A112

回転円柱から放射される空力音源の可視化

飯田明由[○] (工学院大), 水野明哲 (工学院大)

Visualization of aerodynamic noise source of a rotating circular cylinder

Akiyoshi IIDA and Akisato MIZUNO

ABSTRACT

Vorticity structures and flow field around a rotating circular cylinder at Reynolds numbers between 10^2 and 10^4 was numerically visualized. Velocity ratio of the uniform velocity and the rotational velocity of the cylinder was changed from 0 to 3. At low velocity ratio, the wake has anti-symmetric vorticity structure and lift-drag ratio is rapidly increasing. However, when the velocity ratio exceeds about 2, an absolute value of lift-drag ratio becomes small and alternative vorticity structure disappears. As a result, fluctuation of the aerodynamic forces turn weakness and the resulting aerodynamic sound becomes small. Source term of aerodynamic sound was also visualized by using results of CFD analysis. Sound source term generated large scale eddies disappeared at high velocity ratio. It reveals that rotating cylinders are effective for reduction of aerodynamic sound.

Keywords: Aerodynamic noise, Wake, Turbulence

1. 緒 論

円柱後流にできるカルマン渦は振動や空力音の発生原因となることが多く、カルマン渦の抑制と制御は工学的に重要な課題となっている。カルマン渦の抑制方法としてトリッピングワイヤ、円柱に間欠的な孔をあける方法などが提案されている。本研究では、円柱を回転させた場合の渦構造について検討し、回転によりカルマン渦がどのように抑制されるか数値解析によって調べた。また、円柱を回転させた場合に、円柱から発生する空力音がどのように変化するか調べ、空力音の発生に寄与する渦構造の可視化を行った。数値解析の結果、円柱の回転速度が主流速度の2倍以上になるとカルマン渦が崩壊し、空力音を抑制できることがわかった。

2. 解析手法

解析には三次元非圧縮非定常 Navier-Stokes 方程式を支配方程式として用いた。乱流モデルは動的スモグリンスキー・モデルを使用した。空間の離散化には有限要素法、NS 方程式の解法としては ABMAC 法を用いた。

図1に解析メッシュを示す。座標系は円柱中心を原点とし、流れ方向を X、円柱軸方向を Z、X 及び Z 軸に直角に Y 軸とした。解析領域は、円柱直径 D を基準長さとして、流れ方向に $-4D \sim 16D$ 、円柱軸方向に $2D$ 、Y 軸方向に $\pm 8D$ とした。境界条件として、円柱上流 $4D$ の面において一様流入境界を与えた。軸方向の両端は対称境界

とし、円柱表面では円柱の回転速度を速度境界条件として与えた。それ以外の境界はすべて自由流出境界とした。

解析メッシュの総数は約 40 万点であり、最小メッシュサイズは周方向が $0.011D$ 、半径方向が $0.015D$ である。

解析には自作の PC クラスタ (CPU Pentium III:1GHz, 4Node, 並列システム:Score) を使用した。解析ステップ数は約 100,000 である。解析はレイノルズ数 $Re=10^2$, 10^3 , 10^4 の各条件において、円柱の回転速度と主流速度の比 α を 0~3 まで変化させて行った。

3. 解析結果

図2にレイノルズ数 10^3 、速度比 $\alpha=1$ の場合の流線と等渦度面を示す。等渦度面ははく離点近傍付近から 3 次元的なうねりが観察される。スパン方向のメッシュ数及びスパン方向の解析空間が不十分な場合、等渦度面が 2 次元的なまま、下流に放出される可能性がある。そこでスパン方向の解析メッシュや解析空間を変えてメッシュ依存性について検討を行い、メッシュサイズを決定した。図2より、本解析のスパン方向メッシュが渦構造を捉えていることがわかる。

図3は回転速度比 $\alpha=1$ と $\alpha=2$ における円柱近傍の流れである。回転比が大きくなると、はく離点 S の位置が移動する。本解析では円柱が反時計回りに回転しているため、下側のはく離点は速度比が大きくなるとともに回転方向に移動し、後述する非対称渦構造の消滅につながっていくことがわかる。

Fig.1 Computational mesh for flow around a circular cylinder

Fig.2 Stream line and iso-pressure contours around a rotational circular cylinder

$\alpha=1.0$

$\alpha=2.0$

Fig.3 Separation points of a rotating cylinder at $Re=10^3$

図4にレイノルズ数 $Re=10^3$ における速度比 α を変化させた場合の渦度分布を示す。円柱が静止している場合、円柱後流にはカルマン渦が観察される。速度比 $\alpha=0.5$ の場合は、回転方向（反時計方向）に渦構造がやや傾くが、非対称構造を持ったカルマン渦が観察される。円柱直下流の渦度は静止時に比べ、巻き込みが強くなっており、渦構造がより組織的になっている。さらに α が大きくなり、 $\alpha=2$ になると渦列はさらに回転方向に傾き、非対称な配列が崩れはじめる。 $\alpha=3$ の場合は非対称な渦列は観察されなくなる。ポテンシャル流れの場合、 $\alpha=2$ において、前方よどみ点と後方よどみ点が一点になり、円柱表面から離脱する。粘性流れの場合、よどみ点の移動はポテンシャル流れに比べて緩やかであるが、 $\alpha>3$ では非対称渦列の放出が抑制されることから前方よどみ点と後方よどみ点が次第に接近していることがわかる。

渦構造の変化に伴い、円柱に作用する流体力の大きさも変化する。図5は回転比に対する揚抗比を示したものであり、回転によって揚力が発生するため、揚抗比の絶対値は静止状態の場合に比べ大きくなるが、 $\alpha=2\sim3$ 付近を境に揚抗比が減少する。これは渦対の放出が抑制され、揚力の絶対値が低下するのに対して、摩擦抵抗の増加によって抗力が大幅に増加するためである。この傾向は渦法を用いた Cheng ら⁽¹⁾の結果と定性的に一致する。Cheng らの結果では $\alpha=2$ で揚抗比の絶対値が最大となるが、本解析の場合、 $Re=100$ の場合は $\alpha=2$ において最大値をとるが、 Re 数が大きい場合、 $\alpha=3$ 付近で絶対値が最大となる。

揚力及び抗力変動の実効値は $\alpha=1$ 付近までは、回転していない場合に比べて大きくなる。これは回転によって誘起された強い渦によって流体力が増加するためである。しかし、 α がさらに大きくなると、渦構造の非対称性が崩れることに対応して、変動の実効値が小さくなる。非対称渦構造が消滅する $\alpha>3$ では変動がほとんど見られなくなる。 $\alpha>3$ では非対称渦構造が見られなくなることから、ストローハル数もほとんど0になる。

計算された流体力を元に、Lighthill-Curle の理論を使って空力騒音を計算した結果を図6に示す。計算した空力騒音は、各レイノルズ数における静止円柱の騒音を基準に規格化してある。空力騒音と速度比の関係はレイノルズ数にかかわらず、ほぼ同じ特性を示すことがわかる。

速度比 α が 0.5 から 1 付近において空力騒音が最大となり、 $\alpha=2$ においてほぼ静止円柱と同程度の騒音レベルとなり、さらに回転数が増加すると空力騒音が減少する。 $\alpha=3$ ではほぼ静止円柱に比べて 10 dB 騒音を低減できる。

この結果は図3に示した渦構造の変化にほぼ対応している。したがって、柱状物体の空力騒音を制御する手法として物体を回転させる手法が有効であることがわかる。

Fig,4 Contours of vorticity around a rotating cylinder at $Re=10^3$

Fig, 5 Lift-drage ratio of a rotating circular cylinder

Fig, 6 Noise reduction effect on velocity ratio of a rotating circular cylinder

(a) $\alpha=0.0$

(b) $\alpha=2.0$

(c) $\alpha=3.0$

Fig. 7 Distribution of aerodynamic sound source term around a rotating circular cylinder

図 7 に空力的な音源項 ($\text{div}(\omega \times u)$) の分布を示す。カルマン渦によって強い音源項が生成されていることがわかる。回転していない場合は、カルマン渦の巻き上がりに伴い円柱背後に音源項が広い領域に分散しているが、 $\alpha=2.0$ で回転している場合は、円柱背後の音源領域が小さくなっている。また、大規模渦による音源項のスケールも小さくなっているが、全体的な音源項の強さは非回転の場合と大幅には変わらない。このため発生する騒音の絶対値は渦構造の分布ほどには変化しないようである。一方、 $\alpha=3.0$ で回転している場合は、大規模な渦による音源項はほとんど観察されない。円柱背後の大規模渦構造が破壊されたことにより空力音が低下していることがわかる。円柱の周囲にある剥離せん断層は回転の有無にかかわらず存在する。その強さも回転の大きさにはあまり依存していない。円柱近傍の剥離せん断層の強い渦は空力音を発生させる原因ではあるが、それが roll-up して時間的に変化することが空力音の発生につながることから、円柱を回転させて渦構造を変化させた場合は、空力音が抑制されると考えられる。また、回転によって大規模渦構造は円柱表面から遠ざかる傾向にある。低マッハ数流れの場合、渦度の非定常運動が物体表面でスキャタリングすることにより音が発生することから音源項である大規模な渦度変動が物体から遠ざかることが騒音抑制に寄与しているものと考えられる。

4. 結言

回転円柱周りの流れを数値解析によって可視化し、円柱後流の渦構造の変化と発生する空力騒音の関係について検討した。回転速度比が 2 以上になると非対称渦構造が崩壊し、空力騒音が小さくなることがわかった。その際、円柱周囲の剥離せん断層の強度はあまり小さくならないが、大規模渦が roll-up しないため、時間的な変動が抑制されることが音の発生を抑える一因となっていると考えられる。

数値解析に関して、東京大学生産技術研究所 加藤千幸教授からご教授いただいた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) M. Cheng, Y. T. Chew and S.C. Luo: *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.18 (1994) pp.225-236