正方形角柱の振動時の応答変位, 圧力, 空気力の同時測定結果について ハイブリッド技術による二次元角柱の一樣流中における空力特性に関する研究 その1

SIMULTANEOUS-MEASURING DISPLACEMENT, PRESSURE, AND AERODYNAMIC FORCE OF OSCILLATING SQUARE CYLINDER

(Aerodynamic characteristics of 2D cylinder in uniform flow using hybrid technique Part 1)

岡田 玲^{*1}, 磯野由佳^{*2}, 神田 亮^{*3}, 丸田 榮藏^{*4}

*Rei OKADA, Yuka ISONO, Makoto KANDA
and Eizo MARUTA*

In our former paper, the concept and accuracy verifications of the experimental system using the hybrid technique are presented to verify the interactions between the bluff body and the surrounding flow (New Hybrid Aerodynamic vibration Technique; NHAT).

In this paper, first of all, the pressure-estimation performances of NHAT are examined as the final step of accuracy verifications. In the next place, simultaneous-measuring results among displacement, pressure, and aerodynamic force of square cylinder in uniform flow are shown in case of one parameter when the vortex-induced oscillations occur dominantly. The results of parametric studies concerning with the aerodynamic characteristics will report in the next paper.

Keywords: *Vortex-induced oscillations, New Hybrid Aerodynamic vibration Technique, Real time online simulation, Oscillating square cylinder, Uniform flow, Simultaneous measurement*

渦励振、ニューハイブリッド空力振動法、リアルタイムオンラインシミュレーション、振動正方形角柱、一樣流、同時計測

1.はじめに

従来の風洞実験技術に於いて、静止時の表面圧力および作用空気力を測定する技術、空力振動を測定する技術を用い、多くの研究実績が蓄積されてきた¹⁾。空力振動時に物体に作用する表面圧力と作用空気力を応答振幅と同時測定する試みも幾つかあるが²⁾、質量、減衰、剛性などを幅広い範囲で設定したパラメトリックな実験を行うことは容易では無かった。

これに対して神田ら³⁾は風洞実験とコンピュータを組み合わせたハイブリッド技術（以下、ハイブリッド空力振動法；HAT）を開発した。高層建物を対象とし、三次元角柱基部に設置したロードセルにより測定する風外力を外力として振動方程式を解き、得られた応答変位に合わせ模型を強制加振することにより振動時の応答変位と作用空気力の同時評価を可能とする技術である。さらに外力評価を模型表面に設置した圧力センサーによって行うハイブリッド技術（以下、ニューハイブリッド空力振動法；NHAT）を開発し⁴⁾、空力振動時の表面圧力分布の測定も可能となった。

神田らは高層建物を想定し、3D-NHAT（耐震構造、制振構造を対象とした実験装置）⁵⁾、SR-NHAT（免震構造を対象とした実験装置）⁶⁾を主として研究を進めてきた。しかし上記の場合、空力不安定現象

による複雑さに、実験モデルに起因する複雑さ（1.流入気流が境界層乱流であること、2.モデルに有限端があること、3.ロッキングモードで振動すること）を加えた状態で実験を行うことになる。これに対応しシステム精度検証の観点から、単純化した実験システムとして開発されたのが本研究で扱う2次元ハイブリッド空力振動法（2D-NHAT）装置である。

既に2D-NHAT装置により種々の条件下におけるNHATの精度検証を、既往の研究との整合性の観点から行ってきた⁷⁾。3D-NHATおよびSR-NHATを用いた実験結果により明らかにされる知見に対し、本研究で示す知見は精度検証面からの礎となる。

一方、コンピュータ技術の飛躍的な発展に支えられ種々のモデルを用いた数値流体解析により二次元角柱と周辺気流の相互作用に関する多くの研究成果が報告されているが、それらの研究に対しハイブリッド技術（2D-NHAT）を用いたアプローチから基礎データの提供を行うことも視野に入れている。

筆者らが既往の論文⁷⁾で示した精度検証に加えて本論文では二次元角柱の振動時の圧力評価に関する精度を検証する。そのうえで空力不安定振動が顕著に生じたパラメータのモデルを対象として、応答変位、表面圧力、作用空気力の同時測定結果を示す。

^{*1} 東京工業大学総合理工学研究科都市地震工学センター
COE研究員・博士(工学)

^{*2} 日本大学生産工学研究科 大学院生

^{*3} 日本大学生産工学部建築工学科 准教授・博士(工学)

^{*4} 日本大学生産工学部建築工学科 教授・工博

COE Post Doctoral Research Fellow, CUEE, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

Graduate Student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Collage of Industrial Technology, Nihon Univ.,

Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Collage of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Collage of Industrial Technology, Nihon Univ., Dr. Eng.

パラメトリックスタディーによって得られた知見については(その
2)以降で考察する。

2.二次元(2D)-NHATの概要

2.1 非定常空気力の評価方法

2D-NHATのシステムのフローチャートを図1に示す。NHATは実験的に応答変位や風外力を測定する実験機構と、実験制御や構造物の風応答計算を行う制御・計算機構から構成される。

図1 2D-NHAT 実験システムのフローチャート

気流の中に置かれた振動物体と周辺気流の相互作用を評価するとき、振動系の減衰、剛性、慣性は複雑な挙動を示す。構造物の一般的な減衰、密度比の範囲に於いて物体に影響を与えるのは主に減衰性能であり、特にこの相互作用により生じる空力減衰は応答レベルや風速に対し強い非線形性を呈する。本システムでは現象を短い時間刻みに分割し、その間での線形性を仮定して非線形現象を評価するのがコンセプトであり、物体の固有周期0.2秒に対して0.004秒ごとに模型に作用する風圧力を測定し、振動方程式の外力を評価する。これに基づき次ステップの応答変位を算出し、変位差分に相当する速度信号を加力機構に送信し物体を強制加振する。以上のプロセスをリアルタイムオンラインシミュレーションで実現している。

2.2 風洞実験概要

実験は日本大学生産工学部所有の回流式風洞装置（ゲッチングン型風洞）で行った。噴出し口の寸法は高さ2000mm、幅2000mmである。ハイブリッド装置は開放型の測定部に設置され、装置は実験モデル周辺の気流を乱さないように整流端板によって覆われている。なお本実験システムでの一様流（乱れ強さ0.5%以下）の性状および装置概要については文献7を参照されたい。

一様流中におかれた実験モデルは、図2に示す一辺が150mmの正方形断面二次元角柱である。風圧測定点は、各辺につき8点の合計32点を一層として、二層で64点設置しており（図2）全点同時計測が可能である。64chの微差圧センサー（MOUSER; 683-5INCHD2MVMINI）が模型内部に内蔵されている（写真1）。

計測した風圧力(P)をパーソナルコンピュータに転送してコンピュータ内で風力(F)に換算し、制御プログラム内の振動方程式の外力として代入し、応答変位(x_c)を算出する。装置に設置された変位計（緑測器; LP200F-C）により測定された測定変位(x_m)とx_cを各ステップで比較して誤差がある場合には補正制御が行なわれる⁵⁾。誤差補正後の速度信号(ẋ)をサーボモーターに伝達し模型を加振して目標変位に

図2 振動物体の立面図

写真1 表面圧力測定部（圧力センサーを模型に内蔵）

到達させ、次ステップの風外力の計測を行う。数値積分法としてα-OS法⁸⁾を採用している。計算上のパラメータα、β、γの値については文献9を参照されたい。本研究では風直交方向の振動を対象とし、外力は両側面の圧力から算出した揚力を用いる。

3.強制振動時および空力振動時のシステムの精度検証

文献7では下記の点に関して2D-NHATの精度検証を行った。

- ・ サーボモーターの入力信号への追従性（原点維持、正弦波、ランダム波）
- ・ 風外力との相互作用を加味しないように2D-NHATを設定し、種々の外乱に対してシミュレーションを行って得られた応答変位の理論値との対応（初期振幅を与えた自由振動曲線、ホワイトノイズ入力とその応答の関係から求めた伝達関数）
- ・ 静止角柱の平均・変動風圧力係数分布、空力係数、およびストローハル数に関して既往の実験結果との対応

本節では振動時の圧力評価に関する精度検証として、正弦波加振による強制振動時の空力特性、および空力振動時の応答変位の変動成分について調べる。

3.1 正弦波加振による強制振動実験

3.1.1 強制振動時の振動角柱の揚力の風速依存性について

強制振動実験により模型に作用する揚力の加振振動数成分につき既往の実験結果と比較する。模型の変位を $X(t) = A \cos(2\pi f_n t)$ とすると、非定常揚力の実部(C_{Lfn})、虚部(C_{Lfn})、絶対値($|C_{Lfn}|$)、位相差(ϕ_{CLfn})はそれぞれ(1)~(4)のように表される。

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

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

$$|C_{Lfn}| = \sqrt{C_{Lfn}^2 + C_{Lfn}^2} \quad (3)$$

$$\phi_{Lfn} = \tan^{-1} \left(\frac{C_{Lfn}}{C_{Lfn}} \right) \quad (4)$$

(A : 加振振幅、 f_n : 加振振動数、 $C_{Lfn}(t)$: 非定常揚力)

図3に $f_n=5.00$ [Hz]、 $A/D=0.20$ (D : 模型の見付け幅) の実験結果を既往の実験結果^{10,11,12}と共に示す(溝田¹¹)の結果は虚部と位相差、Bearman¹²)は位相差)。横軸は風速 U を f_n と D で割った無次元風速 (V_r) である。本研究結果は既往の研究結果と定性的に良い対応を示している。

図3 非定常揚力の風速依存性

3.1.2 強制振動時の抗力の風速依存性について

次に抗力について既往の実験結果との対応を示す。図4に強制振動時の平均抗力係数の風速依存性を示す。図は $A/D=0.10$ で加振したときの結果である。本研究の実験結果は溝田らの実験結果¹³)と良好な対応を示している。なお本研究では $V_r=4$ が $Re=30,000$ に相当する。

図4 平均抗力係数の風速変化 (強制振動時)

3.2 空力振動

本節では空力振動時の応答特性について、変動成分の風速依存性、生じたロックインやヒステシスといった非線形現象について示す。

3.2.1 空力振動時の既往の研究との対応について

図5に Sc 数¹⁴)=30.0 のときの応答変位の変動成分の風速依存性を既往の実験結果^{15,16,17})とともに示す。縦軸は $\sqrt{2} \times (y_{rms}/D)$ で表す無次元振幅である (ここで y_{rms} は標準偏差)。 Sc 数は(5)式で表され、構造物の空力特性を整理する際に用いられる。

$$Sc = \frac{2m}{\rho BDH} 2\pi h \quad (5)$$

(m : 質量、 h : 減衰定数、 ρ : 空気密度、 BDH : 模型の体積、 $m/\rho BDH$: 質量比) なお、既往の実験結果のうち、大熊ら¹⁵)による結果のみ一様乱流中での応答特性である。本研究を含めた各実験結果の応答特性は定量的に若干の差異があるが、共通して、静止角柱の渦発生周波数が固有振動数に一致する共振風速 $V_r=8.0$ 付近より応答の増大が見られる点、その後いったん応答が収まり、再び渦励振時に比べ緩やかな勾配で風速の増大に伴って応答が増加する点など、正方形角柱の空力特性を定性的に捉えている。

図5 既往の実験結果との対応 ($Sc=30.0$)

3.2.2 減衰定数を変化させたときの応答特性の風速依存性について

図6に質量比を一定にし、減衰定数を変化させたときの応答の変動成分の風速依存性を示す。

図6 減衰を変化させたモデルの応答の変動成分の風速依存性

全てのパラメータに於いて共振風速 ($V_r=8.0$) より少し低い風速から応答が増大し始め、その後急激に応答が増大する。さらに風速が増加すると Scruton の実験結果¹⁴)で示されているように、 $Sc=16.0$ 付近を境に応答特性が二種類に分かれる。 $Sc \geq 16.0$ の実験では Sc 数が大きいほど低い風速で渦励振が終わり応答が低下する。 $Sc < 16.0$ の実験では共振風速を過ぎても応答の低下は見られない。なお、図6中に於いて矢印(↑)で示している風速では実験システム上の制約から諸物理量を測定できなかったが、それ以上の風速域に於いて応答の低下が無いことを確認して上記の Scruton により示された特性を捉え得たと判断した。

3.2.3 空力振動時に観測される非線形現象について

既往の実験¹¹)によって、非定常空気力の影響として示されている現

象が本研究でも観測された。

最初に渦発生周波数が共振風速付近の風速域で固有振動数に一致するロックインについて示す。図7に $Sc=18.7$ の空力振動時の渦発生周波数(揚力の卓越周波数)の風速依存性を静止時のものと併せて示す。なお図中では、静止時の渦発生周波数について同一の風速[m/s]における対応を見る都合上、静止時の風速も空力振動時と同様の処理をして無次元風速で表している。

図7 渦発生周波数の比較(静止角柱と空力振動角柱)

縦軸は f_v で基準化している。静止角柱の渦発生周波数が風速に対して線形に大きくなっていくのに対し、空力振動時は共振風速よりも少し低い風速から固有振動数に漸近している。

次に渦励振領域の高風速側で、同一風速に於いて複数の振動状態が存在することを示す。これは二次元円柱¹⁸⁾や三次元正方形角柱¹⁹⁾の空力特性として既往の実験結果に示されている。また二次元正方形角柱を対象とした数値流体解析²⁰⁾ではさらに複数のリミットサイクルの存在が示唆されているが、本実験では初期変位を種々に変えて実験を行ったが複数のリミットサイクルは確認されなかった。応答変位は図8に示す2つの振動性状(A、B)が継続するか、時間を追って両振動性状間を移り変わる挙動を示すかのいずれかであった。

図8 渦励振領域の高風速側に現れる二つの振動状態(ヒステシス)

このヒステシスが生じている風速域を代表して $U/\bar{u}=9.0$ 付近に於ける両方の振動モード(図8中A、B点)の側面中央部の圧力、揚力、応答変位の周波数性状と応答変位の時刻歴波形(図9[a]: A点、b: B点))を示し両者の差異を考察する。

図9(a)に示すようにA点では表面圧力、空気力の周波数性状が模型の固有振動数成分で卓越しており、ロックインが生じている。応答変位の周波数性状も渦発生振動数においてピークは見られない。応答変位の時刻歴性状をみると振幅レベルは大体安定している。この風速

図9 表面圧力・揚力・変位の周波数性状と変位の時刻歴波形
(f_n : 固有振動数成分、 f_v : 渦発生振動数成分)

域でのピークファクターは1.5程度であり、ほぼ正弦波に近い応答振動性状を示していることがわかる。

一方、図9(b)に示すようにB点では固有振動数成分が卓越しているが表面圧力と揚力に於いて渦発生振動数成分も卓越しておりロックインは生じていない。外力で固有振動数成分が卓越しているため、応答変位の周波数性状を見ると両成分が混在している。応答変位の時刻歴性状をみると、応答が増大減少を繰り返しており、固有振動数および渦発生振動数の二つの振動数成分を含みながら振幅が不安定な状態で振動していると考えられる。以上、3節では空力振動時の表面圧力、揚力、および応答変位の周波数性状から同一風速で2つの振動性状が発生するヒステシスに関し、その特性を示した。

4. 空力振動時の空気力、圧力、応答変位の同時測定

(特定パラメータ; $Sc=18.7$, $h=1.00$ における分析)

本節では風圧力分布・作用空気力・応答変位の同時測定結果を示す。渦励振時に於いて他の空力振動時および静止時とは異なる特性が現れたため、渦励振振動時の表面圧力、作用空気力の特性についてランダム振動時、静止時との対応をもとに明らかにする。実験モデルとし

て、 $Sc \geq 16.0$ で最も渦励振が顕著に生じた $Sc=18.7$ のモデルを用い比較検討を行う。

4.1 振動角柱表面に作用する風圧力

4.1.1.1 平均・変動風圧力係数分布性状

図 10 に静止角柱、空力振動角柱に作用する風圧力と室内圧の差圧を速度圧 ($= (1/2) \rho \cdot U^2$; ρ : 空気密度、 U : 代表風速) で除した圧力係数の平均成分分布(図 10a)、変動成分分布(図 10b)、およびセンサー位置(図 10c)を示す。図中では渦励振時 ($Vr=10.0$)、ランダム振動時 ($Vr=13.9$)、静止時の圧力係数分布を重ねて示している。

図 10 風圧力係数分布

風上面は、平均成分が全ての場合ほぼ同じ値を示すのに対し、変動成分は渦励振振動時のみ大きく差はその中央に於いて顕著になる。これは渦が流れ場に対して支配的になるため淀み点が移動することにより変動成分が上昇したと考える。側面は、平均成分は渦励振時のみ全体的に負圧は小さいが分布形状は変わらない。変動成分は静止時に於いて他の場合と値がずれるが、これは空力振動時に比べて相互作用が弱いことにより場が乱れるためと考える。背面は、平均成分が渦励振時に負圧が小さくなる。一方、変動成分は側面と同様の傾向を示す。

4.1.1.2 平均・変動背圧係数の風速依存性

図 11 に静止時と空力振動時の背圧係数の風速依存性を示す。静止時の背圧係数に風速依存性は認められない。一方、渦励振領域では負圧が低下する。これは図 10a の平均圧力分布で渦励振時に背面の負圧が減少することに対応し、変動背圧係数が渦励振領域で高い点に配慮しても、渦の巻き込みが強くその影響を受けていると考える。

図 11 背圧係数の風速変化

4.1.2 圧力点同士の相互相関性

図 10c に示す圧力測定点のうち任意の二点間の相関性について述べる。タイムラグゼロの相互相関係数によって空間相関性を評価する。相互相関係数が 1.0 に近い場合、ほぼ同一の波形であることを示しており、一方 -1.0 に近い場合はほぼ逆位相の波形となる。

4.1.2.1 流れ方向の相互相関性

図 12a に本実験の、図 12b に既往の研究²¹⁾の静止角柱に於ける相互相関係数分布を示す。ほぼ同位置での値を比較すると本実験での値が若干大きい、良好な対応を示している。図 12c、d に空力振動時 (c ランダム振動、d 渦励振) の相互相関を示す。渦励振時の相関は振幅の標準偏差がほぼ等しいランダム振動時や、静止時の値を下回る。

図 12 流れ方向圧力測定点間の相互相関係数分布

4.1.2.2 両側面同士の相互相関性および側面中央点圧力の周波数分析

図 12 に示したように、ランダム振動時及び静止時と異なる渦励振時の圧力性状は対面同士の相互相関係数分布にも現れている。図 13 に示すように渦励振時のみ -0.7 付近を指しており、交番渦に代表される逆位相とは異なる性状が現れる。両側面中央付近の圧力の周波数特性(図 14)を示す。図中上段のスペクトルに示される卓越振動数成分での位相差に着目すると、静止角柱のときは 180 度で逆位相になるのに対し、渦励振時にはロックインにより圧力の卓越振動数が低周波側にシフトし位相差が 180 度からずれる。図 13 で相互相関係数が -1.0 にならないのはこのためと考える。一方、静止時の渦発生周波数にもわずかに成分を持っており、こちらでの位相差は 180 度付近となる。ここまで示してきたようにロックインによる卓越振動数のシフトと位相差変化に関連性があると考え、今後の検討課題の一つとする。

図13 対面同一位置圧力測定点間の相互相関係数分布

図14 両側面中央点の周波数性状
(上段：パワースペクトル、下段：両圧力点の位相差)

4.2 振動角柱に作用する空気力

4.2.1 平均・変動抗力係数、変動揚力係数の風速依存性

図15にa.平均抗力係数、b.変動抗力係数、c.変動揚力係数の風速依存性を示す。図中で、静止時の諸係数と併せて示す。

図15 空気力係数の風速依存性

静止角柱の場合は Re 数に対応した風速を模型の固有振動数と角柱の見つけ幅で無次元化して重ねている。静止時の各空気力係数が風速依

存性を持たないのに対して、空力振動時の平均抗力係数と変動揚力係数は渦励振領域に於いて値が低下し、変動抗力係数は低風速域で高い値を示す。本論文では、応答に影響を直接与える変動揚力係数が渦励振領域に於いて低下する現象につき応答卓越振動数成分に着目して4.2.2節で考察する。

なお静止時の各空気力係数は図15中、右端に示す値を中心に推移している。これらの値は筆者らが文献7に示した実験結果と同等の値であり、既往の研究との整合性も確認している。

4.2.2 揚力の応答卓越振動数成分の風速依存性

図16にa.応答変位の変動成分と固有振動数で基準化した応答の卓越振動数、b.変動揚力係数(C_{Lrms})の風速依存性を示す。また各風速での応答変位の卓越振動数成分におけるc.絶対値($|C_{Ljmax}|$)、d.位相差($\phi_{C_{Ljmax}}$)、e.速度同相成分(C_{Ljmax})、f.変位同相成分(C_{Ljmax})の風速依存性を示す。

図16 揚力の応答卓越振動数成分の風速依存性

4.2.1で示したように、空力振動をするモデルの変動揚力係数が渦励振領域で小さくなるのは、4.1.2.2で示した両側面間の圧力の位相差が渦励振時には180度からずれることに関連すると考える。しかし応答性状に直接影響を与えている各風速における応答変位の卓越振動数成分の絶対値として評価すると、渦励振領域で値が大きくなることが示された。また揚力と変位の位相差に着目すると、渦励振領域より低

い風速ではほぼ0度付近を示し、渦励振領域では風速の上昇とともに同一の勾配で増大し、渦励振領域よりも高い風速域では30~40度付近で変動する。揚力係数の絶対値が渦励振領域より低風速域で大きくなる事が応答に反映されない理由として、この風速域では位相差が無い事が挙げられ、加えて揚力としては小さいことが影響していると考ええる。一方、揚力の絶対値、速度同相成分ともに渦励振領域より高い風速域では小さい値を示しているが、揚力と変位の位相差が生じていることによりエネルギーが入力され、応答変位が成長していると考えられる。

以上述べてきたように、揚力の応答卓越振動数成分が応答に対して示す強い関連性について実験的に明らかになった。

5.おわりに

既報⁷⁾で示した2D-NHATの精度検証結果に加えて、本報では二次元角柱の強制振動時及び空力振動時に於ける圧力センサーの精度について、以下の観点から検証を行った。

○正弦波加振の強制振動時

- ・揚力の特性（絶対値、位相差、変位・速度同相成分）
- ・抗力の特性（平均抗力係数）

○空力振動時

- ・ $Sc=30.00$ の振動角柱の応答の変動成分
- ・応答の変動成分の減衰依存性
- ・ロックイン、ヒステシス現象

結果、空力振動のシミュレーションを行うにあたってNHATが十分な精度を有していることを確認した。

次に2D-NHATによる空力振動時の振動角柱の表面圧力、角柱に作用する空気力、応答変位の同時測定結果について示した。特に渦励振時において、ランダム振動時、静止時とは異なる特性を実験的に捉える事ができた。この渦励振時の諸特性について、ランダム振動時及び静止時との対応をもとに、 $Sc \geq 16.0$ で最も顕著に渦励振が生じた $Sc=18.7$ の結果について以下の知見を得た。

○風圧力性状

- ・風圧力係数分布

風上面での変動成分は渦励振振動時のみ大きく、その中央に近いほどランダム振動時、静止時との差が大きくなる。側面では平均成分は渦励振時のみ全体的に負圧が小さくなるが、分布形状は変わらない。背面は渦励振時に平均成分の負圧が小さくなる。一方変動成分は側面と同様の傾向を示す。

- ・圧力点同士の相互相関性

渦励振時の値をランダム振動時及び静止時の値と比較したとき、側面の圧力点同士の相関性が下がる。また両側面の同一位置同士の相関性は、ランダム振動時と静止時には-1.0に近く交番渦の存在を示唆しているのに対し、渦励振時は-0.6付近となる。これはロックイン現象により発生する渦の卓越周波数のシフトを原因として、両側面の渦発生位相差が180度から変化するためと考える。

○空気力性状

・静止時には、各空気力係数に風速依存性がない。これに対し空力振動時には、平均抗力係数・変動揚力係数は渦励振領域で値が低下すること、変動抗力係数が渦励振領域より低い風速で値が増大すること

等、風速依存性が確認された。

特に風直角方向の振動と密接に関係のある、変動揚力係数が渦励振領域で低下したことについて、各風速に於ける卓越振動数成分を抽出して検討を行った。その結果、絶対値としては応答の変動成分増減に関し定性的な対応を示した。また応答変位との位相差が渦励振領域より低い風速ではゼロ度付近を示し、渦励振領域では風速に対して線形に上昇し、渦励振領域よりも高い風速域では30~40度付近になった。

以上から揚力の速度同相成分および変位との位相差が応答に対して関連性を有していることを実験的に確認した。

2D-NHATを用いた表面圧力、作用空気力、応答変位の同時測定結果により、渦励振時における各々の特徴についてランダム振動時、静止時との比較を含め示すことができた。今後はパラメトリックスタディーにより更に詳細な分析を進め、得られた知見について(その2)以降で考察していく予定である。

謝辞

2D-NHATシステムの作製にあたり、株式会社WindStyle、東亜工業株式会社、株式会社ヒースエンジニアリング各社より多大なご助言、ご協力をいただいたことに深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 大熊武司ほか2名、建築物の耐風設計、鹿島出版会、1996
- 2) 例えば白石成人ほか4名、各種矩形断面のフラッタ時の圧力分布特性、第8回風工学シンポジウム論文集、pp.297-304、1984
- 3) Makoto Kanda et al.: 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
- 4) Ichiro Hirata et al.: New Hybrid Vibration Technique for Simulating Aerodynamic Vibration of Structures in a Wind Tunnel, Report of the Research Institute of Industrial Technology, Nihon University, pp.1~22, 2003
- 5) 松山哲雄ほか4名：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
- 6) 小泉達也ほか3名：ニューハイブリッド空力振動法を適用した高層免震建物に作用する風外力及び応答の測定システムの開発、日本建築学会技術報告集、23、2006
- 7) 岡田玲ほか3名：2次元流中におかれた角柱の振動時の性状を明らかにするためのニューハイブリッド空力振動技術の開発、日本建築学会技術報告集、22、2005
- 8) 中島正愛ほか2名：実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法、日本建築学会構造系論文報告集、454、pp.61~71、1993
- 9) 平田和也ほか4名：New Hybrid振動法による空力振動シミュレーションに関する研究 その2 制御アルゴリズムと最適なパラメータ、日本建築学会学術講演会概要集、B-1、pp.195~196、2003
- 10) 伊藤学：振動する正方形断面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
- 11) 溝田武人：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、3、1974
- 12) Bearman, P. W. and E. D. Obasaju: An experimental study of pressure fluctuations on fixed and oscillating square-section cylinders, Journal of Fluid Mechanics, 25, pp.401-413, 1982
- 13) 溝田武人ほか1名：振動する角柱まわりの流れの特性と流体力に関する実験的研究、土木学会論文報告集、327、pp.39~47、1982-11
- 14) Scruton C.: On the wind excited oscillations of stacks, towers and masts, Proc. Int. Conf. Wind Effects on Build. and Struct., pp.798-833, 1963
- 15) 大屋裕二：2次元矩形断面柱の空力弾性特性に関する実験的研究、東京大学学位論文、1980
- 16) 大熊武司ほか2名：矩形断面構造物の風直角方向空力不安定振動に関する実験的研究(その1)、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1121~1122、1993
- 17) T. Miyata et al.: Pressure Distribution Measurement for Wind Vibrations of Box Girder Bridges, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 14, pp.223-234, 1983
- 18) G. V. Parkinson: Wind-induced Instability of Structures, Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, Vol. 269, No. 1199, pp.395-409, 1971
- 19) 天野輝久：一様流中における三次元正四角柱の渦励振およびギャロッピングに及ぼす隅欠き・隅切りの効果、日本建築学会構造系論文集、478、pp.63~70、1995-12
- 20) 加藤真志：流れ直角方向に振動する角柱の二次元流れ解析による空力特性評価、日本風工学会誌、pp.15~26、70、1997
- 21) 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, 1966

(2007年1月10日原稿受理、2007年7月4日採用決定)