

乱流中の円柱模型に作用する変動圧力の POD 解析

横浜国立大学大学院 学生会員 ○佐野友紀

徳島大学 正会員 野田 稔

1. はじめに

自然風の乱れによって生じるバフエッティングの応答解析において、一般に、計測が困難な変動空気力の空間相関の代わりに変動気流の空間相関が用いられる¹⁾が、既往の研究²⁾より変動空気力の空間相関の方が変動気流の空間相関よりも高いことが示されており、そのメカニズムは未解明である。白土らはこれを解明する足掛かりとして、変動気流中の矩形断面に作用する変動圧力に対して試験的に固有直交分解 (Proper Orthogonal Decomposition; POD)を行った³⁾。その結果、固有モード形の非対称性と変動圧力の空間相関の間に対応関係があることが示唆された。本研究では、変動圧力の特性把握におけるPOD解析の有効性を検証するため、一様流および乱流中の円柱模型に作用する変動圧力に対してPOD解析を行った。気流特性や模型周りのレイノルズ数が、円柱模型表面に作用する変動圧力の固有モードや基準座標のパワースペクトル密度分布にどのように影響するのかについて考察した。

2. 実験概要

風洞実験は、押し込み式室内還流型風洞（測定胴寸法:幅500×高さ1000×長さ1800 [mm]）を用いて行った。実験に用いた円柱模型は、直径 $D = 50$ mm、長さ $L = 900$ mm であり、模型中央の円周部に 11.25°間隔に計 32 点配置された圧力孔における変動圧力を全点同時に計測した。実験風速は、5.5～12.8m/s の範囲で設定し、圧力計測のサンプリング周波数は 500Hz、評価時間は 60 秒とした。

また、風洞測定胴の上流端に 2 種類の乱流格子を設置することで、気流特性の異なる格子乱流をそれぞれ生成した。乱流格子を測定胴の最上流部に設置しない場合を一様流とする。ここで、格子幅および格子間隔が 10mm、50mm の乱流格子 A、20mm、100mm の乱流格子 B によって生成された格子乱流 A および B の模型設置位置における鉛直成分の乱れ強さと乱れスケールは、それぞれ(2.5%, 12.7mm), (8.0%, 15.7mm)となった。

3. POD 解析の概要

変動圧力の空間相関マトリクスを求め、その固有値問題を解くことで、変動圧力を複数の固有モード（固有ベクトル）に分解することができる。固有モードは、圧力変動を新たな座標（基準座標）で記述するための座標変換係数でもあるため、求めた固有モードから基準座標を導出できる。また、全モードの固有値の総和に対する各固有ベクトルに対応する固有値の比を寄与率と呼び、その固有モードおよび基準座標が示す圧力変動が全体の圧力変動に対してどれだけの重みを持つかを表す。さらに、寄与率の大きい順に各モードを並べたとき、任意の次数までの寄与率の和を累積寄与率と呼ぶ。一方、固有モードと基準座標の積から元の変動圧力を再合成でき、各モード次数において固有モードが空間的な変動を、基準座標が時間的な変動を表している。従って、基準座標のパワースペクトル密度分布より、そのモードが示す圧力変動の周波数特性を調べることができる。

4. 円柱模型に作用する変動圧力の固有モード

円柱模型に作用する変動圧力の時刻歴データに対して POD 解析を行い、固有モードおよび基準座標のパワースペクトル密度を求めた。各気流における累積寄与率を図 1 に示す。いずれの気流も第 3 次モードまでに累積寄与率が 70%を超えており、これらのモードが示す圧力変動が、円柱模型に作用する圧力変動の大半を占めるといえる。実験風速 9.3m/s の格子乱流 B における第 1 次から第 3 次までの固有モードを図 2 に示す。凡例に示された百分率はそのモードの寄与率である。よどみ点に対して対称な固有モード形が 2 つ、非対称なモード形が 1 つ確認された。一様流および格子乱流 A においても同様の固有モードが確認されたが、各モードの寄与率の大小関係は気流特性によって異なる結果を示した。ここで、非対称なモードを A、寄与率の高い対称なモ

キーワード 空間相関, 固有直交分解, 変動圧力, 円柱模型, 乱流

連絡先 〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

横浜国立大学都市イノベーション学府構造研究室

ードを B, 寄与率の低い対称なモードを C とし, 特にモード A に着目する. 各気流におけるモード A に対応する基準座標のパワースペクトル密度分布を図 3 に示す. いずれの気流においても無次元周波数 0.2 付近での変動が卓越しており, この値は円柱のストローハル数に等しい. したがって, モード A はカルマン渦放出による圧力変動を示している. また, パワースペクトル密度分布の裾野の広がり, 乱れ強さおよび乱れスケールが大きい気流ほど広く, 気流の持つ乱れ成分がカルマン渦放出による圧力変動の定常性を弱めていると推察される. さらに, 図 4 に示す各気流におけるモード A の固有モードは, 乱れ強さおよび乱れスケールの大きい気流ほどモード形状が崩れる傾向があることから, 気流の乱れによるカルマン渦放出に関連する圧力変動への影響は, 固有モードの形状にも反映されることが考えられる.

次に, レイノルズ数が圧力変動の POD 解析結果に与える影響を検討した. 格子乱流 B におけるレイノルズ数を変化させた際の各モードの寄与率を図 5 に, 固有モードを図 6 に示す. レイノルズ数の増加に伴い, モード A の寄与率は減少し, モード B の寄与率は増加する傾向が確認された. また, 図 6 より, 両者の寄与率が同程度となり, モード A およびモード B の寄与率の大小関係が入れ替わる境界である $Re = 30,000$ における固有モードの形状は, 他ケースと比較して崩れており, 両モードの寄与率の大小関係が変わる前後で固有モード形状にやや違いがあることから, 各モードの寄与率と固有モードの形状には対応関係があることが示唆された.

5. まとめ

本研究では, 一様流および 2 種類の乱流格子中の円柱模型に作用する変動圧力の時刻歴データに対して POD 解析を行った. その結果, よどみ点に対して非対称なモードはカルマン渦放出による圧力変動を示し, この圧力変動は気流の乱れ成分の影響を受けることが分かった. さらに, 各モードにおける固有モードの形状は, 気流の乱れ特性や各モードの寄与率の高さの影響を受けることが示された.

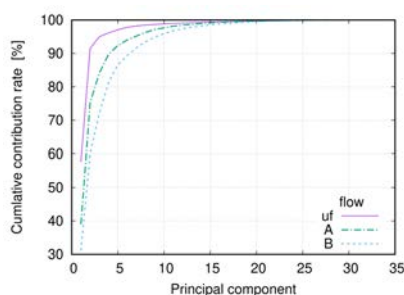


図 1 各気流における主成分の累積寄与率

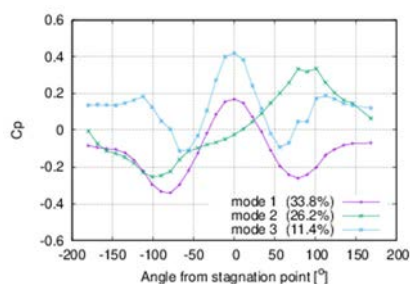


図 2 格子乱流 B における第 3 次までの固有モード

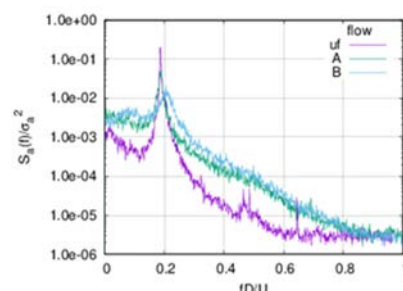


図 3 非対称モード形に対応する基準座標のパワースペクトル密度分布

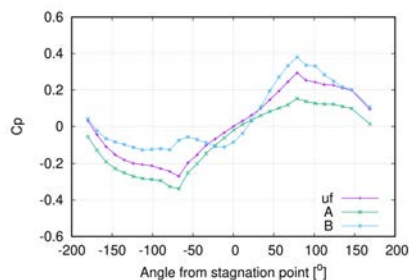


図 4 各気流におけるモード A の固有モード

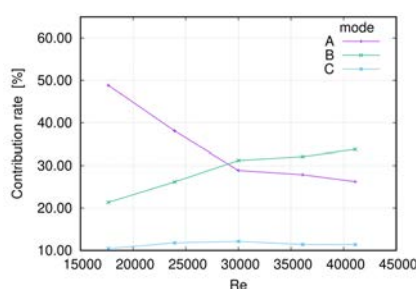


図 5 レイノルズ数と各モードの寄与率 (格子乱流 B)

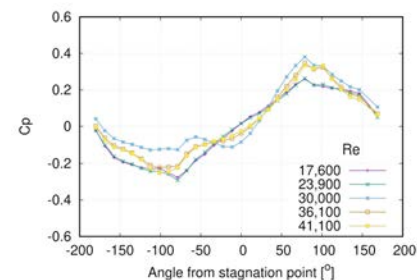


図 6 各レイノルズ数におけるモード A の固有モード (格子乱流 B)

参考文献

- 1) A.G.Davenport, "A Statistical Approach to the Treatment of Wind Loading of Tall Masts and Suspension Bridges" PhD Dissertation, University of Bristol (1961).
- 2) 木村 吉郎, 藤野 陽三, "バフエッティング応答解析におけるストリップ理論の仮定について," 構造工学論文集 40 (1994), pp.1049-1058.
- 3) 白土 博通, 松本 勝, 古川 拓郎, 山根 建治, Le Thai Hoa, 角倉 佑哉, "変動気流中における矩形断面のガスト空気力の空間構造に関する研究," 第19回 風工学シンポジウム論文集(2006), pp.501-506.
- 4) 田村幸雄, "固有値直交関数展開のランダム変動場への応用のすすめ," 日本風工学会誌 第65号 (1995) pp.33-41.