

I - B 10

加振円柱の空力特性に及ぼす周期的攪乱の周波数の影響

岡山大学環境理工学部 正会員 比江島慎二^{*1}

日本大学理工学部 正会員 野村 卓史^{*2}

1. はじめに

物体まわりの剥離流れは流体力学的に不安定であり、音響などの外的な刺激により容易に物体近傍の流れ特性が変化する。著者は、円柱表面上に設けた周期的湧き出し・吸い込み（周期的攪乱）により円柱の剥離せん断層を刺激する数値流体解析を行い、剥離せん断層の不安定性に関する周波数の攪乱により円柱周辺流れの特性や円柱に作用する空力特性が顕著に変化することなどを明らかにしている[1][2][3]。本研究ではさらに、剥離せん断層の不安定性に関する周波数以外の周波数の攪乱についても同様な数値解析を行い、強制加振円柱の空力特性に及ぼす周期的攪乱の周波数の影響について検討する。

2. 解析方法

振動円柱周辺流れの解析方法は、以前の解析[1][2][3]と同じ手法を用いた。すなわち物体変位とともに解析メッシュを变形する ALE 法を適用し、2次元の Navier-Stokes 方程式に基づいて有限要素解析を行った。Navier-Stokes 方程式は SUPG 法により離散化し、得られた有限要素方程式を予測子・修正子法により時間積分した[4]。境界条件及び解析メッシュも以前の解析と同様とする。流入流速 U は一様とし、円柱直径 D を代表長とするレイノルズ数 $Re = 2000$ で一定とした。時間積分における無次元時間刻みは $\Delta t^* = U\Delta t/D = 0.01$ とした。

周期的湧き出し・吸い込み（周期的攪乱）も以前の解析と同様に円柱表面上の 2 点に配置し（図-1）、周期的攪乱による変動流速 $v_{ex} = U_{ex} \sin(2\pi f_{ex}t + \theta_{ex})$ (U_{ex} , f_{ex} , θ_{ex} はそれぞれ変動流速の振幅、周波数および位相) を与え境界条件として扱った。

ただし円柱上 2 点の攪乱において、 U_{ex} , f_{ex} はそれぞれ等しい。また、2 点における攪乱の θ_{ex} を同じにすることで対称攪乱、 180° ずらすことで逆対称攪乱とした。上流側よどみ点と各周期的攪乱の付加位置とのなす角度 ϕ_{ex} は、剥離点近傍と思われる $\phi_{ex} = 80^\circ$ とした。周期的攪乱の強さは、円柱の投影面内に流入する流量 ($U \times D$) に対する片側の攪乱の変動流量の r.m.s 値 $q_{r.m.s}$ の比 $C_q = q_{r.m.s}/(UD) \times 100 = U_{ex}\Delta x/(\sqrt{2}UD) \times 100$ (%) (Δx は攪乱付加位置に対応する円柱表面上の解析メッシュの節点とそれに隣り合う節点との距離) とするとき、 $C_q = 0.6$ (%) とした。

円柱は片振幅 $z_0 = 0.2D$ で流れ直角方向に強制振動させた。円柱に作用する非定常揚力 $L(t)$ において、円柱速度比例成分を $C_{Li} = (2/T) \int_0^T (L(t)/(0.5\rho U^2 D)) (\dot{z}_c(t)/(2\pi f_c z_0)) dt$ により求めた。ただし、 f_c は円柱加振振動数、 $\dot{z}_c(t)$ は時刻 t における円柱の流れ直角方向速度、 ρ は流体密度である。

3. 解析結果および考察

以前の解析[2][3]によれば、周期的攪乱を付加しない場合、円柱の無次元加振振動数 $f_c D/U = 0.23$ 付近において C_{Li} が最大、すなわち非定常空気力による励振力が最大となることが分かっている。よって、この加振振動数で円柱を振動させ、付加する周期的攪乱の無次元周波数を $f_{ex}/f_s = 1.0 \sim 5.0$ (f_s は $Re = 2000$ における円柱静止時のカルマン渦放出周波数) の範囲で 0.5 きざみで変化させて解析した。なお $Re = 2000$ において、円柱静止時のカルマン渦放出周波数 $f_s = 0.55$ Hz、剥離せん断層の不安定性に関する周波数 $f_{ex}/f_s = 4.45$ 付近であることが分かっている。

無次元時間 100 の円柱速度と非定常揚力の時系列から求めた C_{Li} を図-2 に示す。なお、図中 $f_{ex}/f_s = 0.0$ の点は周期的攪乱を付加しない場合の値である。以前の解析[2][3]においてすでに示したように、剥離せん断層の不安定性に関する周波数付近 ($f_{ex}/f_s = 4.45$ 付近) の対称攪乱を付加した場合、円柱後流速度分布の変化に伴う円柱後流域の

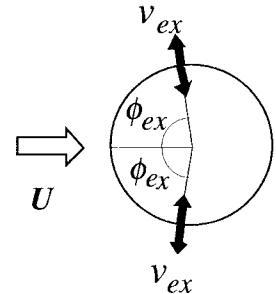


図-1 周期的攪乱

キーワード：円柱，周期的攪乱，剥離せん断層，非定常空気力，有限要素法

*1 〒700-0082 岡山県岡山市津島中 2-1-1 TEL 086-251-8168 FAX 086-251-8257

*2 〒101-0062 東京都千代田区神田駿河台 1-8 TEL 03-3259-0411 FAX 03-3259-0411

不安定性の変化のため、空力特性があまり改善されず、 C_{LI} は攪乱なしの場合に比べほとんど低減されない。一方、同じ周波数付近の逆対称攪乱の場合は、攪乱付加の効果により C_{LI} が低下し空力的に安定化する。それ以外の周波数の攪乱については、対称攪乱の $f_{ex}/f_s = 1.0, 2.0, 3.0$ 、逆対称攪乱の $f_{ex}/f_s = 1.0, 3.0$ 、すなわち円柱静止時のカルマン渦放出周波数 f_s の整数倍の周波数の攪乱により C_{LI} が大きく低下しているのが分かる。

C_{LI} の低下の要因について検討するため、揚力の絶対値 $|C_L|$ ($=\sqrt{C_{LR}^2 + C_{LI}^2}$) 及び円柱変位に対する揚力の位相遅れ β_L ($=\tan^{-1}(C_{LI}/C_{LR})$) について調べた結果を図-3及び図-4に示す。なお、これらのパラメータと C_{LI} の間には $C_{LI}=|C_L|\sin\beta_L$ の関係がある。

以前の解析[2][3]でも示したように、剥離せん断層の不安定性に関する周波数付近 ($f_{ex}/f_s = 4.45$ 付近) の逆対称攪乱の付加による C_{LI} の低下は、 $|C_L|$ の低下よりもむしろ β_L が 90° から遠ざかる効果に起因していることが見て取れる。それ以外に C_{LI} の大きな低減が見られた f_s の整数倍の周波数の攪乱のうち、対称攪乱の $f_{ex}/f_s = 2.0$ および逆対称攪乱の $f_{ex}/f_s = 1.0, 3.0$ の場合は、 $|C_L|$ の低下と β_L の 0° への降下が C_{LI} を低減させ励振力を弱める原因となっている。揚力のパワースペクトルによれば、これらの攪乱を付加した場合、加振振動数 $f_c D/U = 0.23$ の成分のピーク以外に、円柱静止時のカルマン渦放出周波数 $f_s D/U = 0.21$ の成分にもピークが現れることを確認しており、このカルマン渦放出周波数成分の励起が加振振動数成分を弱め、 $|C_L|$ を低下させる原因となっていると考えられる。一方、対称攪乱の $f_{ex}/f_s = 1.0, 3.0$ の場合は、揚力のパワースペクトルに加振振動数成分以外の成分が励起されないため、 $|C_L|$ はあまり低下せず、剥離せん断層の不安定性に関する周波数の逆対称攪乱を付加した場合と同様に、 β_L の変化の寄与が $|C_L|$ の変化の寄与に比べて大きい。カルマン渦放出周波数の整数倍周波数の攪乱付加におけるこのような特性の違いは、対称攪乱における $f_{ex}/f_s = 2.0$ および逆対称攪乱における $f_{ex}/f_s = 1.0, 3.0$ の場合、それらの攪乱により円柱両側の剥離せん断層に生じると考えられる渦の配置が、渦の合体などにより本来のカルマン渦放出周波数である $f_s D/U = 0.21$ の交番渦を励起するような位置関係にあるのに対し、対称攪乱における $f_{ex}/f_s = 1.0, 3.0$ の場合は、2つの剥離せん断層上の渦の配置がそのような位置関係にならないことが原因と考えられる。

f_s の整数倍の周波数の攪乱により励起される揚力成分と円柱加振振動数の揚力成分とが共振すると考えられる $f_c D/U = 0.21$ の強制加振の場合、今回の解析結果とはかなり異なる空力特性を生じる可能性があり、今後さらに解析を行う予定である。

<参考文献> [1] 比江島他：第14回風工学シンポジウム論文集，pp.187-192, 1996. [2] 比江島他：日本風工学会誌，No.71, 1997. [3] 比江島他：土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，第1部(B)，pp.4-5, 1997. [4] 野村：土木学会論文集，No.455/I-21, pp.55-63, 1992.

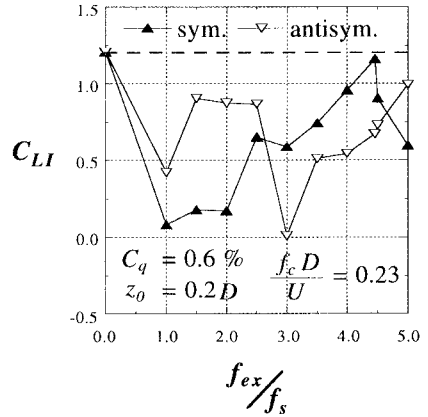


図-2 非定常揚力の円柱速度比例成分 C_{LI}

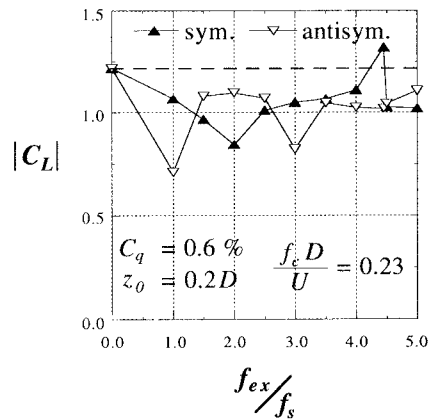


図-3 揚力の絶対値 $|C_L|$

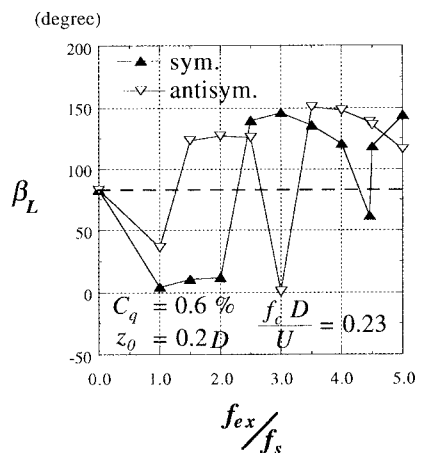


図-4 円柱変位に対する揚力の位相遅れ β_L