



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)

『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』

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:東芝、東京大学、京都大学)

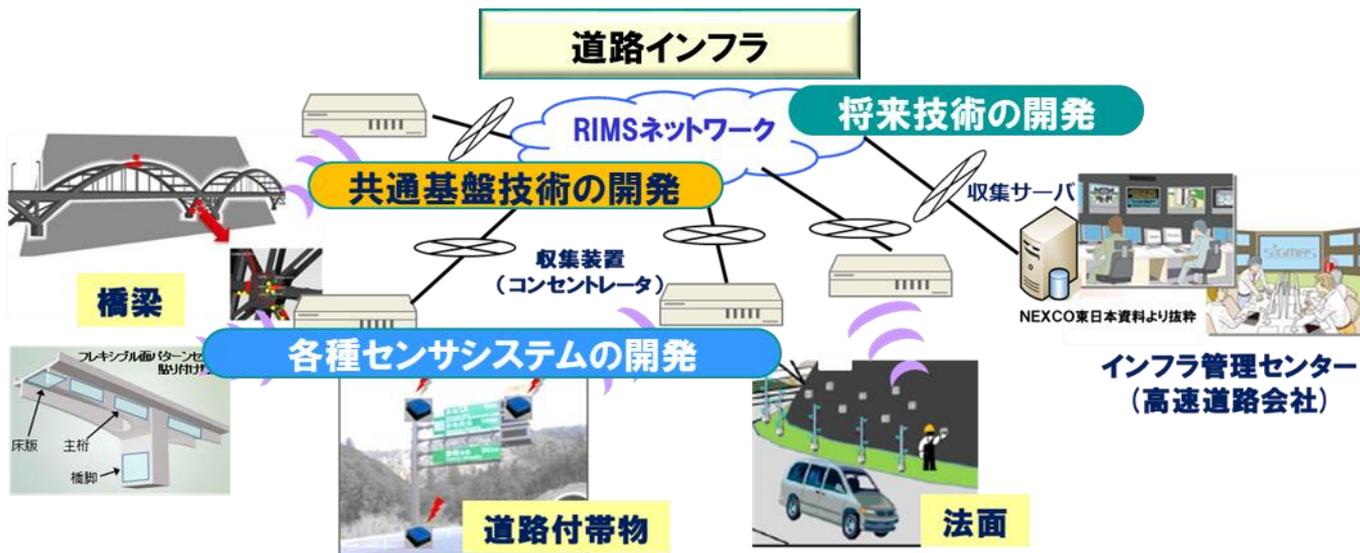
発表者:株式会社東芝 研究開発センター
研究主幹 渡部一雄



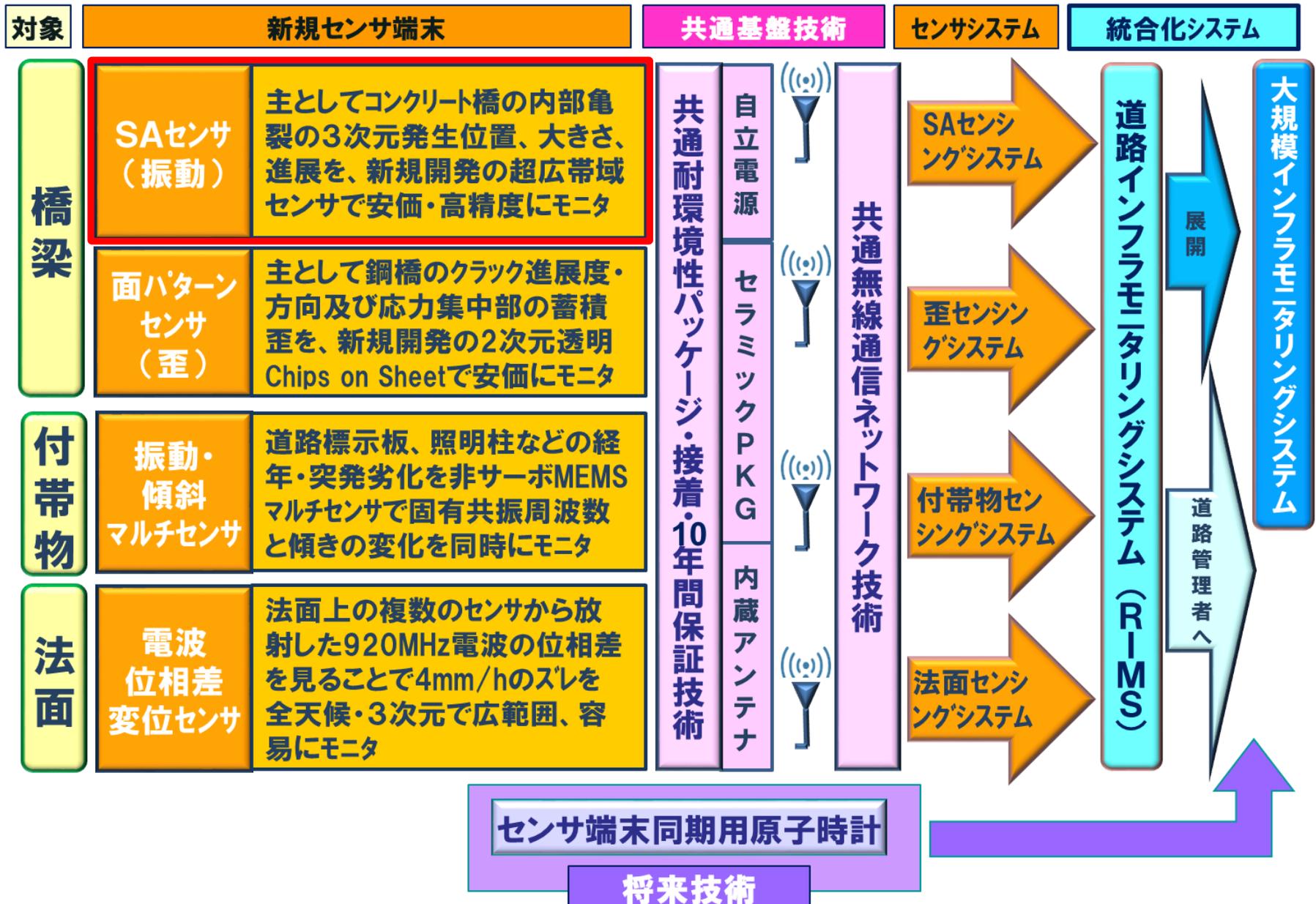
開発概要

- 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
- パッケージとして一般道への展開及び海外展開も容易となる。これは世界初の試みと考える
- 将来技術として、センサ端末同期用原子時計の基盤技術及び高性能振動発電を開発
- 開発したセンサシステムを大規模インフラのモニタリングに展開

大規模インフラ



開発内容



対象とする社会課題と現状

解決すべき課題

橋梁点検は、「近接目視・打音」が基本である。今後20年で半数以上が建設後50年以上となり、従来通りの点検では、**財政的にも、人的リソース的にも維持管理が困難**となる。

今回開発したシステムでは、主に鉄筋コンクリート床版(**RC床版**)の劣化(ひび割れ)を対象とした。RC床版の劣化を初期段階から監視するには、内部ひび割れから生ずる高周波(～1MHz)の振動を検知する必要がある。また、大規模損傷の有無を検知するには低周波(数Hz)に対応することが有効であり、コスト面から広い周波数を1つのデバイスで対応するセンサが望まれていた。

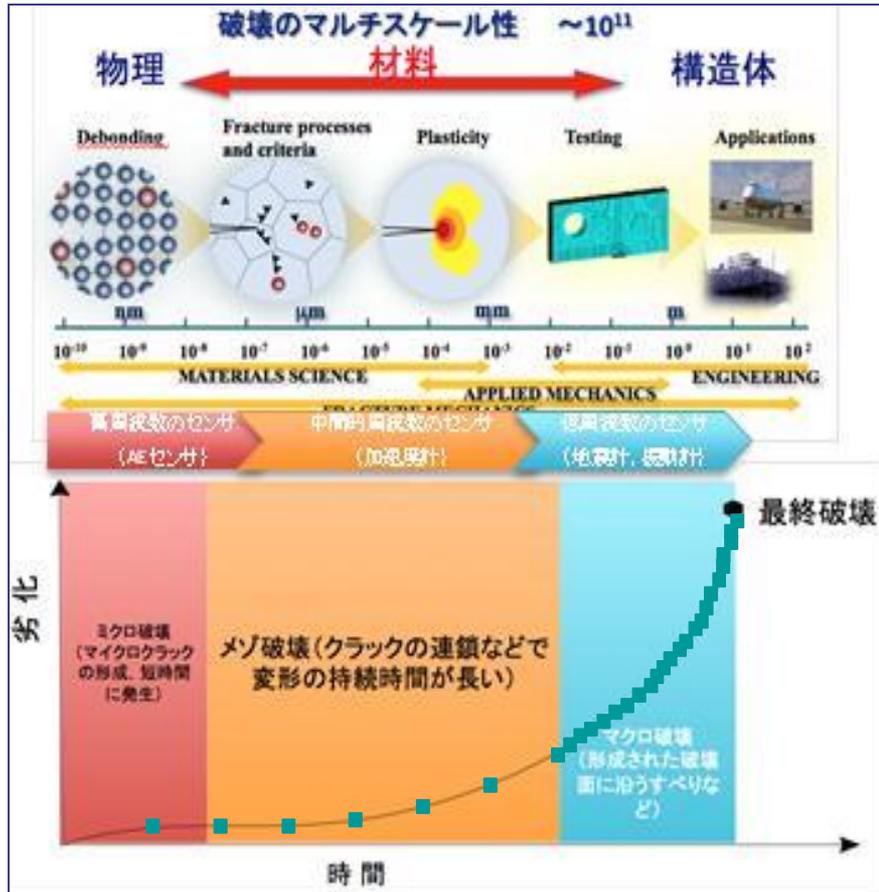
必要性

・破壊のマルチスケール性と劣化の進展から、

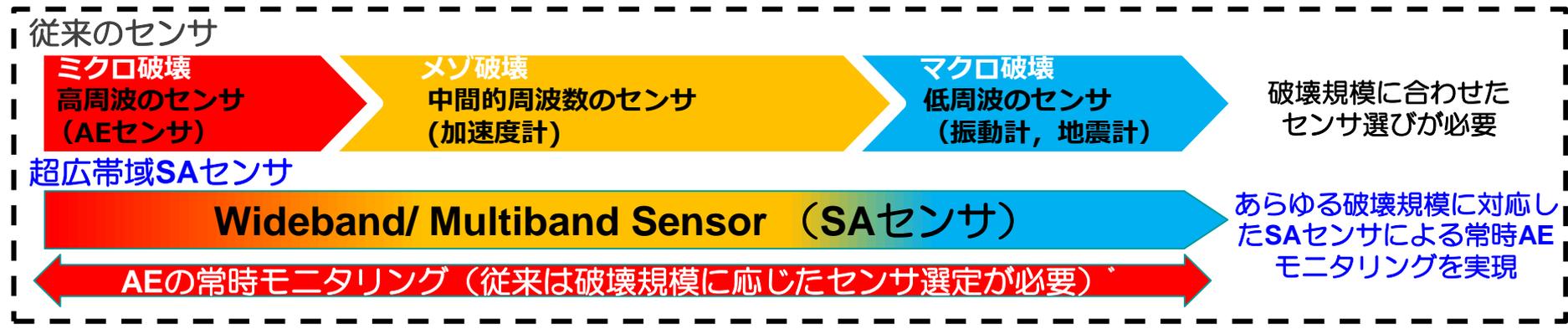
- 初期劣化(マイクロ破壊)
= 高周波センサ(10kHz～1MHz)
- 中間劣化(メゾ破壊)
= 中間周波数センサ(数100Hz)
- 限界劣化(マクロ破壊)
= 低周波センサ(数Hz)



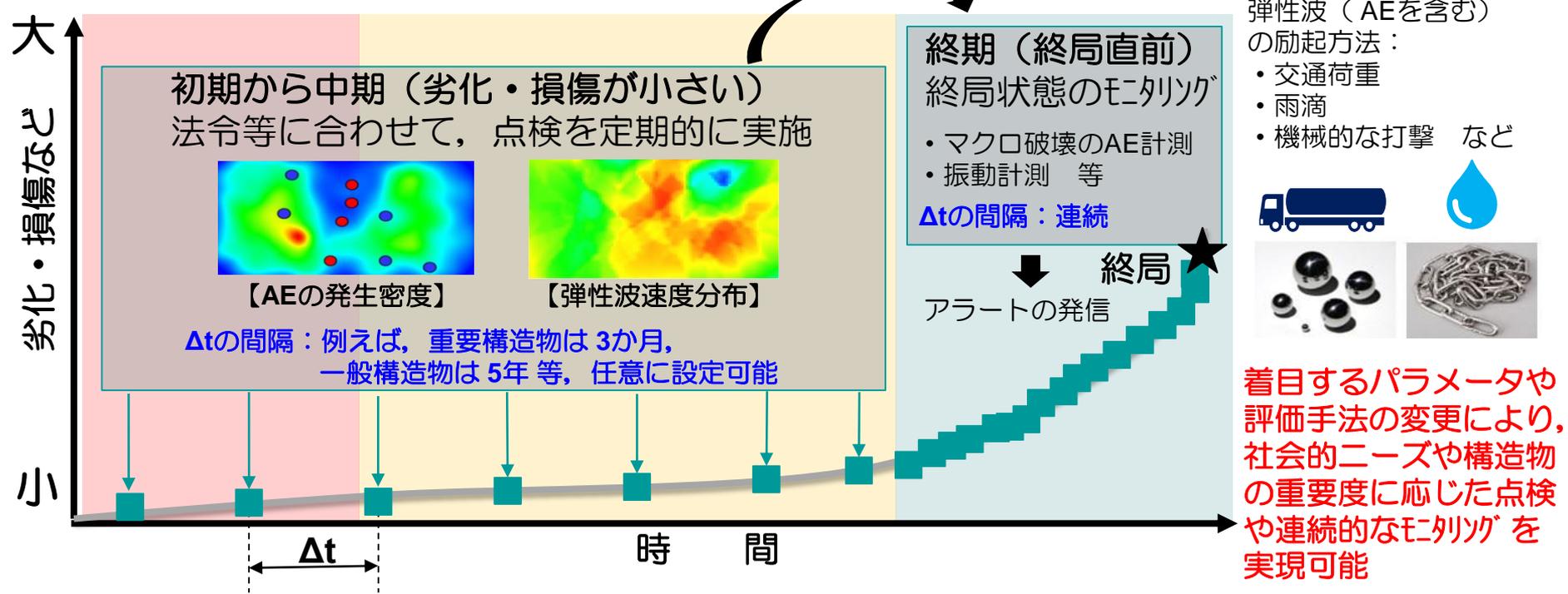
初期段階の劣化から大規模劣化までを振動検知するには超広帯域のセンサが必要
→スーパーアコースティック(SA)センサ



開発テーマ概要と差異化ポイント

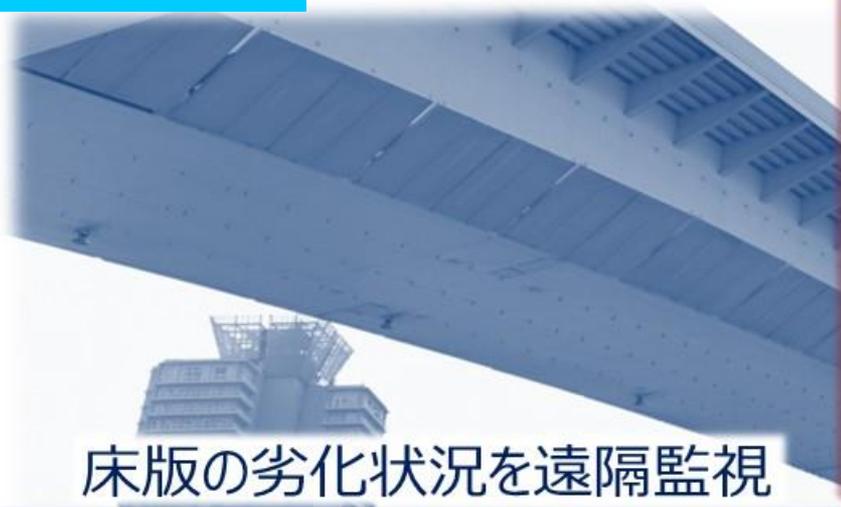


離散計測 (定期検査) から連続計測へシームレスな移行が可能

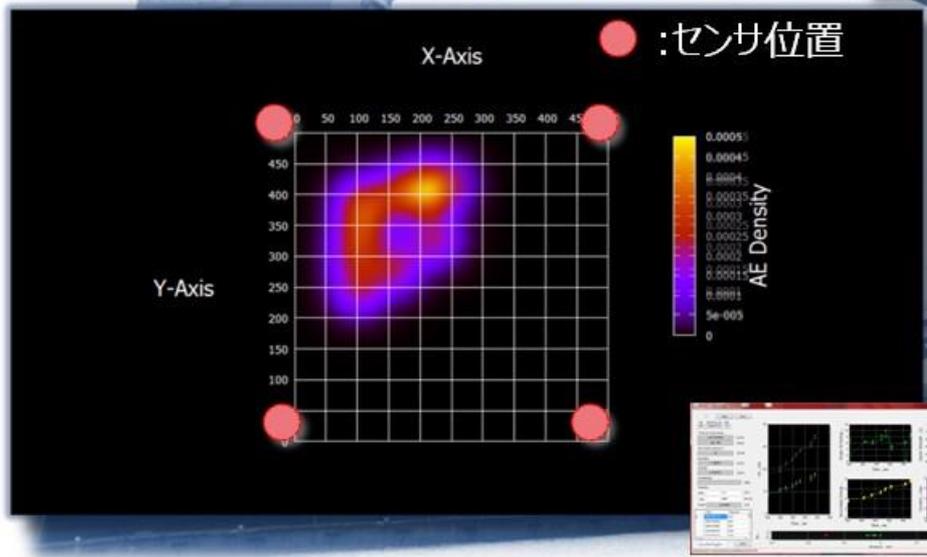
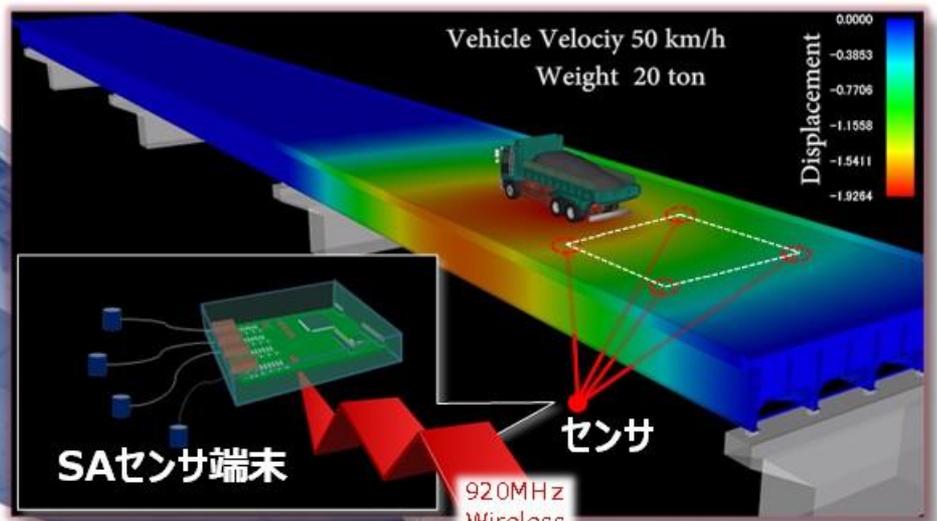


適用イメージ

適用イメージ



床版の劣化状況を遠隔監視



効果

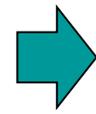
初期段階の劣化から遠隔サーバにて状態監視することが可能となる。

▶ NEDO撮影動画で概要を紹介

開発技術 (1/8)

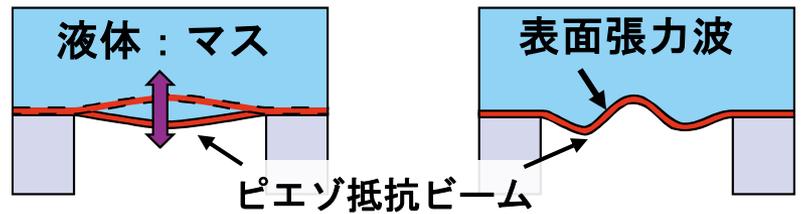
SAセンサデバイスの開発(1)

課題：初期段階の劣化から大規模劣化までを振動検知するには超広帯域 (数Hz～1MHz) のセンサが必要



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

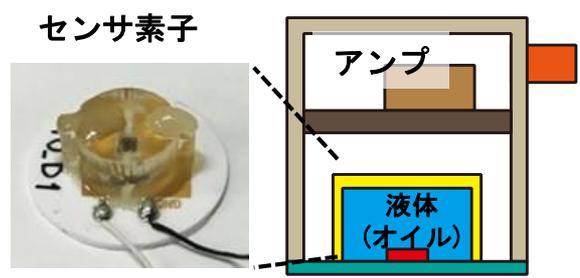
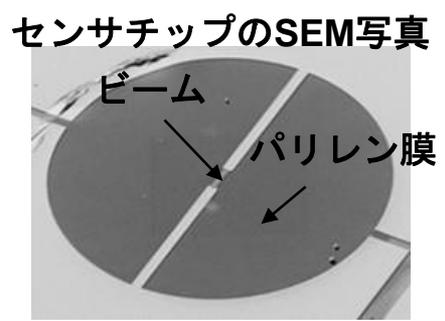
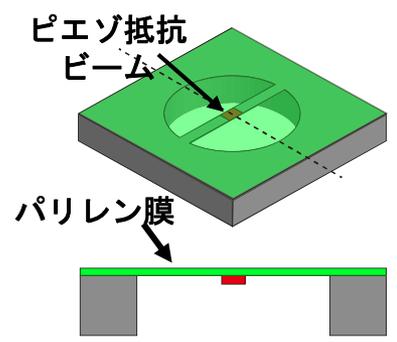
計測原理



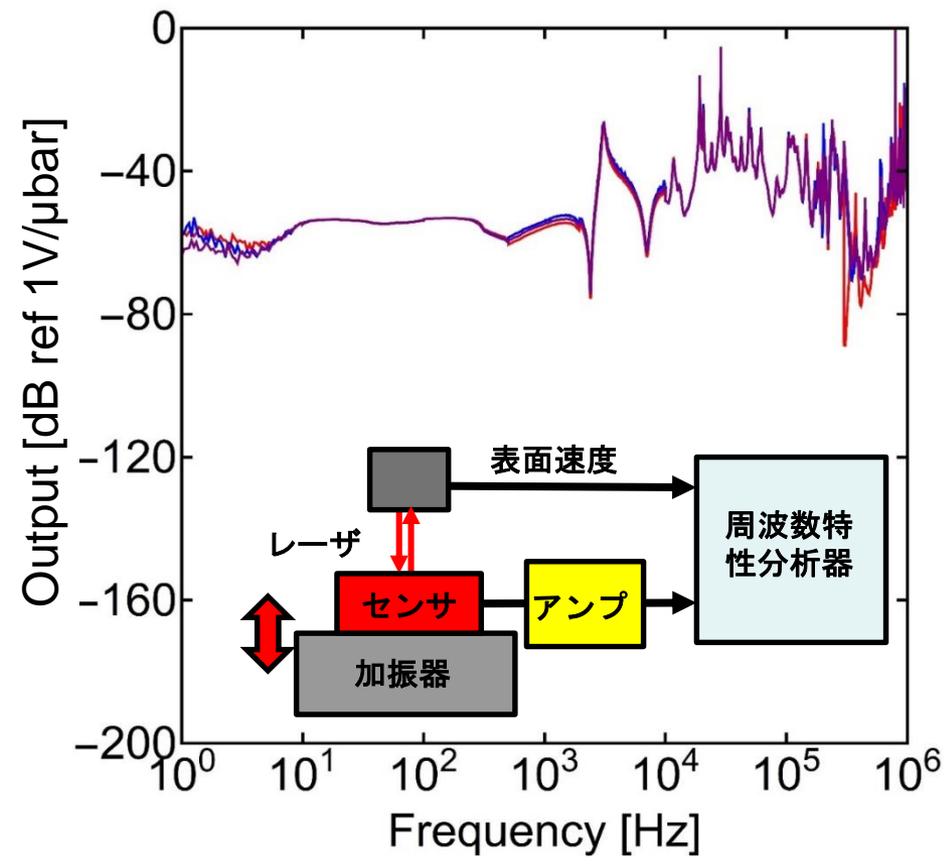
低周波数(加速度)

高周波数(AE等)

SAセンサの構造



試作したセンサの周波数応答特性

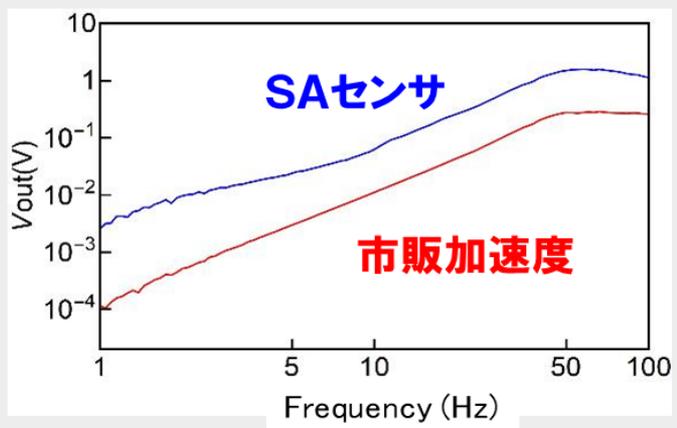
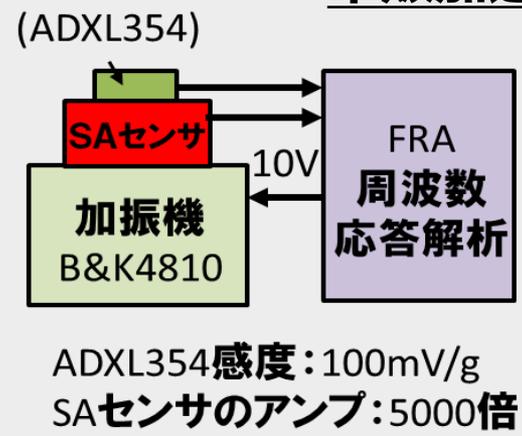


開発技術 (2/8)

SAセンサデバイスの開発(2)

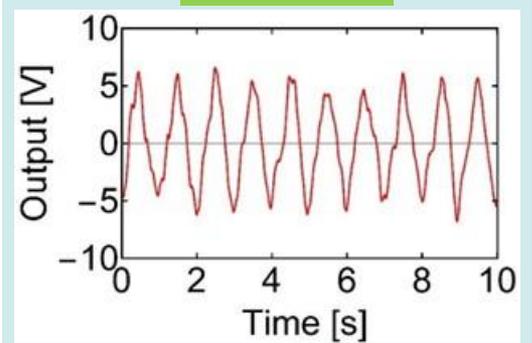
液体/ピエゾ抵抗ビーム/空気の構造で1Hz~1MHzの帯域の振動を計測可能なセンサを実現

市販加速度センサとの比較

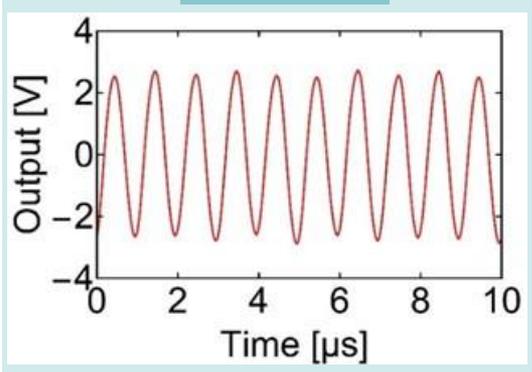


実測波形

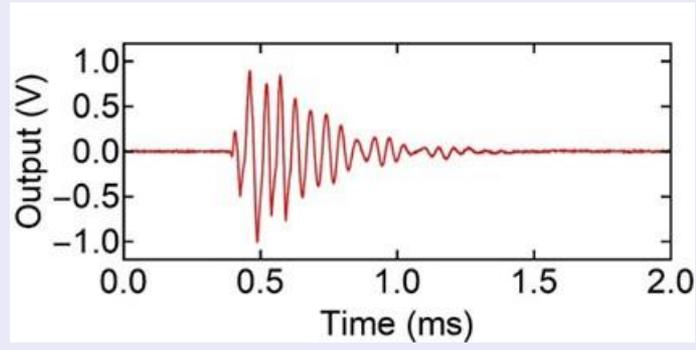
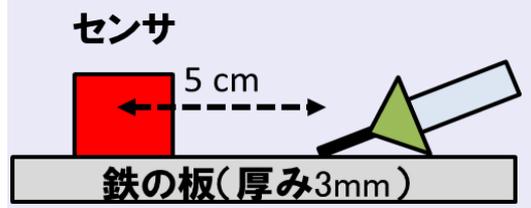
1 Hz



1 MHz



PLBテストで実測したAE波形



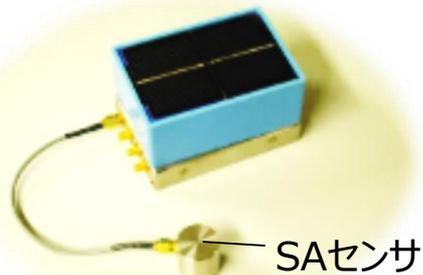
PBT : Pencil Lead Break

開発技術 (3/8)

小型無線センサ端末の開発(1)

エッジで高速信号処理可能で、かつ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

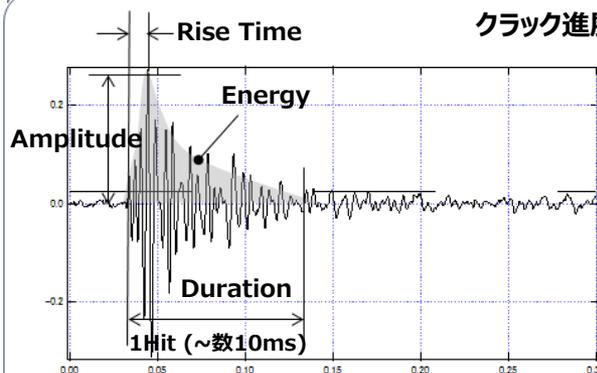
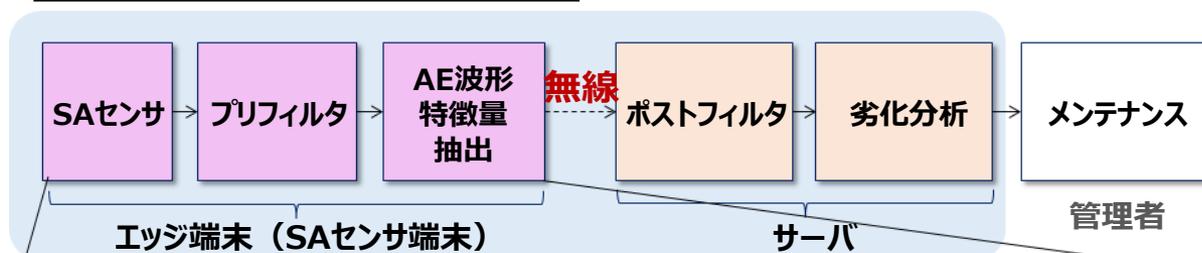
試作端末外観



試作した無線SAセンサ回路

- 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

システムの信号処理ブロック



クラック進展等の代表的なAE波形の特徴量(AEパラメータ)

- 1.到達時刻 (Time of Arrival)
- 2.振幅 (Peak Amplitude)
- 3.立ち上がり時間(Rise Time)
- 4.持続時間 (Duration)
- 5.カウント (Count)
- 6.エネルギー (Energy)

$$E_{AE} = \int_0^{T_d} v^2(t) dt$$

- 7.RMS値 (RMS)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T_d} \int_0^{T_d} v^2(t) dt}$$

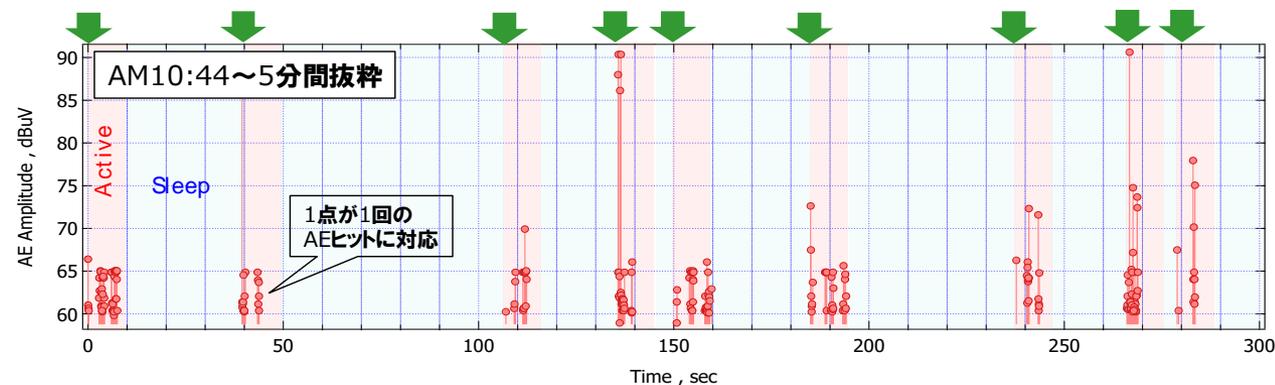
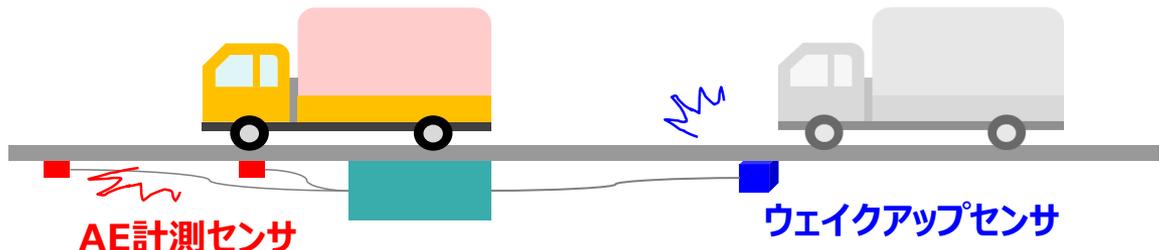
■ エッジ端末での特徴量抽出により1/1000程度にデータを圧縮
→ 省電力無線データ伝送

開発技術 (4/8)

小型無線センサ端末の開発(2)

○小型センサ端末の開発とシステム実証実験

・電力消費抑制動作可能な小型無線センサ端末を開発。動作を実証



試作端末の橋梁への設置

- ・小型(L100mm X W70mm)
- ・920MHz帯無線モジュール
- ・自立発電モジュール接続

イベントドリブン実測結果

大型車走行時のみ起床し計測。その後スリープし、電力消費を抑制。高速道路橋梁にて大型車走行イベント(矢印部)で計測動作を確認(1分あたり1.8イベント)

開発技術 (5/8)

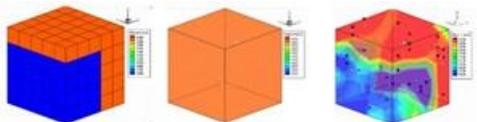
橋梁構造の健全性定量評価手法の開発

<概要>

大規模構造物にも対応した健全性評価手法として、弾性波を用いた非破壊評価手法を提案した。社会的重要度が高く、かつ損傷事例の多い道路橋床版を主たる対象と定め、複数の実橋梁における検証を経て評価指標の提案を行った。

AE(Acoustic Emission)を利用した評価手法の提案

AEの発信位置と発信時刻を推定するとともに弾性波の速度分布を二次元あるいは三次元的に得るAEトモグラフィ法を提案。適切に内部の速度構造を同定できることを数値解析により検証



数値解析による検証結果の例



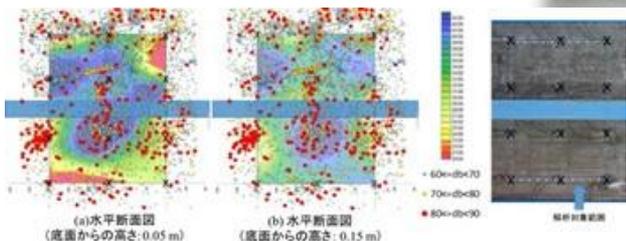
AEトモグラフィの解析フロー

実構造物へフィールド展開 (検証)

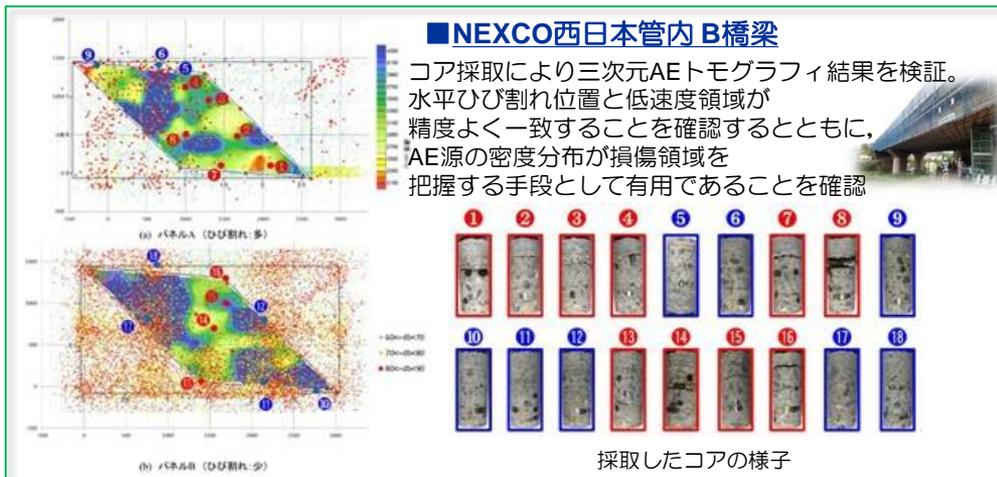
社会的重要度が高く、かつ損傷事例の多い道路橋床版を対象に、実橋梁において計測・解析を繰返し実施し手法の有用性を検証

■NEXCO西日本管内A橋梁

交通荷重に起因し発生するAEを利用し、三次元AEトモグラフィならびに位置標定を実施



■NEXCO西日本管内B橋梁



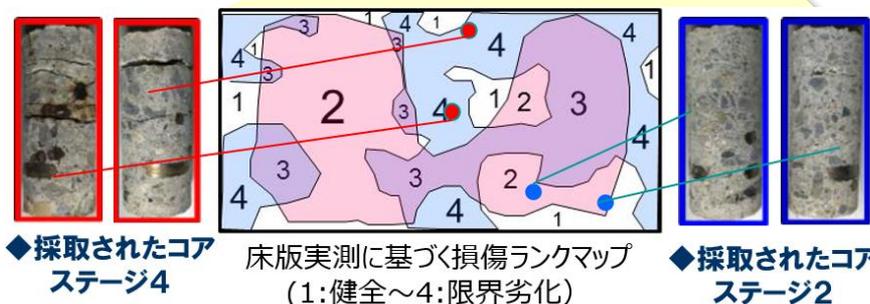
■NEXCO西日本管内B橋梁

コア採取により三次元AEトモグラフィ結果を検証。水平ひび割れ位置と低速度領域が精度よく一致することを確認するとともに、AE源の密度分布が損傷領域を把握する手段として有用であることを確認

採取したコアの様子

評価指標の提案

AEトモグラフィ法による速度分布とAE源の密度分布との双方の情報をベースに、内部損傷を評価するための指標を提案



◆採取されたコア ステージ4

床版実測に基づく損傷ランクマップ (1:健全~4:限界劣化)

◆採取されたコア ステージ2

開発技術 (6/8)

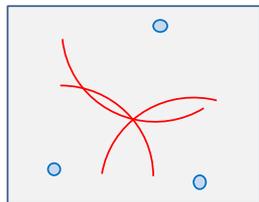
橋梁構造の健全性定量評価手法の開発

検知対象AE

解析手法

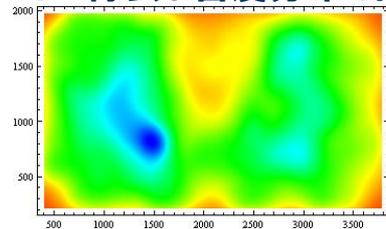
AE源位置標定

複数センサに信号が到達する時間差から発信源の位置を同定



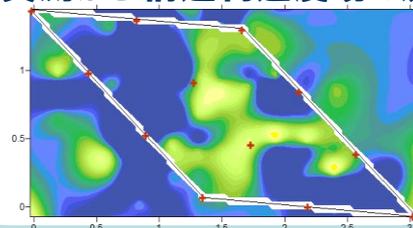
AE密度分布

周波数フィルタリング等によりノイズ除去し密度分布を計算



弾性波速度

発信源から各センサへの到達時間の実測から構造物速度場を決定

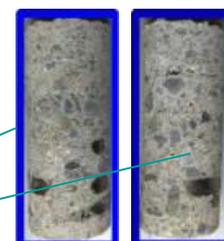
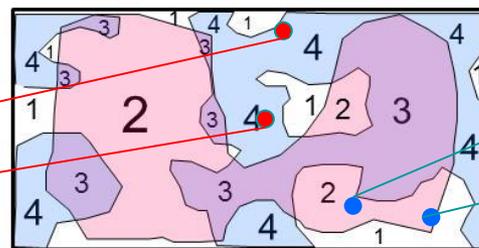
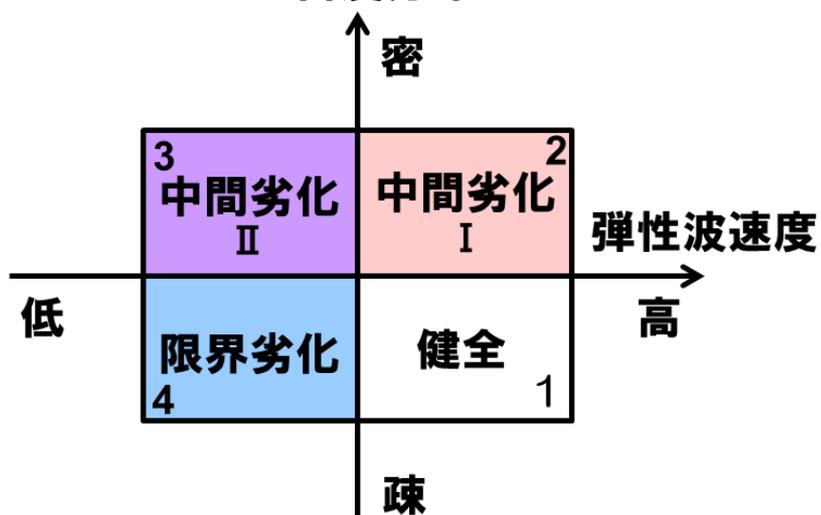


床版内部損傷の程度を定量化・可視化

評価

内部損傷評価

AE密度分布



◆採取されたコア
ステージ4

◆採取されたコア
ステージ2

高速道路橋

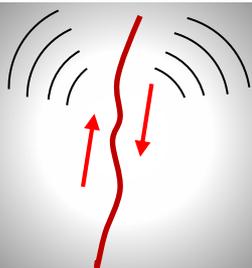
1次AE

き裂の進展や
新たなき裂の発生



2次AE

既存のひび割れ
等のこすれ



開発技術 (7/8)

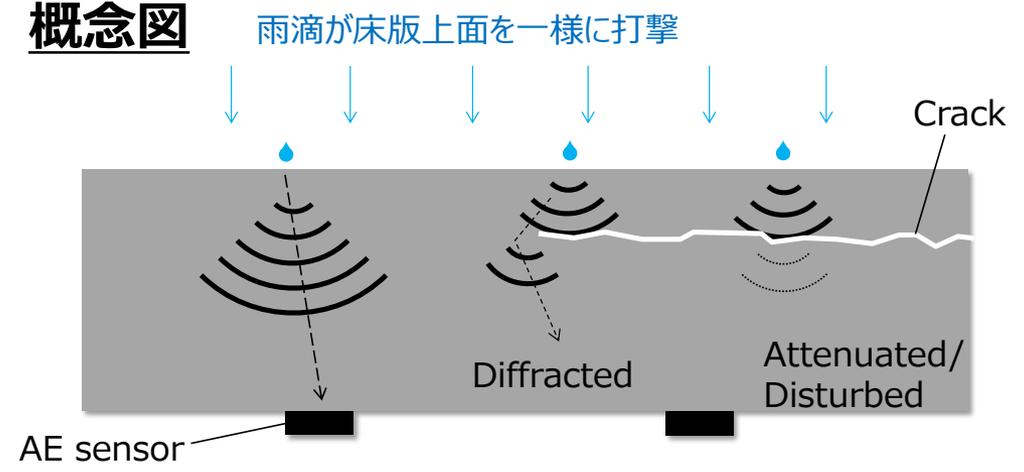
離散的計測に適した橋梁健全性定量評価手法の開発

手法の概要

雨滴弾性波による内部損傷解析
 路面を一様に叩く雨滴により生ずる弾性波が内部ひび割れにより減衰、回折した結果を位置標定分析。結果から内部損傷を推定する。

高効率に床版内部損傷を可視化

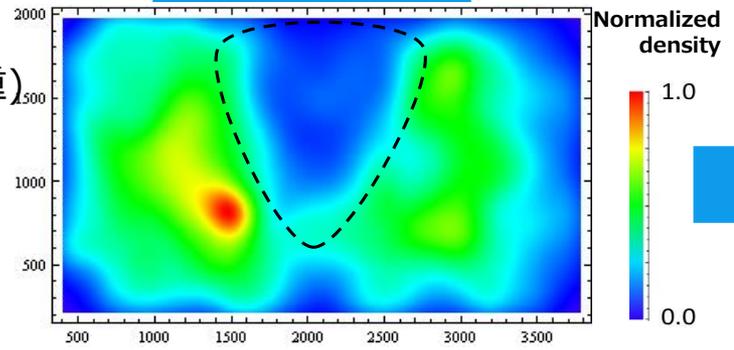
概念図



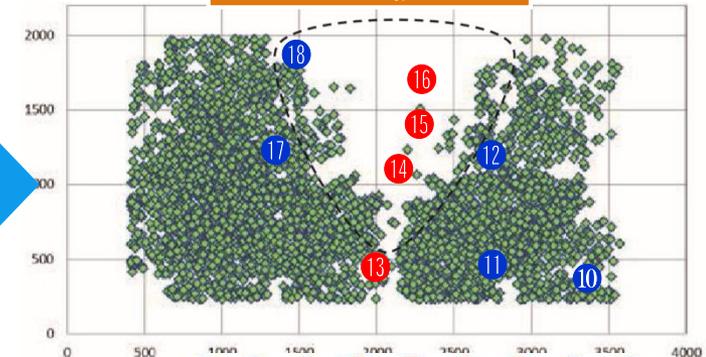
位置標定結果

NEXCO西日本管内
 B橋梁での実測結果
 左) 140時間(交通荷重)
 右) 700秒(降雨時)

交通荷重起因AE
 140時間



降雨起因AE
 700秒



有効性の確認



採取コアの様子→



開発技術 (8/8)

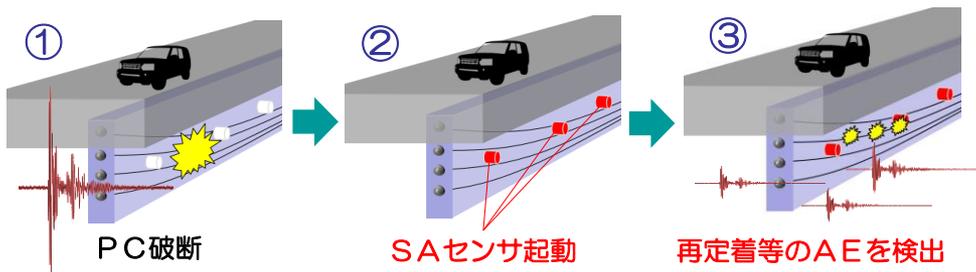
PC橋梁の重大損傷監視システムの開発

<概要>

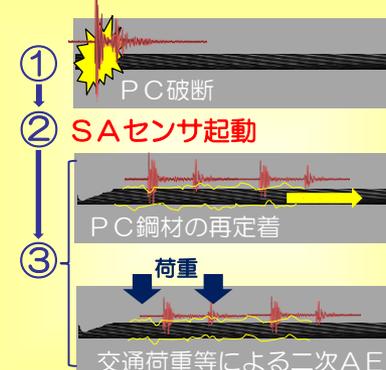
PC鋼材の破断をトリガー信号として、SAセンサを計測状態とし、その後には生じるグラウトの破壊や再定着に起因するAEをSAセンサにより検知することにより、損傷箇所を特定するシステムを開発した。

イベントドリブン型のモニタリングシステムを開発

PC破断とそれに伴い生ずるPC鋼材の再定着に起因するAEを用いたシステムを開発し、動作検証を実施した。



想定される挙動



■ 模擬供試体を用いたPC破断試験

大型の**実大供試体**を作製し、電食等によりPC鋼材破断試験を実施。**破断時の振動挙動を再現し**、システム動作の検証を行ない、**所望の動作を確認した**。



■ 実橋梁における検証試験

実橋梁の箱桁内において、定常ノイズの把握、**模擬弾性波を利用したシステム動作の検証**を実施。超低消費電力端末を用いた**長期モニタリング**も実施した。

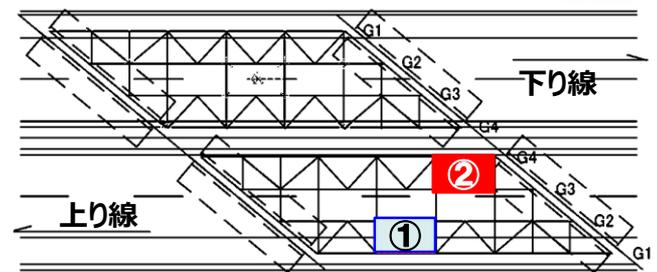


実証実験のまとめと解析、考察(1/2)

実証実験1

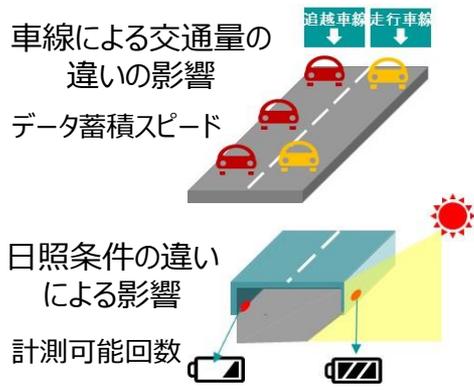
橋梁RC床版にSAセンサを設置し、イベントドリブン動作による監視システムの実証実験を行った。得られたデータから床版の内部損傷分析を行った。

実証場所: NEXCO西日本管内 A橋梁(RC床版鋼鈹桁橋) SAセンサ
対象箇所: RC床版(上り線)
状況: 実証実験実施中

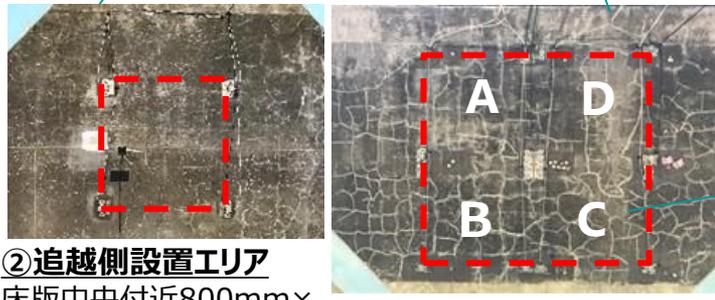


計測対象箇所
上り線RC床版パネル。走行車線①及び追越車線②

①,②パネル比較のポイント

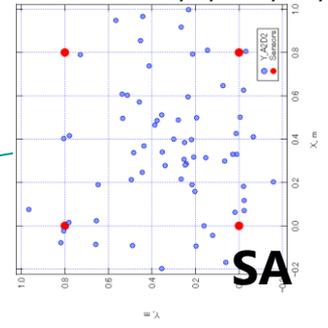


センサ設置部(床版下面)



AE源位置標定結果

①走行側エリアC: 2018/9/7~/10/3のデータ



イベントドリブン計測による交通荷重AE源の位置標定が可能なることを確認した。

実証実験のまとめと解析、考察 (2/2)

実証実験2

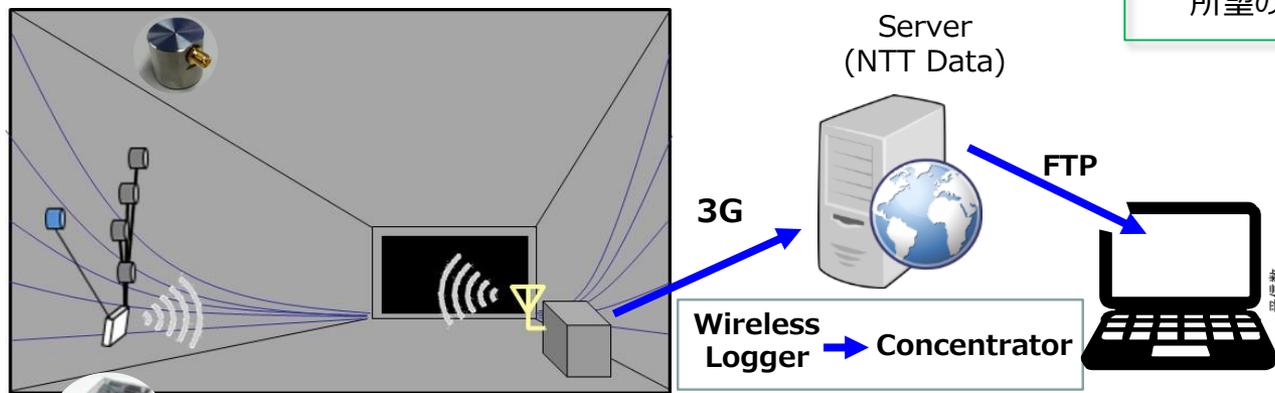
長大橋 (PC橋) にSAセンサを設置しPC鋼材破断監視システムの実証実験を行った。システムの妥当性評価のための供試体試験を実施した。

実証場所: NEXCO西日本管内 D橋梁(5径間連続PC箱桁橋)
対象箇所: 箱桁内PC鋼材埋設部
状況: 実証実験実施中



センサ・端末設置の様子

監視対象鋼材の破断を検知できるようにウェイクアップセンサを設置。SAセンサにて再定着AEを検知し破断事象を特定



端末仕様

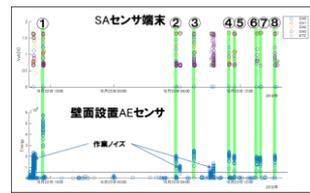
暗渠内で動作する超低頻度重大事象検知システム。一次電池で10年間動作

システム動作実証実験 (PC桁供試体)



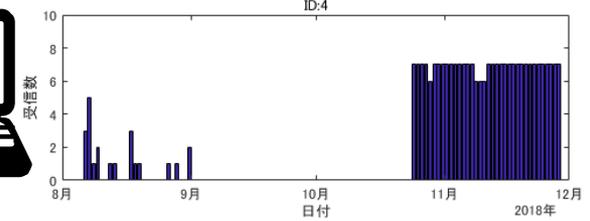
動作実証結果

実橋梁で破断事象は発生しないため、実大供試体でPC鋼材を破断実験。所望の動作を確認した。



実証実験状況

8月に端末設置。システム設定不良等を修正し、10/23より連続動作中



成果まとめ

課題・対象

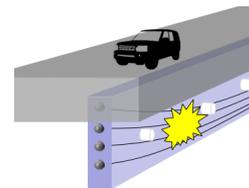
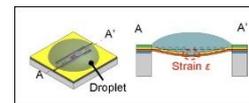
老朽化、点検技術者不足により維持管理が難しくなると予測される橋梁を対象とした。また、社会的 중요度が高く、かつ損傷事例の多い道路橋**鉄筋コンクリート(RC)床版**を主たる対象と定めた。



手法



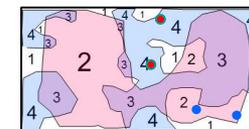
RC床版の劣化を初期段階から監視可能で、かつ大規模損傷まで検知する**超広帯域センサ(SAセンサ)デバイスを開発**した。また、SAセンサを複数搭載し、エッジで高速信号処理し、**自立発電動作可能な無線センサ端末を開発**した。さらに、RC床版の内部損傷の程度を可視化可能な評価手法を開発した。また、PC橋の重大損傷事象である**PC鋼材破断をSAセンサにより監視するシステムを開発**した。



成果



SAセンサが所望の帯域(**1Hz~1MHz**)で**有効な感度**を有することを確認した。また、SAセンサ端末を高速道路橋梁に設置し、**長期実証実験を完了**した。橋梁RC床版から得られたデータをもとに内部損傷を推定する解析を行ない、破壊試験により有効性を確認した。また、**雨滴による効率的な検知手法も考案**し、有効性検証を行なった。**PC鋼材破断システムをPC橋に設置**し実証実験を行ない、動作の**有効性は実大供試体で確認**した。



結論

RC床版の内部損傷を遠隔監視可能なシステムを構築した。
PC橋の超低頻度重大損傷を継続監視するシステムを構築した。
床版内部損傷を効率的に点検可能な手法を考案した。

今後の事業化、実用化について

■ 実用化・事業化に向けた見通し

インフラ維持管理の効率化ニーズは極めて高い。本プロジェクトでの実証実験により、手法の有効性は確認できた。引き続き当社にて量産性を含めた開発を行い、小型 無線センサ端末の事業化及び橋梁診断サービスの事業化を予定する。

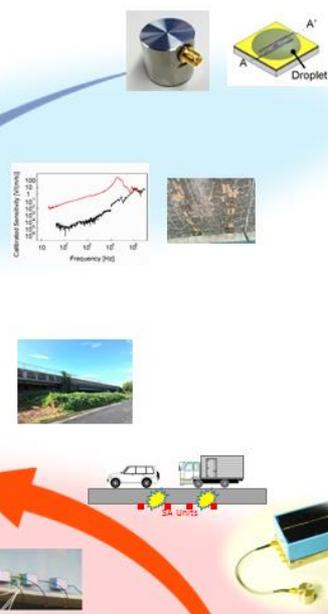
評価手法の開発

直観的に損傷状態が把握可能な位置標定や速度構造を利用した可視化技術を開発



SAセンサの開発

1デバイスで従来にない広帯域に対応可能な新構造センサを考案。試作により応答特性を確認



橋梁現場のセンシングから信号伝送ネットワーク及びサーバにおける健全性評価手法まで一連の遠隔監視システムを構築

エッジで高速信号処理可能で、かつ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。高速道路橋梁環境で動作検証を実施

センシングシステムの開発

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。