

学位論文

剥離干渉法による構造断面柱の
空力弾性振動制振のメカニズムに関する研究

2007 年 9 月

九州工業大学大学院 工学研究科
建設社会工学専攻

林 田 宏 二

論 文 要 旨

氏 名 林田 宏二

論文題目名

剥離干渉法による構造断面柱の
空力弾性振動制振のメカニズムに関する研究

これまでに、構造部材や機能部材を用いて耐風安定性を向上させることに主眼を置き、2つの剥離点を設けることで風による振動の原因である剥離流を制御する「剥離干渉法」と称した空力的制振手法が提案されている。この手法の有効性は、主に応答実験によって確認されているが、耐風安定性の向上に寄与する詳細なメカニズムについては明確にされていないのが現状である。そこで、本論文では完全剥離型断面柱 ($B/D=1$, B : 断面幅, D : 断面高さ) および再付着型断面柱 ($B/D=8$) の矩形断面柱を検討対象とし、剥離干渉法の制振メカニズムや剥離干渉法によって得られる具体的な効果等について明らかにすることを目的として、可視化による画像解析を用いた流速測定技術であるPIV (Particle Image Velocimetry) 実験や表面圧力測定実験などの各種風洞実験手法によって検討を行った。

以下に、本論文で述べている各章における研究内容および結果の総括を示す。

第1章では、序論として、上述した本研究の背景および目的を明らかにし、各章の研究内容、本論文の全体構成について示した。

第2章では、本研究で扱う問題に関する既往の研究成果について述べ、剥離干渉法の制振メカニズムに関して検討すべき課題など、本研究の位置付けを明らかにした。

第3章および**第4章**では、**第2章**で示した既往の知見を踏まえて、完全剥離型断面柱である正方形角柱 ($B/D=1$ 矩形断面柱) に対して、鉛直板によって2次剥離点を設ける「鉛直板タイプ」の剥離干渉法を適用した場合の応答特性および静的空気力特性について、風洞実験によって検討を行った。その結果、応答特性については、剥離干渉法が有効に機能した場合には高風速域におけるギャロッピングの発生が抑制される効果を発揮すること、低風速域においてカルマン型渦励振が発生するが、僅かな構造減衰付加によって大幅な振幅低減効果を得ることができることなどを明らかにした。また、静的空気力特性については、正方形角柱に対して抗力が大きく減少する効果が得られること、揚力勾配が負勾配から正勾配となることによってギャロッピングが制振されること、これらの空気力特性の挙動が辺長比を大きくした場合と似た傾向を示していること等を明らかにした。また、以上の検討結果から、有効な剥離干渉角 θ (断面柱側面に対して2つの剥離点を結んだ線分がなす角度) は $\theta=20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ の範囲にあることを確認した。

第5章および**第6章**では、応答特性および静的空気力特性を踏まえて、静止状態および応答実験で発生した振動現象を対象とした強制加振状態において、表面圧力測定およびPIV実験を行い、断面柱の各部位に作用する圧力分布や周辺流れ場の詳細な挙動に着目すること

で剥離干渉法のメカニズムについて検討を行った。その結果、静的空気力特性については、剥離点間（鉛直板の風上側， 2つの剥離点の間の空間）に発生する定常的な循環流が大きな役割を果たしており，有効な剥離干渉角においては，循環流によって発生する負圧が鉛直板に作用することで抗力を減少させる力が働き，さらにこの負圧が断面柱の側面に作用することで再付着型断面柱と似た圧力分布を示すこと等を明らかにした。応答特性については，有効な剥離干渉角の場合，正方形角柱でギャロッピングが発生するような高風速域においても，2次剥離点である鉛直板の風下側断面には振動に寄与する力が発生せず，鉛直板の風上側の循環流によって発生する負圧が制振力となって空力振動を抑制していること，強制的に振動を与えた状態においても，有効な剥離干渉角では2次剥離点より風下側の流れ場は静止状態に近い流れ場（風軸に対して上下対称）となっていることを明らかにした。また，渦励振が発現する風速域においても，有効な剥離干渉角では鉛直板の風上側に循環流が発生しており，制振に寄与しているが，断面後流に発生するカルマン渦によって鉛直板の風下側断面に作用する励振力が鉛直板の風上側に発生する制振力を上回ることによって振動が発生しているという考察を示した。

第7章では，剥離干渉法を実用化するにあたって検討すべき課題を挙げ，「迎角に対する剥離干渉法の有効性」「風向が風上側，風下側で逆となる場合の剥離干渉法の有効性」「乱流中における剥離干渉法の有効性」「剥離干渉法の手法の違いによる影響」の4つの課題について検討した。その結果，迎角がある場合においても，循環流の働きによって気流迎角がない状態に近い周辺流れ場を形成する効果を発揮しており，剥離干渉法は迎角の影響を受けにくい手法であること，風向変化に対応するために鉛直板を風上側および風下側の両側に設置する必要がある $\theta = 30^\circ$ の場合においても，片側設置の場合とほぼ同じ応答特性を示し，風向変化に対して対応可能であること，剥離干渉法は乱流中においても一様流中と同様の制振効果を発揮していること，隅切り処理によって2つの剥離点を設ける「隅切りタイプ」による剥離干渉法を用いた場合においても，鉛直板タイプと同様に剥離点間に生じる循環流の働きによって同じような流れ場を形成しており，定性的には鉛直板タイプと同じ制振効果を発揮することを明らかにした。さらに，剥離干渉法と回転ローターによるアクティブ境界層制御法との間に密接な関連性があり，パッシブ制御である剥離干渉法がアクティブ制御法と同じ効果を発揮していることを示した。

第8章では，再付着型断面柱である $B/D=8$ 矩形断面柱に対して，剥離干渉法を適用した場合の制振メカニズムについて検討した。その結果，完全剥離型断面柱における剥離干渉法の制振メカニズムと共通の知見が得られ，剥離干渉法は断面柱の種類に関係なく，同じ制振メカニズムが機能しているということを示した。

第9章では，**第3章**～**第8章**の各種検討によって明らかとなった剥離干渉法の制振メカニズムおよび剥離干渉法によって得られる効果に関して，得られた知見をまとめて，本論文の結論とした。

目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 研究の目的および構成	2
第2章 既往の研究から得られる知見	3
2.1 風による構造物の挙動	3
2.1.1 静的な空力特性	3
2.1.2 動的な空力特性	6
2.2 境界層制御を用いた制振対策手法	11
2.2.1 回転ローターを用いた耐風制振機構に関する研究	11
2.2.2 剥離干渉法による耐風制振機構に関する研究	15
2.2.3 隅欠き・隅切り断面による耐風安定性向上に関する研究	19
2.3 本研究への展開	22
第3章 剥離干渉法を適用した場合の応答特性	23
3.1 供試模型およびパラメーター	23
3.2 風洞装置	24
3.3 たわみ1自由度応答実験概要	25
3.3.1 計測システム	25
3.3.2 実験諸元	26
3.4 実験結果および考察	27
第4章 剥離干渉法を適用した場合の静的空気力特性	31
4.1 静的空気力測定実験概要	31
4.1.1 計測システム	31
4.1.2 静的空気力係数の定義	32
4.1.3 実験諸元	33
4.2 実験結果および考察	33
4.2.1 静的空気力特性	33
4.2.2 準定常理論によるギャロッピングの判定	34
第5章 剥離干渉法を適用した場合の表面圧力分布特性	37
5.1 供試模型およびパラメーター	37
5.2 風洞装置	38

5.3	表面圧力測定実験概要	40
5.3.1	計測システム	40
5.3.2	圧力係数の定義	42
5.3.3	実験諸元	42
5.4	実験結果および考察	43
5.4.1	静止状態における表面圧力分布特性	43
5.4.2	強制加振状態における表面圧力分布特性	48
第6章	剥離干渉法を適用した場合の周辺流れ場特性	53
6.1	PIV (Particle Image Velocimetry) 実験概要	53
6.1.1	計測システム	53
6.1.2	PIVによる流速場の測定手法	54
6.1.3	実験諸元	58
6.2	実験結果および考察	60
6.2.1	静止状態における周辺流れ場特性	60
6.2.2	強制加振状態における周辺流れ場特性	70
第7章	剥離干渉法の実用化に関する諸課題に対する検討	80
7.1	迎角に対する剥離干渉法の有効性	80
7.1.1	検討概要	80
7.1.2	迎角に対する剥離干渉法の効果	80
7.2	風向変化に対する剥離干渉法の効果	85
7.2.1	検討概要	85
7.2.2	風向変化の影響	86
7.3	乱流における剥離干渉法の効果	88
7.3.1	検討概要	88
7.3.2	乱流特性	88
7.3.3	乱流中での応答特性	89
7.4	剥離干渉の手法の違いによる影響	91
7.4.1	検討概要	91
7.4.2	隅切りタイプと鉛直板タイプによる剥離干渉法の効果の違い	91
7.5	回転ローターによる境界層制御法との関連性	99
第8章	再付着型断面柱に対する剥離干渉法の適用	101
8.1	供試模型およびパラメーター	101
8.2	各種実験概要	102
8.2.1	計測システム	102
8.2.2	実験諸元	103

8.3 検討結果および考察	104
8.3.1 応答特性	104
8.3.2 静止時の空気力特性	104
8.3.3 強制振動時の空気力特性	105
8.3.4 周辺流れ場特性	105
8.4 再付着型断面柱に対する剥離干渉法の効果	105
第9章 結論	111
9.1 各章の要約	111
9.2 剥離干渉法の制振メカニズム	114
参考文献	116
謝辞	118
関連発表論文	120

主要記号一覧

B	: 模型断面幅
D	: 模型断面高さ
l	: 模型長
θ	: 剥離干渉角
h	: 鉛直板高さ
p	: 隅角部から2次剥離点までの水平距離
V	: 接近風速
V_r	: 換算風速
f_h	: たわみ固有振動数
f_t	: ねじれ固有振動数
f_s	: 後流渦の発生振動数
A	: たわみ応答振幅
$2A/D$: 無次元倍たわみ振幅
ϕ	: ねじれ応答振幅
V_{cr}	: 渦励振発振風速
Re	: レイノルズ数
Sc	: スクルートン数
St	: ストローハル数
ν	: 空気の動粘性係数
α	: 迎角
δ_A	: 空力減衰率
δ_S	: 構造減衰率
ρ	: 空気密度
F_D	: 抗力
F_L	: 揚力
F_M	: 空力モーメント
C_D	: 抗力係数
C_L	: 揚力係数
C_M	: 空力モーメント係数
$dC_L/d\alpha$: 揚力勾配
$dC_M/d\alpha$: 空力モーメント勾配
\bar{C}_p	: 平均圧力係数
\tilde{C}_p	: 変動圧力係数
\bar{C}_f	: 鉛直板の前背面の差圧による平均抗力係数
\bar{C}_p^*	: 断面上下面測定点の差圧による平均揚力係数

X, Y	: 物理空間上の座標
$X/D, Y/D$: 物理空間上の無次元座標
X_1	: 後流 1 次渦中心から模型背面までの水平距離
Y_1	: 循環流中心位置から模型側面までの鉛直距離
r	: 回転ローターの接近流速に対する周速度比
b	: 乱流格子の部材幅
m	: 乱流格子のメッシュサイズ (格子中心間隔)
Iu	: 気流の乱れ強さ
S	: 気流の乱れスケール
θ_1	: 風上側の剥離干渉角
θ_2	: 風下側の剥離干渉角

第1章

序論

1.1 研究の背景

一般的に橋梁に採用される空力振動対策の手法としては、TMD (Tuned Mass Damper) やAMD (Active Mass Damper) などに代表される減衰付加タイプの制振装置による構造的手法とデフレクターやフラップ、スポイラーなどの付加部材によって断面まわりの流れを制御する空力的手法が良く知られている¹⁾。しかしながら、構造的手法は制振装置を設置するスペース確保の問題や初期およびメンテナンスコストの面で負荷が大きい。また、空力的手法は構造的手法に比べてコスト面におけるメリットは大きいですが、構造部材ではないものを付加することになる。さらに近年、海に近い場所に架設された橋梁において潮風による付加部材の腐食や経年劣化の問題等も生じている²⁾。

これらの手法に対して、久保は、構造部材や機能部材を用いて耐風安定性を向上させることに主眼を置き、風による振動の原因である剥離流を制御する剥離干渉法 (SIM: Separation Interference Method) と称する空力的制振手法を提案している^{3),4)}。この手法は、図-1.1に示すように2つの剥離点 (以後、1次剥離点と2次剥離点と呼ぶ) を設け、1次剥離点から発生した剥離流を2次剥離点と干渉させることによって耐風安定性を向上させる境界層制御による制振手法である。

橋梁の主桁や主塔を対象とした場合、図-1.1(a)のような鉛直板タイプは地覆や高欄、検査路等を利用することで、また図-1.1(b)のような隅切りタイプは断面の端部を処理して2次剥離点を設けることで対応可能である。実際に国内最大支間長のPC斜張橋である伊唐大橋の主桁断面をはじめ様々な橋梁に対して、風洞実験によって有効性が確認され、実用化されている。

しかしながら、剥離干渉法の有効性は主に応答実験によって確認されたものであり、耐風安定性の向上に寄与する詳細なメカニズム (剥離干渉法が機能した場合の流れの挙動や構造物に作用する外力の変化) や剥離干渉法によって得られる具体的な効果などについては明確にされていないというのが現状である。

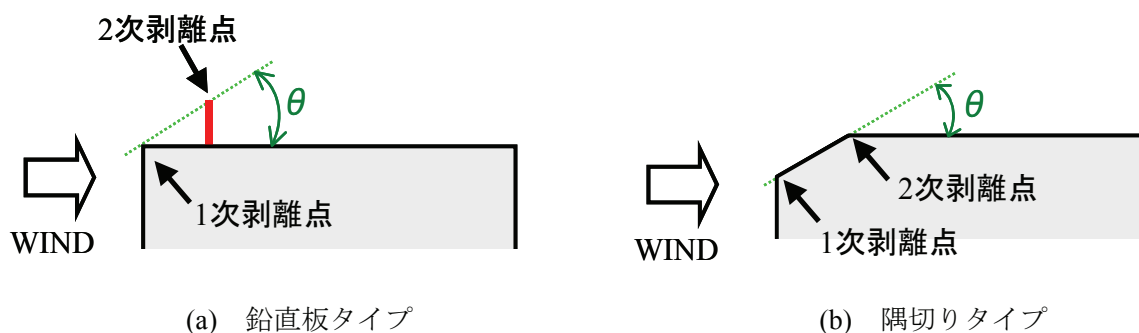


図-1.1 剥離干渉法 (SIM) の適用イメージ

1.2 研究の目的および構成

本研究では、これまで得られている剥離干渉法に関する知見を踏まえた上で、構造物の基本的な断面柱である矩形断面柱の中から、完全剥離型断面柱である正方形断面柱および再付着型断面柱である辺長比8の扁平矩形断面柱を検討対象として、静止状態および強制加振状態での各種風洞実験（振動応答測定、静的空気力測定、表面圧力測定、PIV（Particle Image Velocimetry）による流速場の測定）を行うことによって、剥離干渉法を適用した場合の制振メカニズムを明らかにすることを研究の目的とした。

以上の目的を踏まえて、本論文は第2章から第9章までを次のように構成する。

第2章では、本研究で扱う問題に関する既往の研究成果について述べ、剥離干渉法の制振メカニズムに関して本研究で検討すべき課題など、本研究の位置づけを明らかにする。

第3章および第4章では、第2章で示した既往の知見を踏まえて、完全剥離型断面柱である正方形断面柱に対して、鉛直板タイプの剥離干渉法を適用した場合の応答特性および静的空気力特性について風洞実験によって検討した結果を述べる。

第5章および第6章では、応答特性および静的空気力特性を踏まえて、静止状態および応答実験で発生した振動現象を対象とした強制加振状態において、表面圧力測定およびPIV実験を行い、断面柱の各部位に作用する圧力分布や周辺流れ場に注目することで、剥離干渉法の制振メカニズムについて検討した結果を述べる。

第7章では、実構造物に剥離干渉法を適用する場合に問題となる4つの課題、「迎角に対する剥離干渉法の有効性」「風向が風上側と風下側とが逆になった場合の剥離干渉法の有効性」「乱流中における剥離干渉法の有効性」「剥離干渉法の手法の違いによる影響」について検討した結果を述べ、さらに剥離干渉法と回転ローターによる境界層制御法との関連性について述べる。

第8章では、再付着型断面柱である辺長比8の扁平矩形断面柱に対して剥離干渉法を適用した場合の各種空力特性を把握し、再付着断面柱に対する剥離干渉法の効果について検討した結果を述べる。

第9章では、第3章～第8章の各種検討から得られた成果を要約し、剥離干渉法の制振メカニズムに関して得られた知見についてまとめたものを示して本論文の結論とする。

第2章

既往の研究から得られる知見

2.1 風による建造物の挙動

風による建造物の挙動は、時間平均的な空気力、すなわち静的な空気力（定常空気力）による変形である静的な現象と、それ自身の運動に伴って時間的に変化する空気力、すなわち動的な空気力（非定常空気力）による振動である動的な現象に分けられる。

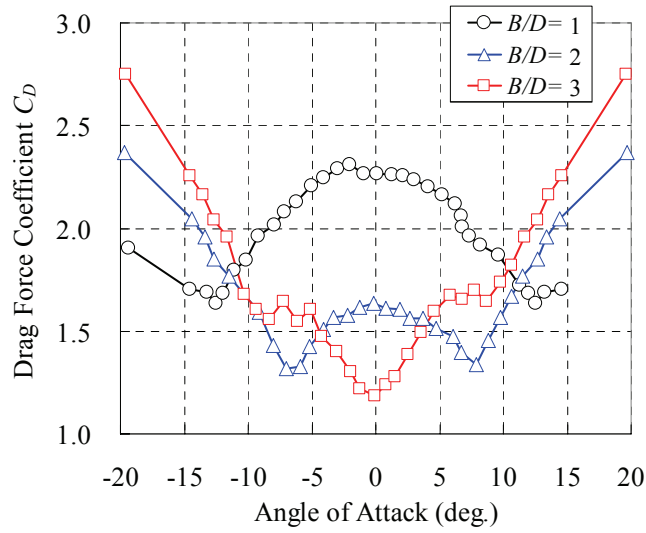
2.1.1 静的な空力特性^{5),6),7)}

静的な現象に着目すると、静的空気力による変形が考えられる。この変形は、風の入射方向、流れ方向を基準にして抗力、これに直角な揚力、さらに中心周りの空力モーメントによって引き起こされるものである。また揚力は、次項に示す発散振動であるギャロッピングの発生の有無に大きく関係している。以下に矩形断面柱に作用する静的な空気力である抗力、揚力、空力モーメントに関する既往の研究結果について述べる。

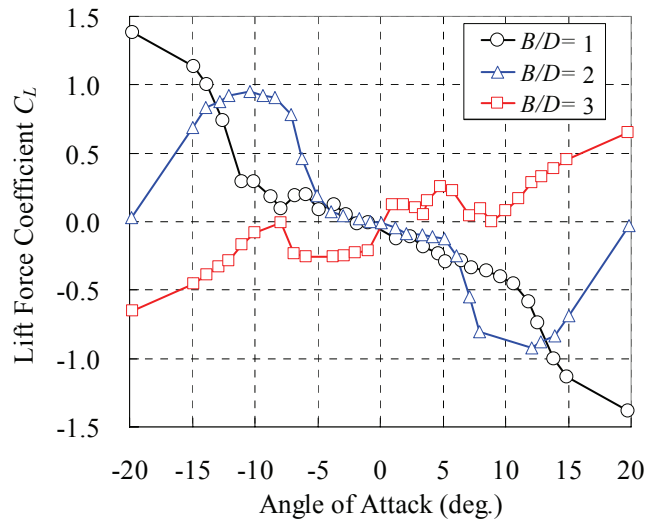
図-2.1 に、一様流中における辺長比 $B/D=1, 2, 3$ (B : 断面幅, D : 断面高さ) の矩形断面柱の静的三分力係数 (抗力係数 C_D , 揚力係数 C_L , 空力モーメント係数 C_M) の迎角 α に対する変化を示す。ここで、 C_D については断面高さ D , C_L および C_M については断面幅 B を用いて無次元化して係数を算出している (後述の式(4.1)~式(4.3)参照)。

抗力係数 C_D については、辺長比が大きくなるに従って、迎角 $\alpha=0^\circ$ における C_D が減少し、 C_D が上に凸となる迎角の範囲が狭くなる傾向を示す。揚力係数 C_L については、迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力係数の勾配 (揚力勾配) $dC_L/d\alpha$ に着目すると、完全剥離型断面柱である $B/D=1, 2$ では負勾配となっているのに対して、再付着断面柱となる $B/D=3$ においては正勾配となっている。空力モーメント係数 C_M については、迎角 $\alpha=0^\circ$ における空力モーメント係数の勾配 (空力モーメント勾配) $dC_M/d\alpha$ に着目すると、完全剥離型断面柱である $B/D=1, 2$ に比べて、再付着断面柱となる $B/D=3$ での負勾配の傾きが大きくなっている。

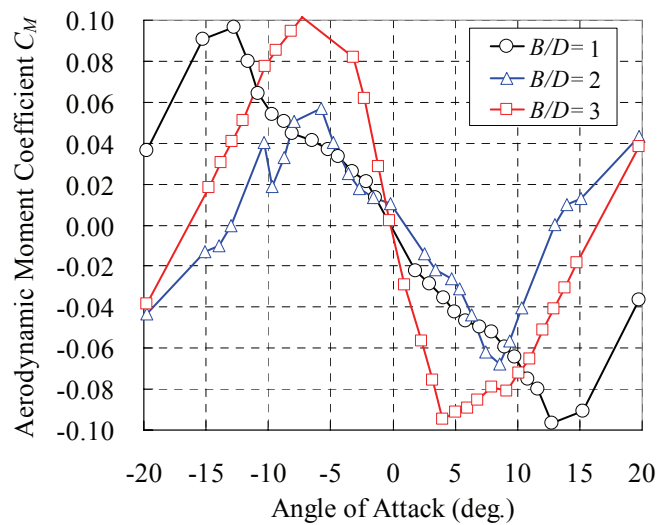
次に、再付着型断面柱である辺長比 $B/D=5, 10, 20$ の扁平矩形断面柱の静的三分力係数の迎角 α に対する変化を図-2.2 に示す。これより、扁平断面柱においては、迎角 $\alpha=0^\circ$ における C_D はほぼ 1.0 に近い値となっている。また、揚力勾配 $dC_L/d\alpha$ は正勾配となる迎角の範囲が広がる傾向を示す。さらに、迎角 $\alpha=0^\circ$ における空力モーメント勾配 $dC_M/d\alpha$ については、 $B/D=5$ では負勾配となっているのに対して、 $B/D=10$ および 20 では正勾配となっている。また辺長比が大きくなるに従って正勾配となる迎角の範囲が広く、正勾配の傾きが大きくなる傾向を示している。



(a) 抗力係数 C_D

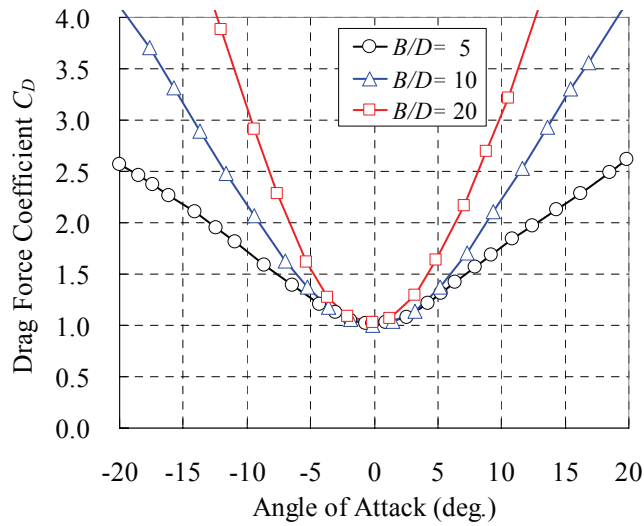


(b) 揚力係数 C_L

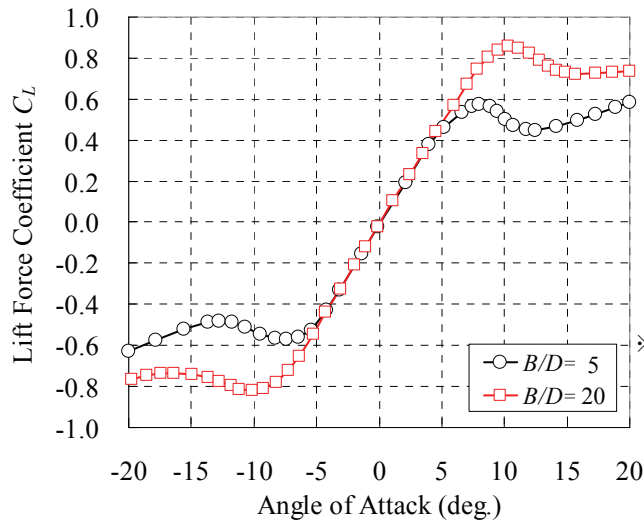


(c) 空力モーメント係数 C_M

図-2.1 $B/D=1, 2, 3$ 断面柱における静的三分力特性^{6),7)}

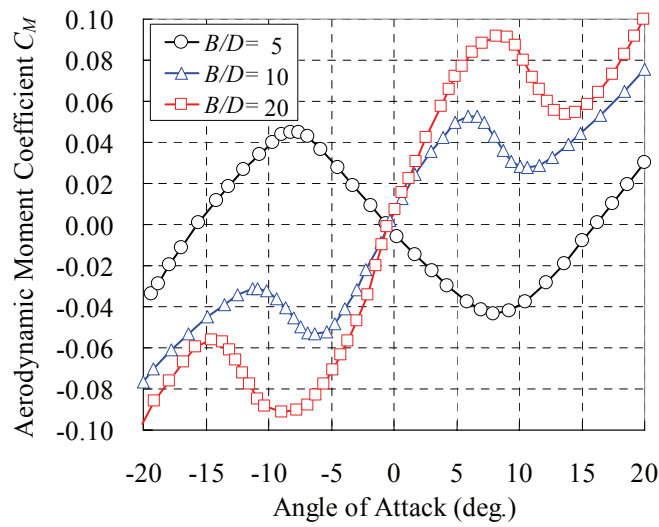


(a) 抗力係数 C_D



※ 文献 6,7)に
B/D=10 についての
検討事例なし

(b) 揚力係数 C_L



(c) 空力モーメント係数 C_M

図-2.2 B/D=5, 10, 20 断面柱における静的三分力特性^{6),7)}

2.1.2 動的な空力特性^{5),6),7),8)}

空気力によって生じる動的な現象（空力弾性振動）は、図-2.3 に示されるように、比較的低い風速域で限定的に生じる渦励振と高い風速域で生じる発散振動としてのギャロッピングやフラッターが代表的である。以下に、各種空力弾性振動現象について述べる。

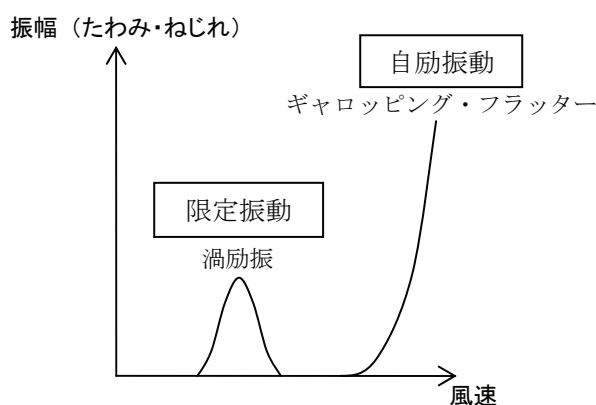


図-2.3 空力弾性振動の種類

(1) 渦励振⁶⁾

土木構造物あるいは構造物材のほとんどは流線型ではなく、鈍い断面柱であることが多い。このような鈍い断面柱が流れの中に置かれると、せん断境界層が表面から剥がれ、その後流に交番渦が発生し、物体には流れと垂直方向に周期的に外力が作用する。このとき発生する渦の発生振動数 f_s は、物体の断面形状とレイノルズ数 Re に固有なストローハル数 St より定まる。構造物の固有振動数 f_h （たわみ方向）が f_s と一致する風速が V_{cr} となる場合に、共振現象により、この風速付近で構造物には流れと垂直方向の振動が励起される。同様に、ねじれ振動、流れ方向の振動の発生が考えられる。この現象が渦励振と呼ばれる。

渦励振の特徴としては、限られた風速範囲においてのみ振動が生じること、その振幅は発散に至らず限定的であることが挙げられる。また、一般的に風向きに垂直なたわみ方向の振動が支配的である。

(2) ギャロッピング^{5),6),7),8),9)}

ギャロッピングは、自励的なたわみ1自由度発散振動である。この振動は氷雪が付着した送電線や辺長比の小さい長方形断面柱およびH型断面柱において発生する。特に長方形断面柱においては、辺長比が $0.7 < B/D < 2.8$ の範囲において発生することが、これまでの研究で明らかにされている。

ギャロッピングの発生メカニズムとしては、以下の通りである。

図-2.4 に示すように、流速 V の中で正方形角柱が中立位置を通過して下方に運動している瞬間を考えた場合、物体の運動速度 \dot{y} と流速 V との間で作られる相対迎角 α' を持つ流れが作用することになる。その結果、下面側の流速は、上面側より速くなり、下面側の負圧が上面側の負圧より小さくなって、下向きの力が作用することになる。下向運動中に下向き（振動が助長される方向）の空気力が作用するため、振幅は増大することになる。逆に上向き運動中に中立位置を通過する瞬間には、上向きの空気力が作用することになる。すなわち、振動変位よりも空気力の方が先行することになる。別の

表現をすれば, 空気力の位相が振動変位よりも進むことになる.これが自励振動のメカニズムである.

ギャロッピングに対して最初に理論的な考察を行ったのが, Den Hartog であり, 氷雪が付着した送電線に発生したギャロッピングに静的空気力を用いた準定常理論を適用し, 静的空気力係数のみでギャロッピングの発生の判定が行えることを示した⁹⁾.

ギャロッピング発生の判定式を以下に示す.

$$dC_l/d\alpha + C_D < 0 \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

準定常理論によれば, 迎角 $\alpha=0^\circ$ において式(2.1)を満足する場合に, 発散振動であるギャロッピングが発生すると言われている. このことより, 図-2.1 に示す静的三分力係数の抗力係数および揚力係数の結果から辺長比 $B/D = 1$ および $B/D = 2$ においてはギャロッピングが発生するが, 辺長比 $B/D = 3$ では発生しないことになる.

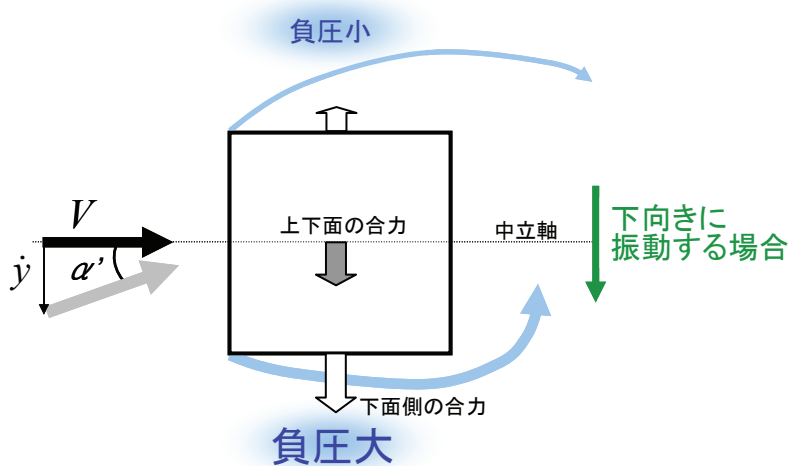


図-2.4 ギャロッピングの発生メカニズム

(3) ねじれフラッターおよび連成フラッター⁸⁾

図-2.5 に示すように構造物が風の流れの中におかれると、空気力を受けて振動し、その振動変位によって新たに空気力が形成され、その空気力（付加空気力）がさらに構造物変位を増し、次の空気力を生むというフィードバック回路が形成される。このような構造物と流体の相関関係によって、発散的な振動（フラッター）が引き起こされると考えられる。

実際の構造物は非流線型で、このような物体まわりの流れは、物体前面のよどみ点から表面に沿って発達した境界層が、後流の物体（After Body）の急な曲率変化による圧力上昇に追従できず、物体から剥離して流れの中に押し出される。この場合にも付加空気力による発散的な振動が現れる。この剥離流フラッターの発生には、剥離流の After Body への再付着の有無など、振動と剥離流の複雑な相関関係が関わっている。

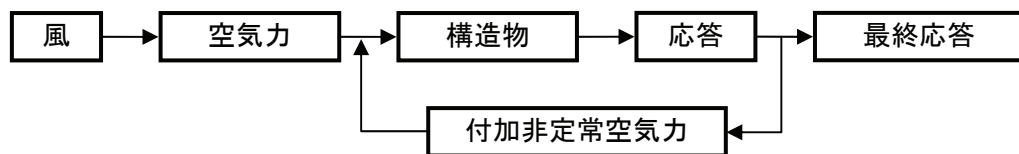


図-2.5 構造－流体相関現象概念図

風の中の弾性構造物が何らかのきっかけで振動し始めると、図-2.5 のように付加非定常空気力が作用する。この空気力は物体の振動に起因するものとして非定常空気力と呼ばれる。線形 N 自由度系の運動方程式をマトリクス表示してみる。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_a\ddot{y} + F_v\dot{y} + F_d y \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

付加空気力は式(2.2)の右辺のように表すことができる。 F_a , F_v , F_d はそれぞれ付加空気力の振動加速度、速度、変位に比例する成分の係数で、換算振動数 fD/V の関数となる。ここで、 f_1 はねじれ固有振動数、 D は代表長（高さ）、 V は流速である。上式の左辺はそれぞれ系の慣性力、減衰力、弾性力で、 y は変位ベクトルを表す。

右辺第 1 項の振動加速度に比例する付加空気力は、薄膜構造のように物体が空間的に大きく、しかも軽い場合にのみ意味を持ち、通常の構造物では無視できる。振動速度比例項と振動変位比例項は符号を変えるとそれぞれ空力減衰、空力剛性に関連する力となる。

フラッターの発生を式(2.2)に当てはめると次のようになる。右辺を左辺に移項して、

$$M^*\ddot{y} + C^*\dot{y} + K^*y = 0 \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

となる。係数マトリクス M^* , C^* , K^* は付加空気力の寄与を含む質量、減衰、剛性マトリクスである。この系について全エネルギーの時間変化は

$$\dot{E} = -(\dot{y}^T C^*_1 y + \dot{y}^T K^*_2 y) \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

で表すことができる。ここで、 M^* は対称マトリクスであると仮定する。 C^*_1 は C^* の対称成分で、系の構造減衰を無視すると、付加空気力の寄与となる。一方、 K^*_2 は K^* の逆対称成分で、系の剛性

マトリクスは対称であるから、これも付加空気力の寄与となる。式(2.4)は流れのエネルギーが付加空気力を通して系に流入することを意味する。右辺第1項は付加空気力のうち、対称成分が等価減衰力の形を取ってなす仕事に相当し、不安定振動が流れによる負減衰効果によって発生することを意味している。このとき、不安定振動は1自由度系としても存在でき、具体的には剥離流フラッターのすべてのタイプが該当する。

第2項は付加空気力のうち、逆対称成分が等価剛性力の形を取ってなす仕事に相当し、不安定振動が変位モード自由度間の連成（自由度間の位相差に伴う負減衰効果）によって発生することを意味している。この場合は多自由度系特有のものということができ、具体的には曲げねじれフラッター（連成フラッター）が該当する。

断面まわりの流れの剥離が大きくなるような鈍い断面の構造物では1自由度のねじれフラッターが発生する。つまり、付加空気力による等価負減衰効果に基づいた不安定振動で、系の慣性力、弾性力に比べて相対的に小さい構造減衰力に対してこの等価負減衰力が打ち勝てば振動は発生するわけで、付加空気力としてはそれほど大きくなくても励振力となり得る。この場合のフラッターを発生させる付加空気力の分布特性は、After Bodyの形状と大きさ、発生する振動モードの種類、および振幅、風の乱れなど物体に入射する流れのもつ乱れの程度と大きさ、さらに振動応答周期 T_S と流れの流下時間 T_F の比、すなわち無次元の換算風速

$$Vr = \frac{V}{fD} = \frac{1}{f} \cdot \frac{1}{B/V} \cdot \frac{B}{D} = \frac{T_S}{T_F} \cdot \frac{B}{D} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

に密接に関係している。

換算風速が大きいことは振動応答に比べて剥離流の流下時間が早いことを、逆に小さいことは遅いことを意味している。一般に剥離流フラッターは付加空気力の非線形性のために強い非線形性を示し、ある換算風速で定常振動（リミットサイクル）を維持する限定振動を呈する。これに比べ、連成フラッターは破壊的な大振幅振動となることが多い。

長方形断面柱等の鈍い物体に発生する種々のフラッターの特性は、作用空気力を調べることで追跡することができる。式(2.2)、式(2.3)、式(2.4)では、付加空気力を物体周辺の表面に分布して作用する圧力を合算した合力で考えているが、剥離流と作用空気力、さらに振動応答との関係を議論するためには、振動する物体表面の非定常圧力分布を調べるほうが有効である。非定常圧力測定において、正弦的な振動変位として $y = A \sin \omega t$ を与えると物体表面上のある点の圧力 $p(t)$ は次式のように振動変位より位相遅れ β を持つ正弦的な変動圧力として観測できる。

$$C_p(t) = \bar{C}_p + \tilde{C}_p \cdot \sin(\omega t + \beta) \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

ここで、 $C_p(t)$: 圧力係数、 \bar{C}_p : 平均圧力係数、 \tilde{C}_p : 変動圧力係数である。振動応答の発生と作用圧力の関係は、振動の1周期間に作用圧力がなす仕事量を計算することによって明らかになる。つまり、

$$W = \oint C_p(t) dy = \pi A C_{PI} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

$$C_{PI} = \tilde{C}_p \cdot \sin \beta \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

となるが、 C_{PI} の正負に応じて仕事量 W が正負、すなわち振動が励振、あるいは減衰されること

になる。従って、測定された非定常圧力について係数 C_{pI} の分布を求めれば、振動応答の発生の有無、あるいは圧力のどの部分が 1 周期の間に励振力として、また減衰力として作用することになるかが判明する。

ただし、振動応答の周期と剥離流れの流下時間との関係、すなわち換算風速の大小に応じて、また振動振幅の大きさによって剥離流の挙動は異なる。曲げ振動時よりもねじれ振動時には、回転運動に伴う剥離流と物体後縁端部の回転運動との干渉が要因として重なって、複雑さが増すと考えられる。さらに、ねじれ振動を発生させる励振モーメントには、物体周辺の圧力分布と回転中心からの腕の長さの関係があるので、剥離流とねじれ振動応答との関連を調べる上でこの点にも留意する必要がある。

2.2 境界層制御を用いた制振対策手法

空力弾性振動は、物体から境界層が剥離することによって剥離流が生じ、この剥離流が作る渦の配置パターンによって生じるという考えを基に、境界層を制御することで剥離を小さくし、振動の原因となる剥離渦の生成を抑制するという「境界層制御」という手法に着目して、アクティブな制振対策の一つである回転ローターを用いた境界層制御法とパッシブな制振対策法の一つである剥離干渉法および隅欠き・隅切り断面柱による耐風安定手法に関する既往の研究について示す。

2.2.1 回転ローターを用いた耐風制振機構に関する研究^{10),11),12)}

空力弾性振動が風上側剥離点から生じる剥離流が主因となって生じる現象であるという考え方に立ち、剥離点となる隅角部に配置した回転ローターを回転させることで剥離流を加速し、境界層を制御することによって耐風安定性を向上させる手法に関する研究が行われてきた。以下に回転ローターによる境界層制御の研究概要について示す。

(1) 実験概要

図-2.6 および図-2.8 に示すような正方形断面柱 ($B/D=1$) および扁平断面柱 ($B/D=10$) に回転ローターを配置した二次元供試模型を用いて検討を行った。

$B/D=1$ 断面柱では、風上側隅角部 2ヶ所に $0.1D$ となるような直径のローターを、 $B/D=10$ 断面柱では、風上側端部に模型高さ D と同一の直径のローターを配置しており、図-2.7 および図-2.9 に示すようにローターを回転させた場合に生じる応答特性について検討を行っている。ローターの回転速度については接近風速 V に対するローターの周速度の比 (以下、回転比 r) として評価した。

迎角 $\alpha=0^\circ$ でローターの回転比を変化させた場合について、バネ支持 1 自由度応答実験結果およびスモークワイヤー法による可視化実験結果について示す。

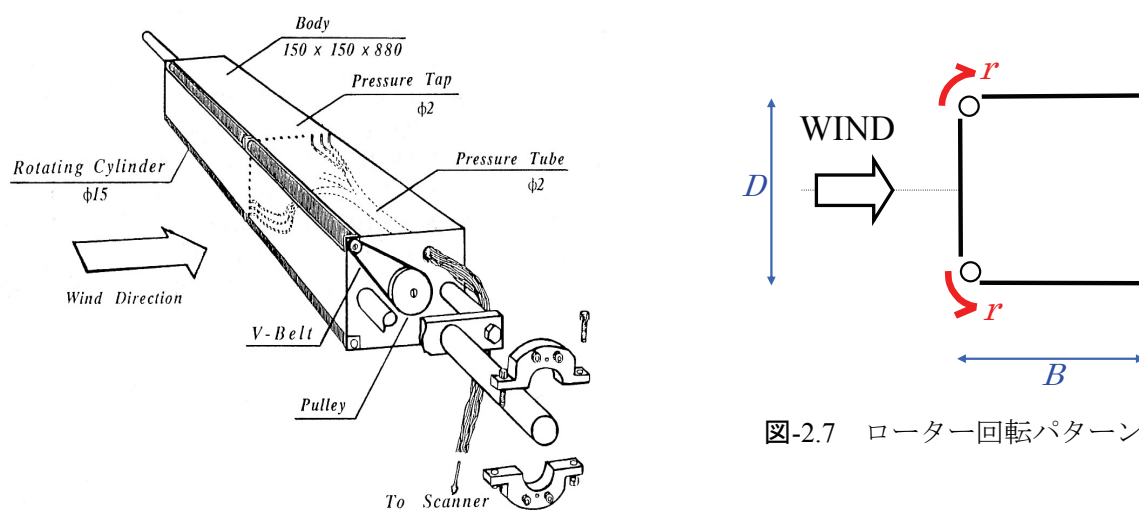


図-2.6 供試模型概略図 ($B/D=1$)

図-2.7 ローター回転パターン

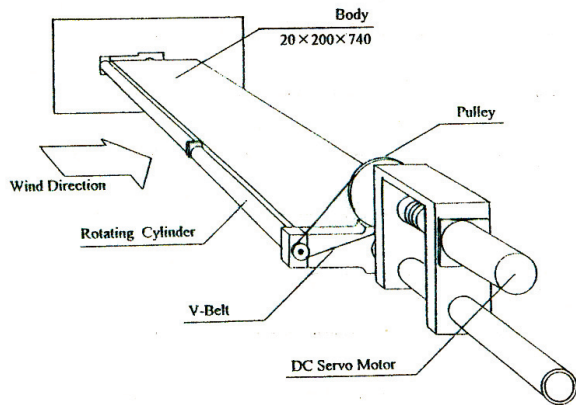


図-2.8 供試模型概略図 ($B/D=10$)

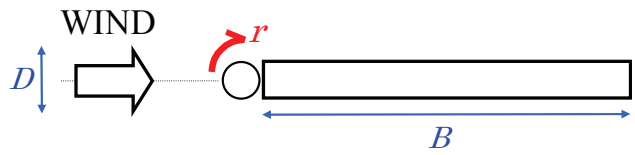


図-2.9 ローター回転パターン

(2) 実験結果および考察

① $B/D=1$ 断面柱におけるたわみ応答特性

迎角 $\alpha=0^\circ$ において、上下面のローターを同回転比で回転させた場合のたわみ応答実験の結果を図-2.10 に示す。応答図の縦軸は応答振幅 A を代表長 D で無次元化した無次元倍振幅 $2A/D$ 、横軸は模型のたわみ固有振動数 f_h と代表長 D で無次元化した換算風速 $V_r (=V/f_h D)$ として整理している。これより、ローター静止時において換算風速 $V_r=6$ 付近からギャロッピングが発生しているのに対して、 $r=0.8$ のときにはギャロッピングの発現風速が $V_r=9.6$ に移行している。さらに回転比を上げるとギャロッピングは測定範囲内では発生しなくなる。また、渦励振についてはローター静止時に $V_r=4.8$ で発生し、回転比を上げててもその最大振幅はわずかに減少する程度で、ほぼ同じ V_r で発生する。

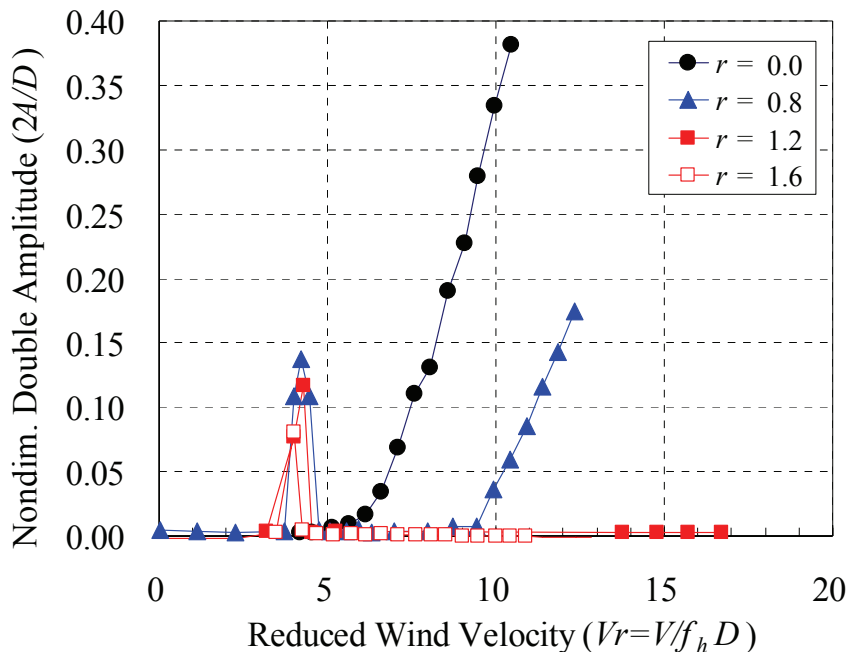


図-2.10 各回転比に対するたわみ1自由度応答特性 ($B/D=1$)

② $B/D=1$ 断面柱における周辺流れ場

ローター無回転の場合と回転比 $r=1.0$ で回転させた場合のスモークワイヤー法による可視化写真を図-2.11 に示す。これらより、ローターを回転させた場合、境界層が加速されることによって剥離流が断面側面に沿うように流れて、剥離が抑えられている。

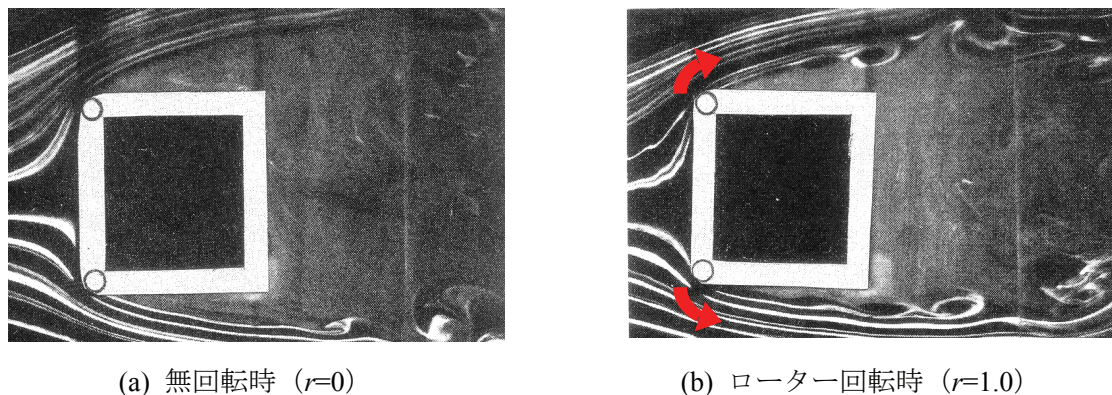


図-2.11 スモークワイヤー法による可視化写真

③ $B/D=10$ 断面柱におけるねじれ応答特性

図-2.12 にねじれ応答実験結果を示す。応答図は横軸に換算風速 $Vr (=V/f_i D)$ (f_i : 模型のねじれ固有振動数), 縦軸に倍振幅 2ϕ [deg.]とする。これより、回転比 $r=0$ では、 $Vr=300$ 付近から振動が発生し、倍振幅 8deg.以上のねじれフラッターが生じているのに対して、回転比 $r \geq 0.4$ ではフラッター発現風速(応答倍振幅が 2deg.以上となる風速と定義)が高風速側に移行する傾向を示している。この傾向は、図-2.13 に示すように迎角が正迎角(吹き上げ)となる場合に顕著である。

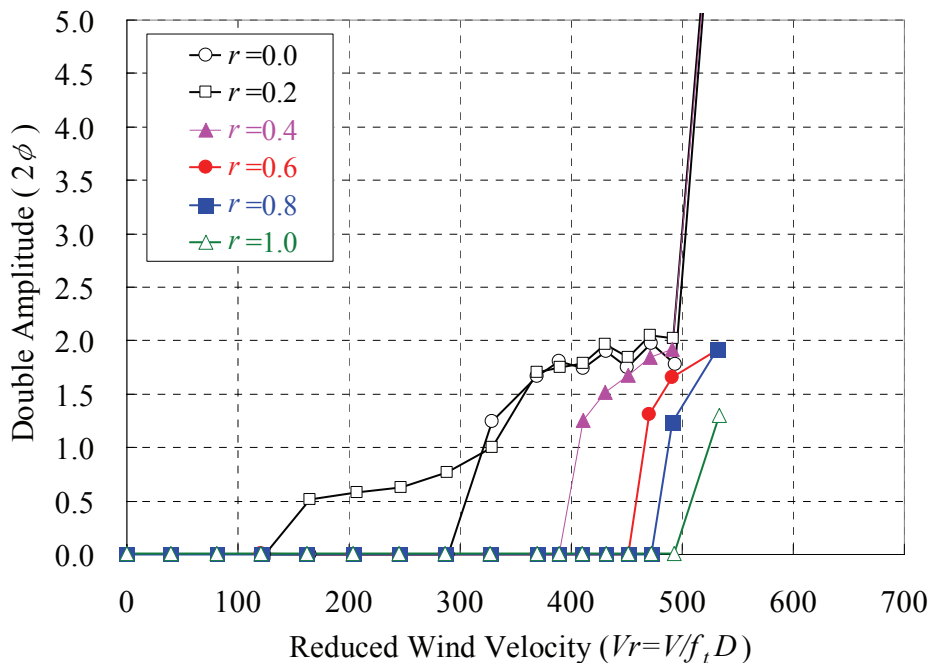


図-2.12 各回転比に対するねじれ応答特性 ($B/D=10$)

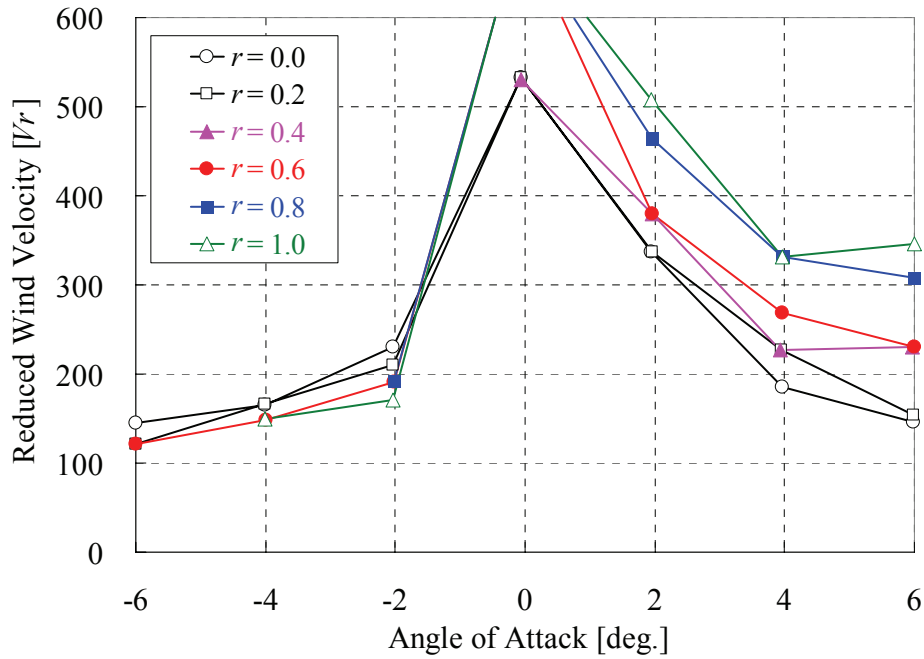


図-2.13 迎角および回転比に対するフラッター発振風速

④ $B/D=10$ 断面柱における周辺流れ場

フラッター発現風速の高風速化に対して顕著な効果があった迎角 $\alpha=+6^\circ$ において、ローター無回転の場合と回転比 $r=1.0$ の場合の可視化写真を図-2.14 に示す。 $r=0$ のときには上面において大きな剥離が生じているのに対し、 $r=1.0$ のときには上面の境界層が狭まっており、扁平断面柱においてもローターによって境界層が加速され、剥離が抑制される効果が現れている。

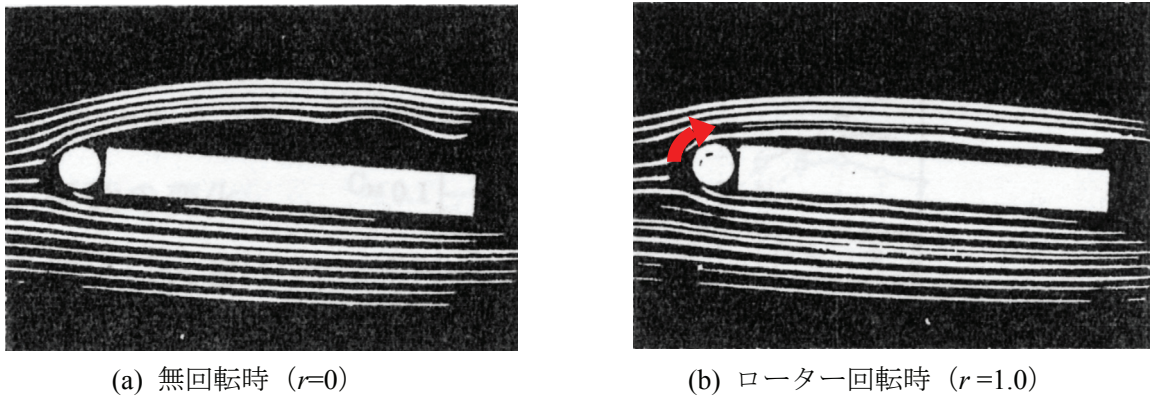


図-2.14 スモークワイヤー法による可視化写真（迎角 $\alpha=+6^\circ$ ）

(3) まとめ

以上のことから、回転ローターによって境界層を加速し、剥離を抑制することで、正方形角柱ではギャロッピングが抑制され、扁平矩形断面柱ではフラッターの発現風速を高風速側に移行させる効果を発揮する。

2.2.2 剥離干渉法による耐風制振機構に関する研究^{3),4)}

久保らは、橋梁の構造部材を対象として、図-1.1(a)に示すような矩形断面柱に鉛直板を設置することによって新たな剥離点（2次剥離点）を設ける鉛直板タイプの剥離干渉法について検討を行っている。その結果、剥離干渉法の基本的な特性として得られた知見を以下に示す。

(1) 実験概要

図-2.15に示すような完全剥離型断面柱である $B/D=1.2$ および再付着型断面柱である $B/D=6$ の矩形断面柱を基本断面柱として、鉛直板の高さ h 、鉛直板の設置位置 p 、1次剥離点である隅角部と2次剥離点である鉛直板端部をむすぶ線分が基本断面柱側面とのなす角度である剥離干渉角 θ をパラメータとして検討を行った。鉛直板は、 $B/D=1.2$ 断面柱では風上および風下の両側側面に、 $B/D=6$ 断面柱では風上側側面のみに設置している。以下に、迎角 $\alpha=0^\circ$ の一様流中で、各パラメータを変化させた場合について、たわみ・ねじれの各1自由度を与えたバネ支持1自由度応答実験によって検討した結果を示す。

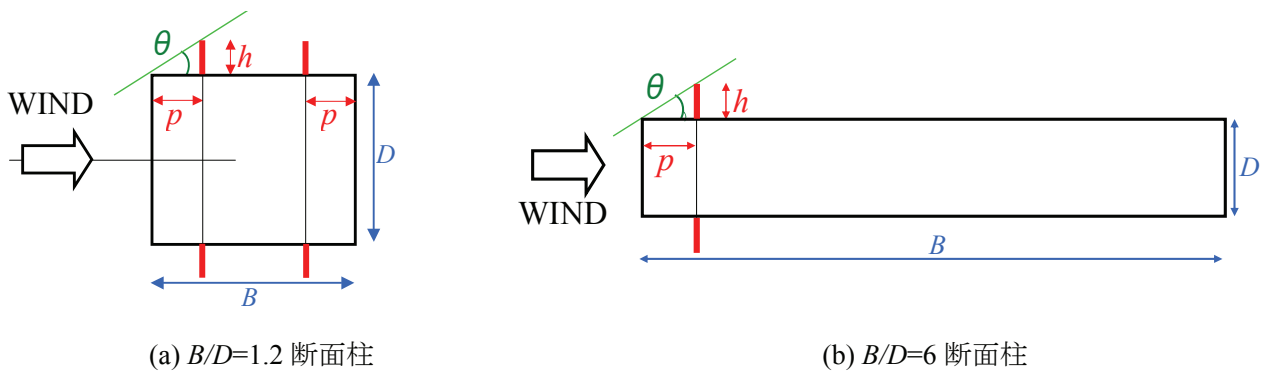


図-2.15 鉛直板による剥離干渉法の適用概要およびパラメーター

(2) 実験結果および考察

① $B/D=1.2$ 断面柱における有効な剥離干渉パラメーター

$B/D=1.2$ 断面柱について、鉛直板の高さ h を基本断面柱の高さ D に対して $h=0.18D$ に固定し、1次剥離点からの距離 p を変化させることで有効な剥離干渉角 θ の把握を行った。剥離干渉角 θ によるたわみ応答特性を図-2.16(a)に示す。これより、 $p/D \geq 0.26$ ($\theta \leq 35^\circ$) の範囲においては、基本断面柱（図中、「Basic」）で生じる高風速域でのギャロッピングの発生が抑制されている。さらに $p/D \geq 0.3$ ($\theta \leq 31^\circ$) においては低風速域での限定振動の発生風速範囲が狭まり、空力的により安定化している状態となっている。

次に、剥離干渉角を $\theta=30^\circ$ に固定して、鉛直板の高さ h と1次剥離点からの距離 p を変化させることで剥離干渉法を有効に機能させるために必要な鉛直板の大きさの把握を行った。 h によるたわみ応答特性を図-2.16(b)に示す。これより、 $p/D \geq 0.3$ ($h \geq 0.17D$) の範囲で、高風速域でのギャロッピングの発生が抑制されている。

② $B/D=6$ 断面柱における有効な剥離干渉パラメーター

再付着型断面柱である $B/D=6$ 断面柱について、 $B/D=1.2$ 断面柱と同様の検討を実施した。剥離干渉角を $\theta=30^\circ$ に固定して、 h/D を変化させた場合のねじれ応答特性を図-2.17に示す。これより、 $0.3 \leq p/D \leq 0.5$ ($0.17D \leq h \leq 0.3D$) の範囲で、高風速域でのねじれフラッターの発生が抑えられている。

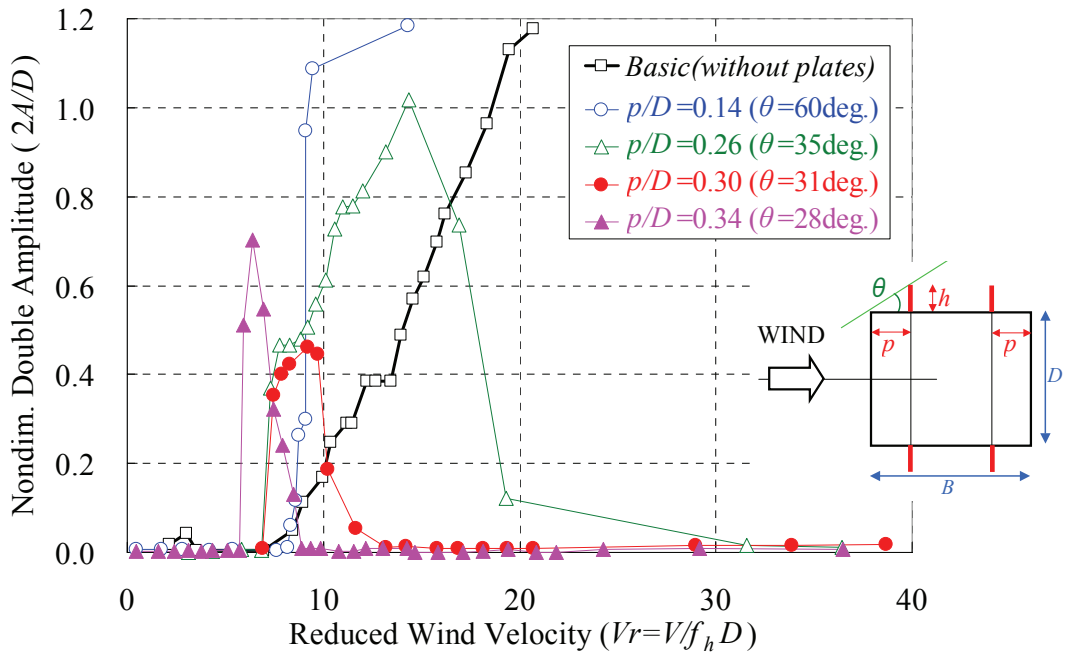
ここで、自由振動法によって得られた高風速域でのねじれ振動に対する変動空気力係数 C_ϕ (式(2.9)参照) についてまとめたものを図-2.18に示す。これより、 $p/D=0.3$ ($h=0.17D$) の場合において最も減衰力が大きくなっており、空力的に安定であることが示されている。

$$C_\phi = -\frac{4\pi I \theta \delta_A}{\rho B^3 l} \cdot \frac{D}{B} \cdot \frac{\phi}{D} \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

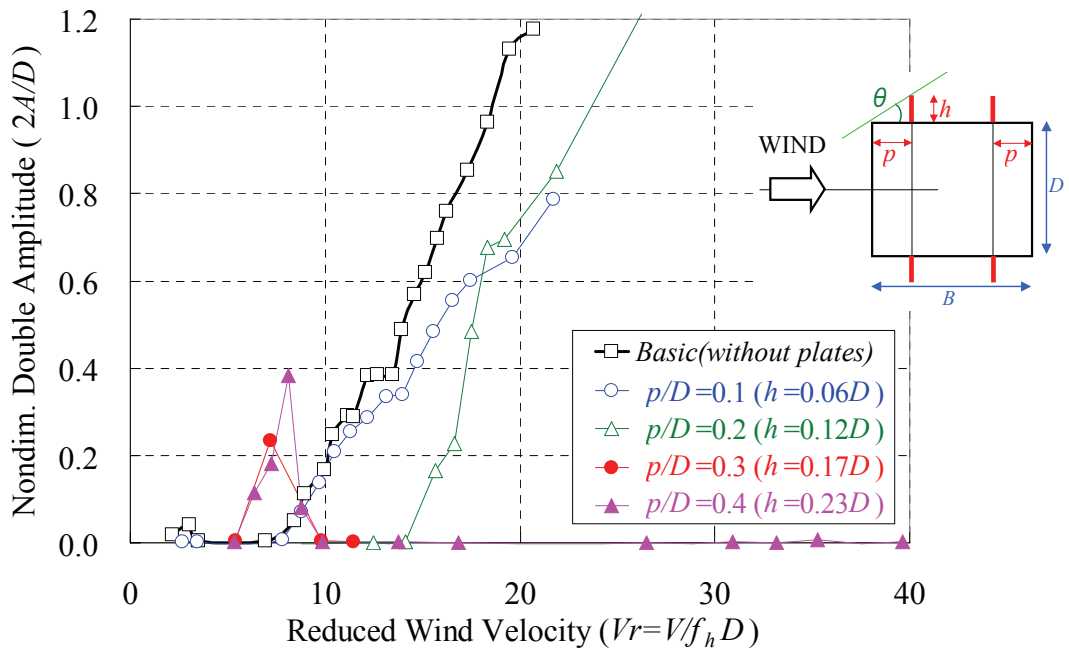
ここで、 I : 極慣性モーメント、 l : 模型長、 ϕ : ねじれ振幅、 δ_A : 対数空気力減衰率

(3) まとめ

以上のことから、鉛直板タイプの剥離干渉法においては、完全剥離型および再付着型の断面の形状によらず、「剥離干渉角 θ を 30° 付近」に設定し、「鉛直板の高さを断面高さの2割程度」とした場合に、有効な制振および耐風安定効果が得られることが示されており、剥離干渉法を適用する場合のポイントとなっている。



(a) 剥離干渉角 θ を変化させた場合 ($h=0.18D$ 固定)



(b) 鉛直板の高さ h と設置位置 p を変化させた場合 ($\theta=30^\circ$ 固定)

図-2.16 辺長比 $B/D=1.2$ 断面柱におけるたわみ1自由度応答特性

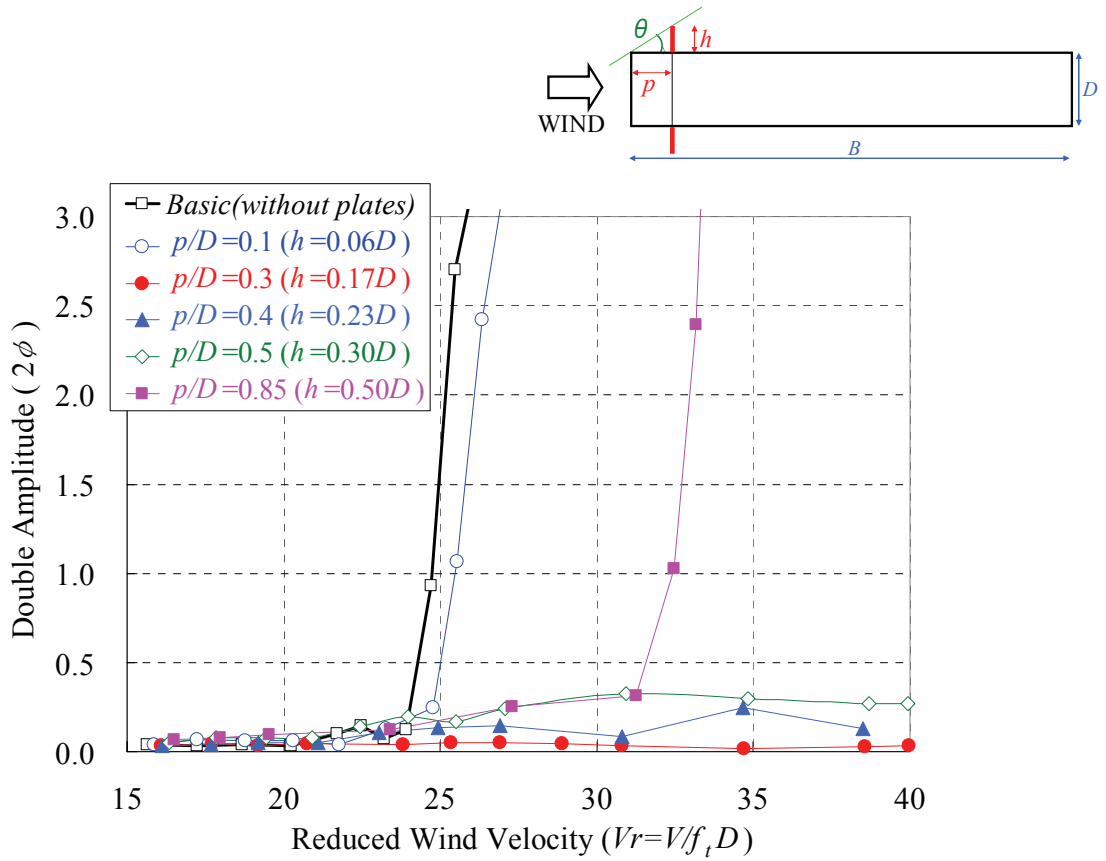


図-2.17 辺長比 $B/D=6$ 断面柱におけるねじれ1自由度応答特性

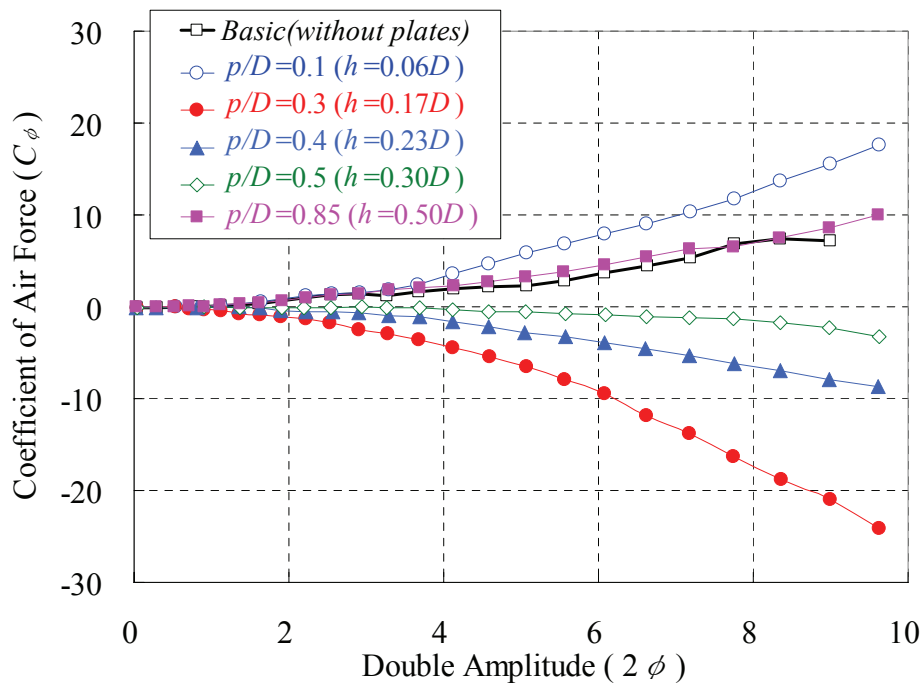


図-2.18 高風速域における変動空気力係数 C_ϕ

2.2.3 隅欠き・隅切り断面による耐風安定性向上に関する研究^{13),14),15)}

断面柱の隅欠き処理は、橋梁の主塔や高層建築物に対して風力および振動応答低減を目的として採用されている手法である。この手法で得られる効果については剥離干渉法のものと同じと考えることができる。隅欠きおよび隅切りの大きさによる耐風安定性の効果について行った研究事例から得られる知見を以下に示す。

(1) 岡島らの検討^{13),14)}

岡島らは、隅欠きの大きさをパラメータとして矩形断面柱の振動応答について検討を行っている。以下に抜粋した検討結果を示す。

図-2.19 および表-2.1 に示すような $B/D'=0.64\sim 0.72$ の断面柱に対して、隅欠き形状を変化させて、たわみ 1 自由度応答実験を行っている。

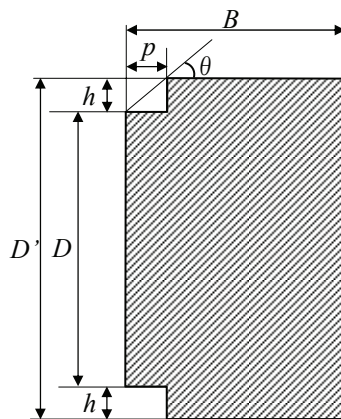


図-2.19 断面形状

表-2.1 検討諸元

断面形状	断面高 D' (D)	断面幅 B	辺長比 B/D' (B/D)	パラメータ				たわみ 固有振動数 f_h	スルトン数 Sc	対数構造 減衰率 δ
				p	h	h/D	θ			
形状 3	60 (50)	43.1	0.72(0.86)	10.8	5.0	0.10	24.8	11.62	11.63	0.005934
形状 6	60 (48)	41.6	0.69(0.86)	10.8	6.0	0.13	29.1	11.91	9.88	0.005346
形状 8	60 (46.2)	39.6	0.66(0.86)	10.8	6.9	0.15	32.6	16.11	10.42	0.005487
形状 9	62 (46)	39.6	0.64(0.86)	10.8	8.0	0.17	36.5	16.11	10.35	0.005287

各断面形状のたわみ応答特性を比較したものを図-2.20 に示す。応答図は横軸を実験風速 V 、縦軸を断面高さ D に対する振幅比 η とする。

これより、形状 3 においてはギャロッピングが発生しているのに対し、形状 6, 8, 9 ではギャロッピングは発生せず、渦励振のみの応答特性を示す。渦励振の応答のピーク値については、形状 6 では $\eta \approx 9\%$ 、形状 8 では $\eta \approx 6\%$ 、形状 9 では $\eta \approx 7.5\%$ となっていることから、形状 8 が最も空力的に安定した断面となっている。

これより、剥離干渉角となる θ については、 30° 付近、隅欠きの大きさは h/D が 15%程度である場合に空力的に安定している。

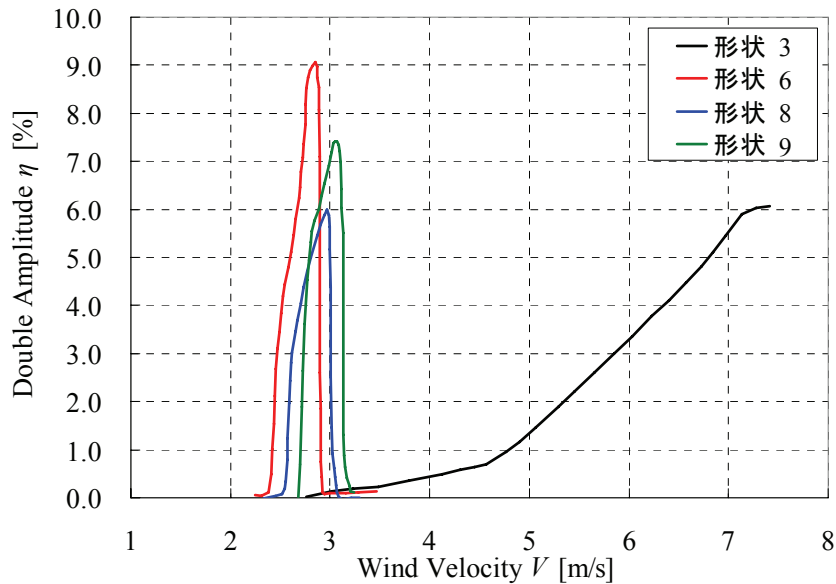


図-2.20 断面形状による応答特性

また、隅欠き断面に対するレイノルズ数 Re の影響についても検討を実施しており、各形状において Re を変化させた場合の応答特性より、 $Re \geq 6000$ となる範囲であれば応答特性に与える影響が小さいこと、ストローハル数や静的空気力特性などの静特性については $Re \geq 10000$ が影響を与えない目安となることが示されている。

(2) 白石らの検討¹⁵⁾

白石らは、橋梁の主塔を検討対象として、矩形断面柱に対して隅欠きを施した場合のギャロッピング抑制の検討を行っている。以下に抜粋した検討結果について示す。

図-2.21 に示すように $B/D'=1.46$ の矩形断面柱を基本断面柱 (Basic) として、4 隅に正方形形状の隅欠き ($\theta=45^\circ$ で固定) を施しており、隅欠き量 h/D' (h/D) を表-2.2 のように変化させている。

隅欠き量 h/D' を変化させた場合のたわみ 1 自由度応答特性を比較した結果を図-2.22 に示す。

これより、剥離干渉角 $\theta=45^\circ$ で固定した場合においても、隅欠き量 h/D' が $2/18$ (h/D で換算すると 0.14) および $3/18$ ($h/D=0.25$) の場合において、ギャロッピングの発生風速が高風速側に移行する結果を示しており、空力的に安定化している。

また、隅欠き形状を隅切り形状に変更した場合の応答特性を図-2.23 に示す。これより、隅切り断面の場合においても、 $h/D'=2/18$ ($h/D=0.14$) の場合に最も空力的に安定した応答特性を示している。

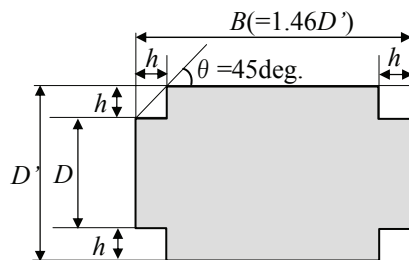


図-2.21 隅欠き断面形状

表-2.2 隅欠き量

h/D'	1/18	2/18	3/18	4/18	5/18	6/18
h/D	0.125	0.14	0.25	0.4	0.625	1

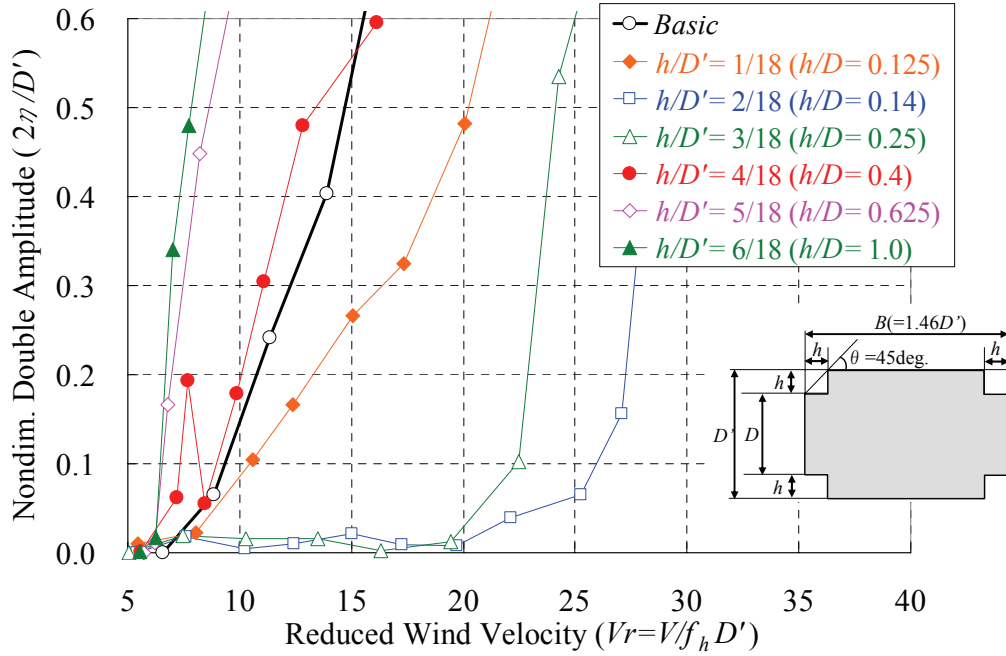


図-2.22 隅欠き量による応答特性 ($\theta=45^\circ$ 固定)

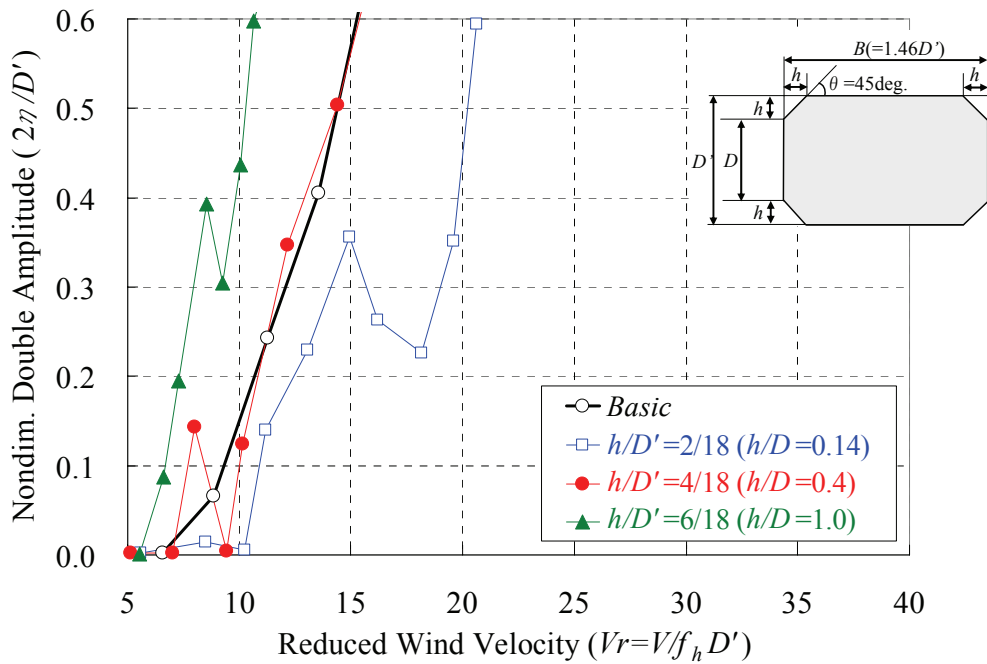


図-2.23 隅切り形状にした場合の応答特性 ($\theta=45^\circ$ 固定)

(3) まとめ

完全剥離型断面柱を対象とした隅欠き・隅切りによる耐風安定性の手法に対しても、鉛直板タイプの剥離干渉法を適用した場合に有効に機能するパラメーターに関する知見、「剥離干渉角 θ が 30° 付近、基本断面高さに対する 2 次剥離点の位置 h が断面高さ D の 2 割程度が有効」が同じように適用できることが明らかとなっている。

以上のことから、剥離干渉法と隅欠き・隅切りによる手法は基本的には同じメカニズムによって機能していると考えられる。

2.3 本研究への展開

既往の研究結果から、剥離干渉法を適用する場合において有効に機能するパラメーターが明らかにされており、有効な剥離干渉法のパラメーターは、完全剥離型断面柱および再付着断面柱のどちらの種類の断面柱においても適用可能であることが示されている。

ただし、これらの研究結果は主に応答実験から得られた知見であり、スモークワイヤー法などによる可視化実験からの追加考察は行われているものの、剥離干渉法の具体的な制振メカニズムは明確にされておらず、把握しきれていない。

そこで、本論文では、可視化による画像解析技術を用いた流速測定技術である PIV (Particle Image Velocimetry) 実験や表面圧力測定実験などの各種風洞実験によって、作用する空気力や周辺流れ場などの変化を詳細に検討することによって剥離干渉法の制振メカニズムの解明を行う。

第3章

剥離干渉法を適用した場合の応答特性

本章では、完全剥離型断面柱である正方形断面柱 ($B/D=1$) を検討対象断面柱として、鉛直板タイプの剥離干渉法を適用した場合について、たわみ1自由度応答実験を行い、剥離干渉法を適用することによって $B/D=1$ 断面柱に生じる振動現象を把握するとともに、剥離干渉法を適用した場合の応答特性について検討する。

3.1 供試模型およびパラメーター

供試模型は、図-3.1に示すように $B/D=1.0$ (幅 B , 高さ D , $B=D=50\text{mm}$) の正方形断面柱を基本断面柱として、端部に模型端板を設置した2次元剛体模型を用いる (写真-3.1参照)。

本研究では、第2章で述べた既往の知見を踏まえて、図-3.2に示すように鉛直板の高さを $h=0.2D$ ($=10\text{mm}$) に設定し、鉛直板の設置位置によって剥離干渉角 θ をパラメーターとして、 θ を 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° に変化させた。また、本研究では剥離干渉による流れの挙動に着目するという趣旨から、鉛直板は上下面共に風上側のみに設置する。

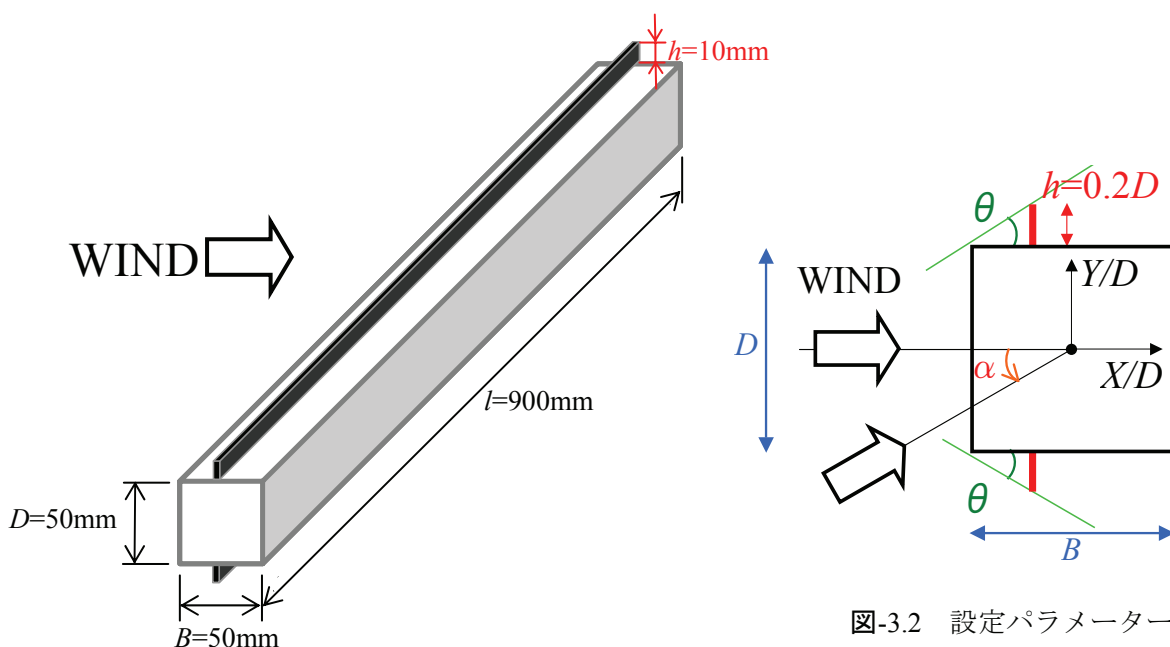


図-3.1 供試模型概要 ($B/D=1$ 断面柱)

図-3.2 設定パラメーター

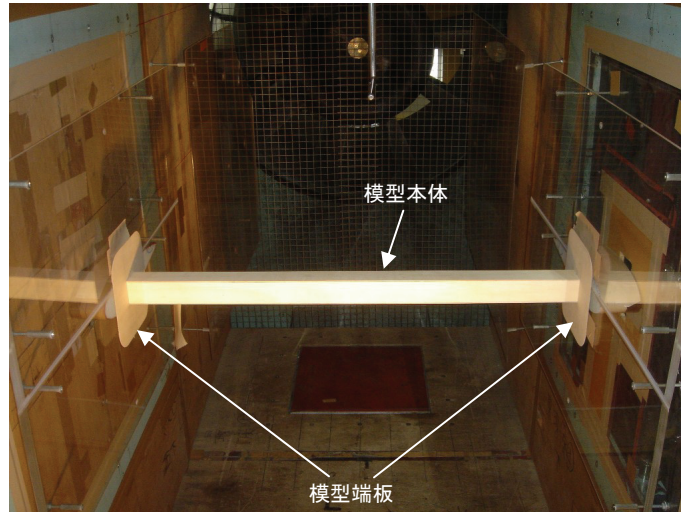


写真-3.1 供試模型 (B/D=1断面柱, 応答・静的空気力実験用)

3.2 風洞装置

応答実験および静的空気力測定実験では, 九州工業大学工学部建設社会工学科付属の境界層型波浪風洞 (測定断面 高さ 1.8m×幅 1.1m) を用いて検討を実施した. 風洞の概観図を図-3.3, 諸元表を表-3.1, 実験状況を写真-3.3 に示す.

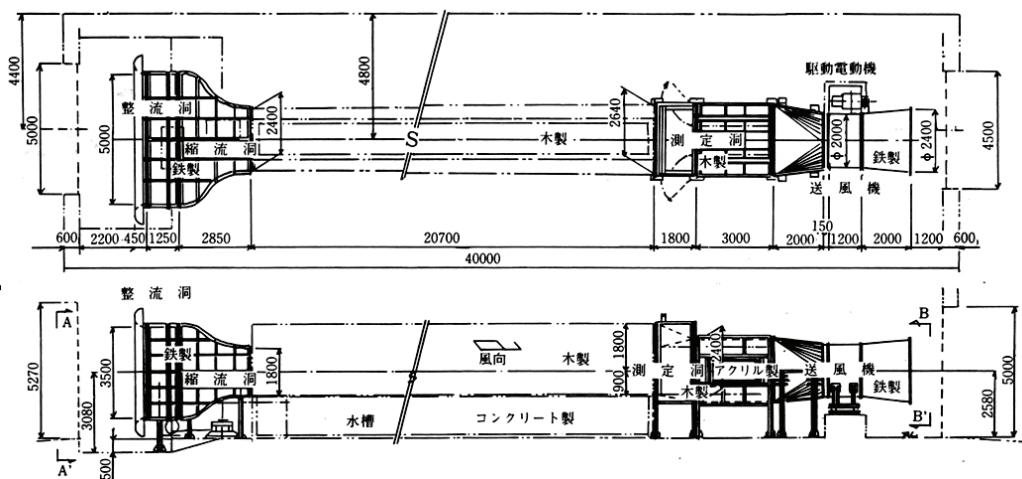


図-3.3 境界層型波浪風洞 (九州工業大学付属)

表-3.1 風洞諸元 (境界層型波浪風洞)

形式	エッフェル型吸い込み式
風洞測定部	幅: 2.4m, 高さ: 1.8m (天井高さ可変), 長さ: 20.0m (本研究での測定断面は, 幅: 1.1m, 高さ: 1.8m)
波浪水槽部測定部	幅: 1.2m, 深さ: 1.5m, 長さ: 20.0m
風速範囲	0.0 ~ 10.0m/sec (本研究では, 0.0~22.0m/sec)

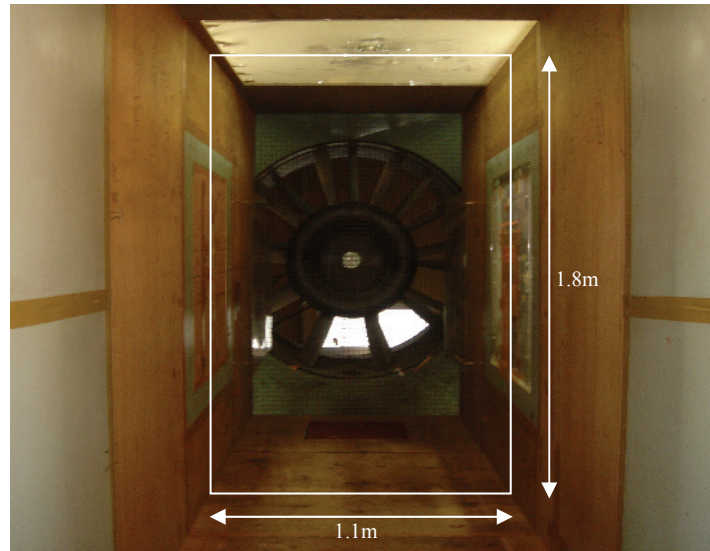


写真-3.3 風洞内状況（縮流部. 測定断面：高さ1.8m, 幅1.1m）

3.3 たわみ1自由度応答実験概要

3.3.1 計測システム

図-3.4 にたわみ1自由度支持装置の概略図, 図-3.5 に計測システム, 表-3.2 に実験で使用した計測機器仕様一覧を示す. たわみ1自由度応答実験では, 片側2本合計4本のコイルスプリングによって模型を弾性支持し, 流れ止めを設置することで流れ方向の静的変形および振動を拘束して, 鉛直（たわみ）方向のみの1自由度を与えている. 実験では, それぞれ風速の変化に伴う振動応答変位, 発散および減衰振動変位を模型支持部の両端に設けられたレーザー変位計で計測する. 得られた計測データをAD変換し, 時系列データとしてコンピューターに格納する. また, それと同時にコンピューター上でローパスフィルターを通し, 振動応答振幅および振動数, 減衰率を求める.

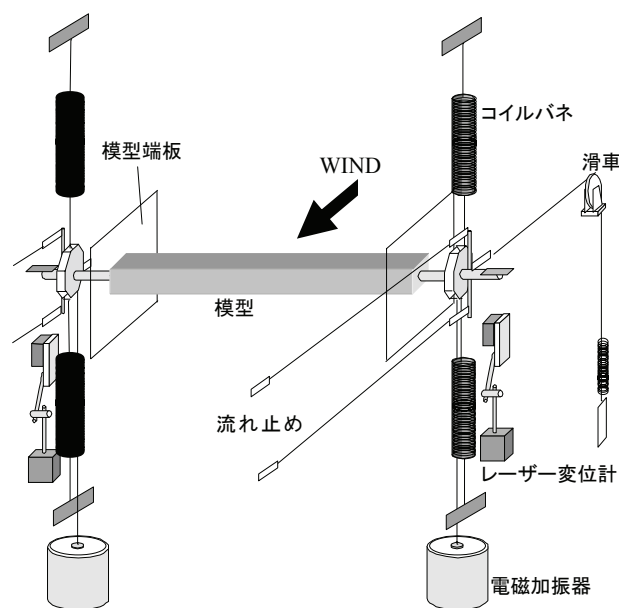


図-3.4 たわみ1自由度支持装置概要

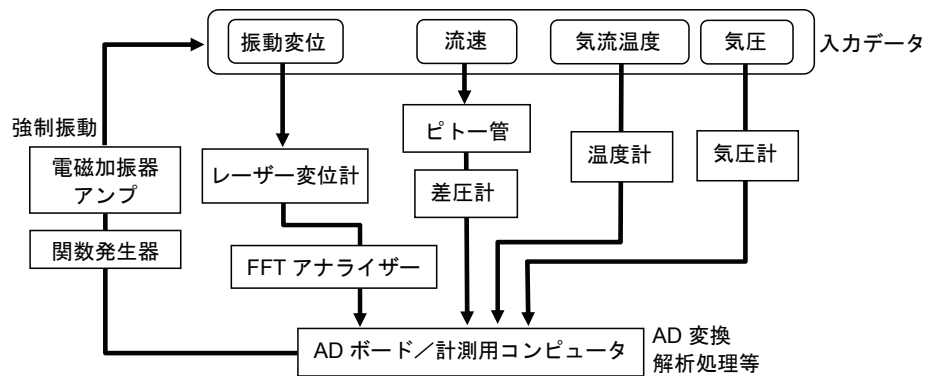


図-3.5 計測システム

表-3.2 使用計測器一覧表

機器名	台数	型番	メーカー
レーザー変位計	4	LB-1200	KEYENCE
スペクトルアナライザ	1	CF-350	小野測器
デジタルマルチメータ	1	VOCA 7411	岩崎通信
ベッツ型マンオメータ	1	0~100mmH ₂ O	岡野製作所
風速測定用微差圧力計	1	MODEL P-70	司測研
微差圧力計用増幅器	1	DPC-1	司測研
AD変換ボード	1	NI PCI-6035E	NATIONAL INSTRUMENTS
関数発生器	1	1920A	NF回路設計
電磁加振器	4	513-A	エミック
加振器用アンプ	2	F371-A	エミック
ユニバーサルカウンタ	1	TR5821	ADBANTEST

3.3.2 実験諸元

たわみ1自由度応答実験における実験ケースを表-3.3に示す。実験気流は一樣流、迎角は $\alpha=0^\circ$ とし、基本断面柱（Basic）に対して剥離干渉角 θ を $15^\circ\sim 40^\circ$ まで 5° 刻みで変化させた。実験風速は $0\sim 14.8\text{m/s}$ の範囲について非振動時には風速を 0.2m/s 間隔、振動時には 0.1m/s 間隔を目安として測定を行った。

表-3.3 たわみ1自由度応答実験諸元

実験種類	たわみ1自由度応答実験
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)
実験気流	一樣流 (乱れ強さ $I_u \leq 0.01$)
実験風速 V	$0\sim 14.8\text{m/s}$
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	$0\sim 49333$
対数構造減衰率 δ_s	0.002
固有振動数 f_h	7.40Hz
スクルーション数 Sc	18
迎角 α	0°
剥離干渉角 θ	$15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$
サンプリング周波数, データ数	1000Hz, 60000個

さらに、得られた応答特性をより詳細に把握するために、断面柱の後流域に発生するストローハル数成分の渦であるカルマン渦の発生を防ぐためのスプリッタープレート（長さ $b_s=10D=500\text{mm}$ 、写真-3.4および図-3.6参照）を挿入した場合の応答特性についても検討を行った^{16),17)}。

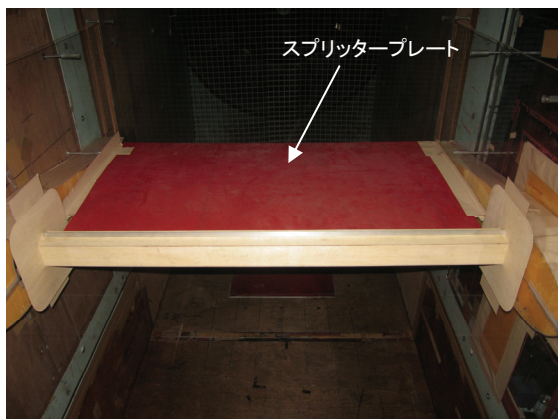


写真-3.4 実験状況

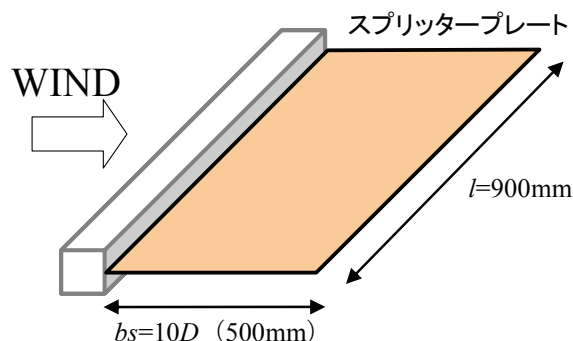


図-3.6 スプリッタープレート概要

3.4 実験結果および考察

迎角 $\alpha=0^\circ$ におけるたわみ1自由度応答特性について、縦軸を無次元倍振幅 $2A/D$ (A : 振動片振幅)、横軸を換算風速 V_r ($=V/f_h D$, f_h : 固有振動数) で整理した応答図を図-3.7に示す。

これより、基本断面柱 (Basic) ではストローハル数 St の逆数となる換算風速 $V_r=7.4$ 付近 ($St \approx 0.135$) から渦励振が発振し、そのまま発散振動 (ギャロッピング) に移行している。これは既往の例^{18),19)}と同様の応答傾向を示している。それに対して、鉛直板を設置した場合には、 $\theta=15^\circ$ では $V_r=20.8$ までギャロッピングの発振風速が高風速側に移行しており、 $\theta=20^\circ \sim 40^\circ$ ではさらに高風速域 ($V_r=40$ まで確認) まで振動の発生は抑制されており、発散振動に対して高い耐風安定性を示している。

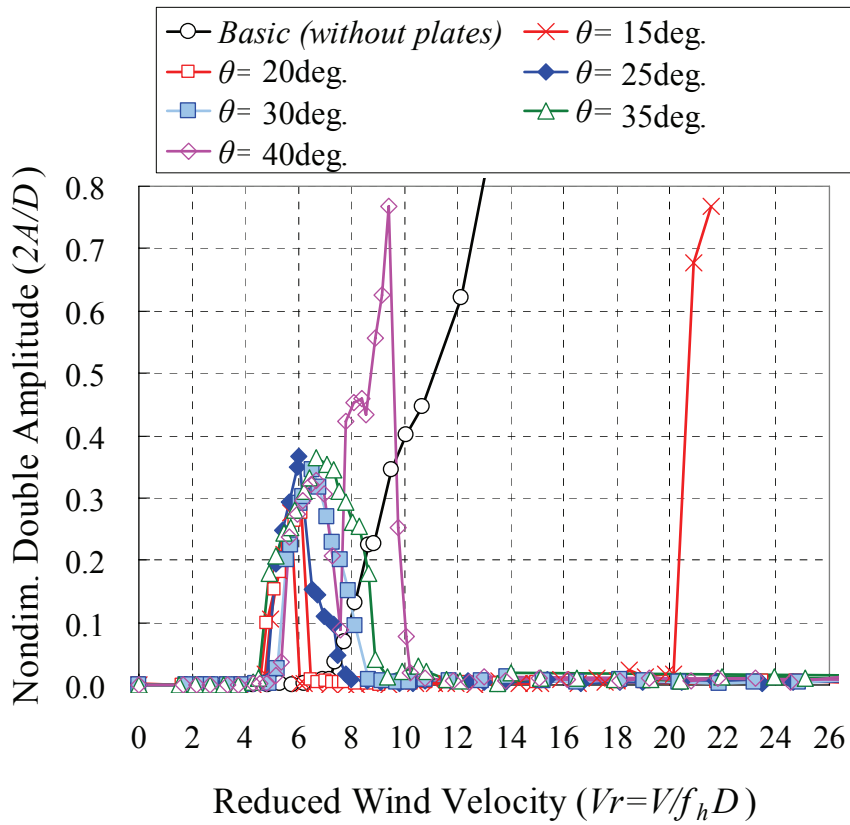
しかしながら、鉛直板を設置することで $V_r=4.5 \sim 5.3$ 付近の低風速域において限定振動が発生しており、 $\theta=40^\circ$ ではさらに正方形断面柱とほぼ同じ風速から $2A/D=0.77$ となるような大振幅の限定振動が発生している。

これらの限定振動について、最大応答発生時の風速における空力減衰 δ_A を図-3.8に示す。これより、 $\theta=40^\circ$ の場合については大きな負減衰力が発生しているが、 $\theta=20^\circ \sim 35^\circ$ で発生する限定振動の負減衰力は小さく、構造減衰 δ_s を0.02確保できた場合には、応答振幅は無次元倍振幅 $2A/D < 0.1$ に低減でき、僅かな構造減衰の付加によって大幅に抑制することが可能である。

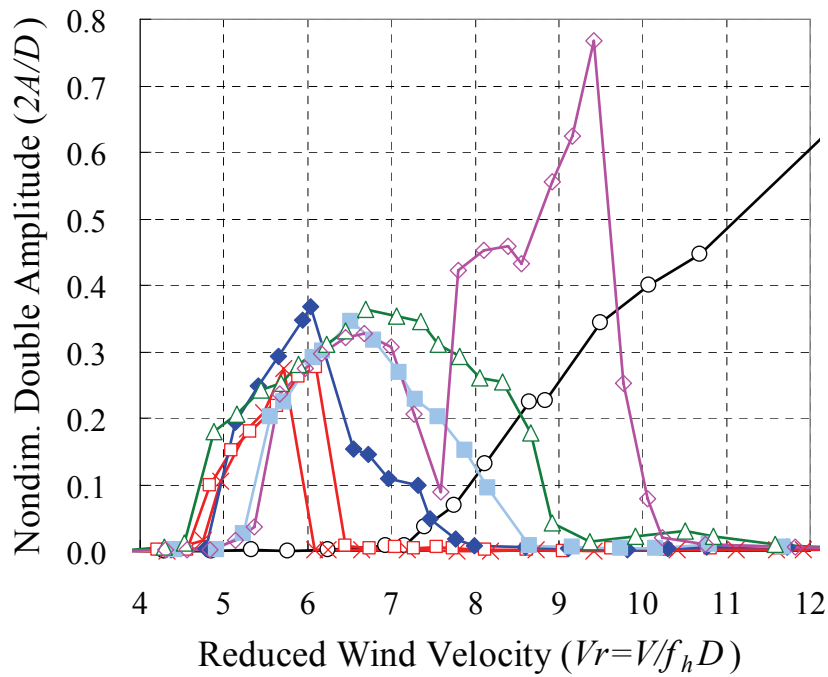
次に、 $\theta=20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$ について、スプリッタープレートを挿入した場合のたわみ1自由度応答図を図-3.9に示す。これより、スプリッタープレートを挿入することによって $\theta=20^\circ$ および 30° では限定振動は発生していない。このことから、 $\theta=20^\circ$ および 30° において発生する限定振動は後流域のカルマン渦によって励起されるカルマン型渦励振と判断される。また、 $\theta=40^\circ$ についてはスプリッタープレートを挿入しても $V_r=7.9 \sim 9.7$ の範囲において振動が発生している。スプリッタープレートがない場合には、 $\theta=40^\circ$ においては $V_r=5.3 \sim 7.6$ と $7.6 \sim 10.2$ で2つの山となる限定振動が発生している(図-3.7(b)参照)ことから、スプリッタープレートの設置によって振動が発生しなかった1つ目の風速域の限定振動はカルマン型渦励振であり、2つ目の限定振動は、1つ目の限定振動とは異なる発生機構

によって発生していると考えられる。

以上のことから、 $B/D=1$ 断面柱に剥離干渉法を適用した場合に、応答特性から判断される有効な剥離干渉角の範囲は $\theta = 20^\circ \sim 35^\circ$ であり、有効な剥離干渉角においては高風速域におけるギャロッピングの発生を抑制する効果を発揮することが明らかとなった。



(a) 全風速域



(b) 低風速域

図-3.7 たわみ1自由度応答特性 ($B/D=1$ 断面柱)

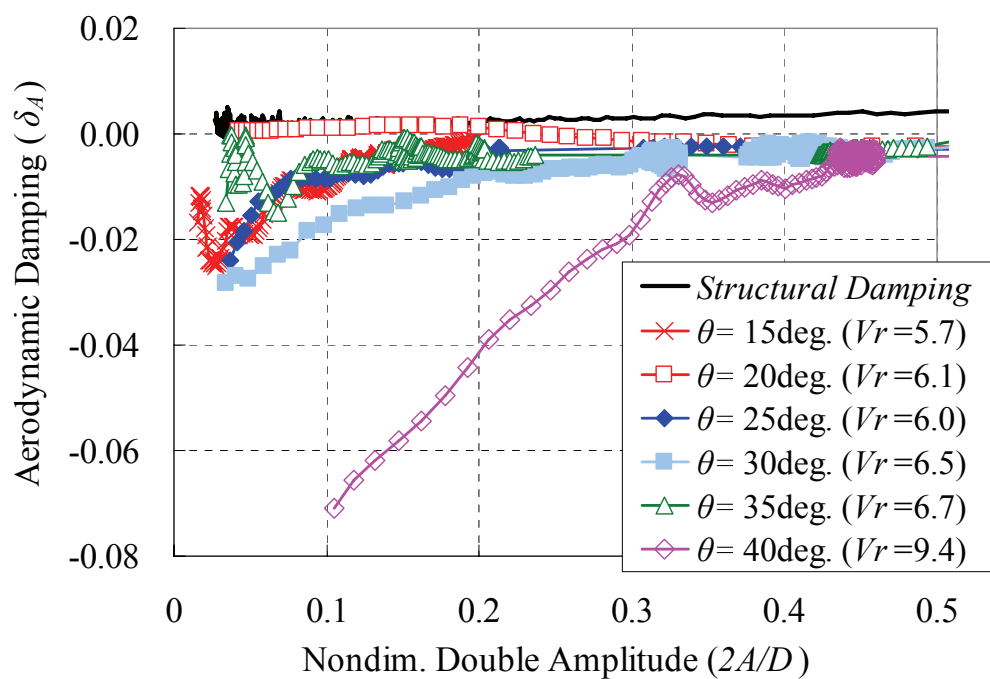


図-3.8 限定振動の最大応答発生風速時の空力減衰率

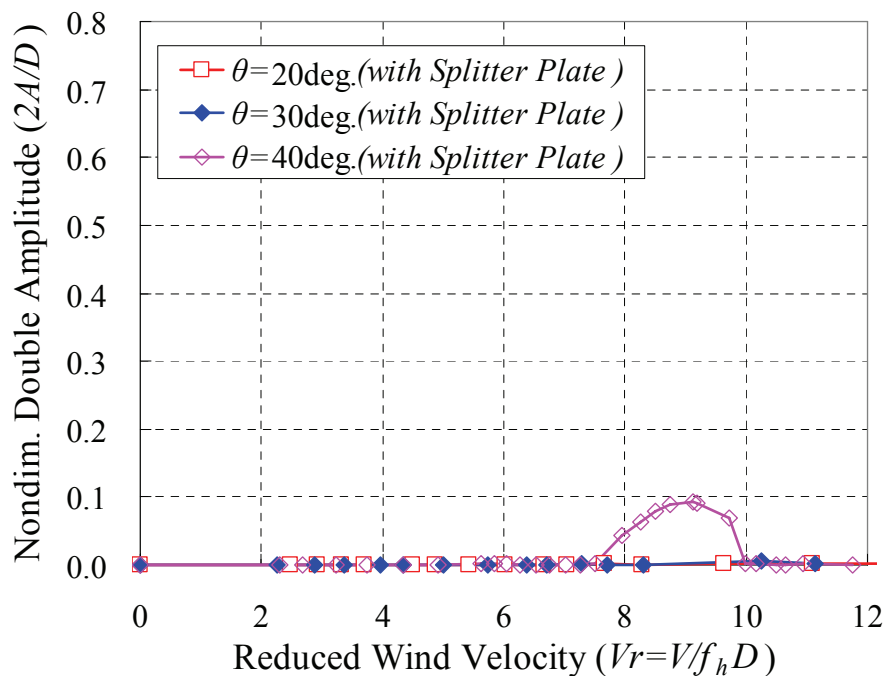


図-3.9 スプリッタープレートを挿入した場合の応答特性 ($B/D=1$ 断面柱)

第4章

剥離干渉法を適用した場合の静的空気力特性

本章では、剥離干渉法を適用した場合に断面柱に作用する空気力に着目して、静的空気力測定実験を行い、断面柱に作用する静的な三分力特性（抗力，揚力，空力モーメント）を確認するとともに、剥離干渉角による各空気力特性について検討する。

なお，本検討では，応答実験と同様の供試模型および風洞装置を用いた（3.1節，3.2節参照）。

4.1 静的空気力測定実験概要

4.1.1 計測システム

図-4.1および写真-4.1に静的空気力測定に用いた三分力天秤および設置全体図，図-4.2に計測システム，表-4.1に実験で使用した計測機器仕様一覧を示す。静的空気力測定実験では，無風時および実験風速時において模型の両端に取り付けてある三分力天秤から出力された3成分の空気力（抗力，揚力および空力モーメント）による歪量の時系列データをコンピューターに格納する。得られた歪データをあらかじめ無風時に計測して得られた歪と荷重（空気力）のキャリブレーション値を用いて空気力を求める。

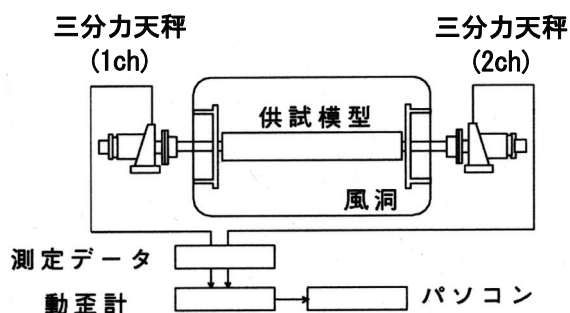


図-4.1 測定装置全体図

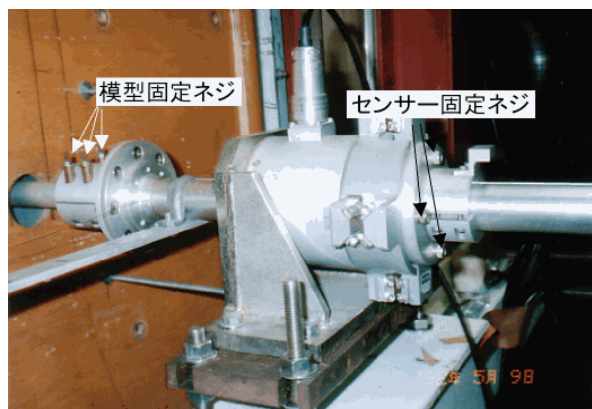


写真-4.1 三分力天秤設置状況

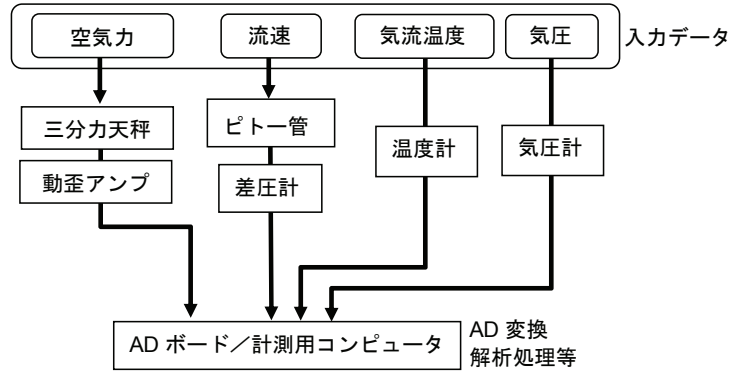


図-4.2 計測システム

表-4.1 使用計測器一覧表

機器名	台数	型番	メーカー
三分力計	2	LMC-3505	日章電気
直流型歪増幅器(6ch)	1	DSA-100	日章電気
ローパスフィルター	2	MS-521	NF回路設計
デジタルマルチメーター	1	VOCA 7411	岩崎通信
ベッツ型マノメーター	1	0~100mmH ₂ O	岡野製作所
風速測定用微差圧力計	1	MODEL P-70	司測研
微差圧力計用増幅器	1	DPC-1	司測研
AD変換ボード	1	NI PCI-6035E	NATIONAL INSTRUMENTS

4.1.2 静的空気力係数の定義

抗力 F_D ・揚力 F_L ・空力モーメント F_M の各空気力と迎角 α の関係を図-4.3に示す。

得られた各空気力は、式(4.1)～式(4.3)より、空気力を無次元化して、抗力係数 C_D 、揚力係数 C_L および空力モーメント係数 C_M として整理する。空気力係数の無次元化に関しては、基本断面柱の断面高さ D および幅 B を用いる。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V^2 D} \quad \dots\dots\dots (4.1)$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V^2 B} \quad \dots\dots\dots (4.2)$$

$$C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2}\rho V^2 B^2} \quad \dots\dots\dots (4.3)$$

ここで、 C_D : 抗力係数, C_L : 揚力係数, C_M : 空力モーメント係数

F_D : 抗力, F_L : 揚力, F_M : 空力モーメント

V : 風速, B : 模型幅, D : 模型高, l : 模型長, ρ : 空気密度

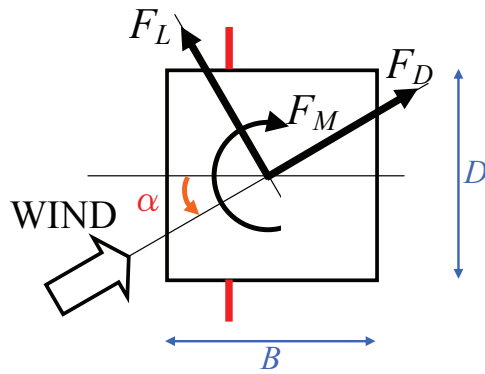


図-4.3 各空気力と迎角の関係

4.1.3 実験諸元

静的空気力測定実験における実験ケースを表-4.2に示す。実験気流および剥離干渉角 θ は、たわみ1自由度応答実験と同条件とする。実験風速は5~9m/sの範囲で変化させて模型が共振しない風速とし、迎角 α を $-13^{\circ}\sim+13^{\circ}$ の範囲において 1° 間隔で測定を行った。

表-4.2 静的空気力測定実験諸元

実験種類	静的空気力測定
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)
実験気流	一様流 (乱れ強さ 1%以下)
実験風速 V	5~9 m/s
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	16500~30000
迎角 α	$-13^{\circ}\sim+13^{\circ}$ (1° 間隔)
剥離干渉角 θ	$15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 35^{\circ}, 40^{\circ}$
サンプリング周波数, データ数	400Hz, 32768 個

4.2 実験結果および考察

4.2.1 静的空気力特性

抗力・揚力・空力モーメントの各空気力係数と迎角の関係を図-4.4~図-4.6に示す。

(1) 抗力係数 C_D

正方形断面柱である基本断面柱では、迎角 $\alpha=0^{\circ}$ において $C_D=2.30$ となっており、既往の結果^{6),7)}とほぼ同じ値となっている。これに対して、 $\theta=40^{\circ}$ では $C_D=2.46$ と増加しており、 $\theta \leq 35^{\circ}$ の範囲では θ が小さくなるに従って C_D は減少している。 $\theta=20^{\circ}$ では $C_D=1.51$ となっており、正方形断面柱に比べて66%まで抗力が減少している。なお、抗力係数の算出には式(4.2)に示すように鉛直板の有無に関係なく基本断面柱の高さ D で無次元化を行っているため、鉛直板の高さを含めて無次元化した場合には、さらに C_D は低減することになる。また、迎角との関係に着目すると、 C_D が上に凸となる迎角の範囲が、 θ の減少に伴って狭まる傾向を示している。

(2) 揚力係数 C_L

基本断面柱では、測定迎角範囲($\alpha=-13^{\circ}\sim+13^{\circ}$)における揚力勾配 $dC_L/d\alpha$ は全て負勾配になっている。鉛直板を設置した場合には、 $\theta=15^{\circ}$ については迎角 $\alpha=0^{\circ}$ 付近の $dC_L/d\alpha$ は基本断面柱と同様

に負勾配になっているが、 $\theta = 20^\circ \sim 40^\circ$ の範囲については全て正勾配に変化している。さらに、迎角 $\alpha = 0^\circ$ における $dC_L/d\alpha$ の正勾配の傾きに注目すると、 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ の範囲ではほぼ同じ傾きとなっているが、 $\theta = 35^\circ, 40^\circ$ では傾きは小さくなっている。また、 $dC_L/d\alpha$ が正勾配となる迎角の範囲は、 θ が増加するに従って広がっている。

(3) 空力モーメント係数 C_M

基本断面柱に比べて、応答実験において剥離干渉法が有効に機能した θ の場合の方がモーメント勾配 $dC_M/d\alpha$ の傾きが大きくなる傾向を示している。

なお、剥離干渉法が有効に機能している場合の各空気力特性は、辺長比を大きくした場合の空力特性（図-2.1 参照）と類似した傾向を示している。

4.2.2 準定常理論によるギャロッピングの判定

上述した抗力係数 C_D および揚力係数 C_L の結果を用いて、第2章で示したDen Hartogの判別式（式(2.1)参照）によるギャロッピング発生判定を行う。準定常理論によれば、この式を満足する場合にギャロッピングが発生することが知られている⁹⁾。

迎角 $\alpha = 0^\circ$ における式(2.1)の左辺についてまとめたものを図-4.7に示す。これより、 $\alpha = 0^\circ$ において正方形断面柱および $\theta = 15^\circ$ では負値となっており、ギャロッピングは発生するが、 $\theta \geq 20^\circ$ の範囲では正値となり、ギャロッピングは発生しないことを示しており、応答実験の結果（図-3.7(a)参照）と整合する。

また、 $\theta \geq 20^\circ$ の範囲については、 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ における値は $\theta = 35^\circ \sim 40^\circ$ と比べて、相対的に大きな正値となっており、ギャロッピングに対して、より安定な特性を示していると判断できる。

第3章で示した応答特性の結果と合わせて考えると、剥離干渉法が空力弾性振動の抑制に対して有効に機能する剥離干渉角 θ は $20^\circ \sim 30^\circ$ と考えることができ、以後、有効な剥離干渉角を $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ と定義することとする。

以上のことから、剥離干渉法が有効に機能している場合には、抗力は大きく減少する効果を発揮する。また、揚力勾配も負勾配から正勾配に変化することでギャロッピングを抑制する空気力特性となっている。

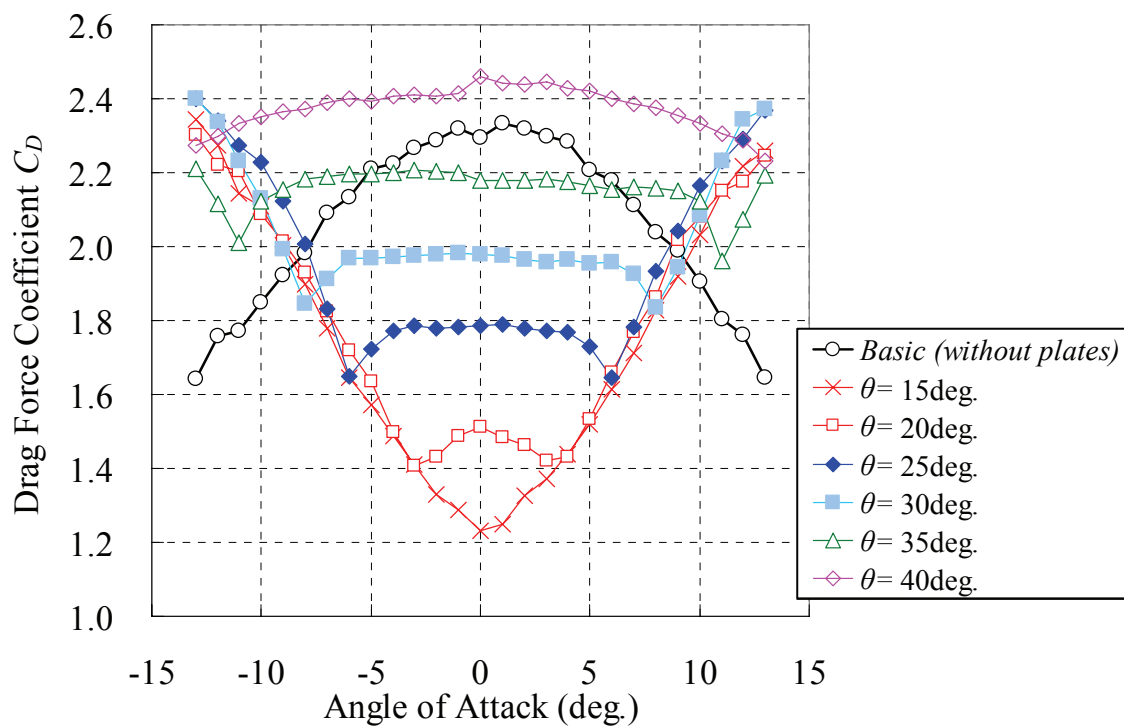


图-4.4 抗力係数特性

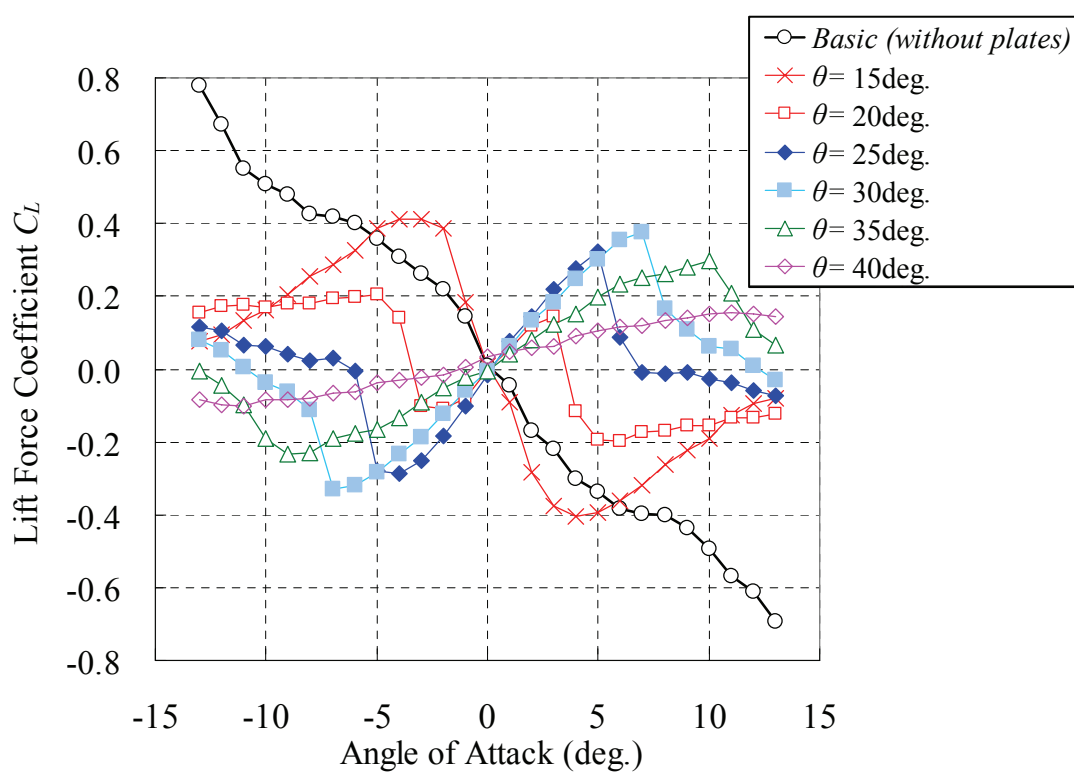


图-4.5 揚力係数特性

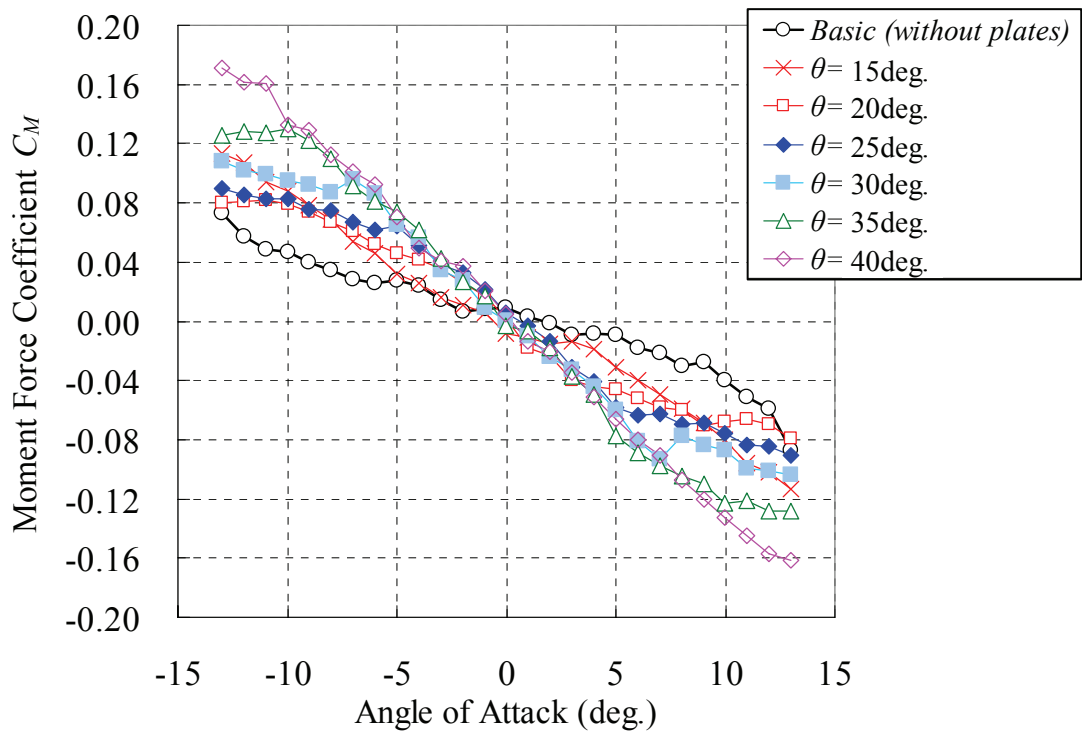


図-4.6 空力モーメント係数特性

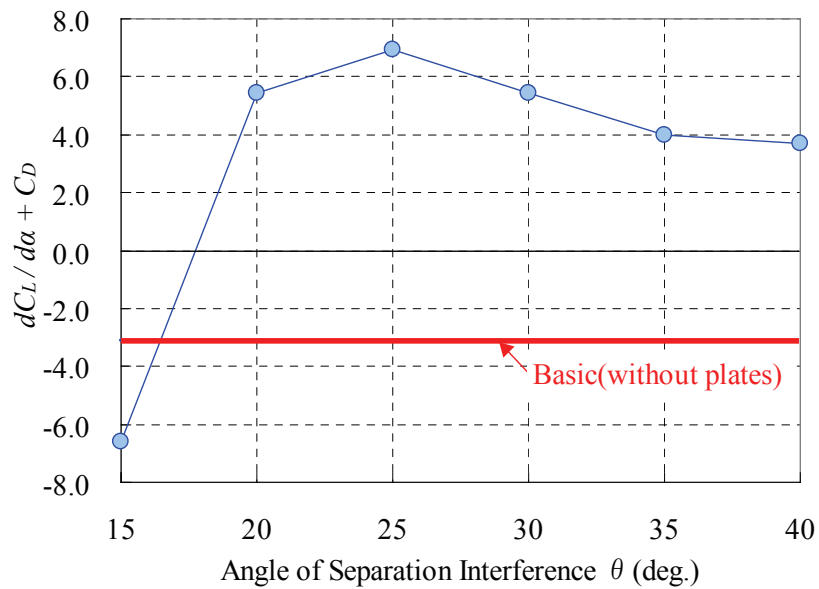


図-4.7 Den Hartogの判別式による判定結果 (迎角 $\alpha=0^\circ$)

第5章

剥離干渉法を適用した場合の表面圧力分布特性

本章では、応答実験と静的空気力測定実験から得られた結果を踏まえて、静止状態および応答実験時に発生した振動現象を対象とした強制加振状態において表面圧力測定実験を実施し、得られた模型表面に作用する圧力分布特性から、断面柱の各部位に作用する圧力分布特性と剥離干渉角との関係について検討する。

5.1 供試模型およびパラメーター

供試模型は、写真-5.1に示すような表面圧力測定実験およびPIV実験用の専用模型を用いた。模型は応答実験および静的空気力測定実験で用いたものと同寸法の断面としており、レイノルズ数 Re ($=VD/\nu$, ν : 空気の動粘性係数) の違いによる影響が現れないように配慮している。

模型には、圧力測定のために模型のスパン方向長さ $l=900\text{mm}$ の中央位置の断面まわりに内径 1mm の圧力測定孔を設けている(写真-5.2参照)。圧力測定孔の位置は図-5.1に示すように各辺に11点(圧力孔間隔 5mm , 隅角部付近は 2.5mm ピッチ), 鉛直板部には頂部・風上面・風下面に各1点ずつ, 計50点を配置している。また、剥離干渉に関するパラメーターは、応答実験および静的空気力測定実験と同一とする。



写真-5.1 供試模型 ($B/D=1$ 断面柱, 表面圧力・PIV実験用)

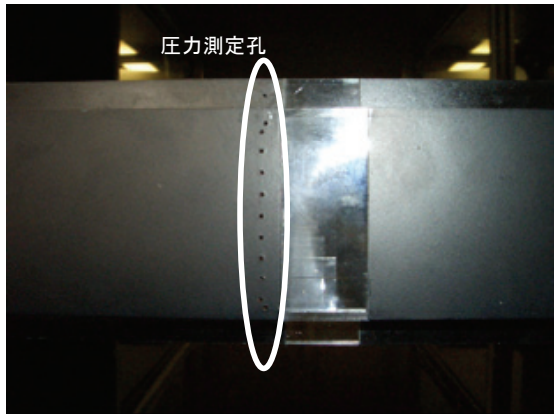


写真-5.2 圧力測定孔

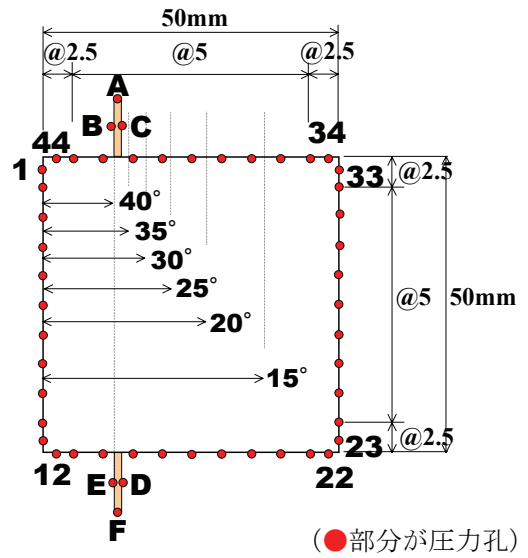


図-5.1 風圧測定孔位置 ($B/D=1$ 断面柱)

5.2 風洞装置

表面圧力測定実験およびPIV実験は、鹿島建設技術研究所付属の可視化風洞（測定断面 高さ1.2m×幅2.0m）を用いて実施した。風洞の概観図を図-5.2、諸元表を表-5.1に示す。

写真-5.3に示すように、風洞内には強制加振装置を導入するために縮流部を設置して、本研究用の測定断面（高さ1.2m×幅0.9m）を形成する。

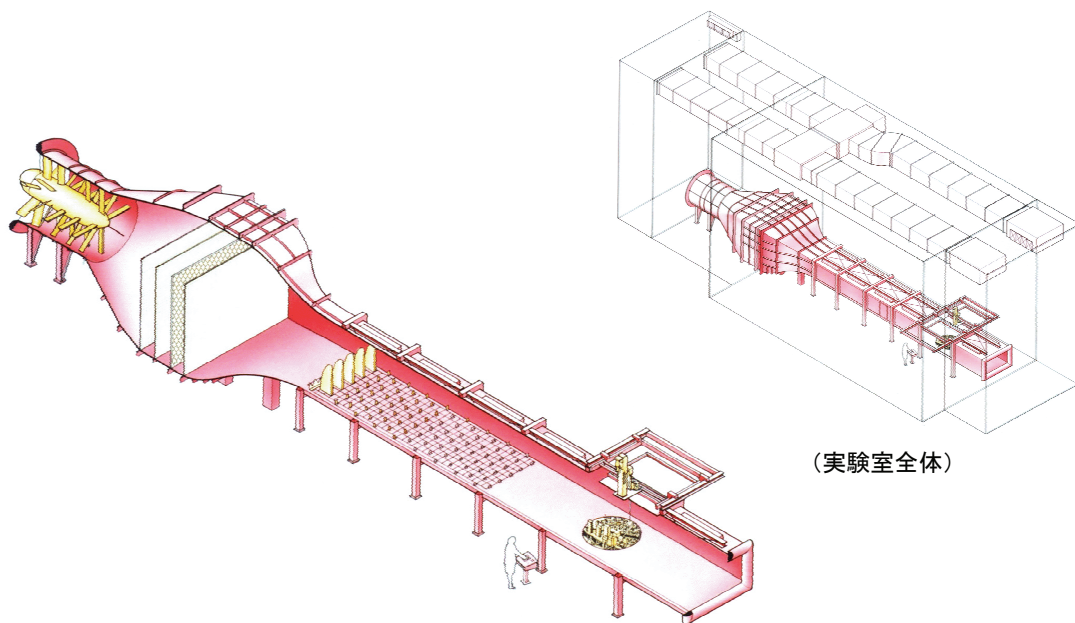


図-5.2 可視化風洞（鹿島建設技術研究所付属）

表-5.1 風洞諸元（可視化風洞）

形式	垂直密閉回流型，垂直開放型（ダンパー使用時）
全長	全長：26.5 m
測定胴	幅：2.0m，高さ：1.2m，長さ：14.6m (本研究では縮流部導入により測定断面は，幅：0.9m，高さ：1.8m)
縮流比	5.0
風速範囲	0.5 ～ 20.0m/sec
風速分布	± 2.0%以内
乱れ強さ	1.0%以内
送風機	軸流送風機
直径	2.22m
最大風量	2,880m ³ /min, 590Pa (60mmAq)
電動機	直流電動機 55kW, 647rpm
付属装置	主ターンテーブル（境界層流実験用,直径 1.6m, 密閉装置付） 外装型トラバース（4軸制御） レーザーライトシート発振器 2次元実験装置（強制加振・バネ支持・三分力測定）

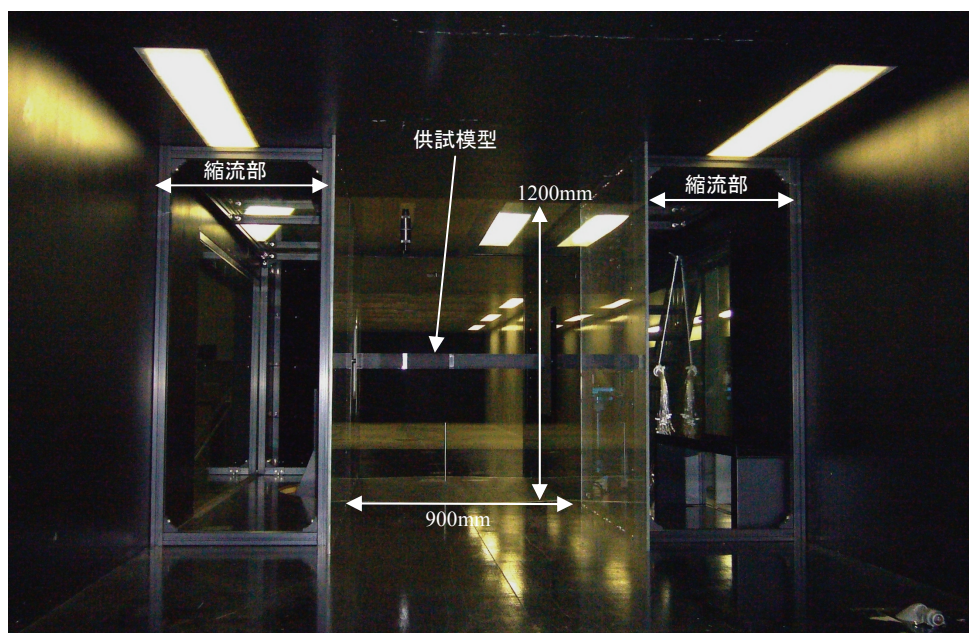


写真-5.3 風洞内状況（風下側から望む．測定断面：高さ1.2m，幅0.9m）

5.3 表面圧力測定実験概要

5.3.1 計測システム

写真-5.4に表面圧力測定に用いた多点風圧測定システム，図-5.3に計測システム，表-5.2に実験で使用した計測機器仕様一覧を示す。



写真-5.4 多点風圧測定システム (センサー・アンプ部)

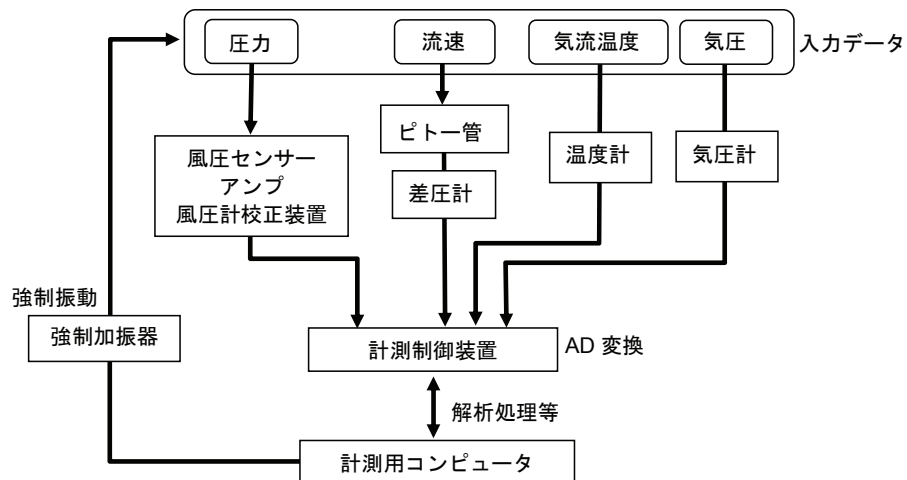


図-5.3 計測システム

表-5.2 使用計測器一覧表

機器名	台数	型番	メーカー
多点圧力計	2	ZOC23B/8Px MUXLESS	Scanivalve Corporation
基準差圧計 (多点圧力測定用)	1	Type 398 差圧計	MKS Baratoron
圧力センサー用 フィルターアンプ	1	PREBOX-2100	システムデザインサービス
AD変換装置	1	DASBOX	システムデザインサービス
気圧計	1	円筒振動式気圧計 F-451-10	横河ウェザック
温度計	1	TP2027 デジタル温度計	芝浦電子
強制加振装置	1	—	マイクロダイナミックス

本検討では、多点風圧測定システムと強制加振装置（写真-5.5、写真-5.6参照）を併用することで、強制振動状態における表面圧力測定を行った。表-5.3に強制加振装置の性能諸元を示す。

表-5.3 強制加振装置性能諸元

加振方向	2自由度（たわみ・ねじれ）
加振振動数	0～10.0Hz（たわみ・ねじれ）
加振振幅（片振幅）	0～50mm（たわみ） 0～15deg.（ねじれ）
加振モード	正弦波

※ 加振可能振幅は、加振振動数に依存する。

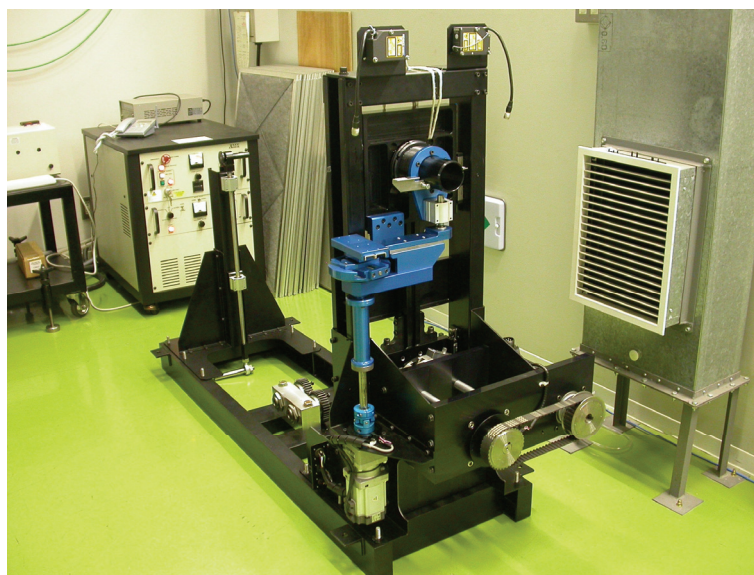
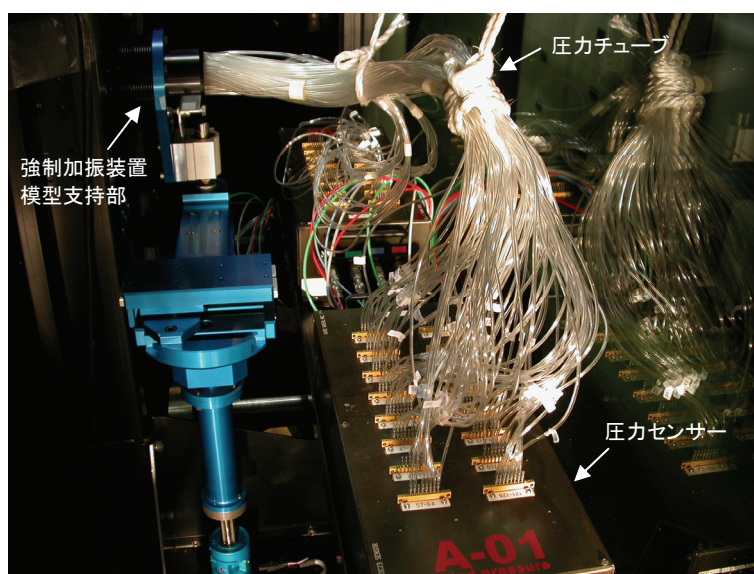


写真-5.5 強制加振装置



（模型支持部を利用して圧力チューブをセンサーに接続）

写真-5.6 風圧センサー設置状況

5.3.2 圧力係数の定義

測定された風圧力は、実験風速時における基準速度圧 q によって無次元化して、平均圧力係数 \bar{C}_p と変動圧力係数 \tilde{C}_p として求める。

平均圧力係数 \bar{C}_p は、測定された平均値成分を含む圧力の時系列データの時間平均値からピトー管の静圧を差し引いて、それを基準速度圧で除して無次元化したものであり、以下の式(5.1)で示されるものである。変動圧力係数 \tilde{C}_p は、測定された圧力変動成分の時系列データの R.M.S. 値を基準速度圧で除して無次元化したものであり、以下の式(5.2)で示される。

$$\bar{C}_p = \frac{\frac{1}{n} \sum (P_i - P_s)}{q} \dots\dots\dots (5.1)$$

$$\tilde{C}_p = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum (P_i - P_s)^2}}{q} \dots\dots\dots (5.2)$$

ここで、 P_i : 圧力の時系列データ、 P_s : 風洞内静圧
 q : 基準速度圧、 n : データ数

5.3.3 実験諸元

表面圧力測定実験における実験諸元を表-5.4 に示す。実験気流、迎角 α 、剥離干渉角 θ については、たわみ 1 自由度応答実験と同条件とした。模型静止状態と強制振動状態において、静止状態では実験風速 V_0 を 9m/s、強制振動状態では加振振動数を応答実験におけるたわみ固有振動数 f_h と同じ 7.4Hz、加振振幅を $2A_0/D=0.2$ と設定して、 $V=1\sim 14.8\text{m/s}$ の風速範囲において 0.2m/s 間隔で測定を行った。

表-5.4 表面圧力測定実験諸元

実験種類	表面圧力測定	
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)	
実験気流	一様流 (乱れ強さ 1%以下)	
模型状況	静止	強制振動
実験風速 V_0	9m/s	1~14.8m/s
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	30000	3333~49333
迎角 α	0°	
剥離干渉角 θ	15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°	
強制加振振動数	—	$f_h=7.4\text{Hz}$
強制加振振幅	—	$2A_0/D=0.2$
サンプリング周波数, データ数	400Hz, 32768 個 (※ 位相平均処理した場合には, 約 600 個のデータを用いて算出)	

5.4 実験結果および考察

5.4.1 静止状態における表面圧力分布特性

基本断面柱まわりの平均圧力係数 \bar{C}_p の分布を図-5.4に、変動圧力係数 \tilde{C}_p の分布を図-5.5に示す。なお、図中の矢印は剥離干渉角 θ 別の鉛直板の設置位置を示している。

(1) 抗力に寄与する圧力分布特性

断面柱の前面においては、平均圧力係数 \bar{C}_p は鉛直板の有無や設置位置による大きな変化は見られない。変動圧力係数 \tilde{C}_p は隅角部に近づくにつれて、鉛直板を設置した場合には基本断面柱に比べて変動が小さくなる傾向を示す。

断面柱の背面においては、全ての断面柱において、背面の \bar{C}_p はほぼ一様な分布を示す。背面中心位置における圧力（以下、背圧とする）に着目すると、基本断面柱では $\bar{C}_p = -1.55$ となっているのに対し、 $\theta = 40^\circ$ の場合のみ $\bar{C}_p = -1.58$ と、基本断面柱より負圧が大きくなるが、 $\theta \leq 35^\circ$ の範囲では基本断面柱より負圧は回復しており、 θ の減少に伴って負圧が回復する傾向を示す。また、 \tilde{C}_p については、鉛直板を設置したケースにおいては θ の減少に伴って変動が小さくなる傾向を示す。

次に、鉛直板部分に作用する圧力分布に着目する。各 θ における上面側の鉛直板の風上面および風下面に設けた測定点における \bar{C}_p および鉛直板に作用する平均抗力係数 \bar{C}_f の分布を図-5.6に示す。ここで、 \bar{C}_f は式(5.3)に示すように鉛直板部の風上側測定点Bと風下側測定点Cにおいて測定された時系列圧力値の差の平均値と定義し、主流風軸方向を正とする。

$$\bar{C}_f = (p_{(B)} - p_{(C)})_{mean} \quad \dots\dots\dots (5.3)$$

ここで、 $p_{(B)}$ ：測定点B（前面側）における測定風圧と静圧との差圧

$p_{(C)}$ ：測定点C（背面側）における測定風圧と静圧との差圧

鉛直板に作用する平均圧力係数 \bar{C}_p については、鉛直板の風上面では、 $\theta = 25^\circ$ において最も大きな負圧を示し、風下面では θ の増加に伴って負圧が大きくなる傾向を示している。鉛直板に作用する平均抗力係数 \bar{C}_f については、 $\theta = 40^\circ$ では $\bar{C}_f = 0.25$ と抗力が増加する方向の力が働いているが、 $\theta \leq 35^\circ$ の範囲では \bar{C}_f は負値となり、抗力を減少させる方向の力が働いている。さらに有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）では $\bar{C}_f \leq -0.5$ となっており、より大きな抗力を減少させる方向の力が発生している。

ここで、基本断面柱と鉛直板部において測定した圧力から、基本断面柱における抗力に対する各剥離干渉角における抗力の比についてまとめたものを図-5.7に示す。これより、有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）における断面全体での抗力減少率は16～34%であるが、そのうち鉛直板部における減少率は9～15%を占めており、鉛直板部に作用する力が断面全体の抗力減少に大きく寄与している。

(2) 揚力に寄与する圧力分布特性

断面柱の側面における平均圧力係数 \bar{C}_p については、基本断面柱では $\bar{C}_p = -1.65 \sim -1.76$ でほぼ一様な分布となっているのに対し、鉛直板を設置した場合には、鉛直板の前後で特徴的な圧力分布を示す。有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）では、鉛直板の風上側において大きな負圧が発生し、風下側で圧力が回復する傾向を示している。鉛直板の風上側で発生する負圧の最大値は $\theta = 20^\circ$ および 25° において $\bar{C}_p = -2.1$ 程度となっている。また、剥離干渉法が有効に機能していない $\theta = 40^\circ$ では、鉛直板

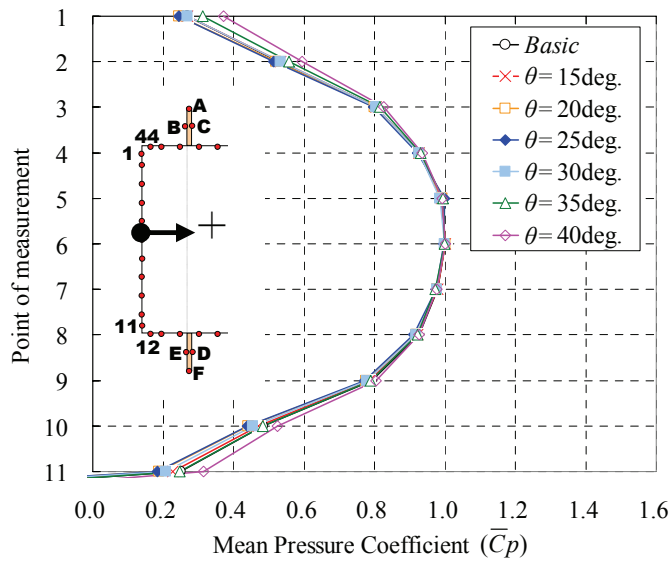
の風下側で負圧が大きくなるような逆の圧力分布の傾向を示している。

変動圧力係数 \tilde{C}_p については、鉛直板を設置したケースにおいては鉛直板の風上側で小さく、風下側で大きくなっている。さらに θ の減少に伴って全体的な変動は小さくなる傾向を示している。

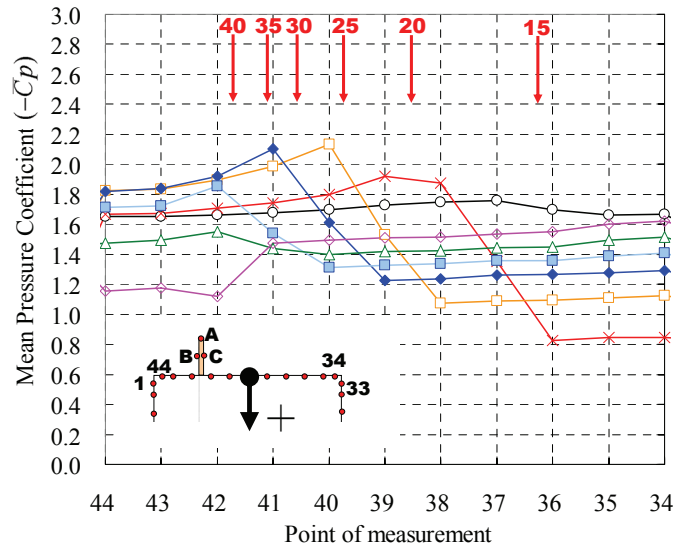
側面における \tilde{C}_p は、完全剥離型断面では後流渦による励振力の寄与と関連づけることができ²²⁾、有効な剥離干渉角 ($\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$) においては、後流渦の励振力の寄与が小さくなっていると考えられる。

また、側面上の鉛直板の風下側において \bar{C}_p の負圧が回復し、 \tilde{C}_p が増加する圧力分布の傾向は、辺長比が大きな断面柱において流れが再付着した場合の圧力分布の傾向と類似している⁷⁾。

以上のことから、有効な剥離干渉角においては、断面柱背面における負圧が回復し、さらに鉛直板部分に抗力を減少させる力が発生することによって断面全体に作用する抗力が大きく減少していることが明らかとなった。また、側面においても、有効な剥離干渉角においては鉛直板の風上側に大きな負圧が発生し、鉛直板の風下側では負圧が回復する特徴的な圧力分布となっている。

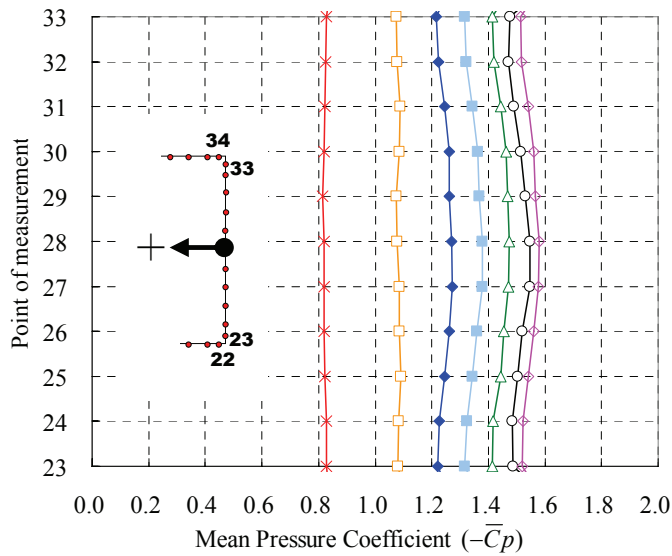


(a) 前面



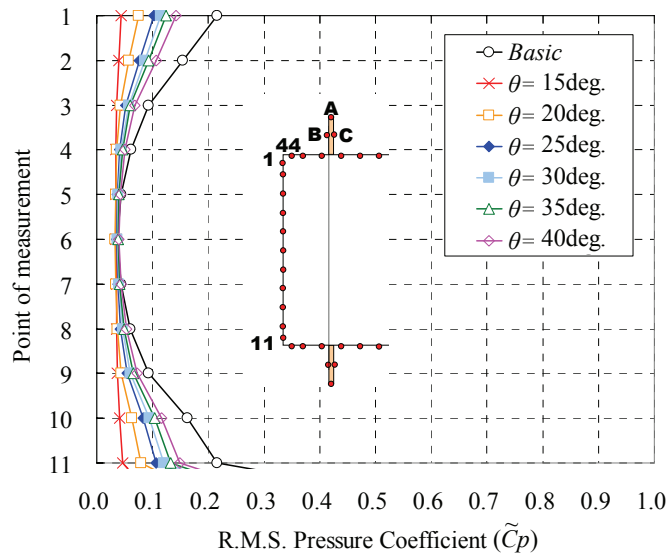
※ ↓矢印が鉛直板設置位置

(b) 側面 (上面側)

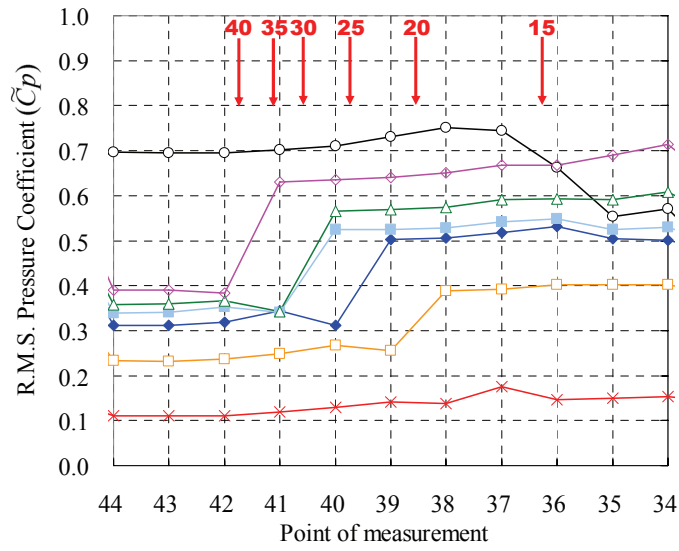


(c) 背面

図-5.4 表面压力分布 (平均压力係数 \bar{C}_p , 静止時)

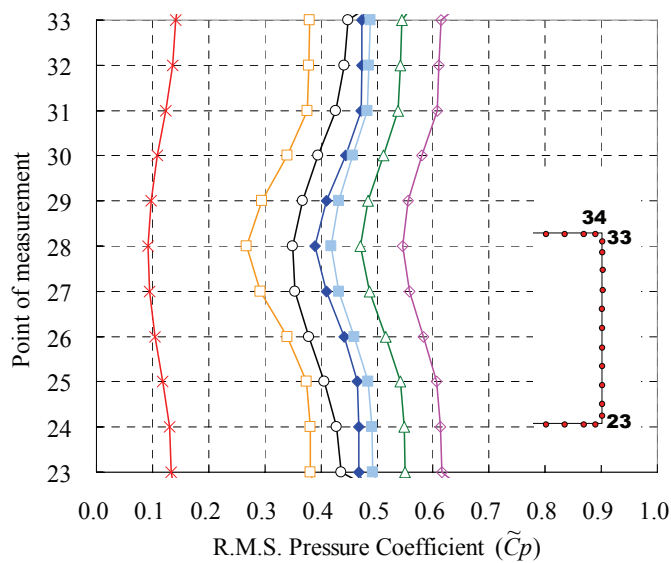


(a) 前面



※ ↓ 矢印が鉛直板設置位置

(b) 側面 (上面側)



(c) 背面

図-5.5 表面圧力分布 (変動圧力係数 \tilde{C}_p , 静止時)

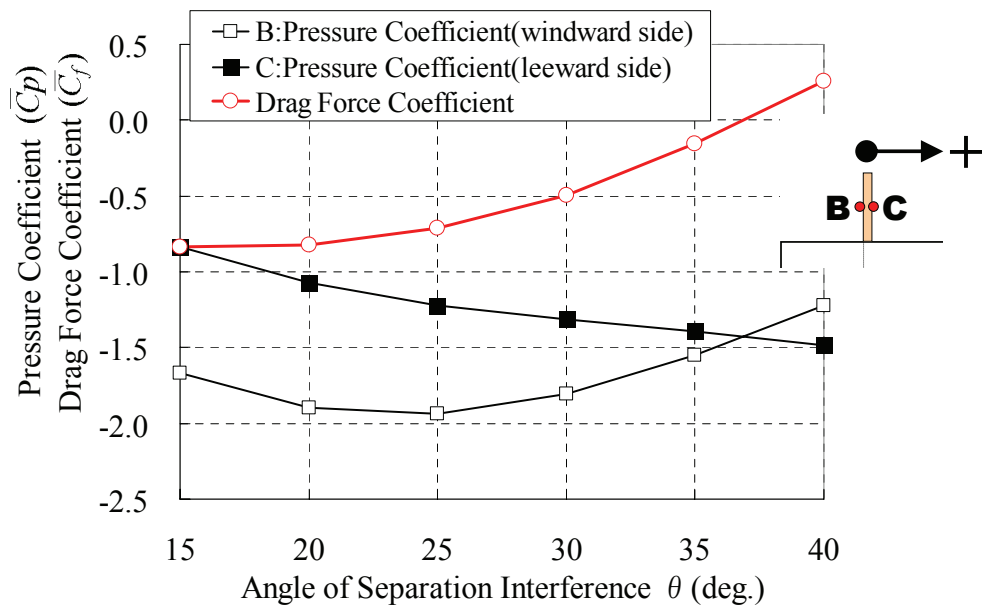


図-5.6 鉛直板に作用する力（平均圧力係数 \bar{C}_p ・平均抗力係数 \bar{C}_f ，静止時）

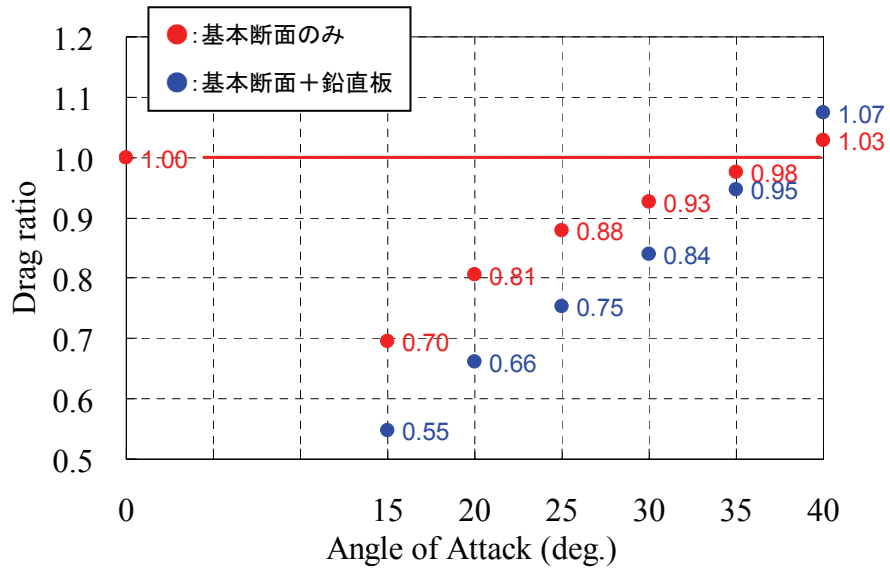


図-5.7 基本断面柱に対する剥離干渉角別の抗力比および鉛直板部の寄与率

5.4.2 強制加振状態における表面圧力分布特性

強制加振時の表面圧力測定結果から、剥離干渉法を適用した場合に発生する渦励振（および限定振動）発生風速領域と基本断面柱においてギャロッピングが発生する風速領域に着目して、剥離干渉法による圧力分布特性について検討する。以下に述べる考察は、測定されたデータから、図-5.8に示す強制加振1周期の中で、下向きの速度および相対迎角が最大となるゼロクロス点（位相 $\phi=180^\circ$ ）および下向きの変位最大で速度がゼロとなる点（位相 $\phi=270^\circ$ ）において位相平均処理した結果を用いる。

(1) 渦励振域における圧力分布特性

有効な剥離干渉角である $\theta=20^\circ$ 、 30° と大きな限定振動が発生している $\theta=40^\circ$ について、限定振動の発生風速（図-5.9参照）における位相 $\phi=180^\circ$ の表面圧力分布を図-5.10に示す。図中の○が平均圧力係数 \bar{C}_p 、●が上下面の測定点での平均圧力係数の差より得られた平均揚力係数 \bar{C}_{p*} を示している。

これより、断面柱の側面に作用する力に着目すると、下向き最大速度の状態（位相 $\phi=180^\circ$ ）において、 $\theta=20^\circ$ および 30° では、鉛直板の風上側では減衰力（上向き）、風下側で励振力（下向き）が働いている。一方、 $\theta=40^\circ$ では、 $V_r=6.5$ 時での圧力分布は $\theta=20^\circ$ および 30° と同様の傾向を示しているが、カルマン型渦励振と異なる限定振動が発生している。 $V_r=8.7$ 時では鉛直板の風上側を含めて側面全体において励振力（下向き）が働いている状態になっている。このとき上面の鉛直板風上側において負圧が回復し、下面の鉛直板風下側で大きな負圧が発生する圧力分布となっており、カルマン型渦励振発生時とは異なる圧力分布特性を示している。

(2) ギャロッピング域における圧力分布特性

応答実験より、 $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$ では高風速域におけるギャロッピングの発生が抑制されている（図-3.7(a)参照）。ここで基本断面柱とギャロッピングが抑制されている $\theta=30^\circ$ 、 40° について、換算風速 $V_r=24$ における位相 $\phi=180^\circ$ および 270° の表面圧力分布を図-5.11～図-5.12に示す。

これより、 $\phi=180^\circ$ における側面に作用する \bar{C}_{p*} （図中●）に着目すると、基本断面柱では側面全体には励振力（下向き）が働いているのに対して、 $\theta=30^\circ$ および 40° では、鉛直板の風上側では減衰力（上向き）が働いている。さらに、風下側においては振動に寄与するような力は発生していない。また、 $\phi=270^\circ$ においては側面全体で振動に寄与するような力は発生していない。つまり、1周期の中で鉛直板の風下側には常に振動に寄与する力は働いておらず、鉛直板の風上側に作用する減衰力によって振動が抑制されていると考えられる。

ここで、鉛直板の風上側の上下面の \bar{C}_p （図中○）に着目すると、 $\theta=30^\circ$ では上面側に大きな負圧が働くことによって減衰力が発生しているが、 $\theta=40^\circ$ では下面側の負圧が回復することで減衰力が発生しており、鉛直板の風上側で生じている現象が両者で異なっている。

以上の結果から、剥離干渉法を適用した場合に発生するカルマン型渦励振は、鉛直板の風下側において作用する励起力が鉛直板の風上側に発生する減衰力を上回ることによって発生していると考えられる。また、ギャロッピングに対しては2次剥離点である鉛直板の風下側の側面において振動に寄与する力が発生しておらず、鉛直板の風上側において発生する負圧による減衰力によって振動が抑制されていることが明らかとなった。

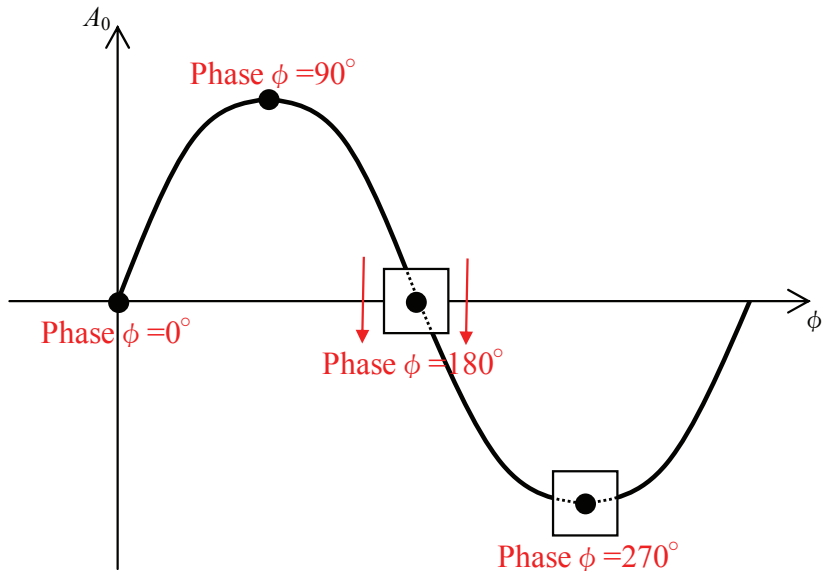


図-5.8 強制加振状態で検討する位相

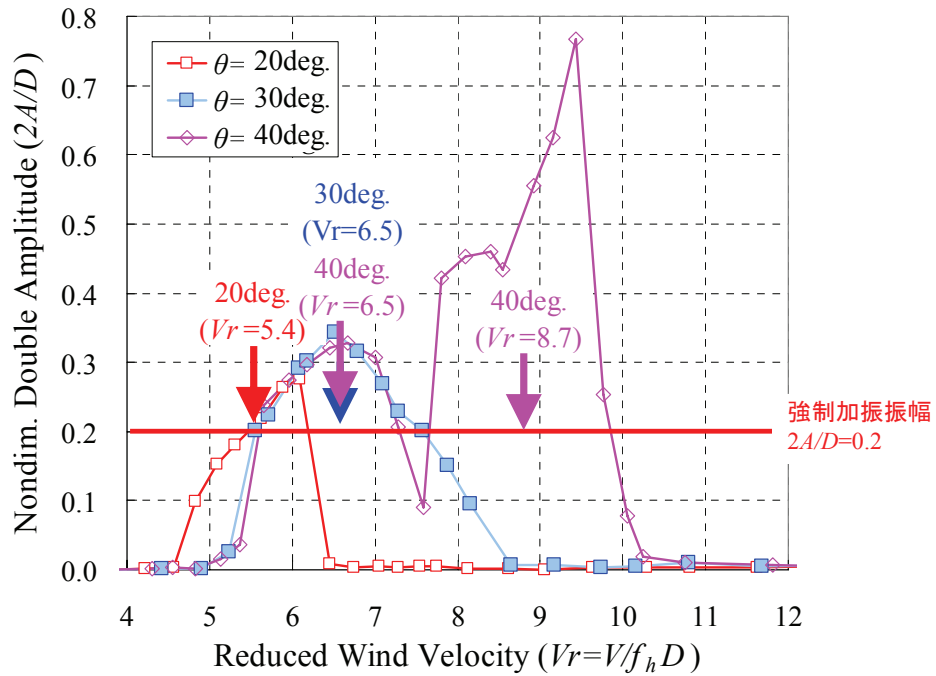
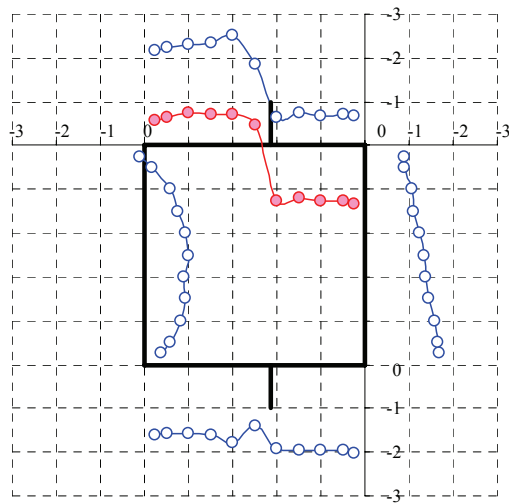
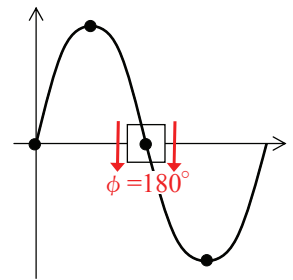


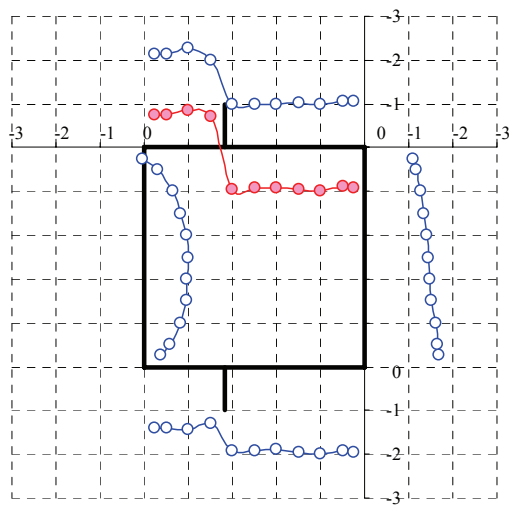
図-5.9 強制加振状態で検討する渦励振時の応答



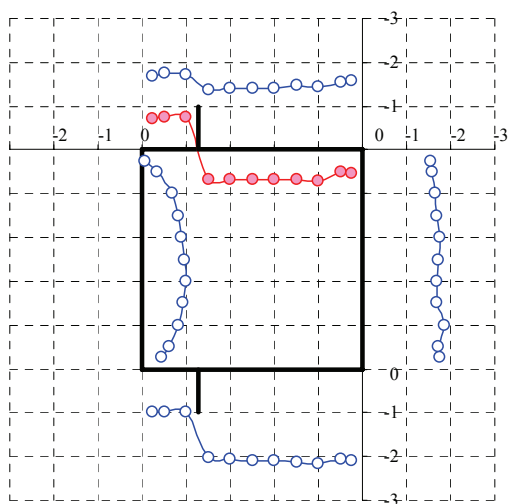
○ : 平均圧力係数 \bar{C}_p
 ● : 平均揚力係数 \bar{C}_p^*



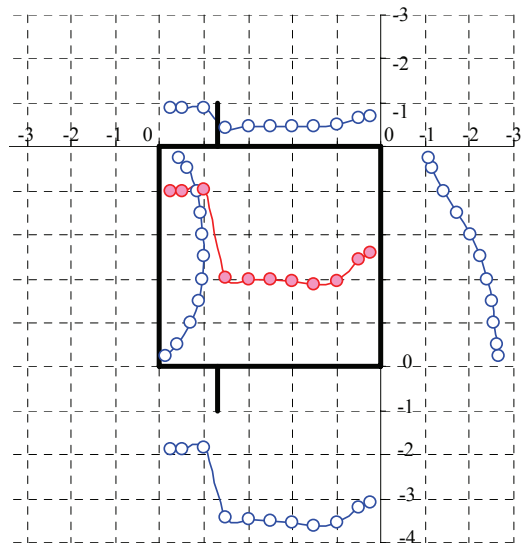
(a) $\theta = 20^\circ, V_t = 5.4$



(b) $\theta = 30^\circ, V_t = 6.5$



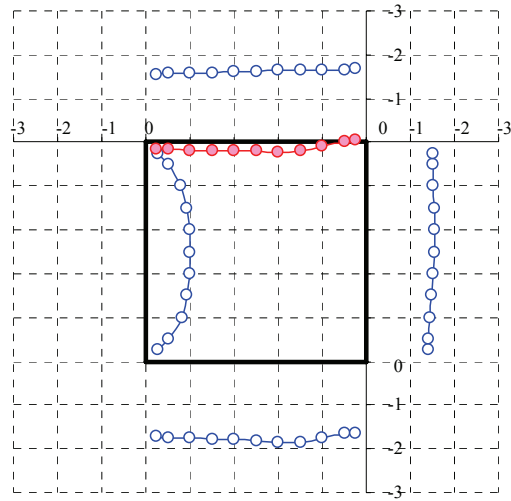
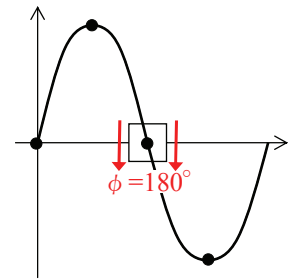
(c) $\theta = 40^\circ, V_t = 6.5$



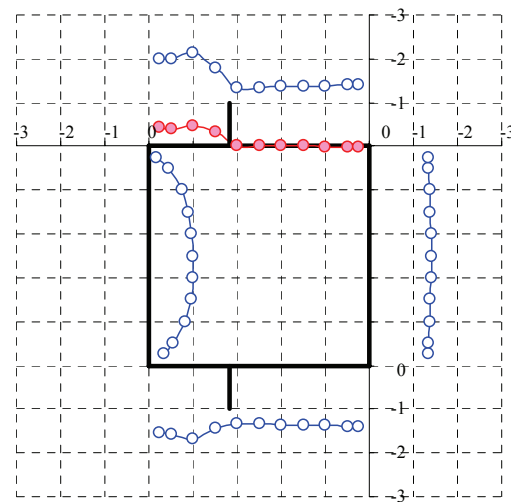
(d) $\theta = 40^\circ, V_t = 8.7$

図-5.10 渦励振域における下向き速度最大時の圧力分布 ($\phi = 180^\circ$)

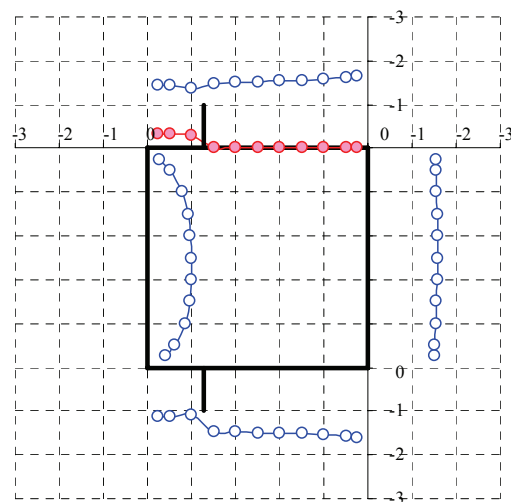
○ : 平均圧力係数 \bar{C}_p
 ● : 平均揚力係数 \bar{C}_p^*



(a) Basic, $V_r=24$

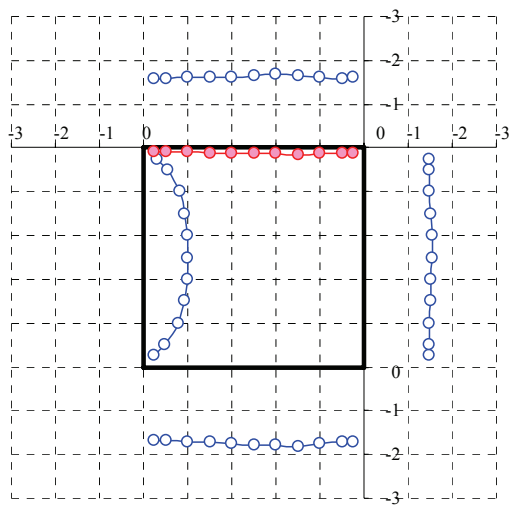


(b) $\theta = 30^\circ$, $V_r=24$

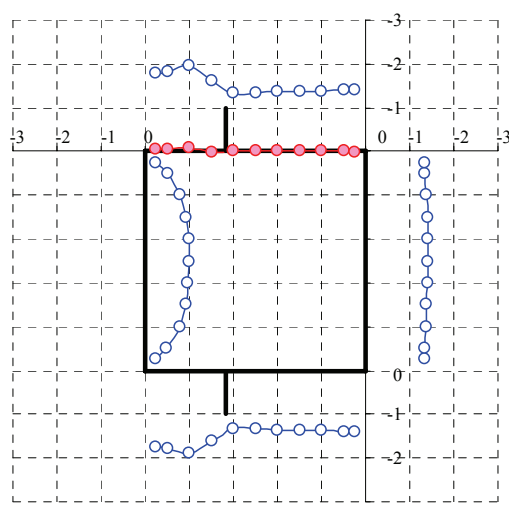
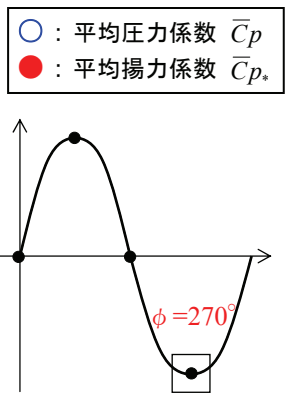


(c) $\theta = 40^\circ$, $V_r=24$

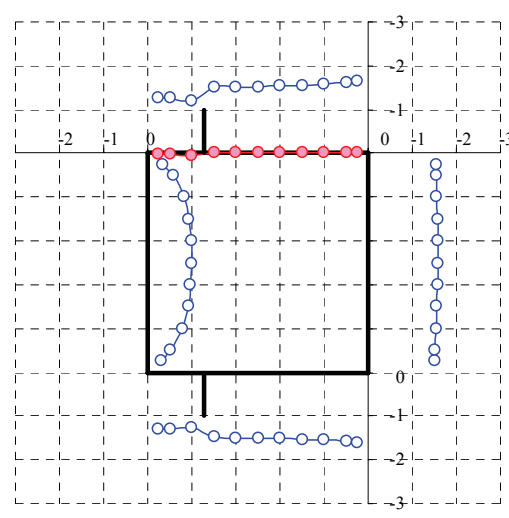
図-5.11 ギャロッピング域における下向き速度最大時の圧力分布 ($V_r=24$, $\phi=180^\circ$)



(a) Basic, $V_r=24$



(b) $\theta = 30^\circ$, $V_r=24$



(c) $\theta = 40^\circ$, $V_r=24$

図-5.12 ギャロッピング域における下向き変位最大時の圧力分布 ($V_r=24$, $\phi=270^\circ$)

第6章

剥離干渉法を適用した場合の周辺流れ場特性

本章では、表面圧力測定実験で検討した静止状態および振動状態を再現した強制加振状態において、PIV (Particle Image Velocimetry) 実験による周辺流れ場の測定を行い、剥離干渉法を適用した場合の断面柱周りおよび剥離点付近における剥離せん断層などの流れ場の詳細な挙動について検討する。

なお、本検討では、表面圧力測定実験と同様の供試模型および風洞装置を用いた (5.1 節, 5.2 節参照)。

6.1 PIV (Particle Image Velocimetry) 実験概要

6.1.1 計測システム

図-6.1にPIVシステム、図-6.2に計測システム、表-6.1に実験で使用した計測機器仕様一覧を示す。

PIVシステムは、風の流れに混入させたトレーサー粒子に向けて、2台のレーザー発振器からレーザーライトシートを非常に短い間隔で2回照射し、高解像度CCDカメラで撮影する。得られた2枚の画像を1組として、画像間の相互相関を解析してトレーサー粒子の移動量と進行方向を計算することにより、空間場の数千点に及ぶ瞬間時の風向・風速を求めることが出来る技術である (図-6.1参照)。

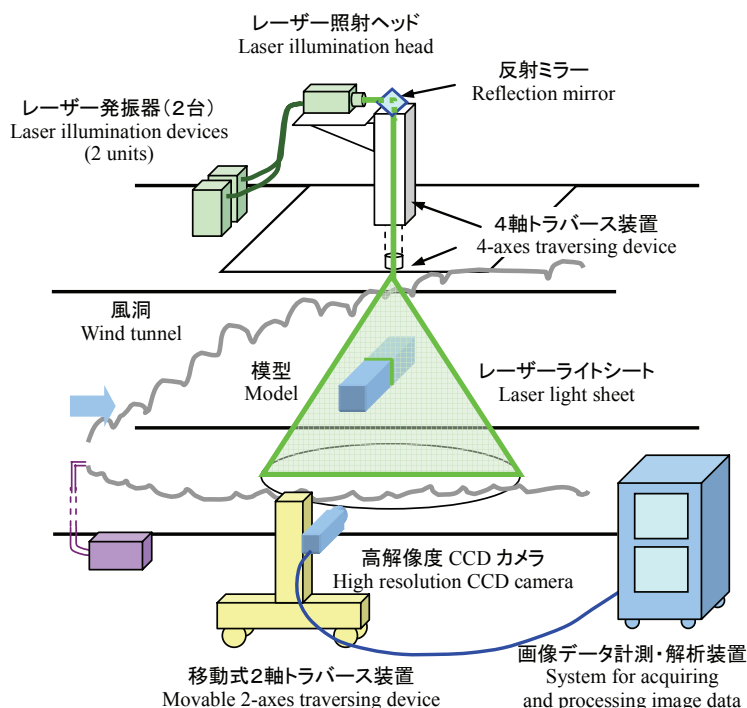


図-6.1 PIVシステム概要

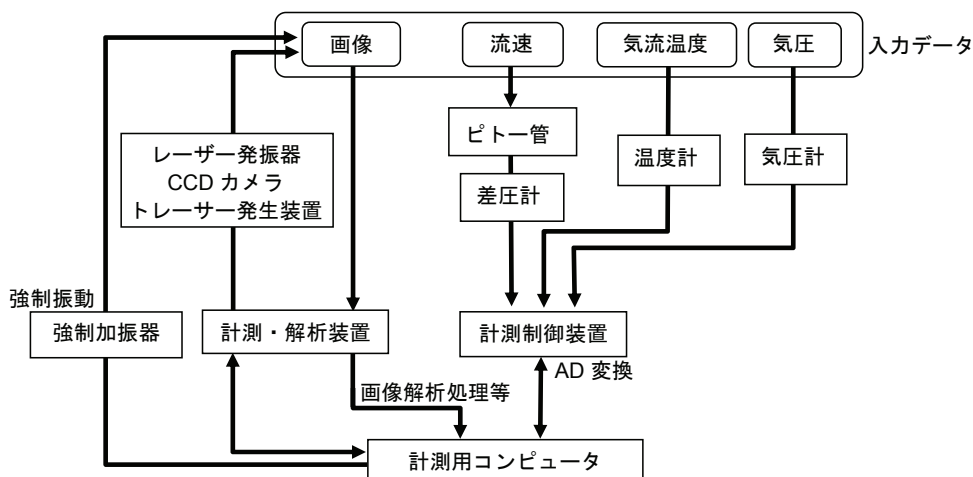


図-6.2 計測システム

表-6.1 使用計測器一覧表

機器名	台数	型番(仕様)	メーカー
解析ソフトウェア	1	Flow Manager	DANTEC
レーザー照射装置	1	120mJ, 15Hz ダブルパルス YAG レーザー	Newwave
CCD カメラ	1	Flowsense, 8bit, 1600×1186pixel, 30fps クロスコリレーションカメラ	DANTEC
トレーサー発生装置	1	PivPart40	西華産業
トラバース装置	1	レーザー用: 4 軸制御 カメラ用: 2 軸制御	風技術センター
強制加振装置	1	—	マイクロダイナミックス

6.1.2 PIV による流速場の測定手法の原理^{27),28)}

PIV の実験装置はいくつかのサブシステムからなる。流れに微細なトレーサー粒子が加えられ、流れの断面が、レーザー光シートにより Δt だけ時間間隔をおいて、2 回照明される。(パルス間の時間間隔は平均流速および、画像の撮影倍率に依存する。) トレーサー粒子は 2 回の照明間に、局所流速に従って移動すると仮定される。トレーサー粒子からの散乱光は、高解像度 CCD カメラによって撮影され、計算機のメモリに実時間で蓄えられる。数値化された PIV 画像は、処理のため“検査領域”と呼ばれる小さな領域に分割される。第 1 と第 2 の照明によるトレーサー粒子像の局所変位ベクトルは、各検査領域についての統計的手法(相互相関)により求められる。検査領域内すべての粒子は、2 回の照明の間一様に動くものと仮定される。局所流速ベクトルの光シート面内成分、すなわち 2 成分のベクトルが、2 照明間の時間差と画像の倍率を考慮して求められる。このプロセスが、PIV 画像の全ての検査領域について繰り返される。こうして、流れ場の風速ベクトルが求められる。

以下に、本検討の画像処理に用いた FFT 解析による相互相関解析について述べる。

(1) PIV 基本原理

PIV 画像処理において、粒子の移動量を求める場合は、統計的に局所パターンの一致を探す。図-6.3 に測定で得られた 2 枚の画像間のトレーサー粒子の移動のイメージ図を示す。

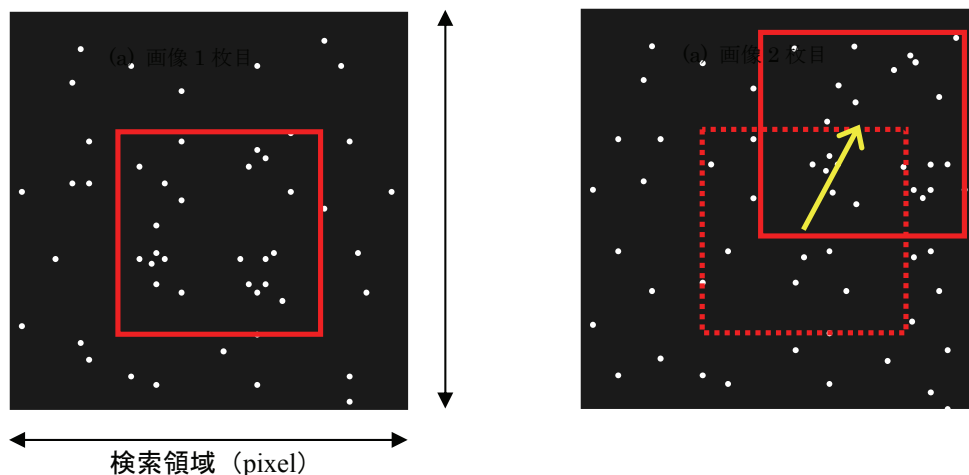


図-6.3 2枚の画像間のトレーサー粒子の移動

図-6.3において、画像の大きさが1つの検索領域 (search region) を表しているものとする。また、画像1枚目と画像2枚目は Δt だけ時間間隔をおいて撮影されているとする。この2枚の画像を比較すると、四角枠で囲まれた部分において粒子が同じパターンで移動していることがわかる。そして、この局所パターンの移動量からその検索領域でのベクトルが求められる。このように検索領域をpixelで指定し、その領域内で局所パターンの相関を離散相互相関法が用いて求めることでベクトルを求める。以下に、相互相関および離散相互相関の数学的背景について述べる。

(2) 相互相関の数学的背景

PIV画像はトレーサー全体を単一露光で記録した2フレーム間の局所的相互相関を取ることで処理される。以下に、検査体積内ではすべての粒子変位 D が一定であると仮定する。そこで、時刻 $t=t+\Delta t$ における第2露光における粒子の位置は、次のように表される。

$$X_i' = X_i + D = \begin{pmatrix} X_i + D_x \\ Y_i + D_y \\ Z_i + D_z \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6.1)$$

さらに粒子像の変位が以下のように仮定される。

$$d = \begin{pmatrix} MD_x \\ MD_y \end{pmatrix} \dots\dots\dots (6.2)$$

これは透視投影の単純化であり、このような表現は光軸近傍に位置する粒子についてのみ有効である。

第2露光時の像輝度分布は、次のようになる。

$$I'(x, \Gamma) = \sum_{j=1}^N V_0'(X_j + D) \tau(x - x_j - d) \tau \dots\dots\dots (6.3)$$

ここで、 $V_0'(X)$ は第2露光における検査体積を表す。



図-6.4 時刻 t で記録された輝度分布 I と Δt 後の t' で記録された輝度分布 I'

ここで、同一光シートと窓特性を考慮すれば、2つの検査領域の相互相関は以下のように書ける。

$$R_{II}(s, \Gamma, D) = \frac{1}{a_1} \sum_{i,j} V_0(X_i) V_0(X_j + D) \int_a \tau(x - x_i) \tau(x - x_i + s - d) dx \quad \dots \quad (6.4)$$

ここで、 s は相関面での変位ベクトルである。上式より以下の式が得られる。

$$R_{II}(s, \Gamma, D) = \sum_{i,j} V_0(X_i) V_0(X_j + D) R_c(x_i - x_j + s - d) \quad \dots \quad (6.5)$$

不規則に分布する粒子間の相関と、主に相関面でのノイズを表す $i \neq j$ の項と、求めるべき変位の情報を含む $i = j$ の項に分離することにより、次式が得られる。

$$R_{II}(s, \Gamma, D) = \sum_{i \neq j} V_0(X_i) V_0(X_j + D) R_c(x_i - x_j + s - d) + R_c(s - d) \sum_{i=1}^N V_0(X_i) V_0(X_i + D) \quad \dots \quad (6.6)$$

ここで再び、相関を3つの部分に分離すると、次式のようになる。

$$R_{II}(s, \Gamma, D) = R_C(s, \Gamma, D) + R_F(s, \Gamma, D) + R_D(s, \Gamma, D) \quad \dots \quad (6.7)$$

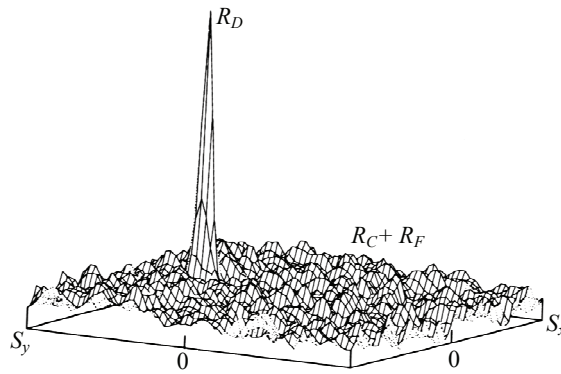


図-6.5 相互相関におけるピーク成分の構成²⁷⁾

$R_D(s, \Gamma, D)$ は以下の相互相関関数の成分を表す。すなわち、それは第1露光から得られる粒子の像と、第2露光から得られる同一の粒子の像 ($i = j$ 項) との相関に相当する。

$$R_D(s, \Gamma, D) = R_c(s - d) \sum_{i=1}^N V_0(X_i) V_0(X_i + D) \quad \dots \quad (6.8)$$

ここで、流れの中の与えられた粒子分布について、変位相関ピークは $s = d$ で最大となる。この最大の位置は平均面内変位を与える。そして、流れ内部の速度の U と V 成分を与える。

(3) 離散相互相関

離散相互相関には、次式が用いられる。

$$R_{I I'}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) I'(i+x, j+y) \quad \dots\dots\dots (6.9)$$

I と I' の変数は画像中の輝度であり、 I' のサイズは I よりも大きい。特に I は、 I' の周囲をシフトさせてマッチングを行う。あるシフト (x, y) に対して、重なったピクセルの輝度をすべて考慮し、1 つの相互相関関数 $R_{I I'}(x, y)$ が得られる。この処理を $(-M \leq x \leq +M, -N \leq y \leq +N)$ のシフト範囲で行うことによって、 $(2M+1) \times (2N+1)$ の大きさの相互相関関数が得られる。相関値は 2 つのパターンの近さを統計的に示す指標であり、最大の相関値を示すシフト量が粒子画像の移動量として用いられる。

上述した相関の求め方は、FFT 解析の基礎となる考え方である。以降に、この計算を効率化した FFT 解析について述べる。

(4) 効率化した相互相関処理

式(6.9)を用いた直接相互相関の代わりに、相関理論を用い、フーリエ変換の複素共役積をとり、相関係数を求めることが行われる。

$$R_{I I'} \Leftrightarrow \hat{I} \cdot \hat{I}'^* \quad \dots\dots\dots (6.10)$$

ここで、 \hat{I} と \hat{I}' は、それぞれ、 I と I' のフーリエ変換である。式(6.9)で表される膨大な 2 次元直接相関処理は、2 次元 FFT 解析によるフーリエ係数の複素共役積に効率化できる。これをさらに、逆フーリエ解析することで、入力と同じ大きさ $N \times N$ の自己相関関数が得られる。

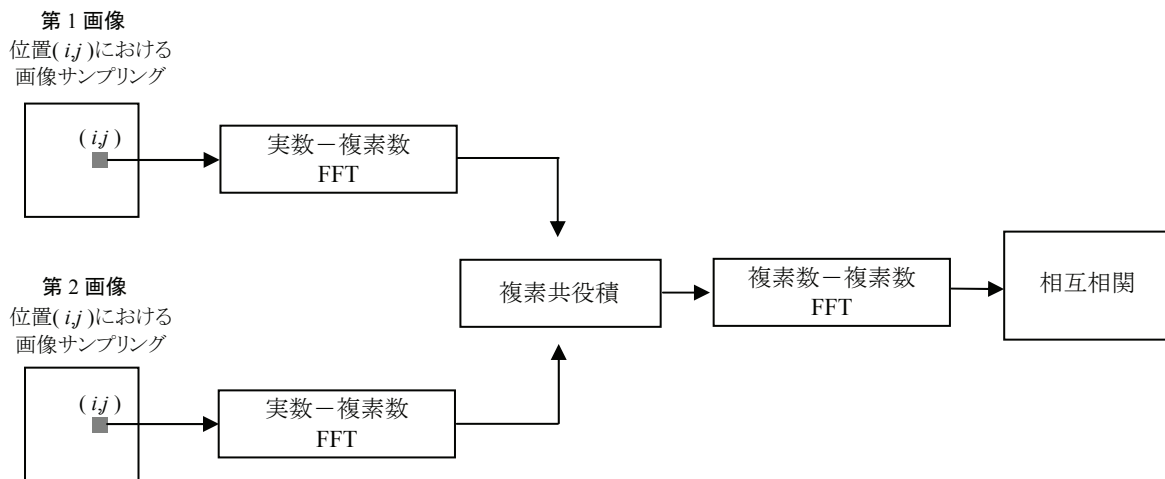


図-6.6 FFT を用いた相互相関処理

(5) FFT 解析のまとめ

直接相関 (式(6.9)) は、規格化されていないので同じ適合度合いでも相関値が異なる場合がある。例えば、数の多い (または明るい) 粒子画像の場合は数の少ない (または暗い) 粒子画像よりも相関値が大きくなる。このことから、複数の領域における相関量を比べることの意味が無くなる。よって、2 画像間の相関の度合いを定量化することが有効である。相互相関係数は、相互相関値を適切に規格化することにより以下のように得られる。

$$c_{1I}(x, y) = \frac{C_{1I}(x, y)}{\sqrt{\sigma_I(x, y)}\sqrt{\sigma_{I'}(x, y)}} \quad \dots\dots\dots (6.11)$$

ここで,

$$c_{1I}(x, y) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [I(i, j) - \mu_I][I'(i+x, j+y) - \mu_{I'}(x, y)] \quad \dots\dots\dots (6.12)$$

$$\sigma_I(x, y) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [I(i, j) - \mu_I]^2 \quad \dots\dots\dots (6.13)$$

$$\sigma_{I'}(x, y) = \sum_{i=0}^M \sum_{j=0}^N [I'(i, j) - \mu_{I'}(x, y)]^2 \quad \dots\dots\dots (6.14)$$

μ_I は検査領域の平均値であり1回だけ計算すれば良い。一方 $\mu_{I'}(x, y)$ は、点 (x, y) における I' の係数の平均値であり、各点ごとに計算する必要がある。以下に、解析の手順を示す。

ステップ1：対象点の画像を取り出し、平均値と標準偏差を求める。

ステップ2：各画像から平均値を減算する。

ステップ3：図-6.5に従い、2次元FFTにより相互相関値を求める。

ステップ4：相関値を元画像の標準偏差によって割る。この値は、 $-1 \leq c_{1I} \leq 1$ の範囲に入り、規格化される。

ステップ5：FFT相互相関に起因する誤差を考慮に入れながら、相関値のピークを探索する。

6.1.3 実験諸元

PIV実験における実験ケースを表-6.2に示す。

実験気流、迎角 α 、剥離干渉角 θ および加振振動数・加振振幅の設定条件については、表面圧力測定実験と同一とする。

取得する画像データ数については、既往の研究例²⁹⁾により、1000組以上のデータを用いることで、平均および変動の統計値として十分安定した結果を得ることができることが示されていることから、本検討ではデータ取得数を1500組と設定した。

強制振動状態での撮影においては、模型下面側領域にはレーザー光で生じる模型の陰が生じ、データの精度に問題があると判断し、位相 $\phi=180^\circ$ に対して $\phi=0^\circ$ での撮影で得られた模型上面側領域のデータを $\phi=180^\circ$ の補完データとして用いることとした(図-6.7参照)。

表-6.2 各種実験諸元 (PIV 実験)

実験種類	PIV 実験	
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)	
実験気流	一様流 (乱れ強さ 1%以下)	
模型状況	静止	強制振動
実験風速 V_0, V_r レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	$V_0=9\text{m/s}$ 30000	$V_r = 5.4$ ($\theta = 20^\circ$), 6.5 ($\theta = 30^\circ$), 8.7 ($\theta = 40^\circ$), $V_r = 24$ ($\theta = 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$)
迎角 α	0°	
剥離干渉角 θ	$15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 35^\circ, 40^\circ$	$20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$
加振振動数 加振振幅	—	$f_h=7.4\text{Hz}$ $2A_0/D=0.2$
撮影位相 ϕ	—	$0^\circ, 180^\circ$
サンプリング周波数, データ数	15Hz, 1500組	

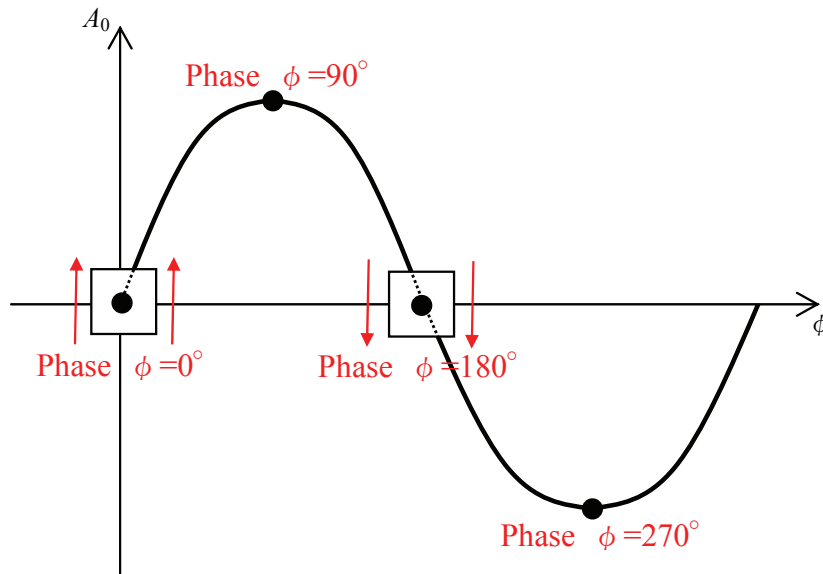


図-6.7 強制振動時に画像取得する位相

6.2 実験結果および考察

6.2.1 静止状態における周辺の流れ場特性

静止状態における剥離干渉角別の周辺流れ場特性について、断面柱の側面上および後流域の流れ場に注目して検討する。

(1) 側面上での流れ場

側面の上面側に注目して、実験風速 $V_0(=9\text{m/s})$ に対する風速比が1.0以上となる増速領域の等風速線図を図-6.8に、流速ベクトル図を図-6.9に示す。これより、基本断面柱では前縁隅角部で生じた剥離の影響によって風速比1.55程度の増速領域が発生しているのに対し、 $\theta \leq 30^\circ$ では基本断面柱よりも高い増速領域（風速比1.6以上）が発生している。また、最大増速領域の発生位置についても、 $\theta \leq 30^\circ$ の範囲では鉛直板の風上側（1次剥離点と2次剥離点との間）で発生しているのに対し、 $\theta \geq 35^\circ$ の範囲では鉛直板の風下側で発生している。また、流速ベクトル図より、鉛直板を設置することによって鉛直板の風上側には定常的な循環流が発生している。有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）での剥離流の増速位置は循環流の発生位置と概ね一致している。このことから、表面圧力測定実験で確認された鉛直板の風上面に生じる大きな負圧はこの循環流によるものであると考えられる。

ここで、鉛直板の風上側に発生する循環流に着目する。水平および鉛直方向の風速が0となる位置を循環流の中心とし、各剥離干渉角 θ における循環流の中心位置での実験風速 V_0 に対する水平成分風速比の鉛直分布を図-6.10に、循環流の上下部における最大風速比の差を図-6.11に示す。また、循環流中心と断面柱側面との間の逆流発生領域に着目し、循環流中心からの距離 Y_1 を断面高さ D で無次元化した Y_1/D と水平成分風速比についてまとめたものを図-6.12に示す。ここで循環流中心から同じ距離において風速が大きい場合には、強い循環が存在しているとみなすことができる。

これらより、有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）においては循環流の上下部分で大きな風速差が発生しており、強い循環となっていることを示している。 $\theta = 15^\circ$ においても大きな風速差が発生しているが、 $\theta = 15^\circ$ では正側の最大風速が発生している位置が断面柱側面から遠い位置で発生しており、図-6.12からも強い循環が発生しているとは言えない。

次に、循環流による剥離境界層の挙動に着目する。断面柱側面から実験風速以上となる位置までの鉛直方向距離を剥離境界層の厚さと定義し、循環流の水平中心位置における剥離境界層厚と同位置における基本断面柱での剥離境界層の厚さとを比較したものを図-6.13に示す。これより、有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）では、剥離境界層の厚さが基本断面柱の場合よりも狭くなっており、剥離流が模型側面に近づいていることを示している。

さらに前縁隅角部上および鉛直板上での気流傾斜角についてまとめたものを図-6.14に示す。これより、前縁隅角部上では、各 θ でほぼ同じ角度で剥離流が発生しているが、鉛直板上においては、 $\theta \leq 30^\circ$ で図-6.14(b)に示すように鉛直板の端部（ $Y/D=0.7$ ）付近で剥離流の角度が小さくなる傾向を示しており、有効な剥離干渉角（ $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ ）では鉛直板付近で剥離が抑えられるような流れになっている。なお、 $\theta = 15^\circ$ においても気流傾斜角は負となっているが、図-6.9(h)に示すように鉛直板の風上側で発生する循環流の巻き込みが2次剥離点を越えて鉛直板の風下側まで及んでいるために負の気流傾斜角となったものであり、剥離流が有効に2次剥離点に干渉するような流れとはなっていないと考えられる。

また、 $\theta \geq 35^\circ$ では鉛直板端部付近で気流傾斜角度が大きくなる傾向を示している。前述した増速領域の発生状況（図-6.8(f)および図-6.8(g)参照）と併せて考えると、参考文献4)や15)で述べられてい

るように1次剥離点から発生した剥離せん断層は2次剥離点と干渉せずに鉛直板の側面に一度衝突した後、2次剥離点から再剥離が生じていると考えられる。

(2) 後流域での流れ場

断面柱の後流域において逆流発生領域の水平成分風速の等風速線図を図-6.15に、後流域での流速ベクトル図を図-6.16に示す。ここで、後流よどみ点を水平成分風速が0となる点、後流で発生する1次渦の中心位置を水平および鉛直方向の風速が0となる位置と定義し、剥離干渉角 θ による後流よどみ点位置の水平方向変化についてまとめたものを図-6.17に、1次渦中心から断面柱背面との間に着目して、1次渦の中心からの距離 X_1/D と実験風速 V_0 に対する鉛直成分の風速比の関係についてまとめたものを図-6.18に示す。

図-6.17より、鉛直板を設置した場合には基本断面柱に比べて後流よどみ点は下流側に移動しており、後流域が広がるが、その中で有効な剥離干渉角 ($\theta=20^\circ\sim 30^\circ$) では後流よどみ点は断面柱背面に近づき、後流域が狭くなる傾向を示している。また、図-6.18より、有効な剥離干渉角では、大きな限定振動が発生した $\theta=40^\circ$ に比べて後流渦の渦中心付近での風速勾配が小さく、渦の巻き込み強さが弱くなっている。また、後流渦の鉛直成分風速比の最大値も小さくなっている。

これらの結果は、5.4.1(2)項に示した側面における変動圧力係数の変化に対する考察と合致しており、有効な剥離干渉角 ($\theta=20^\circ\sim 30^\circ$) では、後流で発生する後流渦による励振力が小さくなっていることが明らかとなった。

以上の結果より、剥離干渉法が有効に機能する剥離干渉角 θ では、鉛直板の風上側に発生する循環流による負圧によって剥離流が引き寄せられ、増速される。さらに2次剥離点と沿うように干渉した後、剥離が抑えられる(断面柱側面に平行に近くなる)ように流下し、断面柱後流において励振力の小さな後流渦が生成していることが明らかとなった。

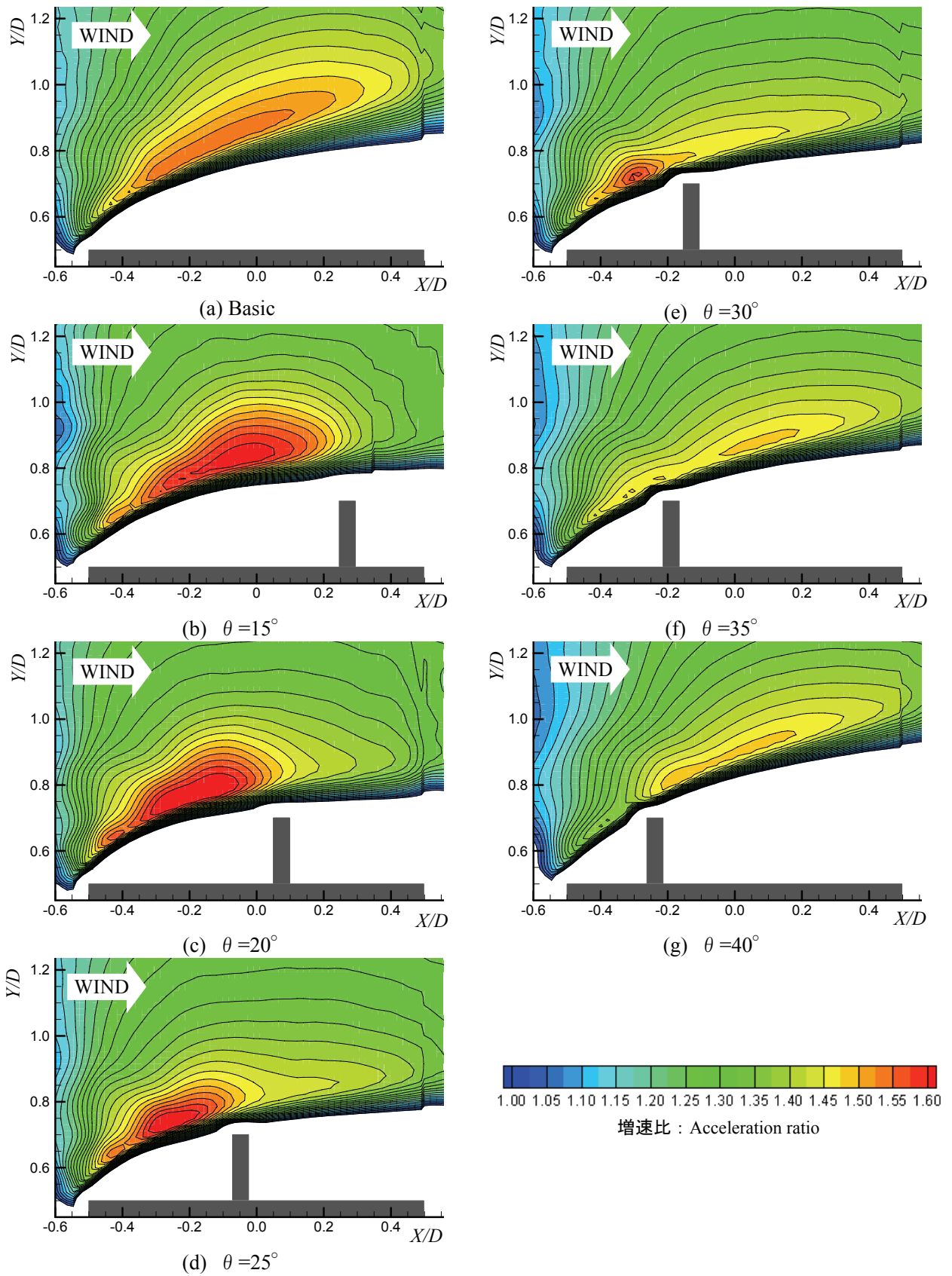


図-6.8 側面上における等平均風速線図（実験風速 $V_0=9\text{m/s}$ に対する増速比，静止時，迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

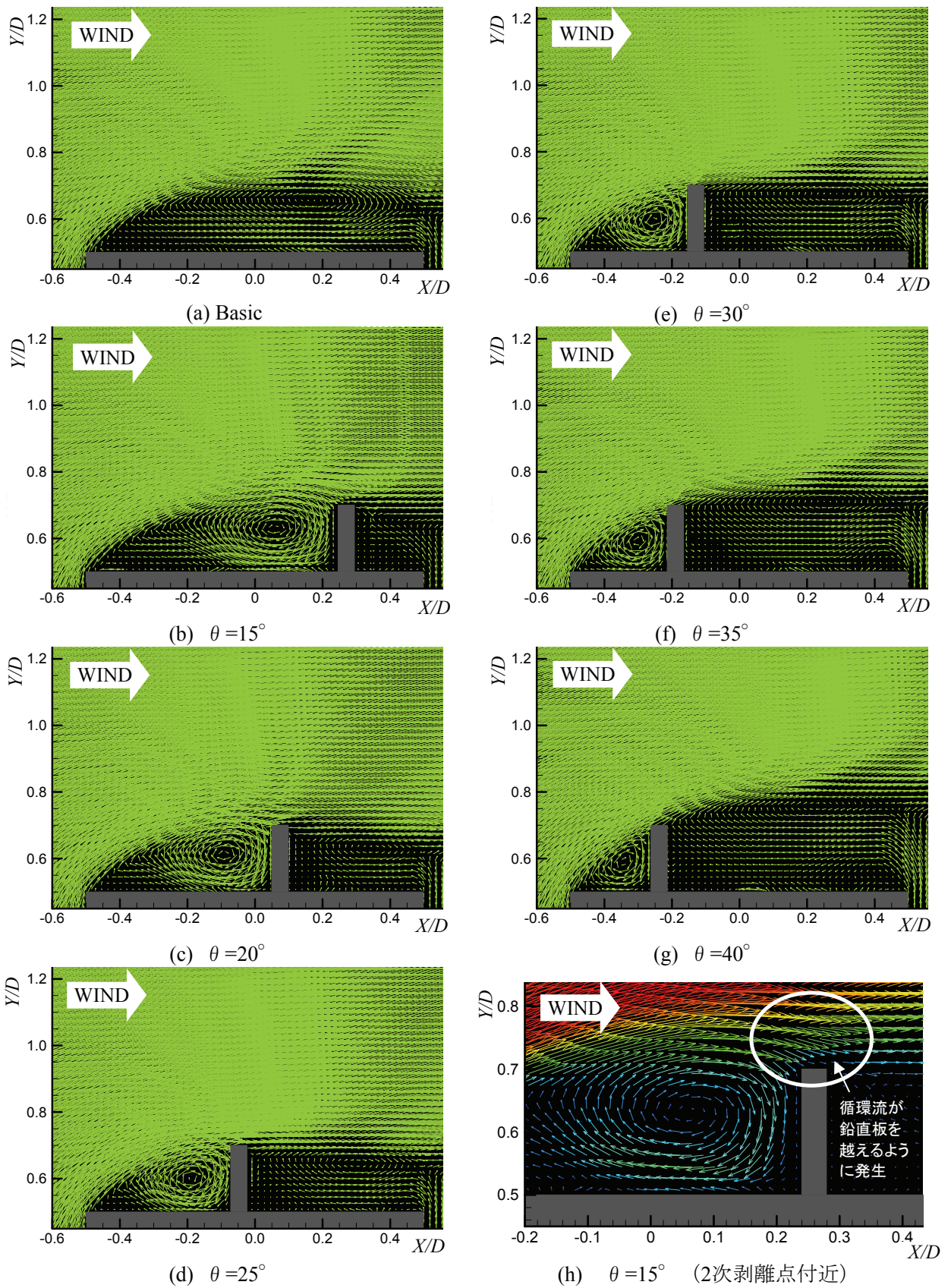


図-6.9 側面上での流速ベクトル (静止時, 迎角 $\alpha=0^\circ$)

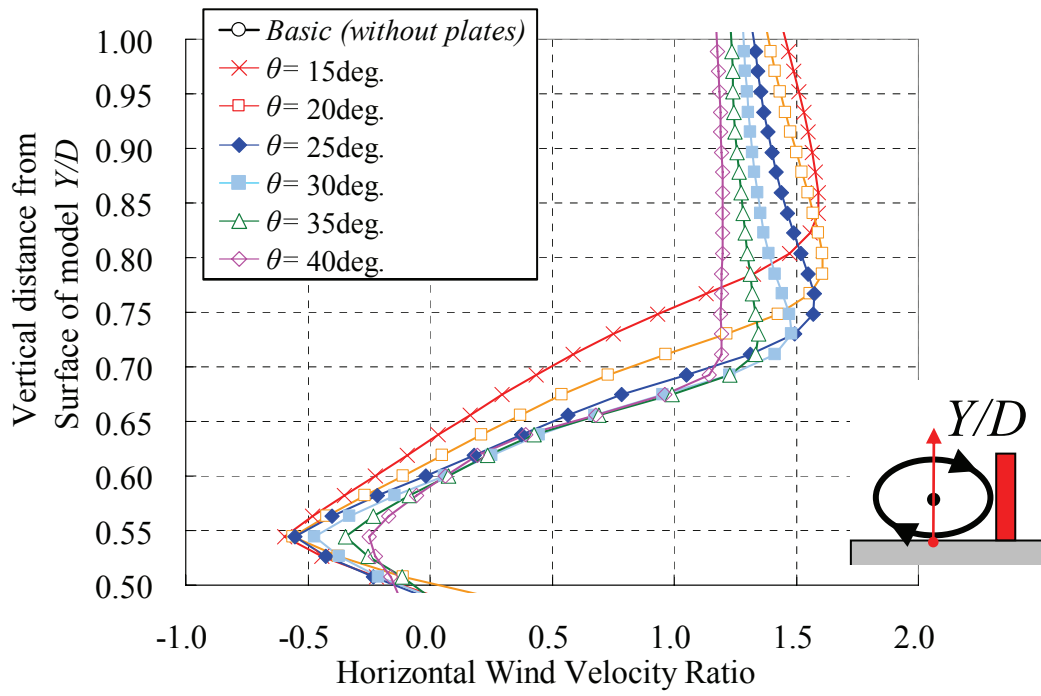


図-6.10 循環流中心位置での水平成分風速比

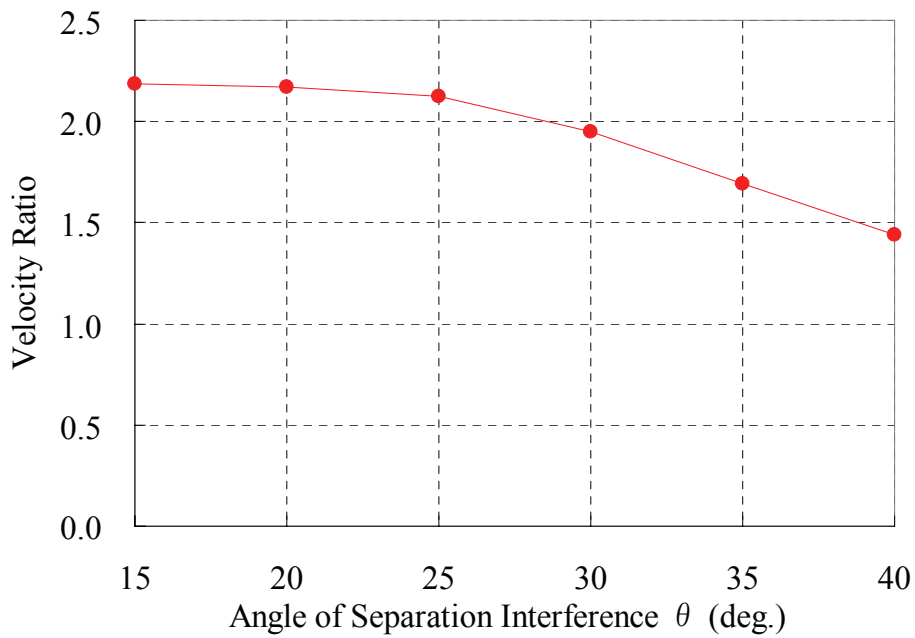


図-6.11 循環流中心位置での上下の最大風速比の差

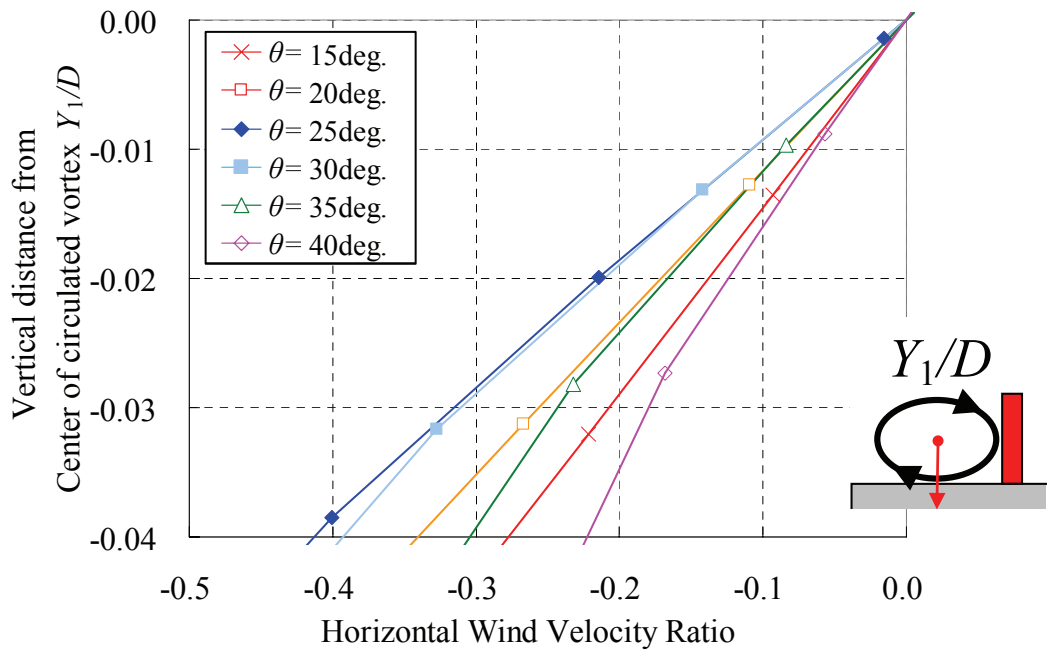


図-6.12 循環流中心付近での水平成分風速比の比較

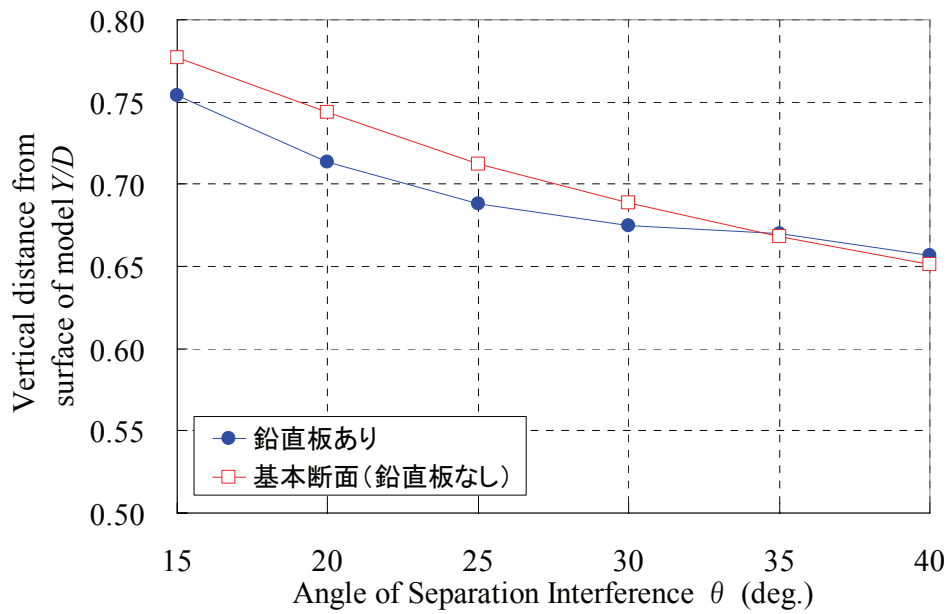
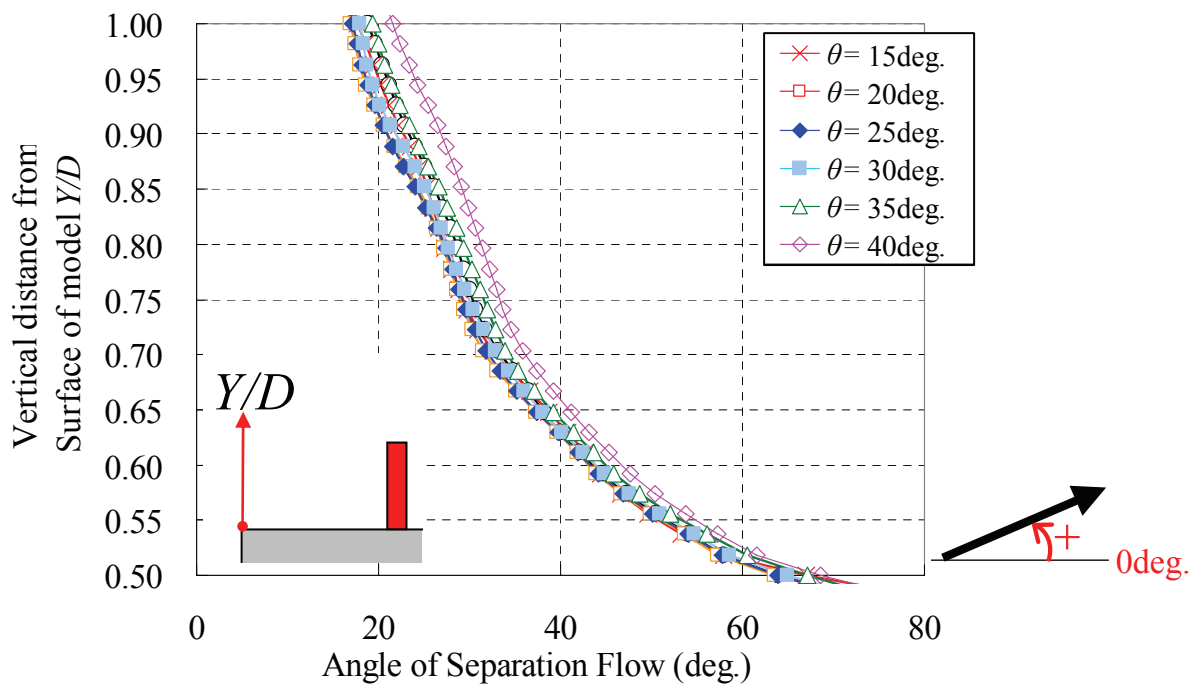
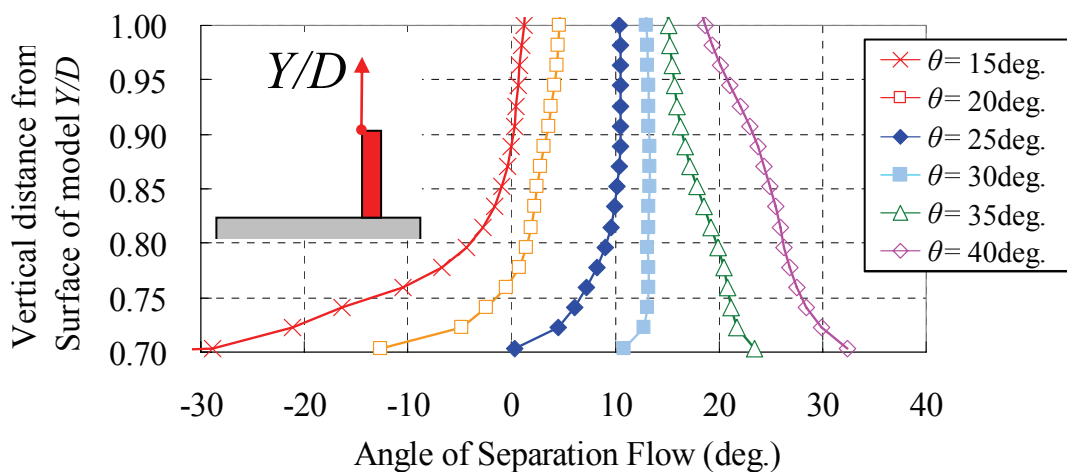


図-6.13 剥離境界層厚の比較



(a) 前縁隅角部上



(b) 鉛直板上

図-6.14 剥離流の気流傾斜角の変化（静止時，迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

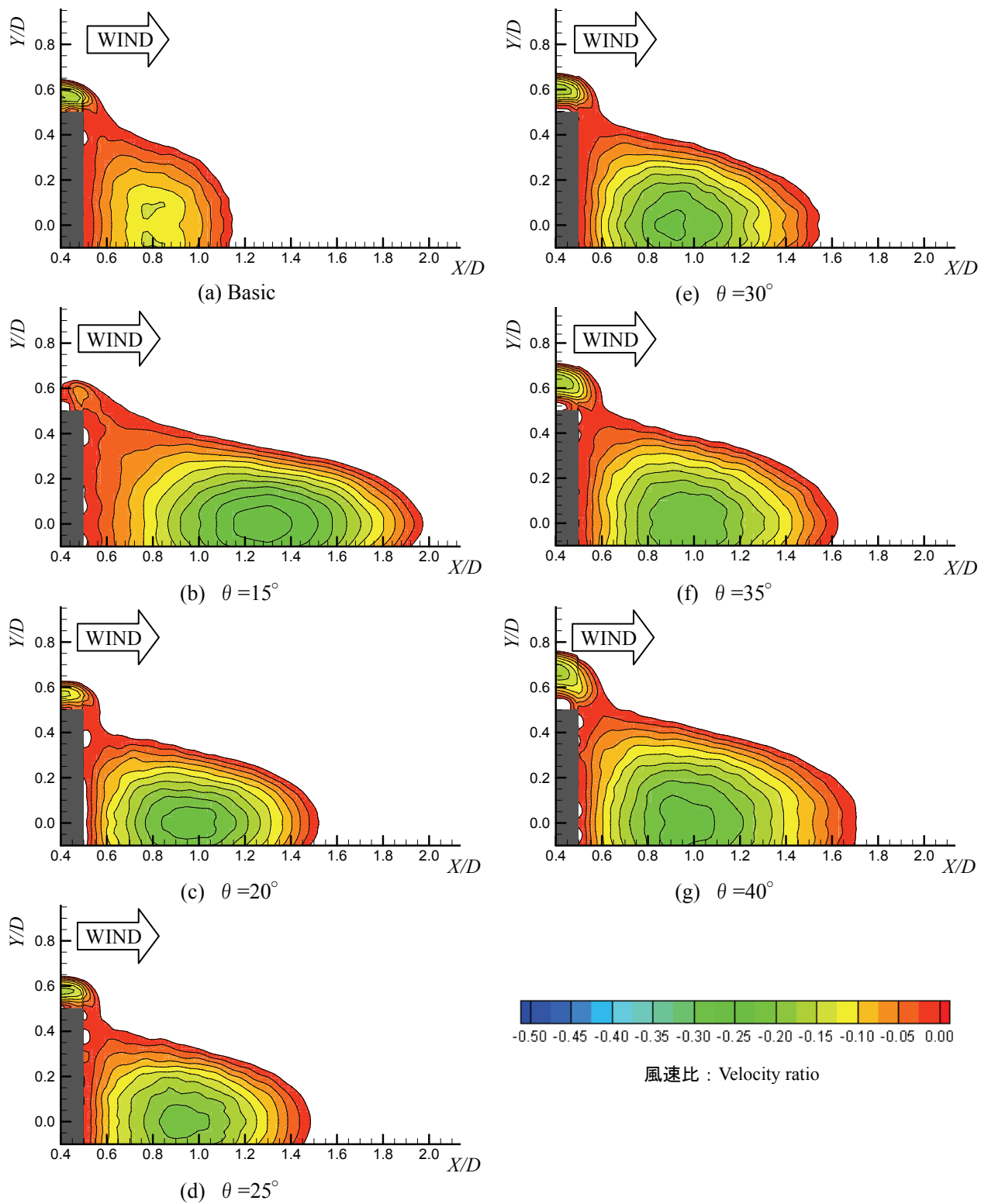


図-6.15 後流域における等平均風速線図（水平成分風速が負となる逆流域，静止時，迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

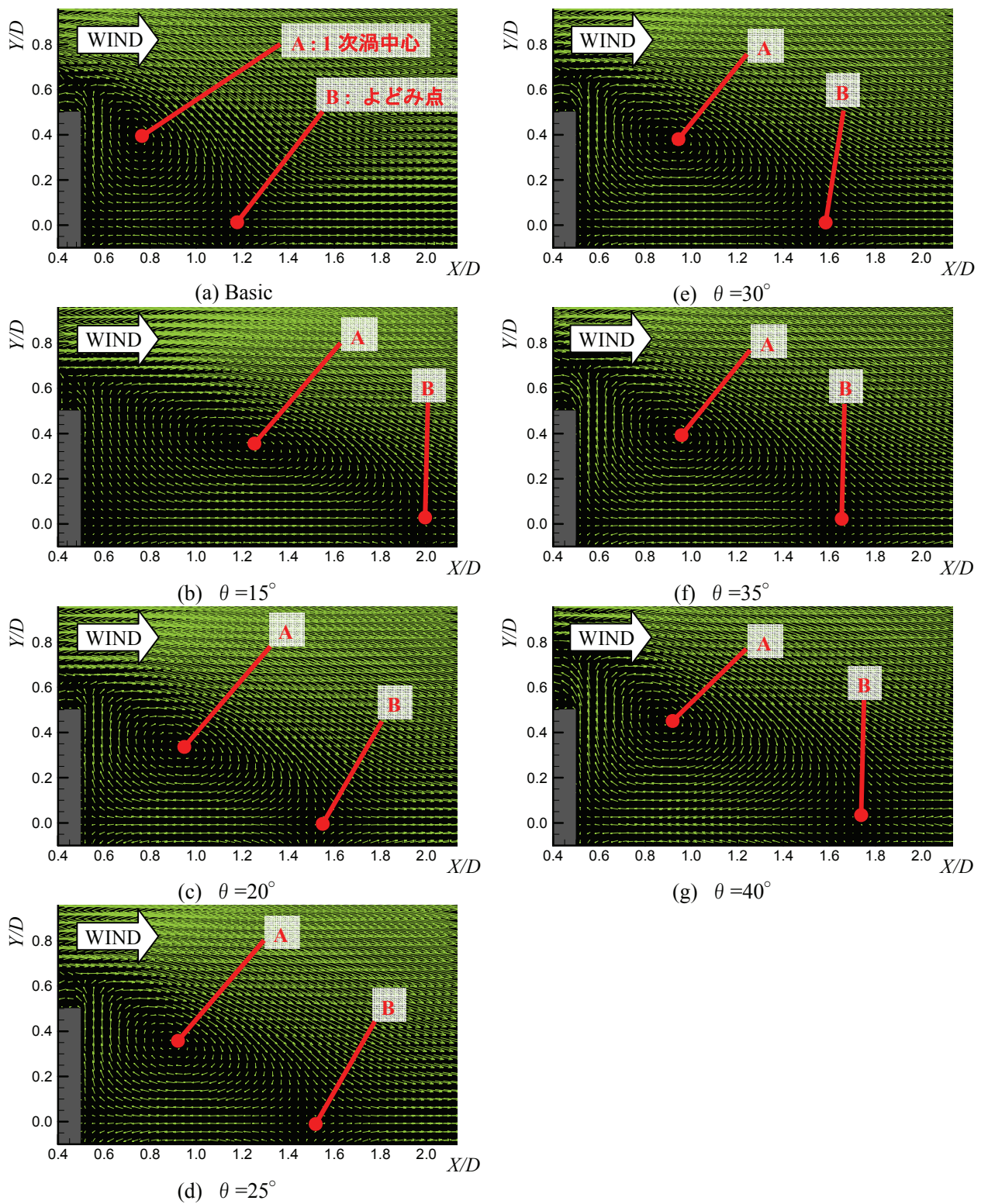


図-6.16 後流域における流速ベクトル（静止時，迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

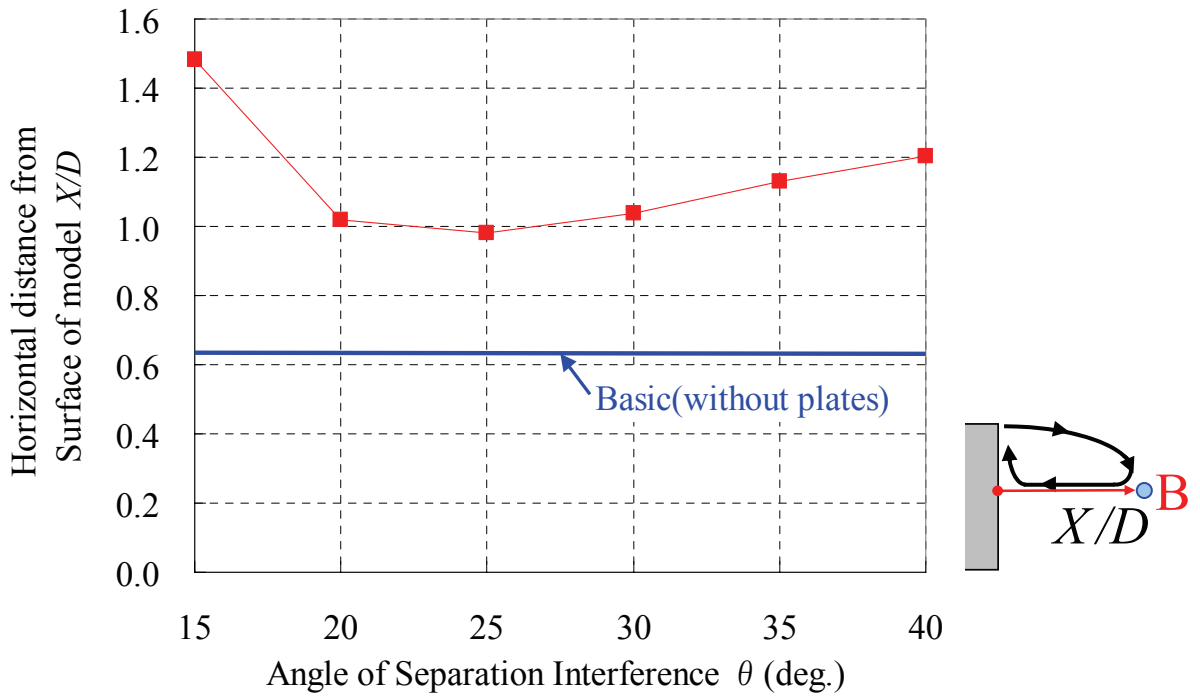


図-6.17 後流よどみ点位置の比

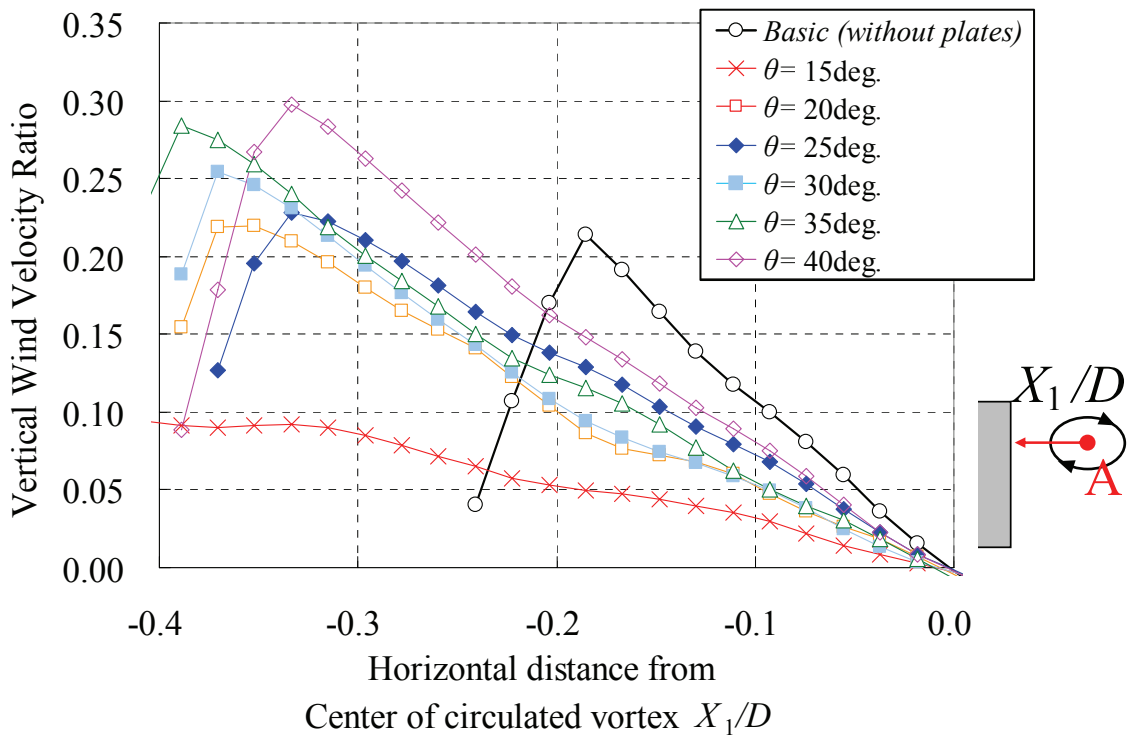


図-6.18 後流1次渦中心付近での鉛直成分風速比の比較

6.2.2 強制振動状態における周辺の流れ場特性

第5章で述べた強制振動状態における圧力分布特性に対応する周辺流れ場について検討し、 $B/D=1$ 断面柱において発生する渦励振およびギャロッピングに対する剥離干渉法の作用および効果について検討する。

(1) 渦励振域における周辺流れ場特性

有効な剥離干渉角である $\theta=20^\circ$ ($V_r=5.4$ 時), 30° ($V_r=6.5$ 時) と 2 つの限定振動が発生している $\theta=40^\circ$ ($V_r=8.7$ 時) について, 限定振動の発生風速 (図-5.8 参照) における位相 $\phi=180^\circ$ の実験風速に対する平均風速比, ベクトル分布および渦度分布を図-6.19~図-6.21 に示す。

平均風速比分布およびベクトル図より, 断面柱背面の後流域において全てのケースでカルマン渦が発生している。また, 渦度分布において Y/D 軸上で渦度が大きくなる部分を剥離せん断層の位置とみなした場合, $20^\circ \rightarrow 30^\circ \rightarrow 40^\circ$ の順で下面側における剥離せん断層の断面柱背面への巻き込みが顕著となっており, 下面側の鉛直板風下側において風速増加領域が発生している。これは, 断面柱後流に発生するカルマン渦によって剥離せん断層が断面柱背面に沿って巻き込むような流れを形成し, 鉛直板の風下側の流れが増速することによって大きな負圧が発生し, 励振する力が働いていると考えられる。また, 図-6.22 に示すように上面側の剥離点間に着目すると, 有効な剥離干渉角である $\theta=20^\circ$ および 30° の上面の鉛直板風上側において循環流が発生している。表面圧力分布の結果 (図-5.9 参照) と合わせて考えると, 有効な剥離干渉角の場合, 渦励振発生時においても鉛直板の風上側では循環流が発生し, これによって発生する負圧によって減衰に寄与する働きをしていると考えられる。

一方, $\theta=40^\circ$ ($V_r=8.7$ 時) では, 上面側の剥離点間において循環流は発生しておらず, 負圧による減衰力が機能しないことで鉛直板の風上側においても励振力が発生している。このことから, スプリッタープレートを挿入してカルマン渦の影響を取り除いた状態において発生した $\theta=40^\circ$ での限定振動 (図-3.9 参照) は, 剥離干渉法が有効に機能しない, つまり剥離点間に循環流が形成されないことによって生じている振動であると考えられる。

(2) ギャロッピング域における周辺流れ場特性

基本断面柱とギャロッピングが抑制されている $\theta=30^\circ, 40^\circ$ について, 換算風速 $V_r=24$ における実験風速に対する平均風速比, ベクトル分布および渦度分布を図-6.23~図-6.25 に示す。

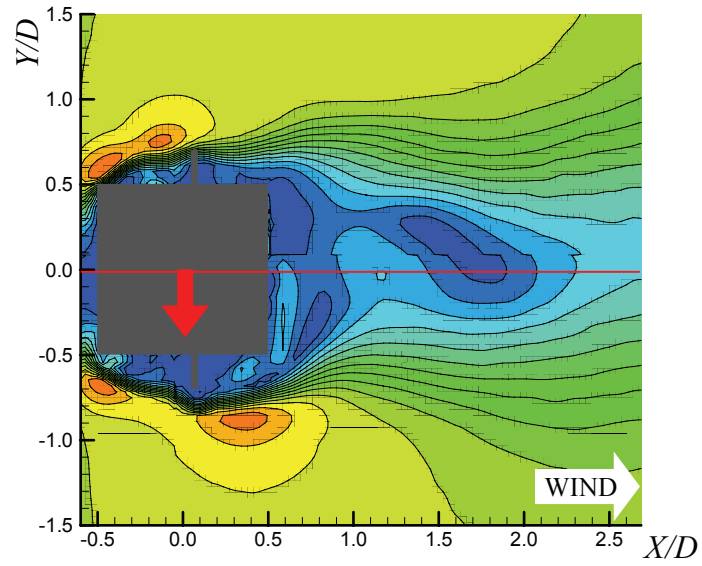
渦度分布において Y/D 軸上で渦度が大きくなる部分を剥離せん断層の位置とみなすと, 基本断面柱では, 下面側の剥離せん断層が断面に近づき, 上下面の剥離せん断層位置が非対称となっているのに対し, $\theta=30^\circ$ および 40° では剥離せん断層位置は上下面でほぼ対称な配置となっている。また後流域で発生するよどみ点 (図-6.24 中の●印) もほぼ $Y/D=0$ 上に発生している。表面圧力分布の結果 (図-5.10 参照) と合わせて考えると, 2 次剥離点である鉛直板より下流側における流れ場は風軸に対して上下対称に近くなっていることを示している。

また, 側面における流れに着目して, 下面側での最大風速に対する上面側での最大風速の比についてまとめたものを図-6.26 に示す。これより, 基本断面柱では上面に対して下面での流速増加が大きくなっているのに対して, $\theta=30^\circ$ を含む有効な剥離干渉角では上面側の風速が増加している。さらに鉛直板の風上側の流れ場に着目すると, 図-6.27 に示すように上面側においては $\theta=30^\circ$ および 40° のどちらのケースでも循環流が発生しているのに対して, 下面側においては $\theta=30^\circ$ では循環流が発生しているが, $\theta=40^\circ$ では明確な循環流は発生していない。つまり $\theta=40^\circ$ での下面側の剥離点間における負

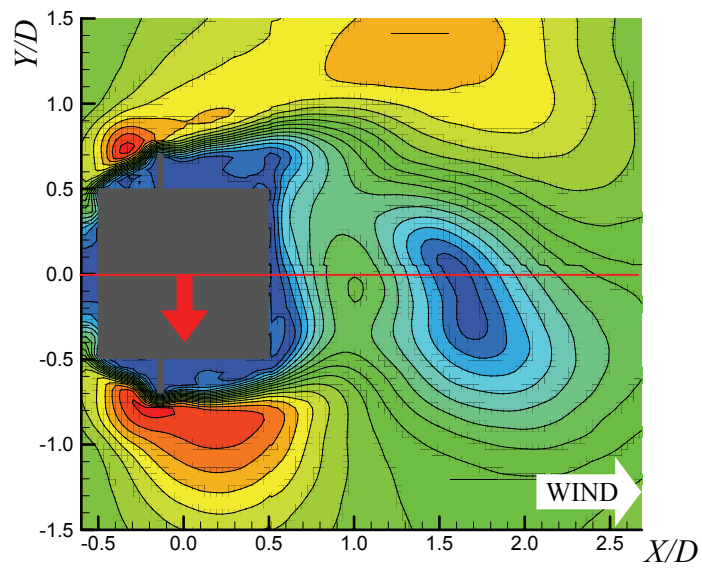
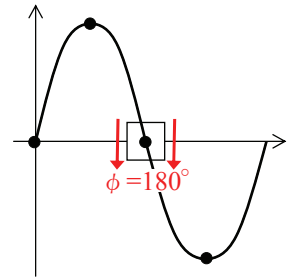
圧の回復（図-5.10(c)参照）は，循環流の働きが弱まる（なくなる）ことによって生じているものと考えられる．

以上のことから，有効な剥離干渉角（ $\theta=20^\circ, 30^\circ$ ）において発生するカルマン型渦励振については，振動発生時においても鉛直板の風上側では減衰力が働いている状態となっていることが明らかになった．また， $\theta=40^\circ$ において発生した2つの山となる限定振動に関しては，有効な剥離干渉角の場合と同様にカルマン型渦励振が発生した後に，鉛直板の風上側に循環流が発生しなくなることによって減衰力が機能しなくなることで再度振動が発生しているものと考えられる．

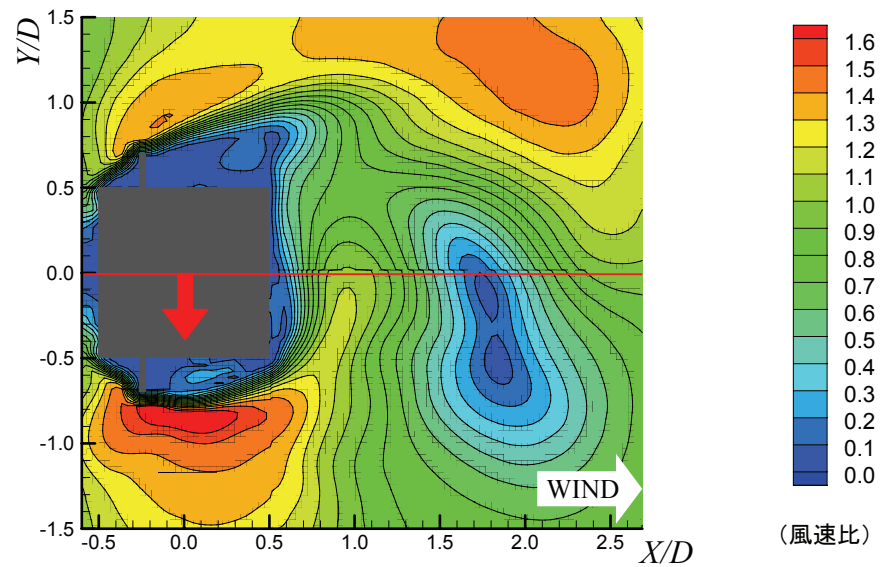
ギャロッピングに対しては，強制的に振動させた状態においても，循環流による剥離流の増速効果によって剥離干渉後の流れが振動の影響を受けず，迎角 $\alpha=0^\circ$ の静止状態に近い流れ場が形成される．これによって2次剥離点より風下側の断面柱には振動に寄与する力が発生しない上に，さらに循環流発生位置で発生した負圧による減衰力が働くことによってギャロッピングに対する抑制効果を発揮していることが明らかとなった．さらに高風速域においても，振動時の相対迎角が小さくなることで静止時の迎角 $\alpha=0^\circ$ により近い気流の状態となるために，剥離干渉法の有効性は保持され続けると考えられる．



(a) $\theta = 20^\circ$, $V_r = 5.4$



(b) $\theta = 30^\circ$, $V_r = 6.5$



(c) $\theta = 40^\circ$, $V_r = 8.7$

図-6.19 強制振動時の平均風速比分布（渦励振時，下向き速度最大 $\phi = 180^\circ$ ）

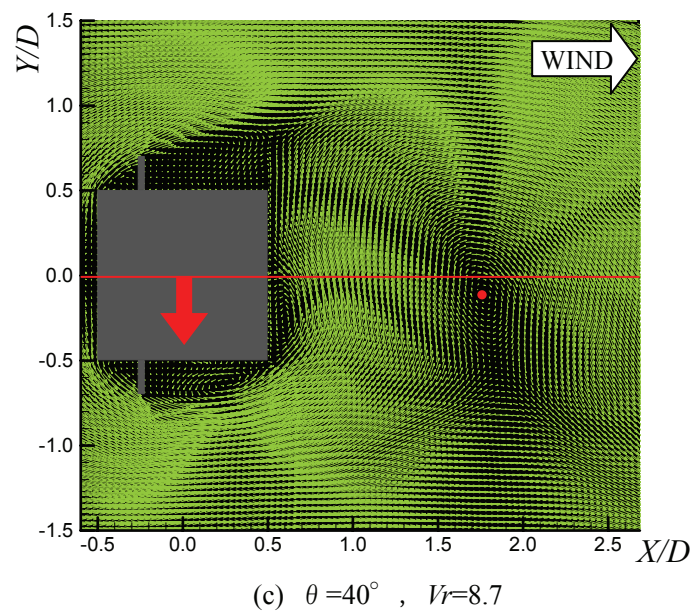
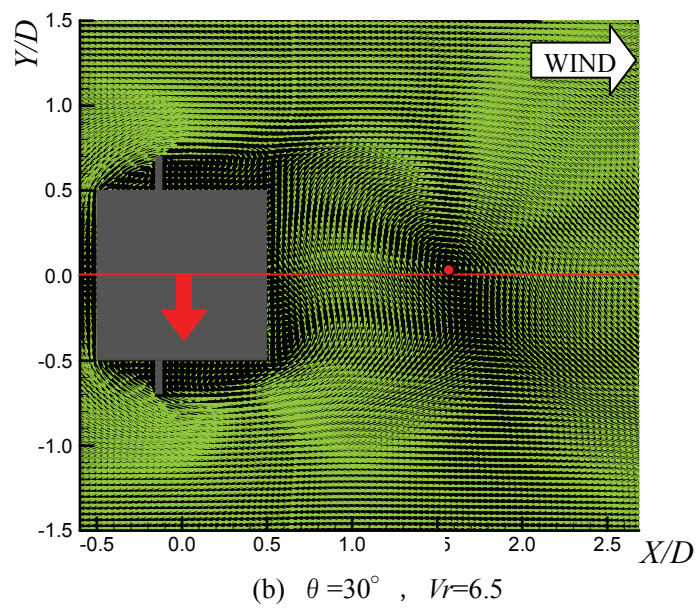
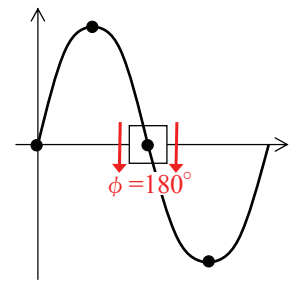
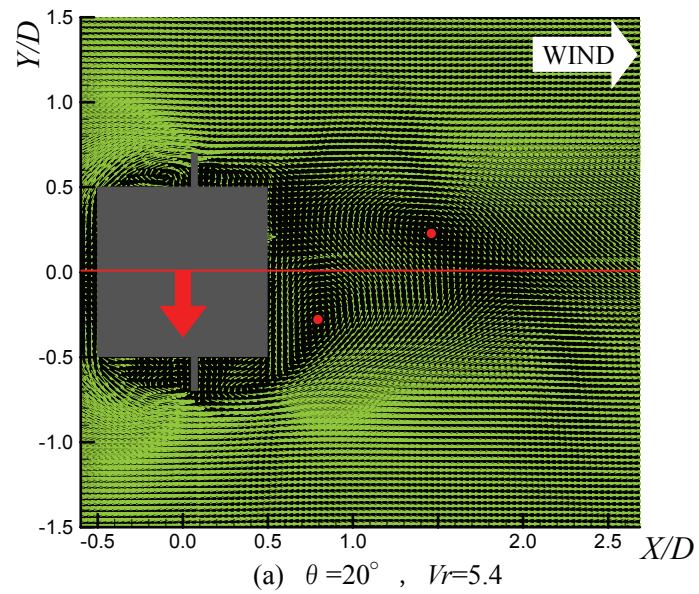


図-6.20 強制振動時の流速ベクトル分布（渦励振時，下向き速度最大 $\phi = 180^\circ$ ）

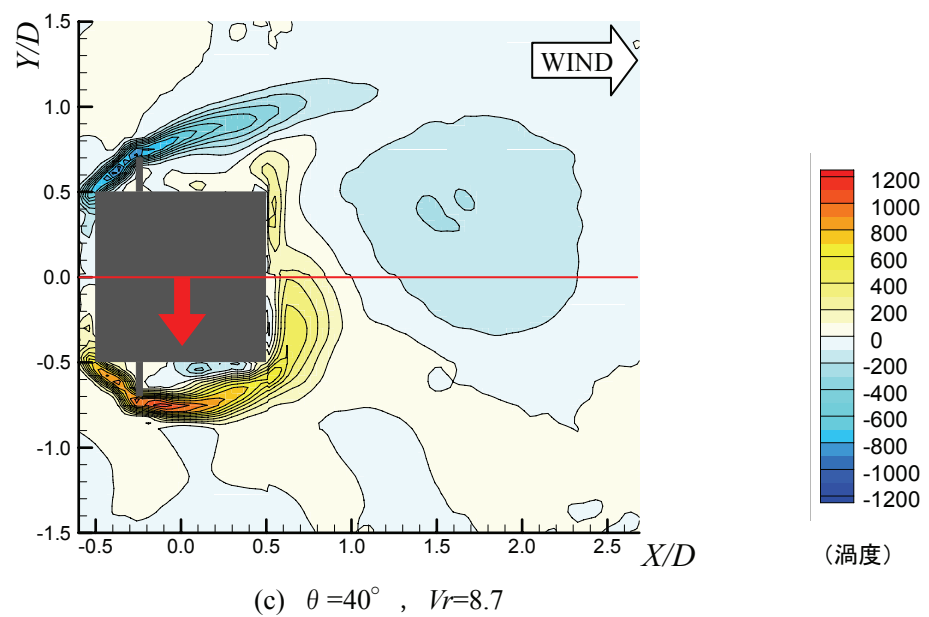
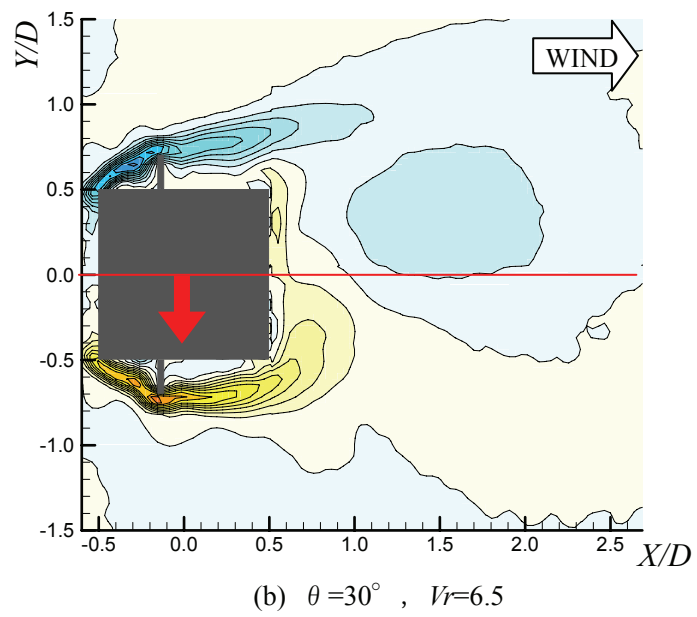
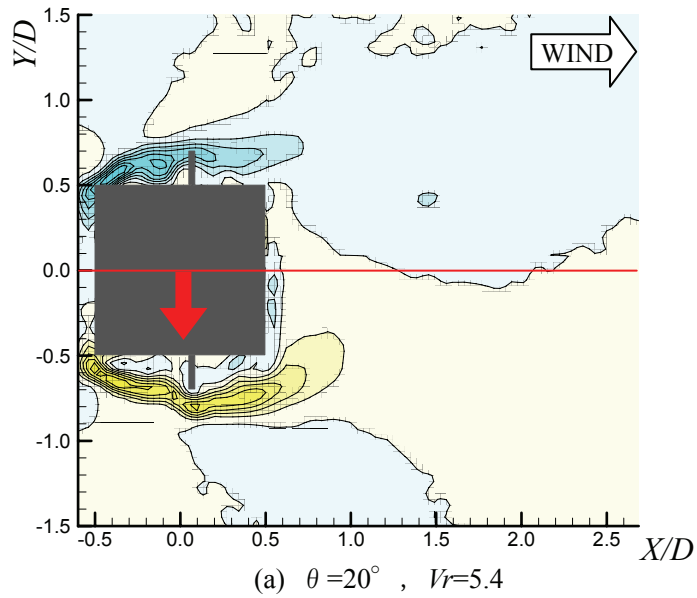
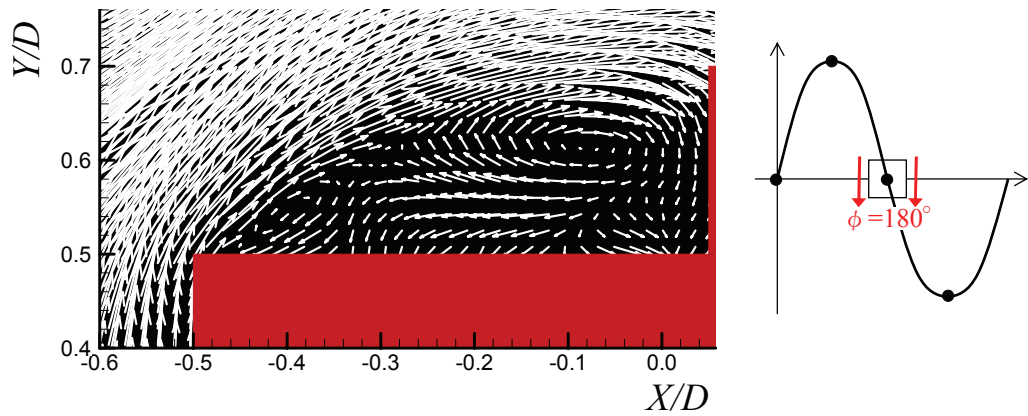
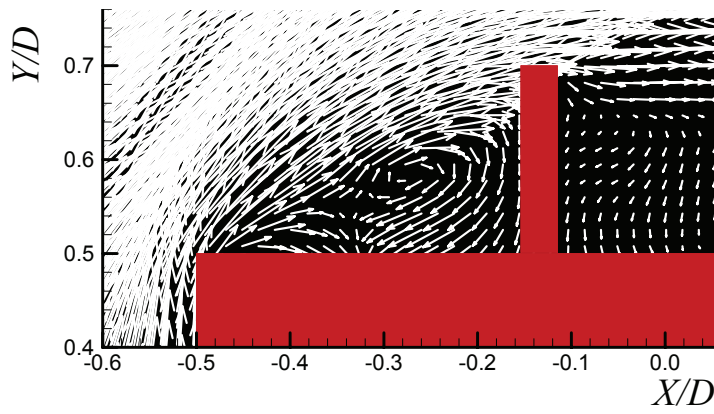


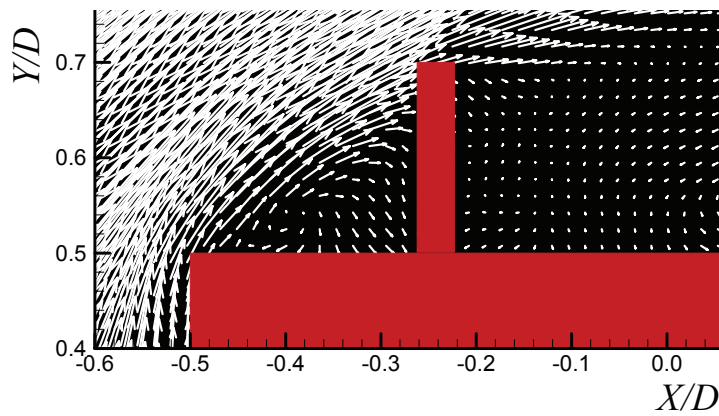
図-6.21 強制振動時の渦度分布 (渦励振時, 下向き速度最大 $\phi = 180^\circ$)



(a) $\theta = 20^\circ$, $V_r = 5.4$



(b) $\theta = 30^\circ$, $V_r = 6.5$



(c) $\theta = 40^\circ$, $V_r = 8.7$

図-6.22 渦励振時における上面側の循環流の発生状況（下向き速度最大 $\phi = 180^\circ$ ）

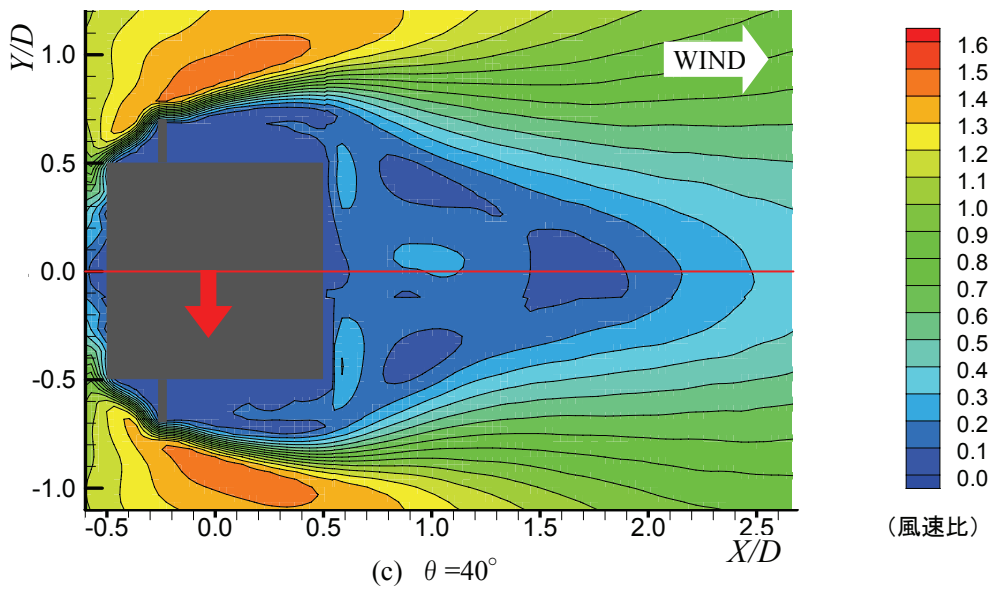
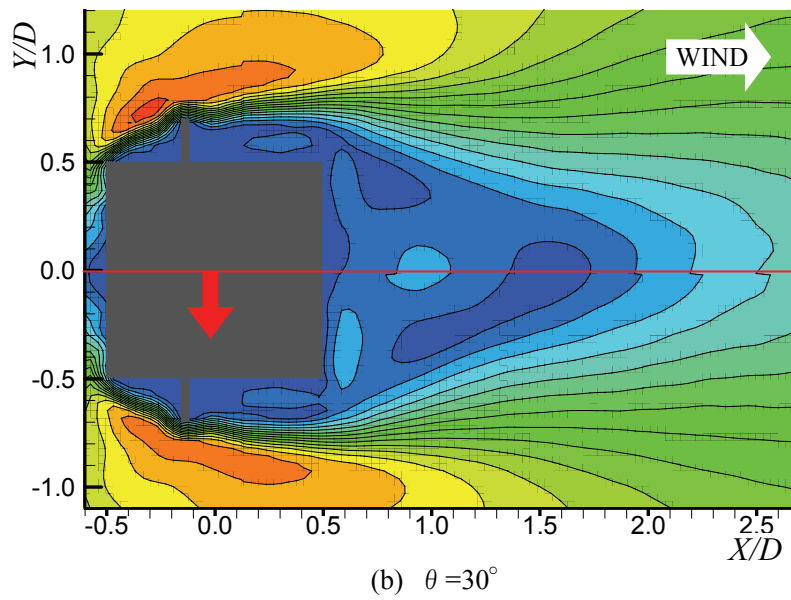
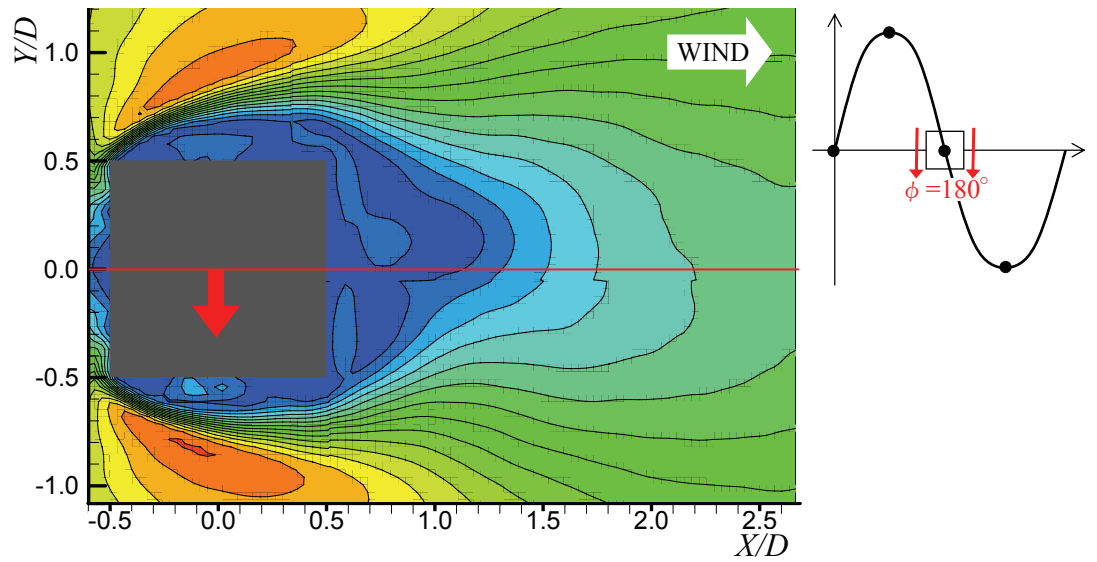


図-6.23 強制振動時の平均風速比分布 ($V_r=24$, 下向き速度最大 $\phi=180^\circ$)

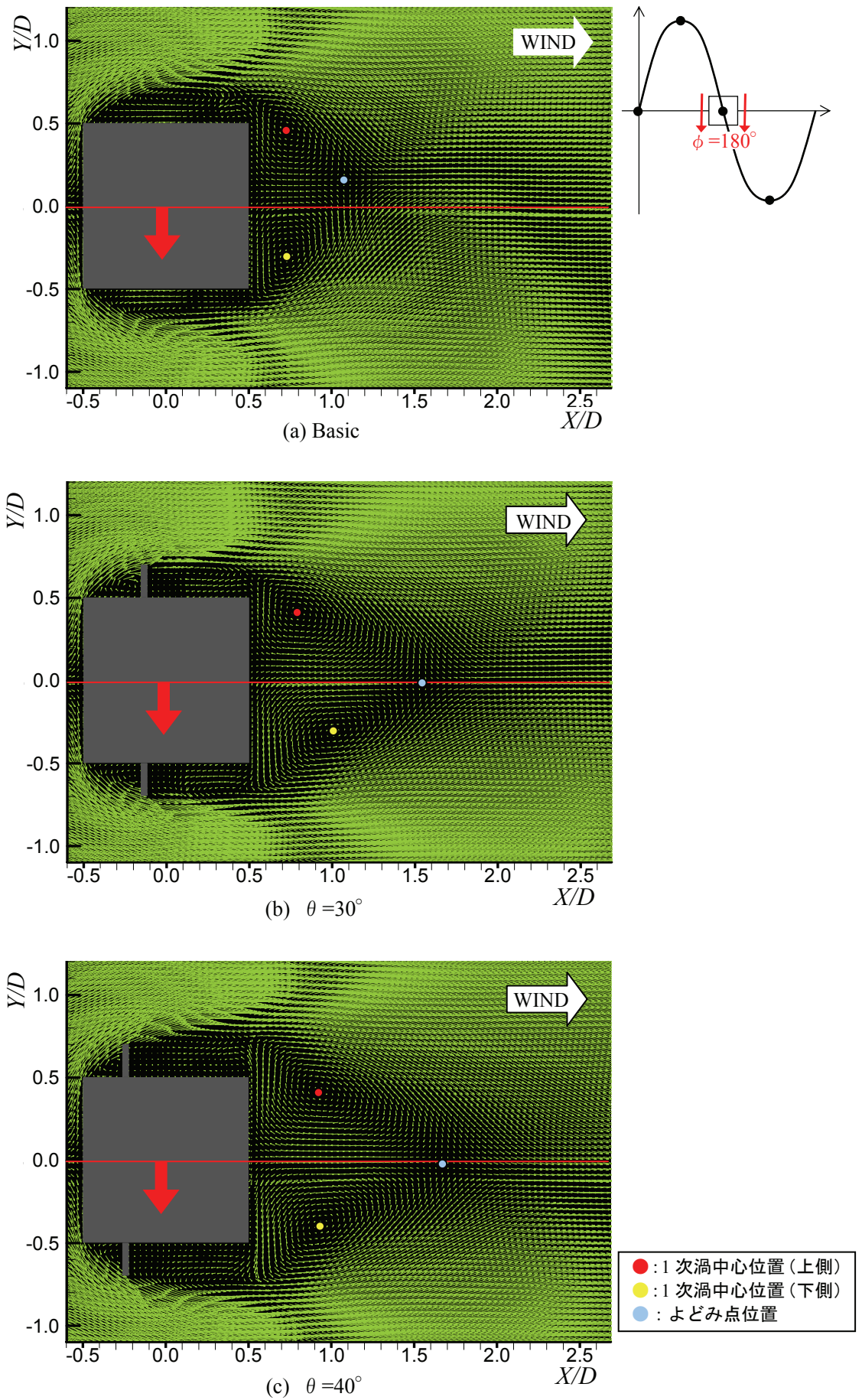


図-6.24 強制振動時のベクトル分布 ($Vr=24$, 下向き速度最大 $\phi = 180^\circ$)

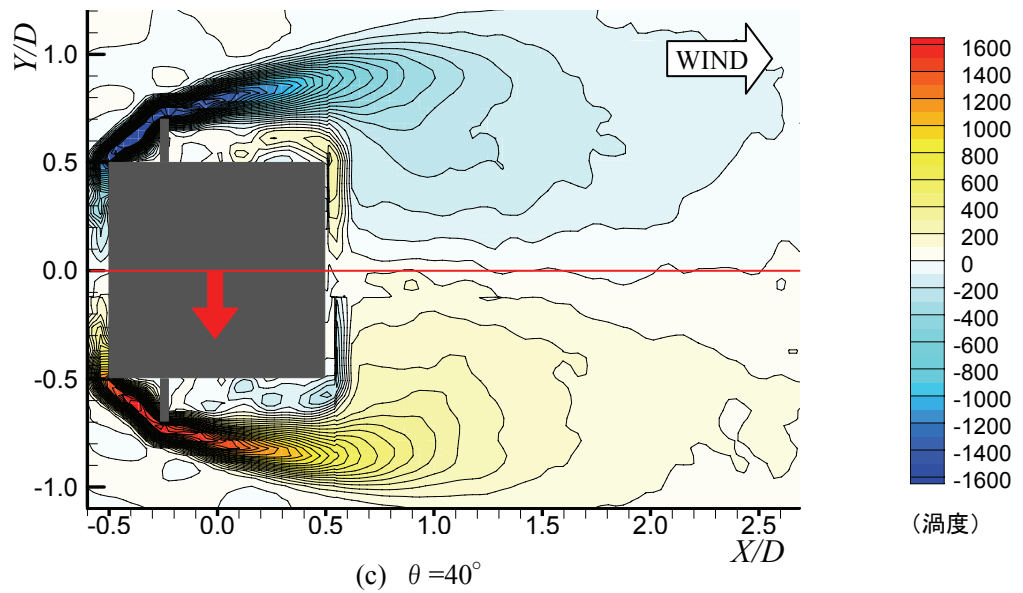
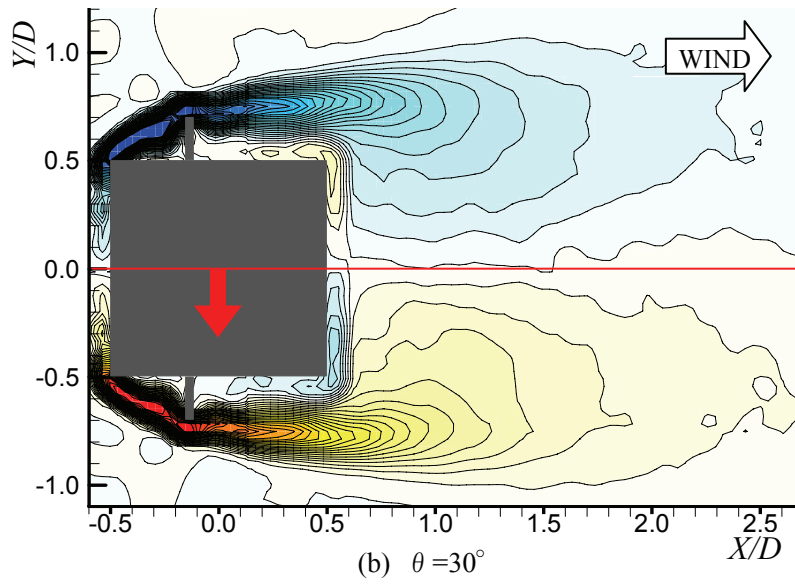
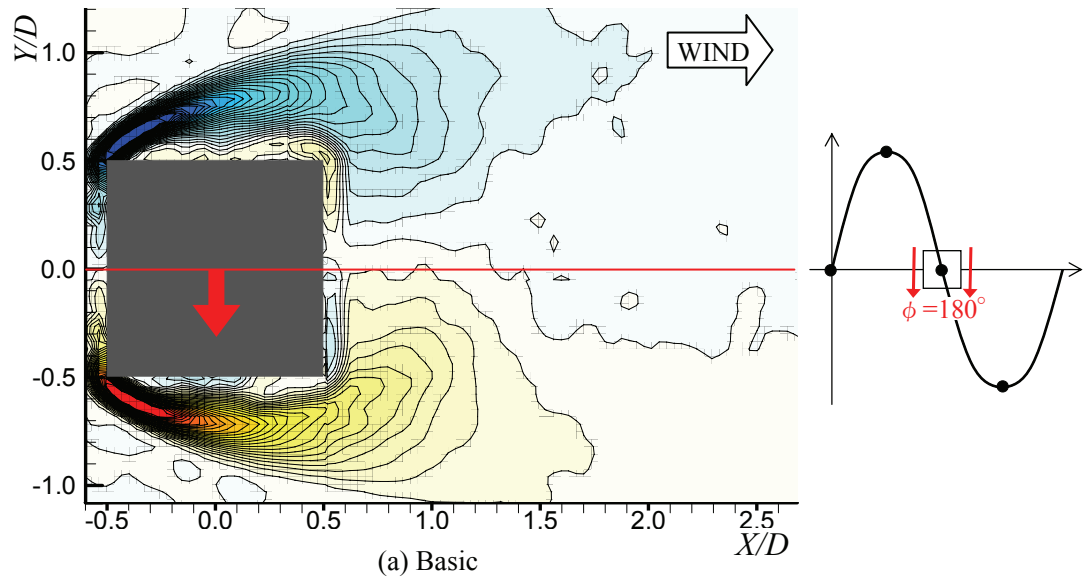


図-6.25 強制振動時の渦度分布 ($V_r=24$, 下向き速度最大 $\phi=180^\circ$)

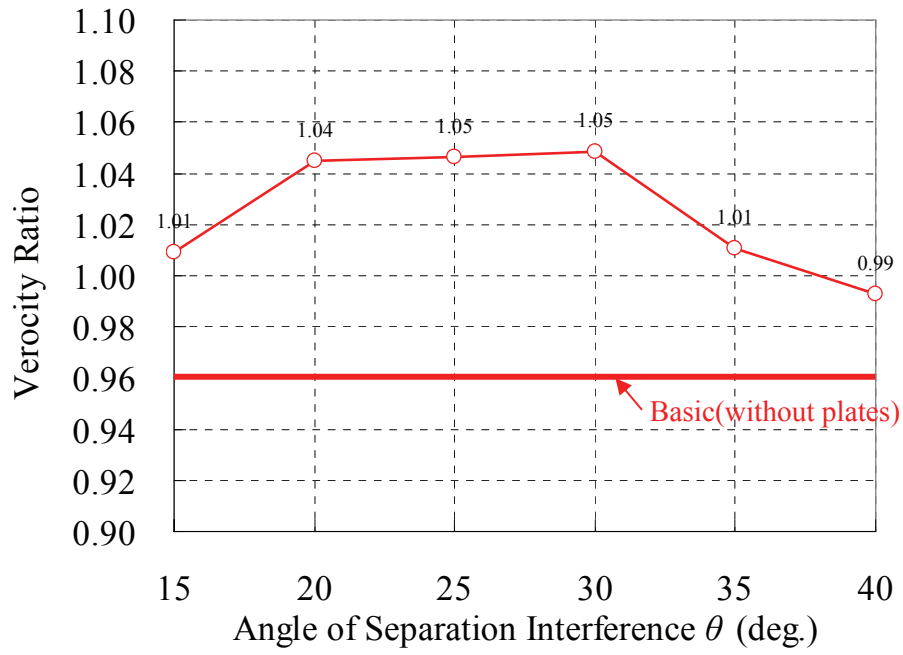


図-6.26 下面側に対する上面側の最大風速の比 ($V_r=24$, 下向き速度最大 $\phi=180^\circ$)

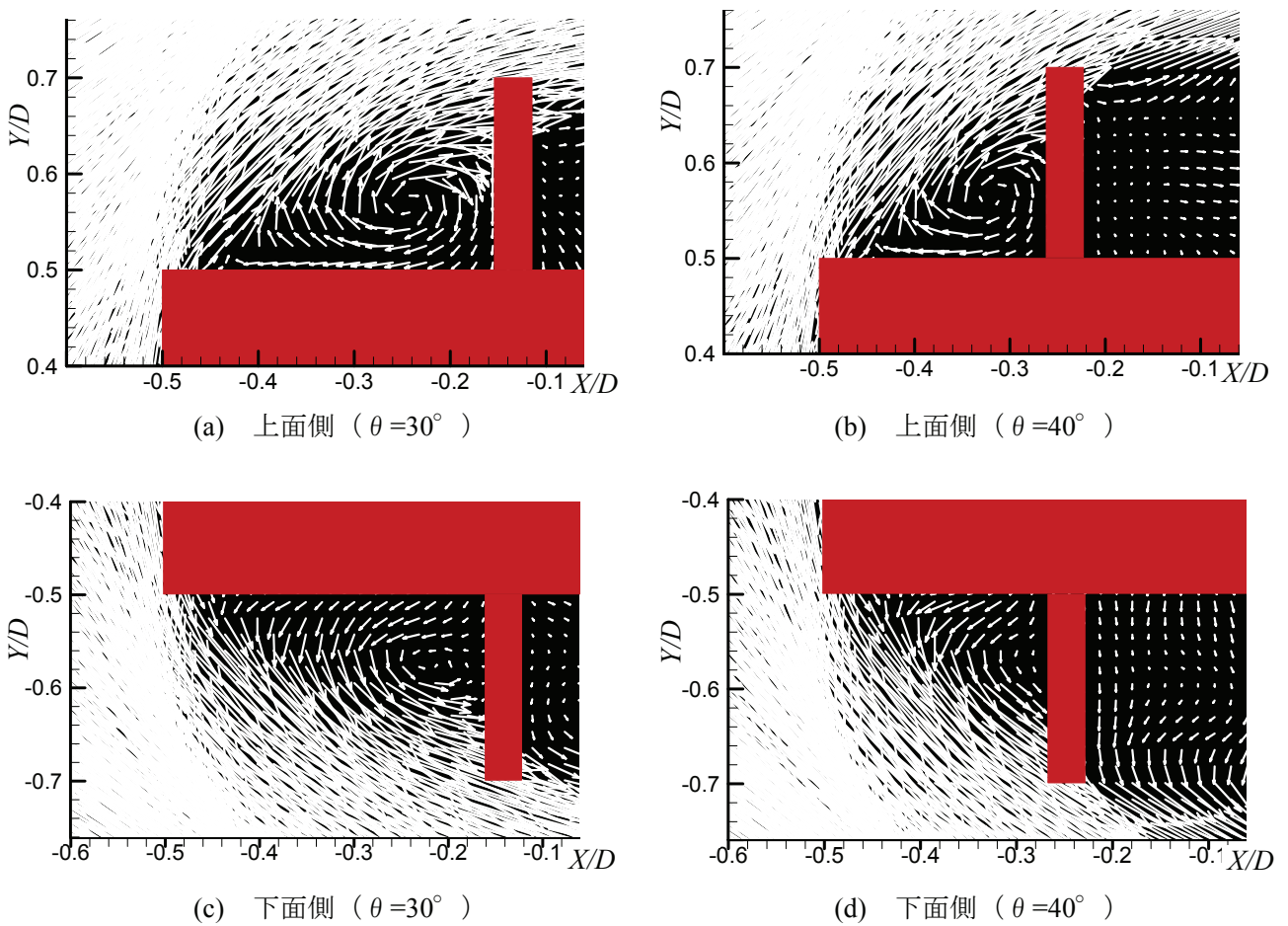


図-6.27 上下面剥離点間での流速ベクトル ($V_r=24$, 下向き速度最大 $\phi=180^\circ$)

第7章

剥離干渉法の実用化に関する諸課題に対する検討

これまで述べた各種検討から、剥離干渉法のメカニズムについて明らかにしてきたが、剥離干渉法を実用化するにあたっては、以下の点について明らかにする必要がある。

- 1) 迎角に対する剥離干渉法の有効性
- 2) 風向が風上側と風下側が逆になった場合の剥離干渉法の有効性
- 3) 乱流中における剥離干渉法の有効性
- 4) 剥離干渉法の手法の違いによる影響

本章では、これらの課題について検討を実施し、実用化に向けた剥離干渉法の有効性について述べる。また、循環流の周辺流れの増速効果に着目し、第2章で述べた回転ローターによる境界層制御との関連性についても述べる。

7.1 迎角に対する剥離干渉法の有効性

7.1.1 検討概要

これまで、迎角 $\alpha=0^\circ$ での検討によって剥離干渉法のメカニズムや有効性を確認してきたが、本手法は剥離流を制御する手法であることから、僅かな迎角の変化によっても大きく空力特性が変わってしまい、有効性が失われることが懸念される。そこで本節では、迎角がある場合の剥離干渉法の効果について、第4章で述べた静的空気力特性を基に、表面圧力測定およびPIV実験によって検討を行った。実験諸元を表-7.1に示す。

表-7.1 各種実験諸元（表面圧力測定および PIV 実験）

実験種類	表面圧力測定	PIV 実験
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)	
実験気流	一様流 (乱れ強さ 1%以下)	
模型状況	静止	
実験風速 V	9m/s	
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	30000	
迎角 α	$0^\circ, +4^\circ, +5^\circ$	$+4^\circ$
剥離干渉角 θ	30°	
サンプリング周波数, データ数	400Hz, 32768 個	15Hz, 1500 組

7.1.2 迎角に対する剥離干渉法の効果

基本断面柱および有効な剥離干渉角 ($\theta=20^\circ\sim 30^\circ$) について、静的空気力測定実験で得られた抗力および揚力係数の結果 (図-4.4~図-4.5参照) を用いて、迎角 $\alpha \leq +10^\circ$ の範囲でDen Hartogの判別式 (式(2.1)参照) によって判定した結果を図-7.1に示す。これより、基本断面柱 (Basic) では大半の迎角において負値となっているのに対して、有効な剥離干渉角では一部の迎角を除いて正值となっている。また、 $20^\circ \rightarrow 25^\circ \rightarrow 30^\circ$ の順で $\alpha=0^\circ$ から連続して正值となる迎角の範囲が広がっている。 $\theta=30^\circ$ では $0^\circ \leq \alpha \leq +7^\circ$ までの範囲で連続して正值となっており、この範囲の迎角に対して、ギャロップ

グは発生しないことが示唆されている。

この結果を踏まえて、迎角 $\alpha=+4^\circ$ においてギャロッピングの発生が示唆される基本断面柱と、ギャロッピングが発生しない $\theta=30^\circ$ について、表面圧力分布と流速場の比較を行う。

図-7.2に $\alpha=0^\circ, +4^\circ, +5^\circ$ における平均圧力係数 \bar{C}_p の分布を、図-7.3に側面の上下面の測定点での平均圧力係数の差より得られた平均揚力係数 \bar{C}_{p*} の分布を示す。これより、 $\alpha=+4^\circ$ と $+5^\circ$ を比較すると、基本断面柱では迎角が増加することによって、下方への力、つまり振動を増大させる力が働いている。一方、 $\theta=30^\circ$ では特徴的な圧力分布を示しており、迎角が増加した場合において上面の鉛直板の風上側に発生する負圧が増大しており、上方への力、つまり振動を抑える力が働いている。ここで、上下面において実験風速 V_0 に対する風速比が1.0以上となる増速領域の等風速線分布および風速ベクトル分布を図-7.4に示す。これより、循環流が発生している鉛直板の風上側における最大増速比は、 $\alpha=0^\circ$ の場合（図-6.8参照）と比較して、上面側では大きく、下面側では小さくなっている。圧力分布の結果と併せて考えると、断面の上下面に発生する循環流の働きによって鉛直板の風上側に制振力となるような流れ場が形成されていると考えられる。

また、鉛直板の風下側に着目すると、 $\theta=30^\circ$ の場合には、迎角の有無に関わらず、上下面での圧力分布はほとんど同じになっており、上下面での圧力差はなく、鉛直板の風下側では振動を励起するような空気力は作用していない。

次に、図-7.5に $\alpha=+4^\circ$ においてPIV実験による断面柱の後流域の流速ベクトルの分布について基本断面柱と $\theta=30^\circ$ を比較したものを示す。これより、基本断面柱では、上下面の後流で発生する1次渦の中心位置（図中Aの両端部）および後流よどみ点（点B）が上方に移動しており、後流の流れ場は上下面で非対称な流れ場となっている。それに対して $\theta=30^\circ$ の場合には、鉛直板通過後の流れ場は、主流方向（水平）軸に対して、ほぼ対称な流れ場となっており、後流域の1次渦は、ほぼ上下対称となる位置に発生し、後流よどみ点も断面高さの中心水平軸上に発生している。この流れ場は、迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合（図-6.11(e)参照）の後流域の流れ場と近くなっており、鉛直板の風下側で圧力分布が上下面对称となる結果を裏付けるものとなっている。

以上のことから、迎角がある場合においても、鉛直板の風下側は、迎角 $\alpha=0^\circ$ の場合と近い圧力および流れの分布となり、前述した鉛直板の風上側で発生する循環流による圧力差のみによって減衰力が働くことで空力的に安定となっていると考えられる。

以上のことから、剥離干渉法は、剥離点間に発生する循環流の働きによって、迎角がない状態（ $\alpha=0^\circ$ ）に近い周辺流れ場を形成する効果を発揮しており、ある程度の迎角の変化に対してもギャロッピングに対して有効に機能する手法である。

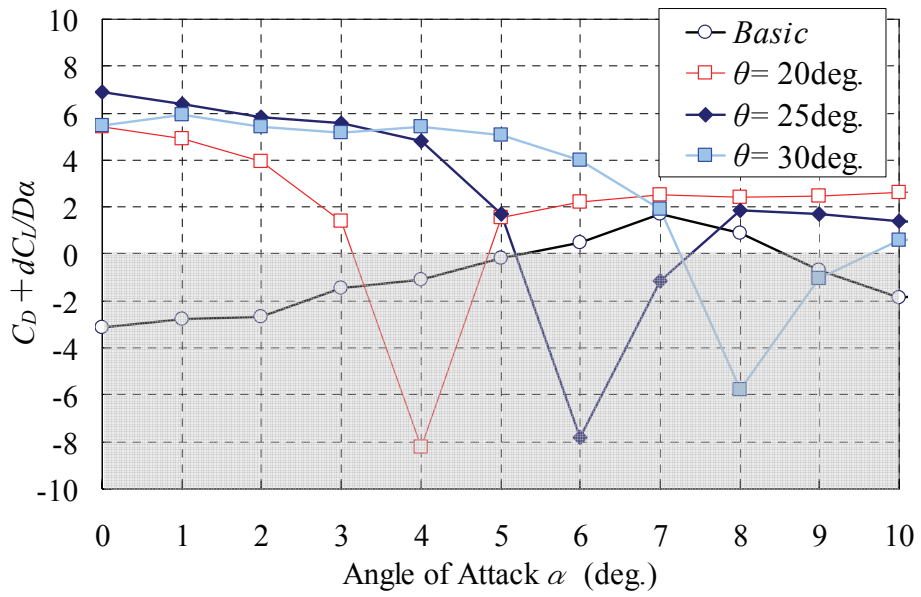


図-7.1 Den Hartog の判別式による判定結果 (迎角 $\alpha=0^\circ\sim+10^\circ$)

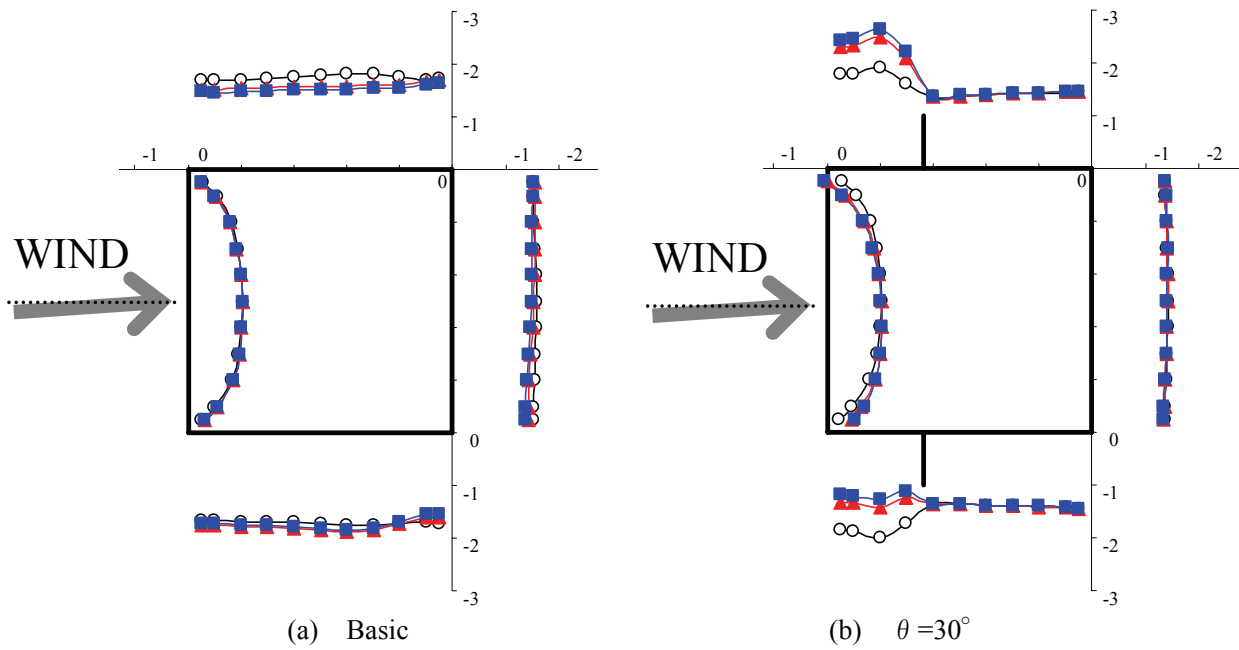


図-7.2 表面圧力分布 (迎角 $\circ \alpha=0^\circ$, $\blacktriangle \alpha=+4^\circ$, $\blacksquare \alpha=+5^\circ$)

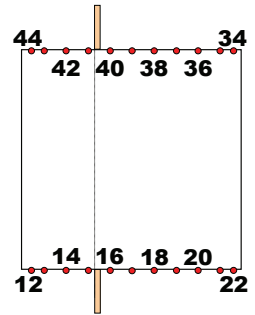
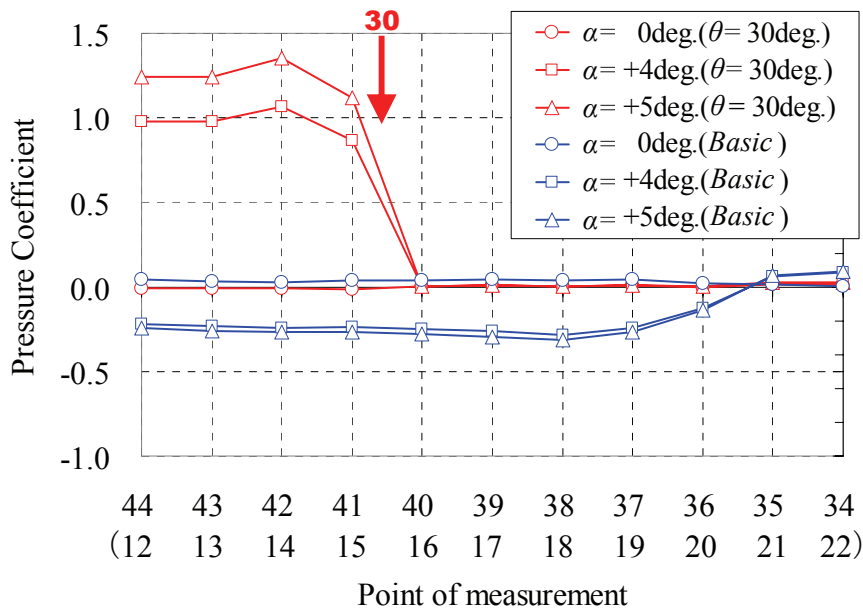


図-7.3 側面上下面の圧力差

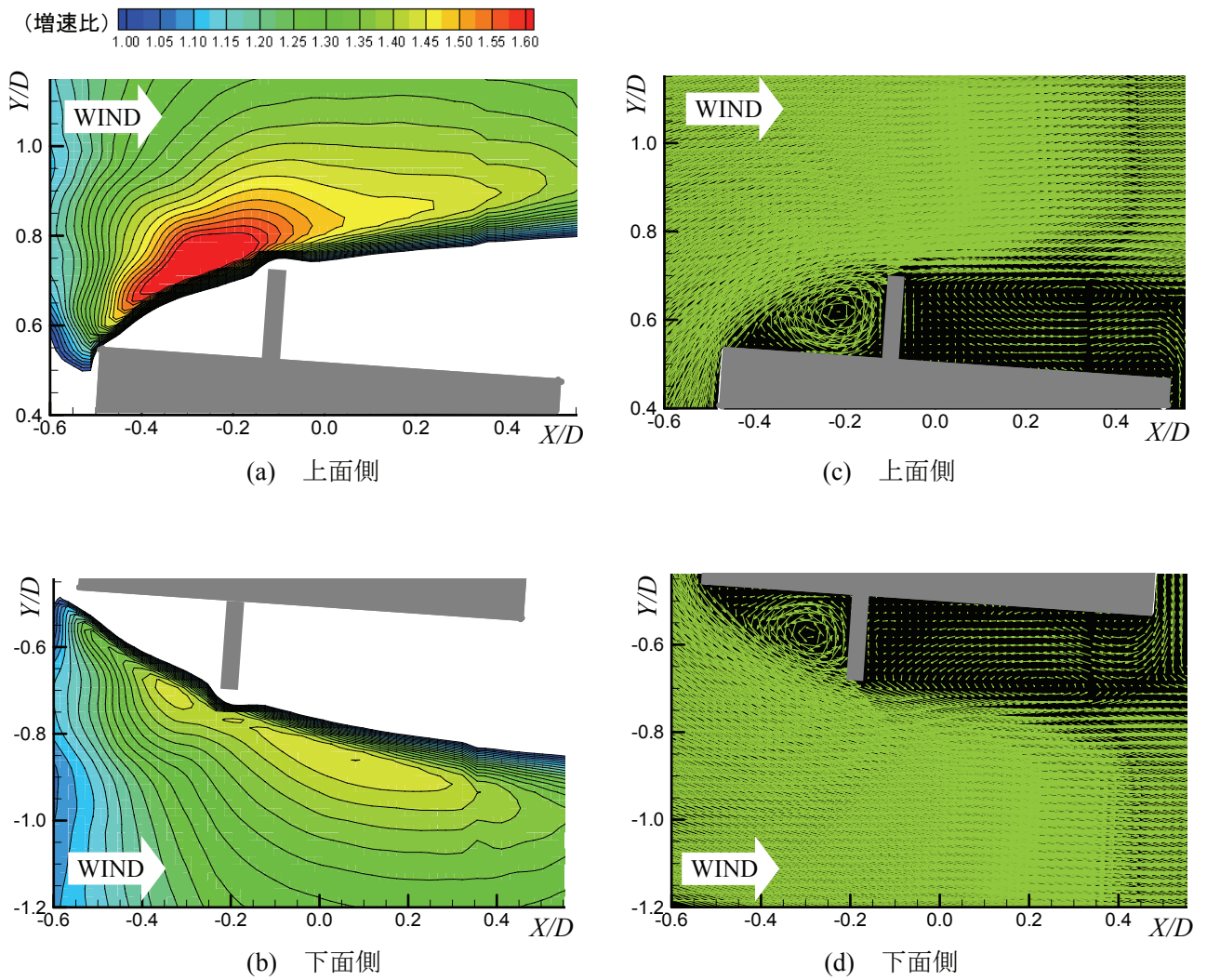
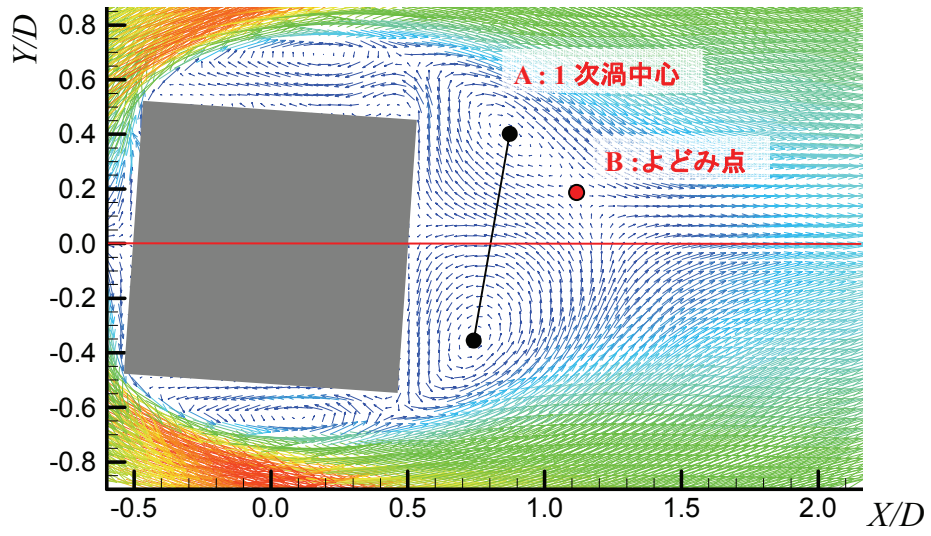
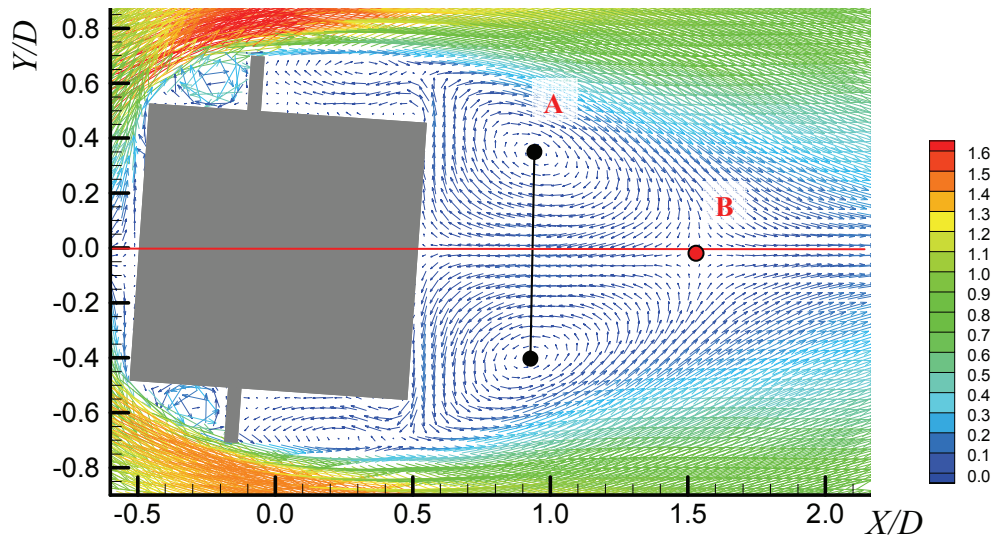


図-7.4 上下面における増速領域およびベクトル分布 ($\theta = 30^\circ$, 迎角 $\alpha = +4^\circ$)



(a) Basic



(b) $\theta = 30^\circ$

図-7.5 流速ベクトルによる流れ場の比較 (迎角 $\alpha = +4^\circ$)

7.2 風向変化に対する剥離干渉法の効果

7.2.1 検討概要

本研究では、剥離干渉現象を詳細に把握するために鉛直板を風上側に設置する「片側設置」を基本として検討を進めているが、実用化にあたっては背面側から風が吹く（風上と風下が逆となる）場合に対する効果について明らかにする必要がある。図-7.6(a)に示すように片側の剥離干渉角 θ_1 が $20^\circ \sim 25^\circ$ であれば他方の剥離干渉角 θ_2 は $23.9^\circ \sim 27.4^\circ$ となり、どちらの剥離干渉角も有効な剥離干渉角の範囲内となり、風向に関係なく剥離干渉法は有効に機能することになる。

$\theta = 30^\circ$ の場合については、図-7.6(b)に示すように風上、風下の両側に2枚設置することになる。風上および風下の両側に2枚設置することになる。そこで本節では、 $\theta_1 = \theta_2 = 30^\circ$ として鉛直板を2枚設置した場合の応答実験によって剥離干渉法の有効性の確認を行った。

実験諸元を表-7.2に、実験状況を写真-7.1に示す。

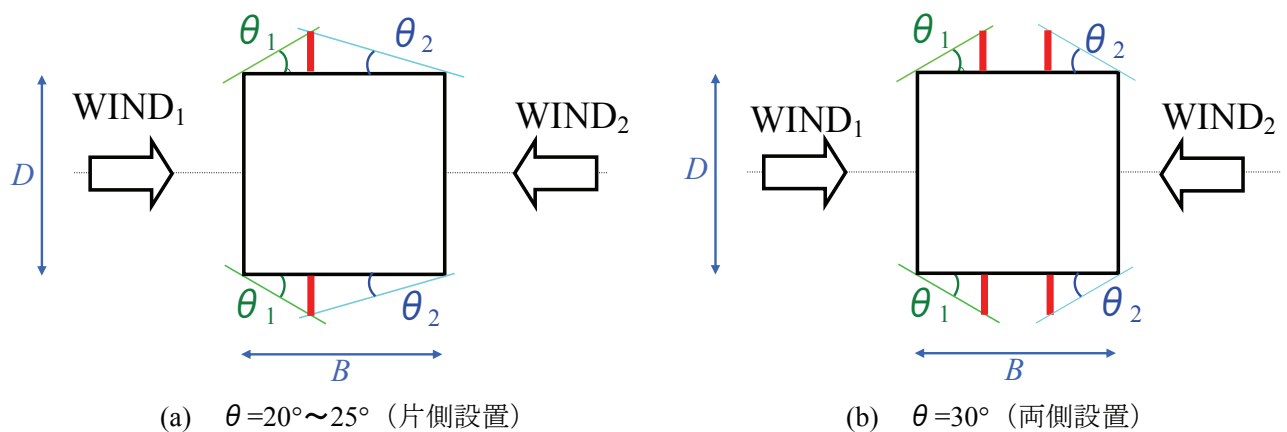


図-7.6 風向が変化する場合の2次剥離点の設定

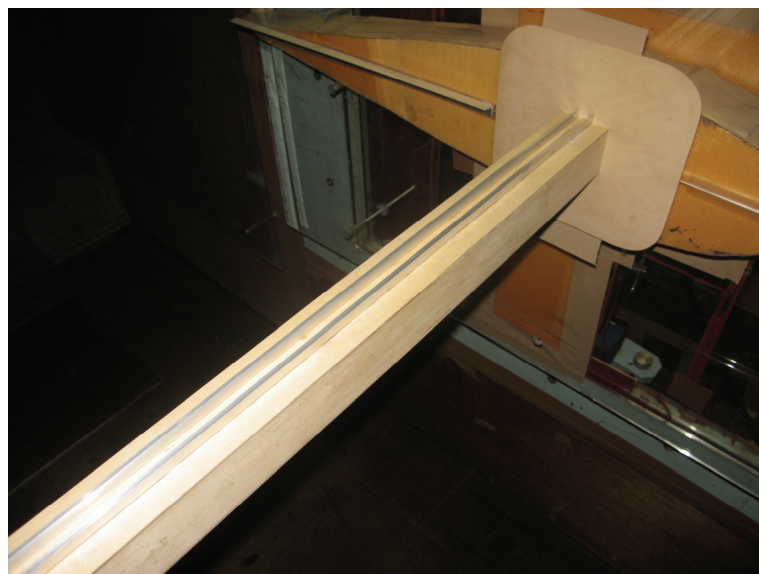


写真-7.1 鉛直板両側設置の模型状況 ($\theta = 30^\circ$)

表-7.2 実験諸元（たわみ1自由度応答実験）

実験諸元	たわみ1自由度応答実験
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)
実験気流	一様流 (乱れ強さ1%以下)
実験風速 V	0~14.8m/s
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	0~49333
対数構造減衰率 δ	0.002
固有振動数 f_h	7.40Hz
スクルーン数 Sc	18
迎角 α	0°
剥離干渉角 θ	30°
サンプリング周波数 データ数	1000Hz, 60000 個

7.2.2 風向変化の影響

鉛直板両側設置と風上側のみの片側設置の応答特性を比較したものを図-7.7に示す。これより、両側設置においても片側設置の場合と同様、ギャロッピングは発生しない。また低風速域の渦励振についてもほぼ同じ応答特性を示している。また、図-7.8に $\theta=30^\circ$ の片側設置（換算風速 $V_r=24$ ，位相 $\phi=180^\circ$ ）での上下面の平均風速比と流線を示す。ここで流線とは、“一本の連続した曲線上のすべての点における接線の方向が、その点の速度ベクトルの方向と一致しているような曲線”と定義されている。つまり、流線とは『流れをつなげていった曲線』であって、流線を描くことで、流れの様子を視覚的に把握できるようにしたものである。

これより、鉛直板の背面における平均風速は非常に小さくなっている。また鉛直板から発生した剥離せん断層は風下側の鉛直板高さより上の位置を流下していることから、風下側に鉛直板が挿入された場合でも干渉するような流れ場とならず、下流側の鉛直板は応答特性に悪影響を与えないと考えられる。

以上のことから、剥離干渉法は風向が変化する場合においても有効に機能するように対応が可能な手法であることが確認された。

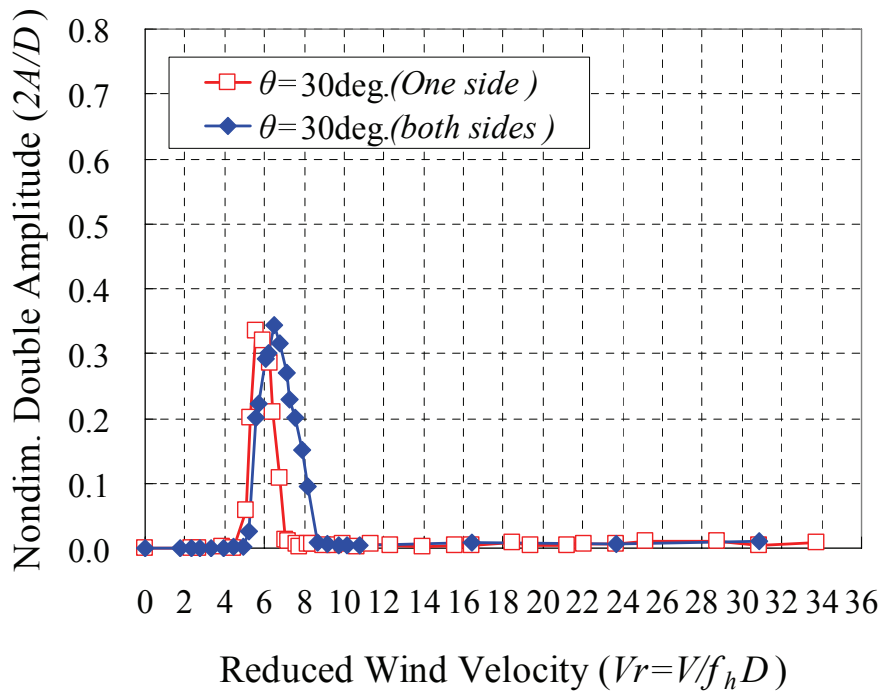


図-7.7 鉛直板両側設置によるたわみ1自由度応答特性 ($B/D=1$)

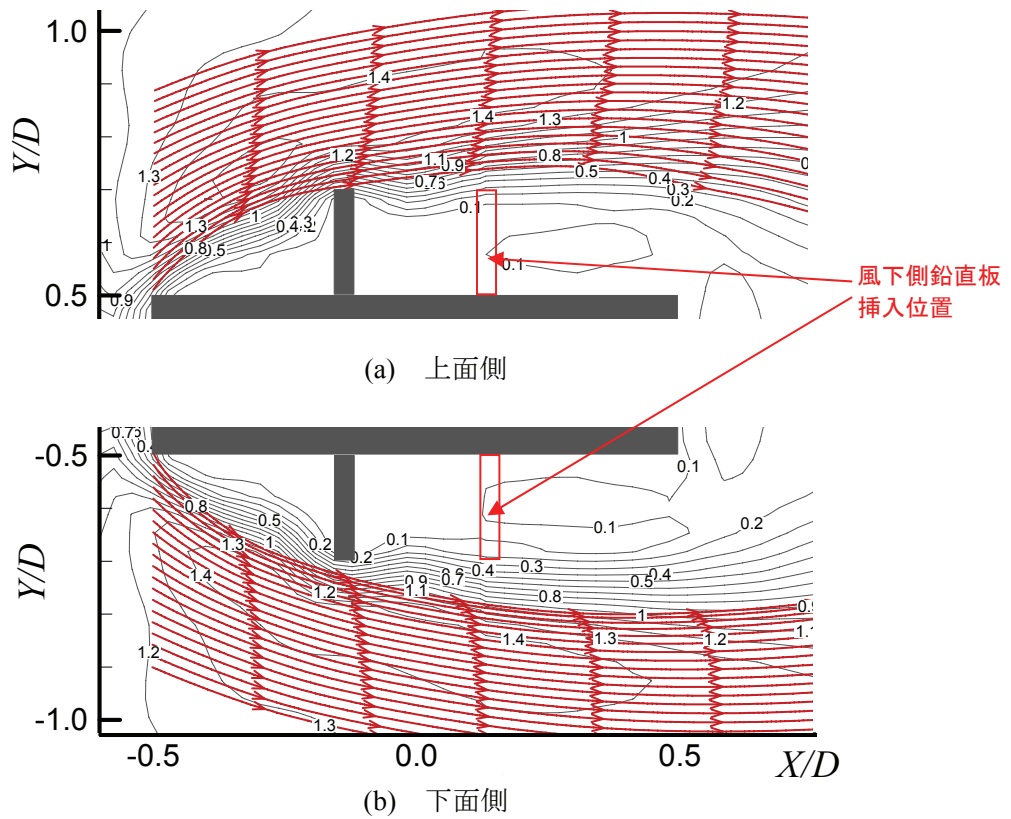


図-7.8 鉛直板を片側設置した場合の流線 ($B/D=1$, $Vr=24$, 位相 $\phi=180^\circ$)

7.3 乱流中における剥離干渉法の効果

7.3.1 検討概要

これまでの検討より、一様流中における剥離干渉法の有効性は十分確認されているが、剥離干渉法の実用化を考えた場合、自然風への対応、つまり乱流中での特性を把握すること、および有効性の検証は重要な課題である。そこで本節では、乱流中における剥離干渉法の有効性を検討するために、基本断面および有効な剥離干渉角である $\theta=30^\circ$ を検討対象断面として 1 自由度たわみ応答実験を行った。実験諸元を表-7.3 に示す。

表-7.3 実験諸元（たわみ 1 自由度応答実験）

実験種類	たわみ 1 自由度応答実験
供試模型断面柱	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)
実験気流	乱流 (乱れ強さ $Iu=0.081\sim 0.085$)
実験風速 V	0~14.8m/s
レイノルズ数 $Re(=VD/\nu)$	0~49333
対数構造減衰率 δ	0.002
固有振動数 f_h	7.40Hz
スクルートン数 Sc	18
迎角 α	0°
剥離干渉角 θ	30°
サンプリング周波数, データ数	1000Hz, 60000 個

7.3.2 乱流特性

本検討で用いた乱流は、模型の風上側に設置した乱流格子によって生成した等方性乱流である。

乱流格子の諸元および乱流の特性を表-7.4 に、乱流格子の設置状況を写真-7.2 に示す。用いた乱流格子は、バーサイズ b を 100mm, メッシュサイズ (縦横の板の中心間隔) m を 470mm に設定し、模型位置から距離 $X=2000\text{mm}$ の風上側に設置した。

これによって得られる乱流特性は、主流方向の乱れ強さ Iu が 8.1~8.5%, 主流方向の乱れスケール S が 54~61mm となっている。

表-7.4 格子乱流諸元

バーサイズ	: b	100mm
メッシュサイズ	: m	470mm
m/b		4.7
格子-模型距離	: X	2000mm
主流方向乱れ強さ	: Iu	8.1~8.5%
主流方向乱れスケール	: S	54~61mm



写真-7.2 乱流格子設置状況

7.3.3 乱流中での応答特性

基本断面と有効な剥離干渉角である $\theta=30^\circ$ について、一様流中および乱流中での応答特性を比較したものを図-7.9 に示す。

これより、両断面ともに、ほぼ同じ応答特性を示している。高風速域でのギャロッピングについては、気流の乱れに関係なく抑制されており、剥離干渉法が乱流中においても有効に機能している。また、低風速域で生じる渦励振についても、発振風速・応答ピーク値もほぼ同じ特性を示している。渦励振の最大応答発生時の空力減衰率 δ_A (図-7.10 参照) についても、一様流中の場合よりも負減衰が大きくなるような特性とはなっていないことから、一様流中と同様に減衰付加によって大幅に応答振幅を抑制することが可能である。

以上の結果から、乱流中においても剥離干渉法は気流の乱れによる悪影響を受けずに一様流中と同様の制振効果を発揮する有効な制振手法であることが確認された。

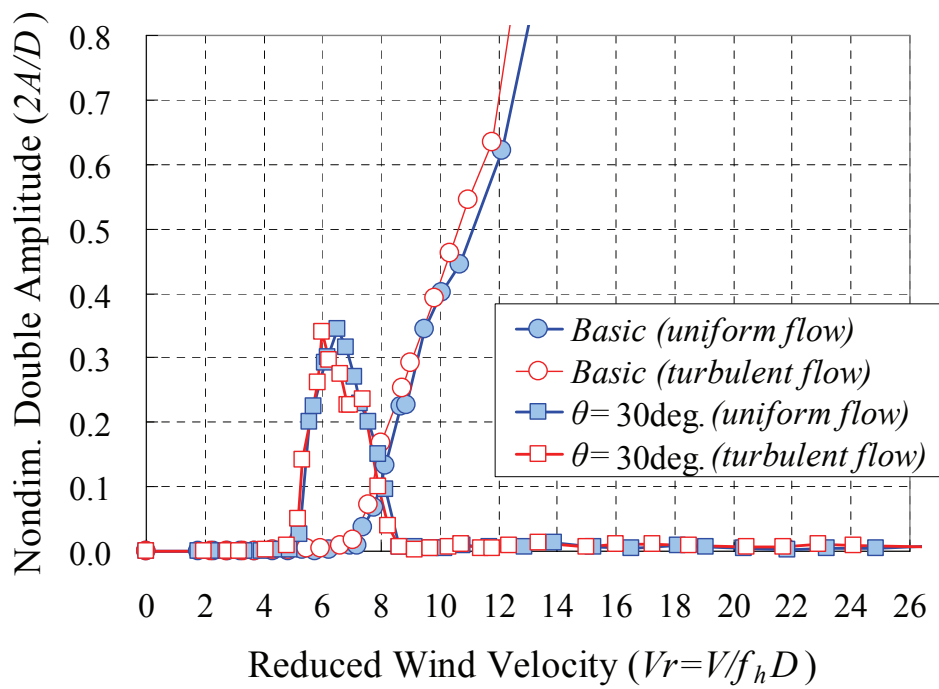


図-7.9 乱流中におけるたわみ 1 自由度応答特性 (乱れ強さ $I_u=8.1\sim 8.5\%$)

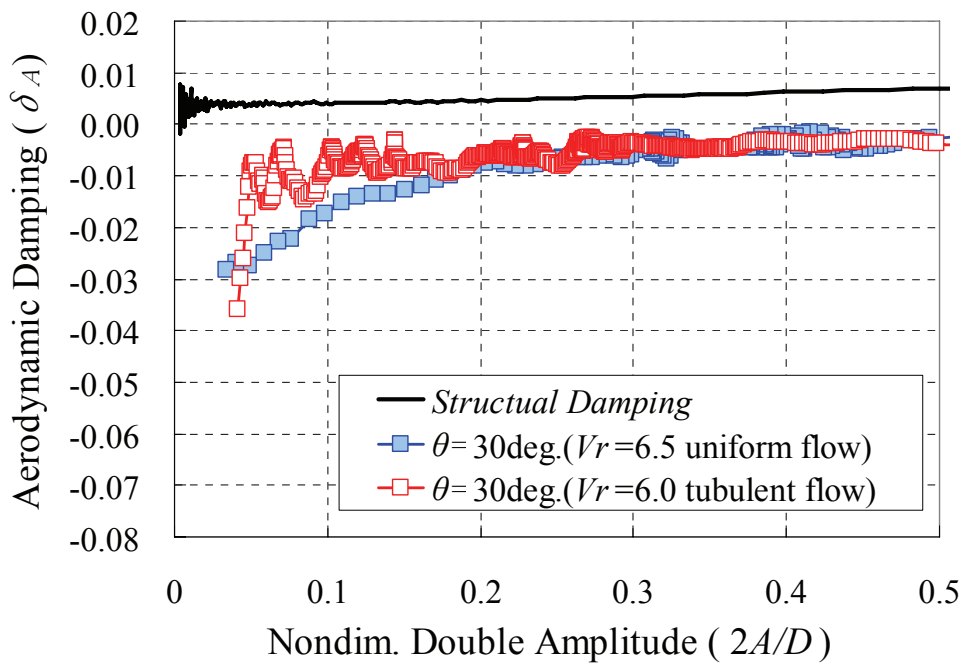


図-7.10 乱流中における渦励振の最大応答発生風速時の空力減衰率 (乱れ強さ $I_u=8.1\sim 8.5\%$)

7.4 剥離干渉法の手法の違いによる影響

7.4.1 検討概要

本研究では、鉛直板によって2次剥離点を設けた手法（以下、鉛直板タイプ）について各種検討を進めており、その結果、剥離点間に生じる循環流が剥離干渉法に関して重要な働きを示すことを明らかにした。しかし、第1章で述べたように剥離干渉法には様々な手法があり、図-1.1(b)のような隅角部をカットすることによって2次剥離点を設ける手法（以下、隅切りタイプ）のような剥離点間の空間がない場合にも鉛直板タイプと同様の効果があるかどうかを明らかにする必要がある。

そこで、図-7.11に示すように剥離点間の空間を塞いだ断面形状について、 θ を 20° 、 30° 、 40° と変化させて、応答実験、静的空気力測定実験、表面圧力測定実験、PIV実験による検討を行った。実験諸元を表-7.5に示す。

表-7.5 各種実験諸元

実験種類	応答実験	静的空気力測定	表面圧力測定	PIV 実験
断面	$B/D=1$ ($B=D=50\text{mm}$)			
実験気流	一様流 (乱れ強さ 1%以下)			
実験風速 V	0~14.8m/s	5~9 m/s	9m/s	
レイノルズ数 $Re (=VD/\nu)$	0~49333		30000	
対数構造減衰率 δ	0.002			
固有振動数 f	7.40Hz			
スクラートン数 Sc	18			
迎角 α	0°	$-13^\circ \sim +13^\circ$	0°	
剥離干渉角 θ	$20^\circ, 30^\circ, 40^\circ$			
サンプリング周波数 データ数	1000Hz, 60000 個		400Hz, 32768 個	15Hz, 1500 組

7.4.2 隅切りタイプと鉛直板タイプの剥離干渉法の効果の違い

(1) 応答特性

剥離干渉角 $\theta = 20^\circ \sim 40^\circ$ において、両剥離干渉手法での応答特性を比較したものを図-7.12に示す。これより、両手法とも高風速域でのギャロッピングに対する抑制効果を発揮している。また渦励振については、振動の発生風速域は両タイプともほぼ同じとなっているが、応答のピーク値は隅切りタイプの方が大きくなる傾向を示しており、特に $\theta = 20^\circ$ ($2A/D=0.28 \rightarrow 0.56$) および 30° ($2A/D=0.34 \rightarrow 0.53$) において顕著である。この渦励振に関しては、図-7.13に示す空力減衰率より、 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ では鉛直板タイプと同様に若干の減衰付加によって大幅に抑制することが可能である。

(2) 静的空気力特性

抗力係数および揚力係数を比較したものを図-7.14に示す。抗力係数 C_D については、迎角 α に対する係数の変化は定性的に同様であるが、隅切りタイプは鉛直板タイプよりも抗力の減少効果が小さくなっている。揚力係数 C_L については、 $\theta = 20^\circ$ では揚力勾配が正勾配になる迎角範囲が狭まっており、 $\theta = 30^\circ$ では定性的な傾向は同じだが揚力勾配の傾きは小さくなっている。また、 $\theta = 40^\circ$ については、測定した迎角内 ($-13^\circ \leq \alpha \leq +13^\circ$) で全て負勾配になっている。

(3) 表面圧力分布特性

断面まわりの平均圧力係数 \bar{C}_p の分布をまとめたものを図-7.15に示す。これより、前面ではほぼ同じ分布を示しており、鉛直板の後流での側面および背面では、隅切りタイプの方が鉛直板タイプに比べて4~10%程度負圧が大きくなる傾向を示しているが、剥離干渉角 θ による定性的な変化については同じ傾向を示している。

次に剥離点間に注目し、隅切り部と鉛直板部での圧力分布を比較したものを図-7.16に示す。これより、測定点A（端部）およびC（背面）での圧力については手法による差はほとんどない。また前面においても測定点B1では隅切りタイプは鉛直板タイプより20%程度負圧が小さくなっているが、1次剥離点に近い測定点B2では差はほとんどない。

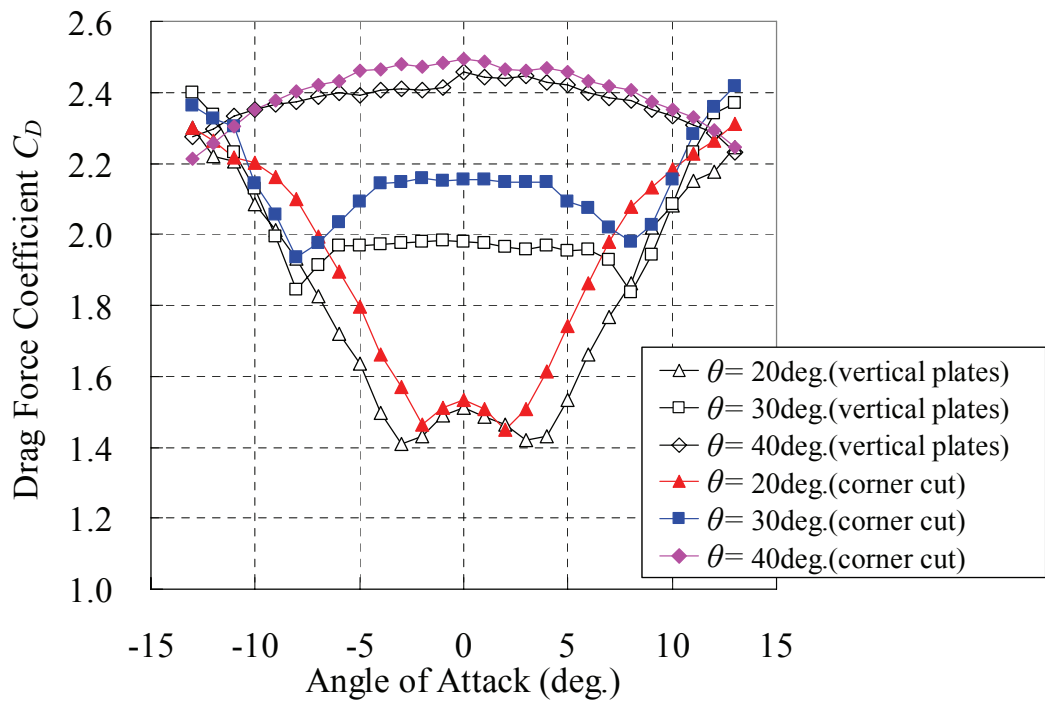
(4) 周辺の流れ場特性

図-7.17に示すように隅切りタイプにおいても $\theta = 20^\circ$ および 30° では、剥離点間に生じる剥離流と模型との間に循環流が発生していることが確認できる。また、 $\theta = 20^\circ$ および 30° での循環流の渦の中心位置での風速水平成分の分布（図-7.18 (a), (b)）からも、模型表面上では逆流域が生じており、循環流の発生を示している。一方、 $\theta = 40^\circ$ では図-7.17 (c) および図-7.18 (c) に示すように剥離点間のどの位置においても循環流の発生は確認できない。

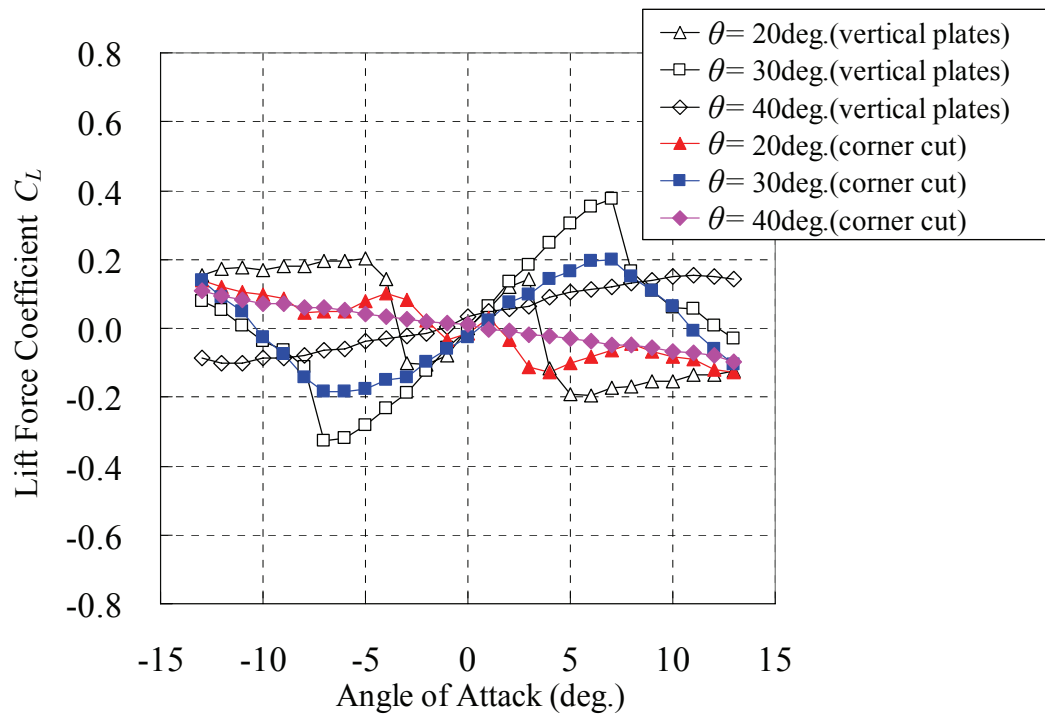
さらに、風速の増速領域について注目してみると、図-7.19より、隅切りタイプは鉛直板タイプに比べると増速効果は若干低くなるが、増速領域の発生位置等は良く整合している。ちなみに、実際に隅切りタイプを適用する場合には図-1.1(b)に示すように鉛直板の背面にはアフターボディが存在することから、鉛直板タイプより増速効果が小さくても剥離流と断面側面との鉛直距離は近くなり、断面に働く圧力が回復し、鉛直板タイプの圧力分布に近づく可能性がある。

次に、両タイプにおいて、1次剥離点である前縁隅角部から剥離した剥離流の流れを把握するため、1次剥離点から生じる流線を比較したものを図-7.20に示す。これより、有効な剥離干渉角である $\theta = 20^\circ$ および 30° では、1次剥離点から生じた流線は両タイプともに基本断面で発生する剥離流とほぼ同じ挙動を示しており、その後、循環流の中心付近から断面柱表面に近づくような流れとなっている。隅切りタイプにおいて発生する循環流は、鉛直板タイプよりも風上側かつ剥離せん断層に近い位置で発生していることから、循環流の発生領域が鉛直板タイプより小さくても、より効率的に剥離せん断層を引き寄せる効果を発揮していると考えられる。

以上のことから、隅切りタイプによる剥離干渉法を用いた場合にでも、鉛直板タイプと同様に剥離点間に生じる循環流の働きによって、同じような流れ場を形成しており、定性的には鉛直板タイプと同じ制振効果を発揮することが明らかになった。

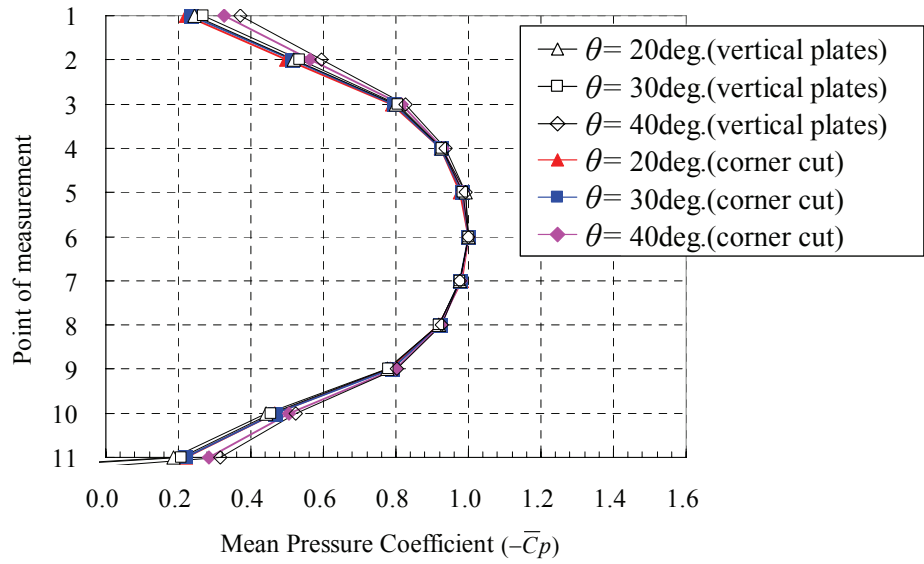


(a) 抗力係数

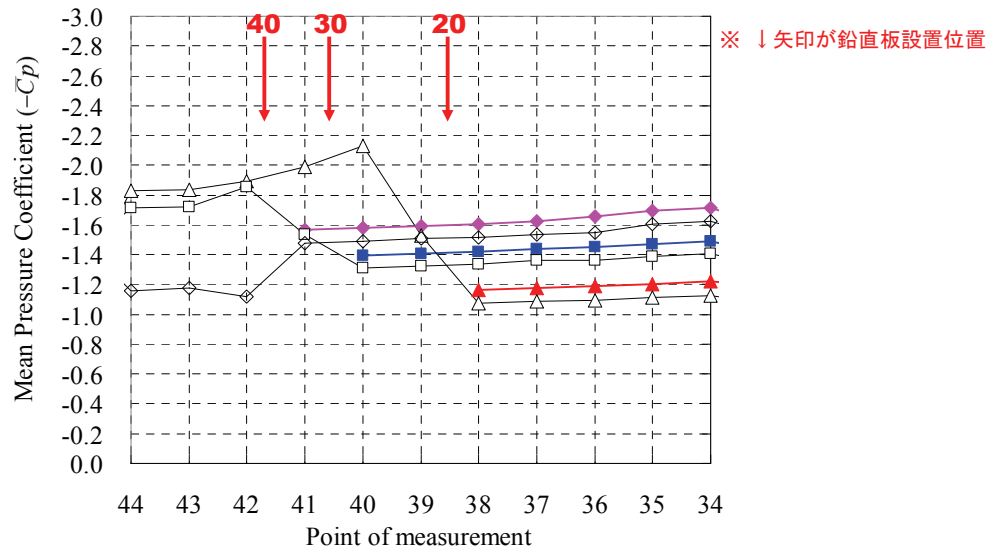


(b) 揚力係数

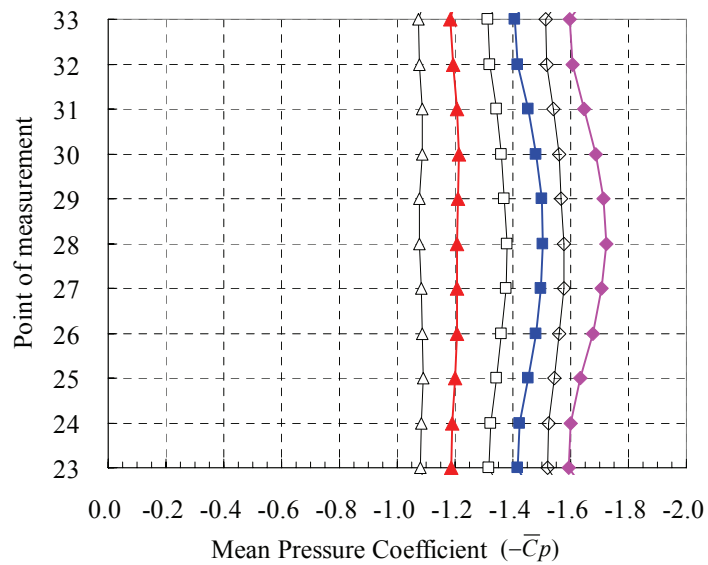
図-7.14 静的空気力係数の比較



(a) 前面



(b) 側面 (上面側)



(c) 背面

図-7.15 表面圧力分布の比較 (平均圧力係数 \bar{C}_p , 静止時)

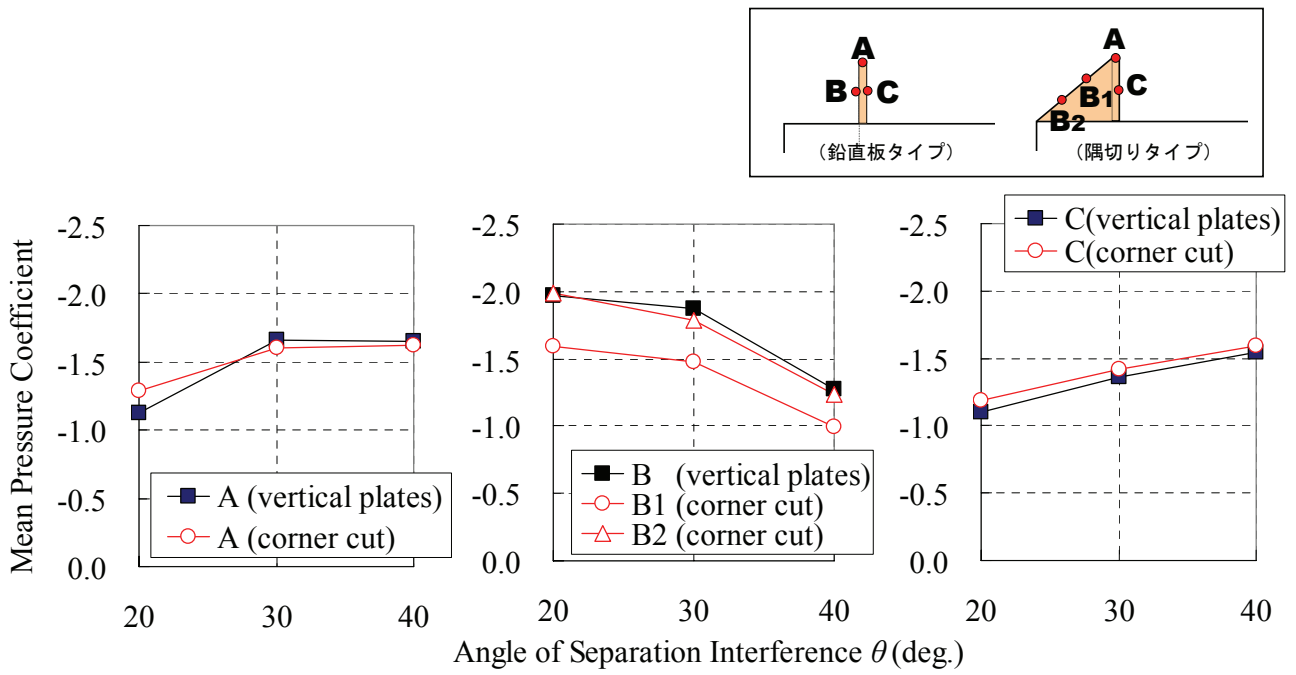


図-7.16 鉛直板部と隅切り部での平均風圧係数分布比較

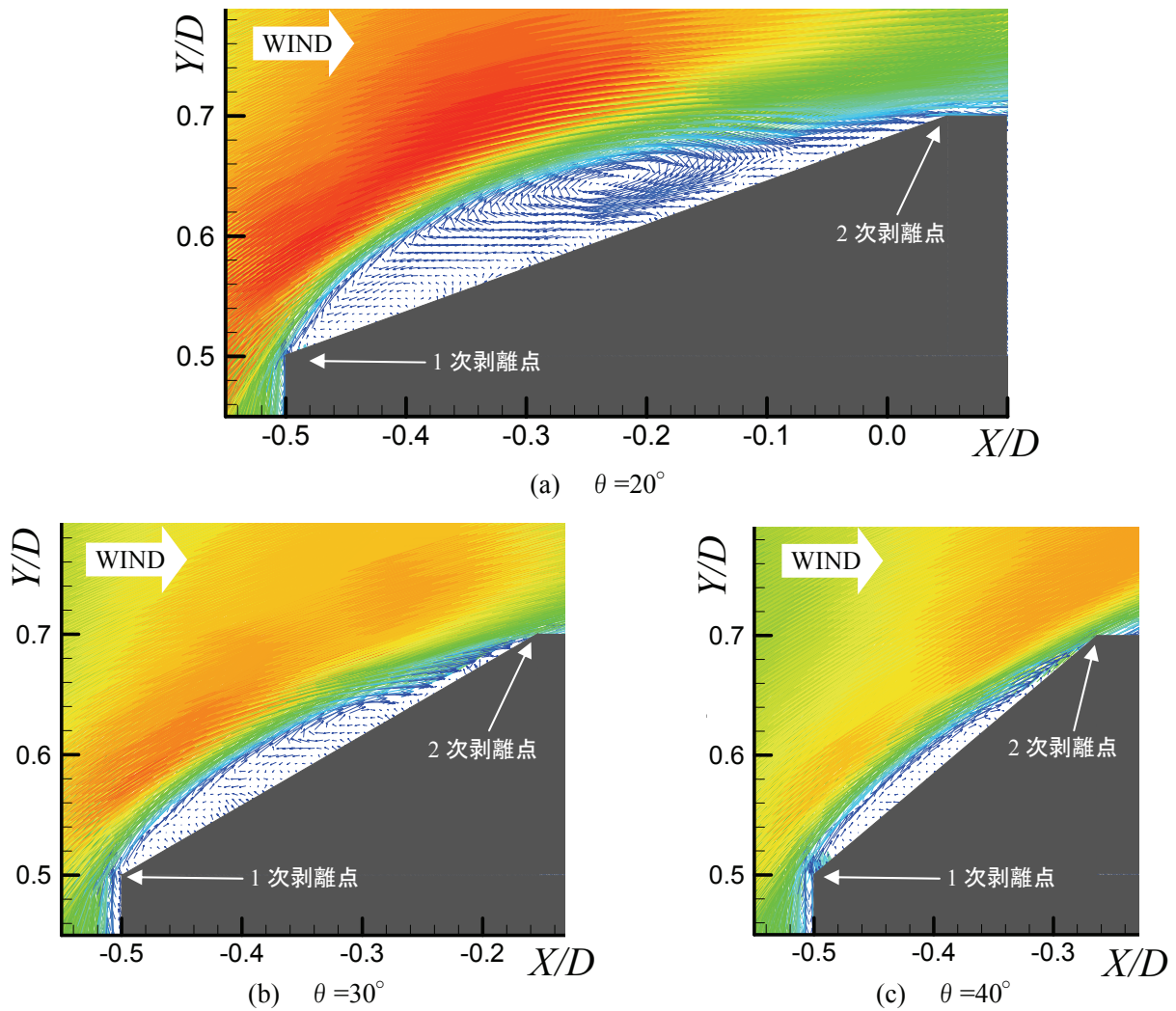


図-7.17 隅切りタイプにおける剥離点間付近の流速ベクトル

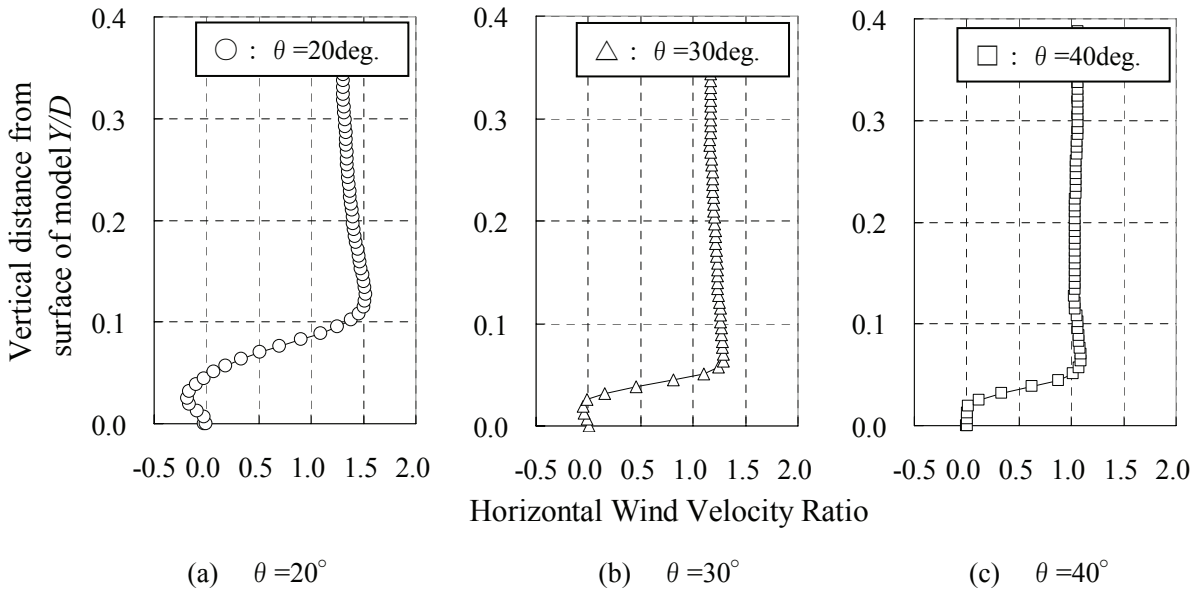


図-7.18 循環流中心位置における水平成分風速分布 ((c)は剥離点間中央位置)

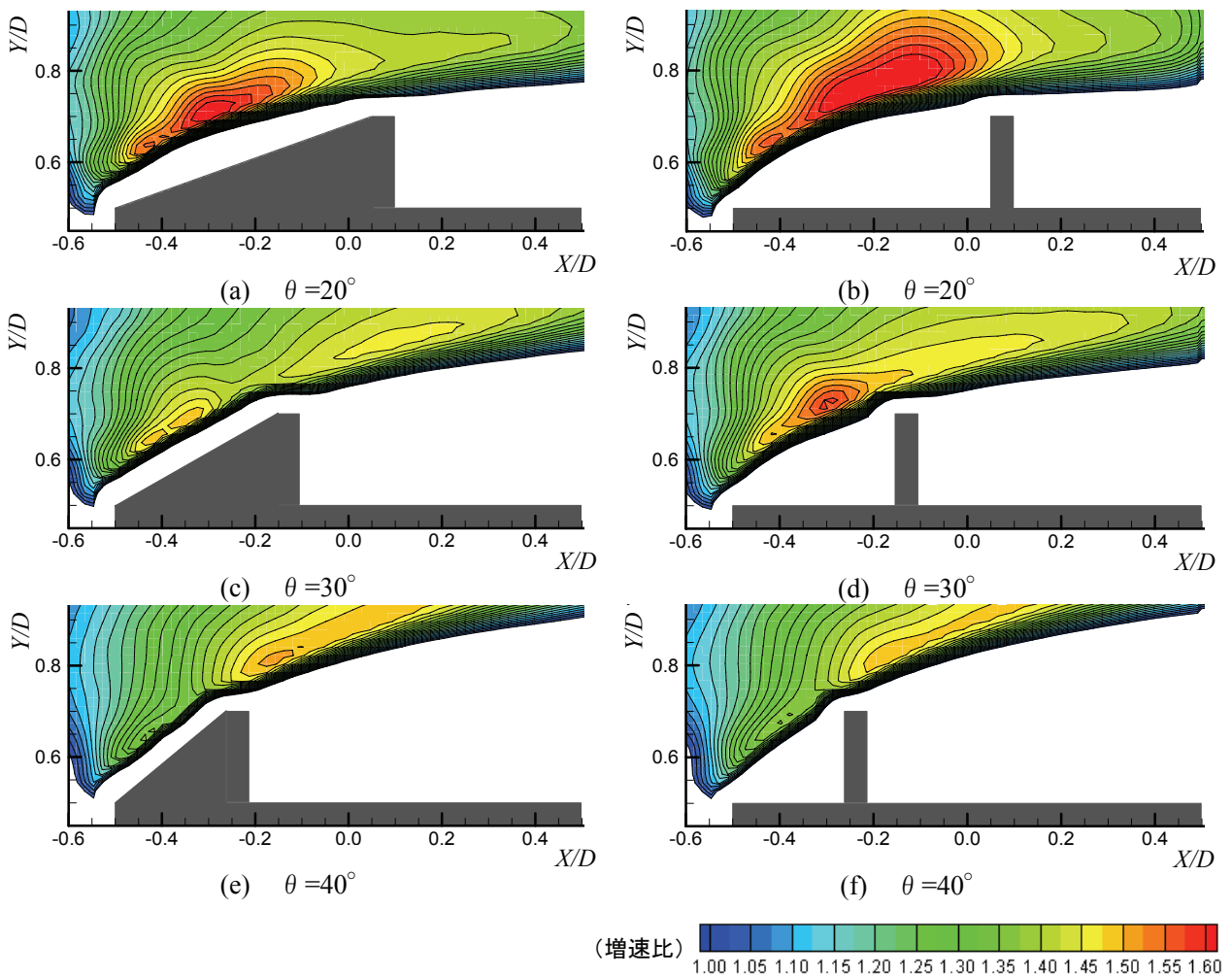


図-7.19 模型上面における増速領域 (左段：隅切りタイプ，右段：鉛直板タイプ)

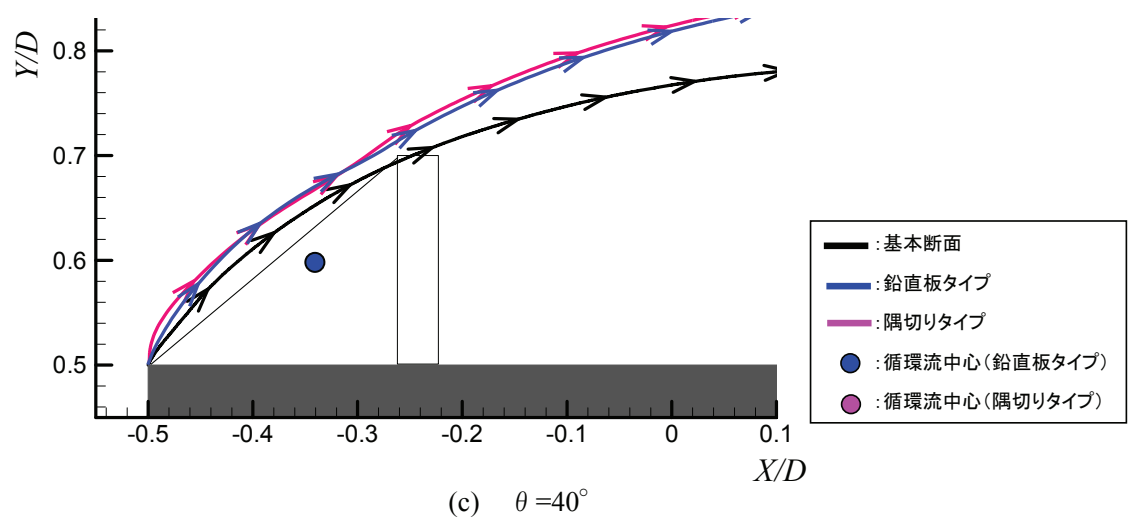
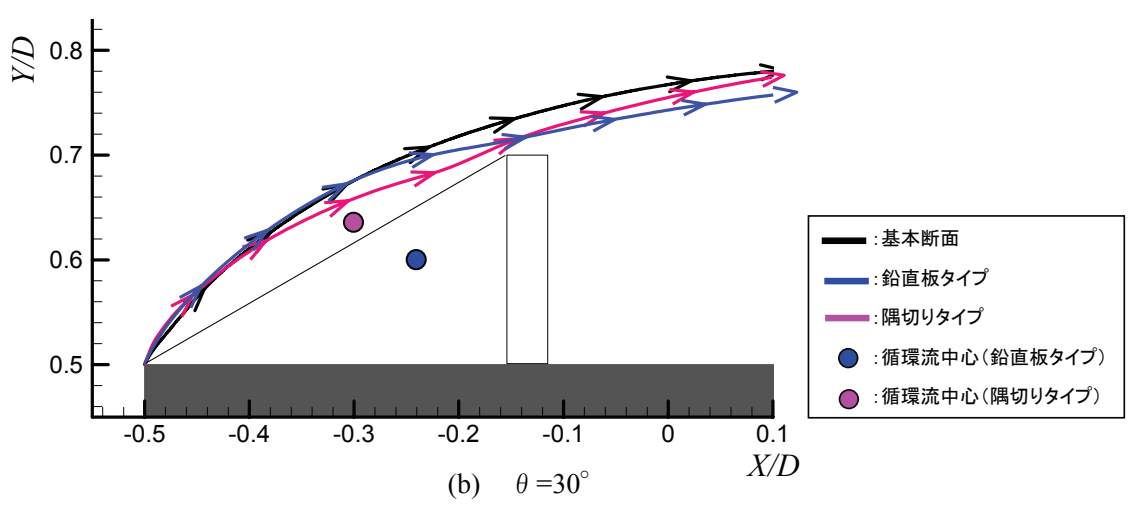
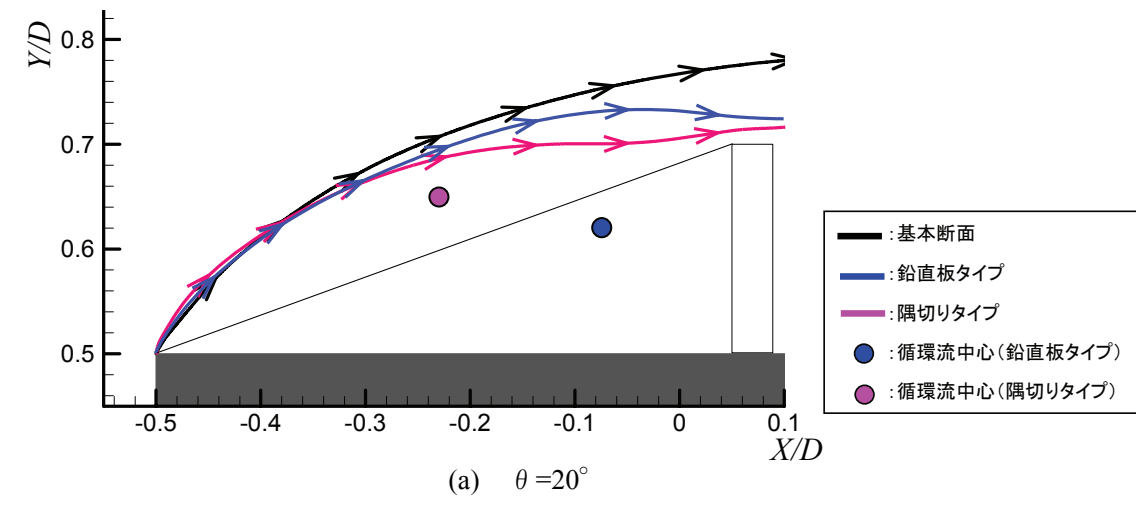


図-7.20 剥離干渉法の違いによる流線および循環流中心位置の変化 (迎角 $\alpha=0^\circ$)

7.5 回転ローターによる境界層制御法との関連性

剥離干渉法は、剥離点間に生じる循環流によって剥離流が加速されることがポイントのひとつであることが明らかになった。これは、久保らが新しい耐風安定性手法として提案している隅角部に配置した回転ローターによる境界層制御法⁷⁾による効果と似たものである。この手法は回転ローターによって剥離流を加速し、剥離の発生を抑えることで制振する手法である。図-7.21に回転ローターによる境界層制御を適用した場合の応答特性および静的空気力特性（抗力係数・揚力係数）についてまとめたものを示す。これより、回転ローターの回転速度比を大きくすることによって、ギャロッピングの発生が抑制される応答特性を示す。また、三分力特性からは抗力係数が上に凸となる迎角の範囲が狭くなりながら減少し、迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力勾配 $dC_l/d\alpha$ は負勾配から正勾配に変化している。これらの傾向は、剥離干渉法を適用した場合（図-4.4, 図-4.5参照）と良く対応している。

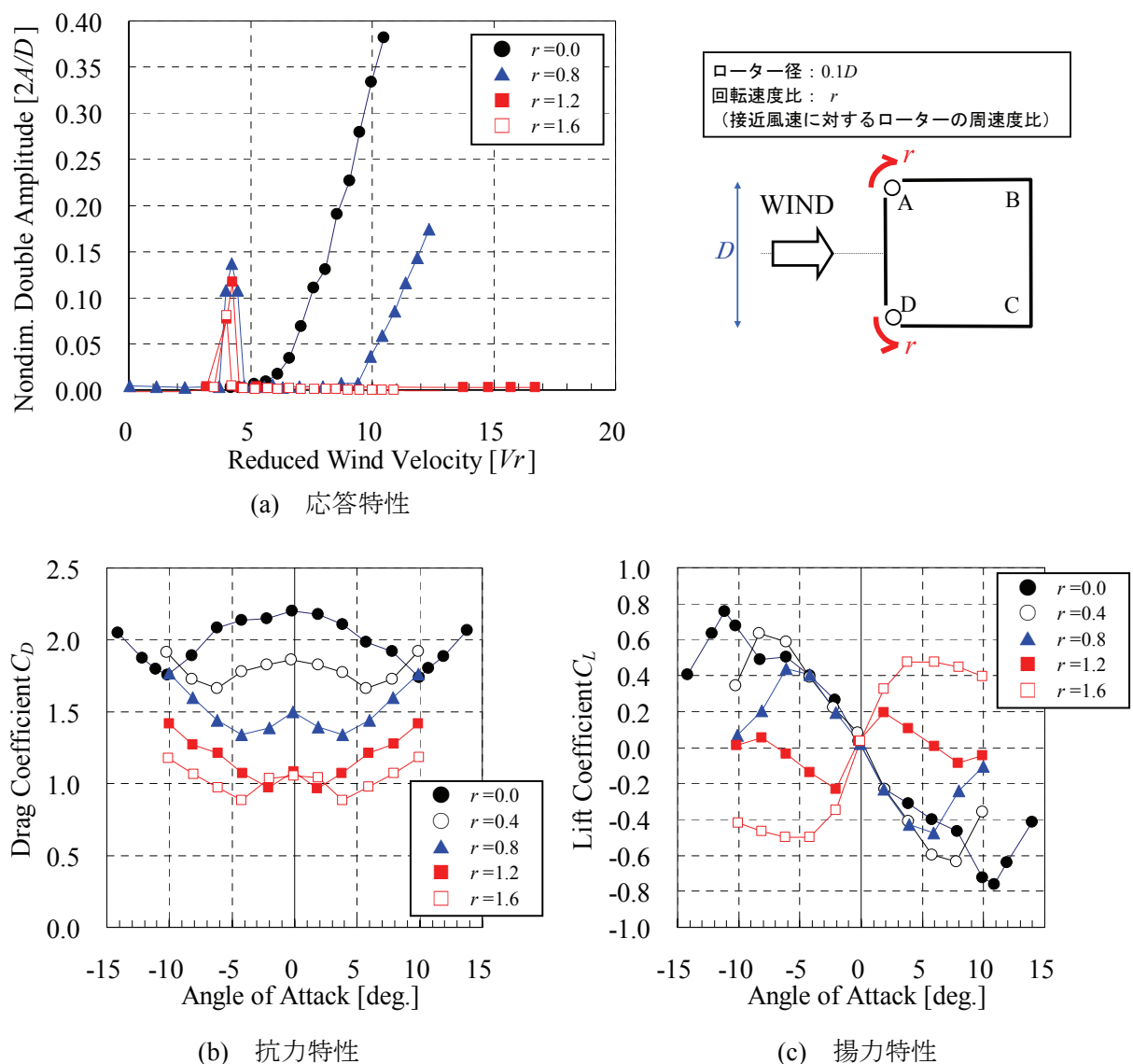


図-7.21 回転ローターによる境界層制御を行った場合の空力特性

次に、図-7.22に回転ローターによる境界層制御を適用した場合の平均圧力係数の表面圧力分布についてまとめたものを示す。これより、側面上および背面において圧力が回復する傾向を示している。これらの傾向は、剥離干渉法を適用した場合（図-5.4参照）と良く対応している。

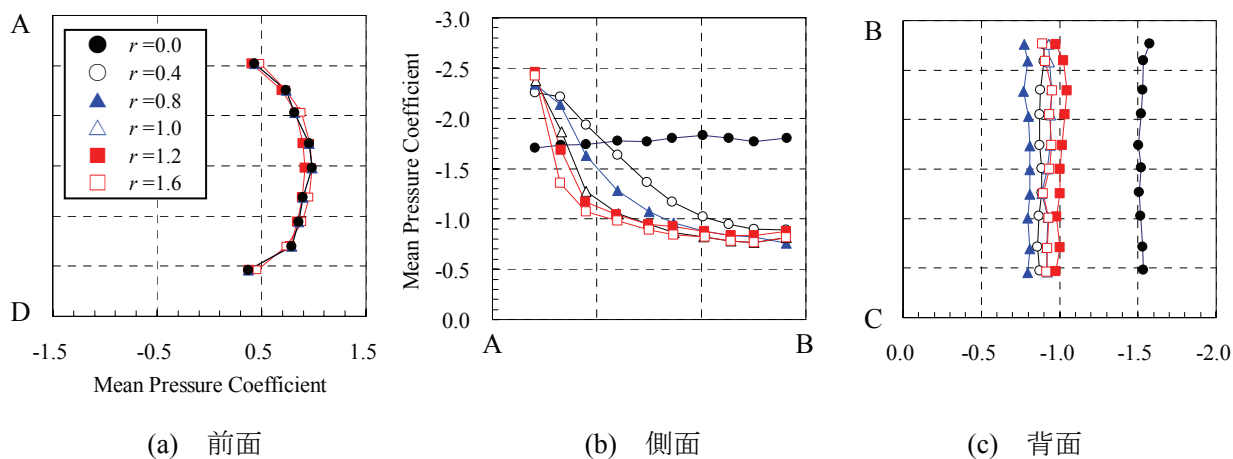


図-7.22 回転ローターによる境界層制御を行った場合の表面圧力特性

以上のことから、剥離境界層にローターの回転によって外力を加えるアクティブ制御に対して、剥離干渉法はパッシブ制御と言え、鉛直板によって生じた循環流が、剥離流に対してローターと非常に良く似た効果を発揮しているという点において2つの手法には密接な関連性があると考えられる。また、パッシブ制御である剥離干渉法を適用することによってアクティブ制御と同様の効果が得られるという点に着目すると、剥離干渉法が非常に有効な耐風制振手法であることが示された。

第8章

再付着型断面柱に対する剥離干渉法の効果

これまで、完全剥離型断面柱である正方形断面柱に対して剥離干渉法の制振メカニズムについて明らかにし、様々な有益な知見を得た。本章では、流れが再付着するような断面柱に対しても完全剥離型断面柱の場合と同様の制振メカニズムおよび知見が適用できるかどうかを確認するために、辺長比 $B/D=8$ の扁平矩形断面柱を基本断面柱として、鉛直板タイプの剥離干渉法を適用した場合について $B/D=1$ 断面柱と同様の検討を行った。

8.1 供試模型およびパラメーター

供試模型は、**図-8.1**および**写真-8.1**示すように $B/D=8$ （幅 $B=400\text{mm}$ ，高さ $D=50\text{mm}$ ）の扁平矩形断面柱を基本断面柱とする。設定する実験パラメーターについては、 $B/D=1$ 断面柱での検討と同一とする。表面圧力測定実験およびPIV実験用模型には、**図-8.2**に示すように前背面に各11点，上下側面に各47点，鉛直板部には頂部・風上面・風下面に各1点ずつ，計122点の圧力測定孔を配置している。

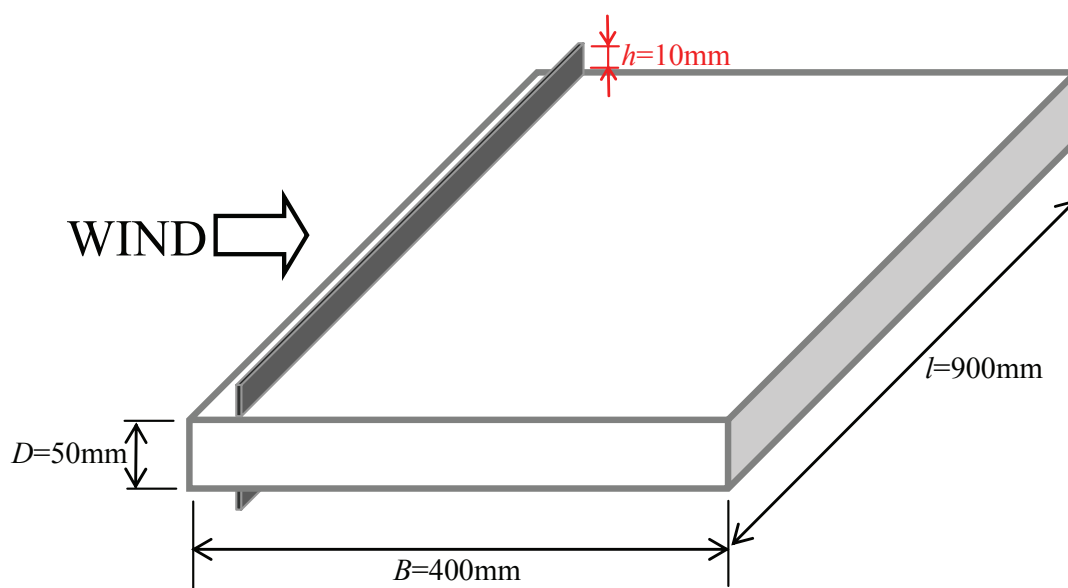


図-8.1 供試模型概要 ($B/D=8$ 断面柱)

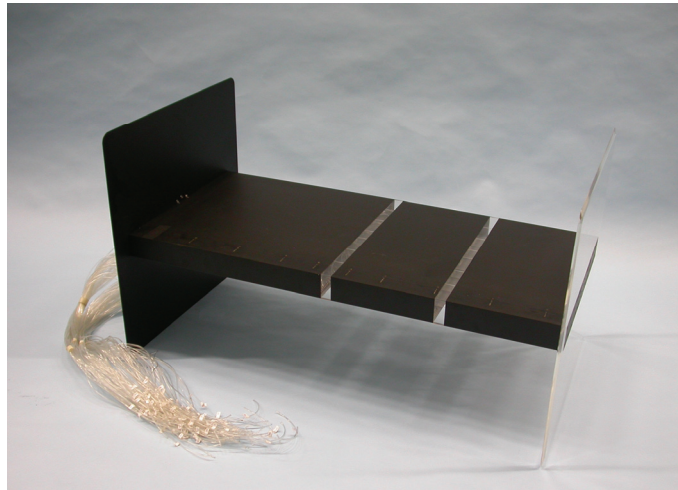


写真-8.1 供試模型 ($B/D=8$ 断面柱, 表面圧力・PIV実験用)

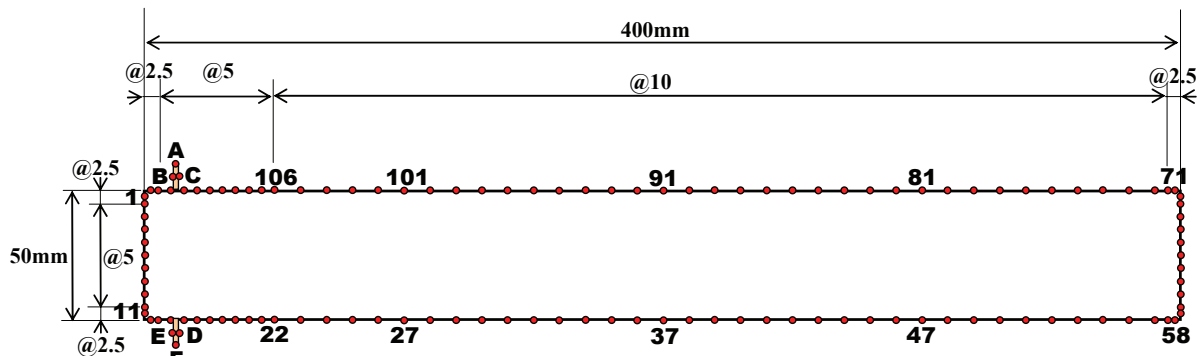


図-8.2 圧力測定孔位置 ($B/D=8$ 断面柱)

8.2 各種実験概要

8.2.1 計測システム

表面圧力測定実験, PIV 実験に関しては, $B/D=1$ 断面柱の検討で用いたものと同様とする。

応答実験では, 図-8.3 に示すような, 2 自由度 (たわみ・ねじれ) の支持装置を用いており, 片側 4 本合計 8 本のコイルスプリングによって模型を支持し, たわみ・ねじれの 2 自由度を与えている。また流れ止めによって流れ方向の変形および振動を拘束している。

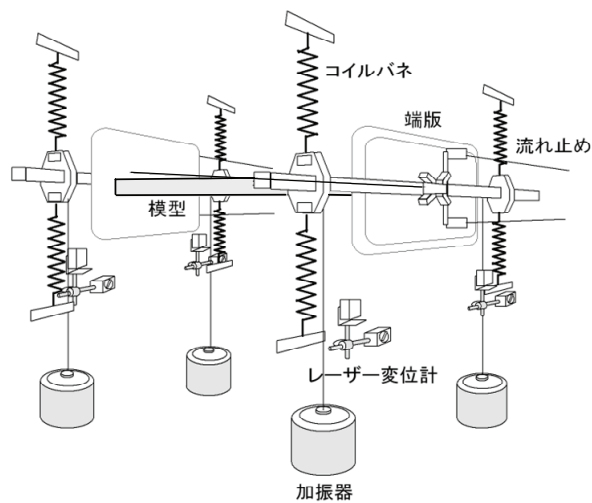


図-8.3 たわみ・ねじれ 2 自由度支持装置概略

8.2.2 実験諸元

本検討で実施した各種実験の諸元を表-8.1に示す。

表面圧力測定実験およびPIV実験における強制振動状態の測定については、図-8.4に示すようなねじれ振動に着目して加振振動数を応答実験におけるねじれ固有振動数 f_i と同じ4.6Hz、加振振幅を $T_0=2\text{deg}$ に設定した。

表-8.1 実験諸元 ($B/D=8$ 断面柱)

実験種類	(1) 応答実験	(2) 表面圧力測定	(3) PIV 実験
供試模型断面柱	$B/D=8$ ($B=400\text{mm}$, $D=50\text{mm}$)		
実験気流	一様流 ($Iu \leq 0.01$)		
実験風速 V (レイノルズ数 Re)	0~14.8m/s (0~49333)	静止時: 9m/s (30000) 強制加振時: 0~16m/s (0~53000)	
迎角 α	0°		
剥離干渉角 θ	15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40° (応答実験では15°は未実施)		
模型状況	2自由度自由振動	静止/強制振動	
振動諸元	$f_i=4.6\text{Hz}$, $\delta=0.003$ $f_h=2.9\text{Hz}$, $\delta=0.004$	ねじれ1DOF強制振動 ($f_i=4.6\text{Hz}$, $T_0=2\text{deg}$.)	
サンプリング周波数, データ数	1kHz, 60000個	400Hz, 32768個 (※位相平均処理した場合には、約600個のデータを用いて算出)	15Hz, 1500組

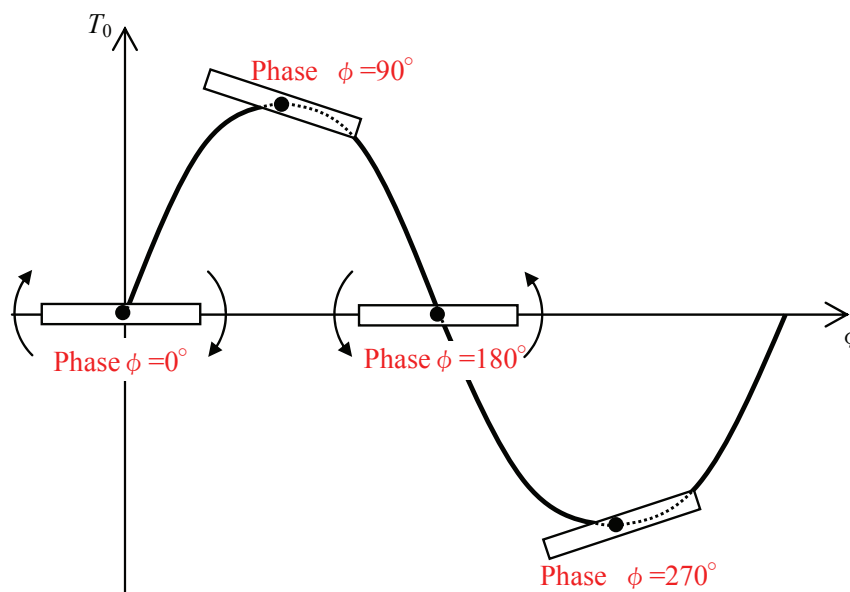


図-8.4 強制加振状態で検討する位相

8.3 検討結果および考察

8.3.1 応答特性

2自由度応答実験より得られたねじれ応答特性を図-8.5に示す。これより、基本断面柱と $\theta=40^\circ$ に関しては $Vr=4.5$ 付近からフラッターが発現しているのに対して、 $\theta=35^\circ$ では $Vr=5.7$ と発振風速が高風速側に移行している。さらに、 $\theta=30^\circ, 25^\circ, 20^\circ$ ではさらに $Vr=7$ 付近まで高風速側に移行している。これより、剥離干渉法は $B/D=8$ 断面柱に対して、ねじれフラッターの発振風速を高風速化する効果を発揮する。有効な剥離干渉角 θ の範囲は $20^\circ\sim 30^\circ$ となり、 $B/D=1$ 断面柱の場合と同じ範囲となっている。

また、基本断面柱および剥離干渉法を適用した場合には、低風速域($Vr=0.6\sim 0.7$ 付近)で渦励振が発生するが、最大応答発生時の風速における空力減衰 δ_A (図-8.6参照)より、僅かな構造減衰付加によって大幅に抑制可能である。

8.3.2 静止時の空気力特性

迎角 $\alpha=0^\circ$ における断面柱まわりの平均圧力係数 \bar{C}_p および変動圧力係数 \tilde{C}_p の分布を図-8.7に示す。これより、有効な剥離干渉角においては、側面の負圧が回復する点、つまり再付着点が上流側に移行しており、剥離流の再付着点が促進されている。これは変動圧力係数 \tilde{C}_p のピーク発生位置が上流側に移行していることから確認できる。また、鉛直板の風上側では有効な剥離干渉角において大きな負圧が発生している。

次に、表面圧力測定で得られた静止時の圧力を断面柱周りに積分して抗力係数 C_D を求めた。迎角 $\alpha=0^\circ$ における剥離干渉角 θ 別の C_D を図-8.8に示す。これより、鉛直板を設置することによって抗力係数 C_D は減少する傾向を示し、 $\theta=25^\circ$ では $C_D=0.97$ となり基本断面柱の $C_D=1.20$ に比べて81%まで減少している。ここで、基本断面柱の各剥離干渉角 θ における上面側の鉛直板の風上および風下面に設けた測定点における \bar{C}_p および鉛直板に作用する平均抗力係数 \bar{C}_f (式(5.3)参照)の分布を図-8.9に示す。これより、有効な剥離干渉角($\theta=20^\circ\sim 30^\circ$)においては大きな抗力を減少させる力が発生している。これは、図-8.10に示すように剥離点間において発生している循環流によるものであり、正方形断面柱の場合と同様に循環流が重要な働きをしている(図-5.6参照)。また、図-8.7(a)より、基本断面柱の背圧に着目すると、正方形断面柱において確認された有効な剥離干渉角における背圧の回復傾向が見られないことから、再付着型断面柱で鉛直板部に作用する力は正方形断面柱の場合よりも抗力減少に寄与していることになる。

さらに、有効な剥離干渉角である $\theta=30^\circ$ について、迎角 $\alpha=+2^\circ$ における側面上の平均圧力係数 \bar{C}_p および変動圧力係数 \tilde{C}_p を基本断面柱と比較したものを図-8.11に示す。 \bar{C}_p については上下面圧力差 \bar{C}_{p*} の分布についても併記する。これより、 $\theta=30^\circ$ の場合には上面側側面における剥離流の再付着点が上流側に移行しており、剥離流の再付着点が促進されている。また、再付着点より下流側においては、迎角 $\alpha=0^\circ$ での圧力分布(図-8.7参照)とよく似た、上下面ではほぼ同一となる分布を示している。

以上のことから、剥離干渉法が有効に機能する剥離干渉角 θ においては、剥離流の再付着点が上流側に移行し、再付着後の圧力場および流れ場は迎角の影響を受けずに上下面で対称となる効果を発揮している。

8.3.3 強制振動時の空気力特性

ねじれ 1 自由度強制加振状態において、高風速域 ($Vr=8.7$ 時) における位相 $\phi=0^\circ$ (ねじれ速度頭上げ最大となるゼロクロス点) での平均圧力係数 \bar{C}_p の分布を比較したものを図-8.12 に示す。得られている応答特性 (図-8.5 参照) は 2 自由度応答実験の結果であるので、ねじれ 1 自由度強制加振状態における空気力特性と応答特性を厳密に比較することはできないが、静止時同様、鉛直板を付加することによって流れの再付着が促進されている。さらに鉛直板の風上側では下向き (頭下げ) の力が発生しており、鉛直板の風下側では上下面の圧力分布はほぼ等しくなっている。ねじれ速度同相成分の圧力はねじれの空力減衰に寄与する³¹⁾ことから、鉛直板の風上側では減衰力が働いており、2 次剥離点以降には励振力となるような空気力は発生していないことを示している。

8.3.4 周辺流れ場特性

基本断面柱と $\theta=30^\circ$ について、図-8.12 と同条件における平均風速比分布および流線を図-8.13 に示す。これより、基本断面柱では上面側に比べて下面側での増速領域が卓越し、大きな剥離を生じているのに対し、 $\theta=30^\circ$ では下面側での剥離が小さくなり、増速領域は上下面において対称となるような分布傾向を示す。さらに再付着点より下流側の流れも断面柱に対して流線はほぼ平行で、風速分布も上下面对称に近くなっている。つまり剥離干渉法によって周辺流れ場は、振動状態においても静止状態と近い分布となる効果を発揮している。

8.4 再付着型断面柱に対する剥離干渉法の効果

以上の検討から、再付着断面柱である $B/D=8$ 断面柱に剥離干渉法を適用した場合のメカニズムに関する知見は以下のとおりである。

- ・ 剥離点間に生じる循環流の働きによって抗力が減少する。
- ・ 剥離流の再付着が促進され、迎角がある場合においても再付着点より下流側における圧力分布が上下面でほぼ対称となり、迎角の影響を受けにくい特性を示す。
- ・ 強制加振時の圧力分布より、剥離干渉法が有効に機能している場合には 2 次剥離点より下流の断面に作用する力は上下面でほぼ対称となっており、鉛直板の風上側にのみ制振力が作用している。
- ・ 強制加振時の周辺流れ場より、剥離干渉法が有効に機能している場合には剥離干渉後の流れは静止時に近い流れ場となっている。

これらの知見は、完全剥離型断面柱 ($B/D=1$ 断面柱) の検討によって得られた知見と同じであり、剥離干渉法の制振メカニズムは、断面柱の形状に関係なく同じメカニズムで機能しているということが明らかとなった。

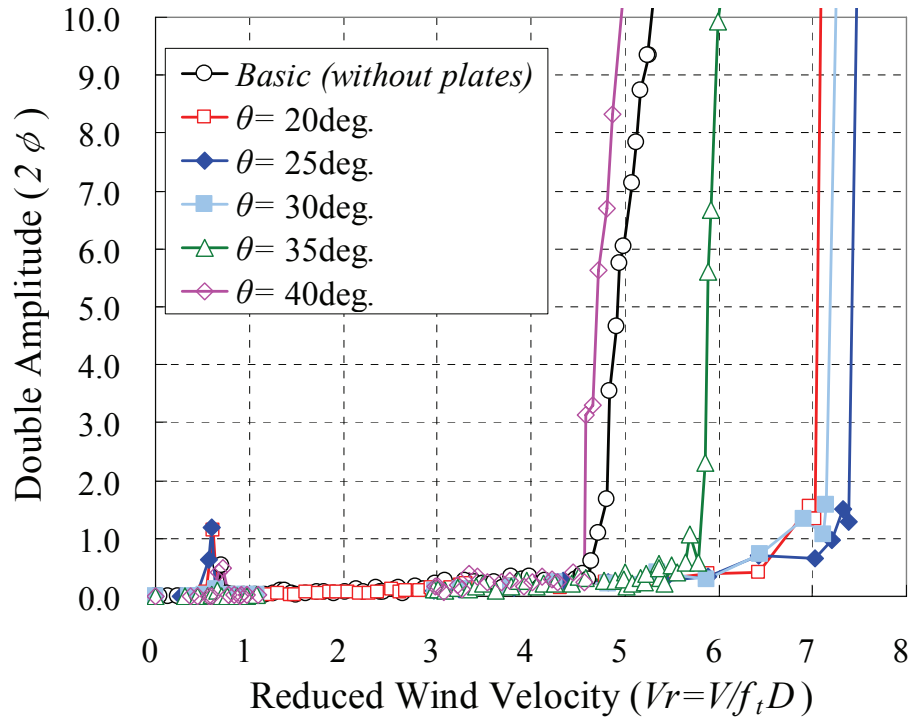


図-8.5 $B/D=8$ 断面柱におけるねじれ応答特性 (2自由度応答実験)

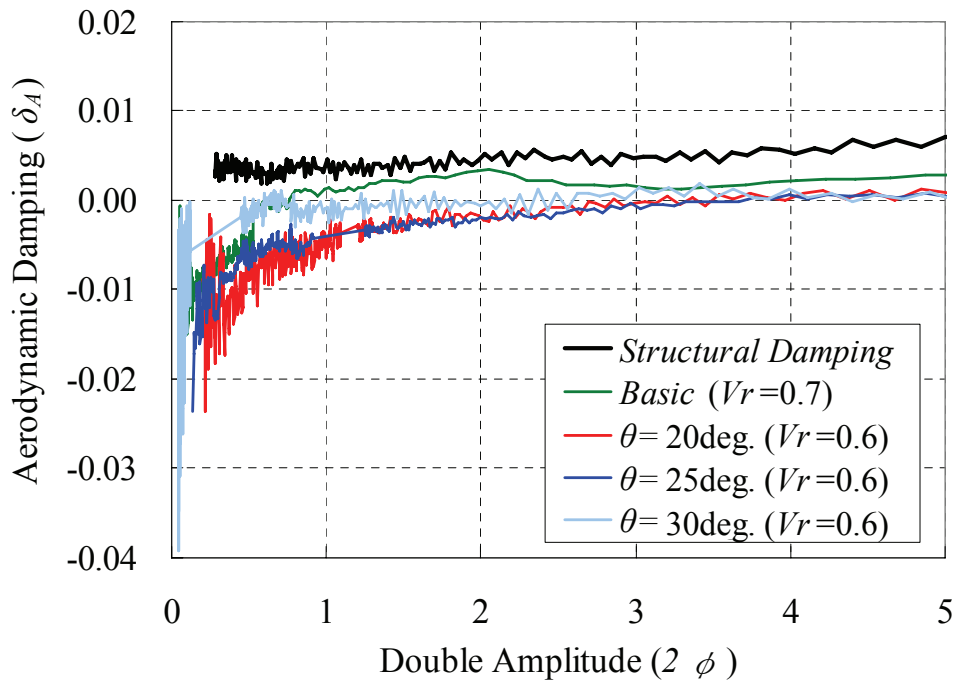
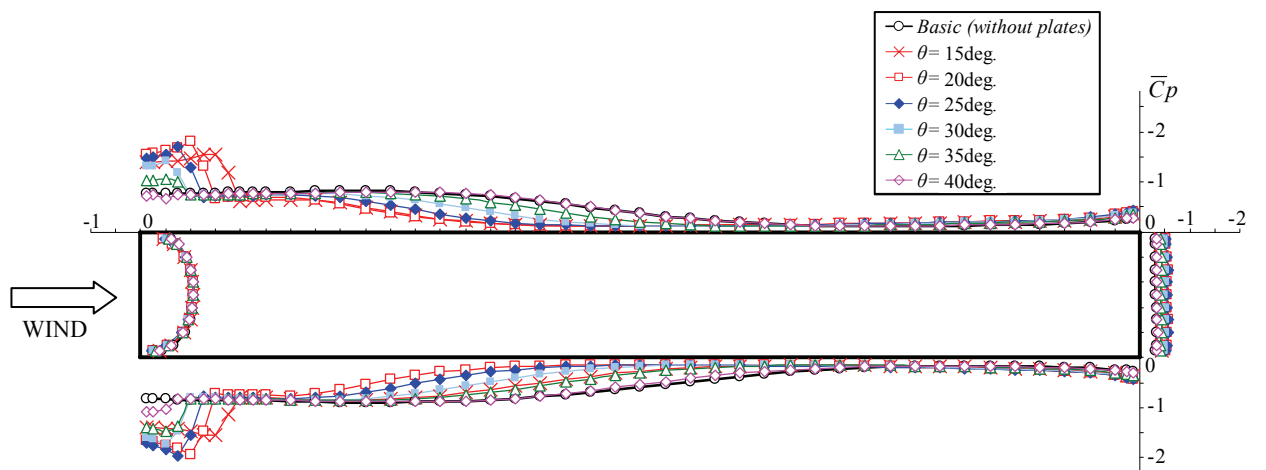
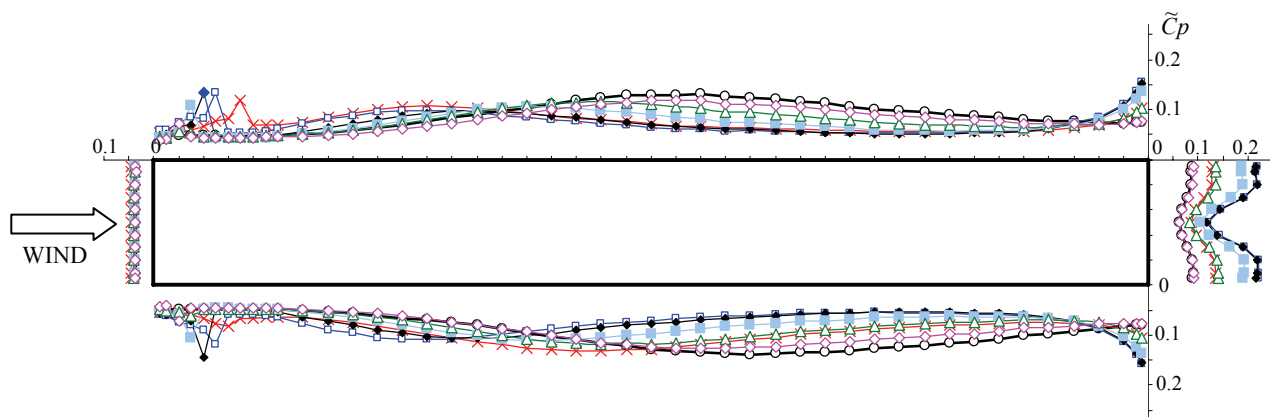


図-8.6 ねじれ渦励振最大応答発生風速時の空力減衰率



(a) 平均圧力係数



(b) 変動圧力係数

図-8.7 剥離干渉角別の圧力係数分布（静止時，迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

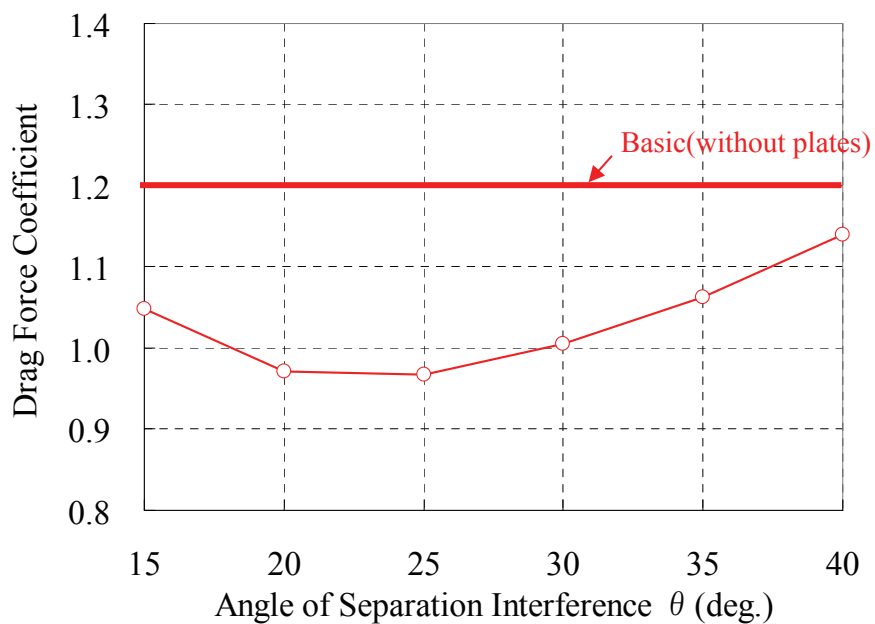


図-8.8 表面圧力分布から得られた剥離干渉角別の抗力係数特性（迎角 $\alpha=0^\circ$ ）

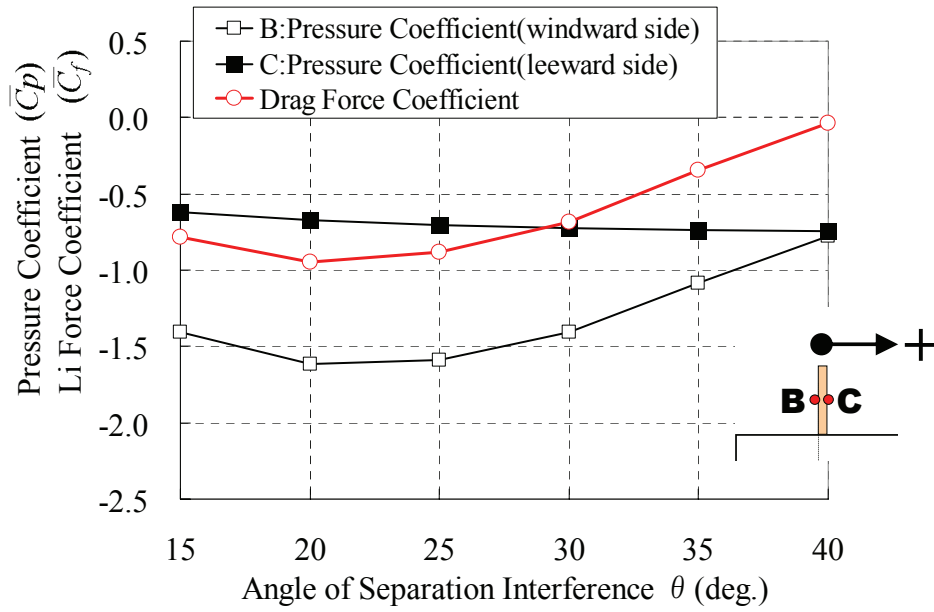


図-8.9 鉛直板に作用する力（平均圧力係数 \bar{C}_p および平均抗力係数 \bar{C}_f ，静止時）

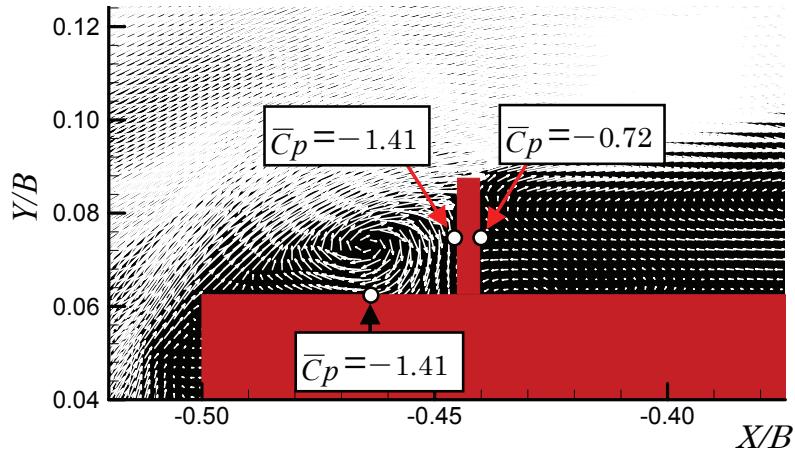
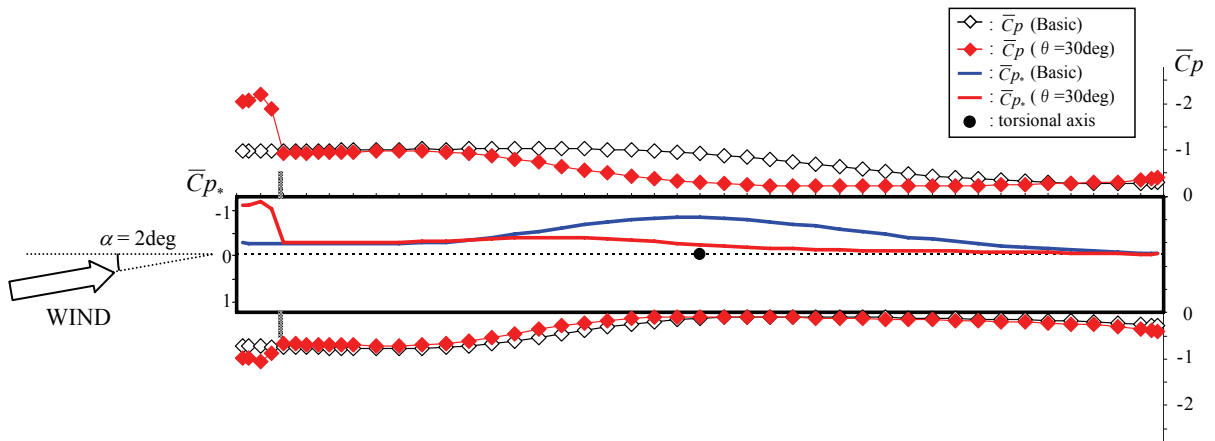
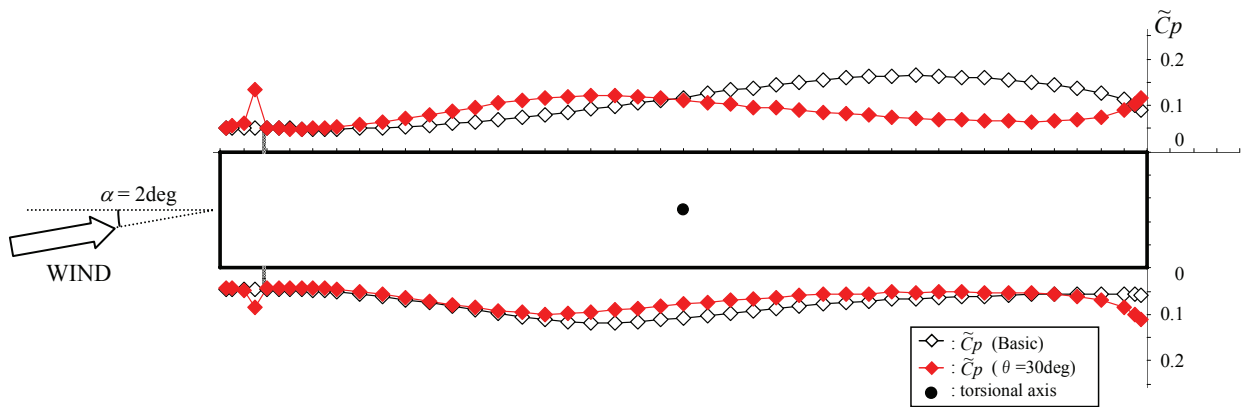


図-8.10 剥離点間付近の流速ベクトルおよび平均圧力係数（ $\theta = 30^\circ$ ）



(a) 平均圧力係数および揚力



(b) 変動圧力係数

図-8.11 迎角 $\alpha = +2^\circ$ における圧力分布の比較 (Basic および $\theta = 30^\circ$)

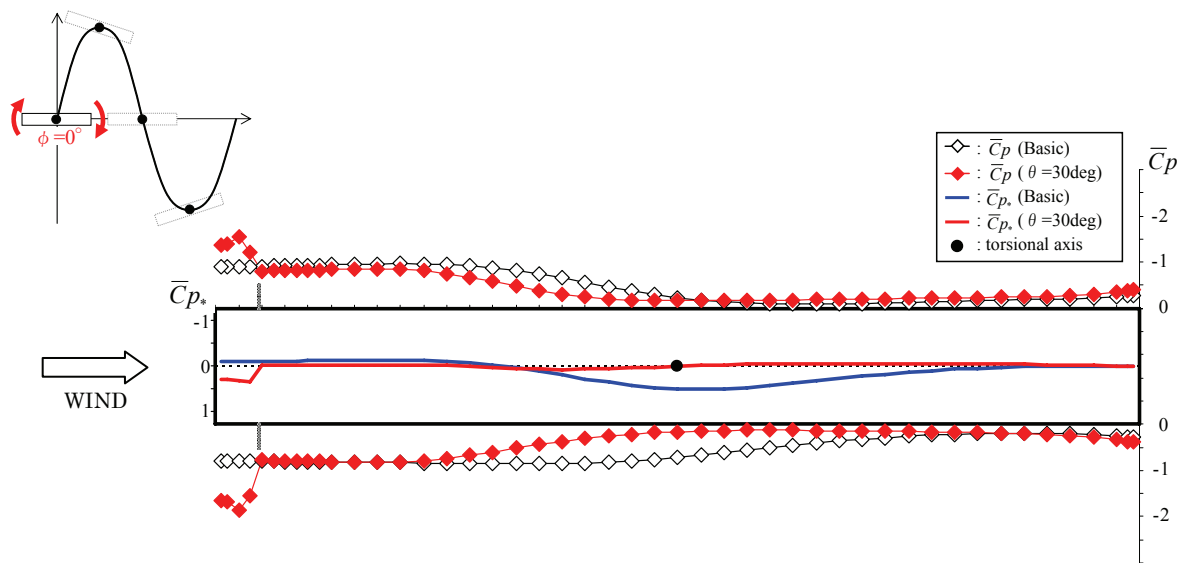
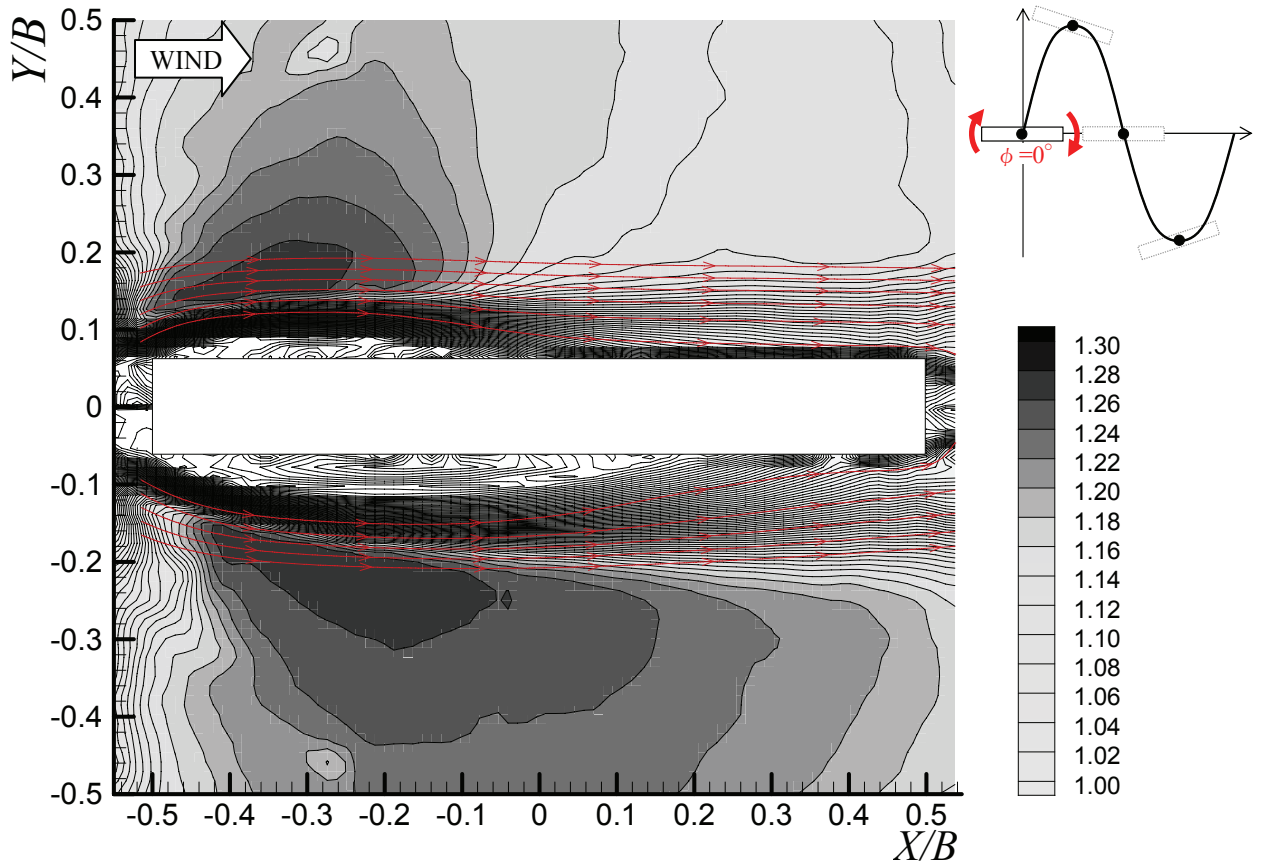
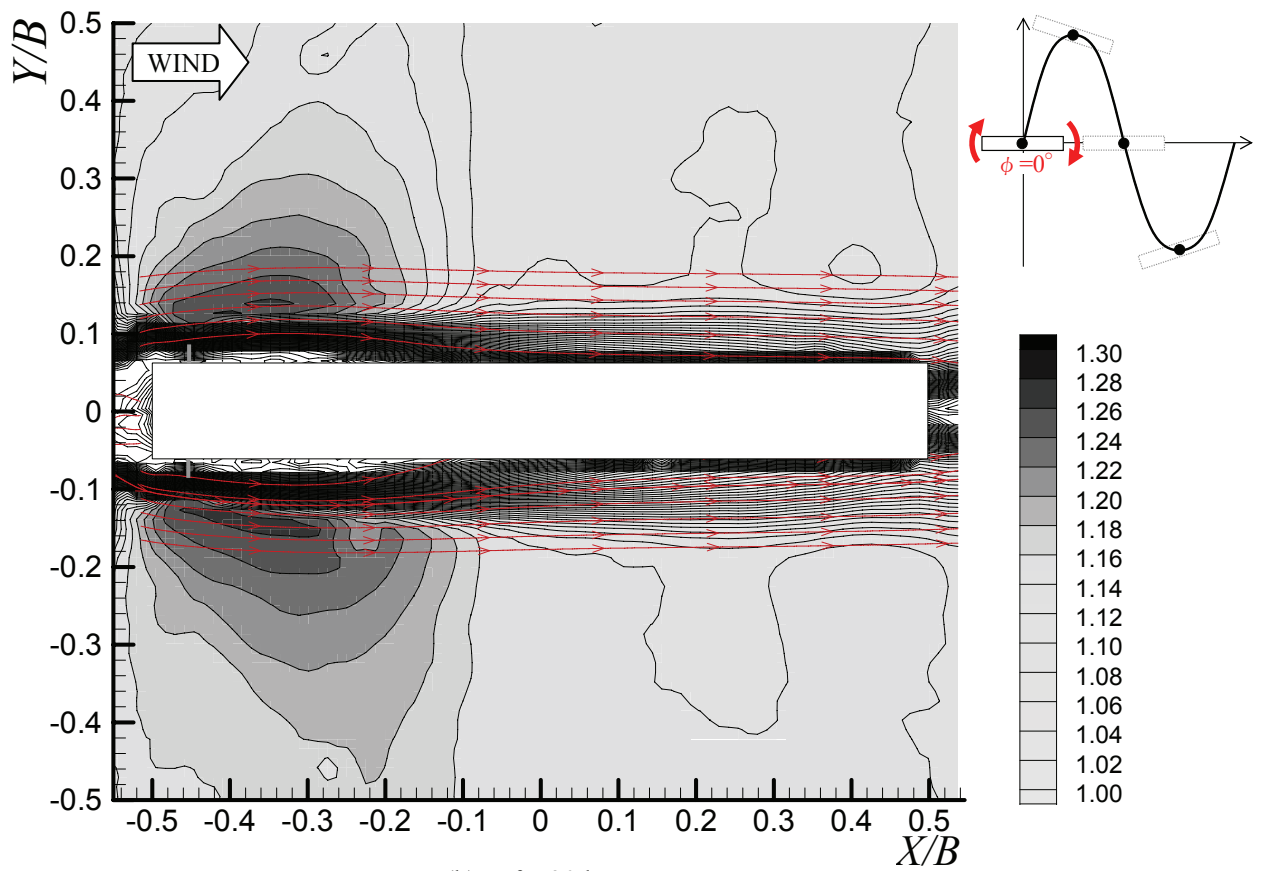


図-8.12 強制加振時における圧力分布の比較 (Basic および $\theta = 30^\circ$, $V_r = 8.7$, $\phi = 0^\circ$)



(a) Basic



(b) $\theta = 30^\circ$.

図-8.13 強制加振時における風速比分布および流線の比較 ($V_f=8.7$, $\phi=0^\circ$)

第9章

結論

本論文では、剥離干渉法（SIM：Separation Interference Method）について、耐風安定性の向上に寄与する詳細なメカニズム（剥離干渉法が機能した場合の流れの変化や構造物に作用する外力の変化、剥離干渉法によって得られる具体的な効果など）について明らかにすることを目的として、完全剥離型断面柱（ $B/D=1$ ）および再付着型断面柱（ $B/D=8$ ）の矩形断面柱を対象として、各種風洞実験によって検討を行った。

以下に、第1章～8章の要約を示したうえで、本研究によって明らかとなった剥離干渉法のメカニズムについて総括して、本論文の結論とする。

9.1 各章の要約

各章で示した内容について要約すると以下のようなようになる。

第1章は序論であり、本研究の背景および目的を明確にし、本論文の構成について示した。

第2章では、本研究で扱う問題に関する既往の研究成果について述べ、剥離干渉法の制振メカニズムに関して本研究で検討すべき課題など、本研究の位置づけを明らかにした。

第3章および第4章では、完全剥離型断面柱である $B/D=1$ 断面柱に対して、剥離干渉法を適用した場合の応答特性および静的空気力特性について検討し、次のような知見を得た。

応答特性

- ・ 剥離干渉角 $\theta=20^\circ\sim 40^\circ$ の範囲では、高風速域でのギャロッピングの発生が抑制される。
- ・ 基本断面柱（ $B/D=1$ 断面柱）および $\theta=15^\circ$ では、ギャロッピングが発生する。
- ・ 剥離干渉法を適用することによって、低風速域でカルマン型渦励振が発生するが、剥離干渉角 $\theta=20^\circ\sim 35^\circ$ の範囲においては、僅かな構造減衰付加によって大幅に低減される。
- ・ $\theta=40^\circ$ では、カルマン渦励振以外に別の機構によって大きな負減衰の限定振動が発生する。

静的空気力特性

- ・ 抗力については、 $\theta \leq 35^\circ$ の範囲において、基本断面柱に対して減少する傾向を示す。また、抗力曲線が上に凸となる迎角の範囲についても、 θ の減少に従って狭くなる。
- ・ 揚力については、基本断面柱においては、迎角 $\alpha=0^\circ$ における揚力勾配 $dC_L/d\alpha$ は負勾配であるが、 $\theta \geq 20^\circ$ の範囲では $dC_L/d\alpha$ は正勾配となる。
- ・ 空力モーメントについては、剥離干渉法を適用することによって迎角 $\alpha=0^\circ$ における空力モーメント勾配 $dC_M/d\alpha$ の傾きが大きくなる。

- ・ 剥離干渉法が有効に機能した場合の静的三分力係数の特性は、辺長比が大きい断面柱の特性と似た傾向を示す。
- ・ Den Hartog の判別式を用いてギャロッピングに対する安定性について検討を行った結果、応答実験においてギャロッピングが発生しなかった $\theta \geq 20^\circ$ の範囲では、 $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ において相対的に大きな正值となり、ギャロッピングに対して抑制効果が高くなる特性を示す。
- ・ 以上の結果から、有効な剥離干渉角 θ は $\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$ の範囲にあることを確認した。

第5章および第6章では、応答実験と静的空気力測定実験から得られた結果を踏まえて、静止状態および応答実験で発生した振動現象を対象とした強制加振状態において、表面圧力測定および PIV (Particle Image Velocimetry) 実験を行い、有効な剥離干渉角 ($\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$) において断面柱の各部位に作用する圧力分布や周辺流れ場の詳細な変化に着目することで、剥離干渉法のメカニズムについて検討し、次のような知見を得た。

静止時における周辺流れ場

- ・ 剥離干渉法を適用することにより、鉛直板の風上側において定常的な循環流が発生し、有効な剥離干渉角 ($\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$) では循環流の巻き込みが強くなる。
- ・ 有効な剥離干渉角では、1次剥離点 (基本断面柱の隅角部) から発生した剥離流は、基本断面柱の場合に比べて断面柱側面に引き寄せられ、2次剥離点の下流側でも剥離が抑えられた状態で流下する。
- ・ 有効な剥離干渉角では、断面柱の後流渦の巻き込みは基本断面柱に比べて弱まる。

静的空気力に寄与するメカニズム

- ・ 有効な剥離干渉角 ($\theta = 20^\circ \sim 30^\circ$) では、断面柱背面における負圧が回復することによって抗力が減少する効果を示す。
- ・ さらに、有効な剥離干渉角では、循環流の効果によって鉛直板部に抗力が減少する力 (負圧) が作用しており、全体の抗力減少に大きく寄与している。
- ・ 断面柱の側面における平均圧力係数 \bar{C}_p については、有効な剥離干渉角では、循環流の働きによって鉛直板の風上側で大きな負圧が発生し、風下側で圧力が回復するような圧力分布の傾向を示す。
- ・ 変動圧力係数 \tilde{C}_p については、有効な剥離干渉角では、基本断面柱に比べて小さくなる傾向を示す。側面における \tilde{C}_p は後流渦による励振力の寄与と関連づけることができ、また、後流における流れ場と性状から、有効な剥離干渉角では、後流渦の励振力の寄与が小さくなっていると考えられる。
- ・ 有効な剥離干渉角における断面柱背面および側面の圧力分布は、流れが再付着する断面柱の圧力分布と類似している。

ギャロッピングに対する剥離干渉法の効果

- ・ 強制的に振動させた状態においても、循環流による剥離流の増速効果によって剥離干渉後の流れが振動の影響を受けず、迎角 $\alpha=0^\circ$ の静止状態に近い流れ場が形成される。
- ・ これにより、鉛直板の風下側の側面においては振動に寄与する力が発生せず、鉛直板の風上側における循環流によって発生する負圧による制振力によってギャロッピングの抑制効果を発揮する。

渦励振に対する剥離干渉法の効果

- ・ 渦励振発生状態においても、有効な剥離干渉角では鉛直板の風上側には循環流が発生しており、制振力を発揮している。
- ・ 剥離干渉法を適用した場合に発生するカルマン型渦励振は、カルマン渦によって鉛直板の風下側において作用する励振力が鉛直板の風上側に発生する制振力を上回ることによって振動が発生していると考えられる。
- ・ $\theta=40^\circ$ において発生するカルマン型渦励振とは別の限定振動は、鉛直板の風上側に循環流が発生せず、断面柱の側面全体において励振力が働くことによって発生する。

第7章では、剥離干渉法を実用化するにあたって検討すべき課題である4つの課題「迎角に対する剥離干渉法の有効性」、「風向が風上下側逆になった場合の剥離干渉法の有効性」、「乱流中における剥離干渉法の有効性」、「剥離干渉法の手法の違いによる影響」、また、回転ローターによるアクティブ境界層制御法との関連性について検討し、次のような知見を得た。

- ・ 迎角がある場合においても、剥離点間に発生する循環流による剥離流の増速効果によって、迎角がない状態 ($\alpha=0^\circ$) に近い周辺流れ場を形成することで迎角の影響を受けにくい特性を示す。
- ・ 風向が風上下側逆になった場合に、鉛直板を風上下に両側設置する必要がある $\theta=30^\circ$ においても、片側設置の場合とほぼ同じ応答特性を示し、剥離干渉法は風向が変化する場合においても対応可能である。
- ・ 乱流中 (乱れ強さ $Iu=8.1\sim 8.5\%$) においても、剥離干渉法は気流の乱れによる影響を受けずに一様流中と同様の効果を発揮する。
- ・ 隅切りタイプによる剥離干渉法を適用した場合、鉛直板タイプと同様に剥離点間に循環流の働きによって、同じような流れ場を形成する。また定性的に鉛直板タイプと同様の空力特性となることから、両手法は同じメカニズムで機能していることを示した。
- ・ 有効な剥離干渉角では、回転ローターによるアクティブ境界層制御を適用した場合と非常に良く似た効果を発揮しており、両者に密接な関連性があることを示した。また、剥離干渉法はアクティブ制御と同様の効果を得ることができる有効な制振手法であることを示した。

第8章では、再付着型断面柱である $B/D=8$ 断面柱に対して、剥離干渉法を適用した場合の制振メカニズムについて検討し、次のような知見を得た。

- ・ 有効な剥離干渉角では、剥離流の再付着が促進される。
- ・ 剥離点間に生じる循環流の働きによって抗力が減少する。
- ・ 迎角がある場合においても、再付着点より下流側における圧力分布は上下面ではほぼ対称となり、迎角の影響を受けにくい特性を示す。
- ・ 有効な剥離干渉角においては、剥離干渉点より下流の断面柱に作用する力は上下面ではほぼ対称となり、鉛直板の風上側にのみ制振力が作用する。
- ・ 強制的に振動させた状態においても、剥離干渉法が有効に機能している場合には剥離干渉後の流れは静止時に近い流れ場となっている。
- ・ 以上の知見は、完全剥離型断面柱の検討によって得られた知見と同じであり、剥離干渉法の制振メカニズムは、断面の形状に関係なく同じメカニズムで機能している。

9.2 剥離干渉法の制振メカニズム

本研究で得られた知見をもとに、完全剥離型断面柱および再付着型断面柱における剥離干渉法の制振メカニズムについてまとめる。剥離干渉法が有効に機能した場合に生じる流れ場の変化のフローを以下に示す（図-9.1参照）。

- 1) 剥離点間（1次剥離点となる基本断面柱の隅角部と2次剥離点となる鉛直板端部の間）において定常的な循環流が発生する。
- 2) 循環流で発生する負圧によって、1次剥離点から発生した剥離流が引き寄せられ、剥離点間における剥離流が増速される。
- 3) 増速された剥離流は2次剥離点に沿うように干渉し、剥離が小さく抑えられた状態で流下する。
- 4) 完全剥離型断面柱では基本断面柱よりは広い後流域となるが、有効な剥離干渉角では後流域が狭まる。再付着型断面柱では流れの再付着化が促進された流れ場を形成する。

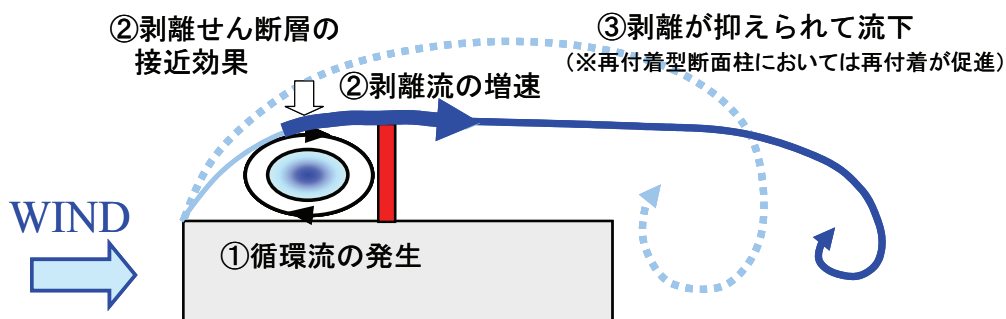


図-9.1 剥離干渉法が有効に機能する場合の流れ場の挙動

これによって得られる剥離干渉法の制振メカニズムの効果は以下のとおりである（図-9.2 参照）。

- a) 循環流によって発生する負圧が鉛直板に作用することで、断面柱全体に作用する抗力を減少させる効果を発揮する。
- b) 完全剥離型断面柱では2次剥離点より風下側（再付着型断面柱では再付着点より風下側）の断面柱には振動に寄与する力が発生せず、循環流の働きによって発生した負圧によって制振力を発揮する。
- c) 迎角がある場合においても、完全剥離型断面柱では2次剥離点より風下側（再付着型断面柱では再付着点より風下側）における圧力分布は上下面で対称となり、断面柱の後流域に発生する流れ場も水平軸に対して対称に近い状態となっており、迎角の影響を受けにくい特性を示す。
- d) 強制的に振動を与えた状態において、2次剥離点より風下側の流れ場は、静止状態に近い流れ場となる。
- e) 断面柱に作用する空気力は、辺長比を大きくした場合と同様の静的空力特性となる。
- f) これらの制振メカニズムは、隅切りタイプの剥離干渉法においても同様のメカニズムが機能している。

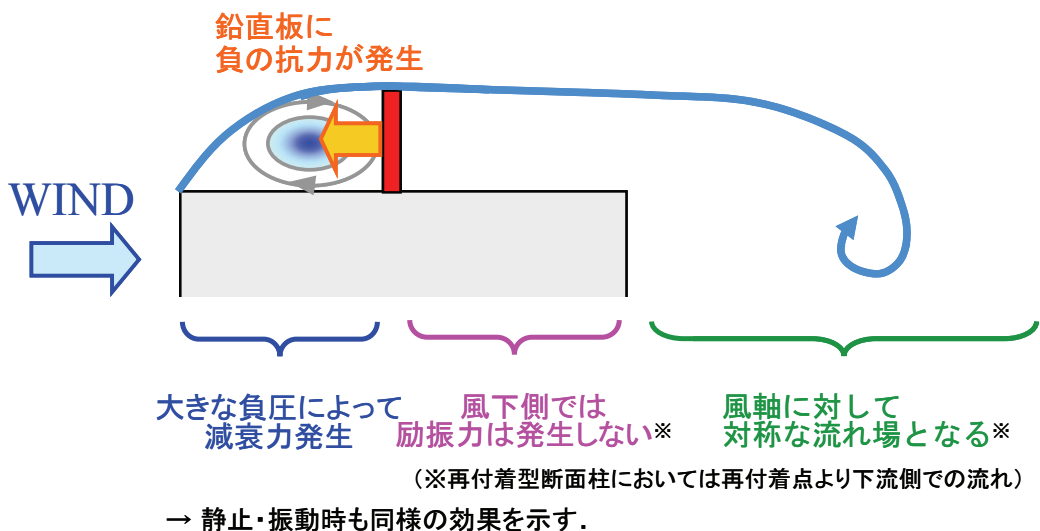


図-9.2 剥離干渉法が有効に機能する場合の効果および制振メカニズム

参考文献

- 1) 土木学会：橋梁の耐風設計－基準と最近の進歩－，2003.
- 2) 本州四国連絡高速道路株式会社 長大橋技術センター：長大橋 NEWS レターNo.13，2002.
- 3) 久保喜延，本多健二，野上千秋，加藤九州男，田崎賢治：PC 斜張橋の閉断面桁および開断面桁の剥離流相互干渉法による耐風性能改善対策に関する研究，構造工学論文集，pp. 430-463，1992.
- 4) 久保喜延，小石明，田崎賢治，中桐秀雄：橋梁断面における空力干渉作用のメカニズムについて，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp. 353-358，1994.
- 5) 岡内功，伊藤学，宮田利雄：耐風構造，丸善，1977.
- 6) 日本鋼構造協会：構造物の耐風工学，東京電機大学出版局，1997.
- 7) 中村泰治，溝田武人，吉村健：矩形および H 型断面柱の空力三分力特性について，九州大応用力学研究所年報，No.40，1973.
- 8) 宮田利雄：構造物のフラッター，日本風工学会誌，No.28，pp.45-64，1986.
- 9) Den Hartog, J.P. : *Mechanical Vibrations*, McGraw-Hill, 1956.
- 10) 久保喜延，安田英明，小坪千野：ローター付正方形角柱の境界層制御による二次元静的空気力特性，第 12 回風工学シンポジウム論文集，pp.155-160，1992.
- 11) 久保喜延，小坪千野，林田宏二，幽谷栄二郎：高迎角時における正方形角柱のローターによる耐風制振法，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp.437-442，1994.
- 12) 久保喜延，加藤九州男，山口栄輝，幽谷栄二郎，松尾智章：偏平矩形柱のフラッター制振への境界層制御の適用，第 14 回風工学シンポジウム論文集，pp.371-376，1996.
- 13) 土木学会構造工学委員会 風洞実験相似則検討小委員会：風洞実験相似則検討小委員会活動成果報告書，1994.
- 14) 岡島厚，上野久儀，阿部彰人：隅切り矩形断面柱の空力特性におよぼすレイノルズ数の影響，日本風工学会誌，No.49，pp.1-13，1991.
- 15) 白石成人，松本勝，白土博通，石崎浩，長田信，松井俊彦：隅切りによる矩形断面の空力安定化効果，pp. 193-260，第 9 回風工学シンポジウム論文集，1986.
- 16) Y.Nakamura, and T.Matukawa : Vortex excitation of rectangular cylinders with a long side normal to the flow, *Jour. Fluid Mech.*, Vol.180, pp.171-191, 1987.
- 17) Y.Nakamura, and K.Hirata : Critical geometry of oscillating bluff bodies, *J. Fluid Mech.*, Vol.208, pp.375-393, 1989.
- 18) Scruton, C. : On the Wind-excited Oscillations of Stacks, Towers and Masts, *Proc. Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures (Teddington)*, Her Majesty's Stationary Office, 1963.
- 19) 白石成人，松本勝：渦励振の発生機構と応答評価，日本風工学会誌，No.20，pp. 103-127，1984.
- 20) 松本勝，藤井大三，山岸稔，青木淳，奥寺健彦，白石成人：鈍い矩形断面のフラッター特性に関する基礎的研究，第 13 回風工学シンポジウム論文集，pp.365-370，1994.
- 21) 山田均，宮田利雄，伊藤学：たわみ振動する角柱の周辺圧力分布に関する一考察，第 6 回風工学シンポジウム論文集，pp.185-192，1980.

- 22) 吉村直樹, 大熊武司, 丸川比佐夫: 矩形および隅欠断面角柱の側面に作用する変動風圧特性について, 第 15 回風工学シンポジウム論文集, pp.275-280, 1998.
- 23) 西村宏昭, 谷池義人: 二次元静止正方形角柱の変動空気力特性, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.255-260, 2000.
- 24) 岡島厚: 種々な断面辺長比の矩形柱周りの流れ, 日本風工学会誌, No.17, pp.1-19, 1983.
- 25) 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.
- 26) 松本勝, 白土博通, 荒木健二, 原村高志: 2 次元断面周りの気流及び表面圧力の空間相関に関する研究, 第 16 回風工学シンポジウム論文集, pp.261-266, 2000.
- 27) M.ラッフエル, C.E.ヴィラート, J.コンペンハウス著, 小林敏雄監修: PIV の基礎と応用 - 粒子画像流速測定法 -, シュプリンガー・フェアラーク東京
- 28) 可視化情報学会: PIV ハンドブック, 森北出版株式会社, 2002.
- 29) 田中洋介, 秋山将之, 久保喜延, 木村吉郎, 加藤九州男, 林田宏二: PIV を用いた剥離干渉メカニズムの解明, 土木学会第 59 回年次学術講演会講演概要集(I), pp.1241-1242, 2004.
- 30) 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.
- 31) 中村泰治, 溝田武人: 矩形断面柱のねじりフラッタについて, 土木学会論文報告集, 第 216 号, pp.1-7, 1973.
- 32) 白石成人: 平板状構造物の曲げねじれフラッター特性に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 226 号, pp.15-24, 1969.
- 33) 松本勝, 白石成人, 白土博通, 重高浩一, 新原雄二, 山口滋弘: 構造基本断面の非定常空気力に関する研究, 第 12 回風工学シンポジウム論文集, pp.231-236, 1992.
- 34) Teodorsen,T.: General Theory of Aerodynamic Instability and the Mechanism of Flutter, NACA TR No.496, 1934.
- 35) 岡島厚, 上野久儀, 長久太郎, 加藤和人: 細長い長方形断面柱のストローハル数と背圧係数, 日本機械学会論文集(B 編)56 巻 523 号, pp.23-30, 1990.
- 36) 鶴田秀紀, 中山龍三, 渡辺公彦, 大屋裕二, 中村泰治: 扁平矩形柱の渦放出の風洞実験と数値解析, 第 10 回風工学シンポジウム論文集, pp.217-222, 1988.
- 37) 林田宏二, 久保喜延, 池田勇人, 野田辰徳: 剥離干渉法による空力振動制振メカニズムに関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム論文集, pp.429-434, 2006.
- 38) 林田宏二, 久保喜延, 池田勇人, 大窪一正: 正方形角柱を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の制振メカニズムに関する研究, 土木学会論文報告集 A, Vol.63, No.2, pp.312-325, 2007.
- 39) 林田宏二, 久保喜延, 大窪一正, 池田隼人: 正方形断面柱を対象とした剥離干渉法による空力制振メカニズム, 日本風工学会平成 19 年度年次研究発表会梗概集, pp.239-240, 2007.
- 40) 大窪一正, 久保喜延, 林田宏二: B/D=8 矩形断面を対象とした剥離干渉法による空力制振メカニズム, 日本風工学会平成 19 年度年次研究発表会梗概集, pp.241-242, 2007.

謝辞

本論文は、九州工業大学大学院工学研究科建設社会工学専攻博士後期課程に在籍中に行った研究をとりまとめたものです。ここで最初に申し上げなければならないことは、本研究を学位論文の形までにまとめることができたのは、ひとえに九州工業大学工学部建設社会工学科教授 久保喜延先生のおかげであるということです。久保先生は著者の学部生時代からの公私にわたる恩師であり、今回も博士後期課程への入学を快く受け入れて頂いたうえに、主査を引き受けて頂きました。さらに先生が長年研究されている「剥離干渉法」というテーマに取り組みさせて頂くことができたということは出来の悪い教え子である著者にとっては正直なところ大きなプレッシャーでありましたが、同時に喜びでもありました。ここに至るまでに、浅学非才な著者に対して常に暖かい御指導や叱咤激励を頂いたことは一生忘れることができないものであります。改めまして深く御礼申し上げます。

また、本研究を実施するにあたっては、本当に数多くの方々のお力添えを頂きました。以下に列挙するかたちで御礼に代えさせていただきたいと思えます。

大学においては、建設社会工学科准教授 木村吉郎先生には学会や委員会等でお会いする度に暖かいお言葉をかけて頂き、本論文の審査委員をつとめて頂きました。

建設社会工学科教授 幸左賢二先生、教授 永瀬英生先生、機械知能工学科教授 鶴田隆治先生には本論文の審査委員をつとめて頂き、論文制作にあたって貴重な御意見を頂きました。

構造研究室助教 加藤九州男先生には、著者がまだ学部生だった頃から風洞実験に関する多くの御指導を頂き、それが本研究の中で新しい実験システムを構築するための基礎となりました。

当時、構造研究室の学生だった田中洋介氏（現 株式会社日立製作所）、池田隼人氏（現 西日本高速道路株式会社）、現在大学院2年生の野田辰徳君には、導入したばかりのPIVシステムや強制加振装置を使って右往左往しながらも、なんとか信頼性のあるデータを取得できるようになるまで一緒に苦労して研究を行い、膨大な実験データの解析処理を手伝ってもらいました。

また、建設社会工学科の先生およびスタッフの方々には、大学にお伺いした際に十数年前と変わらない暖かさで接して頂きました。

会社においては、当時、鹿島技術研究所先端技術研究部部長であった丹羽正徳氏に学位取得に関して本当に暖かい御支援を頂いて以来、現在に至るまで、大橋欣治所長をはじめとする所幹部の皆様方の御理解と御支援を頂いたことで、会社に籍を置きながらも学位論文を完成することができたと大変感謝しております。

著者が所属する都市防災・風環境グループの近藤宏二グループ長には、学位取得のために研究に取り組みやすい環境を整えていただき、常に御支援・御指導をいただきました。

本郷剛専任研究員には、入社後の著者を風チームの一員として受け入れて頂き、厳しくも常に暖かい御指導をいただきました。

鈴木雅靖上席研究員には、研究の進捗状況などの相談に乗っていただき、投稿論文の査読では常に貴重な御意見を頂きました。

山本学主任研究員には、同じ学位取得挑戦者として夜間や休日など一緒になることが多く、非常に心強く感じたことを覚えており、これまで研究や業務に関して多くの御指導を頂きました。

伊藤嘉晃主任研究員には、お忙しい中、夜な夜な相談させていただき、常に有益なアドバイスを頂

きました。

大窪一正研究員には、新入社員として色々と忙しい身であるにもかかわらず、数々の実験データの解析作業を手伝って頂きました。おかげで当初の予定以上の実験を実施することができ、非常に有益な知見を得ることができました。

中山かほるさん、綿貫久美子さんの両名には、日々の忙しい業務の中でグラフ作成やデータ処理などを手伝って頂きました。

(有)メジャアメント代表取締役 宮永隆司氏には、学生達の実験指導や可視化風洞において煙たいトレーサーの中での PIV 実験など数多くの実験を手伝って頂きました。

大保直人上席研究員には、入社以来一貫して同じグループの土木系の上司として暖かい御支援を頂きました。

環境本部 土谷学課長には、同じグループだったときから現在に至るまで、学位取得に関して気にかけて頂き、叱咤激励を頂きました。

また、著者が十数年前に修士課程に在籍していたときの後輩であり、大切な友人である伊東弘一郎氏にも感謝の意を表したいと思います。非常に残念ながら、彼は 2004 年に帰らぬ人となってしまいました。当時、著者は研究の方向性が見いだせず、「本当に自分なんかで学位が取れるのか？」と悩んでいた時期だったのですが、闘病中においても最期まで常に前向きであった彼のことを思いながら、自分も学位取得までやり遂げようと決意したことを覚えています。彼も私をここまで支えてくれた一人です。

以上掲げさせて頂いた方々以外にも、本当に沢山の方々から、折に触れて暖かい御支援のお言葉を頂きました。改めましてここに御礼を申し上げます。

最後になりますが、ここに至るまでに暖かく筆者を支え、見守ってくれた妻と両親に深い感謝の意を表したいと思います。

平成 19 年 9 月 林田 宏二

関連発表論文

田中洋介, 秋山将之, 久保喜延, 木村吉郎, 加藤九州男, 林田宏二 : PIV を用いた剥離干渉メカニズムの解明, 土木学会第 59 回年次学術講演会, pp.1241-1242, 2004.

林田宏二, 久保喜延, 木村吉郎, 田中洋介, 池田隼人 : PIV を用いた剥離干渉効果のメカニズムに関する研究, 第 54 回理論応用力学講演会, 3B08, pp.405-406, 2005.

田中洋介, 久保喜延, 木村吉郎, 林田宏二, 池田隼人 : 扁平矩形柱における剥離干渉効果の PIV による検討, 土木学会西部支部研究発表会講演概要集, 第 I 部門, pp.43-44, 2005.

池田隼人, 久保喜延, 木村吉郎, 林田宏二 : PIV による矩形柱の剥離干渉効果に関する研究, 日本流体力学年会, AM06-02-0111, 2006.

Koji HAYASHIDA, Yoshinobu KUBO, Yousuke TANAKA, Hayato IKEDA, Kichiro KIMURA : Study on a Mechanism of Separation Interference for the Improvement of Aeroelastic Instability by Particle Image Velocimetry, Proceedings of The Sixth Asia-Pacific Conference on Wind Engineering(APCWE-VI), pp.2075-2086, 2005.

- Koji HAYASHIDA, Yoshinobu KUBO, Yousuke TANAKA, Kichiro KIMURA, Hayato IKEDA : Separation Interference Method (SIM) to Reduce Aerodynamic Responses of Structures, Proceedings of PVP2006-ICPVT-11, 2006 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, 93945 (CD 版), 2006.
- 林田宏二, 久保喜延, 池田隼人, 野田辰徳 : 剥離干渉法による空力振動制振メカニズムに関する研究, 第 19 回風工学シンポジウム, pp.429-434, 2006.
- 林田宏二, 久保喜延, 池田隼人, 大窪一正 : 正方形角柱を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の制振メカニズムに関する研究, 土木学会論文集A, Vol.63, No.2, pp.312-325, 2007.
- 林田宏二, 久保喜延, 大窪一正, 池田隼人 : 各種矩形断面柱を対象とした剥離干渉法による空力弾性振動の制振メカニズム, 日本風工学論文集, Vol.32, No.4 [No.113], 2007.

○印は査読付き論文