

1. はじめに

ここでは、その3で見られた小さい質量減衰パラメータ（以下、 δ ）を有する構造物の空力振動時に作用する風外力を、応答振幅を含めた複素 POD 解析を適用し、分析を行い、渦励振時の外力特性を明らかにする。

2. 解析方法及び注意点

複素 POD 解析^{1, 2, 3)}は、その2の場合、正方形角柱回りに形成される風圧変動場を60点の風圧センサーで捉えることで、 60×60 の複素共分散行列を作成し、行った。しかしその4では、その行列式の中に応答の変動成分を含め 61×61 の複素共分散行列を作成し POD 解析を行った。共分散行列は、偏差積和により算出するため大きな変動と小さな変動をかけると片方の変動が隠れてしまう。本論文のような物理次元量の異なる変動と共分散行列を作成する際は、注意が必要である。そこでまず、(1)式のように時刻歴データからその平均成分を除き、標準偏差で割る事で、時刻歴波形の基準化（平均値0、分散1）を行い、異なる物理次元量の変動成分も同等に扱えるようにデータをリサンプルした。次に得られた波形を(2)式 of ヒルベルト変換をし、虚部のデータを算出する。通常、得られた虚部より複素共分散行列の作成を行うが、本論文のテーマである外力と応答の相関性を強めるために(3)式に示す相関係数で(4)式のような 61×61 の行列式を作成した。Fig.1 に解析手順をまとめフローチャートで示す。

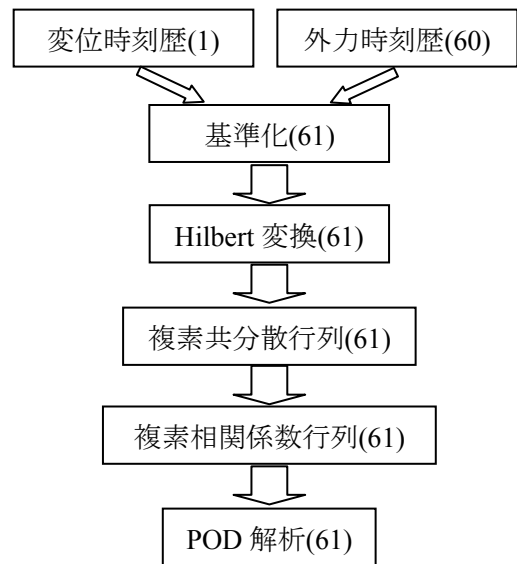
$$Z_{jk}(t) = \frac{X_{jk}(t) - \overline{X_{jk}}}{rmsX_{jk}} \quad \dots (1)$$

$$Z_{jkl}(\omega) = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{Z_{jkR}(t)}{t - \omega} dt \quad \dots (2)$$

$$R_{Z_j Z_k} = \frac{C_{jk}}{\sqrt{V_j V_k}} \quad \dots (3)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & R_{Z_1 Z_2} & \dots & R_{Z_1 Z_{61}} \\ R_{Z_2 Z_1} & 1 & \dots & R_{Z_2 Z_{61}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{Z_{61} Z_1} & R_{Z_{61} Z_2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad \dots (4)$$

ここで、
 Z_{jk} : 基準化時刻歴 X_{jk} : 時刻歴 $\overline{X_{jk}}$: 平均値
 $rmsX_{jk}$: 標準偏差 P : コーシーの主値
 Z_{jkl} : Z_{jk} 実部 Z_{jkR} : Z_{jk} 虚部 R : 相関係数行列
 $R_{Z_j Z_k}$: 相関係数 C_{jk} : 複素共分散 V_j, V_k : 分散



()内は、要素数

Fig.1 解析フロー

3. 解析結果

3.1 解析緒言

構造物の空力振動に着目し、解析を行い、渦励振時に生じる風圧変動場と応答振幅の関連性の分析を行う。そして応答の発達による風外力の性状の変化や風圧力の伝播の性状について明らかにする。ここでは、その1で示した実験パラメータより $\delta = 0.1, 0.3, 0.4, 0.6$ における質量一定の場合の4パターンについて解析を行った。

3. 1 変動の主成分

Fig.2 に、 $\delta=0.4$ の渦励振時のある時刻における変動の主成分の上部 5 層目を示す。Fig.3-A に応答，外力を Fig.3-B に主要な変動の寄与率の変遷を無次元風速（以下 V_r ）に対してそれぞれ示す。

Fig.2 より F は外力（Force）を表し、D は変位（Displacement）を表す。また実線の矢印は、外力の向きを表し、更に薄い点線は、変位 zero の中立軸を表す。説明の便宜上、振動に寄与すると見られる風圧変動を逆位相モードとし、振動に寄与しないと見られる風圧変動を同位相モードとする。逆位相モードでは、 $V_r=10.0$ の Point-A の応答が発達している状態では、外力が最大に達した後遅れて応答振幅が最大となる（ $\delta=0.1, 0.3, 0.6$ でも確認）が、 $V_r=14.2$ の Point-B の応答振幅ピーク時は、外力の最大と応答振幅の最大が一致し 180°

の遅れがある（ $\delta=0.6$ でも確認）。同位相モードは、全 V_r に渡って Fig.2 に示すような変動を見せており、応答振幅との明確な関連性は、見受けられなかった。（ここでは、代表的に Point-B のモードを示す）

次に Fig.3 より応答変位と風力係数に対する変動の寄与率を分析する。渦励振前では、同位相モードが 1st、逆位相モードが 2nd となり V_r 増加と共に寄与率が上昇するが、渦励振中では、各モードが入れ替わり対称的な分布を示している。そして渦励振後は、再度モードが入れ変わりほぼ一定の値を示す。

この傾向より、風圧変動場に寄与の大きい一次、二次モードの挙動が、渦励振や空力振動現象の発生に関連しており、各モードに対して物理的な意味を持たせる事で渦励振の外力特性を明らかにする

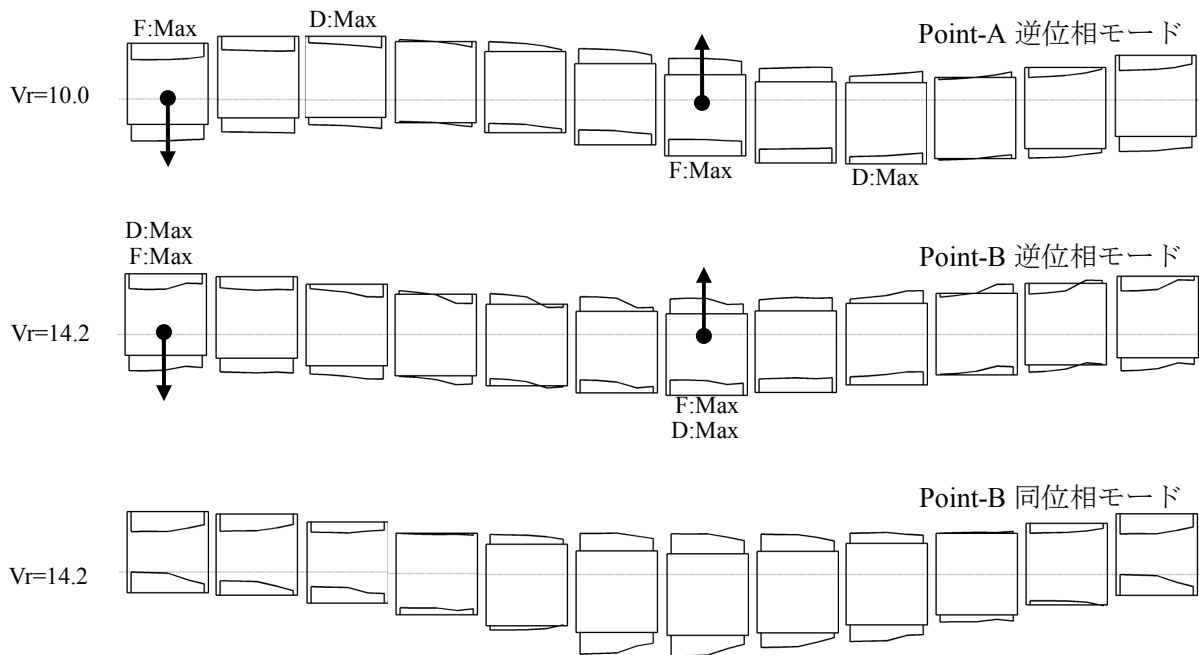


Fig.2 各空力振動状態における応答変位と圧力変動の主要モード

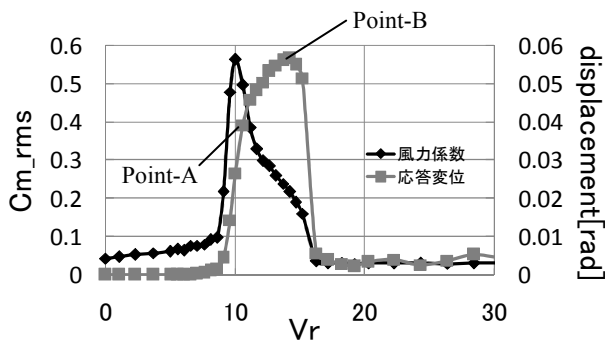


Fig.3-A 応答変位と風力係数分布

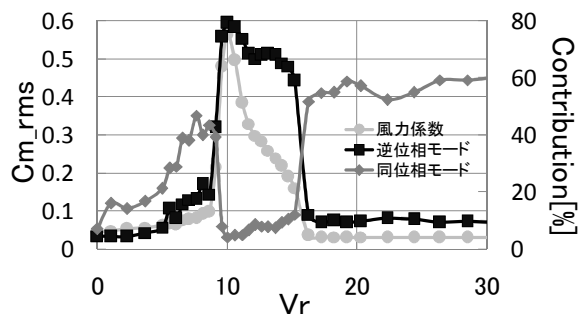


Fig.3-B 逆・同位相モードの寄与率分布

3. 2 変動の周波数特性

ここでは、前節より得られた圧力変動の周波数特性をフーリエ変換によって分析を行う。解析は、空力振動状態を渦励振前、渦励振中、渦励振後、と分類し、その中から代表的に行った。また例示するグラフは、前節同様 $\delta=0.4$ とする。

Fig.4 に逆位相モードの解析結果を示す。図より V_r の増加に対応し、卓越成分の振動数も増加している。また静止状態に作用する逆位相モードも同様の傾向が見られることを確認した。よって逆位相モードの示す圧力変動は、物体に作用する剥離流れの変動と定義することができる。Fig.5 に同位相モードの解析結果を示す。図より低 V_r 、高 V_r には、卓越する振動数が見られるものの、逆位相モードのように物理的現象と関連づけられるような特長が見受けられなかった。しかし渦励振中の $V_r=10.0$ では、逆位相モードで卓越する自励的な振動数成分の他に、その約 2 倍の振動数に明確な卓越振動数を有しているが、これは解析上の見かけの変動を表していると考えられる。そこで同位相モードに対し、物理的な意味を定義することで、渦励振の応答の発達メカニズムを分析する。まず次節で、圧力の伝播性状を明らかにする。

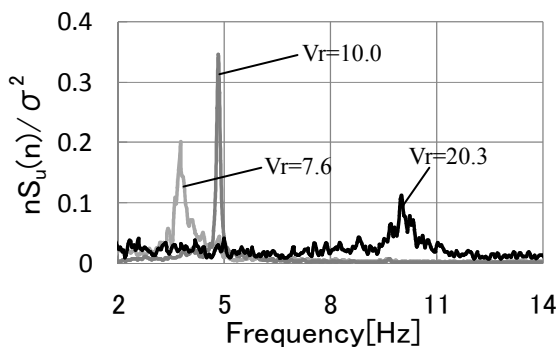


Fig.4 逆位相モードの周波数特性

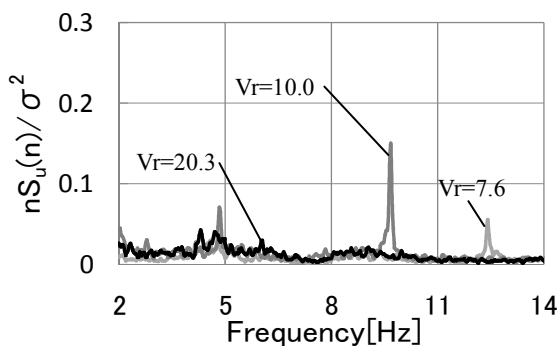


Fig.5 同位相モードの周波数特性

3. 3 振動時の圧力伝播

同位相モードの物理的な意味を定義するため、まず同位相モードの変動場が、応答に対してどのような位相差を持つか検討する。

Fig.6, 7 に Point-A, B それぞれの応答に対する各測定点の位相差を示す。図中の位相差は、応答変位を 0° と基準にしている。また例示するグラフは、前節同様 $\delta=0.4$ とする。

Fig.6 より応答が増大している空力振動状態の Point-A では、応答変位に対して各測定点の位相が全体的に「-」側に存在し、その傾向は、上部より下部、風下より風上の方が強い。またこの時、静止状態では、上部・下部、風上・風下に位相差が見られない。次に Fig.7 の応答がピークを示す空力振動状態の Point-B では、応答変位に対して各測定点の位相が、上部では「+」側、下部では「-」側に存在しており、振動状態によって圧力変動の性状が異なることが確認された。また他のパラメータの位相分布を調査したところ、同様の傾向が確認された。しかし Point-B 付近の応答振幅が大きく測定エリアをオーバーしてしまう $\delta=0.1, 0.3$ では、 $\delta=0.3$ の位相分布は、Fig.7 のような傾向を示したが、 $\delta=0.1$ では、全く異なる傾向を示した。また、 $\delta=0.6$ のように応答ピーク値が減少すると Fig.7 に

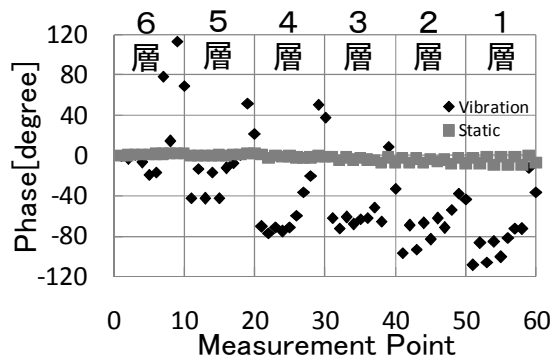


Fig.6 Point-A の圧力位相分布

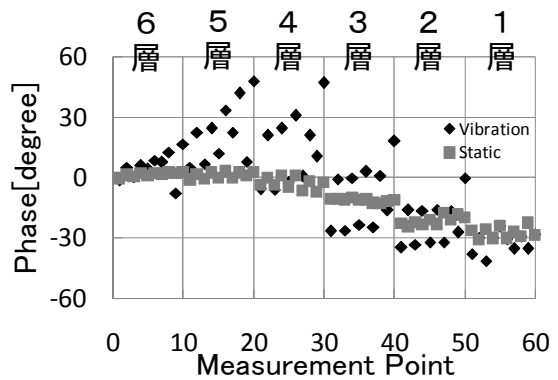


Fig.7 Point-B の圧力位相分布

見られる上部の 1, 2, 3 層目の位相差が 0° 付近に収束し、静止状態に近くなる。

3.3 同位相モードの定義

本節では、静止状態や強制振動状態時の同位相モードの性状と比較することで、空力振動状態の圧力変動場を明らかにし、同位相モードの定義を行う。

Fig.8に強制振動の振幅 $x=0.032[\text{rad}]$ の一次、二次モードの寄与率を示す。モード形が $V_r=12.7$ 付近を境に入れ替わり、高 V_r 側は、渦励振後と同じ傾向を示し、低 V_r 側は、どの状態にも一致しない傾向がみられた。そこで、低 V_r 側の $V_e=7.6$ における各モードの周波数解析を行った。結果をFig.9に示す。図より、逆位相モードは、カルマン渦の周波数と強制加振の5Hzに卓越振動数を有し、そのパワーは、自励成分が大きく、同位相モードは、前述同様の卓越成分を示すものの、そのパワーは反対の性状を示す。この逆位相モード性状は、通常の $V_r=7.6$ では、起こりえない振幅で物体が振動するために本来の剥離により生じる変動のより、振動成分の変動を過剰に計測することが原因である。反対に同位相モードの性状は、低 V_r で起こりえない振動をすることで、通常は検出できない変動成分を過剰に計測するために図のようなスペクトル性状を示す。

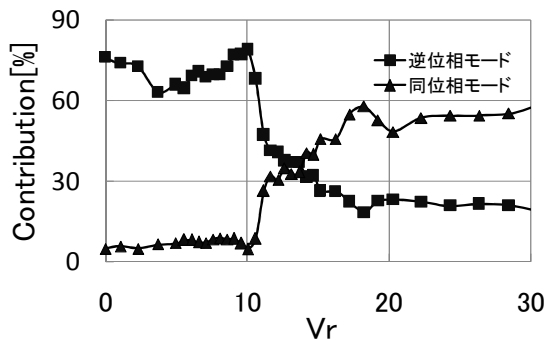


Fig.9 強制振動時の寄与率分布

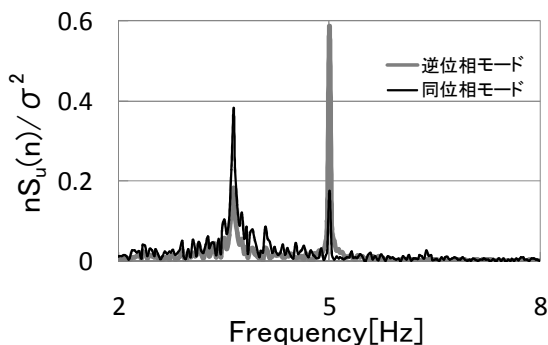


Fig.9 逆, 同位相モードの周波数特性 ($V_r=7.6$)

これらの事実より同位相モードは、剥離流れと振動によって作り出される、風圧変動場と見なすことができる。

4. まとめ

本論文より渦励振時の外力特性に関して以下の知見を得た。

- 1) 空力振動時の外力の分析には、複素 POD 解析が有用である。
- 2) 一様流中における空力振動は、1次、2次モードの挙動が支配的である。
- 3) 空力振動時の逆位相モード形は、剥離流れによる変動を表し、同位相モード形は、剥離流れと振動によって作りだされる変動場を表す。
- 4) 応答変位の発達は、同位相モードの圧力の伝播性状によって定まり、応答変位に対して、上部より下部の位相が、そして風下より風上の位相が進んでいると応答が増大する。そして応答変位がピークを迎える或いは減少する時、応答変位に対して、上部では位相が遅れ、下部では位相が進む。

今後は、分離した変動モードより構成された外力より振動方程式を展開などを行い、更なる分析を行う。また今回の解析で $\delta=0.3, 0.4, 0.6$ に見られる Point-B 付近の渦励振の傾向とは異なる圧力分布を示した (Fig.10 参照) $\delta=0.1$ の振動性状を分析し、発振メカニズムを明らかにする。

参考文献

- 1) 谷口, 谷池: 変動場の組織的な構造を評価するための複素 POD 解析に関する研究, 風工学会論文集, 2006, 10
- 2) 3) 中村, 谷口, 谷池: 角柱周りの変動風圧に関する複素 POD 解析その 1, その 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集(九州), 2007, 9

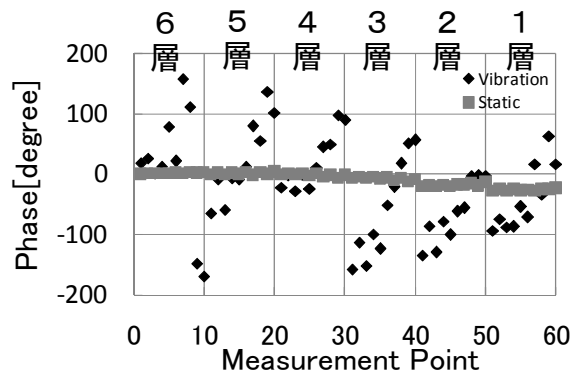


Fig.10 Point-B の圧力位相分布 ($\delta=0.1$)