



**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**

**NEDOインフラモニタリング技術シンポジウム**

**(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)**

**『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』**

**平成31年2月1日(金)@機械振興会館B2ホール**

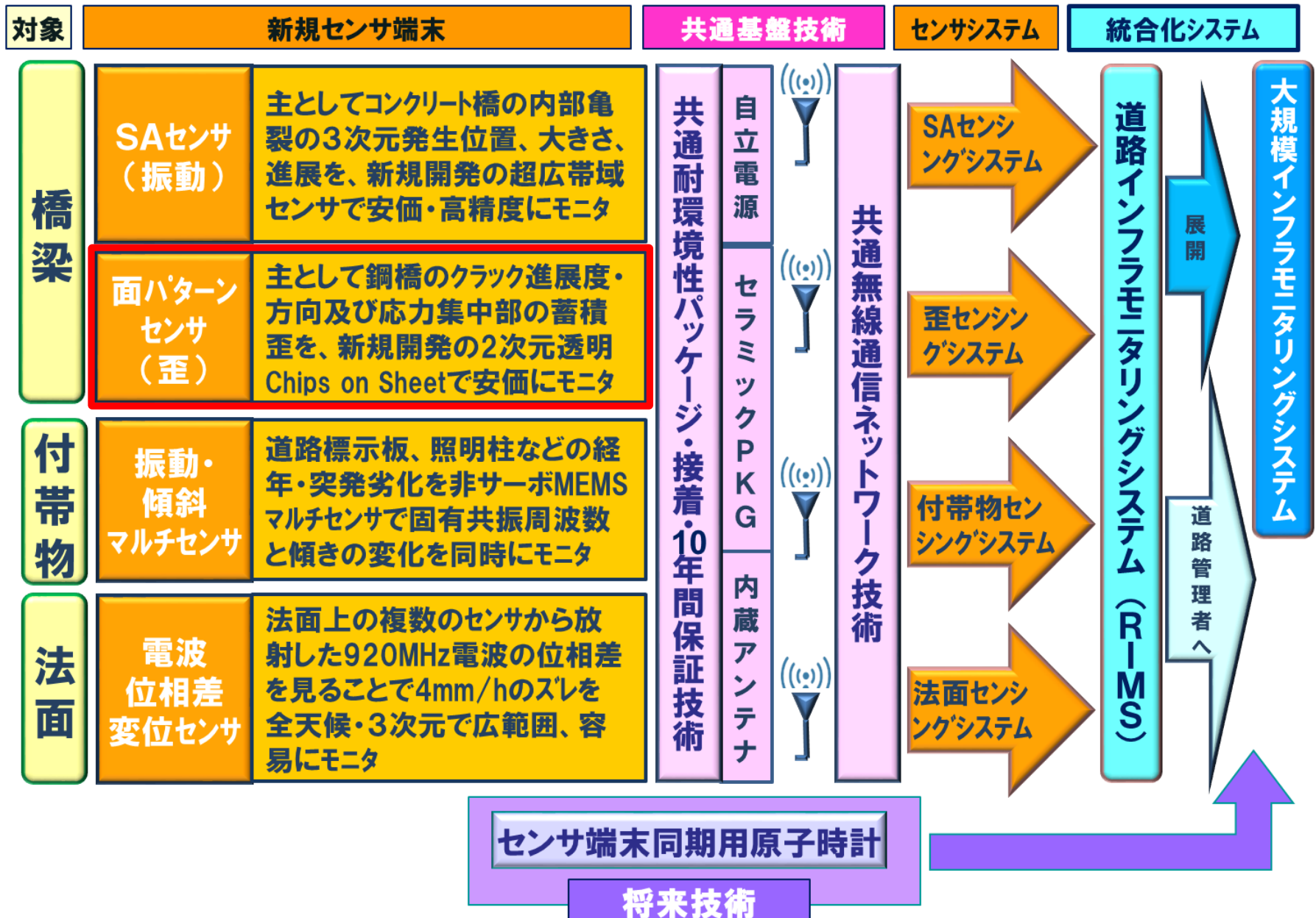
**(委託先:技術研究組合 NMEMS技術研究機構)**

**(実施者:産総研、大日本印刷、東京大学)**

**発表者:産総研 集積マイクロシステム研究センター  
社会実装化センサシステム研究チーム 研究チーム長 小林 健**



# 開発内容

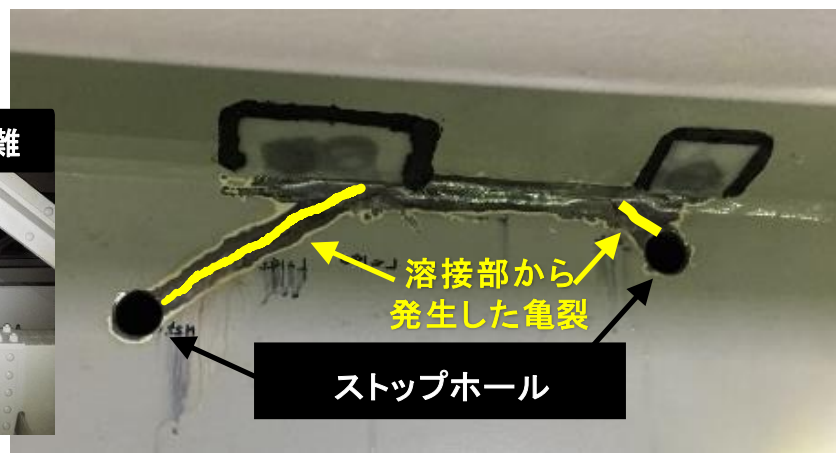


# 対象とする社会課題と現状

全国で疲労亀裂が数千箇所以上発生しており、作業人員・費用が不足  
 亀裂発見から応急処置まで数年、応急処置後の経過観察は未実施  
**解決策: ひずみ分布測定により亀裂進展をモニタリング**

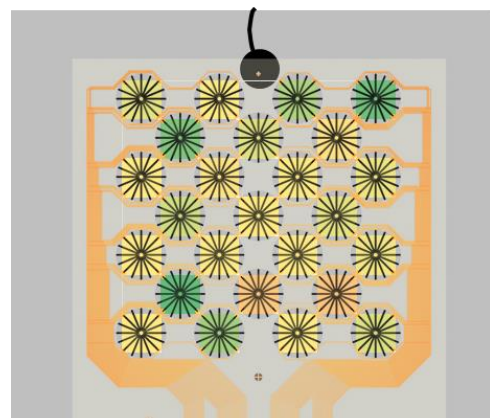


アクセス困難

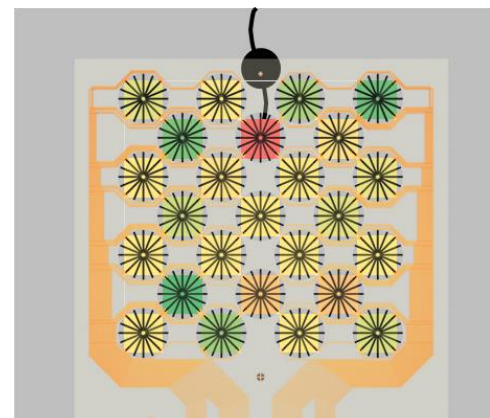


溶接部から発生した亀裂

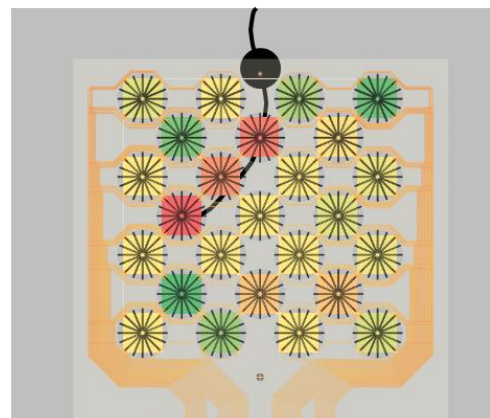
ストップホール



ストップホール近傍にひずみセンサレイ貼付け

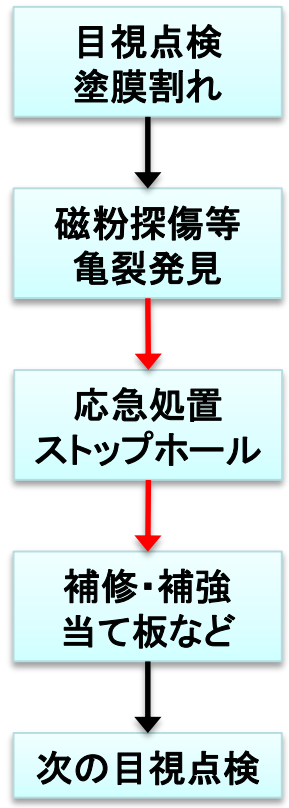
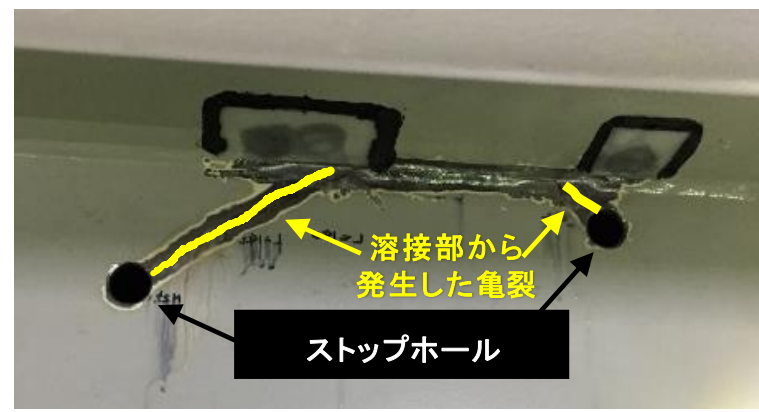
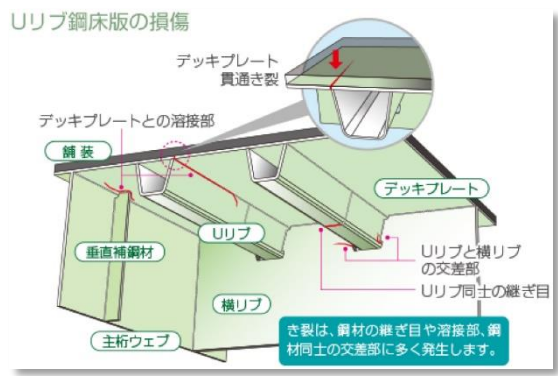


ストップホールから亀裂進展 → ひずみ分布異常 (要注意)



さらに亀裂進展 → 分布異常拡大 (補修)

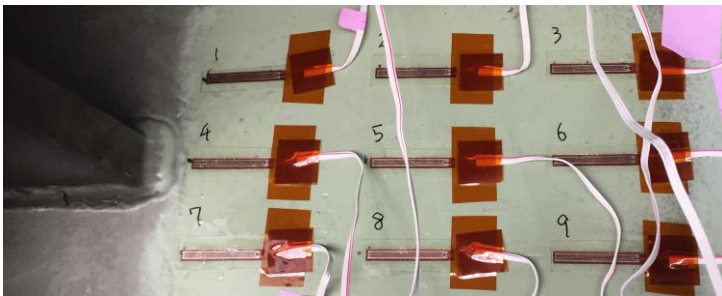
# 適用イメージ



- 5年に1回の目視点検間の亀裂進展を経過観察
  - ✓ 亀裂発見からストップホール形成までの間
  - ✓ ストップホール形成から補修・補強までの間
  - ✓ 補修・補強後
- その他コンクリートのひび進展経過観察への適用も検討

# 研究開発テーマ概要

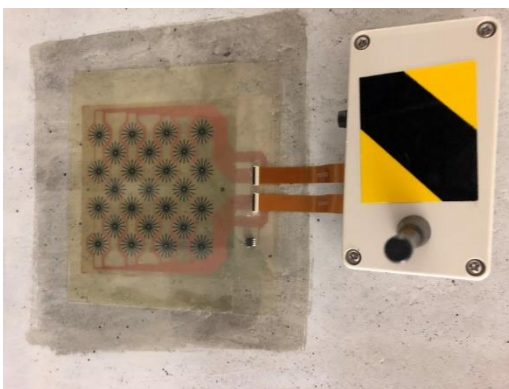
目的: 亀裂進展を常時モニタリング可能なひずみ分布センサシステムを開発



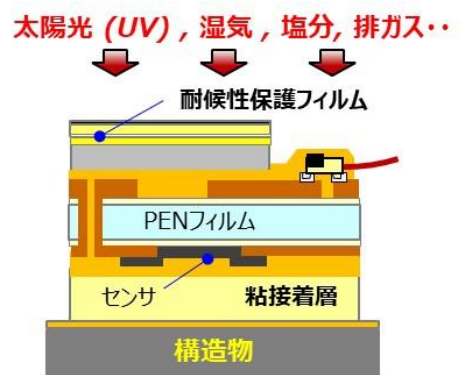
- 従来技術(箔ひずみゲージ)の問題点
- 亀裂進展検知にはセンサを高密度に配置する必要があるが、多数貼るのは施工、配線の観点から困難
  - 箔ひずみセンサアレイシートは高コスト、消費電力が大きい
  - フレキシブル基板や接着材が紫外線や湿気に弱い

## 研究開発内容

- 高密度印刷ひずみセンサアレイ
  - 自立電源無線センサシステム
  - 高耐久・簡単施工接着シート
  - 高耐候性保護フィルム
- 印刷で高密度にひずみセンサ素子を配置することで亀裂進展を確実に検知、低コスト化も実現  
 センサ端末、無線センサシステムの低電力化によりシステム全体の電力を太陽光発電で供給  
 屋外使用10年以上の接着耐久性と貼るだけの簡単施工を実現  
 UVカット、水蒸気バリア性を有する積層構造のフィルム部材を開発



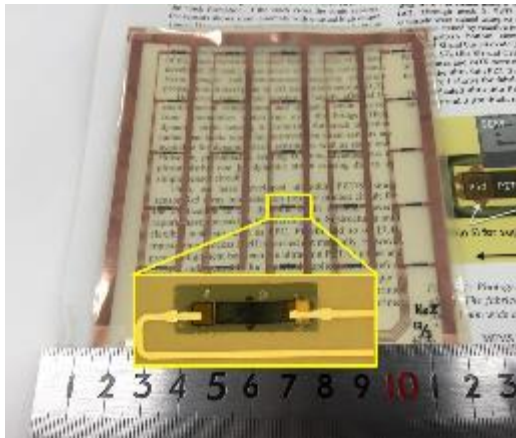
印刷ひずみセンサアレイ



高耐候性保護フィルム

高耐候性保護フィルム + 印刷ひずみセンサ + 接着シート → フレキシブル面パターンセンサ

# 高密度印刷ひずみセンサアレイシート



極薄MEMS-PZT/Siタイプ



グラファイト印刷タイプ

## 高密度・大面積ひずみセンサアレイ

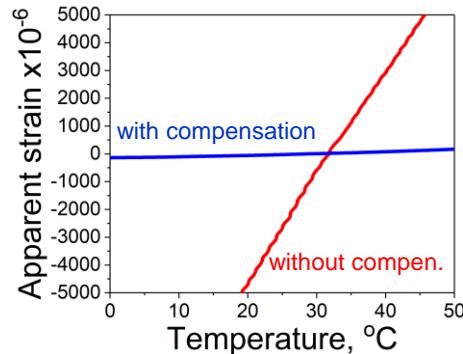
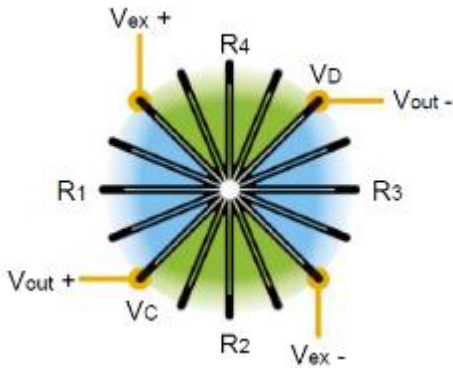
亀裂・クラックがどの方向に進展しても確実に検知する密度でセンサを配置可能

## 低コスト 2000円/100cm<sup>2</sup>

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

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

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



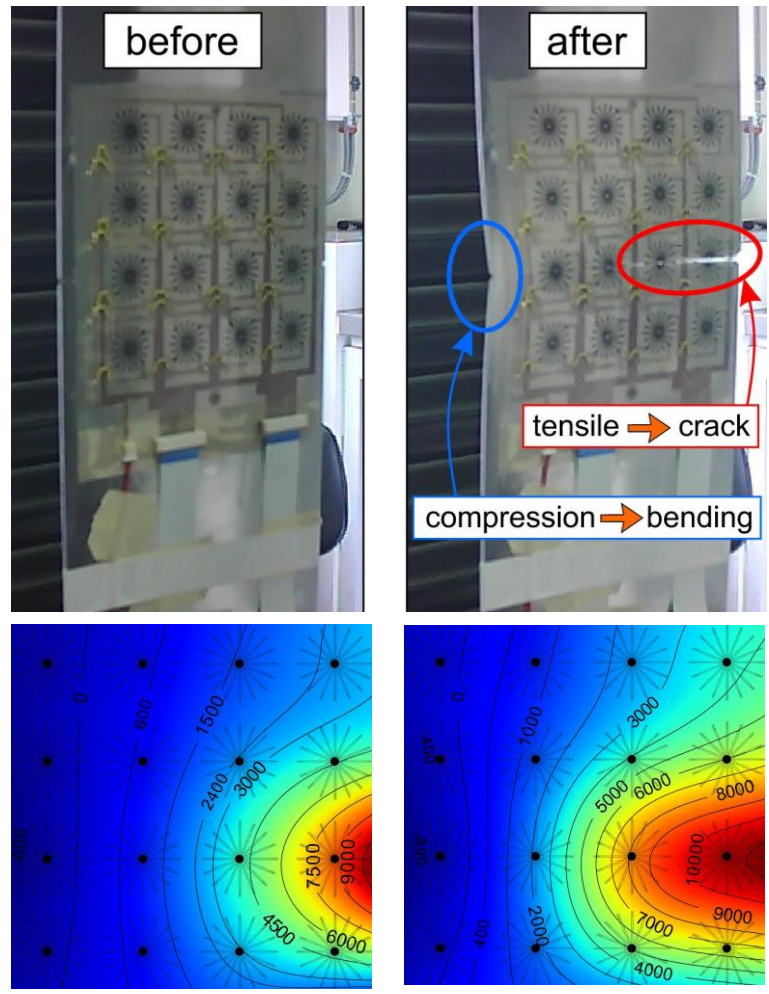
フルブリッジ構造による温度ドリフト低減

	大面積化 高密度化	コスト 25センサ /100cm <sup>2</sup>	25センサ 電力	温度 ドリフト	感度
箔エッチング (市販)	△	100000円	800mW	○	1με
PZT/Si MEMS	○	20000円	0W	◎	1με
グラファイト 印刷	◎	2000円	3mW	○	10με

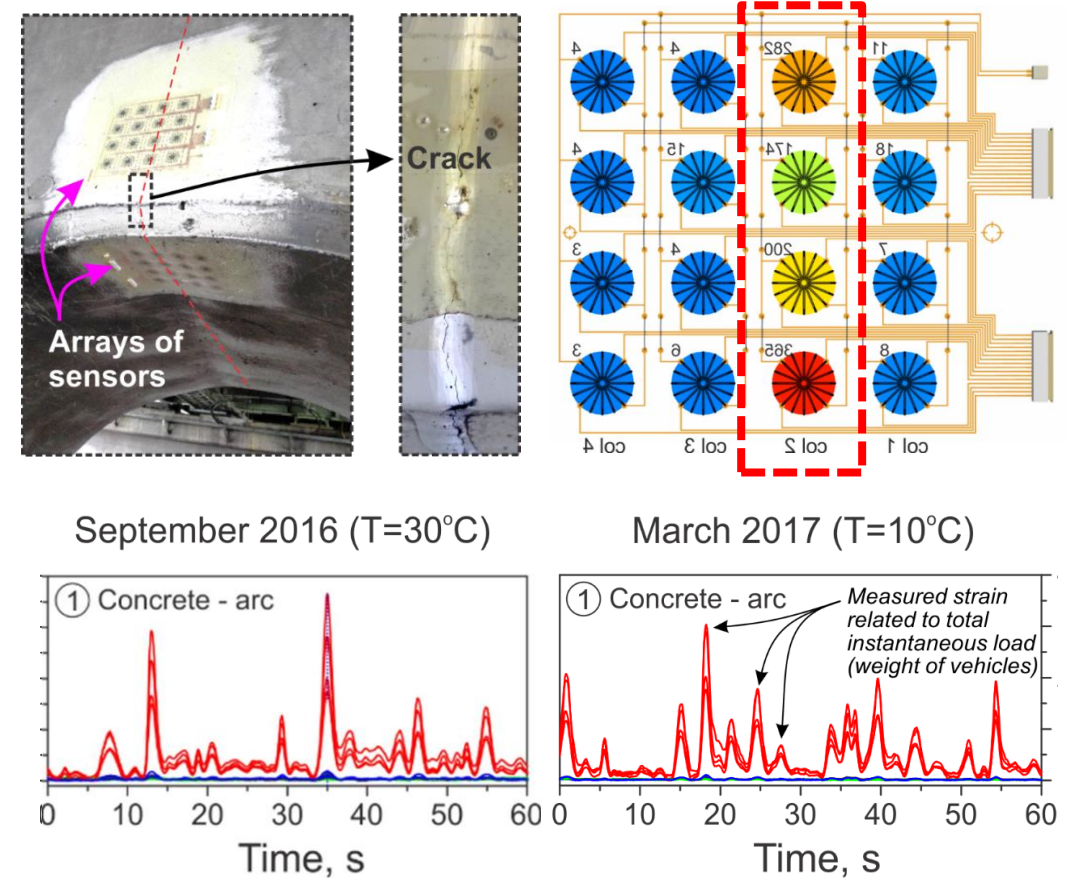
ひずみセンサを高密度配置可能で低コストなグラファイト印刷タイプを選定  
フルブリッジ構造による温度補償により亀裂進展検出に必要な感度を実現

# 印刷ひずみセンサアレイシートによるひずみ分布測定

## 鋼材引張試験による破断



## 実橋でのひずみ分布測定

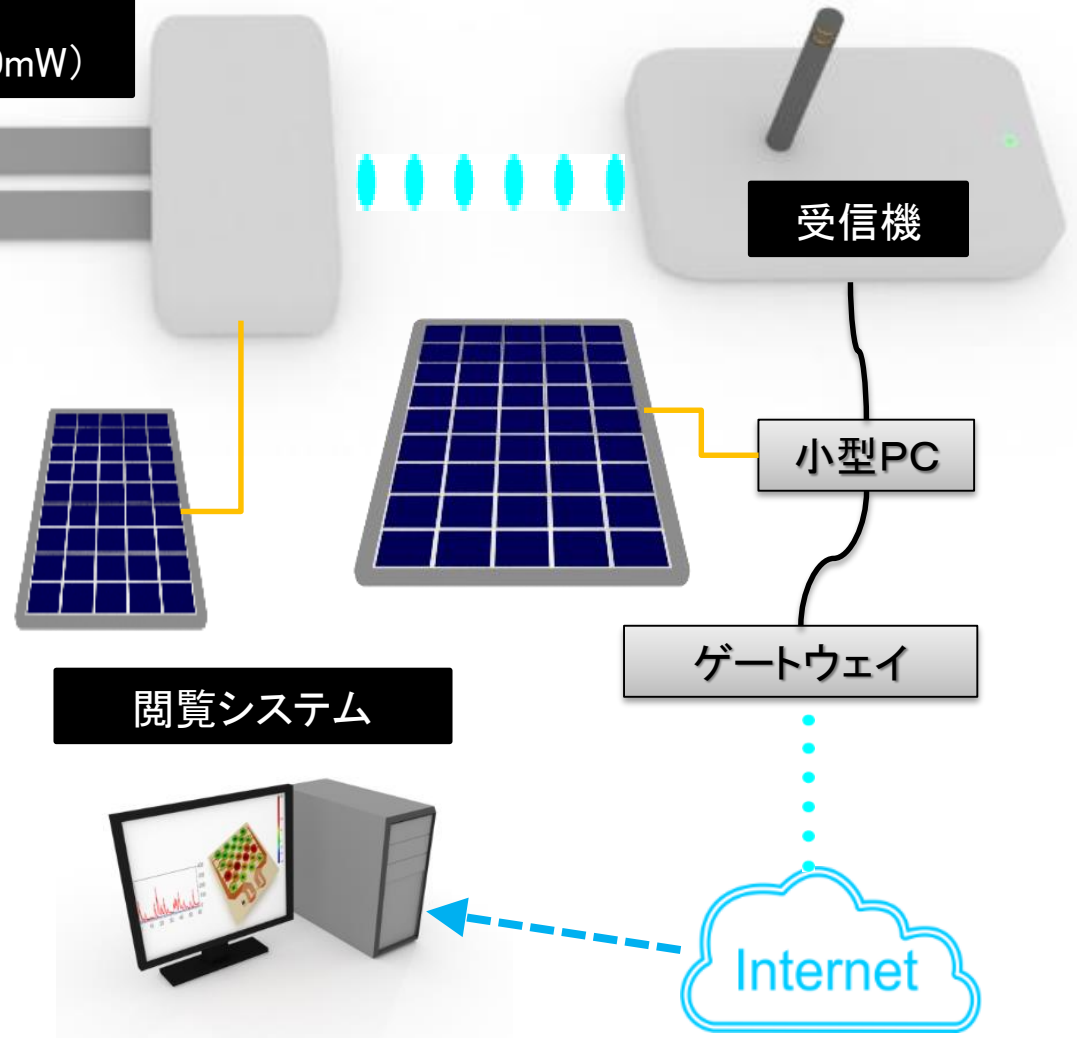
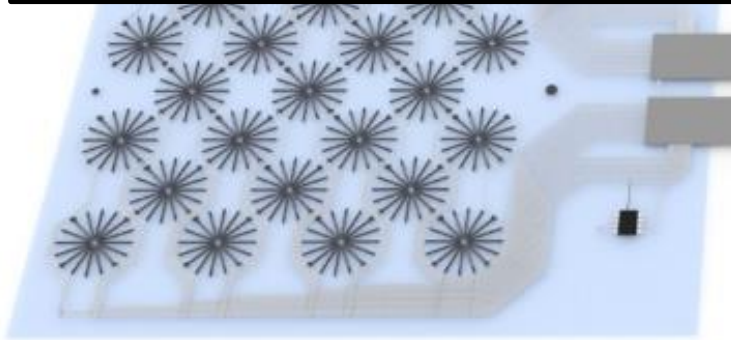


D. Zymelka et al.,  
Smart Mater. Struct. 26 (2017) 105040

試験体の亀裂進展による $1 \times 10^{-2}$ レベルのひずみ発生を検出  
20°Cの気温差でも同様にひずみ分布測定が可能

# 自立電源無線センサシステム

印刷ひずみセンサレイシート、  
25chアンプ・920MHz通信モジュール(120mW)

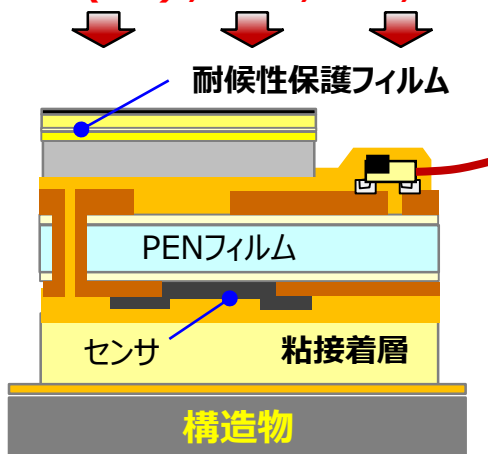


センサ駆動からサーバーへのアップロードまで無線センサシステムを太陽光で自立電源駆動  
測定条件の設定やシステム稼働状態を外部からリモートアクセス可能なシステム



# 高耐候性保護フィルム

太陽光 (UV), 湿気, 塩分, 排ガス...



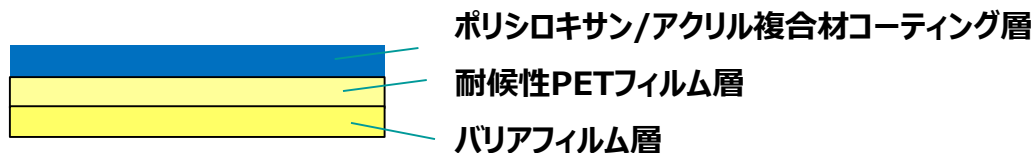
## ● 耐候性保護フィルム

### ● UV光 99.6% 以上カット

10年以上の太陽光照射によるフィルム部材の劣化を防止

### ● 水蒸気透過率 $0.1\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下を実現

太陽電池パネルバックシート同等レベルの水蒸気バリア性



## ● 透明フレキシブル配線板

### ● PENフィルムを適用し、「透明」、「半田実装対応」、「安価」を実現

貼ったあとも、ひびや亀裂の進展について目視点検が可能

## ● 耐久性評価

### ● 温度サイクル $-40\sim 85^{\circ}\text{C}\times 200\text{cyc}$ 以上をクリア

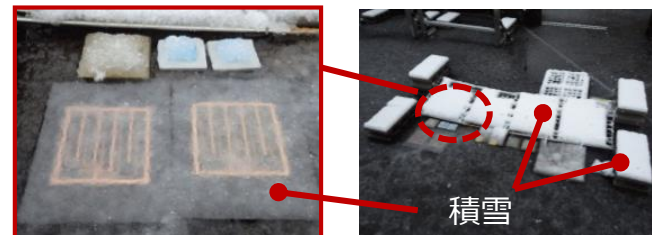
実環境で一日に受ける温度ストレス $\Delta 60^{\circ}\text{C}$  ( $20\sim 80^{\circ}\text{C}$ )  
の10年分に相当

### ● 屋外暴露促進試験で、約2年間の暴露で異常なし

温度、湿度、塩分、日光など、複合環境での耐久性を確認



コンクリート面のひび  
センサ下のひび



積雪  
冬季低温環境暴露試験

UV光 99.6% 以上カット、水蒸気透過率  $0.1\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{day}$ 以下を実現

温度サイクル $-40\sim 85^{\circ}\text{C}\times 200$ 回をクリア、約2年間の屋外暴露促進試験で異常なし

# 接着シートと施工技術

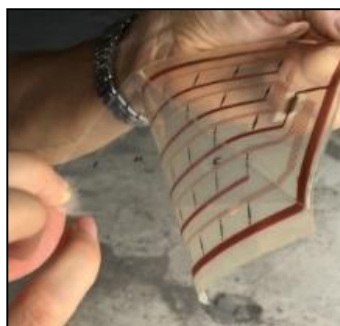
## ● 簡単施工を実現する粘接着シート貼付技術

- ・ 粘接着シートと一体化構造により、湿布薬のように「貼るだけ」の簡単施工を実現
- ・ 粘接着層は日光で露光する事で硬化反応が開始、粘着性を維持する2～3時間貼付け作業が可能で、貼付後はそのまま常温硬化
- ・ 硬化タイプのため、構造物の歪み伝達良好

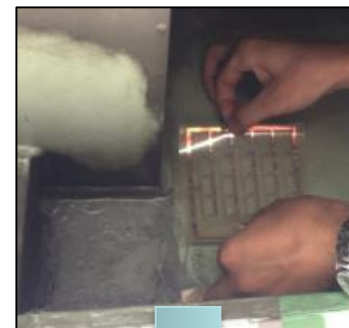
日光で露光



セパフィルム剥がし



センサ貼付け



貼付面の清浄



下地処理(プライマ塗布)



粘接着層の硬化



# フレキシブル面パターンセンサ作製プロセス

## ① グラファイトひずみセンサ印刷



## ② センサ保護層形成 (工程中の搬送ダメージからの保護)



## ③ コネクタ等の部品実装 (低温半田)



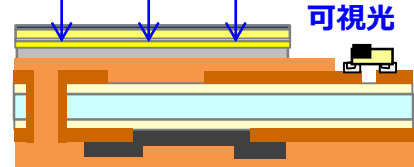
## ④ 配線封止層コーティング



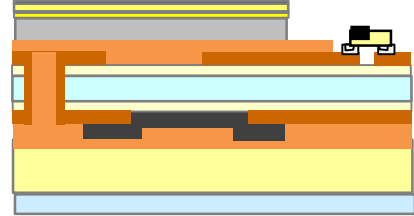
## ⑤ 液状接着剤塗布



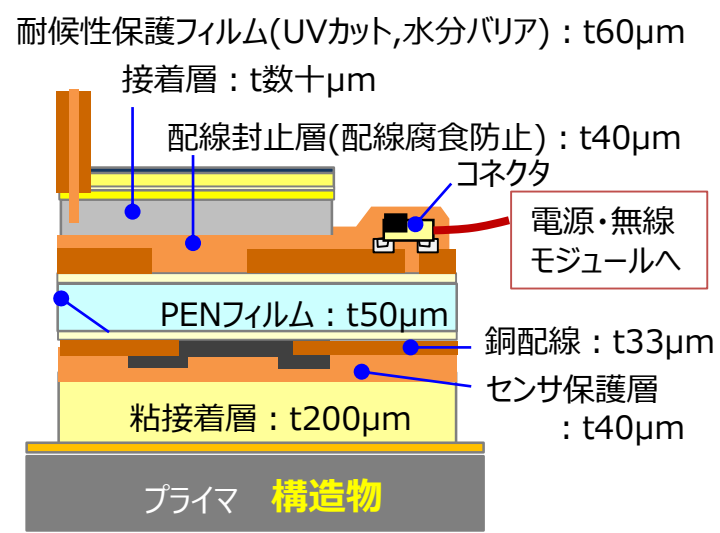
## ⑥ 耐候性保護フィルム貼り合せ、可視光照射による接着層硬化



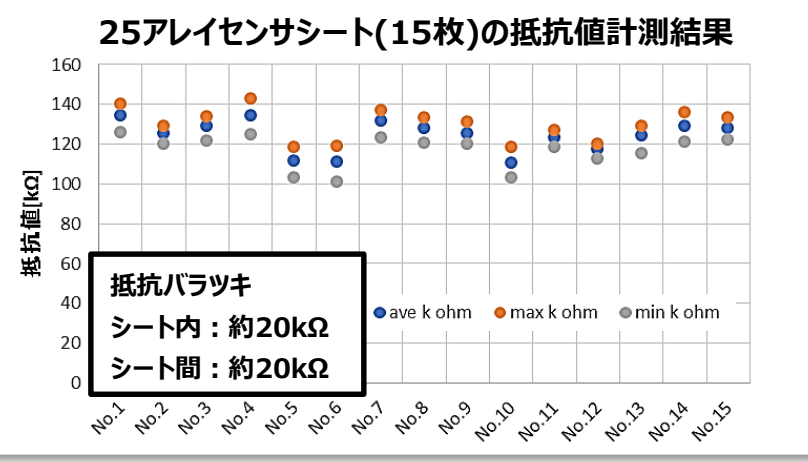
## ⑦ 粘接着シートラミネート、外形加工



## ⑧ 現場貼付へ

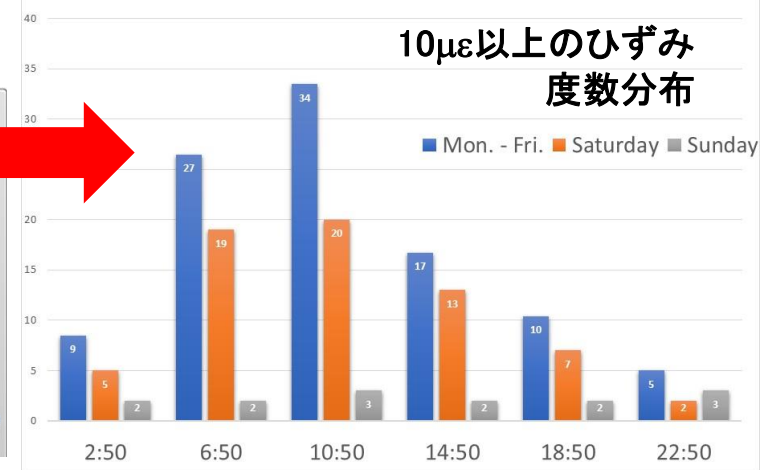
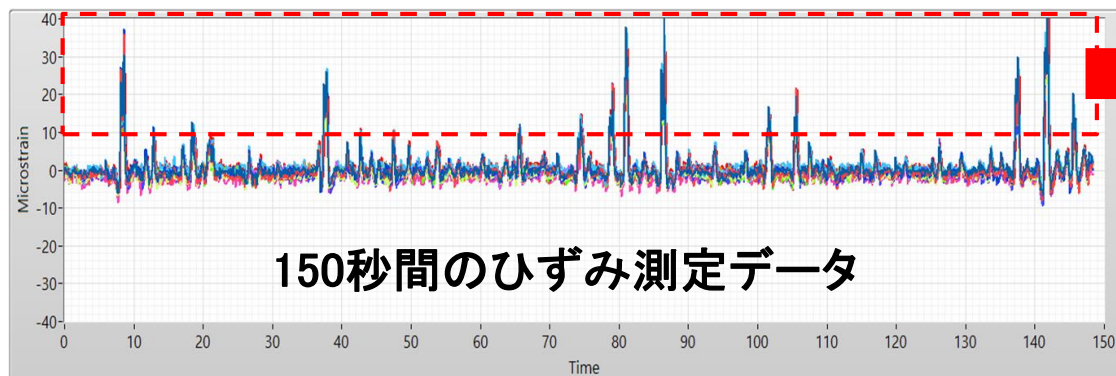
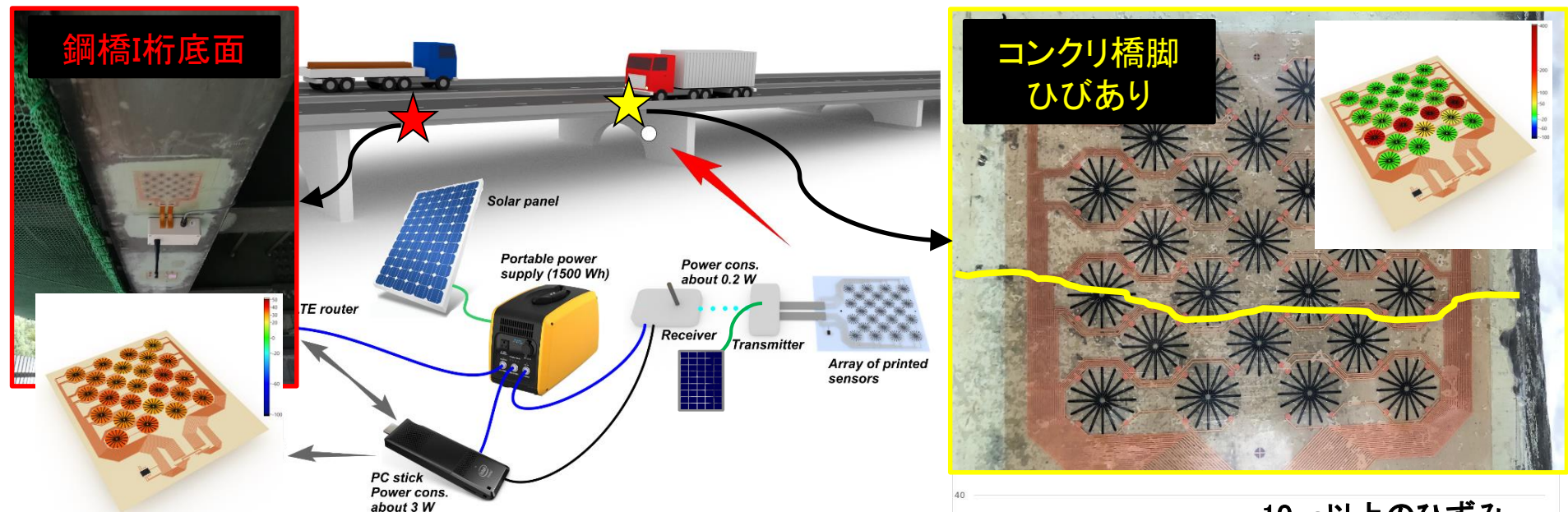


- 太陽電池パネル用バックシートの厚みは通常200 $\mu$ m以上。本開発品は1/3以下の厚みでありながら、バックシートと同等の水蒸気バリア性を達成
- バックシートは白色PET (不透明) で耐UV特性を確保。本開発品は、透明・高耐久性材料である、ポリシロキサン/アクリル層の精密コーティングにより耐UV特性を確保



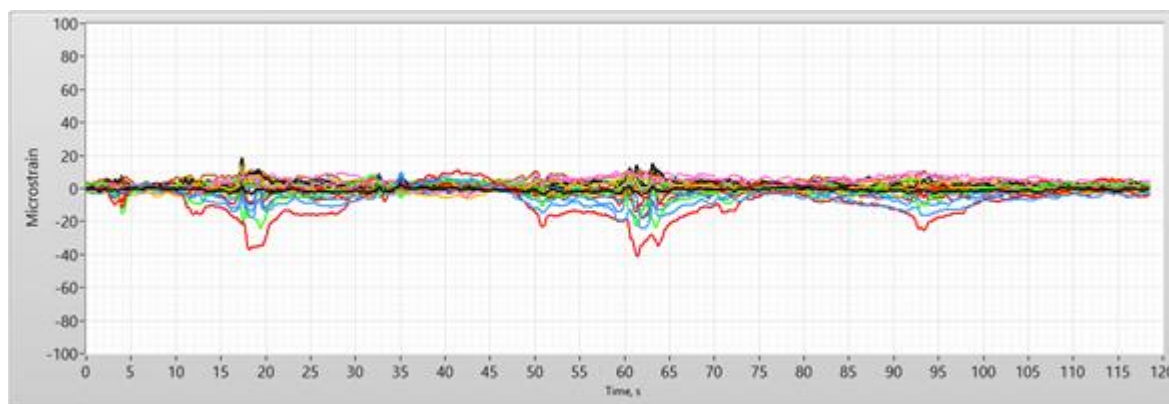
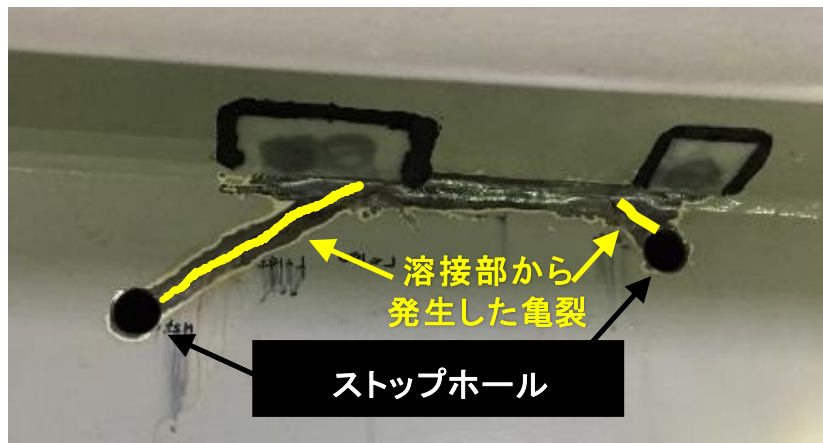
印刷ひずみセンサアレイシート、高耐候性保護フィルム、接着シート一体化プロセスを開発  
 シート15枚上の全ひずみセンサにおいて不良ゼロ、ばらつきは計測に問題ないレベル

# 高速道路橋での屋外システム動作実証試験



屋外橋梁の鋼橋I桁、コンクリ橋脚を太陽光のみで常時モニタリング可能なシステムを実現  
 車両通過時の動ひずみによりひびや亀裂発生部の変化を検知可能  
 I桁底面のひずみから通行量、車重の情報を取得→桁ごとの情報が得られる

# 実証実験のまとめと解析、考察(ストップホール)



車両通過時のストップホール周囲のひずみ波形と分布

床版とUリブ溶接部から発生した亀裂に施したストップホール周囲にセンサ貼付け  
車両通過時の動ひずみ分布よりストップホール周辺のひずみ分布の偏りが見られた

## 社会課題

作業人員不足のため亀裂の発見～補修の間に亀裂進展が危惧される

→亀裂発見、ストップホール応急処置後にひずみ分布センサシートを貼り付け経過観察

## 開発内容

耐候性保護フィルムにより屋外使用10年の耐久性を示す高密度印刷ひずみセンサアレイ、太陽光による自立電源無線センサシステム、貼るだけの簡単施工法を開発

## 成果

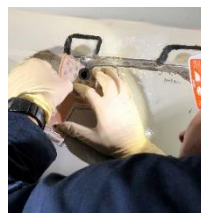
高速道路橋の構造物を太陽光自立電源だけで常時モニタリングするひずみ分布測定無線センサシステムを実現、実橋のひずみ分布測定を実証。



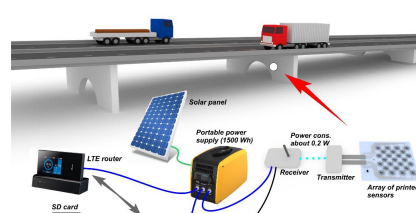
太陽光 (UV), 湿気, 塩分, 排ガス...



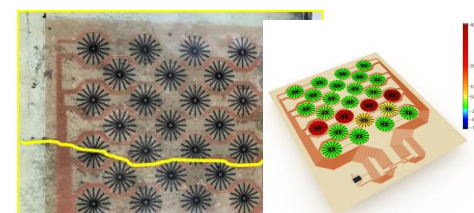
耐候性保護フィルム



貼るだけ簡単施工



自立電源無線センサシステム



実橋のひずみ分布測定

# 今後の事業化、実用化について

- 産総研より技術移管を受け、DNP社内で事業企画の推進
- プロジェクト終了後2年以内の実用化、DNPが高速道路各社や電力事業者へ販売
- DNPの高機能フィルム部材を扱う事業部への移管を想定

## 実用化

- ・DNP保有のフィルム加工技術の活用
- ・既存ライン活用による量産技術を開発

### DNP 関連商材

#### 生活・産業部門

- ・包装、建材、エネルギー（太陽電池）
- エレクトロニクス部門

- ・配線シート（タッチパネル、LEDモジュール）



**既存事業との親和性があり  
早期の事業化が可能**

## 事業展開

## 普及活動

- ・RIMS-PJの実績をアピール
- ・Press、Paper、Patent活動
- ・高速道路、電力向けで実績作り



### 一般道や、他分野へ展開



鉄道



物流



船舶、航空



建設・工場

**本研究は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)の委託業務の結果得られた成果です。**