

機関番号：32665

研究種目：基盤研究 (c) 一般

研究期間：2008～2010

課題番号：20560228

研究課題名（和文）空気を作動流体とする制振システムの研究

研究課題名（英文）Research and Development of Vibration Control System Utilizing Air

研究代表者

渡辺 亨 (WATANABE TORU)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80265933

研究成果の概要（和文）：空気を作動流体とするアクティブ制振システムの研究を行った。一つは超音波による音圧制御で、振動子の励振電圧を直接制御することで音圧を制御し、非接触に対象物の振動を制御することを目的とし、それが可能であることを実証した。もう一つは懸垂物に可変ピッチプロペラを搭載し、懸垂物の振動方向に応じてピッチの向きを切り替えることで振動制御が可能である事を実証した。

研究成果の概要（英文）：Research and development of active vibration control system utilizing air as working fluid has been performed. One system utilizes ultrasound. The acoustic radiation pressure is controlled by modulating driving current for oscillator. The basic property of the presented system is investigated. Besides, another system utilizes variable-pitch propeller as an actuator. The direction of thrust can be changed according to the attack angle. An experimental system is built and its effectiveness is confirmed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
平成 20 年度	1,600,000	480,000	2,080,000
平成 21 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
平成 22 年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：機械力学・制御

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：振動制御、超音波、プロペラ、アクティブ制御、空気

## 1. 研究開始当初の背景

空気が発生する力には多くの種類があり、様々な形で工学的に利用されている。例えば流れ場中の翼に生じる揚力は航空機が飛ぶために、シリンダ内の空気の圧力は空気アクチュエータの動力源として使用されている。しかしながら、重要な技術分野である振動制御においては、空気力の利用は必ずしも一般的ではなかった。超音波振動子の振動面に平行な面には、超音波の音響放射圧（音圧）による圧力が作用する。この力を利用すると非

接触に力を作用させることができる。このような研究においては、超音波それ自体は定常出力状態で用いられることが一般的である。これに対し申請者は、超音波振動子を励振する高周波電流を制御することにより、音響放射圧それ自体を直接制御することで、非接触制振システムとして利用することを提案している。申請者はこのアイデアを基に非接触制振システムの研究を進めており、制御対象に左右から音圧を作用させ、その差圧で振り子の振動を制御する実験を行った。その結

果、制御された音圧により振り子の振動が制御されていることが分かる。しかし、この制振システムにはなお不明な点が多かった。

一方、上記のような研究を進めていく過程で、空気を作動流体とするより一般的な力、すなわちプロペラによる推力を用いて制振力とするアイデアが生まれてきた。空気力は推力を同じ方向に無限に出し続けられるという特徴があり、非常にゆっくりした長周期の振動、例えばクレーンの荷吊りに伴って生じる振動の制御には有効であると考えられた。そこで吊り荷を模擬した単振り子にプロペラを2基搭載したシステムで実験を行い、プロペラによる推力で長周期の振り子の振動制御が原理的に可能である事を確認した。しかし、プロペラ推力の切り替えに伴う時間遅れが大きく、これを克服しないとより短周期の制振ならびに性能向上が困難であることが同時に示された。

## 2. 研究の目的

本研究では、空気を作動流体とする制振システムの開発、具体的には(1)超音波による音圧を用いた非接触制振システムの開発と、その制振メカニズムの解明(2)プロペラ推力を用いた制振システムの開発を目指した。

まず非接触超制振システムに関しては、その制振メカニズムの解明を目指した。これまでの研究で、受圧面が受ける音圧の振動面からの距離に対する特性の計測を行っているが、これに加えて「移動する受圧面が受ける音圧の計測」を行なうことを目指した。制御システムが示す不安定性は、制御対象である振り子の振動に伴うパラメータ励振(振り子が移動すると、それによって負の減衰=加振力が発生する)ではないかという予想があり、受圧面の移動速度によって音圧が変化するかを測定し、この予想を検証する。検証の結果を踏まえ、必要に応じて他の励振メカニズムの可能性も検討する。これら検討により音圧による制振のメカニズムを解明し、これを踏まえて超音波による非接触制振システムの制御技術を開発する。すなわち、励振メカニズムの存在を前提とし、その影響を排除あるいは活用して制振を行う方法を検討する。

一方、プロペラ制振システムについては、原理的な可能性をふまえ、より実証的な制振システムとしての検討を行うことを目指した。プロペラの推力特性(入力電力に対する出力推力の伝達関数)を計測し、それを踏まえて実際のクレーン吊り荷との荷重/推力比を想定した実験装置を製作し、その実証的な意味での有効性を検証する。この結果をふまえて、目視によらず、また制振効果を高められるような自動制御システムを開発する。さらに、プロペラの基数を減少させ軽量

化・低コスト化を図るため、一基の左右対称な可変ピッチプロペラを製作し、このプロペラピッチを正から逆まで連続的に制御することで、左右いずれの方向にも推力を發揮しうるシステムを構成し、その制振性能の検討を行う。

## 3. 研究の方法

まず、(1)超音波による音圧を用いた非接触制振システムの開発においては、音圧による制振のメカニズムの解明のため、移動する受圧面にかかる音圧を計測するシステムを製作する。これを用いて(振動面から相対的に)移動する受圧面にかかる音圧の計測を行う。このデータを基に制振メカニズムのモデル化を行い、その妥当性を検証する。一方これに平行して、非接触制振実験システムの製作を行う。制御対象である振り子にコイルを巻きつけ、これに交流を印加することで強制振動を起こさせ、定常応答を計測することで制振メカニズムの実験的な確認を行う。また、これらの作業とは別に、振動子を直接制御するためのシステムも開発する。埼玉大学の高崎らによって開発された、既に開発実績のある超音波スケーラ用制御システムを参考に、超音波振動子の固有周波数の変化に追従して励振電流の周波数を制御するシステムを製作する。

このようにして製作したシステムの有効性を確認した後、より実証的な非接触制振システムの開発のため、空気浮上による非接触支持と音圧制御による制振を組み合わせたシステムの開発を目指した。具体的には、半導体ウェハを想定した小型円盤を空気力により浮上させ、これに対し上下から超音波振動子による差動音圧を印加しうるような実験装置を製作する。円盤は浮上に伴い空気流により振動が発生するので、これに音圧を印加することにより円盤の振動を非接触に制御する「非接触制振システム」の可能性を検証する。

一方、(2)プロペラ推力を用いた制振システムの開発においては、まずプロペラの推力特性を計測するシステムを製作する。上の「音圧制振システム」で述べた既製の音圧計測システムを参考に、プロペラの推力特性(時間応答含む)を計測するシステムを設計・製作し、これによりアクチュエータとしてのプロペラの特性を同定する。これを受けて可変ピッチプロペラ型アクチュエータを製作し、その動特性を計測することで、提案する可変ピッチプロペラアクチュエータの優位性を確認する。さらに、これによって得られたプロペラ推力特性を基に、プロペラ制振システムの実証的な有効性を実証するため、実際のクレーン吊り荷を想定した振り子・プロペラ制振システムを設計・製作し、

これを用いた制御実験を行い、提案するシステムの実用性・有用性を実大システムで検証する。

#### 4. 研究成果

まず、(1) 超音波による音圧を用いた非接触制振システムの開発においては、より軽量の振り子を用いた制御実験により、制御対象のダイナミクスと音場の連成により自励的に振動が発生することを確認した。図1に制御対象(単振り子)と音場が連成振動している状態での振幅の時刻歴応答の一例を示す。振り子は明らかに正弦波とは異なる挙動を示しており、振り子の振動方向・振動子との距離に依存する非線形性の存在が推察される。

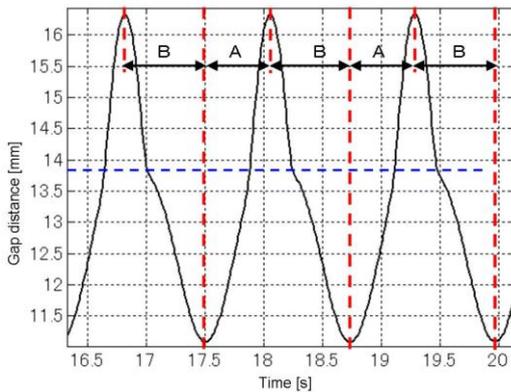


図1 振り子-音場連成振動応答波形

さらに、強制振動する制御対象に対する非接触制振実験を行い、定常応答を計測することで、制振効果を定量的に計測した。その結果、提案する音圧差動メカニズムと励振電圧の直接制御による制振システムが非接触アクティブ制振システムとして実際に有効であることを確認した。振り子を対象とした、音圧非印加・定常音圧印加・アクティブ制御(比例微分=PD制御)音圧印加それぞれの場合の、外乱入力に対する振り子振幅の周波数応答を図2に示す。定常音圧を引火した場合に比べ、フィードバックを加えたことによる制振効果が明瞭に現れている。

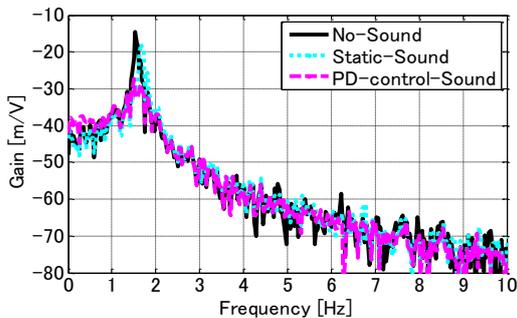


図2 振り子振幅の周波数応答

さらに、実用化を目指した空気浮上と音圧制御を組み合わせた実験装置を試作した。実験の結果、空気流による音場への擾乱が問題であることが明らかにされた。

一方、(2) プロペラ推力を用いた制振システムの開発においては、製作したプロペラ推力の計測装置により、プロペラの推力特性を計測し、その立ち上がりの遅れがモータ・プロペラの回転慣性による部分と、空気流れ場の形成による部分とによることを確認した。その上で、可変ピッチプロペラ型アクチュエータを製作し、その動特性を計測した所、可変ピッチプロペラを常時回転させておくことで、回転慣性による遅れを事実上ゼロにすることが可能であり、これによって通常のプロペラアクチュエータより応答速度を短縮することが可能である事を確認した。図3に、固定ピッチプロペラを回転速度0からスタートした場合の推力立ち上がり特性と、可変ピッチプロペラを定常回転させておきピッチを最大とした場合の推力立ち上がり特性を示す。プロペラが回りだすまでの時間遅れが無いぶんだけ後者の立ち上がり時間が短くなっている事が見て取れる。

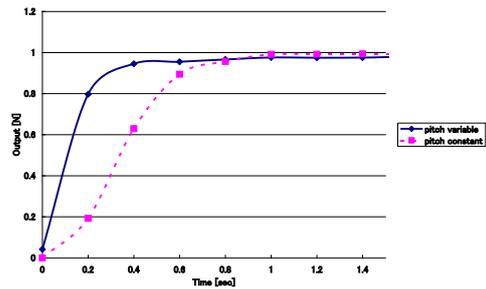


図3 固定/可変ピッチ立ち上がり特性

これにより提案する可変ピッチプロペラアクチュエータの優位性を確認できたので、プロペラ制振システムの実効的な有効性を実証するため、実際のクレーン吊り荷を想定した振り子・プロペラ制振システムの設計に着手し、プロペラピッチの可変機構などを含む基本設計を固めることができた。

さらに、制御手法についても検討を行った。常に最大ピッチを取り、振動方向に依存して切り替えるオンオフ制御と、振幅・振動速度に基づく最適(LQ)制御を比較した。そのトレードオフ関係を図4に示す。横軸が制御対象の固有周期、縦軸が振動収束までの継続時間である。プロペラアクチュエータの時定数は大きいため、制御対象の周期が短い場合は最適制御が優位となるが、周期が長い場合、プロペラの推力が限られているため、むしろオンオフ制御が優位となる事が確認された。

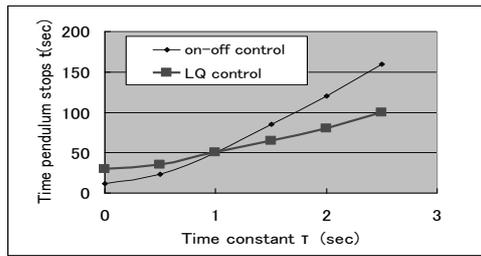


図4 制御方式の比較

## 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)

[雑誌論文] (計6件)

- (1) 兼平拓弥、藤森一寿、渡辺亨、超音波による非接触振動制御に向けた空気浮上実験、第54回日本大学理工学部学術講演会講演論文集、査読無、2011、CD-ROM
- (2) 益戸雅俊、渡辺亨、背戸一登、プロペラを利用したクレーン吊り荷のアクティブ振動制御、第54回日本大学理工学部学術講演会講演論文集、査読無、2011、CD-ROM
- (3) N. Takasaki, T. Watanabe and K. Seto, Basic Study on a Vibration Control System Using Propellers for Crane Load, Proceedings of the 1<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control, 日本機械学会、査読無、09-208, 2009, 195-196.
- (4) K. Fujimori, T. Horiuchi and T. Watanabe, Basic Research on Dynamical Property of Acoustic Radiation Pressure by Ultrasound., Proceedings of the 1<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control, 日本機械学会、査読無、09-208, 2009, 253-254.
- (5) Takao Horiuchi, Toru Watanabe and Kazuto Seto, Non-contact Passive and Active VibrationControl Utilizing Ultrasound, Proceedings of the 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC), 査読無、2008, CD-ROM
- (6) 高崎徳行, 小林慎平, 渡辺亨, 背戸一登、プロペラを用いた荷振り向け装置の研究、日本機械学会年次大会講演会講演論文集、08-034, 2008, 154-157.

[学会発表] (計6件)

- (1) 兼平拓弥、超音波による非接触振動制御に向けた空気浮上実験、第53回日本大学理工学部学術講演会(2010)
- (2) 益戸雅俊、プロペラを利用したクレーン吊り荷のアクティブ振動制御、第53回日本大学理工学部学術講演会(2010)
- (3) N. Takasaki, Basic Study on a Vibration Control System Using Propellers for Crane Load, The 1<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Symposium on

Dynamics and Control (2009)

(4) K. Fujimori, T. Horiuchi and T. Watanabe, Basic Research on Dynamical Property of Acoustic Radiation Pressure by Ultrasound, The 1<sup>st</sup> Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control (2009)

(5) Takao Horiuchi, Non-contact Passive and Active VibrationControl Utilizing Ultrasound, 10th International Conference on Motion and Vibration Control (MOVIC)(2008)

(6) 高崎徳行、プロペラを用いた荷振り向け装置の研究、日本機械学会年次大会講演会(2008)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

渡辺 亨 (WATANABE TORU)

日本大学・理工学部・教授

研究者番号：80265933