

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

小林 健* Zymelka Daniel 山下 崇博（産業技術総合研究所／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)）

Development of Bridge Monitoring System based on Flexible 2D Strain Pattern Sensor Sheet
Takeshi Kobayashi*, Daniel Zymelka, Takahiro Yamashita (National Institute of Advanced Industrial
Science and Technology (AIST) / NMEMS Technology Research Organization)
Kazuyoshi Togashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd. / NMEMS Technology Research Organization)
Ryoichi Ohigashi (Dai Nippon Printing Co., Ltd.)

We have developed 2D strain pattern sensor sheet consisting of a strain sensor array sheet by graphite screen printing, a weatherproof protective layer, and an adhesive sheet for easy construction. We have attached the developed sensor sheet to the actual bridge where the stop hole treatment is performed. It has been demonstrated that the strain sensor near the crack and the stop hole shows a particularly large value.

キーワード：スクリーン印刷，ひずみセンサ，無線センサネットワーク，構造ヘルスマニタリング
(Screen printing, Strain sensor, Wireless sensor network, Structural health monitoring)

1. 緒言

近年の車両の大型化，過積載車両の走行に伴い，鋼橋において疲労亀裂の発生が見られるようになってきている。疲労亀裂の応急処置としては円孔を空けて亀裂の進展を止めるストップホールが代表的であるが，そこから亀裂が進展する事例が報告されている⁽¹⁾。一度応急処置してから，次の点検までには数年以上かかるため，その間にストップホールから亀裂が進展すると，重大な事故につながる恐れがある。

亀裂の進展を検出するには，ひずみセンサアレイでひずみ分布の異常をモニタリングする方法が有効である。Glisicらは市販の有線ひずみゲージを並べて貼り付けた鋼材に引張試験を行い，亀裂の進展に伴い 10000 $\mu\epsilon$ 以上にひずみが増大したエリアが拡大することを示した⁽²⁾。実際の鋼橋に，多数の有線ひずみゲージを貼り付けるのは施工に手間がかかり，配線の取り回しも煩雑になる。また，屋外環境にさらされるため日照や雨水の影響が懸念される。

このような背景から著者らは柔軟性のある基板上に複数のひずみセンサを配置したひずみセンサアレイシート，データ処理と通信を行う無線モジュール，日照や雨水に対する耐候性保護層，施工を容易にする接着シートを一体化したフレキシブル面パターンセンサを開発している。本報では印刷技術によるひずみセンサアレイシートの開発を中心に，耐候性保護層と接着シートとの一体化プロセス，さらに

実際の橋梁モニタリングへの適用について紹介する。

2. 橋梁モニタリングシステム全体像

図 1 にひずみセンサアレイシートによる亀裂進展モニタリングの概要を示す。図 1(a)のように亀裂発生箇所にストップホールを空けた後，シートを貼り付ける。本システムでは車両通過時の動ひずみピーク値の分布をモニタリングする。図 1(a)の例ではシート貼り付け時は亀裂に重なっているひずみセンサのみが大きな値を示す。一定期間を経て図 1(b)のように亀裂が進展すると，亀裂周囲のひずみ値も増大する。このように動ひずみ分布をモニタリングすることで，ストップホールからの亀裂進展を捉えることができる。

図 2 に実橋梁にシステムを導入した様子を示す。ひずみセンサアレイシートと無線モジュールを測定箇所に貼り付ける。電源用太陽電池はセンサアレイシート付近で日照がある箇所に設置する。受信機，データ処理用小型 PC を，無線モジュールから通信できる範囲内に設置する。無線モジュールから送信されたデータは WiFi ルータを通じてクラウドにアップロードされる。

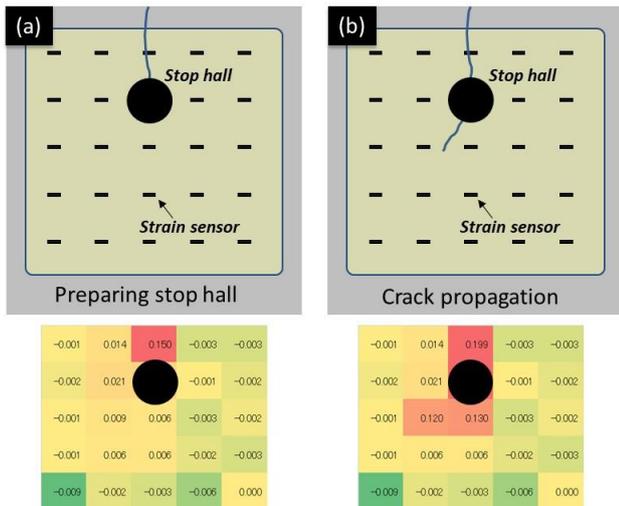


図1 ストップホール周辺へのセンサシート貼り付け
Fig. 1. Sensor sheet attached around stop hall.

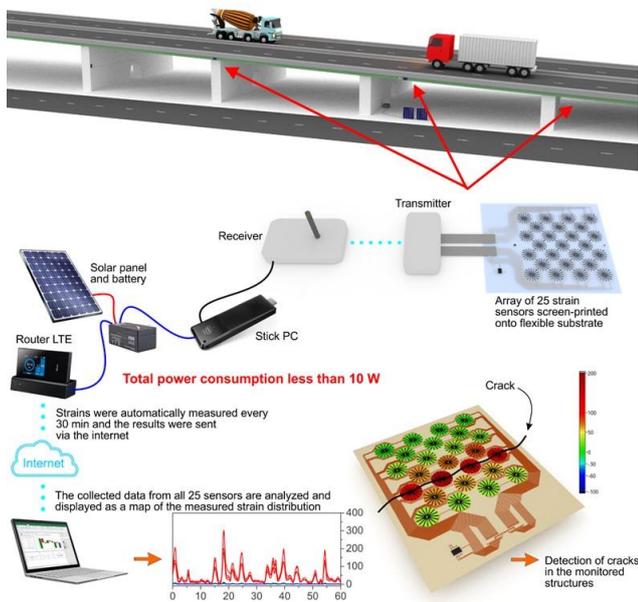


図2 橋梁センシングシステム全体像

Fig. 2. Developed bridge monitoring system.

3. ひずみセンサレイシートの開発

〈3・1〉実橋梁のひずみレベル評価

ひずみセンサレイシートの開発にあたって、まず初めに実橋梁の動ひずみレベルを調べた。図 3(a)のように鋼橋の主桁に市販のひずみゲージを並べて貼り付けた。図 3(b)のひずみ波形より、車両通過時の動ひずみのピーク値は $10 \sim 100 \times 10^{-6}$ 程度であることがわかった。図 3 の測定箇所は溶接部付近であり、溶接点近傍とその周囲のひずみの差は $5 \sim 10 \times 10^{-6}$ 程度であった。図 1 に示したような亀裂進展時のひずみの差は 1000×10^{-6} 以上になることが予想されるため、正常時のひずみ分布をモニタリングしつつ、亀裂進展を検知するには、ひずみセンサの感度が 10×10^{-6} あれば充分であると考えられる。

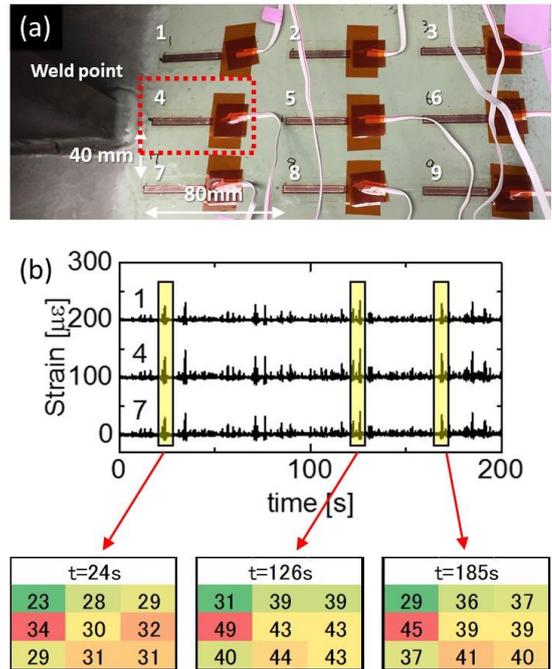


図3 (a)市販ひずみゲージによるひずみレベル評価, (b)ひずみ測定結果

Fig. 3. (a) Measurement of strain by using commercially available strain gauges, (b) Measured strain.

〈3・2〉印刷ひずみセンサレイシートの作製

図 3(a)のように市販の金属ひずみゲージを並べて貼り付ける作業は、実際の現場では困難である。金属ひずみゲージをシート上に並べたものを作製可能ではあるが、消費電力とコストの観点から、実際の橋梁で適用するには現実的でない。そこで我々は印刷技術によるひずみセンサレイシートを開発した。

図 4(a)はひずみセンサレイシートの作製プロセスである。ひずみを検知する抵抗体としてグラファイトを選定した。市販のグラファイトペースト (旭ケミカル, FTU-16R) をスクリーン印刷により、ポリエチレンナフタレート (PEN) を基材とする銅貼フレキシブル回路基板上に印刷した。今回作製した印刷ひずみセンサレイシートのサイズは 120mm 角であるが (図 4(b)), スクリーン版と基材に大判のものを用いることでより大きなサイズのシートも作製できることを確認している。金属ひずみゲージの抵抗は 120Ω であるのに対して、今回のグラファイト印刷ひずみセンサの抵抗は $90k\Omega$ であり、2V 電圧印加時のひずみセンサ 25 個分の消費電力は金属ひずみゲージで $833mW$ 、印刷ひずみセンサで $1.1mW$ と大幅に低減可能である。

続いて印刷ひずみセンサの基本特性を評価した。図 5 は印加ひずみに対する抵抗変化率である。抵抗変化率は実橋梁で測定し得るレベルのひずみ ($-200 \sim 1000 \times 10^{-6}$) に比例していることが確認され、またこの結果からゲージ率は 3.2 と金属ひずみゲージの 2.0 に比べてやや大きな値を示すことが明らかになった。

市販の金属ひずみゲージは抵抗変化の温度依存性がほとんど 0 であるが、今回のグラファイト印刷ひずみセンサは温度依存性が極めて大きく、昼夜だけでも 10℃以上の温度差がある屋外環境の使用には適さない。そこで温度依存性を低減するために、印刷ひずみセンサの形状として図 6 に示したような構造を考案した。この構造ではひずみセンサが 4 つの抵抗に分割されフルブリッジ回路として用いられる。このフルブリッジ構造によりひずみ計測値の温度依存性は $340 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ から $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ へと大幅に低減され、屋外環境での使用に問題ないレベルへと改善された。

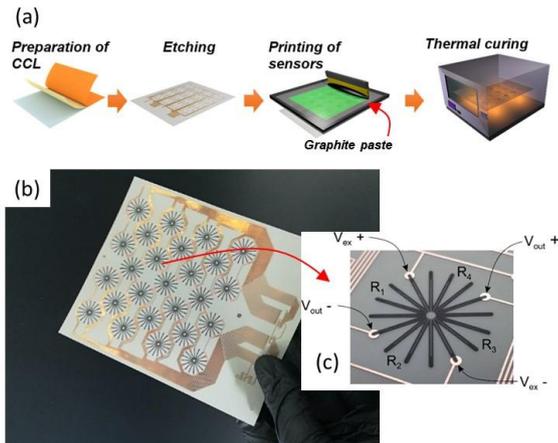


図 4 (a)スクリーン印刷によるひずみセンサアレイシート作製プロセス, (b)作製した印刷ひずみセンサシート
Fig. 4. (a) Fabrication process of strain sensor array sheet by screen printing, (b) Fabricated strain sensor array sheet.

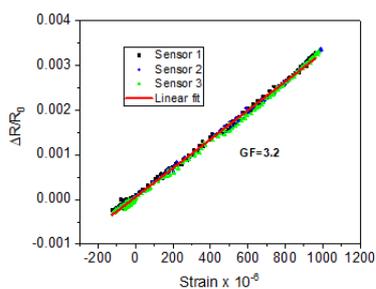


図 5 印加ひずみに対する抵抗変化率
Fig. 5. Resistance change ratio as a function of strain.

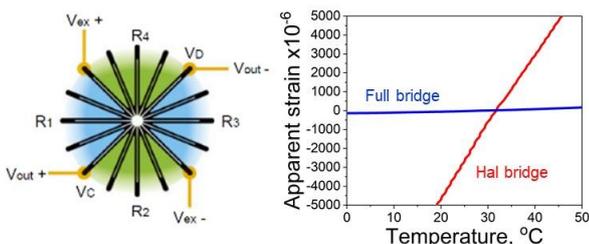


図 6 フルブリッジ構造による温度依存性の改善
Fig. 6. Improvement of temperature dependence by full-bridge structure.

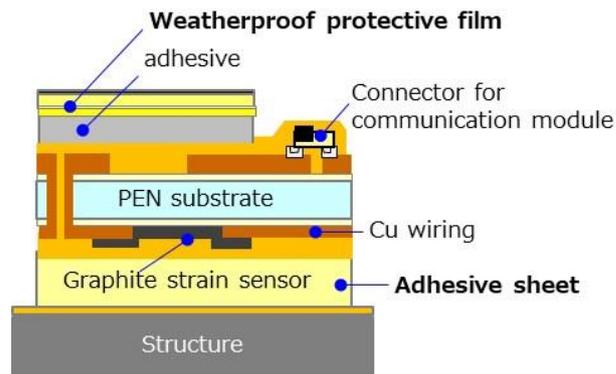


図 7 印刷ひずみセンサアレイシートの施工断面図
Fig. 7. Cross section of printed strain sensor array sheet attached on structure.

〈3・3〉 耐候性保護層および簡易接着手法の開発

長期間ひずみ分布をモニタリングするには、ひずみセンサアレイシートに長期耐久性が求められる。耐久性に影響を及ぼす環境因子としては、昼夜～季節による温度ストレス、太陽光からの紫外線、雨水からの水分、融雪剤や潮風からの塩分、排ガスからの腐食性物質などが考えられる。

図 7 はひずみセンサアレイシートを構造物に貼り付けた断面図である。太陽光や雨水への対策として、最外層に UV カット性と水蒸気バリア性を有する耐候性保護フィルムを設けている。前述のようにフレキシブル回路基板にはポリエチレンナフタレート (PEN) を適用しているが、これは通常用いられるポリイミドに比べて透明性がありコストが低いためである。

ひずみセンサアレイシートの接着には、鋼材やコンクリートに対する接着性と耐久性を有する粘接着フィルムを用いることで、構造物に対して貼るだけの簡単施工を実現している。このフィルムは、紫外線照射により硬化反応が開始し、常温環境で数時間粘着性が維持できる特徴を持つため、その間に余裕を持って貼り付け作業を行なうことができる。実際に使用する場合は、耐候性保護フィルム、印刷ひずみセンサアレイシート、粘接着フィルムが一体化した状態 (これをフレキシブル面パターンセンサと呼ぶ) で現場に持ち込むことで、紫外線を照射して貼るだけという簡易施工が可能となる。

4. 実橋梁での評価

開発したフレキシブル面パターンセンサを実際の橋梁に施工し、ひずみ分布を評価した。高速道路橋にフレキシブル面パターンセンサを施工し、図 2 に示したように受信機や PC などのシステムを導入して測定を行った。今回測定した箇所は図 8(a) に示した鋼橋 I 桁の側面である。図 8(b) は 2016 年 3 月 10 日に施工した後、2016 年 8 月 25 日、2017 年 3 月 9 日、2018 年 3 月 29 日に取得したひずみ波形である。施工からおおよそ 2 年間に経過しているが、いずれの場合

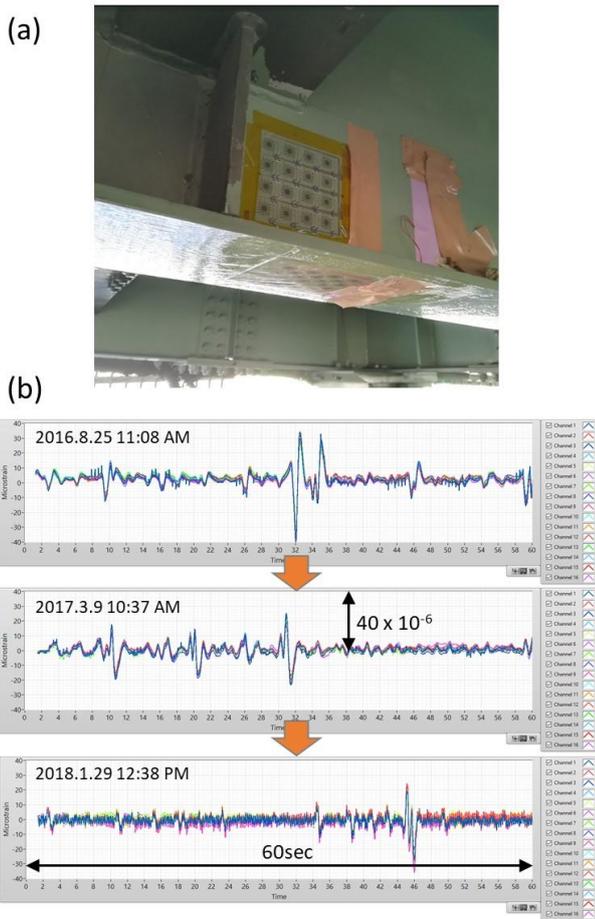


図 8 鋼橋 I 桁のひずみ測定
Fig. 8. Measurement of I shaped steel girder.

も大型車両に由来すると考えられる最大のひずみレベルは 30×10^{-6} 程度であった。当該測定箇所では 2 年間で約 400 万台の大型車両が通過しており、今回開発したフレキシブル面パターンセンサが、多数の車両通過後も安定して計測を行えることが確認された。

実橋梁での評価について、図 1 に示したストップホールの実物に対しても実際にフレキシブル面パターンセンサを貼り付けての評価も行った。図 9(a) は実橋梁でストップホール処置を行った箇所に、フレキシブル面パターンセンサを貼り付けた様子である。図 9(b) のように、亀裂にオーバーラップした部分のひずみが最大値を示していた。しかしながら亀裂の開閉量が予想以上に大きかったため、フレキシブル面パターンセンサに剥がれが生じており正確な計測とはなっていなかった。ストップホールからの亀裂進展モニタリング用には、この点を考慮した設計をひずみセンサアレイシートに対して行う必要があることがわかった。

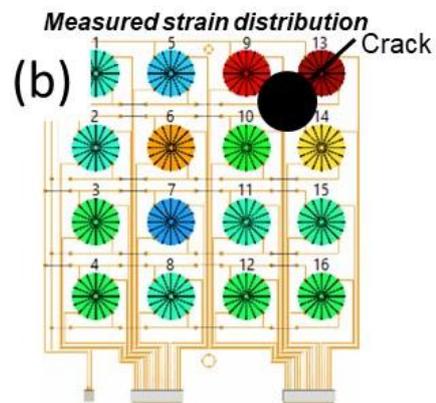
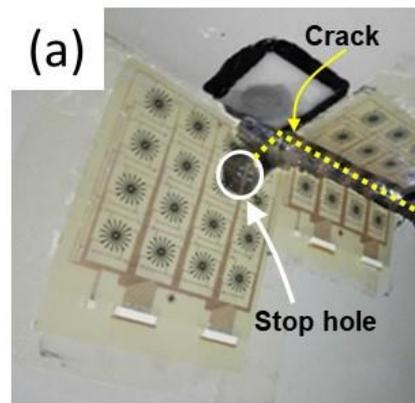


図 9 鋼橋ストップホール箇所のひずみ分布測定
Fig. 9. Measurement of strain distribution around stop hall of steel bridge.

5. 結言

本研究ではグラフィートのスクリーン印刷によるひずみセンサアレイシート、これを保護する耐候性保護層と簡易施工のための接着シートからなるフレキシブル面パターンセンサを開発した。開発したセンサを実橋梁のストップホール処置を行った箇所に貼り付けた結果、クラックやストップホール付近のひずみセンサが特に大きな値を示すことが実証できた。ストップホールからの亀裂進展もひずみが大きな値を示すことで検出できるものと期待される。

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) 三木千壽・町田文孝・伊藤博生:「ガセット継手部の疲労き裂のストップホールによる補修および応力改善対策」, 土木学会論文集 A1, Vol.67, pp.283-293 (2011)
- (2) Y. Yao and B. Glisic: "Detection of steel fatigue cracks with strain sensing sheets based on large area electronics Sensors", Sensors, Vol.15, pp.8088-8108 (2015)