

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

渡部 一雄* ((株)東芝/NMEMS 技術研究機構)
下山 勲 (東京大学)
塩谷 智基 (京都大学)

Bridge Sensing System using Super Acoustic Sensor
Kazuo Watabe*, (Toshiba Corporation / NMEMS Technology Research Organization)
Isao Shimoyama, (The University of Tokyo)
Tomoki Shiotani, (Kyoto University)

This paper addresses a newly developed palm-sized sensor unit for detecting internal deterioration in bridges. The unit utilizes event-driven architecture, energy harvesting and edge computing to conduct an autonomous monitoring of bridges. A vibration sensor, “super acoustic” (SA) sensor, with an extremely wide frequency range is also developed, which is incorporated with the sensor unit.

キーワード：MEMS, ピエゾ抵抗, 無線ネットワーク, アコースティック・エミッション, IoT, 速度構造解析, コンクリート床版, 橋梁
(MEMS, Piezoresistive, Wireless network, Acoustic emission, IoT, Velocity structure analysis, Concrete slab, Bridge)

1. はじめに

国内インフラ構造物は昭和 30 年代にはじまる高度経済成長期に多くが建設されたため、今後、建設後 50 年を迎えるものが急激に増えていくこととなる⁽¹⁾。また、2012 年 12 月の笹子トンネル天井板崩落事故をきっかけに、道路法が改正され、近接目視による 5 年に 1 回の点検が義務化されている。一方で我が国の人口は 2008 年をピークに減少に転じており、中でも生産年齢人口（15 歳から 64 歳）は 1994 年をピークに減少に転じ、2035 年にはピーク時の 25%以上の減少が予測されている状況である。

このため、老朽化が進むインフラ構造物を厳格化された法令に従って維持管理することは、人的リソース的にも、財政的にも、早晚限界が訪れることが予測され、新たな効率化への取組みが急務となってくると考えられる。損傷が深刻化してから大規模な修繕を行う、「事後保全型」から、損傷が軽微なうちに補修を行う「予防保全型」への転換はその基本となる取組みである。

一方で、予防保全そのものを効率化する取組みも必要となる。予防保全の判断材料となる点検が、人手、特に目視に頼っているためである。そこで人手に出来るだけ頼らずに

健全性を判断する手法、例えばセンサを用いたインフラモニタリングの導入が期待されている。

国内の社会インフラ構造物のなかでも、橋梁（きょうりょう）について見ると、長さ 2m 以上の橋梁が 70 万橋以上存在しており、2023 年にはこのうち約 43%が建設後 50 年を超えることになる。これらの橋梁の維持管理をどのように効率化していくかは、喫緊の社会課題になりつつある。

このような背景を受け、筆者らは、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）のインフラ維持管理に関する 5 ヶ年計画の開発プロジェクトに平成 26 年度より参画し、現在は最終年度の開発を行なっている。この取り組みにおいては、1) 広帯域な振動センサ（スーパーアコースティックセンサ）デバイス、2) 自立電源を搭載した小型無線センサ端末、3) 橋梁の健全性定量評価手法、を統合した橋梁センシングシステムを開発し、昨年度より高速道路の橋梁を対象に実証実験を開始している。本稿では、それぞれの要素技術の詳細について紹介する。

2. スーパーアコースティックセンサ

スーパーアコースティックセンサ（以下、SA センサ）とは、従来の AE センサの有効感度帯域(概ね数 10kHz～

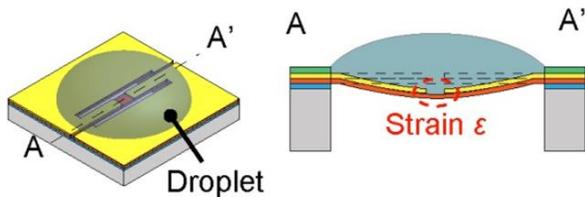


図 1 SA センサの構造模式図

Fig. 1. Schematic diagram of SA sensor.

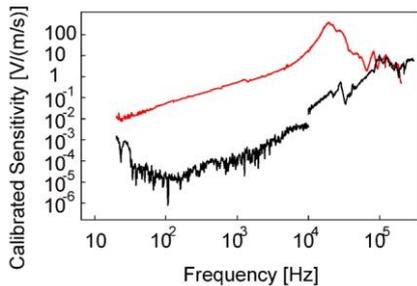


図 2 SA センサの周波数応答 (赤 : SA センサ, 黒 : AE センサ)

Fig. 2. Frequency response of SA sensor (red) and AE sensor (black).

1MHz)を大幅に拡張させ、1 Hz から 1MHz までの非常に広い帯域で感度を持つ MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) によるセンサデバイスである²⁾⁽³⁾。図 1 に SA センサの模式図を示す。両持ち梁タイプの振動検出部 (左図 A-A'線分に相当する部分) の片面に液体層を設けているのが特徴である。両持ち梁の厚さはおよそ 300 nm と薄いため、液体の表面張力による表面波にならって振動する。振動検出部の中央 (図中赤色部) に形成されたピエゾ抵抗層に振動によるひずみが発生することで、抵抗変化として出力が得られる。両持ち梁の両側のギャップ部はマイクロオーダーの幅で形成されており、表面張力により液体の漏れが抑制されている。

SA センサの特徴である非常に広い帯域は、片面に封入した液体により得られる効果である。大気中での両持ち梁の振動特性は固有振動の影響を強く受け、固有振動の周波数近傍では大きな振幅が得られるが、それ以外の周波数では振動が極端に小さくなる。液体の表面にならって両持ち梁が振動することで、固有振動だけでなく広い帯域での応答が得られるようになる。開発した SA センサにより得られた周波数応答特性の例を図 2 に示す。従来の AE センサと比べて特に低域側において良好な応答を有することが分かる。

3. 自立電源搭載小型無線センサユニット

本章では、SA センサデバイスを搭載し、橋梁の健全性モニタリングを行うための小型センサユニットについて紹介する。開発したセンサユニットを含むモニタリングシステム

のシステムブロック図を図 3 に示す。本システムは、SA センサを含むエッジデバイスである無線 SA センサユニットと集約装置 (コンセントレータ) 及び解析サーバからなり、無線 SA センサユニットにより計測されたセンサデータは集約装置を介して解析サーバへと送信され、収集・解析される。無線 SA センサユニットは計測対象構造物に直接設置され、後述するイベントドリブンアーキテクチャと完全自立発電によって自律的に計測を行う。センサユニットのエッジ回路では、AE 帯域 (数 10 kHz~数 100 kHz) を含む信号データを検出し、信号増幅、波形整形、一次選別、特徴量ベクトル化をリアルタイムで行う。サーバ装置では、蓄積した AE 計測データを基に主にノイズ除去と損傷の評価を行い、効率的な維持管理を実現する。

SA センサユニットの外観及び内部回路を図 4 に示す。センサユニットは、SA センサを最大 4 チャンネル搭載可能であり、パッケージサイズ (左図青色部分) は片手で持ち運び可能な 100 mm×70 mm×40 mm である。センサユニット内の処理回路は、アナログフロントエンド、信号処理回路、自立発電回路、ウェイクアップ回路により構成される。アナログフロントエンドは SA センサから出力される信号を増幅し、バンドパスフィルタにより帯域外ノイズを除去する。さらに、その信号を AD コンバータにより量子化し、後段の信号処理回路へ送信する。信号処理部は FPGA (Field Programmable Gate Array) で構成され、信号波形から特徴量ベクトルを抽出する。無線インターフェースとしては、構造物などの障害物が多い都市部でも比較的伝搬特性の良い、920 MHz 帯の ISM (Industry, Science, Medical) パ

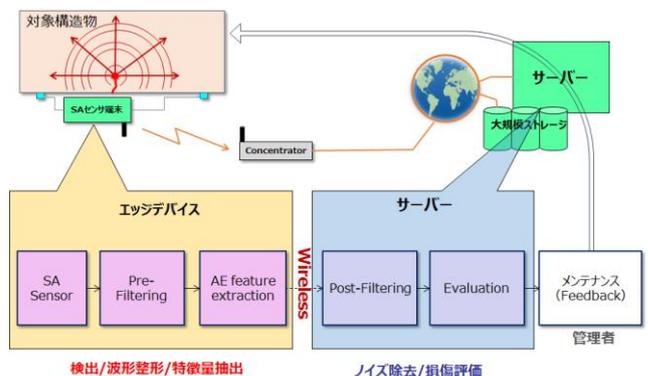


図 3 モニタリングシステムのブロック図

Fig. 3. Block diagram of monitoring system.

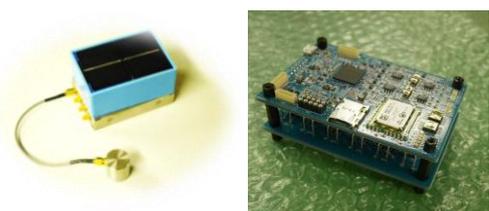


図 4 センサユニットの外観と内部

Fig. 4. Exterior and interior of SA sensor unit.

ンドを利用するものとした。センサユニットの電源は、商用電源の確保が不要で、かつ、長期動作が可能となるように端末上面と概ね同サイズ(90mm×60mm)の太陽光パネルを発電源とし、発電した電力を一時的に蓄電する蓄電デバイスとしてリチウムイオンキャパシタを内蔵した。自立発電回路は、このように太陽光パネルで得られる電力をソースとし、蓄電デバイスの充放電制御を行う。

上述の通り、センサユニットは太陽光エネルギーに基づいた自立電源のみで動作する。しかし、装置を起動したまま、信号計測、データ伝送を継続しつづけると、AEという高周波帯の波形を演算することも電力が枯渇して有効な計測が出来ない恐れがある。そこで、後述するイベントドリブン動作を実装したシステムを提案した。橋梁の場合、例えば大型車の本線走行に伴う交通荷重に相当する一定以上の加速度変化が生じた場合にシステムを起動させ、その直後に発生するAEを計測させることができる。通常の待機状態では低消費電力のウェイクアップセンサのみが給電され、加速度イベントの監視を行う。加速度に変動がない場合は、大部分の回路については電力の供給を停止させることができる。こうすることで、センサユニット全体としての消費電力を大幅に削減することが可能となる。図5に実験状況の模式図を示す。

供用中の高速道路の鋼鉄桁橋(供用開始後約40年)で今基本セッティング(待機状態)

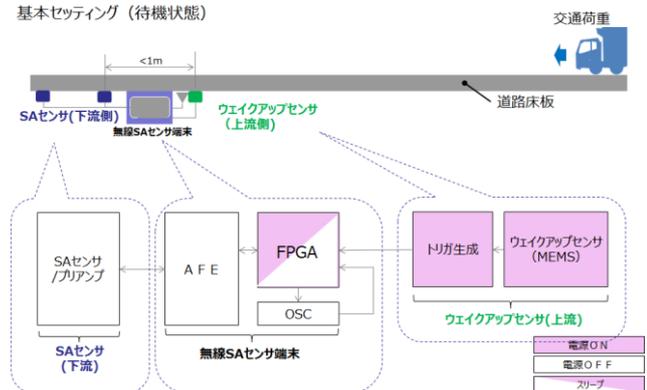


図5 橋梁実験の模式図

Fig. 5. Experimental setup of bridge monitoring.



図6 橋梁外観と計測対象箇所

Fig. 6. Experimental site and close-up view of monitored panel.

後、床版取替工事を検討しているRC床版を対象に、開発したモニタリングシステムの実証実験を開始している⁽⁴⁾。橋梁外観およびセンサ設置箇所(床版)の外観を図6に示す。本線の走行車線側に位置する床版下面に4チャンネルのSAセンサを設置した。SAセンサユニットの本体は、太陽光パネルへの日照が得られるように同じ主桁の側面ウェブに設置した。スリーブから計測開始までの遷移時間を吸収するために、ウェイクアップセンサを上流側、SAセンサを下流側に設置している。イベント発生とみなす加速度の閾値は、対象とする荷重以上の大型車両の走行時にシステムが起床するように調整している。また、無線SAセンサユニットからの信号を受信する集約装置は橋脚部等の地上部に設置している。センサユニットから集約装置までの距離は直線で概ね10m程度であるが、センサユニットからの信号を問題なく受信することが出来ている。

4. 橋梁の健全性定量評価手法

本章では、橋梁の健全性をAE帯域の信号をもとに定量評価する手法について、高速道路床版内部の損傷への適用事例を用いて紹介する⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。対象は、供用後40年が経過した道路床版であり、長期間の交通荷重や外環境による経年劣化により、激しい損傷が見受けられ、新しい床版への架替えが実施された。計測は、架替え前の床版の2,000×3,000mm程度に対し、700mm程度の間隔で15個のAEセンサを設置し、車両通行に伴うAEを計測した。得られた計測データに基づき、AE震源の位置標定⁽⁹⁾およびAEトモグラフィ解析⁽¹⁰⁾に基づく弾性波速度分布を算出、評価し、外観目視では確認できない内部の損傷と比較した。対象とした床版におけるAE震源の位置(図中●で標記)および速度分布(図中カラーコンターで標記)を図7に示す。これより、外観目視でひび割れが多いと判断されたパネルAに関しては、全体的にAE震源が少なく弾性波が低速度の領域が広がっていること、外観目視でひび割れが少ないと判断されたパネルBについても対象領域中央部にAE震源が少なく低速度の領域が分布していることが確認される。図7の赤と青で示した数字は、架替えの際に撤去された床版を対象として、内部の損傷を評価する目的でコアコンクリートを削孔した位置であり、それぞれの位置で採取されたコアを図8に示している。特に、赤で示した部分は内部でのひび割れが確認されたもの、青で示した部分はされなかったものである。この結果に基づくと、赤で示したコアは、ほぼ100%の確率で低速度の領域から採取されており、かつAE震源の量が相対的に少ない部分であることが伺える。

以上を踏まえ、センサから得られた信号を処理することにより同定されるAE震源の密度と弾性波速度の構成から、床版内部での損傷は図9のように整理され、センサ開発により床版から生じるAEをある一定期間継続的に計測することが可能となれば、対象とする部位の劣化程度の判定、さらには将来の劣化の進行速度の予測が可能となると期待さ

れる。

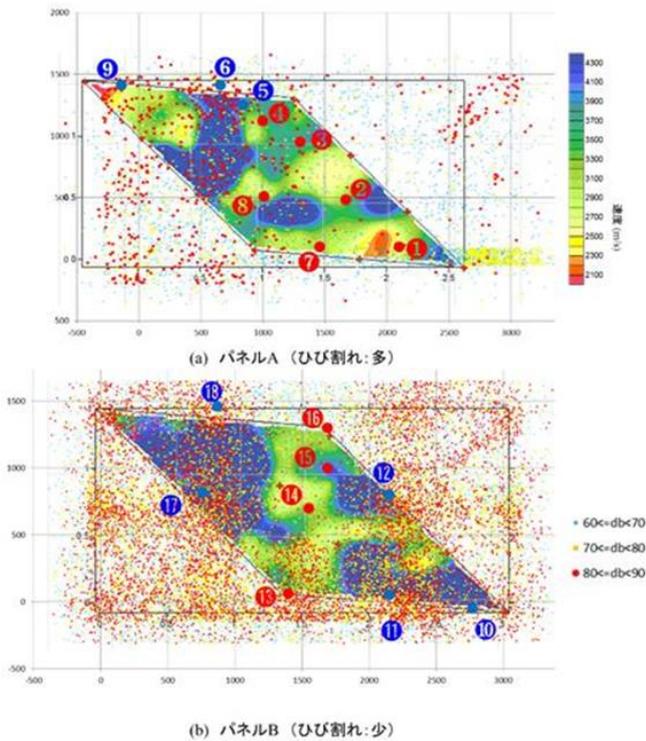


図7 AE震源位置標定とAEトモグラフィによる速度分布
Fig. 7. Results of AE source analysis and velocity structure analysis (AE Tomography).

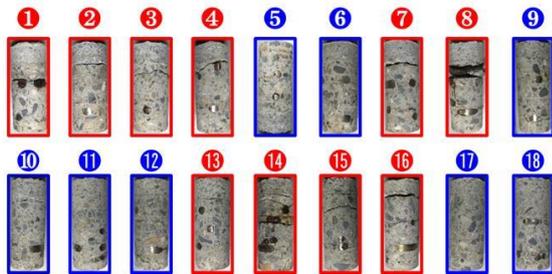


図8 採取されたコアサンプル
Fig. 8. Extracted concrete cores.

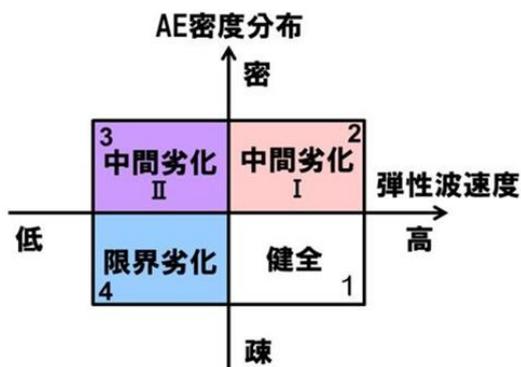


図9 弾性波速度とAE震源の密度に基づく損傷評価
Fig. 9. Damage evaluation based on elastic wave velocity and AE source density.

5. まとめ

高度経済成長期に建設された社会インフラ構造物の老朽化という社会課題を背景に、これらの維持管理を「事後保全型」から「予防保全型」へ転換していく取り組みが必要となってきた。こうした取り組みに活用するための技術開発の一環として、主に橋梁のヘルスマonitoring向けに、広帯域な振動センサ（スーパーアコースティックセンサ）デバイス、自立電源を搭載した小型無線センサ端末、橋梁の健全性定量評価手法、を統合した橋梁センシングシステムを開発した。開発したシステムは、昨年度より高速道路の橋梁を対象に実証実験を開始している。

本稿の技術は、非破壊で自律的に橋梁内部の健全性を把握することが可能なものであり、省力化及び高度化による、維持管理の効率向上への貢献が期待される。また、実証実験を行なっている道路橋梁に限らず、広く社会インフラ構造物、産業機器等への応用展開も同時に期待されるものである。

謝辞

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）の委託研究業務の結果得られたものである。

文 献

- (1) 国土交通省：「V 既存ストックの長寿化」、平成 18 年度道路行政の達成度報告書 平成 19 年度道路行政の業績計画書、<http://www.mlit.go.jp/road/ir/ir-perform/h19/11.pdf>, (2007, 参照日 2018 年 8 月 15 日)
- (2) P. Khang-Quang, N. Minh-Dung, N. Binh-Khiem, P. Hoang-Phuong, K. Matsumoto, and I. Shimoyama, "Multi-axis Force Sensor with Dynamic Range up to Ultrasonic", Proceeding of 27th IEEE MEMS Conference (MEMS2014), pp.769-772, (2014).
- (3) 大森隆広, 碓井隆, 渡部一雄:「アコースティック・エミッション計測を適用した橋梁モニタリングシステムの開発」, 東芝レビュー, Vol.70, No.9, pp.20-23 (2015).
- (4) 上田祐樹, 碓井隆, 大森隆広, 高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基:「イベントドリブ型無線 AE センサシステムによる橋梁モニタリングの実証」, 日本機械学会 IIP2018 情報・知能・精密機器部門 (IIP 部門) 講演会 講演論文集, 1B05, (2018)
- (5) 塩谷智基, 西田孝弘, 麻植久史, 渡部一雄, 福田雅人:「AE 法および AE トモグラフィにより推定された実橋梁 RC 床版の損傷検証」, セメント・コンクリート, No.849, pp.20-26 (2017).
- (6) 渡部一雄, 高峯英文, 宮田弘和, 西田孝弘, 塩谷智基:「高速道路床版の交通荷重 AE 分析とコア採取による整合性検証」, 土木学会第 71 回年次学術講演会, (2016).
- (7) 高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基:「アコースティック・エミッションモニタリングによる橋梁内部のひび割れ検出技術」, 東芝レビュー, Vol. 72, No.2, pp.49-52, (2017)
- (8) K. Watabe, H. Takamine, T. Nishida and T. Shiotani: "Novel nondestructive technique of internal deterioration in concrete deck with elastic wave approaches", Proceedings of the 12th World Congress on Engineering Asset Management (WCEAM 2017), paper93, (2017)
- (9) 大津政康:「アコースティック・エミッションの特性と理論 第 2 版-構造物の診断と破壊現象解析-」, 森北出版株式会社, pp.51-61, (2005).
- (10) Y. Kobayashi, T. Shiotani: "Computerized AE Tomography, Innovative AE and NDT Techniques for On-Site Measurement of Concrete and Masonry Structures", State-of-the-Art Report of the RILEM TC 239-MCM, Springer, pp.47-68, (2016).