

土木研究所資料

複数パイプに及ぼす流体力に関する調査

昭和53年 3 月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

目 次

1. ま え が き.....	1
2. 複数のパイプにおよぼす流体力に関する文献調査.....	2
3. 流れ方向に直列に配置した2円柱にはたらく流体力.....	12
3-1 記号.....	12
3-2 既往の実験結果.....	12
3-3 風洞実験.....	14
4. ま と め.....	17
参考文献.....	17
図集.....	18

1. ま え が き

近年、海中を陸上と同様に空間として利用しようとする時代の要請から各種の海洋構造物が注目をあびているが、これらの構造物は海中という特殊な条件下にあることや、新しい構造形式の採用が考えられるため、作用する外力や耐荷力に関して不確かな点が多い。

当研究室では昨年度より「海洋構造物の設計外力及び耐荷力に関する研究」というテーマで研究を行ってきた。昨年度は海洋構造物としてパイプ構造物を、外力として潮流力をそれぞれ考え、パイプ構造物におよぼす潮流力の影響を明らかにするための前段階として、流れの中におかれたパイプあるいはパイプ列に作用する力およびパイプの挙動に関する文献調査を行ない報告⁽¹⁾した。その時に指摘した問題点の1つに、流れの中におかれた複数のパイプの動的挙動に関する既往の研究が必ずしも十分でない、ということがあった。

そこで今年度は昨年度からの継続として複数パイプに及ぼす流体力を扱った文献を調査するとともに、流れ方向に並べた2本のパイプに作用する流体力を風洞実験により求めた。現時点までに得られた成果をとりまとめてここに報告する。

構造研究室	室 長	成 田 信 之
	研究員	佐 藤 弘 史
	室 員	神 一 夫

2. 複数のパイプにおよぼす流体力に関する文献調査

昨年度に引き続きパイプ構造物におよぼす潮流力に関する文献調査を行なった。その中で複数のパイプにおよぼす流体力を扱った文献を紹介する。

文献は次の様式で整理した。

論文番号 著者名、発表年度

論文題名、掲載論文集名

1. 実験、理論、実測、解説の別
2. 1 の分類が実験の場合、その概要を次の様式で記す。
 - a 流体としては風を用いたか、水を用いたか。
 - b レイノルズ数はどの範囲で実験を行なったか。
 - c パイプの数は単数であったか、複数であったか。
 - d パイプは静止しているものとして、その振動は問題にできなかったか、振動しているとして、その振動の様子を記録したか、あるいは、強制振動させたか。
 - e その他特記する事項。
3. 当論文が解明あるいは説明した事項。
4. 当論文が応用面として主に何を想定しているか。

なお昨年度の調査報告書で文献抄録を掲載したものでも、複数パイプにおよぼす流体力を扱っているものについては再録した。また上述の 1. 2. 4. の各項目については表にまとめた。

論文番号	1				2										3
	実 験	理 論	実 測	解 説	a		b	c		d			e	応 用 面	
					風	水	Re 数の範囲	パイプ		パイプ			その他		
								単 数	複 数	静 止	自 由 振 動	強 制 振 動			
16401	○					○	$1.57 \times 10^4 \sim 2.45 \times 10^4$		○	○				ピア	
17006	○					○	$5 \times 10^4 \sim 10^5$			○		○		一般	
17102				○	○									海洋構造物一般	
17103	○					○	$1.41 \times 10^4 \sim 3.84 \times 10^4$			○	○			一般	
17119	○				○		$10^5 \sim 6.3 \times 10^5$			○	○			一般	
17120	○				○		$10^4 \sim 10^5$			○		○		タワー、アンテナ、コンダクター	
17210	○				○		$10^4 \sim 10^5$			○		○		超高煙突	
17303	○					○	2.2×10^4			○		○		一般	
17304	○				○	○	$1 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^5$			○	○		現場実験もあり	多列円柱構造物	
17305	○					○	$3.9 \times 10^4 \sim 1.7 \times 10^5$			○	○			一般	
17306	○	○				○	10^4 程度		○	○		○		海底パイプライン	
17307	○					○	80 or 4000		○	○				煙突、ケーブル	
17407	○				○		$5.3 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^5$			○	○			煙突、冷却塔、高層建築物、海洋構造物	
17408	○				○		$1.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$		○	○		○		煙突	
17501	○					○	$1.6 \times 10^4 \sim 6.4 \times 10^4$			○	○			一般	
17504	○				○		$\sim 1 \times 10^5$			○		○		煙突、鉄塔、円形建築物、海洋構造物	

16401 R.E. NECE, R.D. UNRUE, A.G. MIRAJGAOKER 1964

Disussions about resistance of cylindrical piers in open-channel flow. J. Hydraulics Div. Proc. A.S.C.E.

J. Hydraulics Div. Proc. A.S.C.E.

1. 実験

2. a. 水

b. $Re=1.57 \times 10^4 \sim 2.45 \times 10^4$

c. 複数

d. 静止

3. フルード数、相対深さ、ピアの並べ方等が、流れにおける円柱のピアの抗力係数に対してどのような影響を与えるか。

4. とくにピア。

17006 今本 博健、武山 正人 1970

開水路流れに設置された円柱の振動特性について

京大防災研究所年報第13号B

1. 実験

2. a. 水

b. $Re = 5 \times 10^4 \sim 10^5$

c. 複数

d. 振動

3. 開水路流れに設置された円柱に作用する流体力の動的現象を取り上げている。

とくに、円柱の振動特性に及ぼす固定位置（上端固定あるいは下端固定）の影響および複数の円柱が設置された場合の円柱間の相互干渉の効果について解明している。

4. 一般

17102 R. N. SAINSBURY, D. KING 1971

The flow induced oscillation of marine structures.

Proc. Instn. Civ. Engrs. 49

1. 実測および解説

2. ———

3. これは Immingham Oil Terminal の建設中におきた構造物、くいの振動に関する報告であり、これらの現象の調査およびその結果施された設計変更について詳説している。Immingham Oil Terminal は平均水深が 75 ft 以上、潮流速度が 5 ノットのところに設置され、らせん状に溶接された厚さ 0.5 in. 直径 24 ~ 30 in. の鋼管ぐいを使用している。この構造物の振動はその大きさばかりでなく、振動方向が一般に潮流方向であった、という点からも注目すべきものである。

4. 海洋構造物一般

17103 永井 荘士郎、倉田 克彦 1971

開水路流れの中の円柱の相互干渉

土木学会論文報告集 第196号

1. 実験

2. a. 水

b. $Re = 1.41 \times 10^4 \sim 3.84 \times 10^4$

c. 複数

d. 静止

3. 流れの方向に平行に2本の円柱を置いた場合、それぞれの円柱に働く力について相互干渉による影響を明らかにしている。上流側円柱に働く抗力および下流側円柱に働く抗力は、2本の円柱間隔 l と直径 D との l/D をパラメータにして調べられており、円柱背後の後流中の速度減少についても言及されている。

4. 一般

17119 N. SUZUKI, H. SATO, M. IUCHI, S. YAMAMOTO 1971

Aerodynamic forces acting on circular cylinders arranged in a longitudinal row

Proc. Int. Conf. Wind Effects on Bldgs and Strct., Tokyo

1. 実験

2. a. 風

b. $Re=10^5 \sim 6.3 \times 10^5$

c. 複数

d. 静止

3. 流れの中におかれた複数の円柱に作用する抗力係数を扱う。実験ケースとしては、単独円柱、流れに直列に並んだ2円柱、6円柱、迎角のついた場合、異なる半径の2円柱等がある。設計に用いるための空気力係数も提案されている。

4. 一般

17120 K. R. COOPER, R. L. WARDLAW 1971

Aeroelastic instabilities in wakes

Proc. Int. Conf. Wind Effects on Bldgs. and Strct., Tokyo

1. 実験

2. a. 風

b. $Re=10^4 \sim 1.2 \times 10^5$ (1部分)

c. 複数

d. 振動

3. 後流の乱れによる振動現象について取扱っている。対象構造物としては、重水工場のタワーや、アンテナ、束ねた電力用コンダクターが想定されており、7つの円柱が並んだ場合、および2次元剛体模型を用いた実験などを実施している。

4. タワー、アンテナ、コンダクター

17210 巻幡 敏秋、与口 正敏 1972

多円柱構造物の空気力についての一考察

第27回年次学術講演概要集

1. 実 験

2. a. 風

b. $Re=10^4 \sim 10^5$

c. 複数

d. 振動～動的な空気力

3. 多円筒構造系の動的空気力（揚力）を構造系全体に加わる力として求めている。

円筒の数は1～4であり、多円筒と鉄塔との複合体として揚力を求めている。

4. 超高煙突

17303 巻幡 敏秋、新井 信一 1973

複数パイルに働く潮流力に関する一実験

第28回年次学術講演概要集 第Ⅱ部

1. 実 験

2. a. 水

b. $Re=2.2 \times 10^4$

c. 複数

d. 自由行動

3. 複数のパイルが流れの方向に直列に配置された場合と三角形配置された場合について、パイル間距離がパイルの流体力にどのような相互干渉を与えているかを、実験的に調べており、その抗力・揚力の振動数の挙動から、干渉の機構を考察している。

4. 一 般

17304 有田 行雄、佐竹 優、藤田 秀夫、多賀谷 宏三 1973

多列円柱構造物に作用する潮流力について

第4回海洋開発シンポジウム講演集

1. 実験および解説
2. a. 水
c. 複数
e. 現場実験も行なっている。
- b. $Re=1 \times 10^4 \sim 3.5 \times 10^5$
d. 静止
3. 単円柱に作用する抗力および複数円柱に作用する抗力について既往の研究成果をとりまとめ、6円柱の大型模型および小型模型を用いて、それぞれ海上曳航試験および水槽試験を実施し、抗力係数を求めている。
4. 多列円柱構造物

17305 永井 莊七郎、倉田 克彦、伊藤 忠 1973

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究

第20回海岸工学講演会論文集

1. 実験
2. a. 水
c. 複数
- b. $Re=3.9 \times 10^4 \sim 1.7 \times 10^5$
d. 静止
3. 開水路流れの中に流れに平行に置かれた2本の円柱のそれぞれに働く力と、2本の円柱間の中心距離との関係を明らかにし、また後流中の流速分布についても検討を加えている。
4. 一般

17306 山本 淳、関田 欣治 1973

潮流海域における浮遊式鋼管構造物および海底パイプライン等に作用する振動力について。

第20回海岸工学講演会論文集

1. 実験および理論

2. a. 水

b. Re は 10^4 のオーダー

c. 単数および複数

d. 自由振動

3. 揚力係数についてパイプ単体の場合、ストローハル数および bluff-ratio を用いてその値を推定する式を誘導している。また単体パイプ、キールタイプスティンガー、トラスタイプスティンガー、トリップワイヤをまいた単体パイプについて揚力係数を測定し、比較検討している。

4. 海底パイプライン

17307 Y. TANIGUCHI, A. OKAJIMA, Y. WATANABE 1973

Stability of a circular cylinder oscillating in a uniform flow or in a wake

Journal of Fluid Mechanics Vol. 61

1. 実験

2. a. 水

b. $Re = 80$ or 4000

c. 複数 & 単数

d. 静止 & 強制振動

3. 水路中に円柱をおき、次のケースについて、抗力、揚力、ストローハル数を測定する。

- 1本の円柱の定常状態および流速方向、流速直角方向に強制振動させた場合
- 流れ方向に直列に並んだ2本の円柱の free な状態および後流側円柱を流速方向、流速直角方向に強制振動させた場合

4. 一般 (煙突、ケーブル etc)

17407 岡島 厚 1974

高レイノズル数における直列2本円柱のまわりの流れ

第29回年次学術講演概要集

1. 実験

2. a. 風

b. $Re=5.3 \times 10^4 \sim 6.3 \times 10^4$

c. 複数

c. 静止

3. 流れの中に直列におかれた2本の円柱に作用する抗力、後流の周波数を測定し、静特性を明らかにした。なお Re 数は亜臨界域～超臨界域までカバーしている。

4. 一般（煙突、冷却塔、高層建築物、海洋構造物）

17408 B. E. LEE 1974

The wind-induced vibration of a pair of model stacks

Proceeding of the Institution of Civil Engineers

1. 実験

2. a. 風

b. $Re=1.5 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$

c. 複数&単数

d. 振動

3. 2本の煙突の風による振動についての風洞実験であり、迎角の変化が応答におよぼす影響についてくわしく実験されている。また振動振幅を小さくするために、固有振動数を変化させたり、ストレークを使用したり、トラスで2本の煙突をつなげたり、煙突の間隔を大きくしたりするなどの手段が検討されている。

4. 煙 突

17501 永井 莊七郎、倉田 克彦 1975

円柱構造物に働く潮流力に関する基礎的研究(第2報)

第22回海岸工学講演会論文集

1. 実験

2. a. 水

b. $Re=1.6 \times 10^4 \sim 6.4 \times 10^4$

c. 複数

d. 静止

3. 開水路流れの中に、流れの方向と直角に並べられた円柱列中の1本の円柱に働く力と、円柱間の中心間隔との関係を求め、円柱に働く力によぼす水路側壁の影響と隣接円柱の影響との相違について検討している。また円柱列背後の流速分布についても同様の検討を加えている。

4. 一般

17504 岡島 厚 1975

直列2本円柱のうず励振

第30回年次学術講演概要集

1. 実験

2. a. 風

b. $Re \sim 1 \times 10^5$ (亜臨界域)

c. 複数

d. 振動

3. 風の中における直列2本円柱の下流側円柱の空力弾性的安定性を扱い、2本の円柱の間隔や減衰率、風速などを変化させそれらが、円柱の応答振幅におよぼす影響を調べた。

4. 一般 (煙突、鉄塔、円形建築物、海洋構造物)

3. 流れ方向に直列に配置した2円柱にはたらく流体力

複数パイプのなかで最も単純な例として流れに直列に配置した2本のパイプを取りあげる。この2本のパイプにはたらく流体力に関して、2で調査した文献からいままでの成果および問題点を取りまとめ報告する。またこの流体力に関しては当研究室で風洞実験により調査を行なったが、この結果もあわせてここに報告する。

3-1 記号

C_D : 抗力係数	- : 平均量を表わす
C_L : 揚力係数	Δ : 変動成分を表わす
D : 円柱の直径	Suffix
Re : レイノズル数 ($= \frac{V \cdot D}{\nu}$)	D : 抗力に関する量
V : 流体の速度	L : 揚力に関する量
X : 2円柱の中心間隔	V : 風速に関する量
ν : 動粘性係数	
S : パワースペクトル	
St : ストロークル数 ($= \frac{f \cdot D}{V}$)	
f : 周波数	
Dr : 抗力	
L : 揚力	
ρ : 流体の密度	
t : 時間	
ℓ : 円柱の長さ	
d : 粒子径	

3-2 既往の実験結果

3-2-1 平均抗力について

流れ方向に並んだ2本のパイプに働く平均抗力については、永井・倉田(17103, 17305)* TANIDA・OKAJIMA・WATANABE(17307), 岡島(17407), SUZUKI, SATO, IUCHI(17119)らの研究がある。

これらの実験結果をまとめて、図1～図4に示す。図1は、 X/D を横軸にとり、 Re をパラ

*参考文献の番号は第2章で示した論文番号で表示する。

メータにして、上流側パイプの $\overline{C_D}$ の変化を示したものである。図2は同じく、下流側パイプの $\overline{C_D}$ の変化を示したものである。図3は、 Re 数を横軸にとり、ある X/D での上流側パイプの $\overline{C_D}$ を示したものである。図3は、 Re 数を横軸にとり、ある X/D での上流側パイプの $\overline{C_D}$ を示したものであり、図4は、同じく下流側パイプの $\overline{C_D}$ を示したものである。なお、永井・倉田らは、2本のパイプに働く抗力を表示する際に、単独での抗力との比で表現しているので、ここでは、単独の抗力係数を1.25とし、その比との積を用いて、ここに図示した。

次にこれらの結果から読みとれる $\overline{C_D}$ の特性について述べる。図1、図2には X/D と $\overline{C_D}$ との関係を示したが、 Re 数および実験手法によって、 $\overline{C_D}$ の値にはかなりバラつきがあることがわかる。 Re 数が亜臨界域のものは、 X/D が5以上になると $\overline{C_D}$ の変化がゆるやかになるが、 X/D が10程度では、上流側のパイプの $\overline{C_D}$ と下流側のそれとでは、値にかなりの差異があり、上流側の方が大きいことがわかる。 X/D が5以下の場合、上流側パイプの $\overline{C_D}$ は永井・倉田の結果を除いては、 $X/D = 2 \sim 4$ の間で、いったん減少することが読みとれる。下流側パイプの $\overline{C_D}$ は、 X/D が4以下のとき負の値をとる事がわかる。 Re 数が超臨界域の場合は、上流側も下流側も、値・特性とも亜臨界域でのそれと全く異なる事がわかる。超臨界域においては、 $\overline{C_D}$ は X/D にはほとんど影響をうけず一定であり、下流側のパイプの値の方が上流側のそれより大きい。臨界域での $\overline{C_D}$ は亜臨界域と超臨界域の中間的な値をもつ。

図3、図4には Re 数と $\overline{C_D}$ との関係を図示した。17103, 17305の結果は直線で示してあるが、これは $\overline{C_D}$ の値に対応する Re 数が範囲で示されたためである。上流側のパイプの $\overline{C_D}$ と Re 数の関係は、 X/D の値にかかわらず、臨界 Re 数に近づくと急激に減少するという傾向を示している。また実験方法の差による結果の不連続といった事が比較的小さい。下流側のパイプの $\overline{C_D}$ と Re 数の関係は、 X/D が3以下では、臨界レイノルズ数に近くなるにつれて、急激に負の値から正の値に変化している事がわかる。 X/D が4以上では、その変化はゆるやかになってくる。また、17103, 17305の結果と他の結果は差違が大きいことが、 X/D が3および5の場合の図から読みとれる。

3-2-2 変動抗力および変動揚力について

流れ方向に直列に配置した円柱の変動抗力については研究が少ない。TANIDA・OKAJIMA WATANABE⁽¹⁷³⁰⁷⁾ は下流側の円柱を流れ方向に強制振動させたときの非定常抗力を求め、 X/D が3, 5, 7の場合のいずれも運動を抑制するような力となることを示している。一方今本・武山⁽¹⁷⁰⁰⁶⁾ は円柱の配置は流れ方向に直列に2本ではないが、複数の円柱を流れの中におき円柱のひずみにより流体力を測定したが、その結果流れ方向には無視できない程度の振動が固有振動数に近い卓越周波数で発生したことを報告している。

流れ方向に直列に配置した円柱にはたらく変動揚力については、巻幡・新井⁽¹⁷³⁰³⁾、山本

・関田(17306), TANIDA・OKAJIMA・WATANABE らの研究がある。これらの成果を図5に示す。 ΔC_L の値は実験手法によりばらつきが多く特性もつかみにくい。ただ、下流側円柱の ΔC_L が上流側円柱の ΔC_L に比べ2~5倍ほど大きいことはよくわかる。

3-3 風洞実験

3-3-1 実験方法および実験条件

実験は建設省土木研究所の橋梁試験用風洞を用いて行なった。風洞の概要は以下のとおりである。

形式；水平単回路回流式風洞（開放・閉鎖併用可能）

寸法；吹出口 $3,000 \times 1,800 \text{ mm}$ （角切辺長 300 mm ）

測定部 $2,000 \text{ mm}$

回路長 $7,000 \text{ mm}$

絞り比；1：6.25

送風機；直径 $3,300 \text{ mm}$

出力 100 kW

風速；最大 20 m/s （開放時）

最大 21 m/s （閉鎖時）

なお実験時には風洞測定部は閉鎖した。

実験に用いた円柱はアルミニウム製のパイプと発泡スチロールで作成した。これを図11に示す。ここに示したように円柱はa~dの4つの部分から成り、bに加わる空気力はdを通じて風洞壁に加わるようにして、aに加わる空気力のみをcを通じて変動空気力天秤により計測した。円柱をaとbに分けたのは高い風速で抗力成分が変動空気力天秤の容量を越えないようにするためである。模型の表面は発泡スチロールを切出した状態のままであり、必ずしも滑らかではない。円柱の外径はaおよびbを変えることにより変化させた。今回の実験では外径 150 mm と 250 mm の円柱で実験を行なった。円柱測定部（a, c, および支持具）の固有振動数は外径 150 mm の場合で 12 Hz 、外径 250 mm の場合で 10 Hz 程度であり、減衰率は両者とも 0.03 程度であった。2本の円柱の相互の干渉を調べるために、図11に示した測定円柱のほかに測定円柱と同じ幾何学形状を有するパイプを測定円柱の上流あるいは下流の位置に固定した。このようすを図12に示す。

空気力は変動空気力天秤により測定した。これは図11のcの両端に接続されており、空気力によって生ずる両端の反力をひずみゲージにより測定するようになっている。両端の変動空気力天秤からの出力を加え、ダイナミックストレインアンプを通じてデータレコーダに記録し、解析を行なった。記録は抗力、揚力、モーメントの3成分をとったが、モーメントは無視でき

るほど小さかったのでこの解析は省略した。

空気力係数は次式で定義をした。

$$\bar{C}_D = \frac{\bar{D}_r}{\frac{1}{2} \rho V^2 D \ell}, \quad \Delta C_D = \frac{\sqrt{\Delta D_r(t)^2}}{\frac{1}{2} \rho V^2 D \ell}, \quad \Delta C_L = \frac{\sqrt{\Delta L(t)^2}}{\frac{1}{2} \rho V^2 D \ell} \quad (3.1. a \sim c)$$

$$\text{ここに } D_r(t) = \bar{D}_r + \Delta D_r(t), \quad L(t) = \Delta L(t) \quad (3.2. a, b)$$

空気力係数やレイノルズ数を求める際に必要な風速は、模型上流に設置したピトー管およびベッツ型マノメータによって動圧を求め、計算した。また測定用円柱の後流の変動風速の測定には熱線風速計を用いた。熱線プローブの位置を図12に示す。

今回の実験したレイノルズ数範囲は、外径150mmの円柱で $1.5 \times 10^4 \sim 8.0 \times 10^4$ 、外径250mmの円柱で $2.5 \times 10^4 \sim 1.3 \times 10^5$ 程度である。実験ケースを表11に示す。

表11 実験ケース

模型直径(D)	測定用パイプ	模型中心間隔(X)
150mm	上流	0*, 3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D
150mm	下流	3D, 4D, 5D, 6D, 7D, 8D
250mm	上流	0*, 2D, 3D, 4D, 5D
250mm	下流	2D, 3D, 4D, 5D, 6D

* 単独円柱の測定である。

3-3-2 実験結果

実験の結果を図13～図15に示す。図13は X/D をパラメータにしてRe数と $\bar{C}_D$, ΔC_D , ΔC_L の関係を示したものである。ある設定風速においては振幅の大きな振動が、流れ方向および流れ直角方向に見られた。比較的風速の低い領域で流れ方向の振動がおり、風速が高くなると流れ直角方向の振動に変わっていった。これは ΔC_D および ΔC_L の増減に対応している。したがって ΔC_D あるいは ΔC_L の値が大きな領域では円柱模型の2次元性が保たれているとはいえず、今回求めた $\bar{C}_D$ の値もその点を考慮して評価しなければならない。

図14はRe数をパラメータにして X/D と $\bar{C}_D$ の関係を示したものである。また図15は抗力、揚力および測定円柱後流風速の変動分を周波数分析したものである。パワースペクトルを求める方法としてはMEM法を用いた。図15ではピーク値の周波数およびストローハル数もあわせて示した。

3-3-3 考察

a. $\overline{C_D}$ について

図1 3.1 および図13. 14 に単独円柱について Re 数と $\overline{C_D}$ の関係が示されている。この図から判断するとこの円柱模型の臨界レイノルズ数は $9 \times 10^4 \sim 10^5$ 付近であると考えられる。これよりこの円柱表面の粗さを推定すれば、岡島、中村⁽²⁾らの研究より d/D がほぼ 2.5×10^{-3} である。

流れに直列に2本の円柱を配置した場合は、Re 数が亜臨界域であれば $\overline{C_D}$ は Re 数によらず一定であり、Re 数が臨界 Re 数の前後で上流側円柱の $\overline{C_D}$ は減少し、下流側円柱の $\overline{C_D}$ は増加する。この傾向は、定性的には図3 および図4 に示した結果と一致する。

$\overline{C_D}$ と X/D との関係は $D = 150\text{mm}$ の上流側円柱に関しては X/D が4程度からほぼ単独円柱の $\overline{C_D}$ に等しくなる。 $D = 250\text{mm}$ の上流側円柱の $\overline{C_D}$ は亜臨界域のものは X/D が大きくなるに従い増加の傾向を見せているが、 $X/D = 5$ でも単独円柱の $\overline{C_D}$ より値は小さい。超臨界域のものは X/D にかかわらずほぼ一定である。下流側円柱は亜臨界域のものも超臨界域のものも同様に X/D が3~5の間で $\overline{C_D}$ が負から正になり、その後 $\overline{C_D}$ の変化は小さくなる。これらの結果は亜臨界域のものについては図1 および図2 に示した結果のうちのあつるものと定性的に一致するが、超臨界域については、上流側円柱としての傾向は一致し、下流側円柱としての傾向は一致していない。

b. ΔC_D , ΔC_L および円柱後流変動風速について

今回の実験で測定した変動空気力は、空気力を直接測定するのではなく、円柱測定部を含むアルミパイプのはりの反力として間接的に測定している。すなわち構造系によって増幅させた変動空気力を測定していることになる。今回の実験のように構造系の固有振動数が後流渦の周波数に近く、しかも構造減衰が小さい場合は増幅率もかなり大きいであろう。したがって ΔC_D および ΔC_L を単に Re 数あるいは X/D の関数として評価して他の結果と比較するのは無意味と思われる。

興味深い点としてあげられるのは、上流側円柱は ΔC_D がかなり大きいのに対し、下流側円柱は ΔC_L がかなり大きいことである。また周波数解析を行なうと、 ΔC_D は固有振動数成分が卓越し、それと共に渦の周波数の2倍の周波数付近にピークが見られるのに対し、 ΔC_L は固有振動数と渦の周波数付近にピークが見られる。円柱後流の変動風速のパワースペクトルは上流側円柱の後方では渦の周波数付近に鋭いピークが見られるが下流側円柱の後方ではなだらかな形になっている。

4. ま と め

今回の調査内容をまとめると次のようになる。

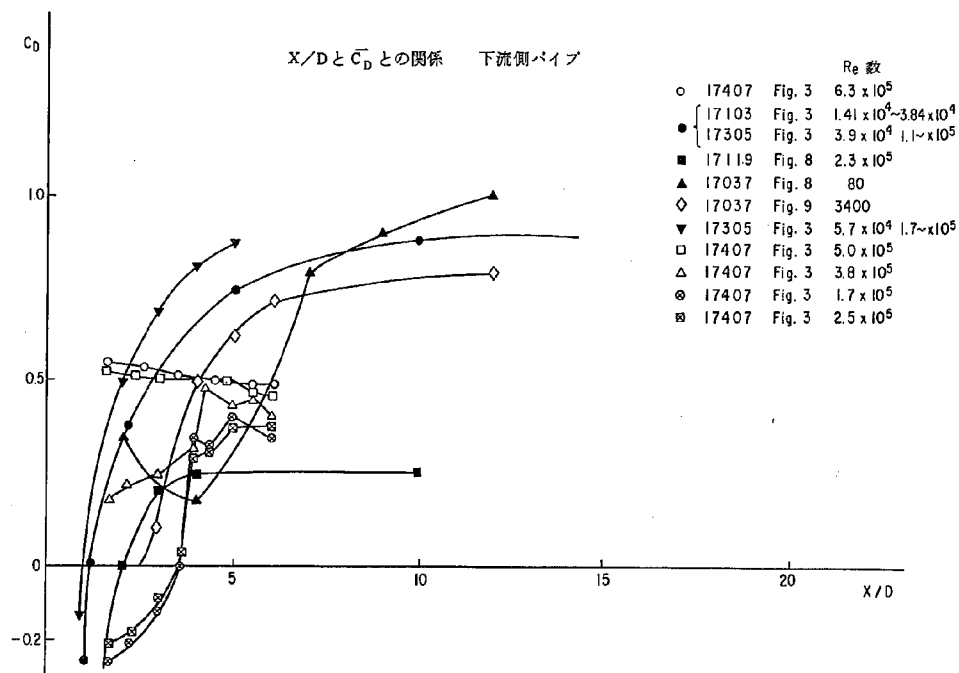
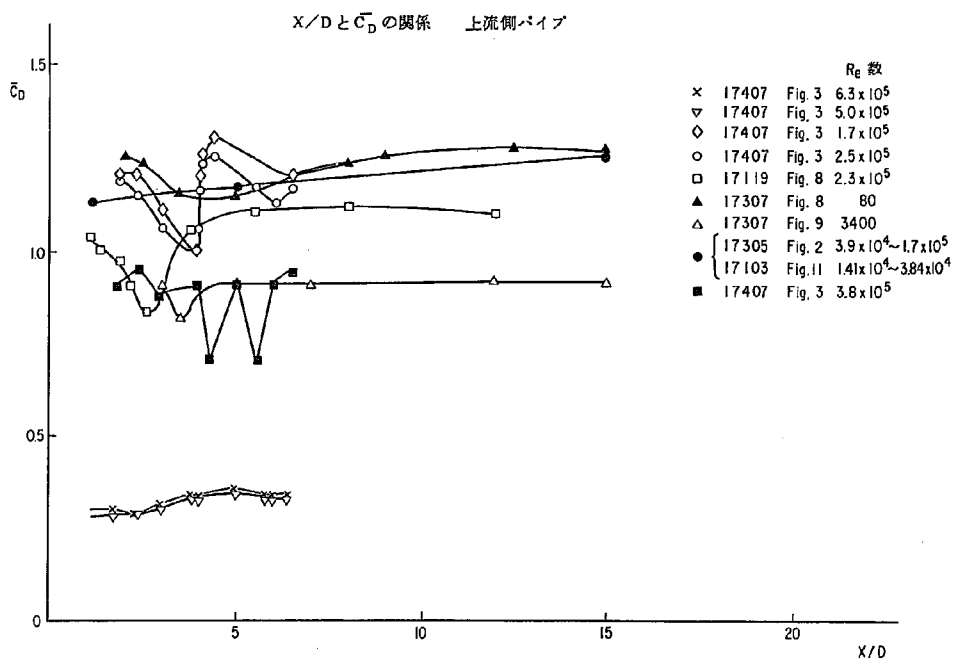
- 4-1 複数パイプに及ぼす流体力を扱った文献を調査し、抄録として整理した。
- 4-2 流れに直列に配置した2本の円柱にはたらく流体力に関する既往の実験結果をまとめて、図に示した。
- 4-3 4-2に関連した風洞実験を行ない、既往の結果と比較した。

また今後の課題としては次の事項がある。

- 4-4 流れに直列に配置した2本の円柱にはたらく平均抗力に関する既往の実験結果にはばらつきが多いのでこの原因が何であるかを検討する必要がある。
- 4-5 流れ方向の変動空気力あるいは振動に関しては従来無視できるほど小さいとされていたが、今回の実験ではかなり大きな変動空気力が検出された。この原因についても今後調査する必要がある。
- 4-6 変動している流体力の検出は圧力計などを用いて直接計測する場合と構造系を通じて間接的に測定する場合があるが、両者は常に等しいとは限らない。固有振動後、減衰率などをパラメータにして両者の関係を調べる。

参考文献

1. 建設省土木研究所；パイプ構造物におよぼす潮流力に関する文献調査、土木研究所資料第1231号、1977.3
2. 岡島厚・中村泰治；高レイノルズ数範囲における表面粗さのある円柱まわりの流れ、九州大学応力研究所報第40号、1973



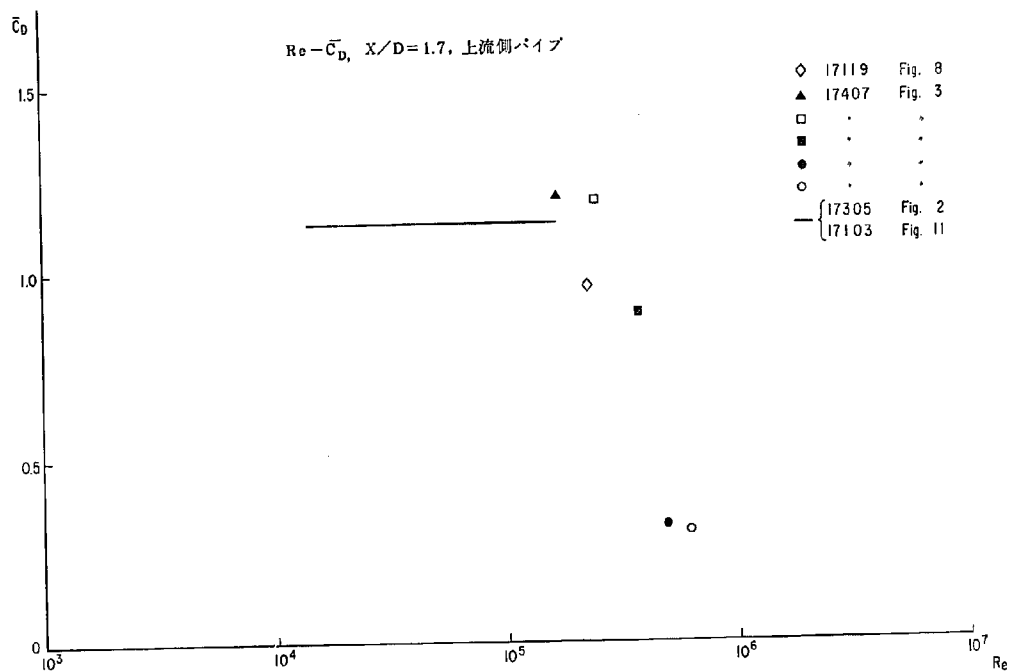


図 3 - 1

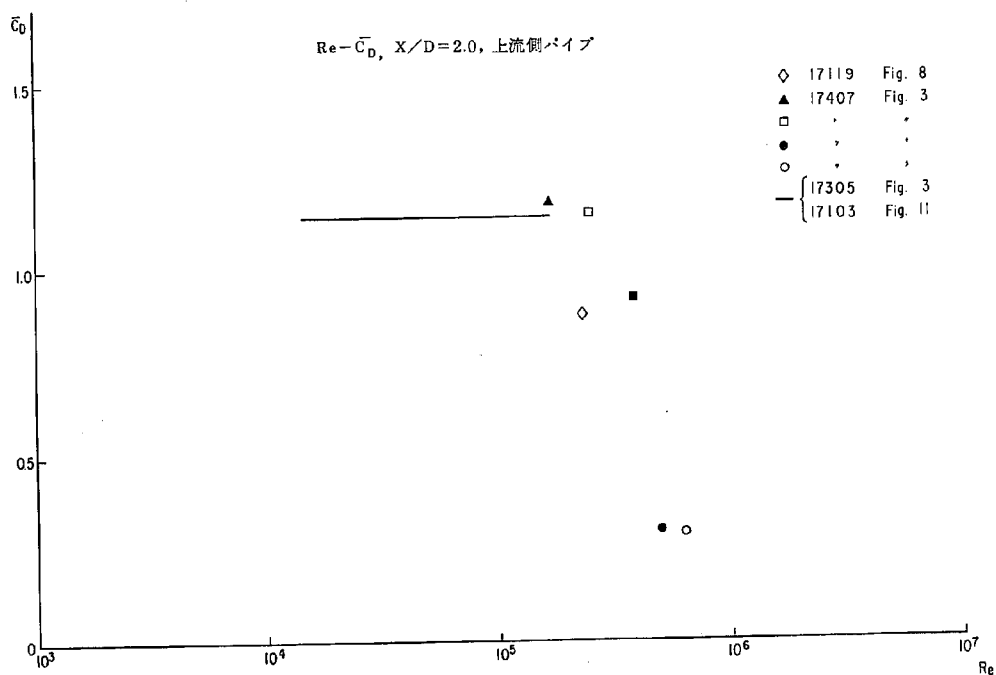


図 3 - 2

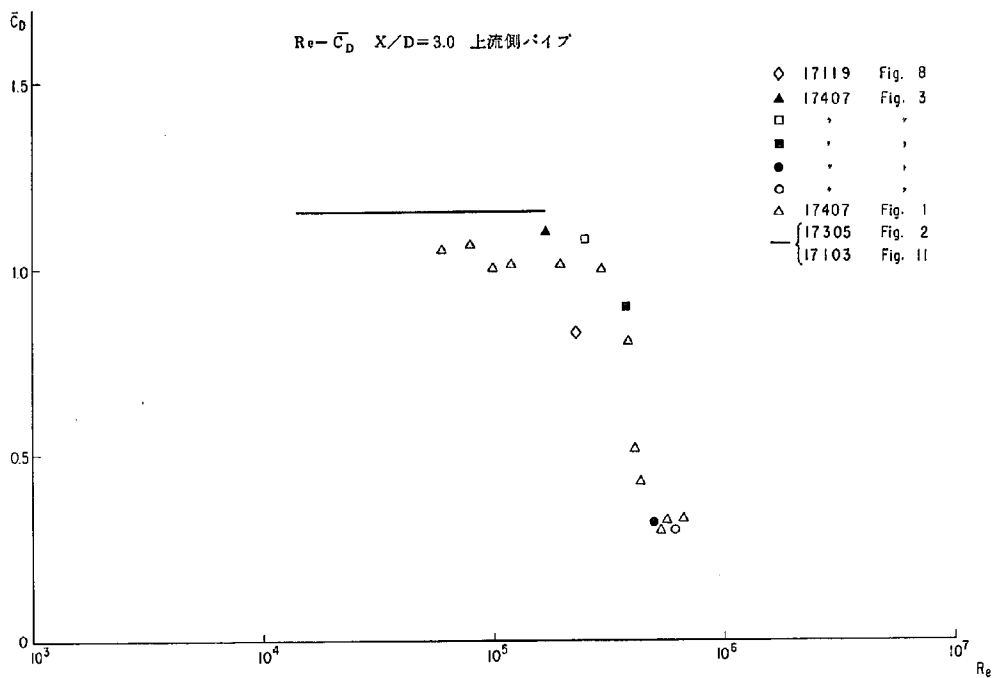


図 3-3

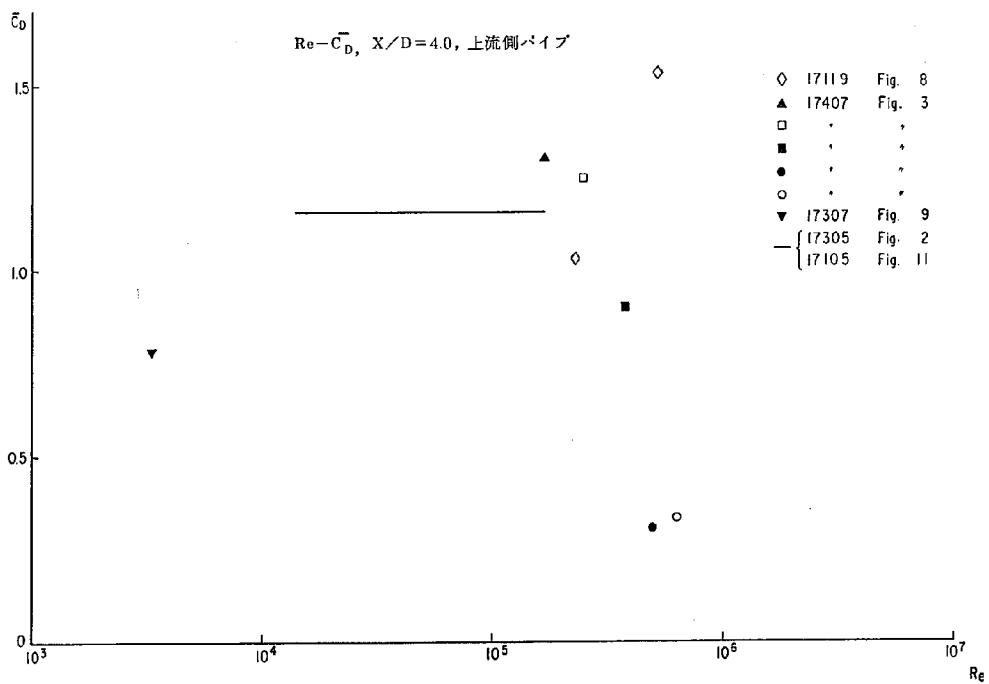
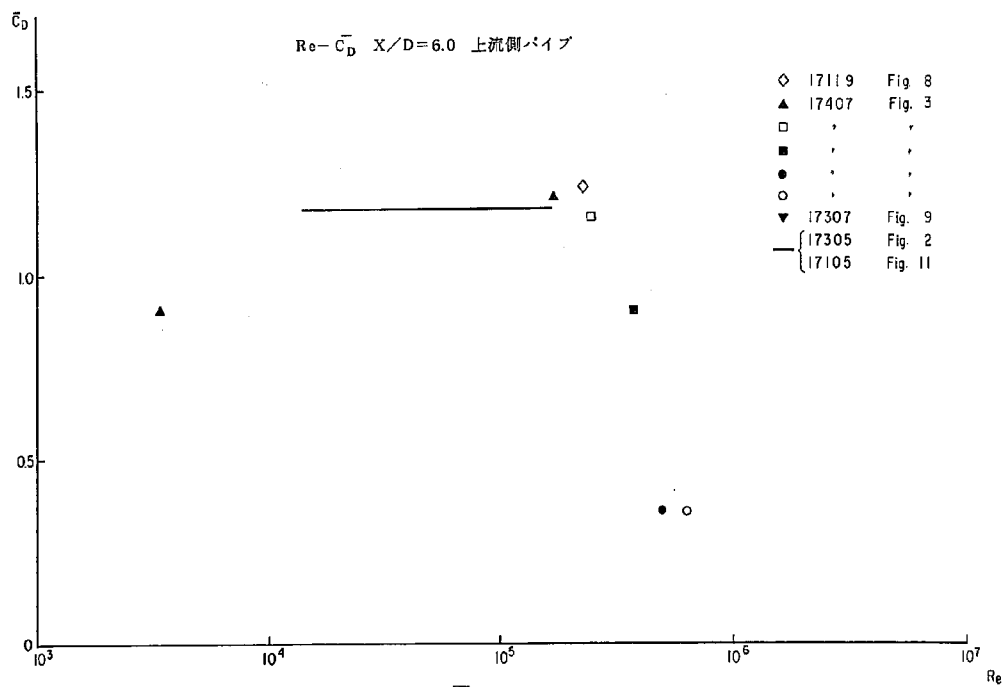
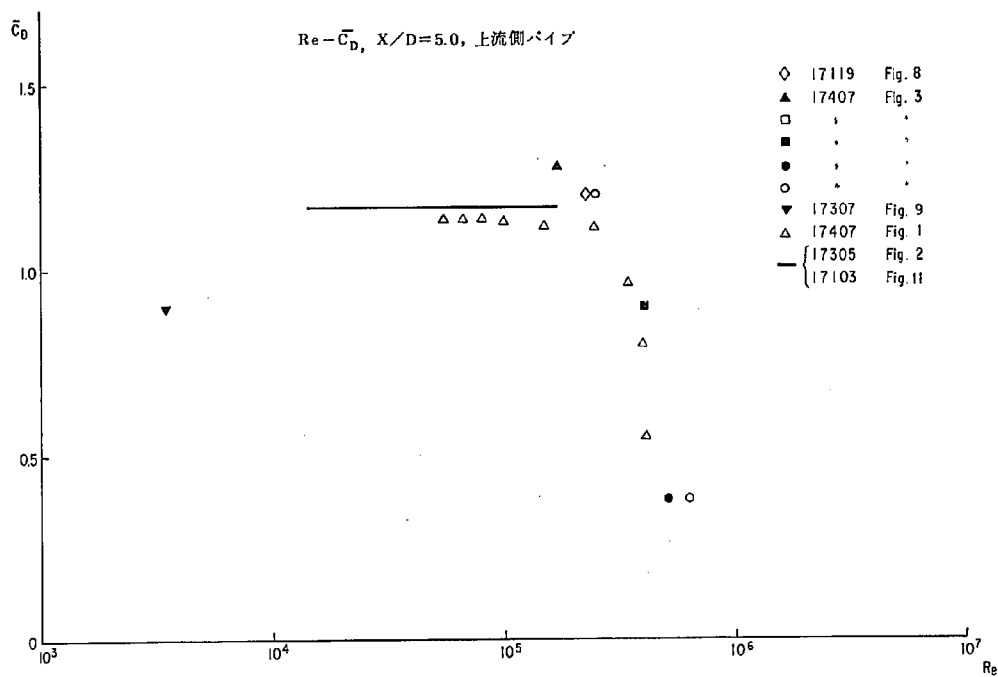
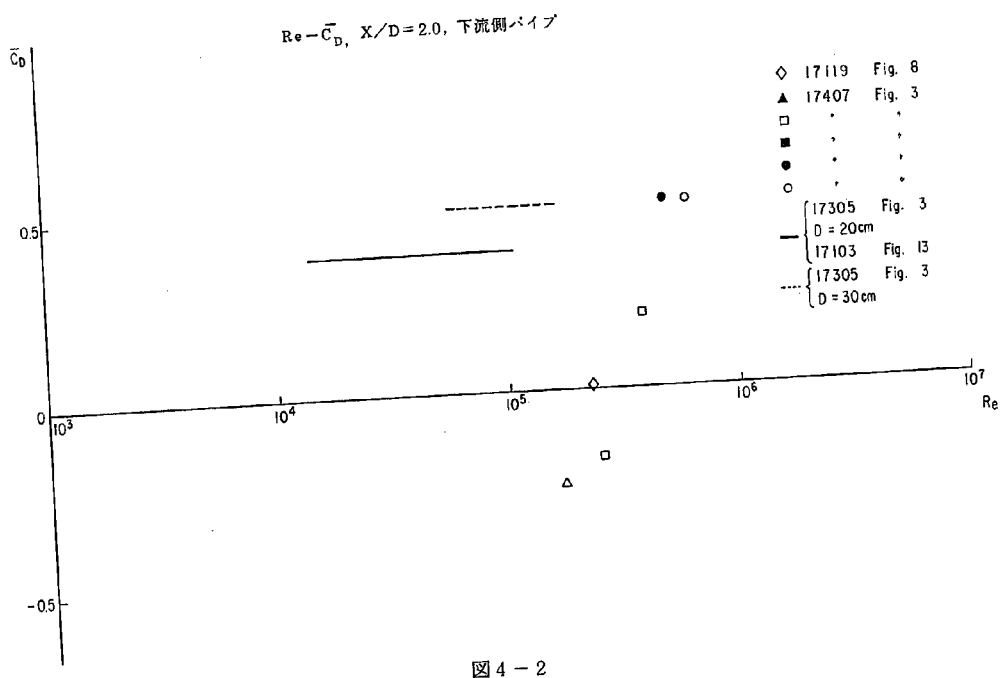
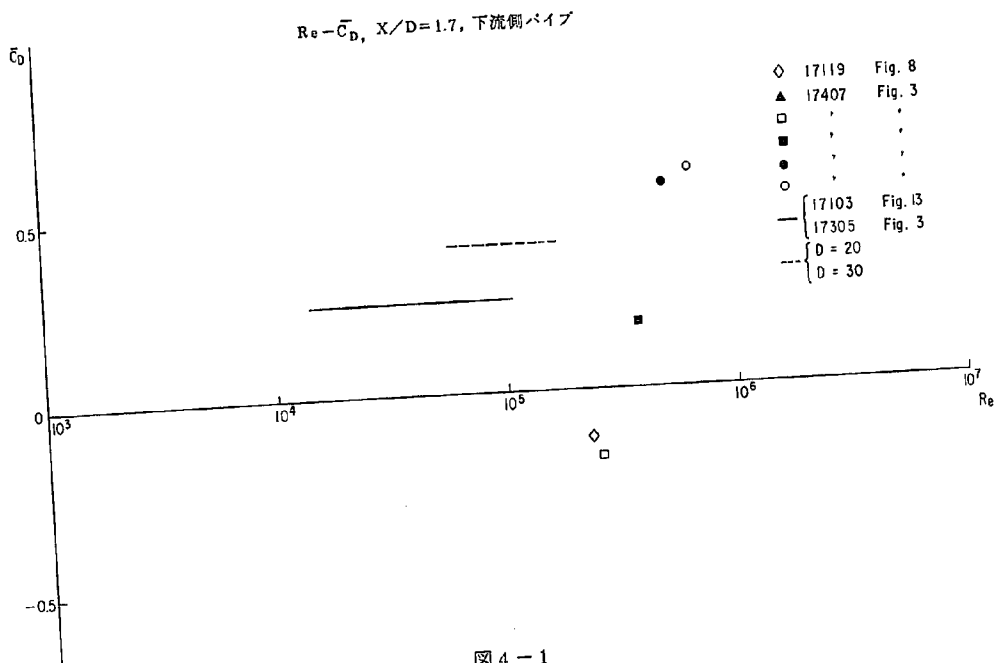
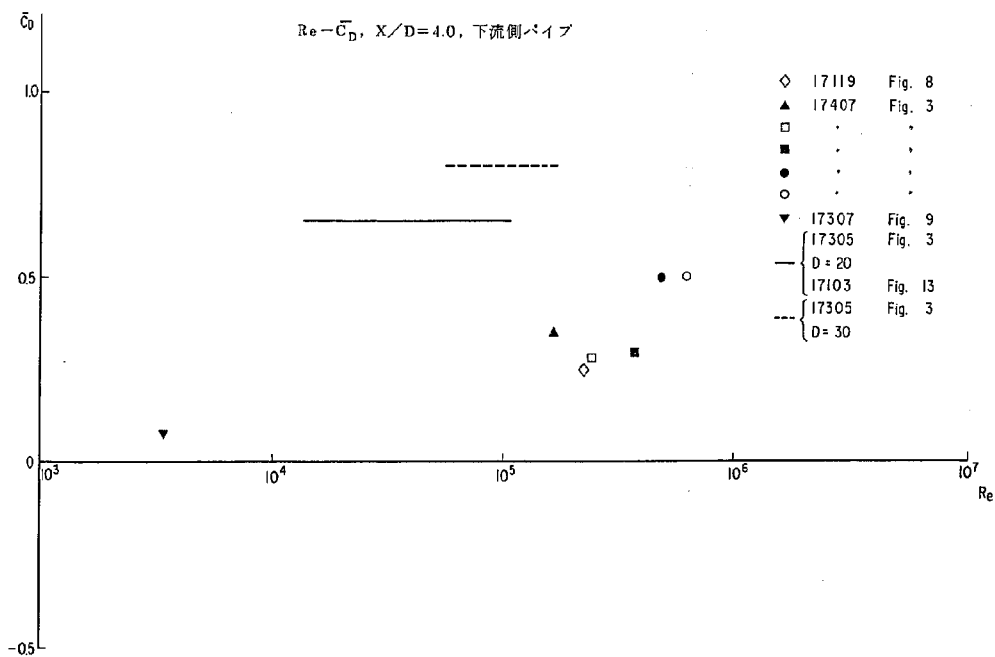
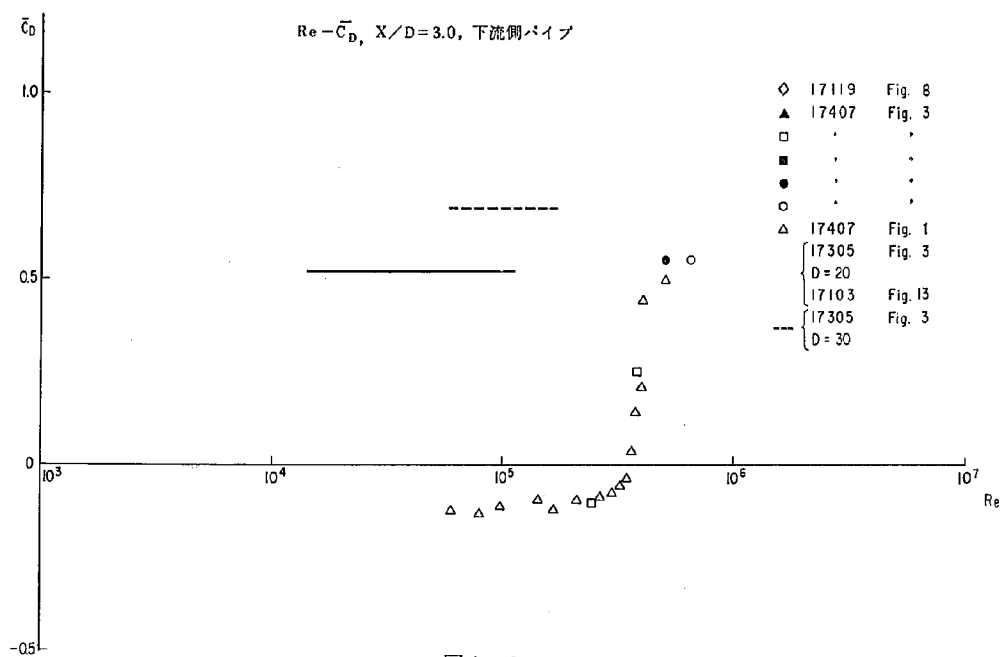
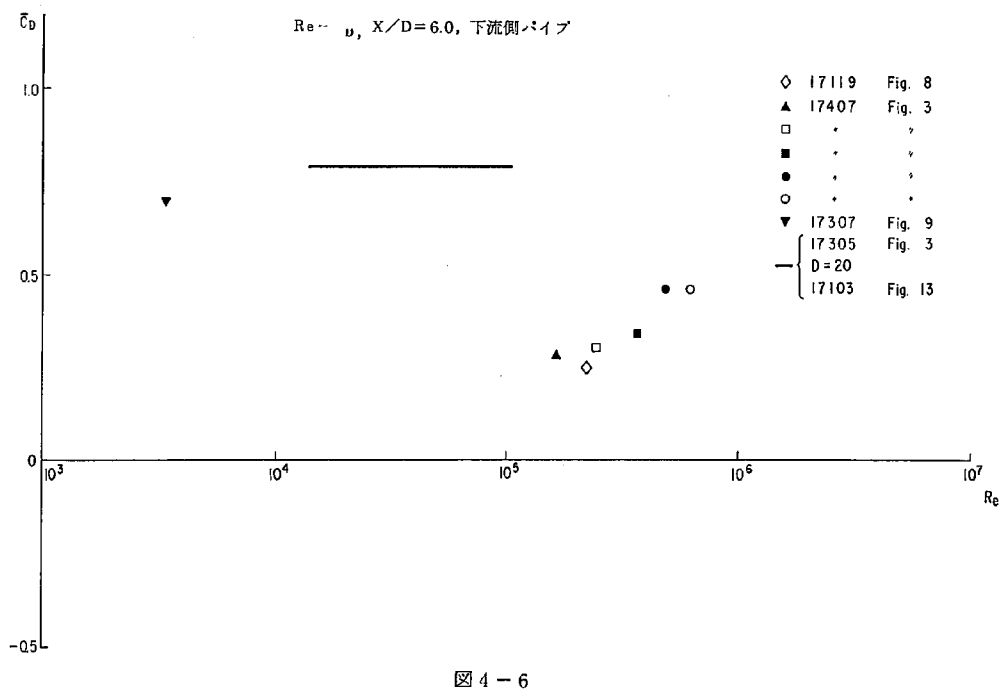
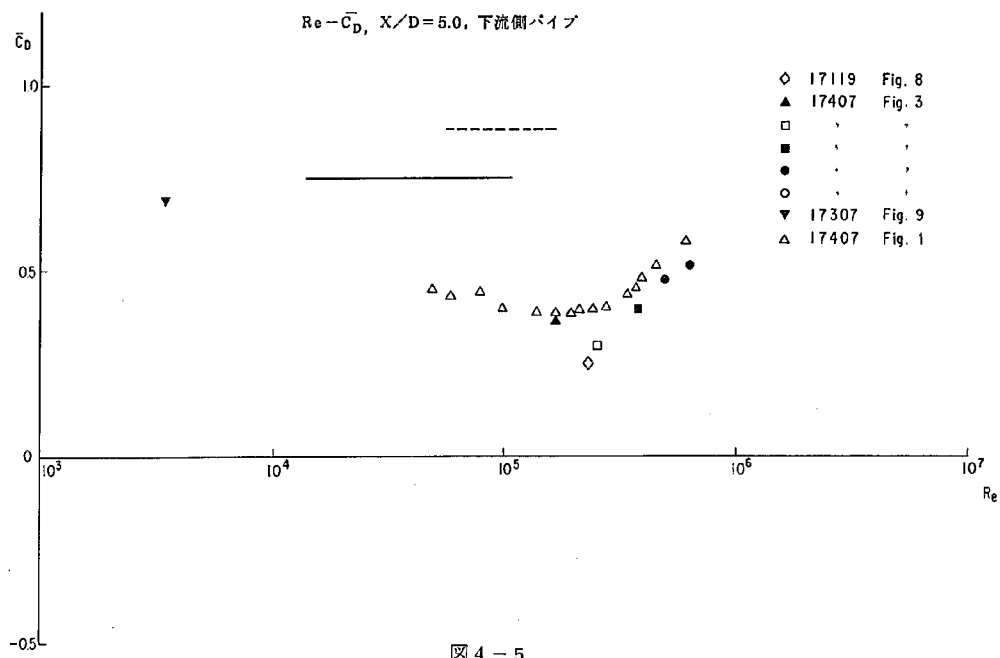


図 3-4









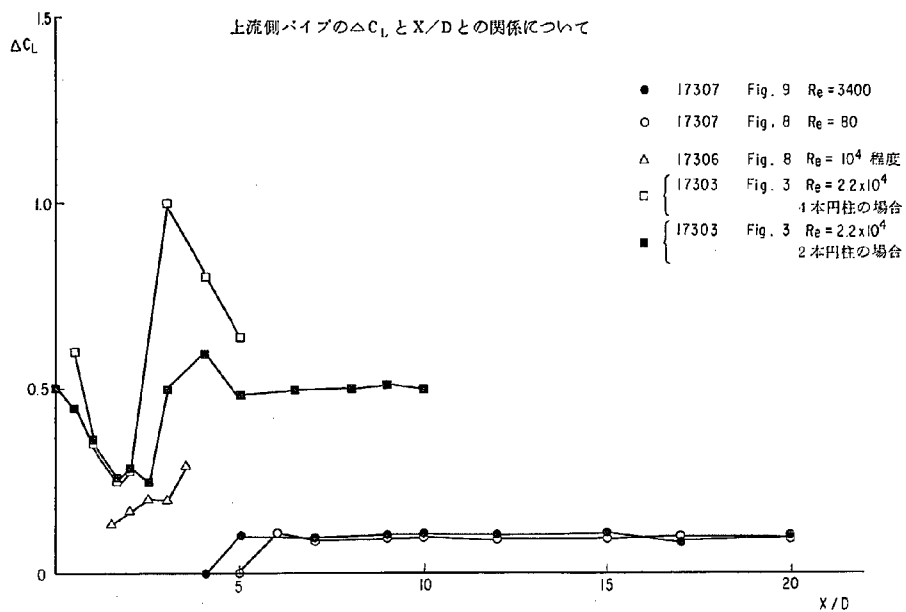


図 5.1

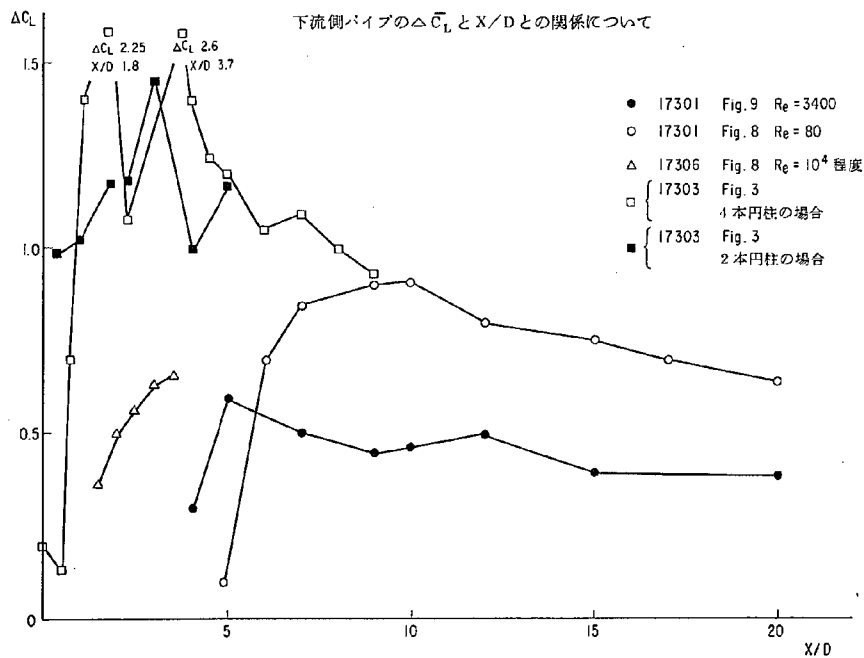


図 5.2

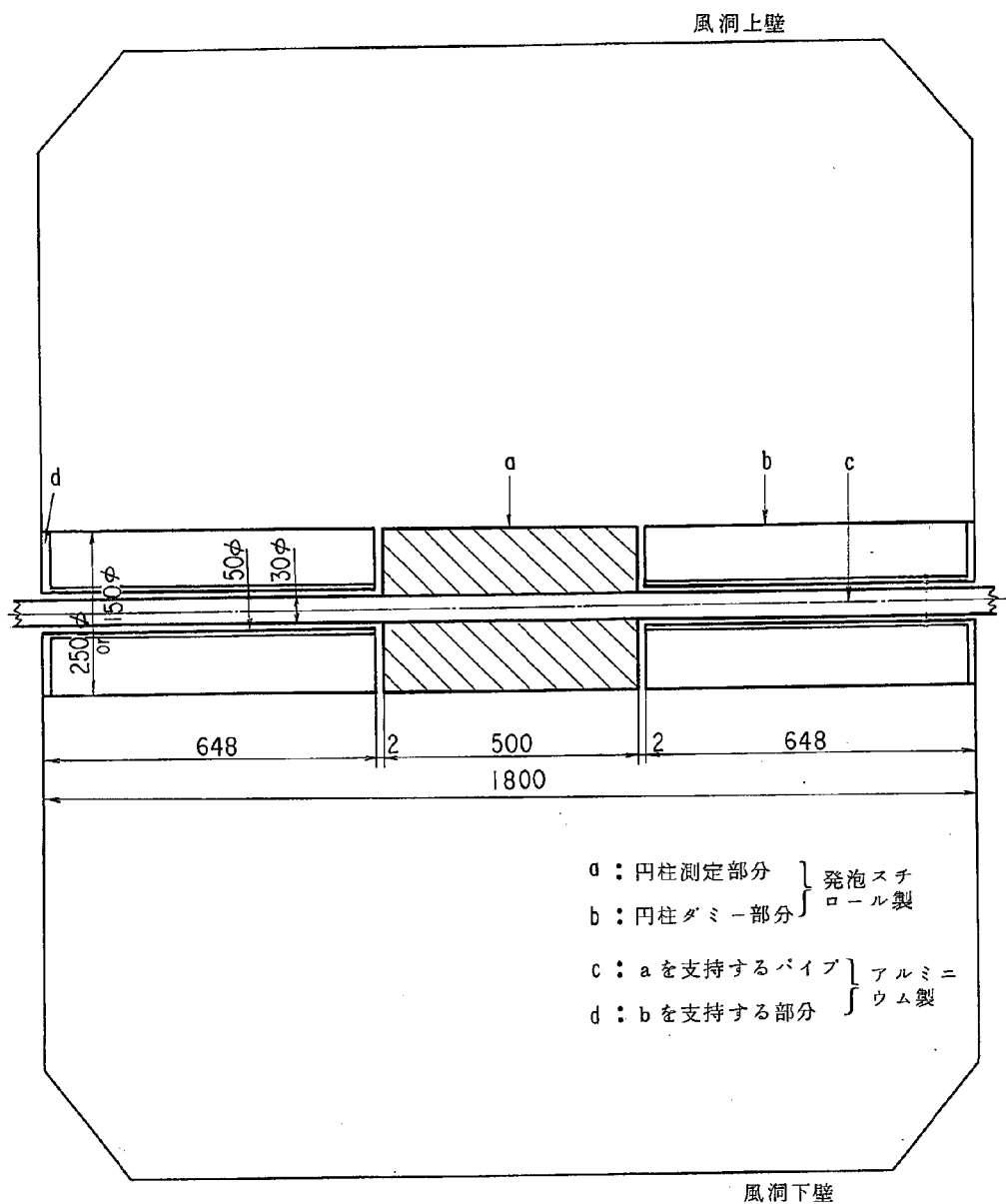


図 11 模型円柱の断面図

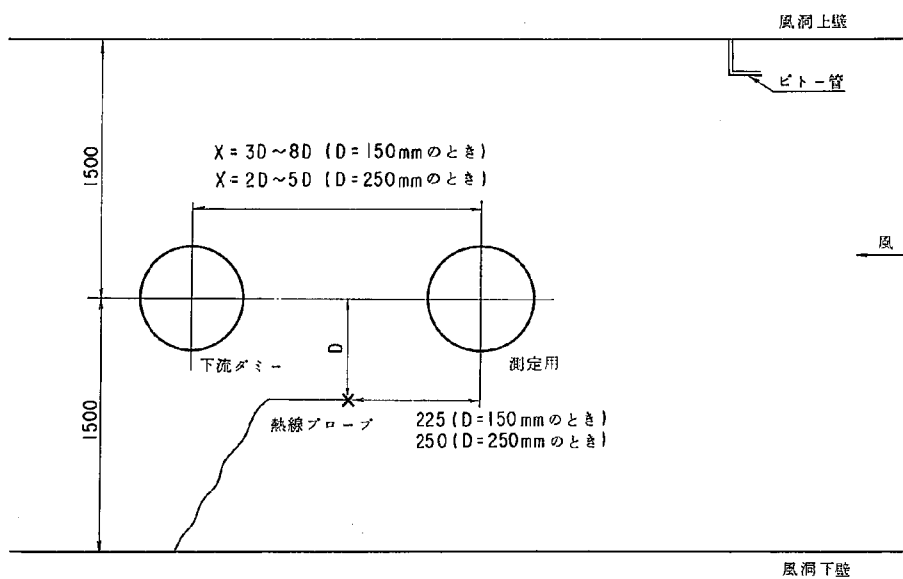


図 12.1 上流側円柱測定の場合

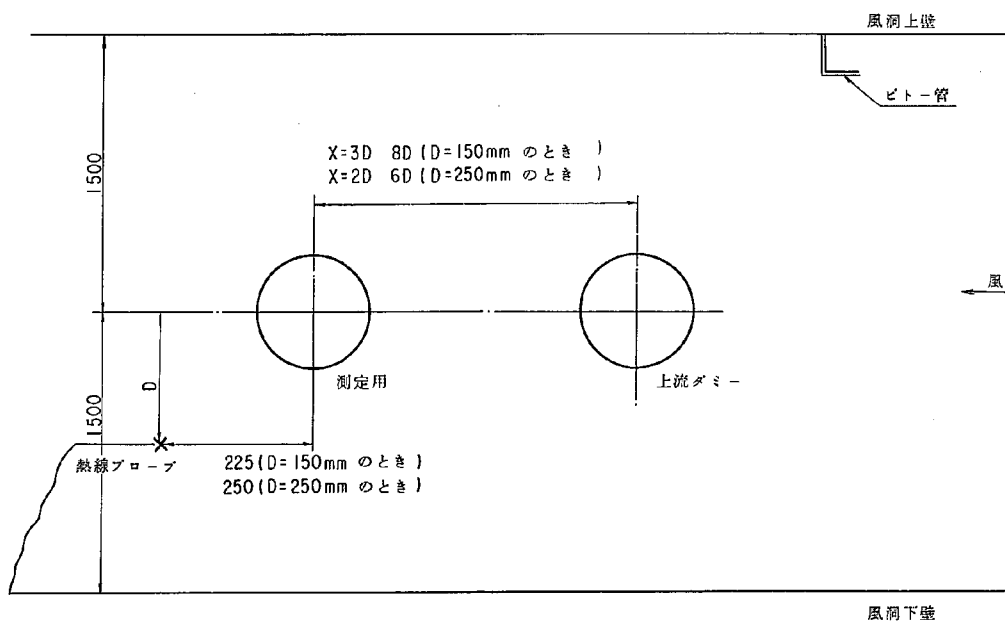


図 12.2 下流側円柱測定の場合

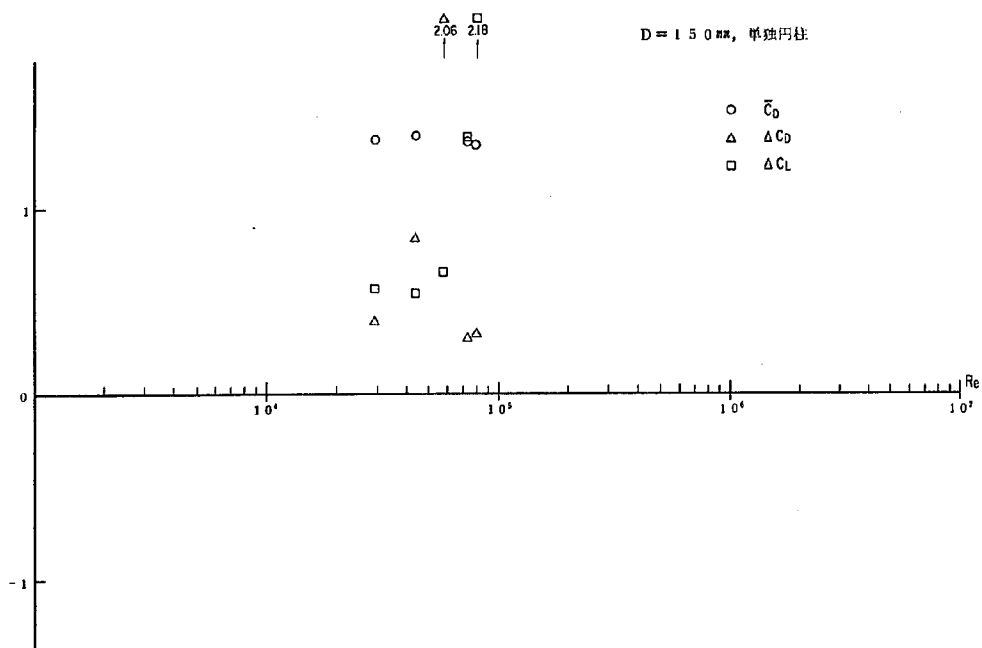


图 13.1

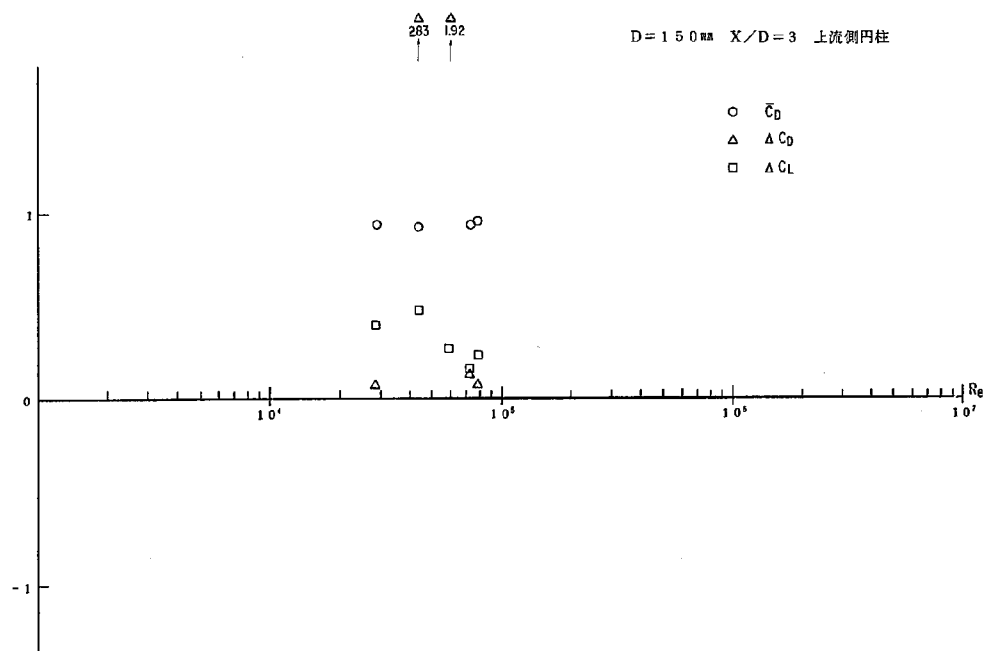


图 13.2

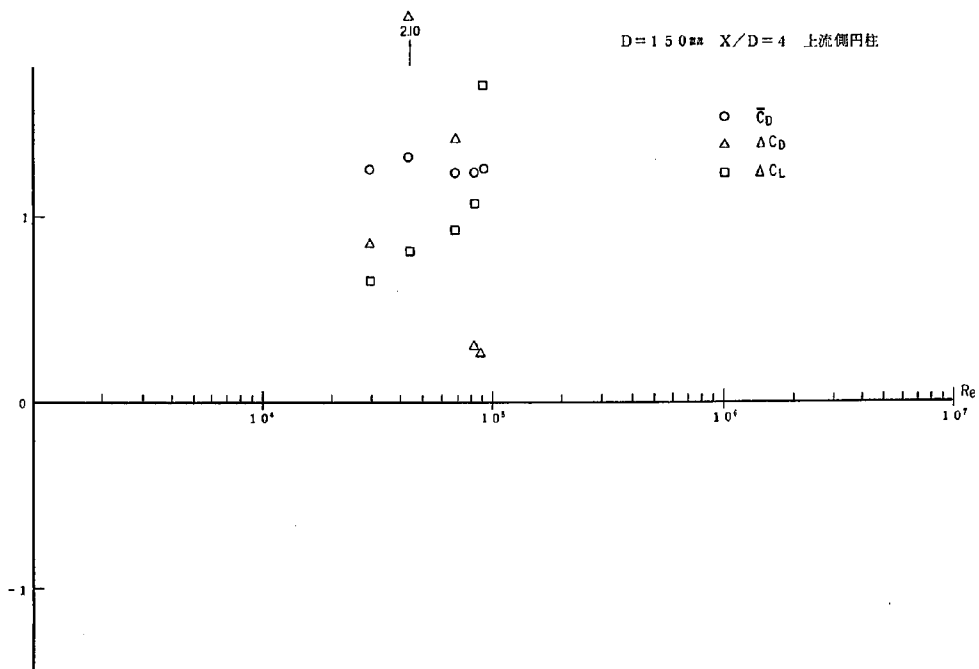


図 13.3

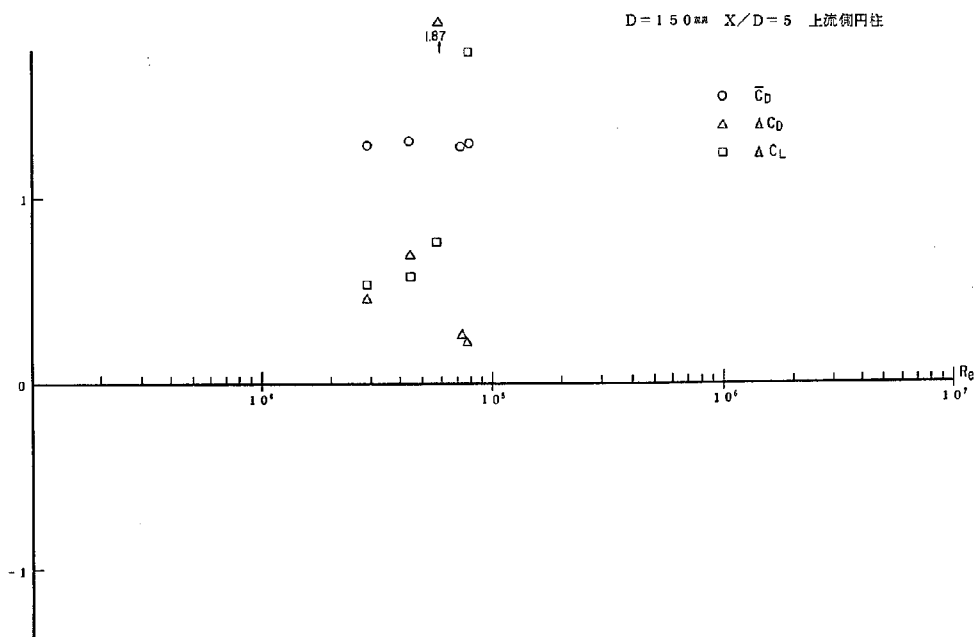


図 13.4

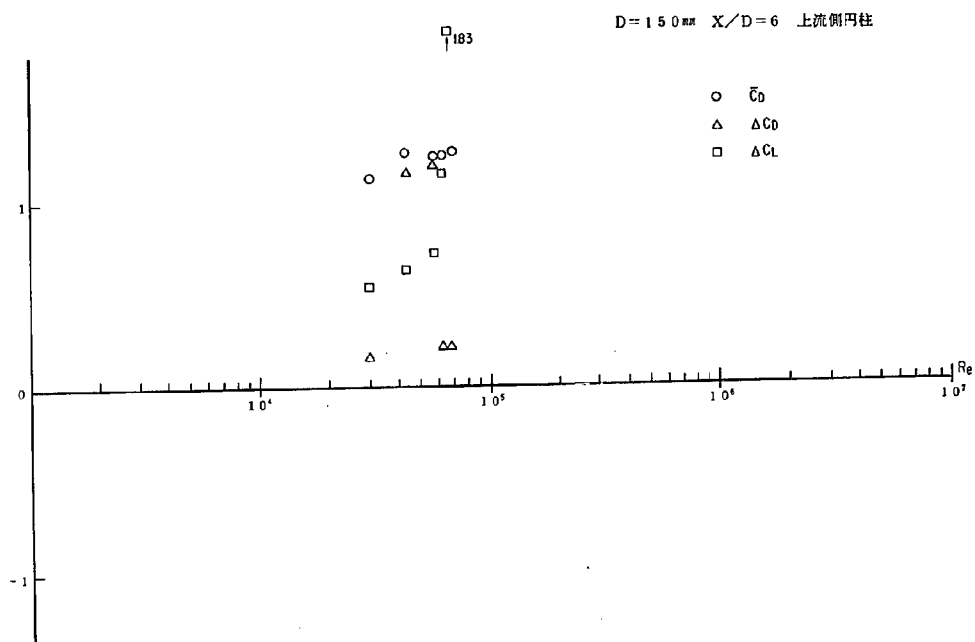


図 13.5

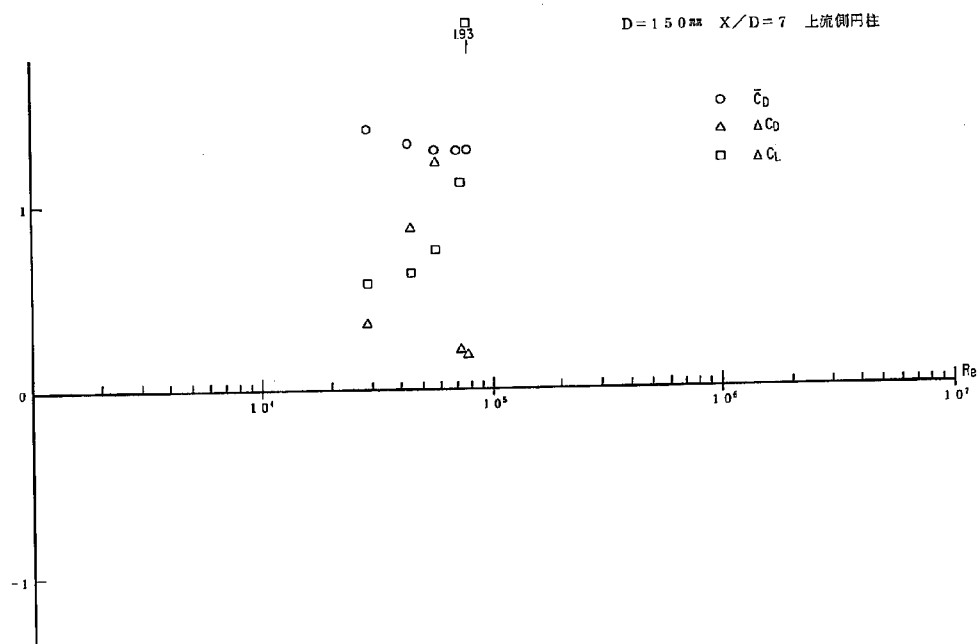


図 13.6

$D = 150\text{mm}$ $X/D = 8$ 上流側円柱

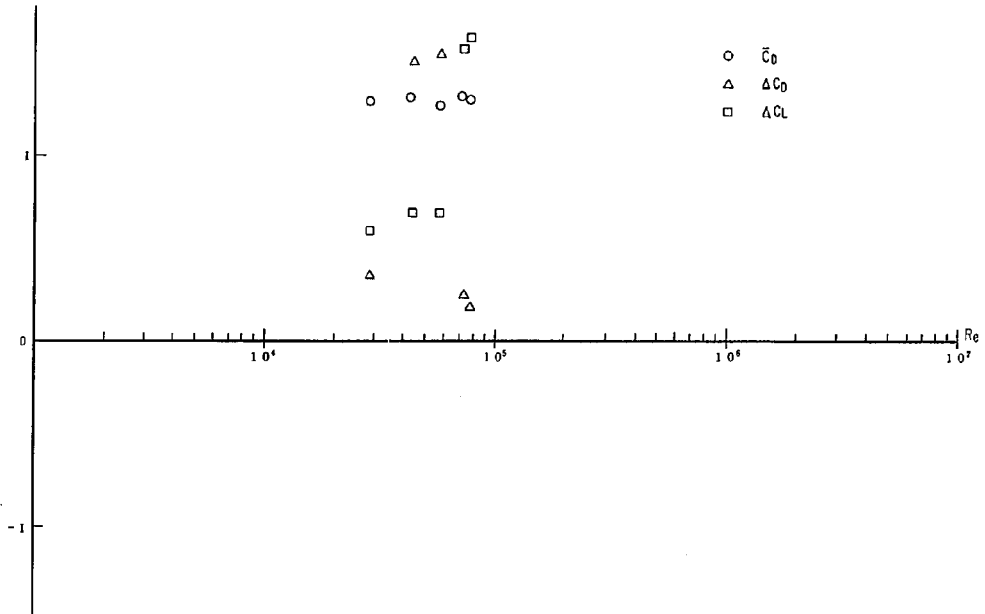


図 13.7

$D = 150\text{mm}$ $X/D = 3$ 下流側円柱

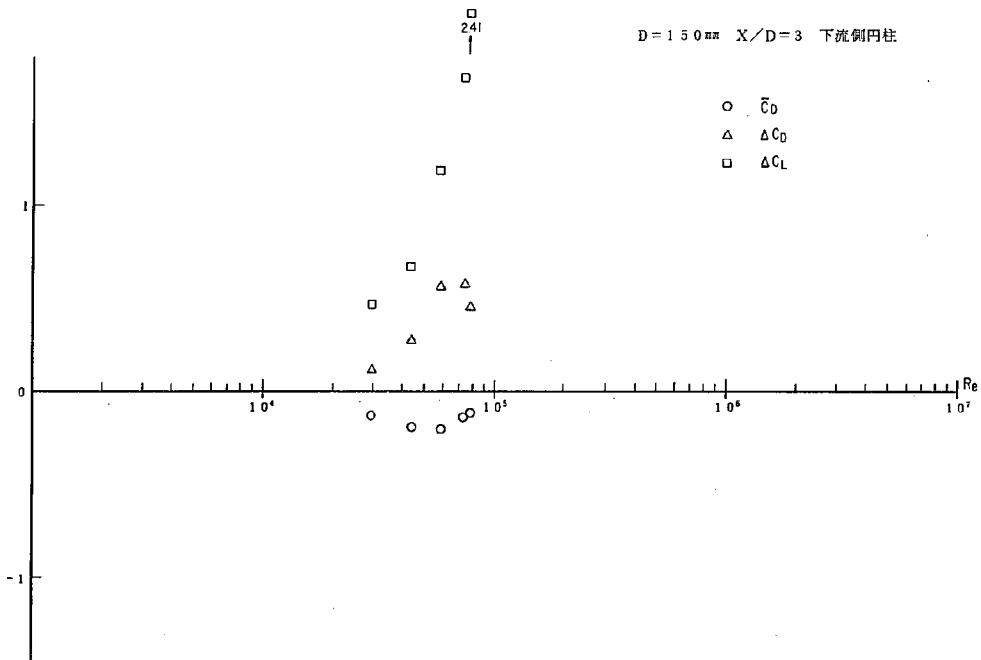


図 13.8

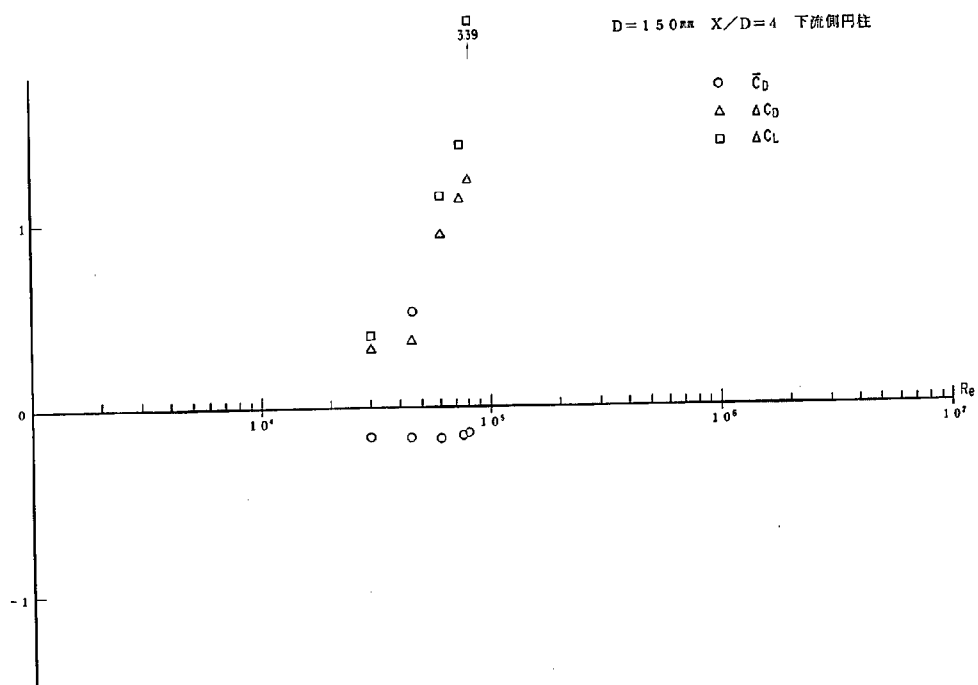


图 13.9

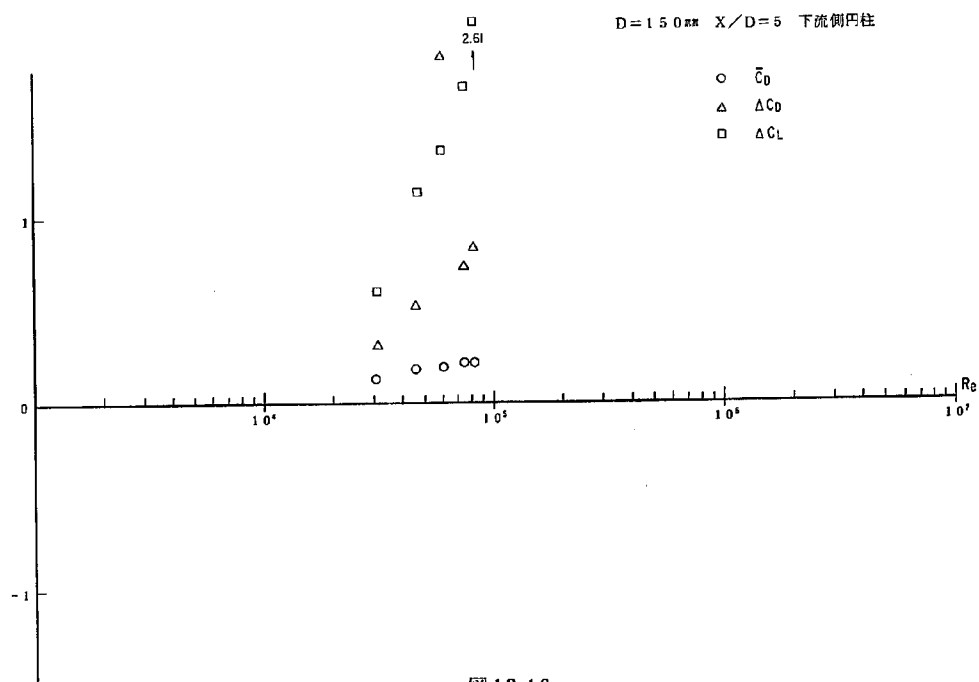


图 13.10

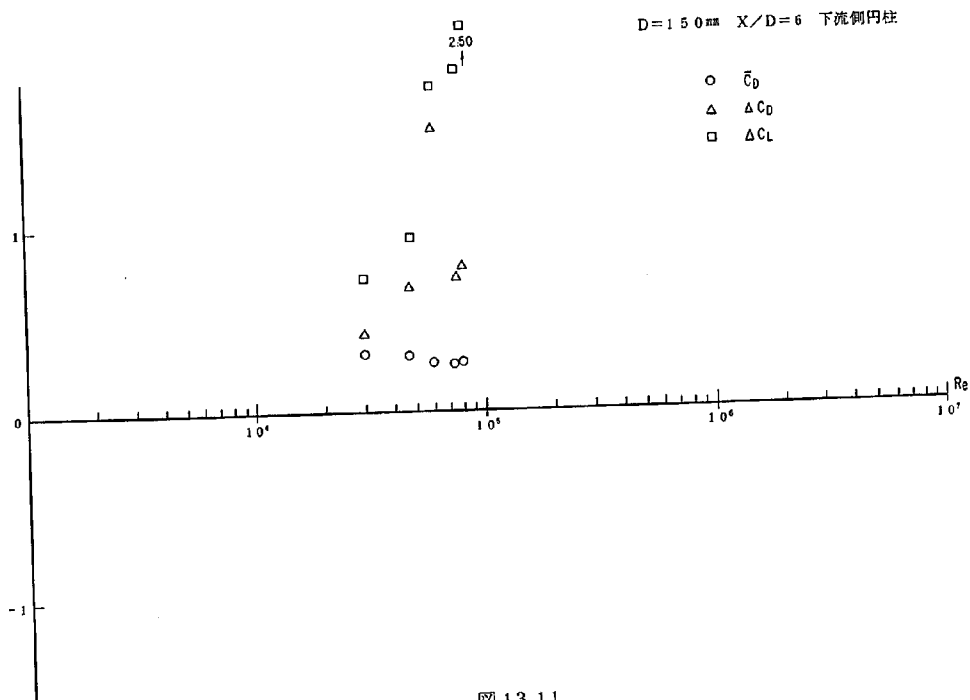


図 13.11

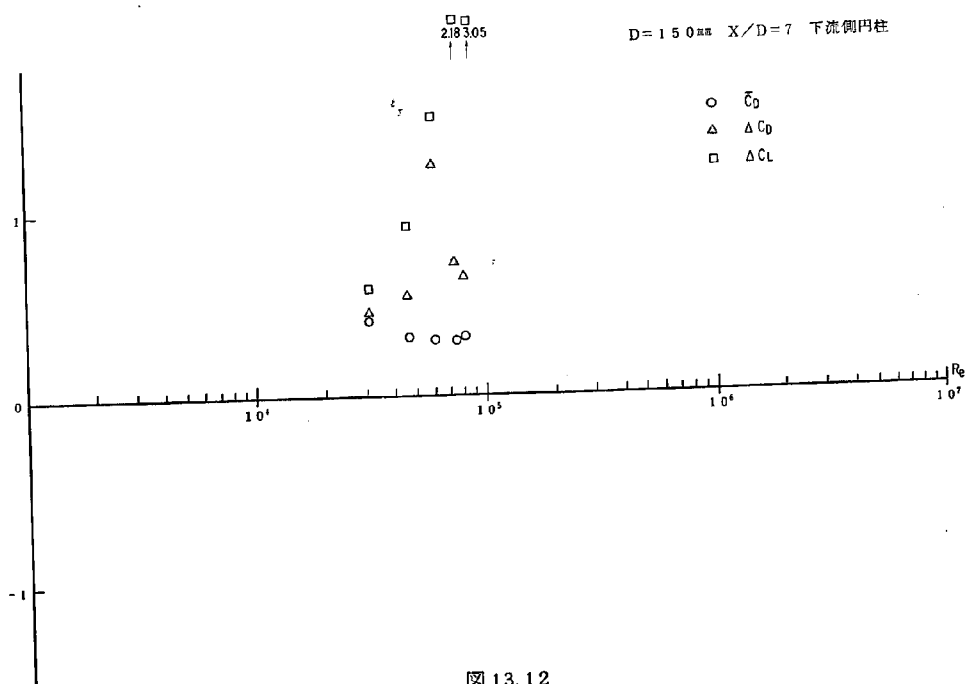


図 13.12

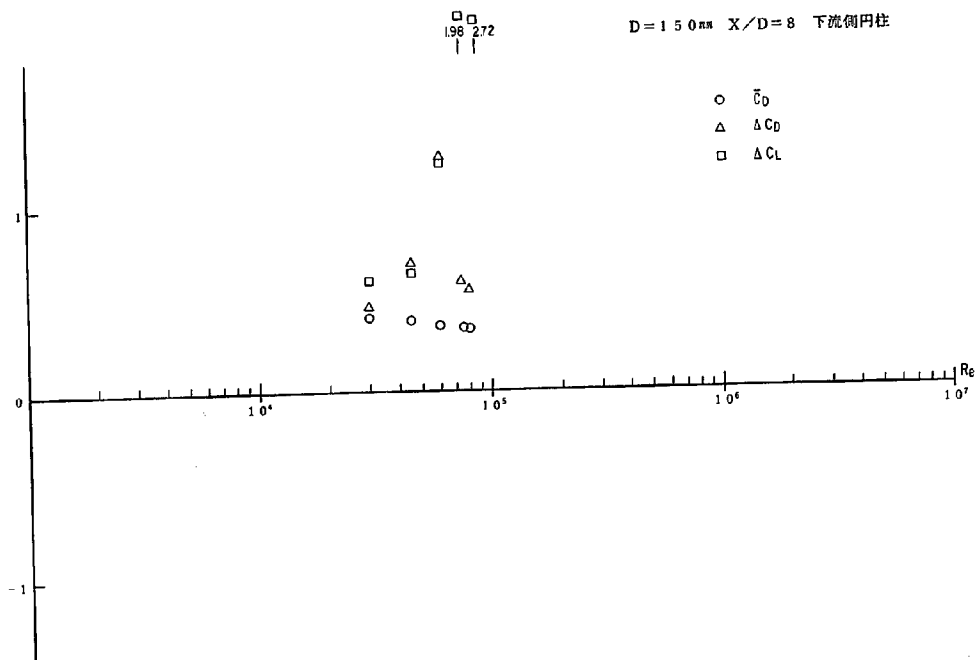


图 13.13

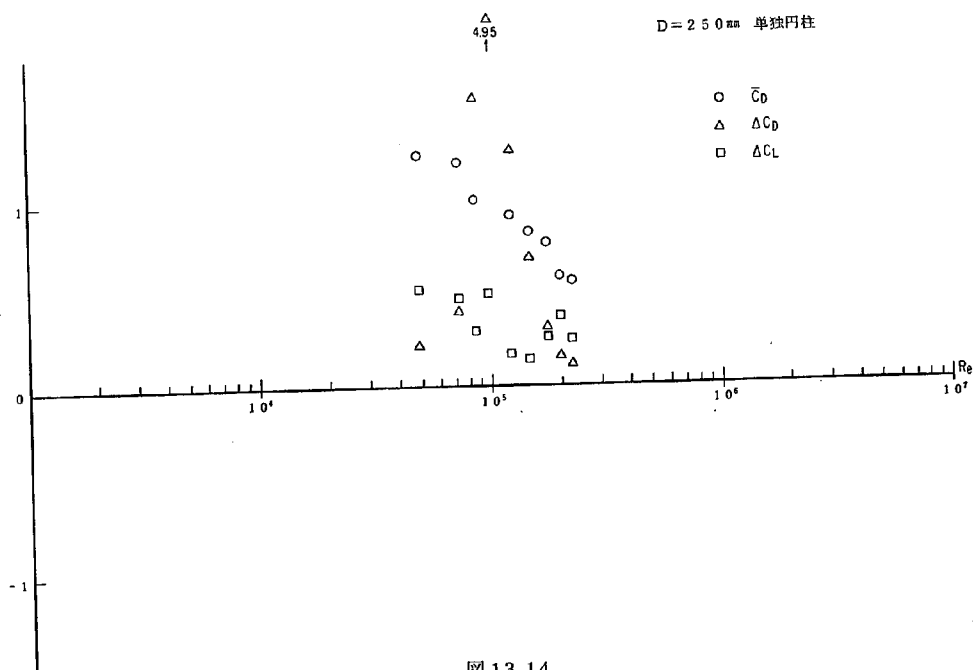


图 13.14

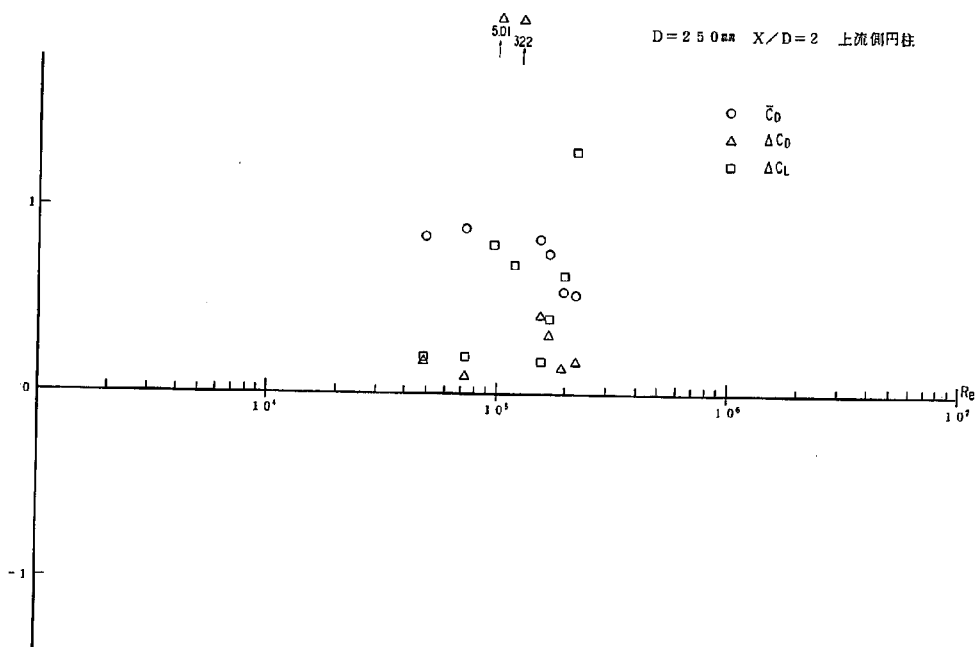


図 13.15

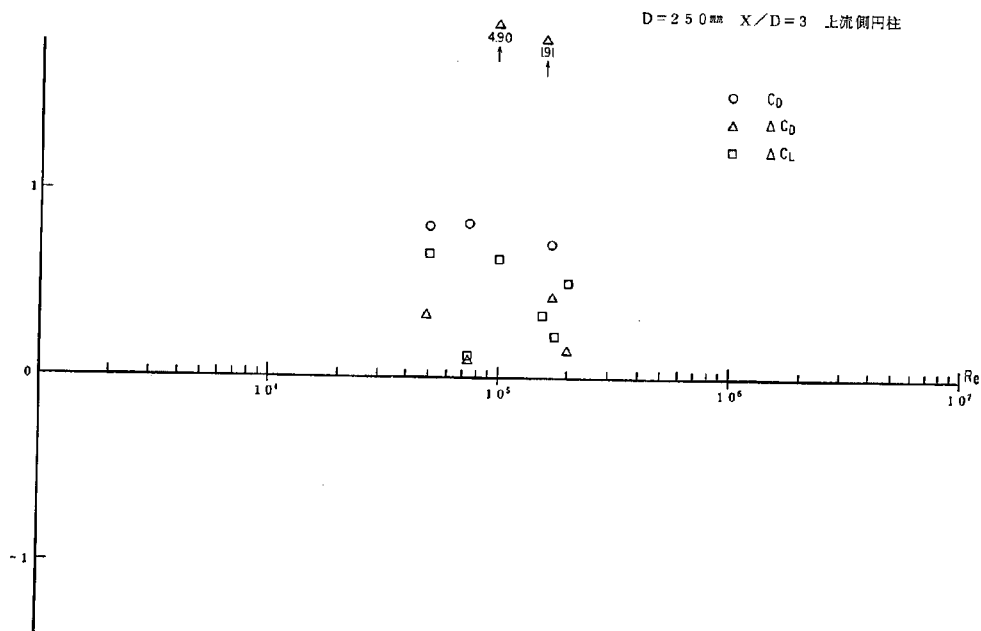


図 13.16

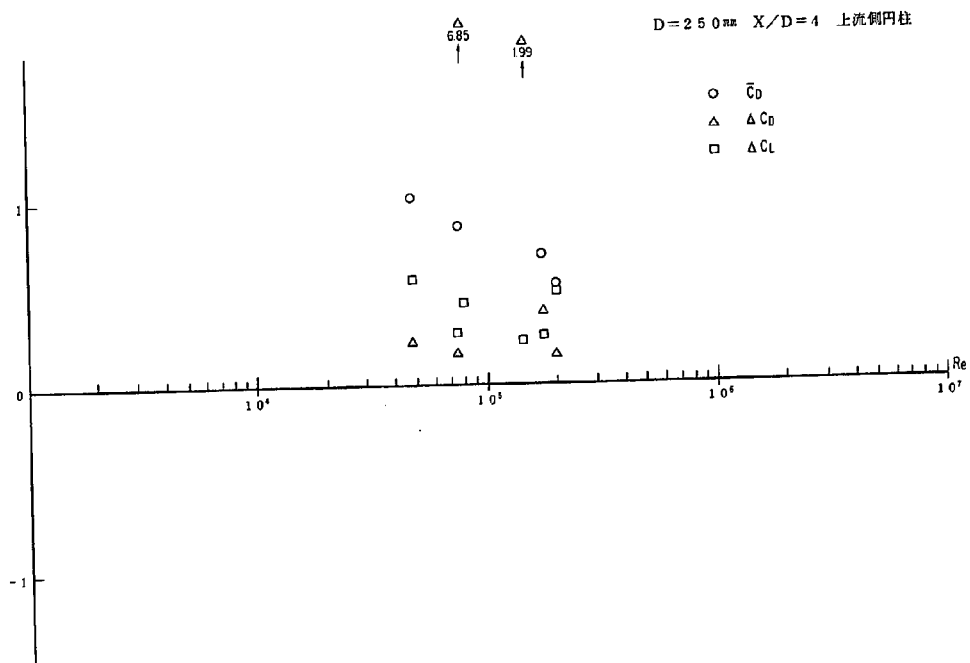


図 13.17

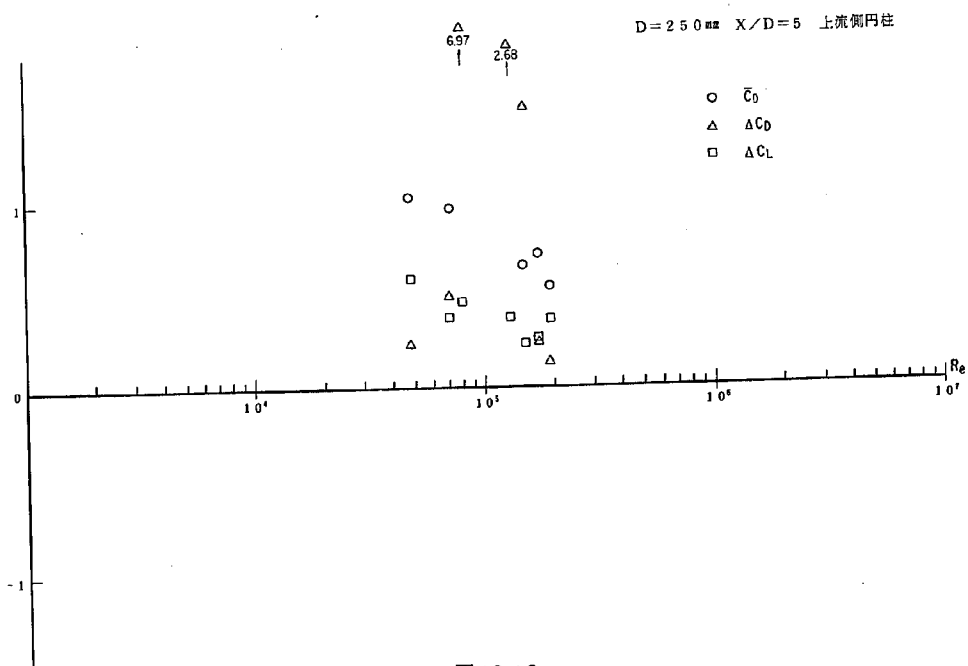


図 13.18

$D=250\text{mm}$ $X/D=2$ 下流側円柱

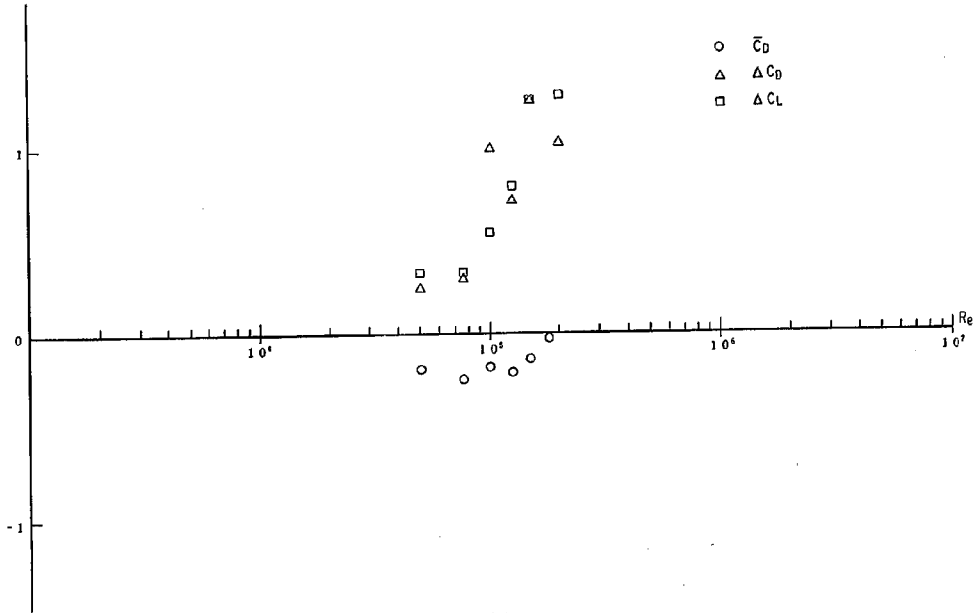


図 13.19

$D=250\text{mm}$ $X/D=3$ 下流側円柱

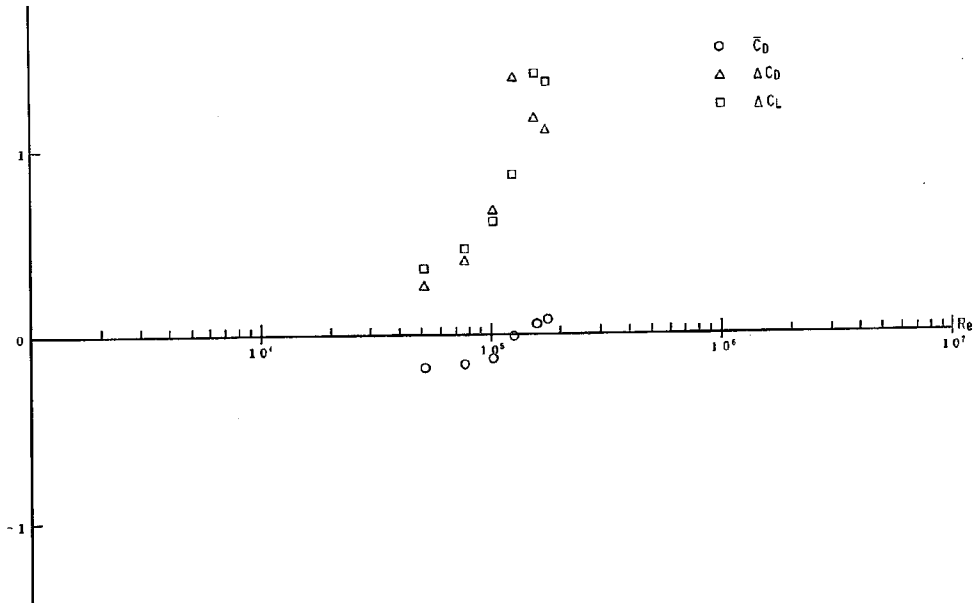


図 13.20

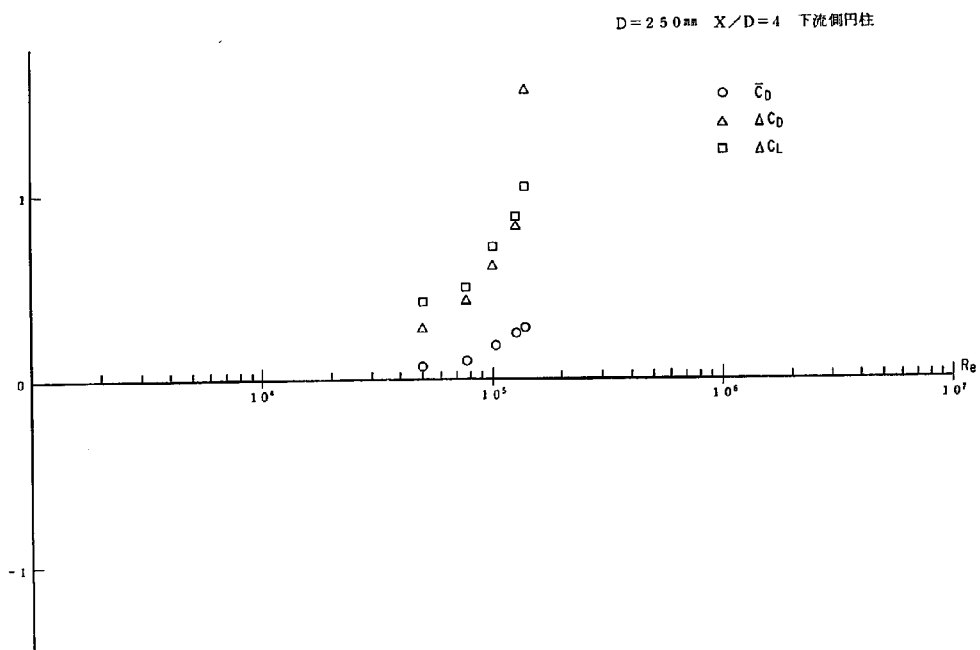


図 13.21

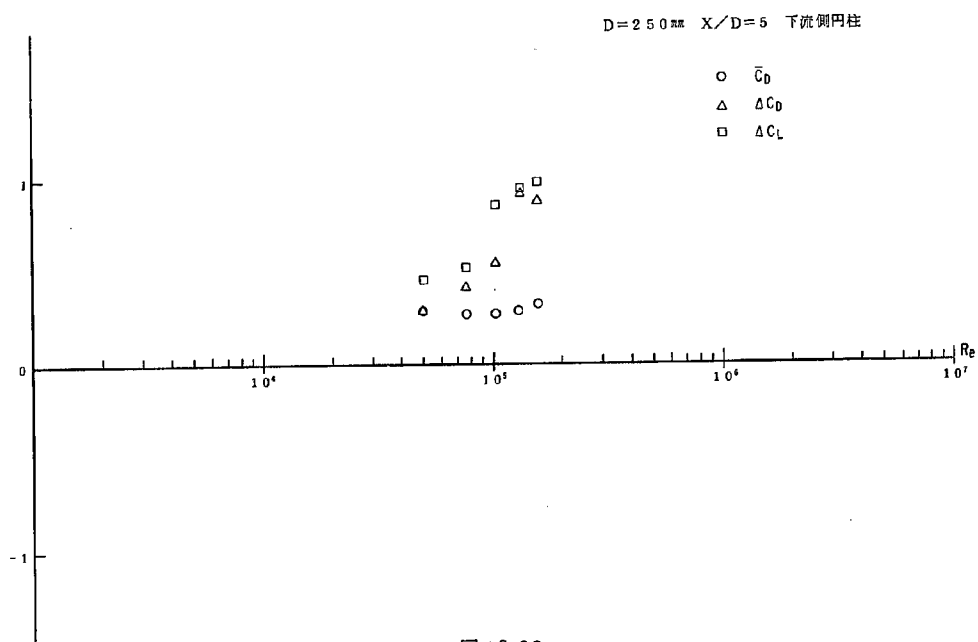


図 13.22

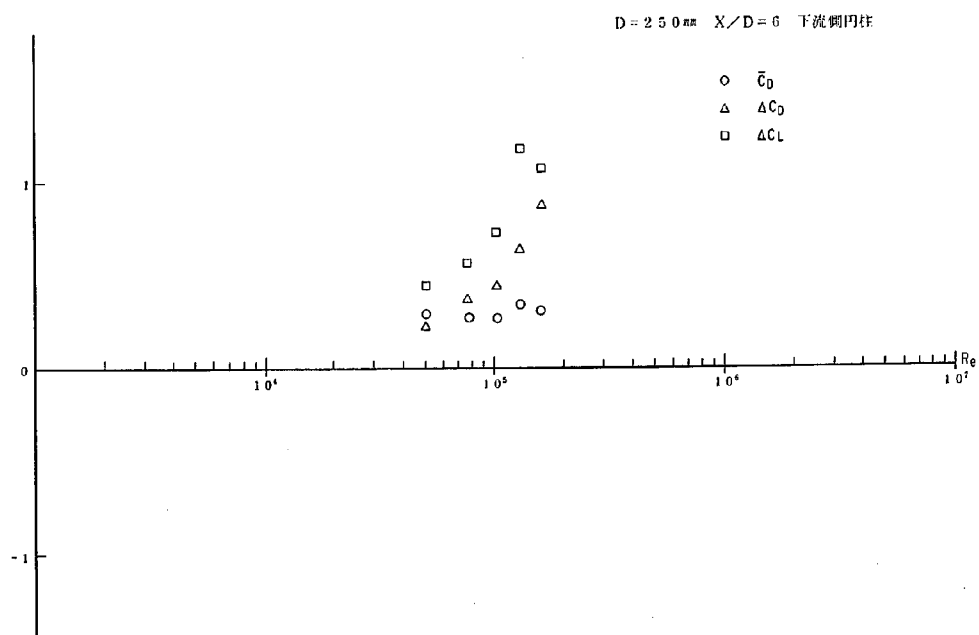


図 13.23

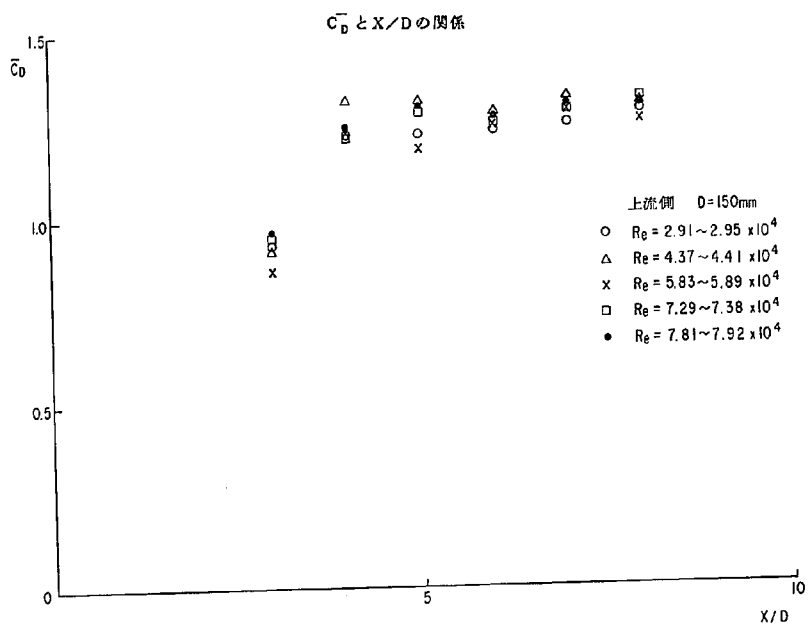


図 14.1

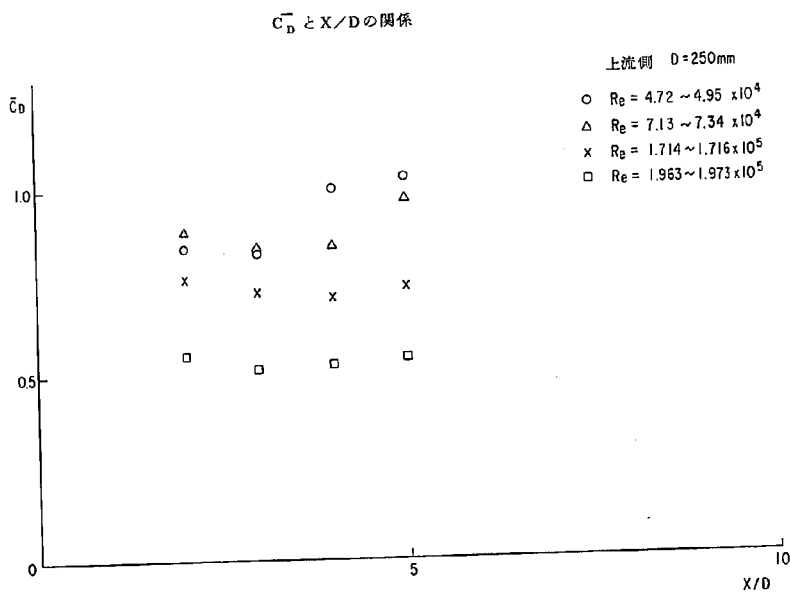


図 14.2

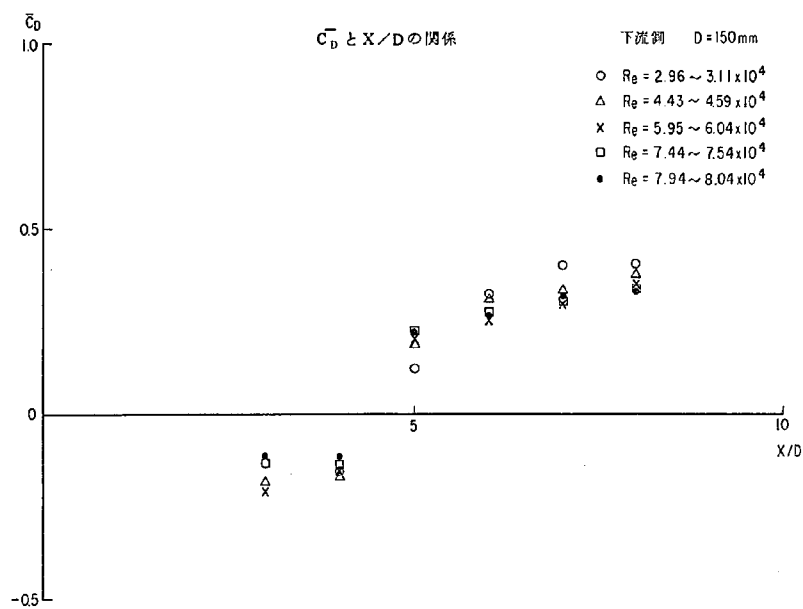


図 14.3

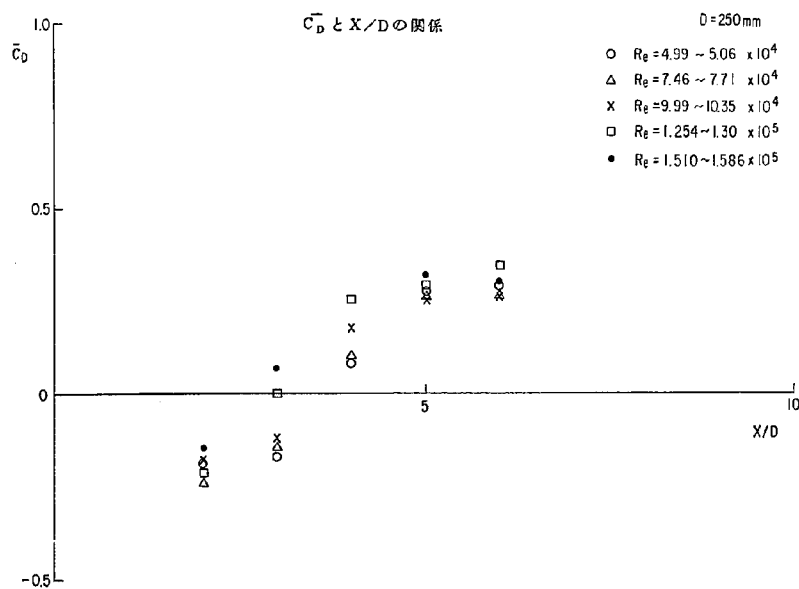
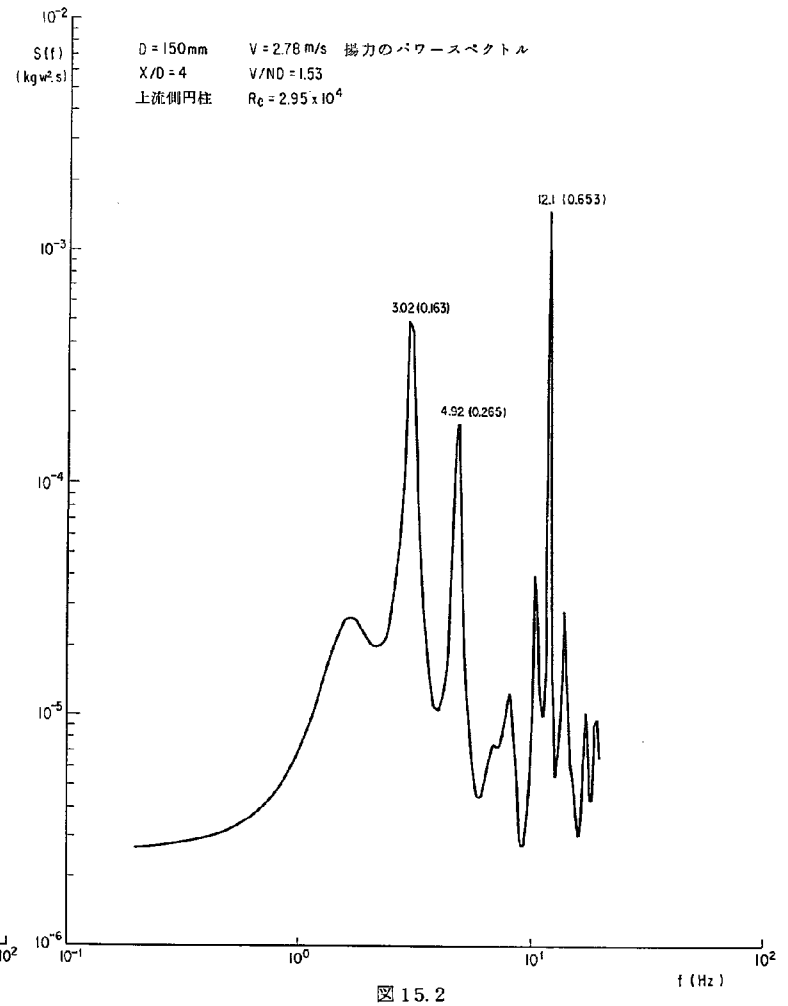
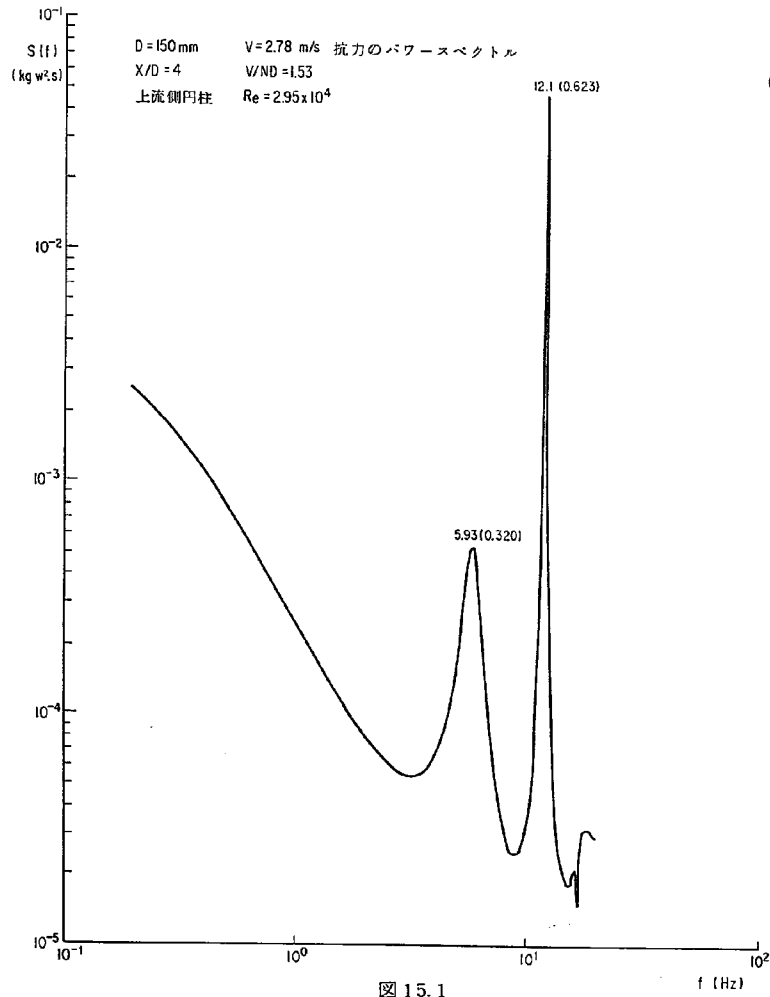


図 14.4



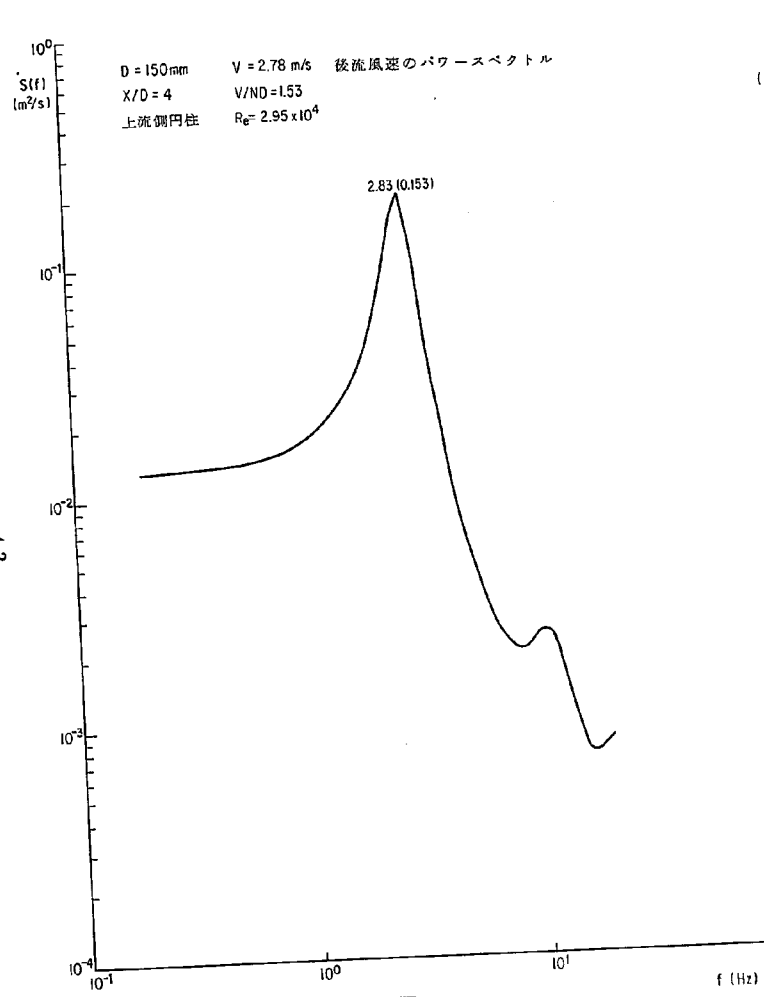


図 15.3

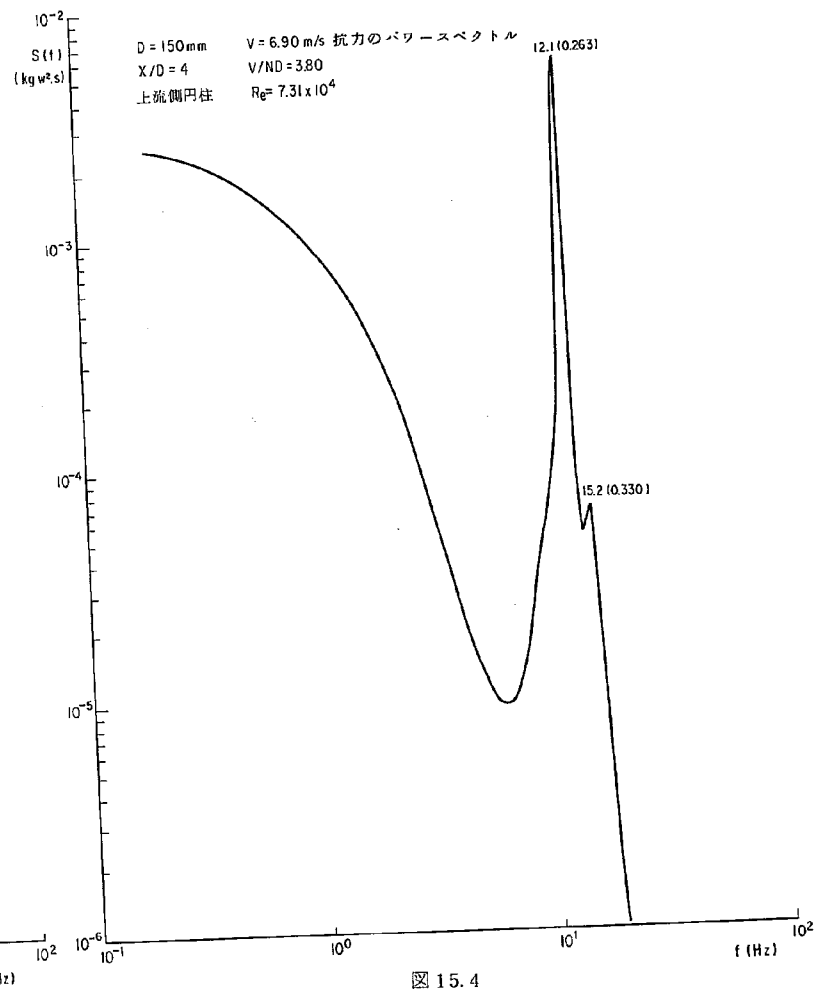


図 15.4

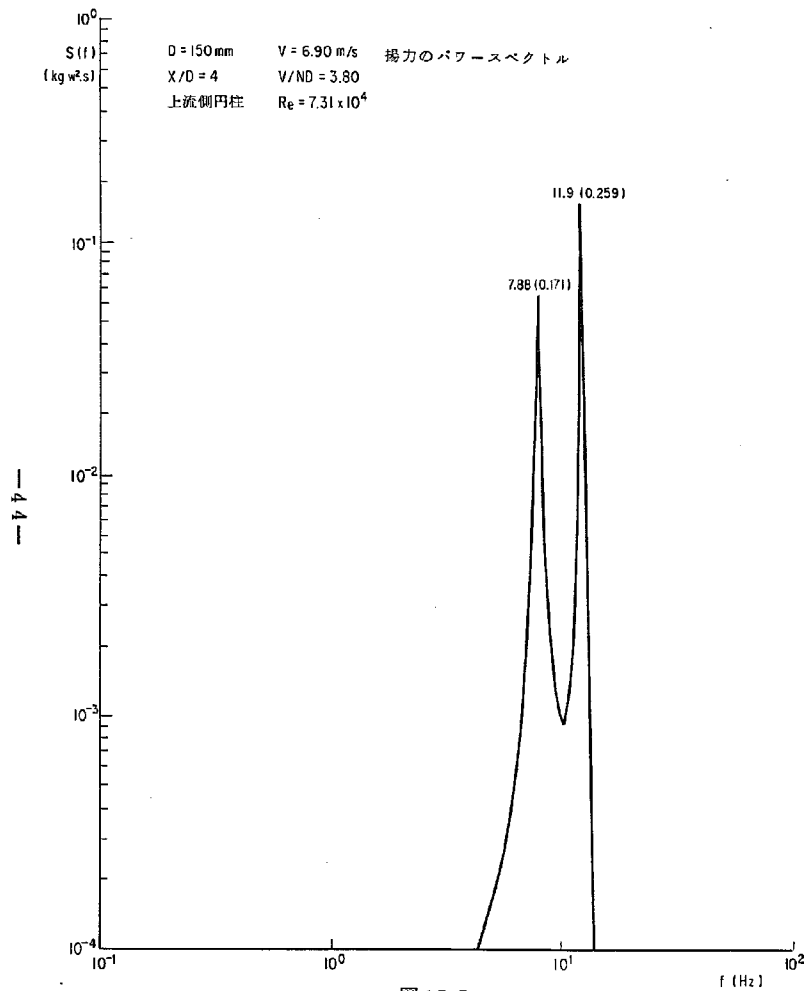


図 15.5

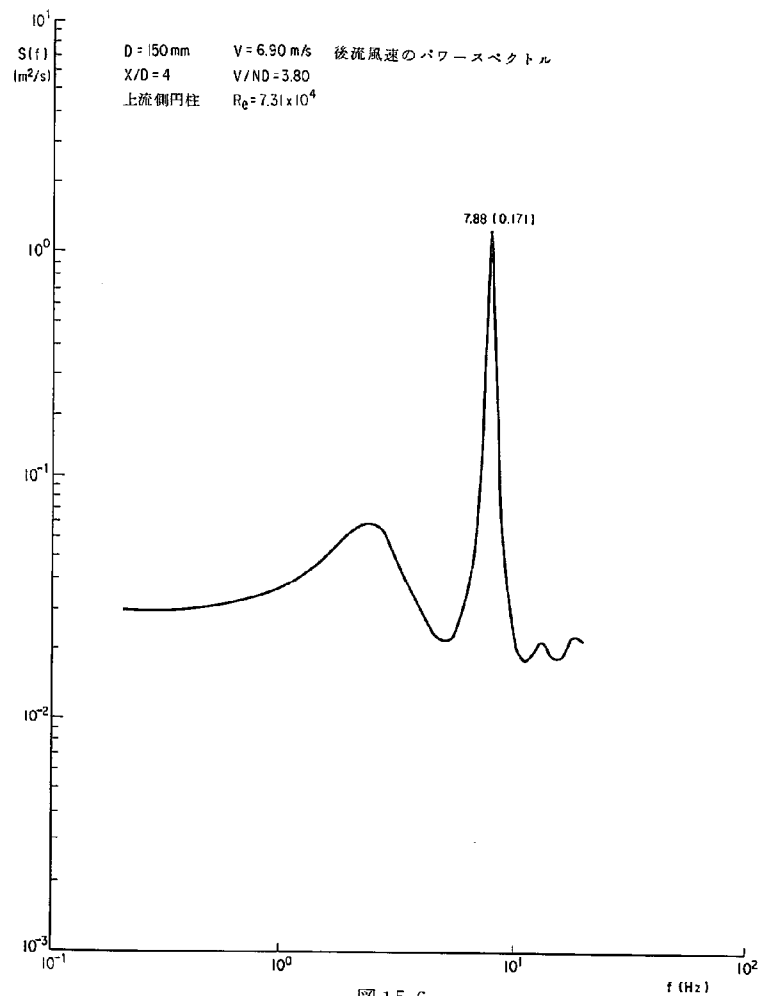
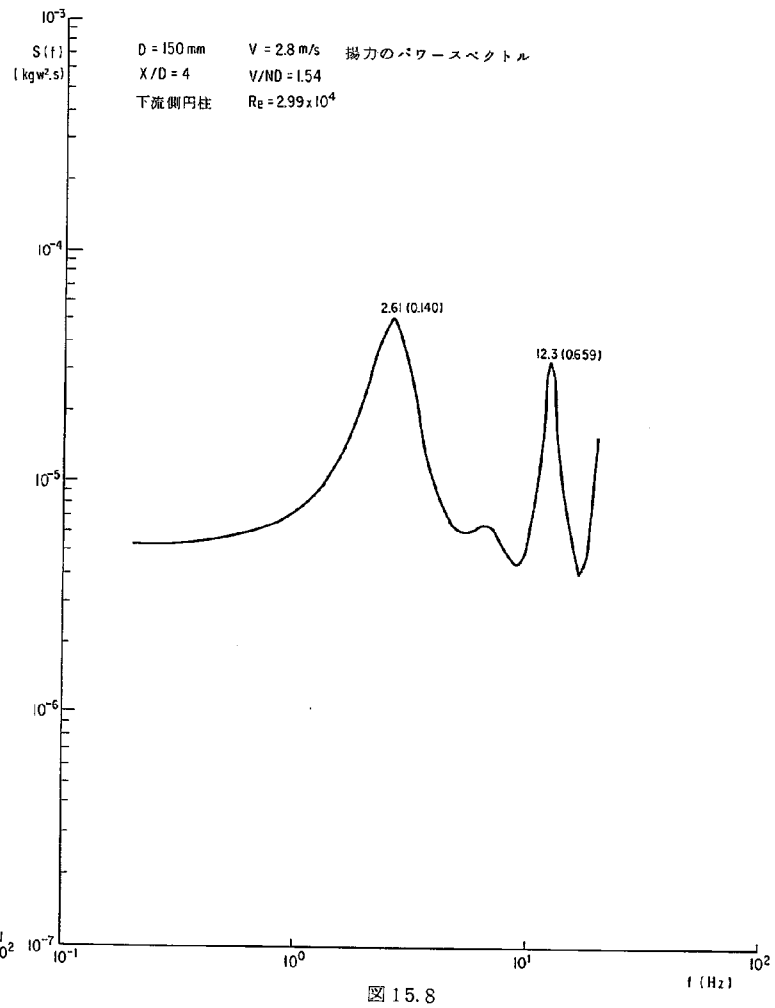
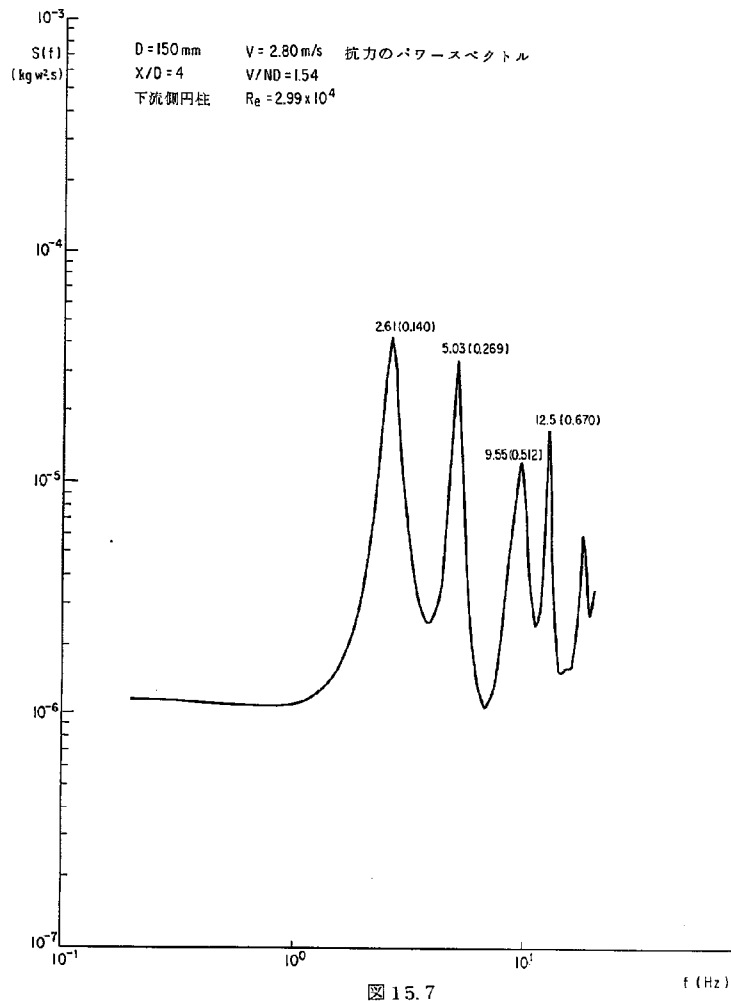
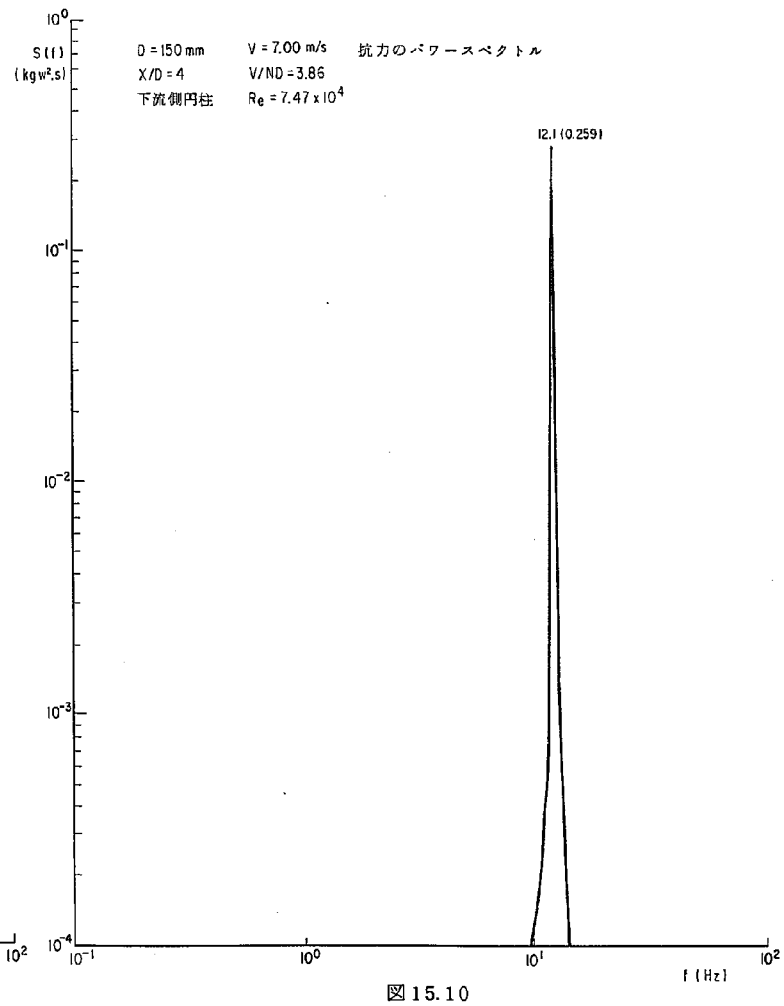
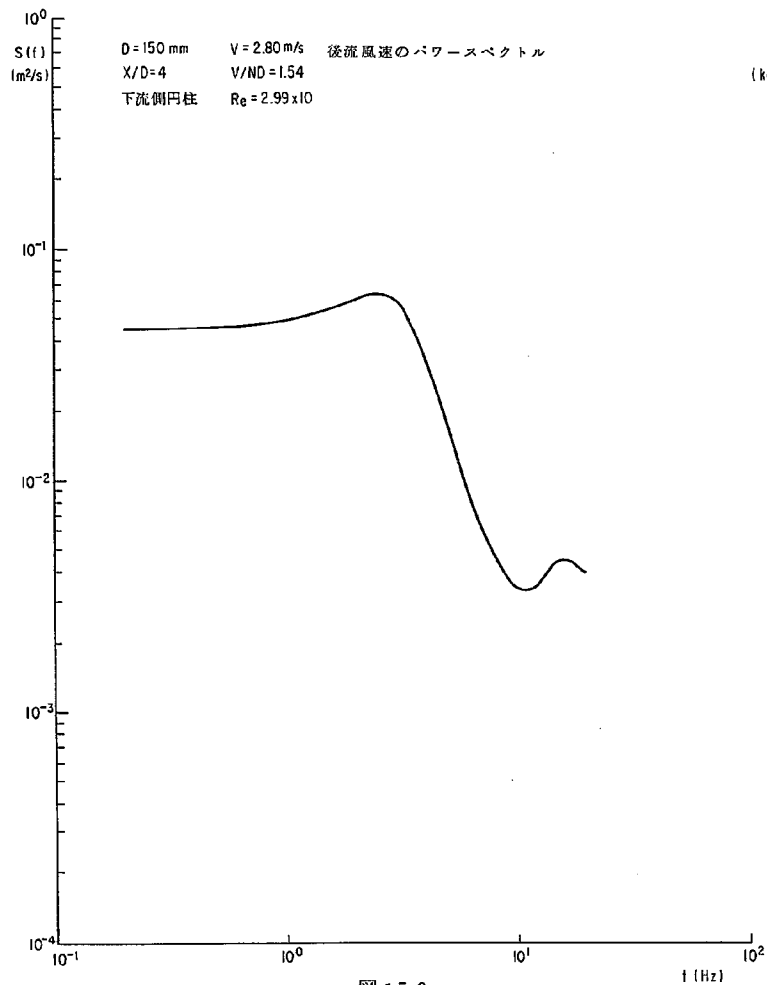


図 15.6





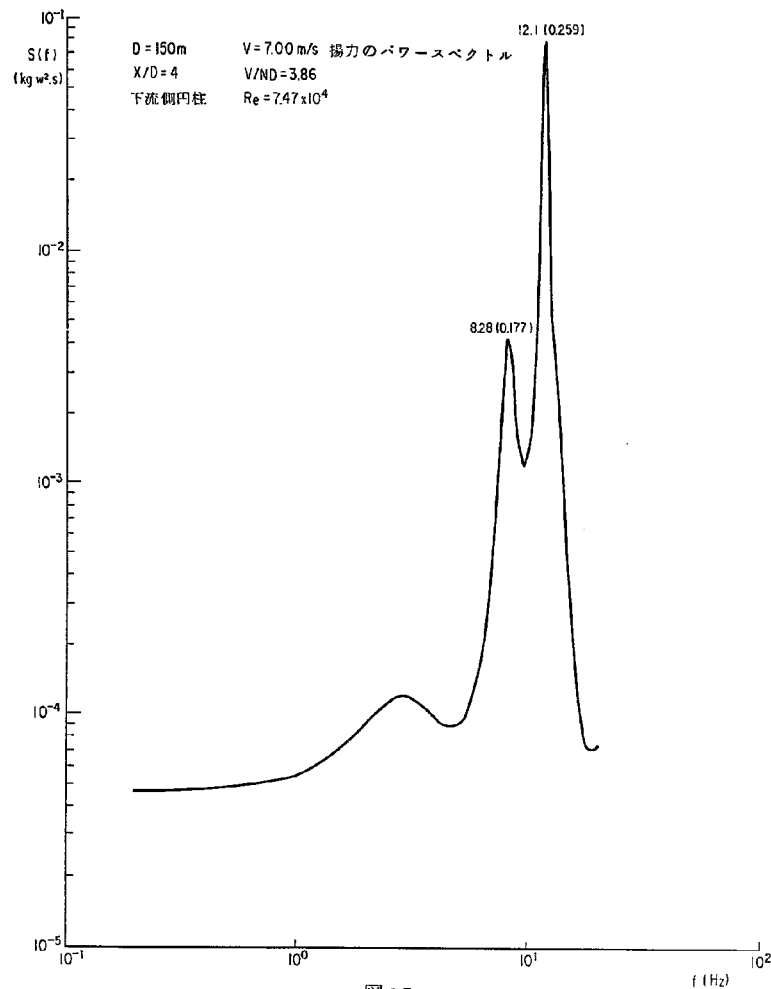


図 15.11

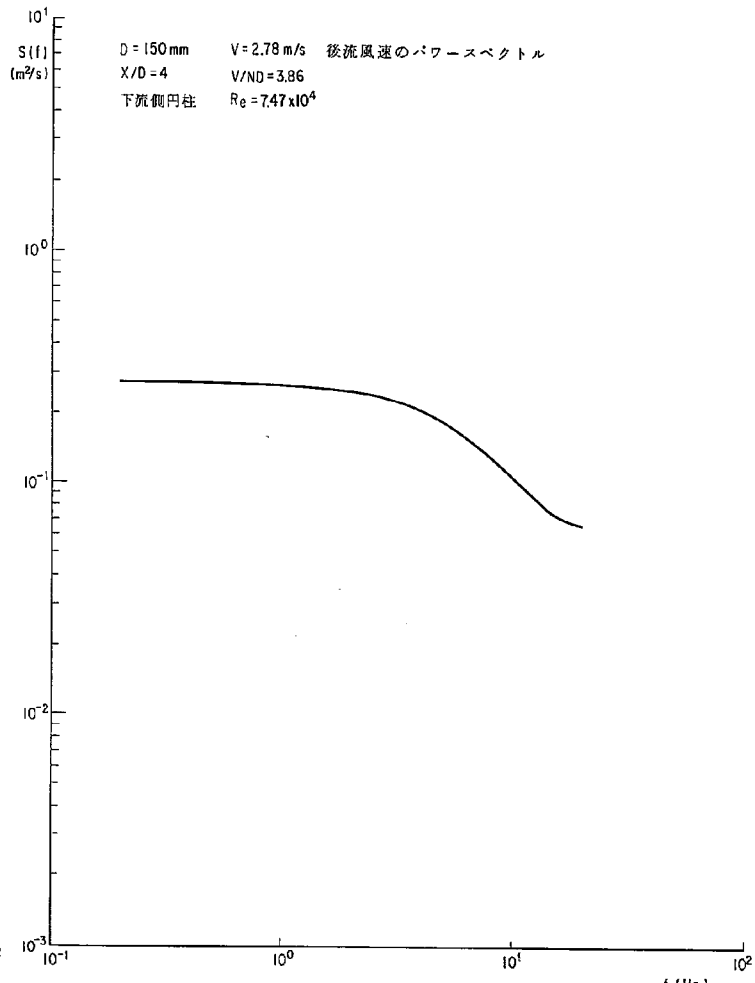


図 15.12