

# タフなロボット技術の研究開発

---

田所 諭

東北大学

タフ・サイバーフィジカルAI研究センター

大学院情報科学研究科

災害科学国際研究所

国際レスキューシステム研究機構



# 東北大学タフ・サイバーフィジカルAI研究センター (TCPAI)

## Society 5.0を実現し、新たな未来社会Society 5.1へ導く

- タフ・サイバーフィジカルAIによる**新たな価値創造**
- 生産性及び競争力の向上、エネルギー、環境、災害、インフラ老朽化、高齢化など**社会の課題解決**

## 社会や産業のニーズを共に解決する「**タフ・サイバーフィジカルAI研究センター**」を設立

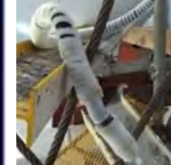
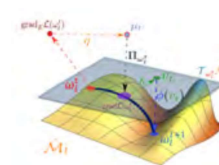
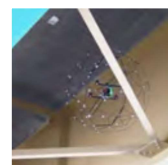
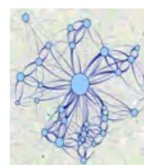
### 東北大学の強み ▶▶ **タフ・サイバーフィジカルAI**

じょうらん

**タフネスとは**：実世界で稼働するAIは、無限定で様々な擾乱に晒された環境下で、サイバーフィジカルな“身体性”を以って実世界と関わる。また、“身体”の有限性から、取得できるデータ規模、定常性、品質などに制約を受けることになる。このような過酷な条件下で安定に高信頼で動作するロバスト性や柔軟性と適応性、そして広い適用性を**タフ**と呼ぶ。



- ・実世界の無限定環境で安定に稼働するロボティクス（災害ロボティクス、極限ロボティクス）
- ・AI（言語化／非言語化、構造化／非構造化、少数例からの学習、説明可能性）
- ・スピントロニクスに基づくAI計算モジュール（低電力消費型、高速演算、セキュアな計算）
- ・交通・インフラにおける多元的データに基づく災害時などの非日常の検出と制御



### タフ・サイバーフィジカルAI研究開発と社会実装

- パートナーとの共同による**根本的課題解決と新事業創出**
- 実用化研究開発・実証試験と、基盤研究の両輪
- 課題の分析とモデリング、グラウンディング

### 社会との協働，課題への取組

- 法制度（個人情報、安全性等）の整備
- AI・ロボット活用の倫理
- **投資を生み、人材が育ち、産業が花開く、圃場の整備**

#### 実証フィールド

学内、福島県、高速道路、橋梁等

#### 産業界

製造業、通信業、交通事業者等

#### 自治体

仙台市、宮城県及び隣接自治体

#### 他機関

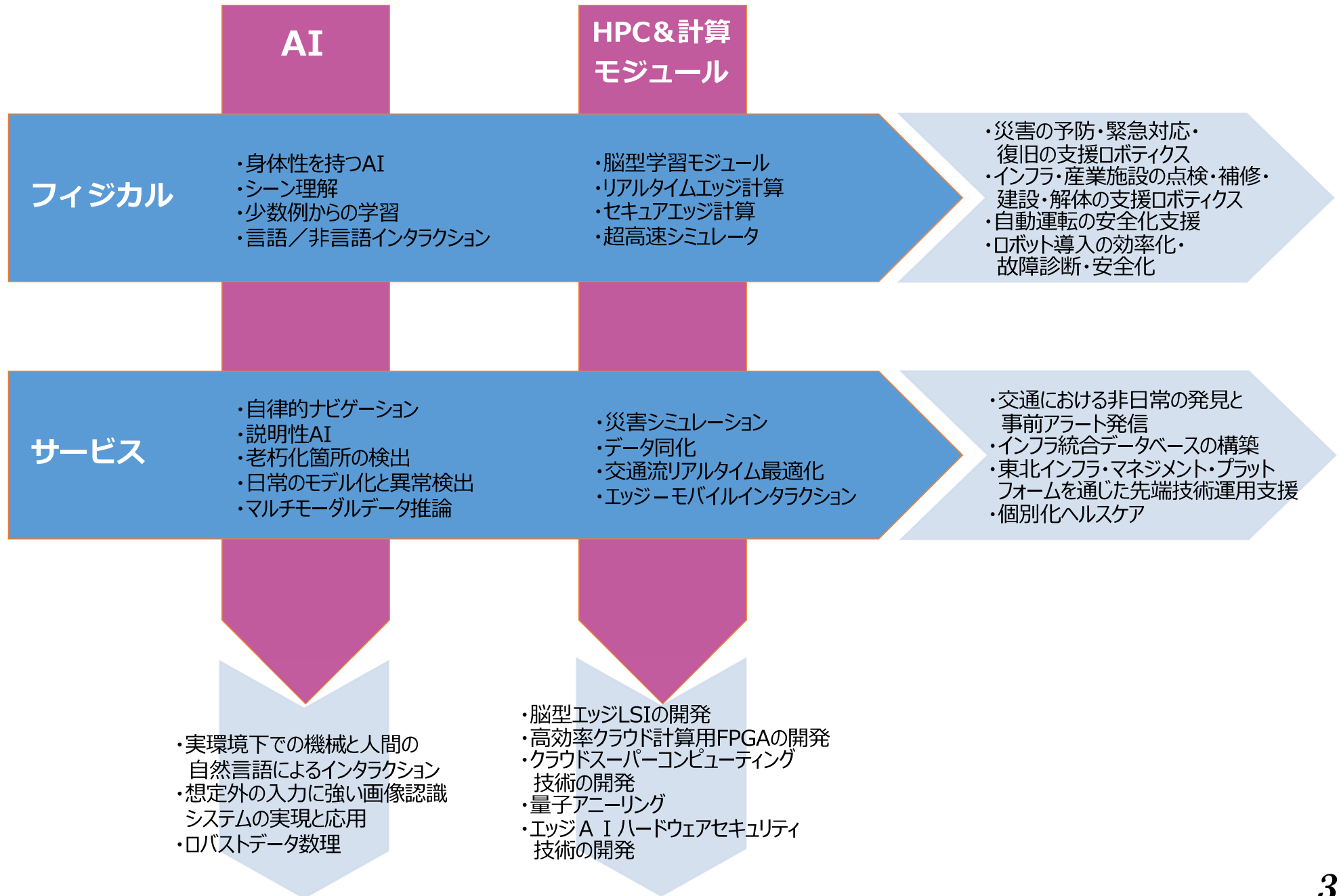
総務省、JAXA、国土交通省等

**産業とアカデミアが共同で課題解決に取組み、人材育成、新たな価値創造を行うオープンイノベーションHub**

**わが国の社会課題・産業課題の解決と国際競争力強化**



# マトリクス統合体制





# 東北大実績：実証的ロボット研究

- 自動運転や交通システムの安全化、災害への対応や復旧、インフラ・建物・産業施設の建設・点検・補修、等に重要となる、情報化やロボットの知能化。
- ビッグデータ処理や機械学習によるセンシング情報の解釈。
- ロボットの行動計画の最適化や自動化を実現。

(自動車市場175兆円)



(a) 疾病患者運転支援  
(仙台市特区実証試験)

(b) 工場屋外搬送自動化  
(トヨタ東日本岩手工場)

(インフラメンテ市場200兆円)



(a) 狭隘箇所点検調査ロボ  
(福島原発使用)

(b) 橋梁点検球殻ドローン  
(国交省実証試験)

## 自動運転の安全化



(a) 災害対応ロボ  
Quince  
(福島原発使用)

(b) 消火ホースロボ  
Dragon Firefighter  
(福島ロボットテストフィールド実証試験)

(c) 柔軟ドラえもんハンド  
Omni-Gripper

## 産業施設・インフラを点検するロボット



(d) 遠隔モニタリング制御  
サイバー救助犬  
(日本救助犬協会と訓練)

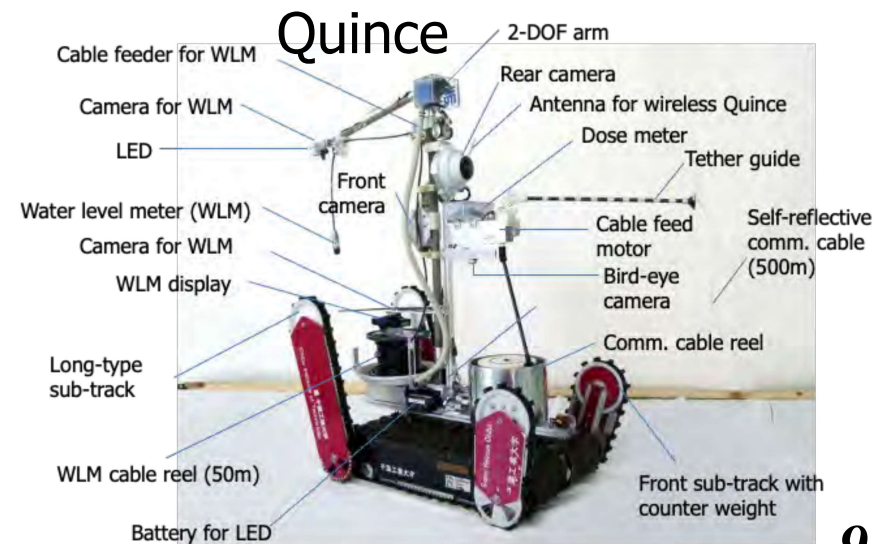
(e) プラント大規模消火ロボ  
ドラゴンハイパー・コマンドユニット  
(総務省消防庁)

## 災害対応や復旧を支援するロボット

(災害被害総額35兆円, 2017)

# 災害救助におけるロボットの役割

- ロボットの役割  
「遠隔自律機能により、人間の仕事を代替することによって、困難な仕事を可能にする」
- ロボットが有効な場面：人間のための道具として
  - 人間では不可能な作業を遂行（飛行、狭隘部、繰り返し作業）
  - リスクが高い状況での作業遂行（汚染、感染、高所、狭所）
  - 効率的に、短時間で、低コストで、作業遂行（自動化）



# 瓦礫からの救助のプロセス

- 1) 被災者が残されていることを覚知する
- 2) 災害状況の把握
- 3) 活動の計画
- 4) 搜索と情報収集
- 5) 瓦礫の掘削
- 6) 被災者の体の確保
- 7) 緊急医療
- 8) 医療機関への搬送
- 9) 活動の報告

# 災害の様相の変化



## 【災害予防】

補修・点検・  
整備・教育・  
想定訓練・  
安全規格

## 【緊急対応】

消火・沈静化・  
人命救助・医療・  
緊急工事・交通・  
避難・安否確認

## 【災害復旧】

復旧工事・修理・  
ロジスティクス・  
水食料・排泄・健康・  
被災者ケア・避難所

# 災害対応ロボット

予防: 狭所の点検

緊急: 上空・瓦礫内で被災者発見

復旧: 土砂ダムの調査・工事

予防: 高所の点検

緊急: 原発建屋内の調査

復旧: 無人化施工

人間では不可能・限界

人間では危険

災害ロボットは減災の切り札

迅速性向上, コスト低減

2つの用途

- 情報収集
- 作業遂行

予防: 足場不要・点検調査の自動マッピング

緊急: 広域自動調査

復旧: 足場不要・点検・調査



# 情報収集ドローン技術

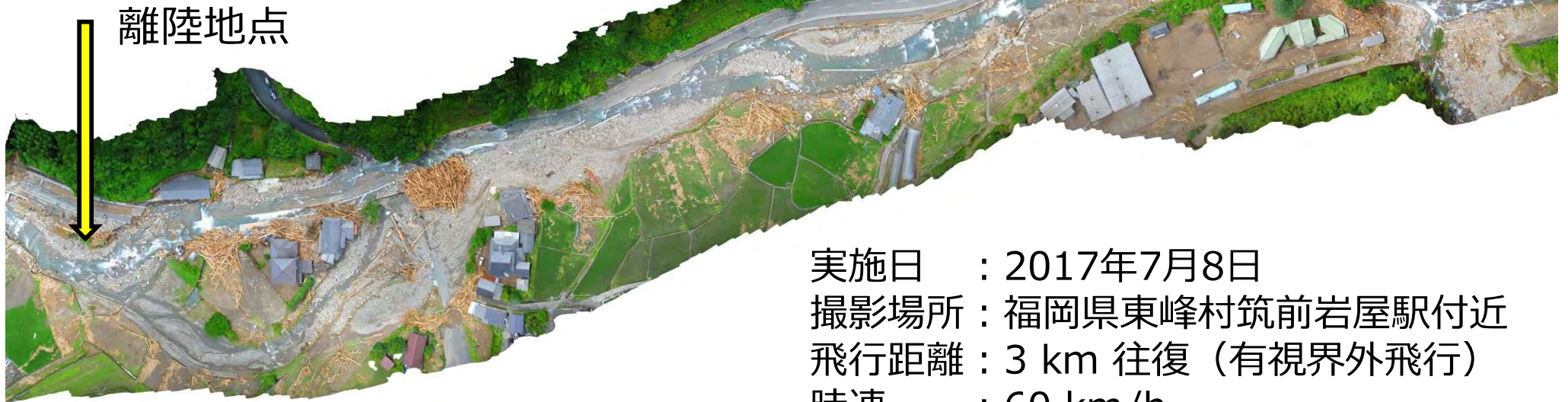








静止画像 5,000枚 (8 fps)  
作成したオルソ画像 (部分)  
解像度 : 2 cm/pixel



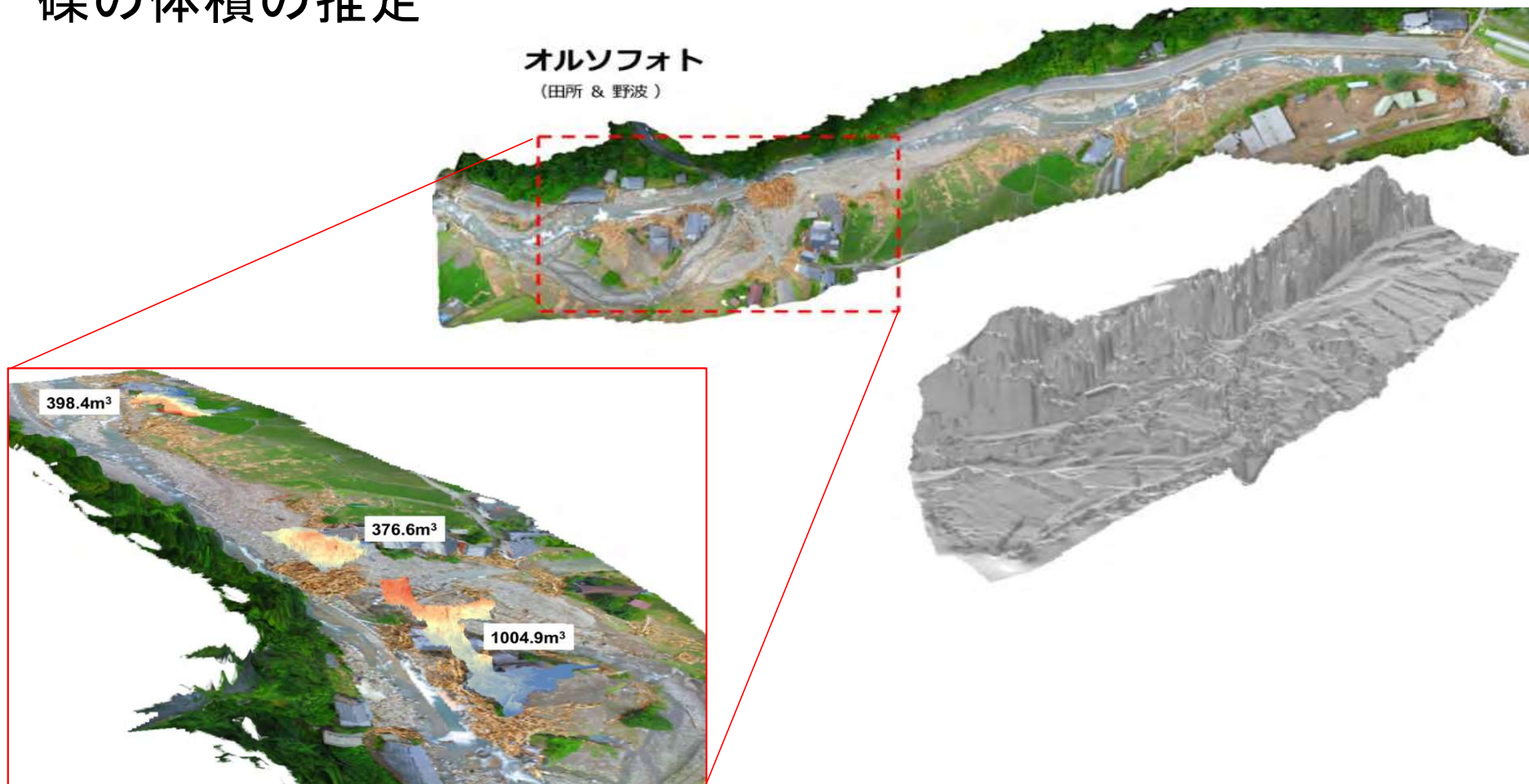
実施日 : 2017年7月8日  
撮影場所 : 福岡県東峰村筑前岩屋駅付近  
飛行距離 : 3 km 往復 (有視界外飛行)  
時速 : 60 km/h  
飛行時間 : 7 min

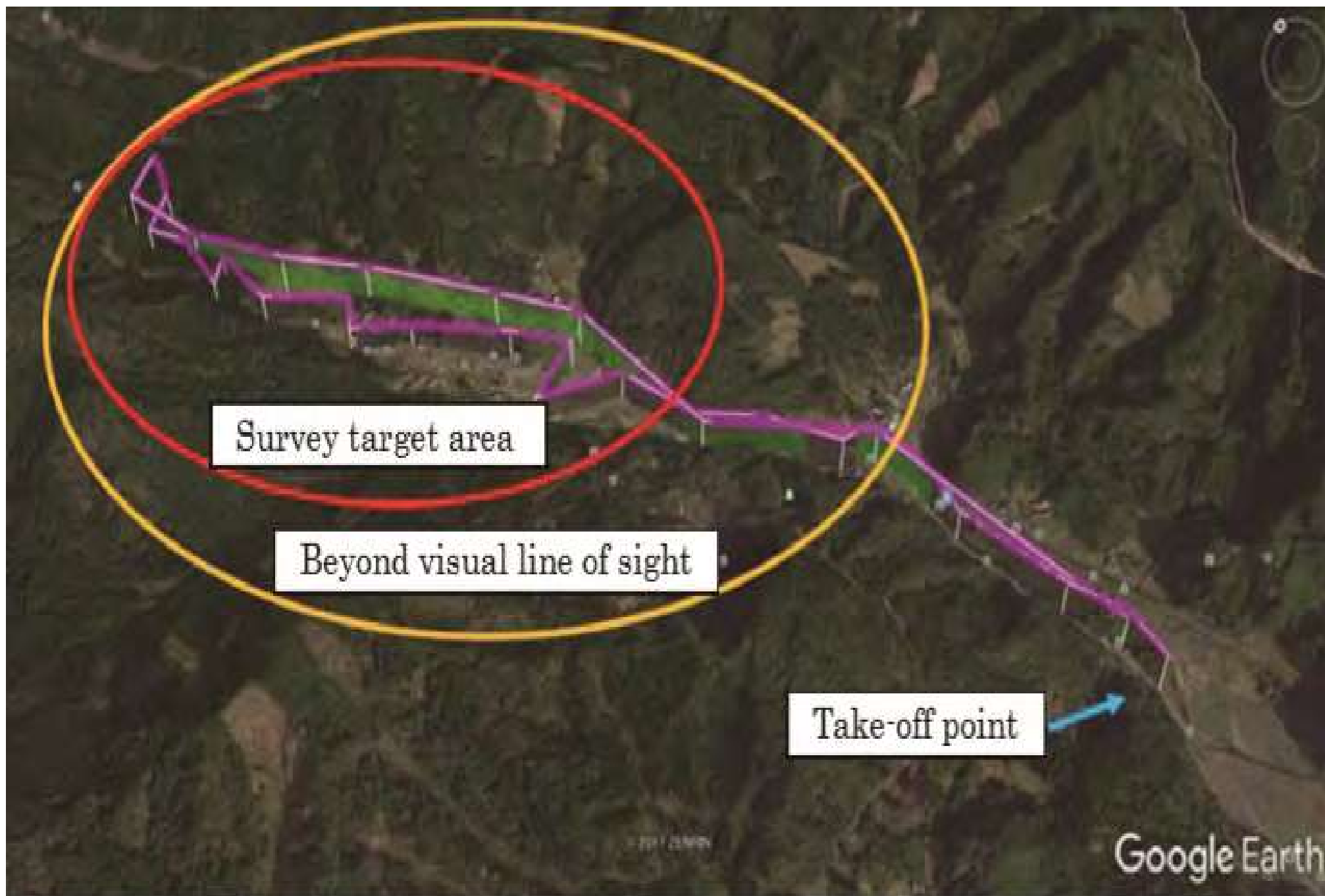
### <成果>

- 福岡県東峰村に入り, ドローンで上空から情報収集
- 総務省消防庁, 内閣府, 福岡県, 防災科研, 他に, データを提供
- データクオリティ, ドローン性能が, 現地ニーズに十分なことがわかった.
- 配備の必要性とともに, 種々の問題点が明らかになった.  
(目視外, 飛行位置共有, 架線データ, 支援機能, 収集情報共有システム)

## 【九州北部豪雨被災地のデータ検証】

平成29年7月九州北部豪雨被災地において撮像された画像から、Structure from Motion (SfM) による3次元地図作成、瓦礫の抽出、瓦礫の体積の推定







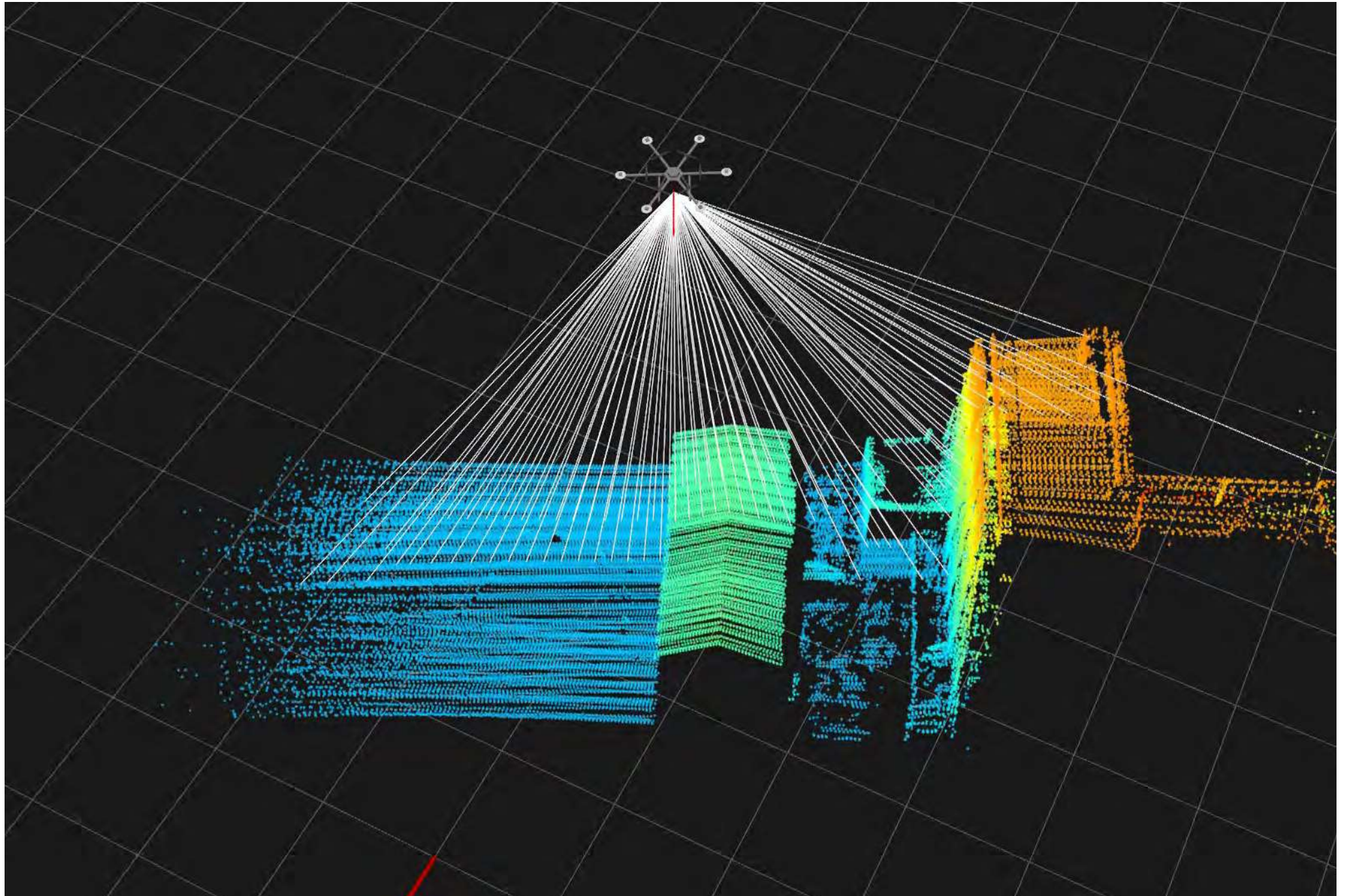
目視外飛行の準備、離着陸

有人ヘリ





# ImPACT-TRC 3D Mapping using LiDAR and GNSS



# Remote Sound Source Exploration

[Nakadai, TITECH; Kumon, Kumamoto U; Okuno, Waseda U]

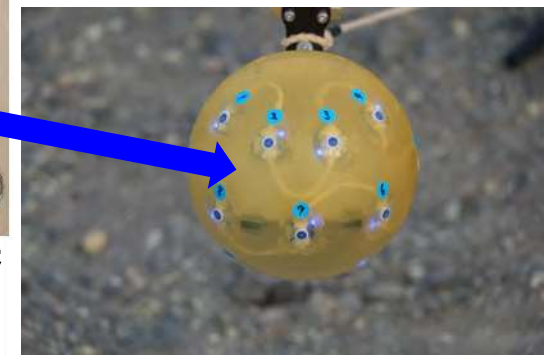
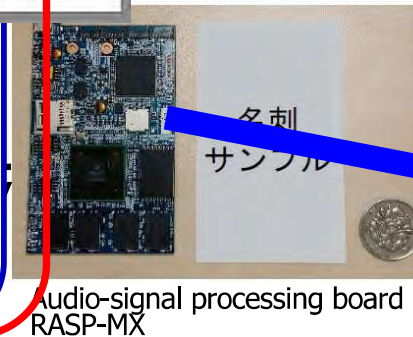
Drone with a remote robot-audition technology to detect/identify human voice under significant noise, which provides an efficient method to search survivors in need of help.

Multicopter helicopter with a microphone array



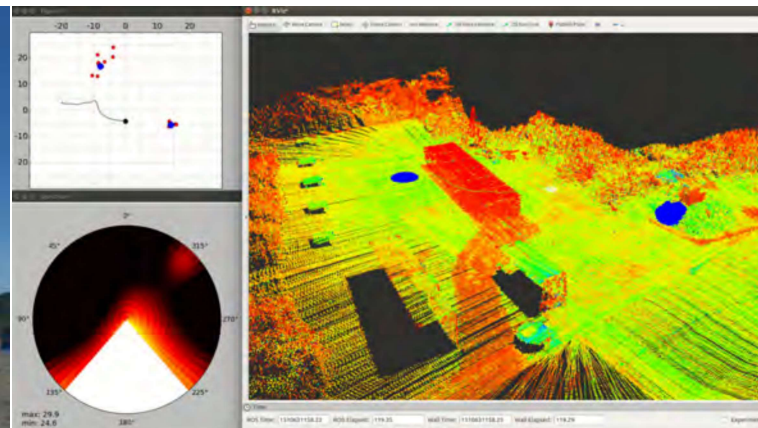
## Keytechnology.

- Integration of sound source localization/separation and sound source identification using deep learning techniques
- Embedded acoustic signal processing system; (Embedded HARK)
- Robust wide-range 3D localization



16ch Microphone-array with an embedded audio signal processing system (RASP-MX)

Sound sources on the ground are localized and displayed on a pointcloud map in realtime (blue dots show the positions of targets). Sensory information is transmitted via ToughWireless technology to GCS.



プロペラの後縁部に適切な形状・配置の構造を付与し、空力性能の低減を抑制しつつ、騒音抑制を実現  
 更にカーボン一体型のプロペラを作製 従来型のプロペラと比較し、8.1dBの騒音低減を実現



PF1, ACSL

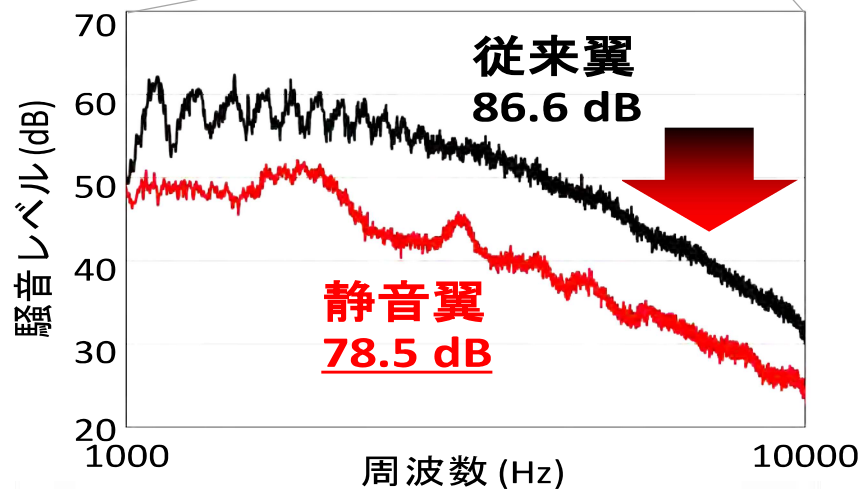
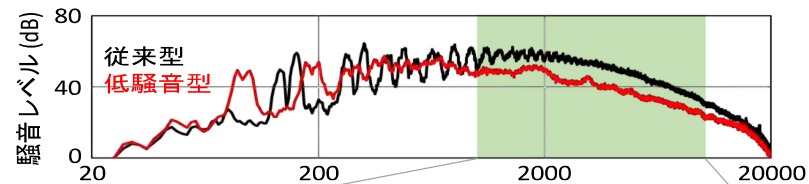
- ・ 本体重量 : 3 [kg]
- ・ プロペラ直径 : 38 [cm]



従来翼 : 86.6 dB  
 静音翼 : 78.5 dB

**8.1 dB 改善**

カーボン一体型の低騒音翼

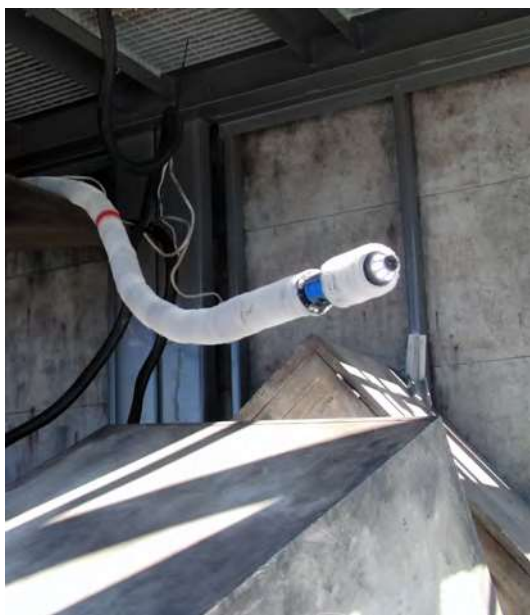


従来翼

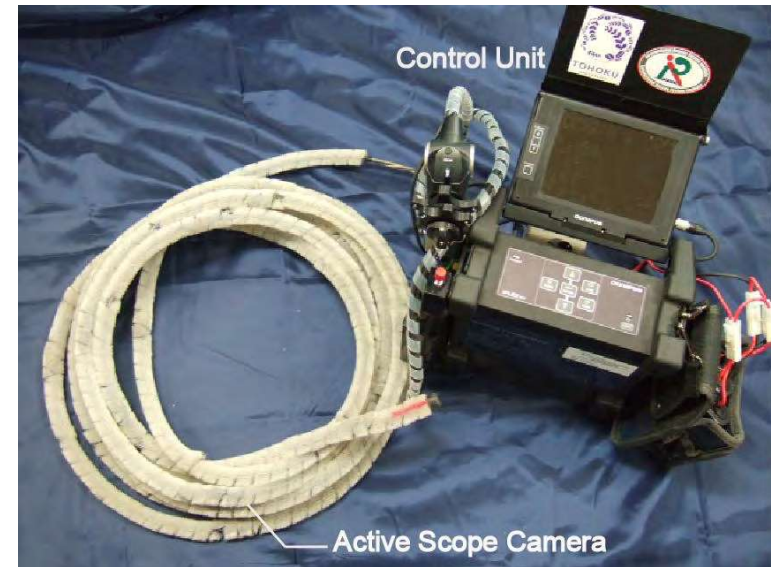
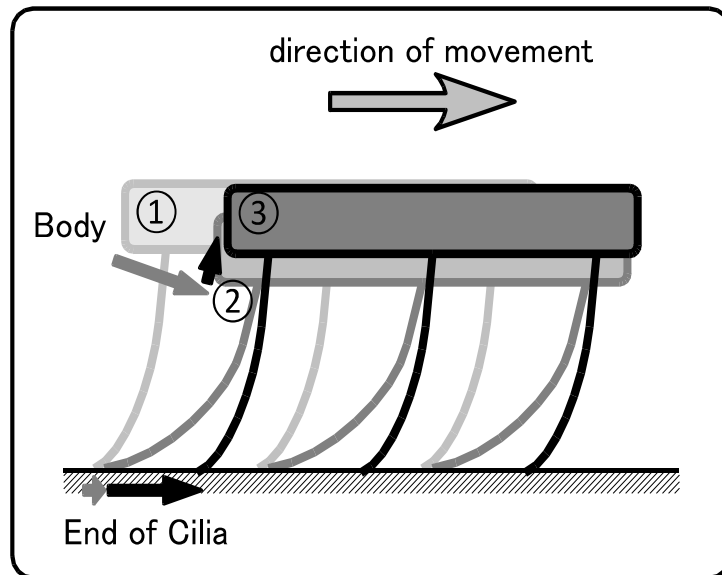


静音翼

# 瓦礫内搜索用ヘビ型ロボット 能動スコープカメラ



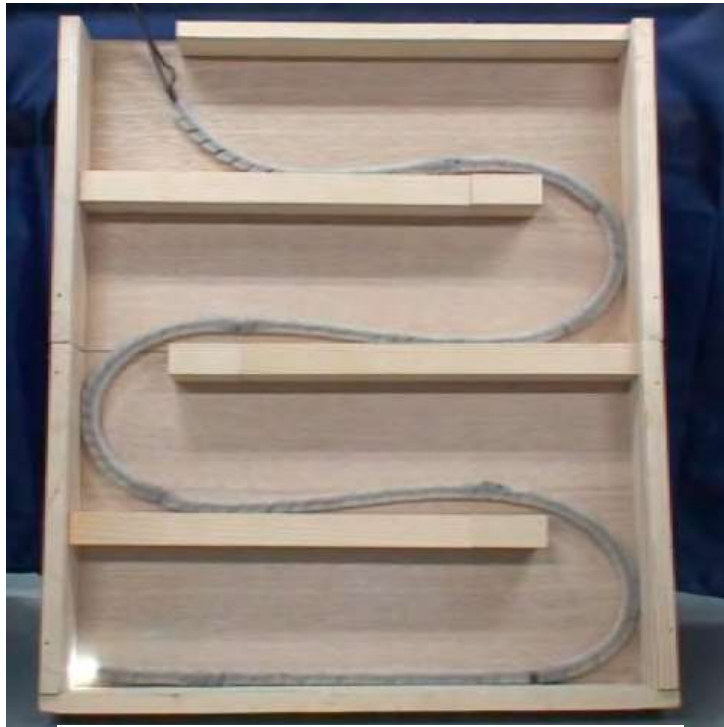
# 瓦礫内狭隘空間探査ロボ：能動スコープカメラ



分布型繊毛振動駆動機構による動作

ねじりによる方向転換

# 瓦礫内狭隘空間探査ロボ: 能動スコープカメラ



能動スコープカメラ ×3



通常の工業用ビデオスコープ ×3

- 分布型繊維毛振動駆動機構により, 自走して, 数cmの隙間に進入
- 屈曲部が多数あっても, つかえずに, 奥まで進入できる
  - 経産省「今年のロボット」大賞優秀賞受賞, 2008
  - 消防庁長官賞最優秀賞受賞, 2008

# 駐車場建設現場倒壊事故



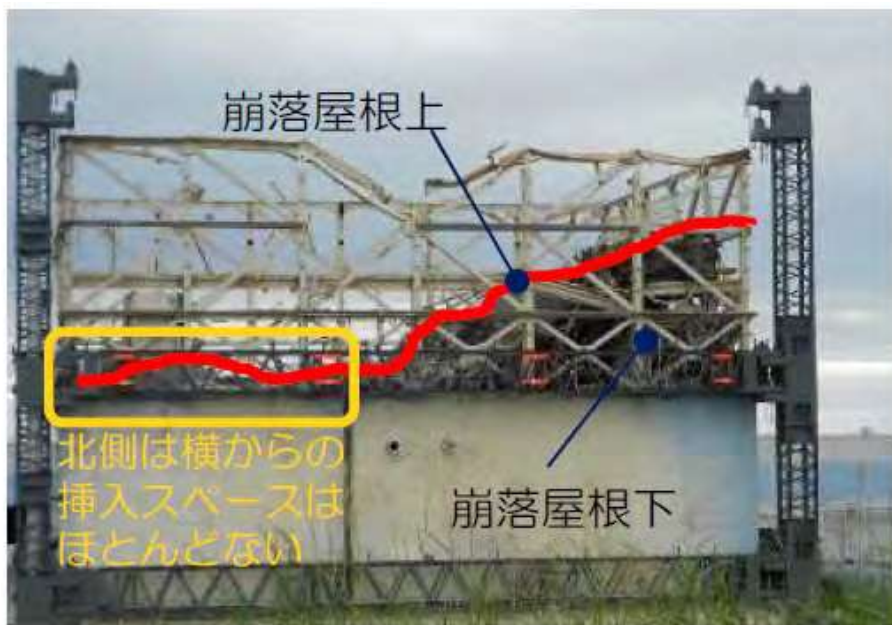
建物倒壊原因調査  
(米国 Jacksonville)



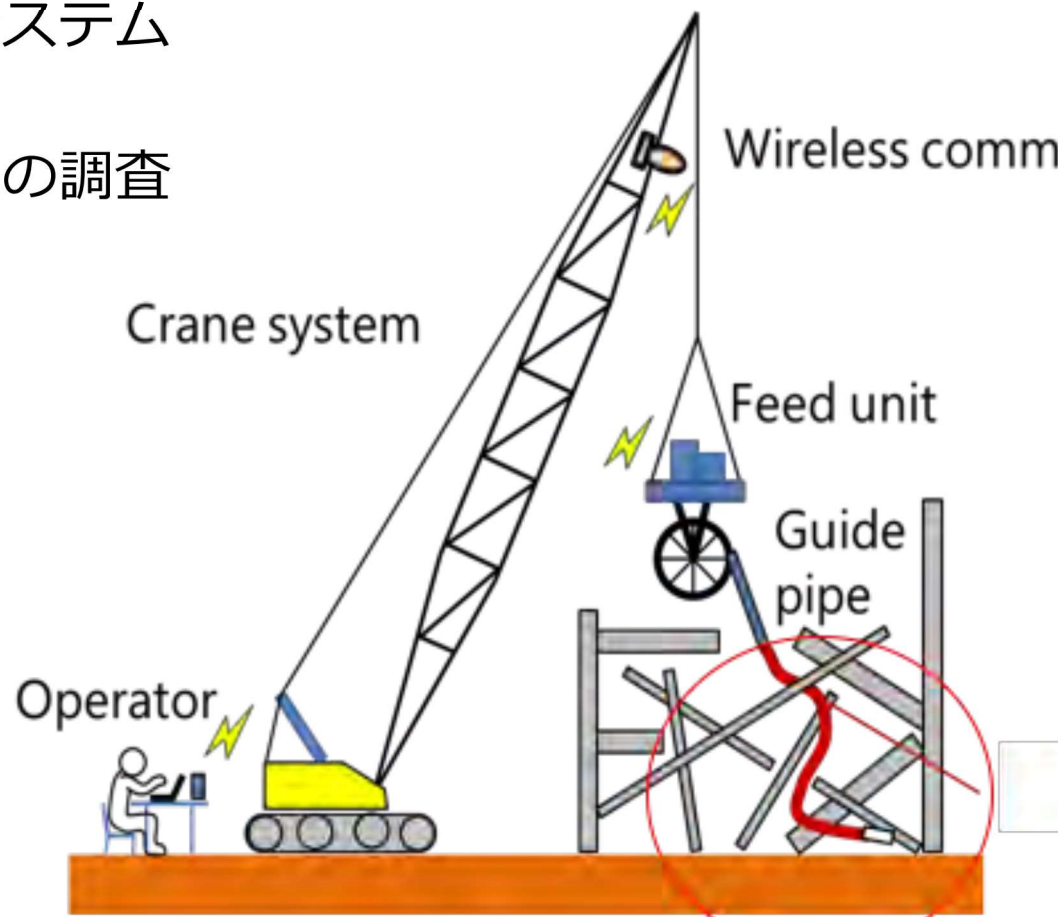
TOHOKU  
UNIVERSITY

# 福島第一原発1号機の内部調査

- 水素爆発により建物内は高放射線の瓦礫
- 能動スコープカメラ+クレーンシステム
- 狭隘箇所は、他の手段で調査不能
- 屋根崩落・使用済み燃料プール他の調査
- ウェルプラグの破壊・線量調査



建屋カバー建設中の状況写真(2011年)

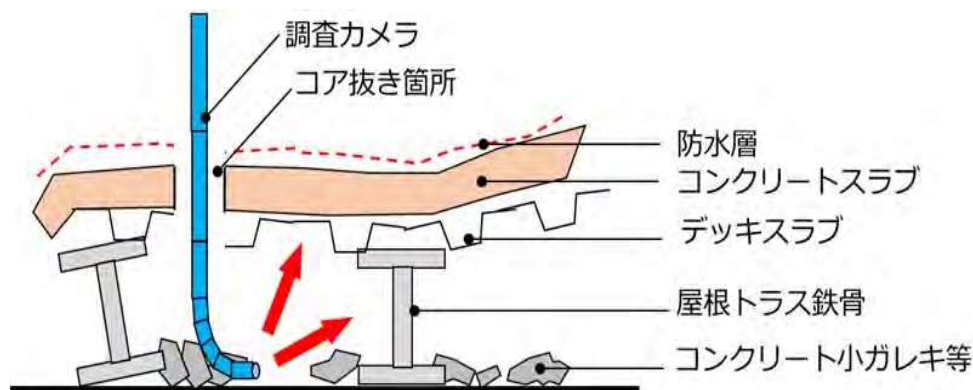


能動スコープカメラ

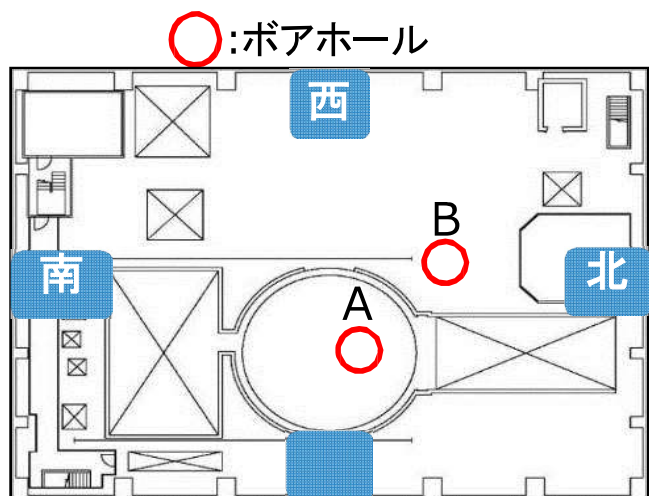


# 構造破壊調査 (2016年12月 - 2017年2月)

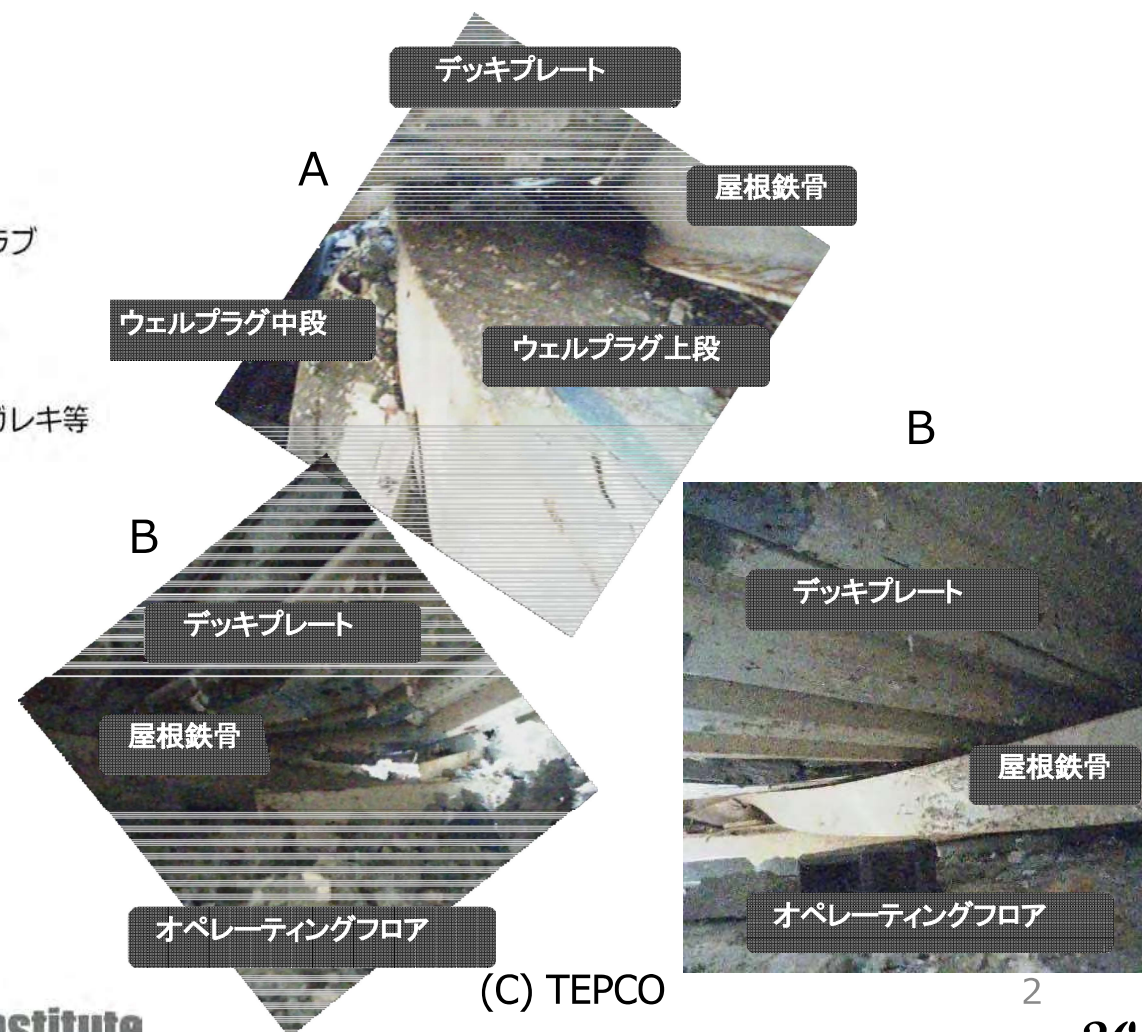
- 福島原発1号機オペレーションフロア(最上階)の瓦礫下の屋根構造の調査
- 調査結果:
  - 屋根の鉄骨フレームはもとの形状を保っている
  - 切断によって除去可能



能動スコープカメラの使用



オペフロ

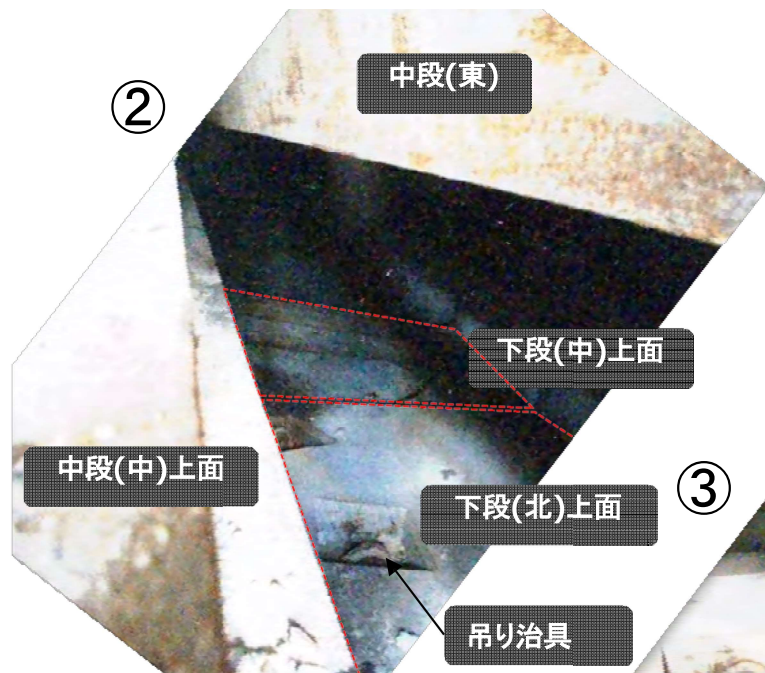


(C) TEPCO

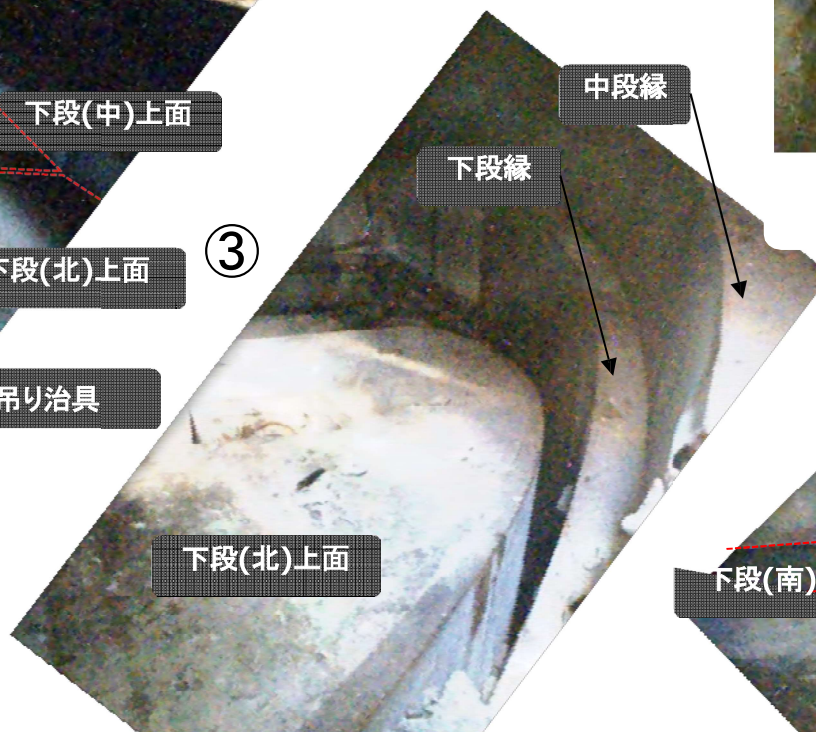
# 格納容器のウェルプラグ調査2 (2016.12-2017.2)

## ➤ 調査結果

- 下層プレートのはずれ



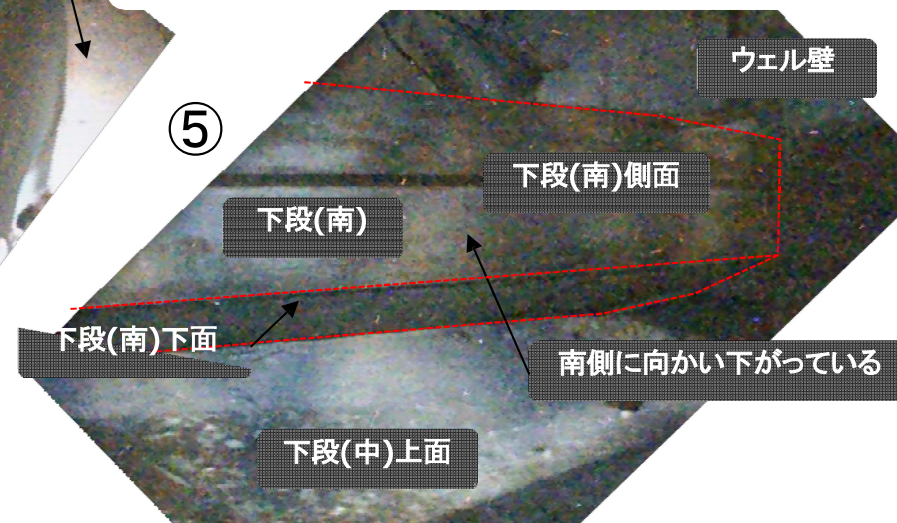
中層プレート  
(北から南を見た図)



中層プレート(北から南を見た図)



中層プレート(南から北を見た図)

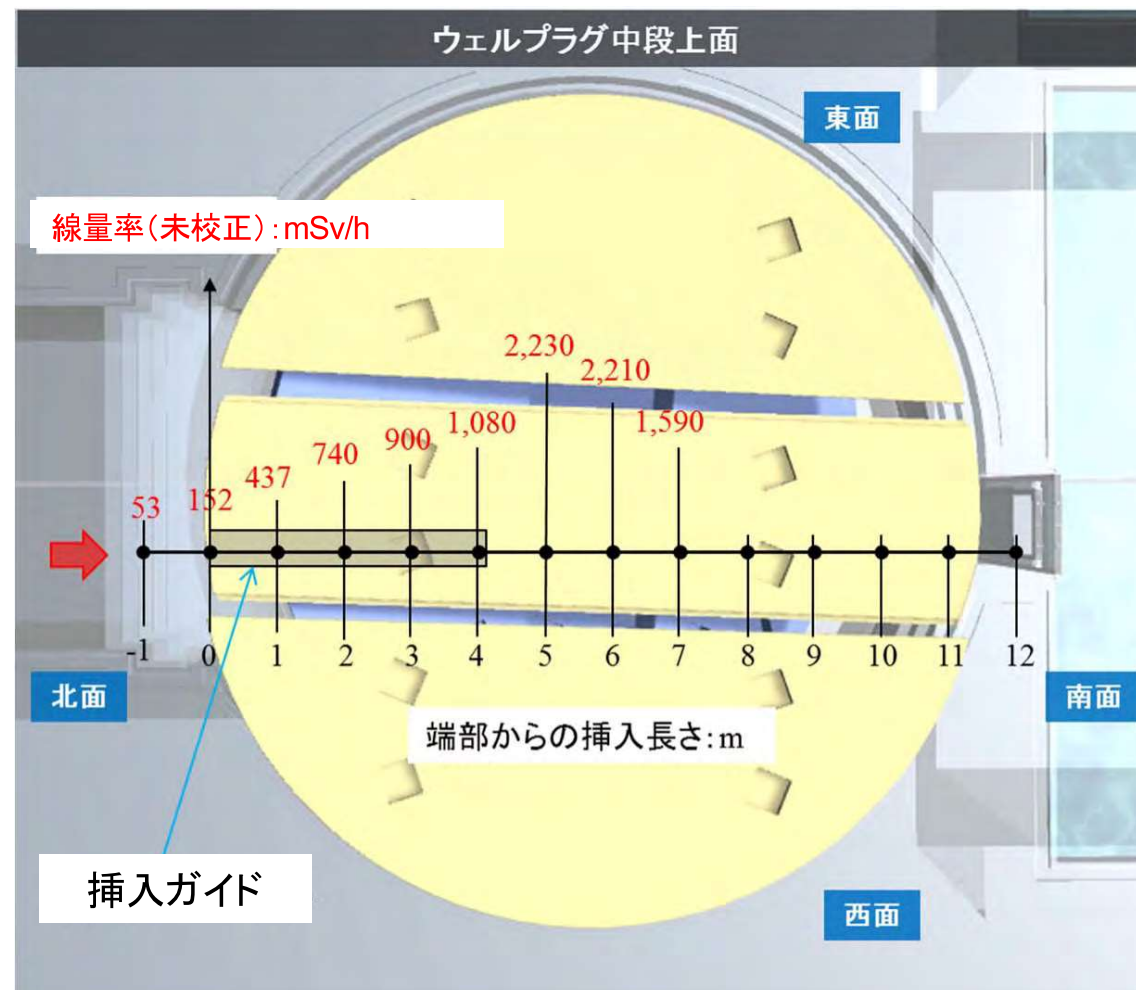


下層プレート(北から南を見た図)

# ウェルプラグ内の線量調査 (2016.12 - 2017.2)

## 調査結果

- ウェルプラグの中央部は高い線量率を示した



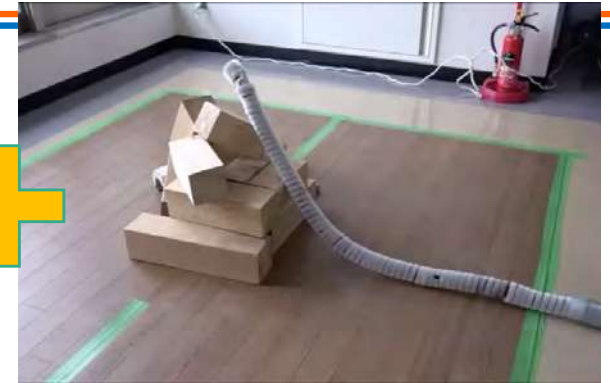
# ImPACT: 能動スコープカメラの開発体制

クローラ機構による  
能動セグメント  
**ASTEM・鄭G**

空気噴射浮上による  
瓦礫踏破  
**東北大・田所/昆陽G**



繊維毛振動による自走



空気噴射による浮上

**運動能力の飛躍的向上**  
**情報収集能力の強化**

統合

**索状ロボット（細径）  
プラットフォーム**  
(代表：東北大・昆陽)

**見える**

先端カメラによる  
移動軌跡と地図生成  
**東北大・岡谷G**

画像の自動認識  
**信州大・山崎G**

**聞こえる**

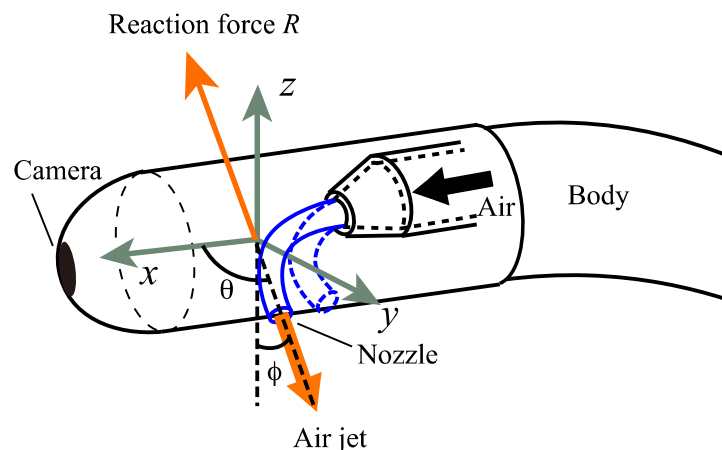
リアルタイム音声強調  
ロボット姿勢推定  
**早大・奥乃/産総研・坂東G**

オフライン音声強調  
**東大・猿渡G**

**触れる**

振動を利用した  
接触推定と提示  
**東北大・昆陽G**

## ■ 空気噴射による先端浮上



### 空気噴射の反力により浮上

- 圧縮空気0.4MPa, 300 [l/min] で  
3~4N程度の浮上力

### 軽量で柔軟な索状体に有利な方式

流量でなく、**噴射の方向制御**により  
応答性の問題を解決



倒壊家屋探査

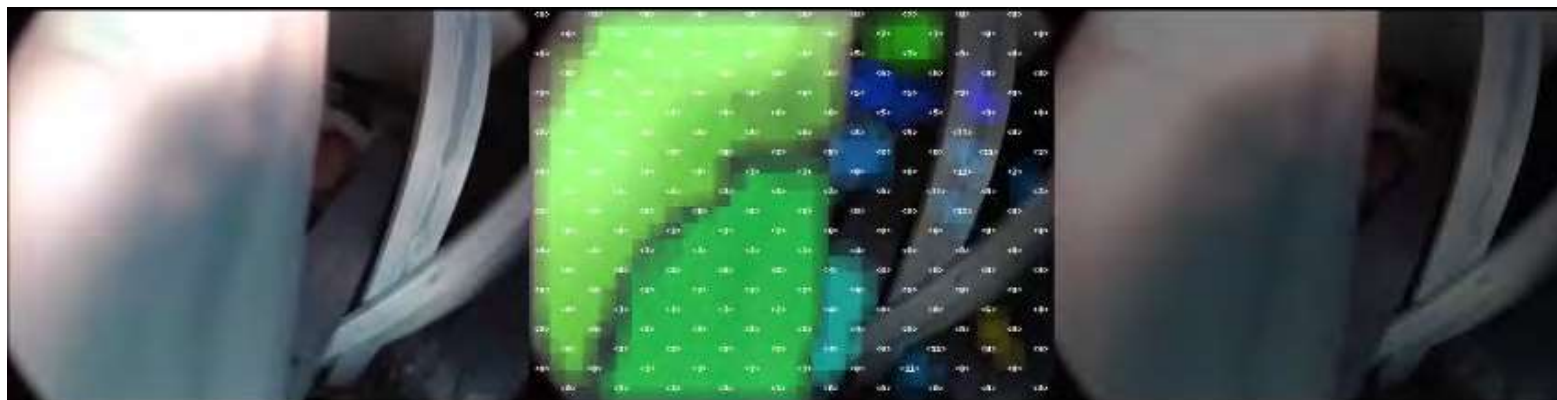


コンクリート瓦礫上走行

# 被災者発見のためのサポート機能

## ■ 瓦礫画像の自動認識システム（信州大・山崎G）

- ・ 撮影映像に映り込む事物を分析 → 検索対象などの候補を抽出・提示



入力映像

画像の領域分割

検索対象の発見

**教師なし学習**  
畳み込み自己符号化器と呼ばれるNNで事前知識なしにカテゴリを分類, 随時更新

**「表現ずらし」学習**  
認識結果群から別途, 確率分布に基づく分類を行い, それに矛盾する特徴ベクトルは更新する

## ■ 騒音下の音声の聞き分け・音声強調（早大・奥乃／産総研・坂東G）

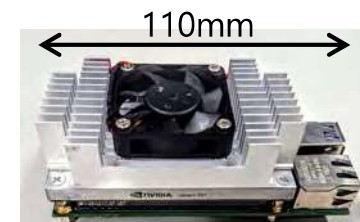
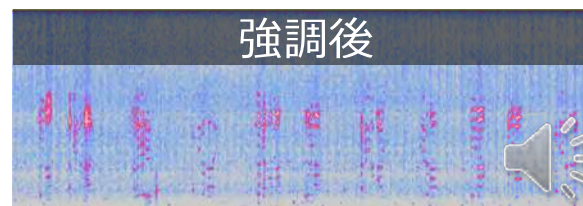
### 瓦礫環境下でも頑健に動作する音声強調法を実現

- 雑音と音声の統計的特徴差に基づき音声を強調  
→ 事前学習不要・未知環境でも動作
- 振幅領域処理 → マイク・音源が移動しても頑健
- 多チャンネル処理 → 半分のマイクが隠れても頑健

特許出願

特願2016-102063号, H28年5月23日,  
「目的音響信号復元システム及び方法」

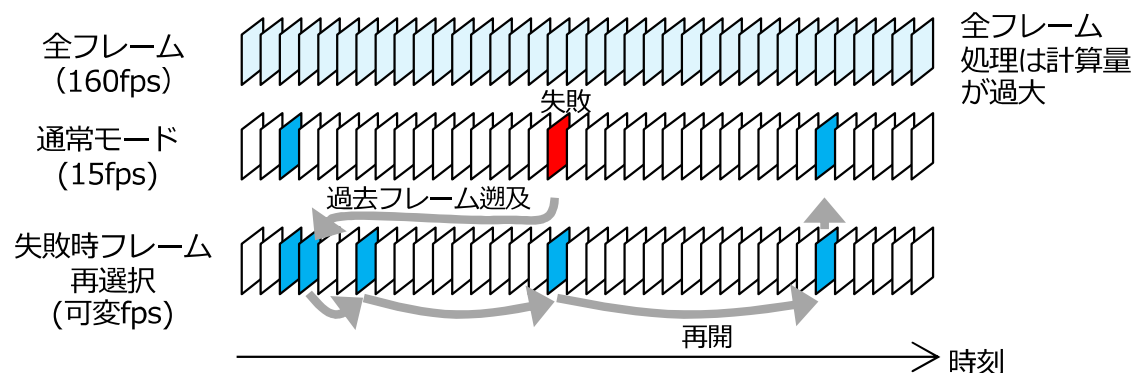
組込GPUモジュールに実装：**リアルタイム動作**



組込GPUモジュール

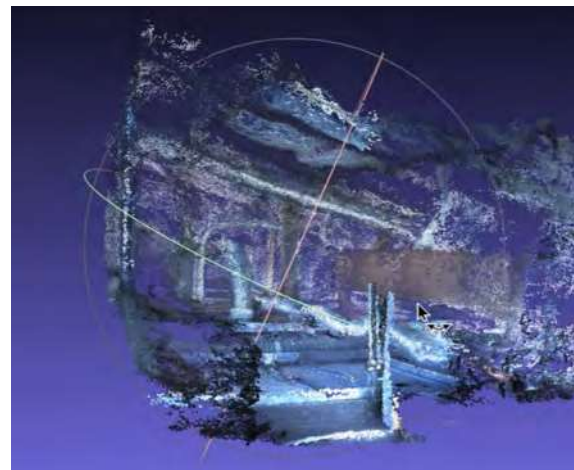
**困難さ：狭隘環境ゆえの低品質動画像**  
 (対象に近く、動きが速い → 特徴点追跡が困難)

**解決策：高速カメラ・IMUの利用と適応的フレーム選択**

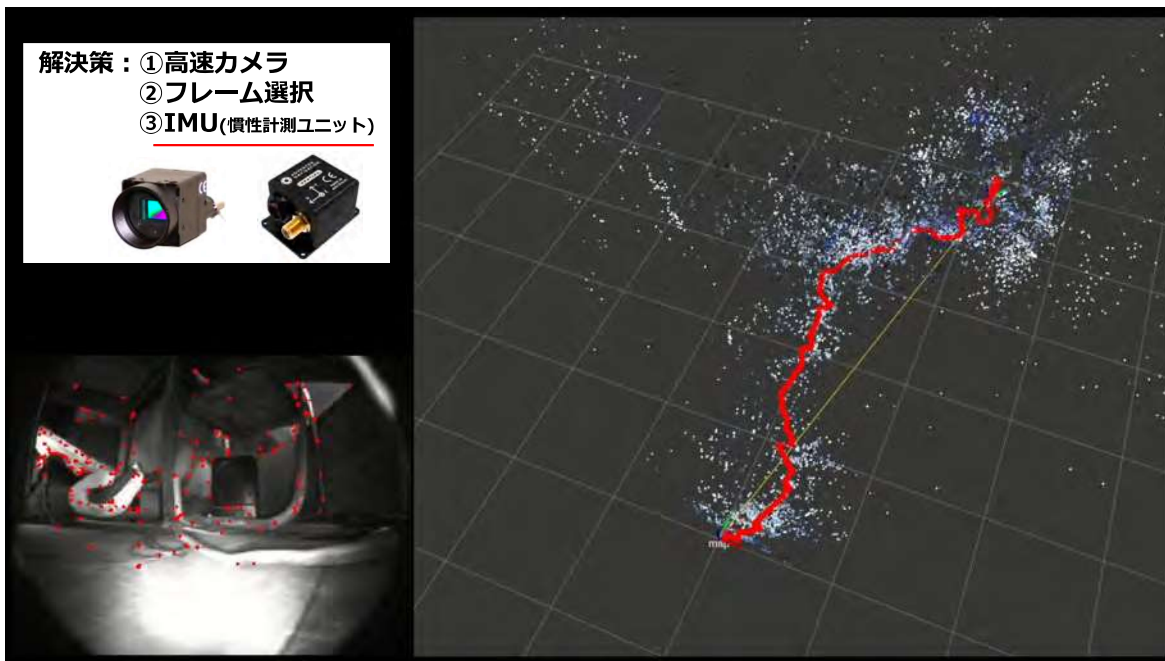


本技術について企業(自動車部品製造)と共同研究を開始：2018年度～

緻密な3次元情報は  
**オフライン**処理で生成可能  
 (~数分程度)



- 解決策：①高速カメラ  
 ②フレーム選択  
 ③IMU(慣性計測ユニット)



# 触覚：挿入部中間の接触状態の推定と表示

東北大・昆陽G + 早大・奥乃/産総研・坂東G

## 狭い空間を探索するには接触状態の把握が必要

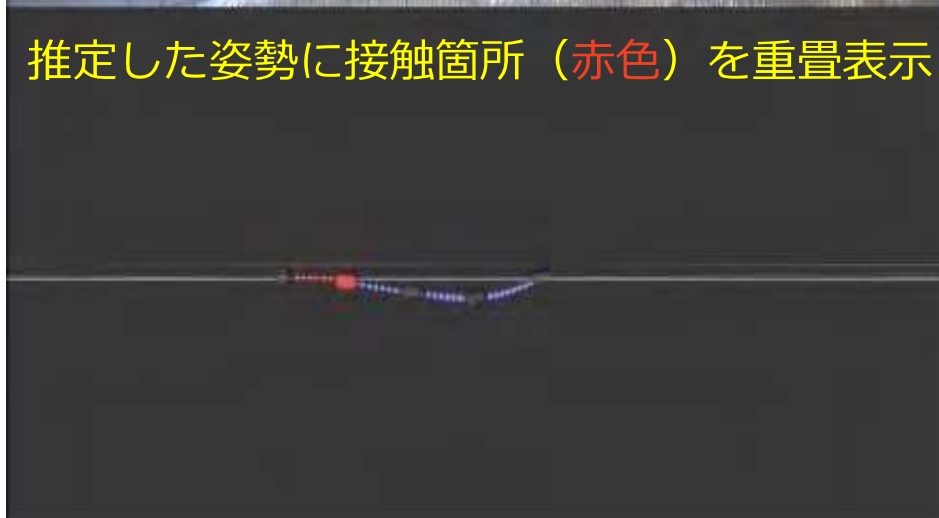
- 局所的な接触によるスタックの把握
- 振動駆動には適切な接触面積が必要

## 胴体上の分布振動センサによる接触判定

- 繊毛振動用モータを加振機として利用
- 接触による振動変化を機械学習

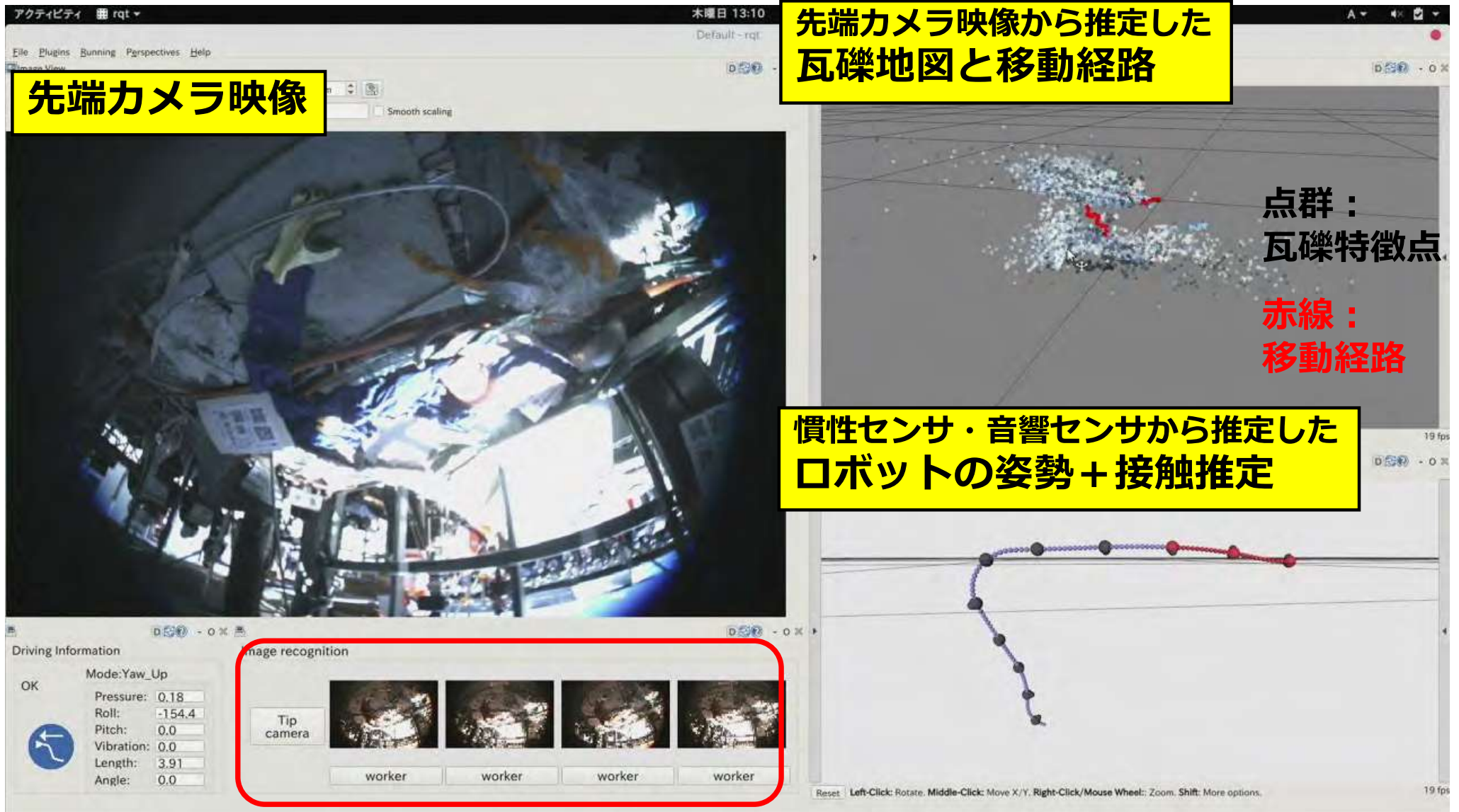


推定した姿勢に接触箇所（赤色）を重畳表示





# センサ情報の統合表示



**先端カメラ映像**

**先端カメラ映像から推定した瓦礫地図と移動経路**

点群：  
瓦礫特徴点

赤線：  
移動経路

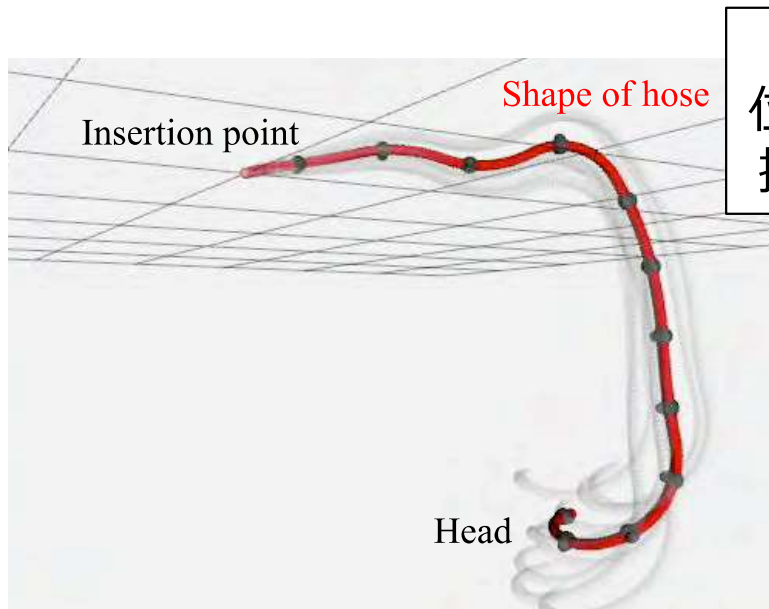
**慣性センサ・音響センサから推定したロボットの姿勢+接触推定**

Driving Information  
Mode: Yaw\_Up  
Pressure: 0.18  
Roll: -154.4  
Pitch: 0.0  
Vibration: 0.0  
Length: 3.91  
Angle: 0.0

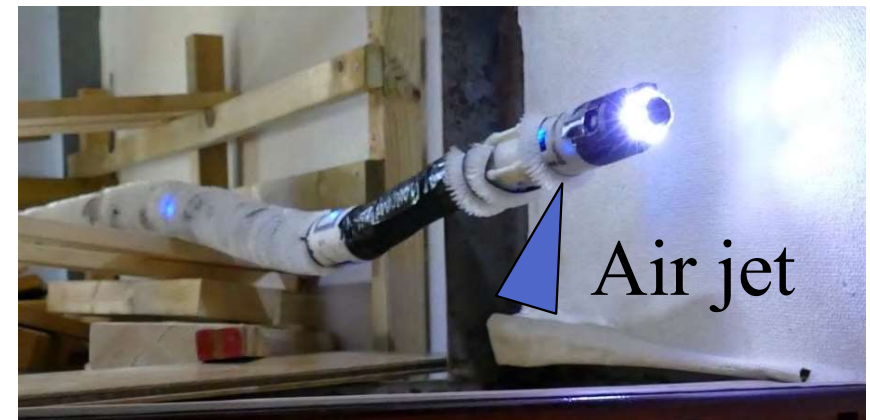
Image recognition  
Tip camera  
worker worker worker worker

発見した対象画像（上位4件）

- 姿勢推定情報を用いて，目標位置へ移動するための空気噴射の方向と挿入量を決定する



ASC先端の  
位置と姿勢から  
操作量を決定



感覚機能統合型ASC

分散的に搭載されたIMUによる  
ASC全体の姿勢推定



ASC挿入機

ASC自動挿入機の開発に関して  
IEEE/ASME AIM2018 Best Paper Award受賞

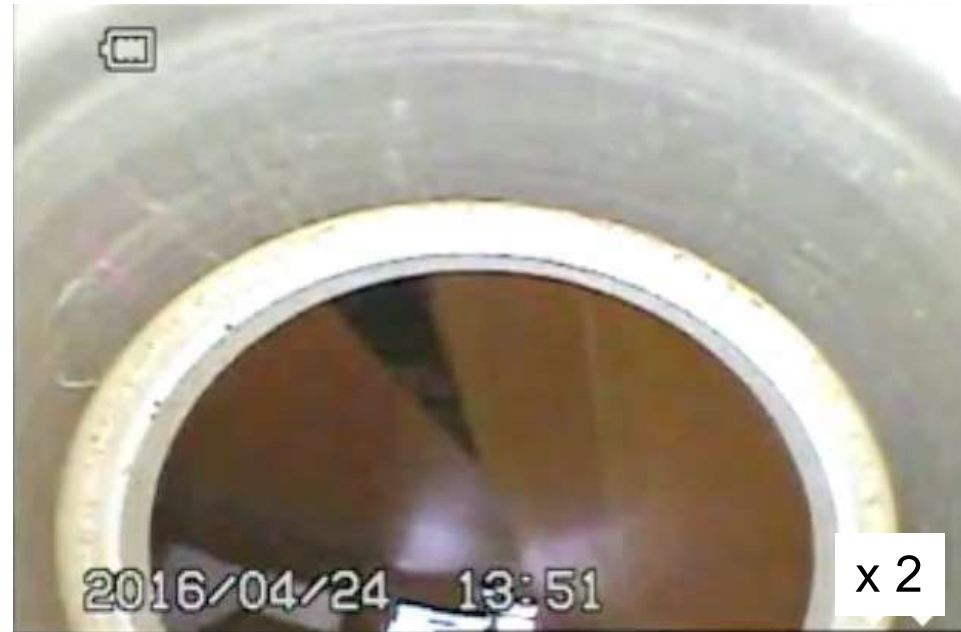
# レスキュー隊のための エアジェット能動スコープカメラ

- 可搬性を確保するため、消防用空気ボンベからエアを供給 [Konyo, Tadokoro, Tohoku U]  
(連続噴射時間 6 min/tank = 通常ミッション 20 min)
- 鍛造マグネシウム合金による超軽量ノズル → 耐久性の向上
- センサを厳選して軽量化 (カメラ、マイク、スピーカ、IMU)



# 適用と評価：熊本地震後の倒壊建物調査

(2016.4.24 東北大災害科学国際研究所との共同)



木造家屋の倒壊状況を内部から確認 → 防災専門家に提供



支柱の破壊

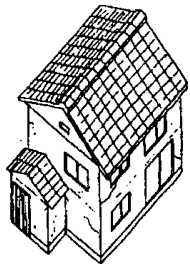


屋根裏の状況

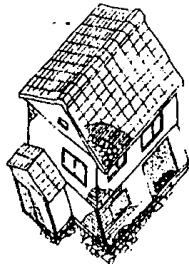


床材の破壊

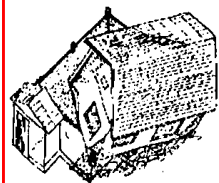
## ■ 土砂崩れにより倒壊した2階建木造家屋



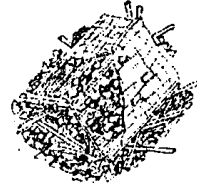
壁面亀裂



一階破壊



2階破壊



完全崩壊

半田山

土砂崩れ



東側側面からパイプ（3m）を介して挿入



## 受動並行機構を用いた空気噴射型ASCを適用



家屋内挿入長さ 約3m (2倍速)



家屋内挿入長さ 約5m (2倍速)

- **家屋内に最大5m程度挿入できた (長さの制約)**
- **空気噴射によって従来乗り越え不可能だった瓦礫も踏破できた**



- 神戸市消防局 特別高度救助隊 2係14名
- ロボットの操作性，課題に関するアンケートを実施
  - ポジティブな意見例
    - 開口部が小さく押し込むだけでは挿入できない状況では有用
    - 隊が装備しているカメラに比べ，障害を突破できる
    - 情報収集だけでなく，被災者に情報を与えることも有効
    - ダクト火災の確認，マンホールや船舶等の酸欠事故などにも活用可能
  - 指摘された課題例
    - さらに自律性，自走性が必要
    - 空気の噴射による粉塵の要救助者への影響が気になる
    - 先端の映像のみではロボットの状況がつかみづらい
    - スピーカの音量が不足

基本的な操法を身につけるための訓練プログラムの導入が有効

# 空飛ぶ消火ホースロボット 「ドラゴンファイヤーファイター」



- **ホースが浮上・飛行し，火元を直接消火**
- **プロトタイプを開発**



# 犬の能力を最大限に引き出す サイバー救助犬スーツ



優れた嗅覚・運動能力で被災者を発見。救助に必要な情報が不足

救助に必要な情報 =

被災者の位置 + 健康状態 + 救助を要する人数 + 周囲の状況



東日本大震災宮城県名取市要救助者搜索  
日本救助犬協会 (JRDA)

## 救助犬の課題

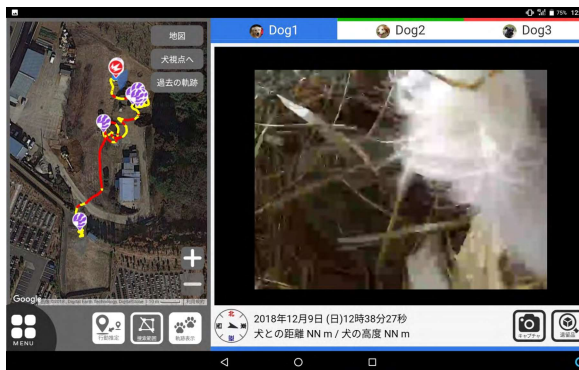
- 犬の位置・行動の把握
- 犬が吠えた理由の特定
- 犬の集中度や疲れの把握
- 犬の行動を指示できない
- 犬の訓練に時間がかかる

## サイバー救助犬

- センサを備えた非侵襲で軽量のサイバースーツを装着
- センサ (IMU他) 情報から、犬の位置・集中度・疲れを推定
- 吠えた対象・周囲状況を認識  
(画像・3D・音声)

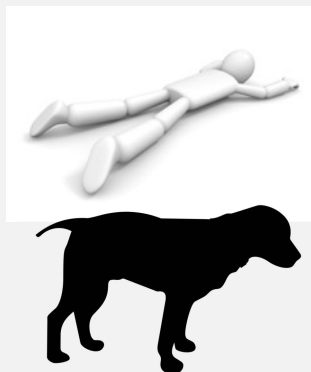


サイバー救助犬スーツ (大野G)



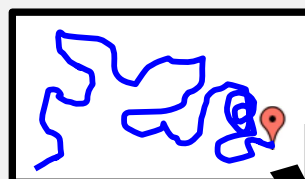
遺留品発見 (山崎G)

救助犬の探査活動・  
集中度・疲れの推定

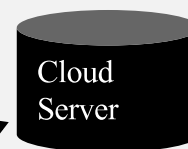


災害救助犬の活動の  
記録と配信

作業の指示



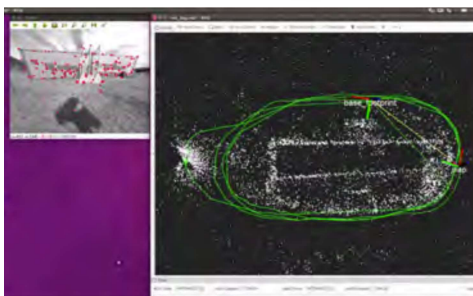
ドローンとの連携



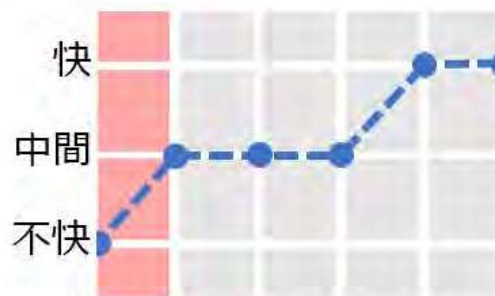
ハンドラー

指揮  
命令者

指揮本部と情報共有



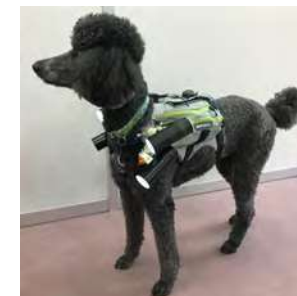
3次元運動推定 (岡谷G)



情動推定  
(菊水G)



行動認識  
(徳山・篠原G)



行動の指示  
(大野G)



## Cyber-enhanced Rescue Canine

Assoc. Prof. Kazunori Ohno

Tohoku University NICHe

School of Engineering, Tokyo University

RIKEN AIP



探査の途中で匂いを嗅いだ場所と、人を発見した場所も自動マーキング



- 救助犬レイラ心拍変動を計測。別の犬のデータで可視化。
- 探索することを快情動となるよう訓練、条件付けされていて、人の匂いをかぎ取った時に快情動が増加と推測



## Guiding a Dog using On-suit Light Sources



Tohoku University, Japan  
<https://www.rm.is.tohoku.ac.jp>



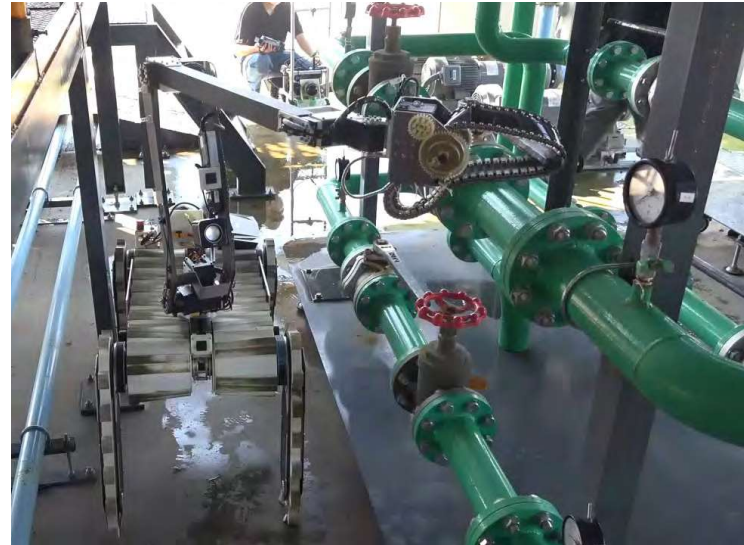
犬が光を追う性質を利用して，遠隔から犬の行動を誘導

# 経産省 World Robot Summit

階段走行とバルブ操作



特殊ハンドによる大型バルブ操作



ドローンと小型地上ロボットを併用したゲージ点検





- World Robot Summit（ロボットオリンピック）  
＝ロボット導入・普及の契機、5年間の研究開発の促進加速と実証実験を提供
- DARPA Grand/Urban Challenge → 自動車の自動運転の道を拓いた
- RoboCupRescue → 福島第一原発事故に対応したQuinceの基盤を作った
- AUVSI Intl. Aerial Robotics Competition → 自律ドローンの基盤を作った
- RoboCup → Naoを標準プラットフォームに → Pepperの基盤を作った
- ロードマップ
  - 2018年に、プレ大会を開催
  - 2020年に、本大会を開催
  - 2024年に、第2回大会を、日本以外の国で開催
  - 2028年に、第3回を...(オリンピックとして定着)
- 3つの分野
  - ものづくり 分野
  - サービス 分野
  - インフラ・災害対応 分野

## 市場未成熟な段階の 基盤・潮流の形成

- 技術的基盤・人材
- 投資家の意識改革
- ユーザ受容を育てる
- 技術情報収集

オープンイノベーションの  
方法論

- Missions: **Inspecting or maintaining infrastructures based on set standards** (e.g. opening/closing valves, exchanging consumable supplies) and searching for disaster victims. Five missions:
  - P1 Daily Inspection & Maintenance
  - P2 Fault Detection
  - P3 Diagnosis
  - P4 Disaster Response: Extinguishing Fire
  - P5 Disaster Response: Search Victim
- Robots: Any type (crawler, drone, humanoid, legged, snake, etc.)
  - Maximum 4 robots per team. **Max. 2 robots** per mission selected from the 4 robots.
  - Maximum 2 robot operators per mission.
  - Robot inspection is required before the missions.
  - Team Description Paper for the robot system is required before the mission.
- Mission duration: **20 minutes** per mission.
- 3D CAD data of the plant layout and the configuration of the plant objects was provided.

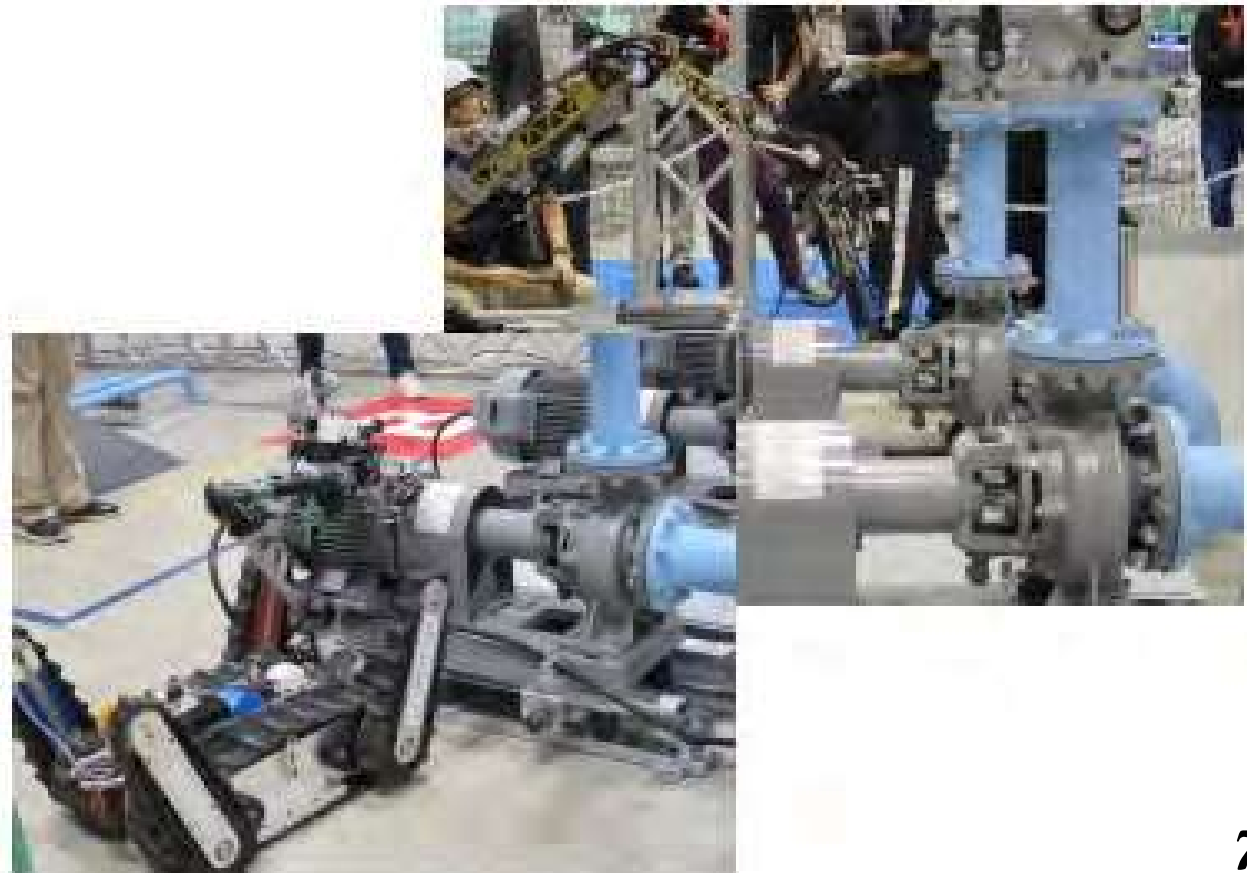
# P1 - Daily Inspection & Maintenance Results

- Reading pressure gauges: Successful. UAVs were efficient.
- Opening/closing valves: Only one team scored.
- Water level reading: Three teams scored.
- Many teams only read the meters, and did not challenge the other tasks.



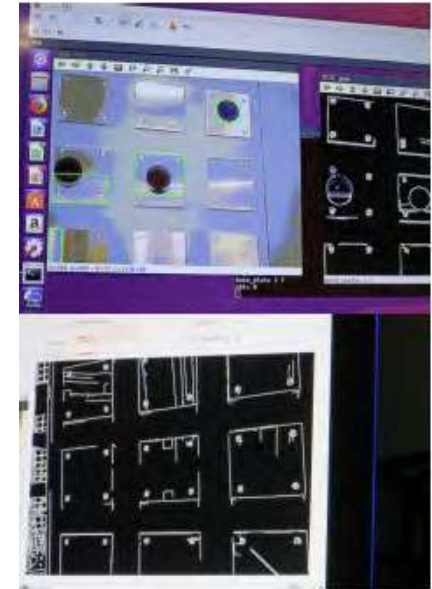
## P2 - Fault Detection Results

- Looseness and rust in bolts at pipes → high success rate
- Abnormal vibration of pumps → rather high success rate
- Abnormal temperature of pipes → high success rate
- Point of gas leaks at pipes → low success
- O<sub>2</sub> concentration in tanks → measured by UAV



# P3 – Diagnosis Results

- Cracks → UAVs were effective by close high resolution images
- Rust → high success rate, but not over 75%. High places were difficult
- Void → sound by hammering, success rate 50-60%
- Most teams challenged to only easy tasks



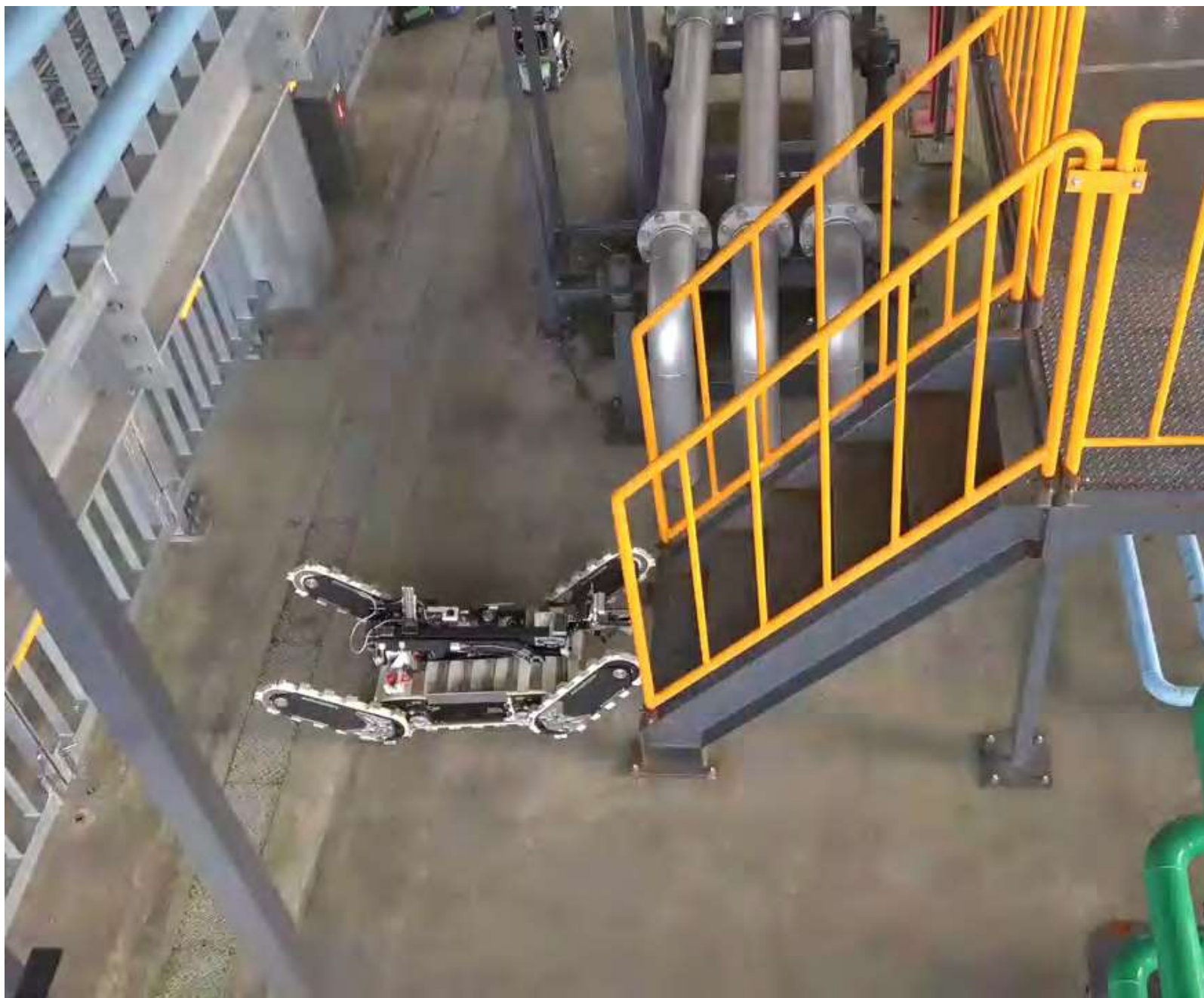
# World Robot Summit 2020



2021年9月8日～10日

福島ロボットテストフィールド(福島県南相馬市)にて, WRS福島大会を開催

# 階段走行とバルブ操作 @ WRS2020



x4

東北大学  
Quix

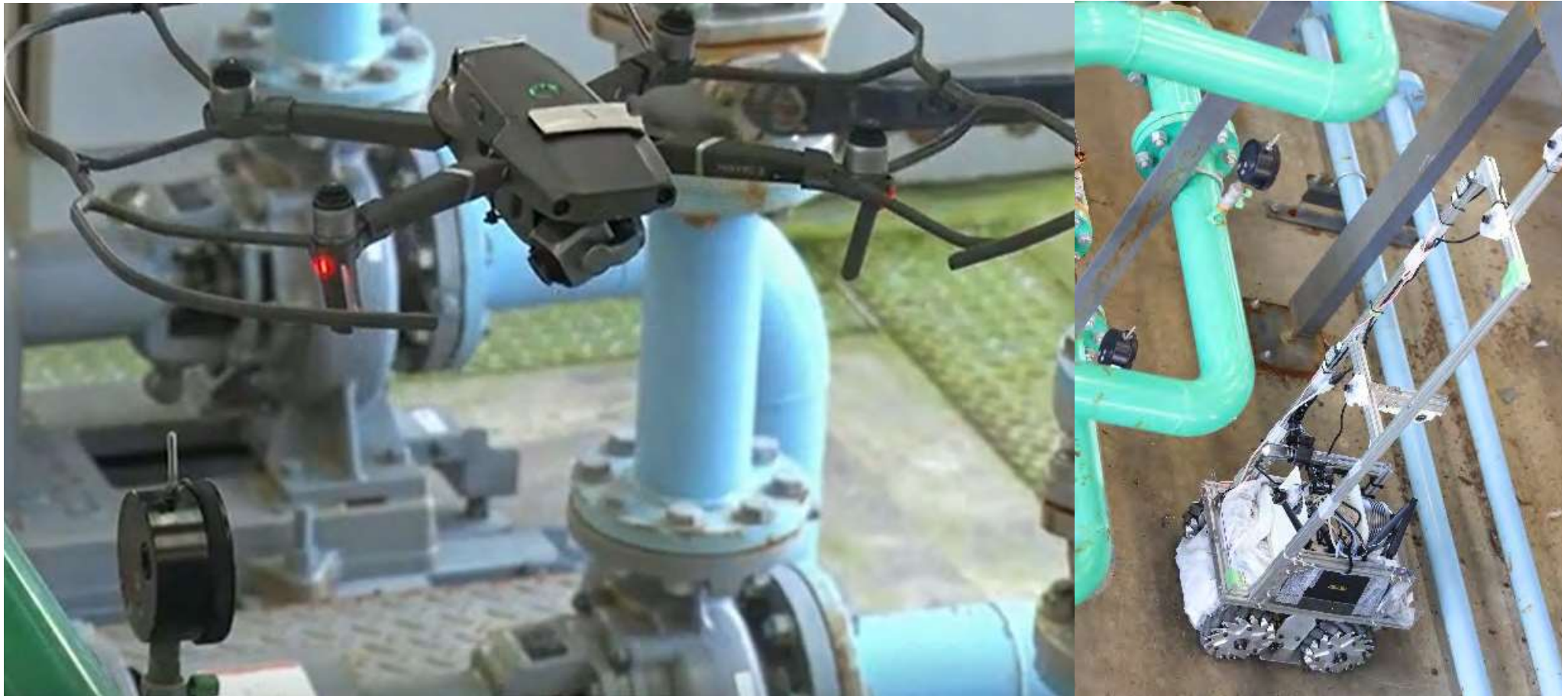


x4

東北大学  
Quix



# ドローンと小型地上ロボットを併用した ゲージ点検 @ WRS2020



東北大学Quix

WRS2020福島大会プラント災害予防チャレンジで、世界優勝

# 災害対応ロボットの展望

- これからの10年
  - ✓ 仕事や生活で、ロボット・ドローン・AIの使用が飛躍的に拡大する
  - ✓ 自動化・遠隔化がこれまでよりも容易に、安価に行える時代
  
- 災害対応ロボットが広く使われ、人命救助に効果を発揮するためには
  - ✓ ロボット・ドローン・AIの、効果的な使い方、を開発しなければならない
  - ✓ ユーザにとって簡単なこと、安価なこと、シンプルな解決、から始める
  - ✓ 最低限必要な機能、性能の吟味が重要
  - ✓ ロボット・ドローン・AIが働ける、環境整備、条件整備が必要
  - ✓ 個別機能の作り込みには、時間がかかる
    - 低TRL → 高TRL
    - 使いやすく
    - 本当のユーザニーズ
    - 本当の制約条件