

道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの研究開発

Outline of Road Infrastructure Monitoring System (RIMS)

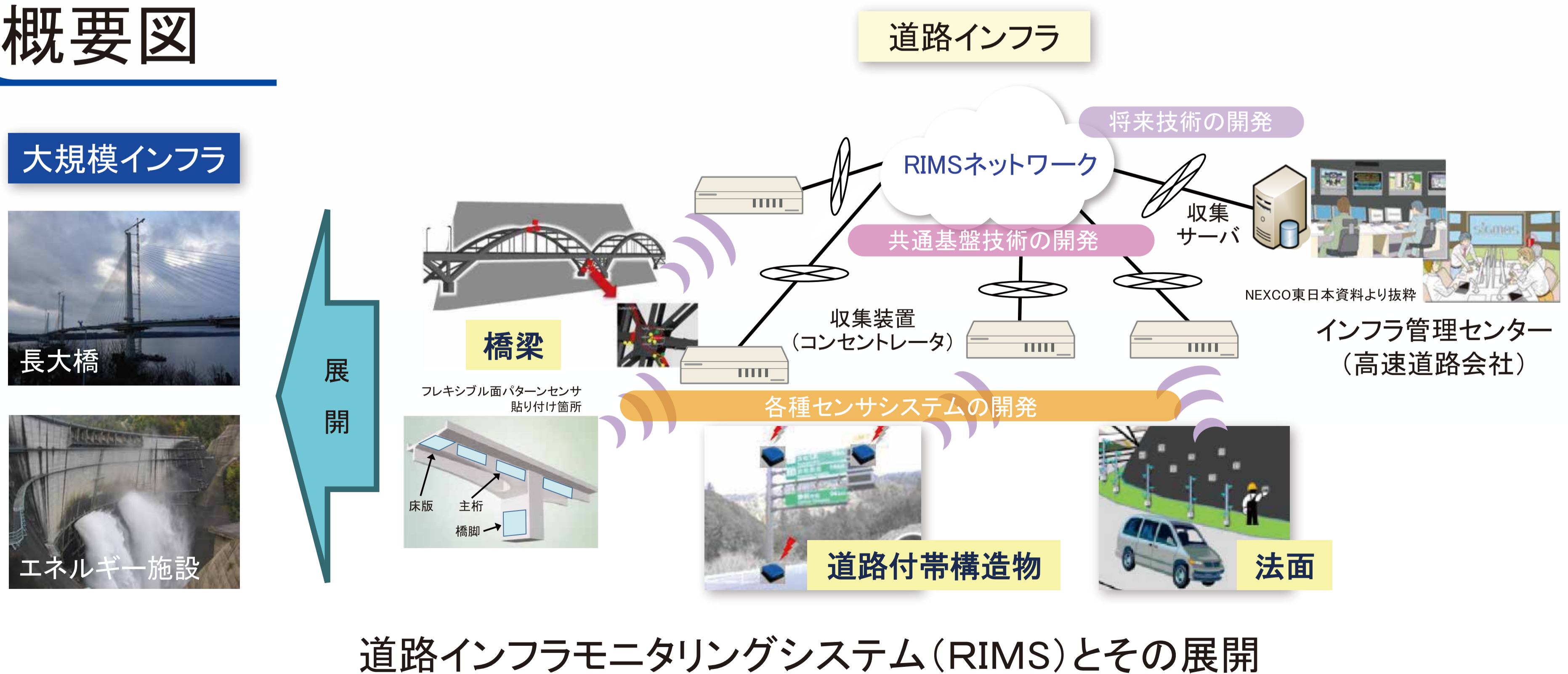
本研究の差異化ポイント

- 環境エネルギーで稼働する小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末を新たに開発
- 道路インフラ(橋梁、道路付帯構造物、法面)を一元管理
- 開発したセンサシステムを大規模インフラのモニタリングに展開

背景とねらい



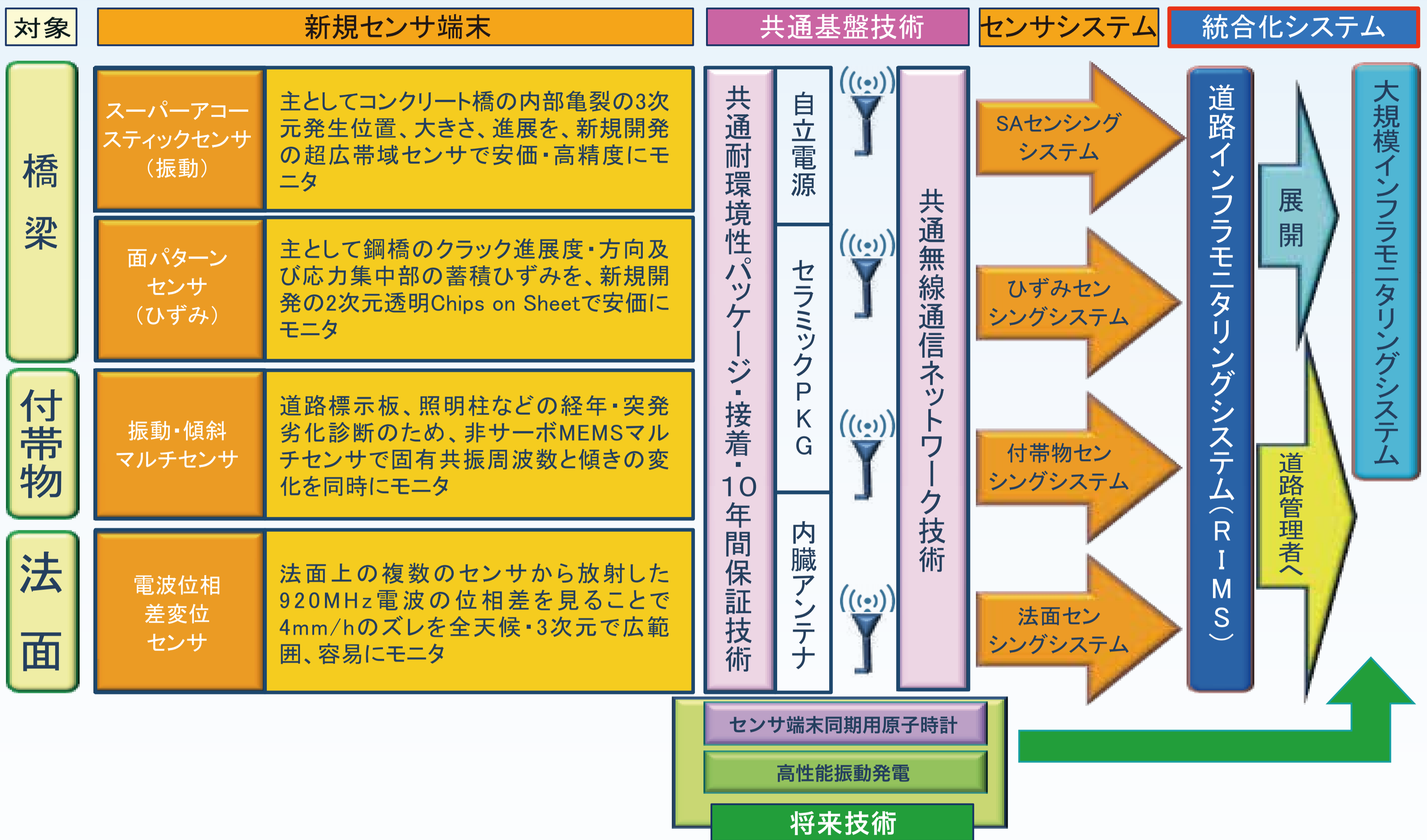
概要図



RIMS の研究開発概要と開発スケジュール

Research Outline and Schedule of RIMS

研究開発の概要



スケジュール

● プロジェクト期間: 2014年7月3日 ~ 2019年3月8日

テーマ名	FY2014	FY2015	FY2016	FY2017	FY2018
(1) 道路インフラ状態モニタリング用センサ端末の研究開発					
(1-1-1) スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発(振動) (東芝、東大、京大)					「大規模インフラ適用可能性検査」及び「本格実証実験完了」
(1-1-2) フレキシブル面パターンセンサによる橋梁センシングシステムの開発(ひずみ) (産総研、大日本印刷)					
(1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発 (富士電機)					
(1-3) 法面変位センシングシステムの開発 (三菱電機)					
(2) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステム共通基盤技術の研究開発					
(2-1) 無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発 (NTTデータ)					「大規模インフラ適用可能性検査」及び「本格実証実験完了」
(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発 (MMC、日本ガイシ、大日本印刷、産総研)					
(3) 道路インフラ状態モニタリング用センサシステムの実証及び評価研究 (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)					省エネ効果検査 本格実証・データ蓄積
(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発(先導研究) (産総研、リコー、MMC、京大、東工大、首都大東京)					将来技術フィージビリティ検証
(5) 大規模インフラ向け高性能振動発電の開発(加速研究) (鷺宮製作所、静大、京大、東大、MMC)					実証

Key Milestones:

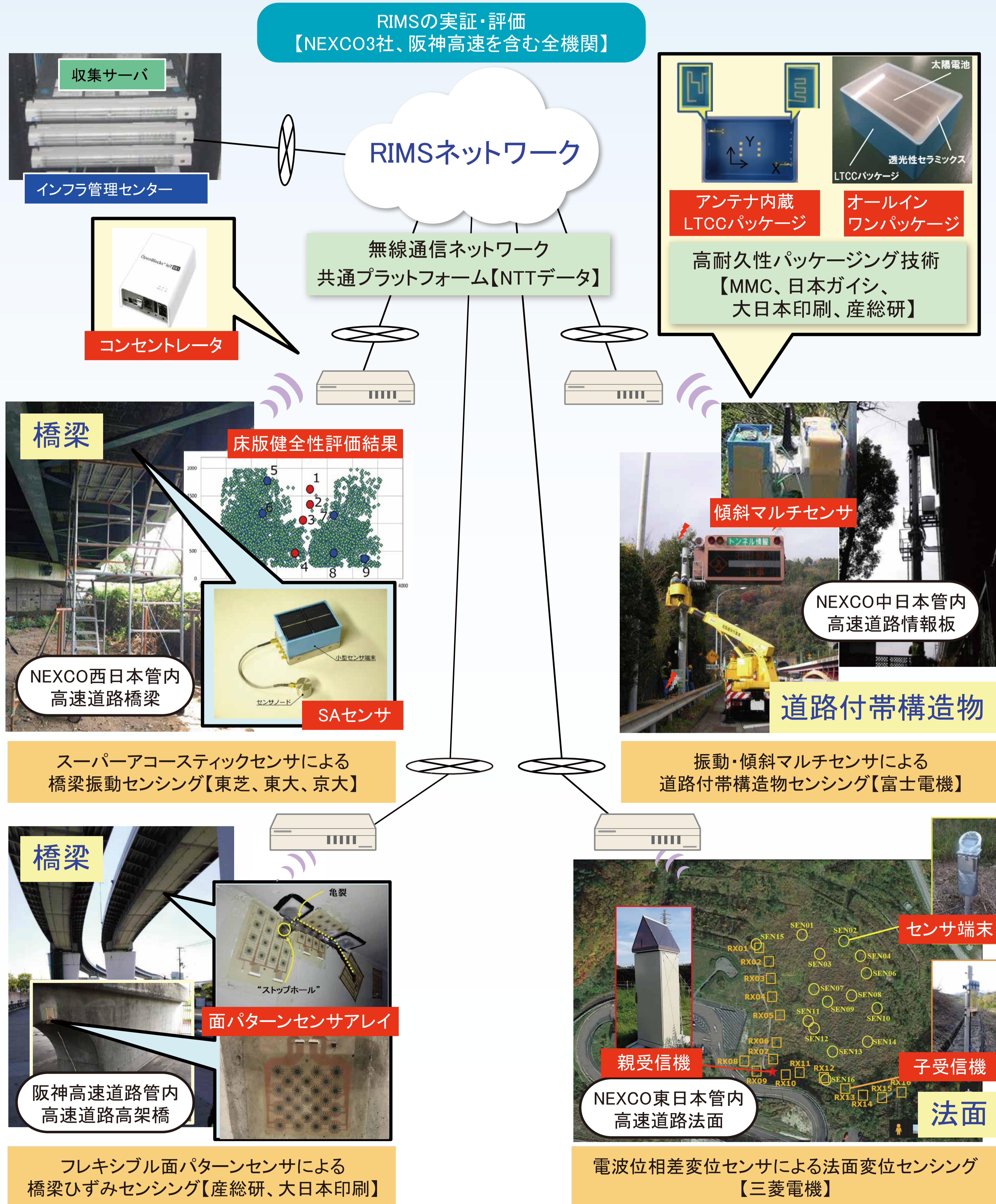
- 3年で新規センサ・センシングシステムを完成** (Complete new sensors and sensing systems within 3 years)
- 共通プラットフォームの完成** (Completion of common platform)
- 実証実験準備** (Preparation for proof-of-concept experiments)



実高速道路での RIMS の実証実験

Demonstration of RIMS in Real Expressways

実証実験の概要



超広帯域振動センサによる橋梁センシング(1)

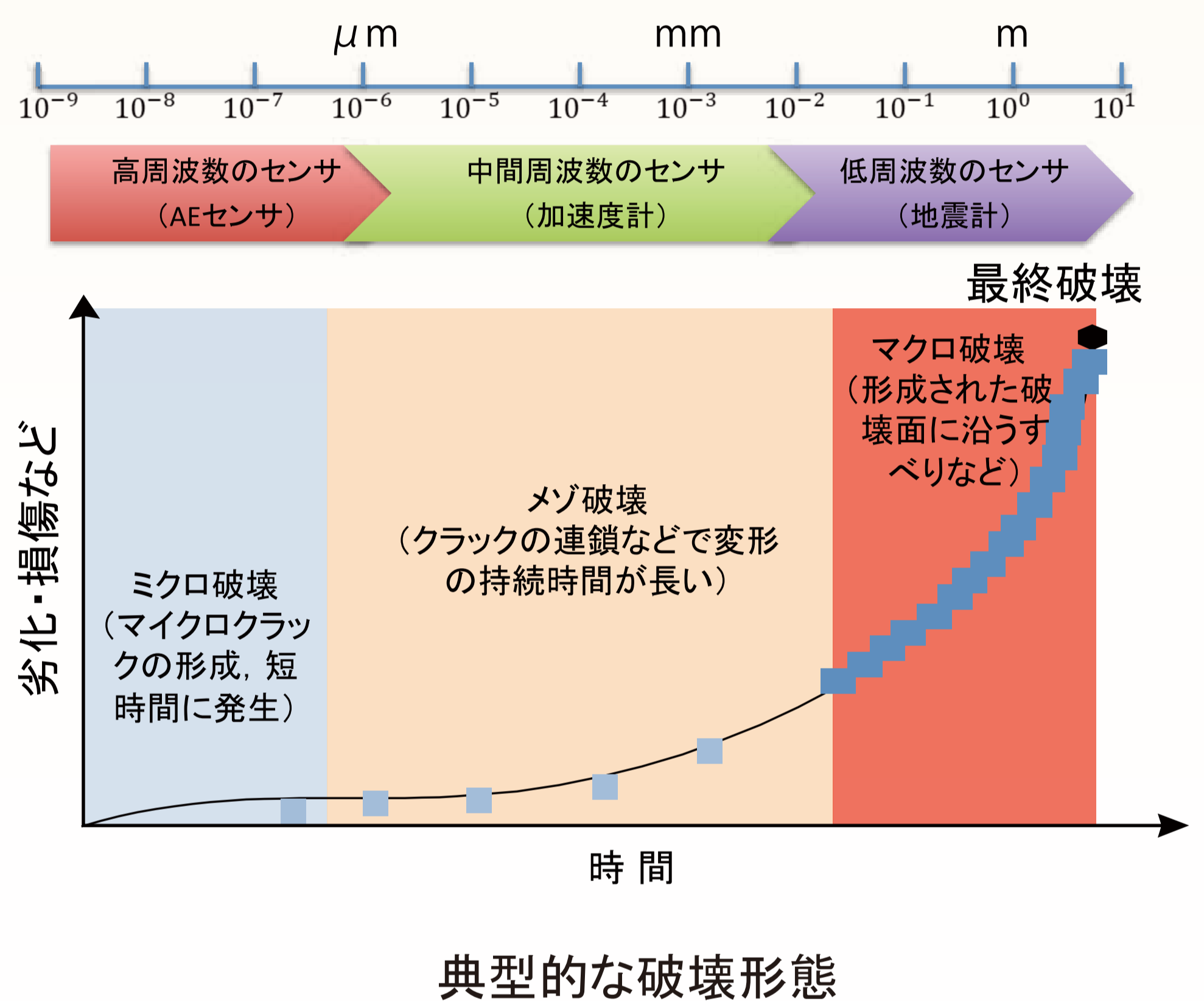
Bridge Sensing System using Super Acoustic Sensor (1)

本研究の差異化ポイント

- 超広帯域振動センサ(SAセンサ:スーパーアコースティックセンサ)の開発
- 橋梁の健全状態から限界劣化までを1つのセンサでカバー
- 手のひらサイズの無線センサ端末により遠隔監視

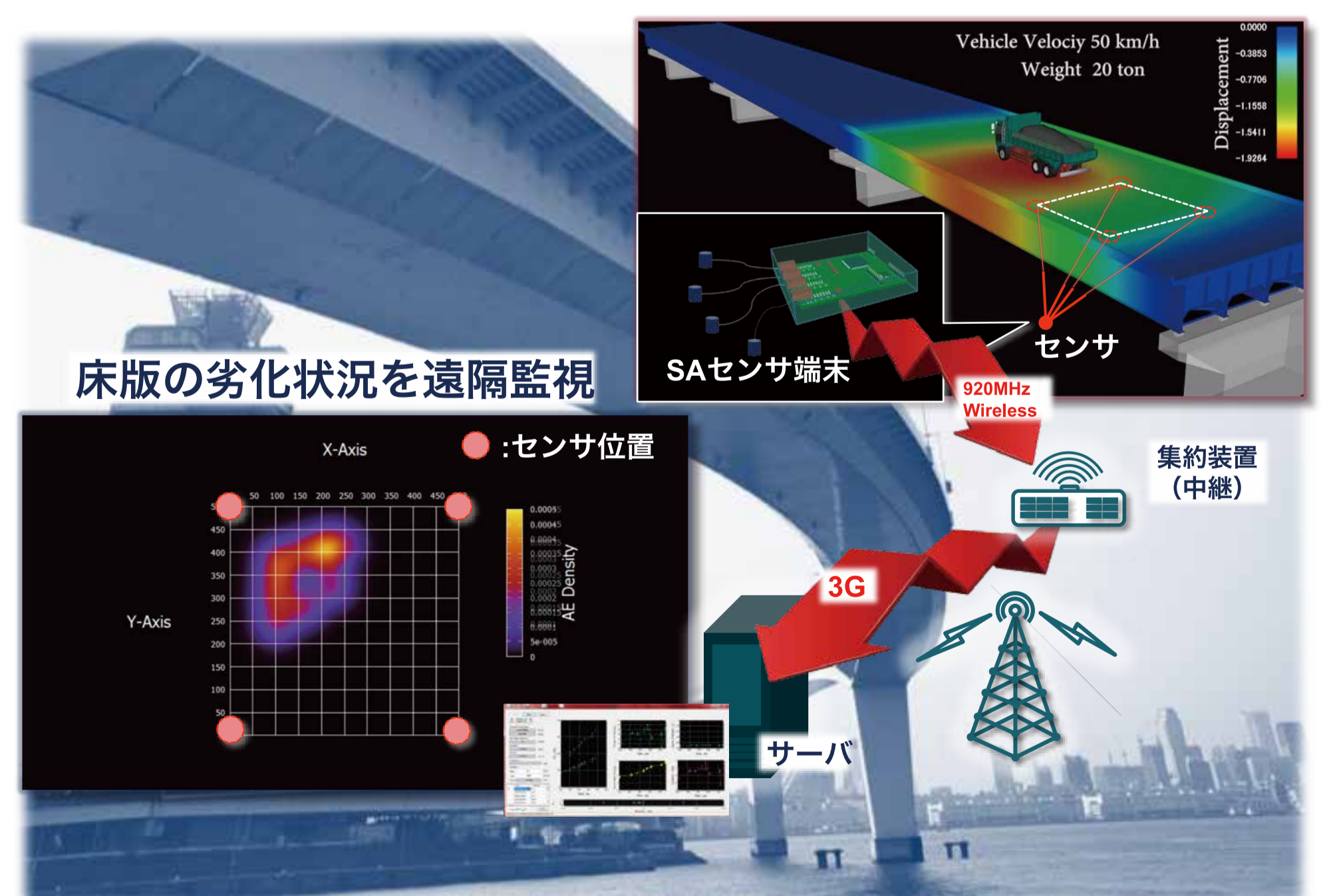
背景とねらい

- 破壊のマルチスケール性(右図)からあらゆる劣化のステージに対応するには数Hz~1MHzの帯域のセンサが必要
- SAセンサを活用した、橋梁の健全状態から、初期劣化(マイクロ破壊:10kHz~1MHz) 中間劣化(メゾ破壊:数100Hz) 限界劣化(マクロ破壊:数Hz) までを一個のセンサで検出できるセンサシステムの構築
- SAセンサの適用対象材料は、土、岩、組積造、コンクリート、鋼、複合材料など広範にわたり、大規模インフラの長大橋はもとより、橋梁以外にも応用展開が期待できる(構造物聴診器)



概要図

- SAセンサを利用した橋梁センシングシステムのイメージ
 - ・ SAセンサ端末…片手サイズ、自立発電、無線伝送可能 橋梁の観測ポイントに設置
 - ・ センシングデータをセンサ端末から無線で収集し、サーバへ送信
 - ・ サーバでデータを分析し、橋梁の劣化状況を監視



超広帯域振動センサによる橋梁センシング(2)

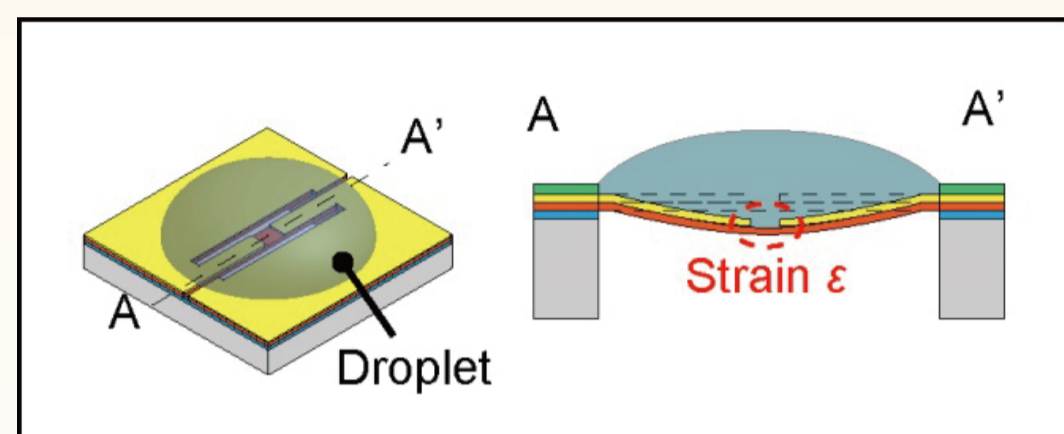
Bridge Sensing System using Super Acoustic Sensor (2)

これまでの成果(H26年～)

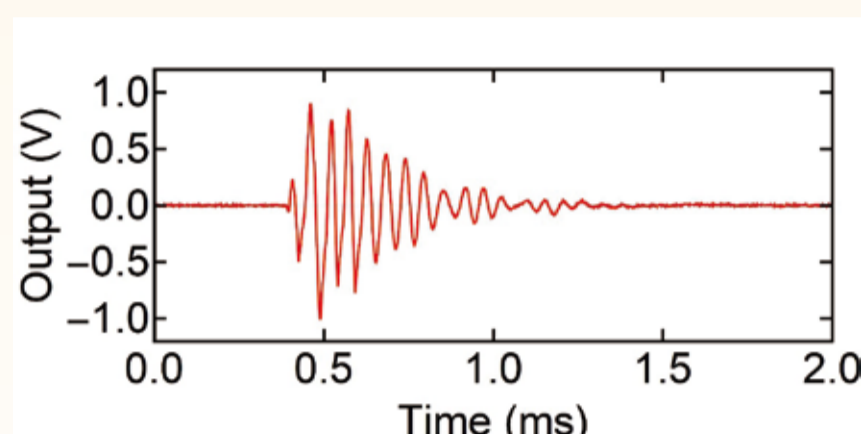
● SAセンサデバイスの開発

- ・構造を最適化したMEMSセンサを試作。広帯域応答特性を確認

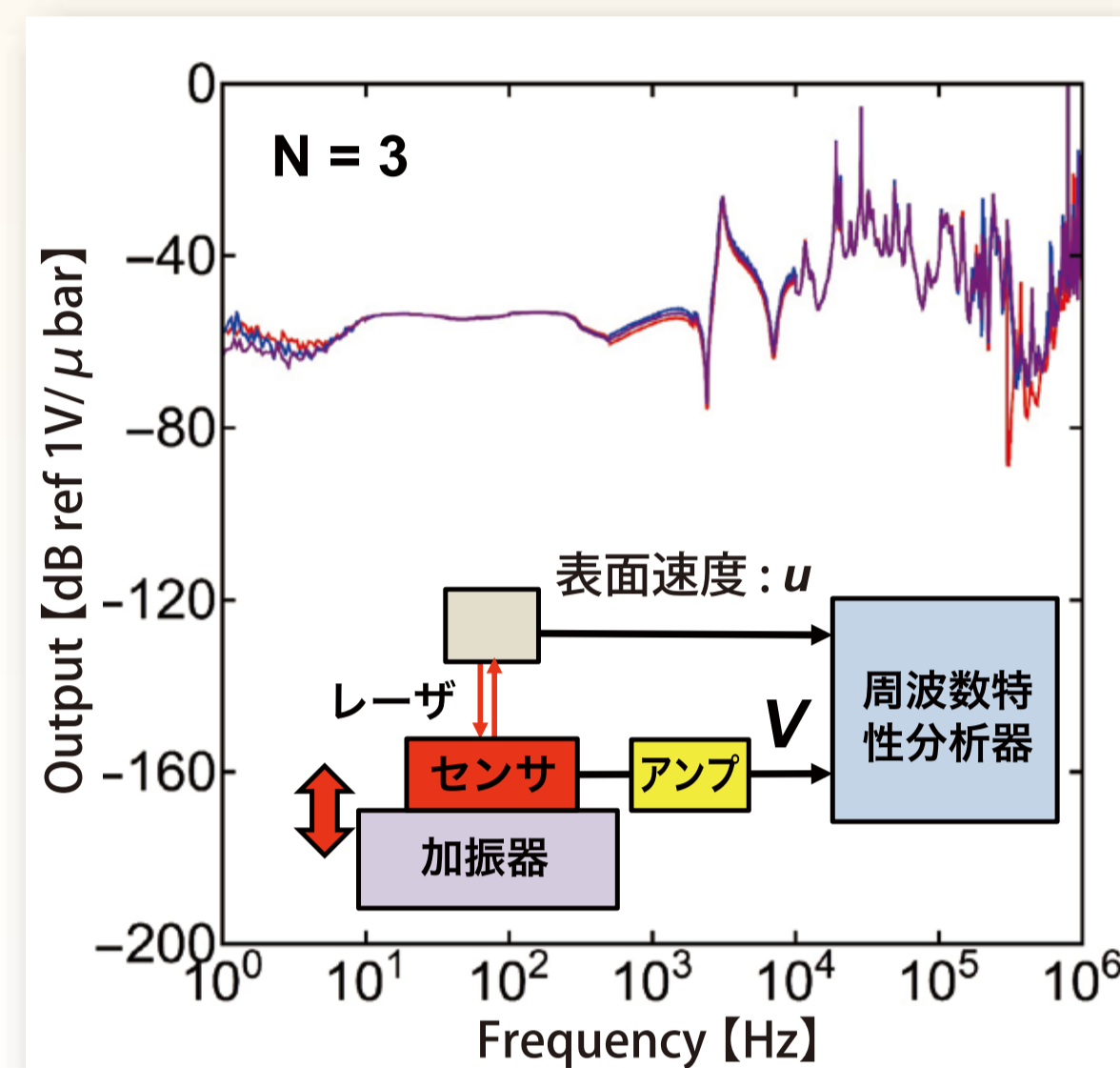
SAセンサの構造



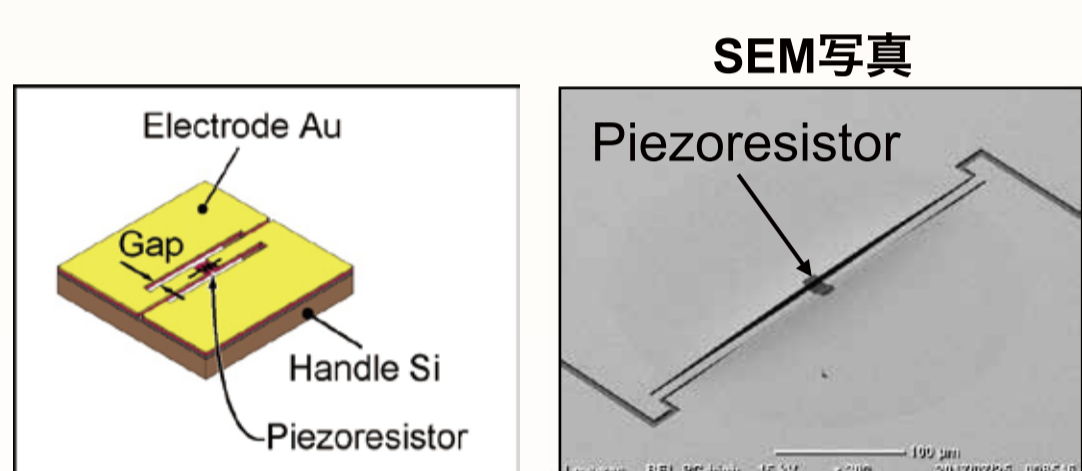
実測AE波形



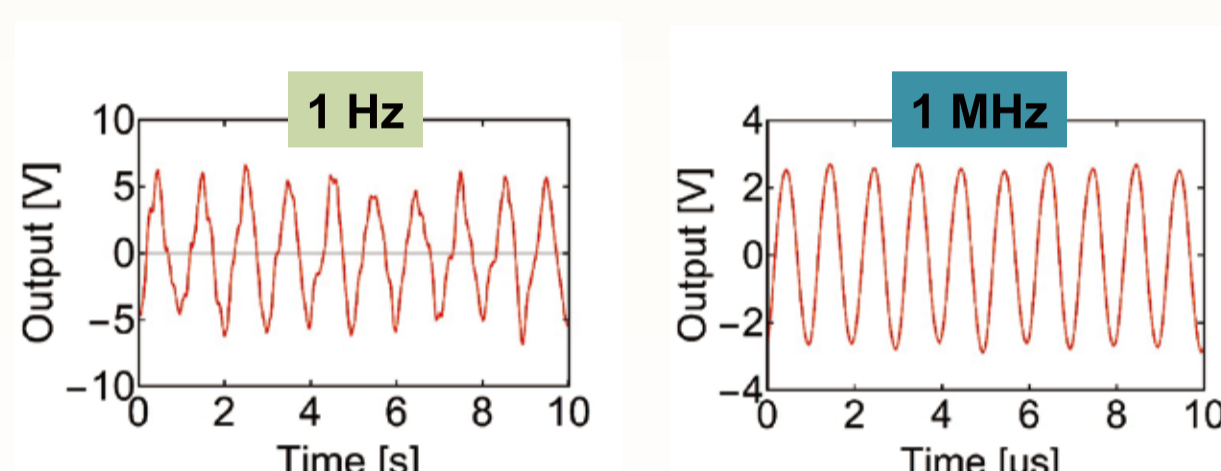
周波数応答特性



振動検出部



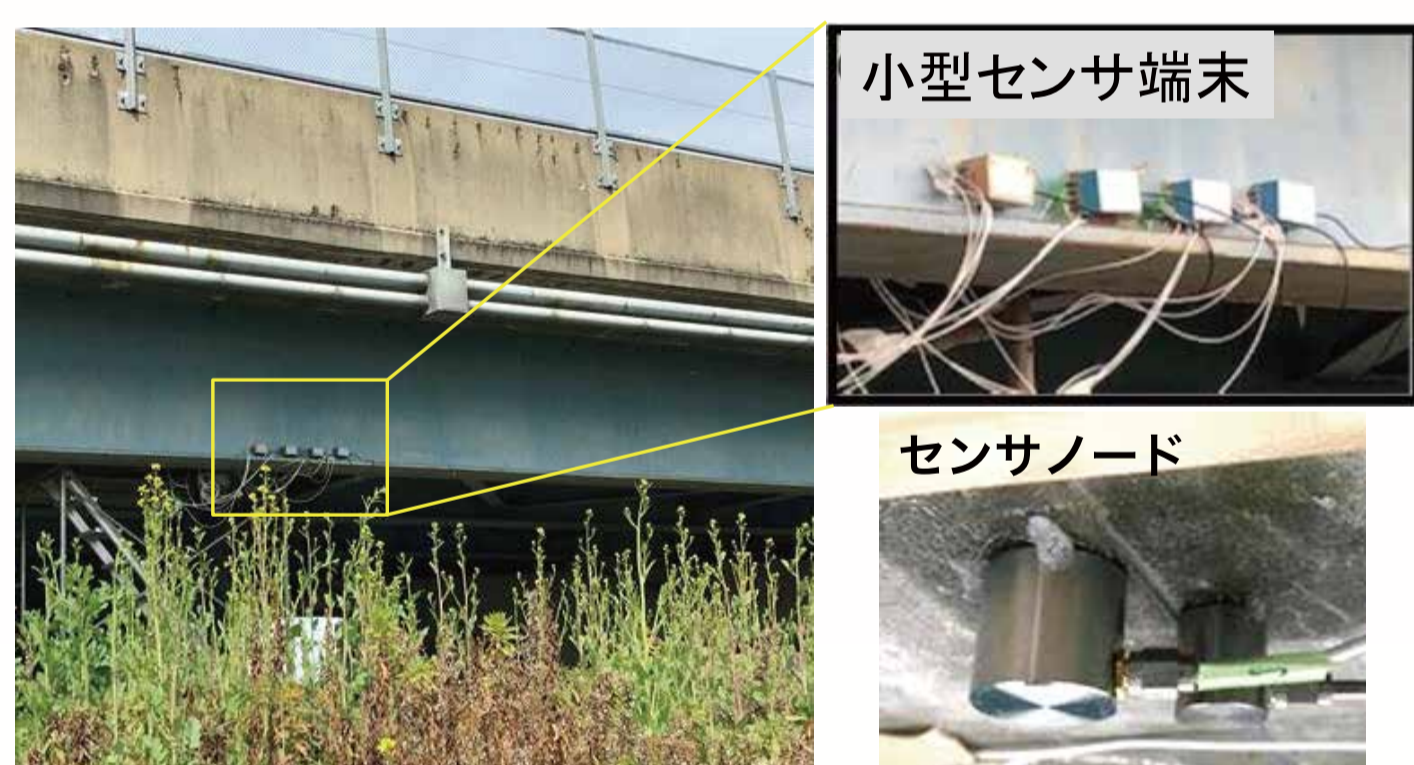
低周波数と高周波数の実測波形



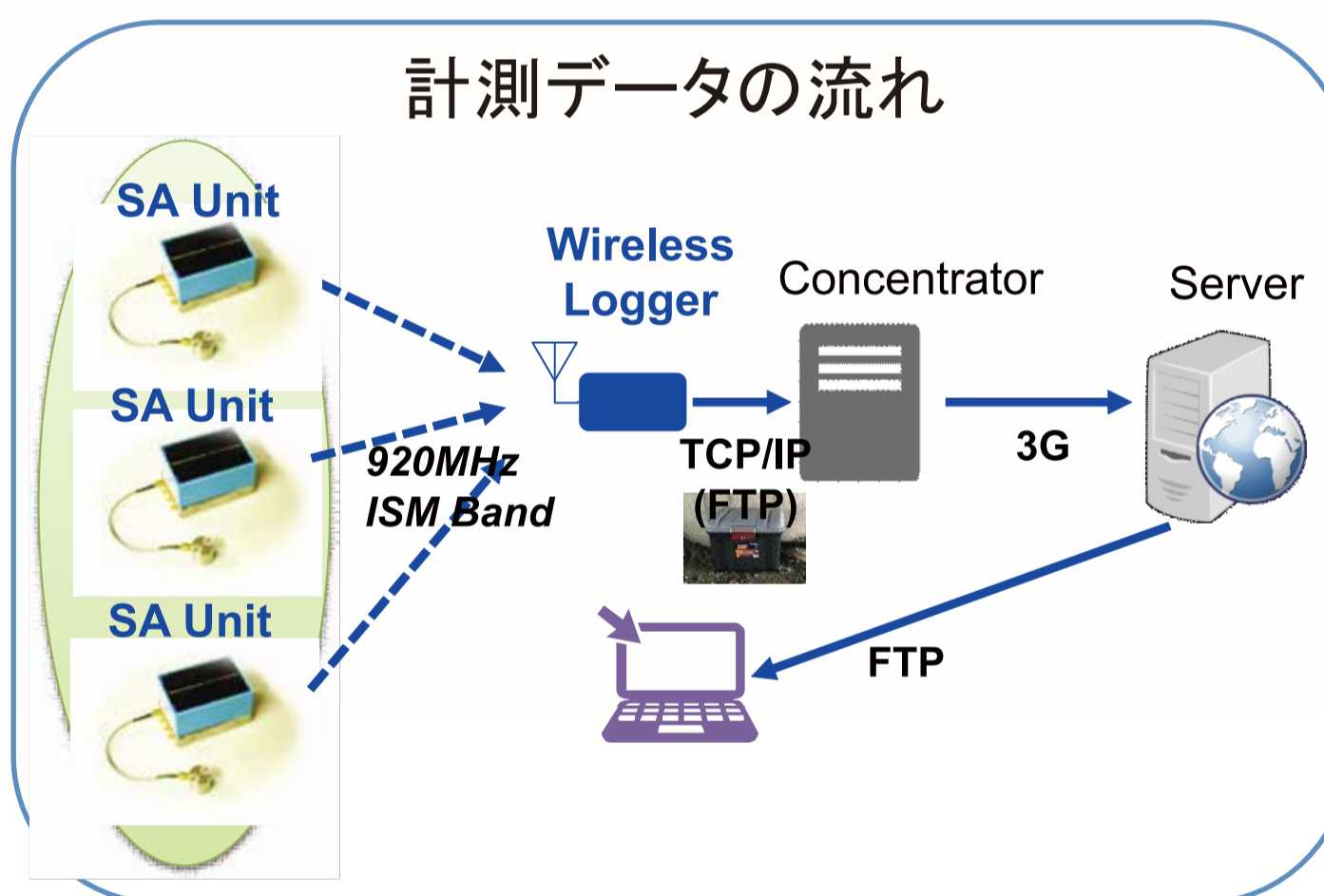
● 小型センサ端末の開発とシステム実証実験

- ・高速道路橋に無線センサ端末を設置し、RC床版遠隔監視体制を確立

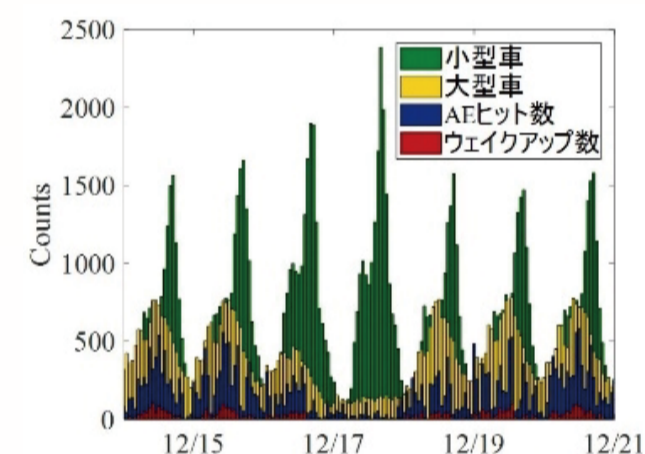
高速道路橋へのセンサ設置の様子



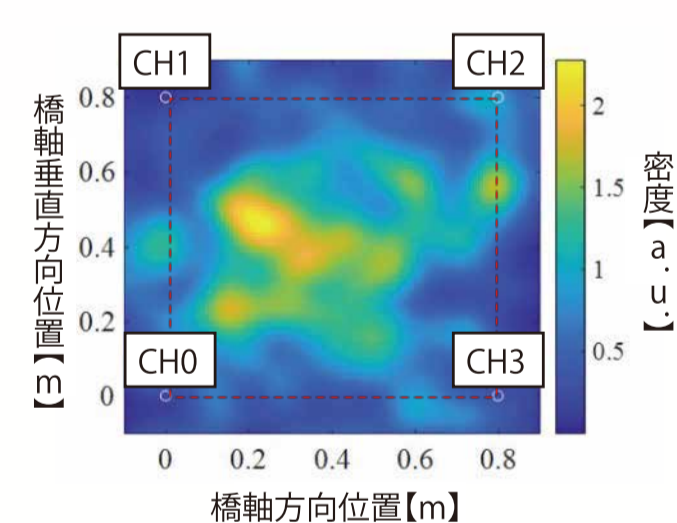
計測データの流れ



交通量と起動データ

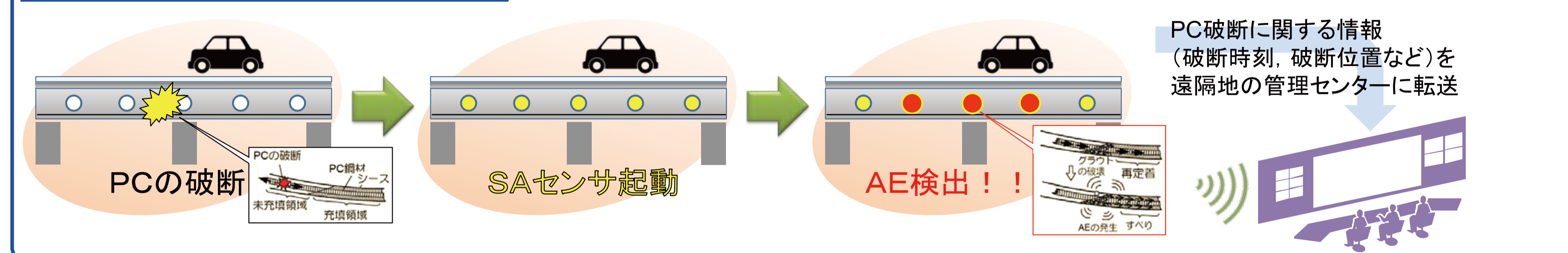


交通荷重AE分析結果



● 長大橋健全性評価手法の開発

PC橋梁の状態監視システム - PC破断をトリガとしてセンサを起動。その後のAE事象を検知し、損傷を特定



模擬供試体を用いたPC破断試験



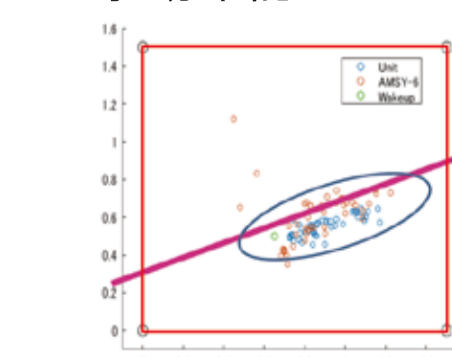
実橋梁における各種検証試験



- ・ノイズレベル確認
- ・ウェイクアップセンサの挙動確認



検知システム



擬似AE位置標定結果

ひずみ分布測定フレキシブル面パターンセンサ (1)

2D-strain-pattern Sensor Sheet (1)

本研究の差異化ポイント

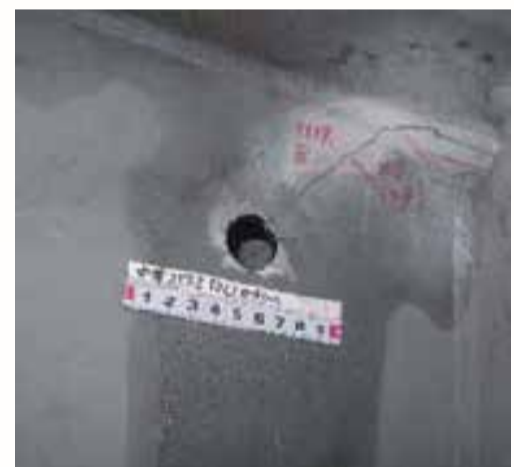
- 高密度・大面積印刷ひずみセンサアレイ
- ひずみ分布の面パターンから橋梁の亀裂を経過観察
- UV・水蒸気バリア層による長期耐久性、粘接着シートで簡単施工

背景とねらい

鋼橋の亀裂

■ 溶接部付近に発生

- 目視点検(5年に1度)
→ 応力集中する溶接部付近に塗膜割れ確認の場合渦流探傷、磁粉探傷で亀裂を探索

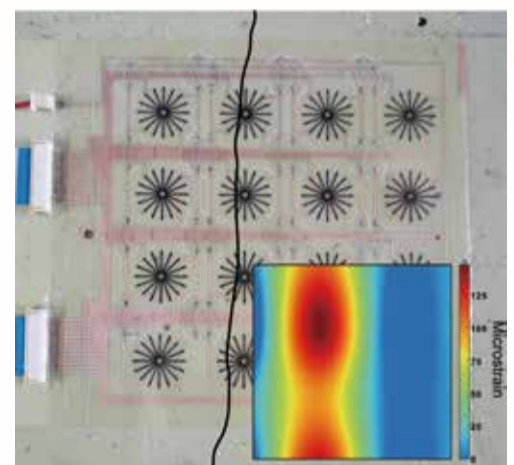


- 補修・補強
→ ストップホール、溶接などを行った後、経過観察

ストップホールによる補修

研究開発のねらい

- ・ ひずみセンサアレイの開発
- ・ 補修部、溶接部に貼付け亀裂を経過観察する**フレキシブル面パターンセンサ**を実現



ひずみセンサアレイによる亀裂検出

ひずみセンサアレイシート

- 箔ひずみゲージは消費電力大、アレイ化の施工困難、配線が煩雑

→ フレキシブル回路基板上に高抵抗ひずみセンサアレイを印刷形成、センサアレイシートを粘接着シートで貼り付け、無線送信

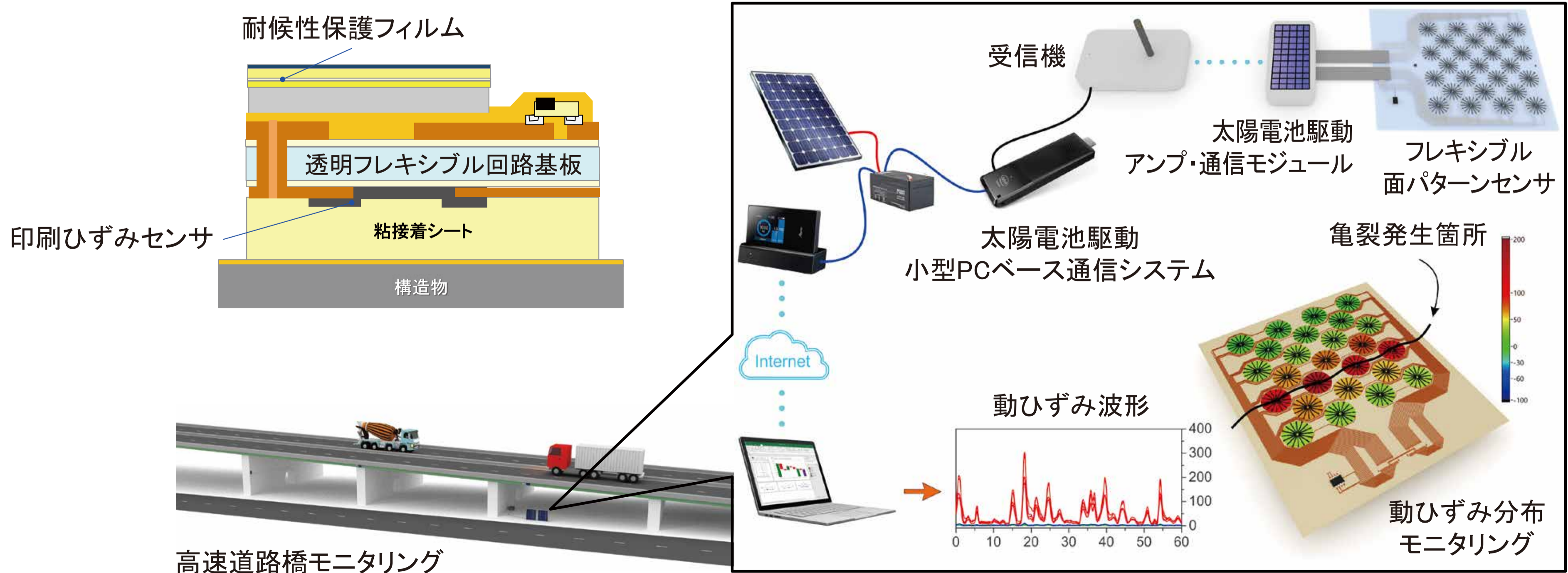
- 静ひずみに通行車両由来の動ひずみが重畳する、動ひずみは車重に依存

→ 通常は動ひずみピーク値の分布の面パターンから応力集中、異常増大をモニタリング、通行規制時に静ひずみ異常から亀裂検出

- フレキシブル基板等樹脂材料の耐久性低

→ 有機無機複合材料による、UV・水蒸気バリア層でひずみセンサアレイシートを保護

システム全体像



ひずみ分布測定フレキシブル面パターンセンサ(2)

2D-strain-pattern Sensor Sheet (2)

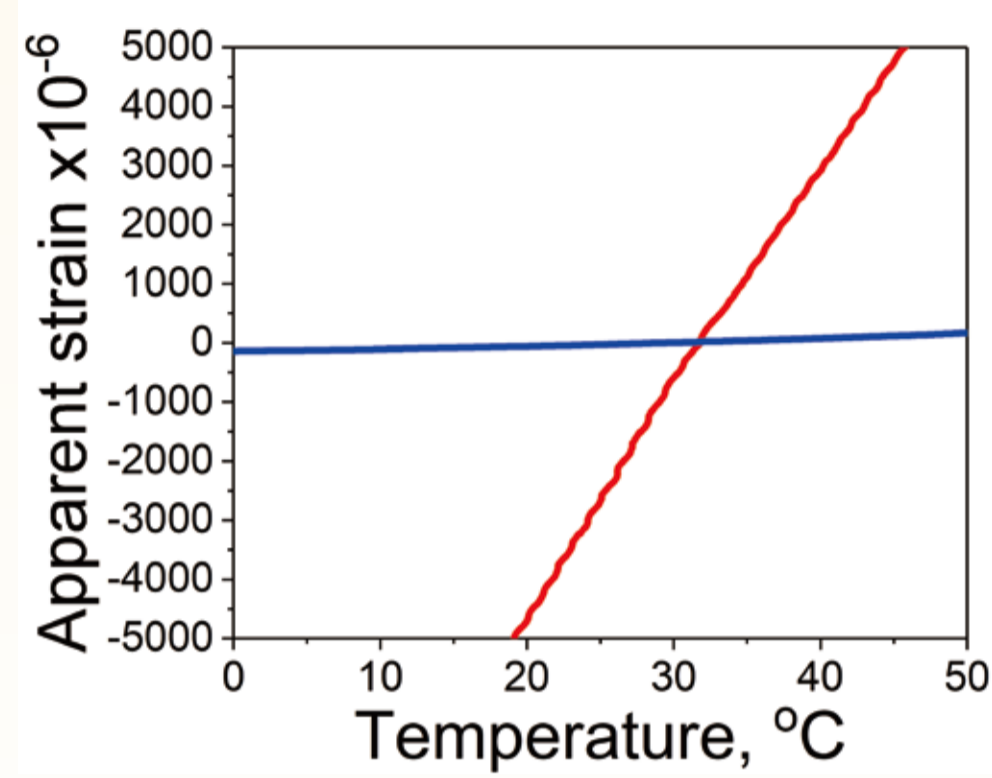
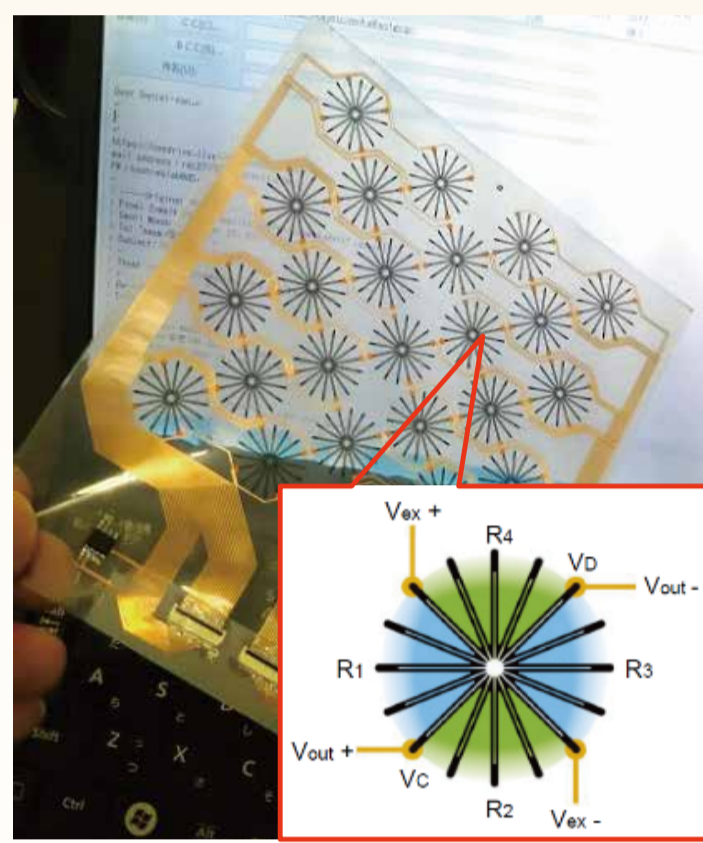
これまでの成果

道路インフラ(H26年～)

● 印刷ひずみセンサアレイ

フルブリッジ構造

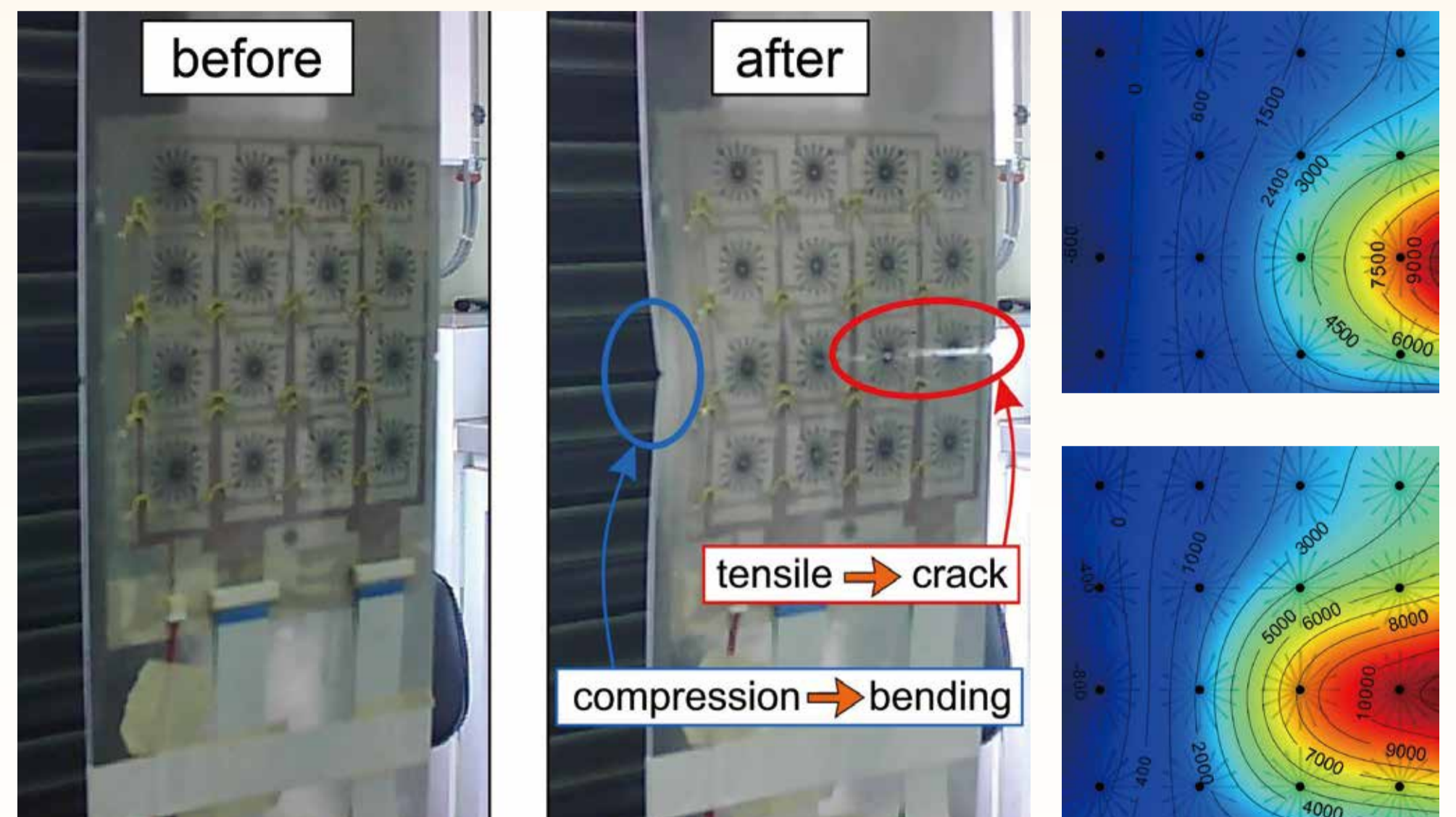
ひずみ検出の温度依存性



- ・ グラファイトインク印刷による一括形成により箔ひずみセンサの1/20以下の低コスト化
- ・ フルブリッジ構造による温度補償により亀裂進展検出に必要な感度を実現

● 亀裂の経過観察(試験体)

試験体で亀裂進展時のひずみ分布変化測定



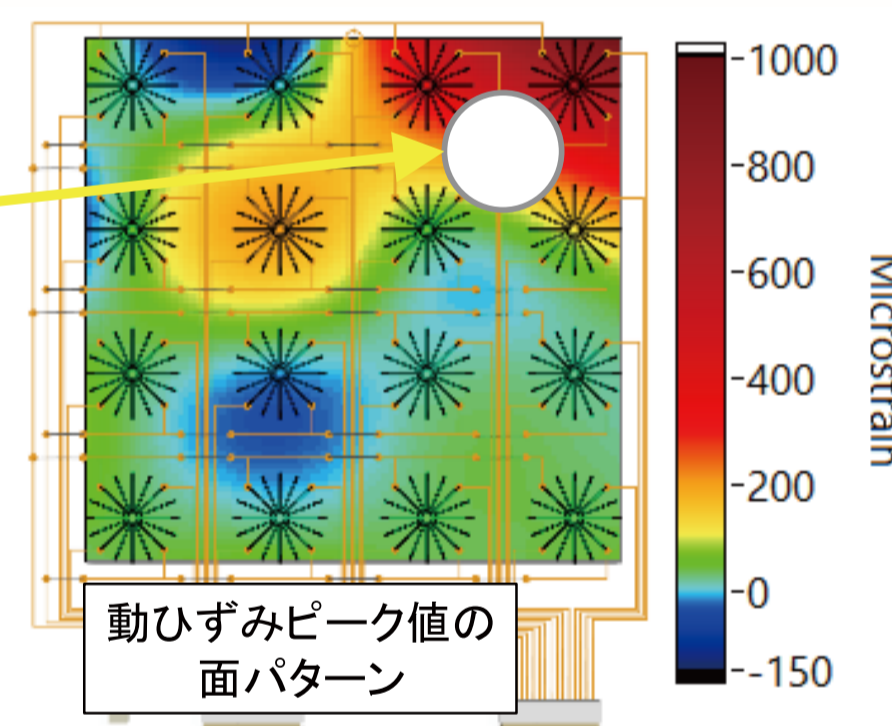
亀裂進展によりひずみ異常箇所(>10000 $\mu\epsilon$)が変化

● フレキシブル面パターンセンサによる鋼橋モニタリング実証試験

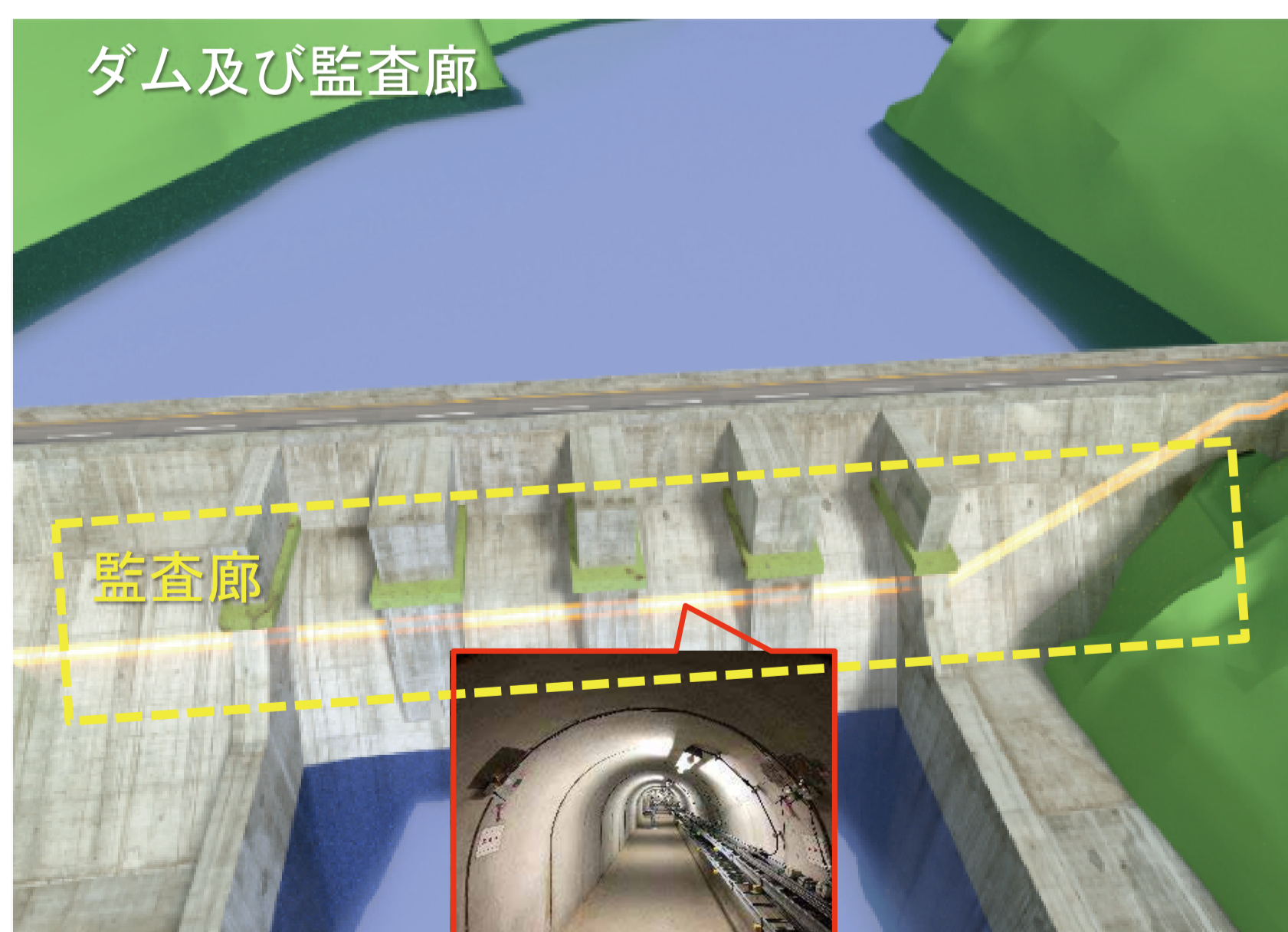
湿布感覚のカンタン施工

亀裂部の応力集中を可視化

時間による振動の違い



大規模インフラへの展開(H29年～)



● 亀裂の開口変位と進展の監視が必要

- ひずみと開口変位の相関を調査
- 亀裂終端の前方にセンサを施工して進展を監視

● ダム監査廊内は閉鎖空間であり通信環境が悪い

- 複数の中継機を経由させるシステムを開発

傾斜マルチセンサによる情報板のモニタリング(1)

Road Information Board Monitoring using Tilt-multi-sensor (1)

本研究の差異化ポイント

- MEMSセンサによる傾斜マルチセンサ端末(傾斜・振動・温度を同時計測)
- 低消費電力化(自立電源)と高速無線通信
- 高速道路(実フィールド)での実証、大規模インフラ(発電施設)への展開

背景とねらい

■ 点検の現状: 付帯設備の老朽化進展と技術者不足

- 今後20年で建設後50年以上経過する施設が増加
補修・更新費用の増大(財政的課題)
- 少子高齢化の進展によるメンテナンス技術者の不足(人的課題)
- 通常点検は目視により行われ、判定結果は技術者の知識、
経験や感覚によるところが大きい

■ 課題への対応: 点検の効率化と判定結果の定量化

- 構造物の変化や変状を検出・定量化、定量結果に基づく点検業務の支援及び効率化

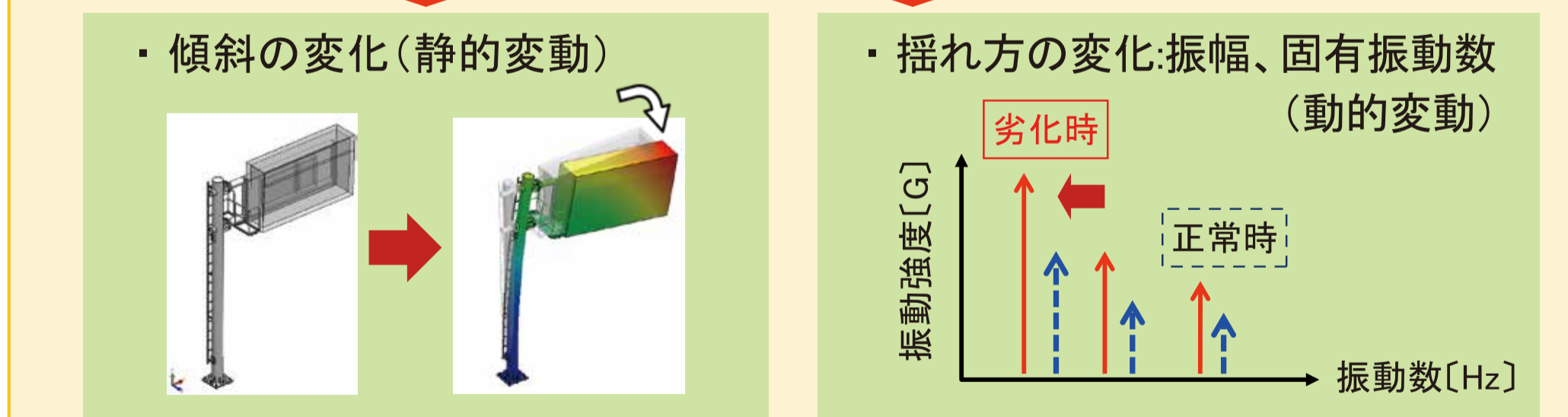
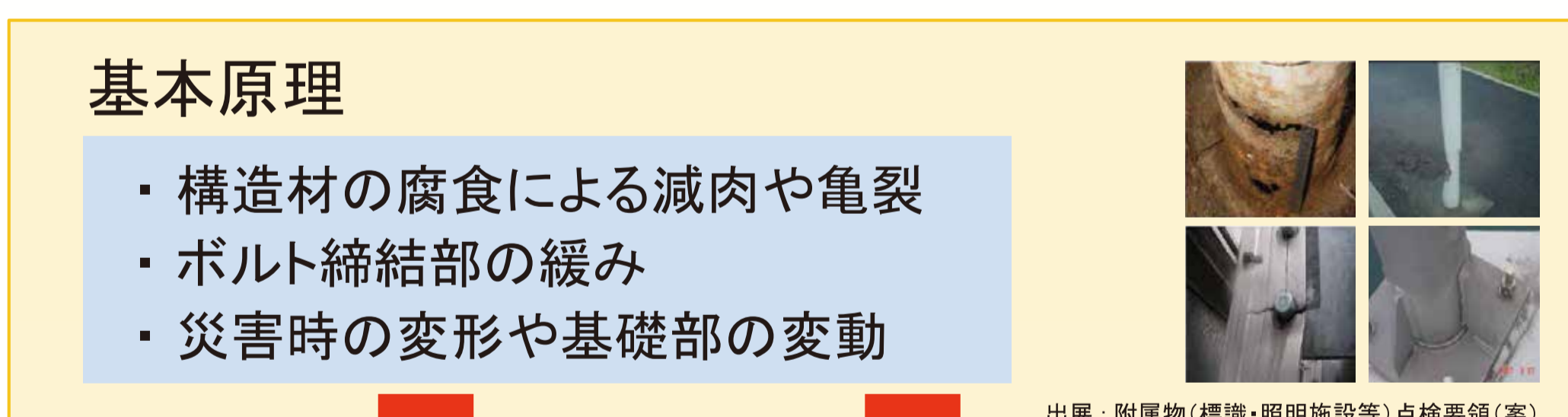
■ 大規模模インフラへの展開

- 公衆災害リスクのある発電施設の常時監視



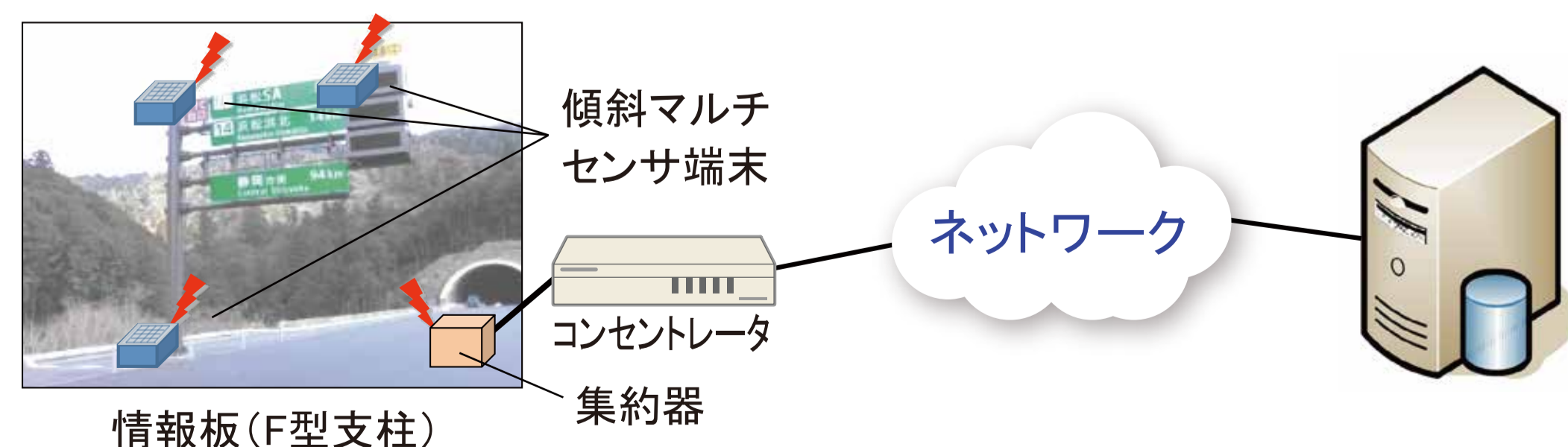
情報板通常点検の現状(イメージ図)

概要図

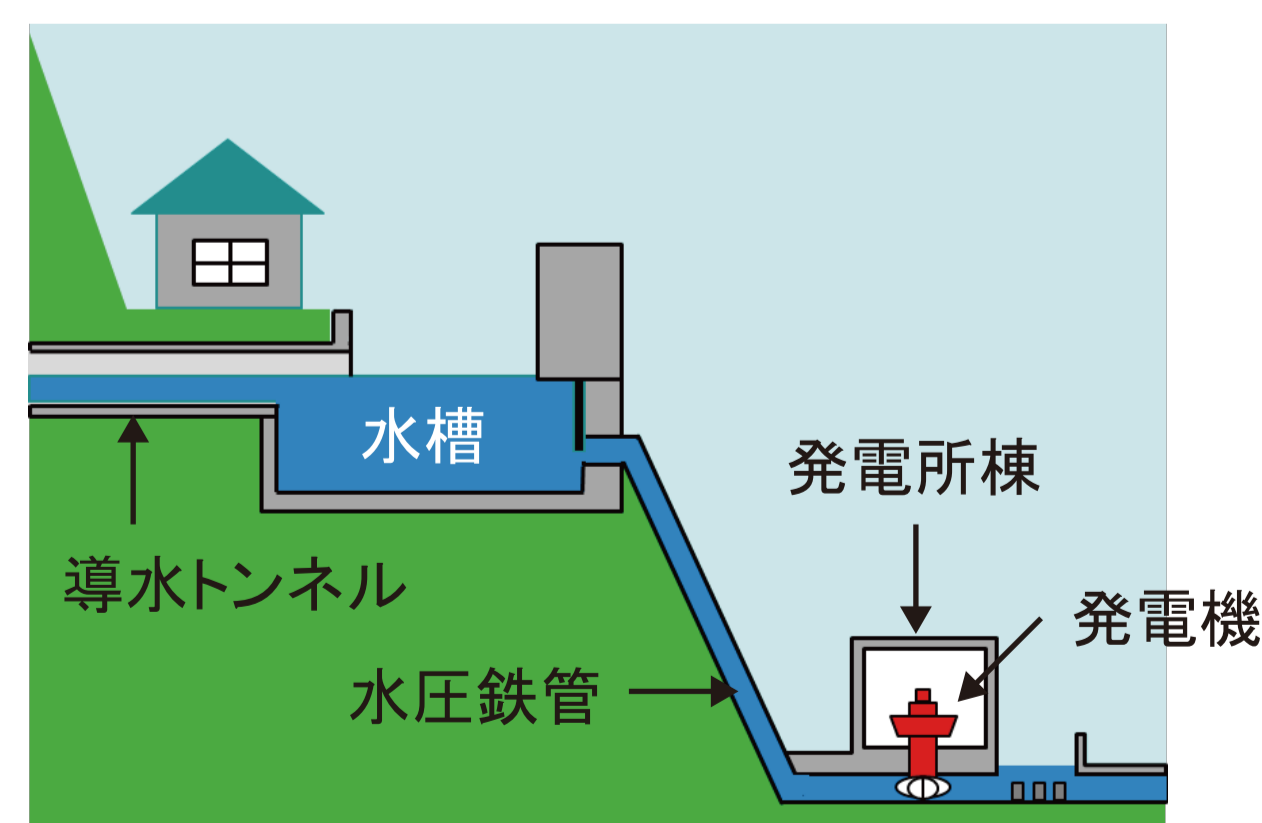


- 道路付帯構造物(情報板等)の静的な変化(傾斜)と動的な変化(振動)を同時にセンシング
* 傾斜マルチセンサ端末の開発
- センサネットワークシステムを構築し常時モニタリングを実現
* センサネットワークシステムの開発
- 大規模インフラモニタリングへの展開
* 発電施設での実証

センサネットワークシステム



展開



大規模インフラへの展開(発電施設)

傾斜マルチセンサによる情報板のモニタリング(2)

Road Information Board Monitoring using Tilt-multi-sensor (2)

これまでの成果

道路インフラ(H26年～)

- MEMSセンサデバイスの開発
(静電容量式加速度センサデバイス:3軸)

開発目標

- 傾斜計測の出力安定性: $\pm 0.05\text{deg}$
- 振動計測の分解能: $\pm 0.1\text{Gal}$

成果概要

- MEMSセンサ部のユニット構造化実施
温度安定性 $\pm 0.05\text{deg}$ 達成
振動分解能 $\pm 0.1\text{Gal}$ 達成

- 傾斜マルチセンサ端末の開発

開発目標

- 傾斜・振動・温度を同時計測
- 太陽電池による自立電源化
- 複数センサ間の時刻同期($\pm 1\text{msec}$)
- 大量データ(200kB/1分)を平均0.1Wsで無線転送

成果概要

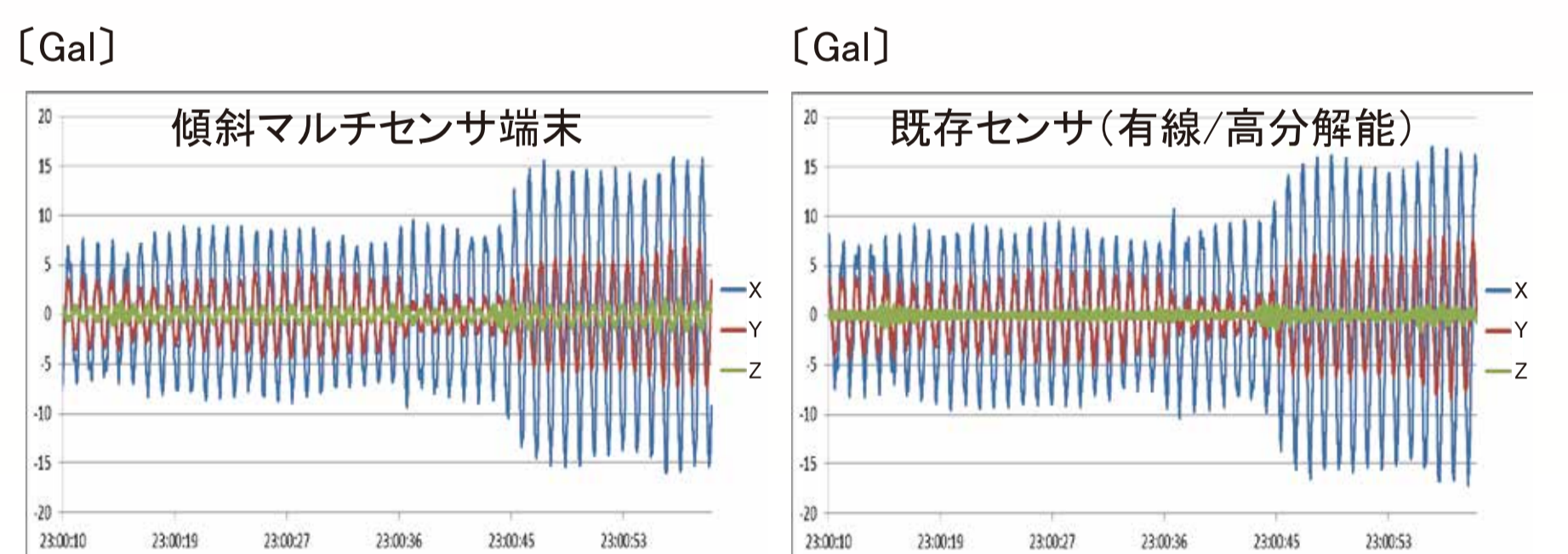
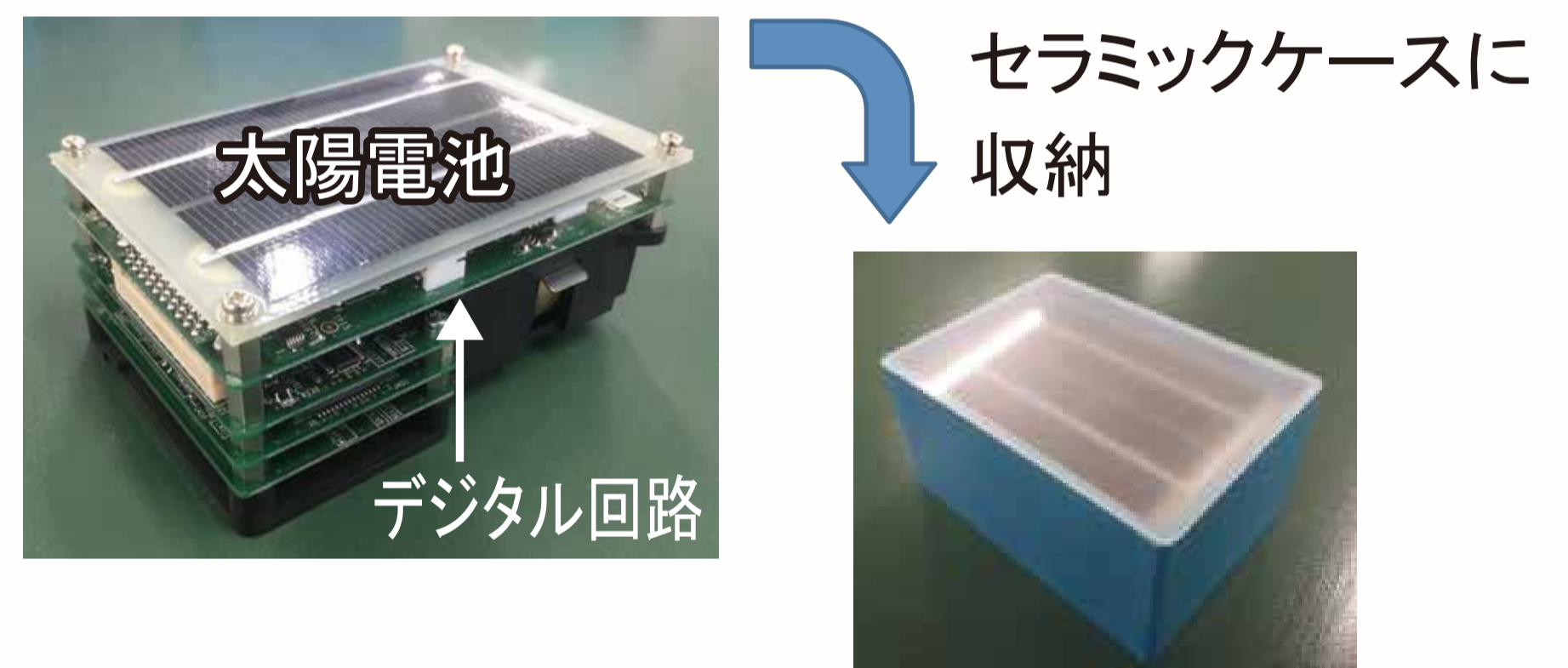
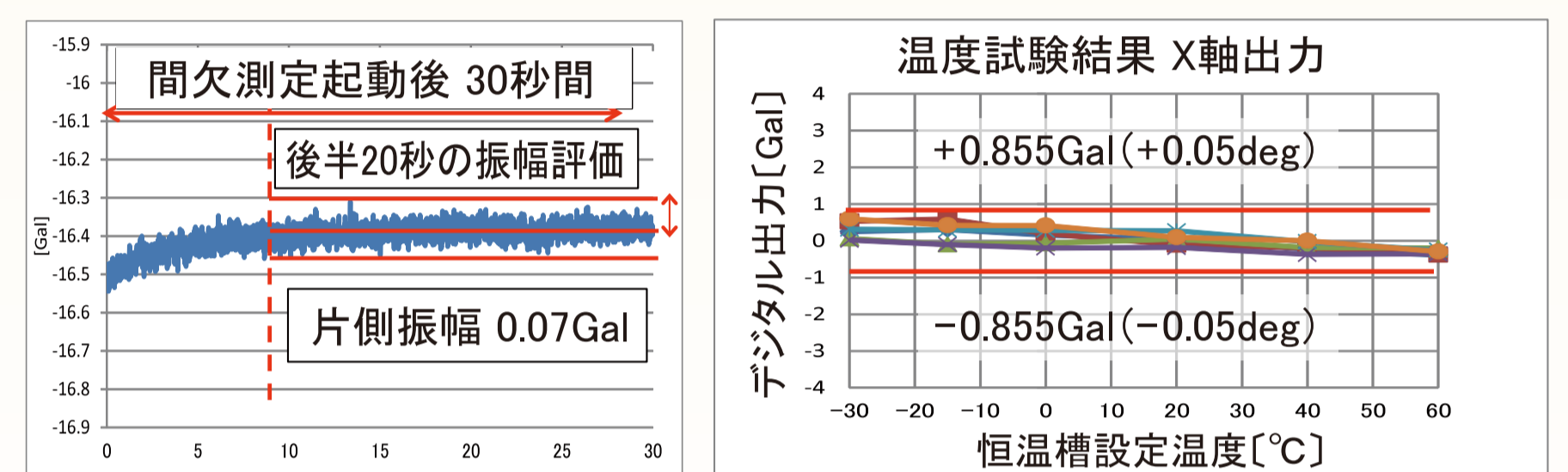
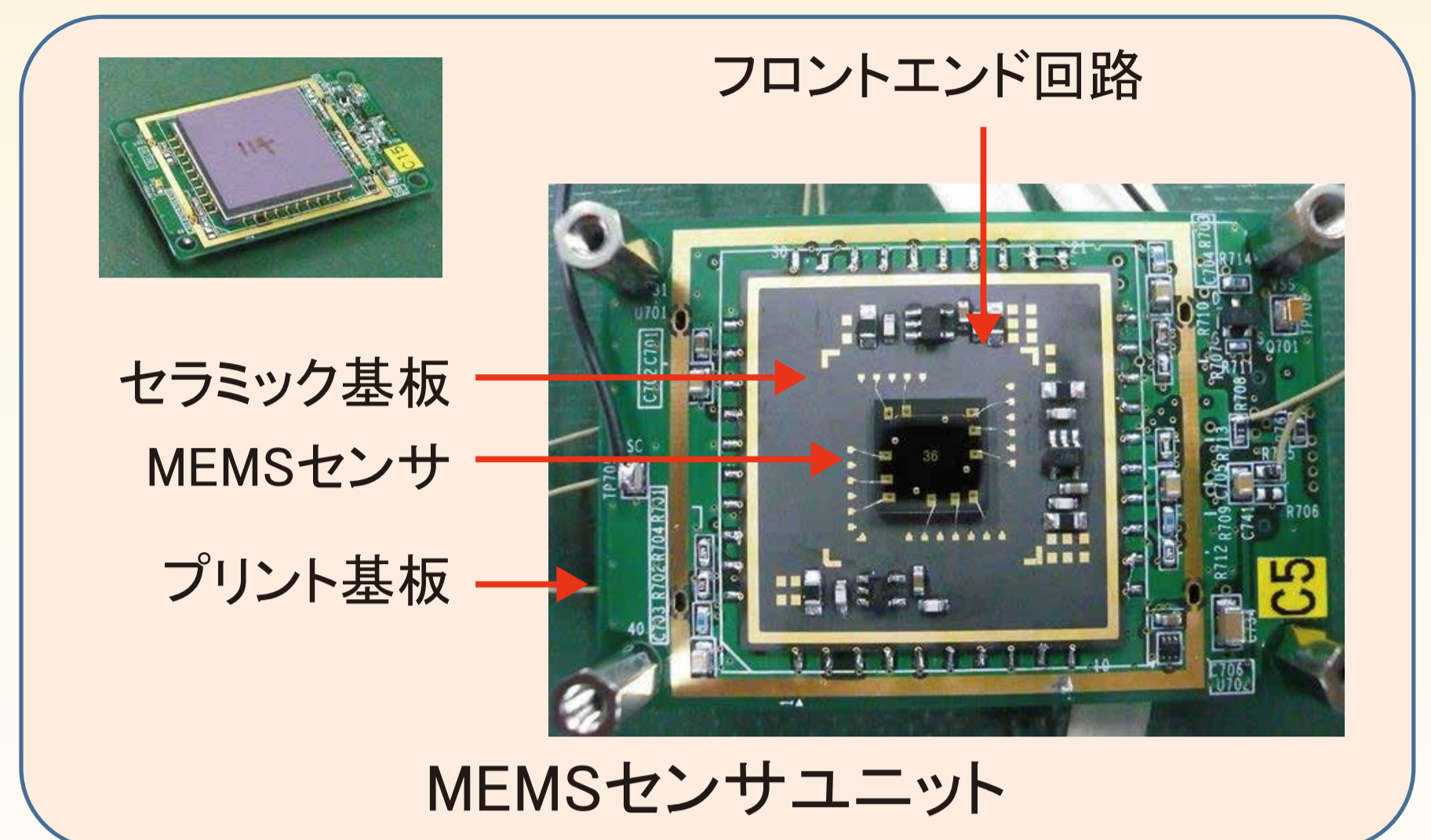
- センサ端末を情報板へ設置完 実証実験中
- 傾斜・振動・温度の同時計測確認
- 実証サイトでの課題抽出と改良実施中

- システム構築と実証試験

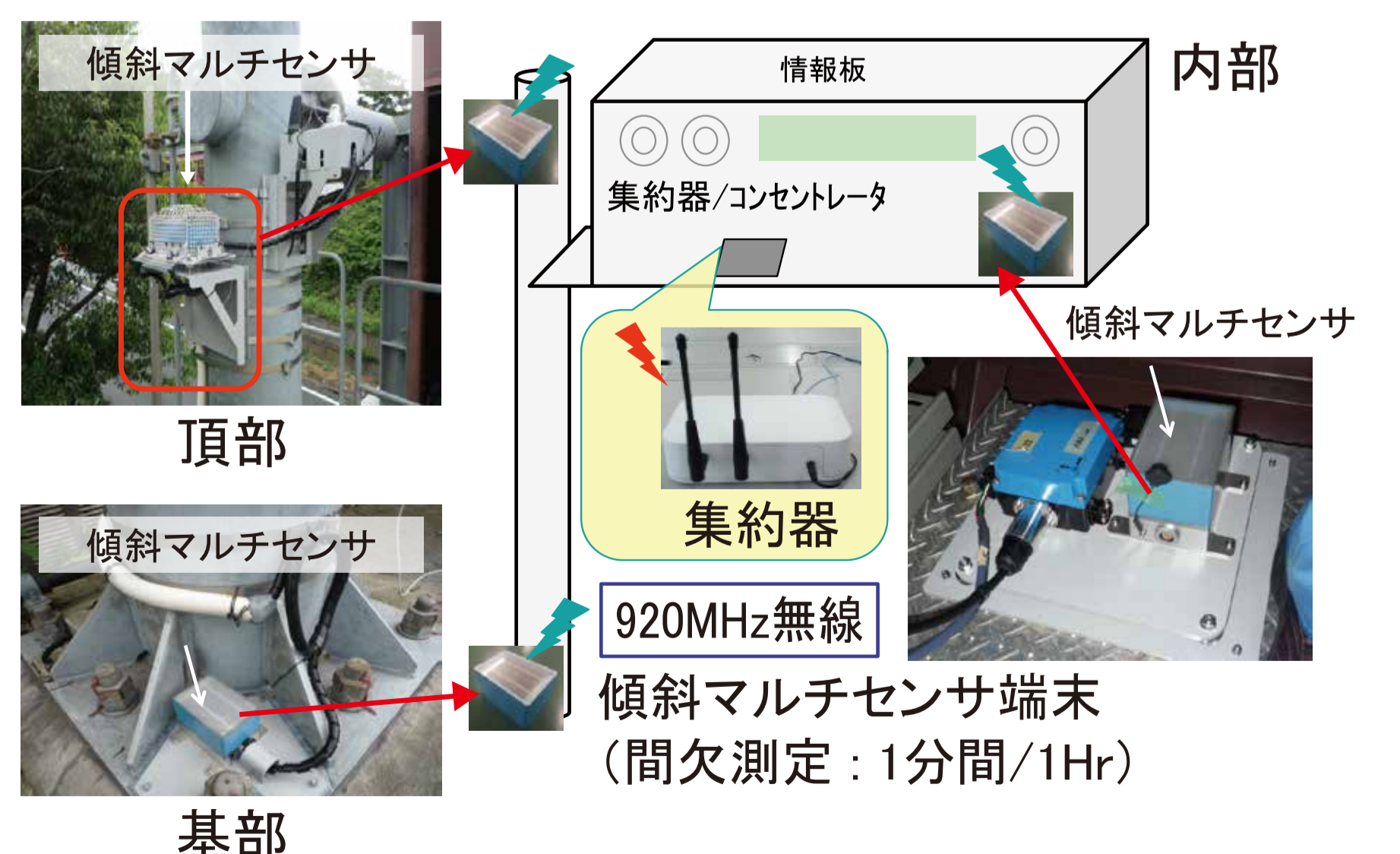
- 先行フィールド試験(既存センサ使用)
高速道路情報板にて傾斜・振動・温度測定
測定結果を元に情報板の挙動解析実施
- 実証実験
実証サイト2カ所(NEXCO中日本管内高速
道路情報板)にて課題抽出と改良実施中

大規模インフラへの展開(H29年～)

- 水力発電施設での実証実験
 - センサシステム構築、実証開始(センサ2カ所)
 - 課題抽出と改良実施中



出力例:(既存有線センサとの比較)



情報板への設置状況



高頻度・全天候型・3次元で法面変位計測(1)

High Data Rate, All Weather, and 3D Slope Displacement Measurement (1)

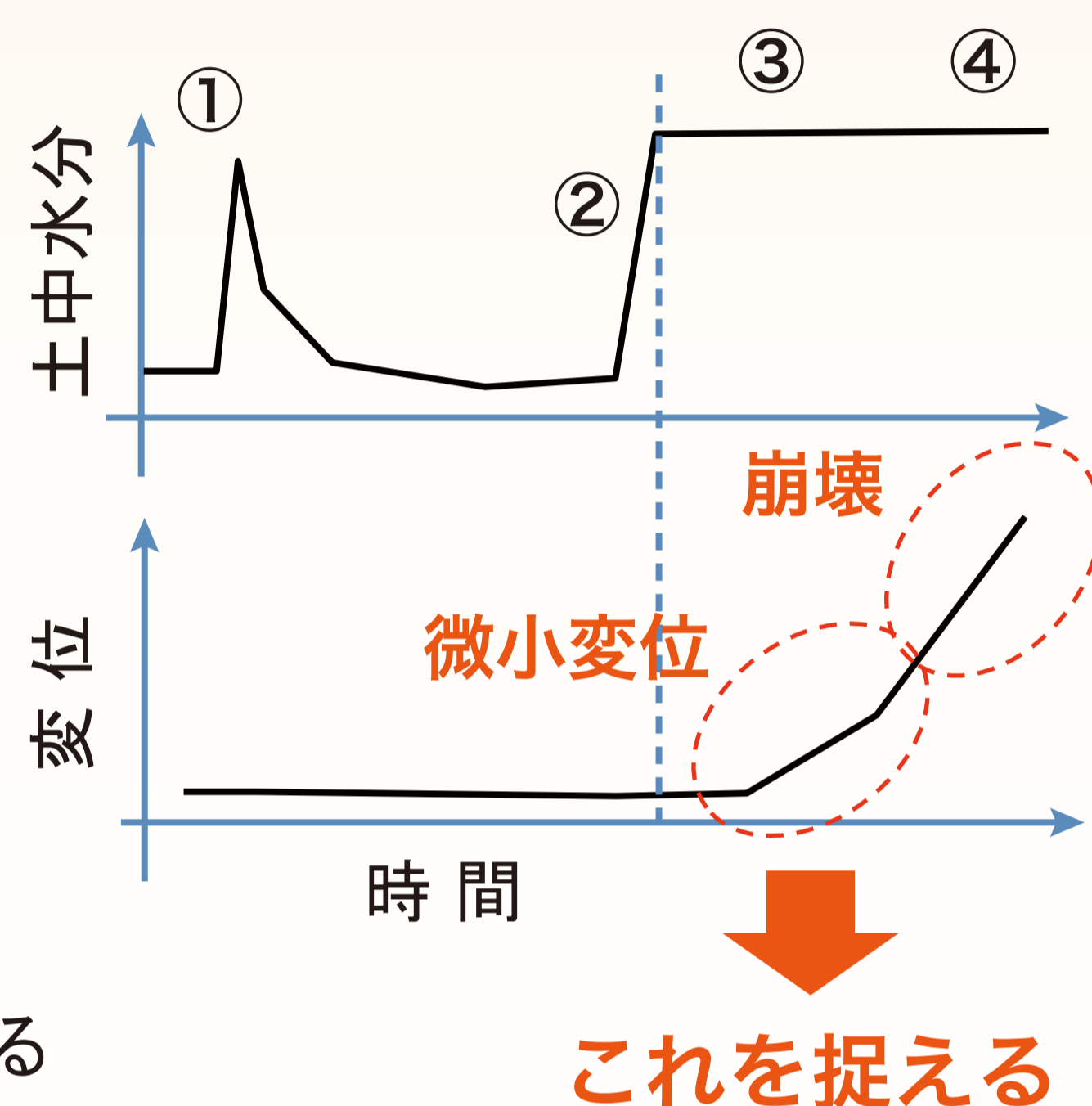
本研究の差異化ポイント

- 電波位相差により高計測頻度・全天候・3次元で法面変位を高精度計測
- 端末間の無線メッシュネットワークによる広範囲計測
- 天候・昼夜を問わず長期間動作する多機能型センサ端末の開発

背景とねらい

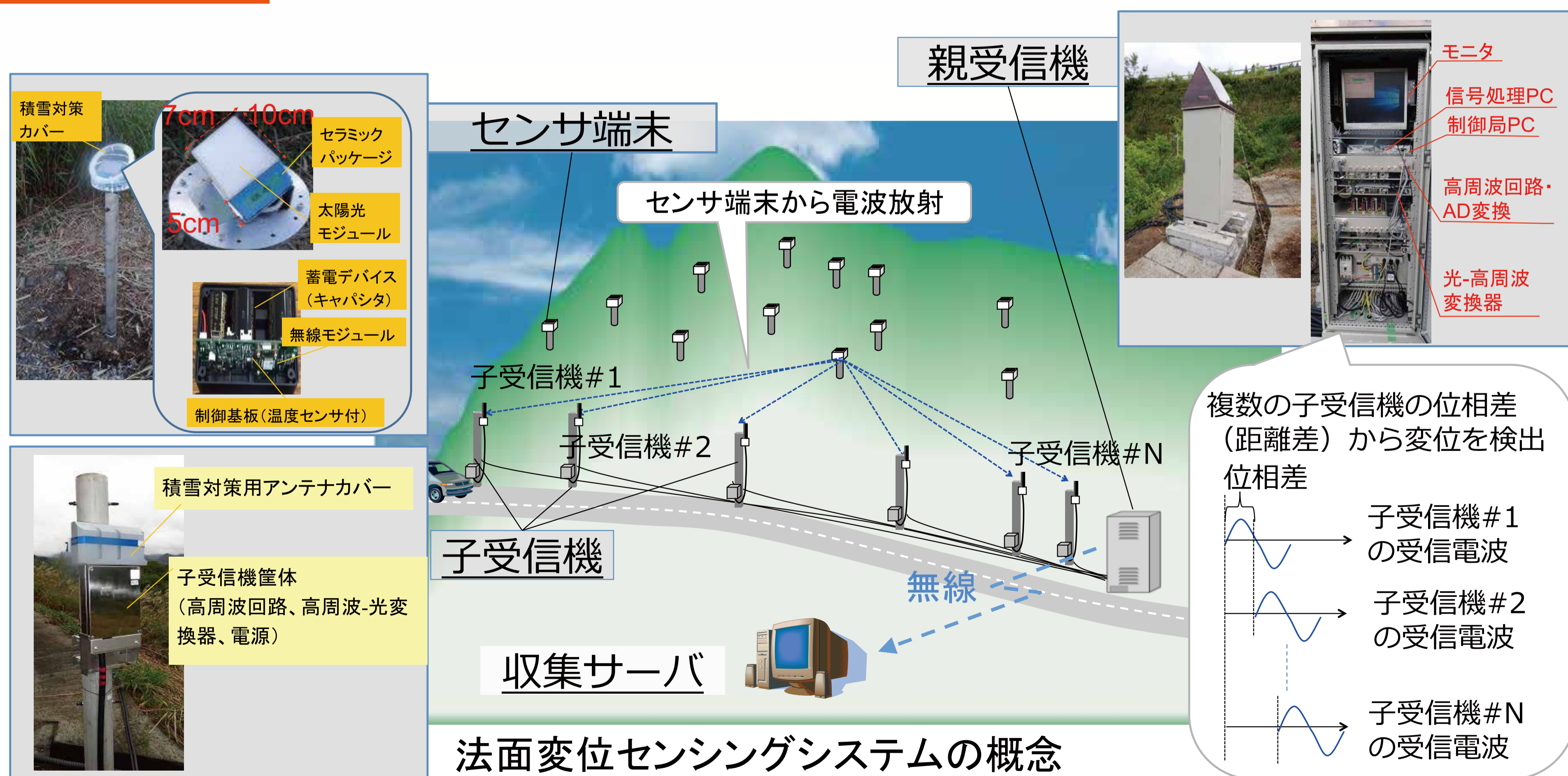
法面崩壊のメカニズム^[1]

- ① 降雨による地盤・岩盤への水の浸透
 - ② 地盤・岩盤内での斜面を支える力の減少
 - ③ 微小変位発生
 - ④ 大変位(崩壊)発生
- 微小変位を早期に検出することで、法面の変状を明確にし、維持管理・通行止めの判断の指標とする
 - 従来、光波測量計が用いられているが、雨天時の計測に問題がある



[1]小泉他, “無線センサネットワークによる多点型土砂災害予測システムの開発,” H24年度 国交省 国土技術研究会発表論文

概要図



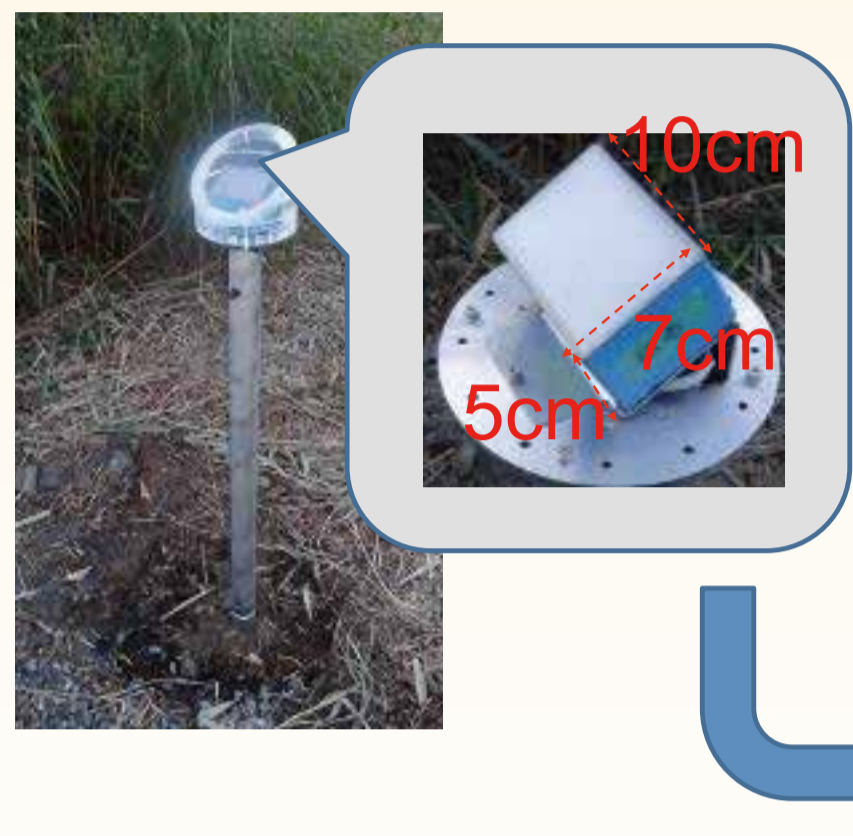
高頻度・全天候型・3次元で法面変位計測(2)

High Data Rate, All Weather, and 3D Slope Displacement Measurement (2)

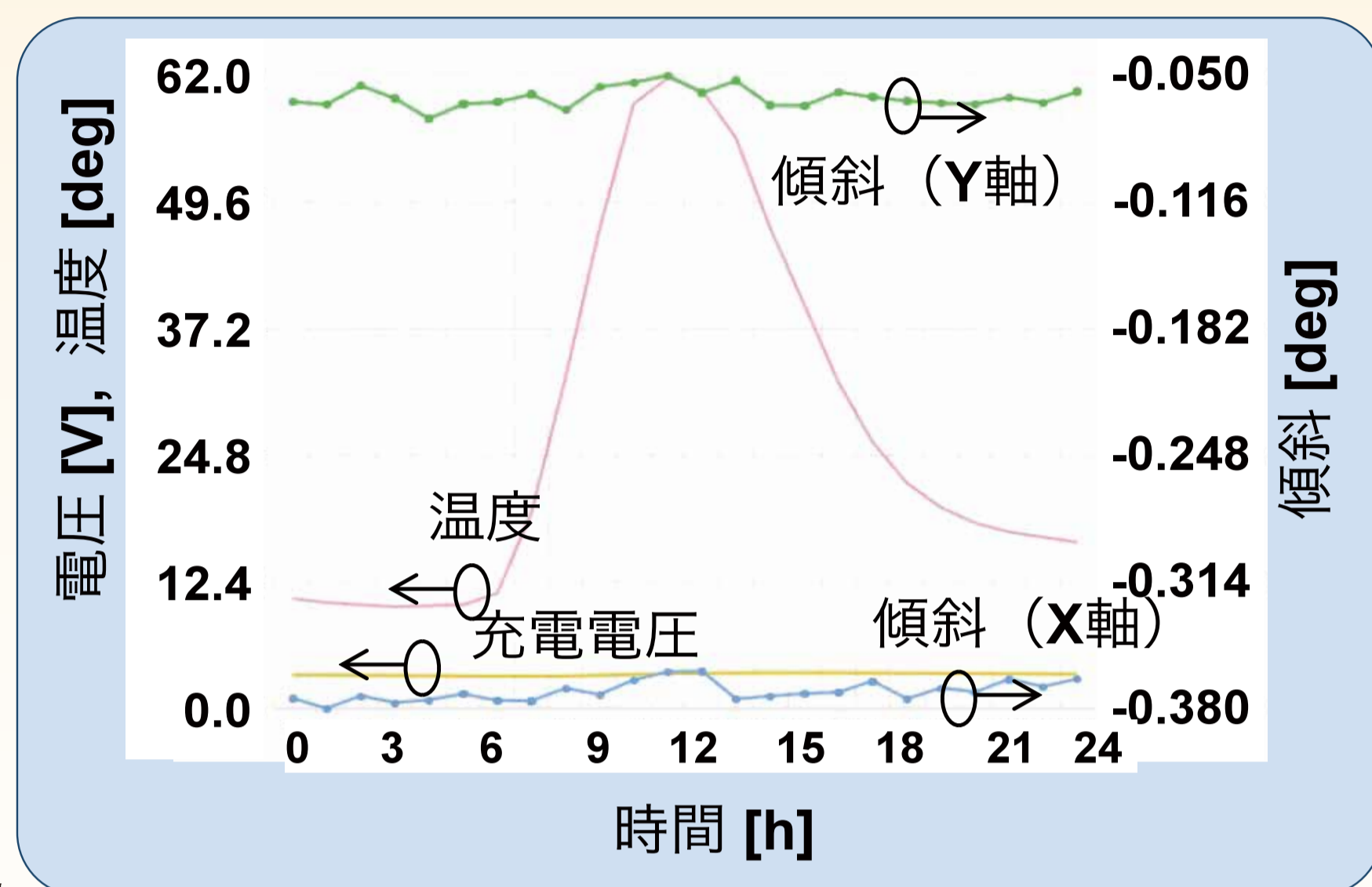
これまでの成果(H26年～)

センサ端末の開発

- 自立発電(太陽光)により動作し、温度・充電電圧・傾斜角の計測及び無線通信を実現
- 実証実験現場に設置し、積雪期を含めた長期動作を確認

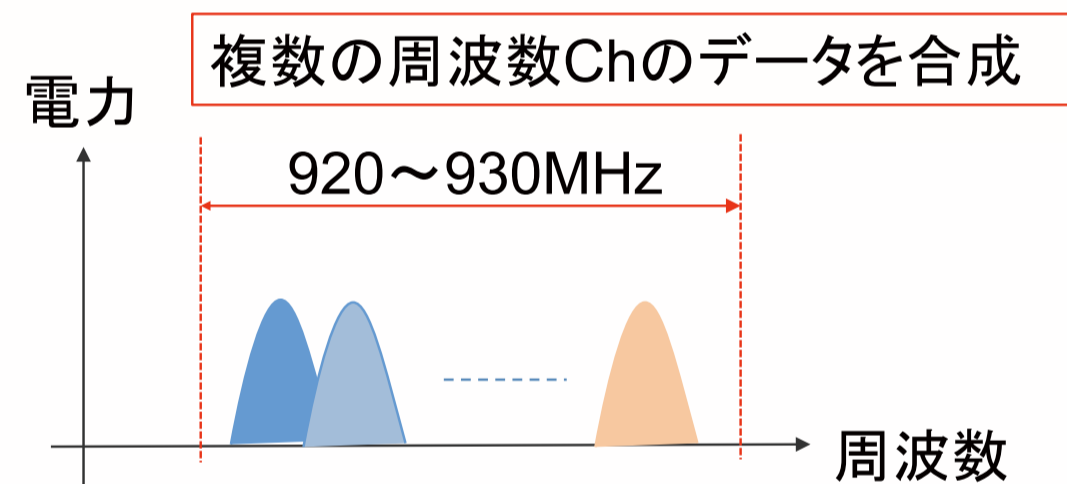
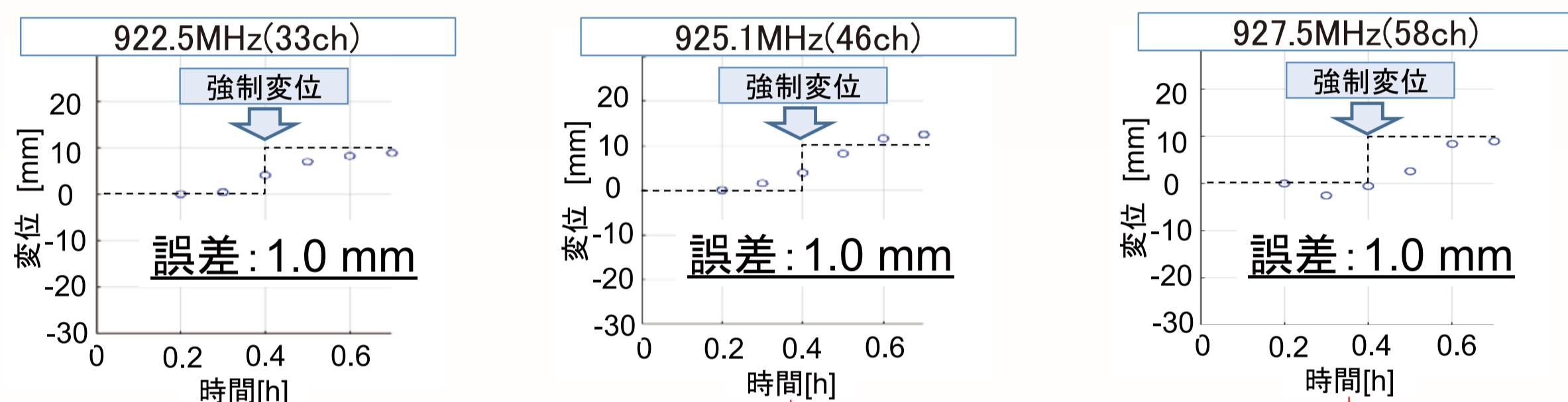


センサ端末と計測したデータ例

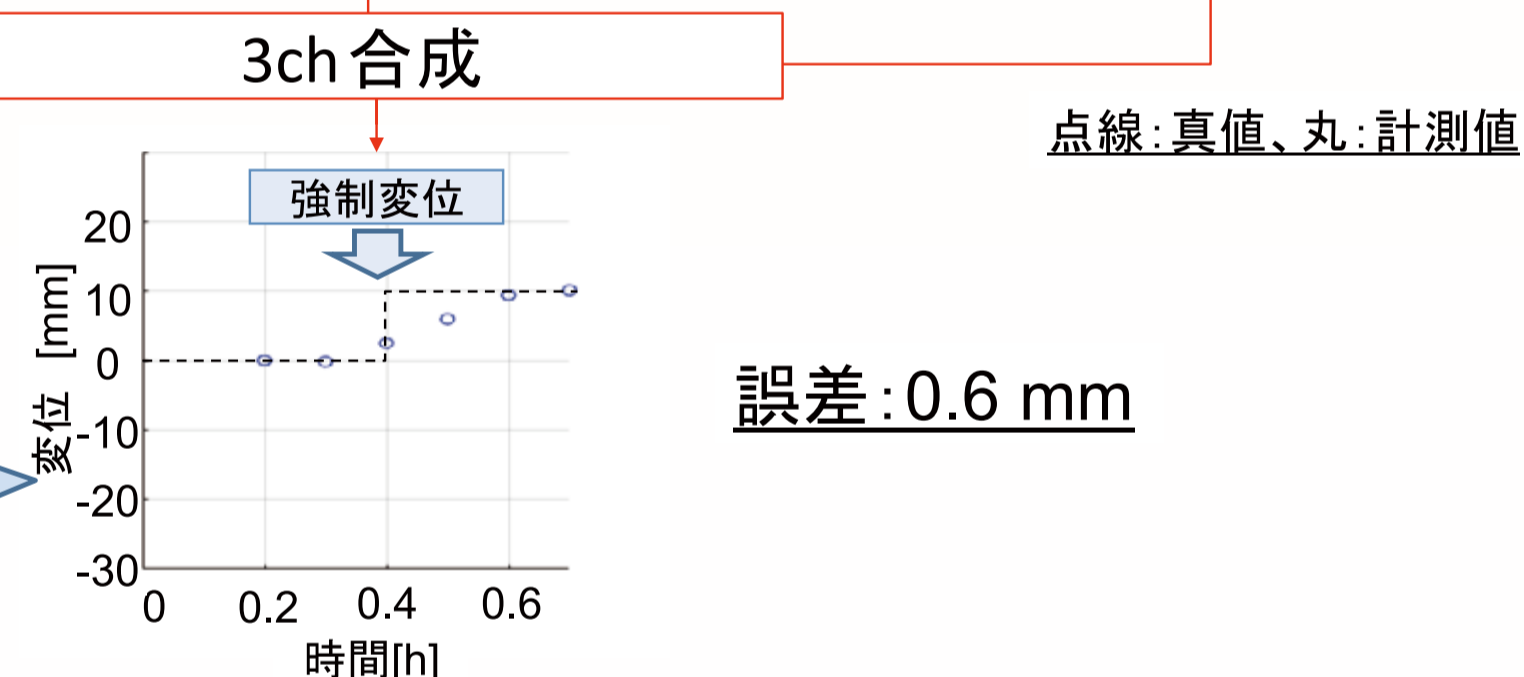


子・親受信機の開発

- 草木の影響による変位計測精度の劣化を防ぐため、複数の周波数Chの電波位相を合成する方式を開発

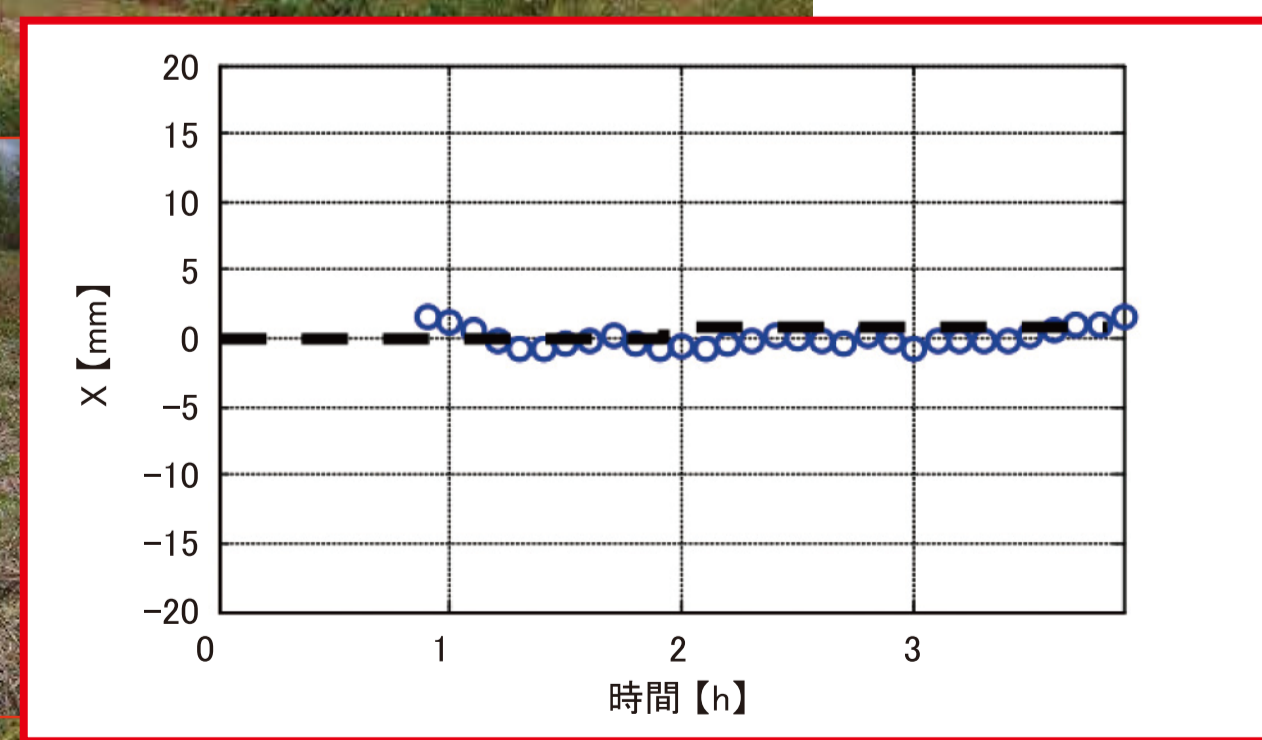
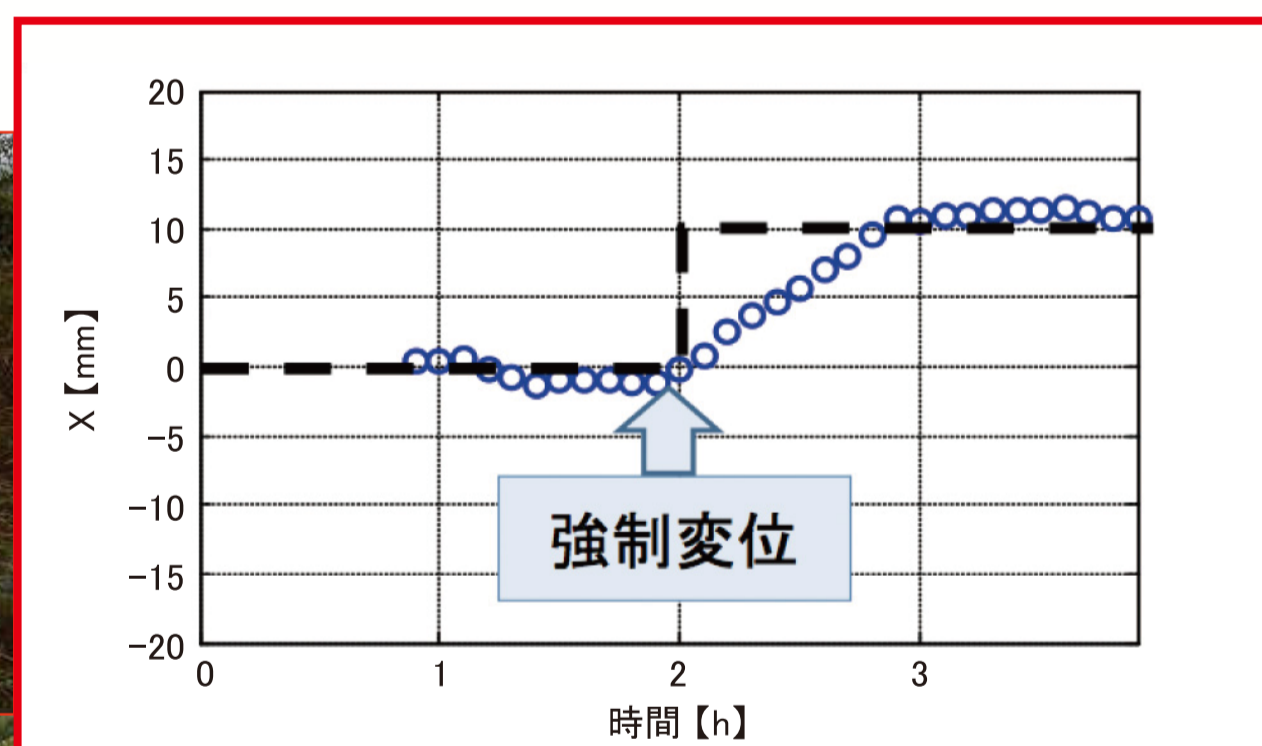
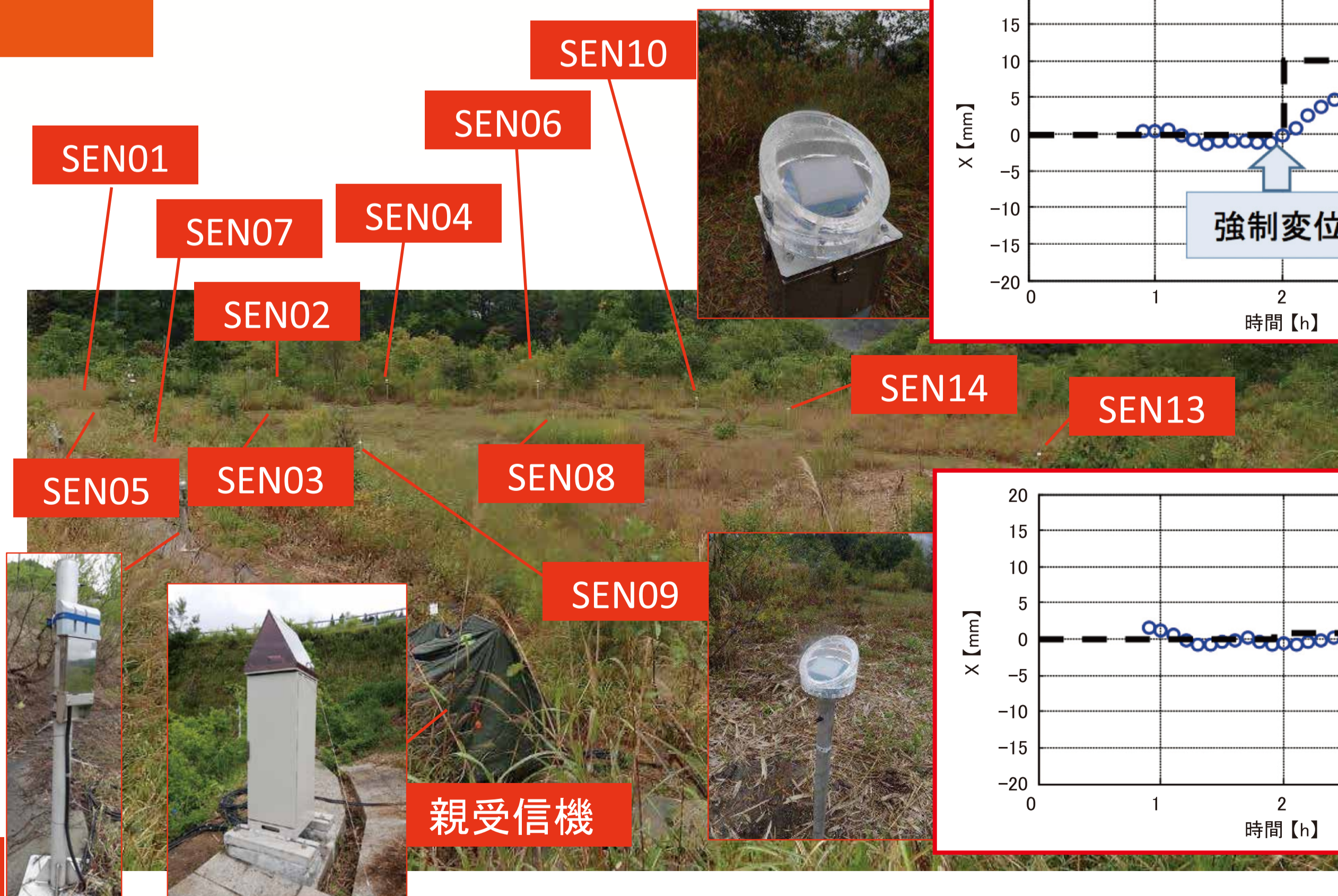


3ch合成により、変位計測誤差が1.0mm→0.6mmと約 $1/\sqrt{3}$ に減少することを実験により確認



実証実験

- センサ端末16台、子受信機16機を現地に設置し、実証実験を実施
- 周波数Ch合成無しで誤差1mm程度で計測可能なことを確認。周波数Ch合成の効果は検証中



実証実験状況と強制変位計測実験結果例

多種多様なセンサに対応するネットワーク通信基盤(1)

Network Communications Infrastructure Corresponding to a Wide Variety of Sensors

本研究の差異化ポイント

- 様々なデータフォーマットやインターフェースの差異を吸収する通信仕様
- 設置容易性とコスト対策を目的としたコンセントレータ間の連携通信
- セキュアな情報収集への対応

背景とねらい

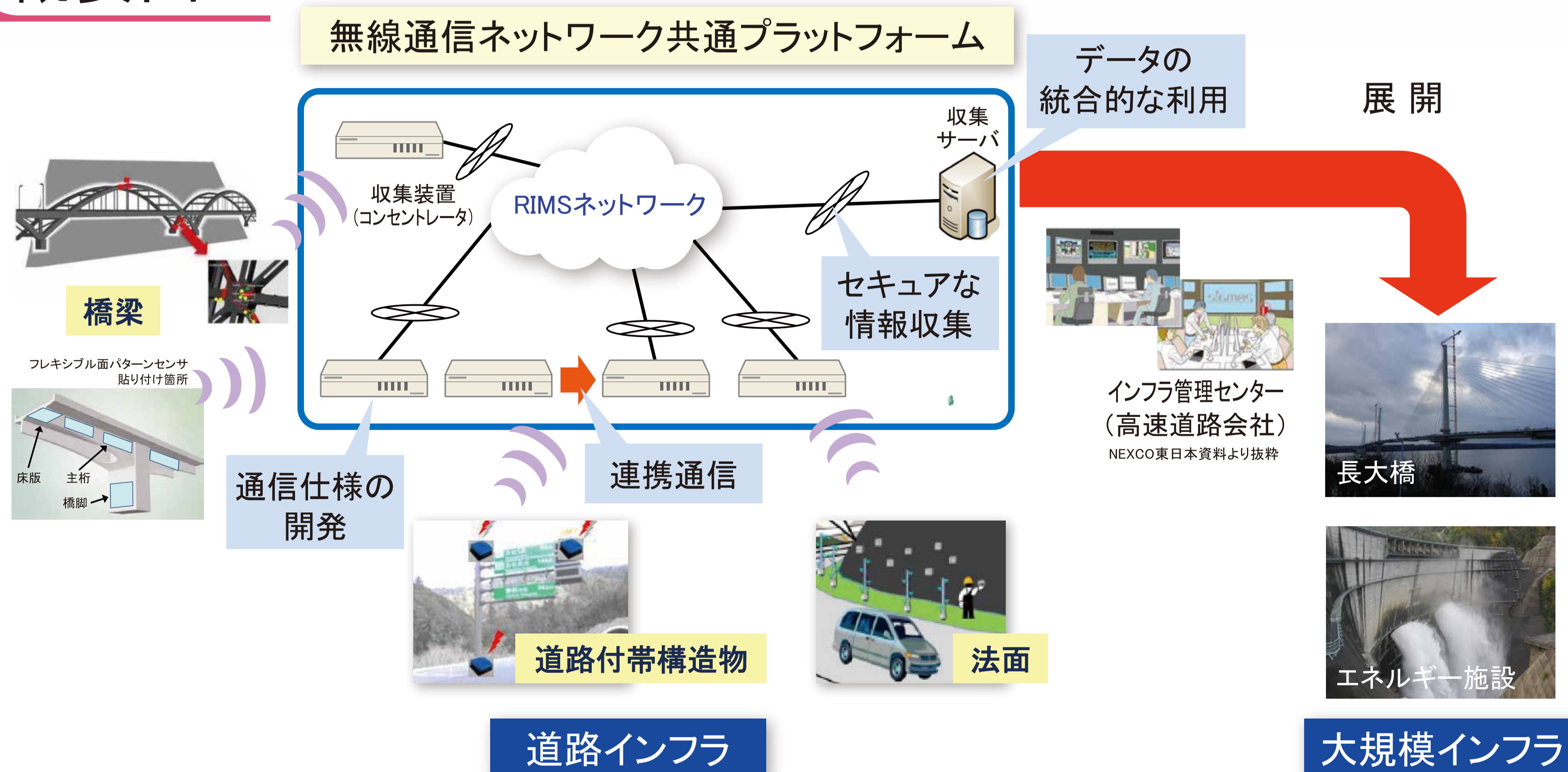
道路インフラの老朽化や定期点検要領の更新などにより、**道路インフラに多種多様なセンサが設置されるに伴い、通信基盤の重複による非効率**が懸念事項

- データ収集の非効率
センサやモニタリングの開発や普及にあわせ、それぞれの独自方式にあわせた専用の機器及びシステムを構築する必要がある。
- データ利用の非効率
データの格納形式に共通性が乏しいため、様々なセンサから取得したデータを統合的に利用することが困難である。

多種多様なセンサ/メーカー、監視目的に対応する**オープンなネットワーク通信基盤**が求められている。差異の吸収はコンセントレータの通信仕様を開発することで実装する。

設備やコストの削減及び多種多様なデータの横断的な利用について道路インフラに加え、大規模インフラで検証を行う。

概要図



多種多様なセンサに対応するネットワーク通信基盤(2)

Network Communications Infrastructure Corresponding to a Wide Variety of Sensors

これまでの成果

道路インフラ(H26年～)

- 多種多様なセンサに対応するための通信仕様の開発
共通インターフェースをもとに各社のデータフォーマットと通信仕様を確定。各社センサデータをコンセントレータで受信し、収集サーバへデータ格納を実施

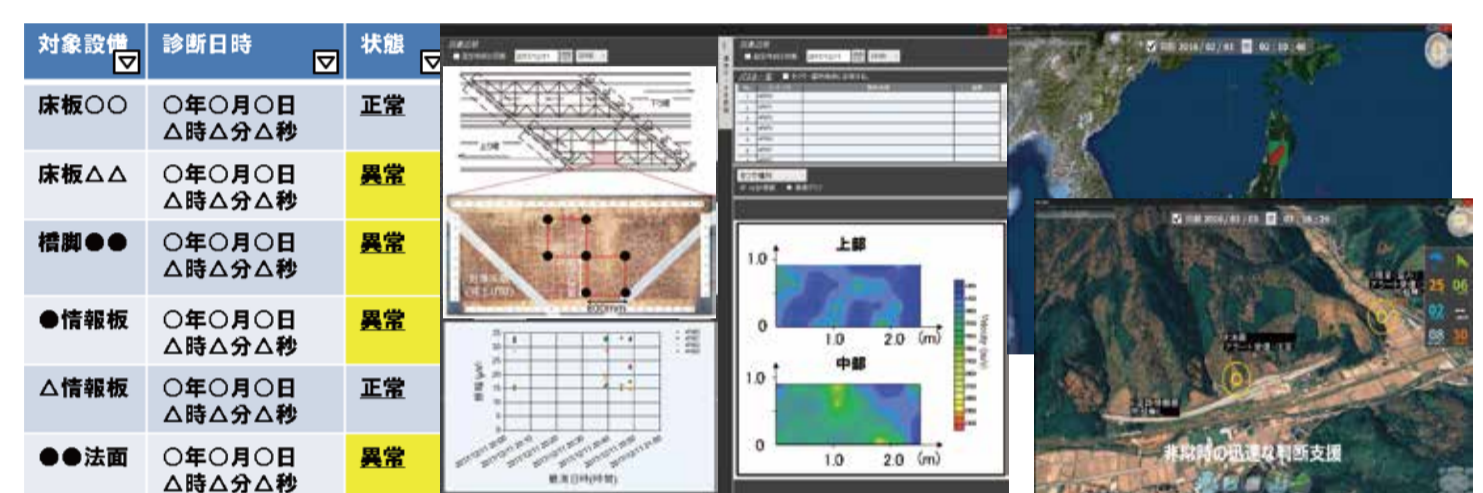


共通的なインターフェースで多様なデータ仕様を吸収し、対応が容易

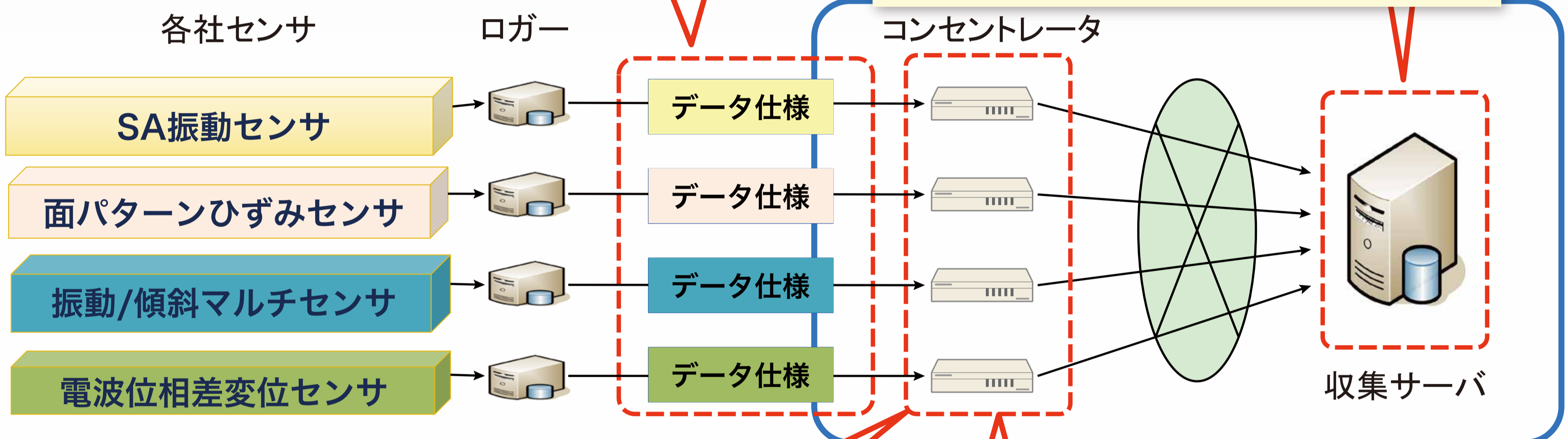
データ仕様：共通インターフェース

- データの統合的な利用

多種多様なデータの統合的な利用例として、道路管理者業務イメージを具体化した各構造物状態の統合モニタリングシステムを開発

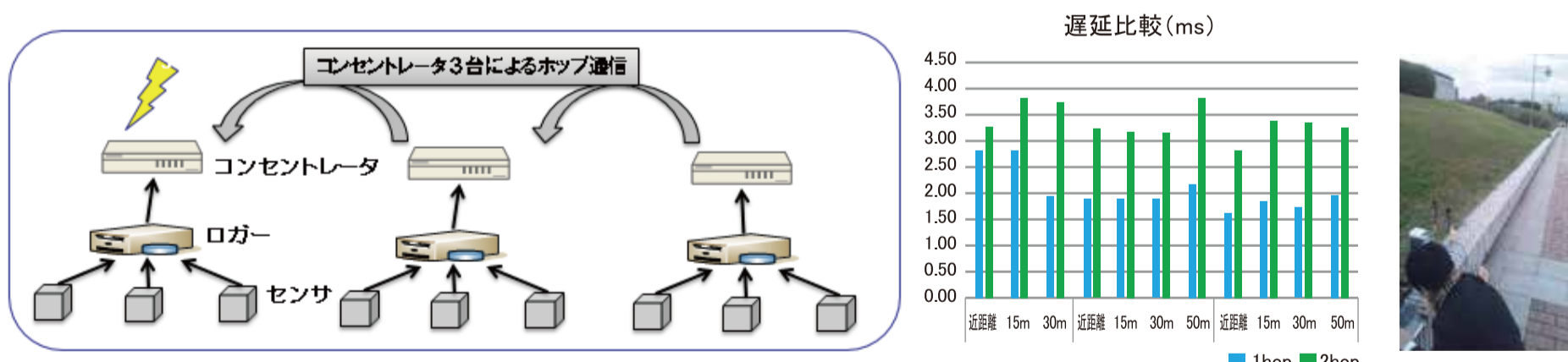


無線通信ネットワーク共通プラットフォーム



- コンセントレータ間の連携通信

屋外環境で3ホップまで性能に問題ないこと確認済み。現地実証中



- セキュアな情報収集

コンセントレータで通信パケットを解析し不正な通信を検出できる機能を検証中



大規模インフラへの展開(H29年～)

- クラウドベースでの無線通信ネットワーク共通プラットフォームを構築

→ 大規模インフラモニタリングでのデータ発生パターンとモニタリング要件を明確化し、構築システムが要件を満たすか性能面で検証を実施。H30年は実際の取得データを用いたモデルで検証予定

道路インフラの環境ストレスに強いパッケージ(1)

Highly Durable Package for Road Infrastructure Environmental Stress (1)

本研究の差異化ポイント

- 常時モニタリングを長期に保証するセンサ端末パッケージング技術
- 自立電源、無線モジュール、各種センサのオールインワンパッケージ
- パッケージを構造物に簡便・強固に設置する粘接着シート接合技術

背景とねらい

高耐久性

■ 過酷なセンサ端末設置環境

- 道路インフラに設置されるセンサ端末は過酷な環境下に設置されるため、従来のパッケージでは耐久性に限界
 - ・ 季節変動による高温・多湿・積雪・凍結
 - ・ 直射日光による紫外線・輻射熱
 - ・ 排気ガスや火山性ガスによる酸性腐食
 - ・ 凍結防止剤、海風による塩分腐食
- モニタリングシステムの実用化において、センサ端末の信頼性確保は重要課題であり、インフラの寿命や点検サイクルに見合う耐久性の確保が必要
 - 道路インフラ等の過酷な設置環境下で、センサ端末の性能を少なくとも10年間維持できる高耐久性パッケージを開発

オールインワンパッケージング

■ 自立型無線センサ端末

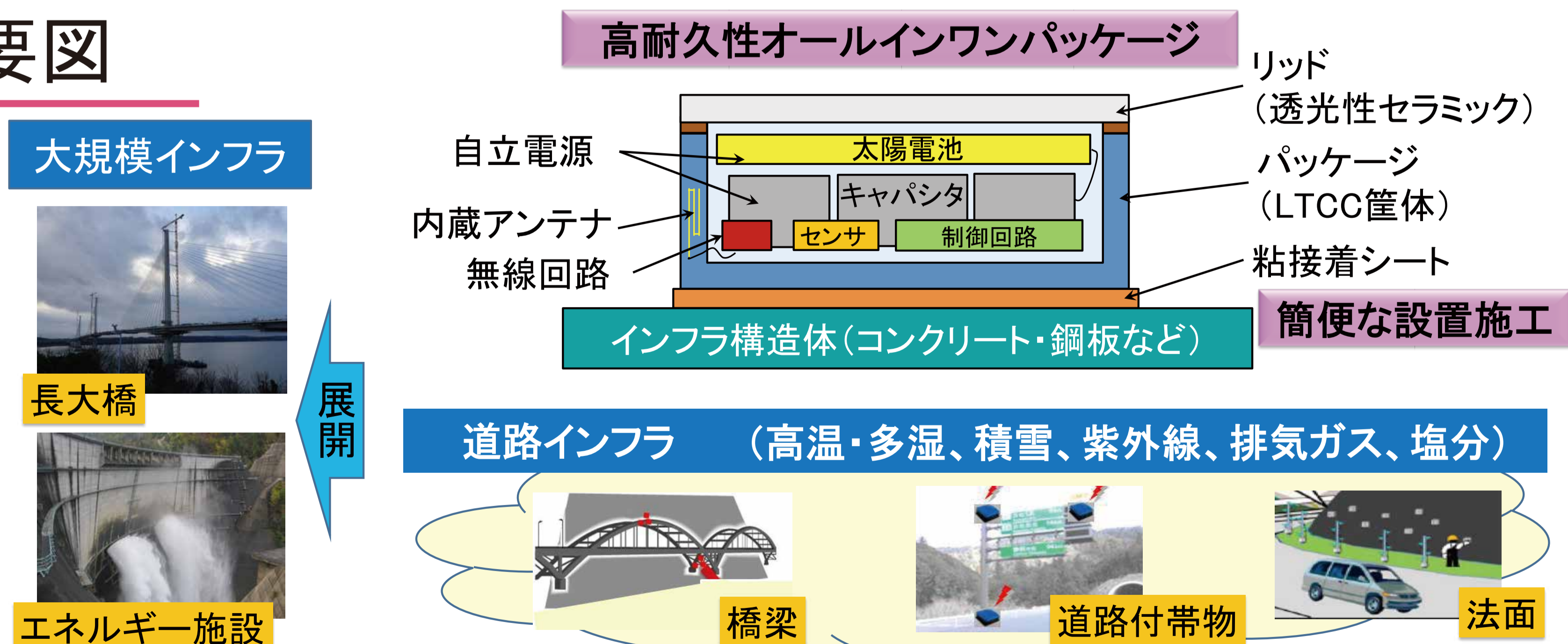
- センサ端末の設置自由度拡大の観点から、電源やセンサ信号の配線引回しを不要とする自立型無線センサ端末が必要
 - 端末構成部品を一括で收容可能な大型セラミック筐体とその気密封止によるオールインワンパッケージング技術を開発

簡便な設置施工

■ 多様な設置現場

- 高所、狭窄・屈曲部など多様な設置現場では、簡便に設置できる施工法が必要
 - センサ端末を内蔵したパッケージをコンクリートや鋼板に長期安定した品質で設置できる粘接着シートによる施工法を開発

概要図



道路インフラの環境ストレスに強いパッケージ(2)

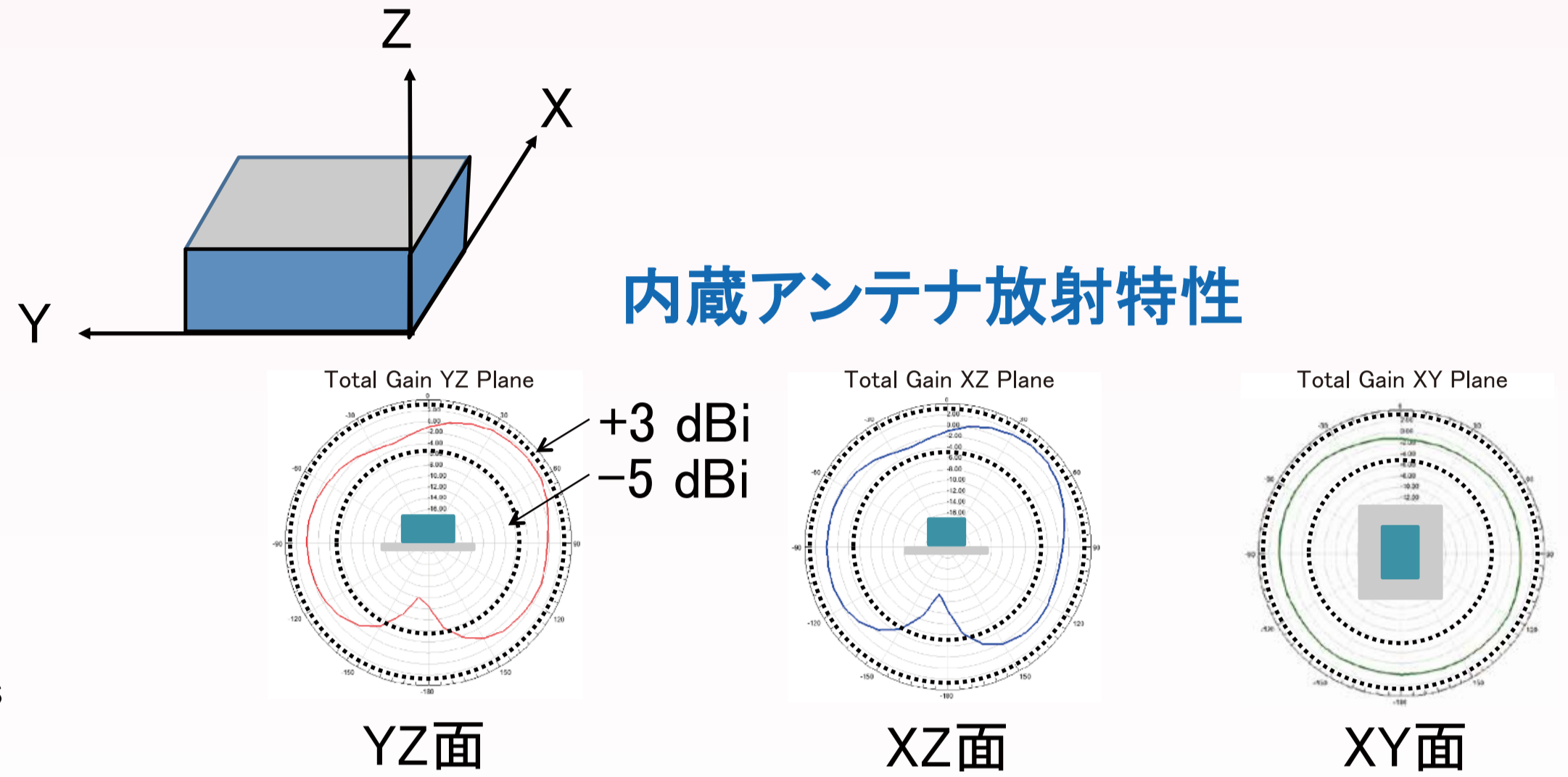
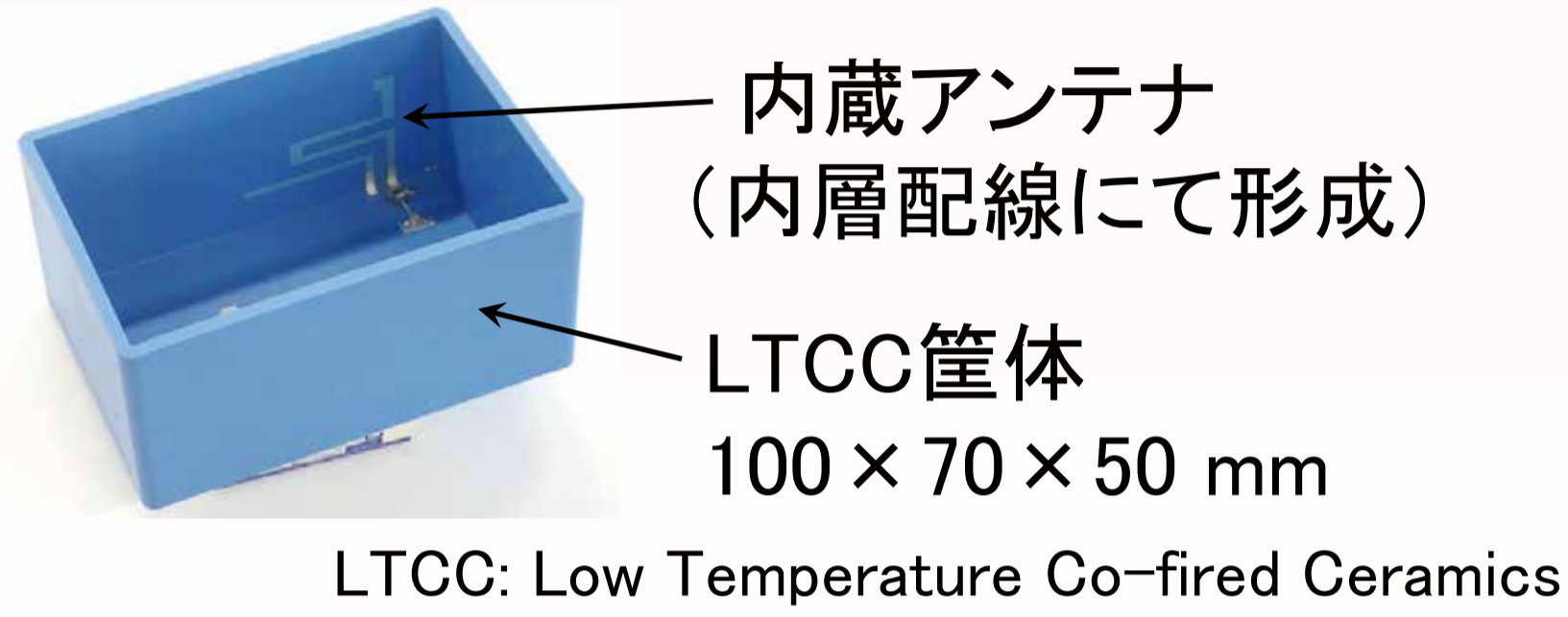
Highly Durable Package for Road Infrastructure Environmental Stress (1)

これまでの成果

道路インフラ(H26年～)

■ 大型セラミックパッケージ

パッケージ筐体の外観

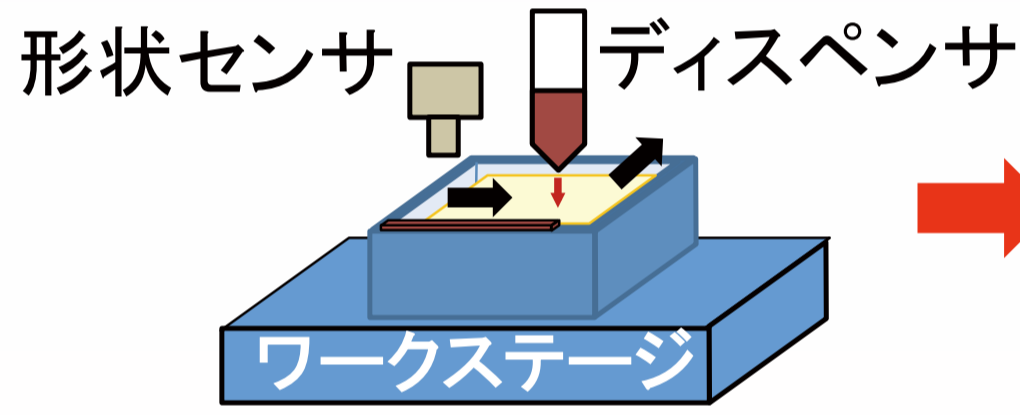


■ 高気密接合封止技術

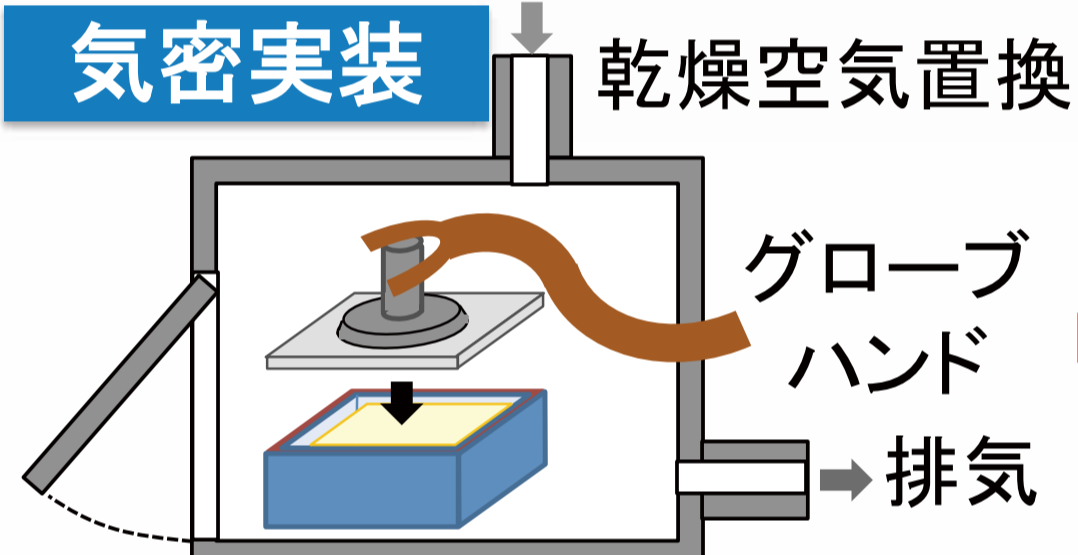
低熱影響封止プロセス

気密封止センサ端末

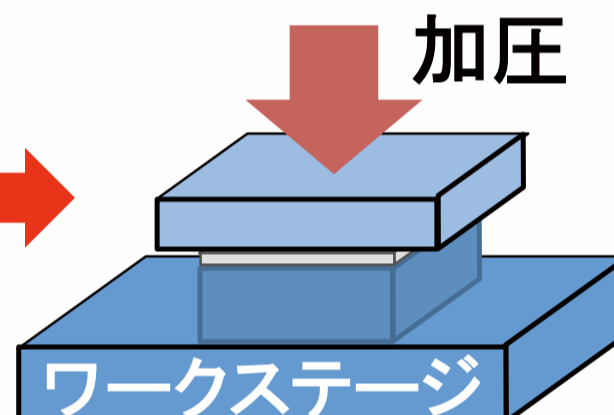
接合材塗布



気密実装



加熱圧着



- ・無機有機複合接着材
- ・ワーク3次元形状倣い塗布
- ・気密グローブボックス内組立
- ・封止雰囲気露点: <math>< -40^{\circ}\text{C}</math>
- ・加熱温度: $40\sim 90^{\circ}\text{C}$
- ・パッケージ内温度: $< 60^{\circ}\text{C}$

■ インフラ構造物への設置技術

橋梁

構造物 (コンクリート床版)

ベースプレート

固定プレート (底蓋)

構造物 (I桁)

粘接着シート SAセンサ

道路付帯物

傾斜センサ

落下防止ネット

粘接着シート

ベースプレート

取付け金具 アタッチメント

法面

雪よけカバー

変位センサ

構造物

ベースプレート (フランジ)

粘接着シート

支柱

アクリルケース

設置形態

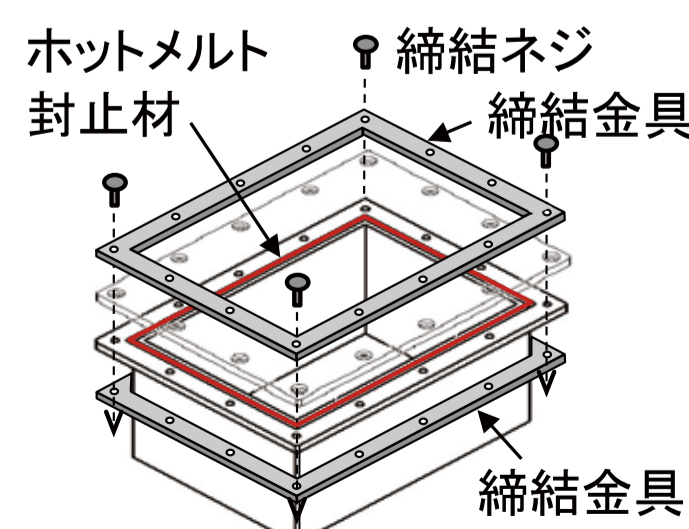
設置現場

設置現場

大規模インフラへの展開(H29年～)

■ 高耐衝撃性樹脂パッケージ

耐衝撃性が要求される長大橋やエネルギー施設など大規模インフラ向けにポリカーボネート(PC)樹脂パッケージを開発し、展開



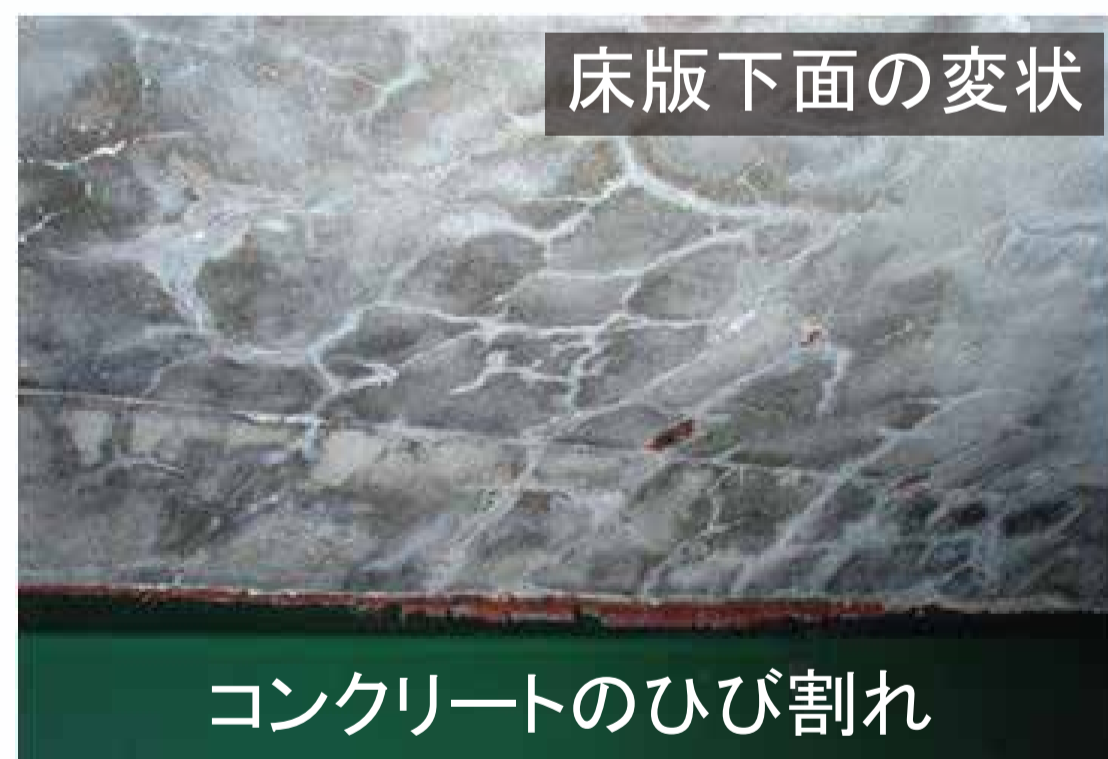
高速道路の橋梁点検

Bridge Inspection of the Expressway

点検の現状

検査路を用いた目視・打音点検	路下からの目視点検	路下から高所作業車を用いた点検
		
本線上から高所作業車を用いた点検	本線上から橋梁点検車を用いた点検(1)	本線上から橋梁点検車を用いた点検(2)
		

変状事例



高速道路ののり面点検

Slope Inspection of the Expressway

点検の現状

切土のり面のり枠、グラウンドアンカーの目視点検



切土のり面の点検



のり面小段部からの目視点検



のり面勾配の調査



盛土のり面の目視点検



変状事例

切土のり面の倒木



のり尻部からの湧水



排水溝に土砂等が堆積



コンクリートブロック積のひび割れ、ずれ



切土のり面のグラウンドアンカーの突出



のり面保護工原地盤の沈下



盛土のり面の崩落



高速道路の附帯設備点検

Inspection of Expressway Equipment

点検の現状



トンネル換気設備の構造検査



照明設備の構造検査

近接目視	磁粉探傷試験	超音波厚さ測定	ファイバースコープ
◇ 道路照明設備の支柱、灯具の構造検査を、目視、触手、簡易な計器を用いて行うものである	◇ 道路照明設備の支柱の構造検査を、磁粉探傷器を用いて行うものである	◇ 道路照明設備の支柱の構造検査を、超音波厚さ計を用いて行うものである	◇ 道路照明設備の基礎の構造検査を、ファイバースコープを用いて行うものである
<ul style="list-style-type: none"> ● 支柱・基礎・灯具の発錆し腐食しやすい部分（アダプター部、メカニカルジョイント部、開口部、地際部等）の検査 ● ガタつき、損傷、腐食等を五感、ハンマー等で確認 	<ul style="list-style-type: none"> ● 支柱の亀裂・損傷等が発生しやすい部分（アダプター部、メカニカルジョイント部、開口部、地際部等）の検査 ● 磁粉探傷装置で亀裂・損傷等を検査（検査部にスプレーで磁粉を塗布し、ブラックライトをあてながら磁界を発生させる装置をあてがうと、亀裂等の溝がある場合はその部分が浮かび上がる） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 支柱の亀裂・損傷等が発生しやすい部分（アダプター部、メカニカルジョイント部、開口部、地際部等）の検査 ● 超音波厚さ計で材料の厚さを検査（厚さが数値で表示される） 	<ul style="list-style-type: none"> ● 地際部（アンカーボルト等）の検査 ● ファイバースコープでボルトの太さ等内部の欠損・腐食状況を検査

詳細点検状況 ～(例)道路照明設備～

劣化事例



点検口下部に母材の腐食が見られる



取付け用アンカーボルトの腐食、減肉化

モニタリングシステムを革新する原子時計(1)

Atomic Clock Leading to Innovation of Monitoring System (1)

本研究の差異化ポイント

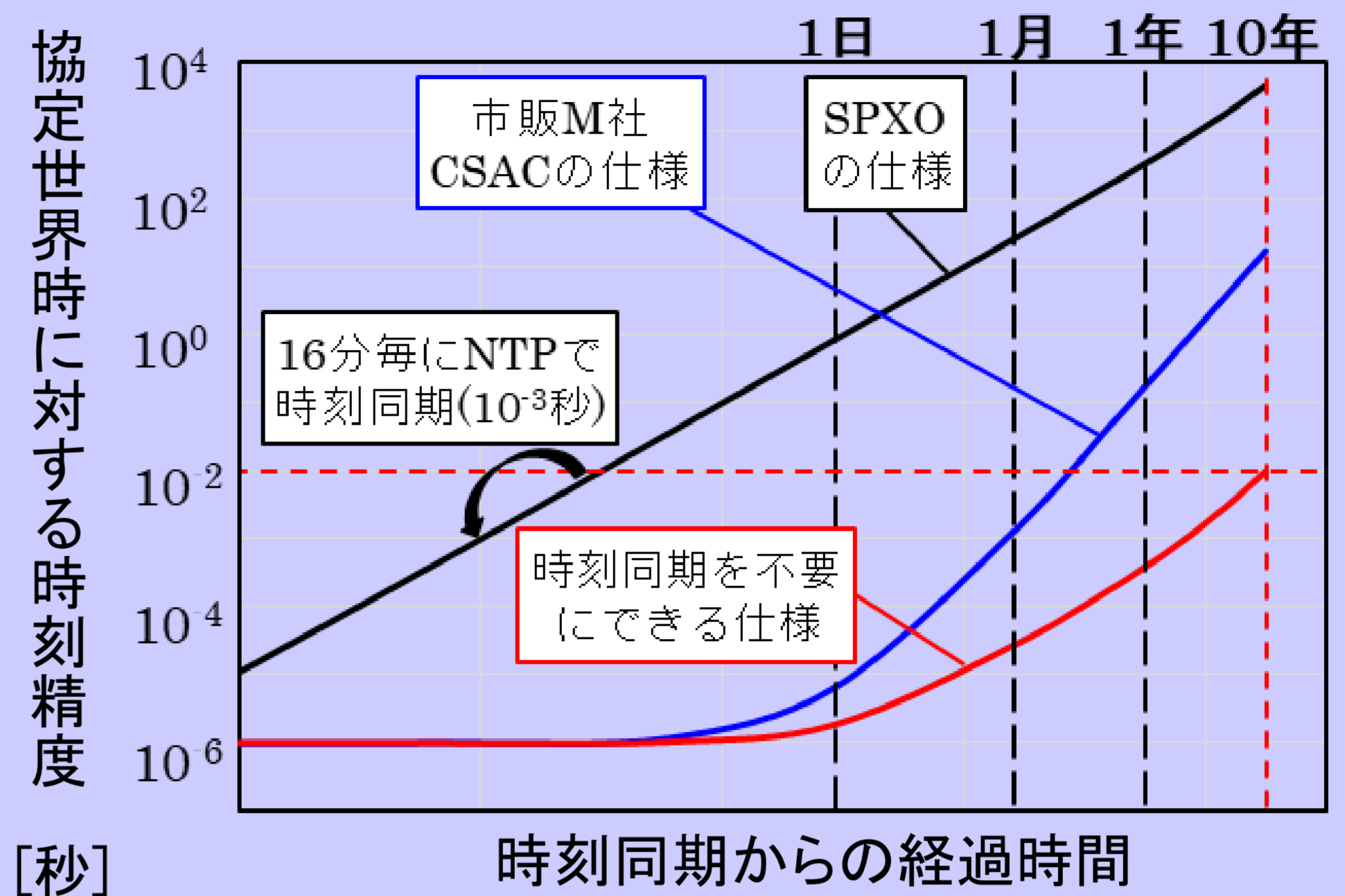
- ◆原子時計の小型化と時刻精度向上を両立するガスセル内環境制御技術
- ◆原子時計内外の環境観測データを基にした基準周波数補正技術
- ◆時刻同期が不要な原子時計を組み込んだセンサ端末によるモニタリング

背景とねらい

■データ間の時刻整合性での課題

橋梁や法面、道路付帯物など各フィールドからのデータを統合して分析するには、データ間の時刻の整合性が重要となる。各データに付与する時刻精度は、センサ端末などに組み込んだ時計間の同期精度で決まり、設置環境や天候で変化する電波状況に依存するため、システム構築には多大なノウハウが必要となっている。

センサ端末に組込可能な小型で低消費電力な原子時計を開発することで、時刻同期を不要としたモニタリングシステムを実現し、システム構築の労力を大幅に削減する。



時刻同期を不要とする時計の仕様

SPXO : Simple Packaged Crystal Oscillator
 CSAC : Chip Scale Atomic Clock
 ULPAC : Ultra-Low Power Atomic Clock
 NTP : Network Time Protocol

概要図

時刻精度と消費電力を両立した小型原子時計

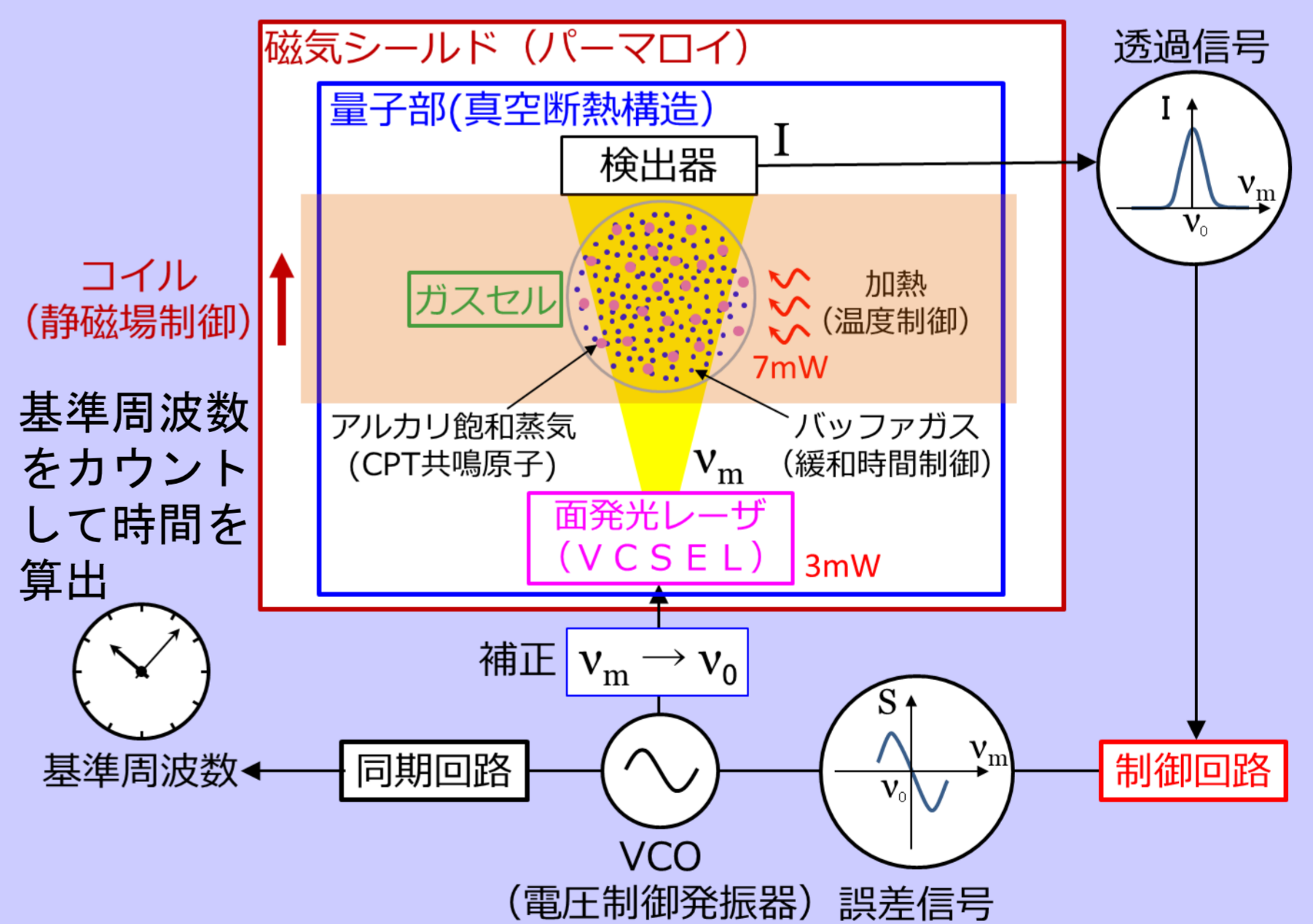
■時刻の高精度化

- 1) 混合バッファガス(温度依存性の低減)
- 2) 真空内でのガスセル中空保持(熱の移動低減)
- 3) 低透過率ガスセル(バッファガス圧変動抑制)
- 4) VCSELエージング処理(光強度の変動抑制 → ライトシフト低減)
- 5) ガスセル内静磁場制御(磁気シールド+磁場生成コイル → ゼーマンシフト固定)
- 6) 環境温度を基にした基準周波数の補正
- 7) デュアルガスによるバッファガス圧の可観測化と、それを基にした基準周波数の補正

■低消費電力化

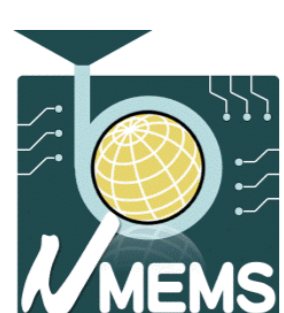
- 8) 低消費電力と低位相雑音を両立したCMOS集積化PLL回路
- 9) 小型ガスセル: $2 \times 2 \times 2 \text{mm}^3$ (内 $1.4 \times 1.4 \times 1.4 \text{mm}^3$)

アルカリ原子固有のCPT共鳴の周波数を利用して、高精度な周波数を作り出す仕組み



センサ端末同期用原子時計(ULPAC)

CPT : Coherent Population Trapping
 PLL : Phase Locked Loop
 VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting Laser



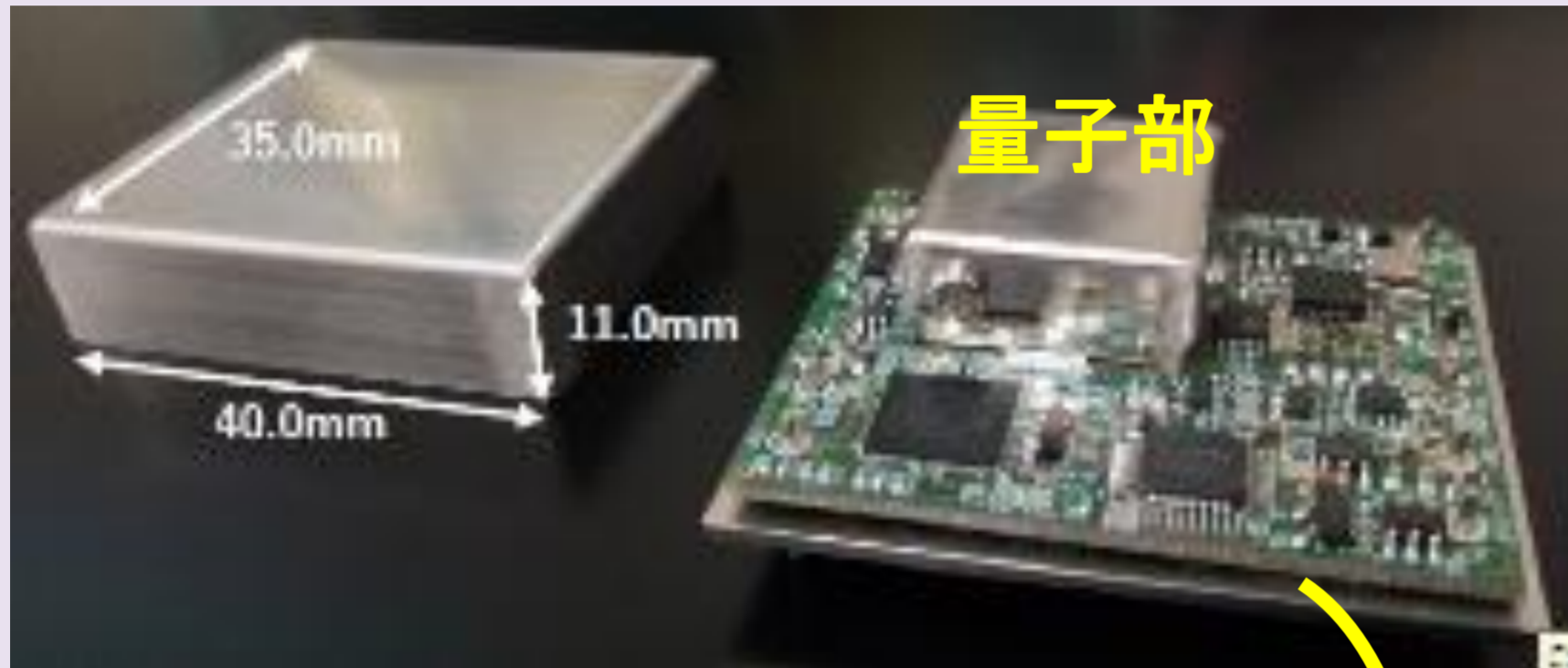
モニタリングシステムを革新する原子時計(2)

Atomic Clock Leading to Innovation of Monitoring System (2)

これまでの成果(H27年～)

TCXO : Temperature Compensated Crystal Oscillator
 PD : Photo Detector
 GPS : Global Positioning System

■原子時計の小型・低消費電力化と時刻精度保持期間の向上



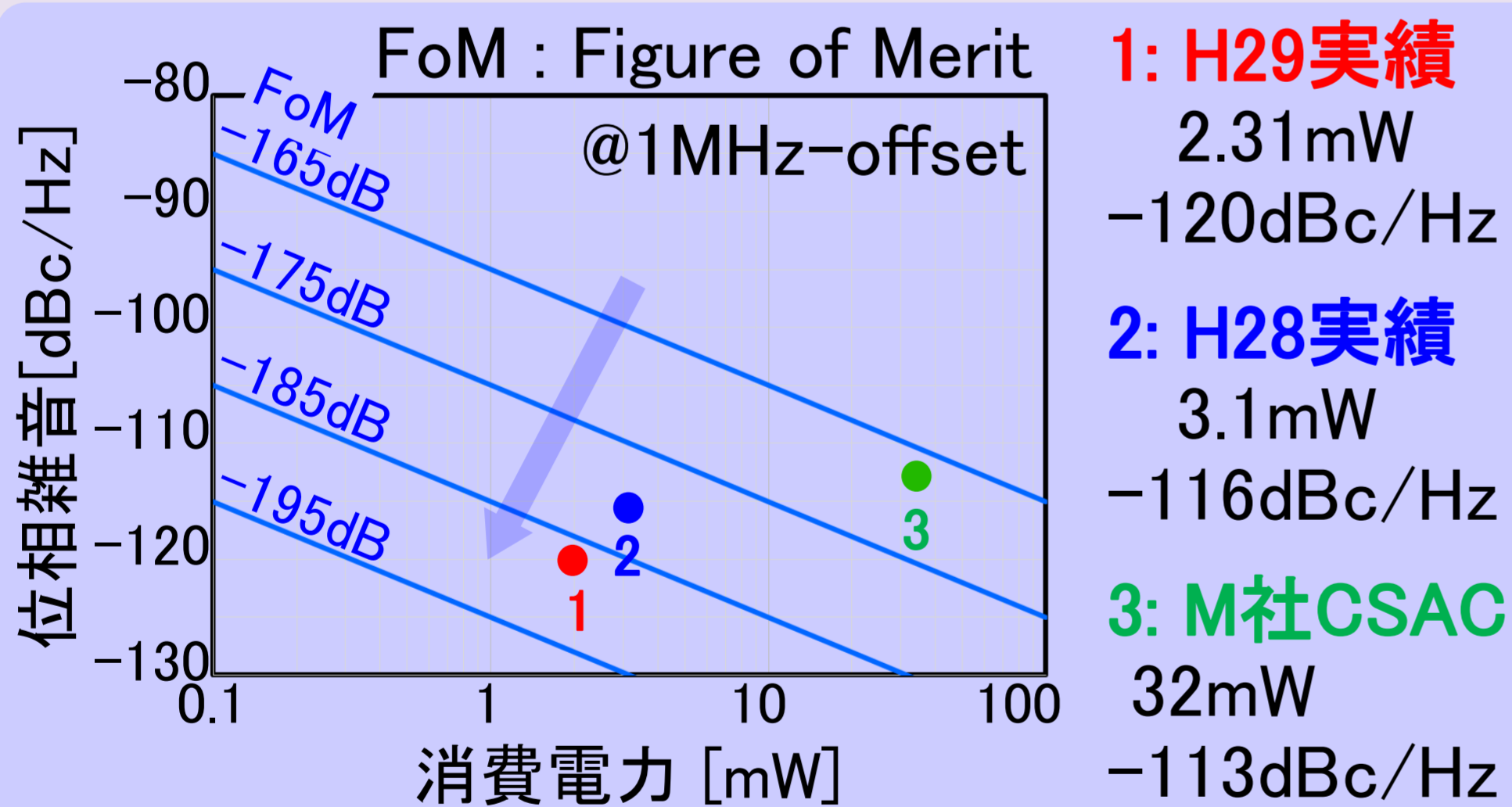
平成29年度原子時計プロト
 (40×35×11mm³)



分解能0.1μsで評価
 GPS (1PPS) 基準の原子時計評価装置

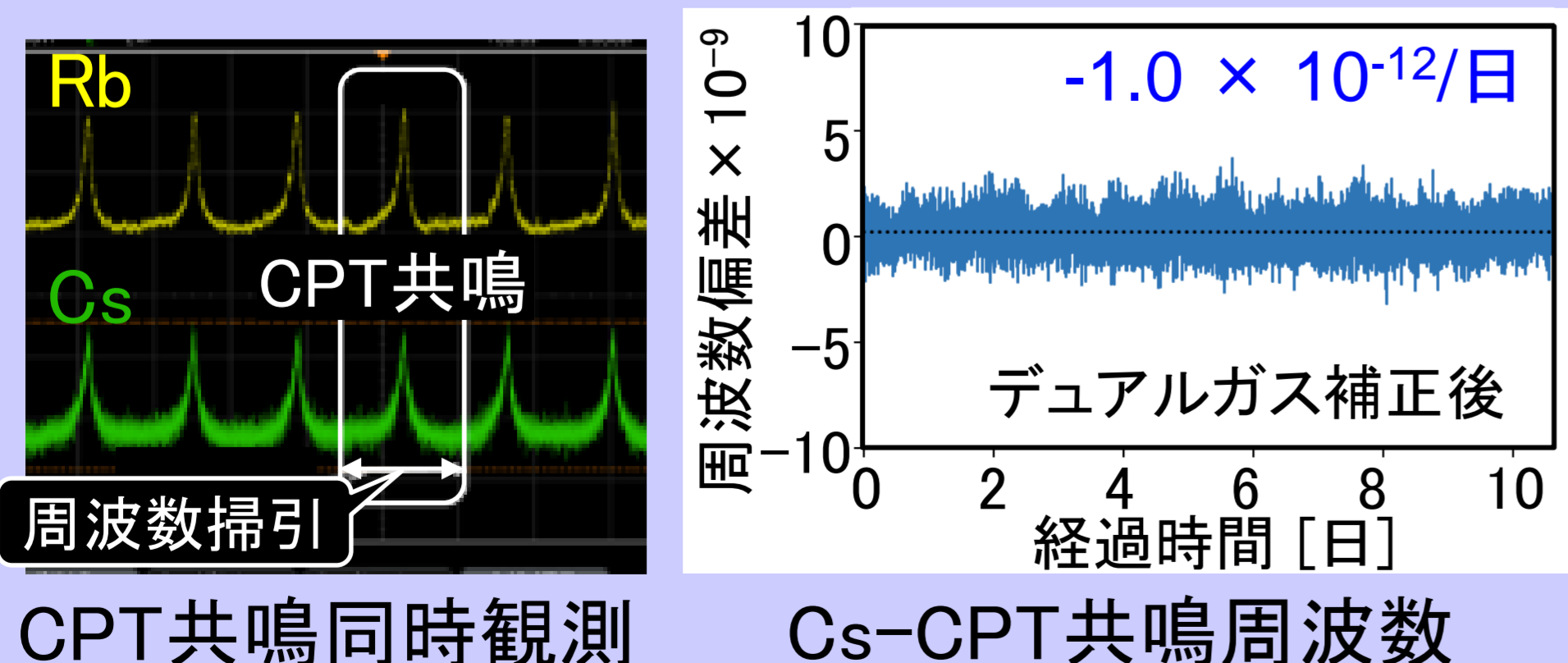
■極低消費電力CMOS集積化PLL回路

《低消費電力と低位相雑音を両立》



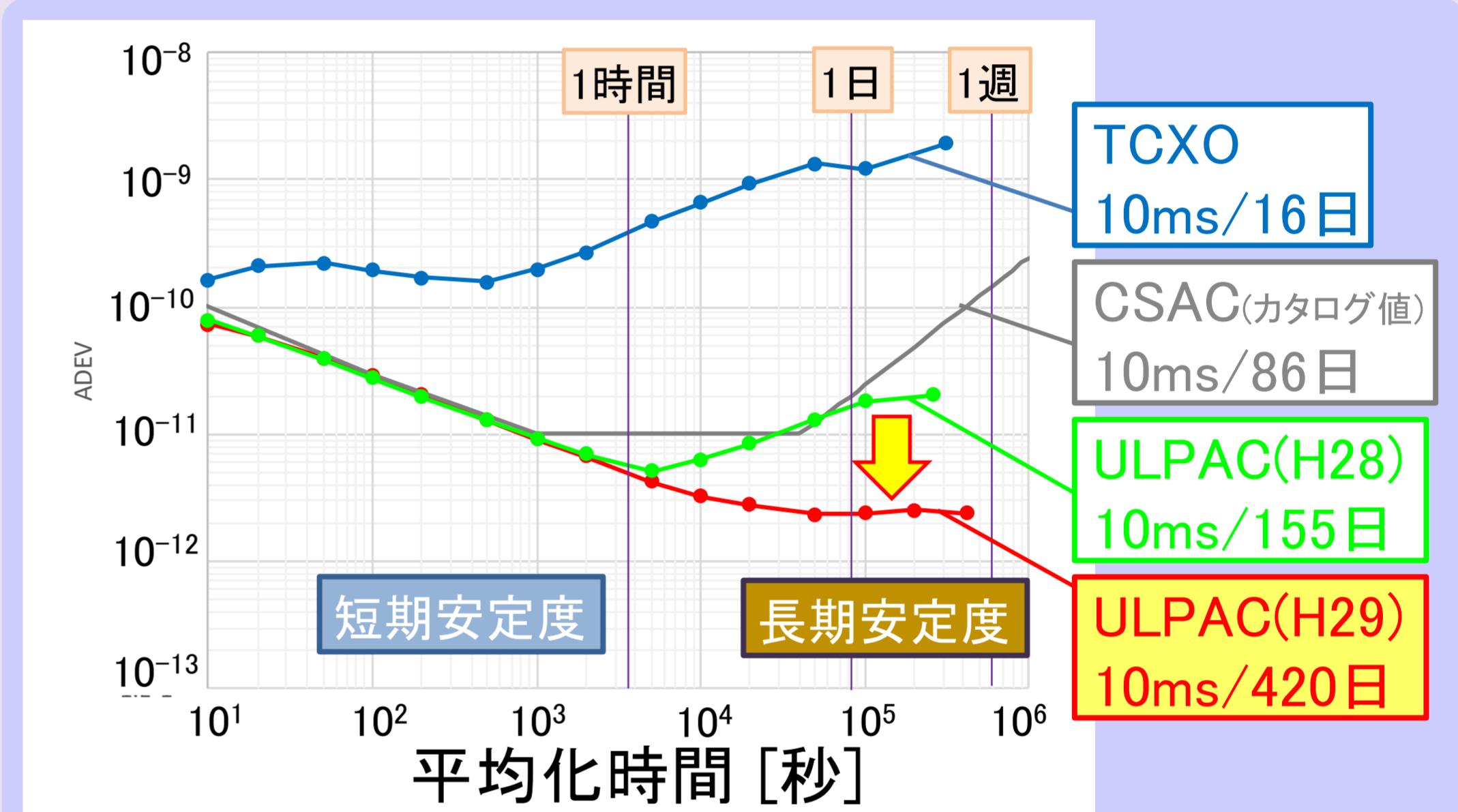
■Cs・Rb併用 デュアルガス補正法

《リアルタイム補正で8倍の時刻精度》



ULPACプロトタイプの開発目標

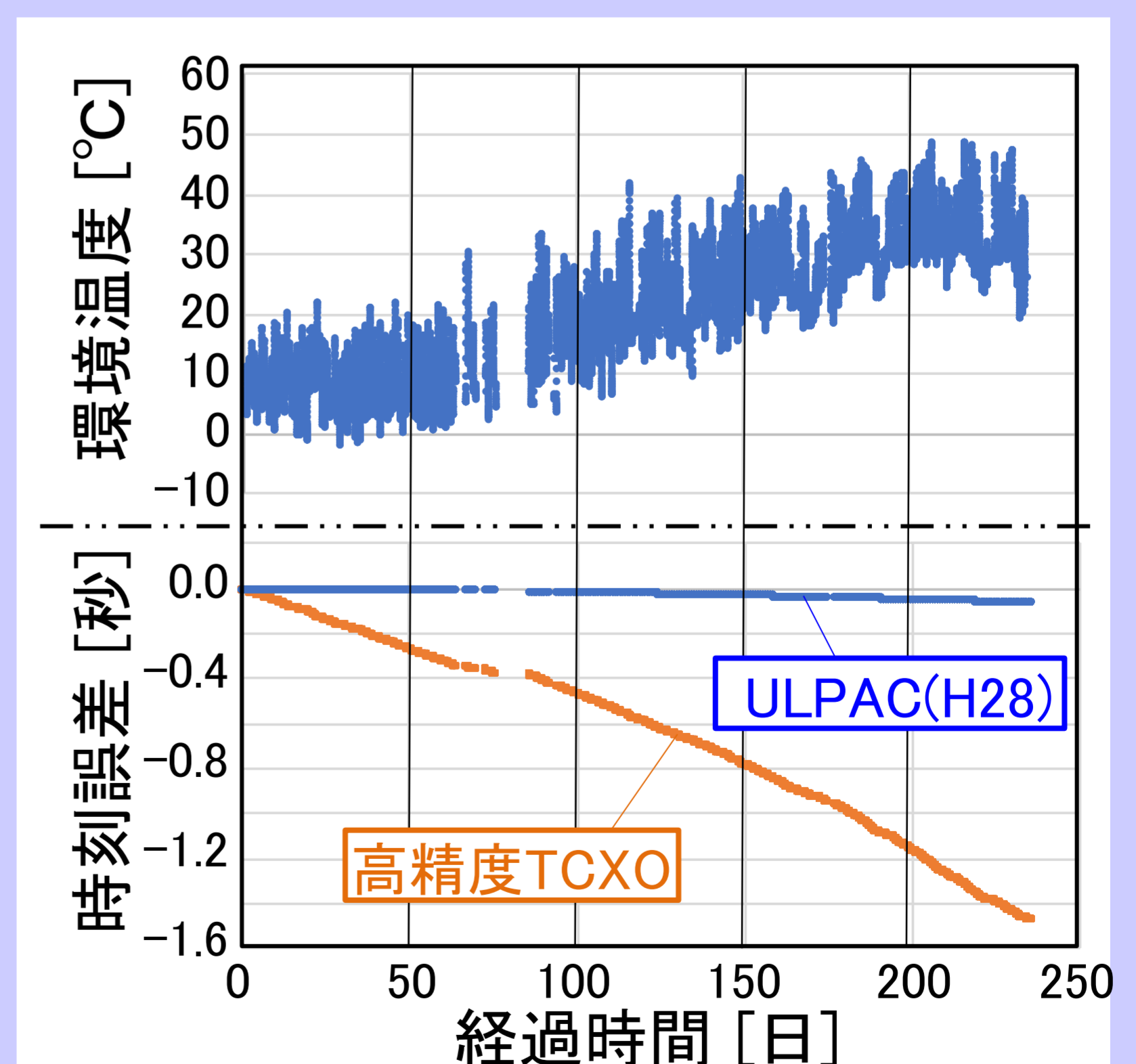
	H28年度目標 (実績)	H29年度目標 (実績)	H30年度目標
時刻精度	10ms/6カ月 (10ms/6カ月)	10ms/8カ月 (10ms/14カ月)	10ms/12カ月
消費電力	120mW (114mW)	90mW (75mW)	60mW
サイズ	40 × 40 × 18 mm ³	40 × 35 × 11 mm ³	30 × 30 × 11 mm ³



平成29年度原子時計プロトタイプのパフォーマンス

■実環境における検証

《GPSから取得する正確な時刻と比較検証》



屋外連続稼働(H29.12.27~H30.08.07)

