

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 31 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26282097

研究課題名(和文) 多点損傷センシングおよびワイヤレス化に対応した小型ひずみ計測センサの開発

研究課題名(英文) Development of Small Type of Wireless Strain Sensor for Large-scale Damage Sensing

研究代表者

宇都宮 登雄 (UTSUNOMIYA, TAKAO)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号：60176708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：CMOSインバータ発振回路を組み込んだ小型センサを用い、ひずみ計測用ゲージとダミーゲージの出力差分を求めることで、ブリッジ回路と同程度のひずみ計測が可能となることを示した。続いて、この小型センサのひずみ計測値をワイヤレスでデジタル出力できる形式に発展させた。また、高サンプリング周波数で計測可能なレシプロカル法を採用した発振回路ひずみセンサを開発した。そして、これらの発振回路ひずみセンサにより、繰返し荷重を受ける試験部材の損傷状況の検出が可能であることを示した。さらに、発振回路ひずみセンサによる、静ひずみ、動ひずみの適切な計測手法を導いた。

研究成果の概要(英文)：Using the manufactured small type of sensor using a CMOS inverter oscillator circuit, it was shown that, by taking the difference of both outputs of dummy gauge and a strain gauge for measurement, strain can be measured with same accuracy as that by ordinary bridge circuit system. Next, the small type of strain sensor for wireless transmitting digital strain output was developed. For improvement of the sampling frequency, the strain measurement sensor combining CMOS inverter oscillator circuits and the reciprocal counting method was constructed. In addition, it was shown that the damage of the specimen under cyclic load can be detected based on the strain measurement by these sensor using CMOS inverter oscillator circuits. Moreover, the method for measuring static strain and dynamic strain with sufficient accuracy by the strain sensor using CMOS inverter oscillator circuits was derived.

研究分野：耐環境構造工学

キーワード：安全システム 防災 ヘルスモニタリング

1. 研究開始当初の背景

構造物/建築物は長時間の使用による構成部材の劣化や、荷重の変動によって部材中にき裂が発生・成長（疲労破壊）し、破壊・破損は起こる。このき裂発生・成長の状況は、それらに起因した部材中のひずみの時間的変化を計測することにより検出・把握できることが示されている。

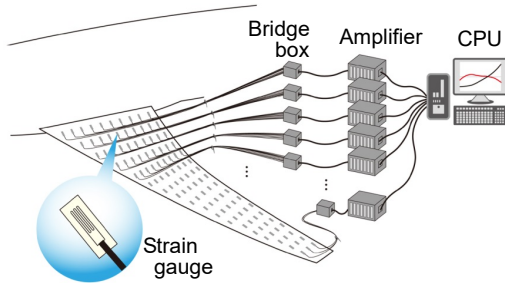


図1 現状機器による大規模ひずみ計測

図1は、現状のひずみゲージとホイートストンブリッジ回路を組み合わせた計測システムを、構造物等におけるひずみ計測に適用した場合の概念図である。このシステムは精度・信頼性の点で優れているが、大規模な計測では、ひずみゲージからブリッジ回路、その微小電圧変化を増幅するためのアンプまでの配線の手間や電源の準備などセットアップの手間が膨大なものとなる。

それに対し、代表者らは、ひずみゲージとCMOSインバータ発振回路を組み合わせ、ゲージの抵抗値変化を発振周波数の変化で捉えて計測するシステムを提案した。本システムは、アンプ・A/Dコンバータなどが不要となるため小型化ができ、またワイヤレス化も容易で、大規模なひずみ計測や可動構造物のひずみ計測で有効になることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、ワイヤレスによる多点計測に利用可能な、発振回路を用いた小型センサを構築するため、以下の開発・検討を行う。

(1) 発振回路を用いた計測システムは、環境温度変化を含めた外乱の影響を受けやすい。この外乱を除去し、静ひずみ計測において、ブリッジ回路によるひずみと同程度の値が得られる計測システムを確立する。

(2) センサ内部にマイコンチップおよびワイヤレスモジュールを搭載して、ひずみ計測値をワイヤレスで出力できる発振回路小型ひずみセンサを作製する。

(3) 高サンプリング周波数での計測が可能なレシプロカルカウンタ法（以下レシプロカル法）を採用した発振回路ひずみセンサを開発する。

(4) 発振回路小型ひずみセンサおよびレシプロカル法による発振回路ひずみシステムを用いて、試験部材の疲労損傷センシングが可能であることを示す。

(5) 直接計測法およびレシプロカル法を用いた発振回路ひずみセンサによる、静ひずみ、

動ひずみの適切な計測手法を導出する。

3. 研究の方法

(1) 既作製の、1つの発振回路を持つ初期段階小型ひずみセンサ（図2参照）を用いて、引張り荷重下のひずみ計測試験を実施する。本試験では、ひずみ計測用のゲージに加えて外乱計測用のダミーゲージを用い、両者の出力の差分を計測することにより、ひずみ出力における外乱除去の可能性を検討する。

(2) 内部にひずみ計測用と外乱計測用の2つの発振回路と、マイコンチップを搭載し、出力としてひずみ値をデジタル出力できる第1段階小型ひずみセンサを試作する。このセンサを用いたひずみ計測試験を行い、計測精度の検証を行う。

(3) ワイヤレスモジュールを組込んだ第2段階小型センサの試作を行う。このセンサのワイヤレスによる計測精度を検証した後、繰返し荷重下の損傷センシング試験に適用する。本センサによってき裂長さにとまらぬひずみ出力変化を調査し、損傷状況の検出可能性を検討する。

(4) 発振回路小型ひずみセンサで用いている直接計測法のサンプリング周波数は低い（1 Hz）ため、高サンプリング周波数での計測が可能なレシプロカル法を用いた発振回路ひずみセンサを作製する。

(5) 第2段階小型センサおよびレシプロカル法を用いたひずみセンサにより計測したひずみとサンプリング周波数の関係をもとに、静ひずみおよび動ひずみを精度よく計測するための2つのセンサの使用法を検討する。

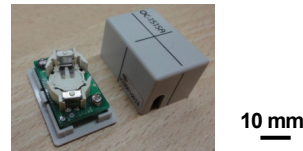


図2 初期段階小型ひずみセンサ

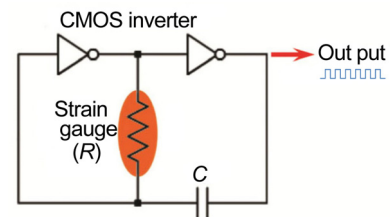


図3 CMOSインバータを用いた発振回路

4. 研究成果

(1) ひずみ計測原理

図3に、CMOSインバータを用いた発振回路の模式図を示す。この発振回路の出力である発振周波数 f と抵抗値 R には、次式の関係が成り立つ。

$$R \times f = \frac{1}{C \left\{ \ln \left(\frac{2E - V_{TH}}{E - V_{TH}} \right) + \ln \left(\frac{E + V_{TH}}{V_{TH}} \right) \right\}} \quad (1)$$

ここで、 C はキャパシタ容量、 V_{TH} はCMOSインバータのスレッシュホールド電圧、 E は印加

電圧である。一方、抵抗にひずみゲージを用いた場合、ひずみ ε と抵抗値変化 ΔR の関係は、ゲージ率 K とゲージ抵抗値 R を用いて次式で表される。

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon \quad (2)$$

式(1)、(2)より、発振回路の周波数変化 Δf とひずみ ε の関係として式(3)を導くことができ、発振回路の Δf を計測すれば、この式によりひずみの値を算出できることになる。

$$\varepsilon = -\frac{\Delta f}{K \cdot f} \quad (3)$$

式(1)の R は、回路自身が内部抵抗を有しているためひずみゲージの抵抗値と一致しない。そこで、3種類の基準ひずみ値に対する抵抗基準抵抗を用いて、回路の周波数変化とひずみの1次関数の傾き k を最小二乗法で求め、ひずみ算出に用いた。

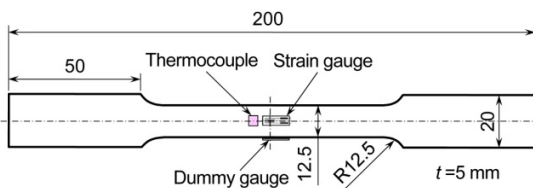


図4 試験片形状

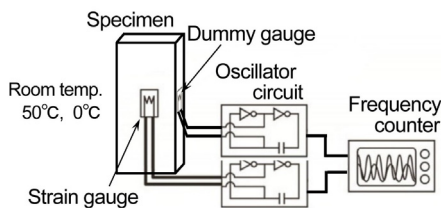


図5 ひずみ計測システム

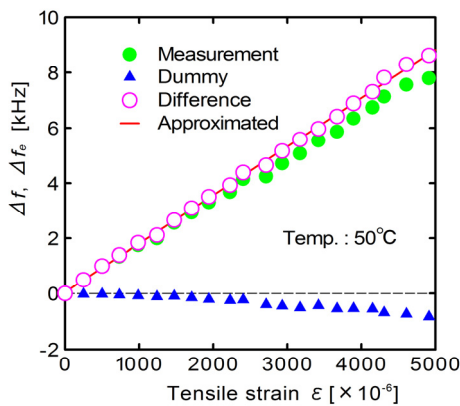


図6 ひずみ計測用ゲージおよびダミーゲージの周波数変化とひずみの関係

(2) ダミーゲージを併用したひずみ計測

図4, 5に、それぞれ、試験片形状、初期段階小型ひずみセンサを用いた計測システム概要を示す。試験片表面には、ひずみ計測用ゲージ(350 Ω)を貼付し、それと同種のダミーゲージを計測用ゲージの近傍側面に、ひずみの影響がない程度にセロハンテープで貼付した。ダミーゲージにより外乱に起因する周波数 Δf_e を計測する。ひずみ ε は、ひずみの

ないときの基準周波数を f_{ref} 、ひずみ計測用ゲージの抵抗値変化にともなう周波数を f とすると、次式により算出できる。

$$\varepsilon = k \times (\Delta f - \Delta f_e) = k \times \{ (f_{ref} - f) - \Delta f_e \} \quad (4)$$

周波数の計測は、一定時間でのひずみ計測信号のパルス数を数える直接計測法により行う。試験片温度は、室温、0°C、50°Cに設定した。図6に、試験結果の例として、50°Cにおける、ひずみ計測用ゲージおよびダミーゲージで計測された周波数変化 Δf 、 Δf_e とひずみの関係を示す。この図より、ひずみ計測用ゲージの Δf とダミーゲージの Δf_e の差を取ることによってほぼ線形の関係が得られることがわかる。図7に、この差分をもとに算出したひずみ値と引張り応力の関係の例として50°Cでの結果を示す。図には、参考のために、120 Ωのひずみゲージを用いたブリッジ回路による計測値も示しているが、ダミーゲージにより外乱の影響を計測することにより、ブリッジ回路と同程度の計測が可能であることがわかる。なお、室温、0°Cにおいても同様の傾向が得られた。

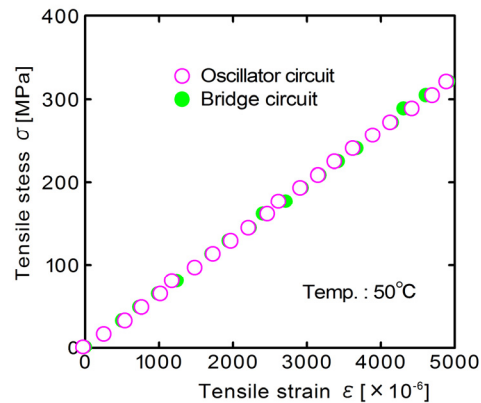


図7 ひずみ計測値と引張り応力の関係(50°C)

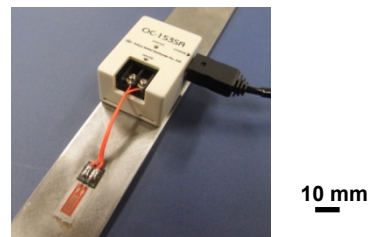


図8 第1段階小型ひずみセンサ

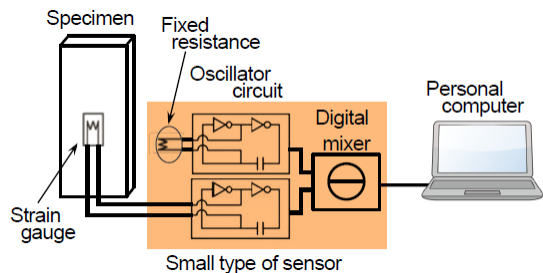


図9 第1段階ひずみセンサを用いた計測システム

(3) デジタル出力できる小型ひずみセンサ

図8, 9に、それぞれ、内部に2つの発振回

路と、マイコンチップを有し、算出したひずみ値をデジタル出力できるようにした第1段階小型ひずみセンサおよび計測システム概要を示す。このセンサは、内部に計測用ひずみゲージと同じ抵抗値 (350 Ω) を持つ固定抵抗を有し、この抵抗で外乱の影響を計測するようにした。またセンサは、内蔵バッテリーまたは外部電源により動作可能であるが、試験では安定化電源を用いた。試験片温度は、室温、0°C、50°Cに設定した。図10に、計測結果の例として、室温での、引張り荷重とひずみ計測値の関係を示す。図には、参考のため、ブリッジ回路による計測値も示す。この図より、小型センサによる値は、ブリッジ回路による値とほぼ一致していることがわかる。なお、50°C、0°Cにおいても、またひずみ計測を弾塑性域まで拡張しても同様の傾向が得られた。

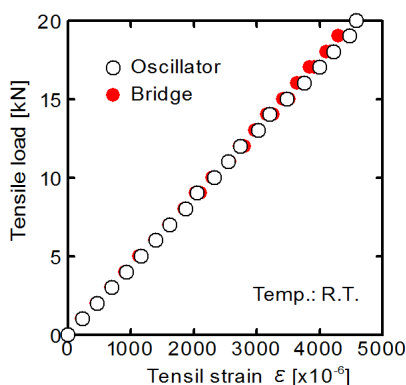


図10 ひずみ計測値と引張り荷重の関係 (第1段階ひずみセンサ, 室温)



図11 第2段階小型ひずみセンサ

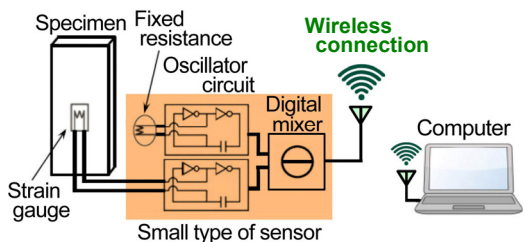


図12 第2段階ひずみセンサを用いた計測システム

(4) ワイヤレス化した小型ひずみセンサ

図11, 12に、それぞれ、内部にマイコンチップを搭載してひずみ値を算出し、有線接続または Bluetooth によりワイヤレスでデジタル出力できるようにした第2段階小型ひずみセンサ、および計測システム概要を示す。図13に、計測結果の例として、引張り荷重とひずみの計測値の関係を示す。図には、外乱の影響

響 $\Delta f_e=0$ とした結果 (図中の○), 固定抵抗により外乱の影響 Δf_e を計測することを試みた結果 (図中の◆)を示す。また、参考のため、ブリッジ回路による計測値 (図中の●)も示す。この図より、荷重とひずみには線形関係が得られ、 $\Delta f_e=0$ とした計測値 (○)は、ブリッジ回路による値とよく一致していることがわかる。このように、ワイヤレス化されたセンサによっても十分な精度でひずみ計測は可能であった。しかしながら、 Δf_e を考慮した値 (◆)は、ブリッジ回路による値とかなり一致しているものの、引張り荷重が8~12 kNの範囲で若干大きくなった。これは、発振回路における貫通電流の影響により、 Δf_e が特定の荷重 (計測周波数) 範囲において変化することが原因と考えられた。

そこで、この貫通電流の影響が小さくなるように発振回路の周波数帯を調整し、第3(最終)段階小型ひずみセンサを作製した (図14参照)。このセンサでは、4つのセンサによる計測を、同時に収集できる。本センサの計測精度については、今後行う予定である。

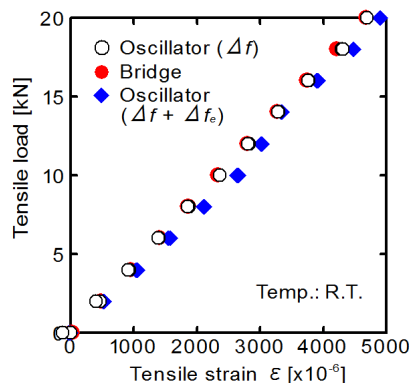


図13 ひずみ計測値と引張り荷重の関係 (第2段階ひずみセンサ)



図14 第3(最終)段階小型ひずみセンサ

(5) レシプロカル法を用いたひずみセンサ

図15, 16に、それぞれ、作製したレシプロカル法を用いたひずみセンサおよび計測システム概要を示す。レシプロカル法では、発振回路からのひずみ計測信号と、分周器1を介した水晶発振器による安定した外部クロック信号よりデジタルミキサで差分周波数信号を出力し、ひずみ計測信号の周波数変化量を強調させる。続いて、分周器2で周波数変化量を拡大させた差分周波数信号の1周期分を検出し、クロック信号との論理積を計測信号とする。計測信号のパルス数をマイコンで数えることで、ひずみ計測信号の周期を計測し、デジタル出力する。この周期の逆数が

ひずみゲージに対する周波数 f であり、ひずみのないときに算出した基準周波数 f_{ref} より $\Delta f (=f_{ref}-f)$ を求め、ひずみを算出した。本センサは、外部からの安定化電源で動作させた。



図 15 レシプロカル法ひずみセンサ

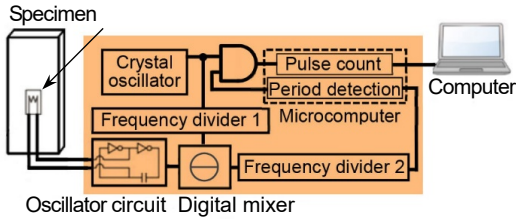


図 16 レシプロカル法を用いたひずみセンサ計測システム

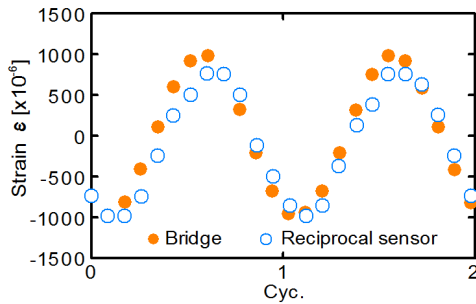


図 17 レシプロカル法による繰返しひずみ計測

図 17 に、作製したひずみセンサを、繰返し荷重下でのひずみ計測に適用した例として、応力振幅 64 MPa、応力比 $R=-1$ 、繰返し周波数 5 Hz の荷重制御で行った試験の結果を示す。ひずみ計測には、1 k Ω のひずみゲージを用いた。本センサによる計測値は、発振回路中の抵抗誤差分を補正した結果である。この図より、本センサによる値は、ブリッジ回路による値とよく一致しており、レシプロカル法による計測は動ひずみの計測に有効であることがわかる。なお、作製したセンサのサンプリング周波数は 58 Hz であったが、サンプリング周期内にはデータ転送時間も含まれるため、これを改善することで 150 Hz 程度まで改善できることが確認されている。また、本センサにおいても計測値における外乱の影響は、ダミーゲージを併用することにより軽減が可能である。

(6) 疲労損傷センシングへの適用可能性

図 18 に、疲労試験に用いた切欠き試験片の形状を示す。き裂進展にともなうひずみ変化を計測するため、切欠き端より長さ方向に 4 mm、幅方向に 3 mm、9 mm の位置にひずみゲージ (小型センサ用 350 Ω 、レシプロカル法用 1 k Ω) を貼付した。試験は、応力振幅 41 MPa、応力比 $R=0.01$ 、繰返し周波数 4 Hz

で行い、小型ひずみセンサによる計測時には 0.1 Hz と 1 Hz まで低下させた。

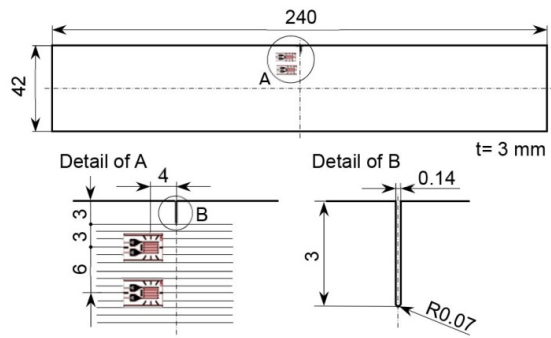


図 18 切欠き試験片

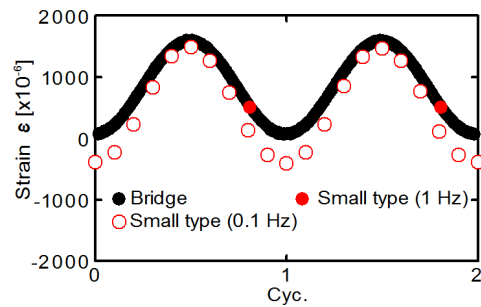


図 19 小型センサによる繰返しひずみ計測

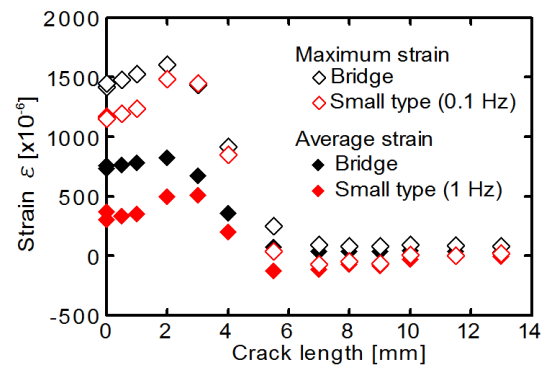


図 20 ひずみ計測値のき裂長さによる変化

図 19 に、試験結果の例として、き裂長さ 2 mm に対する周期とひずみ計測値の関係を示す。参考のため、図にはブリッジ回路による計測値も示している。繰返し周波数 0.1 Hz に対する小型ひずみセンサの計測値 (図中の \circ) は、ブリッジ回路による計測値 (図中の \bullet) とよく一致した結果が得られている。一方、繰返し荷重の周波数 1 Hz に対する計測値 (図中の \bullet) は、ひずみ波形の 1 周期の平均値と一致する。図 20 に、小型ひずみセンサで計測された最大ひずみ値および平均値のき裂長さによる変化を示す。ひずみ計測結果は、き裂端がひずみゲージ (き裂長さ 3 mm) に近づくにつれて大きくなり、通過後は顕著に小さくなることわかる。ここでは結果を省略しているが、き裂長さ 9 mm に対しても、またレシプロカル法で計測された 1 周期のひずみ変化分 ($\Delta \epsilon = \epsilon_{max} - \epsilon_{min}$) を用いた場合も、同様の傾向が現れた。したがって、小型ひずみセンサおよびレシプロカル法を用いたセ

ンサで計測したひずみ値により、き裂進展状況の評価が可能であることがわかる。

(7) 発振回路センサによる適切な計測手法

これまで実施した静的引張り荷重下でのひずみ計測試験、疲労試験におけるひずみ計測試験、また加振試験システムを用い、広範囲に(50 Hz程度まで)振動周波数を変化させた動ひずみの計測試験の結果をもとに、発振回路を用いたひずみセンサによる有効な計測手法として以下のことが考えられる。

作製した小型ひずみセンサは、静ひずみなど低周波数のひずみ計測や、長時間のひずみ変化に基づく損傷センシングに有効である。レシプロカル法を用いたセンサは、十数 Hzまでの周波数の動ひずみの計測、またそれに基づく損傷センシングに有効である。このように、静ひずみ、動ひずみといった計測対象や用途により、使用するセンサを使い分けることが有効と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 2 件)

① A. Kanda, T. Utsunomiya and A. Saito, Development of a Strain Sensor using an Oscillator Circuit, Transactions of the Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, Vol. 57, No. 5, p. 272- 278, (2014/9), 査読有。

② 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, ダミーゲージを併用した発振回路ひずみ計測, 日本機械学会論文集, 81 巻 830 号, DOI:10.1299/transjsme.15-00269, (2015), 査読有。

[学会発表] (計 12 件)

① 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 小型発振回路ひずみセンサーの基本計測特性, 第 56 回構造強度に関する講演会, p. 200-202, (2014 年 8 月 8 日), 浜松市浜北文化センター。

② 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 小型発振回路センサーによるひずみ計測, 日本機械学会 関東支部第 21 期総会・講演会, 10702, (2015 年 3 月 20 日), 横浜国立大学。

③ 笠原利行, 高戸谷健, 宇都宮登雄, スマートボルトによる複合材せん断機械継手におけるボルト緩み検出の解析的検討, 日本機械学会 関東支部第 21 期総会・講演会, 10705, (2015 年 3 月 20 日), 横浜国立大学。

④ 平山拓磨, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 神田淳, 発振回路を用いたひずみセンシングにおけるサンプリング周波数向上に関する検討, 第 57 回構造強度に関する講演会, p. 119-121, (2015 年 8 月 6 日), 岡山理科大学。

⑤ 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, ダミーゲージを併用した小型発振回路センサーによるひずみ計測, 第 57 回構造強度に関する講演会, p. 122-124, (2015 年 8 月 6 日), 岡山理科大学。

⑥ 笠原利行, 高戸谷健, 宇都宮登雄, 多列

継手有限要素解析に基づくスマートボルトによるボルト緩み検出可能性, 第 57 回構造強度に関する講演会, p. 196-198, (2015 年 8 月 7 日), 岡山理科大学。

⑦ 平山拓磨, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 神田淳, 発振回路法を用いたひずみセンシングにおけるサンプリング周波数向上に関する検討, 日本機械学会 関東支部第 22 期総会・講演会, GS0328, (2016 年 3 月 11 日), 東京工業大学。

⑧ 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 平山拓磨, デジタル出力を可能にした小型発振回路センサーによるひずみ計測, 日本機械学会 関東支部第 22 期総会・講演会, GS0329, (2016 年 3 月 11 日), 東京工業大学。

⑨ 平山拓磨, 齋藤敦史, 宇都宮登雄, 神田淳, 発振回路を用いたひずみセンシングにおける動的ひずみ計測, 第 58 回構造強度に関する講演会, p. 63-65, (2016 年 8 月 3 日), 北海道大学。

⑩ 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 平山拓磨, 小型発振回路センサーによる弾塑性ひずみ計測精度, 第 58 回構造強度に関する講演会, p. 66-68, (2016 年 8 月 3 日), 北海道大学。

⑪ 宇都宮登雄, 神田淳, 齋藤敦史, 平山拓磨, ワイヤレス化した小型発振回路センサーによるひずみ計測, 日本機械学会 関東支部第 23 期総会・講演会, GS1001-03, (2017 年 3 月 16 日), 東京理科大学。

⑫ 北村春畝, 宮野裕之, 宇都宮登雄, 発振回路法を用いた疲労き裂進展に伴うひずみ変化の計測, 日本機械学会関東学生会 第 56 回学生員卒業研究発表講演会, 1217, (2017 年 3 月 16 日), 東京理科大学。

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

ひずみリモート計測技術, <http://www.aero.jaxa.jp/research/basic/structure-composite/strain/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宇都宮 登雄 (UTSUNOMIYA TAKAO)

芝浦工業大学・工学部・教授

研究者番号: 60176978

(2) 研究分担者

齋藤 敦史 (SAITO ATSUSHI)

芝浦工業大学・工学部・准教授

研究者番号: 30280994

神田 淳 (KANDA ATSUSHI)

宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・研究領域主幹

研究者番号: 40358693