

研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19560222  
 研究課題名(和文) 流体-構造連成振動系における流力外乱同定と非線形振動特性に関する研究  
 研究課題名(英文) System Identification of Fluid Force Model and Nonlinear Vibration Characteristics of Flow-induced Vibration of Elastic Structures  
 研究代表者  
 小林幸徳(KOBAYASHI YUKINORI)  
 北海道大学・大学院工学研究科・教授  
 研究者番号：10186778

## 研究成果の概要：

本研究では、一様流中に置かれた弾性支持構造物に作用する流力外乱特性を実測データより同定する方法を研究し、最尤推定法に基づく予測誤差法を用いることで、100%に近い適合率を得ることができた。また、非線形特性を有する構造物の渦励起振動に関して実験とシミュレーションによりその特性を調べた。さらに、Wavelet 解析を実施することによって、応答波形の包絡線と瞬間振動数を抽出した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	2,400,000	720,000	3,120,000
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・機械力学・制御

キーワード：流体-構造連成振動、流力外乱同定、システム同定、非線形振動、ロックイン、Wavelet 変換

## 1. 研究開始当初の背景

弾性を有する構造物が流れ場に置かれると、渦放出による変動揚力が作用し、振動が発生する。この現象に関しては、流体工学的視点から弾性支持された物体(ブラフボディ)周りの流れ場の数値解析や渦特性の変化に関する実験的研究などが国内外で多数実施されてきた。しかしながら、振動のアクティブ制御に関する研究は少なく、外乱の周波数伝達特性などを正確に把握しておく必要

がある。しかし、渦励振による流力外乱特性は直接計測が困難であり、その力学的構造は十分には解明されていない。また、流体力によって励振される構造物が非線形ばね特性を有する場合には、流体と構造の非線形特性、すなわち自励振動と幾何学的非線形特性が複雑に連成する。多自由度非線形系の同定問題に関しては、ボルテラ級数を用いた非線形システム同定が知られているが、流体-構造連成非線形系に関する研究は見当たらない。

## 2. 研究の目的

本研究では、片持ちはりによって両端を弾性支持された円柱からなる構造を対象とした。一様流中に置かれた弾性支持構造物に作用する流力外乱特性を実測データより同定する方法を研究し、流力外乱の力学的構造、特に周波数伝達特性と状態方程式表現に関する研究を実施する。さらに、構造物のばね特性が非線形特性を有する場合のロックイン現象に注目し、流体-構造連成系の非線形特性を明らかにする。

## 3. 研究の方法

開放型風洞を用いて一様流を生成し、片持ちはりに対する非接触アクチュエータとして電磁石を用いる。

- (1) 流体力が作用しない構造系に、外乱 ( $M$  系列信号) を加えて円柱の変位を計測し、流体-構造間の伝達特性を同定する。
- (2) 流体力が作用する場合について、外乱 ( $M$  系列信号、周波数掃引など) を加えたときの円柱の変位を計測し、外乱の影響を含む系全体の動特性パラメータを同定する。
- (3) 得られた同定結果から外乱の力学モデル (周波数伝達関数・状態方程式) を導出する。
- (4) 同定された外乱モデルの特性を考慮した外乱相殺制御系を構築し、制御実験に先立って数値シミュレーションを実施して、同定された外乱モデルの妥当性を検証する。
- (5) 構造物のばね特性が非線形性を有する場合について、円柱両端にワイヤーを接続し、ワイヤーの影響による非線形ばね特性を付加し、ロックイン時の振動特性を調べる。
- (6) 各種のマザーウェーブレットを用いたウェーブレット解析を実施して、非線形特性の検出を試みる。

## 4. 研究成果

本研究では、図1に示す片持ちはりによって両端を弾性支持された円柱からなる構造を対象とした。構造系の振動が流体力に帰還され加振力が増幅する流体力モデルを想定し、制御系設計を指向した流体力モデルの構築を目指して、構造の変位情報から流体力モデルを同定する方法を提案した。パラメータ推定には、最尤推定法に基づく予測誤差法を用いる。流体力モデルの次数を3次とし、構造系に作用するノイズを測定出力と推定出力の差とすることで、100%に近い適合率を得ることができた。図2に示すように、流体力発生機構を **Plant F**、構造振動系を **Plant S** とし、構造振動系の出力として考えられる円柱重心の変位と速度が **Plant F** にフィードバックされて外乱  $w$  が発生すると考える。本システムの流体力発生機構には、円柱変位と速度信号のフィードバックを考慮する場合が最も適していることが分かった。

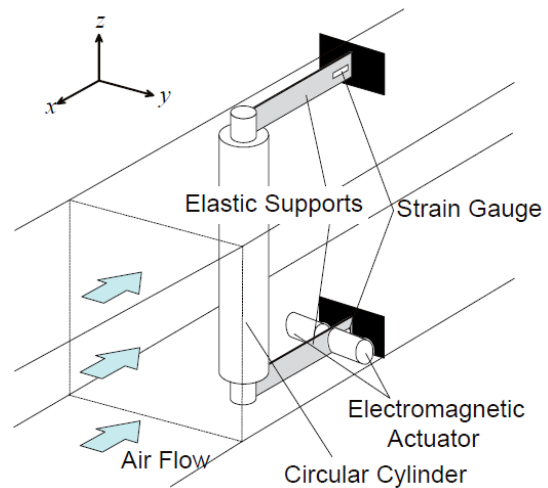


図1 弾性支持円柱

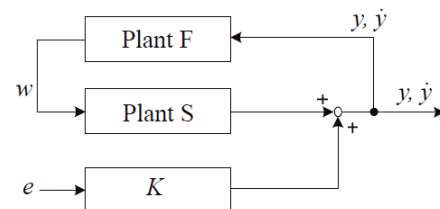


図2 流力連成振動モデル

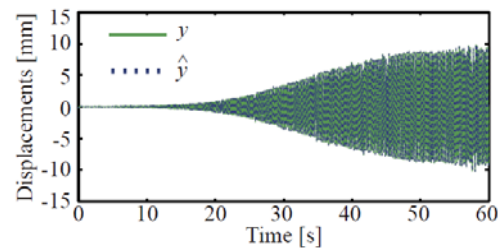


図3 変位  $y$  と推定値  $\hat{y}$

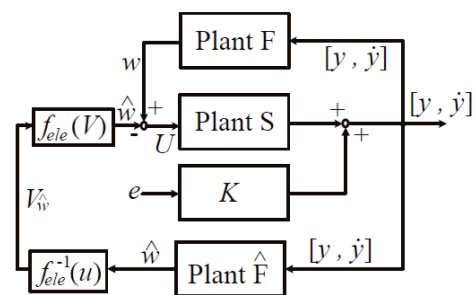


図4 外乱相殺制御系

図3は流体力の乱れに基づくノイズの影響を考慮した3次のフィードバックモデルを用いて求めた変位  $y$  と推定値  $\hat{y}$  であり、出力の時間応答適合率は99.45%となり、出力をほぼ忠実に再現でき、流体力モデルを同定できたことが分かった。

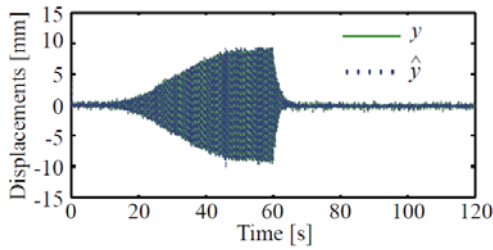


図5 外乱相殺制御実験結果

得られた同定モデルの同定精度を、実際に外乱相殺制御実験を行うことで確認した。図4に示す外乱相殺制御系を構成して、構造系に作用する流体力を相殺する入力を加えて制御を行う。計測を開始してから60秒後に制御入力を開始し、その後60秒後までデータを測定した。その結果、構造振動系の出力推定は精度良く行われるが、制御時の振幅がほとんど変化しないことが分かった。これは、流体力モデルの同定には構造物の変位と速度のみを用いており、実際の流体力の情報を用いることができないため、構造物の変位ならびに速度と流体力の振幅比の情報が得られず、流体力モデルの構造物の変位と速度からフィードバックされる入力に対するゲインを同定することができないためと考えられる。そこで、流体力のゲインを試行錯誤によって調整した結果、図5に示すように制御入力開始後6~7秒で制振できることが分かった。

次に渦励振される系の振動特性を流速を変えながら長時間計測し、振動特性を調べた。風洞による流速  $U$  を  $0.6 \text{ m/s}$  から  $4.1 \text{ m/s}$  まで増加させた場合(forward)と、 $4.1 \text{ m/s}$  から  $0.6 \text{ m/s}$  まで減少させた場合(backward)の応答計測を  $4800 \text{ s}$  行った。渦放出周波数は、 $U = 0.6 \text{ m/s}$  のとき  $3.2 \text{ Hz}$ 、 $U = 4.1 \text{ m/s}$  のとき  $22 \text{ Hz}$  であり、これを  $4800 \text{ s}$  の間に直線的に変化させた。図7は流速を増加させた場合の応答であり、図8は流速を減少させた場合に対する線形支持系の時刻歴応答を示す。図の上段は円柱変位の時刻歴応答、中段は円柱変位の時刻歴応答を  $4 \text{ s}$  ごとに前後  $5 \text{ s}$  内で  $1000$  点サンプリングし、周波数分析して求めたスペクトル密度の時刻歴応答である。下段は熱線流速計によって計測した流速の時刻歴である。forward の場合は  $1300 \text{ s}$  から  $3000 \text{ s}$ 、backward の場合は  $1800 \text{ s}$  から  $3500 \text{ s}$  あたりの領域で、他の領域より明らかに振幅が大きくなるロックイン現象が発生していることが確認できる。スペクトル密度の高い部分は、 $5 \text{ Hz}$  付近で一定であり、流速の変化にかかわらず、円柱は線形固有振動数で振動していることが分かる。流速がロックイン領域より高い部分では、 $12 \text{ Hz}$  付近にもスペクトルの強い部分が現れているが、これは、はりの2次モードの固有振動数であると考えられる。

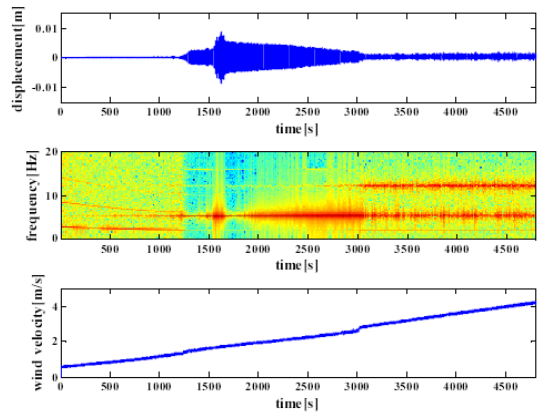


図7 線形支持系の時刻歴応答 (forward)

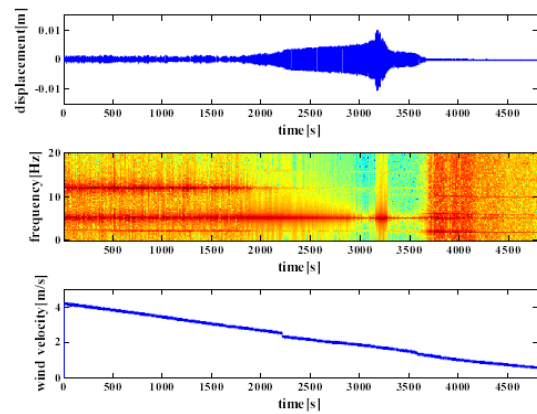


図8 線形支持系の時刻歴応答 (backward)

次に幾何学的非線形性を有する復原力を付加するためにワイヤーを取り付けた構造に対して振動特性を調べた。電磁石を用いて既知外力による加振実験を行い、線形ならびに非線形ばね特性を同定し、3次の非線形項を有するばね特性を図9のように同定した。

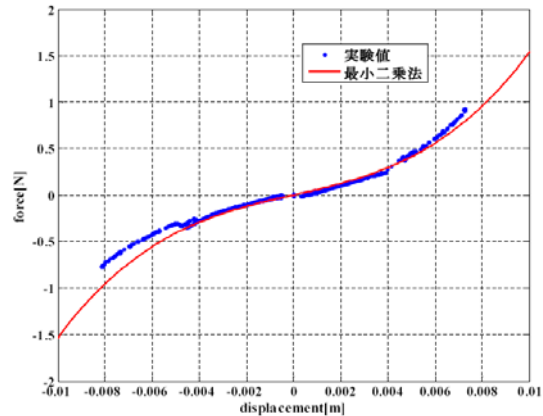


図9 非線形ばね特性

これに対して同様に流速を変化させて振動特性を計測した図 1 0 は流速を増加させた場合の応答であり、図 1 1 は流速を減少させた場合に対する非線形支持系の時刻歴応答を示す。スペクトルの時刻歴応答をみると、円柱の線形固有振動である 5.6 Hz 付近に強い成分が現れているが、ロックイン領域において、このスペクトルの強い部分が徐々に変化している。また、図から振幅が急激に減少するジャンプ現象が確認できる。

図 1 2 にワイヤー有り無し場合における渦励振応答の比較を示す。復原力が線形の場合、円柱は線形固有振動数で振動する。しかし、復原力が非線形特性を有する場合は、ロックイン領域において、振幅の増大に応じて共振振動数も高くなる。また、流速の上昇時と下降時において円柱の応答履歴が異なるヒステリシス性が現れ、ジャンプ現象が発生していることが分かる。

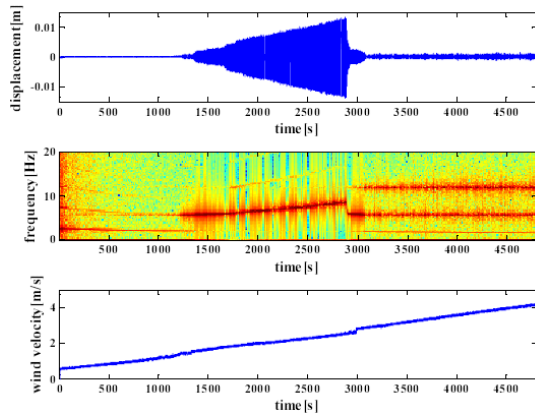


図 1 0 非線形支持系の時刻歴応答 (forward)

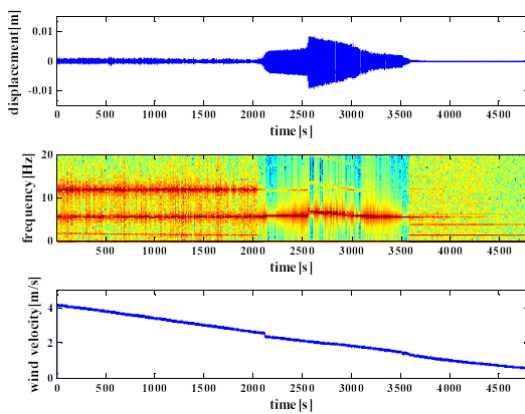


図 1 1 非線形支持系の時刻歴応答 (backward)

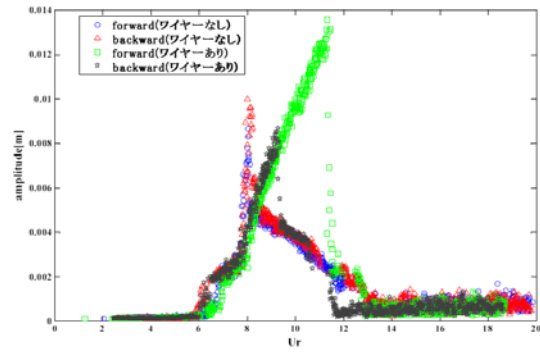


図 1 2 渦励振応答の比較

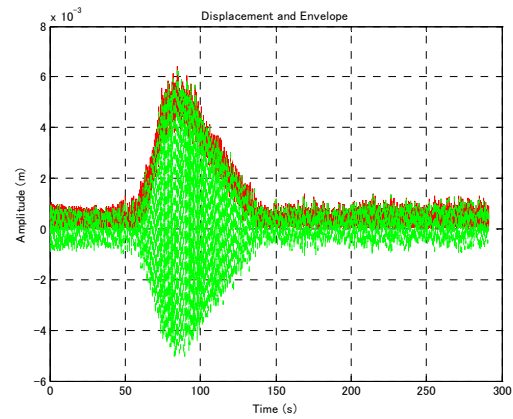


図 1 3 渦励振応答と包絡線

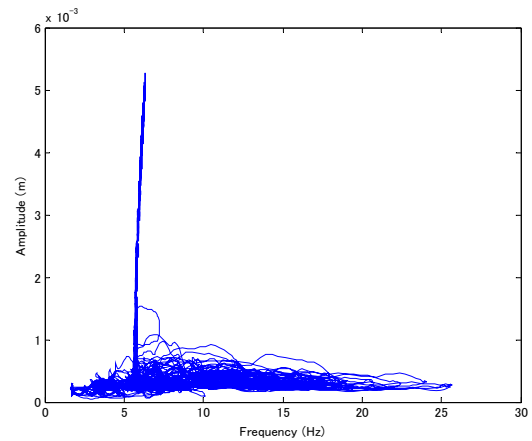


図 1 4 包絡線の周波数応答

図 1 3 はワイヤーの張り方を変えて、わずかなガタを有し、区分線形系とみなせる場合の時刻歴応答と Wavelet 変換によって求めた包絡線を示す。

図 1 4 は図 1 3 で抽出された包絡線に対して、瞬間周波数と振幅を求めて描いた周波数応答である。これより、6Hz 付近で共振が発生し、振幅の増大とともにわずかではあるが共振振動数も増大していることが分かる。

## 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 1 件)

- ① 星野洋平・小林幸徳・山内悠正, 渦励振される弾性支持円柱に作用する流体力モデルのシステム同定, 第 51 回自動制御連合講演会, 2008 年 11 月 22 日, 山形大学工学部, 山形.

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

小林 幸徳 (KOBAYASHI YUKINORI)  
北海道大学・大学院工学研究科・教授  
研究者番号: 1 0 1 8 6 7 7 8

### (2) 研究分担者

星野 洋平 (HOSHINO YOHEI)  
北海道大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号: 9 0 3 7 4 5 7 9

### (3) 連携研究者

なし