

令和 4 年 5 月 22 日現在

機関番号：24201

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14682

研究課題名（和文）分散制御型多点加振を用いた非線形波動変調に基づく大型構造物の接触型損傷検出

研究課題名（英文）Detection of contact-type failure of large-scale structure based on nonlinear wave modulation using multi-excitation using decentralized control

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）：本研究では、分散制御型多点加振法を用いた大型構造物に生じる接触型損傷の検出を実現した。まず、分散制御型多点加振による超音波固有振動の励起技術の開発を行った。局所フィードバック制御を実現するアナログ回路の設計を行い、対象の周波数範囲で制御可能な回路を作成した。多点加振により、超音波固有振動が自動的に励起できることを確認した。次に、大型構造物の超音波固有振動を用いた非線形波動変調に基づく接触型損傷検出を行った。超音波固有振動の周波数が、非線形波動変調に起因する固有振動数変動に追従して変動することを確認した。また、接触型損傷の大きさが大きくなるにつれ、固有振動数変動幅が大きくなることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大型構造物に生じる疲労き裂やボルト緩みなどは、損傷面が接触しており検出が困難である場合がある。このような接触型損傷を精度よく検出することは、構造物の劣化度合いを正確に評価するために重要である。微小な接触型損傷を精度よく検出する手法の一つに、超音波振動の振幅や位相に生じる変調（非線形波動変調）に基づく手法があるが、大型構造物では超音波固有振動の励起が困難であるため適用できなかった。本研究では、超音波固有振動で自動的に発振し、固有振動モードに合わせて加振力が自動的に調整される分散制御型多点加振を実現し、非線形波動変調に基づく接触型損傷検出法の大型構造物への適用を可能にした。

研究成果の概要（英文）：In this study, I developed the multi-excitation method using decentralized control with local feedback control for excitation of ultrasonic natural vibrations and the detection method of contact-type failure based on nonlinear wave modulation using developed multi-excitation method. Firstly, the multi-excitation method was developed. The analog circuit of local feedback control was designed. Therefore, it was confirmed that the ultrasonic natural vibration can be excited. Moreover, the change of natural vibration modes was realized by forced entrainment. Next, the detection experiment of contact-type failure based on nonlinear wave modulation using excited ultrasonic natural vibrations. It was confirmed that the oscillated frequency of ultrasonic vibrations is varied in synchronization with varying of the natural frequencies caused by nonlinear wave modulation. Therefore, the variation width of oscillated frequencies increases with the development of contact-type failure.

研究分野：機械力学・振動制御

キーワード：超音波 非線形振動 損傷検出 自励駆動 固有振動 多点加振 分散制御

1. 研究開始当初の背景

インフラ構造物や発電プラントなどの大型構造物は、近年老朽化による事故が多発するようになっている。微小な損傷を早期に発見し、その位置や進展を評価し、事故に発展する前にメンテナンスすることが求められている。そのために、構造物にセンサやアクチュエータなどを埋め込み、構造物の健全性を常時監視する構造ヘルスマonitoring技術の重要性が増している。

超音波を用いた損傷検出法は、微小な内部損傷を高精度で検出できるという利点から、様々な機械、構造物の非破壊検査に用いられている。開口損傷の場合は、損傷界面における超音波の反射によって損傷を検出できる(図1(a))が、損傷界面が接触している接触型損傷では、超音波が損傷界面を透過してしまうので検出が困難である。代表者は、低周波振動に起因する接触界面の接触剛性変動に起因して超音波振動の振幅や位相に変調が生じる非線形波動変調に基づく損傷検出法を提案している。これまでに、超音波帯域の固有振動を用いることで、構造物全体を検査領域とできることを示している。

しかし、伝播距離に応じて波動が減衰してしまう距離減衰や複数の部材の接合部における局所減衰などにより、大型構造物の超音波帯域の固有振動を励起することが困難である。そのため広範囲を検査するには検査回数が膨大になってしまい、コスト、検査時間ともに現実的ではない。そのため、大型構造物を高効率に精度よく検査する手法が望まれる。

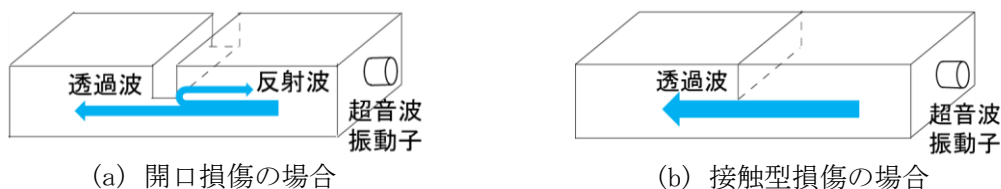


図1 超音波を用いた損傷検出

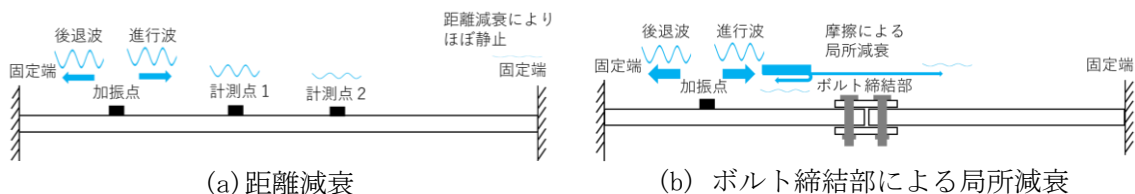


図2 大型構造物における超音波の減衰

2. 研究の目的

本研究では、大型構造物の超音波帯域の固有振動を用いて接触型損傷の検出する技術を開発することを目的とする。まず、固有振動数で自動的に発振させる局所フィードバック制御による自励駆動により自励振動子となる加振機を多数用いた分散制御による多点加振による超音波帯域の固有振動励起技術を開発する。さらに、励起した超音波帯域の固有振動を用いて、非線形波動変調に基づく接触型損傷検出が可能であることを示す。

3. 研究の方法

まず、局所フィードバック制御を用いた多点加振を超音波帯域で実現する。局所フィードバック制御を実現する。同じ位置(コロケート配置)に設置したセンサとアクチュエータで計測した周波数応答関数では固有振動数で位相が $-90^\circ$ になる(図3)。このとき、位相が $-90^\circ$ となる制御コントローラを用いると、固有振動数でのみ発振する。

この局所フィードバック制御を用いた多点加振を行うと、各アクチュエータは構造物を介して結合された状態とみなせる。この時、各アクチュエータは固有振動数で自励発振しており、固有振動モードを通じて同期する。その結果、固有振動励起に適した加振信号に自動調整される(図4)。この同期現象を利用した分散制御型多点加振を用いて超音波帯域の固有振動を励起する。

つぎに、はり構造物に接触型損傷を模擬した模擬損傷を取り付け、非線形波動変調によって生じる固有振動数変動計測が可

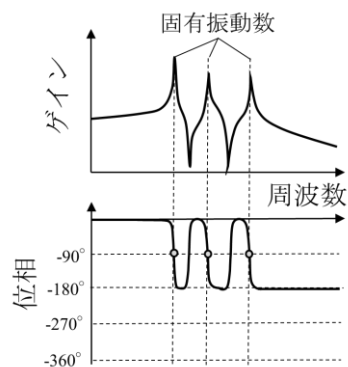


図3 コロケート配置で計測した周波数応答関数

能であることを示す。非線形波動変調が生じる超音波帯域の固有振動は、図5のような1自由度振動モデルで記述できる。このとき、可変剛性の変動周波数は、超音波帯域の固有振動数に対して十分小さい。この場合、線形の固有振動数が低周波数の振動数で変動する線形時変系とみなすことができる。ここで、局所フィードバック制御による自励駆動法では、固有振動数で位相が $-90$ 度となることを利用している。そのため、非線形波動変調によって固有振動数変動が生じると、発振周波数も変動する。この発振周波数変動幅を損傷評価指標とすると、粘性減衰の影響を受けずに損傷を評価することができる。

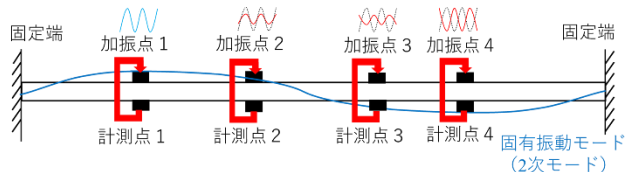


図4 分散制御型多点加振による固有振動励起

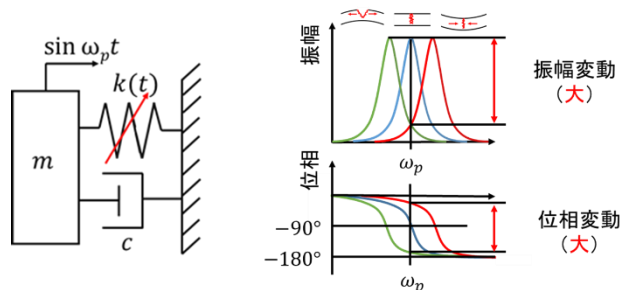


図5 非線形波動変調の1自由度振動モデル

#### 4. 研究成果

初めに、はり構造物に超音波加振および計測用圧電素子を4点に貼付した実験装置を用いて、分散制御による多点加振による超音波帯域の固有振動励起を行った。実験装置の概略図を図6に示す。長さ3000 mmの鋼製はり構造物を検査対象物とした。圧電素子を等間隔になるように600 mmおきに4点に貼付している。局所フィードバック制御のブロック線図を図7に示す。位相を $-90$ °にするために積分帰還制御を用いた。

まず、1200 mmに貼付した圧電素子を用いた1点強制加振と4点強制加振の結果を図8に示す。各位置の計測用圧電素子の開放電圧を計測した結果、1点加振では位相がずれているのに対し、4点加振では位相が同相か逆相でそろっており固有振動が励起できていることが確認できる。このことから、大型構造物の超音波帯域の固有振動励起には多点加振が重要であることが分かる。

次に、分散制御による多点加振を行った結果を図9、10に示す。図9は局所フィードバック制御により自動的に発振し、同期した固有振動である。強制多点加振と同じように各計測点の応答が同相または逆相でそろっており、固有振動が励起できていることが確認できる。図10は、強制引き込みにより励起した固有振動である。引き込み信号の周波数の固有振動数で発振し、同期していることが確認できる。このように、固有振動数で自動的に発振し、強制引き込みによって励起する固有振動を切り替えることが可能であることが確認できた。

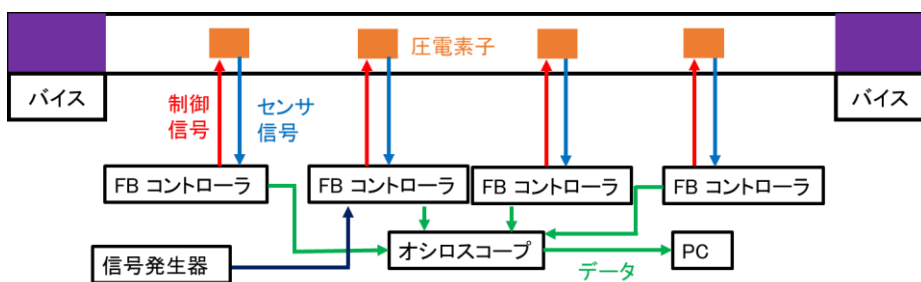


図6 実験装置の概略図

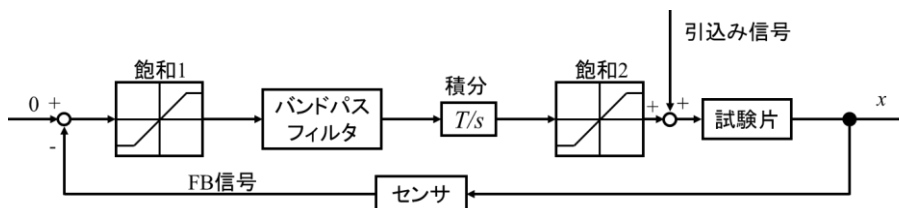


図7 局所フィードバック制御のブロック線図

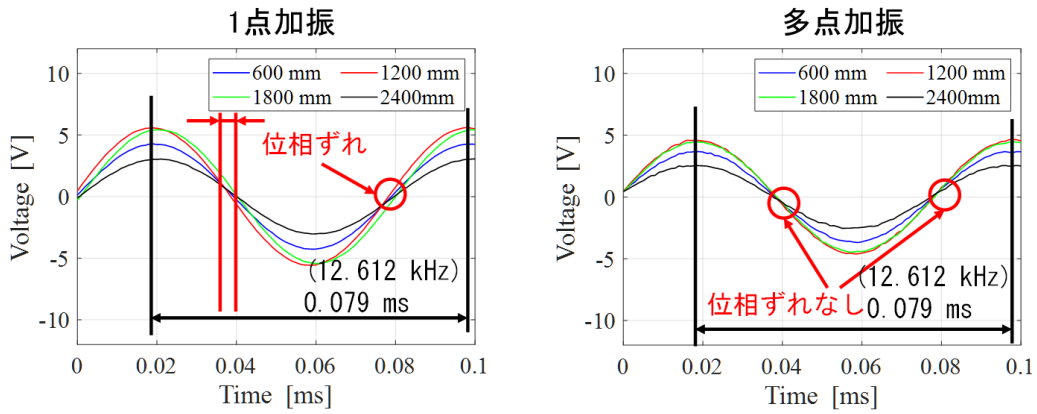


図8 加振点数が大型構造物の超音波帯域の固有振動励起に及ぼす影響

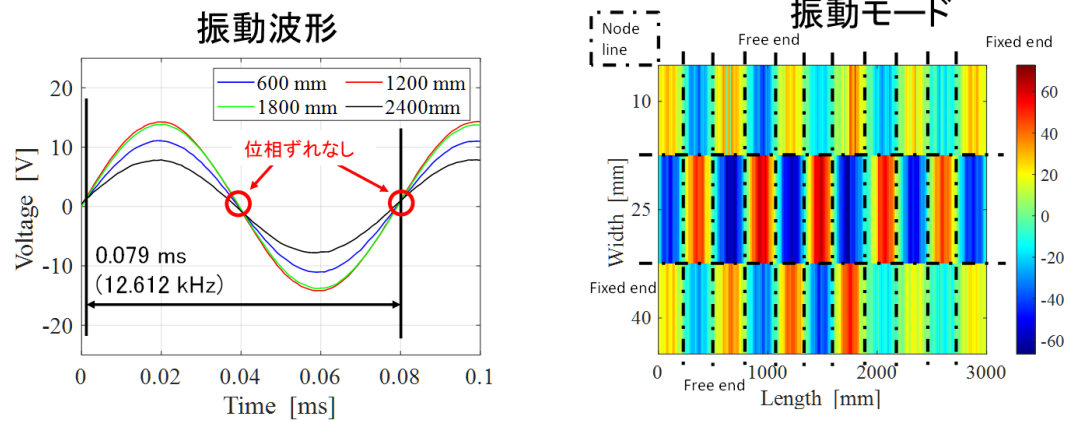


図9 分散制御によって励起された固有振動（自動的に励起）

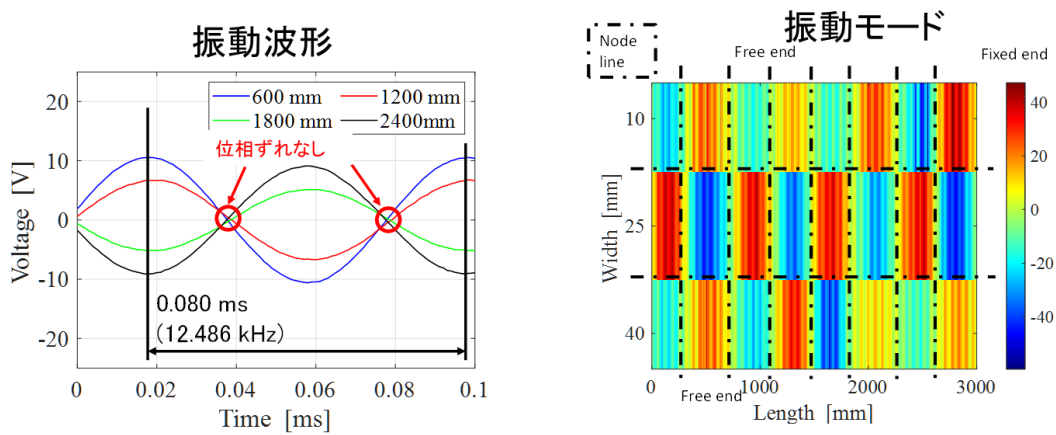


図10 分散制御によって励起された固有振動（強制引き込みによって励起）

最後に、分散制御によって励起した固有振動を用いて、非線形波動変調に基づく接触型損傷検出を行った。実験装置は上述と同じものを用い、接触型損傷は図11に示す模擬損傷を用いた。鋼製の小片を小型バイスではり構造物に取り付けたものである。はり構造物が曲げ変形を行った際に、はり構造物と小片間の接触面積が変動することで、接触型損傷を模擬している。模擬損傷は左固定端より2200 mmの位置に設置した。さらに、低周波振動を入力するために、垂直加振機を左端から250 mmの位置に設置した。垂直加振機は、はり構造物の2次の固有振動である8.6 Hzに設定した。

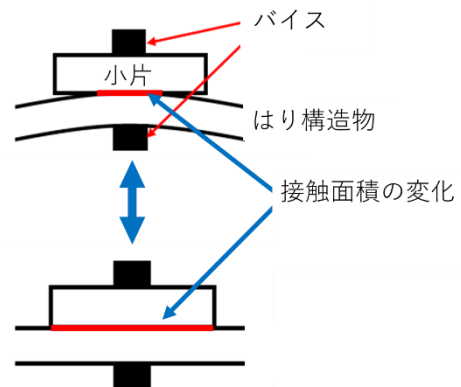


図11 模擬損傷のメカニズム

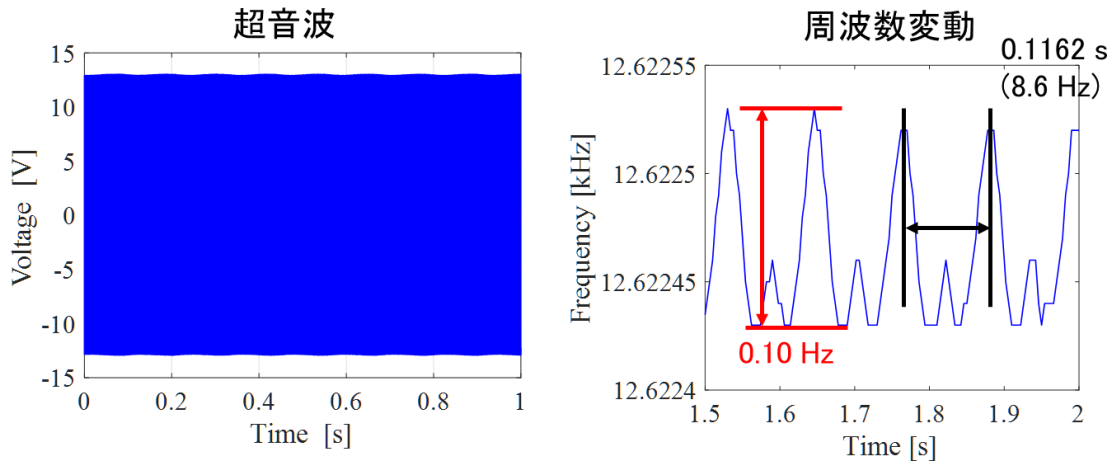


図 1.2 非線形波動変調に起因する分散制御によって発振した超音波帯域の固有振動の発振周波数変動

分散制御によって自動的に発振した超音波帯域の固有振動を利用した損傷検出結果を図 1.2 に示す。計測された超音波振動を短時間フーリエ変換し、発振周波数の時間変動を求めた結果である。低周波振動に同期した周波数変動が生じていることがわかる。このように、非線形波動変調によって生じる固有振動数変動を、発振周波数の変動として検出できた。

以上の結果から、大型構造物の超音波帯域の固有振動を自動的に励起する技術の開発が完了し、励起した超音波帯域の固有振動を用いた非線形波動変調に基づく接触型損傷検出も可能であることを示した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Takashi Tanaka, Takato Tamura, Yasunori Oura
2. 発表標題 Excitation of ultrasonic natural vibrations by multi-Excitation using decentralized control for failure monitoring
3. 学会等名 ASME 2021 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田村空翔, 田中昂, 大浦 靖典, 今村紘大
2. 発表標題 非線形波動変調に基づく接触型損傷の検出 (伝達関数の時間変動計測による損傷評価)
3. 学会等名 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中昂, 田村空翔, 大浦靖典
2. 発表標題 自励発振と同期現象により励起した超音波帯域の固有振動計測による損傷評価に関する基礎研究
3. 学会等名 第28回超音波による非破壊評価シンポジウム
4. 発表年 2020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
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------