

令和 2 年 4 月 30 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13716

研究課題名（和文）自励駆動型超音波を用いた非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出

研究課題名（英文）Detection of contact-type failure based on nonlinear wave modulation using ultrasonic vibration driven by self-excitation

研究代表者

田中 昂（Tanaka, Takashi）

滋賀県立大学・工学部・講師

研究者番号：60759273

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出法は、超音波振動の振幅や位相の変動（変調）の大きさを損傷評価指標とすることで、損傷を検出、評価できる。本研究では、変調の本質が損傷部の剛性変動に起因する固有振動数変動であることに着目した。まず、固有振動数で自励発振する局所フィードバック制御によって超音波振動を励起する技術を開発した。次に、自励駆動された超音波振動を用いた場合、非線形波動変調に起因する固有振動数変動に追従して発振周波数が変化することを明らかにした。最後に、発振周波数変動振幅を損傷評価指標とすることで、粘性減衰に依存しない損傷評価ができることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

疲労き裂や複合材料のはく離などの損傷は、損傷界面が接触しており検出困難な接触型損傷を有する。接触型損傷の大きさを正確に評価することは、構造物の耐久度、余寿命を推定する上で重要である。非線形波動変調に基づく損傷検出法は、微小な接触型損傷も精度よく検出できる。一方で、これらの損傷は損傷の進展に伴い構造物の粘性減衰を変化させてしまう。非線形波動変調により超音波振動の振幅や位相に生じる変動成分は粘性減衰の変化に依存する。本研究では非線形波動変調の本質である固有振動数変動に着目することで、粘性減衰に依存せず損傷を評価できる手法を開発した。

研究成果の概要（英文）：The detection method of contact-type failure based on nonlinear wave modulation can detect and evaluate the contact-type failure by the fluctuation amplitude of the amplitude and the phase of ultrasonic vibrations. In this study, it is focused that the essence of nonlinear wave modulation is the fluctuation of natural frequency caused by the fluctuation of stiffness in the vicinity of failure. Firstly, the self-excitation technique of ultrasonic vibration, which is oscillation at natural frequencies automatically, is developed. Next, it is clarified that oscillation frequencies change by following the fluctuation of natural frequencies caused by nonlinear wave modulation. Lastly, the evaluation of development of the contact-type failure, which is independent of change of viscous damping of structures, is realized using the fluctuation amplitude of the oscillation frequencies.

研究分野：機械力学

キーワード：超音波振動 自励振動 非線形波動変調 局所フィードバック制御 接触型損傷

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

構造物に生じる損傷は構造物の剛性低下をまねき、重大な事故に発展する恐れがある。そのため、微小な損傷を早期に発見し、その位置や進展を評価することが重要である。現在は定期的な非破壊検査による損傷検出が行われているが、損傷の急激な進展に対応することが困難である。そこで、構造物にセンサやアクチュエータを埋め込み、構造物の健全性を常時監視する構造ヘルスマニタリングシステムが提案されている。

超音波を用いた損傷検出法は、構造物に生じる微小な内部損傷を高精度に検出可能である。損傷部において、超音波の散乱特性が変化する。散乱特性の変化に起因する反射波を計測することで、損傷を検出できる。一方で、疲労き裂の先端部に生じる平行損傷や、複合材料のはく離など、損傷の界面が接触している損傷（接触型損傷）では、界面の接触部を超音波が透過するため検出できない。

代表者は、構造物供用時の低周波振動による損傷界面の接触変動に着目した非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出法を開発してきた。低周波振動による損傷界面の接触変動が生じている場合、超音波振動の振幅や位相に低周波振動に同期した変調が生じる（非線形波動変調）（図1）。この振幅や位相の変動振幅は損傷の大きさを評価する指標となる。この手法では、構造物供用時の振動により接触変動が生じるため、小振幅の超音波で損傷を検出できる。しかし、(1)固有振動の超音波振動を用いることで検査精度を向上させているため、固有振動数の把握が必要、(2)損傷の進展過程において、構造物の粘性減衰が変化するが、超音波振動の振幅や位相は粘性減衰に依存して変化するため、変動振幅も粘性減衰の影響を受けると考えられる。この2つの課題のため、煩雑な検出法であった。

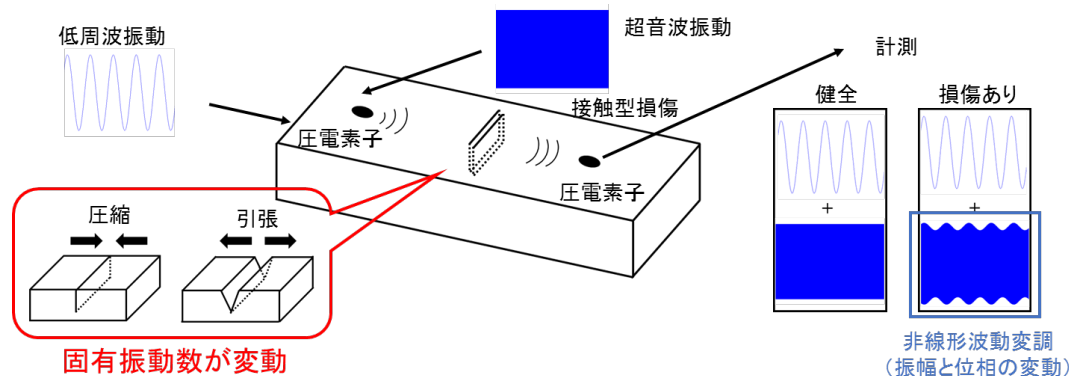


図1 非線形波動変調の概略

2. 研究の目的

本研究では、自励駆動型超音波振動を用いて、非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出法の自動化と粘性減衰に依存しない新たな損傷程度の評価指標を提案する。以下の2つの目的を示す。

- (1) 超音波振動の駆動法を従来の強制駆動から局所フィードバック制御による自励駆動に変更することで、構造物の固有振動数で自動的に自励発振させる（自励駆動型超音波振動）。
- (2) 自励駆動型超音波振動を用いた非線形波動変調に基づいて、粘性減衰の影響を受けず、接触型損傷の大きさと相関のある損傷評価指標を提案する。

3. 研究の方法

非線形波動変調は、超音波振動の単一モード近似により1自由度振動モデルで表現できる（図2(a)）。代表者は、損傷の接触状態変動を発生させる低周波振動の周波数と超音波振動の周波数が十分に離れている場合、線形時変モデルとみなせるとの着想を得た。このモデルにおいて、非線形波動変調は線形の伝達関数の平行移動で表せる。超音波振動の励起に強制駆動を用いた場合、加振周波数は f_p で固定される。よって、超音波振動の振幅や位相が変動する。この変動の大きさは、粘性減衰の大きさによって変化する（図2(b), (c)）。

ここで、固有振動数で位相が90度遅れになることに着目した局所フィードバック制御を用いた自励駆動法を適用した。制御コントローラで位相を90度遅らせると、一巡伝達関数において、固有振動数でのみ位相が180度遅れになる。このとき、一巡伝達関数のゲインが0dBを超えると自励振動が発生し、その発振周波数は固有振動数となる。この駆動法では、構造物の伝達関数において位相が90度遅れになる周波数で発振するため、固有振動数が変化し90度遅れになる周波数が変化すると、発振周波数も変化する。この特性により、自励駆動された超音波振動を用いた非線形波動変調においては、発振周波数が接触状態の変動を発生させる低周波振動の周波数に同期した周波数変調を受ける。固有振動数は粘性減衰に依存しない損傷評価指標である。

本研究では、非線形波動変調の1自由度振動モデルの運動方程式を無次元化し、Matlab/Simulinkによる時刻歴応答解析を行い、提案手法の妥当性を検証した。解析モデルを図3に示す。

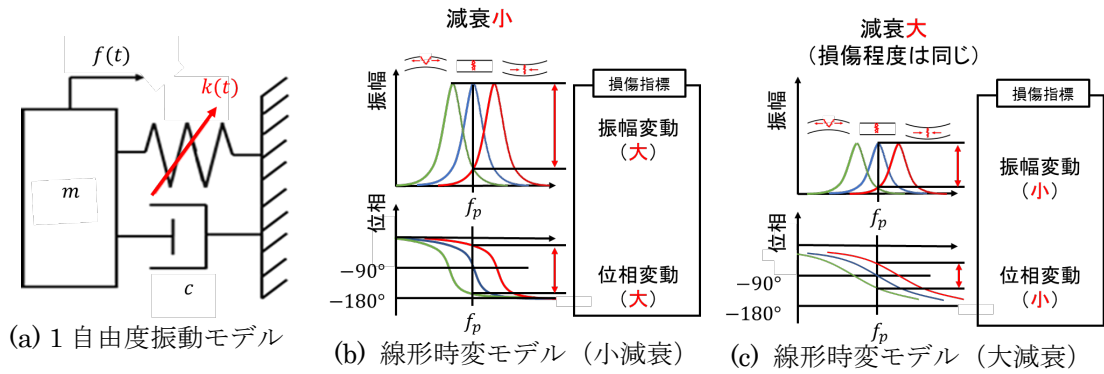


図2 非線形波動変調の線形時変モデル

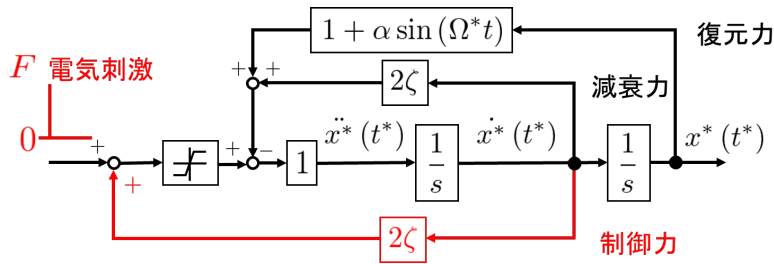


図3 時刻歴応答解析モデル

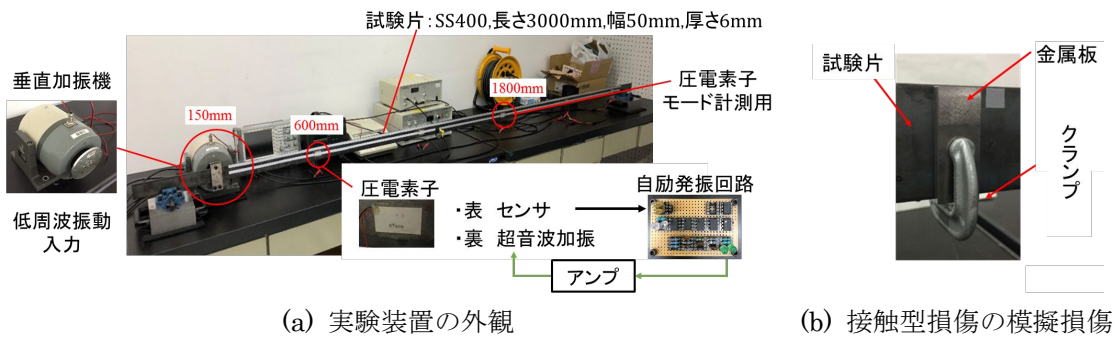


図4 実験装置

さらに、図4に示すはり構造物を用いた実験により、提案手法の妥当性を検証した。はり構造物の材質はSS400、寸法は、長さ3000mm、幅50mm、厚さ6mmである。左端から600mmの位置に超音波加振用の圧電素子、1800mmの位置に振動モード計測用圧電素子をともにはり構造物の両面に貼付した。また、低周波振動加振用の垂直加振機を150mmに設置した。接触型損傷は、条件の変更が容易な模擬損傷を用いた。

4. 研究成果

(1) 平成30年度は、まず、局所フィードバック制御による自励駆動された超音波振動を用いた非線形波動変調の時刻歴応答解析を実施した。解析時間は10000、解析法は固定ステップ解法の4次のRunge-Kutta法を用い、時間分解能は 10^{-4} とした。減衰比 $\zeta=0.03$ 、剛性変動振幅 $\alpha=0.1$ 、周波数比 $=0.001$ のときの解析結果を図5に示す。周波数比に対応した周波数変動が生じていることがわかる。次に、損傷の大きさを表す剛性変動振幅 α が変化した時に、周波数変動振幅がどのように変化するかを調査した(図6)。剛性変動振幅の上昇に伴って、周波数変動振幅も上昇していることがわかる。このことから、局所フィードバック制御によって自励駆動された超音波振動を用いた非線形波動変調では、超音波振動の周波数が接触状態の変動に同期して変動し、その振幅は接触変動面積の増加に伴って大きくなることが明らかとなった。このことから、周波数変動振幅は、接触型損傷の損傷程度の評価指標となることが示された。さらに、粘性減衰が変化する場合を想定し、粘性減衰を変化させた場合の解析結果から、粘性減衰に依存しない損傷評価指標であることも確認された。

次に、局所フィードバック制御を行う回路の設計を行った。超音波振動の制御を行うためには、アナログ回路の設計が必要である。本研究では、LTSpiceを用いて回路シミュレーションを行った。位相を90度遅らせる制御には速度正帰還制御と積分負帰還制御がある。発振する周波数はゲインが高い固有振動数周波数である。速度正帰還制御は高周波数帯域で、積分負帰還制御は低周波数帯域でハイゲインとなる。二つの制御を組み合わせ、バンドパスフィルタを用いることで、広帯域でハイゲインとなることを抑制する。本研究で使用帯域とした12kHz~20kHzにおいて、

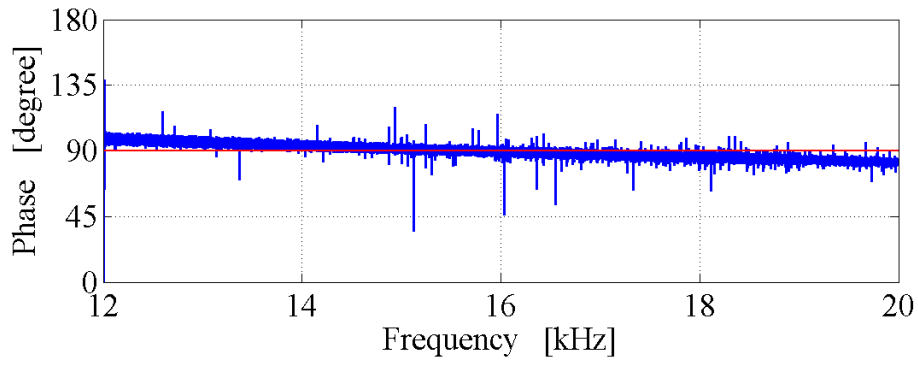


図 8 製作したアナログ回路の位相特性

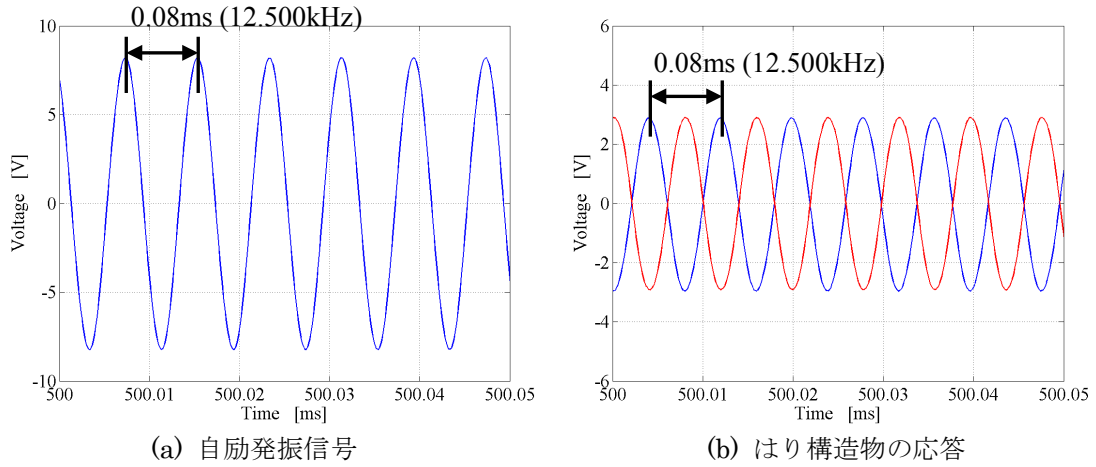


図 9 超音波振動の自励駆動実験結果

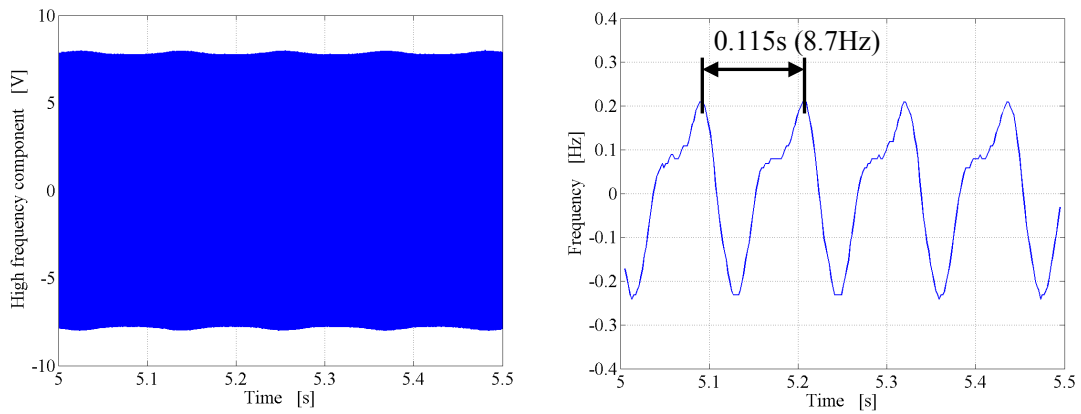


図 10 超音波振動の自励駆動実験結果

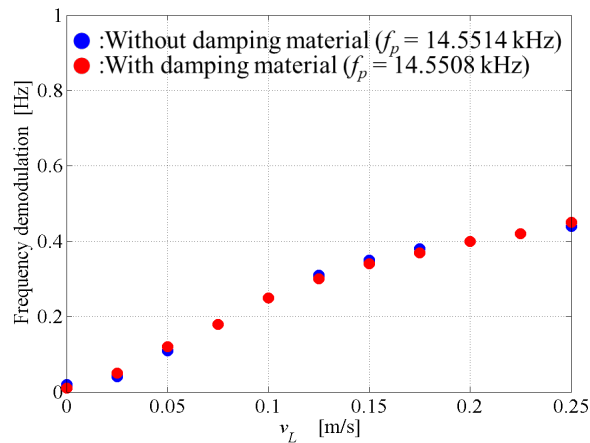


図 11 粘性減衰が周波数変動振幅に及ぼす影響

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 田中昂、前田秀哉、大浦靖典
2. 発表標題 自励駆動された超音波を用いた非線形波動変調の応答解析
3. 学会等名 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 前田秀哉、田中昂、大浦靖典、呉志强
2. 発表標題 自励駆動された超音波を用いた非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Tanaka, Yasunori Oura, Syuya Maeda
2. 発表標題 Detection Method of Contact-type Failure Based on Nonlinear Wave Modulation Utilizing Ultrasonic Vibration Driven by Self-excitation
3. 学会等名 The 32nd Conference on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Tanaka, Syuya Maeda, Yasunori Oura, Zhiqiang Wu
2. 発表標題 Detection of Contact-type Failure Base on Nonlinear Wave Modulation Utilizing Self-excited Ultrasonic Vibration (Evaluation of Failure Development Focusing on Frequency Modulation)
3. 学会等名 10th International Conference on Mechanical Engineering (TSME-ICoME 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田中昂
2. 発表標題 自励駆動型超音波と非線形波動変調に基づく接触型損傷検出技術
3. 学会等名 第12回メンテナンス分野合同研究会（招待講演）
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