

研究開発項目①： インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

本研究開発は、平成28年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

(1) センサ端末開発

以下の全てを満たし、簡易に設置できるセンサ端末を開発する。

- インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できるものとする。
- 少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに、地震等の突発事象を検出できるものとする。
- 片手で取り付け可能なサイズ(概ね7cm×10cm×5cm)以下とする。
- 無線通信は、電波法による無線局の免許を受けことなく利用することができる周波数とし、その距離は実環境下で30m以上とする。
- 実環境下で10年以上の信頼性を有するものとする。

(2) センサネットワークシステムの構築と実証実験

- (1)で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発【1/2】

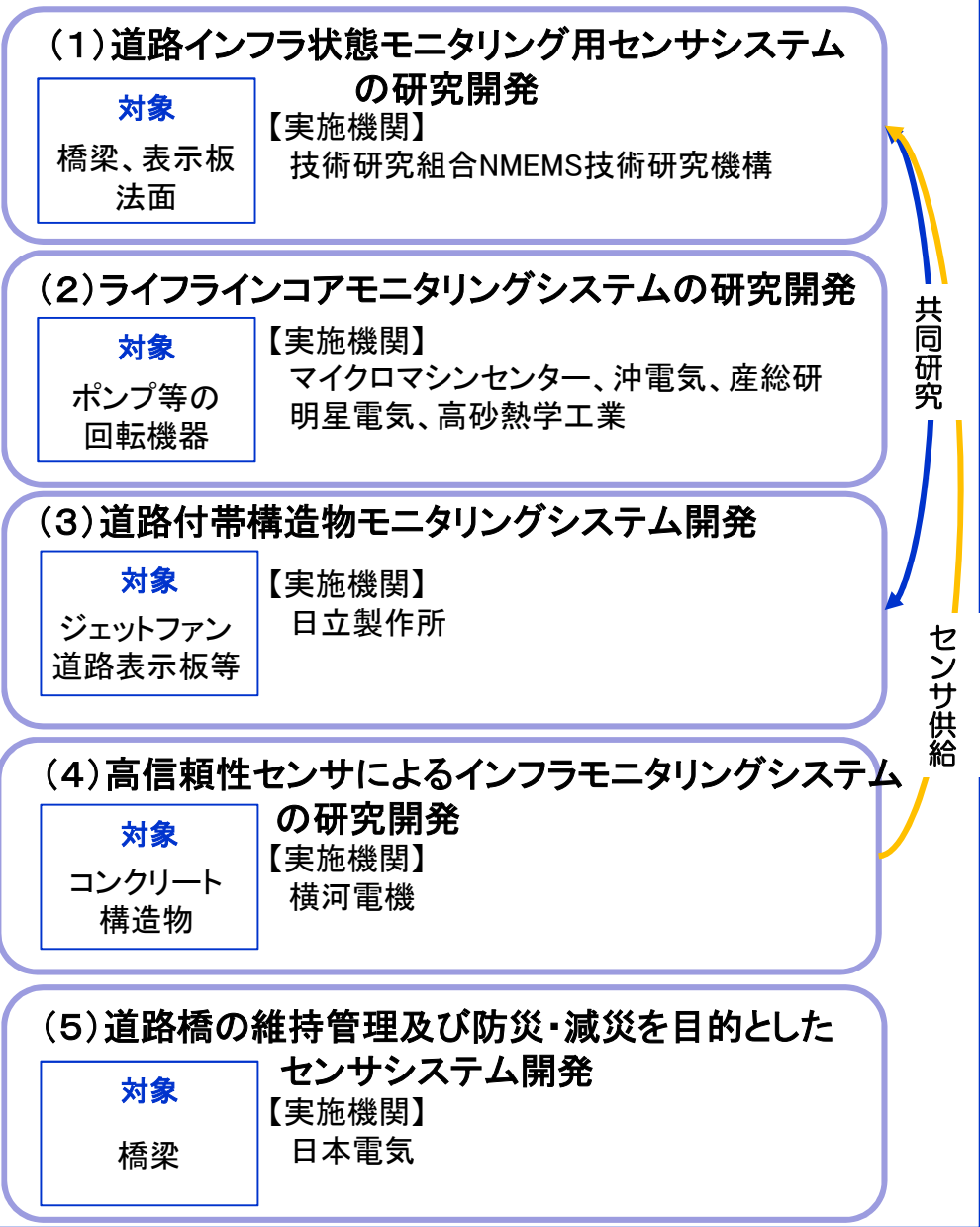
目標及び研究開発の概要

<目的>

橋梁、トンネル、プラント等及びそれらの付帯物を対象とし、それら構造物及びその構成部材の健全度を診断するための振動、変位等を計測でき、安定な接続性と信頼性がある無線通信機能を搭載したセンサ端末を開発する。これらのセンサ端末を駆動させるため、振動、熱、風、光等の環境エネルギーを利用して発電する長寿命で高効率な発電・蓄電一体型自立電源、長期耐久性や信頼性を確保するためのパッケージング技術を開発する。

達成目標

- ・インフラ構造物の健全度を診断するための計測ができ、同時に温度、地震等の突発事象も計測。
- ・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で動作する。
- ・片手で取り付け可能なサイズ(7cm×10cm×5cm)
- ・無線局の免許不要で、実環境下で30m以上の無線通信
- ・実環境下で10年以上の信頼性



①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発【2/2】

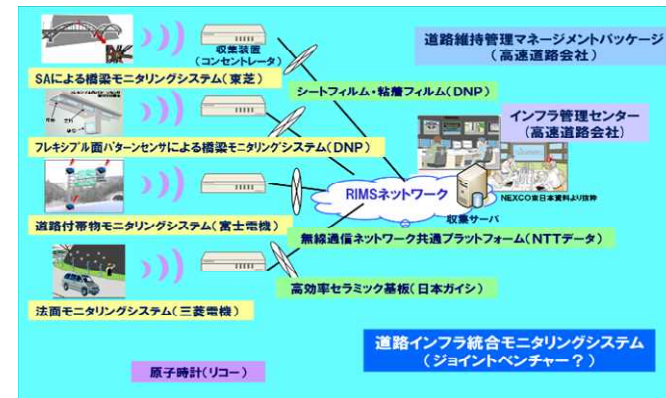
研究開発の成果

- 各テーマが対象とするインフラをモニタリングするセンサシステムが今年度完成見込み
- プロトタイプシステムでの実環境計測に着手。



実用化・事業化に向けた見通し・取組み

- PJ参画ユーザー機関での運用検討
最適なパラメータの抽出、安価な簡易システムの開発
→ 高速道路から一般道へ展開
- 個別技術の多用途展開
当初設定した対象以外の適用を検討し、市場を拡大
- 道路インフラ統合モニタリングシステムパッケージ
ジョイントベンチャー等も視野にいれ、海外展開も検討



事業化戦略の模式図 (NMEMS)



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

(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)

(委託先:技術研究組合 NMEMS技術研究機構)

(組合員: 東芝、三菱電機、富士電機、大日本印刷、NTTデータ、日本ガイシ、産総研、
マイクロマシンセンター、NEXCO東日本、NEXCO中日本、NEXCO西日本、阪神高速)

(再委託先:東京大学、京都大学)

発表者:(技)NMEMS技術研究機構 インフラモニタリング研究所 所長 下山 勲

(国)東京大学IRT研究機構・機構長



対象とする社会課題

老朽化の進展

出展: 国交省資料

2010年 8%
2020年 26%
2030年 53%

約155,000橋 (橋長15m以上)

建設後50年以上経過の割合(橋梁)

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	

現状の課題を解決する手段

高性能・安価な新規デバイスおよ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

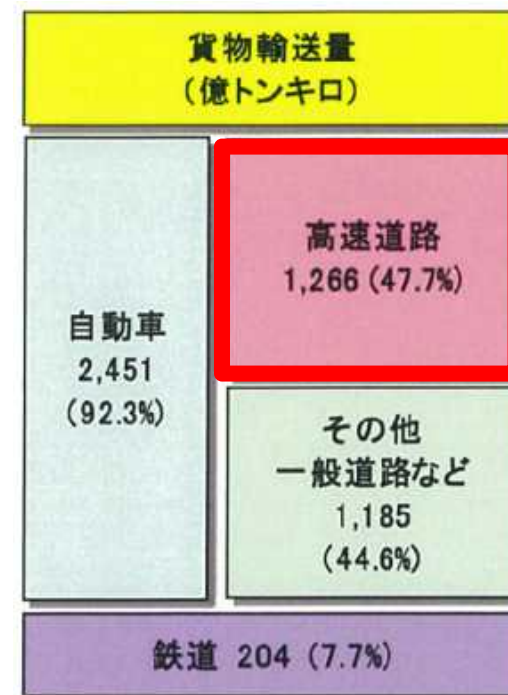
・通常点検
+ 常時・継続モニタリング

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

- 高速道路で技術を高めて一般道へ将来展開

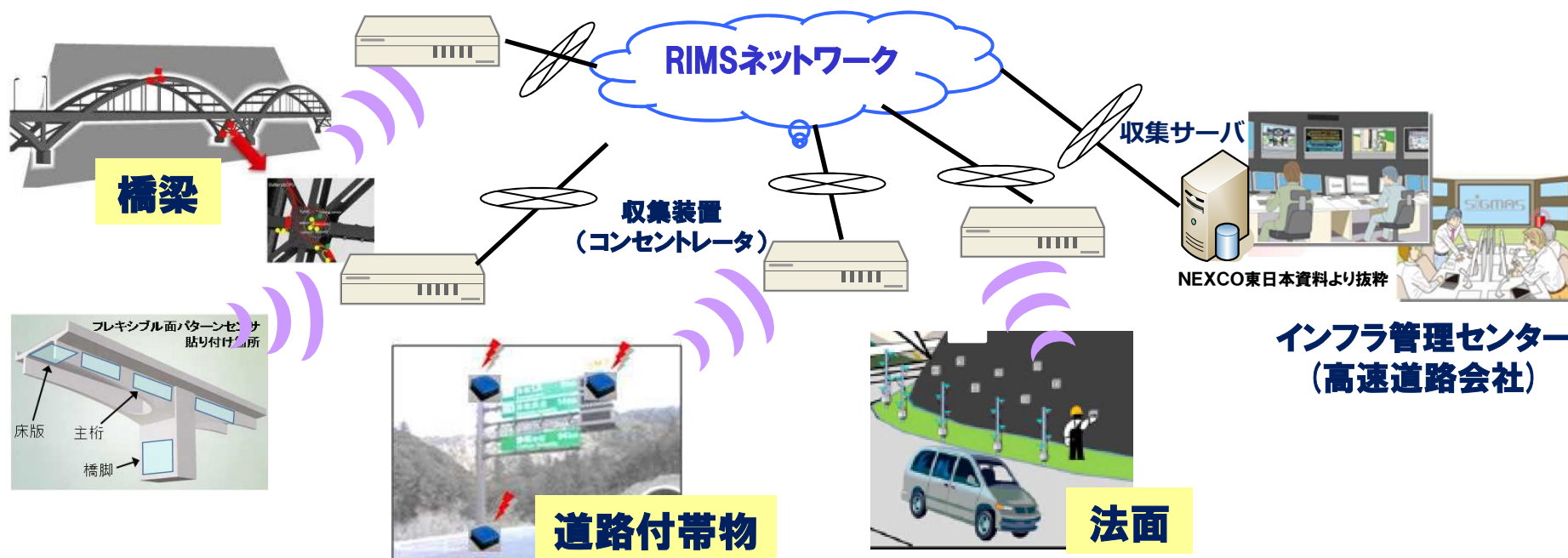


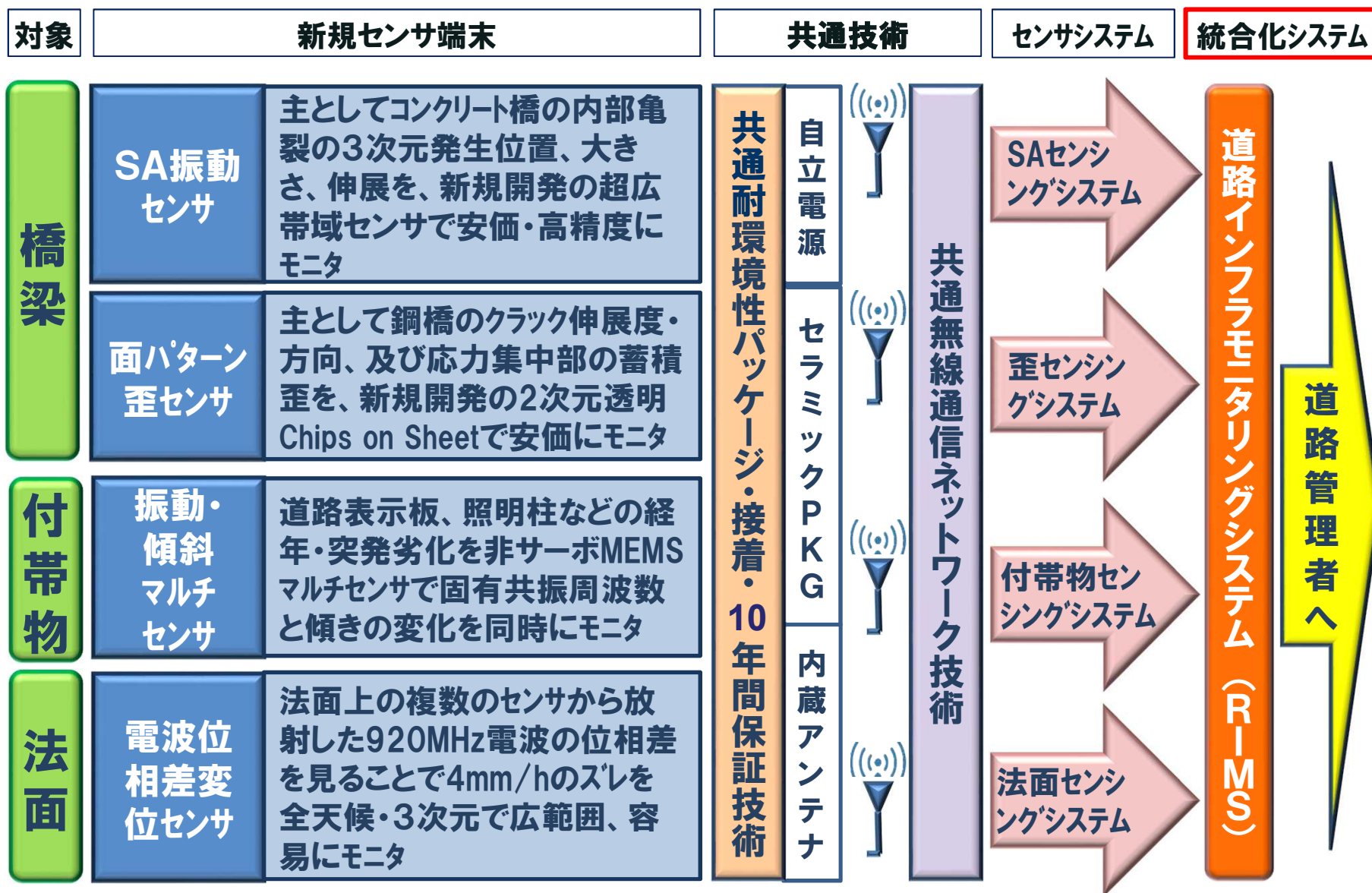
出典: 高速道路便覧(平成 24 年度)

課題を踏まえた開発内容(1) (開発概要)

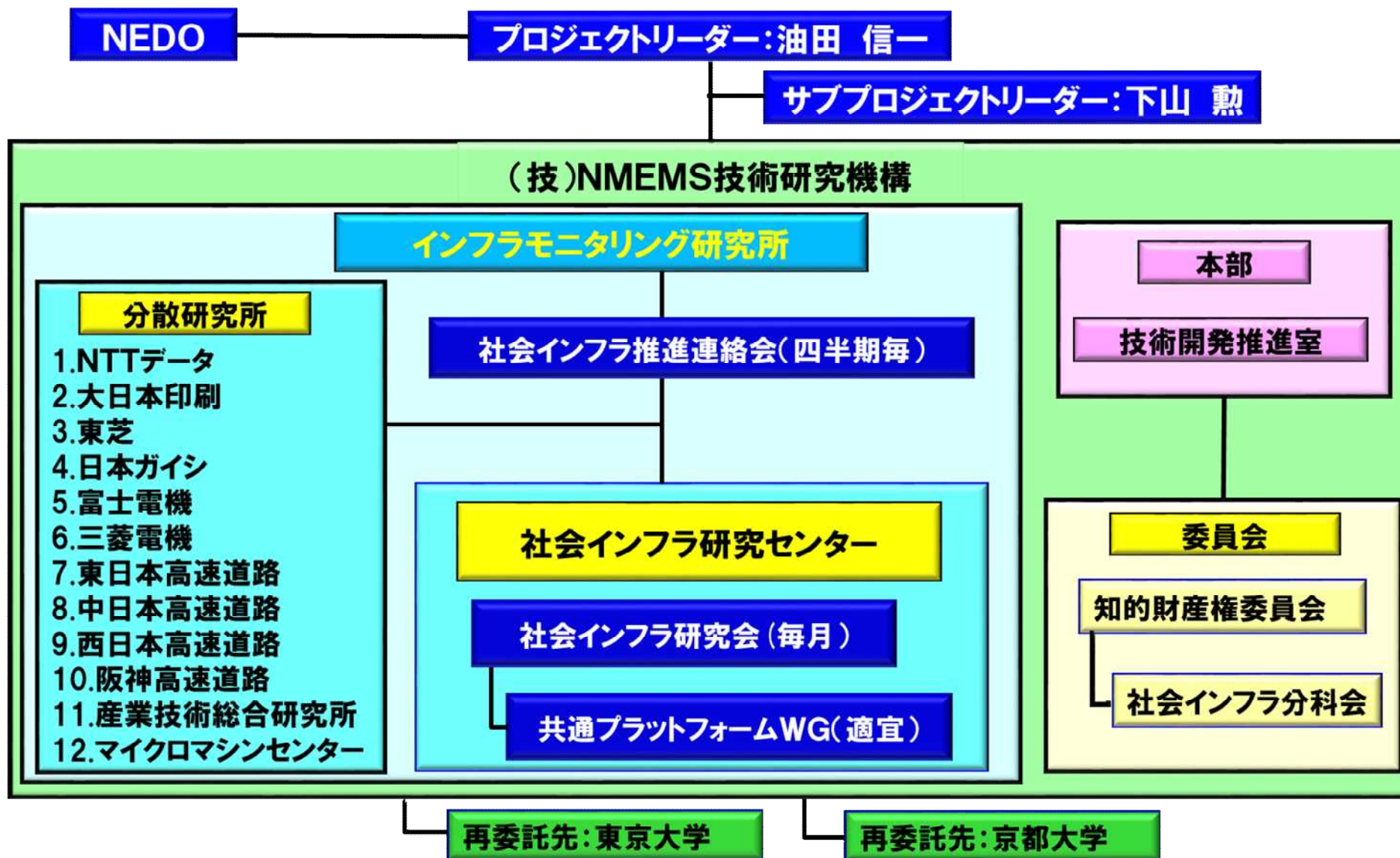


- 環境エネルギーで稼働する小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末を新たに開発
- 「橋梁センシングシステム」、「道路付帯物センシングシステム」、「法面センシングシステム」を開発
- これらのシステムを統合し、道路インフラの状態をリアルタイムに、一元的に維持・管理できる「道路インフラモニタリングシステム(RIMS: Road Infrastructure Monitoring System)」を開発
- ネットワーク技術、高耐久性のパッケージング技術に関しては共通化を図り、効率的な開発を行う





研究推進体制



研究開発評価項目への対応

1. 中間目標の研究開発目標の設定および達成度

- 各テーマとも参画高速道路会社のニーズに沿った目標を設定し、現場での予備実証実験実施中で、開発システムの現場環境への対応性の確認、実装課題を抽出。
- 各テーマとも基本計画で求められている自立電源、無線センサネットワーク、10年耐久性、突発事象対応、サイズ等のセンサ機能を有し、本年度末に来年度からの本格実証実験に供するセンサシステム開発を完了見込み。
- 各センサとも既存のセンサシステムにない優位性(小型・安価・高性能)を有する新規なセンサを実現。
- 統合化道路インフラモニタリングシステムのパイロットモデルを実現。

2. 最終目標の達成見込み

- 参画高速道路会社管理する実証実験場所が1カ所以上選定されており、予備実証実験を実施して、実証実験での課題の抽出が完了しており、最終目標を達成の見込み。
- H29年度に現在選定した実証場所での実証実験を実施するとともに、H30年度には実証場所を追加して、比較検討を行う現実的かつ有効な計画により、最終目標達成見込み。
- 既存データも有効に活用しながら実験室でのモデル化実験、大型構造物を使用した実験およびフィールド実証実験による総合的な評価を実施することで最終目標を達成見込み。

3. 事業化の見通し

- 各システムとも従来方法と比較して優位性のあるシステムになっており、各機関が事業化体制を構築して、事業化計画が立てられている。また、統合化システムに関しては、高速道路会社が核となるスキームでパッケージとして外販の計画を深耕中。
- システムは道路インフラだけでなく、エネルギー施設等他分野へも適用可能な波及効果のある技術。

4. 成果の普及、知的財産権等の確保にむけた取り組み

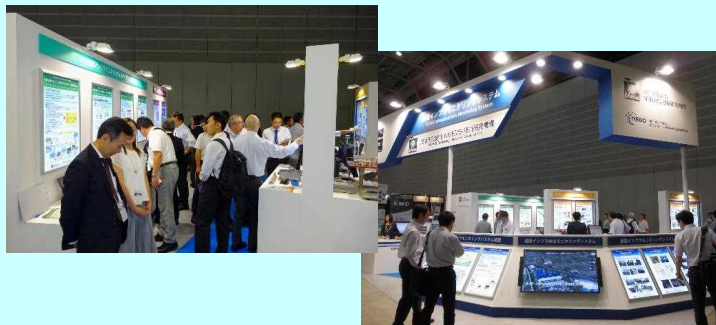
- 成果報告会、展示会、HP、ブログ等により成果の普及に努めるとともに特許19件の出願、論文4件の投稿、56件の学会発表・講演を実施し、NDT AWARDの受賞や日経新聞掲載等マスコミからも注目。

●成果報告会開催(2件)



第2回RIMS成果報告会
(2016/9/15、パシフィック横浜)

●展示会出展による広報(9件)

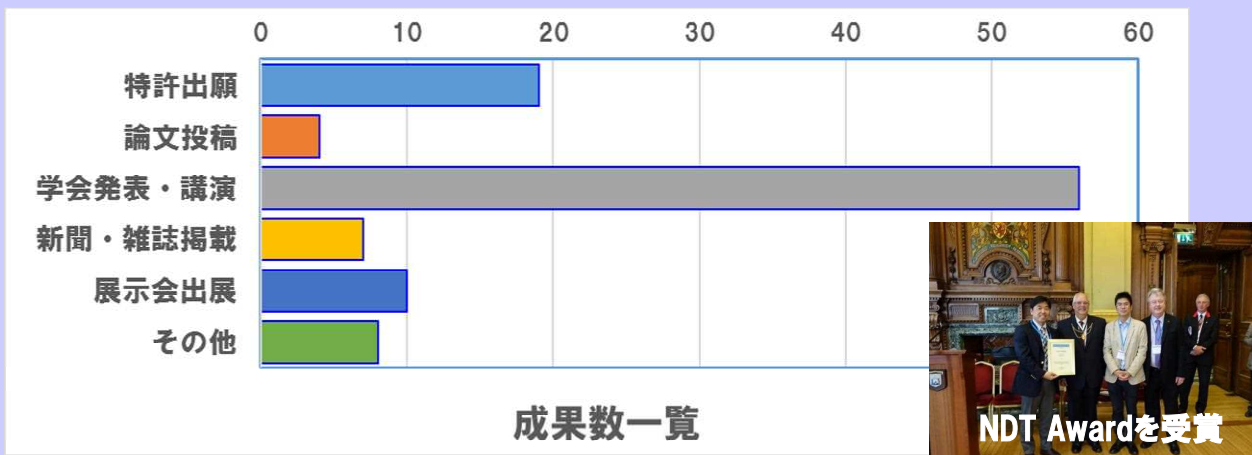


MEMセンシング&ネットワークシステム展2016
(2016/9/14~9/16、パシフィック横浜)

●HPによる成果普及 (<http://rims.la.coocan.jp/>)



●特許19件、論文4件、外部発表56件、受賞1件



●ブログによる成果発信

(http://www.nanomicro.biz/mems/c_at23755847/index.html)

○31件の投稿



写真6 Vincent Thomas橋検査路からの調査の様子

●プレス、雑誌掲載

- 日経エレクトロニクス(2014年12月8日号)等2件掲載、
- 日経新聞等3件掲載、
- 日刊工業新聞等5社取材
- 広報誌(MICRONANO Monthly、<http://mmc.la.coocan.jp/info/monthly/>)による活動報告

●米国家橋梁モニタリング実態調査

- 遠望目視、**破壊危険部材**点検や水面下点検等も組み合わせたメリハリのある点検作業を義務付け
- それぞれの橋特有の問題把握のため長大橋を中心にモニタリング実施
- **有線**モニタリングが中心
- 最近無線化の検討開始
- **自立電源化は未検討**

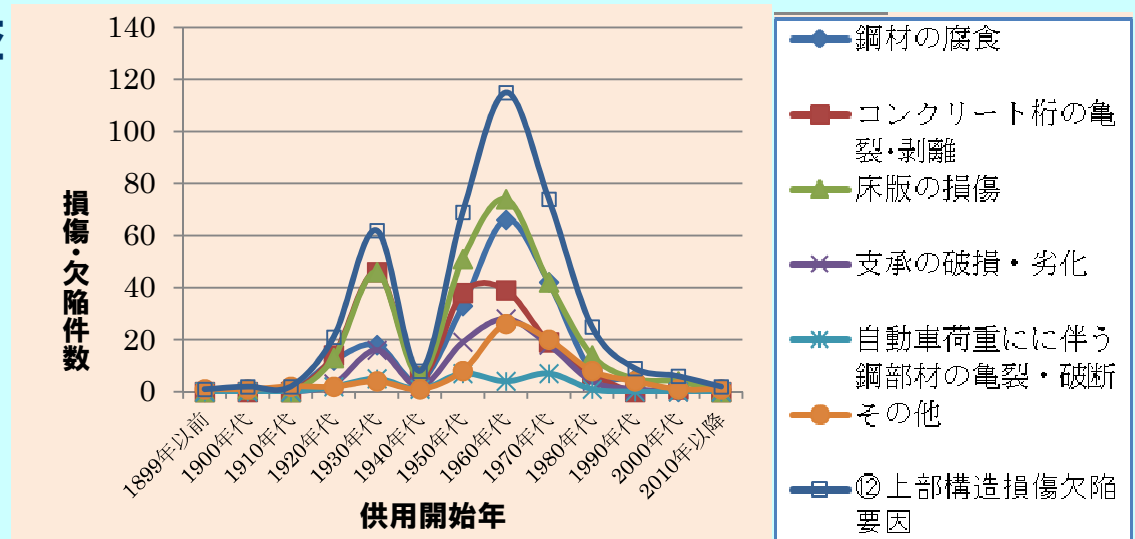


Vincent Thomas橋(カリフォルニア)



●地方自治体橋梁のリスク実態調査

- 通行止め及び通行規制橋梁 **1356** 橋梁の**リスク実態調査**実施
- 東北、関東が通行止め、通行規制をしている橋が多い
- ①**床版損傷**、②**鋼材腐食**、③**コンクリート桁亀裂・剥離**が**欠陥主要因**
- **SA、面パターンセンサ**は地方自治体でも**活躍の場**がある。



個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

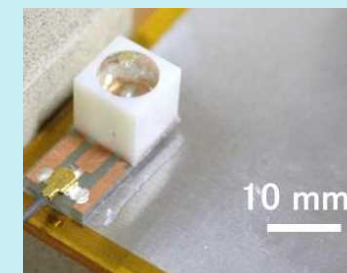
①-(1-1-1)スーパーアコースティックセンサによる橋梁センシングシステムの開発



研究開発の概要と差異化ポイント

①広帯域振動センサ(スーパーアコースティックセンサ、SAセンサ)

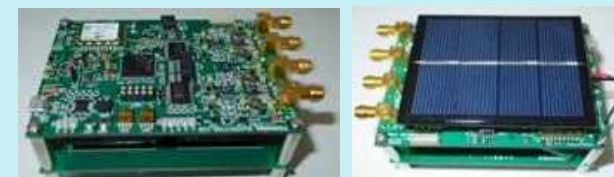
- 液体封止カンチレバー構造の新規なMEMSセンサにより、広帯域(**数Hz~1MHz**)の振動を1つのセンサで検出
- それにより、橋梁の健全状態から、初期劣化(マイクロ破壊:10kHz~1MHz)、中間劣化(メゾ破壊:数100Hz)、限界劣化(マクロ破壊:数Hz)までを1個のセンサで検出可能



SAセンサ

②自立発電動作可能な低消費電力小型無線センサ端末

- エッジ端末での特徴量抽出により**1/1000程度にデータを圧縮**
- スリープ機能を有する低消費電力回路
- 省電力無線データ伝送



小型端末

③コンクリート構造物の内部健全度評価

- 周波数フィルタリングとAE源位置標定精度などによるノイズ除去
- 1次AEと2次AEにより亀裂の伸展と既存ひび割れの定量的評価
- AE源位置標定、AE密度分布と速度構造解析による**コンクリート内部の健全度評価**

①-(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

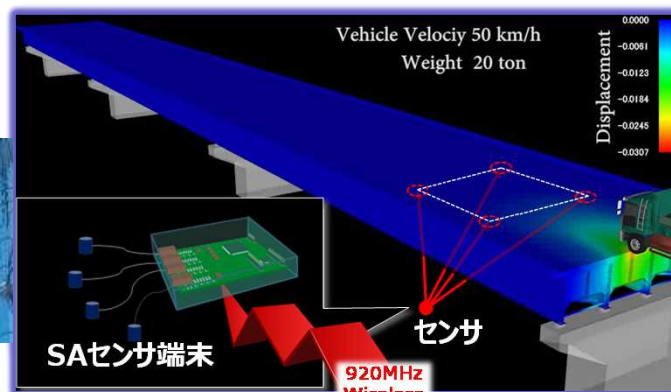
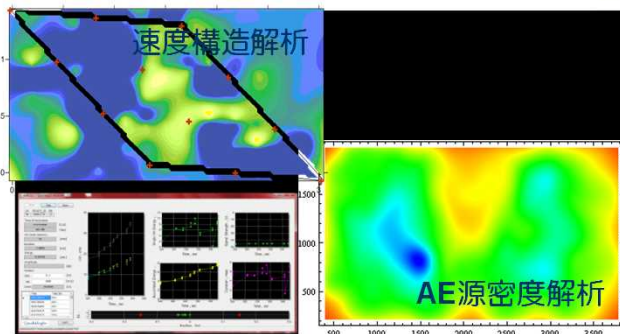


適用イメージ

1. 用途: **橋梁コンクリート床版の内部損傷**をモニタリング
 外観から判別できない内部ひびわれの発生状況をモニタリング。
2. 方法: 4ch SAセンサ搭載小型センサ端末使用。新たに開発した、AE源密度および弾性波速度構造分析を組み合わせた解析法より、**ひびわれの発生位置を3次元で可視化**。モニタリングにより進行状況を監視。
3. 目標価格: 数万円/m



床版の劣化状況を遠隔監視



これまでの研究開発の状況

①-(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

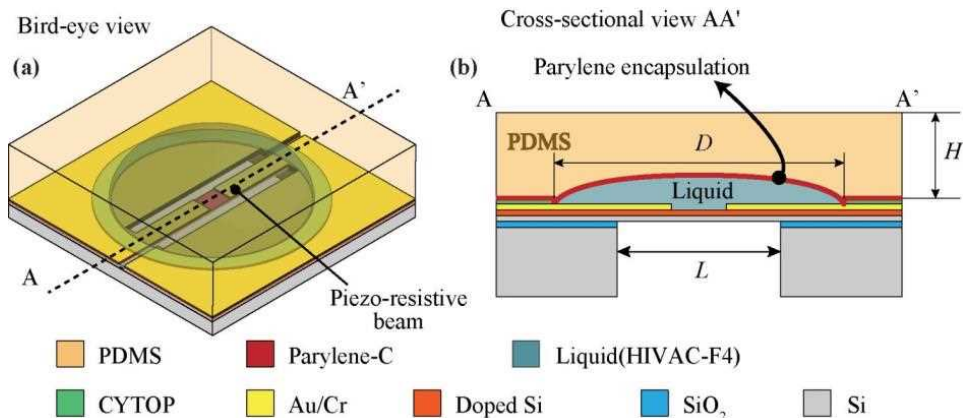


研究開発成果

○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

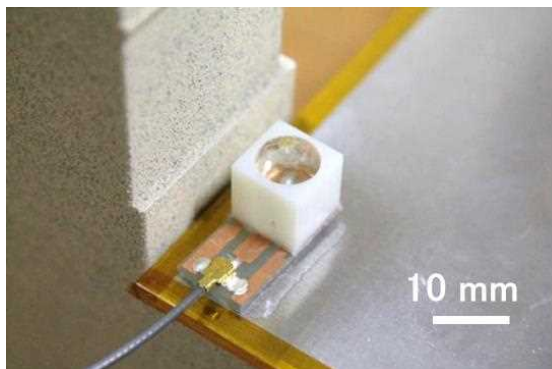
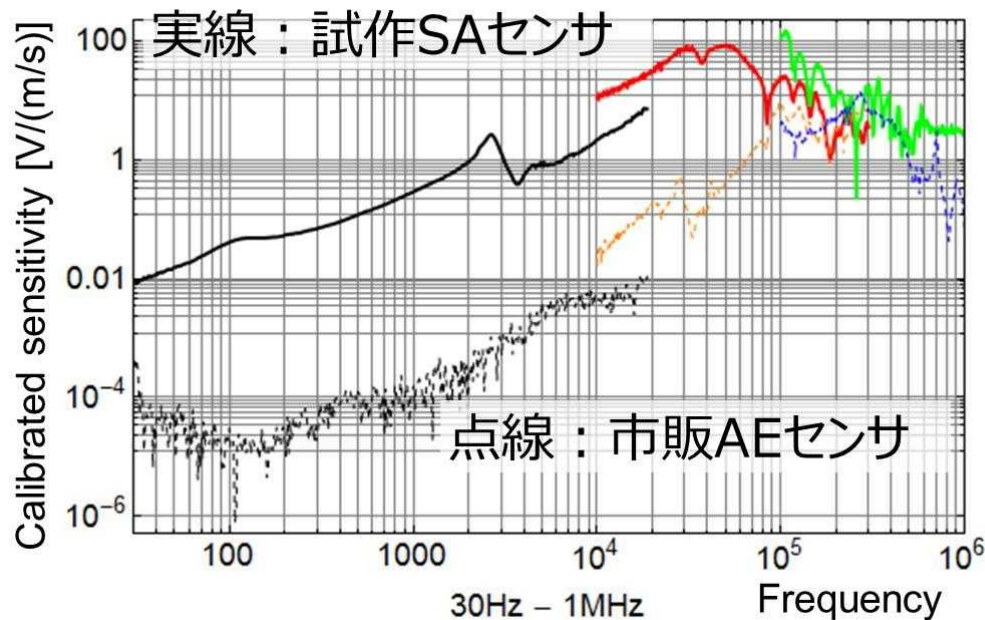
SAセンサの構造



Beam length: 300 μm , width: 10 μm ,
 thickness: 0.3 μm
 Liquid size: $D = 900 \mu\text{m}$,
 PDMS block size: $\phi = 8 \text{ mm}$, $H = 10 \text{ mm}$

周波数応答特性

市販AEセンサとの比較



試作SAセンサ外観

個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

これまでの研究開発の状況

①-(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



研究開発の概要と差異化ポイントと適用イメージ

1. **鋼橋の亀裂**の発生、伸展、伸展方向をモニタリング可能なフレキシブル、超低消費電力、自立電源、無線送信機能を有する**2次元歪センサシート**を開発
2. 従来の箔ひずみゲージの消費電力大、アレイ化の施工困難、配線が複雑という課題を解決
3. 疲労蓄積をモニタ可能なPZT/Siを **Chip on Sheet 実装した高感度タイプ**と、すでに

変状が観察された箇所の経過観察に有利で**安価なグラフィト印刷タイプ**の2種を開発。いずれも容易に短時間施工

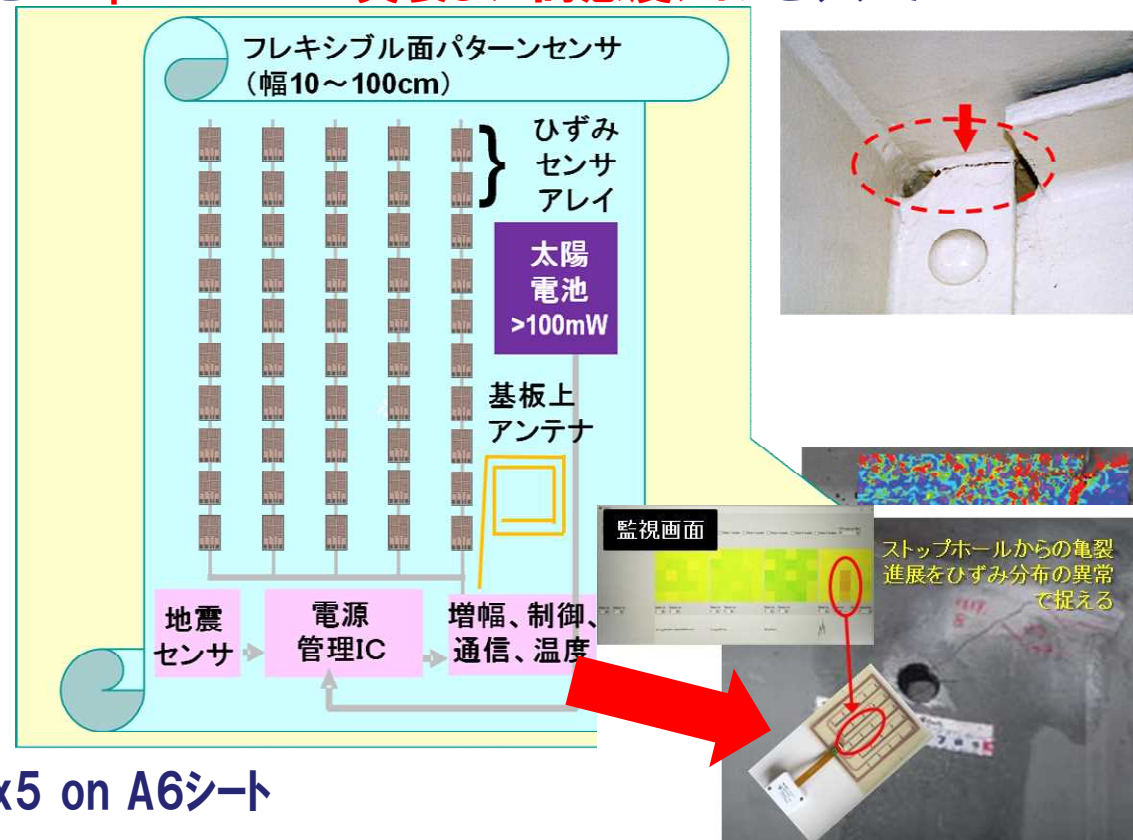
4. 高耐候性保護フィルム、高強度粘着フィルムの新規開発で**10年以上の耐久性確保**

5. **透明フレキシブルシート**により貼付け後も損傷部位の目視観察可能

6. 目標価格:

PZT/Si 2,000円

印刷グラフィト 500円 センサ数5x5 on A6シート



これまでの研究開発の状況

①-(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



研究開発成果

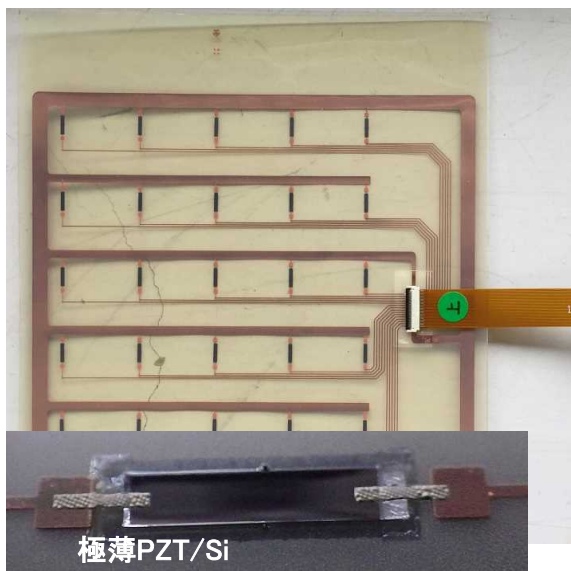
1. 高感度薄膜PZT/Si歪センサチップの開発、Flip Chip 2次元アレイ実装法の開発を完了
2. グラファイトの抵抗変化を利用したコストの安い印刷型歪センサアレイの開発を完了
3. 有機無機複合の耐湿、耐UV保護フィルム、強接着シートを開発を完了
4. 阪神高速13号線 法円坂橋梁で予備実証実験中。課題を抽出し本格実証に臨む。

- 極薄PZT/Siは感度、温特、回路の簡易性に優れる
- 印刷グラファイトは大面積化、センサ密度、コストに優れる

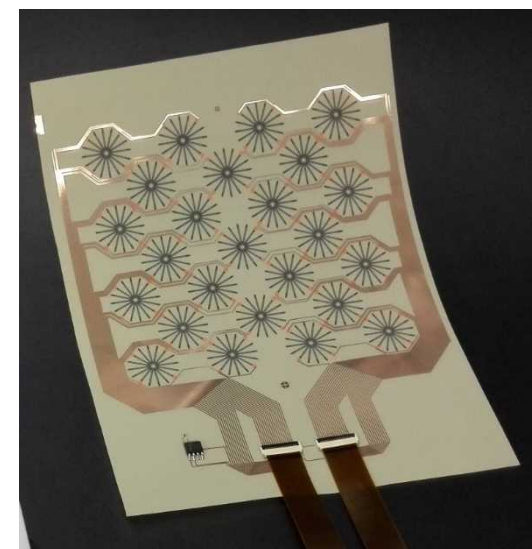
直接水かけても大丈夫



極薄PZT/Si



印刷グラファイト



これまでの研究開発の状況

①-(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



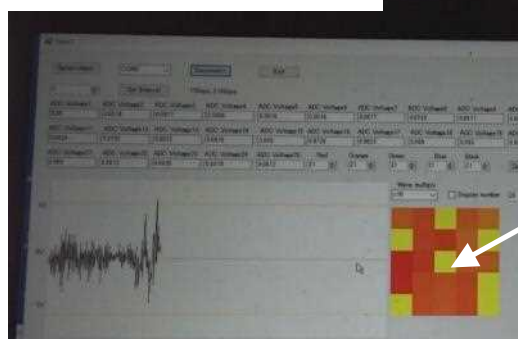
研究開発成果

- ・ 阪神高速法遠坂実証現場にて、通行車両による動ひずみ分布の測定、無線データ送信を名刺大ソーラモバイルバッテリーで動作実証
- ・ 亀裂やひびの開閉による動ひずみの増大を実証

電力	駆動時	待機
アンプ、ADC	11.84mW	0mW
MCU、RFIC	111mW	0.037mW

常時駆動: 123mW、毎時10分間: 20mW
→市販ソーラモバイルバッテリーで駆動可能

極薄PZT/Siセンサ



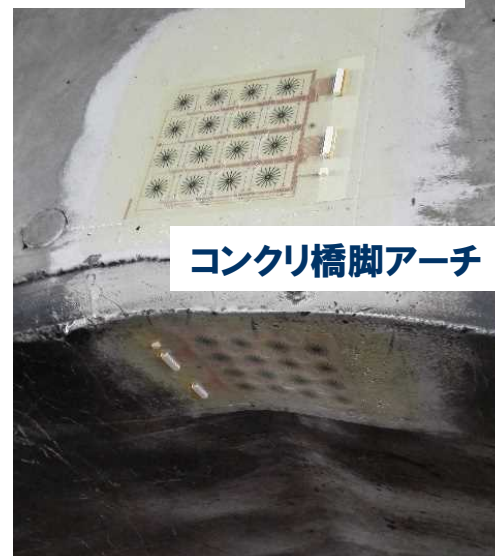
- ・ 通行車両の動ひずみ(10~100 μ e)を検出
- ・ 十分な感度でひずみ分布を示した
- ・ 溶接部の応力集中を可視化できた

鋼橋溶接部



通信ユニット

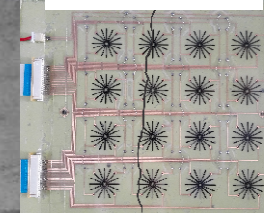
印刷グラファイトセンサ



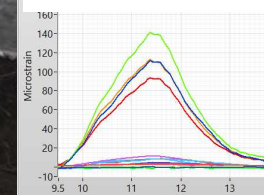
コンクリ橋脚アーチ

- ・ コンクリ橋脚のひび上にセンサを貼り付け
- ・ 動ひずみ振幅異常を可視化
- ・ 凹凸のある曲面上でもセンサが機能

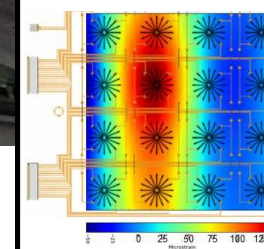
ひびの位置



車両通過時の動ひずみ



動ひずみ分布



阪神高速道路橋におけるフレキシブル面パターンセンサの実証試験

個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

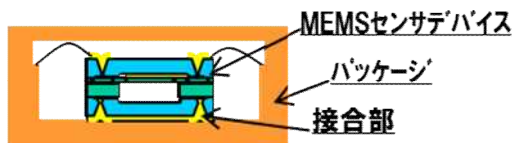
研究開発の概要と差異化ポイント

1. 道路情報板、道路照明灯等、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」により、モニタリングするシステムを開発。

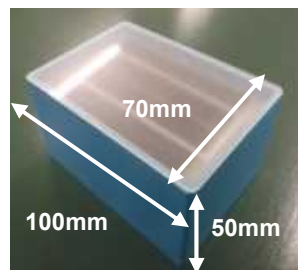
	傾き変化無	傾き変化有
振動数変化有	要検討	異常
振動数変化無	正常	正常(外力大)

参考: ICT技術を活用した道路付帯施設構造検査手法の研究 (中日本高速道路(株)より)

2. **3軸MEMS加速度センサ構造、プロセス最適化**
(対称構造化、高アスペクトエッチング)
回路の最適化、ユニット構造化
による分解能、安定性の向上
3. 自立電源で駆動する、傾斜、振動を
1個のセンサで同時計測する**非サーボ**
型高性能無線マルチセンサを実現



MEMS加速度センサ構造



傾斜マルチセンサ端末

対象構造物

道路付帯物(情報板設備、照明設備等)



これまでの研究開発の状況

①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

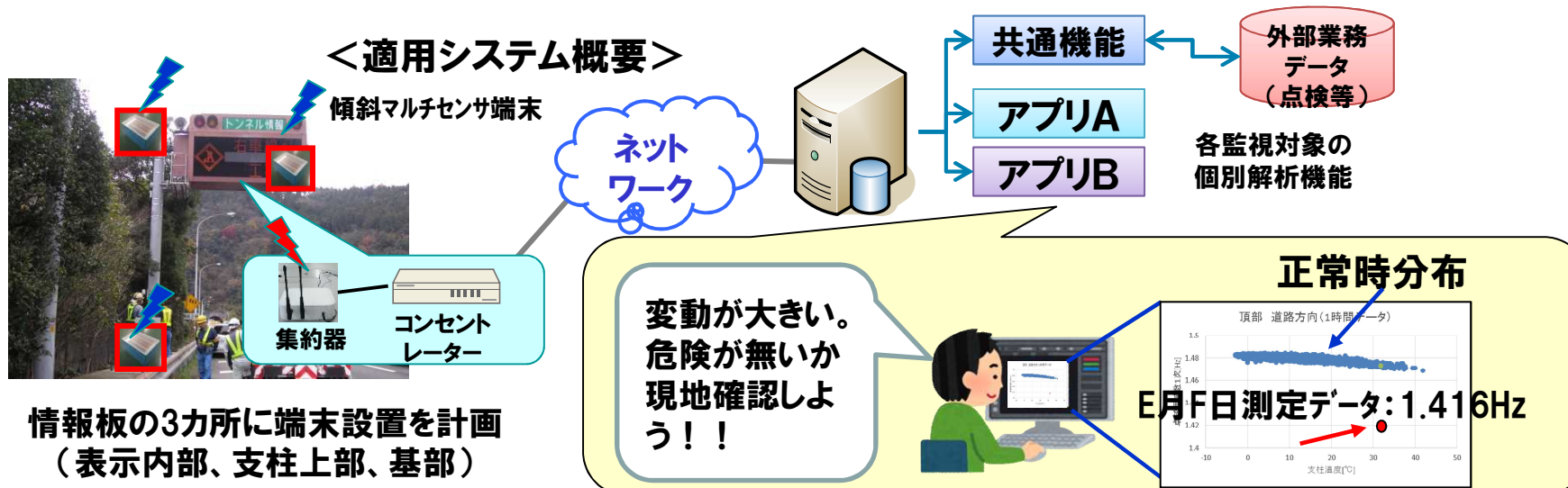
適用イメージ

1. 用途: 道路付帯構造物(情報板、照明柱、等)の劣化・損傷(ボルトの緩み・破断、支柱の腐食・亀裂等の進行、災害・事故による損傷・変形)をモニタリング

⇒現地**点検**の必要性や**優先度の判断**支援(フィルタリング)

⇒**点検業務の効率化**(設備老朽化進展、少子高齢化による技術不足への対応)

2. ニーズ: NEXCO中日本殿で約2000ヶ所、NEXCO 3社と阪神高速道路合計で約10,000ヶ所



個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

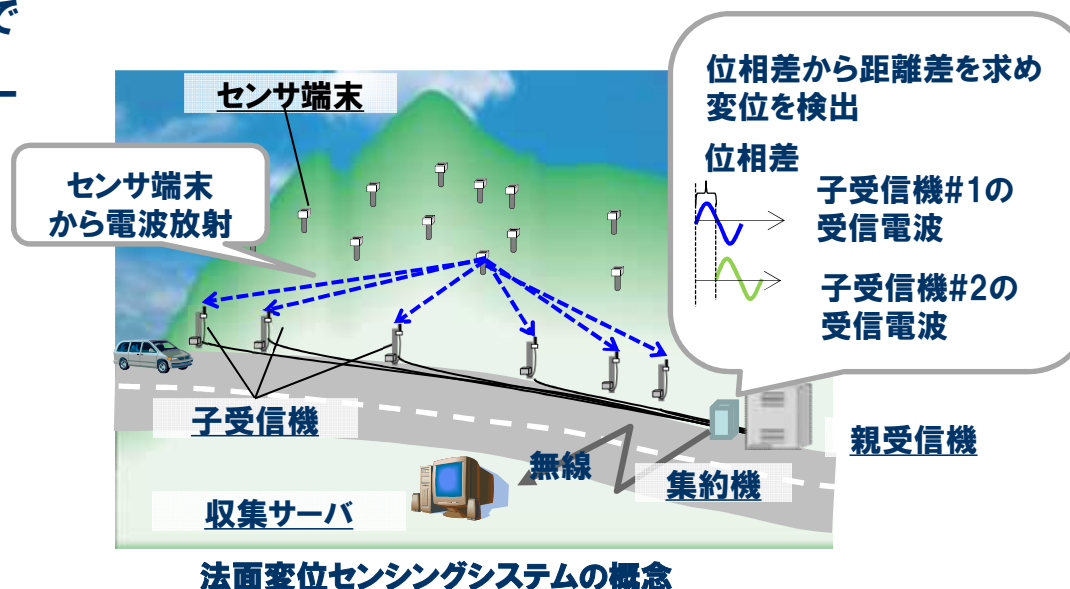
(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

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**で法面の**3次元絶対変位**を高精度(ミリメートル級)で計測
- ◆多点同時計測により、すべり面の想定・比較が可能
- ◆GPSと比較して、高い即時性
- ◆傾斜計と異なり、変位で規定された法面点検の目安*との直接の比較が可能



*高速道路会社における維持管理段階での法面点検等の目安値

点検・要注意または観測強化: 10mm以上/30日、対策の検討: 5~50mm/5日

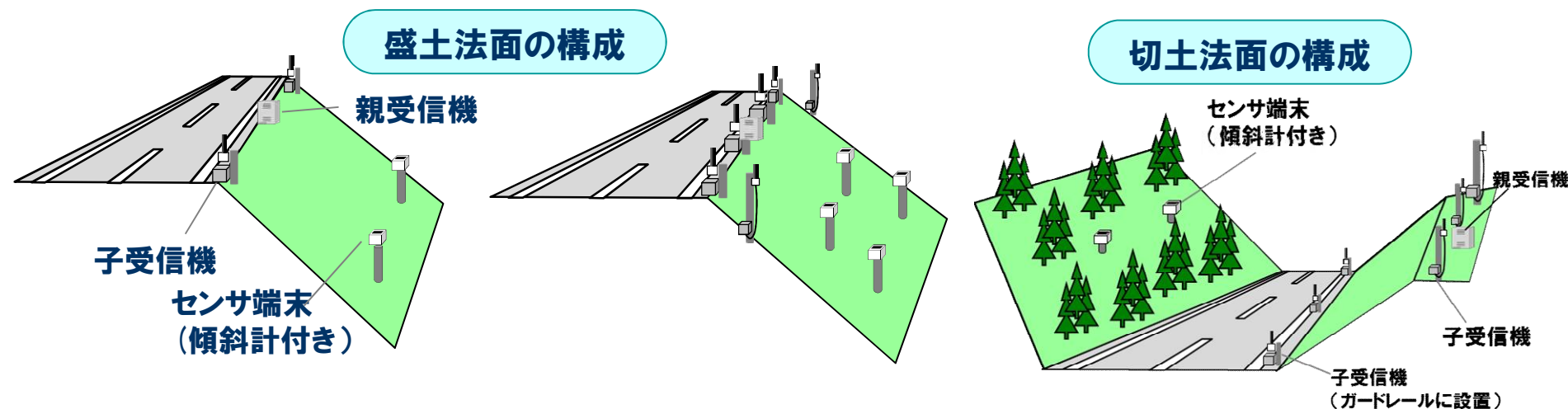
警戒・応急対策通行止めの検討: 10~100mm/1日、**嚴重警戒・通行止め: 4mm以上/h**

これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

適用イメージ

- 用途: 法面の点検・診断に必要な3次元の絶対変位を**ミリメートル級**の精度で計測。
小規模から大規模法面まで崩壊の規模に応じた**スケーラブルな構成**が可能。
- 適用想定個数と価格: 高速道路の要対策箇所は2500箇所、一般国道の危険箇所は52万箇所。
目標価格は規模に応じて100万円(小規模崩壊)~1000万円(大規模崩壊)



傾斜計+1次元変位

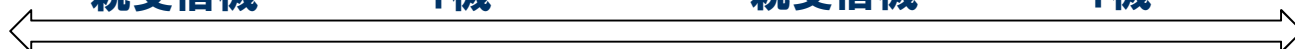
傾斜計+ 3次元変位

小規模崩壊 100万円程度

- ・センサ端末 数個
- ・子受信機 2機
- ・親受信機 1機

大規模崩壊 1000万円程度

- ・センサ端末 10~20個
- ・子受信機 8~16機
- ・親受信機 1機



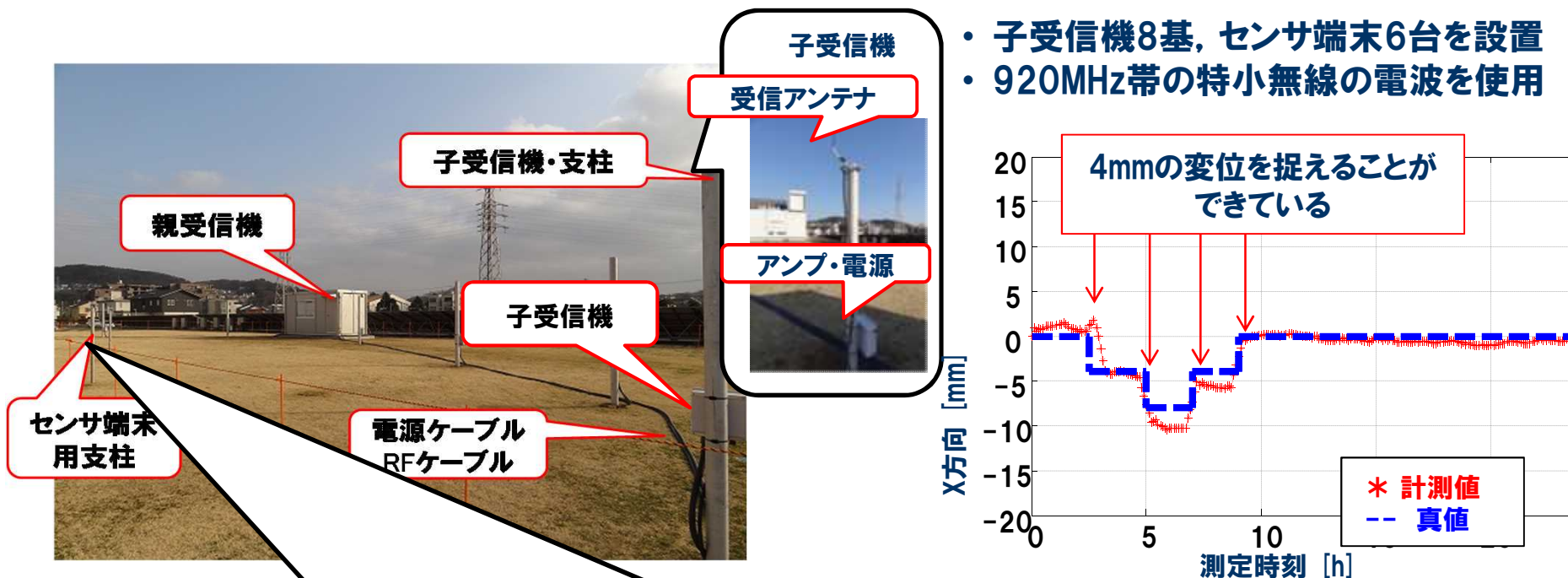
これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

研究開発成果1

(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験 基礎実験による検証

- 試作したセンサ端末を用いた実験により4mmのステップ変位を計測することに成功



- 子受信機8基, センサ端末6台を設置
- 920MHz帯の特小無線の電波を使用

Y方向

Z方向

X方向

センサ端末

3軸ステージを用いて、センサ端末を強制的に±4mm変位

太陽電池モジュール

7cm

10cm

5cm

蓄電デバイス

基板(無線モジュール, 電源制御等)

これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

研究開発成果

(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験(実証実験の準備)

- 実証実験場所である月山湖PA斜面で簡易変位計測装置による変位計測実験を実施

法面小段(こだん)に親受信機, 子受信機, 校正用センサ端末を設置

北

親受信機設置

校正用センサ端末 (位置が既知の端)

センサ端末

子受信機#0

子受信機#1

子受信機#2

子受信機#3

アンテナ

アンプ

バッテリー

005 P

004 GP101

003 GP.3

BG12-4

B9-2

計測ポイント#1 (近距離:20m)

計測ポイント#2 (中距離:70m)

計測ポイント#3 (遠距離:90m)

20m

Google Earthより

電池

ノートPC

親受信機

子受信機#0~3のRF信号

1級基準測量	005 P
	004 GP101
	003 GP.3
孔内伸縮計	BG12-4
	B9-2
	BG9-1

月山湖

月山湖PA斜面での簡易変位計測装置(端末on三脚)による実験

個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

これまでの研究開発の状況

①-(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

研究開発の概要と差異化ポイント

背景/課題

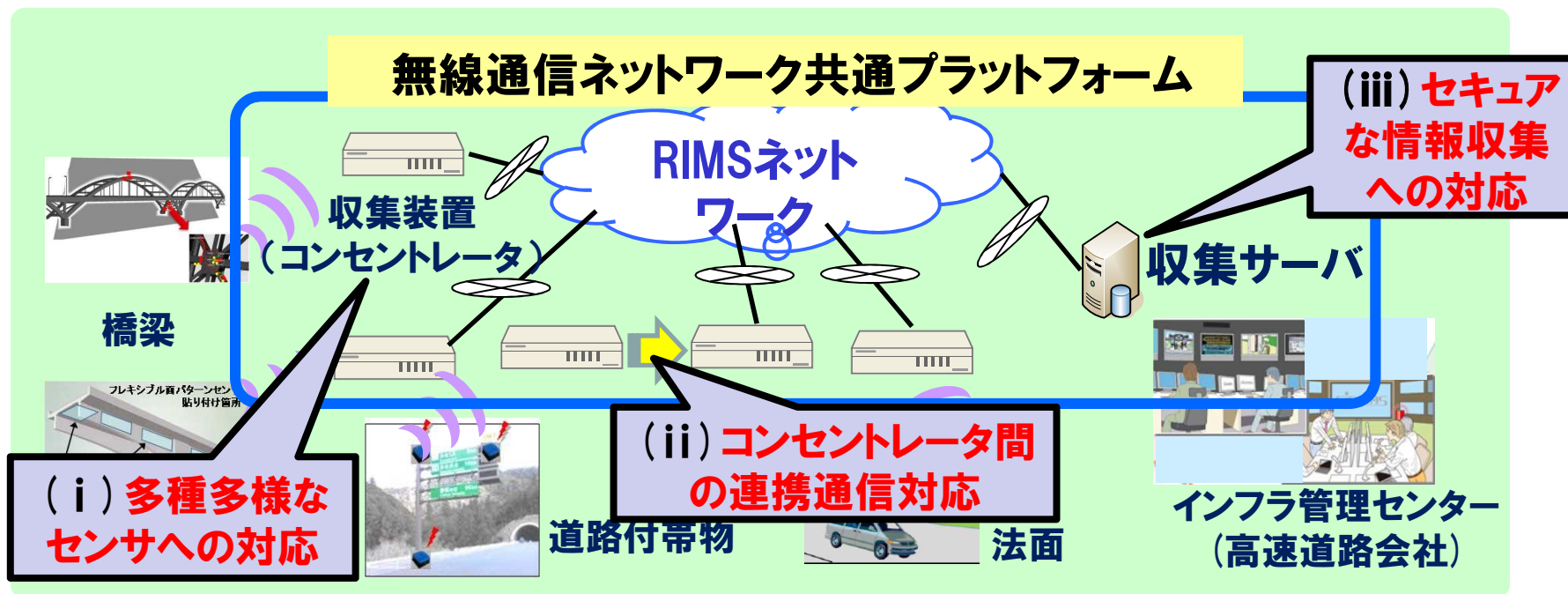
道路インフラの老朽化や定期点検要領の更新などにより、多種多様なセンサが設置されるに伴い、通信基盤の重複による非効率

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



道路インフラモニタリングシステム(RIMS)

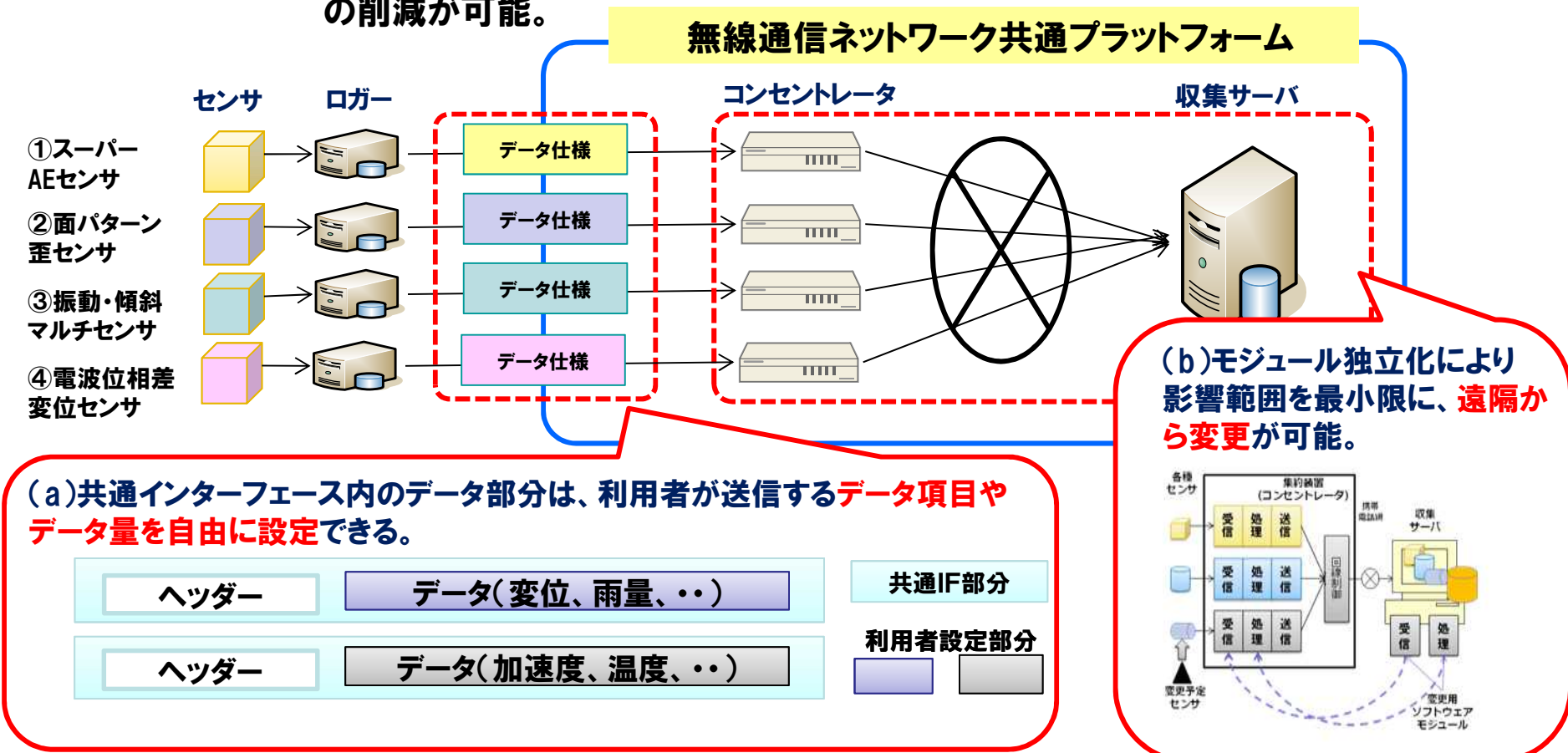
これまでの研究開発の状況

①-(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

研究開発成果

○(i)多種多様なセンサに対応するための通信仕様の開発

- (a) 共通インターフェースの通信仕様を定義し、4社のデータフォーマットを確定した。共通インターフェース内にセンサ会社やユーザの要望を吸収できる部分を含む構造とすることで、利用者要望を容易に対応することが可能。
- (b) 受信モジュールを遠隔から変更させる機能を開発した。ターミナルアダプターのソフトウェア更新技術をベースに、モジュール独立化することで、通信量、通信時間、コストの削減が可能。



個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

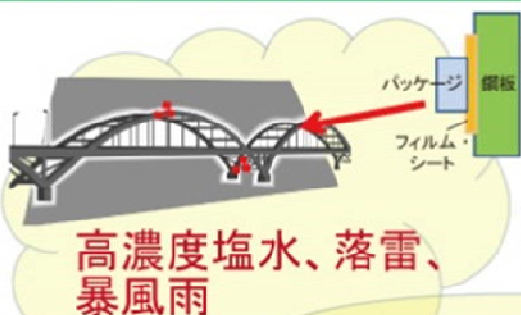
(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

研究開発の概要と差異化ポイント

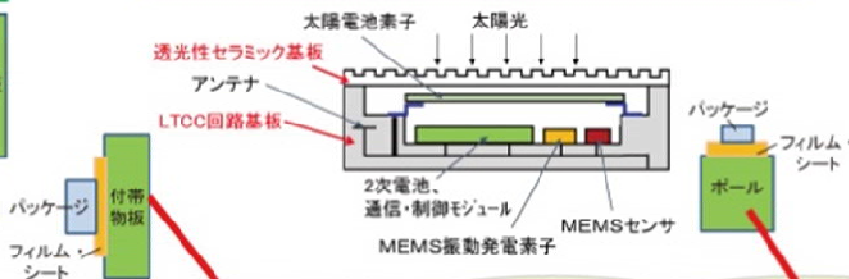
高低温、高湿、落雷、高濃度腐食ガス、高塩分濃度霧困気等の悪環境への耐性及び、小型・軽量を実現するために、共通技術として、**無線アンテナ、自立電源、処理回路を内蔵**するオールインワンセラミックパッケージ、構造物への接着材料・プロセス技術、**10年保証**する試験技術を開発する。

概要図



道路インフラ環境ストレス

オールインワンパッケージング



パッケージを
簡易施工接合
シート実装

大雪、暴風雨、
高温、低温



落雷、暴風雨、
強振動、高濃度
腐食ガス



①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

研究開発成果

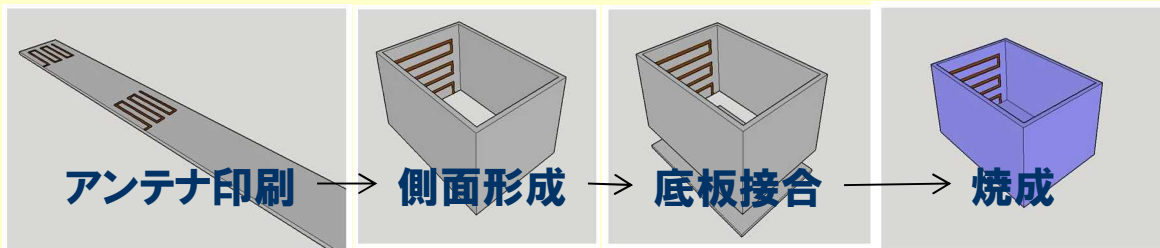
1) アンテナ形成できる大型サイズのLTCCパッケージ開発

●NEDO開発目標の70mm×100mm×50mmの大型サイズのLTCCパッケージの製造技術を開発

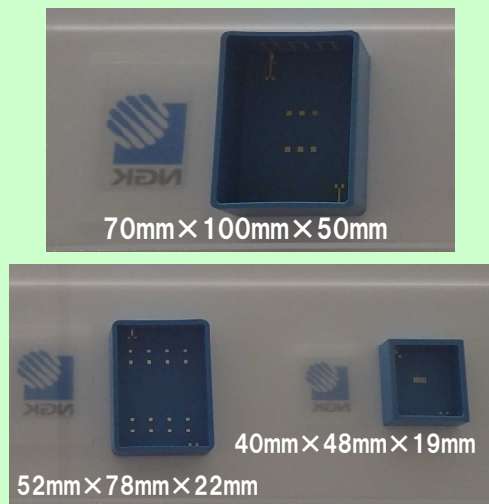
➤従来の積層方式でなく側面展開方式により、安価で**大型パッケージの製造**を実現

LTCCパッケージ製造工程

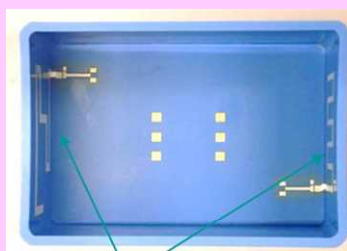
LTCC=Low Temperature Co-fired Ceramics



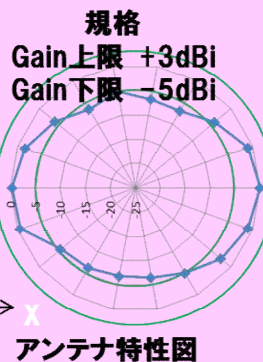
➤側板の変更により、任意サイズのパッケージを容易に実現



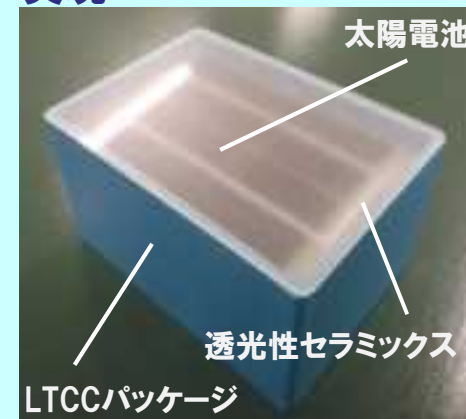
➤側板に低指向性ダイバーシティアンテナを形成することで**アンテナ内蔵**LTCCパッケージを実現



ダイバーシティアンテナ



➤透光性セラミックの接合による太陽電池内蔵**N₂封止**オールインワンパッケージを実現



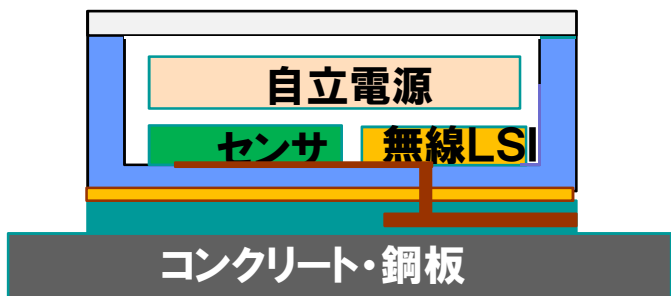
これまでの研究開発の状況

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

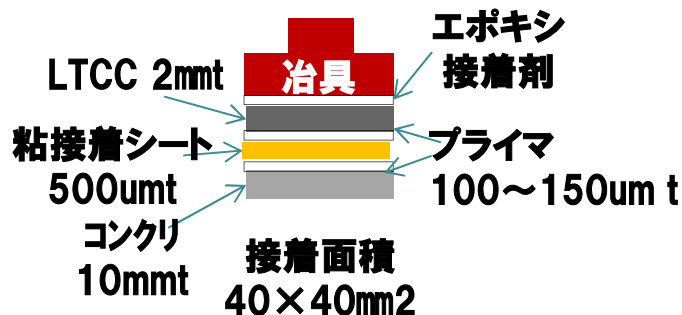
2) 構造物への接合技術開発

● JISA5557 耐久加速試験条件の1.5倍を完了し、コンクリート、鋼板、SUS312Lにおいて LTCCとの引張強度0.4MPa以上であることから**10年相当**の耐久性を確認

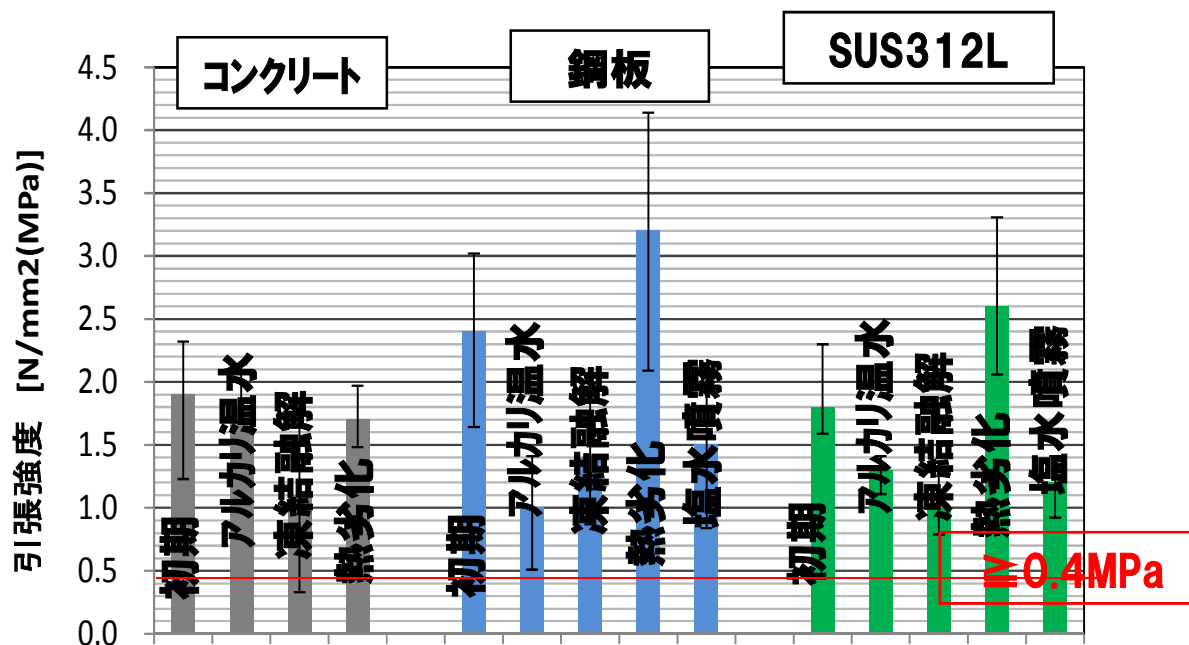
センサ端末パッケージ



引張強度試験



耐久加速試験 引張試験結果



今後の展開

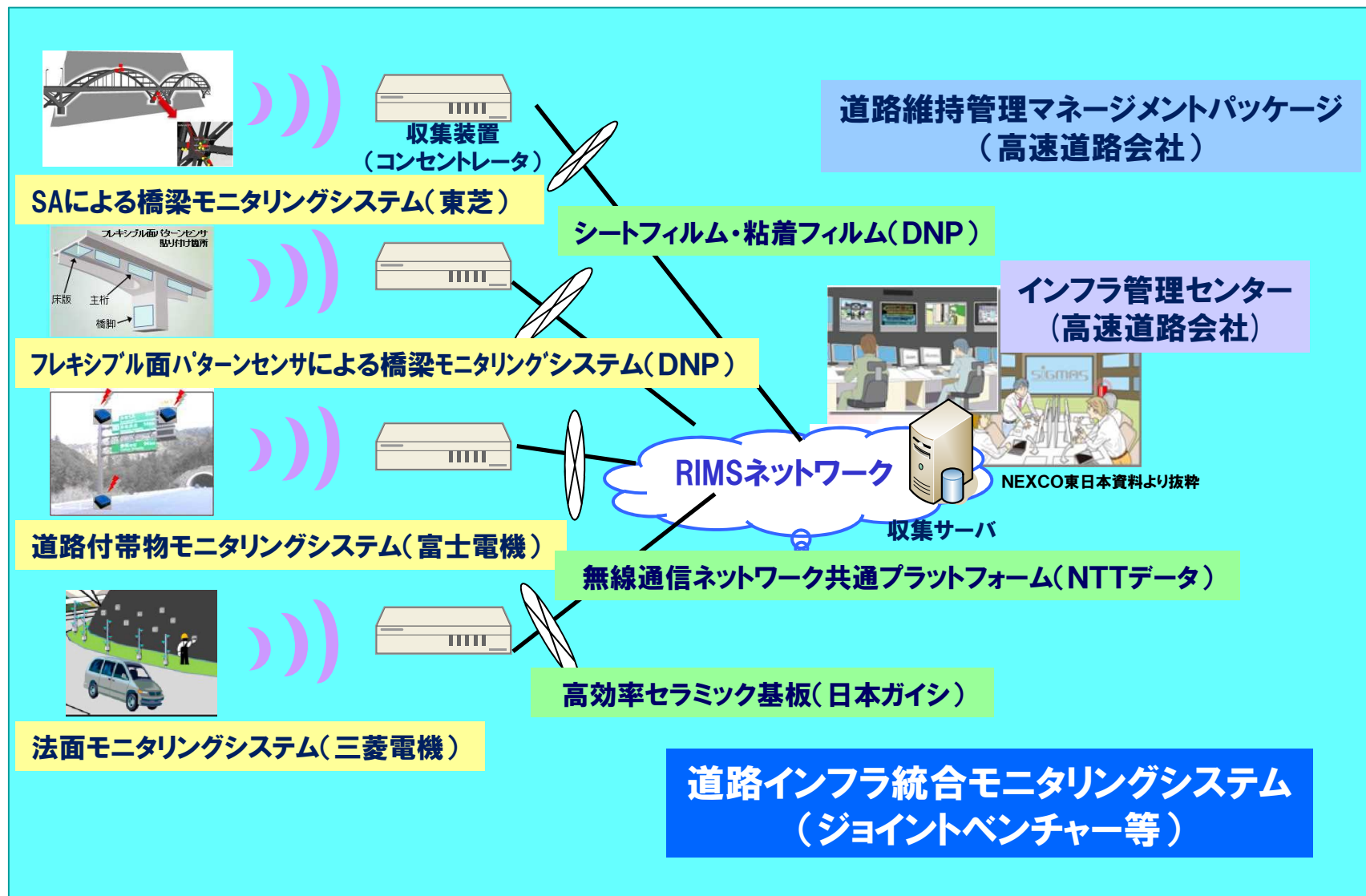
次年度以降の研究開発計画(全体スケジュール)



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)	3年で新規センサ・センシングシステムを完成			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)					
(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					
(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	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	実証実験準備			本格実証・データ蓄積	

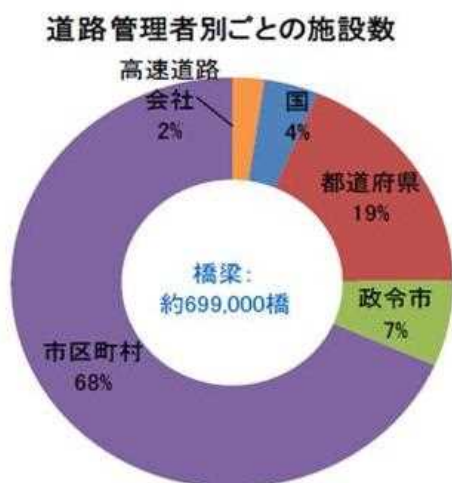
「センサシステム・共通プラットフォーム開発」および「予備実証実験完了」

事業化(全体)見通し(開発するシステムの運用方法)



事業化(全体)の見通し(波及効果)

- (1) 国、地方公共団体管理道路への展開
- (2) 他の社会インフラ(エネルギー関連施設、鉄道、港湾施設等)への展開
- (3) 海外事業展開



(出典: 国交省資料)

他道路インフラ



エネルギー関連施設



鉄道



港湾施設

全体概要説明

本テーマが対象とする具体的な社会課題

● 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

■管理する全ての橋梁の劣化状態を定量的に計測できる設置容易で安価なモニタリングシステムが必要

● 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

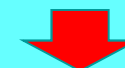


■想定外外力や損傷の定量的な連続モニタリングが必要

● 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

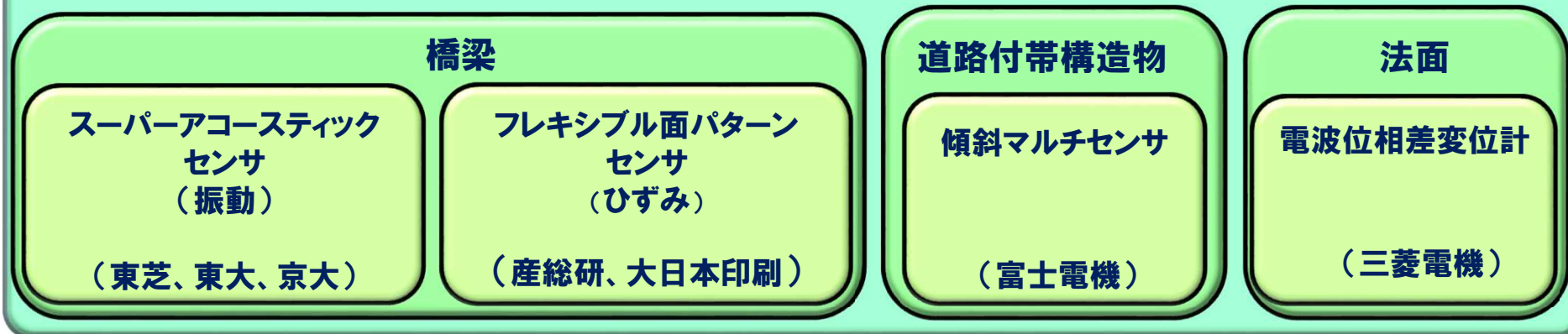


■安価で信頼性の高い連続モニタリングシステムが必要

体制・役割分担

- 役割分担を明確にした14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PDCA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



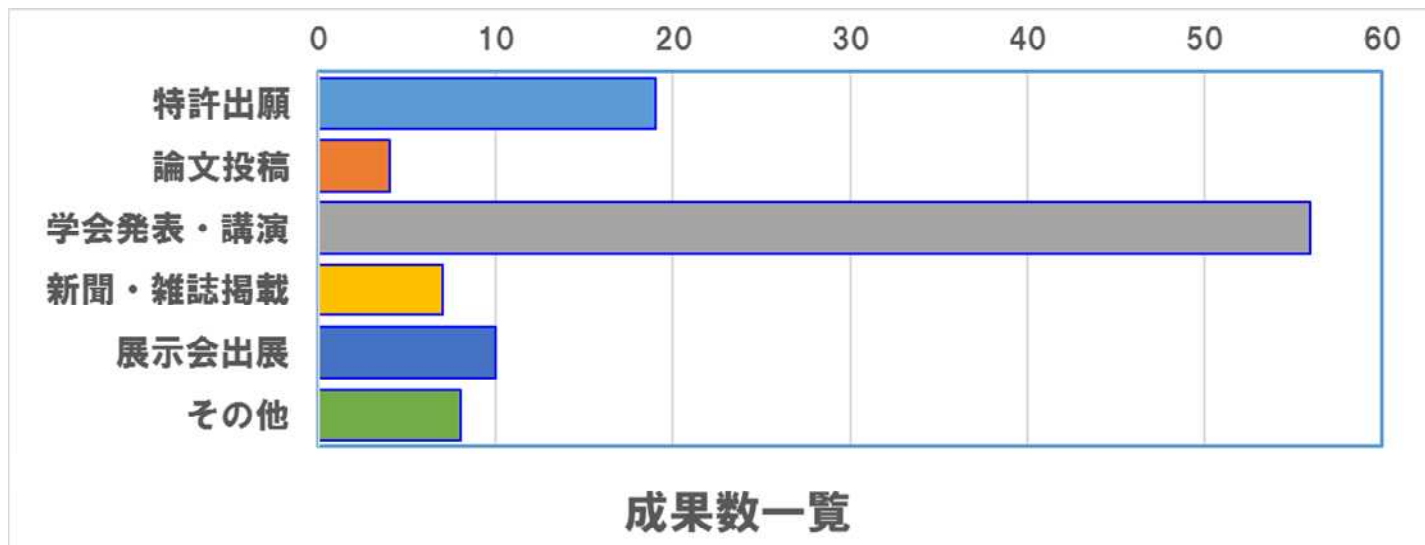
(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

● NDT Awardを受賞(「Structural Faults & Repair-21016」、2016年7月17日～19日@エジンバラ)
 “Applicability of AE Tomography for Accurate Damage Evaluation in Actual RC Bridge Deck”
 by Asaue, Shiotani, Nishida, Watabe, & Miyata



	特許出願	論文投稿	学会発表・講演	新聞・雑誌掲載	展示会出展	その他
(1-1-1) SAセンサ	6	2	20	5	3	2
(1-1-2) 面パターンセンサ	4	2	15	0	0	0
(1-2) 傾斜マルチセンサ	2	0	0	0	0	1
(1-3) 法面変位センサ	3	0	1	0	2	0
(2-1) 無線共通PF	0	0	1	0	0	0
(2-1) 高耐久性パッケージ	4	0	1	0	2	0
(3) 概要、実証	0	0	18	2	3	5
計	19	4	56	7	10	8

●成果報告会の開催による成果普及(2件)



第1回RIMS成果報告会
(2015/4/22、パシフィコ横浜)



第2回RIMS成果報告会
(2016/9/15、パシフィコ横浜)

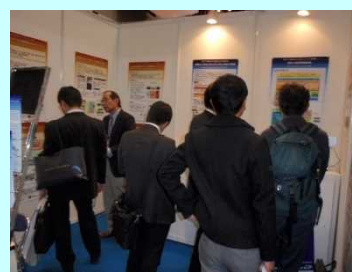
●HPによる成果普及 (<http://rims.la.coocan.jp/>)



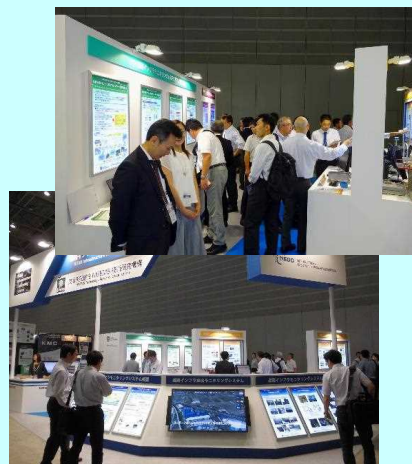
●展示会出展による成果普及(9件)



ナノマイクロビジネス展2015
(2015/4/22~4/24、パシフィコ横浜)



ハイウェイテクノフェア2015
(2015/11/25~11/26、東京ビッグサイト)



MEMセンシング&ネットワークシステム展2016
(2016/9/14~9/16、パシフィコ横浜)

●ブログによる成果発信

(http://www.nanomicro.biz/mems/c_at23755847/index.html)

○31件の投稿



写真6 Vincent Thomas橋検査路からの調査の様子

●プレス、雑誌掲載

- 日経エレクトロニクス(2014年12月8日号)等2件掲載、
- 日経新聞等3件掲載、
- 日刊工業新聞等5社取材
- 広報誌(MICRONANO Monthly、<http://mmc.la.coocan.jp/info/monthly/>)による活動報告

①-(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

①-(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



研究開発の概要と差異化ポイント

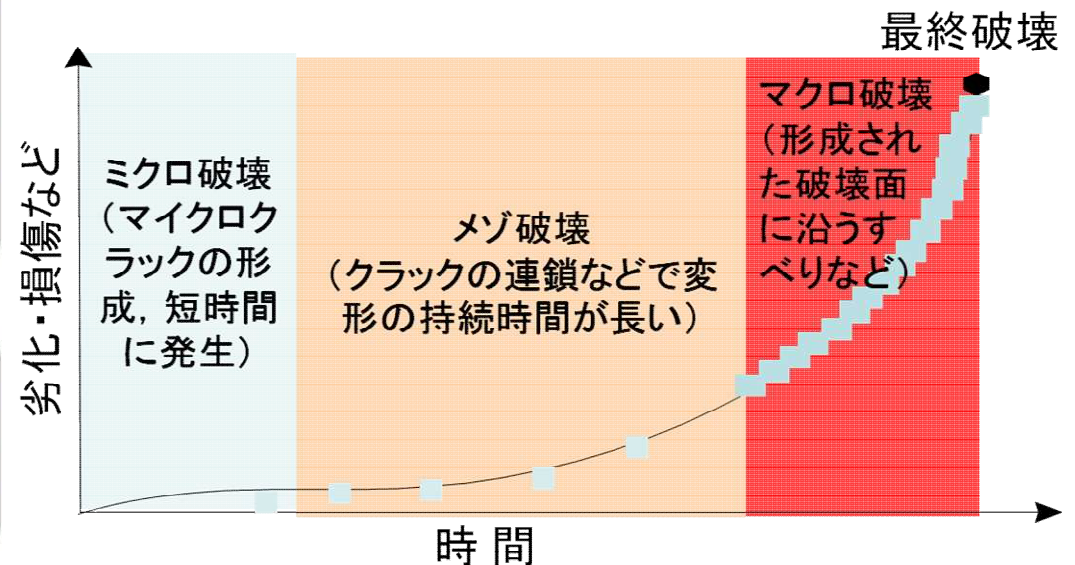
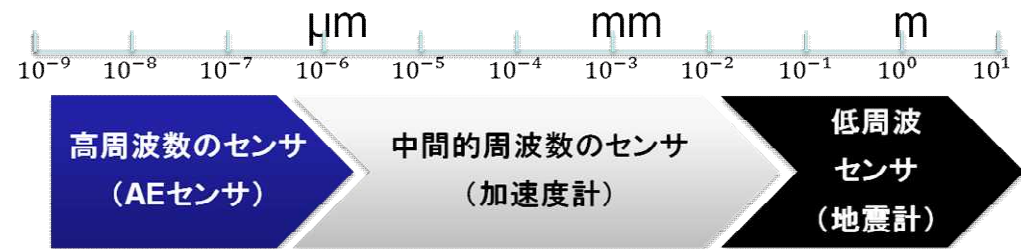
- ◆ 広帯域振動センサ(SA:スーパーアコースティックセンサ)の開発
- ◆ 橋梁の健全状態から限界劣化までを1つのセンサでカバー
- ◆ 手のひらサイズの無線センサ端末により遠隔監視

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1個のセンサで検出できるシステムの構築。

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亘り、橋梁以外にも応用展開が期待できる(構造物聴診器)



①-(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



4.対象橋梁数

全国のコンクリート床版を有する橋梁が対象。

5. どのような社会課題が解決可能か？

現在、コンクリート床版の維持管理では、損傷が進行し顕在化した状態を確認し、更新・修繕の判断を行っており、事後保全が主体となっている。

また、床版上面（内部）損傷は交通運用時に事前確認する事が困難であり、損傷状況の詳細調査を行うためには交通規制等が発生し道路利用者に影響を与えることとなる。

6. どのような展開・波及効果があるか？

コンクリート床版内部の損傷程度・範囲等を非破壊で可視化することで、適切な補修方法の検討が可能であり、継続的に計測することで、損傷の進行状況をモニタリングし、補修時期や方法の判断を行うことができる。

また、床版内部状況を確認することで、床版が健全であることの確認を行うことも可能である。

7. 実証場所

道路橋（鋼鈹桁橋のRC床版）にてセンサ端末を設置し、交通荷重によるAEをモニタリング。

これまでの研究開発の状況

①-(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

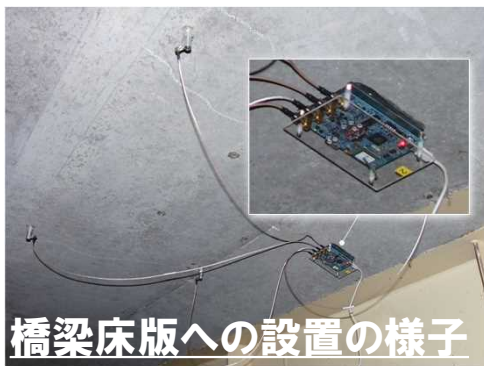
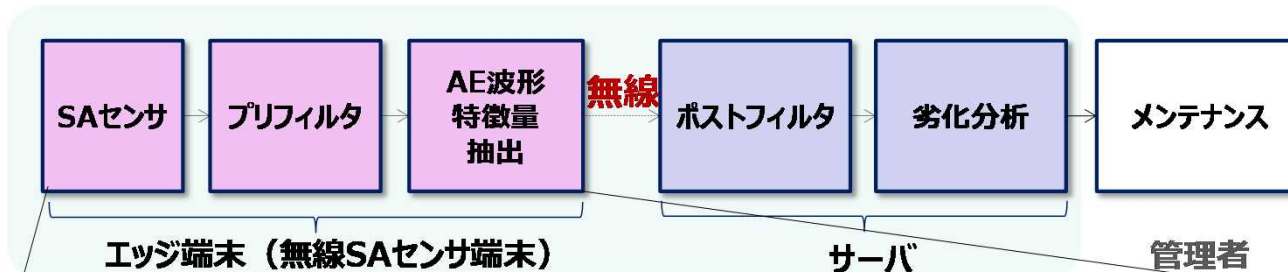


研究開発成果

○小型センサ端末の開発とシステム実証実験

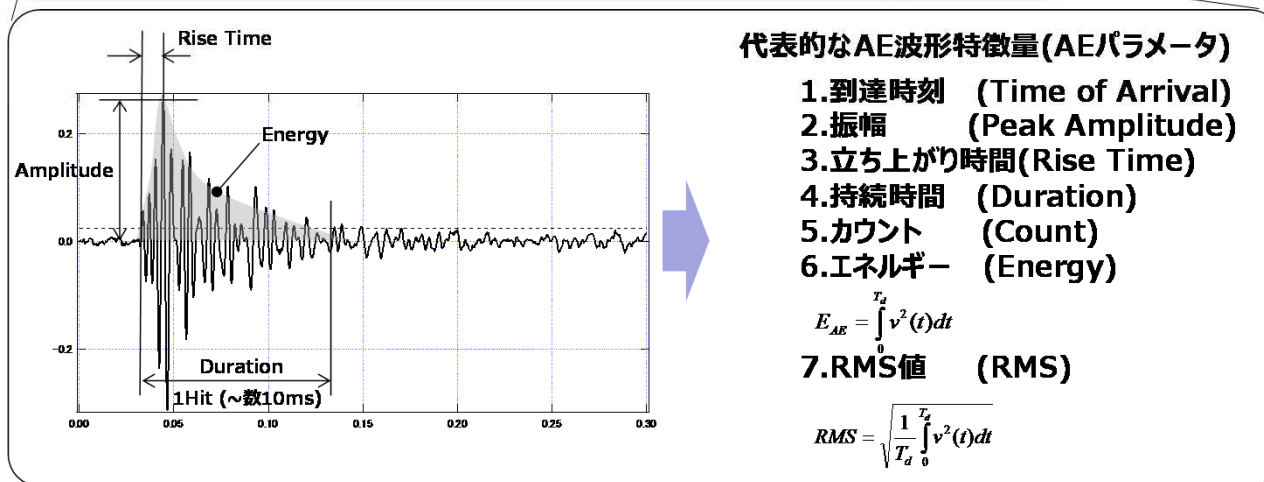
- ・自立発電動作可能な低消費電力小型無線センサ端末を開発

システムの信号処理ブロック



試作した無線SAセンサ端末

- ・小型 (100X70mm)
- ・4ch SAセンサ入力
- ・FPGAによる特徴量抽出
- ・920MHz帯無線モジュール
- ・自立発電モジュール接続



■エッジ端末での特徴量抽出により1/1000程度にデータを圧縮
→ 省電力無線データ伝送

①-(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



中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<ol style="list-style-type: none"> 1) 感度-95dB (re 1V/ubar)、帯域10kHz～1MHzの仕様を満たすSAセンサデバイスの開発を完了する。 2) SAセンサデバイスを複数搭載可能で、片手で持ち運び・取り付け可能なサイズのセンサ端末の開発を完了する。 3) 自立発電デバイスを搭載し、1時間に1回以上の送信頻度でデータ送信を確認する。 4) 小型センサ端末間のデータ相互伝送を確認する。 5) 実橋梁環境における30m以上の無線データ伝送を実証する。 6) 調査対象の損傷規模に適応した、SAセンサのさらなる高性能化指針抽出のため、損傷や劣化規模と弾性波速度や周波数などの弾性波パラメータの関係を明らかにする。 7) 開発するSAセンサから得られる弾性波の種々の特徴抽出パラメータを利用した損傷指標提案を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザニーズ適合性： 外観からは判別できない橋梁床版の内部損傷の非破壊検査のニーズが高く、本開発の対象と合致している。 ・現場環境対応性： 予備実証において、試作無線センサ端末により大型車通過に合わせた弾性波検知を確認済み（市販AEセンサ）。 ・基本的なセンサ機能： 試作無線センサ端末にて、端末間のデータ相互送信、太陽電池を搭載し、自然光下で1時間に1回の送信頻度でデータ送信を確認。また高速道路橋にて、小型センサ端末を設置し、30m以上の無線データ伝送を確認。 ・センサ性能に関する開発進捗： SAセンサを試作し、帯域10kHz～1MHzにおいて概ね-95dB (re 1V/ubar) を満たすことを確認。 ・健全性診断機能に関する開発進捗： 予備実証において、高速道路橋梁床版の内部損傷をAEセンサモニタリングデータから推定。破壊検査により推定の妥当性を確認し、高い診断能力を有することを確認した。 ・競合技術との比較： 予備実証において、電磁波レーダ、超音波エコーと比較し、高い分析精度を有することを確認。 	<ol style="list-style-type: none"> 1) H28年度末達成見込み 2) 達成 3) 達成 4) 達成 5) 達成 6) 達成 7) H28年度末達成見込み

①-(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



最終目標	達成の見込み
<ul style="list-style-type: none"> • 1) 感度-80dB (re 1V/μbar)、帯域1Hz~1MHzの仕様を満たすMEMS SAセンサデバイスの開発を完了する。 • 2) SAセンサを複数搭載し、概ね7cm×10cm×5cmのサイズの小型センサ端末の開発を完了する。 • 3) 開発したセンサ端末・ネットワークシステムを用いて、高速道路会社管轄の実環境下にて実証実験を行う。 • 4) 高速道路会社管轄の実環境下にて実証実験を行い、橋梁構造の健全性評価手法の有効性を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 完成度:仕様を満たすMEMSセンサデバイス(SAセンサ)を完成し、4chのSAセンサを搭載し、仕様を満たすサイズの端末の開発を完了する見通しである。 • 実証実験計画:完成した小型センサ端末を、高速道路会社管轄橋梁に設置し、橋梁床版から生ずる弾性波をモニタリングする。これまでに実施した予備実証の結果から、床版の内部損傷の位置、損傷レベルを位置標定、速度構造解析により可視化することが出来る見通しである。 • 社会課題への対応:橋梁のコンクリート床版において外部から判別不能な内部ひび割れの状況を可視化する非破壊検査手法へのニーズは高く、本方式がこの社会課題に対して有効な解決手法となる。

①-(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



○運用における優位性、有用性

外観から判別不可能な内部損傷を非破壊で、損傷位置、程度を可視化した情報を提供でき、他の方式にはない優位性、かつ有用性を有する。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

センサデバイス、小型センサ端末の製品化と橋梁健全性診断サービスの事業化の両面から事業化を検討している。いずれも本開発の予備実証を通して、実現性が確認されつつあり、H29,30年度の実証試験を経てその確度が高まるものと考えている。

○実用化に向けた体制

デバイス、端末の製品化、橋梁健全性診断サービスの事業化は東芝グループが担当する予定である。

○目標とする事業規模

想定される事業規模(橋梁インフラモニタリング)は、2020年で600億円、2030年で3,200億円が見込まれ、橋梁以外への展開を含めればさらに拡大する。

○波及効果

道路インフラ以外の鉄道、港湾施設、プラント等の構造物モニタリングにも適用可能。

補足説明資料

①-(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

①-(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



適用イメージ

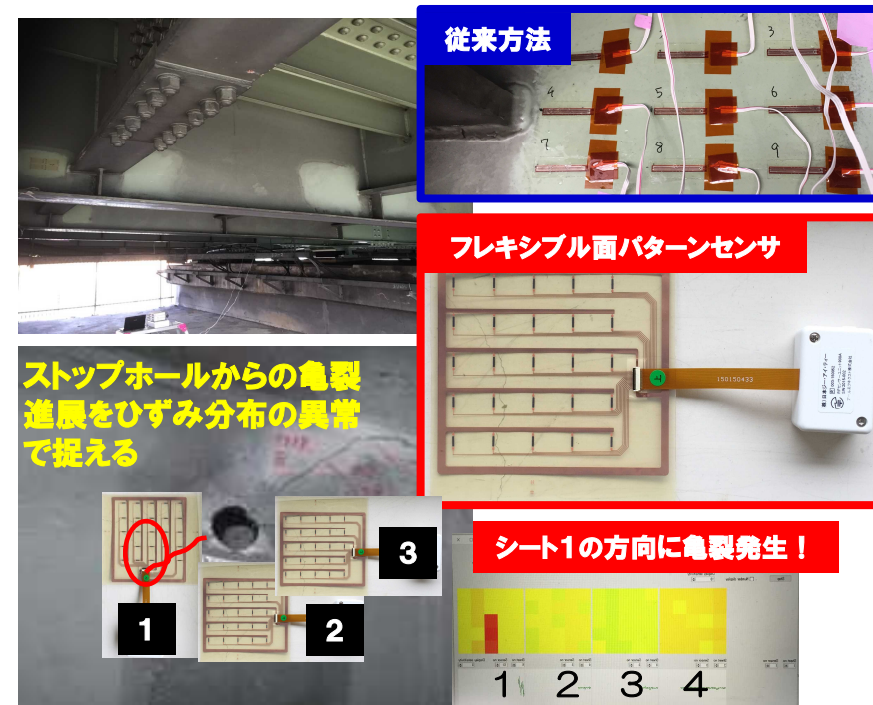
1. 用途: 鋼橋の亀裂の発生、伸展をモニタリング

- ・ 現状: 阪神高速だけでも疲労亀裂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という課題。

2. 対象: 鋼橋の重点監視位置(歪の常時モニタリング)、異常(亀裂、塗装浮きなど)発生個所の劣化の伸展、伸展方向 2次元モニタリング

3. 方法: 透明フレキシブルシート上に、2次元歪センサアレイ、高耐候保護フィルム、超強力接着シートを新たに開発し、貼り付けるだけで上記2種類の歪分布を簡便にモニタリング

4. 目標価格: PZT/Si 2,000円 印刷グラファイト 500円 センサ数5x5 on A6シート



フレキシブル面パターンセンサの設置イメージ

①-(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



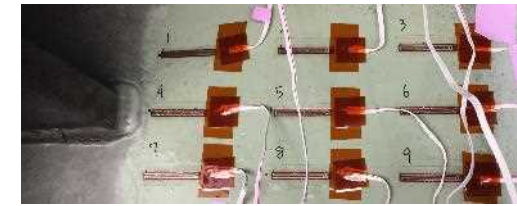
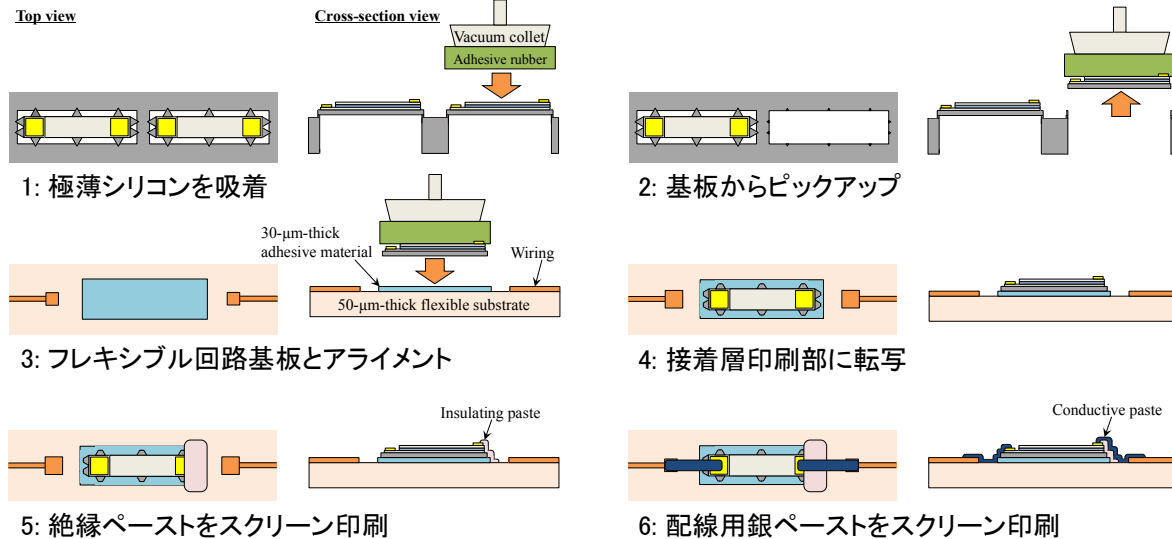
研究開発成果

■従来技術の課題

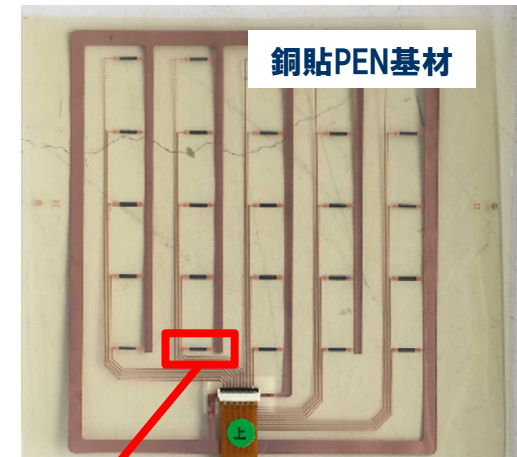
- ・市販ひずみゲージは消費電力大、アレイ施工困難、配線が複雑

■方法

- ・MEMS技術で作製した極薄PZT/Siをフレキ基板上にアレイ化
- ・Amp、ADC、MCU、RF-IC集積モジュールでデータ処理、通信



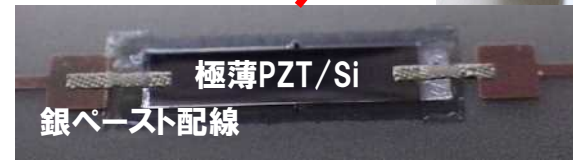
市販ひずみゲージアレイ



銅貼PEN基材



12cm



極薄PZT/Si
銀ペースト配線



アンプ、ADC
MCU、RF-IC
集積モジュール

- ・圧電MEMSによる高感度PZTひずみセンサ技術
- ・実装機を用いた極薄PZT/Siの転写技術
- ・スクリーン印刷による配線技術 →特願2015-171314

極薄PZT/Siをフレキ基板上にアレイ化したフレキシブル面パターンセンサ

これまでの研究開発の状況

①-(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



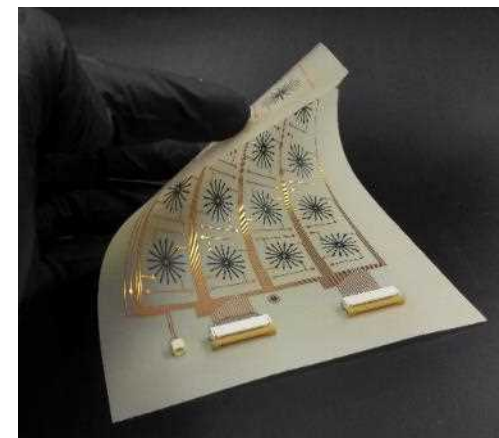
研究開発成果

■従来技術の課題

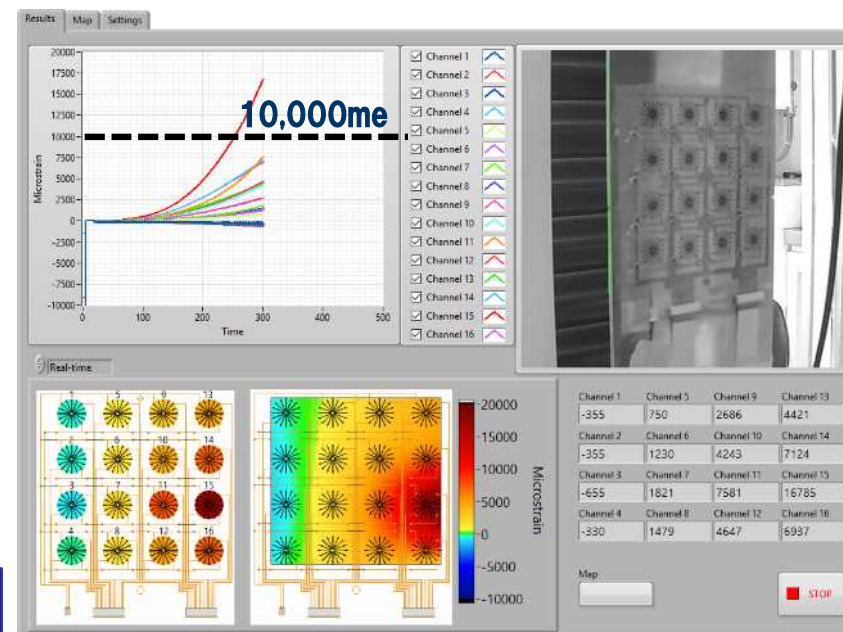
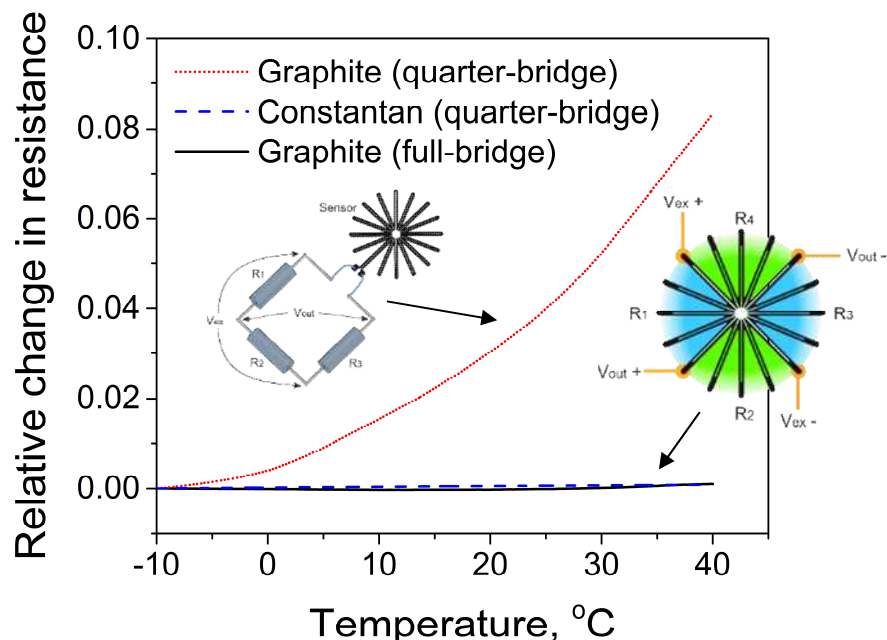
- ・極薄PZT/Siは感度は良いがコスト大、最大ひずみが $1,000\mu\text{e}$

■方法

- ・スクリーン印刷により抵抗型ひずみセンサをアレイ化



スクリーン印刷によるグラファイトひずみセンサアレイ



グラファイトひずみセンサアレイによる
亀裂発生時のひずみ分布測定

- ・印刷性が良く、GFが高いグラファイトを抵抗に選定
- ・フルブリッジ構造により大幅に温特を改善
- ・10,000 μe 以上のひずみ計測を実証

→特願2016-141301

①-(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



中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<ul style="list-style-type: none"> 高感度ひずみセンサアレイ(感度1×10^{-7})、地震検知センサ(0.1g、1~10Hzを検知)を開発する。→年度末達成見込み 大ひずみ用ポリマータイプを開発する →達成 これらが制御回路IC、太陽電池と共に7cm×10cmサイズの配線付きのフレキシブルシート上に形成された、高耐候性(水蒸気透過率2~3g/m²/day)センサシートの開発を完了する。 →達成 実橋で1×10^{-5}の感度でひずみ分布を測定し、300mW程度の標準的な太陽電池を電源として1時間に1回無線データ通信できることを実証する。 →達成(ただし太陽電池駆動は日照時) 	<ul style="list-style-type: none"> ユーザーニーズ適合性: ストップホールからの亀裂進展をモニタリングするニーズがある。 現場環境対応性: ひずみセンサを集積化したフレキシブル回路基板は保護層と一体化されており、これによって0.10g/m²/dayと、高い耐候性が実現されている。 基本的なセンサ機能: 通行車両に由来する動ひずみ検知に必要な、1×10^{-5}の感度での動ひずみ分布が測定可能なひずみセンサアレイを開発した(高感度用極薄PZT/Si転写タイプ、大ひずみ低コスト用グラファイト印刷ポリマータイプ)。開発品を実橋に貼りつけて実際に動ひずみ分布を取得することに成功した。 開発した信号処理、通信モジュールの消費電力123mWであり、300mWの名刺大で容易に入手可能な市販太陽電池モジュールにより、動ひずみ分布を常時取得可能であることを実証した。 センサ性能に関する開発進捗: 施工性に優れた粘接着シートで貼り付けるため、2桁の感度低下を想定してひずみセンサ単体での感度目標を1×10^{-7}としていたが、そこまでの感度低下はなく、1×10^{-5}の感度のひずみ分布測定が可能であることを実橋で実証できた。ひずみセンサ単体感度の精密評価は今年度後半に行う。 健全性診断機能に関する開発進捗: コンクリ橋脚に発生していた亀裂上に貼り付け、通行車両によりひずみ分布異常からその位置が特定可能であることを実証した。今年度後半はストップホール用に設計して、亀裂進展モニタリングの実証試験を行う。 競合技術との比較: ひずみ分布測定にはデジタル画像相関法などが用いられるが、画像が取得しにくいところにも適用可能である。光ファイバひずみゲージに比べると施工が圧倒的に容易である。 	<p style="text-align: center;">達成</p>

①-(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



最終目標

- 平成30年度までにユーザー機関の橋梁にシートデバイスを貼り付けて、損傷の経過観察について実証試験を行いながら、シートデバイスの最適化を行う。

達成の見込み

- 完成度:** ひずみセンサアレイは今年度後半にはばらつきを低減し、フレキシブル回路基板をストップホール用に設計することで、目的のモニタリングが行える状態になる。
信号処理、通信モジュールは太陽電池で駆動可能であるが、電源線の引き回しをスマートにする必要があり、今年度後半は施工現場に適合した方法を開発する。
- 実証実験計画:** 今年度後半より阪神高速鋼橋のストップホールに実際に貼り付け、亀裂進展モニタリングの実証実験を行う。これによりストップホールからの亀裂発生が検出された場合は、優先して補修、補強を行うことを阪神高速に進言する。
- 社会課題への対応:** 阪神高速に5000箇所以上の疲労亀裂があるため、ストップホールによる応急処置後、当て板、補修溶接等の本補修を一気に実施できないという課題があった。フレキシブル面パターンセンサでストップホール周辺のひずみ分布をモニタリングすることにより、疲労亀裂の進展を常時監視することができ、本補修までの構造物の安全性確認と共に優先順位の設定にも役立つ。

平成29年度	平成30年度
<ul style="list-style-type: none"> 実橋のストップホール一か所に、PZT/Siタイプと印刷タイプのセンサシートを貼りつけて実証試験し選定する。(AIST) センサシートの量産プロセス開発と耐候性保護層の量産プロセス開発(DNP) 	<ul style="list-style-type: none"> 前年度に選定したタイプのセンサシートを3箇所以上のストップホールに貼りつけて実証試験を行う。(AIST) フレキシブル面パターンセンサシートの製品仕様、製造プロセスの確定(DNP)
実証: 1,500万円 量産: 1,550万円	実証: 2,250万円 量産: 800万円

①-(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



○運用における優位性、有用性

シールのように簡単に貼り付けることができ、短時間・低コストの施工が可能。
長期間の屋外使用を可能とする耐久性をもつ。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

重要度の高いストップホールの亀裂進展モニタリングの用途で市場参入を果たし、実績を重ねることで完成度を上げ溶接継手箇所など他の用途へ広く展開する。
既存ラインが活用できる製品・製造設計によって早期の事業立ち上げが可能。

○実用化に向けた体制

ユーザー企業(道路会社)とのプロジェクト内連携によりニーズに即した効率的な製品開発が可能。

○目標とする事業規模

高速道路、一般道路などの道路インフラ分野以外も含め、数百万シート/年以上の需要を見込む。

○波及効果

船舶、建物など、大型構造物の亀裂進展モニタリングに適用可能。

補足説明資料

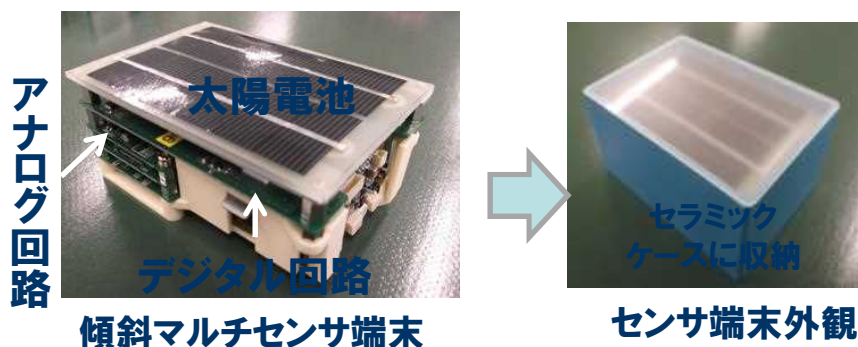
①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシング システムの開発

これまでの研究開発の状況

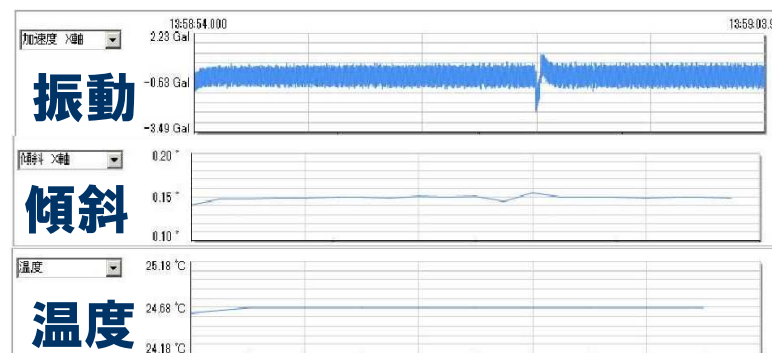
①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発


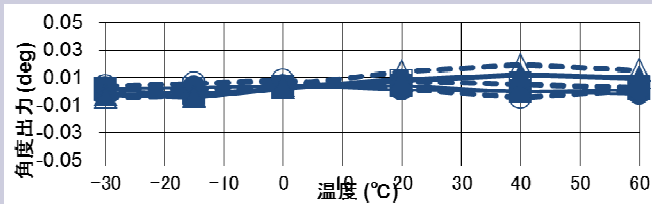
研究開発成果 ◆自立型傾斜マルチセンサ端末

●小形高耐久端末(7cm×10cm×5cm)



●高速無線通信によるマルチ出力



課題	方法	結果
角度出力の温度安定性	<ul style="list-style-type: none"> MEMSセンサ構造改良 ユニット構造採用  <p>センサユニット外観</p>	 <p>原理試作品 温度安定性評価結果</p>
低消費電力	<ul style="list-style-type: none"> 太陽電池を模擬太陽光試験 高速無線による通信時間短縮 間欠計測、間欠制御 低消費電力部品選定 	<ul style="list-style-type: none"> 日照データから演算で発電力を確認 距離:60m、1Mbps(920MHz)達成 動作確認済

これまでの研究開発の状況

①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

研究開発成果

◆実証実験場所の選定と先行フィールド試験の実施

- ・2015年12月から継続試験中
- ・実証実験場所: 東名高速 吾妻山トンネル入口情報板
- ・データ収集: 無線通信(携帯電話回線)にて遠隔からデータをダウンロード



傾斜計、加速度計
(頂部)



温度計



加速度計、傾斜計
(基部)



情報板全景(設置作業時)



傾斜計、加速度計
PC、記録器他
(内部)

中間目標の研究開発目標の設定および達成度

①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<p>1)傾斜測定の実出力安定性:0.05deg 振動測定の実分解能:0.1gal</p> <p>2)傾斜、振動、温度を同時に測定する傾斜マルチセンサ端末を開発。</p> <p>3)1時間に1回の間欠測定と突発事象測定対応の監視モードの動作</p> <p>4)無線通信(通信距離:30m以上、通信速度:1Mbps)</p> <p>5)環境発電素子(太陽電池)からの電源供給による自立電源化。</p> <p>6)センサ端末サイズ:7cm×10cm×5cm</p> <p>7)実証実験に向けシステムの構築 集約器試作、傾斜マルチセンサ間の無線通信の確認。集約器とコンセントレータ間の正常な通信動作確認。</p> <p>8)実証実験実施場所の選定。</p> <p>9)先行開始したモニタリングを継続し基礎データの取得する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザーズ適合性:老朽化進展、少子高齢化(メンテナンス技術者不足)、点検業務の効率化が必要。情報板日常点検は目視(異常変形、異常振動)確認。センサによる傾斜(変形)と振動の常時監視で継続的変化、災害時変化が遠隔監視でき現地点検の必要性・優先順位付(フィルタリング)により点検業務の効率化に貢献。 ・現場環境対応性:無線ユニットとセラミックケース内臓アンテナにより、実使用情報板環境にてセンサ端末と集約器間の正常通信確認。 ・基本的なセンサ機能:傾斜・振動・温度を同時に間欠測定および集約器へ無線出力確認。端末サイズ:7×10×6cmのセラミックケースへの収納を確認。 ・センサ性能に関する開発進捗: 傾斜出力の実安定性:±0.03deg以下(原理試作品) 微小変動要因を特定、対策案確認。MEMSセンサユニット試作・評価中 振動測定の実分解能:略±0.1gal(水平2軸)を簡易評価にて確認(詳細評価・改良中) 無線:距離60m以上、速度1Mbpsを確認。太陽電池を用いた電源ユニットの実設計性能(発電/蓄電)確認。 ・健全性診断機能に関する開発進捗:実証実験サイト選定、先行フィールド試験によりシーズンを通じたデータ取得中(10ヶ月分取得済み) 正常時の傾斜/卓越周波数の分布を元に異常程度評価 ・競合技術との比較:マルチセンサ(傾斜・振動・温度)、コードレス(無線・自立発電)で高耐久(10年)センサ端末はこれまでにない。センサ台数低減、設置作業、メンテナンスの軽減化に貢献する。 	<p>1) H28年度末達成見込み</p> <p>2)達成</p> <p>3)H28年度末達成見込み</p> <p>4)達成</p> <p>5)H28年度末達成見込み</p> <p>6)達成</p> <p>7)H28年度末達成見込み</p> <p>8)達成</p> <p>9)H28年度末達成見込み</p>

①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

最終目標	達成の見込み
<ul style="list-style-type: none"> • (a) MEMSセンサデバイスの開発: 信号処理回路も含め、傾斜測定(安定性:0.05deg)、振動測定(分解能:0.1gal)を満足するMEMSセンサデバイスの開発を完了する。 • (b) 傾斜マルチセンサ端末の開発: 平成28年度までに開発した傾斜マルチセンサ端末をベースに開発したMEMSセンサデバイスを搭載し、小型化を実施する。最終目標の大きさ70×100×50 [mm] を達成する。また抽出された課題の対策を行う。 • (c) センサネットワークシステムの構築と実環境試験: 28年度までに開発した傾斜センサ端末及び構築した通信システムを用い、高速道路会社と協力して実環境試験を実施する。課題の抽出と対策の検討を行うと共に傾斜マルチセンサ端末の要求仕様の明確化を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> • 完成度: <ul style="list-style-type: none"> (a) フロントエンド回路を含めた「MEMSセンサユニット」として目標性能(右記)を満足し開発完了見込み。 (b) 自立電源(太陽電池)、無線通信対応センサ端末試作完、傾斜・振動・温度の同時測定出力を確認。課題抽出と改良を行い開発完了見込み。目標の大きさのセラミックケース内に収納確認。さらなる小型化を検討し完成度アップを図る。 (c) 集約器、傾斜マルチセンサ端末および上位を含めたシステム検証、実環境によるシステム評価と課題抽出/対策の検討を行いセンサネットワークシステムの構築完了見込み。 • 実証実験計画: 実証実験サイトは代表的構造の東名高速吾妻山トンネル入口情報板を選定。実環境試験により傾斜マルチセンサ端末とシステムの耐環境性/動作安定性を評価、課題抽出/対策を行い開発完了見込み。取得データの解析等から、正常時の挙動把握とモニタリングパラメータ抽出を行う。 • 社会課題への対応: 開発システムによる常時モニタリングと正常時の傾斜/振動周波数等の確率密度分布を用いた異常程度判定によりフィルタリング(現地調査必要性や優先度判断)を行うことで、検査の効率化が行われる。老朽化施設の増加と少子高齢化の進展による技術者不足の社会課題対応へ貢献する。



①-(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

○運用における優位性、有用性

- ・傾斜マルチセンサ端末：静的変化(傾斜)、動的変化(振動)、温度の同時測定/数値化(傾斜/振動/温度) ⇒ **一台で正確な状態把握/定量的把握**
 : 端末1台設置、コードレスセンサ端末(自立電源、無線通信)
 ⇒ **設置工数低減、システムの簡素化(イニシャル/メンテナンスコスト低減)**
- ・常時モニタリング : 災害・事故等 突発現象の迅速把握 / 継時変動の定量把握
 ⇒ **優先対応個所の選択、合理的点検計画**
 ⇒ **点検業務の効率化(老朽化進展、技術者不足への対応)**

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

- ・PJ参加高速道路会社と協力し情報板モニタリングの普及
- ・高速道路の実績 ⇒ 国、地方公共団体管理道路付帯設備への展開

○実用化に向けた体制

- ・製品化開発・製造：富士電機(株)(担当)にて実施
- ・設備：現有のクリーンルーム設備、組立製造ラインを使用、必要により増強
- ・システム化：プロセス制御の経験、外部機関(大学、関連企業)との連携により開発
- ・納入：事業部がエンジニアリング、施工、納入

○目標とする事業規模

- ・終了後5年目(H35) 国内市場規模：14000百万円(当社予測) 目標シェア：20%

○波及効果

- ・高速道路での実績を元に国、地方公共団体管理道路付帯設備への展開
- ・他の社会インフラ(エネルギー関連施設、鉄道、港湾施設等)、建築物への展開

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

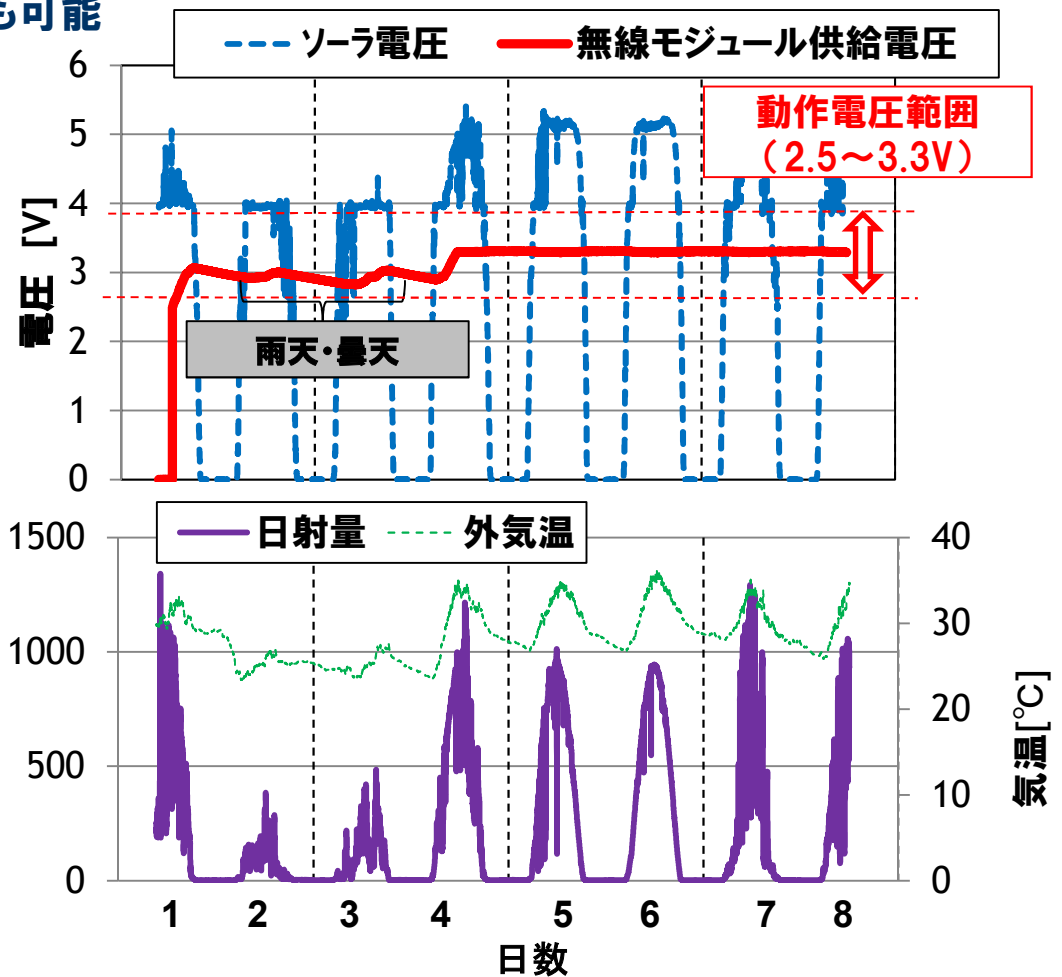
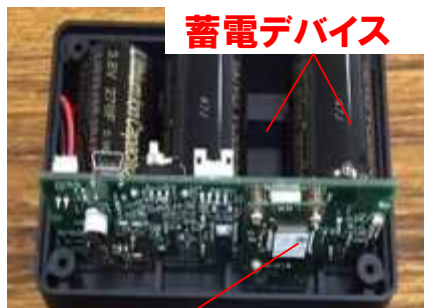
これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

研究開発成果

(i) 法面用多機能型センサ端末の開発 センサ端末の設計・試作

- 太陽電池モジュールと蓄電デバイスにより長期動作計測可能なセンサ端末を設計・試作
- 雨天・曇天時でも連続して動作することを確認
- 温度も同時に計測であり、傾斜計との接続も可能



これまでの研究開発の状況

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

研究開発成果

(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験 子・親受信機設計試作

- 子-親受信機間を光ファイバ接続することにより長距離(数100m)の信号伝送可能とし、設置の自由度を高めた受信機を試作
- 機器単体で十分な位相精度0.4degが得られることを確認



4mm/hの変位検出に必要な位相精度の目安3degに対して、
機器単体で十分な位相精度0.4deg(センサ端末-子受信機間距離100m)を確認

RF : Radio Frequency 無線周波数、 A/D: Analog to Digital アナログ・デジタル
E/O : Electrical / Optical 電気-光変換, O/E : Optical / Electrical 光-電気変換

中間目標の研究開発目標の設定および達成度

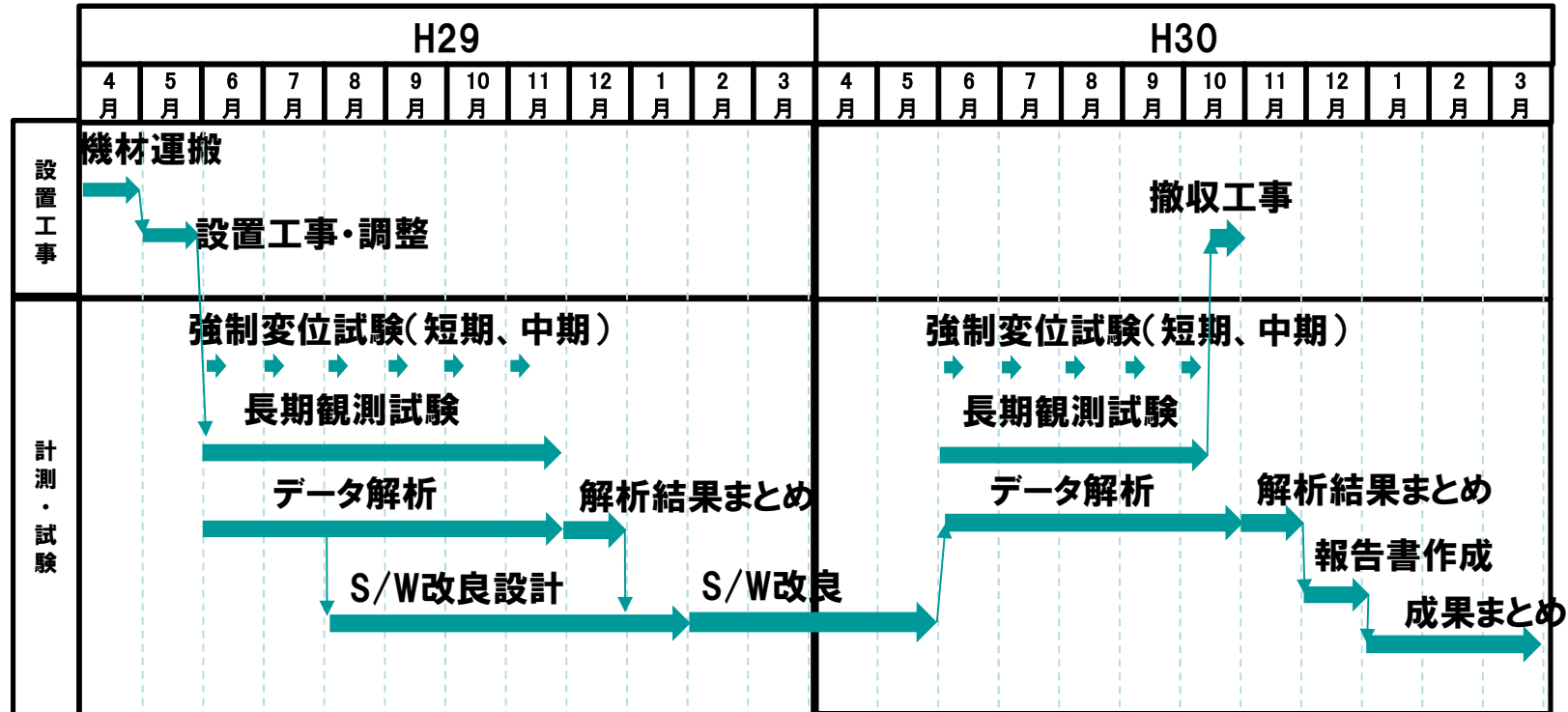
①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発



中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<p>(i) 法面用多機能型センサ端末の開発</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための変位及び温度を同時に計測できる。 2) 1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするとともに突発事象を検出できる。 3) 片手で取り付け可能なサイズとする。 4) 無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数及び出力強度とし、その通信距離は30m以上である。 5) 10年以上の信頼性を有する。 <p>(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <ol style="list-style-type: none"> 6) 1時間に4mm以上の変位を検出できることを基礎実験により検証する。 7) (i) で試作したセンサ端末を用いてインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを試作し、平成28年度中に実証実験を開始する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザーニーズ適合性： 目標設定は、NEXCO各社からのヒアリングにより、4mm/hの変位を検出することとした。この値は法面点検の目安の一つとして用いられている。 ・現場環境対応性： 電源の供給が出来ない現場で使用するため自立電源を用いて雨天・曇天時でも連続計測可能な設計とした。 ・基本的なセンサ機能： 悪天候時にも連続計測可能な電波位相差による変位計測が可能なセンサとした。また突発事象を検出できるように6分間に1回の計測を可能とした。 ・センサ性能に関する開発進捗： 基礎実験(屋外芝生)により、1時間あたり4mmの変位を検出できることを確認した。 ・健全性診断機能に関する開発進捗 NTTデータと協力し、PilotLIMSにおいて、変位計測結果を分かり易く表示し、インフラの健全性を診断可能とした。 ・競合技術との比較： ワイヤー伸縮計ではピンポイントの亀裂の拡大しか測れず、光波測量計では悪天候時の計測が不可。測量用GPSでは誤差が大きい。 	<ol style="list-style-type: none"> 1) 達成 2) 達成 3) 達成 4) 達成 5) 達成 6) 達成 7) H28年度末達成見込み

H29,30の実証実験計画と最終目標達成の見込み

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発



最終目標達成の見込み

- 試作したセンサ端末・子親受信機を用いた基礎実験(屋外芝生)により、1時間に4mm以上の法面変位を検出なことを確認した。実証実験場所での変位計測実験では植生の影響によりバイアス誤差が発生することが分かったが、防草シート等の対策により解決の目途が得られており、最終目標達成可能な見込みである。

①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

最終目標	達成の見込み
<p>(i) 法面用多機能型センサ端末の開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・インフラ構造物及びその構成部材の健全度を診断するための変位及びその他必要と考えられるデータを計測できるものとし、これらは温度も同時に計測できる。 ・少なくとも1時間に1回の無線通信を含む全ての動作を自立電源で自己動作できるものとするともに突発事象を検出できる。 ・片手で取り付け可能なサイズ(7cm×10cm×5cm)以下である。 ・無線通信は、電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる周波数及び出力強度とし、その通信距離は実環境下で30m以上である。 ・実環境下で10年以上の信頼性を有する。 <p>(ii) センサネットワークシステムの構築と実証実験</p> <ul style="list-style-type: none"> ・(i)で開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムはインフラの実環境下で適用できる。 ・実環境下で1時間に4mm以上の法面の変位を検出できる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・完成度： 基礎実験(屋外芝生)により、1時間に4mm以上の法面変位を検出可能な見込みを得た。基礎実験では、試作したセンサ端末(7cm×10cm×5cm)を用いて、温度・変位・傾斜データを同時に計測できることを確認した。また、センサ端末は太陽光発電で動作し、6分間に1回の通信を行い、端末間で30m以上の通信距離を有することを確認した。 ・実証実験計画： 降雪に対する耐久性評価のため、H28年度11月以降にセンサ端末4台と、センサ端末や子受信機を設置する支柱を現地に設置する。H29年度5月(雪解け後)以降に、端末、子受信機、親受信機を追加設置し、法面変位センシングを開始する。一部の子受信機のみデータを用いて、より実際的な小規模システムとしての検証も行う。 ・社会課題への対応： 高速道路では要対策箇所が2500箇所、一般国道では52万箇所程度の災害危険箇所があり、維持管理費の増加が課題である。本システムによりこれらの法面・斜面の常時モニタリングを行い、維持管理費の削減に寄与できる。



①-(1-3)法面変位センシングシステムの開発

○運用における優位性、有用性

- ・天候によらず、法面・斜面の面全体の遠隔監視が可能であり、それにより維持管理費の低減に寄与できる。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

- ・H31、32年度に製品化に向けた設計・開発、事業化判断を行い、H33年度以降に出荷を開始する。事業化に向けて、三菱電機製作所のメンバが出向研究員として本開発に参画しており、社内営業部門・技術部門等と定期的に打合せを実施している。

○実用化に向けた体制

- ・三菱電機の研究所では主に方式開発・原理検証実験を実施し、製作所にて製品化に向けた設計／開発／製造を行う。

○目標とする事業規模

- ・高速道路法面で240億円程度(修繕費用4800億円の5%をモニタリング事業規模と想定)を目指す。

○波及効果

- ・橋梁(モニタリングシステム市場規模約884億円*1)の振動計測、ダム(モニタリング市場規模60億円*2)や風車(20億円*2)等のエネルギー関連施設の変位計測への応用が期待できる(*1:調査会社予測、*2:維持管理費より算出)。

①-(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

①-(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

適用イメージ

○用途

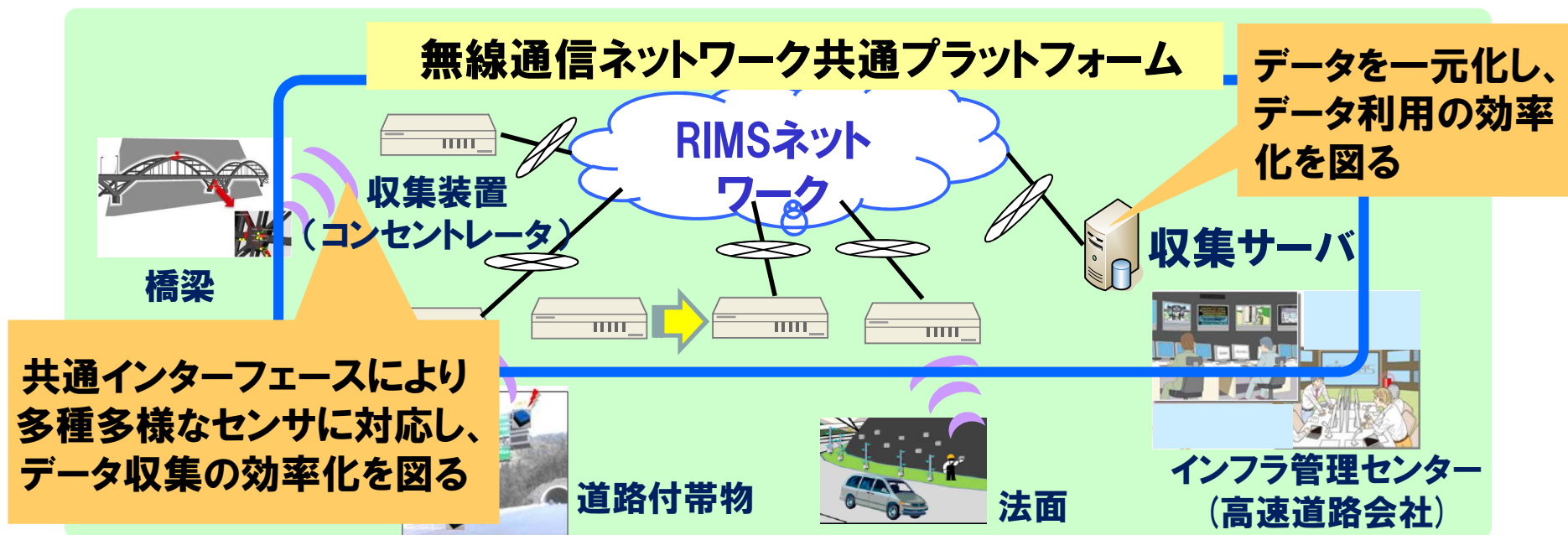
⇒現場設置された多種多様なセンサが取得するデータを一元的に処理する

○方法

⇒現場に設置した収集装置(コンセントレータ)で共通インターフェースにより多種多様なセンサと通信を行い、3G回線で送信された様々なデータを収集サーバにて一元管理する

○コスト

⇒1センサあたり年間数万円程度(※初期導入として必要なハードウェア/ソフトウェアのコスト除く)



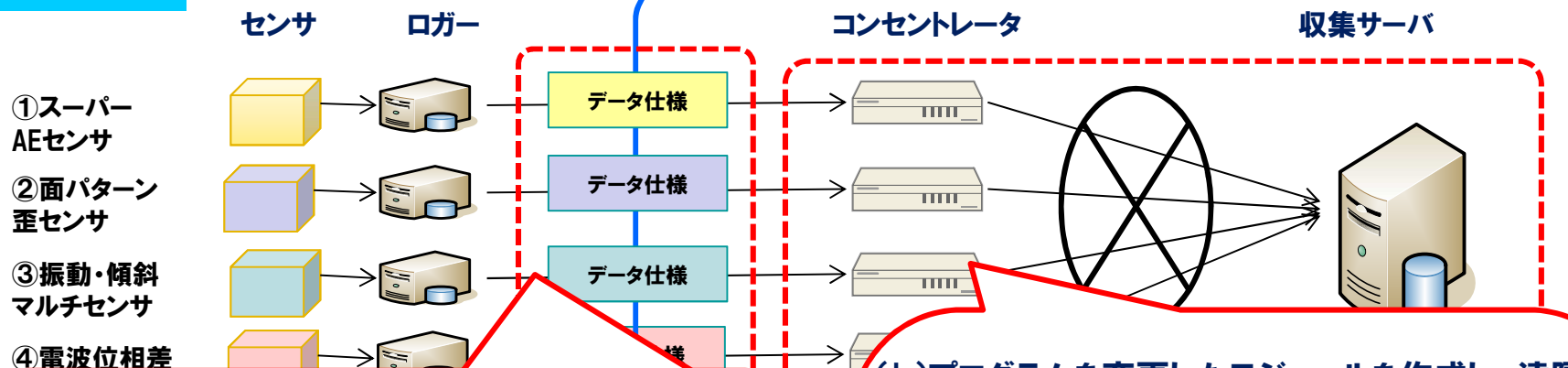
これまでの研究開発の状況

①-(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

○(i)多種多様なセンサに対応するための通信仕様の開発 実証状況

研究開発成果

無線通信ネットワーク共通プラットフォーム



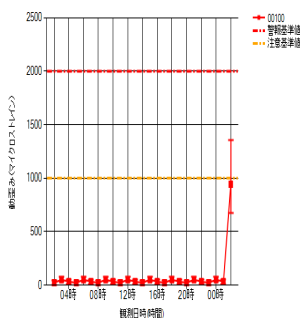
(a)-1 センサデータをロガーに格納し、コンセントレータ間とCVSフォーマットで通信し、収集サーバまでデータ格納できることを確認

(例)面パターン歪センサのフォーマット

```

フォーマットID 0x2001
【CSVフォーマット】 タイムスタンプ、センサ1の値、センサ2の値、...、センサ25の値(※)
【ファイル名】 例:2016.06.01.11.00.00.000.12.3.12.3....12.3
SSK.YYYYMMDDhhmmss-シートID.csv
例:SSK.20160601110000.01.csv
※タイムスタンプのフォーマット:
YYYYMMDD hhmmss.SSS
(DDとhhの間は半角スペース)
※各センサ値:
シートID:シートD(01~n)
浮動小数型 (float)
    
```

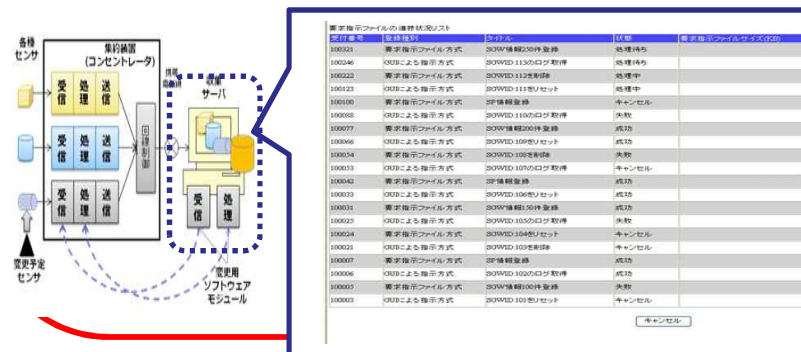
収集サーバに格納されたデータ表示例



(a)-2 ロガーとコンセントレータ間は、CVSフォーマット以外にTCPでの通信も確認し、問題なく収集サーバまでデータ格納できることを確認

(b)プログラムを変更したモジュールを作成し、遠隔からリモートで変更できることを確認
3G回線を使用し、データ通信に問題なくプログラム変更が可能であり、コンセントレータの再起動することなく、モジュールを認識させ、データ送信を再開できることを確認

遠隔リモートでモジュール変更する管理サーバ画面図



これまでの研究開発の状況

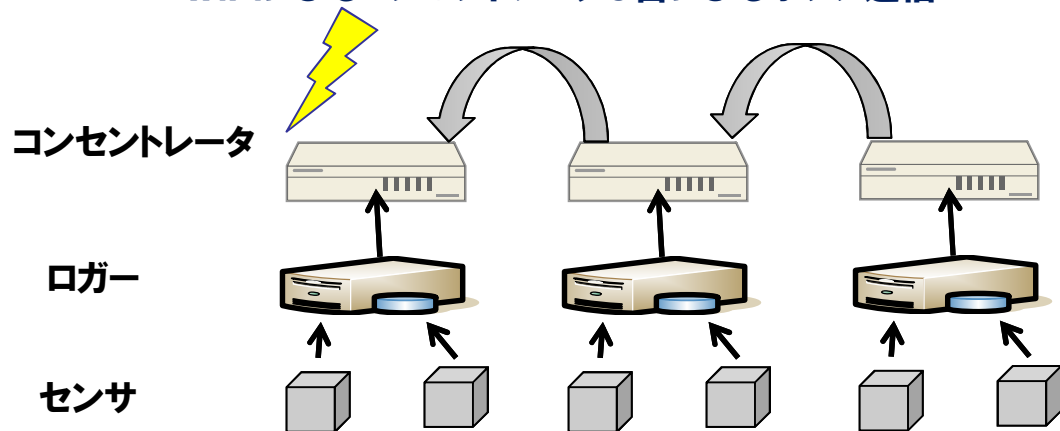
①-(2-1)無線通信ネットワーク共通プラットフォームの開発

研究開発成果

○(ii) コンセントレータ間の連携通信対応

WiFiによる連携通信機能を開発し、3ホップ時のデータ転送性能に問題ないことを確認済み

WiFiによるコンセントレータ3台によるホップ通信

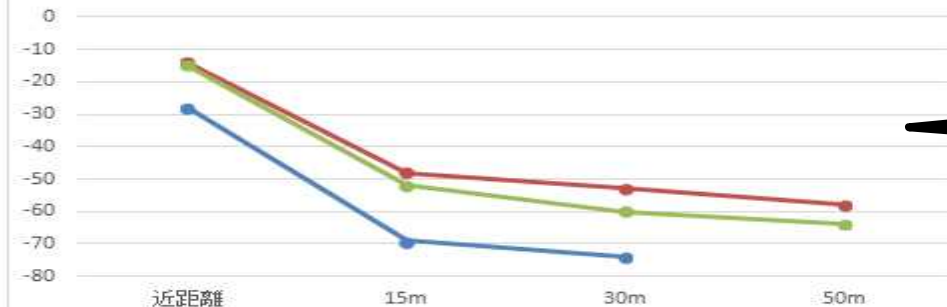


○(iii) セキュアな情報収集への対応

データは独自暗号化方式で通信、内部モジュールの遠隔変更はSSL暗号方式で通信を実装済み

→平成28年度にセキュリティの検証予定

電波強度 (dBm)



距離と電波強度の影響を確認

中間目標の研究開発目標の設定および達成度

①-(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

【判例】○:達成、△:H28年度達成見込み

中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<p>(i)多種多様なセンサへの対応</p> <p>(a) 計4種類のデータフォーマットに対応する。</p> <p>(b) コンセントレータ内の受信モジュール変更で複数センサに対応する。</p> <p>(c) 実構造物に設置されたセンサのデータ収集を1ヶ月以上連続で実施する。</p> <p>(d) コンセントレータの設置容易性、動作安定性を検証する。</p> <p>(ii)コンセントレータ間の連携通信対応</p> <p>(a) 3台連携時のセンサデータ伝送機能を検証する。</p> <p>(b) 実構造物に設置されたセンサのデータ収集を1ヶ月以上連続で実施する。</p> <p>(iii)セキュアな情報収集への対応</p> <p>(a) プログラムの不正な改ざんへの対応のため、コンセントレータの動作中に不正なソフトウェアモジュールに変更する処理が失敗することを確認する。</p> <p>(b) 実構造物に設置されたセンサのデータ収集を1ヶ月以上連続で実施する。</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザニーズ適合性:センサ種別ごとに個別のシステムが構築・運用されることを避けるため、多種多様なセンサに対して、容易に設置/接続できセキュリティを確保したシステムが要望されている。 ・現場環境対応性:コンセントレータの設置容易性や動作安定性、連携通信機能により、現場設置の容易性だけでなく、運用コストの低減を図っている。 ・基本的な機能:基本計画で求められている無線センサネットワーク機能を有している。 ・性能に関する開発進捗:仮センサにてデータ送信とデータ蓄積を開始しており、データ量、性能などの見込みが立っている。 ・競合技術との比較:多様なセンサに対応するための共通インターフェース仕様や独立モジュールの遠隔変更機能により、対応が容易である。 	<p>(i)</p> <p>(a) ○</p> <p>(b) ○</p> <p>(c) △</p> <p>(d) △</p> <p>(ii)</p> <p>(a) ○</p> <p>(b) △</p> <p>(iii)</p> <p>(a) △</p> <p>(b) △</p>



①-(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

実フィールドでの機能評価検証の基本方針として、測定/課題抽出/対策/評価と一連のプロセスを平成29年度、平成30年度と2回繰り返すことで、実用化に向けた品質向上を図る。

	平成29年度(73)	平成30年度(73)
実フィールドでの機能評価検証	機能評価1回目	機能評価2回目
(i) 多種多様なセンサへの対応	課題確認 → 機能実装	測定/課題抽出 → 対策/評価
(ii) コンセントレータ間の連携通信対応	測定/課題抽出 → 対策/評価	測定/課題抽出 → 対策/評価
(iii) セキュアな情報収集への対応	アセスメント実施 → 対策の実施	測定 → 評価
(iv) システム運用における課題の抽出と対策	測定/課題抽出 → 対策/評価	測定/課題抽出 → 対策/評価
(その他) 各社センサデータ変更などの対応	製造/試験	製造/試験/サイト追加対応

①-(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

最終目標	達成の見込み
<p>(i)多種多様なセンサへの対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・データフォーマットの変更や追加に対して、遠隔から受信のソフトウェアモジュールの更新で対応する(更新時間はデータ受信の不可能となる30秒以内)。 ・1台のコンセントレータで2種類以上のセンサデータを受信可能とする。 ・10台のコンセントレータに対して、ソフトウェアモジュールの管理及び同時更新を可能とする。 <p>(ii)コンセントレータ間の連携通信対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ネットワークや機器に障害が発生した場合の通信経路の自動変更機能を検証する(屋内にて、10コンセントレータに対して3コンセントレータに障害が発生した場合の通信継続を確認する)。 <p>(iii)セキュアな情報収集への対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・セキュリティアセスメントを実施し、コンセントレータに対するリスクを網羅した上で、対策が実施されていることを示す。 ・上記の検証を実構造物からのデータ収集した状態で実施する。 <p>(iv)システム運用における課題の抽出と対策</p> <ul style="list-style-type: none"> ・サービスレベルに影響する課題を抽出し、対策の運用コストと品質のバランスを検証する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・完成度:実証実験に必要な主要機能は開発済みであり、仮センサにて検証を開始しており、達成できる見込み。 ・実証実験計画:システムは、開発した機能検証だけでなく、実際の運用による非機能要件の検証が重要であり、2年間の実証期間において検証する計画である。 ・社会課題への対応:道路インフラの老朽化対策などで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性が懸念されるが、本開発によるオープンな通信基盤によって、データ収集の効率化、データ利用の効率化が期待できる。



①-(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

○運用における優位性、有用性

インフラモニタリングは、その目的や用途により、様々なセンサや監視業務アプリケーションとの組み合わせが考えられる。こうした複数機器の監視を一元的に行う共通プラットフォームとして、機能重複を避けることでコスト削減に貢献し、データを一括管理し活用することで、安全を確保する道路管理者の業務改善に貢献できると考える。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

実証結果を受け、システムの信頼性や安定性に関して商用レベルの品質向上を図る。また、本研究で連携するセンサメーカーをはじめ、関連製品や関係者との事業展開を含めて、連携したソリューションとして事業化を目論む。マルチベンダ・マルチキャリアを標榜する弊社の特徴が活かせると考える。

○実用化に向けた体制

本研究開発の実用化などは、エヌ・ティ・ティ・データ社内で既に事業展開しているIoT基盤ソリューション組織内で展開する予定である。

○目標とする事業規模

IoT/M2Mプラットフォーム市場1,281億円(H28)のうち、社会インフラモニタリングの維持管理業務ニーズへの適用を想定。

○波及効果

長寿命化するインフラの修繕コストの削減

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

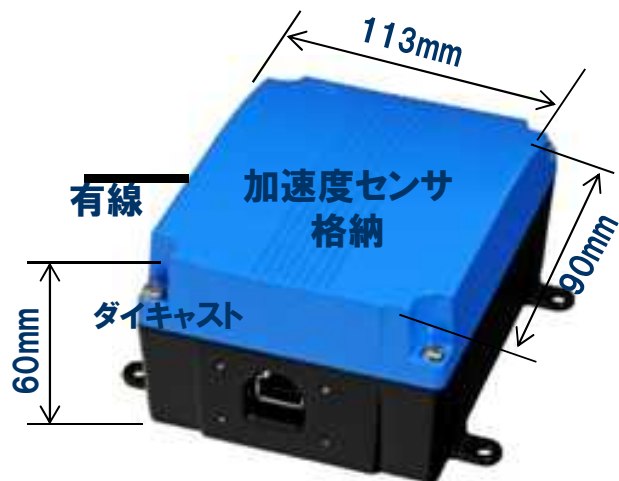
これまでの研究開発の状況

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

研究開発の概要と差異化ポイント

- ◆ 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、環境センサをオールインワンパッケージング
- ◆ パッケージを構造物に強固接着／接合する簡易施工シート実装技術

従来のセンサパッケージ

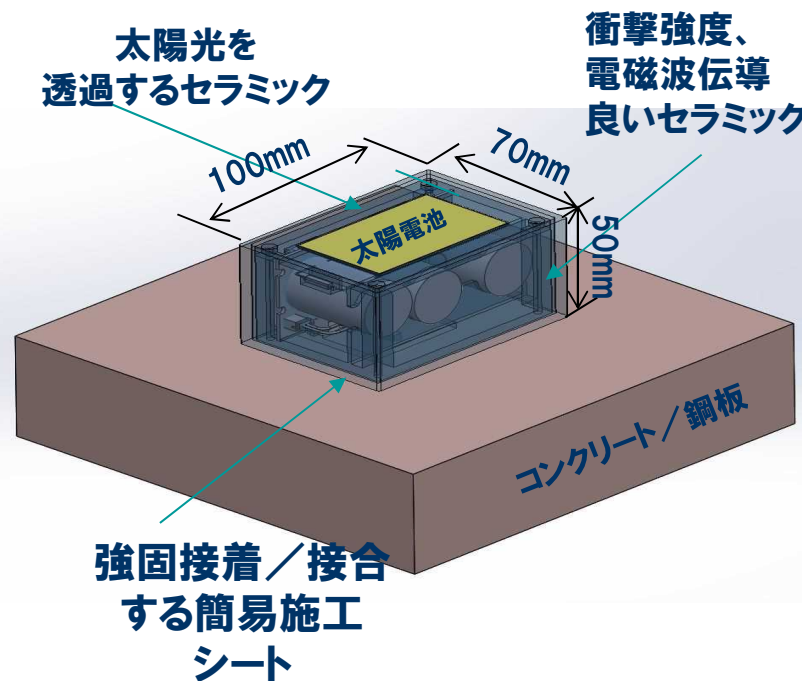


(富士電機感振センサ例)

必要とされるパッケージ内機能

- 自立電源
- 無線モジュール
- 複数環境センサ

本研究の耐久性パッケージ


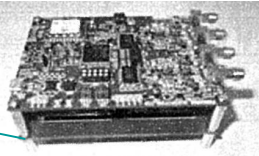


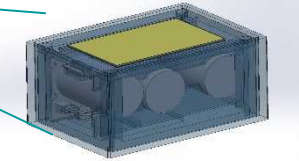


これまでの研究開発の状況

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

適用イメージ

用途

<p>橋梁センシング用スーパーコースティックセンサ用端末 (東芝)</p>	 <p>実証予定: NEXCO西日本安堵橋橋梁</p> <p>I 鋼板側壁、底面、天井、点検しにくい場所等へ設置</p>  <p>センサ端末基板外観</p>
<p>道路付帯物構造傾斜センサ端末 (富士電機)</p>	 <p>実証予定: NEXCO中日本吾妻山</p>  <p>透光性セラミック基板 LTCC基板 センサ取付台 取付金具 支柱 SUSバンド ケーブルグランド系 支柱頂部取付案</p>
<p>法面変位センサ端末 (三菱電機)</p>	 <p>実証予定: NEXCO東日本月山1号キング下法面</p>    <p>端末設置用支柱 端末 センサ端末パッケージ外観</p>

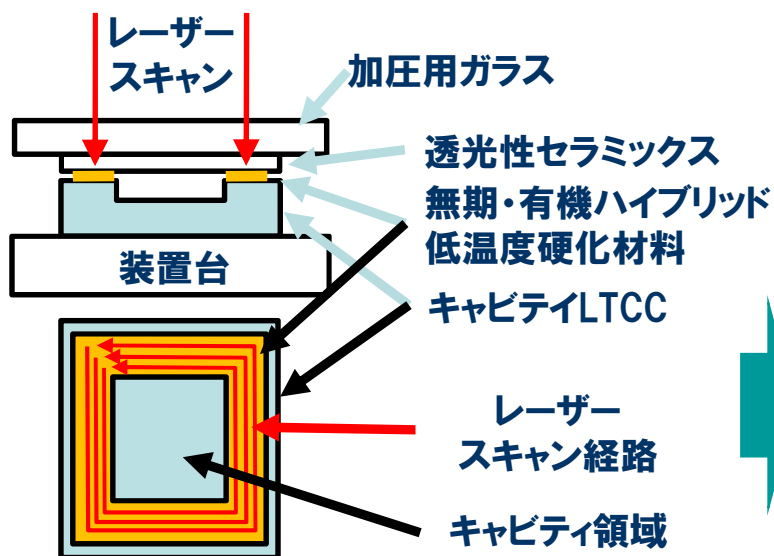
適用想定個数について、各社数量に合わせた生産確保する。
価格については、見積もり中。

これまでの研究開発の状況

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

3) 高気密封止接合技術の開発

- 1) 無機・有機複合接合材の低温硬化に成功した。(50-60°C)。これにより、内部の回路実装時でのダメージをなくすことができる。
- 2) PCT, 耐候性試験、低温ヒートサイクル加速試験の規格を満足した。



接合材塗布用
ディスペンサ

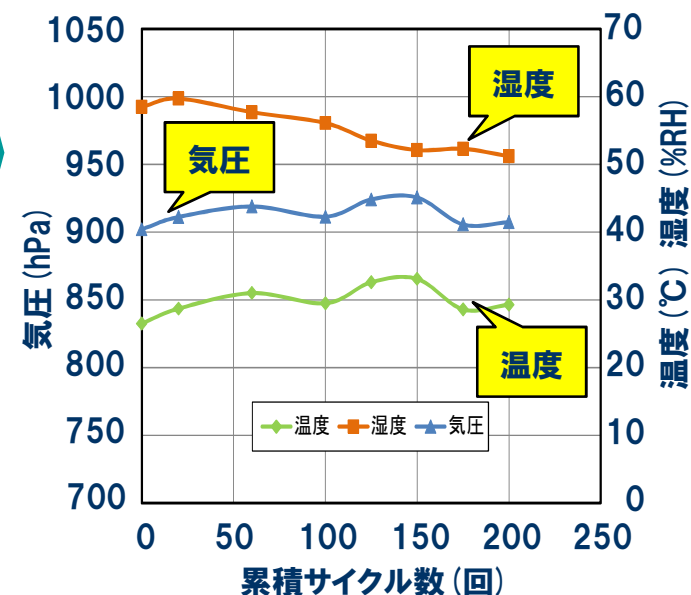


レーザー
加工装置



熱サイクル試験 (-40⇔85°C、4.5Hr周期) で、10年耐久相当の200回を終了

気密特性評価—内部温度と内部気圧の変化図



これまでの研究開発の状況

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

・箱型LTCC、上蓋透光性セラミック、気密封止材からなるパッケージ及びコンクリート、鋼板との接合実装において実用10年耐久性(機械特性除く)加速試験終了し、規格合格。

10年耐久性評価

IEC60068-1規格(自動車、太陽電池基準)での評価

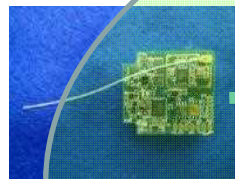
NEXCO/阪神高速での
耐久性実証

環境評価用先行
センサモジュール

LTCCパッケージ

気密封止

加速試験機



H28.6

7x10x5cm
アンテナ内蔵
外部端子付き

7x10x5cm

(~H28.7) 完了

- ①PCT試験
85℃,85%,0.12MPa,672h
- ②光照射試験
162W/m², BPT63℃、500h
- ③低温試験ヒートサイクル(-40~80℃)
- ④塩水噴霧試験
NaCl5%塩水噴霧2h、40℃、93%を7日間:5サイクル
- ⑤振動試験
実測波形値3倍

- ①阪神高速東大阪線
H28.8.8~
コンクリート接合強度耐久性
振動波形実測
光、温湿度実測

- ②NEXCO西日本-西名阪
西安堵橋実証試験
H28.8.4~H28.8.5試験実施
振動波形、光・温湿度実測

- ③NEXCO西日本
西表島亜熱帯環境加速試験
平均30℃、平均湿度85%、太陽光1000W/m²(7倍)、全体で22倍加速
H28.7.26~H28.7.28試験開始

三菱電機
開発端末品



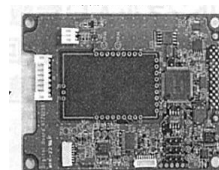
H28.7



有機・無期
ハイブリッド
封止材開発成功



装置台



H28.8

H29年度実施予定 (東芝開発端末品含む)

中間目標の研究開発目標の設定および達成度

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<p>(a)高効率アンテナ内蔵LTCC基板及び透光性セラミック基板の開発(NGK)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・100×70×50mmパッケージの供給。 ・アンテナ内蔵基板を試作し、920MHZでの通信距離30mと無指向性を達成。 <p>(b)高気密封止接合技術の開発(MMC)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・低融点接合材料による高気密封止。 ・目標リーク速度$\sim 10^{-9}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$以下。 <p>(c)ベースプレート実装構造及びプロセスの開発(DNP)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ベースプレートを作製し、屋外10年暴露相当の耐久加速試験後の接着強度0.4MPa以上。 <p>(d) 構造物への取付・接合開発(DNP)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・構造物への最適実装・取付け方法を見出す。 ・フェールセーフの屋外10年暴露相当の加速試験を行い、センサ端末とベースプレート重量以上の荷重負荷に耐えること。 <p>(e) パッケージング評価用モジュールと耐久性加速試験法の開発(MMC、産総研)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・評価モジュールでの10年実用の耐久性加速試験達成。 ・リモート耐久性評価システム完了。 ・阪神高速、NEXCO橋梁及び自然暴露試験一次評価完了。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザニーズ適合性： 手の平サイズでの簡単とりつけられること センサシステムは、点検年数に比べて2倍以上 ・現場環境対応性： 太陽光による自立電源を可能にすること。 通信を方向性を考慮せずに設置可能にすること ・基本的なセンサ機能： アンテナ性能;設置場所に対する設置容易性から無指向性30m通信距離を設定。 光透過性;暗がりでも、光を十分に透過すること。 ・センサ性能に関する開発進捗： LTCCパッケージにて、無指向性のアンテナ内蔵達成 光透過セラミックにて、透過度85%以上達成 ・健全性診断機能に関する開発進捗 長期間使用状況においても、構造物と端末との接着き強度が初期設置時の同じ状態に維持でき、センサ感度を一定状態に保つ。 PCT、塩水噴霧、耐候性加速試験にて、規格満足達成 ・競合技術との比較： 鉄製の箱型パッケージに比べて、耐湿性、電波透過性、光透過性に優れている。 	<p>H28年度末達成見込み</p>

最終目標の達成見込み

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

最終目標	実証実験計画(H29, H30)	達成の見込み
<ul style="list-style-type: none"> 平成28年度までに開発したオールインワンパッケージの要素技術開発を用いて、実証実験を実施する。開発目標7x10x5cmパッケージサイズで10年間耐久性を達成する。 	<p><平成29年度></p> <ol style="list-style-type: none"> 各センサメーカーへ実証用のLTCC、透光性セラミック基板の試作及び供給。製造コストダウンの検討を行う。 各センサメーカーへ基板間の接合・封止技術について、外注メーカーに技術移転し、外注試作及び供給。 開発した接着シートを用いたNEXCO東日本、中日本、西日本及び阪神高速の実証現場での取り付け施工の実施する。 各センサメーカー端末パッケージについて、PCT、熱サイクル、耐候性、振動の加速試験を行うと共に、亜熱帯海洋環境及び亜寒帯環境下での過酷自然暴露加速試験及び評価実施。 <p><平成30年度></p> <p>平成29年度に実施した、1)~4)項目の評価及びフィードバック改良設計・試作・供給実施。</p>	<p style="text-align: center;">達成の見込みあり。</p> <ul style="list-style-type: none"> 完成度 要素技術開発の4項目については、H28. 9月で(80%)開発完了している。H28年度末は完了予定。 実証実験計画 予備実証実験をすでに実施中である：すでに、加速試験機によるパッケージの主な試験項目においては、評価は終了している。さらに、実証現場において、阪神高速法円坂橋梁、西日本NEXCO西安堵橋橋梁にて予備的実証終了している。より過酷自然暴露試験(NEXCO西表島試験場)での耐久性試験も継続実施中である。 社会課題への対応 センサ端末の長寿命が課題である。この高耐久性パッケージング技術開発、パッケージを供給することにより、10年の長寿命を達成できる。

事業化の見通し

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

1) 高効率アンテナ内蔵LTCC基板及び透光性セラミック基板の開発(日本ガイシ)

○運用における優位性、有用性

高耐久性を有する点、アンテナを内蔵する点、自立電源・無線モジュール・環境センサをオールインワンパッケージングできる点において優位・有用である。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

センサ端末開発各社とともに小型化していくことで、ユーザーである高速道路会社にとってより魅力ある製品にすることで採用されるよう進める。

○実用化に向けた体制

製造子会社にてセラミック基板を試作し、量産化への移行を想定した体制としている。

○目標とする事業規模

NEXCO3社管理のインフラとして、橋梁は1万6千橋、情報板は1万4千面など多数ありニーズが見込まれる。市場について調査中である。

○波及効果

大型のパッケージやアンテナ内蔵基板など基本技術は開発できており、道路インフラモニタリング以外の用途への展開について、調査・検討中である。

事業化の見通し

①-(2-2) 高耐久性パッケージング技術の開発

2) 構造物への取付・接合開発(DNP)

○運用における優位性、有用性

- ・粘接着シートによる貼付施工は、液状接着剤と比較して簡単、且つ高い設置品質を実現し、屋外環境10年以上の耐久性を有する。

○事業化シナリオ、事業化計画の現実性

- ・粘接着シート接合技術の耐久性や実用性についてプロジェクトを通じて高速道路各社(ユーザー企業)にアピールし採用を得る。

○実用化に向けた体制

- ・ユーザー企業との密な連携による製品開発

○目標とする事業規模

- ・粘接着シートはLTCCやステンレス、コンクリートのみならずCFRPやガラスなどにも適用できるため、鉄道や工場など屋外に設置される各種IoT端末に対して「高耐久接合技術」を拡販し事業拡大を図る。

○波及効果

- ・誰でも簡単施工で技術者不足に対応

①-(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

個別テーマの概要・開発状況

(1) センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

橋梁

スーパーアコースティック
センサ
(振動)

(東芝、東大、京大)

フレキシブル面パターン
センサ
(ひずみ)

(産総研、大日本印刷)

道路付帯構造物

傾斜マルチセンサ

(富士電機)

法面

電波位相差変位計

(三菱電機)

(2) センサシステム共通基盤技術の研究開発

無線通信ネットワーク共通PF (NTTデータ)

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)

(3) 実証・評価研究共通PF (NEXCO東日本・中日本・西日本、阪神高速を含む全参画機関)

①-(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



研究開発の概要と差異化ポイント

【差異化ポイント】

①統合的なモニタリングシステム

- ・従来は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)

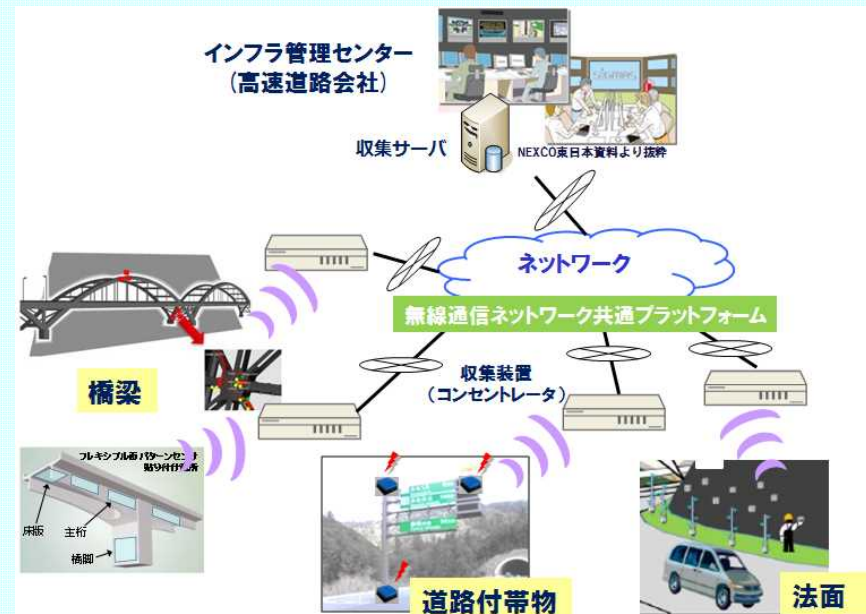
- ・橋梁モニタリングシステム
- ・法面モニタリングシステム

②長期無線モニタリングシステム

- ・従来は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。

【研究開発概要】

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。



これまでの研究開発の状況

①-(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

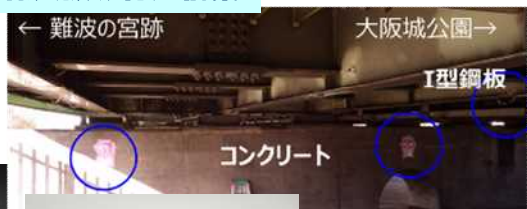
研究開発成果 ● 予備実証実験により本格実証実験での問題点を抽出



阪神高速13号東大阪線大阪城付近橋梁

極薄歪センサアレイ

フレキシブル面パターンセンサによる橋梁歪センシング【産総研、大日本印刷】



アンテナ内蔵 LTCCパッケージ



構造物への取付実験

高耐久性パッケージング技術【MMC、大日本印刷、日本ガイシ】



山形自動車道月山湖PA周辺法面

湖側(コンセントレータ電源調査)

無線通信ネットワーク共通プラットフォーム【NTTデータ】

西名阪自動車道・西安塔橋



スーパーアコースティックセンサによる橋梁振動センシング【東芝、東大、京大】

東名高速 下り線 左ルート 香妻山トンネル入口情報板



傾斜計、加速度計 (頂部)



温度計



加速度計、傾斜計 (基部)



情報板全景(設置作業時)



傾斜計、加速度計 PC記録器他 (内部)

傾斜マルチセンサによる道路付帯構造物センシング【富士電機】

山形自動車道月山湖PA周辺法面



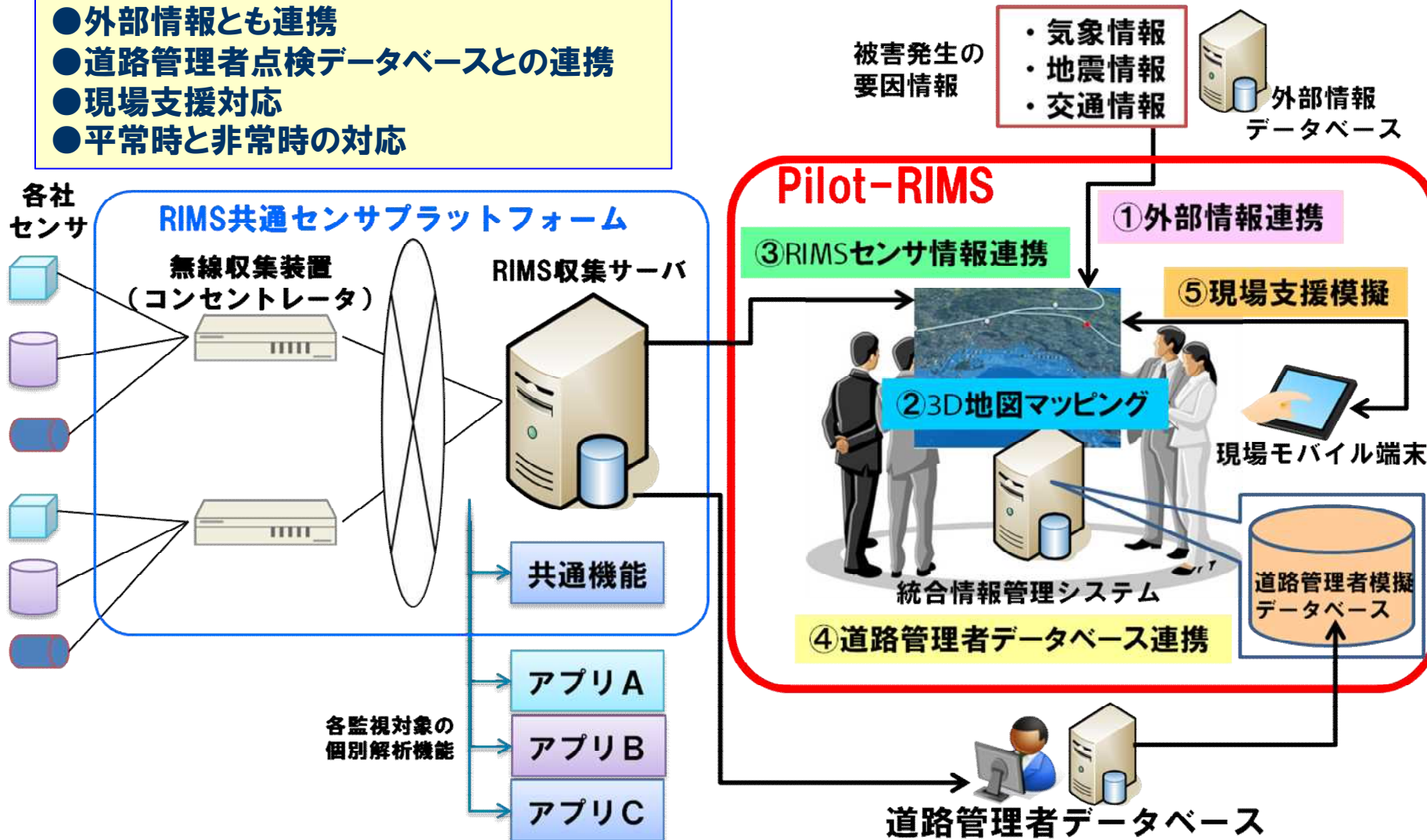
電波変位センサによる法面変位センシング【三菱電機】

①-(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



適用イメージ

- RIMSセンサ間同士の連携
- 外部情報とも連携
- 道路管理者点検データベースとの連携
- 現場支援対応
- 平常時と非常時の対応





研究開発成果

●Pilot-RIMSによる統合的モニタリングシステムの運用方法とデモ



①-(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



中間目標	目標設定および達成度の根拠	達成度
<ol style="list-style-type: none"> 1) センサ端末開発と連携して、各フィールドにおけるセンサシステムの基本仕様を決定する。 2) フィールド毎に1ヶ所以上のモニタリングシステムの実証場所の選定を完了する。 3) NEDOが別途委託している日立製作所及び横河電機と連携して、道路インフラへの実証方法を決定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ユーザニーズ適合性： 各システムとも参画高速道路会社と連携して、参画高速道路会社の実証場所を選定しているため、ユーザニーズに沿った目標設定になっている。 ・現場環境対応性： 各システムとも予備実証実験を通じて、現場環境対応性を確認している。 ・基本的なセンサ機能： 各システムとも基本計画に挙げていたセンサ機能を有しており、またその目標を達成またはH28年度末に達成見込みである。 ・センサ性能に関する開発進捗： 各システムとも対象インフラの健全性を診断するのに必要な感度を目標値としてあげ、H28年度末には目標を達成できる見込みの進捗である。 ・健全性診断機能に関する開発進捗： 各システムとも対象インフラの健全性を診断するのに必要な感度を有するセンサとなっており、高速道路の実フィールドで1年以上の実証をすることで、四季の環境変動を含めたデータを収集することで健全性の診断に寄与できるデータが取得できる。 ・競合技術との比較： 各システムとも既存のセンサシステムにない優位性を有する新規なセンサになっている。 	<ol style="list-style-type: none"> 1) H28年度末達成見込み 2) 達成 3) 達成

①-(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



最終目標	達成の見込み
<ul style="list-style-type: none"> ・開発したセンサ端末を活用した各フィールドのインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムの構築を完了する。 ・各フィールドでの実証実験を1年以上実施し、各フィールドの劣化・損傷診断に必要な基礎データの取得を完了する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・完成度： 各センサシステムのプロトシステムがほぼ完成しており、今年度末に実証実験用のセンサシステムを機械装置として完成させる予定になっている。また、各センサシステムの本格実証実験の実証場所が1カ所以上選定完了している。さらに、予備実証実験も実施して、本格実証での問題点も抽出完了しているため、最終目標も達成見込みである。 ・実証実験計画： 【H29年度】各システムとも参画高速道路会社と綿密な連携のもと、以下の実証場所を実証実験を実施すべく現実的、有効と来な計画を立案している。 <ul style="list-style-type: none"> (1-1-1) SAセンサ: 西名阪自動車道西安堵橋 (1-1-2) 面パターンセンサ: 阪神高速道路13号東大阪線法円坂高架橋 (1-2) 傾斜マルチセンサ: 東名自動車道吾妻山トンネル入口情報板 (1-3) 法面変位センサ: 山形自動車道月山湖PA付近法面 【H30年度】各システムとも引き続き上記実証場所で2年目の実証実験を実施するとともに、データ比較のため、新たな実証な実証場所を1, 2カ所選定して同様の実証実験を実施する。 ・社会課題への対応： 各システムで橋梁、道路付帯物、法面の劣化損傷状態が計測できることを示すことで目的の社会課題の解決が期待できる。



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

(ライフラインコアモニタリングシステムの研究)

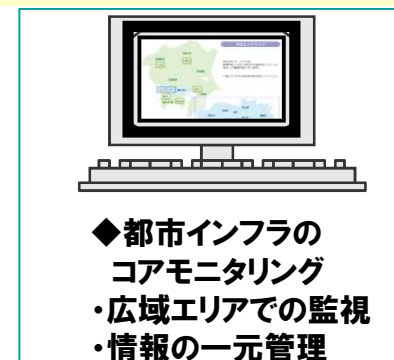
(委託先: 国立研究開発法人 産業技術総合研究所、
(一財)マイクロマシンセンター、明星電気(株)、
沖電気工業(株)、高砂熱学工業(株))
(再委託先: 東京大学)

ライフライン(熱供給)のポンプを対象とした振動監視の無線化により、有線方式での制約(配線・センサ取付工事)を無くし、異常振動固有の周波数情報だけを収集する小型(ペットボトルキャップ)端末により、複雑かつ膨大なログ解析を必要とせず、早期異常検知・メンテナンス時期予測が行えるモニタリングシステムを開発

地域医療支援病院(約500施設)



クラウド型モニタリングシステム



地域冷暖房施設(国内約140ヶ所)

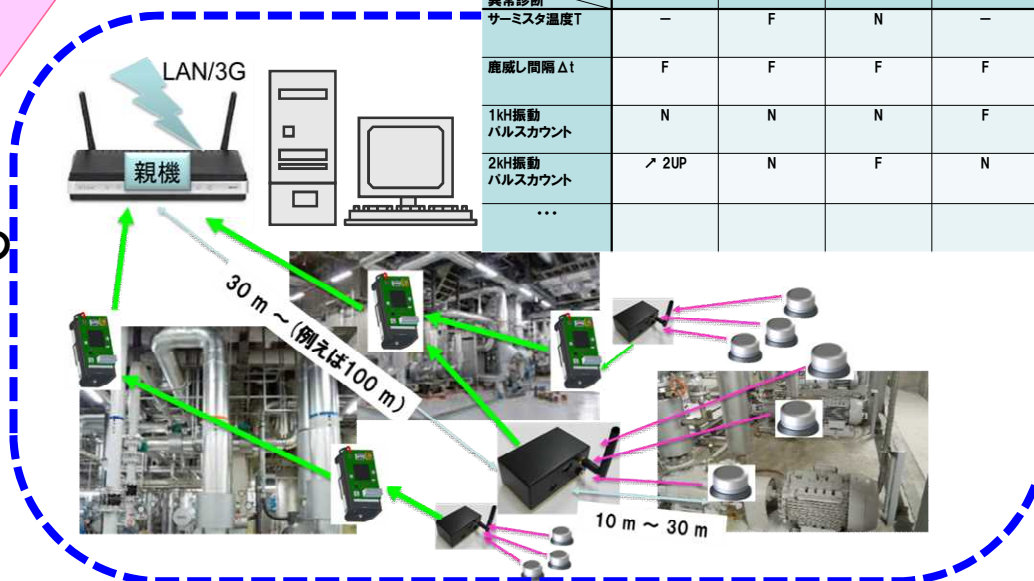


監視室での
遠隔監視

ポンプモニタリング
システムの開発

ポンプ異常原因の特定 フォルトディクショナリーの構築

異常原因	原因 1	原因 2	原因 2	原因 3
異常診断 サーミスタ温度T	-	F	N	-
鹿威し間隔 Δt	F	F	F	F
1kHz振動 パルスカウント	N	N	N	F
2kHz振動 パルスカウント	2UP	N	F	N
...				



本システムの用途とユーザメリット

【コア(=ポンプ群)モニタリングシステムの用途】

①定常監視

- ✓ 経年劣化・異常の検知
- ✓ ポンプ個体差の傾向管理

②非定常監視

- ✓ 地震にてシャットダウン時からの施設エリア毎、配管系統毎の状態監視、復旧可否の高確度判断
- ✓ 定期修理後の修理不良の発見

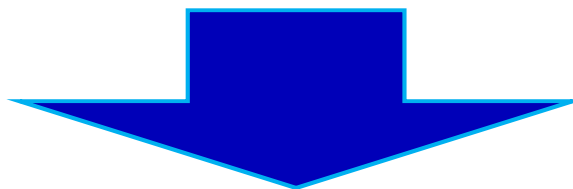


【ユーザー機関のメリット】

- 設備の稼働率向上・・・バックアップ機器が不要になる
- 保全費用の削減・・・軸受の保全間隔が、メーカー推奨間隔(3年ごと)から軸受寿命(3~40,000稼働時間)に延長可能

技術開発課題

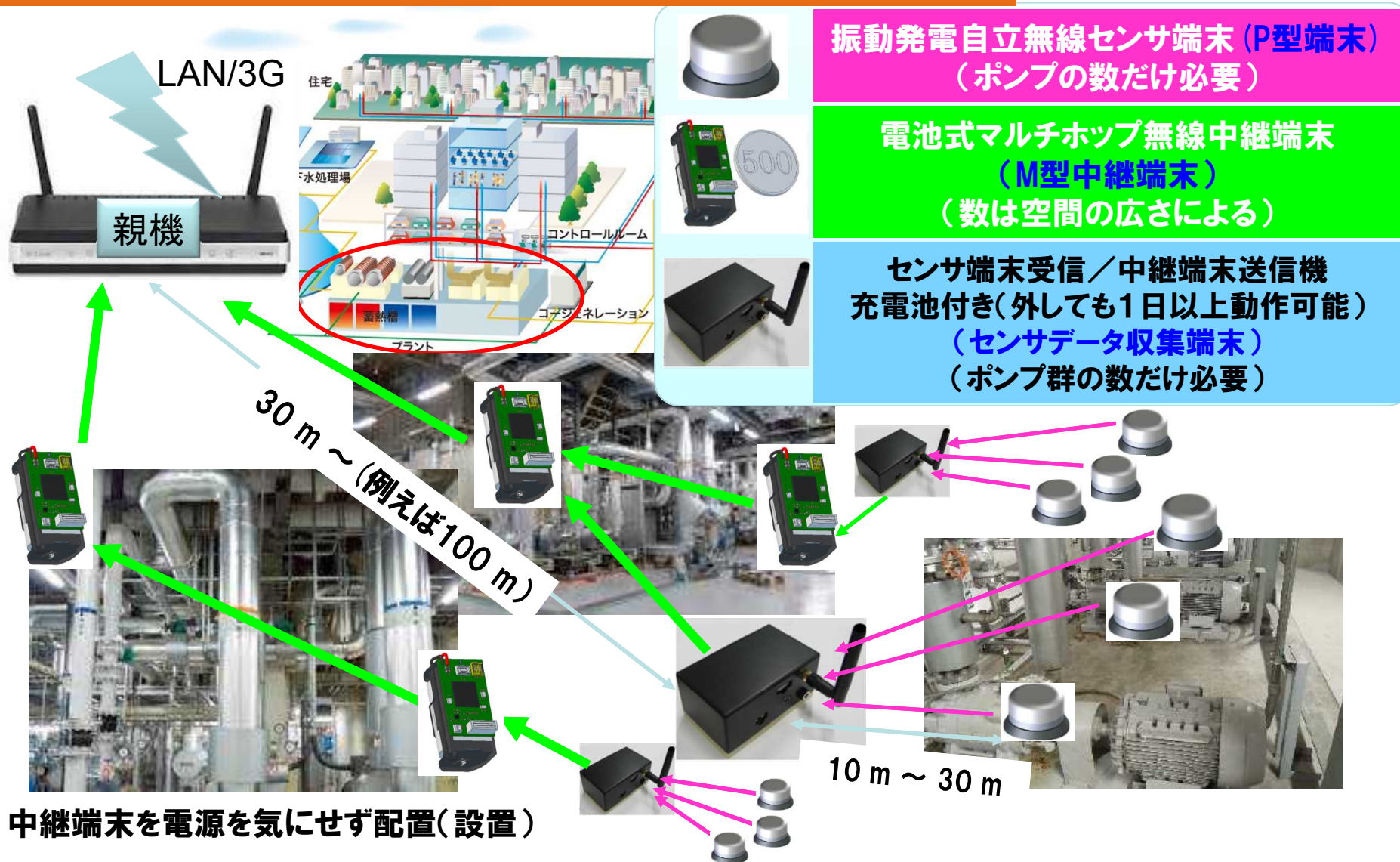
- 有線の(モニタリング)システム:敷設コストを含め100点程度のモニタリングシステムで1000~2000万円
→普及のためには一桁安価にする必要あり
- 無線システムの課題
 - ✓ (敷設コストは低い)有線と同じデータ通信容量・品質は得られない。品質を上げようとするれば、無線センサ端末の消費電力の増加/サイズ増大/高コスト化を招く、端末の自立電源が困難になり、電池交換等の(端末の)メンテナンスコストが増大
 - ✓ 端末に供給される電力量が限られるため、取得データ量も(著しく)制限される




- ◆ 限られたデータ量で状態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
- ◆ 低コスト・低消費電力の高信頼性無線通信システム
などを開発する必要がある

基本計画を実現するための手段 (圧電発電型振動センサをコアとする無線センサネットワークの開発)

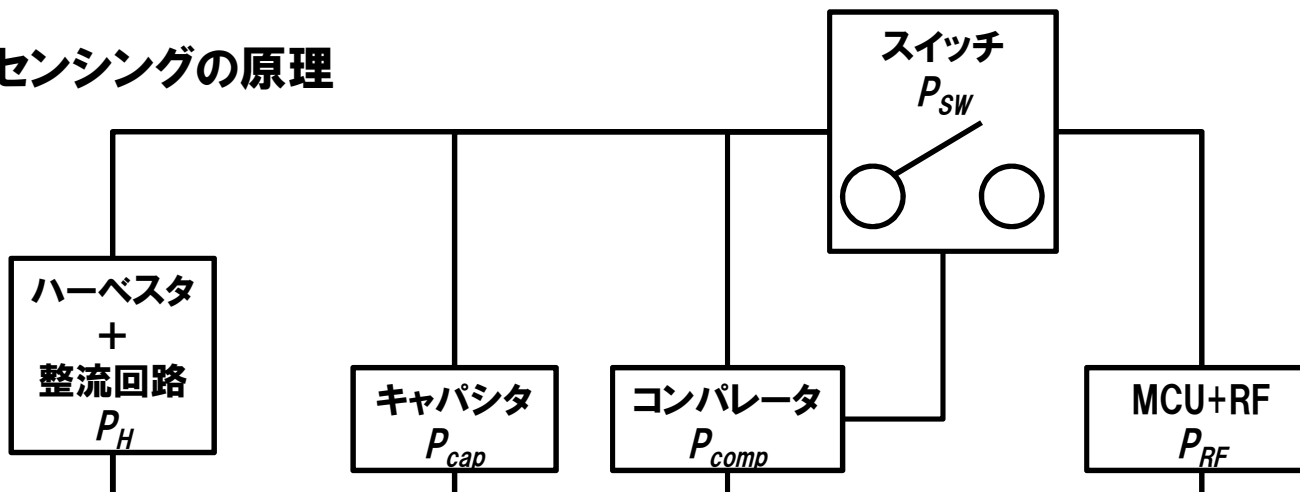
柔軟なルーティングが可能なマルチホップ中継端末と片方向通信
(低コスト)センサ端末を適切に組み合わせてネットワークを構成



センサ端末の中間・最終目標(総括)

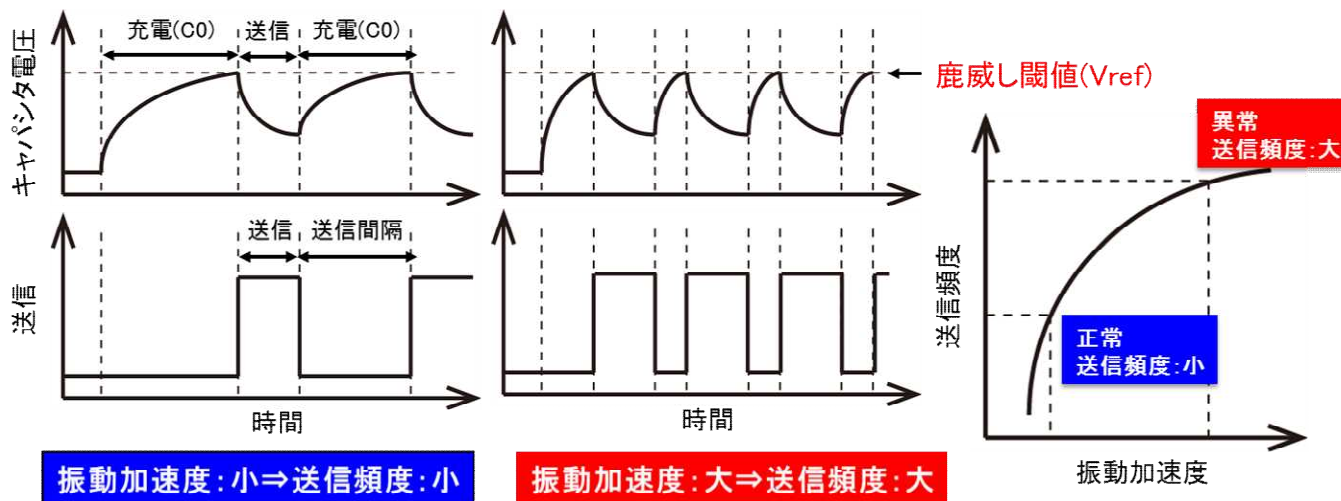
基本計画端末仕様	中間のP型端末(H28年度)	最終のP型端末
振動または変位+温度計測機能	圧電振動センサ(カウント型)+半導体温度センサ	圧電発電型振動センサ+半導体温度センサ
1回/時以上の無線通信	10分に1回程度の非同期送信可(鹿威し方式)	10分に1回程度の非同期送信可(鹿威し方式)
自立電源動作	1次電池を併用したハイブリッド電源(端末消費電力:10 μ W)	センサの振動発電のみで動作(端末消費電力:5 μ W)
地震等の突発事象検出	センサデータ収集端末に感震器を接続(震度4相当の地震で動作)	センサデータ収集端末に感震器を接続(震度4相当の地震で動作)
サイズ:概ね7cmx10cmx5cm以下	直径30mm、高さ50mm 突起部(落下防止用固定部)除く 	ペットボトルキャップ大 
無線通信:免許不要、通信距離30 m以上	920MHz特定小電力, 障害物が無い場合に30m以上、実環境では10 m以上	920MHz特定小電力, 障害物が無い場合に30m以上、実環境では10 m以上
信頼性:10年以上	実環境下で1年以上の実証実験可	実環境下で10年以上

鹿威しセンシングの原理



- 動作原理**
- $P_H > P_{comp} + P_{sw}$ のときキャパシタが充電される
 - キャパシタの電圧 > コンパレータの設定電圧でスイッチがON
 - キャパシタの電力でMCU+RFが動作して、端末のIDを送信
 - 送信がどれくらいの頻度で来てるかで振動状態を判定

- 研究開発内容**
- P_H の増大: ScAINの導入、設計最適化、整流回路低損失化
 - $P_{comp} + P_{sw}$ の低減: 参照電圧発生回路の低電力化



①- (5) コアモニタリングシステムの開発 ②コアモニタリングシステムの構築と実証実験

最終目標(平成30年度末)

●開発したセンサ端末を活用したインフラ状態をモニタリングするネットワークシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを構築

- ・高い信頼性 ……99%の高い検知率を達成
 - ・確実な省力化……回転部位に起因する日常保全項目の95%をカバー
- } 実運用施設に構築し、効果を実証

中間目標	研究開発成果	達成度	最終目標への取り組み
<p>●コアモニタリングシステムの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・鹿威し方式データのモニタリング要素技術の開発 ・検知率とカバー率の検証 <p>●コアモニタリングシステムの構築と実証</p> <ul style="list-style-type: none"> ・病院施設、地域熱供給施設で実証 ・ネットワークを構築し、モニタリングシステムを連続稼動 	<ul style="list-style-type: none"> ・振動加速度ピックアップにて把握したポンプの振動特性から、鹿威し方式データでの異常検知ロジック、余裕時間の予測手法を特定し、モニタリングシステムの要件を完成。 ・既存データ、故障シミュレータから発生する異常振動、ならびに実稼動ポンプにて故意に異常を発生させた診断から検知率、カバー率を検証。 ・地域熱供給施設(所在地:東京都)にて、モニタリングシステムの試験機を稼動。H28年度下期には病院施設(所在地:神奈川県所在)にも導入。 ・地域熱供給施設の機械室にて、P型端末機のローカルネットワークを構築し、コアモニタリングシステムを稼動。 	<p>○</p> <p>△ (H29/2)</p> <p>○ (病院は、H29/2)</p> <p>○</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・フィルタリング機能、異常検知ロジックの現場実証を重ねることで、高信頼性のモニタリングシステムが完成する。 ・従来の振動監視システムと診断結果を比較検証しながら、パラメータを調整することで、高い検知率の達成とカバー率の向上が実現する。 ・大型ポンプを有する他施設での実証を行うことで実用性を高める。 ・実績のあるクラウド型設備管理システムにコアモニタリングシステムを組み込むことで遠隔監視の実運用を図る。

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込、X:未達

成果の概要

①- (5) コアモニタリングシステムの開発

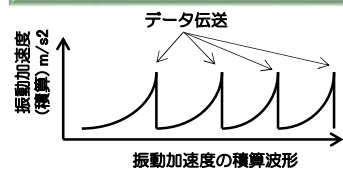
- ・データのフィルタリング、異常検知、余裕時間の算出に関するソフトウェア仕様を特定
- ・コアモニタリングシステムの試作機を開発

② コアモニタリングシステムの構築と実証実験

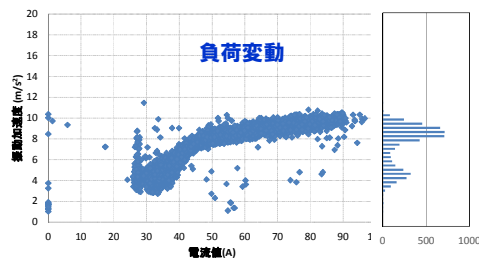
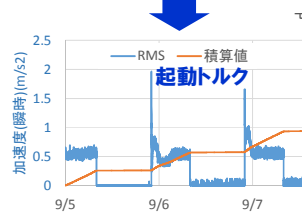
- ・病院施設、地域熱供給施設に従来振動監視システムとコアモニタリングシステムを導入
- ・P型端末を用いたローカルネットワークシステムを構築し、モニタリングを稼動

①- (5) コアモニタリングシステムの仕様特定と試作機開発

■収集データのフィルタリングで有効データを抽出



フィルタリング: 鹿威しデータから、起動時や負荷変動時の非定常状態を層別

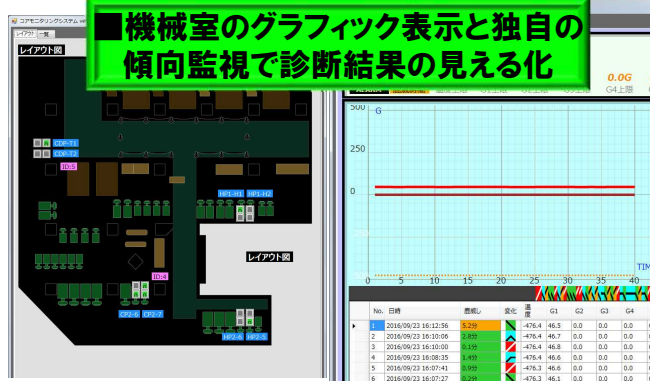


■異常原因をフォルトディクショナリ※で特定

※予兆と異常の因果関係をマトリックス上に定義

異常原因 異常診断	原因 1	原因 2	原因 3
センサ温度	—	F	N
鹿威し間隔 Δt	F	F	F
振動センサ1	N	N	N
振動センサ2	↗ 2UP	N	F

■機械室のグラフィック表示と独自の傾向監視で診断結果の見える化

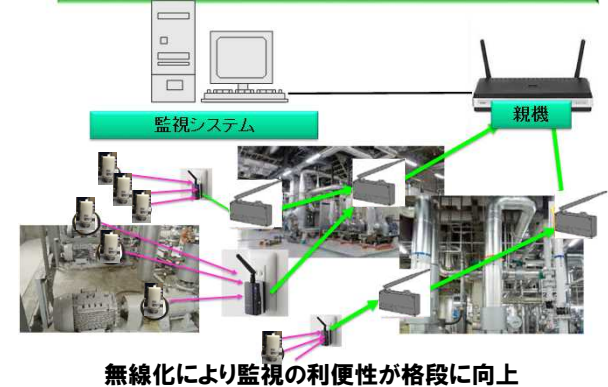


② 実証サイトにてモニタリングシステムを構築

■地域熱供給施設、病院施設にて従来の振動センサを導入

一般的な横型渦巻きポンプ、最新の高効率立型ポンプの振動実態を把握

■P型端末を用いたローカルネットワークシステムを構築



①- (1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

最終目標(平成30年度末)

- 消費電力0.5 μ W以下の鹿威し回路の開発
- 5 μ W以上の発電性能を有する振動発電センサデバイスの開発
- 自立電源センサ端末動作の実証

中間目標	研究開発成果	達成度	最終目標への取り組み
<ul style="list-style-type: none"> ●低消費電力鹿威し回路の開発 	<p>コンパレータのバイアス電流を削減し、BGRでは弱反転領域を利用することによって共に従来比90%以上消費電流を削減。これらを組み合わせ、鹿威し回路の消費電力を目標を大きく上回り0.12 μWまで削減。</p>	◎	
<ul style="list-style-type: none"> ●発電量DC2V、0.5 μWのMEMS圧電振動センサデバイスの開発 	<p>現在までにScAlNを導入するとともにMOSFETを採用した高効率整流回路を開発し、DC2V、0.21 μWの出力を達成。H28年度中にSc添加量を最適化し圧電定数を1.5倍に増大させ発電量を2倍以上に増加させる。</p>	△ (H29/3)	<p>ScAlN成膜の最適化により発電量を8倍上昇させる。加えて応力緩和構造の採用と圧電膜の厚膜化により、さらに発電量を3倍程度上昇させ最終目標を達成する。</p>
<ul style="list-style-type: none"> ●P型端末の模擬的な動作実証 	<p>AlN振動発電センサデバイスと低消費電力鹿威し回路を組み合わせることによって、実際のポンプ振動と同等程度の振動加速度を発生させた加振器上において、鹿威し方式の動作実証を行った。</p>	○	<p>鹿威し回路のワンチップ化による端末の小型化と、振動発電センサデバイスのワイドバンド化を行い、実機ポンプ上でのP型端末動作を実証する。</p>

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込、X:未達

成果の概要

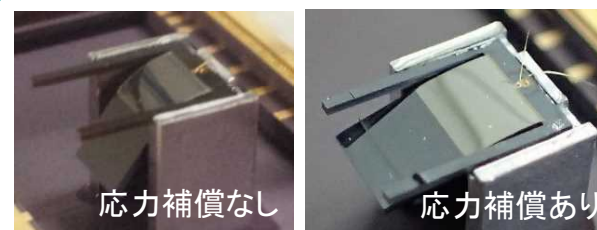
①- (1) コアモニタリング用センシング・発電デバイスの開発

- ・コンパレータ、BGRの消費電力を1/10以下に削減し、鹿威し回路消費電力0.12 μ Wを達成
- ・ScAlNの採用と高効率整流回路を開発し、発電量DC2V, 0.2 μ Wを達成
- ・振動発電デバイスからの電力による無線送信の実証

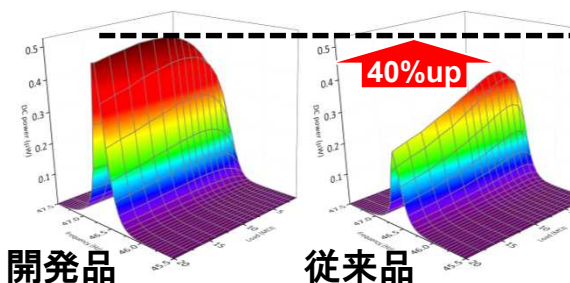
鹿威し回路消費電力 (μ W)

部品	開発品	従来品
コンパレータ	0.021	0.18
BGR	0.072	2.0
その他	0.026	0.026
鹿威し消費電力	0.12	2.2

最終目標0.5 μ Wを大幅に達成



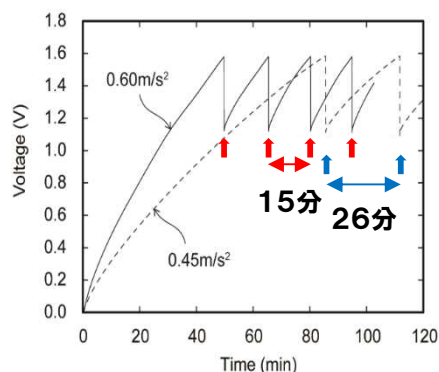
・ScAlNの強力な応力を補償する構造を開発



・振動発電デバイスに特化した整流回路を開発

- ・応力補償構造を備える片持ち梁構造を開発し、発電量を従来比4倍に
- ・従来品比40%効率増の整流回路を開発

- ・Sc組成最適化(d_{33} : 7.2 \Rightarrow 20 [pm/V])で8倍
- ・デバイス構造(主に圧電膜厚)最適化で3倍
- \Rightarrow 合わせて最終目標5 μ W達成見込み



- ・蓄電された振動発電デバイスからの電力でマイコンを駆動し無線送信を実証
- ・振動センサとしての機能を実証

①- (2) コアモニタリング用AIN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発

最終目標(平成30年度末)

- ScAIN圧電デバイス大口徑200mm量産一貫工程完成及び供給
圧電定数 $d_{33} = 15\text{ppm/V}$ の達成、初期量産試作プロセス歩留まり60%
- 圧電デバイス用ウエハレベルパッケージ量産一貫工程完成及び供給
封止接合と電気接続をウエハレベルで同時に行う接合技術確立
@低温接合 250°C 以下、リークレート $\sim 10^{-8}\text{Pa}\cdot\text{m}^3/\text{sec}$ 以下、接合電気抵抗 $1\ \Omega$ 以下

中間目標	研究開発成果	達成度	最終目標への取り組み
● AIN圧電デバイス量産試作プロセス技術 1) AIN圧電デバイス大口徑200mm量産試作要素プロセスの確立 2) ScAIN圧電デバイス大口徑200mm量産試作要素プロセスの確立	・Pt/AIN/Pt 積層膜オールドライエッチング加工技術確立 ・Pt/AIN/Pt 積層膜成膜工程の応力最適プロセス制御確立 ・(0次)予備実証用発電デバイス開発終了、形状歩留り70% ・高周波振動デバイス開発終了(1kHz~8kHz)	○	・Pt/ScAIN/Pt 積層膜オールドライエッチング加工技術、応力制御確立 ・トータル歩留り60%以上達成に向けた加工条件ブラッシュアップ
		(H29/3)	
● ウエハレベルパッケージ技術 1) 電気接続及び封止接合実装プロセス確立	・低温活性化Au-Au接合技術を開発し、 200°C で10MPa接合強度達成 ・(0次)予備実証用発電デバイスパッケージ開発終了 ・電気接続及び封止接合実装構造・プロセス確立	○	・200mm基板、実デバイスで接合技術を確立 ・実証用端末向けデバイス供給 ・ガラスパッケージ構造、接合プロセス確立
		(H29/3)	

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込、X:未達

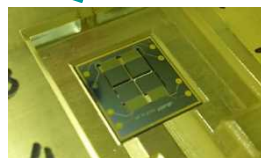
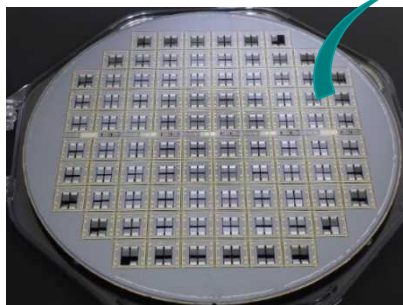
成果の概要

①- (2) コアモニタリング用AlN圧電デバイスのウエハレベルパッケージ技術の開発

- ・200mmSiウエハを用いて低周波、高周波用AlN圧電カンチレバーを試作。圧電定数 d_{33} :6ppm/V、形状歩留り70%
- ・(0次)実証用発電デバイスパッケージ開発終了(8月末)、200°Cの低温活性化Au-Au接合技術を開発し、TEG評価により $10E-11Pa \cdot m^3/s$ 程度の低リーク速度を達成

Pt/AlN/Pt 積層膜成膜技術確立

- ・DC/rfスパッタ成膜条件を調整し、ウエハ内のAlN圧電積層膜応力制御、均一化
- ・圧電定数 d_{33} :6ppm/V



低周波、発電用カンチレバー
(15×15mm)

カンチレバー形状歩留り 70%
電気特性歩留り 65%

プラズマ活性化低温Au-Au接合技術を確立

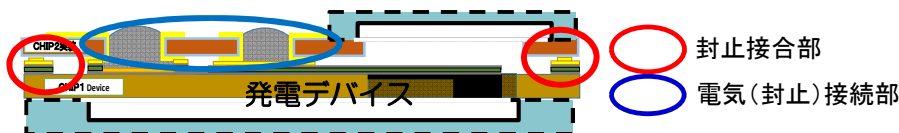
- ・プラズマ活性化低温Au-Au接合方法で、強い接合強度が得られ、封止TEGにより $10E-11Pa \cdot m^3/s$ 程度の低リーク速度を達成

Au-Au接合TEG実験結果

接合方法	接合荷重(N)	接合温度(°C)	接合強度(MPa)
Au-Si 共晶接合	50~190	380*	~33±15
Au-Sn共晶接合	100	300~340	15±1
Au-Au接合	100	200	12~76

プラズマ活性化処理
Ar:20sccm, 100W, 60Pa, 1min

- ・封止接合と電気接続それぞれウエハレベルで接合可能な構造を検討



発電デバイス/実証用パッケージング構造

① - (3) コアモニタリング用センサ端末の開発

最終目標(平成30年度末)

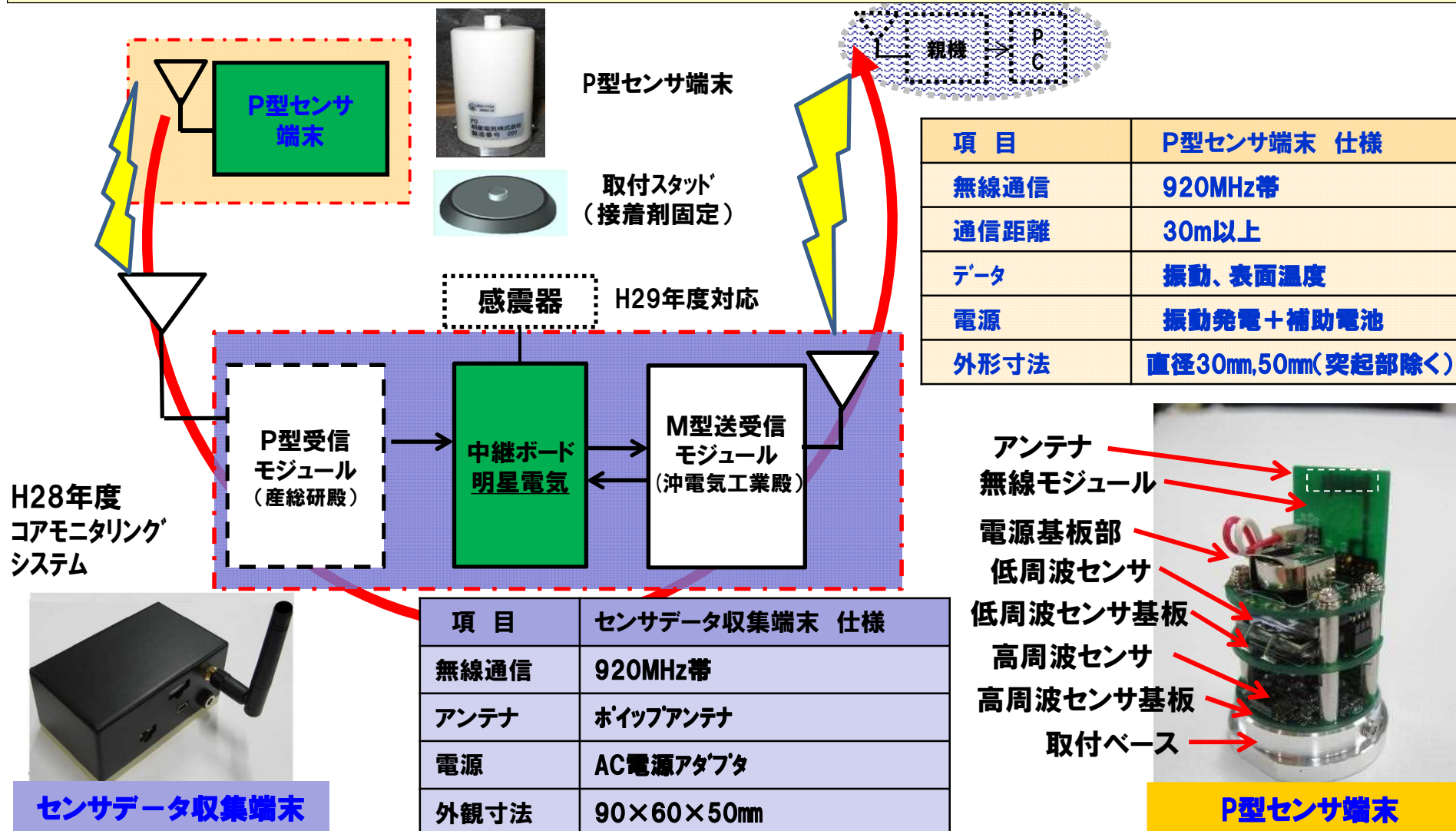
- ・ポンプに設置し、ポンプ振動だけの発電量で振動状態・表面温度変化をモニタリング可能なセンサ端末を開発
- ・振動発電で、1時間に1回以上の無線通信(920MHz)を行えるセンサ端末を開発
- ・地震等の突発事象検出機能を持った端末の開発
- ・センサ端末サイズは ペットボトルキャップ大
- ・センサ端末とセンサデータ収集端末間の無線通信距離は、10m~30m
- ・センサ端末の信頼性:実環境で10年以上

中間目標	研究開発成果	達成度 (予定年度)	最終目標への取り組み
<ul style="list-style-type: none"> ・計測項目(振動、温度) ・10分に1回程度の無線通信 ・1次電池を兼用したハイブリッド電源 ・地震等の突発事象検出 ・センササイズ ・無線通信 実環境で10m ・信頼性実環境下で1年以上 	<ul style="list-style-type: none"> ・低周波振動センサにて振動計測およびサーミスタにて温度計測可能なP型0次端末を開発した。 ・P型0次端末で、実際のポンプに取り付け約3分に1度の無線通信を確認した。 ・自立発電+補助電池で動作を確認。 ・突発事象はセンサデータ収集端末にインターフェースを設け実現する予定 ・P型0次端末の底面サイズ(直径30mm) ・P型0次端末→センサデータ収集端末の無線通信距離を晴海実環境で20mを確認した。 ・実環境動作で確認中。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ ○ ○ △(H29/3) ○ ○ △(H29/3) 	<ul style="list-style-type: none"> ・P型端末の電源キャパシタ容量を増設し自立電源動作予定 ・センサデータ収集端末に感震器を接続し実現予定 ・加速度試験を実施して確認する。

成果の概要

①- (3) コアモニタリング用センサ端末の開発

- ・ P型センサ端末の試作
- ・ センサデータ収集端末の試作



①- (4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発

最終目標(平成30年度末)

●悪環境下で30m程度の無線通信を実施でき、小型電池で10年動作可能な省電力機能を持つM型中継端末向け省電力無線マルチホップネットワークプロトコルスタックを開発する

中間目標	研究開発成果	達成度	最終目標への取り組み
<p>●省電力性能 稼働年数1年以上(実証実験環境下での見込) 端末消費電力:160μW以下</p> <p>●通信性能 (920MHz特定小電力・マルチホップの動作条件として)悪環境下での無線通信 距離:30m以上</p>	<p>●クロック補正を利用した省電力通信方式 本方式を実装した評価機で消費電力を測定した結果、1時間の平均消費電力が154μWで、端末消費電力160μW以下の目標値を達成していることを確認</p> <p>●実機実証 実証現場で電波測定を行い約30mの距離で無線通信できることを確認 平平均RSSI(受信信号強度):-66dBm 最小RSSI(受信信号強度):-67dBm PER(パケットエラー率):0%</p>	<p>○</p> <p>○</p>	<p>●輻輳回避技術の開発 輻輳回避技術の開発実装およびその他調整により、H30年度の一般的なハードウェアで作成したM型中継端末を利用して、端末の平均消費電力が80μW程度以下を実現するための追加技術開発を実施</p> <p>●ガイドライン作成 実環境での現地調査や、文献の調査を行い、冷熱供給施設における無線ネットワークシステム構築のためのガイドラインを作成</p>

◎:大きく上回って達成、○:達成、△:達成見込、X:未達

成果の概要

①- (4) コアモニタリング用ネットワークシステムの開発

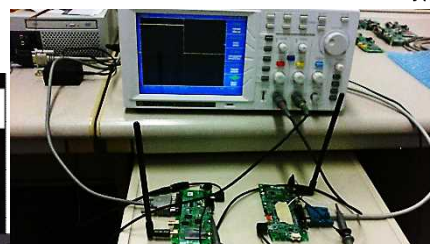
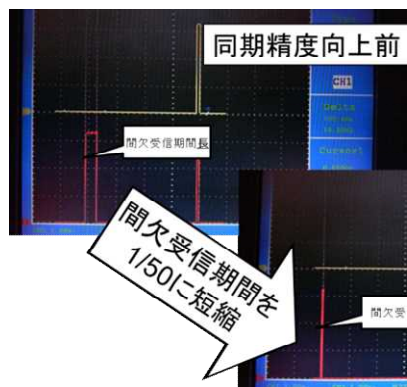
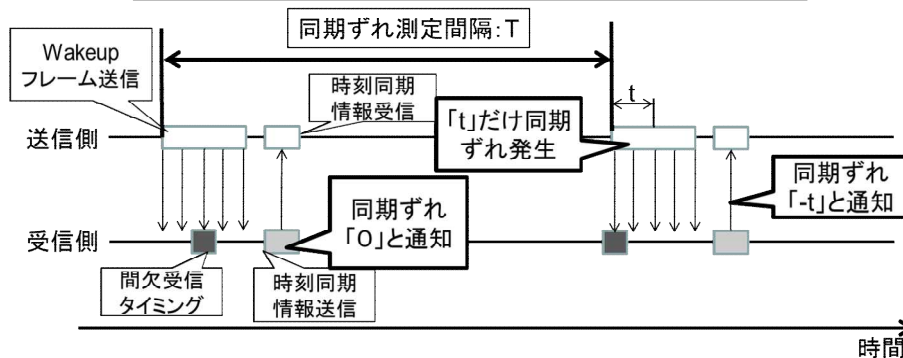
省電力性能に関する成果

- ・ 時刻同期型の省電力通信方式の開発およびマルチホップ化

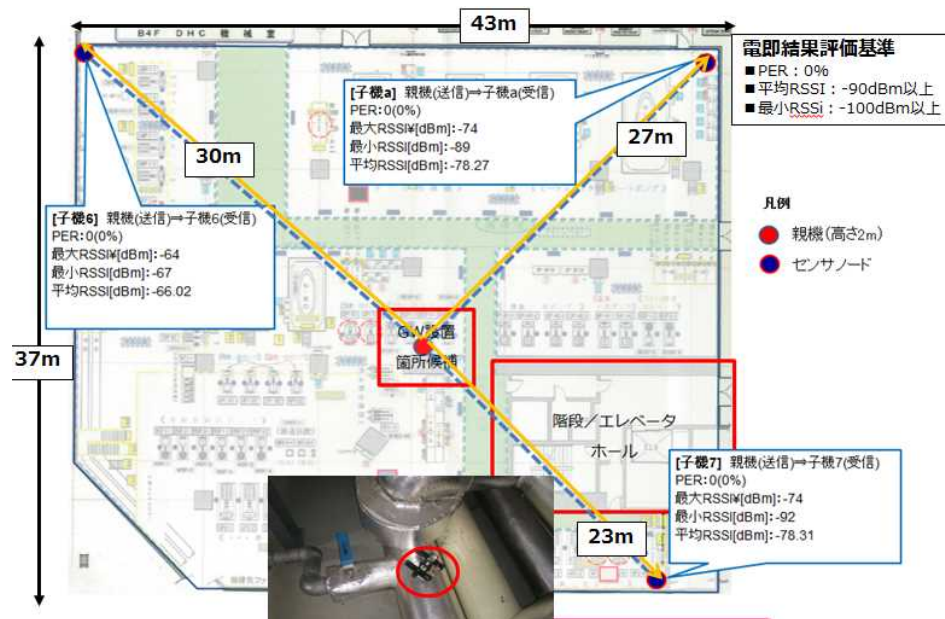
通信性能に関する成果

- ・ 実環境での実証実験の実施
- ・ M型中継端末の試作

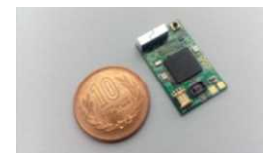
時刻同期型の省電力通信方式



実環境での通信測定実施



M型中継端末の試作



◆知的財産権、成果の普及

	H26	H27	H28	計
特許出願	0	2	1	3
研究発表・講演	0	14	9	23
プレス発表・展示 ・ニュースリリース等	0	7	7	14

※平成28年度10月31日現在



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

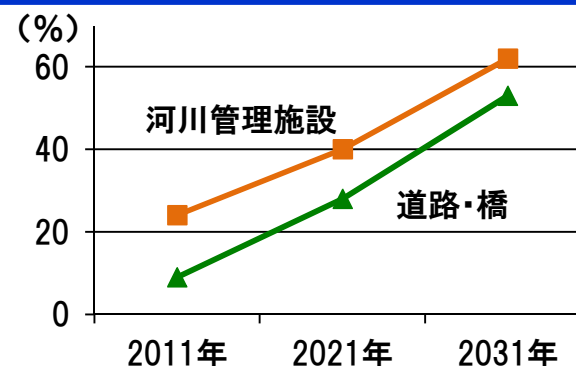
(道路付帯構造物モニタリングシステム開発)

(委託先:株式会社 日立製作所)

本テーマが対象とする社会課題

(1)背景

- ・道路や鉄道など、社会インフラ施設が老朽化
2021年度:築50年以上が25%を超える
- ・事故/災害の発生
2012/12:トンネル崩落 ・2013/09:貨物列車脱線

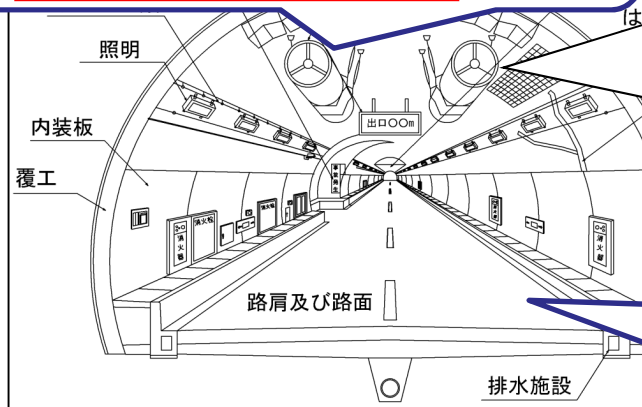


出典:国土交通省
「建設後50年以上経過する施設の割合」

(2)現状の点検業務と課題

課題①

近接目視点検が義務化されている
⇒点検時に交通規制・足場の組上げが必要



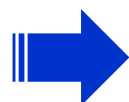
課題②

点検者に熟練技術者を採用
⇒人材不足・点検精度にバラつき有



課題③

故障状態になってからの整備(事後保全)が主流
⇒再建設に近い修繕にかかるコスト大



課題を解決するには効率的にモニタリングし、
施設の状態を正確に把握してタイムリーに修繕を行う予防保全が必要

従来手法の課題

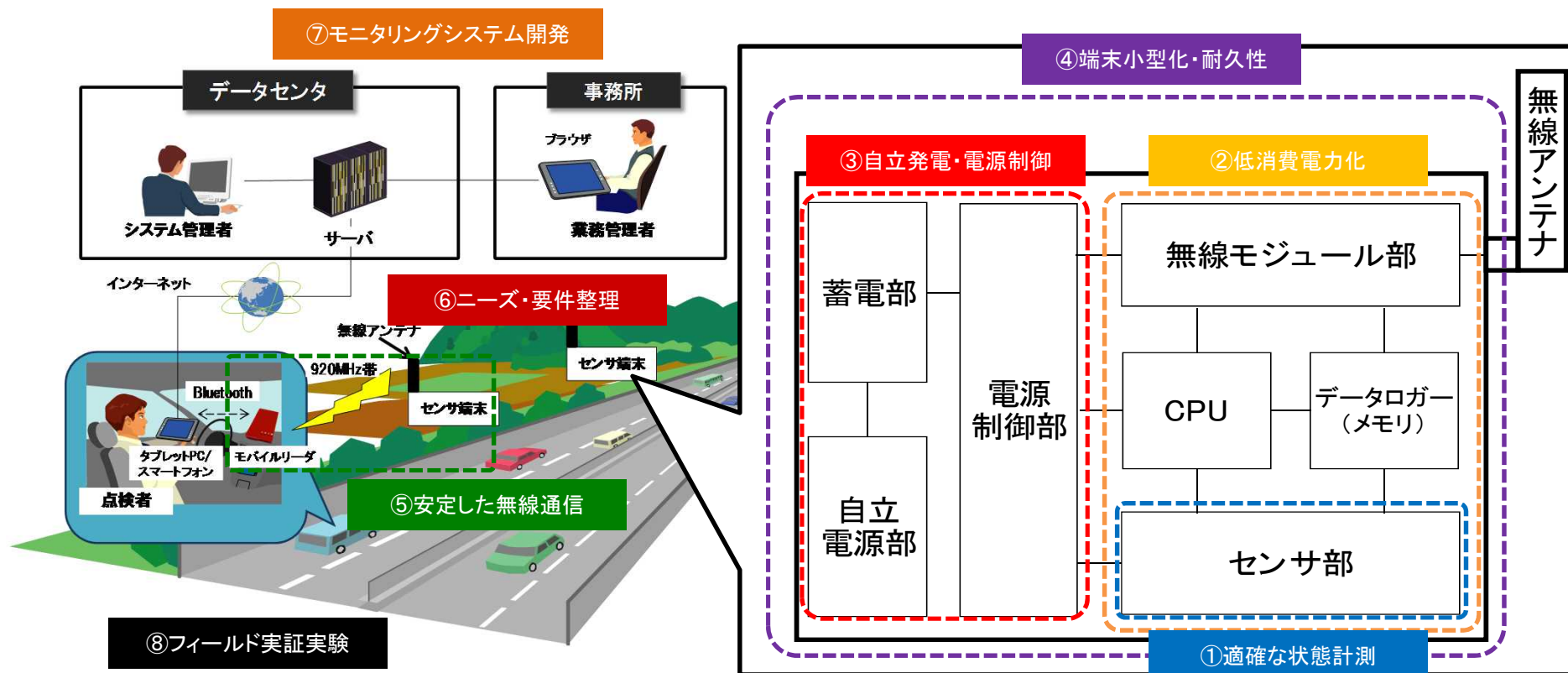
従来のJF点検業務の課題及び解決策（ヒアリングを実施）

設備点検頻度→2ヶ月毎に遠方目視、1年毎に近接目視点検

課題	解決策
2ヵ月毎の点検は遠方目視であるため問題を見落とす可能性がある	JFに異常を検知するセンサを設置することで、短い周期での点検を可能にし、点検箇所の見落としを防ぐ
現場に <u>紙を持って行き、帰ってきてからPCにてシステム入力をする運用</u> のため作業に時間がかかる	<u>タブレット端末を導入</u> することで現場にてデータ入力が可能
モニタリング対象1つにかかる <u>コストが大</u>	自治体を想定した <u>低価格なサービス</u>
現地に <u>電源</u> が必要	<u>自立発電</u> で自己動作可能なセンサ端末の使用
通信インフラにかかるコストが大 (<u>設置・メンテナンス</u> にかかるコストが大)	<u>巡回型データ回収方式</u> による、無線通信技術を用いたシステムの利用
システムを構成する機器が多く、1システムの <u>規模が大</u>	センサ取得部、無線通信部、電源部を一体化した、 <u>小型なセンサ端末</u> の使用

課題を踏まえた開発内容

- ✓付帯構造物の状態監視するための、**自立電源で自己動作可能な小型センサ端末の開発**
- ✓巡回型データ回収方式による**効率的で安定した無線通信技術の開発**
- ✓道路管理ニーズ抽出、フィールド実証による、**実用に求められるセンサネットワークシステムの開発**



基本計画を実現するための手段(センサシステム用)

本プロジェクトは、基本計画に基づき8つの開発項目で整理して推進しております。

【NEDO基本計画仕様】

(a) 構造物の状態を適確に把握するために必要なセンシング性能

(b) インフラ構造物の健全度を診断するための振動、変位等

(c) センサ端末自身で自己動作可能な低消費電力、自立発電

(d) 設置容易性(小型化:7cm×10cm×5cm)

(e) 安定な接続性と信頼性がある無線通信機能

(f) 実環境下で30m以上通信可能

(g) 無線局免許不要な周波数無線の適用

(h) 実用に求められるセンサーネットワークシステムの構築

(i) ユーザ機関と連携した実環境での実証実験

研究開発Ⅰ 【研究開発項目】

① 構造物の状態を適確に把握するためのセンシング技術開発

研究開発Ⅱ

② センサおよび無線機の低消費電力化の技術開発

③ 自立電源および電源制御の技術開発

④ センサ端末の小型化および耐久性・信頼性の技術開発

研究開発Ⅲ

⑤ 安定した無線通信の技術開発

研究開発Ⅳ

⑥ 実用に求められるニーズ調査・要件整理

⑦ 道路付帯構造物モニタリングシステムの開発・構築

⑧ フィールド実証実験

中間目標・最終目標

中間目標(28年度)	最終目標(30年度)
<p>センサ端末/モニタリングシステムとして <u>プロトタイプ完成</u>し、フィールドにて短期間の検証実施</p>	<p>センサ端末/モニタリングシステムとして <u>製品開発を完了</u>し、フィールドにて長期間の検証実施</p>
<p>測定誤差10%以下、数十バイトのデータ量伝送を実現するプロトタイプ完成</p> <ul style="list-style-type: none"> 検出方向:1~3軸 ・ 測定誤差:<u>10%以下</u> 検出加速度:1~1960gal ・ <u>検出区間:1~2区間</u> 	<p>測定誤差1%以下、数バイトのデータ量伝送を実現する製品完成</p> <ul style="list-style-type: none"> 検出方向:1~3軸 ・ 測定誤差:<u>1%以下</u> 検出加速度:0.1~1960gal ・ <u>検出区間:1~3区間</u>
<p>自立発電の実装したプロトタイプ完成</p> <ul style="list-style-type: none"> <u>(収録)70mW以下</u> ・ <u>(待機)170μW以下</u> <u>サイクル寿命:2000回</u> <u>端末:16×16×10cm</u>以下の設計・開発 耐久性:IP61相当(センサ端末本体) IPX5相当(無線アンテナ) 	<p>自立発電最適化を図った製品完成</p> <ul style="list-style-type: none"> <u>(収録)35mW以下</u> ・ <u>(待機)35μW以下</u> <u>サイクル寿命:4000回</u> <u>端末:7×10×5cm</u>以下の設計・開発 耐久性:IP65相当(センサ端末本体) IPX5相当(無線アンテナ)
<p><u>30m以上</u>の通信距離を実現するプロトタイプ完成</p> <ul style="list-style-type: none"> 通信距離:30m以上(走行中にデータ回収) 	<p><u>時速80kmの走行中に30m以上</u>の通信距離でデータ受信を実現する製品完成</p> <ul style="list-style-type: none"> 通信距離:100m以上※事業目標 ダイバーシティ技術の設計・実装 ビームフォーミング技術の実装 (パケット受信成功率:90%以上)
<p><u>実フィールド</u>にプロトタイプを設置。道路区間限定で<u>短期間</u>検証実施</p> <ul style="list-style-type: none"> 道路付帯構造物の維持管理ニーズ整理 センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発 道路区間限定(実フィールド)で短期間実証 	<p><u>道路区間を拡大し長期間</u>での検証実施 ※<u>適用センサも拡大</u>も検討</p> <ul style="list-style-type: none"> 道路以外の分野における維持管理ニーズ整理 必要なシステム機能の実装 道路区間を拡大で長期間実証

中間目標達成度(研究開発 I)

中間目標

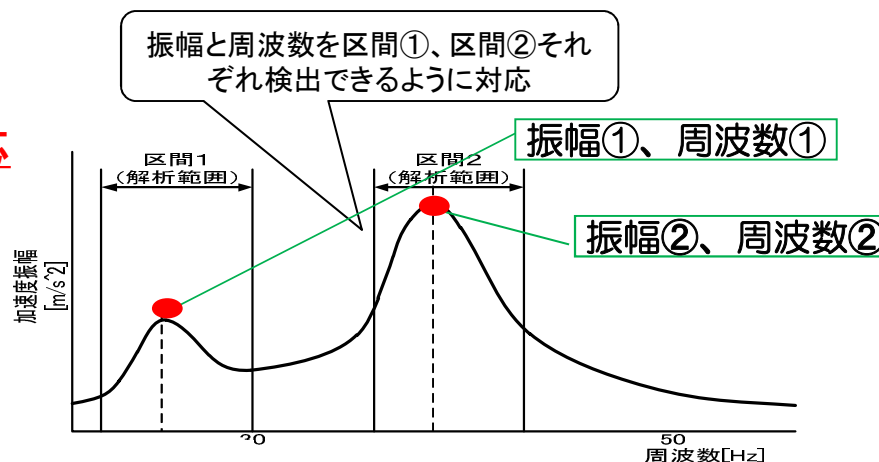
測定誤差10%以下、数十バイトのデータ量伝送を実現するプロトタイプ完成

- ・ 検出方向:1~3軸 ・ 検出区間:1~2区間
- ・ 検出加速度:1~1960gal ・ 測定誤差:10%以下

(1) 活動状況

① 検出内容

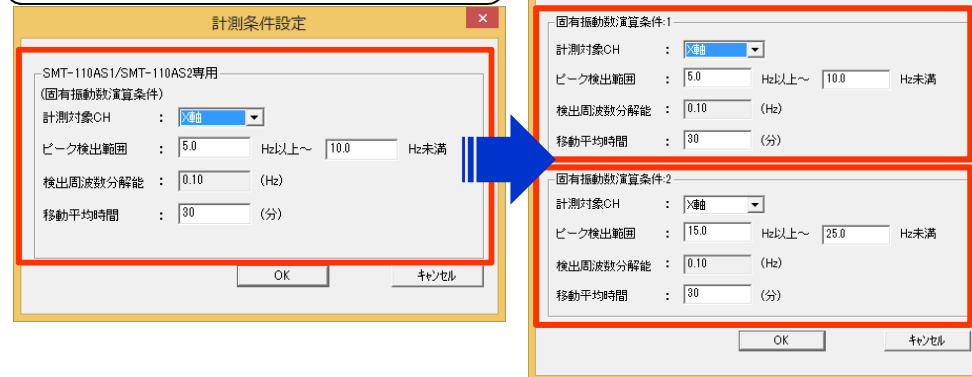
- ・ X軸、Y軸、Z軸の中で2成分検出できるように対応
- ・ 検出加速度については1~1960galの範囲にて検出可能
- ・ 検出区間については区間①、区間②でそれぞれで検出可能



② センシング精度向上

- ・ 各センサから出力されるデータの桁数を増加(1桁→2桁)
⇒ 数十バイトのデータ量を伝送可能
- ・ 周波数だけでなく振幅も利用するように改良
⇒ ±10%以下の測定誤差を実現

複数区間に対応可能となるよう
センサ部のファームウェアを改造



(2) 達成度

- ① 検出内容: 目標達成
- ② センシング精度向上: 目標達成

中間目標達成度(研究開発II)

中間目標

設計値を満たす自立発電モジュールを開発・実装する

(1) 活動状況

① 設計値を満たす自立発電部モジュールの開発

- ・振動・太陽光発電モジュール単体が設計値を満たしているかどうか評価

⇒設計値

- ・振動発電: 0.14mW-10%
- ・太陽光発電: 発電量: 14.1mW-10%

■ 単体評価結果

名称	設計値	結果	判定
振動発電 (オムロン)	発電量: 0.14mW-10%	① 0.14 mW, 0.15 mW (0.15G, 25Hz) ② 0.28 mW, 0.29 mW (0.15G, 30Hz)	OK
太陽光 (スフェラー パワー)	照度: 10,000luxの時 発電量: 14.1mW-10%	① 15.3 mW (照度10,790lux) ② 15.9 mW (照度10,670lux)	OK
太陽光 (Panasonic)		① 20.1 mW (照度10,230lux) ② 19.3 mW (照度10,310lux)	OK

(2) 達成度

① 自立発電部モジュール開発・単体評価: 設計値を満たし **目標達成**



中間目標達成度(研究開発II)

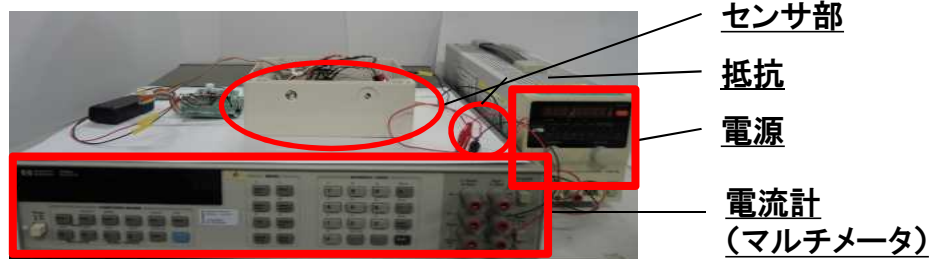
中間目標

- ・センサ部と無線部の消費電力が、目標値以下となるプロトタイプの開発
- ・サイクル寿命2000サイクルを実現する蓄電池の開発

(1) 活動状況

① 低消費電力化評価

- ・センサ部と無線部それぞれについて実施計画書上の目標値および、発電量に基づく設計上の目標値について評価



区分	当初の目標値	設計上の目標値	結果	判定
センサ部	3.7mW以下	①屋外 3.0 mW ②屋内 0.9mW	① 2.0 mW, 2.5mW ② 0.8 mW, 0.7mW	OK
無線部	10mW以下	①屋外 0.9 mW ②屋内 0.3mW	①0.6mw ②0.15mw	OK

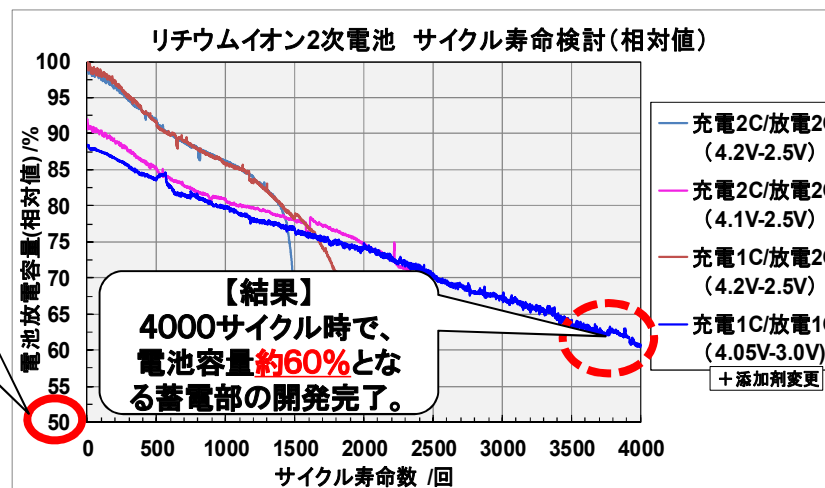
② 2000サイクル特性の実装

- ・27年度までに計測条件(充放電レート・**使用電圧範囲**)

を変更し最適な条件を把握し計測条件に合った**添加剤**を投入することで4000サイクル時で電池容量約60%となるリチウムイオン2次電池の開発完了。

- ・現在は**中間目標サイズの蓄電池**にてサイクル評価中
- ・**現在1500サイクルまで確認済み**

【目標】
4000サイクル時点で、**電池容量50%以上**となる蓄電部を開発する。



(2) 達成度

- ①低消費電力化評価: **センサ部目標達成、無線部目標達成**
- ②2000サイクル特性の実装: **今年度目標達成見込み**

中間目標達成度(研究開発II)

中間目標

端末:16×16×10cm以下で、防水性、防塵性、耐久温度、密封方法等の仕様を満たすセンサ・アンテナを作製する。

(1) 活動状況

① センサ端末小型化

- ・27年度までに中間目標に向け、**16×16×10cm**以下で、センサ部・無線部・電源部を一体化させたセンサ端末を開発済み
- また現時点で**最終目標である100×70×50 cm**以下の端末も**開発済み**

端末内部(正面図)



センサ端末外観図



② 簡易耐水・簡易防塵評価

- ・中間目標である**IP61(※)**に向け、簡易耐水・簡易防塵評価の実施

※耐水:鉛直から落ちてくる水滴による有害な影響がないこと(防滴形)
防塵:粉塵が中に入らないこと(耐塵形)

太陽光発電(パナソニック製)



センサ端末全体の機器仕様

各部名称	項目	仕様
全体	消費電力	max. 35mW (1回/時間)
	消費電流	max. 50mA (過渡時)
	外径寸法	100×70×50mm
	質量	約700g
	材質	アルミニウム合金

(2) 達成度

- ① センサ端末小型化:**最終目標達成**
- ② 簡易耐水・簡易防塵評価:**目標達成**

中間目標達成度(研究開発Ⅲ)

中間目標 **30m以上**の通信距離を実現するプロトタイプ完成(データ回収は走行時に実施する)

(1) 活動状況

①通信距離を検証するため3段階に分けて実験を実施

千葉県某トンネルにて
無線機単体の検証



現場(トンネル内)にて電波反射による電波干渉を考慮した無線通信性能評価を実施

1stプロト端末を
用いて場内無線実験を実施



1stプロトセンサ端末を、**場内に設置されているJFに適用**し、1stプロト端末の無線特性等の検証を実施

実環境にて1stプロト
フィールド無線実験を実施



1stプロトセンサ端末を、**実フィールドに設置されているJFに適用**し1stプロト端末の無線特性等の検証を実施

中間目標達成度(研究開発Ⅲ)

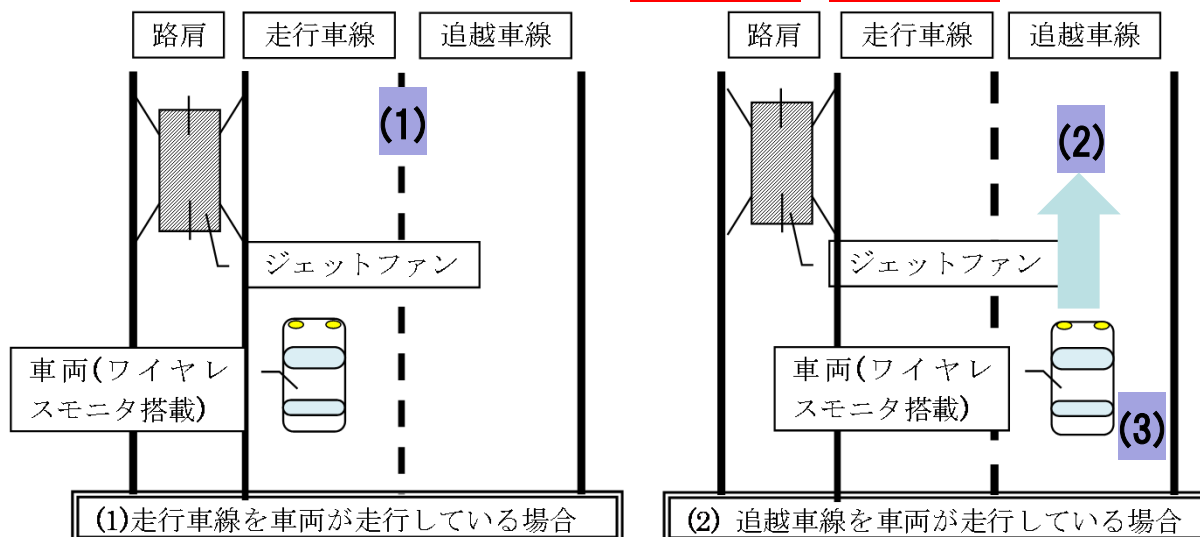
中間目標 **30m以上**の通信距離を実現するプロトタイプ完成(データ回収は走行時に実施する)

(1) 活動状況

②実験内容

- 実験日時: 2016年7月20日~7月22日
- 実験場所: 新東名高速道路/三岳山トンネル(上り線)/JF1号機
- 実験条件: 以下3条件

(a) 走行条件による違い: 車線が**走行車線**、**追越車線**



(b) 走行速度による違い:

- **時速80km**
- **時速100km**

(c) 受信機の設置位置による違い:

- **ダッシュボード上**



- **作業着ポケット**



2(車線) × 2(速度) × 2(受信位置) × 2回
計16パターンの結果で性能評価

中間目標達成度(研究開発Ⅲ)

中間目標 **30m以上**の通信距離を実現するプロトタイプ完成
 ・通信距離:30m以上(走行中にデータ回収)

(1) 活動状況

③実験結果

RSSIが-86dBm以上(正常に通信可能)となる時間から求めた通信距離を判断基準とする。

※1回目/2回目のRSSIの平均値を採用

実験結果	走行条件	受信機 設置位置	走行速度		通信距離	
			80km/h	100km/h	80km/h	100km/h
実験結果①②	走行車線	ダッシュボード	31.235秒	16.482秒	<u>694m</u>	<u>362m</u>
実験結果③④		作業着 ポケット	11.244秒	9.544秒	<u>247m</u>	<u>210m</u>
実験結果⑤⑥	追越車線	ダッシュボード	32.049秒	15.073秒	<u>705m</u>	<u>331m</u>
実験結果⑦⑧		作業着 ポケット	8.338秒	7.545秒	<u>183m</u>	<u>166m</u>

(2) 達成度

通信距離30m以上:**最終目標達成**

※時速80km/hの走行中に30m以上データ受信を実現

中間目標達成度(研究開発Ⅳ)

中間目標

道路付帯構造物の維持管理ニーズ整理

(1) 活動状況

①道路付帯構造物の維持管理ニーズ整理

実際に事業者にヒアリングを実施

(a)システムの利用者と利用頻度について

⇒一番多く利用するのは日常点検員

- ・毎日システムを利用しており、路線やIC間における交通量に応じて点検の頻度が決められる。
(交通量が多い路線を管理している点検員はシステム利用頻度が多い)

⇒1度に入力する項目が多く、利用頻度が高い点検員には入力作業が負担

- ・日中現場で紙を利用して点検を実施し、夕方に事務所にてPCシステムを利用

⇒現場にてすぐに入力できるシステムが必要

- ・ピーク時には数十人/分がアクセス

⇒アクセス不可に耐えるシステム必要

- ・1つの点検情報に数百～数万の損傷データが紐付いて登録されている

⇒点検データを分かりやすく管理するシステムが必要

(b)点検計画登録頻度

⇒点検の計画は年度初めに1回構造物ごとに計画を立案しシステムへ登録

(点検ルートに変更がない限り登録内容の変更はなし)

(2) 達成度

道路付帯構造物の維持管理ニーズ整理: **目標達成**

中間目標達成度(研究開発Ⅳ)

中間目標

センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発

(1) 活動状況

① センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発

システム開発に関して事業者へ実際の作業についてヒアリングを実施し、作成機能を追加

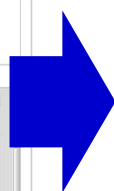
- 過去の点検履歴情報を閲覧し、過去の点検情報を参考に点検実施計画を策定
 ⇒ 点検計画をタブレット端末に受信し、点検計画に基づいたセンサ受信項目に絞込みを行う機能を追加
- 点検計画に基づく点検予定ルートを策定した上で、巡回点検を実施
 ⇒ 点検計画に基づき、受信したいセンサ(エリア、種別)を自動表示する機能を追加



施設管理者

点検計画策定

業務名	設備名称	件名	実施日(予定)	検測(予定)	受注日	検測	状態
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			
点検履歴	本体	法定点検	2012/10/01	2012/10/01			



点検者

点検予定ルート策定

中間目標達成度(研究開発Ⅳ)

中間目標

センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発

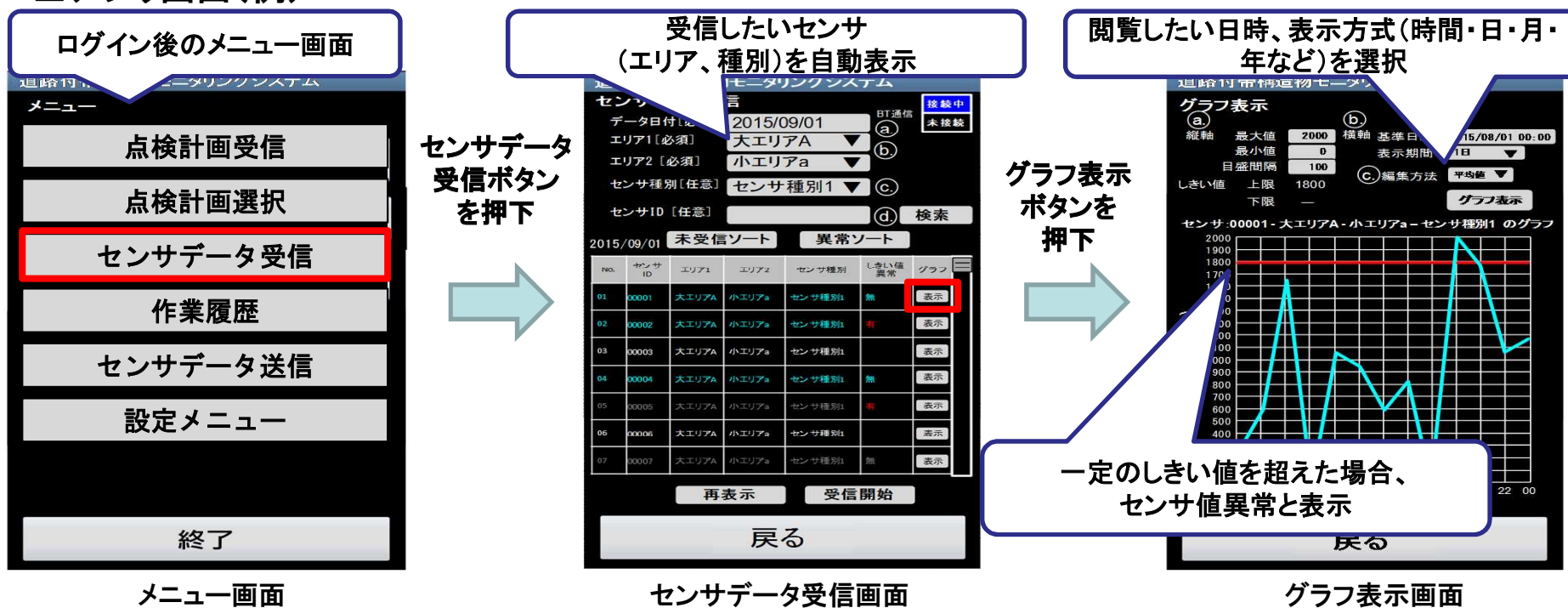
(1) 活動状況

①センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発

■主な機能:センサデータ受信/送信、グラフ表示

閾値による異常判断⇒**ターンバックルの緩みや、羽根車の異常等を検出**

■アプリ画面(例)



(2) 達成度

①センサデータ収集に必要なスマホアプリ開発: **目標達成**

中間目標達成度(研究開発Ⅳ)

■サイトビジットにおける指摘と反映内容

指摘内容

・本センサ端末では明確に異常が検知できるという「**成功事例**」を1つ確立してほしい

実証実験にて、JFの異常が卓越周波数、振幅にどのような影響を与えるのかを検証済み



センサ端末の計測データ	JFの損傷事象
卓越周波数・振幅ともに変化有	吊り金具(ターンバックル)の緩みによるJF落下の危険
振幅のみ変化有	羽根車アンバランスによる振動異常

**センサ端末の計測データの変化によって、
損傷事象を判別することが可能**

但し、外部要因(気温や交通量) JF製造メーカーにより、卓越周波数、振幅の判断基準が異なる
⇒**今後の実証実験にて外部要因やJF製造メーカーに依存しない判別方法を検証予定**

中間目標達成度(研究開発Ⅳ)

中間目標

実フィールドにプロトタイプを設置
道路区間限定で**短期間**検証実施

(1) 活動状況

① 1stプロトフィールド 実験実施フロー



1stプロトフィールド実験は以下3点を目的とし実施

- ・JFに対する**加速度計測による基礎情報の収集**
- ・1stプロトセンサ**端末固有振動数計の計測値の検証**
- ・1stプロトセンサ**端末固有振動数計の無線アンテナ設置位置による通信特性の検証**

1stプロトフィールド実験の結果を元に**中間目標を満たした2ndプロト端末を用いて、同様に実フィールドにて短期間の検証**を12月に実施予定
現在実験計画を策定中

(2) 達成度

道路区間限定(実フィールド)で短期間実証:**目標達成予定**



1stプロトフィールド実験時の
センサ端末設置の様子

最終目標達成見込み

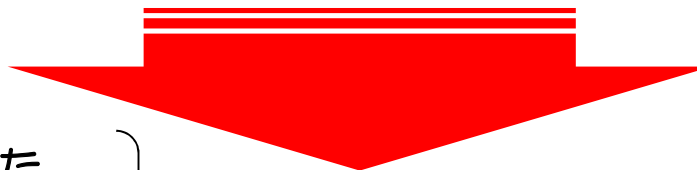
最終目標(30年度)	現状レベル	達成見込み
センサ端末/モニタリングシステムとして 製品開発を完了し 、フィールドにて長期間の検証実施	12月にプロトタイプの完成品を用いてフィールド実験を実施予定	H30年度達成見込み
測定誤差1%以下、数バイトのデータ量伝送を実現する製品完成 <ul style="list-style-type: none"> ・ 検出方向:1~3軸・ 測定誤差:1%以下 ・ 検出加速度:0.1~1960gal ・ 検出モード:1~3次 	中間目標は全て達成できており、測定誤差1%以下に向けて検出方法や測定方法を検討中	H30年度達成見込み
自立発電最適化を図った製品完成 <ul style="list-style-type: none"> ・ (収録)35mW以下 ・ (待機)35μW以下 ・ サイクル寿命:4000回 ・ 端末:7×10×5cm以下の設計・開発 ・ 耐久性:IP65相当(センサ端末本体) IPX5相当(無線アンテナ) 	中間目標は今年度中に達成見込みであり、端末の大きさについてはすでに 最終目標達成済み	H30年度達成見込み
時速80kmの走行中に30m以上 の通信距離でデータ受信を実現する製品完成 <ul style="list-style-type: none"> ・ 通信距離:100m以上※事業目標 ・ ダイバーシティ技術の設計・実装 ・ ビームフォーミング技術の実装 (パケット受信成功率:90%以上) 	通信距離についてはすでに 最終目標達成済み ダイバーシティ技術とビームフォーミング技術については目標達成に向けて、現在方式等を検討中	H30年度達成見込み
道路区間を拡大し長期間 での検証実施 ※ 適用センサも拡大 も検討 <ul style="list-style-type: none"> ・ 道路以外の分野における維持管理ニーズ整理 ・ 必要なシステム機能の実装 ・ 道路区間を拡大で長期間実証 	中間目標は今年度中に達成見込みであり、最終目標に向けて、道路以外の分野における維持管理ニーズや道路区間を拡大しての長期間実証実施に向けて調整中	H30年度達成見込み

今後の実証実験計画(個々の研究開発テーマ)

実施項目	平成29年度	平成30年度
フィールド実証	<p>以下の条件を比較しながら<u>長期間検証を実施</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ・路線(設置場所)の変更、区間の拡大 ・JF製造メーカー ・外部要因(交通量や気温)の変化 	<ul style="list-style-type: none"> ・複数センサを適用しての検証を実施 ・<u>JF以外の道路付帯構造物について実証実験を実施</u>
実証を踏まえた研究開発へのフィードバック	<ul style="list-style-type: none"> ・実証結果に応じた<u>適用センサ拡大の検討</u> ・設置場所に依存しない<u>安定した通信技術の確立</u> ・対象設備に適応した<u>自立発電製品</u>の開発 ・センサネットワークシステム機能追加 	<ul style="list-style-type: none"> ・適用センサ拡大に伴うセンサネットワークシステム開発
ビジネス展開	<ul style="list-style-type: none"> ・<u>JF以外の道路構造物</u>に関するニーズ調査 	<ul style="list-style-type: none"> ・実験結果に基づいた、<u>JF以外の道路構造物に対する実用化</u>の検証
(研究開発費)	80百万円	80百万円

事業化の見通し(実用化シナリオ/日立のビジネス戦略)

欠点(課題)
2カ月毎の点検は遠方目視であるため問題を見落とす可能性がある。短い頻度で状態変化が知りたい
紙を持参し、戻ってから結果入力する運用のため時間がかかる。機能が多く、複雑なため使いこなせない
モニタリング対象1つにかかるコストが大きい。また通信インフラ(設置、ランニング)コストも大きい
システムを構成する機器が多く、1システムの規模が大きい。他のシステムと情報が重複する



ヒアリング結果を踏まえた
対象ユーザ別のビジネス戦略

対象ユーザ	基本方針(要件)
高速道路会社	<ul style="list-style-type: none"> ・システムはオンプレで構築 ・点検を補助するためのモニタリングは精度を求めない ・既存の点検システム、制御監視システムの追加機能として適用していく
地方整備局、自治体	<ul style="list-style-type: none"> ・可能な限りサービス形態で提供(資産化しない) ・健全度評価はコンサル会社委託(コンサル経由でサービス提供) ・低コストでの提供、ランニングコストも抑えた方式 ・見える化など基本機能でOK(難しい機能は必要なし)

外部発表 計4件

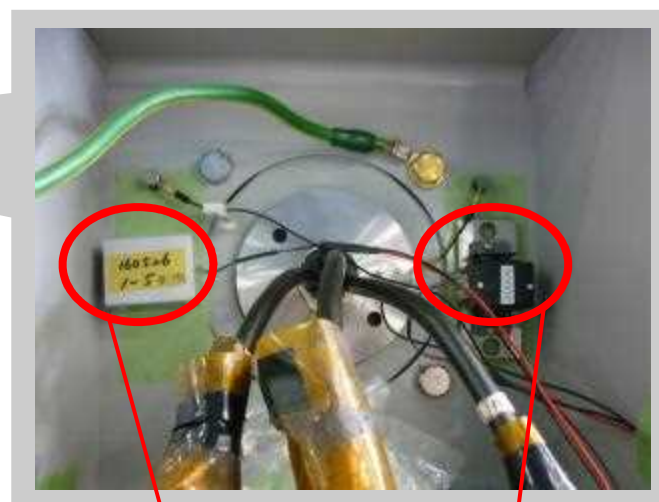
出展先	発表年月
Hitachi Innovation Forum 2014 TOKYO	2014年10月
日立グループ展 in KANAGWA 2015	2015年2月
Hitachi SOCIAL INNOVATION FORUM 2015 TOKYO	2015年10月
日立グループ展 in KANAGWA 2016	2016年1月

- 実験日時：2016年6月23日
- 実験場所：日立製作所/佐野工場内
- 実験内容：JFの端子箱内に加速度計と2種類の発電デバイスを設置し、
加速度と発電波形を測定
- 発電デバイス：単体素子とダンパータイプを準備 ※99Hz付近で発電するよう調整済

(1)振動発電実験状況



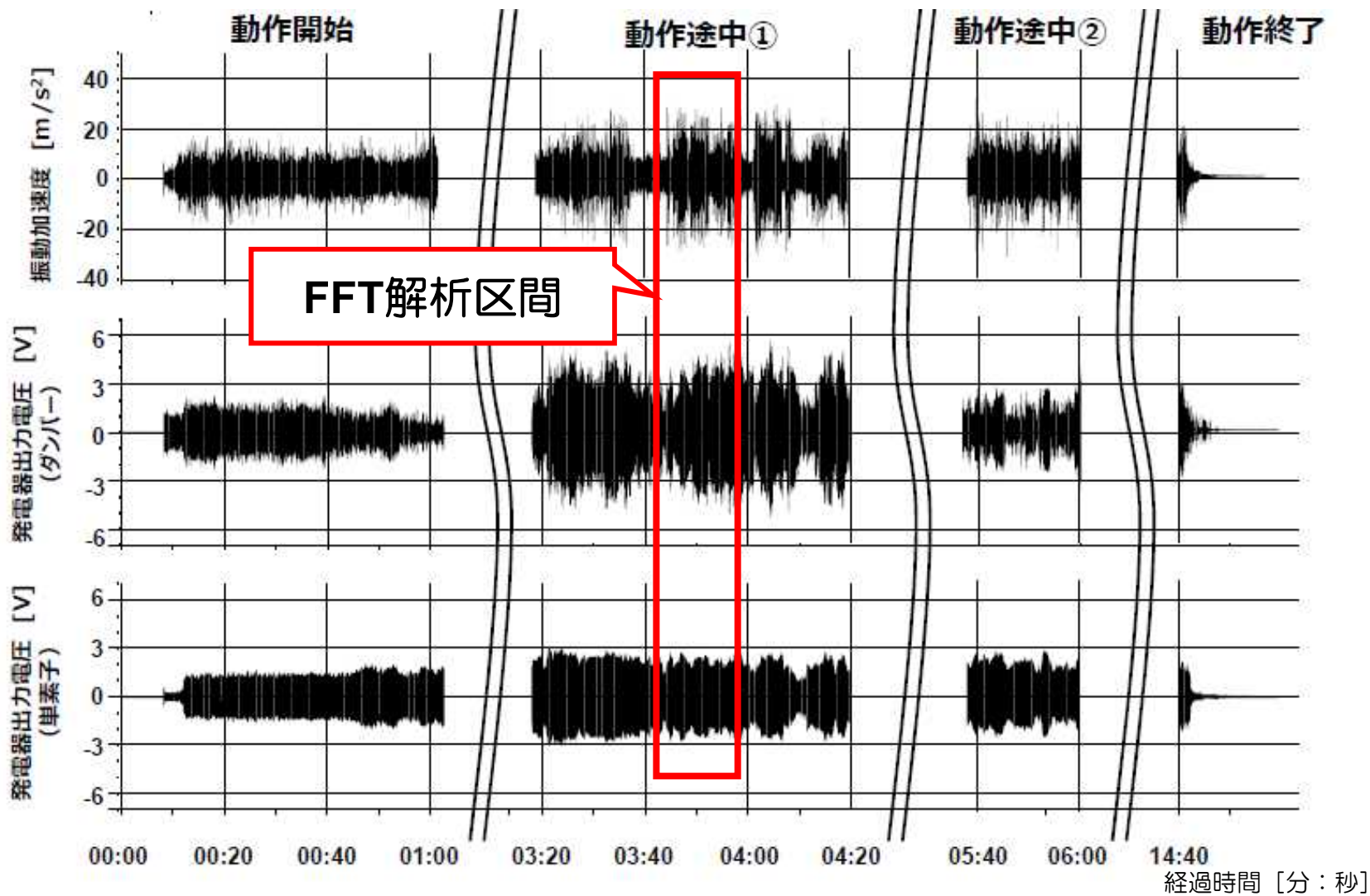
(2)発電デバイス他設置状況



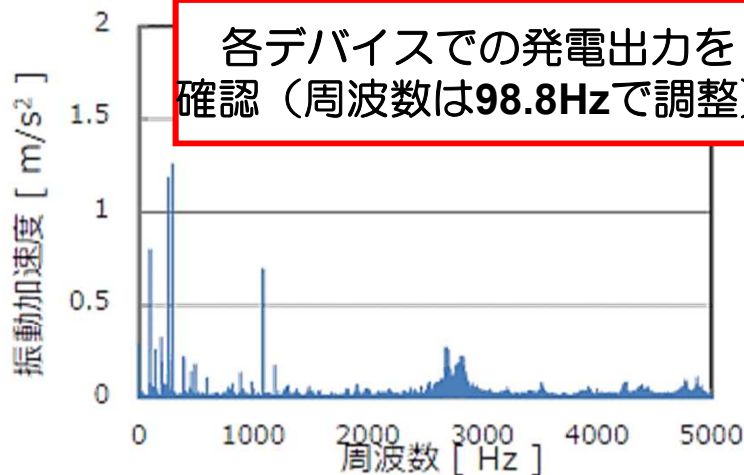
単体素子

ダンパータイプ

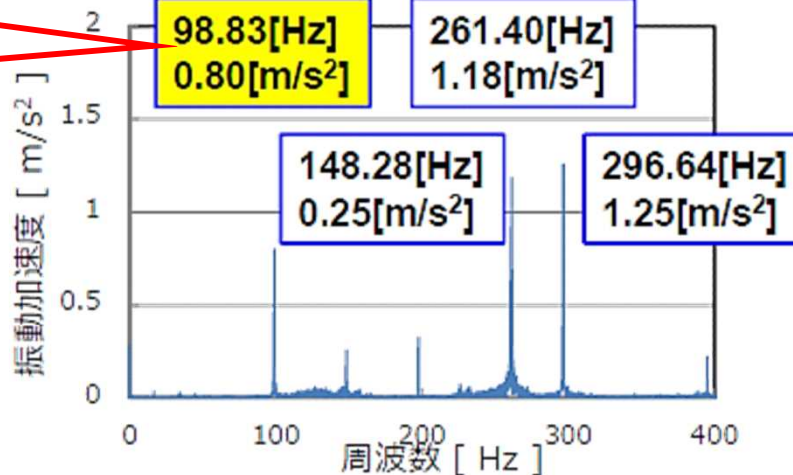
※発電デバイス筐体がダンパー構造になっており、発電効率を増加させる



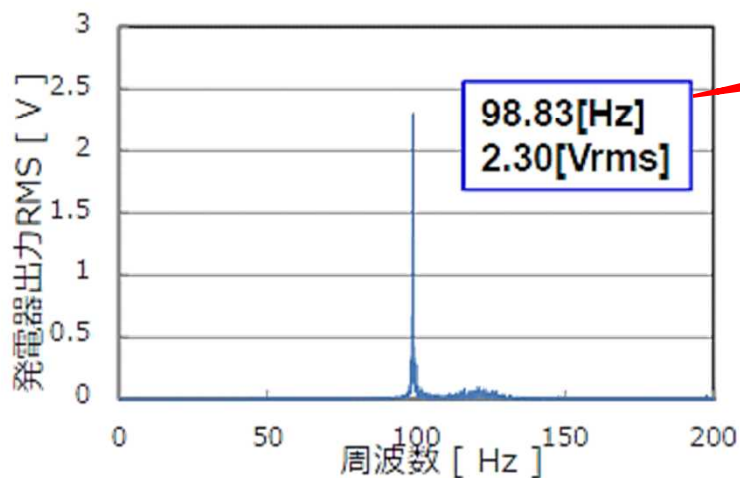
□振動加速度周波数分布



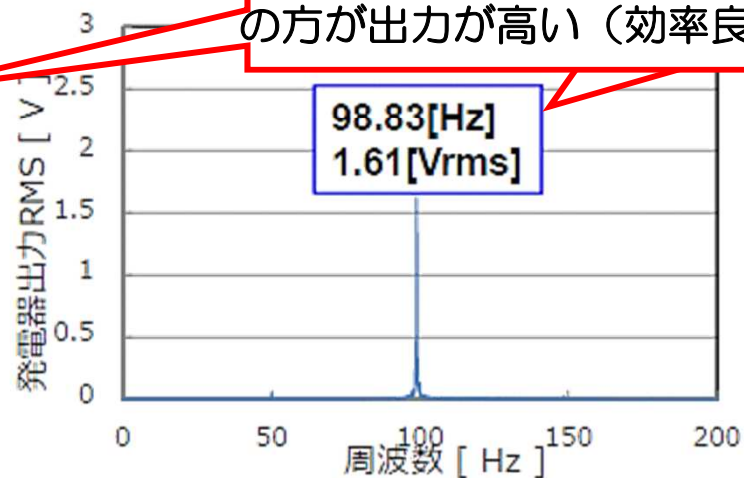
各デバイスでの発電出力を確認（周波数は98.8Hzで調整）



□ダンパー出力



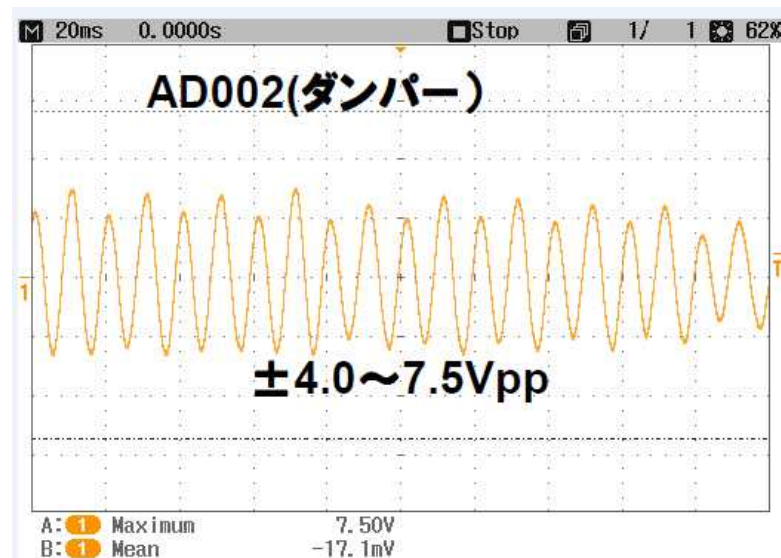
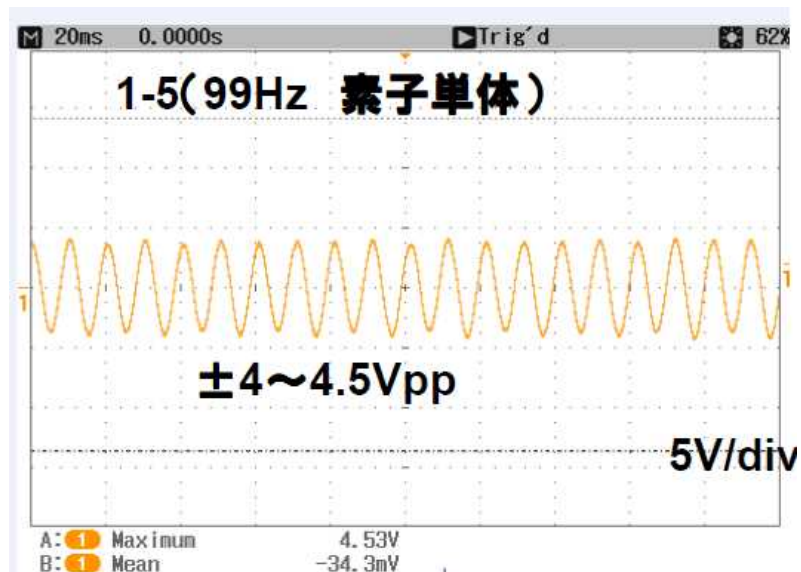
□単素子出力



単体素子よりもダンパータイプの方が出力が高い（効率良い）

■ 単体素子とダンパータイプの発電量比較

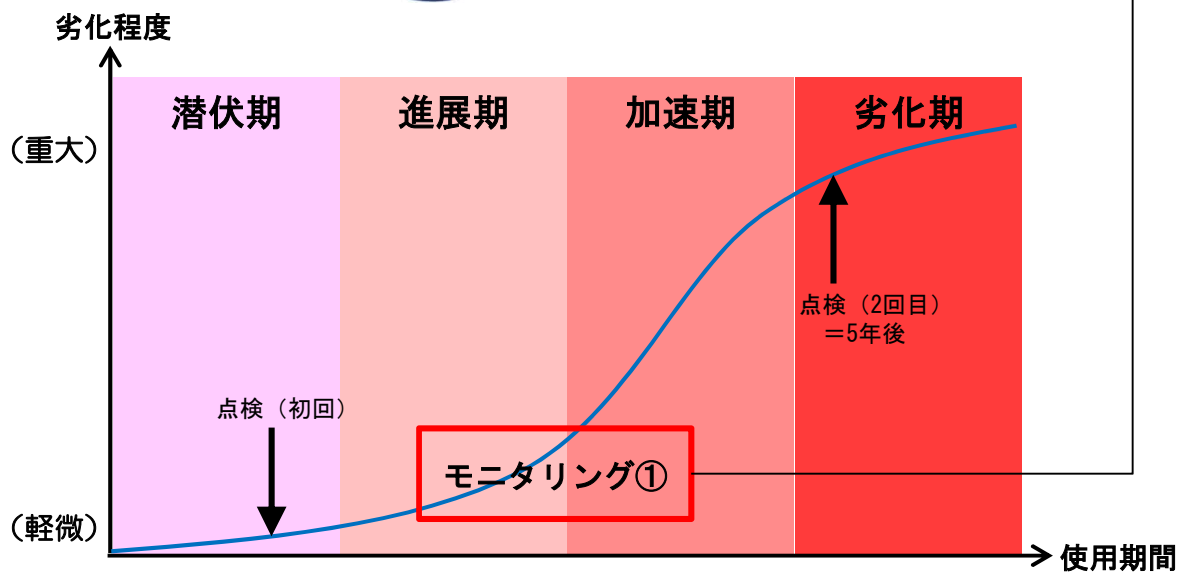
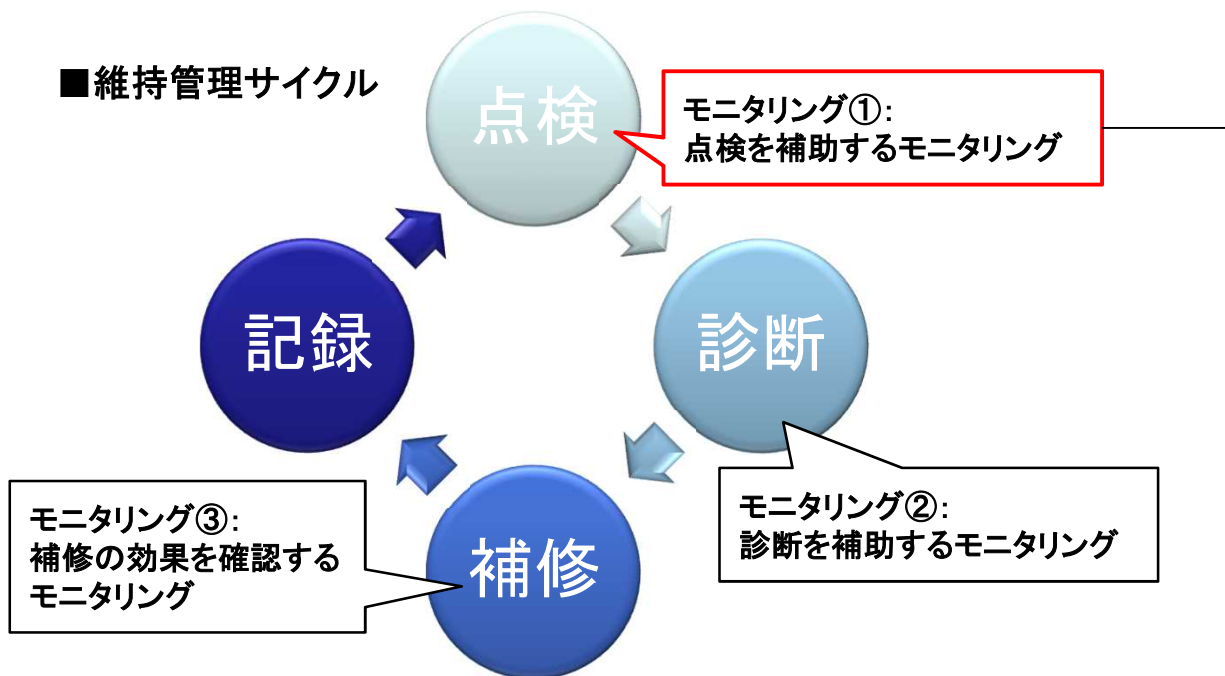
- 振動の変化が大きく発生し、振動が大きい部分においてはダンパーの加震効果が発揮されており、発電量UPに繋がっていると考えられる



今後の検討課題（発電量UPのために）

- 単体素子自体の大型化とそれに対応したダンパーの最適化
- 素子の複数内蔵化
 - ⇒いずれも発電モジュールの大きさ（実装サイズ）も考慮が必要

■維持管理サイクル



高い頻度で対象物をモニタリング

↓

構造物の劣化初期を早期検知

↓

予防保全の実現
= 施設の長寿命化

※広範囲で多数の構造物を対象とするため、低コストが必須条件



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

（高信頼性センサによるインフラモニタリングシステムの研究開発）

（委託先：横河電機株式会社）

**（再委託先：長野日本無線株式会社、大成建設株式会社、
国立大学法人東京大学）**

■ 常時*¹および非常時*²の外乱を受けている建物を対象

■ ユーザニーズ

- ・ 被災時の当該建物の健全性の確認
- ・ 余震による被害の最小化
- ・ 災害後の復興を迅速に進めたい
- ・ 予防保全としての計画的な耐震補強

■ 現況の社会的課題

- ・ 外観目視・部材角計測などに限られる事後判定の限界（事前との比較不可）
- ・ 判定する専門家の養成が必要
- ・ 大規模災害時に判定作業の集中
- ・ 耐震補強の基準(目安)がない

■ 対策

- ・ 建物内部にセンサを設置、内部状況（接合部、柱・はり母材）を常時監視し、この計測結果から当該建物の健全性状況を判定

◆ **方針** 建物の機能維持を担保するため、長期間に渡って構造計測を実施し不測の事象後、速やかに当該建物の状態を診断・評価および通報することができるモニタリングシステムを目指す。』

*1常時 : 小さな揺れ、小規模な強風および地震（概ね震度2以下）を含むものとする。

*2非常時 : 強風や地震（概ね震度3以上）を対象条件とする。

常時監視

- 固有振動数、振幅、歪、傾斜、温度の値のトレンドをモニター
- これらのパラメータの相関から異常を検知



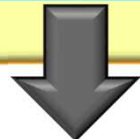
一次診断

- 各階の震度算出し、被害の程度を迅速に推定
- 各階の層間変形角 (部材角) を算出し、設計クライテリアと比較



二次診断

- システム同定による地震継続中の固有周波数・振動モードの時間的变化や、各層の剛性・減衰の変化を算出することによって、損傷部位を絞り込む (センサ設置個数依存)

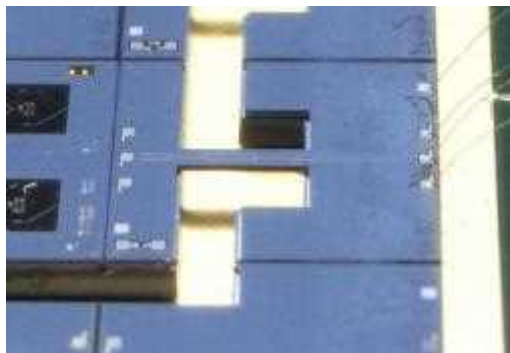
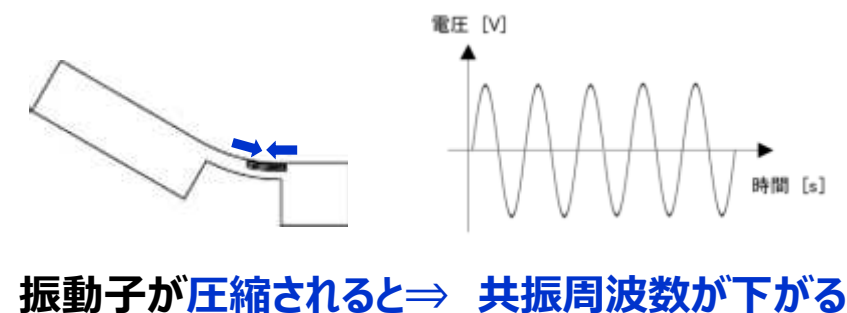
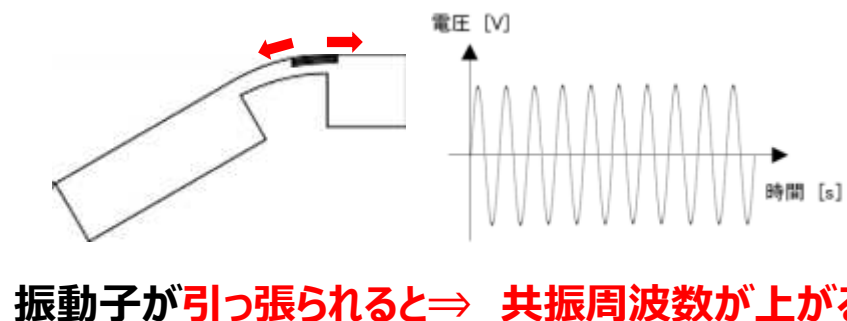
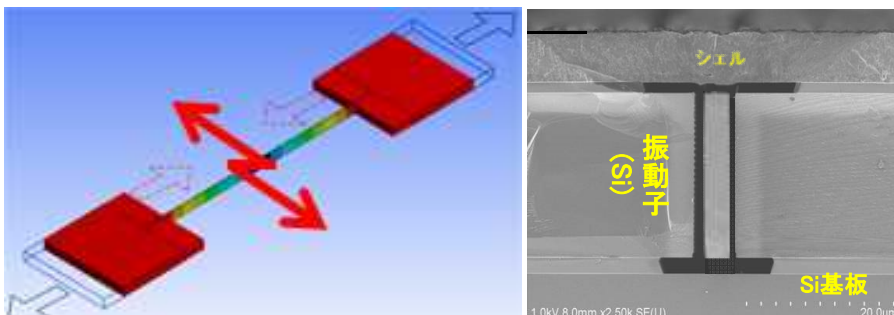


損傷の有無を推定し、補修・修繕の必要性があれば、計画を立案

実施項目	中間目標（平成28年度）	成果	達成度
実施項目① 高信頼性・高感度振動式 加速度センサデバイスの 開発	<ul style="list-style-type: none"> 検出感度：1/100gal，測定範囲±2G 動作温度範囲は、-10℃～50℃ 測定時の消費電流が1mA以下 NMEMS法面センサへ傾斜センサを試供する 	<ul style="list-style-type: none"> 検出感度：1/1000gal，傾斜角0.01° 評価中、達成見込 1.5mA、ローパワーIC化で達成可能 本年12月に試供予定 	80%
実施項目② 高信頼性歪みセンサデバ イスの開発	<ul style="list-style-type: none"> シリコン振動式歪みセンサ測定感度±1με ストレインゲージ型歪みセンサ測定範囲 ±5,000με 使用温度範囲は-10℃～50℃ 鉄骨材料、コンクリートに接合できる構造 	<ul style="list-style-type: none"> 測定感度として±0.1μεと超過達成 シリコンピエゾセンサを評価中、測定範囲 ±5,000μεは達成可能 温度範囲：-10℃～50℃ それぞれの材料に適合できる構造 	80%
実施項目③ 無線通信モジュールの開 発	<ul style="list-style-type: none"> 30m以内のセンサノードによる信号受信確保 センサノードの最大数は、1個の受信機に対 して255個、通信時間間隔は1時間置き 周波数帯は、920MHz帯 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内想定で30m以上の伝搬距離 データ長の制限で、1個の受信機に接続可能 ノードは15台と修正 920MHz帯が最適と決定 	100%
実施項目④ センサ用自立電源モジュ ールの開発	<ul style="list-style-type: none"> エナジーハーベスト電源及びワイヤレス給電装 置を実証評価し、センサ用自立電源としての 発電システム、ワイヤレス給電方法を確立 	<ul style="list-style-type: none"> 屋内向けアモルファス太陽電池、及び-30℃～ 60℃で使用可能な二次電池を選定。また、伝 搬距離～8cmで給電可能なワイヤレス給電を 確認 	80%
実施項目⑤ データ収集システムの開 発	<ul style="list-style-type: none"> 無線通信モジュールによるデータ収集の確立 各センサデータの時間同期の確保 	<ul style="list-style-type: none"> 模擬モデルでの無線データ伝送・収集システム動 作を確認 GPS-1PPSでの時刻同期を達成 	80%
実施項目⑥ データ解析システムの開 発	<ul style="list-style-type: none"> 測定された加速度データから外乱前に実施し た周波数特性と外乱後の周波数特性の差違 を評価する周波数特性プログラムの開発 	<ul style="list-style-type: none"> 加速度波形データから周波数特性解析プログラ ム作成完了。最終目標の時刻歴変位波形算出 プログラムも前倒して完了 	100%
実施項目⑦ システム同定による建物の 詳細な損傷評価手法の 開発	<ul style="list-style-type: none"> システム同定アルゴリズムを利用した、建物損 傷評価プログラムを作成し、妥当性及び有効 性を検証する 	<ul style="list-style-type: none"> 試験体の振動台実験データから、従来システム 同定法と逐次部分空間法とを比較した結果、従 来法では評価できなかった試験体の瞬間的な剛 性低下を詳細に評価可能と判明 	100%

シリコン振動式加速度センサの原理

- ・シリコン振動子は両端が固定された弦のような構造になっておりひずみがかかると共振周波数が変化する。
- ・おもりに加速度がかかると、片持ち梁の表面にひずみが生じ、片持ち梁の表面にあるシリコン振動子の共振周波数が変化する。

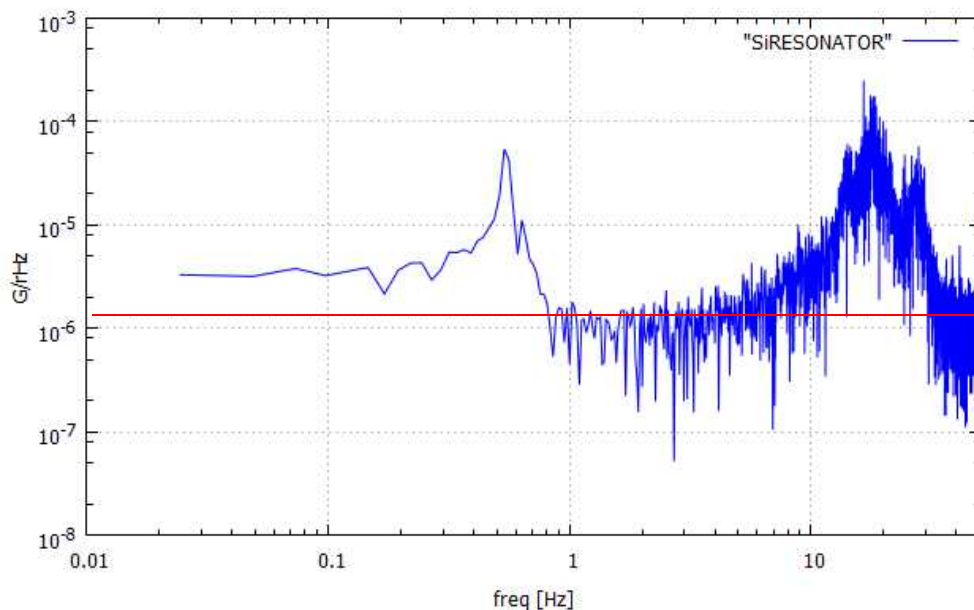


➤ シリコン振動式加速度センサの性能

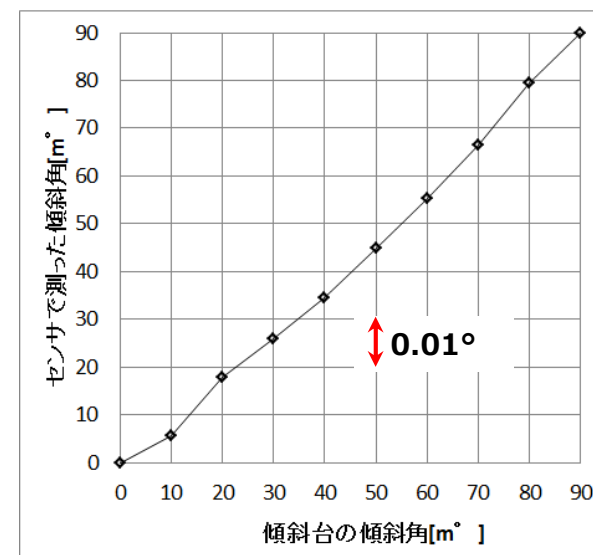
- 加速度の分解能を**10倍改善** ($10\mu\text{G} \rightarrow 1\mu\text{G}$)
- 常時微動の測定が可能になった
- ノイズフロアは $1\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ を達成

➤ シリコン振動式傾斜センサの性能

- 傾斜角の分解能 **0.01° 以下を確認**
- 長期安定性について測定し、温度補償が必要であることを確認。



シリコン振動式センサのノイズフロア

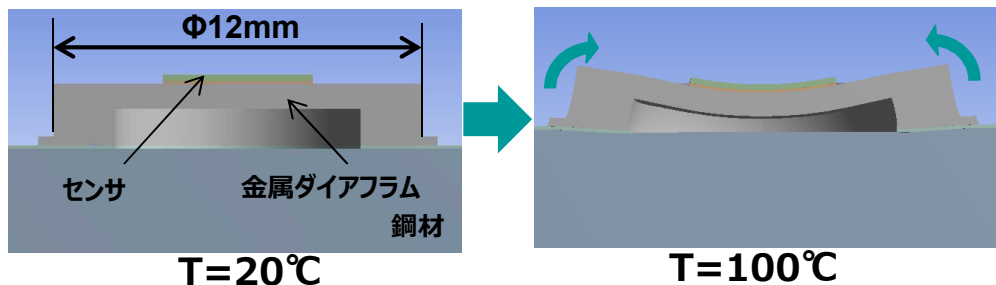


測定時間5秒 (2.496m度 at σ)

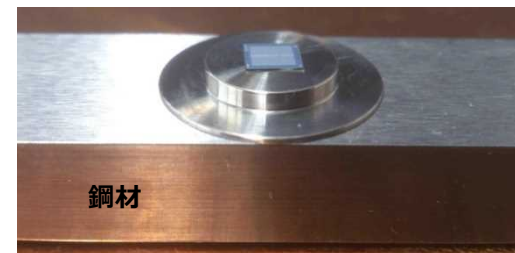
傾斜計の分解能

温度補償機構の原理確認

- ✓ センサ構造設計により、材料の熱膨張係数差に起因してシリコンセンサ表面に発生するひずみを補償できることを確認
- ✓ $-20^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ で $5\mu\epsilon$ のひずみ変化とシリコン単体時の温度ひずみ量の1/100に軽減

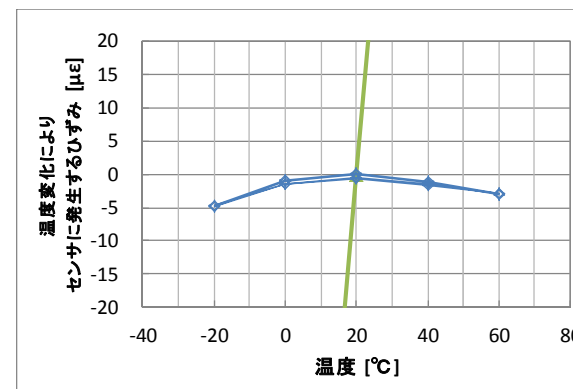
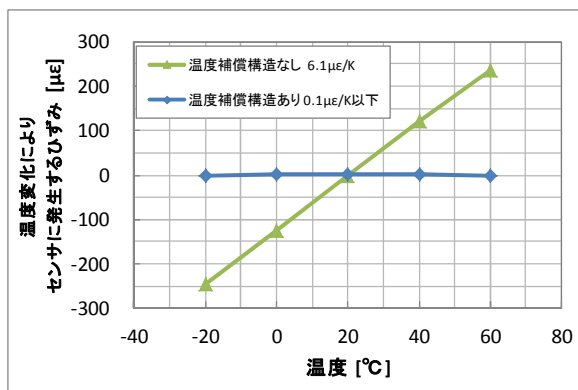


ひずみセンサの温度による形状変化 (シミュレーション)



温度試験用サンプル

シリコン振動式



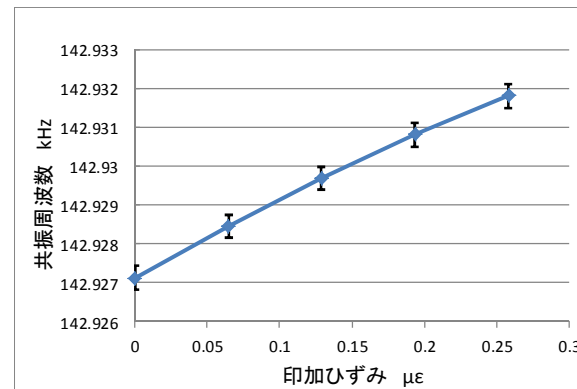
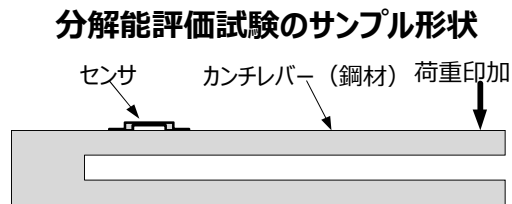
温度変化によるセンサの出力誤差(実測値)

シリコン振動式歪センサの性能

- ・ひずみ分解能 **0.1 $\mu\epsilon$ 以下を確認**
- ・ゲージ率**100以上**

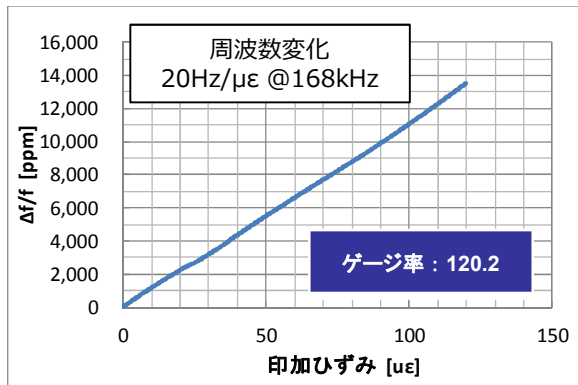
ひずみ分解能 $\pm 0.1\mu\epsilon$ 以下が
実現可能であることを確認

荷重印加試験結果

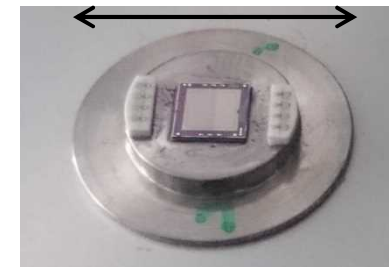


センサ構造での引張試験結果

シリコン振動式



引張試験方法

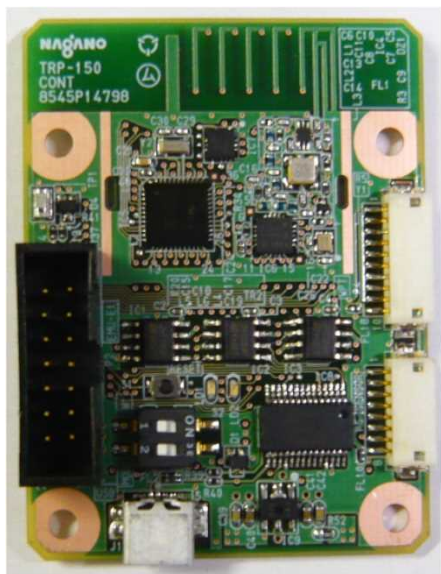


シリコン振動式ひずみセンサの
外観(電極取り出し前)

センサ構造でのゲージ率100以上を確認

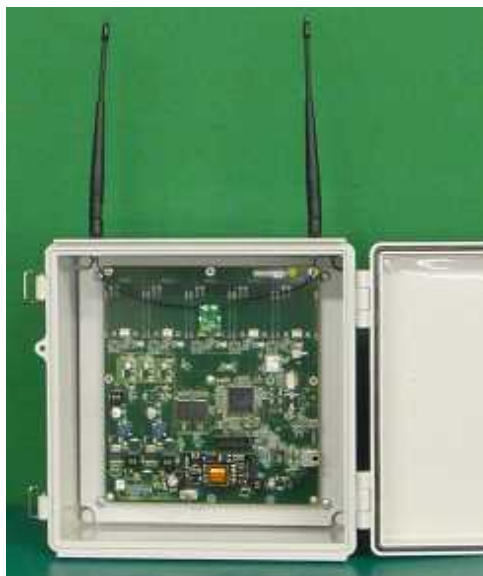
➤ 無線通信モジュール試作機の開発を完了

センサード用
無線通信モジュール



- ・60×45mm
- ・センサデータ用メモリ
- ・デバッグ機能

受信機



- ・28×28×13cm (筐体)
- ・イーサネット通信
- ・GPS-1PPS受信

無線部仕様

920MHz帯特定小電力標準規格
ARIB STD-T108準拠

922.4~928.0MHz 29チャネル

チャネル帯域幅 50kHz

送信出力 最大20mW

変調方式 GFSK

伝送速度 50kbps

▶ 自立電源モジュール試作機の製作を完了

環境発電（太陽電池）タイプ

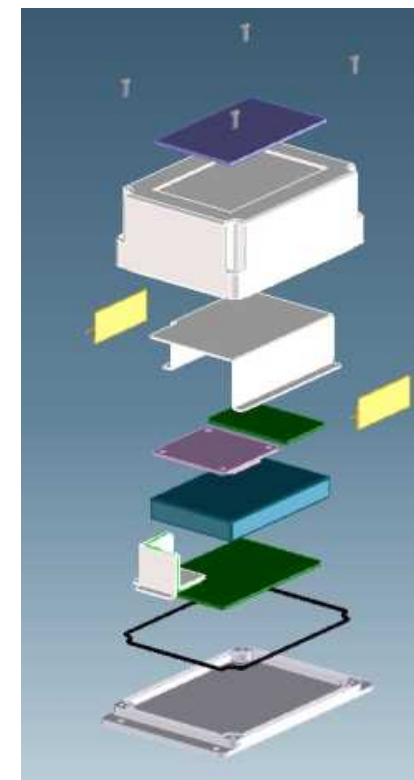
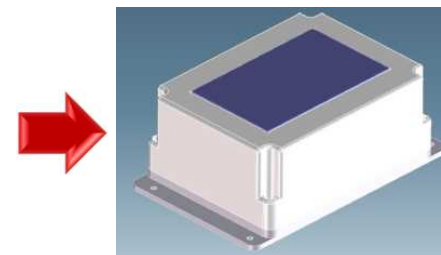


試作機

発電電力	1.4Wh/Y
太陽電池	0.464mW (@7×10cm, 200Lx, 10h/day)
DC/DC	変換効率78.7%
消費電力	1.3Wh/Y
1秒間隔受信	毎秒、受信1msec
1分間隔受信	毎分、受信20msec
常時動作	毎時、センサ計測10sec, 送信3.5sec
非常時動作	72回/年、センサ計測 180sec, 送信63.9sec
待機	常時

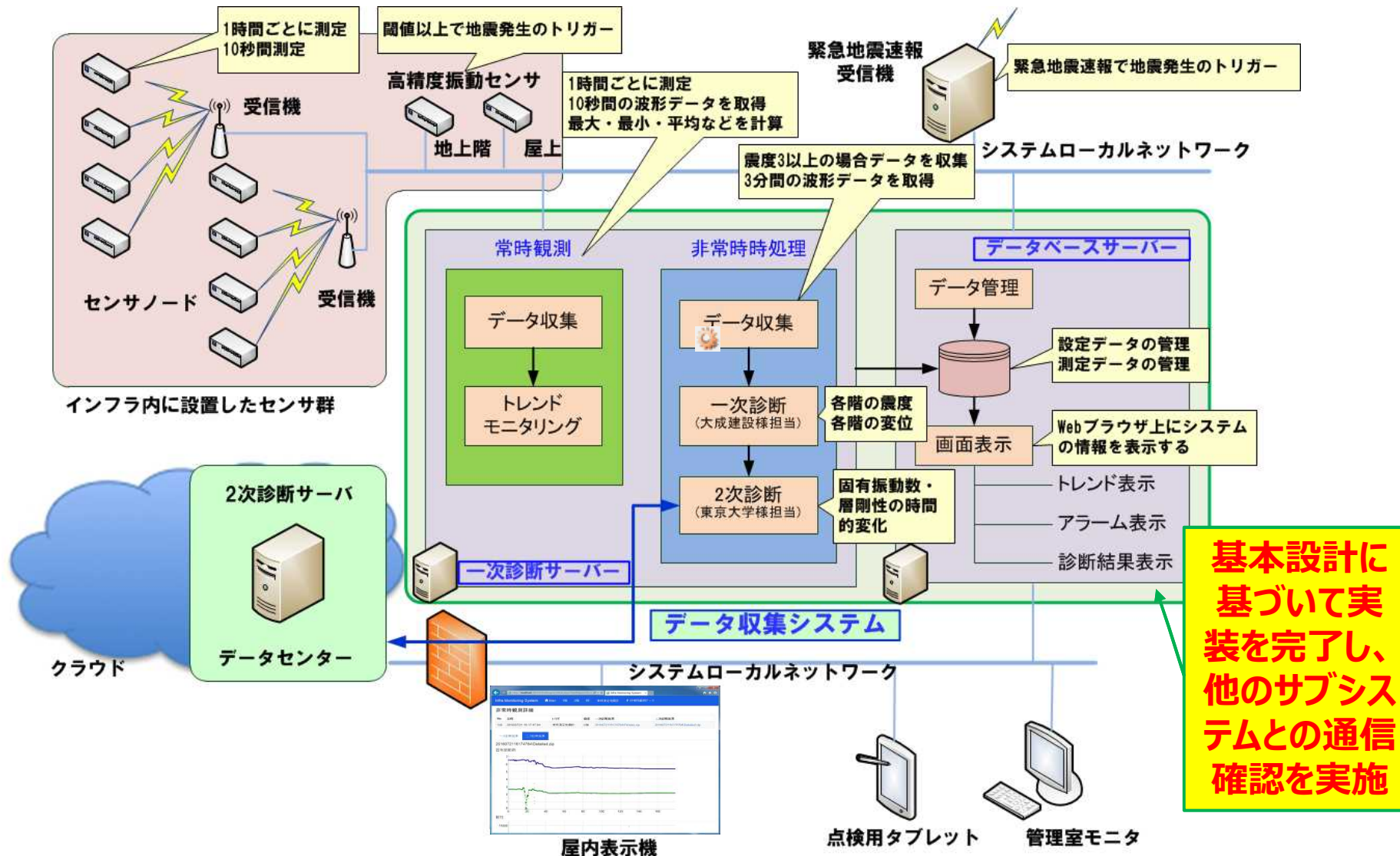
発電電力 > 消費電力

目標 7×10×5cm

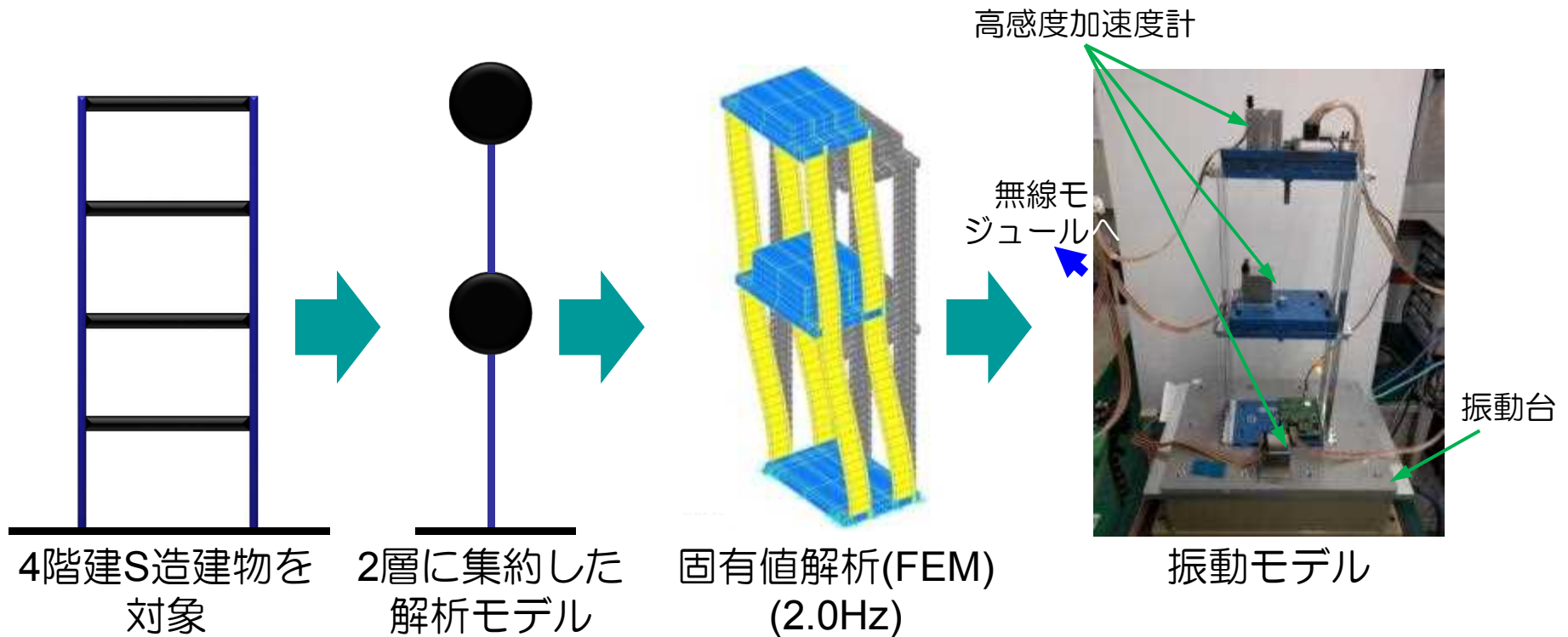


太陽電池
カバー
フレーム
アンテナ 2 面
通信・電源
基板
電池
センサ
パッキン
ベース

➤ センサデータ収集と診断画面表示のシステム基本部実装完了

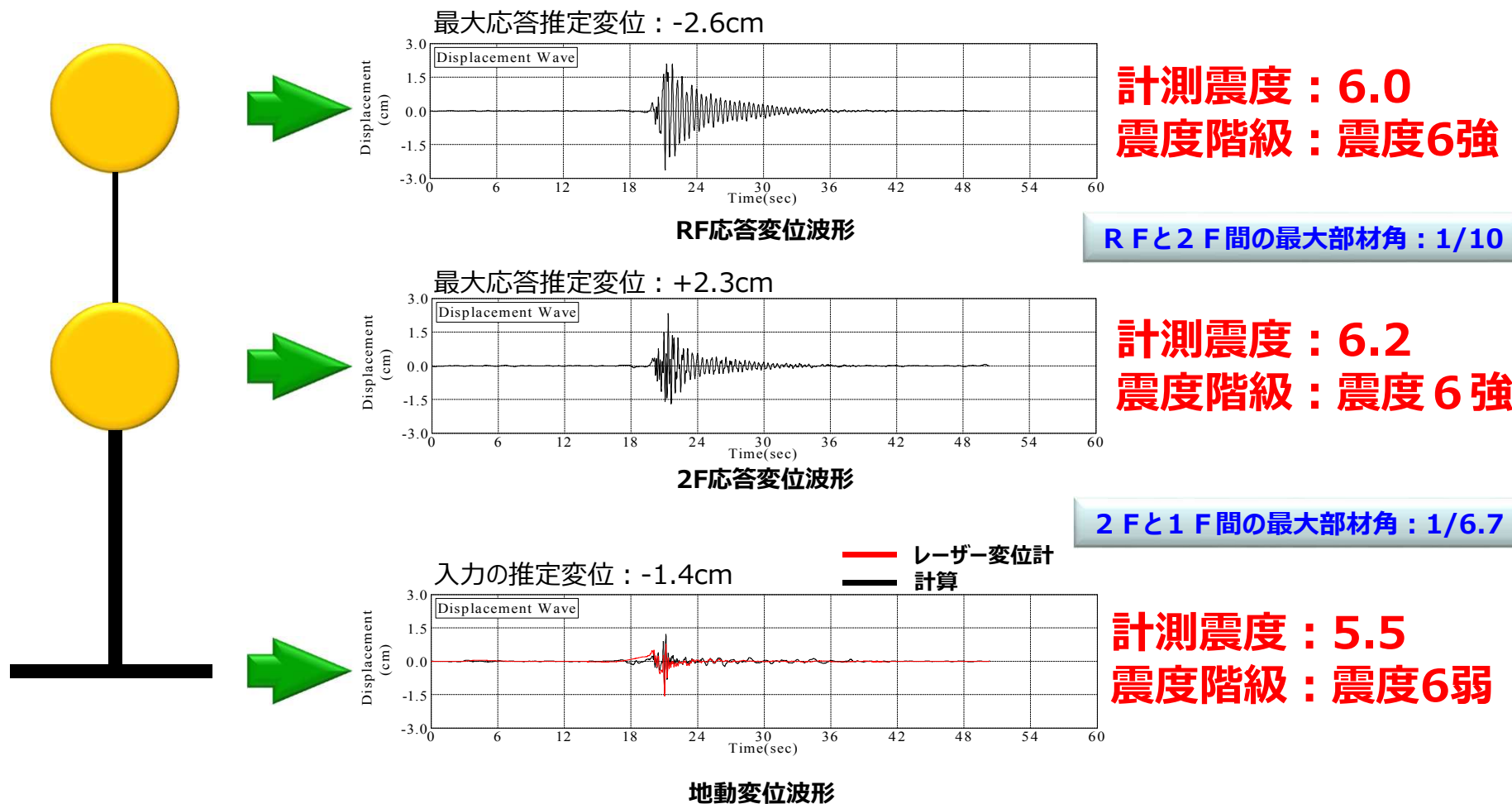


- **二層モデルを用いた振動台実験**
 - 4階建のS造建物を想定
 - 階高は一律:4m(軒高16mと仮定)
 - 1次固有周期概算 ($T=0.03h=0.03 \times 16=0.48$ 秒)
(2.1Hz)

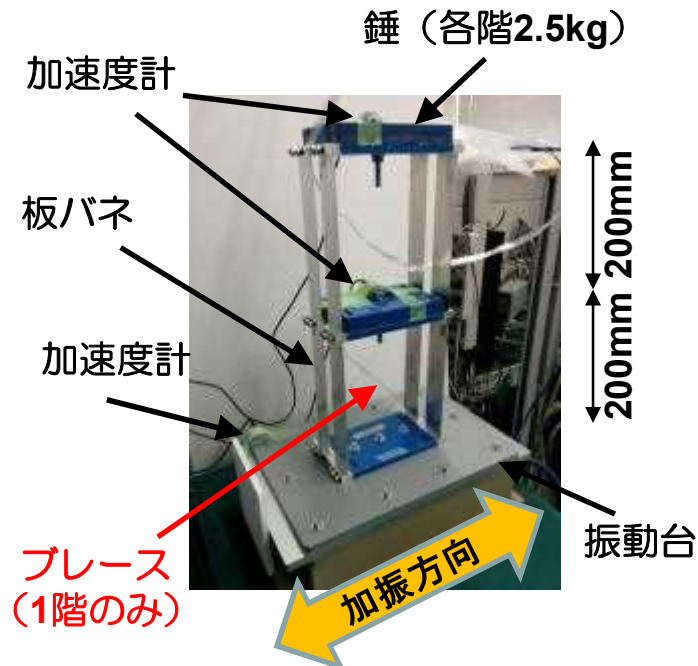


- **1次診断：**
振動データから応答変位を算出し、各層の震度と層間変形角を導出

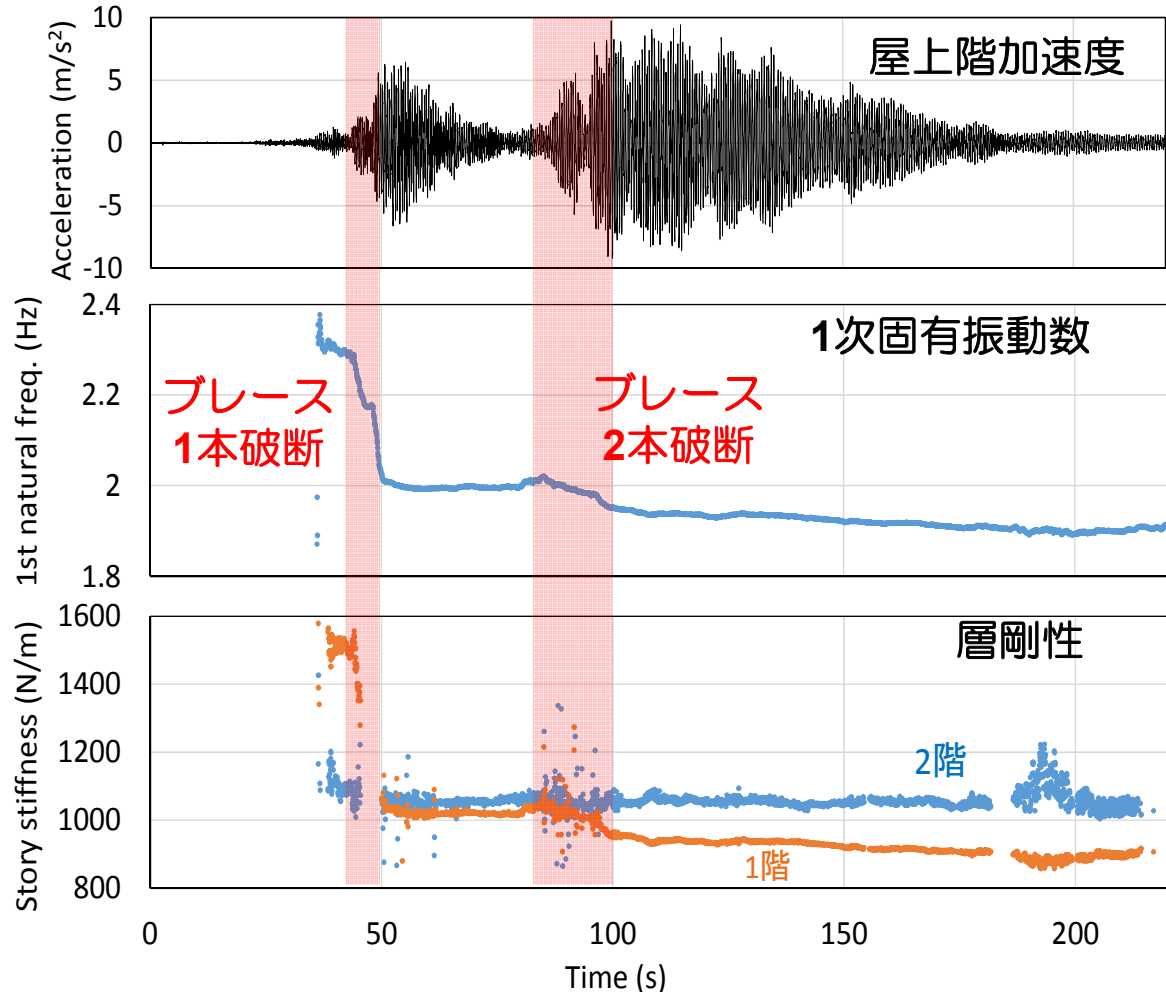
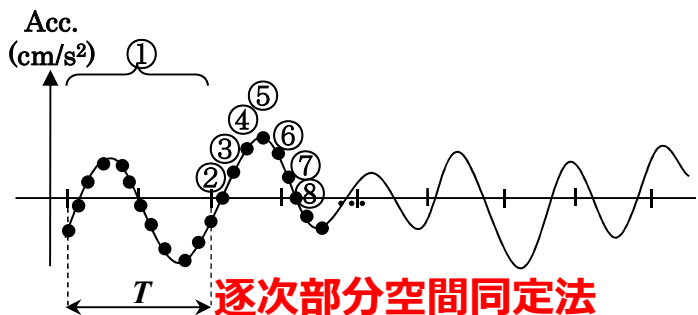
入力地震動：2016年6月16日 内浦湾南茅部（HKD157）原波形の90%



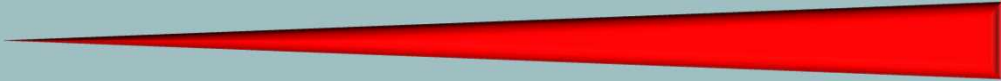


- **2次診断：**
逐次部分空間法により連続的な各層の剛性を算出



建物模型の振動台実験



1階のブレース破断による剛性低下を検出可能

		地震力：小 		大	
インフラ	対象構造物	揺れ：小 		大	
		剛性：高 		低	
建築	公共建物 民間建物	使用可能	目視確認。補修・改修工事を行えば使用可能	半壊状態となり、建物が使用不可	全壊状態となり、建物の使用不可
	重要生産施設	使用可能	目視確認。施設、免震やその他の機器の確認後、使用可能	免震やその他の機器が損傷。使用不可	全壊状態となり、施設の使用不可
土木	橋梁	目視・安全確認後、通行規制の解除	一部が損傷して使用できない。通行規制	支承の損傷等。使用不可	落橋・倒壊

インフラ構造物によって、使用評価区分や損傷部位が異なる。



損傷部位の絞り込み



✓ 解体工事現場（鉄鋼構造建物）でのセンサ設置・モニタリング

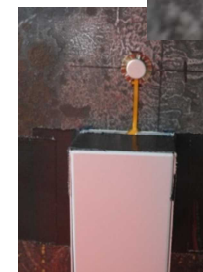
• 10/24~10/28 センサモニタリングシステム実証試験実施



竣工年 : 1970年
 高さ : 20階
 延床面積 : 37,396.65㎡
 建築主 : 三菱地所
 設計 : 三菱地所
 施工 : 大成建設



1階 加速度センサ設置状況



5階 ひずみセンサ設置状況

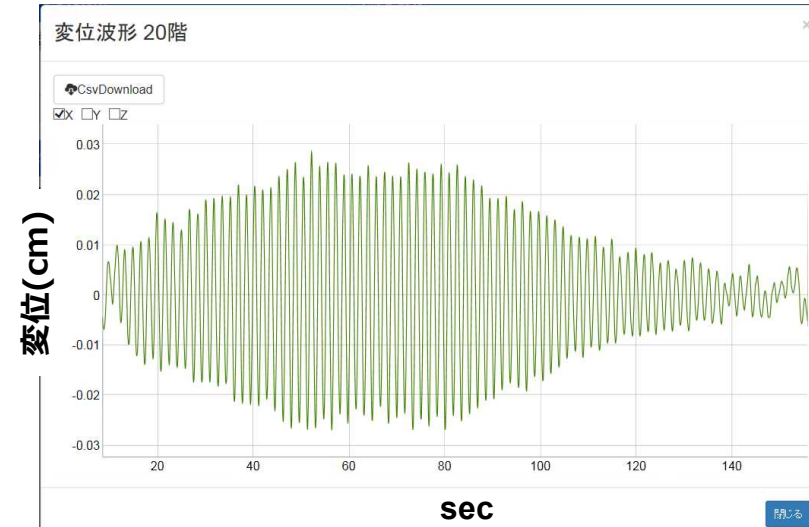
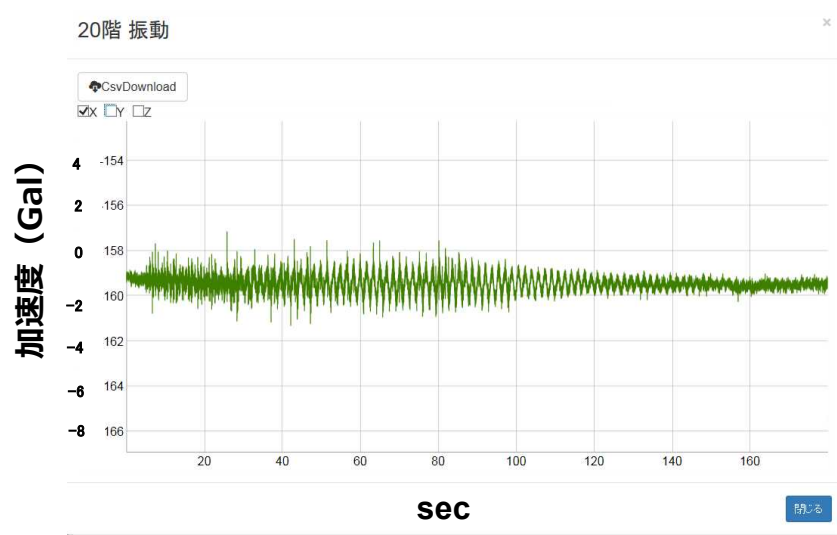


5階 加速度センサ設置状況

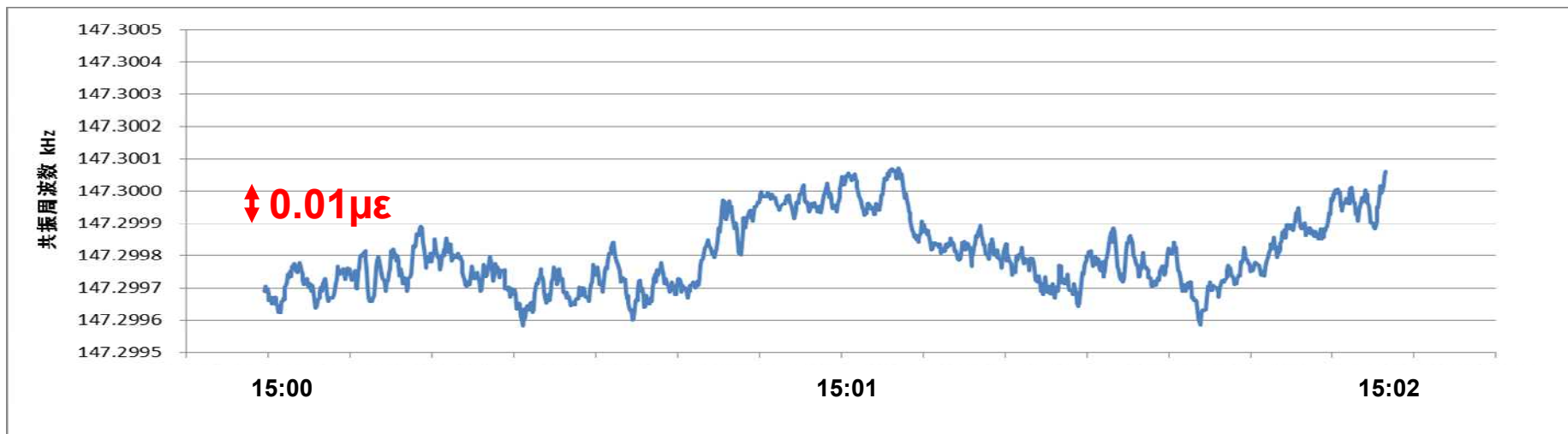


20階 加速度センサ設置状況

◆ 人力加振時のデータ(10月28日実施)



◆ ひずみセンサの連続データ(10月28日実施)



■ 国内インフラのストックと更新費予測

根元 祐二「朽ちるインフラ－忍び寄るもうひとつの危機」日本経済新聞社（2011年5月）

	算定対象	物理量	更新単価	更新投資金額	構造耐用年数	年平均更新額
建築物	学校、病院 庁舎、公営住宅、 公民館、図書館など	64億898万 6000㎡	2,700万円/ ㎡	175兆円	50年	3.5兆円
道路	舗装路面のメンテナンス に掛かる工事	41億432万 3,420㎡	7,000円/㎡	29兆円	15年	2.0兆円
橋梁	橋梁全体	67万7792橋	5,000万円/ 橋	34兆円	50年	0.68兆円
上水道	配管	56万9,608km	10万円/m	57兆円	50年	1.1兆円
下水道	配管	41万7,217km	10万円/m	42兆円	50年	0.83兆円



■ 広範囲に渡るため、健全性モニタリングシステムによる効率的な監視が必要

◆ 実用における優位性・有用性

- ✓ センサモニタリングシステムによる、被災時の対策判定の迅速化
- ✓ 被災判定に関わる技術者人材不足の補強
- ✓ 耐震補強・メンテナンス計画立案をサポート

◆ 実用化シナリオ・波及効果

- ✓ 国内事業化として横河ソリューションサービスでは、鉄道、道路、プラント等取引先からインフラ維持・検査等の引き合いを受けて営業活動を拡大
- ✓ ターゲットとしては、公共性の高い建物（役所・病院・学校等）を中心に、導入・普及化を図る。
- ✓ 健全性診断から耐震補強計画立案までをサポートする。
- ✓ 本センサモニタリングシステムを建築だけでなく土木関係へも展開

名称		本プロジェクト		「揺れモニ」NTTファシリティーズ	「被災度判定システム」鹿島	「構造ヘルスマニタリング」日建設計				
センサ	方式	単結晶Siレゾナントセンサ (MEMS) (新開発)		微小電気機械素子 (MEMS) (自社開発)	静電容量式加速度センサ (白山工業製)	静電容量式加速度センサ (白山工業製)				
	加速度計	分解能	1/1000gal		?	1/100gal	1/100gal			
		測定範囲	±2G		?	±1.5G	±1.5G			
		サブリンク周波数	100Hz		?	100Hz	100Hz			
		周波数特性	DC~50Hz		0.1Hz~1Hzも計測可能	0.1Hz~50Hz	0.1Hz~50Hz			
	ひずみ計	分解能	±1μ(Si振動式), ±10μ(Si ¹⁰⁰ 抵抗式)		×	×	×			
		測定範囲	±500μ(Si振動式), ±2000μ(Si ¹⁰⁰ 抵抗式)		×	×	×			
傾斜計	分解能	0.01°		×	×	×				
通信・電力方式		LAN (PoE)、無線		LAN (PoE)	LAN (PoE)	LAN (PoE)				
設置場所		全層	代表階	全層	1階、最上階および中間階	2階、最上階および中間階				
出力データ	加速度波形	○ (測定)	○ (測定)	○ (測定)	○ (測定)	○ (測定)				
	変位波形	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	×	○ (測定・解析)				
	固有周期	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)				
	層間変位	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)				
	柱の傾斜	○ (測定)	○ (測定)	×	×	×				
	柱およびはりのひずみ	○ (測定)	○ (測定)	×	×	×				
	震度	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)	○ (解析)				
評価方法	1次診断	5分以内	測定値の分析により固有周期と層間変位より評価	即時判断	クライテリアを設定し、赤・黄・青で評価	数分間	構造および非構造部材を健全、小修復と中修復で評価	?	構造および非構造部材の分析指標で評価	
	2次診断	24時間以内	測定値によりシステム同定で建物の剛性と固有周期の変化を時々刻々の評価	×	?	日建設計が2次判定の必要性がある場合のみ元設計会社へ依頼。				
	評価レポート	検討中		?	?	簡易出力版と詳細出力版あり				
備考	無線通信	400MHz、920MHz、2.4GHzで検討		×	×	×				
	エネルギーハーベスト	太陽電池		×	×	×				
	ワイヤレス給電	磁界共鳴方式		×	×	×				
	バッテリー	搭載		搭載	×	×				
	トリガー方式	センサノード (各階) (加速度振幅レベルで設定)		×	×	×	×			
		緊急地震速報 (加速度振幅レベルで設定)		緊急地震速報：検討中		緊急地震速報		緊急地震速報		
		高精度振動センサ (GLまたは屋上階) (加速度振幅レベルで設定)		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))		地下またはGL階のセンサ (想定) (加速度振幅レベルで設定 (想定))		
センサ時刻同期	GPSの時刻を定期的に受信 (1回/分)		×		×		×			
時刻設定	GPS		パソコンの時刻で設定(NTP)		パソコンの時刻で設定(NTP)		パソコンの時刻で設定(NTP)			

研究発表・講演（口頭発表を含む）			
発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2015年9月13日	第22回信頼性設計技術WS	部分空間法によるシステム同定の精度について	肥田剛典（東京大学）
2015年10月16日	The 8th Japan Conference on Structural Safety and Reliability	確率的部分空間同定法を用いた建物の固有振動数の推定	肥田剛典, 永野正行（東京大学）
2016年3月1日	日本建築学会関東支部研究発表会	高層建物の2点強震観測から同定される低次振動特性を用いた層剛性の高さ分布の推定手法の提案	李尚元, 肥田剛典, 高田毅士（東京大学）
2016年8月24日	日本建築学会大会	超高層建物の2点強震観測記録に基づく層剛性の高さ分布推定手法に関する実証的研究	李尚元, 肥田剛典, 田沼毅彦, 小田聡, 永野正行, 高田毅士（東京大学）
2016年10月26日	第33回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	環境温度の影響が少ない高精度ひずみセンサの開発	鮫島 健（横河電機）

プレス発表・展示会・ニュースリリース等			
年月日	媒体	内容	備考
2015年7月22日～25日	インフラ検査・維持管理展2015	NEDOプロジェクトでのインフラモニタリングシステムの概要をパネル展示	東京ビッグサイト
2016年5月11～12日	MEMSエンジニアリングフォーラム	NEDOプロジェクトでのインフラモニタリングシステムの概要をパネル展示及び、シリコン振動式加速度センサの無線での動態展示を行った。	KFCホール
2016年7月20日～22日	インフラ検査・維持管理展2016	NEDOプロジェクトでのインフラモニタリングシステムの概要をパネル展示及び、シリコン振動式加速度センサの無線での動態展示を行った。	東京ビッグサイト
2016年9月14日～16日	MEMSセンシング&ネットワーク展	NEDOプロジェクトでのインフラモニタリングシステムの概要をパネル展示及び、シリコン振動式加速度センサを建物模型上で動態展示を行った。	パシフィコ横浜



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

①インフラ状態モニタリング用センサシステム開発

道路橋の維持管理及び防災・減災を目的としたセンサシステムの研究開発

(委託先:日本電気株式会社、一般財団法人首都高速道路技術センター)

1. 研究開発の背景と目的
2. 中間目標の研究開発目標の設定及び達成度
3. 最終目標の達成見込み
4. 事業化の見通し
5. 成果の普及、知的財産等の確保に向けた取り組み

1. 研究開発の背景と目的

背景：道路橋定期点検での健全度の実態

平成27年度の全国の点検結果によれば、都道府県・政令市等管理橋梁で「判定区分Ⅲ」が11%である。**建設後30年以上を経過すると「判定区分Ⅲ」が増加する傾向にある。**

国土交通白書2015によれば、建設後50年以上経過する道路橋の割合が、平成25年3月の約18%から、10年後には約43%、20年後には約67%と急増する。定期点検での判定区分Ⅲ及びⅣの割合が急増するものと考えられる。

	判定区分	定義	国土交通省 (7,259橋)	高速道路会社 (4,636橋)	都道府県・ 政令市等 (36,397橋)	市区町村 (92,522橋)
I	健全	道路橋の機能に支障が生じていない状態。	61%	11%	36%	38%
II	予防保全 段階	道路橋の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。	31%	81%	52%	52%
III	早期措置 段階	道路橋の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。	8%	8%	11%	10%
IV	緊急措置 段階	道路橋の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。	0.01%	—	0.03%	0.1%

目的: 定期点検と連携したセンサシステム構築

- ① 道路法施行規則の改正により全ての橋梁で5年に1回の頻度で点検。
この定期点検の間の**5年間の損傷の進展**をセンサシステムにより把握。
- ② **地震等災害時の被災状況**をセンサシステムにより把握。

	現行の点検の特徴・利点	ユーザーニーズ
平常時	<p>(定期点検)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・5年に1回の頻度の近接目視点検 ・近接目視による損傷箇所周辺の情報収集による劣化状況と損傷原因の把握 	<ol style="list-style-type: none"> ①定期点検の間5年間の損傷進展把握 <ul style="list-style-type: none"> ・急激な劣化進行の把握(特に健全度Ⅲ(早期措置段階)の橋) ・劣化進行のデータ化 ②定期点検の補強 <ul style="list-style-type: none"> ・損傷データの客観性向上 ・目視点検困難箇所の変状把握 ③補修補強対策後の効果確認
大地震などの災害時	<p>(緊急点検: 災害後1~2日)</p> <ul style="list-style-type: none"> ・即時性に劣る。 ・点検時に応急復旧対策立案 <p>(既存システム)</p> <p>地上: 巡視点検、CCTV 上空: ヘリテレ映像、衛星画像</p>	<ol style="list-style-type: none"> ①災害時における迅速な変状把握 ②余震等の状況下における連続的な状況把握

対象橋梁： 橋長15m以上の単純桁橋で定期点検での健全度判定区分が「Ⅲ：早期措置段階」以上の橋梁

橋梁の種類別の延長比率は、**桁橋が76.2%**、床版橋が13.1%、トラス橋・アーチ橋・ラーメン橋が8.9%、斜張橋・吊橋・その他が1.8%であり、桁橋が多くを占めている。桁橋の内、約7割が単純桁橋であることから、**橋長15m以上の橋の約5割が対象となる。**

	合計	床版橋	桁橋	トラス橋	アーチ橋	ラーメン橋	斜張橋	吊橋	その他
箇所数	165,322	32,342	122,792	1,814	2,582	4,354	317	883	238
比率%	100	19.6	74.3	1.1	1.6	2.6	0.2	0.5	0.1
延長(m)	10,612,478	1,386,132	8,093,575	258,212	277,638	410,420	92,610	87,241	6,650
比率%	100	13.1	76.2	2.4	2.6	3.9	0.9	0.8	0.1



鋼橋桁橋



PC橋桁橋

- ① リスク評価から健全度の判定区分Ⅲ及び判定区分Ⅳの橋梁
 リスク発生確率のランク及び被害規模のランクによる「リスクの大きさ」によりリスクを評価する。リスクの大きさをA領域、B領域、C領域に区分した図を示す。図の**A領域がセンサーシステムの設置が効果的**と考えられる対象橋梁である。

発生確率のランク ↑ 高 低	Ⅳ	A	A	A	A	A領域
	Ⅲ	B	A	A	A	
	Ⅱ	B	B	B	B	B領域
	Ⅰ	C	C	C	C	C領域
			1	2	3	4
		小	→			大
		被害規模のランク				

図 リスクと健全度のマトリックス



健全度Ⅲ事例：桁の断面欠損



健全度Ⅳ事例：PC桁のケーブル破断

- ② 地震時の損傷発生確率の高い部位

東北地方太平洋沖地震における道路橋の被災状況（津波被害以外）から桁端部における損傷（支承、落橋防止装置、主桁端部の座屈）が多くを占めている。**震度6弱以上を観測した地域の橋梁の約10%に桁端部付近の損傷が生じ、約6%に上部工の損傷が生じている。**

通行規制橋梁の実態

平成25年4月時点で、地方公共団体が管理する橋長15m以上の橋梁で

通行止め 232橋 通行規制 1,149橋

通行止めの橋梁数が増え続けている。(平成20年4月:121橋)

上部構造の損傷要因は、「**床版の損傷**」「**鋼材の腐食**」「**コンクリート桁のき裂・剥離**」及び「**支承の破損・劣化**」が多い。(一社)次世代センサ協議会調査)

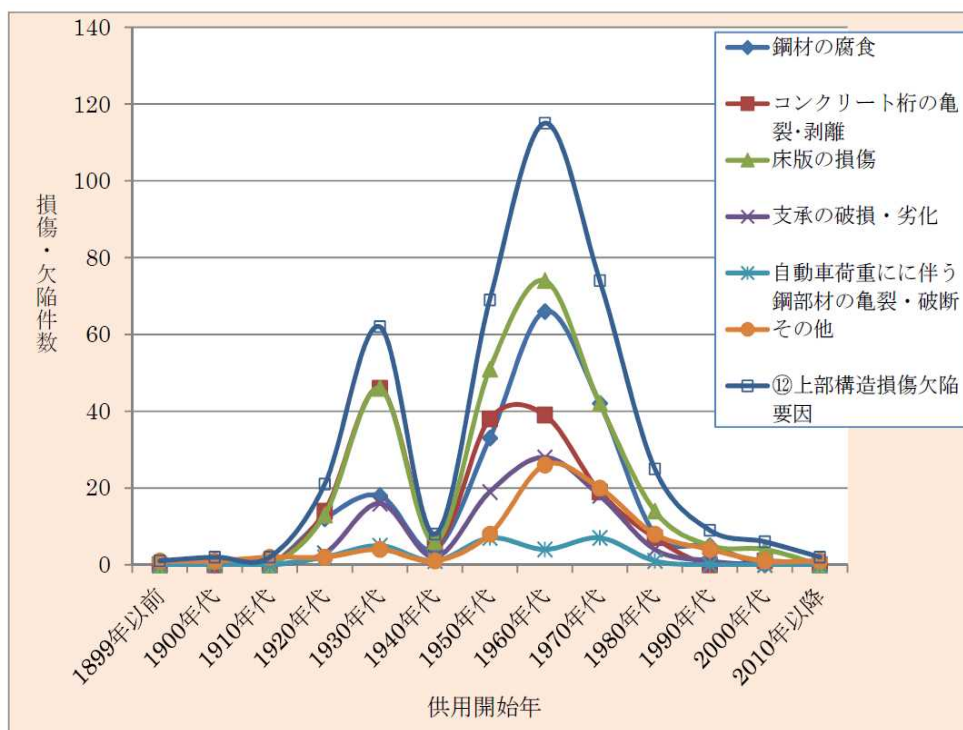


図 供用開始年と規制橋梁分布(上部構造損傷要因)

経年劣化する損傷に対しては、モニタリングにより損傷箇所の進行度を把握し、適切な時期の補修・補強を計画することが重要である。

センサシステムが対象とする損傷は、地方自治体の通行止めの原因となっている「**鋼材の腐食**」「**コンクリート桁のき裂・剥離**」「**支承の破損・劣化**」及び危険性の高い「**鋼材の疲労き裂**」とする。

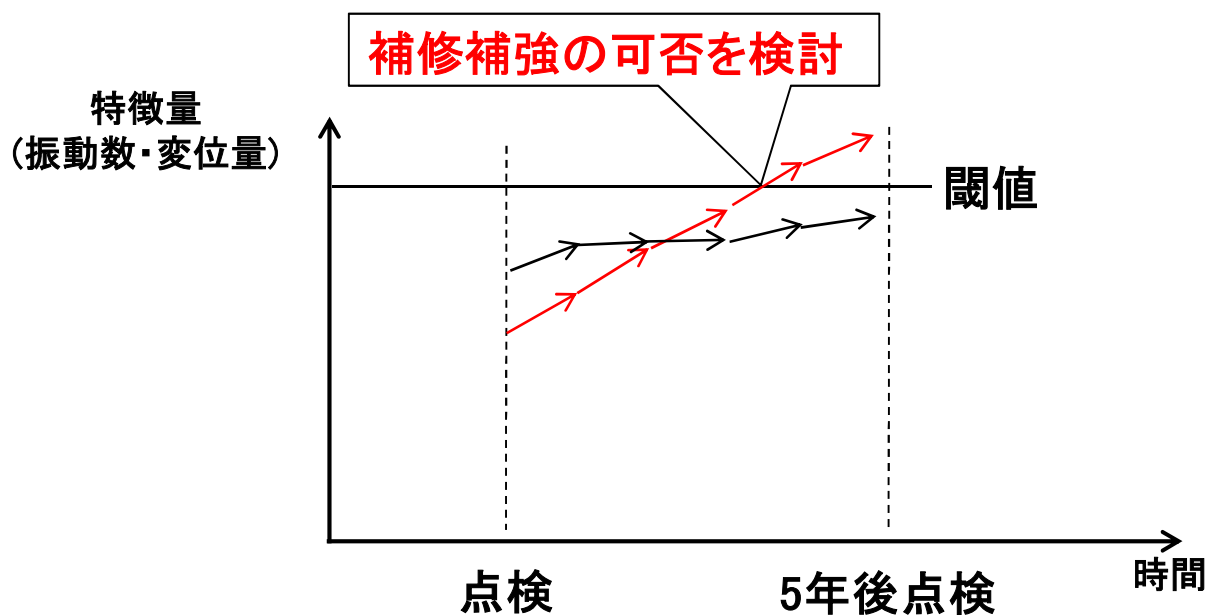


図 センサシステムを活用した予防保全のイメージ

2. 中間目標の研究開発目標の設定 及び達成度

開発項目①: センサシステムの開発
 センサ端末の開発、無線ネットワークの開発

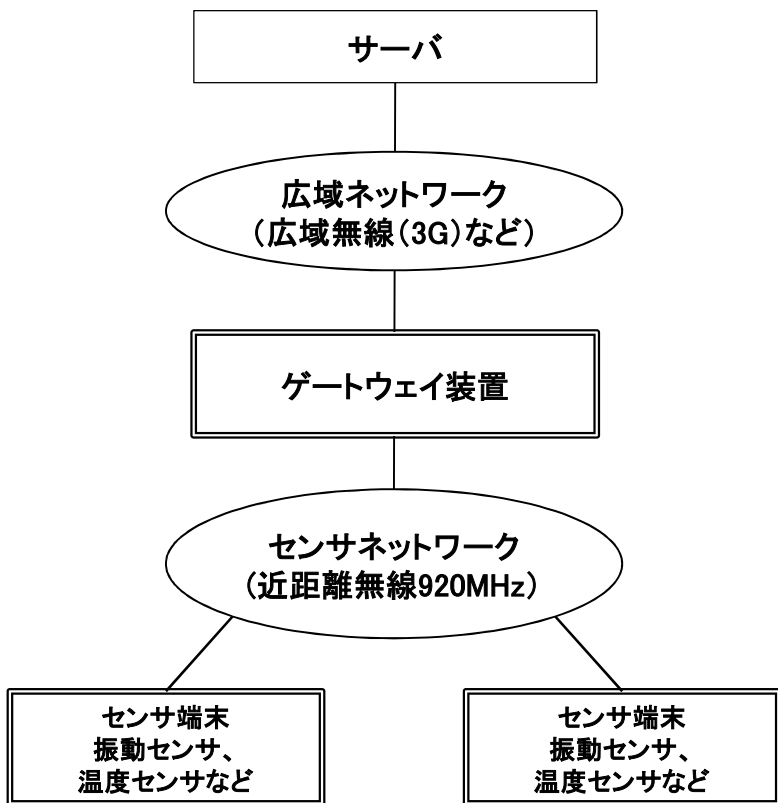


図 センサシステムの基本構成

開発項目②: センサシステムのニーズ・運用・導入の検討

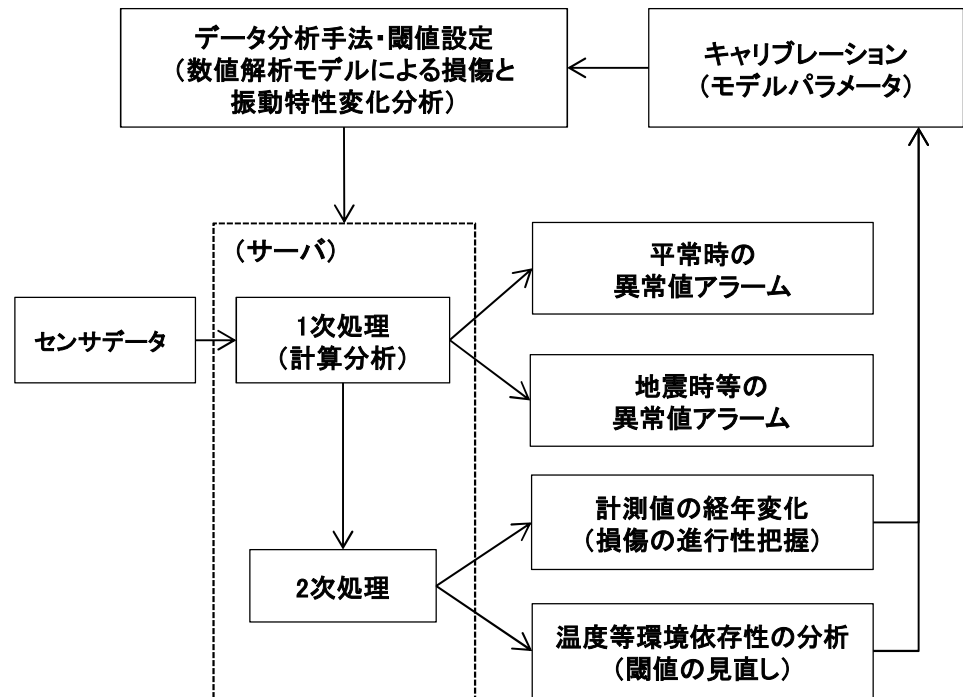


図 振動センサデータの分析手法

(1) 計測データの分析手法

収集・蓄積したデータを基に、損傷を検知する特徴量を抽出し、損傷の進行をモニタ。

【異常検知の方法】

- ・ 橋梁における損傷の発現・進行を計測診断できるセンサ種別と**計測データ(特徴量)を定義**
- ・ **数値解析**により損傷が計測データ(特徴量)に与える影響を把握
- ・ 計測データの取得と**特徴量の抽出方法の定義**(ノイズの少ない計測データ、ノイズの除去)
- ・ 統計的手法による「a.分布推定」「b.異常度の定義」「c.閾値の設定」の手順で**閾値を設定**。
- ・ 計測値の2次処理として経年的変化の把握、季節変動の把握。

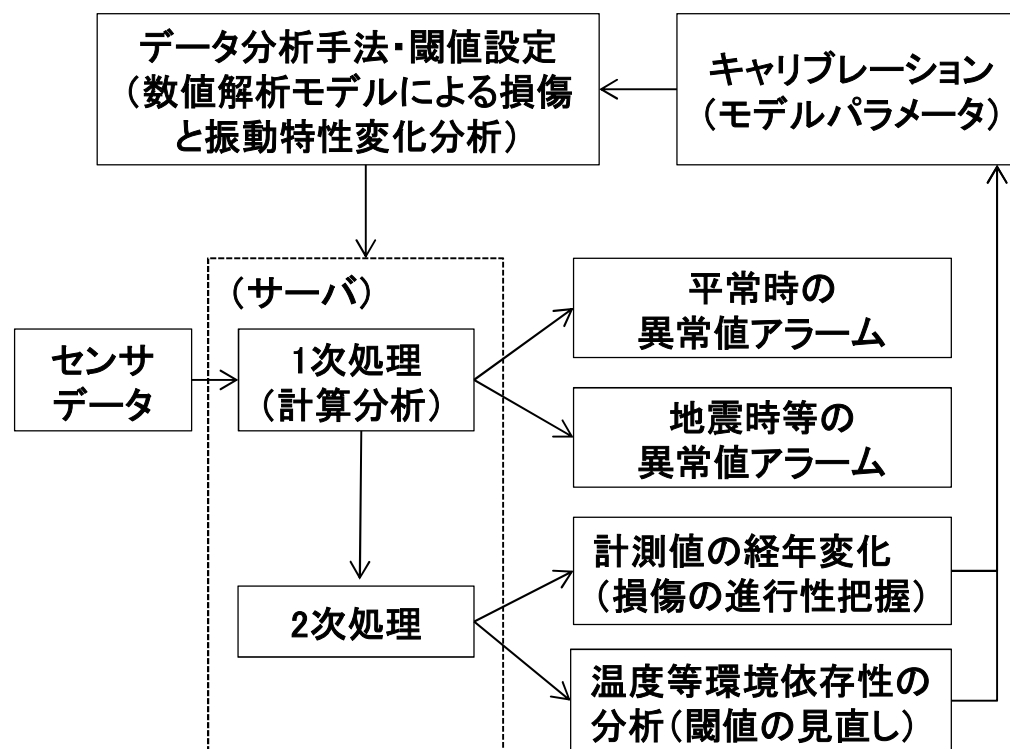


図 振動センサデータの分析手法

(2) 損傷検知の対象と検知手法

代表的損傷は、鋼橋の主桁腐食、主桁疲労き裂、コンクリート橋の主桁ひび割れ、支承の機能障害及びコンクリート床版のひび割れである。

橋梁の定期点検結果から主桁の損傷が多いこと及び支承の移動・回転機構の損失が上部構造の損傷を招くことから、**橋梁主桁の損傷検知及び支承の移動・回転機構の損失検知に着目したセンサシステムを開発する。**

部位		損傷種別	計測箇所	センサ種別	振動特性変化と狭域計測による損傷検知
上部構造	鋼部材	腐食による板厚減少	-	-	・板厚減少の進展により剛性が低下し、 振動特性に影響 を与える。
		主部材の疲労き裂	き裂箇所	き裂センサ	・き裂の進展により剛性が低下し、 振動特性に影響 を与える。 ・き裂の進展がき裂センサにより進展速度が計測される。
	コンクリート部材	顕著なひび割れ	主桁ひずみ	ひずみセンサ	・ひび割れの進展により剛性が低下し、 振動特性に影響 を与える。 ・ひび割れの進展が主桁ひずみ量の増加となる。
	コンクリート床版	床版ひび割れ	床版たわみ	変位センサ	・床版ひび割れの進展が床版たわみ量の増加となる。
支承部		変位機能低下 路面段差	支承水平・鉛直方向変位	変位センサ	・支承部の固着が 振動特性に影響 を与える。 ・支承部の変位機能の低下が変位センサでの 支承変位の円滑性 に影響を与える。 ・ 地震時の過大な変位 が変位センサにより計測。

(3) 振動特徴量の抽出

- ・損傷が生じた場合に損傷が計測値に表れること(構造状態変化>環境因子影響・ノイズ)が必要である。**閾値設定のため計測対象物の損傷時のシミュレーションと計測データの分析(特徴量の抽出)が必要**となる。
- ・このような検証とセンサシステムの信頼性検証のための、**実橋における継続的なモニタリングが必要**である。
- ・振動センサはモードの腹と節を捉える配置とし、単純桁では桁の端部、1/4、1/2に配置する。

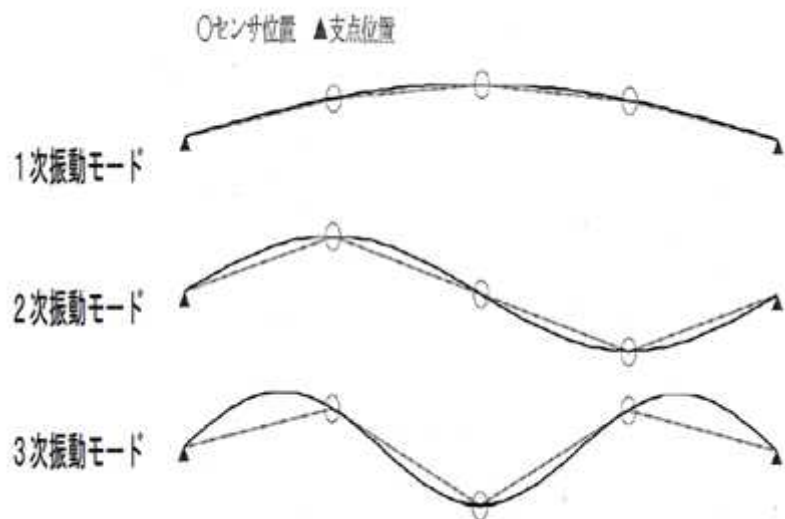


図 センサ位置と振動モードの関係

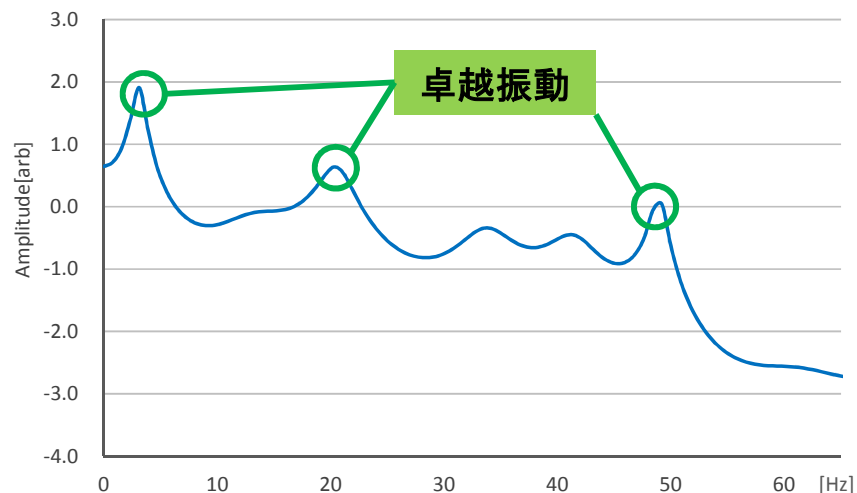


図 特徴量(卓越振動)抽出例

(5) 支承部変位センサ

常時における温度変化による水平移動、活荷重による回転変形を計測。地震時の水平移動量を計測。

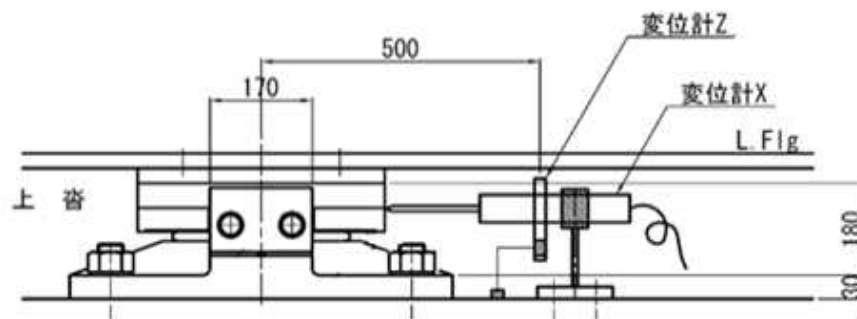


図 支承部変位センサ設置イメージ

(6) き裂センサ設置イメージ

鋼桁の点検で発見したき裂で、次の定期点検までの損傷を監視する必要があるものを対象に、き裂センサを配置して監視する。



写真 鋼桁がセット取り付け部き裂位置



写真 ガセット端部に発生したき裂

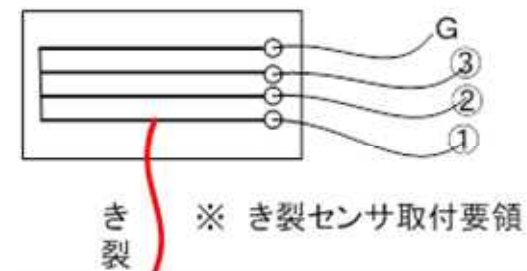


図 き裂センサ構造イメージ

以下の機能、性能等を有するセンサシステムの開発を中間目標とし、平成28年度中に完了予定である。

	中間目標(平成28年度)	平成28年度計画	活動状況・達成度
1	走行車両(特に積載荷重が大きい車両)の加振による道路橋の剛性低下の検知を目的とした振動応答を広帯域(1Hz~10kHz)で計測する。	異常検知のための機能追加: 無線センサ端末に接続されるデバイスおよび無線センサ端末の異常検知を行う機能を検討し、実装する。 実橋梁における短期間動作検証: 実環境での動作確認として開発した装置を実橋梁に簡易設置し、センシング、センサ端末からゲートウェイへの測定値の通知、遠隔サーバとの通信を実際に行い開発・実装した機能を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・実橋梁における短期間動作検証を実施済み。 ・平成28年度末までに異常検知機能を含む実装機能検証を達成見込み。
2	橋梁支承の変状検知を目的とした変位量(±50mm)を計測する。	変位センサの開発: 平成27年に試作した変位センサを改良し、IP54相当の防水防塵性を備えた設計とする。	<ul style="list-style-type: none"> ・IP54相当防水防塵設計済み。 ・温度変化によるインダクタンス変動に対し、温度変化で容量値の変化が少ないコンデンサに変更し温度依存性に対してキャリブレーションを行うことで対応予定。
3	自立電源を有し、振動を計測するとともに少なくとも1時間に1回の無線通信で計測したデータを送信する。	自立発電の設計・製造: 平成27年度までの検討結果に基づき、IP54相当の防水防塵性を備えた自立発電装置の設計・製造を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・自立発電の設計・製造及び実橋梁での短期間動作検証を実施済み。 ・平成28年度末までに実橋梁環境での検証を達成見込み。
4	地震等の突発的な事象を検出し、検出後に自動的に計測周期を短く変更してデータを無線送信する。	地震検知機能の検証: 平成27年度に実装した無線センサ端末で低周波振動を補足して起動しセンシングを行いゲートウェイへ送信する機能の検証を行う。	<ul style="list-style-type: none"> ・平成28年度末までに実装機能検証を達成見込み。

	中間目標(平成28年度)	平成28年度計画	活動状況・達成度
5	無線通信は電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる920MHz帯の近距離無線により、実環境下で送信距離30m以上の通信をする。	実橋梁における短期間動作検証: 実環境での動作確認として開発した装置を実橋梁に簡易設置し、センシング、センサ端末からゲートウェイへの測定値の通知、遠隔サーバとの通信を実際に行い開発・実装した機能を確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・実橋梁における短期間動作検証を実施済み。 ・センサ端末からゲートウェイ装置までの距離を30mとし、920MHz特定小電力無線によるデータ通信、ゲートウェイ装置から遠隔サーバに広域無線(3G)通信でのデータ送信を確認済み。
6	遠隔サーバとセンサ端末間の双方向通信により、各種設定変更等の制御を可能とする。	異常検知のための機能追加: ゲートウェイのシステムリソース状態やソフトウェアの正常性を定期的に自動点検しレポートする方法によりゲートウェイの異常を検知する機能を検討し、実装する。 通信プロトコルの更新: 平成27年度の結果を踏まえ、無線センサ端末とゲートウェイの間の通信プロトコルのさらなる最適化を行う。 データ圧縮機能の実装: 平成27年度の検討を踏まえ、遠隔サーバ、センサ子機及びゲートウェイに圧縮機能を実装し効果を確認する。 サーバアプリケーションの機能追加の実装: 平成27年度の検討を踏まえ、アプリケーション向けAPIを実装する。APIを利用するアプリケーションのプロトタイプとしてフィールド評価で収集したデータの検証ツールを実装する。 システムの異常検知機能の実装: 10年使用可能なシステムとするため、ゲートウェイとの通信エラーや収集したデータの値に閾値を設けるなどの手法によりシステムの異常を検知しメンテナンスを促す機能を実装する。	<ul style="list-style-type: none"> ・異常検知の機能検討中。実環境下での検証を平成28年度末までに達成見込み。

	中間目標(平成28年度)	平成28年度計画	活動状況・達成度
7	実環境下で作業車が設置・運用する作業性の観点から、センサ端末(子機)の大きさは概ね350cm ³ (7cm×10cm×5cm相当)の体積)以下とする。	環境性の検討: 平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、無線センサ端末の耐環境性能を検証する。	<ul style="list-style-type: none"> ・無線センサ端末のサイズは目標達成の目途がしたが、実運用観点からセンサ及び自立発電部は子機と分離型とした。 ・一次電池を廃止し自立発電装置から直接給電される構成に変更、基盤レイアウトの工夫、実装の高密度化等により高さ2.6cm×幅10cm×奥行4.8cmの筐体サイズを実現した。平成26年度試作より体積で約460cm³小型化した。
8	実環境下での使用に耐える筐体として、耐環境性能(IP54)を有する。	環境性の検討: 平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、無線センサ端末の耐環境性能を検証する。	<ul style="list-style-type: none"> ・筐体を耐食性アルミニウム合金ダイキャストとし塗装を施したほか、筐体内部へのパッキン設置や電源等のコネクタ類への防水対策によりIP54の防塵・防滴設計とした。
9	10年以上、動作可能な装置とする。	耐環境性の検証: 平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、ゲートウェイとしての耐環境性能を検証する。	<ul style="list-style-type: none"> ・10年以上の使用を考慮し、MTBFの長い部品を使用する設計とし、個々の部品、部材のマージン(電子部品では、電圧、電流など)を考慮し設計した。

中間目標①

走行車両(特に積載荷重が大きい車両)の加振による道路橋の剛性低下の検知を目的とした振動応答を広帯域(1Hz~10kHz)で計測する。

開発内容(平成28年度)

① 異常検知のための機能追加

無線センサ端末に接続されるデバイスおよび無線センサ端末の異常検知を行う機能を検討し、実装する。

② 実橋梁における短期間動作検証

実環境での動作確認として開発した装置を実橋梁に簡易設置し、センシング、センサ端末からゲートウェイへの測定値の通知、遠隔サーバとの通信を実際に行い開発・実装した機能を確認する。

研究開発成果

- 圧電セラミック方式の振動(加速度)センサを取り付け可能な**低消費電力の無線センサ端末を開発**。広帯域(1Hz~10kHz)な**振動センサのデータと温湿度センサのデータの計測機能を実装済み**。
- センサ端末内のファームウェア処理で定期的なデータ収集機能を実装し、更にサンプリング周波数/収集周期/収集時間/通信設定などの設定変更を可能とした。
- 分析手法の変更に対して柔軟な対応が可能となるよう**データの収集・格納・提供を行う機能部分と分析を行う機能部分を分ける設計**とした。データ提供機能については外部システムとの連携も視野に入れ、**Web-API※として実装済み**。

※Web-API: コンピュータプログラムの提供する機能を外部の別のプログラムから呼び出して利用するための手順・規約(API)の種類の一つで、HTTPなどWebの技術を用いて構築されたものこと。

- 平成28年度成果

- ① 異常検出のための機能追加

- 平成28年8月のサイトビジット時に実橋環境でセンサデータを上位サーバまで送信できることを確認済み。異常検出のための機能を実装中で平成28年度末までに完了予定。

- ② 実橋梁における短期間動作検証

- 平成28年8月のサイトビジット時に**実橋環境でセンサデータを上位サーバまで送信できることを確認済み**。

達成状況

平成28年度末 達成見込み

中間目標②

橋梁支承の変状検知を目的とした変位置量(±50mm)を計測する。

開発内容(平成28年度)

災害時の橋梁支承部の変状を測定することを目的とした、変位センサの開発を行う。

支承部の変形を感知するために、±50mm程度の変位置量を計測可能なセンサの新規開発を行う。

<特徴>

- ・構造が極めて単純 ⇒ コスト低減、信頼性向上
- ・低消費電力 ⇒ 自立発電で運用することで保守が容易

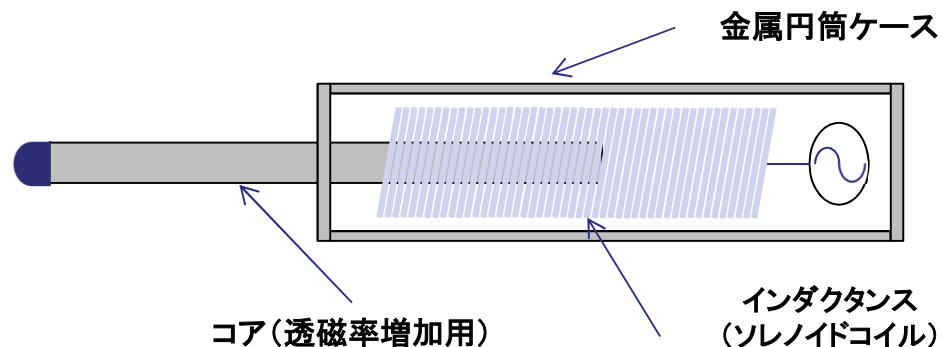


図 変位センサ構造イメージ

研究開発成果

- インダクタンス方式※の変位センサを試作した。検知可能変位量は最大±50mm。
X軸・Y軸・Z軸の3方向の変位センサをディジーチェーンで接続することによりセンサ端末側の1つの入力インターフェースで受信可能とした。尚、目標分解能は下記とした。
 - ①地震時の橋梁の変状測定(目標)
0.2mm
 - ②支承の損傷(固着など)の検知(ストレッチ目標)
0.02mm(100mm範囲で12ビット精度)
- 構造が単純なインダクタ方式※とし、インダクタ検出用の低消費電力ICを使用することで回路を簡略化し、消費電力を低減した。
 - ※インダクタ方式: 内部のコイルにコアを挿入し、コアの挿入量によるコイルのインピーダンス変化を検出することで変位量を検出する。

● 平成28年度成果

- ①実橋梁環境で橋脚上部の変位量を測定し上位サーバまで送信できることを確認済み。
- ②下記の課題に対して対策方法を検討し、解決見込が立ち平成28年度末までに対処完了予定。

課題と対策

- 1) 温度影響が大きく温度特性が非線形
内部回路を見直し、温度影響と温度特性の非線形性を低減した。(対処完了)
- 2) 伸縮特性に端点で非線形な特性が出現
コアの構造を見直し、伸縮特性を改善できる見込みが立った。
- 3) 可動部分の防塵、防水対策
蛇腹構造のカバーで覆うことで対処予定

達成状況

平成28年度末 達成見込み

【平成28年度成果詳細】

② 課題と対策

課題1) 温度影響が大きく温度特性が非線形

⇒ 内部回路を見直し、温度影響と温度特性の非線形性を低減した。

温度影響に関しては一次式でキャリブレーションできる目途が立った。

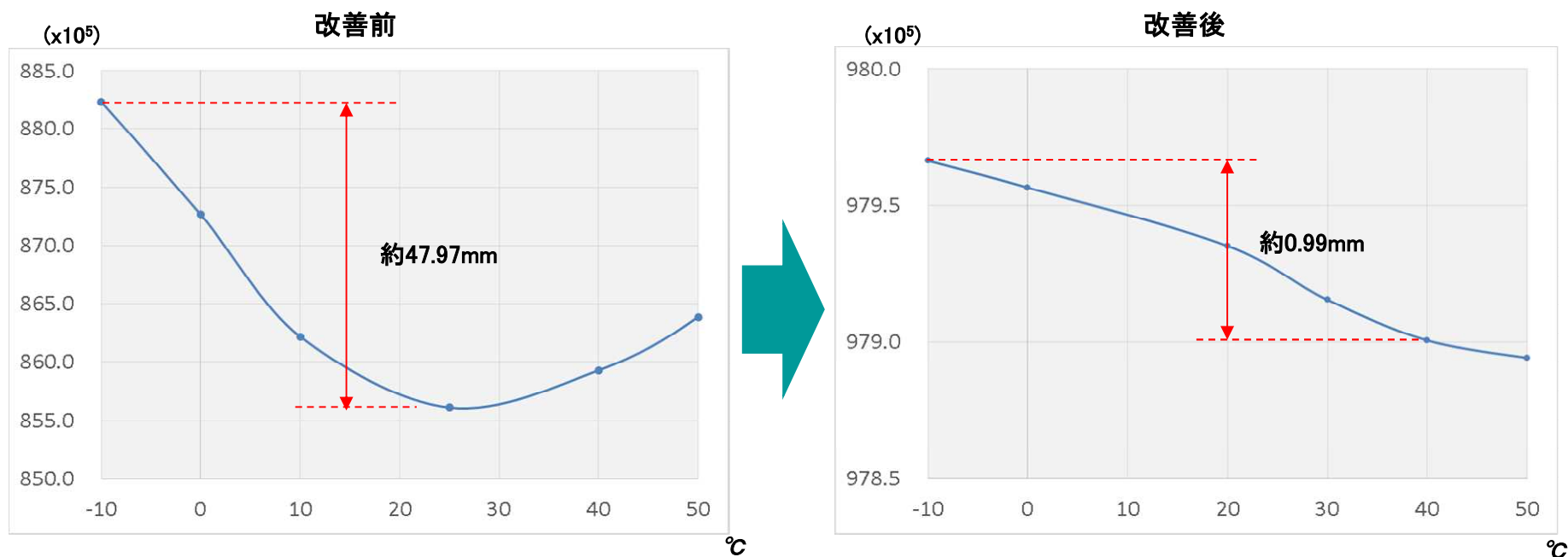


図 変位センサの温度影響改善

【平成28年度成果詳細】

課題2) 伸縮特性に端点で非線形な特性が出現

⇒ 下図の伸縮特性に示すように100mm側の端部に非線形な特性が出現。

端部以外は伸縮特性が線形であることが確認できた。

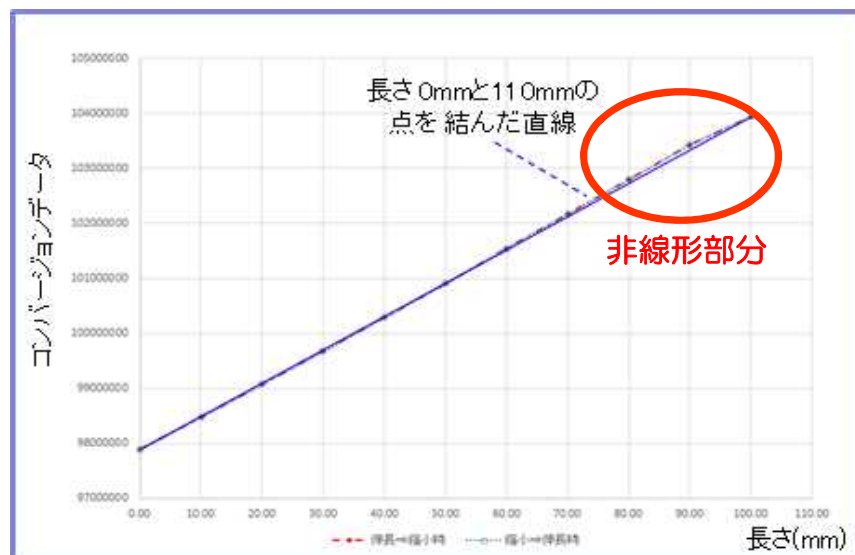


図 変位センサ測定結果
100mm変化(10mm刻み)

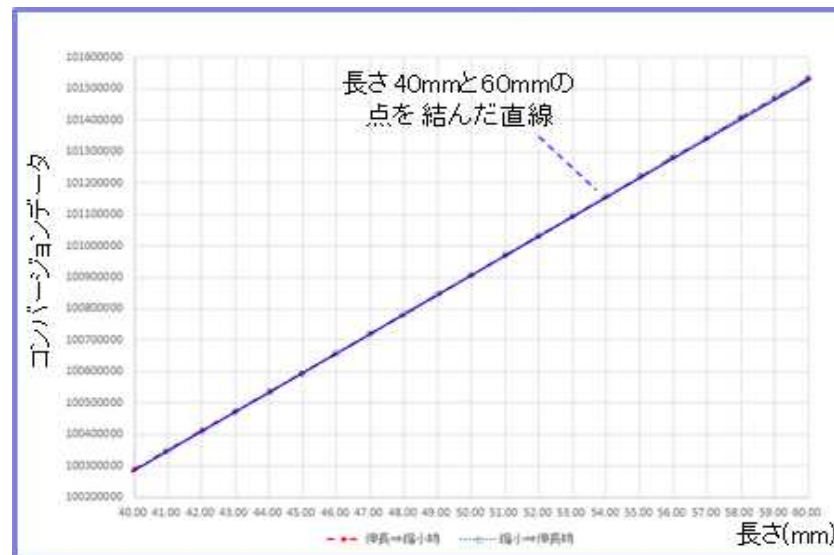


図 変位センサ測定結果
40~60mm変化(1mm刻み)

◆ 端点部分の非線形の原因と対策

100mm側端部ではコアがソレノイドコイルの端の位置まで移動するため、非線形な特性が出現していることが判明。

⇒ コア長を短くすることで伸縮特性が線形になることを確認済み。

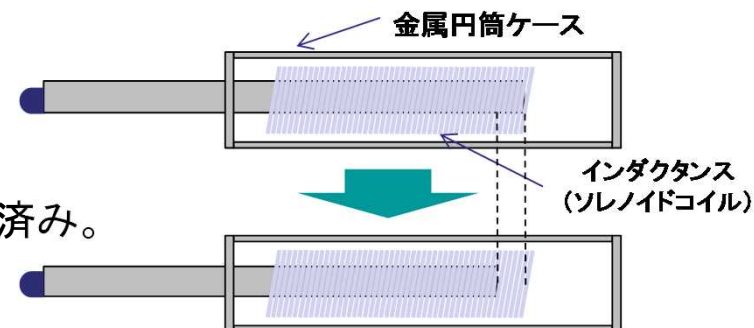


図 変位センサ改善イメージ

【平成28年度成果詳細】

課題3) 可動部分の防塵、防水対策

⇒ 蛇腹構造のカバーで覆うことで対処予定。



写真 変位センサ本体(カバー無し)



写真 変位センサ本体(防水・防塵カバー付)

中間目標③

自立電源を有し、振動を計測するとともに少なくとも1時間に1回の無線通信で計測したデータを送信する。

開発内容(平成28年度)

自立発電の設計・製造

平成27年度までの検討結果に基づき、IP54相当の防水防塵性を備えた自立発電装置の設計・製造を行う。

研究開発成果

- 自立発電装置の装置構成と主要構成部材を検討。太陽光パネルは温度や汚れに強い耐環境性に優れた製品(単結晶シリコン太陽電池)を選定、蓄電媒体は寿命が非常に長いLIC(リチウムイオンキャパシタ)を用いることとした。
- 平成28年度成果
 - ① LIC容量設計
無線センサ端末の実機により消費電力を確認し、晴天時の2時間充電で5日間稼働するよう設計した。
 - ② 試作と評価
筐体の收容設計、蓄電デバイスのチャージ回路の高効率化・安定化を考慮したものを試作。実橋梁環境下での自立発電の稼働率検証を平成28年度末までに実施予定。

達成状況

平成28年度末 達成見込み

【平成28年度成果詳細】

① LIC容量設計

太陽光パネルの起電力を実測し、センサ端末の消費電力の実測結果から晴天時の2時間充電で5日間稼働するように設計した。

LIC容量：600F

センサ端末平均消費電力：4.3mW

晴天时起電流：100mA

① 試作と評価

筐体の收容設計(平成28年度8月のサイトビジット時より小型化)し、蓄電デバイスのチャージ回路の高効率化・安定化を考慮したものを試作。実橋梁環境下での自立発電の稼働率検証を平成28年度末までに実施予定。

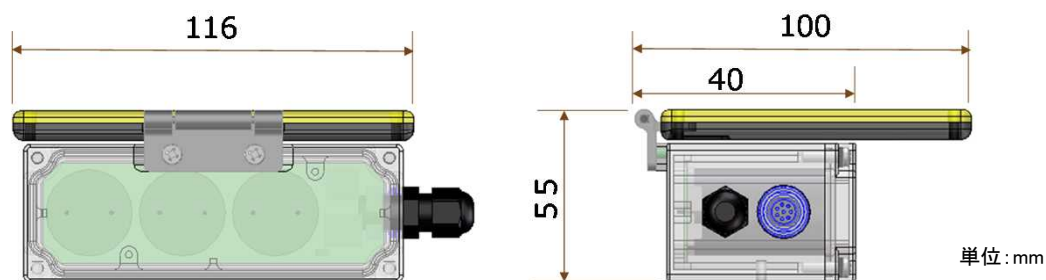


図 自立発電装置(電源ボックス+太陽光パネル)サイズ



図 自立発電装置外観

中間目標④

地震等の突発的な事象を検出し、検出後に自動的に計測周期を短く変更してデータを無線送信する。

開発内容(平成28年度)

地震検知機能の検証

平成27年度に実装した無線センサ端末で低周波振動を捕捉して起動しセンシングを行いゲートウェイへ送信する機能の検証を行う。

研究開発成果

● 平成28年度成果

① 通信プロトコルの対応

地震時の無線センサ端末の動作及びデータ送信に関して検討し、**地震時動作に対応した通信プロトコルを実装した。**

② 無線センサ端末に地震検知用センサを追加することで地震を自ら検知しデータ計測を開始する方式について、**無線センサ端末へのハードウェア実装を完了した。**平成28年度末までに機能確認を完了予定。

達成状況

平成28年度末 達成見込み

中間目標⑤

無線通信は電波法による無線局の免許を受けることなく利用することができる920MHz帯の近距離無線により、実環境下で送信距離30m以上の通信をする。

開発内容(平成28年度)

実橋梁における短期間動作検証

実環境での動作確認として開発した装置を実橋梁に簡易設置し、センシング、センサ端末からゲートウェイへの測定値の通知、遠隔サーバとの通信を実際に行い開発・実装した機能を確認する。

研究開発成果

- 無線ネットワークを実現するセンサ端末とゲートウェイ装置を開発。通信用に920MHz特定小電力無線モジュールを内蔵した。

- 平成28年度成果

- ①実橋梁環境での評価

- センサ端末からゲートウェイ装置までの距離を30mとし、920MHz特定小電力無線によるデータ通信、ゲートウェイ装置からクラウド環境の遠隔サーバに広域無線(3G)通信でデータ送信が正しく行えることを実橋梁環境で確認済み。

達成状況

達成

【平成28年度成果詳細】

① 実橋梁環境での評価

実橋梁環境に右図の構成でゲートウェイ装置とセンサ端末間の距離を30m以上で設置し、センサ端末で測定した振動及び変位センサのデータをサーバに保存できることを確認した。

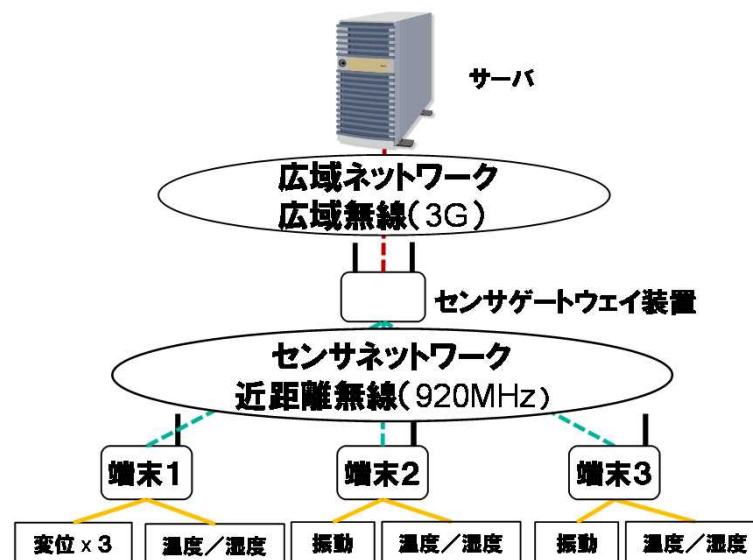


図 サイトビジット(平成28年8月)時のシステム構成



図 センサ端末外観



図 ゲートウェイ装置外観

サイトビジット(平成28年8月)時のご質問事項について

【ご質問内容】

サブギガ帯の特定小電力無線で(海外では)混信が発生しているとの話も聞いている。混信対策について報告して欲しい。

【ご回答】

◆ 特定小電力無線(920MHz)の国内における利用状況

平成23年12月に電波法が改正され20mW以下の特定小電力無線局は免許及び届出不要な無線局として利用可能となった。無線LAN、Bluetooth、電子レンジ等の影響を受けやすい2.4G帯と比較し、920MHz帯は干渉が起きにくい特徴がある。

現状は混信の問題は顕在化していない状況であるが、**今後急速に広まっていく無線周波数帯であると予測され、混信問題が発生するものと推測される。**

◆ 規格上での混信対策

規格(ARIB STD-T108)でキャリアセンス時間(電波送出前に他の電波が無いことを一定時間確認する)と送信時間制限(1時間当りの送信時間は360秒以下)等を設けていることが大きな特徴であり、**規格上でも混信対策が考慮されている。**

◆ 混信対策

規格により送信最大時間や休止時間も規定されているため、混信時に**通信をリトライすることは混信に対して有効**。また、周波数分割により複数の通信チャンネルがあるため、混信が継続する場合には**他のチャンネルに切り換えるという対策**も考えられる。

◆ 本システムの対策

本システムで使用している920MHz通信モジュールは**通信リトライ機能を実装している。**

また、通信モジュールを使用し低レイヤの無線制御処理をアプリケーションから独立させることで、チャンネル切替等の混信対策が無線モジュール側で対応した際、通信モジュールを差替えることで**容易に混信対策機能を実装できるように考慮している。**

中間目標⑥

遠隔サーバとセンサ端末間の双方向通信により、各種設定変更等の制御を可能とする。

開発内容(平成28年度)

①異常検知のための機能追加

ゲートウェイのシステムリソース状態やソフトウェアの正常性を定期的に自動点検しレポートするなどの方法によりゲートウェイの異常を検知する機能を検討し、実装する。

②通信プロトコルの更新

平成27年度の結果を踏まえ、無線センサ端末とゲートウェイの間の通信プロトコルのさらなる最適化を行う。

③データ圧縮機能の実装

平成27年度の検討を踏まえ、遠隔サーバ、センサ子機及びゲートウェイに圧縮機能を実装し効果を確認する。

④サーバアプリケーションの機能追加の実装

平成27年度の検討を踏まえ、アプリケーション向けAPIを実装する。APIを利用するアプリケーションのプロトタイプとしてフィールド評価で収集したデータの検証ツールを実装する。

⑤システムの異常検知機能の実装

10年使用可能なシステムとするため、ゲートウェイとの通信エラーや収集したデータの値に閾値を設けるなどの手法によりシステムの異常を検知しメンテナンスを促す機能を実装する。

研究開発成果

● 平成28年度成果

① 異常検知のための機能追加

ゲートウェイのシステムリソース状態の監視機能を実装済み。
また、アプリケーションのログを監視し、エラー発生を監視する機能を実装済み。

② 通信プロトコルの更新

ゲートウェイとセンサ端末間の通信で受信応答の送信を必要最小限になるように最適化し、通信時間を削減した。

③ データ圧縮機能の実装

圧縮手法を検討し、ADPCM方式を採用することとし、圧縮することによる振動センサ信号からの特徴量抽出結果に影響しないことを確認した。センサ端末に実装し、平成28年度末までに実橋梁環境での評価を完了予定。

④ サーバアプリケーションの機能追加の実装

平成28年8月のサイトビジット時に収集したセンサデータ等をサーバに実装したAPIを使用し、データ収集状況やセンサ信号波形等を閲覧できることを確認済み。

⑤ システムの異常検知機能の実装

異常検出機能に関しては下記の項目の検出機能をセンサ端末／ゲートウェイに実装済みで実橋梁環境での試験を平成28年度末までに完了予定

検出項目：メモリ異常、バッテリー電圧、920MHz通信異常、3G通信異常、
ファームウェアアップデート異常等

達成状況

平成28年度末 達成見込み

中間目標⑦

実環境下で作業車が設置・運用する作業性の観点から、センサ端末(子機)の大きさは概ね 350cm^3 ($7\text{cm} \times 10\text{cm} \times 5\text{cm}$ 相当)の体積)以下とする。

開発内容(平成28年度)

- 環境性の検討

平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、無線センサ端末の耐環境性能を検証する。

研究開発成果

- 平成28年度成果

- ① 無線センサ端末のサイズは目標達成の目途がしたが、実運用観点からセンサ及び自立発電部は子機と分離型とした。
- ② センサ端末の体積を平成26年度試作より約 460cm^3 小型化し、高さ $2.6\text{cm} \times$ 幅 $10\text{cm} \times$ 奥行 4.8cm (125cm^3)の筐体サイズを実現した。
 - ・ 一次電池を廃止し自立発電装置から直接給電される構成に変更
 - ・ 基板レイアウトの工夫
 - ・ 実装の高密度化 等

達成状況

達成

中間目標⑧

実環境下での使用に耐える筐体として、耐環境性能(IP54)を有する。

開発内容(平成28年度)

●環境性の検討

平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、無線センサ端末の耐環境性能を検証する。

研究開発成果

●平成28年度成果

- ① 筐体を耐食性アルミニウム合金ダイキャストとし塗装を施したほか、筐体内部へのパッキン設置や電源等のコネクタ類への防水対策によりIP54の防塵・防滴設計とした試作機を作成した。
- ② 平成28年度末までIP54試験を実施予定。

達成状況

平成28年度末 達成見込み

中間目標⑨

10年以上、動作可能な装置とする。

開発内容(平成28年度)

●耐環境性の検証

平成27年度までの検討方式をもとに、耐環境性能(IP54)を有する筐体を製造し、ゲートウェイとしての耐環境性能を検証する。

研究開発成果

●平成28年度成果

- ① 10年以上の使用を考慮し、MTBF※の長い部品を使用する設計とし、個々の部品、部材のマーヅンを考慮し設計した。
 - ✓電解コンデンサやリレー等のMTBF※の短い素子は使わない
 - ✓低消費電力設計により発熱量を最小限とし自己発熱による回路素子の劣化を防止
- ② 各種異常検出し、システムの正常性を監視できるようにすることで長期間運用時の保守性を考慮した。
- ③ 平成28年度末まで振動試験、塩水噴霧試験を実施予定。

※MTBF: 機械システムや情報システムなどにおける信頼性(Reliability)をあらわす指標となる数値。

達成状況

平成28年度末 達成見込み

平成28年度末までに実橋梁での簡易設置による検証を今後2回実施予定。

平成28年12月：平成28年度開発項目の実環境評価

平成29年1月：12月の結果をふまえたフィードバック内容の確認

3. 最終目標の達成見込み

最終目標(平成30年度)	達成見込み
<p>中間目標までに開発したセンサシステムを実環境下のフィールドに設置し、継続的な実証を実施することにより、本研究が終了する平成30年度末時点で、ユーザ機関が実施する点検作業の延長として作業員が容易に設置、導入、試行できるレベル(運用性・操作性、信頼性、安全性等)を有し、道路橋の状態を継続的に把握するセンサネットワークシステムを完成すること。</p> <p>道路橋には多くの構造形式があるが、代表的な構造形式として鋼橋及びPC橋を対象として目標達成を目指す。</p>	<p>センサ端末(変位センサ、自立発電装置含む)・ゲートウェイ装置・遠隔サーバを平成28年度末までに開発完了見込み。</p> <p>平成29年度からはこれらの機器を用いて実橋梁にセンサシステムを構築し、継続的なモニタリングを行い、設置・運用を評価する。平成30年度末に達成の見通し。</p>
<p>開発するセンサシステムの販売先と、運用者を明確にし、市町村に対しても事業化可能なビジネスモデルを確立する。</p>	<p>事業化計画策定中。</p>

(1) 対象橋梁

福島県における劣化が進行した単純桁橋を対象とする。

構造形式 : 橋長15m以上の単純桁橋(鋼橋)

定期点検結果: 健全度判定区分「Ⅲ: 早期措置段階」の橋梁で
「緊急輸送道路を構成する橋梁」

参考: 福島県道路橋(緊急輸送道路を構成する橋梁)の平成27年度点検結果

管理者	点検実施数	判定区分Ⅰ	判定区分Ⅱ	判定区分Ⅲ	判定区分Ⅳ
国土交通省	117	23	76	18	0
高速道路会社	58	4	42	12	0
都道府県	433	88	289	56	0
市町村	7	2	4	1	0
合計	615	117	411	87	0

出展: 平成28年度(第1回)福島県道路メンテナンス会議(平成28年7月7日)資料

(2) 実証実験内容

① 損傷検知手法の検証

- a. 桁の損傷状況に応じたセンサ種別・センサ配置の検討
- b. FEM解析による損傷の進展と振動特性の変化の把握
- c. 計測データ(振動値、変位値)からの特徴量の抽出方法
(ノイズの少ないデータの抽出、ノイズの除去)
- d. 計測データの管理方法及び維持管理への活用方法

② センサシステムの機能検証

- a. センサ・子機の設置・固定方法の検証(劣化部材への設置・固定)
- b. 自立発電の現場環境における発電量及び耐環境性の評価
- c. センサ・子機・親機の耐久性評価

③ センサ・子機設置に係る作業歩掛りの把握

(3) 2年間の実証実験の重要性

実橋梁環境で長期間継続して取得したセンサデータは希少であり、以下を把握するため、2年間の現場検証が必要であり、重要である。

- ① 温度変化の計測データへの影響把握
- ② 計測データにおけるノイズの把握
- ③ 自立発電量とセンサ・子機の消費電力との整合
- ④ 実際の現場環境での機器の耐久性検証

平成29・30年度 実証実験計画

実施項目	平成29年度				平成30年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
実験使用機器製造、センサシステム構築(NEC)	→							
機器評価(NEC)	→							
実橋データ収集(NEC)			→					
収集データ評価(NEC/首都高技術センター)				▲		▲		▲
統計分析(NEC)					→			

4. 事業化の見通し

地方自治体が管理する橋梁にモニタリングシステムを普及させるためには、道路管理者の予算制約及び技術者不足を考慮すれば、道路橋毎に単独システムを導入するのではなく、クラウド方式によりモニタリングシステムを導入し、橋梁の専門技術者により計測データを管理していくことが妥当である。

センサシステム運用会社がサーバに計測データを集約して解析し、結果をそれぞれの道路管理者に通知するクラウド方式が適当と考えられる。

センサシステムの設置対象となる15m以上の道路橋は約17万橋である。全国の点検結果から建設後30年以上を経過すると健全度「判定区分Ⅲ：早期措置段階」が増加する。クラウド方式のセンサシステムの事業化が課題解決に資する。

(1) 販売先・運用者の検討

クラウドシステムでのセンサシステムの業務は①センサシステムの設置計画及び解析業務、②センサシステムの設置工事、③センサシステムの運用(システム管理)、④計測データの統計分析業務に大別される。橋梁のセンサシステムの導入から管理までの事業者は、業務内容別に概ね以下となる。**モニタリングシステムの普及のためには、建設コンサルタント、センサメーカー及びクラウド事業者との連携が重要**である。

	業務内容	事業者	備考
1	センサシステムの設置計画及び解析業務(センサシステムの必要性の有無、設置する場合のセンサ種別・仕様、センサ配置、閾値設定)	建設コンサルタント	・定期点検業務と連携したセンサシステムの検討業務 ・モニタリング手法の標準化・高度化業務
2	センサシステムの設置工事	建設コンサルタント センサメーカー 通信機器メーカー	
3	センサシステムの運用(システム管理)	クラウド事業者	
4	計測データの統計分析業務(損傷進行性、閾値見直し)	クラウド事業者 建設コンサルタント	

(2) 地方自治体へのビジネスモデルの検討

道路橋センサシステムの運用管理はクラウド基盤で実施することが妥当であることから、センサシステム業務は「**センサシステム設置**」と「**センサシステム運用管理**」に区分して発注することが妥当である。「センサシステム運用管理」は**都道府県単位**で特定し、「センサシステム設置」は標準化し、仕様を統一して、**橋梁単位あるいは地区単位**(対象橋梁をまとめ)で発注することが妥当と考えられる。

地方自治体における「多様な入札契約方式」として「包括発注方式」があり、この適用が考えられる。

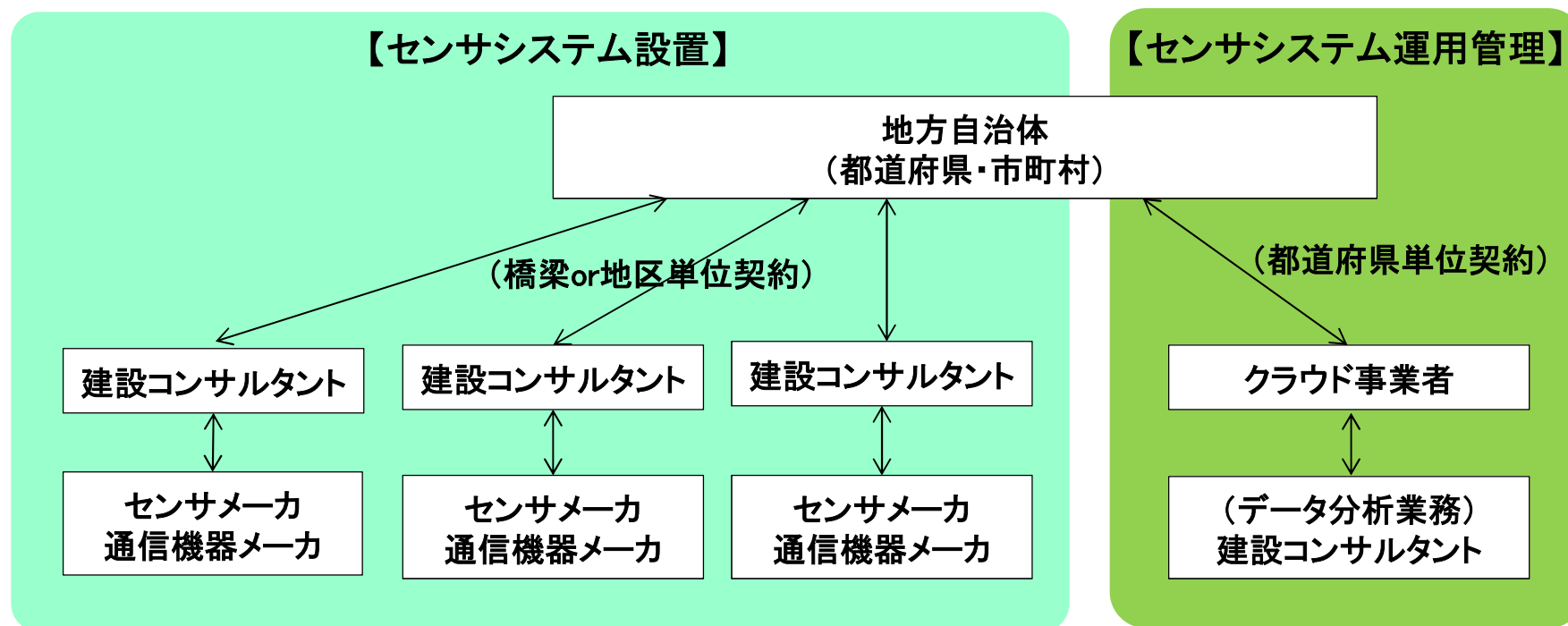


図 センサシステムの発注区分

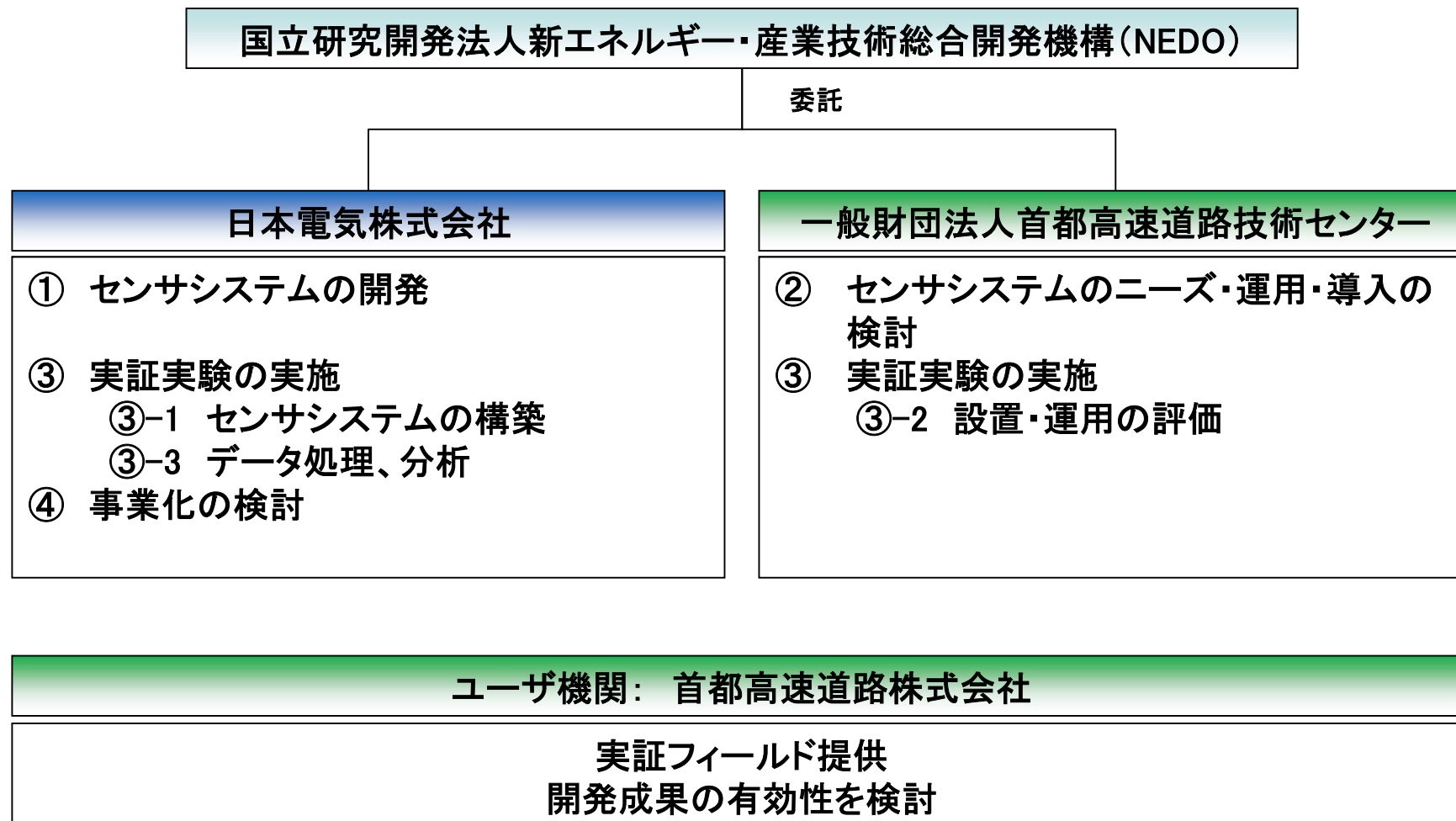
5. 成果の普及、知的財産等の 確保に向けた取り組み

(1) 成果の普及について

平成28年度下期(平成28年11月)にNEC主催の社外向け展示会で、開発中のセンサ端末を展示。

(2) 知的財産等の確保に向けた取り組み

開発中のセンサ端末等に関する特許を平成28年度末までに1件出願予定。



テーマ全体の方向性：開発概要：開発スケジュール(個々の研究開発テーマ)

実施項目	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度
実施項目①(NEC) 1. センサ端末の開発 1. センシング・無線機能 2. 自立発電 3. 筐体の開発 4. 変位センサの開発(H27年度～追加項目) 2. 無線NWの開発 1. ゲートウェイの検討 2. フィールド評価 3. 遠隔サーバ					
(実施項目①研究開発費) 190百万円	59百万円	71百万円	60百万円	—	—
実施項目②(首都高技術センター) 1. 要求仕様の整理 2. 損傷が構造特性に与える影響とセンサ計測項目、精度の検討 3. 最適なセンサ配置					
(実施項目②研究開発費) 12百万円	4百万円	4百万円	4百万円	—	—
実施項目③(NEC/首都高技術センター) 1. センサシステムの構築設置(NEC) 2. 設置・運用の評価(首都高技術センター) 3. データ処理、分析(NEC)					
実施項目④(NEC) 1. 事業化の検討					
(実施項目③④研究開発費) 68百万円	—	—	—	49百万円	19百万円

1-4. センサシステム設置優先度の高い橋梁・部位

橋梁のリスク発生確率の区分

- ・ リスクの定義を、発生確率と損傷事象発生による影響度(人身事故、通行規制の社会的影響)とのリスクマトリックスとする。
- ・ 道路橋の定期点検(近接目視により5年に1回)での健全度の診断区分が、橋梁の安全性のリスク発生確率と見なすことができる。

	健全度 診断区分	状態	リスク発生確率のランク
I	健全	構造物の機能に支障が生じていない状態。	—
II	予防保全段階	構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。	80年を超えても使用可能
III	早期措置段階	構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。	放置すると4~5年のうちに緊急の対応が必要となるか、致命的な状態になる損傷
IV	緊急措置段階	構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。	落橋のおそれがあり通行止め等の必要

【補足説明資料】 ユーザニーズの解決手段

(1) 道路橋の損傷事象とモニタリング項目・センサ種類

橋梁の通行規制までに至る「重大損傷」を対象にモニタリング項目・センサ種類を設定する。

項目	事象	モニタリング項目	主なセンサの種類
全体	鋼部材の腐食・疲労き裂、コンクリート部材の顕著なひび割れによる剛性の低下	外力(走行車両、地震)における振動特性、桁たわみ量の変化	加速度センサ 変位計 ひずみセンサ
鋼部材	主部材の腐食による板厚減少	表面性状 腐食環境	デジタルカメラ 腐食センサ
	主部材(主桁、鋼橋脚)の疲労き裂	き裂の進展	き裂センサ
コンクリート部材	主部材(桁)の顕著なひびわれ	ひびわれの進展	クラックゲージ ひずみセンサ AEセンサ
コンクリート床版	床版ひびわれ	ひびわれの進展	きれつ変位計 ひずみセンサ
支承部	支承部の腐食	変位機能の低下、路面段差、支持力低下	変位計 荷重計

【補足説明資料】 ユーザニーズの解決手段

(2) センサシステム現場適用の要件

国土交通省「社会インフラのモニタリング技術活用推進検討委員会(2013.10.18)資料5」において「モニタリング技術の現場適用にあたって備わらべき要件」7項目が示されている。開発において、この要件を達成する。

	現場適用要件	対応方針・解決手段
1	トータルコストの縮減・平準化の達成に見合ったコストで実現できること	単純桁橋を主な対象とし、標準化した無線センサシステム及びクラウド化により実現。
2	劣化損傷等の把握すべき事象に見合った精度・信頼性を有すること	重大損傷を対象に、橋梁の振動特性変化及び損傷部位へのセンサ配置により実現。
3	劣化メカニズム等の技術的な知見レベルに整合していること	数値解析モデルによる損傷と振動特性変化との関係分析により実現。
4	供用中の様々な環境下において性能を維持できること	雨、塵芥、振動などの環境下において取付方法を含めて10年以上の信頼性を確保。
5	社会インフラの寿命や点検サイクル等に見合った期間、性能を維持できること	橋梁定期点検5年間に合わせたシステム点検及び耐久性10年以上確保により実現。
6	大量の計測データ等を効率的に収集・処理・分析し、維持管理に活用できること	計測データをサーバ(クラウド基盤)に収集し、処理・分析することにより実現。
7	建設・供用開始後でも設置・データ取得が可能であること	無線センサシステム(通信距離30m以上)の採用により任意の箇所での新規・追加設置を実現。

開発するモニタリングシステムの運用方法と効果

(1) モニタリングシステムの設置対象

モニタリングシステムの設置対象となる15m以上の道路橋は約17万橋であり、管理者別の箇所数と延長を下表のとおりである。**地方自治体が管理する橋梁は、箇所数比で83%、延長比で60%を占める。**

	全国	高速自動車国道	有料道路	直轄国道	補助国道	都道府県道	市町村道
箇所数(橋)	174,400	12,000	2,400	16,000	14,000	37,000	93,000
比率%	100	7	1	9	8	21	53
延長(km)	11,700	2,000	1,000	1,700	1,000	2,400	3,600
比率%	100	17	8	14	9	21	31

(出典:国土交通省道路施設現況調査 平成23年4月1日現在)

(2) クラウド基盤のモニタリングシステム

地方自治体が管理する橋梁にモニタリングシステムを普及させるためには、道路管理者の予算制約及び技術者不足を考慮すれば、道路橋毎に単独システムを導入するのではなく、**クラウド基盤によりモニタリングシステムを導入し、橋梁の専門技術者により計測データを管理していくことが妥当である。**

モニタリングシステムを標準化し、センサシステム運用会社がサーバーに計測データを集約して解析し、結果をそれぞれの道路管理者に通知するクラウド方式が適当と考えられる。

開発するモニタリングシステムの運用方法と効果

本研究開発終了後2年以内(平成32年度中まで)に事業化を考えている。事業化には、定期点検と連携したセンサシステムが必要と考えている。開発中において、現場検証の機会を多く得て、センサシステムによる実環境でのデータ収集を重ね、損傷検知・進行把握の精度向上を図る。

事業化のため、技術開発と並行して道路橋の点検業務を実施しているコンサルタント事業者との協業関係を構築することを予定している。

コンサルタント事業者との協業は、①定期点検業務と連携したセンサシステム構築における協業と、②センサシステムの設置・運用における協業に区分される。

① 定期点検業務と連携したセンサシステム構築における役割

定期点検で損傷が検出された場合における、劣化進行を把握するためのセンサシステムの必要性の有無、設置する場合のセンサ種別・仕様、センサ配置、閾値設定の業務もしくは技術支援。

② センサシステムの設置・運用における役割

センサシステムの適切な維持管理、コスト低減のためには、道路橋毎の単独システムではなく、クラウド基盤によるシステム構築が望ましい。このためにはセンサシステムの標準化、計測データの分析手法の標準化、閾値設定手法の標準化が必要となる。このような標準化の業務もしくは技術支援。

【補足説明資料】 開発するモニタリングシステムの運用方法と効果

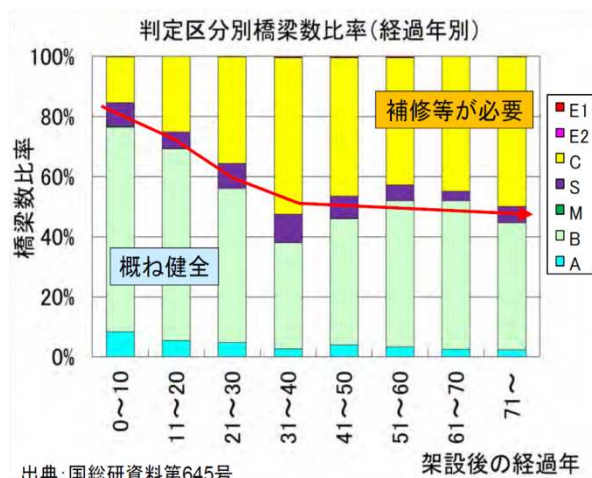
橋梁のセンサシステムの事業規模を平成36年で440億円(ハード、ソフト)と推定

国土交通省国総研資料第645号によれば、国土交通省直轄道路の経過年数31年から40年で、補修等が必要な橋梁が増加し、その後は横ばいとなっている。

健全度判定区分での「Ⅲ早期措置段階(放置すると(4~5年のうちに)致命的な状態になる損傷)」の橋梁をセンサシステム設置対象橋梁と想定し、これを「橋長15m以上の橋梁で建設から50年を経過した橋梁」と想定する。

上記に該当する橋梁数を現状(平成26年)、プロジェクト期間終了時点(平成31年)及びプロジェクト期間終了後5年後(平成36年)について算定し、各年の設置率を平成26年0%、平成31年20%、平成36年40%を目標設定する。

1橋当たりの機器費用を100万円、設置・運用のための検討費用を100万円の計200万円(工事費を含まない)とすると、平成36年に440億円の市場規模となる。



	15m以上 50年経過橋梁数	センサシステム 設置橋梁数	市場規模
現状(平成25年度末)	約21,000橋	-	-
プロジェクト期間 終了時点(平成31年)	約34,000橋	6,800橋	13,600百万円
プロジェクト期間 終了後5年後(平成36年)	約55,000橋	22,000橋	44,000百万円

研究開発項目②:

イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

本研究開発は、平成28年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

(1) イメージング技術開発

- 完全自動により画像データから0.2mm以上のひび割れ等を8割以上の確率で判別できる画像処理技術を開発し、実証する。
- 撮影時の位置ずれを補正でき、平面のみならず、奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法を開発し、実証する。なお、1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。

(2) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

- (1)で開発したイメージング技術を用いて、インフラ状態をモニタリングするシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する

②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発【まとめ】

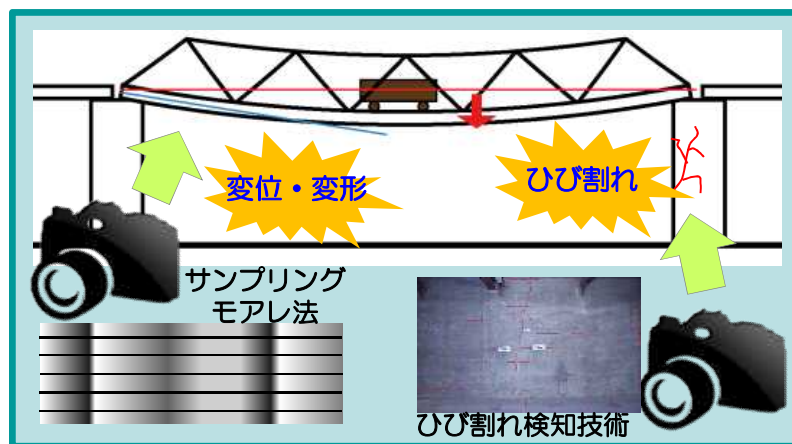
目標及び研究開発の概要

<基本計画>

完全自動により取得データからひび割れ等を判別できるデータ処理手法、撮影時の位置ずれを補正でき平面のみならず、奥行き(3D)もわかる画像解析手法を開発し、実証実験を行う。

■コンクリート等のひび割れについて、その定量的把握および経過観察を精密かつ効率的に行うため、自動検出技術およびモニタリングシステムを開発する。

■インフラ構造物の変位について、簡易かつ高精度に計測可能な、位相解析手法を用いた画像計測システムを開発する。



研究開発の成果

■ひび割れ検出精度は、最終目標値80%を達成する見込み(機械学習の効果)
事業者19機関に対しニーズをヒヤリングし、開発システムの仕様の一部反映
開発中の解析ソフトをクラウド上に設置し、性能や動作を確認済み

■構造物の変位を簡易に計測するシステムが一通り完成する見込み
プロトタイプシステムによる実環境計測に着手し、実用に即したユーザーニーズをシステムに組み込み中(超横長カメラ、格子パターンなし計測、時刻同期撮影システム)

実用化・事業化に向けた見通し・取り組み

- 現行の点検要領にかわる新たな点検ワークフローを確立し、首都高の点検に導入した後、各地方公共団体や海外に展開する。
- 国内外において、変位計測に関する点検規格の採用を狙い、JR西の鉄道橋りょうをはじめ、道路橋やトンネル等の一般土木構造物全般に本システムを普及させる。

① センサシステム

	H26	H27	H28	計
特許出願(うち外国出願)	1	13 (1)	6	20件
学会発表・講演	6	46	12	64件
論文	0	3	3	6件
新聞・雑誌等への掲載	4	0	3	7件
展示会への出展	3	15	2	20件

② イメージング

	H26	H27	H28	計
特許出願(うち外国出願)	0	1	1	2件
学会発表・講演	7	17	6	30件
論文	1	1	0	2件
新聞・雑誌等への掲載	1	1	1	3件
展示会への出展	4	5	3	12件

※平成28年度8月末現在

**NEDOインフラ維持管理・更新等の
社会課題対応システム開発プロジェクト**

**②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発
道路構造物ひび割れモニタリングシステムの研究開発**

委託先:

首都高技術株式会社

国立大学法人東北大学

独立行政法人産業技術総合研究所

再委託先:

アダコテック株式会社

研究開発の背景

道路構造物の高齢化 ⇒ 損傷の増加



利用者(道路構造物)の安全を確保することができなくなる



適切な維持管理手法が重要



正確な診断、記録が大切



時間も費用もかかる + 人の手では限界



イメージング技術を用いたインフラ構造物のモニタリングで可能

基本計画を実現するための手段

基本計画

○イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

本研究開発は、2016年度末までに概ねの研究開発を終了することを中間目標とし、以降は、実証実験を中心に実施する。

(1) イメージング技術開発

① 完全自動により画像データから0.2mm以上のひび割れ等を8割以上の確率で判別できる画像処理手法を開発し、実証する。

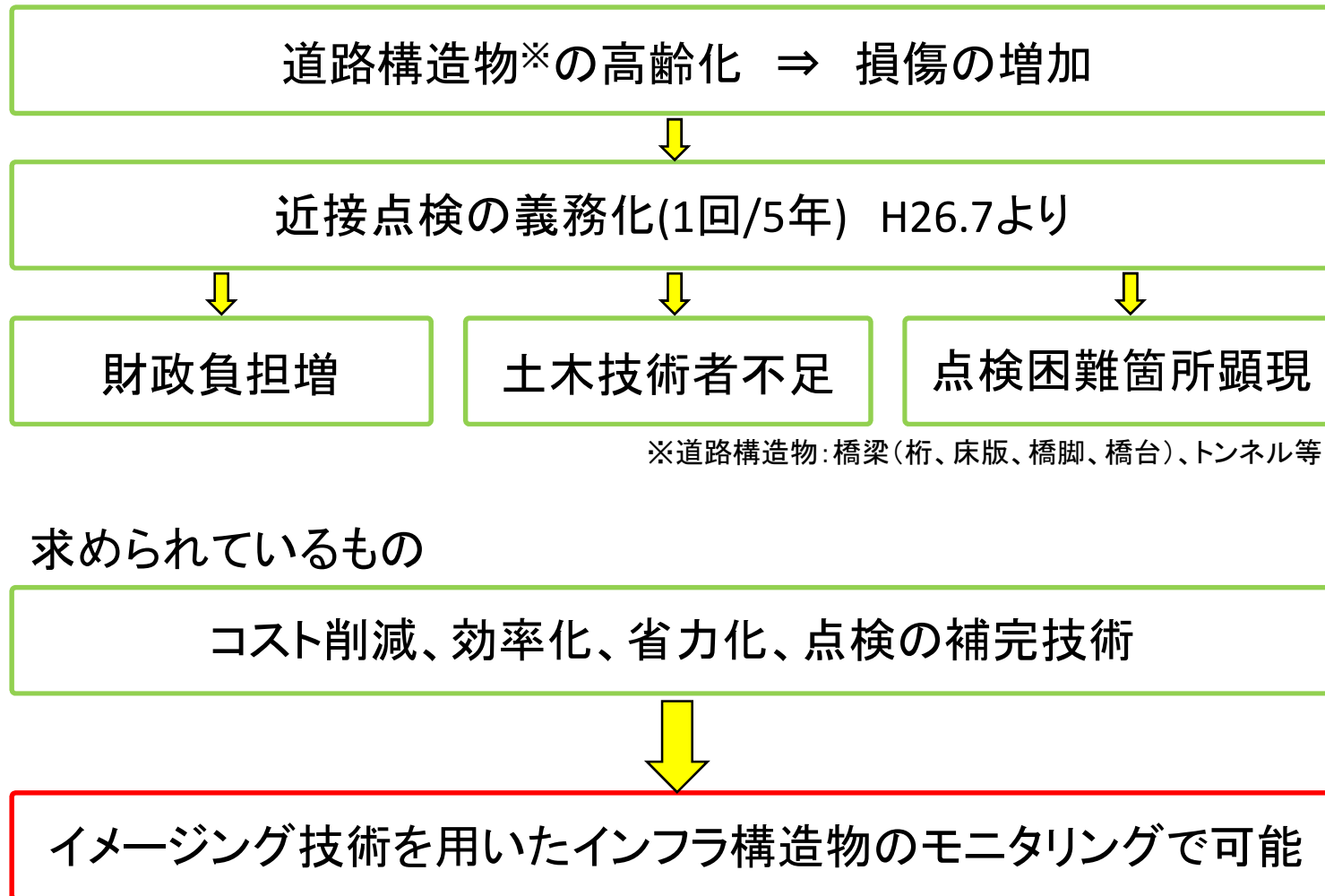
(2) イメージング技術を用いたモニタリングシステムの実証実験

(1)で開発したイメージング技術を用いて、インフラ状態をモニタリングするシステムを構築するとともに、インフラの実環境下で適用できるシステムを開発する。

実現手段

首都高技術が道路インフラの構造物および試験体を用いた**撮影**および**実験**を通じ、**産総研**のもつ**画像解析技術**および**異常検出技術**、**合成処理技術**、**東北大学**のもつ**コンクリート構造物の耐久性の調査解析**および**維持管理技術**をコア技術として、持続的に実運用可能なひび割れモニタリングシステムと、この利用を想定した業務モデル(指針、マニュアル)、ツールを開発し、実用化する。

道路構造物の維持管理に関する課題



開発概要

開発内容

コンクリートひび割れの定量的把握
経過観察を支援するひび割れ自動検出技術
モニタリングシステムの開発

技術シーズ

首都高技術

首都高・各地公体等
Co構造物の
ひび割れ損傷撮影

東北大

コンクリート構造物の
調査解析および
維持管理技術

産総研

画像解析技術、
異常検出技術および
合成処理技術

成果

実運用可能なひび割れモニタリングシステムの開発

事業化

事業化により得られる効果

点検効率化

点検受託事業の拡大

詳細調査事業

開発項目と研究開発体制

プロジェクト役割分担表

	首都高技術	東北大学	産総研
①ひび割れ自動検出技術の開発			○
②ひび割れデータの採取と 模擬試験体作成	○	○	
③パノラマ合成技術の開発			○
④経年モニタリング技術の開発	○		○
⑤モニタリングシステムの開発性能 評価および判別性能の高精度化	○	○	○
⑥モニタリングシステムを用いた点検 ワークフローの開発、実証評価	○	○	○

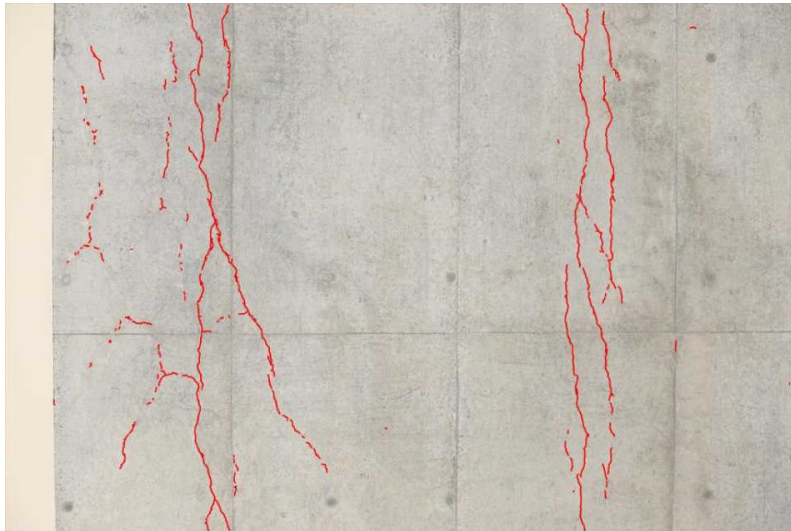
これまでの研究開発状況①

①ひび割れ自動検出技術の開発【達成度：100%】

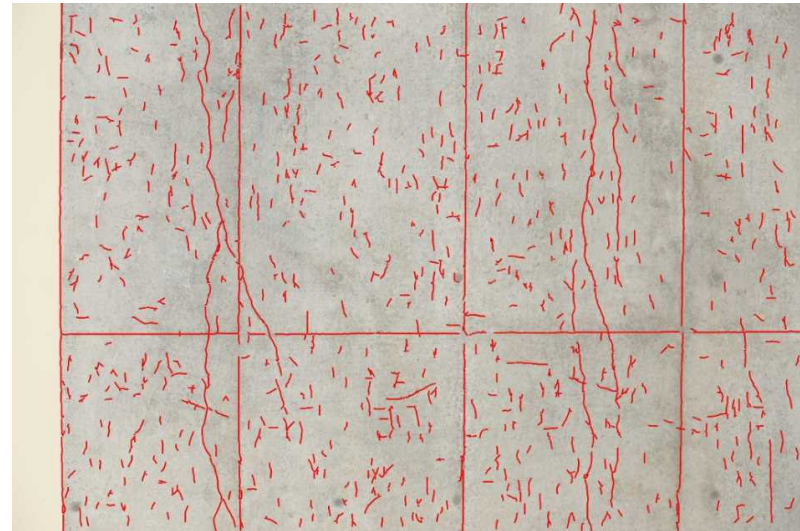
【最終年度】道路構造物のデータ10万件に対し、幅0.2mm以上のひび割れを80%以上の確率で検出する

【28年度中間】**検出精度81.07%、処理速度20.6秒／枚**

開発中のプログラム



市販のひび割れ検出ソフト

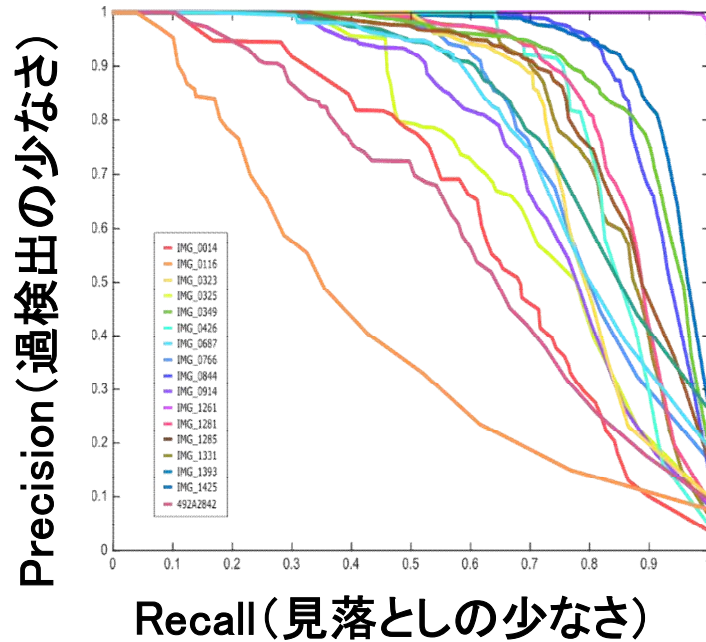


開発システムのデモ

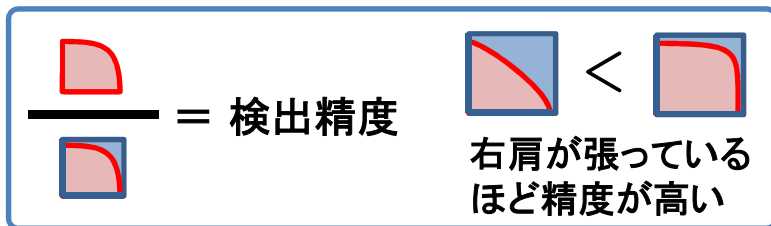
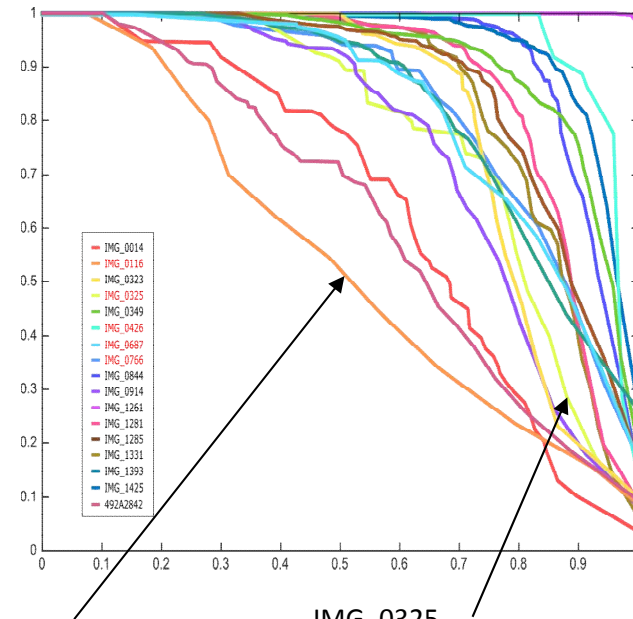


開発技術に関する検出精度向上具合

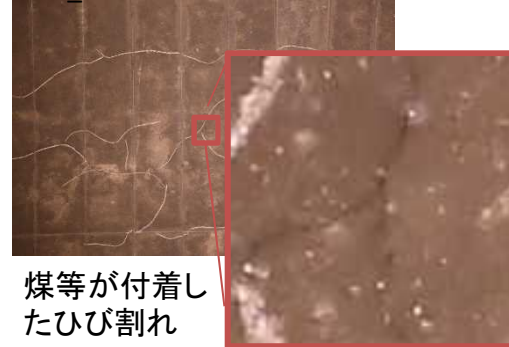
昨年度(検出精度79.10%)



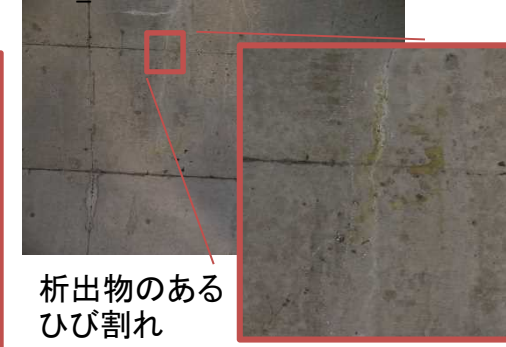
本年度(検出精度81.07%)



IMG 0116



IMG 0325

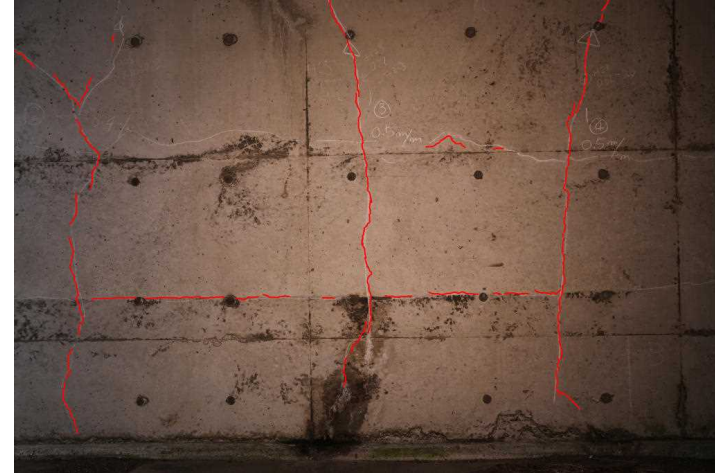


検出結果事例：トンネル

元画像



点検者(タグ付)



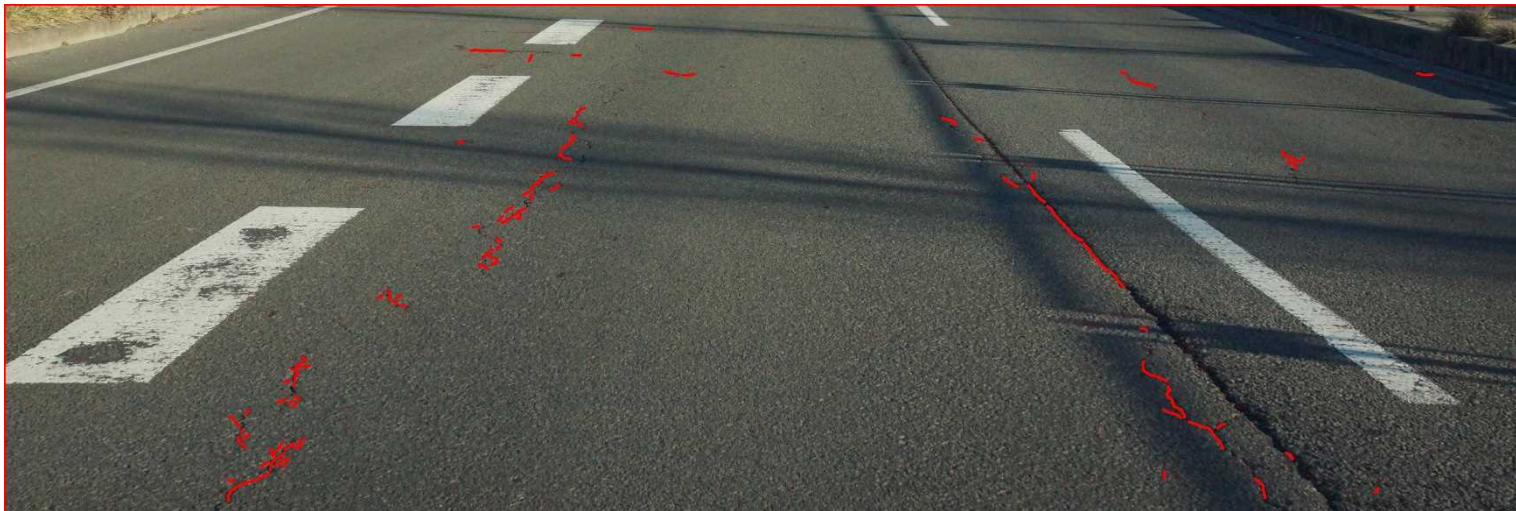
開発技術



市販ソフト



検出結果事例：道路面



これまでの研究開発状況②

②ひび割れデータの採取と模擬試験【達成度：70%】

【最終年度】中間目標の1,000枚に加え、さらに2,000枚のひび割れ画像を採取してタグ付けする

【28年度中間】約4,000枚採取し、約700枚をタグ付け



塩害



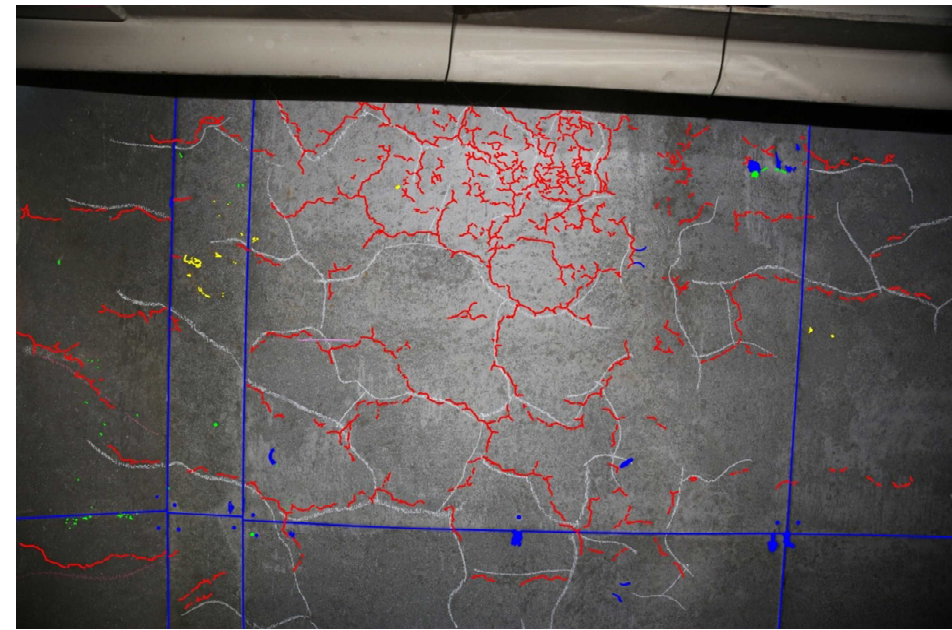
凍害



アル骨



コンクリート舗装ひび割れ



タグ付け写真

各種コンクリートひび割れ損傷写真

これまでの研究開発状況③

③パノラマ合成技術の開発【達成度：90%】

【最終年度】対象構造物140m²を撮影した断片画像を1分以内でパノラマ合成する

【28年度中間】特徴の少ない**コンクリート表面でも特徴をとらえる特徴抽出技術**を開発
近距離撮影画像に適用可能な合成技術を開発中

特徴の乏しいコンクリート表面への対策

断片画像

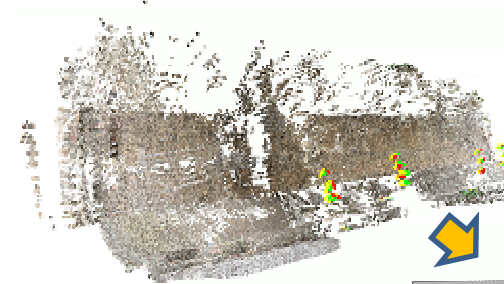


コンクリート表面から
でも多数の特徴点を
検出する特徴抽出法

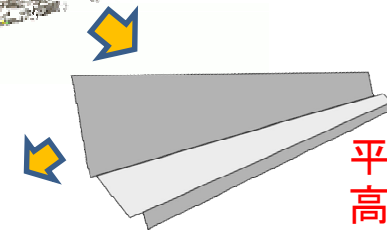
高精細パノラマ画像



立体の近距離撮影による歪みへの対策



同じ断片画像から
カメラ位置を推定
し、立体復元

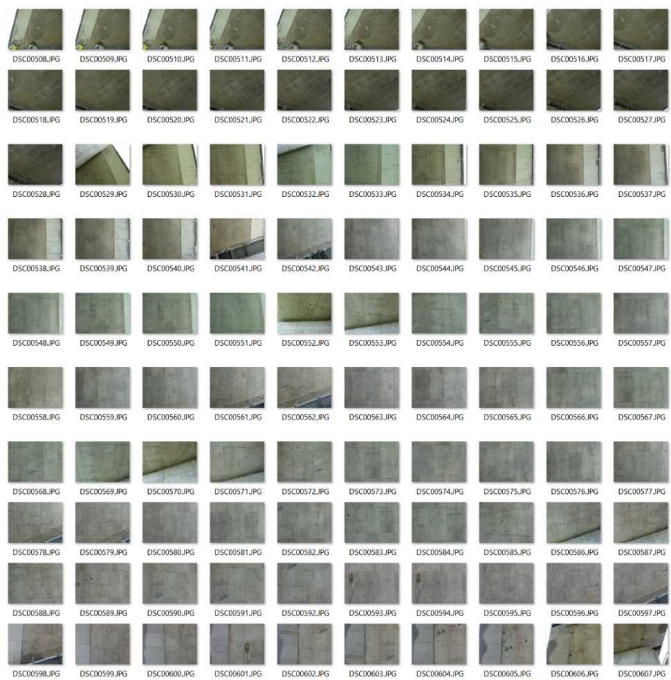


平面部分を
高精度推定

歪みのない
パノラマ合成画像

特定した面に合わせて
点検画像を合成

パノラマ合成結果例：床版



約4分



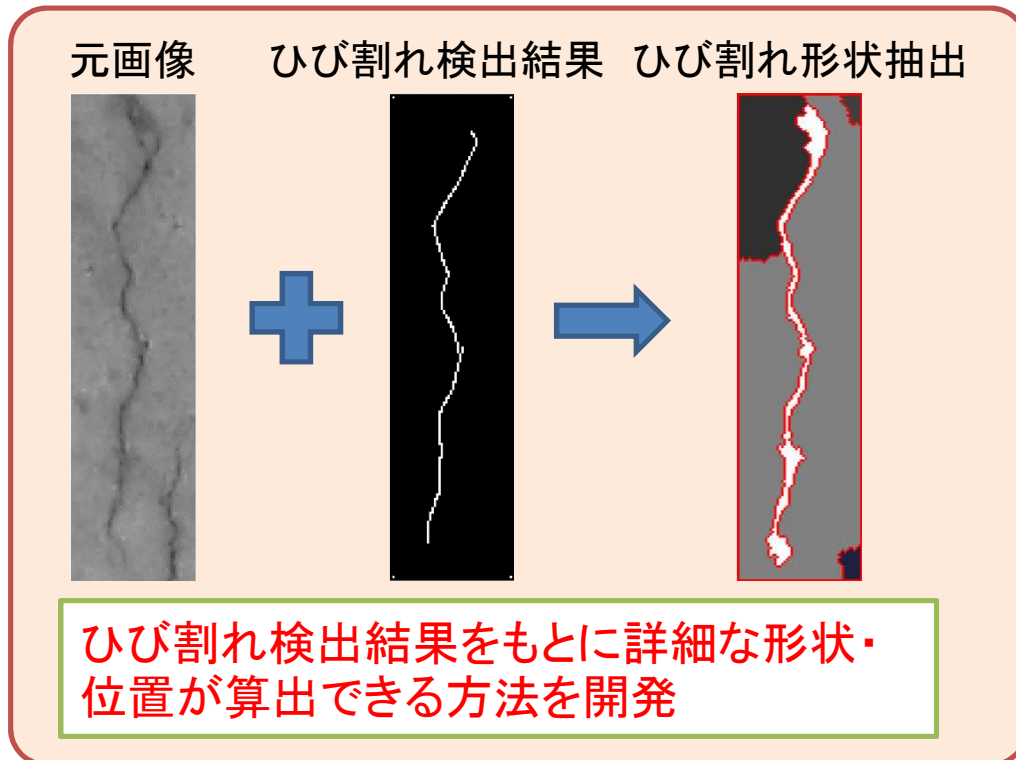
4864x3648サイズ 100枚

これまでの研究開発状況④

④経年変化モニタリング技術の開発【達成度:80%】

【最終年度】ひび割れ形状の差分抽出技術及び重ね機能を開発し、約1,000サンプルを用いた場合の誤り率0%とする

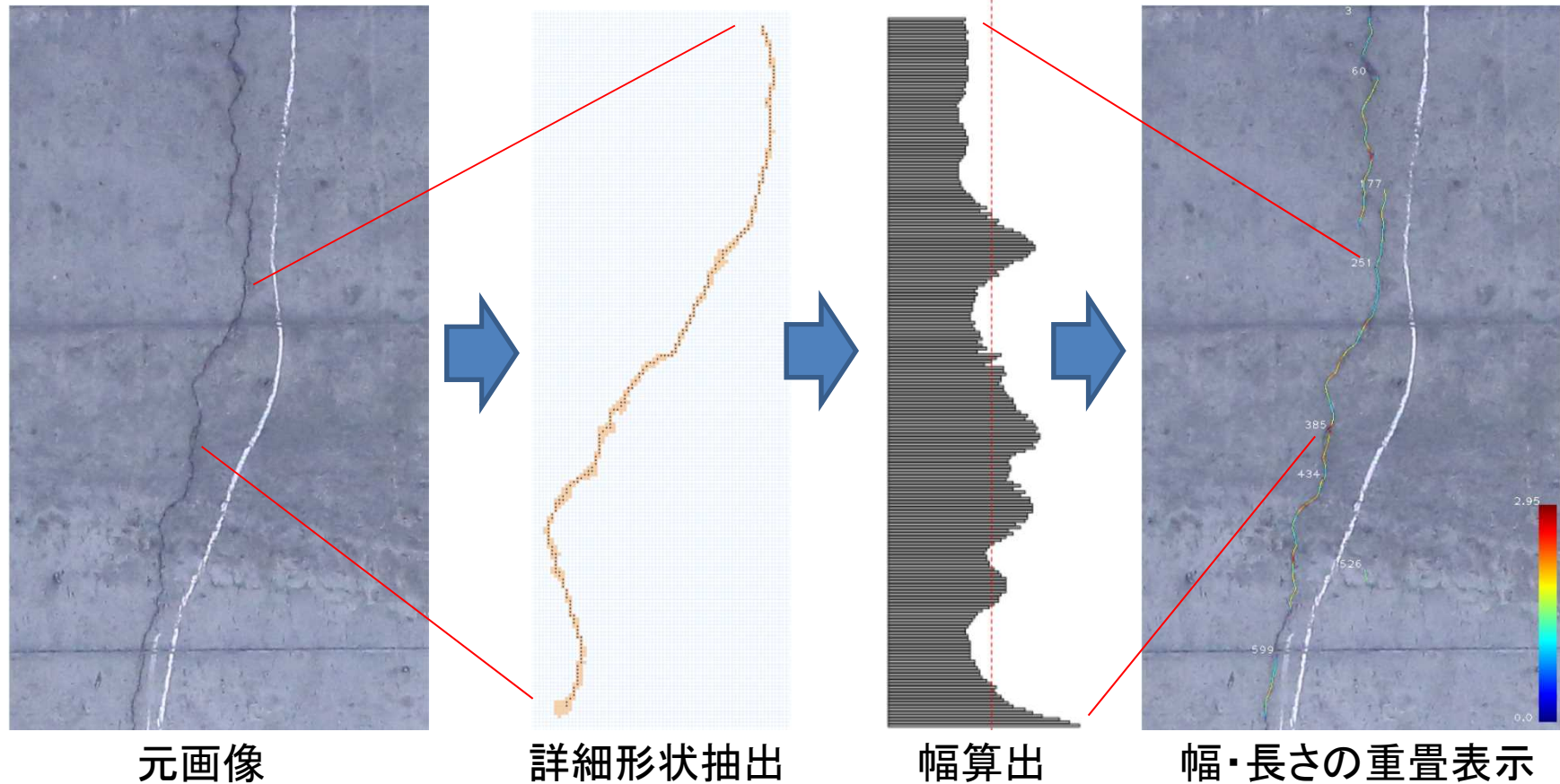
【28年度中間】詳細な形状および寸法を算出する技術を開発し、対応部分を自動検出して位置合わせする技術を開発



ひび割れ幅を調整し供試体による位置合わせ試験
(年度内実施予定)



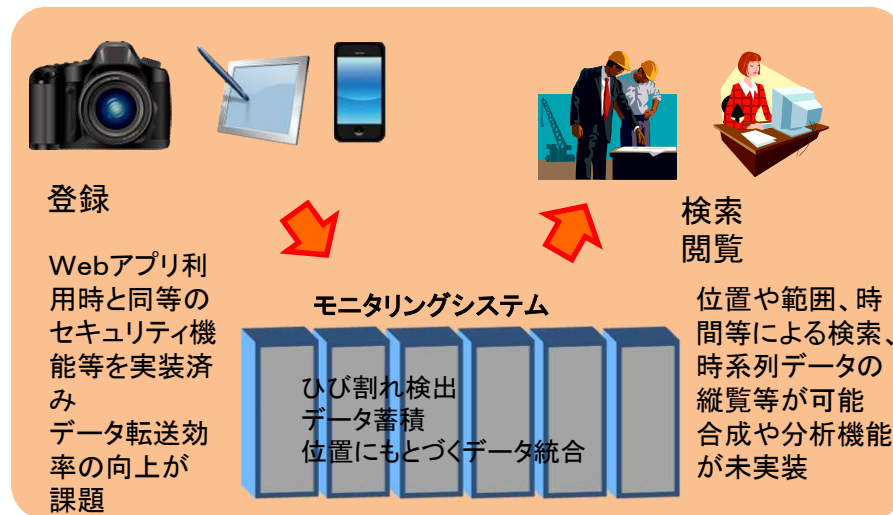
詳細形状・寸法算出の出力例



これまでの研究開発状況⑤

⑤モニタリングシステムの開発、性能評価および判別性能の高精度化【達成度:95%】
【最終年度】耐故障性や負荷分散機能を向上させる改良等を行い、事業適用を
想定した形態で実証評価し、信頼性の高いモニタリングシステムとする。

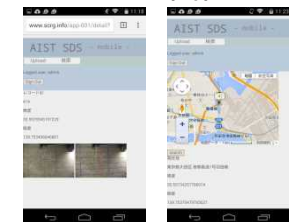
【28年度中間】ひび割れ自動検出機能を実装し、評価中
データの登録・検索・閲覧機能を実装し、試験稼働中
可視化ツールの開発⇒再委託先での開発
損傷図等の自動生成機能⇒CADデータ(ベクトルデータ)生成機能は開発



PC画面



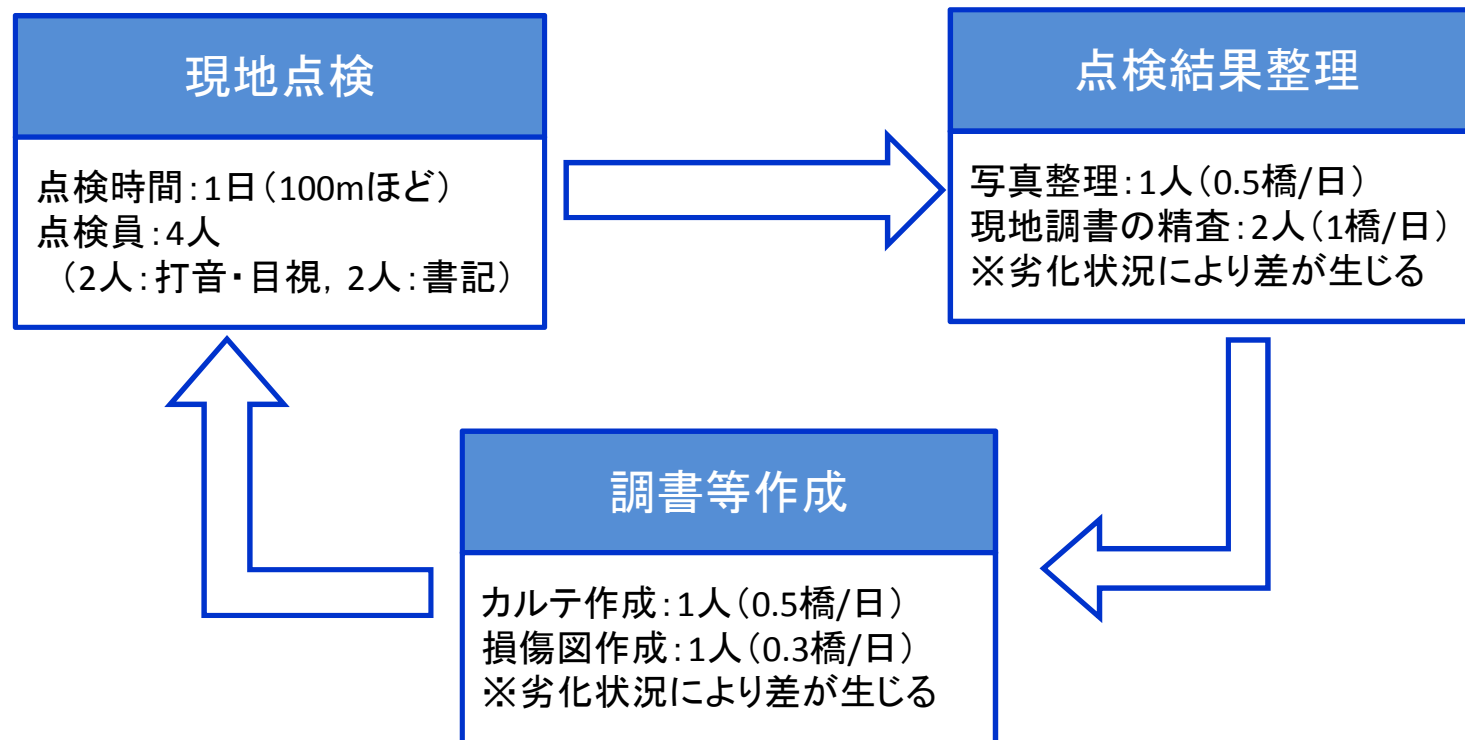
スマホ画面



使用デバイスや用途に応じた操作体系を構築済み

これまでの研究開発状況⑥

- ⑥モニタリングシステムを用いた点検ワークフローの開発、実証評価【達成度:50%】
【最終年度】点検作業に関する工程において新たなモニタリングシステムの利用を
想定した業務モデル、ツールの設計・試作
【28年度中間】従来の点検ワークフローの整理・比較・検証



ユーザーニーズの適合性

(ヒアリングの実施)

事業者へのヒアリング

開発システムの汎用性を向上させるためヒアリングを実施
(○発注者 ○コンサル業者 ○点検業者 計19者)

代表的なコメント

ひび割れの伸展の有無、ひび割れ密度が出せるとよい

検出精度80%あれば実用的である

一般的に使用するカメラは防水コンデジである

撮影距離や角度はどの程度まで可能なのか、検証して欲しい

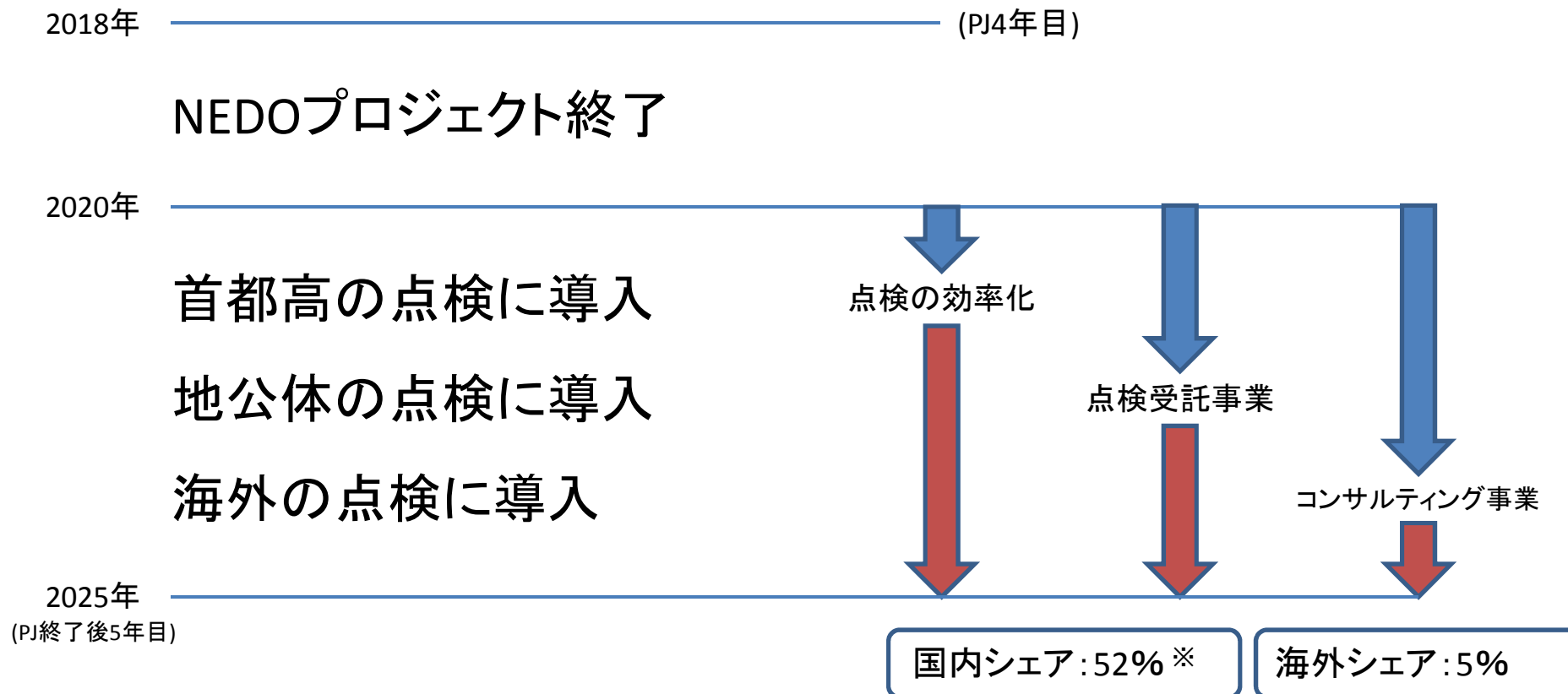
対象面に対して、撮り漏らし防止機能があるとよい

CADへの出力ができるものがよい

遊離石灰や角欠けが抽出できるとよい

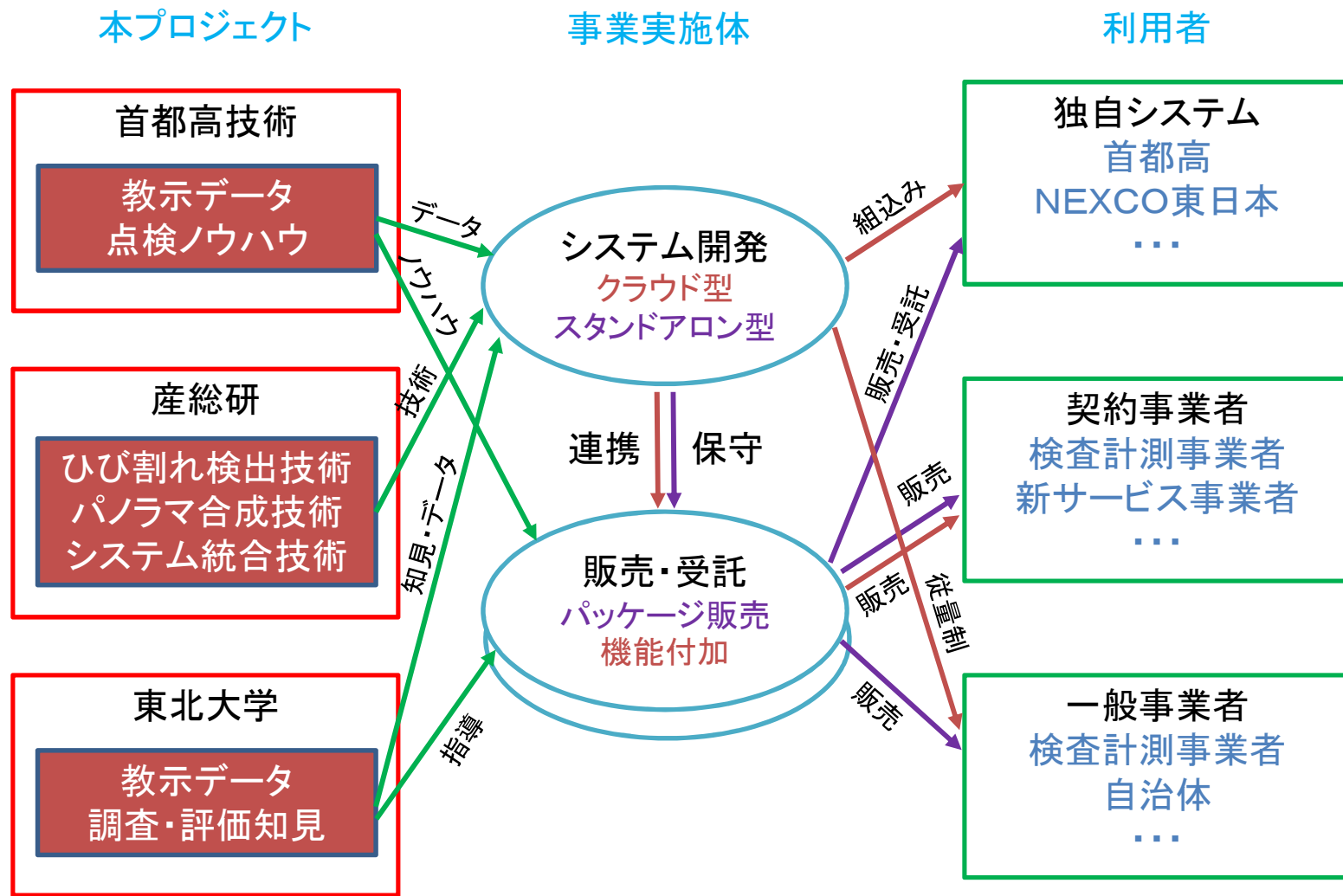
実用化へのシナリオ

実証実験



※非破壊検査協会加盟会社(点検会社と想定)【50%】、首都高速道路【2%】

事業イメージ



成果の普及、知的財産等の確保に向けた取り組み

○対外発表状況

・学会発表

2015年 土木学会東北支部 技術研究発表会

平成27年度土木学会全国大会 第70回年次学術講演会

平成28年度土木学会全国大会 第71回年次学術講演会

SSII2016 第22回画像センシングシンポジウム

IWAIT2017 高度画像処理技術に関する国際ワークショップ(採択通知)

・展示会

2015.11.25-26 ハイウェイテクノフェア2015

2016.6.1-2 EE東北'16

2017.11.1-2 ハイウェイテクノフェア2016

・HP <http://www.mihari.net>

○知的財産権出願状況

標題 : 「損傷抽出システム」

出願年月日: 2016年3月17日

受付番号 : 特願2016-054447

出願人 : 首都高技術(株)、東北大学、産業技術総合研究所



NEDOインフラ維持管理・更新等の社会課題対応システム開発プロジェクト

②イメージング技術を用いたインフラ状態モニタリングシステム開発

(位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発)

**(委託先:ジェイアール西日本コンサルタンツ株式会社, 株式会社共和電業,
4Dセンサー株式会社, 国立大学法人福井大学)**

インフラ構造物の安全を維持し，さらに長寿命化を行うためには，検査を効率よく行う技術の開発が不可欠である。

これまでの研究開発実績

- サンプリングモアレ法の開発
- ・ 鉄道橋のリアルタイム変位計測
 - ・ 遠隔からのビルや斜面の変形計測
 - ・ たわみ角算出のアルゴリズム
 - ・ 三次元変位計測手法など

本提案：

1. 奥行きも含めた三次元変位計測手法の開発
2. 変位・ひずみ・応力解析アルゴリズムの開発
3. 新しい撮像システムの開発

実績を活用して，新規技術へ発展させる

新規研究開発

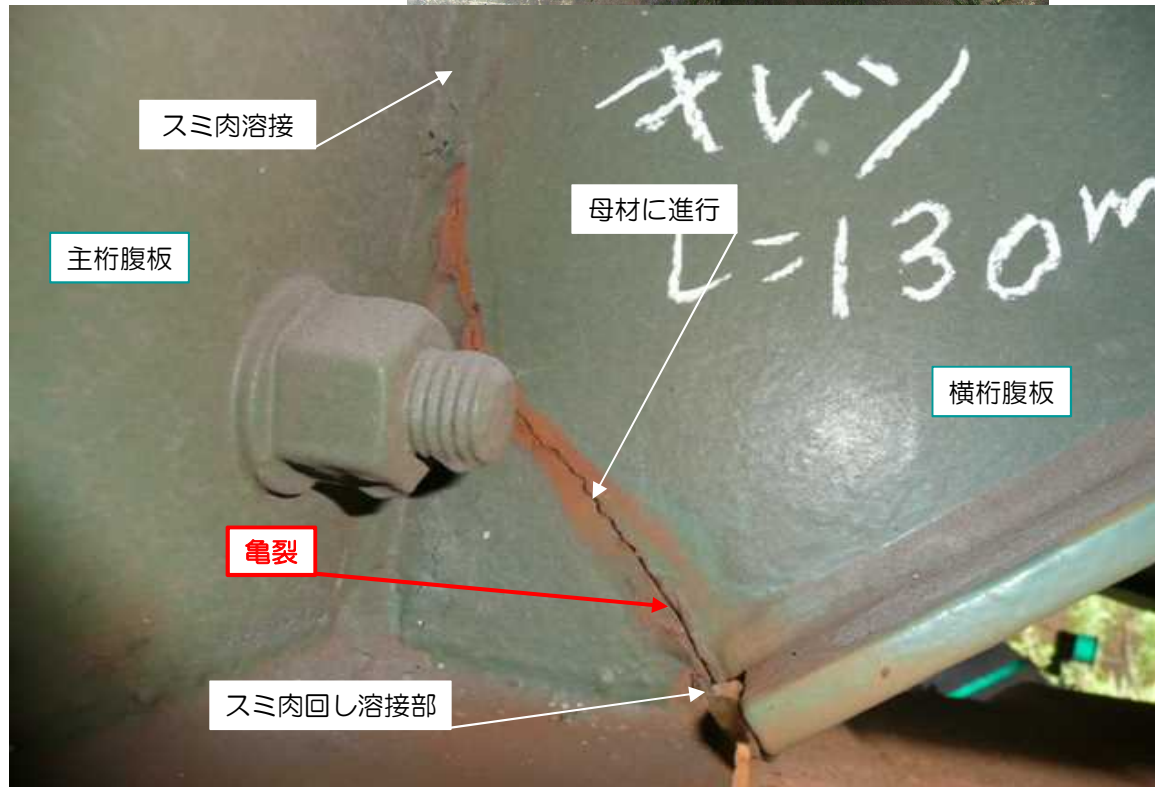
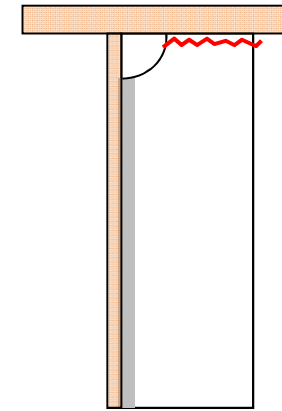
1. 対象物表面のパターンの利用
2. 三次元変位計測手法
3. 診断アルゴリズムの開発
4. 特殊カメラの試作
5. 実用的なソフトの開発

実証
試験

試作・
改良

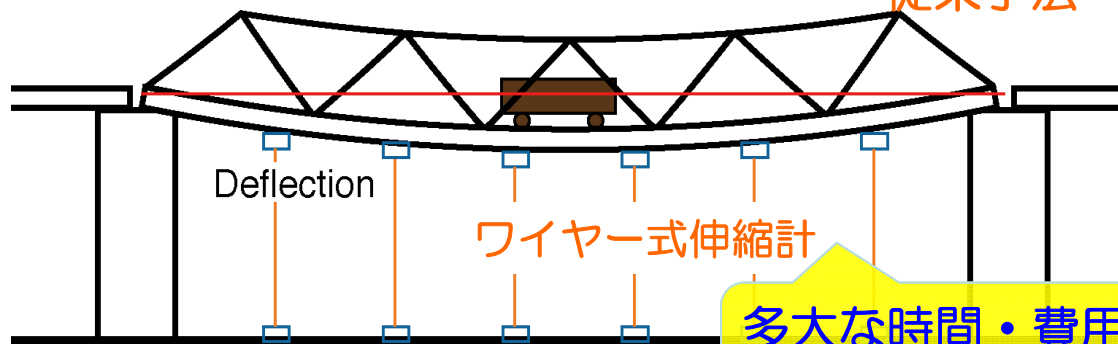
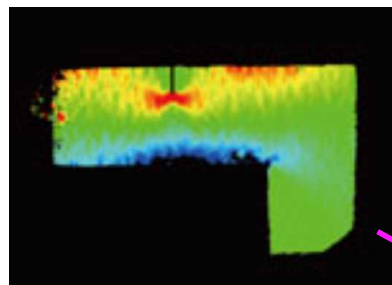
製品化
標準化・規格
化

橋りょう，トンネル，道路，プラント，鉄塔，ダムなどのインフラ構造物の検査に適用する。



応力集中や疲労等による亀裂が現実に発生している

従来手法



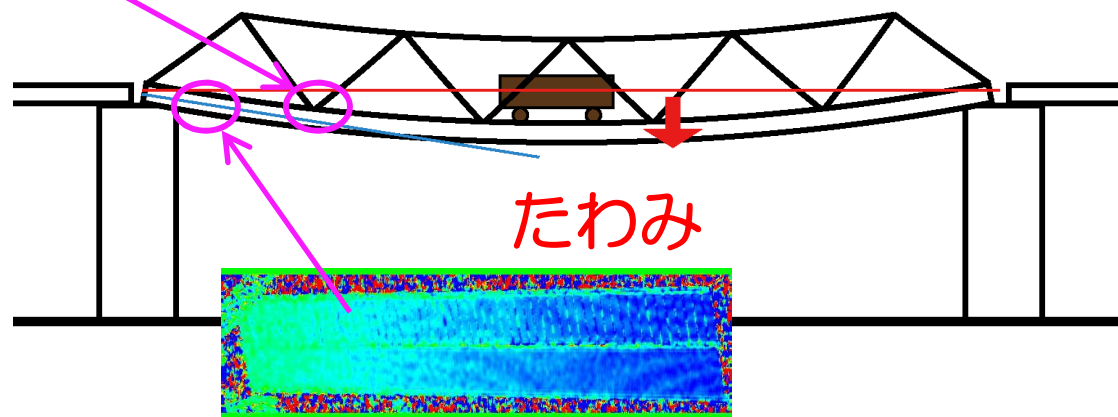
多大な時間・費用が必要

★ひずみ分布

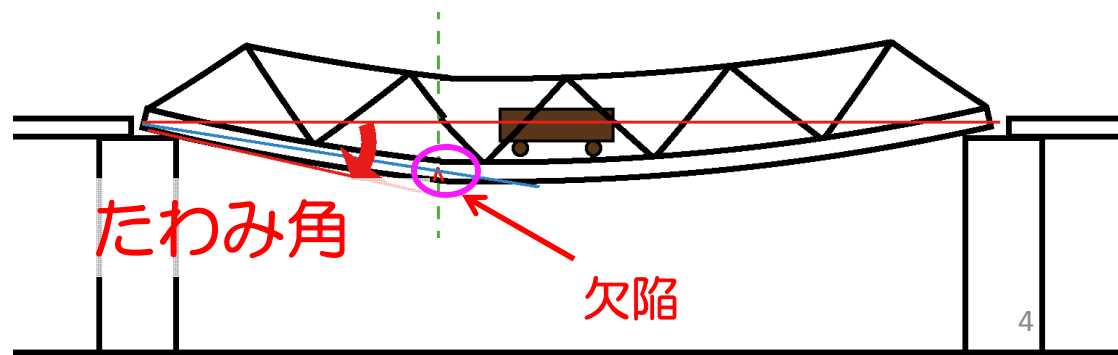
ひずみ分布からクラックの有無を見つける。

★たわみ・たわみ角

広い範囲で構造部材の欠陥を見つけるのに有効



遠くからカメラで撮影するだけで計測できれば、非常に効率が良い。



本テーマが対象とする社会課題(1)

鉄道橋梁

土木構造物の経年が進展
・補修対象構造物の**急増**



構造物の健全度評価による
適正な時期の対策実施が肝要

・**熟練検査技術者の不足**
・鉄道の運休は社会的影響大
⇒運休が困難なため、補修等に
相当な期間・費用を要す



効率的な検査手法のニーズ

	課題	現 状
①	対象数量	経年60年超えが全体の約40% 高度成長期構築の鉄道橋が約30%
②	安全性	高所作業対応を要す
③	作業性	支点部 狭隘・高所・耐震補強等による 後付施設による阻害
		径間部 道路・河川等支障回避への対応を 要す
④	技術者 ・技術力	橋梁技術者はH14→H18で 約70%に減少
⑤	計測精度	橋りょうの支点部は変位が微細で その挙動を定量的に評価する
⑥	評価手法	手法・指標が存在しない

一般土木構造物

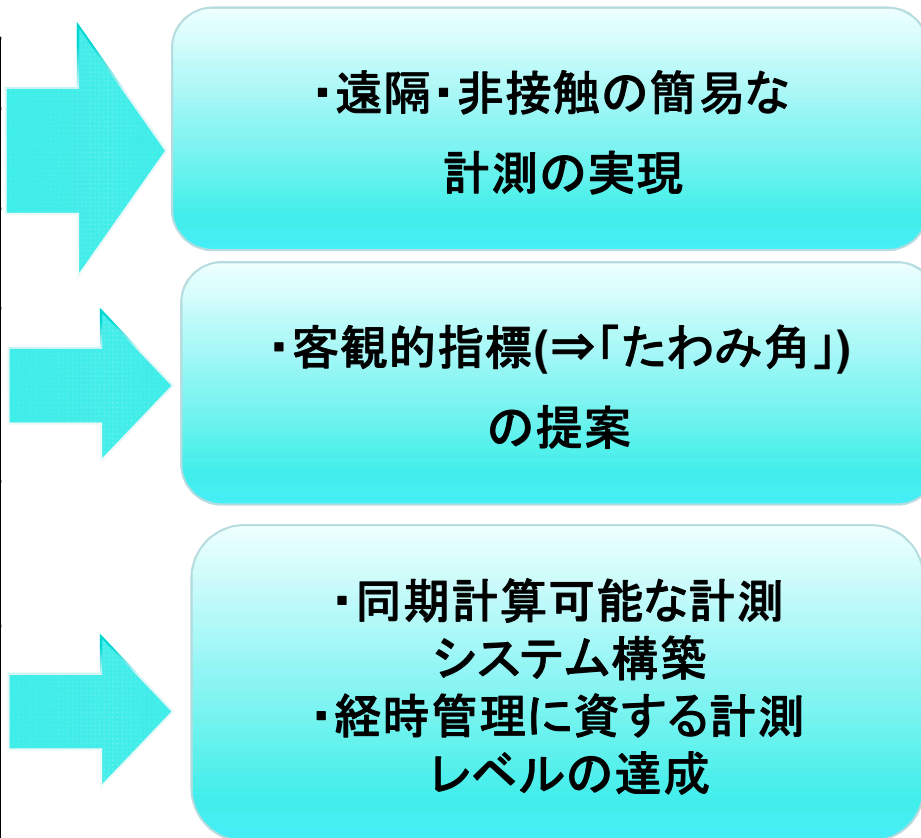
- ・現状、どのような状態にあるのか
- ・どうすることが求められているのか
- ・どのような課題があるのか

橋梁・トンネル構造等・・・老朽化構造物の増大
診断，長寿命対策必須
定期診断費用の低減，効果的な点検手法

本テーマが対象とする社会課題(2)

鉄道橋梁

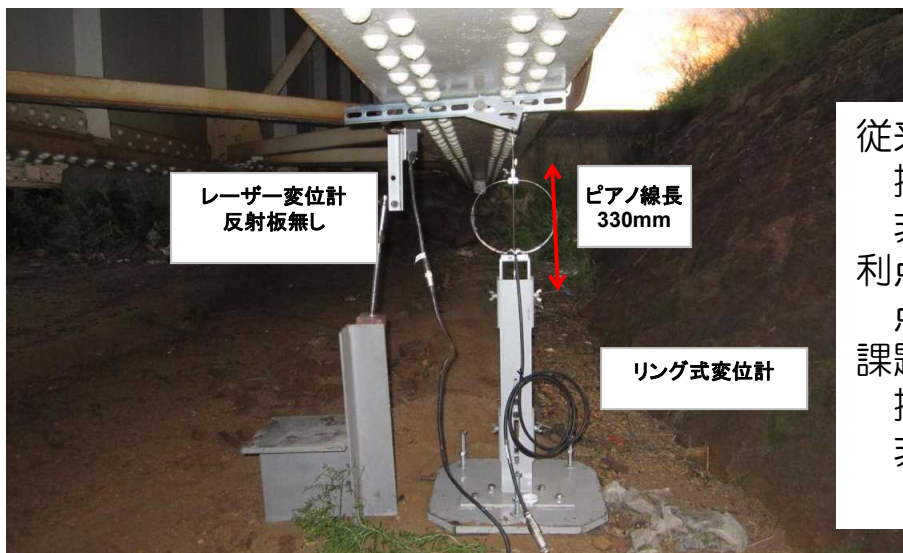
課題		ニーズ
対象数量		簡易な計測手法
安全性		非接触式
作業性	支点部	遠隔・非接触の検査手法の構築
	径間部	
技術者・技術力		経験が少ない技術者でも評価可能な客観的指標の提案
計測精度		経時管理に資する計測精度
評価手法		橋りょう支点部等の経時変化評価手法の確立



従来手法の課題

鉄道橋梁

	従来法	課題
変位	変位計 (レーザー式・ワイヤ式)	・河川や道路等の支障物が存在する径間部直下は、概ね機器の設置が困難 ・機器設置箇所から桁下までの距離が長い場合は計測精度が低い
たわみ角	2台の変位計 (近似値)	2台の計器の動機付けが必要で、高所の橋りょう部に機器を設置する労力が大きい
振動数	振動センサー	高所の橋りょう部に機器を設置する労力が大きい



一般土木構造物

従来

- 接触型・・・変位計，加速度センサ，ひずみゲージ等
- 非接触型・・・レーザー変位計，ドップラー式，画像処理

利点

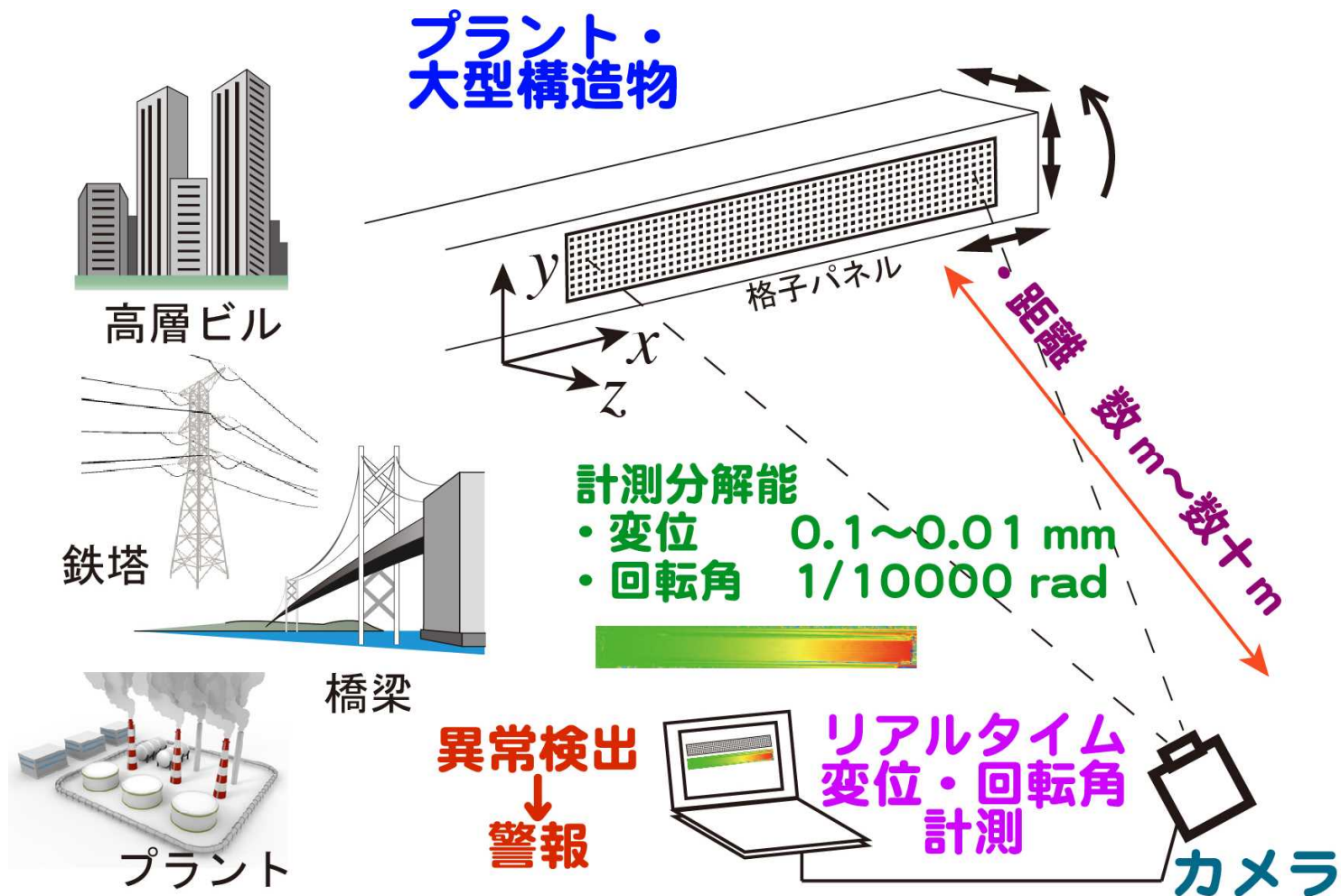
点検手法が認知・確立している

課題

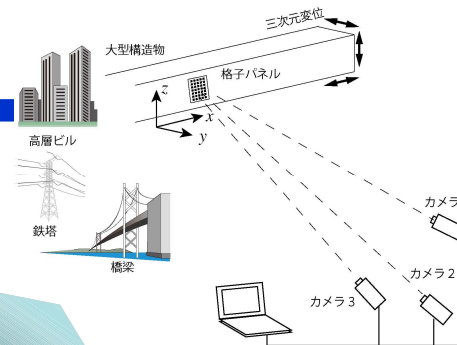
- 接触型・・・センサ類および取付工事費用などの費用減
- 非接触型・・・多点計測，固定点距離の長大

サンプリングモアレ法

- ・格子パターンの位相解析を行う
- ・遠隔からでも精度よく、変位や回転角が計測できる



体制・役割分担



インフラの 検査体系 構築

ユーザー企業
(グループ企業)

鉄道橋梁, 道路橋,
トンネル, 鉄塔,
ダム, ビル, プラ
ントなど

- ・サンプリングモアレカメラによる変位計測システムの開発
- ・アルゴリズムの開発
- ・橋梁用計測システムの開発
- ・実証試験

- ・評価・改善
- ・ニーズの抽出
- ・システム提案
- ・実用化の推進

- ・全体取りまとめ
- ・特殊ハード開発
- ・計測手法の開発
- ・標準化, 規格化

ジェイアール西日本
コンサルタンツ
鉄道橋梁用
評価・ニーズ抽出

福井大学・
和歌山大学 (H27まで)
計測手法の開発

協力
メーカー

ハード開発
解析アルゴリズム開発
(分布情報, 欠陥検出, 異常
検出・・・)

- ・アルゴリズムの開発
- ・アルゴリズム評価試験用計測システムの開発
- ・実証試験
- ・標準化, 規格化

実橋や土木建造物
での評価実験

試作・改良
試作装置

4Dセンサー
システム開発

ソフト・解析
アルゴリズム

メーカー企業

共和電業
一般土木用
システム開発
評価・ニーズ抽出

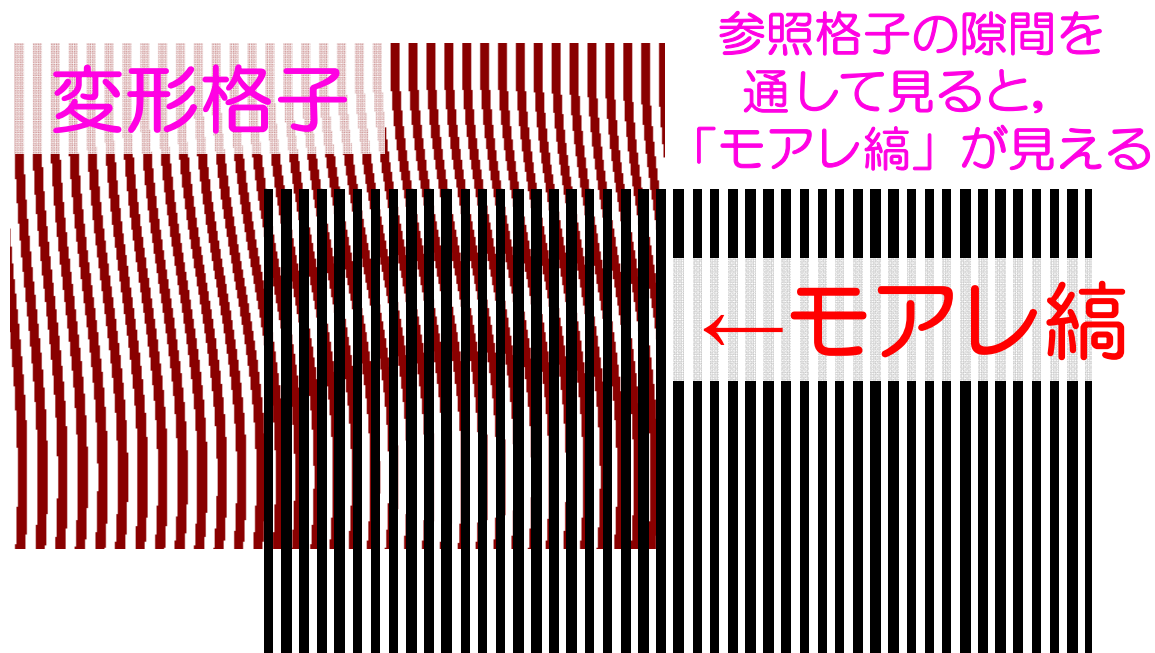
協力
ユーザー

- ・各種センサーと
組み合わせた
計測・検査システム

検査シ
ステム
提供

サンプリングモアレ法の原理

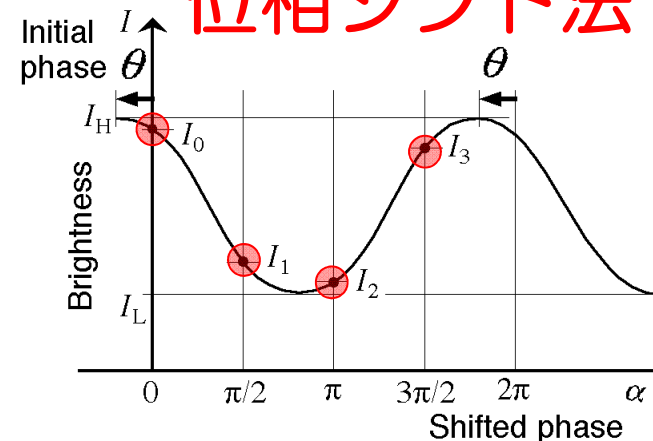
モアレ縞の発生と位相シフト



参照格子
(移動することでモアレ縞の位相がシフトする)

「位相シフト法」により，精度よく位相解析を行うことができる。

位相シフト法



4点の輝度から位相 θ が精度よく得られる。

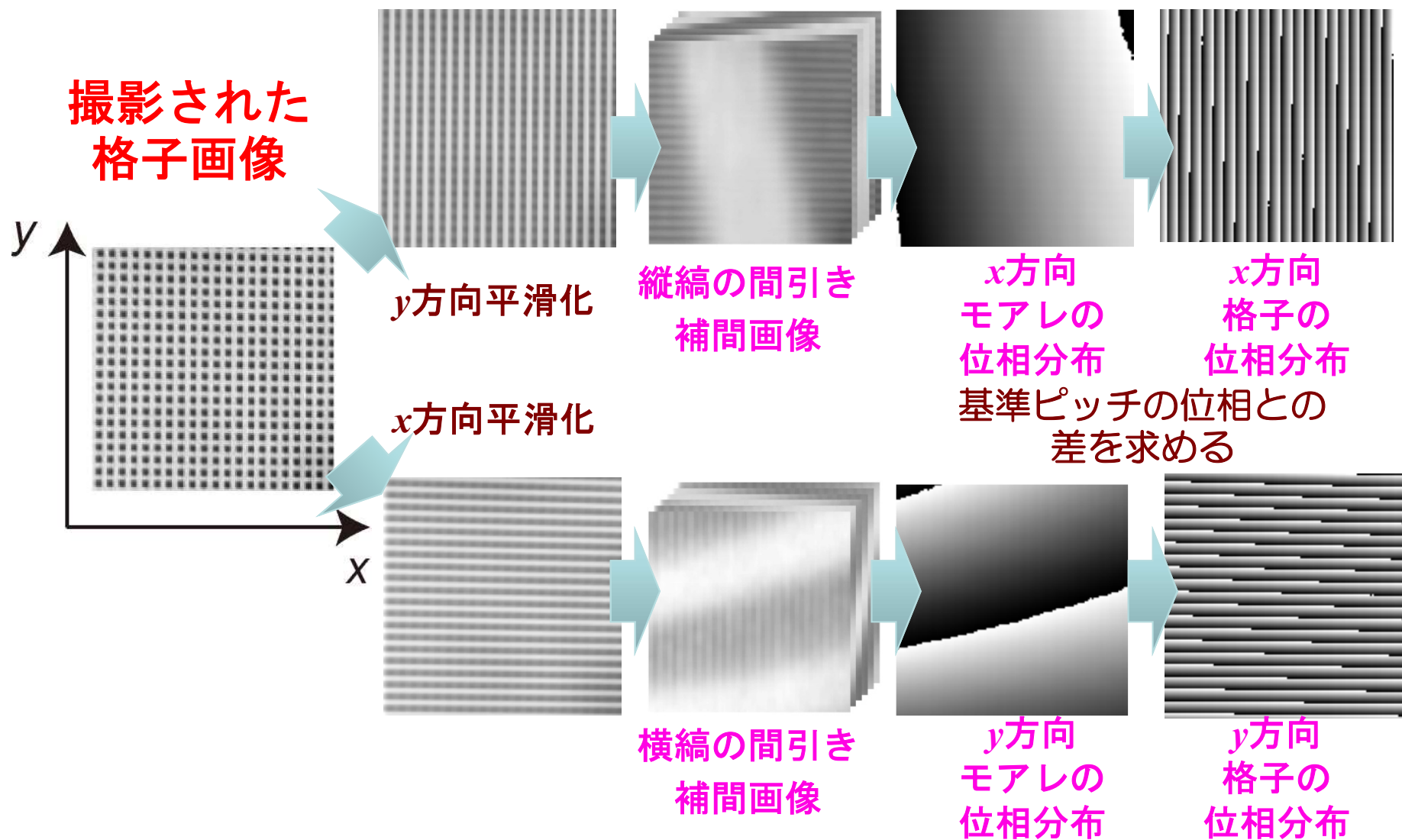
$$I_0 = a \cos \theta + b$$

$$I_1 = a \cos \left(\theta + \frac{\pi}{2} \right) + b$$

$$I_2 = a \cos (\theta + \pi) + b$$

$$I_3 = a \cos \left(\theta + \frac{3\pi}{2} \right) + b$$

$$\tan \theta = -\frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_0}$$



1枚の格子パターンの画像から、x方向とy方向の格子の位相分布が高精度かつ簡単に得られる。(位相の分解能は、格子ピッチの1/数100~1/1000)

たわみ角(回転角)の算出方法

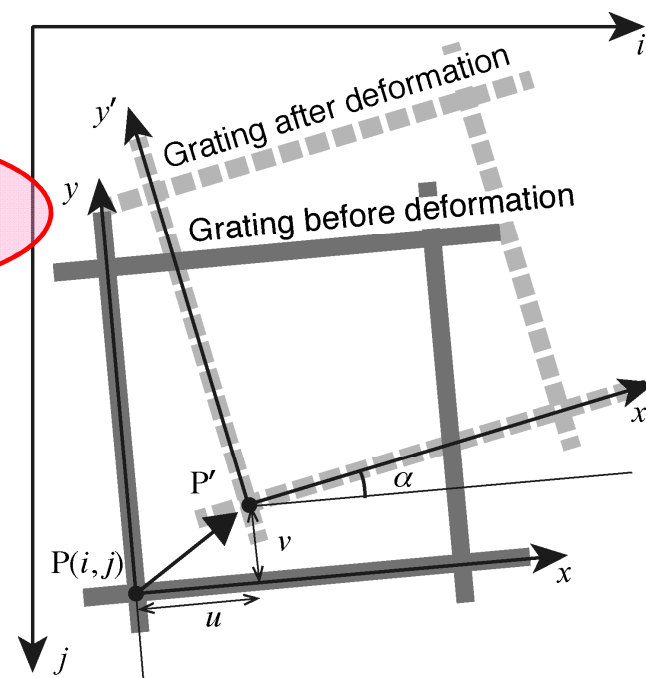
$$\tan \alpha = \frac{\partial v}{\partial x}$$

y方向の変位分布の
x方向の傾き

$$\tan \alpha = \frac{2\pi}{p_x} \cdot \frac{\frac{\partial v}{\partial i}}{\frac{\partial \phi_x}{\partial i}}$$

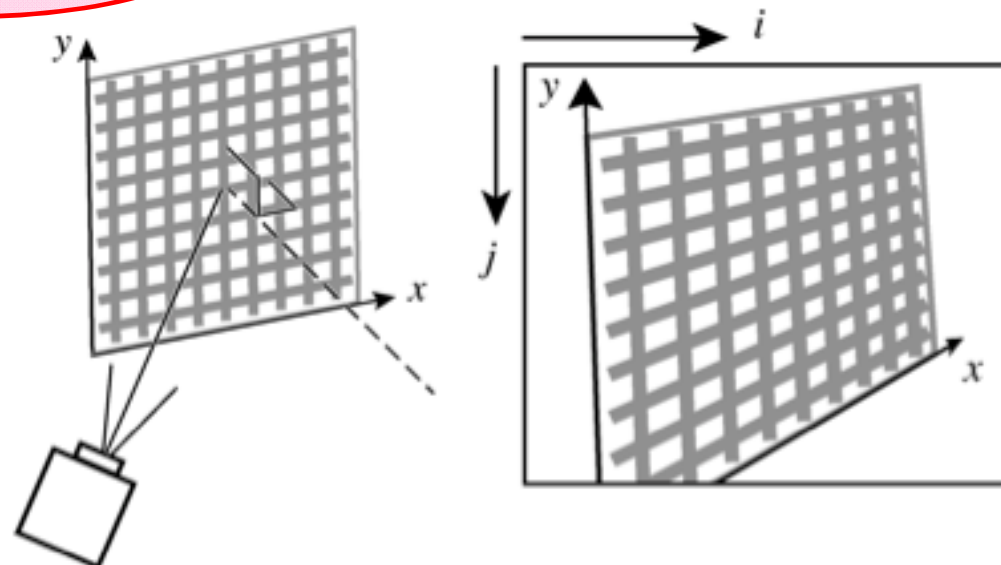
y方向の変位分布の
i方向の傾き

x方向の座標分布の
i方向の傾き



↑

サンプリングモアレ法
で、それぞれ分布とし
て得られる。

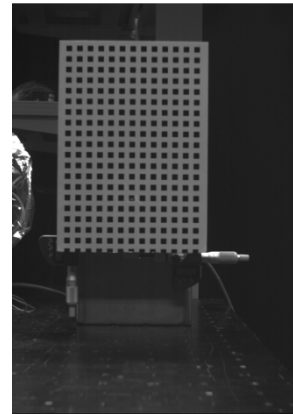


サンプリングモアレ法の特徴

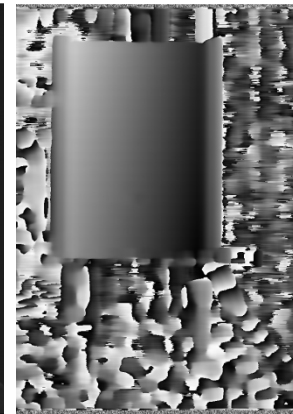
1. ワンショットで撮影した画像から， x 方向と y 方向の2次元の変位が同時に計測できる。

$$\begin{cases} d_x = \frac{p_x}{2\pi} \Delta\phi_x \\ d_y = \frac{p_y}{2\pi} \Delta\phi_y \end{cases}$$

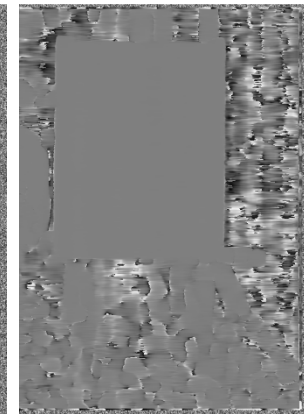
変位 ピッチ 位相差



撮影画像



位相分布



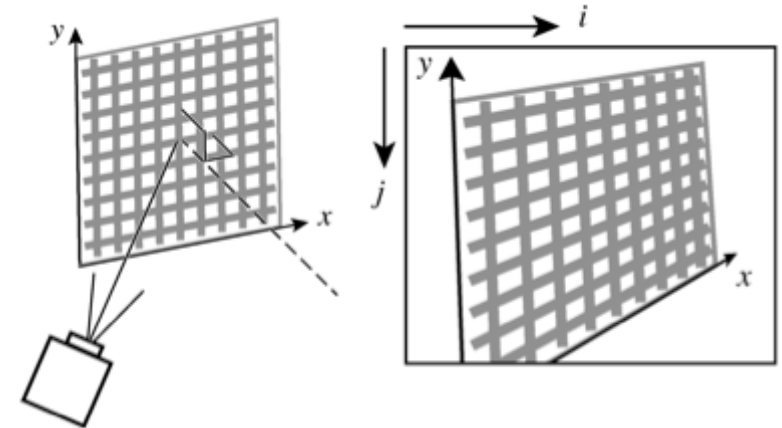
位相差分布

2. 変位計測分解能は，格子ピッチの1/100から1/1000程度が得られる。

3. 回転角は，100~30 μrad の精度

4. 計測対象側は，格子パターンを固定するだけでよい。

5. キャリブレーションが不要



- ひとつのカメラを用いた変位計測やたわみ角計測の場合
- 対象物に固定されているピッチが既知の格子を用いるため

1. ユーザーニーズの適合性

(1) 鉄道橋梁用

次の点がニーズに適合している。

- 橋りょうの変位を簡易な装置で計測できる
- たわみとたわみ角を用いて支点部の不具合を検査する手法
- ターゲットが取り付けられない部位の変位計測

(2) 一般土木用

計測対象物によって、ニーズに適合しているものとそうでないものがある。

次の点がニーズに適合している。

- 風車タワー，トンネル内，橋りょうなど

ただし，次の点は計測が困難である。

- トンネル内でターゲットが撮影できないほど粉塵が多い場合

2. 開発システムの現場環境への対応性

(1) 鉄道橋梁用

- 対象物の正面からでなく斜めからでも計測できる点は，現場で使いやすい。
- 30m～50m離れた位置から撮影できれば，ほとんどの場合は十分である。
- 夜間についても，ターゲットを再帰反射材で作っておき，照明を当てることで計測可能である。

(2) 一般土木用

- 撮影機材が設置でき，粉塵等が少ない場合であれば，ほとんど問題なく使用できる。

3. 画像計測機能に関する進捗

- 実用的レベルでのたわみ角が計測できるようになった。
- ターゲット無しの場合でも、0.5mm程度の精度で計測できる。
- 複数のカメラに対する無線タイミング同期装置を試作した。これによって、離れた位置に設置した複数のカメラが1ms以下の分解能で同期して撮影することが可能となる。

4. 開発システムのユーザビリティ

- 現時点でのサンプリングモアレカメラは、有線式の同期装置の重量が大きく、移動と設置に時間がかかる。H29には、軽量の撮影システムを構築する。
- 現時点では、ソフトウェアが、技術者向けのものになっている。H29には、現場の作業者が技術的知識がなくても作業できるような使いやすいソフトウェアを開発する。
- 解析処理とレポート作成が容易にできるようなソフトウェアがいまのところ無いので、これについてもH29に試作する。

5. 競合技術（既存技術）との技術的な比較

- デジタル画像相関法を用いた既存技術（I-DAPなど）と比較して変位に関しては同程度の精度で計測が可能である。キャリブレーションが不要な点は現場での使用にあたり、優位である。また、たわみ角については他の手法で計測できていないので、優位である。
- 別の研究機関がサンプリングモアレ法による橋りょう計測の研究を進めているが、基本的には同じ手法である。リアルタイムに結果が出力できるサンプリングモアレカメラや、回転角（たわみ角）の計測技術については、本プロジェクトでのみ行っている点であり、優位である。

1. 計測手法の確立

- 面内変位計測 → 目標達成
- 三次元変位計測 → 計測手法を構築した。
- 回転角（たわみ角）計測 → 目標達成（チャンピオンデータ： $30 \mu \text{rad}$ ）
- ターゲットを用いないアルゴリズムの開発 → 完成（50m離れて誤差0.5mm以内）

2. 装置試作

- 三次元変位計測装置 → 試作完成
- 横長カメラ（一次試作） → 試作完成（領域は飛び飛び，9460画素相当）
- 横長カメラ（二次試作，連続タイプ） → 基本設計と光学系の実験を実施した。
- 屋外用の多数カメラ同期式の変位計測装置 → 完成。実証試験に利用（JRNC）
- 屋外用のカメラとセンサーとの同時計測装置 → 完成。実証試験に利用（共和電業）
- ソフト版サンプリングモアレカメラ → 基本部分は完成（4Dセンサー）
- 無線式トリガ装置（親機，子機） → 試作完成（福井大）（屋外用の本試作中）

3. 実際の構造物への適用（実証試験）

- 鉄道橋りょう → 多数の試験を実施した。（在来線，新幹線）（JRNC）
- 一般土木 → 各種の構造物（風車タワー，トンネル，道路橋など．．．）に対して多数の実証試験を実施した。（共和電業）
 （各分野の大手ユーザと協力し，現場での実証試験を行っている）
- その他 → 振動計測，ビルの揺れ計測，屋外での気象条件と精度の関係（実施中）

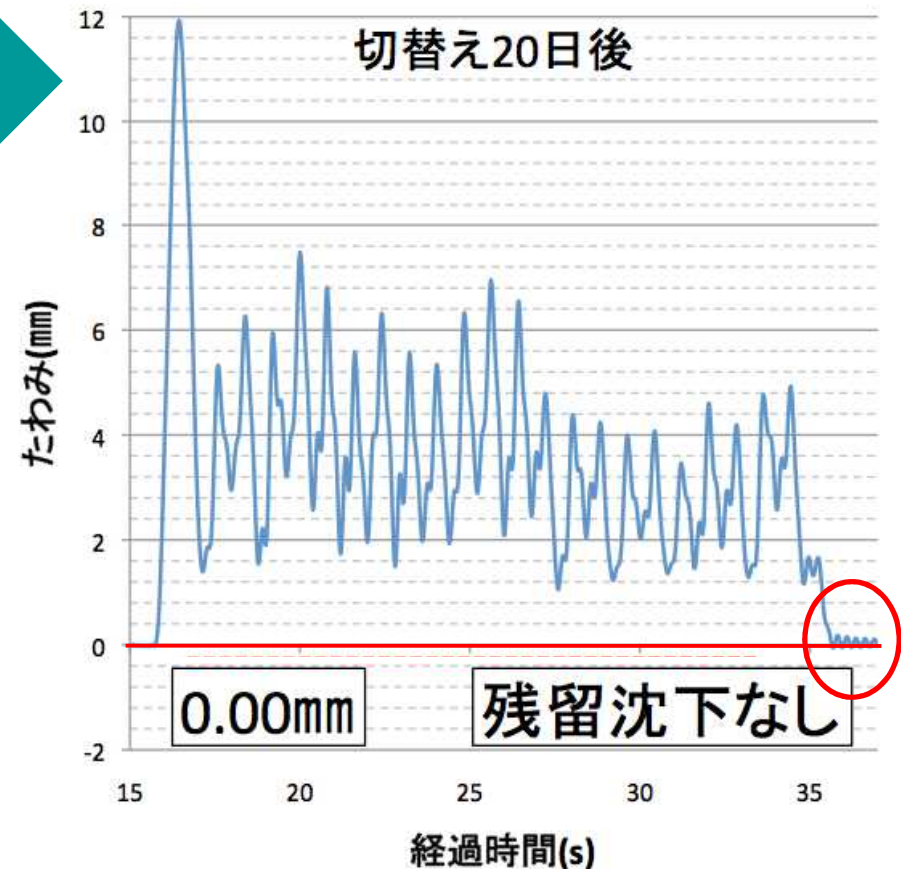
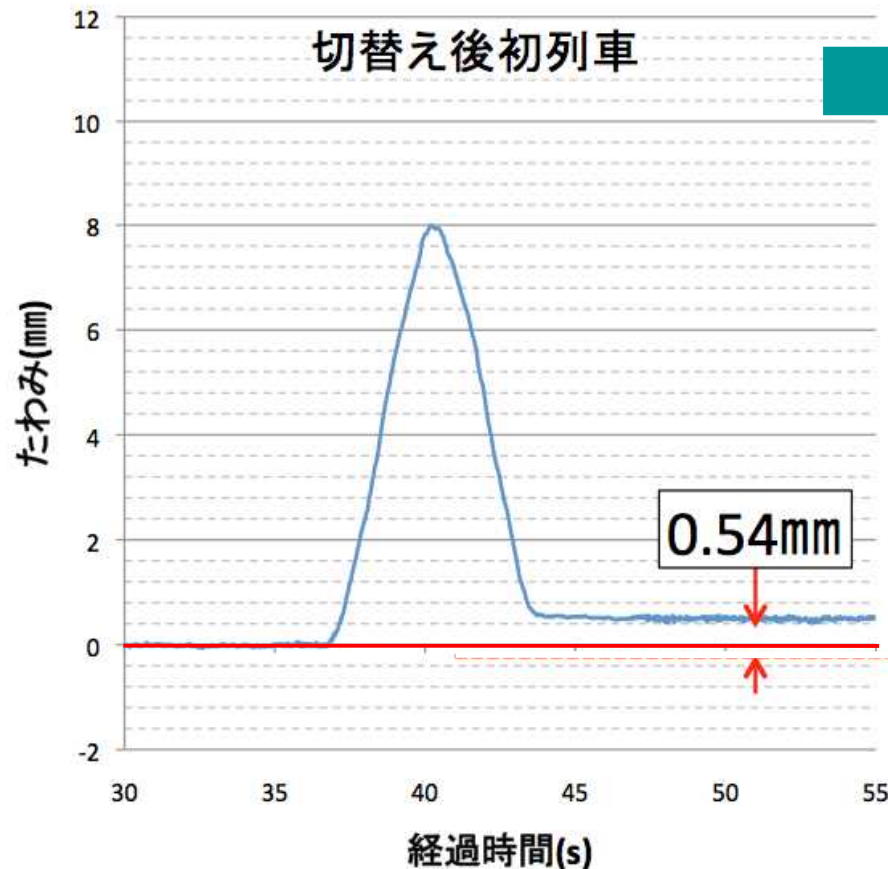
4. 新しい提案

- 鉄道橋りょうで，たわみとたわみ角による新しい管理手法を提案した。（JRNC）

A橋りょう上り線における桁中央のたわみ

線路切替え直後と線路切替え20日後の計測例

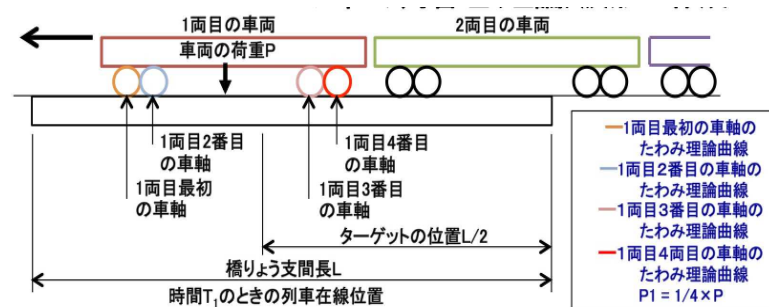
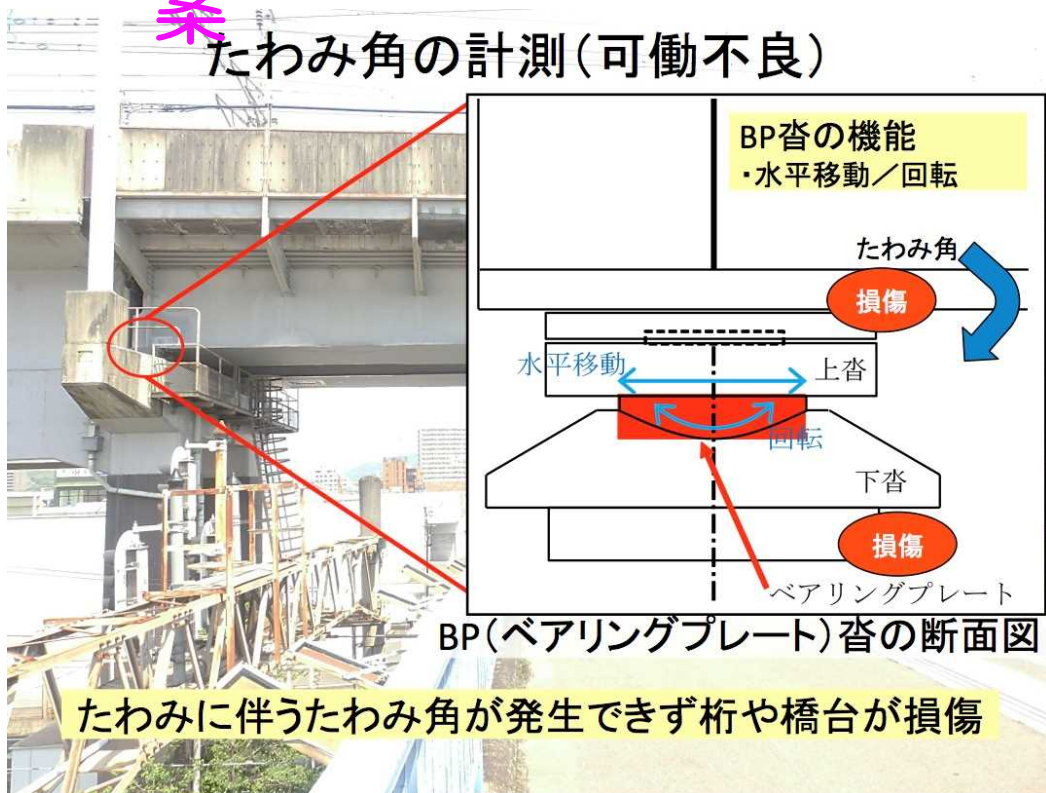
- 初列車の通過による**残留変位**(微小な変位)も計測されている



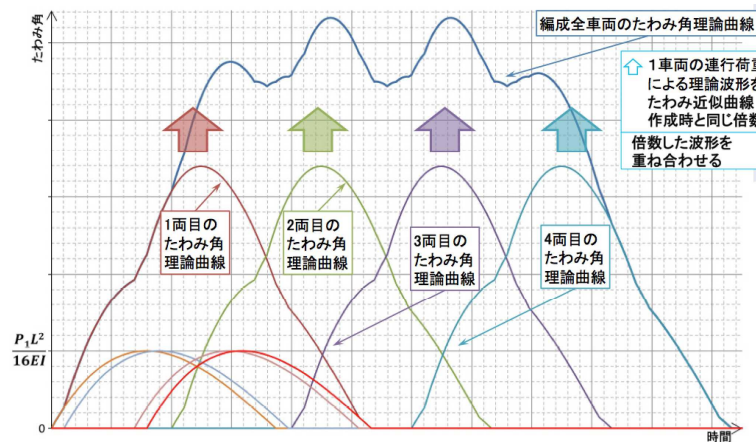
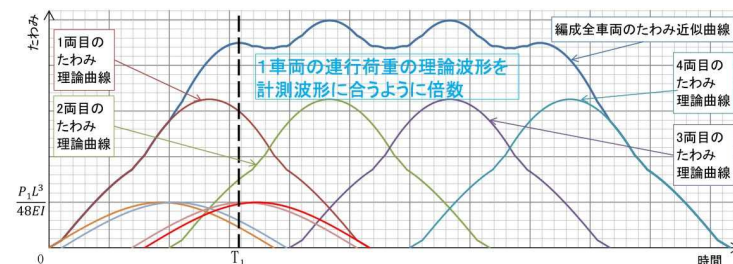
時系列管理に資する健全度評価手法の提案 ～たわみ角管理(理論)波形の作成～

たわみとたわみ角による新しい管理手法を提案

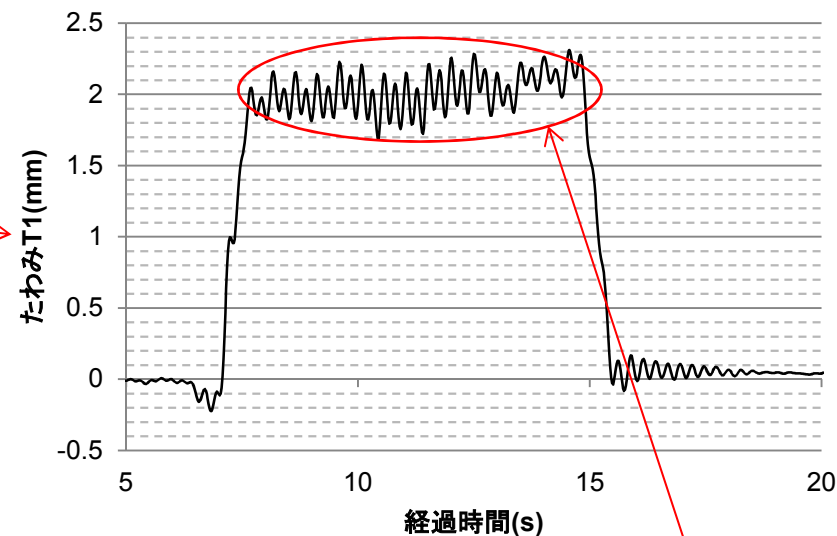
たわみ角の計測(可働不良)



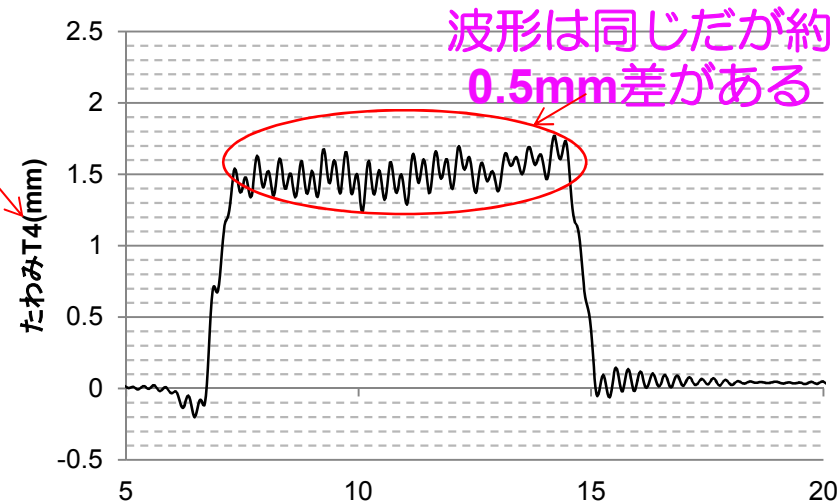
●たわみの計測波形に理論波形を整合させたたわみ近似曲線の作成
【仮定】①列車速度は一定, ②1車両当たりの荷重Pは各車軸に均等配分



主桁のたわみと列車載荷位置との相関関係



4連の外側のたわみ



4連の内側のたわみ



課題を踏まえた開発内容（4Dセンサー株式会社）

2-①. 三次元変位計測アルゴリズムの開発

変位・ひずみについて時系列データを取得するソフトウェアの開発を行った。
原画像保存により再解析可能（解析手法の改善に利用）。

2-③. 橋梁用診断アルゴリズムの開発

たわみ角算定のために複数領域ごとの個別解析機能を設計した（実装中）。

2-④. 一般土木用診断アルゴリズムの開発

現場計測実験に参加し、問題および要件抽出を行い、道路橋・一般建造物用診断アルゴリズム・画面仕様の検討を行った。

アルゴリズム改善（単一カメラによる奥行方向変位計測の可能性検証）の発表・デモを行った（SSII2015）。

4-①. アルゴリズム評価試験用計測システムの試作

原画像保存による後解析評価試験用システムを開発し、屋外試験を行った。
新規アルゴリズム評価用SDKの要件抽出・設計を行った。

8-①. 標準化、規格化の調査

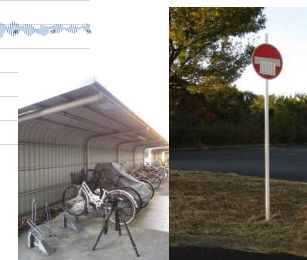
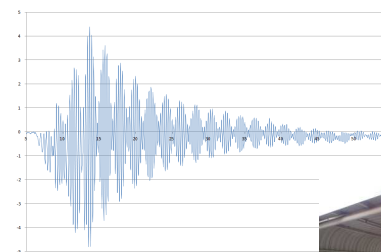
（1）標準化

国土交通省のデータベース「NETIS」に登録について（国土交通省・近畿技術事務局に対して）調査・情報収集を行った。

また建造物被害状況モニタリングのための要件調査・適用可能性検討を行った。

（2）規格化

展示会等（関西設計・製造ソリューション展）にて民間規格について調査を行った。



たわみ角屋外計測実験

たわみ角を $3/100,000$ [rad.]程度の精度で計測するにはどのような条件で計測すべきか検証を行った



計測条件

レンズの焦点距離(計測距離 30 m)	400 mm
露光時間	15 [ms]
フレームレート	50 [fps]
計測時間	10 [s]
基準取得枚数	50 [枚]

回転ステージの中心から**110[mm]**離れた位置からオプトマイクによって反時計方向に**20[μ m]**ずつ変位を与えて、回転ステージを少しずつ傾けながら繰り返し計測を行った

距離: 30 m

たわみ角計測結果

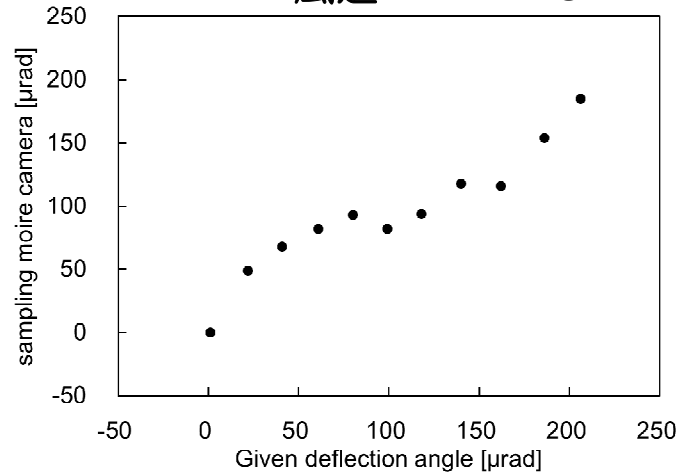
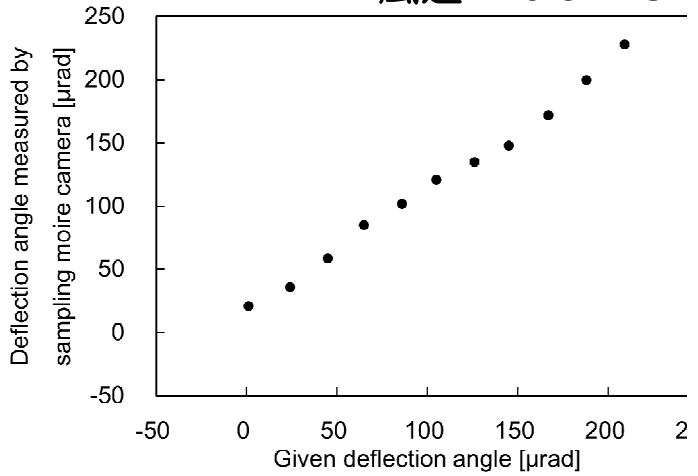


0 deg, 180x180 mm (448x448 pixel)

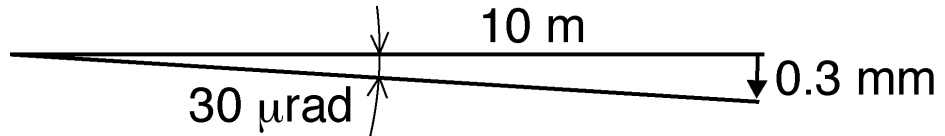
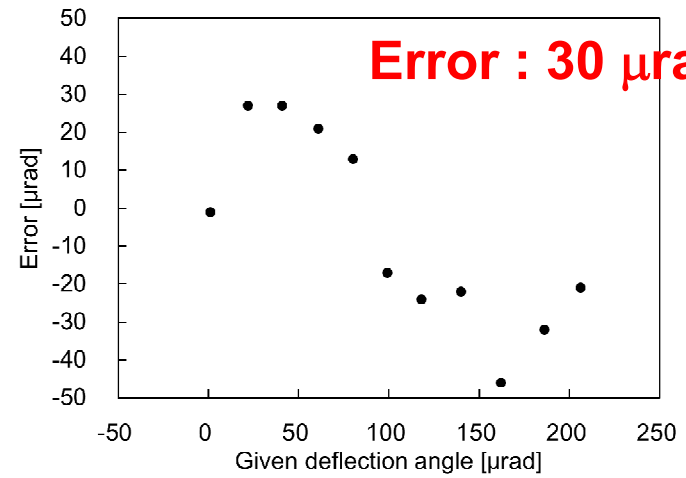
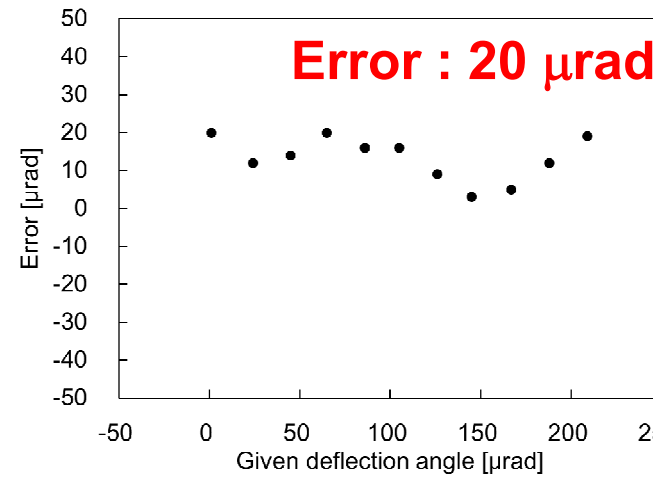
30 deg, 180x180 mm (416x423 pixel)

風速: 0.8 m/s

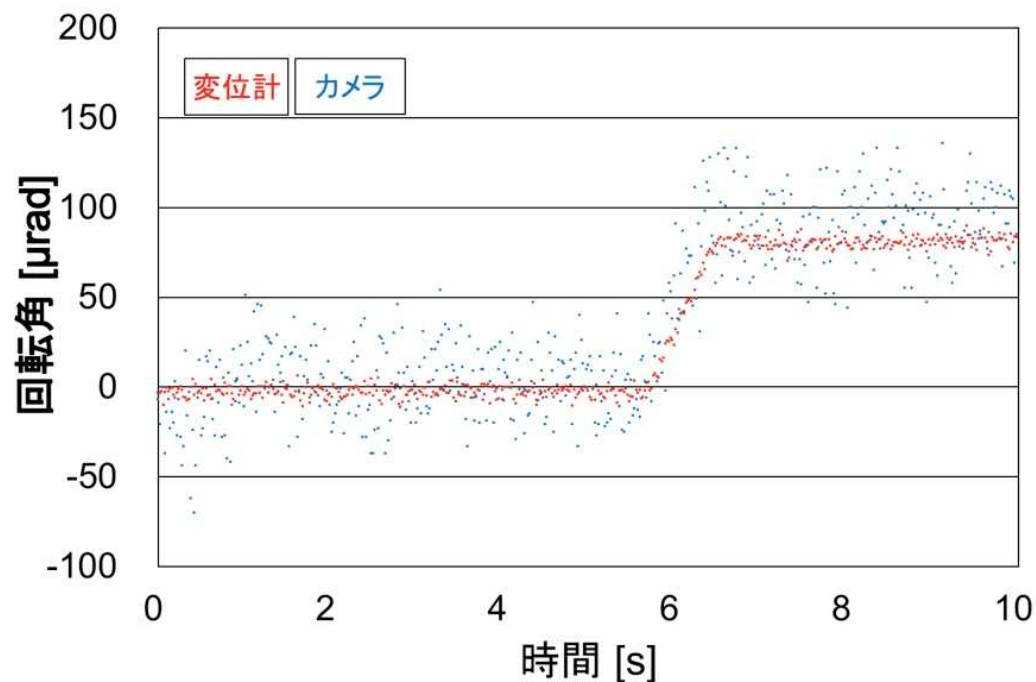
風速: 2.2 m/s



橋りょうのたわみ角は、数百 μrad → 実用的な精度



回転角の計測精度確認実験(屋内)

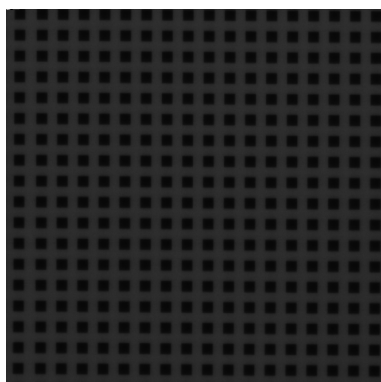


与えた回転角: $81 \mu \text{ rad}$

計測値: $91 \mu \text{ rad}$

誤差: $10 \mu \text{ rad}$

標準偏差: $25 \mu \text{ rad}$



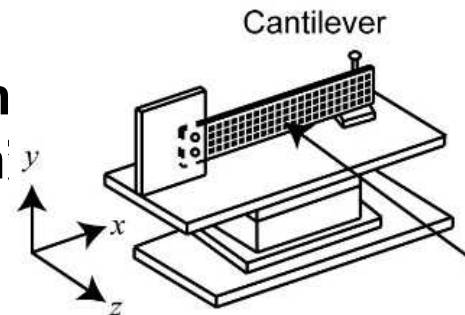
撮影画像

格子ピッチ: 10mm
 距離: 5m
 フレームレート: 50fps
 画像サイズ: 448×448 pixels

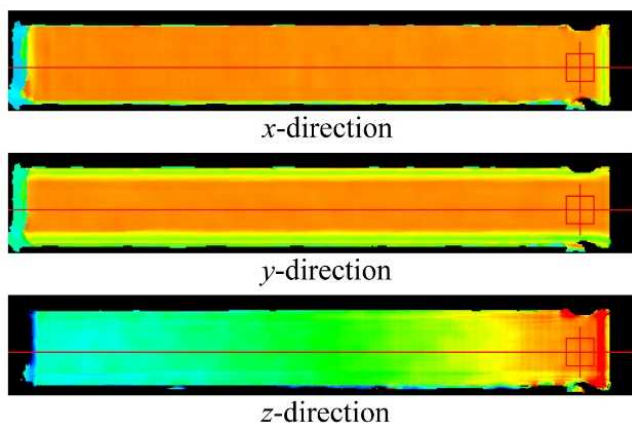
・ターゲットに回転を与え、レーザー変位計で読みとった変位から回転角を算出した。

三次元変位結果

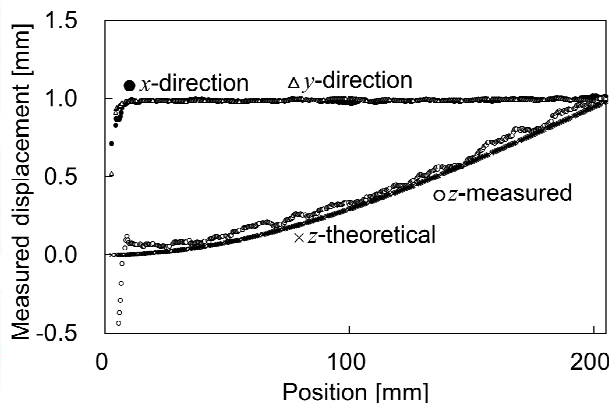
・片持ち全体を x, y 方向に1.00 mm
 および片持ち梁右端を z 方向に1.00mm



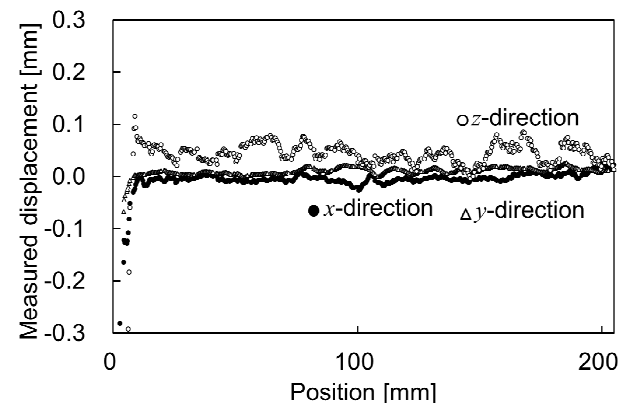
撮影画像(カメラ間画素対応付け後)



変位分布画像



変位分布計測結果



計測誤差

	x	y	z
平均誤差 [mm]	0.01	0.01	0.00
標準偏差 [mm]	0.007	0.005	0.022

高精度に3次元変位分布を計測できた→大型構造物に適用できると考えられる

格子パターンを貼付けずに変位を計測する手法の開発²⁵

- 間隔は既知（設計図がある）
- 横線は平行線（普通はそう作る）
- 垂直方向に変位（中央部付近）であることを利用する



2次元格子

たわみ計測
たわみ角計測

中央部は格子を貼りにくい

たわみ計測

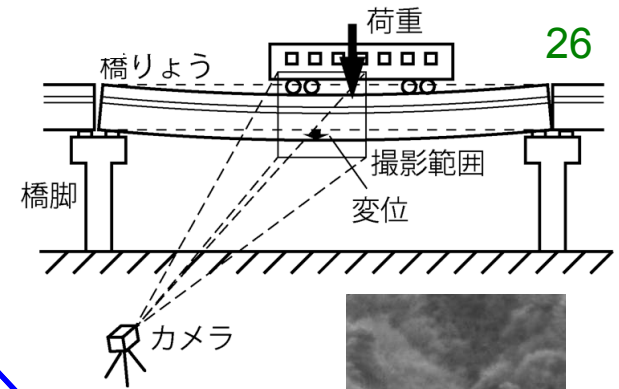
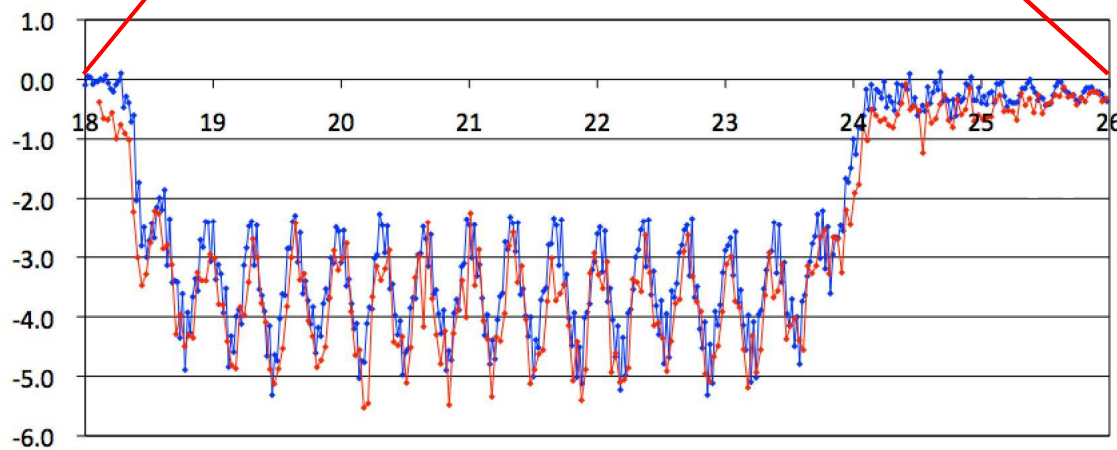
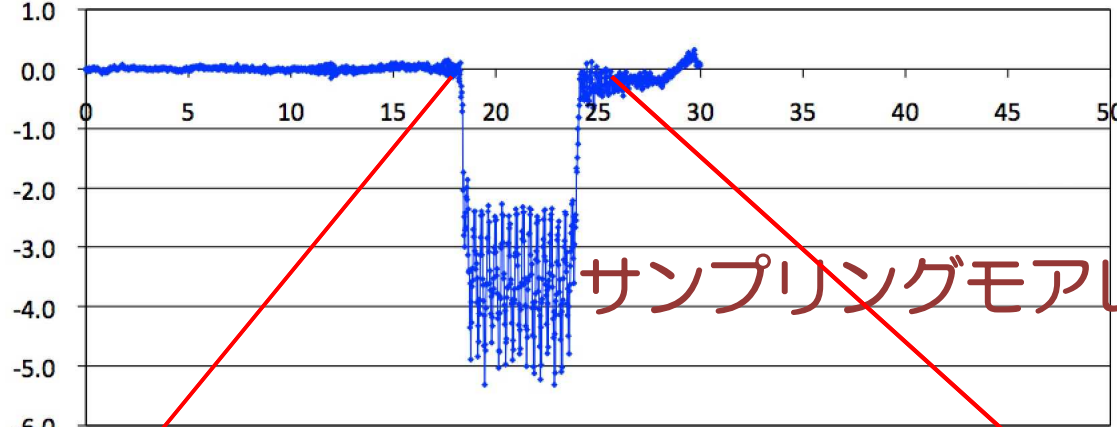
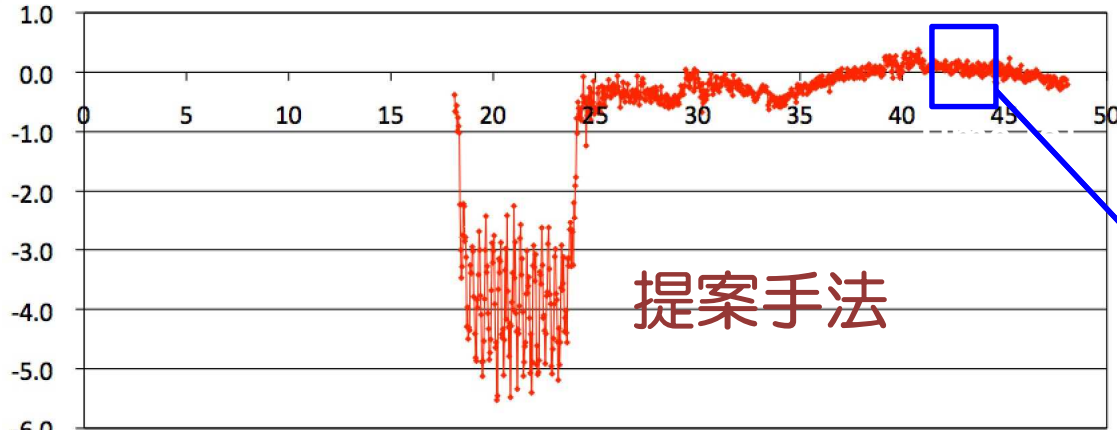
角度は変化しない

2次元格子

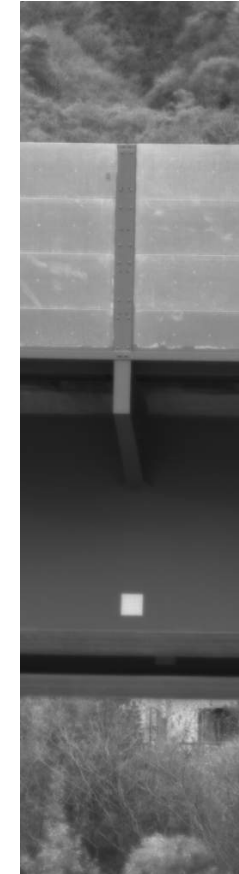
たわみ計測
たわみ角計測



サンプリングモアレカメラとの比較

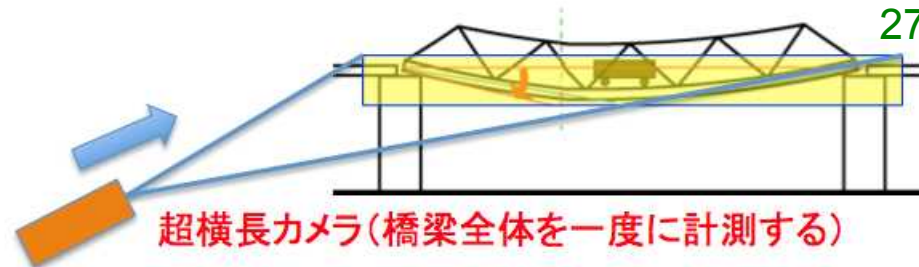
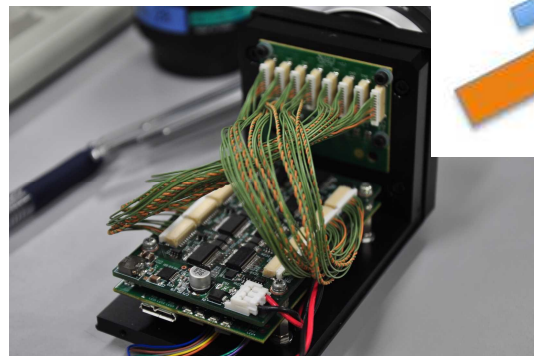


標準偏差：
0.07 mm
100 points
(41.61~44.91s)



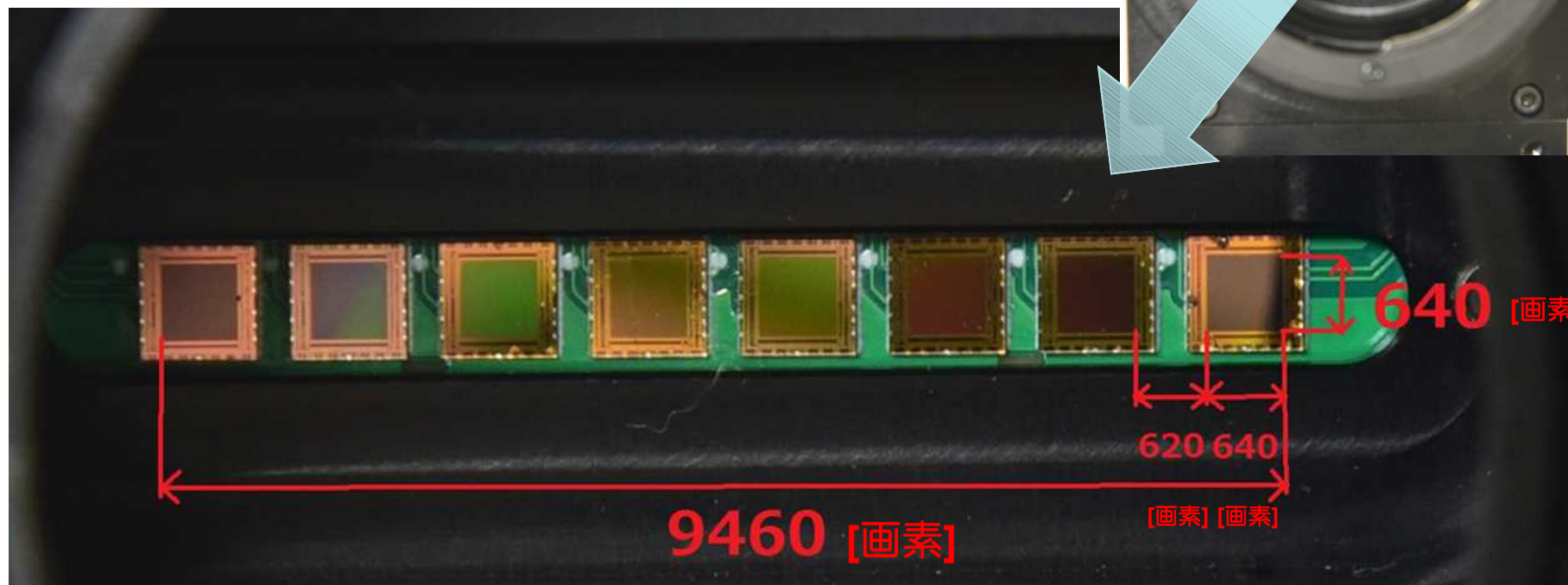
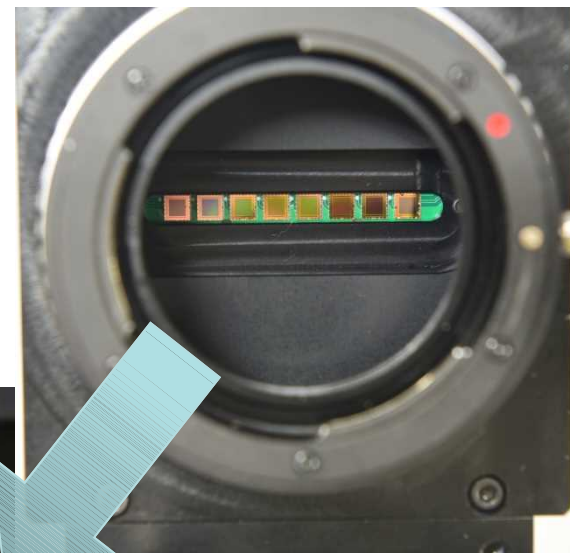
サンプリングモアレカメラとの
差は約 **0.5 mm**

横長カメラ内部の試作

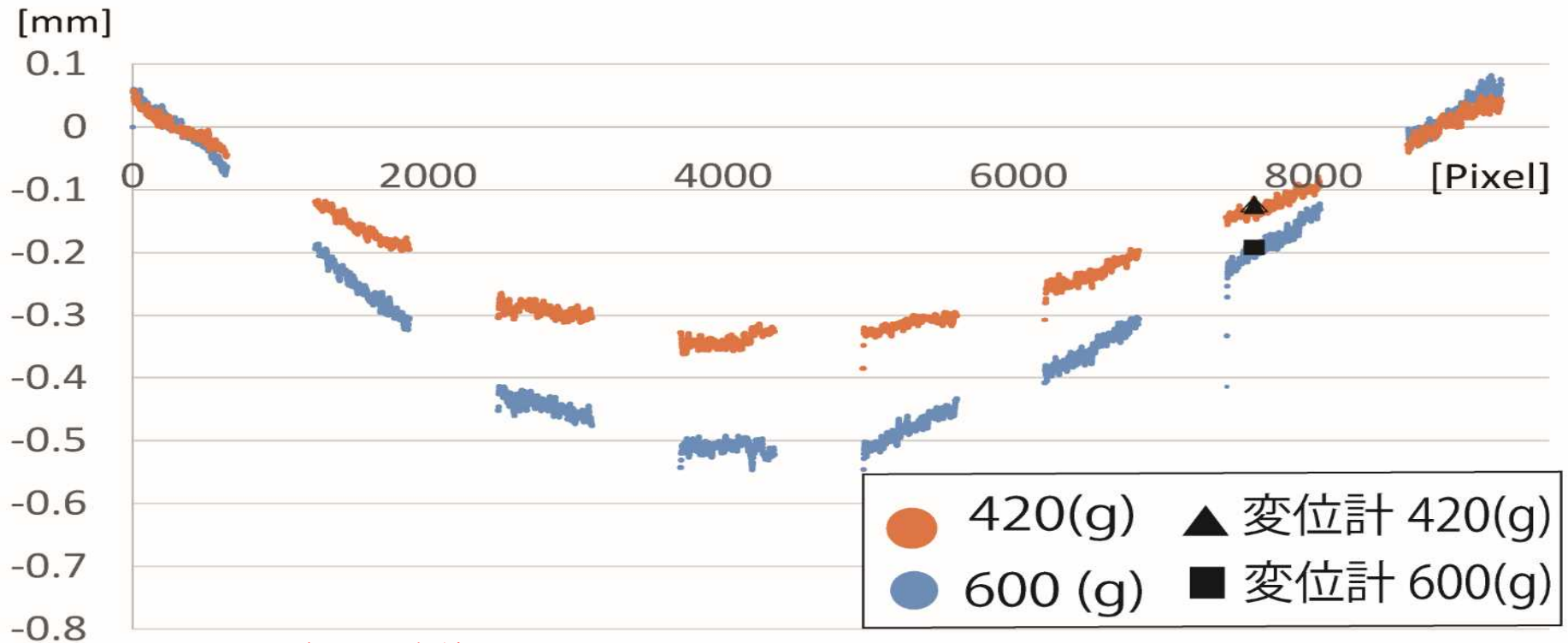
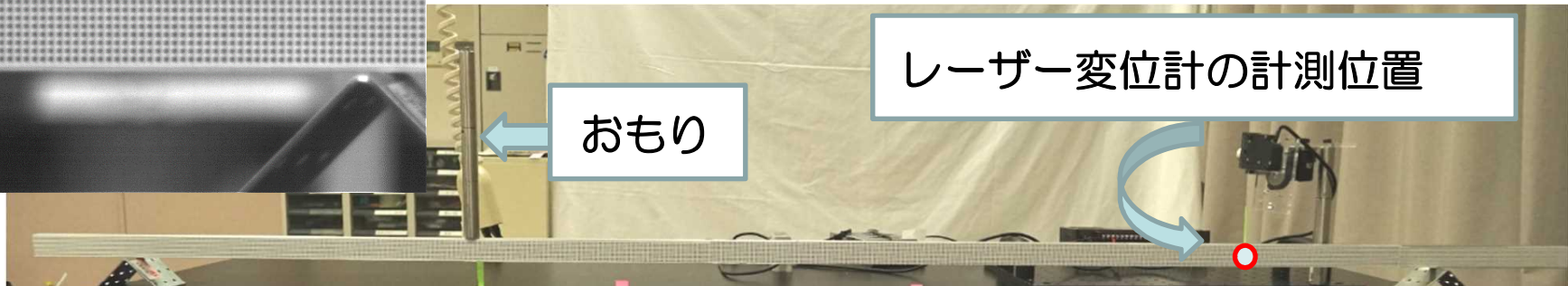
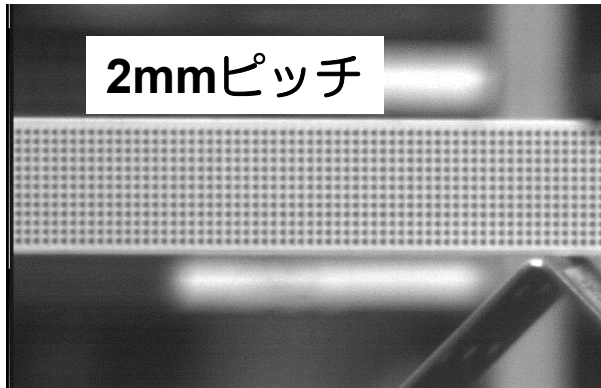


- 外形寸法
- 縦 78 mm
- 横 70 mm
- 高さ 147 mm

横型カメラでは9460×640画素相当の範囲を計測することができる。



計測結果



7600画素での変位

(420g) 横長カメラ: -0.119 mm レーザー変位計: -0.124 mm 誤差: 0.05 mm

(600g) 横長カメラ: -0.195 mm レーザー変位計: -0.191 mm 誤差: -0.04 mm

無線トリガー装置の概要

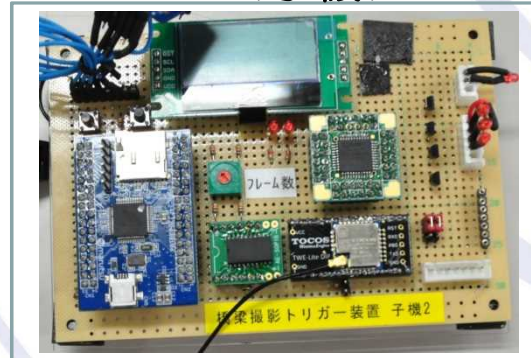
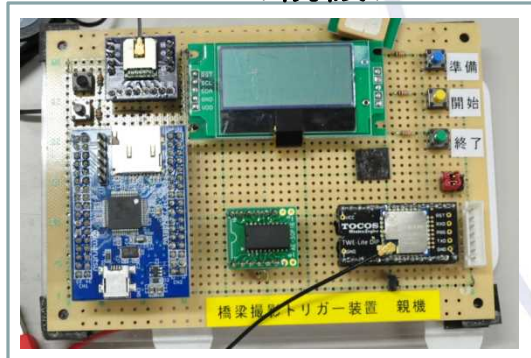


GPSからのPPS信号で同期を取り複数台のサンプリングモアレカメラで同期撮影を行う装置

<試作装置の外観>

<親機>

<子機>

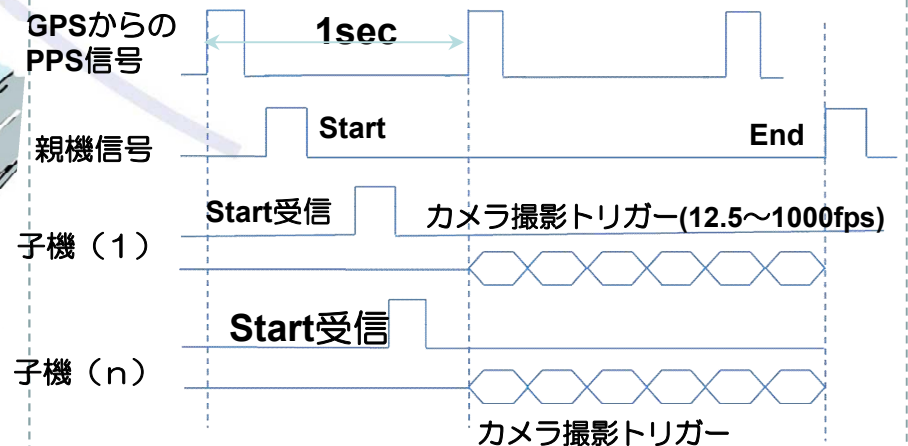


<使用イメージ>

GPSからのPPS信号



動作タイミングチャート



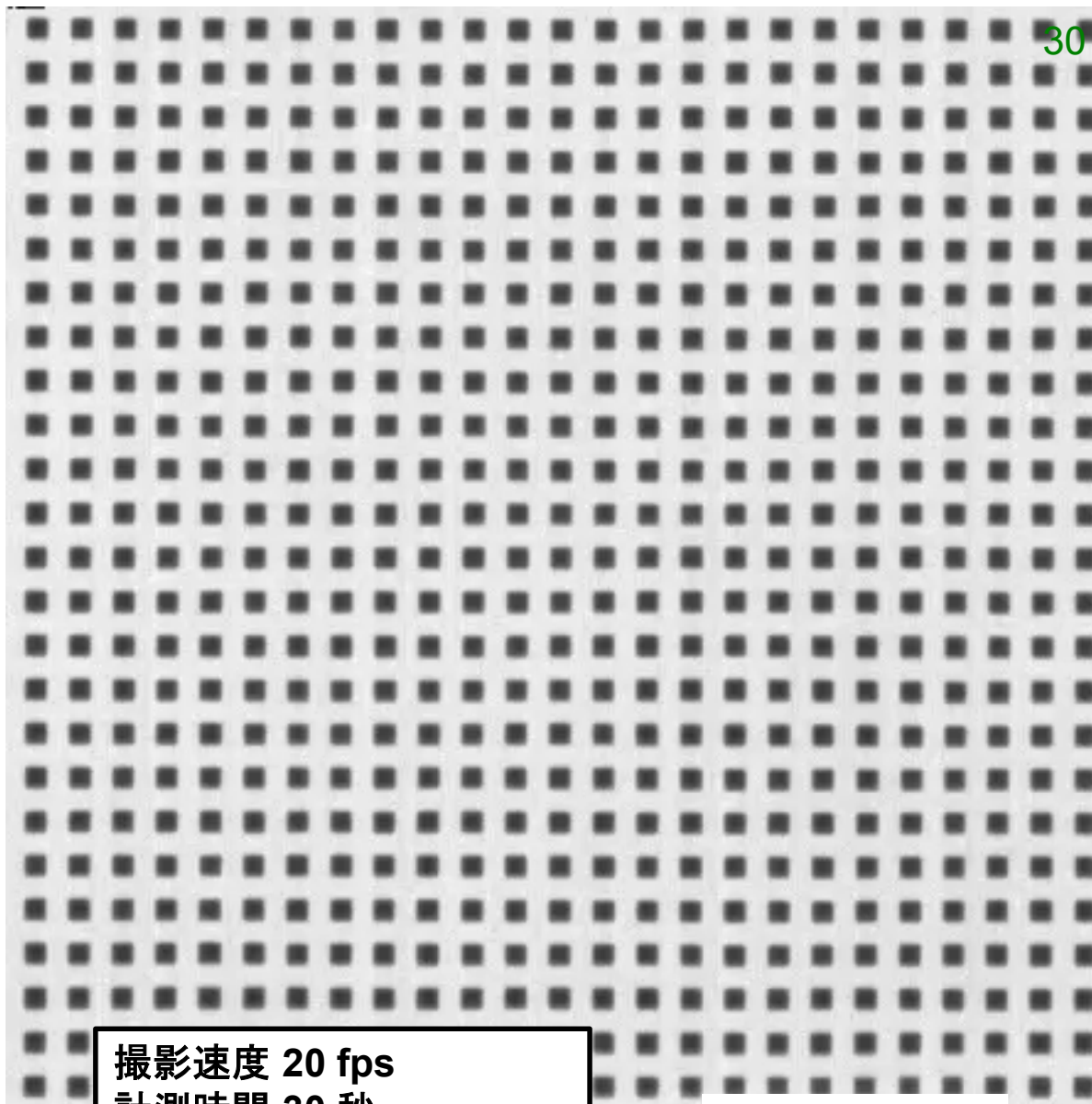
ゆらぎの測定実験

実験方法

- ・カメラと三脚の距離 30m
- ・しぼり値を変えて測定
(F4.5, F16, F32)



Nikon AF Nikkor
75-300mm 1:4.5-
5.6

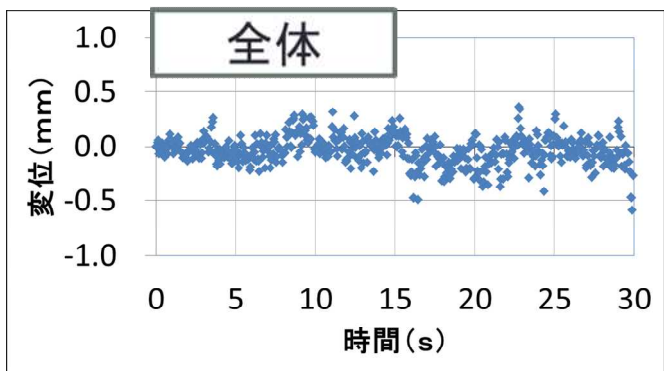


撮影速度 20 fps
計測時間 30 秒
画像サイズ 448 × 448
pixel
平滑化, 間引数 21 pixel
格子間画素数 21 pixel

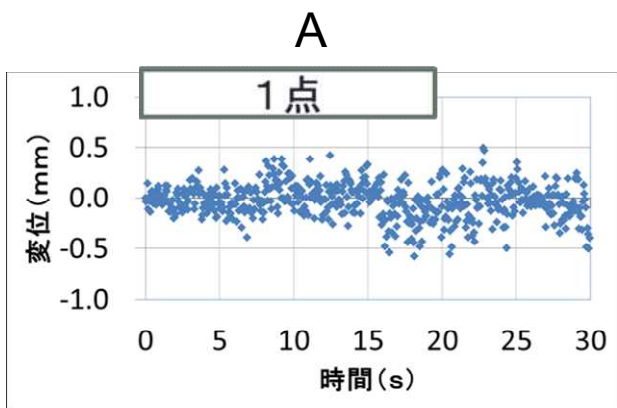
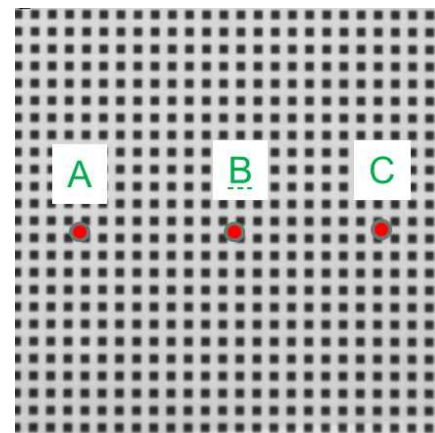
映像 ゆらぎ

気温 19.1 °C
焦点距離 300 mm
天気 晴れ

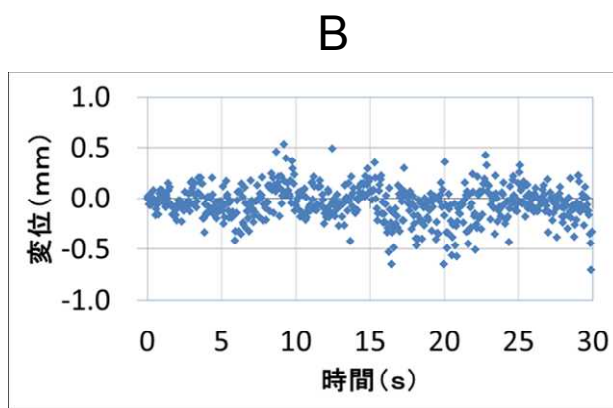
しぼり 32



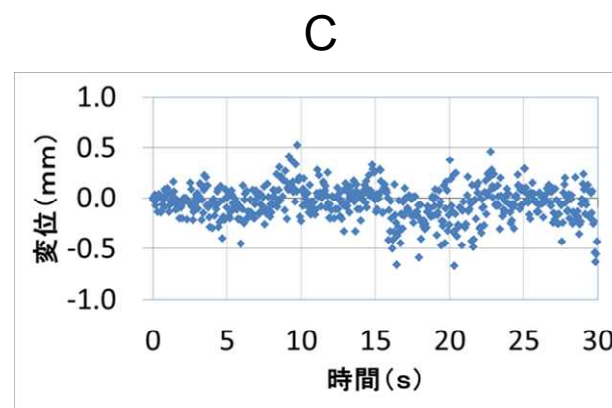
標準偏差
0.13mm
平均風速
1.6 m/s



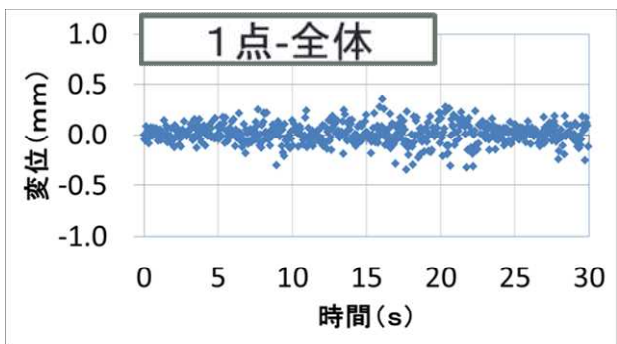
$\sigma=0.16\text{mm}$



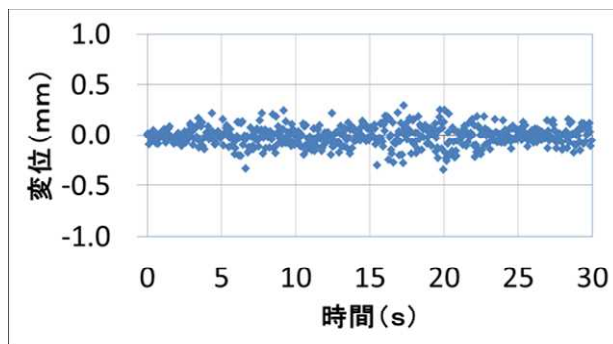
$\sigma=0.16\text{mm}$



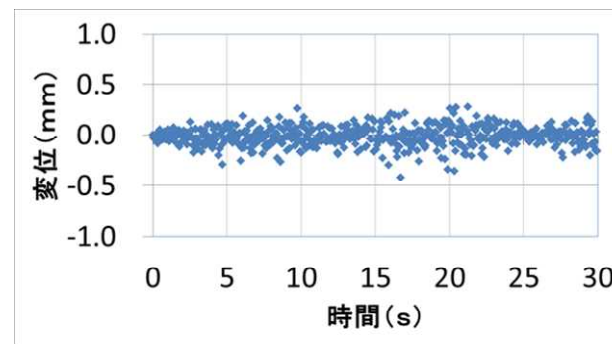
$\sigma=0.16\text{mm}$



$\sigma=0.09\text{mm}$



$\sigma=0.09\text{mm}$



$\sigma=0.09\text{mm}$

基本計画

中間目標	成果	達成度
1. 奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法の開発	・3次元の変位計測手法を開発した。原理の確認実験を行い、有効性を確認した。	→達成
2. 1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。	・20mの構造物の場合は、2万分の1は2mmとなる。十分な精度で計測できることを橋梁等の15m以上の実構造物で確認した。	→達成

1. サンプルングモアレ法による変位計測システム		中間目標	達成度
1-①適用可能性の調査(鉄道橋梁用)	【JRNC】BP沓を有する鉄道橋梁の管理指標として新たにたわみ角を用いた効率的な手法を提案		→達成
1-②適用可能性の調査(一般土木用)	【共和電業】電力会社や自治体等に、訪問デモによる本装置による試験計測提案を行った。列車通過時の駅舎柱の実挙動(変位・振動)計測を行った。風車のタワー動揺計測、発電設備関連の実物計測の実施計画中。海外道路橋梁診断向けとして、変形計測を提案して実施した。		→達成
1-③サンプルングモアレ計測システムの試作と評価	<p>【JRNC】鉄道橋に対して実施した。橋脚の固有振動数の計測を試みる。揺らぎ抑制対策。視準距離の縮減対策。新幹線のBP沓を有する合成桁のたわみ角が約2/10000rad以上、PC桁が1/10000radであることを確認。ほか。</p> <p>【和歌山大学】三次元変位計測、たわみ角の実験。</p> <p>【福井大学】実験環境の整備、動作確認。</p>	<p>目標1:「サンプルングモアレ計測システム」として、</p> <ul style="list-style-type: none"> ・変位 0.3mm(x,y方向) ・3mm(z方向(奥行き方向)) <p>・たわみ角 1/5000ラジアン</p> <p>目標2:雨や雪などの外乱がある場合の計測できる限界値を得る。</p>	<p>→達成</p> <p>→三次元変位計測のアルゴリズム構築と基礎実験は完了。大型構造物に対しては未実施。</p> <p>→達成</p> <p>→10%通常レベルの降雨では計測に支障がないことを確認 (H28に福井大で実施予定)</p>

2. アルゴリズムの開発	中間目標	達成度
2-①. 三次元変位計測アルゴリズムの開発	橋梁や構造物の変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))	→90% アルゴリズム完成 →現場での確認実験がまだ
2-②格子パターンを用いない変位計測アルゴリズムの開発	橋梁の変位 0.2mm(x,y方向)が計測できること	→90% →橋梁での実験を行った。50mの距離で変位計測精度0.5mを達成。精度評価と改良を引き続き行う。
2-③橋りょう用診断アルゴリズムの開発	50fps以上のデータが取得できること (H28)精度および速度の評価を行うことができ、実験室内で評価実験を行うことができること	→達成
2-④. 一般土木用診断アルゴリズムの開発	10Hz程度の固有振動数の計測ができるように50fps以上の時系列データが取得できること。 (H28)距離20m, 各環境条件で精度0.2mmで時系列データが取得できること。距離20mにて、変位の時間安定度0.2mm/H以内。温度安定度0.2mm/10°C以内	→70% →達成

3. ハードウェアの開発		中間目標	達成度
3-①構造物計測用撮像装置の開発	【和歌山大学】横長撮影ができるカメラを試作した。 【福井大学】近赤外に近い赤色(波長740nm)の照明を選定し、白色光源との違いについて評価実験を行った。試作した横長カメラの評価実験を行った。	横幅の画素数5000画素程度の横長のカメラを試作し、支点付近と中央部の両方を同時に計測できることをめざす。(H28)同じ	→80% → 模型実験で実施済み
3-②三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作	【和歌山大学】装置の試作とソフトウェアの製作を行った。	変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))	→100%
4. アルゴリズム評価試験用計測システムの開発			
4-①. アルゴリズム評価試験用計測システムの試作	【4Dセンサー】仕様・設計を策定し、機器選定・見積りを行った。性能評価を行った。原画像保存による後解析評価試験用システムを開発し、屋外試験を行った。新規アルゴリズム評価用SDKの要件抽出・設計を行った。	10Hz程度の固有振動数を計測でき、50fps以上でデータを取得できるようにする。	→30%(3月までに100%まで進める予定である。)
4-②. アルゴリズム評価試験用計測システムの評価	【4Dセンサー・福井大学】ソフトに組み込む内容の打合せを福井大学と行い、方針を決めた。 【4Dセンサー】2線モアレ方式を組み込んだ。	各機関との計測実験を通してアルゴリズムの評価を行い、②-4で定めた精度を確認する。 (H28)H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	→50%(H28に引き続き進める。)
4-③. アルゴリズム評価試験用計測システムの改良	【4Dセンサー】	(H28)H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	

5. 橋梁用計測システムの開発		中間目標	達成度
5-①橋りょう用計測システム試作	【JRNC】沓周辺のたわみ角を計測する計測システムを開発。 【福井大学】トリガ同期装置を試作した。	稼働率100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。視準距離40～50mにおいて桁のたわみおよびたわみ角についての仕様策定を行う。 (H28)「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10,000ラジアンをめざす。	→20%(H28に本格的に試作を行い, 100%をめざす) →沓周辺のたわみ角を計測しその分布を確認した。安定したシステムの構築のために, トリガ機能について検討した。
5-②橋りょう用計測システムの評価	【JRNC】前記の評価とシステムの改良を行った。それらに対して, 機材の稼働率(信頼性)の向上, 計測作業性の向上, 計測実績の蓄積, 橋脚の固有振動数の計測を行った。目標を上回る精度を確保, とりわけたわみ角は当初目標を大きく上回る 3/100,000radの精度を確保。	稼働率100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。 (H28)「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10,000ラジアンをめざす。	→20%(H28とH29に本格的に評価を行い, 100%をめざす)
5-③. 橋梁用計測システム改良	【JRNC】エンド同期システムの開発による計測所要人員の削減・コスト削減の実現		

6. 一般土木用計測システムの開発		中間目標	達成度
6-①. 一般土木用計測システム試作	【4Dセンサー】仕様・設計を策定し、機器選定・見積りを行った。性能評価を行った。原画像保存による後解析評価試験用システムを開発し、屋外試験を行った。新規アルゴリズム評価用SDKの要件抽出・設計を行った。	仕様策定を行う。稼働率100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。(H28)同じ	→未実施(一部は4Dセンサーにより実施している。試作をH28に行い、100%をめざす。)
7. 実証試験			
7-①. 鉄道橋梁による実証試験	【JRNC】たわみとたわみ角については従来手法と比較検証し非常に高い相関性を確認 【JRNC】鉄道橋における共振現象が確認できる際の列車速度との関係を確認 【JRNC】視準距離20m以内の好条件時での列車通過時の最大たわみ角 7×10^{-5} radの挙動を確認		
7-②. 橋梁用診断アルゴリズムの改良	【JRNC】従来手法との比較検証で高い相関性を確認(既存アルゴリズム・計測システム改良での対応)		

8. 標準化, 規格化(30年度まで)		中間目標	達成度
8-①. 標準化, 規格化の調査	<p>【4Dセンサー】国土交通省のデータベース「NETIS」に登録を検討. 民間規格について調査を行った. 建造物被害状況モニタリングのための要件調査・適用可能性検討を行った. 展示会等(関西設計・製造ソリューション展)にて民間規格について調査を行った.</p> <p>【福井大学】日本非破壊検査協会の規格とその立案方法について調査を行った.</p>	<p>2機関以上の規格を調査する. (H28)規格の提案先を固定する.</p>	→達成
9. ニーズ調査			
	<p>【共和電業】要求性能・課題を整理していく. 風車タワー, ダム, 道路橋, 屋根柱等について情報集を行っている. 「1-②. 適用可能性の調査(一般土木用)」での実計試験データにより, 各対象構造物毎のユーザニーズや改良点, 要求性能・課題を整理していく.</p>	<p>ターゲットについて調査して, 目標仕様を設定する.</p>	→50%

1. モニタリングシステムの完成度

- サンプルングモアレカメラは完成度が高い。
すでに商品化がされている。
- ソフト版サンプルングモアレカメラについては、
開発途上ということで、現状では完成度は高くない。
H28末には完成度の高いものを構築する。



2. 実証実験計画

- H29前期には、これまでに構築したシステムを使って実証実験の続きを行う。
- H29前期中に、現場で使いやすい計測システムの試作を行う。
- H29後期には、前期中に試作する現場で使いやすい計測システムを使って実証試験を行い評価する。
- H30前期に、さらにその評価結果に基づいて、計測システムの改良を行う。さらに、ニーズに応じて開発した新しいアルゴリズムも追加する。
- H30後期には、改良版の計測システムを使って実証試験を行い評価する。

3. 社会課題への対応

- インフラ構造物については、鉄道橋、道路橋、鉄塔などからさらに広げて、土構造物などの計測検査にも対応できるようにする。
- インフラ構造物だけでなく、生産現場の工場内の設備も老朽化しているものが増え
てきている。これらにも対応できるようにする。

基本計画

最終目標	現時点の研究開発成果	達成の見通し
1. 奥行き(3次元)の変形も計測できる画像解析手法の開発と実証	・3次元の変位計測手法を開発した。原理の確認実験を行い、有効性を確認した。	・H29,30に、現場で使いやすいシステムを開発する。現場での実証試験を行い、システムの改良を行うことで目標が達成する。
2. 1回の撮影で構造物の支点間の長さの2万分の1の変位を計測できること及び15m以上の構造物を計測できることとする。	・20mの構造物の場合は、2万分の1は2mmとなる。十分な精度で計測できることを橋梁等の15m以上の実構造物で確認している。	・構造物の部分的な計測に置いては、すでに達成済み。構造物全体の変位分布を計測するためには、連続的に撮影できる横長カメラの試作が必要となるが、それにより実証試験が行える。

● 現時点の研究開発成果

2. アルゴリズムの開発		最終目標	達成の見通し
2-①. 三次元変位計測アルゴリズムの開発	・3次元の変位計測手法を開発した。実験室内で原理の確認実験を行った。離れた位置に設置したカメラ間の同期については50fps以上で同期については、同期ができるトリガ信号出力装置を試作中である。	「三次元変位計測アルゴリズムの開発」として、橋梁や構造物の変位0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))が計測できることおよび加速度センサーやレーザー変位計等の他の計測機と50fps以上で同期できること	・計測精度については、現場での実証はH28達成予定である。ソフト版のサンプリングモアレカメラで、他のセンサーとの同期はH28に完成できる。トリガ信号出力装置の第二次試作は、H28に完成予定である。
2-②. 格子パターンを用いない変位計測アルゴリズムの開発	・アルゴリズムの構築と、実際の新幹線橋りょうを計測した画像を用いたデータ解析を行い、サンプリングモアレカメラの結果と比較した。橋梁での実験により、50mの距離で変位計測精度0.5mmを達成(y方向)。	格子パターンを用いない変位計測として、橋りょうの変位0.2mm(x,y方向)が計測できること	精度評価と改良を引き続き行う。
2-③. 橋りょう用診断アルゴリズムの開発	評価実験は、室内、屋外とも実施した。	「橋梁用診断アルゴリズムの開発」として、精度および速度の評価を行うことができ、実験室内で評価実験を行うことができること	→達成
2-④. 一般土木用診断アルゴリズムの開発	・屋外評価実験については、ほぼ達成している。一部の気象条件で実施したが、十分なデータ取得と整理は未実施である。通常レベルの降雨では計測に支障がないことを確認している。	精度および速度の屋外評価実験を行い、距離20m、各環境条件(晴天、曇天、昼夜間)で精度0.2mmで時系列データが取得できること。距離20mにて、変位の時間安定度0.2mm/H以内。温度安定度0.2mm/10°C以内(屋外、晴天下、コンクリート地面カメラ三脚設置想定)	屋外評価実験の目標の条件について不足するデータを取得する。

● 現時点の研究開発成果

3. ハードウェアの開発		最終目標	達成の見通し
3-① 構造物計測用撮像装置の開発	・計測領域が飛び飛びではあるが、横長カメラの試作を行い、橋梁のような横長構造物に適用する実験を屋内で行った。	実際のフィールドで試験を行い橋梁の支点付近と中央部の両方の変位を200mm角程度の領域に対して同時に0.2mm程度の精度で計測できること。	・現場での実験を行い、改良を加えることで目標の精度をめざす。
3-② 三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作	・3次元の変位計測で用いる三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作を行い、室内での原理確認実験を行った。	「三次元変位計測用キャリブレーション装置の試作」として、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))が計測できることをめざす。	・屋外での実験を行うことで、目標の精度が得られることを確認する。
4. アルゴリズム評価試験用計測システムの開発			
4-①. アルゴリズム評価試験用計測システムの試作	・ソフト版サンプリングモアレカメラによって試作済みであるが、対照比較実験についてはH28中に実施予定である。	対照比較実験を通して、アルゴリズムの評価を行い、評価目標値を定める。	・対照比較実験を行い、目標値を定める。
4-②. アルゴリズム評価試験用計測システムの評価	・実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価を行った。	各機関との計測実験を通してアルゴリズムの評価を行い、②-4で定めた精度を確認する。中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	・共同で計測実験を行えるように各機関との調整を行い、目標達成をめざす。
4-③. アルゴリズム評価試験用計測システムの改良	・実際の鉄道橋や道路橋で計測実験を実施してアルゴリズムの評価結果を元に、アルゴリズム評価試験用計測システムの改良(ソフトウェアの改良)を行った。	「アルゴリズム評価試験用計測システムの改良」中間目標:H27の研究開発成果を元に定めた評価目標値	・設定した目標を達成するように、システムの改良を進める。

● 現時点の研究開発成果

5. 橋梁用計測システムの開発		最終目標	達成の見通し
5-①橋りょう用計測システム試作	・奥行き方向以外の変位とたわみ角について、実橋梁での実証試験を行った。	「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10000ラジアンをめざす。	・奥行きはH28実施予定。
5-②橋りょう用計測システムの評価	・「橋梁用計測システム」としては、試作を行い、現場での検証実験により目標値を達成した。	「橋梁用計測システム」として、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/10,000ラジアンをめざす。	・達成しているが、現場で使いやすいシステムを構築し、現場での試験とその結果を元にした改良を行う。
5-③. 橋梁用計測システム改良	・x,y方向の変位については、現場での適用実験で実証した。z方向は、実験室内での検証は行った。たわみ角は、屋外での検証実験で、約1/30000ラジアン(30 μ ラジアン)を達成した。	変位 0.1mm(x,y方向), 1mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/20,000ラジアンをめざす。平成27年までにユーザー要求を把握して仕様を決める。	・z方向について現場での適用実験を行う。現場で使いやすいシステムを構築し、現場での試験とその結果を元にした改良を行う。

● 現時点の研究開発成果

6. 一般土木用計測システムの開発		最終目標	達成の見通し
6-①. 一般土木用計測システム試作	<p>・一般土木用計測システムにおいては、多くの対象物に適用することを試している。</p> <p>タワー上部(標点距離78m, 平均風速8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続2分間)では、±10mm前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した。バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した。</p> <p>また、トンネル内での24時間連続計測(1FPS)、擁壁の約1か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)ではX,Y方向の0.2mm絶対変位が計測できた。(測量機器, ワイヤー式変位計との比較)</p>	<p>「一般土木用計測システム」として、標点距離80mにて、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40°C, 昼間晴天下)を受けずに連続1分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続24Hの静的(1FPS)計測(絶対変位)ができること。</p>	<p>・対象とする構造物をある程度絞り込み、それに合わせて目標の検証を進める。</p>
6-②. 一般土木用計測システム評価	<p>・50m程度離れていても1ms以内のずれで撮影の同期ができるトリガ装置の試作を行っている。一次試作により評価を行い、改良版の本試作中である。</p> <p>タワー上部(標点距離78m, 平均風速8m/s)での加速度計との比較試験(昼間晴天時, 100FPS, 連続2分間)では、±10mm前後の変動変位が精度よく計測できることを確認した。バンドパスフィルタの使用により加速度波形とも良く一致した。</p> <p>また、トンネル内での24時間連続計測(1FPS)、擁壁の約1か月間断続(昼間のみ)計測(1FPS)ではX,Y方向の0.2mm絶対変位が計測できた。(測量機器, ワイヤー式変位計との比較)</p>	<p>稼働率100%の安定して計測できるシステム構築をめざす。発電機がなくても計測できる可搬性に優れた機器開発をめざす。「一般土木用計測システム」として、標点距離80mにて、変位 0.2mm(x,y方向), 2mm(z方向(奥行き方向))を、屋外計測現場での使用環境の影響(0~40°C, 昼間晴天下)を受けずに連続1分間の動的(20Hz)計測(相対変位), 連続24Hの静的(1FPS)計測(絶対変位)ができること。</p>	<p>・H28に第二次試作ができる。それを用いてH29に現場で評価実験を行う予定である。</p>
6-③. 一般土木用計測システム改良	<p>・対象物によっては目標を達成している。</p>	<p>変位 0.1mm(x,y方向), 1mm(z方向(奥行き方向)), たわみ角 1/20,000ラジアンをめざす。</p>	<p>・鉄道橋りょうと同じ技術を用いるため、鉄道橋りょうで評価と改良を行った後に、一般土木用のシステムとしても評価実験を行う。</p>

● 現時点の研究開発成果

7. 実証試験		最終目標	達成の見通し
7-①. 鉄道橋梁による実証試験	・一部, 前倒して実施している.	鉄道橋梁を対象として既存の計測装置と比較することにより実証試験を行う.	・H29,30に現場で使いやすい計測システムを試作し, 現場への適用試験を実施する.
7-②. 橋梁用診断アルゴリズムの改良		鉄道橋梁を対象とした実証試験の結果を元にしてアルゴリズムの検討および改良を行い, さらに評価実験によって性能を確認することで, 所要の計測精度の装置を開発する.	・同上
7-③. 鉄塔など土木建造物等による実証試験		鉄塔等の土木建造物を対象として実証試験を行う. ひずみゲージ等の各種センサと組み合わせ, それらと比較することで評価を行う.	・同上
7-④. 一般土木用診断アルゴリズムの改良		鉄塔など土木建造物等を対象とした実証試験の結果を元にしてアルゴリズムの検討を行い, さらに評価実験によって性能を確認することで, 目標の計測装置を開発する. H28までの研究開発成果を元に評価目標値を定める.	・H29,30に現場で使いやすい計測システムを試作し, 現場への適用試験を実施する. それを元に本項目を実施する.
8. 標準化, 規格化		最終目標	達成の見通し
8-①. 標準化, 規格化の調査	・日本非破壊検査協会の規格化については, 申請準備に入った.	規格の提案先を固定して, 8-②において提案する.	・H28,29,30に実施予定
8-②. 標準化, 規格化の提案	・現在, 未実施.	規格化をする.	・H29,30に実施予定

(1) 鉄道橋りょう用（ジェイアール西日本コンサルタンツ）

- ★通常の計測条件（視準距離30m以内）における計測精度は **実用レベルに到達**している。
- ★たわみ角が計測できる（従来手法の計測装置（I-DAPなど）では、たわみ角は計測できない）
- ★山陽新幹線においてその変状が多く確認されており維持管理上の課題となっている **BP沓を有する桁**における計測に対して、他の手法（リング式変位計など）と比べて、 **沓の回転機能を容易に計測**ができる。ターゲットパターンも設置しやすい。



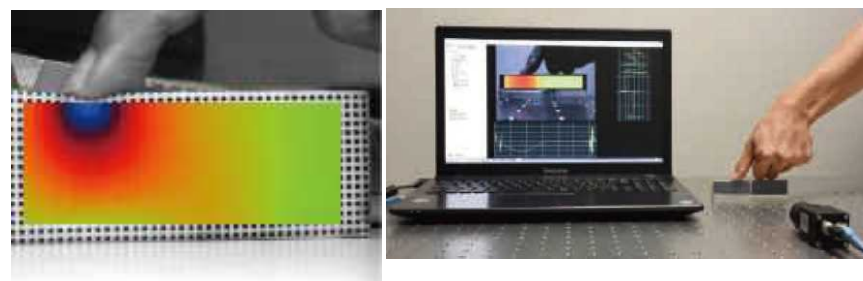
(2) 一般土木用（共和電業）

- ★各実証試験により「遠望多点同時変位計測方法」として従来計測手法（センサ取付方式，レーザー方式，画像計測方式）を凌ぐ可能性をユーザーとともに確認した。
- ★遠隔から容易に微小な変位が計測できる。



(3) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発（4Dセンサー）

- ★ハードの原価が安い（汎用ノートパソコンと汎用産業用カメラの組み合わせ）。
→安価に短時間で供給できる。
- ★バージョンアップも容易に実現
- ★新しいアルゴリズムの組み込みが容易
→特注仕様に短時間で対応できる。



(1) 鉄道橋りょう用（ジェイアール西日本コンサルタンツ）

- ★事業者の検査ルーチンに盛り込ませ、普及の促進環境を整備する。
 - ・たわみ角を管理指標として用いることの事業者の支持を得る。
 - ・本計測システム特有の健全度評価手法を提案し、事業者と協議・調整中である。
- ★降雨時の信頼度の向上、発電機不要なシステムの構築、機器のコンパクト化
 - ・機器稼働の信頼性向上や機器の使い勝手が優れていることが必要
- ★2～3年間の販売予定台数：数台／年（当面はJR西日本関連企業での利用）

(2) 一般土木用（共和電業）

- ★課題の改良と実証試験による実用化
 - ・ターゲットの取付方法とサイズ、撮影距離との関係を整理
 - ・天候による計測誤差対処法、あるいは長期計測時のカメラ固定方法や誤差の補正方法（固定点補正）を確立する。
- ★事業化①：既存のメンテナンス・計測会社や事業主・管理者への機器単品販売
 - ・機器単品販売。ユーザーの継続的な定期点検や長期定点観測がメインとなるため、画一的な計測方法となり販売台数が見込める。
 - ・まずは橋梁、タワー等がターゲット
- ★事業化②：本計測による点検業務を請け負う事業
 - ・計測コンサルティングサービス事業として、様々な構造物に対応できるノウハウを持っておく。
 - ・共和電業計測エンジニアリング部門で可能。
- ★2～3年間の販売予定台数：10～20台／年

(3) 橋梁用・一般土木用計測システムの開発(4Dセンサー)

★実地計測に即した製品

- 屋外での使用実績を増やす。
- 計測精度検証，市場ニーズの調査，それらのフィードバックにより使い勝手の良い製品にする。

★汎用製品と特機品

- 多くの企業や研究機関で使用できる汎用製品を安価に供給する。
- 用途に合わせて特別仕様に対応できるようにする。

★規格化・標準化についての取組み

- 知財面，規格化，製品の周知（NETISI）に力を入れ，提案手法・製品の競争優位性を確立する。

★2～3年間の販売予定台数：20～30台／年

開発システム共通事項

★現場で使い易いシステムを構築する。

★現場での計測実績を増やす。

★認知度を高める（技術，有効性，実績など）。

→これにより，多くの企業や自治体で使ってもらえるようにする。

★3年後以降，3年間の販売予定台数：30台／年

★6年後以降，5年間の販売予定台数：100台／年

- 対外発表状況（学会発表、ニュースリリース、展示会など）
- 知的財産出願状況

特許，論文，外部発表等の件数（平成28年10月末現在）

件名	件数
特許出願件数	1
査読有論文発表数	2
査読無論文発表数	0
外部発表	30
・国際会議（内，招待講演など）	9 (3)
・国内会議	17
・講演	4
解説記事	1
展示会	17
メディア発表	3
・雑誌／広報誌	2
・テレビ	1

◎現時点で，これ以外に2件の出願を予定している。

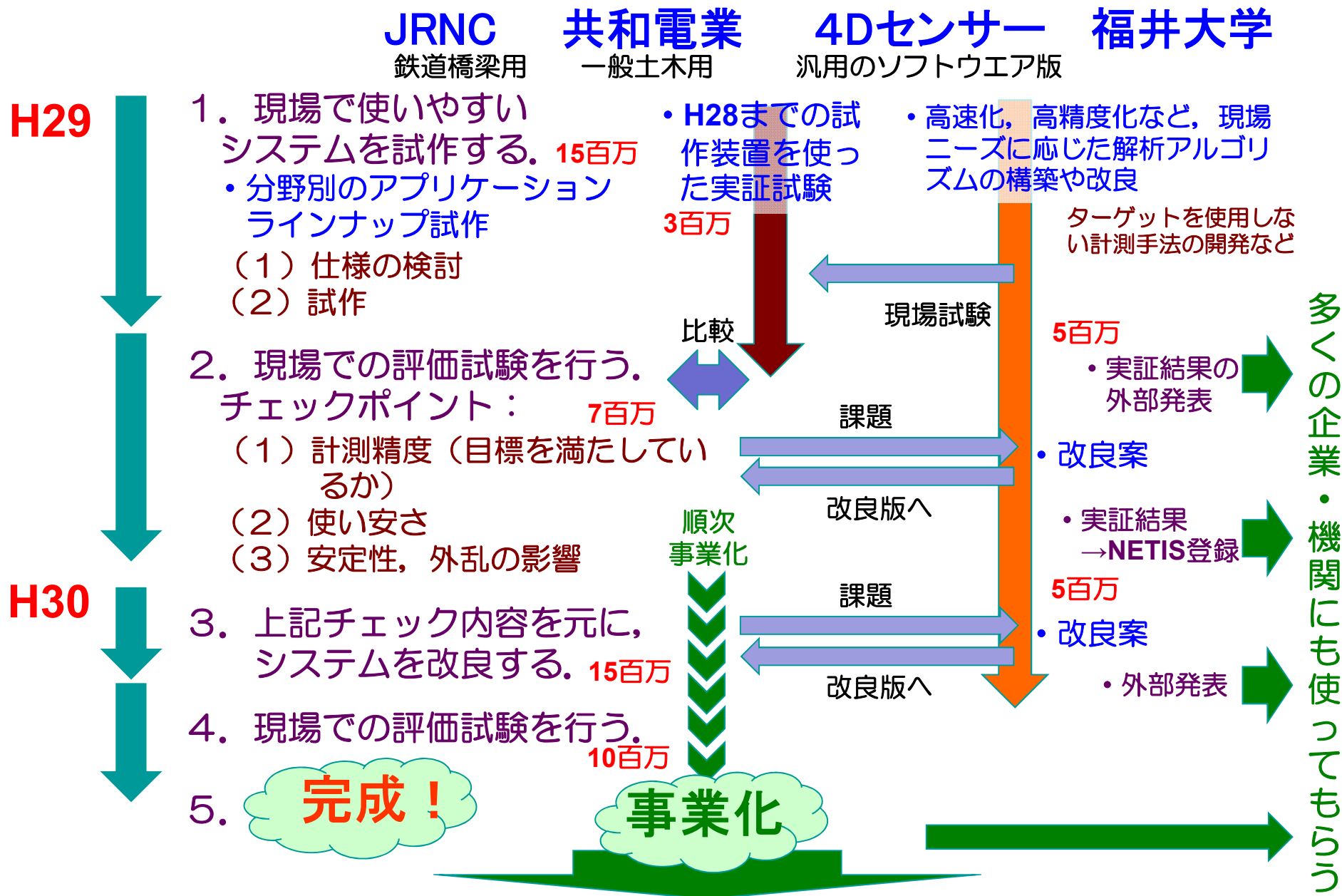
（2カ所に貼ったターゲットの相対変位計測，面外変位計測）

◎大学だけでなく，参加企業による発表も多い（論文1件，発表8件，展示会11件）

◎実用化をめざした技術開発であることを対外的にアピール

◎富山県で行った現場での実験の様子が地元テレビのニュースで放映された（共和電業）

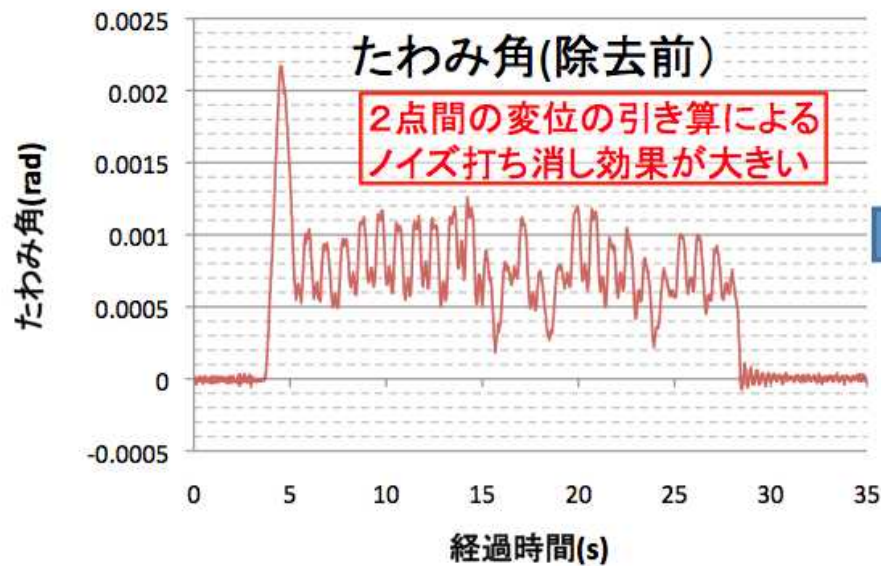
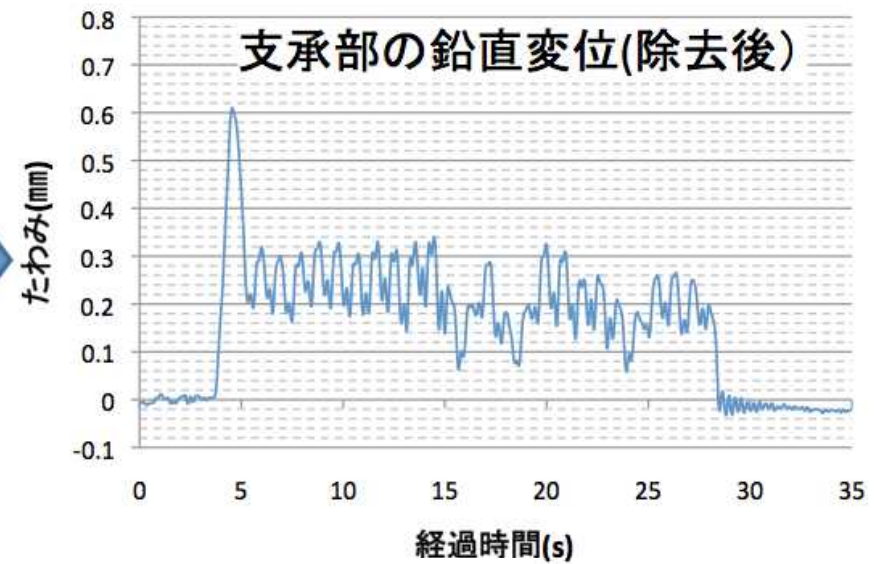
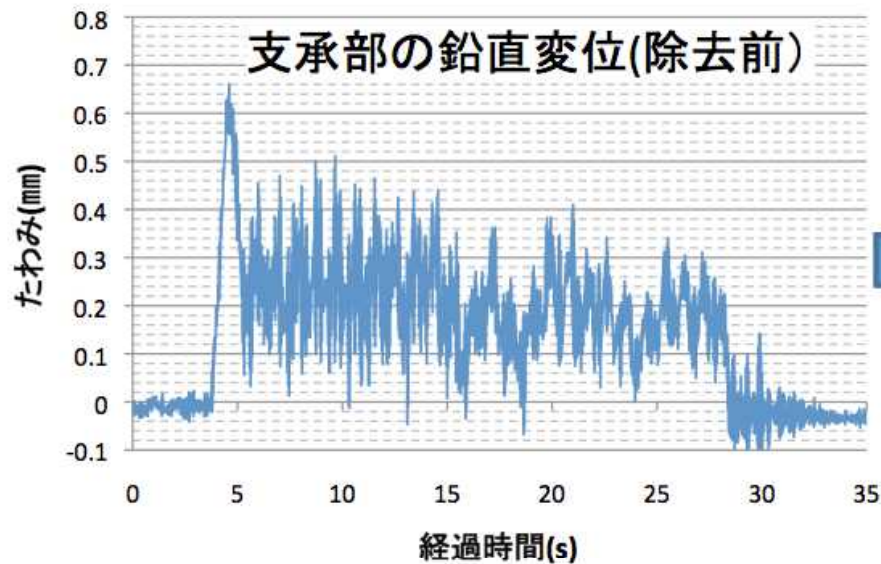
目標：インフラの実環境下で適用できるシステムを開発して実証試験を行う。



- 本スライドは発表時間外（質疑応答などの際）に使用する補足説明資料となります。必要に応じて作成ください。

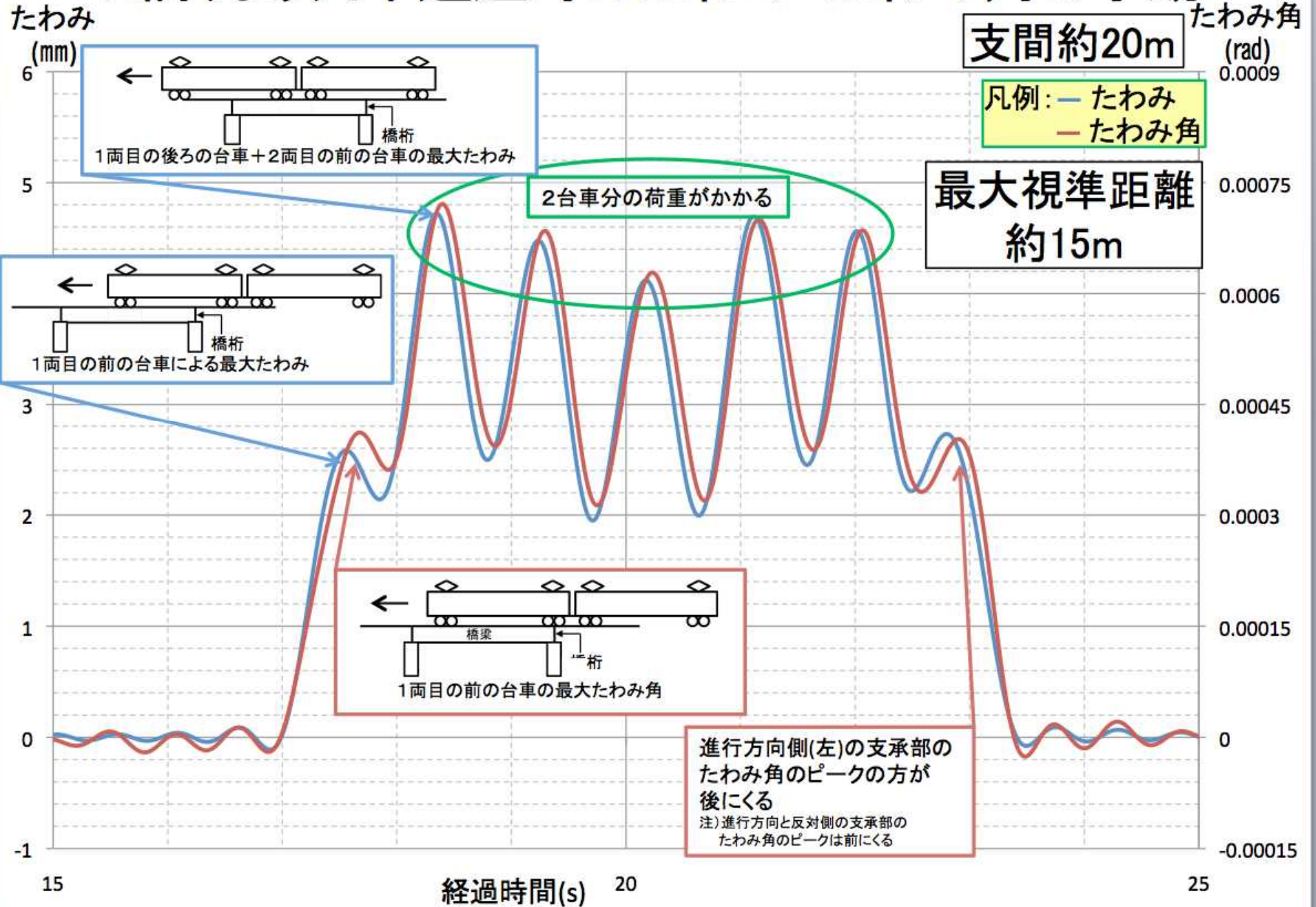
ジェイアール西日本 コンサルタンツ株式会 社

ノイズ処理 & 鉛直変位差による計測事例



変位が小さく、ノイズが卓越していても、列車通過に伴う桁の挙動が明瞭にわかる

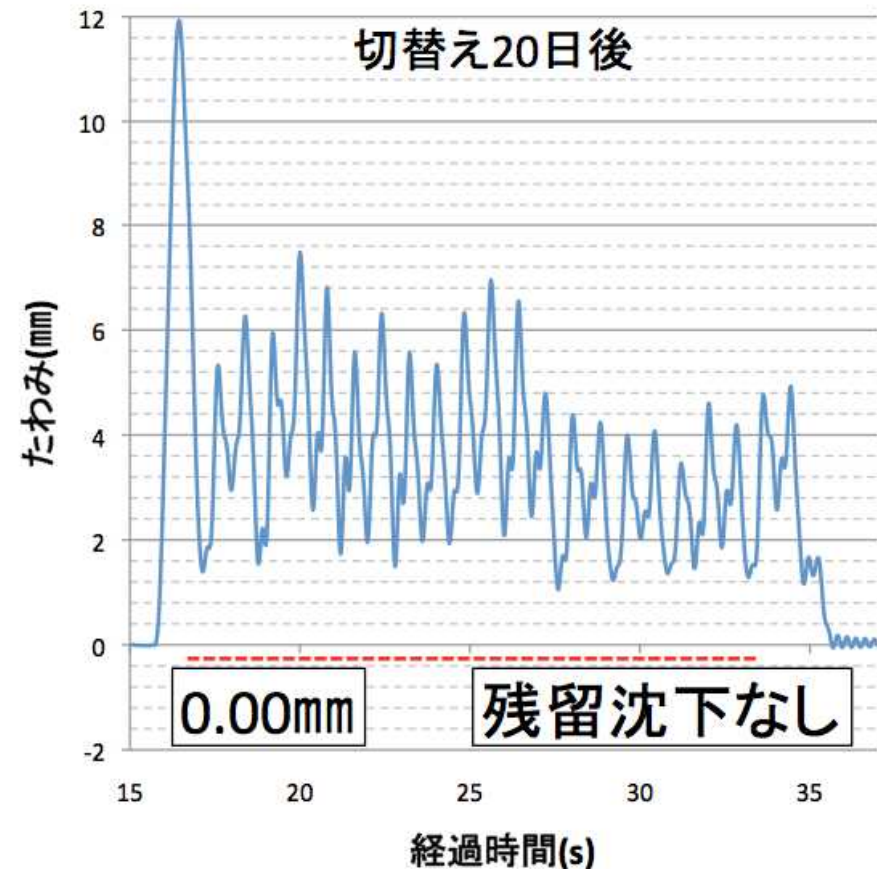
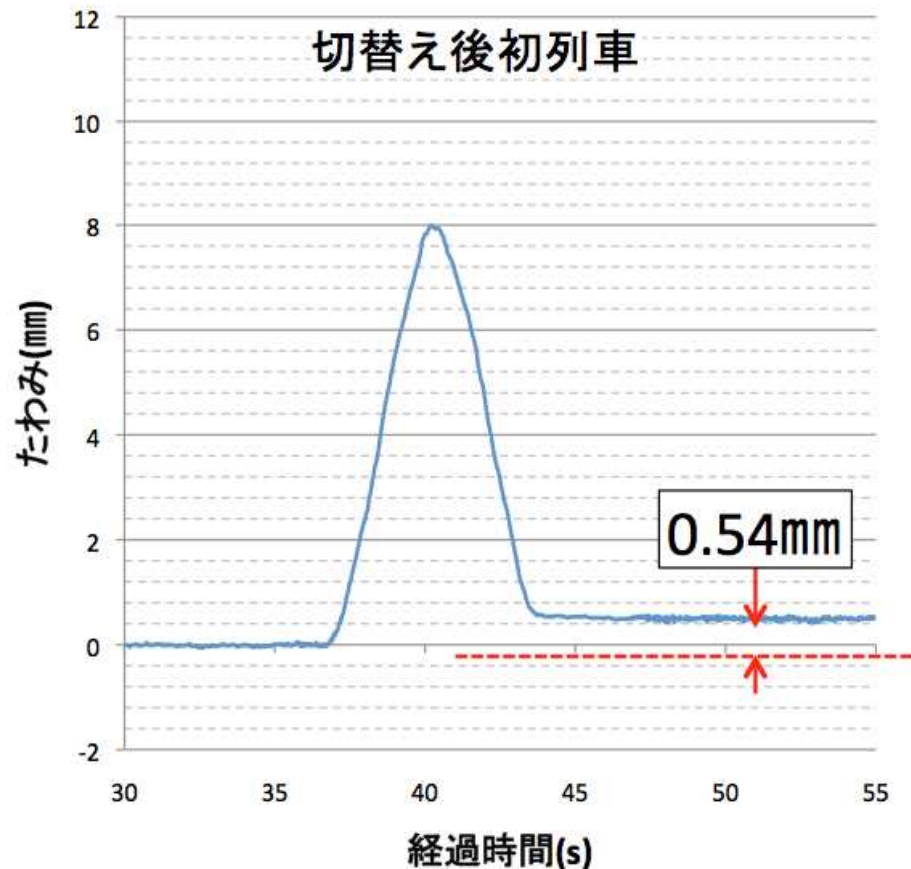
A橋りょう列車通過時のたわみ・たわみ角の挙動



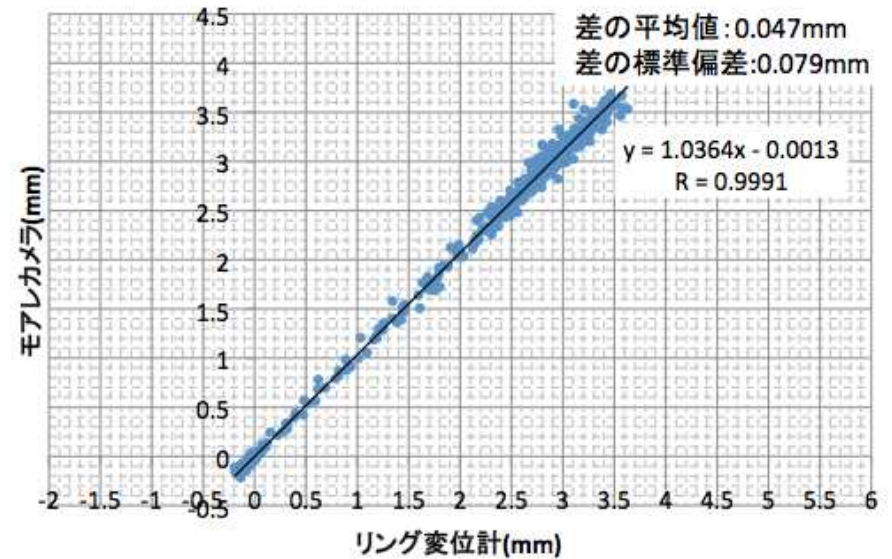
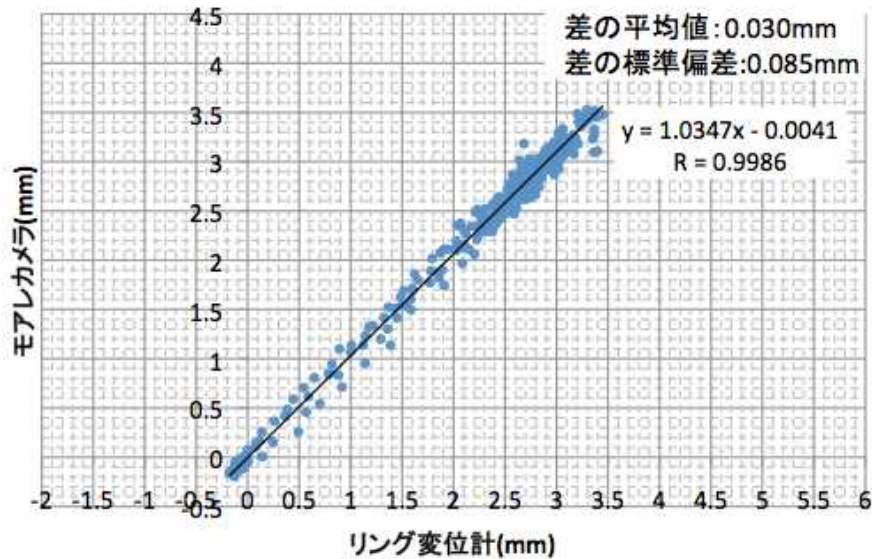
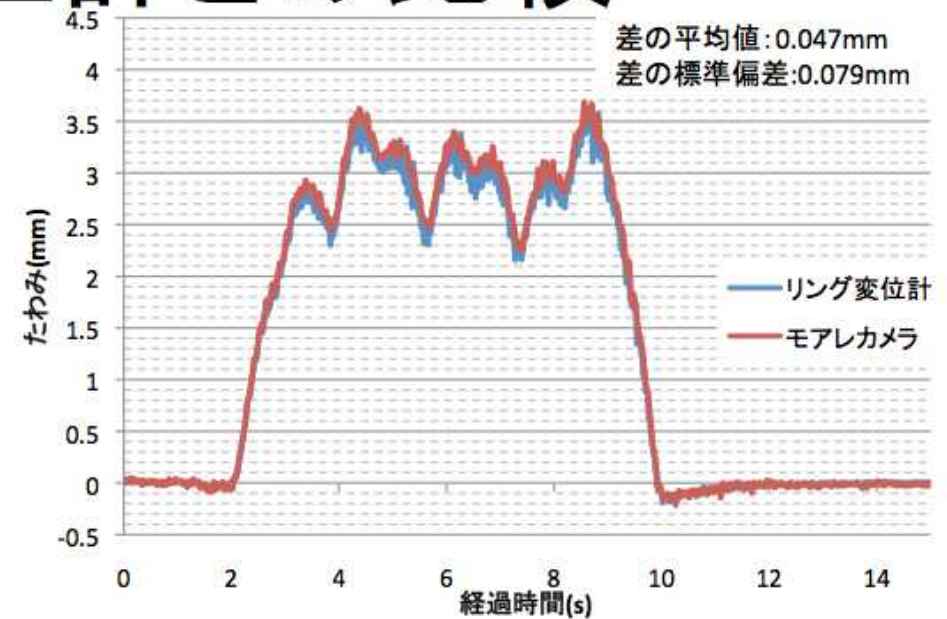
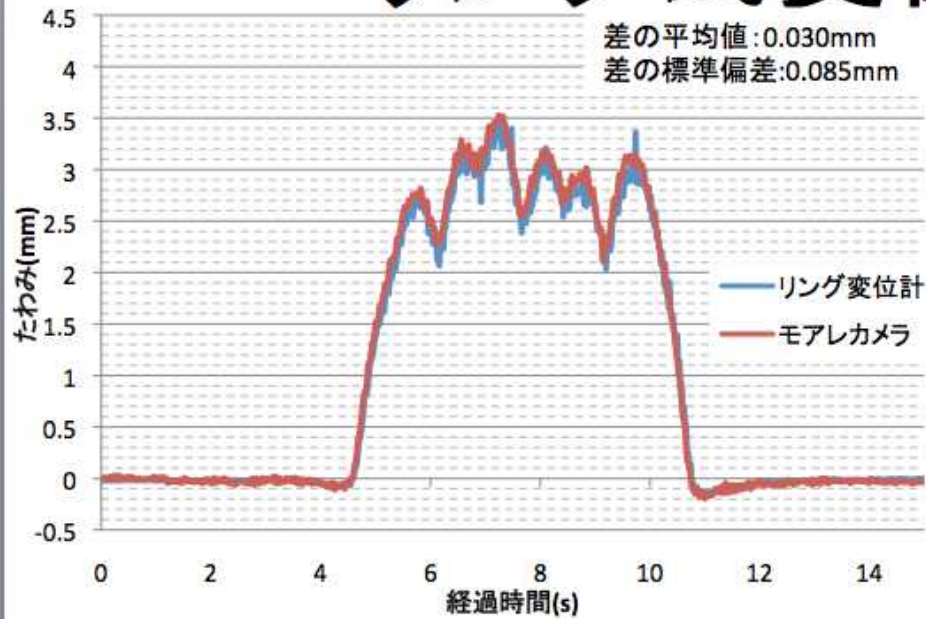
A橋りょう上り線における桁中央のたわみ

線路切替え直後と線路切替え20日後の計測例

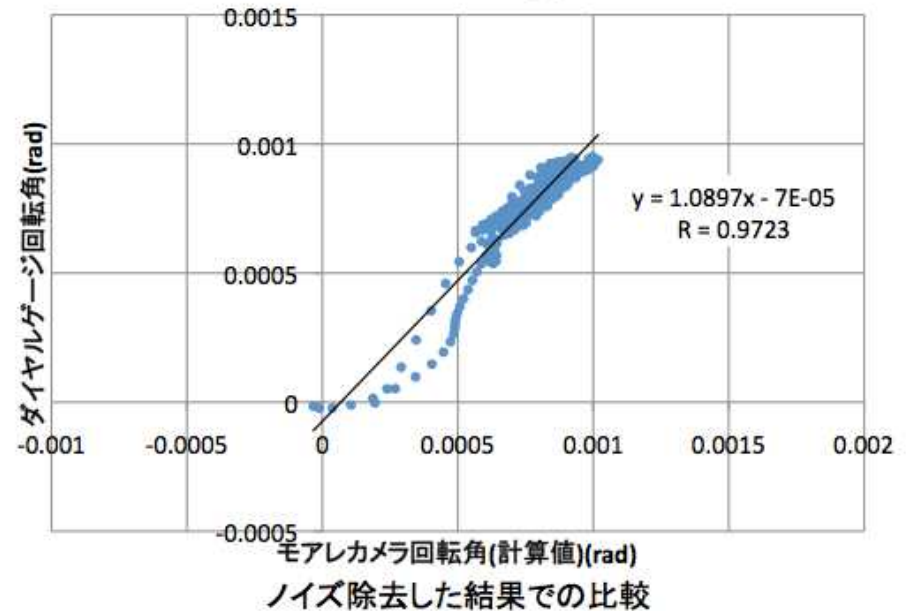
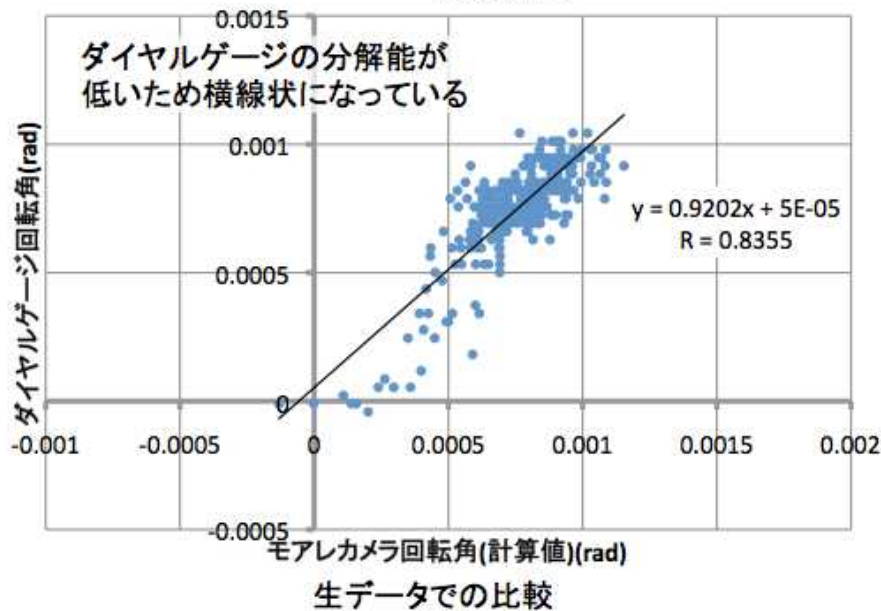
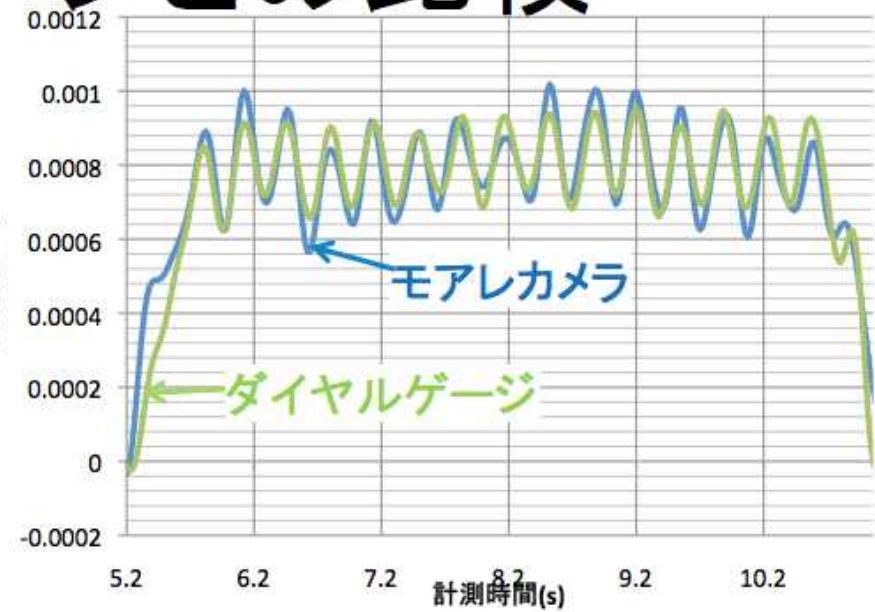
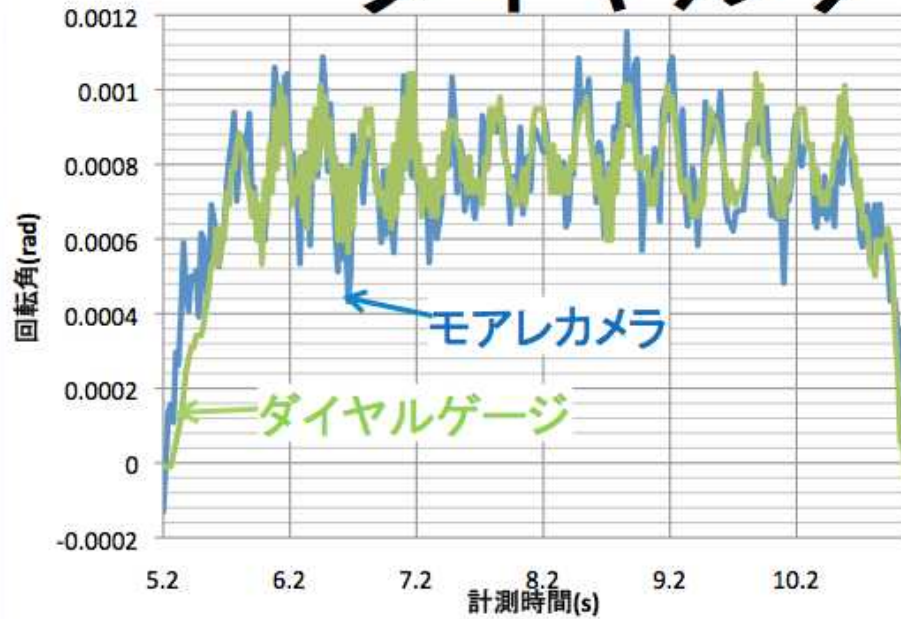
- 初列車の通過による残留変位(微小な変位)も計測されている



リング式変位計との比較

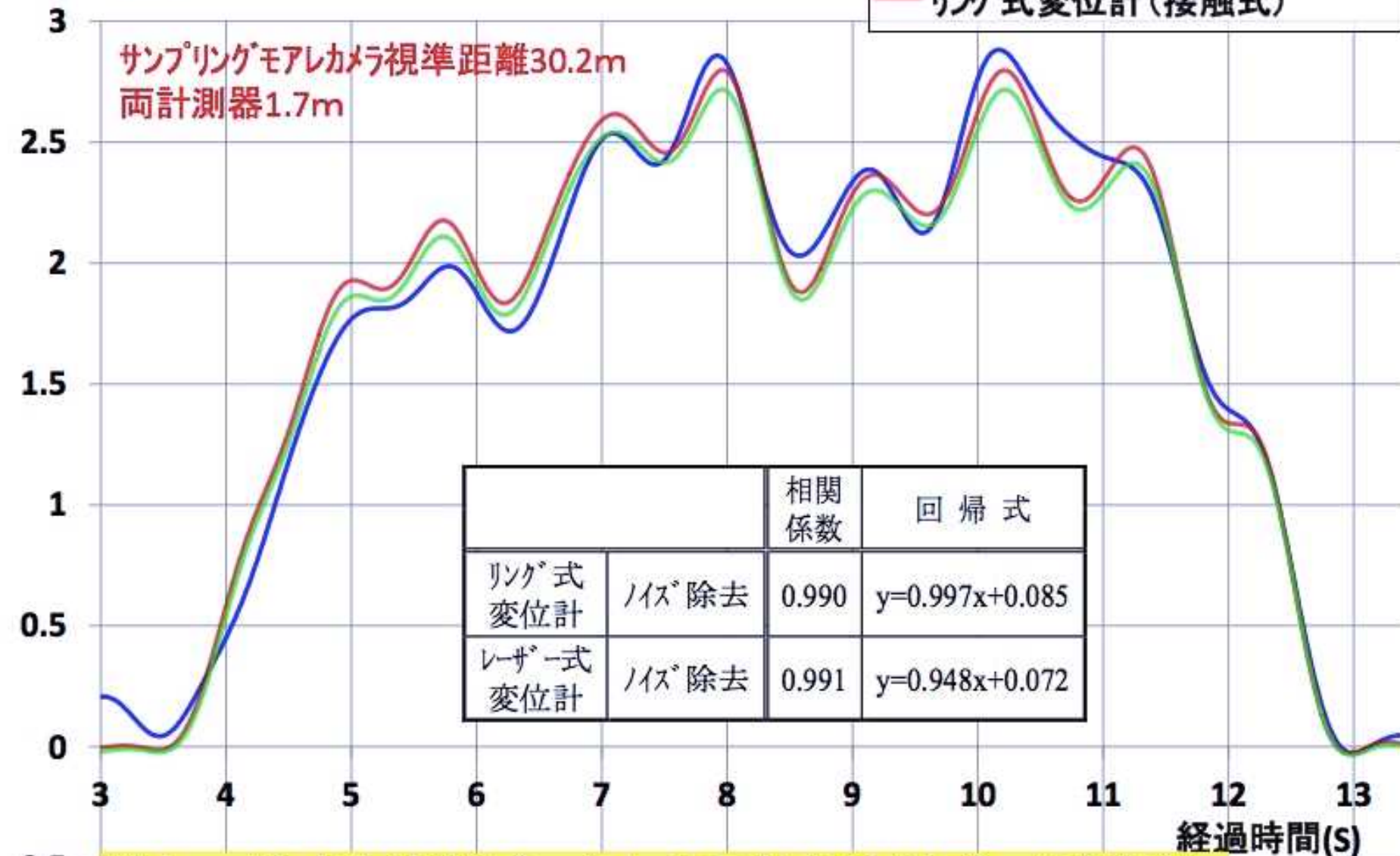


ダイヤルゲージとの比較



たわみの精度検証

たわみ(mm)



概ね一致する波形データから有効な計測データを取得

たわみ角の精度検証

たわみ角(rad)

0.0004

サンプリングモアレカメラ視準距離15.5m
両計測器1.75m、1.9m

凡例

- サンプルングモアレカメラ(非接触式)
- レーザー式変位計(非接触式)
- リンク式変位計(接触式)

59

0.0003

0.0002

0.0001

0

-0.0001

		相関係数	回帰式
リンク式変位計	ノイズ除去	0.973	$y=1.044x+0.000$
レーザー式変位計	ノイズ除去	0.724	$y=0.285x+0.000$

3

4

5

6

7

8

9

10

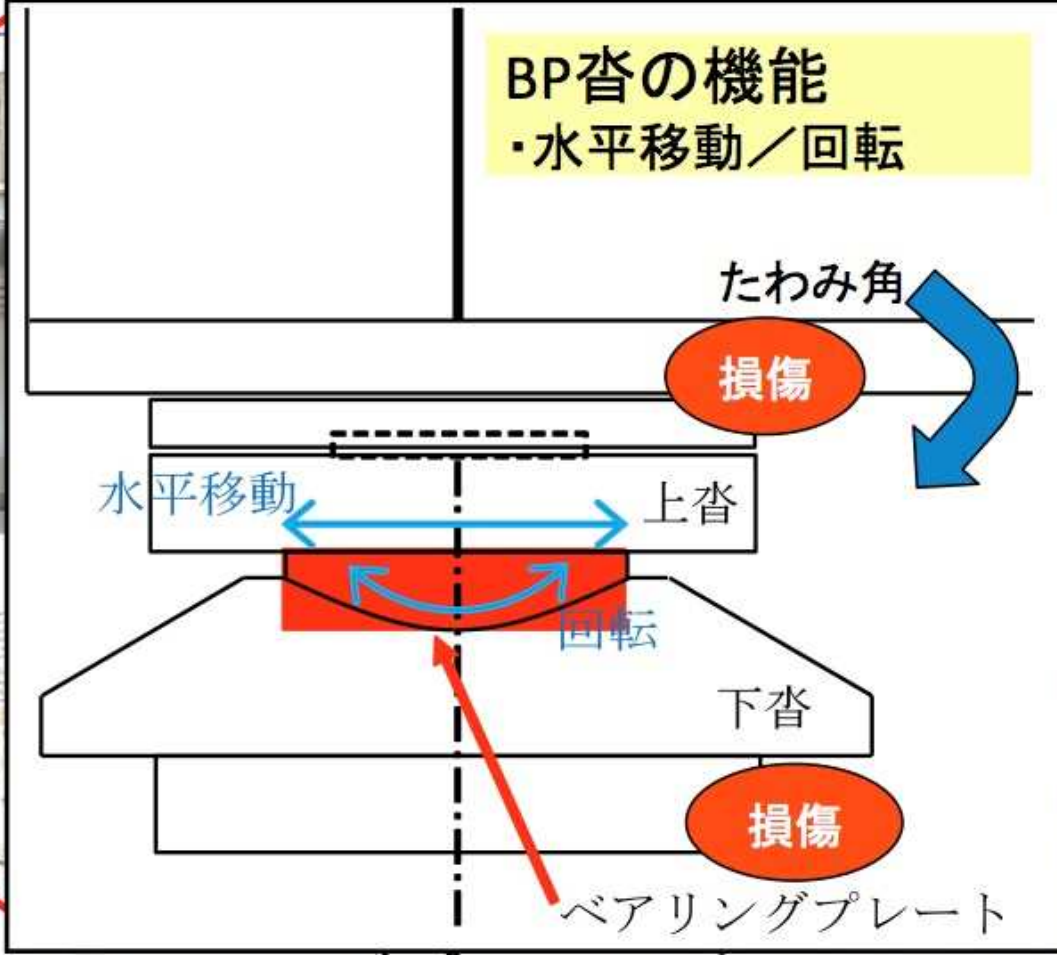
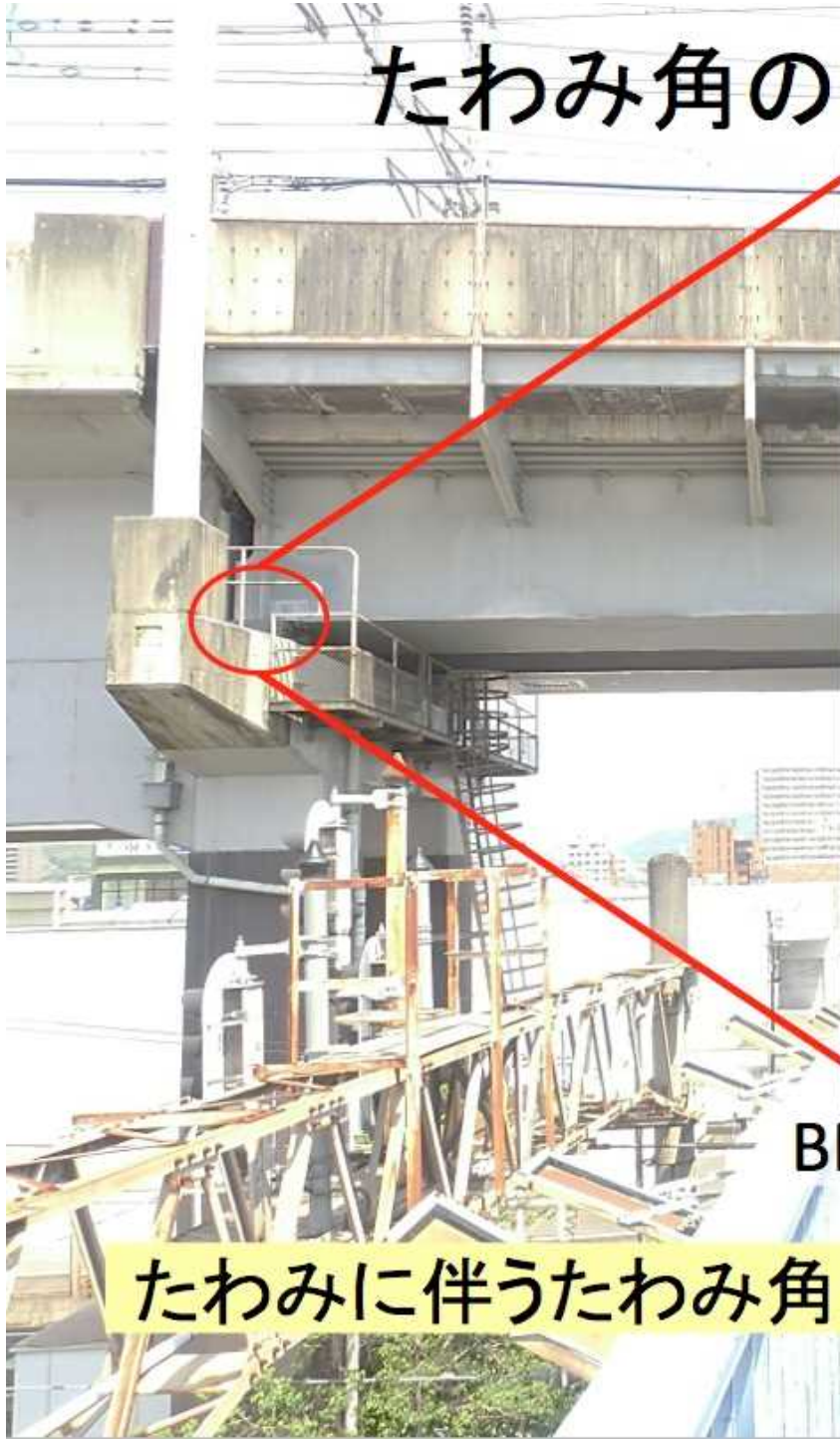
11

12

13

概ね一致する波形データから有効な計測データを取得 経過時間(s)

たわみ角の計測(可働不良)

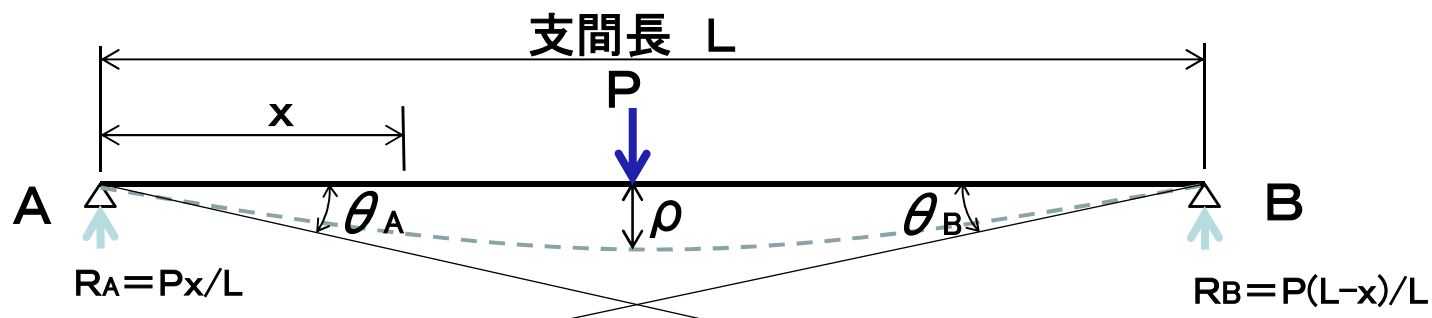


BP(ベアリングプレート)沓の断面図

たわみに伴うたわみ角が発生できず桁や橋台が損傷

時系列管理に資する健全度評価手法の提案

たわみ角・たわみ比の考え方



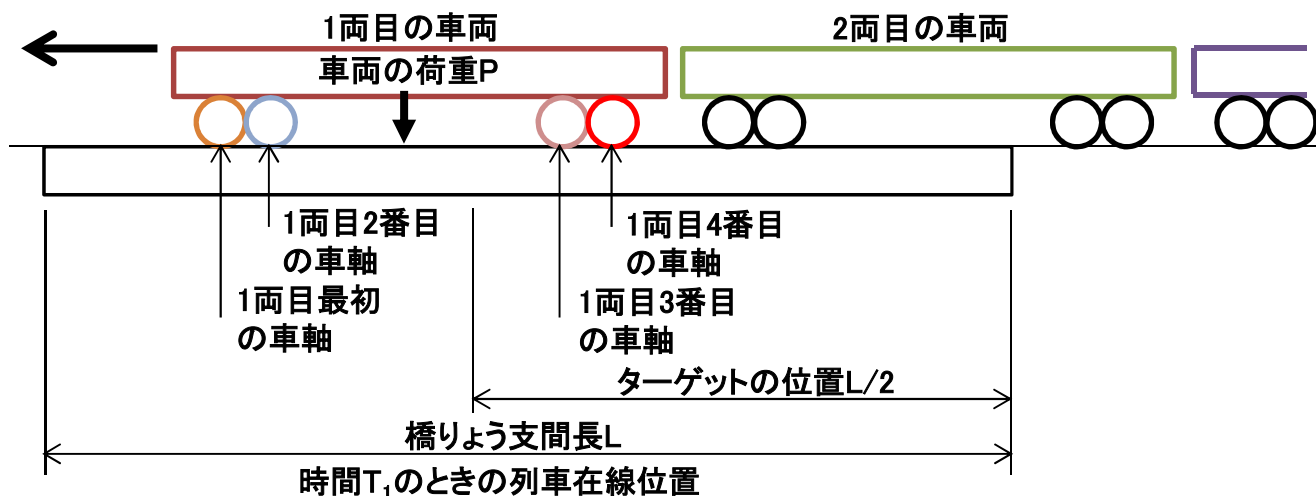
荷重点の曲げモーメント $M = Px^2/L$ $x = L/2$ の時 $M = PL/4$

スパン中央での撓みと支点撓み角の比較(一点集中荷重の場合)

- たわみ角の式 $\theta_A = ML/4EI = PL^2/(16EI)$
- たわみの式
 - 【径間中央】 $\rho_c = ML^2/(12EI) = PL^3/(48EI)$
 - 【点Xの位置】 $\rho_x = PL^3/(48EI) \times (3x/L - 4x/L^3)$
- たわみスパン比 ρ/L
- たわみ角/たわみスパン比 $= \theta_A / (\rho/L) = 3$ 【径間中央】

桁のEIが一定の場合、集中荷重Pが作用したとき
たわみ角とたわみ量の比は定数となる

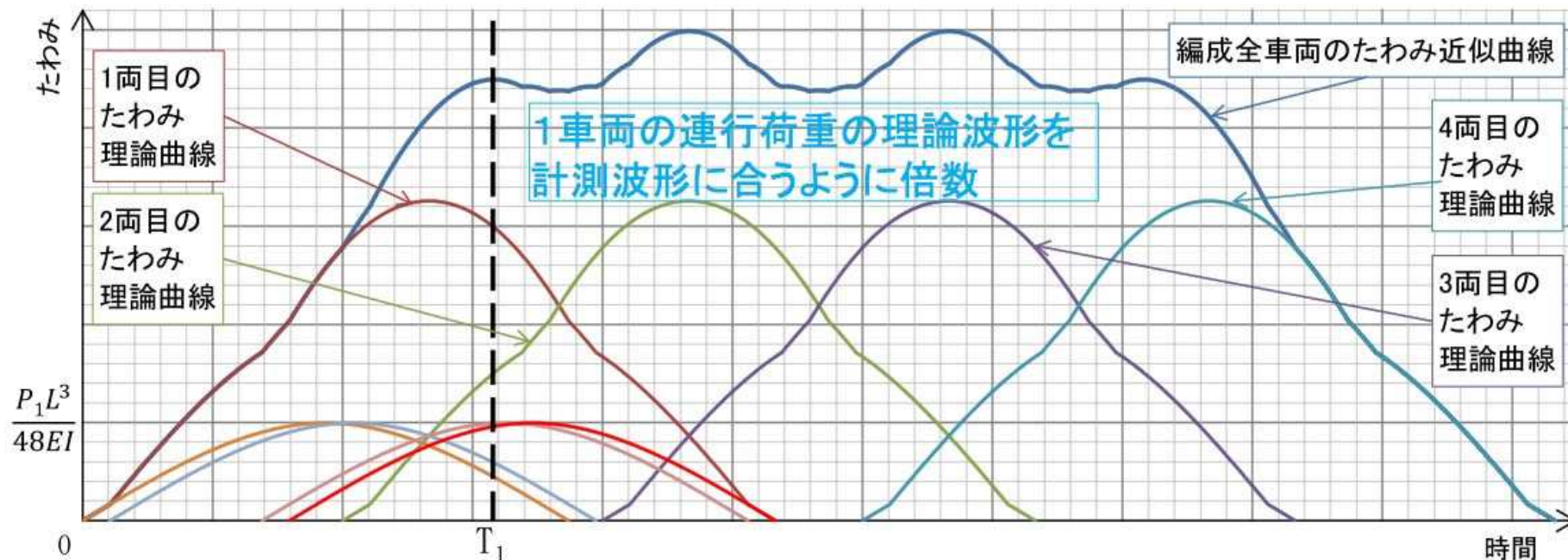
～たわみ角管理(理論)波形の作成～



- 1両目最初の車軸のたわみ理論曲線
 - 1両目2番目の車軸のたわみ理論曲線
 - 1両目3番目の車軸のたわみ理論曲線
 - 1両目4両目の車軸のたわみ理論曲線
- $P_1 = 1/4 \times P$

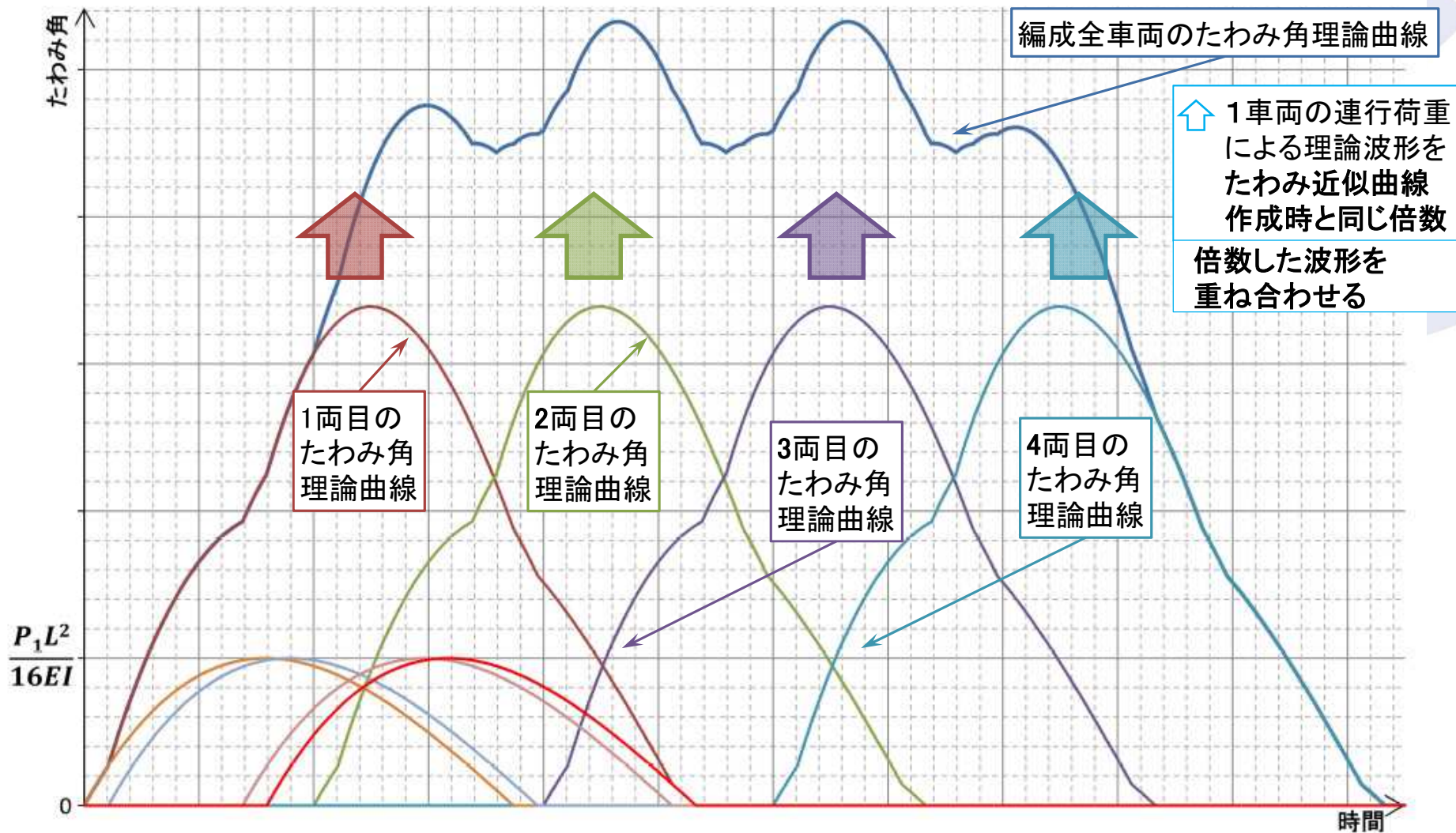
●たわみの計測波形に理論波形を整合させたたわみ近似曲線の作成

【仮定】①列車速度は一定, ②1車両当たりの荷重Pは各車軸に均等配分

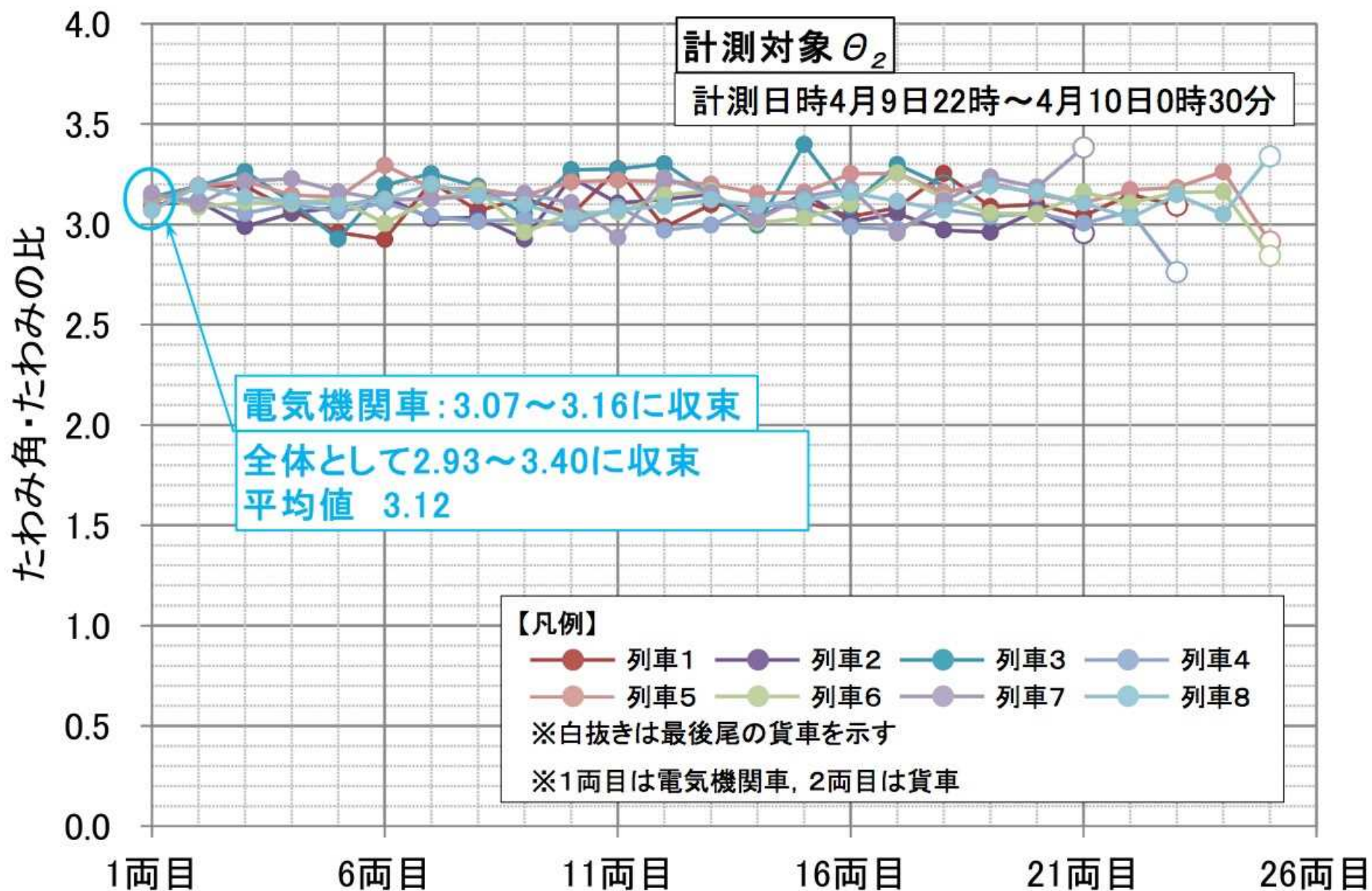


時系列管理に資する健全度評価手法の提案① たわみ角管理(理論)波形の作成

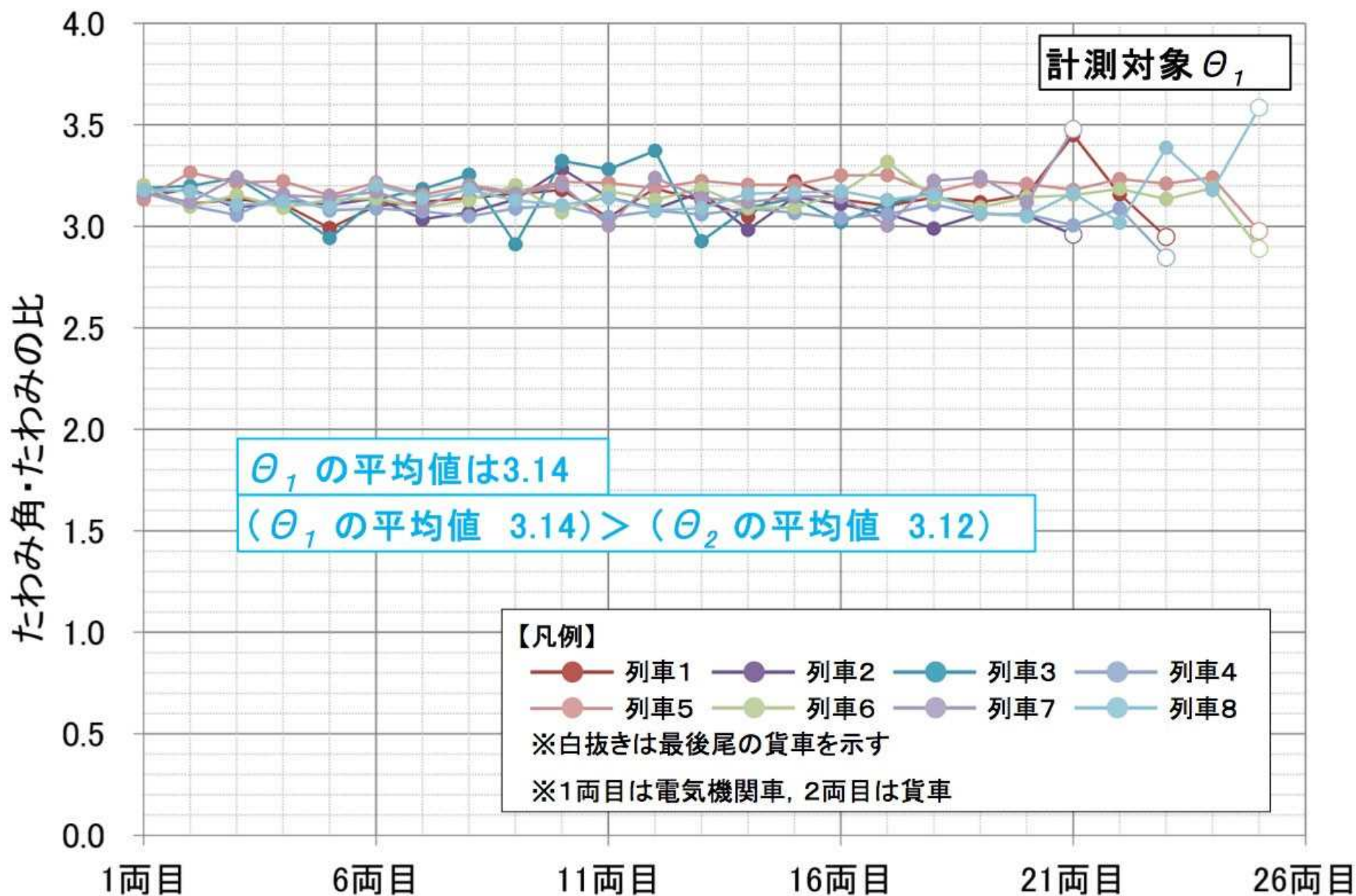
- 【凡例】
- 1両目最初の車軸のたわみ角理論曲線
 - 1両目2番目の車軸のたわみ角理論曲線
 - 1両目3番目の車軸のたわみ角理論曲線
 - 1両目4番目の車軸のたわみ角理論曲線
- $P_1 = 1/4 \times P$



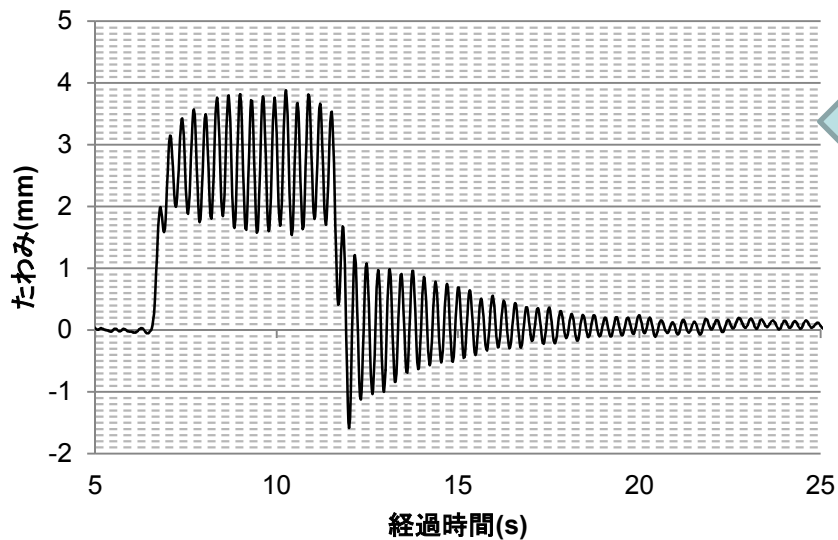
供用間もない新設(単線)桁のたわみ角・たわみの比



供用間もない新設(単線)桁のたわみ角・たわみの比

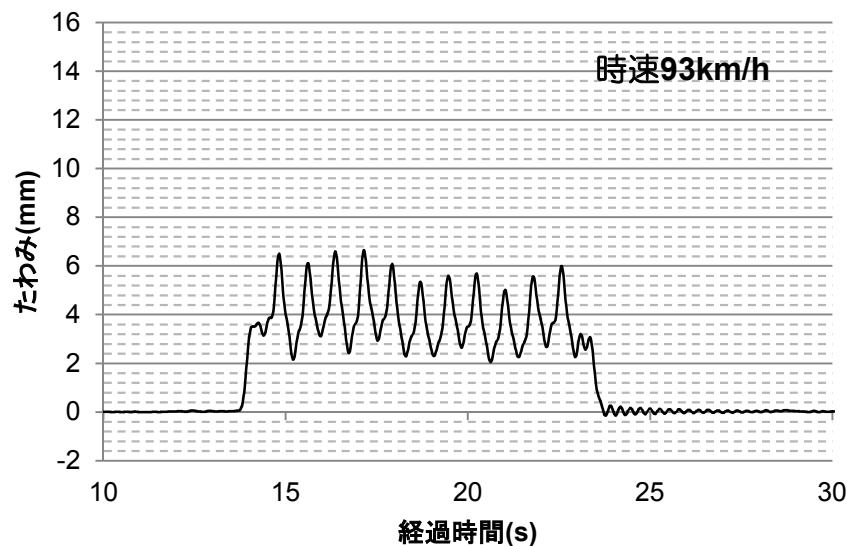
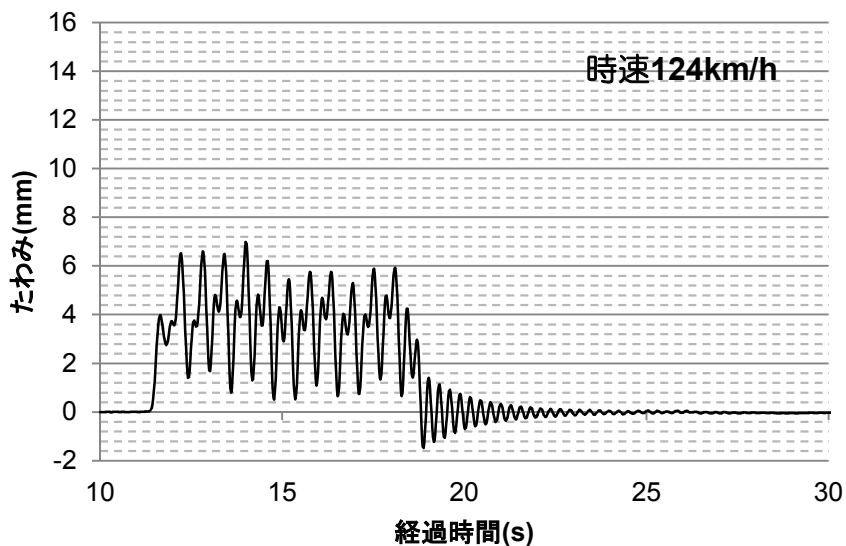


桁の自由振動

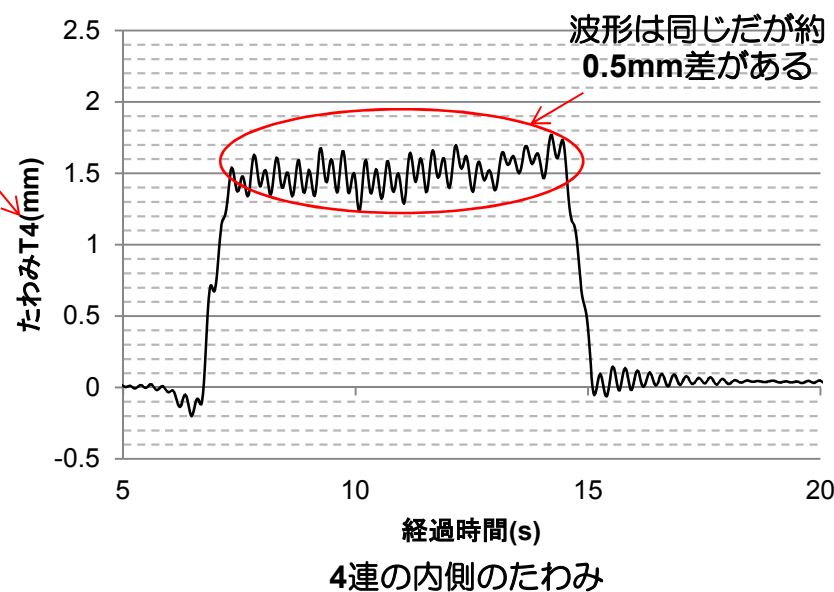
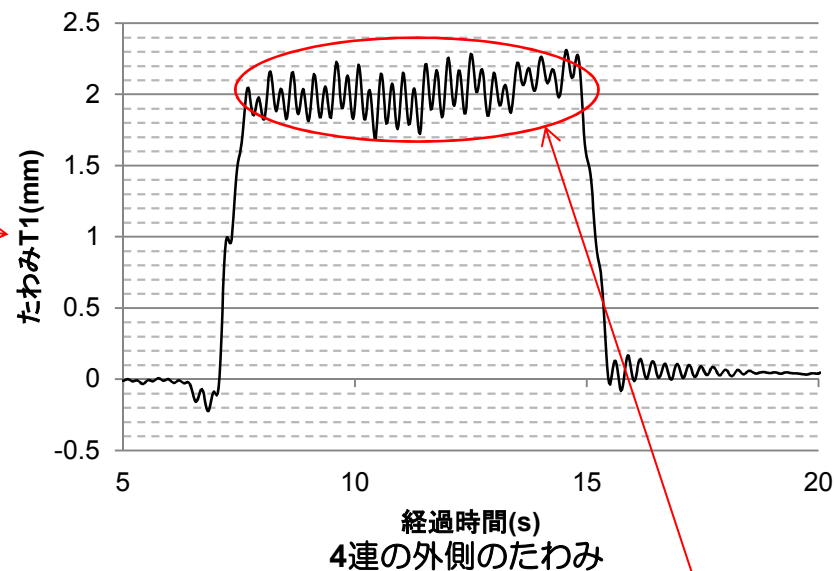


列車通過後の桁の自由振動の例
 大きな自由振動が通過後に収まっていく状況
 がわかる

列車速度による自由振動の違い
 この橋りょうでは120km/h程度の速度の場合
 大きな自由振動が発生する



主桁のたわみと列車載荷位置との相関関係



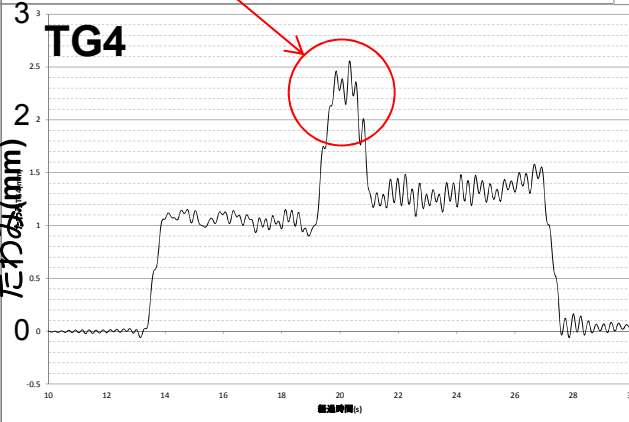
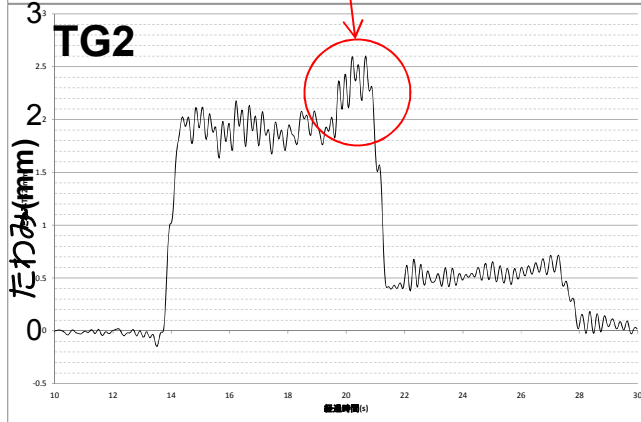
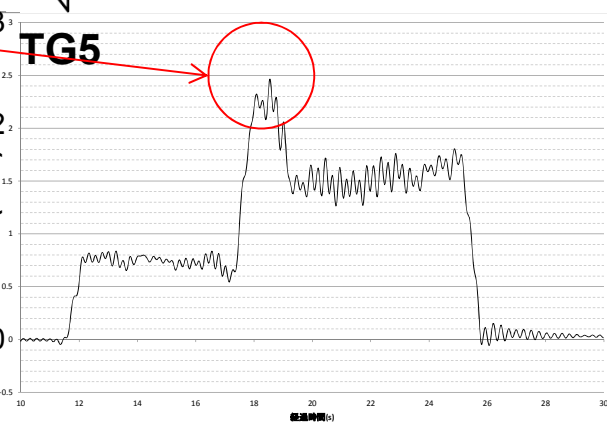
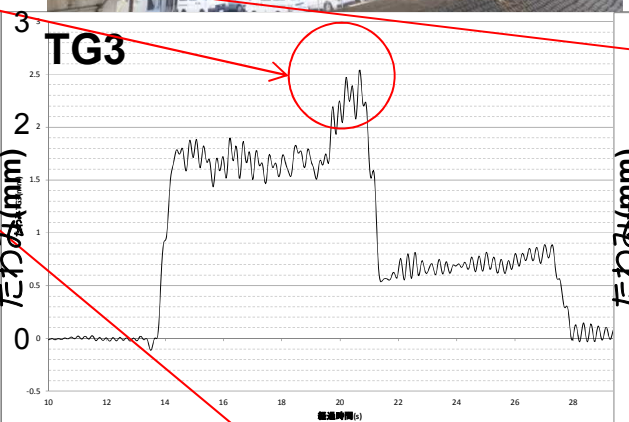
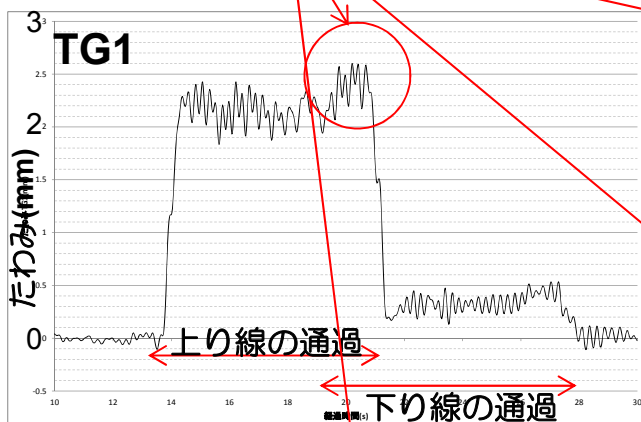
上下線列車の同時通過

上下線の列車が交錯したことによるたわみの変化

上下線が同時に橋りょうに乗って荷重がかかったため、ターゲットの位置にかかわらずピークはほぼ同じ



下り線 外側の主桁	
下り線 外側から 2 本目の主桁	
下り線 外側から 3 本目の主桁	
下り線 外側から 4 本目の主桁	TG5
上り線 外側から 4 本目の主桁	TG4
上り線 外側から 3 本目の主桁	TG3
上り線 外側から 2 本目の主桁	TG2
上り線 外側の主桁	TG1



TG1では上り線通過時の方がたわみ量が卓越しているが、TG5では下り線通過時の方がたわみ量が卓越している
 →橋りょうの横断方向に均等に荷重がかかっていないことがわかる

株式会社共和電業

最近の活動報告(研究開発成果や実施状況報告)

9-①. ニーズの調査

- ・「1-②. 適用可能性の調査(一般土木用)」での実計試験データにより、各対象構造物毎のユーザニーズや改良点、要求性能・課題を整理していく。

技術紹介・広報活動

- ・3月2日～4日 東京ビックサイト

「風力発電展」に出展し、風車翼模型による変形計測デモンストレーション展示を行った。

- ・7月20日～22 東京ビックサイト

「インフラ維持管理展」に出展し、ブース動揺計測のデモンストレーション展示を行った。

- ・8月19日 名古屋大学

「中部地方の橋をどう守るかを考えるシンポジウム(SGST主催)」で、デモンストレーションを行った。

現状の課題

1-②. 適用可能性の調査

- 実証試験現場毎のターゲットの設置方法, サイズ
- 距離と撮影範囲の相関性の確認
- 用途毎の精度確認, 性能・仕様の整理

ex. 測定Ch数, サンプルング速度, 収録時間, 操作性, 設置方法

2-④. 一般土木用診断アルゴリズムの開発

- トンネル施工管理, 安全監視向け長期モニタリングとしての検討
- 道路コンクリート橋モニタリング向けとしての検討
- 長期変状計測向けとしての検討

9-①. ニーズの調査

- その他の計測手法（画像計測, 非接触計測）との差別化検討

4Dセンサー株式会社

課題を踏まえた開発内容（4Dセンサー株式会社）

2-①. 三次元変位計測アルゴリズムの開発

変位・ひずみについて時系列データを取得するソフトウェアの開発を行った。
原画像保存により再解析可能（解析手法の改善に利用）。

2-③. 橋梁用診断アルゴリズムの開発

たわみ角算定のために複数領域ごとの個別解析機能を設計した（実装中）。

2-④. 一般土木用診断アルゴリズムの開発

現場計測実験に参加し、問題および要件抽出を行い、道路橋・一般建造物用診断アルゴリズム・画面仕様の検討を行った。

アルゴリズム改善（単一カメラによる奥行方向変位計測の可能性検証）の発表・デモを行った（SSII2015）。

4-①. アルゴリズム評価試験用計測システムの試作

原画像保存による後解析評価試験用システムを開発し、屋外試験を行った。
新規アルゴリズム評価用SDKの要件抽出・設計を行った。

8-①. 標準化，規格化の調査

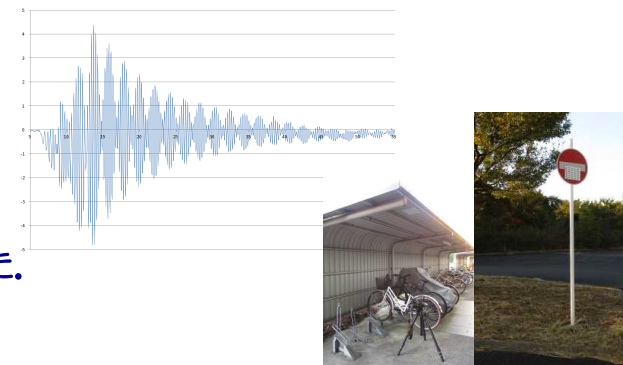
(1) 標準化

国土交通省のデータベース「NETIS」に登録について（国土交通省・近畿技術事務局に対して）調査・情報収集を行った。

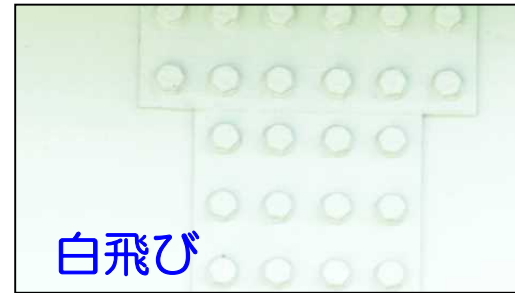
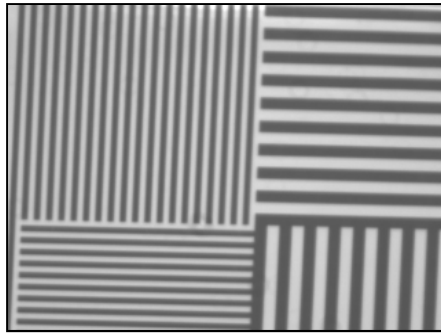
また建造物被害状況モニタリングのための要件調査・適用可能性検討を行った。

(2) 規格化

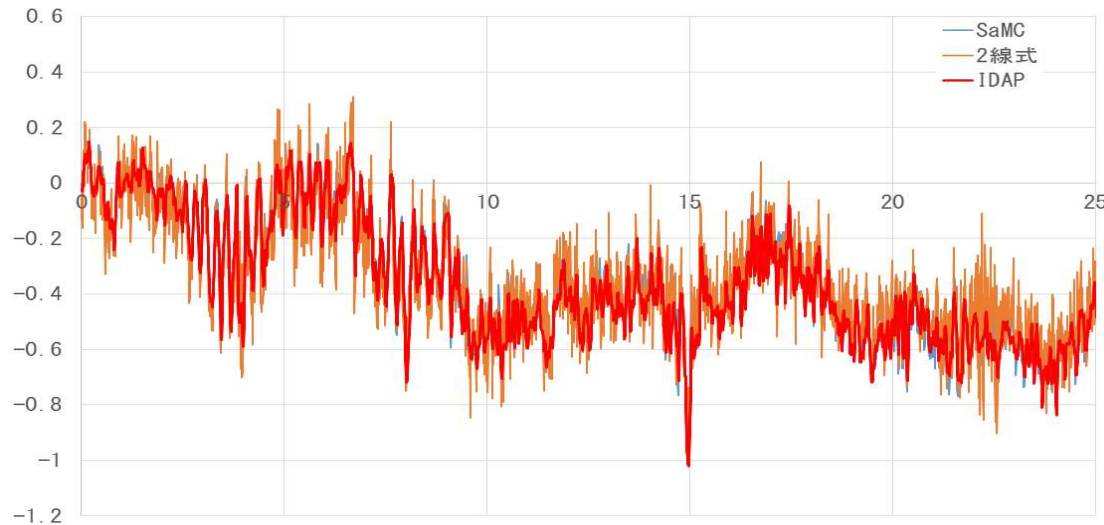
展示会等（関西設計・製造ソリューション展）にて民間規格について調査を行った。



- 画像相関法とSaMC, 2線式を比較する
- デジカメおよび USB 3.0 (対象画像は異なる)



道路橋である六十谷橋を撮影した。
 道路橋の歩道そばの欄干に格子板をクランプで設置した。
 IDAP での撮影も同時行い、中央部の橋桁接合部（ボルトの場所）をターゲットにした。
 Canon Eos の動画は撮影ミスで白飛びしてしまっていたが、かろうじてボルトが写っており、これを対象に解析を行っている。



撮影: 2016/7/29 11:25
 測点: 六十谷橋
 機材: Eos Kiss X5 FHD 29.97 [fps]
 距離: 20.0 [m]
 傾斜角: 16.0
 焦点距離: 291.69
 IDAP: 200 x 200画素, フィルタサイズ 3
 2線式: USB3.0, 100.02 [fps]
 256画素 x 8, フィルタサイズ 3
 SaMC: USB 3.0 100.02 [fps]
 200 x 200画素平均

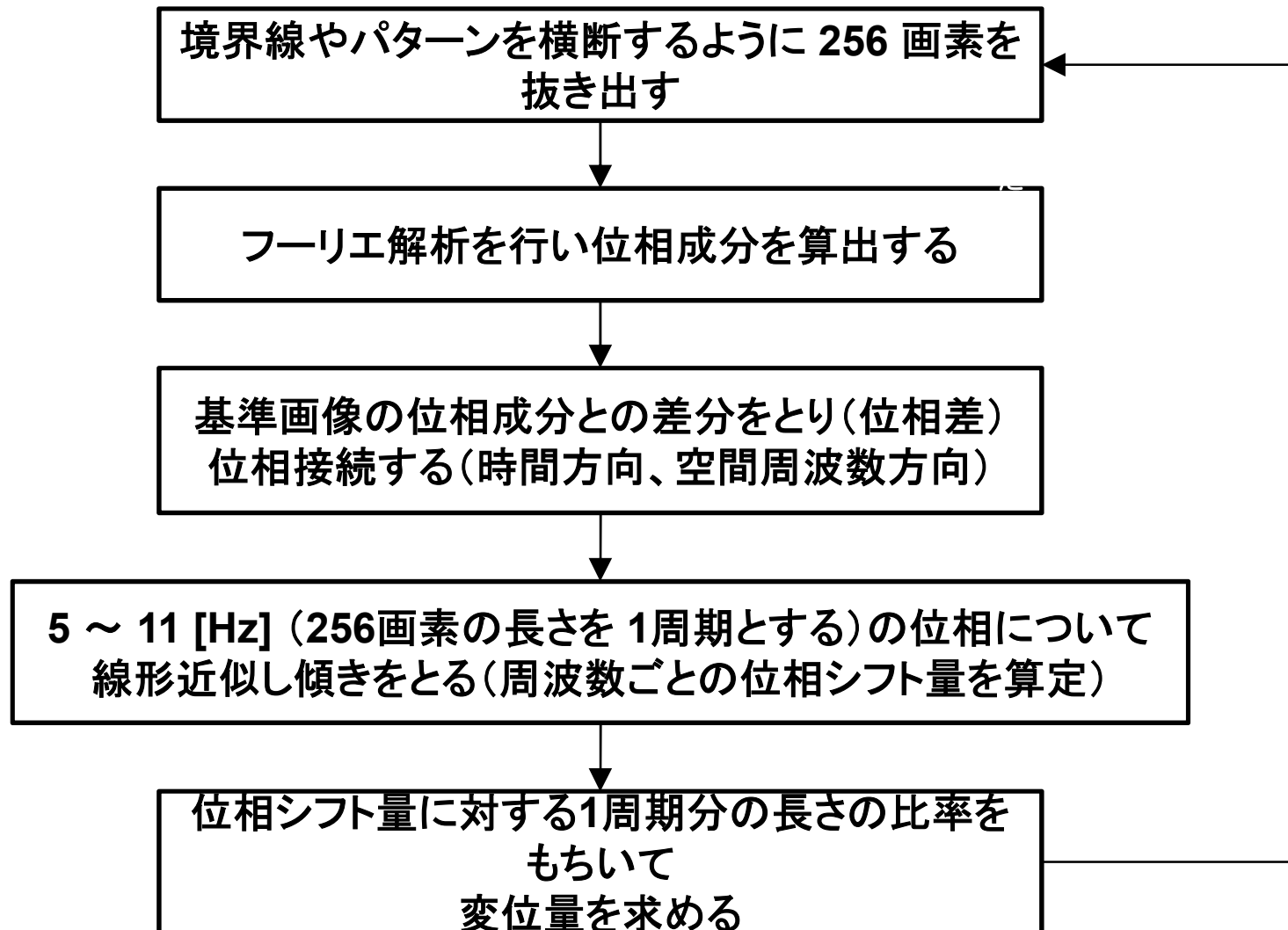
今後の計画

- ▶ 2線式をアプリケーションに機能として追加したい
- ▶ 機能仕様や使用方法を確定していきたい

▶ 問題点

- ▶ 画像相関法と同じく、画素寸法の特定をどうするか
 - ▶ 現在は撮影前にアルミスタッフでマーカを記録して参照している
- ▶ 道路橋測定では何をどう計測するかよくわからない
 - ▶ 振動はわかるが、何が、いつ通過したか不明
 - ▶ どうなれば異常として検出できたことになるのか不明
 - ▶ 大型で重量の分かる車両を通過させる？
 - ▶ 加振機を使用？

➤ (今回は)簡便な方法で2線式を適用した



和歌山大学

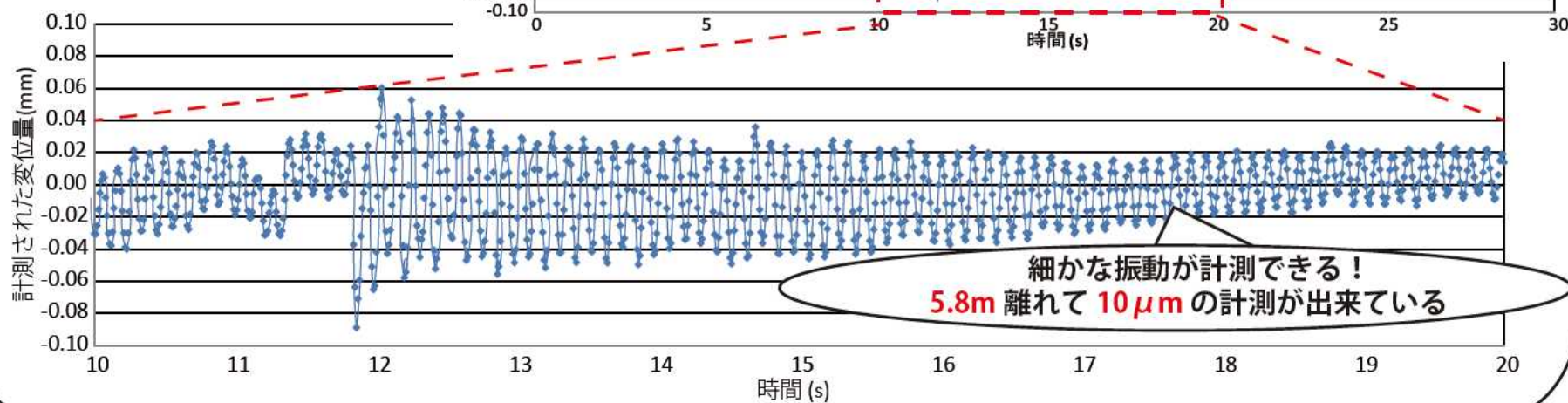
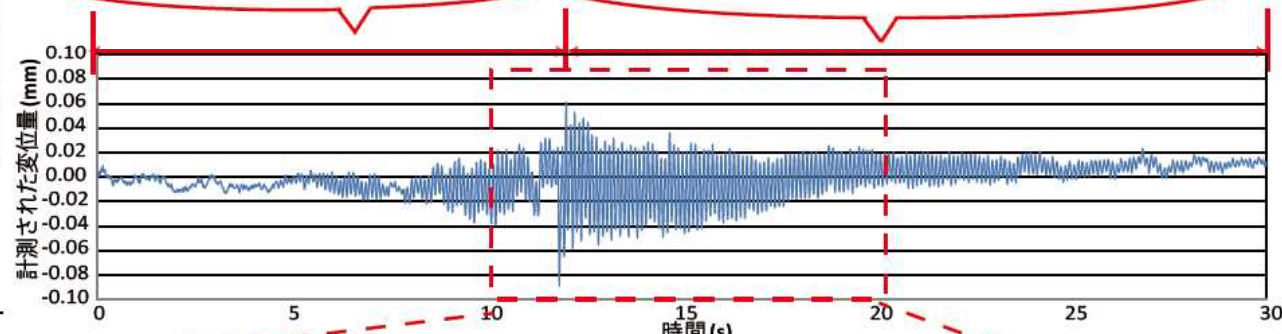
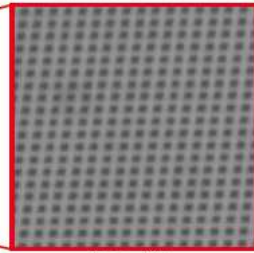
渡り廊下の計測

○渡り廊下で人が歩いたり，ジャンプをしたときどのように振動するのか計測した。

実験の条件	
計測距離	: 5.8 m
画像	: 256 × 256
平滑化数	: 13
間引き数	: 13
フレームレート	: 100 fps
露光時間	: 4.5 ms
格子ピッチ	: x 方向 1 mm y 方向 1 mm



撮影風景 (カメラと格子の距離)



細かな振動が計測できる！
5.8m 離れて 10 μ m の計測が出来ている

3次元変位計測手法の開発

和歌山大学

$$\begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix} = A \begin{pmatrix} \Delta\phi_{1i} \\ \Delta\phi_{1j} \\ \Delta\phi_{2i} \\ \Delta\phi_{2j} \\ \vdots \\ \Delta\phi_{Ni} \\ \Delta\phi_{Nj} \end{pmatrix}$$

3次元変位量算出に用いる計算式(カメラN台)

- d_x, d_y, d_z
→ x, y, z 方向の変位量
- $\Delta\phi_{ni}, \Delta\phi_{nj}$
→ i, j 方向の位相差
- A
→ 変換行列(2N x 3行列)

<例>複数台(2台)のカメラを用いた
3次元変位計測実験の模式図

・変位量を算出するには変換行列Aを求める必要がある



・計測前に変換行列の算出を行う

$$\begin{pmatrix} \Delta\phi_{1i} \\ \Delta\phi_{1j} \\ \Delta\phi_{2i} \\ \Delta\phi_{2j} \\ \vdots \\ \Delta\phi_{Ni} \\ \Delta\phi_{Nj} \end{pmatrix} = S \begin{pmatrix} d_x \\ d_y \\ d_z \end{pmatrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} e_{1ix} & e_{1iy} & e_{1iz} \\ e_{1jx} & e_{1jy} & e_{1jz} \\ e_{2ix} & e_{2iy} & e_{2iz} \\ e_{2jx} & e_{2jy} & e_{2jz} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{Nix} & e_{Niy} & e_{Niz} \\ e_{Njx} & e_{Njy} & e_{Njz} \end{pmatrix}$$

変換行列Aの擬似逆行列S

3次元変位計測手法

変換行列の算出

1. 擬似逆行列 S の x, y 成分を求める

格子1ピッチ分変位すると位相は 2π 変化するので、
計算だけで擬似逆行列 S の x, y 成分が求まる

$$e_{nix} = 2\pi/p_x \quad (n = 1, 2, \dots, N) \quad e_{nly} = 2\pi/p_y \quad (n = 1, 2, \dots, N)$$

$$e_{nmx} = 0 \quad e_{nmy} = 0 \quad \begin{matrix} p_x, p_y \rightarrow \text{2次元格子の} x, y \text{方向のピッチ} \\ N \rightarrow \text{カメラの台数} \end{matrix}$$

$$S = \begin{pmatrix} e_{1ix} & e_{1iy} & e_{1iz} \\ e_{1jx} & e_{1jy} & e_{1jz} \\ e_{2ix} & e_{2iy} & e_{2iz} \\ e_{2jx} & e_{2jy} & e_{2jz} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ e_{Nix} & e_{Niy} & e_{Niz} \\ e_{Njx} & e_{Njy} & e_{Njz} \end{pmatrix}$$

変換行列 A の擬似逆行列 S

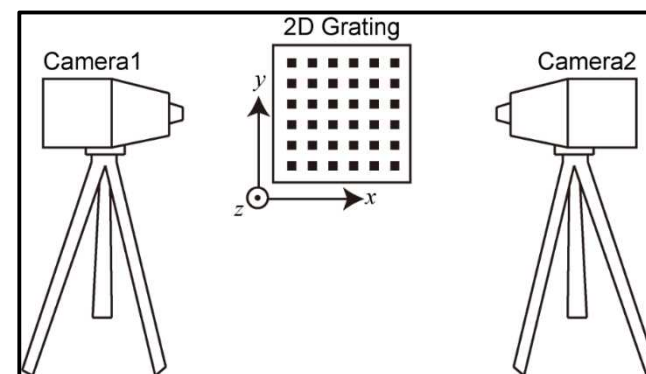
2. 擬似逆行列 S の z 成分を求める

カメラと格子との角度関係によって
得られる位相差は変化する

実際に2次元格子を z 方向に任意の値だけ
変位させて位相差を得る必要がある

大型構造物に貼り付けた2次元格子を
変位させるのは不可能

大型構造物用の擬似逆行列 S の z 成分
算出方法を考案した



3次元変位計測イメージ図

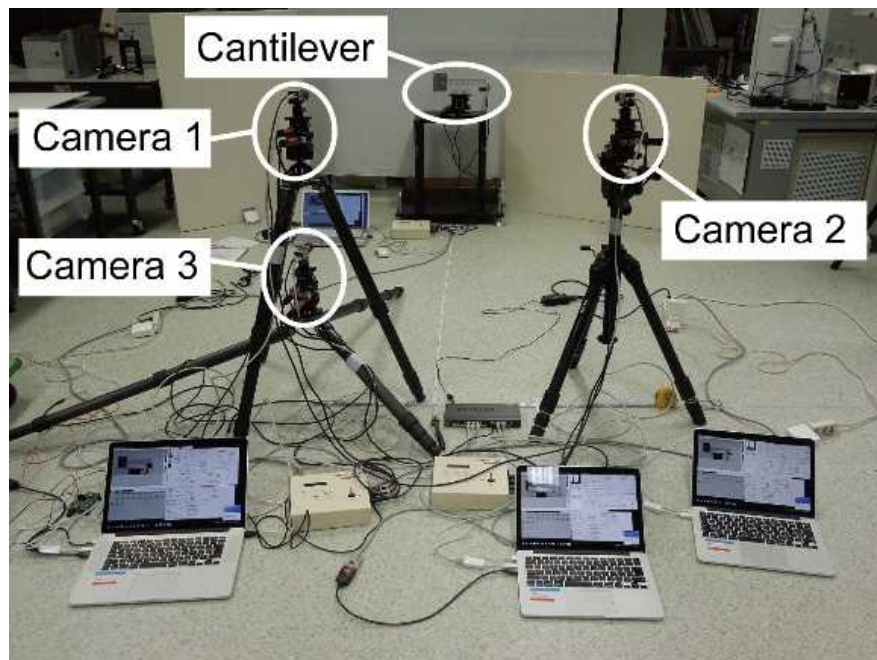
三次元変位計測実験

・計測装置の距離関係と格子ピッチ

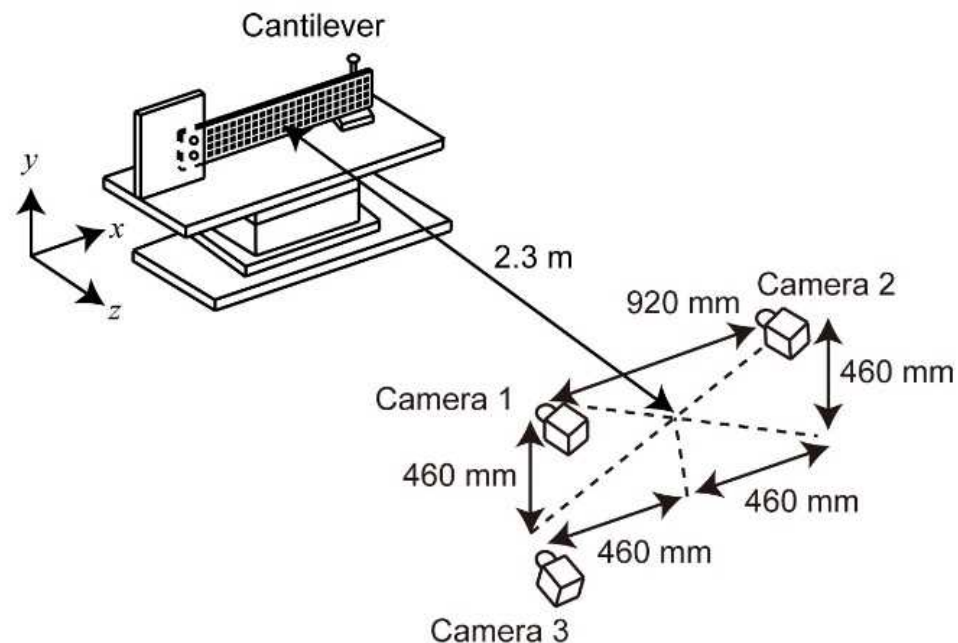
計測距離	2.3 [m]
カメラ間の距離	920 [mm]
格子ピッチ(x 方向)	4.99 [mm]
格子ピッチ(y 方向)	4.99 [mm]

・カメラの設定条件

画像サイズ	1024 x 512 [pixel]
露光時間	15 [ms]
フレームレート	10 [fps]



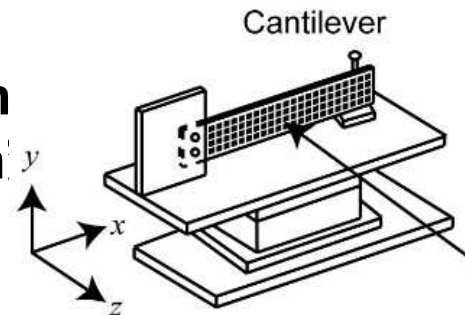
実験風景



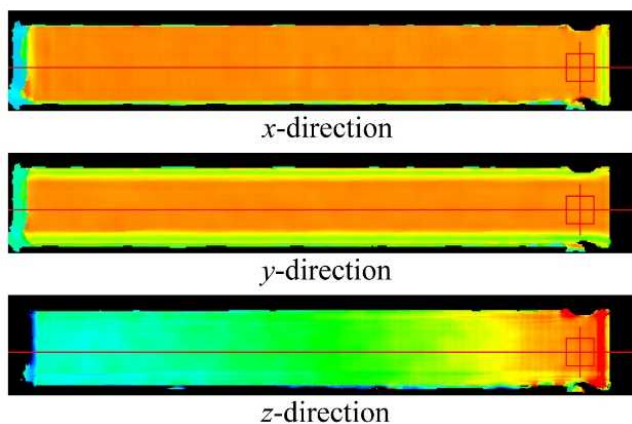
実験装置の配置図

三次元変位結果

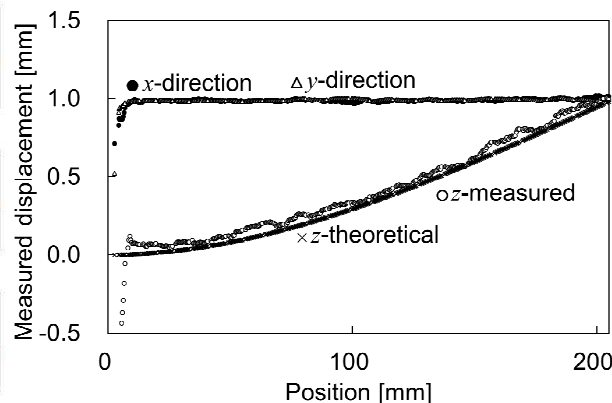
・片持ち全体を x, y 方向に1.00 mm
 および片持ち梁右端を z 方向に1.00mm



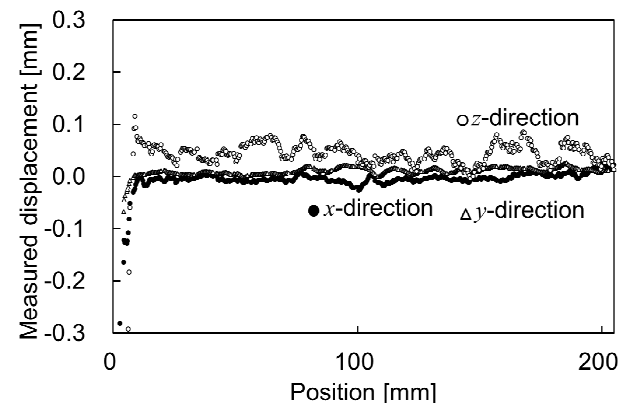
撮影画像(カメラ間画素対応付け後)



変位分布画像



変位分布計測結果



計測誤差

	x	y	z
平均誤差 [mm]	0.01	0.01	0.00
標準偏差 [mm]	0.007	0.005	0.022

高精度に3次元変位分布を計測できた→大型構造物に適用できると考えられる

たわみ角屋外計測実験

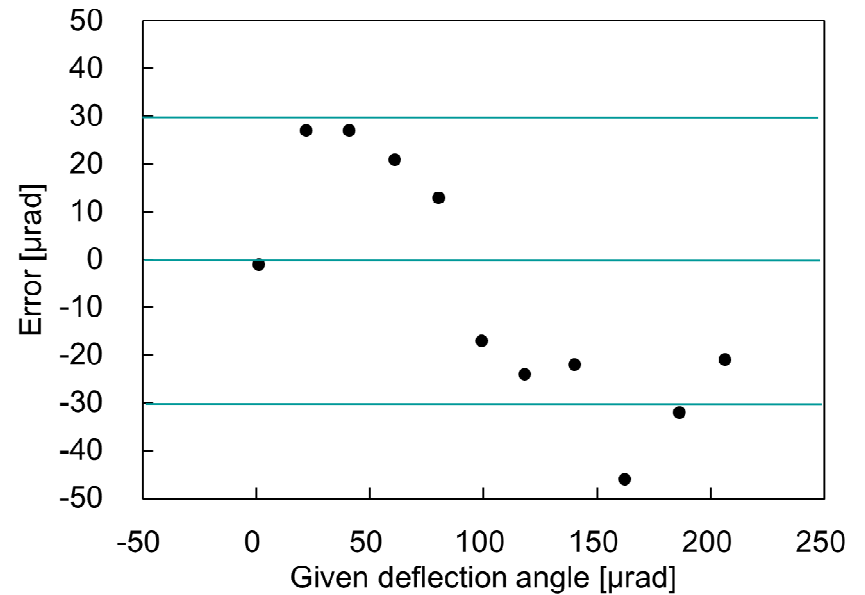
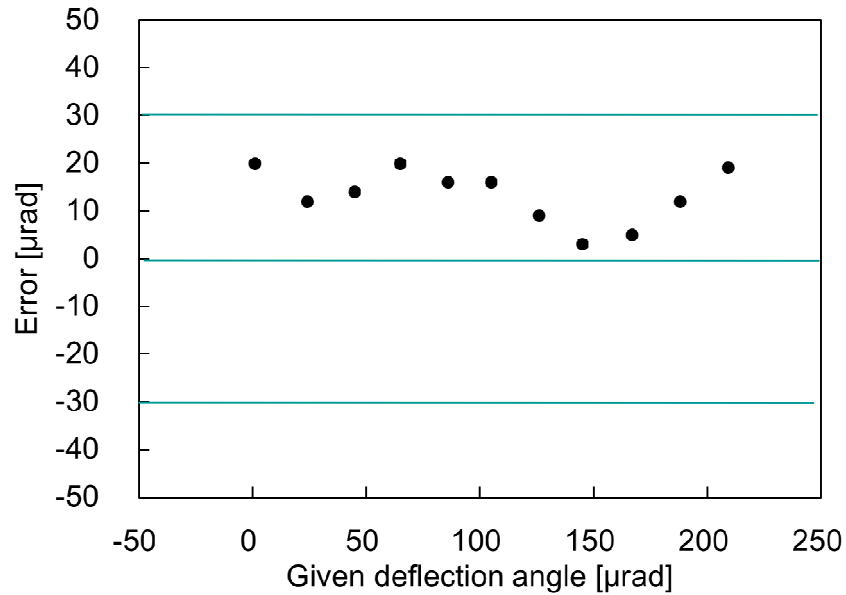
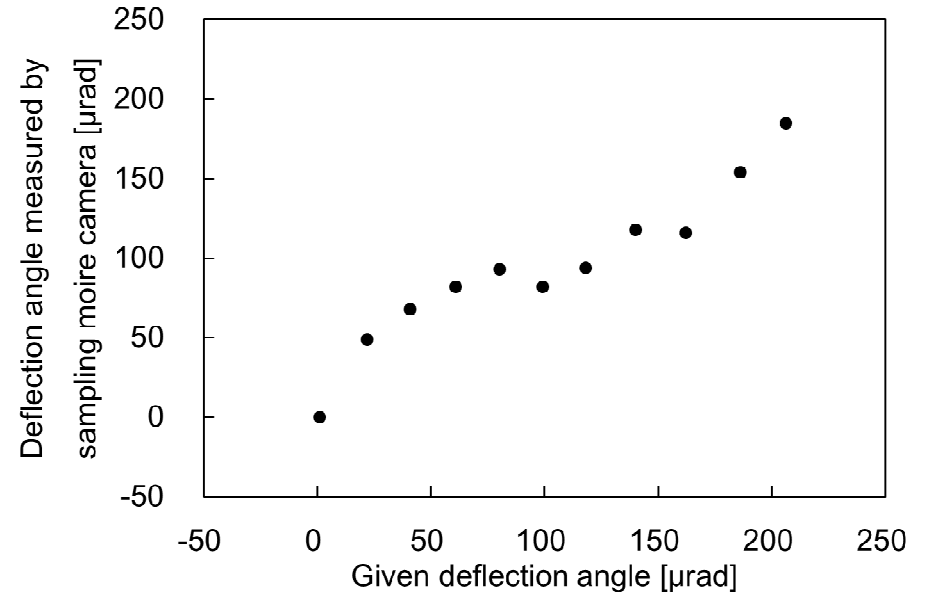
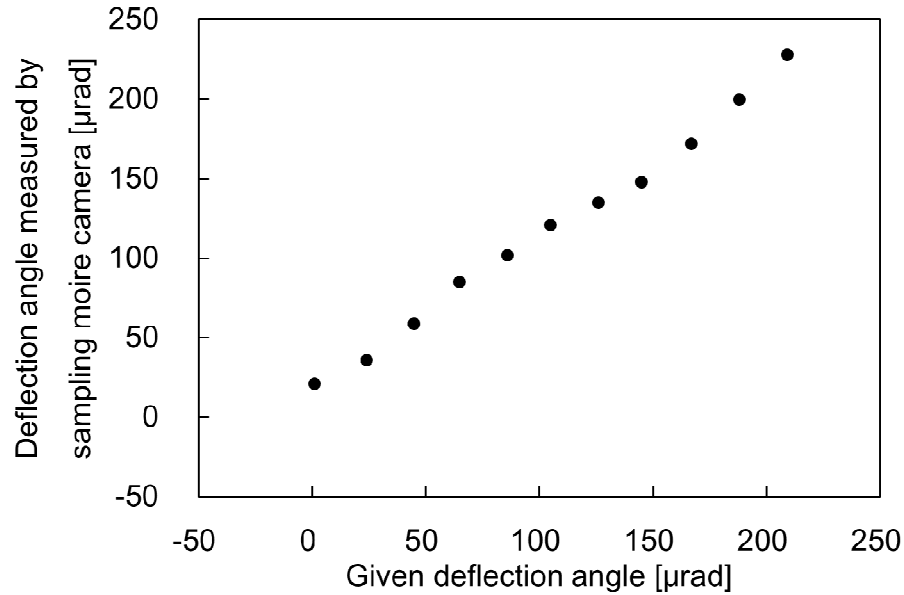
たわみ角を $3/100,000$ [rad.]程度の精度で計測するにはどのような条件で計測すべきか検証を行った



計測条件

レンズの焦点距離(計測距離 30 m)	400 mm
露光時間	15 [ms]
フレームレート	50 [fps]
計測時間	10 [s]
基準取得枚数	50 [枚]

回転ステージの中心から**110[mm]**離れた位置からオプトマイクによって反時計方向に**20[μ m]**ずつ変位を与えて、回転ステージを少しずつ傾けながら繰り返し計測を行った



正面撮影 180 mm角 (448x448 pixel) 風速 0.8 m/s

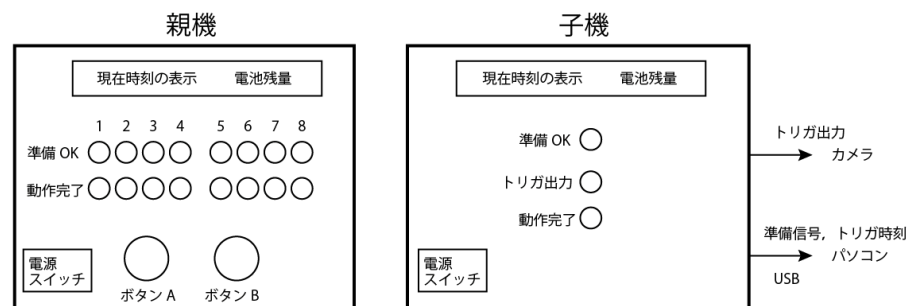
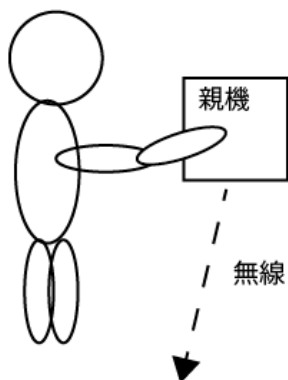
斜め撮影 180 mm角 (416x423 pixel) 風速 2.2 m/s

福井大学

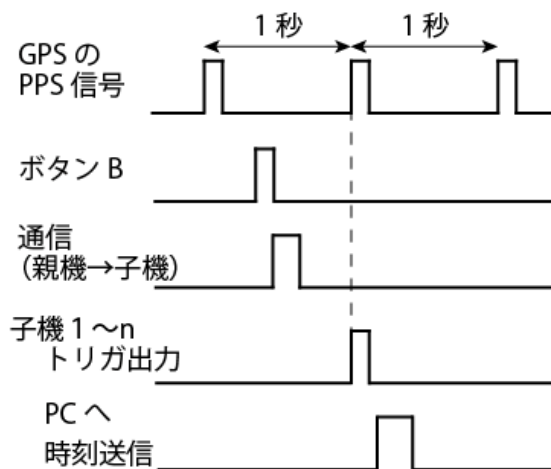
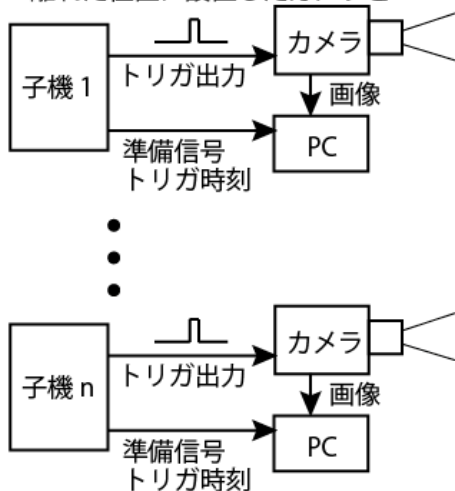
タイミング装置の試作

複数個のカメラの撮影開始（または撮影終了）のトリガを同期して送る装置

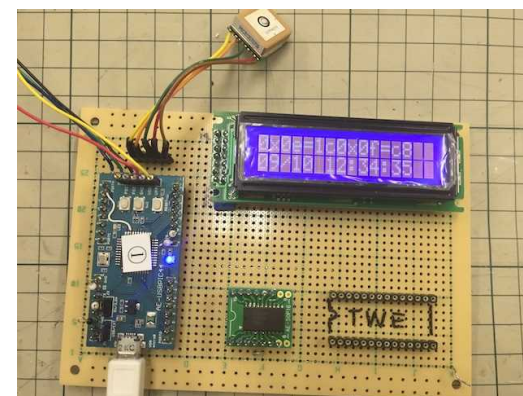
- ・ GPSのPPS信号を使って同期を取る.
- ・ フレームごとのトリガ信号を出力できるようにする
- ・ 同期精度：1ms



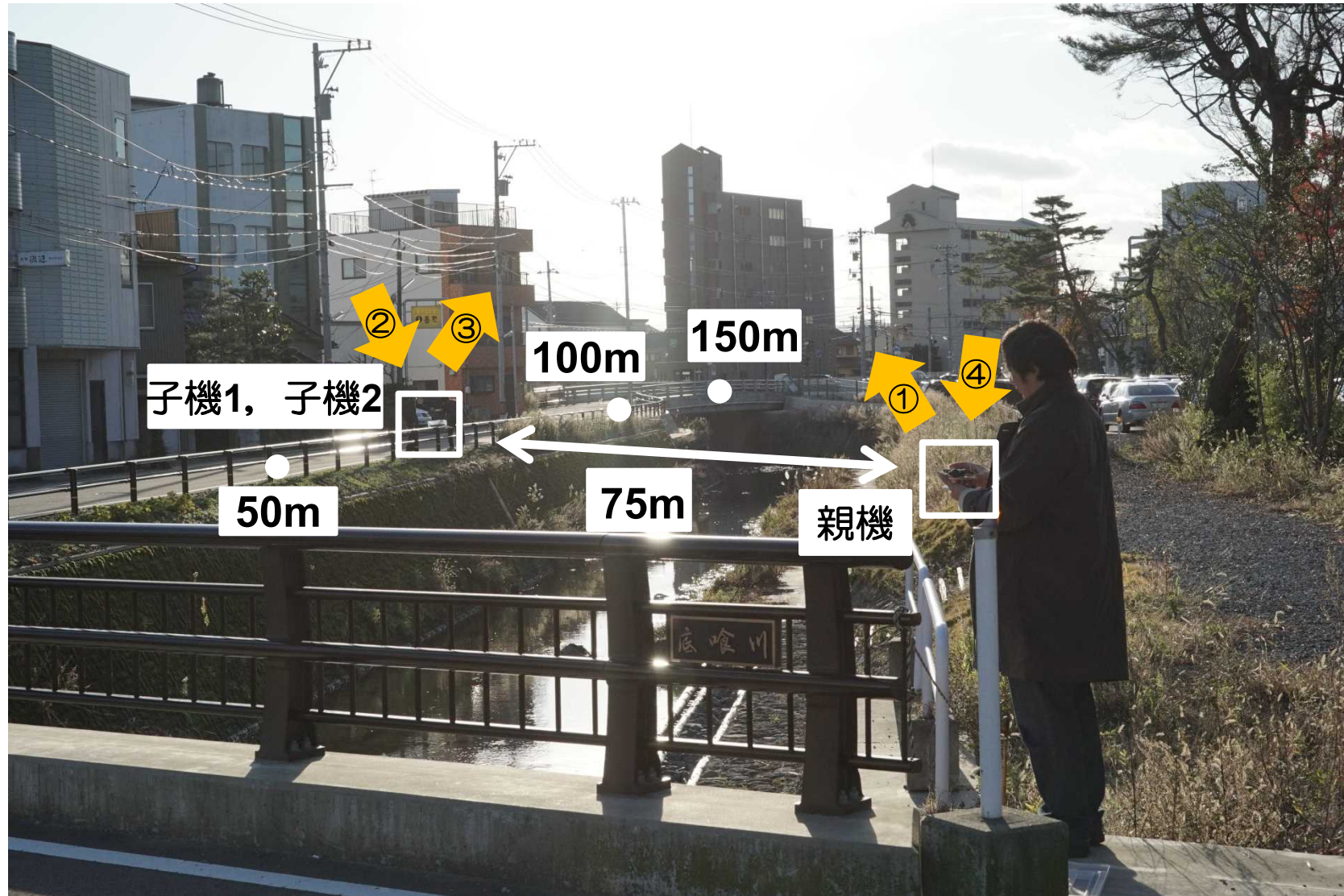
離れた位置に設置したカメラと PC



機能試作中



各地点(25,50,75,100,150m)において、親機からの信号を受信できるかどうかを確かめた 87



- ①.親機から子機へ信号を送る
- ②.子機が信号を受け取って信号に対応したLEDを光らせる
- ③.子機から親機へ信号を返す
- ④.親機が信号を受け取ってモニターに状況を表示



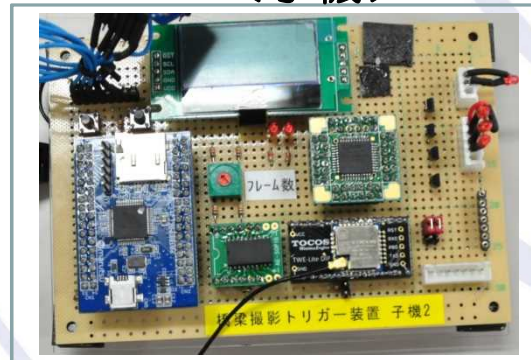
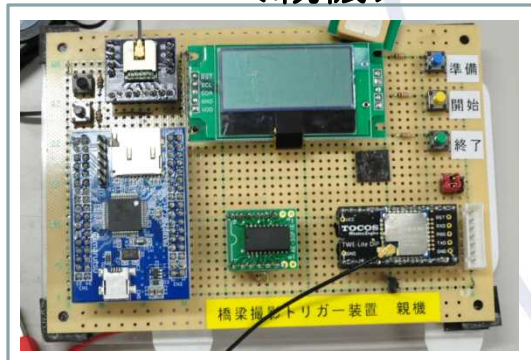
無線トリガー装置の概要

GPSからのPPS信号で同期を取り複数台のサンプリングモアレカメラで同期撮影を行う装置

<試作装置の外観>

<親機>

<子機>

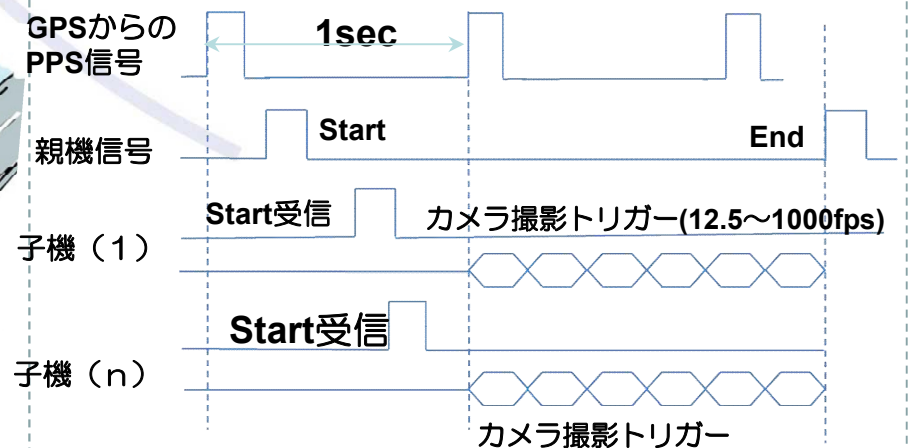


<使用イメージ>

GPSからのPPS信号



動作タイミングチャート



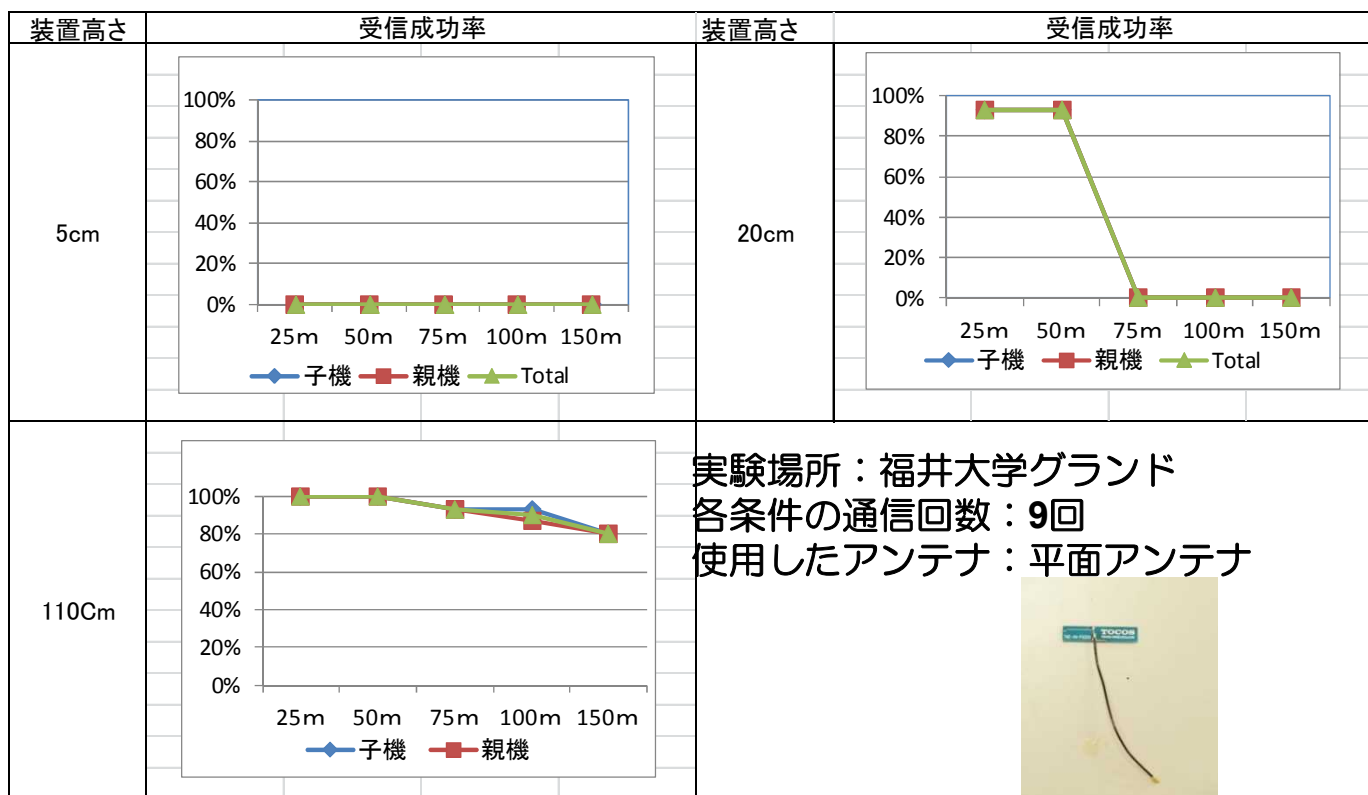
本装置は、親機と子機間をZigbeeという無線規格で通信している。
親機と子機間の通信可能距離を以下の条件で確認した。

- ①親機と子機間の距離・・・25m～150m
- ②地上から装置の高さ・・・5cm・20cm・110cm

<結果>

地上から110cmの高さであれば、距離50mまでは受信成功率は100%

地上からの高さが影響するため、量産装置はアンテナ位置を高くできるような外付けアンテナとする。



親機 子機 撮影同期確認結果

試作機では、サンプリングモアレカメラを動作させる差動信号は出力されてい。変換回路を無線トリガー装置子機とSMC間に増設し、撮影タイミングの同期を子機2台で確認した。

<確認結果>

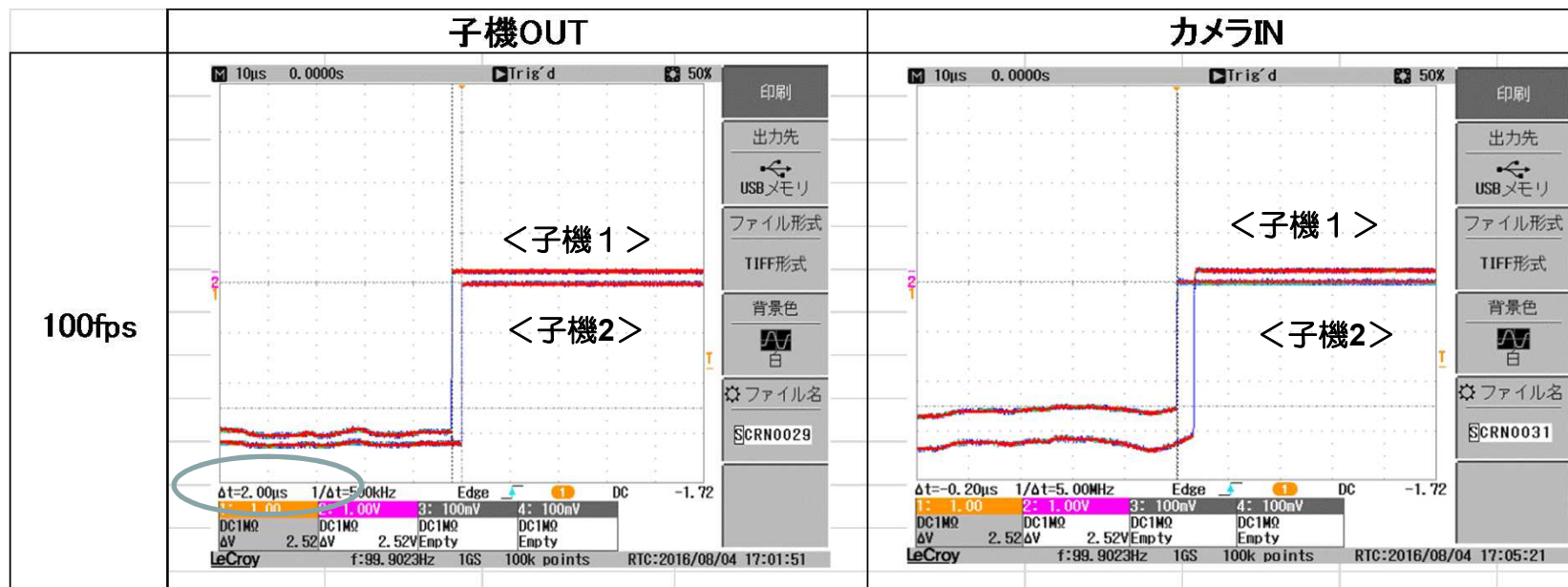
単位: μs

	子機OUT	カメラIN
50fps	19.6	24.6
100fps	2.0	0.2
200fps	11.6	10.8

目標としている1ミリ秒以内で同期していることが確認できた。

<確認した波形>

子機OUT・・・無線トリガー装置からの出力信号
カメラIN・・・増設した変換回路からの出力信号



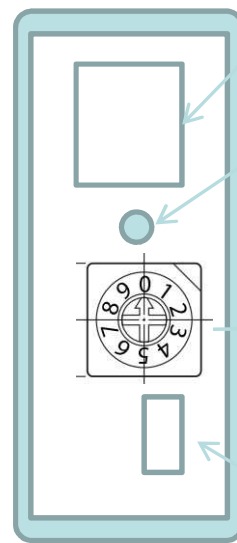
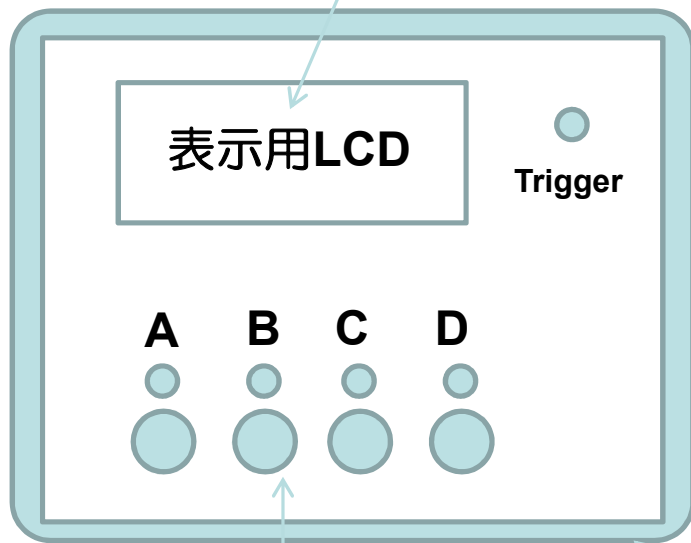
製作中の装置概要

<表示部>

LCD表示	親機	子機
GPS受信状態	○	○
電源残量	○	○
GPS位置情報	○	○
子機の受信状態	○	-
Zigbee電波郷土	○	-

<外部信号出力端子>

①	5V	外部出力	500mA(MAX)
②	Ready	準備信号	パルス出力(ワンパルス)
③	Start	開始信号	パルス出力(ワンパルス)
④	End	終了信号	パルス出力(ワンパルス)
⑤	D-	Frame信号	差動トリガー(終了信号受信まで)
⑥	D+	Frame信号	差動トリガー(終了信号受信まで)
⑦	FRAME OUT	Frame信号	FPS信号
⑧	GND	外部出力	GND



<リセット>

<フレームレート設定>

No	FPS	No	FPS
1	1000	6	100
2	500	7	50
3	250	8	25
4	125	9	12.5
5	62.5		

<電源&メンテナンス用USB端子>

USB	装置電源
-----	------

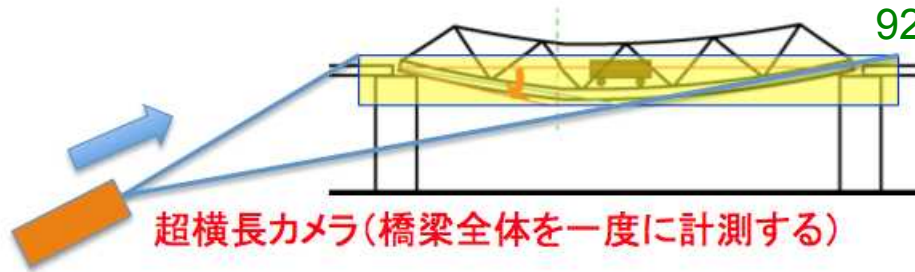
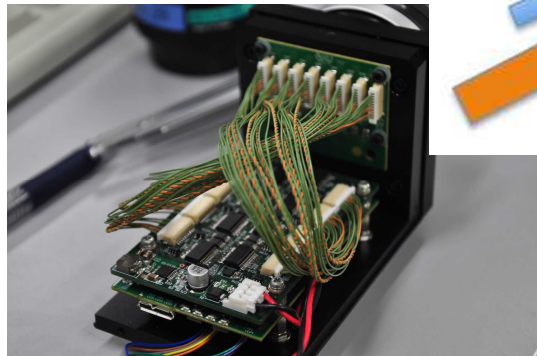
<操作SW&表示LED>

	親機	子機
A Ready	準備PB	表示のみ
B Start	開始PB	
C End	終了PB	
D Test	テストPB	

ケース外観			
赤	親機	青	子機

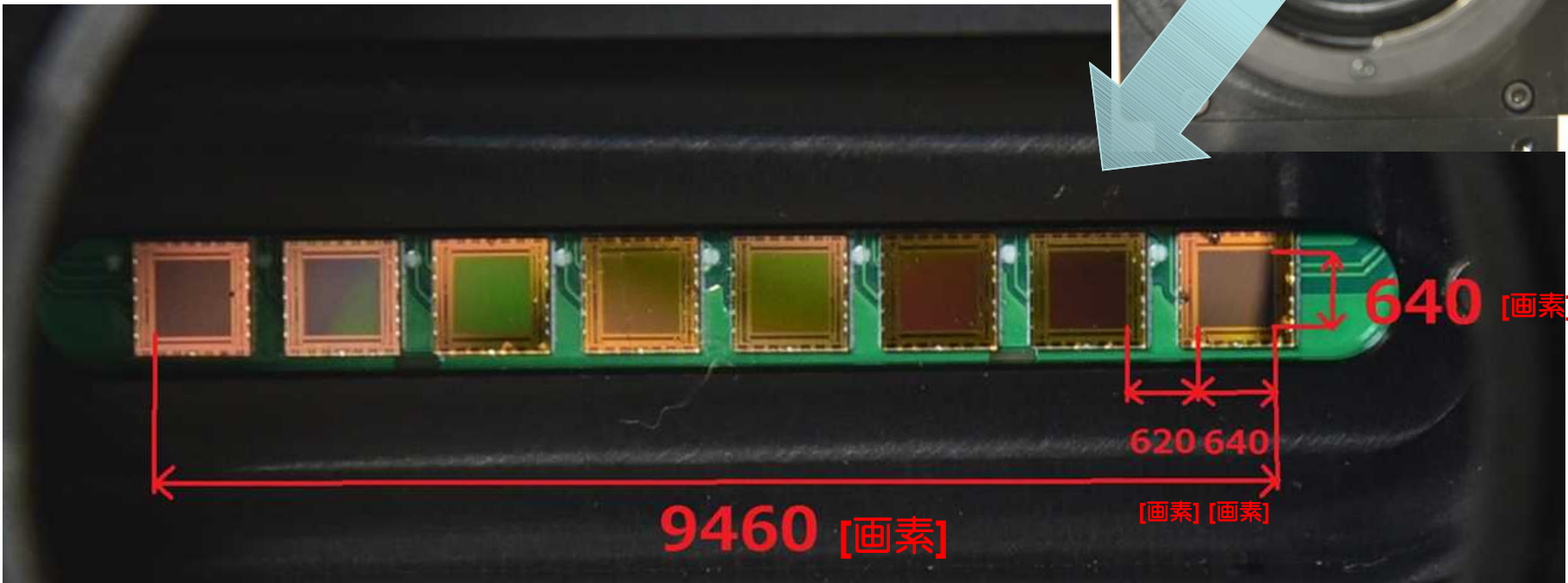
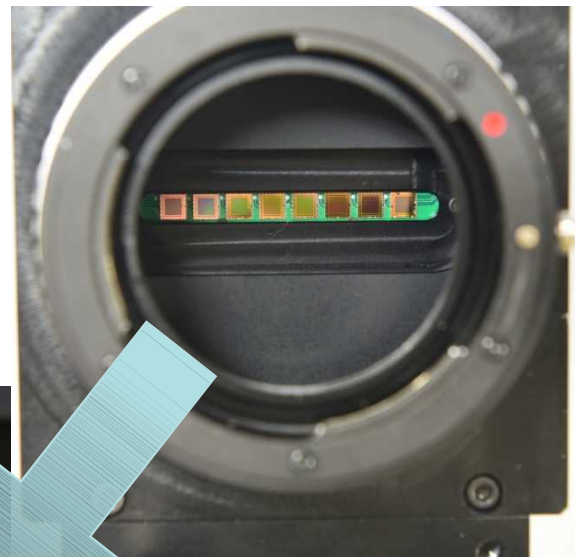
TestPB : GPS信号を受信しない状態で、子機との通信をテストする

横長カメラ内部の試作

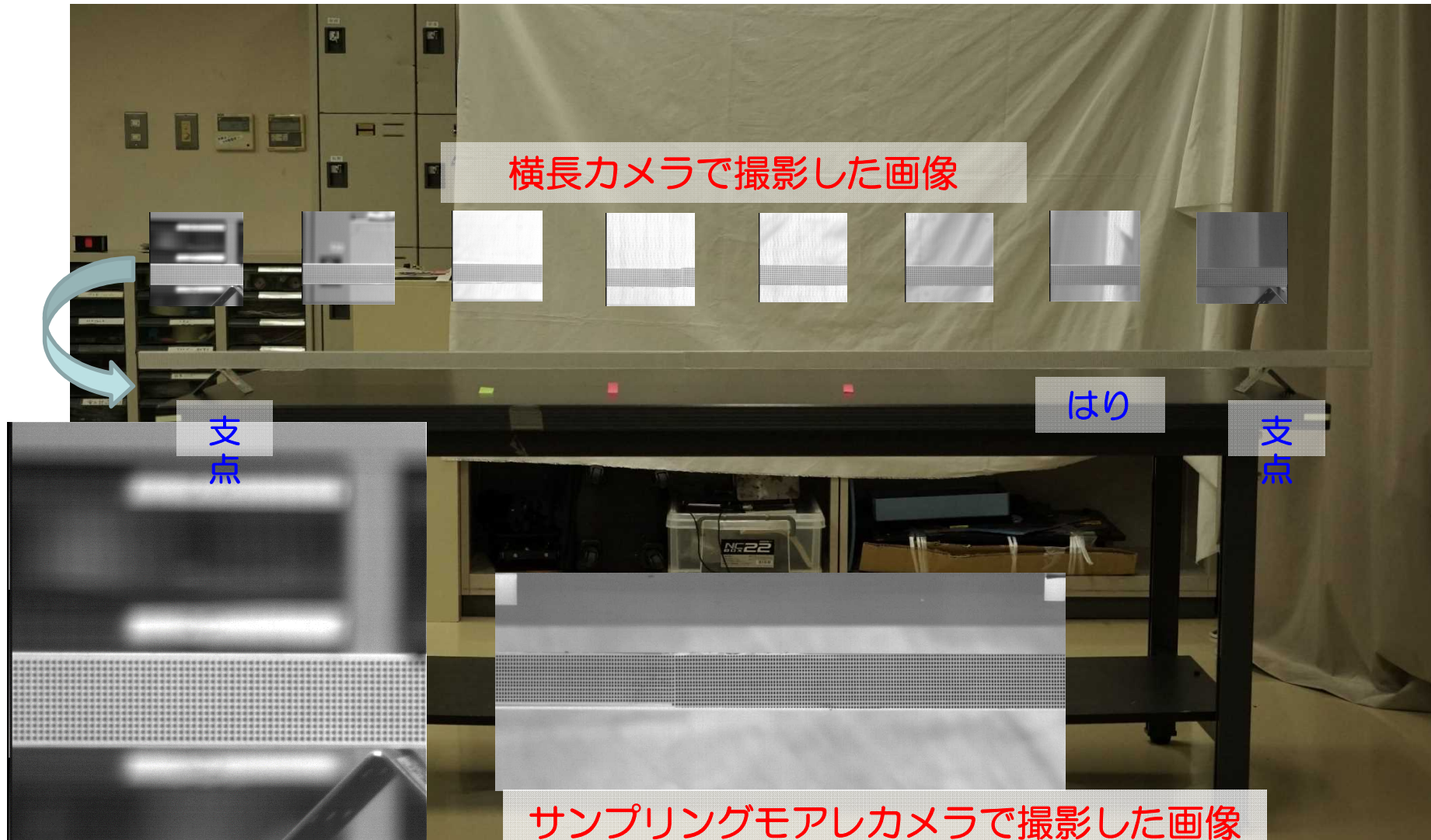


- 外形寸法
- 縦 78 mm
- 横 70 mm
- 高さ 147 mm

横型カメラでは9460×640画素相当の範囲を計測することができる。



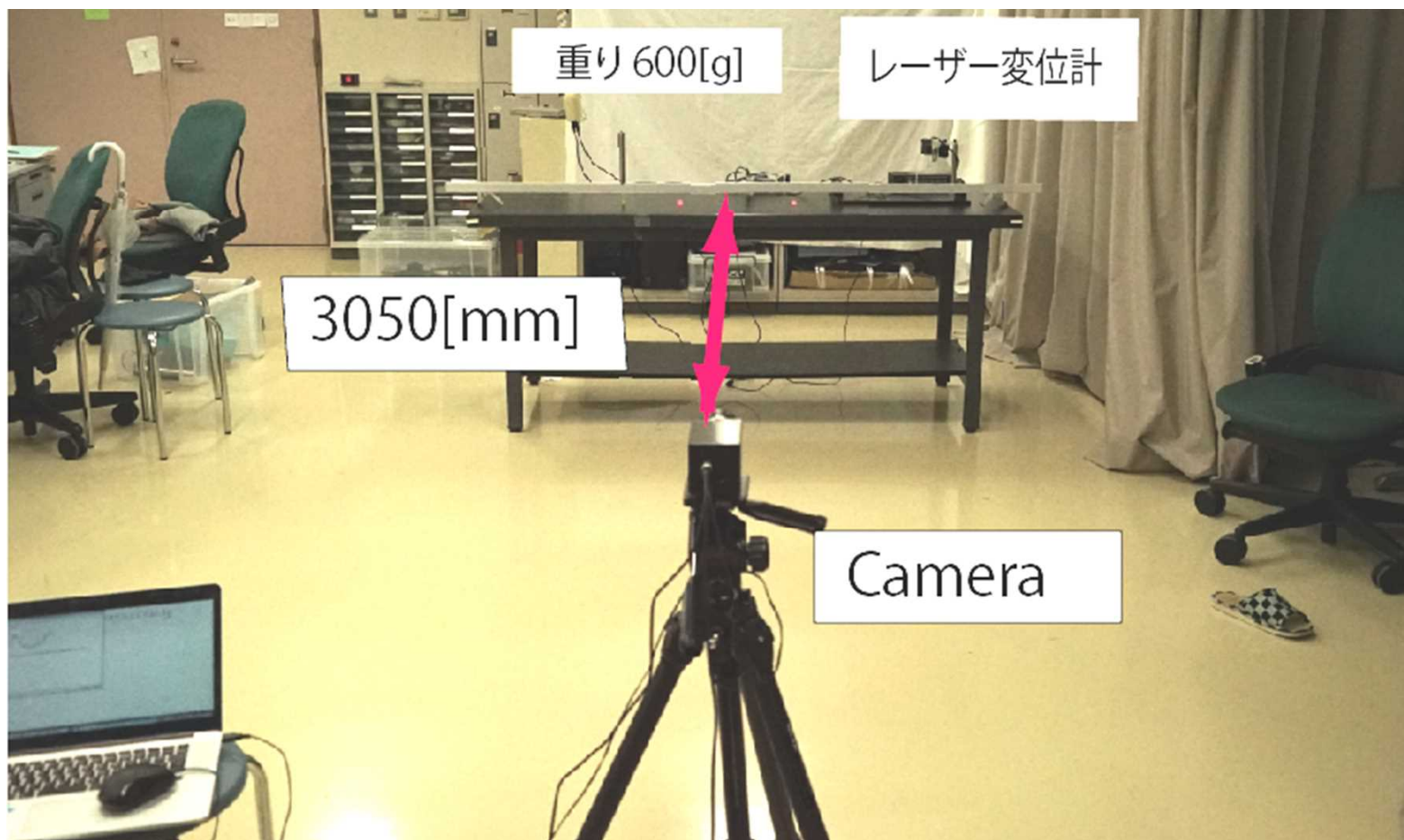
横長カメラによる変位分布計測実験



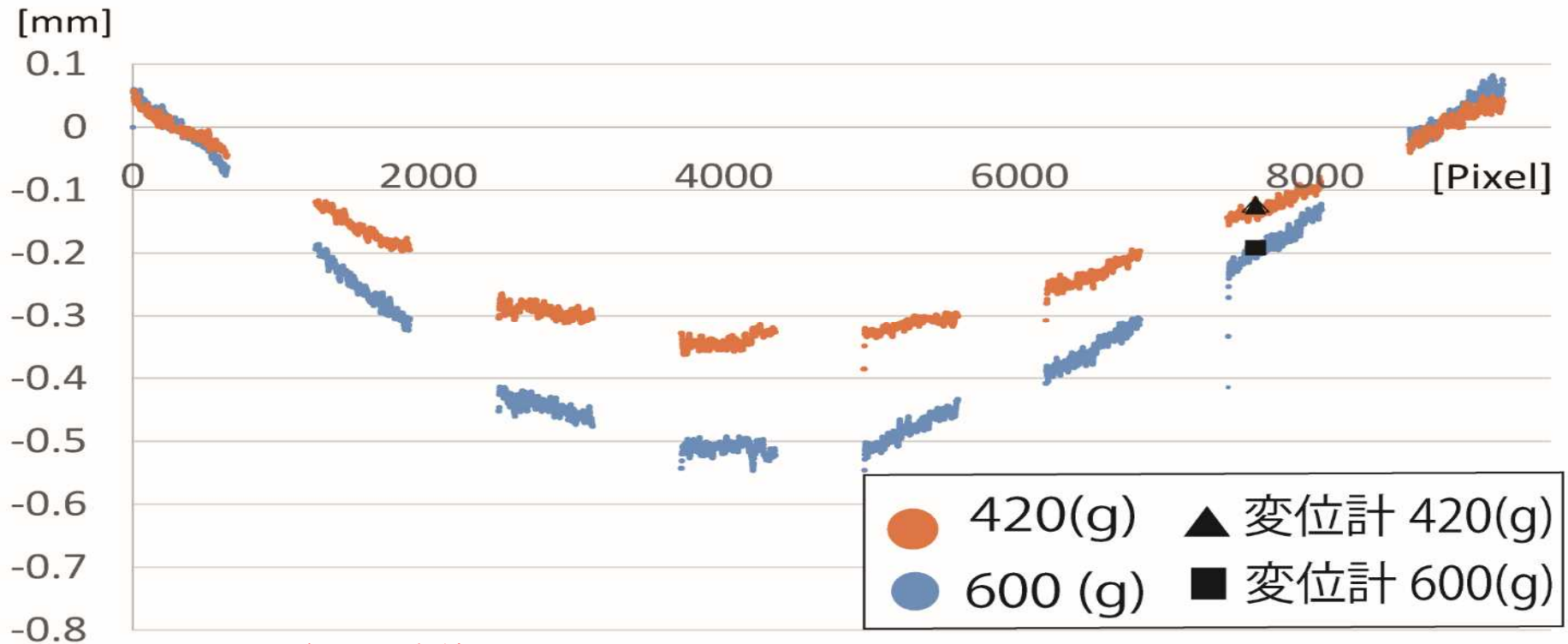
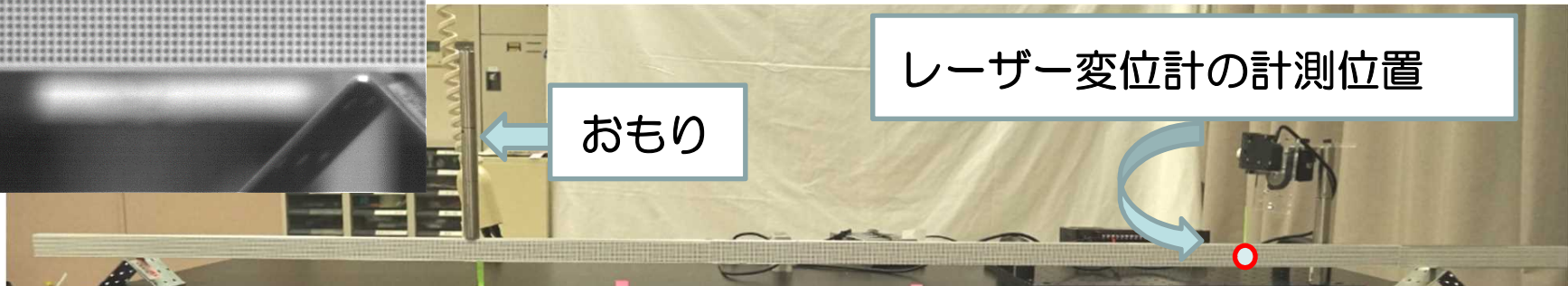
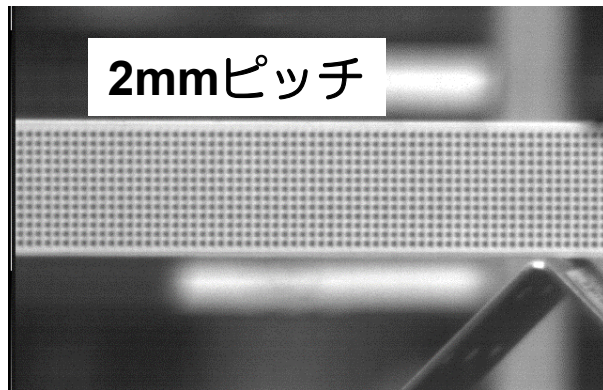
- 露光時間 15000[us] 対象物との距離 3050[mm]

実験方法

- ・ アルミパイプ (長さ2000 [mm] 高さ30 [mm] 幅15 [mm]) に2.0mmピッチの格子を貼った.
- ・ アルミパイプの両端をアングルの頂点にのせて単純支持梁とした.
- ・ 左端から540 [mm] の位置に①600グラム ②420グラムの荷重をかけた.
- ・ アルミパイプと横長カメラの間隔は3050mm.
- ・ 右端から420 [mm] の位置にレーザ変位計を設置して精度を比較した.



計測結果

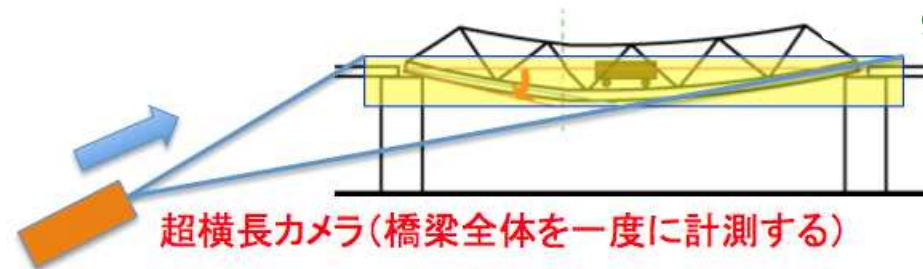


7600画素での変位

(420g) 横長カメラ: -0.119 mm レーザー変位計: -0.124 mm 誤差: 0.05 mm

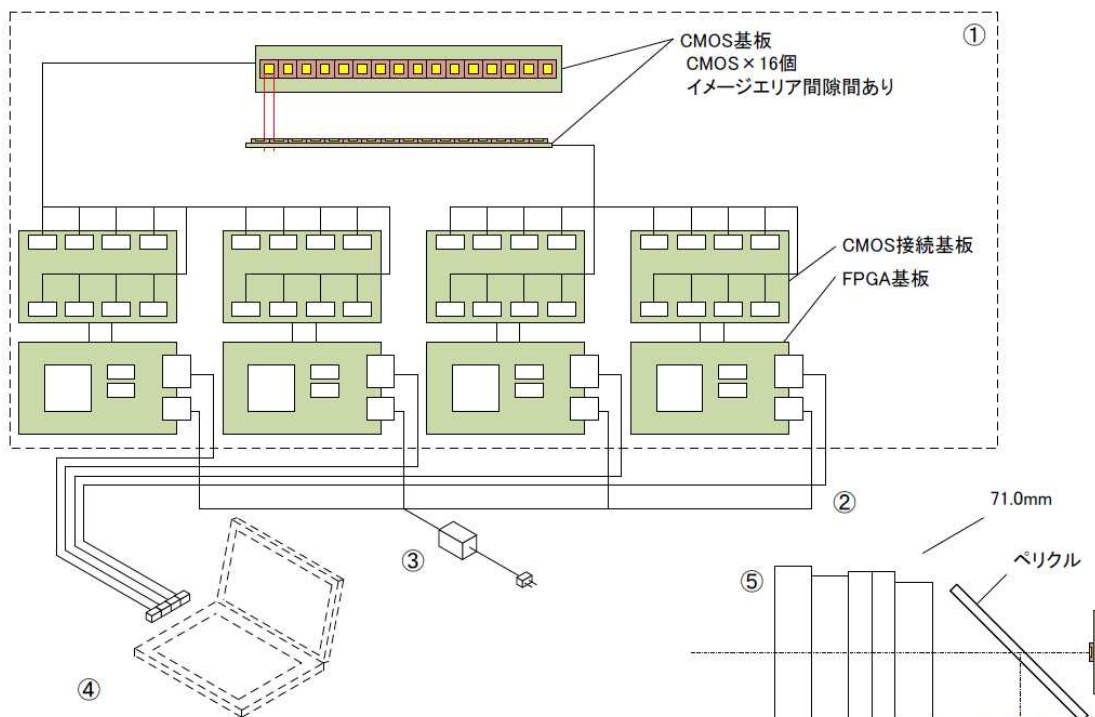
(600g) 横長カメラ: -0.195 mm レーザー変位計: -0.191 mm 誤差: -0.04 mm

横長カメラの設計



世の中の動向：

- ・ CANONの一眼レフ (EOS 5Ds) : 8688 × 5792画素
- ・ 産業用カメラ (Phase One, IXU 180) : 10328 x 7760画素
- ・ 9000画素 × 128画素 (日本のメーカー, 特殊仕様向け試作)



20,000画素 × 640画素をめざして設計した。

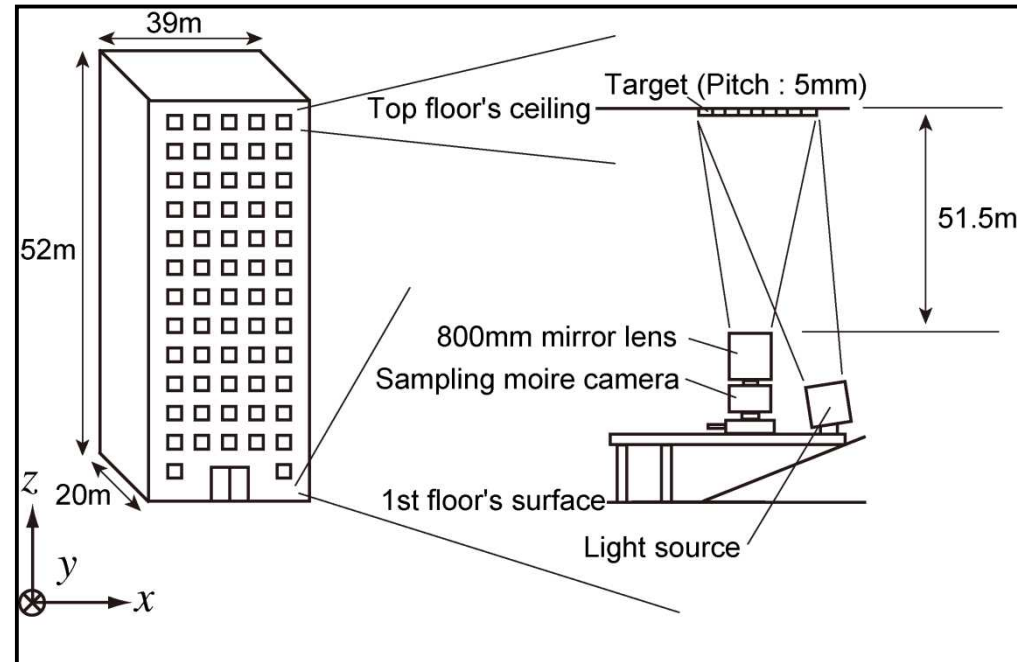
実施内容 (実験により検証)

- ・ ペリクルビームスプリッタで分離できること
- ・ 収差の影響 (端部で結像すること)

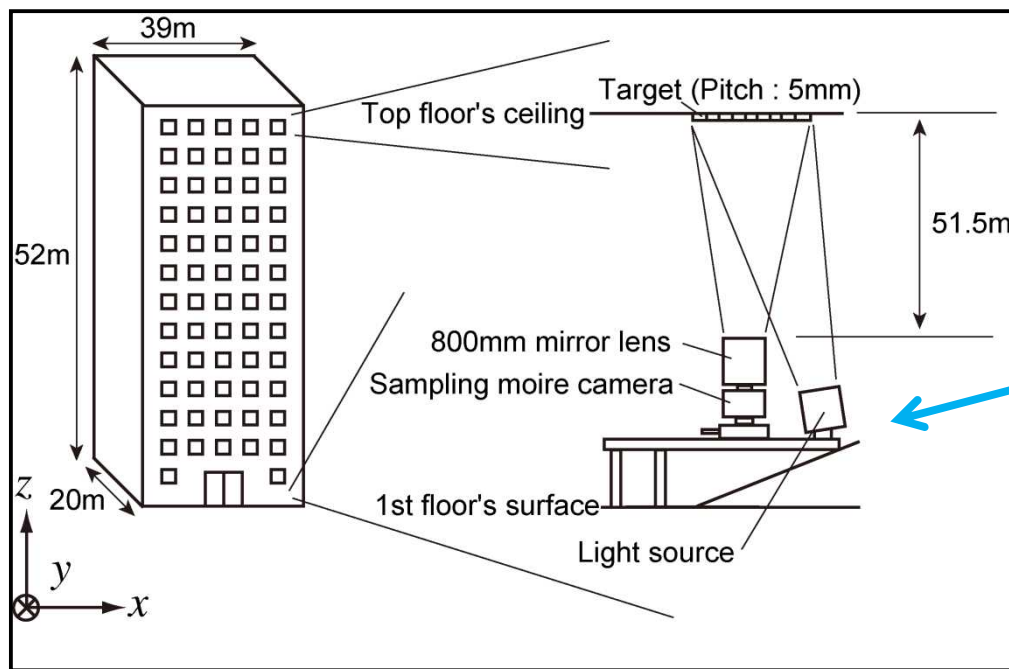
試作の可能性が確認できた。

- ・ 分離可能
→ 連続画像撮影可能
- ・ 像面湾曲の発生を確認
→ 取付のベースを湾曲させることで対処可能

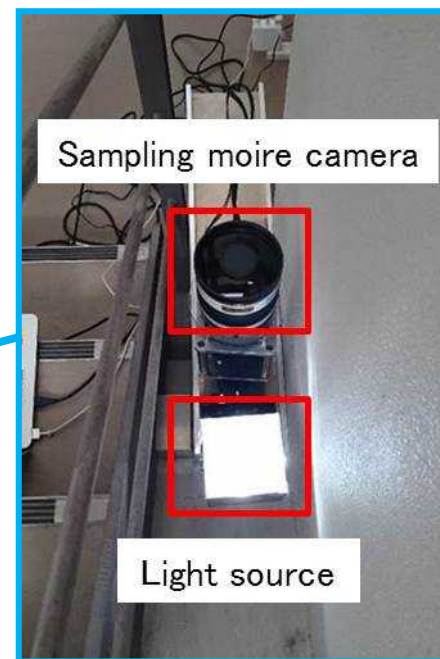
・サンプリングモアレカメラを建物の変位計測に適用した



- ・13階建て高さ52mの左図の建物の変位を、風の吹いていない場合と、吹いている場合で計測し、変位の違いを比較した

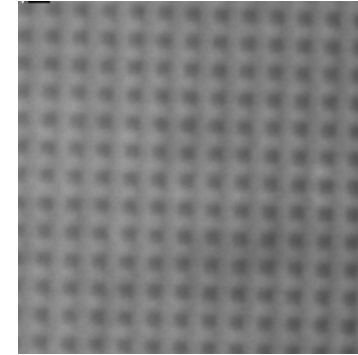


実験装置の構成



1階に設置したカメラと照明

- カメラから格子ターゲットまでの距離：**51.5 m**
- 二次元格子のピッチ間隔：**5 mm**
- 建物内部の1階にカメラ用の台を固定し、カメラを設置した
- 格子ターゲットは13階の天井にカメラから正面になるよう張り付けた



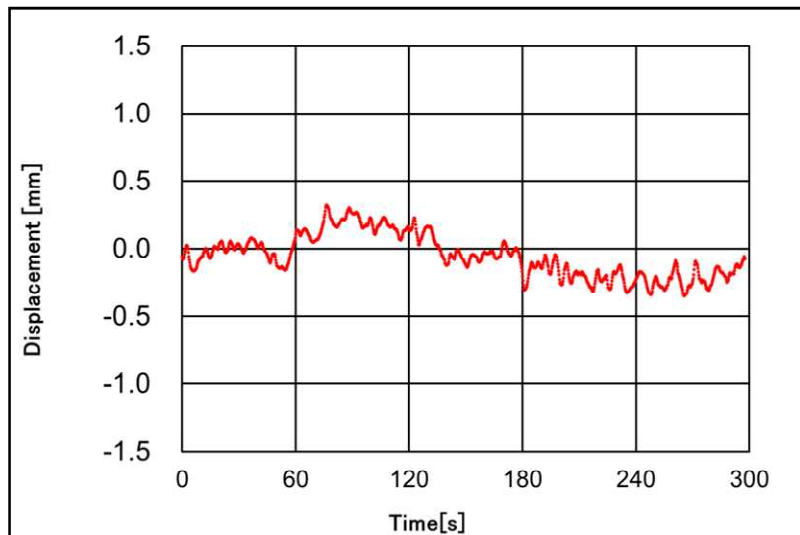
サンプリングモアレカメラで撮影された画像
(風速0.0~0.8 m/s)

サンプリングモアレカメラで撮影された画像
(風速5.6~8.3 m/s)

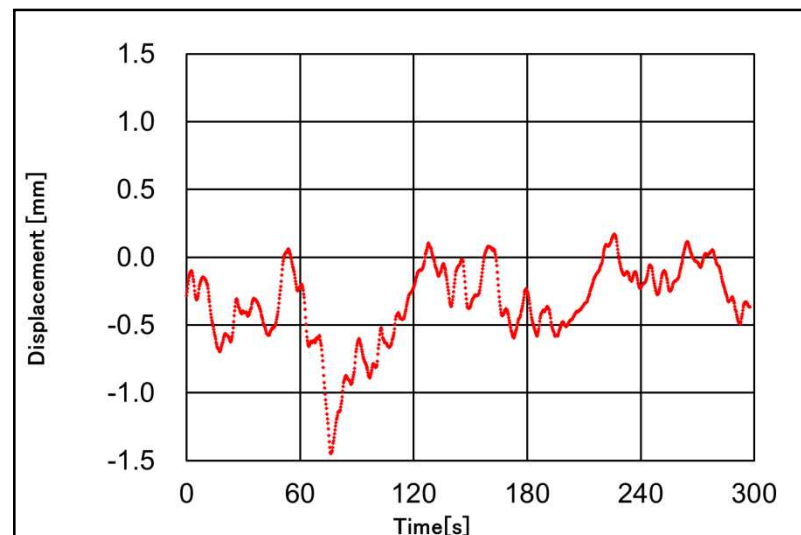
- 露光時間: 50 ms
 - 画像サイズ: 208 x 208 pixels
 - 撮影速度: 4 fps
 - 格子間画素数: 15 pixels
- 露光時間: 200 ms
 - 画像サイズ: 176 x 176 pixel
 - 撮影速度: 4 fps
 - 格子間画素数: 15 pixels
- 各撮影は300秒間行った
 - 画面全体の変位を平均して一点の変位とした
 - 各結果に(前後4点の)移動平均処理を行った

実験結果(移動平均9点)

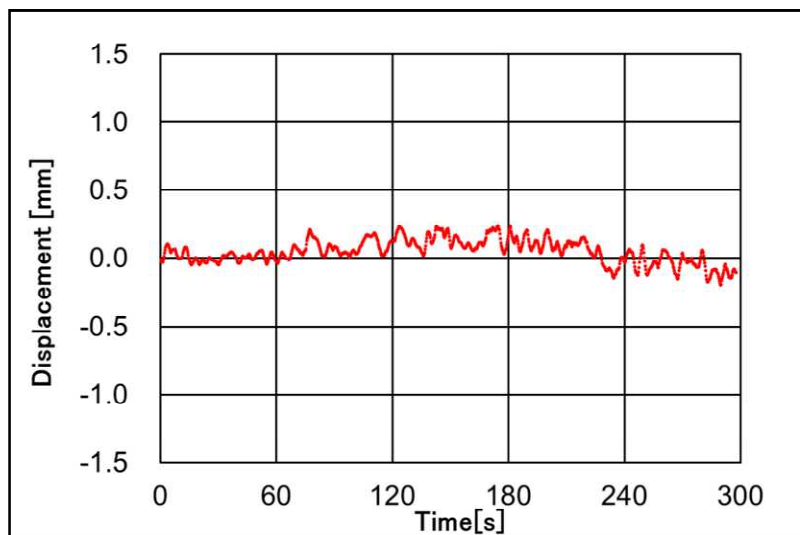
- 各風速時における変位結果に移動平均を行ったものを示す



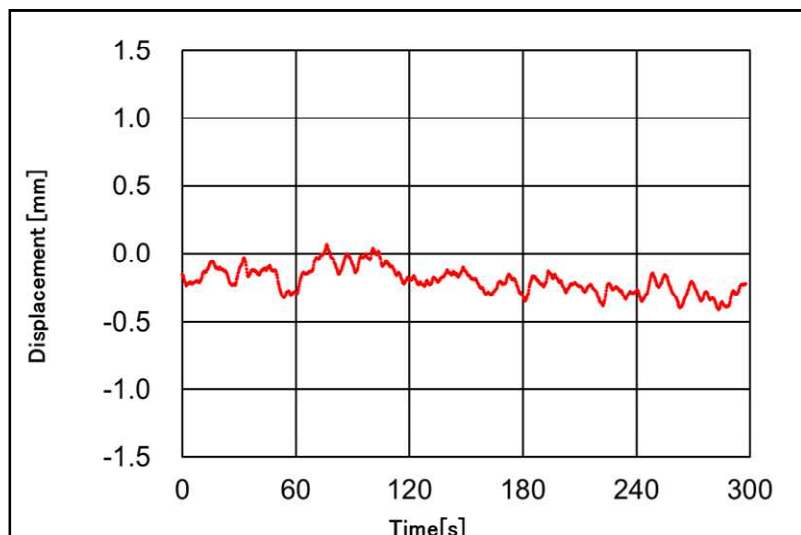
x 方向の揺れ(風速0.0~0.8 m/s)



x 方向の揺れ(風速5.6~8.3 m/s)



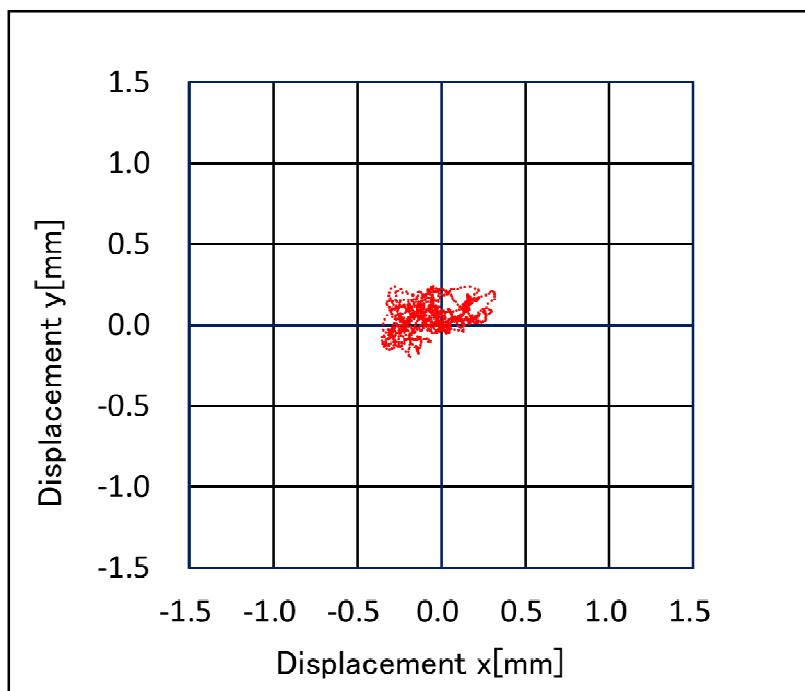
y 方向の揺れ(風速0.0~0.8 m/s)



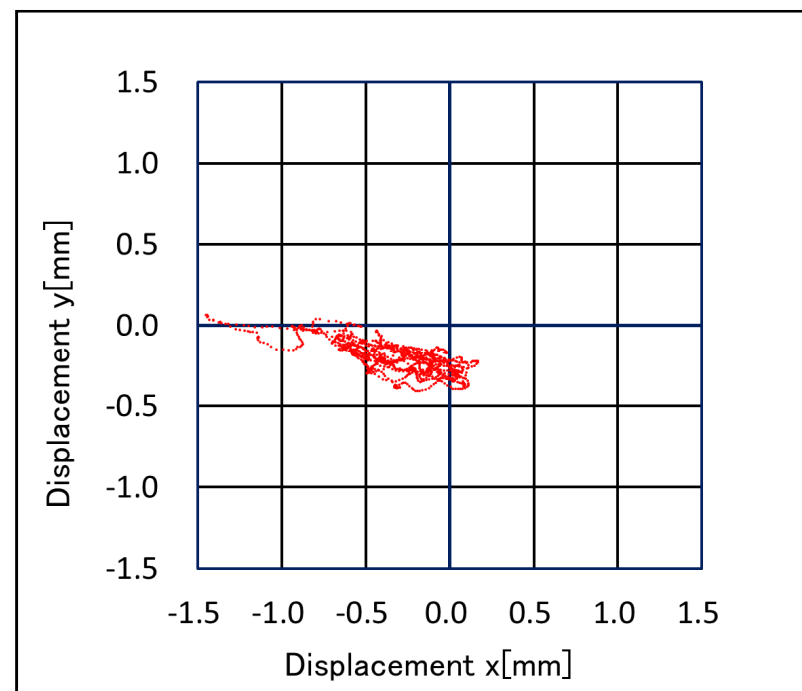
y 方向の揺れ(風速5.6~8.3 m/s)

実験結果

- 各風速時におけるx, y方向の変位の値をそれぞれ横軸, 縦軸にプロットする。(軌跡の表示)

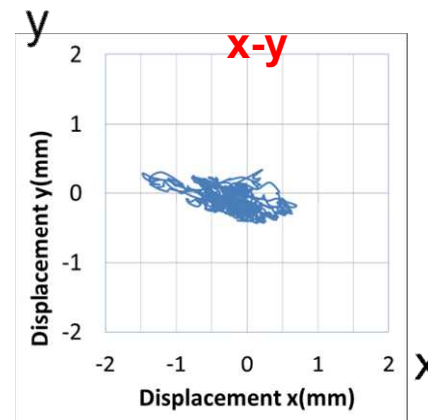
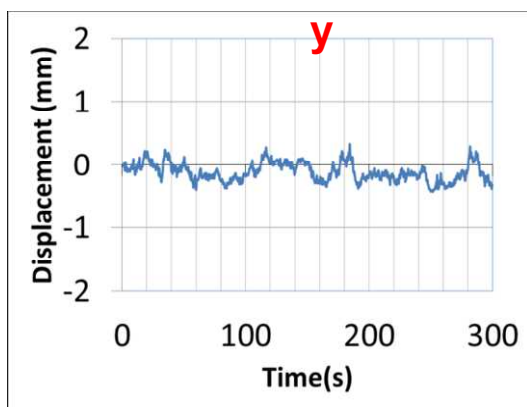
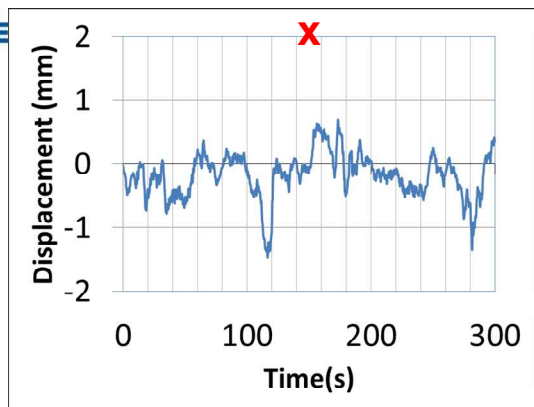


2方向の変位(風速0.0~0.8 m/s)



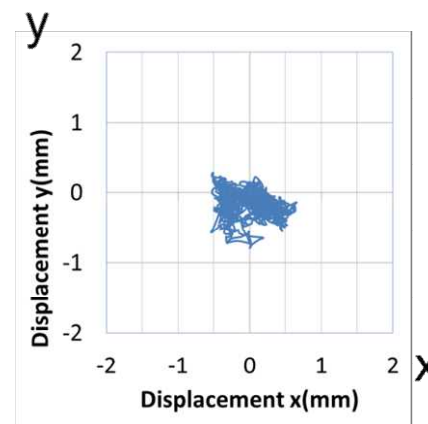
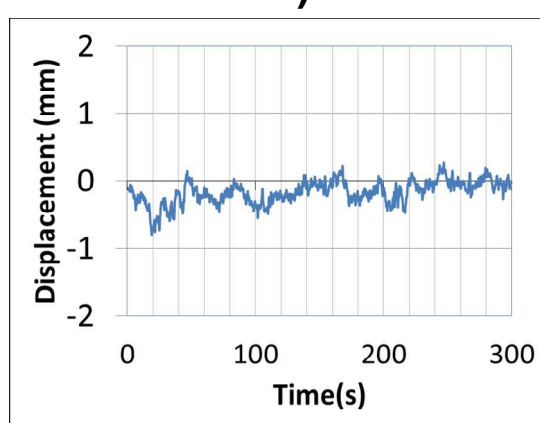
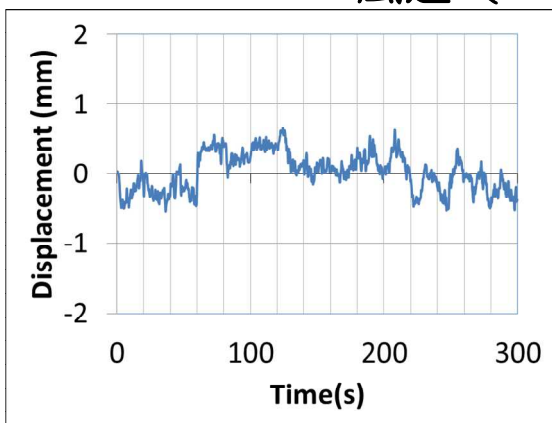
2方向の変位(風速5.6~8.3 m/s)

- 風の強い場合の方が, x方向に揺れが大きくなっていることが確認できる

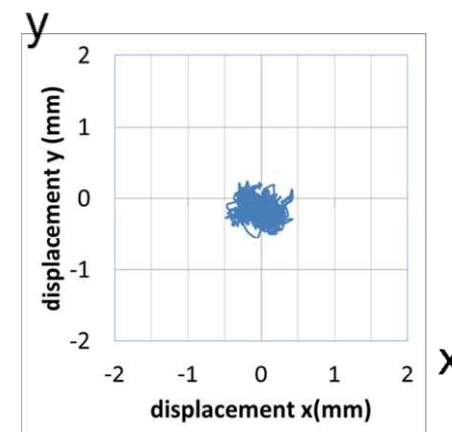
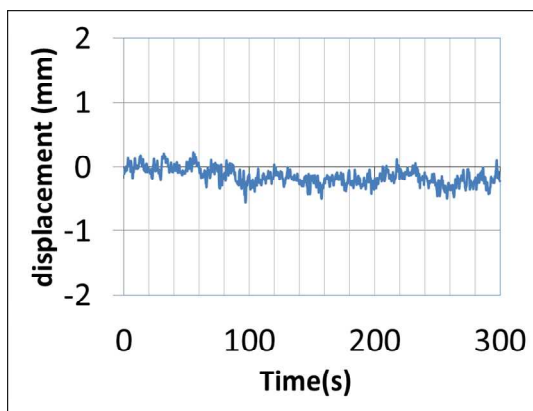
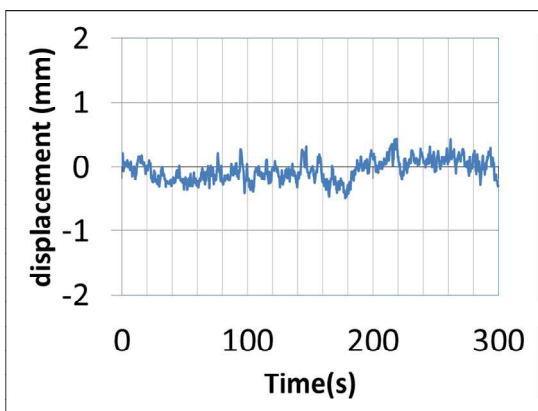


横軸：x
縦軸：y

風速 (4.0 m/s~10.0m/s)



風速(2.0 m/s~7.0m/s)



風速 (0.0m/s~1.5m/s)

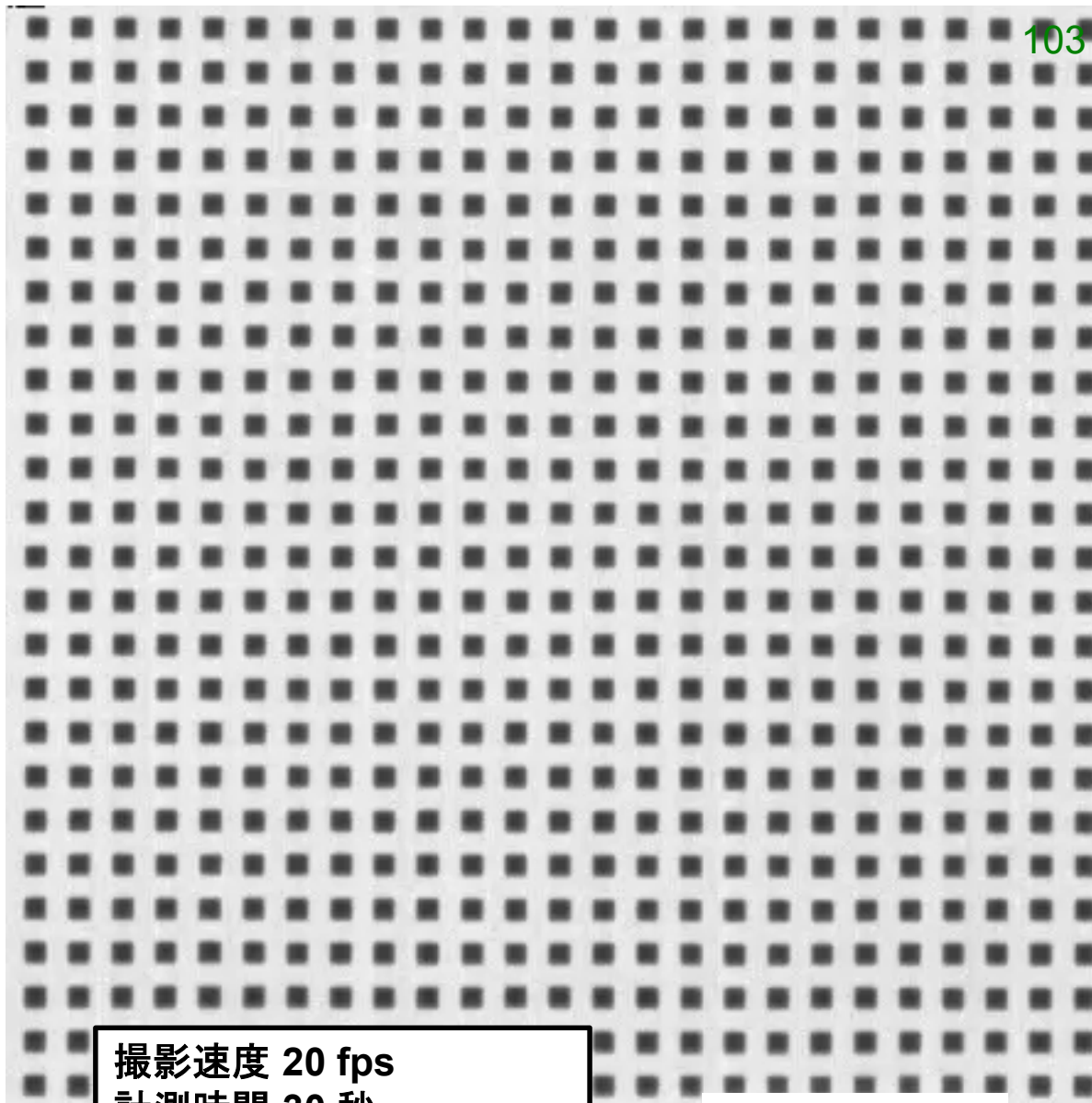
ゆらぎの測定実験

実験方法

- ・カメラと三脚の距離 30m
- ・しぼり値を変えて測定
(F4.5, F16, F32)



Nikon AF Nikkor
75-300mm 1:4.5-
5.6

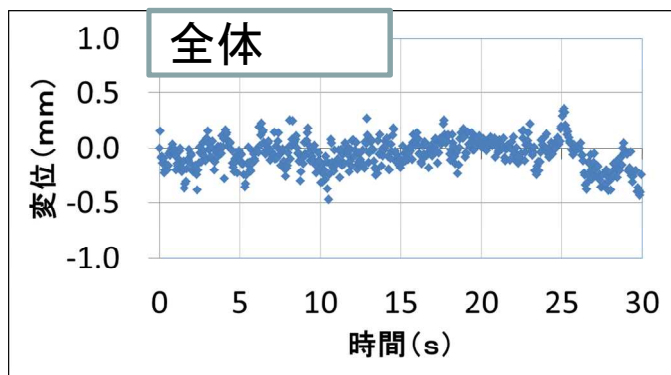


撮影速度 20 fps
計測時間 30 秒
画像サイズ 448 × 448
pixel
平滑化, 間引数 21 pixel
格子間画素数 21 pixel

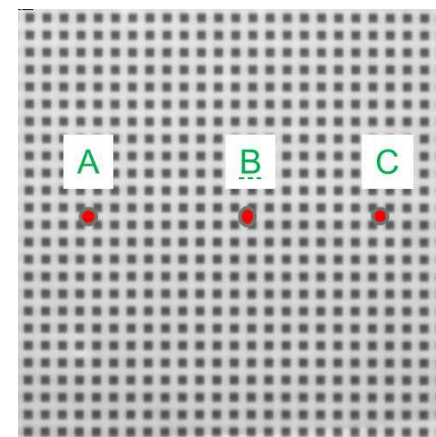
映像 ゆらぎ

気温 19.1 °C
焦点距離 300 mm
天気 晴れ

しぼり 4.5



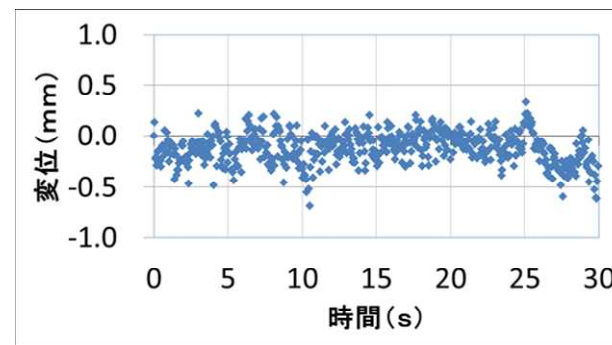
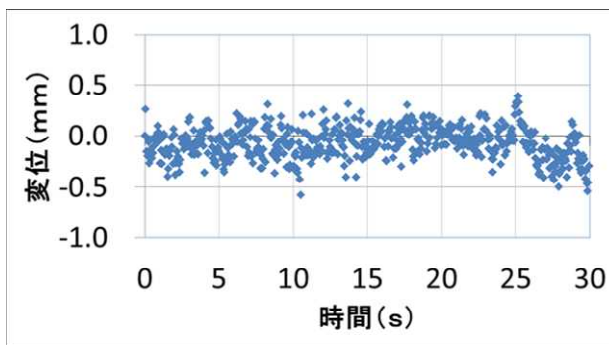
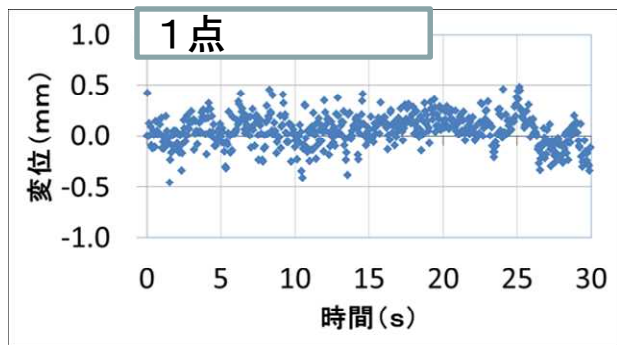
標準偏差
0.13mm
平均風速
2.4 m/s



A

B

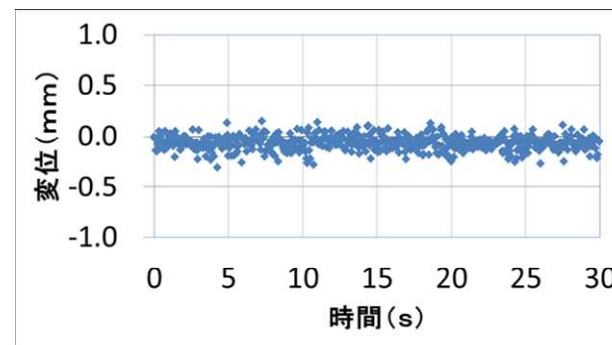
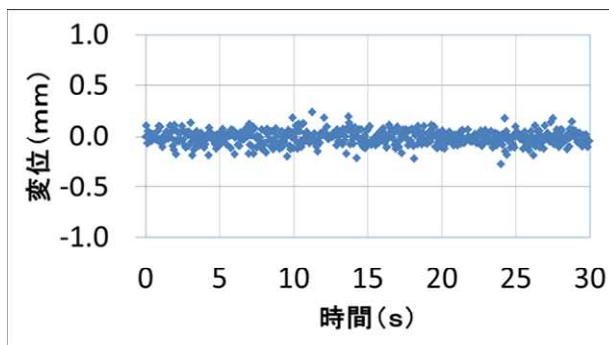
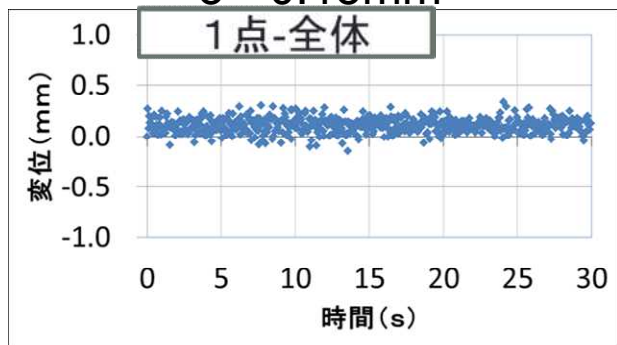
C



$\sigma = 0.15\text{mm}$

$\sigma = 0.15\text{mm}$

$\sigma = 0.14\text{mm}$



$\sigma = 0.07\text{mm}$

$\sigma = 0.06\text{mm}$

$\sigma = 0.07\text{mm}$

まとめ

しぼりとゆらぎの大きさの関係

レンズの有効口径	しぼり(F値)	1点-全体の標準偏差(mm)		
		A	B	C
大	4.5	0.07	0.06	0.07
	16	0.11	0.1	0.11
	32	0.09	0.09	0.09
小				

- F値が、4.5 と 16 を比べてみると、標準偏差は4.5の方が小さくなっている。
- F値が16と32を比べてみると、あまり差が出ていない。

レンズの有効口径を大きくすることで、ゆらぎの影響を小さくできる

格子パターンを貼付けずに変位を計測する手法の開発 406

- 間隔は既知（設計図がある）
- 横線は平行線（普通はそう作る）
- 垂直方向に変位（中央部付近）



2次元格子

たわみ計測
たわみ角計測

中央部は格子を貼りにくい

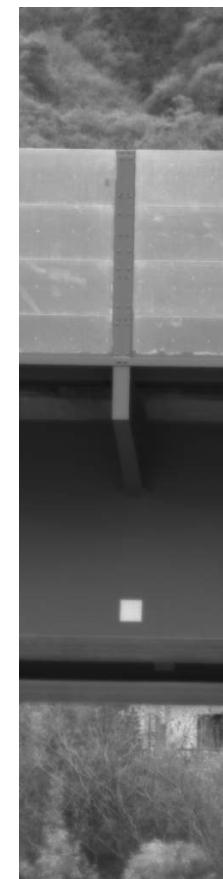
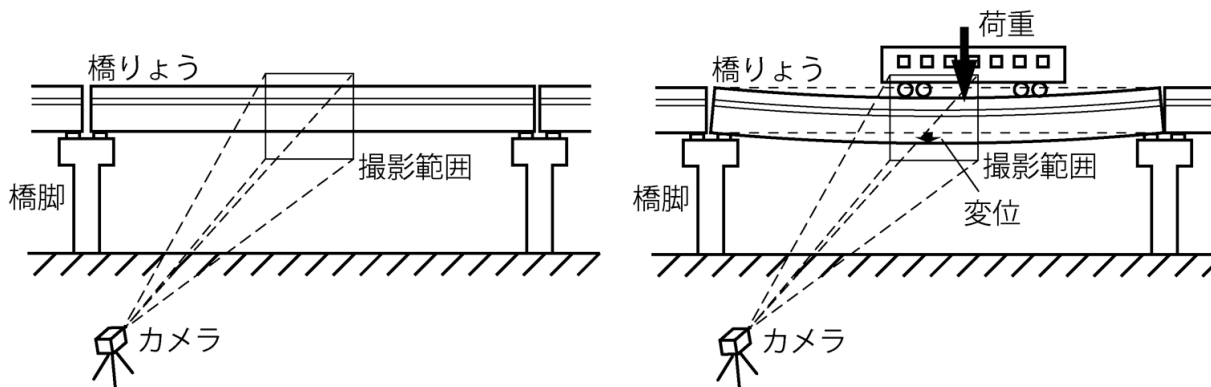
たわみ計測

角度は変化しない

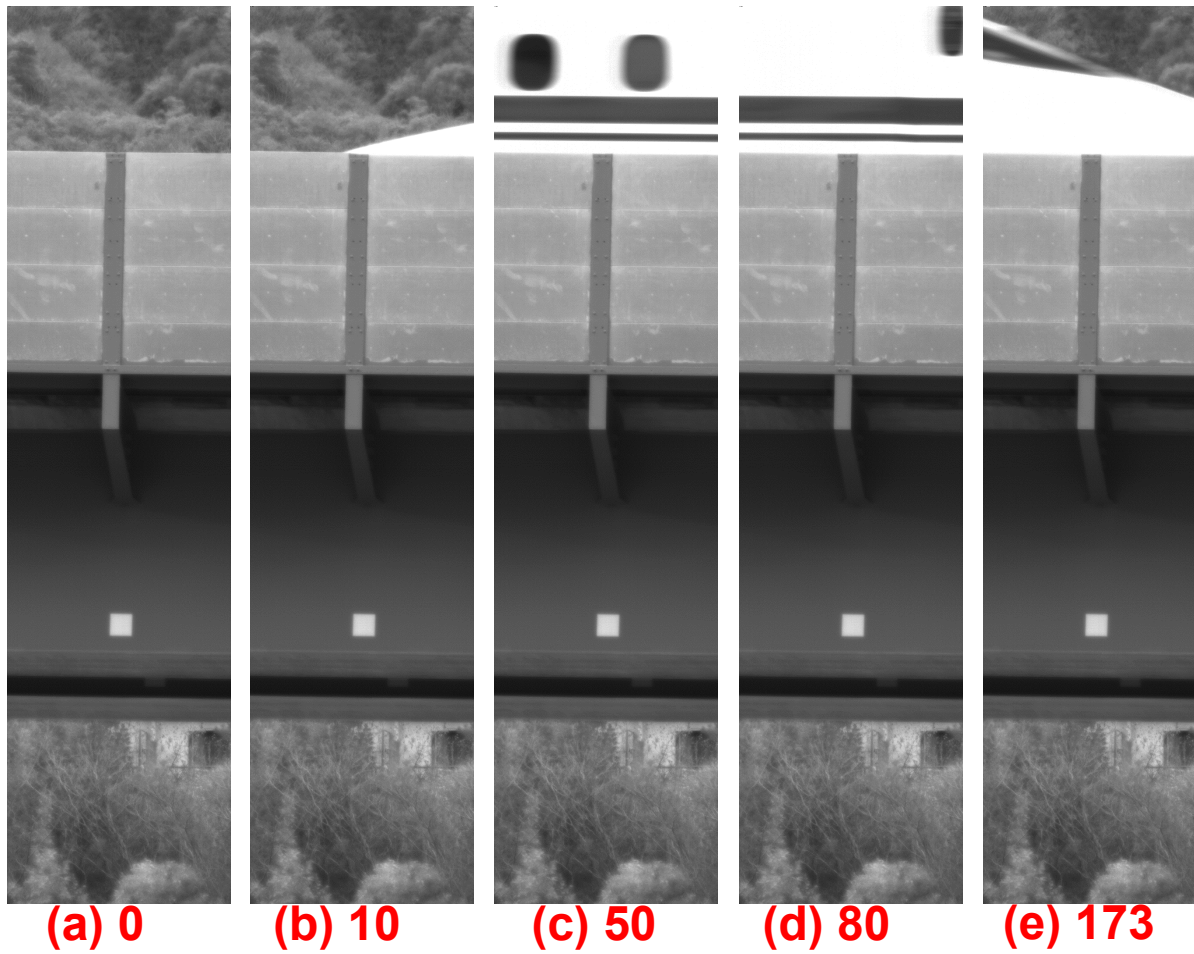
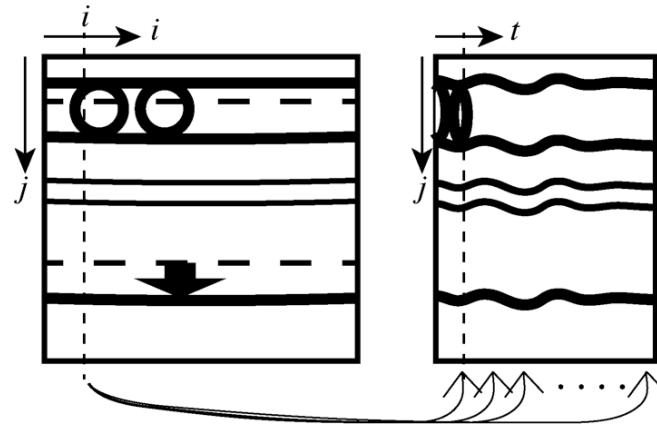
2次元格子

たわみ計測
たわみ角計測

対象物までの距離	55 m
露光時間	3 ms
撮影フレーム速度	30 fps
撮影画素数	512 X 2048 pixels



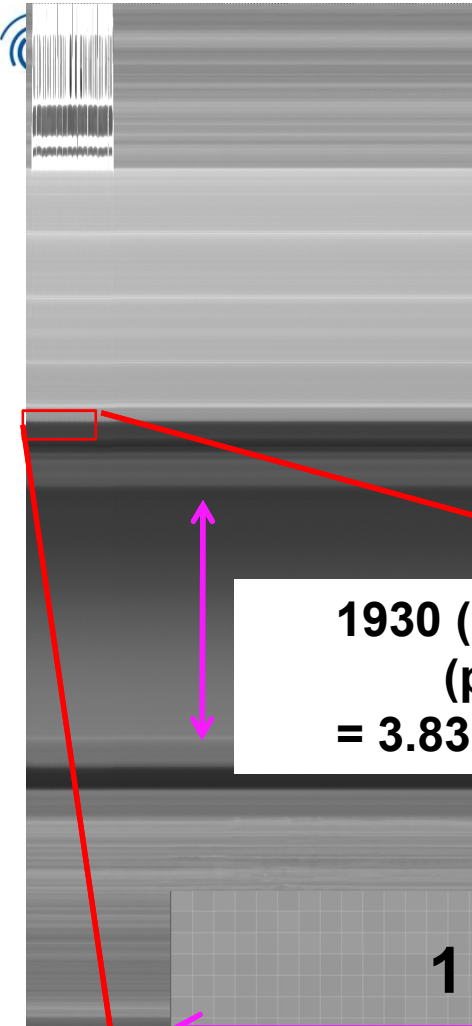
兵庫県赤穂，第三大津橋



512 lines (17 sec)



Train speed : approx. 80 m/s
Length of train : 400 m
Number of coaches: 16



1930 (mm) / 504 (pixel)
= 3.83 mm/pixel

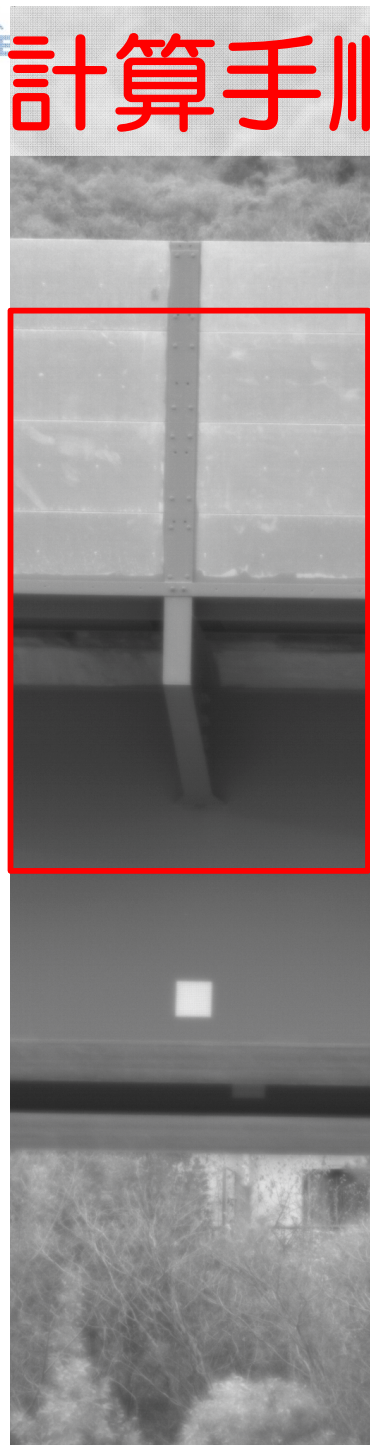
Time 33 ms/pixel



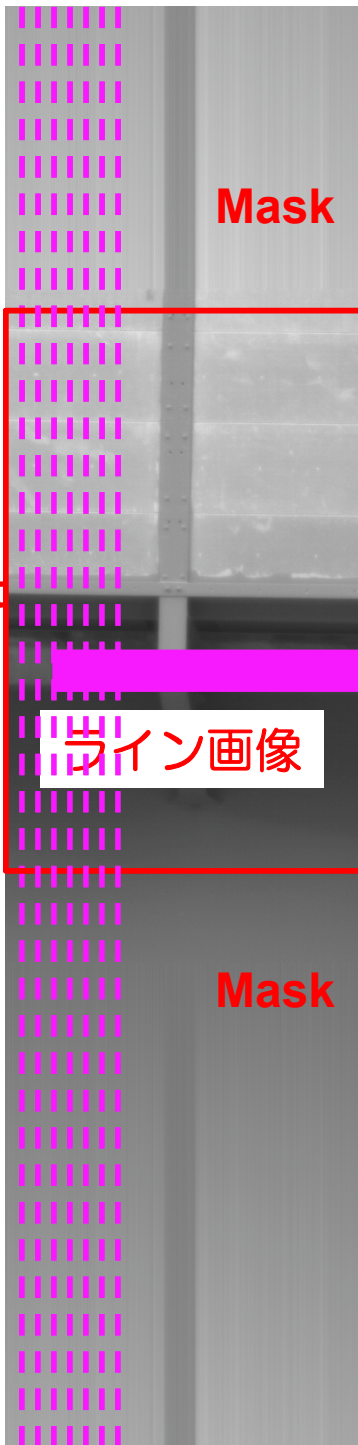
1 s



計算手順



Extract



Mask

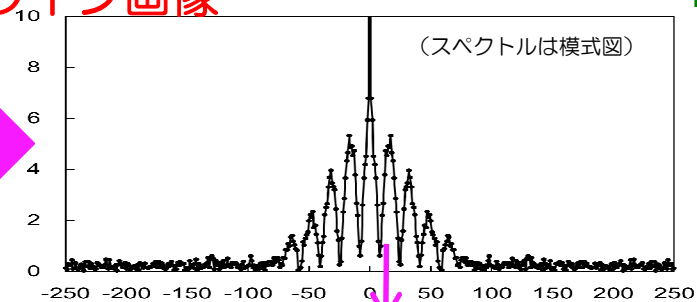
Mask

ライン画像

基準のライン画像

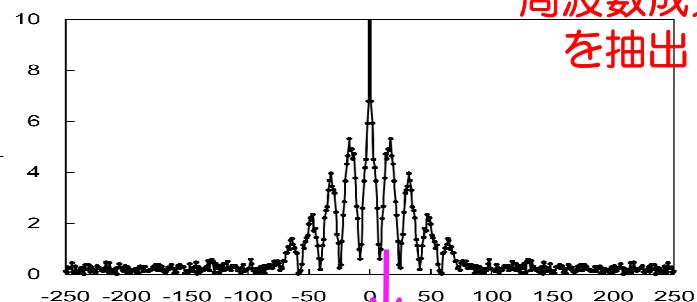
FFT

FFT



Phase θ_{ref}

必要な周波数成分を抽出



θ

必要な周波数成分を抽出

周波数ごとに位相差算出

位相差→変位に変換

パワーで重み付け平均

多数ラインの平均

$\Delta\theta$

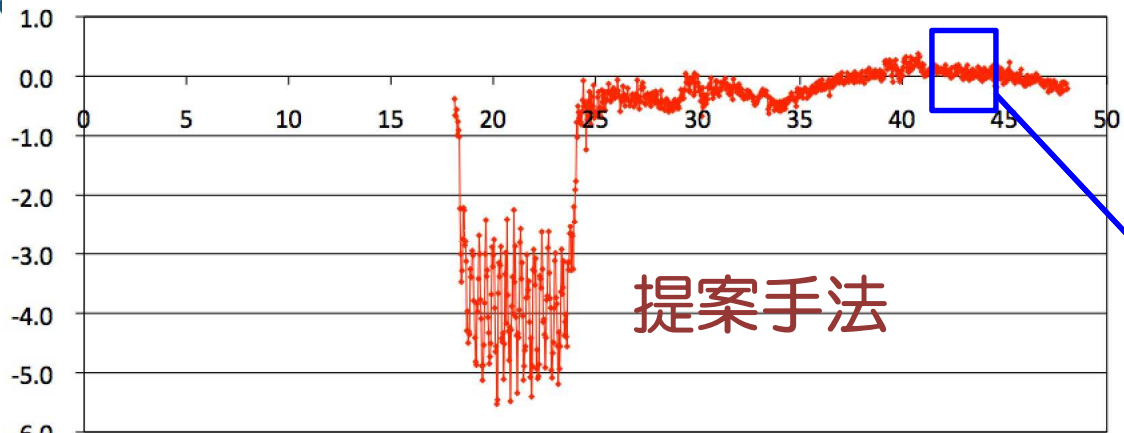
変位

変位

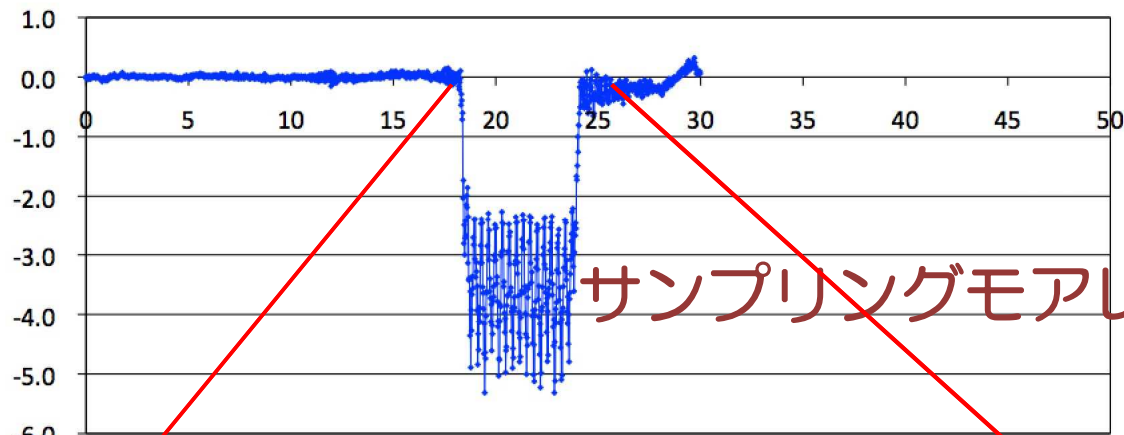
変位

精度アップ

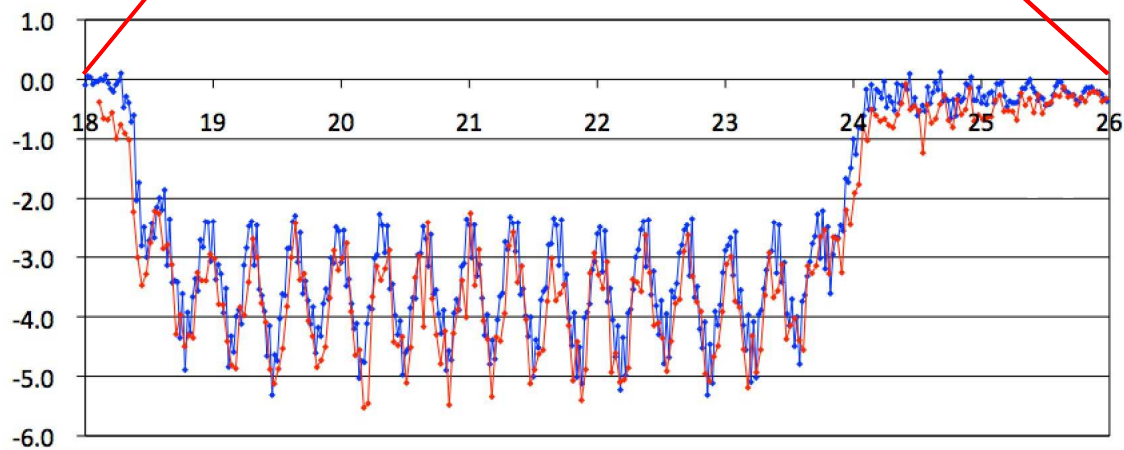




提案手法



サンプリングモアレカメラ



サンプリング¹¹¹ モアレカメラ との比較

標準偏差：
0.07 mm

100 points (41.61~44.91s)

サンプリングモ
アレカメラとの
差は約 0.5 mm

Thank you