

(別紙 2)

建設技術研究開発費補助金総合研究報告書

1. 研究課題名 状態可視化点検および構造応答発電センシングによる診断技術の高度化
2. 研究期間 平成 25 年度～平成 26 年度
3. 代表者及び研究代表者、共同研究者

代表者	佐々木 栄一	東京工業大学・准教授
研究代表者	佐々木 栄一	東京工業大学・准教授
共同研究者	鈴木 啓悟 田村 洋 長船 寿一 岩吹 啓史 洞 宏一 片岡 藤嗣 近藤 泰光	福井大学・講師 東京工業大学・助教 (株)高速道路総合技術研究所 (株)高速道路総合技術研究所 特許機器(株) (株)ITM 福井県建設技術研究センター

4. 補助金交付総額 44,720 千円

5. 研究・技術開発の目的

本研究の目的は、構造物の実用的診断技術を構築することを目指し、目視による点検が困難な部位等の「①構造物の状態を可視化する点検技術(状態可視化点検技術)の開発」、および、点検間の状態を確認し将来の劣化予測を可能とするため、無電源環境でも構造物の状態監視を自律的に行う「②構造応答発電を利用したセンシング技術(構造応答発電センシング技術)の開発」を行うことにより、点検と監視の融合による統合的な診断技術の提案・高度化を図ることである。

「①状態可視化点検技術の開発」では、渦流探傷および超音波探傷を組み合わせた損傷可視化技術(構造物スキャナー)の高度化、人間が入り込めない部位やアクセスできない部位の観察・計測等の点検が可能なマイクロロボット(構造物内視鏡)の開発を行うとともに、これらを組み合わせたマイクロロボットによる点検(マイクロロボティック点検)の提案も行う。

「②構造応答発電センシング技術の開発」では、構造応答や環境を利用した発電機構を有するセンサおよび高効率発電装置、省電力データ転送および効果的データ分析の提案により、無電源環境下でも長期状態監視を実現する自己電源供給型の自律的センシング技術を提案する。

6. 研究・技術開発の内容と成果

本研究では、「①状態可視化点検技術の開発」および「②構造応答発電センシング技術の開発」を研究サブテーマとして実施した。

以下、研究期間内の各年度毎に実施した内容と成果をまとめる。

平成 25 年度の研究内容及び研究成果

①状態可視化点検技術の開発

本研究では、(1)構造物内部状態の可視化を高精度に行うため、これらの仕組みを発展させ、渦電流探傷システムと超音波探傷システムを組み合わせた点検方法の開発を行うとともに、(2)鋼部材、コンクリート部材いずれもリモート点検が可能な構造物内視鏡を提案する。そのうえで、これらを組み合わせた、(3)マイクロロボットによる点検(マイクロロボティック点検)の提案を行っている。平成 25 年度は、上記研究テーマのうち(1)、(2)の技術開発を進めることを主眼に置いた検討を行った。

(A) 超音波探傷による腐食損傷検出に関する検討(テーマ(1))

構造物の内部を可視化するうえで課題となる、コンクリートに埋め込まれた鋼材の腐食損傷の検出する方法について FEM 解析および実験により検討し探傷条件について分析した。引き続き、渦流探傷との組み合わせによる高精度化の可能性について検討することとした。

- (B) 複数プローブ制御による渦流探傷およびデータ分析方法に関する検討 (テーマ(1))  
申請者らの開発している渦流探傷の特徴である複数プローブを利用した探傷方法について等速スキャンによる時間情報取得方法と取得データの分析方法について検討し、腐食損傷を受けた鋼材面の検出について実験的に確認した。
- (C) 構造物内視鏡の性能に関するハード面からの検討 (テーマ(2))  
鋼部材、コンクリート部材いずれにおいても探傷が可能となるように、これまでのコイル電磁石による制御ではなく、吸着素材を利用した新しいマイクロロボットを開発し実際に様々な構造物への適用を試みた。表面の状態(空隙の有無など)より吸着レベルを変えた対応ができるロボットとなっている。
- (D) 構造物内視鏡の性能に関するソフト面からの検討 (テーマ(2))  
マイクロロボットの検査位置把握のため、LED 付軽量カメラをマイクロロボットに設置するとともに、移動性能(直進性、傾斜対応性)の確保のため、吸着システムの駆動プログラムの確認・確立を行った。
- (E) 構造部材を模擬した暴露供試体を用いた適用性検証 (テーマ(1)およびテーマ(2))  
東京工業大学に保管している長期使用した実構造部材および暴露を実施している供試体を用いて、開発機器の適用性を検証し、問題点の把握を行った。

## ②構造応答発電センシング技術の開発

当該研究開発項目では、(1)電源不要のワイアレスパッシブセンサリングの開発、および、(2)構造応答を利用した TMD 型発電・蓄電装置の開発を行い、これらを組み合わせて検討を行う。本研究では、より低周波数の領域に対応可能な発電センサリングおよび発電・蓄電装置の開発を行うとともに、技術確立のため、現場での長期適用を試み、実用性の向上を目指すものである。平成 25、26 年度の 2 年間で実用化を目指している。平成 25 年度は、以下のようなシステム作りに重点を置いた検討に取り組んだ。

- (A) 低周波領域での発電センサリングの検討 (テーマ(1))  
土木構造物に発生するより低周波数領域の振動に対しても、より低加速度からデータが取得でき、十分発電レベルが確保できる発電センサリングの可能性について検討するため、低周波数に共振点を移動したセンサなどの適用性確認を行った。
- (B) 発電センサを利用した統合的パッシブセンサリングシステムの開発 (テーマ(1))  
腐食環境計測のための ACM センサなどのデータをワイアレスで取得できる統合的なセンサリングシステムを提示し、ワイアレスで計測する仕組みを現場適用した。
- (C) 構造振動応答を利用した発電・蓄電装置の高効率化に関する検討 (テーマ(2))  
橋梁の主要な振動成分として 14Hz の振動数に着目して、14Hz 程度の振動数で最大の発電量とするような新しいパラメータ設定法の提案に基づき TMD 型発電・蓄電装置を提案し、実機開発を進め、発電効率の向上を図った。リニア発電装置は 14Hz 程度の振動数で最大の発電量とするにはより高度の最適化が必要となる。そこで、リニア発電装置部分を効率化し、かつ、蓄電効率を考慮した新しい発電・蓄電装置を開発する。
- (D) パッシブセンサリングおよび発電・蓄電装置の現場適用性の検討 (テーマ(1)、(2))  
発電センサリングおよび発電・蓄電装置について、実際に対象となる構造物を選定後、設計、チューニングを行い、現場適用性の確認の段階に移行した。発電・蓄電装置による交通荷重に伴う蓄電レベルの確認を行った。引き続き長期計測への適用性を検討することとした。

## 平成 26 年度の研究内容及び研究成果

### ①状態可視化点検技術の開発

本研究では、上述のように、(1) 構造物内部状態の可視化を高精度に行うため、これらの仕組みを発展させ、渦電流探傷システムと超音波探傷システムを組み合わせた点検方法の開発を行うとともに、複数のプローブにより取得したデータを効果的に処理できるデータ分析方法を検討する。さらに、(2) 鋼部材、コンクリート部材いずれもリモート点検が可能となるよう、観察位置同定方法の高度化も図りながら、より厳しい環境での利用に耐えられる構造物内視鏡を提案する。そのうえで、(3) これらを組み合わせて、マイクロロボットによる点検（マイクロロボティック点検）の提案を行うことを目指し、平成25、26年度の2年間で実用化を目指し検討を行った。そのうち、平成26年度は以下のような検討を実施した。

(A) 超音波探傷による損傷可視化に関する検討（テーマ(1)）

主に、鋼部材の腐食損傷をターゲットとして、腐食による板厚減少の分布を検知し、可視化する仕組みについて探傷方法およびデータ分析の観点から検証し、高精度化を図ることを目的としてフェイズドアレイ探触子による腐食損傷の分析法について検討した。さらに、マイクロロボットに搭載することを想定し、より簡易に探傷し、損傷可視化する方法について検討し、SH波を利用した損傷検知手法を提案し、精度検証のため、実験により検討を行った。

(B) 渦流探傷による損傷可視化に関する検討（テーマ(1)）

平成25年度に引き続き、プローブの等速スキャンによる探傷結果を基に、リフトオフと損傷部材表面の形状との関係について詳細に検討を行い、内部に残存する鋼材の表面形状を簡便に分析する方法を提案し、点検者にわかりやすく内部状態を示す可視化方法を提示した。

(C) 構造物内視鏡の現場適用性に関する検討（テーマ(2)）

構造物内視鏡について実構造物材において適用性を確認するべく、実際のコンクリート構造物および腐食損傷の著しい実橋梁で現場実験を実施し、移動点検、鋼部材、コンクリート部材への適用性、傾斜した部材への適用性を確認した。さらに、人がアクセスできない部位への侵入および観察を実際に実施して問題点がないか把握したうえで、その改良を図りつつ、様々な表面や位置に対応可能な構造物内視鏡（ロボット）を実現した。さらに、ロボットで撮影した写真画像を用いて、ロボットの移動方向や位置を同定できるデータ分析方法を開発した。

(D) 構造物スキャナー機能を具備した構造物内視鏡の提案（テーマ(3)）

コンクリートなどの非磁性体を透過して探傷できる渦流探傷と超音波探傷を組み合わせ、より効果的に損傷レベルの可視化を行うことを目指したテーマ(1)の検討と、人がアクセスできない部位などに侵入して観察を行う構造物内視鏡（マイクロロボット）のテーマ(2)の検討を組み合わせ、これまで点検困難であった部位についてマイクロロボットで侵入し観察に加え、状態可視化を行う機能を追加し、より高度な診断が行えるよう新しい構造物内視鏡の機能について検討し、詳細点検で損傷の原因究明に必要となる構造部材の挙動を可視化するセンサを設置し、その現場実験を実施した。

②構造応答発電センシング技術の開発

当該研究開発項目では、上述のように、(1) 電源不要のワイアレスパッシブセンサリングの開発、および、(2)構造応答を利用した TMD 型発電・蓄電装置の開発を行い、これらを組み合わせて検討を行う。本研究では、より低周波数の領域に対応可能な発電センサリングおよび発電・蓄電装置の開発を行うとともに、技術確立のため、現場での長期適用を試み、実用性の向上を目指すものである。(1)のテーマについては、これまで開発した仕組みを統合するパッシブセンサリングシステムの開発、(2)のテーマについては、構造物の様々なスケールに対応するよう、これまでの10Hzをターゲットとした発電・蓄電装置の高効率化、より低周波に対応できる新しい装置の設計・開発・現場適用性の検討が必要である。平成25、26年度の2年間で実用化を目指し検討した。平成26年度は以下のような検討を行った。

- (A) パッシブセンサリングおよび発電・蓄電装置の現場適用性の検討 (テーマ(1), (2))  
平成 25 年度に引き続き、対象橋梁において現場適用性の検証および長期計測への適用を試み、パッシブセンシングについては、システム改善を図り、発電・蓄電装置についてはワットオーダーの高効率の発電が可能であることを明らかにした。
- (B) 低周波領域に対応した発電センサリングの統合化 (テーマ(1))  
平成 25 年度に検討・開発する低周波領域の振動に対応した発電センサに対して、性能評価を引き続き実施するとともに、10Hz レベルの発電センサ同様にセンサリングの方法、データ処理について検討を行い、システム構築を図った。
- (C) 低周波領域での構造振動を利用した発電・蓄電装置の検討 (テーマ(2))  
橋梁や建物等の構造物はその規模により様々なレベルの固有振動数が存在する。対象橋梁の低次周波数に対して機能するよう、対応すべく開発・提案した発電・蓄電装置の機能拡張を行うべく、改めてリニア発電機をベースに、発電・蓄電できる装置を再設計、パラメータ決定・開発を行った。
- (D) 低周波領域に対応したパッシブセンサリングおよび発電・蓄電装置の現場適用性の検討 (テーマ(1), (2))  
改めて開発した低周波領域の振動に対応した発電センサを用いた統合センサリングシステムと低周波領域の振動に対応した発電・蓄電装置について、橋梁現場において実験を実施し適用性の検証を行った。その結果、低周波対応のセンサの方が反応の良い橋梁の振動成分があること、低周波領域の振動についても適切に発電・蓄電できる設計法であったことを確認した。
- (E) 発電・蓄電装置を利用した新しい振動制御装置開発への展開の検討  
構造振動応答を利用した TMD 型発電・蓄電装置を提案しているが、この検討の将来的な目標は、これまで実現していない、チューニングが容易な電磁発電部を減衰装置とする振動制御装置の開発である。その可能性について検討するため、実験室における減衰レベルの同定実験などを行って、改良すべき点などを示した。

本研究では、最終的に「①状態可視化点検技術の開発」および「②構造応答発電センシング技術の開発」の実施を通じて、以下のような技術を開発・提案した。

- 1) 超音波 (フェイズドアレイおよび SH 波を利用) による腐食部材の損傷可視化手法
- 2) 渦流探触子を用いた損傷部材の内部残存部の表面形状および損傷厚さの可視化手法
- 3) 土木構造物で想定される様々な部位、表面状態、材料に対応した軽量で小型な構造物内視鏡 (ロボット) とその検査位置の同定機能、構造物挙動把握のためのセンシング機能を活用したロボティック点検の手法
- 4) 様々な構造物の周波数成分への対応を考慮した振動発電センサおよび発電・蓄電装置 (発電・蓄電装置については、設計方法も提示し、減衰装置としての拡張可能性を検討)
- 5) 継続的な計測が可能なパッシブセンシングシステム

最後に改めて、本研究をまとめると、以下のように記述できる。

本研究では、「①状態可視化点検技術の開発」および「②構造応答発電センシング技術の開発」を研究サブテーマとして研究開発を実施した。

「①状態可視化点検技術の開発」では、(1)構造物内部状態の可視化を高精度に行うため、これらの仕組みを発展させ、渦電流探傷システムと超音波探傷システムを組み合わせた点検方法の開発を行うとともに、(2)鋼部材、コンクリート部材いずれもリモート点検が可能な構造物内視鏡を提案する。そのうえで、これらを組み合わせた、(3)マイクロロボットによる点検 (マイクロロボティック点検) の提案を検討した。その結果、渦流探傷プローブの等速移動データを用いた部材内部の残存鋼材の表面形状の可視化、フェイズドアレイ探触子および SH 波を利用した簡易な損傷検出方法を示した。また、鋼部材、コンクリート部材問わず様々な材料の構造部材を自走できるマイクロロボットを開発し、その

改良を重ね、近接点検、点検位置同定、部材の動的挙動を把握できるセンサ等の多様な機能を具備した軽量(328g程度)ロボットを実現し、マイクロロボティック点検手法を提示、その現場適用性を確認した。

「②構造応答発電センシング技術の開発」では、(1)ワイアレスパッシブセンシングの開発、および、(2)構造応答を利用した TMD 型発電・蓄電装置の開発を行い、これらを組み合わせて電源不要のシステムについて検討を行うこととした。本研究では、より低周波数の領域に対応可能な発電センシングおよび発電・蓄電装置の開発を行うとともに、技術確立のため、現場での長期適用を試み、実用性の向上を目指した。その結果、長期計測可能なパッシブワイアレスセンシングシステムを開発し、実際の橋梁現場で適用性の確認を行うとともに計測データの蓄積を行った。また、センシングシステムの電源確保の目的で、橋梁の振動エネルギーを効率的に電気エネルギーに変換する仕組みとして、二質点系同調質量系発電装置を開発し、適用橋梁と対象周波数に応じて適切にかつロバストなチューニングを行う方法を提案、長期安定して 50%を超える発電効率を実現できることを現場実験により確認した。また、この発電装置により、蓄電できることを示し、センシングで使用したエネルギーを次の測定までの間に補うなどの運用で長期センシングが自律的に可能であることを示した。さらに、発電装置の設計法およびチューニング手法を応用して新しい振動制御デバイスへ拡張できる可能性を示唆した。

従って、本研究は、簡便な点検による状態可視化の方法と狭隘箇所などの近接目視、詳細点検を実現する様々な材料の構造物表面を自走する小型軽量のマイクロロボットによる構造物点検を組み合わせ、より実用的な維持管理手法を提案し、構造物の安全管理に資する技術を提案するとともに、点検と点検の間の状況の変化を自律的に電源しつつ継続的にセンシングするシステムを、発電センサおよび効率的な発電・蓄電デバイスにより実現を図ったものであり、それらの技術の現場適用性を実証したものである。

#### 7. 研究成果の刊行に関する一覧表

刊行書籍又は雑誌名（雑誌のときは雑誌名、巻号数、論文名）	刊行年月日	刊行書店名	執筆者氏名
土木学会西部支部沖縄会第4回技術研究発表会、可動式渦流探傷プローブによる腐食鋼板残存板厚分布の評価	2014.10.30	土木学会 西部支部 沖縄会	田村洋, 富永理史, 佐々木栄一, 峰沢ジョージヴウルペ
IABSE, Development of Tuned Dual-Mass Electric Power Generator for Energy Harvesting of Bridge Vibration	2015.5.13	IABSE	Koichi Takeya, Eiichi Sasaki
土木学会年次学術講演会、表面 SH 波の適用に基づく鋼コンクリート埋込部の非破壊評価に関する基礎的検討	2015.9 予定	土木学会	乙部裕一, 鈴木啓悟, 佐々木栄一
土木学会年次学術講演会、橋梁振動を対象とした二質点同調質量系発電デバイスの実橋梁への適用	2015.9 予定	土木学会	竹谷晃一, 佐々木栄一, 長船寿一, 岩吹啓史, 洞宏一, 名児耶武

8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況

知的財産権の内容	知的財産権の種類、番号	出願年月日	取得年月日	権利者名
申請検討中（明細書作成中）				

9. 成果の実用化の見通し

本研究では、構造物可視化のための点検技術とアクセス困難位置等の点検も可能とするロボティック点検、さらには、自律的な電源確保を可能とした継続的なセンシング手法を提案しており、いずれも現場適用性を確認している。また、現場道路管理者として福井県の方々とも議論しながら検討を進めたことから、引き続き管理者へ成果を伝え、適用拡大を図りたいと考えている。また、タイやベトナムをはじめとするアジア諸国でもこれらの技術への興味は強く海外展開も視野に進める予定である。

10. その他

振動発電装置の開発に伴って、これまで困難であった発電型の振動制御装置の設計法やチューニング方法が提示できたと考えられ、新しい構造物振動制御装置の開発へつながる成果を得たと考えられる。

(注)

1. 用紙の大きさは、日本工業規格で定めるA列4とし、縦位置左綴とすること。  
各項目の記入にあたっては、数字、図表等を用いて詳細に説明すること。記入量に応じて、適宜、欄を引き伸ばして差し支えない。
2. 「研究課題名」について  
平成26年度建設技術研究開発費補助金交付申請書に記載した研究課題名を記入すること。
3. 「研究期間」について  
当該研究課題について補助金が交付された期間（年度）を記入すること。
4. 「代表者及び研究代表者、共同研究者」について
  - (1) 「代表者は1人又は1法人を記入すること。研究代表者は1人を記入すること。共同研究者は、研究に参加している者全てを記入すること。
  - (2) 研究組織の変更により代表者又は研究代表者を交替している場合は、交替後の研究者名を記入すること。
5. 「6. 研究・技術開発の内容と成果」について
  - (1) 当該研究期間に行った研究によって得られた成果を、各年度の交付申請書の「研究・技術開発の目的及び目標」「本年度の実施計画」と対比させてわかりやすく記入すること。
  - (2) 主要な研究方法、手段等の経過を詳細に記入すること。
6. 「7. 研究成果の刊行に関する一覧表」について
  - (1) 記入した書籍又は雑誌については、その刊行物又は別刷り一部を添付すること。
7. 「8. 研究成果による知的財産権の出願・取得状況」
  - (1) 説明上必要な書類を、適宜、添付すること。
8. 「9. 成果の実用化の見通し」について
  - (1) 研究・技術開発の成果による実用化について、具体的な計画がある場合にはその内容を記載すること。