平成 22 年度修士論文要旨

東京大学大学院　新領域創成科学研究科　海洋技術環境学専攻

流れ中に置かれた回転する円筒構造物の VIV 応答特性に関する研究

A study of VIV response characteristics of a rotating cylinder in a current

学籍番号 47-096646　　加藤　浩一郎
指導教員　　林　昌奎　教授

平成 23 年 3 月 24 日修了予定
Keywords: 渦励起振動，回転円柱，渦離散法，模型実験
Keywords: Vortex Induced Vibration, Rotating cylinder, Discrete Vortex Method, Model experiment

１．序論

将来のエネルギー安定確保のためには大水深域での掘削が必要不可欠である。昨今、その掘削方法としてデュアルグラディエント掘削方式が注目を浴びている。これはリターンパイプを用いて泥水を循環させながらドリルパイプのみによって掘削を進める方法で、小口径のケーシングを用いる事ができるため経済性の面から非常に有利であり、実用化が期待されている。しかし、大水深域での掘削を考えた場合、パイプ長が伸びる事によりシステムの剛性は相対的に低くなる。

ドリルパイプのような流れ中で回転する構造物に働く力として、カルマン渦列の影響により周期的に変動する流体力と、回転による揚力が挙げられる。前者の流体力の規則的な変動による円筒構造物の振動は渦励起振動(VIV, Vortex Induced Vibration)と呼ばれる。特に、円筒構造物から放出される渦の周波数が構造物の固有振動数に近づいた際に、円筒構造物の振動に同期する事によって、流れと直角な方向への構造物の振動振幅が増大するロックイン現象は有名である。

従来から回転円柱周りの流れ解析や、VIV に関する研究は数多くなされている。しかし、回転円柱の VIV を取り扱った研究はほとんどされていないのが現状である。そこで本研究では、一様流中に置かれた円筒構造物を回転させた時の VIV 応答特性を知る事を目的とし、水槽実験と数値シミュレーションを行う。

２．水槽実験

2.1　実験方法

水槽実験は東京大学生産技術研究所の風路付回流水槽にて、径の異なる 2 種類のテフロンパイプ製の 3 次元模型を用いて行った。一方は外径が 19 mm、内径 16 mm、他方は外径が 28 mm、内径が 25 mm である。模型は Fig.1 に示すようにピットが掘られた水槽の最も深い断面に設置しているため、流れは模型の上半分のみにあたる。模型変位は模型中央近に記したターゲットの動きを 2 台のビデオカメラで録画し、画像解析により求めた。画像解析には Ditect 社 Dipp motion Pro を用いた。本実験において変化させる事のできるパラメータは流速、張力、回転速度の 3 つである。このうち、振動がどのパラメータに依存するかを知るために、この 3 つのうち 2 つを固定し、残り 1 つを変化させていくという実験を行った。

2.2　実験結果

本研究で用いたテフロンパイプには自重によるたわみが生じていた。この影響を見るために静水中でパイプを回転させ、CF (Cross-flow)方向の平均振幅を取ったのが Fig.2 である。ここでf_rは回転周波

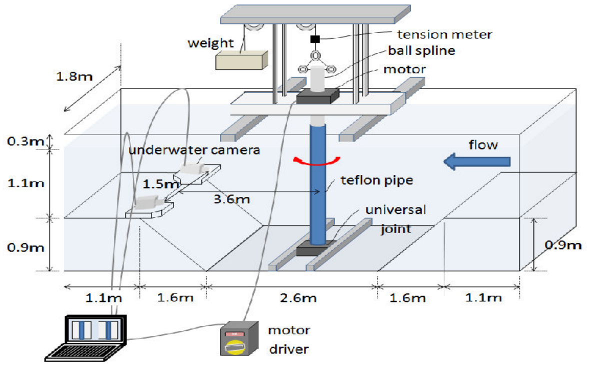


Fig.1 Water tank experimental model.

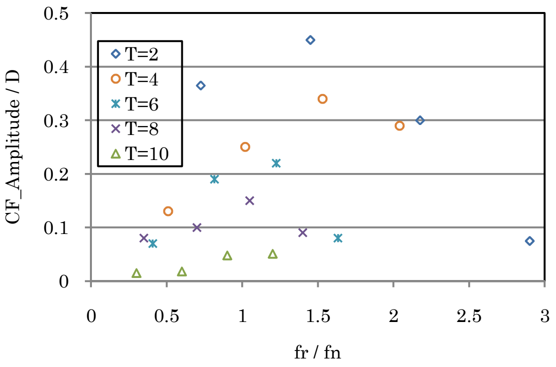


Fig.2 Effect of flexure on displacement amplitude.

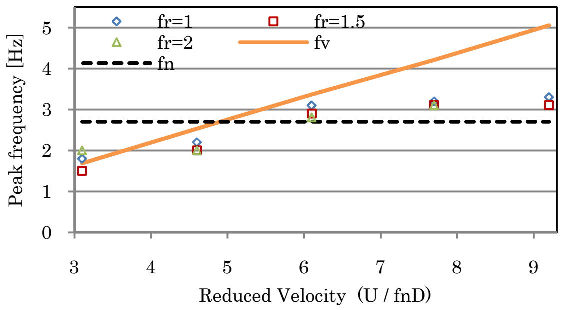


Fig.3 CF peak frequency variation with U_r.

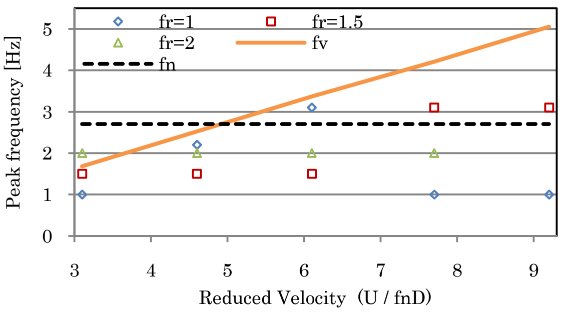


Fig.4 IL peak frequency variation with U_r.

数、f_nは静水時の固有振動数である。これを見ると総じてf_r / f_n＝1.0～1.5 付近にピークが出ているのがわかるが、これは回転周波数と固有振動数が近づいた事によって共振が起きた可能性を示唆している。次に、回転速度と張力を固定し、流速を変化させていった場合の結果を示す。ここでは外径 D=19 mm のテフロンパイプに対し、張力 T=7.5 kgf で固定し、一様流速 U=16～48 m/s まで、8 m/s 間隔で上昇させいてく。この時、回転周波数f_r=1.0,1.5,2.0 Hz について、CF 方向と IL(In-Line)方向のピーク周波数をプロットしたものがそれぞれ Fig.3,4 である。図中に示した換算流速(Reduced Velocity)とは流速を固有振動数と円柱の直径で割り、無次元化したものであり、(1)式で表される。

$$U_r = \frac{U}{f_n D} \tag{1}$$

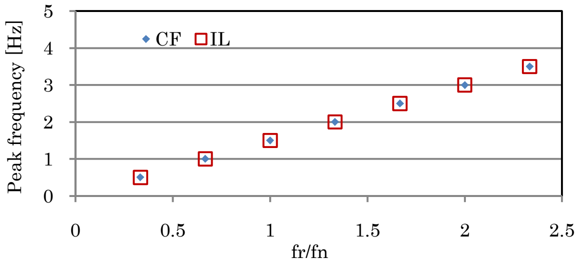
この結果を U_r＝3.8、U_r＝4.5～6.2の時、U_r＝7.6～9.1の時の 3 つの領域に分けて考える。U_r＝3.8では CF、IL 共に回転周波数に支配されているのがわかる。また、U_r＝4.5～6.2では CF は渦発生周波数に、IL は渦発生周波数もしくは回転周波数に支配される。U_r＝7.6～9.1の時、CF は固有振動数、IL は固有振動数もしくは回転周波数にそれぞれ支配されている。この結果を基に、換算流速U_rが小さい時、5.0 付近の時、大きい時の 3 つの領域のそれぞれについて、換算流速を固定し、回転速度を変化させていった時の実験結果を記す。Fig.5 には U_r=3.8, 4.5, 8.5 のそれぞれの場合におけるピーク周波数の変化を示した。U_r＝3.8の時、そのピーク周波数は CF、IL 共に回転周波数に一致している。U_r＝4.5の時、CF は全て固有振動数に、IL はf_r / f_n＝0.7～0.9 付近においては回転周波数に支配され、それ以外の領域では固有振動数に支配されている。U_r＝8.5の時、f_r / f_n=3.3～4.0 と非常に大きい領域では固有振動数に、それ以外では回転周波数に支配されている。これらの結果より回転円筒構造物の VIV 応答特性は以下のようにまとめられる。

○換算流速が小さい時は、CF、IL 共に回転周波数に支配される。

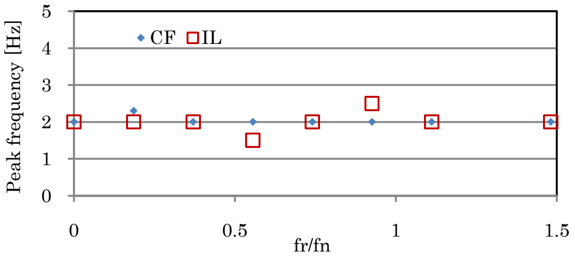
○換算流速が 5.0 付近の時は CF は固有振動数に、IL はたわみの影響が特に大きい領域では固有振動数、それ以外の領域では回転周波数に支配される。

○換算流速が大きい時は、たわみの影響が非常に小さい時を除き、固有振動数に支配される。

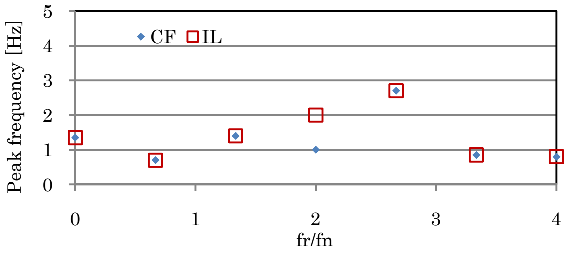
つまり、回転する円筒構造物の VIV 応答特性を見る際には、固有振動数と渦発生周波数のロックイン現象だけでなく、固有振動数と回転周波数の共振についても考慮する必要があると言える。



(a) U_r＝3.8



(b) U_r＝4.5.



(c) U_r＝8.5.

Fig.5 Peak frequency of rotating circular cylinder.

３．回転する円筒構造物の流体力数値解析

3.1 基礎理論

本研究では２次元断面の流体力解析に離散渦法(DVM, Discrete Vortex Method)を用いた。離散渦法は円筒表面に連続的に分布する渦度を離散的なフリー渦に置き換え、フリー渦の移動や渦度変化をLagrange 的に追跡する手法である。格子を必要としないため、移動境界の取り扱いが必要な流れ場の解析を非常に短時間で行えるという利点があり、本研究のような構造物の振動の基礎的な特性を知る際には適した手法であると言える。本研究で用いる離散渦法は、林 [1]が提案した RDVM(Random Discrete Vortex Method)をベースにしている。回転する２次元断面の流体力解析方法が、回転のない２次元断面の流体力解析と大きく異なるところは、円筒表面の圧力の成分にある。離散渦法において、表面圧力 P は(2)式に示すベルヌーイの式を用いて求める。

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} + \frac{q^2}{2} + \frac{P}{\rho} = \mathrm{const} \tag{2}$$

ここで、$\emptyset$は速度ポテンシャル、qは流体の速度、ρは流体の密度である。本研究では、(2)式の圧力 P を(3)式のように速度ポテンシャルの時間変動成分P_1と全体速度成分P_2に分けて取り扱う。回転のない２次元断面においては、P_2成分が無視できるほど小さいが、回転する２次元断面ではP_2成分を無視できず、P_2成分による平均流体力は回転する２次元断面に働く平均揚力となる。

$$\mathrm{P} = P_1 + P_2 \tag{3}$$

$$\frac{\partial \emptyset}{\partial t} + \frac{P_1}{\rho} = \mathrm{const} \tag{4}$$

$$\frac{q^2}{2} + \frac{P_2}{\rho} = 0 \tag{5}$$

速度ポテンシャルの時間変動成分であるP_1成分を円筒の接線方向に微分すると(6)式のようになる。

$$\frac{1}{\rho}\frac{\partial P_1}{\partial s} = -\frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\partial \emptyset}{\partial s}\right) = -\frac{\partial q_s}{\partial t} = -\frac{\gamma}{\Delta t} \tag{6}$$

ここで、γは円筒表面に連続的に分布する渦度である。この式から、P_1成分の絶対値を求める事はできないが、２次元断面の VIV 解析に必要な流体力を算出する場合は、(7)式から求まる円筒表面上の要素間の相対値のみで十分である。また、平均圧力成分P_2は(8)式のようになる。

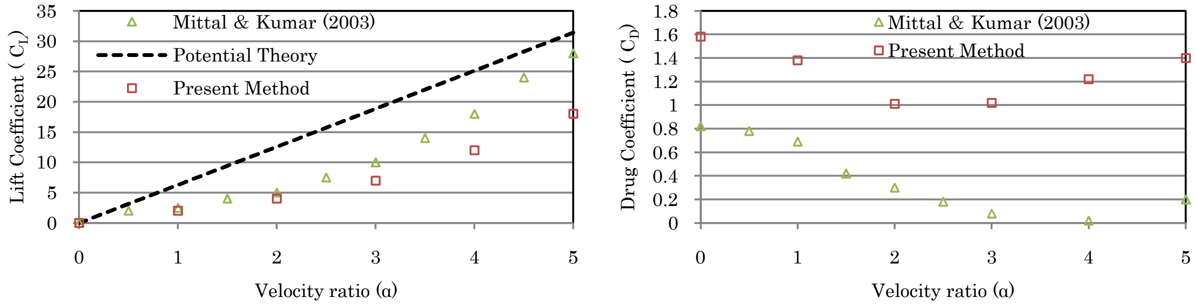
$$P_{1,m} = P_{1,0} - \frac{\rho}{\Delta t}\sum_{\mathrm{t=1}}^{\mathrm{m}} \gamma_i \,\mathrm{ds} \tag{7}$$

$$P_{2,m} = \frac{\rho}{2}q^2 = \frac{\rho}{2}(r\omega + \gamma_m)^2 \tag{8}$$

ここで、rは円筒の半径、ωは円筒の回転角速度である。

3.2 流体力解析例

まず、本研究で提案する離散渦法の性能比較に、固定した回転円筒に対する流体力の解析結果を用いた。その理由は、流れ中に置かれた回転する円筒構造物を対象にした VIV 解析例はあまりなく、公開されている研究成果のほとんどが固定された回転円筒構造物の流体力解析に注目した研究であるという事である。そのため、Fig.6 には円筒表面の回転速度を一様流速で割った流速比αに対する平均揚



(a) Lift coefficient (C_L)　　(b) Drug coefficient (C_D)

Fig.6 Lift and Drug Coefficients on 2-D rotating circular cylinder.

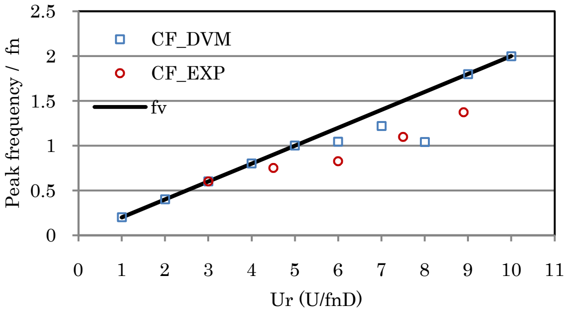


Fig.7 CF peak frequency variation with U_r.

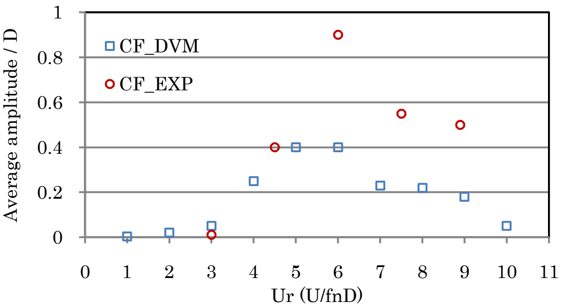


Fig.8 CF oscillation amplitude variation with U_r,

力、平均抗力の変化を Mittal & Kumar[2]の解析結果およびポテンシャル理論値と共に示している。本研究で提案している方法により求められた結果は他の方法と同様の傾向を示すが、揚力の値が大きく、坑力の値が小さくなっている。これは提案する方法が粘性影響の取り扱いがあいまいな方法であるため、粘性影響が強くなる、高い回転流速の表現が不十分であった事に起因すると思われる。次に、回転のない円柱に対し、流速を与えそのピーク周波数と平均振幅をプロットしたのが Fig.7,8 である。ここでは本実験により得られた値も共に示す。平均振動振幅の値自体には差があるものの、換算流速に対するピーク周波数、平均振動振幅の特性については実験結果と数値シミュレーション結果がほぼ一致している。以上より、本研究で提案する離散渦法は回転円筒構造物の VIV 応答の基礎的な特性を知る上では十分実用的な手法であると言える。

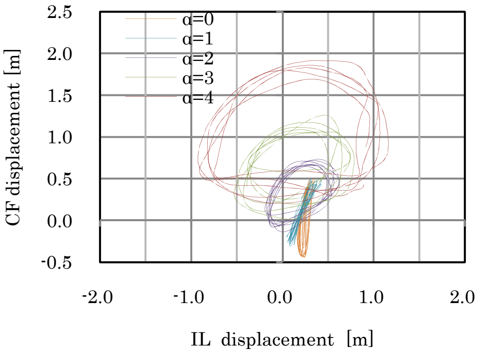


Fig.9 time history of trajectory variation with α.

次にこの手法を用いて、U_r＝5 の下で流速比α=1.0～5.0 まで 1.0 刻みで変化させ、構造物を振動させた時の結果を示す。Fig.9 は円筒の中心座標の時間変化を描いたものである。ここで流れは IL 正方向、つまり紙面左から右に与え、円筒は時計周りに回転している。ここでは回転のない状態でロックイン領域にある円筒構造物に回転を与えた場合のαによる振動の様子の変化を、最大振幅を取る振動の軸、円筒中心座標の描く軌跡、円筒中心座標の時間平均値の 3 点から述べる。まず、最大振幅を取る軸は回転のない時 CF 方向にある。そこからαを上昇させていくと、回転を与えた方向に振動の軸も回転していく。次に円筒中心座標の描く軌跡であるが、回転のない時は CF 方向を長軸とした楕円形もしくは”8”の字型など IL 方向に対して対称の図形を描く。そこから回転を与えると円運動に近づいていく。円筒中心座標の時間平均値は、回転のない時は IL 軸上流れ後方にある。そこから円を描くように移動しながら、最終的には CF 軸上揚力方向に達する。つまり、回転のない時には CF 軸上で IL 軸に対称な動きをしていた構造物が、回転速度を上げていくと徐々に IL 軸上の揚力が発生する方向を中心とした円運動に近づいていくという事である。この傾向は同様に実験結果からも確認されている。

4．結論

本研究では、水槽実験と離散渦法による数値シミュレーションにより、流れ中に置かれた回転する円筒構造物の VIV 応答の基礎的特性を明らかにした。水槽実験結果から、回転を与えた場合、回転周波数と固有振動数の同期により共振が発生する可能性を示し、換算流速が$U_r < 4$や$U_r > 8$付近においてはこの回転周波数による振動が出やすい事がわかった。また回転のない状態から回転速度を上げていくと、VIV による振動から回転による円運動に変わっていく様子を実験と数値シミュレーションの双方から確認した。また、本研究で提案したシミュレーション手法は先行研究、実験結果との比較により、回転円筒構造物の基礎的な VIV 応答特性を知る上で実用的な解析法と言えたが、回転速度の高い領域への適用は困難である事も明らかになったため、新たな解析手法の考案が必要となる。実験においてもより様々な条件下について考察する事が回転円筒の VIV 応答特性の解明には必要となるだろう。

参考文献

[1] 林昌奎, 金裕徹 : 離散渦法による円筒構造物の VIV 応答解析、日本船舶海洋工学会論文集, 第 8 号, pp. 249-257, 2008.
[2] Sanjay Mittal and Bhaskar Kumar : Flow past a rotating cylinder, J. Fluid Mech., vol.476, pp.303-334, 2003.