

## 乱流中の基本断面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 高知大学 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<sup>1)</sup>。しかし、既往の研究<sup>2)</sup>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<sup>3)</sup>。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、 $B/D = 12.5$ の扁平矩形断面模型に作用する変動圧力に対してPOD解析を行い、変動圧力の固有モードおよび基準座標のパワースペクトル密度分布について考察した。

### 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計測した。扁平矩形断面模型は断面幅  $B=350$ mm, 高さ  $D=28$ mm 長さ 900mm であり、圧力孔は模型両面の流れ方向( $x$  方向)に 25 列, スパン方向( $y$  方向)に 10 列配置された 212 点の圧力孔における変動圧力を全点同時計測した。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 10mm, 格子間隔 50mm の乱流格子 A, 格子幅 20mm, 格子間隔 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、各固有ベクトルに対応する固有値に対する、全モードの固有値の総和の比を寄与率と呼ぶ。これは、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。本研究では、分解した圧力変動を固有値が大きい順に 1 次, 2 次モードと呼ぶこととする。また、固有モードと基準座標の積から元の変動圧力を再合成することができる。これは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すことを意味する。すなわち、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

実験風速 9.3m/s における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 主成分までに累積寄与率が 70%を超えていることから、これらの主成分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。また、乱れ強さおよび乱れスケールが大きい気流ほど、累積寄与率が収束するモード次数が高くなっており、気流が持つ乱れ成分によって各モードの寄与率が低下することが示された。図 2 に、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 においても同様に、よどみ点に対して対称な固有モード形 2 つと非対称なモード形 1 つが確認されたが、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。

固有モードの特徴を考察するにあたり、各気流におけるよどみ点に対して非対称なモードに着目した。このモード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付近で分布が卓越しており、この値は円柱のストローハル数に等しい。すなわち、よどみ点に対して非対称な固有モードは、カルマン渦放出に関する圧力変動を表している。これより、カルマン渦に起因する圧力変動の特性は固有モード形の非対称性に反映されることが明らかになった。

## 5. 扁平矩形断面模型に作用する変動圧力の固有モード

扁平矩形断面模型の各点に作用する変動圧力について上下面の差圧を求め、その時刻歴データに対してPOD解析を行った。図4より、いずれの気流においても累積寄与率が70%を超えるまでに要するモード数の割合は円柱模型よりも高い。これは、円柱模型の場合と比べて各モードの寄与率が低いことを示している。扁平矩形断面模型周りの圧力変動は、前縁での流れの剥離や後縁での剥離流れの再付着により円柱模型よりも複雑であることが各モードの寄与率の低下に反映されたと考えられる。また、POD解析により得られた固有モードおよび平滑化した基準座標のパワースペクトル密度分布の一例を図5および図6に示す。

## 6. まとめ

本研究では、一様流および格子乱流中において円柱模型および扁平矩形断面模型に作用する変動圧力の固有モードについてPOD解析による検討を行った。その結果、円柱断面においては、概ね3つの固有モードで変動圧力が表現され、気流の乱れにより各固有モードの寄与率が低下する傾向を確認された。また、扁平矩形断面については、円柱模型より複雑な固有モードによって変動圧力が構成されていることが分かった。今後は、乱流特性の種類を増やし、さらによりスケールの大きな変動気流を用いて変動圧力の固有モード特性について検討を進める予定である。

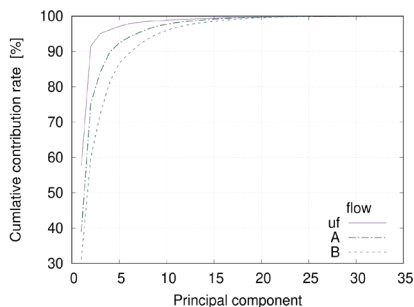


図1 各気流における主成分の累積寄与率 (円柱模型)

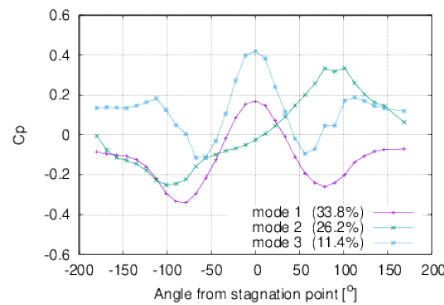


図2 格子乱流 B における第3次までの固有モード

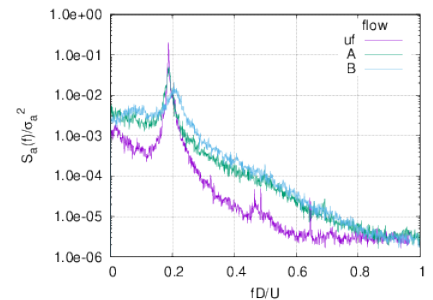


図3 非対称モード形に対応する基準座標のパワースペクトル密度分布

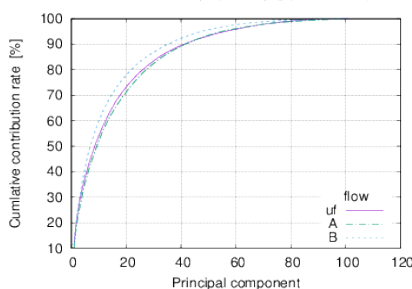


図4 各気流における主成分の累積寄与率 (扁平矩形断面模型)

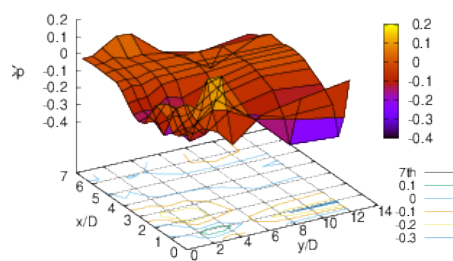


図5 格子乱流 B における第7次固有モード

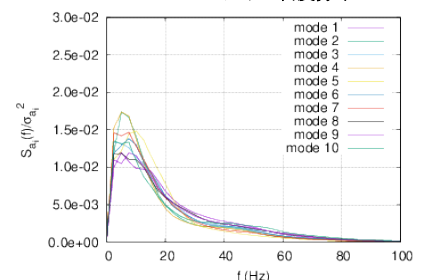


図6 格子乱流 B における第10次までの基準座標のパワースペクトル密度分布

## 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, pp.1049-1058, 1994.
- 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, pp.501-506, 2006.
- 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, pp.33-41, 1995.