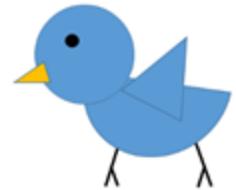


# 大阪大学におけるローカル5Gの 実証実験から見えてきた課題

大阪大学 大平健司



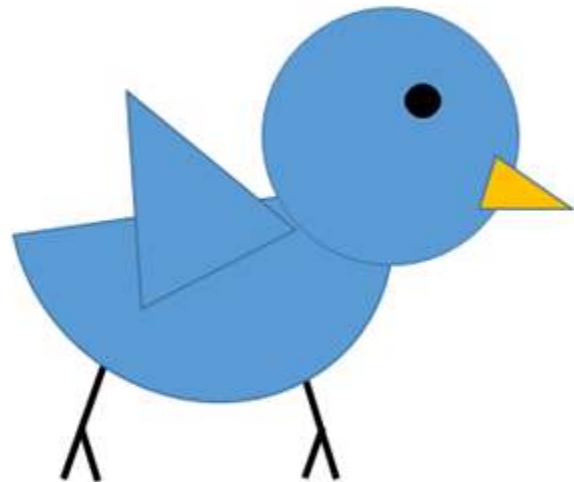
# 講演者自己紹介

- ・大平 健司(おおひら けんじ)
- ・大阪大学 情報推進本部 准教授
- ・博士(情報学):2010年7月取得、京都大学
- ・第三級陸上特殊無線技士:2022年8月取得
- ・ResearchMap: <https://researchmap.jp/torus>
- ・連絡先:[ohira.kenji.oict@osaka-u.ac.jp](mailto:ohira.kenji.oict@osaka-u.ac.jp)

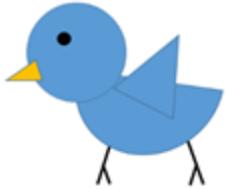


# 本講演の話題

- ・本学に導入したローカル5G環境の導入過程及び実証実験
  - NICT総合テストベッドB5Gモバイル環境
  - 学内システム連携ローカル5G無線通信システム一式
- ・ローカル5Gネットワークの運用に関して得られた知見・課題
- ・将来的な発展の方向性の例



# NICT総合テストベッドB5Gモバイル環境



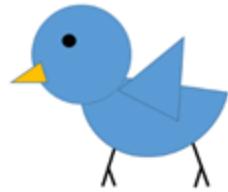
# B5Gモバイル環境導入背景

- ・総務省は令和3年4月に「Beyond 5G研究開発促進事業研究開発方針」[1]において、Beyond 5G の早期かつ円滑な導入を目指し、この分野の研究開発を重要視している。
- ・NICTはこれを受け、[2]において、「こうしたBeyond 5Gネットワークの高い信頼性・可塑性確保には、产学研官が多様な技術を持ち寄って研究開発・実証を行う必要があり、そのための検証環境（テストベッド）を整備する。」としている。
- ・このBeyond 5Gテストベッド（のうち**B5Gモバイル環境**）の導入先として学界からは本学と九州工業大学が選定され、本学－NICT間は令和3年11月5日に研究協力の覚書を締結した[3]。

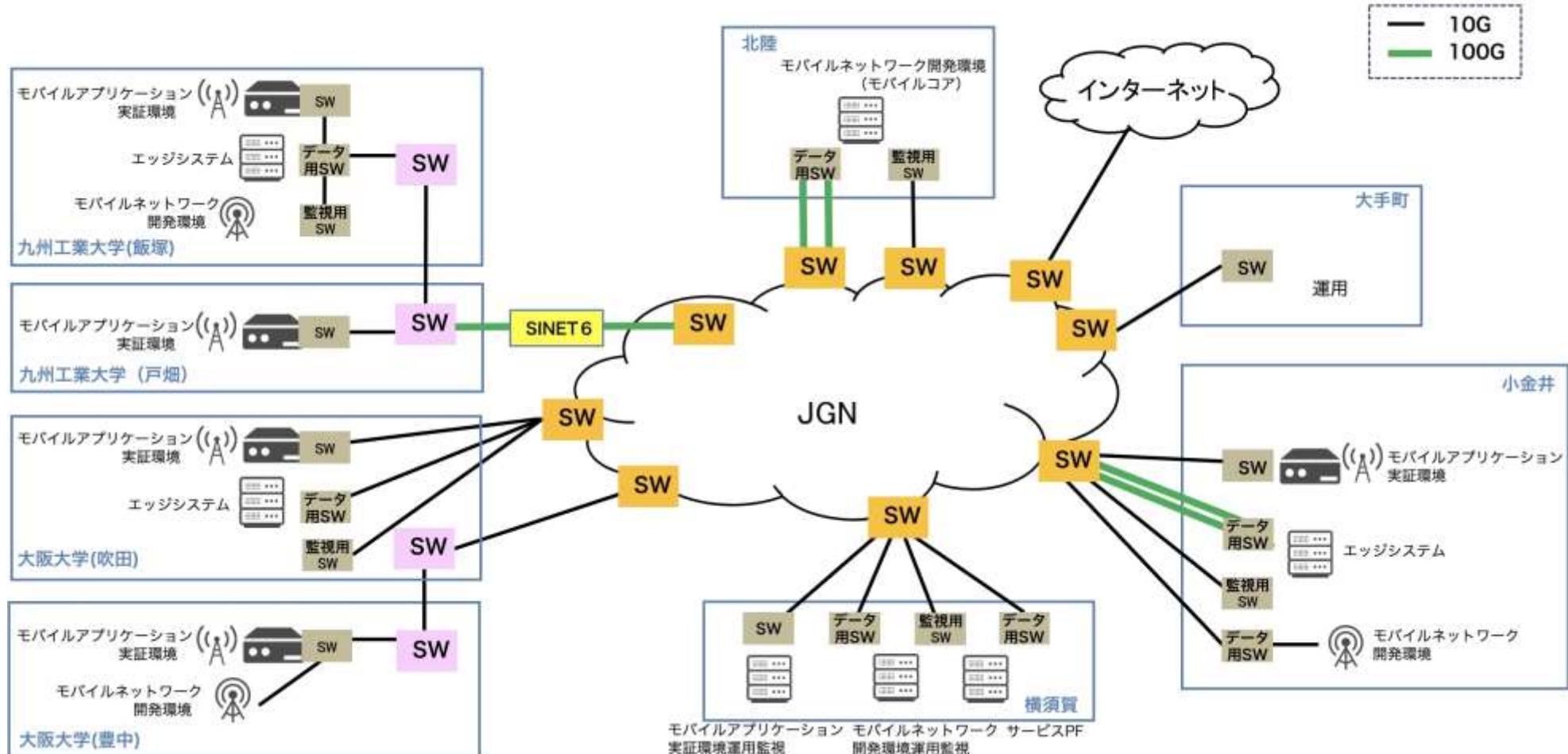
[1] [https://www.soumu.go.jp/main\\_content/000747504.pdf](https://www.soumu.go.jp/main_content/000747504.pdf)

[2] <https://testbed.nict.go.jp/bunkakai/pdf/bunkakai-11-02-1.pdf>

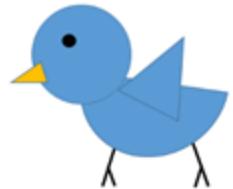
[3] <https://www.nict.go.jp/info/topics/2021/11/05-1.html>



# B5Gモバイル環境の全体構成



引用: <https://testbed.nict.go.jp/b5gm/>



# B5Gモバイル環境の仕様

- 無線: 5G NR 4.8-4.9GHz (SA型)

- 実験試験局として免許取得

- 利用者端末: 以下が貸与される

- スマートフォン型端末: FCNT社製MDE01001

- [https://www.fcnt.com/assets/pdf/solution/fmp1811\\_catalog\\_2022-01.pdf](https://www.fcnt.com/assets/pdf/solution/fmp1811_catalog_2022-01.pdf)

- モバイルルータ型端末: Compaq社製RAKU+(Plus)

- <https://www.apaltec.com/ja/mifi/>

- 実験試験局のため、端末の電源操作などは要免許(3陸特以上)

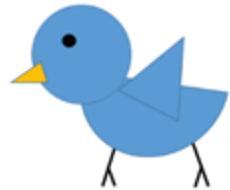




# 3種類の実証環境

- ・モバイルアプリケーション実証環境 (A面)
  - 多種多様なアプリケーションを中心とした技術の研究開発・実証
- ・モバイルネットワーク開発環境 (B面)
  - Open5GCore や Free5GC によるモバイルコアや基地局ソフトウェアの開発
- ・モバイル基地局開発環境 (C面)
  - 28GHz帯、Sub-6GHz帯基地局の無線エリアを備える

大阪大学には上記のうちA面とB面の環境が展開されている



# 大阪大学における実証環境設置エリア

	A面	B面
屋内	吹田	(設置なし)
屋外	吹田・豊中	豊中

- 吹田キャンパス

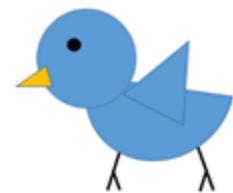
- 屋内: サイバーメディアコモンズ(A面)
- 屋外: 食堂前歩行者専用道路(A面)

- 豊中キャンパス

- 屋外: グラウンド(A面、B面)

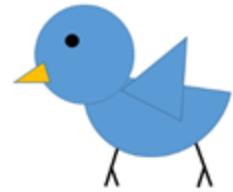
運用上の制限事項

- 運用時間帯は原則として平日10時から16時
- A面とB面の同時利用不可



# 共同研究TB-A22013「デジタルツイン基盤としての Beyond 5Gの運用方法に関する研究」

- 目的: Beyond 5Gモバイルネットワークをデジタルツイン基盤として用いる際に求められる運用方法を追究
  - B5Gモバイルコアの各種環境下における性能評価
  - B5Gモバイルテストベッド環境における無線電波状況の推定
  - 分散型AIによるエッジクラウドシステム最適化
- 申込: '22/9/6、許可: '22/10/1、期限: '26/3/31
- 貸与端末(両面共通): モバイルルータ型・スマホ型各4台
- 貸与コア(B面): リファレンス、ベアメタル
- 無線従事者: 1名



# 吹田キャンパスの実証環境設置エリア

## ①中央機械棟

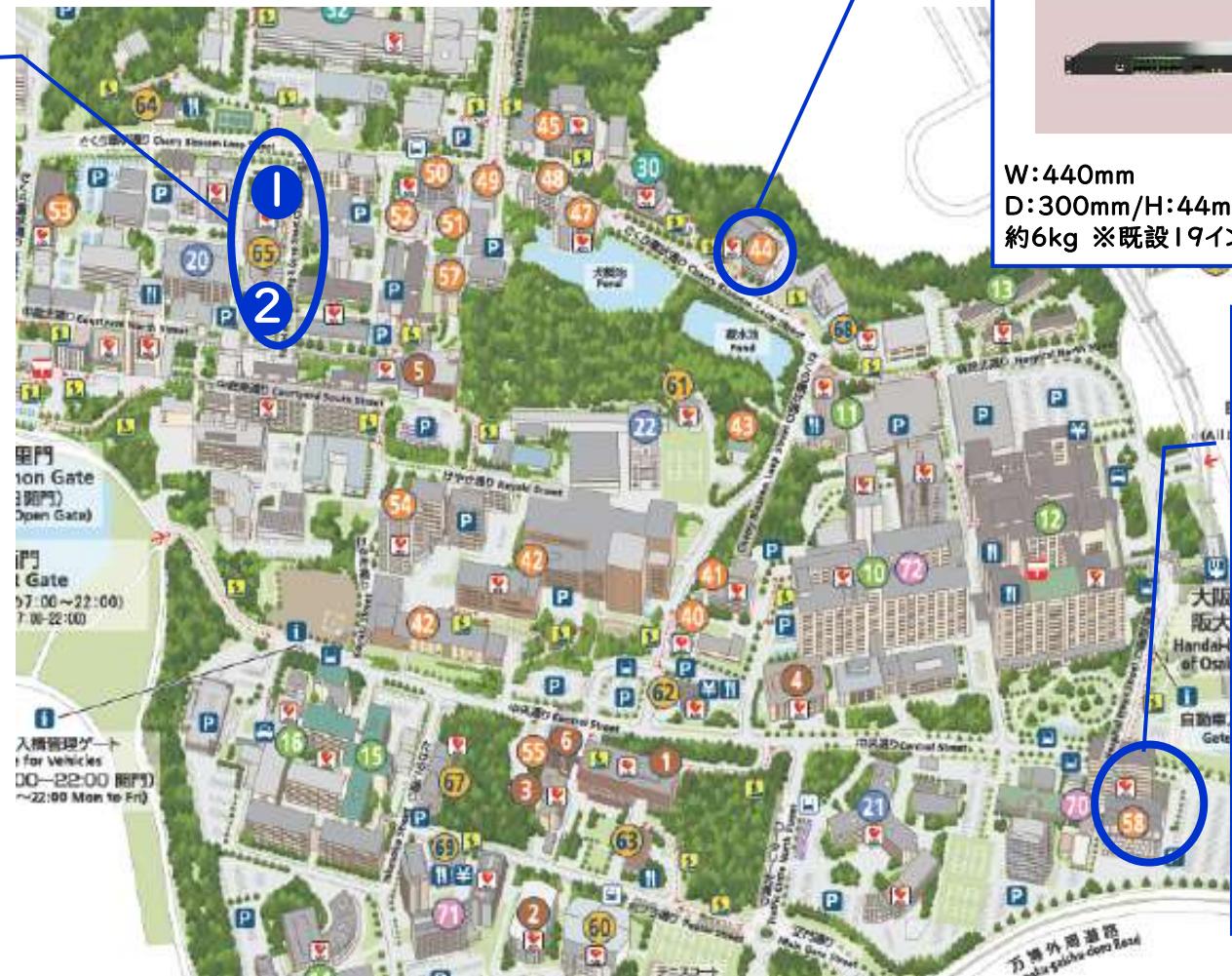
RU×1台 A面

## ②センテラス(食堂)

RU×1台 A面



W:259mm/D:353mm/H:76mm  
約6.5kg



## サイバーメディアセンター

RHUB×1台

pRadio×3台



W:440mm  
D:300mm/H:44mm  
約6kg ※既設19インチラック搭載



W:208mm/D:208mm  
H:58mm 約3kg

## 脳情報通信融合研究センター 基地局システムA

(既設19インチラック)



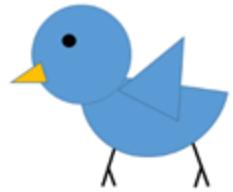
## エッジシステム

(既設19インチラック)



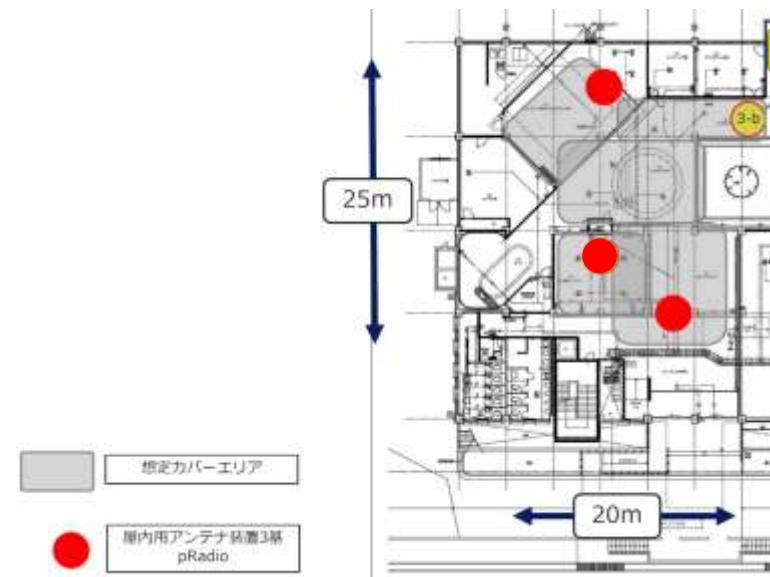
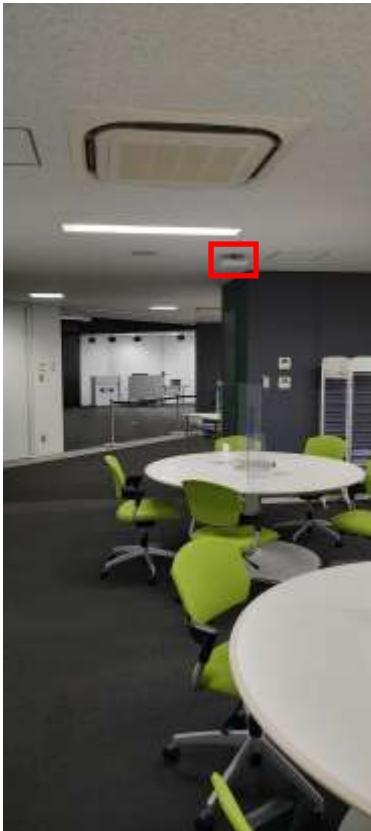
## GPSアンテナ

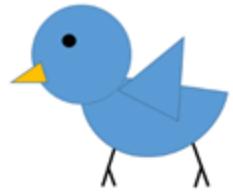




# アンテナ設置場所(吹田・屋内)

サイバーメディアセンター  
コモンズ



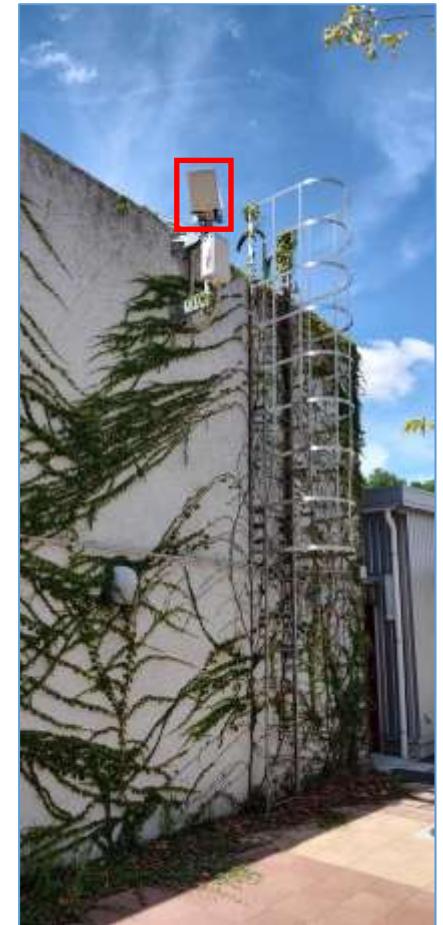


# アンテナ設置箇所（吹田・屋外）

センテラス（食堂）側



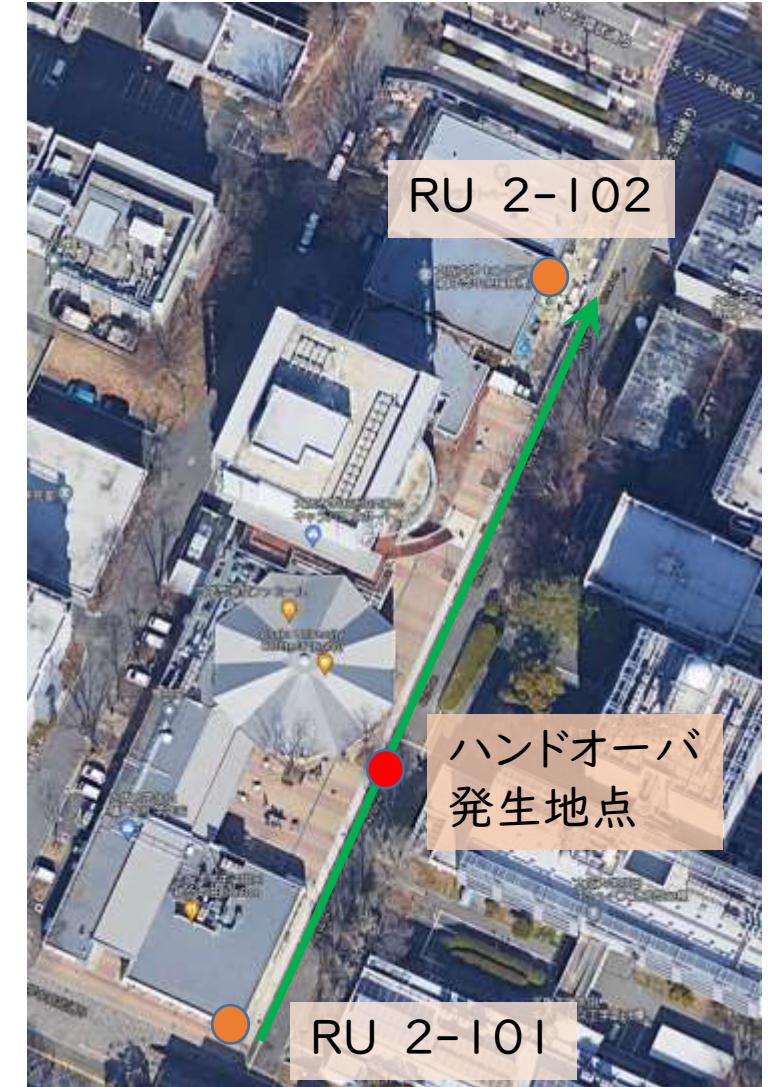
中央機械棟側





# A面・屋外での計測

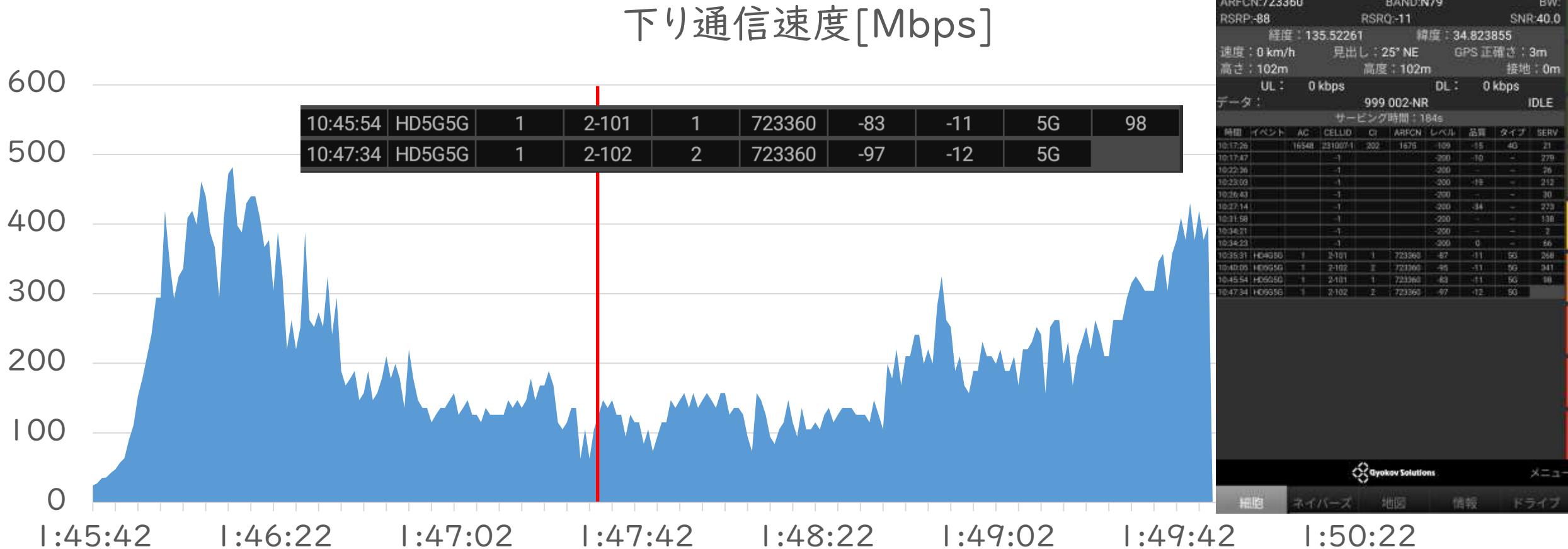
- RU2台が対向
- ハンドオーバ前後での通信品質  
(通信速度・遅延変動)を計測
  - N6に接続したVM(@横須賀)に対して iperf3を実行
- 計測ツール
  - 端末: FCNT社製MDE01001
  - OS: Android 12
  - アプリ: G-NetTrack Lite (強度表示)  
he.net-Network Tools (iperf3)

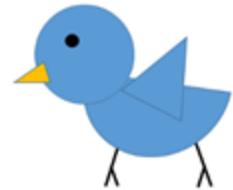




# ハンドオーバーと下り通信速度

- TCP通信（下り側のみにペイロード）により計測



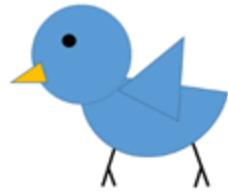


# ハンドオーバと上り通信速度

- TCP通信（上り側のみにペイロード）により計測

上り通信速度[Mbps]

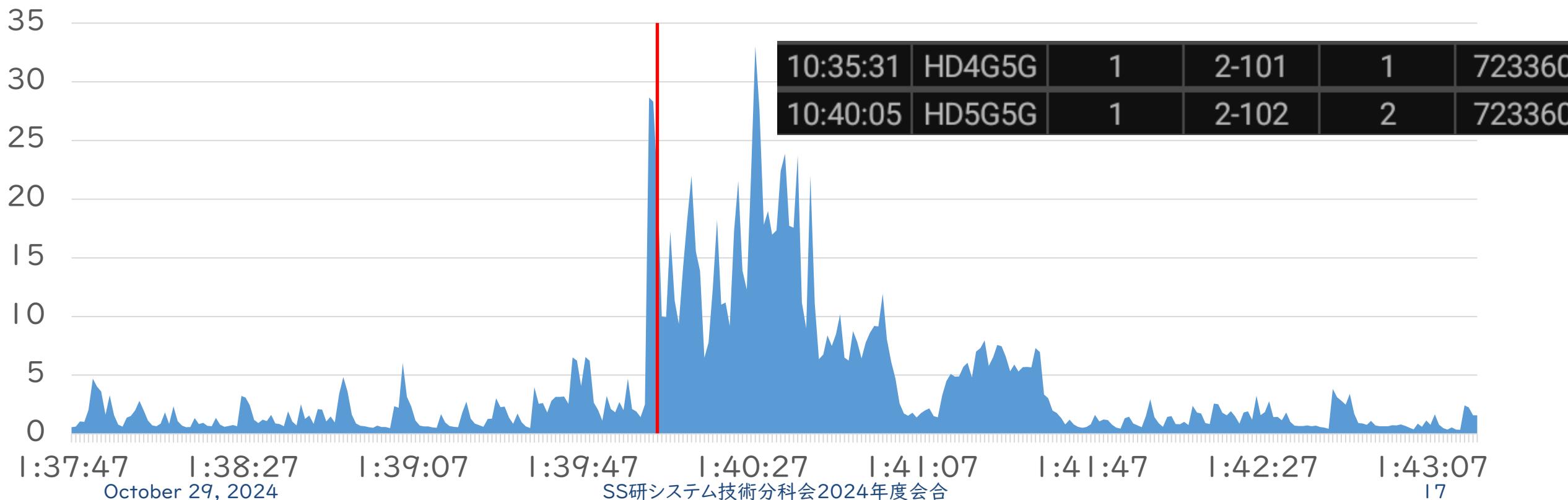




# ハンドオーバと遅延変動

- UDP通信(上り側のみ)により計測
  - 下り側のみの計測はAndroidの制約により実行できず

遅延変動[ms]





# A面・屋内での計測

- pRadio3台は全て1台のRHUBに収容
  - Cell IDとしては2-103一つしか見えない

11:26:21	CR5G5G	1	2-103	3	723360	-88	-11	5G
----------	--------	---	-------	---	--------	-----	-----	----

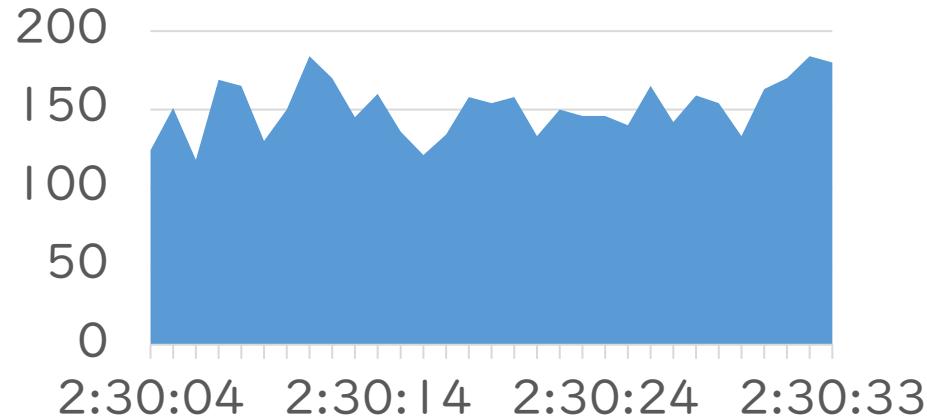
- 屋外での計測との比較用
  - 計測ツールおよび計測項目は屋外での計測と同様
  - 屋外計測と異なり、計測中は移動せず30秒間計測



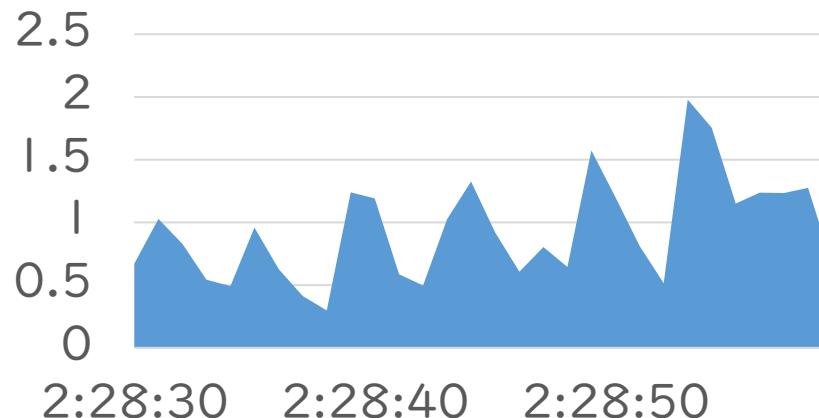


# iperf3を用いたA面・屋内の計測

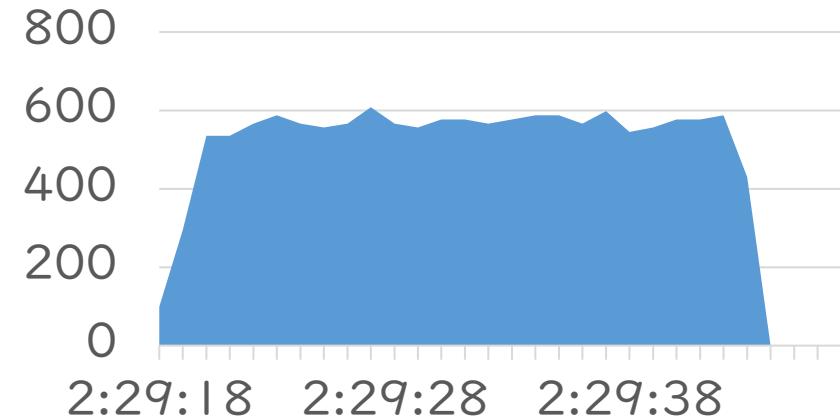
上り通信速度[Mbps]



遅延変動[ms]



下り通信速度[Mbps]



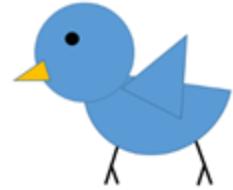
上り通信速度: 151Mbps  
下り通信速度: 464Mbps  
遅延変動(上り): 0.67ms



# B面モバイルコアの提供形態

- RAN: Radisysコア
- ミドルウェア: OpenStack / Kubernetes
- モバイルコアソフト: Free5GC / Open5GCore (要ライセンス)

提供単位	ベアメタルサーバ	VPC (vCenter/OpenStack)	仮想マシン (VM)	リファレンス5GC
提供環境	IPMI ベアメタルサーバ(OS無)	VM管理機能	仮想マシン	構築済5GC環境のコピー
ユーザ分離レベル	物理サーバ	テナント	仮想マシン	物理サーバ
収容可能ユーザ数	△	○	○	△
OSカスタマイズ	○	○	×	△
ネットワーク追加	申請ベース	ユーザ操作(権限範囲内)	申請ベース	申請ベース
サーバ/VMへの アクセス経路	仮想コンソール/SSH	仮想コンソール/SSH	SSH	仮想コンソール/SSH



# 豊中キャンパスの実証環境設置エリア

## 豊中グラウンド

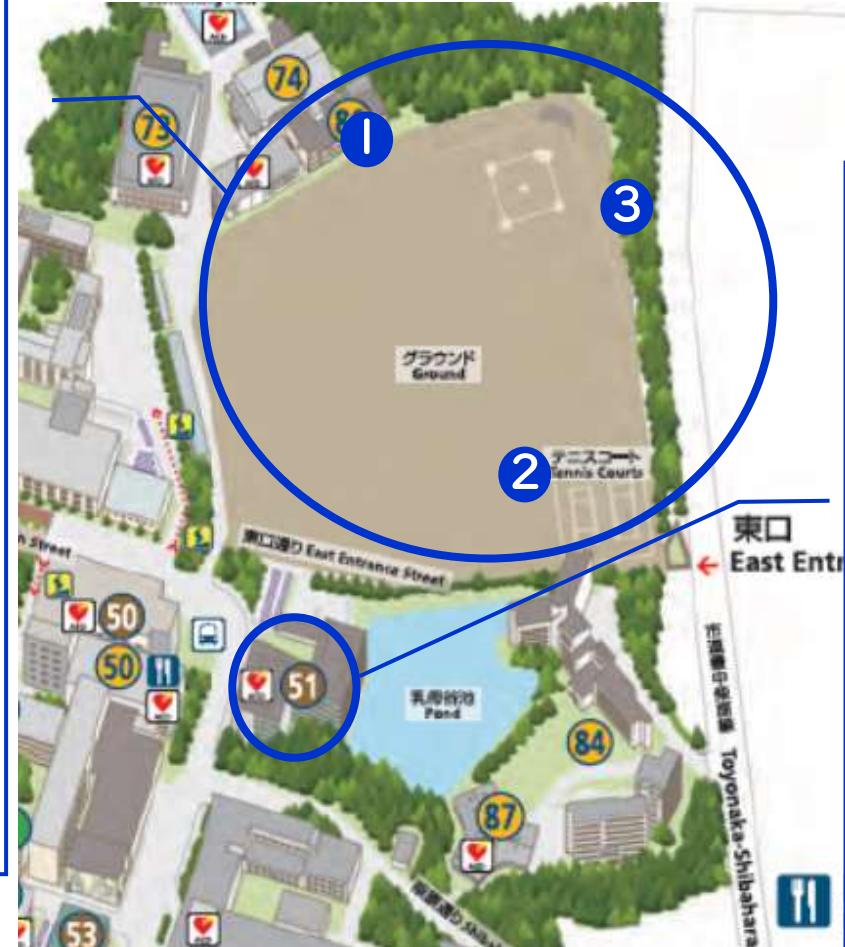
①既設コン柱M8 (健康体育研究棟前)  
RU×2台 (A面・B面)

②既設コン柱M4 (テニスコート付近)  
RU×2台 (A面・B面)

③既設コン柱M2 (3塁側)  
RU×1台 (B面)



W:259mm/D:353mm/H:76mm  
約6.5kg



サイバーメディアセンター  
豊中教育研究棟  
基地局システムA  
(新設19インチラック)

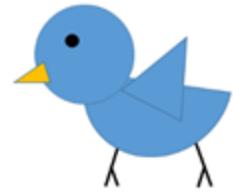


汎用サーバーデータベース  
(新設19インチラック)

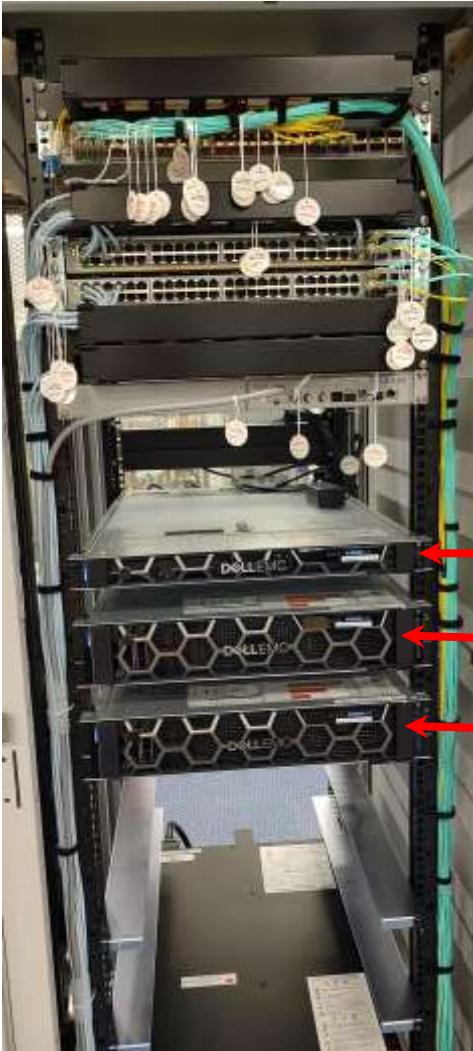


GPSアンテナ





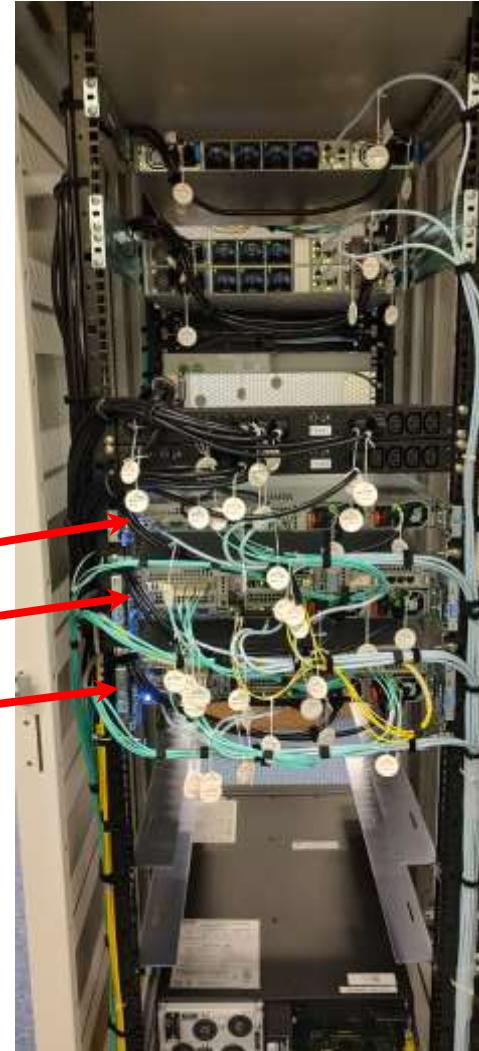
# B面用サーバラック@CMC豊中教育研究棟

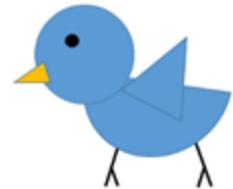


RIC (RAN Intelligent Controller)

DU (Distributed Unit)

CU (Central Unit)



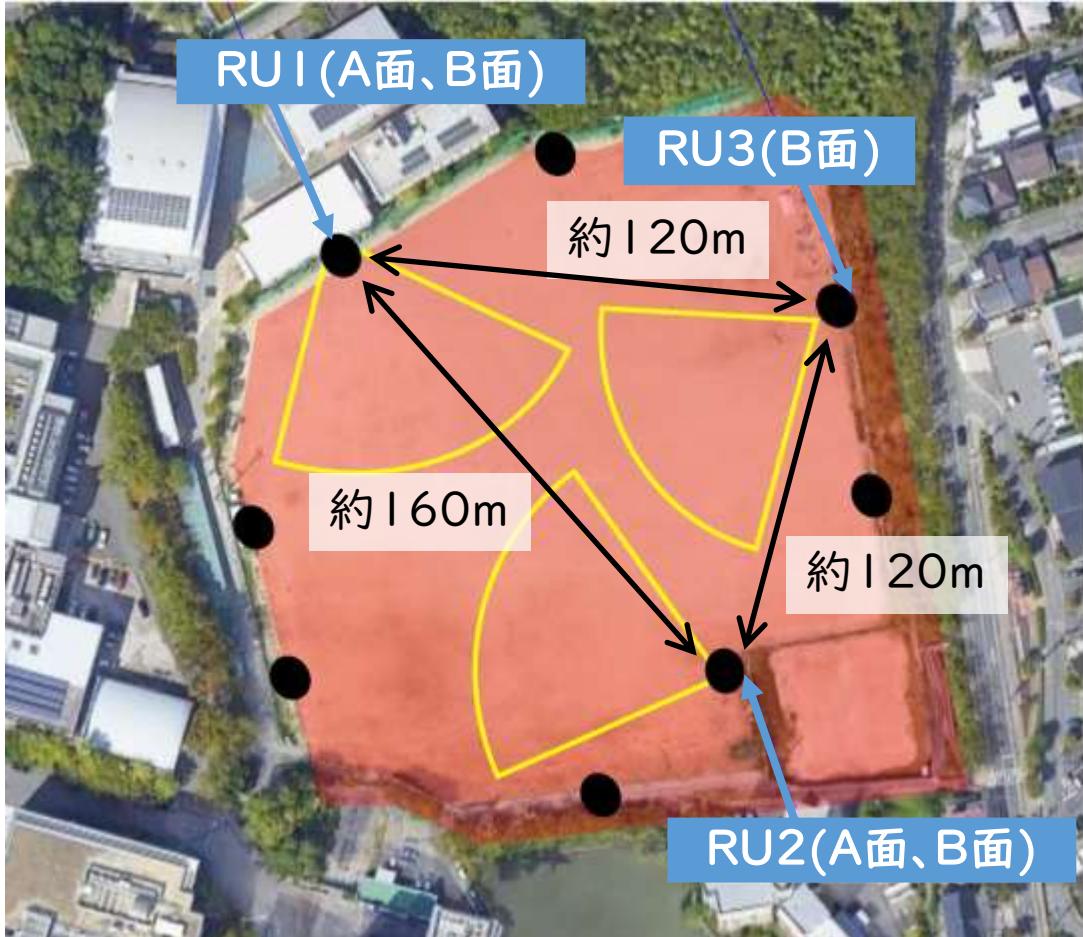


# アンテナ設置状況@豊中グラウンド

豊中キャンパス グラウンド



RUI



RU2

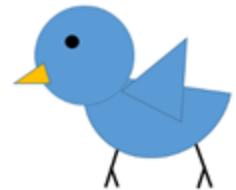


RU3



# B面・リファレンスコア

- コアサーバ
  - ベアメタルサーバの上にK8sにてfree5gcコンテナ展開
  - 管理用VLAN(on JGN)にアクセス用マシンを接続して制御



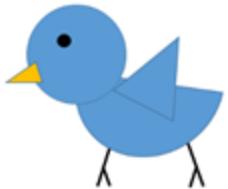
# リファレンスコア環境下の状況





# IPv6を使えるようにしよう！

- ・リファレンスコアがIPv6をサポートしていない  
→ IPv6対応している5Gコアに替えてやればいい（後述）
- ・テストベッド環境にIPv6がない  
→ トンネルで引っ張ってくればいい（後述）



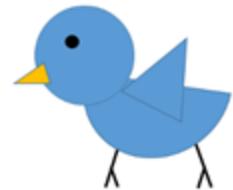
# B面・ベアメタルコア

- コアサーバ  
- OS:Ubuntu 22.04.1  
- 5GC:Open5GS 2.5.6
- Open5GSのインストールと設定[1]  
- libssl1.1のインストール[2]  
- amf.yaml (MCC/MNC、N2アドレス、S\_NSSAI [3])  
- upf.yaml (N3アドレス)  
- nssf.yaml (NSI [3])

[1] <https://open5gs.org/open5gs/docs/guide/01-quickstart/>

[2] [https://askubuntu.com/questions/1403619/mongodb-install-fails-on-ubuntu-22-04-\(depends-on-libssl1-1-but-it-is-not-installed\)](https://askubuntu.com/questions/1403619/mongodb-install-fails-on-ubuntu-22-04(depends-on-libssl1-1-but-it-is-not-installed))

[3] <https://github.com/open5gs/open5gs/issues/859>



# サブスクリバ情報の抽出と登録

- リファレンスコアからの抽出
- Open5GSへの登録

The image shows two screenshots of network management interfaces. On the left, the free5GC Web Console displays a list of subscribers with columns for PLMN and UE ID. An 'Edit Subscriber' dialog is open, showing fields for PLMN ID (999002), SUPI (IMSI) (999002000000001), Authentication Method (5G\_AKA), and K\* (e90f198...). On the right, the Open5GS interface shows a list of subscribers with IMSI numbers. A large green arrow points from the free5GC 'Edit Subscriber' dialog to the Open5GS 'Edit Subscriber' dialog, which contains fields for Subscriber Configuration (IMSI 999002000000006, Subscriber Key K), USIM Type (OP), Operator Key (OPc/OP), and UE-AMBR parameters (Downlink 1 Gbps, Uplink 1 Gbps). The Open5GS interface also includes tabs for Profile and Account.



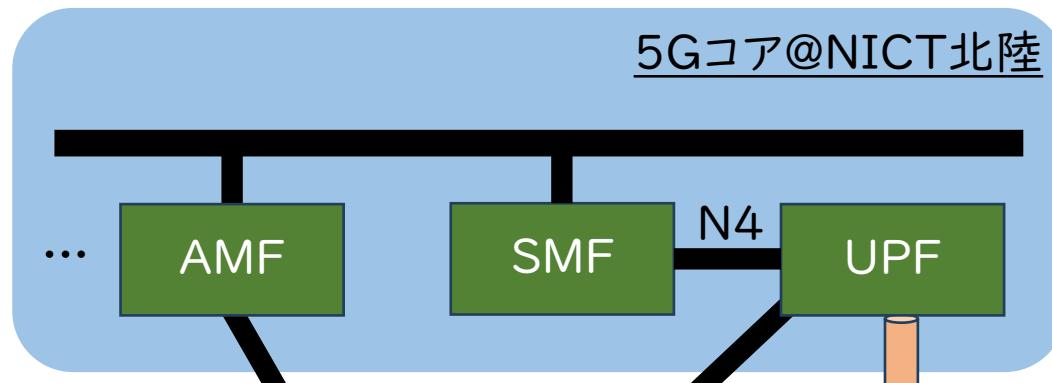
# IPv6アドレスブロックのBYON

smf.confとupf.confに  
IPv6アドレスブロックを追加

各UEに/64が割り当てられる



RAN@大阪大学豊中キャンパス



OpenVPNトンネルを設定

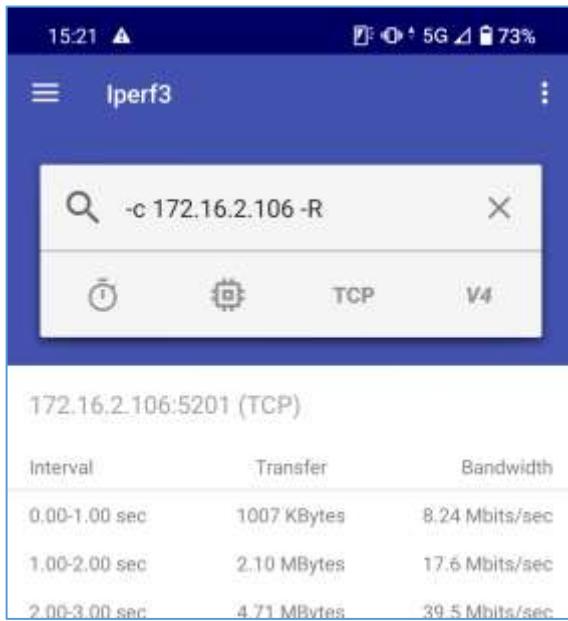
2001:2f8:1b:e300::/56

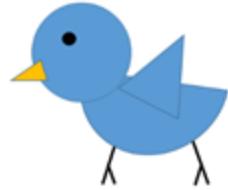
VyOS

ODINS



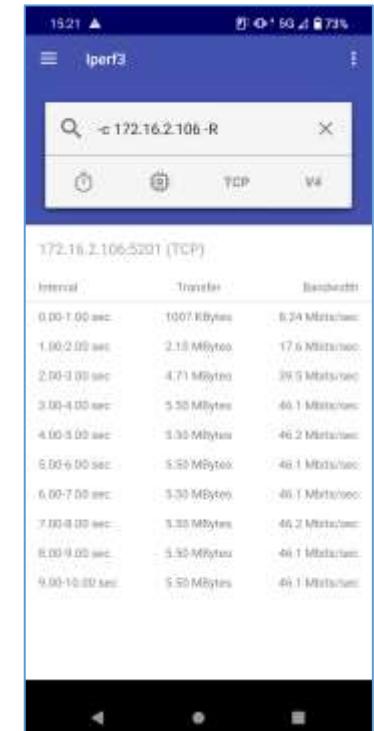
# ベアメタルコア環境下の状況





# スマートフォン型端末での電波状況計測 (1/2)

- OSはAndroid 12
  - OS制限によりUDP下りの測定ができない
    - 外部からのパケットのうち、自身がinitiatorでない通信への応答でないものは遮断されてしまう
- 使用したアプリ
  - 強度表示: G-NetTrack Lite
  - iperf3: he.net-Network Tools



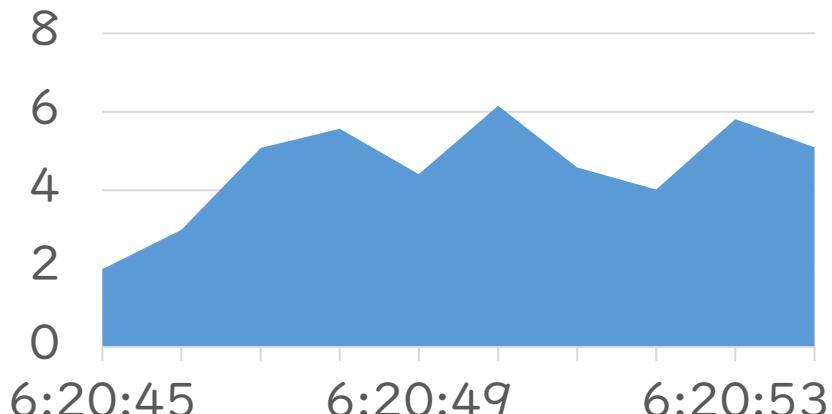


# スマートフォン型端末での電波状況計測 (2/2)

- UE=スマートフォン型端末
- iperf3(速度:TCP、遅延変動:UDP)

上り通信速度: 10.7Mbps  
下り通信速度: 40.4Mbps  
遅延変動(上り): 5.1ms

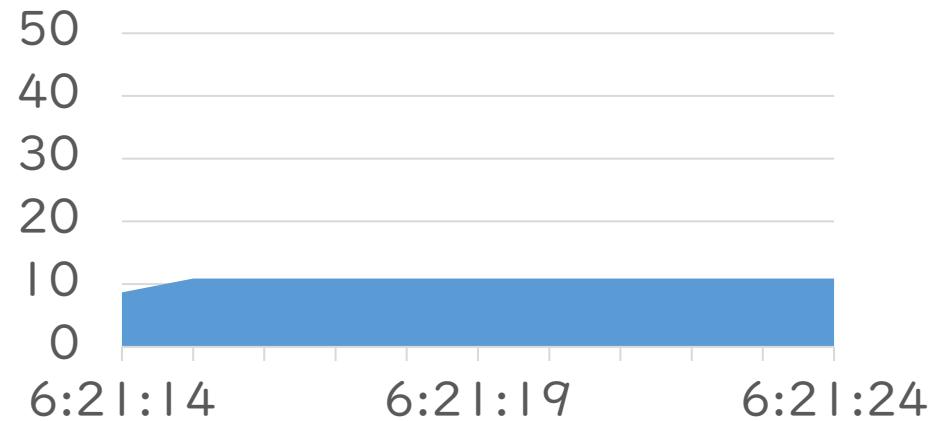
遅延変動[ms]



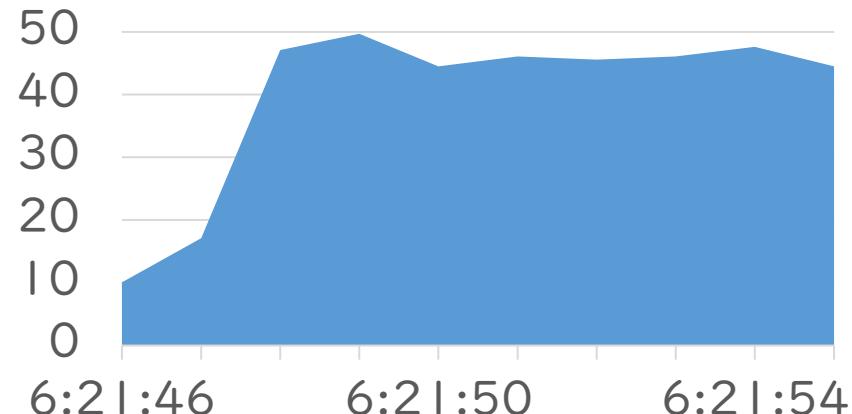
October 29, 2024

SS研システム技術分科会2024年度会合

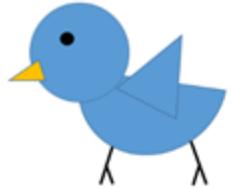
上り通信速度[Mbps]



下り通信速度[Mbps]

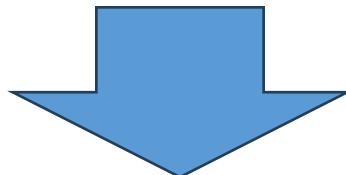


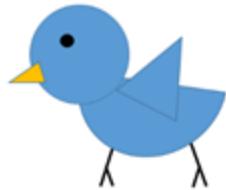
32



# モバイルルータでの電波状況計測 (1/5)

- ・スマートフォン型端末の場合と異なる点
  1. 受信電波強度値を(モバイルルータにUSB接続した)PC上で取得可能
  2. 外から流入するトラフィックについて、フィルタせずテザリング先PCに転送する設定が可能
- ・うれしい効果
  1. 受信電波強度の計測結果と他の計測(pingやiperf3等)の結果を同期的かつ端末性能をあまり気にすることなくひとつのログファイルに収められる
  2. iperf3でUDP下りについても測定可能になる





# モバイルルータでの電波状況計測 (2/5)

- Raku+にPCからUSBケーブル越しにadb接続
- adbシェルでコマンド実行し受信電波強度値を取得

```
/ # atcli AT+CESQ
AT+CESQ
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 61, 38, 51
OK
/ # |
```

左の例では61, 38, 51



-13.5 ≤ RSRQ [dB] < -13  
-119 ≤ RSRP [dBm] < -118  
2 ≤ SINR [dB] < 2.5

9個の値が得られるが5G関連の値は末尾3つ。順に概ね

ss\_rsrq:  $-43.5 + 0.5 \cdot \text{val} \leq \text{ss_rsrq} < -43 + 0.5 \cdot \text{val}$

ss\_rsrp:  $-157 + \text{val} \leq \text{ss_rsrp} < -156 + \text{val}$

ss\_sinr:  $-23.5 + 0.5 \cdot \text{val} \leq \text{ss_sinr} < -23 + 0.5 \cdot \text{val}$

ss: synchronization signal

rsrq: reference signal received quality

rsrp: reference signal received power

sinr: signal to noise and interference ratio

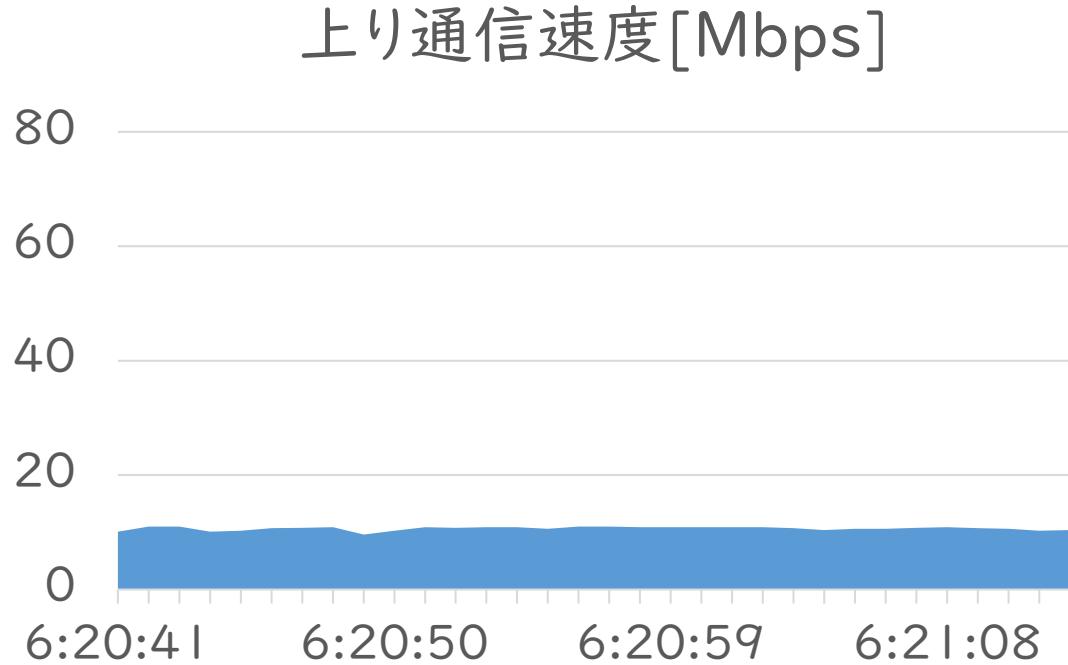
[1] [https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/27\\_series/27.007/27007-f90.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/27_series/27.007/27007-f90.zip)



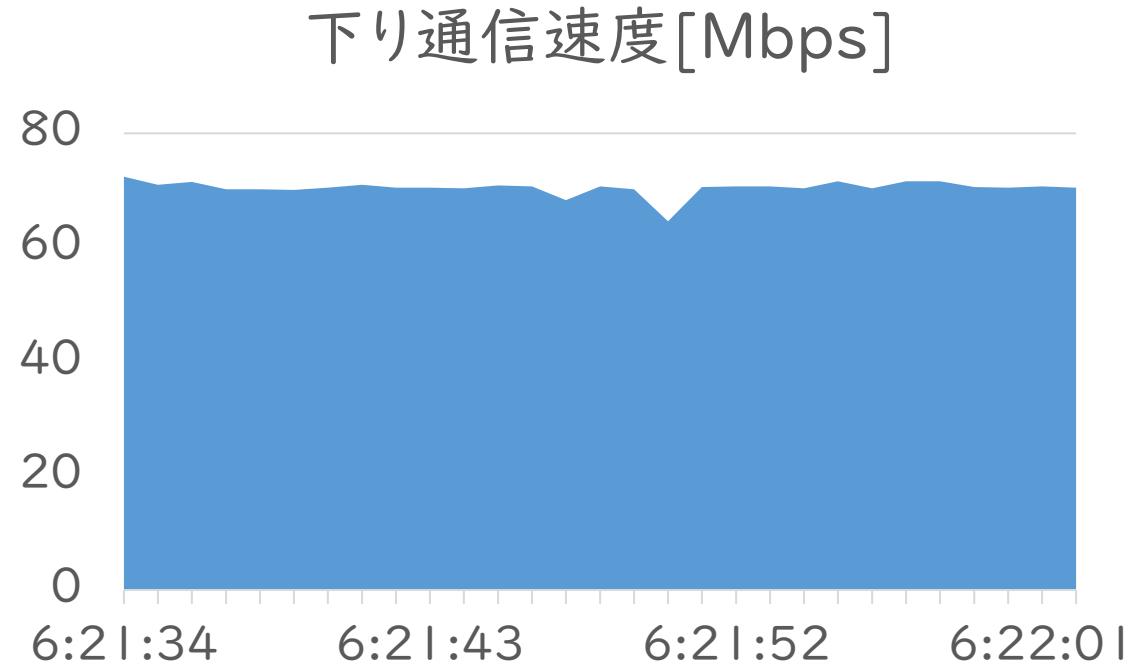


# モバイルルータでの電波状況計測 (3/5)

- UE=モバイルルータ+PC
- iperf3(UDP)



上り通信速度: 10.7Mbps  
下り通信速度: 70.5Mbps

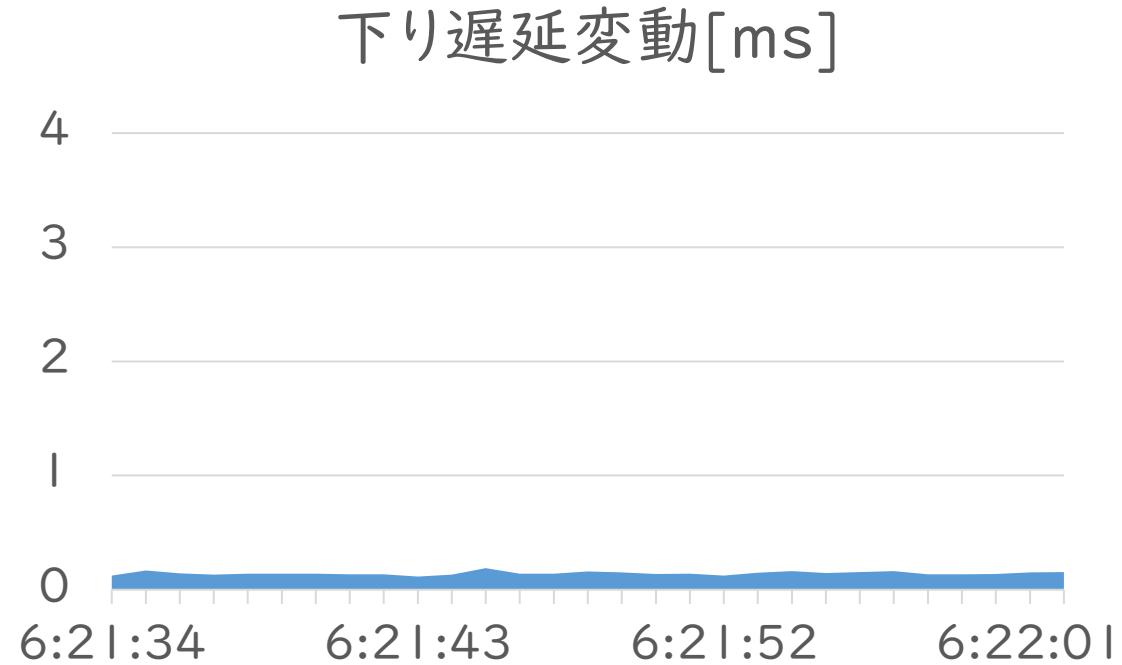
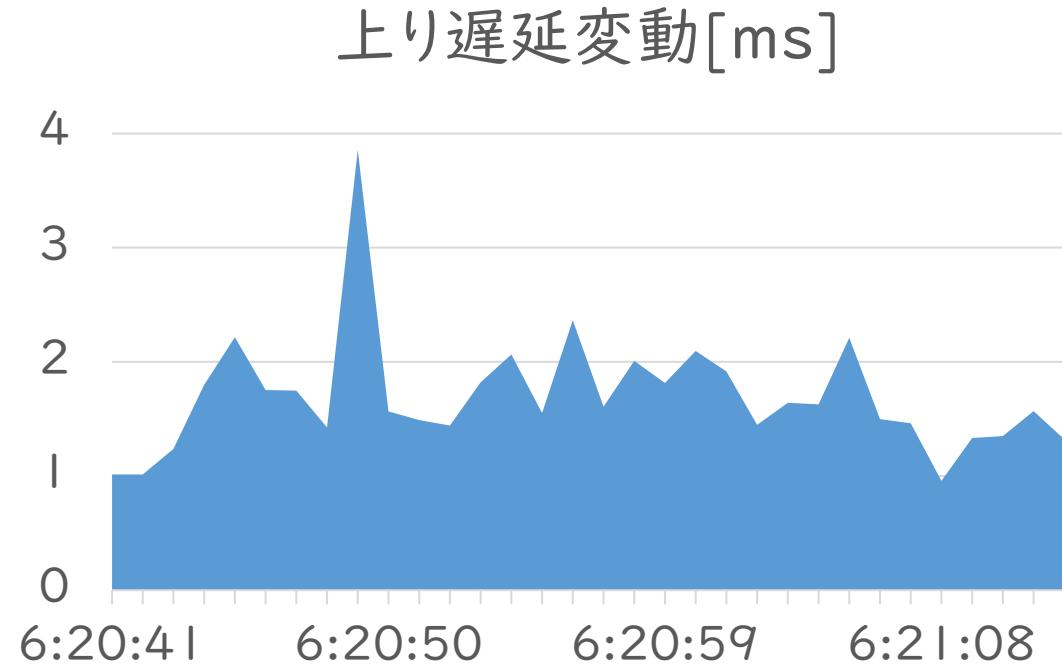




# モバイルルータでの電波状況計測 (4/5)

- UE=モバイルルータ+PC
- iperf3(UDP)

上り遅延変動: 1.323ms  
下り遅延変動: 0.156ms





# モバイルルータでの電波状況計測 (5/5)

- UE=モバイルルータ+PC

- ping、GPS/GNSS



、受信電波強度

-11 ≤ RSRQ [dB] < -10.5  
-74 ≤ RSRP [dBm] < -73  
27 ≤ SINR [dB] < 27.5

\$GPGGA,042930.00,3448.40964,N,13527.35568,E,2,10,0.91,54.5,M,34.0,M,,0000\*62  
64 bytes from 2001:2f8:1b:e300::1: icmp\_seq=1 ttl=63 time=52.5 ms  
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 65, 83, 101

ping  
応答有

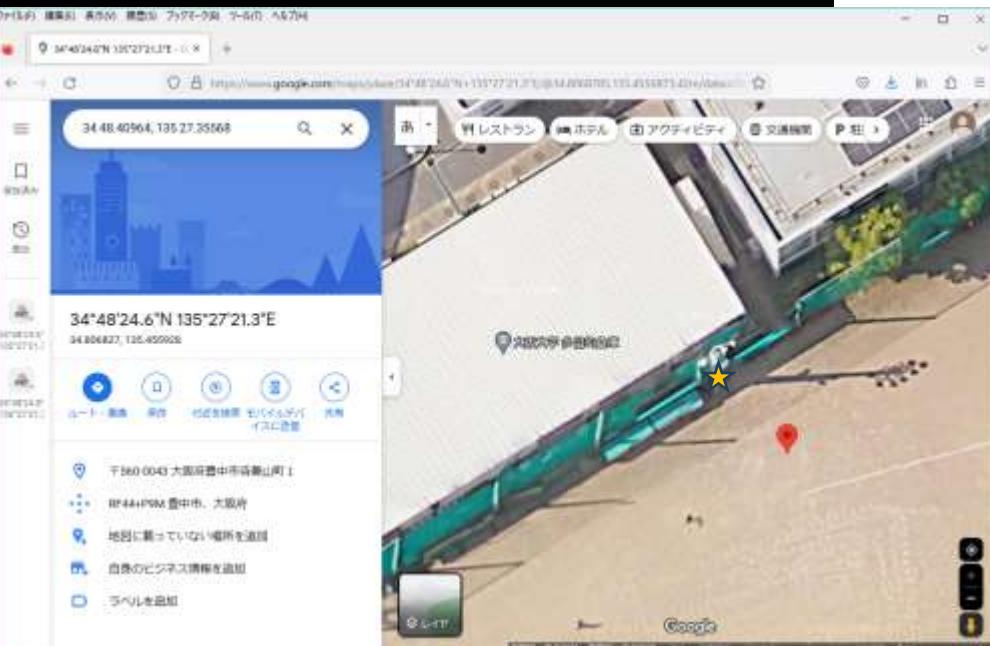
\$GPGGA,043839.00,3448.41321,N,13527.35529,E,1,  
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 65, 83, 98  
64 bytes from 2001:2f8:1b:e300::1: icmp\_seq=549 ttl=

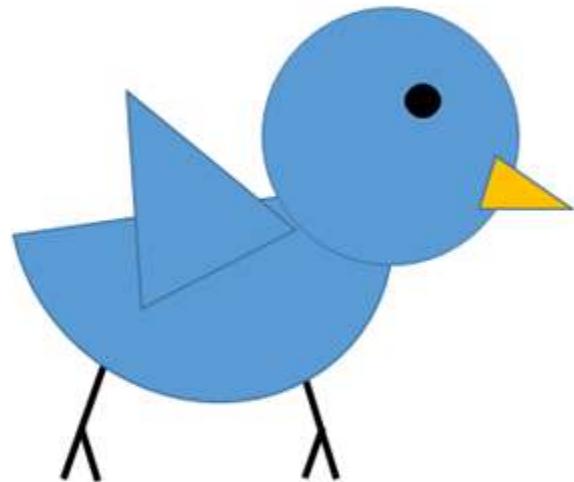
ping  
応答無

\$GPGGA,043840.00,3448.41324,N,13527.35525,E,1,  
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 65, 83, 98

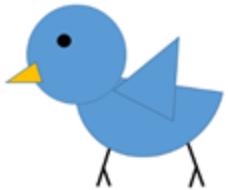
\$GPGGA,043841.00,3448.41329,N,13527.35522,E,1,  
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 65, 81, 68

\$GPGGA,043842.00,3448.41329,N,13527.35533,E,1,  
+CESQ: 99, 99, 255, 255, 255, 255, 1, 17, 62





# 学内システム連携ローカル5G 無線通信システム一式



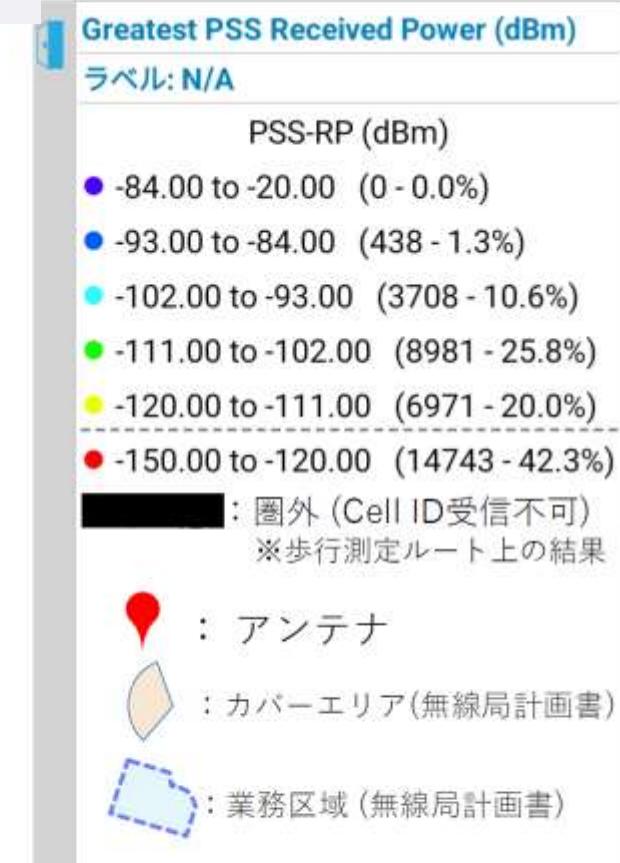
# 導入背景

- ・令和4年度補正予算を得た「教職員システムID(Beyond OUDXシステム)」の一部
- ・**研究DXを推進**するため、ローカル5G無線通信システムによるセキュアで高速なネットワーク接続もあわせて構築し、大学内でのリアルな実験や活動をエッジやクラウドの上に構築されたサイバー空間へと高速かつセキュアに接続する
  - ローカル5G無線通信システムは、実世界の課題を解決するアプリケーションにおいて利用されるセンサーヤやユーザ端末をローカル5Gネットワークにて高速かつセキュアに接続するものであり、ここから超高速ネットワークにてエッジやクラウドに接続することでリアルタイムに**AI処理**することを可能とする
  - 将来的には規模を拡大し100G高速ネットワークを導入することで、**全学規模での研究DX**をより一層充実させることを最終的な目標とする
  - **学内システムにアクセスする際**、学内Wi-Fiや通信事業者のシステムなど既存の通信手段に加えて、強固な**SIM認証**を備えた高速なローカル5G無線通信システムを構築する
- ・来る2030年/B5G時代を見据えたネットワーク研究者とアプリケーション研究者の双方が**社会課題を解決する研究**をより加速的に**推進**する、すなわち**研究DX**が可能となる



# 基地局設置状況とサービスエリア

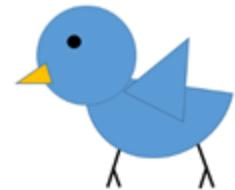
4+





# ネットワーク諸元

- ・周波数帯等:4.8GHz(n79)、Stand Alone(SA)型
- ・基地局:NEC RVI 200
- ・5GC:クラウドサービス上
- ・端末:Xperia 1 IV XQ-CT44(20台),  
Compal RAKU+(3台)
- ・SIM:nanoSIM 23枚
  - PLMN:44019(事業者:NECネットエスアイ株式会社)

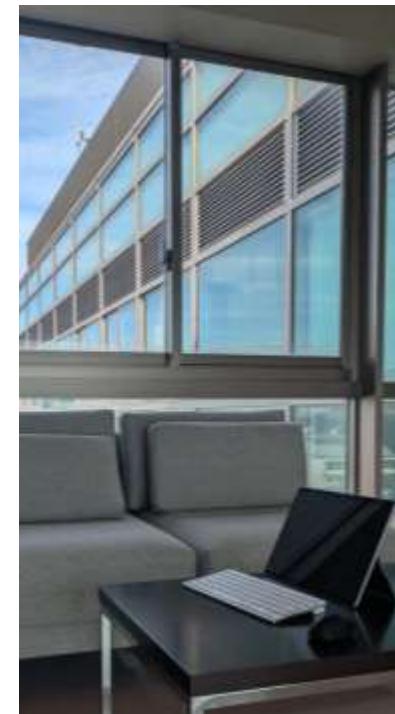


# ユーザ持ち込み端末での接続性確認 (1/2)

- 以下の端末で接続できることを確認した

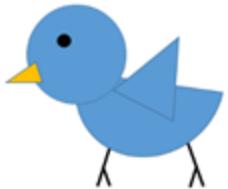
- 京セラ K5G-C-100A

- Microsoft Surface Pro (第11世代、5G対応モデル) ZEJ-00011



アダプター名: 携帯電話  
サービス プロバイダー: 5GCoreCloudServ (5G)  
接続の種類: 5G



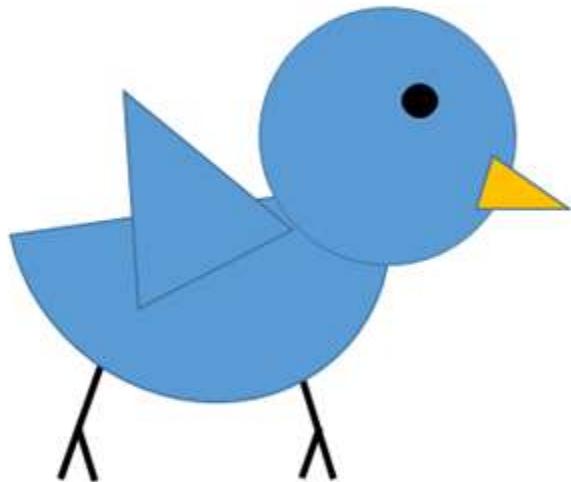


# ユーザ持ち込み端末での接続性確認 (2/2)

- 以下の端末では接続できなかった(※)
    - Google Pixel 7a (Android 15)
    - Apple iPhone 16 (iOS 18.0.1)
- ※ 手動でネットワークを探しても該当PLMN(MCC/MNC)が見つからない

n79対応かつSA対応であっても接続できるとは限らない模様

- [1] <https://www.softbank.jp/mobile/products/>
- [2] <https://www.au.com/mobile/product/sim/devices/>
- [3] [https://www.ntt-docomo.ne.jp/service/5g\\_sa/compatible\\_model.html](https://www.ntt-docomo.ne.jp/service/5g_sa/compatible_model.html)
- [4] <https://cittec.ctc-g.co.jp/blog/asocs-ios17>



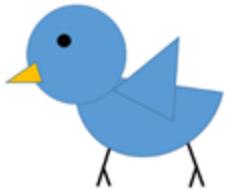
# ローカル5Gネットワークの運用に関して 得られた知見・課題



# 至る所にブラックボックス

- ・(キャリア) 5Gで使える端末でもローカル5Gで使えるかは都度確認が必要
- ・ローカル5Gを導入した組織に対してもSIMの内容は開示されないことがある
  - 999-002であればこちらで制御できたかも知れない
- ・SIM単体での(追加)調達が難しい
  - 何かしらとの抱き合わせ販売ばかり

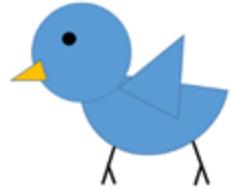
ネットワーク構成に関して少しずつ色々試したいと思った時にすぐに動けない要因が多い



# 後発導入者との干渉調整

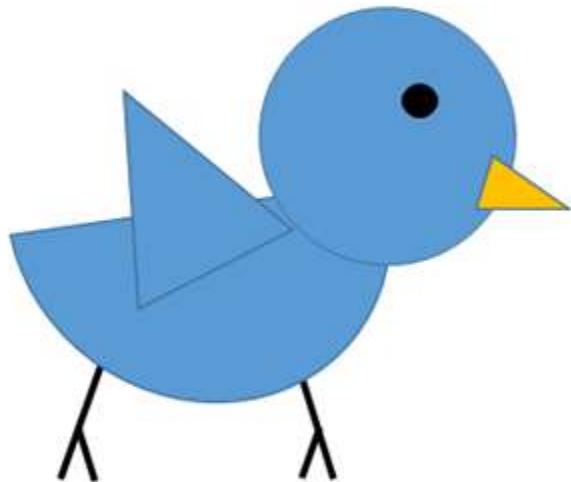
- ・本学他部局が導入しようとするL5Gと周波数・カバーエリア (B5Gモバイル環境・吹田キャンパス内屋外) が重複
  - 事前に実験スケジュールを通知しあい、同時に実験しないようするなど運用調整が必要となる
- ・NICT経由で調整
  - 取り急ぎは当方の利用予定がないことから、当方の電波送出を停止し、先方の利用を許諾
  - 今後の調整方法については継続検討
    - 間に入る組織が多いため、リードタイムを減らすべく、簡素化が必要

ローカル5Gを各所が導入しようとなつた際には顕在化する課題

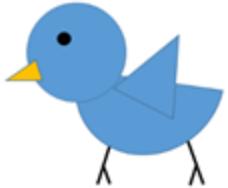


# 今後の予定事項・検討事項

- SIM情報に基く学内システムへの一気通貫なアクセス制御
- 利用者毎に使用するネットワークスライスの切り替え
- eSIM



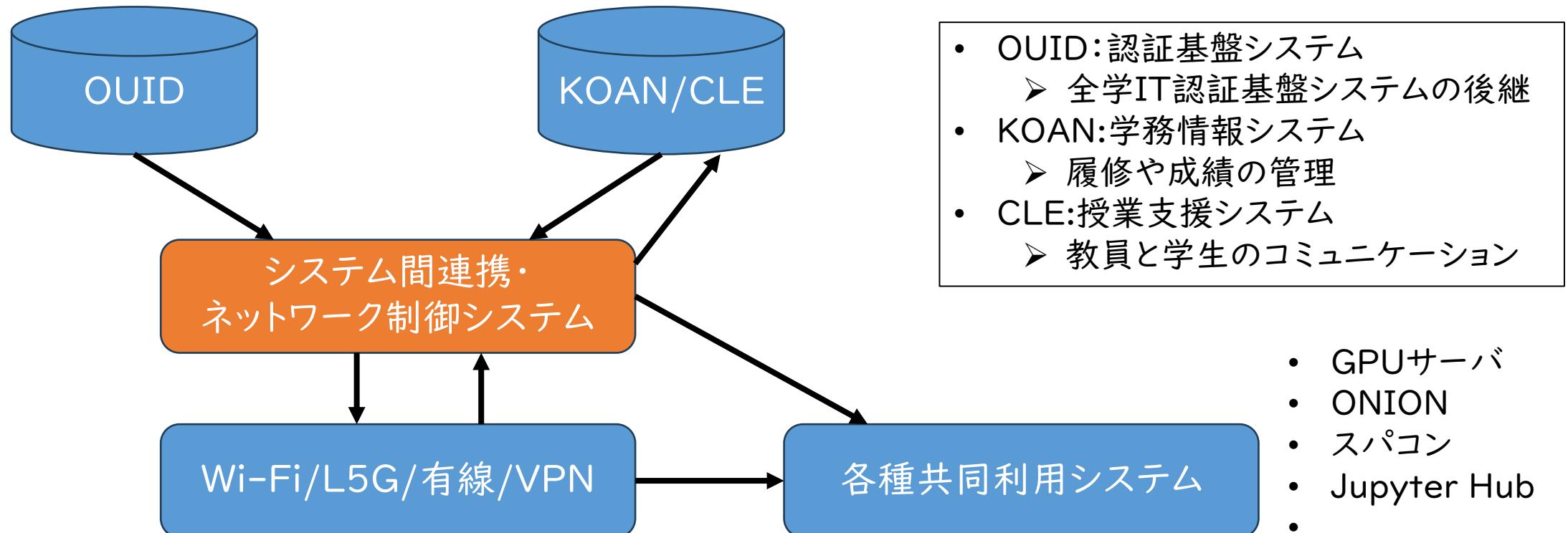
## 将来的な発展の方向性の例

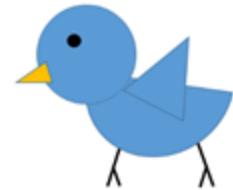


# 情報システムの有機的な連携

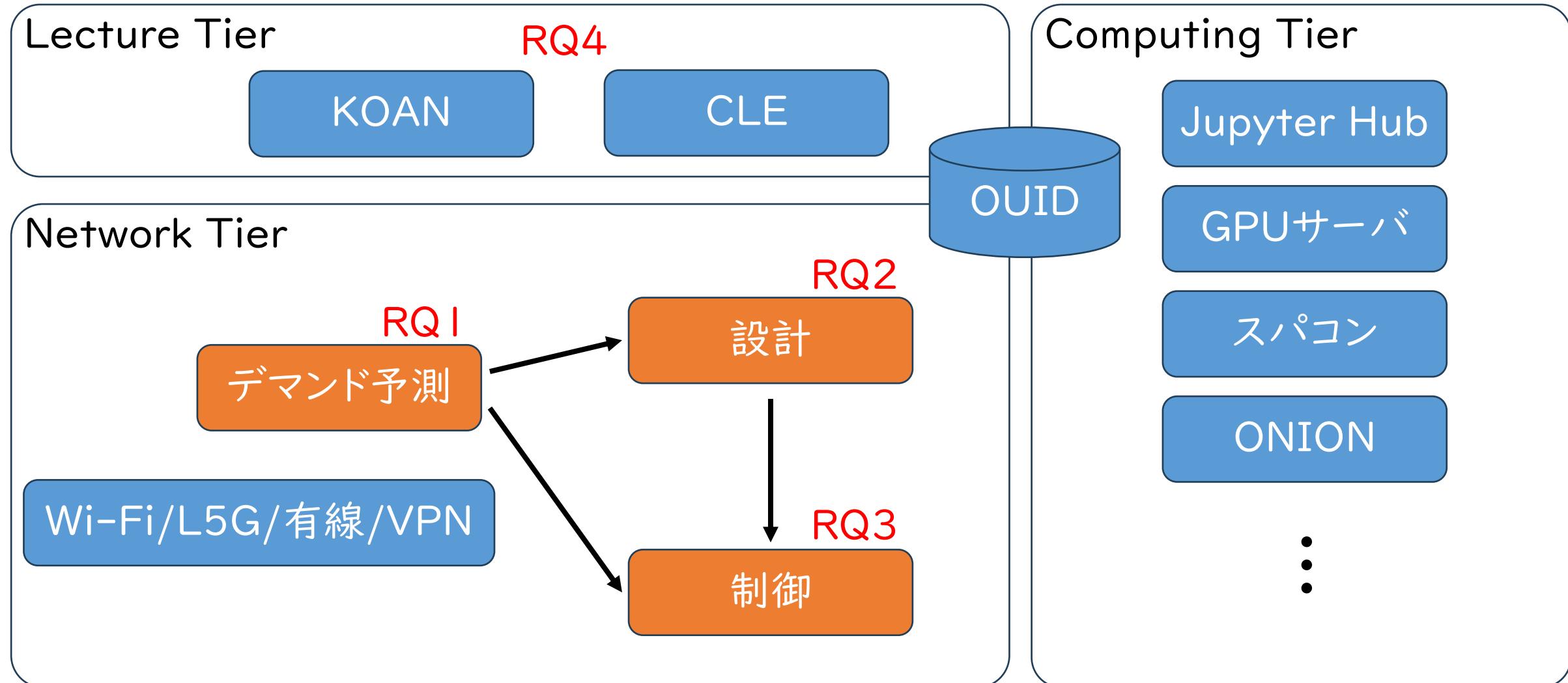
- OUDX構想

- 情報システムを有機的に連携させ、教育・研究・経営を横断的に支えられる基盤にする





# 精密で動的な予測と制御が可能なネットワークへ

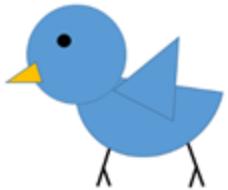




# RQ1：デマンド予測

- 大学での講義や診療におけるデマンド予測
  - デマンド予測の材料となる情報
    - 教室その他の講義/講義外での利用見込み
    - 建物/部屋のCADデータ、既存設備(什器)
    - 無線基地局のカタログスペック
    - 電波シミュレータの結果
    - 予算等の制約条件

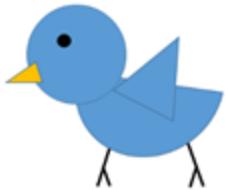
これまでのODINS運用のノウハウやログ情報、講義に関する情報から大学におけるネットワーク利用のデマンド予測ができるのか？



## RQ2: 設計

- Wi-Fi/L5Gの好適なリソース配分を決定するネットワーク設計アルゴリズム
  - Wi-FiとL5Gを相補的に導入し、トータルコストを安く抑えたい
    - Wi-Fi: 屋内中心、ホットスポット的、大容量
    - L5G: 屋外中心、広いカバレッジ
  - キャンパスの物理的な制約を考慮に入れる

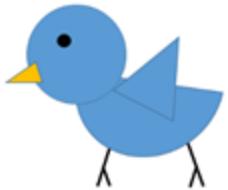
「勘と経験」頼りを脱却し、客観的なデータとアルゴリズムにより好適なリソース配分を求めたい



## RQ3: 制御

- Wi-Fi/L5Gのロードバランスとビームフォーミング制御
  - トライフィックのWi-FiとL5Gへの好適な分散
  - 受講者数に比べて少ない本数のビームでどのようにビームフォーミングを行うのが適切か

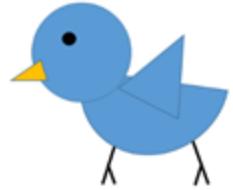
(本学では)「勘と経験」のない領域。  
動的な制御は人力で対応できるものではなく、自動化必須。  
実施した制御が妥当なものだったかを評価する仕組みも欲しい



## RQ3+：制御

- 利用者の位置情報と講義情報を関連付けた、ネットワークリソース制御
  - 講義関係者への優先的リソース割当
    - 利用者の位置情報はネットワークインフラから取得
    - 講義情報（受講者・教室・講時等）は学務情報システム等から取得

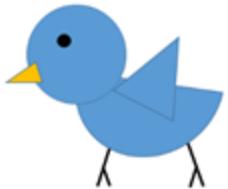
講義情報を与えることでRQ3課題を更に高度にしたうえで  
解決できないか



## RQ4: 行動分析・行動変容

- ・学習支援のための行動分析を行うために教育専門の研究部門に提供すべき情報の選別

ネットワークから取得できるデータのうちどのようなものが学習支援に使えそうなのか、見当がついていないため、教育部門と連携してデータセットの選別を行いたい



# まとめ

- ・本講演では下記ご紹介
  - 本学に導入したローカル5G環境の導入過程及び実証実験
    - NICT総合テストベッドB5Gモバイル環境
    - 学内システム連携ローカル5G無線通信システム一式
  - ローカル5Gネットワークの運用に関して得られた知見・課題
    - ブラックボックスを減らす努力が必要
    - 近隣導入者との干渉調整手順の開発が必要
  - 将来的な発展の方向性の例
    - 精密で動的な予測と制御が可能なネットワーク