

# 道路インフラ状態モニタリングシステム用センサ端末の 高耐久性パッケージング技術の開発

福本 宏\* 原田 武（マイクロマシンセンター／NMEMS 技術研究機構）  
柏屋 俊克（日本ガイシ(株)／NMEMS 技術研究機構）  
富樫 和義（大日本印刷(株)／NMEMS 技術研究機構）  
大東 良一（大日本印刷(株)）

High Durability Packaging Technology of Sensor Nodes for Road Infrastructure Monitoring System  
Hiroshi Fukumoto\*, Takeshi Harada (Micromachine Center / NMEMS Technology Research Organization)  
Toshikatsu Kashiwaya (NGK INSULATORS, LTD. / NMEMS Technology Research Organization)  
Kazuyoshi Togashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)  
Ryoichi Ohigashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd.)

This paper describes a high durability package developed for long-term stable operation of sensor nodes composed of sensors, radio circuits, antennas and autonomous power supply under severe environments such as road infrastructure. As a result of the durability acceleration test on the sensor package which adopted LTCC as the housing material and the inorganic-organic composite adhesive as the sealing material, the durability equivalent to the targeted 10 years was obtained.

キーワード：センサ端末，パッケージング，セラミックス，気密性，接着接合，耐久性，加速試験  
(Sensor nodes, Packaging, Ceramics, Air tightness, Adhesive bonding, Durability, Acceleration test)

## 1. はじめに

橋梁，道路付帯物，法面など道路インフラ施設の健全性を無線でモニタリングするセンサネットワークシステムでは，センサ端末を長期安定して稼働させるために，その構成部品の実装には耐久性の高いパッケージが必要となる。そこで，耐候性に優れた LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics) を筐体材料に採用し，センサ端末部品をオールインワンで封止実装する高耐久性パッケージング技術，及びインフラ構造物への高耐久性設置技術を開発した。

本報では，試作したパッケージの構成，気密封止法，及びインフラへの設置法について，耐久性加速試験，実フィールドでの実証試験の結果と併せて報告する。

## 2. 背景と目的

図 1 に NMEMS 技術研究機構が NEDO からの委託を受けて実行している「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」(RIMS: Road Infrastructure Monitoring System)のコンセプトを示す<sup>(1)</sup>。老朽化が進む橋梁，道路付帯物，法面などの道路インフラ施設の健全性をモニタすることで施設維持管理の省人化・省エネルギー

化を目指す無線センサネットワークシステムである。

本システムにおける無線センサ端末は，高温，高湿，排ガス，塩害などの厳しい外部環境に長期間さらされるため，その構成部品を実装するパッケージには高い耐久性が要求される。

図 2 にセンサ端末用パッケージの概念図を示す。センサ端末は，センサ，電子回路，無線回路，アンテナ，及び自立電源から構成され，信頼性を確保する観点からもこれらの部品を全てセラミックパッケージの中に実装するオールインワンパッケージ構成とすることとした。



図 1 道路インフラモニタリングシステム

Fig.1. Road Infrastructure Monitoring System.

本パッケージ開発では、図2に示す3項目、(1)大型セラミックパッケージ、(2)高気密封止接合技術、(3)インフラ構造物への設置技術について検討を行った。また、インフラの寿命や点検サイクルから要求される耐久性として、少なくとも10年間の性能維持を目標とした。

### 3. 大型セラミックパッケージ

#### (3-1) パッケージ材質・構造

パッケージ材質として、10年以上の耐久性を有すると共に、無線アンテナを内蔵して通信可能なセラミックスが適している。金属材料では耐久性は期待できるものの、電波を遮断するため無線アンテナを内蔵できない問題があり、樹脂材では無線アンテナを内蔵し通信できるものの、10年レベルの耐久性に課題がある。ここでは、セラミックスの中でも、金属配線材料との同時焼成によりアンテナ等を内層配線で形成可能なLTCC (Low Temperature Co-fired Ceramics)を選定した。また、自立電源として、汎用性が高い太陽電池の採用が望まれるため、太陽電池をパッケージ内部に搭載しても発電できるようにパッケージ上面のリッド(蓋)には太陽光を透過し、かつ長期耐久性を有する透光性アルミナを選定した。なお、今回選定した透光性アルミナの全光線透過率は約83%であった。

パッケージサイズは、内蔵するセンサや電子回路等の大きさによって決定されるが、現場で簡単に設置施工することを考えると、片手で容易に持てる大きさであることが望ましく、サイズは最大で100×70×50 mmとした。一般的な電子部品用セラミックパッケージは十数 mm程度のサイズであり、今回開発したセラミックパッケージは従来にない大型のものとなっている。図3にアンテナを内層配線で形成し試作したセラミックパッケージの外観を示す。

#### (3-2) 内蔵アンテナの放射特性

道路インフラ状態モニタリングシステムは、センサ端末で計測されたデータを無線で中継器に送信する構成であり、端末と中継器の相対位置関係は設置条件に依存するため一意的には決まらない。そのため、アンテナの特性は、できるだけ全方向に均等に放射する低指向性が求められる。表1に今回設定した内蔵アンテナの仕様(目標値)をまとめて示す。

アンテナ設計は、内蔵する部品の大きさ、位置を考慮して電磁界シミュレーションにより行った。パッケージ内に太陽電池やモジュール等、多くの金属を高密度で、隙間無く実装するため、金属部品の大きさ・配置を考慮してアンテナの位置やサイズを決定している。シミュレーションの結果得られた放射特性(利得)を図4に示す。内蔵アンテナは指向性の低い放射特性であり目標を満たした。なお、図4のYZ面とXZ面の下側で、利得が-5dBiを下回るのは、パッケージ底面に配置した金属部材により電波が遮られるためである。

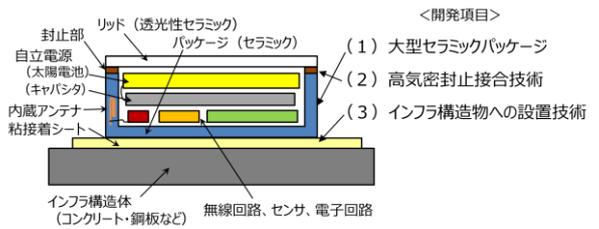


図2 センサ端末用高耐久性パッケージの構成  
Fig.2. Structure of the high durability package.

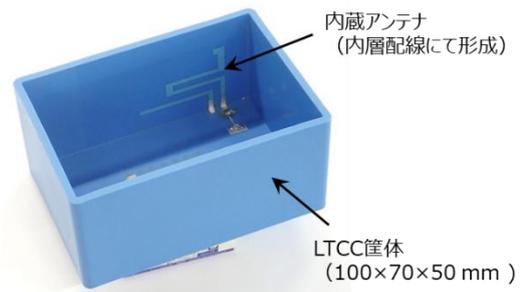


図3 セラミックパッケージの外観  
Fig.3. External view of the ceramic package.

表1 内蔵アンテナの目標仕様  
Table 1. Target specifications of the antenna.

項目	仕様値
中心周波数	925 MHz
バンド幅(帯域)	min ±20 MHz (over 905~945 MHz)
インピーダンス	50 ohm
利得	max +3 dBi, min -5 dBi

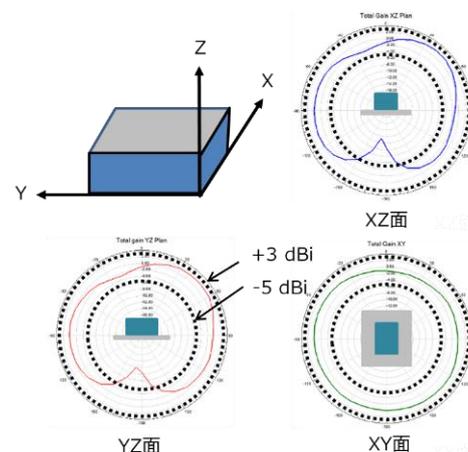


図4 アンテナ放射特性のシミュレーション結果  
Fig.4. Simulation results of the antenna radiation characteristics.

### 〈3・3〉 パッケージの耐久性

パッケージサイズは従来にない大きさであることから、熱膨張に起因する割れが懸念される。そこで、熱衝撃試験機にてパッケージ単体（LTCC 管体）の試験を実施した。

図 5 に熱衝撃試験の条件を示す。試験後のパッケージ外観検査の結果、割れ、欠けなどの異常は見られず、熱衝撃に対し十分な耐久性を有することを確認した。

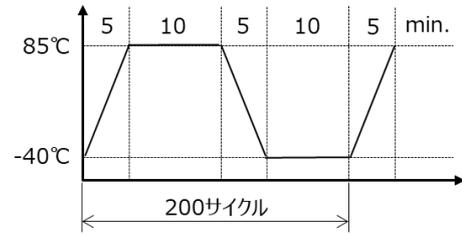


図 5 熱衝撃試験の条件

Fig.5. Conditions of thermal shock test.

## 4. 高気密封止接合技術

道路インフラ状態モニタリングシステムが設置される環境において 10 年以上の耐久性を有するセンサ端末を実現するため、前章で述べた耐久性に優れたパッケージ（LTCC）とリッド（透光性アルミナ）を高気密封止接合するプロセス技術を開発してきた<sup>(1)</sup>。

表 2 にセンサ端末封止における技術課題と対応策をまとめて示す。ここでは、高い気密性を長期間にわたって保つ封止構造を実現するための封止接合プロセスの開発、及び封止性能の耐久性試験を実施した。

### 〈4・1〉 封止接合プロセス

前章で示した通り、センサ端末は、パッケージとリッドに異種材料が使用され、さらにパッケージサイズが大きいことから、熱膨張率の違いにより発生する熱応力による接合部の剥離が懸念される。そのため低温での封止が必要になる。プロセス設計において、高耐久性封止材料と低熱影響プロセス方法の選択が重要課題である。

(1) 封止材料 耐久性重視の観点からは無機材料が望ましいが、反面、接合温度が高くなりセンサ端末部品への熱影響が問題となる。そこで、封止材としてアルミナ粒子フィラーをエポキシ樹脂で埋める構造の無機有機複合接着材を選択し、プロセス温度の低温化を図った。

(2) 実装プロセス 表 3 にセンサ端末の封止実装プロセス条件を示す。パッケージの接合枠に封止材を塗布し、乾燥空気雰囲気中でリッドを貼り合せ、熱圧着により封止接合を実施した。図 6 に封止したセンサ端末の外観写真を示す。パッケージ（LTCC）とその上面のリッド（透光性アルミナ）とを無機有機複合接着材で封止接合している。

### 〈4・2〉 気密封止性能耐久性試験

前節で述べた封止実装プロセスで組み立てたセンサ端末の気密封止性能の耐久性加速試験、及びセンサ端末を道路インフラ環境よりも過酷な環境に設置して環境ストレスをかける過酷環境暴露試験を実施した。

(1) 気密性評価方法 封止したセンサ端末の耐久性を判定する際の性能指標として気密性を用いた。図 7 に構築した気密性評価システムを示す。気密封止されたパッケージの内容積は一定であるので、パッケージ内部の気体の温度と気圧を計測すれば、その比率はボイルシャルルの法則から一定となる。そこで、温・湿度、及び気圧センサを含む評価用センサ端末を試作し、端末周囲の温度を変化させたときのパッケージ内部気圧の変動計測値を無線で読み出し、センサ端末パッケージの気密性を評価した。

表 2 センサ端末封止における課題と対応策  
Table 2. Problems and solutions of the sensor node packaging.

項目	技術課題	対応策
パッケージ	異種材料接合	熱膨張率整合、低温プロセス
プロセス	高耐久性封止	無機材料選定
	気密封止	低露点雰囲気中接合
	低熱影響	局所加熱プロセス（レーザー、熱圧着）
性能評価	気密性、耐久性	評価端末の信頼性加速試験 屋外環境暴露試験

表 3 センサ端末の封止実装プロセス

Table 3. Packaging process of the sensor node.

ワーク	LTCC/パッケージ (100×70×50 mm) 透光性アルミナ蓋 (厚さ: 0.73 mm) 接合枠幅: 3 mm
封止材	アルミナフィラー・エポキシ樹脂複合接着剤
封止材塗布	ワーク高さ検出・速度制御ディスプレイによる自動制御塗布
組立雰囲気	乾燥空気 (露点温度: -40°C以下)置換グローブボックス内
接合装置	荷重制御・熱圧着装置
接合荷重 (圧)	100 N (0.1 MPa)
接合温度	40°C, 8 hr + 90°C, 1 hr



図 6 封止したセンサ端末パッケージ

Fig. 6. Sealed sensor node package.

(2) 耐久性加速試験 試験項目として、PCT (Pressure Cooker Test)、耐候性試験、低温試験、熱サイクル試験、塩水噴霧試験、及び腐食ガス試験を選択し、電気・電子部品の環境試験方法規格 JIS C 60068 に準拠する IECQ 認定試験所<sup>(2)</sup>に委託して加速試験を実施した。

表 4 に各試験の条件と結果をまとめて示す。全ての試験項目で合格していることから、概ね 10 年間の耐久性を有する見通しが得られた。

(3) 屋外環境暴露試験 道路インフラ環境は、熱や水分、温度ストレスなどの基本的劣化要因に太陽光（紫外線）、排ガス、振動など複数の劣化因子が重なる複合的環境であり、装置を用いた耐久性加速試験では再現できない劣化が起こり得る。そこで、センサ端末設置環境における耐久性を確認するため屋外環境暴露試験を行なった。

本項では亜熱帯性気候の西表島海岸地区において実施した屋外環境暴露試験の結果を示す。(1)項で述べた温・湿度、及び気圧センサを含む評価用センサ端末を表 3 で示したプロセスで封止した試験体を西表島海岸の試験場に設置し、最長 2 年間の屋外環境暴露試験を実施した (図 8)。この環境では、日照による約 60℃の温度上昇と紫外光照射、海水と豪雨による多湿、高塩分濃度が劣化因子となる。

図 9 に当環境で 1 年間試験を実施した後のセンサ端末の気密性評価結果を示す。端末パッケージ内部の気圧と温度がほぼ線形の関係を持って変動していることがわかる。本試験の結果、西表島の過酷環境においても 1 年以上の気密性とセンシング性能を維持できることが確認された。

### 5. インフラ構造物への設置技術

LTCC は化学的に安定で耐久性に優れパッケージ材料として適した材料であるが、一方で、脆性材料のため機械加工が難しく、LTCC パッケージをインフラ構造物へ設置する際、金属管体のように直接ボルト等で固定することは困難である。ここでは、接着剤を用いてセンサ端末の LTCC パッケージをインフラ構造物に簡単・安定的・高耐久に設置できる接合技術を開発した。

接合には、粘接着シート<sup>③</sup> (大日本印刷(株)製) を適用し、目標とする屋外 10 年相当の使用環境に耐える接合耐久性を確認するため、各種加速試験装置による耐久性試験、及び屋外環境暴露試験を行なった。

#### 〈5・1〉 粘接着シート接合の耐久性加速試験

粘接着シート接合の耐久性加速試験条件を表 5 に示す。JIS A 5557(外装タイル張り用有機系接着剤)、及び JIS Z 2371(塩水噴霧試験) を適用した。JIS A 5557 の条件は屋外 7 年相当の加速条件と考えられ<sup>(4)</sup>、試験時間を 1.5 倍することで屋外 10 年相当の加速条件とした。図 10 に試験サンプルの構造を示す。パッケージで使用する LTCC を試験片(40 × 40 mm)に加工し、インフラ構造物として想定されるコンクリート、鋼板、及びステンレスに粘接着シートで接合した。耐久性加速試験環境暴露後の引張強度 0.4MPa 以上の達成が目標である。

図 11 は耐久性加速試験環境暴露後の引張強度の測定結果である。サンプル数 N=5 での平均値と最大/最小値をエラーバーで示している。全ての耐久性加速試験条件において、引張強度は規格の 0.4MPa 以上を満たしており、屋外使用 10 年相当の接着耐久性を有することを確認した。

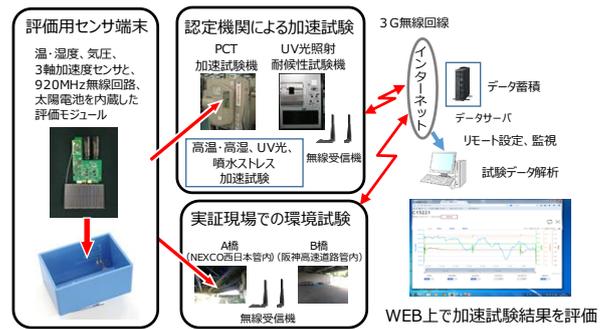


図 7 センサ端末パッケージの気密性評価システム

Fig.7. Air tightness evaluation system of the sensor node package.

表 4 耐久性加速試験条件と結果

Table 4. Conditions and results of durability acceleration test.

試験項目	条件	結果
PCT	85℃, 85%, 0.12 MPa, 672 hr	合格
耐候性試験	UV 162 W/m <sup>2</sup> , 63℃, 500 hr	合格
低温試験	-40℃, 100 hr	合格
熱サイクル試験	-40℃ ⇄ 85℃, 各 2 hr × 200回	合格
塩水噴霧試験	(塩水2 hr/ 40℃, 98%, 7日) × 4回	合格
腐食ガス試験	SO <sub>2</sub> 25 ppm + NO <sub>2</sub> 4 ppm, 40℃, 80%, 500 hr	合格



図 8 西表島での屋外環境暴露試験

Fig.8. Outdoor environment exposure test in Iriomote Island.

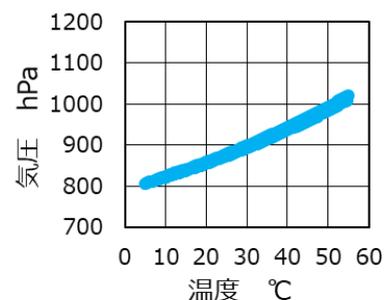


図 9 屋外環境暴露後のセンサ端末の気密性評価  
Fig.9. Air tightness evaluation of the sensor node package after outdoor environment exposure.

〈5・2〉 粘接着シート接合の屋外環境暴露試験

前章でも述べた通り、センサを設置する実環境は複数の劣化因子の複合的環境であり、装置を用いた加速試験では再現できない劣化が起こり得る。そこで、実環境における接合耐久性を確認するため屋外環境暴露試験を行なった。

表 6 に屋外暴露試験の実実施場所とその内容を示す。阪神高速道路では、実橋梁に試験サンプルを接着しているため、車両通行に伴う振動や歪み負荷がかかる環境である。西表島では、引張試験サンプル（図 10）を海岸に面して設置しているため、亜熱帯性気候の高温多湿に加え、塩分濃度の高い環境である。

阪神高速における試験では、暴露期間 2 年 8 か月の中で数か月毎に現地にてハンディスケールによる引張荷重テスト行なってきた（図 12）。現時点で 20 回以上の引張り負荷を与えてきたが、接着面は剥離すること無く 350 N 以上の引張り荷重に耐えた。

表 5 耐久性加速試験環境条件

Table 5. Environmental conditions for durability acceleration test.

条件	項目	時間 hr	温度 °C	雰囲気条件	引張強度 MPa
初期評価	-	-	-	-	≥ 0.6
耐久条件 JIS A 5557準拠 ×1.5倍	アルカリ 温水浸漬	252	60±2	水酸化カルシウム 飽和溶液	≥ 0.4
	凍結 融解	2	-20±3	低温雰囲気中	≥ 0.4
		1	20±3	水中	
	これを300サイクル繰り返す(900 hr)				
熱劣化	504	80±2	高温乾燥雰囲気中	≥ 0.4	
耐久条件 JIS C 60068-2-52	塩水 噴霧	2	15~35	塩化ナトリウム5%溶液	≥ 0.4
		168	40±2	93% 湿度	
	これを4サイクル繰り返す(680 hr)				

表 6 屋外環境暴露試験

Table 6. Outdoor environment exposure test.

暴露現場	環境の特徴	期間	試験内容
B橋 高架下 (阪神高速道路管内)	振動、排ガス、粉じん	2015/11/25~2018/8/1 (2年8か月)	ハンディスケールによる 引張荷重テスト
沖縄県 西表島	高温多湿、高紫外線 高塩分	2016/7/27~2018/5/29 (1年10か月)	引張強度試験 (JIS A 5557準拠)

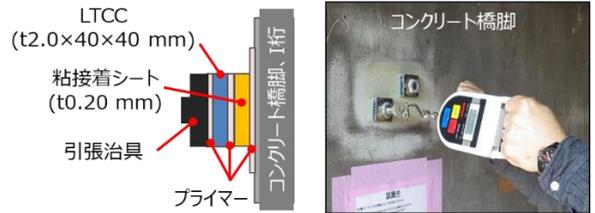


図 12 ハンディスケールによる現地での引張荷重テスト  
Fig.12. On site tensile load test by handy scale.

西表島海岸での試験では、暴露期間 1 年 10 か月後の引張試験サンプルを持ち帰り JIS A 5557 に基づく引張強度測定を実施し、規格の 0.4MPa 以上をクリアした。

6. まとめ

道路インフラ状態モニタリングシステムへの適用に向け、センサ、電子回路、無線回路、アンテナ、及び自立電源等で構成されるセンサ端末をオールインワンで実装する高耐久性パッケージング技術を開発した。開発項目として、(1)大型セラミックパッケージ、(2)高気密封止接合技術、(3)インフラ構造物への設置技術 を取り上げ検討を行った。パッケージ材として耐候性に優れたセラミック (LTCC)、封止材として無機有機複合接着剤を採用し試作したセンサ端末パッケージにて耐久性加速試験を実施した結果、目標とする 10 年相当の耐久性が得られる見通しを得た。また、インフラ構造物へ設置には、粘接着シートを用いる接合方式を提案し、試験サンプルによる耐久性加速試験にて、同じく 10 年相当の耐久性を確認した。

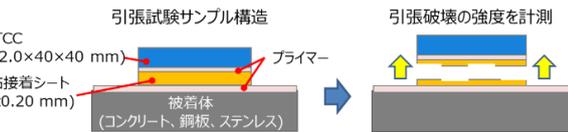


図 10 引張り試験サンプル構造 (JIS A 5557 準拠)  
Fig.10. Tensile test sample structure.  
(based on JIS A 5557)

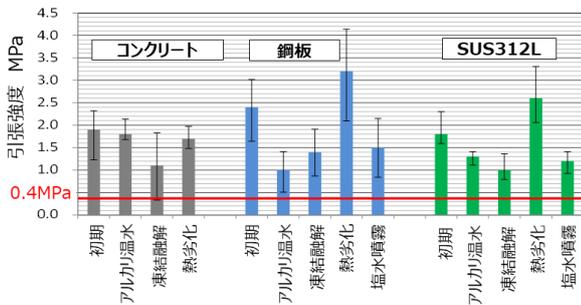


図 11 耐久性加速試験環境暴露後の引張強度  
Fig.11. Tensile strength after durability acceleration test environment exposure.

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) 下山:「道路インフラの統合的な常時監視を実現するモニタリングシステムの研究開発」, MEMS センシング&ネットワークシステム展 2017 研究開発プロジェクト成果報告会 (2017)
- (2) 一般財団法人 日本品質保証機構ホームページ <https://www.jqa.jp>
- (3) 大日本印刷株式会社ホームページ [http://www.dnp.co.jp/works/detail/10113975\\_18925.html](http://www.dnp.co.jp/works/detail/10113975_18925.html)
- (4) 橋向:「有機系接着剤を利用した外装タイル・石張りシステムの開発: その 21.屋外暴露 10 年後の接着強さ」, 日本建築学会大会学術講演梗概集, A-1, pp. 269-270 (2005)