

開発項目「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／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」平成26年度～平成28年度
のうち平成27年度分中間年報

委託先名 技術研究組合NMEMS技術研究機構

1. 研究開発の内容及び成果等

本研究開発では、従来の点検技術を補完し、無線センサネットワークを活用して道路インフラの状態を常時・継続的・網羅的に把握することを可能とし、さらには、容易にアクセスできない場所のモニタリングや災害等の突発事象への対応も可能な道路インフラモニタリングシステム（RIMS:Road Infrastructure Monitoring System）を開発している。具体的には、高速道路の橋梁、道路付帯物、法面等を対象にして、環境エネルギーを利用した自立電源を有し、各フィールドのモニタリングに適した新規の小型、安価、高性能、高耐久性の無線センサ端末を開発する。無線通信センサネットワークや高耐久性のパッケージングに関しては共通化を図り、効率的な開発を行うとともに、各フィールドのセンシングシステムを統合して道路インフラのトータルな維持管理が可能な道路インフラモニタリングシステムを構築する。平成27年度は以下の内容を実施し、当初の目標を達成した。

(1)道路インフラ状態モニタリング用センサ端末及びモニタリングシステムの研究開発

(1-1) 橋梁センシングシステムの開発

(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

MEMS スーパーアコースティックセンサ（SAセンサ）デバイスの開発に関しては、センサの基本構造を確立し、実証に向けた、振動検出部と振動伝達部の各パラメータの設計指針も確立し、10mm x 10mm x 10mmのプロトタイプของセンサを試作した。また、小型センサ端末の開発として、橋梁に適した自立発電デバイスとして太陽電池パネルを選定し、想定消費電力2mWの省電力システム設計を完了した。電力ノードを試作し、稼働時の消費電力が約1.1Wとなることを確認した。センサネットワークシステムの構築と実証実験に関しては、交通荷重下の高速道路橋の計測を行い、複数床版パネルの内部損傷状況を推定するとともに、高速道路橋梁近傍における無線データ伝送性能確認試験を行い、30m以上の伝送を確認した。橋梁構造の健全性定量評価手法の開発に関しては、2つの実床版から得られたアコースティックエミッション（AE）に基づいて、AE位置標定および三次元AEトモグラフィにより得られる速度構造により、目に見えない内部損傷の位置を的確にとらえることができる三次元AEトモグラフィ法を確立しSAセンサの要求性能を示した。

(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

極薄ひずみセンサアレイの開発に関しては、幅1mm、厚さ3 μ mの極薄シリコンひずみセンサをフレキシブル基板上に転写する技術、スクリーン印刷により配線する極薄シリコンひずみセンサを作製するプロセスを確立し、長さ5mm、幅1mm、厚さ3 μ mの極薄ひずみセンサアレイを、25個フレキシブル基板上にアレイ化したフレキシブル面パターンセンサプロトタイプを試作し、 1×10^{-6} の感度を確認した。配線付きフレキシブルシート、センサ実装、封止プロセスの開発に関しては、水蒸気透過率は0.1～0.2g/m²/dayの耐候性保護フィルムを試作するとともに、配線シートを貼り合せプロセスを確立し、熱ストレスに対して10年以上の耐久性を持つ事を示した。また、粘接着シートの最適厚を200 μ mに決定する事ができた。システム化と実証試験に関

しては、阪神高速 13 号東大阪線の I 桁橋を選定し、予備実証を開始した。また、センサシートとデータ送信モジュールを完成させ、実証現場での歪分布計測ができる準備が完了した。

(1-2)道路付帯構造物傾斜センシングシステムの開発

MEMS センサデバイスの開発においては、温度特性の変動幅が従来の約 1/10 になり出力安定性が向上することを確認するとともに X,Y 軸の出力安定性の変動要因（プリント基板の吸湿によるストレイ容量の変動）を明らかにした。対策として MEMS センサとフロントエンド回路を気密封止構造にする事で、目標の出力安定性 0.855[gal] (=0.05[deg]相当) 以下となる 0.69[gal](=0.04[deg])の安定性確認した。傾斜マルチセンサ端末の開発においては、無線モジュールの試作・免許取得・評価を完了し、同期、計測データ伝送の確認、無線通信距離が 30m 以上であることを確認した。また、傾斜マルチセンサ端末の回路設計を完了し、消費電力試算の結果、目標の 3.5mW（平均）以下の 2.9mW（平均）を得た。システムの構築と実証試験に関しては、高速道路会社と協力し、先行フィールド試験を行う情報板を吾妻山トンネル入口情報板（東名下り線 左ルート 66.6KP）に決定した。先行フィールド試験用に市販のセンサを用いた簡易計測システムを構築し、12 月中旬に上記選定した情報板に設置完了し、測定を開始した。

(1-3)法面変位センシングシステムの開発

法面用多機能型センサ端末の開発に関しては、自立電源、省電力化技術、複数センサ共有に関し、H26 年度に選定した最適構成・技術を実装し、屋外電波環境下で評価・検証を行った。その結果、設計通りの動作をしていることを確認した。これを踏まえて、高耐久性パッケージに封止するセンサ端末の試作を行った。センサネットワークシステムの構築と実証実験に関しては、無線メッシュネットワークに関して最適方式の実装を完了し、想定通りの動作を確認した。また、低消費電力化方式の設計を行い、消費電力を見積もった。実証実験候補場所に設置する前提で、消費電力 7mWh 以下であり、雨天時の 6 日間連続動作が可能であることを確認した。無線メッシュネットワークの低消費電力化方式の適用、変位計測誤差を低減するトレンドモデルによる平滑化処理の導入、実証実験候補場所の植生による減衰等を考慮した詳細設計を完了し、1 時間に 4 mm 以上の変位を検出可能な見込みを得た。

(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

多種多様なセンサに対応するための通信仕様の開発に関しては、各社のセンサとの通信仕様を再整理し、平成 26 年度に構築したインターフェースについて屋内での接続検証を完了した。加えて受信モジュールの遠隔管理による変更が可能であることの確認が完了した。コンセントレータ間通信対応については、メッシュネットワーク機能を実装し、目標とした 3 台までのホップ通信機能を確認し、コスト抑制効果について整理が完了した。セキュアな情報収集への対応技術については、技術開発要件の整理が完了した。また、コンセントレータの設置に関する条件を整理し、平成 28 年度の方針を整理するとともに、蓄積したデータの容易な利活用方針として RDF サーバを構築した。

(2-2)高耐久性パッケージング技術の開発

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に関しては、無線モジュール、センサ、2 次電池をコンパクトに格納できる目標寸法 100mm×70mm×50mm 以下のパッ

ケーシング基板を実現し、三菱電機及び富士電機に提供した。複数のアンテナを内蔵する LTCC 基板を実現するために、高周波電磁波放射シミュレーションを実施し、その指向性の評価と改良を行い、920MHz の無指向放射パターン基板設計を確立した。高気密封止接合技術に関しては、低融点の接合材料を用いて、レーザ加工装置及び接合材料加工装置の導入により、LTCC 基板と透光性セラミックスのレーザ局所加熱による接合封止試作を行い、回路基板部における温度を一般的なはんだ実装温度である 260℃以下の低熱影響条件（約 40℃）で実装することを達成した。接合材料として、無機有機複合材が高温・高湿加速試験 PCT において耐用年数 10 年相当の良好な結果が得られた。シートフィルム実装材料及びプロセス開発に関しては、フィルム表面処理条件等の処理による層間密着性の性能を向上し、新規バリヤ層の形成等によるバリヤ特性向上、配線層の防錆処理等による配線の耐腐食性向上を図ったシートフィルムにおける積層シート全プロセスの基本工程を確立した。耐久加速試験として、-40℃～+85℃の温度サイクル試験（JIS8990 に基づく）を行い、電気接続信頼性目標の 200 サイクル以上断線なしを達成した。構造物への取付・接合開発に関しては、コンクリートや鋼板に適合する粘接着シートの開発を完了し、粘着シートの形成工程プロセスを確立した。10 年屋外暴露相当の耐久加速試験（アルカリ温水浸漬・凍結融解・熱劣化・塩水噴霧など）の試験条件にて、耐久加速試験を試験機関への外注にて実施し、接着強度における JISA5557 規格の 0.4N/mm²(MPa)を達成した。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に関しては、パッケージング評価用モジュールを改良設計・試作し、基本計画である寸法 100mm×70mm×50mm 等の目標を達成した。また、加速耐久試験は、IEC60068-2-5 の不飽和型 PCT 試験、JIS C8917 の耐候性試験及び IEC60068-2-52 の腐食試験で確認し、封止特性の確認を行なった。

(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

センサネットワークシステムの構築に関しては、関連学会、展示会、セミナー等で市場・技術動向を調査するとともに毎月開催する研究会において、橋梁、道路付帯物、法面を対象とした個別フィールドのモニタリングシステムに必要なセンサの仕様について検討し、センサ端末開発にフィードバックした。また、RIMS の高速道路会社及び一般道等への普及を加速させるために、RIMS センサ情報だけでなく、外部要因情報（地震、気象、交通情報等）の収集、表示、3 次元地図への情報マッピング、RIMS センサ情報間の連携、高速道路会社データベースとの連携や現場作業支援に向けたタブレット等のモバイル端末への情報提供機能等を備えた Pilot-RIMS (P-RIMS)を開発し、道路管理者の活用イメージを表現することができた。実証実験に関しては、毎月開催する研究会での検討及び高速道路会社の現場調査を行う等して、本プロジェクトに参画している高速道路会社（NEXCO3 社および阪神高速道路）管理の高速道路から各フィールドに適した実証場所を絞りこんだ。また、開発したモニタリングシステムを将来的に自治体に展開するため、地方自治体が管理する橋梁のリスク実態の調査として、アンケート調査票を 2 府 34 県の残り 949 橋梁の調査を実施した。

(4) センサ端末同期用原子時計の研究開発

センサ端末同期用原子時計の長期安定度の向上を目的に、ガスセル内圧力変動に起因する基準周波数変動予測モデルを構築し、ガスセル試作によりモデルの有用性を確認した。また、Cs・Rb 併用ガスセルの温度特性評価から基準周波数の補正効果を推定し、先のモデルとの併用で目的の時刻同期精度を達成できる見通しを得た。消費電力の削減では、量子部熱解析モデルと実験データとの合わせ込により、ガスセル温度制御での消費電力を 10mW 以下とする設計指針を得た。

2. 成果

(1) 研究発表・講演

発表年月日	発表媒体	発表タイトル	発表者
2015/4/21	ナノ・マイクロビジネス展 2015 社会課題対応システム関連プロジェクト成果報告会	道路インフラモニタリングプロジェクトの概要と成果	下山勲
2015/5/20	次世代センサ協議会 社会インフラ・モニタリングシステム研究会	MEMS AE センサによる橋梁モニタリング	西村修
2015/5/23	第 32 回強誘電体応用会議	スタンピング転写法を用いた圧電ひずみセンサシートの開発	山下崇博、岡田浩尚、伊藤寿浩、小林健
2015/6/4	東京大学精密工学特別講義Ⅲ	マイクロ・ナノセンサとその応用	武田宗久
2015/6/22	18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (Transducers 2015)	Acoustic emission sensor using liquid-on-beam structure	P.Quang-Khang, N.Minh-Dung, M.Kiyoshi, I.Shimoyama
2015/7/1	日本機械学会誌	橋梁センシングシステムの展望と開発	渡部一雄, 大森隆広
2015/9/1	東芝レビュー2015年9月号	AE センサを用いた橋梁モニタリングシステム	大森隆広, 碓井隆, 渡部一雄
2015/9/5	精密工学会 2015 年度秋季大会	道路インフラ状態モニタリング用センサシートの開発 (第 2 報)	山下崇博、岡田浩尚、伊藤寿浩、小林健
2015/9/5	精密工学会 2015 年度秋季大会	Development of resistive strain sensors printed onto flexible thermoplastic polymer substrates	ダニエル ジメルカ、山下 崇博、高松 誠一、伊藤 寿浩、小林 健
2015/9/16	土木学会第 70 回年次学術講演会	高速道路床版の交通荷重を用いた AE モニタリング	高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基, 大原基憲
2015/9/16	土木学会第 70 回年次学術講演会	Applicability of Acoustic Emission Method to Damage Evaluation for RC Decks	張凱淳, 塩谷智基, 大原基憲, 八ツ元仁
2015/9/28	2015 International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM 2015)	Transfer Methods of Ultrathin Piezoelectric Strain Sensor to Flexible Printed Circuits	Takahiro Yamashita、Hironao Okada、Toshihiro Itoh、Takeshi Kobayashi
2015/10/15	平成 27 年度非破壊検査協会秋季講演大会	AE 法による輪荷重走行試験下での RC 床版損傷進展評価	麻植久史, 塩谷智基, 西田孝弘, 張凱淳, 中山宏
2015/10/27	第 31 回日本道路会議	高速道路橋梁床版の交通荷重下の AE モニタリング	高峯英文, 渡部一雄, 塩谷智基, 大原基憲

2015/10/28	第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	IoT時代の実現に向けて今なすべきこと	今仲行一
2015/10/29	第32回「センサ・マイクロマシンと応用システム」シンポジウム	広帯域アコースティックエミッションセンサ	グエンミンジュン、松本潔、下山勲
2015/10	Japanese Journal of Applied Physics, vol.4, no.10, pp. 10ND08	Manufacturing process for piezoelectric strain sensor sheet involving transfer printing methods	Takahiro Yamashita、Hironao Okada、Toshihiro Itoh、Takeshi Kobayashi
2015/11/4	IEEE Sensors 2015	Piezoelectric Strain Sensor Array Fabricated by Transfer Printing Methods Transfer	Takahiro Yamashita、Seiichi Takamatsu、Hironao Okada、Toshihiro Itoh、Takeshi Kobayashi
2015/11/11	World Conference on Acoustic Emission-2015	Assessing Deterioration of an In-field RC Bridge Deck by AE Tomography	Masato Fukuda, Hisafumi Asaue, Takahiro Nishida, Tomoki Shiotani, Toyoaki Miyagawa, Kazuo Watabe
2015/11/15	第20回アコースティック・エミッション総合コンファレンス	Damage visualization of a field RC bridge deck by AE tomography	A. Sagradyan, C.Chang, T.Shiotani, K.Watabe, T.Oomori, M.Oohara
2015/11/15	第17回日米誘電体・圧電セラミックスセミナー	Integration of thin PZT/Si onto flexible printed circuit by novel transferring using chip mounter and wiring using screen printer	小林 健、山下 崇博、高松 誠一、牧本 なつみ、伊藤 寿浩
2015/11/19	第20回アコースティック・エミッション総合コンファレンス	AE法による実橋床版の健全性評価	麻植久史、塩谷智基、高峯英文、渡部一雄、大原基憲
2015/11/25	日韓未来創造フォーラム	道路インフラモニタリングプロジェクト(RIMS)の概要と成果	下山勲
2015/11/27	近畿化学協会エレクトロニクス	道路インフラモニタリング	下山勲

	部会平成 27 年度第 2 回研究会	プロジェクト(RIMS)の概要と成果	
2015/12/8	東大生研奨励会特別研究委員会	IoT 時代の MEMS 技術とビジネス	今仲行一
2016/1/13	微細構造デバイス研究開発における事業化推進セミナー	IoT 時代に向けた MEMS オープンイノベーション	今仲行一
2016/1/14	日立製作所 第 191 回 最新技術セミナー	IoT 時代のセンサ、センサシステムとアプリケーション	下山勲
2016/1/24	IEEE MEMS2016	ULTRA-THIN PIEZOELECTRIC STRAIN SENSOR ARRAY INTEGRATED ONTO FLEXIBLE PRINTED CIRCUIT FOR THE APPLICATION TO 2D STRAIN MAPPING	小林 健、山下崇博、高松 誠一、牧本 なつみ、伊藤 寿浩
2016/2/10	2015 年度計量標準総合センター成果発表会	センサ端末同期用小型・低消費電力原子時計の開発	柳町真也、高見澤昭文、池上健、高木秀樹、倉島優
2016/3/1	東芝レビュー2016年3月号	橋梁モニタリングシステムの開発	渡部 一雄
2016/3/14	日本機械学会 IIP2016 情報・知能・精密機器部門講演会	音響センサを用いたインフラ劣化モニタリングシステムの開発	碓井隆、大森隆広、高峯英文、渡部一雄
2016/3/15	電子情報通信学会	920MHz 帯無線通信の電波位相差を用いた変位計測実験	福島浩文
2016/3/17	精密工学会 2016 年度春季大会	道路インフラ状態モニタリング用センサシートの開発 (第 3 報)	山下崇博、岡田浩尚、伊藤寿浩、小林健
2016/3/22	第 30 回エレクトロニクス実装学会春季講演大会	道路インフラモニタリングシステムとセンサ端末実装技術の開発	原田 武 荒川 雅夫

(2) 特許等

出願年月日	受付番号	特許表題	出願人
2015/8/31	特願 2015-171314	電子デバイス及びその製造方法、産業技術総合研究所	産総研
2015/11/4	643533WO01	測位装置および測位方法	三菱電機
2015/11/25	特願2015-227187	無線センサ端末	一般財団法人マイクロマシンセンター 国立研究開発法人産業技術総合研究所
2015/11/27	特願 2015-231423	構造物の亀裂発生検出システム及びそれに用いるひずみセンサ	産総研
2016/2/23	644636JP01	測位装置	三菱電機

2016/3/11	特願 2016-048299	耐候性を有するセンサ端末	大日本印刷株式会社
2016/3/11	特願2016-048306	電子部品モジュール、 電子部品構造体、及び、シートモ ジュール	大日本印刷株式会社
2016/3/16	特願 2016-52944	構造物評価装置、構造物評価シ ステム及び構造物評価方法	株式会社東芝、国立 大学法人京都大学

(3) 受賞実績

なし

3. その他特記事項

(1) 成果普及の努力（プレス発表等）

- ・ナノ・マイクロビジネス展 2015 社会課題対応システム関連プロジェクト成果報告会「第1回道路インフラモニタリングプロジェクト成果報告会」開催（2015年4月23日、パシフィコ横浜アネックスホール）
- ・取材
 - －日経新聞社 科学技術部（松田省吾記者、6/3）
 - －日経新聞社 企業報道部（奥津茜記者、6/16）
 - －日経 BP 社取材（東芝対応、10/20）

(2) その他

- ・RIMS の HP にて広報 (<http://rims.la.coccan.jp/>)
- ・ブログ (<http://www.nanomicro.biz/mems/cat23755847/index.html>) にて広報 14 件実施
- ・ナノ・マイクロビジネス展 2015 出展（2015年4月22日～4月24日、パシフィコ横浜：NMEMS 技術研究機構）
- ・第7回インフラ検査維持管理展（2015年7月22日～7月24日、東京ビッグサイト：東芝、三菱電機）
- ・第5回オープンイノベーション企画技術展出展（2015年8月21日、JR ホール：三菱電機）
- ・CEATEC JAPAN2015 出展（2015年10月7日～10月10日、幕張メッセ：日本ガイシ）
- ・ハイウェイテクノフェア 2015 出展（2015年11月25日～11月26日、東京ビッグサイト：NMEMS 技術研究機構）
- ・2015 国際ロボット展出展（2015年12月2日～5日、東京ビッグサイト：東京大学）

契約管理番号	14100960-0
--------	------------