

LPWA を用いた疲労き裂 検知モニタリング手法の開発

松本 直樹¹・石川 敏之²・公門 和樹³・上田 尚史⁴

¹学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail : k172603@kansai-u.ac.jp

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail : t-ishi@kansai-u.ac.jp

³正会員 株式会社アスコ (〒680-0843 鳥取県鳥取市千代水二丁目 121-2)
E-mail : komon@asc-co.jp

⁴正会員 関西大学准教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail : n.ueda@kansai-u.ac.jp

実橋で、塗膜割れが確認されると磁気探傷試験により疲労き裂の有無を確認するため、疲労き裂の検出は高コストとなる。そのため、低コストかつ遠隔で疲労き裂を検知できるモニタリング技術が求められている。本研究では、シングルボードコンピュータとひずみアンプシールドを用いて長期間のひずみ計測が可能な装置を製作し、LPWA(Low Power Wide Area)を用いてデータ転送する疲労き裂検知モニタリング手法を提案した。そして、製作した無線ひずみ計測機器を用いて、疲労試験にて疲労き裂の発生・進展をモニタリングした。その結果、製作した無線ひずみ計測機器で、荷重が作用していないひずみを経時的に計測することにより、疲労き裂の発生・進展がモニタリングできることを明らかにした。また、製作した無線ひずみ計測機器を用いて、電源が確保できない場所での長期間のモニタリングが可能であった。

Key Words: LPWA, monitoring, strain under unloading conditions, fatigue tests

1. はじめに

鋼道路橋の代表的な損傷原因として、疲労と腐食がある¹⁾。腐食は目視可能な損傷が多く、目視点検で検出できるが、疲労き裂は小さい段階では、塗膜があるため目視による検出は困難である。一般に、5年に1度の定期点検時の近接目視において、塗膜割れが生じており、疲労き裂の発生が疑われる箇所に対しては、塗膜を剥がして磁気探傷試験(MT)を実施し、疲労き裂の有無を確認している。疲労き裂は、小さい段階で発見できた場合、き裂除去²⁾やICR処理^{3) 4)}を行うことで、比較的簡易に短時間で処置できるため、小さな疲労き裂を容易に検出できる技術が必要とされている。

疲労き裂を検出するためのモニタリングは、鋼構造物の維持管理分野における重要な位置づけであるため、これまでに、様々な方法が提案されている。例えば、ひずみゲージや光ファイバーによって計測されたひずみ変化によって評価する方法が提案されている^{5) 6)}。文献 8)では、鉄道橋に対して、溶接ゲージと無線型データロガーを用いた損傷検知手法が提案されている。この方法では、

週に1度、約15分間ひずみ範囲を計測して損傷によるひずみ範囲の変化を評価しており、載荷荷重の変化が小さく、一定の位置を走行する鉄道橋に適した手法である。文献 9)では、電力を必要としない圧電素子センサと省電力で施工性に優れた小型なMEMS加速度センサを組み合わせた簡易な疲労損傷の検知システムが提案されている。この方法は、圧電素子センサから得られる代替ひずみ応答とMEMS加速度センサから得られる変位応答に基づいて疲労損傷の有無を判定する方法であり、ランダムな外力が作用する道路橋にも適応できる。さらに、通信回数やデータ量が限定されているが、低コストで通信可能であるLPWA(Low Power Wide Area)の活用が提案されている^{10) 13)}。文献 13)では、疲労き裂の発生・進展により、き裂進展監視ゲージの断線をLPWAによってデータ転送する、IoTによる疲労き裂の進展検知方法が提案されている。この方法では、1日に2回のデータ転送を想定すると、内臓電池のみで約5年間稼働できる可能性がある。

このように、疲労き裂のモニタリング技術は、多数提案されているが、一般的な応力頻度測定⁷⁾の72時間計測

ではなく、文献 13)のように疲労き裂の発見から補修までの数か月～数年程度の間の監視を想定した、低コストかつ長期間計測が可能なモニタリング技術が必要であると考える。

筆者らは、面外ガセット溶接継手の溶接止端部近傍の無荷重時のひずみ計測によって、疲労き裂の発生・進展を評価する方法¹⁴⁾を検討している。この手法は、疲労き裂の発生によって、溶接による残留応力のつり合いが変化する際のひずみを経時的に計測する方法であり、外力が必要なく、疲労き裂の発生によって残留応力が解放されることで、大きなひずみ変化が生じるため、明確に疲労き裂を検出できる利点がある。疲労き裂による残留応力の開放によるひずみは、数日に1度、数秒程度、静的にひずみを計測するだけで、疲労き裂の発生の有無が評価でき、LPWAを用いたIoTによるモニタリングに適した指標になると考える。LPWAは、無線通信規格の一種であり、1度に通信できるデータ量に制限があるが、低速な狭帯域を利用することで10 kmを超える長距離通信¹⁵⁾ができ、低電力で通信可能なためIoT機器の長期間稼働に適していることが特徴である。このLPWAを利用することで、低コストかつ長期間の疲労き裂検知モニタリングが実現できる可能性があると考えられる。LPWAの長距離伝送の特長は、広域に分散したインフラのモニタリングに適していると考えられるが、鋼橋においては、動的に変化するひずみや加速度を計測することが多く、扱うデータ量が多いため、鋼橋でのLPWAの適用事例はまだ少ないのが現状である。

そこで本研究では、疲労き裂の発生・進展による無荷重時のひずみを汎用の電子部品を組み合わせることで製作したLPWA通信が可能な無線ひずみ計測機器を用いて、無線ひずみ計測を実施し、疲労き裂検知モニタリングが可能であるかを明らかにする。また、バッテリーによる駆動を想定した屋外での長期間モニタリングも実施する。

2. 計測機器概要

(1) LPWAについて

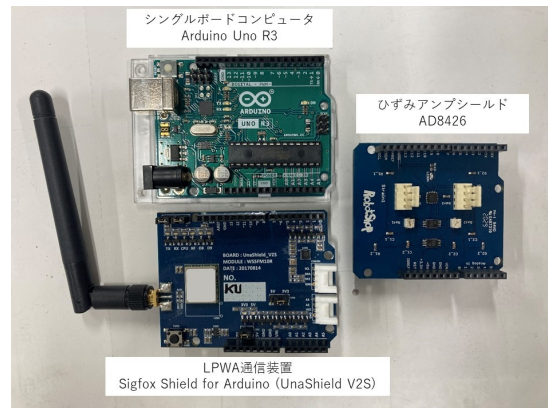
本研究では、LPWAとして、アンライセンスバンドの一種であるSigfoxを用いた。Sigfoxは、日本では免許や登録が不要なサブギガ帯域である920 MHzを利用し、最大10km程度の長距離通信が可能であり、通信可能エリアであれば、基地局やゲートウェイを準備する必要がない。また、対応デバイスが低コストなため、導入しやすいことが特徴である。

(2) 計測機器の構成

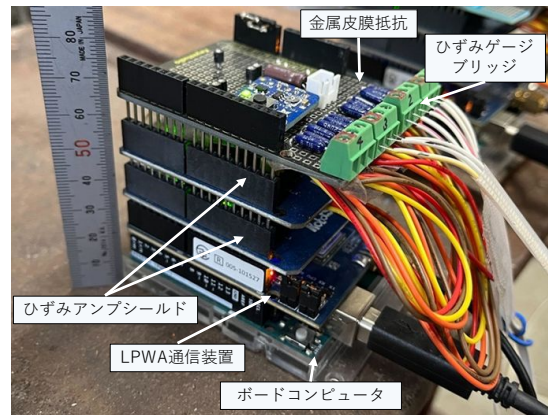
製作した無線ひずみ計測機器の主な構成を表-1、図-1

表-1 機器構成一覧

項目	仕様・品名
ボードコンピュータ	Arduino Uno R3 (Arduino 社)
LPWA 通信装置	Sigfox Shield for Arduino (UnaShield V2S)
ひずみアンプシールド	AD8426 (Robotshop 社)
ひずみゲージ	KFGS-1-120-C1-11 LIM3R (共和電業)
ひずみブリッジ (金属皮膜抵抗器)	金属皮膜抵抗器 120Ω, 許容誤差+0.1% (VISHAY 社)



(a) 計測機器構成部品



(b) 無線ひずみ計測機器

図-1 計測機器構成部品と無線ひずみ計測機器

に示す。シングルボードコンピュータとして、Arduino Uno R3 (Arduino 社)、ひずみ計測のためのアンプシールドとして、2チャンネルひずみアンプシールドAD8426(Robotshop 社)、LPWA通信機器として、Sigfox Shield for Arduino (UnaShield V2S)を用いた。本研究では、図-1のように、Arduino Uno用のシールドを組み合わせ、無線ひずみ計測機器とした。この計測機器では、4ヶ所のひずみデータが計測できるように、ひずみアンプシールドを2つカスケードして利用している。また、ひずみを計測する際に、ゲージ長1 mm、ベース幅24 mmのひ

ひずみゲージ(120Ω)を3線式結線法(リード線の温度影響の補償法)で接続するため、許容誤差±0.1%、温度係数±5ppm/°Cの120Ω金属皮膜抵抗器(VISHAY社製)で、ひずみゲージブリッジを組んだ。

ひずみアンプシールド AD8426 は標準設定でひずみゲージから得られた電圧を495倍に増幅し、ボードコンピュータは0~5Vのアナログ電圧を0~1,023の整数に変換したデータ(2バイト)を出力する。ただし、ひずみアンプシールドの基準電圧(ブリッジ電圧)が3.3Vのため、0~675の整数に変換されたデータが出力される。そのため、ひずみ値を得るには、計測された出力値の整数をひずみに変換する必要がある。出力電圧とひずみの関係は次式で与えられる。

$$\frac{e}{E} = \frac{1}{4} \cdot K_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、

- e : 出力電圧
- E : ひずみアンプシールドのブリッジ電圧(3.3V)
- K_s : 使用するひずみゲージのゲージ率
- ε : ひずみ

製作した無線ひずみ計測機器から計測された出力値と出力電圧の関係を次式に示す。

$$e = \frac{V_{cc} \cdot X}{Par \cdot Amp} \quad (2)$$

ここに、

- V_{cc} : アンプシールドへの供給電圧
- X : 無線ひずみ計測機器の出力値(整数)
- Par : ひずみアンプシールド分割数(1,024)
- Amp : ひずみアンプシールド標準電圧増幅(495倍)

式(1)、(2)より、出力値 X とひずみ ε の関係は次式で与えられる。

$$\varepsilon = \frac{4 \cdot V_{cc}}{E \cdot K_s \cdot Par \cdot Amp} \cdot X \quad (3)$$

この式(3)を用いて、ゲージ率を2.00として計算すると、ひずみは出力値の約 5.98×10^6 倍になる。したがって、出力値が1変化すると、ひずみは約 5.98μ 変化する。また、1.65Vの際の出力値(337)がひずみ値の0に対応するため、ゲージ率によって若干変動するものの、今回製作した無線ひずみ計測機器は、計測できるひずみ範囲が、 $-2,000 \mu \sim 2,000 \mu$ 程度となる。

製作した無線ひずみ計測機器を用いて、実際のひずみを計測する場合には、出力値を計測できるひずみ範囲の中央値に補正するのが良いが、本研究では、ひずみゲージを貼付した時点の初期値からの変化量を指標としているため、以下の試験結果では、初期の出力値を差し引いた値を用いて評価する。

計測データの送信に利用する Sigfox Shield for Arduino (UnaShield V2S)は、ひずみアンプシールドから得られた

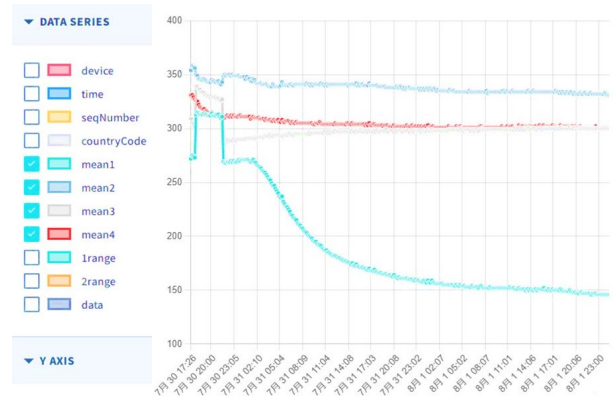


図-2 SORACOM Air for Sigfox 画面の一例

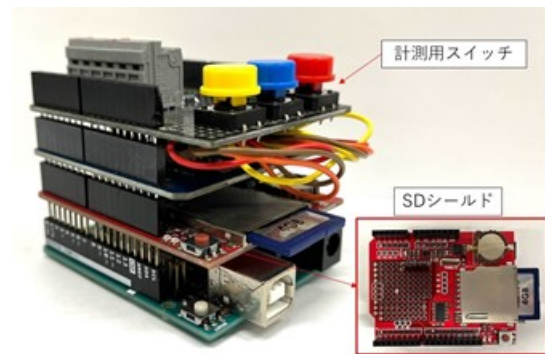


図-3 SDシールドを利用した無線ひずみ計測機器

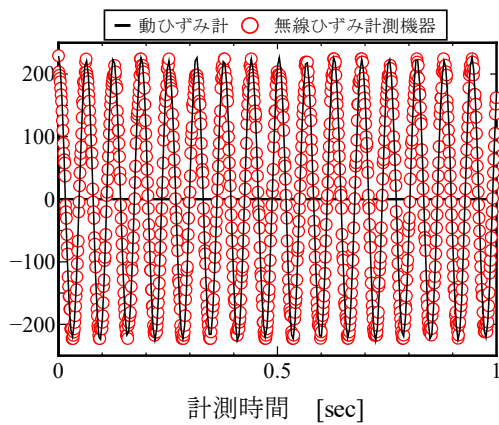
データをLPWAによって、転送するための機器である。

本研究では、WEBプラットフォームとして、SORACOM Air for Sigfox(ソラコムIoTプラットフォーム)¹⁶⁾を利用した。SORACOM Air for Sigfoxは、計測データの蓄積や複数の無線ひずみ計測機器の管理、図-2に示すように、データ送信されたひずみデータをWeb上でモニタリングすることができる。SORACOM Air for Sigfoxは1回の送信でデータ量を12バイト以下、1日のデータ転送回数が最大140回以下にする必要がある。ひずみアンプシールドの1データが2バイトなので、1度の通信で最大6データが送信できる。

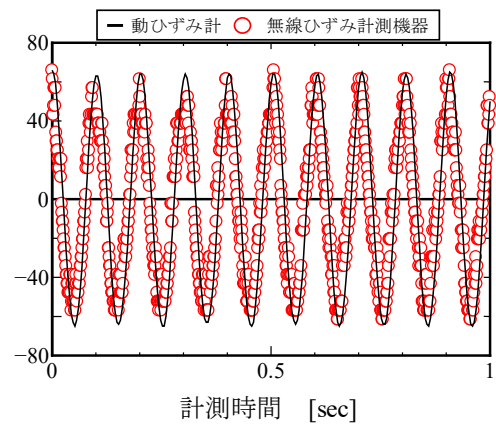
製作した無線ひずみ計測機器は、USBケーブルによる常時給電(5V)と7~12Vの直流による給電に対応している。したがって、バッテリーを用いることで、電源の無い環境でも使用することが可能である。

(3) 無線ひずみ計測機器の基本性能

まず、製作した無線ひずみ計測機器の基本性能を評価するために、図-3に示すような、データを保存するためのSDシールドおよびひずみアンプシールドをシングルボードコンピュータに接続した。ひずみアンプシールドは2,000Hz以上でひずみが計測されているが、SDシールドに1回の計測データを保存できる上限の速度が1ミリ秒であったため、製作した無線ひずみ計測機器では1,000Hzでひずみを計測する。ただし、1,000Hzでひずみ



(a) 振動数 16Hz



(b) 振動数 10Hz

図-4 無線ひずみ計測機器と動ひずみ計で計測されたひずみデータ

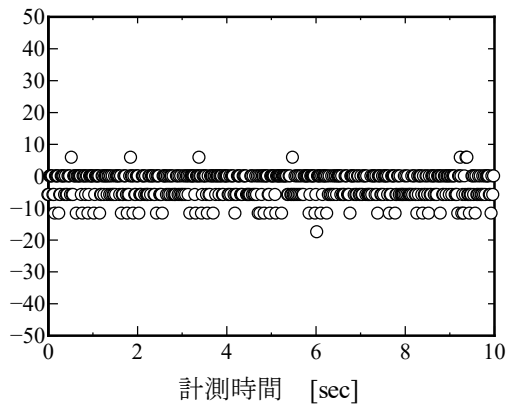


図-5 計測した無荷重時のひずみデータ

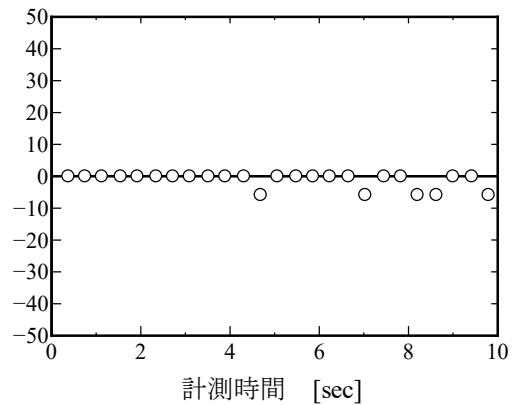


図-6 Median Filter 適用後の無荷重時のひずみデータ

計測した場合、SD に保存する間はデータの取得ができないため、計測データが欠落している。

無線ひずみ計測機器の基本性能を評価するために、後述する面外ガセット溶接継手と板曲げ振動疲労試験機を用いて、振動数 16Hz、10Hz、応力比 $R=-1$ の両振りで試験体を振動させ、ひずみを計測した。

図-4 に、無線ひずみ計測機器から得られた一定振幅で振動させた試験体のひずみデータを示す。参考として、疲労試験などに利用する動ひずみ計(2,000Hz)で計測したひずみ波形も併記している。図-4 からわかるように、16Hz、10Hz とともに、一部のデータが欠落しているが、無線ひずみ計測機器と動ひずみ計で計測したひずみ波形データは若干ノイズの影響がみられるものの、ほぼ一致していることがわかる。したがって、本研究で用いた無線ひずみ計測機器は、疲労試験中のひずみの計測が可能であると考えられる。

(4) Median Filter によるノイズの除去

静止させた面外ガセット溶接継手試験体において、無線ひずみ計測機器によって計測された無荷重時のひずみデータを図-5 に示す。図では計測開始時点のひずみを基準(0 μ)として示している。図より、無荷重時のひずみ

の計測データは 6 \sim 12 μ (出力値: 1 \sim 2)の範囲内ではばらついており、ノイズが計測データに含まれている。

そこで、本研究では、ノイズを除去するために、ノイズフィルタとして Median Filter を用いた。Median Filter は、一定範囲のデータの中央値を代表値とすることで、スパイクノイズのような特異データを除去することに効果的なフィルタである。図-5 の計測データに対して、21 回の計測データに対する Median Filter 適用後のひずみデータを図-6 に示す。図より、Median Filter を利用することで、計測データ数は減るものの、ノイズが 6 μ (出力値: 1)まで低減されていることがわかる。

本研究で利用する板曲げ振動疲労試験機では、通常 15 \sim 20Hz で試験体を振動させて疲労試験を実施する。高速で振動する板曲げ振動疲労試験では、ある計測時間の中で Median Filter を適用した計測を複数回繰返すことで、ノイズを除去したひずみデータの最大値および最小値を計測できると考えた。そこで、2. (3) 節と同様に、面外ガセット溶接継手試験体に対して、板曲げ振動疲労試験機を用いて、試験体を振動させ、ひずみを計測した。振動数は 17Hz および 10Hz とし、それぞれの振動数に対して、21 データの Median Filter を 10 回、20 回、50 回繰返した。それぞれの繰返し回数に達した際の最大値と最小

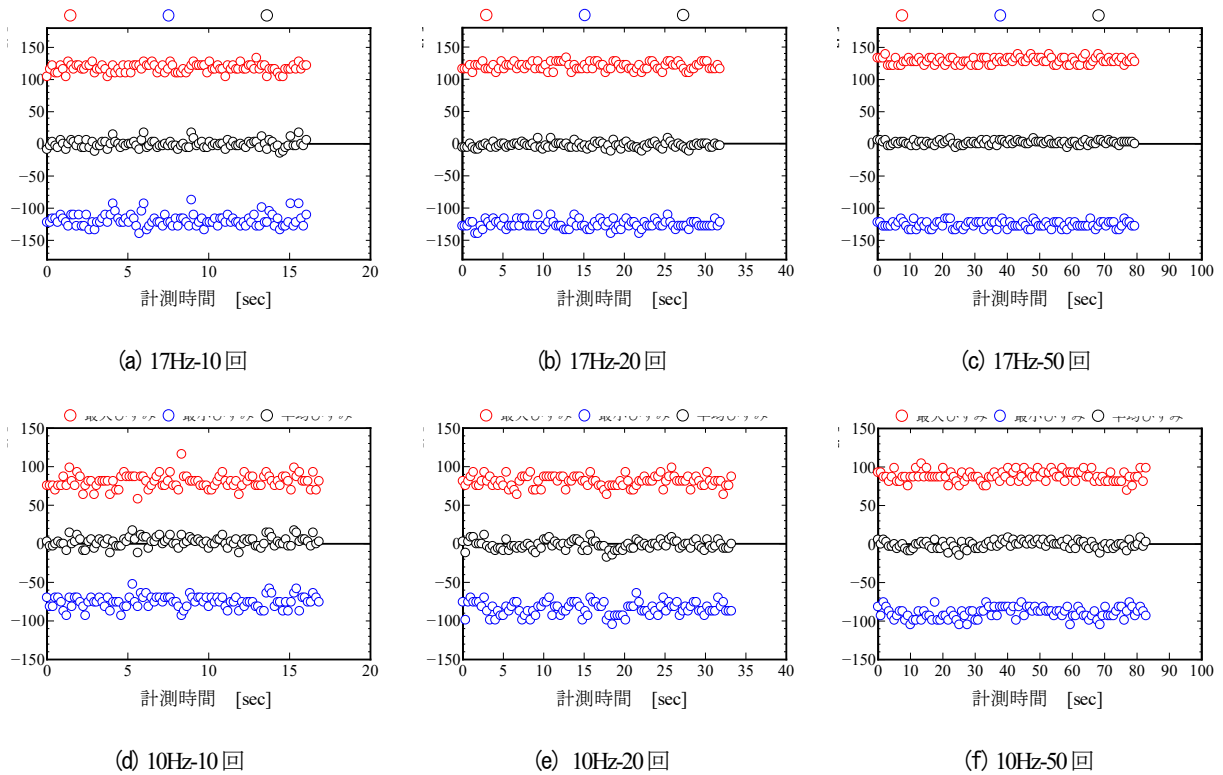


図-7 Median filter を複数回繰返した最大・最小ひずみおよび平均ひずみと計測時間

値からひずみ範囲と平均ひずみを 100 回算出した。それぞれの計測結果から得られた、ひずみ範囲と平均ひずみの標準偏差と計測時間間隔、計測が 100 回終了するまでの経過時間を表-2 に、各計測条件で得られた最大・最小ひずみおよび平均ひずみと計測時間の関係を図-7 に示す。図では、平均ひずみの平均値が 0μ になるようにグラフ全体をシフトさせている。また、図-4 と図-7 では、作用荷重が異なる。表-2、図-7 より、Median Filter の繰返し回数が多いほど標準偏差が小さくなり、最大・最小ひずみおよび平均ひずみのばらつきが小さくなる傾向があることがわかる。また、ひずみ範囲は 12μ 以下、平均ひずみは 7μ 以下に収まっているため、振動数の違いによって、標準偏差に大きな差は生じなかった。経過時間は Median Filter の繰返し回数に依存していることがわかる。そのため、Median Filter の繰返し回数が多い場合、消費電力が多くなることに注意が必要である。

以上より、Median Filter を用いることで、ノイズを除去できることが分かった。Median Filter の繰返し回数を増やすことで、さらにノイズ等のばらつきを低減できると考えるが、本研究の疲労試験では、PC から電源を供給していること、17Hz 程度で振動させていることから、繰返し回数を 50 回として、疲労試験時の最大および最小ひずみを、無線ひずみ計測機器で計測した。ただし、実橋では、スパイクノイズ等の特異データを除去する目的で Median Filter を適用するため、計測時間短縮や消費電力削減を考慮し、Median Filter を用いるデータ数とその繰

表-2 Median Filter の繰返し回数と標準偏差と時間の関係

振動数	繰返し回数	標準偏差		計測間隔 (sec)	経過時間 (sec)
		ひずみ範囲	平均ひずみ		
17Hz	10 回	11.080	5.980	0.162	16.0
	20 回	8.761	4.177	0.321	31.8
	50 回	8.237	3.079	0.801	79.3
10Hz	10 回	10.912	6.272	0.170	16.8
	20 回	10.769	5.665	0.336	33.2
	50 回	10.438	4.761	0.836	82.8

返し回数は少なくても良いと考える。

3. 疲労試験

(1) 試験概要

LPWA を用いた無線ひずみ計測による疲労損傷モニタリングの評価確認として、本研究では、面外ガセット溶接継手試験体を用いた板曲げ疲労試験を実施した。

本疲労試験で用いる面外ガセット溶接継手試験体は、文献 14)と同様に、図-8 に示すような、厚さ 12mm、幅 200mm の主板(SM490Y)に、厚さ 12mm、高さ 100mm のガセットプレート(SM490Y)が、半自動 CO_2 ガスシールドアーク溶接(電流 320A、電圧 37V、速度 24.0 cm/min、下向き)されている。まわし溶接部では、溶接の継ぎを設け

表-3 鋼材の機械的性質と化学成分

鋼種	板厚	降伏応力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	化学成分(%)				
					C	Si	Mn	P	S
SM490Y	12	431	549	25	0.16	0.28	1.32	0.009	0.004

ていない。すみ肉溶接は等脚長の 6mm としている。本疲労試験で用いた鋼板の機械的性質を表-3 に示す。

疲労試験には、板曲げ振動疲労試験機^{17) 18)}を用いた。

図-8 に、本疲労試験のひずみ計測位置を示す。LPWA を用いた無線ひずみ計測位置(青色)は、溶接止端近傍の軸方向のゲージ AL、軸直角方向のゲージ AT、その位置から試験体の幅方向に 50mm の位置のゲージ B、主板裏面のゲージ F および溶接止端ビード部のゲージ G の位置とし、最大・最小ひずみを 10~15 分に 1 度計測する。ひずみゲージは、ゲージ長 1mm、ベース幅 φ5mm の 2 方向ゲージ(3 線式)およびゲージ長 1mm、ベース幅 2.4mm の単軸ゲージ(3 線式)を利用した。本疲労試験では、USB ケーブルを用いた PC からの常時給電とした。また、本疲労試験では、SD シールドを用いていないため、無線ひずみ計測機器は、2,000Hz 以上の計測となっている。

計測結果の比較として、動ひずみ計を用いた計測(赤色)も実施した。動ひずみ計を用いた計測は、文献 14)と同様に、ゲージ A~E, F または G を貼付し、無線ひずみ計測機器を用いた計測と同様に、10~15 分に 1 度、2,000Hz で 4,096 データ(約 2 秒)を取得した。ただし、無線ひずみ計測機器と動ひずみ計を用いたひずみ計測の位置は、軸直角方向に 5mm 程度離れている。

本疲労試験では、文献 14)と同様に、ひずみゲージ B, C から計測された载荷初期のひずみ範囲の平均値に鋼材のヤング係数($E_s=200\text{ kN/mm}^2$)を乗じて、公称応力範囲とした。また、全て応力比 $R=-1$ で実施したため、平均ひずみが無荷重時のひずみとなる。

(2) 疲労寿命の定義

本疲労試験では、図-9 に示すように、まわし溶接部の止端に φ0.05mm の銅線を貼付し、疲労き裂が発生し、銅線が断線した段階の繰返し回数を N_{bc} 、まわし溶接部の止端から発生した疲労き裂が溶接部から離れて主板に進展し始め、溶接のすみ肉溶接部に沿って試験体軸方向に貼付した銅線が断線した段階の繰返し回数を N_b 、疲労き裂が溶接止端部から 10mm 離れた位置に貼付した銅線が断線した段階の繰返し回数を N_{10} と定義した。 N_b , N_{10} は、左右で先に断線した繰返し回数としている。疲労試験は、疲労き裂が N_{10} に達した段階で終了した。

本疲労試験の結果の一覧を表-4 に示す。

(3) 疲労強度

図-10 に、本疲労試験から得られた疲労寿命 N_{10} に対す

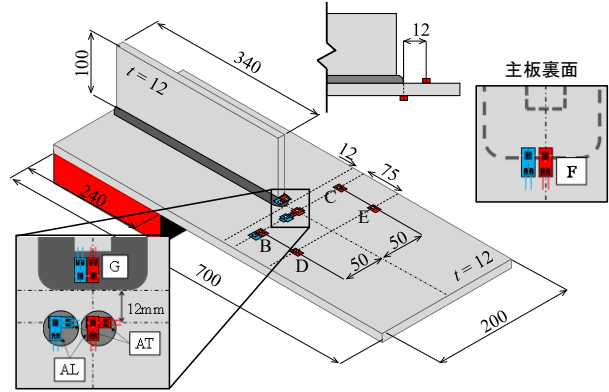


図-8 試験体寸法とひずみゲージ貼付位置

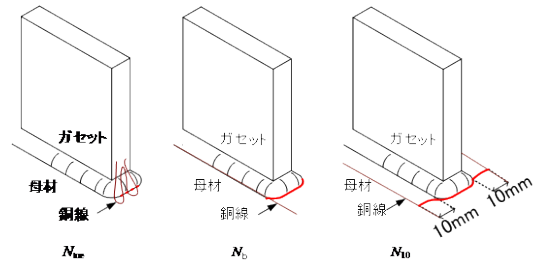


図-9 疲労寿命の定義

表-4 試験体と疲労試験結果

試験体	応力範囲 (N/mm ²)	疲労強度($\times 10^4$ 回)		
		N_{bc}	N_b	N_{10}
AW150	151.1	4.1	11.5	17.8
AW110	111.3	7.2	27.9	49.5
AW95	94.6	45.1	60.0	110.0
AW70	70.6	42.4	124.0	196.9

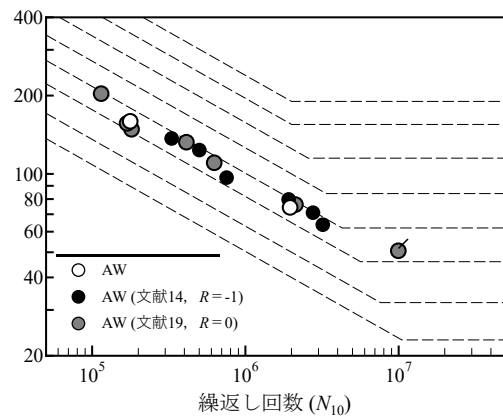


図-10 疲労寿命 N_{10} に対する S-N 関係

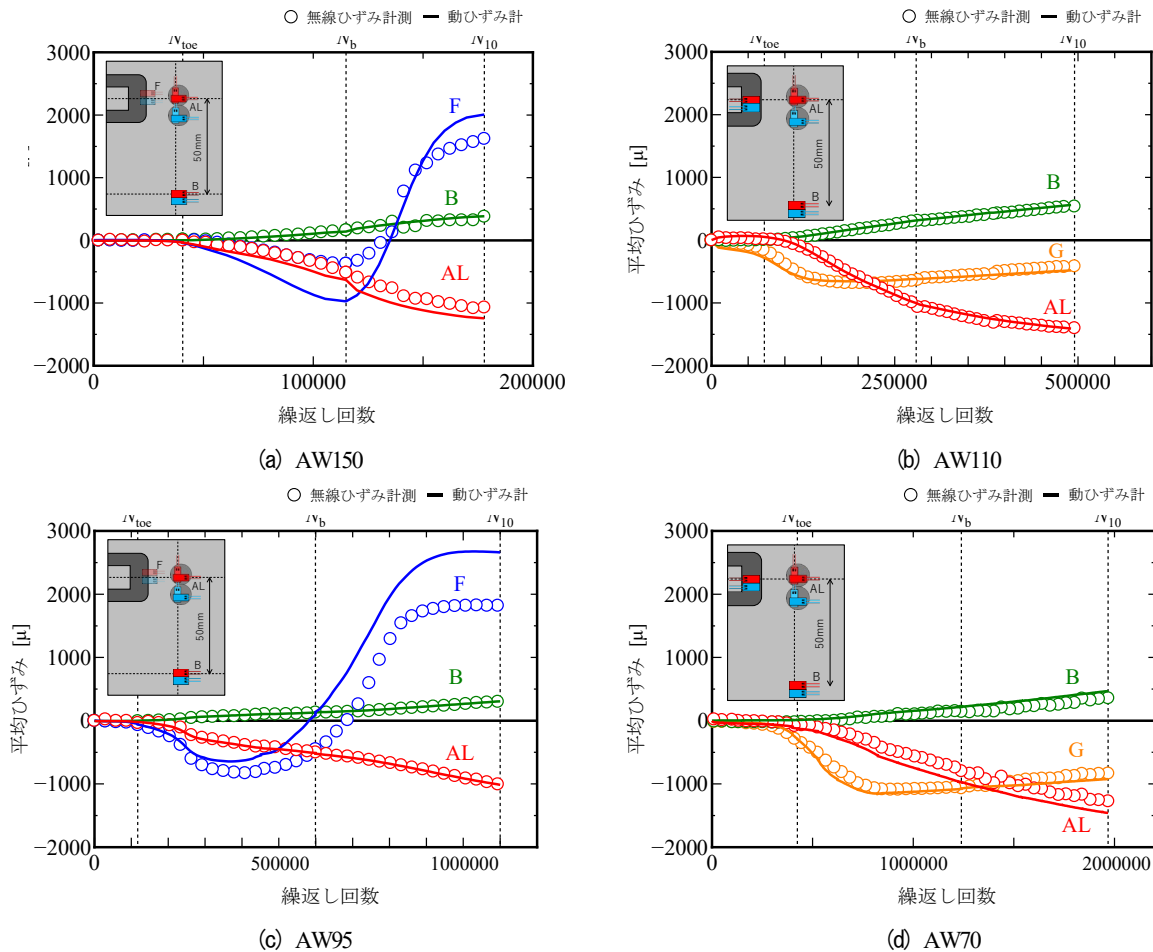


図-11 疲労試験から得られた平均ひずみと繰返し回数

る $S-N$ 関係を示す. 図には, 過去に同寸法の試験体で実施された疲労試験結果¹⁴⁾と応力比 $R=0$ で実施された疲労試験結果¹⁹⁾もプロットしている. 図-10 より, 本疲労試験で利用した試験体は, これまでの疲労試験と同程度の疲労強度であることがわかる.

(4) 平均ひずみの変化

疲労試験において, LPWA を用いた無線ひずみ計測から得られた平均ひずみの変化と繰返し回数の関係を図-11 に示す. 試験体 AW150, AW95 では, ゲージ AL, B, F の位置, 試験体 AW110, AW70 はゲージ AL, B, G の位置の計測結果を示している. 図には, 動ひずみ計を用いて計測された平均ひずみの変化, 各き裂の長さに対する疲労寿命も示している.

図-11 より, 文献 14) と同様に, 引張残留応力領域であるゲージ AL の平均ひずみは圧縮側に変化し, 圧縮残留応力領域であるゲージ B の平均ひずみは引張側に変化している. 主板裏面のゲージ F の平均ひずみは, 一度圧縮側に変化するが, その後引張側に変化している. 溶接止端ビード部のゲージ G の平均ひずみは, 他の計測位置よりも繰返し回数が少ない段階から減少し, その後増加する傾向が見られた. さらに, 図-11 より, AW150 および

AW70 のゲージ AL では, 無線ひずみ計測と動ひずみ計を用いた計測の平均ひずみの計測値には, 若干の差が生じているが, 無線ひずみ計測と動ひずみ計のひずみゲージを入れ替えて確認した結果, ひずみゲージの貼付位置の違いによる影響であることがわかった.

ゲージ F を貼付した主板裏面では, 少しの位置の違いで残留応力が異なる²⁰⁾ため, 動ひずみ計と無線ひずみ計測の計測値に差が生じたと考える. また, 試験体 AW95 では, ゲージ F の平均ひずみの変化が大きく, 無線ひずみ計測機器で計測できるひずみの範囲を超えたため, 試験終了付近の平均ひずみの変化が一定になった.

次に, 溶接止端近傍に貼付した試験体軸方向と試験体軸直角方向の 2 方向ゲージ AL, AT から得られた平均ひずみの変化と繰返し回数の関係を図-12 に示す. 図より, ゲージ AL の平均ひずみは減少, ゲージ AT の平均ひずみは増加することがわかる. これは, 溶接止端部近傍の残留応力が, 試験体軸方向では引張残留応力, 試験体軸直角方向では圧縮残留応力であるためである. 試験体 AW150, AW70 での計測方法による差は前述の通り, 2 軸ゲージを並べて貼付したため, 計測位置の差が生じたと考える.

ゲージ AL と B または AL と AT の計測は, 平均ひずみ

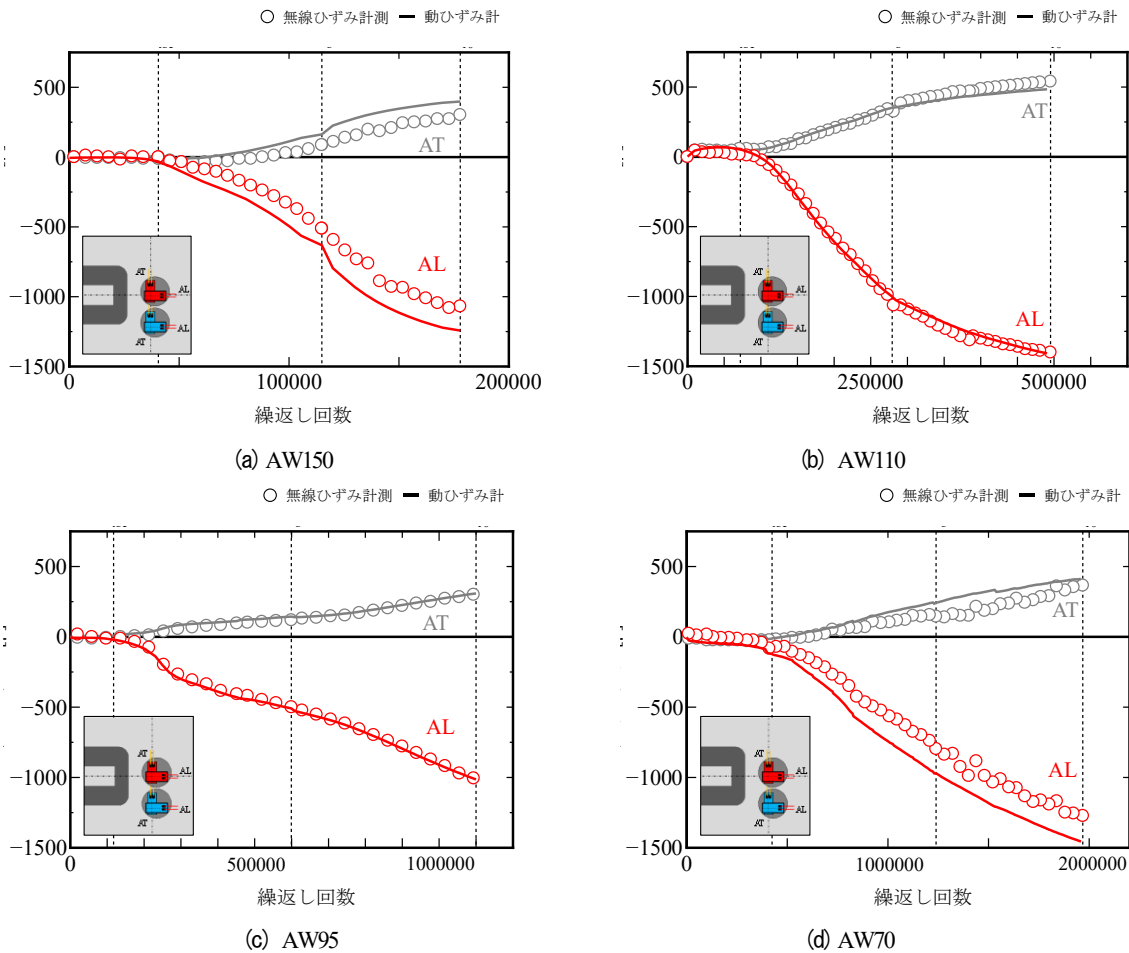


図-12 軸方向と軸直角方向の2方向ゲージから得られた平均ひずみと繰返し回数との関係

の減少と増加が確認できるため、温度変化による影響と疲労き裂発生による影響を区別できる可能性がある。

以上より、疲労試験において、LPWAを用いた無線ひずみ計測と動ひずみ計の平均ひずみの変化の傾向が同様であったことから、疲労き裂の発生・進展をモニタリングすることが可能と考える。

(5) 試験機を静止して計測したひずみの変化

試験体 AW70 では、繰返し回数 10 万回ごとに試験機を停止させ、動荷重が載荷されていない状態で、無線ひずみ計測機器および動ひずみ計を用いて、無荷重時のひずみを計測した。試験体 AW70 から得られた無荷重時のひずみと繰返し回数の関係を図-13 に示す。図より、試験機を停止させて計測した無荷重時のひずみは、図-11 (d) で示した試験体 AW70 の平均ひずみと同様な変化であることがわかる。N₁₀に着目すると、無荷重時のひずみと平均ひずみの変化量はほぼ同じであった。

したがって、載荷荷重や載荷位置がランダムである道路橋においても、LPWAを用いた無線ひずみ計測によって、無荷重時のひずみを定期的に計測することで、疲労き裂検知モニタリングが可能であると考えられる。

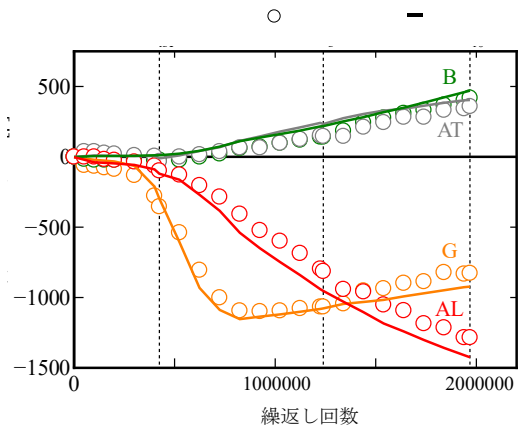


図-13 無荷重時のひずみと繰返し回数との関係

4. 無線ひずみ計測機器を利用した長期計測

実橋において、電源の確保が難しい場合は、無線ひずみ計測機器をバッテリーによって駆動させる。しかし、製作した無線ひずみ計測機の消費電力(ひずみ計測時 500mW 以上)を考えると、バッテリーのみで長期間のモニタリングを行うことは困難である。そこで、低電力で駆動するタイマーを利用することにより、無線ひずみ計測機器を2時間に1回のみ起動させて、バッテリーの消

耗を抑えてひずみを計測した。また、温湿度計(DHT11)を無線ひずみ計測機に接続し、温度変化も計測した。図-14のように、防水ボックスに無線ひずみ計測機器とバッテリー(2500mAh/エネルーブ PRO×4本)を格納し、背合わせで縦置きした面外ガセット試験体の無荷重時のひずみのモニタリングを行った。試験体は、溶接したまま(As-welded)で疲労き裂が発生していない面外ガセット試験体 AW と疲労き裂が N_{10} まで進展した面外ガセット試験体 N10 を用いた。貼付したひずみゲージは3線式結線法のリード線温度補償を用いて、ひずみゲージをVMテープでカバーし、エポキシ樹脂でコーティングして防水加工を施している。

図-15 に試験体 AW, N10 で計測された無荷重時のひずみと温度の約5か月間の計測結果を示す。計測位置は、図-8 に示した、ゲージ AL, B とした。

図-15 より、試験体 AW, N10 とともに、気温の変化に伴って、無荷重時のひずみが減少し、最大で約 50μ 変化した。温度変化によるひずみ変化は、試験体内で温度に差が生じた場合などの物理的なひずみだけでなく、温度変化によるブリッジやボードコンピュータに用いられている抵抗値の変化の影響、ひずみゲージ自体の温度依存性の影響が考えられる。しかし、疲労き裂による無荷重時のひずみの変化(図-13)と比較すると、温度変化による無荷重時のひずみの変化は十分小さかったため、日および年の変動を把握できれば、疲労き裂の検出には大きな影響を与えないと考える。

本研究の長期計測では、約150日でバッテリーが切れ、計測不能となった。本計測構成で、約2時間に1度の計測を行った場合は6~7ヵ月の計測にとどまるが、1日に1度の計測など計測間隔を長くすることで、数年間、バッテリーのみで長期計測が可能である。今回は、疲労試験に用いた 120Ω のひずみゲージを用いて長期計測を実施したが、消費電力を抑えるために、長期計測では 350Ω のひずみゲージを用いるのが良い。

6. 結論

本研究では、汎用の電子部品を組み合わせて製作した LPWA 通信が可能な無線ひずみ計測機器を用いて、疲労き裂検知モニタリングおよびバッテリーによる駆動による動作確認を行った。本研究の範囲内で得られた主な知見を以下に示す。

1) 製作した計測機器は、SD シールドを用いた計測によって $1,000\text{Hz}$ でひずみを計測できるが、保存する間の一部データが欠落する。また、計測時に Median filter を適用することで、スパイクノイズ等の特異データを除去できる。

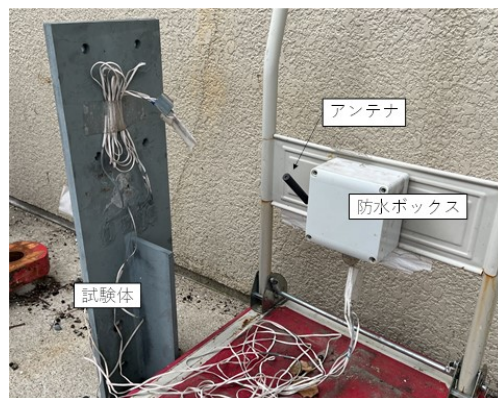
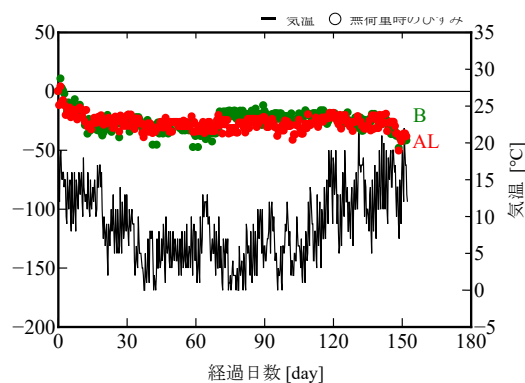
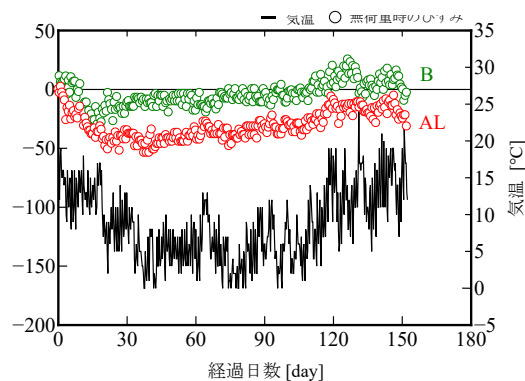


図-14 長期計測試験状況



(a) 試験体 AW



(b) 試験体 N10

図-15 無荷重時のひずみと温度の長期計測結果

- 2) 疲労試験において、LPWA を用いた無線ひずみ計測によって、無荷重時のひずみの変化を計測することで、疲労き裂の発生・進展のモニタリングが可能であった。
- 3) 屋外に静置した試験体をバッテリーによる駆動で無線ひずみ計測した結果、温度変化によるひずみ変化が確認されたが、本試験の設置状況では、疲労き裂の発生によって変化する無荷重時のひずみと比較すると、大きな変化ではなかった。

本研究では、計測位置として、溶接止端部近傍に着目し、疲労き裂のモニタリング試験を行った。実橋では、

疲労き裂の発生だけでなく、すでに発生している疲労き裂の進展をモニタリングすることが考えられる。溶接止端部近傍の無荷重時のひずみ計測は、疲労き裂の発生の検知には適しているが、すでに疲労き裂が発生していた場合、残留応力の一部が解放されているため、その後の疲労き裂進展に対しては、無荷重時のひずみの変化量が小さくなる。したがって、疲労き裂の進展モニタリングでは、疲労き裂のき裂先端近傍の無荷重時のひずみ計測や銅線等の断線を用いた検知など目的に応じた検知方法を適用する必要がある。

謝辞

本研究は、関西大学教育研究高度化推進費を受けて実施した。ここに記して、謝意を示す。

REFERENCES

- 1) 日本道路協会：道路橋補修・補強事例集(2009年版)，丸善出版，2009.
- 2) 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の疲労対策技術，鋼構造レポート 22，2013.
- 3) 山田健太郎，石川敏之，柿市拓巳：疲労き裂を閉口させて寿命を向上させる試み，土木学会論文集 A，Vol.65，No.4，pp.961-965，2009.
- 4) 石川敏之，山田健太郎，柿市拓巳，李 薈：ICR 処理による面外ガセット溶接継手に発生した疲労き裂の寿命向上効果，土木学会論文集 A，Vol. 66，No.2，pp.264-272，2010.
- 5) 土木学会 鋼構造委員会：鋼橋の性能照査型維持管理とモニタリング，鋼構造シリーズ 31，2019.
- 6) 伊藤裕一，伊東真一：鋼橋の応力監視装置の開発，土木施工，Vol.58，pp.97-100，2017.
- 7) 松本和之：東京ゲートブリッジの維持管理計画，土木施工，Vol.53，pp.80-84，2011.
- 8) 三木千壽，鈴木啓悟，小野潔，柳沼安俊：疲労損傷の疑いのある橋梁の応力測定，土木学会論文集 F，Vol.66，No.3，pp.337-350，2010.
- 9) 森近翔伍，関屋英彦，葉山瑞樹，Yanjie ZHU，永井政伸：圧電素子センサおよび MEMS 加速度センサを活用した鋼橋の疲労損傷検知に関する研究，土木学会論文集 A2(応用力学)，Vol.77，No.2(応用力学論文集 Vol.24)，pp.I-525-I-533，2021.
- 10) 小林亘，大原美保：LPWA を用いた市街地でのリアルタイム浸水モニタリングに関する研究，土木学会論文 F3(土木情報学)，Vol.75，No.1，pp.36-47，2019.
- 11) 関屋英彦，木ノ本剛，高木真人，丸山収，三木千壽：LPWA を活用した鋼箱桁橋における無線計測に関する基礎的研究，土木学会論文 F3(土木情報学)，Vol.76，No.1，pp.53-62，2020.
- 12) 森近翔伍，関屋英彦，高橋慶多，三上貴仁：非接触型センサと LPWA 無線測定器を用いた小河川における水位計測の現場実証，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.2，No.1，pp.151-157，2023.
- 13) 齋藤豪，安川和利：専用断線ゲージを用いた疲労き裂進展の遠隔監視手法の検討，令和元年度土木学会全国大会第 74 回年次学術講演会，I-205，2019.
- 14) 石川敏之，松本直樹：疲労き裂の発生・進展による無荷重時のひずみ変化の評価，構造工学論文集 Vol. 68A，pp.554-563，2022.
- 15) 総務省：平成 30 年版情報通信白書，pp.13，日経印刷，2018.
- 16) SORACOM：SORACOM Air for Sigfox，<https://soracom.jp/services/air/sigfox/>，2024 年 1 月 5 日閲覧
- 17) 山田健太郎，小藺江朋亮，小塩達也：垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験，鋼構造論文集，Vol.14，No.55，pp.1-8，2007.
- 18) 山田聡，渡辺直起，山田健太郎，小塩達也：簡易型振動試験機の開発と適用試験，トピー工業技報，No.24，pp.15-22，2008.
- 19) 日本鋼構造協会：鋼橋の強靱化・長寿命化に向けた疲労対策技術資料，JSSC テクニカルレポート No.120，2020.
- 20) 石川敏之，櫻井勇太，横田貴大，藤井通之，松村寿男：溶接部近傍の残留応力計測によるき裂検出，鋼構造年次論文報告集，第 25 巻，pp.538-545，2017.

(Received September 30, 2023)

(Accepted November 30, 2023)

DEVELOPMENT OF FATIGUE CRACK DETECTION MONITORING USING LPWA

Naoki MATSUMOTO, Toshiyuki ISHIKAWA, Kazuki KOMON and Naoshi UEDA

In actual bridge, fatigue cracks are detected by magnetic particle testing, when the crack in the paint is observed. However, the investigation of fatigue cracks needs much cost. Therefore, the low-cost and remote fatigue crack detection techniques are required. In this paper, a fatigue crack monitoring system using IoT was proposed, and developed a strain logger using a single board computer and a strain amplifier shield. This device can measure the strain for a long time and transmit the recorded data via LPWA (Low Power Wide Area). It was confirmed that the fatigue crack initiation and propagation were able to monitor fatigue tests using the developed strain logger. In addition, it was shown that the developed device can be long-term monitoring with a battery.