

# 一様流中における風直交方向に振動する二次元角柱の空力特性に関する研究

## NHAT を用いた応答変位・表面圧力・空気力の同時測定

日大生産工（院） 磯野由佳 東工大総理工 岡田 玲  
日大生産工 神田 亮 日大生産工 丸田榮藏

### 1. はじめに

神田らにより風洞実験と数値解析を組み合わせたリアルタイムオンライン実験であるハイブリッド空力振動法 (Hybrid Aerodynamic vibration Technique: 以下 HAT と記す) の開発<sup>1)</sup>が行なわれてきた。外力測定機構にロードセルを用いるこの手法に改良を加え、多点同時風圧計測システムにより模型表面の圧力から外力を評価する手法がニューハイブリッド空力振動法 (NHAT) である<sup>2)</sup>。NHAT は空力振動時の物体と周辺気流の相互作用を含む風圧力および空気力を捉えることが可能であり、振幅や風速によって複雑に変化する構造物の減衰・剛性性能を評価できる、空力不安定振動の発生機構に関する知見を得る可能性を有するなどの利点がある。

本研究では複雑な空力現象を分析するにあたって、流入気流・振動モードなど条件を可能な限り単純化したモデル (一様流中に弾性支持され並進モードで振動する二次元角柱) を対象とした実験システムを開発し、精度検証結果を示すとともに断面が正方形であるモデルに

作用する空気力特性を明らかにすることを目的としている。

これまでに実験システムの開発および各機構の精度検証結果<sup>3)</sup>、正方形角柱を対象とした空力応答特性の再現性<sup>4)</sup>について示した。本論文では NHAT により強制加振および弾性支持された模型の挙動を再現し、その際の応答変位およびモデルに作用する表面圧力、空気力の特性を示す。

### 2. 実験概要

風洞実験は回流式開放型風洞装置 (ゲッチンゲン型風洞) を用いて行なった。実験装置 (図 1) は実験模型周辺の気流が乱されないよう整流用の端板によって覆われている。実験模型は一辺が 150[mm] の正方形断面を有する二次元角柱であり、風圧センサーは各辺 8 点ずつ一層につき 32 点が 2 層設置されている。本システムは X 軸 (風方向) Z 軸 (風直交方向)  $\theta$  軸 (回転方向) の 3 自由度を有するが、本論文では Z 軸のみを対象として実験を行なう。

空力振動実験では自由振動法による既往の実験結果との対応を図るため、前風速での最大振幅を初期変位として与えている。模型の固有振動数 ( $f_0$ ) を 5.00[Hz] とする。

### 3. 強制振動時に作用する空気力特性

本システムで測定される振動時空気力の精度検証として強制振動実験を実施し、模型に作用する非定常揚力係数の加振振動数成分について既往の研究との比較を行なった。評価にあたり模型の変位を  $X(t) = A \cos(2\pi f_m t)$  とすると非定常揚力係数の絶対値  $|C_L|$ 、位相差  $\phi_L$ 、実部

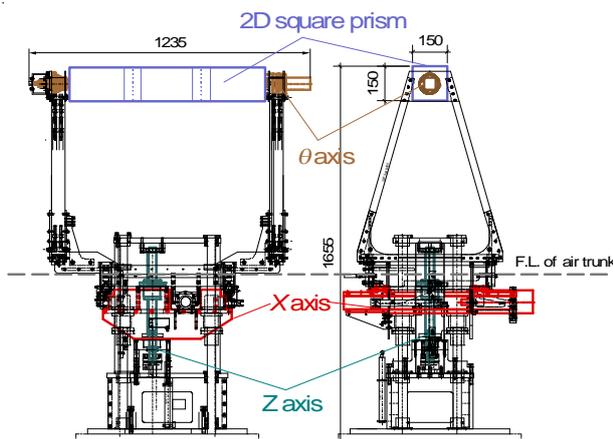


図 1 加振装置 (立断面)

Aerodynamic Characteristics of 2D Oscillating-Square Cylinder in Uniform Flow  
-Simultaneous Measurement of Response Displacement, Surface Pressure  
and Aerodynamic Force Using NHAT -

Yuka ISONO, Rei OKADA, Makoto KANDA and Eizo MARUTA

$C_{Lr}$ 、虚部  $C_{Li}$  は次式によって示される。

$$C_{Lr} = \frac{1}{T} \int_{-T}^T C_L(t) \cos 2\pi f_m t dt \quad (1)$$

$$C_{Li} = \frac{1}{T} \int_{-T}^T C_L(t) \sin 2\pi f_m t dt \quad (2)$$

$$|C_L| = \sqrt{C_{Lr}^2 + C_{Li}^2} \quad (3)$$

$$\phi_L = \tan^{-1} \left( \frac{C_{Li}}{C_{Lr}} \right) \quad (4)$$

ここで  $A$  : 加振振幅、 $f_m$  : 加振振動数、 $C_L(t)$  : 非常揚力係数である。図 2 に  $f_m = 5.00$  [Hz]、 $A/D = 0.20$  ( $D$  : 模型の見付け幅) の実験結果を既往の研究<sup>5)6)</sup>との対応で示す(但し溝田の結果は  $A/D = 0.15$ )。良い対応を示していることが分かる。

#### 4. 空力振動時に作用する空気力・表面圧力特性

ここでは弾性支持された角柱に作用する空気力および表面圧力の特性について質量  $m = 3.01$  [kg]、減衰定数  $h = 1.00$  [%]、スクルートン数  $Sc = 18.7$  を中心に考察する。

##### 4.1 空気力の風速に対する変化

図 3 に応答変位の変動成分と卓越振動数  $f_{max}$ 、図 4 に揚力の変動成分を示す。各風速における揚力係数の応答卓越振動数成分のうち絶対値  $|C_{Lr}|$  を図 5 (a)、揚力と変位の位相差  $\phi_{Lr}$  を (b)、実部  $C_{Lr}$  を (c)、虚部  $C_{Li}$  を (d) に示す。

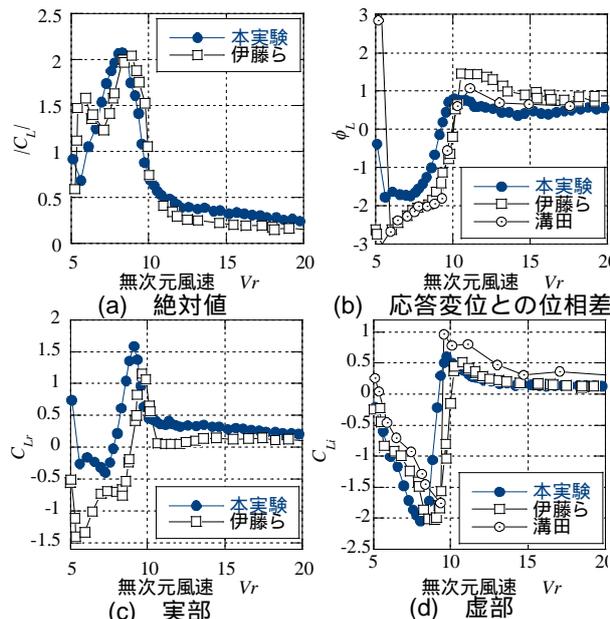


図 2 揚力加振振動数成分の風速に対する変化

渦励振領域において変動揚力係数が小さくなる傾向が示されており、この点は他の質量・減衰定数のモデルにおいても確認された。しかし、各風速における応答卓越振動数成分で評価すると、絶対値は共振風速 ( $V_r = 8.0$ ) においてピーク値を示している。位相差は渦励振より低い風速ではほぼ 0 度付近を保つ。それに対し渦励振領域では風速の上昇とともに線形に増大し、渦励振よりも高い風速域では 30 度近辺を保っている。また渦励振よりも低風速側の領域において揚力係数の応答卓越振動数成分の絶対値

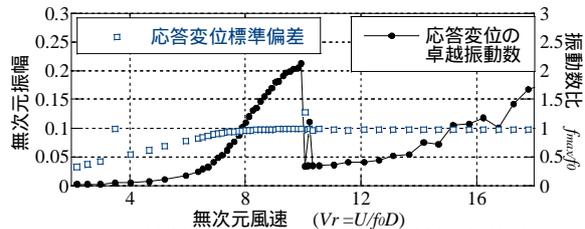


図 3 応答特性(無次元振幅と卓越振動数比)

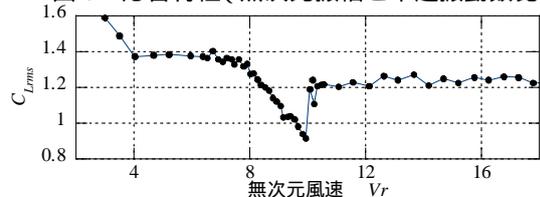
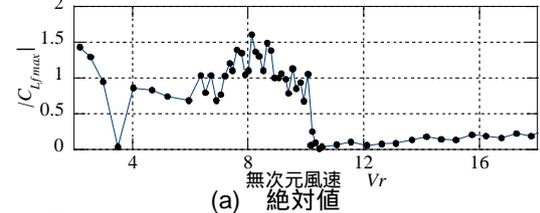
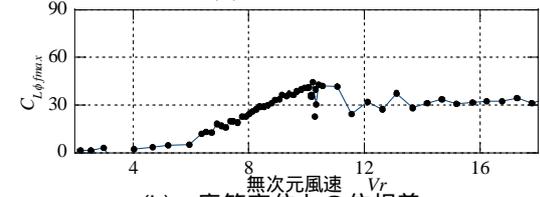


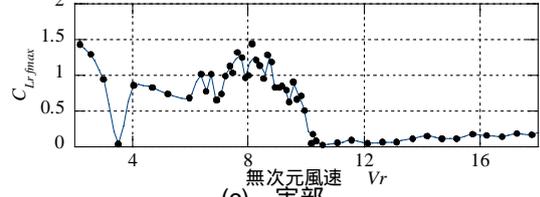
図 4 変動揚力係数の風速に対する変化



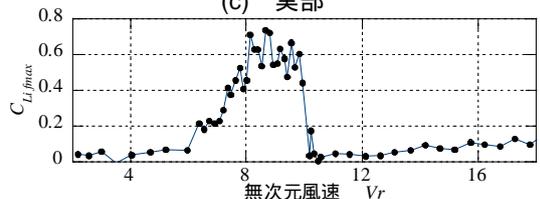
(a) 絶対値



(b) 応答変位との位相差



(c) 実部



(d) 虚部

図 5 揚力係数の応答卓越振動数成分

が大きくなっており、その際の応答卓越成分は渦発生周波数と一致している。一方、虚部（応答変位に対する揚力の速度同相成分）は応答変位の風速に対する変化と定性的に一致しており、この成分が振動系の応答振幅に大きな影響を与えていることが分かる。

#### 4.2 圧力分布

図7に静止時、空力振動時の風圧力係数の平均値および標準偏差の分布を示す（測定点の配置については図6を参照）。静止時は共振風速 ( $V_r=8.0$ )に相当するレイノルズ数  $Re = 6.2 \times 10^4$ 、空力振動では渦励振が発生している  $V_r=10.0$  およびランダム振動している  $V_r=14.0$  を示している。

平均風圧分布を見ると上流面ではいずれの状態においても分布がほぼ重なるのに対し、下流面・側面では静止時に比べ渦励振時の負圧が小さくなる。ランダム振動時の側面および下流面の分布は静止時とほぼ一致した。

一方、変動風圧分布では上流面で渦励振時に静止時より大きい値をとっている。また渦励振時側面では上流側において若干静止時より大きい値を示し、下流側から2番目および3番目の圧力点において値の低下が見られる。この傾向は質量・減衰定数を変化させた場合においても同様であった。ランダム振動時には上流面のよどみ点付近における値が静止時に比べ大きくなっており、側面においては静止時よりも若干低い値となっている。

#### 4.3 風圧力の相関性

ここでは図6に示す圧力測定点のうち二点間の相関性について示す。前節と同様の風速において静止時・振動時の分析を行い、相関性の評価にはタイムラグゼロの相互相関係数を用いることとする。

図8に側面の向かい合う測定点間における相互相関係数の分布を示す。角柱後流に発生する交番渦の影響を考えると、その影響により両側面に作用する風圧力が逆位相になることが容易に想像できる。静止時およびランダム振動時には相互相関係数が-1に近い値を示しており逆位相となっていた（図9(a)参照）。一方、渦

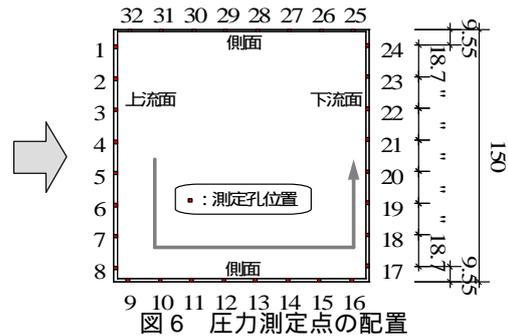
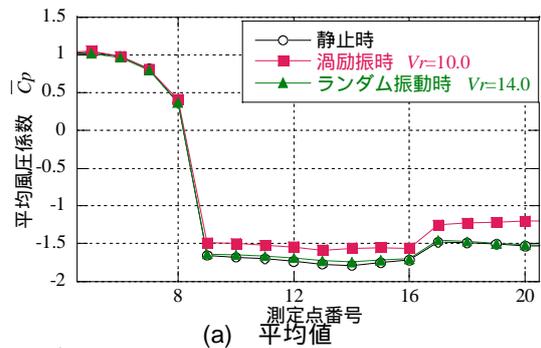
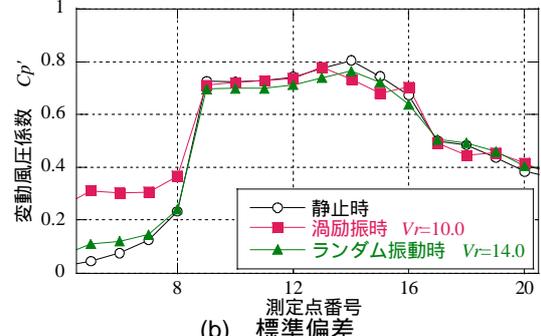


図6 圧力測定点の配置



(a) 平均値



(b) 標準偏差

図7 風圧力係数分布

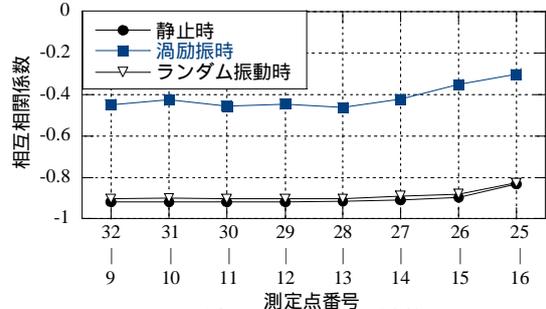
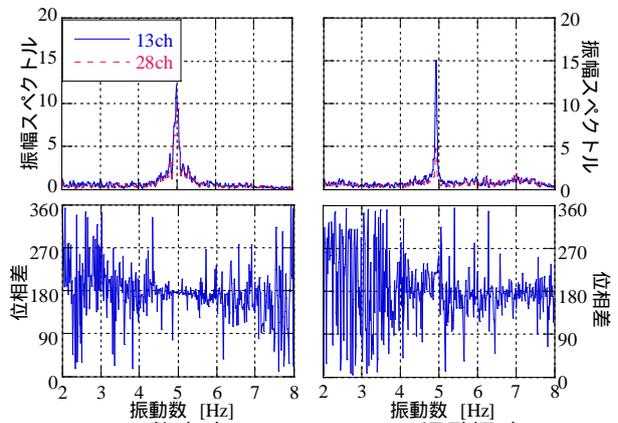


図8 対面同士の間相関係数



(a) 静止時 (b) 渦励振時  
図10 向かい合う圧力点の周波数性状

励振時には相関係数が大きくなっており向かい合う圧力点が静止時とは異なる性状を示している。この現象について、さらに測定点 13 および 28 における圧力のフーリエ振幅スペクトルと位相差を検討した(図 9 (b))。2 点の振幅スペクトルをみると卓越振動数はほぼ一致するのに対し両者の位相差が 200 度付近となっており、相関係数の低下は振動数の異なる波形が混在しているためではなく位相にずれが生じたためであることがわかる。

図 9 に側面測定点間の相互相関係数分布を示す。(a)に既往の研究<sup>7)</sup>、(b)に本実験結果での静止時の分布を示す。ほぼ同位置の測定点における値を比較すると良い対応を示している。次に空力振動時について(c)に渦励振 ( $V_r=10.0$ ) を、(d)にランダム振動時 ( $V_r=14.0$ ) の相互相関係数分布を示す。ランダム振動時には隣り合う 2 点間の相関係数は若干低い値を示すものの、静止時と良く似た分布となっている。また、静止時・ランダム振動時に最下流測定点で相関係数が低い値を示しており、この傾向は向かい合う測定点同士の相関にも見られる。これは後流渦の三次元性など含め、理由が挙げられるもののさらなる検討が必要である。一方、渦励振時には全体的に相関係数が低くなっており、向かい合う測定点同士の相関にも現れた傾向である。

## 5. まとめ

二次元角柱を対象とした NHAT を用いて空力振動実験を行い、振動時の正方形角柱に作用す

る空気力および表面圧力の性状について以下の知見を得た。

- ・ 渦励振時に、応答の増大に対して変動揚力係数は減少するが、応答卓越振動数成分の揚力係数虚部は応答変位の風速に対する変化と定性的に一致する。
- ・ 渦励振時に作用する風圧力は静止時・ランダム振動時とは異なる性状を示しており、今後の詳細な検討が必要である。

## 参考文献

- 1) M. Kanda, A. Kawaguchi, T. Koizumi, and E. Maruta: A new approach for simulating aerodynamic vibrations of structures in a wind tunnel – development of an experimental system by means of hybrid vibration technique, *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 91, pp. 1419-1440, 2003
- 2) 松山, 神田, 平田, 名波, 丸田; 多点同時風圧計を用いた 3 次元ニューハイブリッド空力振動実験システムの開発, *日本建築学会技術報告集*, 22, (2005)
- 3) 磯野, 岡田, 松山, 神田, 丸田; 一様流中におかれた二次元形状を有する振動柱と周辺気流に相互作用に関する研究, *日本大学生産工学部学術講演会建築部会講演概要*, 37, pp.37-40, (2004)
- 4) 磯野, 岡田, 松山, 神田, 丸田; 二次元流中におかれた振動角柱と周辺気流の相互作用に関する研究 ニューハイブリッド空力振動法を用いた風洞実験, *日本大学生産工学部学術講演会建築部会講演概要*, 38, pp.37-40, (2005)
- 5) 伊藤, 宮田, 藤沢; 振動する正方形角柱に作用する空気力の特性, *土木学会第 30 回年次学術講演会概要集*, I-208, 1975-10
- 6) 溝田; 矩形断面柱の非定常揚力と後流の速度変動について, *構造物のための耐風性に関するシンポジウム*, 第 3 回(1974)
- 7) Vickerly, B. J.: Fluctuating lift and drag on a long cylinder of square cross-section in a smooth and in a turbulent stream, *Journal of Fluid and Mechanics*, 25, pp. 481-494, 196

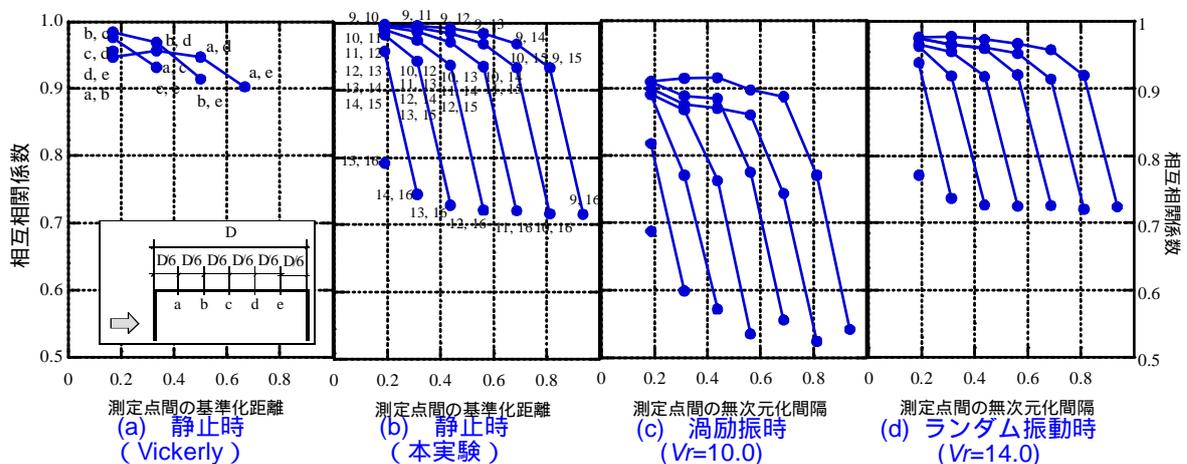


図 9 側面流れ方向圧力点の相関係数