

研究開発プロジェクト成果報告会

Connected Industries推進に向けたMEMSセンシング & ネットワーク技術

セッション1

道路インフラモニタリングシステム(RIMS)の 研究開発

平成30年10月18日(木)

(技)NMEMS技術研究機構 インフラモニタリング研究所 所長／
(国)東京大学IRT研究機構 機構長 教授
下山 勲

対象とする社会課題

老朽化の進展



道路インフラの劣化

大型車両・過積載車両の増加



異常気象・地震による 災害の多発



維持管理・更新

平常時

劣化原因事象の監視

詳細点検必要箇所の抽出

劣化の発見、場所の特定

劣化進行状況の監視

補修優先順位の決定

補修効果の確認

非常時

災害発生時における迅速な状況把握

通行可否の迅速な判断

復旧優先順位の決定

現状

- H26年に道路法施行規則が一部改正され、道路構造物の近接目視点検が法制化👉でも大変

点検作業量の増大

点検困難場所存在

熟練点検員不足

点検・維持管理・更新予算不足

あいまいな目視判定・評価基準

内部の損傷・劣化が正確に把握出来ない

高性能・安価な新規デバイス及びモニタリングシステムの開発により
現状の課題を解決し、道路インフラの低コスト維持管理・更新を実現

・通常点検
+ 常時・継続モニタリング

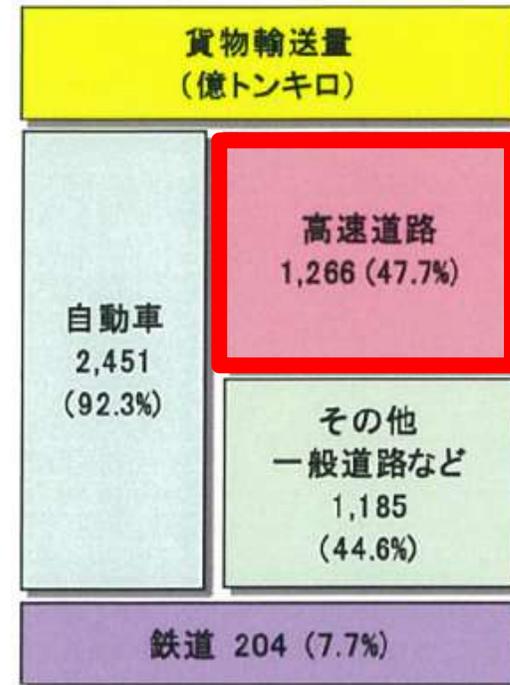
劣化・損傷診断による、
事後保全から予防保全へ

- 24時間モニタリングで現状の保守・点検作業を補完
→ 将来は 目視点検の不要化を目指す

- 近寄れなかった、見えなかった場所もモニタリング
・無線・自立電源・高耐久性パッケージ

- 道路インフラを一元管理
・多様なセンサをシームレスに統合する
インターフェースとネットワーク

- 高速道路で技術を高め一般道へ将来展開



出典: 高速道路便覧(平成 24 年度)

● 橋梁:

■ 老朽化の進展

○ NEXCO3社が管理する全橋梁数**16,112**橋中43%が30年以上経過

| <10年 | 10~20年 | 20~30年 | 30~40年 | 40~50年 | 50年< |
|------|--------|--------|--------|--------|------|
| 10% | 22% | 25% | 25% | 16% | 2% |

○ 橋長2m以上の橋梁は全国で**699,000**橋あり、その大半は市町村管理で平均年齢も35年以上になっている。

| 管理者 | 国 | 都道府県 | 政令都市 | 市町村 | 高速道路会社 |
|------|-----|------|------|-----|--------|
| 比率 | 4% | 19% | 7% | 68% | 2% |
| 平均年齢 | 35年 | 38年 | | 35年 | 29年 |



■ 法改正で5年に1回の近接目視による点検が義務付けされたが今後老朽化が加速する膨大な道路インフラを従来の点検手法で実施するのは困難

● 道路付帯構造物:

■ 環境条件等の変化で設計基準の見直し必要

○ 橋梁上の情報板は交通振動で想定寿命下回る可能性あり
 ・NEXCO中日本の橋梁上情報板：200面／3,000面
 ・NEXCO3社では：約1,000面／14,500面



■ 想定外外力や損傷の定量的な連続モニタリング必要

● 法面:

■ 異常気象により要注意箇所
10年前の2倍

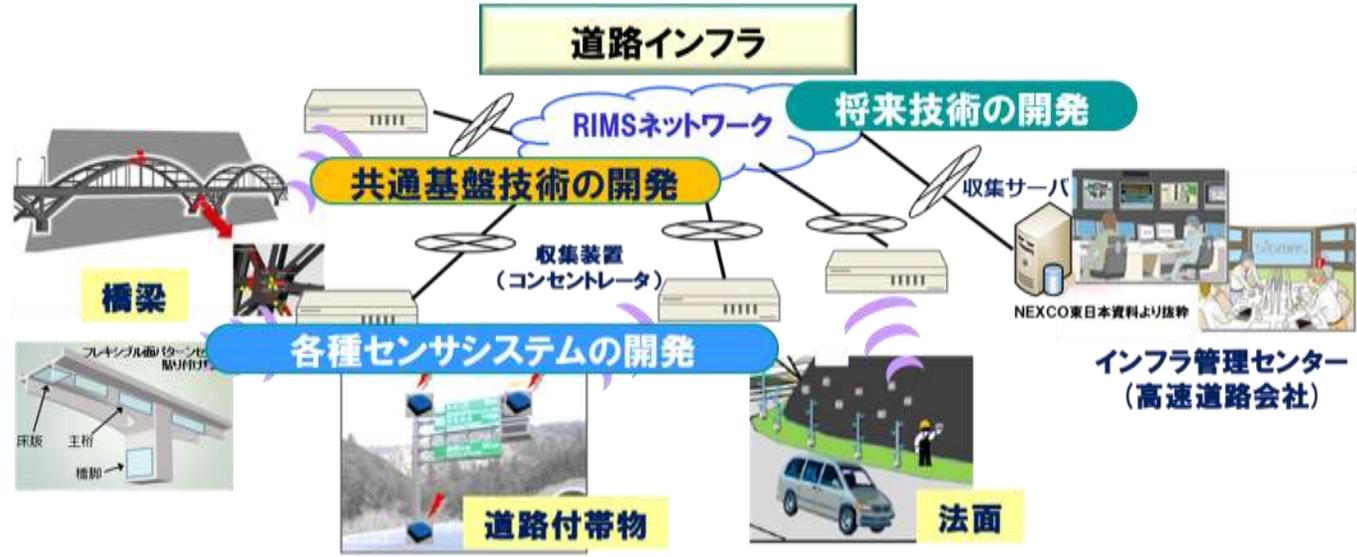
・要注意法面約2,500箇所／修繕予定法面117,606箇所

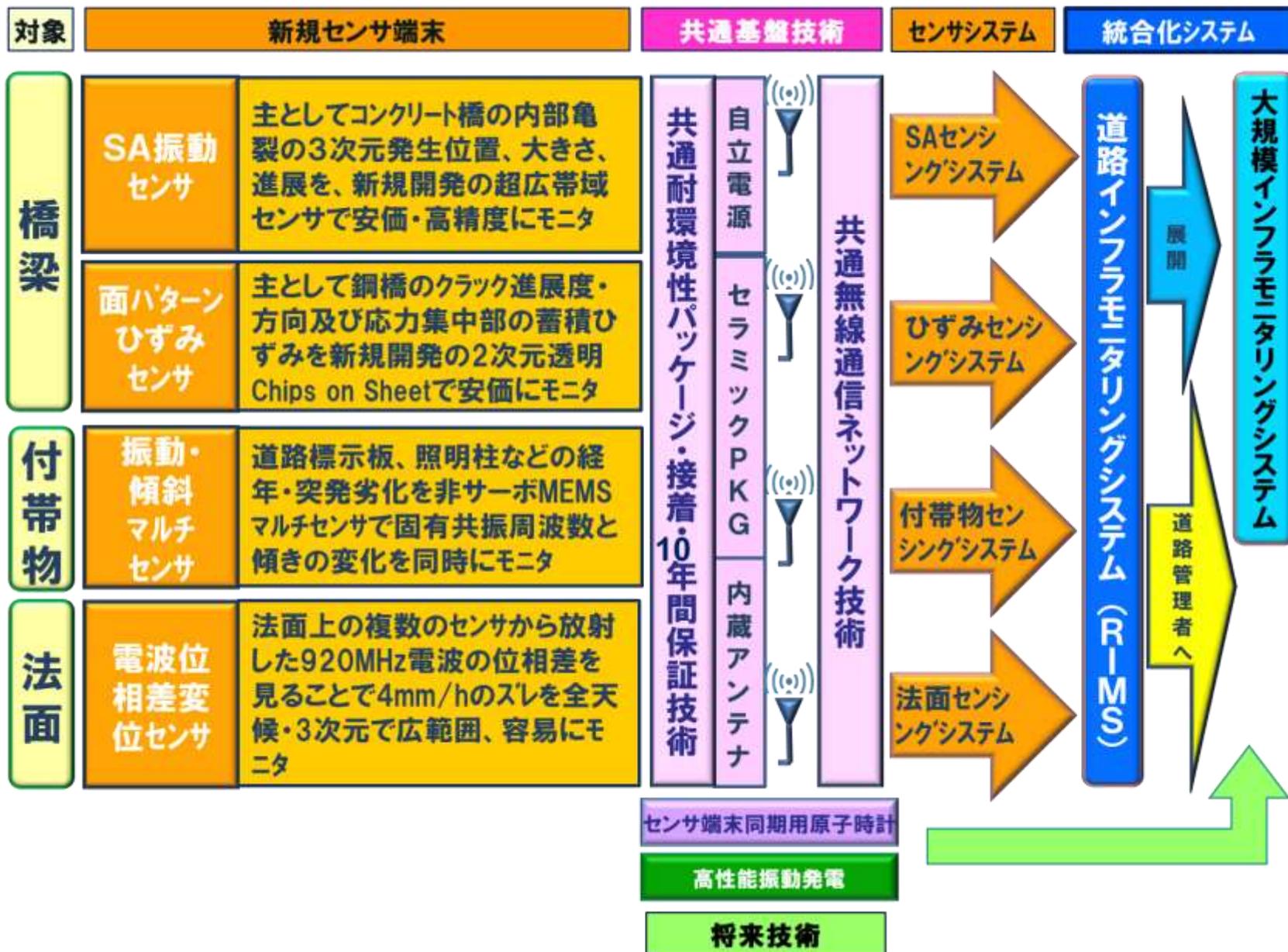


■ 安価で信頼性の高い連続モニタリングシステム必要

- ・ 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
- ・ 「橋梁センシングシステム」、「道路付帯物センシングシステム」、「法面センシングシステム」を開発
- ・ これらのシステムを統合し、道路インフラの状態をリアルタイムに、一元的に維持・管理できる「道路インフラモニタリングシステム（RIMS: Road Infrastructure Monitoring System）」を開発
- ・ ネットワーク技術、高耐久性のパッケージング技術に関しては共通化を図り、効率的な開発を行う
- ・ パッケージとして一般道への展開及び海外展開も容易となる。これは世界初の試みと考える
- ・ 将来技術として、センサ端末同期用原子時計の基盤技術及び高性能振動発電を開発
- ・ 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

大規模インフラ





- 役割分担を明確にした19機関の産官学連携体制（技術研究組合として実行）
- ネットワーク技術、パッケージング技術、信頼性保証技術の共通化による高い開発効率
- 主要高速道路会社参画でニーズに沿った速いP D C Aサイクル

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

(1-1) 橋梁

(1-1-1) スーパー
アコースティック
(振動)
(東芝、東大、京大)

(1-1-2) フレキシ
ブル面パターン
(ひずみ)
(産総研、大日本印刷)

(1-2) 道路付帯物 (傾き・振動)

(富士電機)

(1-3) 法面 (変位)

(三菱電機)

(2) 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PF (NTTデータ)

(2-2) 高耐久性パッケージング共通PF (MMC、日本ガイシ、大日本印刷、産総研)

(3) 共通実証・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)

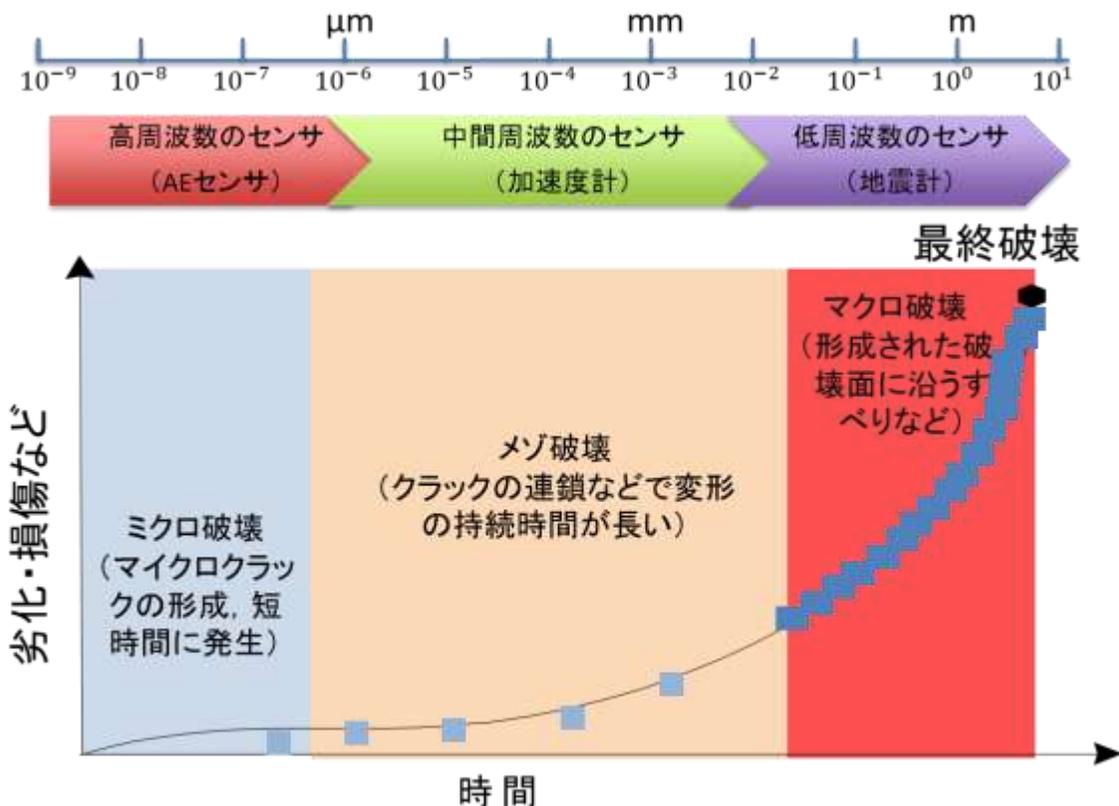
(4) 先導研究: センサ端末同期用原子時計 (産総研、リコー、MMC、京大、東工大、首都大東京)

(5) H29年度加速研究: 大規模インフラ向け高性能振動発電 (鷺宮製作所、静大、京大、東大、MMC)

| 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) | | | | 大規模インフラへ適用可能性検証 | 「本格実証実験完了」及び「大規模インフラへ適用可能性検証完了」 実証評価及び実用化研究 |
| (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) | | | | 実証評価及び実用化研究 | |
| (1-2) 道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発 | | | | | |
| (1-3) 法面変位センシングシステムの開発 | | | | | |
| (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 | | | | 大規模インフラへ適用可能性検証 | |
| (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 | | | | 実証評価及びデータベース構築 | |
| (2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発 | | | | | |
| (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 | | | | 省エネ効果検証 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) | | | | | 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) | | | | | 実証 |

研究開発の概要と差異化ポイント

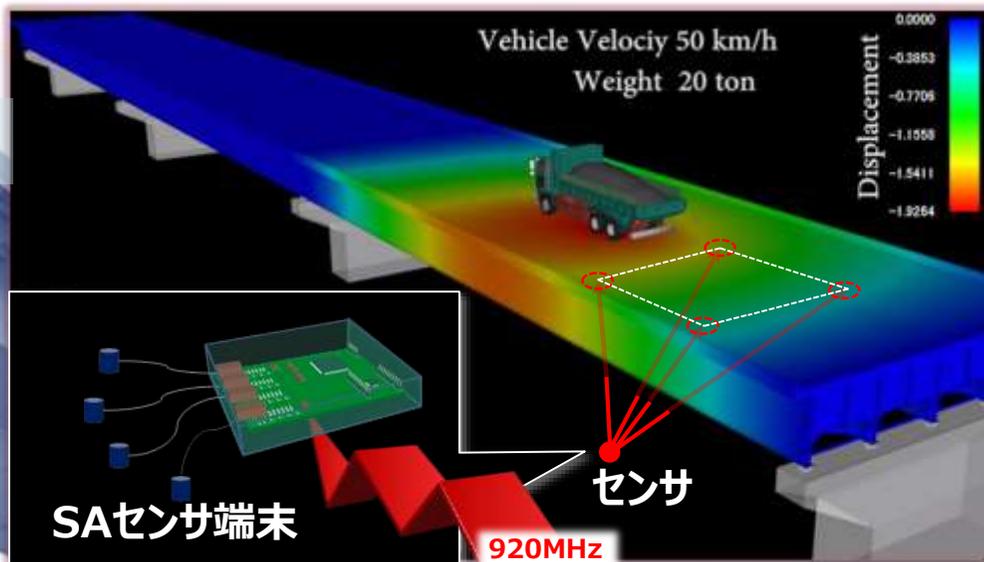
- 破壊のマルチスケール性（右図）からあらゆる劣化のステージに対応するには数Hz～1MHzの帯域のセンサが必要
- SAセンサを活用した、橋梁の健全状態から初期劣化（マイクロ破壊：10kHz～1MHz）
中間劣化（メゾ破壊：数100Hz）
限界劣化（マクロ破壊：数Hz）
までを一個のセンサで検出できるセンサデバイスの構築
- SAセンサの適用対象材料は、土、岩、組積造、コンクリート、鋼、複合材料など広範にわたり、大規模インフラの長大橋はもとより、橋梁以外にも応用展開が期待できる（構造物聴診器）



これまでの成果

橋梁モニタリングシステムの実現イメージ

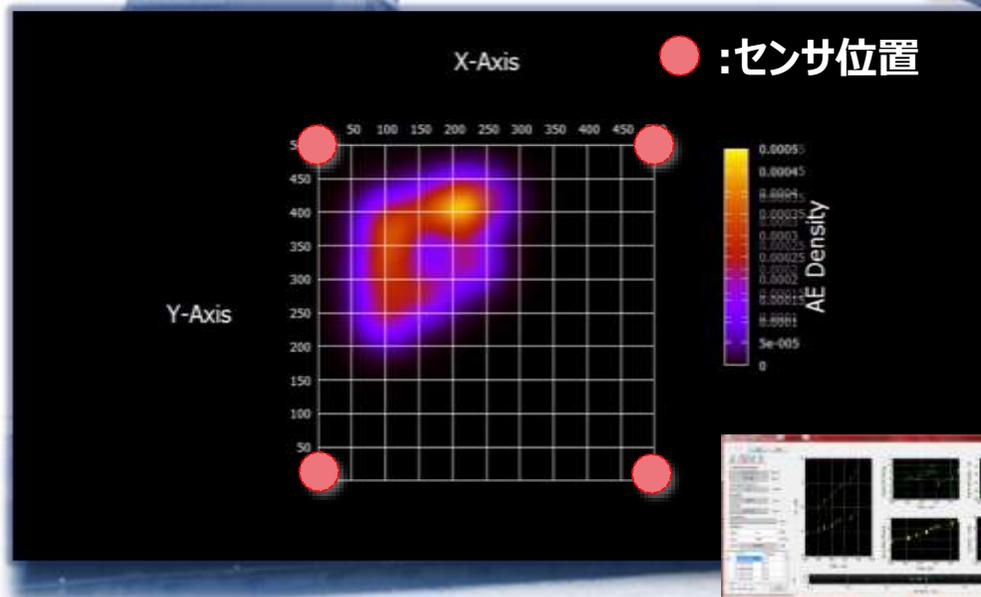
床版の劣化状況を遠隔監視



SAセンサ端末

920MHz Wireless

集約装置 (中継)



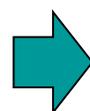
サーバ

3G

これまでの成果

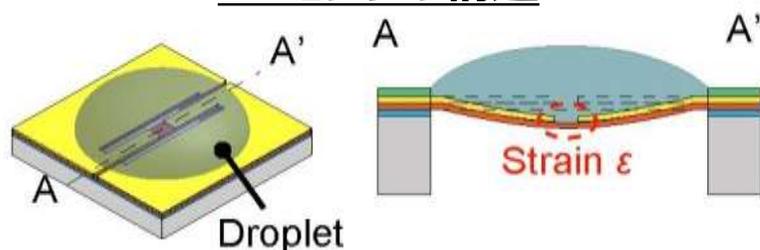
SAセンサデバイスの開発

課題：破壊のマルチスケール性からあらゆる劣化の状態に対応するには数Hz～1MHzの帯域のセンサが必要

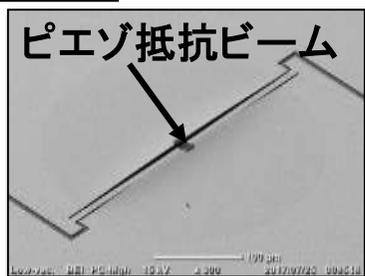
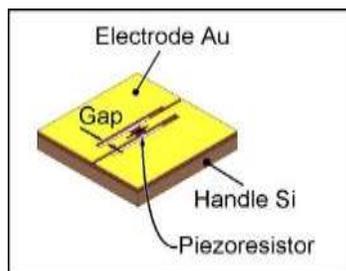


液体/ピエゾ抵抗ビーム/空気の構造で1Hz～1MHzの帯域の振動を計測可能なセンサを実現した

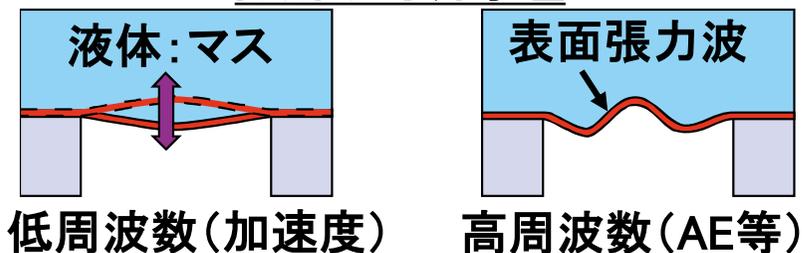
SAセンサの構造



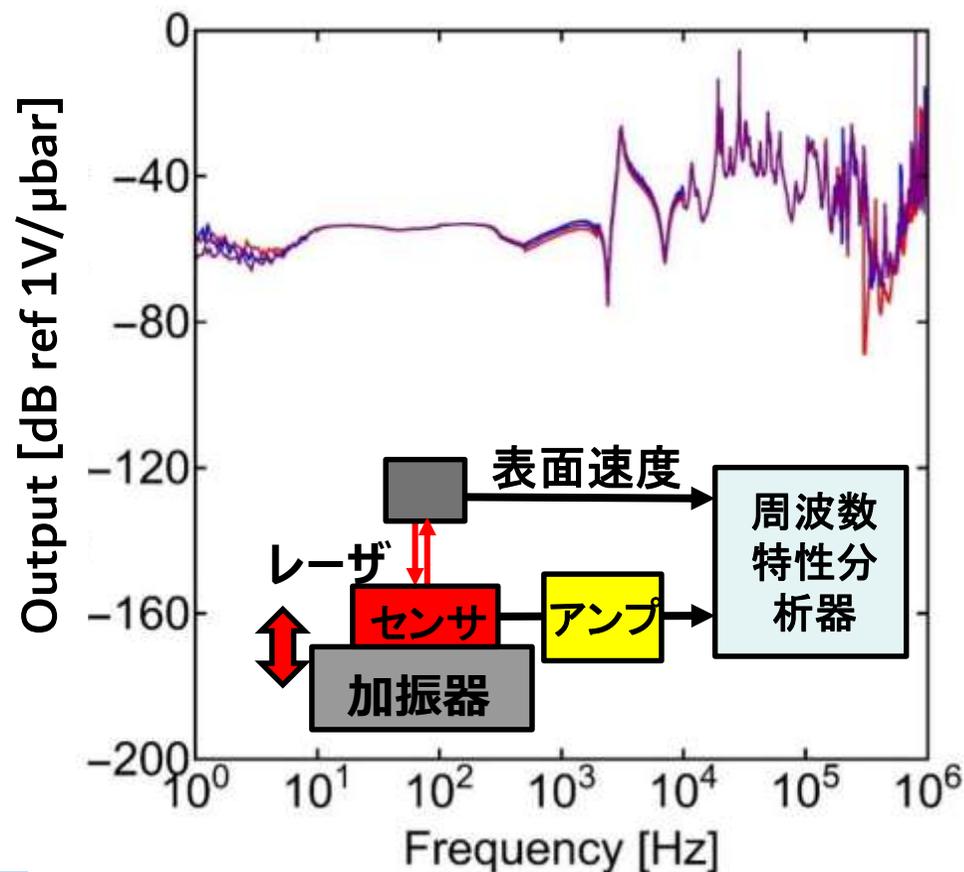
振動検出部



振動の計測原理



試作したセンサの周波数応答特性

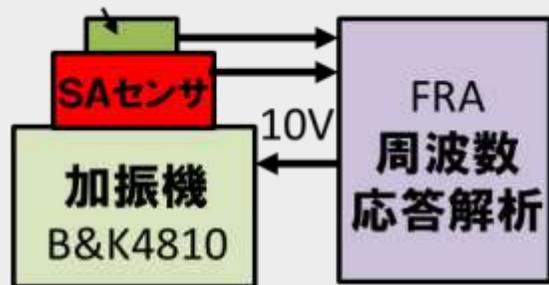


これまでの成果

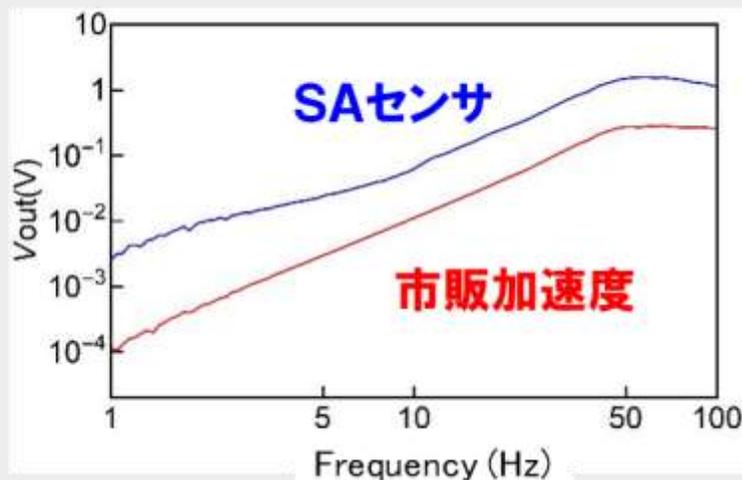
SAセンサデバイスの開発

市販加速度センサとの比較

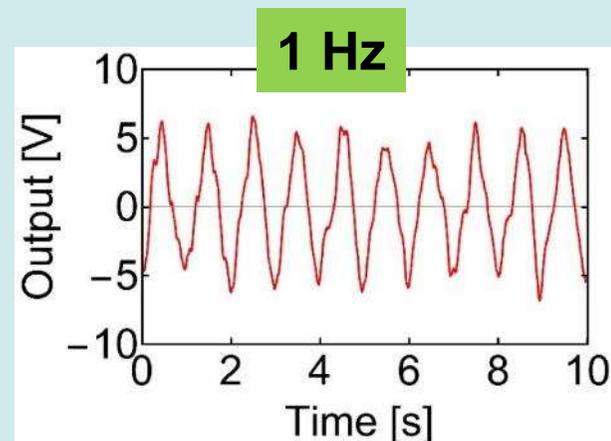
(ADXL354)



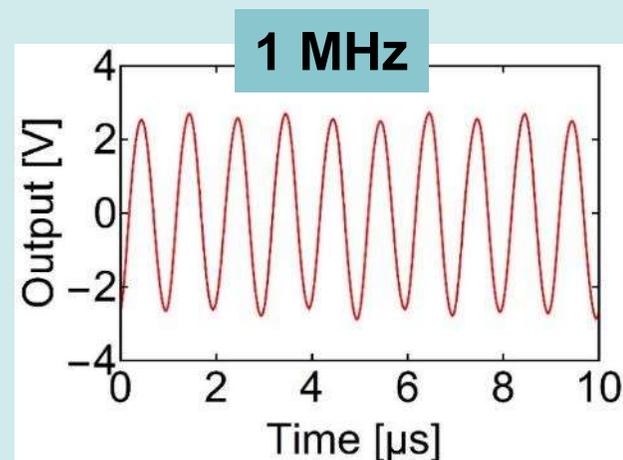
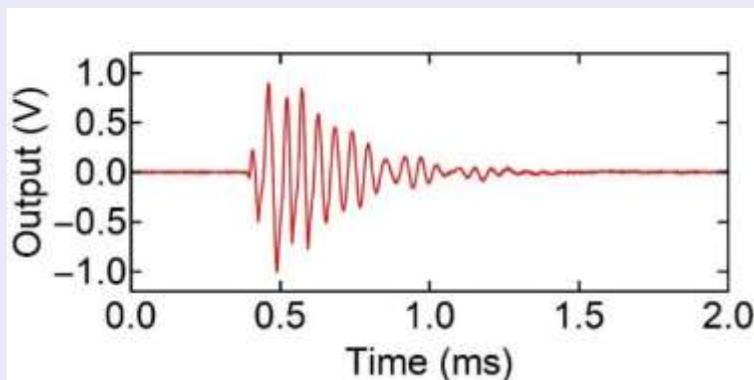
ADXL354感度: 100mV/g
SAセンサのアンプ: 5000倍



実測波形



PLBテストで実測したAE波形



これまでの成果

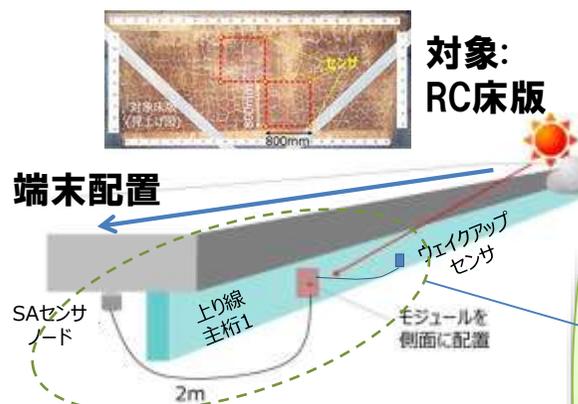
RC床版の状態監視システム

橋梁RC床版にSAセンサを設置し、イベントドリブン動作による監視システムの実証実験を行う。得られたデータから床版の内部損傷分析を行なう。

実証場所：高速道路橋（A橋：RC床版鋼鈹桁橋）

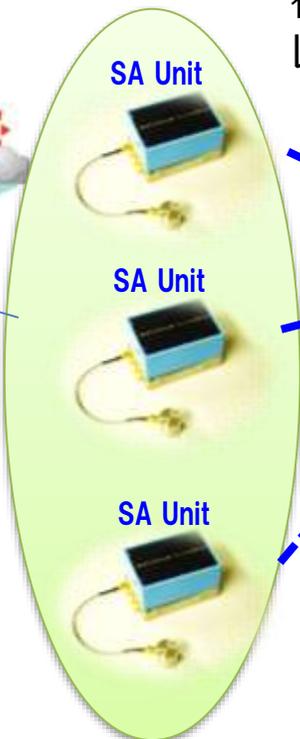
対象箇所：RC床版（下面にセンサ設置）

状況：実証実験実施中



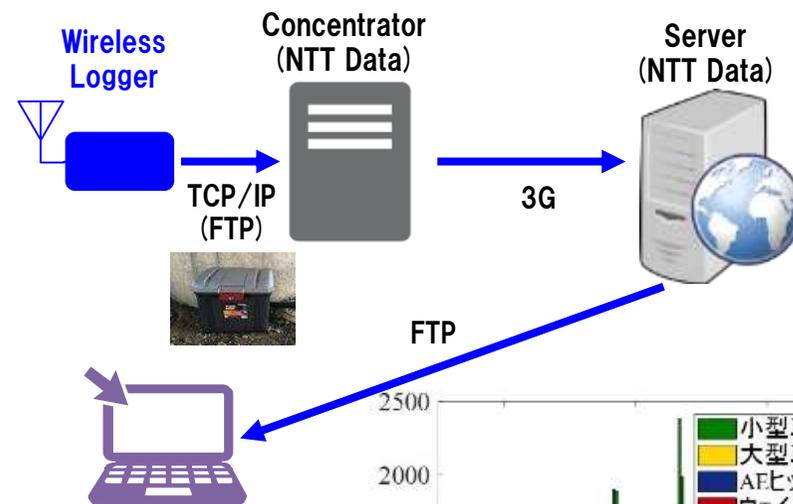
イベントドリブン計測

大型車通過(イベント)時起床し、計測



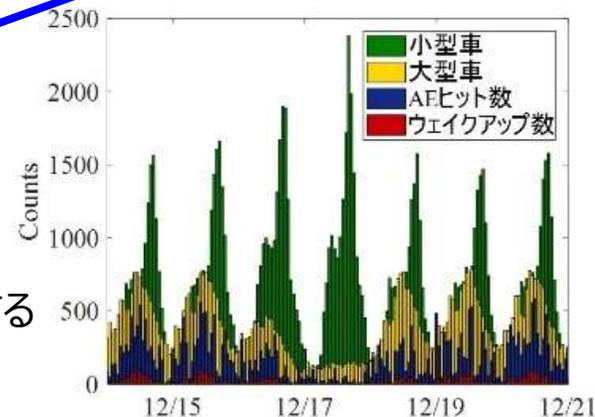
データの流れ

複数端末のデータを無線で1台のロガーに集約。コンセントレータを介してサーバへ送信。遠隔監視体制を確立。



交通量と起動データ

大型車に反応して起動・計測する所望の動作の実現を確認。



これまでの成果

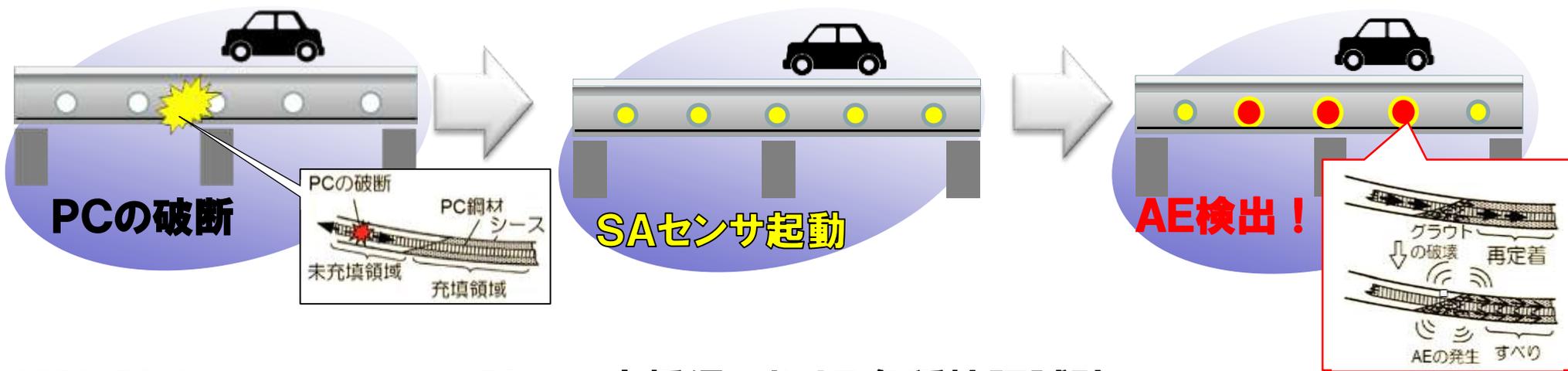
PC橋梁の状態監視システム

PC鋼材破断をトリガー信号として、SAセンサを計測状態とし、その後には生じるグラウトの破壊や再定着から生じるAEをSAセンサにより検知することにより、損傷箇所を特定。

実証場所：西日本の高速道路橋(B橋：5径間連続PC箱桁橋)

対象箇所：箱桁内PC鋼材埋設部

状況：実証実験実施中



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
- ・ウェイクアップの挙動確認



これまでの成果

検知対象AE



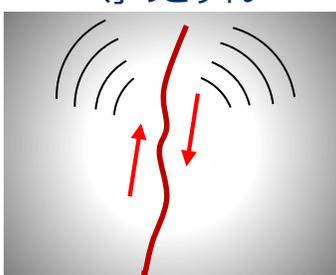
1次AE

き裂の進展や
新たなき裂の発生



2次AE

既存のひび割れ
等のこすれ

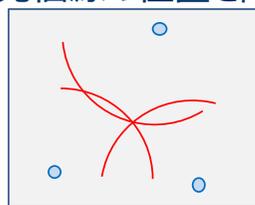


健全性定量評価手法の開発

解析手法

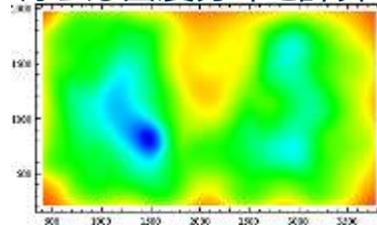
AE源位置標定

複数センサに信号が到達する時間差
から発信源の位置を同定



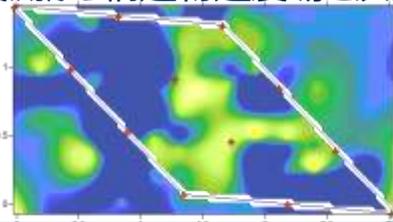
AE密度分布

周波数フィルタリング等によりノイズ
除去し密度分布を計算



弾性波速度

発信源から各センサへの到達時間の
実測から構造物速度場を決定

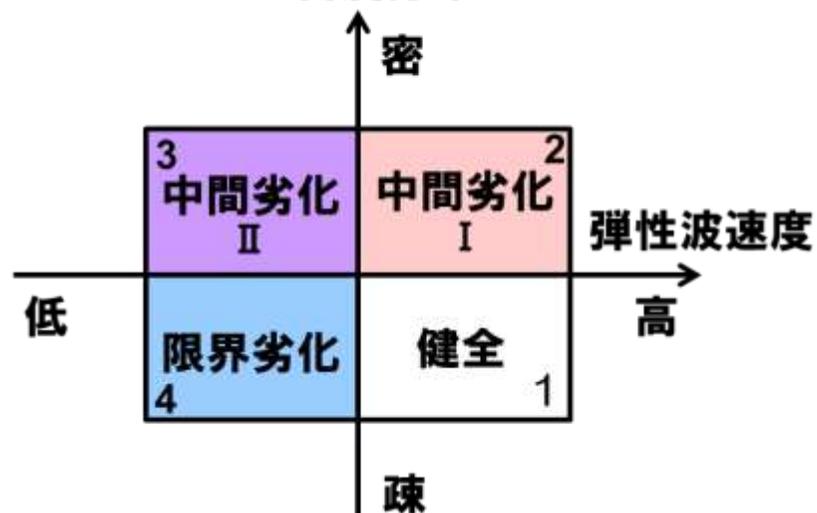


床版内部損傷の程度を定量化・可視化

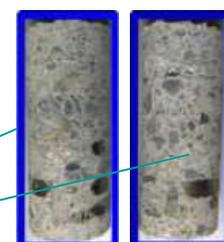
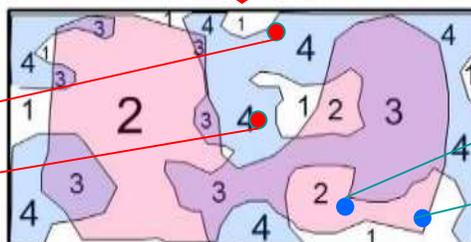
評価

内部損傷評価

AE密度分布



◆採取されたコア
ステージ4



◆採取されたコア
ステージ2

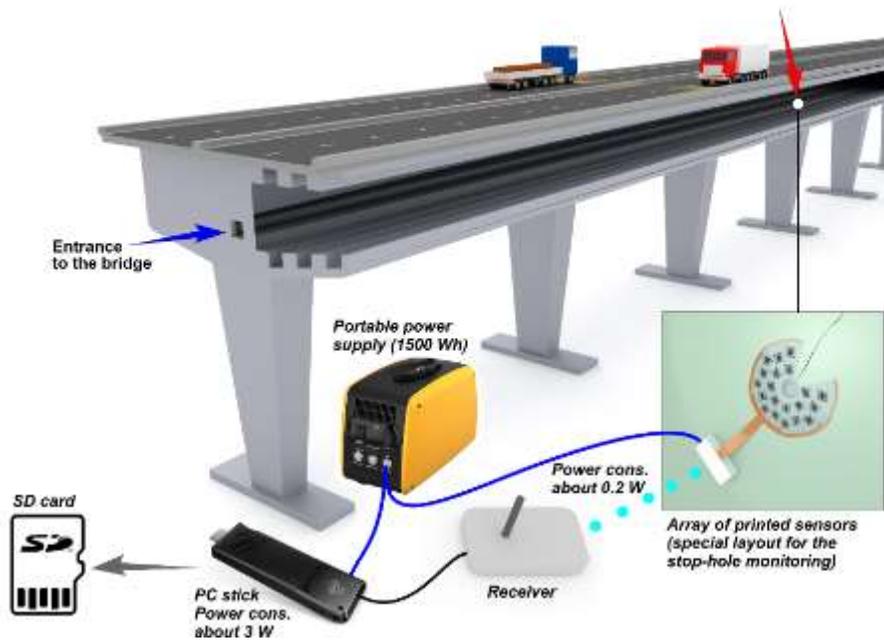
研究開発の概要と差異化ポイント(ひずみ分布センサシートと測定システムの開発)

社会課題と現状

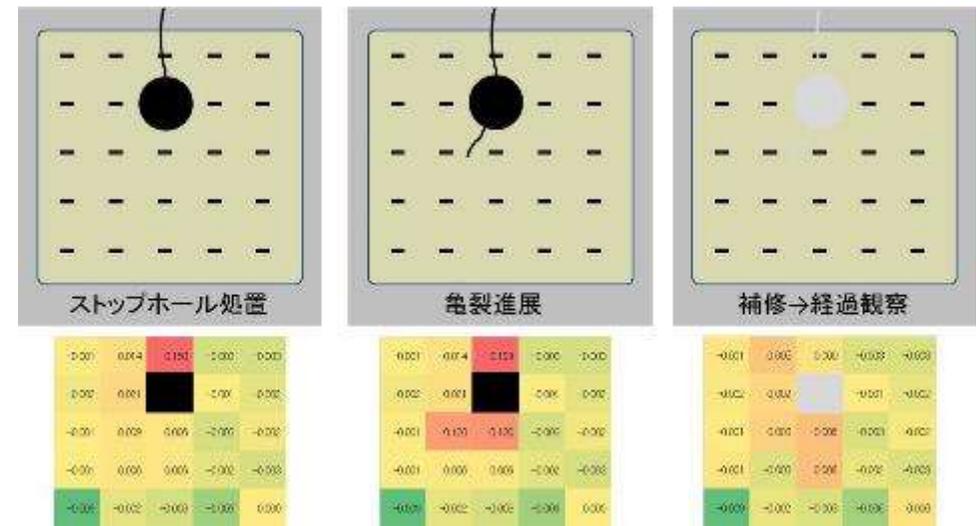
阪神高速だけでも疲労亀裂が5000箇所以上発生しており、作業人員・費用が不足
応急処置、当て板、補修溶接等の補修を一気に実施できず点検も難しい

解決策：ひずみ分布測定により鋼橋亀裂の進展をモニタリング

対象・場面：鋼橋のストップホール周囲のひずみ分布を測定することで亀裂進展をモニタリング



箱桁内ストップホール処置箇所への
フレキシブル面パターンセンサシステムの設置

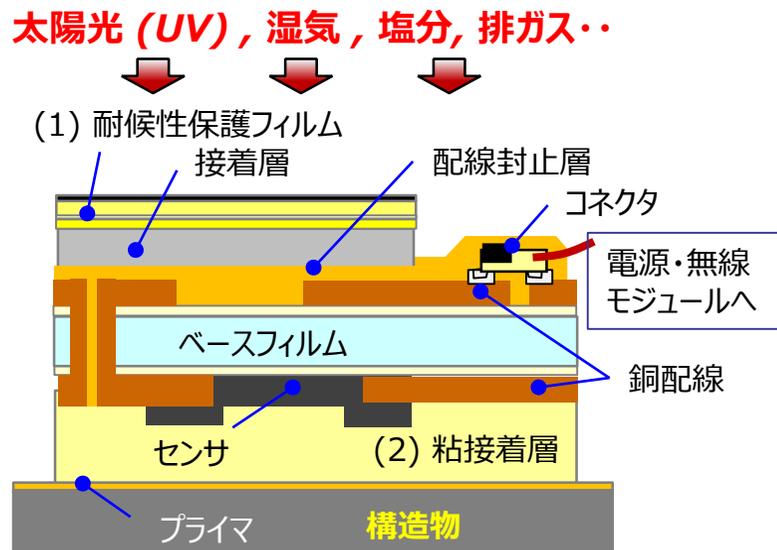


- 1 : ストップホール処置後にセンサシートを貼りつけ
- 2 : 亀裂進展によりひずみ分布に変化→補修
- 3 : 補修後再度貼り付けて経過観察

研究開発の概要と差異化ポイント(高耐候性保護フィルムと施工方法)

課題

プラスチックシートや接着材の屋外環境耐久性 (10年以上)、簡易的な施工方法



貼った後も、ひびの目視点検ができる

フレキシブル面パターンセンサの特長

- ・屋外環境10年相当以上の耐久性
- ・下地の目視点検を可能とする透明性
- ・接着耐久性と簡単施工性

(1) 高耐候性保護フィルムの開発

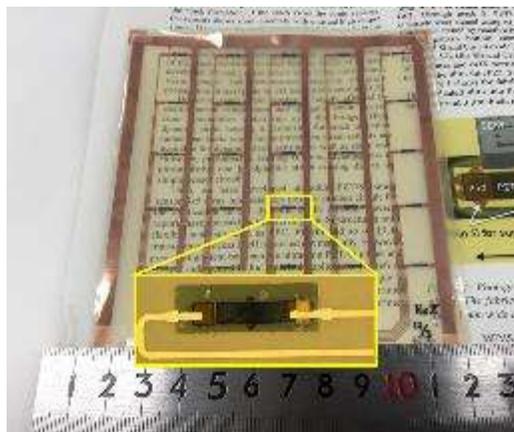
外部環境から、センサやフィルム部材を守るため、UVカット、水蒸気バリア性を有する積層構造のフィルム部材を開発

(2) 耐久性と簡単施工を両立する粘接着シート貼付技術の開発

- ・屋外使用10年以上に耐える接着耐久性の実現
- ・熟練技術や大掛かりな設置用機材を必要としない
簡単施工の実現

これまでの成果

ひずみセンサアレイシートの開発



極薄MEMS-PZT/Siタイプ



グラファイト印刷タイプ

高密度・大面積ひずみセンサアレイ

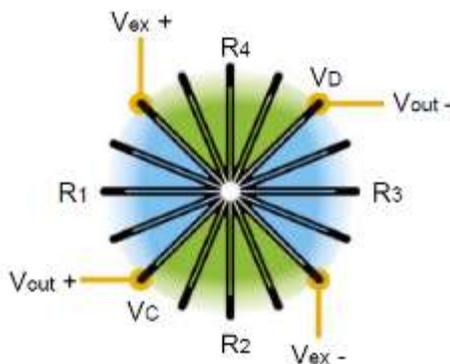
亀裂・クラックがどの方向に進展しても確実に検知する密度でセンサを配置可能

低コスト 2000円/100cm²

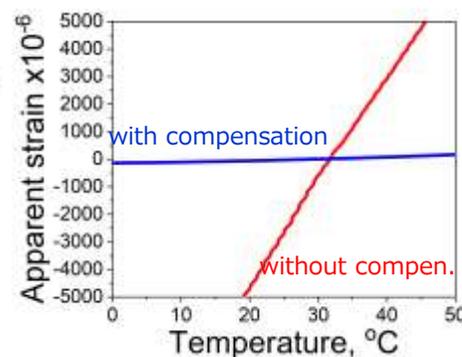
グラファイトインク印刷による一括形成
(同面積の箔ひずみセンサの1/20)

温度ドリフト低減 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$

フルブリッジ構造による温度補償により、
クラック検出に必要な感度を実現
(温度補償無しだと $340 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)



フルブリッジ構造による温度ドリフト低減

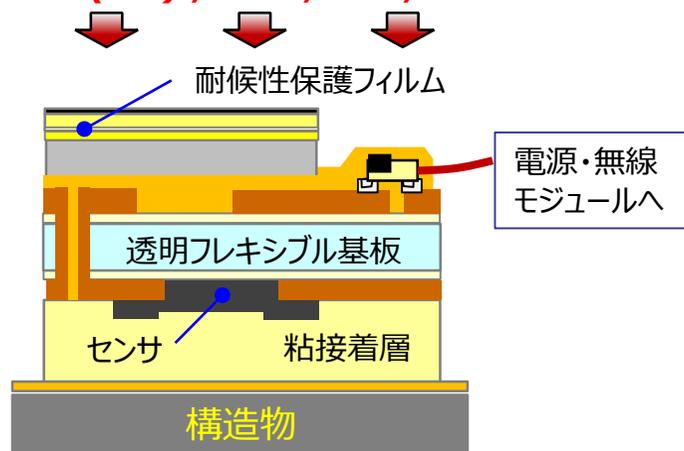


| | 大面積化 高密度化 | コスト 25センサ /100cm ² | センサ 耐久性 | 温度 ドリフト | 感度 |
|----------------|--------------|-------------------------------------|-------------|------------|------|
| 箔エッチング (市販) | × | 100000円 | 2年 | ◎ | 1με |
| PZT/Si MEMS | ○ | 20000円 | 10年 保護層有 | ◎ | 1με |
| グラファイト 印刷 | ◎ | 2000円 | 10年 保護層有 | ○ | 10με |

ひずみセンサを高密度配置可能で低コストなグラファイト印刷ひずみセンサアレイシートを開発

これまでの成果

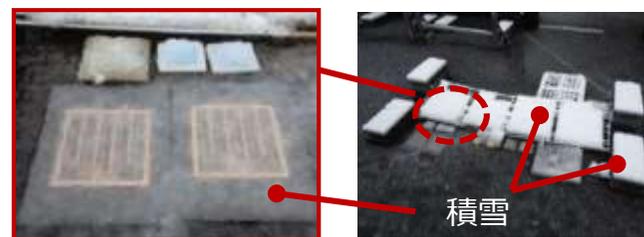
太陽光 (UV), 湿気, 塩分, 排ガス...



高架橋実証試験(コンクリート橋脚貼付)



高温多湿・高塩分の腐食促進環境暴露試験



冬季低温環境暴露試験



「貼るだけ」施工の様子

作製技術と施工技術の開発

● 耐候性保護フィルム

● UV光 99.6% 以上カット

10年以上の太陽光照射によるフィルム部材の劣化を防止

● 水蒸気透過率 0.1g/m²・day以下を実現

太陽電池パネルバックシート同等レベルの水蒸気バリア性

● 耐久性と簡単施工を両立する粘接着シート貼付技術

● 温度サイクル-40~85℃×200cycで剥れなどの異常なし

実環境で一日に受ける温度ストレスΔ60℃ (20~80℃)

の10年分に相当

● 屋外暴露促進環境 (西表島) にて、約2年間の暴露に耐えることを確認

温度、湿度、塩分、日光など、複合環境での耐久性を確認

● 簡単施工性

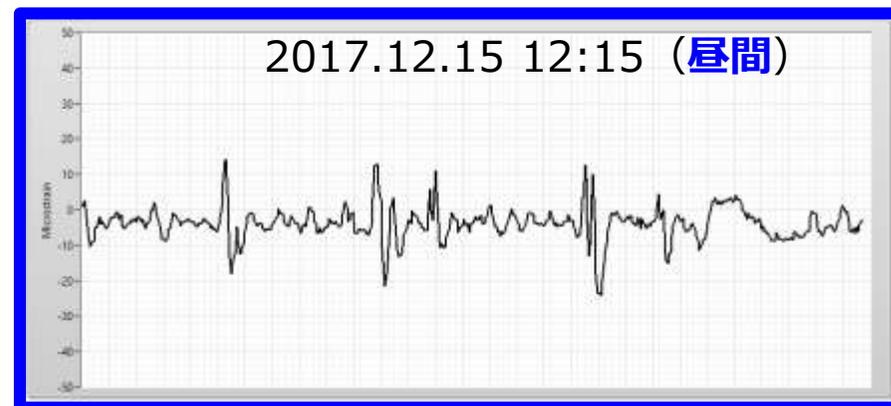
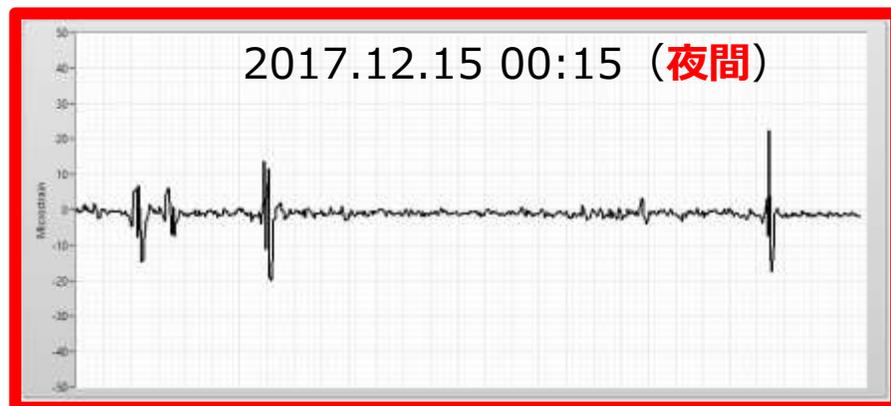
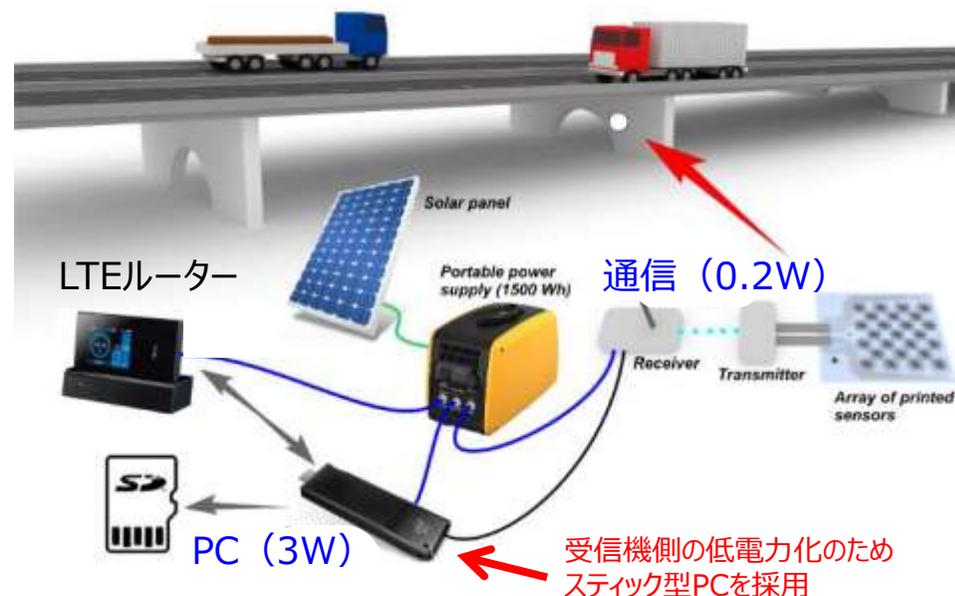
ボルト固定など従来設置工法と比較して、構造物を傷めず、「貼るだけ」の簡単施工を実現

これまでの成果

実証試験用システムの開発

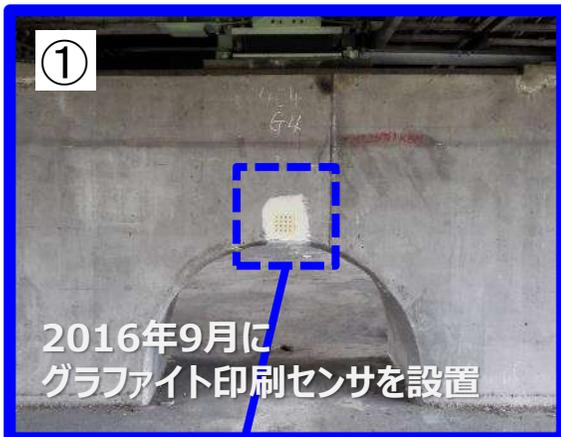
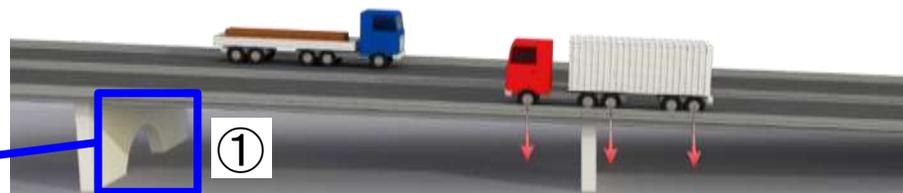
実証実験で明らかになったこと

- 実証実験では30分間隔で1分間測定し送信
700Whのバッテリーで70hの測定が可能
→ システムの消費電力は10W
- 最大ひずみは30meで、過去の計測結果と同等
→ システムは正常動作している
- 交通量が多い昼間は橋の振動成分が重畳
→ 橋の健全性評価は夜間が適している



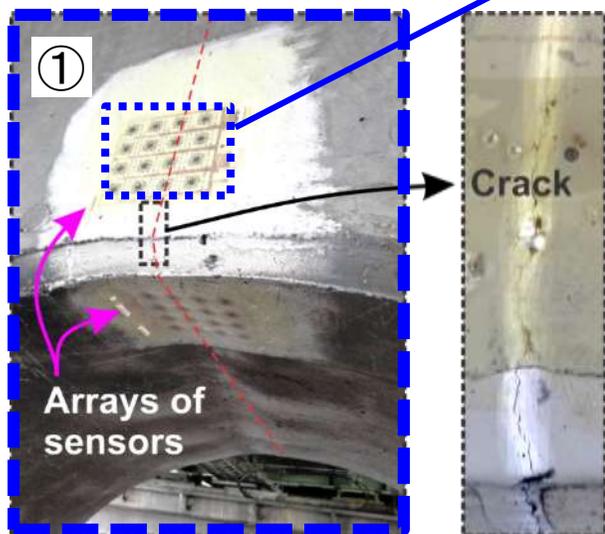
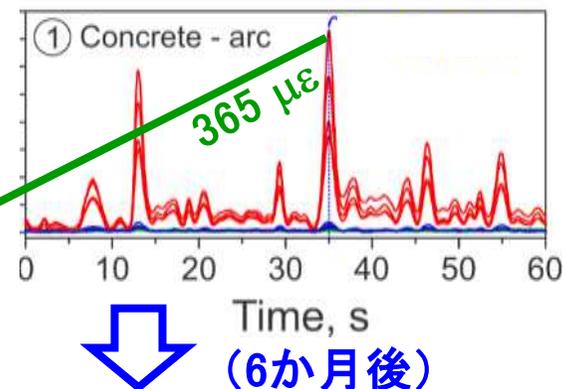
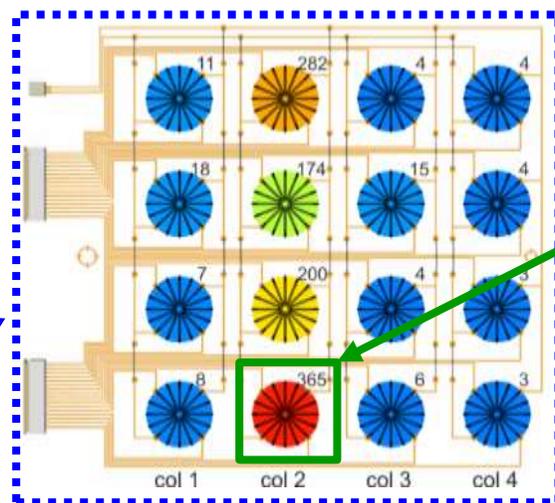
これまでの成果

実証現場での耐久性評価

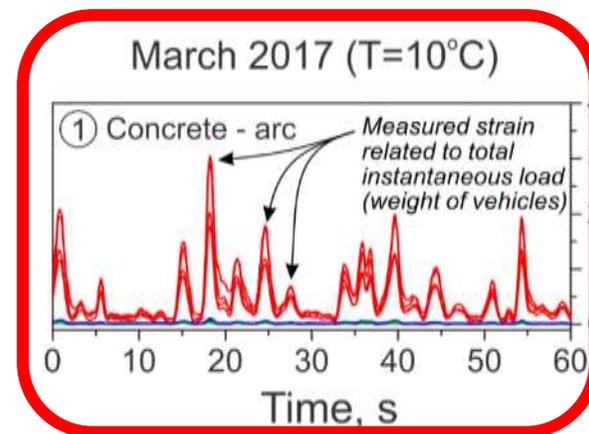


亀裂上のひずみは正常比で10倍以上

September 2016 (T=30°C)



耐候性保護層なしで150万台の車両が通過も感度に異常なし!



耐候性保護層で数年レベルの耐久性は十分確保可能

D. Zymelka et al.,
Smart Mater. Struct. 26 (2017) 105040

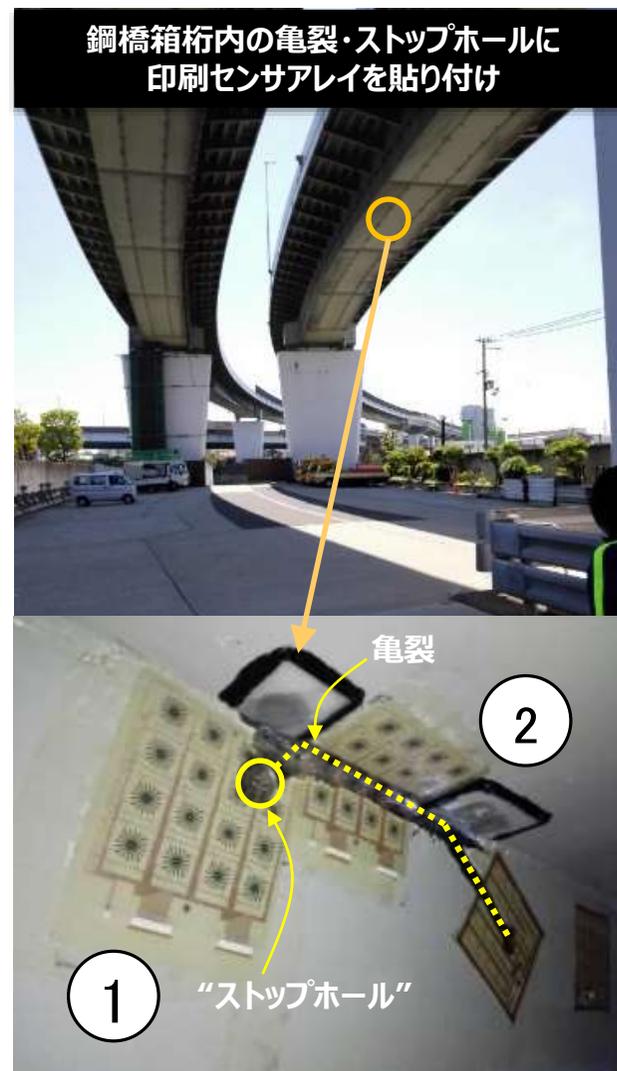
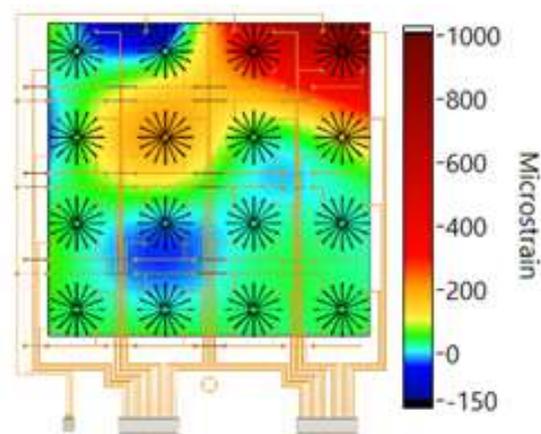
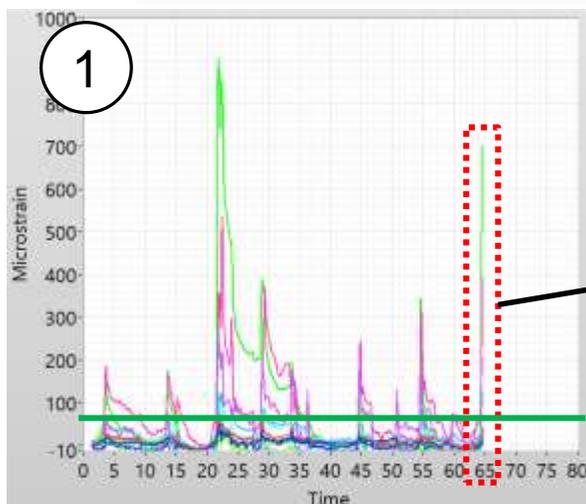
これまでの成果

亀裂・ストップホール実証試験

鋼橋箱桁内の亀裂・ストップホール直上2箇所印刷センサアレイを貼り付けた

- 亀裂・ストップホール周辺のひずみの大きさ($\sim 900\mu\epsilon$)を測定した。ひずみは以前に予備実験で測定したコンクリート橋脚の亀裂部での値より3倍程度大きい。
- ひずみ分布表示により、亀裂やストップホールの可視化に成功した。ストップホールからの亀裂進展の経時変化も等システムにより検出可能と考えられる。

亀裂・ストップホール周辺のひずみ分布測定結果



研究開発の概要と差異化ポイント

◆ 開発の背景

- 付帯設備の老朽化進展と技術者不足
日常点検 目視による異常な揺れや変形の確認
⇒センシングシステムによる点検業務の効率化
判定の定量化、状態変化の常時監視

◆ 開発の目的

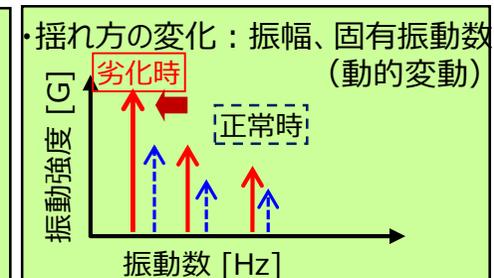
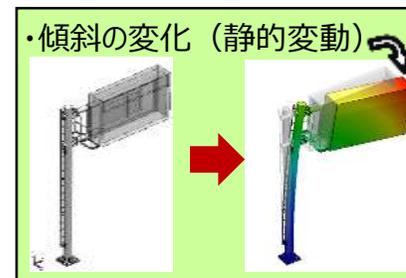
- 傾斜マルチセンサ端末を開発し、
道路付帯物の劣化・損傷を、「傾斜の変化」及び「揺れ方（振幅、振動数）の変化」の
常時モニタリングにより状態変化を検出（フィルタイング）し、点検業務の効率化に資する。

◆ 傾斜マルチセンサ端末概要

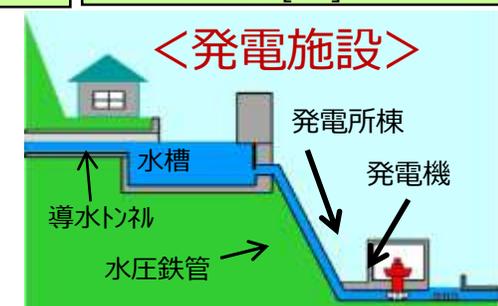
- 傾斜、振動、温度を同時計測（マルチセンサ）
- 自立電源、無線通信（コードレスセンサ端末）
- 上位での高度解析対応
 - (1)複数センサ間の時刻同期
 - (2)高速無線通信による大容量データ送信
- 高速道路（実フィールド）での実証
- 大規模インフラ（発電施設）への展開

対象構造物

道路付帯物（情報板設備、照明設備等）



展開



これまでの成果

◆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)

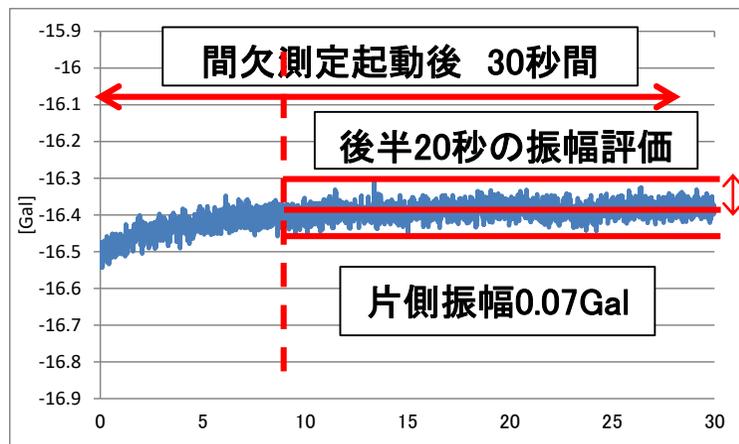
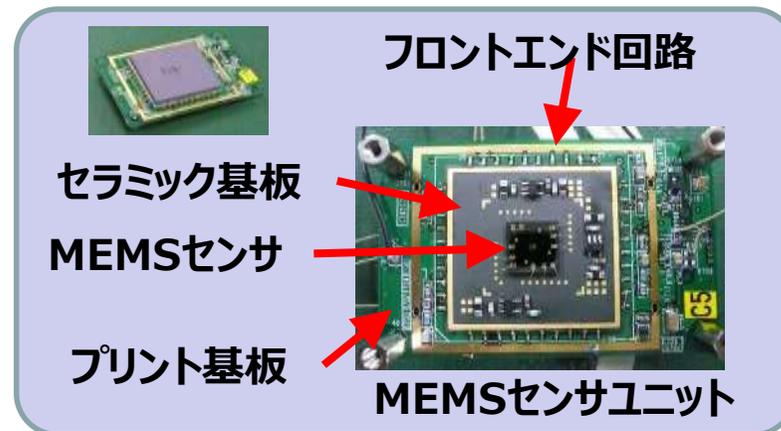
・開発目標

- ①傾斜計測の出力安定性 : $\pm 0.05\text{deg}$
- ②振動計測の分解能 : $\pm 0.1\text{gal}$

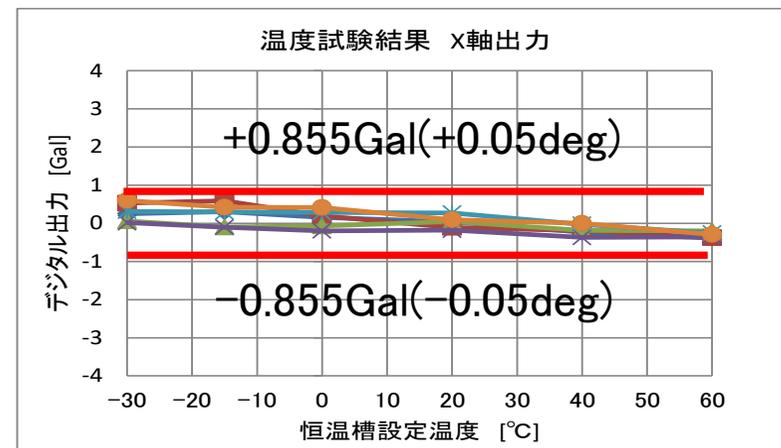
・成果概要

MEMSセンサデ部のユニット構造化

- ① 傾斜温度安定性 $\pm 0.05\text{deg}$ 達成
- ② 振動計測分解能 $\pm 0.1\text{Gal}$ 達成



振動分解能評価結果



温度安定性評価結果

これまでの成果

◆ 傾斜マルチセンサ端末の開発

・ 開発目標

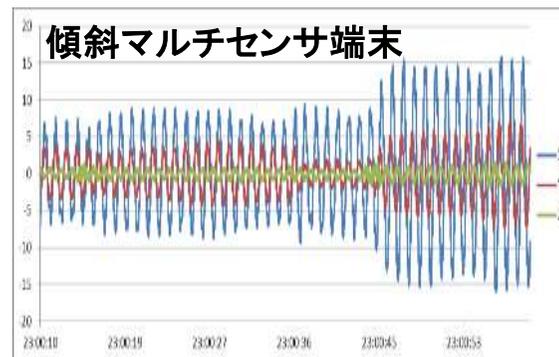
- ① 傾斜・振動・温度を同時測定 (マルチセンサ)
- ② 太陽電池による自立電源化
- ③ 複数センサ間の時刻同期 ($\pm 1\text{msec}$)
- ④ 大量データ (200 k B/1分間) を平均0.1mW s で無線転送

・ 成果概要

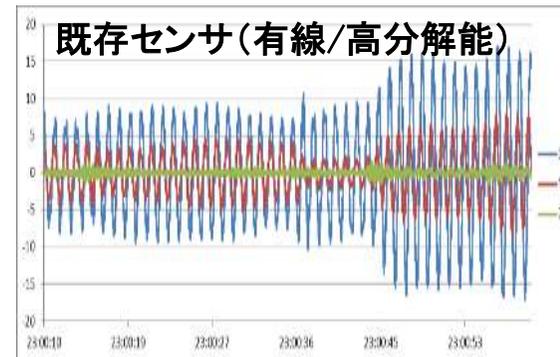
- i) 傾斜・振動・温度の同時計測確認
- ii) 太陽電池での動作/無線通信確認
- iii) センサ間時刻同期
- iv) 実証サイトでの課題抽出と改良
実施中

傾斜マルチセンサ端末
インナーユニット傾斜マルチセンサ端末外観
(寸法70×100×50mm)

[Gal]



[Gal]

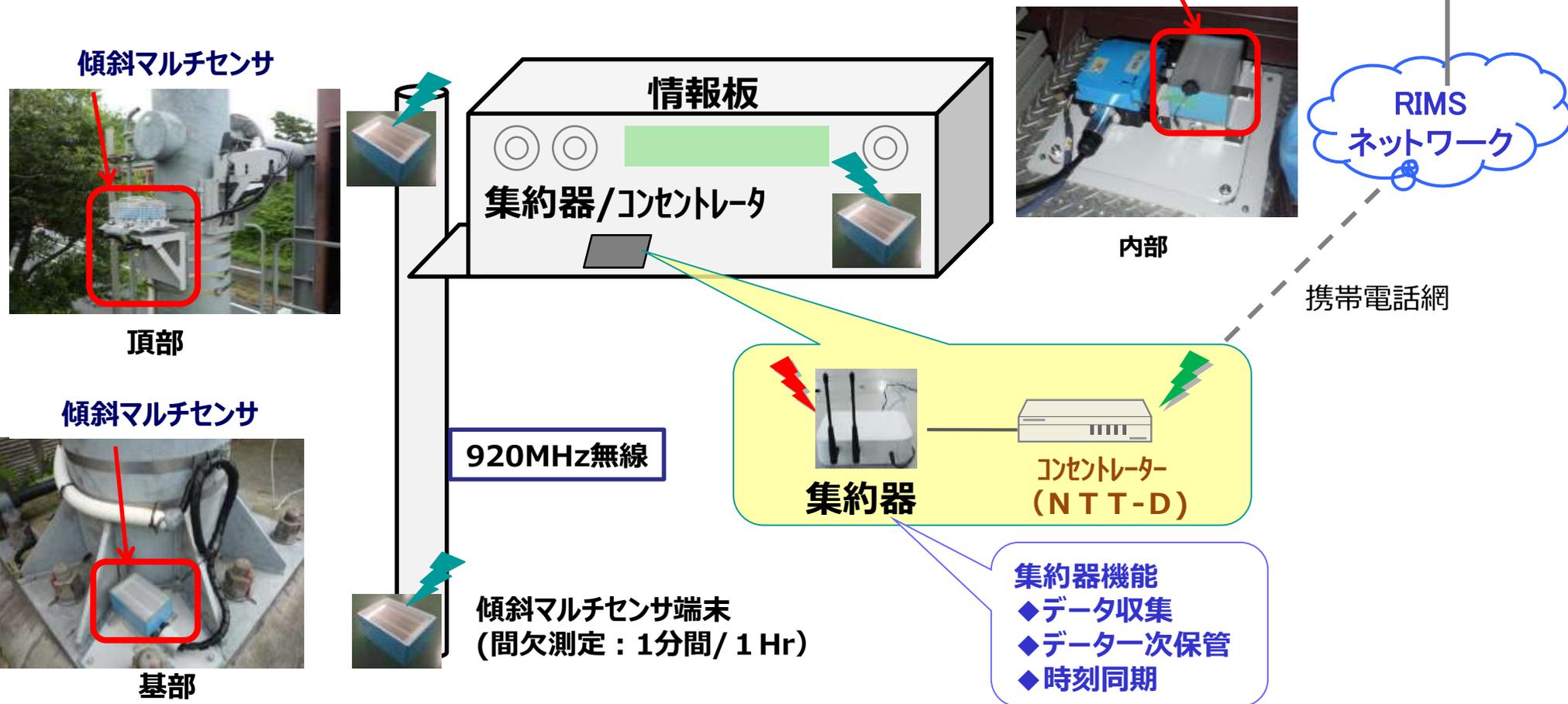


出力例：(既存有線センサの比較)
既存有線センサと比較し同じ出力波形が得られた。

これまでの成果

◆センシングシステム構築

- ・集約器の設計製作・動作試験完了
- ・計測システムの実環境での動作確認完了



これまでの成果

◆ 実証実験 (情報板2サイトでの実施)

- ・実証実験場所：NEXCO中日本管内 情報板 (東名高速道路、中央自動車道)
- ・データ収集：構築したセンシングシステムにより遠隔から取得
- ・課題抽出：実用化に向け課題の抽出と抽出課題の対策実施中



傾斜マルチセンサ (頂部)



実証サイト1 (東名高速道路)



傾斜マルチセンサ (内部)



傾斜マルチセンサ (頂部)



傾斜マルチセンサ (内部)



傾斜マルチセンサ (基部)



傾斜マルチセンサ (基部)



実証サイト2 (中央自動車道)



これまでの成果

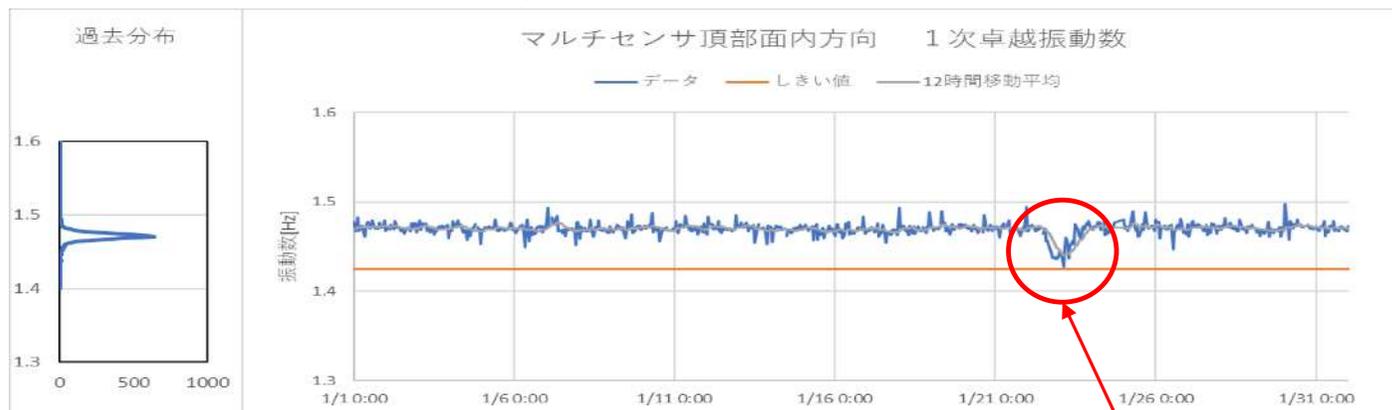
◆システム構築と実証実験 (傾斜マルチセンサの出力例)

計測データ例：2018/1/1～1/30：卓越周波数のトレンド



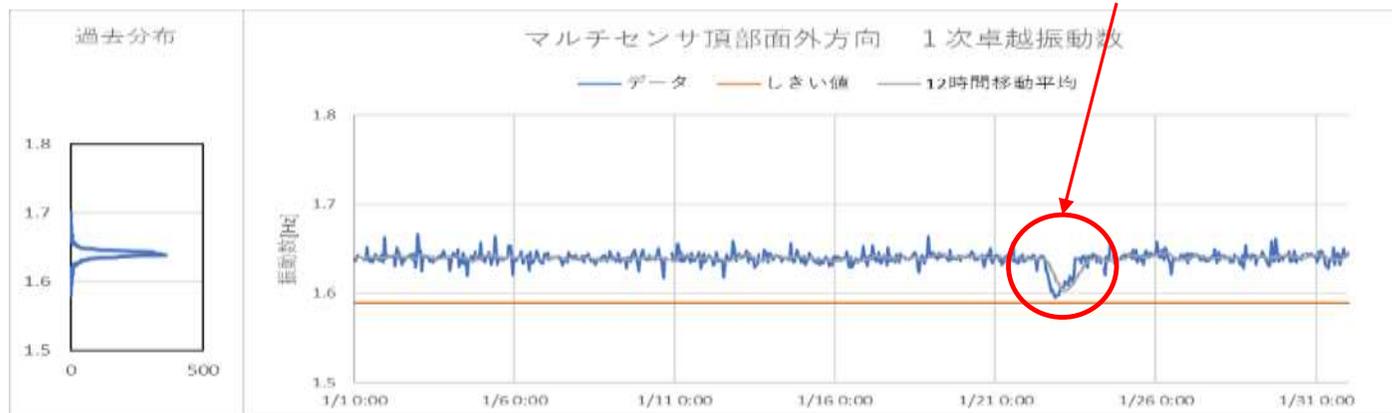
実証サイト1 (東名高速道路)

・面内方向 (道路幅方向)



・面外方向 (道路方向)

積雪 (重量増) に伴う変動

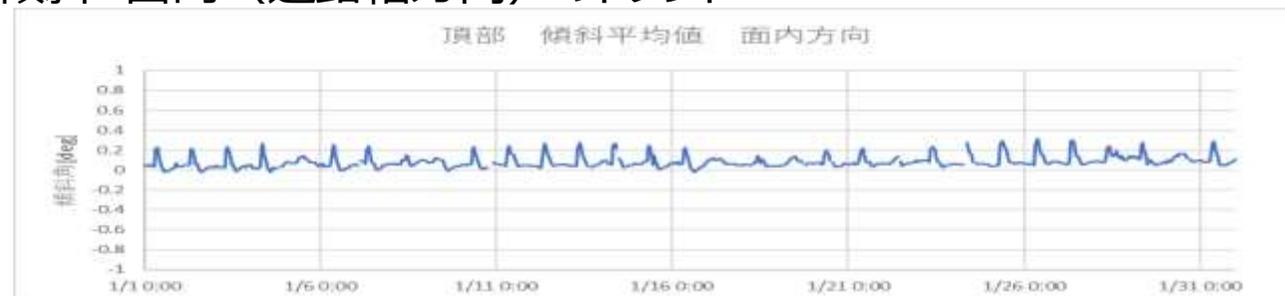


これまでの成果

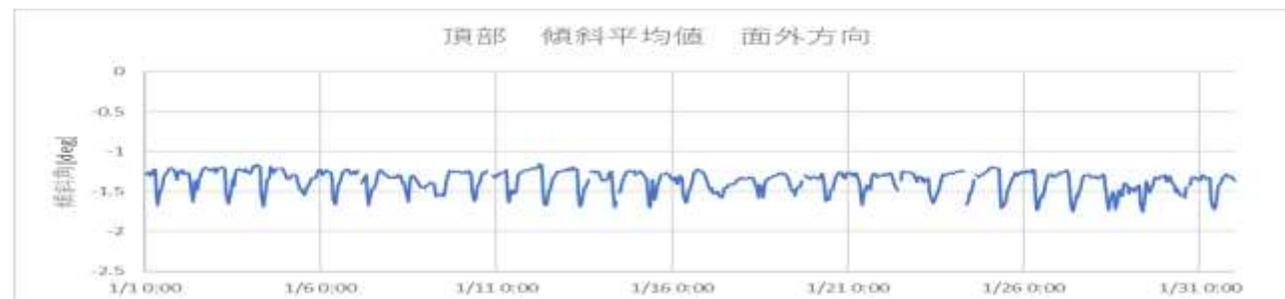
◆システム構築と実証実験 (傾斜マルチセンサの出力例)

計測データ例：2018/1/1～1/30：傾斜及び温度

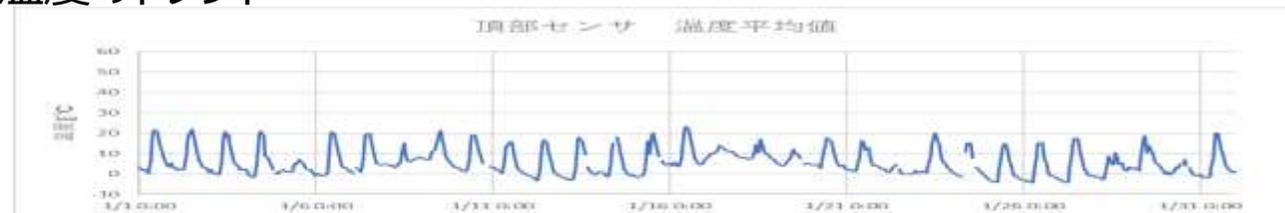
- ・傾斜 面内 (道路幅方向) のトレンド



- ・傾斜 面外 (道路方向) のトレンド



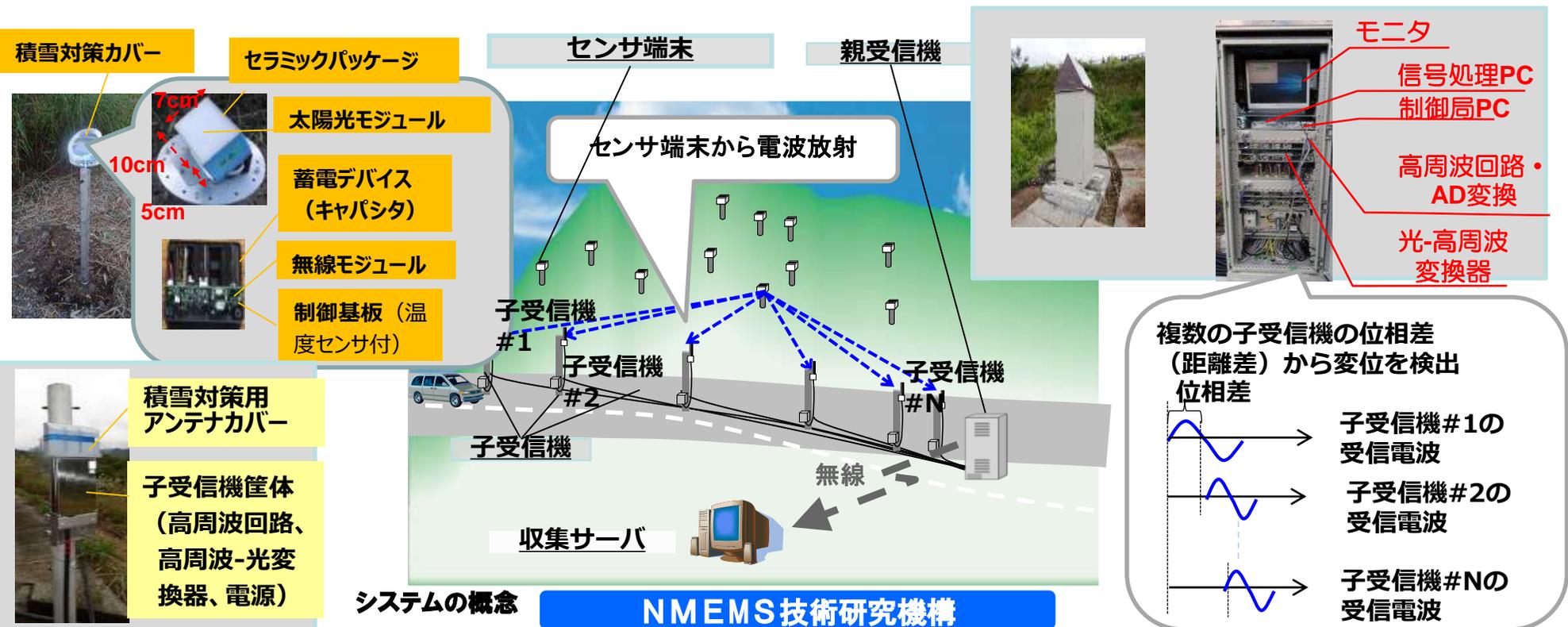
- ・温度のトレンド



実証サイト1 (東名高速道路)

研究開発の概要と差異化ポイント

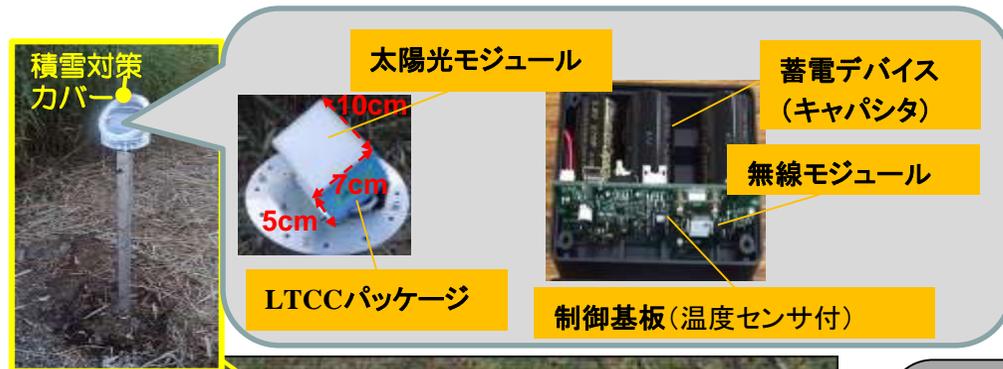
- ◆ 電波位相差により高計測頻度・全天候・3次元で法面変位を高精度計測
- ◆ 端末間の無線メッシュネットワークによる広範囲計測
- ◆ 天候・昼夜を問わず長期間動作する多機能型センサ端末の開発
 - 微小変位を早期に検出することで、法面の変状を明確にし、維持管理・通行止めの判断の指標とすることを目的とする
 - 従来、光波測量計が用いられているが、雨天時の計測に問題がある



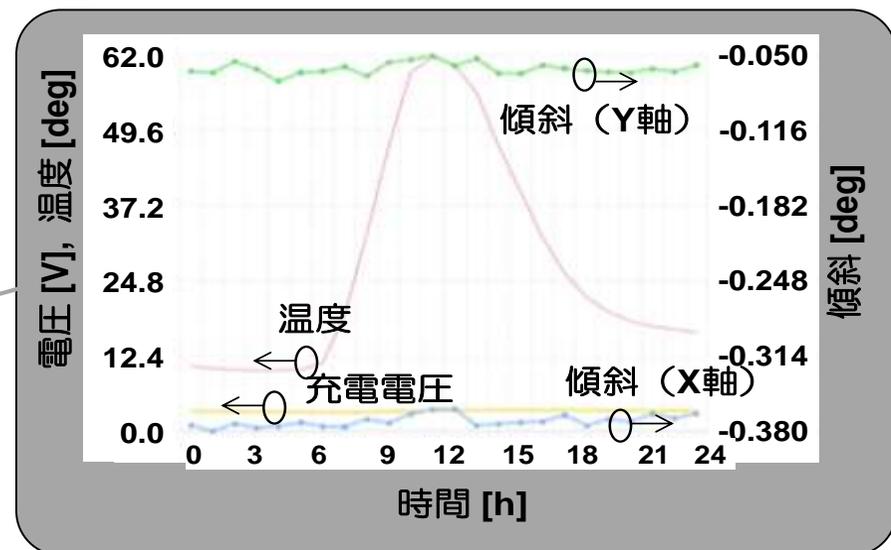
これまでの成果

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



- 変位, 温度, 充電電圧, 傾斜データを計測可能
- センサ端末サイズ5cm×7cm×10cm
- 1時間に10回の計測可能
- 通信距離30m以上
- 積雪対策+LTCCパッケージにより実環境下での信頼性

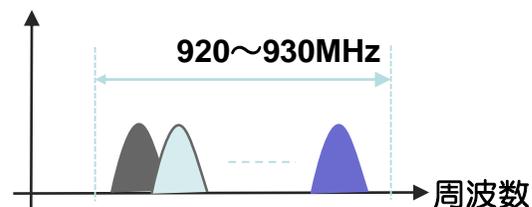


これまでの成果 子・親受信機の開発 - 草木対策の検討 -

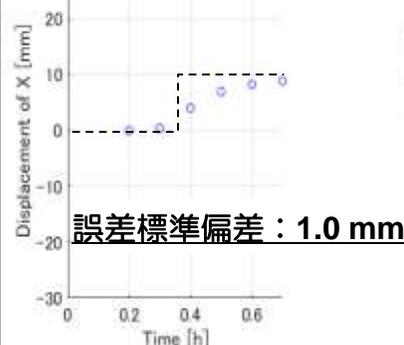
草木対策として、複数の周波数Chの電波位相を合成する方式を開発し、実験により効果を検証

複数の周波数Chの電波位相を合成

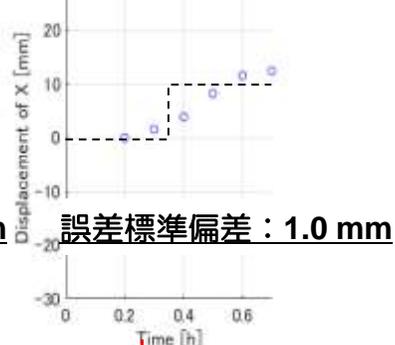
電力



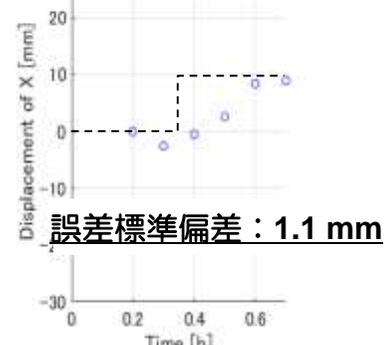
922.5MHz (33ch)



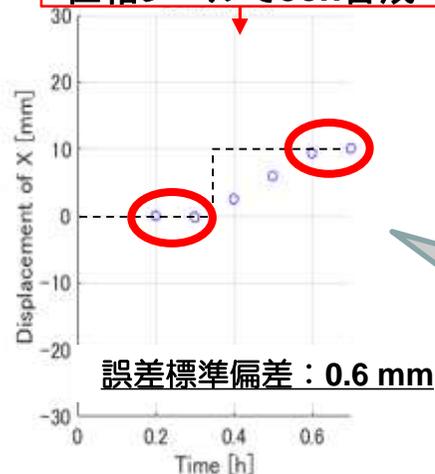
925.1MHz (46ch)



927.5MHz (58ch)



位相レベルで3ch合成



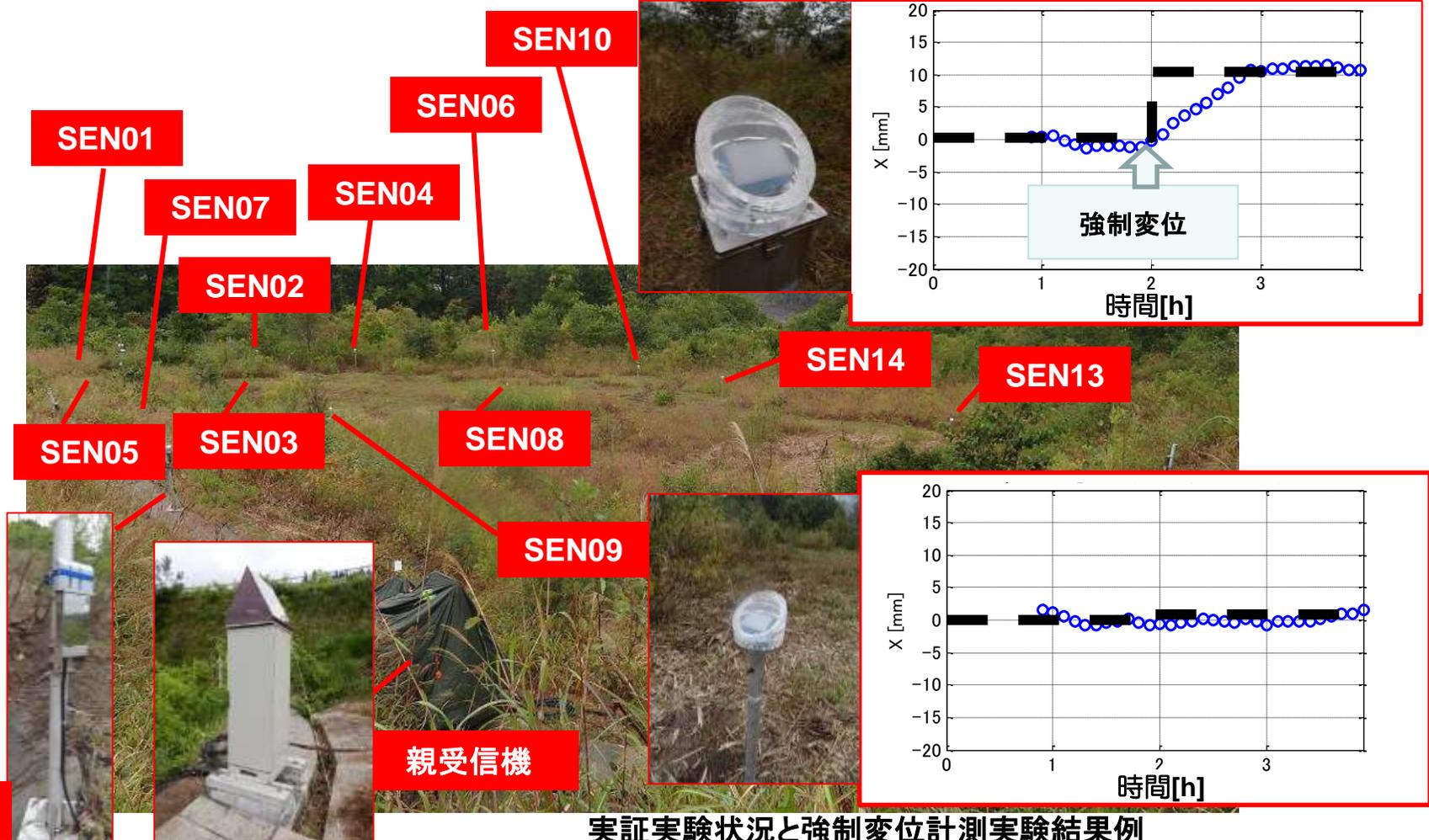
- 6分に1回データ取得
- 3サンプルで時間平均

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



これまでの成果 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。

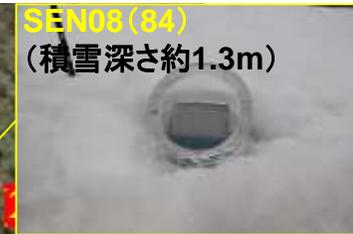


実証実験状況と強制変位計測実験結果例

これまでの成果

センサ端末の開発

17年度に設置した全センサ端末15台の融雪後の正常動作を確認



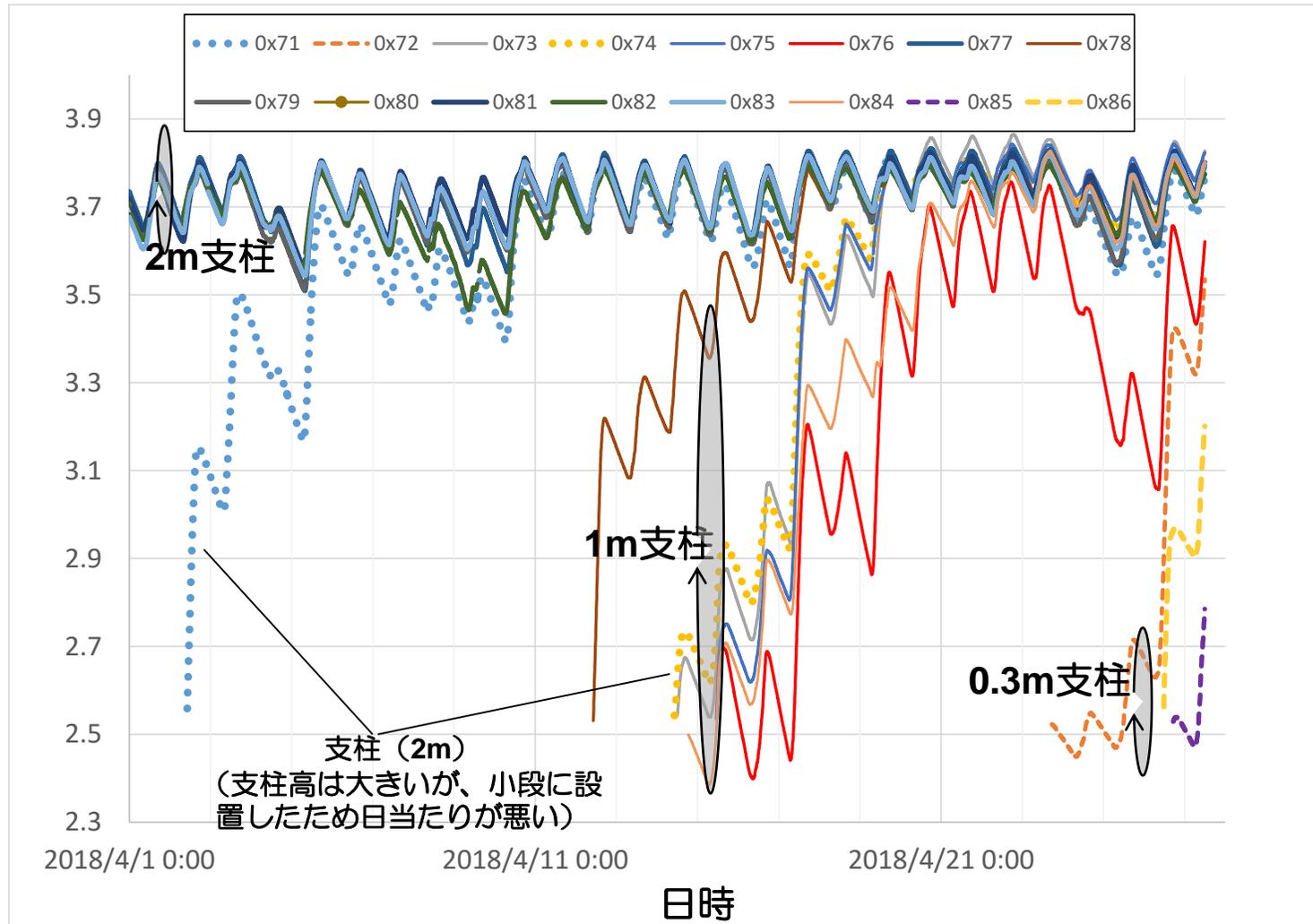
4/11 の現地状況

これまでの成果

センサ端末の開発

融雪期に、支柱高が大きい順に太陽光による充電を開始し、復帰・動作することを確認

センサ端末内のキャパシタ
の充電電圧 [V]



研究開発の概要と差異化ポイント

課題

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、**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**

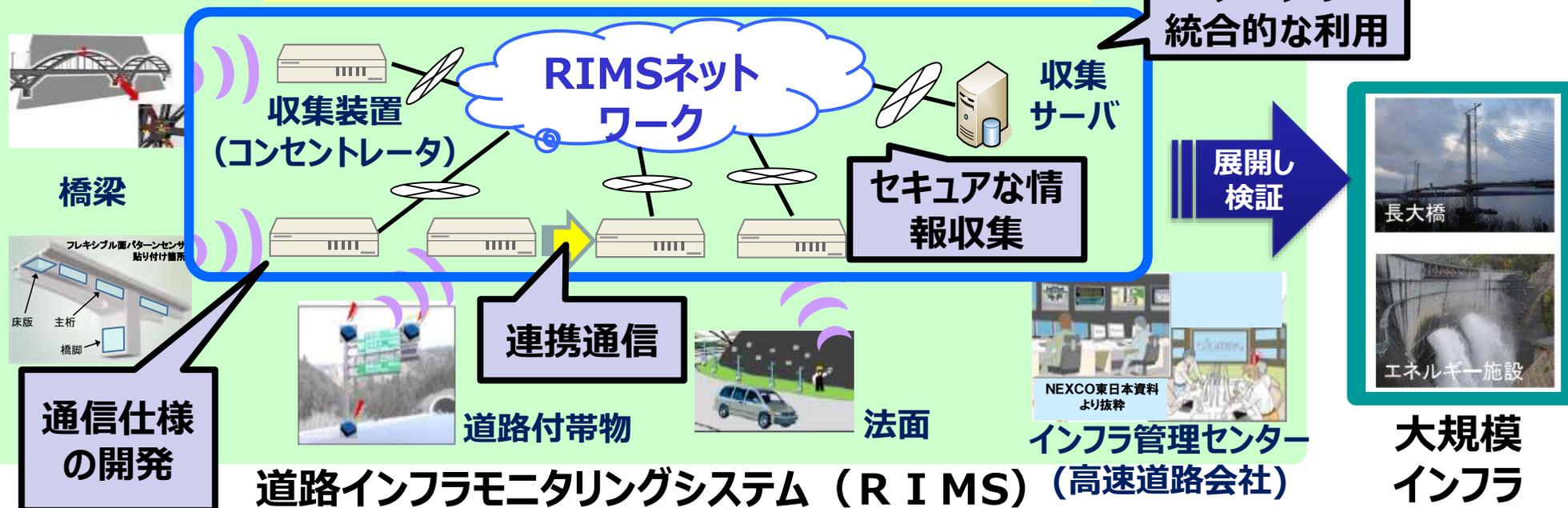
ニーズ

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

無線通信ネットワーク共通プラットフォーム



通信仕様の開発

連携通信

データの統合的な利用

展開し検証

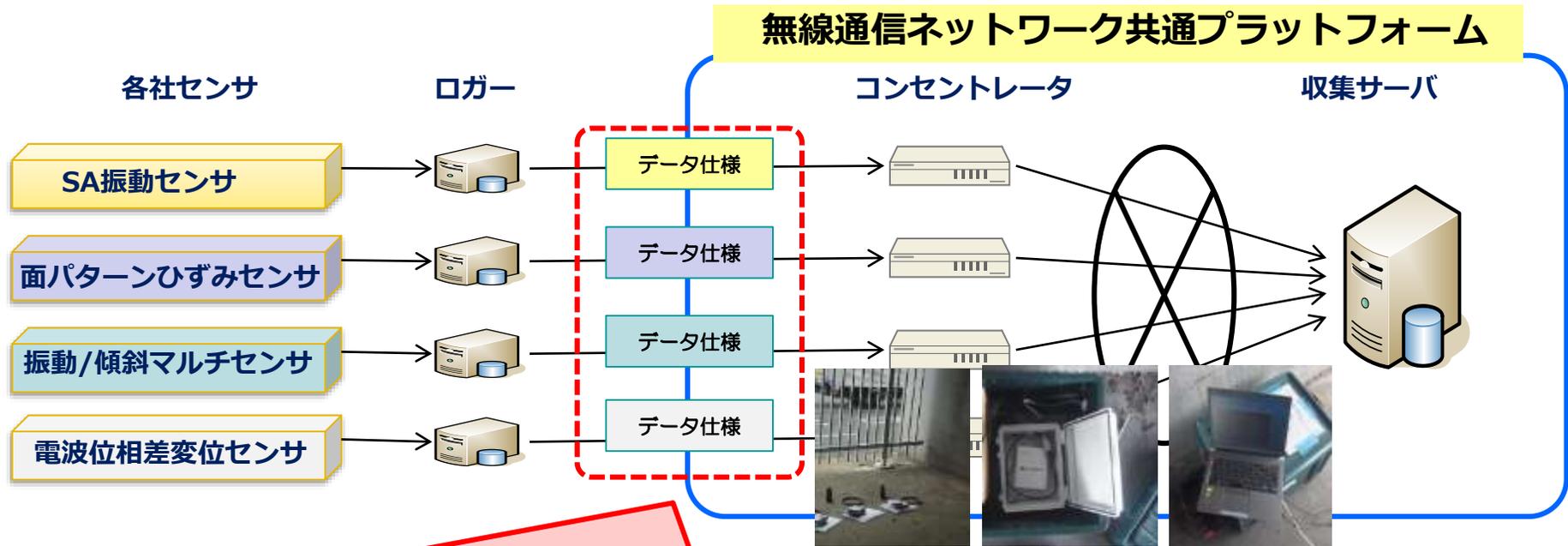
セキュアな情報収集

大規模インフラ

道路インフラモニタリングシステム (RIMS) (高速道路会社)

これまでの成果

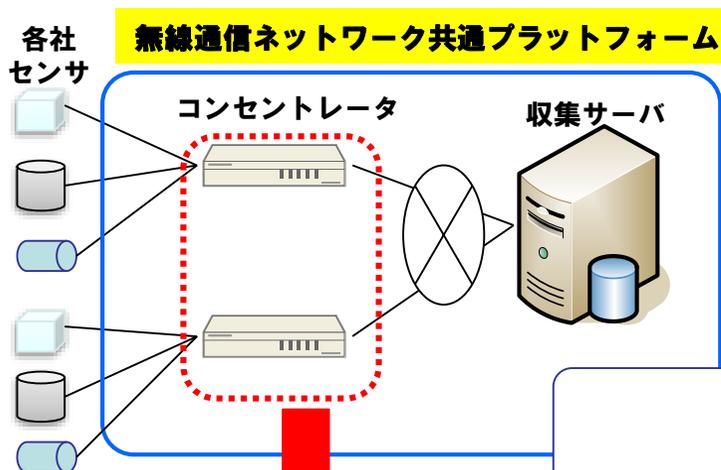
- 多種多様なセンサに対応するための通信仕様の開発
 - ① 共通インターフェースをもとに各社のデータフォーマットと通信仕様を確定し
多種多様なセンサ対応が容易であることを確認済み



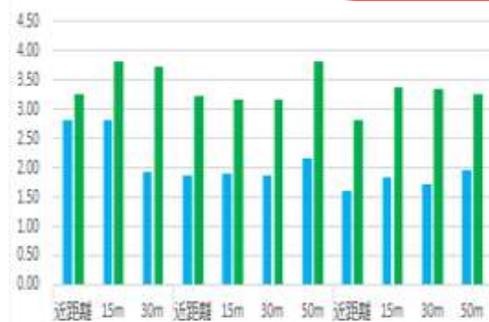
各社センサデータをロガーから共通インターフェースにもとづきコンセントレータで受信し、収集サーバへデータを格納

これまでの成果

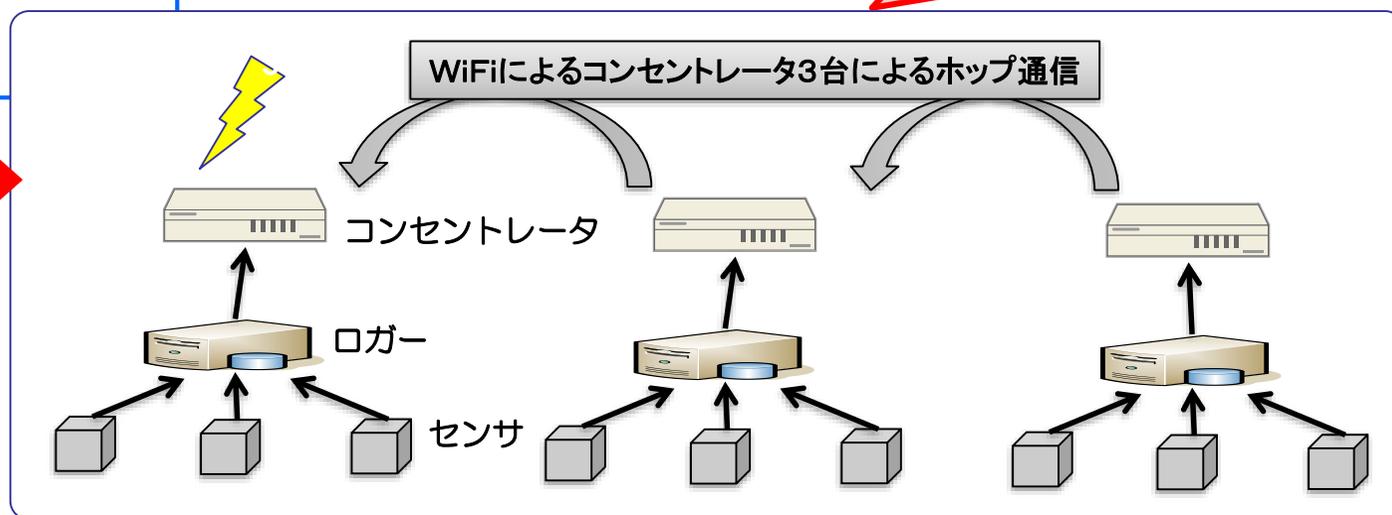
- コンセントレータ間の連携通信対応
コンセントレータ間のホップ通信について動作検証し、基本的な評価が完了
現地環境で機能評価を実施予定



メッシュネットワークを利用し、近くのコンセントレータのセンサデータは1つの回線からまとめて送信することでコスト削減を図る。ホップ通信時の遅延や帯域を調査。



ホップ通信時の遅延比較



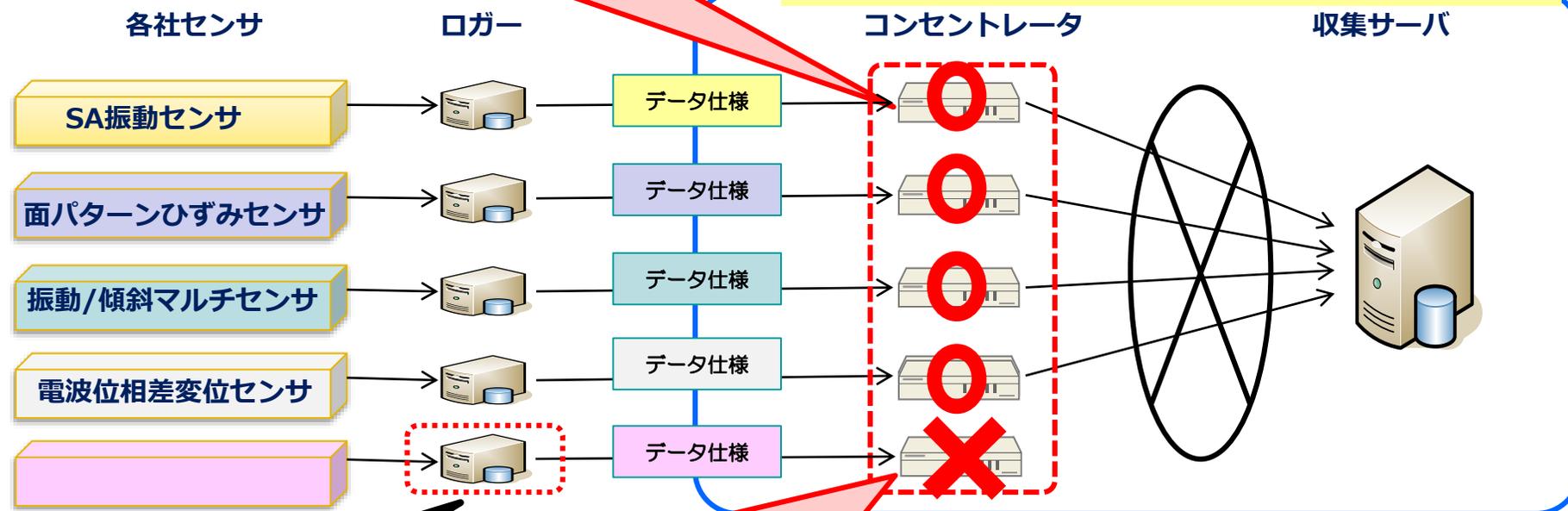
これまでの成果

○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実装済み
相応の負荷がかかるためデータ通信処理へ影響ないか検証中

通信パケットのヘッダー情報を評価し、正常な通信は通す

無線通信ネットワーク共通プラットフォーム

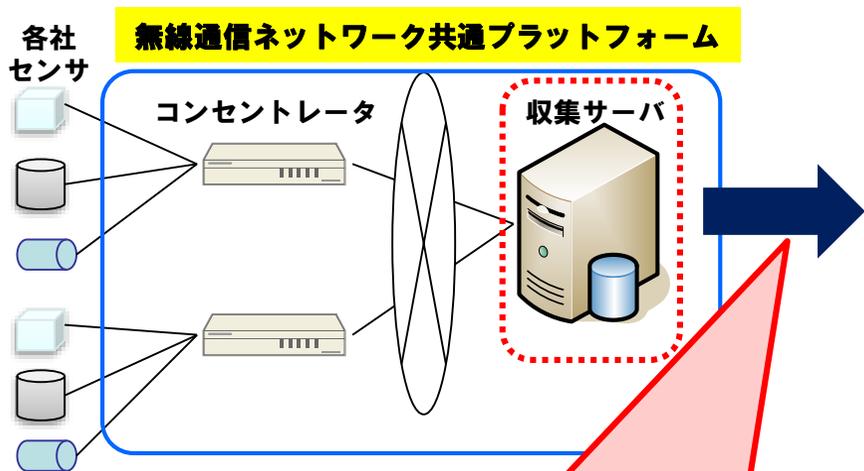


なりすました不正ロガー等

通信パケットのヘッダー情報に不正を検出した場合は通信を遮断

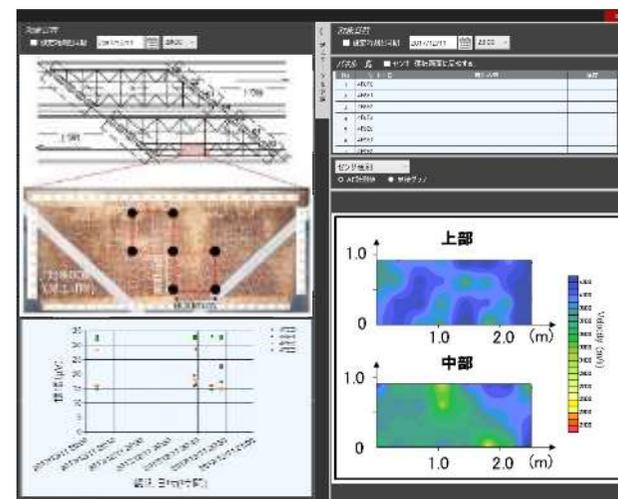
これまでの成果

- データの統合的な利用
一元的に収集されたデータを活用し、道路管理者のインフラモニタリング業務イメージを具体化し、様々な構造物状態を確認する統合モニタリングシステムを作成済み
ユーザに有効性などについてヒアリング中



| 対象設備 | 診断日時 | 状態 |
|------|------------------|----|
| 床板○○ | ○年○月○日 △時△分△秒 | 正常 |
| 床板△△ | ○年○月○日 △時△分△秒 | 異常 |
| 橋脚●● | ○年○月○日 △時△分△秒 | 異常 |
| ●情報板 | ○年○月○日 △時△分△秒 | 異常 |
| △情報板 | ○年○月○日 △時△分△秒 | 正常 |
| ●●法面 | ○年○月○日 △時△分△秒 | 異常 |

構造物状態の一覧表示例



グラフ表示例

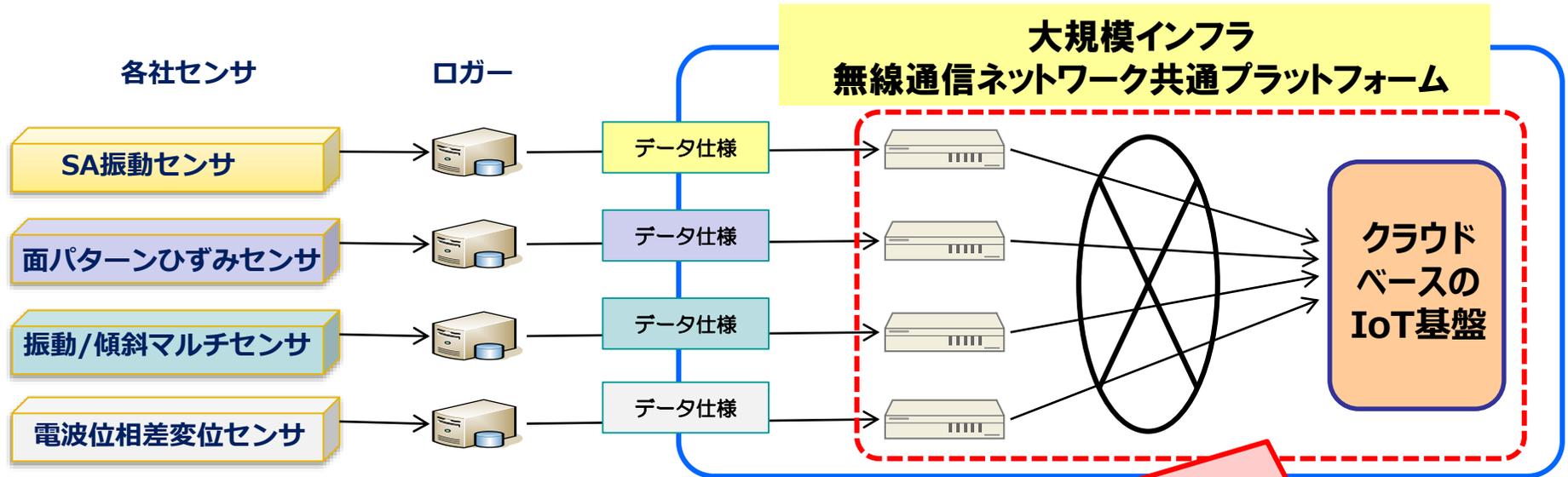
- ・一元的に収集された様々なデータを活用したシステムを構築
- ・データの統合的な利用に加えて、システムの統合的な利用について検証中



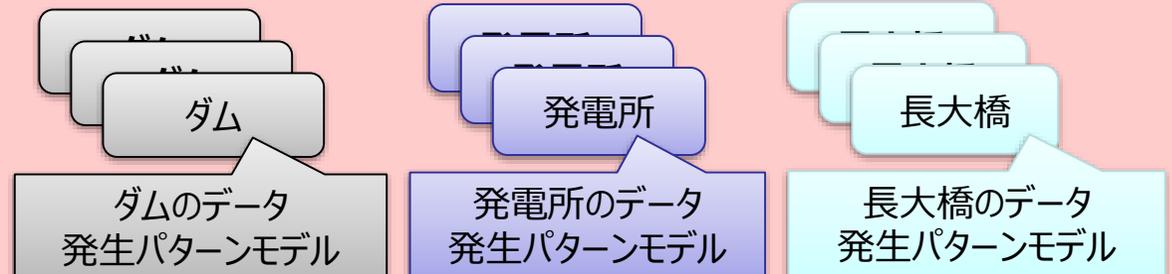
地図情報との重畳表示例

これまでの成果

- 大規模インフラへの展開
 - ・クラウドベースでのプラットフォームを構築済み
 - ・大規模インフラ監視基盤としてデータ発生パターンを明らかにし、構築したシステムが要件に耐えうるか検証を実施済み



複数の大規模インフラから発生するデータパターンをモデル化し、処理性能などの要件が十分であるか使用リソースなどを調査し検証を行う



研究開発の概要と差異化ポイント

道路インフラの環境ストレスに強いパッケージ

● 高耐久性

- ・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
- ・実用化において、インフラ寿命や点検サイクルに見合う耐久性の確保が必要

➡ 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

- ・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気密実装するオールインワンパッケージを開発

● 簡便な設置施工

- ・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

➡ センサ端末をインフラ構造物に設置する粘接着シートによる施工法を開発



大規模インフラ



長大橋



エネルギー施設

展開

インフラ構造物 (コンクリート・鋼板など)

道路インフラ

(高温・多湿、積雪、紫外線、排気ガス、塩分)



橋梁



道路付帯物



法面

これまでの成果

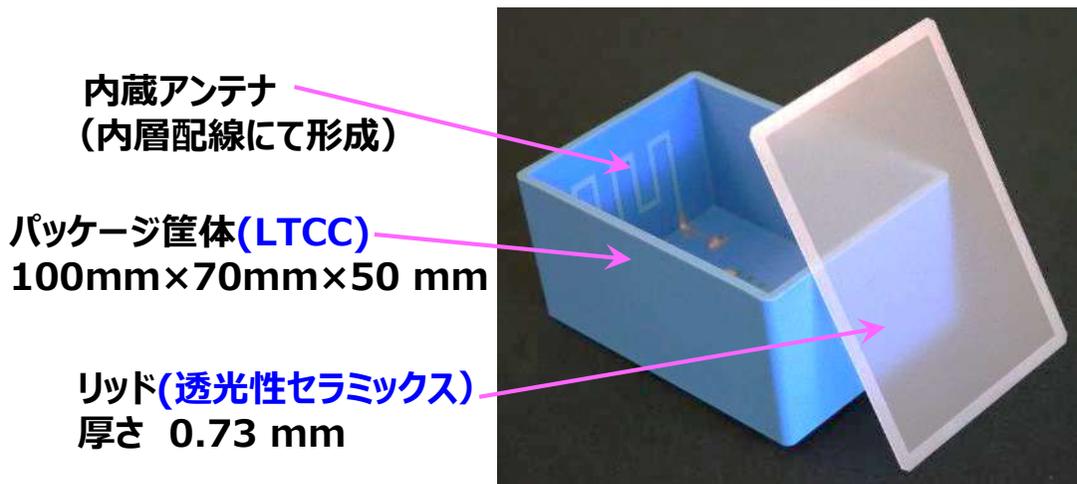
■ 大型セラミックパッケージ

パッケージ材として、10年以上の耐久性、アンテナ内蔵可能な電波透過性を有することが必要

- ▶ パッケージ筐体には、アンテナ配線パターンを内層金属配線として形成可能なLTCCを選定
- ▶ パッケージのリッド(蓋)には、内蔵太陽電池に日射導入が可能な透光性セラミックスを選定

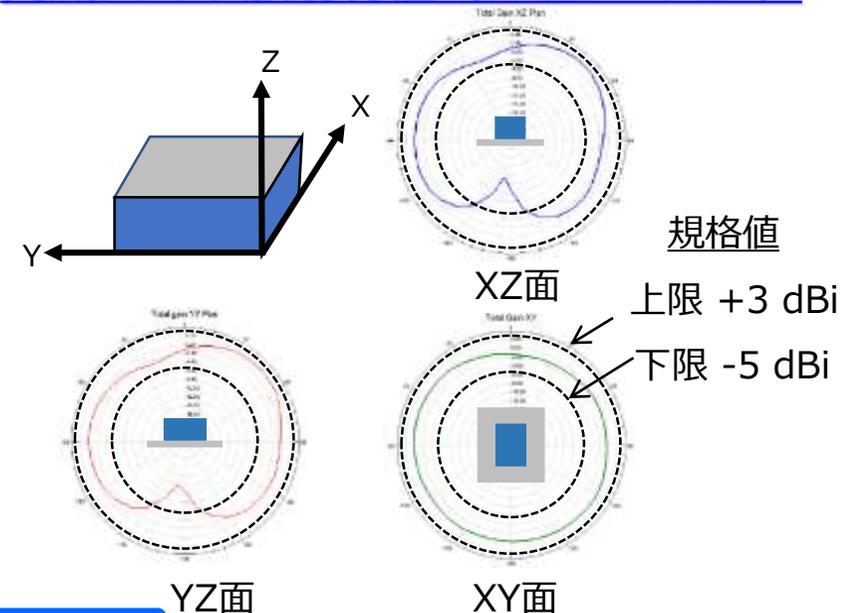
- ・従来のセラミックパッケージのサイズ(10 mm程度)を大幅に上回るLTCC製アンテナ内蔵大型セラミックパッケージ(100mm×70mm×50 mm)を開発
- ・内蔵アンテナの放射特性は、規格値を満たす全指向性であることをシミュレーションにて確認

パッケージ筐体の外観



LTCC: Low Temperature Co-fired Ceramics

内蔵アンテナ放射特性 (シミュレーション)



これまでの成果

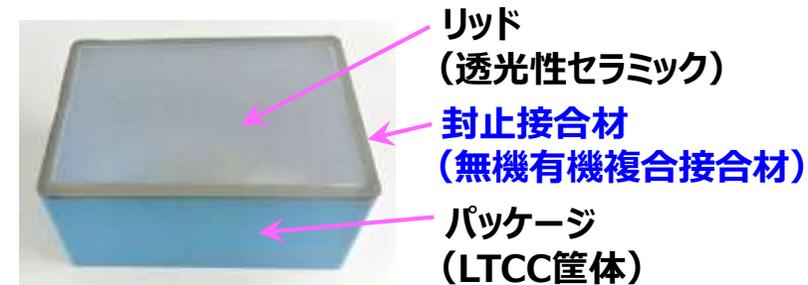
■ 高気密接合封止技術(1)

10年以上の気密耐久性を有する接合封止材、及び内蔵部品に熱ダメージを与えない低熱影響接合封止プロセスの開発が必要

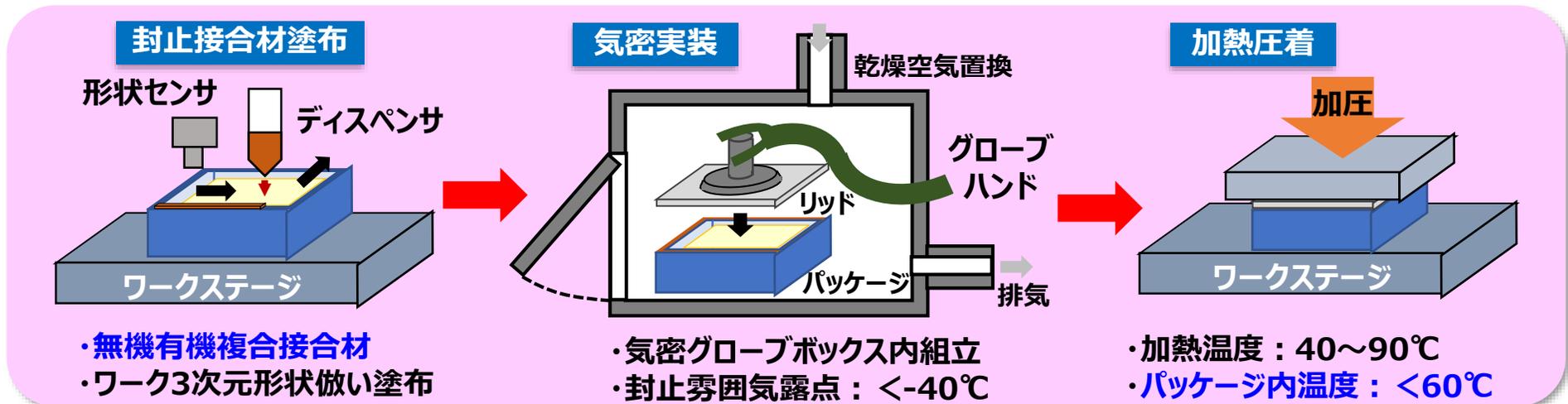
➡ 封止接合材として、高耐久性の無機材料と低温接着可能な有機材料の複合接合材を選定

- ・ 無機有機複合接合材を用いた低熱影響封止プロセス (パッケージ内最高温度 60°C) を開発
- ・ 半導体パッケージと同等水準の気密性封止達成 (封止部リーク速度 : $1 \times 10^{-9} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3 / \text{s}$)

気密接合封止されたセンサ端末



低熱影響接合封止プロセス



これまでの成果

■ 高気密接合封止技術(2)

- ・パッケージに気密封止した評価用センサモジュールによるリアルタイムリモート耐久性評価システムを開発
- ・耐久性加速試験、環境暴露試験の経過データを内蔵の無線発信機で送信し、インターネットを介してサーバに蓄積、WEB上で試験結果を評価

リアルタイムリモート耐久性評価システム



これまでの成果

■ 高気密接合封止技術(3)

・道路環境ストレスに対応する耐久性加速試験の結果、10年相当の耐久性を確認

耐久性加速試験結果

| | ①凍結防止剤 /塩害 | ②渋滞/排気 ガス | ③重量車両で の振動 | ④積雪/低温 /凍結 | ⑤多雨/多湿 | ⑥日射/紫外線 |
|----------------------|---|---|--|---|---|---|
| 道路環境 ストレス |  |  |  |  |  |  |
| 対応する 耐久性 加速試験 | 塩水噴霧 サイクル試験 | 腐食ガス試験 | 加速振動試験 | 低温試験 | PCT試験 (Pressure Cooker Test) | 耐候性試験 |
| 条件 (耐久性10年 相当) | (塩水噴霧2 hr + 40℃98%7日) ×4回 | 40℃, 80%, SO ₂ :25 ppm NO ₂ :4 ppm 500 hr | 1.6m/s ² 90 hr (振動実測波 の3倍) | -40℃, 100 hr | 85℃, 85% 0.12 MPa 672 hr | (UV162 W/m ² 48 min + 散水 12 min) ×500回(63℃) |
| 判定 | 合格 | 合格 | 合格 | 合格 | 合格 | 合格 |

これまでの成果

■ インフラ構造物への設置技術(1)

10年以上の設置耐久性を有し、多様な現場で簡便・強固に設置できる施工法の開発が必要

➡ 粘接着シートによりパッケージを構造物に接合設置する施工法を選定

- ・各種センサ端末の設置形態に合わせた施工を実施し、実証試験にて耐久性を確認



| | 橋梁 (SAセンサ) | 道路付帯物 (傾斜センサ) | 法面 (変位センサ) |
|------|--|---|---|
| 設置形態 | <p>構造物 (コンクリート床版) LTCC-PKG 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</p> | <p>傾斜センサ 落下防止ネット 構造物 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</p> | <p>雪よけカバー 変位センサ ベースプレート 粘接着シート アクリルケース 支柱</p> |
| 設置現場 | <p>橋梁 (奈良県)</p> | <p>情報板 (神奈川県、東京都)</p> | <p>斜面 (山形県)</p> |

これまでの成果

■ インフラ構造物への設置技術(2)

- ・2年間の亜熱帯海洋環境暴露試験において、引張強度0.4MPa以上を満足し、実使用上十分な耐久性を確認
- ・屋外10年相当の耐久加速試験において、引張強度規格0.4MPaを満たすことを確認 (JIS A 5557準拠)

亜熱帯海洋環境暴露試験の様子

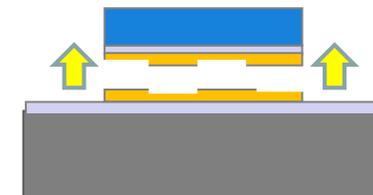


引張試験サンプル

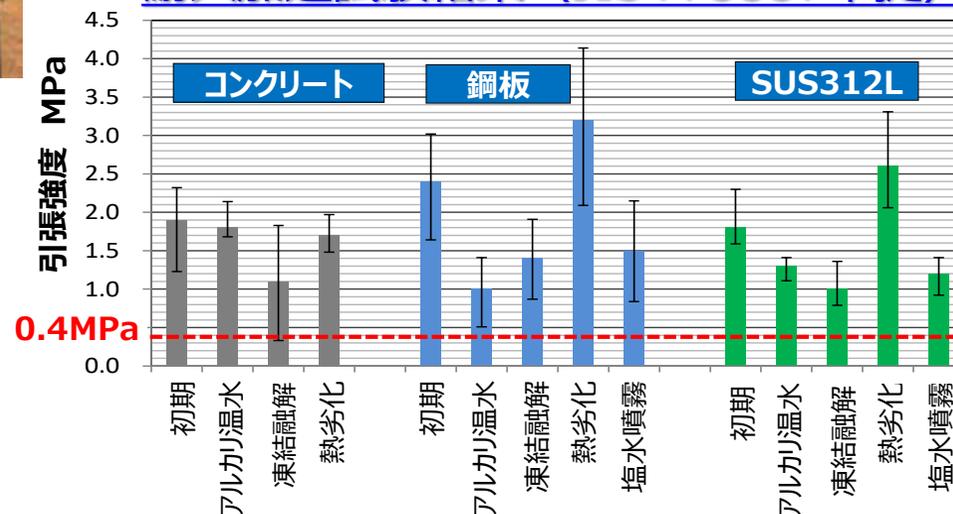
引張試験サンプル構造



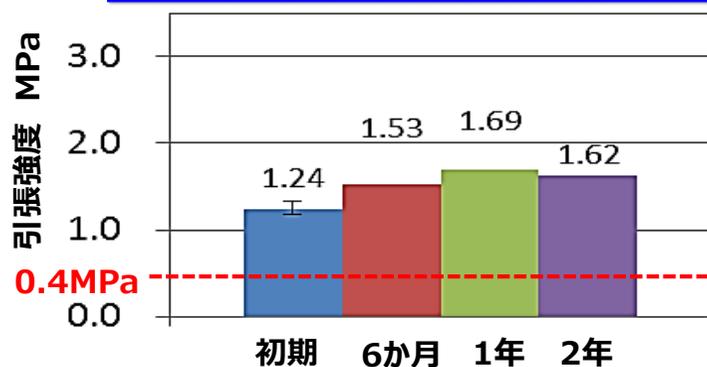
引張破壊の強度を計測



耐久加速試験結果 (JIS A 5557準拠)



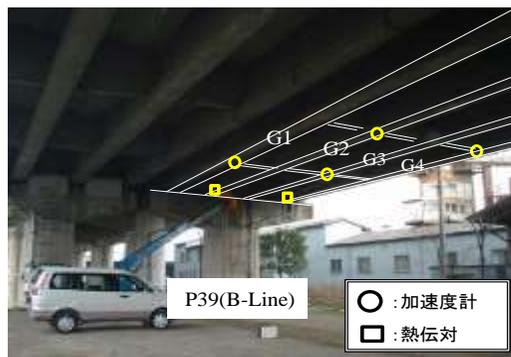
亜熱帯海洋環境暴露試験結果



研究開発の概要と差異化ポイント

【現状】

- 個別フィールドのモニタリングシステムはあるが、フィールドを跨った統合的なモニタリングシステムはない。
(例)
 - ・橋梁モニタリングシステム
 - ・法面モニタリングシステム
- 有線の長期モニタリングはあるが、無線センサによるモニタリングは一般的には1年未満の短期モニタリングであり、研究期間終了後はセンサを取り外している。
- 人や車両によるモニタリングは離散的であり、常時モニタリングできない。
- 人によるモニタリングは判定にバラツキが大きい。
- 点検困難なモニタリング箇所がある。



有線センサによる橋梁モニタリング 点検車によるモニタリング

【開発内容】

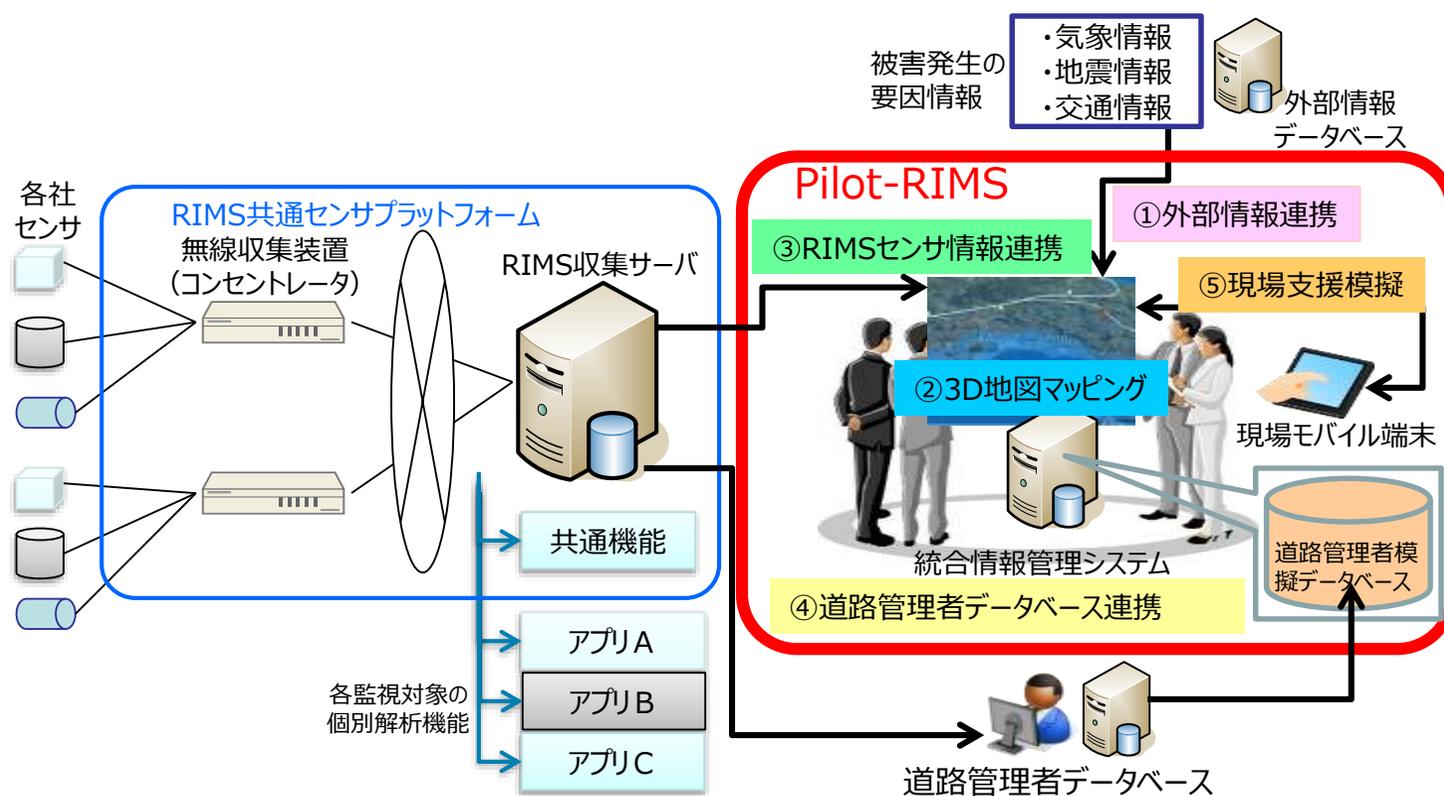
4つのフィールドで自立電源、無線センサネットによる2年の常時モニタリング実証実験を実施し、進行している劣化・損傷診断に必要な基礎データを取得する。データの一元管理化や統合データベース構築とネットワークを利用した閲覧の実証及び評価研究を実施する。一般道へ展開するために有用なパラメータを抽出する。



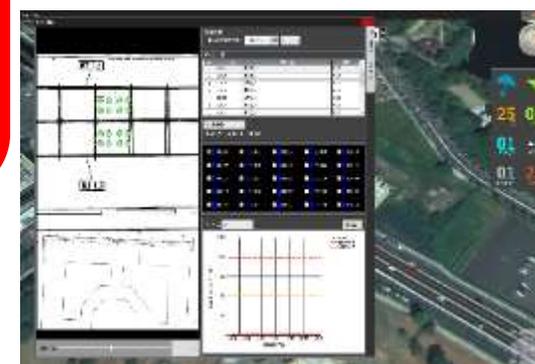
これまでの成果

- RIMSセンサ間の連携及び外部情報や道路管理者情報との連携を模擬するエミュレータ (Pilot-RIMS) を開発

➡ 道路管理者の運用シナリオを作成し、具体的な業務支援内容や効果のデモを作成



アラート表示画面例



センサデータ表示画面例



**本研究は、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
の結果得られた成果です。**