

弾性支持円柱の振動と質量の関係

The effect on cylinder weight for an elastically supported circular cylinder

○森垣養真（電通大），黒田成昭（電通大），坪倉誠（電通大），朴炳湖（電通大），仙北谷直美（電通大）

Yoshin MORIGAKI*, Shigeaki KURODA*, Makoto TSUBOKURA*, Binghu PIAO*, Naomi SENBOKUYA

*Dept. of Mechanical Engineering, University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo 182-8585, Japan

The objective of this study is to investigate the effect of Reynolds number on flow induced vibration by changing the mass ratio over a certain range to compare the flow pattern at the same Reynolds number with different "reduced velocity" which is commonly used as a parameter in flow induced oscillation. Large discrepancy is found at a half of critical reduced velocity over a certain Reynolds number range and an increase in mass ratio suppress the oscillation. Flow fields at the "reduced velocity" region are visualized using CFD results and relationship between the flow pattern and the Reynolds number dependence is also investigated.

1. 結論

流体中に置かれた弾性支持された構造物は、その流速の変化に伴ってさまざまな振動をすることが知られており、この振動が原因となって大きな事故を起こすことがある。このような背景から流体励起振動の研究は工学的に応用が広く、振動機構の解明や振動抑制を目的として古くから研究が行われている。これらの研究においては振動系の固有振動数を考慮した「換算流速」というパラメータが一般的に用いられている。また振動と構造物後方に発生する渦は密接な関係があるとされており、レイノルズ数とも何らかの関係があると考えられる。また流体と振動の複合現象として考慮すべきパラメータは多いが、これらによる考察を行っている研究は十分でない。そこで質量のみを変化させることで同じレイノルズ数で異なる換算流速のときの振動の変化を捉えることを目的として実験を行い、振動の様子を比較・考察した。また数値計算によって質量比の違いによる流れ場の比較を行った。

2. 記号

Re ($=U \cdot d / \nu$)	レイノルズ数	Vr ($=U / \omega_n \cdot d$)	換算流速
ξ ($=x/d$)	最大無次元振幅	M	無次元質量
CD	抗力係数	CL	揚力係数

3. 振動実験

3. 1 実験装置、方法

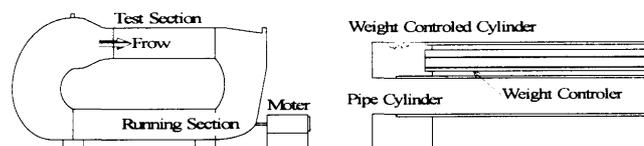


Fig.1 Water Tunnel and Test Circular Cylinder

図1に実験に用いた回流水槽(図1左)と供試円柱(図1右)を示す。代表長さである円柱直径を各円柱で同じにし、円柱の質量を変化させるため内部を中空としそこへ質量の異なる棒材を挿入することで質量を調節した円柱を10本製作した。これらの質量比は1.39から6.92までの幅を持たせ、過去の実験²⁾よりも段階的な変化を捉えられるようにした。また実験結果比較の基準としてアルミの単一円柱を用い、この質量比は3.47で10本の円柱のほぼ中央値となっている。これらの円柱を回流水槽観測部に片持梁状に弾性支持し、振動の計測は円柱支持棒にひずみゲージを貼り付け電圧変化として計測、あらかじめ円柱最下端部における変位と出力電圧の関係を求めておき最大変位を計算した。

3. 2 実験結果、及び考察

実験は10本の円柱それぞれにつき複数回の計測を行った。また基準円柱については過去のデータとの比較も行い再現

性が得られている。ここでは特徴的だった質量比が最も大きい円柱と小さい円柱の結果と基準円柱の実験結果について示した。

3. 2. 1 換算流速 - 最大無次元振幅の関係

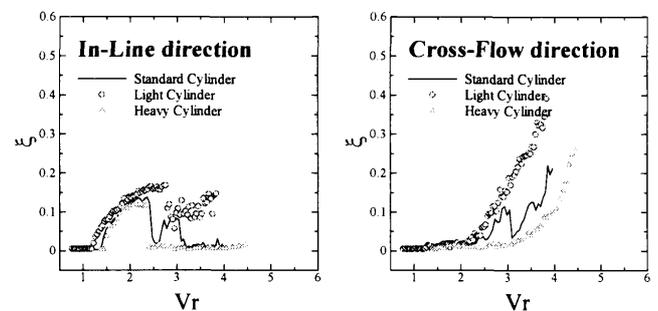


Fig.2 Response of a Circular Cylinder in Water

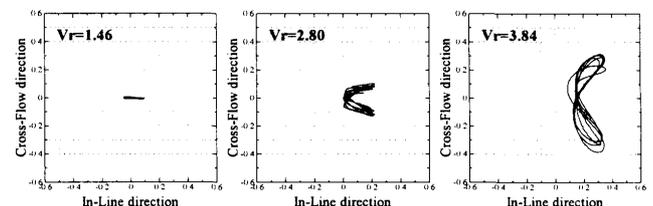


Fig.3 Locus of Light Circular Cylinder

図2から流れ方向で質量比の減少とともに $Vr=1.5\sim 2.5$ 付近で第一励振の立ち上がりが低換算流速に移動している。 $Vr=2.5$ 付近で振幅は小さくなるが基準円柱よりは大きな振幅を示し、以降振幅は増幅している。直角方向においては $Vr=2.5$ 付近から振幅が直線的に増大を始め、 $Vr=3.0$ 以降で振幅が減少することなく増幅している。換算流速で評価しているため、実際の流速は異なっていることや質量と固有振動数が異なるので減衰率が違いこのような差が生じたものと考えられる。図3に示すように $1/2$ 共振換算流速である $Vr=2.5$ 付近から流れ方向の楕円軌跡が直角方向に伸びて、馬蹄型になるのが確認できた。 $Vr=3.5$ 付近になって直角方向に拡大した8の字の軌跡を示したが、このことから $Vr=4.0$ 付近ではまだ第二励振内であると思われる。増幅傾向から共振に至るまで振動が小さくなることはないと考えられる。しかしこれより高い換算流速域でどのような挙動を示すかは、更なる広い範囲で実験が必要とされる。

一方で質量比の大きい円柱では流れ方向において第一励振の立ち上がり振動域のピークから落ち込む点がわずかに移動し振動領域が狭くなっている。また $Vr=2.5\sim 3.0$ 付近での第二励振においては両方向で振動していない。 $Vr=3.0$ 以降での振幅は基準円柱と比較して小さく緩やかな増加傾

向を示している。第一励域，第二励域におけるこれらの変化は，励振機構が異なるため減衰率が変化しても同じような振幅の変化は見られないという研究結果¹⁾があり，このために大きな差が生じたものと考えられる。

図2には円柱3本の結果しか表示していないが，10本の円柱の実験結果から振動領域や振幅の変化は質量比の変化とともに移動していることが確認できたのでここで示した質量比の円柱のみに現れた変化ではないと言える。また田中らによる実験²⁾では鉄とアルミで質量比の異なる円柱を用いていたが，振幅の減少や振動域の縮小などの変化は一致した。特に質量比の増加に伴い固有振動数が低くなり換算減衰率が高くなることから，第一励域からの落ち込みが低い換算流速に移動し振幅の小さい領域が出来たもの¹⁾と思われる。振動においては質量比すなわち固有振動数が密接に関係しているといえる。

3. 2. 2 固有振動数とレイノルズ数の関係

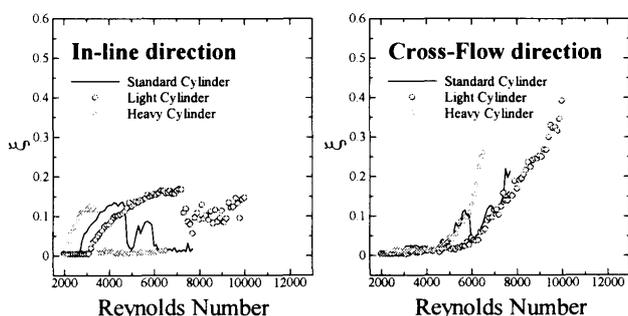


Fig.3 Response of Circular Cylinder by Reynolds Number

図3は円柱振動と実際の流速の関係を比較するために，横軸にレイノルズ数をとってグラフ化したものである。ここには基準円柱と質量比が最も大きい円柱と小さい円柱の結果を重ねて示した。

図3から流れ方向，直角方向ともに質量比が小さく，固有振動数が高くなると振動領域が高レイノルズ数域に移動している。換算流速の定義から，同一換算流速で固有振動数が高くなると流速が大きくなる必要があるためレイノルズ数が大きくなるのがわかる。振動の要因は円柱後方に放出される渦と言われており，本実験で円柱の質量変化は直接円柱の固有振動数に影響を与えている。レイノルズ数が低いと渦の発生周期は長くなり固有振動数の高い円柱すなわち質量比の小さい円柱では大きな振動は見られない。このとき逆に固有振動数の低い円柱が振動しているものと考えられる。また円柱が振動すると渦の発生周期を乱し，渦の発生を誘発し振動を拡大している場合もあると推測される。

3. 3 数値計算結果との比較

実験結果から円柱の質量比が変化すると特に第二励域において振動に変化が生じたが，このときの流れ場の様子を考察するために数値計算を行った。計算に用いたパラメータとして，無次元質量は3.0と30.0， $Re=1000$ ， $Vr=3.0$ で換算流速は各円柱で最も大きな変化が現れた第二励域内の値を用いた。また計算条件については境界適合格子を用い，計算アルゴリズムには部分段階法，時間微分の離散化には対流項にAdams-Bashforth法，粘性項にCrank-Nicholson法を用いた。また境界条件は物体表面に滑りなし条件，流入側は一樣流条件，流出側はSommerfeldの放射条件，圧力についてはNeumann条件を使用した。その結果を図4(無次元質量3.0)，図5(無次元質量30.0)に等圧力線図を示す。

図4，5を見ると円柱の上下で交互に大きな圧力の変化が起きていることがわかる。しかし大きな変位を示しているのは軽い無次元質量3.0の円柱だけで，無次元質量30.0の

円柱は振動していない。軽い円柱の振動は円柱上下の圧力変化に対してすばやい反応を示し一定の振動を示していないが，振幅は大きい。これは図2の結果と一致している。一方で，重い円柱は円柱自身の質量が大きいため圧力変化について振動できず弱い。円柱後方に静止円柱の場合とほぼ一致した規則的な渦列が確認できた。

図6に計算時間における抗力係数，揚力係数の変化を示す。質量比の大きい $M=30$ のグラフを見ると， CD ， CL は振動していないために定常に近い変化をしているのに対して， $M=3.0$ では CD ， CL ともに大きく乱れている。また両円柱において各係数の差はあまり大きくないが振幅の差は大きい。前述のとおり振幅の差は質量比の影響が考えられるが，係数の変化は円柱自身の振動が円柱回りの流れに対して影響を与え渦の放出を乱しこのような変化が見られるものと考えられる。



Fig.4 M=3.0

Fig.5 M=30.0

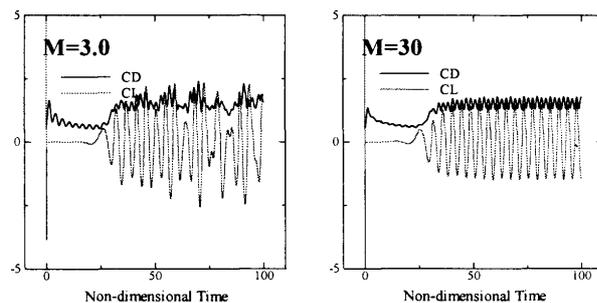


Fig.6 CD, CL (M=3.0, 30)

4. 結論

弾性支持した円柱の流体励起振動において，質量の変化という観点から実験を行い以下にまとめた結論を得た。

- 円柱の振動現象は質量比，固有振動数に対する依存性が高い。本研究で行った範囲では質量比が小さく振動数が高くなると振動領域は低い換算流速域に移動し，低くなると高い換算流速域に移動して振動領域も変化する。
- 振動の抑制という観点から見ると，第二励域において質量を大きくすることで高い抑振効果が期待できる。
- 質量の変化に伴い振動域のレイノルズ数が異なり同じレイノルズ数であっても振動の様子が異なる。
- 数値計算から軽い円柱では振動が後方の渦発生を乱し，円柱周りの圧力変化に瞬時に反応している様子が確認できた。また重い円柱では圧力変化について振動できず，振幅も小さい。円柱後方には規則的な渦を見ることができ，振幅の増加についても実験結果と一致した。

引用文献

- 1) 岡島厚 日本機械学会論文集B編 65巻635号 (1997-7) P2196~P2203
- 2) 田中博樹 日本機械学会論文集B編 65巻640号 (1997-12) P3933~P3940