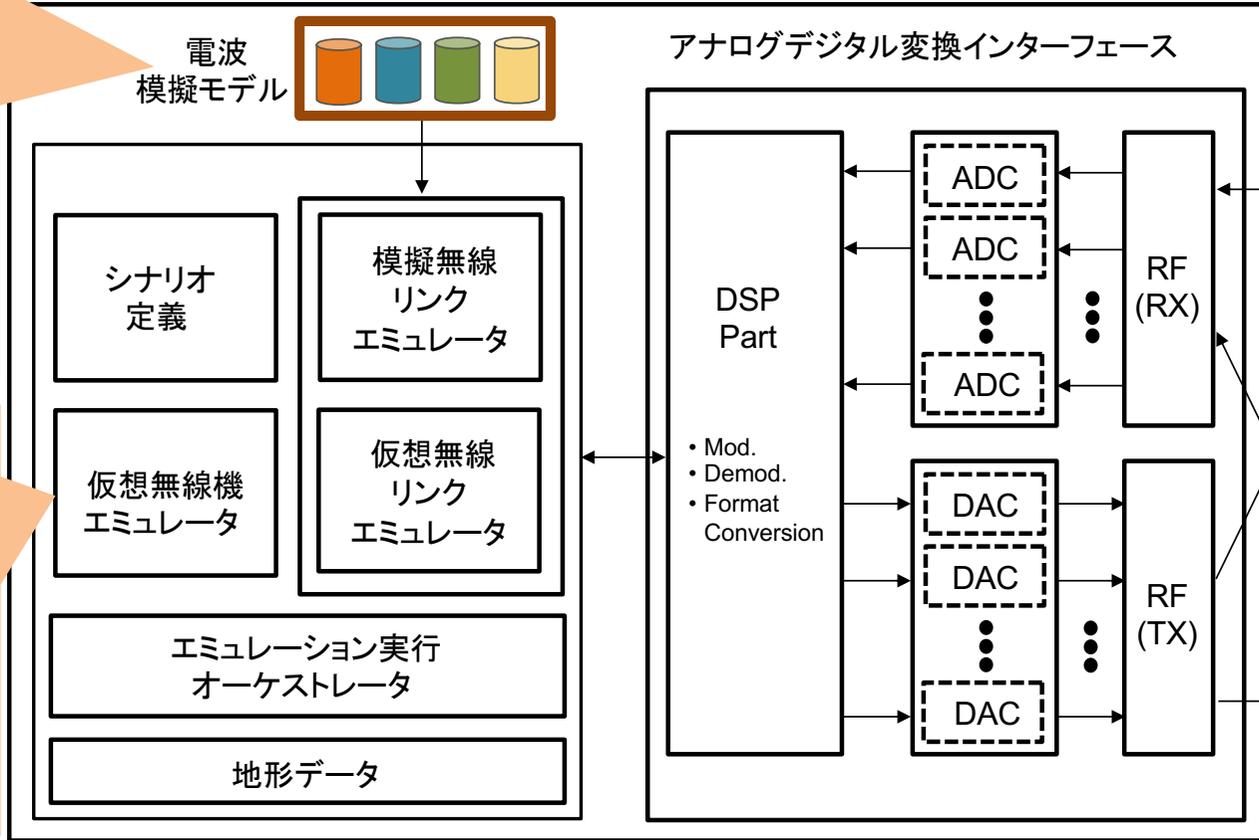
□ : Facility (Application / Control)  
 □ : Facility (File Storage / Database)

— : Network (Data)  
 --- : Network (Control)

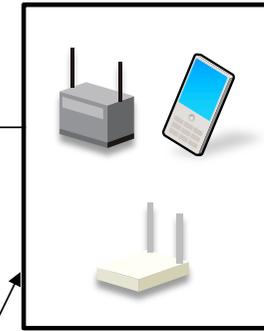
## 大規模仮想環境検証基盤(ワイヤレスエミュレータ)

決められたユースケース、無線パラメータにおいて、各位置における電波伝搬特性がモデル化

仮想無線機、実無線機、地形データ、電波模擬モデルを用いて無線通信システムの評価を実施



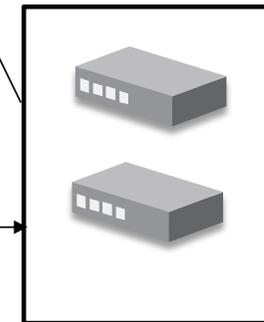
実無線機



利用者が開発した実無線機

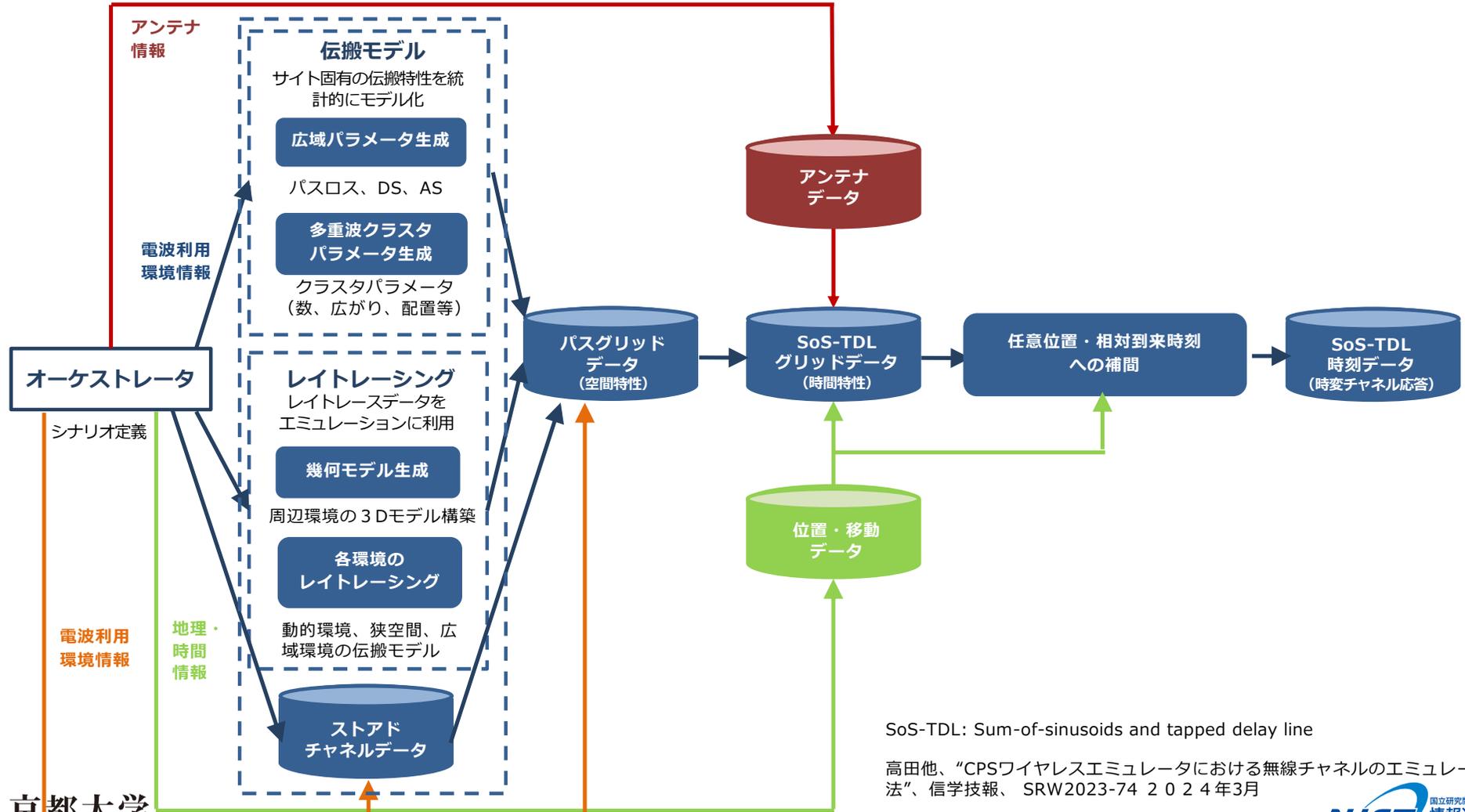
エミュレータ上の仮想無線機と連携・協調動作可能

疑似無線機



通信方式・無線パラメータを変更可能な無線機

研究成果を実無線機開発前に反映可能

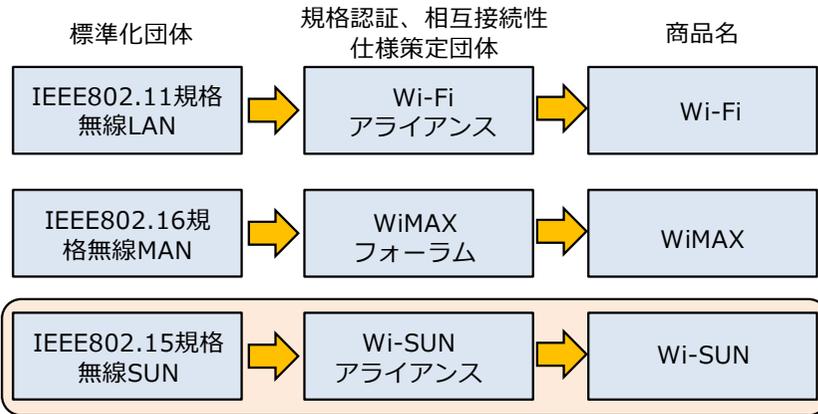


# ワイヤレスエミュレーションの例

## IEEE 802.15.4 (Wi-SUN)のエミュレーションの例



## Wi-SUNの位置付け

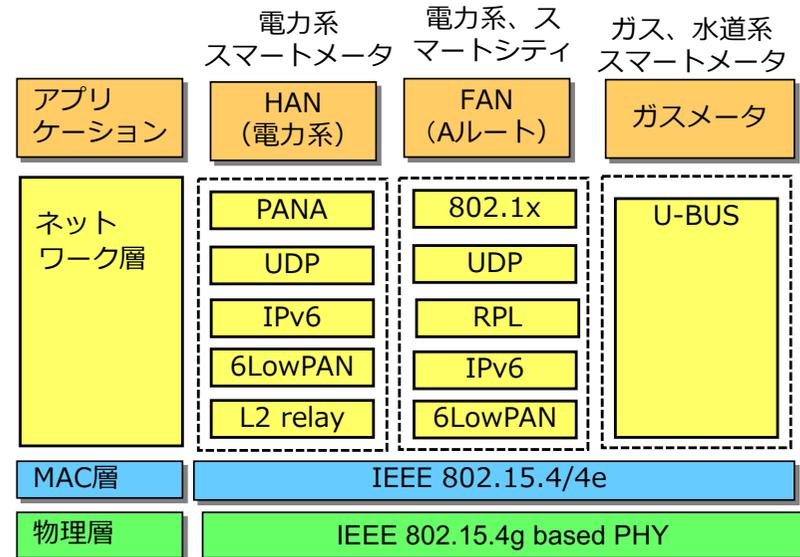


## 規格の概要

項目	仕様
標準規格	物理層 IEEE 802.15.4g MAC層 IEEE 802.15.4/e
周波数	免許不要帯域 (日本では920MHz)
伝送速度	FSK: 50-300 kbps, OFDM: 12.5-2400 kbps
伝送距離(typ)	約1 km (市街地) 約2km (郊外地)
変調方式	2 GFSK, OFDM
最大送信電力 (日本)	20 mW (免許不要) 250 mW (登録局)
誤り訂正	畳み込み符号 (オプション)
特徴	IPv6対応、マルチホップ可能

## Wi-SUNアライアンスの概要

- 国際標準 IEEE802.15.4gをベースに各種アプリケーションに対応した仕様、ベンダ間の相互接続性を担保する測定仕様を制定し、無線機の認証とメーカー間の相互接続性を行う国際的な規格認証団体
- **原田はWi-SUNアライアンスの創業者、理事会議長**
- 4種類の仕様 (3種類は商用化)
- 2012年1月に策定 (**日本発**)
- 2021年現在、全世界で**300**社以上が加盟
- 全世界で**1億台**以上の無線機が出荷



## □ Border Router

- ◆ 広域各ノードからの情報収集, マルチホップの経路を決定
- ◆ 自身が管理するマルチホップネットワークへのアクセス認証, 暗号鍵マネージメント
- ◆ 他のネットワークとの接続

## □ Router node

- ◆ データ及びセキュリティとアドレスの管理のための必要な情報を中継

## □ Leaf node

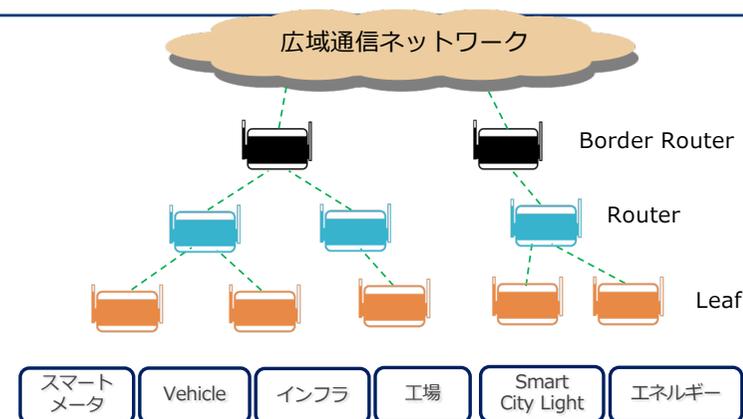
- ◆ PANの探索、Join
- ◆ パケットの送信、受信

## □ 特徴

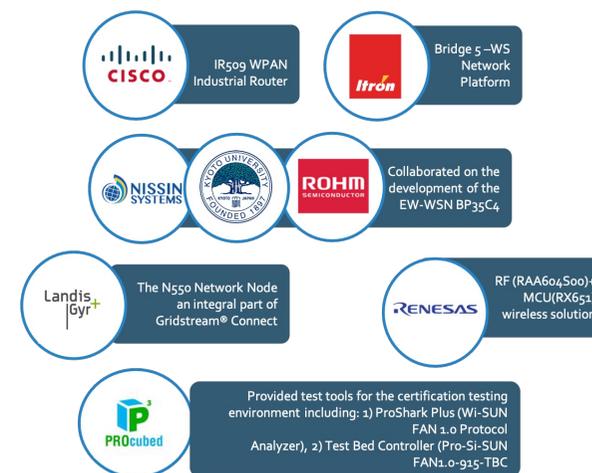
- ◆ **IEEE 2857**で標準化
- ◆ 周波数ホッピングによる干渉回避
- ◆ IETF RPLによる20段を超えるマルチホップが実現
- ◆ IEEE 802.1xのセキュリティを用い、またベンダ間での相互接続が担保

## □ 現状

- ◆ Wi-SUN FAN 1.0 はリリース
- ◆ 現状 Wi-SUN FAN 1.1 が標準化中



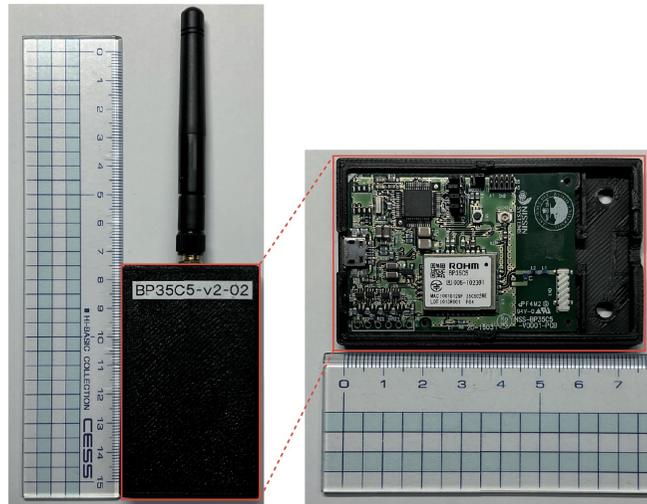
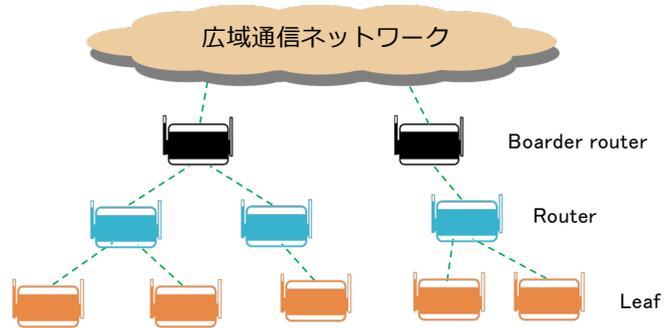
IEEE 802.15.4g/4e PHY/MAC, 6LoWPAN, IPv6  
 多段中継 (マルチホップ対応)  
 周波数ホッピングによる干渉回避



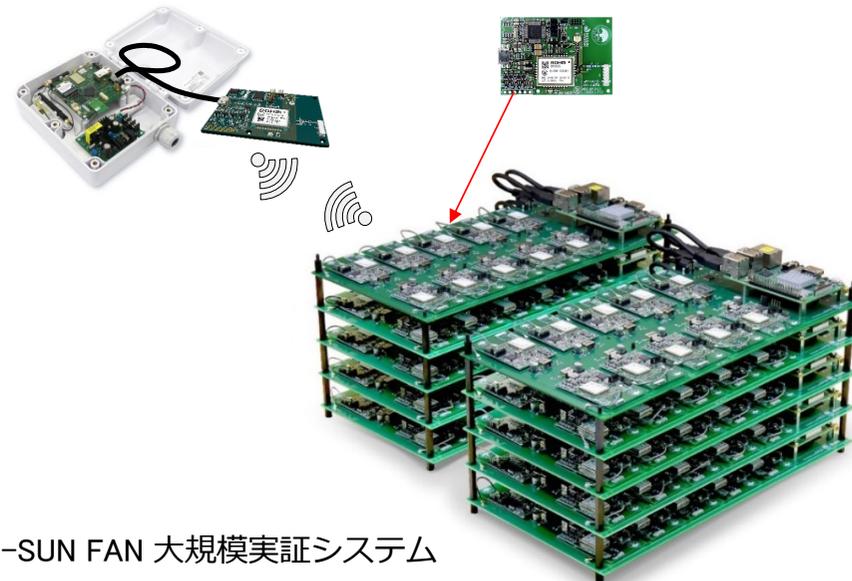
Wi-SUN FANは最初5社が認証 (2019年2月)  
 出典: Wi-SUNアライアンス資料より



Wi-SUN FAN 基盤

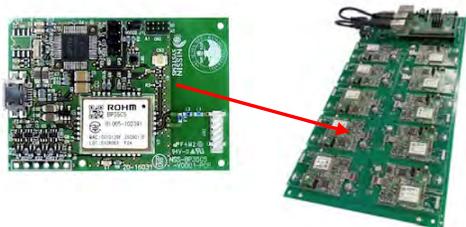


Wi-SUN FAN 搭載無線機



Wi-SUN FAN 大規模実証システム

# 大規模マルチホップ通信の商用化に向けた試験：1000台



Wi-SUN FANを用いた無線機1,000台の自律マルチホップ通信試験に成功(2023年2月16日)：99%以上の伝送成功率

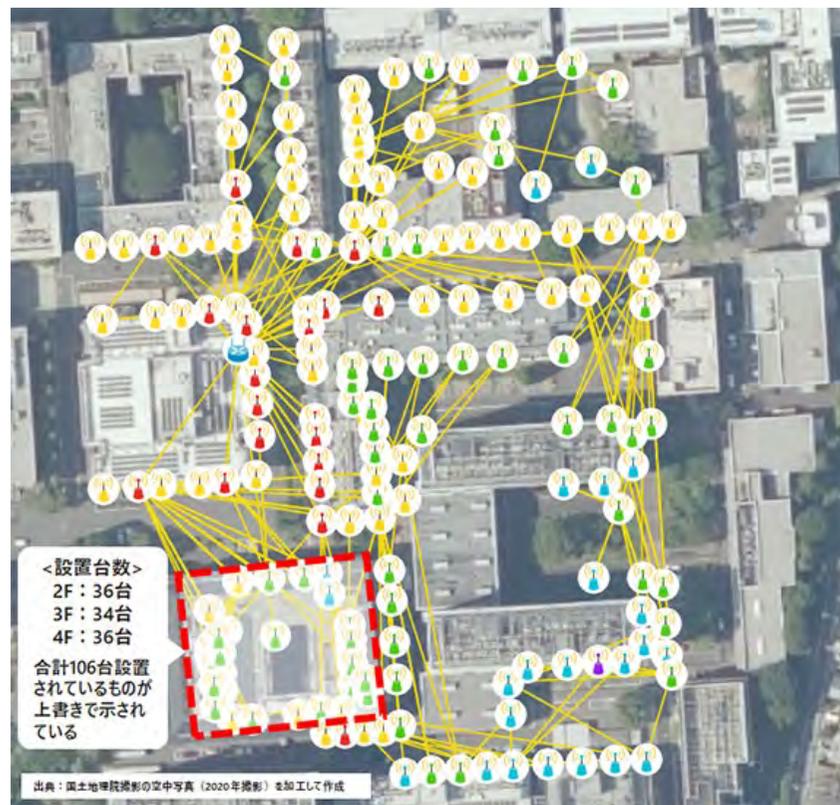


# Wi-SUN FANマルチホップ屋外伝送実験の様子：400台

- モバイルバッテリーを搭載したWi-SUN FAN機器400台を現場にランダムに設置
- 数日間の連続運用
- 通信成功率97.1%以上を確立



Radio equipment

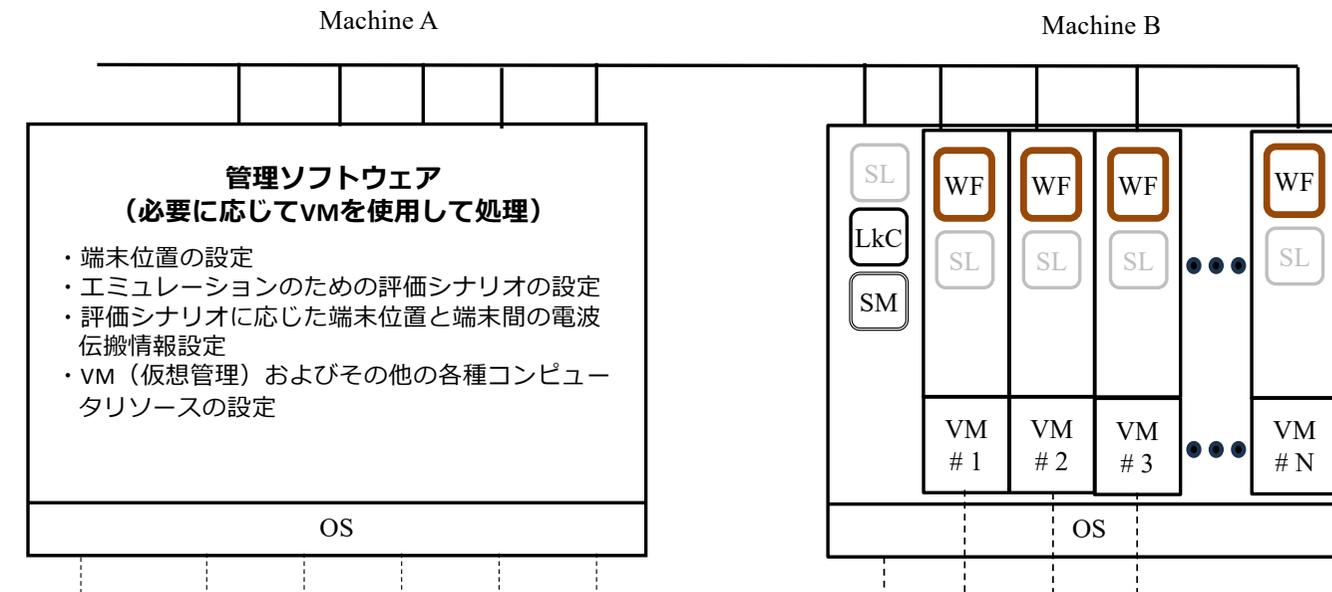


Geospatial authority of Japan

- 🌐 ボーダールーター：1台
- 📶 2段目の無線機：44台
- 📶 3段目の無線機：146台
- 📶 4段目の無線機：158台
- 📶 5段目の無線機：51台
- 📶 6段目の無線機：1台
- 実際の接続

※無線機は2台1組で設置しているため、上記のアイコン1か所が2台の無線機を含む  
※6段目のアイコンのみ、5段目と6段目の無線機が1台ずつ含まれている

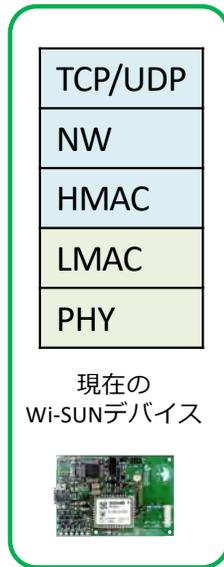
WF: Wi-SUN FAN仮想無線機



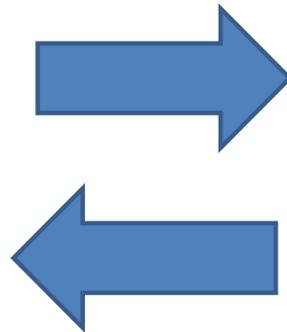
SL: SyslogAgent  
LkC: LinkController  
SM: StorageMounter

- : Facility (Application)
- : Facility (File Storage / Database)
- : Facility (System Log)
- : Service
- : Network (Data)
- : Network (Control)

## Wi-SUN デバイス



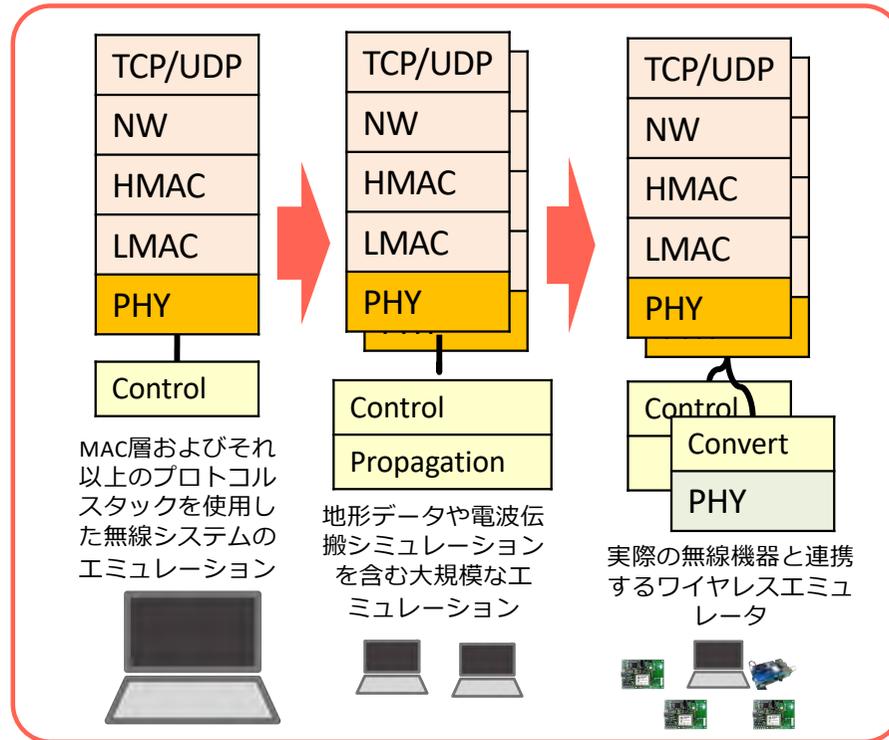
実機にインストールされているソフトウェアをそのまま無線エミュレータ上で動作させることで、大規模評価を実施



- :ハードウェアによる信号処理
- :組み込みOS上のソフトウェアによる信号処理

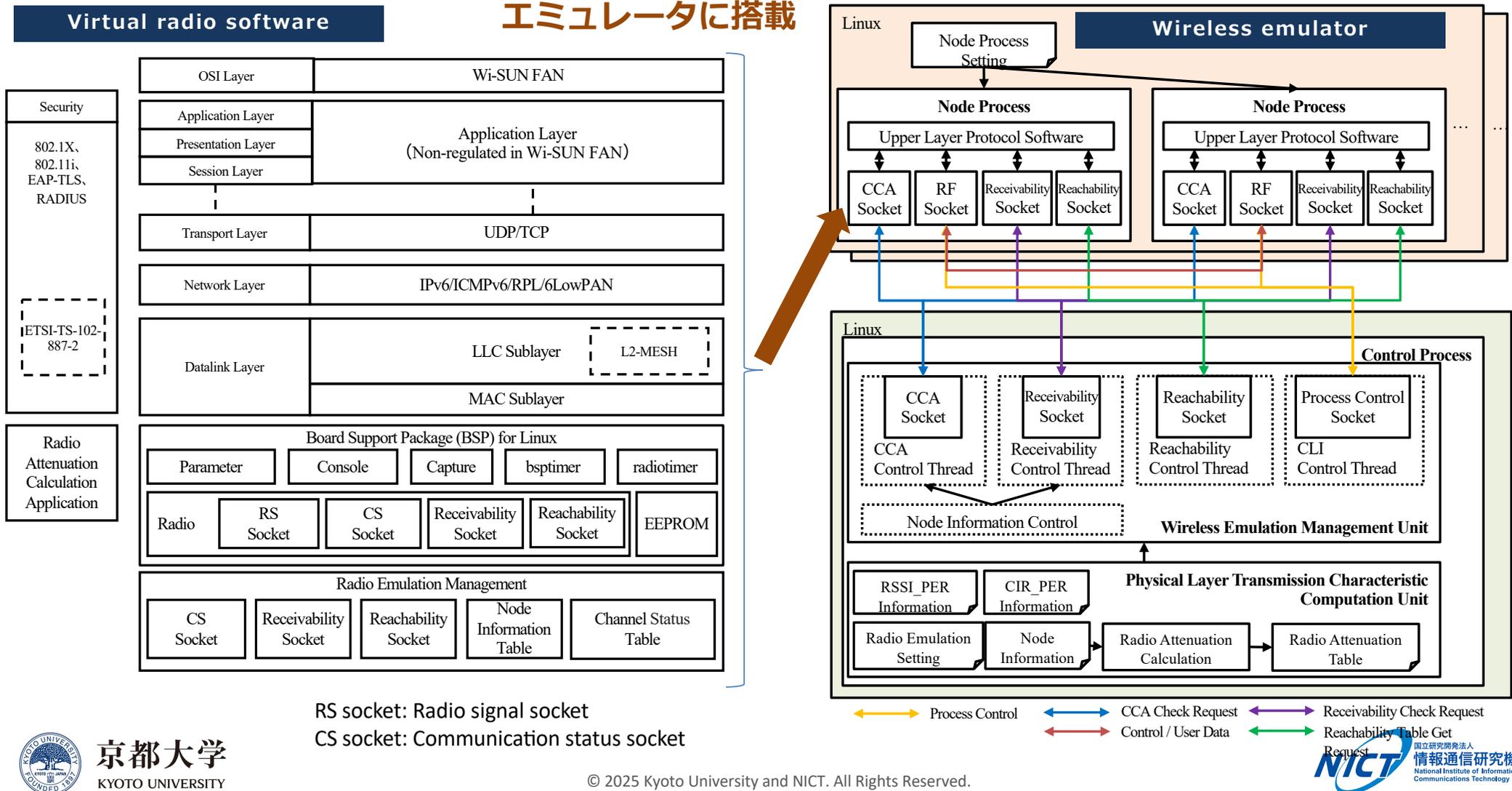
仮想空間に多数の端末を設置し、その伝送特性を評価し、評価結果に基づいて改良した部分を実際の機器に搭載

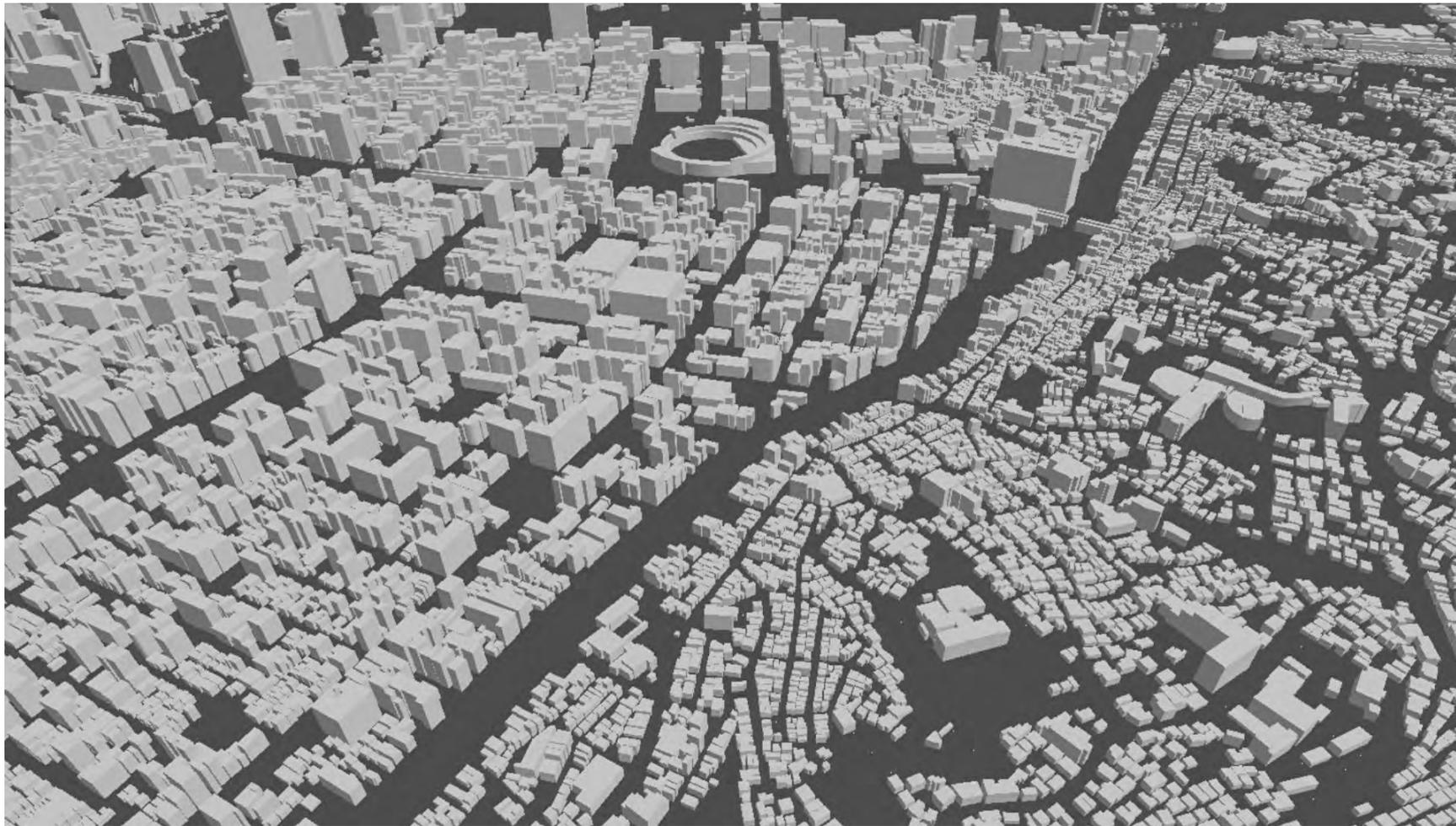
## Wi-SUN 仮想無線機

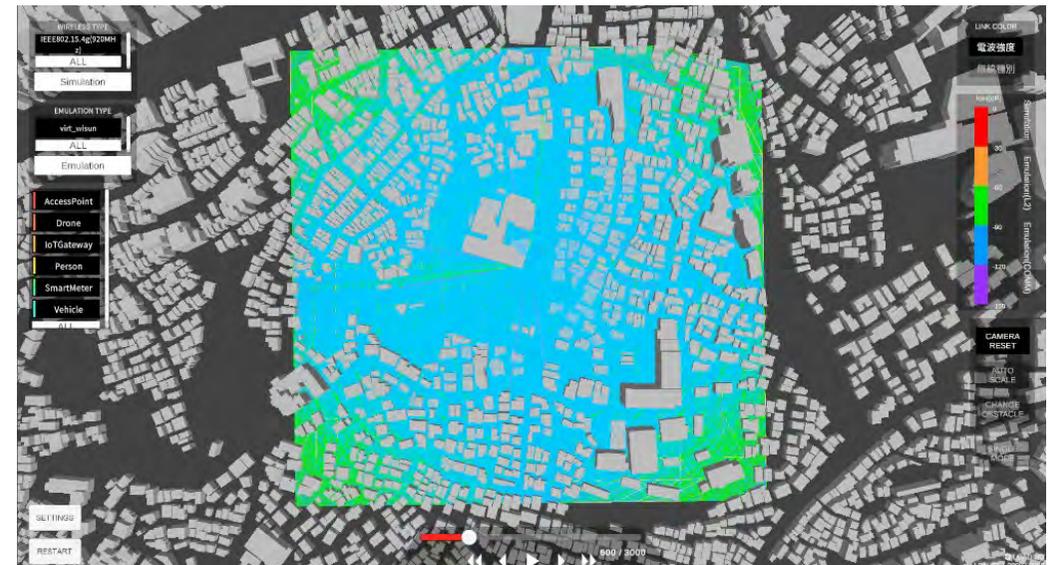
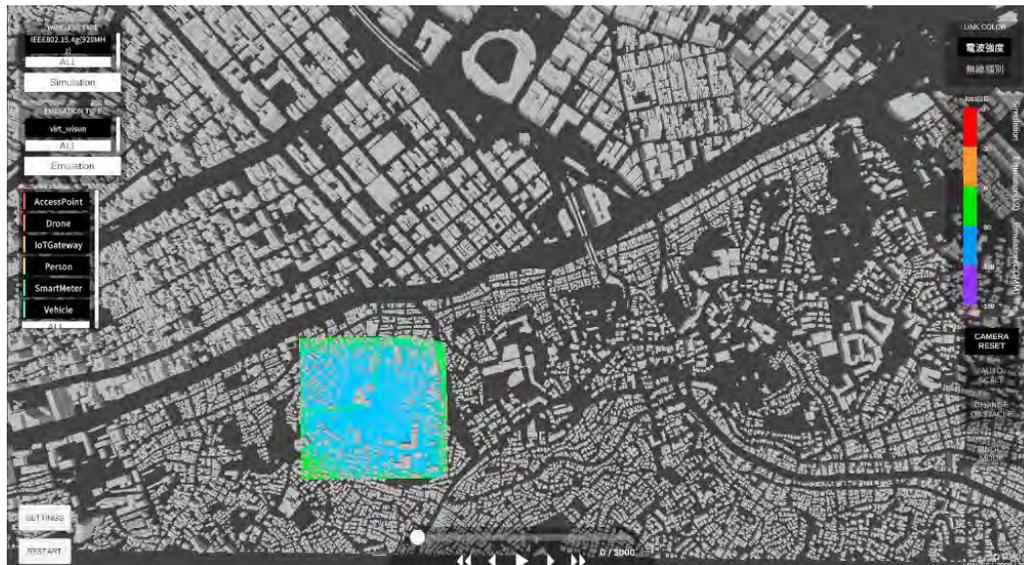


- :ワイヤレスエミュレータで使用されるOS上のソフトウェアによる信号処理(ex. Linux)
- :コンピュータ上の仮想化を使用したエミュレーション

# 仮想無線機の例 (IEEE 802.15.4+Wi-SUN FAN)

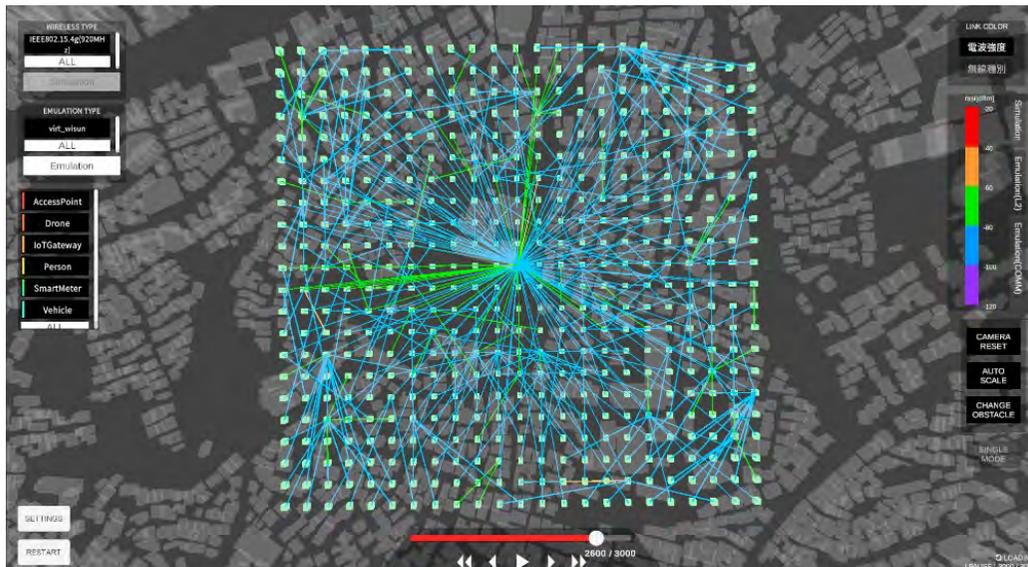




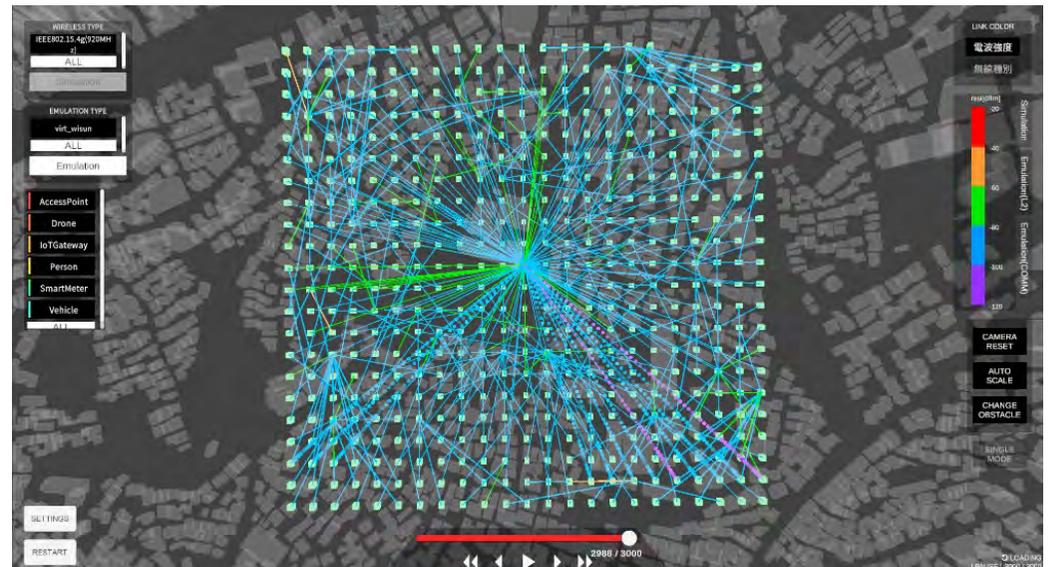


①無線機の設置（地形データ利用）  
（横浜の住宅街に500台のWi-SUN FANシステムを設置）

②全リンクの伝送特性を計算（地形データ利用）  
（例：大地反射二波+遮蔽、課題ア作成モデル）



③Wi-SUNエミュレーション実施  
(マルチホップ形成状況の可視化)

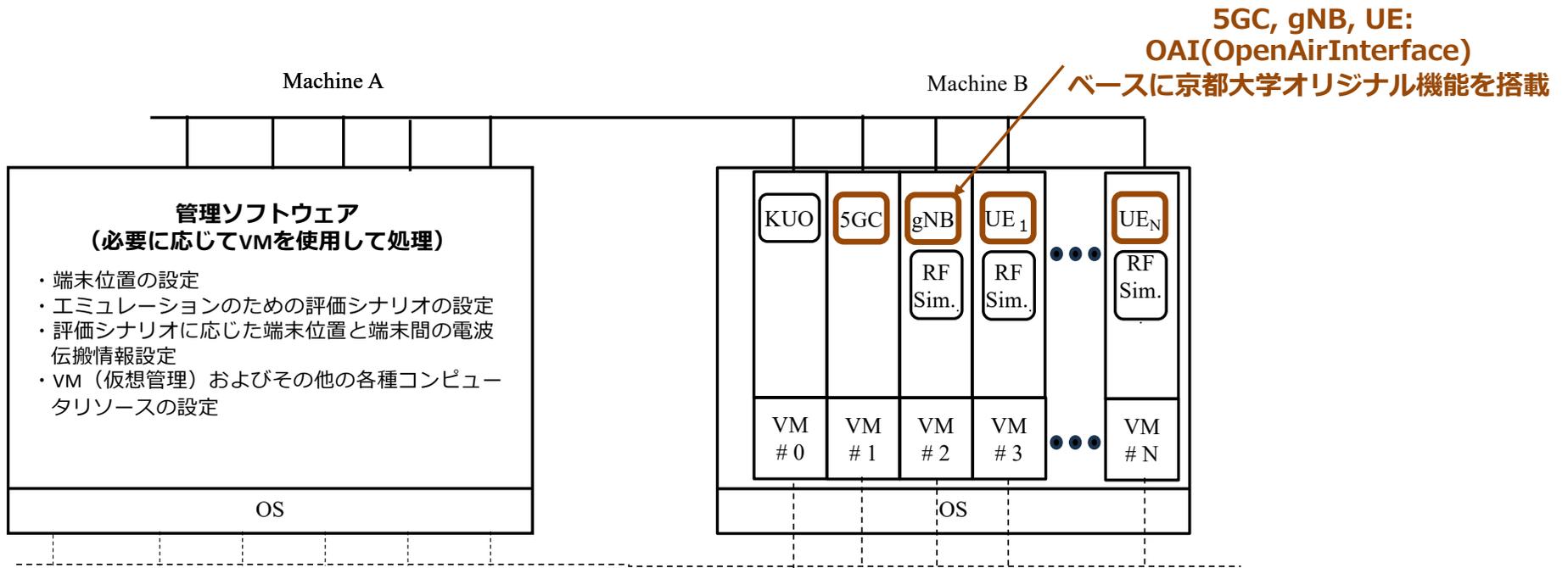


④パケット伝送 (伝送状況の可視化)  
[実線：経路、点線：パケット伝送]

# ワイヤレスエミュレーションの例

## 5G-NRのエミュレーション例



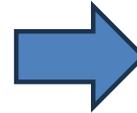


KUO: Kyoto Univ. Orchestrator

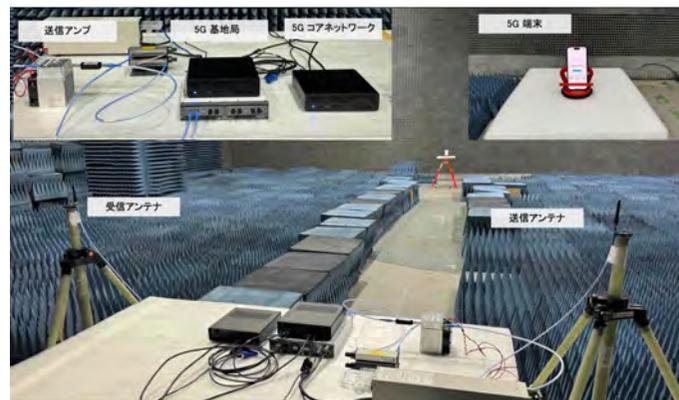
- : Facility (Application)
- : Facility (File Storage / Database)
- : Facility (System Log)
- : Service
- : Network (Data)
- : Network (Control)

## □ 背景

- ◆ ローカル5G（自営系5G）の価格が高い、普及しない
- ◆ 4.9 GHzの普及が十分行われていない
- ◆ 研究成果を実システムで運用させたい



OpenAirInterface (OAI) アライアンスが制定するオープンソースを利用した**ソフトウェア無線型ローカル5Gシステム**の開発（全て内製化）



- 4.85GHzで運用
- 5GC、CU,DUをオープンソースソフトウェアをベースにgNBを開発
- 10万程度のPCで実現
- OFDMA (Q,16,64-QAM OFDMA)
- 商用端末 (Iphoneを接続)
- 研究開発をした帯域外輻射制御機能を搭載
- Iphoneの利用帯域幅を基地局で制御
- 下り伝送速度：237 Mbps、上り伝送速度73.8 Mbpsを達成

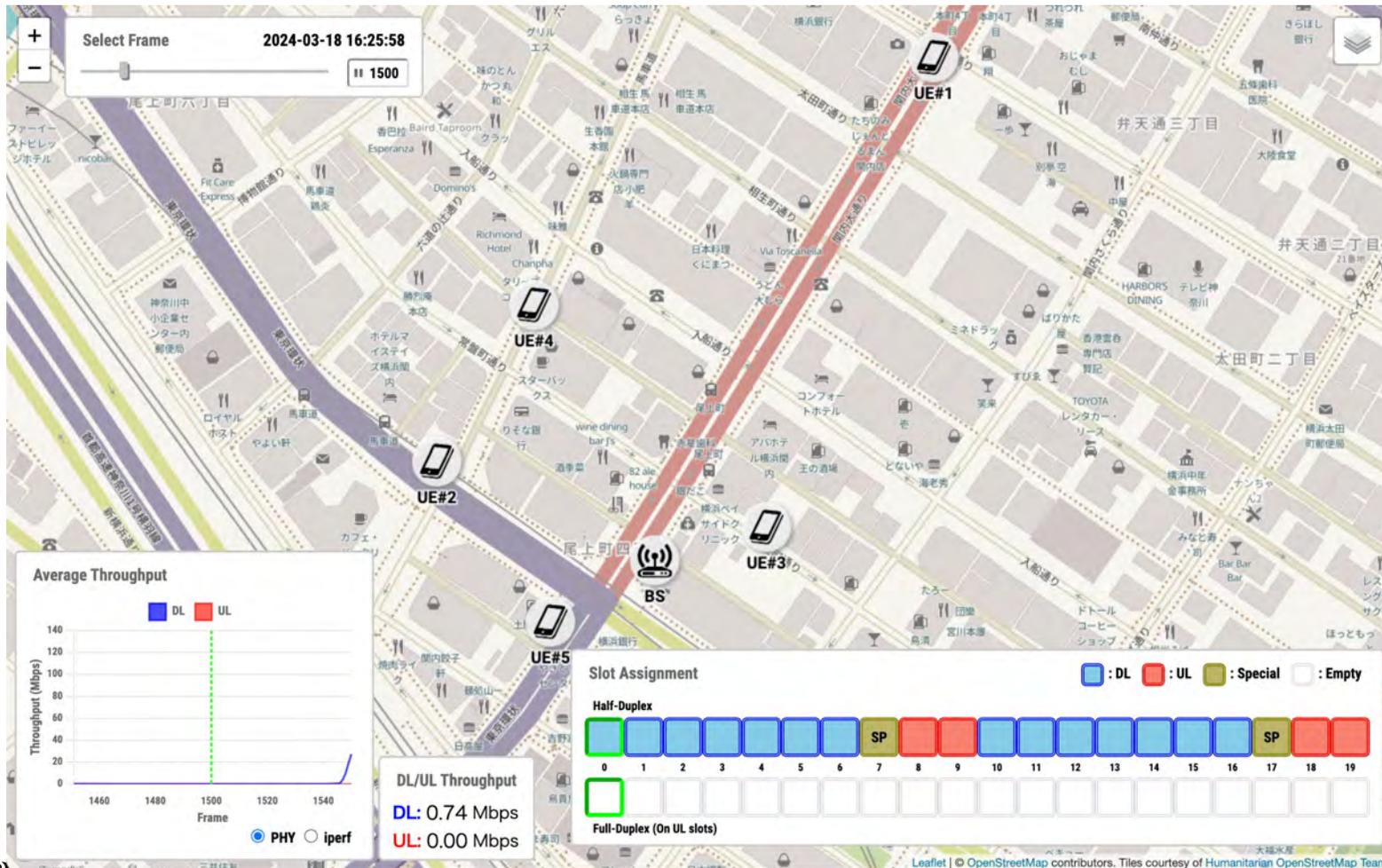
K. Takeda, K. Mizutani, H. Harada "Open-Source Software-based gNB Prototype for Highly Spectral-Efficient Private 5G System," IEEE Consumer Communications & Networking Conference (CCNC), Jan. 2025.

Parameter	Value
Virtual radio	OAI based Kyoto univ. original virtual radio
Num. of gNBs and UEs	gNB: 1, UE: 4
Propagation characteristics	Path grid data modeled from measured data
Carrier Frequency	4.8 GHz
Subcarrier Spacing	30 kHz
Bandwidth	40 MHz
Resource Blocks	106
Modulation Scheme	Adaptive (In accordance with measured SINR) MCS 2~28
Channel Model	CDL-D (6-path)
OAI Mode	SA (Standalone)
DL:UL	7:2 (1 special slot)
Antenna Configuration	TX: 1, RX:1
gNB Transmission Power	44 dBm
UE Transmission Power	23 dBm
gNB Noise Figure	5 dB
UE Noise Figure	9 dB
SI Cancellation	110 dB

電波伝搬データは、実験から得られた電波伝搬特性データからモデル化されたSoS-TDL時刻データを搭載



# 5台のUEがBS (gNB) と通信 (横浜、館内エリア)



## 無線機器の設置位置のデザイン



② 3D環境における無線機間の電波伝搬、伝送特性の計算

① 無線機の電波に関する情報および設置環境の提供 (送信電力、変調・復号方式、アンテナ高、3D地図情報、地図内各種什器の情報、人・モノの動態情報)

③ 計算結果の通知

無線機器の設置を検討する利用者



ユーザ  
・オフィス  
・工場  
・高度道路交通システム (ITS)

④ 計算結果の可視化 (ワイヤレスエミュレータ内の可視化ツール、サードパーティ製の可視化ツール)

## 無線機器の機器認証



② 複数台の仮想無線機がネットワークを構築し、DUTに対して試験シナリオを伝送

① 認証を受けたい無線通信規格、テスト項目の情報の提供、開発者の無線機 (DUT) を接続

③ 計算結果の通知



ユーザ  
・無線機機器認証企業  
・無線機器ベンダ

④ 評価結果がログの形でわかり、認証試験の合格の可否がわかる



## 周波数共用のための各種パラメータの算出



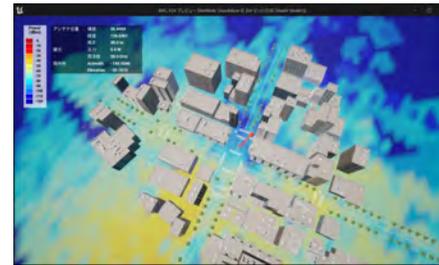
② 3D環境における各無線システムの電波伝搬、伝送特性の計算

① 共用を行う無線機の電波に関する情報および設置環境の提供 (送信電力、変調・復号方式、アンテナ高、アンテナゲイン)

③ 計算結果の通知

各共用予定システムの通信システムの通信エリアの明確化、離隔距離明確化

将来的には周波数共用データベースとして利用



ユーザ  
・周波数行政を行う官公庁  
・通信キャリア

④ 計算結果の可視化 (ワイヤレスエミュレータ内の可視化工具、サードパーティ製の可視化工具)

## 無線システムの研究開発の支援



② 仮想無線機の一部に利用者の提案する機能を入れてシステムシミュレーション

② 仮想無線機とユーザ開発無線機を接続し、システムシミュレーション

① 利用したい通信システム、変更したい機能、接続したい無線機の情報を提供

③ 計算結果の通知



ユーザ  
・大学  
・無線機器ベンダ

④ 仮想無線機のみで計算した場合と、研究成果、開発結果を利用した場合の差が得られる

論文にすぐ利用可能



京都大学  
KYOTO UNIVERSITY

## 電波利用をベースにしたコンテスト（電波版ロボコン）



① コンテストで利用する通信システム、変更したい機能、コンテストを行う地図情報等を通知



② 3D環境における各無線システムの電波伝搬、伝送特性の計算

ある無線通信を利用したアプリケーションを実現するため（例えば自動運転）のアルゴリズムコンテストの実現



利用領域  
・大学・高専・高校  
・一般ユーザ

④ コンテストの結果の表示

## ジェネレーティブワイヤレスデザイン（将来展開）



① 通信を設置したい場所情報、所要伝送特性



② 3D環境における各無線システムの電波伝搬、伝送特性の計算を実施し、

③ 推奨する無線システム、各種条件（アンテナの指向性、出力）等を自動生成

あるエリアに、あるアプリケーションを設置したい  
（収容台数、伝送にまつわる所要条件は決定済）

この条件にあう、無線通信システム、台数、設置位置を決めて欲しい

- 過去の電波伝搬取得データ等のアーカイブ
- 産学官が協働して知財を創出環境の整備
- 産学が共通の土俵で知的創造物を公平に評価することにより、才能のある人材、機関、企業の早期発掘
- 屋外実験にかかる時間、費用の低減



ワイヤレスエミュレータの開発を推進することにより  
無線通信システムを自動生成する  
ジェネレーティブワイヤレスデザイン時代の幕開けとなり、  
Beyond 5G時代の競争力のある社会を牽引





京都大学  
KYOTO UNIVERSITY



国立研究開発法人  
情報通信研究機構  
National Institute of Information and  
Communications Technology

本発表には、総務省の電波資源拡大のための研究開発（JPJ000254）、総務省SCOPE（JPJ000595）及び国立研究開発法人情報通信研究機構（NICT）の委託研究（JPJ010017C07501）によって実施した成果を含みます。