PIV 測定結果に基づく相互作用現象の実験的評価

後流域との相互作用を考慮した三次元角柱の振動発生機構に関する基礎的研究 (その 1)

EXPERIMENTAL EVALUATION OF INTERACTION PHENOMENON
BASED ON PIV MEASUREMENTFundamental study on vibration mechanism of three-dimensional prisms
in consideration of wake interaction (Part 1)

喜々津 仁密*, 奥田 泰雄**, 大橋 征幹***, 神田 順****

Hitomitsu KIKITSU, Yasuo OKUDA, Masamiki OHASHI
and Jun KANDA

This paper discusses interaction mechanism between vibrating three-dimensional square prism and fluctuating wind velocity field. Wind velocities in the wake region were measured by PIV (Particle Image Velocimetry) system and the dominant structure in the mechanism of vortex-induced oscillation was evaluated by applying POD (Proper Orthogonal Decomposition) analysis to the measured data. Based on the result of POD analysis, qualitative generation mechanism of lift force was presented. The main purpose of this study is that the dominant structure of the interaction mechanism between three-dimensional square prism and its wake is identified to evaluate the mechanism of across-wind response on the experimental basis.

Keywords: *Three-dimensional prism, Self-excited oscillation, Interaction phenomenon, PIV system, POD analysis*

三次元角柱, 自励的渦励振, 相互作用現象, PIV システム, POD 解析

1. はじめに

三次元角柱の風直角方向振動のうち自励的渦励振や空力不安定振動は, 角柱自身の振動が周囲の流れに影響を与えることによって生じる付加的空気力がさらに角柱に作用して振幅を増大させるという相互作用機構を有している。したがって, これらの振動の発生機構を理解するためには, 角柱の振動 (応答) 結果のみの考察だけではなく, 角柱振動時における周囲の流れの挙動を把握することも同時に求められる。そして, 角柱周りの流れに関する既往の実験的研究では, 主に可視化実験による考察がされてきた。二次元角柱周りの流れについては, 溝田らの一連の研究^{例) 1, 2)}により時々刻々の振動状態との対応を考慮した流れの定量的な議論がされているが, 三次元角柱周りの流れについては, 例えばロックイン現象時での後流域の可視化実験結果を踏まえた振動発生機構の議論は未だ不十分であると思われる。

そこで本研究では, 代表的な面計測手法である粒子画像流速測定法 (Particle Image Velocimetry, PIV) を用いて振動する三次元角柱後流域での流速場を測定し, 角柱と流体との間の相互作用現象に関する傾向を捉えてそれを特徴付けるパラメータにより定量的な評価を行う。次に, 角柱の振動変位の測定と PIV による測定とを同期させる計測システムを構築して, 同時刻での両者の時系列データに基づく相關特性等を把握する。加えて, 得られた変動流

速データに POD (Proper Orthogonal Decomposition) 解析を行うことによって角柱振動時の定性的な揚力発生機構の推定を試みる。以上の一連の実験的評価が, 相互作用現象に係る機構を構成する流体の大局的な構造の把握及び相互作用の結果である自励的渦励振等の発生機構の更なる解明に資することを目的とする。

2. 風洞実験の概要

2.1 実験模型及び実験気流

本研究の風洞実験は, 独立行政法人建築研究所所有の乱流境界層風洞 (幅 3m×高さ 2.5m×測定胴長さ 25m, 回流式) で実施した。風速, 長さ及び時間の縮尺率は, それぞれ 1/4, 1/500 及び 1/125 であり, 基準高さが 300m 相当の超高層建築物を想定した。三次元角柱模型は幅(B)70mm×奥行(D)70mm×高さ(H)560mm であり, 模型密度は 204kg/m³ である。また, 空力振動実験時における風直角方向の固有振動数 n_0 及び減衰定数 h はそれぞれ 13.1Hz, 1.1% である。図 1 に掲げる実験気流は, 粗度要素がない状態と粗度要素 (スパイア+ラフネスブロック) を配した状態の 2 通りであり, 以下では前者を「気流 U」, 後者を「気流 T0」とよぶ。また図 2 に, 気流 T0 中の模型高さ H における変動風速のパワースペクトルを示す。気流 T0 の鉛直分布性状は概ね地表面粗度区分Ⅲ³⁾に近く, スペクトル形状もカルマン型に対応した結果となっている。

* 独立行政法人建築研究所 主任研究員・博士 (環境学)

** 独立行政法人建築研究所 上席研究員・博士 (工学)

*** 国土交通省国土技術政策総合研究所 主任研究官

**** 東京大学大学院新領域創成科学研究科 教授・Ph. D.

Senior Researcher, Building Research Institute, Ph. D.

Chief Researcher, Building Research Institute, Dr. Eng.

Senior Researcher, National Institute for Land, Infrastructure and Management, MLIT

Prof., The University of Tokyo, Ph. D.

図1 実験気流の鉛直分布

図2 変動風速のパワースペクトル (気流 T0)

2.2 PIV システム

三次元角柱後流域を対象とした可視化実験に当たっては、PIV システムによる粒子画像流速測定法を用いた。これは測定空間を浮遊するトレーサの可視化技術にデジタル画像処理技術を加えることにより、流速場の瞬時かつ平面内における多点の速度情報を抽出する方法である。本研究でのシステムによって得られる流速ベクトルのサンプリング周波数は 30Hz 又は 500Hz である。500Hz の場合について、基本仕様とタイミングチャートを表 1 と図 3 にそれぞれ掲げる。

表 1 PIV システムの基本仕様

デジタル高速度ビデオカメラ	名称	Phantom V7 (Vision Research Inc.)
	センサー種別	SR-CMOS
	最大レート	4800frame/s
ダブルパルスレーザー	有効ピクセル数	800×600pixels
	名称	Pegasus-PIV (New Wave Research, Inc.)
	レーザー種別	Nd:YLF Laser
トレーサ粒子発生装置	エネルギー	10mJ@1000Hz
	波長	527nm
	繰返しレート	1000Hz
制御・解析ソフトウェア	型式	Ruskin Nozzle
	名称	Piv Part 40
	粒子径	約 1μm
制御・解析ソフトウェア	名称	INSIGHT-Stereo (TSI Inc.)

ベクトル画像の取得に関しては、各フレーム前後にレーザー発光をし、連続する 2 枚の画像に 2 時刻の画像をそれぞれ記録(フレームストラドリング)することで、各々の瞬間における 2 枚 1 組の画像の組み合わせが得られる。この 2 枚 1 組の画像から FFT 相互相関関数法⁴⁾を用いて流速ベクトルを算出する。ここで、検査領域単位は 32×32pixels であり、画像の隣同士の測定点における検査領域のオーバーラップは 50%とした。またサンプリング周波数

500Hz の場合は、図 3 に掲げるように、レーザー変位計の収録装置側からトリガー信号を出力することにより、同時刻の振動変位と取得画像とを対応づけることが可能となる。

図3 PIV システムのタイミングチャート

3. 後流域の平均流速場の特性

振動する三次元角柱の後流域における平均流速場の特性を把握するため PIV 実験を行った。サンプリング周波数は 30Hz であり、取得画像を解析して得られた 509 の流速ベクトルデータを平均して平均流速場におけるベクトルを算出した。測定高さは後流域の三次元性を考慮して 0.95H、0.8H、0.6H 及び 0.3H の 4 通りである。ここでは、後流域での渦の形成領域を代表する距離のパラメータとして角柱の背面から後方よどみ点までの距離を角柱の奥行 D で規準化した値 x_{ws}^* (以下「規準化後方よどみ点距離」という)に着目して、その値の平均風速に対する変化について検討する。後方よどみ点の位置は平均流速ベクトルデータをもとにして、概ね角柱中心軸の延長線上の流速の主流方向 u 成分の値が負から正に変わる点として特定した (図 4 中の ■ 印)。

図4 平均流速場における規準化後方よどみ点距離 x_{ws}^* の定義

図 5 に空力振動実験から得られた規準化風直方向変位と規準化後方よどみ点距離との関係を、図 6 に規準化後方よどみ点距離の高さ方向分布をそれぞれ示す。なお、図 6 中の静止角柱に関する結果(点線)は、振動角柱の固有振動数 n_0 により得た無次元風速として示している。

気流 U のもとでは、規準化後方よどみ点距離が急激に減少し始める風速と自励的渦励振の発現風速、また、当該距離が最小となる風速と自励的渦励振による応答が最大となる風速がそれぞれ一致する結果となった。さらに、この両者の非線形な挙動を示すのは $n_s/n_0=1.0$ (n_s : 渦の発生周波数) となる風速の範囲に対応していることから、同期(ロックイン)現象時には逆流の形成領域が急激に角柱背面まで接近していることがわかる。以上の結果から、

一様流中での渦励振発生機構を把握する上で、規準化後方よどみ点距離は角柱振動時の流体挙動を示す基本的なパラメータであると言える。これは、二次元振動円柱の振幅が大きくなるほど後流域の *formation-region length* が小さくなる性状³⁾と同様の傾向であると考えられる。一方の気流 T0 のもとでは、規準化後方よどみ点距離に対する風速変化の影響は小さく、平均的な逆流の形成領域の大きさはほとんど変化していない。

また図 6 をみると、気流 U 中の自励的渦励振時 ($U^*=10.8$) 以外の振動状態における規準化後方よどみ点距離の高さ方向分布はいずれも点線で示した静止角柱での分布と相似な結果となっており、これらの振動状態は角柱自身の振動の影響が少ない強制振動的な様相を呈していると考えられる。

図 5 規準化風直角方向変位と規準化後方よどみ点距離との関係

図 6 規準化後方よどみ点距離の高さ方向分布

4. 後流域の変動流速場の特性

本節では角柱の振動変位に対応した後流域の挙動に関してさらに知見を深めるため、三次元角柱の後流域を対象にして変動流速場に関する検討を行う。よどみ点高さ近傍での流れに着目して、本節で示す PIV 測定結果はいずれも高さ $0.8H$ での結果であり、サンプリング周波数は 500Hz である。

4.1 振動変位の条件付抽出に基づく考察

水平断面内での PIV 測定で得られる流速ベクトルから、風直角方向振動に対する後流域の挙動を検討する。ここで対象とした角柱の振動状態は、気流 U 中において応答が概ね最大となる自励的渦励振時 ($U^*=10.6$) と非自励的渦励振時 ($U^*=14.5$) である。吉川ら⁶⁾の手法に倣い、振動変位を正弦波 $y^*=y(t)/y_{\max}=\sin 2\pi n_0 t$ とみなして、(1)式に示すように振動変位が 0 の位置から移動する瞬間の位相を 0 とし、位相 $2\pi n_0 \tau_j$ の値が $\pi/6$ ごと (当該位相 $\pm 0.03\pi$) の瞬間ベクトル画像をそれぞれ条件付抽出してアンサンブル平均を行った。

$$\langle V(x, y, 2\pi n_0 \tau_j) \rangle = \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} V(x, y, t_i + \tau_j) \quad (1)$$

ここで、 $\langle \bullet \rangle$: アンサンブル平均演算子、 N_j : 画像数、 $V(x, y, t)$: 座標 (x, y) における流速の u 又は v 成分、 t_i : i 番目に角柱の振動変位が 0 の位置から移動する時刻、 $\tau_j = j/12n_0$ ($j=0, 1, \dots, 11$) である。気流 U 中での測定結果の一例を図 7 に示す。なお、以下では図中の角柱の隅角部を左上から反時計回りに隅角 1→2→3→4 とよび、渦度は反時計回りを正とする。

自励的渦励振時(a)の場合は、 $2\pi n_0 \tau=0$ (速度が図中上向きに最大) では隅角 1 からはく離せん断層が角柱背面から約 $1.5D$ 後方で 2 つの流れに分岐し、一方は角柱背面側に負の渦度をもつ逆流を形成し、他方は正の渦度をもつ蛇行した流れとなって後方へ流下している。ここで、蛇行した流れは Gerrard⁷⁾の言う *entrainment flow* に相当し、相対する流れに取り込まれることによって蛇行するような流れの性状を示している。 $2\pi n_0 \tau=\pi/3$ から $2\pi/3$ にかけて、隅角 2 からはく離せん断層が隅角 3 付近で 2 つの流れに分岐し、一方は角柱背面側に正の渦度をもつ流れを形成し始める。その正の渦度をもつ流れと蛇行した流れとの間で挟まれることによって、 $2\pi n_0 \tau=0$ の時点で認められた逆流は明確な形状を示さなくなる。

非自励的渦励振時(b)の場合も角柱背面での逆流の形成は明確である。 $2\pi n_0 \tau=0$ で隅角 1 からはく離せん断層が角柱背面から約 $3D$ 後方で 2 つの流れに分岐して、一方が角柱背面側に負の渦度をもつ逆流を形成している。そして $2\pi n_0 \tau=\pi/3$ から $2\pi/3$ にかけて、隅角 2 からはく離せん断層が角柱背面側に回り込んで正の渦度をもつ逆流を形成し始めており、これらの角柱の振動にともなう流れの形成パターンは自励的渦励振時と概ね同一のようである。しかし、この場合は風上前縁からはく離せん断層が角柱背面直後で回り込まずに比較の後方まで伸びるために、逆流の形成位置がさらに後方へと伸びている点の特徴である。

注) 図中の点線は角柱の静止時の位置を表し、角柱内の矢印は $2\pi n_0\tau=0$ の速度に対する角柱の振動速度を表す。

図7 角柱の振動変位に対応した後流域の流速場(気流 U)

4.2 POD 解析に基づく考察

次に、前節での測定結果に POD 解析を適用することによって変動流速場の大局的な構造を抽出し、後流域ではどのような流れの性状が当該領域を支配(代表)しているのか考察を行う。

(1) POD 解析の概要⁸⁾

ランダムに変動する流速 $V(x, y, t)$ が与えられ、かつ、それらの値が均一な間隔で分布しているとき、POD 解析は一般に次のようなマトリクス表現で表される。

$$[R_V]\{\Phi_m\} = \lambda_m\{\Phi_m\} \quad (2)$$

ここで、 $[R_V]$: 変動流速の空間相関マトリクス($M \times M$)、 $\{\Phi_m\}$: 空間相関マトリクスの固有ベクトル(モード)、 λ_m : 空間相関マトリクスの固有値($m=1, 2, \dots, M$)である。解析対象領域は角柱背面から風下方向に $4.0D$ 、角柱中心軸から左右両方向にそれぞれ $1.5B$ の範囲とし、 $M=713$ である。流速の u, v 成分を $V(x, y, t)$ として、それぞれの流速成分について POD 解析を行った。いずれも、それぞれの位置での風速から平均値を引いた値である。(2)式で得られる1次の結果はランダムに変動する流速場の情報を最も多く含ん

でおり、当該場の変動性状を表現するのに最も効率の良いモードである。そして固有値 λ_1 の値も最も大きくなる。

また、(2)式を解いて得られる固有ベクトルの直交性を利用して、もとの変動流速は

$$V(x, y, t) = \sum_{m=1}^M a_m(t) \Phi_m(x, y) \quad (3)$$

と表される。ここで、 $\Phi_m(x, y)$ は m 次固有ベクトルであり、 $a_m(t)$ は m 次規準座標 (m 次主成分) とよばれ

$$a_m(t) = \frac{\iint V(x, y, t) \Phi_m(x, y) dx dy}{\iint \Phi_m^2(x, y) dx dy} \quad (4)$$

と表される。また、もとの流速変動の分散の和に対する m 次の基準座標の分散の比を寄与率 c_m と定義し、(5)式のように寄与率の1次から N 次までの和を N 次までの累積寄与率とよぶ。

$$C_N = \sum_{j=1}^N c_j = \frac{\sum_{j=1}^N \lambda_j}{\sum_{j=1}^M \lambda_j} \quad (5)$$

(2) POD 解析の結果

① 固有モード形状 $\{\Phi_i\}$ 及び累積寄与率 C_i

気流 U 中での自励的渦励振時の変動風速の u, v 成分それぞれについて得られた固有モード形状 (1~3 次) を図8に示す。 u 成分の固有モード形状は、角柱中心軸に対して1次及び2次モードは左右逆位相、3次モードは左右同位相の分布となり、さらに2次モードでは $x/D=0.5$ を境にして風上側と風下側とで逆位相となっている。一方、 v 成分の規準モード形状は、1次モードは風上側から風下側へ向かって $x/D \approx 1.5$ を境にして位相が負から正へ逆転し、2次モードは $x/D \approx 1.0, 2.6$ を境にして位相が正、負、正へと逆転している。また、1次モードの正負それぞれの値がピークとなる位置の x 座標が、2次モードでは位相が逆転する位置つまり値が概ね0となる位置のそれと一致している。

以上の1次及び2次モードで認められた u 成分で左右逆位相、 v 成分で風下方向に向かって交互に位相が変わるといった形状は、角柱の両側面からカルマン渦が交互に放出される現象を反映していると考えられる。

図8 後流域における変動流速場の固有モード形状(気流U)

次に, u , v 成分それぞれのモードに対する累積寄与率の変化を図9に示す。いずれの無次元風速の場合についても, u 成分よりも v 成分の方が低次のモードでの寄与率が大きくなっており, 例えば自励的渦励振時(a)では10次モードまでの累積寄与率は v 成分が約70%であるのに対して, u 成分が約40%である。したがって, 低次のモードのみに着目して後流域における変動流速場を把握しようとした場合, v 成分の方が相対的により明確に当該場の構造を抽出できると考えられる。また, 風速の違いで比較すると, $U^*=10.6$ のほうが14.5よりも v 成分の低次の累積寄与率が大きく, 各風速での風直角方向変位の大きさの大小関係と対応している。なお, ここに掲げていないが, 気流T0では気流Uの場合と異なり, モードに応じた u , v 成分の累積寄与率の変化の傾向はお互いにはほぼ等しい結果となった。

ここで得られた v 成分の1次モードの寄与率は概ね25~35%の範囲であり, この結果は菊池ら⁹⁾によるアスペクト比5の三次元角柱壁面の変動風圧を対象としたPOD解析結果での1次の寄与率(約26%)と同程度となっている。菊池らは, この解析した1次モードについて渦放出現象を強く反映するものであると考察しており, ここでも, 図8に掲げる変動流速場の固有モード形状から渦放出現象が読み取れる可能性を指摘した。このように解析対象のデータが変動風速, 変動風圧とお互いに異なっても, 渦放出という同一の物理的現象が支配的であればそれを最も反映したモードの寄与率が同程度になるというのは興味深い結果である。

図9 各モードの累積寄与率

② 規準座標 $\{a\}$

三次元角柱の振動と後流域の挙動との間の相互作用現象において, 後流域の変動流速場が三次元角柱の振動発生機構に及ぼす影響の考察に当たっては, 変動流速と振動変位との相関性状を把握することが有効であろう。そこで, 菊池ら⁹⁾の考察に倣って, 10次までの u , v 成分それぞれの規準座標と振動変位との相関係数を求めた。気流U中での自励的渦励振時の結果を図10に示す。

u , v 両成分ともに1次及び2次の規準座標と振動変位との相関が高くなる結果となった。また, 両成分の振動変位に対する相関の推移する傾向は, 符号の変化も含めて似た結果となっている。さらに周波数領域における相関性状を比較するため, 3次までの規準座標と振動変位のパワースペクトルを求めた。1024個のデータを512個ずつの2ブロックに分けてアンサンブル平均した結果を図11に示す。 u , v 両成分はともに1次及び2次モードのピーク位置が振動変位のそれと一致しており, 図10に示した両モードと振動変位との高い相関結果を裏付ける結果となっている。つまり, 1次及び2次モードから構成される変動流速場が固有振動数 n_0 の角柱の振動と同期する状態となり, それが自励的渦励振の発生機構に寄与していると考えられる。

図10 変動流速場の規準座標と風直角方向変位との相関係数(気流U, $U^*=10.6$)

図 11 変動流速場の規準座標と風直角方向変位のパワースペクトル (気流 U, $U^*=10.6$)

(3) 変動流速場の大局的な構造の抽出

以上の解析結果を踏まえて、以下では低次のモードのみの固有モード形状と規準座標の結果によって再構成される流速ベクトル $(\tilde{u}, \tilde{v})$ を求めた。

$$\begin{aligned} \langle \tilde{v}(x, y, 2\pi n_0 \tau_j) \rangle &= \frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{m=1}^{N_m} a_m^v(t_i + \tau_j) \Phi_m^v(x, y) \\ &= \sum_{m=1}^{N_m} \left[\frac{1}{N_j} \sum_{i=1}^{N_j} a_m^v(t_i + \tau_j) \right] \Phi_m^v(x, y) \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $\langle \bullet \rangle$: アンサンブル平均演算子, $\tilde{v}(x, y, t)$: 座標 (x, y) における再構成された流速の u 又は v 成分, N_j : 画像数, N_m : 考慮するモード数, $\Phi_m^v(x, y)$: 流速の u 又は v 成分の m 次固有ベクトル, $a_m^v(t)$: 流速の u 又は v 成分の m 次規準座標, t_i : i 番目に角柱の振動変位が 0 の位置から移動する時刻, $\tau_j := j/12n_0$ ($j=0, 1, \dots, 11$) である。気流 U 中の $U^*=10.6, 14.5$ の場合は、 v 成分の累積寄与率が 50% を超える 3 次モードまでを対象とした ($N_m=3$)。

気流 U 中での解析結果を図 12 に示す。自励的渦励振時(a)の場合について、 $2\pi n_0 \tau=0$ の結果をみると、角柱のすぐ背後では負の渦度をもつ循環、さらにその風下側では正の渦度をもつ循環の形成がそれぞれ認められる。この結果を図 7(a)の流速ベクトルと比較すると、前者の負の循環によって角柱背面で形成されている構造は図 7(a)で示した逆流の構造が、後者の正の循環は蛇行した流れの構造がそれぞれ抽出されたものであると考えられる。その負の循環は振動変位の位相の増加とともに風下方向に移動していく。 $2\pi n_0 \tau=\pi/3$ では、逆に正の渦度をもつ循環が角柱周りに形成され始めており、その発達にともなって $2\pi n_0 \tau=2\pi/3$ では負の循環が風下方向へ押し出されるような性状を示している。この性状は従来から指摘されている渦の放出現象^{例えば 10)}に対応する構造であると考えられる。そして角柱周りで発達過程にある正の渦度をもつ循環も $2\pi n_0 \tau=\pi$ になると明確な渦構造となる。

一方、非自励的渦励振時(b)の場合は自励的渦励振時と同様に角柱背後で循環が形成されているが、その形成領域はより風下側に

位置している。 $2\pi n_0 \tau=\pi/3$ で正の渦度をもつ循環が角柱周りで形成し始めており、それが角柱の振動にともなって徐々に発達すると同時に、 $2\pi n_0 \tau=2\pi/3$ では既に発達している負の循環を風下側に押し出している様子が認められる。

注) 図中の点線は角柱の静止時の位置を表し、角柱内の矢印は $2\pi n_0 \tau=0$ で速度に対する角柱の振動速度を表す。

図 12 角柱の振動変位に対応した後流域の大局的な流速場 (気流 U)

4.1 節において角柱の振動変位の条件付抽出に基づいた場合は、両側面のはく離せん断層からそれぞれ分岐する逆流と蛇行した流れの形成過程に着目して後流域の挙動を把握したが、以上のように低次のモードにより再構成された流速ベクトルに基づいた場合は、循環構造に関する次の 3 つの段階、(1)角柱周りで形成開始 → (2)角柱背後での発達 → (3)風下側への放出に着目して、効率よく後流域の挙動を論ずることが可能となる。

5. 定性的な揚力発生機構の推定

5.1 推定の概要

前節では、変動流速場を特徴づける代表的な構造を低次のモードから抽出することにより、角柱周りで形成して発達する循環とそれによって風下側へ放出される循環それぞれの推移を把握することができた。ここでは、前者の角柱周りで形成される循環性状

に着目して、振動する角柱に作用する定性的な揚力発生機構の推定を行う。

一般に、角柱に作用する揚力 L は、以下の完全流体を対象としたクッタ・ジュコフスキーの定理による考え方に基づいて角柱周りに形成される循環と関連付けて説明されている^{例えば 11), 12)}。ここで、 ρ ：空気密度、 U ：平均風速、 Γ ：角柱周りの循環である。

$$L = -\rho U \Gamma \quad (7)$$

角柱の風上面及び側面領域は PIV 測定の対象ではないので、ここで対象とする角柱周りの循環は厳密には(7)式を構成する循環と異なる。また、風下側へ放出された循環が PIV 測定の領域を超える場合は、その循環の大きさは評価できない。このように PIV 測定領域上の制限はあるが、ここでは、以下の2つの仮定のもとで同定理を準用することにより角柱に作用する揚力特性が定性的に評価しようと考え、(8)式で改めて非定常揚力 $\tilde{L}(t)$ を定義する。

- i) 角柱周りに形成される循環 (PIV 測定の領域がその一部を包含する) が、揚力形成に寄与する
- ii) 風下側へ放出された循環は、揚力形成に寄与しない

$$\tilde{L}(t) = -\rho U \cdot \tilde{\Gamma}_w(t) \quad (8)$$

(8)式で考慮する循環 $\tilde{\Gamma}_w(t)$ の算定の考え方を以下に述べる。変動流速場の構造と振動角柱に作用する揚力の発生機構との関係は、POD 解析で得られた v 成分の1次モード形状に着目して図13でまとめることができる。

図13 定性的な揚力発生機構と POD 解析結果との関係

解析対象領域を位相変化位置 $x_{v1} \cdot D$ を境とする2つの領域に分けて、角柱の背面側の領域で角柱周りの循環が平均的に形成され、もう一方の風下側の領域で循環が放出されると仮定する。そして背面側の領域での循環が揚力発生機構に直接寄与するものと仮定し、同図中の点線内の領域での循環 $\tilde{\Gamma}_w(t)$ を(9)式で計算して(8)式に代入することにより、各瞬間の非定常揚力 $\tilde{L}(t)$ を求める。こ

で、 $\omega_n(t)$ ：各点における渦度である。以上の方法に基づいて、前節で対象とした各々の振動状態での非定常揚力について考察することにする。

$$\tilde{\Gamma}_w(t) = \int_{-1.5B}^{1.5B} \int_0^{x_{v1} \cdot D} \omega_n(t) dx dy \quad (9)$$

5.2 推定の結果

気流 U 中での自励的渦励振時の非定常揚力について、(8)式によって求めた時刻歴を図14に、標準偏差で規格化したパワースペクトルを図15にそれぞれ示す。時刻歴は振幅の大きさが変化する非定常な性状を示し、また揚力変化の卓越周波数は角柱の固有振動数 n_0 と等しくなっていることがわかる。

図14 非定常揚力の時刻歴 (気流 U , $U^*=10.6$)

図15 非定常揚力と風直角方向変位のパワースペクトル (気流 U , $U^*=10.6$)

次に石崎・谷池¹³⁾の検討に倣って、非定常揚力と三次元角柱の風直角方向変位との位相差 β を求めた。位相差の算定結果を図16に示す。気流 U 中では、 $U^*=7.3$ で負値 (位相遅れ) となっているが無次元風速の増加にともなって位相差は単調に増加し、自励的渦励振時には45～90度の位相差となっている。図中には石崎・谷池¹³⁾の強制振動法 (正方形断面角柱、アスペクト比4.5) による変位と非定常空気力との位相差も併記しているが、本研究により得られた位相差の特性は強制振動法での結果と概ね整合した結果となっている。また乱流については、気流 T0 のほかにもラフネスブロックの高さが異なる3通りの気流 (T1～T3) を作成して高風速範囲での測定を行い、各々位相差を求めた。 U^* が12を超える範囲では90～180度周辺に分布しており、西村・谷池¹⁴⁾による既往の乱流中での結果と概ね同様の傾向を示している。

以上の結果から判断して、図13に示した揚力発生機構の前提と

なる仮定は妥当なものであり、限定された領域内であるが、PIVシステムを用いて空力振動時の三次元角柱周りの流れ場の流速を測定することによって直接非定常空気に相当する揚力特性を定性的に評価することが可能であると考えられる。

図 16 非定常揚力と風直角方向変位との位相差

6. まとめ

本研究では、代表的な面計測手法である PIV システムを用いて振動する三次元角柱後流域での流速場を測定し、角柱と流体との間の相互作用現象に関する基礎的な傾向を捉えた。主な知見を以下に掲げる。

- ・ 後流域の平均流速場を特徴付けるパラメータとして規準化後方よどみ点距離に着目し、その風速に対する変化を考察した。気流 U 中では共振風速付近で当該距離が急激に小さくなるという非線形な傾向が認められ、そのような傾向を示す風速範囲は、角柱が自励的渦励振を発現する風速範囲と概ね一致する。一方、気流 T0 中での規準化後方よどみ点距離は、風速の変化によって大きく距離が変化することなくほぼ一定の値で推移し、気流 U 中の場合と異なる傾向を示した。
- ・ PIV システムで測定した変動流速場を POD 解析し、各固有モード形状について考察した。 u , v 成分それぞれの位相の分布からカルマン渦が交互に放出される構造を把握した。また低次のモードの累積寄与率については、気流 U 中では u 成分より v 成分のほうが大きい。
- ・ 流速ベクトルを低次のモードにより再構成することによって大局的な流速場の構造抽出を試み、循環が角柱周りに形成されて発達する過程を抽出した。さらに、循環が風下側へ放出される過程がこれまで可視化実験によって指摘されている渦の放出現象と対応する構造であることを示した。
- ・ 後流域において循環が放出されるとみなせる平均的な位置を v 成分の 1 次モード形状から特定した上で、クッタ・ジュコフスキーの定理の考え方を援用して定性的な揚力特性の推定を行った。自励的渦励振時の非定常揚力の卓越周波数が角柱の固有振動数と一致すること、振動変位との位相差の特性が既往の強制振動実験結果と同様であるという結果から、ここで仮定した揚力発生機構の考え方は妥当であると考え

られる。

謝辞

PIV 実験の実施に当たり、西華産業(株) 中村健一氏及び飯島弘章氏には機器設定等の御協力及び測定方法のご指導を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 溝田武人, 岡島厚: 角柱まわりの時間平均流れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 312 号, pp.39-47, 1981.8
- 2) 溝田武人, 岡島厚: 角柱まわりの非定常流れに関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 312 号, pp.49-57, 1981.8
- 3) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 丸善, 2004
- 4) 可視化情報学会編: PIV ハンドブック, 森北出版, 2002
- 5) O.M.Griffin, S.E.Ramberg: The vortex-street wakes of vibrating cylinders, *J. Fluid Mech.*, vol.66, part 3, pp.553-576, 1974
- 6) 吉川清峰, 奥田泰雄, 伊藤真二, 大橋征幹, 佐々木康人: PIV を用いた流れの可視化と風圧の同時測定による細長い三次元柱周りの流れと空気力に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 573 号, pp.53-60, 2003.11
- 7) J.H.Gerrard: The mechanics of the formation region of vortices behind bluff bodies, *J. Fluid Mech.*, vol.25, part 2, pp.401-413, 1966
- 8) 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ゝめ, 日本風工学会誌, 第 65 号, pp.33-41, 1995.10
- 9) 菊池浩利, 田村幸雄, 上田宏, 日比一喜: 高層建物に作用する変動風圧の特性 (POD 解析), 日本建築学会大会学術講演梗概集 (北海道) B-1, pp.249-250, 1995.8
- 10) 溝田武人, 岡島厚: 振動する角柱まわりの流線と非定常流体力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 327 号, pp.49-60, 1982.11
- 11) 丸山勇祐: 高層建物周りの流れ場と空力不安定振動に関する研究, 京都大学学位請求論文, 2000
- 12) 大熊武司, 神田順, 田村幸雄: 建築物の耐風設計, 鹿島出版会, 1996
- 13) 石崎澁雄, 谷池義人: 風向直角方向に振動する角柱の空力不安定性について, 日本建築学会論文報告集, 第 306 号, pp.11-19, 1981.8
- 14) 西村宏昭, 谷池義人: 境界層流中における高層建物の空力不安定振動—正方形断面をもつ高層建物の場合—, 日本建築学会構造系論文集, 第 456 号, pp.31-37, 1994.2

(2006年6月8日原稿受理, 2006年10月13日採用決定)