

ライフラインコアモニタリングシステムの研究開発

Development of Utility Infrastructure Core Monitoring System (UCoMS)

研究開発の目的

- **都市インフラ(ライフライン)**は、経験にもとづく目視・聴音点検が主体であり、近年各種の遠隔管理システムが進化しているとはいえ、普及については緒に就いたばかり。
- 病院、地域エネルギー供給施設等のインフラはその公共性も高く、その中核となる発電機、**ボイラ**、**ポンプ等の回転機器をコア**としたシステムの保全が都市機能の安定化・安全化に重要な役割を担う。
- 本研究開発では、ライフラインのコア設備の早期異常検知、健全性確保が行える、低コストの常時モニタリングシステムの開発を目的とする。

現状と課題

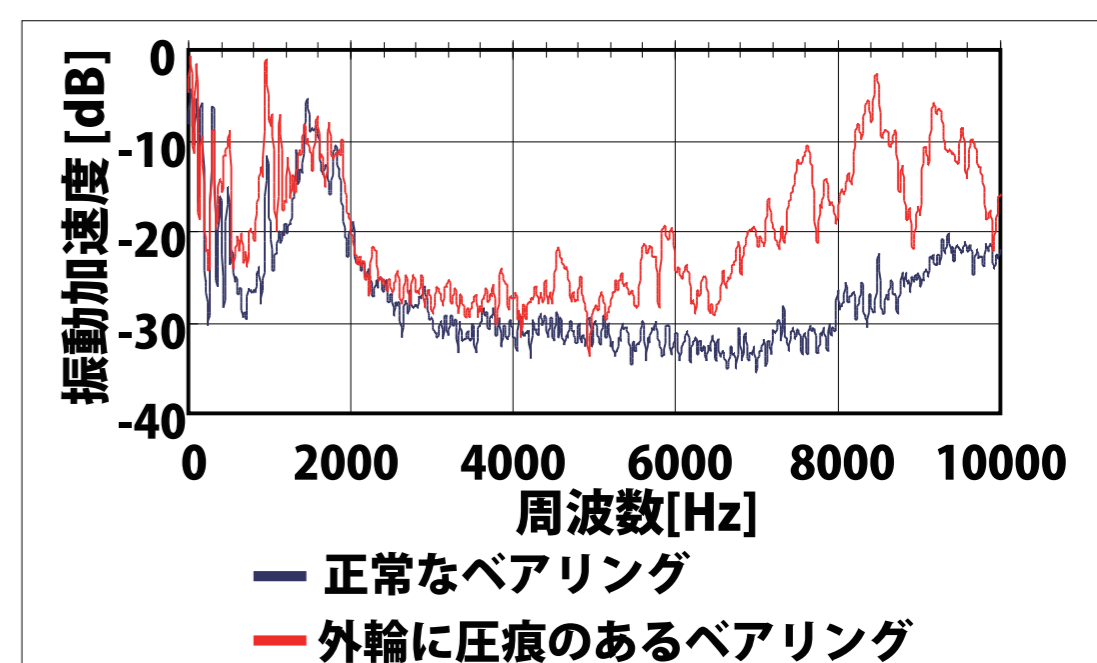
- **エネルギー**供給施設の心臓部にあたる回転機器は、月1回の定期点検、年2回の精密検査、日常は保守員が振動音や機器温度を確認
- 振動値の傾向管理、周波数解析による異常原因推定
- 有線モニタリングシステムの課題：敷設コストを含め100点程度のモニタリングシステムで1000～2000万円
- 無線ネットワークシステムの課題：センサ端末の電池交換によるメンテナンスコスト増大、遮蔽物・電磁波発生環境での通信性能の低下

課題解決のための取り組みと研究開発項目

- 限られたデータ量でモニタリングを可能にする技術
- 限られた発電量で自立動作する低コスト端末の開発
- 低コスト・低消費電力の高信頼性無線ネットワークシステム
- 低周波数域振動発電センサデバイス、鹿威し方式自立発電センシング
- 振動発電センサデバイスの低コスト化・量産技術
- 耐振性端末実装構造、低コスト設置方法、信頼性試験方法の開発
- 時刻同期型の省電力通信方式、再送を伴わない衝突回避制御方式
- 圧電振動発電センサデバイスを用いた監視技術、シームレスに処理するモニタリングシステムの開発

UCoMSの開発推進体制

- 研究開発コンソーシアムである**コアモニタリング研究体**で推進
(研究体長：東京大学 新領域創成科学研究科 伊藤寿浩教授)
- センシング・発電デバイスの開発 (担当：産業技術総合研究所)
- AIN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発
(担当：マイクロマシンセンター)
- コアモニタリング用センサ端末の開発 (担当：明星電気)
- コアモニタリング用ネットワークシステムの開発
(担当：沖電気工業)
- コアモニタリングシステムの開発 (担当：高砂熱学工業)
- コアモニタリングシステムの構築と実証実験
(担当：高砂熱学工業)



コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

研究のポイント：Point

- 回転機器に設置した圧電MEMS振動発電デバイスが蓄電キャパシタに貯めた電力でデータ送信（鹿威し方式）
- データ送信の頻度をモニタリングすることで、振動波形のAD変換、FFTせずに低電力で回転機器を異常診断

背景と目的：Background & Purpose

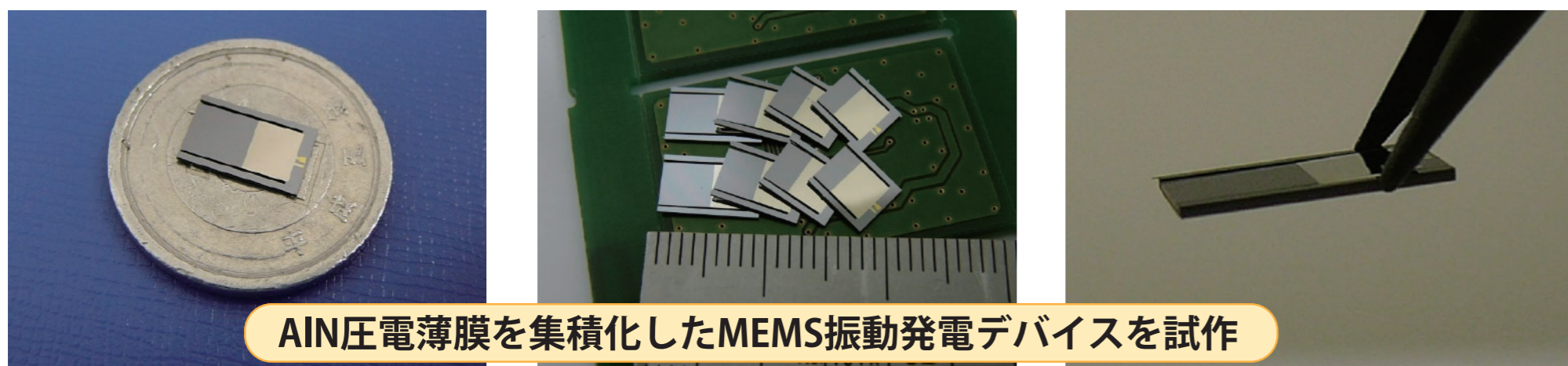
- 回転機器のモニタリングにおいて、通常は振動波形をAD変換してデータを送信後、フーリエ変換して振動強度や周波数の変化から異常を判定。
- 振動発電による自立電源無線センサ端末でモニタリングするには、データ量を必要最小限にして、送信電力を大幅に低減することが必要不可欠。
- **目的**：圧電MEMS振動発電デバイスが発電した電力のみでデータの無線送信を行う鹿威し方式の電池レスのワイヤレス振動モニタリング端末の開発。

研究の内容：Summary

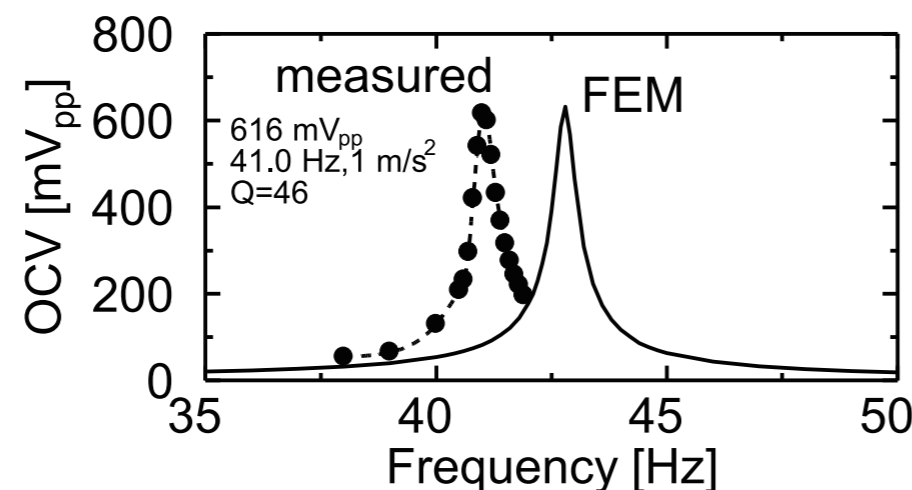
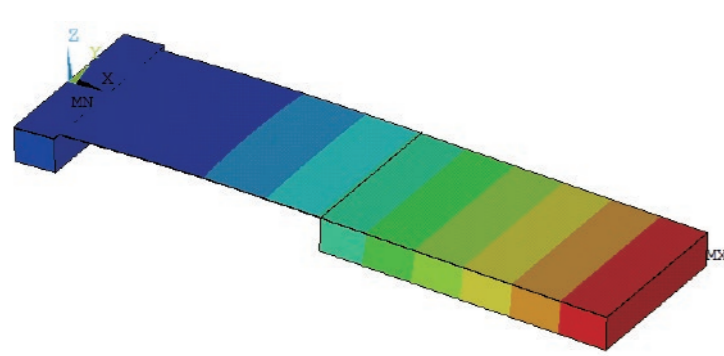
- 高効率圧電MEMS振動発電デバイスの開発
 - ・・・AIN圧電薄膜、MEMS構造最適化、整流回路低損失化
- 鹿威し回路の低電力化
 - ・・・コンパレータ、参照電圧生成回路の低電力化
- **目標**
発電量 $> 2V \ 0.5 \mu W @ 110Hz \ 0.5m/s^2 >$ 鹿威し回路消費電力

実験及び実証のデータ：DATA

圧電MEMSプロセス

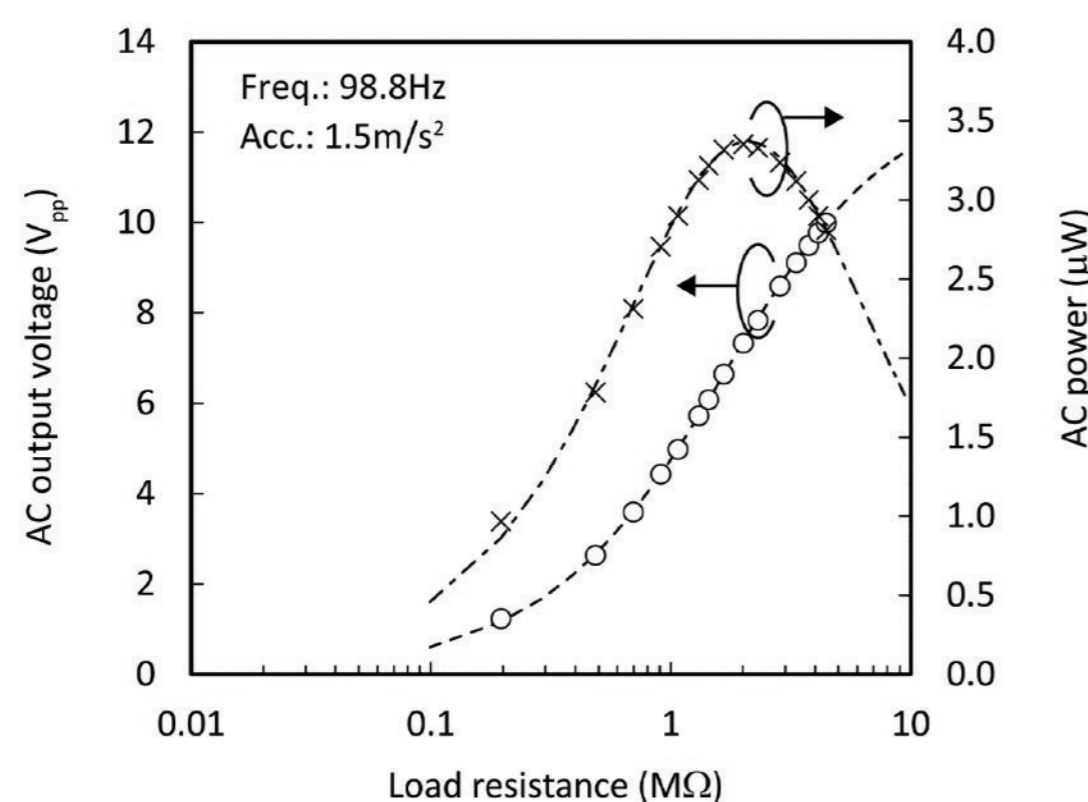
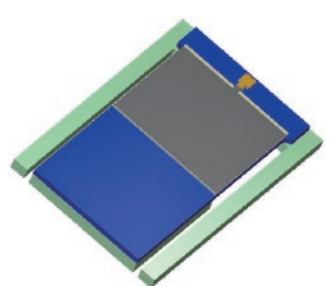


有限要素法による設計



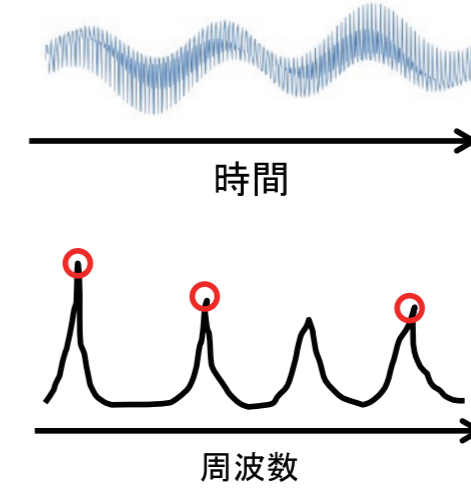
ダンピング係数の調整により正確なシミュレーションを実現

発電特性



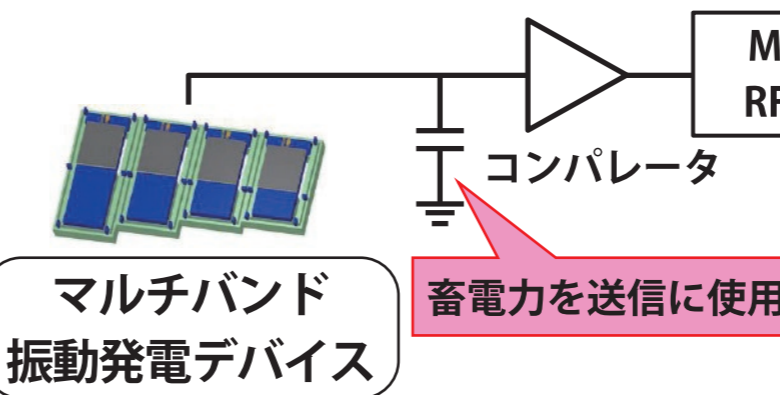
AIN-MEMS振動発電デバイス：8V_{pp} 3.3 μW@98.8Hz 1.5m/s²
→ ScAIN高性能圧電薄膜、整流回路低損失化により目標達成の見込み

通常の振動モニタリング

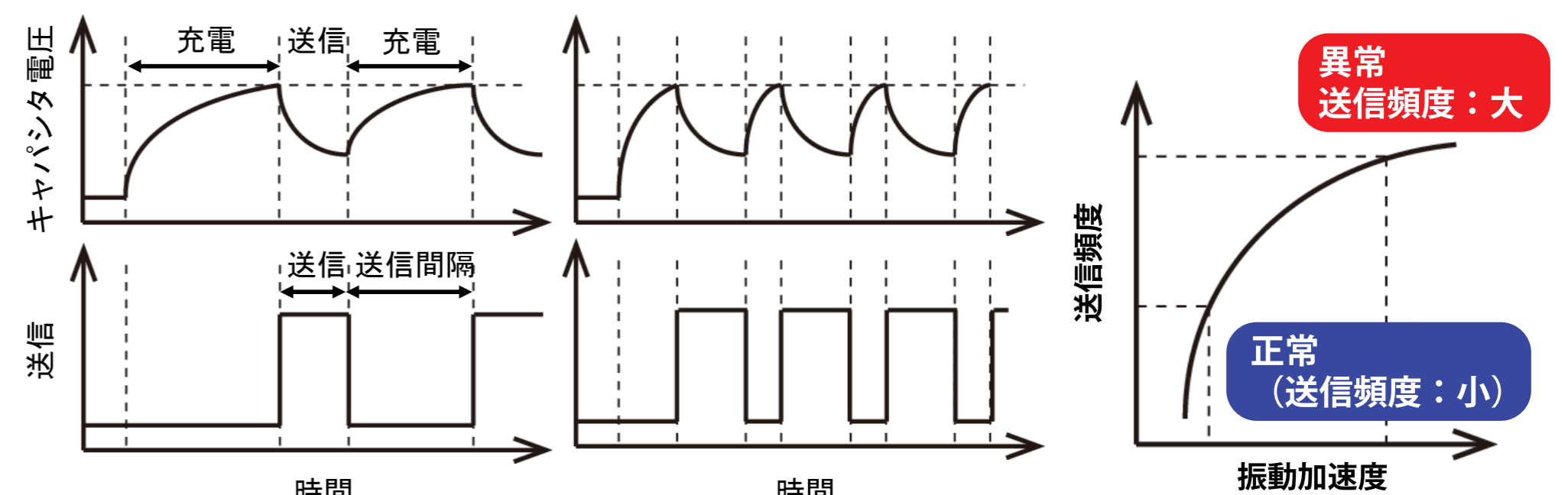


- 1) ADC→送信
 - ・データ量16000bit
 - ・10分間欠送信で50 μW
- 2) 受信機側でFFT

本研究開発（鹿威し方式）

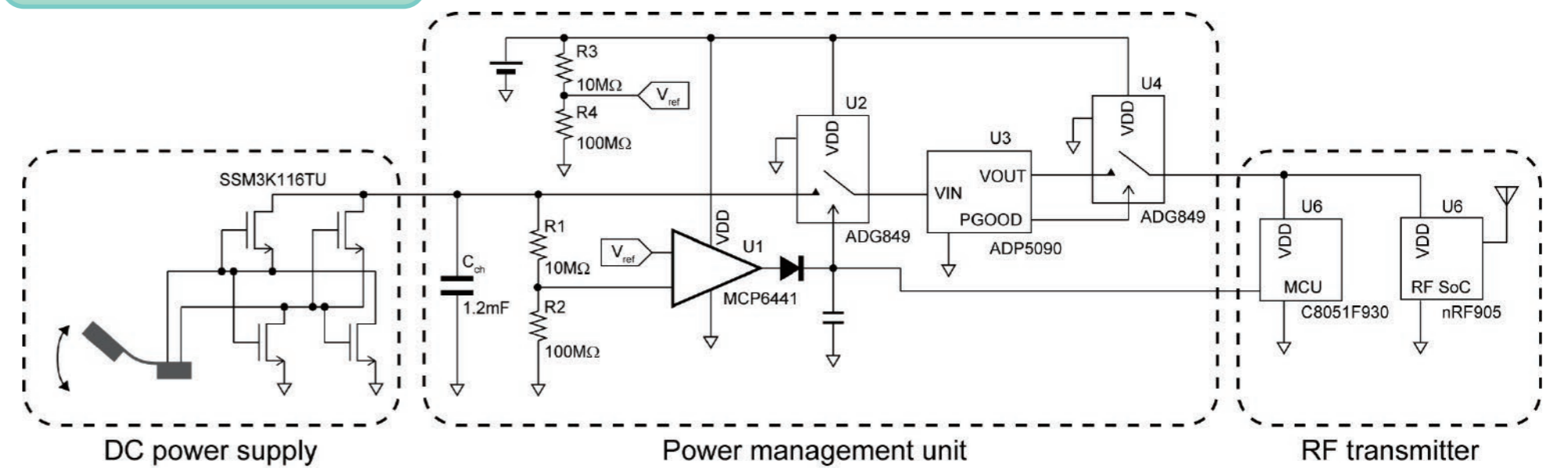


振動発電デバイスと鹿威し回路の組み合わせにより、振動値に相当する情報を送信する。



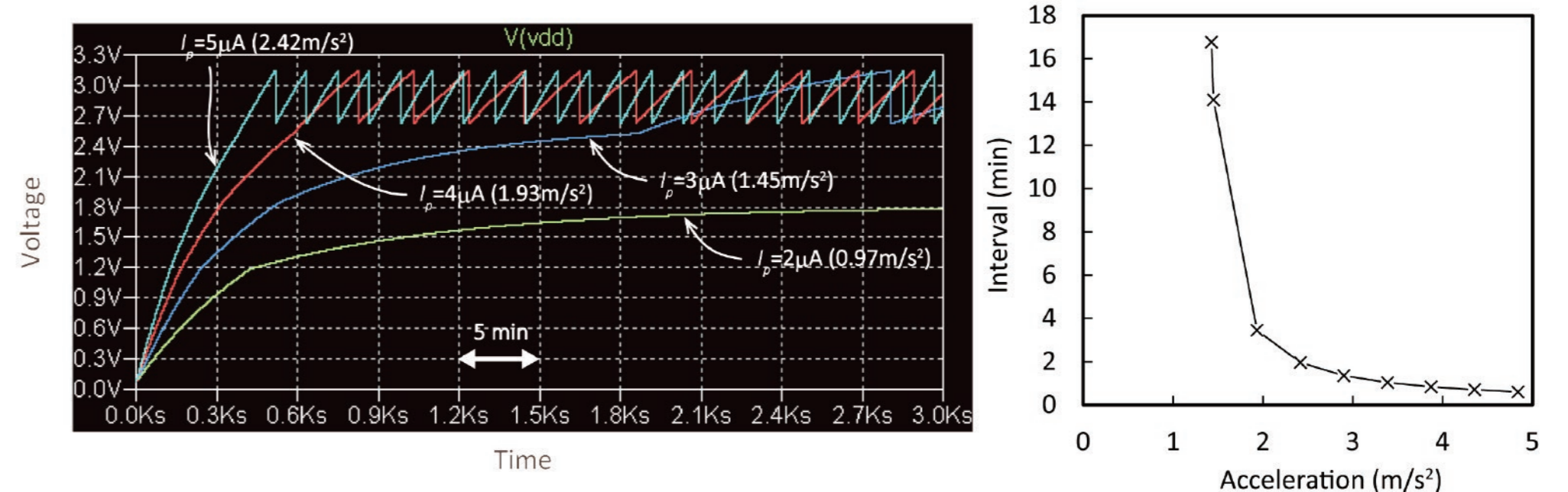
振動加速度：小⇒送信頻度：小 振動加速度：大⇒送信頻度：大

端末全体の回路図



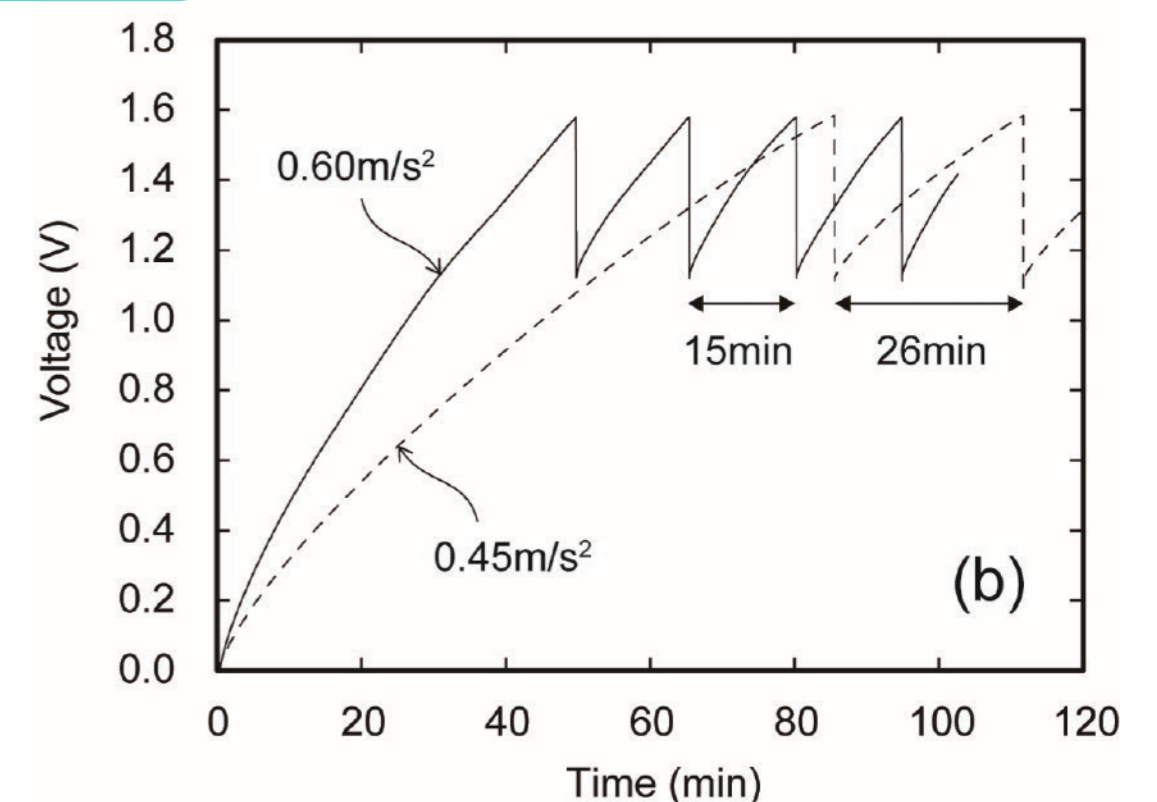
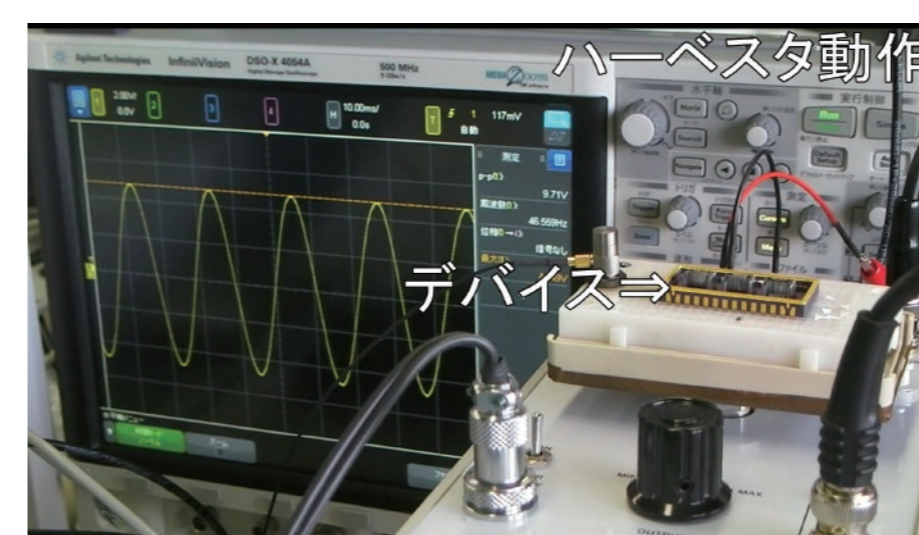
電源制御回路部の消費電力：～0.2 μW

回路シミュレーション



SPICEにより送信頻度と振動加速度の相関をシミュレーション

AIN-MEMS振動発電デバイスによる動作検証



振動発電による鹿威し回路の自立動作に成功

コアモニタリング用 AIN 圧電デバイスの ウェハレベルパッケージ技術の開発

研究のポイント：Point

- コアモニタリング用 AIN 圧電デバイス量産プロセス及び低コスト・高信頼性ウェハレベルパッケージプロセスの開発

背景と目的：Background & Purpose

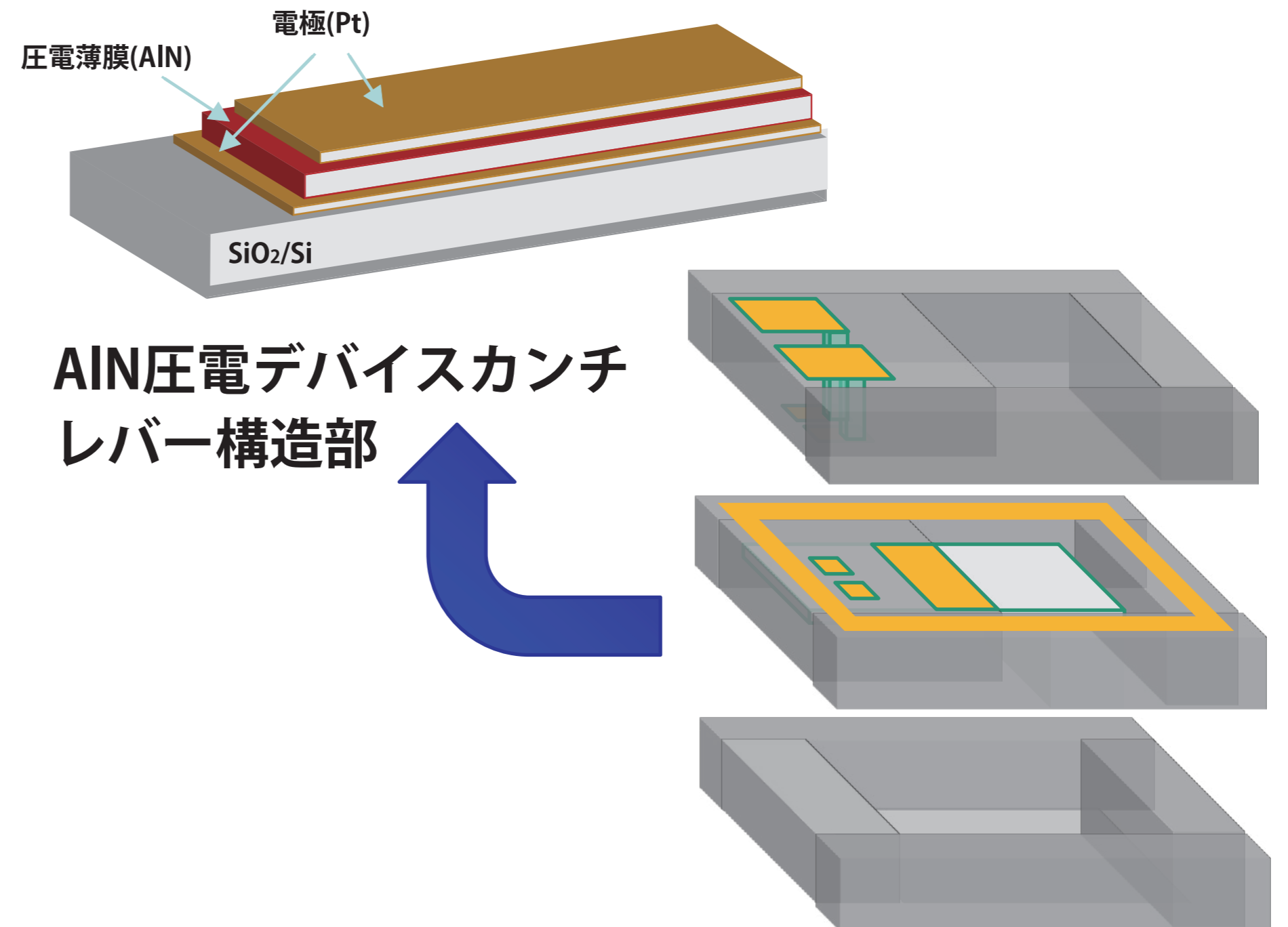
- 産総研が担当する AIN 圧電振動センサ素子、発電素子、トリガセンサ素子の設計開発に基づき、これらの異なる設計の AIN 圧電デバイスを 8 インチ Si 基板に一括して製造する低コストプロセスの開発
- AIN 圧電振動デバイスをウェハレベルで気密封止する低コスト、高信頼性パッケージプロセスの開発

研究の内容：Summary

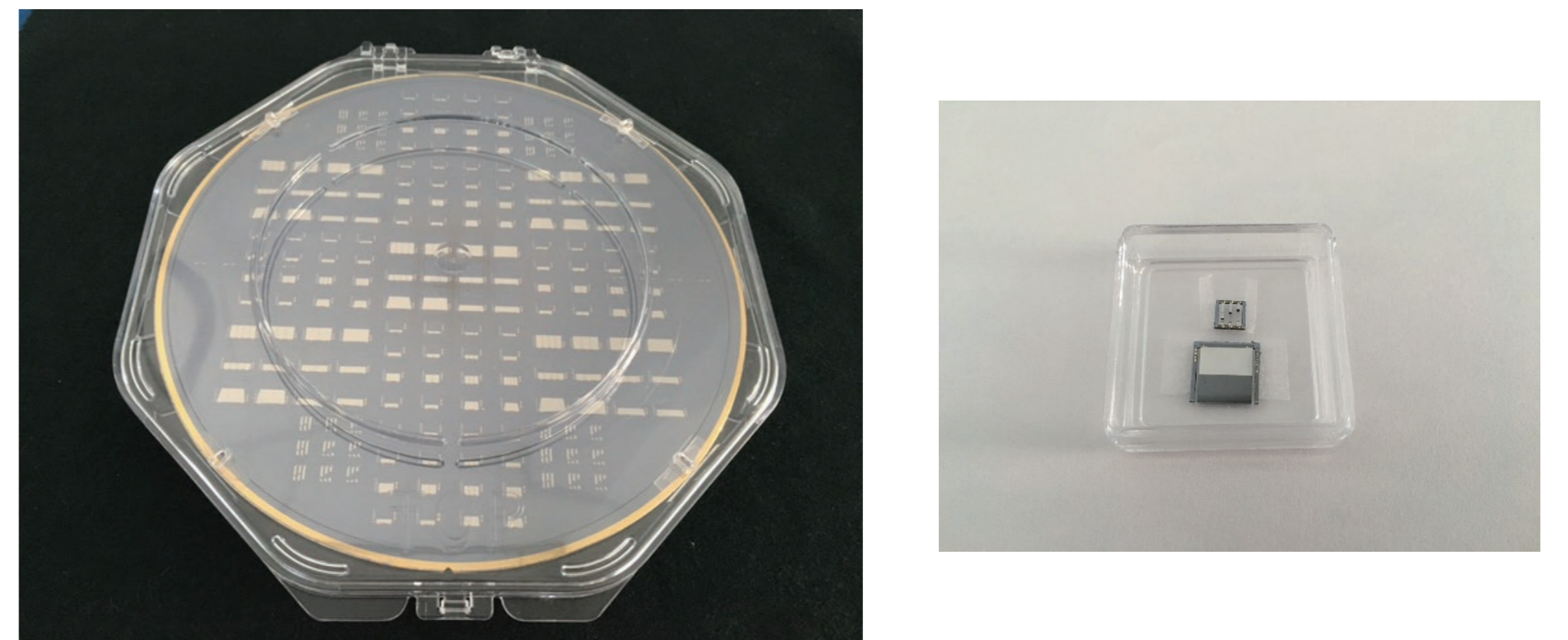
- 8 インチ試作ラインにて、カンチレバー構造の AIN 圧電デバイスの試作を実施
- 電極取り出し構造と封止構造を同時接合プロセスで可能にするウェハレベルパッケージプロセスを開発

実験及び実証のデータ：DATA

- AIN 圧電デバイス量産プロセスの開発
 - ・量産を想定し、8 インチ Si ウエハを用いた、AIN 圧電デバイス加工プロセスを開発
 - ・開発したプロセスにてカンチレバー構造を作製し、目標とする圧電特性を確認
(圧電定数 d_{31} ：目標 1.0 → 1.14 pm/V)
 - ・試作したカンチレバー型振動センサ素子・発電素子の基本動作を確認
 - ・出力向上を狙い、ScAIN 圧電薄膜成膜技術を開発
- ウェハレベルパッケージプロセスの開発
 - ・ AIN 圧電振動デバイスをウェハレベルパッケージ構造の設計、プロセス開発を実施
 - ・ Au-Au 低温活性化接合で良好な電気特性、高い接合強度を伴う封止性能を確認



AIN 圧電デバイスのパッケージ構造

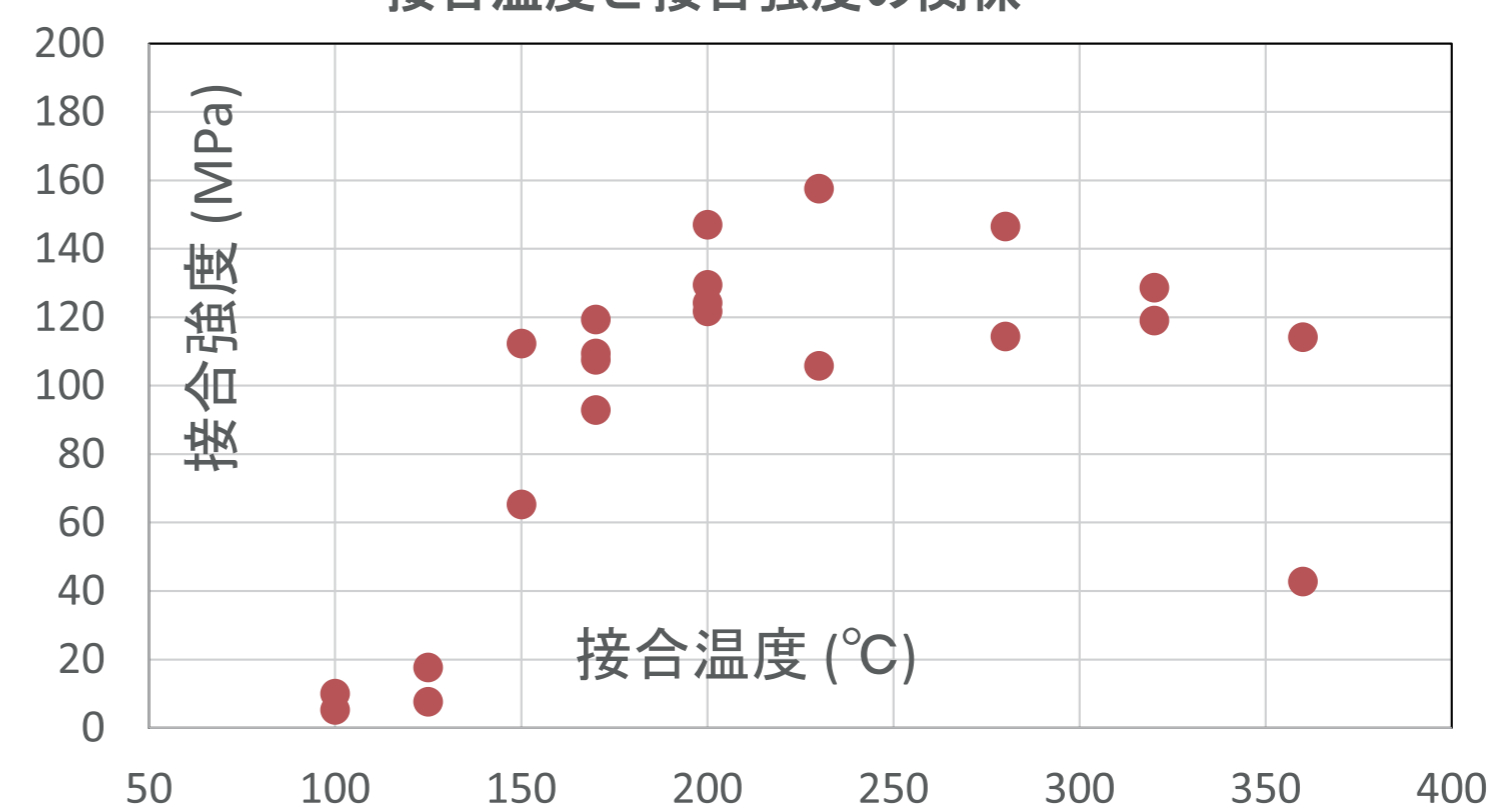


AIN カンチレバー試作ウエハ・デバイス例

8 インチ AIN 圧電デバイスの圧電特性

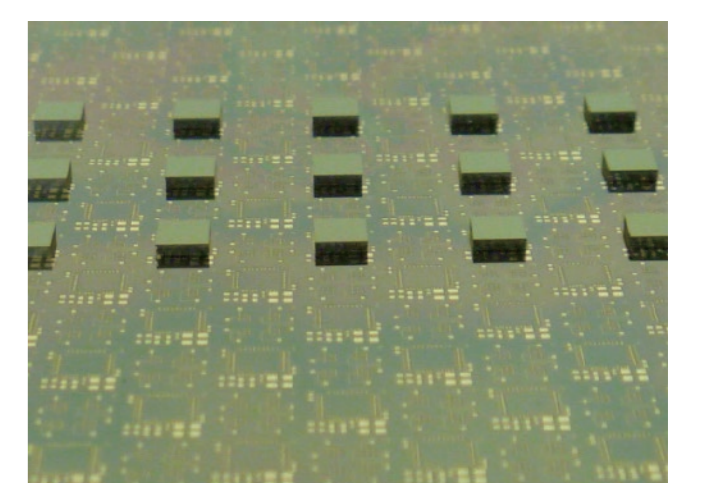
圧電性能	AIN (試作結果)	ScAIN	
		(試作結果)	(目標)
圧電定数 d_{31} [pm/V]	1.1	5	14
誘電率 ϵ_r	13	19	16
ヤング率 E [GPa]	350	250	250
出力電圧 $V \propto d_{31}/e$	1.27	4	13.1
発電出力 $P \propto E \cdot d_{31}^2/e$	0.07	0.7	6.56

接合温度と接合強度の関係

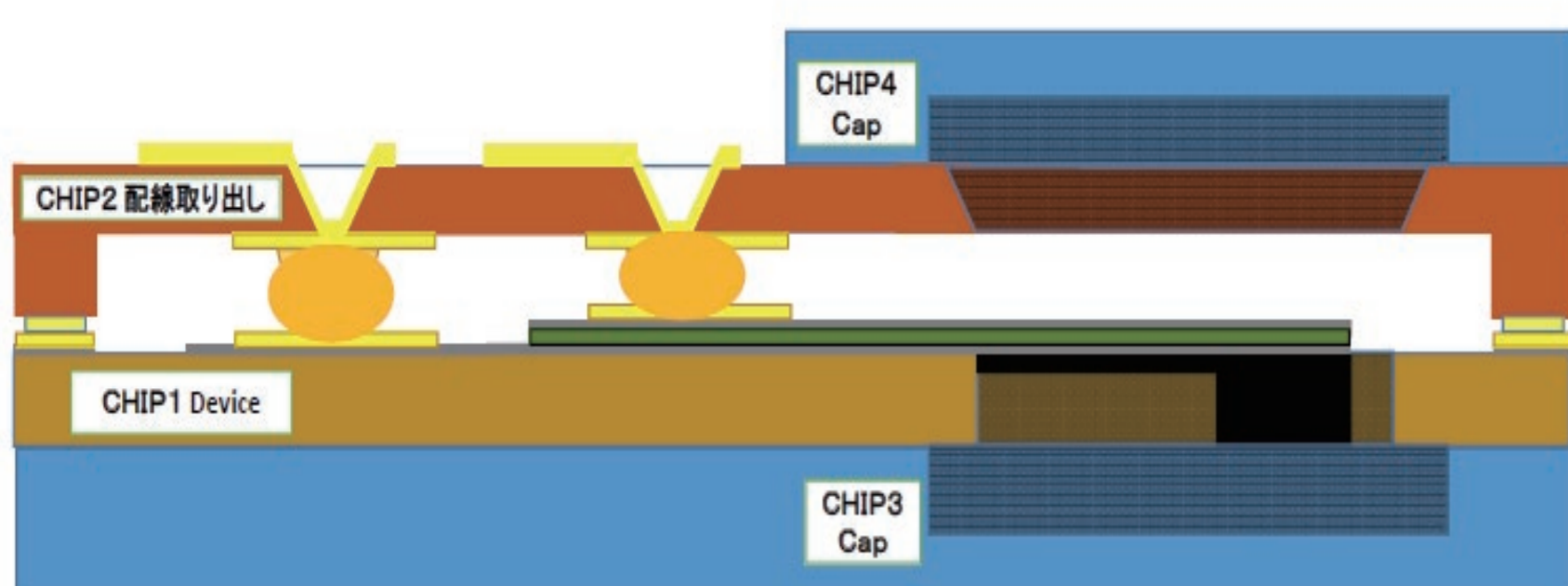


Au-Au 低温活性化接合結果

(低温活性化条件例)
プラズマ活性化処理: Ar:20sccm, 100W, 60Pa, 1min
Au-Au 接合時間: 5分、圧力 60MPa



低温活性化接合実験ウエハ



低周波発電デバイスパッケージング構造

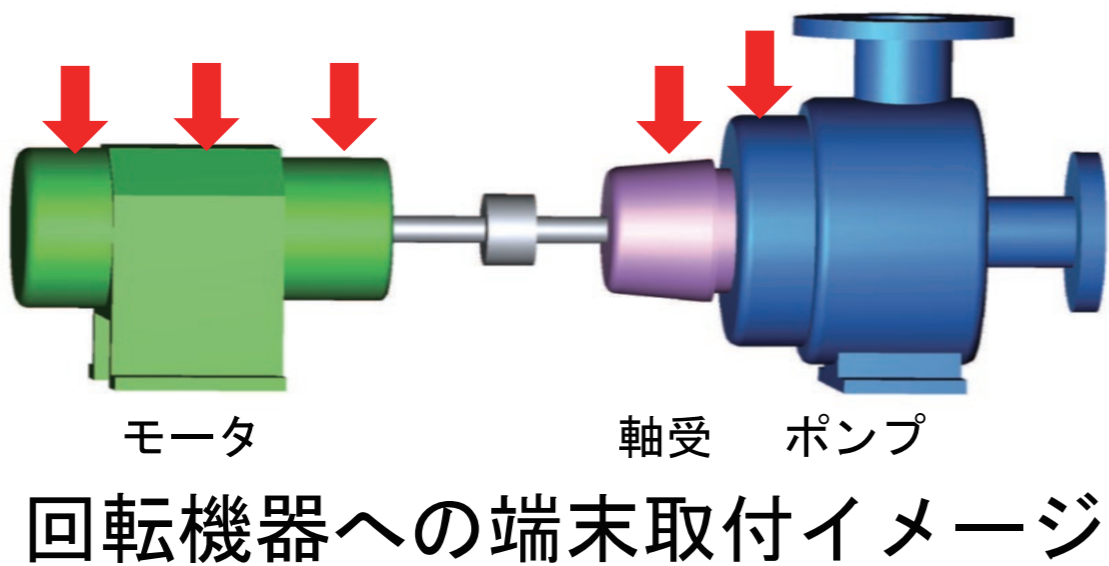
振動センサ、無線、制御回路の小型パッケージと 回転機への固定部の開発

研究のポイント：Point

- 振動センサへの振動伝達性の考慮しつつ、小型パッケージと固定方法の確立

背景と目的：Background & Purpose

- 回転機器の予知保全モニタのため、1kHz以上の高周波振動計測が必要
- 安価なシステムアップを目指すため、長期メンテナンスフリーの信頼性
- 回転機器の任意の場所に設置を可能にするための固定方法と小型パッケージ



研究の内容：Summary

- 目標値
 - ・ 無線センサ端末の小型化と10年間の耐振動性
 - ・ 無線センサ端末のサイズをP型（ペットボトルキャップサイズ）に小型化検討
 - ・ センサ端末、固定部の10年間耐久性の実証

実験及び実証のデータ：DATA

■ 情報収集端末 [中継端末] (試作)

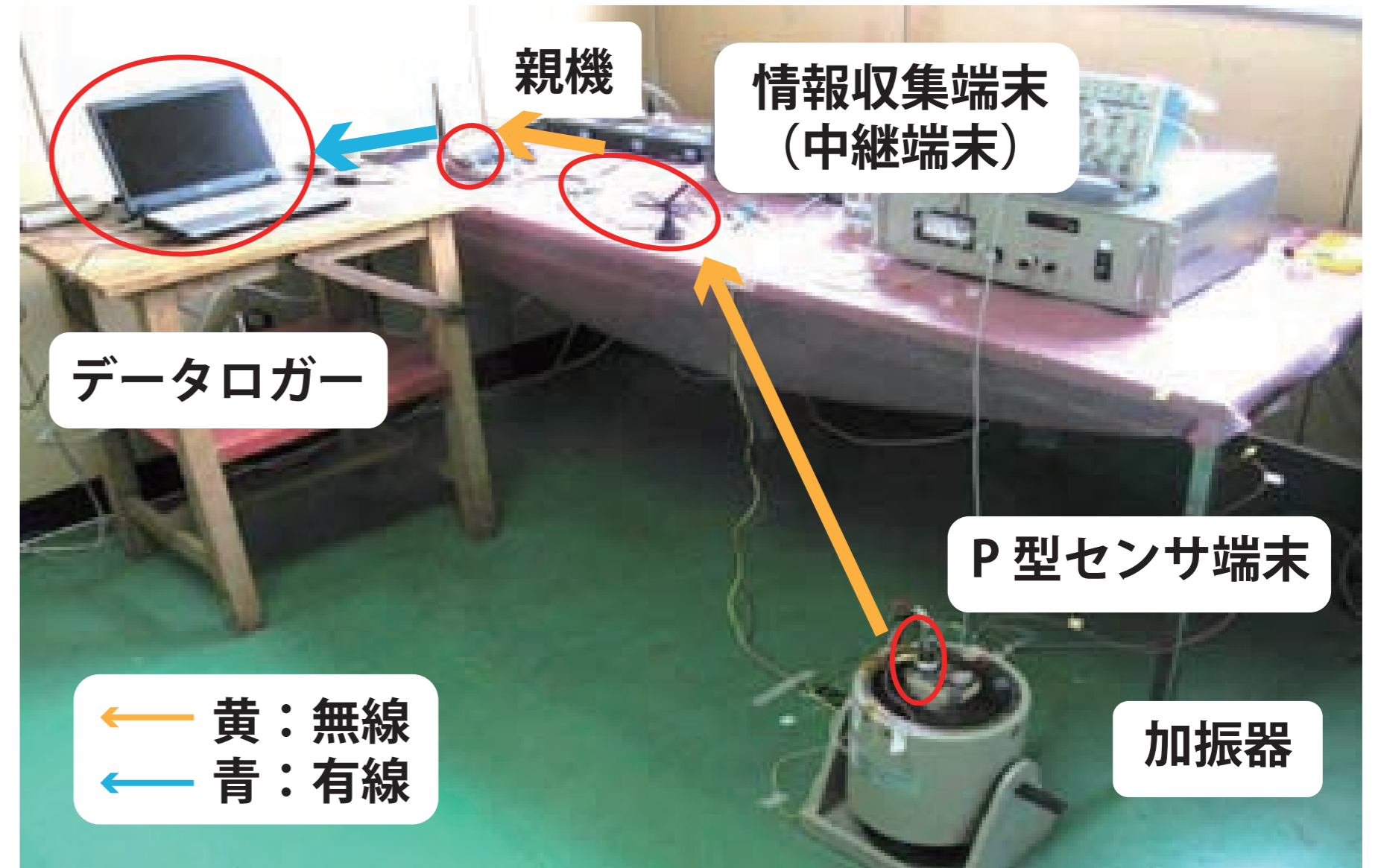


項目	試作端末仕様
無線通信	920MHz帯
受信アンテナ	外付けポイプアンテナ
端末取付	マグネット取付 専用金具取付
電源	AC電源アダプタ
外観寸法	90×60×50mm
外形色	黒

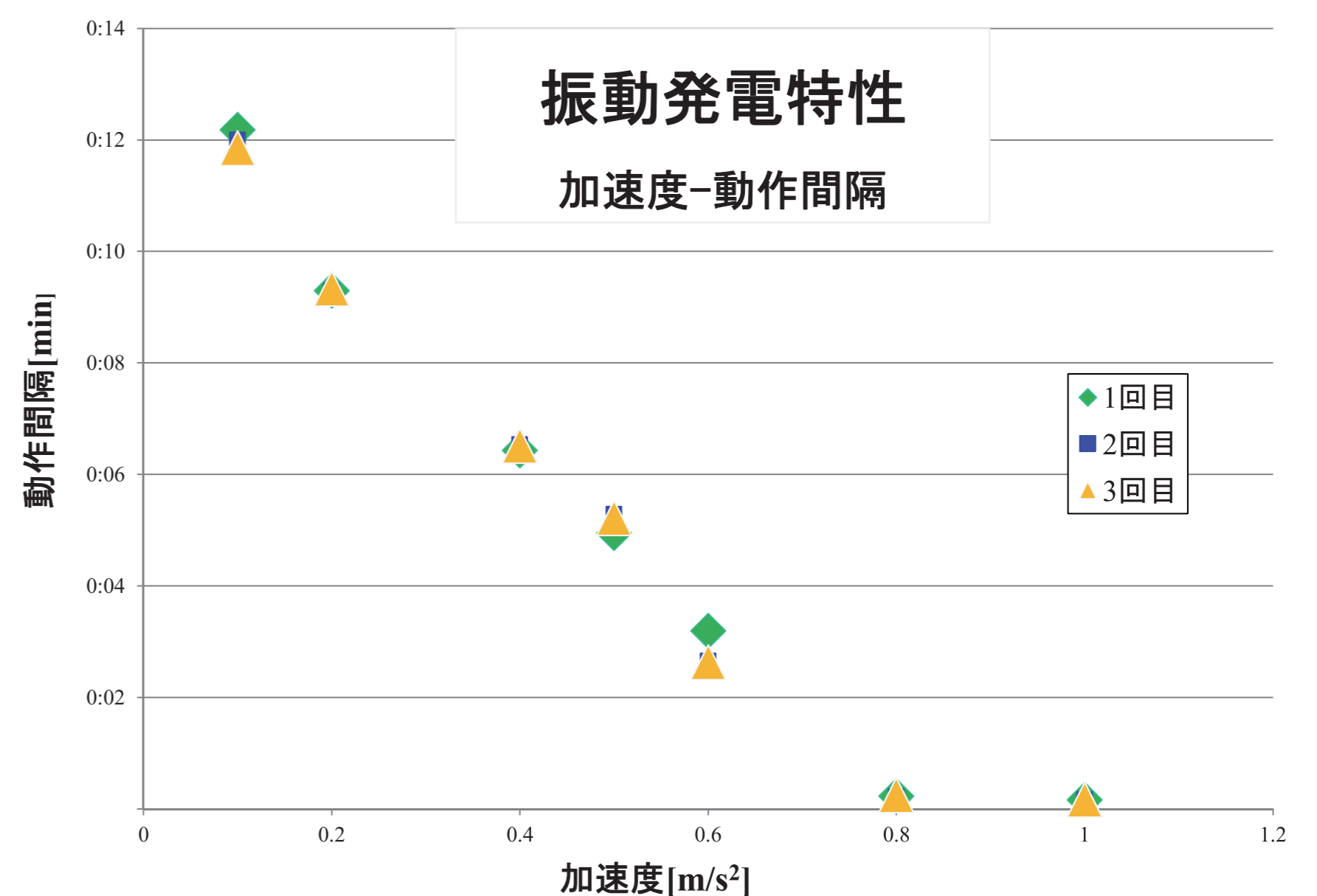
■ P型センサ端末 (試作)



項目	試作端末仕様	最終端末仕様
無線通信	920MHz帯	920MHz帯
通信距離	30m以上	30m以上
送信データ	振動 表面温度	振動 表面温度
電源	振動発電 +補助電池	自立電源 (振動発電)
外形寸法	30φ, 46mm (突起部除く)	30φ, 20mm (突起部除く)

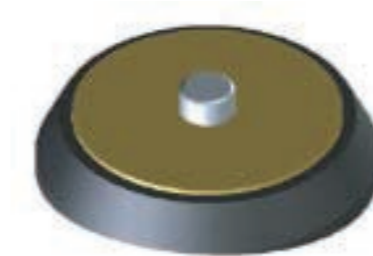


振動発電特性試験構成



モニターする回転機器の振動から振動発電センサデバイスで発電し、鹿威し方式によりP型センサ端末を動作させる動作間隔より振動加速度が想定できる

■ 端末の固定化方法検討

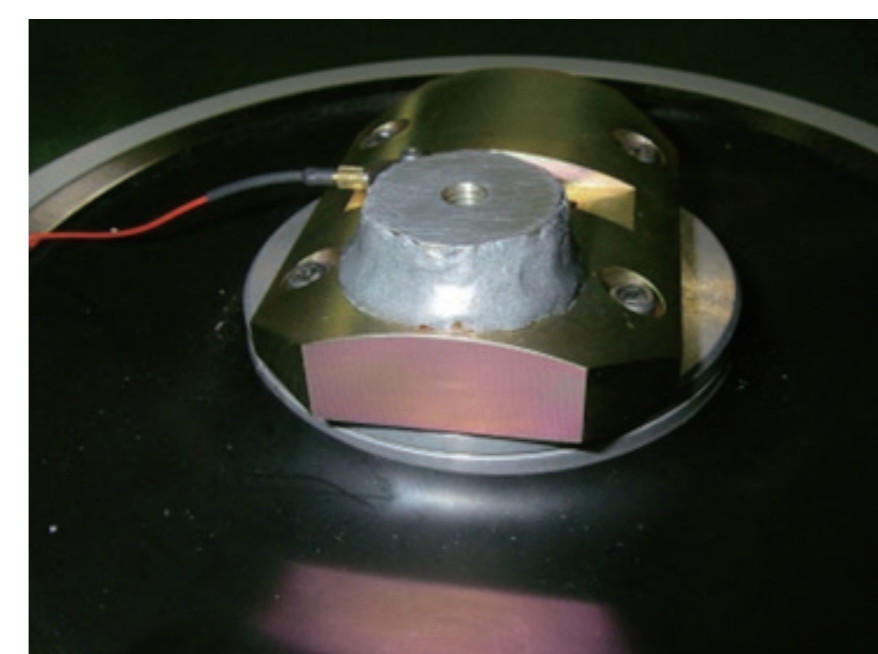


スタッドを回転機器に
接着剤で固定



センサ実装

■ 端末固定化方法



曲面への接着固定の
耐振動性を確認

コアモニタリング用ネットワークシステムの開発

研究のポイント：Point

- ライフラインコアモニタリングシステム実現のための省電力な無線マルチホップ通信システムの開発

背景と目的：Background & Purpose

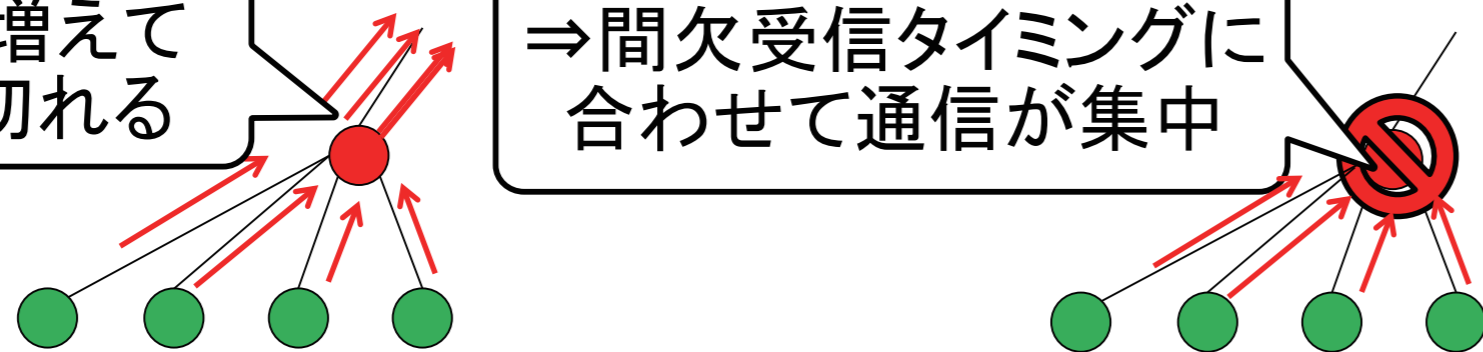
- インフラコアモニタリングシステム完全無線化のメリット
 - ・ 通信や電源配線の敷設コスト不要
 - ・ センサ設置が容易となり工事コスト削減
- インフラコアモニタリングシステム無線化の課題
 - ・ 自立電源で動作可能な省電力無線通信技術の確立
 - ・ 構造的に複雑で多くの遮蔽物が存在する環境での、無線ネットワークの信頼性確保
- 省電力無線モジュールによるマルチホップ通信ネットワークの実現を目指す

研究の内容：Summary

- 目標値：2018年度にノードあたり消費電力20uW程度で無線マルチホップ通信環境を構築
- 課題：特定のノードへトラフィックが偏る
 - ・ ノードの消費電力上昇
 - ・ 輻輳発生率上昇

課題：消費電力上昇
⇒ 転送量が増えて電池が早く切れる

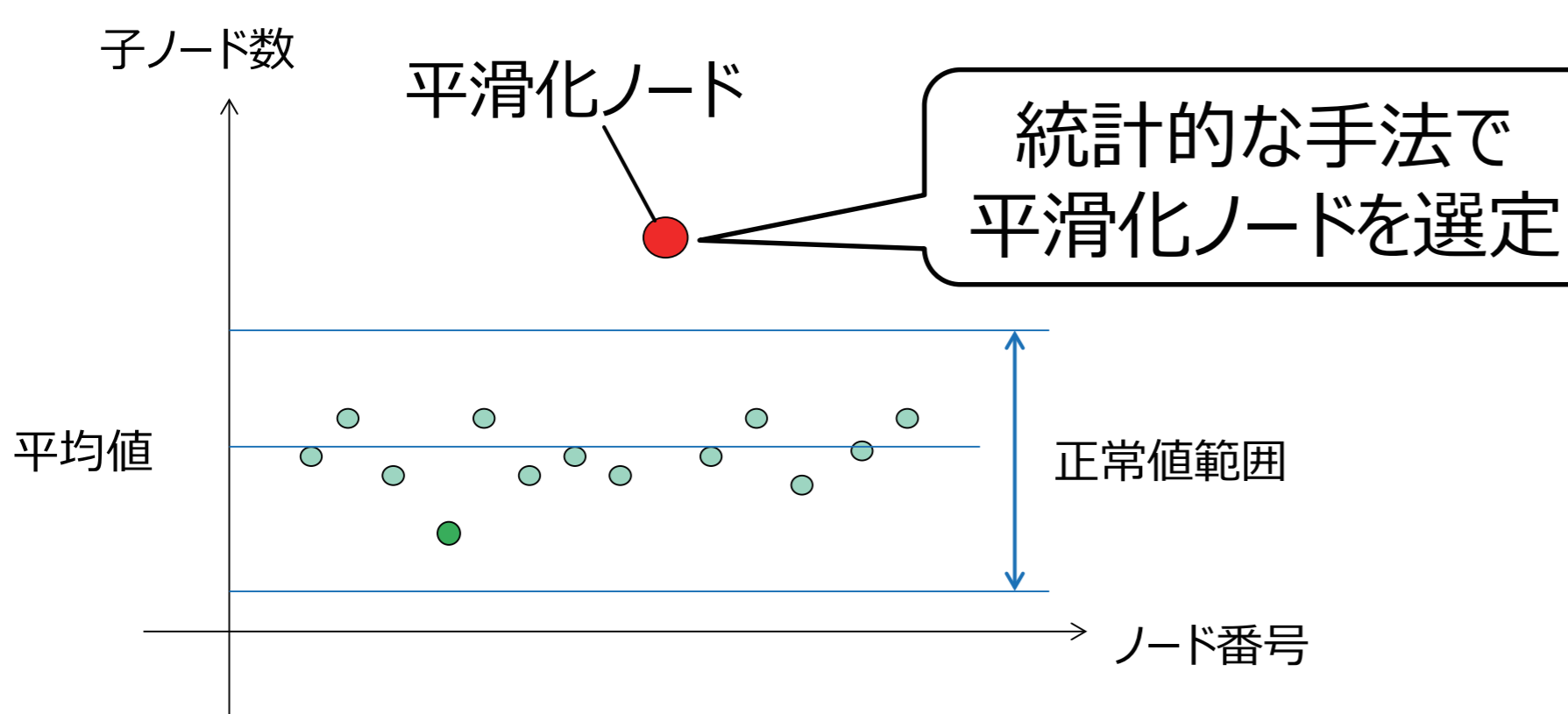
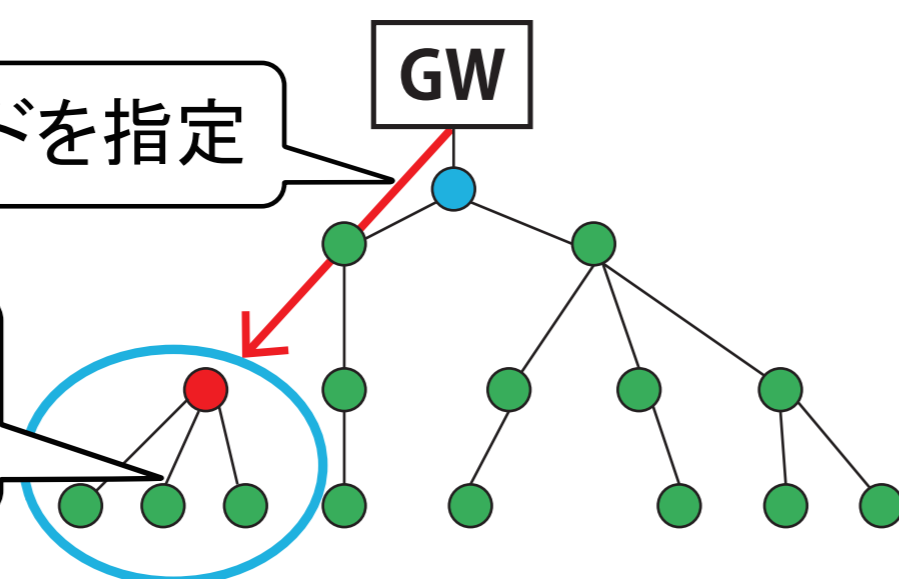
課題：輻輳発生率上昇
⇒ 間欠受信タイミングに合わせて通信が集中



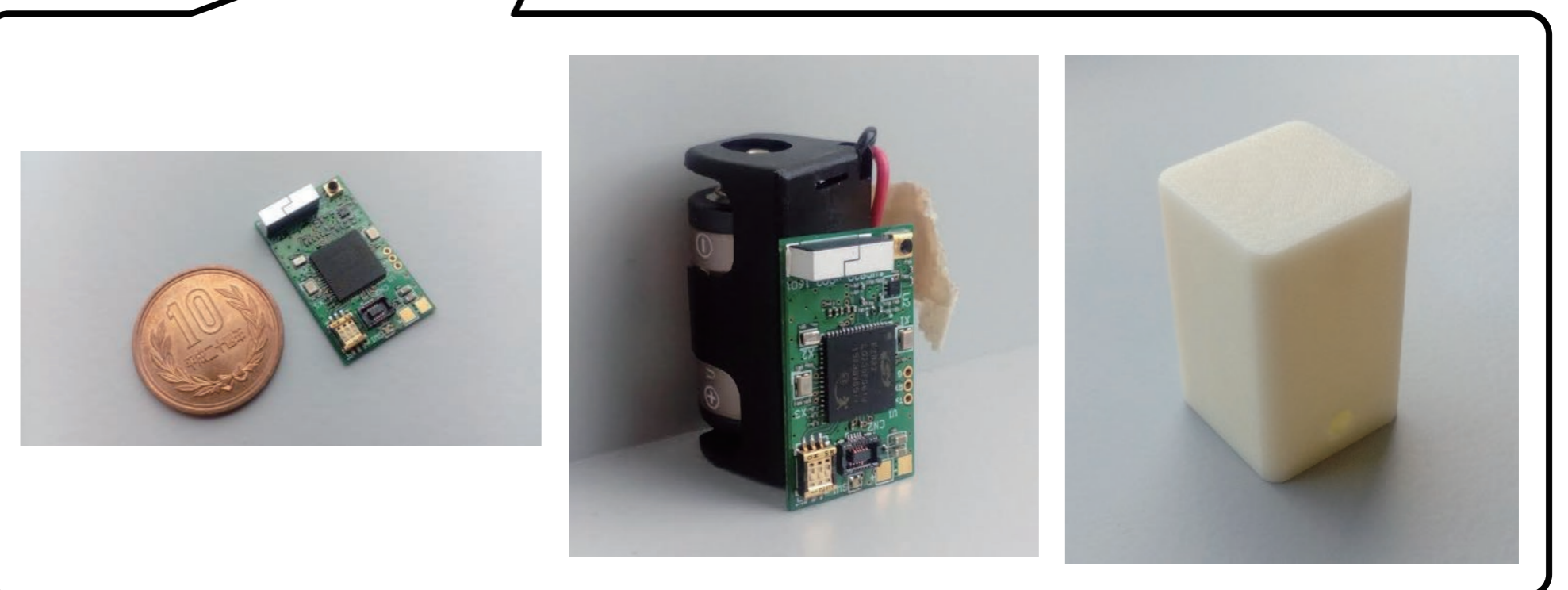
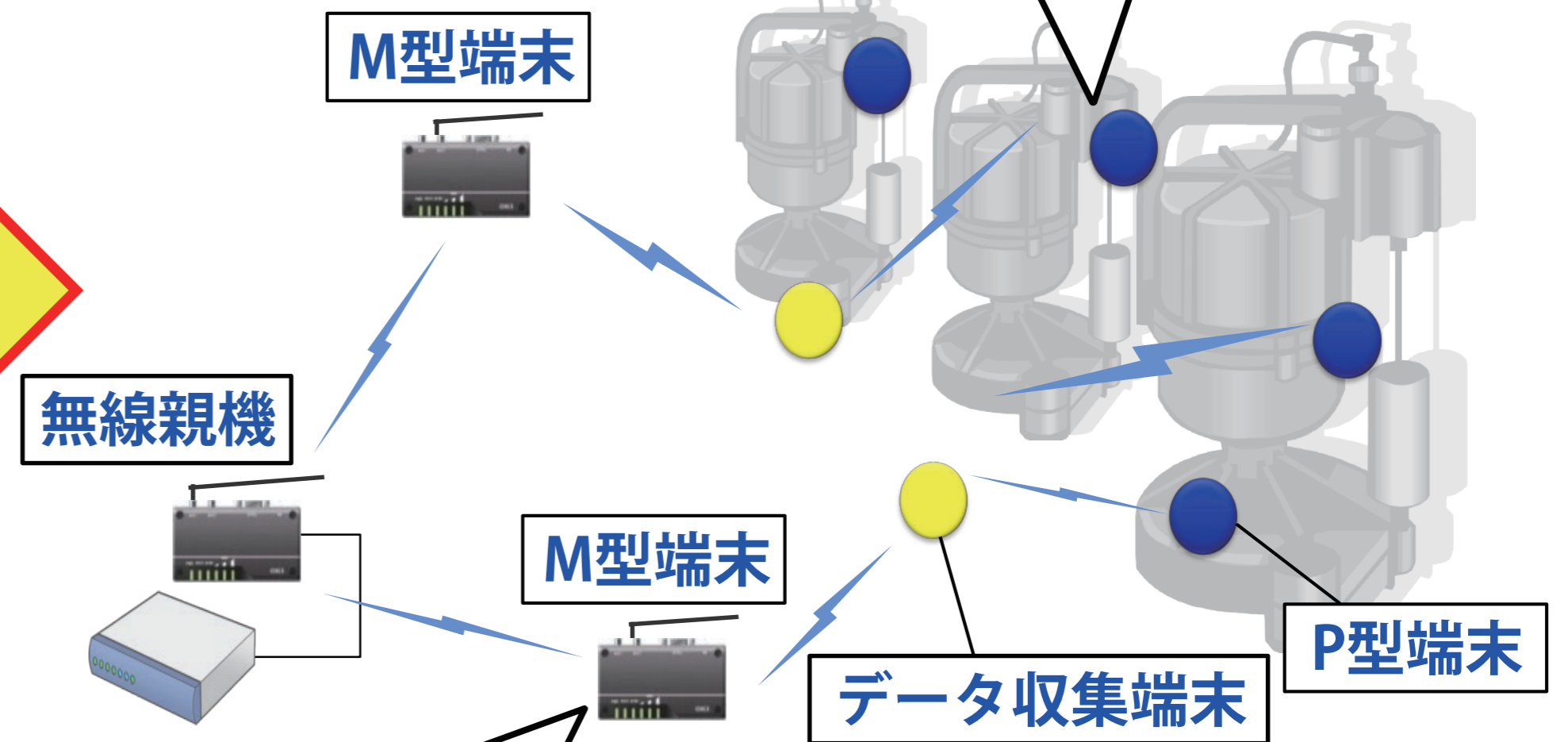
- 対策：子ノード数を平滑化→トラフィックの偏りを修正
- 実現方法：GWで平滑化ノード決定，その後ローカルで調整

① 平滑化するノードを指定

② ローカルで自律的に平滑化



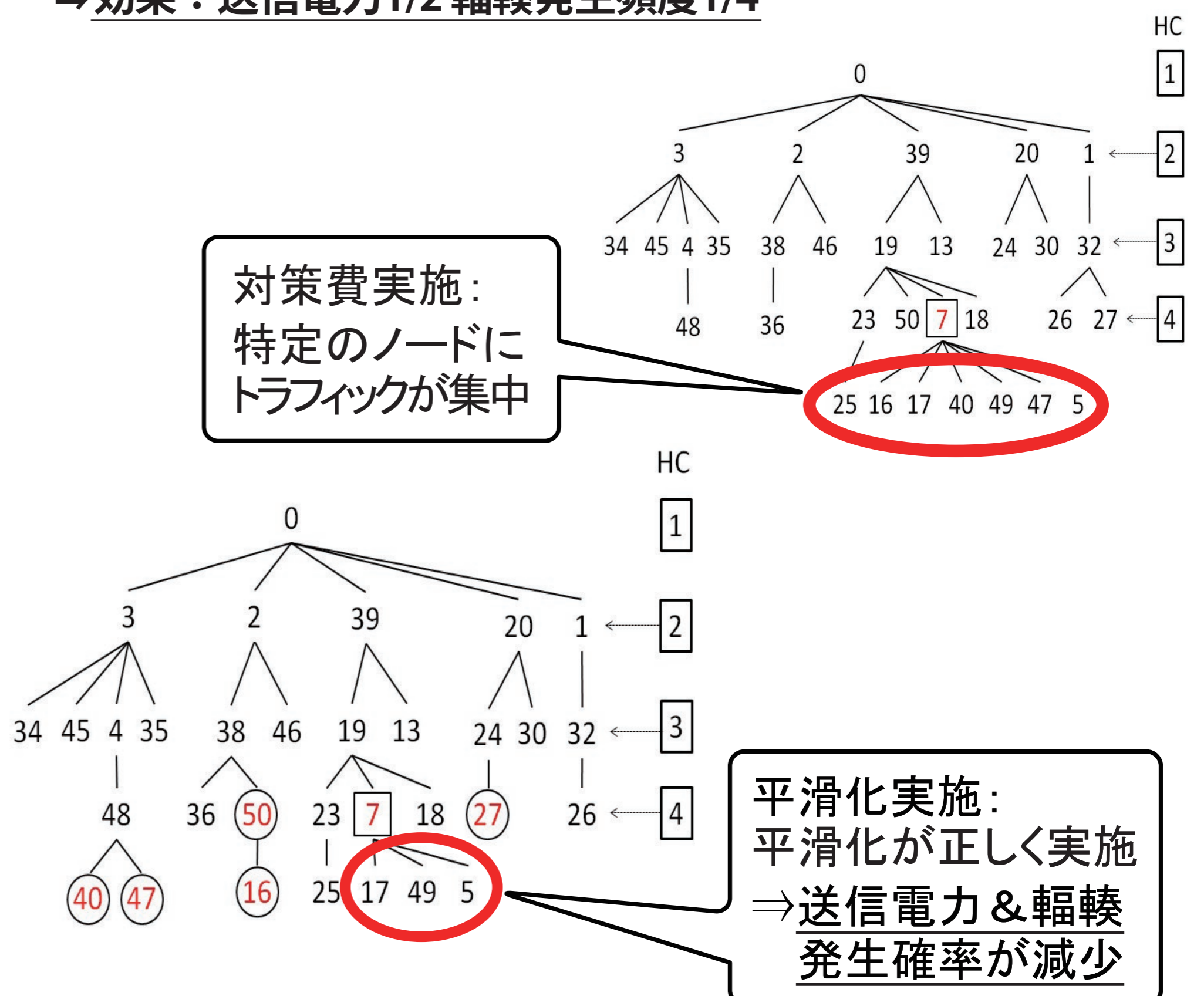
マルチホップ通信（多段通信）を採用することで、無線化しながら信頼性を確保



超小型省電力無線モジュール（2015年開発）

実験及び実証のデータ：DATA

- 実際のNWトポロジ（50台）を元に効果を確認
統計的手法として箱ひげ法を利用し、効率よく平滑化が実施できることを確認
⇒ 効果：送信電力1/2 輻輳発生頻度1/4



コアモニタリングシステムの開発

研究のポイント：Point

- 熱エネルギーの供給拠点、災害時の防災拠点となる施設の心臓部であるポンプの状態監視
- 鹿威し方式の不定期なデータから異常兆候の高確度検知、保全時期の実務精度予測

背景と目的：Background & Purpose

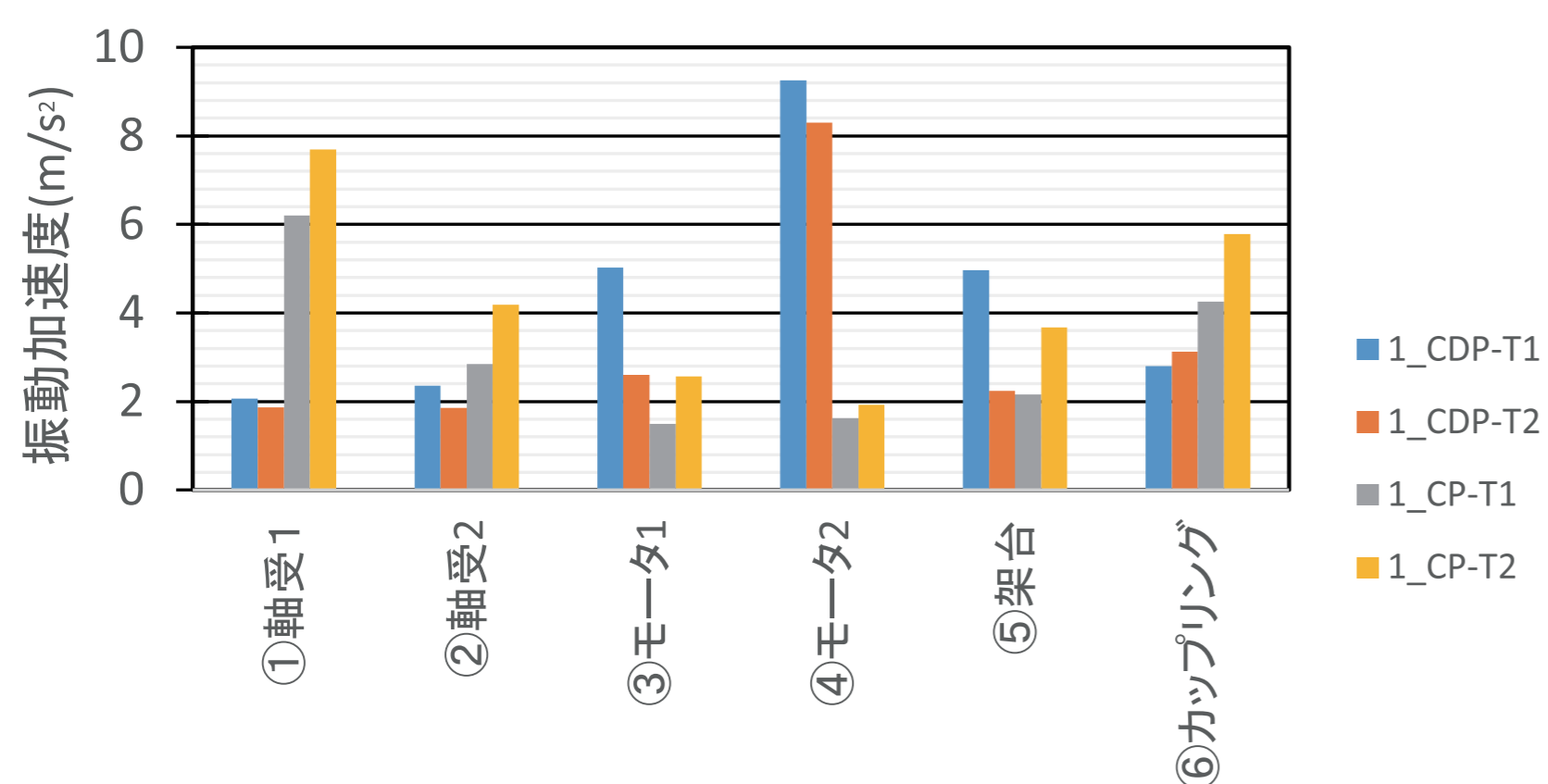
- 施設設備のセンサシステムで常時・継続モニタリングしたい事象として、振動加速度、表面温度への要望が大多数
- ポンプの軸受など回転部位の損傷は、傷端部のバリと鈍りが繰り返しながら進行する非正常現象
- 監視の信頼性向上には、非正常現象を確実に検知し、かつ特殊な技能がなくても判定ができるマンマシンインタフェースを開発

研究の内容：Summary

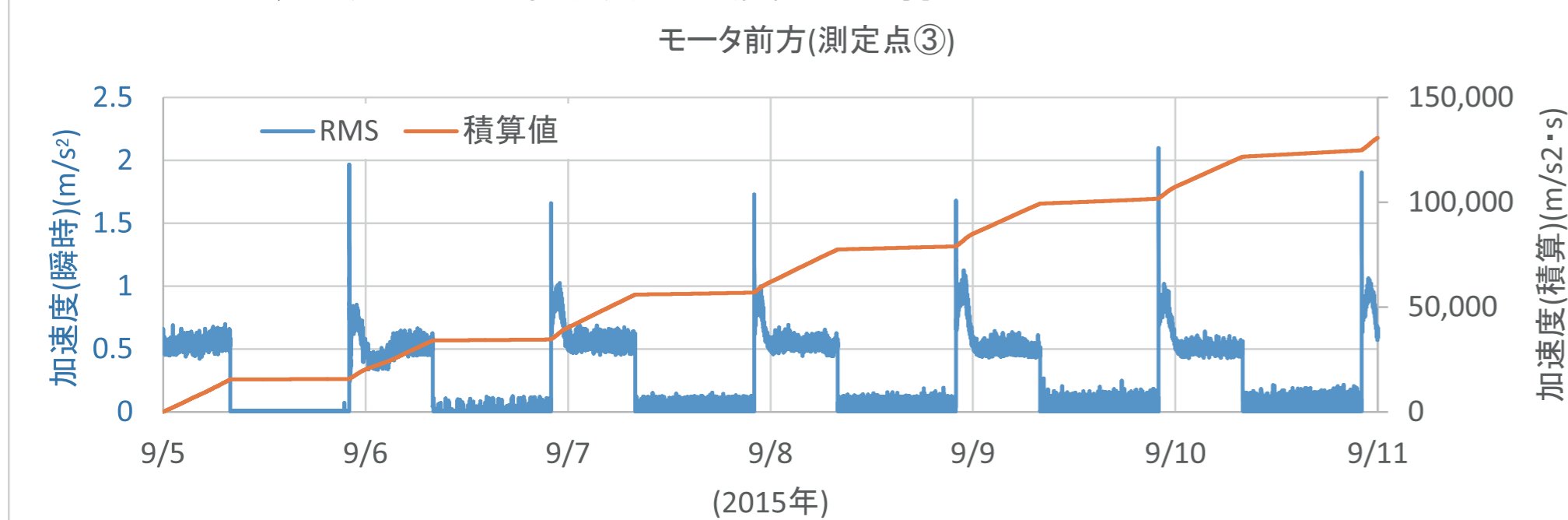
- 研究開発フェーズ（平成26年度～平成28年度）
コアモニタリングシステムの要素技術である「振動データのフィルタリング機能」「運転モード別の異常検知手法」「保全までの余裕時間予測手法」を開発
【平成27年度】
 - ◆ 鹿威しセンサデバイスのエミュレータ開発
多チャンネル化で同時データ収集を可能とし、無線デバイスによる伝送を確認
 - ◆ データフィルタリングの適用と異常検知ロジックの開発
定常時並びに否定常時の異常検知アルゴリズムを構築
- 実証フェーズ（平成29年度～平成30年度）
要素技術を統合したモニタリングシステムを構築

実験及び実証のデータ：DATA

測定箇所による振動加速度の差異



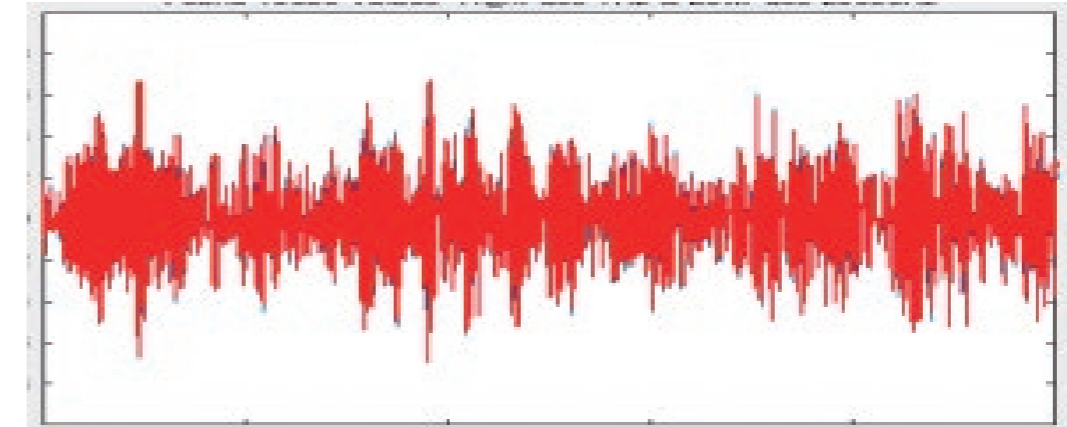
ポンプの起動により振動加速度が急増



横型ポンプ

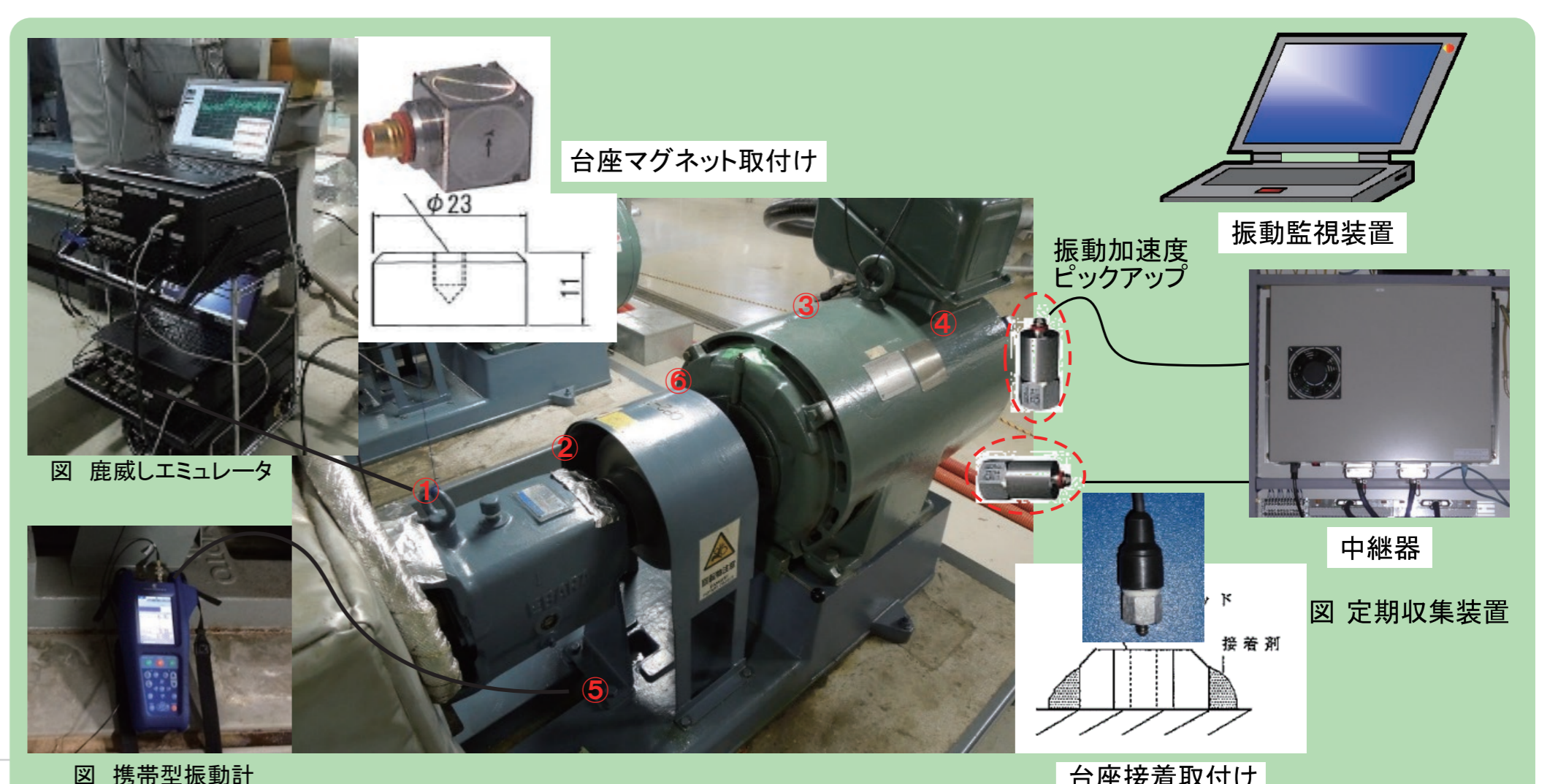
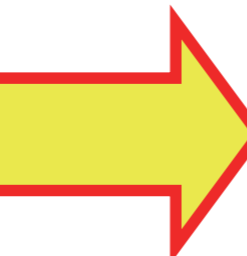
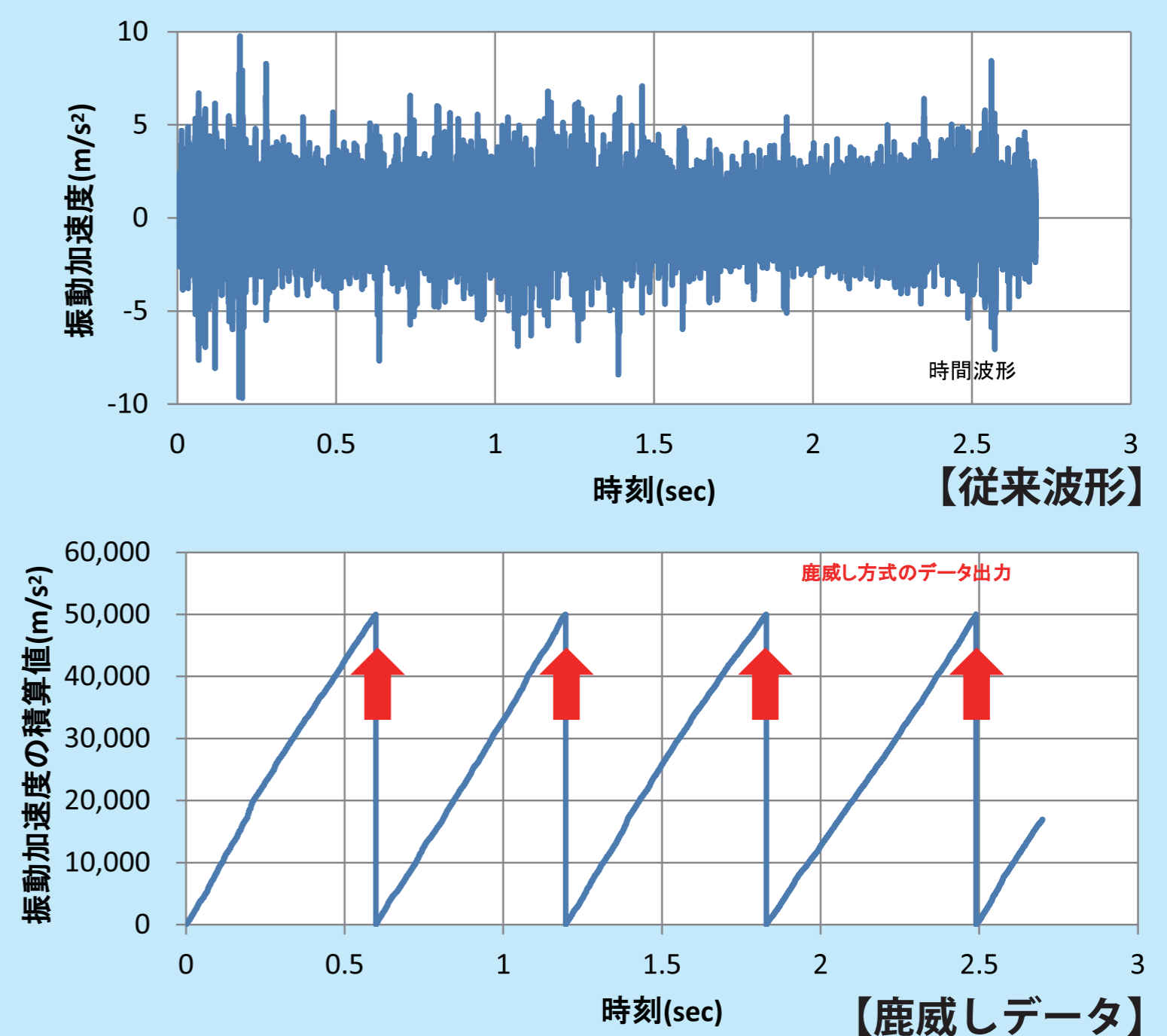


立型ポンプ



従来データ：振動加速度の時間波形

開発データ：鹿威し方式の振動データ



【鹿威しセンサデバイスの多chエミュレータ】

コアモニタリングシステムの構築と実証

研究のポイント：Point

- 施設BCP(Business Continuity Plan事業継続計画)対応に合致
- 都市インフラ(熱エネルギー供給施設、病院施設)の安全な維持管理を実現

背景と目的：Background & Purpose

- 設備全体における劣化発生頻度の高い機器
1位：回転機器37%、2位：配管17%、3位：制御機器9%
- 熱エネルギーの安定供給が求められる病院施設、地域熱供給施設を特定
- 熱エネルギー供給の重要機器(ポンプ)、配管を対象として、広く設備に普及展開可能で安価な監視システムを提供
- クラウド利用型のネットワークシステムを用いた遠隔での群管理システムを実証

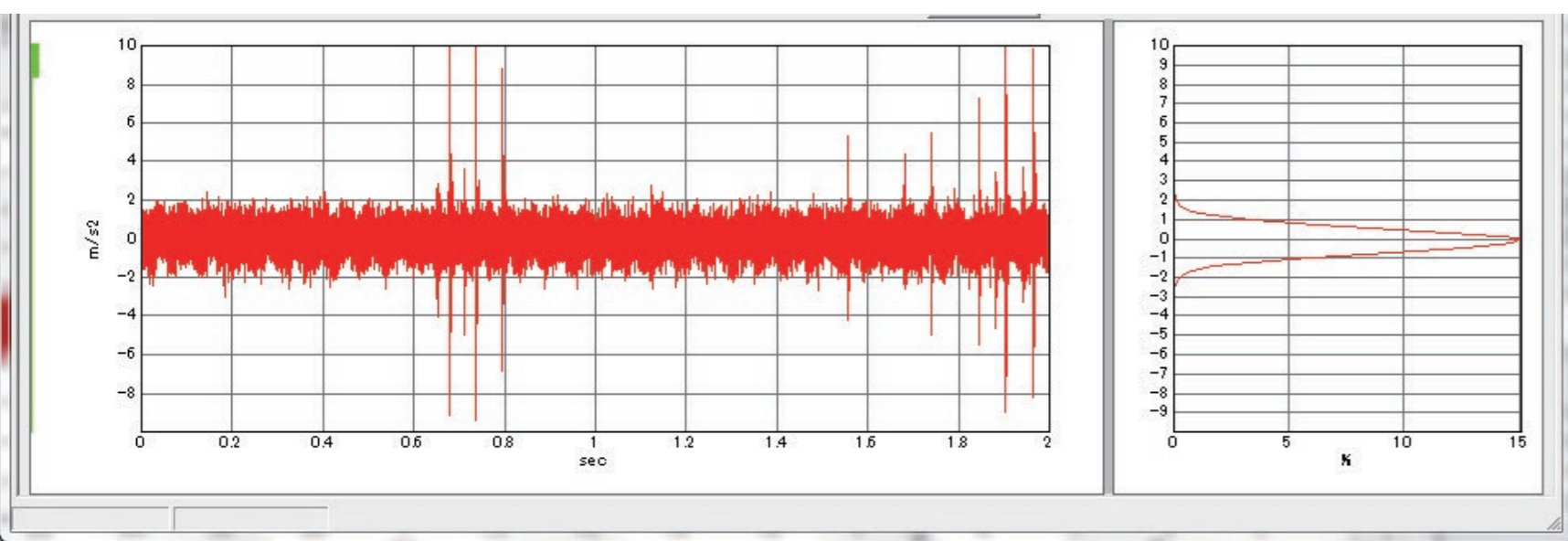
研究の内容：Summary

- 研究開発フェーズ(平成26年度～平成28年度)
実証現場におけるセンサ端末仕様、設置方法、ネットワークシステム構築上の課題抽出、汎用振動加速度センサを用いた遠隔でのモニタリングを実証
【平成27年度】
◆ センサ設置位置、固定法、ネットワーク構築法の検証
☞ 現場実用の観点からのデータ収集に着手
◆ 鹿威しエミュレータを用いた不連続データによるシステム検証
☞ 鹿威し方式データによる異常検知の感度解析
- 実証フェーズ(平成29年度～平成30年度)
鹿威しセンサデバイスを用いたモニタリングシステムを実設備に構築し、設備群の遠隔モニタリングを実証

実験及び実証のデータ：DATA

- 劣化の進行に伴う振動加速度の変化

通常時のデータ(横型ポンプ、軸動力37kW)



劣化進行時のデータ(横型ポンプ、軸動力37kW)

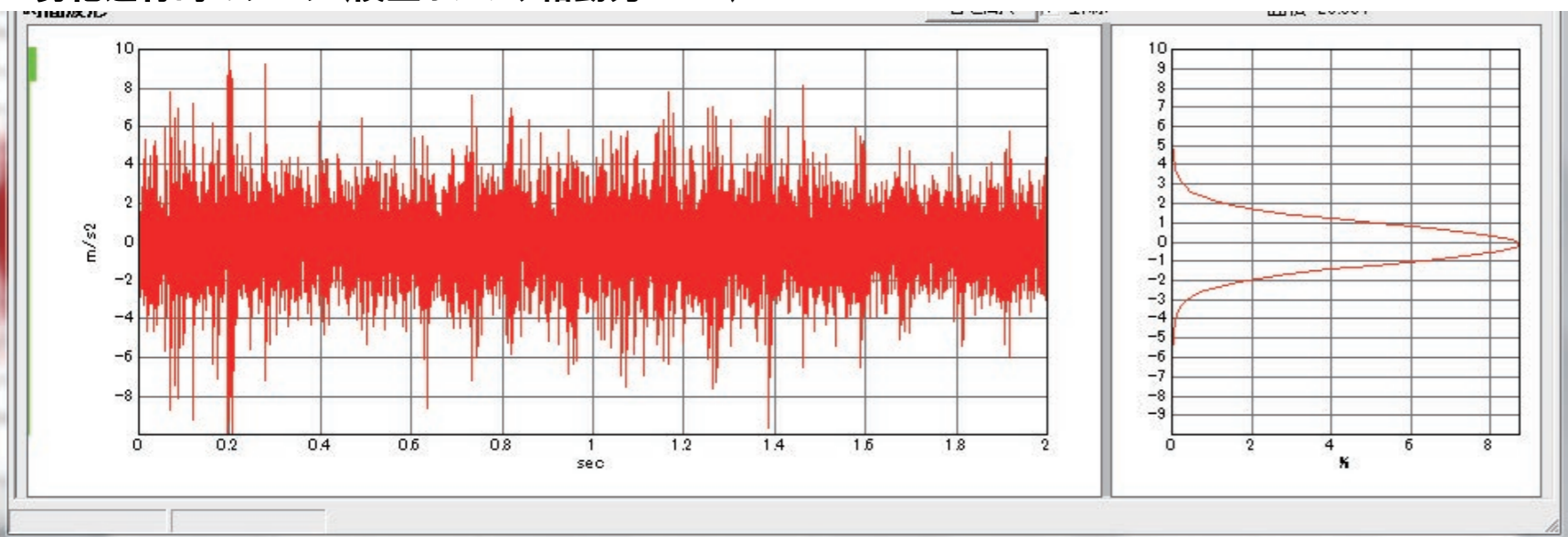
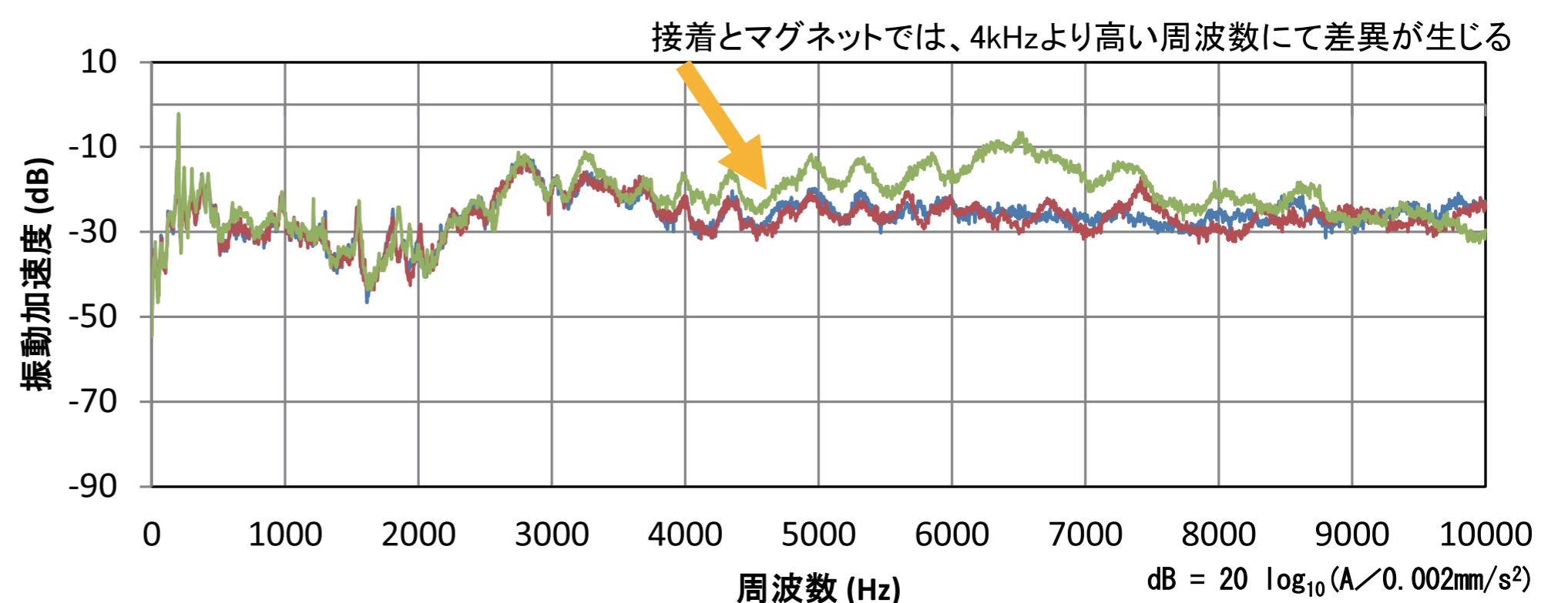
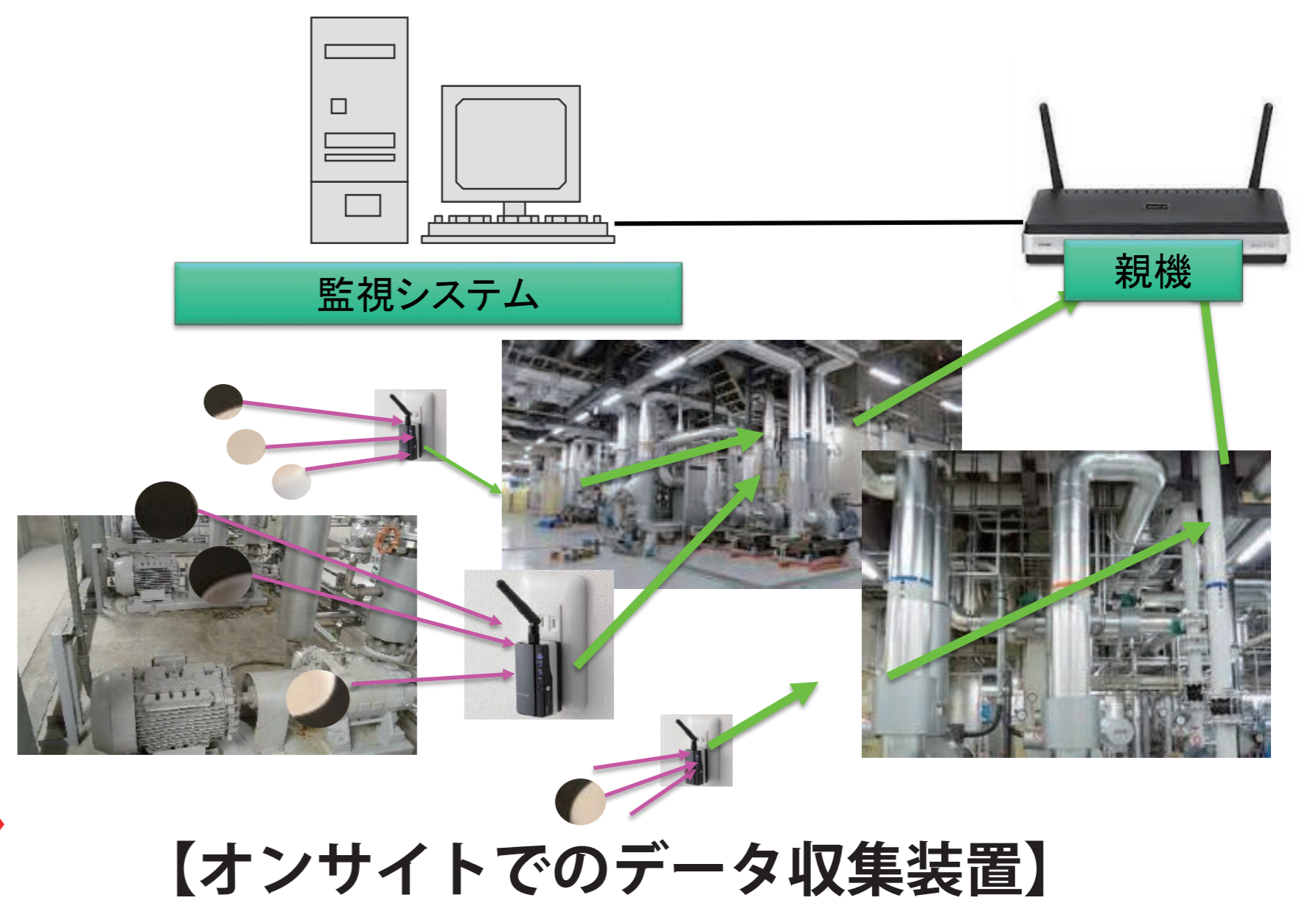
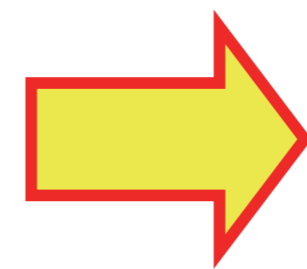
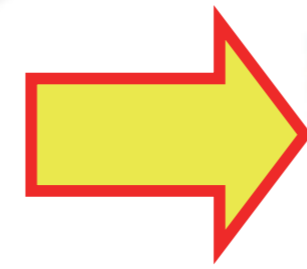


図 振動加速度の時間波形(2秒間)と確率密度関数



【センサ固定方法による振動加速度の差異】

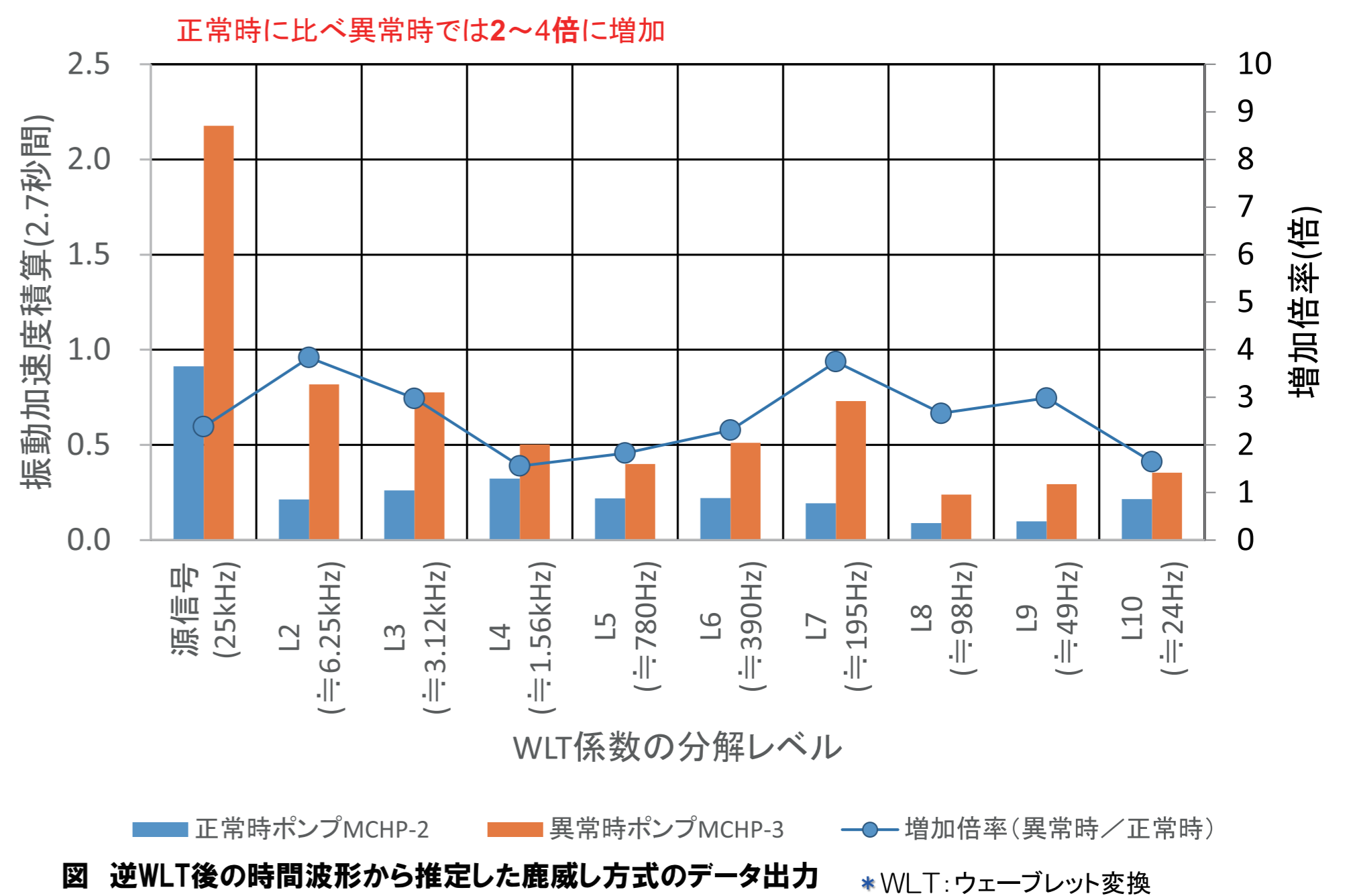


図 逆WLT後の時間波形から推定した鹿威し方式のデータ出力 *WLT:ウェーブレット変換