

一様流中におけるブラッフボディの空力振動特性に関する研究

-その2 複素 POD による風圧変動場の分析-

日大生産工(院) ○永塚康宏 日大生産工(院) 名波 航
日大生産工 神田 亮 日大生産工 丸田榮蔵

1. はじめに

その1では、構造物の空力振動現象を調べる手法として、NHAT を紹介し、その手法を用いて得られた三次元角柱の基本特性を示した。NHAT は、構造物が空力不安定時であってもその表面に作用する局所的な風圧力まで測定が可能である。一方近年、構造物の風圧変動場を有効に分析する手法として POD 解析やそれを複素数の領域まで拡張した複素 POD 解析が提案されている。その2では、NHAT で得られた不安定振動時の風圧変動場の分析を複素 POD 解析で行い、不安定振動の発生メカニズムについて調べることを目的とする。また、外力と応答の位相差や迎角と風圧変動場の関連性についても考察する。

2. 位相と迎角の算出

2.1 算出法

位相差を求めるときに対象とする現象は、次のような仮定が成り立つものとする。

1. 現象は、ほぼ定常状態である。
2. 外力及び応答は、ほぼ同じ振動数付近で卓越し、その分布は、極狭い周波数領域のみに存在する。

対象とする現象は、1 自由度の構造物の空力振動であるが、その支配方程式は次式のようにになる。

$$m_s \ddot{x} + c_s \dot{x} + k_s x = f_\omega \quad \dots(1)$$

ここに、 m_s 、 c_s 、 k_s は、構造物そのものの質量、減衰定数、剛性であり NHAT の PC で入力する値に等しい。また f_ω は、風力で N.H.A.T のモデル上で時々刻々得られる風力に等しい。

\ddot{x} 、 \dot{x} 、 x は質点の応答加速度、速度、変位である。定常状態では、次式のように \ddot{x} 、 \dot{x} 、 x f_ω は、仮定できる。

$$x = A e^{i\omega t} \quad \dots(2.a) \quad \dot{x} = iA \omega e^{i\omega t} \quad \dots(2.b)$$

$$\ddot{x} = -A \omega^2 e^{i\omega t} \quad \dots(2.c)$$

また

$$f_\omega = m_s \alpha e^{i(\omega t - \phi)} \quad \dots(3)$$

ここに、 A は応答振幅、 ω は応答の円振動数、

α は外力の加速度レベルに相当する振幅、 ϕ は外力と応答の位相差である。式(2)(3)を式(1)に代入し整理すると

$$-\omega^2 + 2h_s \omega_s \omega i + \omega_s^2 = \frac{\alpha}{A} e^{i\phi} \quad \dots(4)$$

ここに ω_s は構造物の固有円振動数、 h_s は減衰定数であり $\omega_s^2 = k_s / m_s$ 、 $c_s = 2h_s \omega_s m_s$ の関係が成り立つ。式(4)の両辺の実部及び虚部に対し次式が成り立つ。

$$\omega_s^2 - \omega^2 = \frac{A}{\alpha} \text{Cos } \phi \quad \dots(5.a)$$

$$2h_s \omega_s \omega = \frac{A}{\alpha} \text{Sin } \phi \quad \dots(5.b)$$

式(5.a)(5.b)より、位相差は次式のように表される。

$$\phi = \tan^{-1} \frac{2h_s \omega_s \omega}{(\omega_s^2 - \omega^2)} \quad \dots(6)$$

式(6)は、位相差が、構造物の円振動、応答の円振動数、減衰定数のみにより表されており式(6)を用いれば、NHAT の実験結果から、位相差を求める事ができる。

次に迎角の求め方について述べる。図1に示すように風速の流れ方向成分の平均値を \bar{U} 構造物の応答速度を \dot{x} とすると迎角 ϕ は、次式のように定義される

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\dot{x}}{\bar{U}} \right) \cong \frac{\dot{x}}{\bar{U}} \quad \dots(7)$$



図1 迎角の定義

\dot{x} は、 \bar{U} に比べ非常に小さいため上式のような関係が成り立つ。次節では、式(6)(7)を用いてその1で行われた実験に於ける ϕ 、 ϕ を算出する。

2.2 振動数比と位相差、迎角

ここでは、その1で求めた応答の標準偏差、転倒モーメント係数に加え、振動数比、位相差、迎角を求め、その特性について論じる。図2に、 $\delta = 0.2, 0.4, 0.7$ に関する振動数比、

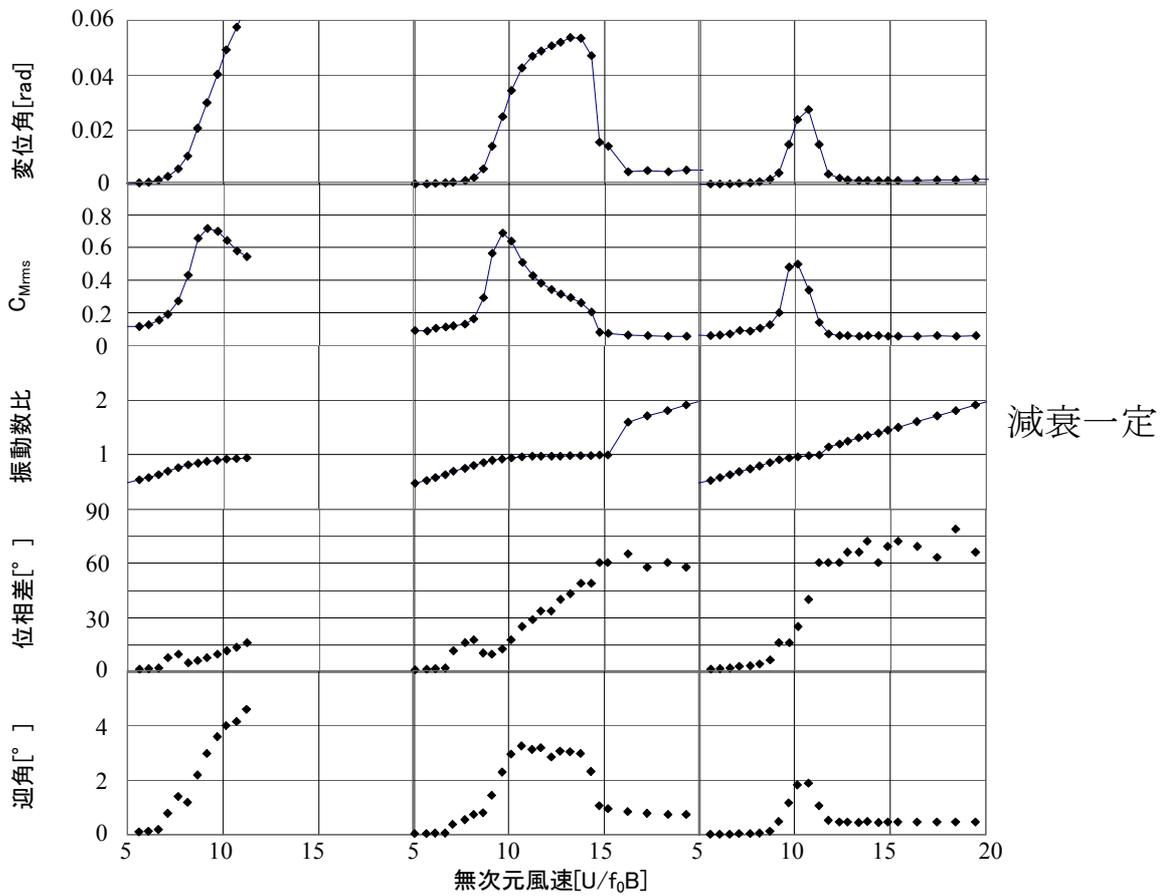
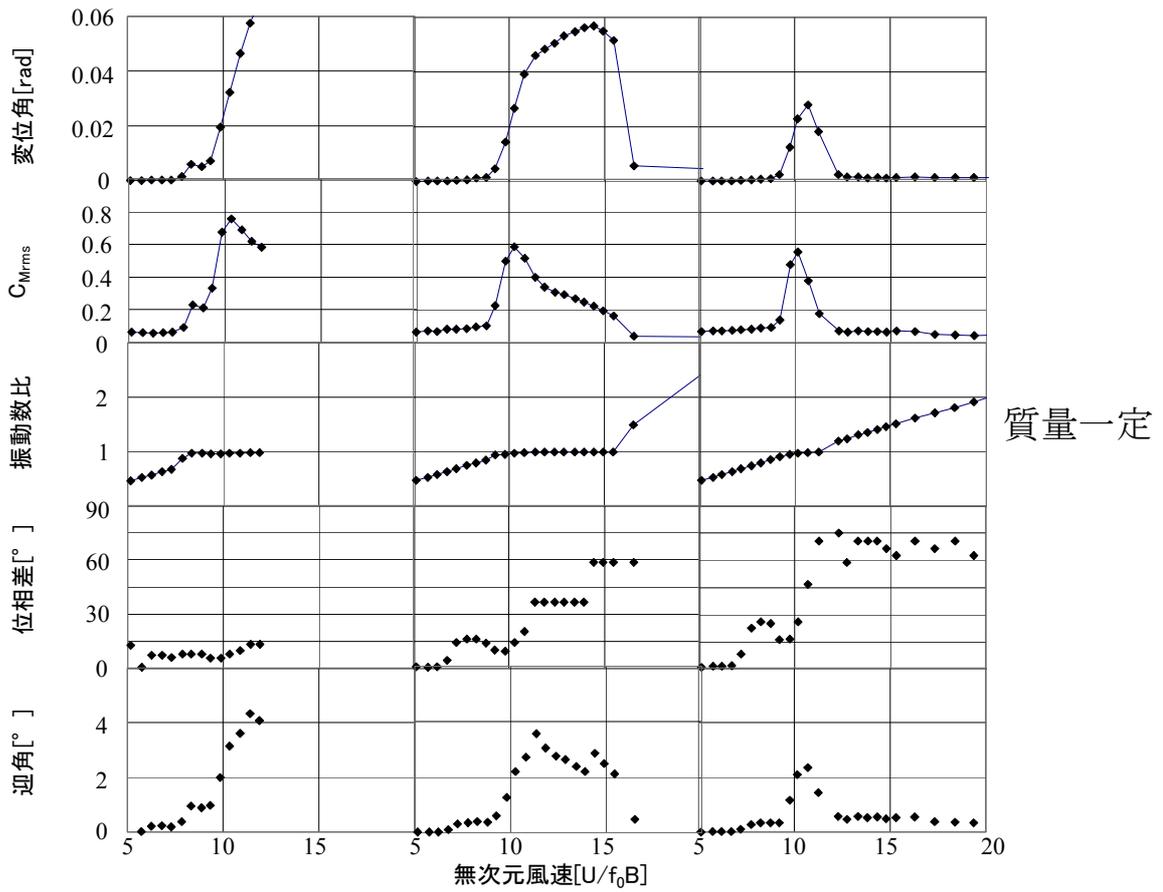


図2 $\delta = 0.2, 0.4, 0.7$ の空力振動特性

位相差, 迎角を応答の標準偏差, 転倒モーメント係数とともに, 無次元風速 V_r について示す。振動数比は, 外力スペクトルがピークを示す振動数とモデルの固有振動数の比として求められる。 $\delta = 0.2, 0.4, 0.7$ の各応答曲線の形状から予測できることと過去の研究成果を総合すると, $\delta = 0.2$ では, フラッター振動, $\delta = 0.4$ では, フラッター振動と渦励振, $\delta = 0.7$ では, 渦励振がそれぞれ支配的であると思われる。更に, 振動数比を見ると全般的に, 一定値となる領域をはさんで, 前後に比例的变化する領域がある。振動数比一定の領域では, 外力のパワースペクトルは, 渦の発生によるものと思われ, 渦の発生周期が角柱の振動数に引きずられる, いわゆるロックイン現象が発生している。これらより, ここで示した空力振動現象は, 振動数比一定の前・中・後の3つの領域に大別される傾向にある。以後, 前述の δ とフラッター振動と渦励振とこの3つの領域に着目して考察をすすめる。 $\delta = 0.4, 0.7$ では, 外力と応答の位相差は, 振動数比が一定となる前では, $0 \sim 30^\circ$ となるが, 振動数比が一定になると V_r の上昇とともに上昇し, 振動数比一定の後では, V_r が上昇しても一定値を示す。 $\delta = 0.2$ では, $V_r = 10$ を超えても位相差は目立って大きくならない。自励的振動であろうフラッター振動と渦励振には, 位相差にも違いがみられる。また, $\delta = 0.4$ の振動数比一定領域では, δ が同じであっても, 建物密度比, 減衰の違いによって, 位相差にも違いがみられる。質量一定では, 位相差は不連続に段階的に変化しているが, 減衰一定では, 連続的に変化する。これは, 質量の大小に関係していると思われるが, 詳細は不明である。このように, 3次元角柱の空力振動について興味深い現象が捉えられているが, これらのメカニズムの解明には, 更なるデータの蓄積と分析が必要である。

次に, 迎角についてであるが, 全般的に応答値の標準偏差と同様な傾向を示している。すなわち, 応答振幅が大きければ, 応答速度が大きくなり, 迎角も大きくなることは, 容易に予想できる。 $\delta = 0.4$ の振動数比一定では, 応答値の上昇が鈍ると迎角の上昇は頭打ちとなる。 $\delta = 0.7$ では, 迎角と応答曲線は, にかよった形状となっている。更に迎角について分析するために迎角と位相差の関連性について調べた。図3は, 縦軸に位相差, 横軸に迎

角をとり, 値をプロットしたものである。 $\delta = 0.2$ では, プロットした点は, 図中に示すA領域内すなわち位相差は $0 \sim 20^\circ$ 迎角 $0 \sim 5^\circ$ の広い範囲に分布している。 $\delta = 0.4$ では, プロットした点は, B領域内すなわち位相差 $20 \sim 60^\circ$, 迎角 $2 \sim 3.5^\circ$ に分布するものとC領域内すなわち位相差 $55 \sim 90^\circ$, 迎角 $0 \sim 1^\circ$ の両領域に含まれる。 $\delta = 0.7$ では, プロットした点は, C領域内にかなりの割合で含まれる。これらの一連の迎角は, δ 別に明確になるため, フラッター振動と渦による振動についての特性に関連していると思われるが, 詳細については, 今後更に検討が必要である。

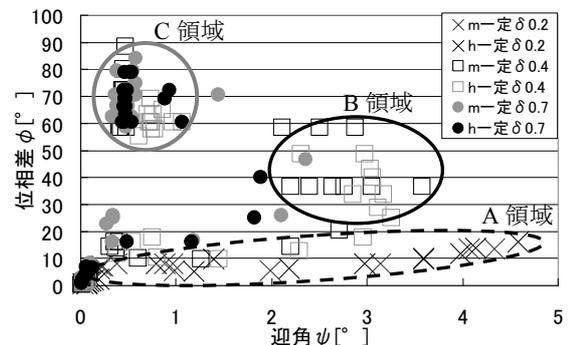


図3 位相差に対する迎角の分布

3. 複素 POD による変動風圧場の分析

3.1 解析概要

POD¹⁾とは, Proper Orthogonal Decompositionの略であり, 統計・多変量解析分野では, 主成分分析と呼ばれている。この解析法の最大の利点は, 現象を構成する種々の現象を組織的構造(モード)として分解出来る事と各モードが現象にどのくらい寄与しているか判別し, 分析ができる事にある。本論文では, POD解析を拡張した複素 POD解析^{2~4)}を適用する。実 POD解析は, 共分散行列 σ_{ij}^2 より固有値を算出することで各モード, 寄与率が定まる。複素 POD は, 式(8)のように共分散行列 σ_{ij}^2 を複素数成分で構成される。

$$\sigma_{ij}^2 = \frac{2}{T} \sum_k X_i(f_k) X_j^*(f_k) \quad \dots(8)$$

ここに X_i は, 同時計測されたN点の各フーリエ級数であり, *は共役複素数。共分散行列は $N \times N$ の行列である。また, 式(8)で定義される共分散は, 全周波数領域を積分して作成することも, 任意の区間の周波数領域を積分して作成することも可能であり, 特定の周波数領域に, 着目してこの解析を行うことも可能である。これは実 PODにはない利点である。

また、複素数により情報を得ることで各計測点の振幅のみならず位相も明らかとなり各モード振幅大きさと各点の時間差も明らかにすることが出来る。

3.2 モードによる振動状態の分析

図4に、減衰一定、 $\delta = 0.2$, $Vr = 10.8$, 及び同様に $\delta = 0.7$, $Vr = 11.3$ における複素 POD 解析結果を位相を $0 \sim 360^\circ$ に変化させた場合の振幅分布について示す()内は、寄与率を示す。 $\delta = 0.2$, $Vr = 10.8$, $\delta = 0.7$, $Vr = 11.3$ は、ともに振動が最も卓越した場合である。 $\delta = 0.2$, $\delta = 0.7$, とも1次モードでは、向かい合う面の風圧変動は、ほぼ逆位相を示し、風圧の合力は、振動を誘発するように作用している。このモードの寄与率も高く現象を十分に説明できる。同様に2次モードでは、向かい合う面の風圧変動は、同位相を示し、風圧の合力は、ほぼ0となっている。このモードの寄与率は、1次モード程高くない。しかし、2次モードについては、 $\delta = 0.2$, 0.7 で、異

なる点も見られる。それは、同一平面内の風圧分布で、 $\delta = 0.2$ では、風上と風下で正負圧が逆転しているが、 $\delta = 0.7$ では、面内で同一の符号となる分布をしている。

4. まとめ

NHAT を用いて行った空力振動実験に対し外力と応答の位相差, 迎角, 複素 POD 解析を行い, それらの結果より, 以下の知見を得た。
1) 振動依存風力が作用し定常状態が仮定できる場合の外力の振幅及び位相差を推定する方法を提案し, 位相差, 迎角の推定を行った。位相差, 迎角各々の特性のみならず, 両者の関連性について検討した。
2) 空力不安定振動状態にある3次元角柱の風圧変動場に対し, 複素 POD 解析を適用して変動場の分析を行った。その結果, 不安定振動発現に寄与するモードやその振動を抑制に寄与するモード形状を明らかにすることができた。

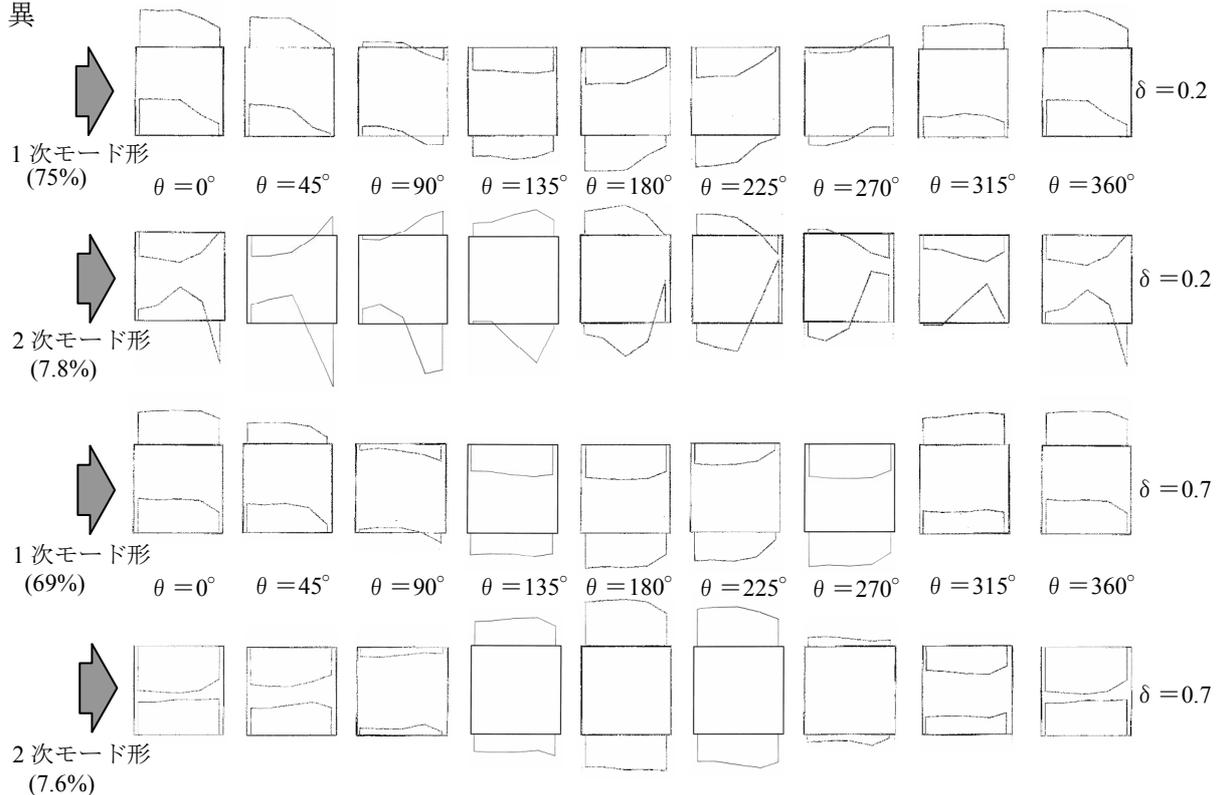


図4 複素 POD によりモード形状($\delta = 0.2, 0.7$, 頂部から2層目)

4. 参考文献

- 1) 田村幸雄：固有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、10
- 2) 浅見、寺崎：角柱型建物の変動風圧性状(複素 POD 解析による分析)、大成建設技術研究所報告、第30号、1997、pp.135-138
- 3) 谷口、谷池、浅見：変動場の組織的構造評価のための複素 POD 解析-その1 解析方法-、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2006、9
- 4) 谷口、谷池、浅見：変動場の組織的構造評価のための複素 POD 解析-その2 2次元角柱に関する風洞実験-、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、2006、9