

塔状弾性模型を用いた風洞実験による高風速渦励振の発現特性に関する研究

北川徹哉¹・藤野陽三²・木村吉郎³

¹正会員 工修 日本大学助手 理工学部土木工学科 (〒101 東京都千代田区神田駿河台1-8)

²フェロー Ph.D. 東京大学教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 (〒113 東京都文京区本郷7-3-1)

³正会員 Ph.D. 東京大学助教授 工学系研究科社会基盤工学専攻

通常の渦励振の発現風速より高風速で発生する“高風速渦励振”的励振源が模型頂部付近に発生する自由端渦であることが、北川らが行った円柱ロッキング模型を用いた風洞実験により明らかにされつつある。本研究では形状の異なる円柱塔状の弾性模型を用いて高風速渦励振のメカニズムを実験的に調べている。まず、一様円柱の塔状弾性模型を用いて実験し、高風速渦励振の発現と自由端渦の発生を確認した。また、模型頂部に直径のやや大きい円盤を設置した場合、自由端渦の発生が妨げられ、高風速渦励振も発現しなかったことを示し、自由端渦が高風速渦励振の励振源であることを明らかにしている。さらに、可視化実験により後流を観察し、自由端渦の振動数がカルマン渦の放出振動数よりも低い原因について考察した。

Key Words :circular cylinder elastic tower, flow visualization, vortex-induced vibration at a high wind speed, wind tunnel experiment, wind velocity fluctuation measurement

1. はじめに

円形断面を有する構造物においては、物体背後にカルマン渦が形成され、その放出振動数が固有振動数とほぼ一致する風速域において、渦励振が発現する。

しかしながら、Wootton¹⁾や河井²⁾らは渦励振の発現風速より数倍高い風速域においても渦励振と類似の限定振幅型の振動が現れることを示唆している。

筆者らは、この高風速域における振動現象を“高風速渦励振”とよび、風洞実験によってその発生機構を検討してきた³⁾。そこでは、河井の実験と同様に一様円形断面の塔状模型を採用し、基本的な性状を検討するために板バネで片持ち支持した一自由度のロッキング模型を用いた。その結果、通常の渦励振発現風速の約3倍の風速において高風速渦励振の発現が確認された。また、その励振源を調べるために後流風速変動を高さ方向に多点で測定したところ、3次元的な流れに起因すると思われる変動成分が自由端近傍の後流中に検出され、これを“自由端渦”とよぶことにした。自由端渦は2次元円柱渦（カルマン渦）の放出振動数よりも低い振動数を有し、その振動数が固有振動数に一致する風速において高風

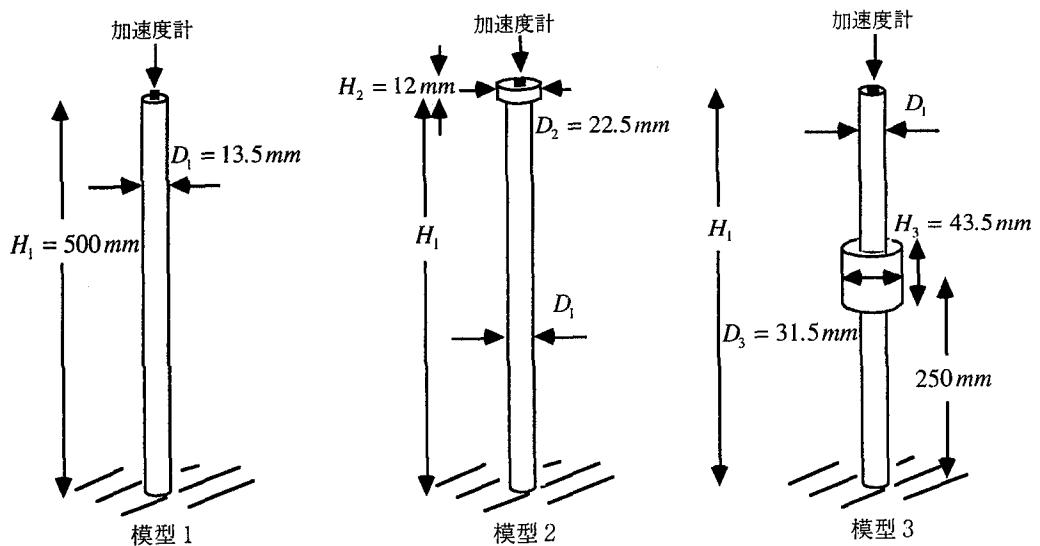
速渦励振が発現していた。ゆえに、高風速渦励振は自由端渦によって励起されると推察された。

しかし、実在するタワー等の塔状構造物は弾性構造物であり、断面形状も必ずしも一様ではない。したがって、前述の一様円形断面ロッキング模型を用いた実験結果のみでは、実構造物への対応を考慮する上で不十分である。

そこで本研究においては、弾性模型を用いて風洞実験を行う。まず、一様円形断面を有する塔状弾性模型を用い、ロッキング模型実験と同様に高風速渦励振が発現するか、また、その励振源が自由端渦であるかを調べる。次に、非一様断面の塔状構造物を対象として、断面直径がやや大きい小円盤を頂部に設置した模型、および中腹に断面直径がやや大きい小円柱を有する模型を用いて各々実験を行い、自由端渦の発生と高風速渦励振の発現に与える影響を検討する。

さらに、自由端渦の形成状況を観察するために、煙とレーザーを用いて可視化実験を行い、自由端渦と2次元円柱渦の放出特性を比較し、自由端渦の振動数が2次元円柱渦の振動数よりも低い原因について考察する。

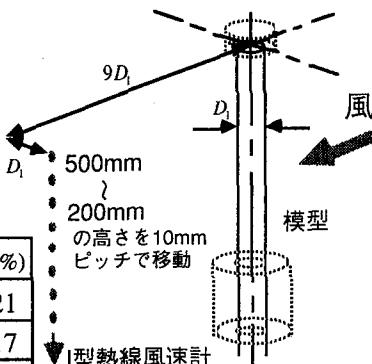
なお、本論文は文献4)を整理し、新たな実験結果



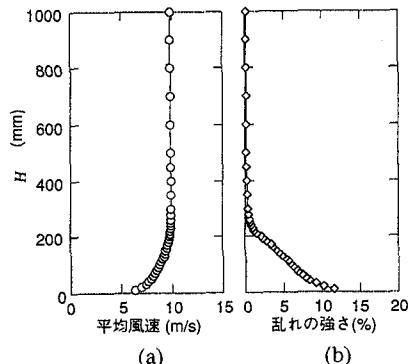
図一1 実験模型

表一1 各模型の振動特性

模型	f_{n1} (Hz)	f_{n2} (Hz)	ξ_1 (%)
1	27.5	140.0	0.21
2	26.0	131.5	0.17
3	28.0	140.0	0.19



図一2 I型熱線風速計の位置



図一3 (a)風速のプロファイル
(b)乱れの強さのプロファイル

を加えるとともに再構成したものである。

2. 風洞実験の方法

図一1に示す3種類の塔状弾性模型を用いた。模型1は一様断面円柱（直径 $D_1 = 13.5\text{ mm}$ 、高さ $H_1 = 500\text{ mm}$ ）となっている。模型2は模型頂部に直径のやや大きい小円盤（ $D_2 = 22.5\text{ mm}$ 、 $H_2 = 12\text{ mm}$ ）を、模型3は模型中部高さに小円柱（ $D_3 = 31.5\text{ mm}$ 、 $H_3 = 43.5\text{ mm}$ ）を有する。各模型は8質点で構成されており、質量バランスは等しくしてあるが、表一1に示すように、各模型の振動特性（固有振動数： f_{n1} （1次）、 f_{n2} （2次）、1次モードの減衰定数： ξ_1 ）には若干のばらつきが見られる。なお、2次モードの

減衰定数は調べていない。

模型の風直角方向応答を模型頂部に設置した加速度計により測定した。また、図一2に示すように後流の風速変動をI型熱線風速計を用い、模型中心から $9D_1$ 下流側、風直角方向に $1D_1$ の位置において風洞床面からの高さ H を変化させて多点（ $H = 200 \sim 500\text{ mm}$ の範囲を 10 mm ピッチ）で測定した。なお、熱線風速計の下流側の位置はそれを支持する器具が後流および応答に影響を及ぼさず、かつ可能な限り模型に近くなるように決定された。応答および後流風速変動のデータのサンプリングは 500 Hz で行い、 280 Hz でローパスフィルターをかけた。

風洞実験は清水建設（株）技術研究所所属の幅 $2.6\text{ m} \times$ 高さ $2.1\text{ m} \sim 2.4\text{ m} \times$ 長さ 18.9 m の回流型密閉式

風洞において行った。平均風速 $V=10\text{m/s}$ において測定した模型設置位置での気流のプロファイルを図-3に示す。風洞床面に起因する境界層が風洞床面からの高さ約200mmまで発達しているが、それ以上の高さにおいては $I_u=0.8\%$ 以下の乱れの少ない気流となっている。この気流はロッキング模型実験³⁾において用いたものと同じである。

また、可視化実験は模型上流側から煙流脈を放出させ、後流側からレーザーをあてるにより行った。ただし、煙発生装置の都合上、全スパンにわたり同時に煙流脈をあてることは不可能であったため、部分的に可視化し観察する方法を探査した。

3. 実験結果

(1) 風速と風直角方向応答の関係

図-4に模型1を用いた場合の無次元風速 $V/f_{n1}D_1$ と無次元化した風直角方向応答 $y/D_1(\text{r.m.s})$ との関係を示す。ここで、 y は模型頂部における風直角方向変位であり、計測した加速度を積分することによって求めた。 $V/f_{n1}D_1=5.7$ において通常の渦励振(1次)による応答のピークが見られる。また、 $V/f_{n1}D_1=21$ においてもピークが現れており、これが本研究が対象とする高風速渦励振である。一方、2次の通常の渦励振は $V/f_{n1}D_1=28$ と33の2点に現れていると思われるが、これについては3.(3)で述べる。

図-5に風直角方向の変位応答の時系列を示す。図-5(a)は渦励振が発現した風速における時系列であるが、振幅一定となっていることがわかる。一方、高風速渦励振の応答(図-5(b))は、振幅が緩やかに変化するものとなっている。

図-6に模型2における $V/f_{n1}D_1$ と y/D_1 の関係を示す。通常の渦励振(1次)がやはり $V/f_{n1}D_1=5.7$ において発現している。しかし、模型1を用いたケースに現れた高風速渦励振のピークはみられない。また、渦励振の時系列(図-7(a))は、やはり振幅一定となっている。このケースでは高風速渦励振は発現していないが、比較のため模型1における高風速渦励振の発現風速と同じ風速における応答の時系列を図-7(b)に示す。振幅が不規則に変化しており、ガスト応答であると思われる。緩やかな振幅の変化を有する図-5(b)とは明らかに異なる特性を示している。

模型3を用いた場合の $V/f_{n1}D_1$ と y/D_1 の関係を図-8に示す。通常の渦励振(1次)は $V/f_{n1}D_1=5.9$ において、高風速渦励振は $V/f_{n1}D_1=22$ において発現している。通常の渦励振の波形(図-9(a))は、模型1、模型2と同様に振幅一定となっている。高風速渦励振の波形(図-9(b))は、やはり模型1において発

現した高風速渦励振と同様、緩やかな振幅の変化をともなうものとなっている。

以上で述べたように、高風速渦励振が発現した場合、その振幅は緩やかに変化するものとなった。この傾向はロッキング模型を用いた実験結果³⁾と整合する。

また、模型2と模型3を組み合わせた形状の模型(図-10(a))、すなわち模型頂部に小円盤、模型中腹に小円柱を有する模型(模型4とする)を用いた実験も別途⁵⁾行っている。その結果を図-10(b)に示す。比較のため、模型3のケースを点線で併せて示してある。模型4においては、 $V/f_{n1}D_1=17$ に微少なピークが現れている。文献5)において、この小ピークは自由端渦によって励起された高風速渦励振ではなく、 D_1 による渦放出が励起した渦励振であることが、応答および後流風速変動のスペクトル解析によって示されている。しかし模型3において、このタイプの渦励振によるピークはほとんど現れておらず、この原因は不明である。

一方、模型3の場合、ガスト応答と思われる応答振幅($V/f_{n1}D_1>10$ において風速とともに増加する応答成分)が、模型4の場合よりも大きい。ここで、なぜガスト応答の大きさが模型によって異なるのかという疑問が生じる。以下にこの点について考察を加える。

まず、風洞床面に起因する境界層(図-3)がガスト応答を励起している可能性はある。実験に用いた気流の境界層は模型の中腹高さより下に存在し、そこでは各模型の断面形状は同じであり、各模型の減衰定数にも大きな差はみられない(表-1、また文献5)より模型4の ξ_1 は0.2%)ため、各模型のガスト応答振幅はほぼ等しくなるはずである。しかし、本実験結果において興味深いのは、模型によってガスト応答振幅が異なることがある。そこで図-4、6、8、10(b)を比較すると、小円盤を頂部に持たない模型1(図-4)および模型3(図-8)においては、ガスト応答振幅が大きくなっていることがわかる。すなわち、模型頂部に小円盤がない場合、頂部近傍の後流の乱れが顕著となり、セルフバフェティングの応答成分が加算されたと考えられる。

(2) 後流風速変動の測定結果に基づく渦放出特性

前節で示したように、高風速渦励振は模型1および模型3のケースで発現した。本節においては、後流風速変動の測定結果から高風速渦励振の励振源を特定する。また、模型2では高風速渦励振は発現していなかったが、その原因を各模型の測定結果を比較することによって検討する。

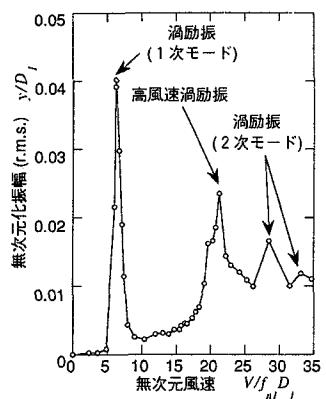


図-4 風速と風直角方向応答の関係
(模型 1)

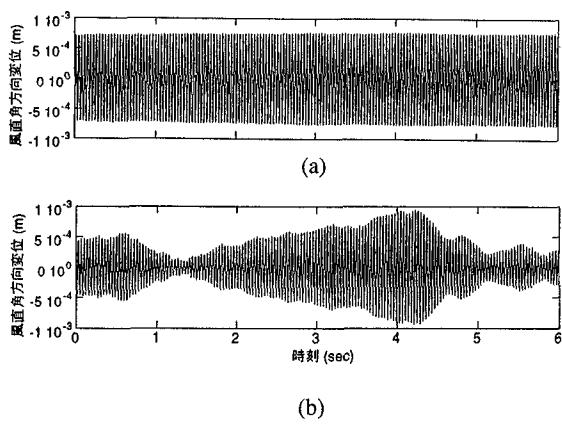


図-5 模型 1 の風直角方向応答時系列
(a) $V/f_n D_i = 5.7$ (b) $V/f_n D_i = 21$

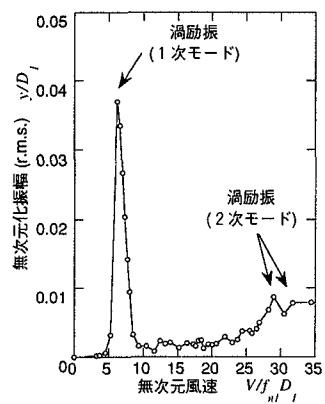


図-6 風速と風直角方向応答の関係
(模型 2)

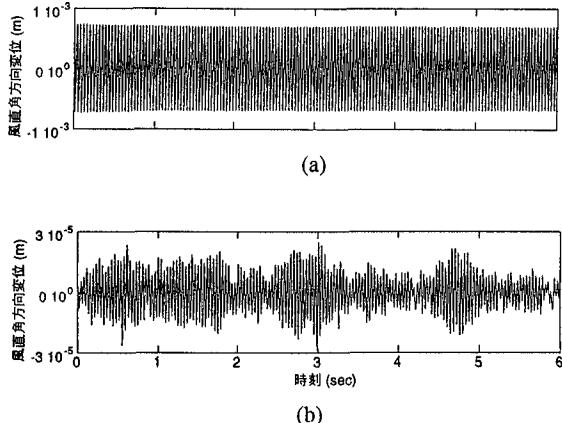


図-7 模型 2 の風直角方向応答時系列
(a) $V/f_n D_i = 5.7$ (b) $V/f_n D_i = 21$

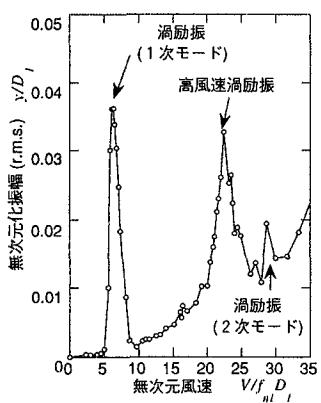


図-8 風速と風直角方向応答の関係
(模型 3)

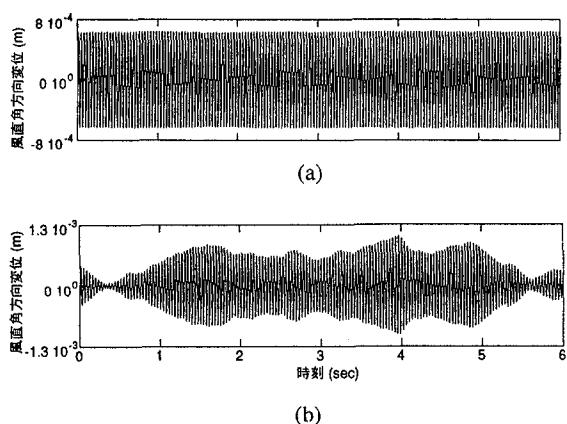


図-9 模型 3 の風直角方向応答時系列
(a) $V/f_n D_i = 5.7$ (b) $V/f_n D_i = 21$

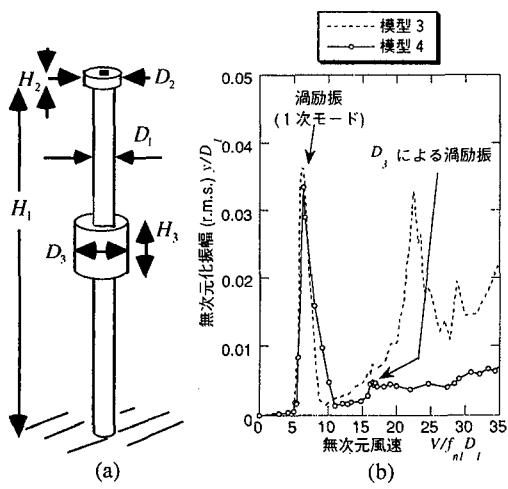


図-10 (a)模型4の形状
(b)模型4における風速と
風直角方向応答の関係

模型1を用いた場合の $V/f_{n1}D_1=5.7$ における風直角方向変位応答のパワースペクトルを図-11(a)に示す。この風速では通常の渦励振(1次)が発現しており(図-4), f_{n1} の振動数成分が際立っている。また、 f_{n2} の成分も若干現れている。図-11(b)に $V/f_{n1}D_1=5.7$ における後流風速変動のパワースペクトルを、無次元化した高さ H/H_1 を縦軸とする等高線で示す。なお、見やすくするためにスペクトル強度の高いレベルのみを表示している。測定した範囲全域において($H/H_1=0.4\sim1.0$), f_{n1} に一致した2次元円柱における渦(以下では“2次元円柱渦”とする)の放出振動数がみられる。次に $V/f_{n1}D_1=16$ における風直角方向応答のパワースペクトルを図-12(a)に示す。この風速は通常の渦励振(1次)の発現風速より高風速域(図-4)であり、2次元円柱渦の放出振動数は f_{n1} を外れ、 $f/f_{n1}=2.5$ と 2.8 に分岐して応答のパワースペクトル中に現れている。また、 $f/f_{n1}=0.7$ にもピークがみられ、2次元円柱渦とは異なる渦の外力が存在すると思われる。そこで後流風速変動のパワースペクトル(図-12(b))をみると、応答のパワースペクトルに現れた二つの2次元円柱渦放出成分のうち、 $f/f_{n1}=2.5$ の成分は $0.67 < H/H_1 < 0.87$ 付近に、 $f/f_{n1}=2.8$ は $H/H_1 < 0.65$ に存在していることがわかる。一方、 $f/f_{n1}=0.7$ の成分は、 $0.88 < H/H_1 < 0.97$ の自由端付近に存在しており、これが自由端渦である。さらに、高風速渦励振の発現風速である $V/f_{n1}D_1=21$ における応答のパワースペクトル(図-13(a))では、自由端渦によるピークの振動数は高振

動数側へ移動し f_{n1} に一致している。後流風速変動のパワースペクトル(図-13(b))をみても $0.88 < H/H_1 < 0.97$ に存在する自由端渦の振動数が f_{n1} に一致していることが確認できる。ゆえに高風速渦励振は自由端渦によって励起されると考えられる。自由端渦の存在範囲は広くはないが、模型の頂部付近に発生するため、励振源として作用している可能性はある。

次に模型2を用いた場合、通常の渦励振の発現風速($V/f_{n1}D_1=5.7$)における応答および後流風速変動のパワースペクトルは、模型1の場合とほぼ同様な性状であった。図-14(a)に $V/f_{n1}D_1=16$ における応答のパワースペクトルを示す。やはり2次元円柱渦の放出振動数が $f/f_{n1}=2.6$ と 2.9 に分岐して現れる。一方、模型1の場合には $V/f_{n1}D_1=16$ において自由端渦によるピークが現れていたが(図-12(a))、模型2の場合にはみられない。後流風速変動のパワースペクトル(図-14(b))をみても、自由端渦は現れていない。したがって模型2において高風速渦励振が発現しなかったのは自由端渦が生成されなかつたためであると考えられる。模型2は頂部に断面直径がやや大きい($D_2=22.5\text{mm}$)小円盤を有するため、自由端渦の生成が妨げられたと思われる。

模型3を用いた場合の $V/f_{n1}D_1=22$ (高風速渦励振の発現風速(図-8))における応答のパワースペクトルを図-15(a)に示す。自由端渦の振動数が f_{n1} に一致していると思われる。また、後流風速変動のパワースペクトル(図-15(b))をみると、 f_{n1} に一致した自由端渦の振動数が $0.88 < H/H_1 < 1.0$ 付近にみられる。したがって、やはり高風速渦励振は自由端渦によって励起されると考えられる。

なお、模型3は中部高さにおいて断面直径がやや大きい小円柱($D_2=31.5\text{mm}$)を有している。そのため、 $H/H_1=0.5$ 付近の渦放出振動数は D_1 による2次元円柱渦の放出振動数よりも低く、 $f/f_{n1}=1.3$ 付近にピークが位置している。しかし、この渦放出による影響は応答のパワースペクトル(図-15(a))にはピークとして現れていない。この原因は不明だが、 D_1 による2次元円柱渦の発生高さは低く、励振力として作用するには至らなかった可能性はある。

(3) 応答と渦放出振動数の関係

模型1および模型3においては高風速渦励振が発現し、その励振源は模型上端部付近に形成される自由端渦であることを示した。本節では模型1のケースを対象に、応答と渦放出振動数との関係について述べる。

風速に対する渦放出振動数の関係を図-16に示す。応答振幅についても点線で示してある。2次元

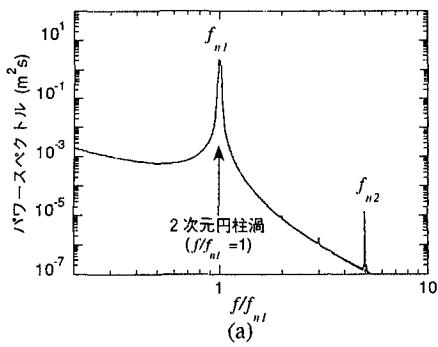
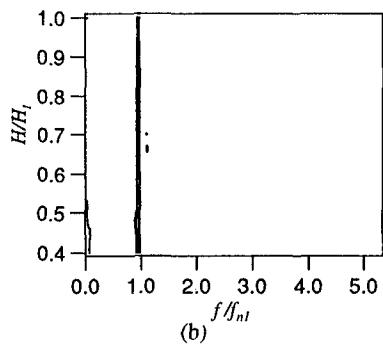


図-11 模型1におけるパワースペクトル ($V/f_{nl}D_i=5.7$: 涡励振時)



(b)

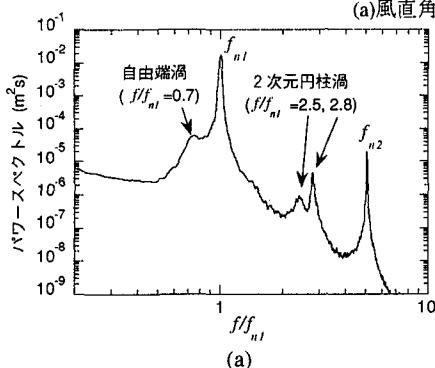
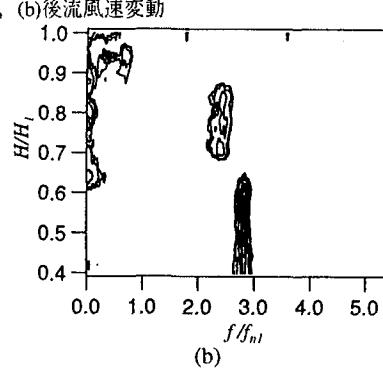


図-12 模型1におけるパワースペクトル ($V/f_{nl}D_i=16$)



(b)

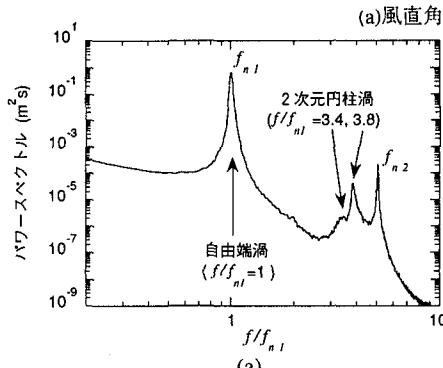
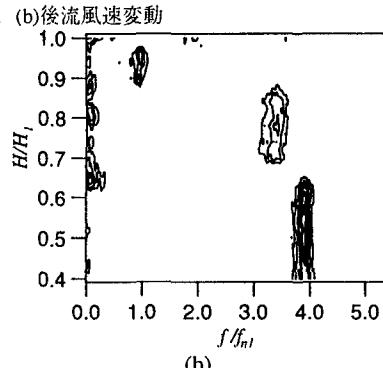


図-13 模型1におけるパワースペクトル ($V/f_{nl}D_i=21$: 高風速渦励振時)

(a)風直角方向変位, (b)後流風速変動



(b)

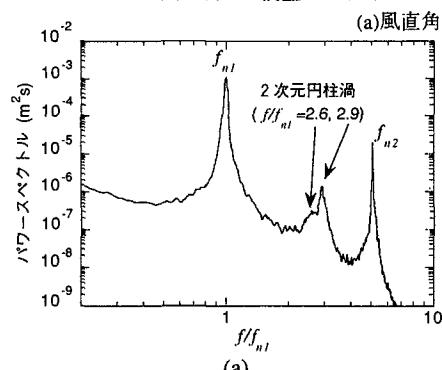
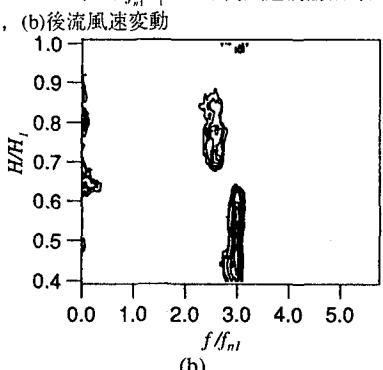


図-14 模型2におけるパワースペクトル ($V/f_{nl}D_i=16$)

(a)風直角方向変位, (b)後流風速変動



(b)

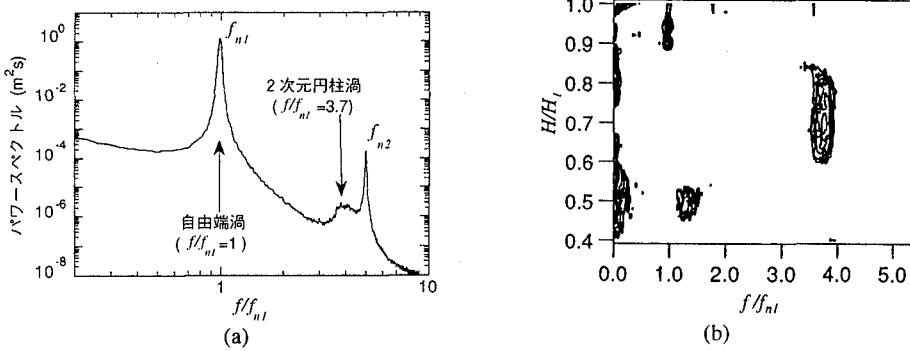


図-15 模型3におけるパワースペクトル ($V/f_{n1}D_1 = 22$: 高風速渦励振時)
(a)風直角方向変位, (b)後流風速変動

円柱渦については $H/H_i = 0.66$ を境に、放出振動数が不連続に分岐したため、 $H/H_i = 0.6$ と0.7で測定されたものを代表として示している。ただし、 $H/H_i = 0.7$ のものについては風速を細かく変化させて測定しなかつたため、情報が少ない。 $V/f_{n1}D_1 = 5.2$ 付近において2次元円柱渦のロックイン現象が始まり、応答振幅は $V/f_{n1}D_1 = 5.7$ において通常の渦励振(1次)によりピークとなる。風速に比例して、それぞれの2次元円柱渦の放出振動数は増加し、 f_{n1} を離れるが $V/f_{n1}D_1 = 28$ と33において f_{n2} と一致し、渦励振(2次)が励起される。しかし、このときのロックイン現象は捉えられていない。

一方、図-16における自由端渦については $H/H_i = 0.9$ で測定された振動数を示している。自由端渦の振動数は $V/f_{n1}D_1 = 13$ 付近からスペクトル中にピークとして識別可能となり、風速の増加とともに高振動数側へ移動した。自由端渦の振動数は2次元円柱渦の放出振動数と同様に、風速に対しほば比例することがわかる。 $V/f_{n1}D_1 = 21$ において f_{n1} と一致し、振幅はピークとなる。この点については模型3においても同様な結果が得られた。すなわち、高風速渦励振は自由端渦により励起されていると考えられ、ロッキング模型による実験結果³⁾と整合する。なお、図-16からは高風速渦励振の発現風速域における自由端渦のロックイン現象の有無は識別できない。

なお、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に不連続的に分岐する現象はロッキング模型による実験³⁾においては見られなかった現象であり、この不整合性については4.において触れる。

(4) 可視化実験に基づく自由端渦の形成特性

以上において高風速渦励振が自由端渦によって励

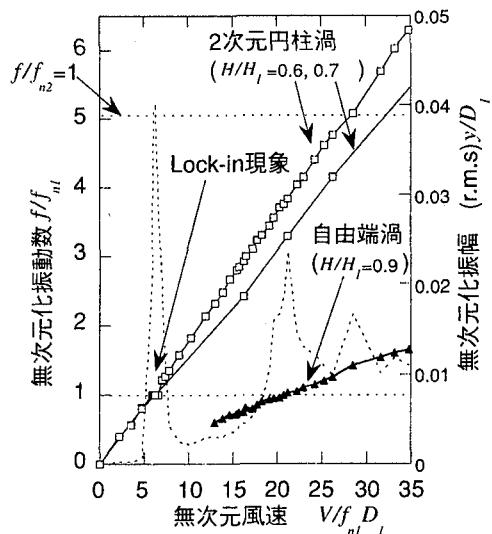


図-16 風直角方向応答と渦放出振動数の関係
(模型1を用いたケース)

起されることが示された。しかし、自由端渦の形成状況は後流風速変動の測定のみから考察するのは難しい。そこで本節においては、可視化実験の結果を基に自由端渦の形成特性を検討する。

可視化実験には模型1を用いた。図-16に示したように模型1においては、自由端渦が後流風速変動スペクトル中に明確なピークとして識別されたのは $V/f_{n1}D_1 = 13$ 以上の風速である。しかし、その風速においては煙が薄くなるため、低風速($V/f_{n1}D_1 = 2.7$, $Re=945$)の下で可視化実験を行った。

図-17に後流の可視化写真を示す。図-17(a)は模型の頂部付近、図-17(b)は模型の中腹($H/H_i = 0.5$ 付近)の後流を示している。図-17(a)をみると、

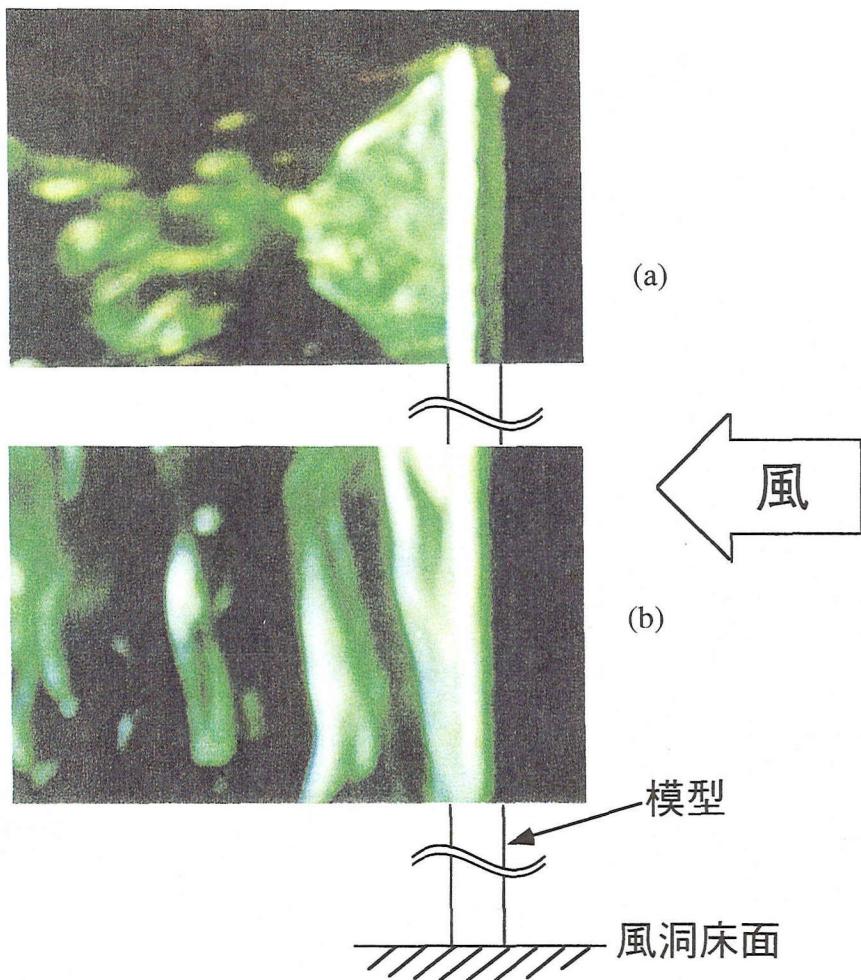


図-17 模型1の後流の可視化写真 ($V/f_{\alpha}D_1 = 2.7$, $Re = 945$)
 (a)模型頂部(自由端渦が放出される直前) (b)模型中腹



図-18 自由端渦が放出された瞬間 ($V/f_{\alpha}D_1 = 2.7$, $Re = 945$)

模型の上を通過する流れが背面に引き込まれていることがわかる。半円形の煙面が模型背後に存在しており、その上端部はTrailing Vortex⁹⁾である。その半円形煙面の後流側に現れている煙塊が、放出された自由端渦であると思われる。ただし、その形状は明確には認識できない。

一方、模型中腹（図-17(b)）では、2次元円柱渦がやや傾斜して放出されている。Williamson⁷⁾は、たとえ端板を設けた2次元円柱であっても、渦放出が風洞壁面に発生する境界層の影響を受け、渦放出の位相がスパン方向に連続的になれず、渦は傾斜放出されることを示している。本実験は3次元実験である上、風洞床面による境界層が存在する。これらが2次元円柱渦の傾斜放出の原因であると思われる。

次に、自由端渦の放出状況を詳しく観察する。図-18も模型頂部付近の後流を示しており、図-17(a)と図-18は時間的に連続した写真である。図-17(a)に現れた半円形煙面の後流側先端は、次の瞬間（図-18），上流側へ引き込まれている。同時に、自由端渦と思われる煙塊が放出されている。すなわち、自由端渦はこの半円形煙面の後流側先端から放出されており、そのFormation Region（渦形成域の気流方向スケール）は模型の側面から半円形煙面の後流側先端までの長さであると思われる。そこで図-17(a)と(b)を比較すると、自由端渦のFormation Regionは2次元円柱渦のものより長いことがわかる。

Formation Regionと渦放出振動数の関係については、Roshko⁸⁾が2次元円柱模型の背後に、断面直径の1.14倍の長さのスプリッタープレートを設置することによって調べている。その結果によると、スプリッタープレートを円柱から後流側へ遠ざける程、渦放出振動数は低くなる。これはスプリッタープレートが渦同士の相互作用を妨げ、渦はスプリッタープレートの後縁で放出されることを意味する。つまりFormation Regionが長いほど、放出振動数は低くなる。

Roshkoの考察を本実験に当てはめると、自由端渦の振動数が2次元円柱渦の振動数よりも低いのは、自由端渦のFormation Regionが長いことに起因すると考えられる。

4. 2次元円柱渦の放出振動数の分岐

本実験において、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に不連続に変化することが観測された。この現象は幾つかの既往の研究^{9),10),11),12)}においても報告されており、Williamsonら⁹⁾はこれをCellular

Sheddingと呼んでいる。

円柱塔状構造物を対象とした研究では、Farivar¹⁰⁾が $Re=7.0 \times 10^4$, $I_u=0.9\%$ の気流において、アスペクト比10.0, 11.0, 12.5の有限長静止円柱の表面圧力の測定、および後流風速変動の高さ方向の多点測定を行っている。その結果は、自由端渦に対応する振動数成分が円柱頂部近傍に存在するとともに、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に不連続に変化することを示している。Farivarの結果によると、2次元円柱渦放出振動数の不連続点は $H/H_0=0.60$ にあり、一方、本研究では $H/H_0=0.66$ 付近である（図-12(b)）。模型のアスペクト比は異なるものの（模型1のアスペクト比： $H_0/D_0=37.0$ ），比較的良好一致している。また、二つの2次元円柱渦の放出振動数の比については、Farivarの結果においては約0.88であるのに対し、本研究の場合は0.89であり、やはり良好一致している。

しかしながら、ロッキング模型を用いた実験³⁾においては、同じプロファイルを有する気流を用い、模型の高さも同じであったにもかかわらず、2次元円柱渦の放出振動数が不連続に変化する現象は、見られていない。この不整合性の原因は不明であるが、ロッキング模型と弾性模型の違いから原因となり得る点を抽出すると、まずロッキング振動と弾性振動（1次モード）の振動形の違いが考えられる。しかし、本実験の弾性模型においては、応答振幅が小さい風速域においても2次元円柱渦の放出振動数はスパン方向に分岐しており（図-12(b)，もしくは図-14(b)），振動形の違いが2次元円柱渦の放出振動数の分岐に影響しているとは考え難い。また、もう一点として、本実験の弾性模型においては弾性変形を妨げぬように、表面に微小なクリアランス（約1mm、スパン方向に等間隔に6カ所）が設けられていることが挙げられる。このクリアランスが流れに影響を与え、2次元円柱渦の放出振動数をスパン方向に変化させる要因となっている可能性はある。

一方、このような2種類の渦放出振動数の位相が揃うときに大きな渦が生成され、その低周波渦放出が高風速渦励振を励起するのではないかとの指摘がある¹³⁾。以下にこの点について考察する。

まず模型1の場合、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に分岐する現象がみられ、これら2種類の渦放出振動数により低周波渦が発生し、高風速渦励振の発振に関与している可能性はある。しかし、模型2を用いた場合、2次元円柱渦の放出振動数の分岐が観測されたにもかかわらず、高風速渦励振は発現していない。また、ロッキング模型を用いた実験においては、2次元円柱渦の振動数の分岐はみら

れなかったが、高風速渦励振は発現していた。以上のように、2次元円柱渦の振動数の分岐がみられたとしても、高風速渦励振は発現しない場合があり、逆にその現象が現れなくとも高風速渦励振は発現する。したがって、2次元円柱渦の放出振動数の分岐と、本実験における高風速渦励振との関連性は薄い。

次に、模型3のケースを検討する。模型3も高風速渦励振が発現した模型である。模型3の場合、中腹に設置した直径の大きい($D_3=2.33D_1$)円柱により、 $H/H_1=0.5$ 付近での渦放出振動数は、 D_1 による2次元円柱渦の放出振動数より大幅に低くなっている(図-15(b))。スパン方向に異なる2次元円柱渦の放出振動数が存在していることになり、これらを2次元円柱渦の振動数の分岐と捉えることができる。そこで、その2つの渦放出振動数によって低周波渦が発生したと仮定し、その振動数を $V/f_n D_1=22$ におけるパワースペクトル(図-15(b))を用いて算出する。対象となる2つの2次元円柱渦の放出振動数は、 $f/f_{n1}=1.3$ (高さ: $H/H_1=0.5$ 近傍)および3.7(高さ:0.6< H/H_1 <0.83)であり、これらの振動数の位相が揃う周期は約0.36秒である。すなわち、発生する低周波渦の放出振動数は約 $f/f_{n1}=0.1$ となる。しかし、図-15(b)は高風速渦励振が発現した風速におけるスペクトルであるため $f/f_{n1}=1.0$ の振動数を有する渦放出が必要だが、算出された低周波渦の放出振動数はこれに一致していない。ゆえに、仮に低周波渦が発生していたとしても、本実験における高風速渦励振の励振源となっている可能性は低い。

以上のように、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に異なる現象は、本実験における高風速渦励振の発生原因には結びつかないと思われる。一方、高風速渦励振が励起された模型では自由端渦が発生しており、その振動数が固有振動数に一致する風速において高風速渦励振が発現している。したがって、高風速渦励振はやはり自由端渦によって励起されると考えられる。また、自由端渦は頂部に小円盤を有していない模型においてのみ発生したことから、模型頂部形状に依存して形成されると推定される。しかし、本実験は自由端渦の生成メカニズムを明らかにするには至っておらず、さらなる検討が必要である。

5.まとめ

円形断面を有する塔状構造物における高風速渦励振の特性を調べるために、形状の異なる3種類の弹性模型を用いて風洞実験を行った。風直角方向応答および後流風速変動を高さ方向に多点で測定し、そ

れぞれの実験結果を比較することによって、自由端渦の発生と高風速渦励振の発現との関連性を検討した。また、可視化実験により自由端渦の形成特性について考察した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 頂部付近の断面形状が一様の模型においては高風速渦励振が発現した。また、頂部に断面直径がやや大きい小円盤を有する模型においては高風速渦励振は発現しなかった。
- (2) 高風速渦励振が発現した模型においては、模型の自由端付近の後流中に自由端渦が生成されており、応答のパワースペクトルにもその影響が確認された。また、高風速渦励振が発現しなかった模型においては、自由端渦は検出されなかった。
- (3) 自由端渦の振動数は風速に対しほば比例するが、2次元円柱渦の放出振動数よりも低い。自由端渦の振動数が模型の固有振動数に一致する風速域において高風速渦励振が励起される。この結果は一様円形断面を有するロッキング模型による実験結果と整合する。
- (4) 自由端渦のFormation Regionは2次元円柱渦のFormation Regionよりも長い。この長いFormation Regionが自由端渦の振動数が低い原因であると考えられる。
- (5) 高風速渦励振の発現に関与しないと推定されるが、一様断面の模型および頂部に断面直径のやや大きい小円盤を有する模型においては、2次元円柱渦の放出振動数がスパン方向に不連続に変化する現象が確認された。この現象はロッキング模型を用いた実験においてはみられておらず、この不整合性については、さらに検討する必要がある。

今後、自由端渦の発生がどのようなパラメータに依存するのかについての詳細な検討が、また、自由端渦が高風速渦励振の励振力として模型にどのように作用するのかについて圧力模型を用いた実験や数值解析による研究が必要である。

謝辞：風洞実験において、清水建設（株）技術研究所流体グループの皆様、特に若原敏裕氏に多大な御協力をいただきました。また、日本大学理工学部の野村卓史助教授より貴重な御意見をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Wootton, L. R. : The oscillations of large circular stacks in wind, Proc. Inst. Civil Eng., Vol. 43, pp. 573-598, 1969.
- 2) 河井宏允：テーパーつき円柱の渦励振、日本風工学会

- 誌, No.59, pp. 49-52, 1994.
- 3) 北川徹哉, 若原敏裕, 藤野陽三, 木村吉郎 : 円柱塔状構造物における高風速渦励振の発生メカニズムに関する実験的解明, 土木学会論文集, No.543, I-36, pp. 195-207, 1996.
 - 4) 北川徹哉, 藤野陽三, 木村吉郎 : 円柱塔状構造物の高風速渦励振に関する実験的研究, 第14回風工学シンポジウム論文集, pp.299-304, 1996.
 - 5) 若原敏裕, 北川徹哉, 藤野陽三, 木村吉郎 : 風洞実験に基づく高層タワーの渦励振に関する研究, 日本風工学会誌, No.63, pp.193-194, 1995.
 - 6) Kawamura, H., Hiwada, M., Hibino, T., Mabuchi, I. and Kumada, M. : Flow around the finite circular cylinder on a flat plate, *Bull. JSME*, Vol. 27, pp.2142-2151, 1984.
 - 7) Williamson, C. H. K. : Oblique and parallel modes of vortex shedding in the wake of a circular cylinder at low Reynolds numbers, *Jour. Fluid Mech.*, Vol.206, pp.579-627, 1989.
 - 8) Roshko, A. : On the wake and drag of bluff bodies, *Jour. Aeronautical Sci.*, Vol. 22, pp. 124-135, 1955.
 - 9) Khalak, A. and Williamson, C. H. K. : Dynamics of a hydroelastic cylinder with very low mass and damping, *Jour. Fluids and Struct.*, Vol. 10, pp. 455-472, 1996.
 - 10) Farivar, D. : Turbulent uniform flow around cylinders of finite length, *AIAA Jour.*, Vol. 19, pp. 275-281, 1981.
 - 11) Tombazis, N. and Bearman, P. W. : A study of three-dimensional aspects of vortex shedding from a bluff body with a mild geometric disturbance, *Jour. Fluid Mech.*, Vol. 330, pp. 85-112, 1997.
 - 12) Fox, T. A. and Apelt, C. J. : Fluid-induced loading of cantilevered circular cylinders in a low-turbulence uniform flow. Part 3 : Fluctuating loads with aspect ratios 4 to 25, *Jour. Fluids and Struct.*, Vol. 7, pp. 375-386, 1993.
 - 13) 松本勝, 西崎孝之, 青木淳, 北沢正彦, 白土博通 : 斜張橋ケーブルの限定型振動としてのレインパイブレーションに関する研究, 構造工学論文集, Vol.40A, 土木学会, pp. 1059 - 1064, 1994.

(1997. 4. 8 受付)

A STUDY ON VORTEX-INDUCED VIBRATION OF CIRCULAR TOWER ELASTIC MODEL AT A HIGH WIND SPEED

Tetsuya KITAGAWA, Yozo FUJINO and Kichiro KIMURA

Wind tunnel experiments using circular tower elastic models were conducted to investigate the mechanism of the vortex-induced vibration at a high wind speed. Special attention was paid to the generation of the tip-associated vortices. In order to clarify the role of this vortex in conjunction with that vibration, the models with different free-end shapes were used. It was shown that the tip-associated vortices were the cause of that vibration and this consideration was consistent with that obtained by a previous experiment using a circular tower rocking model. Also, the reason why the tip-associated vortices had a frequency lower than the Karman vortex shedding frequency was discussed based on the result of a flow visualization.