

無線ネットワークと社会の レジリエンシー向上に向けて

2025年11月6日

国立研究開発法人情報通信研究機構

レジリエントICT研究センター サステナブルICTシステム研究室

室長 滝沢 賢一

E-mail: sis_contact@ml.nict.go.jp



はじめに

- **コンテンツ**
 - 2021年に発足したサステナブルICTシステム研究室の研究成果をダイジェスト的にご紹介
- **お世話になっている皆様へ**
 - ご支援のおかげで成果を重ねることができました。引き続きよろしくお願いいたします。
- **はじめましての皆様へ**
 - 今日この日が、未来へつながる“共創の出会い”のはじまりとなりますように。

レジリエンシー（強靱性）向上への期待



社会課題の多様化に伴い要求も多様に

社会課題	概要	求められるテクノロジー
社会インフラ（電力・交通・医療など）のICT依存	ICT依存によって通信障害が社会全体の機能不全へ	・通信の冗長性・分離設計 ・低遅延・高信頼通信（例:5G URLLC）の活用
災害・緊急事態時の通信確保	地震、台風、津波等の災害時、通信インフラ途絶による救援・避難が困難	・通信網の多重化（光・衛星・無線など）による途絶しにくい通信ネットワーク ・バックアップ電源、移動基地局等の整備
被災後エリアのデジタルディバイド解消	通信基盤が脆弱となった地域では情報格差が拡大	・衛星通信、無人機、地上系による分散型通信 ・通信途絶時も動作するエッジ処理やローカルAI
気候変動・大規模自然災害への対応	地震・津波・洪水などが通信・観測設備に影響	・耐環境性の高い通信・観測インフラの設計 ・環境発電活用による持続可能なシステム構築
サイバー攻撃・情報漏えいへの耐性	サイバー攻撃（ランサムウェア、DDoS攻撃など）が増加	・攻撃を受けても業務を継続できるネットワーク構成 ・AIによる自動検知・復旧、ゼロトラスト
地政学リスク・サプライチェーンの分断	物流制限等により、通信機器・部品の供給が不安定化	・国産・多国間調達による供給網の多様化 ・オープン化（O-RANなど）による相互運用性確保

「頑健性」と「強靱性」

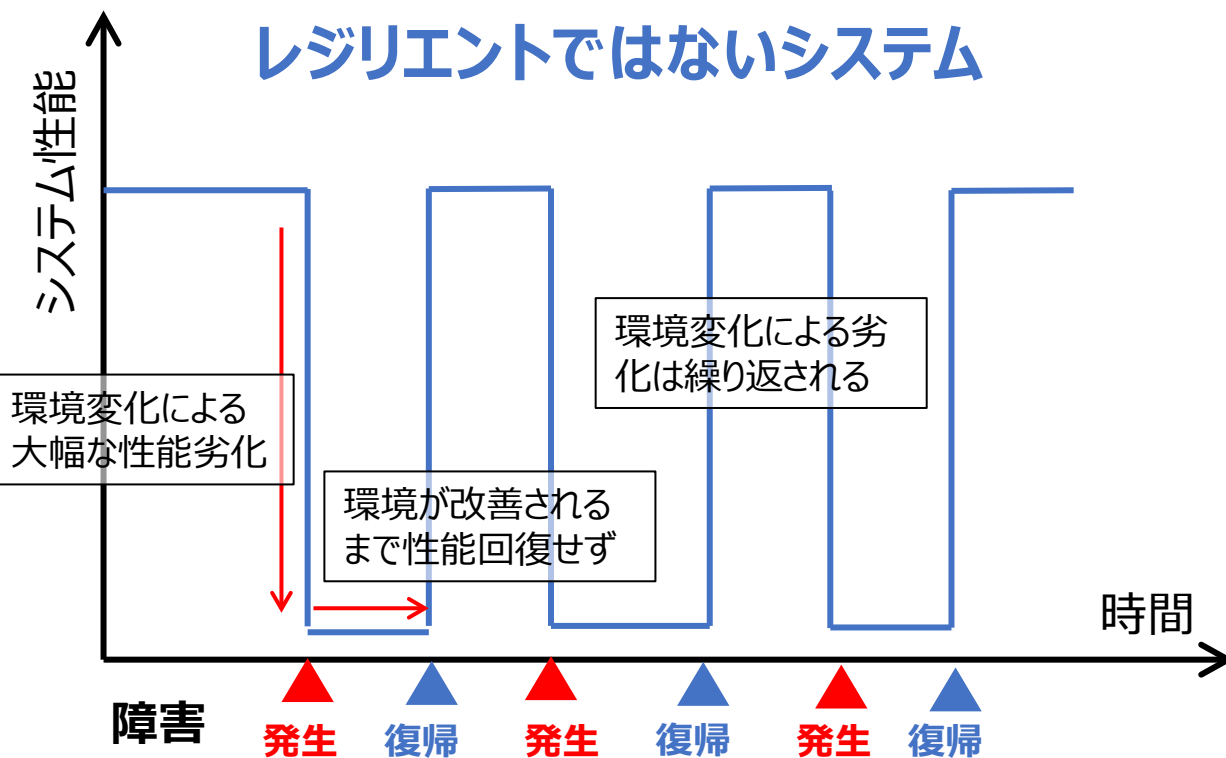


頑健性	強靱性
設計思想：「影響を受けない」	設計思想：「影響を受けても立ち直り進化」
外乱を受けない・壊れない強さ（障害を防ぐ・耐える）	外乱を受けても回復・適応して機能を維持する力（障害から立ち直る・適応する）
安定性、堅牢さ	柔軟性、回復力、学習能力
想定された障害や攻撃に対して、機能を 変えずに正常動作を維持。	想定外の障害や攻撃に対しても迅速に復旧、必要に応じて形を変えてでも機能を回復。
災害等に対する“耐性”	被害を受けても“早期復旧・再構築できる力”
・通信ネットワークに「冗長構成」を持たせる。	・通信網の一部が途絶しても別経路や衛星通信などでサービスを復旧。 ・AIや分散制御で動的に再構成を継続。 ・被災経験を次の対策へ活用。

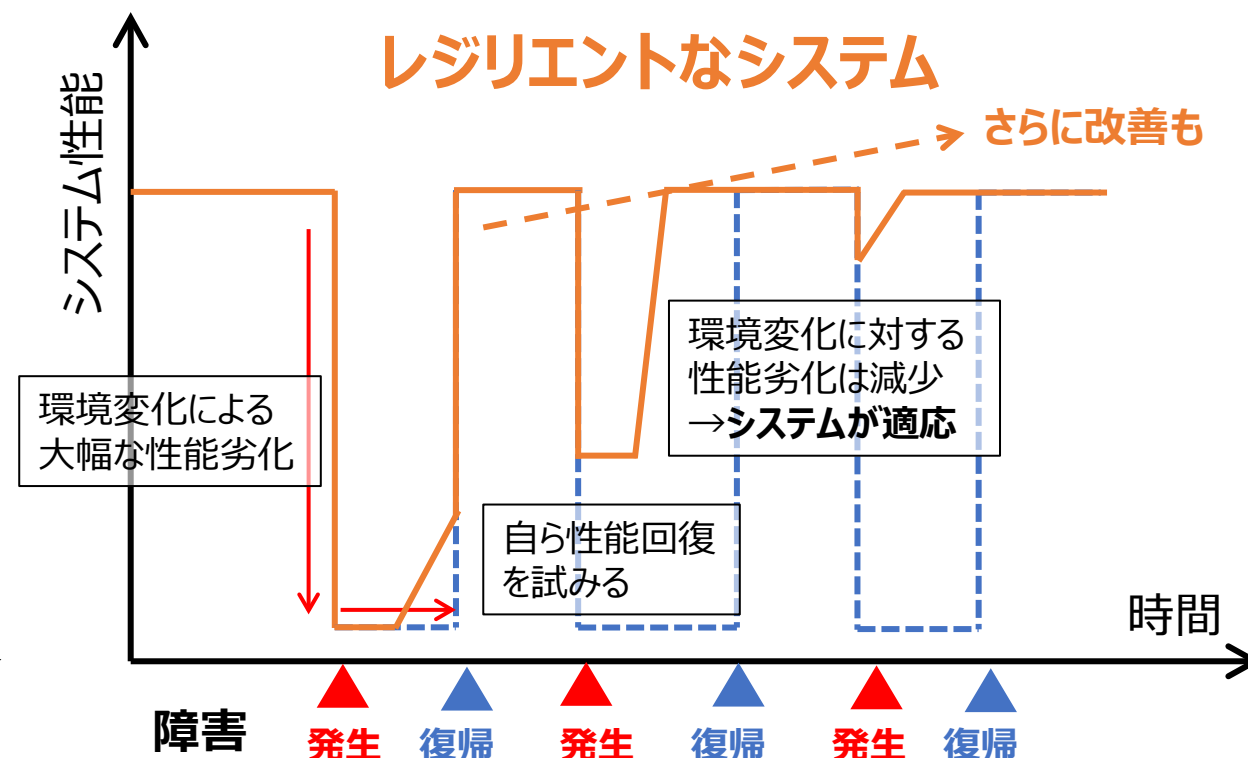
“レジリエント”

- 「**複雑かつ変化する環境下での組織の適応できる能力**。中断・阻害を引き起こすリスクを運用管理する組織の力である。」
 - ISO22300 Security and resilience — Vocabulary

レジリエントではないシステム



レジリエントなシステム



レジリエントなシステムに向けて



通信・ネットワークや自然環境計測を行うシステムに対して、
このサイクルにもとづく学習を適用、強靱性を自ら磨くシステムの実現へ
(例：無線通信の場合、途絶予兆を検知して再構成する"Make-before-Break"を実現)

補足) 「D2R2」の図は、ITU-T, Network 2030 Architecture Framework, June 2020を参考にした。

2つの研究テーマ

無線ネットワークのレジリエンシー向上

通信環境の急変（電波強度、ネットワーク構成等）に対応

研究員6名, 技術員2名

ユースケース例：電波環境が大きく変動する複雑な構造をもつ場所でも、ロボット遠隔群制御のような高い通信要件を途切れずに提供



キーワード：無線通信、エッジクラウド、機械学習（深層学習、Transformer）、統計信号処理、量子アニーリング、ロボット制御

ICTによる社会のレジリエンシー向上

自然現象等（噴火、津波発生等）の急変を検知

研究員3名

ユースケース例：ネットワークカメラや省電力センサを利用して、自然災害（津波発生、山火事等）の発生（規模や位置など）をいち早く検知



キーワード：インフラサウンド、信号処理、機械学習（オブジェクト検出）、映像解析、電力管理（環境発電）

技術創出、成果展開に向けて



自治体・海外での実装

企業への技術移転

社会実装に向けて

国際標準化活動
(ITU, 3GPP等)

オープンデータ公開

オープンソース化

ユーザニーズ提供、
共同実証、技術移転

- ・25社以上の国内企業様
- ・10以上の自治体様

共同研究、連携研究

- ・20以上の国内大学・研究機関との共同研究や共同受託
- ・10以上の海外大学・研究機関との共同研究
- ・多くの機構内連携

エッジクラウド
技術

インフラサウンド
関連技術

環境発電駆
動システム開
発

無線アクセス
技術

研究成果 (コア技術)

映像AI解析

電波強度
予測技術

周波数有効
利用技術
(量子デジタル統合)

独創性・革新性の高い研究の実施

社会課題解決

福島第一原発
廃炉措置への貢献

鳥獣被害対策
への貢献

科学的意義

国際会議や論文での出版、発明創出

1. 無線ネットワークをレジリエントに

1. 無線ネットワークをレジリエントに

ユースケース例：複雑な構造をもつ建物内での群ロボット遠隔制御

電波の強さは場所・時間でダイナミックに変化
→無線通信にとって過酷な環境

しかしながら、低遅延・高信頼の提供が必要
→高い通信要件



- 1. 無線アクセス技術**：機械学習等を活用して電波伝搬特性を予測、予測結果にもとづく通信リソース配分の最適化を行い、ロボット協調作業のような高い通信要件を継続して提供。
- 2. エッジクラウド技術**：クラウドサーバへの通信が途絶した場合でも、ノード間で利用可能な機能（計算機・データ・通信回線）を共有し、クラウドサービスをローカルに再構成。

無線アクセス技術

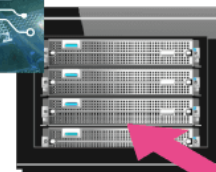
移動するロボットとの無線通信技術

無線アクセス技術

低遅延無線中継実験
@試験用プラント

分散協調無線実験
@がれきフィールド

低遅延無線中継実験
@試験用トンネル



低遅延無線中継技術

• 目的 低遅延通信のエリアを広げたい！

ロボット遠隔制御等で求められる低レイテンシ（サブミリ秒）無線のカバレッジを簡易にかつ動的に拡大できるようにしたい。

• 技術

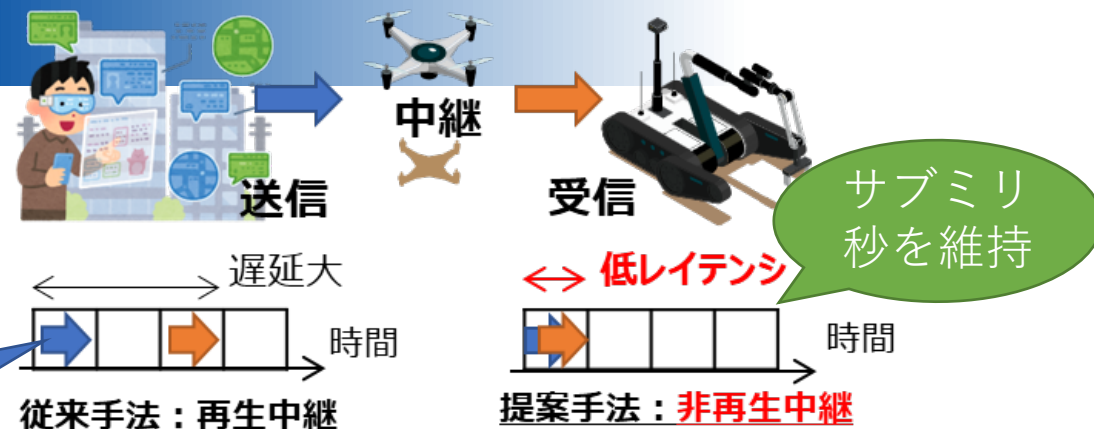
非再生中継を採用、自己干渉等の抑圧処理を低遅延（マイクロ秒オーダ）で行う技術（特許出願済、IEEE国際会議発表済）。

• 成果

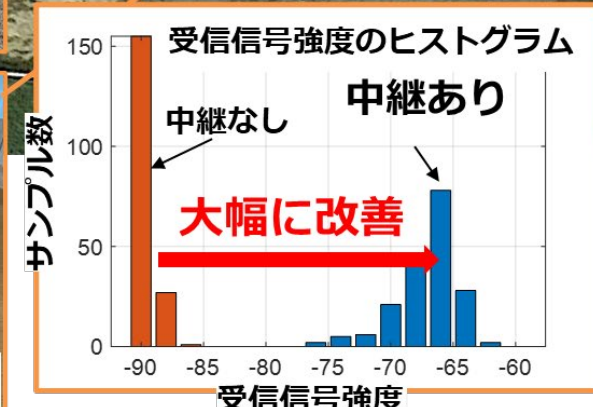
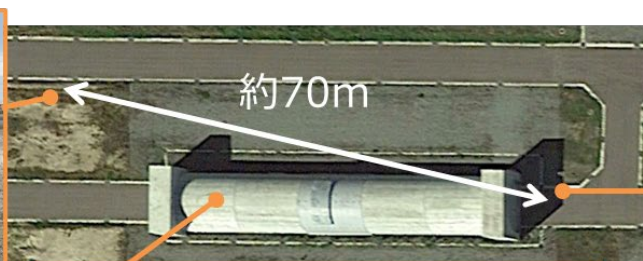
・試験用トンネルや福島第一原発モックアップ@日本原子力研究開発機構で実証済（2GHz帯及びsub-6 L5G帯）。

・3GPP Rel. 18 Network-controlled repeaterへ寄書を入力、標準仕様TS38.213等3編へ反映。

本研究開発成果の一部は、民間企業からの受託研究成果を含む（トンネル内）



低遅延無線中継のイメージ



中継処理遅延は約2.5 μ s

福島ロボットテストフィールド（試験用トンネル実験）

分散協調無線技術

• 目的 瓦礫下のロボットともつながり続ける！

伝搬損失が大きい環境（がれき下等）でも、複数分散局（位相まで同期）を用いた協調無線によって、ロボット制御に必要な無線通信品質を提供。

• 技術

移動局におけるコヒーレント受信に必要となるオーバーヘッド（シグナリング）を削減しつつ合成利得を維持する手法（特許登録済、IEEE国際会議発表済）。

• 成果

- ・福島ロボットテストフィールド等の実フィールドにおいてロボットを利用した実証を完了。
- ・3GPP Rel. 19 NR MIMO Phase 5へ寄書を入力、標準仕様TS38.214等3編へ反映。

本研究開発成果の一部は、NEDOポスト5G先導研究による受託研究及び民間企業からの受託研究の成果を含む



利用イメージ（複数分散局間で協調して電波を送信）



福島ロボットテストフィールド（がれき環境）実証



3GPP標準化



	5G	5G Advanced
リリース	3GPP Release 15～17	3GPP Release 18～20
導入時期	2019年～	2025年頃～
基本性能	高速通信（10Gbps級）、高信頼 低遅延（1ms未満）、多数同時接続	XR/メタバース、産業IoT、V2X・ドローン制御、 NTNなどの高度応用
レジリエンシーに関する検討項目	・基本的な信頼性確保（URLLC）	・GNSS依存性低減 ・URLLC/TSC拡張 ・中継(IAB, NCR等)/NTNによる経路拡張 ・接続回線の柔軟な拡張（mTRP等） ・AIによる故障予測（ビーム再最適化）

期待される効果

- 基地局の移動、中継、衛星リンクによって“孤立地域”を復旧
- 移動局の複数接続切替によるダウンタイム最小化

6G Goals

Sustainability

- Focus on environmental, social, and economic sustainability. This includes energy efficiency, reduced resource consumption, and contributing to global emissions targets.

Resilience

- Designing networks that are robust and can withstand various events, including operational errors, heavy traffic, and disasters.

Security

- Increased security, integrity, and privacy are required from day one, incorporating zero trust principles and post-quantum security measures.

Customer Experience

- Improved end-user/customer experience through seamless, ubiquitous connectivity, ensuring reliable, high-quality services delivery. Optimized Quality of Experience (QoE) across diverse devices and network conditions.

Efficiency

- Cost reduction via simplified systems and operations, with AI-driven automation and optimization.

Interoperability

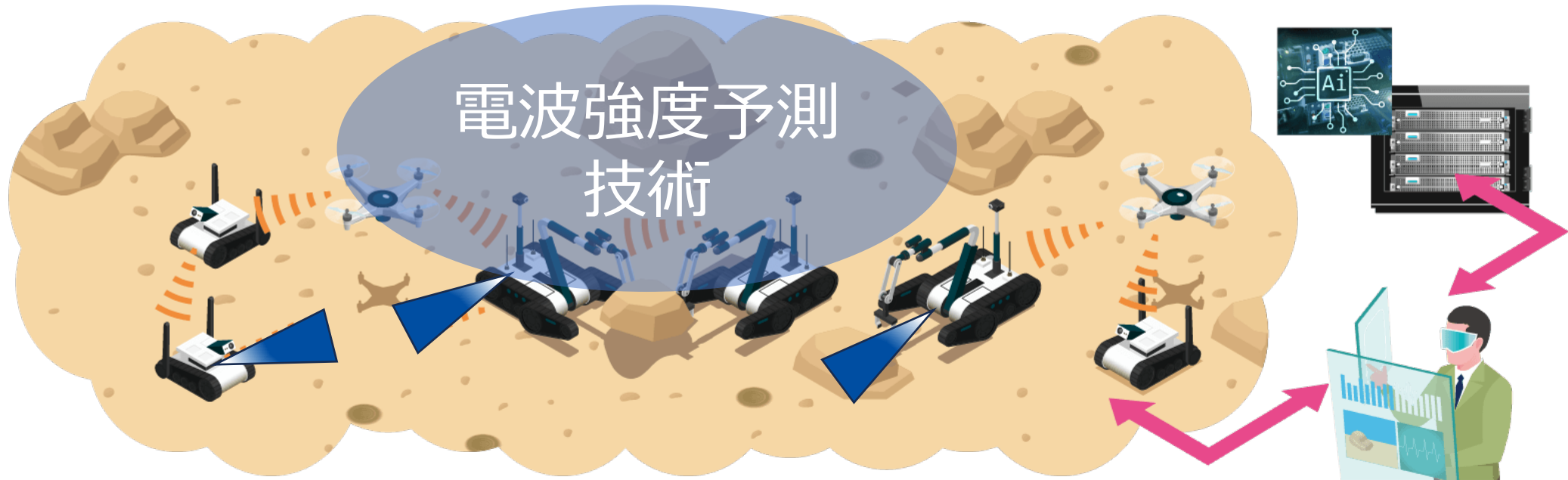
- Promoting open/interoperable interfaces and collaboration to foster innovation and avoid market fragmentation.

6GWS-250238, Chair's summary of the 3GPP workshop on 6G, March 2025より引用

電波強度予測技術



制御回線が途切れないよう、進む先の電波強度をリアルタイム予測



電波強度予測技術



・目的 **電波が見えるロボットを創りたい！**

ロボットが備えるカメラやライダー等のセンサを利用して、**ロボットの進む先（例えば1秒後）の電波強度を予測**し、制御回線が途切れないようにしたい。

・技術

- ・3D-ResNETを用いてカメラ映像から電波強度を予測（国際会議発表済）。
- ・カメラの他、LiDARを利用することで、明暗の変化があっても精度よく予測できる手法を考案し、実証済（IEEE論文誌出版済）。

・成果

- ・福島第一原発一号機モックアップ等で実証済（2.4GHz帯Wi-Fi及びsub-6 L5G帯）
- ・予測モデルのハードウェア化（FPGA）を実施。

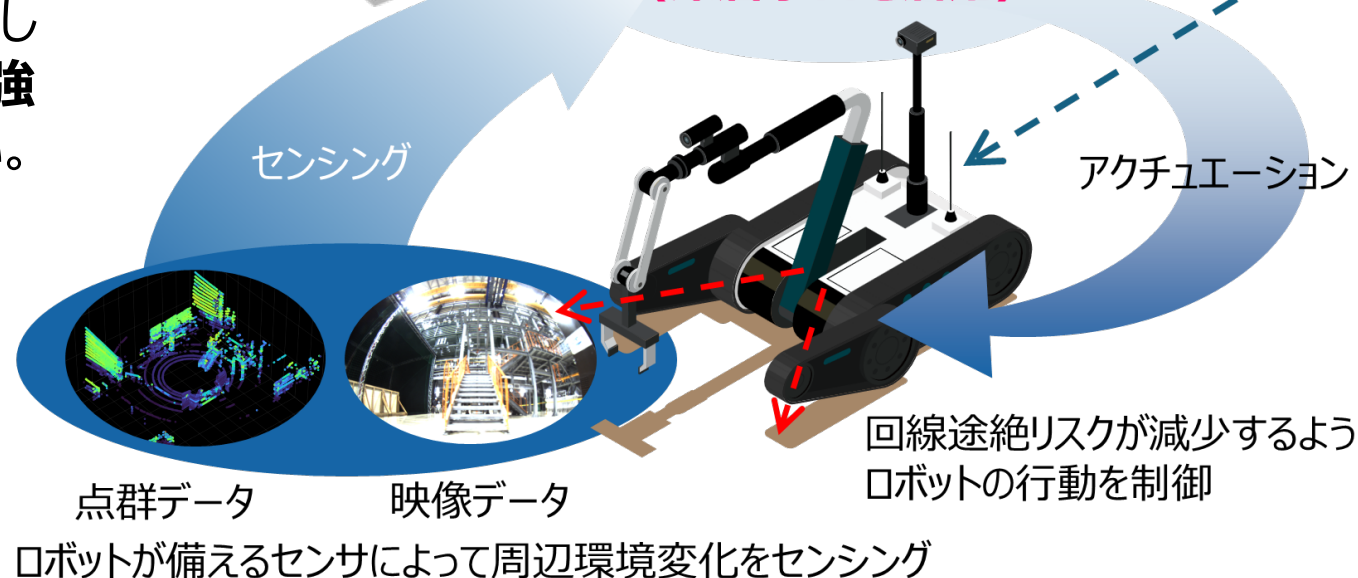
本研究開発成果の一部は、福島国際研究教育機構「困難環境下ロボット・ドローン活用促進に向けた研究開発事業」を含む。

トンネル内の電波強度分布
(シミュレーション, 2295MHz帯)

通信途絶リスクをリアルタイムで可視化

予測モデル
(**深層学習を活用**)

遠隔制御回線
(電波)



これまでに予測モデルを開発・実証した周波数帯

周波数帯	センサ	モデル
920MHz帯	カメラ、ライダ、IMU他	3D ResNET
2.4GHz帯	カメラ、ライダ	3D ResNET(+LSTM)
4.9GHz (L5G)	カメラ、ライダ	3D ResNET
60GHz帯	カメラ	3D ResNET+LSTM

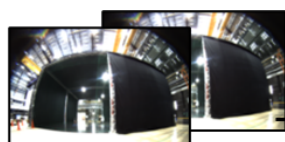
電波強度予測技術



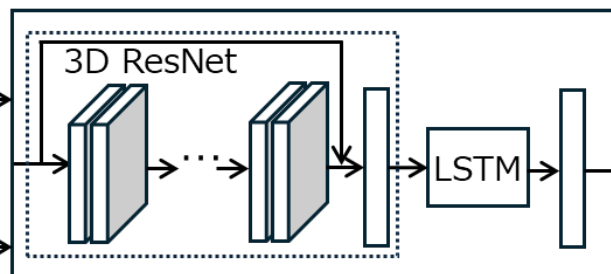
・実証実験の例

日本原子力研究開発機構福島第一原発一号機モックアップでの実験（2.4GHz帯Wi-Fiを利用）

実験用ロボット



ロボットのカメラで
取得した映像データ
制御回線の
電波強度履歴



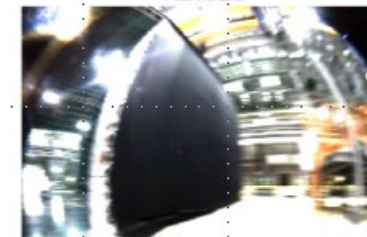
ロボットがそのまま
進んだ場合の
強度予測値
(例えば1秒先)

Imaging data acquired by robot. Sample number = 919 (Frame rate = 5 fps)

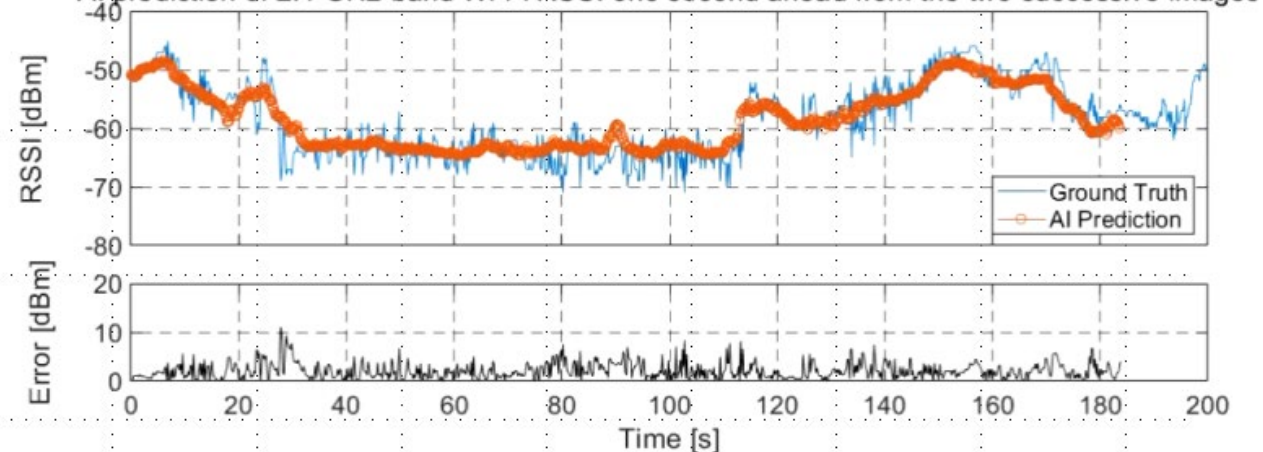
Frame 1/2



Frame 2/2



AI prediction of 2.4 GHz-band Wi-Fi RSSI one second ahead from the two successive images



量子アニーリングによる超多数接続



利用可能な周波数資源が限定されても通信を継続

周波数有効利用
技術
(量子デジタル統合)



量子アニーリングによる超多数接続



- **目的** 量子のチカラで無線通信をアップグレードしたい！

6G時代に求められる5Gを超える多数接続性の実現へ（特に上り回線）。

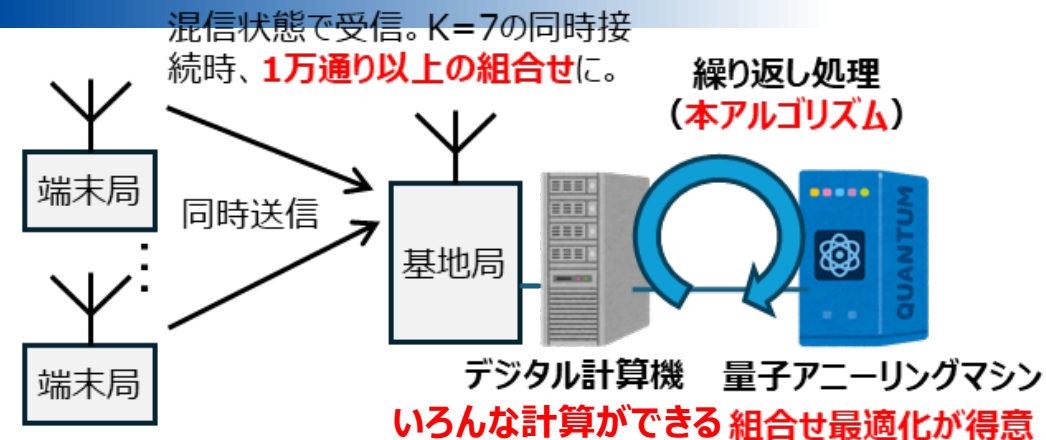
- **技術**

量子アニーリングマシンとデジタル計算機を併用するハイブリッド計算手法（組み合わせ最適化を量子アニーリングマシンで解く）を考案、周波数チャネル同時利用時の信号分離へ適用（特許出願済、IEEE論文誌採択済）

- **成果**

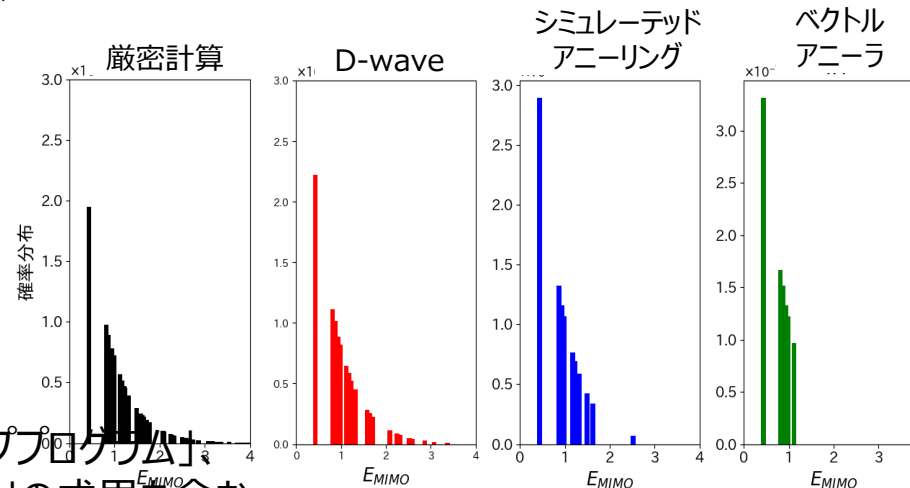
世界初の電波発射を伴った屋外通信実験によるオンライン処理での実証を完了し、プレスリリース済。5G NR信号を用いた実証も完了。

本研究開発成果の一部は、文科省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」、総務省からの受託研究「戦略的情報通信研究開発推進事業」の成果を含む



非直交多元接続における信号分離への適用

ポイント：量子アニーリングマシン（QA）を高速な「サンプラー」として用いて確率分布を精度よく近似



厳密計算

$$\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in Z} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$$

↓

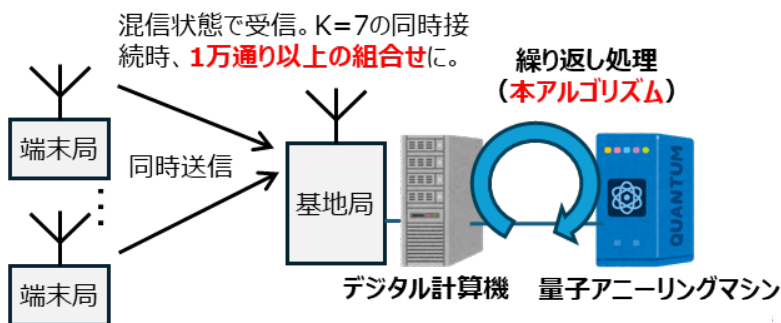
D-wave

$$\Pr[R|X] = \frac{e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}{\sum_{z \in Z_{QA}} e^{-\frac{E(z)}{N_0}}}$$

量子アニーリングによる超多数接続



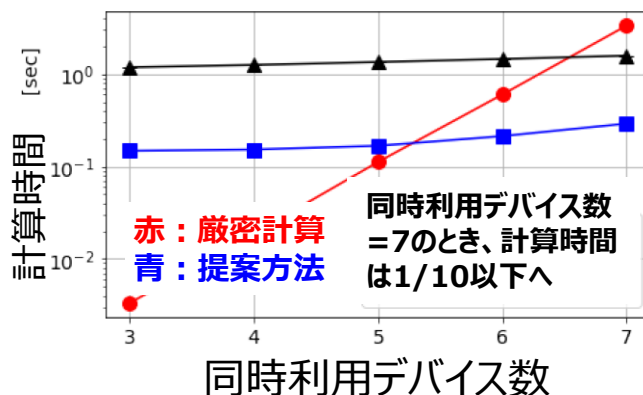
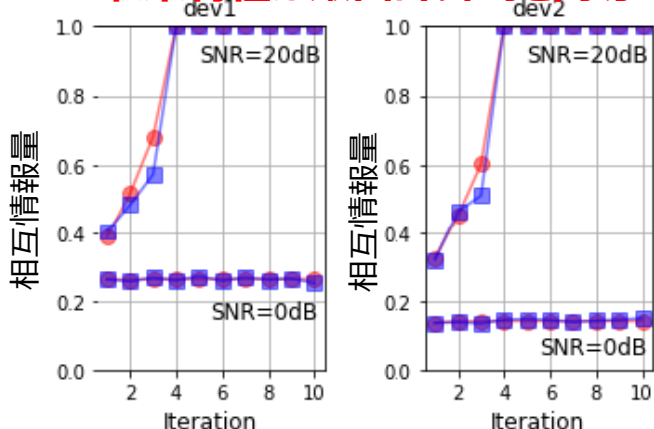
・ 実証実験の例



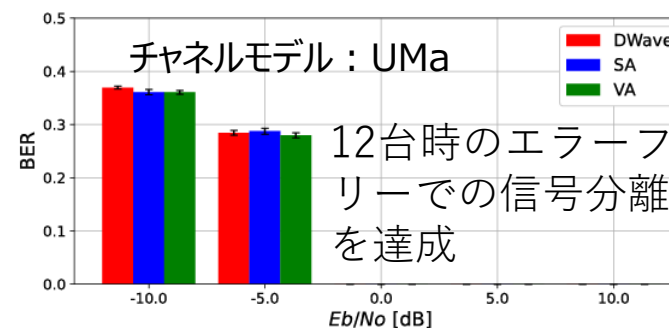
電波発射によるオンラインでの信号分離実証に成功 (プレスリリース、2022年)

収束特性は厳密計算時と同等

計算時間を1/10へ短縮



量子アニーリングマシン (D-wave) を利用した屋外実験



→5G NRを想定したMIMO-OFDM系での屋外実験において、提案手法は10台の信号検出に成功 (2GHz帯、SCS=15kHz、QPSK+5GNR LDPC)



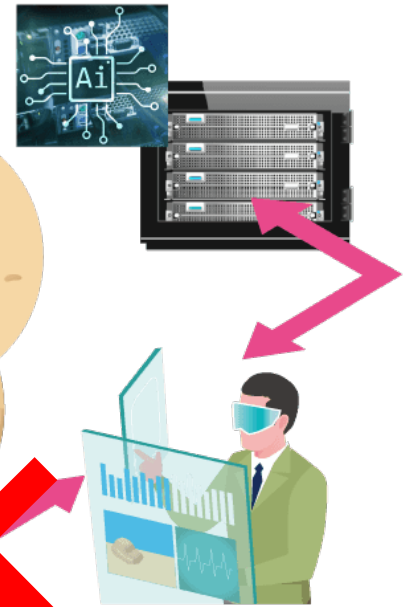
5G NR信号を利用した実験

文科省「光・量子飛躍フラッグシッププログラム」、総務省からの受託研究「戦略的情報通信研究開発推進事業」の成果を含む

エッジクラウド技術

クラウド回線が途切れてもノード間協調によって機能継続

エッジクラウド
技術



エッジクラウド技術

・ 目的

クラウドサーバへの通信回線が災害等で途絶した場合でも、エッジ側で接続可能な複数ノード間で自律制御を行うことで、クラウドサービスの継続利用を可能に。

・ 技術

接続可能なノードを自律で発見し、各ノードが持つリソースに応じて、サービスを構成する機能要素を分担させる**オーケストレーション機能**（特許出願済）。

・ 成果

- ・災害時情報共有システムへの応用として、内閣府SIP第3期を通じてシステム「X-ICS（クロスイクス）」を開発、災害実動機関による標準システムとしての活用をめざす。
- ・25年度中に群ロボット制御をユースケースとした実証を完了予定。

本研究開発成果の一部は、内閣府SIP第3期「スマート防災ネットワークの構築」の成果を含む

機関横断情報通信システム（X-ICS）の特長

- 複数の公衆通信網を**束ねて容量を最大化**し、広域での情報共有を可能とします。
- 公衆通信が利用できない状況下でも、可搬ノードを持ち運ぶことで、**同ノード間でバケツリレー式に情報を蓄積・運搬・共有**し、現場での情報共有を実現します。



災害時情報共有に向けたシステム（X-ICS）の概要

エッジクラウド技術

・災害実動機関によるシステム利用の例

みちのくALERT2024（宮城県石巻市）

（2024年11月16-17日） 主催：陸上自衛隊東北方面隊

- ・大規模災害の被災地で通信インフラが利用不可、**最前線システム（X-FACE）**で取得した災害情報を、**X-ICSでクラウドサーバ（SIP4D）まで転送し、実動機関等間で共有。**
- ・クラウドサーバで解析した津波遡上予測結果及び隊員の位置情報から、**X-ICSを介して、二次災害防止アラート**を隊員へ発報。



仙台駐屯地における合同実証（宮城県仙台市）

（2025年7月14-15日）

訓練参加機関：陸上自衛隊東北方面隊、陸上自衛隊教育訓練研究本部、仙台市消防局、黒川地域消防、仙台市立病院、宮城DMAT

- ・車両やドローン等に搭載可能な**小型・軽量のX-ICSを開発し**、通信インフラ利用不可の場所であっても、ドローン等が移動することで、**10km以上離れた活動現場と現地合同調整所間で情報共有を実証**
- ・**ローカル5GによるX-ICS同士の接続・データ同期、共有を実証**



2. ICTで社会をレジリエントに

2. ICTで社会をレジリエントに

ユースケース例：カメラや各種センサを利用した自然災害発生の検知

自然環境計測可視化・解析



環境計測センサ群情報収集



- 1. 自然環境計測可視化・解析**：汎用カメラで撮影した映像やインフラスウンド波形（可聴域よりも低い周波数の音波）を解析することで、自然災害の発生（規模・場所など）を検知。
- 2. 環境計測センサ群情報収集**：商用電源や公衆網（携帯電話）が届かない場所に設置された自然環境計測センサで取得したデータを効率よく確実に処理・解析を行う場所へ収集。

“インフラサウンド”

- 目的：津波の早期検知に向けて

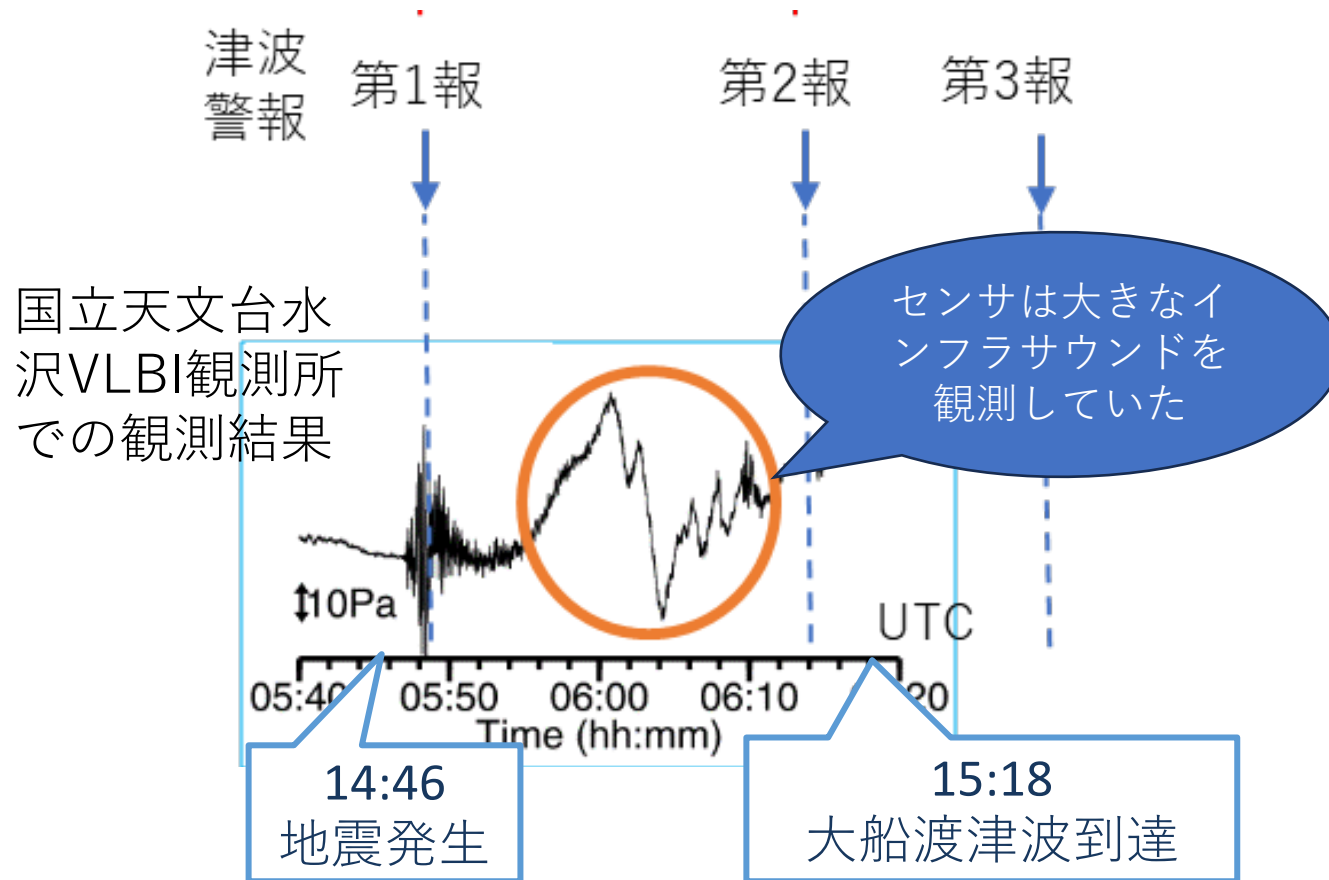


周波数が20 Hzよりも低い音



インフラサウンドは津波よりも早く伝搬
→実際の津波発生をいち早く知らせられる可能性

過去の観測結果（2011年3月11日）



災害検出のための新たな情報源へ

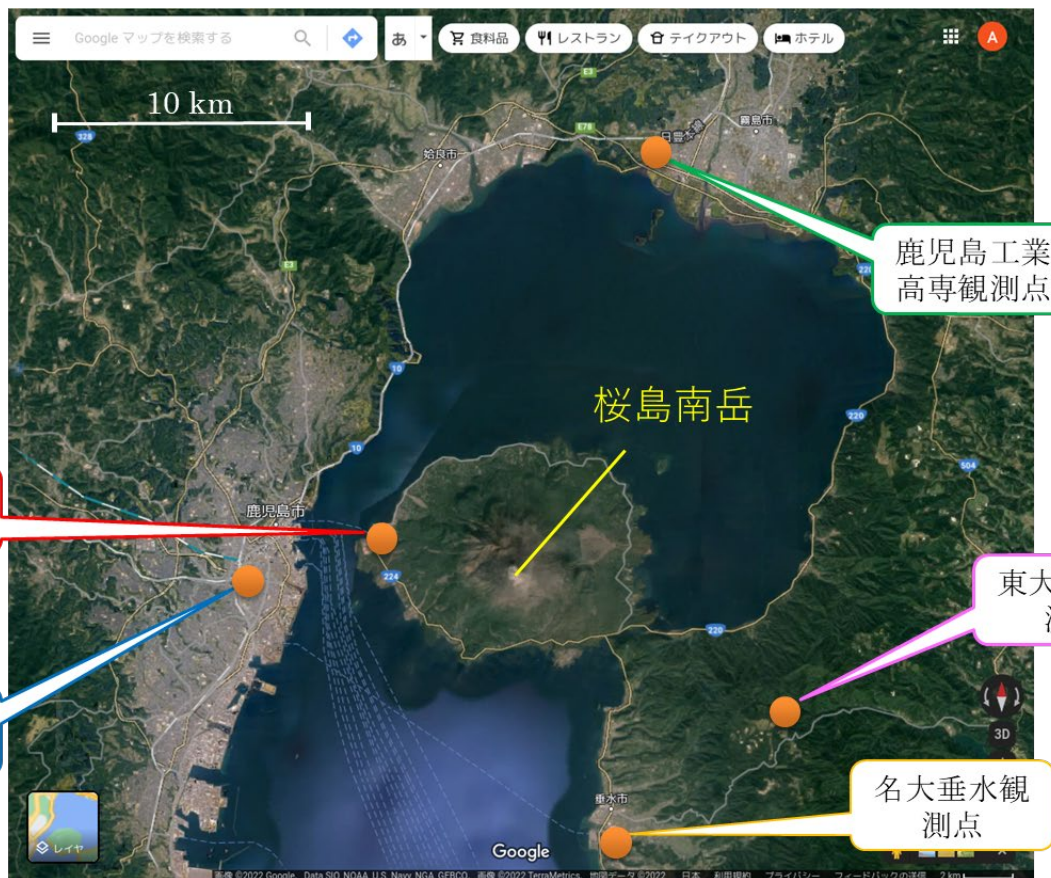
- # 開発センサ
- 
- The image shows a custom-built sensor module housed in a clear plastic enclosure. The module features a green PCB with various components, including a microcontroller, a sensor chip, and several resistors. A coin is placed next to the enclosure for scale.



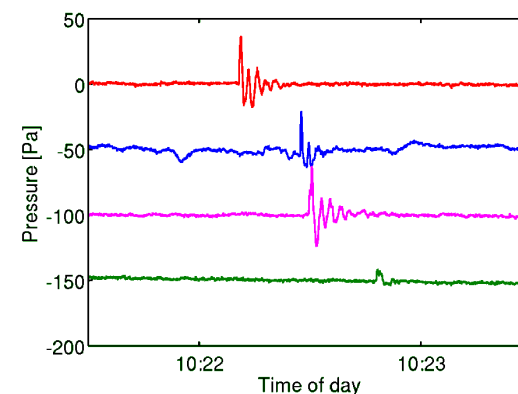
一部を日本気象協会「インフラサウンド・モニタリング・ネットワーク」を通して一般公開

“インフラサウンド”

• 火山噴火による音源位置の推定



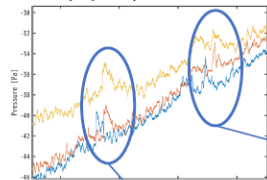
各計測地点での波形
• 計測地点間の伝搬時間差から音源位置を推定すると、桜島の南岳の位置になる



“インフラサウンド”

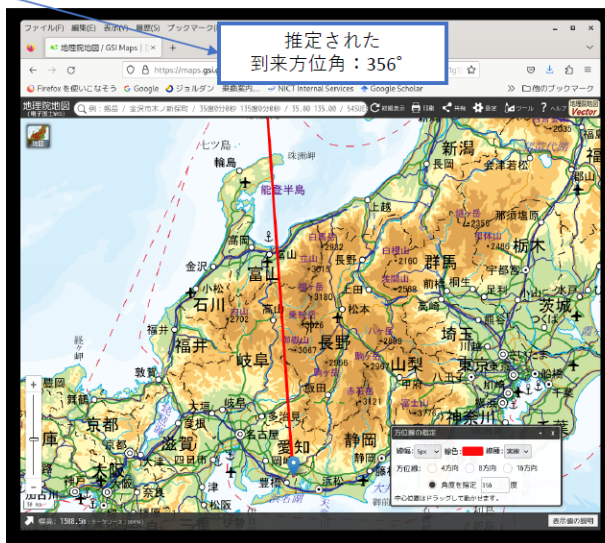
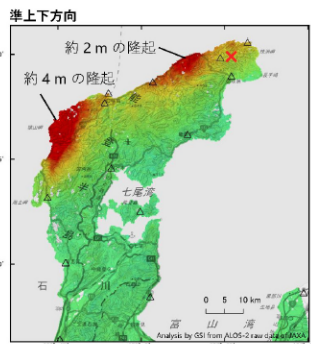
• 地震・津波の発生位置推定に向けて 能登半島地震

愛知でのインフラサウンド
観測データ

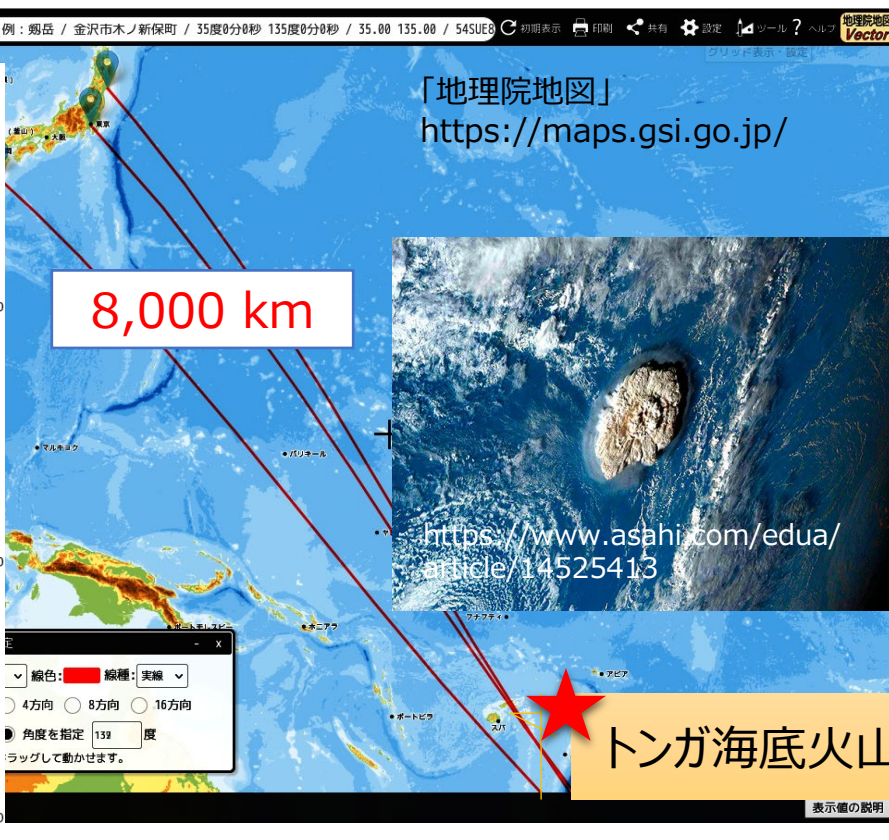
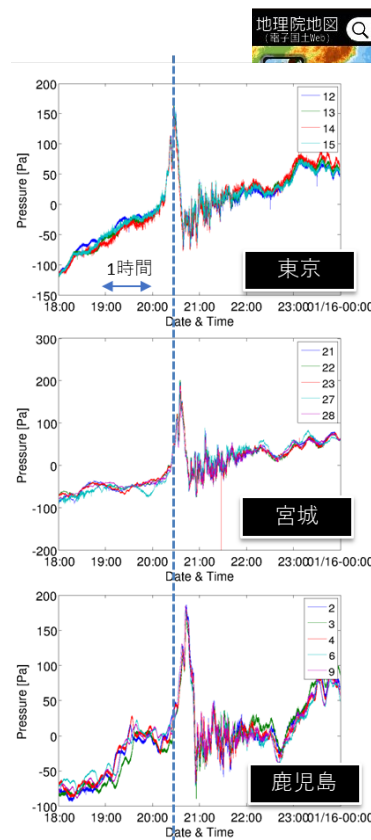


地震調査委員会「令和6年能登半島地震の評価（令和6年2月9日公表）」から抜粋

「だいち2号」による衛星観測データ（暫定値）



トンガ海底火山噴火



「地理院地図」
<https://maps.gsi.go.jp/>

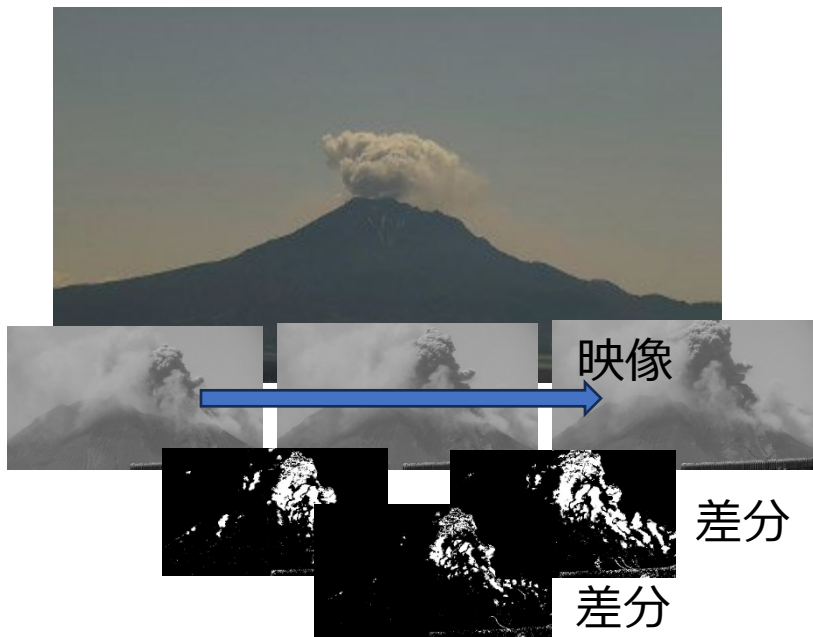
<https://www.asahi.com/edu/article/14525413>

トンガ海底火山

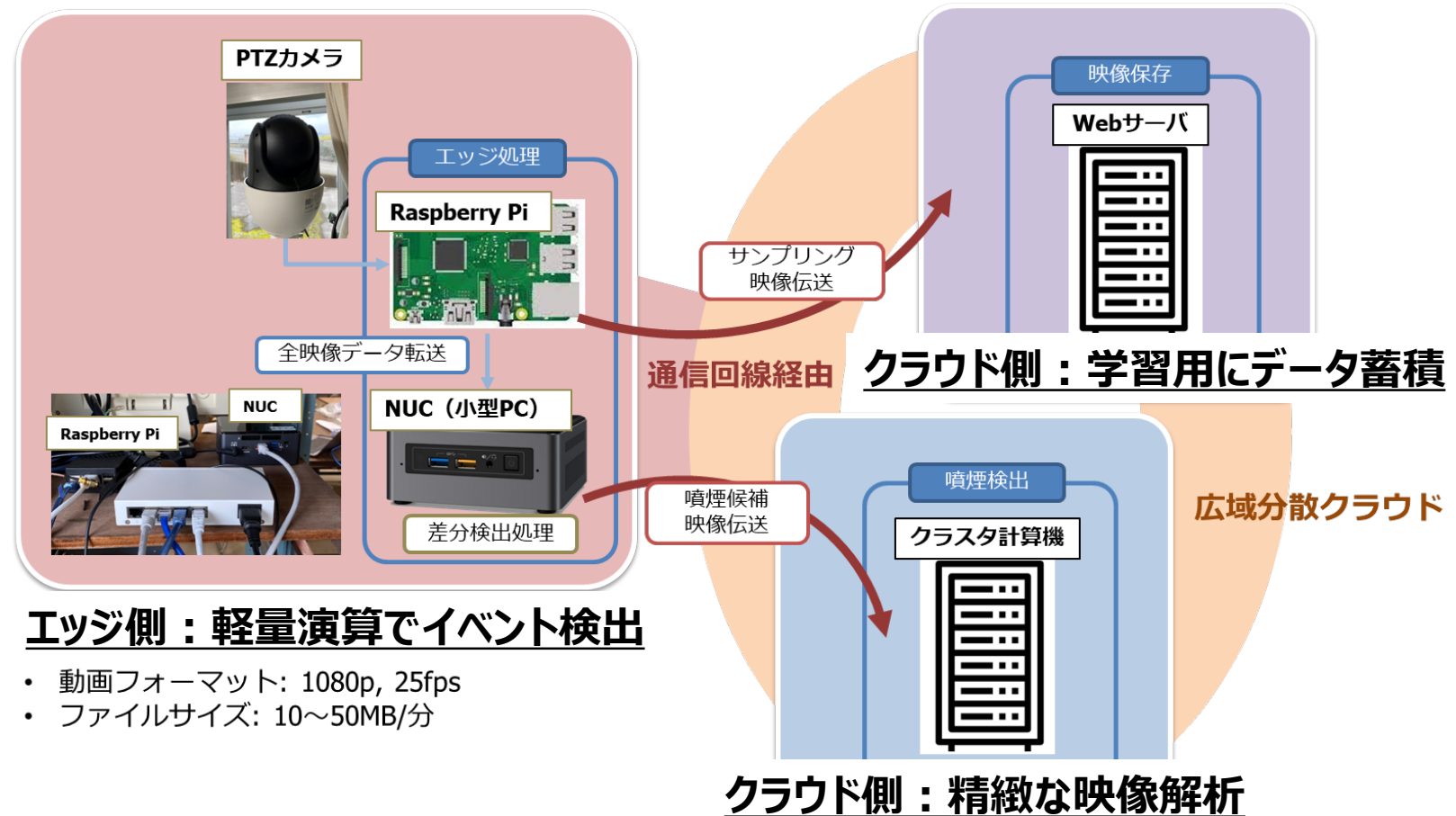
映像解析技術

- 目的：汎用ネットワークカメラで撮影した映像を解析、自然現象の変化を検知
- 技術：エッジ・クラウド連携処理

例：火山噴火の検知



方法：カメラ側（エッジ側）で実装可能な軽量演算でイベント検出を行うことで、エッジ・クラウド間のトラヒックを軽減。



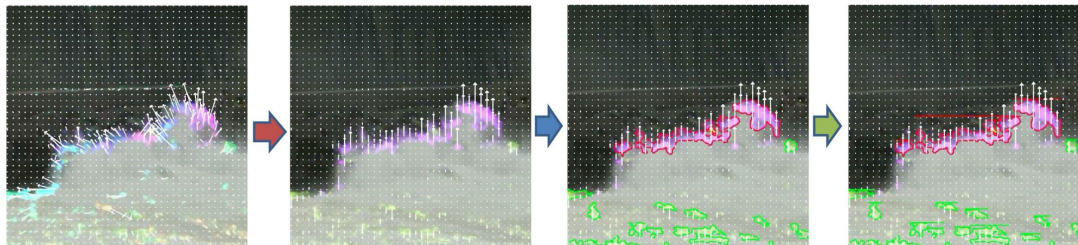
映像解析技術

1. 煙検出

- 動きベクトルの特徴解析による煙検出。
- 総務省「地域社会DX推進パッケージ事業」を共同受託し、仙台市における実証に向けて準備中。
 - 火災の早期検知に向けた煙検出の他、鳥獣検出も実施予定。

2. 波浪打ち上げ高を推定

- 動きベクトルの特徴解析で波高リアルタイム計測。
- 国土交通省北陸地方整備局「革新的河川技術事業」を受託し、富山県で実証済。



y軸方向のみ

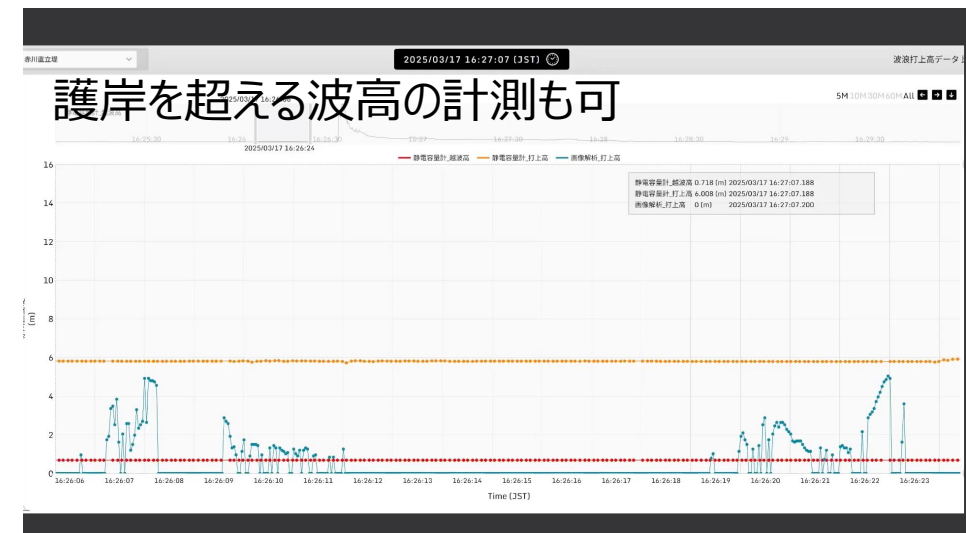
領域を抽出

ピークを検出

10ピクセル×10ピクセル程度の煙も検知可



護岸を超える波高の計測も可



電源自立観測システム開発

・宮崎県霧島硫黄山での運用試験



- ・ 1分毎に静止画を自動更新
- ・ 夜間も月光による白黒映像

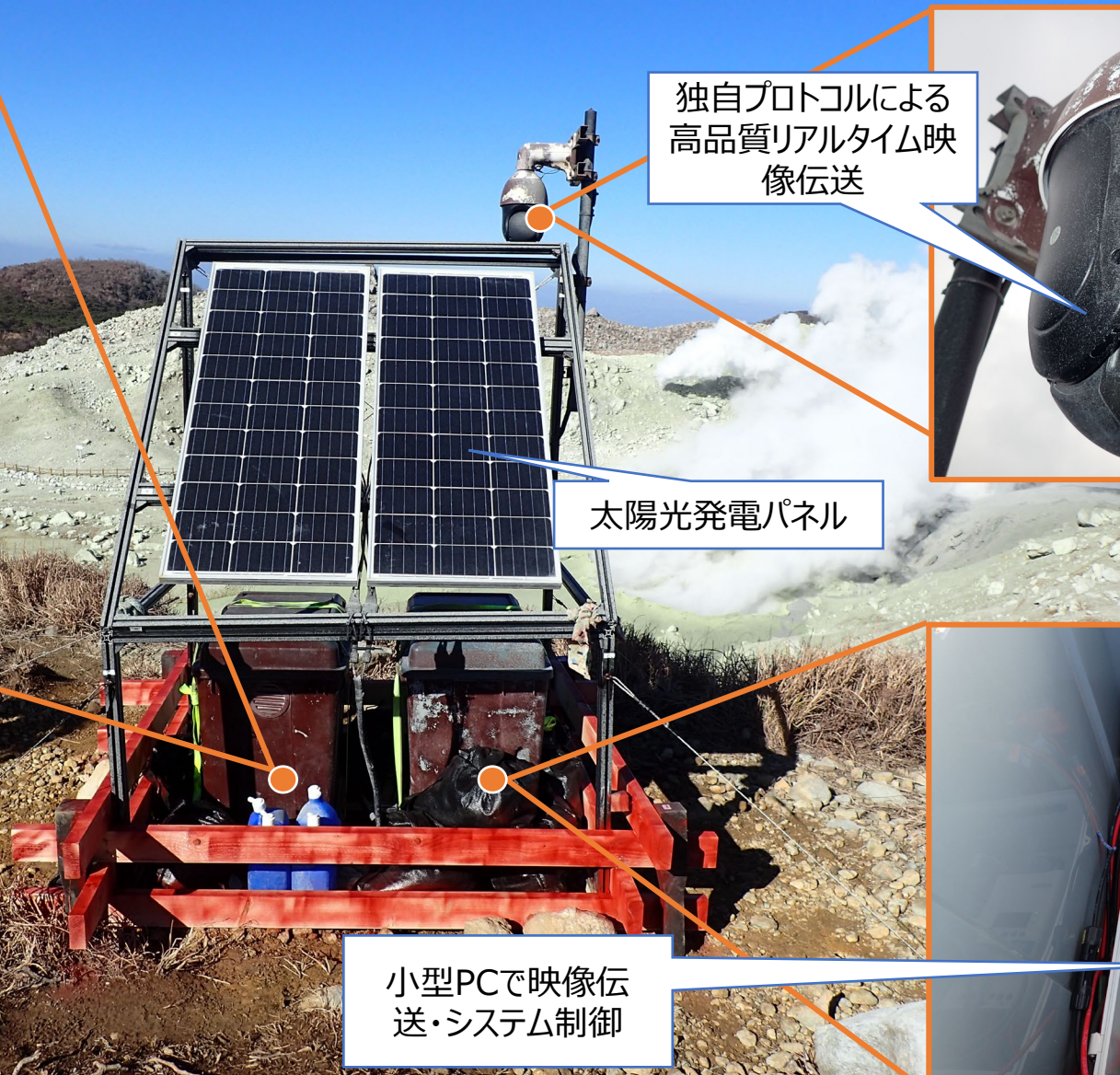


自治体（えびの市）が主催した火山防災訓練における映像活用

電源自立観測システム開発



DMFC (メタノール燃料電池)による電力バックアップ



独自プロトコルによる
高品質リアルタイム映像伝送

太陽光発電パネル

小型PCで映像伝送・システム制御



宮崎県硫黄山火口付近
でのフィールド試験

おわりに

今日この日が、未来へつながる“共創の出会い”のはじまりとなりますように。

無線ネットワークのレジリエンシー向上

通信環境の急変（電波強度、ネットワーク構成等）に対応



ICTによる社会のレジリエンシー向上

自然現象等（噴火、津波発生等）の急変を検知



ありがとうございました