

# 不連続な断面をもつ角柱に作用する風力に関する実験的研究

建築防災及び風工学研究室 西村 真

## Abstract

角柱構造物に作用する風力特性については多くの研究がある。しかし、そのほとんどは、断面が高さ方向に変化しない単純な形状に関するものである。最近では、住宅の高層化により、バルコニーなどをもつ高層建物が増えており、その断面は高さ方向に変化している。そこで本研究では高さ方向に断面が変化する構造物について空力振動実験を行い、構造物の風応答特性について調べる。次に、風力実験により構造物に作用する風力、特に変動揚力について調べる。最後に、単純な角柱に対し、風応答が大幅に減少した形状の角柱模型について風圧実験を行い、単純な角柱模型との比較により、風力が減少した原因について考察する。

## 1. まえがき

高層建物の側面にバルコニーなどの突出物がある場合、変動風力が低減されるという報告がある<sup>1)</sup>。これは、建物の断面形状が高さ方向に変化することにより変動風力の周期性が弱められた結果であると考えられる。しかし、この種の構造物の風応答について調べた研究は見受けられない。そこで本研究では、正方形断面角柱模型に節を設けた、不連続な断面をもつ角柱模型の空力応答特性および風力特性を調べた。また、応答が小さくなった形状の模型の変動風圧場についても、風力が低減する原因について考察した。

## 2. 研究概要

図1に本研究の対象とした実験模型の立面図を示す。図1に示す角柱模型は左から順番にそれぞれ

### a)滑面型

節をもたない単純な断面の角柱建物で幅32m、高さ160mの縮尺1/400模型

### b)バルコニー型

実スケールに換算してバルコニー部分の軒の出長さが1.6m、階高約3mの角柱模型

### c)節型

高さ方向に節を等間隔に取付け不連続に断面が変化する角柱模型

と名づけることにする。また、節型については分割数と節部分の軒の出長さの2つのパラメータをもち、分割数については8(節の数4)と16(節の数8)の2種類、軒の出長さについては軒の出長さ[mm]/模型見つけ幅(80mm)が約4%、7.5%、約11%の3種類とし、合計6種類の節型模型を実験に用いた。

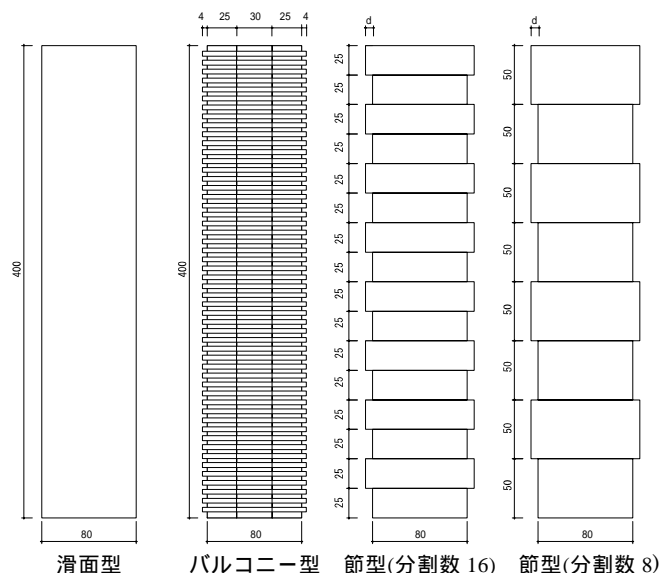


図1 角柱模型の立面図

## 3. 空力振動実験

図2に、軒の出比約4%の節型と、バルコニー型、滑面型について、無次元風速 $V^* = V / (n_0 B)$  [ $V$ : 模型頂部相当高さの平均風速,  $n_0$ : 模型の固有振動数,  $B$ : 模型見つけ幅80mm]と風直角方向の変動変位の関係を示す。図中の縦軸は $100\sigma/H$ を示し、 $H$ は角柱模型の回転中心から模型頂部までの距離(430mm)、 $\sigma$ は模型頂部における風直角方向の変動変位の標準偏差である。共振風速域での応答変位はバルコニー型が小さくなったものの、他の形状については顕著な違いは見られなかった。

次に、図3,4から軒の出長さの応答変位への影響を見ると、軒の出長さが長いほど共振風速域での変動変

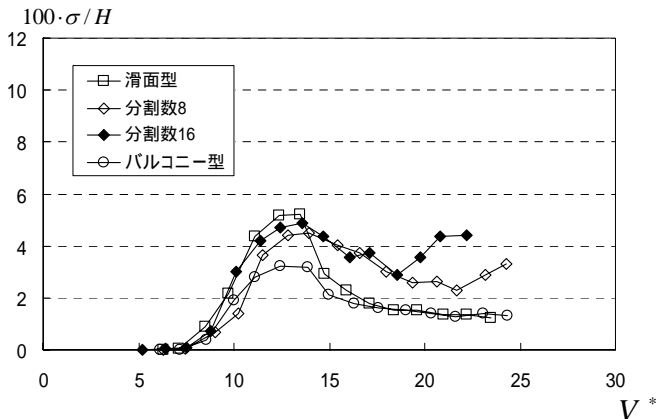


図2 風直角方向の変動変位(軒の出比約4%)

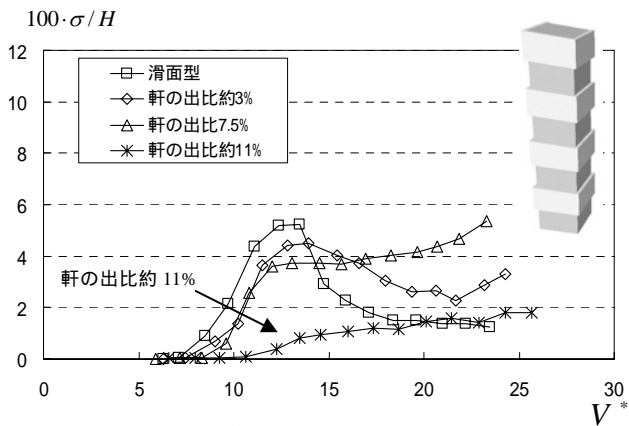


図3 風直角方向の変動変位(分割数8)

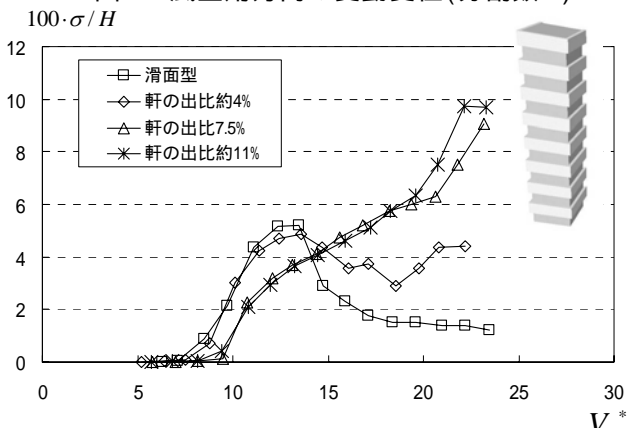


図4 風直角方向の変動変位(分割数16)

位は低下することを示している。特に、分割数8で軒の出比約11%の角柱模型については、共振風速付近の変動変位は極端に低下しており、 $V^*=15$ 以上の高風速域においても、風速の増加に対する応答変位の増加の割合は緩やかである。

#### 4. 風力実験

風力実験では、模型に対する抗力、揚力および3軸回りのモーメントを計測した。ここでは、これらをもとに得られた風力係数および空力モーメント係数により、不連続な断面をもつ角柱模型の風力特性について示す。

##### a) 風向方向の風力特性

図5, 6は平均抗力係数  $C_{Dmean}$  および風向方向平均転倒モーメント係数  $C_{MDmean}$  を示したものである。図5から、バルコニー型は滑面型と比較して  $C_{Dmean}$ ,  $C_{MDmean}$

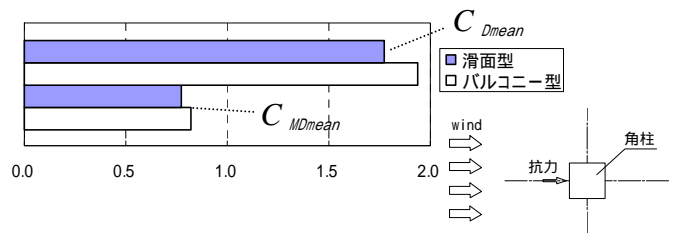


図5 抗力係数および風向方向転倒モーメント係数

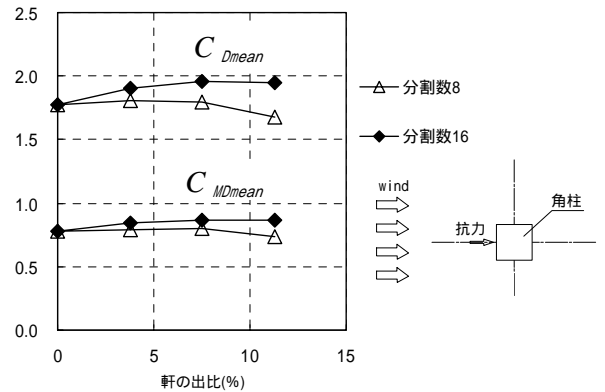


図6 抗力係数および風向方向転倒モーメント係数

ともに僅かに増加している。また、図6から不連続な断面をもつ角柱模型では、分割数16のときよりも分割数8のときの方が、軒の出長さに依らず風向方向の平均風力が小さい。

##### b) 風直角方向の風力特性

変動揚力係数  $C_{Lrms}$  と風直角方向変動転倒モーメント係数  $C_{MLrms}$  について、軒の出比約4%の場合の、分割数による比較を図7に示す。ここで、バルコニー型の軒の出比は5%であるが、軒の出比約4%の節型との比較のため掲載した。図7から軒の出比約4%において、 $C_{Lrms}$  はバルコニー型で最も小さいことがわかる。

次に、 $C_{Lrms}$  および  $C_{MLrms}$  の軒の出長さによる影響を図8, 9に示す。不連続な断面をもつ角柱模型では、軒の出長さが増すとともに  $C_{Lrms}$  および  $C_{MLrms}$  は低下する。ただし、 $C_{Lrms}$  および  $C_{MLrms}$  は、軒の出比約4%で一端増加し、その後は軒の出長さの増加に伴い減少する。

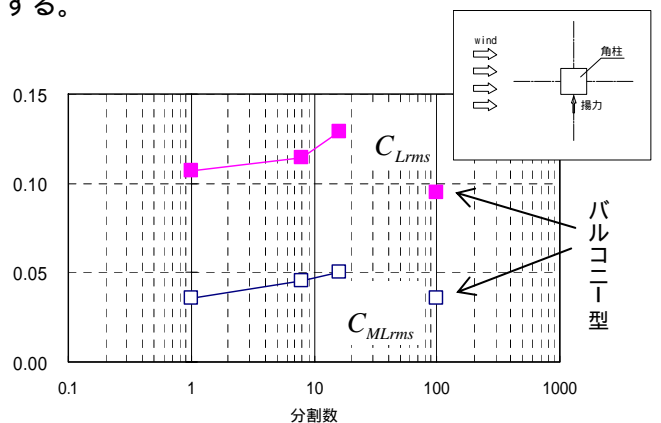


図7 分割数による比較(軒の出比約4%)

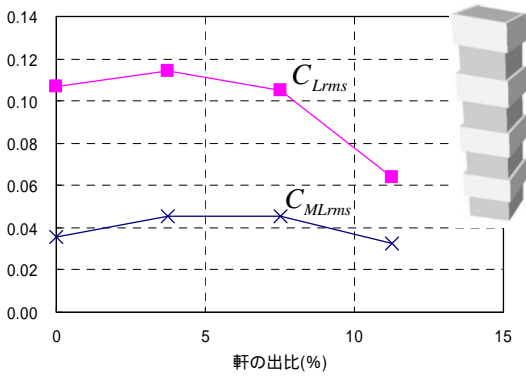


図 8 分割数 8 の場合

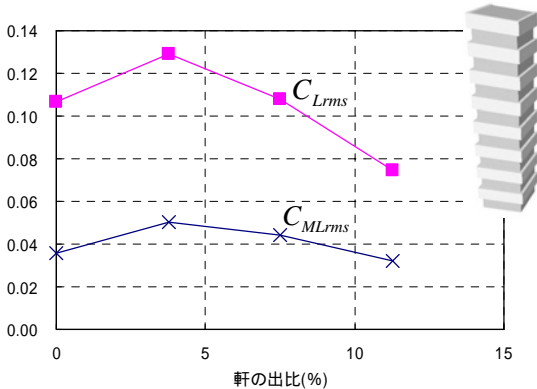


図 9 分割数 16 の場合

c)変動揚力のパワースペクトル

図 10 に風速 10m/sec における変動揚力のパワースペクトルを示す。軒の出長さの増加にともないストローハル数成分のパワーが低下している。また、軒の出比約 11% の場合では、分割数 8 と分割数 16 とでは、分割数 8 の方がストローハル数成分のパワーが低下しており、渦の周期性が弱められている。

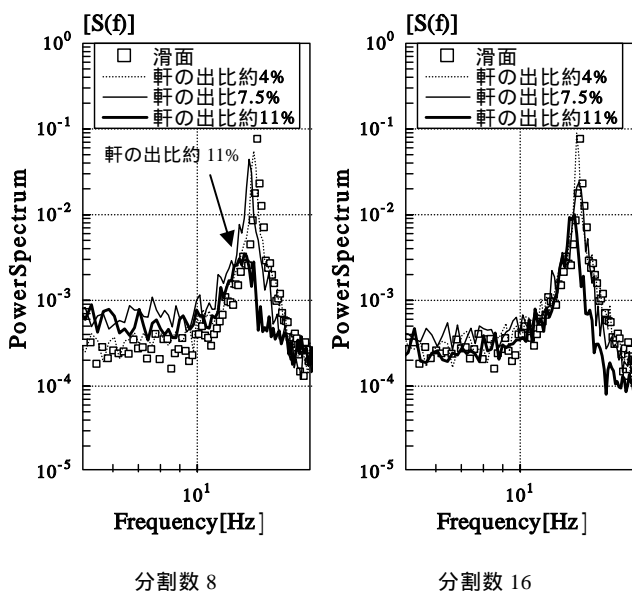


図 10 変動揚力のパワースペクトル

5. 風圧実験

ここでは、変動揚力が最も小さくなった節型角柱模型(分割数 8 軒の出比約 11%)について風圧実験をおこない、単純な角柱模型の風圧特性と比較し、変動揚力が低減した原因について考察する。図 11 に風圧模型を示す。風圧模型は片方の側面にのみ風圧孔を設けた。図 12 に複素 POD 解析<sup>4)</sup>により得られた、それぞれのモードの固有値および寄与率を示す。また、1 次規準座標から 3 次規準座標までのパワースペクトルをそれぞれの角柱模型について図 13 に示した。図 13 から 1 次モードおよび 2 次モードはストローハル数成分を中心にパワーが集中していることから、1 次モードおよび 2 次モードはカルマン渦の現象を示すと考えられる。不連続な断面をもつ角柱模型は単純な断面の角柱模型よりも 1 次モードおよび 2 次モードの固有値および寄与率は小さくなる。これは、不連続な断面をもつ角柱模型は渦の周期性が弱められていると考えられ、図 10 の変動揚力のパワースペクトルと同様のことを示している。

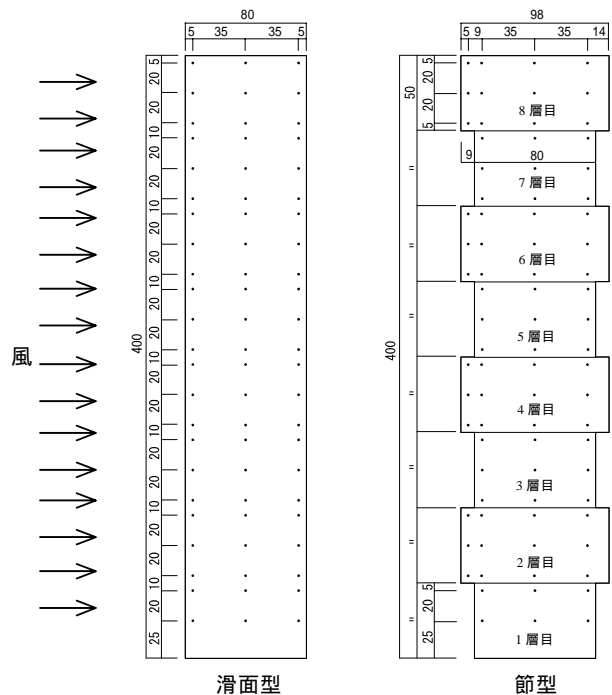


図 11 風圧模型

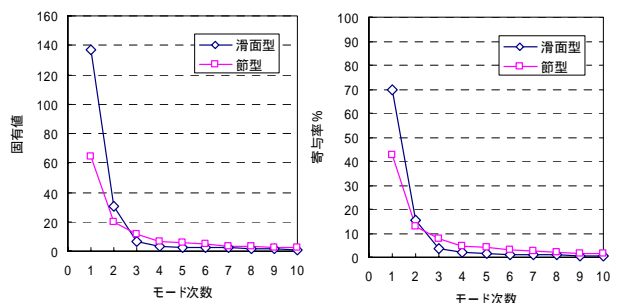


図 12 固有値および寄与率

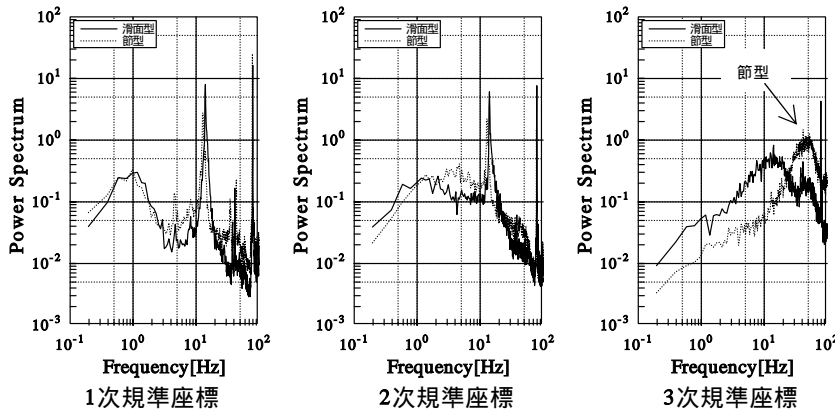


図 13 規準座標のパワースペクトル

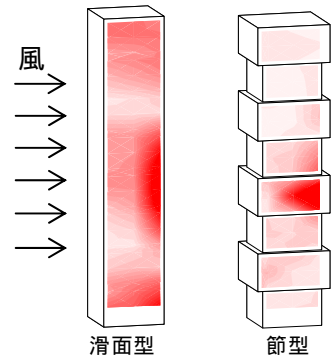


図 14 3 次モードの絶対値

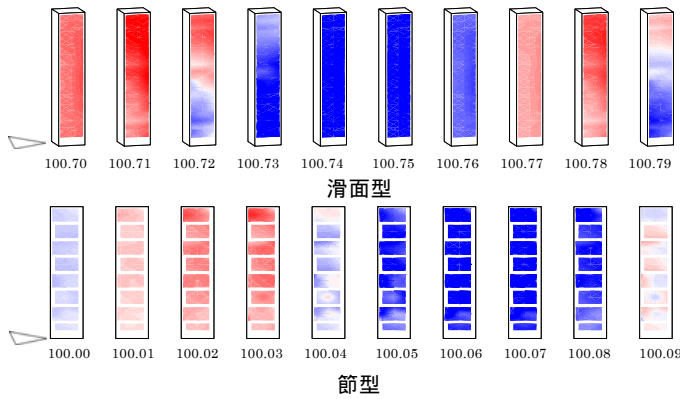


図 15 1 次モードを再合成した変動風圧性状

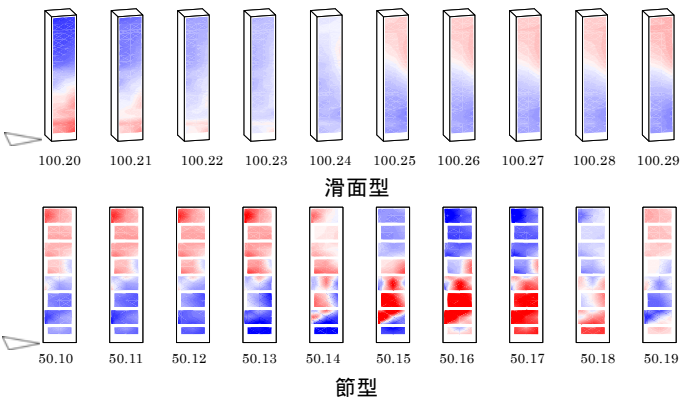


図 16 2 次モードを再合成した変動風圧性状

図 14 はそれぞれのモデルの 3 次モードの絶対値である。模型中央部の風下側において、絶対値の大きな部分が見られ、この部分の変動は他と比べて大きいことがわかる。これは、風上側の稜線部から剥離した流れが、模型高さ中央部の風下側において再付着しているためと考えられる。3 次規準座標のパワースペクトルから、節型では渦の発生周波数よりも高い周波数で頻りに再付着していると考えられ、これが周期的な渦の発生を妨げている要因と考えられる。図 15, 16 は 1 次モードのみ、2 次モードのみを再合成して得られた模型側面の変動風圧場を示しており、図の下に示す数値は測定開始からの時刻である。図 15 から、滑面型と節型の圧力は側面全体で一様に変化しており、この現象は渦の発生周波数で周期的に見られた。また、図 16 では両方の模型において、模型側面の上半分と下半分で、常に

全く逆の圧力を示しており、上下の圧力は周期的に入れ替わっている。

## 6. まとめ

正方形断面角柱模型に節を設けた不連続な断面をもつ角柱模型の空力特性を調べ、以下の知見が得られた。

- 1) アスペクト比 5 の正方形断面角柱模型に対して、それぞれの高さが等しくなるように 8 つの層にわけ、1 層おきに節を取り付け、かつ節部分の軒の出長さが模型見つけ幅の約 11% の不連続な断面をもつ角柱模型は、渦励振を著しく抑制した。
- 2) 風力実験により、渦励振を著しく抑制する場合、変動揚力が小さくなるとともに、その周期性が弱まっていることを示した。
- 3) 渦の周期性が弱くなる原因について複素 POD 解析を用いて調べ、その結果、剥離流の再付着がカルマン渦の放出周波数より高い周波数で起こるため、カルマン渦放出の規則性を乱している可能性を示した。
- 4) 節部分の軒の出長さが模型見つけ幅の約 4% に限り、本研究で対象とした断面形状のなかで、共振風速付近の風直角方向の応答変位はバルコニー型で最も低減することが判明した。

## 参考文献

- 1) 高森浩治、西村宏昭：「凹凸のある建物の風圧分布」日本建築学会大会学術講演梗概集 1993 年 9 月
- 2) 片桐純治、丸川久佐夫、藤井邦雄、中村修：「隅欠を有する高層建物におけるバルコニーの影響に関する実験的研究」第 13 回 風工学シンポジウム
- 3) 奥田泰雄、谷池義人：「3 次元角柱まわりの渦構造(その 2). 側面上に形成される渦」風工学シンポジウム 1990
- 4) 谷口徹郎、谷池義人：「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」日本風工学会論文集 平成 18 年 10 月

討議等

討議 [ 谷口与史也 教授 ]

8 分割の場合で、渦励振の応答の抑制に最も効いていることになっているが、建築的にどの寸法を押さえればいいのか？

回答

風圧場の考察から、応答の抑制に深く関係しているのが、模型側面に形成される渦の分断でありと考えられます。節と節との間を「溝」と考えると、軒の出長さが長いだけ、すなわち溝が深いだけでは渦は分断されません。トラックが溝を乗り越えるときを想像すると、溝の幅が狭ければ、どれだけ溝が深くてもタイヤは溝にはまることはありません。渦が高さ方向に途切れる現象は、タイヤが溝にはまることをイメージしてもらえばいいと思います。したがって、建築的にどの寸法を押さえるべきかという質問ですが、それは溝の形状であり、溝の深さ（軒の出長さ）と幅（節と節との間隔）の比率を押さえるべきです。具体的には、[ 軒の出長さ / 節と節の間隔=9/50=0.18 ] となります。

討議 [ 谷口与史也 教授 ]

4 分割の場合でも応答変位は抑制されるのか？

回答

4 分割の場合であっても、8 分割の場合と模型高さが同じで、かつ軒の出比が約 11% ならば、8 分割と同じように側面に形成される高さ方向の渦は分断されると思います。

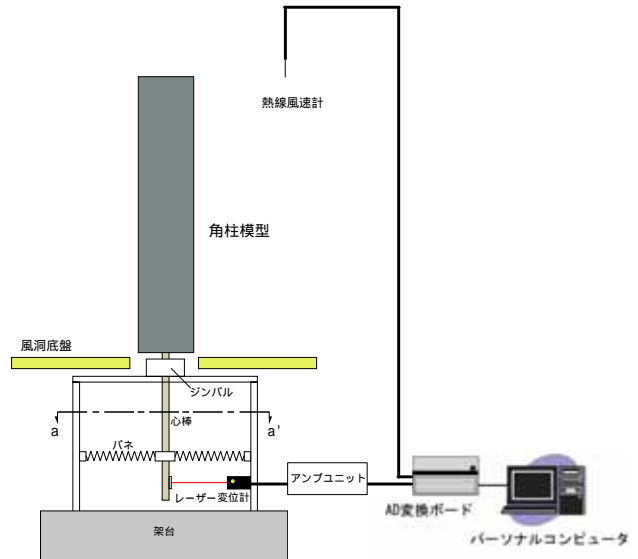
複素 POD 解析から、8 分割で軒の出比約 11% の節型では、模型中央部の風下側で、渦の発生周波数よりも高い周波数で、風上稜線部から剥離した流れが再付着している可能性を示しています。8 分割で軒の出比が約 11% の節型ではこの再付着の周期が渦発生周期よりも短いため、周期的な渦の発生を抑えていると考えられます。軒の出比が約 11% の場合において、4 分割の場合でも 8 分割のときと同じ現象が起きるかどうかは風圧実験をしてみないとわかりませんが、少なくとも高さ方向に伸びる渦は分断されると考えられるので、その分については風直角方向の応答変位は低減できると予測できます。

討議 [ 大内一 教授 ]

模型の剛性はどうなっているのか？

回答

空力振動実験は風直角方向にのみロッキング振動するシステムを採用しました。



空力振動実験システム図

模型の回転剛性  $k$  は

$$k_{\theta} = M / \theta \quad (\theta = x_H / H)$$

$x_H$  : 模型頂部における水平変位

$H$  : 回転中心から模型頂部までの距離 430mm

ここで  $M$  は回転中心に作用するモーメントを表します。自由振動実験では模型頂部において水平方向に  $0.25\text{kg} \times 9.8 = 2.45\text{(N)}$  の力を作用させました。そのときの頂部水平変位  $x_H$  は 6.9mm なので

$$\theta = x_H / H = 6.9 / 430 = 0.016$$

$$M = 2.45 \times 0.43 = 1.054 \text{ (Nm)}$$

従って、回転剛性  $k$  は

$$k = 1.054 / 0.016 = 65.8 \text{ (Nm/rad)}$$

となります。

本実験では実構造物における変位量との対応についても検討しておくべきでした。

討議 [ 木内龍彦 講師 ]

実験の風速は実際の風速に換算してどのくらいか？

回答

実験模型のプロポーシオンはアスペクト比 5 (高さ  $H = 400\text{mm}$ , 幅  $B = 80\text{mm}$ ) の縮尺 1/400 模型です。したがって、想定建物の固有周期  $T_0$  は

$$T_0 = 0.02H = 0.02 \times 160\text{(m)} = 3.2\text{sec}$$

となり、固有振動数  $n_0$  は  $n_0 = 1 / T_0 = 1/3.2$  となります。

無次元風速  $V^*$  の定義式から、実際の風速  $V$  は

$$V^* = V / (n_0 B) \text{ より}$$

$$V = V^* \times (n_0 B) = V^* \times (1/3.2) \times 32 = 10 V^*$$

となります。

共振風速付近では無次元風速  $V^* = 10$  であるので、実際の風速に換算すると 100m/sec となります。