

令和 5 年 6 月 8 日現在

機関番号：82627

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04950

研究課題名（和文）パラメトリック励振を用いた自己給電可能なアクティブ型動吸振器の基礎的開発

研究課題名（英文）Basic development of self-powering active dynamic absorber based on parametric resonance

研究代表者

谷口 智之（Taniguchi, Tomoyuki）

国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員

研究者番号：20782460

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）：船内振動に対する国際規格の改正や騒音規制の導入など効果的な振動・騒音の低減が求められる中、建造後に対策可能な動吸振器による制振装置が研究されている。中でも周囲のエネルギーを振動エネルギーに変換し、発生・成長する自励振動を用いた装置は効率的な制振が可能であり、振動発電にも利用される。本研究では、その振動発電による自己給電を電源とすることで外部電力を不要にし、アクティブ制御によって効果範囲を広げた自励振動による動吸振器を研究対象とした。理論解析により制御と励振のエネルギーが発電の散逸エネルギーを超えれば実現できることを明らかにし、実験的にも確認を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建造前に高精度な振動・騒音予測を行うことは難しいのが現状であり、建造後に対応可能な制振装置があれば、引き渡し拒否といった最悪の事態を免れることができる。一方、自励振動による動吸振器は、制振効果が表れる周波数範囲が狭く、ロバスト性には課題がある。また、動吸振器を制御することで低減効果のある周波数範囲を広げるアクティブ型動吸振器があるが、外部電源が必要となるなど運用コストの負担が増加する。本研究は、自励振動による抑制効果と振動発電のそれぞれの特長を活かして、振動発電を電源としたアクティブ制御を導入することにより、広範囲かつ効果的に制振を行う自己給電型制振装置である。

研究成果の概要（英文）：In response to demands for effective vibration and noise reduction, such as the international standards for shipboard vibration and noise regulations, vibration control devices using dynamic vibration absorbers that can be implemented after construction are being studied. Devices that use self-excited vibration to generate and grow by converting surrounding energy into excitation energy can provide efficient vibration control and are also used for vibration power generation. In this study, a self-powered and active controlled dynamic vibration absorber is developed. This eliminates the need for external power and is expected to expand the effective range through active control. We showed that this can be achieved if the control and excitation energies exceed the dissipated energy of power generation, and this was confirmed experimentally.

研究分野：機械振動学

キーワード：オートパラメトリック励振 振動制御 自励振動 安定判別

1. 研究開始当初の背景

近年、国際規格 ISO20283-5 が適用されるなど、船内振動に対する振動対策が焦眉の課題となっている。船舶では主な起振源は主機であり、その振動を抑えることが本質的かつ抜本的な解決策である。事前の予測に基づく設計や構造変更によって抑えることが第一であるが、精度の良いモデルや外力を推定することは難しく、また、据え付けられた主機周りを事後に構造変更させることは施工上困難である。そこで、比較的小型で建造後に取り付けることができる動吸振器が注目されてきた。動吸振器とは、図 1 のように小さな質量をばねとダンパを介して制振対象（主系）に取り付け、動吸振器が主系の代わりに振動することによって、制振を図る装置のことである。動吸振器についてはいくつか形式が存在するが、近年では自励振動を用いた動吸振器に関する研究も注目されている。自励振動とは周囲のエネルギーを振動エネルギーに変換し、発生・成長する振動であり、自励振動を用いた装置が制振対象の代わりに振動することによって、効率的に振動を低減化させる。この性質は振動発電としても用いられる。しかしながら、制振効果が表れる周波数範囲が狭く、ロバスト性には課題が残る。また、動吸振器を制御することで低減効果のある周波数範囲を広げるアクティブ型動吸振器があるが、外部電源が必要となるなど運用コストの負担が増加する。自励振動による抑制効果と振動発電のそれぞれの特長を活かして、振動発電を電源としたアクティブ制御を実施できれば、自励振動を用いた自己給電型の動吸振器の開発につながる。

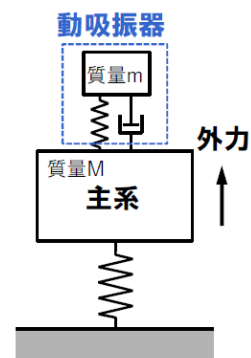


図 1 動吸振器

2. 研究の目的

本研究の目的は、自励振動を用いた自己給電可能なアクティブ型動吸振器でのエネルギー的な収支関係を明らかにし、それに基づき効率的に振動を抑制する制御方法を確立することである。自己給電型の動吸振器はこれまでの研究の多くが、振動的な外力によって振動発電を行う強制振動系を対象としている。一方、周囲のエネルギーを振動的なエネルギーに変換して振動発電を行う自励振動系の自己給電型の動吸振器については知る限りでは前例がない。また、実験や数値計算結果によってその効果を検証するだけでなく、エネルギー的な収支関係を明らかにし、理論的な適用限界を示す。本研究によって事後対策が可能で外部電源も不要な装置の開発が可能となれば、船舶における振動問題解決への一助となる。また、本提案装置はエネルギーハーベスティング装置として捉えることができ、船舶の主機のような振動問題に限らず、自己給電型センサーや波力発電などへの展開も可能と考える。

3. 研究の方法

本研究では、制御入力によって増加された自励振動の励振エネルギーと発電によって失われる散逸エネルギーとの間の関係を理論的に明らかにし、自励振動が安定的に発生し、かつ制振に効果的な制御方法を明らかにする。上記検討の妥当性は数値計算および実験により検証する。主に以下の①～③の研究アプローチをとる。

① 解析モデルに基づくエネルギー的な関係の導出

本研究では、オートパラメトリック励振を用いた振り子型動吸振器を用いる。オートパラメトリック励振は、質量や剛性係数が周期関数となることで発生する自励振動であり、立ちこぎのブランコのように外力の振動方向と直角方向に振幅が拡大する現象として現れる。解析モデルは、制振対象（主系）と動吸振器および制御系の 3 つの系の連成系として構築する。本研究では図 2 に示すような解析モデルを対象とする。主系は上下方向にのみ振動する 1 自由度系とし、起振源から上下方向の振動的な外力 F が作用する。主系の上下運動によって振り子が左右方向に自励振動を起こし、発電される。発電の抵抗を減衰としてモデル化し、散逸エネルギーを発電エネルギーに換算する。振り子には、トルクモーターによるトルク制御力 U が作用する。上記解析モデルに基づき、励振エネルギーと散逸エネルギーを導出し、数式的にその関係を明らかにする。

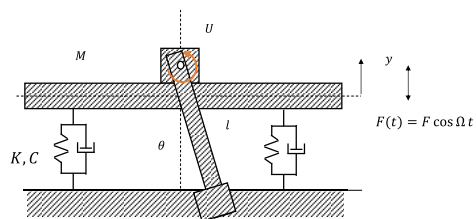


図 2 オートパラメトリック励振を用いた動吸振器の解析モデル

② エネルギー的な収支関係に基づく効果的な制御方法の検討

上記で得られた解析モデルと解析結果に基づき、フィードバック制御系による主系の振動エネルギーを最小化するような制御方法を検討する。このとき、オートパラメトリック励振の特徴を活かした制御入力を検討する。

③ 実験に基づく妥当性の検証

実験的な観点から提案装置と解析モデルの妥当性を検証する．図 2 の解析モデルを再現できるような装置を製作する．実験はバッテリーの代わりに外部電源を用いた構成にて行い，角速度，主系の振幅などをロータリーエンコーダおよび加速度センサーを用いて計測する．理論計算との比較や実験的に制御入力を用いたオートパラメトリック励振による制振と発電が可能であるかについて検証する．

4. 研究成果

研究期間内の本研究成果について，3. 研究の方法で述べた①～③に対応する形式で下記のとおりにまとめる．

① 解析モデルに基づくエネルギー的な関係の導出

図 2 の解析モデルから，ラグランジュの運動方程式を導出すると次の式(1)となる．

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{y} + 2C\dot{y} + 2Ky + ml(\dot{\theta}^2 \cos \theta + \ddot{\theta} \sin \theta) = F \cos \Omega t \\ ml^2\ddot{\theta} + mgl \sin \theta + \dot{y}ml \sin \theta + C_\theta \dot{\theta} = U \end{cases} \quad (1)$$

式(1)の第 1 式は主系に関する運動方程式であり，第 2 式は振り子に関する運動方程式とみなせる．また，上記に対して無次元数を導入すると，式(2)となる．

$$\begin{cases} v^2 \xi'' + 2\zeta_\xi v \xi' + \alpha^2 \xi + \mu v^2 (\theta'^2 \cos \theta + \theta'' \sin \theta) = \eta \cos \tau \\ v^2 \theta'' + 2\zeta_\theta v \theta' + \sin \theta + v^2 \xi'' \sin \theta = u \end{cases} \quad (2)$$

ここで，自励振動が発生するかしないかは安定・不安定境界上の状況について検討すればよい．まず， $\theta = 0$ の場合，解は次のようになる．

$$\xi = A_0 \cos(\tau + \phi), \quad A_0 = \frac{\eta}{\sqrt{(\alpha^2 - v^2)^2 + 4\zeta_\xi^2 v^2}} \quad (3)$$

つまり，式(3)で表される周期解からの摂動成分の振幅が拡大するか否かによって安定性（自励振動が発生するか否か）が決定される．また，減衰と励振項を外力とみなすと，それらの外力が摂動成分に対して 1 周期の間になす仕事をそれぞれ散逸エネルギーと励振エネルギーと考えることができる．

以上より， $\theta = B \cos(\tau/2 + \phi)$ と仮定し，線形化を行った後，振り子系に対して散逸エネルギー $-W_d$ ，励振エネルギー W_p ，制御入力によりなされる仕事 W_u を導出すると，次のようになる．

$$\begin{cases} W_d = \int_0^{4\pi} (-2\zeta_\theta v \theta') \theta' d\tau = -\frac{\pi}{2} 2\zeta_\theta v B^2 \\ W_p = \int_0^{4\pi} (-v^2 \xi'' \theta) \theta' d\tau = \frac{\pi}{2} v^2 B^2 A_0 \sin(\phi - 2\psi) \\ W_u = \int_0^{4\pi} (u) \theta' d\tau \end{cases} \quad (4)$$

導出は割愛するが，制御入力がない場合，調和バランス法により特性指数が求められ，特性指数が正となる条件から，自励振動が発生するためのエネルギー的な関係は次のように示される．

$$W_d + W_p > 0 \quad (5)$$

つまり，励振エネルギーが散逸エネルギーを上回る場合に，自励振動が発生する．また，上記は制御入力がない場合であるため，制御入力を含む場合は以下のように拡張できる．

$$W_d + W_p + W_u > 0 \quad (6)$$

② エネルギー的な収支関係に基づく効果的な制御方法の検討

上記で明らかとなったエネルギー的な収支関係をもとに，制御入力を検討する．まず，式(6)より，自励振動が発生しやすくさせるためには $W_u > 0$ であることが望まれる． W_u は式(4)で定義されるとおりであるため， u には周期 4π の成分とその高次成分を持っていた場合，それらは積分によりゼロとなってしまう．そのため， u について ξ と θ に関する 2 変数の 2 次までのテイラー展開を行った場合， ξ と θ の連成項以外は積分するとゼロとなる．そのため，自励振動の発生に対して影響を与えることができる制御入力は次式で定義することが妥当といえる．

$$u = K_G \xi \theta \quad (7)$$

この時、式(4)の制御入力による仕事は次のように導出される。

$$W_u = \int_0^{4\pi} (K_G \xi \theta) \theta' d\tau = \frac{\pi}{2} K_G B^2 A_0 \sin(\phi - 2\psi) \quad (8)$$

式(4)の関係を考慮すると、 $W_p > 0$ のとき、 $W_u > 0$ となるためにはゲイン K_G は正の値である必要があり、かつ K_G を大きくできるほど、自励振動が発生しやすくなる。

次に、式(2)の変動成分を考えて、自励振動の発生条件について検討する。まず、式(2)の変動成分を $\theta = B e^{\sigma \tau} \cos(\tau/2 + \phi)$ と仮定しなおす。ここに、 σ は特性指数と呼ばれ、 $\sigma > 0$ のとき自励振動が発生することを意味する。式(2)に代入し、調和バランス法を適用して解を導出すると次式となる。

$$\sigma = -\frac{\zeta\theta}{\nu} \pm \frac{1}{4\nu^2} \sqrt{4A_0^2(\nu^2 + K_G)^2 - (\nu^2 - 4)^2} \quad (9)$$

この式からも K_G が大きいほど特性指数 σ が大きくなることが確認された。一方で、実際にはモータの特性上、外力として出力できる大きさには限界はある。また、モータの特性を反映した減衰係数 ζ である必要がある。

図3はルンゲ・クッタ法を用いて非線形数値シミュレーションを実施した時の結果である。図中の左図は主系、右図は振り子に対する周波数応答を示しており、青色は制御入力がない場合、橙色は制御入力ありの場合の結果である。まず、青色で示すように、振動数が2.0（振り子単体の振動数が主系の振動数の2倍）付近のときに振り子の振幅が急激に拡大していることがわかる。一方で、主系の振幅はその領域において抑制されており、オートパラメトリック励振による制振が現れている。また、制御を用いた場合、その抑制領域が振動数領域で拡大していることがわかる。このように数値シミュレーション上では制御入力による有効性が示された。

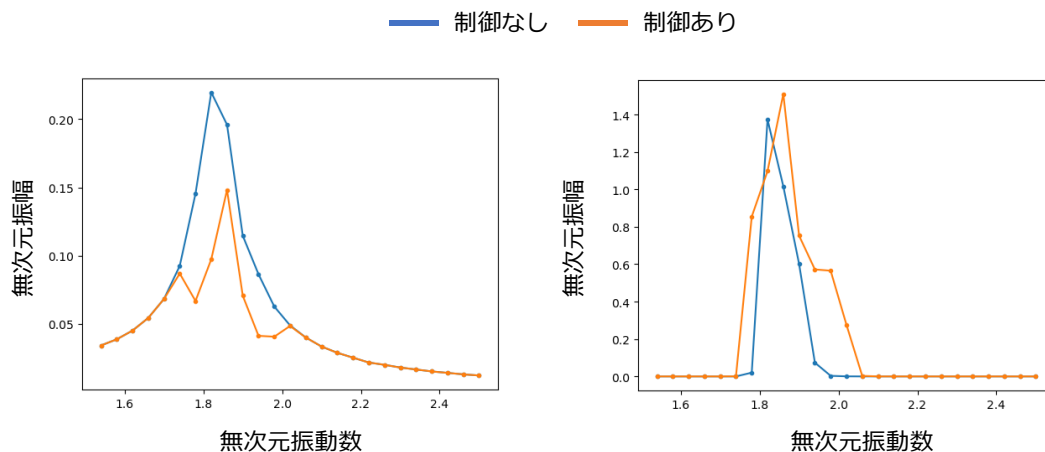


図3 数値計算結果（左：主系，右：振り子）

③ 実験に基づく妥当性の検証

上記論理的な検討の妥当性と装置としての実現可能性について実験的な観点から検討するため、図4に示すような実験装置を製作した。諸元は表1の通りである。

動吸振器部は、振り子と錘、およびエンコーダと制御用のブラシレスモータ(maxon製)で構成される。それ以外のアルミフレームは主系部となり、主系は起振用のブラシレスモータを用いた。コイルばねによって支持されており、シャフトを用いて上下方向の振動となるようなガイドを設けている。主系が上下方向に振動し、振り子は左右方向に振動するオートパラメトリック励振系となる。制御モータの制御にはRaspberry Pi Picoを用いている。安価で簡単に利用できることから採用した。ロータリーエンコーダと慣性計測装置から振り子の回転角と起振部の上下方向加速度を計測し、それらをRaspberry Pi Pico上のプログラムで処理してから、制御入力用の計算を実施する。計算値はmaxon製の制御モータのduty比の計算に用いることで制御を実施する。制御入力式は式(7)を用いている。

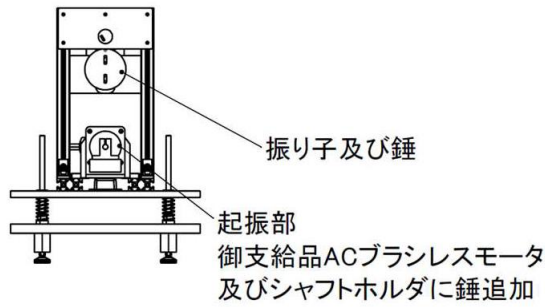


図4 実験装置

表1 実験装置の諸元

項目	数値	単位
ベース部重量	4.5	kg
ばね定数	1.256	N/m
静的たわみ	35	mm
振り子固有振動数	2.5	Hz
単身同時の振り子長さ	39.72	mm
起振部モータ偏心量	35	mm
偏心錘重量	0.2	kg
寸法 (縦×横×高さ)	300×200×300	mm

図5は実験結果の応答を示しており、青色は制御なし、橙色は制御ありのときの振幅結果を示している。この図から、4.5Hz~4.6Hzの間で急激に振り子の振幅が拡大しており、オートパラメトリック励振が起きていることが確認される。また、制御入力を加えた場合はオートパラメトリック励振が発生する範囲が広がっていることがわかる。このように、式(7)で示すような制御入力によってオートパラメトリック励振は拡大することが実験的にも示すことができた。

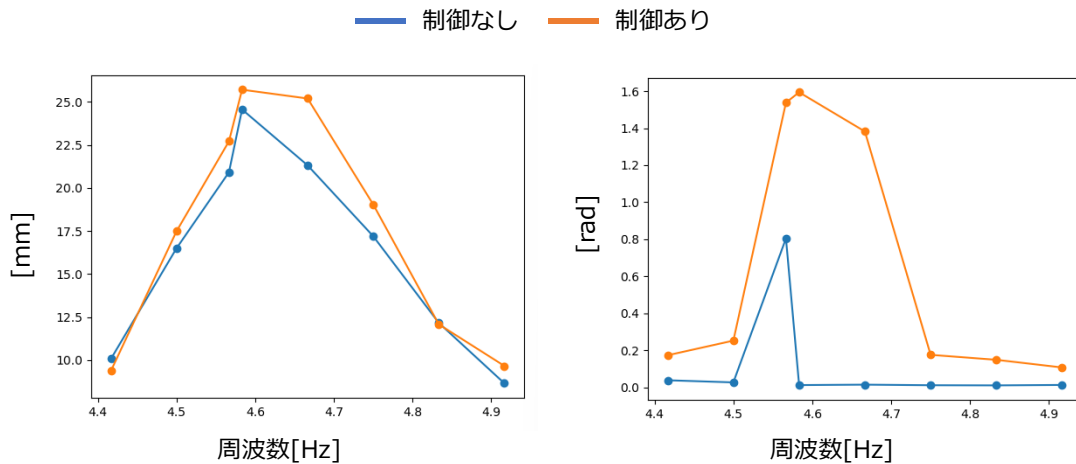


図5 実験結果 (左:主系, 右:振り子)

一方で、主系について、図3の数値シミュレーションのような抑制効果はみられていない。この原因についてはいくつか考えられるが、主に制御系のむだ時間による影響だと考えている。図3で示した数値シミュレーションに対して、50msの無駄時間を発生させた場合、自励振動の発生領域は拡大するが、無駄時間によって抑制効果がほとんどなくなってしまうことが数値シミュレーション上で確認された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔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
研究分担者	藤本 修平 (Fujimoto Shuhei) (80586686)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	
研究分担者	市川 泰久 (Ichikawa Yasuhisa) (20586680)	国立研究開発法人海上・港湾・航空技術研究所・その他部局等・研究員 (82627)	

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