

第 I 部門

円形断面における空気力の励振力に着目した渦励振の応答振幅評価手法の検討

京都大学 学生員 ○山口 宗一郎  
 京都大学 正会員 松宮 央登

京都大学 非会員 Marouane Fakhry  
 京都大学 正会員 野口 恭平  
 京都大学 フェロー会員 八木 知己

1. 背景

構造物やその部材等に風が作用すると、断面背後に渦が形成され、その渦の放出周波数と構造物の固有振動数が一致すると渦励振という空力振動が発生する。構造物の部材等では、渦励振が繰り返し発生することで、定着部の疲労や接続部のボルト脱落などにつながる場合がある。様々な風速域における円形断面をもつ部材の渦励振に対して、いくつか簡易評価式が提案されている<sup>1)2)</sup>が、ヘリカル突起付きなど断面形状が変わった場合の応答振幅を評価する方法は確立されていない。本研究では、照明柱や橋のケーブルで用いられる円形断面およびその制振対策として用いられるヘリカル突起付円形断面を対象に、2次元剛体模型を用いた風洞実験を実施して、空気力による励振力を評価することで様々な条件下における渦励振の応答振幅の評価方法を検討した。

2. 静的空気力特性

本研究では、京都大学桂キャンパスの風洞設備を用い、静的空気力測定実験と鉛直 1 自由度ばね支持振動実験を実施した。対象は直径 $D=90\text{mm}$ 、スパン長さ $L=900\text{mm}$ の円柱模型であり、丸断面を有するヘリカル突起を接着した(図 1)。ヘリカル突起の巻き付け角は $\gamma=45^\circ$ とし、直径 $d$ を 1.2mm, 4mm, 6mm の 3 種類に設定した。また、比較のためにヘリカル突起を設置しない円柱模型 (Normal cylinder) での計測も行った。

静的空気力測定実験は、風速 $U=1.5\sim 5\text{m/s}$  (0.5m/s 刻み) で実施し、レイノルズ数 $Re = 8.4 \times 10^3 \sim 2.8 \times 10^4$ に相当する。模型に作用する抗力 $F_D[\text{N/m}]$ と揚力 $F_L[\text{N/m}]$ を各風速で 5 分間測定し、以下の式から抗力係数 $C_D$ 、変動揚力係数 $C'_L$ 、ストローハル数 $S_t$ を求めた。

$$C_D = \frac{\overline{F_D}}{1/2\rho U^2 D}, C'_L = \frac{\sigma_L}{1/2\rho U^2 D}, S_t = \frac{f_K D}{U} \quad (1)$$

$\overline{F_D}$ は平均抗力[N/m]、 $\sigma_L$ は揚力の標準偏差[N/m]、 $f_K$ はカルマン渦の放出周波数[Hz]、 $\rho$ は空気密度[kg/m<sup>3</sup>]である。カルマン渦の放出周波数は、揚力波形のパワースペクトルのピーク周波数として、その周波数の $\pm 3\text{Hz}$ のバンドパスフィルタを適用した揚力波形から標準偏

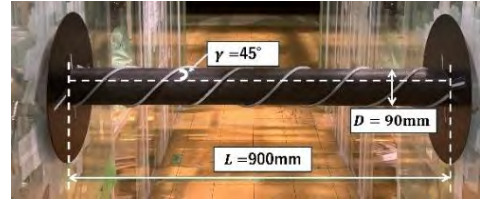


図 1 使用した模型の例 ( $d=6\text{mm}$ )

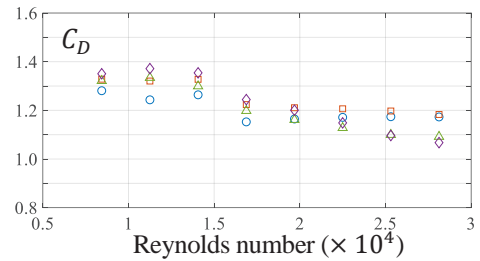


図 2 抗力係数 $C_D$

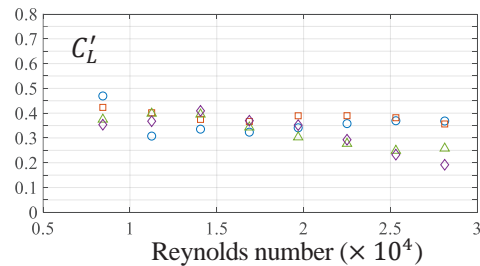


図 3 変動揚力係数 $C'_L$

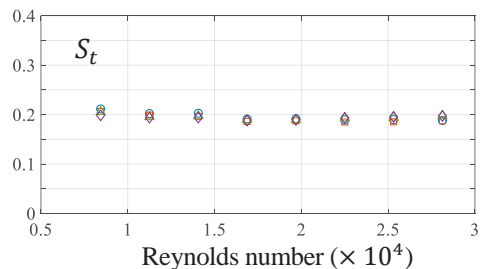


図 4 ストローハル数 $S_t$

差 $\sigma_L$ を算定した。測定結果を図 2~4 に示す。

$Re \leq 2.0 \times 10^4$ では断面によらず概ね一致しており、この範囲では概ね同じ空気力特性を示している。一方、 $d=4, 6\text{mm}$  のケースでは、 $Re > 2.0 \times 10^4$ の範囲において、レイノルズ数の増加に伴い、 $C_D, C'_L$ が小さくなった。これらの断面では臨界レイノルズ数に達して、断面近傍におけるはく離流れが乱流遷移したと考えられる。ただし、十分に高いレイノルズ数に達していないため、スト

ローハル数 $S_t$ は 0.20 付近の一定値を示し、本実験での風速および $d$ に対して大きな変化が見られなかった。

### 3. 渦励振の振動特性およびその励振力評価

鉛直 1 自由度ばね支持振動実験は、風洞内に模型をばね支持し、各風速における定常振幅の計測に加えて、静止状態からの発散過程 (図 5)、初期振幅を与えたときの減衰過程を測定し、各振幅における空気力による励振力・減衰力を算出した。得られた定常応答振幅を図 6 に示す。横軸は無次元風速 $U/f_0D$  ( $f_0$ は固有振動数[Hz])、縦軸は無次元倍振幅 $2A/D$ である。図には各ケースの固有振動数 $f_0$ 、対数構造減衰 $\delta_{y0}$ 、スクルートン数 $S_c$ を併記した。 $d$ が大きくなるほど、渦励振の応答振幅は小さくなる傾向が確認されたが、その効果は限定的であった。図 3 の変動揚力係数は本実験で対象としたレイノルズ数 ( $U/f_0D=5\sim7$  で $Re=1.7\sim 2.3\times 10^4$ 程度) の範囲では、いずれの断面でも概ね同じ値をとり、静止時の渦の放出強度はほぼ同等であることを示している。空気力の励振力を評価するために、以下の式を用いて非定常空気力係数 $H_1^*$ を無次元振幅 $2A/D$ ごとに算出した。

$$H_1^* = \frac{m}{\pi\rho(D/2)^2}(\delta_{y0} - \delta_y) \quad (2)$$

$\delta_y$ は有風時の対数減衰率、 $H_1^*$ は振動中に作用する空気力の仕事を振幅ごとに捉える指標であり、振幅ごとの空気力による励振力・減衰力を評価することができる。構造減衰と空気力の仕事の釣り合いを考慮することで定常応答振幅を評価することができ、様々な構造条件に対して汎用的な応答振幅評価が可能になると考えられる。

図 7 に、Normal cylinder と $d=4\text{mm}$  のケース ( $U/f_0D=6$ ) で得られた $H_1^*$ を比較する。空気力の励振力は、定常応答振幅に至るまでに一定ではなく、つまり、空気力の非線形性があることがわかる。また、断面形状の違いによってもその値が変化することが確認できた。今後、より広い風速範囲などで分析を進める。

### 4. まとめ

空気力の非線形性を考慮した渦励振の応答振幅評価に向けた手法の検討を行った。定常的な空力特性のみならず、振動中の動的な空気力特性を分析する重要性が示された。また、振動中の振幅ごとの空気力による励振力が断面形状に応じて変化することが確認され、断面毎の

空気力の励振力を評価することで、様々な構造条件での渦励振の応答振幅評価が可能だと考えられる。

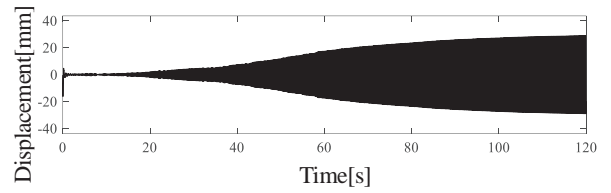
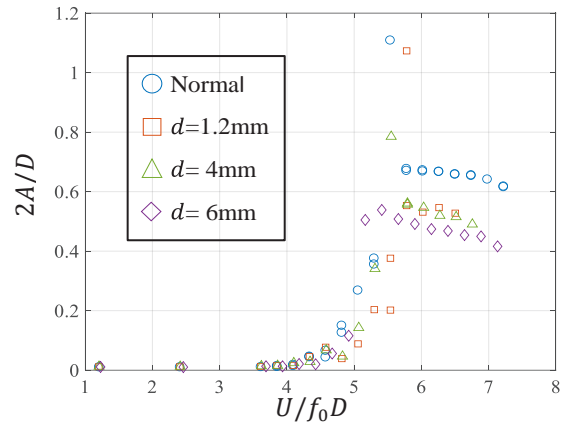


図 5 鉛直変位の時系列波形 (Normal cylinder,  $U/fD=6.0$ )



	$f_0$ (Hz)	$\delta_{y0}$	$S_c$
Normal	4.6199	0.0042	1.8415
$d=1.2\text{mm}$	4.6138	0.0044	1.927
$d=4\text{mm}$	4.6043	0.0044	1.8561
$d=6\text{mm}$	4.5179	0.0046	2.1309

図 6 自由振動実験結果

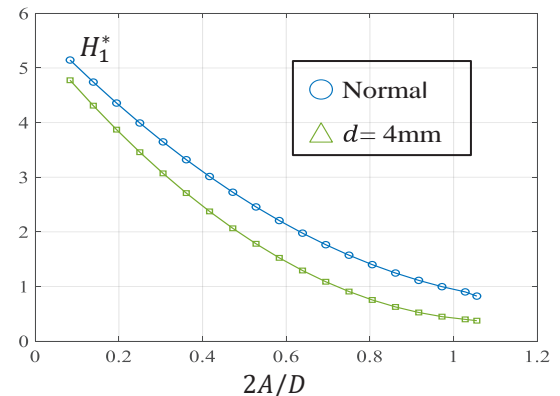


図 7 振幅ごとの $H_1^*$ の比較,  $U/fD=6$

### 参考文献

- 1) 田村幸雄, 天野晶彦: 円筒の渦励振に関する研究 その 3, 日本建築学会論文報告集, 337 号, pp.65-72, 1984
- 2) 大熊武司: 自然風中における円柱構造物の渦励振に関する理論的研究[III]: 二三の実験現象の解析, 日本建築学会論文報告集, No. 188, pp.59-67, 1971