

矩形断面周りの流れ場に関する DMD 解析を用いた研究

京都大学大学院工学研究科 学生会員 ○下西 舞
京都大学大学院工学研究科 正会員 白土博通

中部電力株式会社 塚前伊久磨
(研究当時 京都大学大学院生)

1. 序論

乱流中の矩形断面周りの流れ場において、スパン方向の空気力の空間相関は、接近流のスパン方向の相関より上昇することが知られている。要因としては接近流が剥離せん断層に移る過程で流れの二次元化が促進されることや、剥離バブルが相関上昇に寄与すると考えられている。

本研究では、スパン方向の空間相関上昇のメカニズムを検討するため、以下の流れで実験・解析を行った。まず、可視化実験により、 $B/D=8.0$ の矩形断面周りの流れ場を撮影し、得られた画像から PIV 解析により流れ場の流速ベクトルを求めた。その流れ場の時系列データに対して DMD (Dynamic Mode Decomposition) を適用し、剥離を含む流れ場の空間特性について考察した。

2. 流れの可視化実験及び PIV 解析

室内回流式エッフェル型風洞 (測定部高さ 1,800 mm, 幅員 1,000 mm, 測定部全長 6,550 mm) を用いて、 $B/D=8.0$ の矩形断面模型 (断面幅員 $B=300$ mm, スパン長 $L=890$ mm, 桁高 $D=37.5$ mm) を対象に流れの可視化実験を行った。スパン中央断面周り (以下 XZ 平面)、模型上面水平面 (以下 XY 平面) の 2 種類の平面に対し流れの可視化実験及び PIV 解析を行った。気流は一樣中及び格子乱流中とし、風速は主流方向平均風速 $U=1.0$ m/s を設定した。格子乱流の接近流変動鉛直 w 成分の乱れ強度は約 8.5%, 乱れスケールは約 41 mm であり、接近流変動風速主流 u 成分の乱れ強度は約 9.5%, 乱れスケールは約 102 mm である。なお、以下では主流方向を x , スパン方向を y , 鉛直上向きを z とし、それぞれの風速を u, v, w とする。

3. DMD 解析

PIV 解析で得られた膨大な時系列データから流れ場の特性を捉えるために DMD 解析を用いて流れ場のモード分解を行った。モード分解としてよく用いられる POD は共分散行列の固有値問題であり、定常的な流れの特徴を捉えるのには優れているが、増幅減衰を伴う複雑かつ非定常な流れ場の把握には適していない。

これに対し、瞬間場の前後関係を扱うことで、動的な情報とそれに対応するモードの抽出を行う手法が DMD である。DMD は連続する時系列データの関係性から、特定の周波数を持つモードの時間的増幅減衰等の情報を得ることができる。

(1) 数理¹⁾²⁾

速度の時系列データ x_t から時間平均された速度を引き変動風速 x'_t を求める。ここで求めたある瞬間 t の流れ場 x'_t に対して線形写像 A を作用させることで次の瞬間 $t+1$ の流れ場が得られると仮定する。行列 A の固有ベクトルが求めたい動的モードであるが、行列 A はかなり大きな行列であるため固有値計算の精度が低く、特異値分解を用いて近似的に固有値及び固有ベクトルを得た。これらから流れ場は以下のように表される。

$$x'_t = A^{t-1} x'_1 = \sum_{i=1}^r c_i \kappa_i^{t-1} \xi_i \quad (3)$$

κ_i は i 次モードの固有値、 ξ_i は i 次モードの固有ベクトルを示す。(3)式のうち時間変化するのは κ_i^{t-1} の項のみであるため、 ξ_i が表す流れは $|\kappa_i| < 1$ で減衰、 $|\kappa_i| > 1$ で増幅し、 $|\kappa_i| \approx 1$ では周期性をもつ。各 DMD モードの次数決定については、(3)式の c_i を用い、

$$c_{\text{mid } i} = c_i |\kappa_i|^{\frac{t}{2}} \quad (4)$$

で表される $c_{\text{mid } i}$ を i 次モードの寄与率とみなし、寄与率の大きい順に 1 次モード、2 次モード、...とした。それぞれのモードが持つ周波数は固有値 κ_i から

$$f_i = |\arg(\kappa_i)| / 2\pi\Delta t \quad (5)$$

で求められる。ただし Δt はデータの時間間隔である。また、複素数である DMD モードについて、

$$\xi'_{ij}(t) = |\xi_i| \cos(\omega_i t + (\varphi_{i0} - \varphi_{ij})) \quad (6)$$

で表すモード形状の時間変化を用い検討を試みた。ここで φ_{ij} は DMD モードの要素 j の偏角、 φ_{i0} は基準点

剥離バブル、流れの二次元化、空間相関、DMD 解析

〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 Tel: 075-383-3170 Fax: 075-383-3168

の偏角であり、基準点を模型前縁のスパン中央の点(x, y) = (0, 0)とした。 ω_i はモードの固有値 κ_i の偏角である。

4. DMD を用いた流れ場解析

XZ・XY 平面それぞれの流れ場に対して DMD 解析により流れ場を検討する。

(1) XZ 平面

流れが模型前縁で剥離し、定常的に模型表面に再付着していく特徴的な流れを捉えることが出来た。Fig.1 に特徴的な流れを示す粒子画像とそれに対応するモード図を示す(乱流)。この図からは、模型前縁で放出された渦が瞬間的には主流方向 50 mm 付近で再付着し、その渦に巻き込まれるようにして、渦の下流側で再付着が生じていることが確認できた。またこの特徴的なモードの周波数は $f=7.43$ Hz である。一樣流でも同様の流れが確認できた($f=7.20$ Hz)ため、XZ 平面での流れは、一樣流と乱流で同様の特徴を有すると言える。

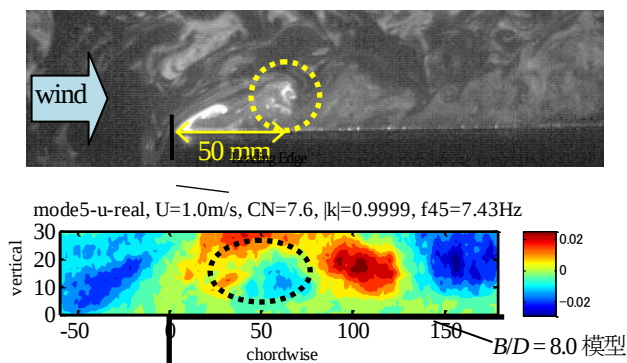


Fig.1 粒子画像と DMD モード図 (XZ 平面, 乱流)

(2) XY 平面

(1)で示した特徴的な流れが表れた周波数域に着目して検討を行った。XY 平面においては一樣流と乱流で大きく異なる流れが確認できたため、Fig. 2, 3, 4 にそれぞれ示す。Fig. 2 のように一樣流ではスパン方向に一樣な剥離を示すモードが確認できた。しかし、乱流では 2 次元な剥離を示すモードが確認できず、これは乱流では剥離がスパン方向に一樣では無いことが原因だと考えられる。Fig. 3 では模型表面近傍の平面において、一樣流・乱流ともに瞬間的な再付着を示すモードが確認できた。また、一樣流ではスパン方向に一樣に再付着し、乱流ではスパン方向に蛇行して再付着をしている様子が確認できた。このような再付着の蛇行モードは一樣流では見られなかった。さらに、Fig. 4 の模型表面近傍の粒子画像において、一樣流では流れはほぼ停滞しゆるやかな逆流が生じているのに対し、乱流では激しく渦巻きながら流下している様子が確認できた。これらの流れの特徴から、乱流条件では表面近傍でスパン方向へと流れが輸送され、スパン方向への相関を上昇させていると考えられる。

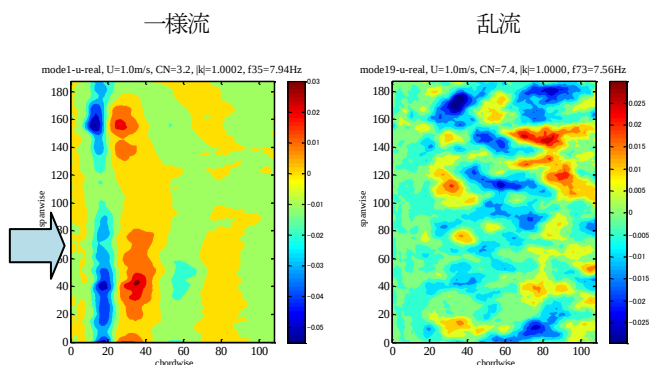


Fig. 2 DMD モード図 (XY 平面, $h = 6.0$ mm)

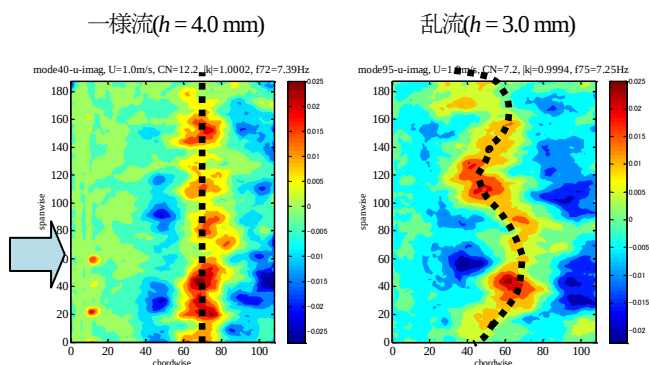


Fig. 3 DMD モード図 (XY 平面)

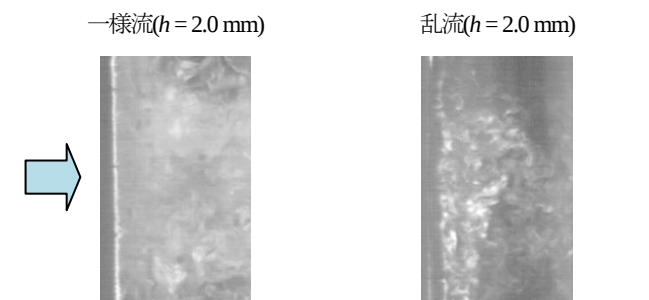


Fig. 4 粒子画像 (XY 平面)

5. まとめ

$B/D=8.0$ の矩形断面における XZ 平面の流れは、一樣流と乱流で同様の特徴を有すると考えられる。XY 平面の一樣流と乱流で大きく異なる特徴が存在し、一つは剥離及び瞬間的な再付着のスパン方向への一樣性、もう一つは、表面近傍の流れの違いである。このような流れにより、乱流では表面近傍で流れがスパン方向に輸送され、相関上昇が起こると考えられる。従って、瞬間的な再付着の位置や周波数を考慮することで、スパン方向の空間相関上昇の検討が可能になると言える。

参考文献

- 1) P. J. Schmid: "Dynamic mode decomposition of numerical and experimental data", J. Fluid Mech., 656 (2010)
- 2) 平邦彦, 「固有直交分解による流体解析: 2. 応用」, 30(2011)