

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 26 日現在

機関番号：82670

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26820078

研究課題名(和文) クラスタ制御を用いた高周波振動試験システムの提案

研究課題名(英文) High frequency vibration test system using cluster control

研究代表者

福田 良司 (FUKUDA, Ryoji)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発本部開発第一部機械技術グループ・主任研究員

研究者番号：60463030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：はじめに加振台を模擬した4台の加振器によって支持される矩形平板に対し、クラスタ制御系の適用可能性について検討する。具体的には3D CADとCAEを用いて、試験機の加振台を想定した矩形平板の固有値解析と、本研究で提案するクラスタアクチュエーションによる平板の振動特性について、動解析を行ったのでその結果について報告する。次に、鉄製の矩形平板を4台の加振器によって支持し、通常の1点加振とクラスタアクチュエーションによって加振した際の周波数特性を比較し、優位性を検討する。最後に試験品の搭載を想定し、ダミーウェイトによる加振性能への影響について報告する。

研究成果の概要(英文)：This study considers the control method of a vibration table for a vibration test system. Recently, the vibration test with a high frequency range is required for aircraft parts. Difficulty in vibration test with high frequency range is the resonance frequency of the vibration table or the testing product. First, the cluster filtering and the cluster actuation used in the present study are brought together. Secondary, the result of the eigenvalue analysis was shown. It is for a simply supported rectangular plate to obtain the theoretical solution to verify the validity of the numerical analysis. Finally, the experimental results for the four point supported rectangular plate was ascertained. In addition, the result of dynamic analysis was shown, and the vibration characteristic of the cluster actuation was clarified.

研究分野：振動制御

キーワード：振動試験 振動制御 クラスタ制御 振動モード 3D CAD CAE

1. 研究開始当初の背景

構造物には、必ず共振周波数が存在する。振動試験を行う際に使用する加振台も、構造物であるため、共振を避けることはできない。一方、近年需要が増加している航空機向け製品に対しては、2000Hz までの高周波振動試験が要求されているが、一般的な加振器と加振台の組合せで、2000Hz までに加振台の共振が生じないようにすることは、かなり難しい。そこで本研究では、提案者がこれまでに研究を行っているクラスタ制御法を用い、新たな加振システムの提案を行う。

2. 研究の目的

これまで構造物の振動制御手法として研究を進めてきたクラスタ制御法の最大の特徴は、構造物に無数に発現する振動モードを、信号の加減算のみという簡素な手法で有限のグループに弁別し、これらを独立に制御できることにある。この特性を加振システムに活かすと、クラスタアクチュエーションの次元で、構造物に励起される振動モードの数が、矩形平板を対象とした場合には、一般的な加振方法と比較して、4分の1に抑えてしまうことができる。この特徴を活かして、加振台が高周波域までピークを持たないシステムの提案を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、4 台の加振器により構成される 4 点支持された矩形平板の振動特性を、特に振動モード形状についての解析と実験の両面から明らかにし、クラスタ制御の適用可能性を検証する。次いで、クラスタアクチュエーションによる加振システムの具現化を行い、加振上限周波数の検証を行う。すなわち、振動モードを発現させずに加振することができる限界を明らかにすることで、本計画で提案するクラスタ制御振動試験の優位性を明らかにする。最後に、より現実的な加振試験の状況を想定し、無負荷時の振動特性と加振台にダミーウェイトを搭載した際の振動特性について比較を行い、クラスタ制御の適用範囲について検証する。

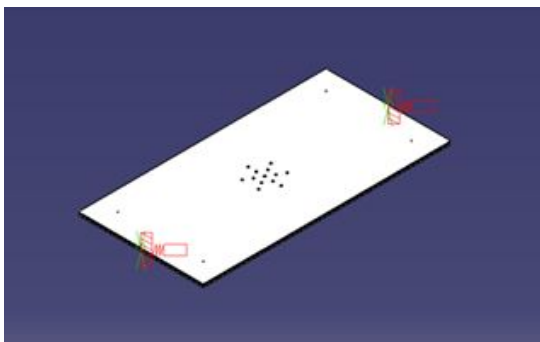


図 1. 加振台を模擬した CAE モデル

4. 研究成果

(1) 4 点加振される矩形平板の振動特性 (数値解析) について

はじめに、クラスタアクチュエーションの加振台への適用可能性を検討するため、CAE を用いて矩形平板を対象とした動解析を行った。実際の加振台を模擬した解析モデルとするため、平板の周辺には境界条件を与えないことが望ましい。しかしながらモデルを拘束しないと、動解析を行うことができなくなってしまったため、その打開策として平板の 2 辺をパネで支持する境界条件を与えた。CATIA V5 によるモデリングを行い、さらに CATIA CAE を用いて FEM モデルを作成した。このモデルを図 1 に示す。はじめに、一般的な垂直加振台を模擬した中央加振による調和応答解析について述べる。解析条件としては、平板中央の 4 つの穴に垂直方向の力を与え、10~500Hz の範囲で調和応答解析の結果、複数のピークが励起されていることが分かった。この結果から、従来の加振台を模擬した加振方法では、ピークのレベルに違いはあるものの、全てのモードが励起されていると言える。また、本研究では触れていないが、センサとアクチュエータ(加振点)のコロケーションが成立していないため、スプilloーバが生じることも容易に予想できる。

次に平板の 4 隅を加振することにより、クラスタアクチュエーションのシミュレーションを行う。力の与え方は単純支持平板の時と同じく、奇数/奇数クラスタアクチュエーションを行う際には、平板 4 隅に同じ向き、同じ大きさの力を与えればよい。この方法によって得られた解析結果として、図 2 に $r=(0.25\text{ m}, 0.05\text{ m})$ の位置における加速度を示す。ピークの値を低い方から順に述べると、15Hz, 62Hz, 89Hz, ... となっており奇数/奇数クラスタアクチュエーションが成立していることが分かり、単純支持矩形平板の時と同様、それぞれのクラスタに属するモードのみが励起されていることが確認できる。これらのことから、加振器 4 台によって支持される加振台に対して、クラスタアクチュエーションによる加振を行うと、所望するクラスタに属するモードのみが励起され、他のモード

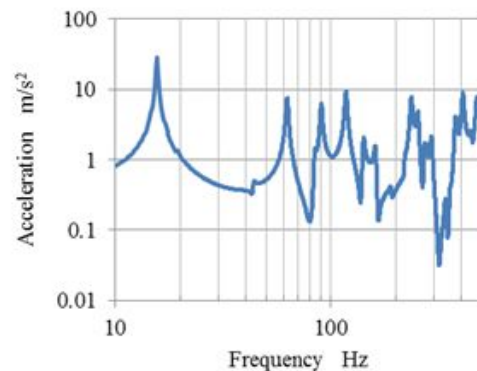


図 2. 矩形平板の数値解析結果 (クラスタアクチュエーション)

群は励起しないことが分かる。したがって、加振台を奇数/奇数クラスタアクチュエーションによって駆動すれば、奇数/奇数モードのみしか励起されず、さらにセンサとアクチュエータの間にコロケーションを成立させた加振システムを構築すれば、高周波領域まで加振台を使用することができる可能性を示すことができた。

(2)クラスタアクチュエーションによる加振台の具現化

前節で示した数値解析の妥当性の検証と、高周波数の振動試験の実現に向けて、4台の加振器を用いて平板を支持し、平板を加振した際の周波数特性について検証する。はじめに、本実験で用いる装置を図3に示す。平板は0.4m×0.3m、板厚0.0032mの鉄製とし、平板の4隅を加振器とボルトで締結している。4台の加振器はLabworks社製ET-126-4型(最大加振力:57N、最大変位:19mm p-p)を用い、パワーアンプとして、4台のパイオニア製A-50を用い、それぞれの加振器を駆動した。また、平板の振動を計測するため、 $r=(0.03m, 0.04m)$ の位置に加速度ピックアップを設置した。

実験はこの4台の加振器に、発信器から生成した10~800Hzのホワイトノイズを入力して駆動させ、平板を加振する。すると、4台



図3 . 4台の加振器で支持される平板

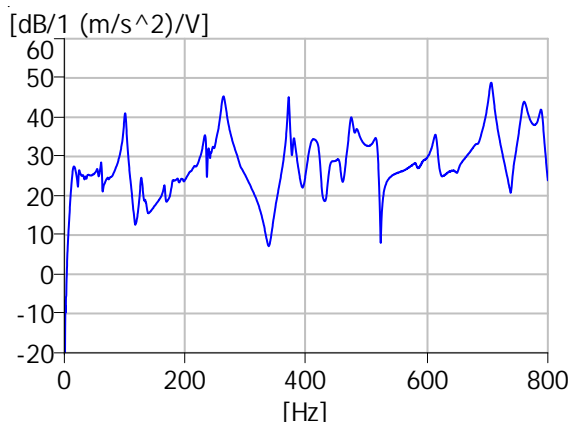


図4 . クラスタアクチュエーションによって加振された平板の振動特性

の加振器が同一の信号で、同時に駆動されることから、奇数/奇数クラスタアクチュエーションが成立した状態で平板を加振していることになる。このときの平板の周波数特性を示したのが図4である。次に、従来の一般的な加振システムを模擬し、平板の中央に1台の加振器を設置し、平板を加振する実験を行った。先ほどの奇数/奇数クラスタアクチュエーションの際と比較するため、加振器の数が減ったことによる支持条件の変更を除き、同じ条件で平板を加振した。この結果を図6に示す。2つの図を比べると、ピークの数に違いが見られ、図6の加振器1台による加振よりも、図4に示したクラスタアクチュエーションによる加振の方がピークの数が少ないことが分かる。この結果と、前節で述べた数値解析の結果と照らし合わせてみると、4台の加振器によって支持される平板においても、これまでのクラスタ制御に関する研究で用いてきた、周辺をナイフエッジによって単純支持された平板と同様に、クラスタアクチュエーションが成立していることが分かる。

(3)ダミーウェイトによる加振台への影響

最後に、実際の加振試験を想定し、平板にダミーウェイトを付した際の特性について検討する。クラスタアクチュエーションに

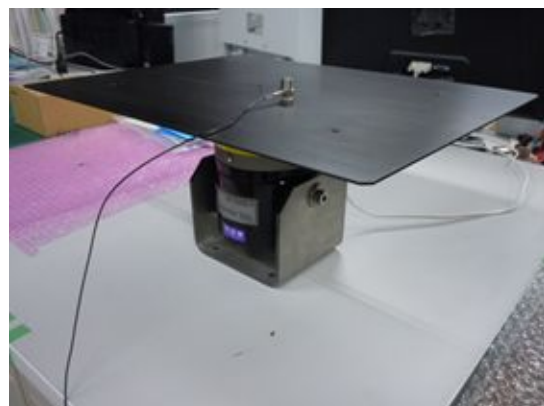


図5 . 一般的な加振台を模擬した平板と加振器

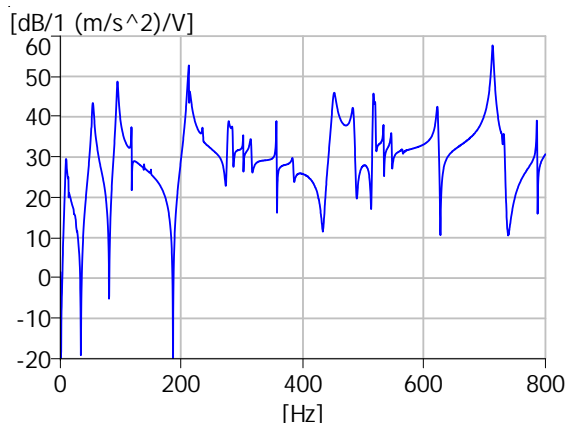


図6 . 中央1点加振による平板の振動特性

よって特定のモード群のみが励起されるのは、矩形平板の振動モード形状が対称性を有していることを利用したものである。前節では4台の加振器によって支持される平板をクラスタアクチュエーションによって加振すると、特定のモード群のみが励起されることを実証した。しかし、実際に加振試験では、試験品の重心が加振台の中心と一致することは考えにくく、むしろ試験品の重心が加振台の中央とは異なる位置になることを想定する必要がある。従来の加振台では、加振台の振動モード形状が考慮されることはなかったが、本手法ではクラスタアクチュエーションを採用することから、モード形状の対称性が崩れると、加振特性に影響が生じることが考えられる。

そこで試験品を想定したダミーウェイトを平板に設置し、平板の周波数特性の変化を確認する。実験では、287.6gのダミーウェイトを平板に設置し、クラスタアクチュエーションを講じた際の周波数特性を計測した。なお、平板の質量は1495gである。まず図7には平板中央と加振点の中心にダミーウェイトを設置した際の周波数特性を示した。このダミーウェイトによる影響を評価するため、各加振器と平板の間にロードセルを設置し、静的な荷重の変化を予め計測した。各加振器が受ける負荷を図8に示す。この結果をみると、ダミーウェイトの設置によって、各加振

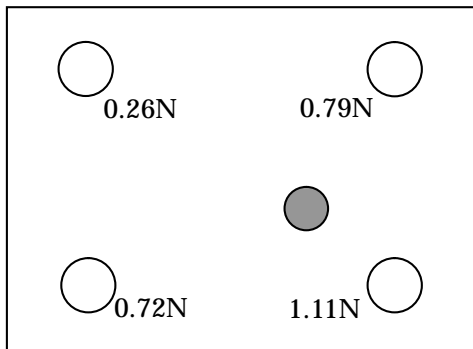


図7. おもりの設置位置と4台の加振器が受ける荷重(a)

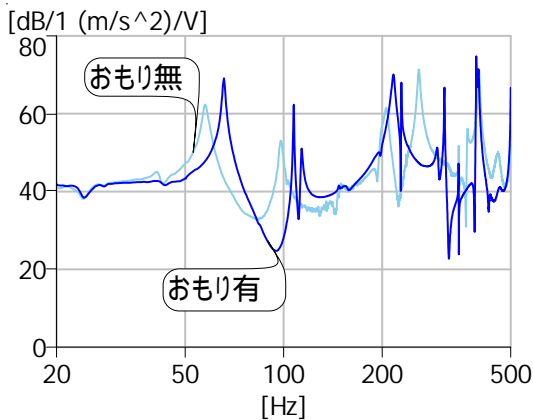


図8. ダミーウェイトによるクラスタアクチュエーションへの影響(a)

器が受ける荷重に違いがあることが確認できる。これを踏まえて図7の周波数特性をみると、ダミーウェイト無しの時と比べ、ピークの数や位置が異なっていることが分かる。このことから、ダミーウェイトの影響により平板のモードの対称性が崩れ、結果としてクラスタアクチュエーションが成立しなくなっていることが分かる。次に図10にはダミーウェイトの位置を変化させて、再度平板を加振した際の周波数特性を示す。先ほどの図8と同様、ピークの数や位置が変化していることが確認できる。この時のダミーウェイトの位置と、各加振器が受ける荷重は図9に示すとおりである。

以上2つの実験結果から、加振台に試験品が搭載されると、加振台の特性、特にモード形状に変化が生じ、これまでと同じ手法のクラスタアクチュエーションでは、特定のモード群のみを励起することができず、結果的に全てのモードを励起してしまう可能性が確認できた。

(4)まとめ

本研究では、振動試験機の垂直加振台において高周波数帯までの振動試験の実施を目的として、クラスタ制御法を活用した新たな加振システムを提案し、その性能について実験により検証した。

はじめに、これまでのクラスタ制御に関する

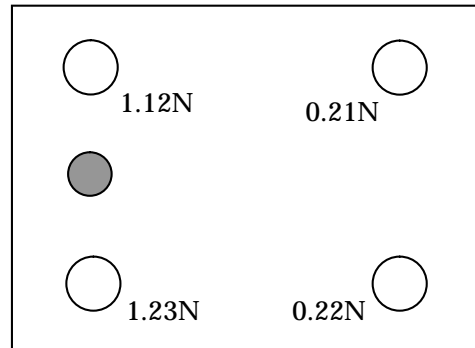


図9. おもりの設置位置と4台の加振器が受ける荷重(b)

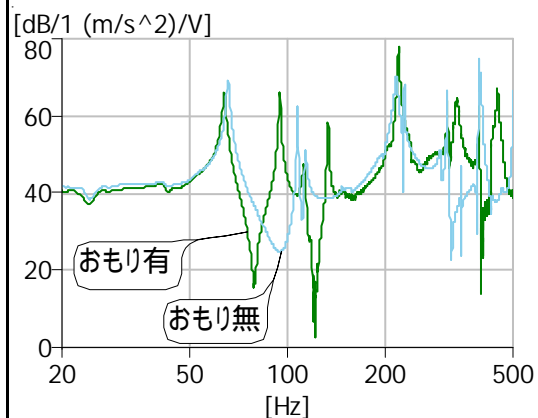


図10. ダミーウェイトによるクラスタアクチュエーションへの影響(b)

る研究で得られた成果をもとに、今回対象とする加振台に対してクラスタ制御の適用可能性について検討した。具体的には数値解析(CAE)を用いて、周辺が固定されない矩形平板をモデル化し、クラスタアクチュエーションによって加振した際の振動特性を検証した。その結果、在来の研究で用いた周辺単純支持平板と同様、特定のモード群のみを励起することが可能であることを明らかにし、クラスタ制御の適用可能性を確認した。

次に、4台の加振器によって支持される矩形平板を具現化し、クラスタアクチュエーションによって平板を加振した際の振動特性を明らかにした。これまでのクラスタ制御で対象としていた周辺単純支持平板と同様、特定のモード群のみが励起されることを実証した。さらに、一般的な振動試験装置の加振台で採用されている中央支持された矩形平板の振動特性と比較し、1次モード周波数の上昇と、発現するピークの数が増加することを確認し、本研究で提案する手法が高周波数帯の加振試験実現に適していることを実証した。

最後に、実際の加振試験を想定したダミーウェイトを平板に設置し、平板の振動特性への影響を検討した。ウェイトが平板の中心とは異なる位置に設置された場合、モード形状が崩れることにより、モード形状の対称性を利用したクラスタアクチュエーションは成立しないことが確認された。

今後は、加振システムとしての実用性を追求するため、試験品の搭載位置による影響を受けないような、クラスタアクチュエーション法に関する研究を進める予定である。

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)

[学会発表](計2件)

福田良司, クラスタ制御を適用した振動試験用垂直加振台の数値解析, Dynamics and Design Conference 2015, 2015年8月26日, 弘前大学

福田良司, クラスタアクチュエーションを用いた振動試験用垂直加振台の基礎的検討, Dynamics and Design Conference 2016, 2016年8月26日, 山口大学

[その他]

福田良司, 複数の加振器を用いた高周波振動試験手法の検討, TIRI クロスミーティング 2017, 2017年6月9日, 東京都立産業技術研究センター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

福田 良司 (FUKUDA Ryoji)

地方独立行政法人東京都立産業技術研究センター・開発第一部機械技術グループ・主任研究員

研究者番号: 60463030