

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560251

研究課題名(和文) 高層煙突支持部材に発生する自励振動の防止方法に関する研究

研究課題名(英文) Study on the prevention of self-excited vibration which are generated in the support of high stack

研究代表者

佐藤 勇一 (SATO, Yuichi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：30134828

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：旋回流れ内に置かれた弾性棒に生じる振れ回り運動について、2つの装置で旋回流れを作り検討した。その結果、渦放出に起因した流れ方向と直交する向きの振動と振れ回り運動が生じることを明らかにした。後者の振れ回り運動のメカニズムについては、動圧の効果を表す剛性行列の非対称性によって説明できることを示している。

研究成果の概要(英文)：This experimental study describes self-excited vibration of an elastic rod in swirling flow. We investigate behavior of an elastic rod using two apparatuses, that is, swirling flow is induced by supplying water horizontally along a cylinder wall in an apparatus and by rotating a cylinder in the other. Consequently, two types of vibrations are observed. One is due to vortex shedding. The other is due to the asymmetry of the stiffness matrix of equations of motion.

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：流体関連振動 ギャロッピング 自励振動 安定性

### 1. 研究開始当初の背景

石油化学コンビナートなどにおいては、構想煙突を数多く見ることができる。この高層煙突は、強度上の利点から鉄塔構造で支持されるものも多い。風による空気流の乱れや部材の後流に発生する渦がもとで、個々の部材が振動し、一群の部材や鉄塔全体の振動に発達することがある。一般的に風による振動問題はカルマン渦が原因であることが多い。しかしながら、今回対象とした風による振動問題は、カルマン渦が風向きによらずに振動を引き起こすのに対して、ある一定の風向きするときのみ発生するものである。このようなことから、この振動の原因はカルマン渦とはことなるメカニズムによるものと考えられる。設計の段階においては、カルマン渦による振動問題については検討がなされている。しかし、今回対象とした振動に関しては設計上の検討はなされていない。このようなことからその発生メカニズムの解明と防止方法の構築がもてめられている。

### 2. 研究の目的

(1) 石油コンビナートや発電プラント等に設置される高層煙突を支持する鉄塔に風が吹きつけるときに鉄塔補強部材に発生する不安定振動のメカニズムを明らかにすること。

(2) 一般的に知られているカルマン渦による振動とは異なるこの不安定振動の制振方法を確立し設計指針を得ることを目的としている。

### 3. 研究の方法

本研究では、このような旋回流れ内に置かれた弾性棒に生じる振れ回り運動について、2つの装置で旋回流れを作りその発生メカニズムと動特性を検討している。

### 4. 研究成果

旋回流れ内に置かれた弾性棒に生じる振れ回り運動について、実験装置で旋回流れを作り検討した。その結果、渦放出に起因した流れ方向と直交する向きの振動と振れ回り運動が生じることを明らかにした。後者の振れ回り運動のメカニズムについては、動圧の効果を表す剛性行列の非対称性によって説明できることを示している。

### 実験

#### 水の供給による旋回流れ

静止した円筒容器内に外部から水を水平に供給することで作られる旋回流れ内に置かれた弾性棒に発生する振れ回り運動について検討する。

図1に実験装置(以下では、装置と呼ぶ)の概要を示す。装置は、内径130 mm、高さ126 mmの円筒容器と上端を固定された長さ1000 mmおよび直径3 mmの細い弾性棒からなる。図に示すように、弾性棒は下端から40 mmの部分で円筒内に挿入されている。円筒の底から35 mmの位置にパイプが水平に取り付けられており、ここから円筒の内壁に沿うように水を供給することで、円筒内に旋回

流れを作る。円筒の上部は開放されており、余分な水はここから排出される。

図2のように水が供給されてくる方向と平行逆向きに $x$ 軸、それと直交する方向に $y$ 軸をとる。さらに、後述の議論のために、図2に示すような弾性棒の周方向変位 $u_\theta$ および半径方向変位 $u_r$ を導入する。弾性棒の設置位置は原点からの距離 $r$ 、 $x$ 軸からの角度 $\theta$ を用いて表す。弾性棒の変位は、図1および図2に示すように、弾性棒の上端から165 mmの位置でレーザー変位計を用いて測定した。なお、円筒容器に水を入れた状態で打撃試験を行って得られた弾性棒の固有振動数は1次が2.2 Hz、2次が13.2 Hzであった。

装置において、弾性棒の半径位置を

$r = 49 \text{ mm}$ とし、設置方向を

$\theta = 0 \text{ deg} \sim 315 \text{ deg}$ の間で45 degおきに変化させ、水の流量 $q$ をさまざまな値に設定しながら振動発生の有無を調べた。その結果、異なる流量において2種類の大きな自励振動が発生した。弾性棒軌跡の測定結果と、 $x$ 軸および $y$ 軸方向変位の周波数解析結果を図3および図4に示す。

図3(a)は、流量が $q = 8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ のときに発生した振動である。流れと直交する方向(円筒の半径方向)に細長い軌跡であり、図中に矢印で示すように反時計回り(旋回流れと同じ向き)に振れ回っている。図3(b)に示すように、このとき弾性棒の2次の固有振動数とほぼ一致する13.3 Hzの周波数成分が卓越している。弾性棒の設置位置( $\theta$ の値)によって振れ回り形状が若干異なるのは、装置の構造上、流れ場が原点に対して完全には対称でないためであると考えられる。

流量をさらに大きくすると、

$q = 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ において図4(a)に示す振れ回り運動が発生した。図4(b)に示す周波数解析結果より、この運動の振動数は2.2 Hzであり、弾性棒の1次の固有振動数と一致する。振れ回り方向は図3(a)と同様に反時計回りであるが、図4(a)の軌跡の形状は水の流れ方向にやや細長い楕円を描いている。

つぎに、弾性棒の設置方向を固定して、半径位置を変化させながら弾性棒の挙動を調べた。装置では、水を供給するパイプから比較的離れた位置の流れがより整流されると考えられる。図4(a)を見ると、 $\theta = 225 \text{ deg}$ の位置では明瞭な楕円に近い振れ回りが生じている。これらを踏まえて、弾性棒の設置方向は $\theta = 225 \text{ deg}$ とした。半径位置については、後述の図6で示すように、半径位置の変化に対する流速の変化がほぼ直線的に増加している $r = 38 \text{ mm} \sim 49 \text{ mm}$  ( $r/R = 0.58 \sim 0.75$ )の間で変化させた。

図5は、流量 $q$ をさまざまな値に設定して得られた弾性棒の軌跡を示したものである。図の横軸は弾性棒の設置位置における流れの速度 $V_\theta$ 、縦軸は設置位置 $r$ を円筒半径 $R$ で

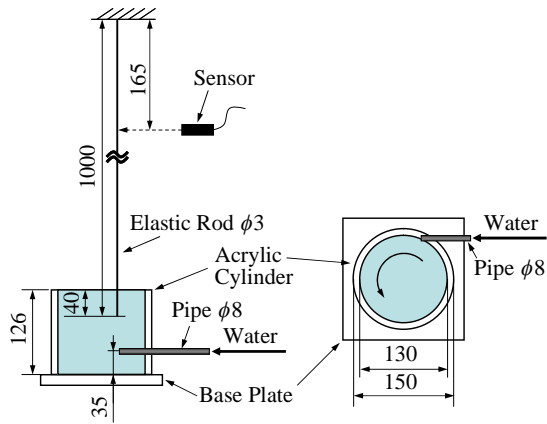


図1 実験装置弾性棒とセンサ位置

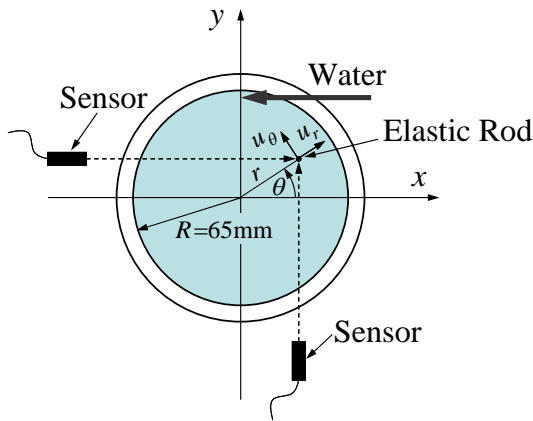
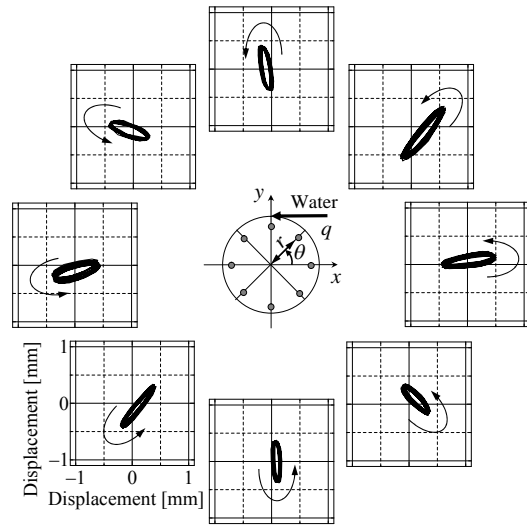


図2 実験装置

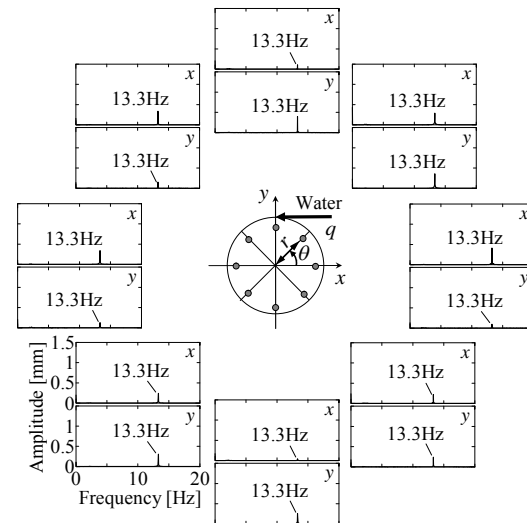
無次元化した値である。流れの速度 $V_0$ は弾性棒を挿入していないときの測定結果を用いており、その決定方法については後述する。図5中において、黒色で示したものは1次モードで振動する図4のタイプの振れ回り軌跡、灰色で示したものは2次モードで振動する図3のタイプの振れ回り軌跡である。いずれの半径位置においても、流速が高くなるとまず2次モードの振れ回りが生じ、さらに流速を高くすると1次モードの振れ回りが生じている。

2種類の振れ回り運動のメカニズムを明らかにする上では、流れ場の様子を明らかにすることが重要であると考えられる。そこで、水を墨で着色し、その上に白色の微小粒子を浮かべて動きを追跡することにより、さまざまな半径位置における流速を調べた。図6は測定結果の一例を示したものである。なお、測定は弾性棒を設置していない状態で行い、白色粒子が弾性棒の設置位置である $\theta = 225 \text{ deg}$ の近傍 ( $\pm 45 \text{ deg}$ の範囲) を通過するときの流速のみを示している。

図7は、各半径位置 $r/R$ における流量 $q$ と流速 $V_0$ の関係を示したものである。



(a) 軌跡



(b) 周波数成分

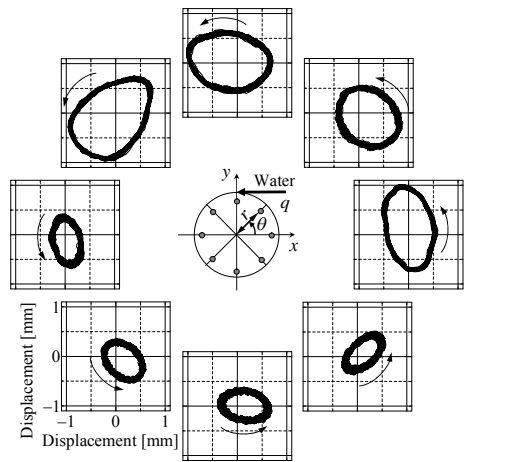
図3 軌跡と周波数成分

( $r = 49 \text{ mm}$ ,  $q = 8.5 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

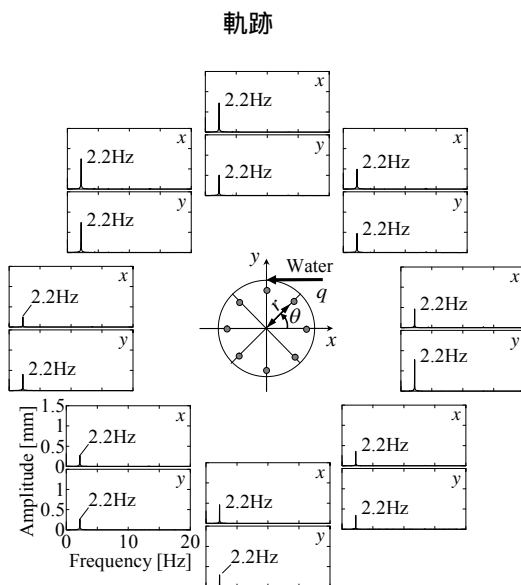
いずれの図においても、流量 $q$ の増加とともに流速 $V_0$ がほぼ直線的に増加している。上述の図5では、この直線近似を用いて、各流量 $q$ の測定値を流速 $V_0$ に変換して示している。

図6の流れ場は、中心から位置が遠ざかるほど流速が速くなっているが、剛体流のような比較的簡単な流れ場にはならず、解析的な取扱いが複雑になる。また、水面の乱れにより、渦放出などについて詳しく検討することが困難であった。そこで、もう1つの装置を用いて水に剛体流を作り、上記の2種類の振れ回り運動のメカニズムについて検討する。

これらの実験結果より、1次モードの振れ回り運動は、旋回流から作用する動圧の変化によって運動方程式の剛性行列が



(a)



(b) 周波数成分

図4 軌跡と周波数成分

( $r = 49 \text{ mm}$ ,  $q = 1.13 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ )

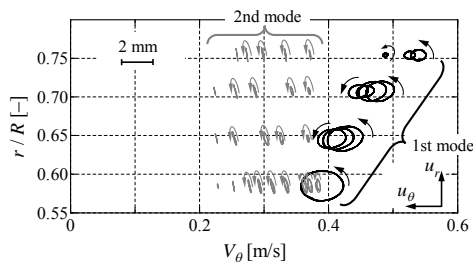
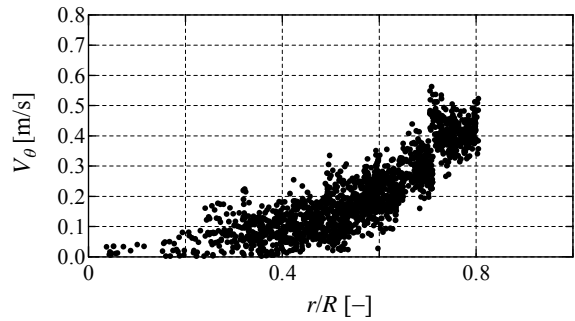


図5 弾性棒のふれ回り

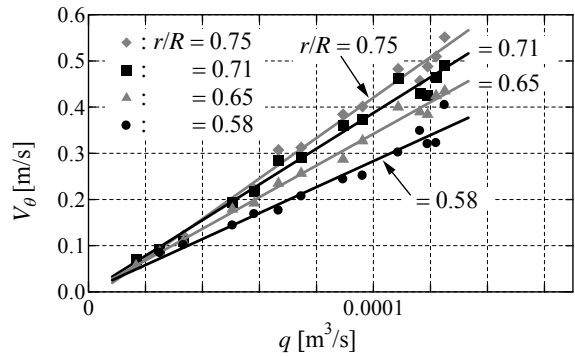
非対称性をもつことにより説明できる。このような  $u_\theta$  と  $u_r$  の連成により、運動方程式の剛性行列に非対称性が生じる。

#### まとめ

旋回流れ内に置かれた弾性棒に生じる自励振動について調べた結果、実験を行った範囲において流れと直交する方向に細長い振動と、流れ方向にやや細長い軌跡を描いて振れ回る振動の2種類の自励振動が発生すること

図6 流れの速度分布  $V_\theta$ 

( $q = 9.0 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ )

図7  $q$  と  $V_\theta$ 

がわかった。振れ回りの向きは流れの旋回方向と同じであった。振れ回り軌跡と流れを可視化した結果より、流れと直交する向きに細長い自励振動は交番渦の放出に起因するものと考えられる。一方、系を単純化した解析より、流れ方向にやや細長く振れ回る自励振動は動圧の変化によって剛性行列が非対称性をもつことで説明できることを示した。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

森博輝, 長嶺拓夫, 市村龍美, 佐藤勇一, 旋回流れ内に置かれた弾性棒に生じる自励振動, 日本機械学会論文集 C 編 77 巻, 779 号, pp.2566-2575, 査読有, 2011.

〔学会発表〕(計0件)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

佐藤 勇一 (SATO, Yuichi)

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号: 30134828

##### (2) 研究分担者

長嶺 拓夫 (NAGAMINE, Takuo)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 00323379

##### (3) 連携研究者

森 博輝 (MORI, Hiroki)

埼玉大学・理工学研究科・准教授

研究者番号: 504551737