

令和 元年 6 月 1 日現在

機関番号：12301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06145

研究課題名(和文) 低周波音吸収のための座屈後曲面カオス吸振装置の開発

研究課題名(英文) Development of vibration absorbing device utilizing chaotic vibrations of buckled curved plate for reduction of low-frequency sound

研究代表者

永井 健一 (Nagai, Ken-ichi)

群馬大学・その他部局等・名誉教授

研究者番号：00110403

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)：低周波音吸収の新手法として、座屈後曲面を用いた、飛び移りカオス振動誘起型の低周波音吸振装置の開発を目的とし、座屈後曲面振動板の振動実験を行った。

炭素繊維の方向が異なる二層を表裏非対称に積層させたCFRP板を中心固定し、制作時の高温から常温に低下させ、熱膨張係数の異方性により双安定性を有する試験片を作成した。曲率形状板は、曲率方向が互いに直交した二つの安定形状を有した。周期横方向加振力の下での非線形振動実験を行い、矩形境界に対する炭素繊維配位方向や集中質量の付加により、CFRP曲板に動的飛び移りによるカオス振動を生じる条件を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

非対称積層CFRP板に動的飛び移りを伴うカオス振動が生じる条件を明らかにすることで、広帯域の低周波音と簡素な仕組みで吸音できる装置への応用可能性が飛躍的に高まった。

研究成果の概要(英文)：Aiming at developing a low-frequency sound-absorbing device utilizing chaotic vibrations of a buckled curved plate accompanied by dynamic snap through transition, experiments are conducted on nonlinear vibrations of a rectangular unsymmetrically laminated CFRP plate. The CFRP plate is fixed at center with bolts. The CFRP plate has two stable equilibrium configurations which is an upward convex and a downward convex. The CFRP plate is excited with periodic acceleration by an electromagnetic shaker. Sweeping the excitation frequency, responses of the plate are measured by laser displacement sensors. In a specific condition of fiber orientation with respect to the rectangular boundary and attached concentrated masses, it was shown that chaotic vibrations are induced accompanied with dynamic snap-through transition.

研究分野：機械力学

キーワード：非線形振動

1. 研究開始当初の背景

我が国の各種機械、輸送機械や再生エネルギーの各産業は高機能と高効率の稼働で、より一層の経済性を高める重要な使命を有している。一方、我が国の狭い土地面積の影響で、産業地域、車両交通路、航空機航路などが住宅地域と隣接し密集している現状にある。

各種産業は動力源を用い仕事を行うと同時に、環境公害としての振動・騒音が発生し易い。特に、動力源と付帯設備からの低周波振動が大気を媒体に、音として広範囲に遠方まで伝播し住宅住民への低周波音の環境公害問題が多発している。例えば、その原因として、上空を航行するプロペラ機やヘリコプターからの低周波音をはじめ、空港近傍の航空機離発着、鉄道と自動車の走行沿線、架橋やトンネル近傍からの低周波音、工場での動力源や建物筐体からの伝播低周波音、風力発電ロータブレードの風切り低周波音、さらには、住宅地域間での冷暖房機器や給湯器による低周波音などがあげられる。

従来の対策は、騒音源や住宅外壁などを高剛性で重量な遮音壁で完全に密閉する必要があり、莫大な費用と資材を要し、実現を困難にしている。これに対し、低周波音を受ける住居の壁や窓、出入りに、高効率な低周波音吸振装置を取り付け、容易に低周波音を遮蔽することは、汎用性や経費面からも重要である。これより、豊かな生活環境が保たれる。

2. 研究の目的

簡素で高効率の低周波音吸収の新技术として、座屈後曲面板を用いた、飛び移りカオス振動誘起型の低周波音吸振装置の開発を目的とする。平板を座屈後変形させた曲板の動的飛び移りによる大変形で広帯域の振動を誘起させ、低周波の振動騒音のエネルギー吸収の新技术を確立し、汎用で低コストの低周波音吸収法による装置を新たに提案することを目的とし、座屈後曲面板の振動実験を行った。炭素繊維の方向が異なる二層を表裏非対称に積層させた CFRP 板を中心固定し、制作時の高温から常温に低下させ、熱膨張係数の異方性により双安定性を有する試験片を作成した。曲率形状板は、曲率方向が互いに直交した二つの安定形状を有した。矩形境界に対し炭素繊維配位方向が異なる CFRP の試験片を複数作製し、周期横方向加振力の下での非線形振動実験を行った。

3. 研究の方法

(1) 実験装置

CFRP の矩形板と支持装置を図 1 に示す。炭素繊維の方向が異なる二層を表裏非対称に積層させたもので、制作時の高温から常温に低下させる際の熱膨張係数の異方性により双安定性を有する、一辺約 70 mm のほぼ正方形に切り出された曲板である。CFRP 板の中心をボルトとナット、座金を用いて固定支持した。測定系の座標として CFRP 板の上方の水平面内に、CFRP 板の二辺に投影した方向に沿って x 、 y 軸を設け、それらと垂直な鉛直下方向に z 軸を設けた。実験では、 x 軸方向に対する繊維方向が一層目は 0 度、二層目は 90 度の「0/90」の積層板および、一層目は 45 度、二層目は -45 度の「45/-45」の積層板を使用した。なお、 z 軸方向が負側の層を一層目、他方を二層目と称した。厚さは $h=0.119$ mm、密度は $\rho=1.51 \times 10^4$ kg/m³ である。また、[45/-45]の積層板の各辺上に $m=0.066 \times 10^{-3}$ kg の集中質量を計四個取り付け付けた状態の実験を後に行った。集中質量は $(x, y) = (0, 18)$ [mm]、 $(x, y) = (38, 0)$ [mm]、 $(x, y) = (27, 65)$ [mm]、 $(x, y) = (65, 47)$ [mm] に取り付け付けた。

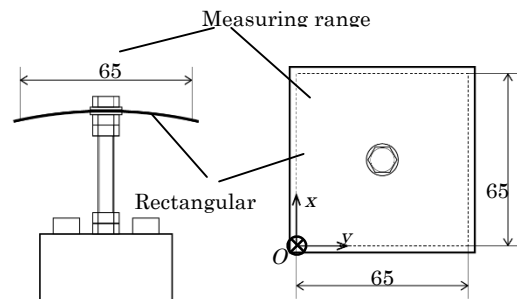


Fig.1 Rectangular plate and fixture.

(2) 実験要領

はじめに、CFRP 板の形状と線形固有振動数、復元力特性を調べた。続いて、「0/90」、「45/-45」の二積層の板について、それぞれ二つある安定平衡状態を初期状態として、加速度振幅 $|a|=40$ m/s² での周波数掃引を行い、掃引中の各周波数における振動応答と加速度を記録した。応答振幅の計測点は矩形板の座標 (x, y) [mm] において、 $(x, y) = (0, 0)$ [mm]、 $(x, y) = (0, 65)$ [mm]、 $(x, y) = (65, 0)$ [mm]、 $(x, y) = (65, 65)$ [mm] とした。後に、[45/-45]の積層板の各辺上に $m=0.066 \times 10^{-3}$ kg の集中質量を計四個取り付け付けた状態の実験を行った。集中質量は $(x, y) = (0, 18)$ [mm]、 $(x, y) = (38, 0)$ [mm]、 $(x, y) = (27, 65)$ [mm]、 $(x, y) = (65, 47)$ [mm] に取り付け、同様の加振実験を行った。加振実験では、支持装置の振動変位に対する、CFRP 板の各計測点の変位応答との差動をとり、CFRP 板の支持装置に対する相対変位を得た。相対変位と加振加速度波形から、CFRP 板の時間波形の記録と周波数分析、および相対変位における応答の実効値を数値的に求め、周波数応答曲線の作成を行った。

4. 研究成果

(1) 板の基本特性

① **CFRP 板の形状** CFRP 板の各安定平衡点における初期形状を図2に示す。板は一層目の繊維に曲率を有する形状（上凸形： \cap -shape）と、二層目の繊維方向に曲率を有する形状（下凸形：U-shape）の二つの安定的安定平衡状態を有する。

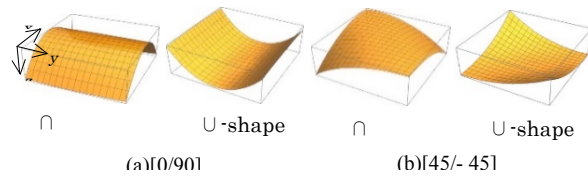


Fig.2 Configurations of CFRP plate

② **線形固有振動数と固有振動モード** 音圧加振より求めた固有振動モードと固有振動数について、[0/90]の上凸形は一次~三次モードを、それ以外の形状では一次モードの形状を図3に示す。図3より、全ての形状の最低次モードで、一層目の繊維方向に一本の中心を通る節が存在し、節に対して対称となるモードである。

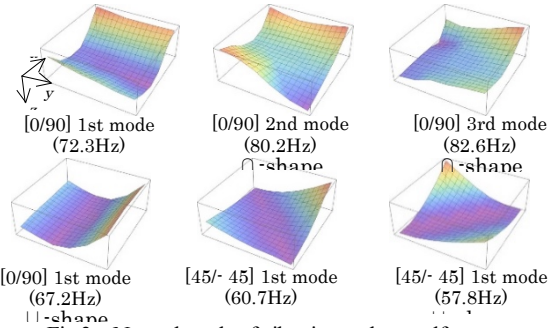


Fig.3 Natural mode of vibration and natural frequency

(2) 加振実験結果

電磁式加振器により周期横方向加速度を与えた際の CFRP 板の振動実験結果を示す。

以降の図の各軸は次のように示している。周波数応答曲線の縦軸は応答の実効値振幅 W_{rms} [m]、横軸は加振周波数 f [Hz] である。応答の変位時系列波形の縦軸は加速度変位に対する CFRP 板の相対変位 W [m]、横軸は時間 t [s] である。周波数分析結果の縦軸は応答振幅のデシベル値 A [dB]、横軸は分析周波数 f_{sp} [Hz] である。

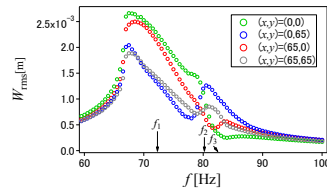


Fig.4 Frequency of response curves [0/90] \cap -shape

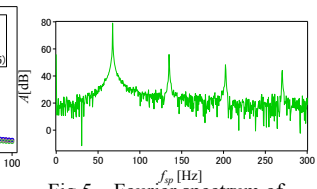


Fig.5 Fourier spectrum of displacement [0/90] \cap -shape

① [0/90] 上凸形

$f = 120$ Hz から $f = 50.0$ Hz までの掃引を往復で行った。図4に $f = 100$ Hz から $f = 60.0$ Hz における周波数応答曲線を示す。計測点 $(x, y) = (0, 0)$ [mm] の周波数下降掃引における、一次モードの主共振による最大振幅時の $f = 67.5$ Hz での、周波数分析結果を図5に示す。図5より、主共振での周波数成分は加振周波数成分の振幅が最大で、加振周波数の整数倍の成分が存在している。[0/90]の下凸形、[45/-45]の上凸形でも同様の結果が得られた。

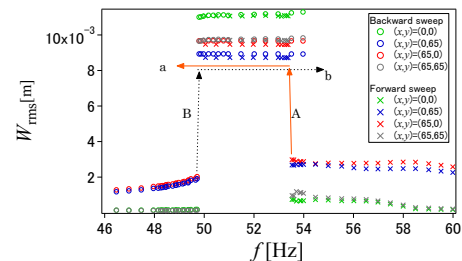


Fig.6 Frequency of response curves [45/-45] U-shape

② [45/-45] 下凸形

$f = 120$ Hz から $f = 50.0$ Hz まで周波数下降掃引、および $f = 45.0$ Hz から $f = 54.0$ Hz まで上昇させる周波数上昇掃引を行った。図6に $f = 45.0$ Hz から $f = 60.0$ Hz までの範囲の、周波数応答曲線を示す。図6において周波数下降掃引時の $f = 52.5$ Hz、周波数上昇掃引時の $f = 49.8$ Hz にて、下凸形から上凸形への飛び移りを生じた。上昇、下降の掃引ともに飛び移り変形後も周波数掃引を続けたが、図6中の矢印 Aa, 矢印 Bb で示すように、当初の下凸形への飛び移り変形はしなかった。計測点 $(x, y) = (65, 0)$ [mm] の周波数下降掃引における、飛び移りを伴う変形前の加振周波数 $f = 55.4$ Hz での、時系列波形を図7に示す。図7より、二周期ごとに同じ波形を繰り返す変位時系列波形となっている。これに対応して、図8の周波数分析結果には加振周波数成分の整数倍の周波数成分と共に加振周波数の $1/2$ 倍の周波数成分が含まれており、サイドバンドが出現している。

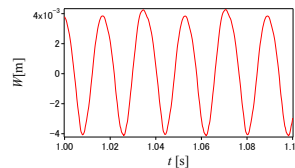


Fig.7 Time history of displacement [45/-45] U-shape

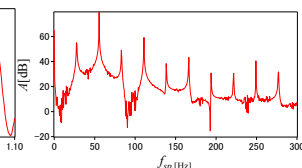


Fig.8 Fourier spectrum of displacement [45/-45] U-shape

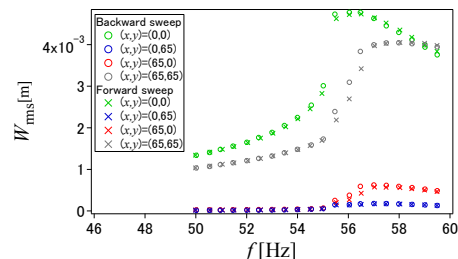


Fig.9 Frequency of response curves [45/-45] \cap -shape

上凸形での $f = 50.0$ Hz から $f = 60.0$ Hz までの往復の周波数掃引における周波数応答曲線を図9に示す。下凸形での実験結果図6と比較すると応答振幅の増大している範囲の周波数が約 5 Hz の差異があり、動的飛び移り応答の発生には至っていない。周波数掃引時に下凸形の状態から、もう一方の上凸形に遷

移しても、その加振振動数が遷移後の形状での固有振動数から離れ、振動振幅が小さいため、下凸形へ遷移する飛び移りが生じなかったと考える。

③ [45/-45] に集中質量を取り付けた場合 上凸形
 $f = 60.0 \text{ Hz}$ から $f = 40.0 \text{ Hz}$ までの掃引を往復で行った。図 10 に周波数応答曲線を示す。 $f = 43.8 \text{ Hz} \sim f = 42.8 \text{ Hz}$ の範囲では、動的飛び移りを伴う振動応答がみられた。計測点 $(x, y) = (0, 0) \text{ [mm]}$ の周波数下降掃引で行った実験における、 $f = 43.0 \text{ Hz}$ での、変位の時系列波形を図 11、周波数分析結果を図 12 に示す。図 11 よりこの振動応答は二つの安定平衡間を非周期的に動的に飛び移る、カオス振動状態の応答を示している。図 12 より広帯域の周波数成分を有し、カオス振動の特徴を示している。集中質量を取り付けたことにより、一次モードの固有振動数が、上凸形で 49.9 Hz 、下凸形で 51.3 Hz と近接し、また両形状での最低次モードへの加振力が増加したことで、動的飛び移り応答が生じた。

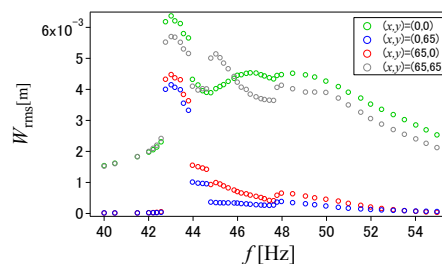


Fig.10 Frequency of response curves [45/-45] with concentrated mass □-shape

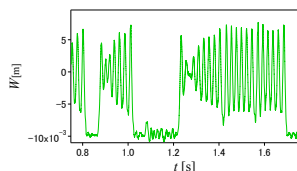


Fig.11 Time history of displacement [45/-45] with concentrated mass □-shape

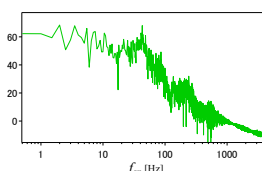


Fig.12 Fourier spectrum of displacement [45/-45] with concentrated mass □-shape

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 1 件)

松澤和彦, 丸山真一, 山口誉夫, 永井健一: 双安定性を有する CFRP 積層曲板の非線形振動実験, Dynamics and Design Conference 2017, 講演論文集(2017), No. 341

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 丸山 真一

ローマ字氏名: MARUYAMA SHINICHI

所属研究機関名: 群馬大学

部局名: 大学院理工学府

職名: 准教授

研究者番号 (8 桁): 6 0 3 4 4 2 9 5

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。