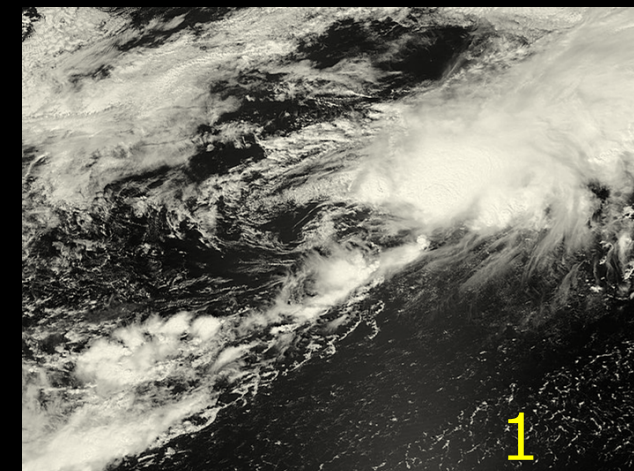




オンデバイス学習技術の確立と社会実装

松谷 宏紀（慶應義塾大学 理工学部）



情報化社会の基盤技術

- DX：情報技術の浸透によって人々の生活を良い方向へ変化させる
- 情報化社会の基盤技術：AI、IoT、ビッグデータ

現実空間



クラウド（サイバー空間）



IoT（センサ+アクチュエータ）

センシング、制御、…

データ収集



ビッグデータ（大量データ）

データ利活用



社会をより良い
方向へ

AI（人工知能）

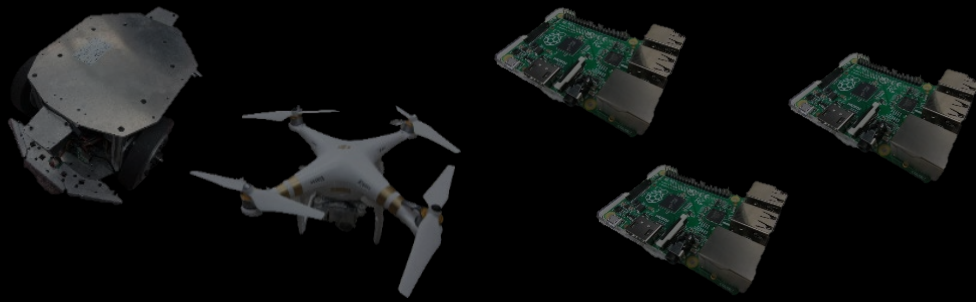
自動化などの付加価値

情報化社会の基盤技術

- DX：情報技術の浸透によって人々の生活を良い方向へ変化させる
- 情報化社会の基盤技術：AI、IoT、ビッグデータ

現実空間

クラウド（サイバー空間）



IoT（センサ+アクチュエータ）

センシング、制御、…

データ収集
→

ビッグデータ（大量データ）

←
社会をより良い
方向へ

↓ データ利活用

AI（人工知能）

自動化などの付加価値

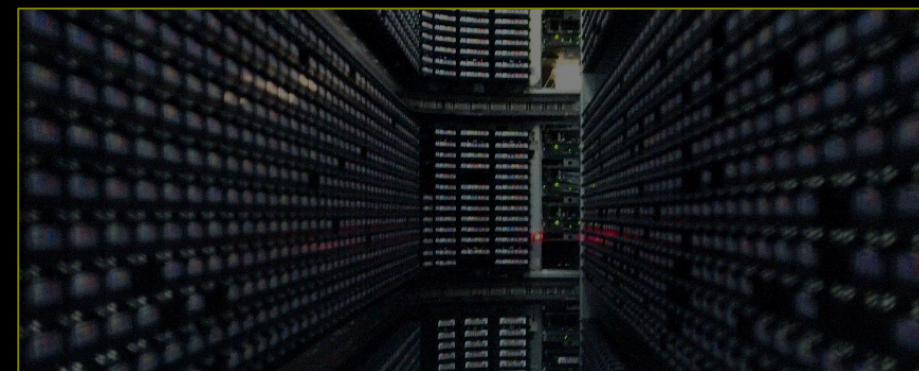
情報化社会の基盤技術

- **エッジAI：現実空間で動作する組み込みAI**
オンデバイス学習によってIoTデバイス側に新たな付加価値を持たせる

現実空間



クラウド（サイバー空間）



IoT（センサ+アクチュエータ）

センシング、制御、認識、異常検知、...

データ収集



ビッグデータ（大量データ）

データ利活用



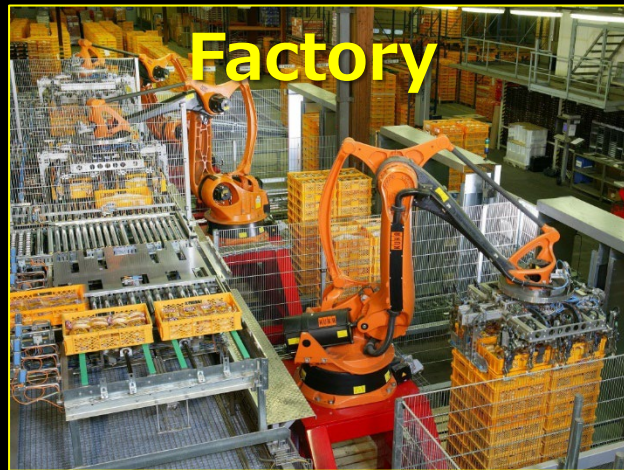
AI（人工知能）

自動化などの付加価値

社会をより良い
方向へ

エッジAI：アプリケーション

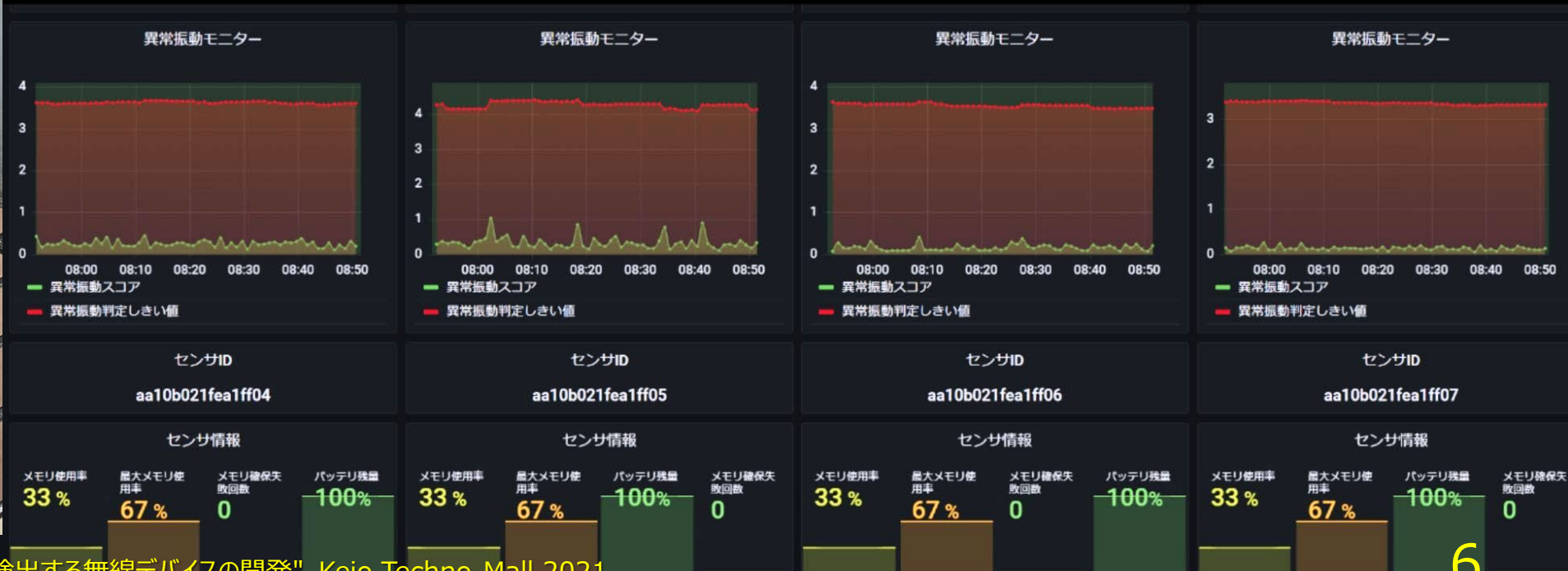
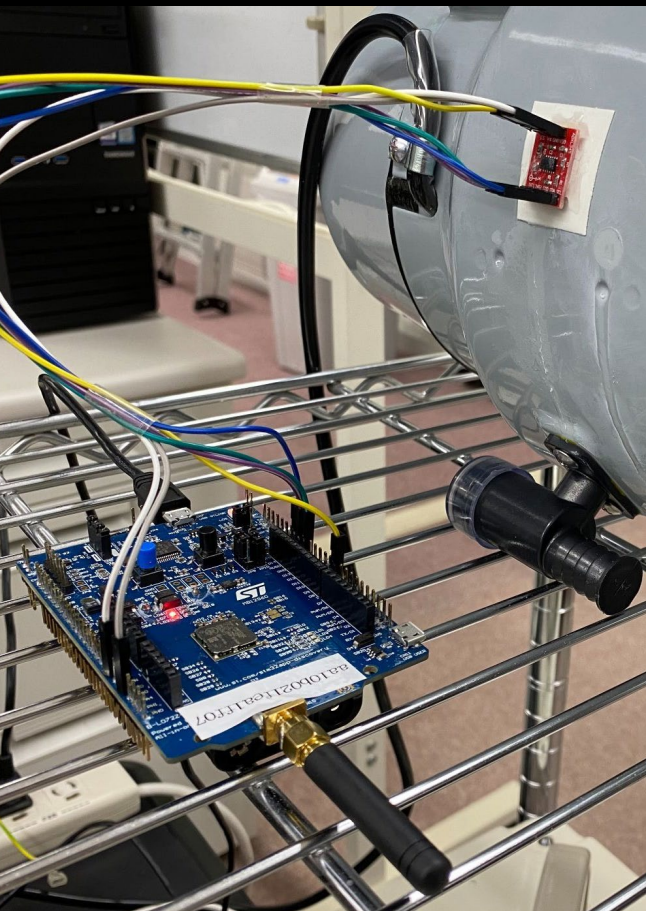
- エッジAI：現実空間で動作する組み込みAI（用途：異常検知など）
工場、設備監視、ドローン、電動車いす、家電、監視カメラ、環境モニタ、…



エッジAI：設備監視の例

無線センサノードによる空調システムの監視 [1]

エッジ側でセンシング、前処理、推論（異常検知）、学習などの知的処理

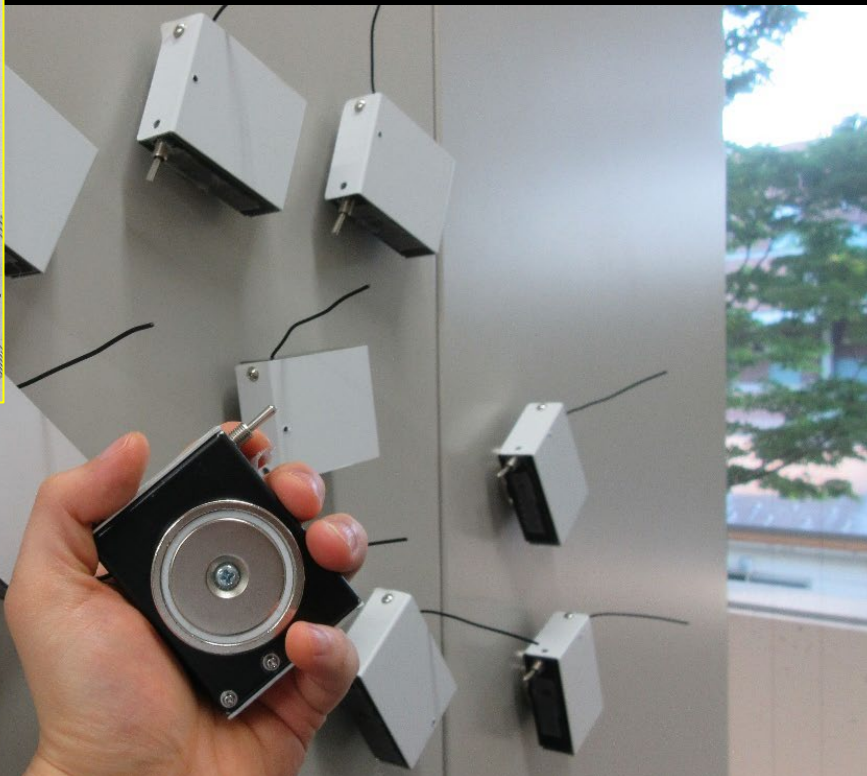
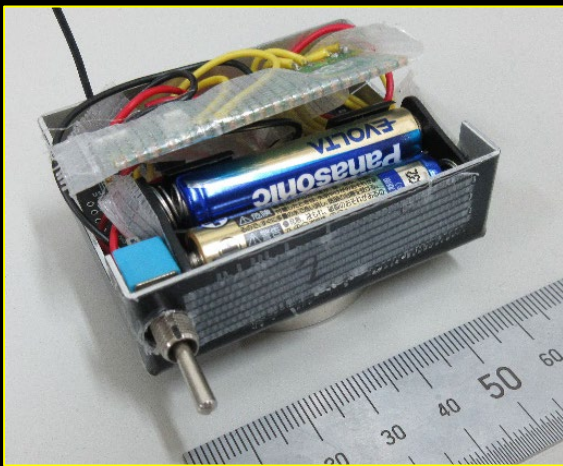


[1] 塚田 峰登, "回転機械の異常振動を検出する無線デバイスの開発", Keio Techno-Mall 2021.

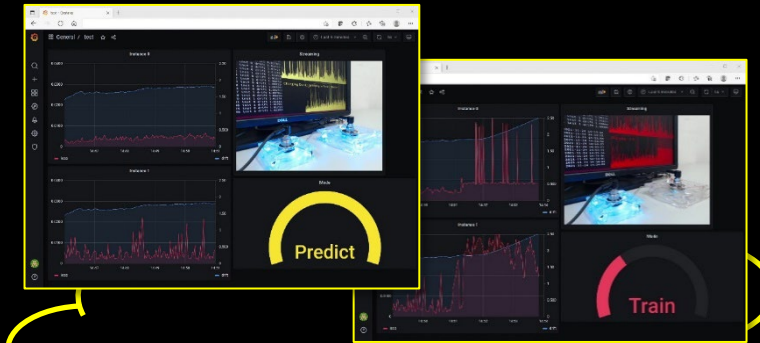
エッジAI：設備監視の例

- 貼り付けるだけ異常検知器 [1]

Raspberry Pi Pico、各種センサ、無線モジュール、電池、マグネット
エッジ側でセンシング、前処理、推論（異常検知）、学習などの知的処理



エッジAI：分類



サーバ側

どこまでエッジでやるか？

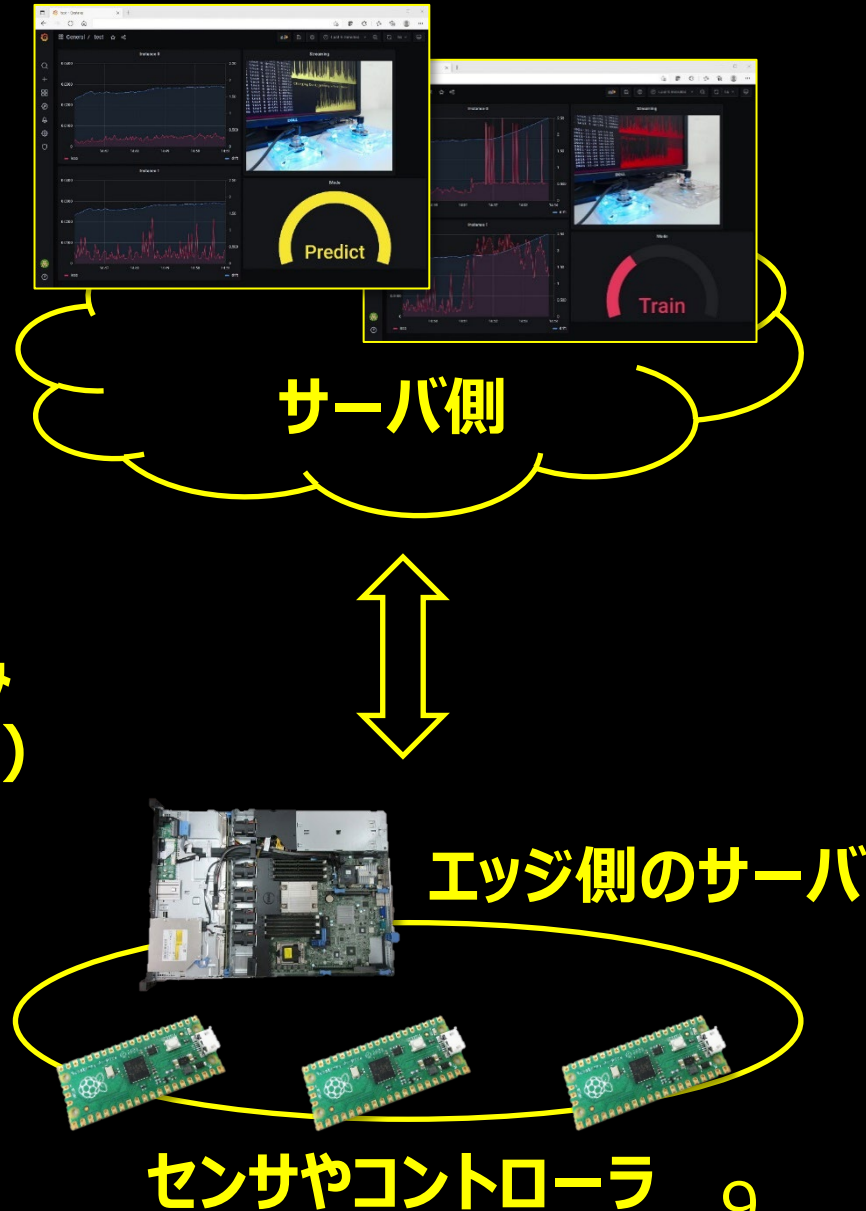
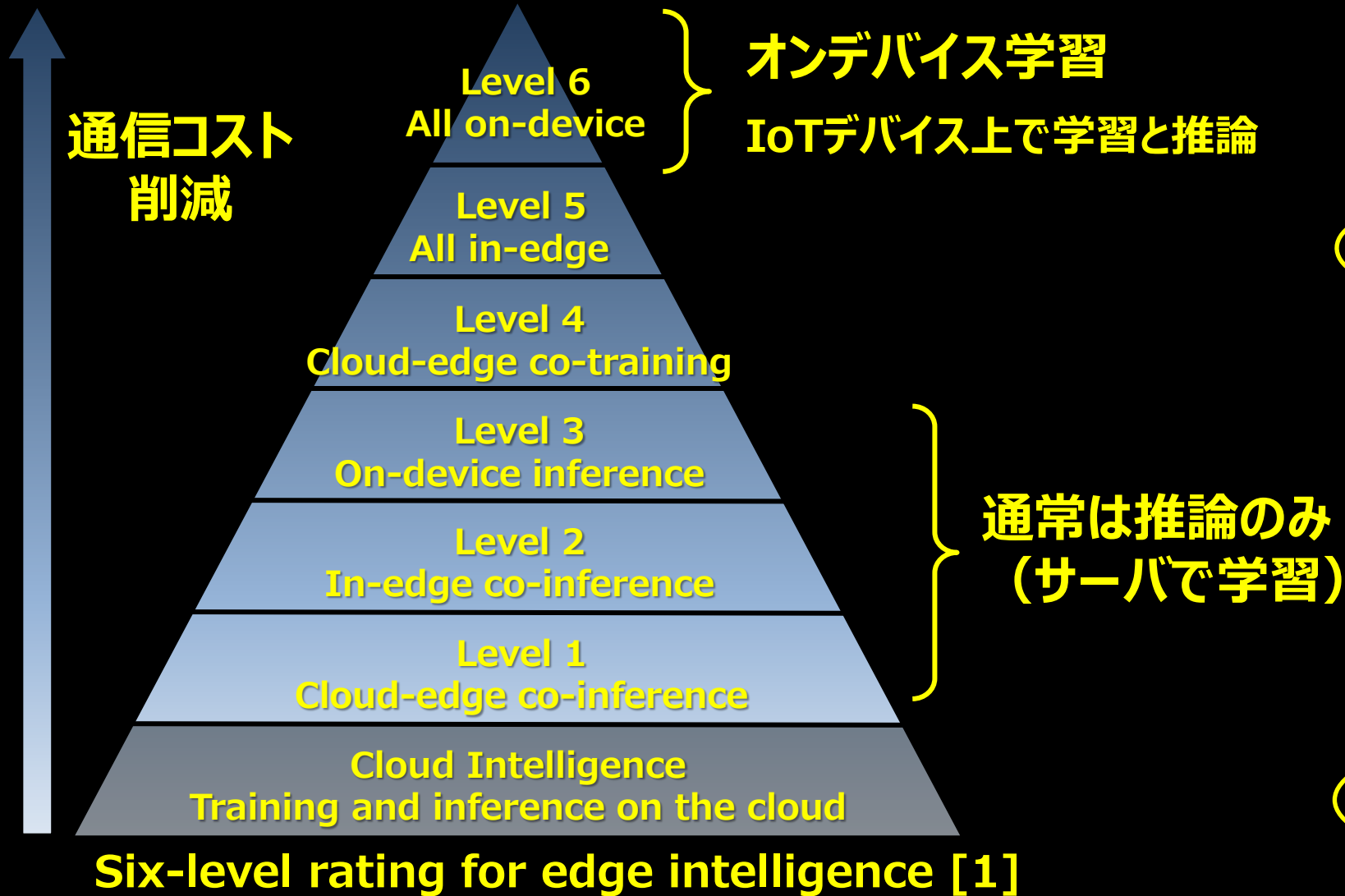


エッジ側のサーバ



センサやコントローラ

エッジAI：分類

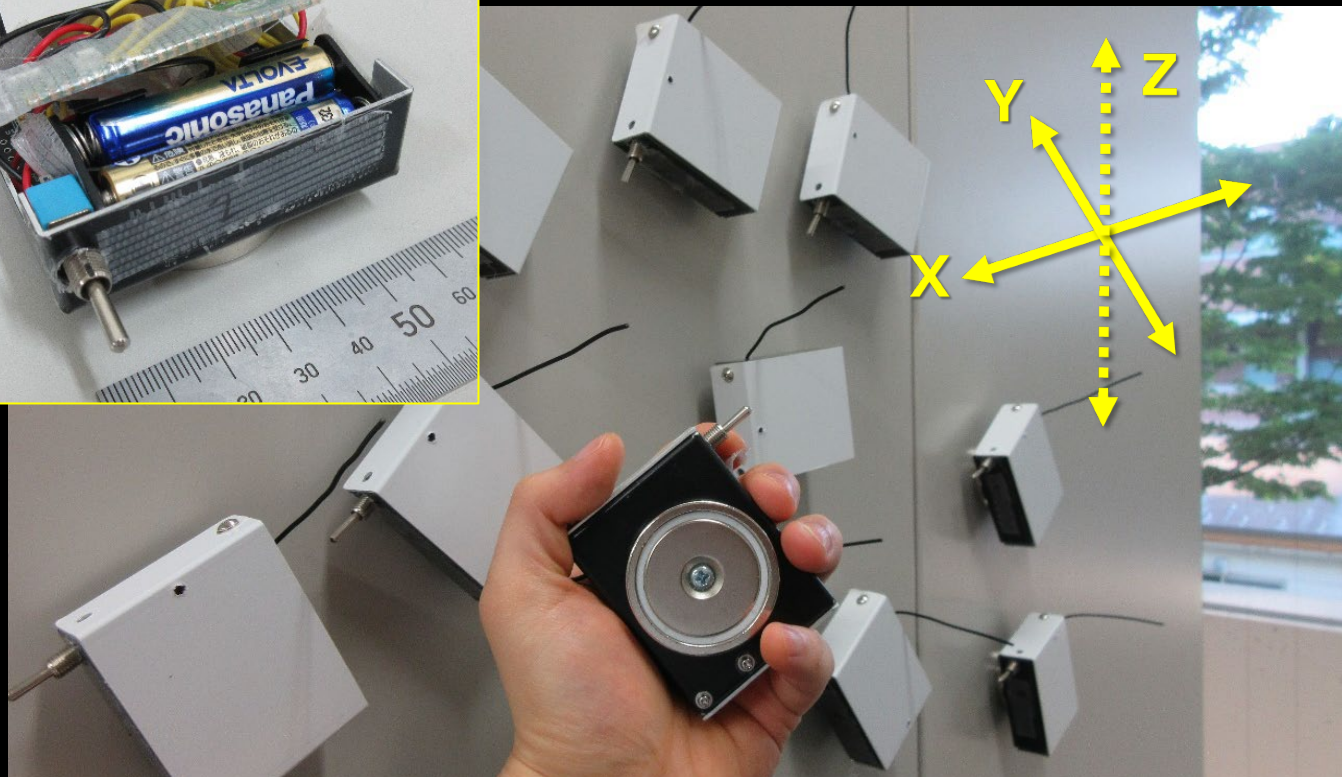
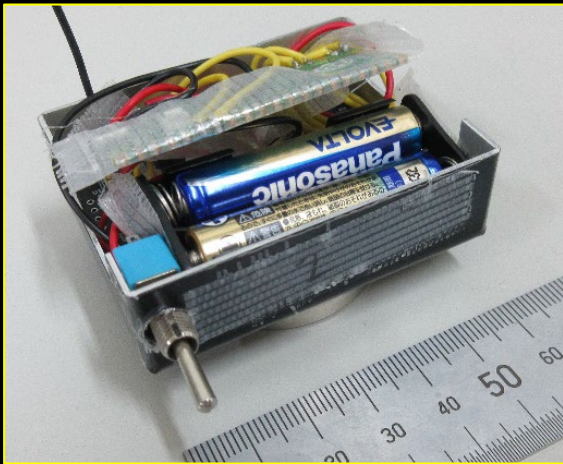


[1] Z. Zhou et al., "Edge Intelligence: Paving the Last Mile of Artificial Intelligence With Edge Computing", Proceedings of the IEEE (2019).

オンデバイス学習：必要性

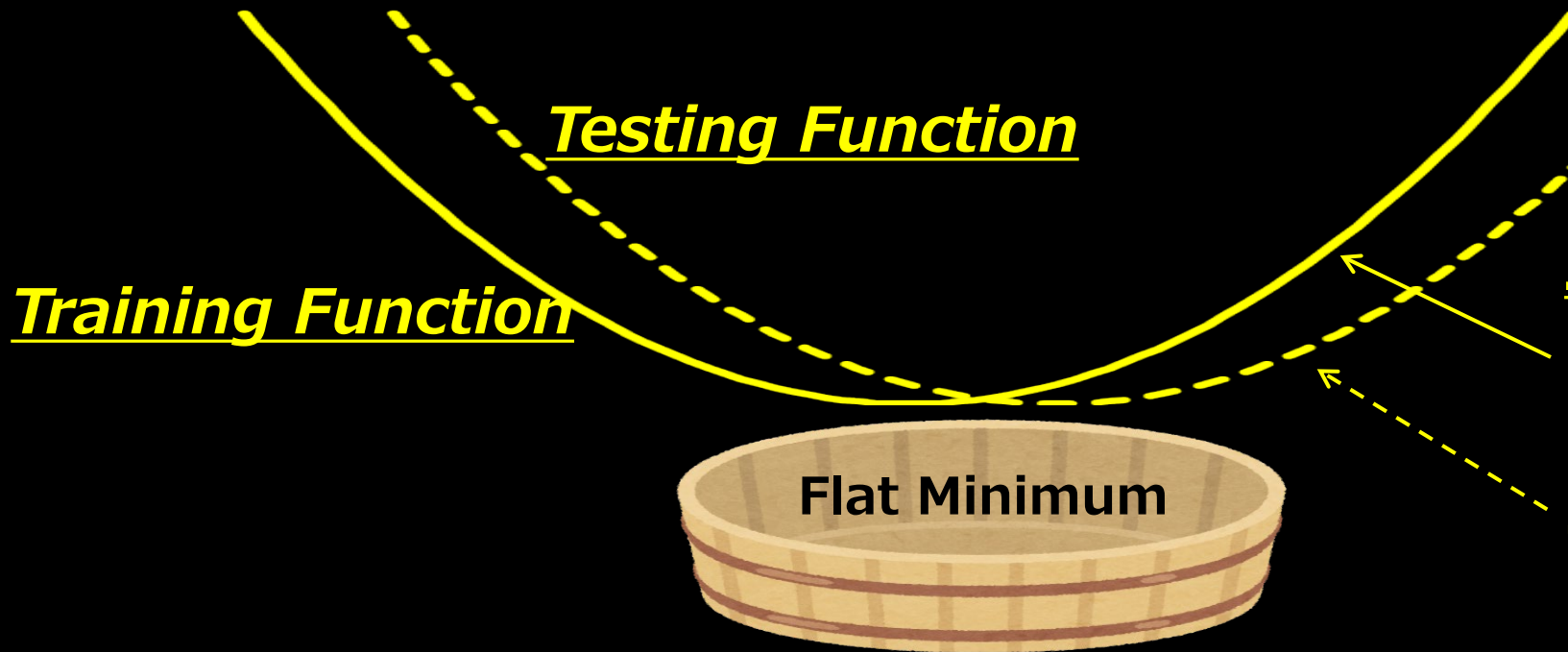
- 現場ごとにセンサの値の見え方が違う

例：センサの角度（加速度センサのXYZ）、周囲のノイズ、個体差、…
訓練データ（事前に集めたセンサの値）と現場で実際に得られた値がズれる



オンデバイス学習：必要性

- エッジAIの難しさ：訓練データ (training function) と現場環境 (testing function) の乖離が大きくなりがち



エッジAIの一般的な利用手順

1. 訓練データの収集 (どこか)
2. サーバ上で学習
3. 現場で推論

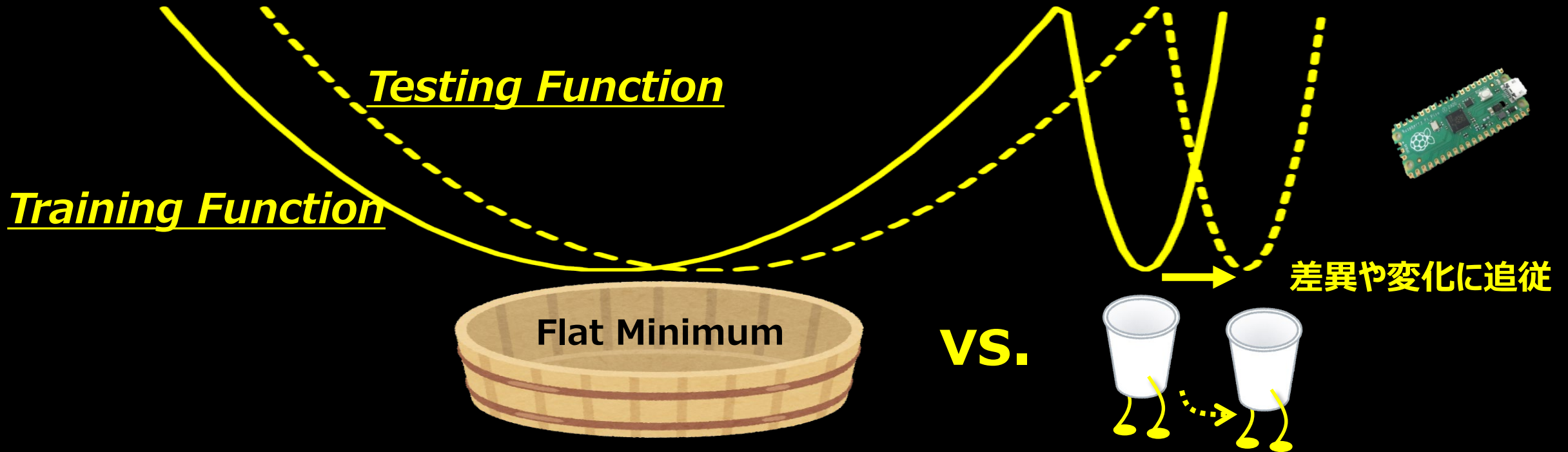
1~3が違う場所、違うタイミングで行われるのでズレやすい

一般的な解決策

- ✓ 差異を吸収できる高度な汎化性能
- ✓ 深層ニューラルネットワーク

オンデバイス学習：コンセプト

- エッジAIの難しさ：訓練データ（training function）と現場環境（testing function）の乖離が大きくなりがち



一般的な解決策

- ✓ 差異を吸収できる高度な汎化性能
- ✓ 深層ニューラルネットワーク

オンデバイス学習 [1]

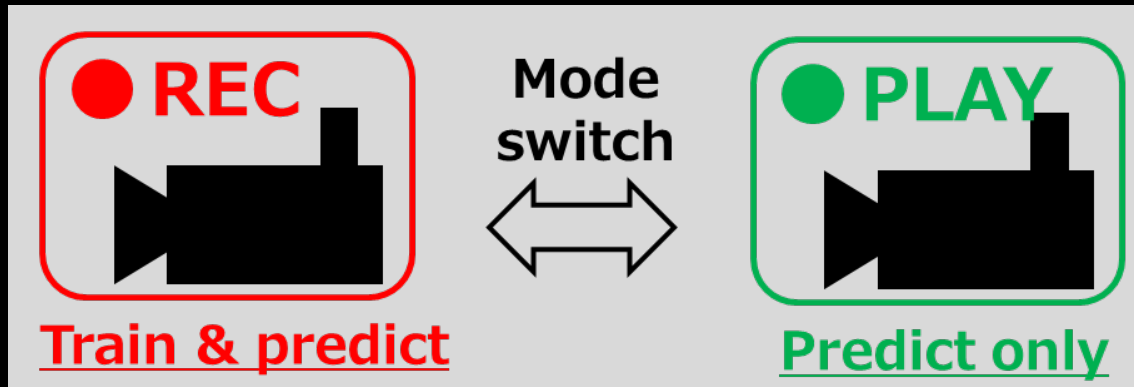
- ✓ 極小ニューラルネットワーク
- ✓ 現場で学習することで差異や変化に追従

オンデバイス学習：2つの動作モード

1. 学習モード

2. 推論モード

推論モードしかないエッジAIに、学習モードが追加されると何が出来る？



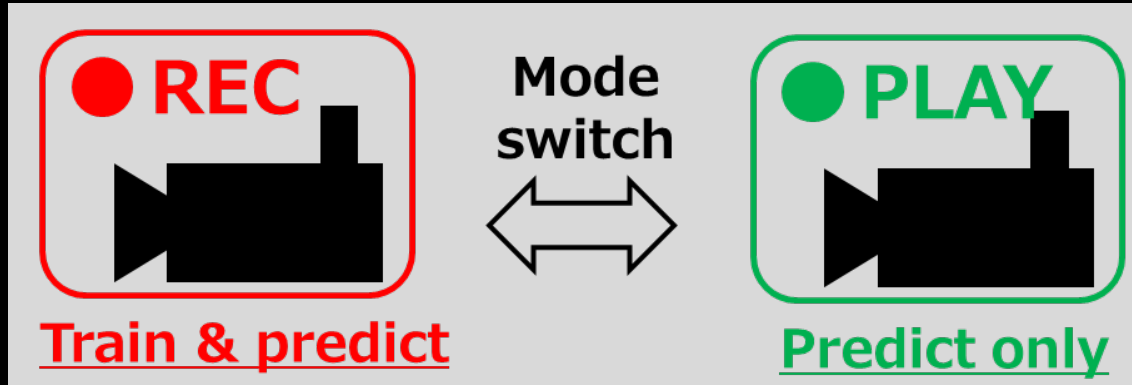
オンデバイス学習：2つのモード切替方法

1. 現場で工夫できるAI

現場のユーザが現場の判断で追加学習

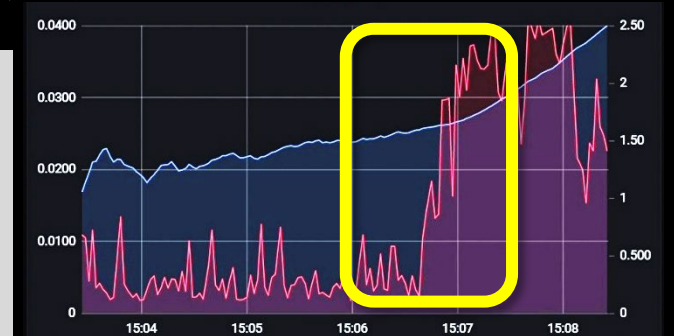


学習ボタンによる追加学習



2. 現場に適応できるAI

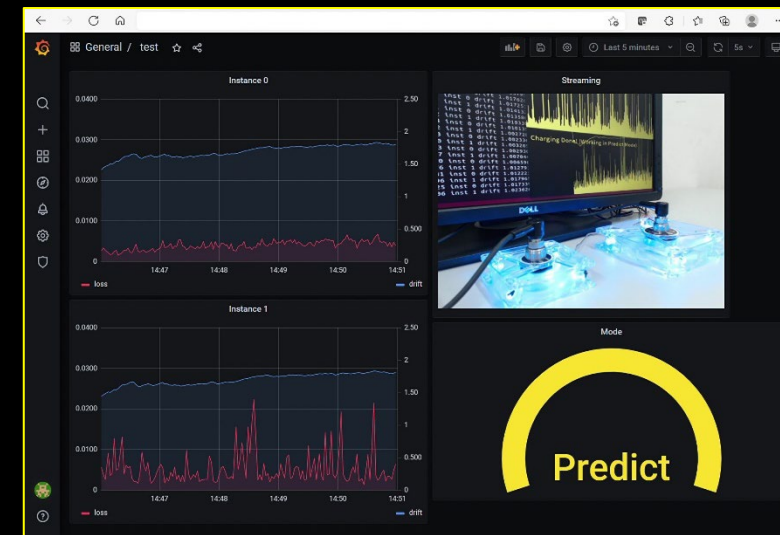
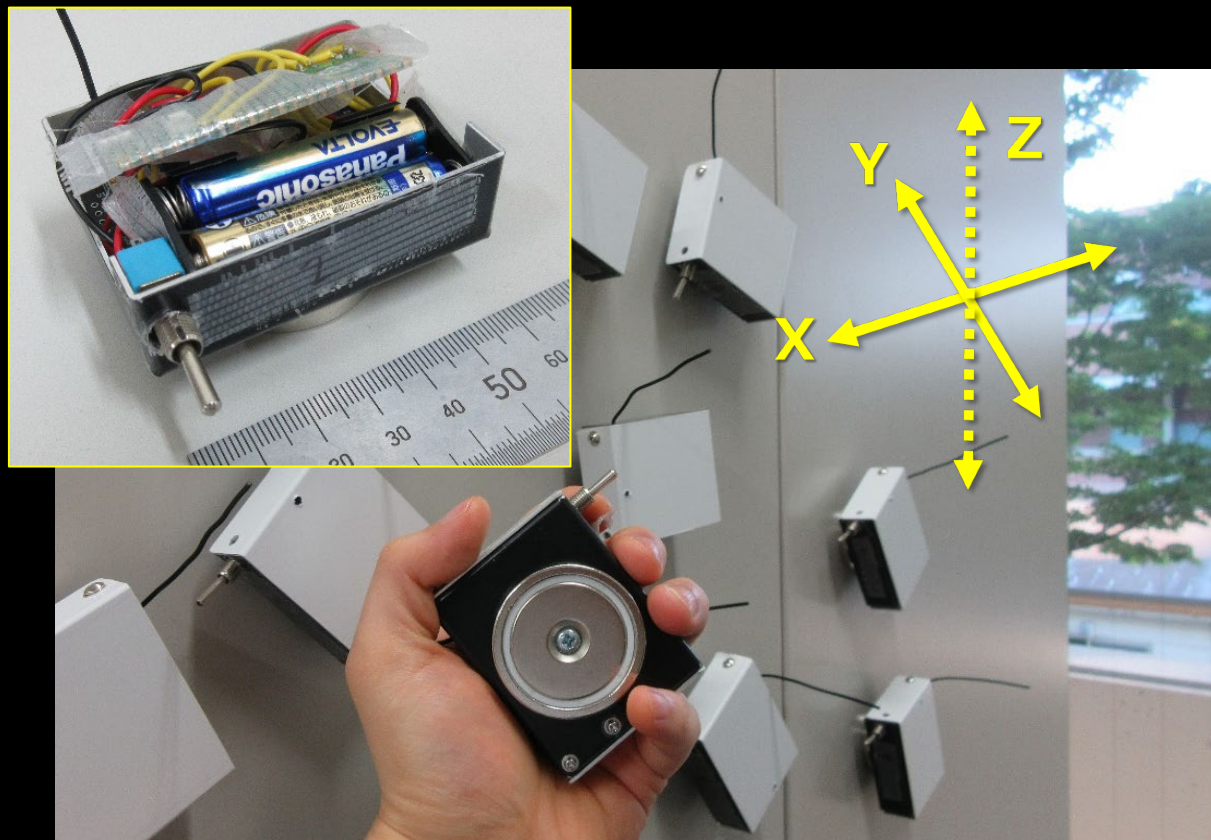
パターンの変化を自動で検知して追加学習



検知アルゴリズムによる追加学習

オンデバイス学習：2つのモード切替方法

- コンセプトドリフト検知と連動した自律的追加学習
環境変化を検知して自動的に追加学習 → 外乱に強い異常検知



Mode Change



Mode Change

オンデバイス学習：2つのモード切替方法

1. 現場で工夫できるAI

現場のユーザが現場の判断で追加学習

学習ボタンによる追加学習

1-2mW



20-30mW



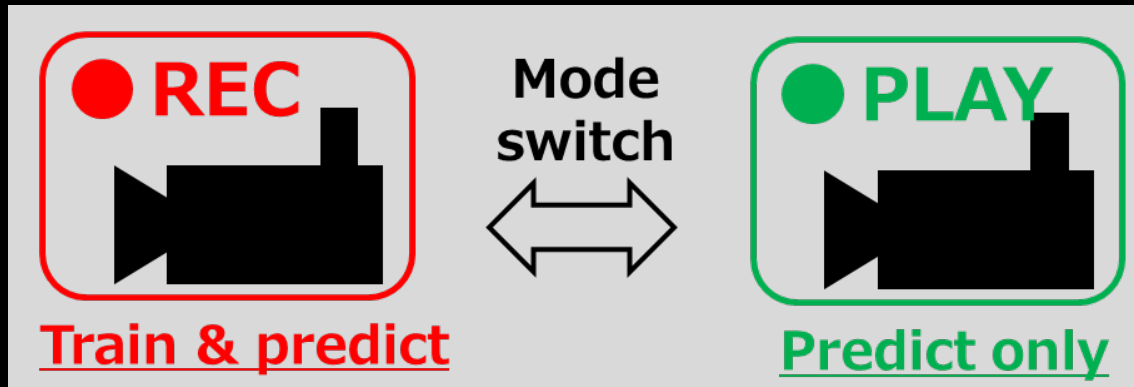
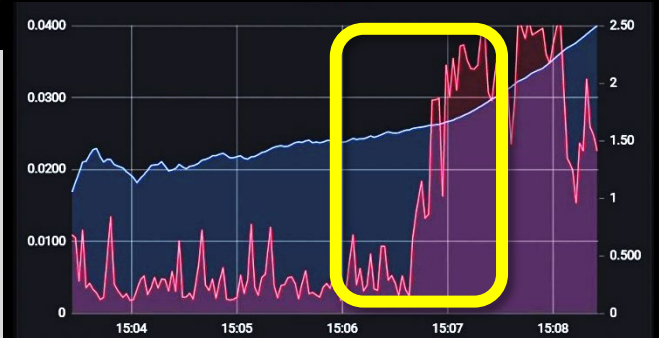
0.2-1W



2. 現場に適応できるAI

パターンの変化を自動で検知して追加学習

検知アルゴリズムによる追加学習



2-10W



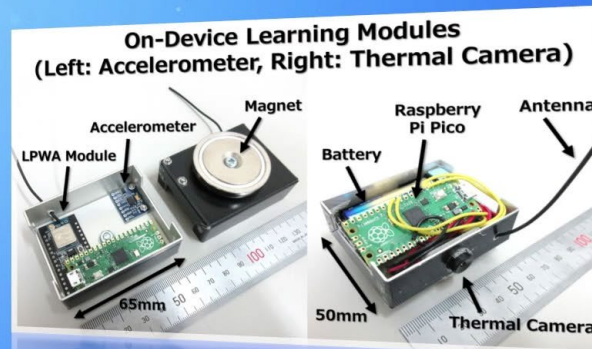
200W+



応用例：貼り付けるだけ異常検知器

実例1 慶大G

On-device learning
貼り付けるだけ異常検知器

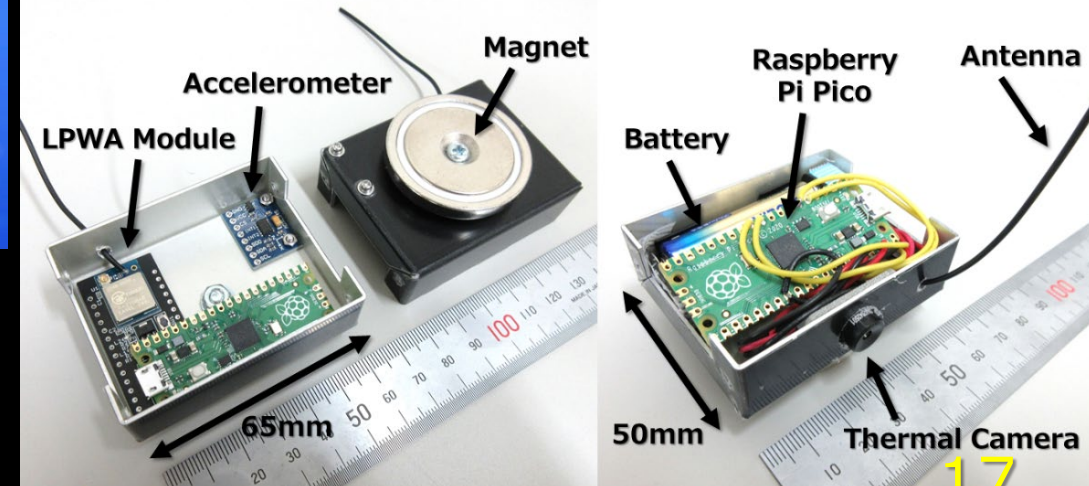


「貼り付けるだけ異常検知器」に電源を入れると学習開始です

On-Device Learning of Neural Networks on Wireless Sensor Nodes



On-Device Learning Modules (Left: Accelerometer, Right: Thermal Camera)



応用例：熱カメラ、振動センサ、監視カメラ、...



On-Device Learning

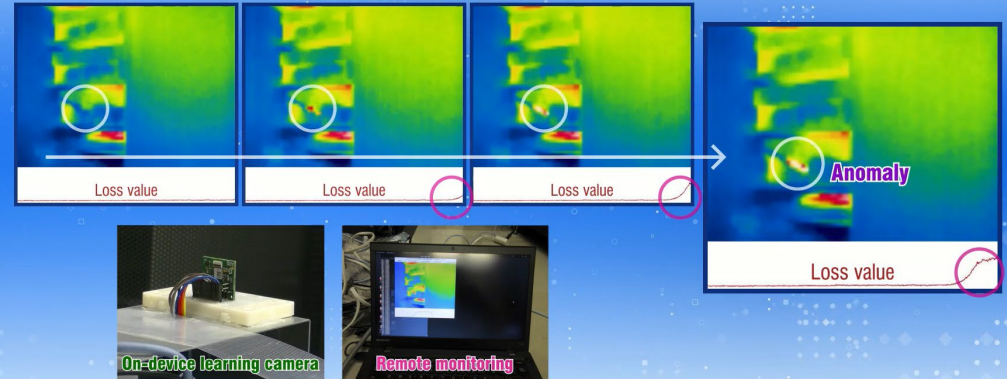
A New Edge AI for On-Site Learning

Hiroki Matsutani
Department of Information and Computer Science, Keio University

Masaaki Kondo
Graduate School of Information Science and Technology, The University of Tokyo

CASE 2 Server rack & computer

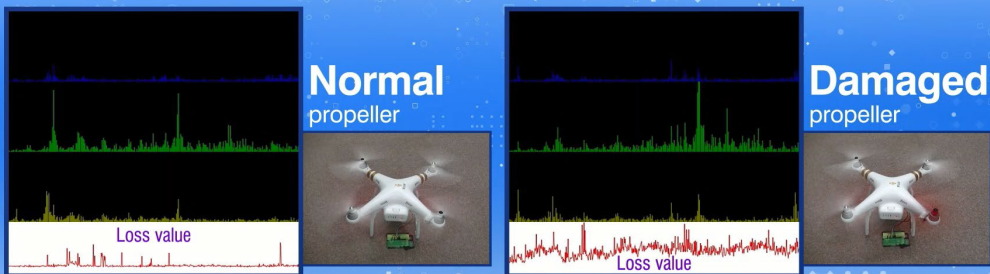
Heat map is learned → Detect unusual event



loss value that indicates difference from the normal pattern also increases.

CASE 3 Mobile robot (UAV)

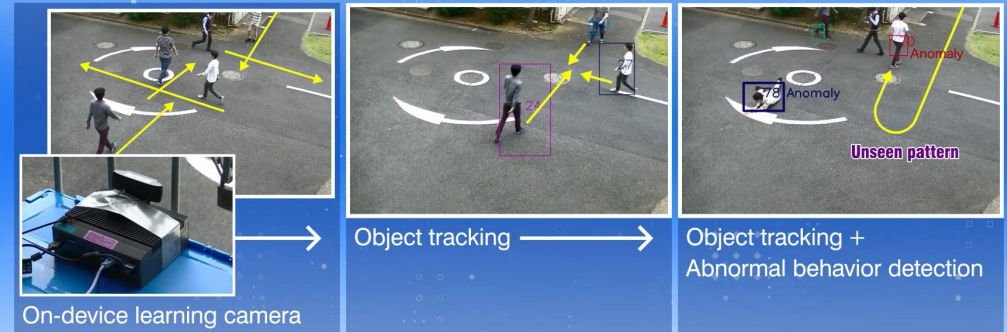
Normal propeller (white) and damaged propeller (red)
→ Detect anomaly pattern



The damaged propeller can be detected by comparing their loss values

CASE 4 Surveillance camera

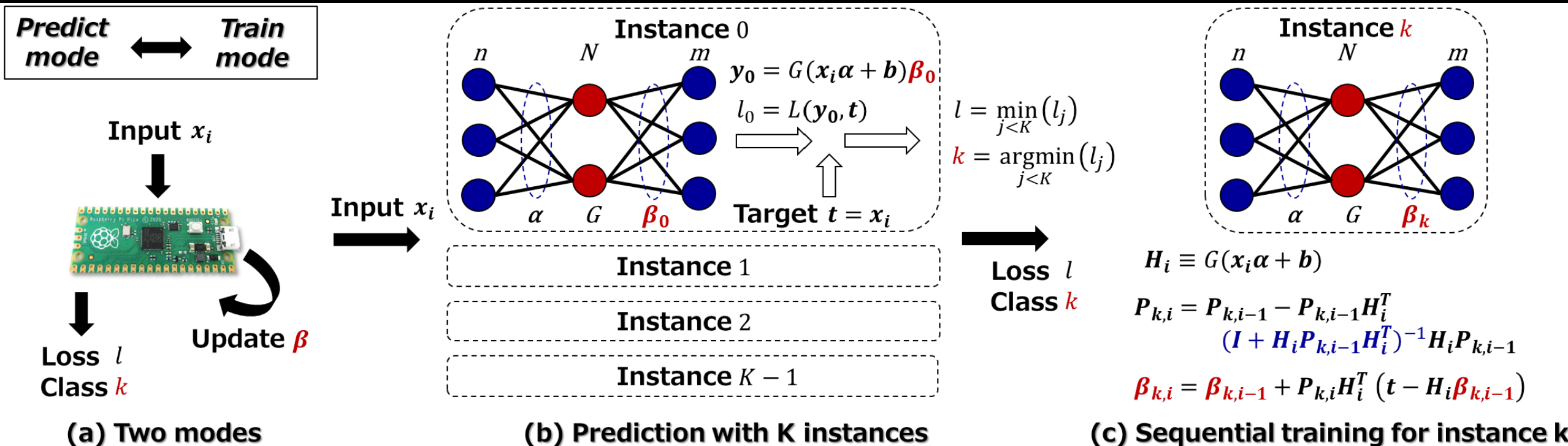
Normal behaviors differ depending on position/angle of camera
→ Normal should be learned autonomously



オンデバイス学習：アルゴリズム

- ニューラルネットワークの逐次学習アルゴリズム [1] を簡略化
- 正常パターンが複数あっても異常検知可能

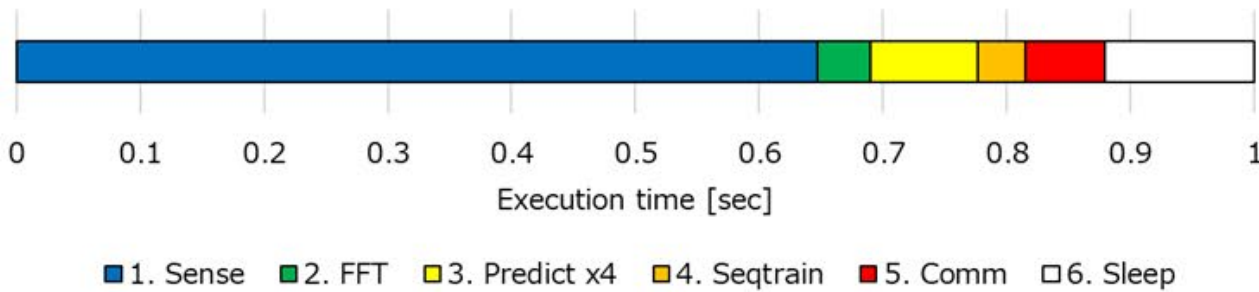
例：回転機械の異常検知（複数の回転速度、複数の動作モード、…）



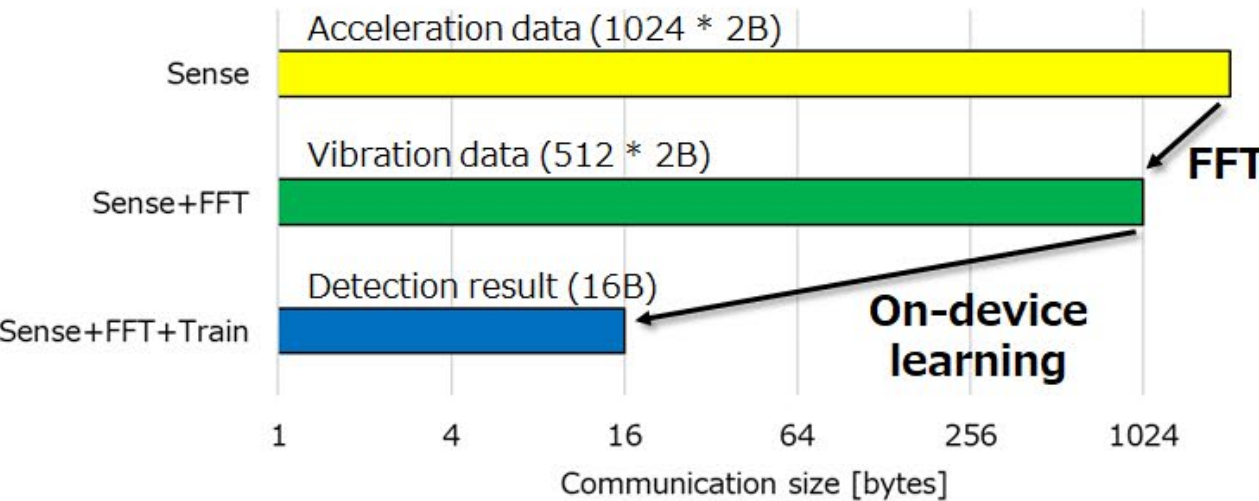
[1] N. Y. Liang, G. B. Huang, P. Saratchandran, N. Sundararajan, "A Fast and Accurate Online Sequential Learning Algorithm for Feedforward Networks", IEEE Trans. on Neural Networks, vol. 17, no. 6, pp. 1411-1423, Nov. 2006.

オンデバイス学習：通信量削減

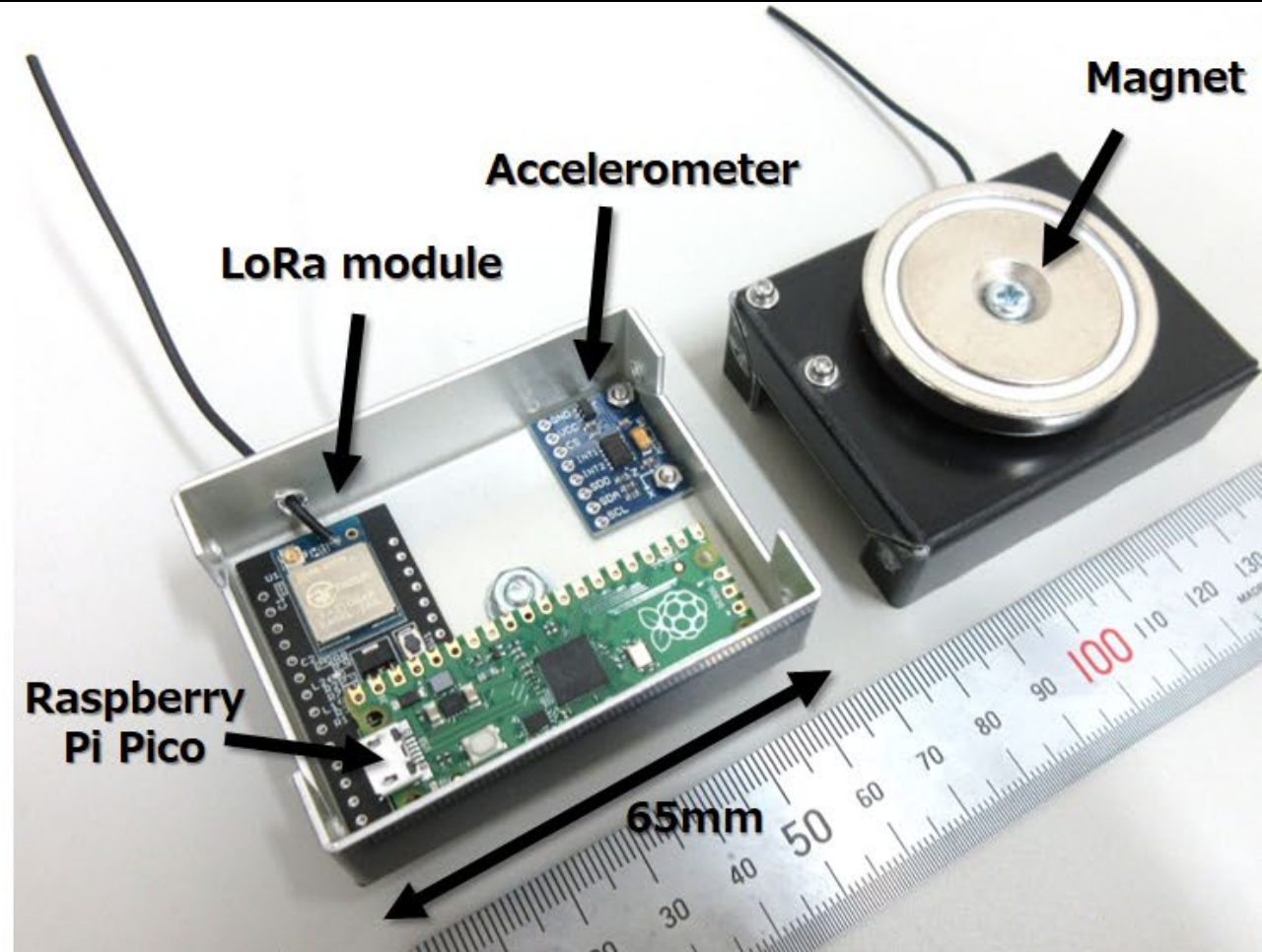
- 推論結果だけ送る（データは送らない） → 通信エネルギー削減



(a) Execution time of on-device learning (total)



(b) Communication size reduction by on-device learning

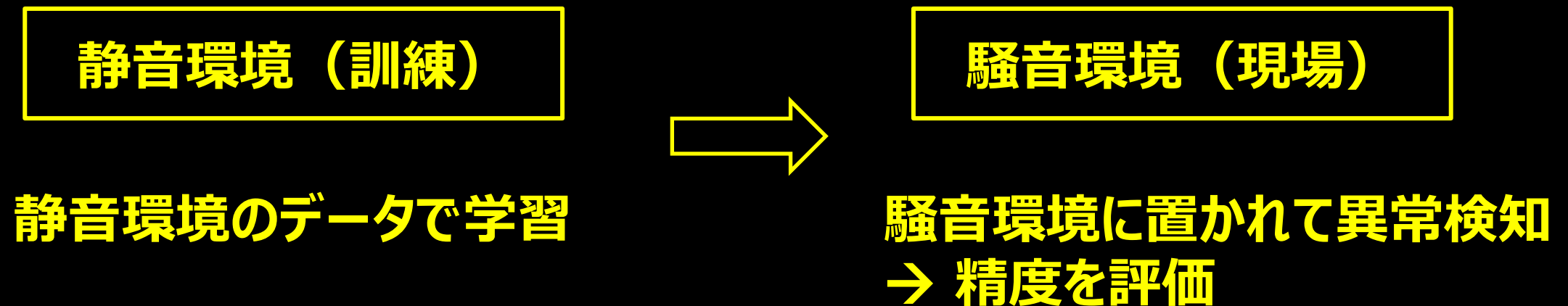


(c) Implementation of sensor node

オンデバイス学習：ファンの異常検知

- シナリオ：静音環境にて学習後、騒音環境に置かれて異常検知
 - 推論のみAI：騒音環境に適応できない
 - オンデバイス学習：騒音環境に適応できる

オンデバイス学習の利点：訓練データと現場環境の乖離が大きくても使える

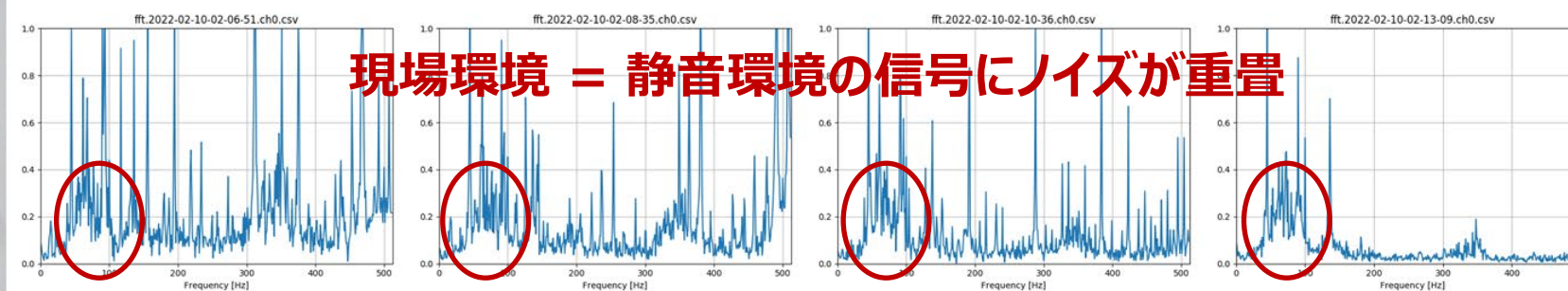
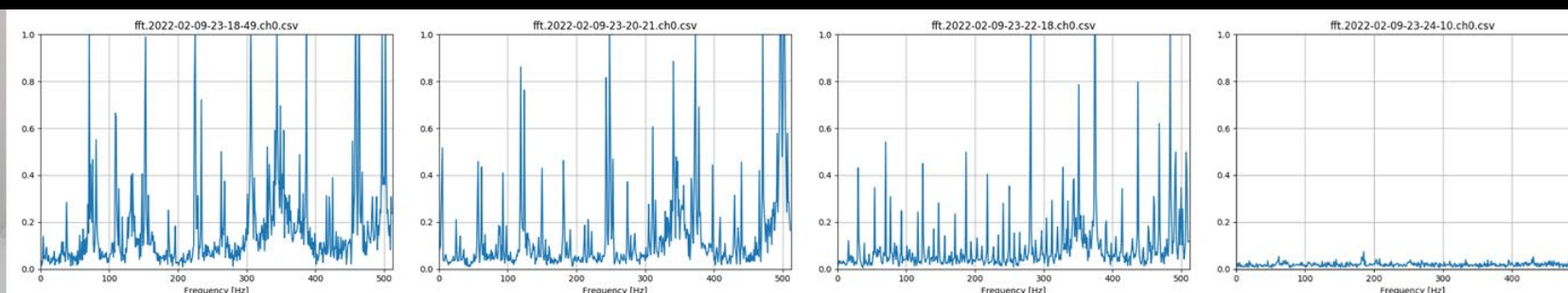
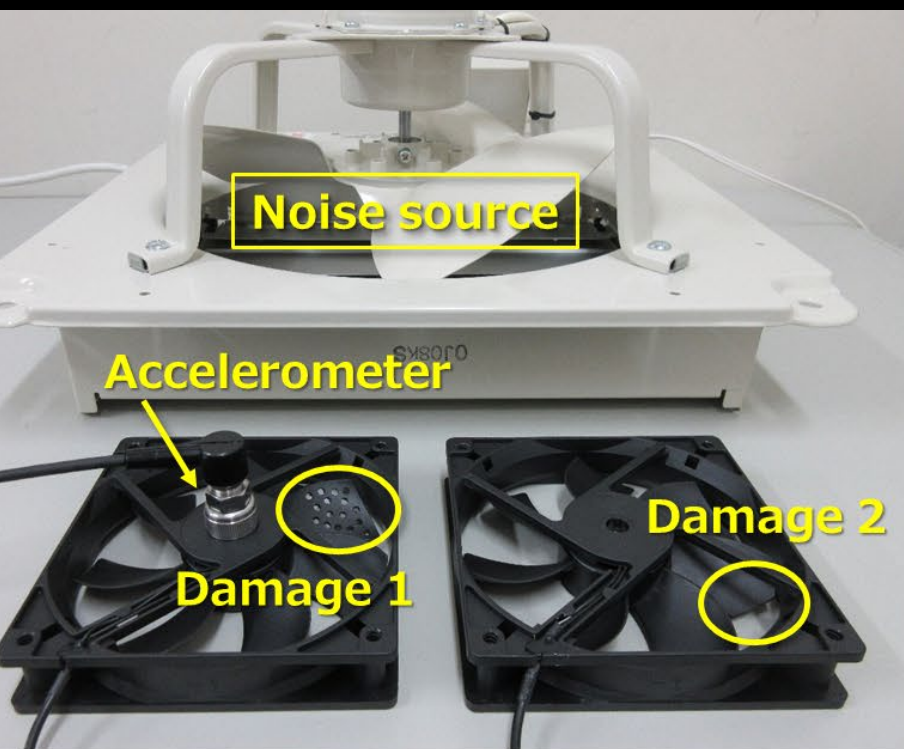


オンデバイス学習：ファンの異常検知

- シナリオ：静音環境にて学習後、騒音環境に置かれて異常検知

■ 推論のみAI：騒音環境に適応できない

■ オンデバイス学習：騒音環境に適応できる



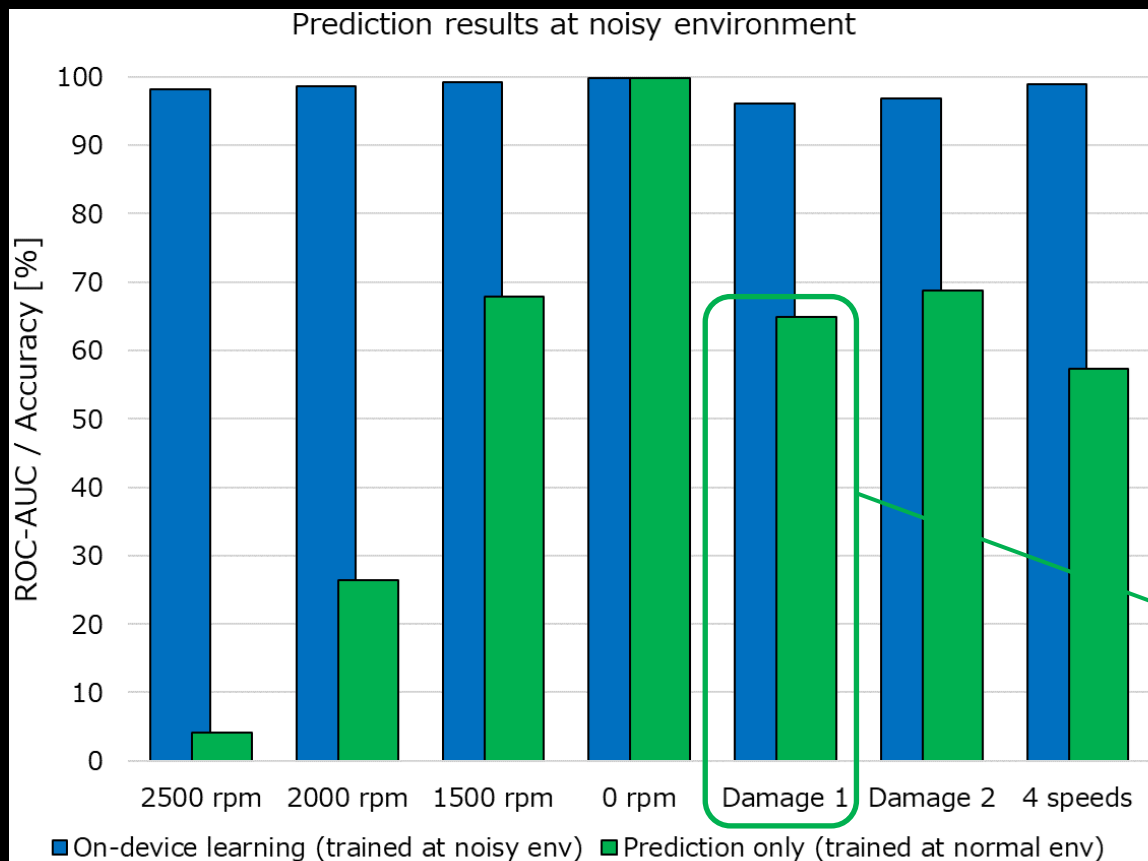
(静音環境：オフィス、騒音環境：換気扇の付近)

オンデバイス学習：精度

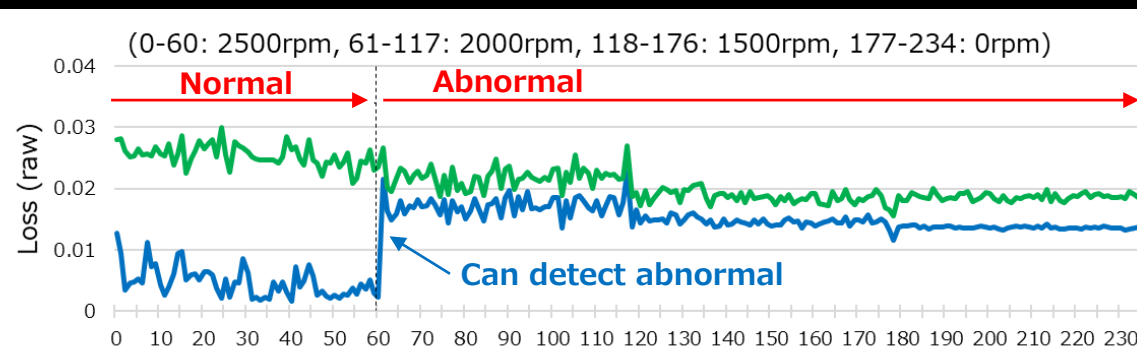
- シナリオ：静音環境にて学習後、騒音環境に置かれて異常検知

■ 推論のみAI：騒音環境に適応できない → 精度が大幅に低下 ☹️

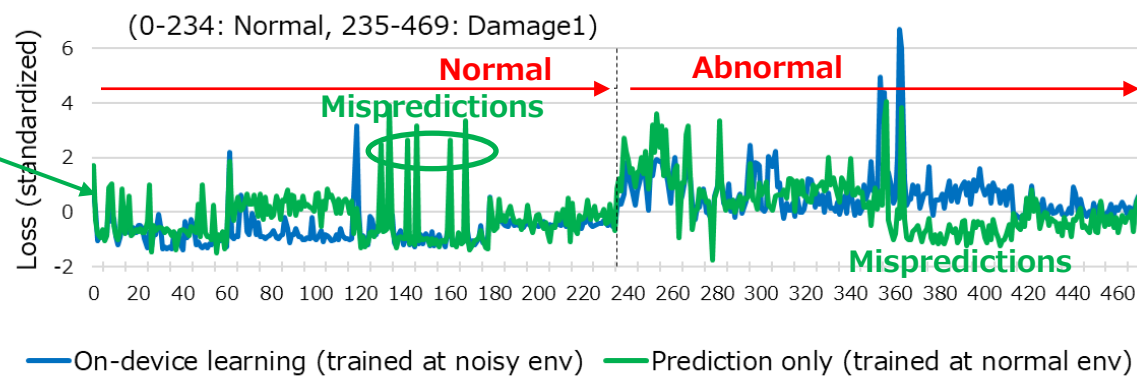
■ オンデバイス学習：騒音環境に適応できる → 高い精度をキープ 😊



(a) Summary of seven tasks



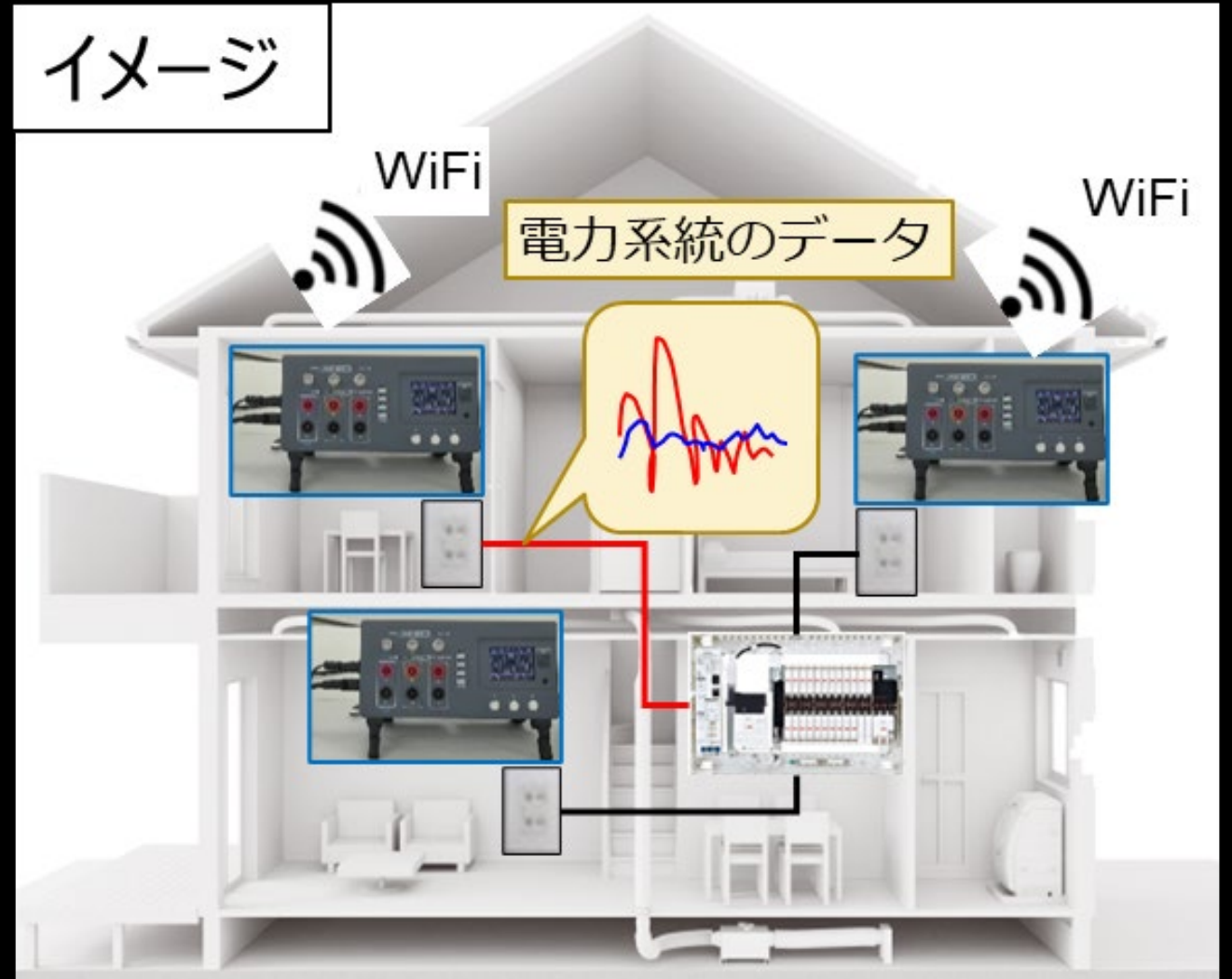
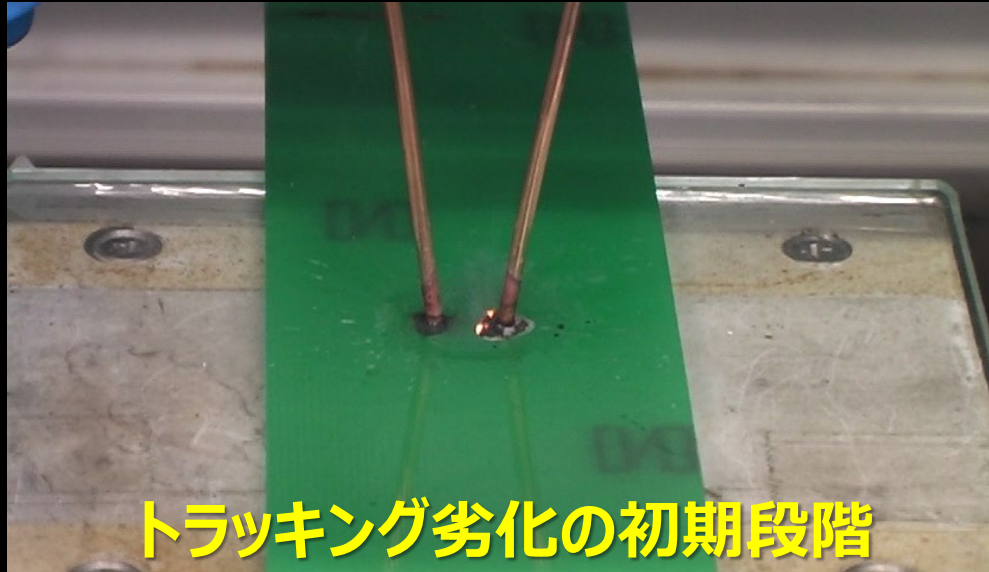
(b) Result of 2500rpm task



(c) Result of Damage1 task

応用例：電気火災の予兆検知（パナソニックG）

- オンデバイス学習によって、普段と異なるトラッキング劣化の予兆検出



応用例：電気火災の予兆検知（パナソニックG）

- モデルハウスでの実証実験



空気清浄機



冷蔵庫



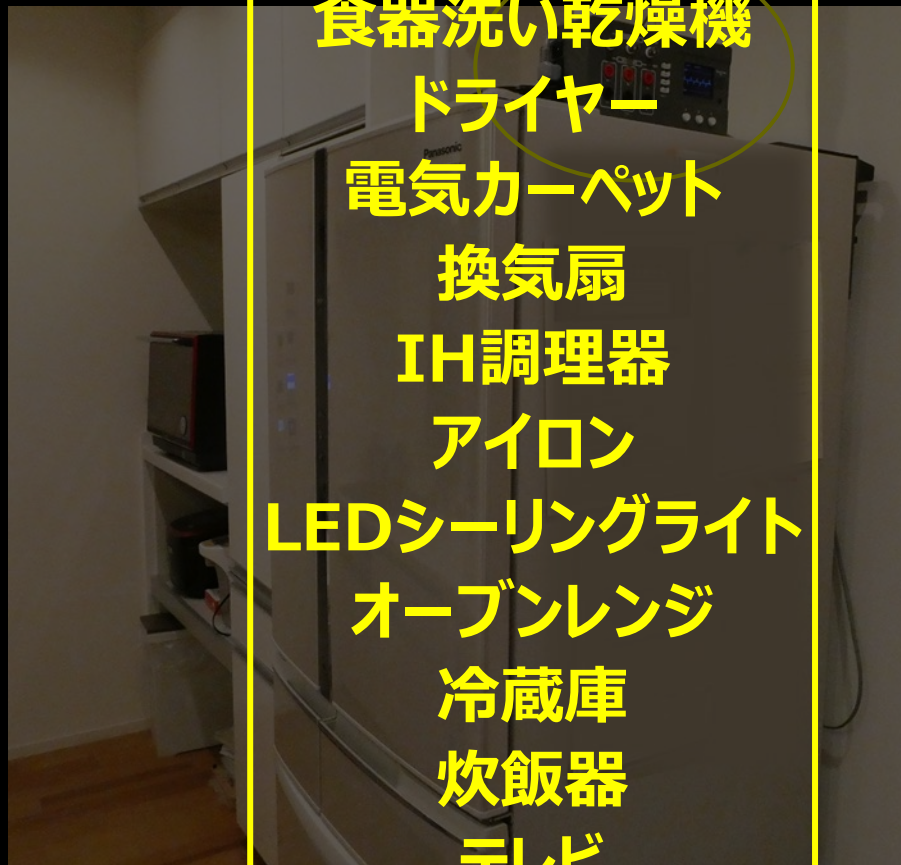
エアコン

応用例：電気火災の予兆検知（パナソニックG）

・家電データセットの公開



空気清浄機



名称	正データ数	異常データ数
空気清浄機	9	9
実験装置 エアコン	39	39
食器洗い乾燥機	20	20
ドライヤー	23	23
電気カーペット	7	7
換気扇	3	3
IH調理器	14	14
アイロン	3	3
LEDシーリングライト	9	9
オーブンレンジ	18	18
冷蔵庫	16	16
炊飯器	26	26
テレビ	3	3
掃除機	5	5
		実験装置 エアコン

応用例：異常動作検知（フィックスターズG）

- **ロボットアーム：周期運動**
周期性をオンデバイス学習
動きが遅くなると異常として検知

前段：物体認識（画像処理）

後段：オンデバイス学習（異常検知）



応用例：異常動作検知（フィックスターズG）

- **ロボットアーム：周期運動**
周期性をオンデバイス学習
動きが遅くなると異常として検知

前段：物体認識（画像処理）

後段：オンデバイス学習（異常検知）



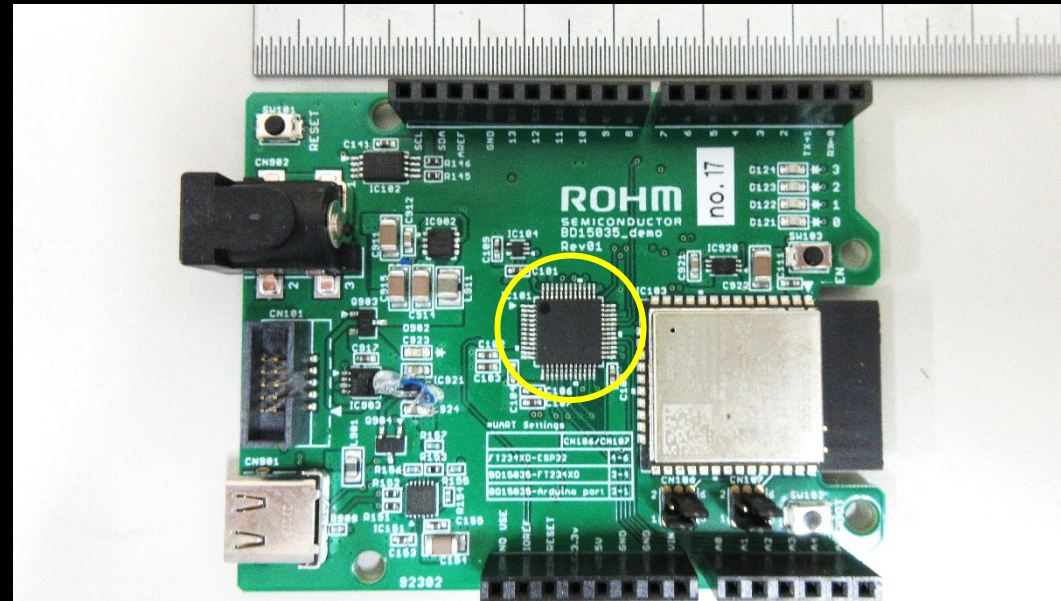
タブレット端末で動作し、
一定期間、アームの周期性を覚えさせる
→異常動作検知に使える

応用例：オンデバイス学習チップ^o（ロームG）

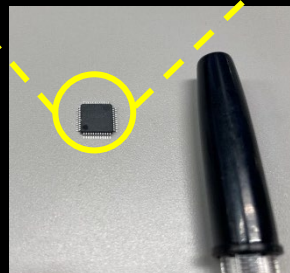
- オンデバイス学習のすそ野をセンサ・コントローラまで押し下げる

未知の入力データ → 「いつもと違う」を数値化して出力

8bit CPU (Matisse)	64kB Flash	
On-Device Learning Accelerator (AxICORE-ODL)	SRAM 448kB	
	LDO	OSC
	12bit ADC	
	UART/SPI/I2C	
	GPIO	



応用例：
モータの異常検知
や予知保全など



20-30mW



0.2-1W



2-10W



200W+

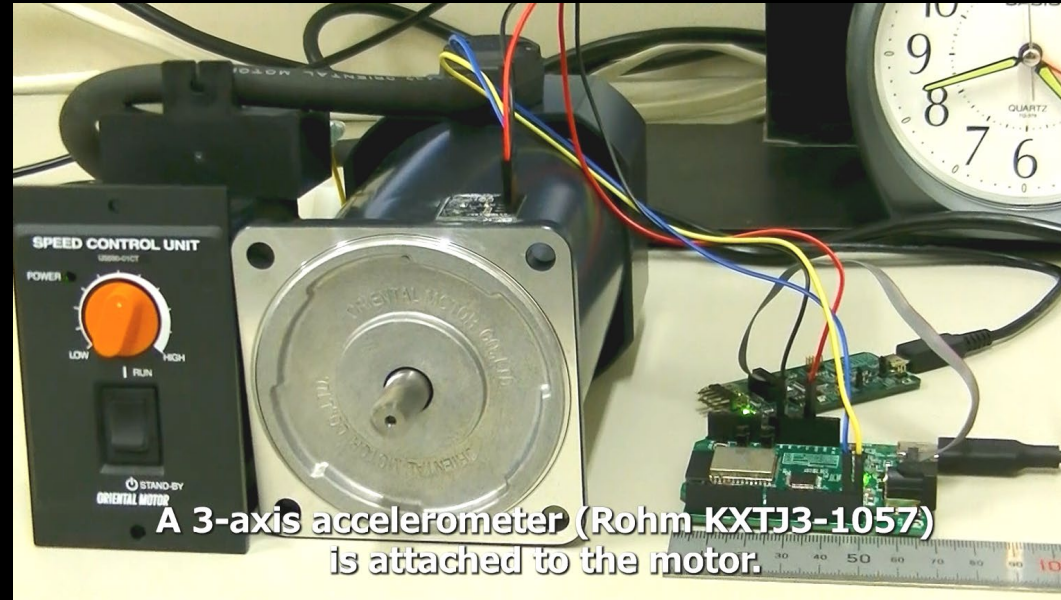


応用例：オンデバイス学習チップ[®]（ロームG）

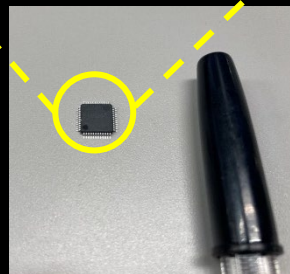
- オンデバイス学習のすそ野をセンサ・コントローラまで押し下げる

未知の入力データ → 「いつもと違う」を数値化して出力

8bit CPU (Matisse)	64kB Flash	
	SRAM 448kB	
	LDO	OSC
On-Device Learning Accelerator (AxICORE-ODL)	12bit ADC	
	UART/SPI/I2C	
	GPIO	



応用例：
モータの異常検知
や予知保全など



20-30mW



0.2-1W



2-10W



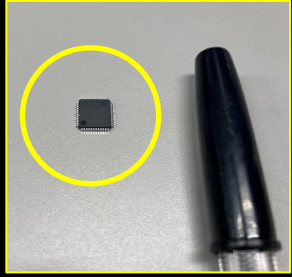
200W+



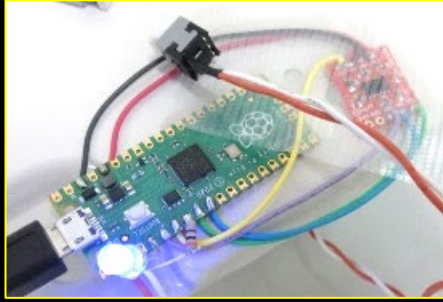
[1] ローム株式会社, 2022/9/27プレスリリース, "クラウドサーバー不要、現場でリアルタイムの故障予知を実現する、数10mW超低消費電力のオンデバイス学習AIチップを開発".

オンデバイス学習：各種プロトタイプ

(As of Nov 2022)



AIチップ
(ロームG)



\$5



\$10



\$50

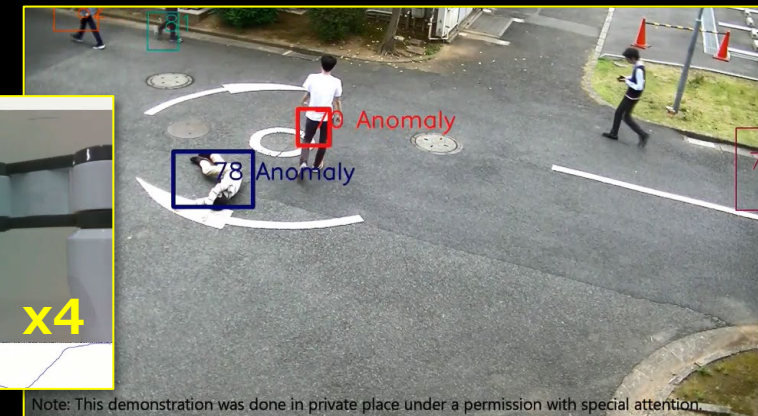
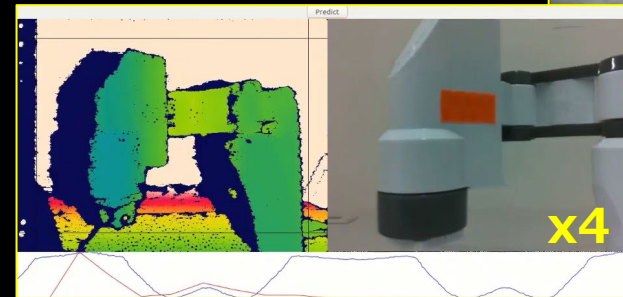
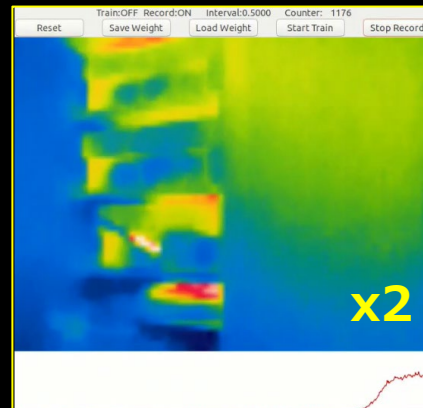
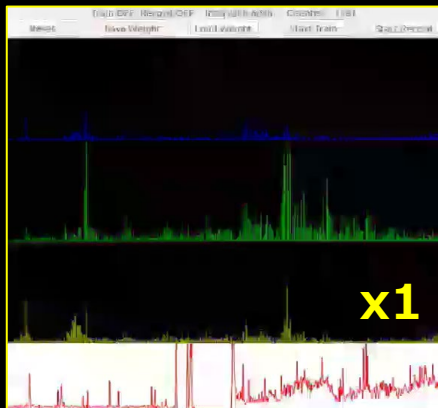
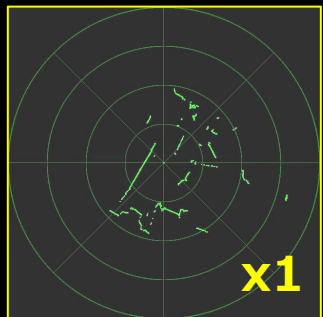


\$500+

FFT

画像処理

物体追跡



LiDAR

加速度センサ

熱カメラ

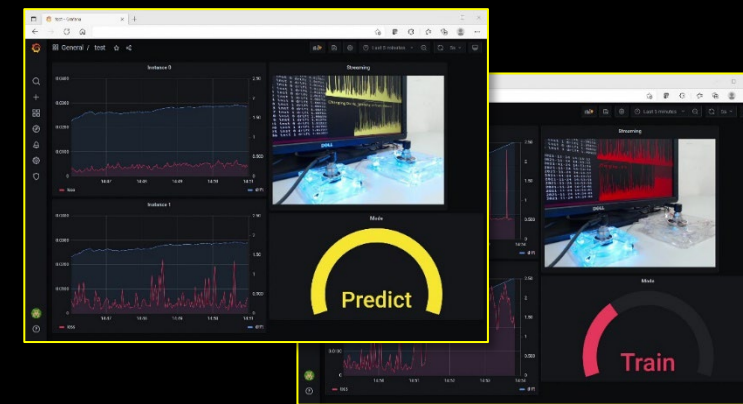
深度カメラ

RGBカメラ

オンデバイス学習：まとめ

- **エッジAI：現実空間で動作する組み込みAI**
 オンデバイス学習によってIoTデバイス側に新たな付加価値を持たせる
 AIならではの「学習に伴う煩雑さ」の軽減
 (教師データの準備、学習コスト、モデルの版管理など)

Monitoring anomaly scores of edge devices



知的処理・付加価値



Cloud AI	Sensing	Prediction, Training, Monitor & control
Edge AI	Sensing, Prediction	Training, Monitor & control
On-device learning	Sensing, Prediction, Training	Monitor & control

謝辞

本研究はJST CREST JPMJCR20F2の支援を受け、株式会社フイックスターズ、理化学研究所、パナソニックホールディングス株式会社、ローム株式会社と協力して実施したものです。