

NEDO委託事業
「IoT推進のための横断技術開発プロジェクト」
2016年度～2021年度

**超高効率データ抽出機能を有する
学習型スマートセンシングシステム(LbSS)
の研究開発と実証実験成果**

機器に貼るだけ！環境発電無線センサで楽々IoT！

LbSSプロジェクトリーダー 藤田 博之 東京都市大学教授

技術研究組合 NMEMS技術研究機構

(株)日立製作所、東京電力ホールディングス(株)、(株)東光高岳、ローム(株)、富士電機(株)、オムロン(株)、(株)鷺宮製作所、(一財)マイクロマシンセンター、静岡大学、東京大学【再委託】、(一財)電力中央研究所【再委託】

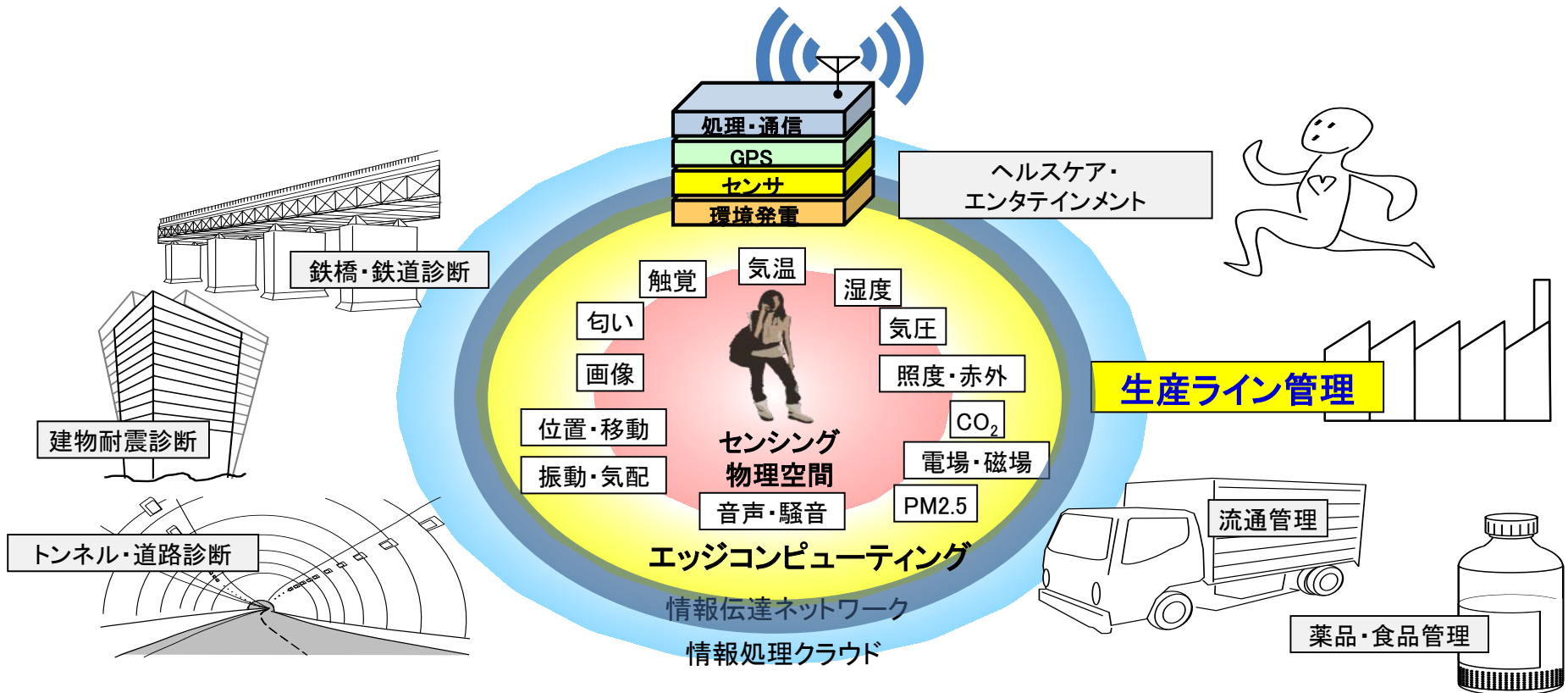
- この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務(JPNP16007)の結果得られたものです。

IoT センシングネットワークと無線センサ



無線センサネットからスマートセンシングシステムへ

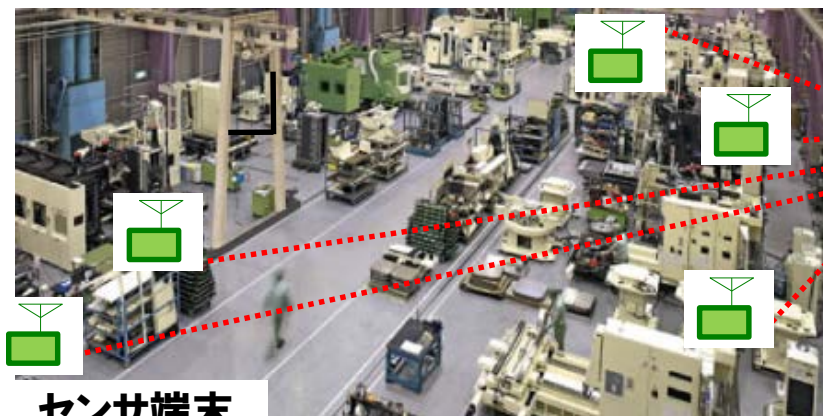
- 測定すべきパラメータ(例:周波数帯域)を自動調整
 - 測定データから知りたい情報を自動抽出
 - 有価情報の抽出で、送信データを圧縮
 - 無線通信、無給電、無交換(電池)
- センサ選定が楽
信号の解析が楽
通信と蓄積が楽
センサ設置が楽



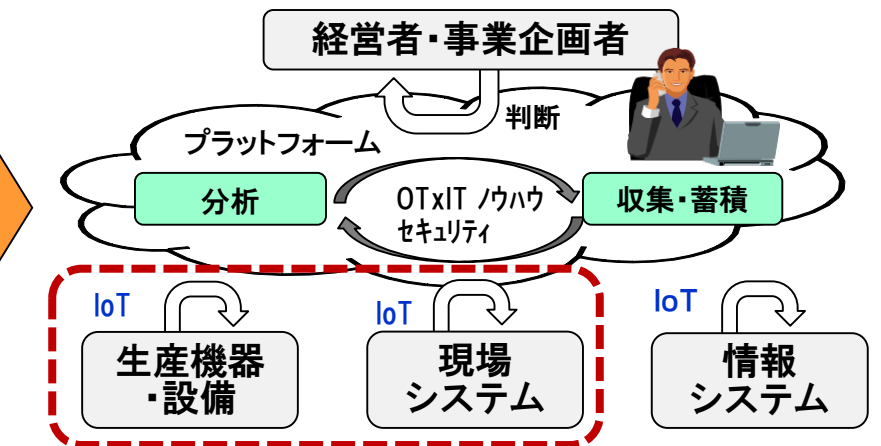
スマートセンシングシステムの研究概要

- **背景**: 工場のデジタル化が進展する中、IoTによる生産性向上が喫緊の課題であり、既設**ラインやレガシー設備**(工作機械の80%以上が導入から10年超)へのセンサ設置とネットワーク接続が必要なため
- **内容**: 学習機能を備えた**エッジ処理**により**データ量・データ送信量を削減するスマートセンシングシステム**、**高信頼無線通信**による動的センシングで**自動最適化するスマートセンサ端末**(赤外線アレ、ガスセンサ)、センサ端末の無給電動作を実現する**環境発電(振動発電)**
- **目標**: 多種多様な機器・設備から高効率に**有用データを抽出(従来比100倍)**、設備環境から高効率で**振動発電(500 μ W)**
- **効果**: **工場の機器制御や状態判断を、環境を問わず取り出せるエネルギー(振動、光、熱)で実現するシステムを、機械停止なく軽い設備負担で構築可能**

生産システムからの個別データ収集・監視



センサ端末



経営効率化のための現場情報の収集*

* 出典: 日立評論 2016 Vol.98 NO.4 P.58

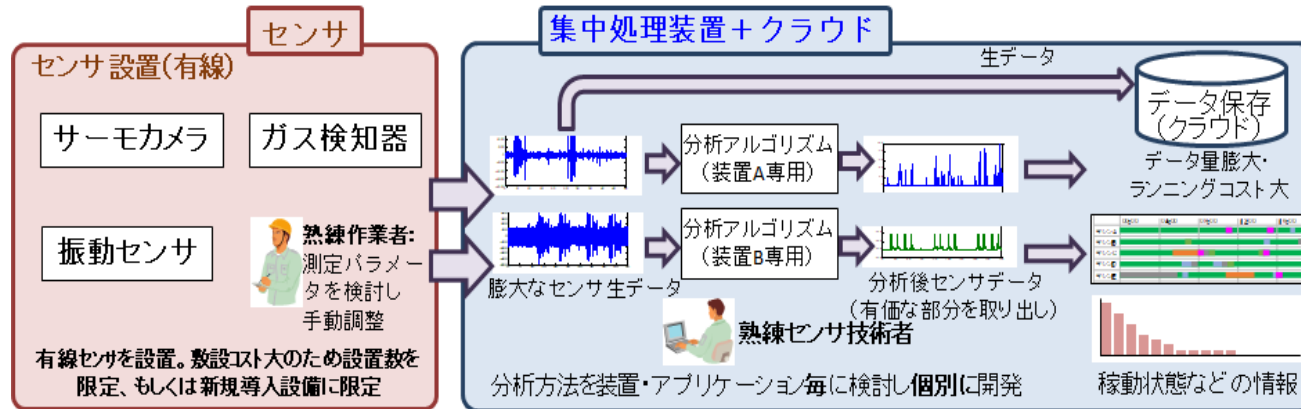
スマートセンシングシステムの優位性

■IoT(工場のデータ収集) 導入のハードル (従来技術)

- ・種類/型式の異なる設備状態を把握するにはシステムの個別開発、センサ毎の個別調整と実験の繰り返しによるアルゴリズム検証が必須
- ・センサ設置/配線工事やセンサ維持管理コスト高く、広域への多数設置は困難



PoCだけで終わって
本格導入に至らない！

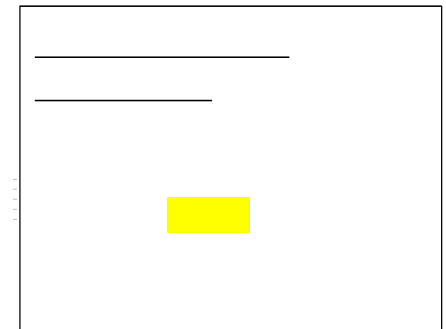
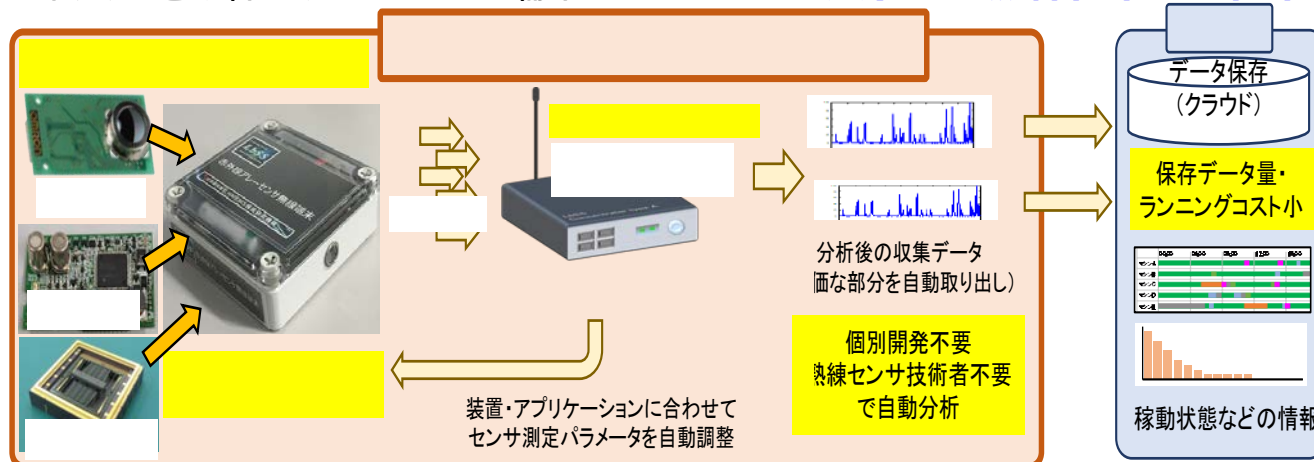


測定対象毎に開発・調整が必要

- ・測定対象となる設備数が制限される
- ・センサ設置/運用開始に長期間(8週間~)

■LbSSシステムの優位性

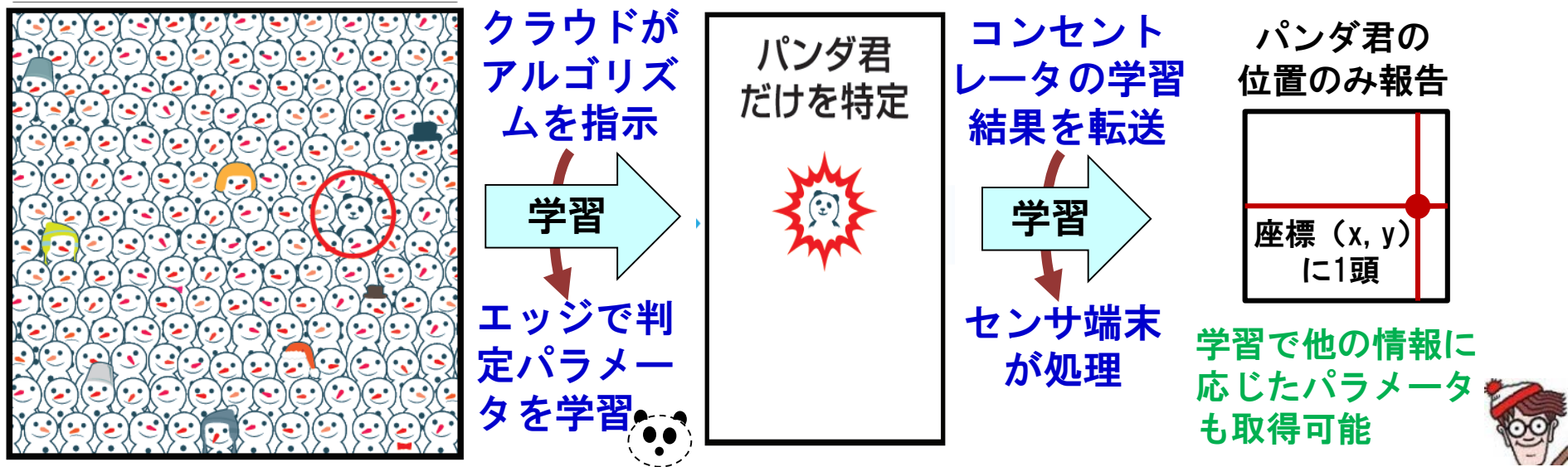
- ・学習型分析アルゴリズムで個別のシステム開発・調整・実験を不要とし、**導入に必要な期間を1/8に削減**
- ・環境発電動作の無線センサ端末により**設置コスト小**、**熟練作業者の作業不要**で容易に設置可能



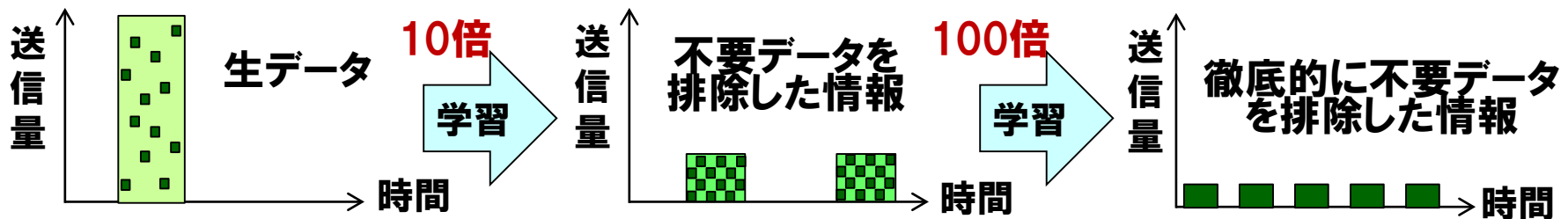
学習型スマートセンシングシステム の概念

■ 課題: 従来のクラウド集中型では、通信負荷・コスト増大で大規模工場監視が困難

■ 解決手段: **学習式エッジ分散型**を用い、環境発電で収集する**情報密度を100倍増**

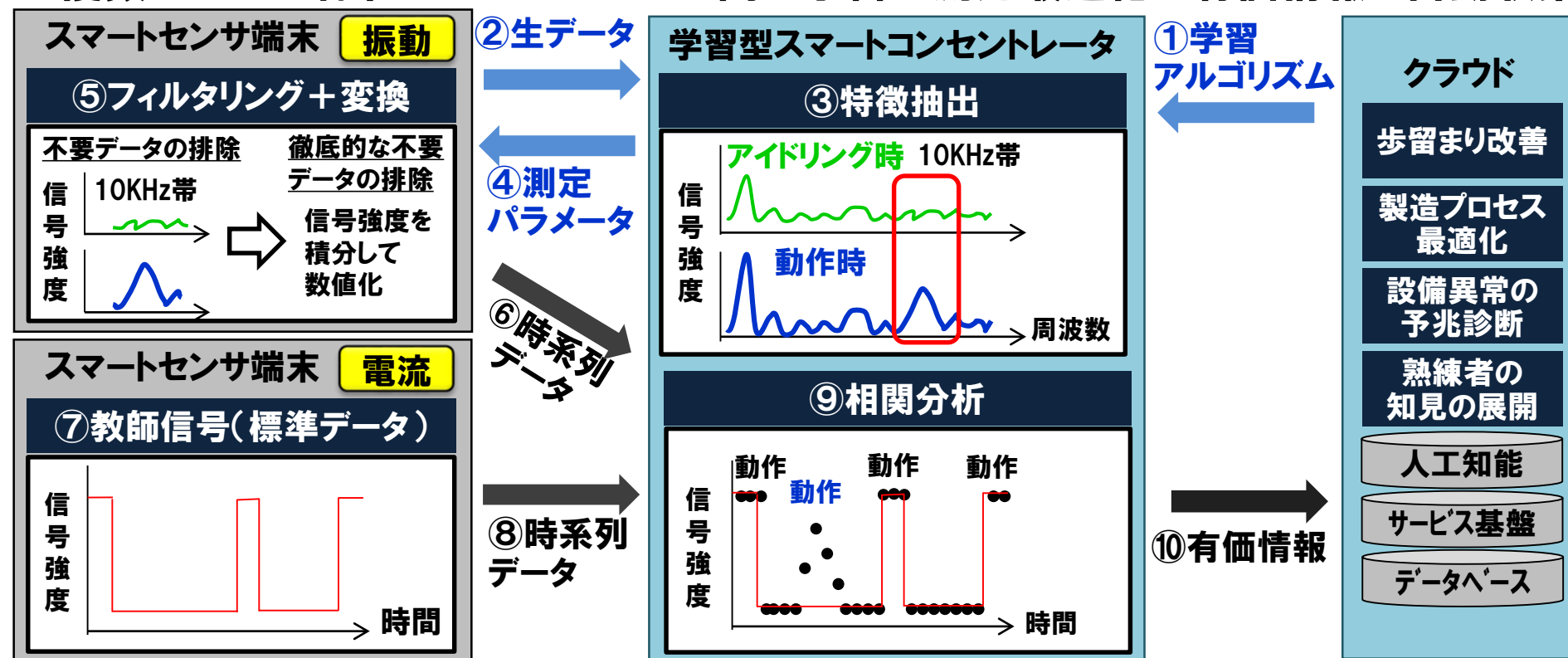


⇒ 生データの送信は非効率的、**不要データを排除した情報**のみの送信が効率的



学習型センシングアルゴリズム: 複数センサによる稼働状況監視の例

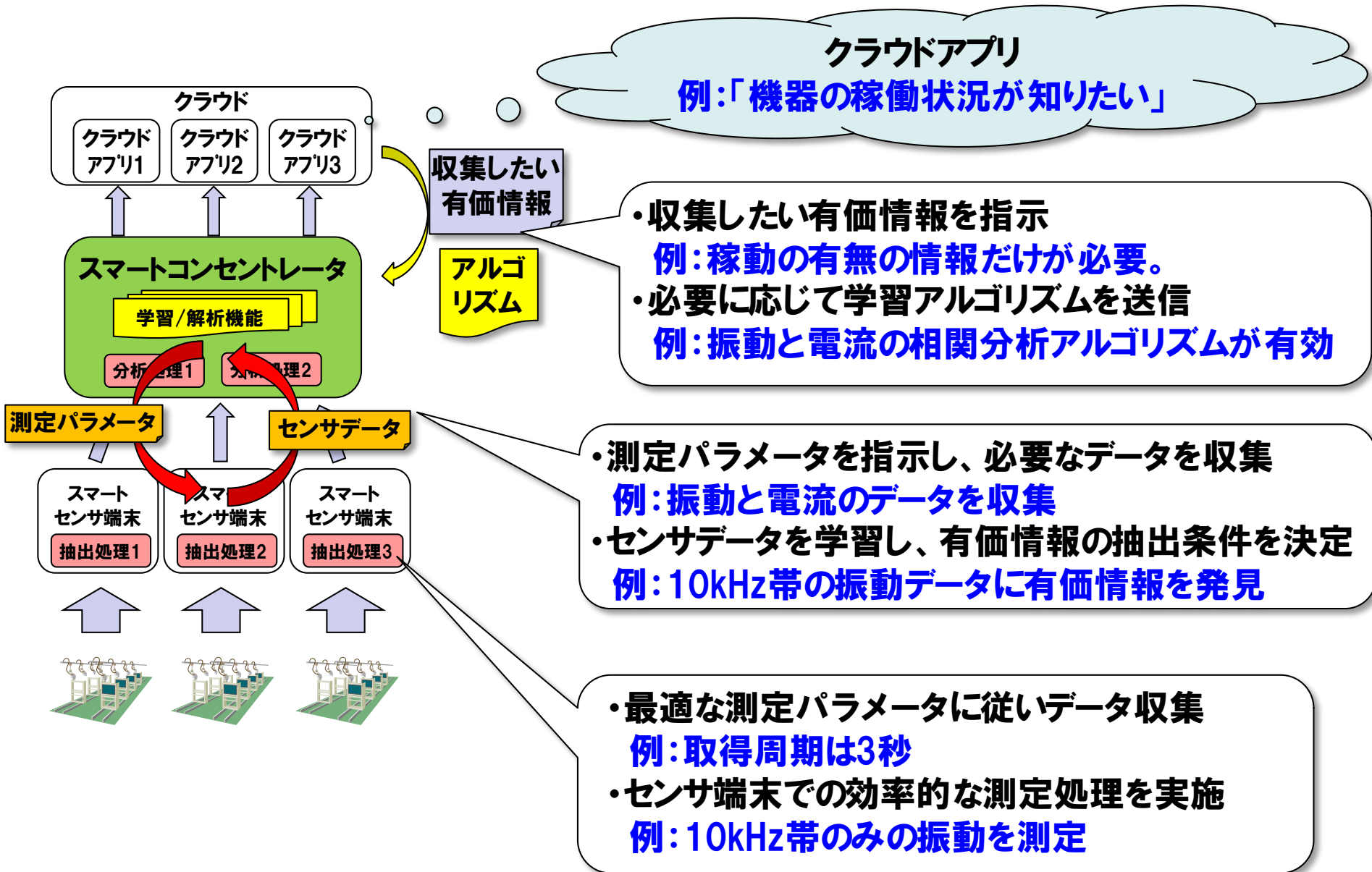
■ 複数のセンサ端末ーコンセンレータ間の学習や測定最適化で有価情報を自動収集



有価情報量100倍(送信頻度増・送信量減・センサデータ連携増)で新たに実現すること

歩留まり改善	秒単位のリアルタイム稼働状況監視と工程品質向上
製造プロセス最適化	工場全体に亘る多種多様な生産物の仕掛状態の一括・一貫モニタリング
設備異常の予兆診断	長期的な保守状況の履歴蓄積によるデータベース構築とデータ解析
熟練者の知見の展開	点検自動化と機器情報の見える化による統合的管理

学習型スマートセンシングの流れ



研究開発項目内容および役割分担

スマートセンサ端末要素技術開発

①- (1) スマートセンシング

フロントエンド (SFE) 回路 (日立製作所)

①- (3) 低電力無線モジュール (ローム)

② 産業向けスマートセンサ

(1) 省電力ガスセンサ (富士電機)、

(2) 赤外線アレーセンサ (オムロン)

③ 微小振動で高出力可能な自立電源

(鷺宮製作所、静岡大学、マイクロマシンセンター、再委託 [東京大学、電力中央研究所])

500 μ W振動発電
+ 省電力デバイス

自律センサノード

①- (2) 産業設備の状態監視

アルゴリズムの検証

(東京電力ホールディングス)

①- (4) 生産設備における

LbSSシステムの実証実験

(東光高岳)

動的パラメータ変更

五感代替計測

複数ガス検出 +
特定ガスを選択

広視野 + 注視

学習で最適化

クラウド

分析・管理

DB

経営情報として
フィードバック

従来比100倍の
有価情報を取得

稼動状況

保守状況

工程品質

学習
支援

多様な対象に対応

学習 + 複数センサ融合

①- (1) 学習型スマート

コンセントレータの開発

(日立製作所)

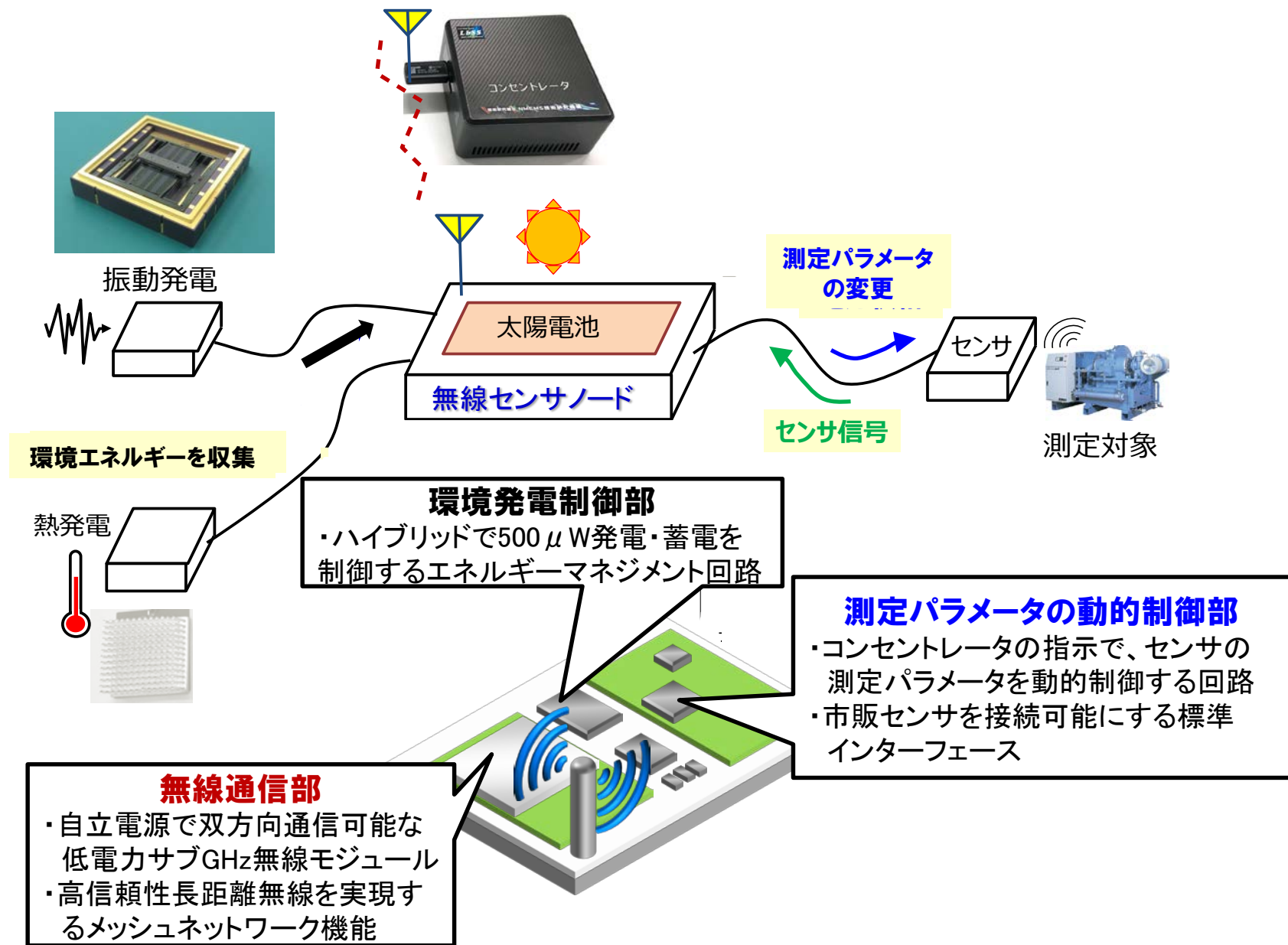
測定対象と環境を学習・判断し
測定パラメータに自動反映

高信頼双方向通信

動的センシング制御

ハイブリッド環境発電(500 μ W)と無線スマートセンサ端末

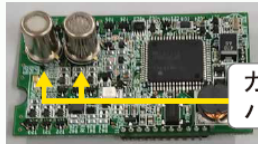
学習型コンセントレータ



開発した無線スマートセンサ端末

- 学習した結果により測定パラメータを可変とするスマートセンサを開発
- これにより、柔軟なシステム構築と環境発電で動作する低電力性を同時実現

省電力マルチガスセンサ(開発品)



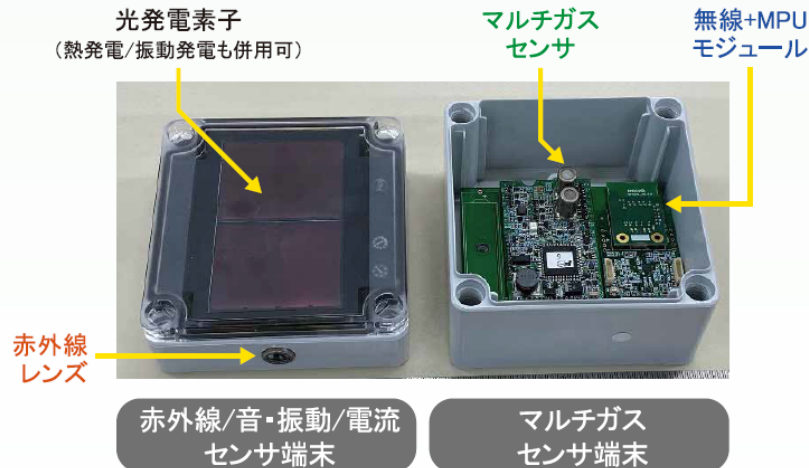
ガスセンサ
パッケージ

- 6種のガスセンサを搭載
- 状況により使用センサ選択、加熱パラメータ変更で省電力化

パラメータ可変型赤外線アレーセンサ(開発品)

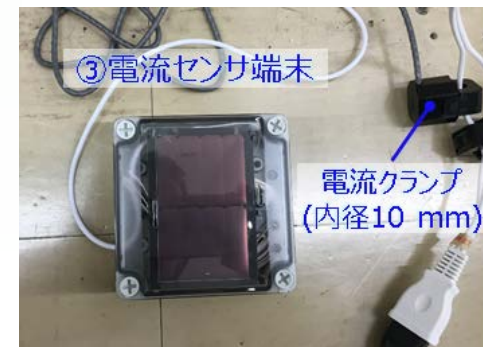
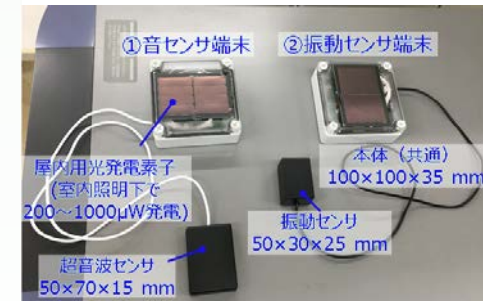


- 画素: 256画素 (16x16)
- 状況により計測画素を選択計測し省電力化



- 環境発電動作により電池交換不要
- 10×10 cmの小型・防水筐体により実工場環境で使用可能

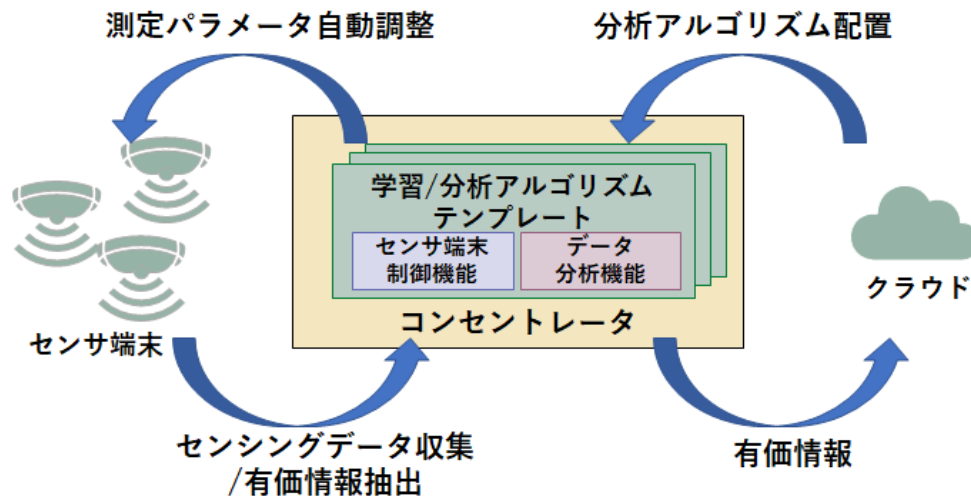
音・電流・振動センサ



- 市販センサを接続、可変パラメータ測定
- アナログ/デジタルセンサ対応

開発したスマートコンセントレータ

- 分析対象となる装置やアプリケーションに適切な分析アルゴリズムテンプレートを、収集したセンシングデータより自動決定
- 学習により、コンセントレータが自動で最適な分析アルゴリズムに修正
- 分析結果より、コンセントレータが自動で各センサの測定パラメータを自動調整し、有価情報を収集



ユースケース	分析アルゴリズムテンプレート									
	A データ整形	B 相関分析	C 周波数解析	D センサ制御	E クラスタ解析	F 閾値判定	G 真理判定	H 最大最小	I 最大最小	J 画素選択
1	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
2	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
3	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
4	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

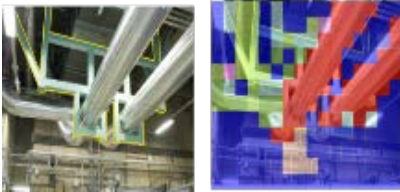


◎ 分析アルゴリズムの組合せをテンプレート化することにより様々な設備のセンシングに対応可能⇒設備毎のアプリケーション開発不要

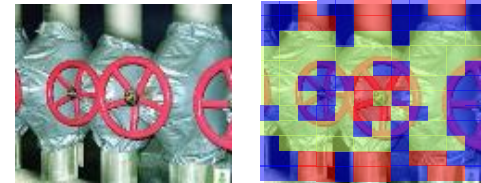
パラメータ可変型赤外線アレーセンサの活用例

広範囲の温度を非接触で計測し、
設備の稼働状態・加工品の加工状態・エネルギーロス等を監視

配管からの蒸気モレ監視



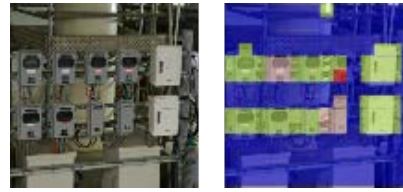
断熱材欠損による熱モレ監視



モーターの稼働状況監視



配電盤の稼働状態監視



【その他】

- ・搬送ラインにおける加工品の流動監視、加工後の品質検査
- ・ガスセンサや電流センサ等の他のセンサとの連携による異常モードの判別

動的に温度測定条件を変更することで、有価情報量が増加

(活用例)

学習によりモーター周辺に測定範囲を限定し、高頻度・高温高分解能で測定する

設置直後



学習後



	設置直後		学習後
有価情報:	1	→	16
画素数:	256	→	64
温度分解能:	2℃	→	1℃
測定頻度:	1回/分	→	2回/分

赤外線アレーセンサのベンチマーク

項目	値
方式	サーモパイル
寸法	20 mm x 37 mm
温度	0 ~ 100°C
視野角	90°
画素数	256 = 16 x 16

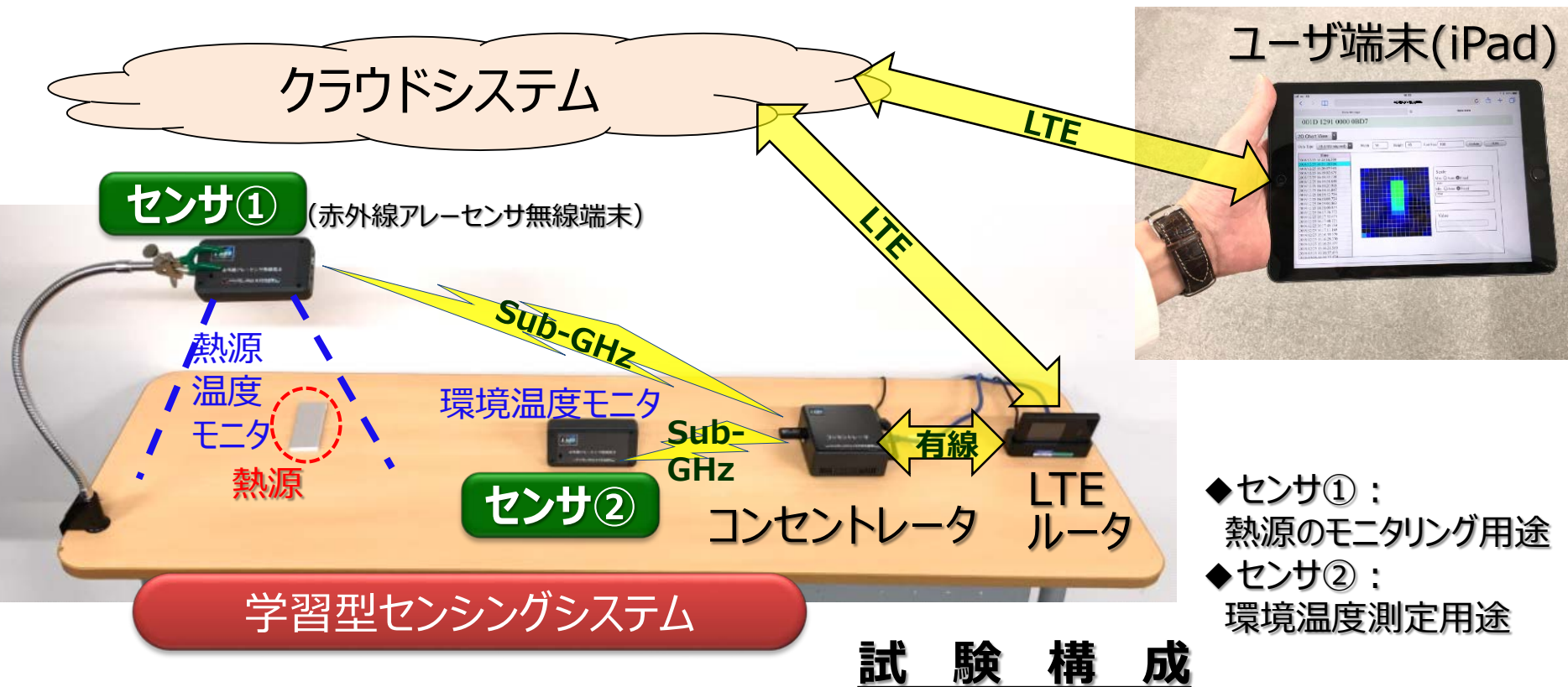


広視野角、低消費電力

	本開発	A社	B社	C社
方式	サーモパイル	サーモパイル	サーモパイル	マイクロボロメータ
画素数	256	64	2000	4800
視野範囲	90度	60度	33度	63.5度
画素選択	可	不可	不可	不可
駆動電圧	3 V	←	←	←
駆動電流	4 mA	4.5 mA	5 mA	50 mA

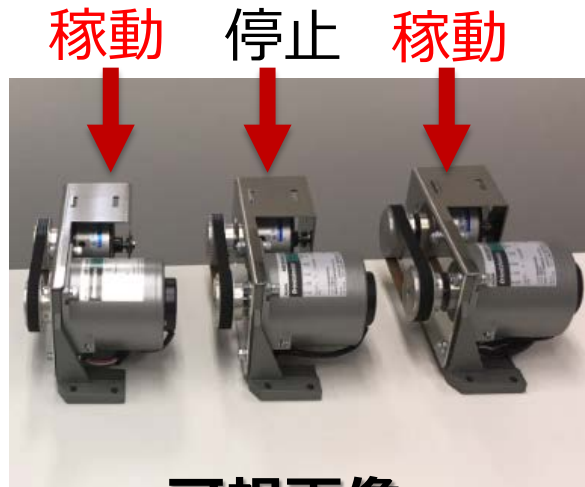
コンセントレータへの2センサ収容とセンサデータ連動

- 赤外線アレーセンサを用いた温度監視システム（クラウドシステム接続環境）において、2センサをコンセントレータに収容し、センサデータを連動させることで、学習後に閾値を自動設定する機能を実現し、実験室環境で検証。
- これにより、複数センサをコンセントレータに収容し、センサデータを連動させるセンシングシステム構築が可能となる。

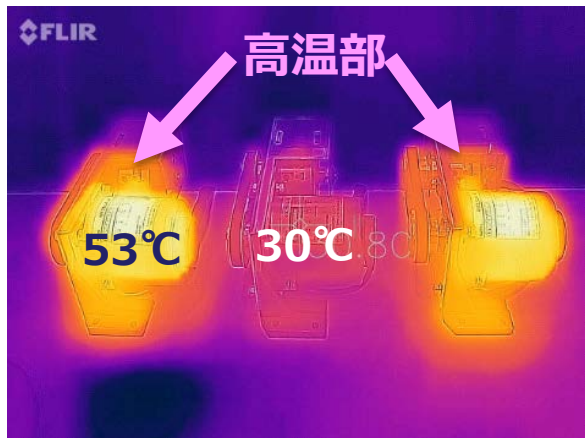


アプリケーション: 赤外線アレーによるモーター温度監視

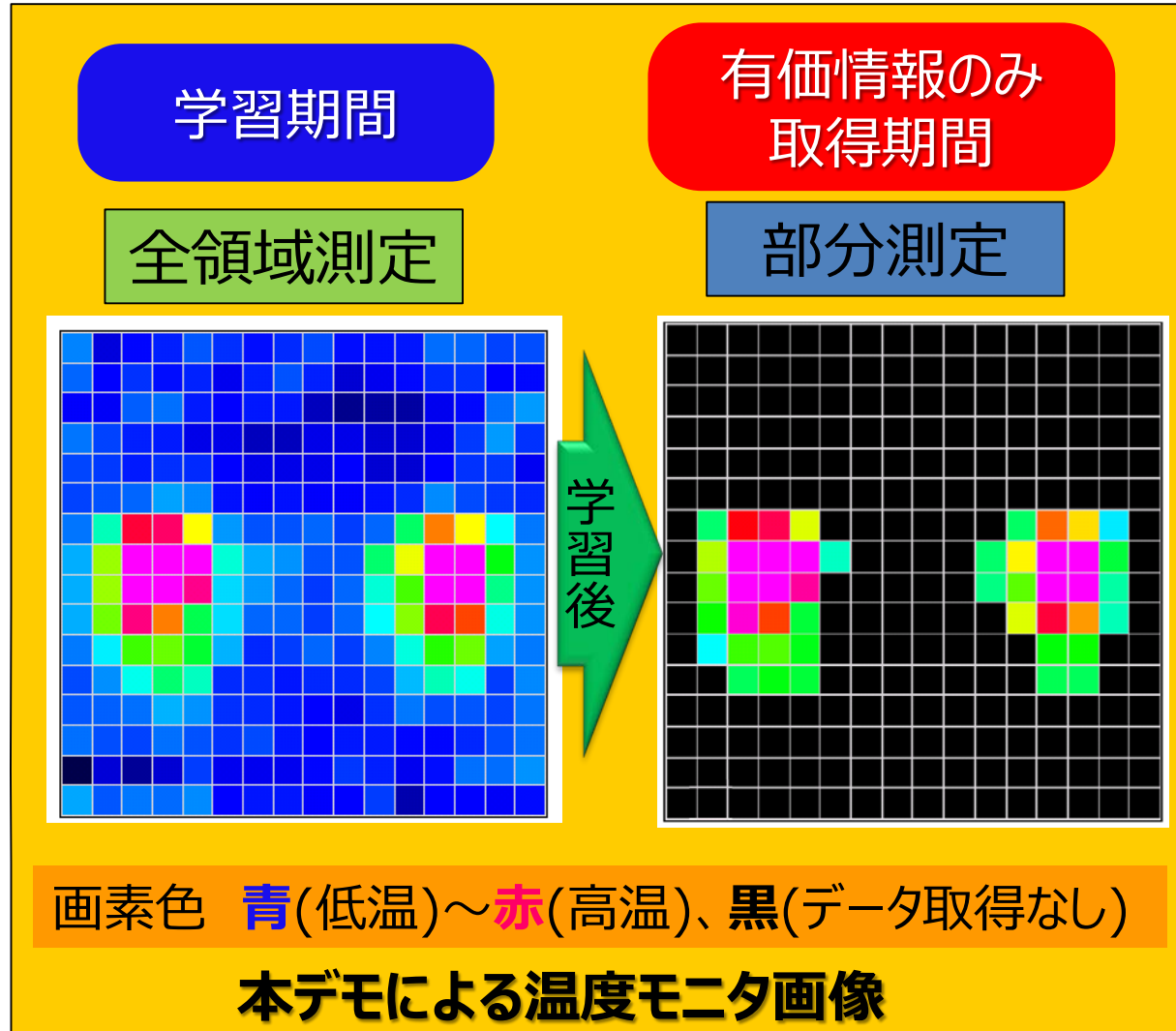
学習後は、高温部のデータのみを取得



可視画像

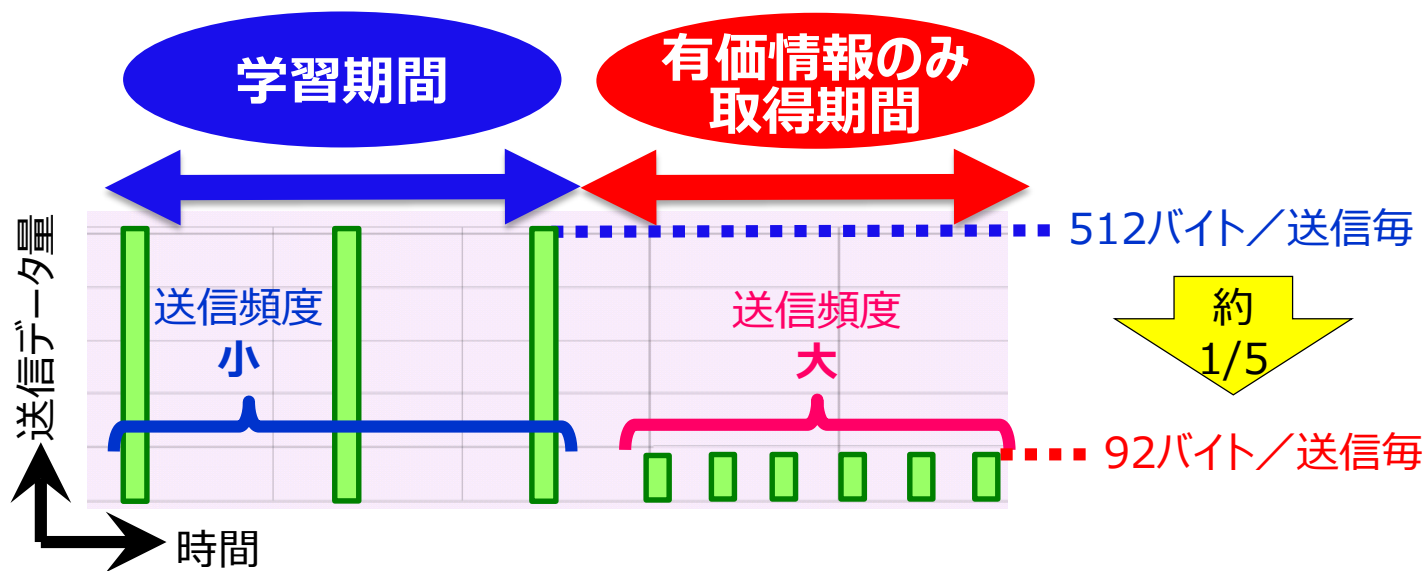
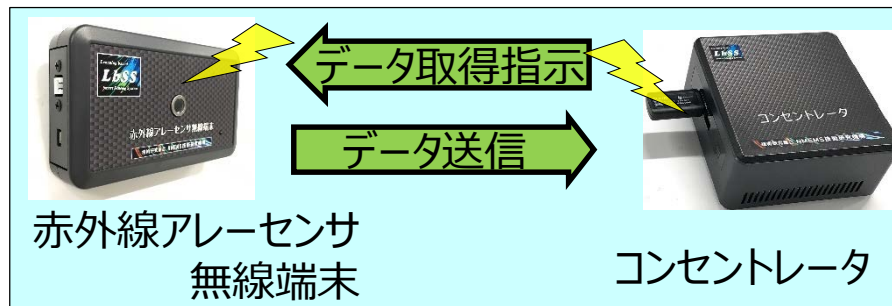


サーモグラフィ(市販)画像



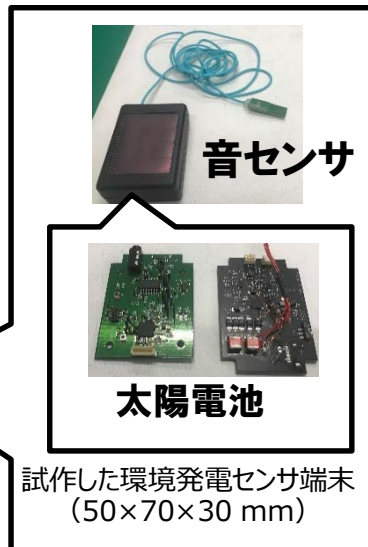
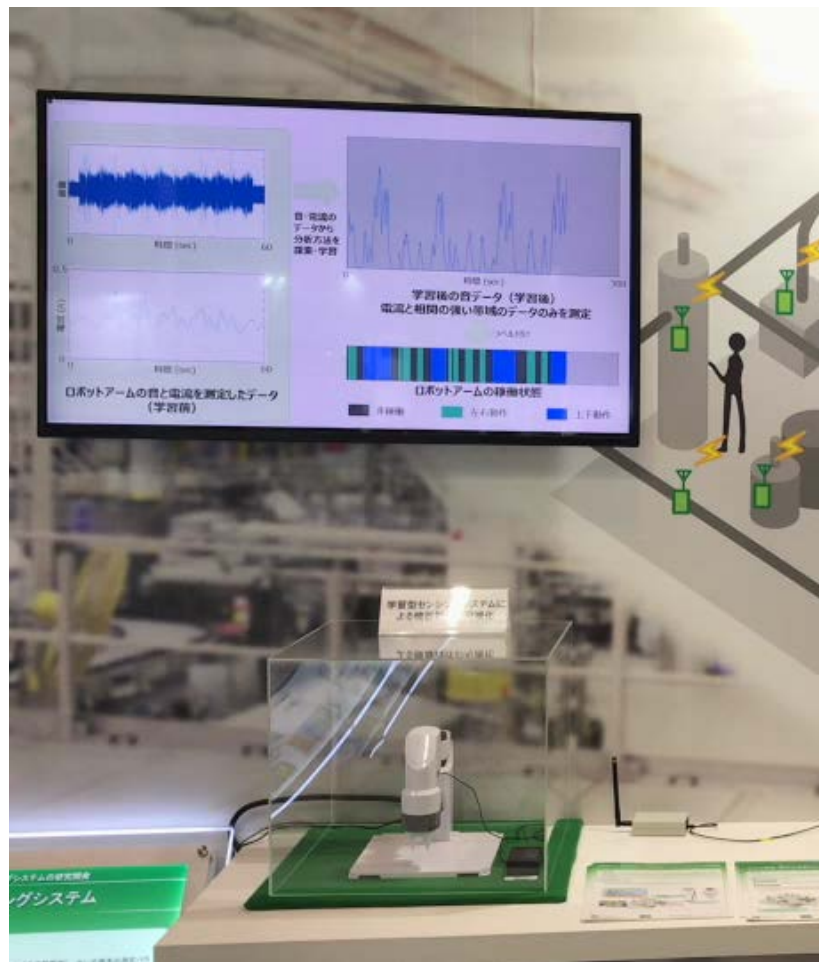
学習適用例：赤外線アレー送信データ量の削減

- 本例の場合、学習後は送信データ量が約1/5以下に低減
- 端末に環境発電を用いる場合、送信頻度の増加が可能



音、電流センサのフュージョンによる産業機器 の状態監視システム

デモ展示



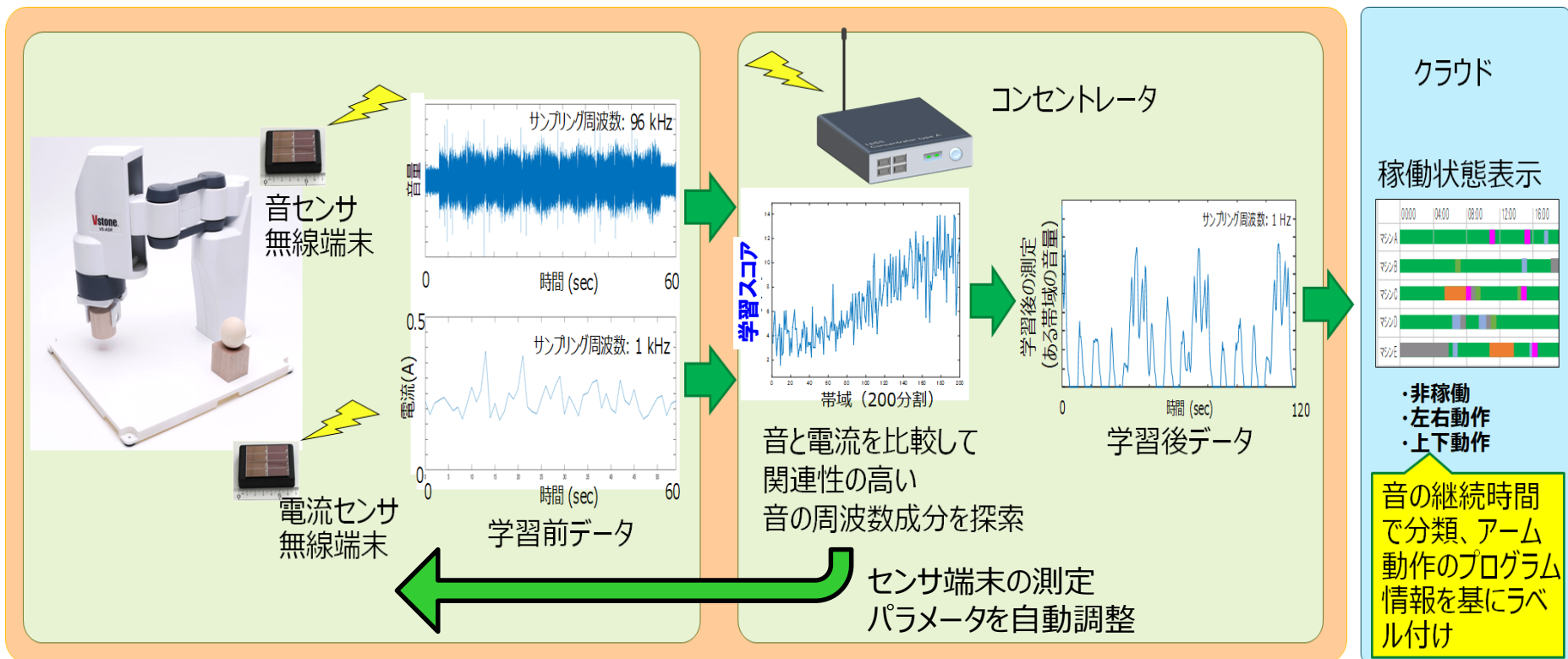
開発したスマートセンシングシステム：

- ・後付けの無線センサによる動作音を測定
- ・バッテリー交換不要(環境発電)で動作可能
※約500 μ Wの消費エネルギー
で、ほぼリアルタイムに動作を見える化

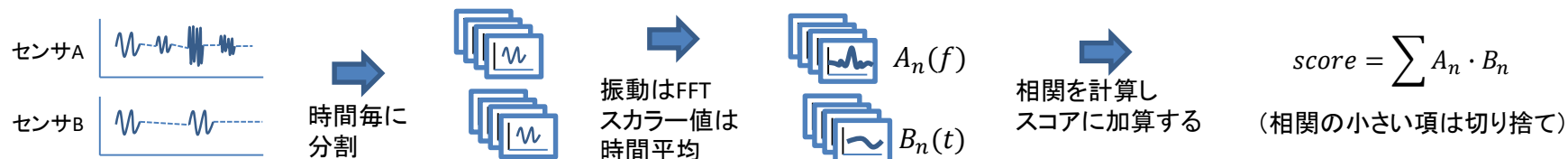
学習適用例：稼働時の細かな動作モード(上下・左右)を分離可能

学習前データ量(100kB/秒)→学習後(2B/秒)に削減

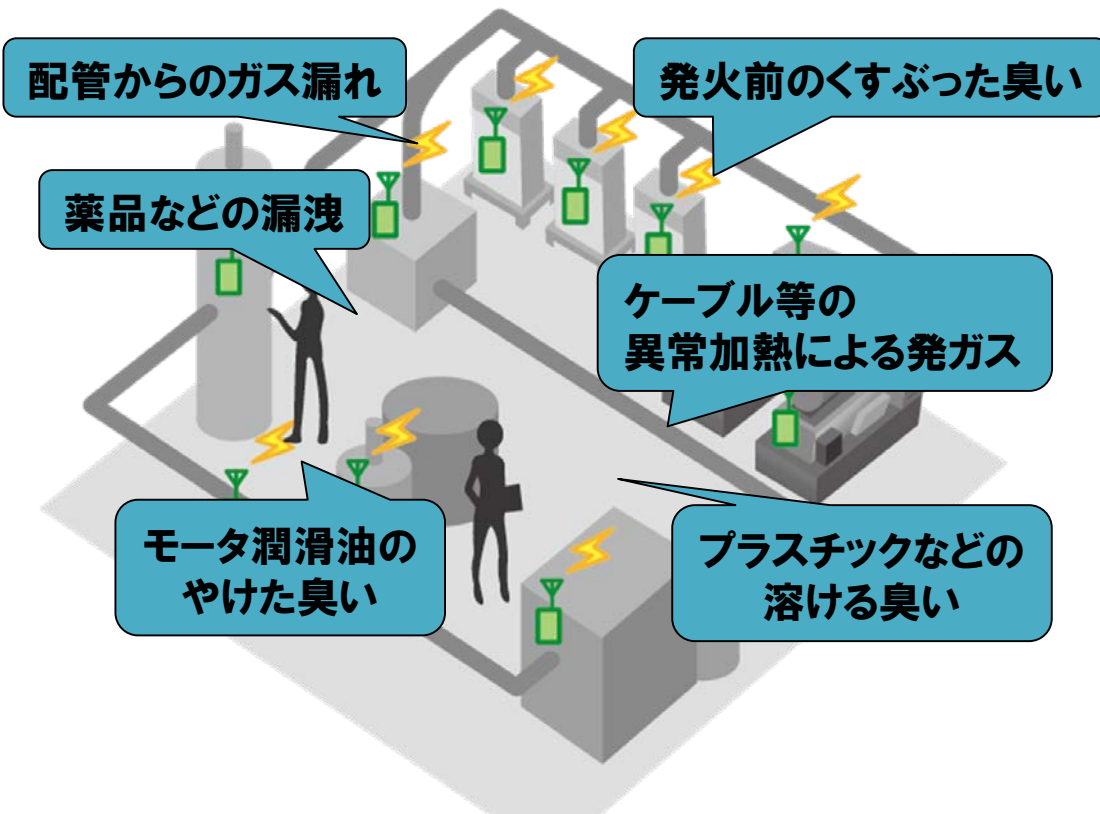
- ・音と電流を比較して関連性の高い音の周波数成分を探索
 - ・関連性の高い成分のみを測定するようにセンサ端末の測定パラメータを自動調整
- 配線レス・置くだけセンサで産業機械の稼働状態を見える化可能



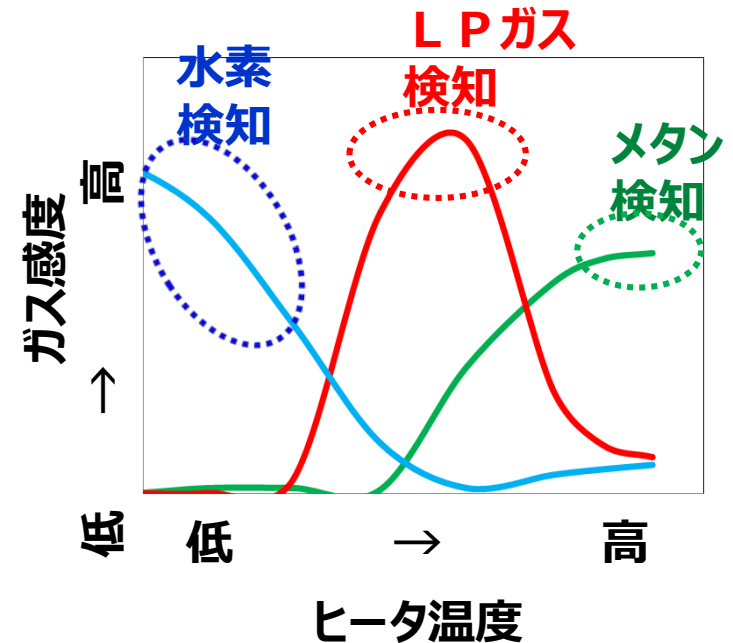
学習スコア:数分間に1回程度の離散的な複数センサのデータから相関度を抽出しスコア化



省電力マルチガスセンサの適用例



■ 燃料ガスの漏洩



適用例	対象ガス例
燃料ガスの漏洩	CH₄、H₂、LP 、ジメチルエーテルなどの 可燃性ガス
火災初期の発生ガス	無煙熱分解/くすぶり燃焼：CO ₂ 、 CO の発生が多い、その他、HCl、HCNなど
薬品などの漏洩	溶剤： エタノール 、IPA、 アセトン 、アセチレン、トルエン、ベンゼンなどの 揮発性有機化合物 (VOC)
発熱によるにおい	プラスチックの加熱：ベンゾチアゾール、スチレン、 エチレン 、 エタン 、 プロパン 、ブタンなど ケーブル等の過熱： 2-エチルヘキサノール 、 1-ブタノール 、 1,3,5-トリイソプロピルベンゼン など
設備の異常監視	油のにおい成分：ヘプタナール (C ₇ H ₁₄ O)、油入機器診断： メタン 、 H₂ 、 エタン 、 エチレン 、 アセチレン

MEMSガスセンサの構造とセンシング技術

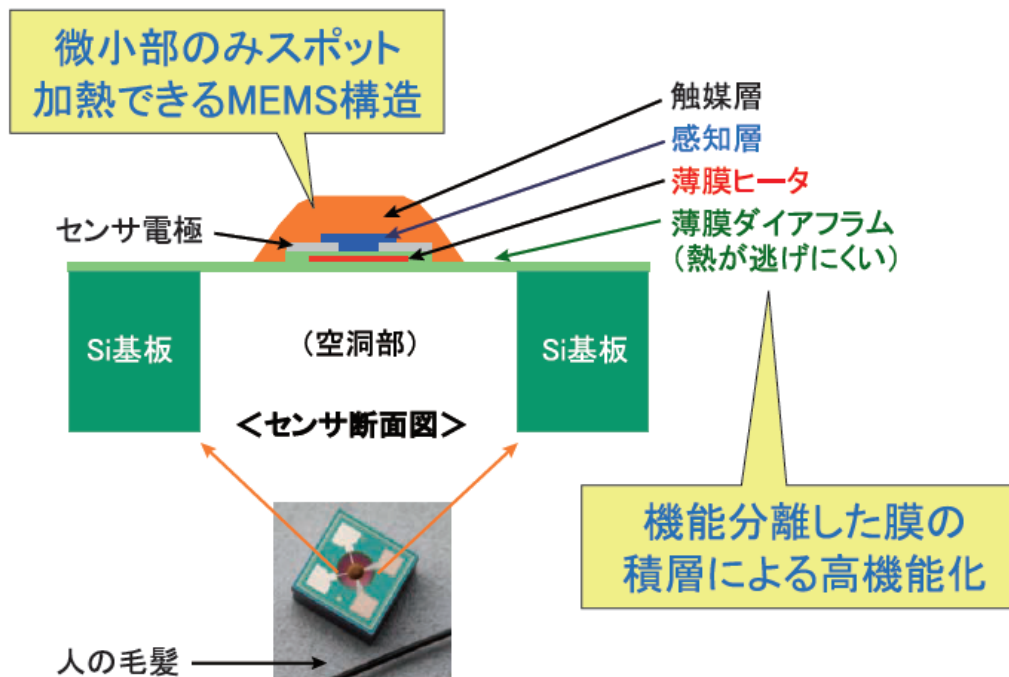
MEMSガスセンサ

MEMS構造

⇒ 超低消費電力で自立電源駆動可能

高機能膜

⇒ 微細化により高感度・高選択性



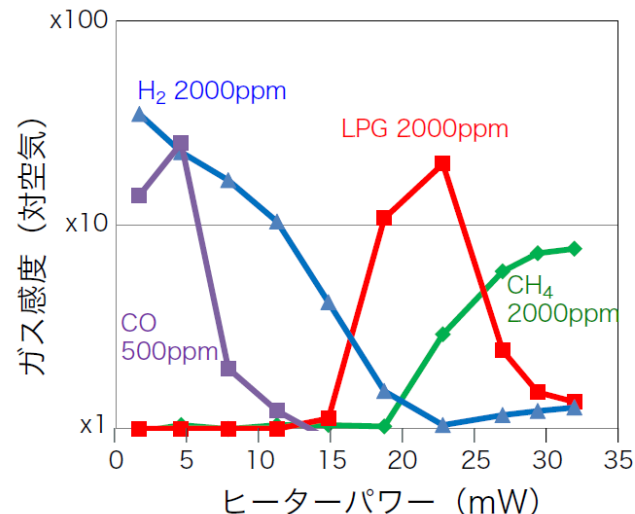
マルチデバイス方式



選択燃焼層の触媒材料を変更する事により複数ガス種を検知

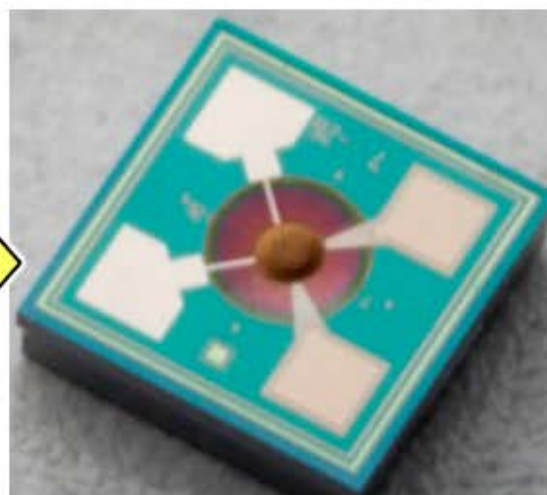
マルチドライブ方式

ヒーターの運用（加熱温度）でターゲットガス選択



省電力マルチガスセンサモジュール

触媒の加熱温度を制御して、複数ガス種を嗅ぎ分ける

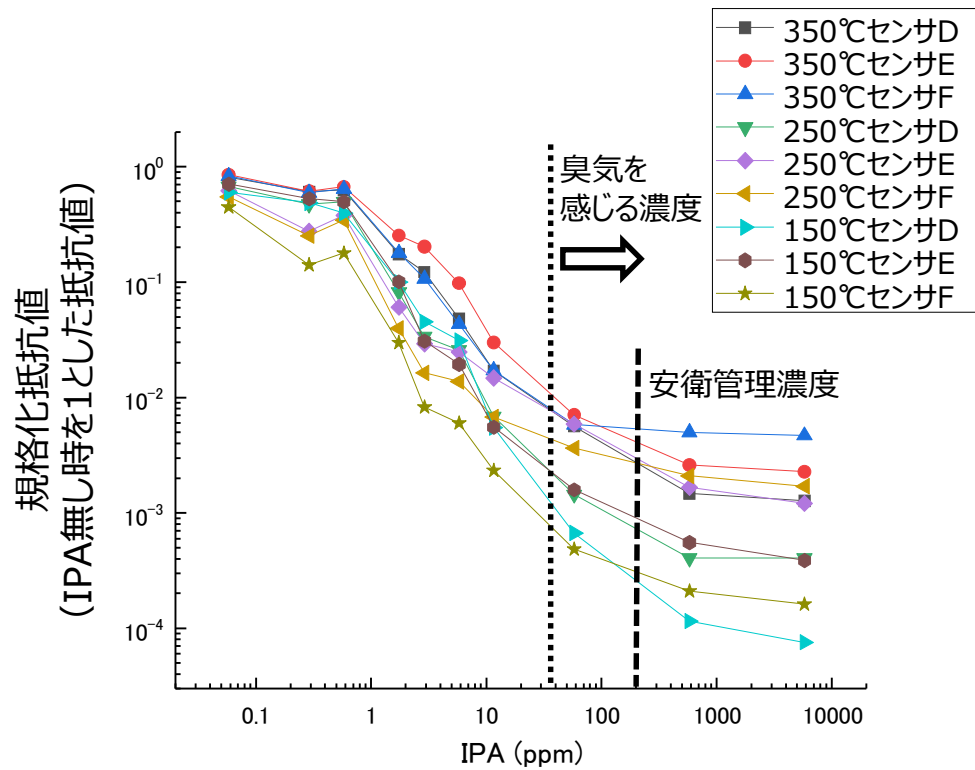


マルチガスセンサモジュールの動的センシング

センサ	最大6種のガスセンサを切替
ヒータ温度	検知ガス種変更
駆動周期	測定頻度変更
* センサ種とヒータ温度を変更により12種以上のガスを検出可能 * 現場に応じたセンサ種、温度を選択 * 定常時は低頻度、におい検知で高頻度監視	

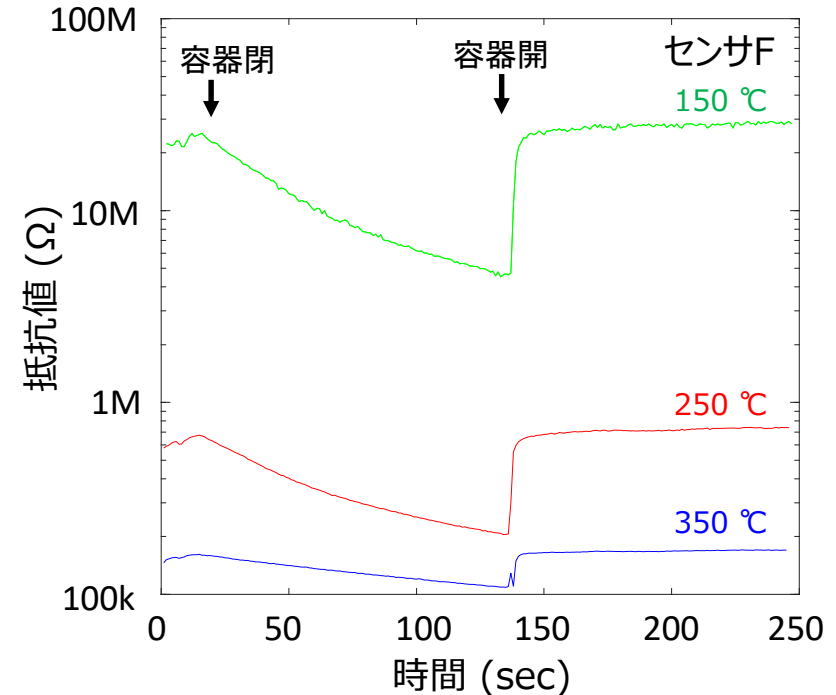
サイズ4cm × 8cm 消費電力200 μ W以下

ガスセンサ切り替えによるIPA、機械油の検知実験



有機溶媒(IPA)検出実験結果

- ・ヒーター温度150℃、センサF (不織布フィルタ) の変化率大
- ・0.1ppm程度まで検出可能
- 有機溶媒を人の嗅覚より敏感に検出
(IPA管理濃度 200 ppm, 臭気閾値 26 ppm)

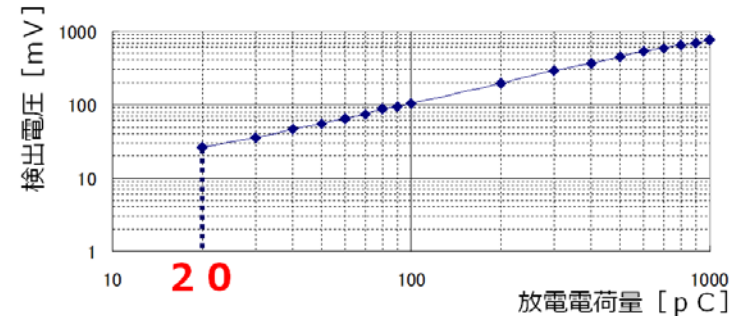
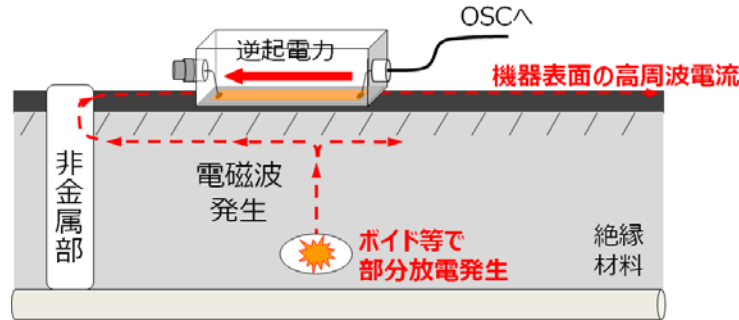


機械油検出実験結果

- ・ヒーター温度150℃、センサFが変化率大
- ・飽和時で抵抗値1桁程度の変化
- 機械油の漏れ等を検出可能

面電流センサ

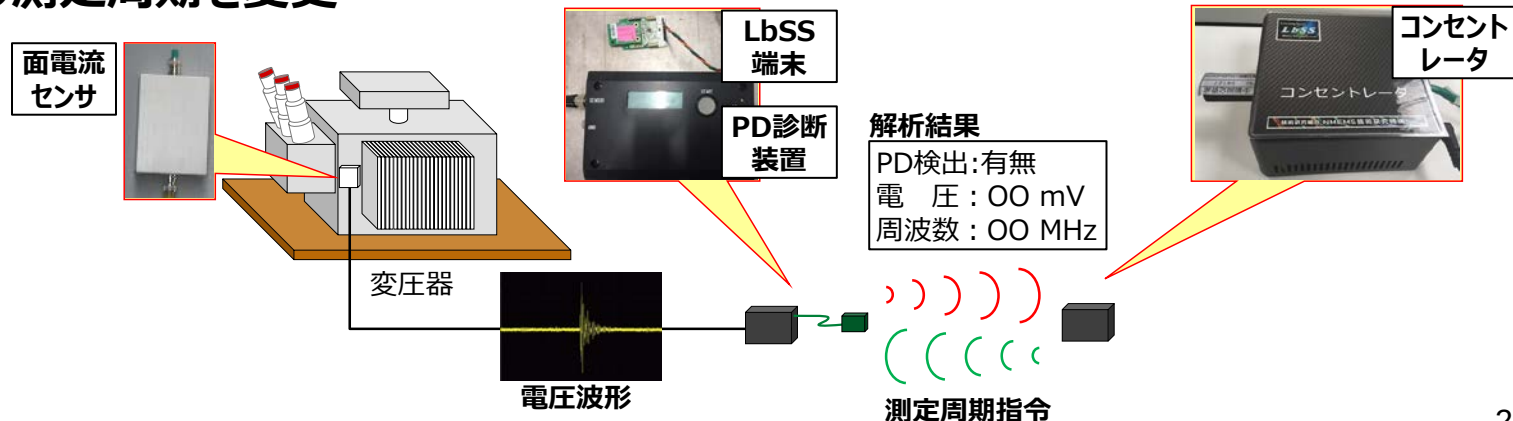
- 工場内に電力を供給する受変電設備（開閉器，変圧器など）の経年劣化は、絶縁体の欠陥発生から絶縁破壊へと進行
- 面電流(漏洩電磁波)センサは、部分放電(PD)の発生に伴い機器表面に発生する高周波電流を検出



検出電圧 - 放電電荷量特性
(実験室レベル)

<部分放電(PD)監視システム>

- 面電流センサにより得られた電圧波形をPD診断装置で解析
- 解析結果（PD検出回数，電圧，周波数）をLbSS端末からコンセントレータへ送信
- 学習によりコンセントレータが自動で通常/警戒/異常の3段階を決定し、レベル応じて面電流センサの測定周期を変更



振動発電

デモ展示

100Hz, 0.15Gで 500 μ W以上発電

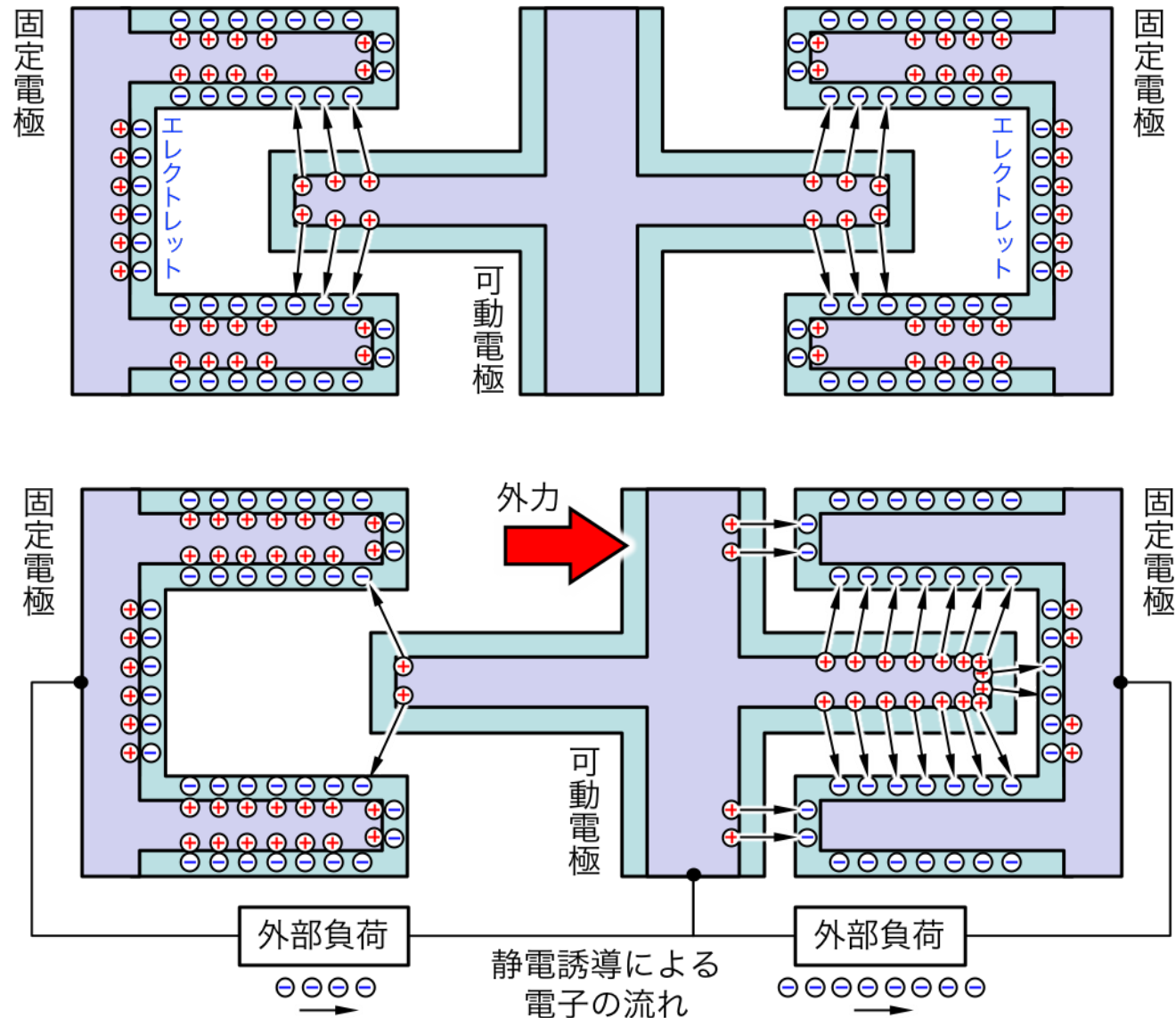
◆ 微小振動発電の様子 (出力682 μ W)

- 周波数 : 97.3 ~ 98.2 Hz
- 加速度 : $1.8 \text{ m/s}^2_{(0-P)} = 0.13 \text{ G}_{\text{rms}}$



理論限界 = $0.5 \times (1.9108 \text{ g} + 47.9 \text{ mg}) \times 2\pi 95\text{Hz} \times 540\mu\text{m} \times 2.5\text{m/s}^2 = 789 \mu\text{W}$
・ E_H (効率) = $682\mu\text{W} / 789\mu\text{W} = 0.92$

エレクトレットによる発電方法



実際のデバイス, おもり, パッケージ

◆ 実証試験用デバイス

セラミックパッケージ
3.1 cm × 3.1 cm

MEMSチップ
シリコン製
2.1 cm × 2.1 cm

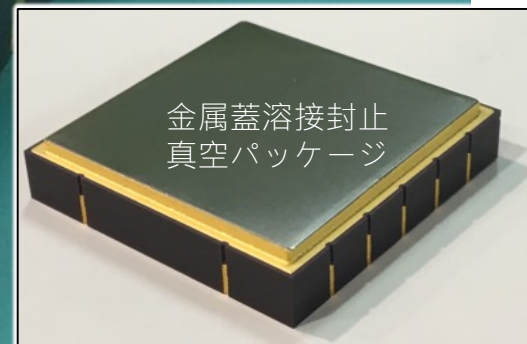
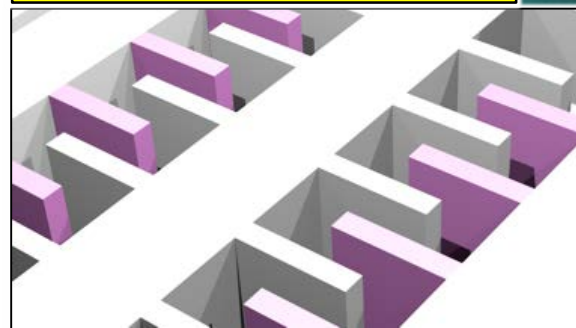
櫛歯電極
エレクトレット
帯電 400 V

原理検証試作品
2018.07

金属おもり
焼結タングステン
1グラム

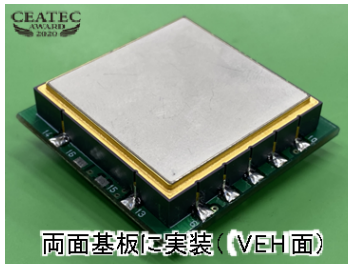
真空封止
0.1 Pa

金属蓋溶接封止
真空パッケージ



発電性能

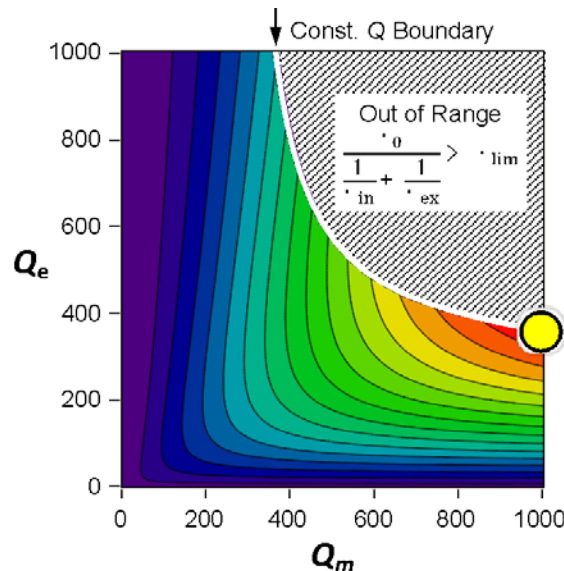
- 理論値に対して**92%のエネルギー回収を実現（世界最高性能）**
- 100Hz、0.15 G（実効値）の振動から500μWを発電可能



◆ 真空パッケージ



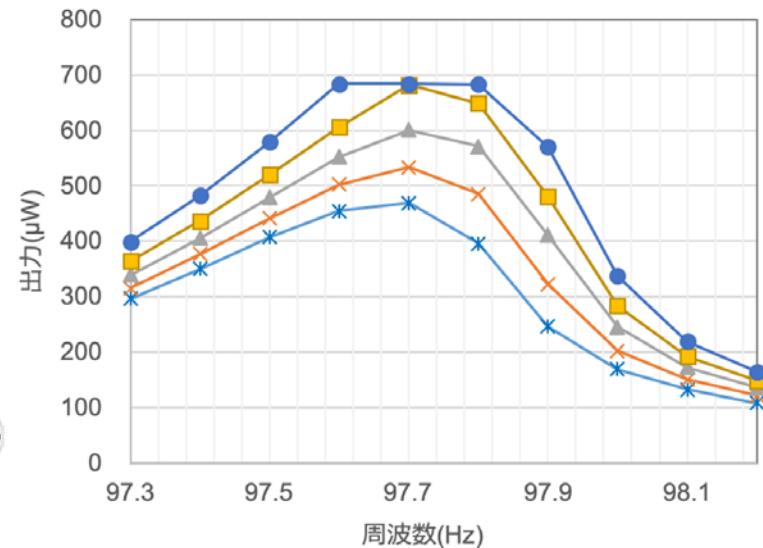
◆ 専用充電回路



〈発電性能〉

- 周波数 : 97.3 ~ 98.2 Hz
- 加速度 : $1.8 \text{ m/s}^2_{(0-P)} = 0.13 G_{rms}$

—*— 1.5m/s² —x— 1.6m/s² —▲— 1.7m/s² —■— 1.8m/s² —●— 1.9m/s²



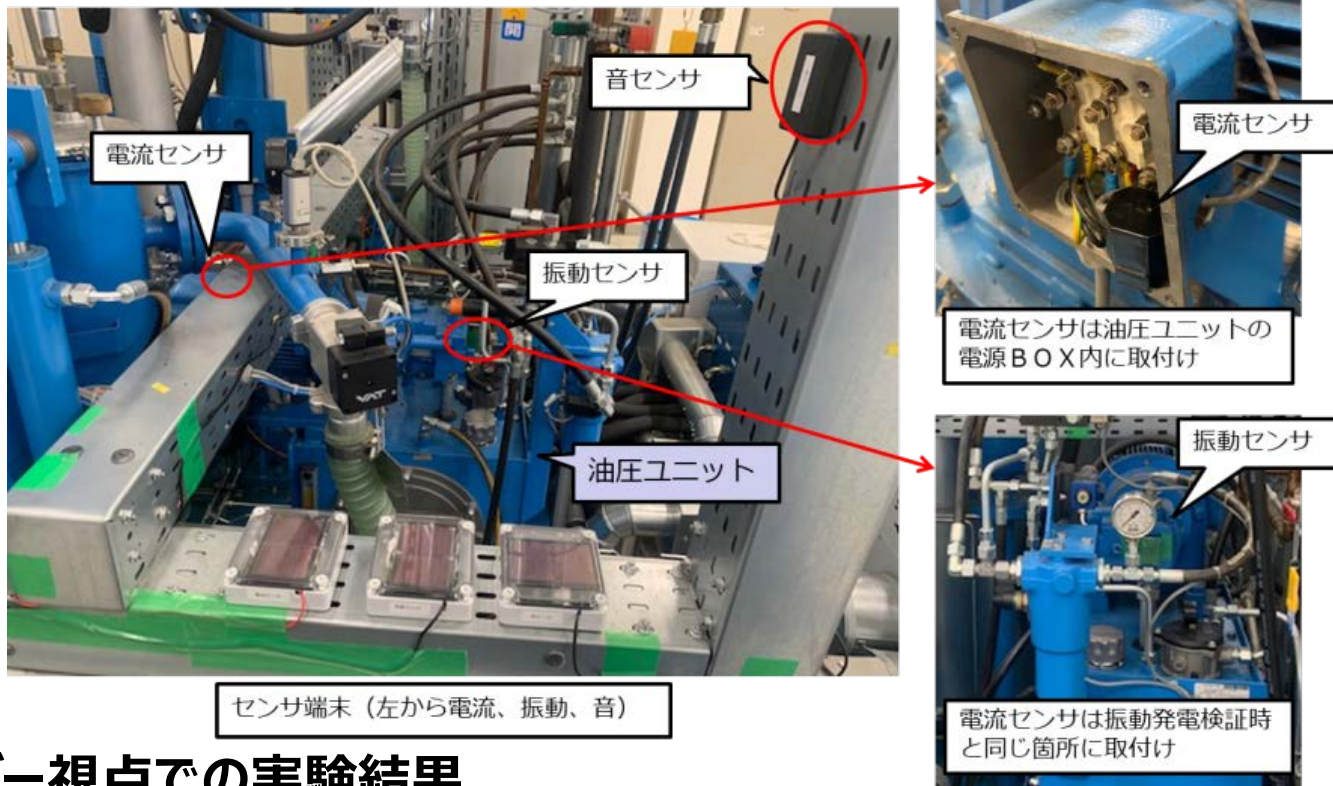
- $P_{\text{実験値}} = 682 \mu\text{W}$
- $P_{\text{理論値}} = 0.5 \times (2.0g) \times 2\pi \times 97.7\text{Hz} \times 670\mu\text{m} \times 1.8\text{m/s}^2 = 738.7 \mu\text{W}$
- $E_H = P_{\text{実験値}} / P_{\text{理論値}} = 682 \mu\text{W} / 738.7 \mu\text{W} = 0.92$

LbSSシステム実証実験

実証実験 対象	目的	対象 設備	具体例	有価情報収集方法
工場設備 (東光高岳)	生産設備の状態 見える化・監視	成型機 等	動作・停止のタ イミング・時間の 把握	振動・電流のセンサフュージョン 振動・光発電 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 実施中
		回転機器 等	複数回転機 の温度監視	赤外線アレセンサ 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 完了
		受変電 設備	絶縁監視	面電流センサ、アンテナ 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 完了
工場設備 (ナカヨ)	生産設備の状態 見える化・監視	組立機 加工機 等	動作・停止のタ イミング・時間の 把握	振動（音）・電流のセンサフュージョン 光発電 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 完了
	作業環境監視 (ガスセンサ実証)	洗浄設備	ガス濃度変化の 有無確認	ガスセンサ 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 完了
工場設備 (宮本工業)	生産設備の状態 見える化・監視 ※中小企業の、 非IT化設備 および作業現場を対 象	プレス 加工機 など	動作・停止の 時間の把握	振動（音）・電流のセンサフュージョン 光発電 学習アプリ 公衆LTE網＋クラウド 完了

実証実験：現場技術者だけで楽々IoT

- 東光高岳の生産設備で、装置動作状態把握を目的とした無線スマート端末を現場技術者だけで設置し、ユーザー視点で実証実験を実施

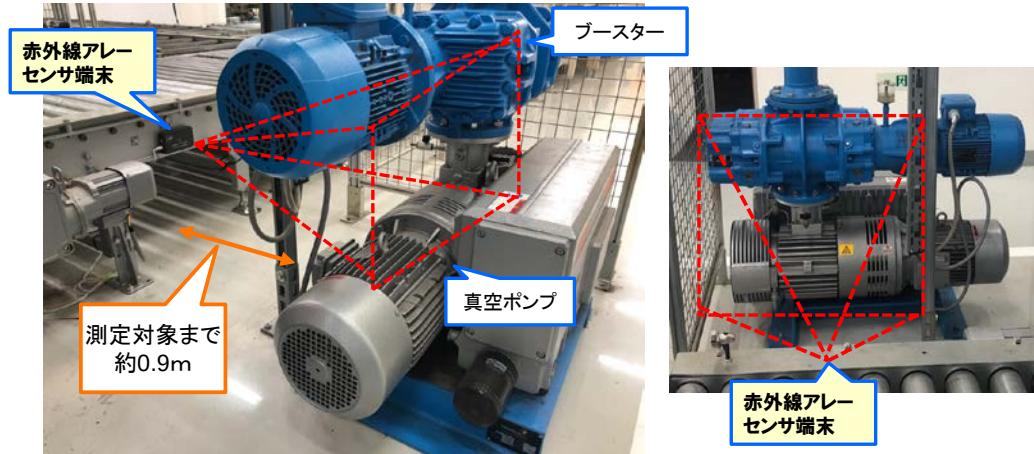


■ ユーザー視点での実験結果

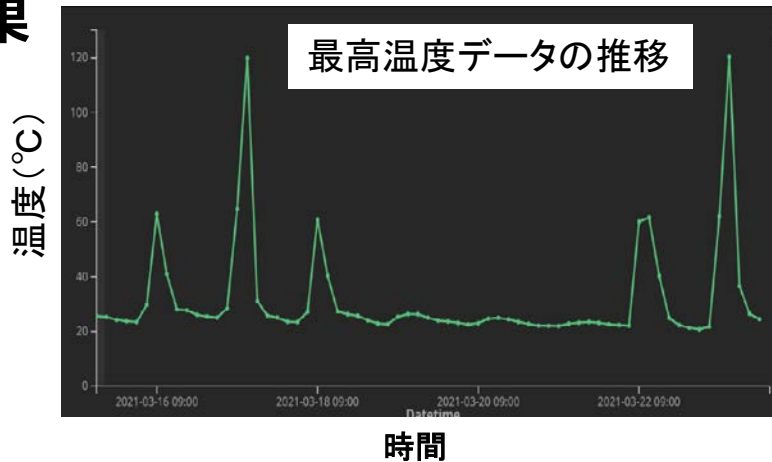
- 電源線、通信線を気にせず、様々な場所へ多数の無線センサ端末を簡便に設置できた。
- 無線センサ端末との通信接続設定も専門の知識は不要で、簡便に接続できた。
- PCやモバイル端末からいつでもリアルタイムでセンシングデータを確認できた。

実証実験：用力機器の温度監視

● 東光高岳の真空ポンプに、動作時の温度監視を目的として無線赤外線アレーセンサ端末を現場技術者だけで設置し、高温部の自動抽出と稼働状態を把握できるか検証

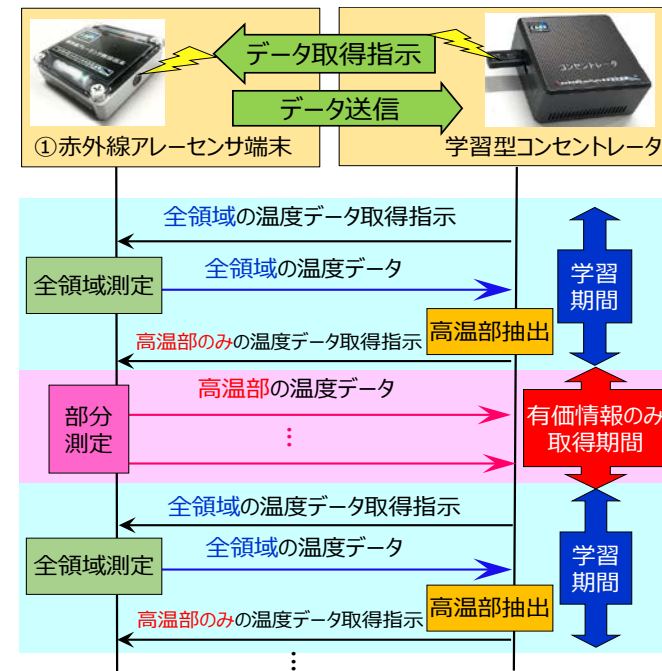


■ 実験結果



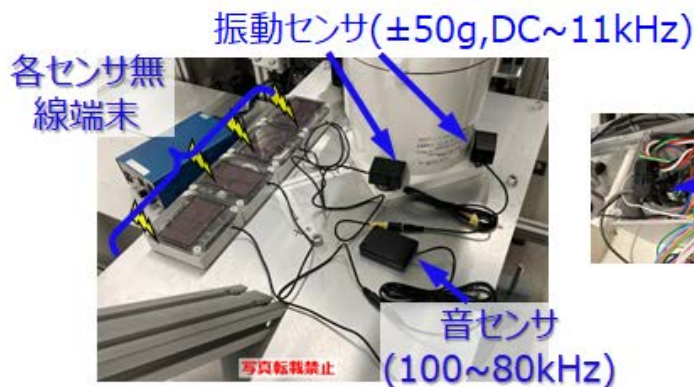
● 全領域(256画素)の温度データを学習後、最高温度点(1点)を、1回/30秒の測定間隔で自動抽出してグラフ化、最高点のみデータから、稼働状態の変化が把握できることを確認
データ量は学習前後で1/256に削減できた。

センシングシーケンス



実証実験：組み立てロボットの稼働状態把握

- ナカヨの製造ラインで稼働している、組み立てロボットのタクトタイムを、環境発電（光）駆動の無線スマートセンサ（振動、音、電流）と学習アルゴリズムで把握できるか検証

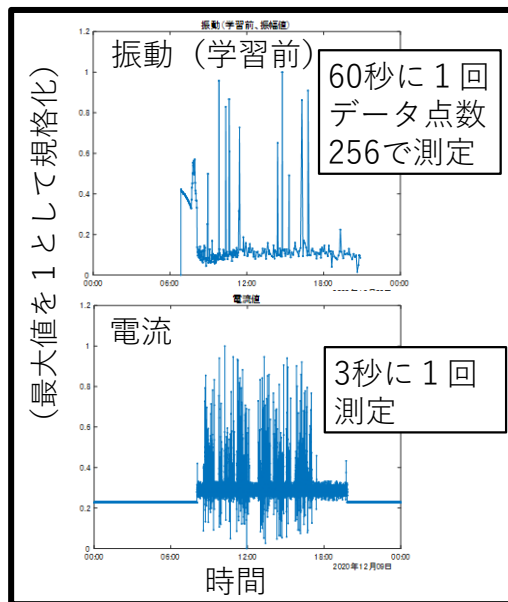


電流クランプ

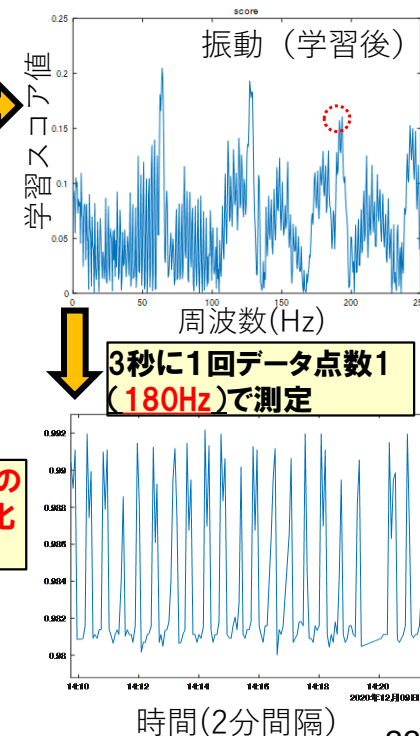
■ 実験結果

- **振動と電流のフュージョン**でロボットアームのタクトタイム40～43秒に対応する周期の振動変化を取得できた。

- 学習前後でデータ量削減1/256、取得頻度20倍（60秒毎→3秒毎）となり、環境発電でほぼリアルタイムモニタリングを実現できる見通しを得た。

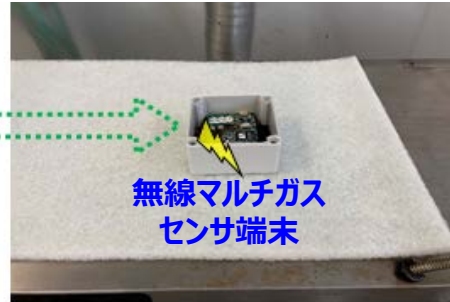
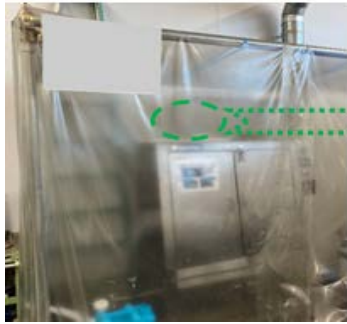


学習で振動と電流で強い相関のある周波数を抽出



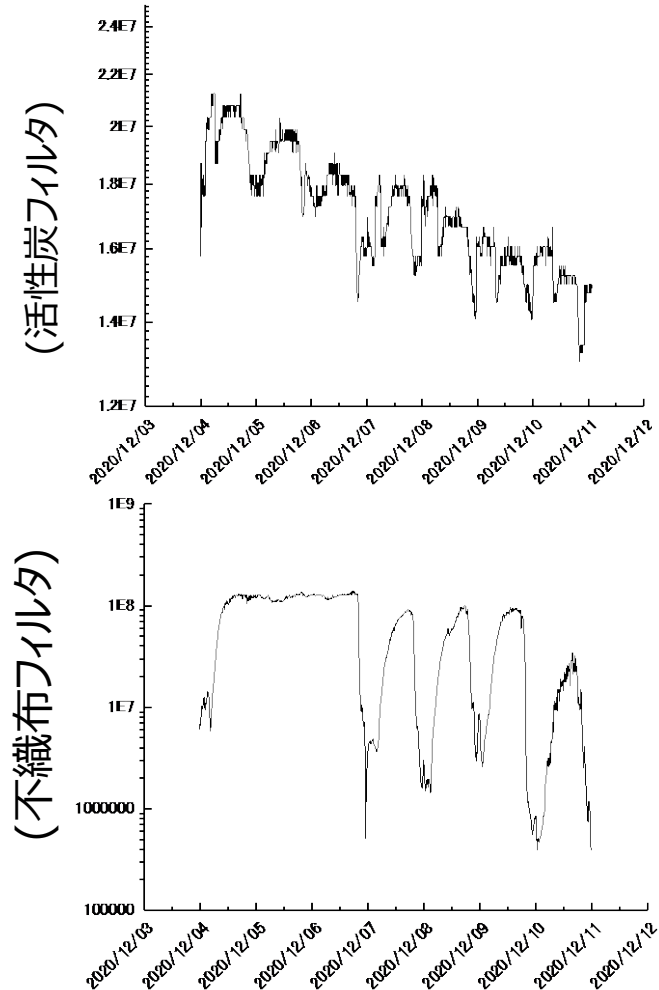
実証実験：パレット洗浄装置の作業環境把握

- ナカヨの生産現場で使われているパレット洗浄装置に、マルチガスセンサ端末を設置し、溶剤雰囲気を検知できるか検証



■ 実験結果

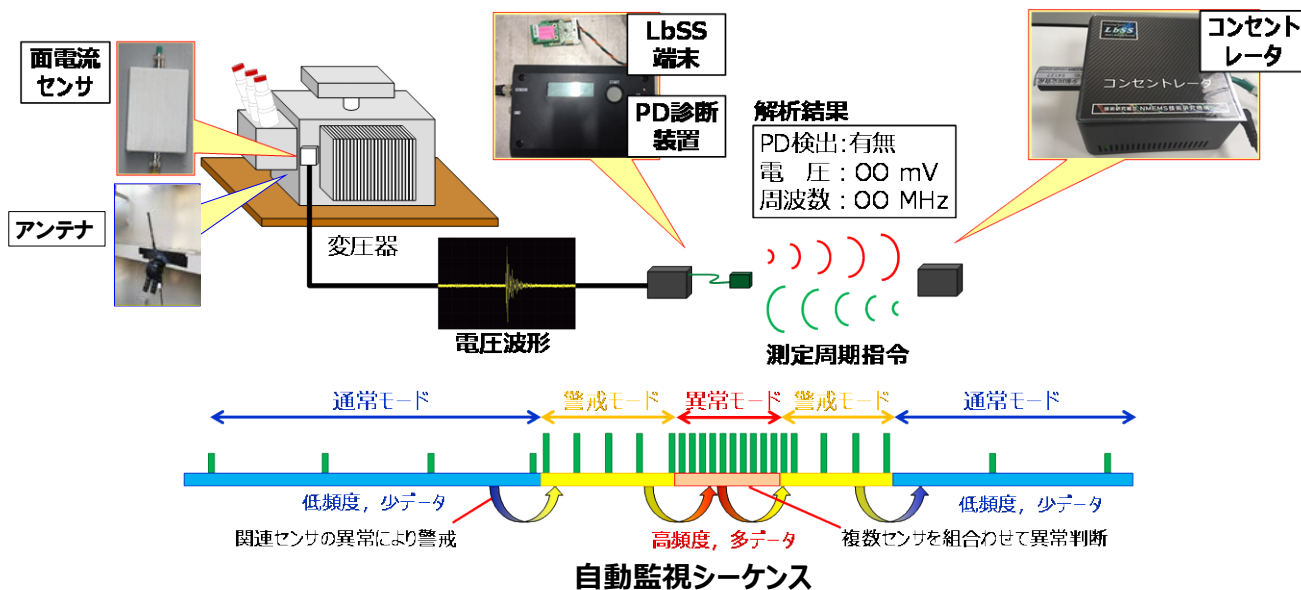
- 最適なセンサ種・駆動条件を抽出するため、ガスセンサ6種類 x 駆動温度3条件で、30秒毎のモニタリングを1日実施
- 2種のガスセンサ x 駆動温度1条件を抽出し、10分毎のモニタリングで雰囲気変化を検知できた。データ量は最適化前後で1/180に削減できた。



2種類のガスセンサによる
日々の雰囲気変化モニタリング結果

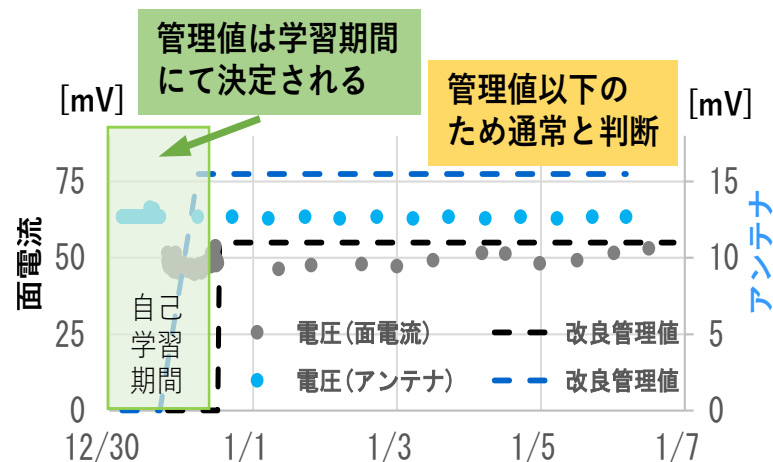
実証実験：受変電設備の部分放電監視

- 東光高岳の受変電設備(変圧器)に面電流センサとアンテナを設置し、部分放電(PD)監視システムの学習アルゴリズムが機能するか検証



■ 実験結果

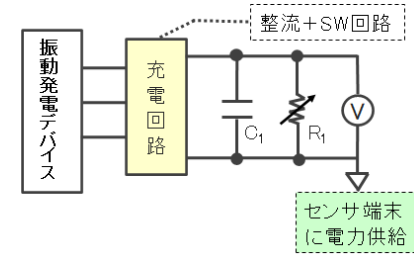
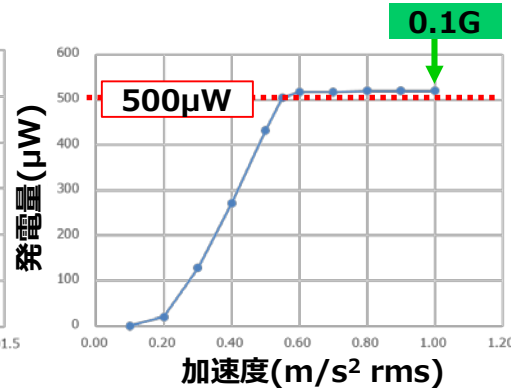
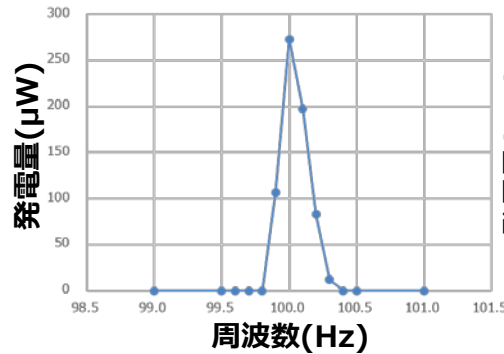
- 面電流センサとアンテナの組み合わせで、PDの(通常/警戒/異常)レベルに応じて測定間隔(12時間/30分/5分)を自動設定するアルゴリズムをPD診断装置に実装し、2か月間のモニタリングを実施
- PDの電圧・発生回数に応じて、アルゴリズムが想定どおり機能することを確認した。



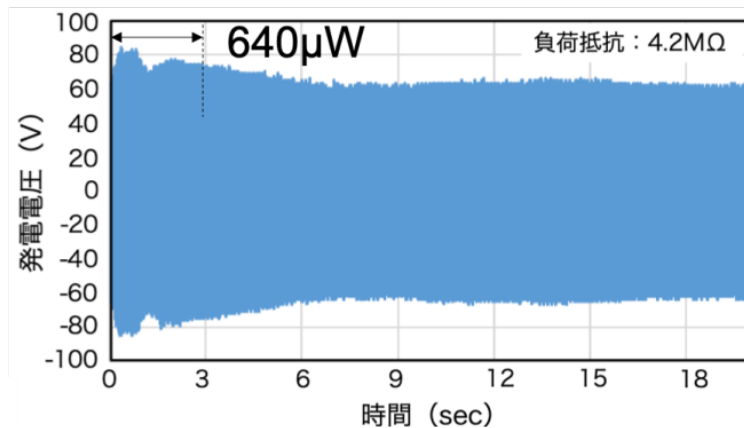
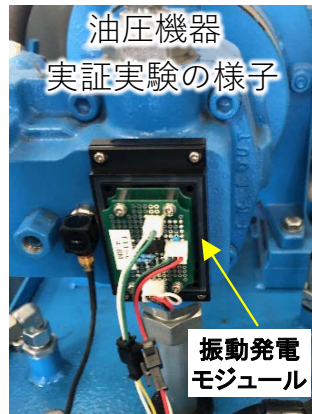
実証実験：産業機器の振動から500 μ W発電

- 様々な工場機器の振動周波数・加速度を調査し、整流回路/充電回路後でも500 μ W以上の出力が得られるか検証

■ 実験結果



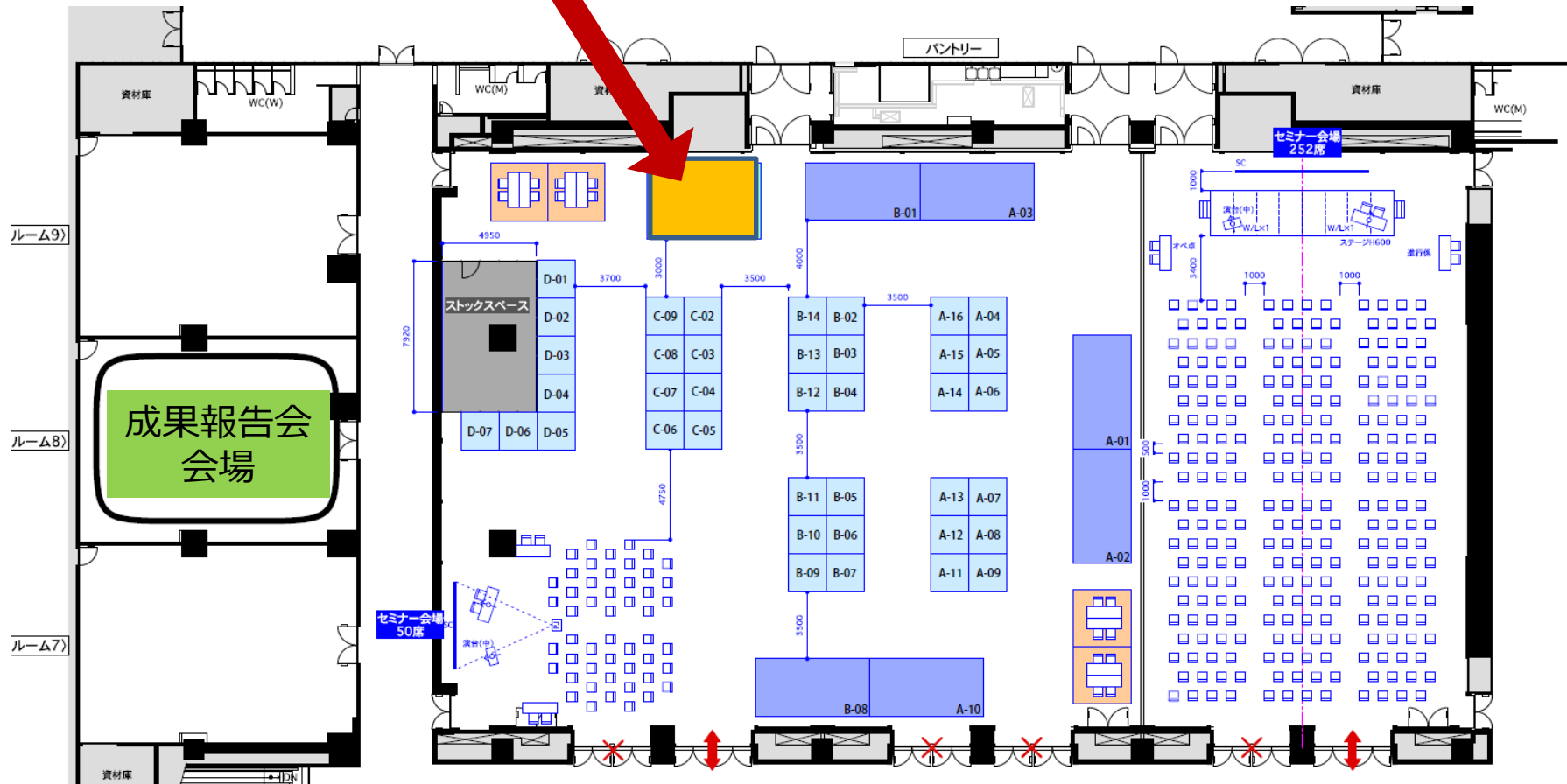
- 100Hz、0.1G程度の振動しか生じない電力設備において、充電回路後でも519 μ Wを発電することを確認した。



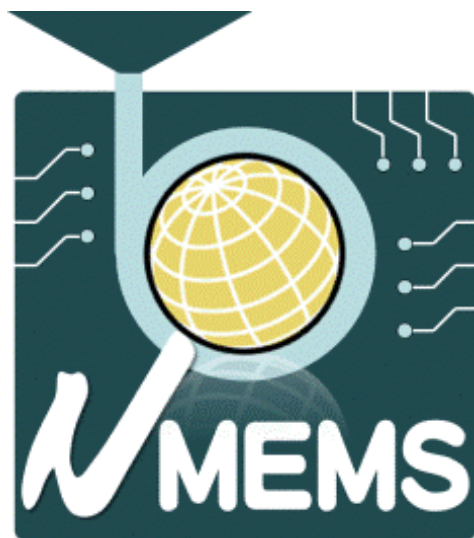
$$P = V^2/R = (52)^2/4.2 \times 10^6 = 643 \mu W$$

- 100Hzよりも高い周波数で振動する機器として油圧機器(223Hz、0.3G)を選定し、振動発電デバイスの共振周波数を合わせた結果、500 μ W以上発電することを確認した。

NMEMS機構展示ブース:C-01



●ご来場の際にはぜひ当機構のブースへお立ち寄りください。



技術研究組合NMEMS技術研究機構
スマートセンシング研究所
〒101-0026 東京都千代田区神田佐久間河岸67
MBR99ビル6階

- この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO)の委託業務 (JPNP16007) の結果得られたものです。