

# 海外テストベッドにおける利活用事例の調査

---

**MRI** 三菱総合研究所

2023/10/17

三菱総合研究所 先端技術・セキュリティ事業本部

# 海外テストベッドの利活用事例調査

- 米国・欧州を中心に多種多様な目的のテストベッドについて概要・特徴・利活用状況を調査する。
  - 本調査では、NICTと同様に不特定多数のユーザが利用できるテストベッドを対象とする。
- 利活用状況に関しては、一部のテストベッドは公開情報を基にテストベッドの代表事例として整理する。

調査対象テストベッド

国名	テストベッド名	概要
米国	FABRIC	広域ネットワークを提供するテストベッド
米国	COSMOS	実際の街を実証環境として提供するテストベッド
米国	AERPAW	ドローンの実証環境を提供するテストベッド
米国	ARA	地方における無線通信実証環境を提供するテストベッド
米国	POWDER	ソフトウェア化された5G通信の実証環境を提供するテストベッド
米国	Chameleon	エッジ・クラウドの実証環境を提供するテストベッド
欧州	GÉANT Network	広域ネットワークを提供するテストベッド
欧州	5GTN	中小企業が利用しやすい5G実証環境を提供するテストベッド
欧州	FIT IoT-Lab	多種多様なIoT通信の実証環境を提供するテストベッド
その他(インド)	TiHAN testbed	自動航法システムの実証環境を提供するテストベッド
その他(豪州)	Argyle Square 5G and IoT Test Bed	IoTデータの収集・分析基盤を提供するテストベッド

# FABRIC

- 各種研究を国際的なネットワーク環境や広域のエッジコンピューティング環境で実証することを目的に構築された、米国の広域ネットワークテストベッドである。
- 大きく5つの分野の研究が促進できるように広域ネットワークテストベッドは構築され、米国の各テストベッド間の接続にも利用されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 各種研究を国際的なネットワーク環境や広域のエッジコンピューティング環境で実証する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NSFのサポートを受け、SRIインターナショナル、バージニア大学、ジョージア工科大学、フロリダ国際大学を中心に構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 米国内の29の拠点に接続できるよう100G回線やテラビット回線を提供</li> <li>● 国際的な連携も実施され、日本の東京大学と連携済み</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 次世代インターネットと最新サイエンスアプリケーション</li> <li>● 次世代に向けたサイバーセキュリティ向上</li> <li>● HPCと無線通信とIoTの統合</li> <li>● 機械学習や人工知能の基盤制御管理への統合</li> <li>● 次世代コンピュータサイエンス研究者の教育</li> </ul>

FABRICの広域ネットワークの概要図



# COSMOS

- クラウドエッジコンピューティングをターゲットとした広帯域・低遅延な通信と関連するアプリケーションの実証を目的に構築された、実環境のテストベッドである。
- 実環境のテストベッドとして、既にカメラなどのセンサも街中・建物に設置されている。大きく4つの軸で実証研究が進められ、通信技術・アプリケーション共に研究されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● クラウドエッジコンピューティングをターゲットとした広帯域・低遅延な通信</li> <li>● 広帯域・低遅延な通信を必要とするアプリケーションの実証</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PAWRとNSFのサポートを受け、ラトガース大学・ニューヨーク大学・コロンビア大学を中心に構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 約2.6平方kmの範囲の街に、大小さまざまなノードとなる機器を設置した実環境</li> <li>● 100Gbps+のファイバー、FPGA・GPUなどのハードウェアが利用可能</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無線の全二重通信の実証</li> <li>● 光無線x-haulネットワークの実証</li> <li>● クラウドエッジを利用したARの実証</li> <li>● スマートシティのアプリケーションの実証</li> </ul>

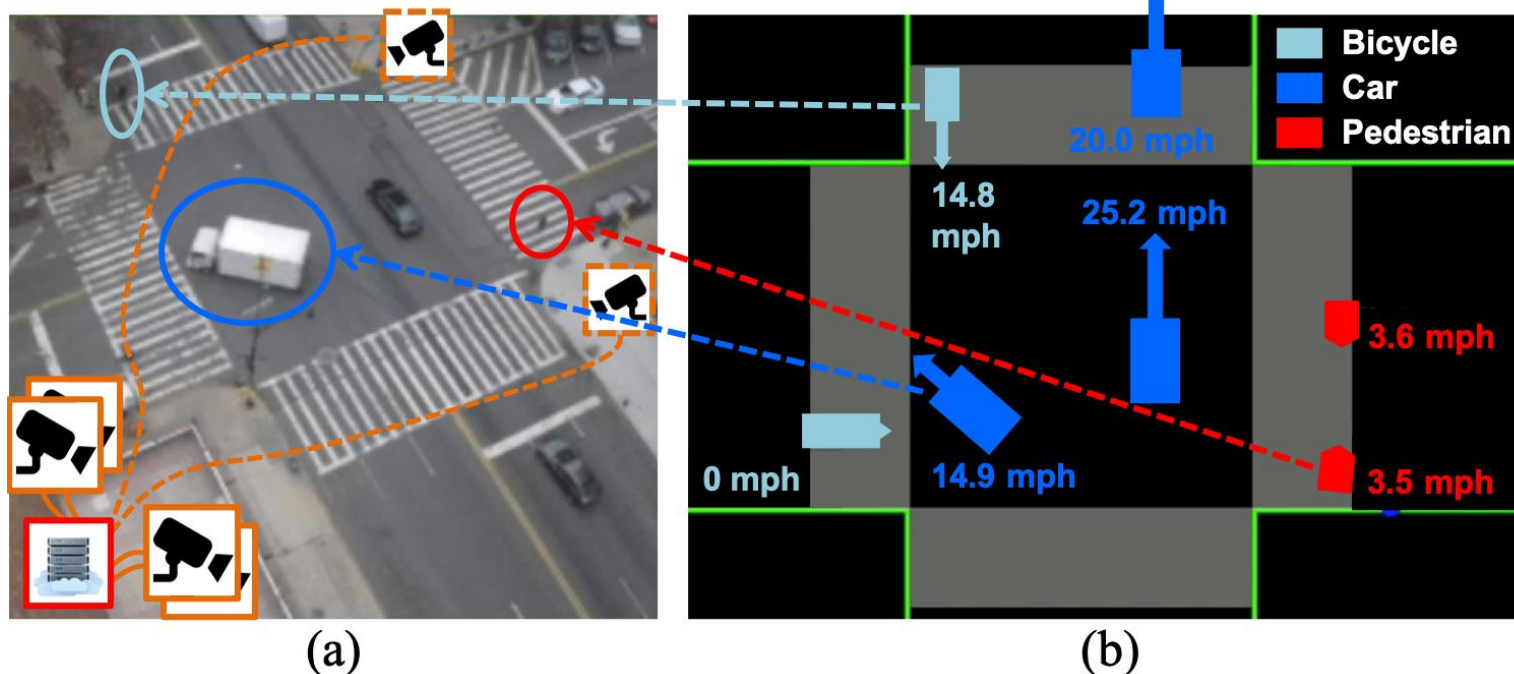
COSMOSのテストベッドの範囲



## COSMOSの代表事例

- COSMOSにおける代表的な事例として、実環境における物体検知が挙げられる。
- 街中のカメラ画像を利用して、リアルタイムで物体検知の性能を評価することが可能である。また、プライバシーを考慮した物体検知などの実験も行われている。
- 通信機器・半導体の開発を行う米国企業のクアルコムやラトガース大学を含めた様々な大学が本環境を利用して実証している。

COSMOSにおける物体検知の一例

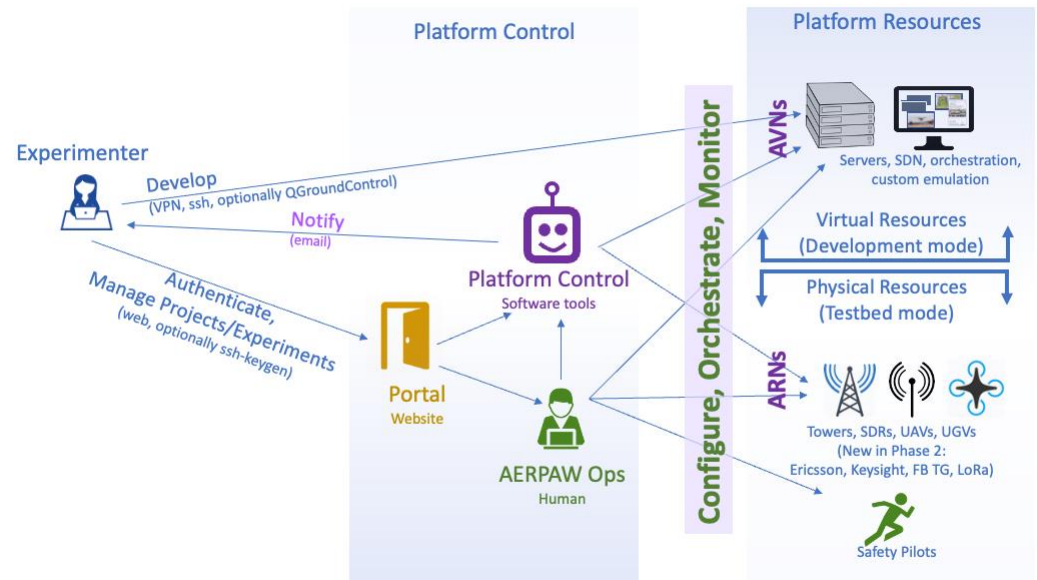


# AERPAW

- 5G通信における無線の無人航空機(ドローン)に関する実証を行うことを目的に構築された、無線通信に焦点を当てたテストベッドである。
- 無人航空機における無線通信の様々なシナリオを実証することが可能である。また、無人航空機だけでなく、無人地上機の実証も行うことが可能である。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 5G通信における無線の無人航空機(ドローン)に関する実証を行う</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PAWRとNSFのサポートを受け、ノースカロライナ大学を中心に運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 無人航空機や無人地上機の実機も利用可能</li> <li>● 実施した実験に関するネットワーク構成図やコンフィグをマニュアルの一部として公開</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 固定されている無線基地とドローン間の通信の実証</li> <li>● 固定されている無線基地と地上機間の通信の実証</li> <li>● 複数の無線基地と複数のドローン・地上機の通信の実証</li> </ul>

## AERPAWのシステムの全体像

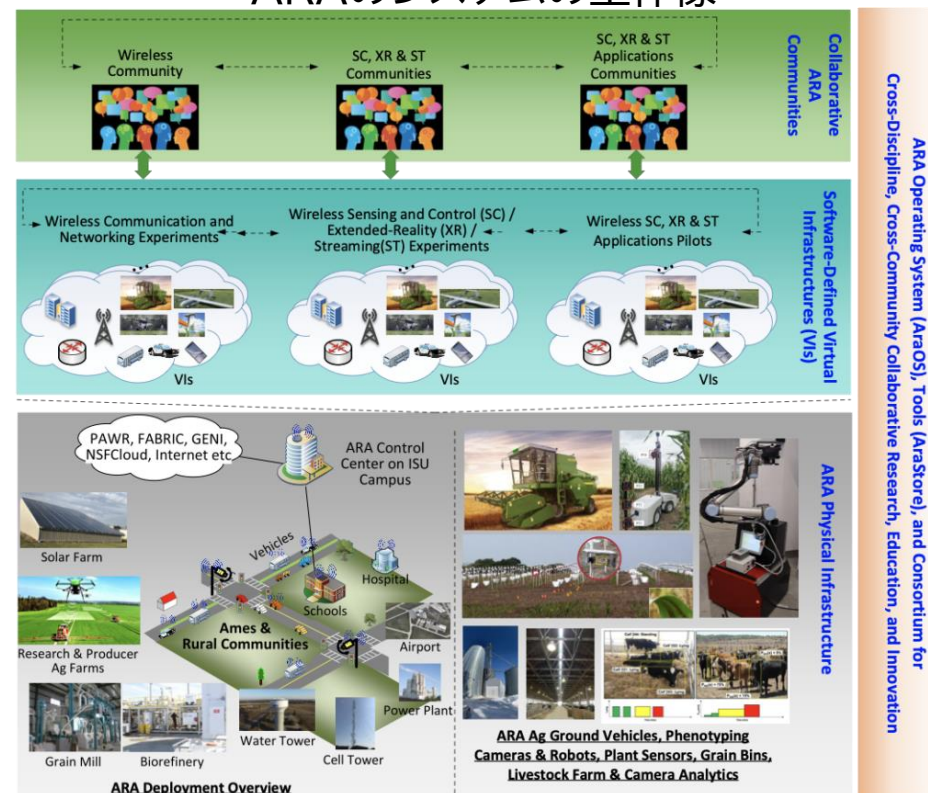


# ARA

- 地方における5G利用の実証研究を行うことを目的に構築された、農場地を含めて提供している実環境のテストベッドである。
- 地域における農業、学業、コミュニティ形成における実証研究が進められ、アプリケーション構築にを前提として、通信技術やアーキテクチャの研究が進められている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 地方における5G利用の実証研究を行う</li> <li>● 地方における農業、学業、コミュニティ形成などの5G通信のユースケースの構築</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PAWRとNSFのサポートを受け、ラトガース大学・ニューヨーク大学・コロンビア大学を中心に構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 実際の農場地、各種の通信帯域(194Thz、11GHz棟)、MIMO機器、Software Defined Radios等が利用可能</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 映像を用いた自動農業</li> <li>● 地方におけるEnd-to-Endのインフラとアプリケーションの構築</li> <li>● ARを用いた農業体験</li> </ul>

ARAのシステムの全体像

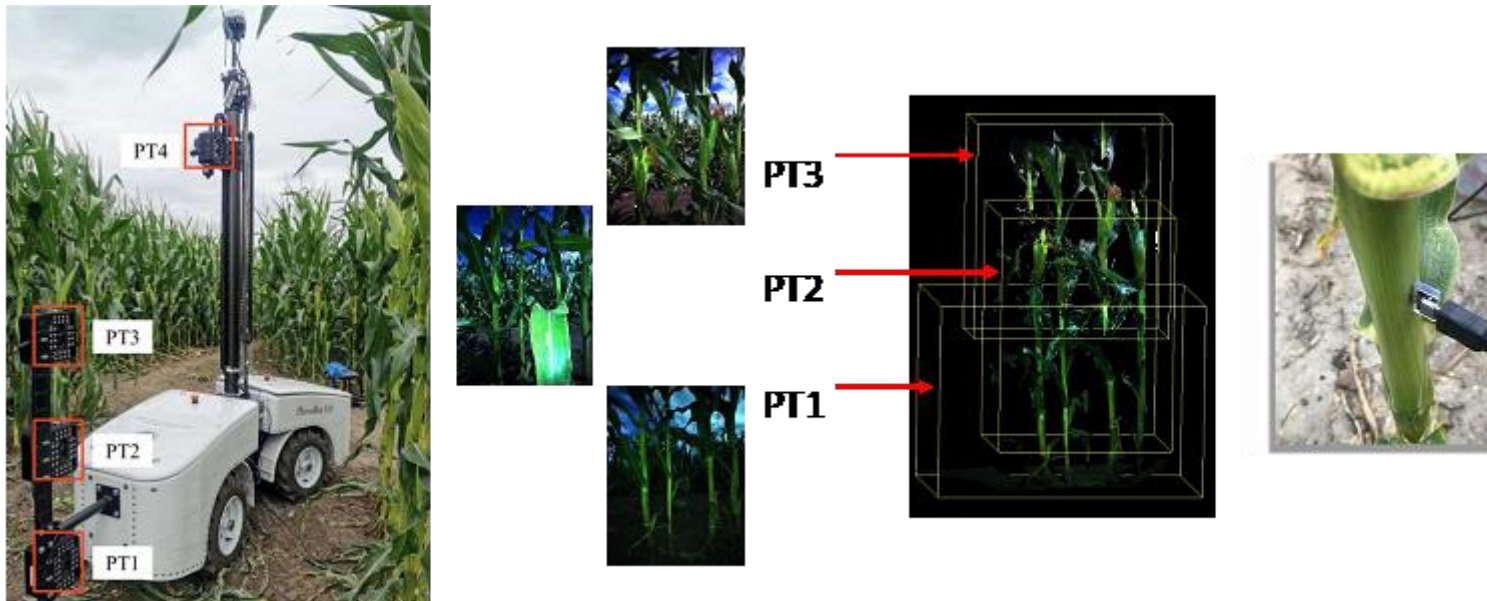


出所) <https://arawireless.org/about-ara/>

## ARAの代表事例

- NSFが補助している研究事業の1つとして、イリノイ州立大学が実施している農作物の育成状況のリアルタイム監視が挙げられる。
- 本研究は、農場に設置されたカメラロボットのコストを下げ、導入しやすいアプリケーションを構築することを目的としている。
- テストベッドが持つ実地にカメラロボットを設置し、テストベッドが持つ高速の無線通信を利用し、高精細な画像をリアルタイムで分析し、農作物の育成状況をリアルタイム監視の実証を行っている。

研究の概要図



出所) <https://arawireless.org/research/agriculture-use-case/>

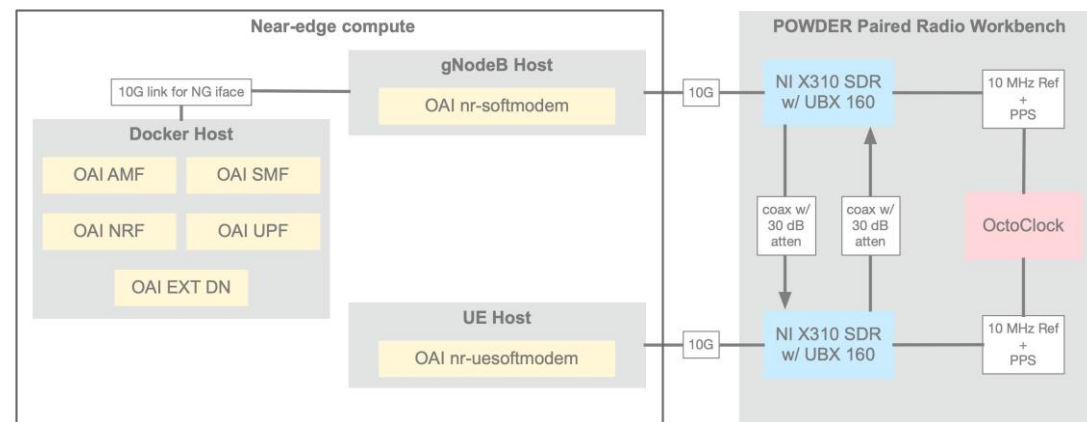


# POWDER

- ソフトウェア化された無線アクセスネットワークを実証することを目的に構築された、5G・ORAN等の無線通信を取り扱うテストベッドである。
- 通信の要素技術研究向けに計測機器含めた様々な機器が設置されている。簡便に5G通信を構築実証できる環境であり、ウタ大学で実環境での実証が可能である。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ソフトウェア化された無線アクセスネットワークを実証する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● PAWRとNSFのサポートを受け、ウタ大学が運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 5G無線アクセスネットワークの構築、無線周波数のモニタリング機器・発信機、エンドポイントデバイス、5G OTA環境等が利用可能</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ソフトウェアデザインの5G通信に関する実証</li> <li>● 巨大なMIMOを利用した実証</li> <li>● アメリカ独自の帯域であるCBRSの実証</li> <li>● 無線周波数・高周波のモニタリング</li> </ul>

## POWDERにおける5G通信システムの全体像



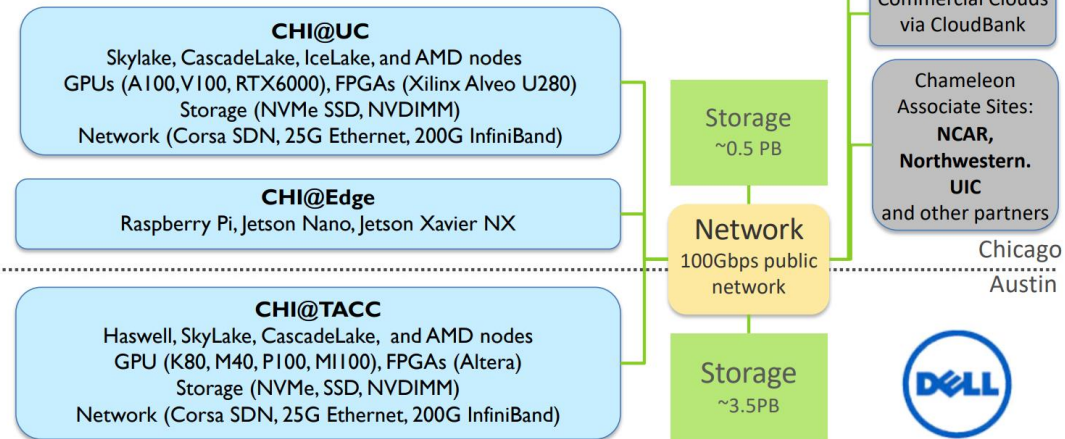
# Chameleon

- 情報工学システムのインフラ～アプリケーションまで全ての研究を支援することを目的に構築された、多種多様なハードウェアを利用できるテストベッドである。
- 巨大なストレージに加え、各種計算資源が用意されていることから、IoTとエッジ・クラウド連携を中心に約600のChameleonを利用した論文が公表されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 情報工学システムのインフラ～アプリケーションまで広い範囲の研究を支援する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● NSFのサポートを受け、CSI、TACC、iCAIR、RENCIを中心に構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自由に構成を変更可能なクラウドエッジ環境を構築できる環境を提供</li> <li>● 100Gbps+のファイバー、FPGA・GPUなどのハードウェアが利用可能</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IoTとエッジ・クラウドを利用した連合学習</li> <li>● IoTとエッジ・クラウドを利用した生体認証</li> <li>● IoTとエッジにおける通信の信頼性</li> </ul>

## Chameleonの構成概要

### CHAMELEON HARDWARE



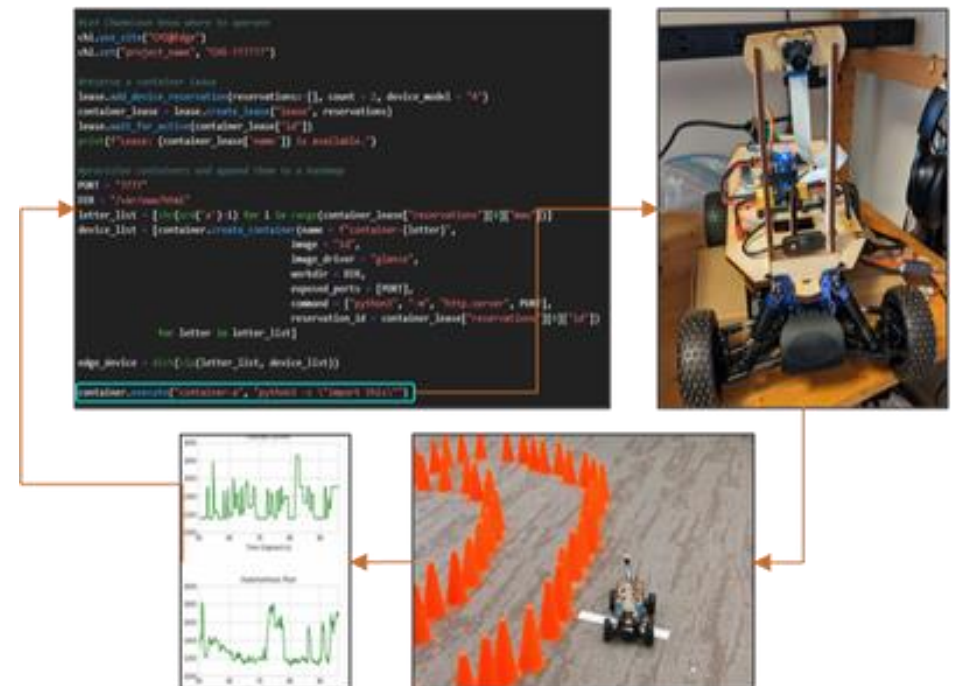
出所) <https://www.chameleoncloud.org/>

# Chameleonの代表事例

- Chameleonの代表事例として、クラウドからリモートで自動車を運転操作することができる機械学習モデルを作成するための研究が挙げられる。
- 本研究では、学習モデルを作成するためのデータ収集に注目し、学習モデルの学習状況に応じて、新たなデータを収集するためのコースを組み替えることを自動化する。
- Chameleonの自由に構築可能なクラウドエッジ環境を前提に、テストベッドとして以下の機能を提供している。

- 自由にシステムを構築可能なコンテナ環境
- JupyterHubを通して実験環境へのアクセス
- 安定したネットワーク環境
- コードや実証結果をリモートで確認できる環境

研究の概要図



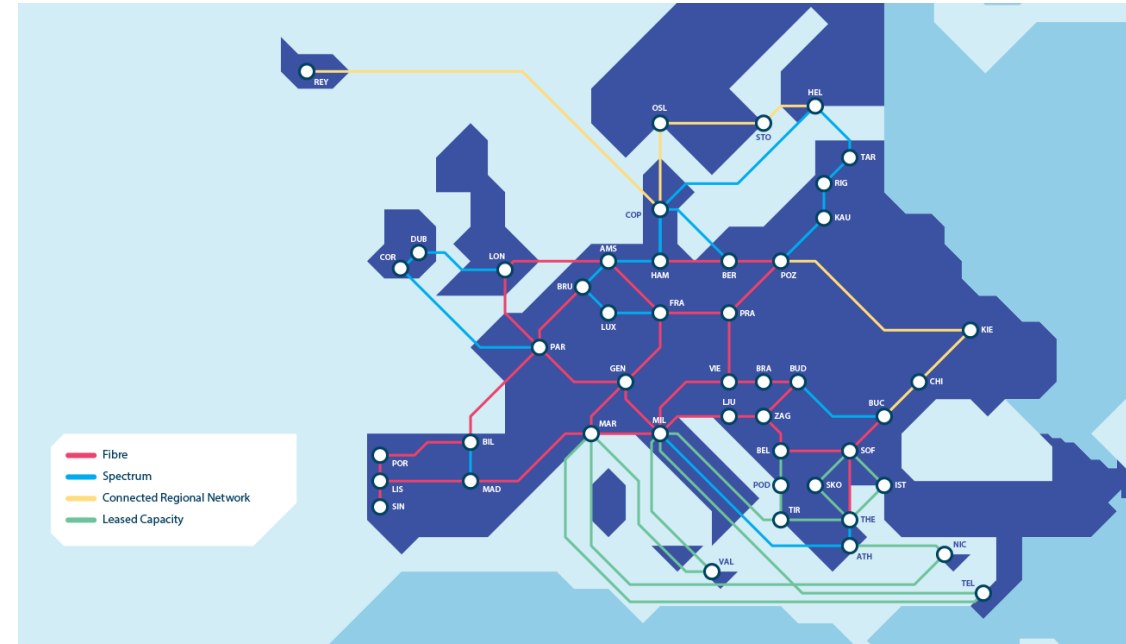
出所) <https://www.chameleoncloud.org/blog/2022/12/19/driving-autonomous-cars-from-edge-to-cloud-with-chiedge/>

# GÉANT Network

- 欧州各国における研究機関や研究用ネットワーク間を接続させることを目的に構築された欧州の広域ネットワークテストベッドである。
- 欧州の主要都市間のネットワーク接続が構築され、広域ネットワークを利用した実証に利用されている。また、日本のSINETとも連携されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 5G通信における無線の無人航空機(ドローン)に関する実証を行う</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EUとヨーロッパのNRENsのサポートをGÉANTが運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EUにおける各種研究機関との様々なネットワーク接続を提供</li> <li>● 国際的な連携も実施され、日本のSINETと連携済み</li> <li>● ネットワークだけでなく、ネットワークマネジメント・監視システムを提供</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EUにおける広域の実環境ネットワークを利用する研究</li> </ul>

GÉANTの広域ネットワークの概要図



出所) <https://network.geant.org/services/>

# 5G Innovation Hub North

- 中小企業における5Gに対応した商品やサービスの開発を促進することを目的に構築された、実環境での5G通信を提供しているテストベッドである。
- 5Gの環境だけでなく、簡易に実証できるよう5G接続が可能な各種機器も提供されている。目的としている中小企業の利用だけでなく、大学や研究機関も通信技術の研究を実施している。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 中小企業における5Gに対応した商品やサービスの開発を促進する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● EUのサポートを受け、ルレオ工科大学を中心にテリアやエリクソンどの企業と共に構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● ルレオ工科大学を中心として複数の地点で5G環境を構築</li> <li>● 5G接続が可能な各種機器(携帯・SIMカード・ラズパイ)を提供</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 低消費電力な5Gネットワークの構築</li> <li>● 機械学習を利用した効率化された5Gネットワークの構築</li> </ul>

## 5G Innovation Hub Northの各地点での設備状況

	5G Stand Alone (SA)	5G Non-Stand Alone (NSA)	Local breakout	Edge-nod	Indoor coverage	Outdoor coverage	Number of cells
Luleå campus	x	x	x	x	x	x	4
Kronandalen, Luleå	x				x		1
The Great Northern, Skellefteå	x	x			x		2
Särkkivaaragården, Övertorneå	x	x			x		1
Storumans sjukstuga	x				x		1
Skellefteå campus	x	x			x		1

# FIT IoT-lab

- 様々なワイヤレスセンサボードを利用しながらIoT社会のミクロな部分の通信やアプリケーションを開発することを目的に構築された、IoTに焦点を当てたテストベッドである。
- ワイヤレスセンサに焦点を当てたテストベッドであり、IoTのセキュリティ・通信性能向上・消費電力削減等、計570の本テストベッドを利用した論文が公表されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 様々なワイヤレスセンサボードを利用しながらIoT社会のミクロな部分の通信やアプリケーション開発する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 大学・民間組織・公的機関で構成されたFITコンソーシアムが構築・運営</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Arduino等の23個のセンサボードを利用可能</li> <li>● BLE、LORA、IEEE802.15.4等の複数のセンサ用通信を利用可能</li> <li>● テストベッドを構築しているほぼすべてのコードがオープンソースで公開</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● IoT機器の通信におけるセキュリティの向上</li> <li>● IoT通信における消費電力の削減</li> <li>● IoTの通信性能の向上</li> </ul>

## FIT IoT-labが構築されている環境

Several deployments.  
Several possibilities.



Grenoble



Lille



Paris



Saclay



Strasbourg



Toulouse

出所) <https://www.iot-lab.info/community/publications/>

# TiHAN testbed

- インドにおける自律航法システムの作成を支援することを目的に構築された、車両走行の実環境が提供されているテストベッドである。
- インド初の自律航法に関するテストベッドであり、自律航法の実証において必要な設備が車両以外には基本的に提供されている。また、実環境ではスマート信号機・踏切などの設備に加え、ラウンドアバウトなども実地に設置されている。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● インドにおける自律航法システムの作成を支援する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● インドの研究機関であるIIT Hyderabadのサポートを受けて研究グループのTiHANが構築・運用</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 車両が走行できる実環境とサポートする各種設備(スマート信号機、踏切等)の提供</li> <li>● 車両走行における各種シミュレーションツールの提供</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 自律航法システムのシミュレーションテスト</li> <li>● 自律航法システムの実地実証</li> </ul>

TiHAN testbedの概要図

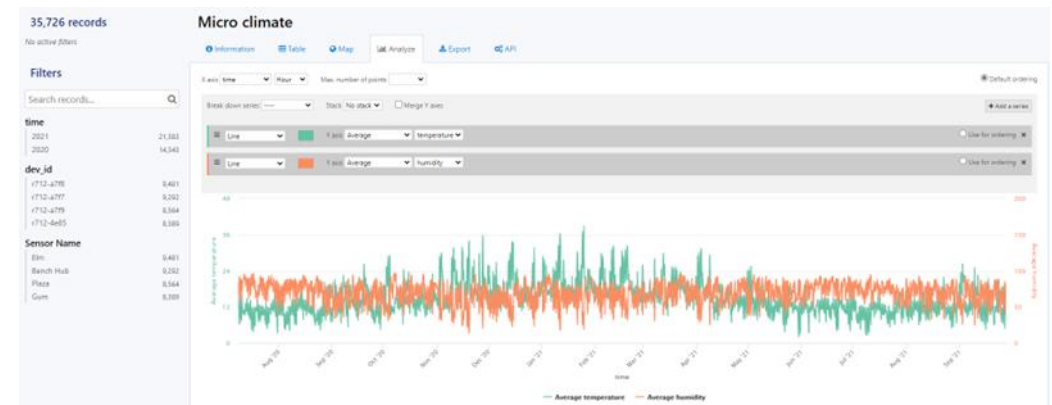


# Argyle Square 5G and IoT Test Bed

- センサデータの収集・分析とメルボルンが設定する共同研究を実施することが目的に構築された、5GとIoTに焦点をあてたテストベッドである。
- IoT機器をメルボルン市内の公園に設置し、実データを収集している。収集したデータを可視化する機能も作成し、企業との共同研究にも利用することを想定している。

カテゴリ	調査内容
目的	<ul style="list-style-type: none"> <li>● センサデータの収集・分析する</li> <li>● メルボルンが設定する共同研究を実施する</li> </ul>
運用主体	<ul style="list-style-type: none"> <li>● メルボルン市を中心に大学・民間組織(AWS・メルボルン大学等)構築・運営</li> </ul>
特徴	<ul style="list-style-type: none"> <li>● データをAPIを通してWebを通してダウンロードすることが可能</li> <li>● 各データが簡易的だがグラフ化されている</li> <li>● 協働性を深めることを目標としたテストベッドであり、企業からの共同研究などを募集</li> </ul>
実施している研究例	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 5GとIoTに関連した研究</li> </ul>

## Argyle Square 5G and IoT Test Bedにおけるデータ可視化の例





## 調査のまとめ

- 近年のテストベッドの多くは、特定のテーマや目的が明確であることが確認できた。
- 特に米国は、各テーマごとにテストベッドを構築し、テーマに必要な設備を揃えている。また、テストベッド間の連携を行えるようFABRICという広域ネットワークが準備されている。
- NICTにおいても同様のモデルでテストベッドの構築が進められており、米国の動向を注視しながら、参考にできる内容を取り込むことが望まれる。

