管内における柱状物体周りの流れの解析

Flow Simulation around Bluff-body Column in a duct

北口 真由,電通大院,東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: mayu-k@kuroda.mce.uec.ac.jp 黒田 成昭,電通大 ,東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1, E-mail: kuroda@mce.uec.ac.jp Mayu Kitaguchi, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan Shigeaki Kuroda, Univ. of Electro-Communications, Chofugaoka 1-5-1, Chofu-shi, Tokyo, 182-8585 Japan

There are many papers that deal with the performance of the Karman vortex shedding flowmeter in a fully developed turbulent pipe flow. But few reports discuss the flow in a rectangular duct at low Reynolds number. This study was performed to examine the three-dimensional features of vortex shedding by finite difference method. The ratio of the bluff body width (d) to the duct inner diameter (D) was 0.28.

1.緒論

工業的に重要な流量計の1つとして,カルマン渦流量計が 挙げられる.この流量計は,流れの中に柱状物体を配置した 場合後流に形成されるカルマン渦を流量測定に応用したも ので,管内流の流量測定に広く用いられている⁽¹⁾⁽²⁾.しかし より広範囲で使用できるよう,常に一定のストローハル数を 得られるような渦発生体の形状,管路を検討し,さらに性能 を向上させるため,内部流れを明らかにすることが必要であ る.円管内乱流域での研究は多くなされているが⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾, 様々な工業上の熱流体機器内には円管以外の断面を持つ管 路が用いられている上,管が非常に細い場合その内部流れは 層流となり,層流域での研究が必要となる.また渦の周波数 を測定するため渦発生体後方に渦検出器を設置した場合,そ の流れ場は渦検出器の影響を受け1物体の場合とは異なった 様子を示す.

本研究では層流域で管内に渦発生体と渦検出器をモデル 化した柱状物体を配置し,3次元での解析を行うことで,馬 蹄渦⁽⁸⁾の影響を考慮した渦発生体近傍の流れ場の様子とセ ンサーの設置位置によって流れ場が受ける影響について明 らかにするすることを目的とする.

2.解析方法

3次元非圧縮粘性流れの計算を Navier-Stokes 方程式(1)と 連続の式(2)を用いて解析を行った.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\operatorname{grad} P + \frac{1}{\operatorname{Re}} \nabla^2 u \tag{1}$$

$$D \equiv divu = 0 \tag{2}$$

計算は MAC 法に基づいて行った.時間差分については一次精度の前進差分,空間微分項については二次精度の中心差分を,対流項については3次精度の風上差分を用いて離散化を行った.計算は速度,圧力ともに陰解法を用いて SOR 法で収束計算を行った.

3. 解析条件

解析モデルの1例を Fig.1 に示す.



Fig.1 analysis model.

格子形成には境界適合直交格子を使用した.また境界内部 まで格子が張られている為マスキング法を用い物体を認識 させた.

マスキング法とは境界内部まで格子が張られている場合 に有効である.境界内部は実際は物体内部であるため,計算 上はその領域を飛ばすような措置が必要となる.そこで物体 壁面となる格子点には境界条件を代入し,物体内部となる格 子点にはスウィッチ関数を用いることにより計算を行わな いことで,計算領域と識別する方法である.

管直径と渦発生体の絞り比を =d/D,渦発生体と渦検出器 との距離を L,ストローハル数は平均流速 U_mを用い,流路 断面で修正した修正ストローハル数 St'で表す.速度の境界 条件は物体,管壁面を滑りなし,管入口は一様流,管出口は Sommerfeld の放射条件とし,圧力の境界条件は Neumann 条 件を使用した.

渦発生体として, Fig.1 に示した実験的に最適化された形状⁽⁹⁾(以下,六角柱と呼ぶ),円柱,角柱を使用した.また 渦検出器をモデル化した後方物体として長さ 0.6d,幅 0.1d の矩形柱を採用した.

4. 渦発生体周りの流れ

4.1 渦発生体が円柱の場合

レイノルズ数 Re を 1000,格子数を x 方向 149 点, y 方向 99 点 z 方向 39 点,円柱直径を d,軸方向高さ D,絞り比 =0.3 とした.

Fig.2 に流れ場(流線)を示す.Fig.2 (a)より円柱のすぐ後方 に強いカルマン渦が形成されていることが分かる.またFig.2 (b)から馬蹄渦による影響が比較的少なくなっていることが 分かる.馬蹄渦によって押し上げられた流れはカルマン渦を 包み込むように,後方へいくにつれ管中心に向かっていく.





Fig.2 Stream line. (Re=1000,T=250)

4.2 渦発生体が角柱の場合

レイノルズ数 Re を 1000,格子数を x 方向 149 点, y 方向

99 点 z 方向 39 点,角柱断面 d×d,軸方向高さ D,絞り比 =0.1 とした.

Fig.3 に流れ場(流線)を示す.Fig.3 より円柱の場合より絞 り比が小さいにもかかわらず馬蹄渦の影響により,渦発生体 よりやや後方でカルマン渦が形成されている.これは渦発生 体後流の壁面近傍の流れが押し上げられ,角柱から剥離した 流れが下流に伸びるためためだと考えられる.それによって 壁面近傍の流れが管中心へ流される位置も後方へ移行する.



(a) Over view. (b) Side view. Fig.3 Stream line. (Re=1000,T=250)

4.3 渦発生体が六角柱の場合

レイノルズ数 Re を 1000 から 5000 まで変化させ,格子数を x 方向 99 点, y 方向 57 点 z 方向 55 点, 絞り比 =0.28 とした.

Fig.4 に流れ場(流線)を示す.Fig.4(b)より角柱の場合と同様に,馬蹄渦の影響により渦発生体直後の壁面近傍流れが押し上げられ3次元性の強い流れ場となっていることが分かるしかし角柱の場合と異なり強い渦が形成され易い形状のため渦は後方に流されることなく,直後で形成されている.従って渦発生体直後に壁面近傍の流れが管中心へ向かうため,渦発生体周りの強い縦渦の影響で流れはらせん状の軌跡をたどっている.



(a) Over view. (b) Side view. Fig.4 Stream line.(Re=1000,T=250)

Fig.5 にレイノルズ数 Re が 1000 から 5000 における無次元 時間 T が 50 刻みの修正ストローハル数 St'の変化を示す.ま ず同レイノルズ数においては時間変化による St'の変化はほ とんどない.またレイノルズ数を変化させると若干ずれはあ るものの 0.29 前後でほぼ一定となっている.



Fig.5 Strouhal number versus Reynolds number.

Fig.6 に六角柱直後から管出口までの後方の管中心圧力変 位を示す.Fig.6 より渦発生体後方 L=3d ~ 5d の間, x=3.6(物 体からの距離 L=1.28)で圧力が最も回復していることが分か る.また x=2.8(物体からの距離 L=0.48)においても圧力の回 復が認められるが,渦検出器を設置する位置としては,渦発 生体に近過ぎることで渦発生体へ大きな影響を与え,正確に 検出できない可能性が高く不適切であると考えられる.よっ て L=3d ~ 5d 近辺に渦検出器を設置することが望ましい.し かし渦検出器を設置することで流れ場は影響を受けるため, 2 物体で解析を行うことで正確な最適設置位置を検討するこ とが必要である.



Fig.6 Pressure change between T=100 and T=250

5. 渦発生体と渦検出器周りの流れ

渦発生体として六角柱を使用し、レイノルズ数 Re を 1000, 格子数を x 方向(i 方向)169 点, y 方向(j 方向)57 点 z 方向(k 方向)31 点, 絞り比 =0.28, 渦発生体と渦検出器との距離 L を 3d, 5d とした.

5.1 渦発生体,渦検出器との距離Lが3dの場合

Fig.7~11 にある時刻における流れ場を示す.Fig.7 より後 方の渦検出器が近いため,完全に渦発生体から渦が放出され る前に接触している様子が分かる.このため渦検出器の中心 部に流れが集中し,時間が異なっても常に渦検出器前面で中 心部の圧力が高くなっている様子が,Fig.7(b),Fig.8,Fig.9 からもわかる.また1物体の場合と同様に壁面近傍の流れは らせん状に管中心部へ向かっており,渦検出器前面で中心へ の流れが落ち着いている.従って,現位置(L=3d)より前方に 渦検出器を設置するとより複雑な流れになることが予想さ れ,不適切である.



(a) Over view.



(b) Side view.

Fig.7 Stream line.(Re=1000,T=125)



Fig.8 Velocity of j=19 and j=39. (Re=1000,T=120)



Fig.9 Velocity of j=19 and j=39. (Re=1000,T=121)



Fig.10 Velocity of j=12. (Re=1000,T=125)



Fig.11 Velocity of j=15. (Re=1000,T=125)

Fig.10, Fig.11 は流れ方向に平行な断面での速度ベクトル を示したものであり, Fig.11 の方がより物体に近い位置であ る.Fig.10より馬蹄渦の影響から,壁面近傍の流れが渦発生 体から遠い位置から回り込むような流れになっていること が分かる.またこの流れは渦発生体直後に強い縦渦を形成し ており渦発生体に近づくにつれ,縦渦の影響も低くなってい る様子が Fig.11 からも分かる.さらに渦検出器に接触し圧力 上昇を引き起こしている渦としては,完全に剥離していない カルマン渦であることが分かる.従って渦が交互に発生する タイミングで,圧力の高い位置は左右にのみ変化し,軸方向 への変化はほとんどない.

5.2 渦発生体,渦検出器との距離Lが5dの場合

Fig.12~16 にある時刻における流れ場を示す.Fig.12 より 渦検出器との距離が十分であるために,渦は完全に剥離し, その後渦検出器に接触している様子がわかる.形成されたカ ルマン渦は,他と同様強い渦度を示しており渦検出器に与え る影響は最も高いと予想される.Fig.12(b)より渦検出器前方 に流れが存在しない広い領域がある.この領域には上部に存 在する強いカルマン渦と壁面に囲まれていることで,軸方向 へ大きな縦渦が形成されており,この渦も渦検出器へ少なか らず影響を与えていると考えられる.

前述した L=3d では渦検出器の圧力分布の軸方向変化はな かったが, Fig.13, Fig.14 から渦検出器前面の圧力分布に軸 方向の変化があることがわかる.Fig.13 では渦検出器前方に 大きな縦渦は見られない.従って渦検出器周りの流れ場はカ ルマン渦によって大きく支配されることになる.これに反し Fig.14 では渦検出器前面で大きな縦渦が形成され接触してい るいるため,渦検出器前面の圧力は全面にわたって高くなっ ている.

また Fig.15, Fig.16 から L=3d の時とは異なり,後流の影響によって,馬蹄渦が押し上げている流れの一部は管中心へ向かう途中で押し戻され,そこで縦渦を形成していることがわかる.



(a) Over view.



(b) Side view. Fig.12 Stream line.(Re=1000,T=125)



Fig.13 Velocity of j=19 and j=39. (Re=1000,T=120)



Fig.14 Velocity of j=19 and j=39. (Re=1000,T=125)



Fig.15 Velocity of j=13. (Re=1000,T=125)



Fig.16 Velocity of j=15. (Re=1000,T=125)

5-3. 渦検出器の設置による圧力変化

渦発生体後方に渦検出器を設置した場合,流れ場は大きく 変化する.そこで渦検出器を設置した場合としない場合の圧 力変化を比較し,流れ場への影響を検討する.

Fig.17 に渦発生体と渦検出器からの距離 L=3d,5d における管中心圧力変化を示す.

Fig.17 (a)よりどの時刻においても,渦検出器の直前直後で は影響を受けていることがわかる.しかし渦検出器後流にお いては Fig.6 の渦発生体のみの場合の圧力変化とほぼ同じ値 を示しており,前方に渦検出器がある影響はほとんど受けて いない.





Fig.17 Pressure change between T=100 and 125

また Fig.17 (b)においても,L=3d の場合と同様,渦検出器の 直前直後では物体があることで圧力変化が大きくなってい るが,渦検出器後流においては前方に渦検出器がある影響は ほとんど受けていない.

6 . 結論

- (1)馬蹄渦の影響により渦発生体直後の管壁面近くの流れが 上部に押し上げられることで流れ場は 3 次元的なものと なり、その影響は渦発生体の形状によって異なることがわ かった。
- (2)渦検出器を設置する位置によって、流れ場は異なった様子を示す.したがって最適な設置位置が存在するが、本研究では圧力変化、後方の渦検出器の流れ場への影響を考慮した結果渦発生体後方L=3d~5dが最適であることがわかった.
- (3)渦発生体と渦検出器の間の流れ場は、渦検出器との距離がある一定以上離れることで、渦検出器前方に縦方向の強い渦が発生し、流れ場に大きな影響を与えていることが分かった。
- (4)渦検出器を設置しても、管中心圧力変化から圧力に関して は後流にあまり影響を与えないことが分かった。

参考文献

- 山崎,石川,栗田,"カルマン渦流量計 渦放出の規則性 による新しい流量測定 "計測と制御,10-3(1971), 173-188.
- (2) 栗田, "カルマン渦流量計"計測と制御, 18-5(1979), 407-412.
- (3) 本多,山崎,"円管内3次元流中での渦放出の安定化"計 測自動制御学会論文集,17-7(1981),764-769.
- (4) 五十嵐, "直円管内の渦発生体の抵抗係数とストローハル数"機論, 65-629, B(1999), 229-236.
- (5) 横井,斎藤,亀本,小川,"円管内における円柱からの渦 放出",機論,57-544,B(1991),4011-4015.
- (6) 平野,菊地,"円管内を横切る円柱に働く抗力と渦放出"
 機論,53-492,B(昭 62),2390-2394.
- (7) 雀, 寺尾, 高本, 松井, "カルマン渦流量計内部の流れ構造に関する実験的研究(第1報, トリプルワイヤによる流速測定)"機論, 64-619, B (1998), 649-655.
- (8) 亀本,横井,斎藤,田中,小川,"渦流量計内水流の染料 注入法による可視化",可視化情報,11,Suppl.No.2 (1991), 289-294.
- (9) 寺尾,高本,"カルマン渦流量計の渦発生体形状の最適化 と不確かさの算出法に関する研究"計量研究所報告書, 48-4(1999), 17-23.