

令和 2 年 6 月 18 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06228

研究課題名(和文) 機械の包括的自己状態監視を実現する埋め込み型自己給電アクティブセンサシステム

研究課題名(英文) Self-powered active sensing system for comprehensive self-condition monitoring of machineries

研究代表者

増田 新 (Masuda, Arata)

京都工芸繊維大学・機械工学系・教授

研究者番号：90252543

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：機械構造物に埋め込み可能な自己給電型アクティブセンシング技術の開発とそれを基盤とした自立型の自己状態監視ネットワークへの展開を示すことを目指して、構造中に埋め込んだ圧電体によって、機械の稼働時振動から取り出した電力を発振回路を介して圧電体に戻すことによって周囲の構造中に超音波波動場を励起する自己給電超音波発振技術、および励起された波動場を用いて構造健全性を評価する技術を開発した。さらに複数個のセンサを弾性波動場を介して協調動作させて損傷状態を評価する技術を開発することにより、完全自立型の包括的自己状態監視ネットワークの実現に向けた重要な基盤技術を確立することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

少子高齢化が進み労働人口が減少していく我が国では、人口増加時に築き上げた社会システムの維持が多方面で困難に直面している。特に「社会・産業インフラの維持」の問題は顕在化して久しい。機械や構造システムの信頼性と可用性を高い水準で維持するためには、機械や構造システムが稼働中に自らの状態を監視し、異常の予兆を的確に把握することが肝要である。本研究による自己給電アクティブセンサネットワーク技術は、人間のオンサイトや細やかな指示を前提とせず、自分自身の健全性を維持することができるスマートでタフな機械システムの創造を目指すものであり、持続可能でかつレジリエントな社会・産業基盤の確立に資する。

研究成果の概要(英文)：Aiming to indicate a possible future of an autonomous and self-sufficient condition monitoring networks for structures and machines based on structurally-embedded self-powered active sensing technologies, this study has developed a piezoelectric ultrasonic active sensor that intermittently oscillates using energy harvested by itself from the operational vibration of the host structure, and failure evaluation methodologies based on the induced ultrasonic elastic wave field. Moreover, a damage detection technology which employs multiple active sensors cooperating with each other via the mutually induced elastic wave field has been investigated as the basis towards the realization of the fully autonomous, self-sufficient comprehensive self-condition monitoring networks to establish sustainable and resilient infrastructure systems.

研究分野：機械力学および計測制御、特に構造や材料の力学を利用した知的構造システムの創成

キーワード：評価・診断 状態監視 超音波 圧電素子 センサ アクチュエータ 振動発電

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

機械や構造システムの信頼性と可用性を高い水準で維持し高品質のサービスを長く提供するためには、機械や構造システムが稼働中に自らの状態を監視し、異常の予兆を的確に把握することが肝要である。このような自己監視・診断技術の概念は状態モニタリングや構造ヘルスマニタリングと称されており、センサ、マイクロプロセッサ、無線技術、クラウドコンピューティングなど ICT の果実を取り入れながら近年急速な発展を見せている。

現状においては、温度、圧力、振動加速度、ひずみなどの物理量を限られた点において受動的に計測し評価するシステムが実用水準に達しつつあるが、今後、より高感度で対象物全体を包括的に網羅することのできる自己状態監視システムを実現するためには、受動的センサのみならず、超音波などを用いて対象物に能動的に働きかけ力学的な情報を引き出すことのできる埋め込み型のアクティブセンサを高密度に分散配置する必要がある。しかし、センサ配置の高密度化は電力供給とデータ伝送のための配線量の増大と配線経路の複雑化を招き、かえって保守性を悪化させたり脆弱性を導入してしまう矛盾を抱えている。このうちデータ伝送については、無線技術の発達によってワイヤレス化が容易となり一定の解決を見せているが、電池による電力供給のワイヤレス化は、保守性の観点から全く現実的でない。

いっぽうで、圧電素子や磁歪素子、電磁誘導などを用いて、センサ配置点における稼働時振動のエネルギーを電気エネルギーに変換し、センサノードの電力源として用いる振動発電技術が、活発に研究され実用化されつつある。この技術を用いてアクティブセンサを駆動できれば、外部からの電力供給を必要としない自己給電型の状態監視センシングシステムの実現に端を開くことができると期待される。

そこで、本研究では、1枚の圧電素子を、発電デバイス、アクチュエータおよびセンサとして同時に使用する自己給電超音波アクティブセンシングシステムを着想した。すなわち、構造中に埋め込んだ圧電素子によって振動発電を持続的にを行い、蓄えた電気エネルギーを間欠的に解放して素子を超音波発振させ、励起した弾性波動に対する応答を計測ノードで計測・分析して結果を外部に送信するシステムである。さらに、将来的には弾性波動場を介してこれらを多数、協調的に動作させることで、完全自立型の包括的自己状態監視が可能になると考えた。

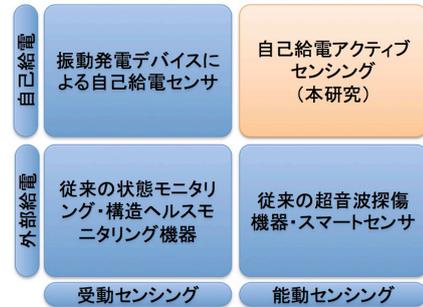


図1 研究の位置付け

2. 研究の目的

本研究の目的は、機械構造物に埋め込み可能な自己給電型アクティブセンシング技術の開発と、それを基盤とした自己状態監視ネットワークへの展開を示すことである。具体的には、構造中に埋め込んだ圧電体によって機械の稼働時振動から取り出した電力を、発振回路を介して圧電体に戻すことによって周囲の構造中に超音波波動場を励起する技術、および励起された波動場を用いて構造健全性を評価する技術の確立を目指す。さらに複数個のセンサを弾性波動場を介して協調動作させる技術を開発することにより、孤立配置されたセンサノードからなる完全自立型の超音波アクティブセンサシステムによる構造の知能化を目指す。

3. 研究の方法

上述のような自己状態監視システムの実現を目指して、本研究では三つの目標を設定して研究を行った。

- 【単一の圧電素子による自己給電超音波発振技術の確立】 単一の圧電素子、蓄放電制御回路、発振回路の各モジュールからなる自己給電超音波アクティブセンサ(図2)の要素技術の確立を行った。圧電素子による振動発電によって得られる電力のモデル化を行い、その向上方法についても検討した。次に、蓄電された電力を使って圧電素子を発振させる方法として、任意の周波数で発振させる方法および構造物の高周波数域における固有振動数で発振させる方法を開発し評価した。
- 【圧電素子が励起する超音波弾性波動を用いた損傷検出技術の開発】 自己給電超音波発振技術の開発と並行して、圧電素子から発振される超音波弾性波を用いた損傷検出手法の開発を行った。損傷部分での接触非線形性に着目し、放射された超音波が損傷部で散乱する際の周波数混合効果や変調効果を利用して損傷の検出と評価を行うものである。さらに、自己給電アクティブセンサの利用形態の一つとして歯車などの機械要素への適用可能性も検討した。
- 【複数の自己給電アクティブセンサ間の協調のための基礎技術の開発】 複数センサを協調動作させるための基礎検討として、二つのセンサを同時に発振させた場合の相互引き込み

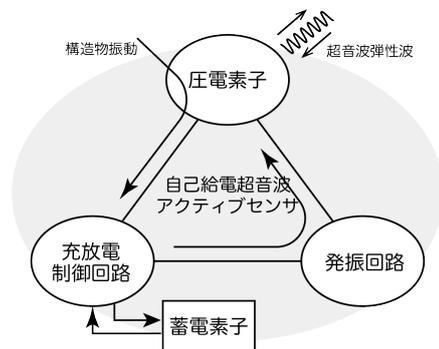


図2 自己給電センサの構成

の挙動を実験的に検討した。また、複数の圧電素子が異なる周波数で励起した波動場を用いて損傷検知を行う技術を開発した。

4. 研究成果

(1) 【単一の圧電素子による自己給電超音波発振技術の確立】

① 薄板構造物に貼付した圧電素子による振動発電のモデル化と発電性能の評価

本研究では、対象となる薄肉構造物の表面に圧電素子を貼付固定し、これをもって振動エネルギーの回収と超音波の送信受信を行うことを想定している。したがって発電機能の観点からは、振動している対象構造物表面のどの箇所にどのように圧電素子を貼ればどのくらいの電力が産生されるのかを事前にアセスメントできることが重要となる。そこで、図3の写真のようにアルミ合金薄板に貼付した圧電素子によってどの程度の発電電力が見込めるか、それは理論上回収可能な電力の最大値に対してどの程度の割合であるのかを評価する計算モデルを構築した。

「回収可能な電力の最大値」を振動の1周期中に圧電素子に蓄えられる最大エネルギーを時間当たりに換算したものとしたとき、それに対する発電電力の比は、計算モデルより次式のように導出された。

$$\eta = \frac{\beta}{1 + \beta} \frac{2\rho}{1 + \rho^2}, \quad \beta = k_e^2 \Gamma |\Psi_s|^2 / |\Phi_s|^2$$

ここで ρ は無次元負荷抵抗, k_e^2 は圧電素子の材料定数からなる結合係数, Γ は平板と圧電素子の厚さ比に依存した形状係数, $|\Psi_s|^2$ は圧電素子貼付部分における平板の曲率の平均値の2乗, $|\Phi_s|^2$ は圧電素子貼付部分における平板の曲率の2乗平均値に相当する係数である。図3のグラフは4箇所に貼付した圧電素子による1次～4次モード振動からの発電性能の η 値の理論値と実験値の比較である。理論モデルが実験と良く合うこと、対象振動モードのモード形状に合わせて貼付位置を選ぶことで最大8%程度の η 値を期待できることがわかる。これは使用した圧電素子の k_e^2 値が2%程度であることを考えると妥当な値である。さらに、SSHI回路などの電力増幅インターフェースを組み合わせることで、その20%増程度の出力を得られることも示している。

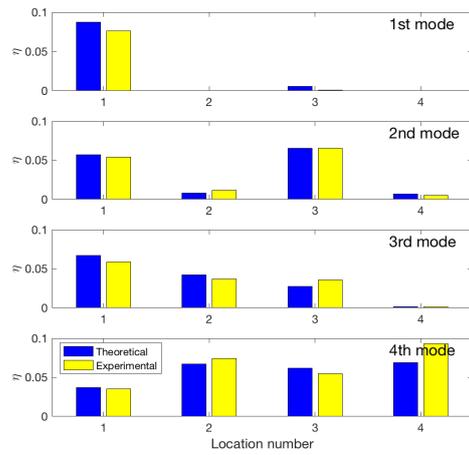
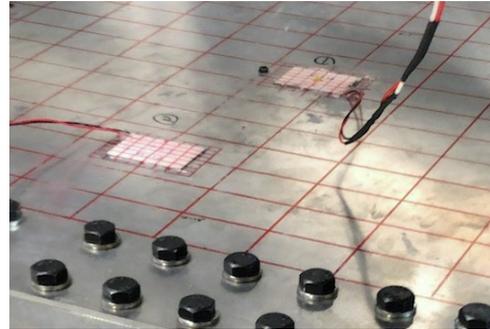


図3 平板に貼付した圧電素子と発電性能

② 薄板構造物に貼付した圧電素子の発振回路

本研究では、圧電素子を発振させるために負性抵抗素子を用いた二種類の発振回路を開発した。その際、できるだけシンプルな回路構成でエネルギー効率の良い発振回路を設計することに留意した。一つは圧電素子を指定した周波数で発振させるための回路で、電圧制御型負性抵抗素子であるラムダダイオードを用いたもの、もう一つは圧電素子を構造物の固有振動数で発振させるための回路で、オペアンプを用いた電流制御型負性抵抗素子 (NIC) を用いたものである。このうち、ラムダダイオードは N チャネル接合型 FET と P チャネル接合型 FET を組み合わせた回路であり、6V~8V 程度のバイアス電圧を掛けると電圧変動に対する電流変動が負の傾きを呈する特性を持つ。

開発した発振回路の回路図を図4に示す。破線で囲んだ部分は圧電素子の等価回路である。ラムダダイオードを用いた回路では、ラムダダイオードにバイアス電圧を与えるために直流電源が直列に接続されている。これは実際には蓄電素子であるキャパシタに置き換えられる。また、圧電素子に並列に接続されたインダクタは発振周波数を調整するためのもので、圧電素子の拘束キャパシタンス C_p との間で並列共振を起こして発

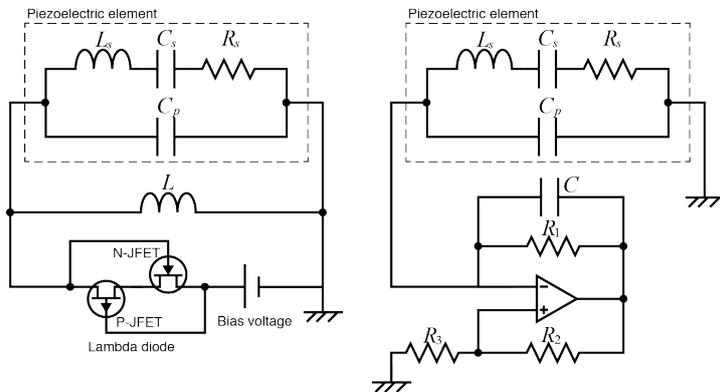


図4 発振回路の概略図 (左:ラムダダイオードを用いた並列共振回路; 右: NIC を用いた直列共振回路)

振回路を開発した。その際、できるだけシンプルな回路構成でエネルギー効率の良い発振回路を設計することに留意した。一つは圧電素子を指定した周波数で発振させるための回路で、電圧制御型負性抵抗素子であるラムダダイオードを用いたもの、もう一つは圧電素子を構造物の固有振動数で発振させるための回路で、オペアンプを用いた電流制御型負性抵抗素子 (NIC) を用いたものである。このうち、ラムダダイオードは N チャネル接合型 FET と P チャネル接合型 FET を組み合わせた回路であり、6V~8V 程度のバイアス電圧を掛けると電圧変動に対する電流変動が負の傾きを呈する特性を持つ。

振する。発振周波数は $1/\sqrt{LC_p}$ である。NICを用いた回路では、圧電素子の拘束キャパシタンスをキャンセルするための負性キャパシタンスと、圧電素子を直列共振周波数で発振させるための負性抵抗がNICによって並列に構成されている。NIC内のオペアンプを駆動するために直流電源を必要とするが、これは実際には蓄電キャパシタで置き換えられる。圧電素子の直列共振周波数は構造物の共振周波数であるので、この回路では高周波数域における構造物の固有モードのうち電気機械結合アドミタンスのゲインがもっとも高いものが自励振動を起こす。劣化によって構造物の固有振動数が変化すると発振周波数にも変化が生じるため、この発振回路を用いたセンサは、センサ近傍の構造物の動特性の変化を発振周波数の変化として拾い上げる働きが期待できる。

これらの回路における発振時の挙動の一例を図5に示す。また、発振時のリミットサイクル特性は記述関数法により解析され、実験との整合性が確かめられた。さらに、直流電源の代わりに蓄電されたキャパシタを用いる実験が行われ、ラムダダイオードを用いた回路では、8.5Vにチャージされた3.3mFのキャパシタ1個で2秒の発振、NICを用いた回路では、12Vにチャージされた1mFのキャパシタ2個で0.6秒の発振を行うことができた。この結果からわかるように、NICを用いた回路はラムダダイオードを用いた回路に比較してエネルギー効率が悪い。これにはNIC内の抵抗での損失に加えてオペアンプ内部での損失が大きく寄与していることがわかっている。

以上のように、自己給電のための発電機能とアクティブセンシングのための発振機能についてそれぞれシンプルな回路構成での実現を行うことができた。それらを統合する蓄放電制御回路については残念ながら研究期間内に実装することができなかったが、市販されているヒステリシスコンパレータとMOSFETによる簡単な構成で実現が可能であると予想される。

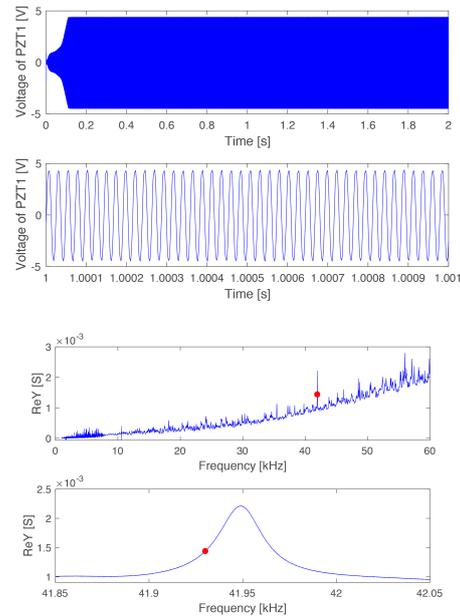


図5 上：NIC回路による発振波形；下：アドミタンスと発振周波数（赤点）

(2) 【圧電素子が励起する超音波弾性波動を用いた損傷検出技術の開発】

① 非線形圧電インピーダンス変調法による接触型損傷評価の数理モデル

自己給電アクティブセンサから発振された弾性波は構造物内に伝播する。損傷がき裂や剥離など粗い接触界面を持つ接触型損傷である場合、到達した弾性波が損傷部の非線形性によってさまざまな変性を受けることが知られている。研究代表者らはこれまでに、損傷部位に入射した単一正弦波の超音波と低周波振動の非線形相互作用による変調現象に注目し、単一の圧電素子で微小損傷の有無を判別可能な非線形圧電インピーダンス変調法を提案している。この方法の特長は、他の非線形超音波法に比較して微弱な超音波での損傷検知が可能なる点であることから、自己給電アクティブセンサにおける損傷検知の基盤技術となるものである。

本研究では、これまで十分ではなかった非線形圧電インピーダンス変調現象の数理モデルの構築を行い、より現実的な状況下で有効な損傷評価方法の確立を目指した。図6は数理モデルの模式図であり、弾性体構造物の一部に粗な接触界面が存在するというものである。

界面にはヘルツの接触理論に基づく接触剛性の非線形性に加えて接触による非線形なエネルギー散逸効果を加えた。構造物の低周波振動応答と超音波帯域での応答の非線形性を考慮して解析した結果、入射した超音波に対する等価剛性を表す無次元剛性は低周波振動による接触界面の相対運動と同期して変動し、さらに低周波振動の振幅の増加に対して軟化する方向にドリフトすることがわかった。このドリフト効果はこれまで本手法での損傷評価において無視されていたものであり、これを取り入れることにより接触界面での接触剛性の様相をより適切に再構成できるものと考えられる。

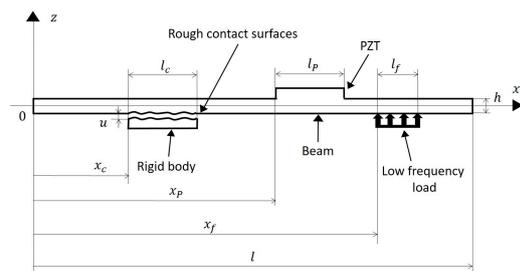


図6 接触界面を持つ構造物の数理モデル

② 圧電素子による機械要素の状態監視技術の検討

本研究で開発する自己給電超音波アクティブセンサの将来的な利用形態の一つとして、歯車などの機械要素への適用が考えられる。機械要素に圧電素子を埋め込み、動作時振動から得た電力を用いて超音波による健全性評価を行うものである。この一形態として、歯車に貼付した圧電素子を超音波発振させたときの電気機械結合アドミタンスの変化から歯車のかみ合い状態

の変化を評価することを試みた。これは非線形圧電インピーダンス変調法の応用であり、従来の振動法では困難だった低速歯車の状態監視を狙ったものである。

図7のように平歯車対において駆動側歯車の端面に圧電素子を貼付し、スリップリングを介して超音波帯域の交流電圧を印加した際の電流応答を計測した。交流電圧の周波数は周方向に n 本の節線を持つモード（円板の曲げ $(n,0)$ モードに相当するモード）の固有振動数近傍とした。その結果、歯毎のかみ合いに対応した変調と、モードの腹節の波長に対応した変調が重なって現れることがわかった（図7は $n=3$ の場合）。モードに起因する変調は節線上的のかみ合い歯の評価を困難にするため、その影響を取り除くための方法を考案した。極端な損傷状態として幾つかの歯が欠損した歯車に同手法を適用したところ、欠損歯の箇所を明瞭に検出することができた。（発表予定の国際会議が延期になったため未発表）

研究は継続しており、今後はモードの影響を本質的に取り除くための方法の検討と、より現実的な損傷歯による評価を行う予定である。

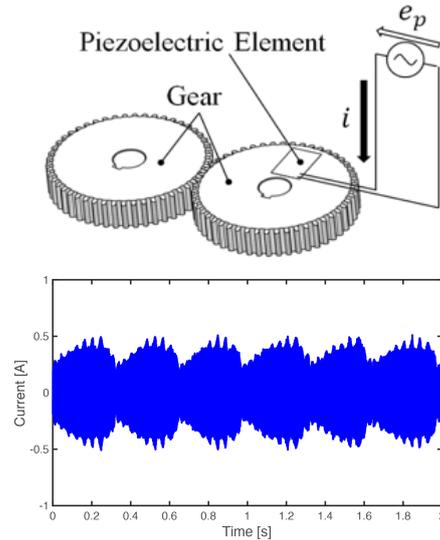


図7 歯車に貼付した圧電素子の電流応答による接触状態監視

(3) 【複数の自己給電アクティブセンサ間の協調のための基礎技術の開発】

① 発振する複数の圧電素子間の相互作用

(1)②で示した NIC 発振回路を接続した複数の圧電素子を異なる場所に貼付すると、貼付場所によって電気機械結合アドミタンスが異なるため、それぞれは異なる周波数で発振する。これを同時に発振させると、発振周波数が近接している場合、相互引き込みを起こして発振周波数が同期する。これは多数の自己給電超音波アクティブセンサをネットワーク化する際に重要な性質である。2枚の圧電素子を用いてその基礎実験を行い、周波数が20%程度異なる場合でも引き込みが生じることを確認した。（未発表）

② 発振周波数の異なる複数の圧電素子を用いた接触型損傷検知

ラムダダイオードを用いた発振回路では発振周波数を任意に設定することができる。そのような自己給電超音波アクティブセンサを複数個貼付し、それぞれに異なる周波数を設定した状態を想定して、発振周波数差を用いた損傷検知手法を提案した。

図8はその概念図である。ここでは実験装置の都合上、1枚の圧電素子から二つの周波数成分を同時入力する想定になっている。周波数差を一定に保ちながら周波数スイープを行い、計測用圧電素子の開放端電圧を計測すると、損傷が存在しないときは入力した二つの周波数成分のみが計測されるが、損傷が存在する場合は二つの周波数成分の差の周波数を持った低周波応答が計測される。したがって、この成分の発生を監視することで損傷の有無を知ることができる。

差周波数成分の生起メカニズム

を説明する数理モデルを構築し、

振動法による解析結果から差周波数成分の振幅が瞬時入力周波数によって変化すること、および二つの入力波に対する線形応答振幅の積に比例することを示した。また実験においても、振動法による解析結果同様に模擬損傷近傍での差周波数成分の振幅と二つの入力周波数の応答成分の振幅の積との間に概ね線形関係が認められた。このことから損傷部の非線形性による差周波数成分の生起が2次の非線形性によって説明できることを示した。

この手法の利点は、超音波帯域での動的応答を用いながらも、計測するのは低周波数の応答でよいことである。上述のように発振周波数をスイープすれば、損傷に関する広帯域のダイナミクスを反映した非線形応答を、低速なハードウェアで得られる利点が期待できる。このことから、本技術は完全自立型の包括的自己状態監視ネットワークにおける基盤技術の一つとなると考えている。

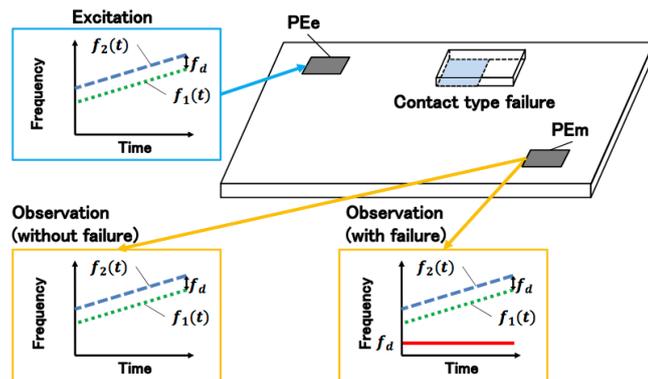


図8 発振周波数差を用いた損傷検知手法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Masuda Arata, Inoue Masaaki, Fujiwara Yosuke	4. 巻 11379
2. 論文標題 Self-powered oscillation of piezoelectric ultrasonic active sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of SPIE	6. 最初と最後の頁 1137913, 1-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1117/12.2559254	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

1. 発表者名 井上雅敏, 藤原遥介, 増田新
2. 発表標題 圧電素子を用いた自己給電型超音波センサの発振回路の検討
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 藤原遥介, 井上雅敏, 増田新
2. 発表標題 圧電素子を用いた自己給電型超音波センサの発電回路の検討
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西田雄太, 増田新
2. 発表標題 非線形圧電インピーダンス変調現象に基づく接触型損傷の新たな評価指標の提案
3. 学会等名 日本機械学会 第17回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野中昭太, 増田新, 松村卓樹
2. 発表標題 歯車端面に貼付した圧電素子による低速回転歯車のかみ合い状態監視
3. 学会等名 日本機械学会 第17回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Masuda, S. Nonaka and T. Matsumura
2. 発表標題 Mesh condition monitoring for spur gears by vibro-acoustic admittance modulation of piezoelectric elements attached on the end face
3. 学会等名 The 26th International Congress on Sound and Vibration (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山下昂輝, 増田新, 田中昂
2. 発表標題 弾性波の周波数down-conversionに基づく薄板構造物の接触タイプ損傷検知
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下昂輝, 増田新, 田中昂
2. 発表標題 変調した超音波チャープの周波数down-conversionに基づく接触型損傷の検出と特徴付け
3. 学会等名 日本非破壊検査協会 平成29年度秋季講演大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山下昂輝, 増田新, 田中昂
2. 発表標題 二つの超音波チャープ波の非線形相互作用を利用した接触型損傷検知
3. 学会等名 日本機械学会 第16回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野中昭太, 増田新
2. 発表標題 平歯車に貼付した圧電素子の電気機械結合アドミタンスの変動
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野中昭太, 増田新
2. 発表標題 平歯車に貼付した圧電素子によるかみ合い状態監視に関する基礎研究
3. 学会等名 日本設備管理学会 秋季研究発表大会 2017
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 野中昭太, 増田新
2. 発表標題 平歯車に貼付した圧電素子の電気機械結合アドミタンスのかみ合い状態変化による変動
3. 学会等名 日本機械学会 第16回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 藤原遥介, 井上雅敏, 増田新
2. 発表標題 単一の圧電素子を用いた 自己給電超音波センシング技術の基礎研究
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会2017年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 増田 新, 野中 昭太, 松村 卓樹
2. 発表標題 スマートセンサによる機械要素の状態監視
3. 学会等名 日本設備管理学会2019年度春季研究発表大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田 雄太, 増田 新
2. 発表標題 接触剛性の非対称性を考慮した非線形圧電インピーダンス変調現象の解析
3. 学会等名 日本機械学会 D&D Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田 雄太, 増田 新
2. 発表標題 接触面における剛性および減衰の非対称性を考慮した非線形圧電インピーダンス変調現象の解析
3. 学会等名 日本機械学会 第18回評価・診断に関するシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----