

ISSN 0386-5878

土研資料第 1655 号

ST. Division

土 木 研 究 所 資 料

海洋構造物の設計外力及び耐荷力に
関する研究報告 (II-1980)

昭和56年 3 月

建設省土木研究所
構造橋梁部構造研究室

Copyright ©1981 by P. W. R. I.

All rights reserved, No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複写は土木研究所長の承認を得ずしてこれを行ってはならない。

序

海洋構造物の設計外力及び耐荷力に関して実施した研究結果をとりまとめ、以下の項目について報告する。

- (1) 2本のパイプの流体力および渦励振に関する2次元模型実験
- (2) 2本のパイプの渦励振に関する3次元模型実験

昭和56年3月

構造研究室	室長	山本邦夫
	研究員	佐藤弘史
		野村一夫
		神崎一夫

目 次

1. 研究の概要	1
2. 2本パイプの流体力および渦励振に関する2次元模型実験	1
2.1 まえがき	1
2.2 実験方法	1
2.2.1 二分力実験	2
2.2.2 バネ支持模型実験	2
2.2.3 非定常空気力実験	2
2.3 実験結果	3
2.3.1 二分力実験	3
2.3.2 バネ支持模型実験	4
2.3.3 非定常空気力実験	5
2.4 考察	5
2.4.1 格子乱流の影響	5
2.4.2 前年度に得られた成果との比較	6
2.5 まとめ	6
3. 2本パイプの渦励振に関する3次元模型実験	7
3.1 まえがき	7
3.2 実験方法および実験条件	7
3.2.1 気流	7
3.2.2 模型	8
3.2.3 計測方法およびデータ処理方法	8
3.3 実験結果	9
3.3.1 一様流中における単体パイプの渦励振	9
3.3.2 一様流中における2体パイプの渦励振	9
3.3.3 格子乱流中における単体パイプの渦励振	10
3.3.4 格子乱流中における2体パイプの渦励振	10
3.4 考察	10
3.4.1 単体パイプの渦励振特性について	11
3.4.2 パイプの渦励振におよぼす格子乱流の影響	12
3.4.3 パイプの渦励振におよぼす隣接パイプの影響	12
3.5 まとめ	12
4. おわりに	14
参考文献	14
表	17
図	20

1. 研究の概要

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明確な点が少なくない。

当研究室では、昭和51年度より潮流作用下において海洋構造物としてのパイプ構造物が受ける流体力あるいは構造物が示す挙動について研究を実施してきた。現在までに実施した研究内容としては、パイプ構造物におよぼす潮流の影響を明らかにするための予備調査として、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流体力およびパイプの振動について文献調査を行ったこと¹⁾、流れ方向に並列した2本のパイプに作用する定常的な流体力を明らかにするために、文献調査および2次元模型による風洞実験を行ったこと²⁾、流れ方向に並列した2本のパイプの渦励振特性を明らかにするために、2次元模型による風洞実験を行ったこと³⁾、潮流によるパイプ部材の渦励振の推定法を提案したこと³⁾、パイプ構造物の振動による疲労問題に対する設計法について文献調査を行ったこと³⁾、などが挙げられる。

今年度は、流れ方向に斜めに配置された2本パイプおよび流れに対して直角方向に配置された2本パイプに作用する定常的な流体力およびその渦励振特性を明らかにするために、2次元模型を用いて風洞実験を行った。また、構造物の3次元性が渦励振特性に及ぼす影響を明らかにするため、3次元模型を用いて風洞実験を行った。

2. 2本のパイプの流体力および渦励振に関する2次元模型実験

2.1. ま え が き

パイプの渦励振は、流れの中におかれたパイプの後流に発生するカルマン渦に起因する振動である。この渦は流速に比例した周波数をもち、一般に渦の周波数とパイプの固有振動数が一致した流速付近で顕著な振動が発生する。複数のパイプ部材により構成されるパイプ構造物においては、着目する部材の周辺にもパイプ部材があるために、上流側パイプからのカルマン渦により流れが乱されたり、下流側パイプによりカルマン渦が干渉されたりして、渦励振特性も単体パイプの場合とは異なることが予想される。当研究室では、昭和54年度に流れ方向に並列したパイプをとりあげ、2次元剛体模型を用いて風洞実験を実施した³⁾。

今年度は、2本のパイプを流れ方向に並列させた場合の外に、流れ直角方向および流れに対して斜めに配置した場合について2次元剛体模型を用いて、二分力実験、バネ支持模型実験、および非定常空気力実験を実施した。気流としては乱れのほとんどない一様流の外に測定胴の上流端付近に格子を取付けて発生させた乱流も使用した。以下に現在までに得られた成果をとりまとめ報告する。

2.2. 実験方法

実験に使用した風洞は建設省土木研究所構造研究室所属の非定常空気力風洞であり、その諸元を表2-1に示す。実験には直径10 cm、長さ98 cmで両端に直径15 cm（二分力実験は支持具の都合により22 cm）、厚さ5 mmの端板を取付けたパイプ模型を使用した。実験は単体

パイプおよび並列パイプについて実施した。並列パイプは図2-1のようにダミー模型を移動することにより 0° , $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ の角度で配置した。プラスの角度はダミー模型を測定模型の上流側に置いたことを表わしている。また、並列模型の純間隔は模型直径の1倍, 2倍, 4倍, 6倍とした。ダミー模型は風洞壁に押し付けて固定してある。実験ケースの一覧を表2-2に示す。また、今年度は風洞気流として乱れのほとんどない一様流の外に、測定胴の上流端付近に格子を取付けて発生させた乱流中での実験も実施している。その気流特性を図2-2~4に示す。図2-2は風速と乱れの関係を示したものであり横軸が風洞風速であり縦軸が乱れ強さである。図2-3, 4は乱流のパワースペクトル図であり、図2-3が主流方向成分(U成分), 図2-4が主流直角方向成分(W成分)である。

2.2.1. 二分力実験

本実験は風洞に設置されている三分力天秤(定常空気力測定用)を用いて定常的な抗力および揚力を測定するものである。抗力および揚力は風洞に風を流したときの作用力を読みとり、無風時の作用力を減ずることによって求めた。抗力係数および揚力係数は次式により計算した。

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2 \cdot A}$$

ここに、 C_D ；抗力係数、 C_L ；揚力係数、 F_D ；抗力、 F_L ；揚力、 ρ ；空気密度、 V ；風洞風速、 A ；投影面積

また、レイノルズ数は次式により求めた。

$$Re = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

ここに、 Re ；レイノルズ数、 D ；パイプの直径、 ν ；空気の動粘性係数

2.2.2. バネ支持模型実験

バネ支持模型実験は、風洞内にパイプ模型をコイルバネを用いて支持し、風を流したときの模型の振動を測定し、風速と振動状況の関係を求める実験である。振動変位は模型支持装置に取付けたターゲットの動きを光学式変位計で測定することにより求めた。模型は加振減衰器を使用して模型振動系の固有振動数で加振し、一定の振幅に達した後自由振動させその後の振動を記録した。固有振動数は4.0 Hzであり、無風時の減衰は加振減衰器により対数減衰率で0.02に設定した。バネ支持模型実験の実験条件を表2-3に示す。

2.2.3. 非定常空気力実験

一般に流体中の1自由度系の振動は次の方程式で表わされる。

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f(t)$$

ここに、 m ；質量、 C ；粘性抵抗、 K ；バネ定数、 x ；変位、 $f(t)$ ；外力

外力 $f(t)$ として物体が振動することによって流体より受ける力、すなわち非定常空気力を考

えれば、非定常空気力は物体の振動変位に比例する成分と振動速度に比例する成分に分解して次のように表わすことができる。

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = A\dot{x} + Bx \dots\dots\dots (1)$$

(1)式を変形して

$$m\ddot{x} + (C-A)\dot{x} + (K-B)x = 0 \dots\dots\dots (2)$$

(2)式の $(C-A)$ の値により振動の減衰状況が推定できる。すなわち、

- 1) $C-A > 0$: 減衰
- 2) $C-A = 0$: 中立
- 3) $C-A < 0$: 発散

したがって(2)式の定数 A 、 B （すなわち非定常空気力）がわかれば構造物の対風応答を推定することができる。

今回実施した実験は流れ直角方向に強制加振したときの非定常揚力の測定である。空気力の測定には模型の慣性力を機械的に除去できる非定常空気力検出器を使用し、変位は模型加振軸に取付けたターゲットの動きを光学式変位計で測定することにより求めた。測定した非定常空気力より非定常空気力係数を求める計算方法はすでに詳細が報告³⁾されているのでここでは省略する。

2.3. 実験結果

2.3.1. 二分力実験

実験結果を図2-5～24に示す。図の横軸には風洞風速およびレイノルズ数が併記しており、縦軸が抗係数あるいは揚力係数である。図は抗力・揚力および気流別にまとめ、同じダミー模型設置角度の並列パイプ間隔を変えたケースを1枚の図にまとめている。これらの図から明らかになったことを以下に述べる。

(1) 抗力係数

抗力係数と風速の関係を図2-5～14に示す。図2-5～9は一様流中での実験結果であり、図2-10～14は乱流中の結果である。

- 1) 抗力係数は一様流中では図2-1に示したダミー模型の設置角度（以降角度とする）が 90° で模型間隔が $4D$ 、 $6D$ の場合を除き風速が増加してもほとんど変化しない。角度が 90° で模型間隔が $4D$ 、 $6D$ の場合は風速が増加すると係数が小さくなる。
- 2) 乱流中での抗力係数は風速の増加にともなって減少する傾向にあるが、角度 90° の $1D$ 、 $2D$ の場合は逆に増加している。
- 3) 一様気流中では、角度 90° の場合を除けばどの2本パイプのケースもほぼ単体パイプの抗力係数と同様の特性を示す。角度 90° の場合は間隔を近づけるにしたがい抗力係数は小さくなり、 $1D$ のときは負の値をとる。 $6D$ の場合でも単体パイプの抗力係数の約 $1/2$ と小さな値となっている。
- 4) 乱流中では、角度 90° の場合を除けばどの2本パイプのケースもほぼ単体パイプの抗力係数と同様の特性を示す。角度 90° の場合は Re 数 10^4 までの範囲で間隔が $1D$ 、 2

Dのときは風速の増加にしたがい抗力係数は増加し、4 D、6 Dのときは風速の増加にしたがい減少する。 Re 数が $(1.0 \sim 1.6) \times 10^4$ の範囲では抗力係数は単体パイプの場合と同様一定の値をとる。

(2) 揚力係数

揚力係数と風速の関係を図2-15~24に示す。図2-15~19は一樣流中での結果であり、図2-20~24は乱流中の結果である。なお、単体パイプの定常揚力は本来0になるはずであるが、今回の結果では0以外の値になっているため、これらの係数を使う場合には注意が必要である。

- 1) 一樣気流中における2本パイプの実験では、角度 0° のとき揚力係数が単体パイプに比べ大きくなる。この傾向は間隔が小さいほど大きく、1 Dのときは単体パイプに比べ0.2程度揚力係数が大きくなる。
- 2) 乱流中における2本パイプの実験では、角度 0° のとき一樣気流中と同様に揚力係数が単体パイプに比べ大きくなる。この傾向は間隔が小さいほど大きい。また角度 45° および -45° では間隔が1 Dのとき揚力係数が単体パイプに比べて小さくなる。

2.3.2. バネ支持模型実験

一樣流中の実験結果を図2-25~29に、乱流中の実験結果を図2-30~34に示す。図の横軸は換算風速 V/ND (V :風洞風速, N :振動数, D :パイプの直径)であり、縦軸が渦励振振幅である。パイプの振動振幅はかならずしも一定でなく、うなりを起して振動するため、図には最大振幅と最小振幅を直線で結び、その中心に記号をプロットした。これらの図からつぎのことがわかる。

(1) 一樣流中の渦励振特性

- 1) 単体パイプの渦励振は換算風速が4.9を越えると発現し、5.62で極大振幅となり6.14を越えると振動が収まる。また渦励振振幅が極大となる風速では倍振幅17 mmから23 mmの範囲でうなった振動となっている。
- 2) 渦励振の発現風速はダミー模型を置くことによりダミー模型の設置角度（以降角度という）が 90° 、 45° 、 -90° の場合は単体パイプの場合より高くなり、角度が 0° 、 -45° の場合は低くなる。
- 3) 渦励振の振幅はダミー模型を置くと角度が 90° 、 -45° の場合は単体パイプの渦励振振幅より小さくなり、 45° 、 -90° の場合は逆に大きくなる。しかし、角度が 0° の場合はパイプ間隔1 Dを除いて単体パイプの場合と変わらない。角度 0° の1 Dの場合は振幅が大きくなる。
- 4) 2本のパイプの間隔を狭くするほど2)および3)に述べた傾向が強くなり、角度が -45° でパイプ間隔1 Dの場合は渦励振が発現しない。

(2) 乱流中の渦励振特性

- 1) 単体パイプの渦励振は換算風速が4.8を越えると発現し、5.36で極大振幅となり6.5を越えると収まる。また、渦励振振幅が極大となる風速では倍振幅3 mmから6 mmの範

間であつた振動となつてゐる。

- 2) 渦励振の発現風速は、2本パイプの角度が 90° および 45° の場合、間隔によって複雑に変化している。角度 0° のときは単体パイプとほぼ同じ発現風速であり、角度 -45° および -90° のときは、単体パイプに比べ発現風速は高くなる傾向を示している。
- 3) 2本のパイプをならべた角度 90° の場合の渦励振の発現する風速範囲は単体パイプの場合の発現風速範囲より広くなる。例として最も影響の現われているパイプ間隔が1Dの場合をとりあげると換算風速3.5～10.0の風速範囲で渦励振が発現しており、単体パイプの発現風速範囲より3.8倍も広がっている。
- 4) ダミー模型を置くことにより角度が 45° 、 -90° の場合、渦励振の振幅は単体パイプの場合より大きくなる。角度が 90° 、 0° 、 -45° の場合は単体パイプの渦励振振幅とはほとんど変わらない。ただし、角度が -45° でパイプ間隔を狭くした1D、2Dの場合は渦励振が起きていない。

2.3.3. 非定常空気力実験

今年度の非定常空気力実験は単体パイプについての実験のみ実施しており、一様流中の結果を図2-35に、乱流中の結果を図2-36に示す。図の横軸は換算風速であり、縦軸は非定常空気力係数である。空気力係数の変位位相成分(C_{LHR})は振動数に影響を及ぼす成分であり、速度位相成分(C_{LHI})は振動減衰に影響を及ぼす成分である。以降では速度位相成分について検討を加えることにする。空気力係数(C_{LHI})は正の値のとき不安定状態を表わす。図より以下のことがわかる。

- (1) 一様流中では換算風速が4.7～5.5の間で、係数が負の極大値から正の極大値へと急激に変化する。一方、乱流中では換算風速が2.2～3.8という一様流の場合より低い風速で負から正へ変化する。
- (2) 係数は正の極大値および負の極大値とも乱流中の方が一様流中より小さい。不安定状態を表わす正の極大値で比較すると、一様流中の極大値が0.48であるのに対して乱流中では0.09と1/5以下になっている。
- (3) 高風速領域での係数値は一様流中では換算風速9.0で再び負に変わるが、乱流中では風速が高くなるにつれて徐々に零へと近づくが実施した換算風速0～10の範囲では負に変化することはない。

2.4. 考 察

2.4.1. 格子乱流の影響

実施した各実験の一様流中の結果と乱流中の結果を比較するとつぎのことがわかる。

- (1) 二分力実験の抗力係数は一様流中では風速が増加してもほとんど変化しないが、乱流中では風速が増加するにしたがい小さくなる。しかし、揚力係数は乱流による影響は小さいといえる。
- (2) 乱流中の渦励振は一様流の場合より発現する渦励振振幅が小さい。
- (3) 非定常空気力は減衰に影響を及ぼす速度位相成分係数(C_{LHI})の正の極大値で比較する

と、乱流中では一様流の場合の $1/5$ 以下と小さくなり、係数が負から正となる無次元風速は低くなる。

以上のことから乱流は単体パイプおよび並列パイプの流体力および渦励振現象に対して、一様流の場合と比べると力および振動を概して弱める方向に働くといえる。

2.4.2. 前年度に得られた成果との比較

昭和54年度の成果を図2-37～39に示す。図2-37, 38はバネ支持模型実験の結果であり、図2-39は非定常空気力実験の結果である。実験に使用した風洞、模型および支持装置は今年度に使用したものと同一である。また、実験条件も今年度と同じである。前年度はダミー模型を主流方向に並列させて実験しており、ダミー模型を振動模型の上流側に置いたケースは今回のダミー模型設置角度 90° に相当し、下流に置いたケースが角度 -90° に相当する。しかし、並列パイプの間隔は $1D$ については同じであるが他の間隔は違っている。前年度はダミー模型を上流側に置いた場合のパイプ間隔は $1D$, $10D$ であり、下流に置いた場合は $1D$, $3D$, $12D$ である。図2-37～39に示された前年度の成果と今回の実験によって得た成果を対比すると以下のことがいえる。

(1) バネ支持模型実験

- 1) 単体パイプの渦励振の特性を比較すると前年度は換算風速 5.60 で最大振幅 $9 \sim 18\text{mm}$ が発現し、今年度は換算風速 5.62 で最大振幅 $17 \sim 23\text{mm}$ が発現した。渦励振の発現風速は両者ともほぼ等しいといえるが、渦励振の最大振幅は今年度の結果の方が大きい。この原因としては、渦励振振幅は風速によって敏感に変化するため、若干の測定風速の差が振幅に影響を与えることなどが考えられる。
- 2) 昨年度の結果によればパイプを並列させた場合の渦励振の発現風速はダミー模型を振動模型の上流側と下流側のどちらに置いても高くなる。また、並列パイプの間隔を狭くするほど発現風速が高くなっているが、今年度のダミー模型を上流側に置いた場合のみ逆の傾向を示す。これはダミー模型を上流に置く場合は $6D$ の間隔では依然として $10D$ の場合とは性質の異なった影響を振動模型に及ぼしているためと思われる。
- 3) 渦励振の最大振幅が、ダミー模型を上流に置いた場合は小さくなり、下流に置いた場合は大きくなるという特性は両者ともよく対応しているといえよう。また、並列パイプの間隔を狭くするほどその影響が強くなるという点でもよい対応を示している。

(2) 非定常空気力実験

一様流中で実験した単体パイプの結果を比較すると、減衰に影響を及ぼす非定常揚力係数 (C_{LHI}) が負から正に急激に変化する風速は換算風速で前年度が $4.5 \sim 5.5$ であり、今年度が $4.3 \sim 4.7$ である。また、正の極大値は前年度 0.47 、今年度 0.49 であり両者はよい対応を示しているといえる。

2.5. ま と め

今年度の実験より明らかとなったことをまとめると以下のとおりである。

- (1) 流れによる定常抗力は、流れに並列した2本パイプの後流側パイプで単体パイプと異なる

特性を示し、流れが乱流のときは一様流の場合に比べ抗力係数の値は小さくなる。

(2) 流れによる定常揚力は、流れに直交して配置した2本パイプでは単体パイプと異なりその間隔を広げる方向に作用する。

(3) 2本パイプの渦励振は、対象とするパイプの下流あるいは斜め上流にパイプがあるときは単体パイプに比べその振幅が大きくなり、対象とするパイプの上流あるいは斜め下流にパイプがあるときはその振幅が小さくなる、という傾向がある。なお流れが乱流のときは、一様流の場合に比べ振幅は小さくなる。

3. 2本のパイプの渦励振に関する3次元模型実験

3.1. ま え が き

海洋構造物の部材として用いられるパイプは、その振動振幅が部材軸方向に一様でないため流体力が振幅依存性の強い場合は流体力も部材軸方向に一様でなく、この意味で3次元性を有する構造物といえることができる。したがって、2次元模型実験より得られたパイプの渦励振特性より、実際のパイプ部材の渦励振特性を推定するためには、構造物の3次元性および流体力の3次元性が渦励振特性におよぼす影響を考慮し、必要に応じて何らかの補正を行う必要がある。

また、2章に述べた2次元模型実験において、2本のパイプの渦励振特性を調べたときには、実験装置の都合上常に一方の模型をダミー模型とし風路に固定したが、実際の構造物ではどちらのパイプも振動しうる状態であるため、この状態でパイプの振動を測定することが望ましい。

単体のパイプの抗力係数がレイノルズ数によって変化するように、渦励振におよぼす3次元性の影響、および支持条件の影響もレイノルズ数によって程度が異なることが予想されるので、広い範囲のレイノルズ数にわたりこれらの影響を評価するのが理想的であるが、実験設備、期間等の制約により今回は2種類の直径のパイプの3次元模型を用いて、風洞実験より単体パイプの渦励振特性、および流れ方向に並列した2本パイプの振動特性を求めた。さらに接近流速の時間的・空間的変動がこの振動におよぼす影響を調べるために、気流としては乱れのほとんどない一様気流の他に格子によって乱れを生じさせた気流（格子乱流）も用いた。

3.2. 実験方法および実験条件

3.2.1. 気 流

使用した風洞は建設省土木研究所耐風工学実験施設内のフラッター風洞である。本風洞の諸元を表3-1に示す。実験には乱れのほとんどない一様気流の他に、格子乱流も用いた。使用した格子の諸元は、メッシュサイズ0.625 m、バーサイズ0.175 mである。

格子乱流の特性は以下のとおりである。

乱れ強さ；主流方向成分	24%（格子下流3.12 m）	14%（格子下流5.00 m）
	11%（格子下流6.25 m）	8%（格子下流8.00 m）
鉛直方向成分	18%（格子下流3.12 m）	10%（格子下流5.00 m）

鉛直方向成分 8% (格子下流 6.25 m) 6% (格子下流 8.00 m)

いずれも測定胴断面中央において測定したものであり、平均風速 1 m/s 以上では、乱れ強さはほぼ一定であった。

乱れのスケール：

L_x^u (主流方向風速の主流方向のスケール) および L_x^w (鉛直方向風速の主流方向のスケール)

測定胴断面中央において測定したデータから、MEM法によりパワースペクトルを求め、周波数 0 の成分からスケールを計算すると、 L_x^u 、 L_x^w は格子からの距離に対してはほとんど変動しないが、平均風速とともに増加する傾向を示し、平均風速 1 m/s ~ 11 m/s の間で、 L_x^u は 0.3 m ~ 0.7 m、 L_x^w は 0.1 m ~ 0.5 m であった。

L_y^u (主流方向風速の主流直角水平方向のスケール) および L_y^w (鉛直方向風速の主流直角水平方向のスケール)

測定胴中央の高さにおいて、主流直角方向にトラバースして得られたデータから相関係数を求め、これよりスケールを計算すると、 L_y^u 、 L_y^w は平均風速および格子からの距離に対してはほとんど変動せずに、 L_y^u は 0.4 m ~ 0.5 m、 L_y^w は 0.1 m ~ 0.2 m であった。

3. 2. 2. 模 型

模型は直径 50 mm および 70 mm の 2 種類のアルミパイプを用いた。模型は格子を設置する測定胴上流端より約 8 m ほど下流に鉛直にたて、測定胴上下方の内壁に単純支持の条件を満足するようにユニバーサルジョイントを介して設置した。また、2 本のパイプで実験する場合には、流れ方向に並列して設置した。模型の諸元および設置位置を図 3-1、および図 3-2 にそれぞれ示す。

パイプの振動はひずみ型加速度計により計測した。パイプの 1/2 点および下方 1/4 点の主流方向および主流直角方向の振動を測定するために、1 体のパイプの内部に 4 台の加速度計を組み込んだ。加速度計の取付け位置および実験結果の整理の便宜上つけた加速度計の番号を図 3-3 に示す。

加速度計を組み込んだパイプ模型の構造特性を表 3-2 に示す。表の固有振動数および対数減衰率の実測値は、無風時に模型に力を加え変位させ、瞬時に力を取り去り自由振動させたときの加速度記録より読み取ったものであり、多少のバラツキを含むものである。

実験は単体パイプの他に、流れ方向に 2 本並列したケースについても実施したが、このときのパイプの純間隔はパイプ直径の 1 倍、3 倍および 9 倍にそれぞれ定めた。実験ケースをとりまとめ、表 3-3 に示す。

3. 2. 3. 計測方法およびデータ処理方法

一様気流中における気流の計測には、ピトー管および精密微差圧計を用い、格子乱流中における気流の計測には熱線風速計を用いた。

パイプの振動は、3. 2. 2 に述べたように模型内部に組み込んだ加速度計により計測した。

加速度から変位を求める際には、加速度の時系列データをフーリエ変換し、周波数領域で積分操作をした。これより振動変位の標準偏差を求める場合は、低周波数における雑音の悪影響を避けるために、ある遮断周波数 f_1 以下の成分を除去することにした。この遮断周波数 f_1 の設定にあたっては、数ケースのデータを用いて f_1 を 0 Hz から模型の固有振動数 f_0 まで変化させ、そのときの振動変位の標準偏差 σ_x の変化を調べた。その結果 f_1 が 0 Hz から $1/2 f_0$ に変化する際は、 σ_x も減少を続けるが、 $1/2 f_0$ から f_0 に変化する際には、 σ_x はほぼ一定の値をとることが明らかになったため、 f_1 は $1/2 f_0$ の値に設定した。

3.3. 実験結果

3.3.1. 一様流中における単体パイプの渦励振（実験番号 1 および実験番号 16）

直径 50mm の単体パイプの一様流中における風速と振動変位の標準偏差の関係（以下 $V - \sigma_A$ と略す）を図 3-4 に、直径 70mm の単体パイプの同様の関係を図 3-5 にそれぞれ示す。図 3-4 より直径 50mm のパイプの場合は風速約 2 m/s および約 9 m/s で振幅が増大することがわかる。風速 2 m/s 付近ではおよそ 1 次の曲げ振動数で、また、風速 9 m/s 付近ではおよそ 2 次の曲げ振動数でそれぞれ振動している。4 つの振動変位のうち、風速 2 m/s 付近では $1/2$ 点の主流直角方向の変位が大きく、風速 9 m/s 付近では $1/4$ 点の主流直角方向の変位が大きい。一方、図 3-5 より直径 70mm パイプの場合は風速約 4 m/s で振幅が増大することがわかる。この振動はほぼ 1 次の曲げ振動数で起こり、 $1/2$ 点の主流直角方向の変位が大きい。今回実験した風速範囲では、直径 70mm パイプの 2 次の曲げ振動数に対応した振動は見られなかった。

今回の実験結果の整理は直径 50mm パイプの曲げ 1 次の渦励振に対しては $1/2$ 点の主流直角方向変位に注目して、曲げ 2 次の渦励振に対しては $1/4$ 点の主流直角方向変位に注目して、また、直径 70mm パイプの曲げ 1 次の渦励振に対しては $1/2$ 点の主流直角方向変位に注目して行った。

3.3.2. 一様流中における 2 本パイプの渦励振（実験番号 2～4 および実験番号 13～15）

2 本パイプの間隔を変化させたときの、一様気流中での $V - \sigma_A$ を図 3-6～図 3-8 に示す。図 3-6 は直径 50mm のパイプの曲げ 1 次の渦励振に着目し、 $1/2$ 点の主流直角方向の振動のようすを示したものである。図より 2 本パイプの間隔が 1 D のときはほとんど顕著な渦励振が見られないこと、3 D のときは共振風速が単体パイプより若干高くなり下流側パイプの振幅は単体パイプに比べ約 6 倍も大きくなること、9 D のときは単体パイプの挙動にほぼ近くなることなどがわかる。図 3-7 は直径 50mm パイプの曲げ 2 次の渦励振に着目し、 $1/4$ 点の主流直角方向の振動のようすを示したものである。図より 2 本パイプの間隔が 1 D のときは共振風速が単体パイプより約 1.3 倍ほど高くなり、振幅は上流側パイプも下流側パイプも単体パイプに比べ数十倍も大きくなること、3 D のときは共振風速が単体パイプより約 1.1 倍ほど高くなり、振幅は上流側パイプも下流側パイプも単体パイプに比べ数倍も大きくなること、9 D のときは単体パイプの挙動はほぼ近くなることなどがわかる。図 3-8 は直径 70mm パイプの曲げ 1 次の渦励振に着目し、 $1/2$ 点の主流直角方向の振動のようすを示

したものである。図より2本パイプの間隔が1Dのときは共振風速が単体パイプより約1.3倍ほど高くなり、振幅は上流側パイプも下流側パイプも単体パイプに比べ数倍も大きくなること、3Dのときは共振風速が単体パイプより約1.1倍ほど高くなり、振幅は単体パイプとほぼ同じであること、9Dのときは単体パイプの挙動にはほぼ近くなることなどがわかる。

3.3.3. 格子乱流中における単体パイプの渦励振（実験番号8および実験番号9）

単体パイプの格子乱流中における $V-\sigma_A$ を一樣気流中の $V-\sigma_A$ と比較して図3-9～図3-11に示す。図3-9は直径50mmパイプの曲げ1次の渦励振に着目したものであるが、図より乱流中では共振風速が一樣流中に比べ約1.1倍高くなり、振幅は若干大きくなることがわかる。図3-10は直径50mmパイプの曲げ2次の渦励振に着目したものであるが、乱流中では共振風速が一樣流中に比べ約1.2倍高くなり、振幅は若干小さくなることがわかる。図3-11は直径70mmパイプの曲げ1次の渦励振に着目したものであるが、乱流中では共振風速が一樣流中に比べ約1.2倍高くなり、振幅は若干小さくなることがわかる。

3.3.4. 格子乱流中における2本パイプの渦励振（実験番号5～7および実験番号10～12）

2本パイプの間隔を変化させたときの、格子乱流中での $V-\sigma_A$ を図3-12～図3-14に示す。2本パイプの間隔がパイプの共振風速および振幅におよぼす影響は定性的には一樣流中の特性とほぼ同様であるが、振幅の変化は一樣流中の変化に比べおだやかになっている。

3.4. 考 察

3.4.1. 単体パイプの渦励振特性について

流体力の2次元性を無視すれば、渦励振振幅は次式で推定できる³⁾。

$$y(x) = \frac{\int_0^L |X(x)| dx}{8\pi f_0^2 \delta \int_0^L m \{X(x)\}^2 dx} C_L \rho U^2 D X(x) \quad (1)$$

ここに、 $y(x)$ ； x におけるパイプ振幅

L ；パイプ長さ

$X(x)$ ；パイプの固有振動モード

C_L ；パイプの非定常的な揚力係数

ρ ；空気密度

U ；流速

D ；パイプ直径

f_0 ；パイプの固有振動数

δ ；パイプの構造減衰率

m ；単位長さあたりのパイプ

また、渦励振振幅が極大となる風速は次式で推定できる³⁾。

$$U_p = r \frac{f_0 D}{S} \quad (2)$$

ここに、 U_p ；渦励振振幅が極大となる風速

r ；定数

S: ストローハル数

一様気流中における単体パイプの実験より求まる諸数値を用い、 $S = 0.2$ と仮定し、(1)式中の C_L 、(2)式中の r を推定した結果を表 3-4 に示す。これより r は Sainsbury らの報告⁴⁾ による 1.08 に比較すればほぼ等しいといえ、直径 50mm パイプの曲げ 2 次振動および直径 70mm パイプの曲げ 1 次振動の C_L は、Bishop らの報告⁵⁾ および松井らの報告⁶⁾ による 0.2 ~ 0.6 に比較すればほぼ等しいといえるが、直径 50mm パイプの曲げ 1 次振動の C_L はかなり小さめの値である。この理由としては、渦励振振幅が極大値となる流速 U_p におけるレイノルズ数が、直径 50mm パイプの曲げ 1 次振幅では約 7×10^3 であるのに比べ、直径 50mm パイプの曲げ 2 次振幅では約 3×10^4 、直径 70mm パイプの曲げ 1 次振幅では約 2×10^4 と大きくなるが、このレイノルズ数の差が C_L の値に影響を与えていることなどが考えられる。

これらの結果より、レイノルズ数 $7 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ におけるパイプの渦励振の発現流速は (2)式より $S = 0.2$ 、 $r = 1.0$ とすればほぼ推定できること、またレイノルズ数 $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ におけるパイプの渦励振の振幅は、(3)式で $C_L = 0.2 \sim 0.4$ とすればほぼ推定できることが明らかとなった。

3.4.2. パイプの渦励振におよぼす格子乱流の影響

3.4.1 に述べたように直径 50mm パイプの曲げ 1 次振動時における C_L の値、換言すれば振幅の値が既往の報告に比べ著しく小さい値で得られたので、以下に格子乱流による影響および隣接パイプの影響を考察する際には、このケースを除き、直径 50mm パイプの曲げ 2 次振動および直径 70mm パイプの曲げ 1 次振動に着目することにする。

格子乱流中においては渦励振が極大となる風速は、一様流中に比べ高くなる。その程度は、単体パイプの場合で約 1.2 倍となるが、図 3-10 ~ 図 3-11 の $V - \sigma_A$ および (2)式を考え合わせれば、ストローハル数が約 0.8 倍になったと考えることができる。また、渦励振の極大振幅は、一様流中にある場合に比べ低下しているが、(1)式よりこの原因は格子乱流中での C_L が一様流中に比べ低下したことにあると考えられる。したがって、レイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ の範囲では格子乱流はストローハル数および C_L を低下させる効果があるといえる。

3.4.3. パイプの渦励振におよぼす隣接パイプの影響

流れの方向にパイプを 2 体並べると、渦励振振幅が極大となる風速は単体パイプに比べ高くなり、渦励振の極大振幅は単体に比べ大きくなる。これらの傾向は 2 本のパイプの純間隔がせまいほど顕著に現われ、間隔が直径の 9 倍程度になるとほぼ単体パイプの挙動に近くなる。

2 本のパイプの純間隔が直径の 1 倍のとき、渦励振振幅が極大となる風速は単体パイプに比べ約 1.3 倍であるが、極大振幅は単体パイプに比べ数倍から数十倍にも増大する。この現象は発生する風速領域が限定されているという意味で渦励振に似た特性をもち、上流側パイプの後流乱れにも関連しているという意味でバフティングと考えることもでき、また振動の激しさから流体および 2 本のパイプを含む振動系の自励振動と考えることもできるが、現在のところこの現象の発生機構の詳細は不明な点が多い。

今回は 2 本のパイプとも振動を拘束しない支持方法をとったが、この結果を昨年度実施し

た二次元模型実験結果³⁾，すなわち上流側模型あるいは下流側模型いずれかを風路内に固定して実験した結果と比較すると以下のことがいえる。

一方を固定した2本パイプの実験結果では，渦励振の発振風速が単体パイプの場合に比べ増加するという傾向，および上流側模型の渦励振振幅が単体パイプの振幅より大きくなるという傾向があり，これらは今回の実験結果と一致している。しかし，上流側模型を固定し，下流側模型の挙動を調べると，下流側模型の振幅は単体パイプの振幅に比べて小さくなったが，この傾向は今回の実験結果と異なっている。したがって，下流側模型の振動には上流側模型の振動状態，さらにこれに起因する上流側模型の後流の状態が重要な意味をもつと考えられる。

3.5. ま と め

今回の実験より明らかとなった事項をまとめると以下のとおりである。

- (1) 一様気流中における単体パイプの渦励振特性を3次元模型実験により把握した。この結果，渦励振振幅が極大となるレイノルズ数が $7 \times 10^3 \sim 3 \times 10^4$ の範囲にある場合には，渦励振振幅が極大となる風速は既往の式により推定できること，また同レイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ の範囲にある場合には，渦励振の極大振幅は構造物の3次元性のみを考慮した既往の式により推定できることが明らかとなった。
- (2) 格子乱流中においては，渦励振振幅が極大となるレイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ の範囲にある場合は，一様流に比べその風速は高くなり，極大振幅は低下する。
- (3) パイプを流れ方向に2本並列したとき，渦励振振幅が極大となるレイノルズ数が $2 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4$ の範囲にある場合は単体パイプに比べその風速は高くなり，極大振幅は増加する。この傾向は2つのパイプの純間隔が小さいほど顕著であり，直径の9倍ほど離すと単体パイプの挙動にほぼ近くなる。
- (4) 今回の実験より求めた隣接パイプの影響を，いずれか一方のパイプを風路内に固定した2次元実験より求めた結果と比較すると，下流側パイプの渦励振振幅の値が2次元実験より求めた方が過少評価していることが明らかとなった。

4. お わ り に

今年度の調査により，隣接して設置された2本のパイプに作用する定常的な流体力および2本パイプの渦励振特性の一部が明らかとなった。これらの特性はレイノルズ数によって少なからぬ影響を受けるため，今回の成果もその適用範囲には限界があるが，定常流体力特性および渦励振特性を端的に知るためには有効なデータを蓄積できたと考える。

実験装置の都合上超臨界域および極超臨界域における定常流体力特性および渦励振特性を実験的に求めることは困難なため，これらについては文献調査により資料を収集することにし，また亜臨界領域において欠けているデータ（主流方向に対し斜めに配置された3次元2本パイプの渦励振特性など）については今後実験を行うことにより収集し，潮流力に対するパイプ構造物の設計法を提案するため研究を続けるつもりである。

参 考 文 献

1. 建設省土木研究所構造研究室；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，昭和52年3月
2. 建設省土木研究所構造研究室；複数パイプに及ぼす流体力に関する調査，土木研究所資料第1370号，昭和53年3月
3. 建設省土木研究所構造研究室；海洋構造物の設計外力及び耐荷力に関する研究報告（I-1979），土木研究所資料第1560号，昭和55年3月
4. R. N. Sainsbury, D. King ; The flow induced oscillation of marine structures, Proc. Instn. Civ. Engrs. 49, 1971
5. R. E. D. Bishop, A. Y. Hassan ; The lift and drag force on a circular cylindar in a flowing fluid, Proc. Roy. Soc. A, 1964
6. 松井，田中，高原，梅村，池上；カルマン渦による円柱の振動について，三菱重工業株式会社，昭和49年

表 · 図

11

12

表 2-1. 非定常空気力風洞諸元

風 洞 形 式			単回路還流式
主要寸法	測定胴	幅 (mm)	1,000
		高 (mm)	2,000
		長 (mm)	3,000
	縮流胴	入 口 (mm×mm)	3,000×5,000
		出 口 (mm×mm)	1,000×2,000
		縮流比	7.50
	風 路 全 長 (mm)		55,000
送 風 機	形 式		固定ピッチ動翼軸流式
	動 翼 直 径 (mm)		1,500
	有 効 全 圧 (mm Ag)		40.0
	風 量 (m³/s)		70.0
	回 転 数 (rpm)		1,250.0
	容 量 (kw)		50.0
気 流	最 大 風 速 (m/s)		30.0
	乱 れ 率 (%)		0.5 % 以下

表 2-2. 実験ケース一覧表

実験の種類別	気 流	設置模型	ダミー模型設置角度	並列パイプ間隔
二分力実験	一様流 格子乱流	単体パイプ 並列パイプ	0°, ±45°, ±90°	1 D, 2 D, 4 D, 6 D
バネ支持模型実験	一様流 格子乱流	単体パイプ 並列パイプ	0°, ±45°, ±90°	1 D, 2 D, 4 D, 6 D
非定常空気力実験	一様流 格子乱流	単体パイプ		

表 2-3. バネ支持模型実験条件

模 型 重 量	3217 gf/model
振 動 数 (たわみ)	4.0 Hz
バ ネ 定 数	2073.6 gf/cm 上バネ: 411.5 gf/cm × 4 本 下バネ: 213.8 gf/cm × 2 本
支 持 方 法	たわみ 1 自由度
構 造 減 衰	0.02

表 3-1. フラッター風洞諸元

風 洞 形 式			単 回 路 還 流 式
主 要 寸 法	測 定 胴	幅 (mm)	2,500
		高 (mm)	4,000
		長 (mm)	10,000
	縮 流 胴	入 口 (mm×mm) 出 口 (mm×mm) 縮流比	7,000×8,500 2,500×4,000 5.95
風 路 全 長 (mm)			115,000
送 風 機	形 式		固定ピッチ動翼軸流式
	動 翼 直 径 (mm)		4,000
	有 効 全 圧 (mm Ag)		40.0
	風 量 (m ³ /s)		242.0
	回 転 数 (rpm)		400.0
	容 量 (kw)		250.0
気 流	最 大 風 速 (m/s)		25.0
	乱 れ 率 (%)		0.5 % 以下
付 属 計 測 機 器 等			三分力天秤 フラッタ模型支持装置 乱流発生装置 データ処理装置

表 3-2. パイプ模型の構造特性

	直 径 50 mm の パ イ プ		直 径 70 mm の パ イ プ	
	計 算 値	実 測 値	計 算 値	実 測 値
質 量	12.2 g/cm (アルミ密度 2.75 g/cm³ と 仮定)	4.521 kg (アルミパイプ 367 cm) 1.446 kg (取付治具 2 体) 0.052 kg (加速度計 4 体) 0.410 kg (加速度計 取付治具 2 体)	17.4 g/cm (アルミ密度 2.75 g/cm³ と 仮定)	6.365 kg (アルミパイプ 367 cm) 2.900 kg (取付治具 2 体) 0.052 kg (加速度計 4 体) 0.834 kg (加速度計 取付治具 2 体)
曲げ剛体(EI)	$8.9 \times 10^9 \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$ (アルミのヤング率 $7.2 \times 10^8 \text{ gf/cm}^2$ と仮定)		$2.6 \times 10^{10} \text{ gf} \cdot \text{cm}^2$ (アルミのヤング率 $7.2 \times 10^8 \text{ gf/cm}^2$ と仮定)	
固有振動数(曲げ)	9.1 Hz (1 次) 36 Hz (2 次) (単純支持, 長さ 382 cm のパイプ と仮定)	8.4 Hz (1 次)	12.9 Hz (1 次) 52 Hz (2 次) (単純支持, 長さ 382 cm のパイプ と仮定)	11.6 Hz (1 次)
対数減衰率		0.1 (曲げ1次)		0.1 (曲げ1次)

表 3-3. 実 験 ケ ー ス

実験 番号	パイプ直径 D (m)	単体 or 2 体 の別	パイプ間隔 X/D	一様気流 or 格子乱流の別	実験したレイ ノルズ数範囲	渦励振付近のレイノルズ数	
						1 次	2 次
1	0.050	単 体		一 様 気 流	$\sim 4 \times 10^4$	$(6 \sim 8) \times 10^3$	$(3 \sim 4) \times 10^4$
2		2 体	1				
3			3				
4			9				
5			1				
6			3				
7			9				
8		単 体		格 子 乱 流			
9	2 体	1					
10		3					
11		9					
12		9					
13		3					
14		1					
15	単 体						
16							

表 3-4. 単体パイプ一様流中の振動

	直径 50mm パイプ曲げ 1 次 渦励振 (1/2 点)	直径 50mm パイプ曲げ 2 次 渦励振 (1/4 点)	直径 70mm パイプ曲げ 1 次 渦励振 (1/2 点)
f_0	8.4 (Hz)	34 (Hz)	11.6 (Hz)
D	0.050 (m)	0.050 (m)	0.070 (m)
S	0.2*	0.2*	0.2*
U_p	2.2 (m/s)	8.8 (m/s)	4.2 (m/s)
r	1.05**	1.03**	1.03**
ρ	0.12 (kgf·m ⁻⁴ ·s ²)	0.12 (kgf·m ⁻⁴ ·s ²)	0.12 (kgf·m ⁻⁴ ·s ²)
U	2.2 (m/s)	8.8 (m/s)	4.2 (m/s)
δ	0.1	0.1	0.1
m	0.12 (kgf·m ⁻⁴ ·s ²)	0.12 (kgf·m ⁻² ·s ²)	0.18 (kgf·m ⁻² ·s ²)
$X(x)$	$B \sin \frac{\pi x}{\ell}$	$B \sin \frac{2\pi x}{\ell}$	$B \sin \frac{\pi x}{\ell}$
$y(x)$	0.074 (mm)***	0.28 (mm)***	1.0 (mm)***
C_L	0.043**	0.21**	0.41**

* 仮定値

** 表に示した値から式(1)あるいは式(2)を用いて求めた推定値

*** 実験より得られた標準偏差を $\sqrt{2}$ 倍したもの

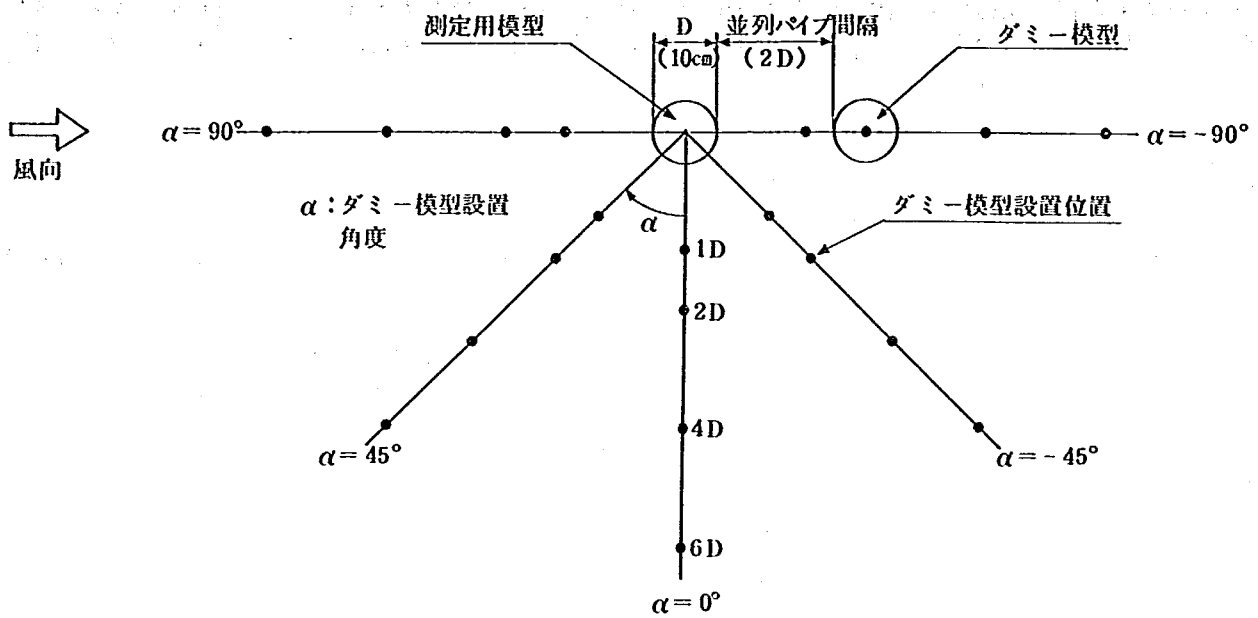


図 2 - 1 模型配置図

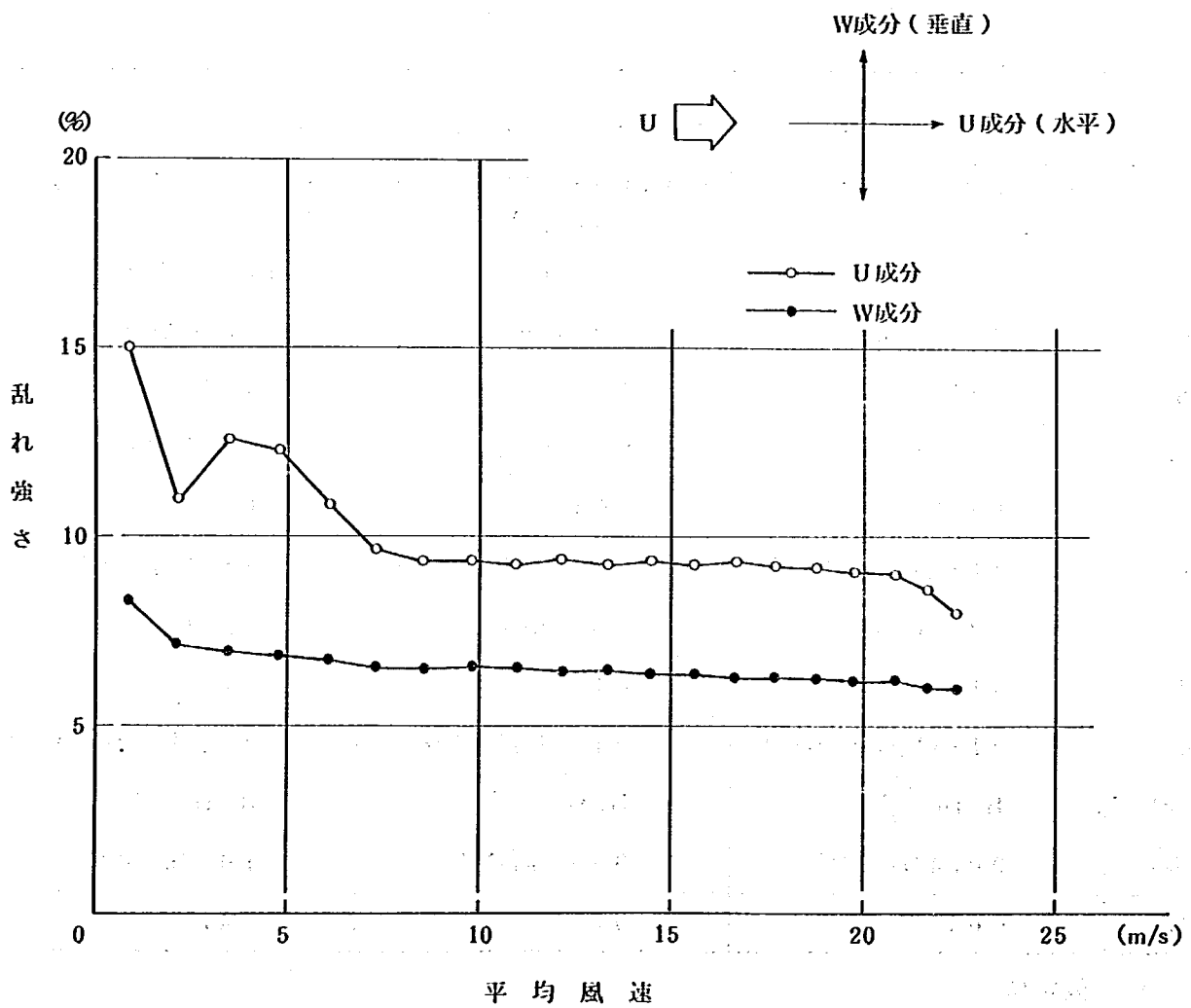
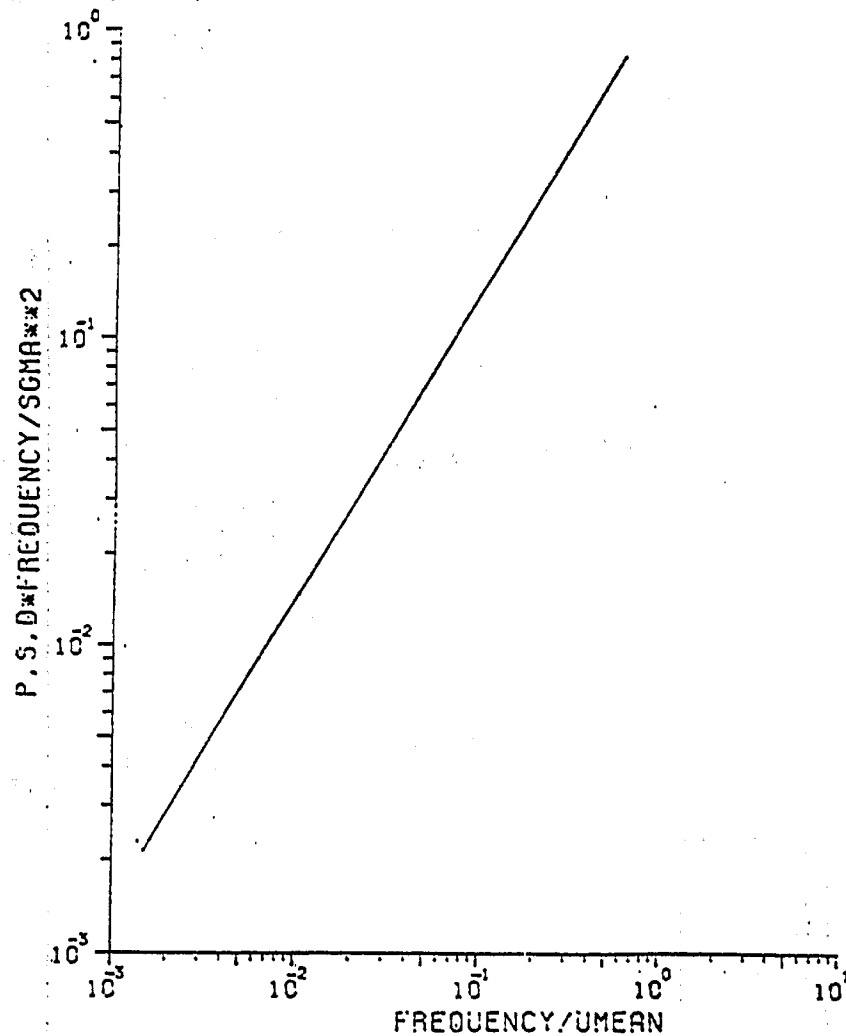


図 2 - 2 乱流特性 (バネ支持位置)

POWER SPECTRAM OF WIND

KOHSHI RANRYU No.61
 NOISE (FILTER 0 HZ)
 U= 16.69(M/S)
 S/M= 9.3(%)
 BANE SHIJI
 U SEIBUN

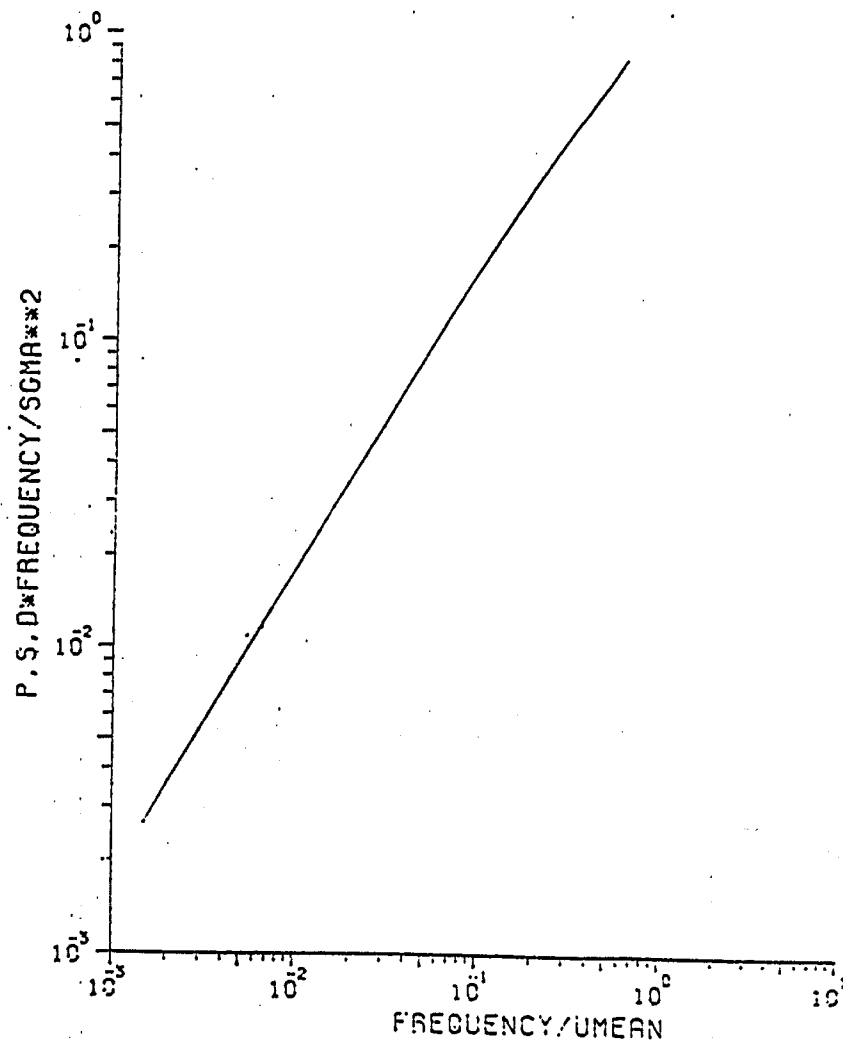
P.S.D BY MEM
 DT= 50MS
 N= 400
 FPE



POWER SPECTRAM OF WIND

KOHSHI RANRYU No.61
 NOISE (FILTER 0 HZ)
 U= 16.69(M/S)
 S/M= 6.2(%)
 BANE SHIJI
 W SEIBUN

P.S.D BY MEM
 DT= 50MS
 N= 400
 FPE



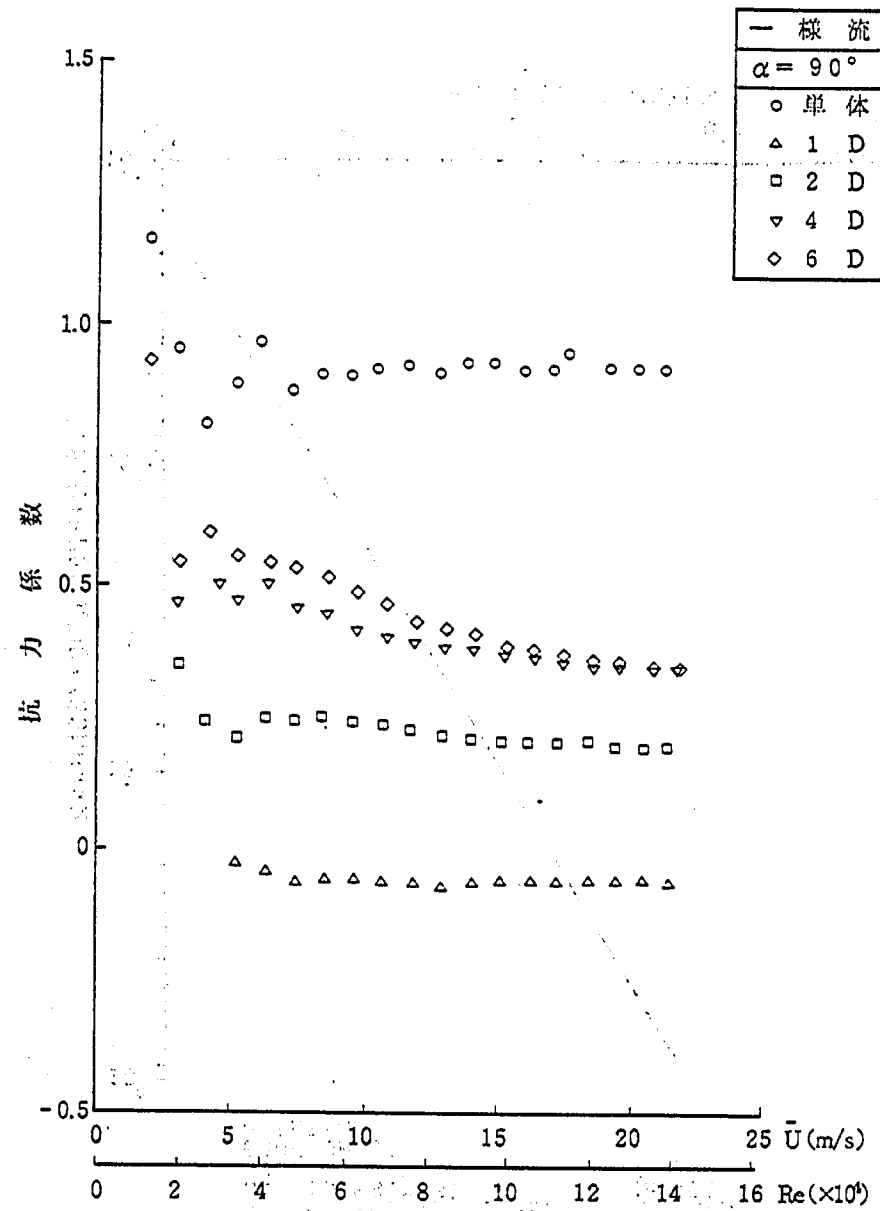


图 2-5

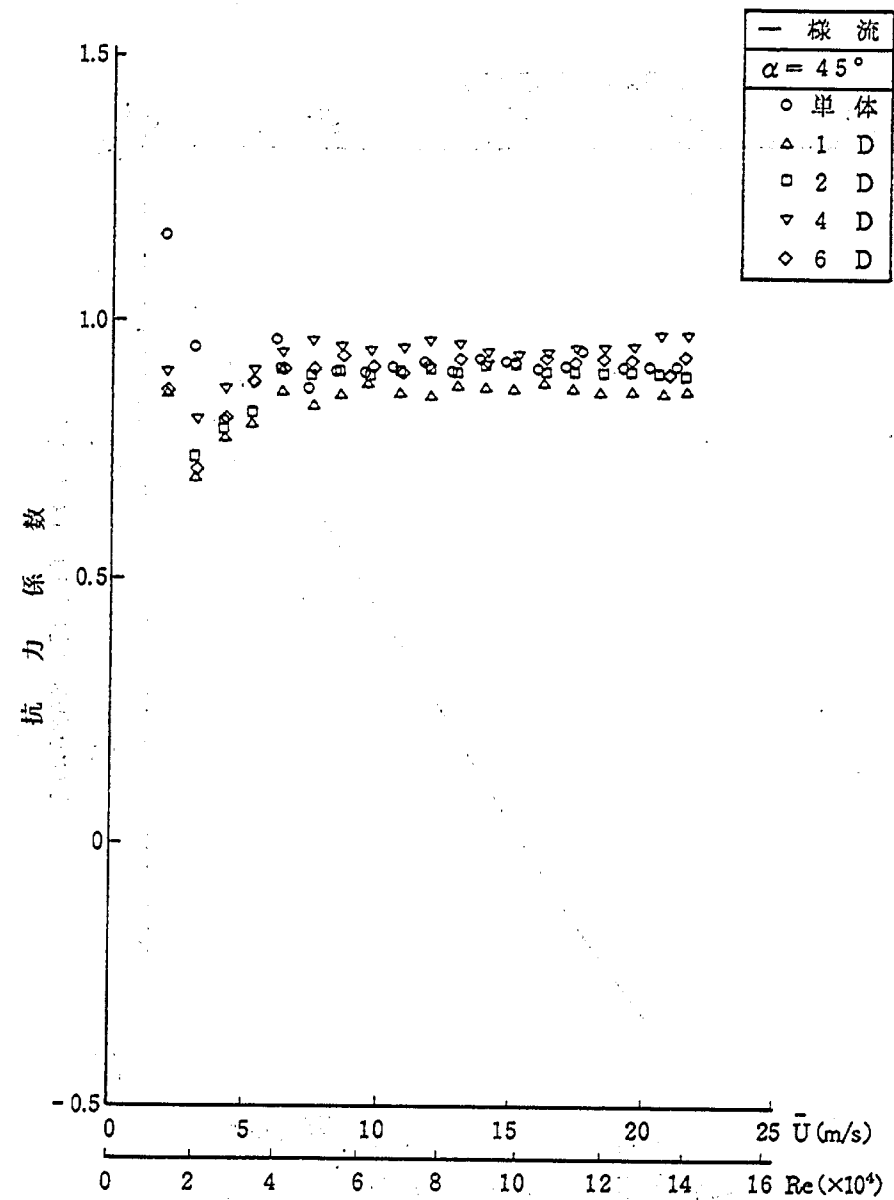


图 2-6

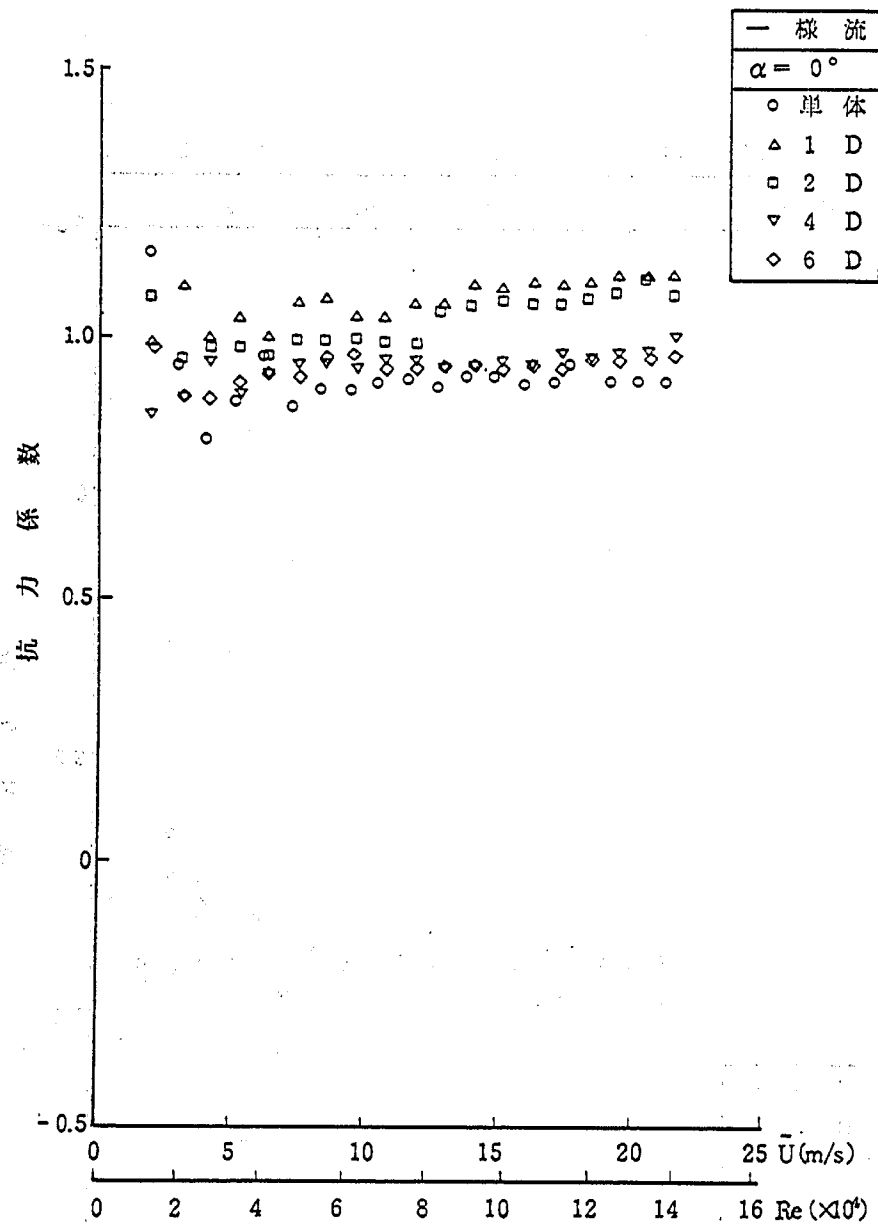


图 2-7

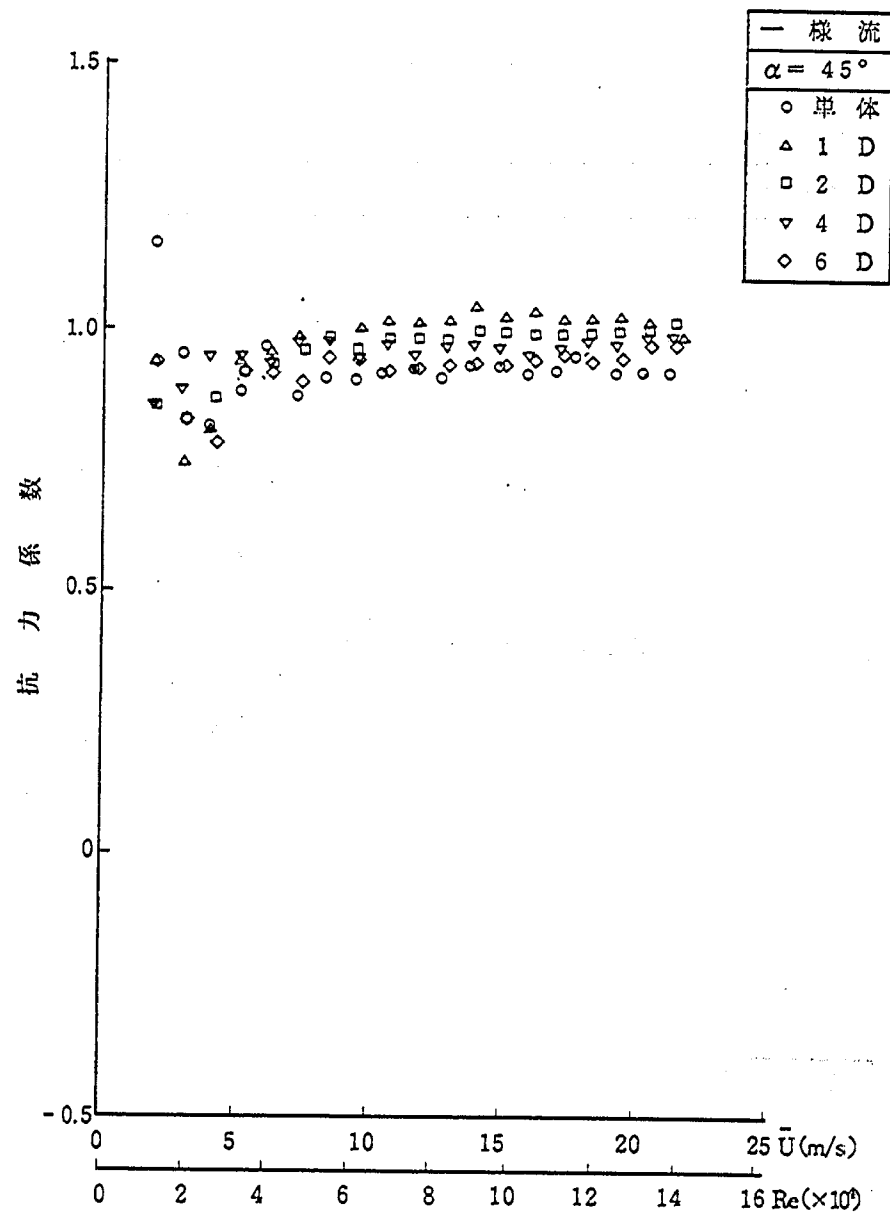


图 2-8

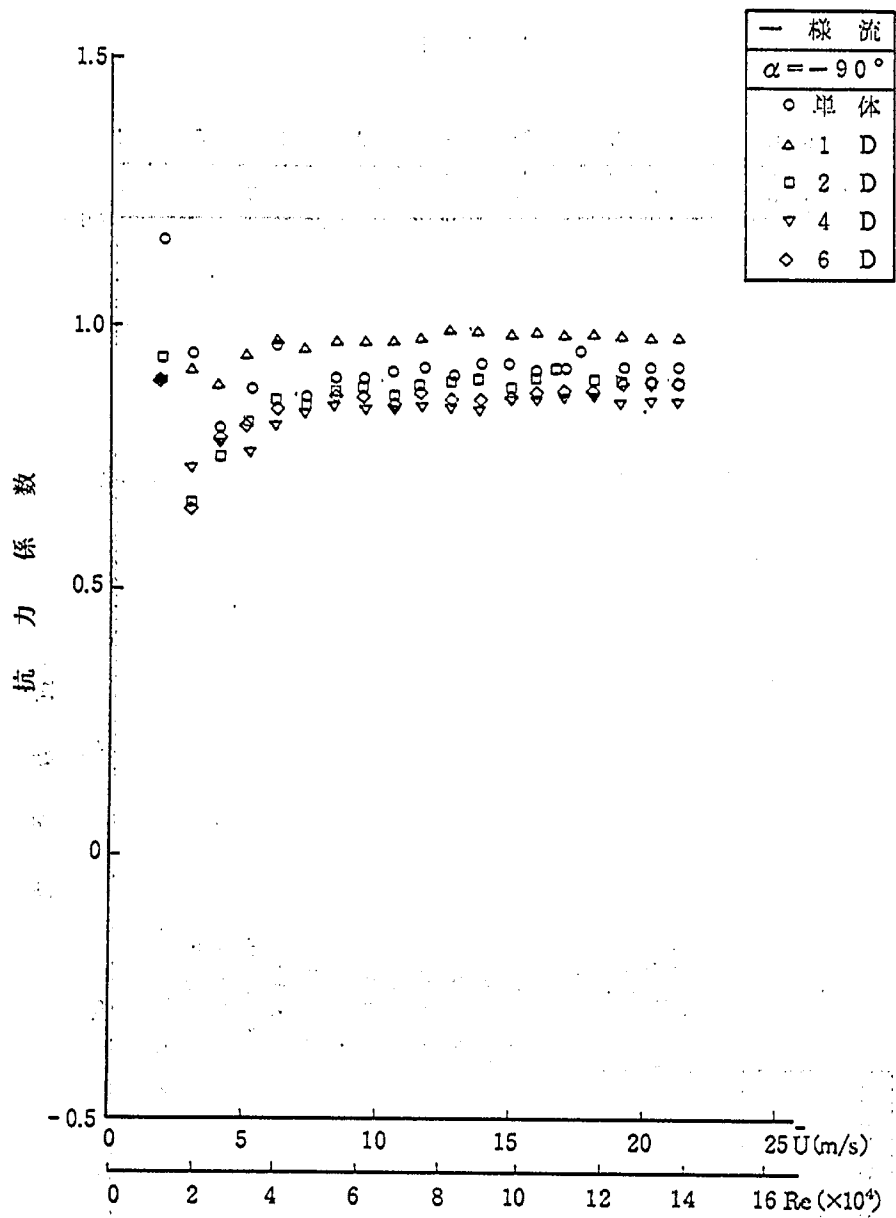


图 2-9

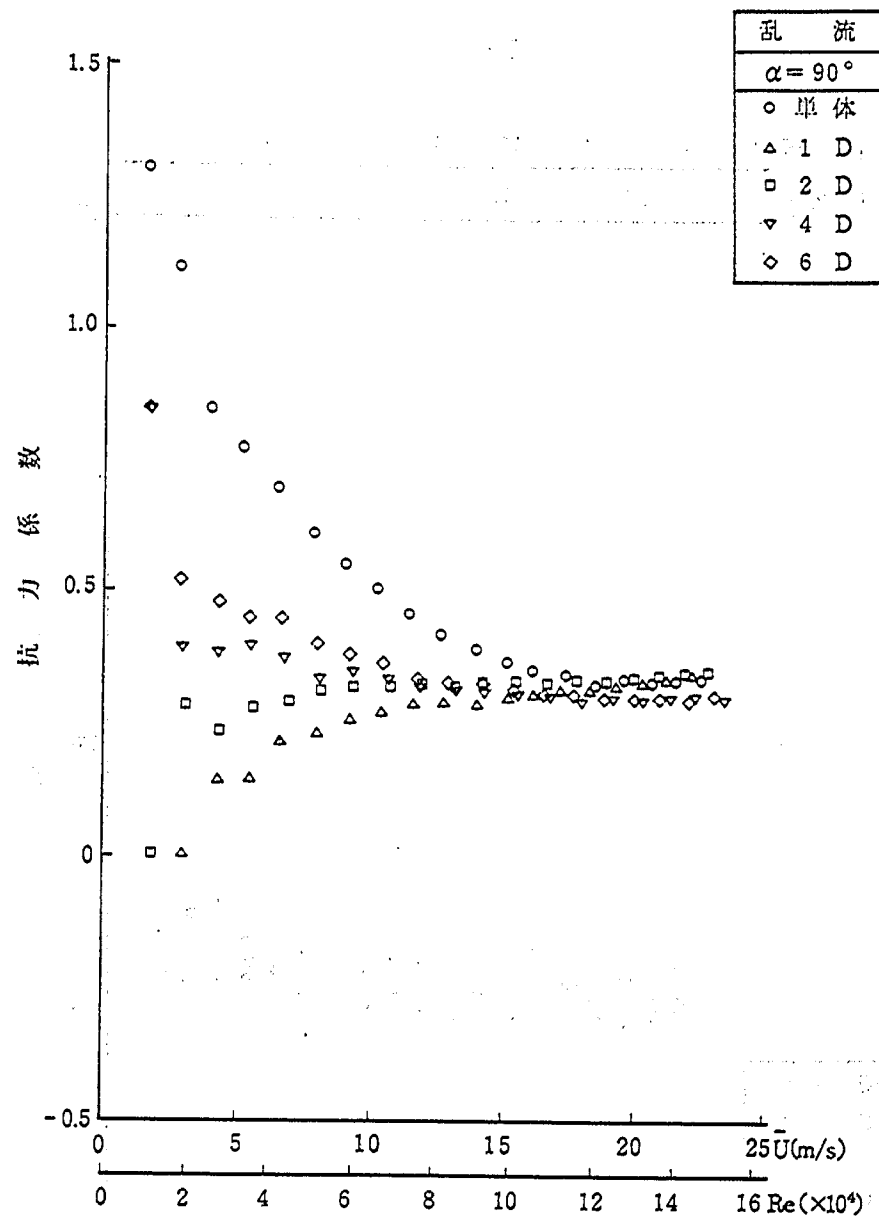


图 2-10

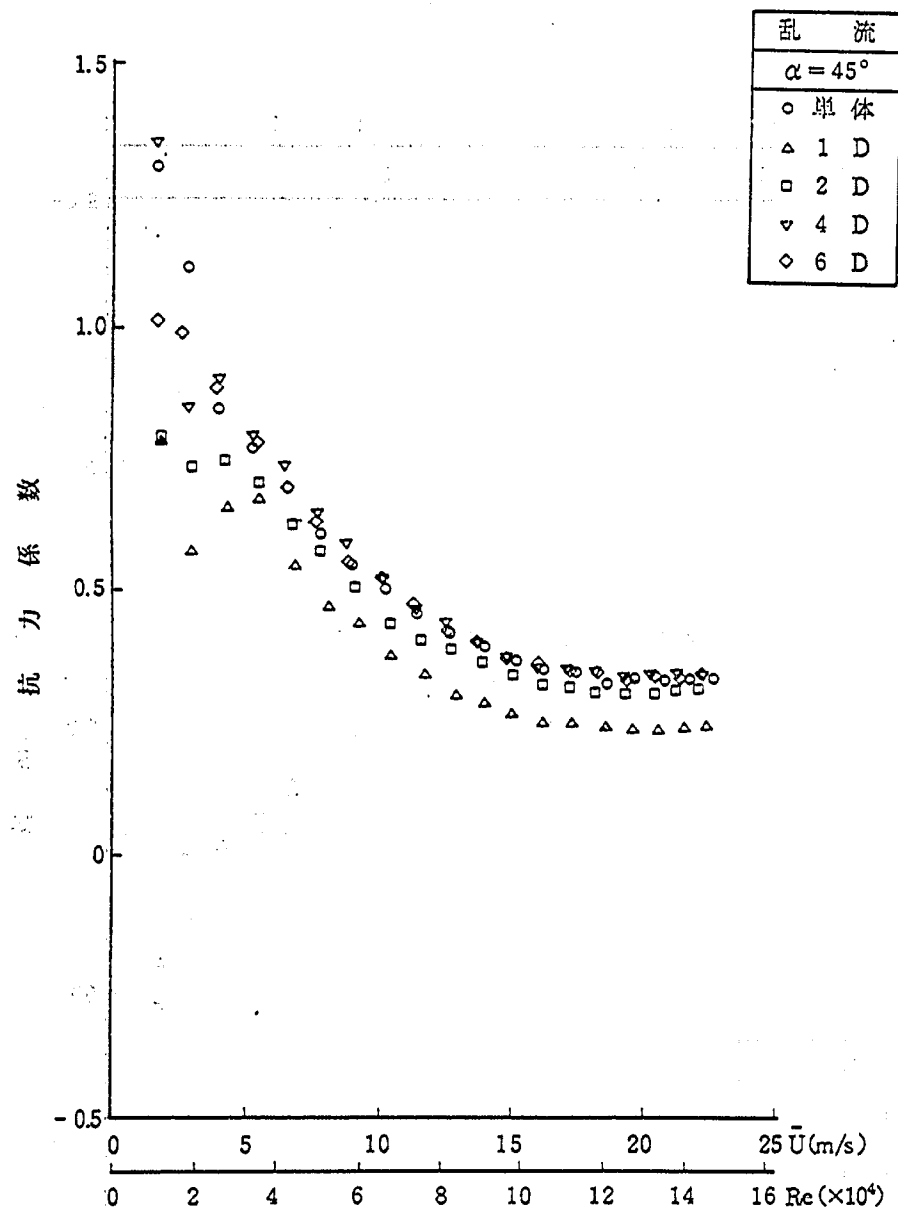


图 2 - 11

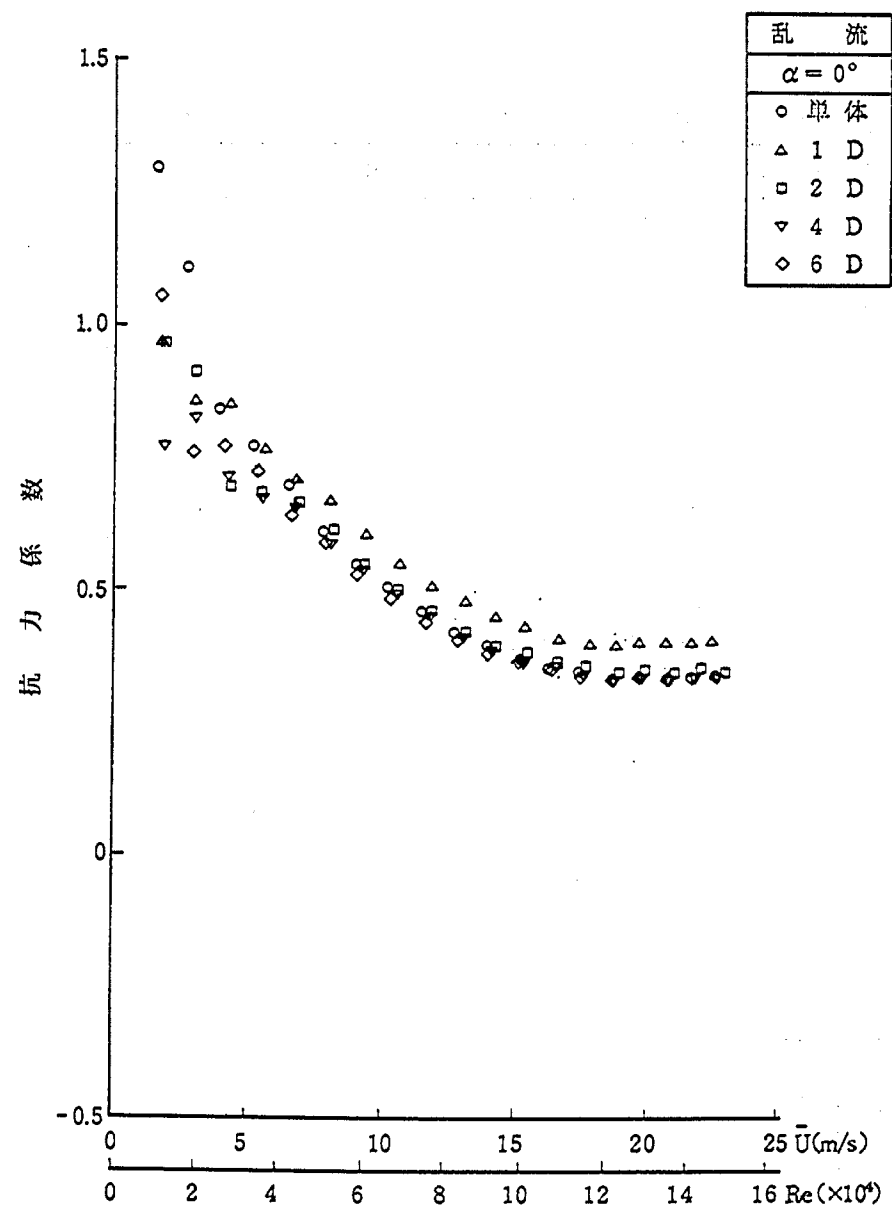


图 2 - 12

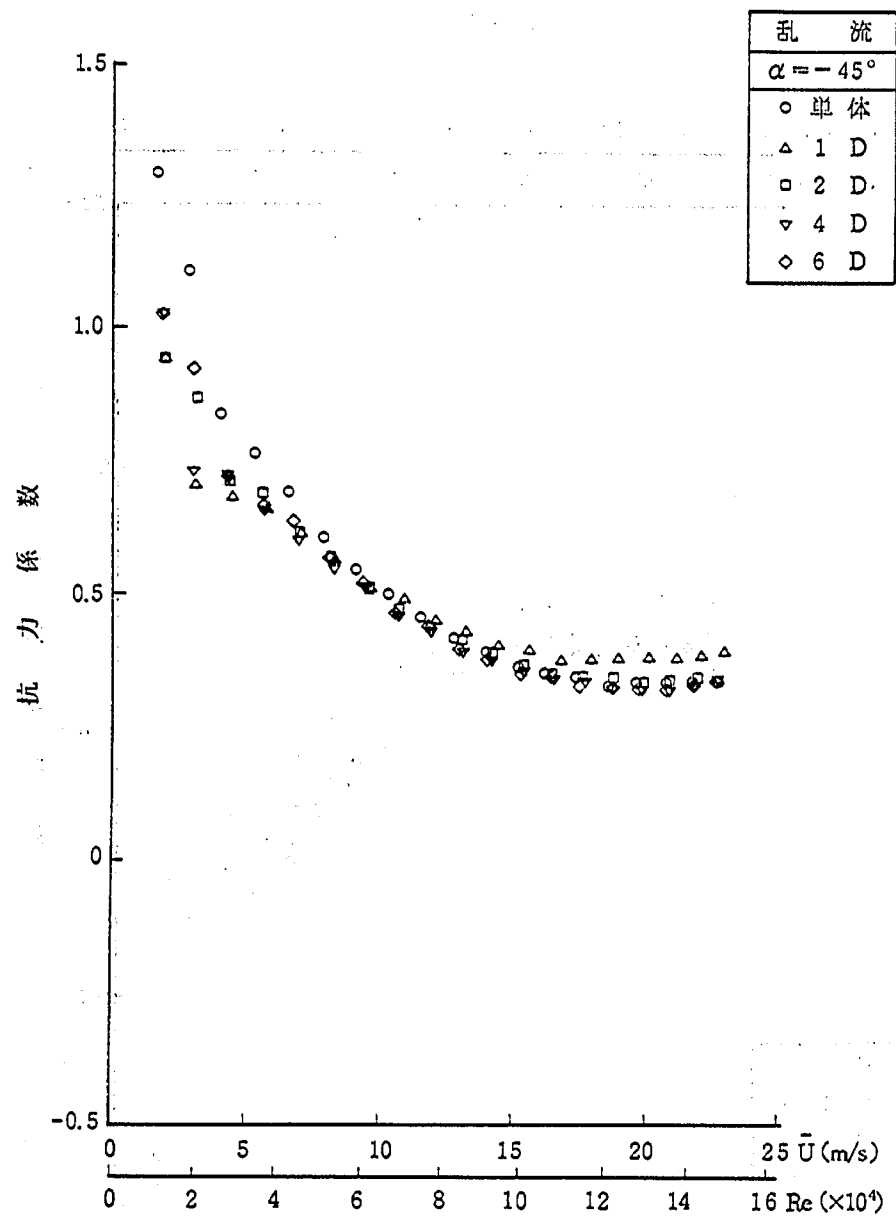


图 2 - 13

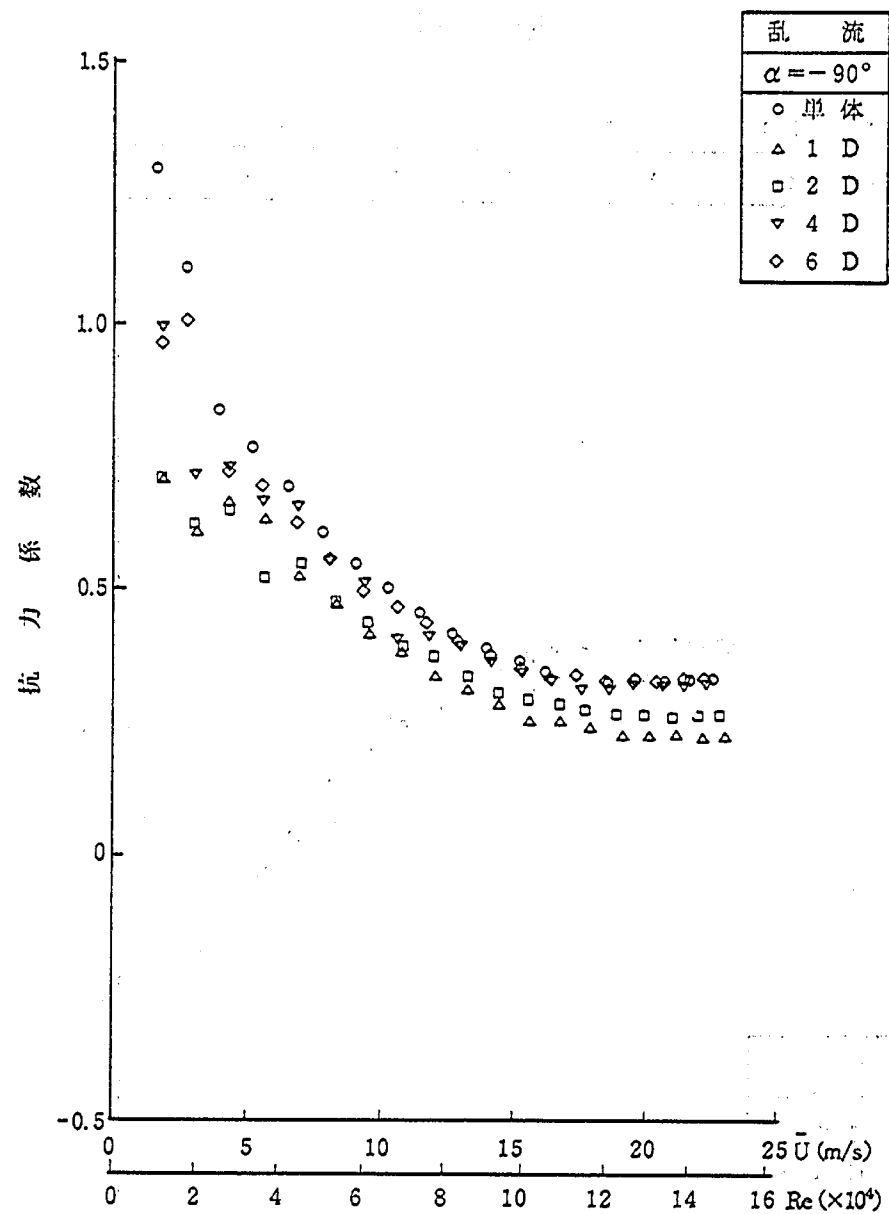


图 2 - 14

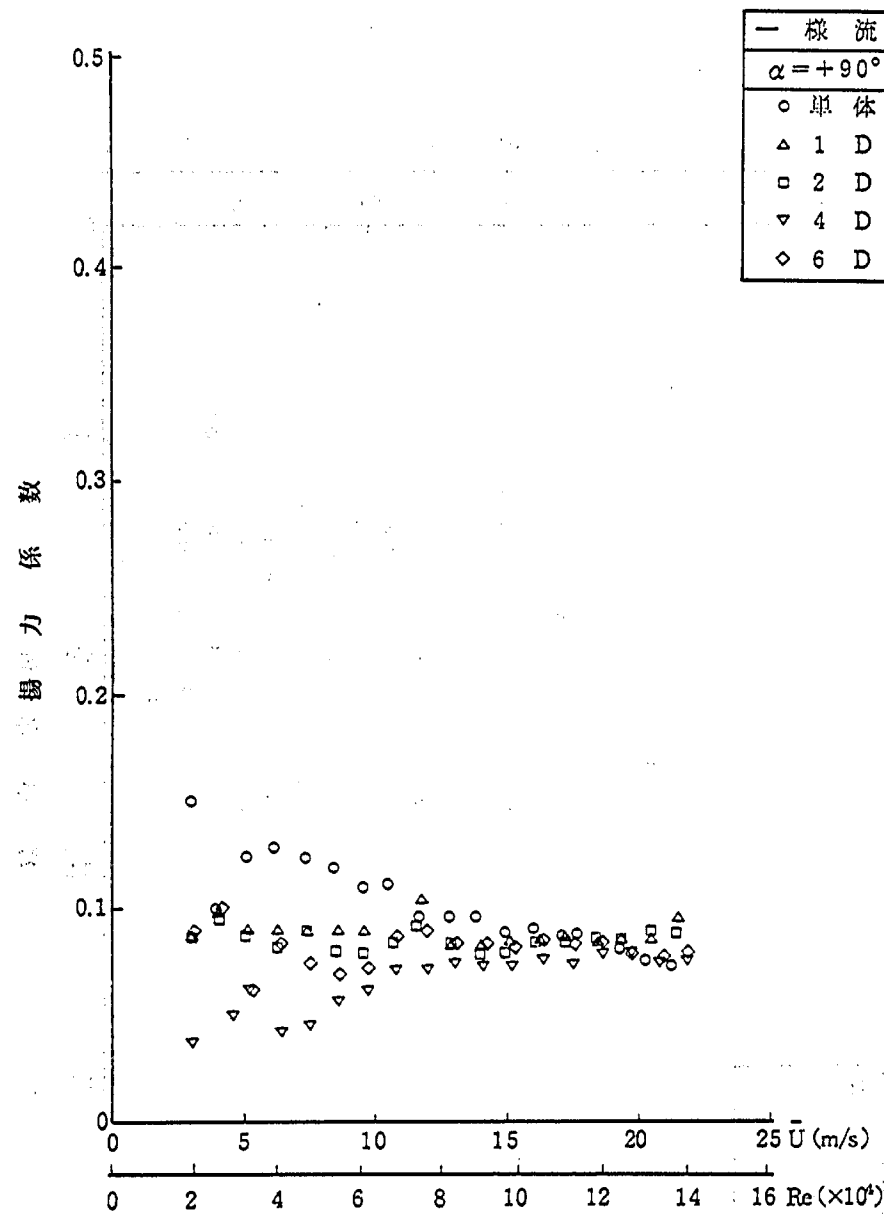


圖 2 - 15

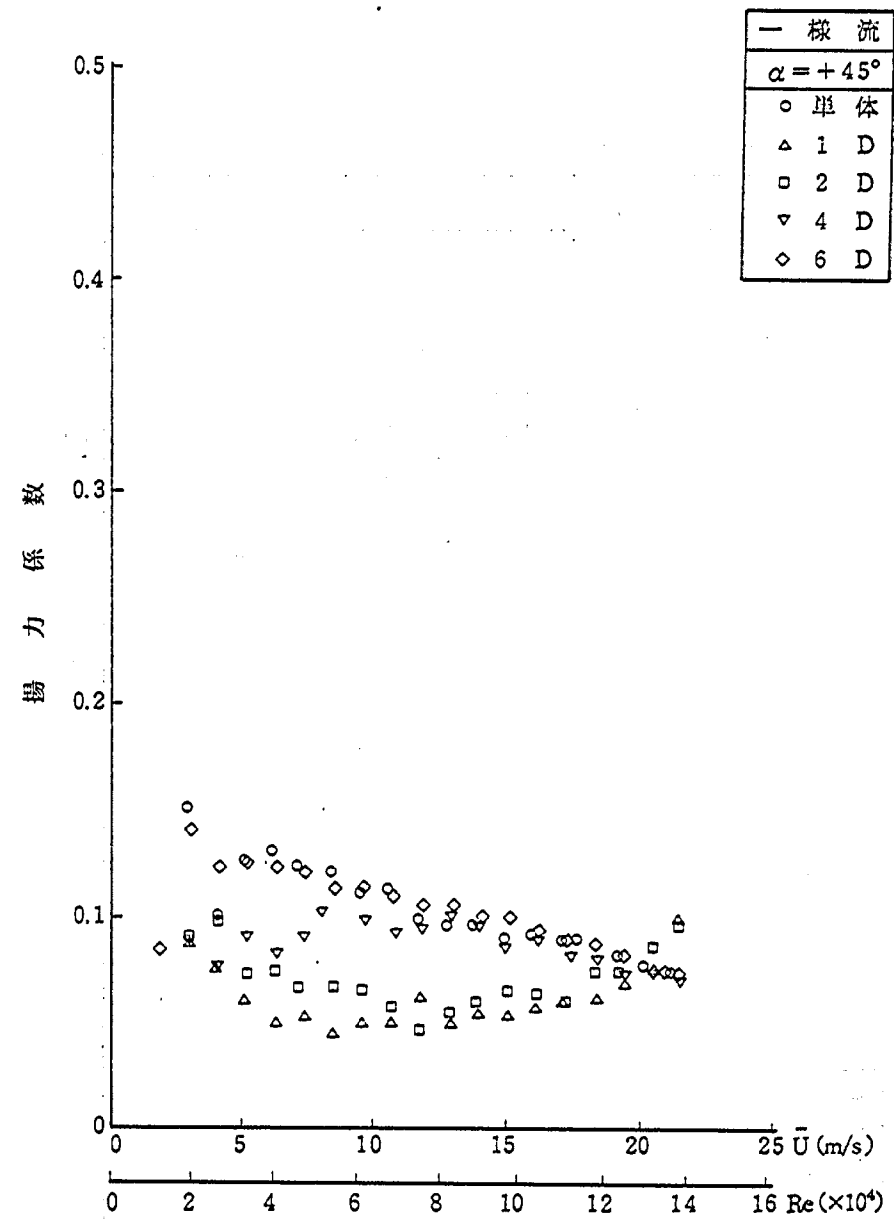


圖 2 - 16

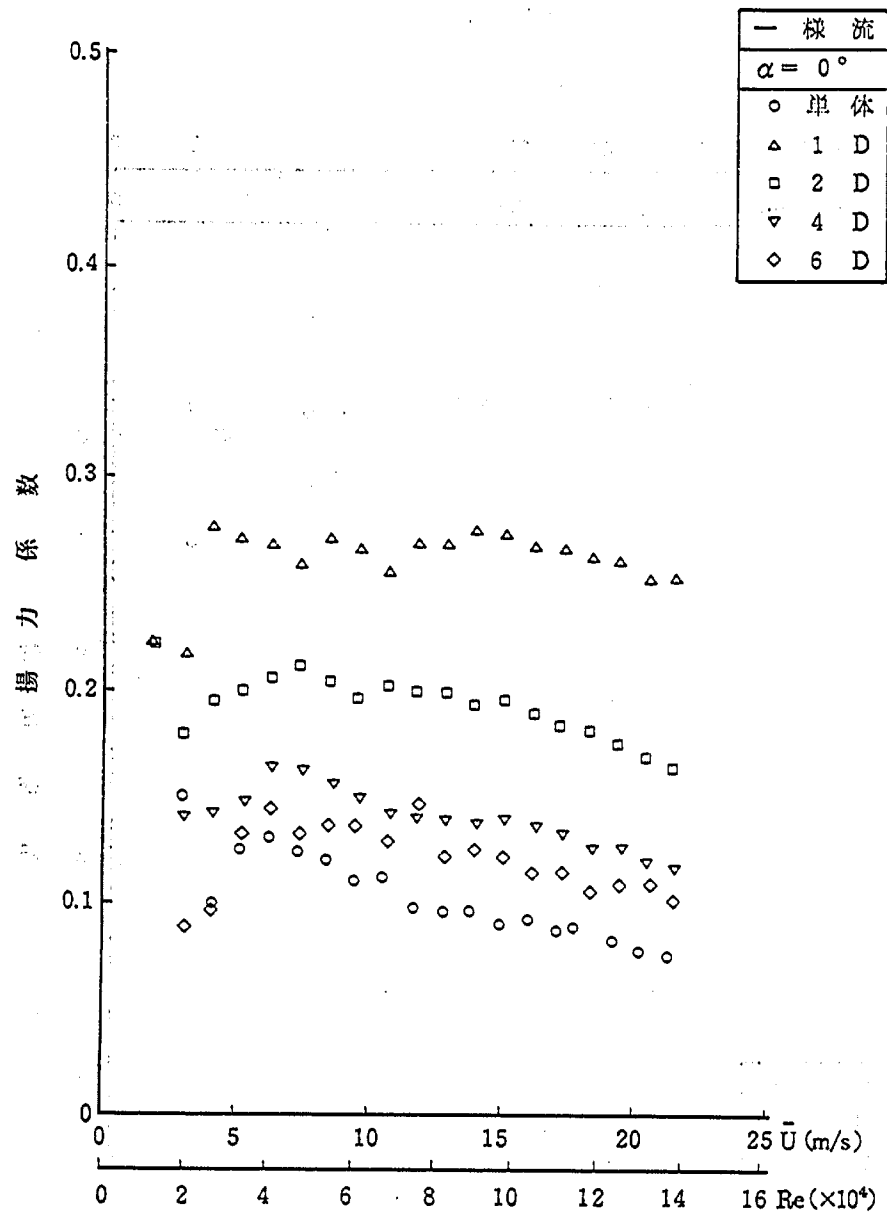


圖 2 - 17

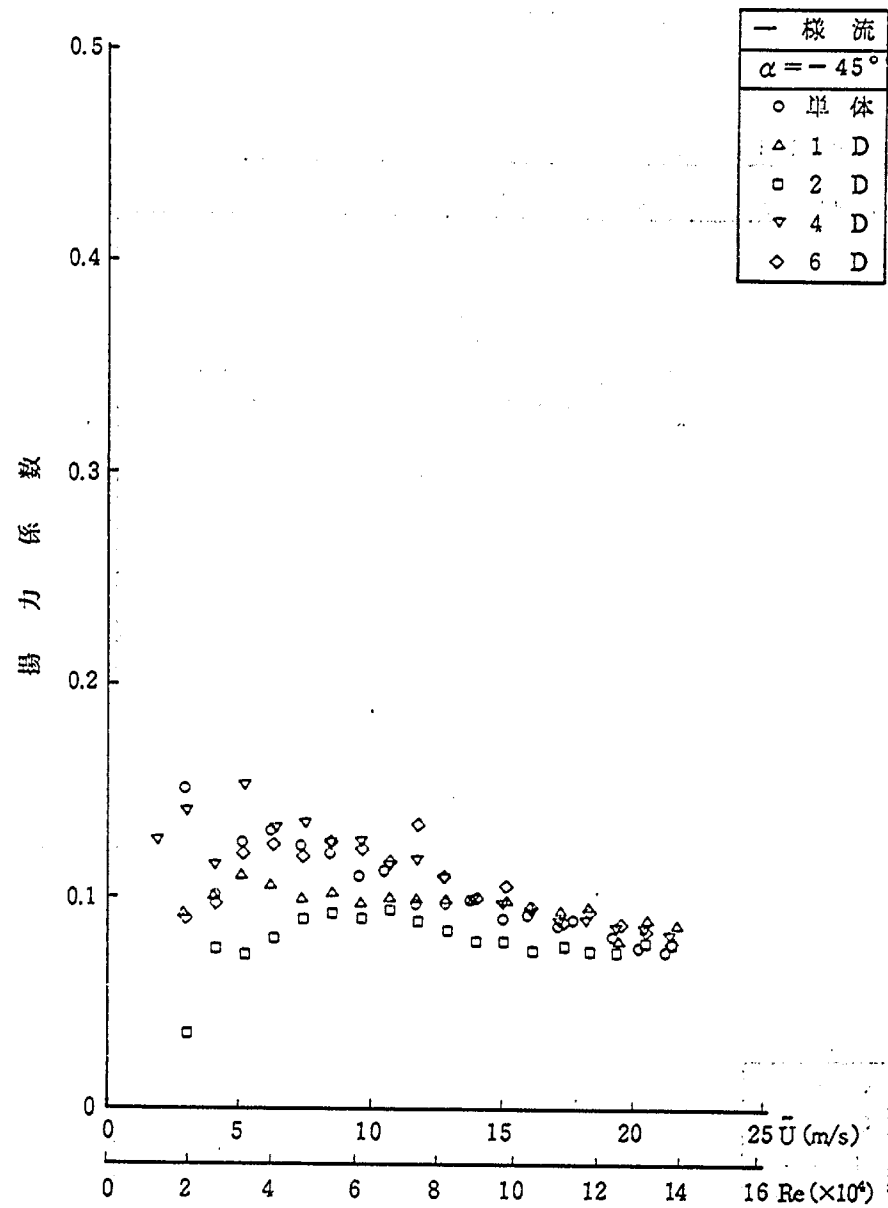


圖 2 - 18

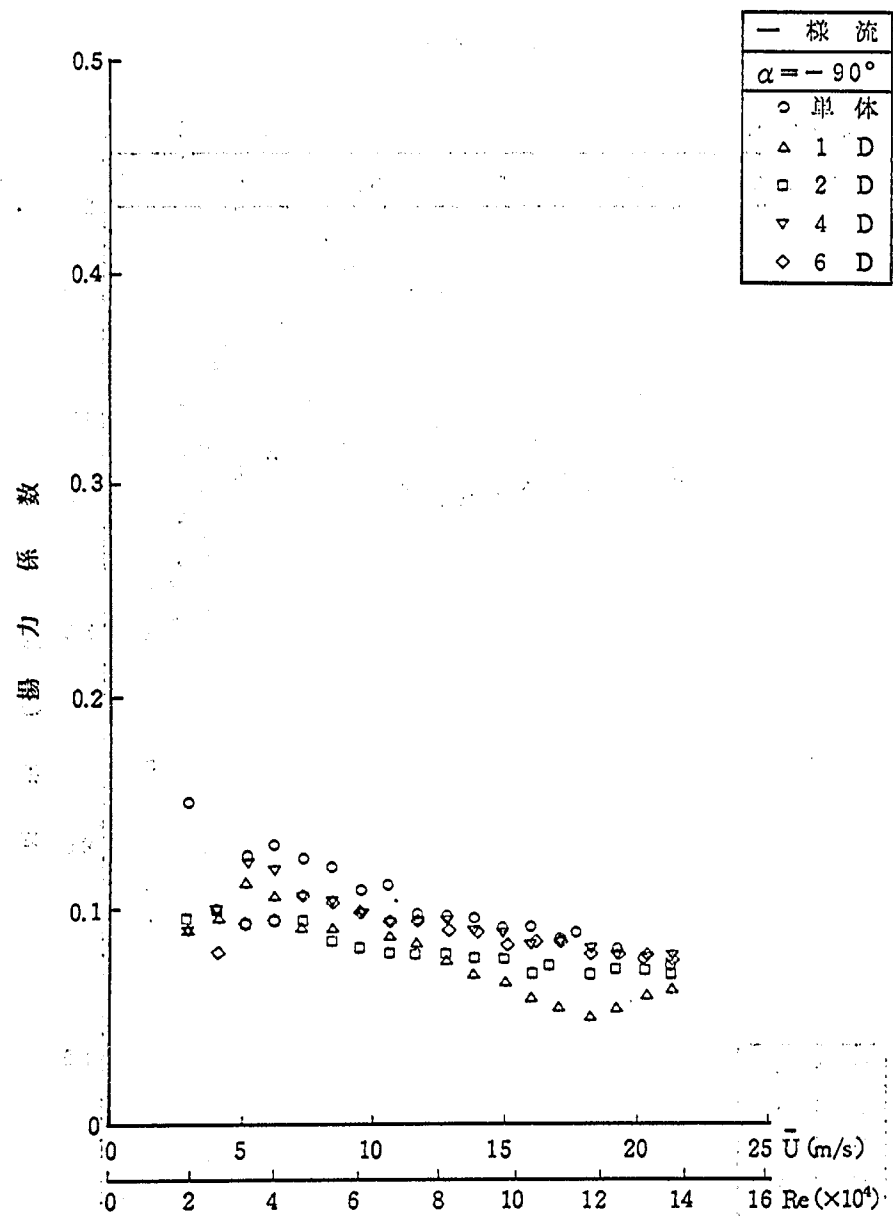


图 2-19

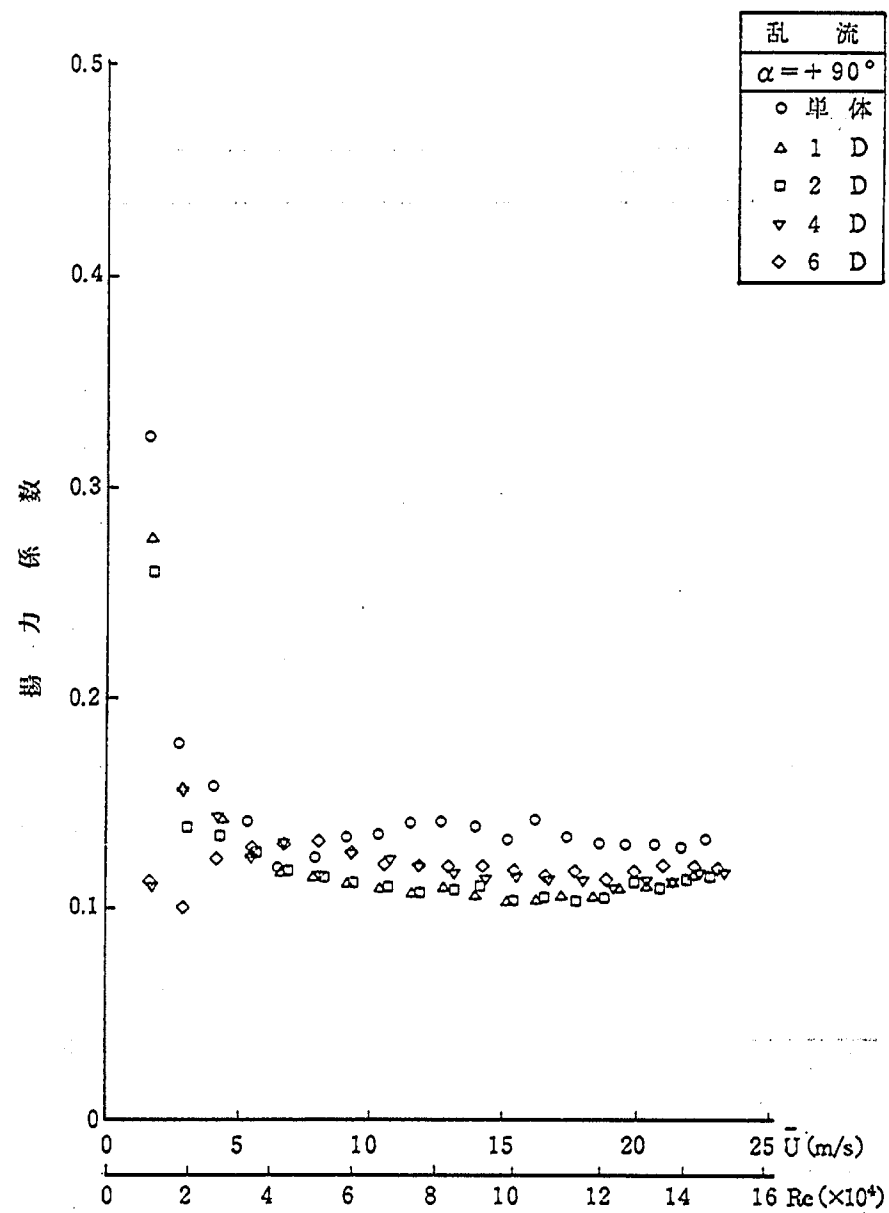


图 2-20

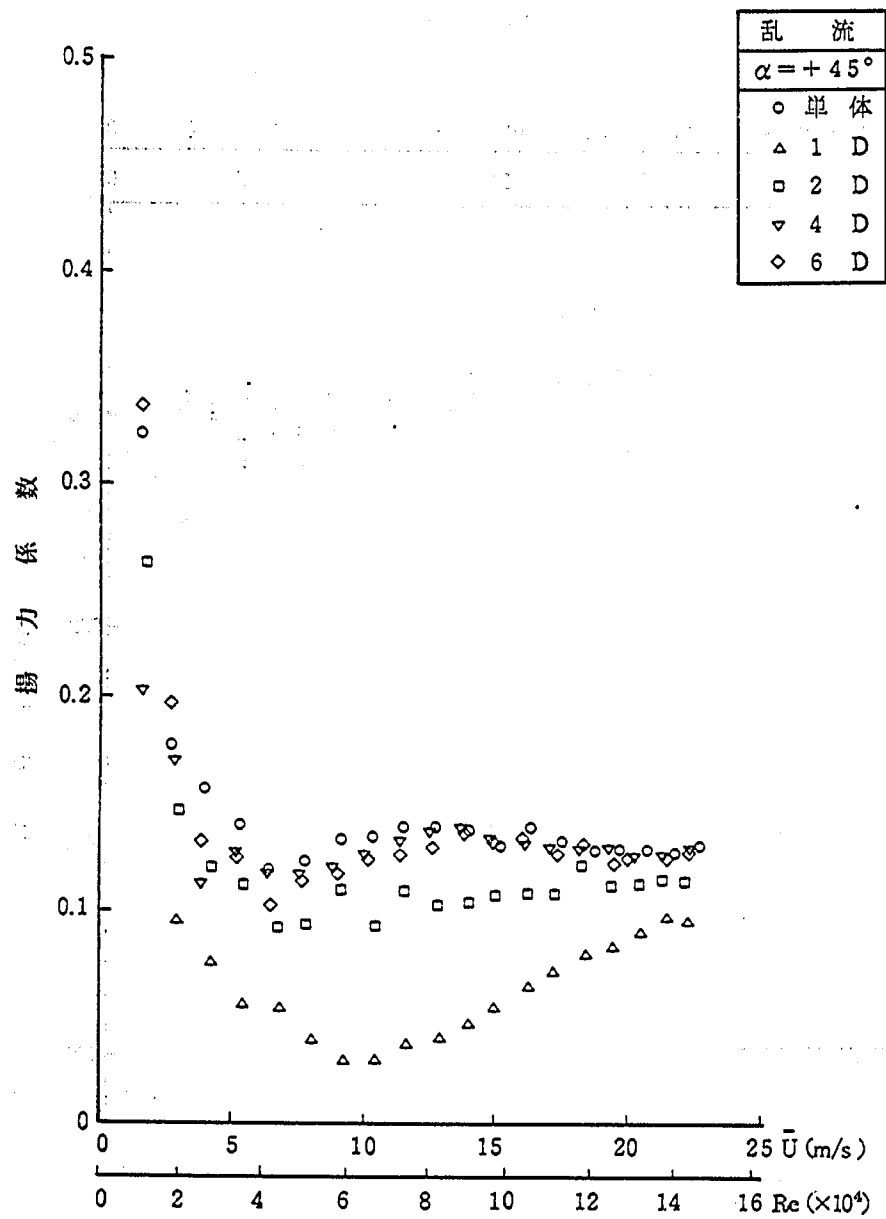


图 2-21

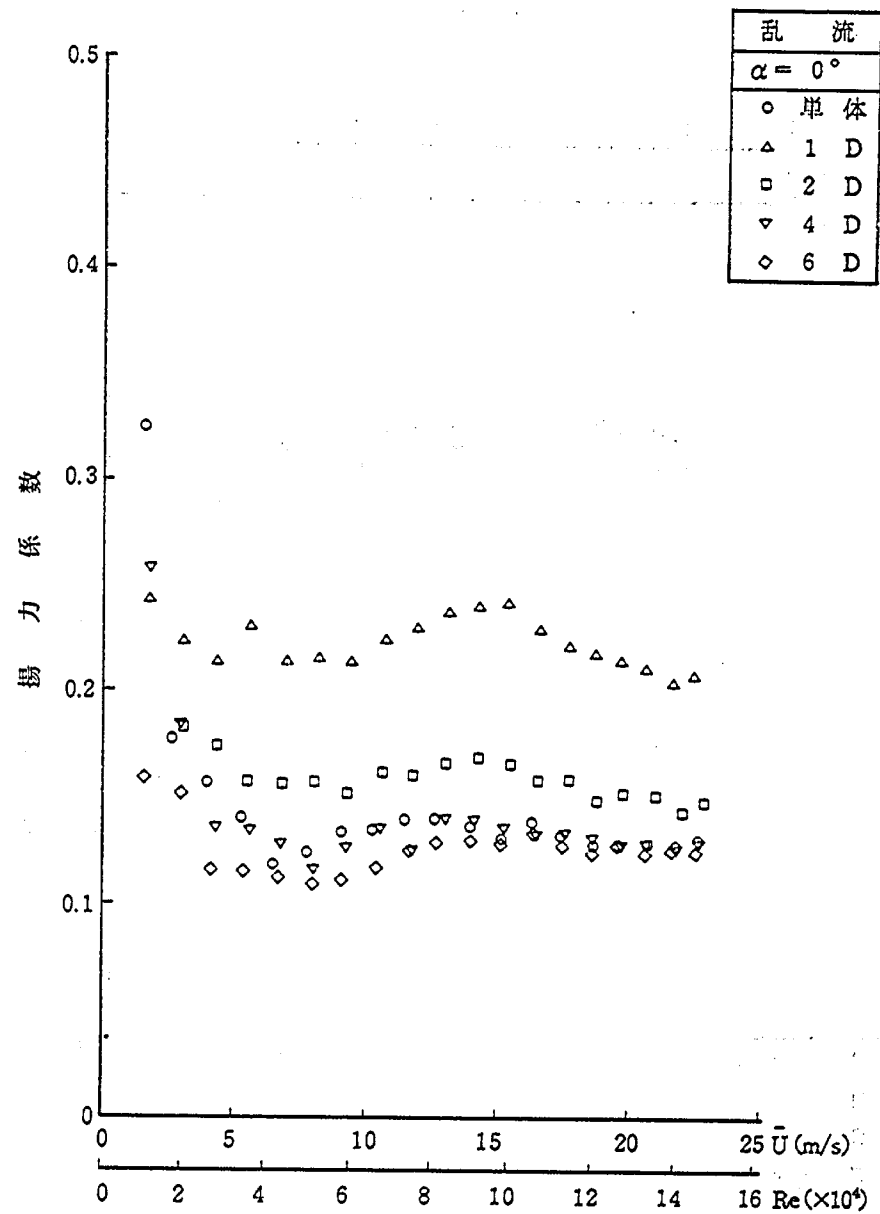


图 2-22

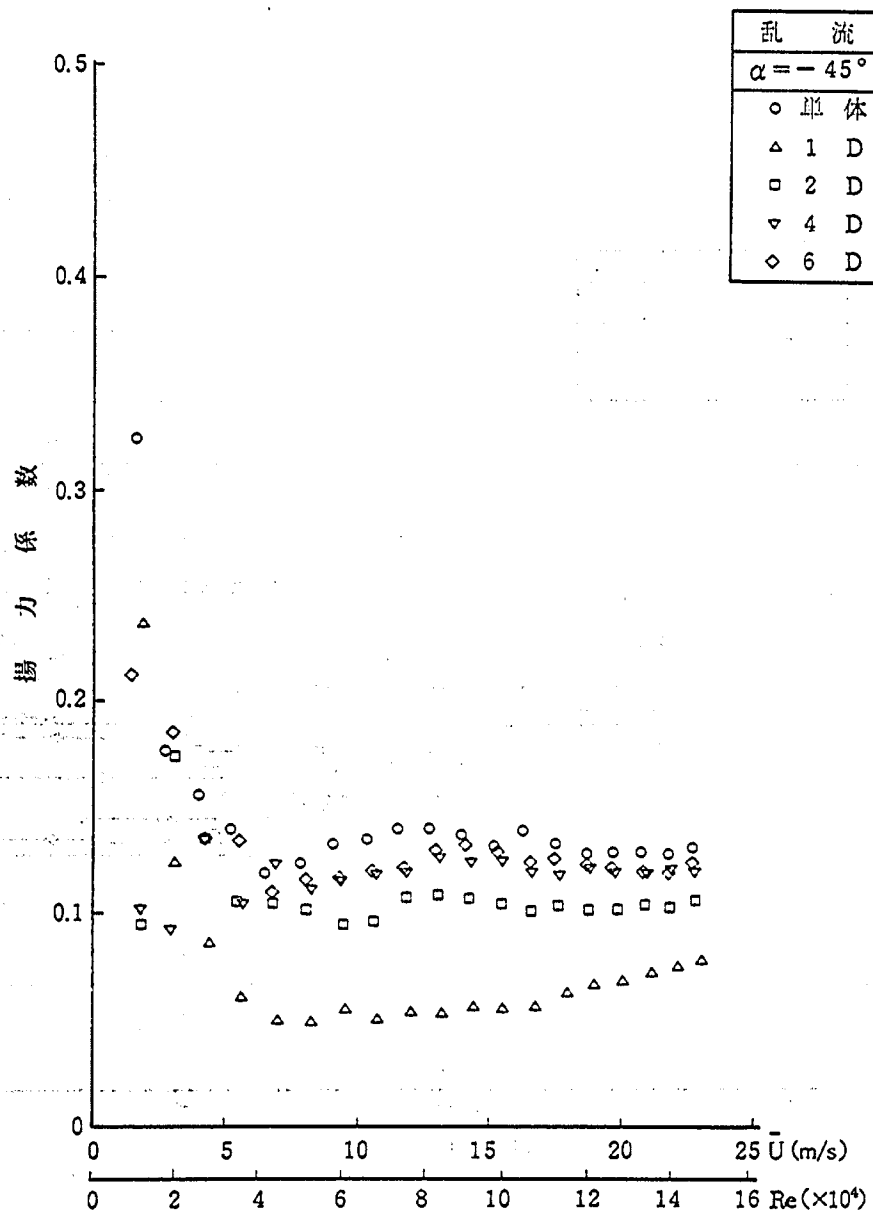


图 2-23

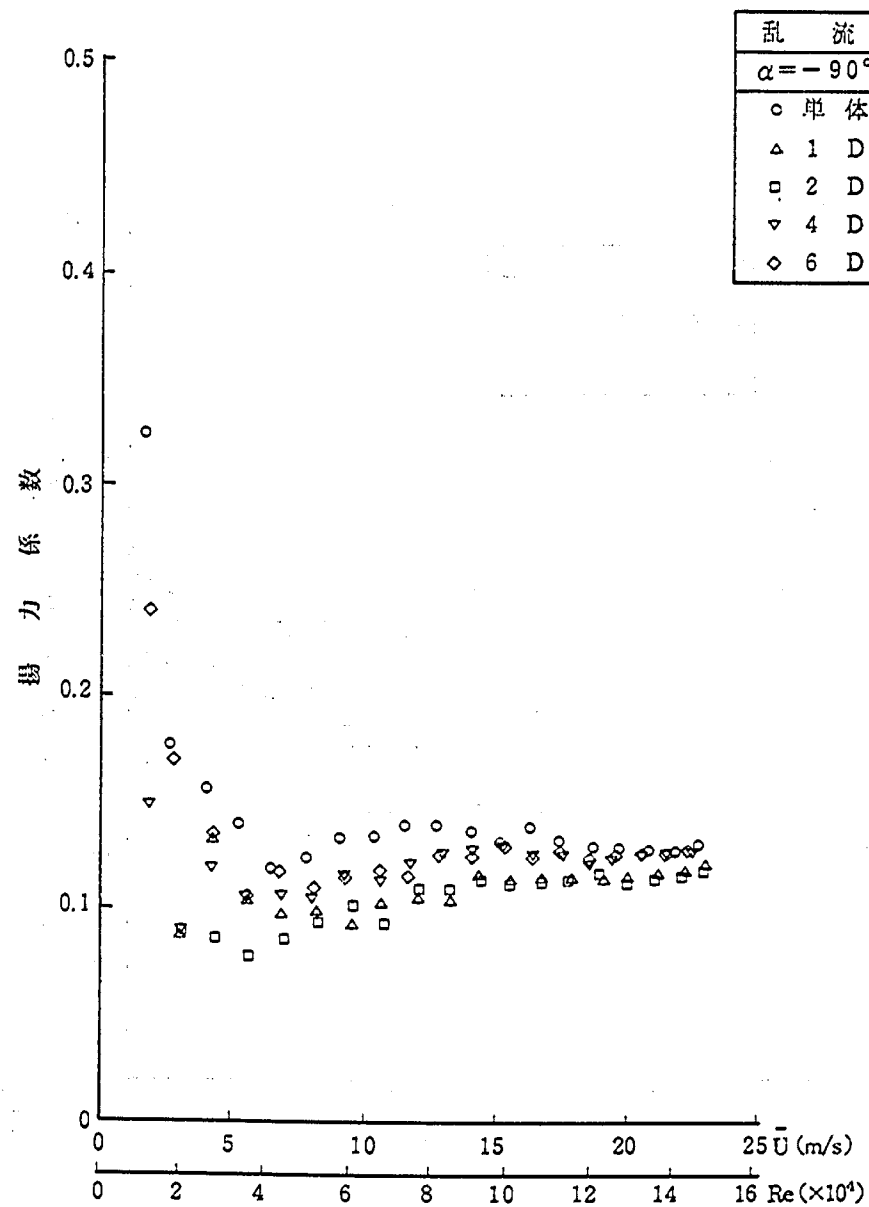


图 2-24

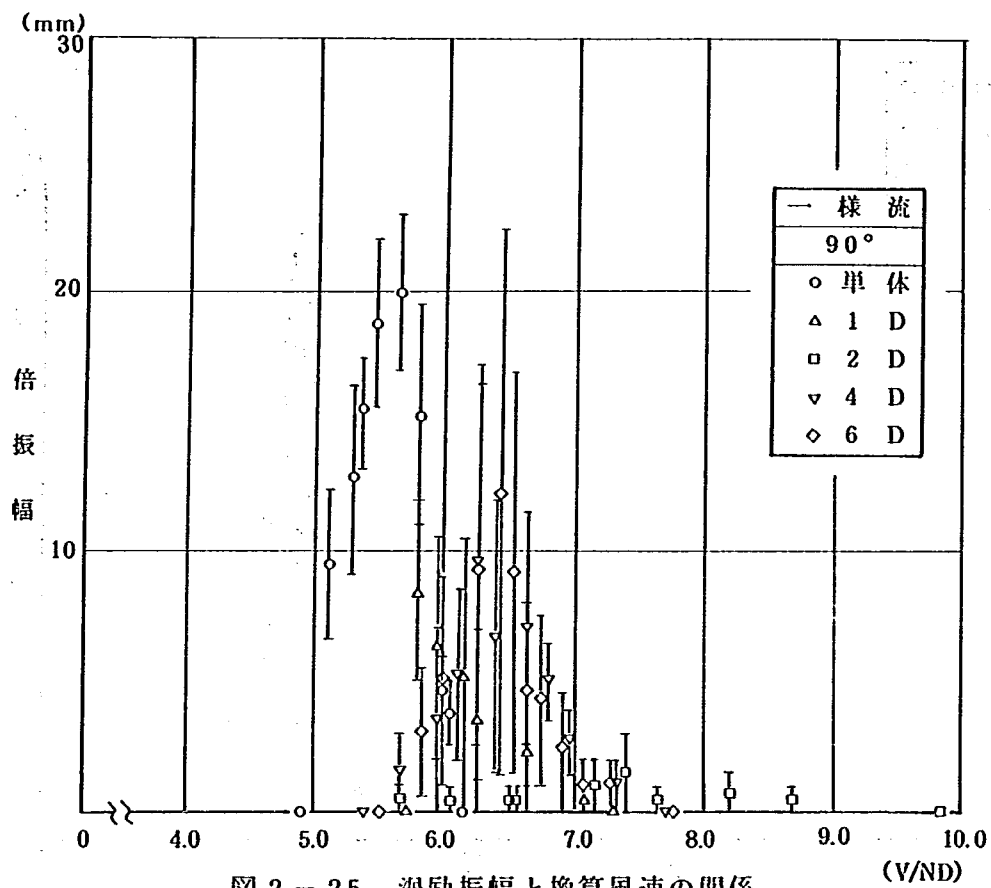


図 2 - 25 渦励振幅と換算風速の関係

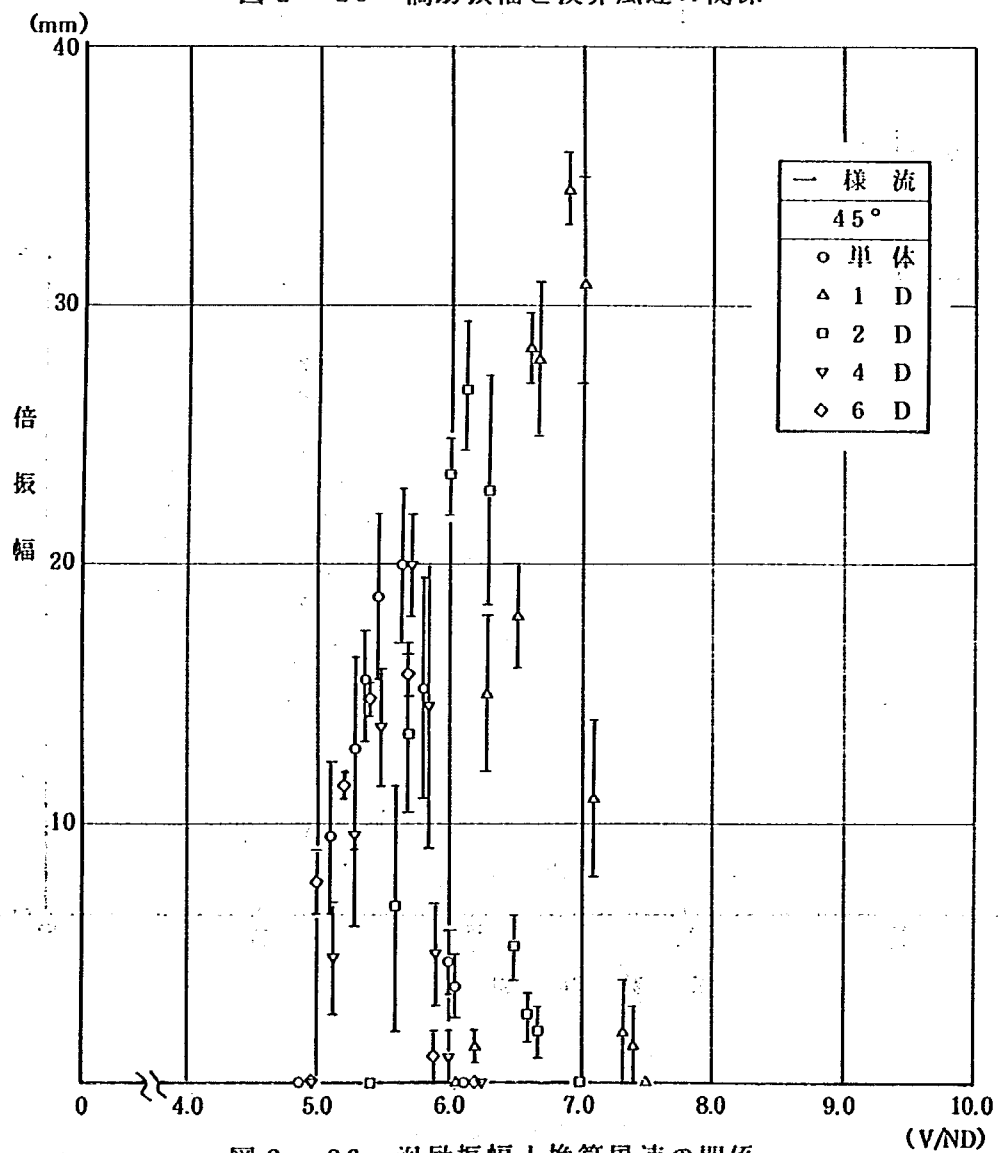


図 2 - 26 渦励振幅と換算風速の関係

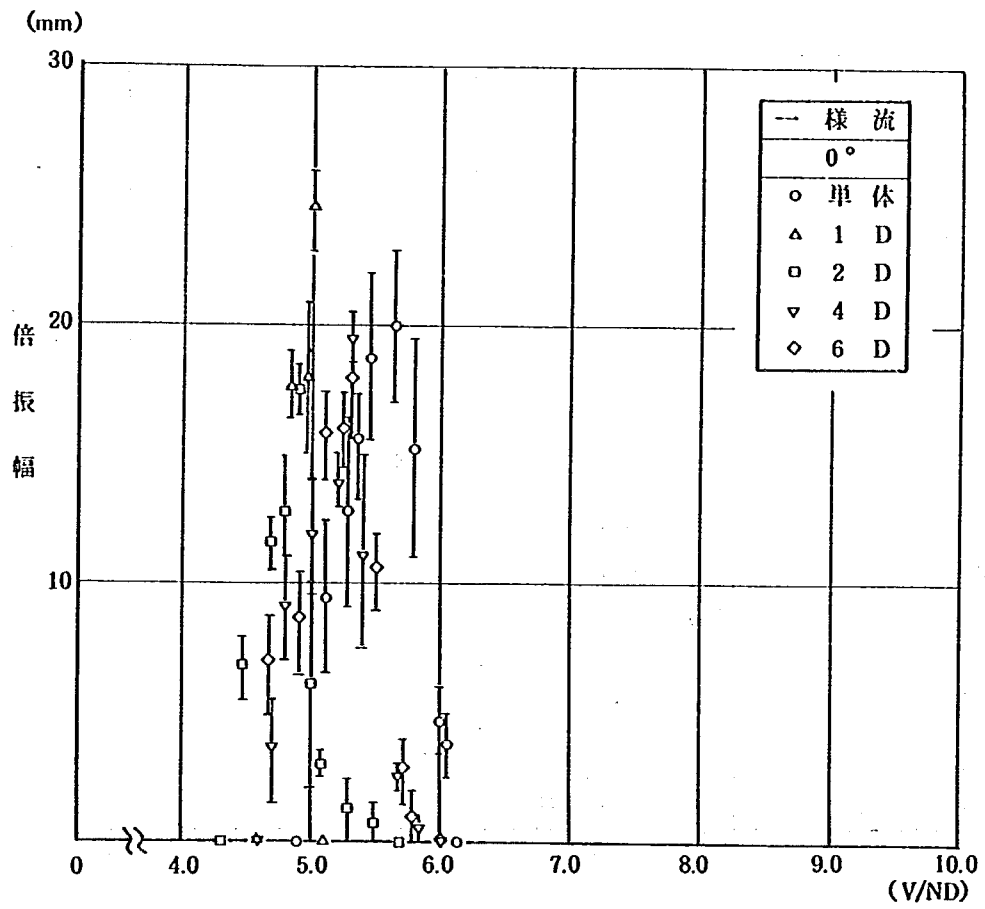


図 2 - 27 渦励振幅と換算風速の関係

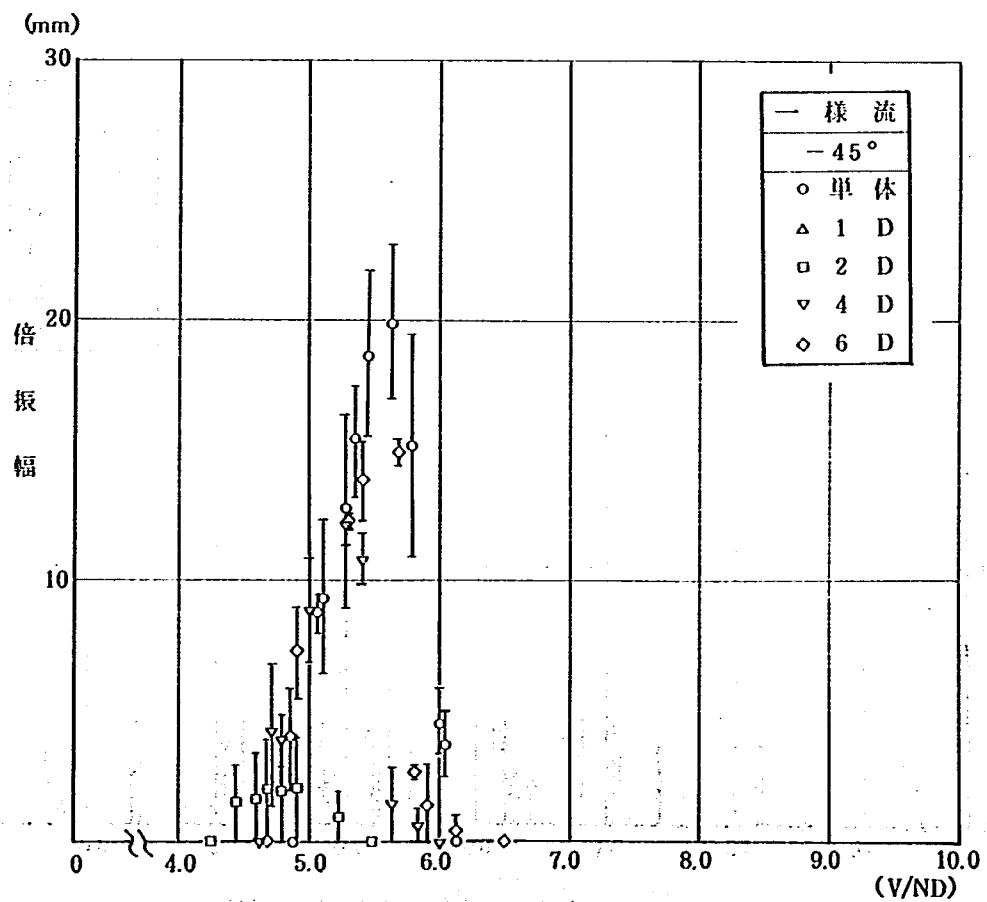


図 2 - 28 渦励振幅と換算風速の関係

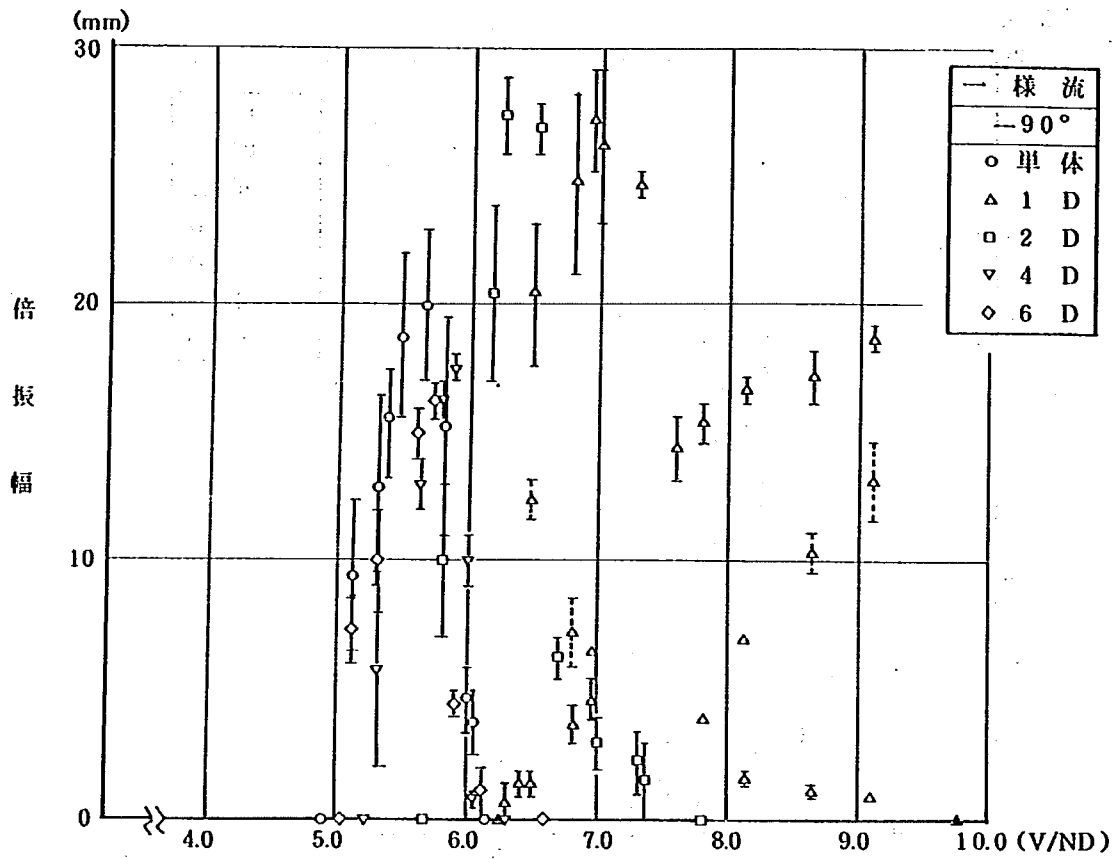


図 2-29 渦励振幅と換算風速の関係

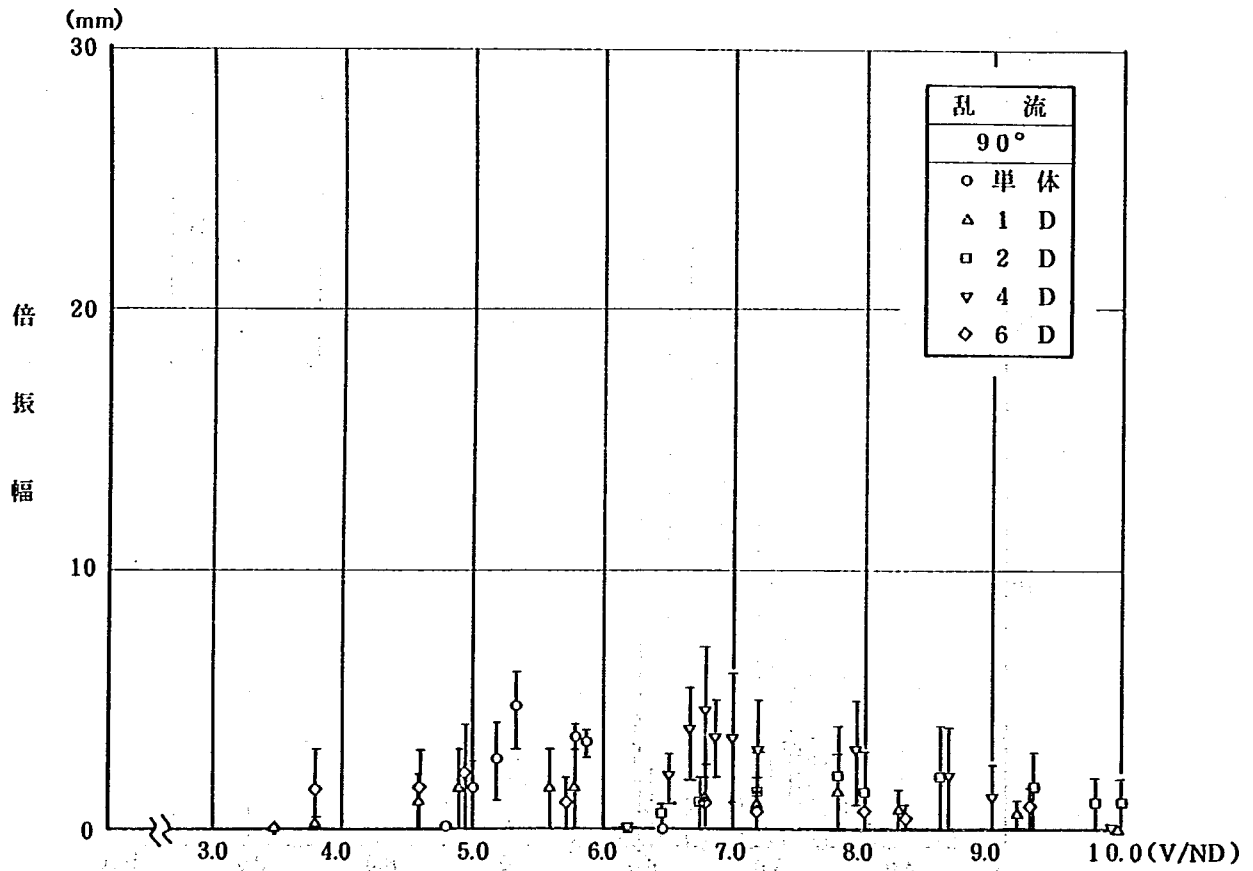


図 2-30 渦励振幅と換算風速の関係

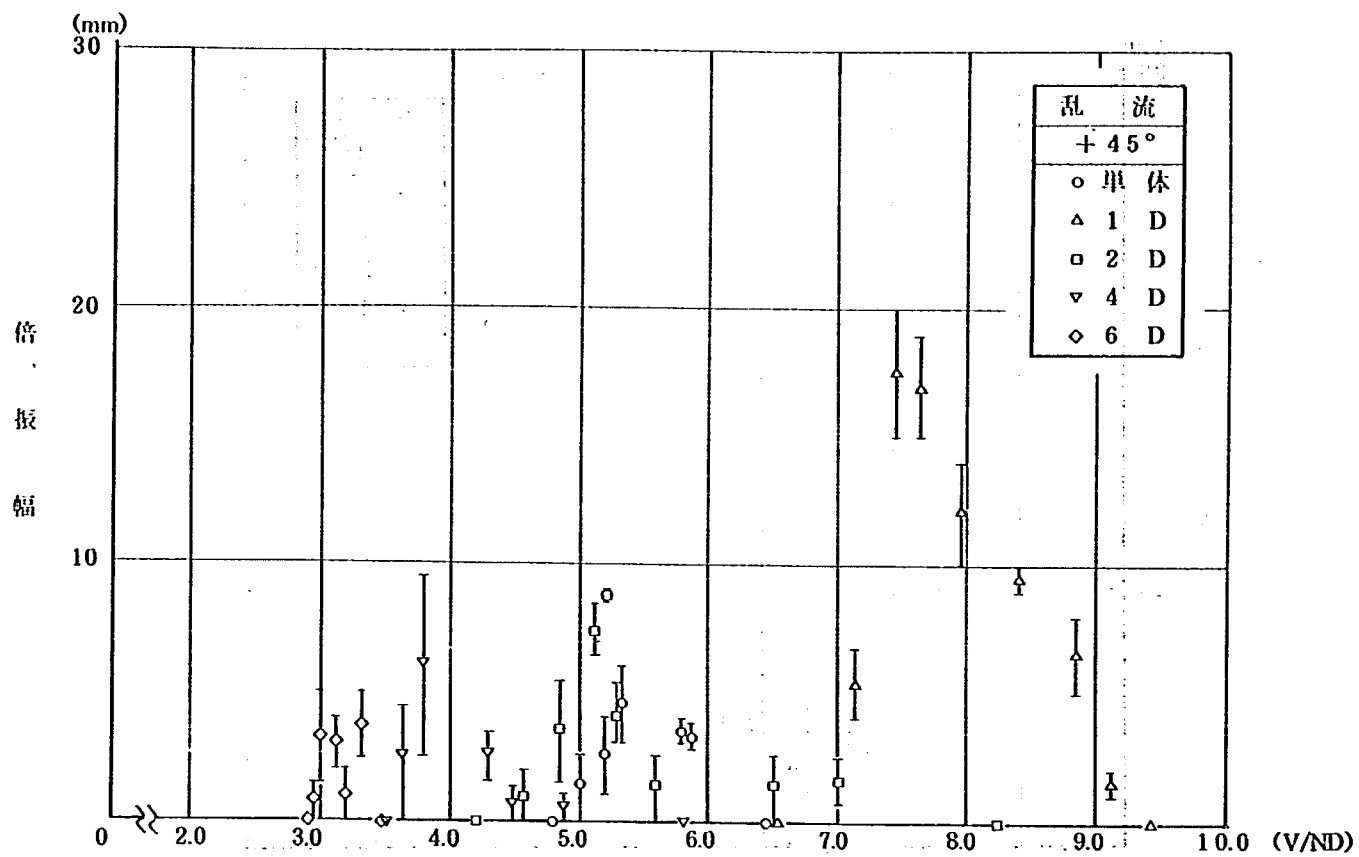


図2 - 31 渦励振幅と換算風速の関係

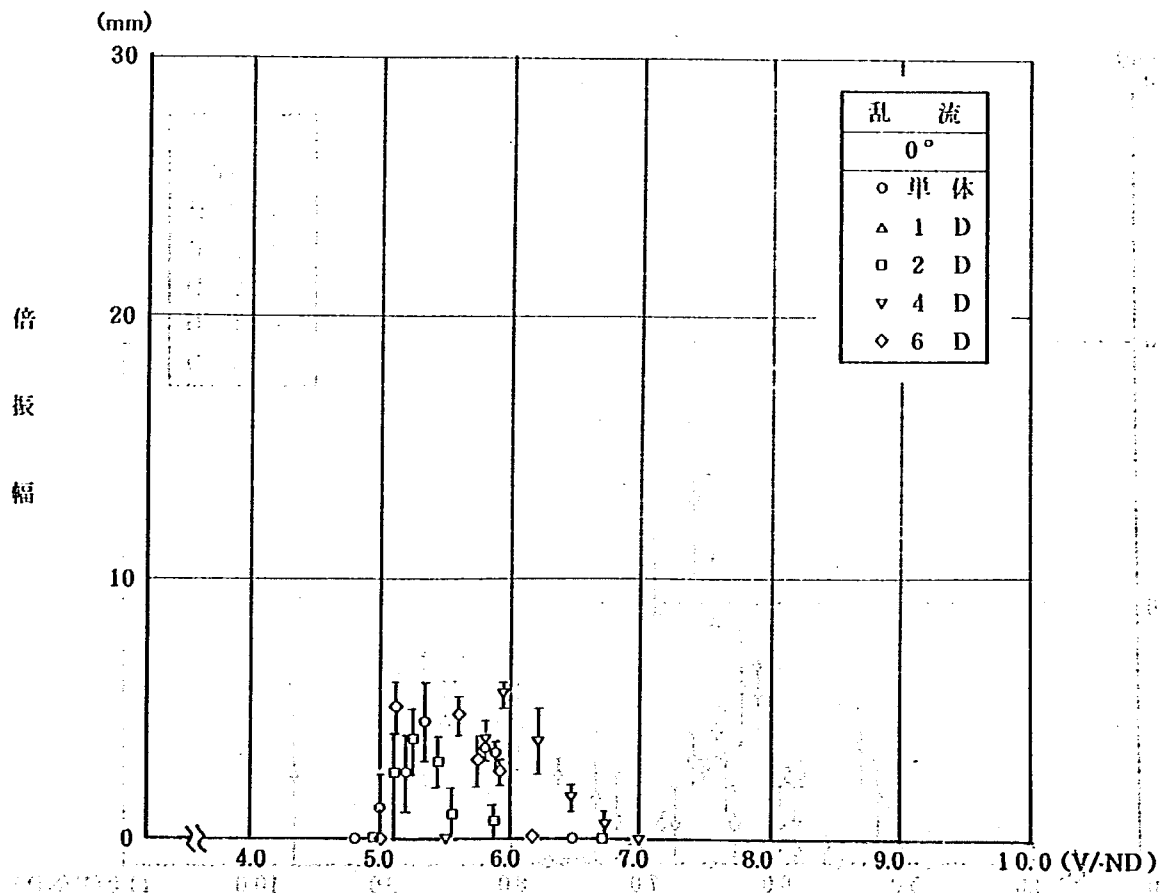


図2 - 32 渦励振幅と換算風速の関係

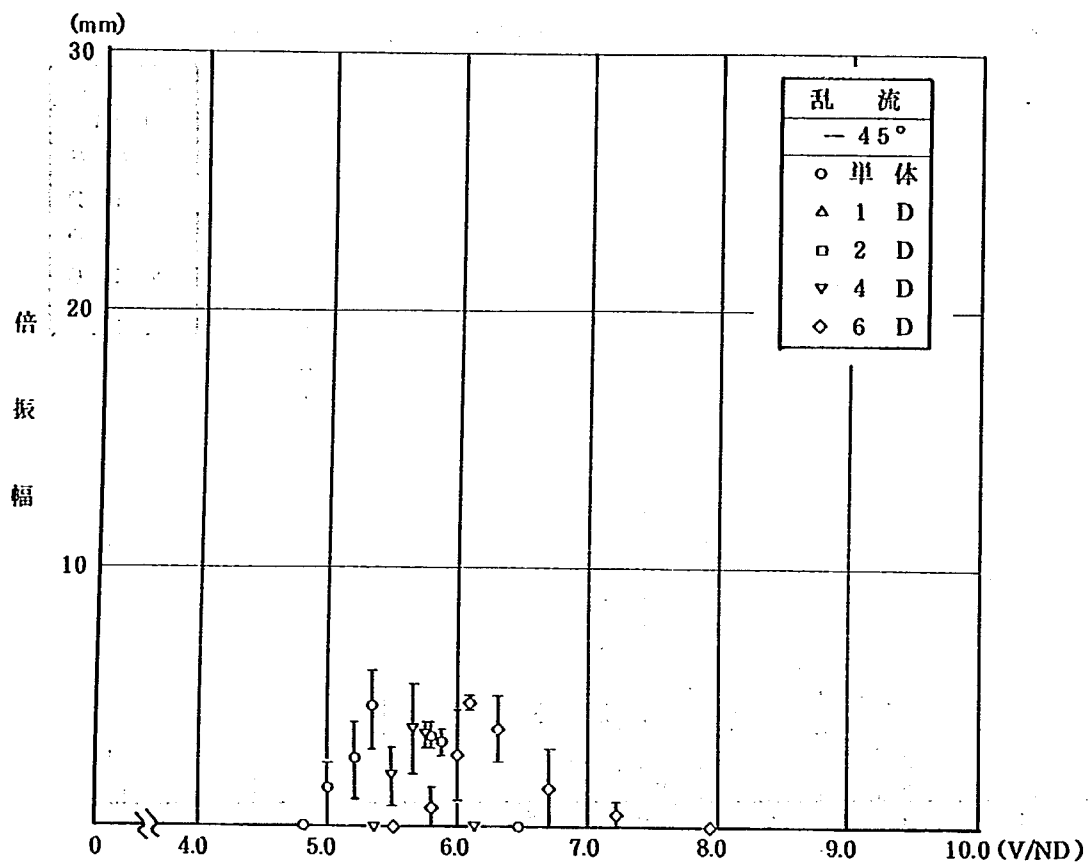


図 2 - 33 渦励振幅と換算風速の関係

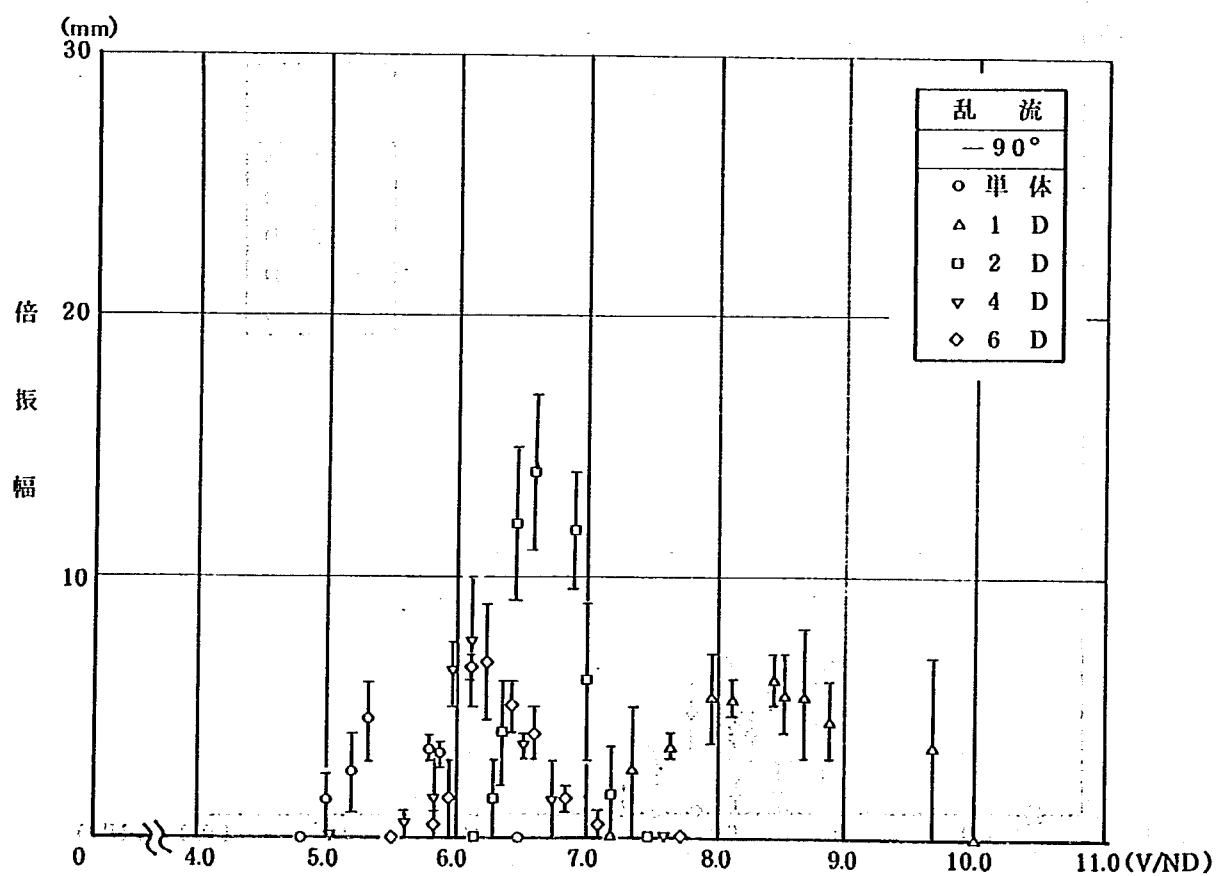


図 2 - 34 渦励振幅と換算風速の関係

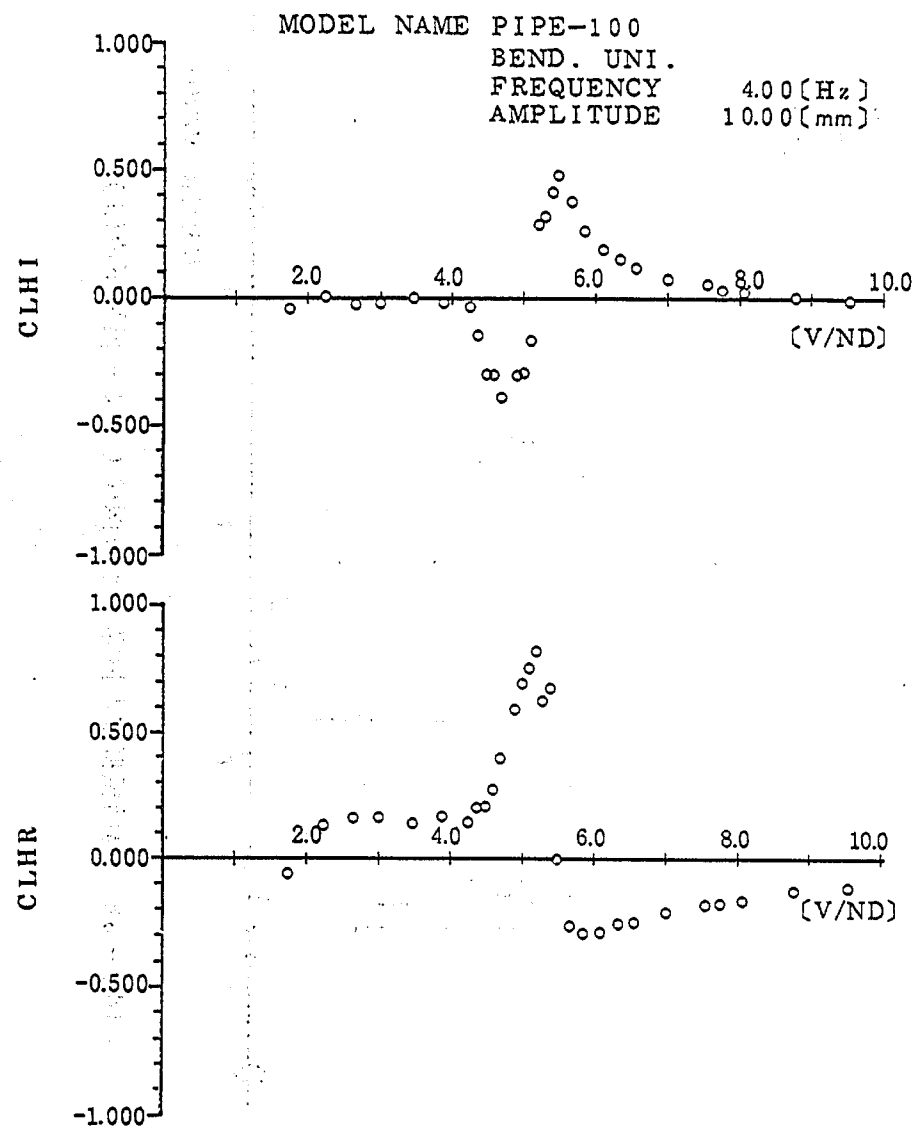


図 2-35 非定常空気力係数 (単体パイプ, 一様流)

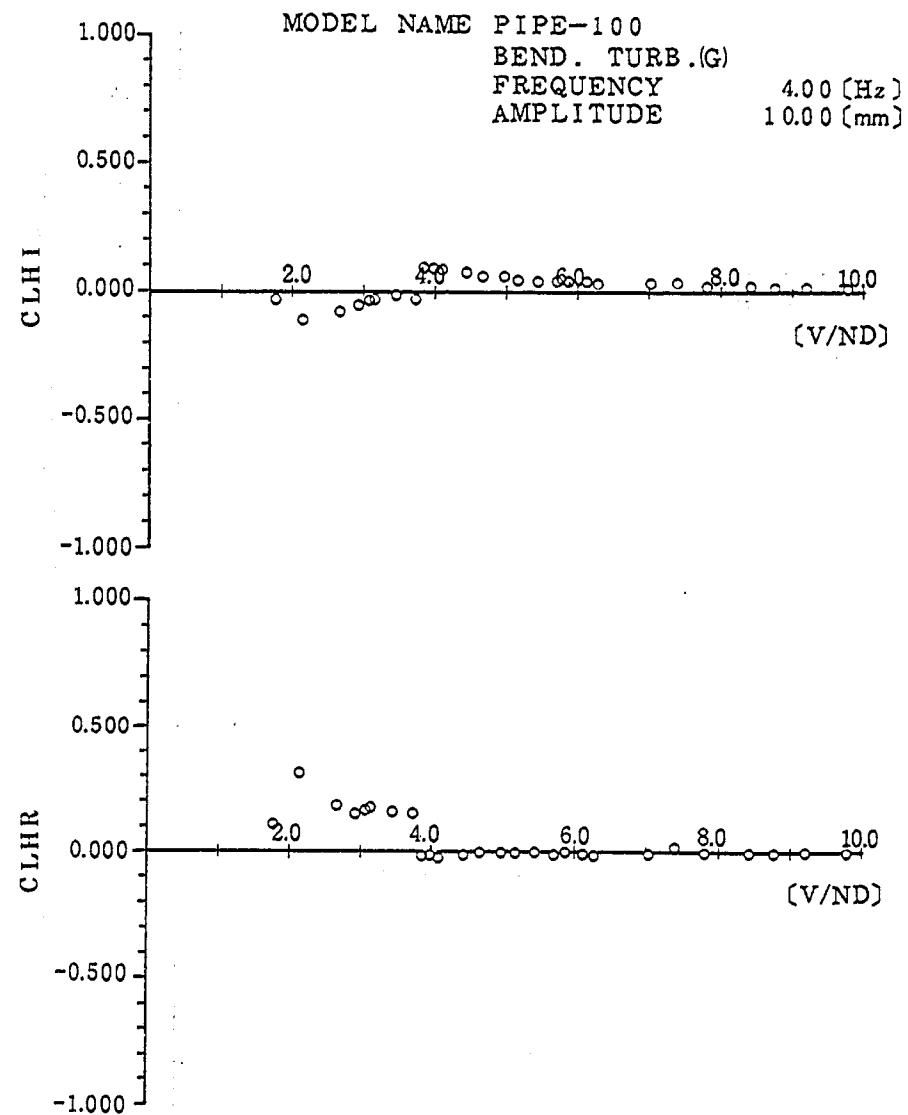


図 2-36 非定常空気力係数 (単体パイプ, 乱流)

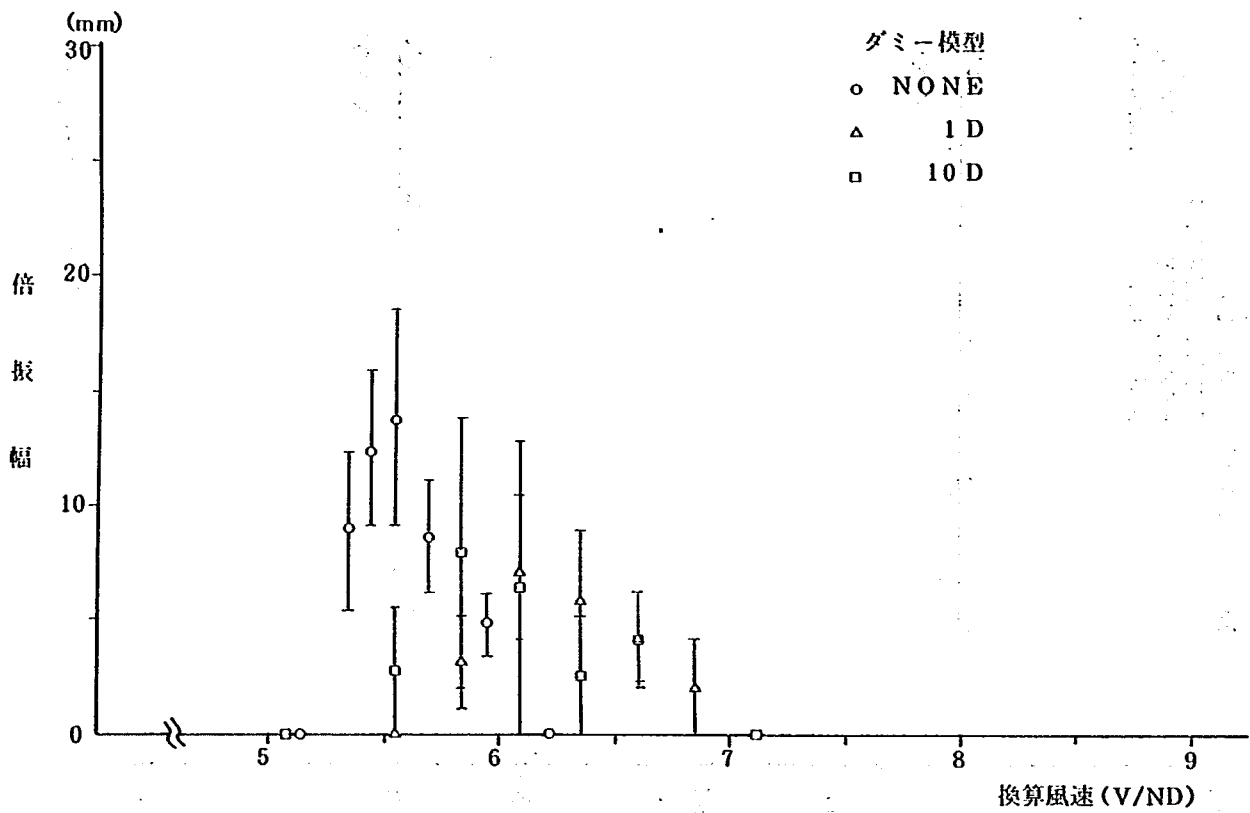


図 2-37 渦励振振幅と換算風速の関係 (ダミー模型上流側)

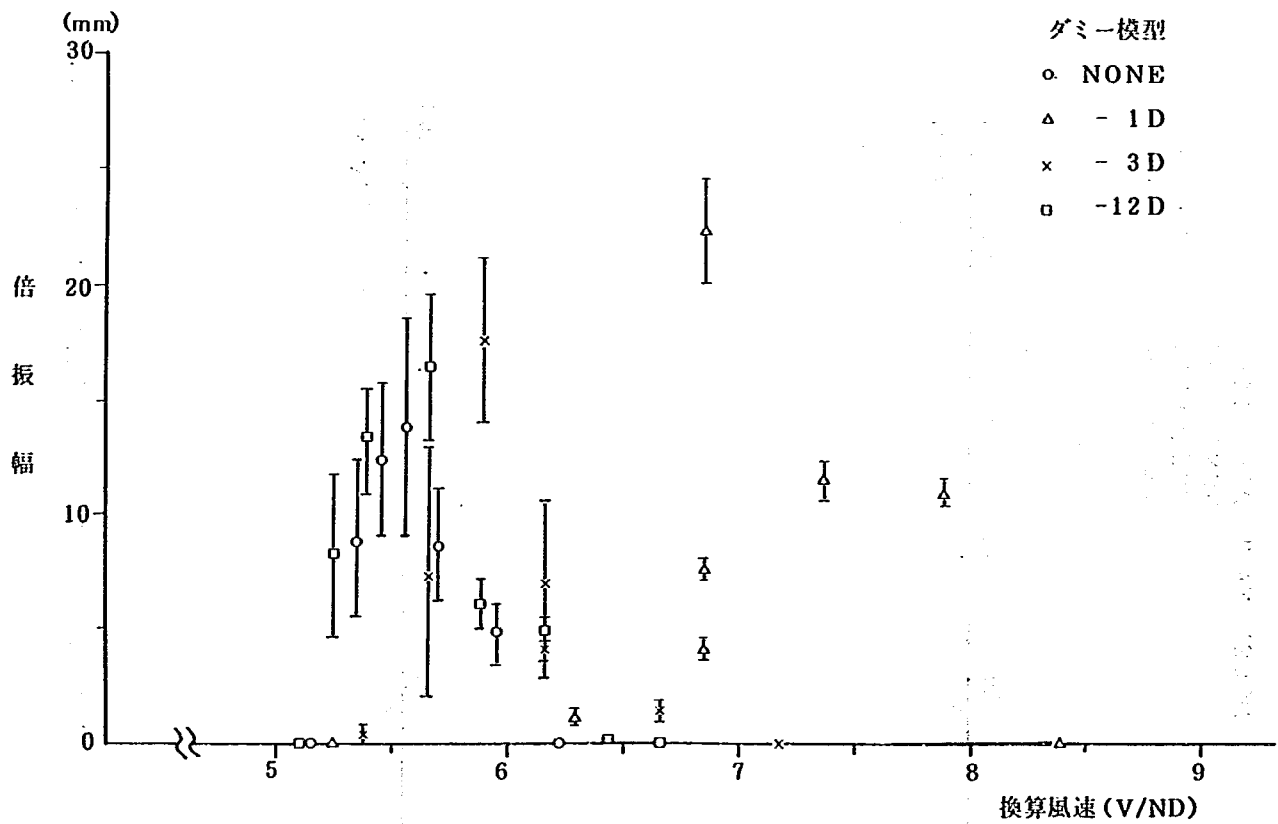


図 2-38 渦励振振幅と換算風速の関係 (ダミー模型下流側)

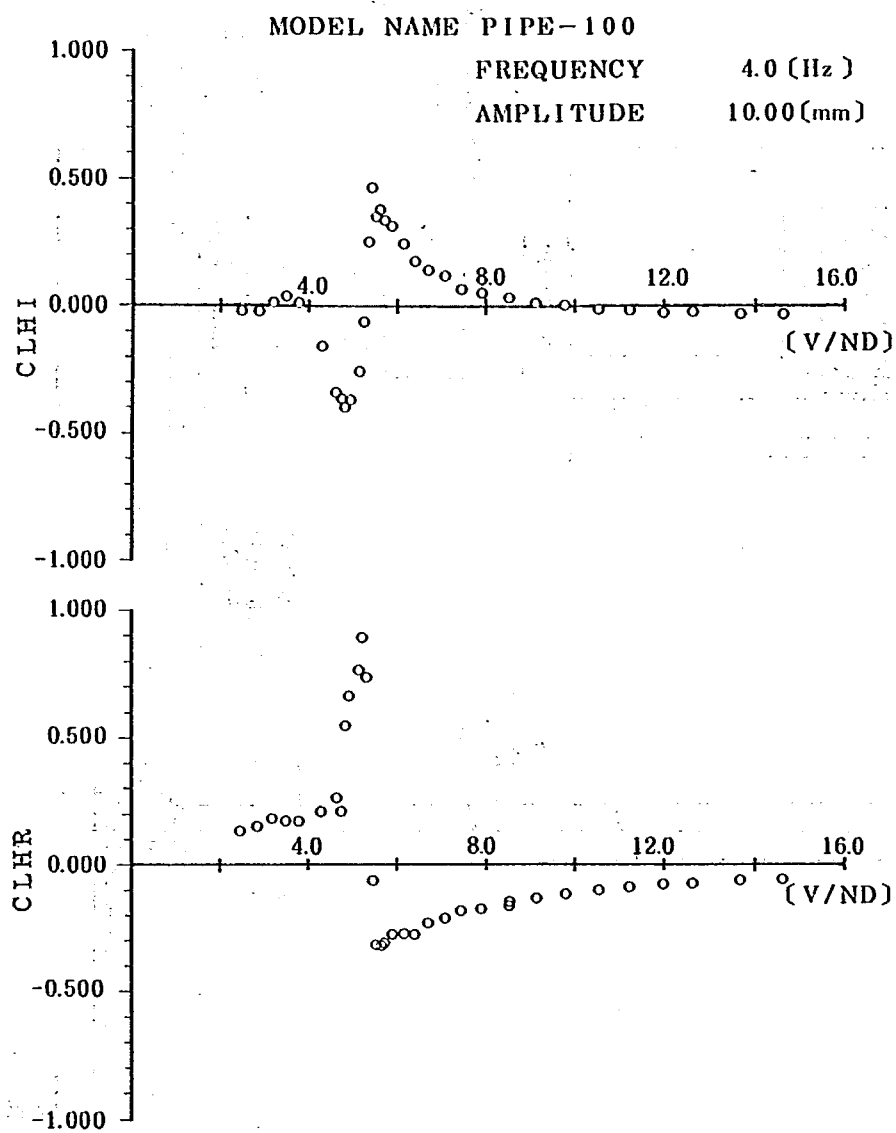


図 2 - 39 非定常空気力係数 (単体パイプ)

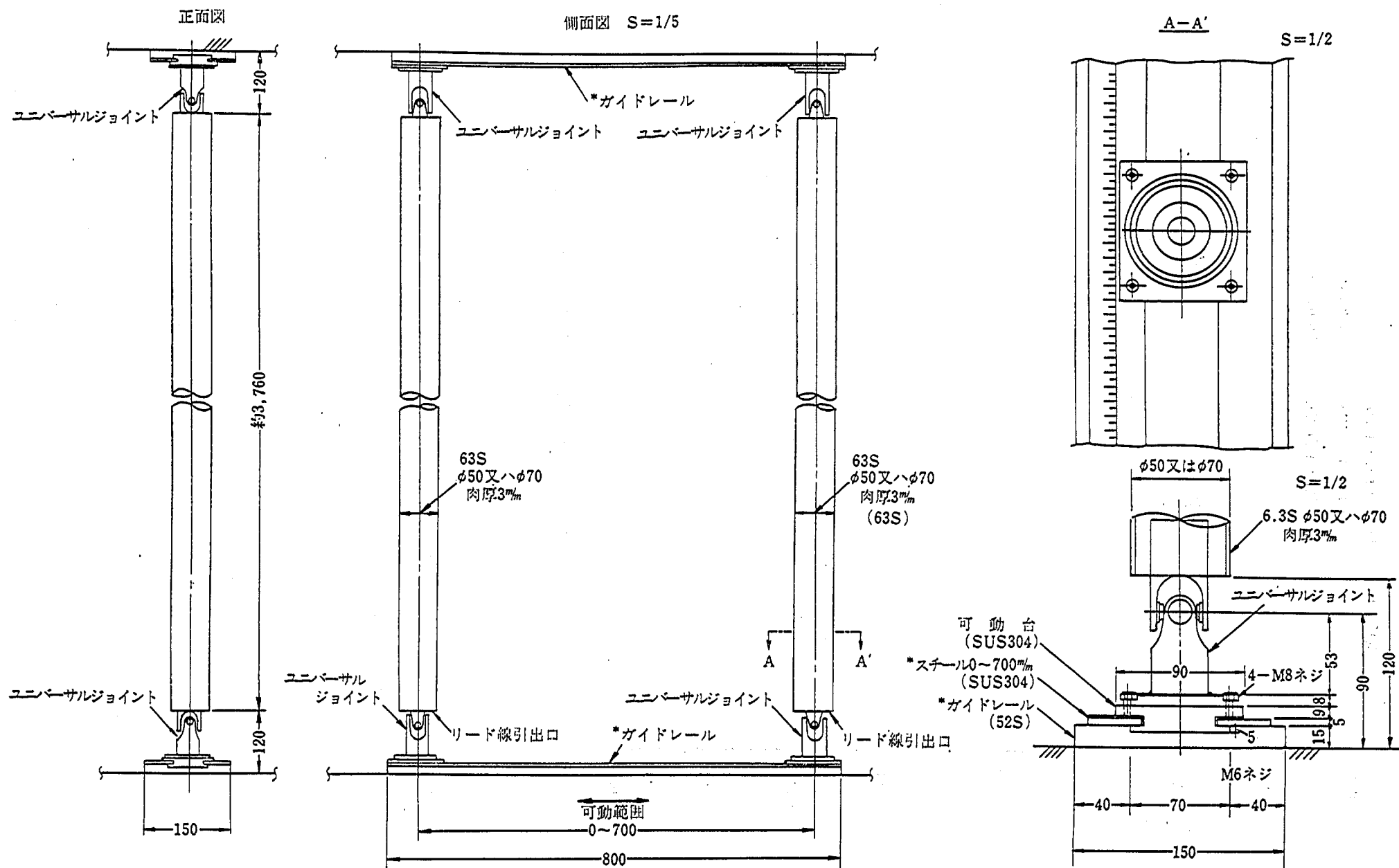


図3-1 パイプ模型及び支持具

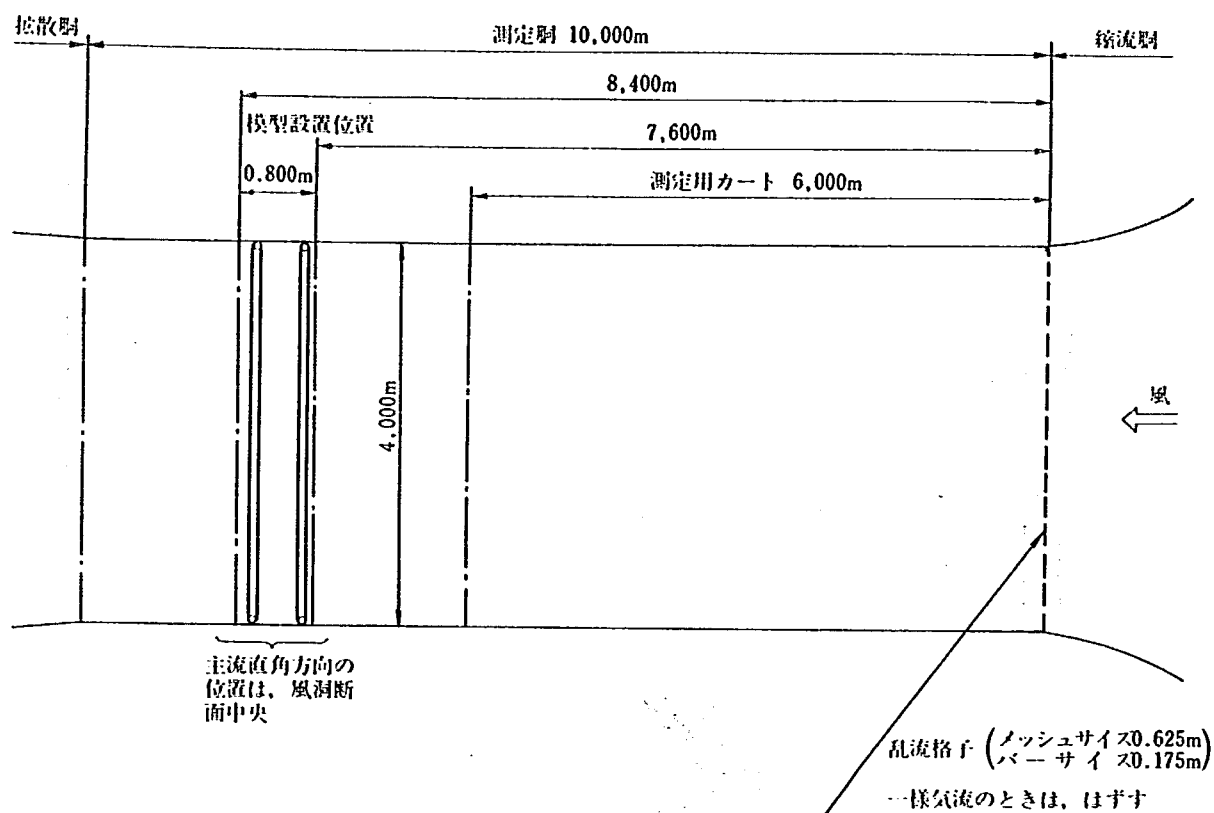
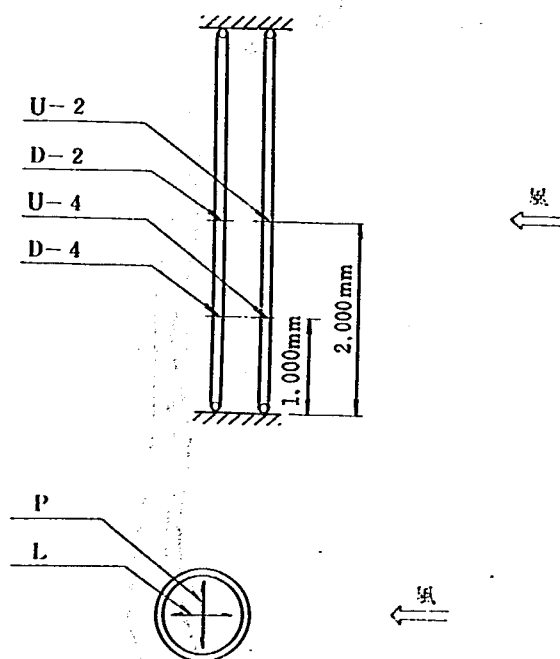


図 3 - 2 模 型 の 設 置 位 置



- 加速度計番号
- 1 U(pstream)-2-P(ependicular)
 - 2 U-2-L(ongitudinal)
 - 3 U-4-P
 - 4 U-4-L
 - 5 D(own stream)-2-P
 - 6 D-2-L
 - 7 D-4-P
 - 8 D-4-L

図 3 - 3 加 速 度 計 の 配 置

パイプ
振動変位
標準偏差(mm)

10⁰

10⁻¹

10⁻²

- 1/2点主流直角方向
- - - 1/2点主流方向
- 1/4点主流直角方向
- - - 1/4点主流方向

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15

風洞風速(m/s)

図 3 - 4 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50$ mm, 単体, 一様流)

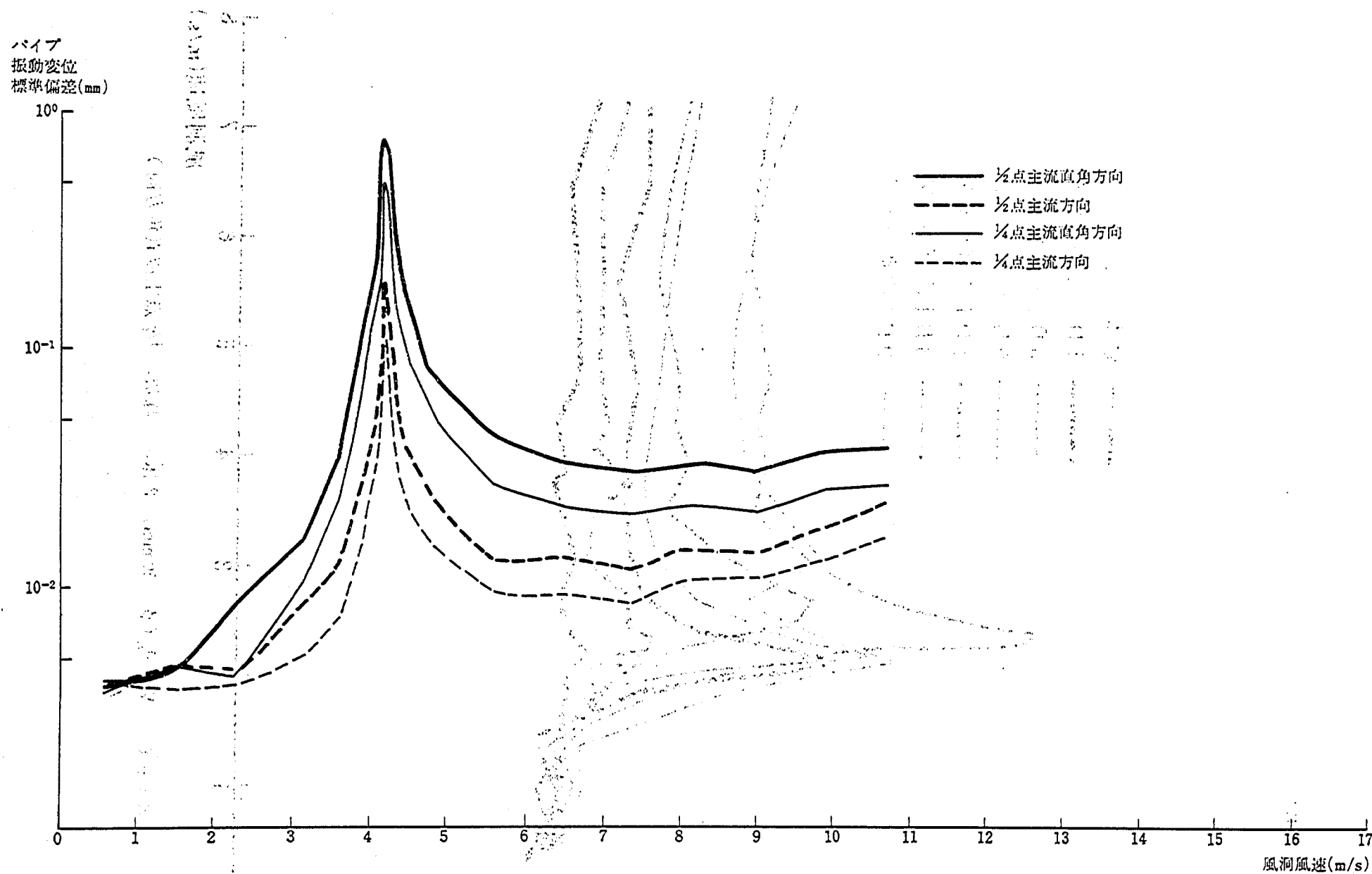


図 3-5 $V - \sigma_A$ ($\phi = 70$ mm, 单体, 一樣流)

パイプ
振動変位
標準偏差(mm)

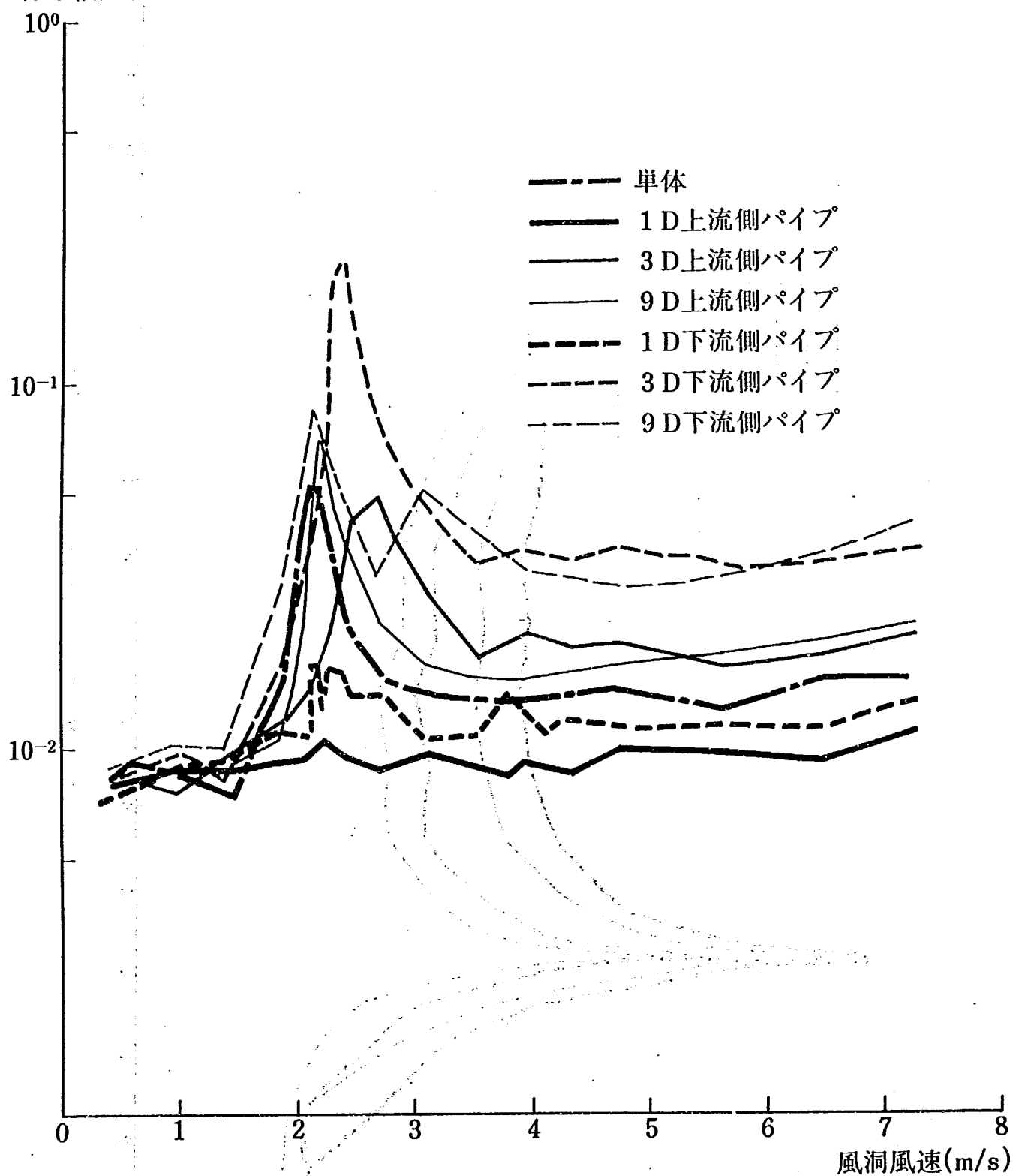


図 3 - 6 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50$ mm, 2 体, 一様流, $1/2$ 点主流直角方向)

パイプ
振動変位
標準偏差(mm)

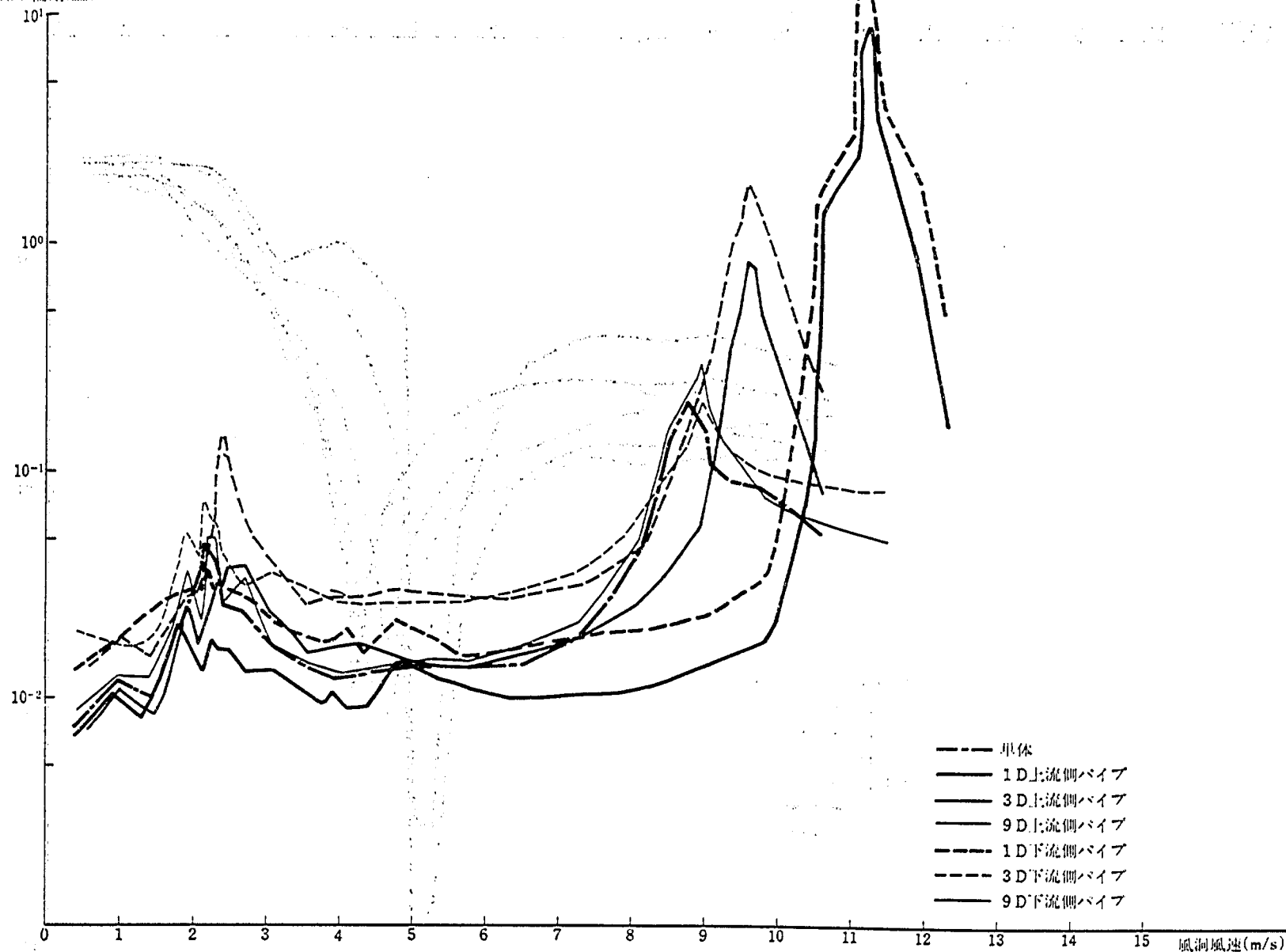


図3-7 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50 \text{ mm}$, 2体, 一様流, $1/4$ 点主流直角方向)

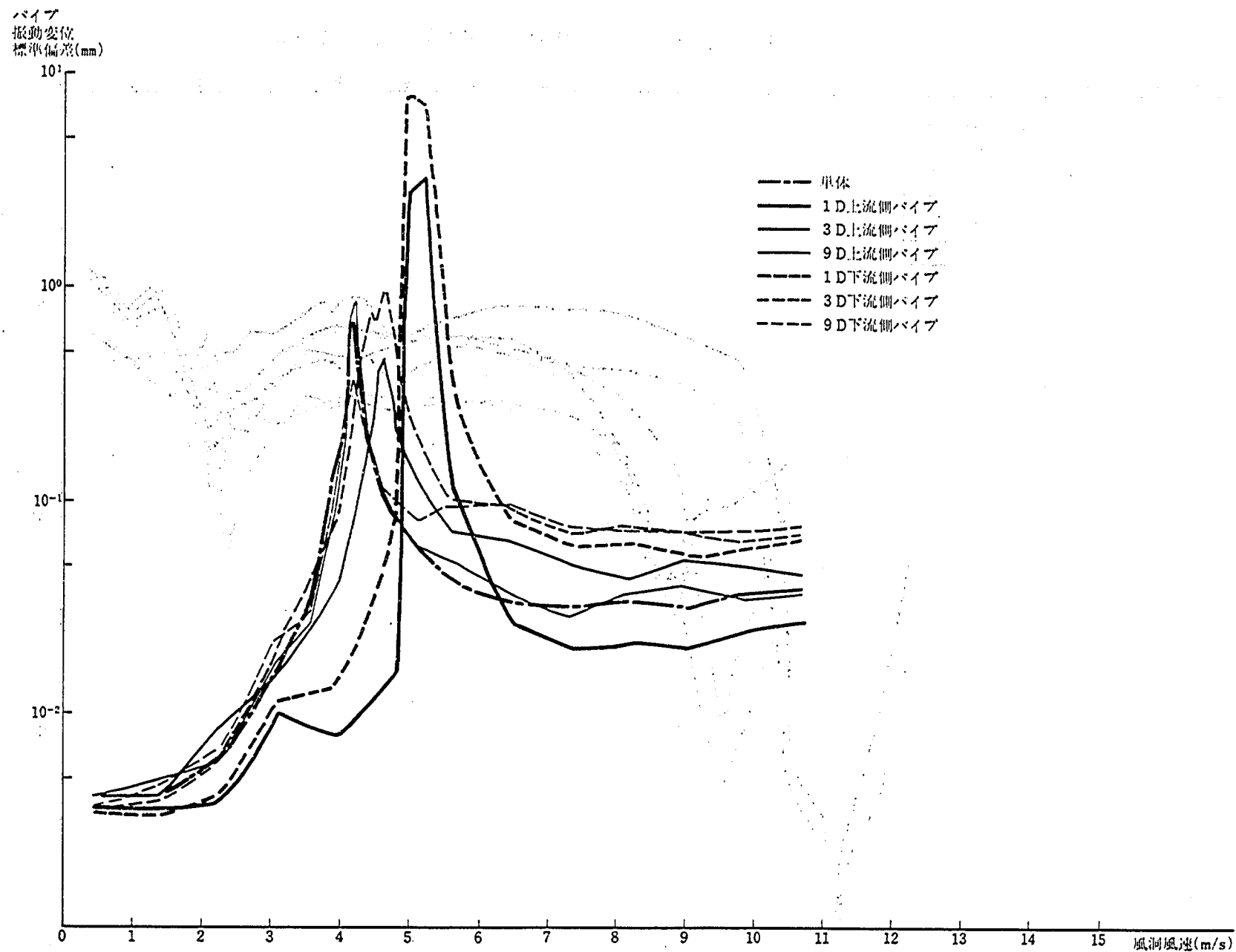


図 3 - 8 $V - \sigma_A$ ($\phi = 70$ mm, 2 体, 一様流, $1/2$ 点主流直角方向)

パイプ
振動変位
標準偏差 (mm)

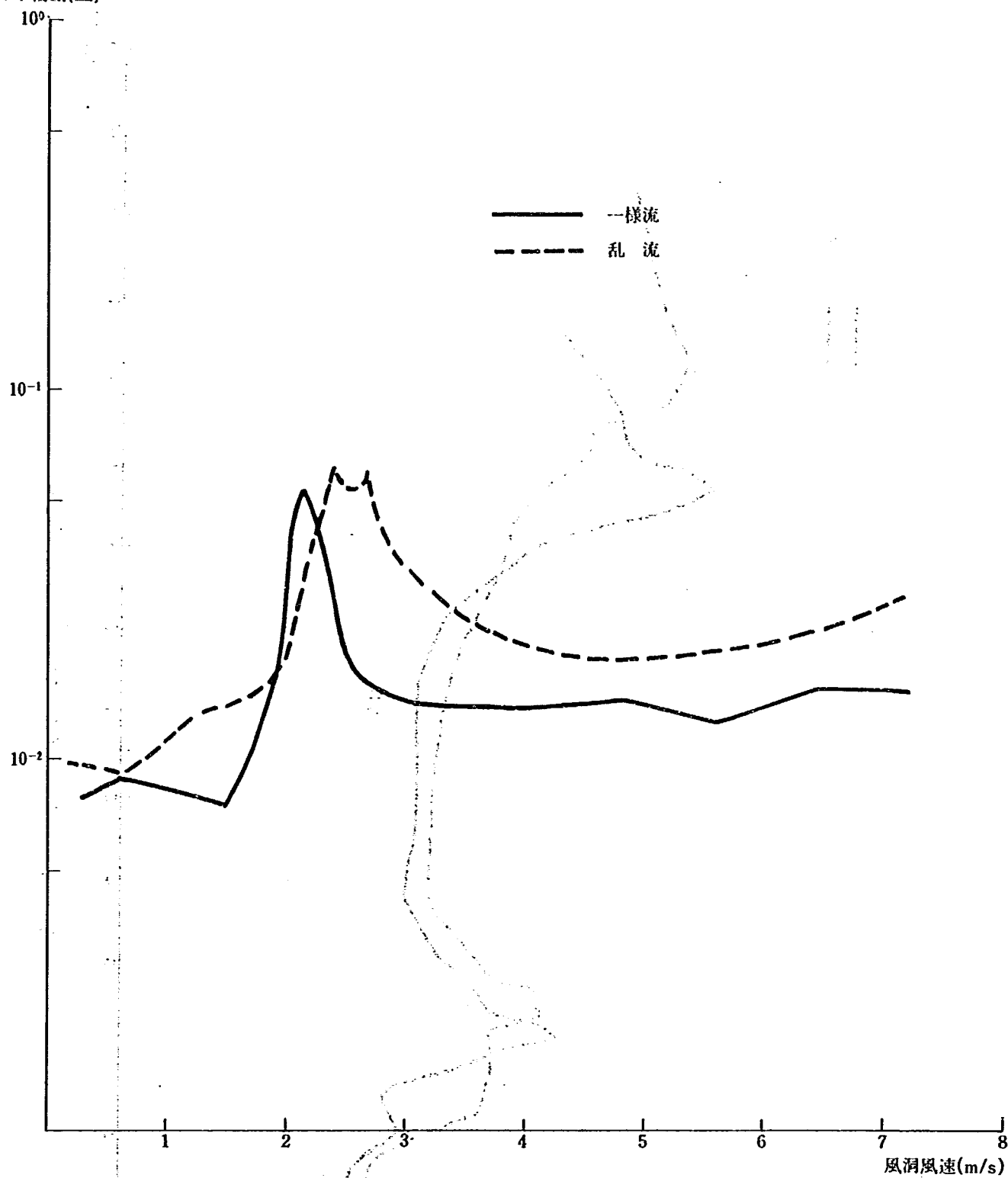


図 3 - 9 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50$ mm, 単体, $1/2$ 点主流直角方向)

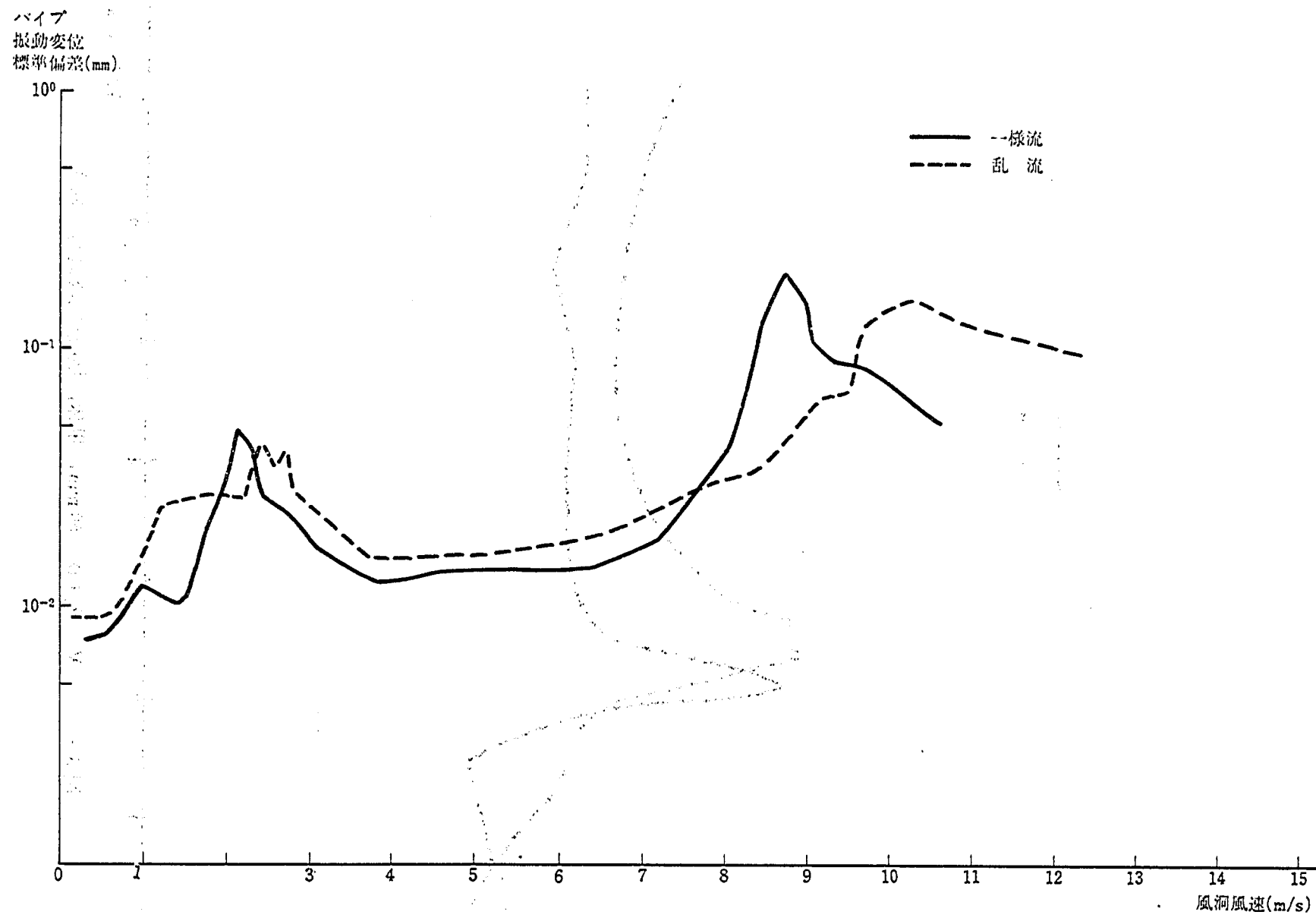


図 3 - 10 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50$ mm, 単体, $1/4$ 点主流直角方向)

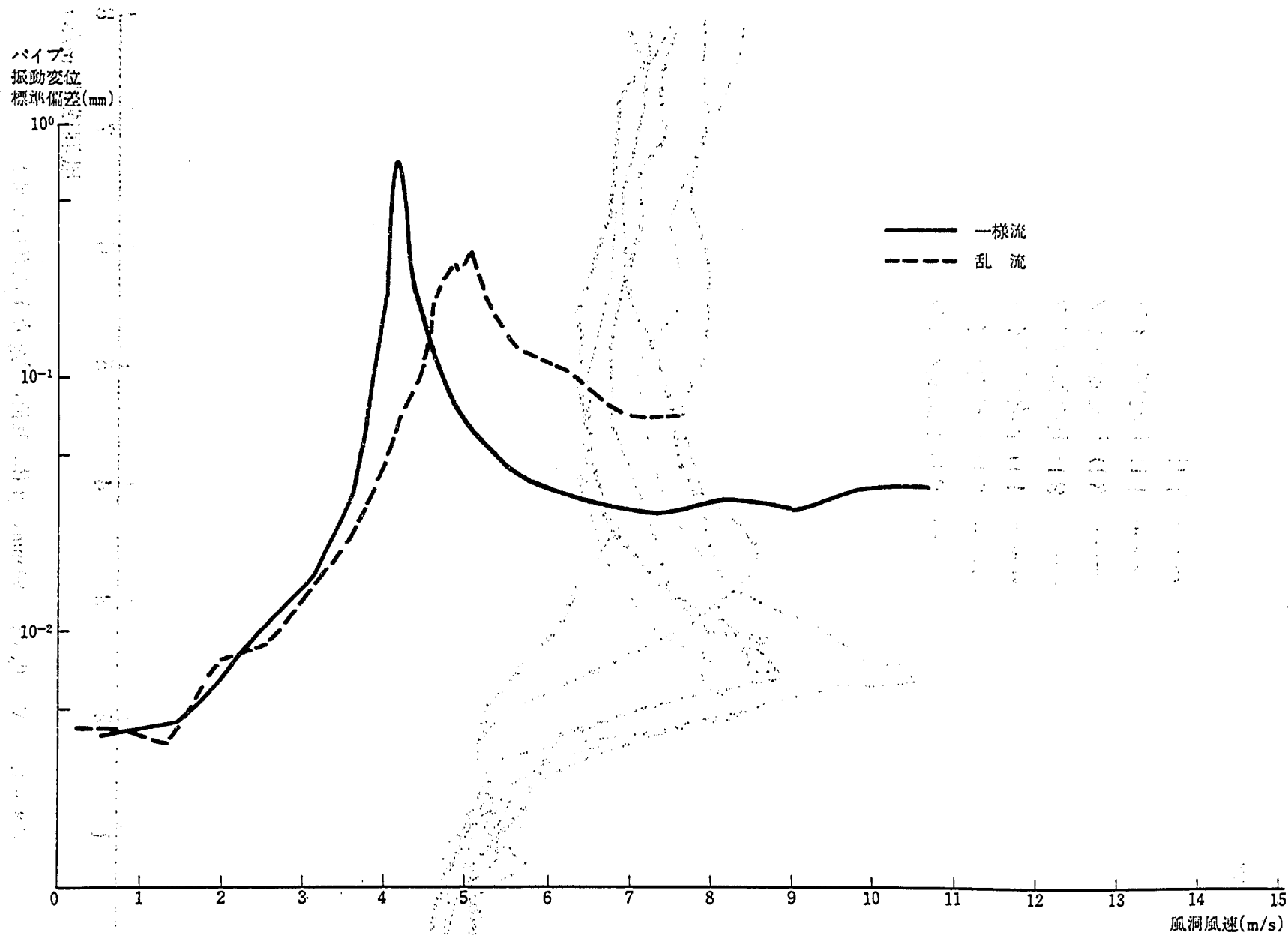


図 3-11 $V - \sigma_A$ ($\phi = 70$ mm, 単体, $1/2$ 点主流直角方向)

パイプ
振動変位
標準偏差(mm)

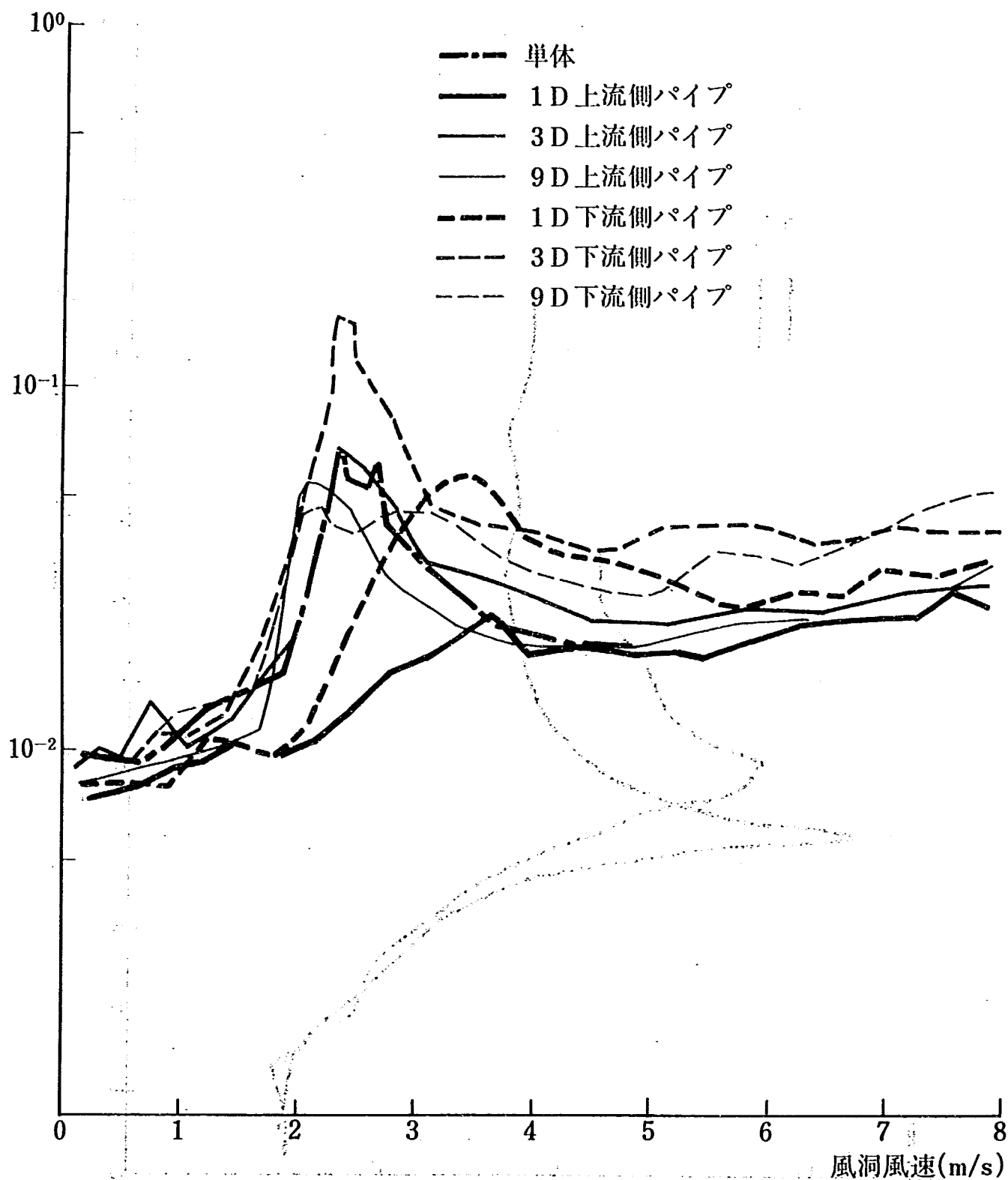


図 3 - 12 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50 \text{ mm}$, 2 体, 乱流, $z = 1/2$ 点主流直角方向)

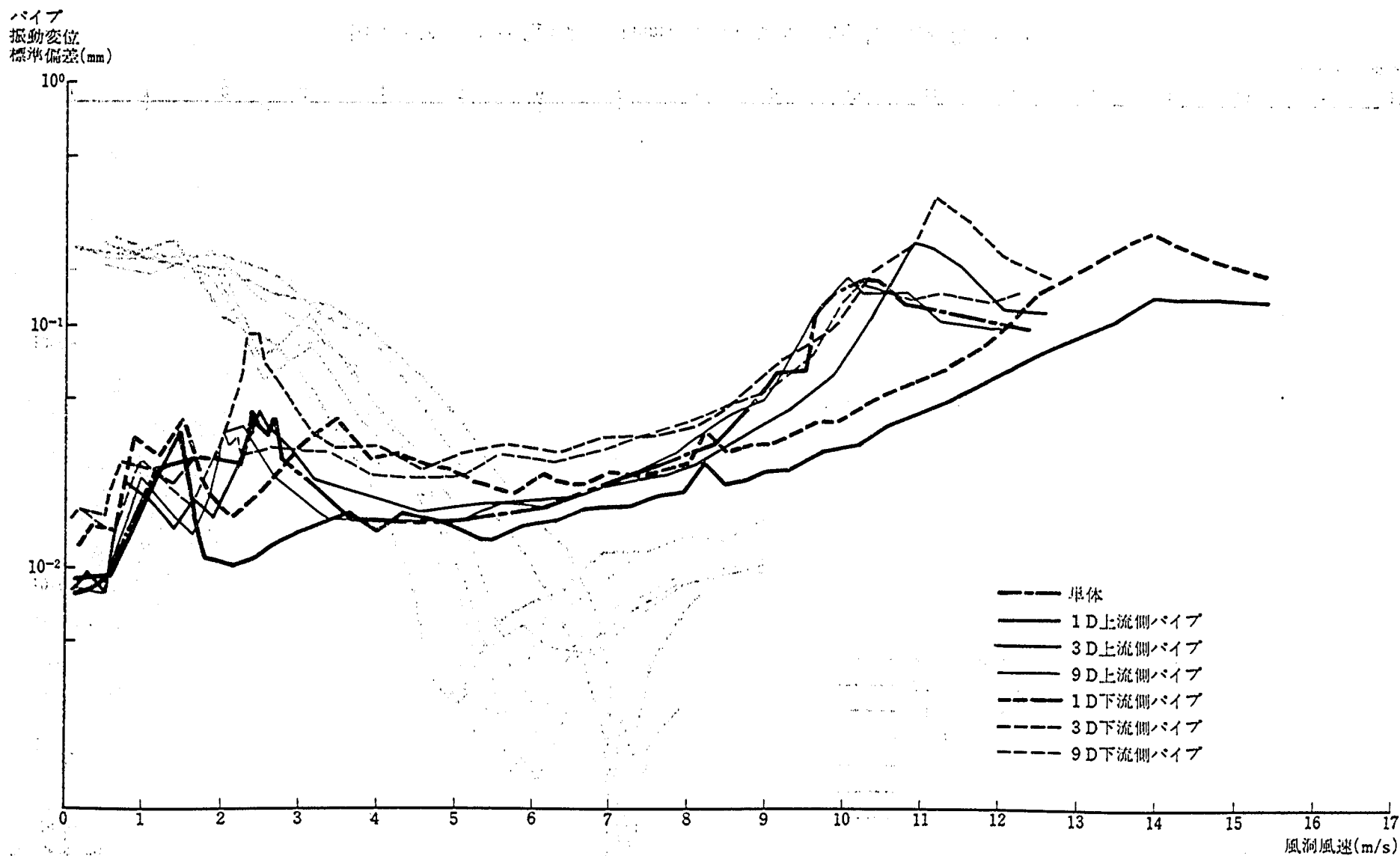


図 3-13 $V - \sigma_A$ ($\phi = 50$ mm, 2 体, 乱流, $1/4$ 点主流直角方向)

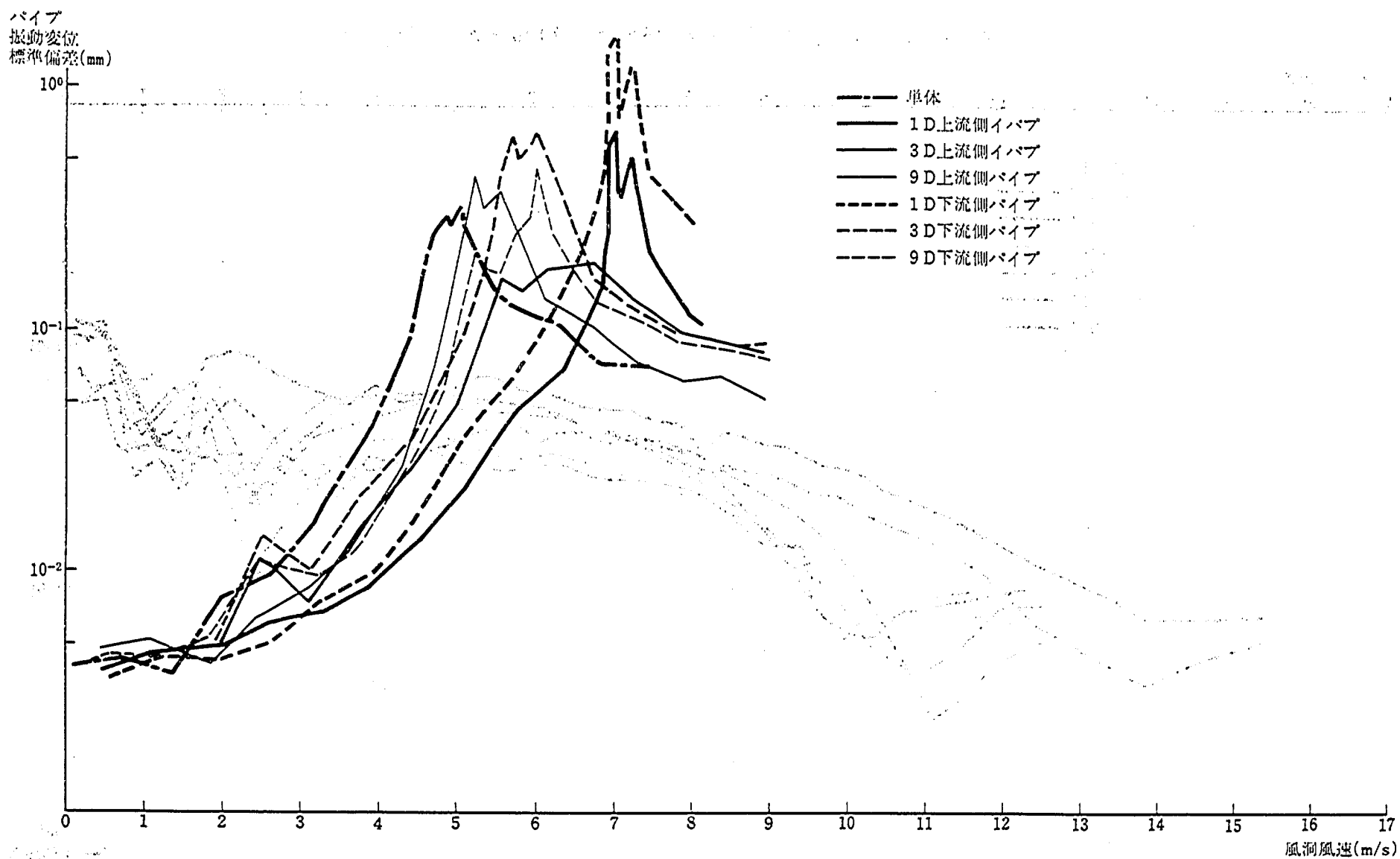


図 3 - 14 $V - \sigma_A$ ($\phi = 70$ mm, 2 体, 乱流, $1/2$ 点主流直角方向)

海洋構造物の設計外力及び
耐荷力に関する研究報告
(Ⅱ-1980)

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第 1655 号
昭和 56 年 3 月 (1981)
山本邦夫・佐藤弘史

キーワード パイプ構造物, 海洋構造物, 潮流力, 渦励振

要 旨

以下の項目について報告した。

- 1) 2本のパイプの流体力および渦励振に関する2次元模型実験
- 2) 2本のパイプの渦励振に関する3次元模型実験



郵便はがき

四十円切手
をはって下
さい

3 0 5 - □ □

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

建設省土木研究所
構造研究室 御中

No. 7

No. 7

配布先氏名

配布先住所



土木研究所資料第1655号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名 印