

渦励振される円柱構造物の外乱相殺制御に関する研究

学位論文内容の要旨

一様流中にある弾性構造物が渦励振力によって振動することは古くから知られており、これまでに多くの研究が行なわれている。円柱が直交流中に置かれ、流れと直角方向への振動が生じるとき、換算流速 5 付近で渦放出周波数が構造系の固有振動数へ引き込まれるロックイン現象が生じる。また、平成 7 年に起こった高速増殖原型炉原子力発電所「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故は、流力連成振動による温度計さや管の破損が原因であった。その後の調査によって、流れ方向の双子渦放出が上記換算流速よりも低い流速域で起こることによる励振に伴い、高サイクル疲労破壊を起こしたことが明らかとなった。これらの現象は、単なる渦放出に伴う強制振動ではなく、渦放出も含めた自励系の振動であることが知られており、渦励振力を抑制する観点からも渦放出のメカニズムを解明することは重要である。

一方で、渦放出に伴う振動を抑制する技術もまた過去多く研究されてきた。パッシブな手法としてはトリッピングワイヤやスプリッタによって渦の形成を阻害する方法や、断面形状の変更によりはく離を抑える方法である。しかし、流速や流れ方向が変動する場合や断面形状の変更が設計上困難な場合は、その適用が制限される。また後流の構造に着目し渦放出をアクティブに抑制する手法、構造物の振動に主眼を置いて円柱にかかる外力モデルを構造物の固有振動数と等しい周波数を有する正弦波とみなしたアクティブ制振も行なわれている。しかし、渦放出機構は複雑であり、外乱を正弦波で仮定した場合には外乱誤差の影響を評価し、制御手法の限界を見極めておくことが重要である。

本論文では、渦励振される弾性構造物へ外乱相殺制御を適用するための基礎的研究として、直交流中に置かれた弾性支持円柱の振動を、渦励振を外乱とみなして外乱相殺制御によって抑制することを試みた。また、その有効性を検証するために直交流中に置かれた弾性支持円柱の振動を、支持部への制御入力によって抑制する実験を行なった。

本論文は 4 章から構成されている。以下にそれぞれの章の概要を具体的に示す。

第 1 章は序論であり、本研究の目的と意義及び各章の概要について述べている。

第 2 章では、まず直交流中にある円柱の後流渦構造を概観し、複素ポテンシャルを用いる渦点法によって流体力を算出した。すなわち、カルマン渦列モデルと 2 P モードモデルが流速と円柱の振幅に依存してその発生領域が区分されることを示し、それぞれの場合に対して渦点法により流体力を求めてその特徴を示した。そして面内 2 自由度を有する円柱

モデルを考え、渦励振される円柱の振動制御をシミュレーションによって検証し、制御性能を整定時間と残留定常振動の振幅によって評価した。制御系はフィードバック制御とフィードフォワード制御の併合制御による外乱相殺制御を適用して構成した。渦放出に伴う励振力を調和外力と仮定し、その振幅は最小次元オブザーバを用いて推定する。シミュレーションの結果より、最適レギュレータによるフィードバック制御のみでも、十分な制御入力を供給できれば整定時間を短くでき、残留振動振幅も微小とできることがわかった。一様流中にある円柱には常に定常的な周期外力が作用するため、制御入力が不十分な場合フィードバック制御のみでは定常的な振動が残留する可能性が考えられる。しかし、実機に適用するにあたっては制御入力の上限值に制約があり、また消費エネルギーが小さいことが求められる。一方、併合制御による外乱相殺制御を適用した場合、整定時間、残留振動振幅ともフィードバック制御のみの場合よりさらに良好な結果が得られた。また、この場合の制御入力はフィードバック制御のみの場合に比べて小さいことがわかった。さらに、渦モデルマップに対応してオブザーバの外乱モデル周波数を切り替えることによって、より効果的に外乱を相殺できることが分かった。

第3章では、両端を弾性支持され、並進と回転の2自由度を有する円柱が一様流中に置かれる場合に対して、併合制御による外乱相殺制御の有効性を調べた。まず、制御対象の力学モデルを構築し、これに第2章で提案した外乱相殺制御を適用し、シミュレーションを実施した。さらに、開放型風洞を用いたモデル実験を実施し、その有効性を検証した。実験においては、表面が滑らかな発泡スチロール製の円筒の両端を鋼製はりによって弾性支持した。はりにはひずみゲージを貼付し、そのひずみ信号からはりの振動変位を求め、さらに円筒の振幅を算出した。また、制御アクチュエータとしては、一方の鋼製はり固定端付近に設置された電磁石を用いた。渦励振力が円筒の振幅に依存するため、振幅がある程度抑制されると渦放出による励振力が小さくなる。その結果、シミュレーションによって決定したフィードバック係数を用いることによってシミュレーションよりも良好な制御効果が確認された。また、第2章と同様に併合制御による外乱相殺制御がフィードバック制御のみの場合より優れていることが分かった。

さらに本章では、オブザーバの外乱モデル周波数が実際の渦放出周波数に対して誤差を有する場合の性能劣化について調べた。その結果、オブザーバ内のモデルの周波数を高めに設定することはある程度まで許容されるが、低く設定した場合には制御性能が著しく劣化することがわかった。実際には、ロックイン状態における渦放出周波数は、円柱系の固有振動数よりわずかに小さいことが知られており、外乱モデルの周波数を円柱系の固有振動数としておけば、周波数誤差が負となることはない。また、併合制御は変位に関してはフィードフォワード制御のみの場合に比べて振幅を早く抑制する効果があり、回転角に関してはフィードフォワード制御のみに比べて併合制御を用いた場合はより大きな周波数誤差まで大振幅の振動は起きないことがわかった。このことから併合制御はフィードフォワード制御のみを用いた場合と比べてよりロバスト性が高いと言える。

第4章は各章の結果をまとめた結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 山 田 元
副 査 教 授 藤 川 重 雄
副 査 教 授 土 谷 武 士
副 査 助 教 授 小 林 幸 徳

学 位 論 文 題 名

渦励振される円柱構造物の外乱相殺制御に関する研究

一様流中にある弾性構造物が渦励振によって振動することは古くから知られており、これまでに多くの研究が行なわれてきている。円柱が直交流中に置かれ、流れと直角方向への振動が生じるとき、渦放出周波数が構造系の固有振動数へ引き込まれるロックイン現象が生じる。また、平成7年に起こった高速増殖原型炉原子力発電所「もんじゅ」のナトリウム漏えい事故は、流れ方向の双子渦放出が起こったための励振に伴う、温度計さや管の高サイクル疲労破壊であることが明らかとなった。これらの現象は、単なる渦放出に伴う強制振動ではなく、渦放出も含めた自励系の振動であることが知られており、渦励振力を抑制する観点からも渦放出のメカニズムを解明することは重要である。

一方、渦放出に伴う振動を抑制する技術もまた多く研究がなされ、パッシブな手法としてはトリッピングワイヤやスプリッタによって渦の形成を阻害する方法や、断面形状の変更によりはく離を抑える方法がある。また、後流の構造に着目し渦放出をアクティブに抑制する方法、構造物の振動に主眼を置いて円柱にかかる外力モデルを構造物の固有振動数と等しい周波数を有する正弦波とみなしアクティブ制振も行なわれている。しかし、渦放出機構は複雑であり、外乱を正弦波で仮定した場合には外乱誤差の影響を評価し、制御手法の限界を見極めておくことが大切である。

本論文は、渦励振される弾性構造物へ外乱相殺制御を適用するための基礎的研究として、直交流中に置かれた弾性支持円柱の振動を、渦励振を外乱とみなして外乱相殺制御によって抑制することを試みるとともに、その有効性を検証するために直交流中に置かれた弾性支持円柱の振動を、支持部への制御入力によって抑制する実験を行なったものであり、その主要な成果は次の2点に要約される。

(1) まず直交流中にある円柱の後流渦構造を概観し、複素ポテンシャルを用いた渦点法によって流体力を算出した。すなわち、カルマン渦列モデルと2Pモードモデルが流速と円柱の振幅に依存してその発生領域が区分されることを考慮し、それぞれの場合に対して渦点法により流体力を求めてその特徴を示した。そして面内2自由度を有する円柱モデルを考え、渦励振される円柱の振動制御をシミュレーションによって

検証し、制御性能を整定時間と残留定常振動の振幅によって評価した。制御系はフィードバック制御とフィードフォワード制御の併合制御による外乱相殺制御を適用して構成した。渦放出に伴う励振力を調和外力と仮定し、その振幅は最少次元オブザーバを用いて推定する。シミュレーションの結果より、最適レギュレータによるフィードバック制御のみでも、十分な制御入力を提供できれば整定時間を短くでき、残留振動振幅も微小とできることがわかった。一方、併合制御による外乱相殺制御を適用した場合、整定時間、残留振動振幅ともフィードバック制御のみの場合よりさらに良好な結果が得られた。また、この場合の制御入力はフィードバック制御のみの場合に比べて小さいことがわかった。さらに、渦モデルマップに対応してオブザーバの外乱モデル周波数を切り替えることによって、より効果的に外乱を相殺できることもわかった。

(2) 両端が単純支持され、並進と回転の2自由度を有する円柱が一様流中に置かれる場合に対して、併合制御による外乱相殺制御の有効性を調べた。まず、制御対象の力学モデルを構築し、ここで提案した外乱相殺制御を適用し、シミュレーションを実施した。さらに、開放型風洞を用いたモデル実験を実施し、その有効性を検証した。その結果、シミュレーションによって決定したフィードバック係数を用いることによって良好な制御効果が確認された。また、併合制御による外乱相殺制御がフィードバック制御のみの場合よりも優れていることがわかった。さらに、オブザーバの外乱モデル周波数が実際の渦放出周波数に対して誤差を有する場合の性能劣化についても調べた。その結果、オブザーバ内のモデルの周波数を高めに設定することはある程度まで許容されるが、低く設定した場合には制御性能が著しく劣化することがわかった。

これを要するに、著者は、直交流中に置かれた弾性支持円柱の振動を、渦励振を外乱とみなして外乱相殺制御によって抑制することを試みるとともに、その有効性を検証するためにその振動を抑制する実験を行ない、渦励振される弾性構造物への外乱相殺制御の有用性に関して有益な知見を得たものであり、機械工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。