

# 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 (IV—1982)

昭和58年 3 月

建設省土木研究所  
構造橋梁部構造研究室

Copyright ©1983 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なってはならない。

## 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きているが、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、これらの構造物に作用する外力やその耐荷力に関しては不明確な点が少なくない。

当研究室では、昭和51年度より海洋構造物の代表的構造形式であるパイプ構造物に潮流が作用したときに、その構造物に作用する流体力の推計手法あるいは構造物が示す動的挙動について研究を行ってきた。現在までに実施した研究内容としては、流れの中におかれたパイプ部材あるいはパイプ列に作用する流体力およびそれらの振動特性に関する文献調査<sup>1)</sup>、流れ方向に並列に置かれた2本のパイプに作用する定常的な流体力に関する文献調査およびパイプに作用する流体力を測定することを目的とした風洞実験<sup>2), 4)</sup>、流れ方向に並列して置かれた2本のパイプの渦励振特性を明らかにするために2次元剛体模型および3次元弾性模型を用いて実施した風洞実験<sup>3), 4), 5)</sup>、潮流によるパイプ部材の渦励振特性の推定法の提案<sup>6)</sup>、パイプ構造物の振動による疲労を考慮した設計法に関する文献調査<sup>7)</sup>などが挙げられる。

今年度は並置された2本のパイプの渦励振特性を明らかにするために、3次元弾性模型を用いて追加実験を行うとともに、本研究の最終年度にあたるために、研究のとりまとめを行い、潮流に起因してパイプ構造物に作用する定常流体力の推計方法、流れに起因する振動の発現流速および振動振幅の推定方法、ならびに渦励振が生じた場合の疲労に関する検討手法などについて報告する。

昭和 58 年 3 月

構造研究室 室 長 山 本 邦 夫  
研究員 佐 藤 弘 史  
" 中 神 陽 一  
技 官 神 嵩 一 夫

## 目

## 次

## まえがき

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 昭和57年度の調査 .....          | 1  |
| 1.1 実験方法および実験条件 .....        | 1  |
| 1.2 実験結果 .....               | 2  |
| 1.3 ま と め .....              | 4  |
| 第2章 潮流に対するパイプ構造物の設計手法 .....  | 5  |
| 2.1 静的設計に用いる定常流体力の推定方法 ..... | 5  |
| 2.2 流れに起因する振動の推定方法 .....     | 6  |
| 2.3 渦励振による疲労に関する検討方法 .....   | 13 |
| 第3章 今後の課題 .....              | 16 |
| 参考文献 .....                   | 16 |
| 表 .....                      | 18 |
| 図 .....                      | 24 |

## 第1章 昭和57年度の調査

本年度は本研究の最終年度にあたるため、とりまとめに必要な補完資料を得ることを目的とした実験を主として実施した。以下、本年度実施した実験の内容および結果について述べる。

### 1.1 実験の方法および条件

#### (1) 実験施設および使用気流

実験に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。同風洞の主要諸元を付表1-1に示す。また、実験に使用した気流は乱れのほとんどない一様流である。

#### (2) 実験対象模型および実験ケース

今年度実験の対象とした模型は直径40, 50, 60および70mmの4種類のアルミ製の弾性模型である。模型は測定胴上流端より約8m下流に鉛直にたて、測定胴の内壁の上面および下面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。2本のパイプは、流れ直角方向(90°)、流れ方向(0°)あるいは流れに対して斜め45°の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1-1および付図1-1にそれぞれ表わす。

また、今年度実施した実験ケースを表1-1に示す。実験の対象としたパイプの純間隔はそれぞれ直径40mmのパイプの場合には1.5D, 3D, 9D(Dはパイプの直径)とし、直径50mmのパイプの場合には1D, 6Dとし、直径60mmのパイプの場合には1D, 3D, 9Dとし、直径70mmのパイプの場合には1D, 6Dとした。また、2本のパイプの設置角度はそれぞれ0°, 45°, 90°とした。

#### (3) データの計測方法とその処理方法

風速の測定にはピトー管および精密微差圧計を用いた。また、パイプの振動応答の測定にはひずみ型加速度計を用い、加速度計はパイプの1/2点および下方より1/4点の気流主流方向および主流直角方向のパイプの振動応答量が測定できるように、1体のパイプの中に4台組み込んだ。加速度計の取り付け位置ならびに便宜上つけた加速度計の呼称を図1-2に示す。また、今回の実験に使用した加速度計の校正係数などを付表1-2に示す。さらに、今回の実験に使用したパイプ模型の風洞に設置した状態での構造特性を表1-2に示す。表の中のパイプの固有振動数の実測値は、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をさせたときの加速度記録より読み取ったものであり、多少のデータのバラツキを含んでいる。

加速度を変位に変換する手法としては、加速度の時系列データをフーリエ変換し、周波数領域で積分する方法をとった。また、振動応答(変位)の標準偏差を求める場合には、低周波数領域の雑音を与える悪影響を避けるために、ある周波数 $f_1$ 以下の成分を除去することにしたが、この遮断周波数 $f_1$ の設定にあたっては、数ケースの実験データを使用して $f_1$ を0Hzから模型の固有振動数 $f_0$ まで変化させ数値計算を行い、そのときの振動応答の標準偏差 $\sigma_x$ の変化の状況を調べた。その結果 $f_1$ を0Hzから $1/2 f_0$ の間で変化させた場合にはカット周波数領域が大きくなるにしたがって、 $\sigma_x$ も減少を続けるが、 $f_1$ を $1/2 f_0$ から $f_0$ の間で変化させた場合には $\sigma_x$ はほぼ一定値をとることが明らかとなったため、 $f_1$ として $1/2$

$f_0$ を採用することにした。

## 1.2 実験結果

実験より得られた渦励振の極大振幅の気流直角方向の成分の標準偏差(1分間のデータによる解析結果)とパイプの直径( $D$ ), 2本のパイプの設定角度( $\alpha$ ), 2本のパイプの間隔( $L$ ), 風速( $U$ ), レイノルズ数( $Re$ )およびストローハル数( $S$ )の関係を表1-3に示す。また, 2本のパイプの間隔がパイプの渦励振特性におよぼす影響を明らかにするためにとりまとめた風速と振幅の標準偏差の関係図と, 2本のパイプの設置角度がパイプの渦励振特性におよぼす影響を明らかにするためにとりまとめた風速と振幅の標準偏差の関係図をそれぞれ付図1-2および付図1-3に示し, それぞれの図に対応する条件を付表1-3-1および付表1-3-2に示す。

主に, 今年度の主目的実験であった直径40および60mmのパイプを使用した実験結果より, パイプ間隔( $L$ )と渦励振の極大振幅の標準偏差( $S_v$ )とパイプの配置の関係をとりまとめて図1-3に, 後流側パイプの極大振幅の発現無次元風速( $V_F$ )の単独パイプの極大振幅の発現無次元風速( $V_{F0}$ )に対する比 $V_F/V_{F0}$ とパイプの間隔とパイプの設置位置の関係をとりまとめて図1-4に,  $V_F/V_{F0}$ と2本のパイプの設置角度( $\alpha$ )の関係をとりまとめて図1-5にそれぞれ示す。また, 昨年までに行った実験結果も含めて, パイプを2本並列して設置した場合にパイプに生じる渦励振の極大振幅と2本のパイプの相対的位置の関係をとりまとめて図1-6に示す。図中に示した数値はパイプを並列したときに発生するパイプの渦励振振幅の極大値の標準偏差とそれに対応する単体パイプの渦励振振幅の極大値の標準偏差の比として示している。参考のために図1-6-2には乱流中における実験結果を示してあるが, これは昨年度までに実験した結果より求めたものである。実験に使用した乱流はメッシュサイズ0.625 m, バーサイズ0.175 mの格子で作ったものであり, その乱流特性は下記の通りである。

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)

                                 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る。

乱れのスケール;

$L_x^*$ (主流方向風速の主流方向のスケール)および $L_z^*$ (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,  $L_x^*$ ,  $L_z^*$ は格子からの距離に対して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,  $L_x^*$ は0.3 m~0.7 m,  $L_z^*$ は0.1 m~0.5 mであった。

$L_H$  (主流方向風速の主流直角水平方向のスケール) および  $L_V$  (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、 $L_H$ 、 $L_V$  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、 $L_H$  は 0.4 m ~ 0.5 m、 $L_V$  は 0.1 m ~ 0.2 m であった。

これらの図表をもとにして、並列パイプの間隔がパイプに発生する渦励振の極大振幅やその発現風速に与える影響および 2 本のパイプの設置角度が極大振幅の発現風速に与える影響などについて述べると以下ようになる。

#### (1) パイプ間隔が渦励振の極大振幅に与える影響

図 1-3 からわかるように、パイプの間隔が 1.5 D (  $\phi 60\text{mm}$  のパイプの場合は 1 D ) で、設置角度が  $0^\circ$  あるいは  $45^\circ$  の場合に後流側のパイプの振動振幅は非常に大きくなる。その値はパイプの径により異なるが、おおむね上流側パイプの振幅の 5 ~ 10 倍程度の値となっている。また、パイプの径が  $40\text{mm}$  のときには、パイプの間隔が 1.5 D から 3 D に広がる、総てのケースについてその振幅が減少する。一方、パイプの径が  $60\text{mm}$  の場合には、パイプの間隔が 1.0 D から 3 D に広がると上流側パイプの振幅は増大するが、後流側パイプの振幅は減少する。さらに、パイプの間隔が 9 D まで広がるといずれのケースにおいても発振振幅はほぼ同一の値となる。しかしながら、パイプの設置角度が  $90^\circ$  の場合には上述した傾向はうかがわれるものの、設置間隔による発振振幅の差はあまりない。

また、図 1-4 からわかるように、後流側のパイプの極大振幅が発現する風速は、パイプの設置間隔が 1.5 D (  $\phi 60\text{mm}$  のパイプの場合は 1.0 D ) で、パイプの設置角度が  $0^\circ$  ないし  $45^\circ$  の場合にはパイプが単体で置かれた場合の値に比べてかなり上昇し、その比は 1.2 ~ 1.5 となっている。また、その傾向はパイプの設置角度が  $45^\circ$  の場合が著しい。しかしながら、パイプの設置角度が  $90^\circ$  の場合には、極大振幅が発現する風速は、単体パイプの場合と並列パイプの場合とではほとんど変わらない。この傾向はパイプの間隔が広がるにしたがって減少しパイプの間隔が 9 D の場合には、並列パイプの極大振幅が発現する風速は単体パイプのそれとほとんど変わらなくなってくる。また、上流側に設置したパイプも同様な振動特性を有している。

#### (2) パイプの設置角度が極大振幅に与える影響

パイプの設置角度が極大振幅の発現風速に与える影響は、パイプの間隔が 1.5 D (  $\phi 60\text{mm}$  のパイプの場合には 1.0 D ) の場合に特に大きいので、この場合を例として図 1-5 に示した。この図からわかるように、 $\phi 40$ 、 $50$ 、 $60\text{mm}$  のいずれのパイプの場合にも、その影響が顕著に現われるのはパイプの設置角度が  $45^\circ$  の場合であり、その極大振幅の発現風速は単体パイプの場合に比較して 1.2 ~ 1.5 倍近くになっている。一方、2 本のパイプの設置角度が  $0^\circ$  あるいは  $90^\circ$  の場合には  $\phi 40\text{mm}$  のパイプを除き、後流側パイプの極大振幅の発現風速は単体パイプの発現風速とほぼ同程度の風速となっている。

2 本のパイプの間隔および設置角度がパイプに発生する渦励振の極大振幅に与える影響を平面的に理解できるように取りまとめたものが図 1-6 である。図中の枠の中の値は○印の位置にダミーパイプを

置いた場合に●印のパイプに発現する渦励振の極大振幅の標準偏差をそれに対応する単体パイプのそれを除いて求めた値である。一般的な振動特性は上述した通りであるが、2本のパイプが流れ方向に並列して置かれ両パイプの距離が1 D程度と狭い場合には、後流側のパイプに発現する振動は渦励振というよりもバフェティングと考えられ、パイプの剛性が小さいとその振動振幅はかなり大きくなるので注意が必要である。

### 1.3 まとめ

3年間にわたって実施してきたパイプの剛体模型あるいは弾性模型を使用して行った風洞実験の結果より、2本のパイプが接近して配置された場合には、パイプに発現する渦励振の発現風速および発現振幅の大きさなどその振動応答特性が、単体の場合と比較してかなり異なることが明らかとなった。主な内容は次の通りである。

- (イ) 渦励振の発現風速は単体パイプのそれより高くなる。
- (ロ) 2本のパイプの距離が1 D近くになり、2本のパイプの設置位置が流体の主流方向に一致すると渦励振というよりもバフェティング現象が起り、振動振幅は単体パイプの渦励振振幅の数10倍となる恐れがある。また、2本のパイプ間の距離が9 D程度になっても他のパイプがあることがパイプの振動振幅に微妙な影響を与え、それは2本のパイプの距離のみでなく配置位置によって異なってくる。
- (ハ) パイプの渦励振特性は、2本並列した場合にも乱流効果の影響を受ける。今回の実験では乱流の特性を自然流体の乱流に相似されることが出来なかったもので、振幅の絶対値は参考値として載せたものであるが、振動振幅に乱流効果の影響が現われることに注意をうながしたい。

## 第2章 潮流に対するパイプ構造物の設計手法

潮流がパイプ構造物におよぼす影響としては、定常的な流体力の作用による静力学的な問題と非定常な流体力による振動問題が挙げられる。前者については、流体力が算定できればあとは通常の静的設計によって対処することができる。後者については、構造物の特性（構造諸元、固有振動数、質量など）および潮流の特性（潮流速度、速度の頻度分布、乱流特性など）に基づき、構造物に振動が発現する可能性の有無について検討し、振動の発現の恐れのある場合にはその振動が構造物の安全性あるいはその使用性に悪影響を与えないようにする必要がある。

本章では、静的設計に用いる定常的な流体力の推計方法、流れに起因する振動の発現流速、振動振幅の推定手法および渦励振が生じた場合の疲労問題についての取り扱い方について述べることにする。

### 2.1 静的設計に用いる定常流体力の推定方法

#### 2.1.1 単体パイプに作用する定常流体力の推定方法

単体パイプに作用する定常流体力  $P$  は基本的には海洋鋼構造物設計指針（案）解説（以下指針という）の2.6.1～2.6.3に述べるところに従い(1)式によって推計することが出来る。

$$P = \frac{1}{2} \rho U^2 C_D \cdot D \quad (1)$$

ここに  $P$  : 定常流体力

$\rho$  : 流体の密度

$U$  : 流体の流速

$C_D$  : パイプの抗力係数  $Re < 3.5 \times 10^5, 1.2, \quad Re \geq 3.5 \times 10^5, 0.7$

$D$  : パイプの直径

$Re$  : レイノルズ数  $Re = UD/\nu$

$\nu$  : 流体の動粘性係数

抗力係数  $C_D$  はレイノルズ数（ $Re$  数）および構造物の表面の粗さによって変化する。指針の表2.4.1に示されている  $C_D$  の値0.7は表面の滑らかなパイプが  $Re$  数  $3.5 \times 10^5$  以上の領域の一樣な流体中におかれた場合の値である。レイノルズ数が  $3.5 \times 10^5 \sim 3.5 \times 10^6$  の領域の一樣流中においては、 $C_D$  が0.7以下となるため、この領域においては  $C_D$  として0.7の値を採用してパイプ構造物を設計しても安全側の設計となるが、 $Re$  が  $3.5 \times 10^5$  より小さい領域においては、 $C_D$  の値が0.7より大きくなるため、設計では  $C_D$  の値として1.2の値を用いる必要がある。しかしながら、パイプの表面が必ずしもなめらかでない場合には、 $10^6$  オーダーの高  $Re$  数の領域においても  $C_D$  の値は1程度となることもある。したがって、 $C_D$  の値として1.2を採用して静的設計を実施した場合に、かなり不経済な設計となるようであれば、A. Roshko の実験結果<sup>a)</sup>、E. Achenbach の実験結果<sup>b)</sup>より  $Re$  数、表面粗さを考慮した  $C_D$  を求め、再検討する必要がある。

### 2.1.2 複数パイプに作用する定常流体力の推定方法

複数のパイプに作用する定常流体力については必ずしも十分なデータが蓄積されていないため、一般には実験により推定することが望ましい。実験によらない場合は図2-1より抗力係数を求め上記(1)式を用いて複数パイプに作用する定常流体力を求めることができる。

この図は当研究室で実施した実験のデータをとりまとめて作成したものであり、Sochsの実験結果も併記してある。また、図中には生データの $C_D$ の値の他に $AR$ （パイプの直径と長さの比：アスペクト比）の補正をほどこした値（生データの $C_D$ 値を $0.8^{\frac{1}{AR}}$ で除したもの）を併記した。設計にあたっては $AR$ 値にアスペクト比による補正をほどこして求めた値を用いる必要がある。

図からも明らかなように $Re$ 数が $10^5$ 程度の付近では、上流側にパイプを配置した状態（ $\alpha=0^\circ$ ）の場合を除き、パイプの純間隔（ $L$ ）がパイプの直径（ $D$ ）の4倍以上の場合にはパイプの抗力係数は単体パイプのそれとほとんど変わらなくなる。 $\alpha$ が $0^\circ$ の場合には $L/D \geq 4$ の場合でも並列パイプの $C_D$ 値は単体パイプの $C_D$ 値の $1/2 \sim 1/3$ 程度となる。

しかしながら、高 $Re$ 数の領域においてはこの傾向は異なり、岡島の実施した実験<sup>9)</sup>によると、 $Re$ 数が $5 \times 10^5 \sim 6.3 \times 10^5$ となる超臨界域では、流れに直列におかれた2本のパイプの上流側パイプ（ $\alpha=180^\circ$ ）の $C_D$ 値は $L/D=0.7 \sim 5.3$ の場合に約0.3となり、単体のパイプの $C_D$ 値に近い値を示すが、下流側パイプ（ $\alpha=0^\circ$ ）の $C_D$ 値は0.5となり、単体パイプの $C_D$ 値より大きくなるという結果を示している。

なお、参考のため大型の6円柱模型を用いて、 $Re$ 数が $5 \times 10^5 \sim 4 \times 10^6$ の領域で $C_D$ 値を測定した結果<sup>9)</sup>の一部を表2-1に示す。ただし、同表の結果は各円柱ごとに抗力を測定したのではなく、全体の抗力を測定し、各柱の分担率を仮定して求めたものであることに注意をする必要がある。

## 2.2 流れに起因する振動の推定方法

### 2.2.1 単体パイプの振動

流れの中におかれた単体パイプは、その背後に生じる渦により周期的な力の作用を受け発振することがある。この現象は一般に渦励振（風琴振動）と呼ばれ従来より多くの研究が行われてきている。ここでは、それらの成果および当研究室で実施した実験の結果に基づき海洋構造物としての単体パイプの渦励振についての解析手法について述べる。

#### 2.2.1.1 解析に用いた記号

以下に解析に使用した記号について一括説明する。

|                        |                                 |
|------------------------|---------------------------------|
| $A$ ：パイプの断面積           | $U$ ：流速，添字 $d$ ：設計流速， $c$ ：発振流速 |
| $C_L$ ：揚力係数            | $W$ ：単体重量，添字 $w$ ：海水， $s$ ：パイプ  |
| $D$ ：パイプの外径            | $X$ ：第1次の基準関数                   |
| $E$ ：ヤング率              | $x$ ：パイプの長さ方向の座標                |
| $f$ ：振動数，添字 $o$ ：固有振動数 | $y$ ：パイプの変位，添字 $a$ ：許容値         |

|                                       |                                     |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| $g$ : 重力加速度 ( $= 9.8 \text{ m/s}^2$ ) | $t$ : 時 間                           |
| $I$ : 断面 2 次モーメント                     | $t_h$ : パイプ厚                        |
| $l$ : パイプの長さ                          | $\delta$ : 構造物の対数減衰率                |
| $M$ : モーメント                           | $\rho$ : 密度, 添字 $w$ : 海水, $s$ : パイプ |
| $m$ : 単位長さあたりの質量                      | $\sigma$ : 応力, 添字 $a$ : 許容値         |
| $p$ : 単位長さあたりの分布外力                    | $\psi$ : 一般座標                       |
| $r$ : パイプ半径方向の座標                      | $\omega$ : 円振動数, 添字 $o$ : 固有円振動数    |
| $S$ : ストローク数                          | $\zeta$ : 構造物の減衰定数                  |

### 2.2.1.2 渦励振に対処するための手法の基本的な考え方

渦励振に対して対処する方法として2つの方法が考えられる。1つの案は設計流速以内に渦励振を起こさせないように設計する方法である(渦励振の防止)。次に、この考え方に基づいて構造物を設計すると構造物が不経済設計となる場合には、渦励振による発振振幅などを構造物の安全性、使用性などに支障がない程度に抑制する案が考えられる(渦励振の抑制)。渦励振は流速にほぼ比例して剝離する渦の周波数が構造物の固有振動数とほぼ一致する流速周辺で発生するため、渦励振の発生そのものを抑制するためには、渦励振の発現流速  $U_e$  を構造物の設計流速  $U_d$  以上にすれば良いことになる。これを式に表わすと(2)式のようになる。

$$U_d < U_e \quad (2)$$

また、第2の考え方に基づいて設計する場合には、その注目する物理量を変位とするか、加速度とするか、応力とするかにより取り扱い方が多少異なってくるが、それぞれの発現量をそれぞれの許容値以下にすればよい。これらの関係を式で表わせばそれぞれ(3)、(4)、(5)式のようになる。

$$y < y_a \quad (3)$$

$$\ddot{y} < \ddot{y}_a \quad (4)$$

$$\sigma < \sigma_a \quad (5)$$

ここに  $y$  : 発現振幅  $y_a$  : 振幅の許容値

$\ddot{y}$  : 発現振動の加速度  $\ddot{y}_a$  : 許容加速度

$\sigma$  : 発生最大応力  $\sigma_a$  : 許容応力

### 2.2.1.3 渦励振の発現を防止するための設計手法

渦励振は渦の発生周波数と構造物の固有振動数とが一致する流速 ( $U^*$ ) よりやや低い流速より発現するので、渦励振が発現する流速 ( $U_e$ ) は(6)式で表わされる。

$$U_e = \alpha U^* (= \alpha f_o D/S) \quad (\text{m/s}) \quad (6)$$

ここに  $U_e$  : 渦励振の発現流速 (m/s)

$\alpha$  : 補正係数

$U^*$ : 渦の発生周波数と構造物の固有振動数が一致する流速 (m/s)

$$= f_0 D/S$$

構造物の設計において、設計流速以下で渦励振を発生させないようにするためには(2)式の間係を満足する必要がある。(2)式と(6)式より(7)式が成立する。

$$U_d < \alpha f_0 D/S \quad (7)$$

(7)式のうち、 $\alpha$ 、 $S$ の値としては以下の値を採用するのが適当である (Sainsbury らの報告<sup>1)</sup>および Griffin らの報告<sup>2)</sup>)。

$$\alpha = 0.7 \quad S = 0.2$$

また、パイプの曲げモードの固有振動数は(8)式より求めることができる。

$$f_0 = \frac{\beta^2}{2\pi\ell^2} \sqrt{\frac{EIg}{WA}} \quad (8)$$

ここに、 $\beta$  : 支持条件を表わす定数

両端ピンの場合  $\pi$  (3.14)

片持ちばりの場合 1.87

両端固定の場合 4.73

$I$  : パイプの曲げ剛性

パイプ直径 ( $D$ ) に比べてパイプ厚 ( $t_b$ ) が十分小さい場合には次式で求めることができる。

$$\frac{\pi}{8} D^3 t_b$$

$WA$  : パイプの仮想重量

$$= \frac{\pi}{2} D^3 W_w + \pi D t_b (W_s - W_w)$$

(7)式に(8)式を代入して整理すると(9)式が求まる。

$$\frac{\ell}{D} < \beta \left( \frac{\alpha}{2\pi S} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{Eg}{4 \left( \frac{D}{t_b} \right) W_w + 8 (W_s - W_w)} \right)^{\frac{1}{4}} U_d^{-\frac{1}{2}} \quad (9)$$

(9)式が、パイプ構造物に渦励振を生じさせないために必要なパイプの細長比と剛性と流速の間関係式であるが、パイプ材料を鋼とした場合について同関係を図化したものが図2-2である。同図を作成するにあたって、パイプのヤング率  $E$  は  $2.1 \times 10^8 \text{ kg f/m}^2$ 、パイプの単位体積重量  $W_s$  は  $7.85 \text{ kg f/m}^3$ 、海水の単位体積重量  $W_w$  は  $1.03 \times 10^3 \text{ kg f/m}^3$  とした。これらの数値を使うと(9)式は(10)式となる。

$$\frac{\ell}{D} = \beta \left( \frac{\alpha}{2\pi S} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{2.1 \times 10^8}{4.2 \left( \frac{D}{t_b} \right) + 56} \right)^{\frac{1}{4}} U_d^{-\frac{1}{2}} \quad (10)$$

図2-2より各流速において流れ直角方向の渦励振を生じさせないために必要な  $\ell/D$  の上限値と

$D/t_h$  の値を求めることができる。

なお、構造物の質量および減衰率が小さい場合には、より低い流速で流れ方向の渦励振が起りうる。<sup>8)</sup> この渦励振を生じなくさせるための条件は(9)式において  $\alpha/S=1.2$  とすれば求めることができる。しかしながら、この渦励振が発現するかどうかは構造物の質量および減衰率が微妙に影響するため、今後の研究にまつことが多大である。

#### 2.2.1.4 渦励振による振幅量などを許容値以下におさえるための設計手法

パイプ構造物のような線状構造物に任意の分布強制外力が作用するときの振動現象を解析する場合には、構造物を多自由度系とした振動モード解析法が有効な手段である。

渦励振では1次モードの振動が最も低い流速で発現するので、1次モードのみに着目し、振動モード解析法を適用すると、変動流体力  $P(x, t)$  が作用したときのパイプ構造物の任意の着目点の応答  $y(x, t)$  は1次モードの直交函数  $X(x)$  と基準座標  $\psi(x)$  を用いて

$$y(x, t) = X(x) \psi(t) \quad (11)$$

の形で与えられる。

この式を対象とする等分布質量  $m$  のパイプ構造物の運動方程式に代入すると、基準座標  $\psi$  に関する運動方程式(12)式が求められる。

$$\ddot{\psi} + 2\omega_0 \zeta \dot{\psi} + \omega_0^2 \psi = \frac{\int_0^l X(x) P(x, t) dx}{\int_0^l m [X(x)]^2 dx} \quad (12)$$

また、流れによるパイプ構造物に作用する変動流体力  $P(x, t)$  は一般に次式のように近似できる。

$$P(x, t) = \frac{1}{2} C_L(\bar{y}) \frac{X(x)}{|X(x)|} \rho U^2 D \cos(\omega_0 t) \quad (13)$$

(12)式に(13)式を代入すると軸方向に質量が一定のパイプ構造物の運動方程式が求まる。

$$\ddot{\psi} + 2\omega_0 \zeta \dot{\psi} + \omega_0^2 \psi = \frac{\frac{1}{2} \rho U^2 D}{m} \frac{\int_0^l |X(x)| C_L(\bar{y}) dx}{\int_0^l [X(x)]^2 dx} \cos(\omega_0 t) \quad (14)$$

(14)式の定常解は次の通りである。

$$y(x, t) = X(x) \psi_0 \sin(\omega_0 t) \quad (15)$$

$$\frac{\bar{y}(\bar{x})}{D} = \frac{X(x) \psi_0}{D} = \frac{U_r^2}{4\pi k_s} \frac{\int_0^l |X(x)| C_L(\bar{y}) dx}{\int_0^l [X(x)]^2 dx} X(x) \quad (16)$$

$$\text{ここに, } k_s = \frac{2m\delta}{\rho D^2}, \quad U_r = \frac{U}{f_0 D}$$

また、最大振幅が発現するとき ( $\bar{y}$  が最大するとき) の  $C_L(\bar{y})$  の値は次式で近似できるので<sup>1)</sup>,

$$C_L(\bar{y}) = 0.35 + 0.60 \left| \frac{\bar{y}}{D} \right| - 0.93 \left| \frac{\bar{y}}{D} \right|^2 \quad (17)$$

(17)式を(16)式に代入すると次式が導びかれる。

$$B_2 a = \alpha (0.35 B_1 + 0.60 B_2 a - 0.93 B_3 a^2) \quad (18)$$

$$\text{ここに, } B_n = \int_0^l |X(x)|^n dx \quad n=1, 2, 3$$

$$\alpha = U_r^2 / 4\pi k_s \quad a = \psi_0 / D$$

(18)式より  $\psi_0$  を求め、(15)式に代入すれば振動応答変位  $y$  を求めることができる。

また、加速度  $\ddot{y}(x, t)$  および応力  $\sigma(x, t)$  は同様にして次式より求めることができる。

$$\ddot{y}(x, t) = -\omega_0^2 X(x) \psi_0 \sin(\omega_0 t) \quad (19)$$

$$\sigma(x, t) |_{r=\frac{D}{2}} = \frac{1}{2} E D X''(x) \psi_0 \sin(\omega_0 t) \quad (20)$$

以上がパイプ構造物に発生する渦励振による最大振幅などを求めるための手法であるが、個々のパラメーターについて具体的な検討を加えると次のようになる。渦励振振幅は流速により変化するが、過去の実験結果よりそれが最大となる  $U_r$  はおおよそ  $6 \sim 8 f_0 D$  である。 $U_r$  の値を実験より求めない場合には、一般に  $k_s$  が小さくなると  $U_r$  は大きくなるので<sup>2)</sup>、 $U_r$  値として 8 を採用すればよい。しかしながら、 $U_0/f_0 D$  が 8 を超える場合には  $U_0$  以下の流速で最大振幅があらわれるので、上述の方法をとればよいことになるが、 $U_0/f_0 D$  の値が 8 以下の場合には  $U_0$  と最大振幅の関係は単純増加関数となるので、最大振幅を求めるためには上述の手法に補正を加えた(21)式によって求めなければならない。

$$\frac{\psi_0^*}{D} = \left\{ \frac{(U_0/f_0 D) - 3.5}{8.0 - 3.5} \right\} \frac{\psi_0}{D}, \quad 3.5 \leq \frac{U_0}{f_0 D} < 8.0 \quad (21)$$

$$= \frac{\psi_0}{D} \quad 8.0 \leq U_0/f_0 D \quad (22)$$

なお、式中  $f_0 D$  の値は(8)式より導びかれる次式で求めることができる。

$$f_0 D = \left( \frac{P}{\ell} \right)^2 \frac{\beta^2}{2\pi} \sqrt{\frac{2.1 \times 10^8}{4.2 \left( \frac{D}{t_h} \right) + 56}} \quad (23)$$

また、鋼製パイプが海水中におかれた場合には  $k_s$  は次式で求めることができる。

$$k_s = \pi \delta \left[ 1 + \frac{13.2}{(D/t_h)} \right] \quad (24)$$

式中  $\delta$  は構造物の対数減衰率であるが、対数減衰率は構造物の形式などによって微妙な影響を受けるため既存の類似構造物より推定する必要があるが、その値が正確に求められない場合には、既存の構造物の実測データなどよりみて、下記の値を用いて設計すればよい<sup>2)</sup>。

$$\begin{aligned} \delta &= 0.02 && \text{両端ピン構造, 両端固定構造} \\ &= 0.01 && \text{片持ばり構造} \end{aligned}$$

$\delta$  をパラメーターとして、 $D/t_h$  と  $k_s$  の関係を図 2-3 に示す。

さらに、(15)、(18)式より明らかなように、渦励振振幅は振動モードと  $\alpha = U_r^2 / 4\pi k_s$  の関数となっている。

各支持条件における $\alpha$ と $a$ との関係を図2-4に示す。なお、図を作るにあたって、振動モードとしては表2-2に示すものを用いた。

以上単独パイプ構造物に発現する渦励振の最大振幅，最大加速度，最大応力の求め方について，説明を加えてきたが，実際の設計においては，以上の諸量をそれぞれの許容値にする必要がある。この関係を式で表わすと次式のようにになる。

$$\left| X(x) \frac{\psi^*}{D} \right|_{\max} \leq \frac{y_a}{D} \quad (25)$$

$$|X(x) \omega_o^2 \psi_o^*|_{\max} \leq \ddot{y}_a \quad (26)$$

$$\frac{1}{2} \left( \frac{D}{\ell} \right)^3 \left| \ell^2 X''(x) \frac{\psi_o^*}{D} \right|_{\max} \leq \frac{\sigma_a}{E} \quad (27)$$

このうち(26)式については，同式に(8)式を代入すると(28)式のようにになる。

$$\left| X(x) \frac{\psi_o^*}{D} \right|_{\max} \beta^4 \left( \frac{D}{\ell} \right)^3 \left( \frac{2.1 \times 10^7}{4.2 \left( \frac{D}{t_b} \right) + 56} \right) \leq \frac{1}{\ell} \frac{\ddot{y}_a}{g} \quad (28)$$

計算の便宜のため，各支持条件に対して， $X(x)$ ， $|X(x)|_{\max}$  および  $|\ell^2 X''(x)|_{\max}$  を計算した結果を表2-2に示す。

また， $U_d/f_o D$  が8以上の場合には， $\frac{\psi^*}{D}$  は支持条件， $D/t_b$ ， $U_r$  および  $\delta$  だけの関数となるため，(26)，(27)式はそれぞれ次のように書き直せる。

$$\ell/D \geq g\ddot{y} \left( \text{支持条件, } D/t_b, U_r, \delta, \frac{1}{\ell} \frac{\ddot{y}_a}{g} \right) \quad (29)$$

$$\ell/D \geq g\sigma \left( \text{支持条件, } D/t_b, U_r, \delta, \frac{\sigma_a}{E} \right) \quad (30)$$

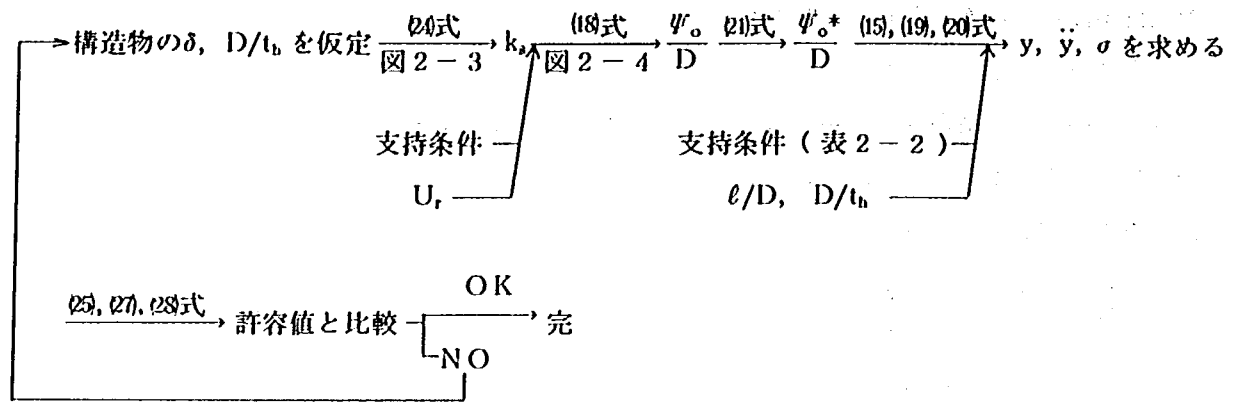
さらに，多くのパイプ海洋構造物においては $\alpha$ 値は1～100の間の値をとり，この $\alpha$ 値に対する $a$ の値は図2-4からわかるようにほぼ一定値となるので(29)，(30)式は次式のように簡略化することができる。

$$\ell/D \geq g\ddot{y} \left( \text{支持条件, } D/t_b, \frac{1}{\ell} \frac{\ddot{y}_a}{g} \right) \quad (31)$$

$$\ell/D \geq g\sigma \left( \text{支持条件, } \sigma_a/E \right) \quad (32)$$

(32)式をもとにして，支持条件をパラメーターとし $\ell/D$ と $\sigma_a/E$ との関係を図化したものが，図2-5である。この図より各許容応力を越さないための $\ell/D$ の限界値を求めることができる。

以上述べたパイプ構造物の渦励振に対する検討過程をフローチャートで表わすと次のようになる。



また、流れ方向の渦励振の振幅は、 $k_s$  値が小さい場合でも高々  $0.12 D$  程度であり、流れ直角方向の渦励振振幅の約  $1/10$  であること<sup>8)</sup>、この場合の流体力係数が明らかでないことなどを考慮し、流れ直角方向の  $\psi_0/D$  の値の  $1/10$  の値を用いて上述した方法により検討すればよい。

以上は、パイプの諸元を適当に定めることにより、渦励振による変位、応力、あるいは加速度をある値以下に抑制する方法であるが、種々の制約によりこの方法が実施できない場合には、付属物を取り付け渦励振を抑制することが必要となる。付属物には、固有振動数を高め発振流速を向上させるもの（近接する2本のパイプのモードの腹の部分にロープで結ぶなど）、減衰性能を高め振幅を抑制するもの（減衰器の取付け）、流力特性の改善を図るもの（穴あき板でおおう、パイプ軸方向に細長い板を数枚取付ける、パイプ表面にらせん状にひれを付ける）、などがある。Every らが実施した比較実験によれば、流力特性を改善する3つの方法の中では、 $k_s$  が小さい場合にはらせん状のひれが、また  $k_s$  が大きい場合には軸方向の細長い板がそれぞれ有効となる<sup>8)</sup>。

## 2.2.2 複数パイプの振動

流れによる複数パイプの振動現象は次の3種類に分類される。

1. 渦励振
2. 上流側後流の規則的な渦による共振現象<sup>1)</sup>
3. 流れの場の非一様性に起因する自励振動
  - Whirling (振れ回り振動)<sup>1), 2)</sup>
  - ジェットスイッチ現象<sup>1), 3)</sup>
  - ウェイクギャロッピング<sup>4)</sup>

このうち、3の現象は構造物の破損につながる現象であり、その発生を防止することが必要である。これらの現象のうち Whirling およびジェットスイッチ現象は間隔が密に配置された複数パイプに生ずる現象であり、間隔がある程度大きくなれば発生しない。その限界のパイプ間隔については必ずしも十分な研究はなされていないが、パイプ純間隔が  $0.3 D \sim 1.7 D$  のときにこの現象が観測されたことが報告されている<sup>2)</sup>。しかも、発現流速は  $k_s$  の小さい構造物では渦励振発現流速と同じあるいはそれ以下となる<sup>2)</sup> ため、海洋構造物の設計にあたってはパイプ純間隔を少なくとも  $2 D$  とる必要がある。一方

ウェイクギャロッピングは2つのパイプの純間隔が比較的大きい場合にも起りうる<sup>1)</sup>。 $k_s$ の比較的大きな空気中の構造物では、発現流速は渦励振のそれに比べ10倍程度高いが<sup>10)</sup>、 $k_s$ の小さな構造物の発現流速は不明の点が多い。したがって、 $k_s$ の小さな複数パイプの自励振動についてはさらに検討が必要といえる。

1 および2 に関しても  $k_s$  の小さなパイプのデータは必ずしも十分ではないが、ここでは2本のパイプを用いて当研究室で実施した実験結果に基づきその特性を述べる。付図2-1に直径および振動数の等しい2本のパイプの渦励振の最大振幅およびそのときの流速を示している。図より明らかなように、2本のパイプの間隔が大きくなれば渦励振特性は単体パイプのそれに近づく。パイプの間隔が小さい場合には、後流の渦の特性が近接パイプにより変化すること、あるいは接近流が上流側パイプから剝離した規則正しい渦を含んでいることなどの理由により単体パイプの渦励振特性とかなり異なる。しかも、その変化のしかたはパイプと流れの相対角度(図では $\alpha$ で示した)、他のパイプが固定されているか振動できるよう支持されているかにより定性的にも異なる。

$k_s$ が10程度( $(m\delta)/(\rho D^2)$ が5程度)で、 $\alpha=0^\circ$ の場合、下流側のパイプは上流側のパイプが固定されていれば渦励振振幅は単体パイプに比べ小さくなるが、上流側のパイプが固定されていなければ振幅は大きくなる。上流側のパイプの振幅は、下流側の支持条件にかかわらず若干大きくなる。 $\alpha=45^\circ$ のときは、上流側パイプの振幅は小さくなるが、下流側パイプの振幅は大きくなる。 $\alpha=90^\circ$ のときは、若干振幅が大きくなる。しかしながら、自励振動を防ぐためにパイプ間隔を2D以上とれば、2本のパイプの渦励振振幅は単体パイプの高々2倍となり、6D以上とれば単体パイプのそれとほとんど変わらなくなる。また、最大振幅の発現する無次元流速は5~8の範囲である。

$k_s$ が100程度の2本のパイプでは、定性的には $k_s=10$ の場合とほぼ同じであるが、単体パイプの振幅に対する比はかなり大きくなる。海洋構造物として用いる場合のパイプは、図2-3に示したように $k_s$ は高々1であるため、近接パイプによる渦励振振幅の増加はかなり小さいものと推定される。

以上の理由により複数パイプの渦励振に対する設計法をまとめると次の通りである。2本のパイプ間隔が6D以上であれば2.2.1に基づき単体パイプと同様な方法で設計する。また、2本のパイプの間隔が2D以上6D未満であり、単体パイプとして渦励振が発現する恐れのある場合には、渦励振振幅を単体パイプの2倍として2.2.1.4に基づきその振動が有害なものかどうかを検討し、必要があればその振動の抑制方法について検討する。

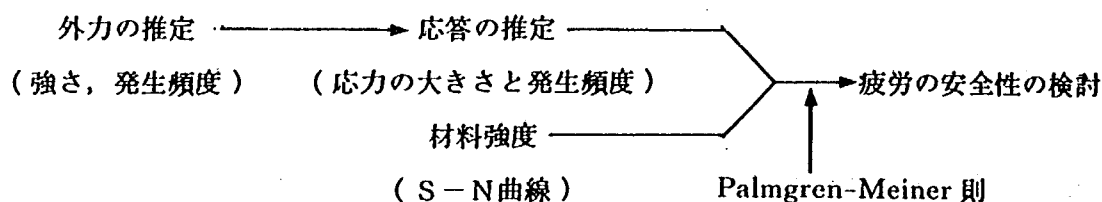
その手法は単体パイプのところで述べた方法と同様な方法で行うことができる。

### 2.3 渦励振による疲労に関する検討方法

2.2における渦励振に対する設計の考え方は、渦励振を発現させないか、あるいはある許容基準を越えるような渦励振は1度も発生させないか、であったが、例えば疲労に対する安全性の検討のように、応答(変位、加速度、応力など)の大きさによってある回数以下ならば発現してもよい、という考え方もある。本節ではこの考え方に従い、渦励振による海洋鋼造物(パイプ構造物)の疲労設計の検討の仕方について述べる。

### 2.3.1 疲労設計に対する基本的な考え方

疲労設計は基本的には以下の流れに沿って実施することができる。



### 2.3.2 実用的な疲労設計法

パイプ構造物の疲労問題を検討するにあたり、図2-6に示す潮流曲線を勘案して、潮流は最大流速  $U_d$  で周期 0.5 日で正弦的に規則的に変化するものとし、渦励振特性として、その発現流速は実験結果より、無次元流速が 3.5 ~ 12.5 の間で発現し、その振幅は図2-7に示すように変化するものとした。

しかしながら、 $U_d$  の分布形状あるいは振幅と流速の関係が明らかとなっている場合は、これに基づき解析を行うことが望ましい。

潮流は 0.5 日周期で正弦的に規則的に変化するものとしたので流速とその頻度分布の関係は、流速が 0 から  $U_d$  となる 1/4 周期間 (0.125 日間) を考えればよい。この期間を  $m$  等分すれば、第  $i$  番目の流速  $U_i$  とその頻度  $P_i$  は次式で表わされる。

$$U_i = U_d \sin \left[ \left( i - 1/2 \right) \frac{\pi}{2m} \right] \quad (33)$$

$$P_i = \frac{1}{m} \quad (34)$$

一方、図2-7および(33)式より  $U_i$  に対応する応力振幅  $(\sigma/E)_i$  は次式で表わされる。

$$(\sigma/E)_i = \begin{cases} 0 & U_i/f_0 D < 3.5 \\ (\sigma/E)_{\max} (U_i/f_0 D - 3.5)/4.5 & 3.5 \leq U_i/f_0 D < 8 \\ (\sigma/E)_{\max} (12.5 - U_i/f_0 D)/4.5 & 8 \leq U_i/f_0 D < 12.5 \\ 0 & 12.5 \leq U_i/f_0 D \end{cases} \quad (35)$$

ここに

$$(\sigma/E)_{\max} = \frac{1}{2} \left( \frac{D}{\ell} \right)^2 \left| \ell X''(x) \frac{\psi_0}{D} \right|_{\max} \quad (36)$$

(36)式の  $|\ell X''(x)|_{\max}$  は表2-2より、また  $\frac{\psi_0}{D}$  は(18)式あるいは図2-4より求められる。この応力振幅の発現回数  $n_i$  は次式で表わされる。

$$n_i = f_0 \cdot T \cdot P_i = \frac{f_0 T}{m} \quad (37)$$

ここに、 $T$ ；耐用期間 (単位は秒)。

応力振幅  $(\sigma/E)_i$  と疲労破壊に至る回数  $N_i$  との関係については必ずしも十分には明らかにされてい

ないが、ここではT、Y、およびK型のパイプ継手部（全断面溶込みグループ溶接）のS-N曲線<sup>(5)</sup>（American Welding Society: Structural Welding Code Table 10.7.3のD'）を用いて、解析を行った。このS-N曲線を式で表わし、本報告の記号を使い、 $N_i$ を $(\sigma/E)_i$ の関数とすれば、次式が得られる。

$$N_i = \begin{cases} \exp(-2.3 \ln(\sigma/E)_i - 10) & -8.0 \leq \ln(\sigma/E)_i \\ \exp(-5.3 \ln(\sigma/E)_i - 34) & -9.1 \leq \ln(\sigma/E)_i < -8.0 \\ \exp(-6.7 \ln(\sigma/E)_i - 47) & \ln(\sigma/E)_i < -9.1 \end{cases} \quad (38)$$

一方、Palmgren-Meiner 則より疲労に対して安全なための条件は、

$$\sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} < 1 \quad (39)$$

となる。逆に疲労に関する構造物の寿命Tは、式(37)を用いて次のように求まる。

$$T = \frac{m}{f_0 \sum_{i=1}^m \frac{1}{N_i}} \quad (40)$$

$Tf_0$ と $U_d/f_0D$ および $(\sigma/E)_{\max}$ の関係を図2-8に示す。

本解析を行い、設計が初期の条件を満足しない場合には、構造物の設計をやりなおし、初期の条件を満足するまで繰返す必要がある。

### 2.3.3 考 察

2.2.1.4で述べたように、一般のパイプ海洋構造物では $\frac{\psi_0}{D}$ がほぼ一定であるため、 $(\sigma/E)_{\max}$ は近似的に $\ell/D$ のみの関数として扱える。疲労を考えなければならないようなパイプ構造物は、図2-2より明らかなように $\ell/D$ が少なくとも20以上となるようなパイプ構造物であり、実際の構造物は全体の剛性を確保する必要があるため $\ell/D$ としては200程度以下であろう。図2-5よりこの範囲の $(\sigma/E)_{\max}$ はおよそ $10^{-4} \sim 10^{-3}$ であることがわかる。しかしながら、図2-8より $(\sigma/E)_{\max}$ が $10^{-4} \sim 10^{-3}$ のときに疲労寿命が長くなる $\alpha$ は、 $U_d/f_0D$ が3.5よりやや大きい場合に限られる。

したがって、 $U_d/f_0D$ が3.5よりやや大きい場合、 $(\sigma/E)_{\max}$ が $3.2 \times 10^{-6}$ 以下の場合、あるいは仮設構造物のように耐用期間が短い場合を除き、パイプ構造物を設計する場合には、流れ方向に対して直角方向に発現する渦励振による振動に対して、疲労の面より検討を加える必要がある。

一方、流れ方向の渦励振に対しては、図2-6において横軸を1/4倍した図、すなわち $U_d/f_0D=0.875$ で $\frac{\psi^*}{\psi_0}$ が0、 $U_d/f_0D=2.0$ で1、 $U_d/f_0D=3.125$ で0とした図と、図2-8より疲労寿命が推定できるが、その振幅は流れ直角方向のそれに比べて1/10程度であり、応力も同様となるので、この場合には渦励振が発生しても疲労の面からは問題が起るケースは比較的少ないと考えられる。

### 第3章 今後の課題

今年度は本調査の最終年度として、既応の研究成果および当研究室で実施した実験の結果をもとにして、パイプ構造物の動的応答を考慮した設計手法について提案を行ったが、パイプ部材の流体中における動的応答特性については、その現象の基本的な要因などについて未だ不明な点が多いこと、当研究室で実施した実験も実験施設の能力などの面よりある特定の条件下における実験に限定されたことなどから、今後なお追求すべき問題点も数多く残されている。今後の研究が期待されるところである。

以下、残された問題点のうち主要なものについて述べる。

- (1) 円形断面の一様流中における抗力係数はレイノルズ数の影響を顕著に受ける性質を持っており、限界レイノルズ数( $3.5 \times 10^4$ 付近)では流体の後流幅が急激に減少するため、その値は不連続的に激減する性質をもっている。今回の実験の対象としたレイノルズ数の範囲は実験施設の都合上 $10^4$ オーダーの付近であるが、実際の構造物ではレイノルズ数が限界レイノルズ数以上となる場合も多いので、今後レイノルズ数が限界レイノルズ数以上となる範囲における実験を行い、その条件下でのパイプ構造物の動的応答特性をつめる必要がある。
- (2) 円形断面の抗力係数はレイノルズ数の影響を受けるが、その影響の度合が一様流中と乱流中で異なるという研究成果もあり、また当研究室で実施した実験の結果でも極大振幅が一様流中と乱流中では異なるという結果を得ているため、今後、自然の流れが持っている乱流特性をよく把握し、その特性を持った流体中におけるパイプ構造物の振動応答特性をつめていく必要がある。
- (3) 一般に、流体中に置かれた構造物に発現する渦励振の振幅は、構造物の持つ減衰定数の影響を顕著に受ける場合が多く、しかも構造物あるいは構造部材の持つ減衰定数はその構造物の境界条件によって決定されるものである。今回実施した実験においては実験実施上の制約条件より、特定の減衰定数を持つような場合のみについて実施しているので、今後構造物の持つ減衰定数とその渦励振振幅にどのような影響を与えるかについてつめていく必要がある。
- (4) 近接して設置された2本のパイプの渦励振特性については、ある程度明らかとなったが、今後近接することによりなぜ振動振幅が増大するのか、その増大の仕方の機構、パイプの径、振動モードなどがどのような理由から発振振幅に影響を与えているかなどの基礎的なつめの研究に期待が持たれるところである。

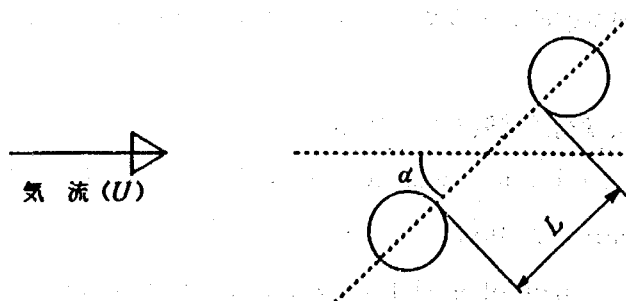
#### 参考文献

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およ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. 建設省土木研究所構造研究室 ; 海洋構造物の設計外力および耐荷力に関する研究報告 (Ⅱ-1980), 土木研究所資料第1655号, 昭和56年3月
  5. 建設省土木研究所構造研究室 ; 海洋構造物の設計外力および耐荷力に関する研究報告 (Ⅲ-1981), 土木研究所資料第1793号, 昭和57年3月
- a) A. Roshko ; Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number, J. Fluid Mech., Vol.10, 1961
  - b) E. Achenbach ; Influence of surface roughness on the cross-flow around a circular cylinder, J. Fluid Mech., Vol.46, 1971
  - c) P. Sachs ; Wind Forces in Engineering, Rergamon Press, 1972
  - d) 岡島 厚 ; 高レイノルズ数における直列2本円柱のまわりの流れ, 第29回年次学術講演概要集, 1974
  - e) 本州四国連絡橋公団 ; 本州四国連絡橋調査報告書, 下部工設計調査編, 昭和48年9月
  - f) R. N. Sainsbury & D. King ; The flow induced oscillation of marine structures, Proc. Instn. Civ. Engrs. 49, 1971
  - g) O. M. Griffin & S. E. Ramberg ; Some recent studies of vortex shedding with application to marine tubulars and risers, Tran, ASME, J. of Energy Resources Technology, Vol.104, March 1982
  - h) R. King, M. J. Prosser and D. J. Johns ; On vortex excitation of model piles in water, J. of Sound and Vibration, 29 (2), 1973
  - i) R. D. Blevins ; Flow-Induced Vibration, Van Nostrand Reinhold Company, 1977
  - j) O. M. Griffin, R. A. Skop, & S. E. Ramberg ; The resonant, vortex-excited vibrations of structures and cable systems, Offshore Technology Conference, OTC 2319, 1975
  - k) 白木万博, 藤田勝久 ; 機械工業における振動問題, 機械の研究, 第30巻第7号, 1978
  - l) K. R. Cooper & R. L. Wardlaw ; Aeroelastic instabilities in wakes, Proc. 3rd Int. Conf. Wind Effects on Buildings and Structures, 1971
  - m) 宇都宮英彦, 鎌倉米康 ; 並列円柱の空気力学的挙動に関する基礎的考察, 第5回構造物の耐風性に関するシンポジウム論文集, 1978
  - n) 岡島 厚 ; 直列2本円柱の渦励振, 第30回年次学術講演概要集, 1975
  - o) W. Hanenkamp & W. Hammer ; Transverse vibration behaviour of cylinders in line, J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 7, 1981
  - p) B. E. Lee ; The wind-induced vibration of a pair of model stacks, P. Instn. Civ. Engrs., 1974
  - q) American Welding Society ; Structural Welding Code, AWS D1.1-75
  - r) 気象庁・建設省 ; 本州四国連絡架橋調査, 気象調査 (中間報告その5) —— 瀬戸内海の気象と海象一, 昭和42年2月

表 1 - 1 実験ケース一覧表

| Case No. | パイプ直径<br>D(mm) | 設定角度<br>$\alpha$ ( deg ) | パイプ純間隔<br>L | 実験したレイ<br>ノルズ数範囲<br>$\times 10^4$ |
|----------|----------------|--------------------------|-------------|-----------------------------------|
| 001      | 0.040          | 0                        | 1.5 D       | 0.11~2.92                         |
| 002      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 003      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 004      |                | 45                       | 1.5 D       |                                   |
| 005      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 006      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 007      |                | 90                       | 1.5 D       |                                   |
| 008      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 009      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 010      |                |                          | 単 体         |                                   |
| 011      | 0.050          | 0                        | 1 D         | 0.17~4.12                         |
| 012      |                |                          | 6 D         |                                   |
| 013      |                | 45                       | 1 D         |                                   |
| 014      |                | 90                       |             |                                   |
| 015      | 0.060          | 0                        | 1 D         | 0.15~2.95                         |
| 016      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 017      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 018      |                | 45                       | 1 D         |                                   |
| 019      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 020      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 021      |                | 90                       | 1 D         |                                   |
| 022      |                |                          | 3 D         |                                   |
| 023      |                |                          | 9 D         |                                   |
| 024      |                |                          | 単 体         |                                   |
| 025      | 0.070          | 0                        | 6 D         | 0.17~3.17                         |
| 026      |                | 90                       | 1 D         |                                   |



U : 風速 (m/s)

D : パイプの直径 (m)

L : パイプの純間隔 (直径の何倍で表示する。)

$\alpha$  : 設置角度 (DEG)

表 1-2 パイプ模型の構造特性

|        | 直径40mmのパイプ                                    |                                                                                                       | 直径50mmのパイプ*3                                  |                                                                                                       | 直径60mmのパイプ                                       |                                                                                                       | 直径70mmのパイプ*3                                     |                                                                                                       |
|--------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|        | 計算値                                           | 実測値                                                                                                   | 計算値                                           | 実測値                                                                                                   | 計算値                                              | 実測値                                                                                                   | 計算値                                              | 実測値                                                                                                   |
| 質 量    | 9.6 g/cm                                      | 3.510 kg<br>(パイプ)<br><br>1.157 kg<br>(取付治具)<br><br>0.052 kg<br>(加速度計)<br><br>0.266 kg<br>加速度計<br>取付治具 | 12.2 g/cm *1                                  | 4.521 kg<br>(パイプ)<br><br>1.446 kg<br>(取付治具)<br><br>0.052 kg<br>(加速度計)<br><br>0.410 kg<br>加速度計<br>取付治具 | 14.8 g/cm                                        | 5.331 kg<br>(パイプ)<br><br>2.169 kg<br>(取付治具)<br><br>0.052 kg<br>(加速度計)<br><br>0.638 kg<br>加速度計<br>取付治具 | 17.4 g/cm *1                                     | 6.365 kg<br>(パイプ)<br><br>2.900 kg<br>(取付治具)<br><br>0.052 kg<br>(加速度計)<br><br>0.834 kg<br>加速度計<br>取付治具 |
| 曲げ剛体*1 | $4.3 \times 10^9 \text{gf} \cdot \text{cm}^2$ |                                                                                                       | $8.9 \times 10^9 \text{gf} \cdot \text{cm}^2$ |                                                                                                       | $1.6 \times 10^{10} \text{gf} \cdot \text{cm}^2$ |                                                                                                       | $2.6 \times 10^{10} \text{gf} \cdot \text{cm}^2$ |                                                                                                       |
| 固有振動数  | 7.1 Hz<br>(1次)                                | 6.58 Hz<br>(1次)                                                                                       | 9.1 Hz*2<br>(1次)                              | 8.4 Hz<br>(1次)                                                                                        | 11.0 Hz<br>(1次)                                  | 10.28 Hz<br>(1次)                                                                                      | 12.9 Hz*2<br>(1次)                                | 11.6 Hz<br>(1次)                                                                                       |
|        | 28 Hz<br>(2次)                                 | 26.4 Hz<br>(2次)                                                                                       | 36 Hz<br>(2次)                                 |                                                                                                       | 44 Hz<br>(2次)                                    |                                                                                                       | 52 Hz<br>(2次)                                    |                                                                                                       |

\*1 アルミの密度  $2.75 \text{ g/cm}^3$ ，ヤング率  $7.2 \times 10^9 \text{gf/cm}^2$  と仮定

\*2 単純支持した長さ 382 cm のパイプと仮定

\*3 土木研究所資料：海洋構造物の設計外力および耐荷力に関する研究報告（Ⅱ-1980）より

表 1-3-1 極大振幅発生時の諸数値

(パイプ直径: 40mm)

| 設定角度 | 着目するパイプ     | パイプ間隔 | 風 速<br>(m/s) | レイノルズ数<br>$\times 10^4$ | ストローハル<br>数 | 極大振幅の標準偏差(mm) |       |
|------|-------------|-------|--------------|-------------------------|-------------|---------------|-------|
|      |             |       |              |                         |             | 一次            | 二次    |
| 90°  | Left        | 1.5 D | 1.49         | 0.41                    | 0.176       | 0.0518        |       |
|      |             |       | 5.63         | 1.55                    | 0.188       |               | 0.673 |
|      |             | 3 D   | 1.91         | 0.53                    | 0.138       | 0.0396        |       |
|      |             |       | 5.47         | 1.51                    | 0.193       |               | 0.676 |
|      |             | 9 D   | 1.87         | 0.52                    | 0.141       | 0.0565        |       |
|      |             |       | 5.47         | 1.51                    | 0.193       |               | 0.670 |
|      | Right       | 1.5 D | 1.65         | 0.45                    | 0.160       | 0.0557        |       |
|      |             |       | 5.46         | 1.50                    | 0.193       |               | 0.671 |
|      |             | 3 D   | 2.32         | 0.64                    | 0.113       | 0.0335        |       |
|      |             |       | 5.47         | 1.51                    | 0.193       |               | 0.714 |
|      |             | 9 D   | 2.03         | 0.56                    | 0.130       | 0.0749        |       |
|      |             |       | 5.72         | 1.58                    | 0.185       |               | 1.233 |
| 45°  | Up Stream   | 1.5 D | 1.65         | 0.45                    | 0.160       | 0.0771        |       |
|      |             |       | 7.01         | 1.92                    | 0.151       |               | 0.514 |
|      |             | 3 D   | 1.87         | 0.52                    | 0.141       | 0.0560        |       |
|      |             |       | 5.63         | 1.55                    | 0.187       |               | 0.684 |
|      |             | 9 D   | 1.44         | 0.40                    | 0.183       | 0.0542        |       |
|      |             |       | 5.36         | 1.49                    | 0.197       |               | 0.890 |
|      | Down Stream | 1.5 D | 1.65         | 0.45                    | 0.160       | 0.939         |       |
|      |             |       | 7.01         | 1.92                    | 0.151       |               | 2.242 |
|      |             | 3 D   | 1.87         | 0.52                    | 0.141       | 0.0384        |       |
|      |             |       | 5.81         | 1.60                    | 0.182       |               | 1.027 |
|      |             | 9 D   | 1.43         | 0.40                    | 0.183       | 0.0636        |       |
|      |             |       | 5.36         | 1.49                    | 0.197       |               | 1.049 |
| 0°   | Up Stream   | 1.5 D | 1.45         | 0.40                    | 0.182       | 0.252         |       |
|      |             |       | 6.92         | 1.89                    | 0.153       |               | 2.250 |
|      |             | 3 D   | 1.70         | 0.47                    | 0.154       | 0.0493        |       |
|      |             |       | 6.08         | 1.67                    | 0.174       |               | 0.486 |
|      |             | 9 D   | 1.84         | 0.50                    | 0.143       | 0.0362        |       |
|      |             |       | 5.54         | 1.50                    | 0.191       |               | 0.714 |
|      | Down Stream | 1.5 D | 1.45         | 0.40                    | 0.182       | 1.015         |       |
|      |             |       | 6.92         | 1.89                    | 0.153       |               | 16.35 |
|      |             | 3 D   | 1.93         | 0.53                    | 0.137       | 0.0931        |       |
|      |             |       | 6.08         | 1.67                    | 0.174       |               | 0.509 |
|      |             | 9 D   | 1.84         | 0.50                    | 0.143       | 0.0725        |       |
|      |             |       | 5.71         | 1.55                    | 0.185       |               | 0.266 |
| 単 体  |             |       | 1.08         | 0.27                    | 0.244       | 0.0464        |       |
|      |             |       | 5.56         | 1.38                    | 0.190       |               | 0.474 |

表 1-3-2 極大振幅発生時の諸数値

(パイプ直径: 50mm)

| 設定角度 | 着目するパイプ     | パイプ間隔 | 風 速<br>(m / s ) | レイノルズ数<br>×10 <sup>4</sup> | ストローハル 数 | 極大振幅の標準偏差(mm) |       |
|------|-------------|-------|-----------------|----------------------------|----------|---------------|-------|
|      |             |       |                 |                            |          | 一次            | 二次    |
| 90°  | Left        | 1 D   | 2.81            | 0.82                       | 0.162    | 0.0159        |       |
|      |             |       | 8.39            | 2.44                       | 0.215    |               | 0.175 |
|      |             | 6 D   | 2.19            | 0.64                       | 0.208    | 0.0363        |       |
|      |             |       | 8.75            | 2.57                       | 0.206    |               | 0.281 |
|      | Right       | 1 D   | 2.31            | 0.67                       | 0.197    | 0.0172        |       |
|      |             |       | 8.64            | 2.51                       | 0.208    |               | 0.162 |
|      |             | 6 D   | 2.19            | 0.64                       | 0.208    | 0.0427        |       |
|      |             |       | 8.83            | 2.59                       | 0.204    |               | 0.471 |
| 45°  | Up Stream   | 1 D   | 3.15            | 0.92                       | 0.145    | 0.0198        |       |
|      |             |       | 12.54           | 3.68                       | 0.144    |               | 1.635 |
|      | Down Stream |       | 3.23            | 0.95                       | 0.141    | 0.149         |       |
|      |             |       | 12.54           | 3.68                       | 0.144    |               | 5.710 |
| 0°   | Up Stream   | 1 D   | 1.85            | 0.54                       | 0.246    | 0.0187        |       |
|      |             |       | 11.44           | 3.32                       | 0.157    |               | 2.081 |
|      | Down Stream |       | 2.38            | 0.69                       | 0.191    | 0.0253        |       |
|      |             |       | 11.44           | 3.32                       | 0.157    |               | 4.821 |

表 1-3-3 極大振幅発生時の諸数値

(パイプ直径:60mm)

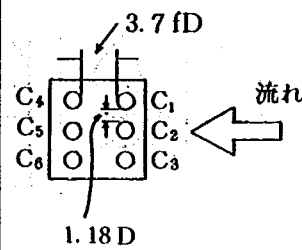
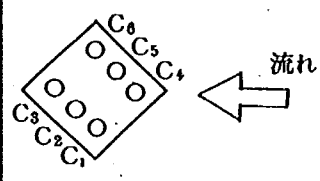
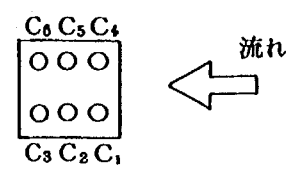
| 設定角度 | 着目するパイプ     | パイプ間隔 | 風 速<br>(m/s) | レイノルズ数<br>×10 <sup>4</sup> | ストローハル数 | 極大振幅の<br>標準偏差<br>(mm) |
|------|-------------|-------|--------------|----------------------------|---------|-----------------------|
| 90°  | Left        | 1 D   | 3.05         | 1.06                       | 0.203   | 0.191                 |
|      |             | 3 D   | 2.98         | 1.06                       | 0.207   | 0.409                 |
|      |             | 9 D   | 3.06         | 1.09                       | 0.202   | 0.200                 |
|      | Right       | 1 D   | 2.96         | 1.03                       | 0.208   | 0.270                 |
|      |             | 3 D   | 2.98         | 1.06                       | 0.207   | 0.250                 |
|      |             | 9 D   | 2.97         | 1.06                       | 0.208   | 0.270                 |
| 45°  | Up Stream   | 1 D   | 4.41         | 1.57                       | 0.140   | 0.0336                |
|      |             | 3 D   | 3.22         | 1.15                       | 0.192   | 0.0795                |
|      |             | 9 D   | 3.06         | 1.09                       | 0.201   | 0.210                 |
|      | Down Stream | 1 D   | 4.33         | 1.54                       | 0.143   | 0.614                 |
|      |             | 3 D   | 3.22         | 1.15                       | 0.192   | 0.258                 |
|      |             | 9 D   | 3.14         | 1.29                       | 0.197   | 0.219                 |
| 0°   | Up Stream   | 1 D   | 3.65         | 1.29                       | 0.169   | 0.162                 |
|      |             | 3 D   | 3.49         | 1.35                       | 0.177   | 0.194                 |
|      |             | 9 D   | 3.14         | 1.12                       | 0.196   | 0.210                 |
|      | Down Stream | 1 D   | 3.23         | 1.14                       | 0.191   | 0.969                 |
|      |             | 3 D   | 3.42         | 1.32                       | 0.181   | 0.455                 |
|      |             | 9 D   | 3.06         | 1.09                       | 0.202   | 0.185                 |
| 単 体  |             |       | 2.97         | 1.06                       | 0.208   | 0.207                 |

表 1-3-4 極大振幅発生時の諸数値

(パイプ直径:70mm)

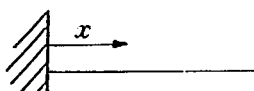
| 設定角度 | 着目するパイプ     | パイプ間隔 | 風 速<br>(m/s) | レイノルズ数<br>$\times 10^4$ | ストローハル数 | 極大振幅の<br>標準偏差<br>(mm) |
|------|-------------|-------|--------------|-------------------------|---------|-----------------------|
| 90°  | Left        | 6 D   | 4.16         | 1.46                    | 0.186   | 0.661                 |
|      | Right       |       | 4.24         | 1.49                    | 0.183   | 1.178                 |
| 0°   | Up Stream   | 1 D   | 5.17         | 1.82                    | 0.150   | 0.976                 |
|      | Down Stream |       | 5.17         | 1.82                    | 0.150   | 4.234                 |

表 2-1 抗力係数<sup>\*)</sup>

|                                      |                                    | 円柱の抗力係数 $C_{Do}$                                                                  |                                                                                    |                                                                                     |            |                      |
|--------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------------|
|                                      | 平板, 箱型断面, I型断面の抗力係数 $C_{Do}$ (パイプ) |  |  |  |            |                      |
|                                      |                                    | $C_1, C_3, C_5, C_6$                                                              | $C_1, C_4$                                                                         | $C_2, C_3, C_5, C_6$                                                                | $C_1, C_4$ | $C_2, C_3, C_5, C_6$ |
| 平板, 箱型断面, I型断面の抗力係数 $C_{Do}$ を仮定した場合 | 1.00                               | 0.51                                                                              | 0.51                                                                               | 0.50                                                                                | 0.51       | 0.02                 |
|                                      | 1.60                               | 0.38                                                                              | 0.38                                                                               | 0.31                                                                                | 0.38       | -0.07                |
|                                      | 2.00                               | 0.30                                                                              | 0.30                                                                               | 0.19                                                                                | 0.30       | -0.12                |
| 設計値                                  | 1.20                               | 0.70                                                                              | 0.70                                                                               | 0.65                                                                                | 0.70       | 0.05                 |

注) 1) 本試験の Reynolds 数は約  $3.4 \times 10^6$ 2) 円柱の抗力係数は  $U=4\text{Knots}$  の場合を採った。

表 2-2 振動モードに関する諸量

| 支持方法<br>諸 量                 | 両端ピン                   | 片 持 ば り<br>                                                                                                                | 両 端 固 定                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $X(x)$                      | $\sin \frac{\pi x}{l}$ | $(\cos \beta \frac{x}{l} - \cosh \beta \frac{x}{l})$<br>$+ (\frac{\sin \beta - \sinh \beta}{\cos \beta + \cosh \beta})$<br>$\times (\sin \beta \frac{x}{l} - \sinh \beta \frac{x}{l})$<br>ここに $\beta = 1.8751$ | $(\cos \beta \frac{x}{l} - \cosh \beta \frac{x}{l})$<br>$- (\frac{\cos \beta - \cosh \beta}{\sin \beta - \sinh \beta})$<br>$\times (\sin \beta \frac{x}{l} - \sinh \beta \frac{x}{l})$<br>ここに $\beta = 4.7300$ |
| $ X(x) $<br>$x/l = 0$       | 0.000                  | 0.000                                                                                                                                                                                                          | 0.000                                                                                                                                                                                                          |
| $x/l = 1/4$                 | 0.707                  | 0.195                                                                                                                                                                                                          | 0.863                                                                                                                                                                                                          |
| $x/l = 1/2$                 | 1.000 *                | 0.679                                                                                                                                                                                                          | 1.588 *                                                                                                                                                                                                        |
| $x/l = 3/4$                 | 0.707                  | 1.315                                                                                                                                                                                                          | 0.863                                                                                                                                                                                                          |
| $x/l = 1$                   | 0.000                  | 2.000 *                                                                                                                                                                                                        | 0.000                                                                                                                                                                                                          |
| $ l^2 X''(x) $<br>$x/l = 0$ | 0.000                  | 7.032 *                                                                                                                                                                                                        | 44.746 *                                                                                                                                                                                                       |
| $x/l = 1/4$                 | 6.979                  | 4.625                                                                                                                                                                                                          | 4.438                                                                                                                                                                                                          |
| $x/l = 1/2$                 | 9.870 *                | 2.388                                                                                                                                                                                                          | 27.197                                                                                                                                                                                                         |
| $x/l = 3/4$                 | 6.979                  | 0.684                                                                                                                                                                                                          | 4.439                                                                                                                                                                                                          |
| $x/l = 1$                   | 0.000                  | 0.000                                                                                                                                                                                                          | 44.744 *                                                                                                                                                                                                       |

\*印は最大値を示す。

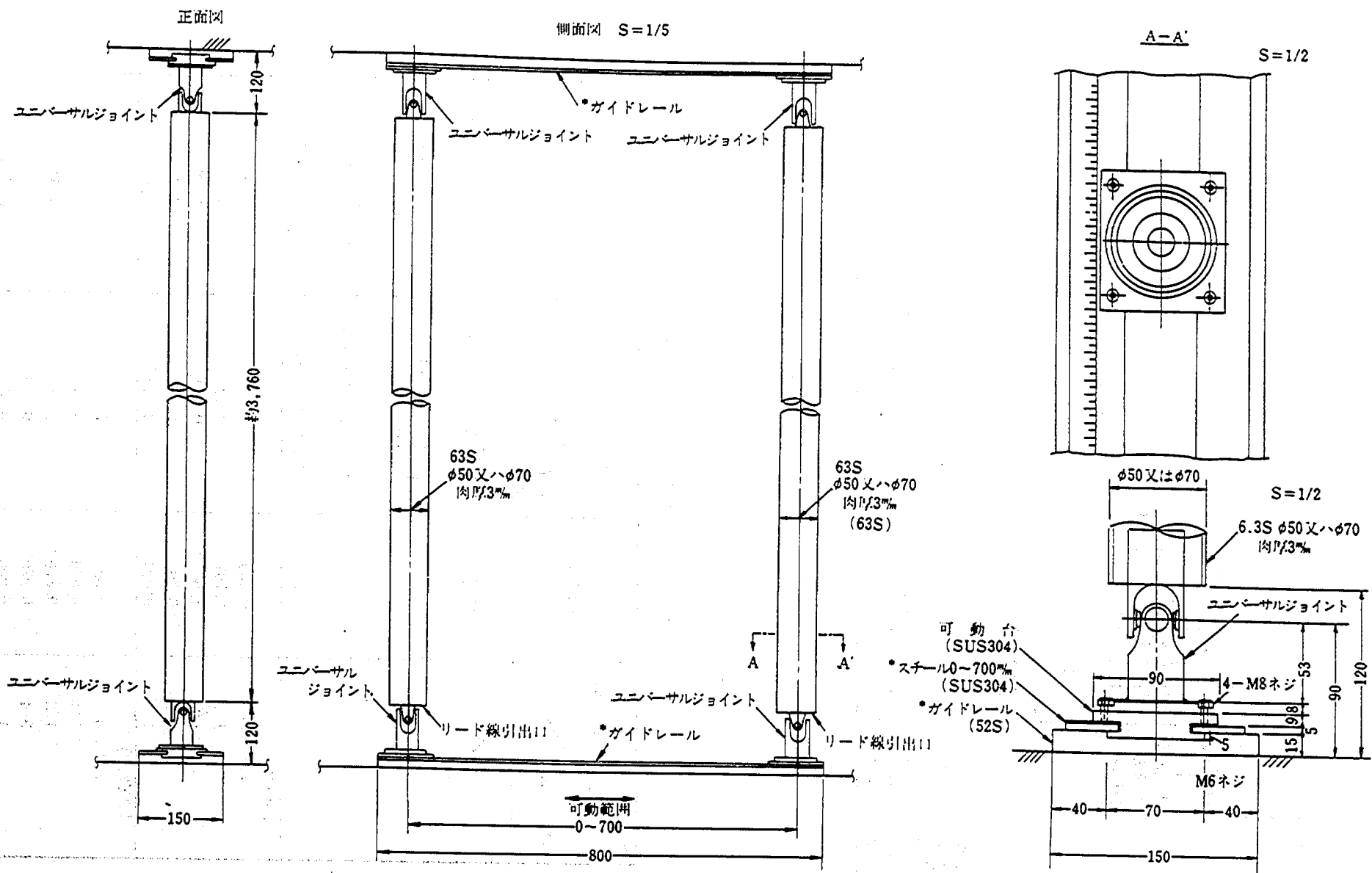


図 1-1 パイプ模型及び支持具

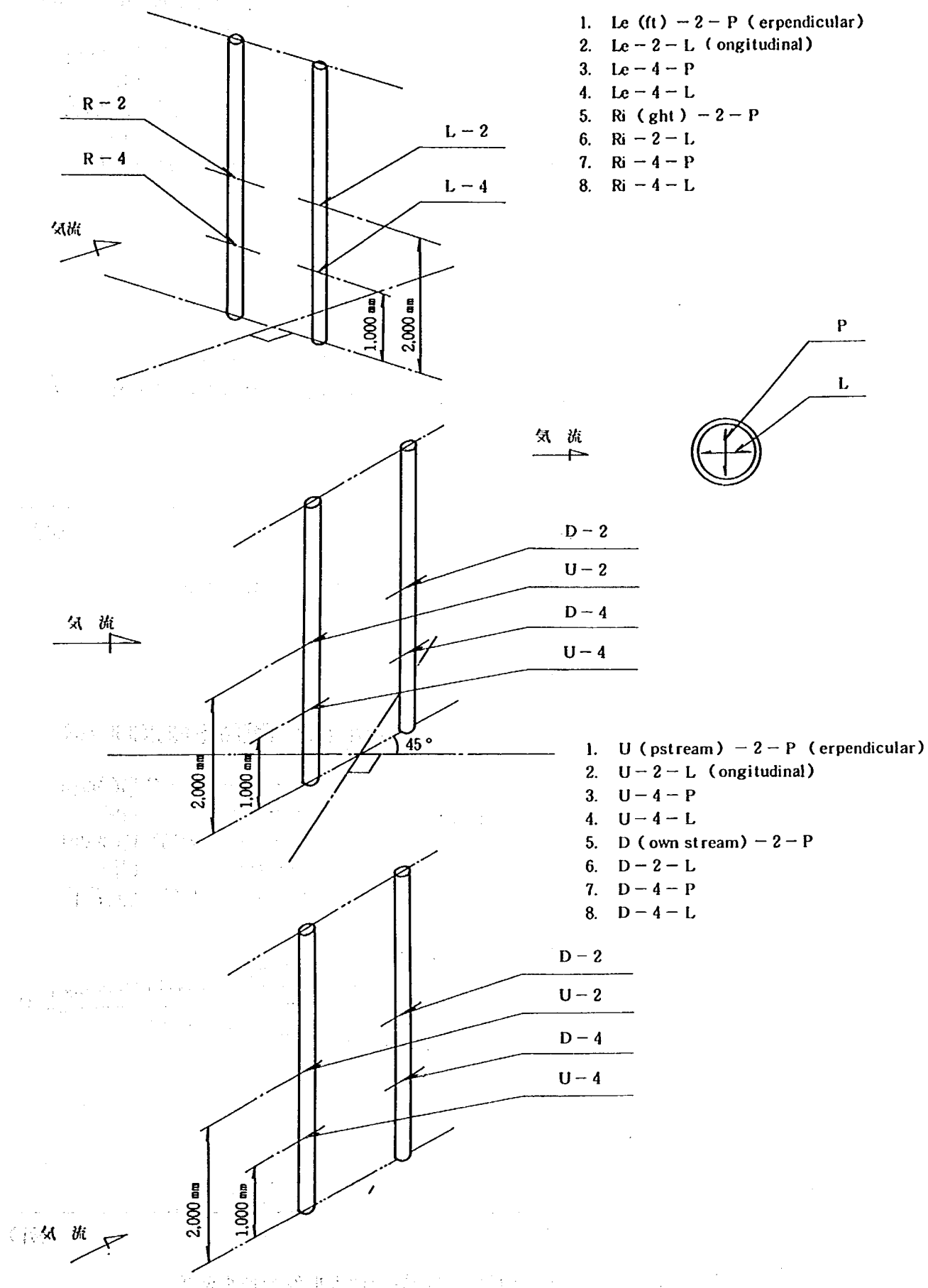


図 1 - 2 加速度計の配置および呼称

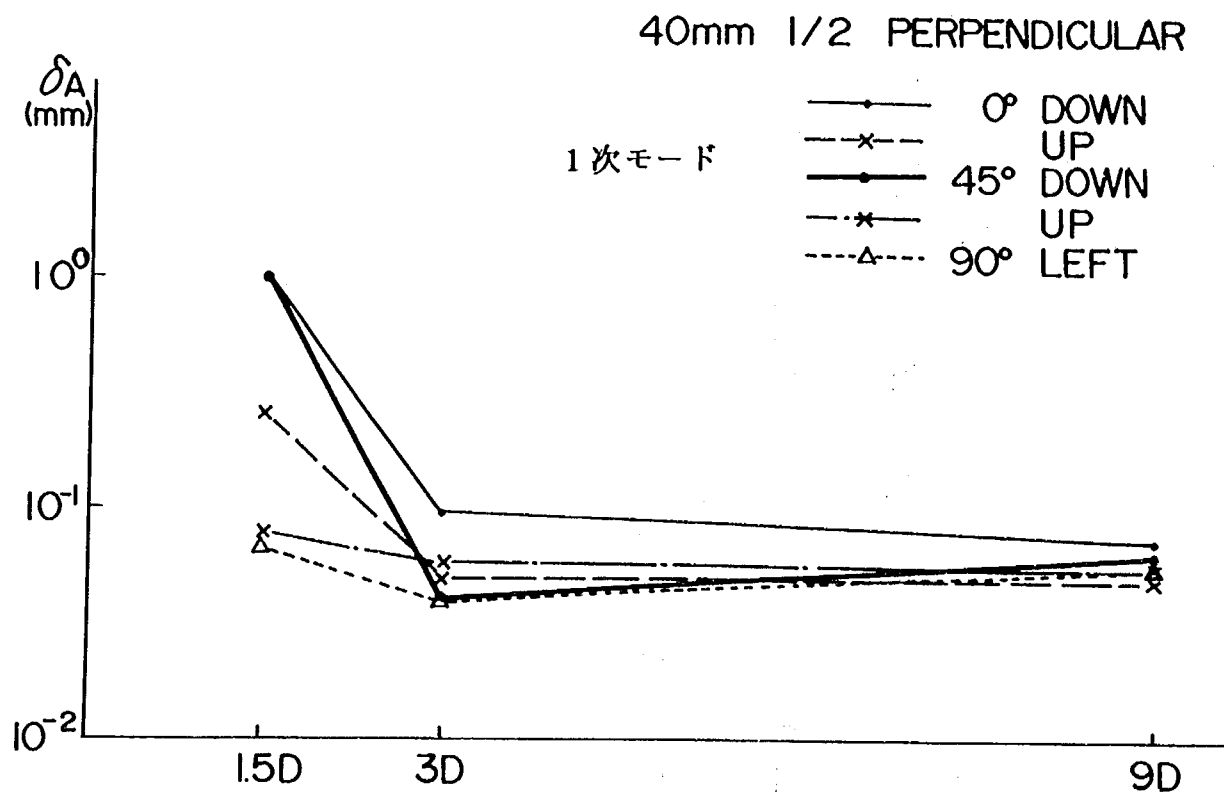


図 1 - 3 - 1 パイプ間隔と渦励振の極大振幅の標準偏差

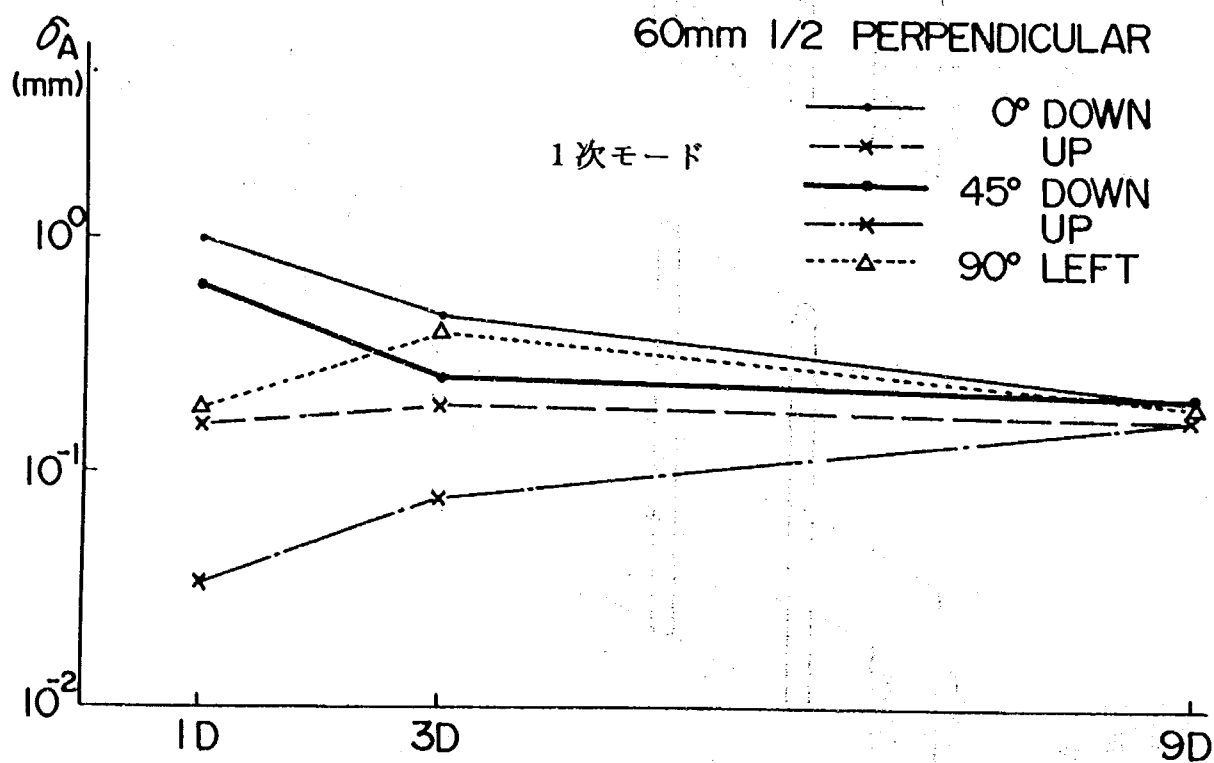


図 1 - 3 - 2 パイプ間隔と渦励振の極大振幅の標準偏差

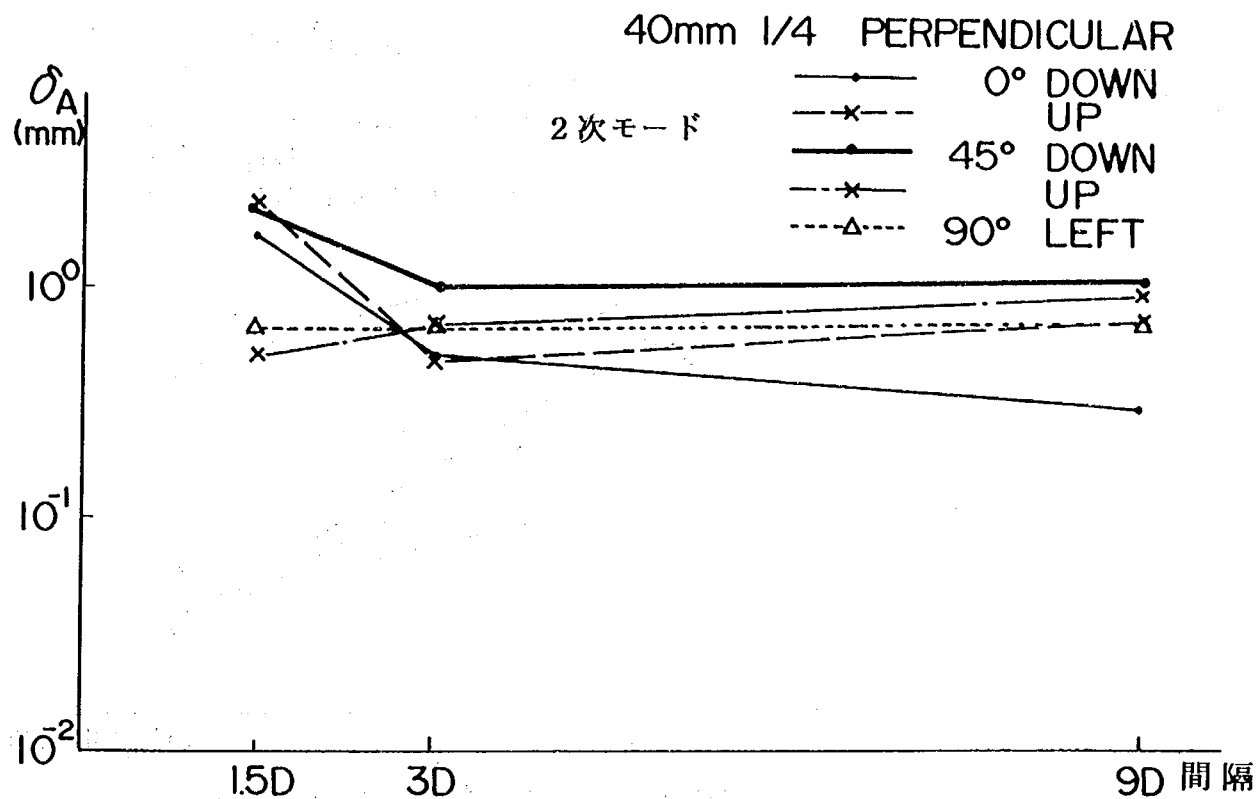


図 1-3-3 パイプ間隔と渦励振の極大振幅の標準偏差

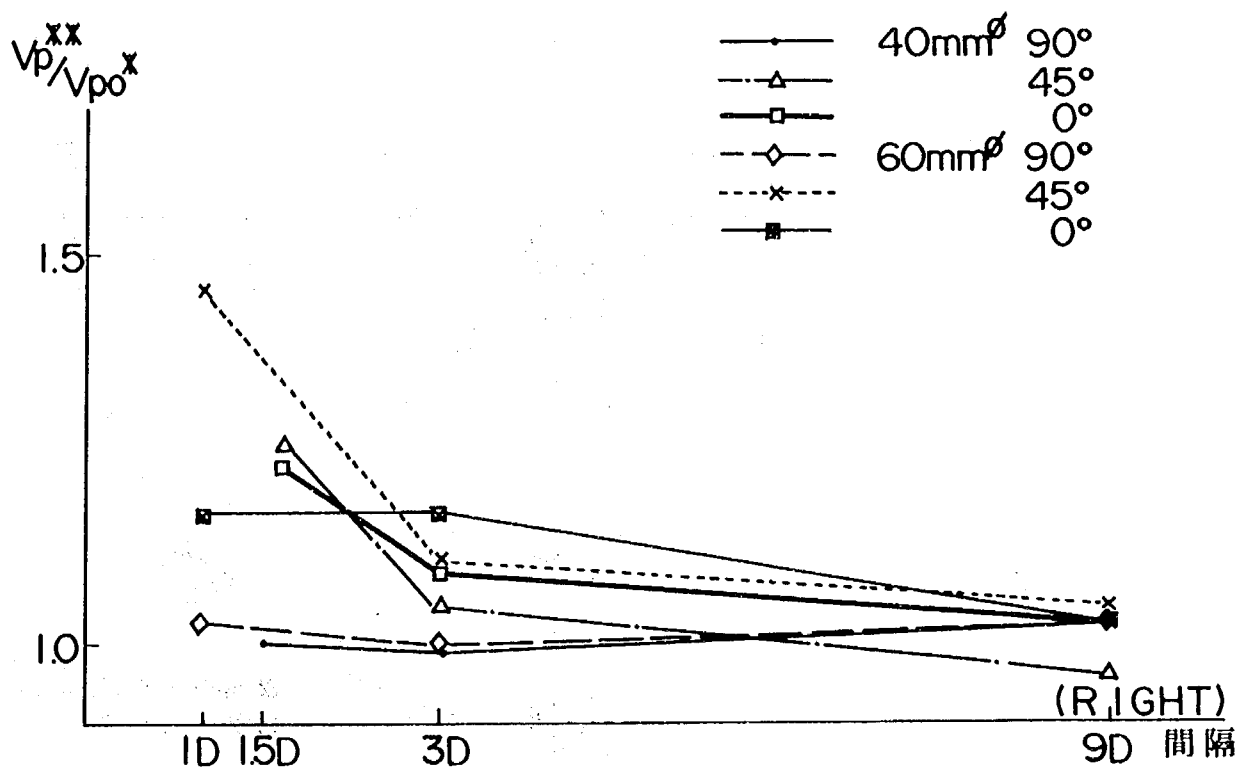


図 1-4 極大振幅発生風速とパイプ間隔 (後流廻りパイプ)

× 単体の極大振幅が発生した無次元化風速  
 ×× 極大振幅が発生した無次元化風速

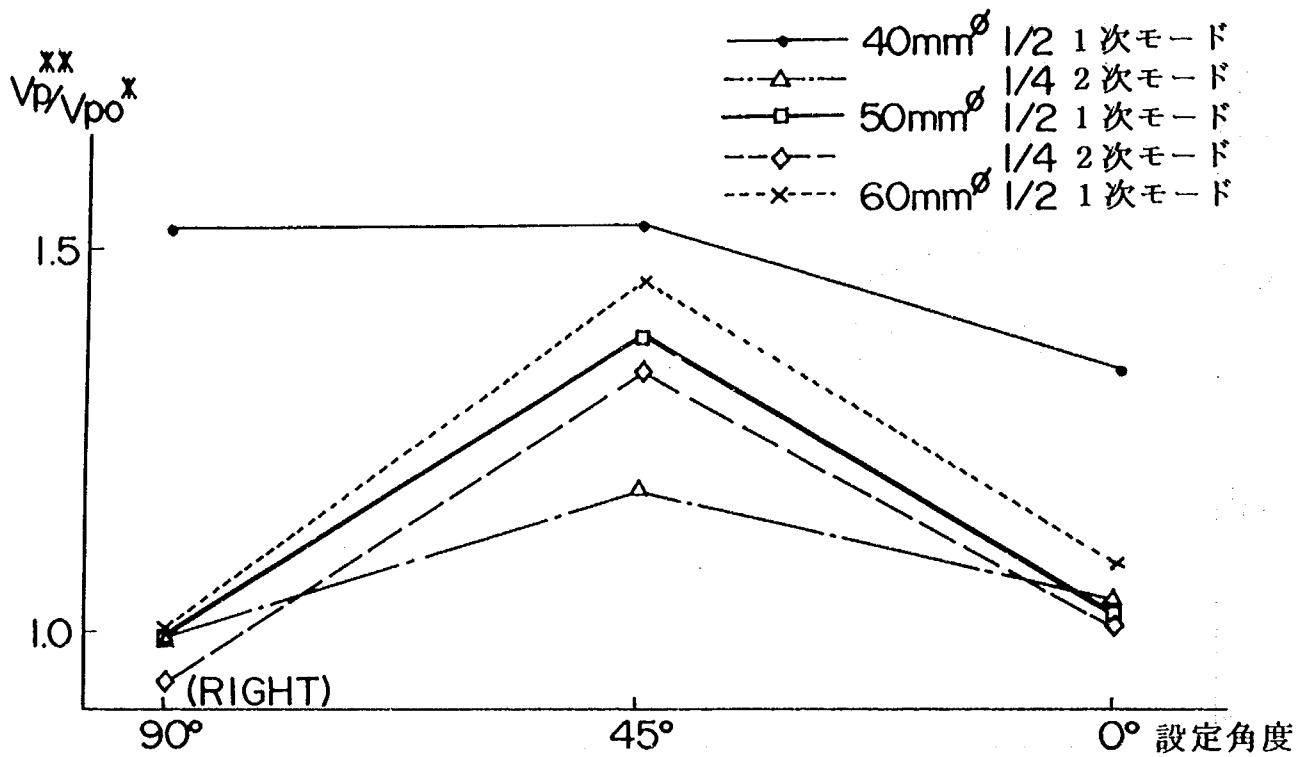


図 1 - 5 極大振幅発現風速と設定角度 (パイプの間隔 1 D あるいは 1.5 D)

- $\times$  単体の極大振幅が発生した無次元化風速 ( $V/ND$ )  
 $\times \times$  極大振幅が発生した無次元化風速 ( $V/ND$ )

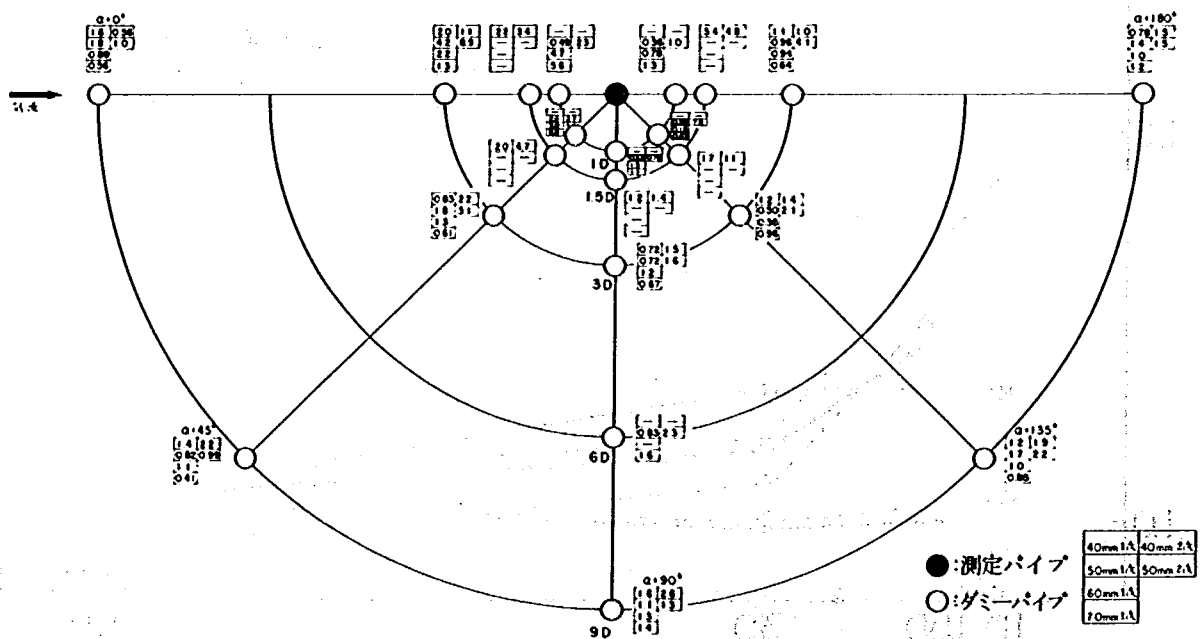


図 1 - 6 - 1 パイプ模型の配置と渦励振の極大振幅の標準偏差

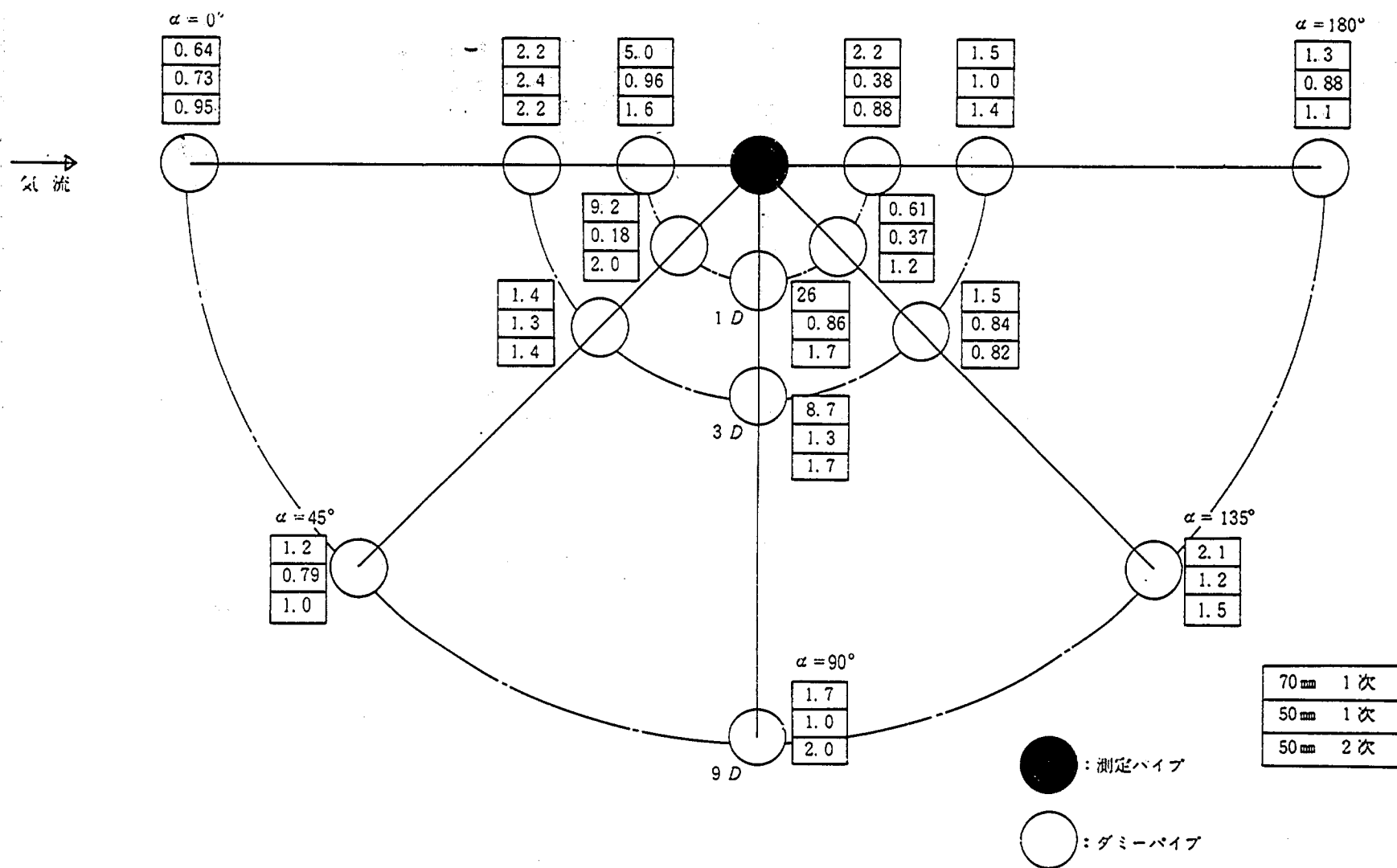


図 1-6-2 近接パイプが渦励振におよぼす影響 (格子乱流)

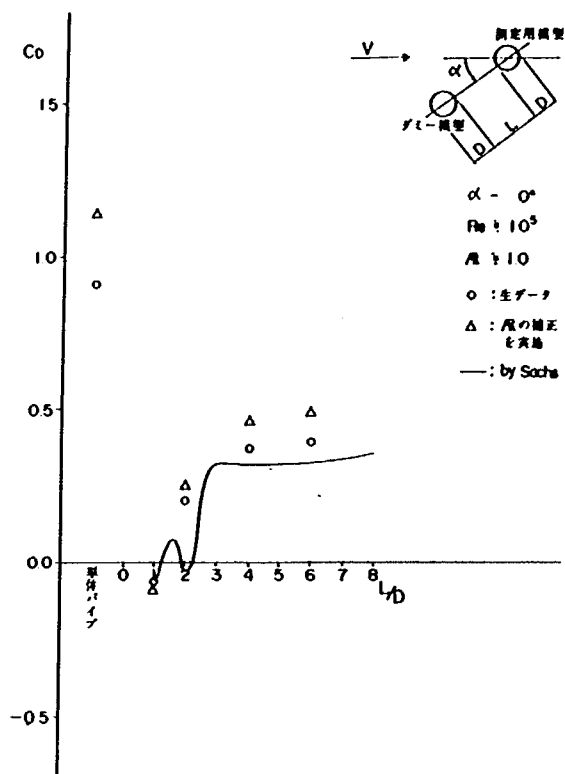


図 2 - 1 - 1 後流パイプの抗力係数

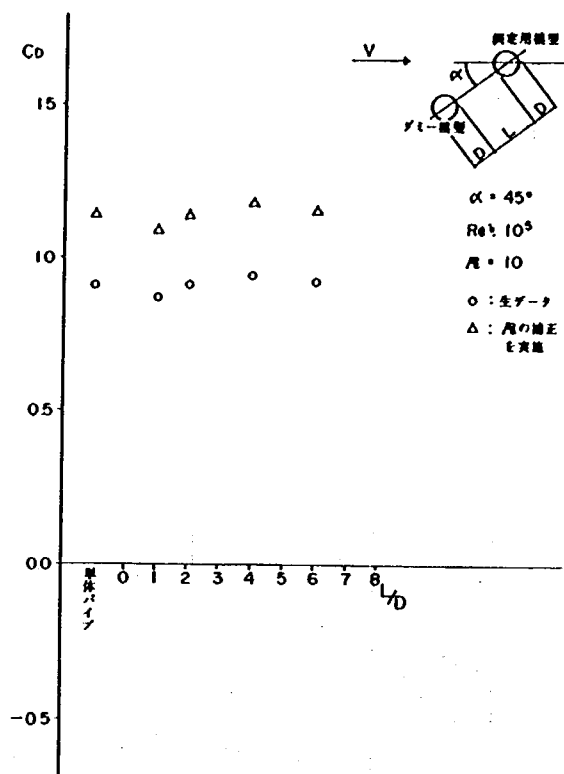


図 2 - 1 - 2 後流パイプの抗力係数

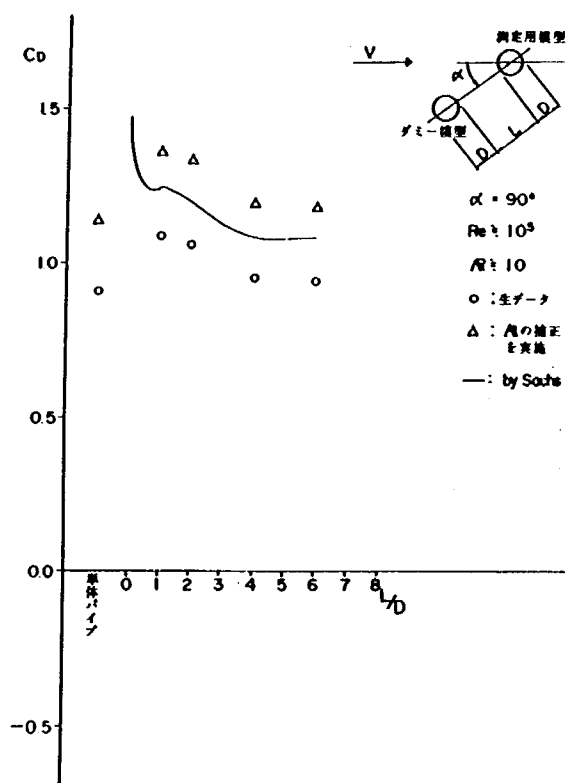


図 2 - 1 - 3 後流パイプの抗力係数

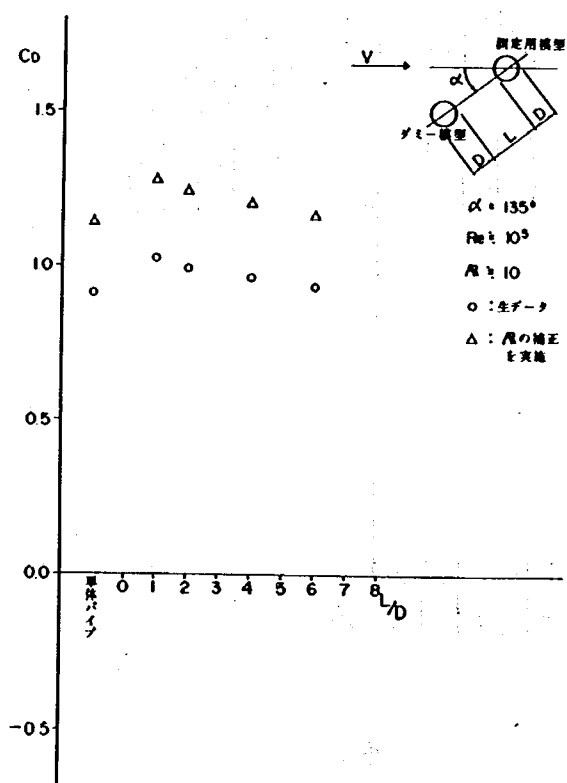


図 2 - 1 - 4 後流パイプの抗力係数

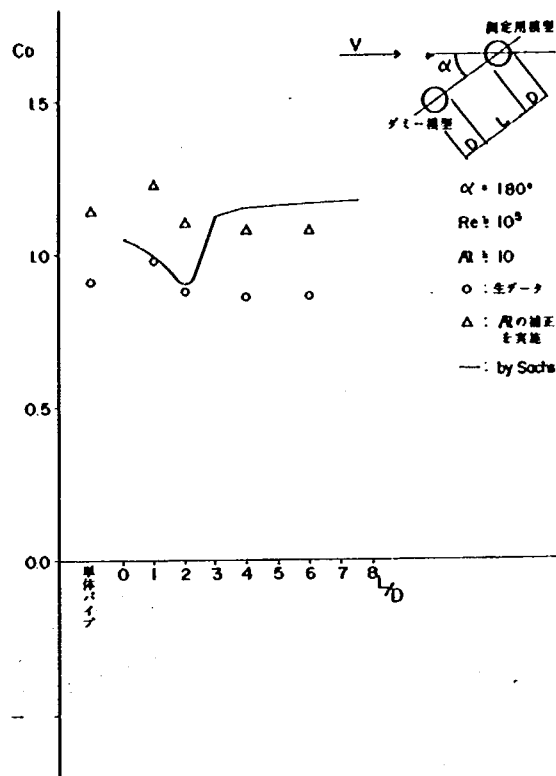


図 2-1-5 後流パイプの抗力係数

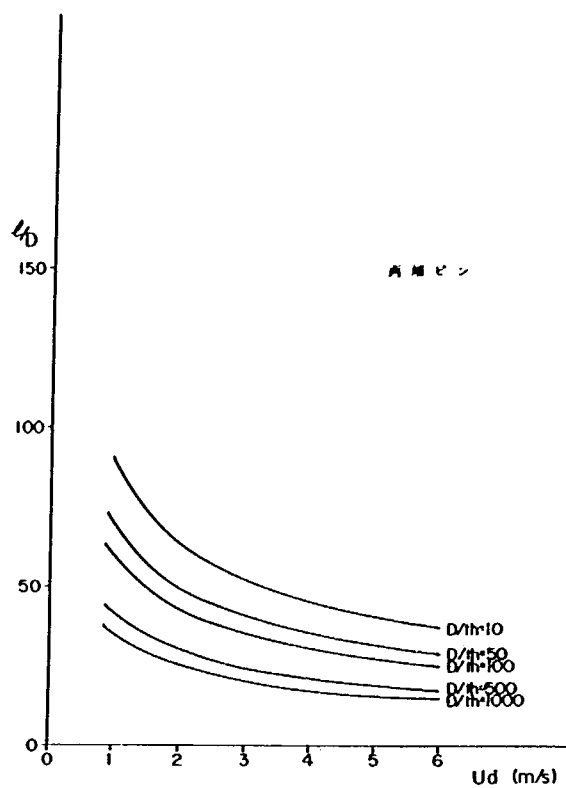


図 2 - 2 - 1 流速-細長比

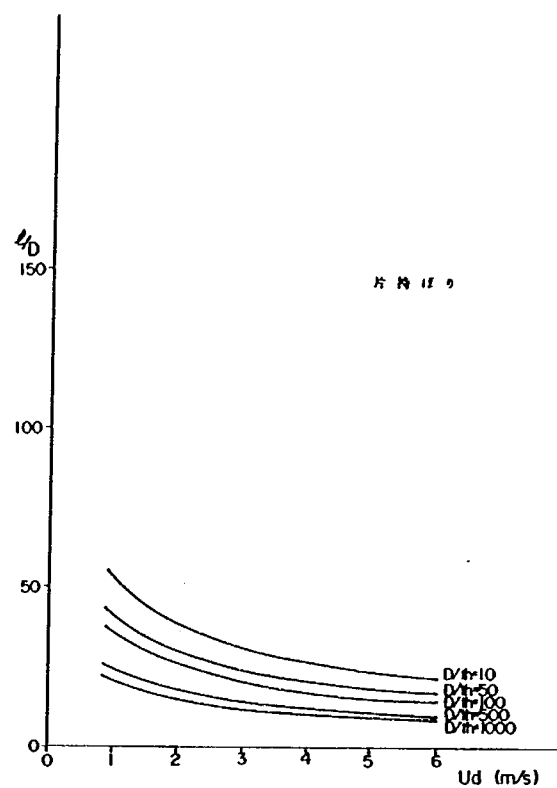


図 2 - 2 - 2 流速-細長比

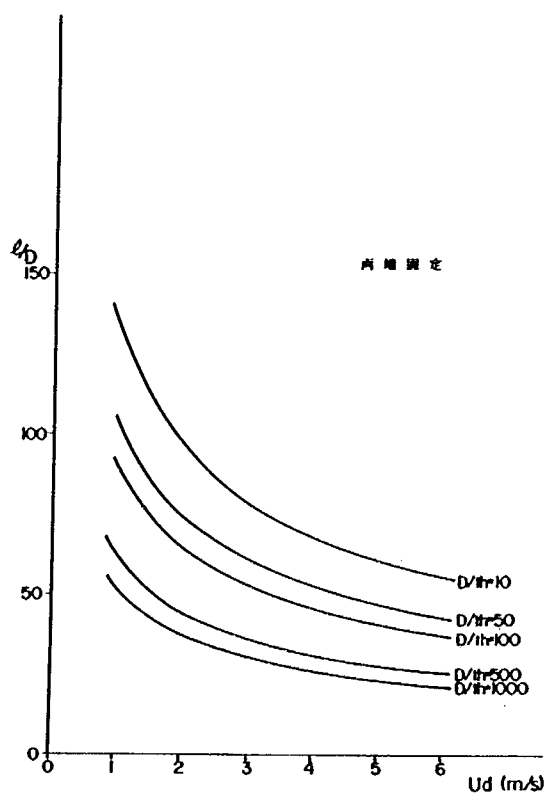


図 2 - 2 - 3 流速-細長比

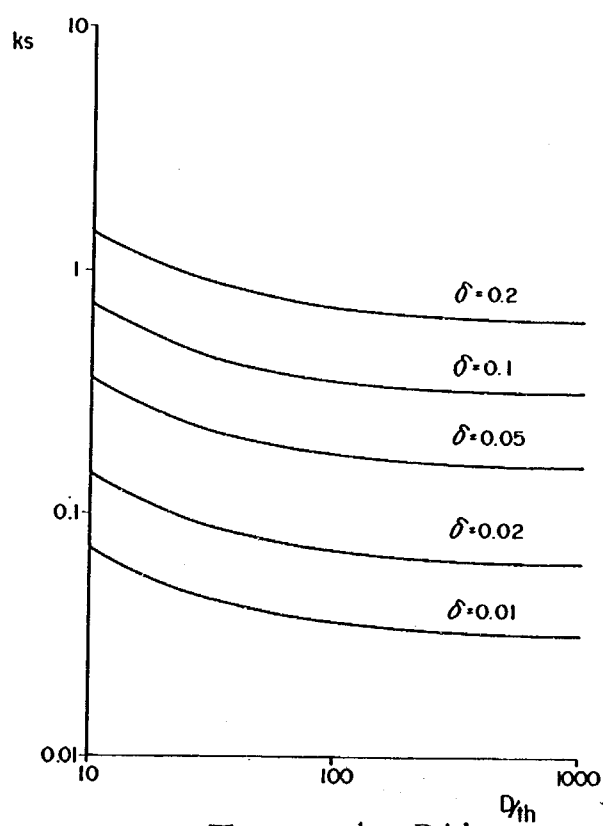


図 2 - 3  $k_s - D/th$

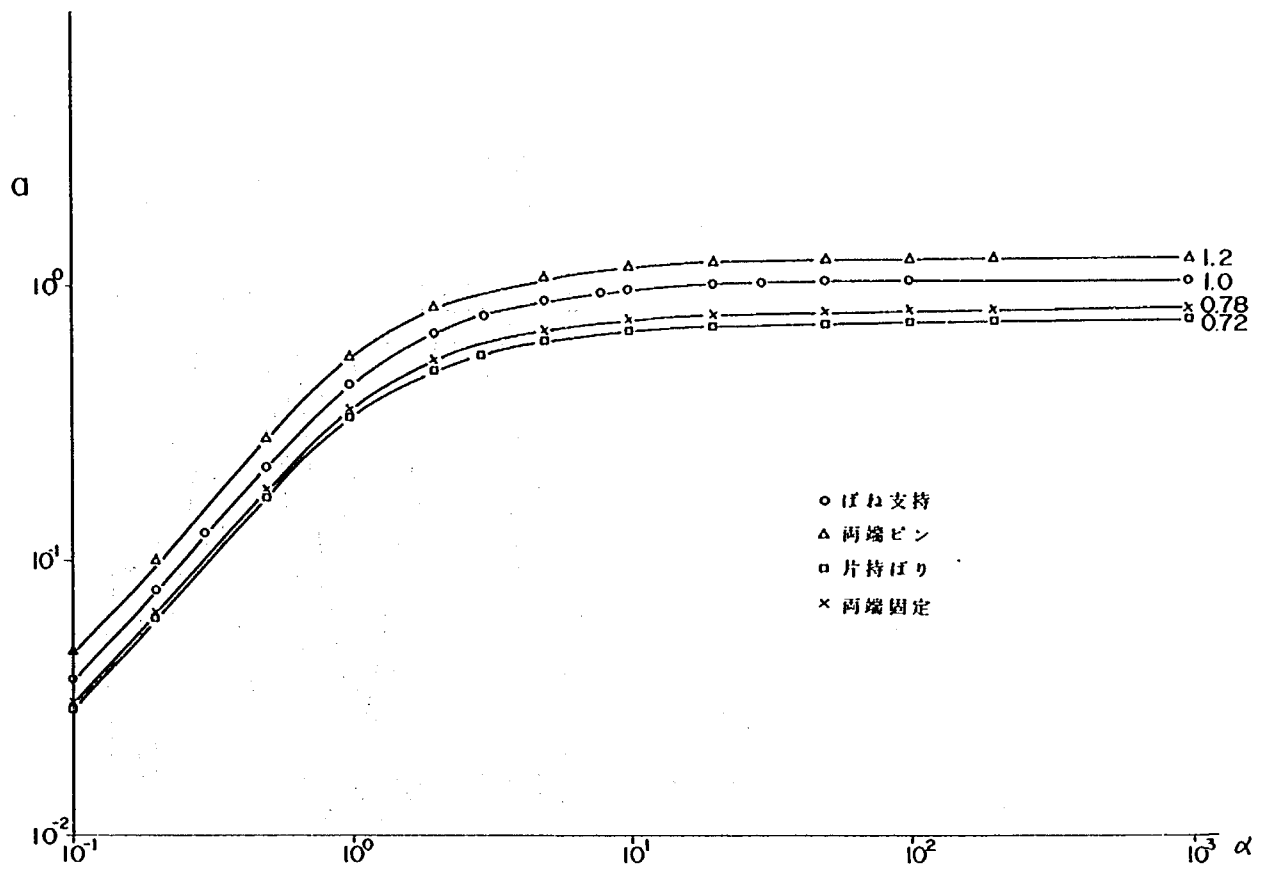


図 2-4  $\alpha - a$  関係図

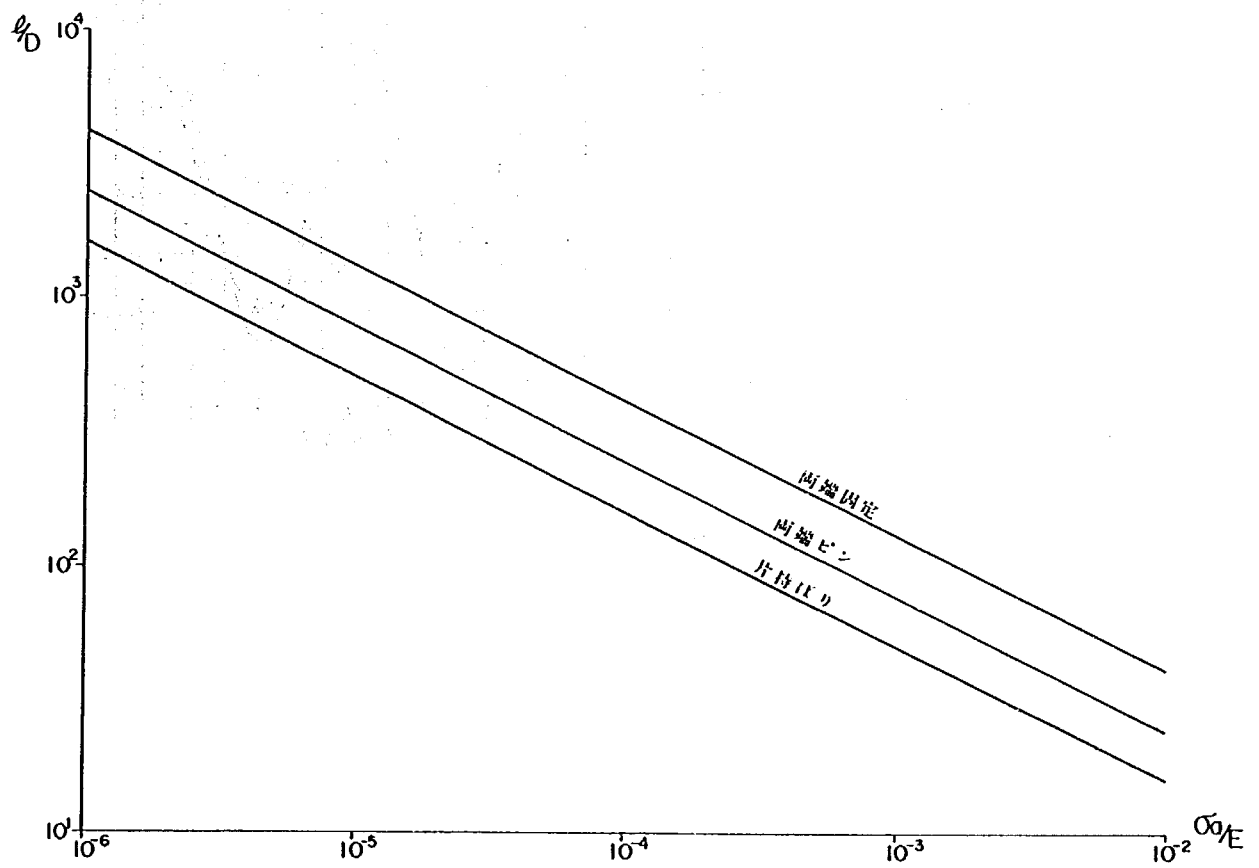


図 2-5  $\ell/D - \sigma_a/E$  関係図

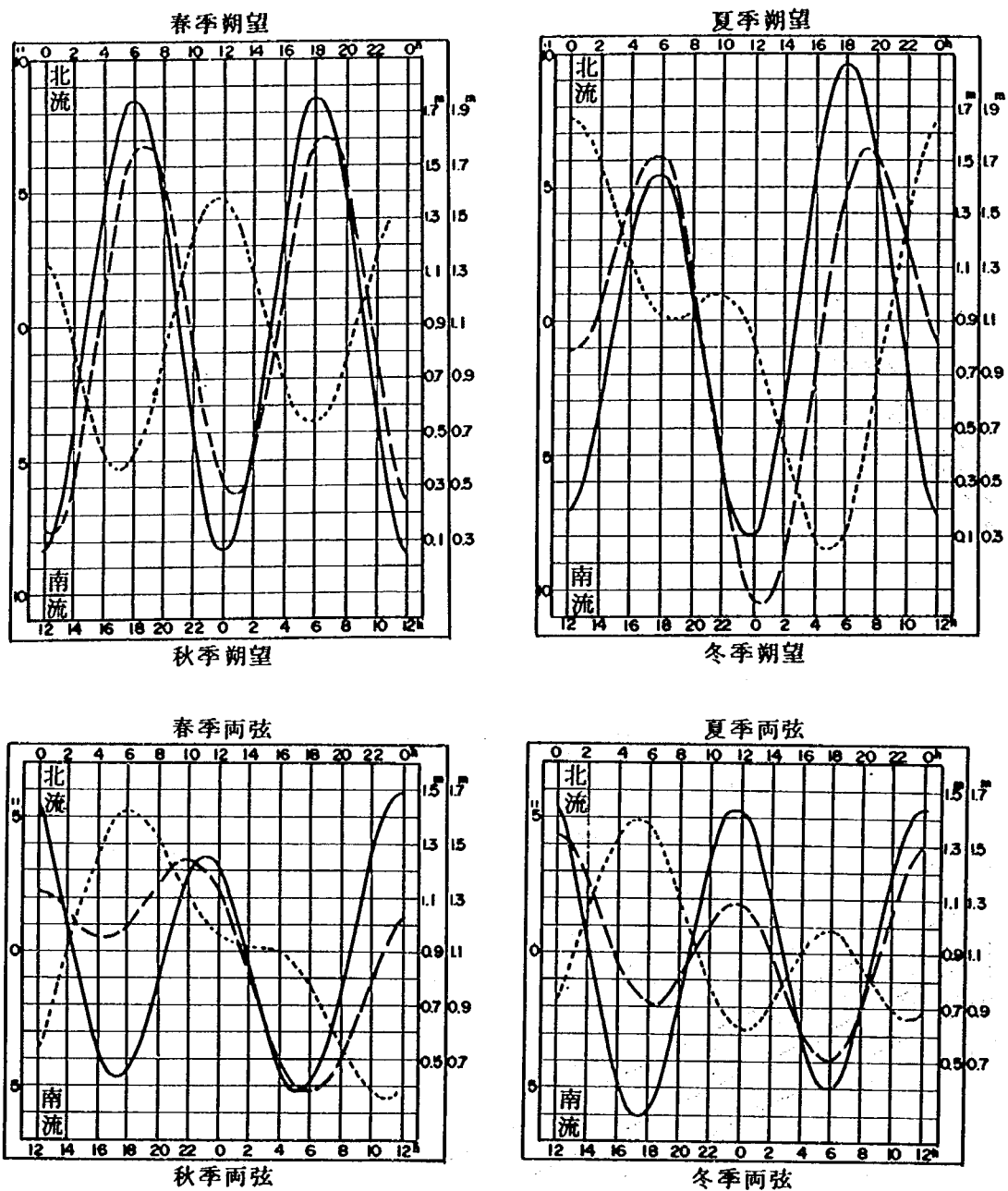


图 2-6 潮流曲线

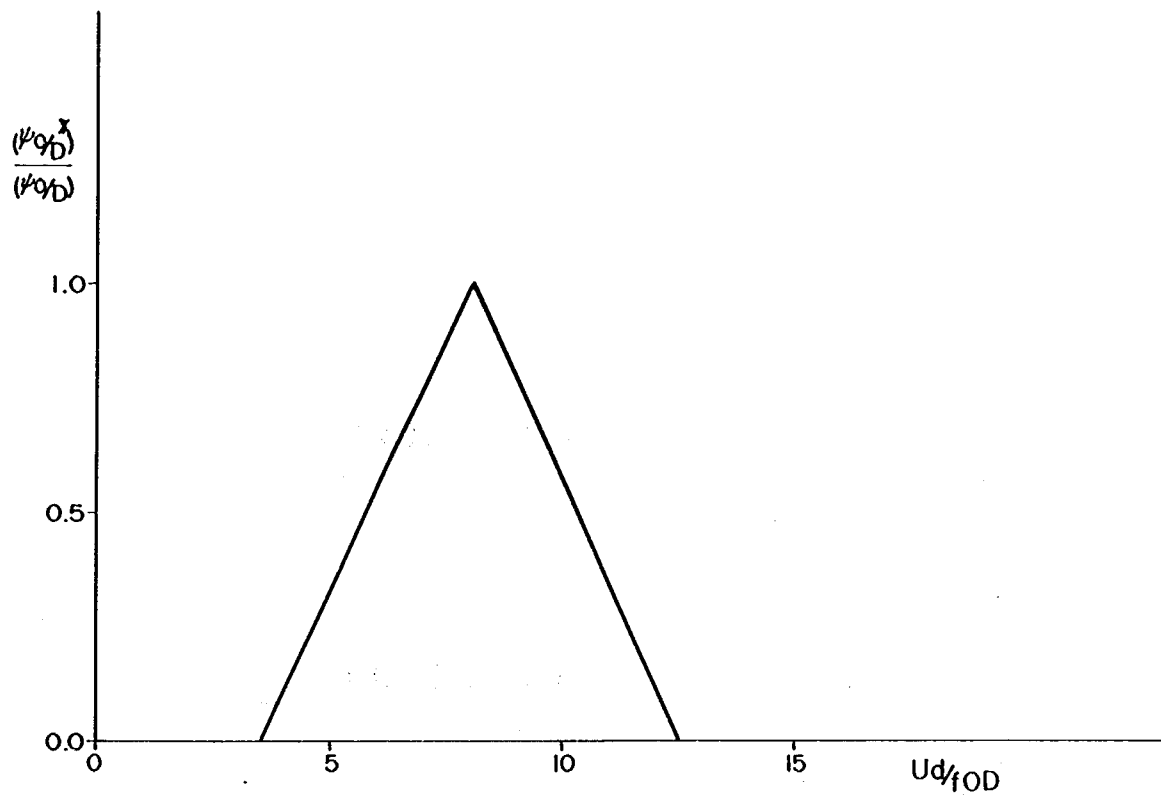


図 2 - 7 渦励振現象の模式図

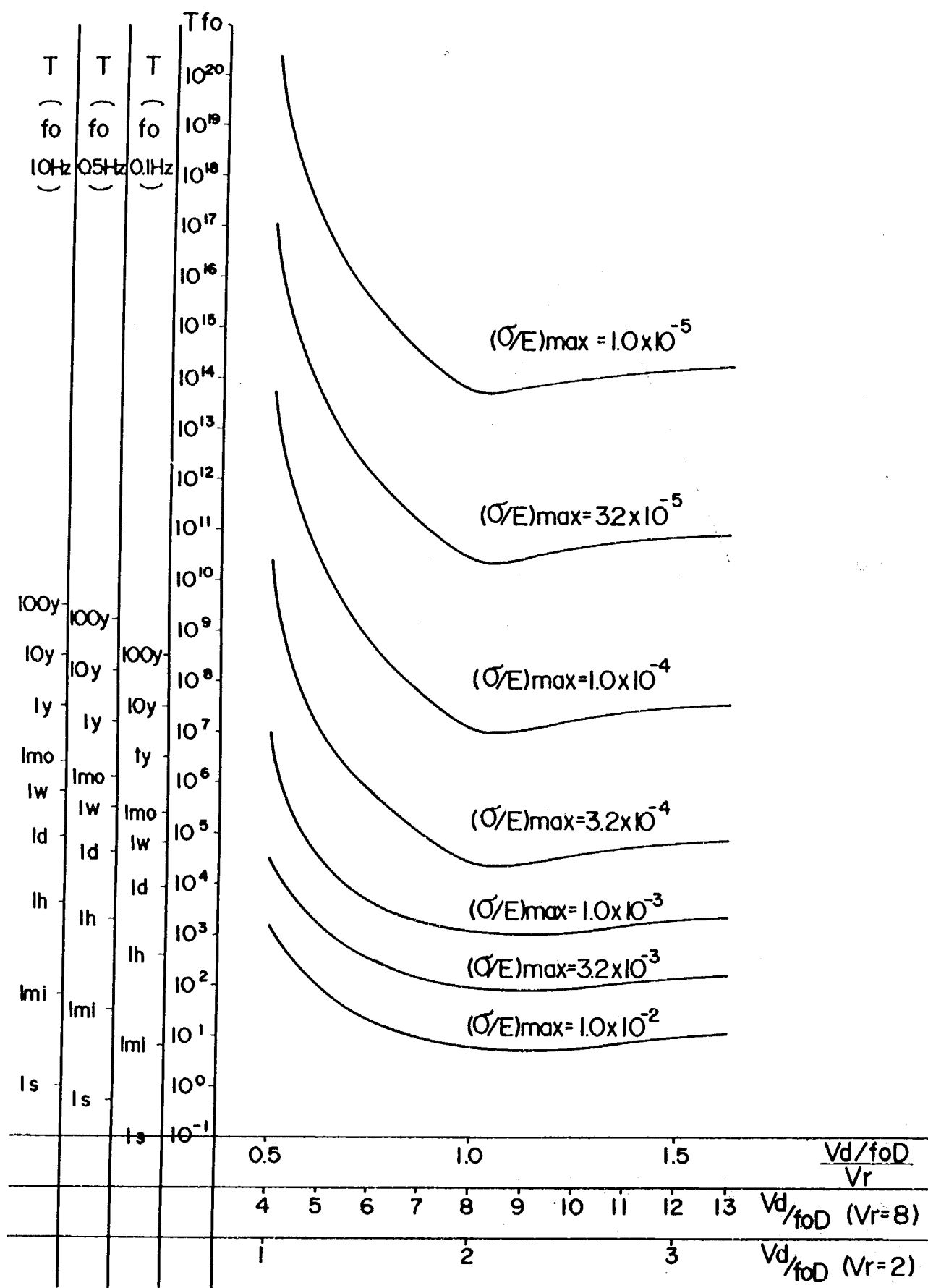


図 2-8 流速と疲労限界関係図

附 表 · 附 图

付表 1-1 フラッター風洞諸元

| 風 洞 形 式          |                         |             | 単回路還流式                                   |
|------------------|-------------------------|-------------|------------------------------------------|
| 主<br>要<br>寸<br>法 | 測<br>定<br>洞             | 幅 (mm)      | 2,500                                    |
|                  |                         | 高 (mm)      | 4,000                                    |
|                  |                         | 長 (mm)      | 10,000                                   |
|                  | 縮<br>流<br>洞             | 入 口 (mm×mm) | 7,000 × 3,500                            |
|                  |                         | 出 口 (mm×mm) | 2,500 × 4,000                            |
|                  | 縮 流 比                   |             | 5.95                                     |
|                  | 風 路 全 長 (mm)            |             | 115,000                                  |
| 送<br>風<br>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 <sup>3</sup> /s) |             | 242.0                                    |
|                  | 回 転 数 (rpm)             |             | 400.0                                    |
|                  | 容 量 (kw)                |             | 250.0                                    |
| 気<br>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<br>フラッタ模型支持装置<br>乱流発生装置<br>データ処理装置 |

付表 1-2 加速度計の製造番号および校正係数

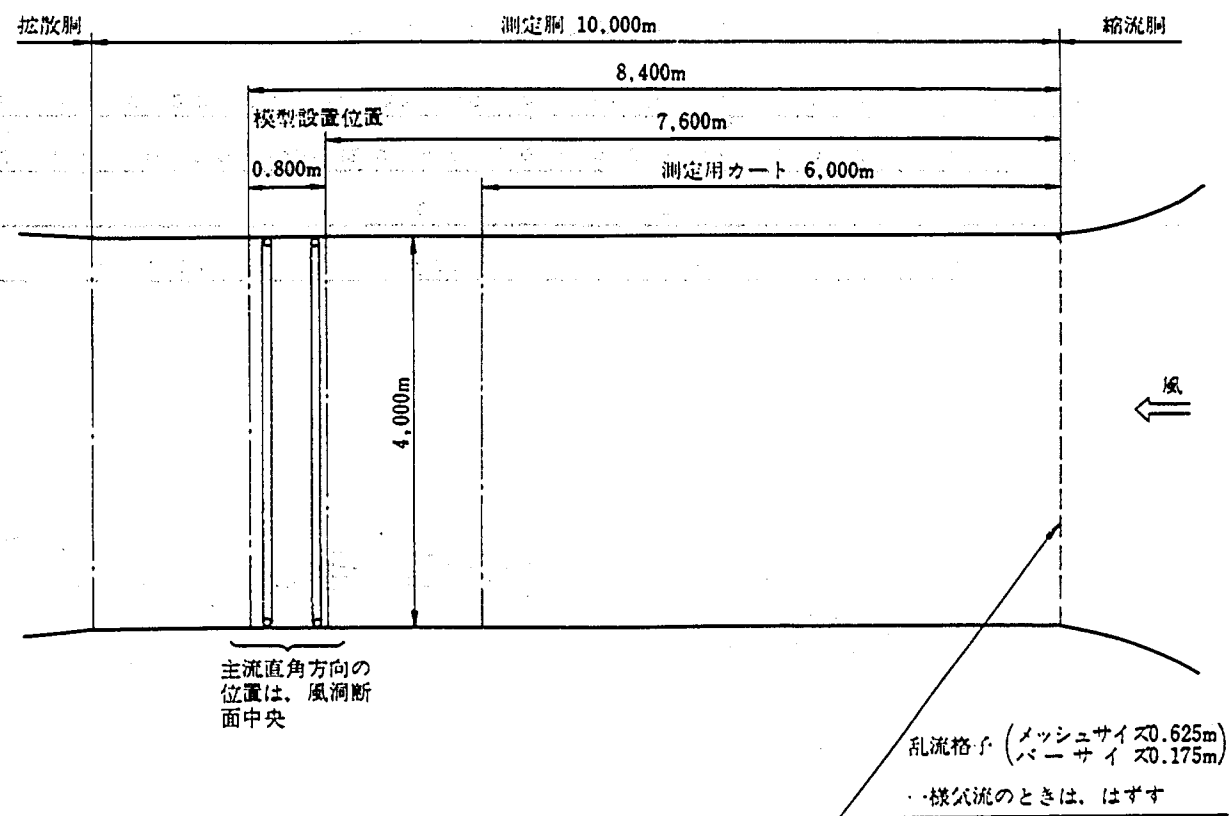
| チャンネル | 製造番号   | 校正係数<br>(g/1×10 <sup>-6</sup> strain) | 取付位置       |
|-------|--------|---------------------------------------|------------|
| 1     | CD0351 | 0.009643                              | U(L E)-2-P |
| 2     | CD0352 | 0.01048                               | U(L E)-2-L |
| 3     | CD0350 | 0.01149                               | U(L E)-4-P |
| 4     | CD0328 | 0.01131                               | U(L E)-4-L |
| 5     | CD0347 | 0.01086                               | D(R I)-2-P |
| 6     | YG3260 | 0.009132                              | D(R I)-2-L |
| 7     | YG3204 | 0.01248                               | D(R I)-4-P |
| 8     | CD0348 | 0.01130                               | D(R I)-4-L |

付表 1-3-1 パイプ間隔の変化による  $V-\sigma_A$  一覧表

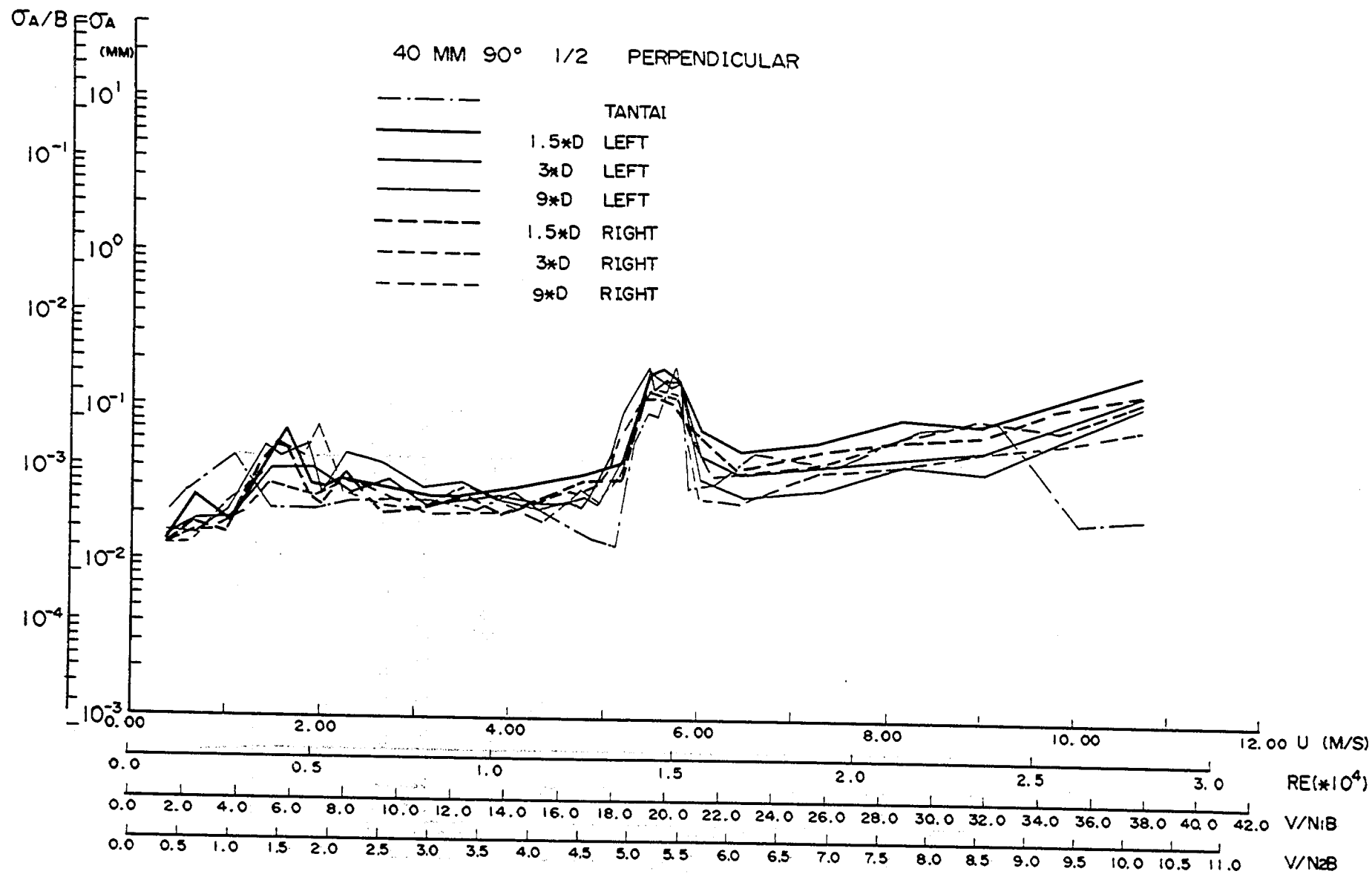
| パイプ直径<br>(mm) | 設定角度<br>(deg) | チャンネル | Case No.           | Fig. No. |
|---------------|---------------|-------|--------------------|----------|
| 40            | 0             | 1, 5  | 001, 002, 003, 010 | 4-2-1    |
|               |               | 3, 7  |                    | 2        |
|               | 45            | 1, 5  | 004, 005, 006, 010 | 3        |
|               |               | 3, 7  |                    | 4        |
|               | 90            | 1, 5  | 007, 008, 009, 010 | 5        |
|               |               | 3, 7  |                    | 6        |
| 60            | 0             | 1, 5  | 015, 016, 017, 024 | 7        |
|               | 45            |       | 018, 019, 020, 024 | 8        |
|               | 90            |       | 021, 022, 023, 024 | 9        |

付表 1-3-2 設定角度の違いによる  $V-\sigma_A$  一覧表

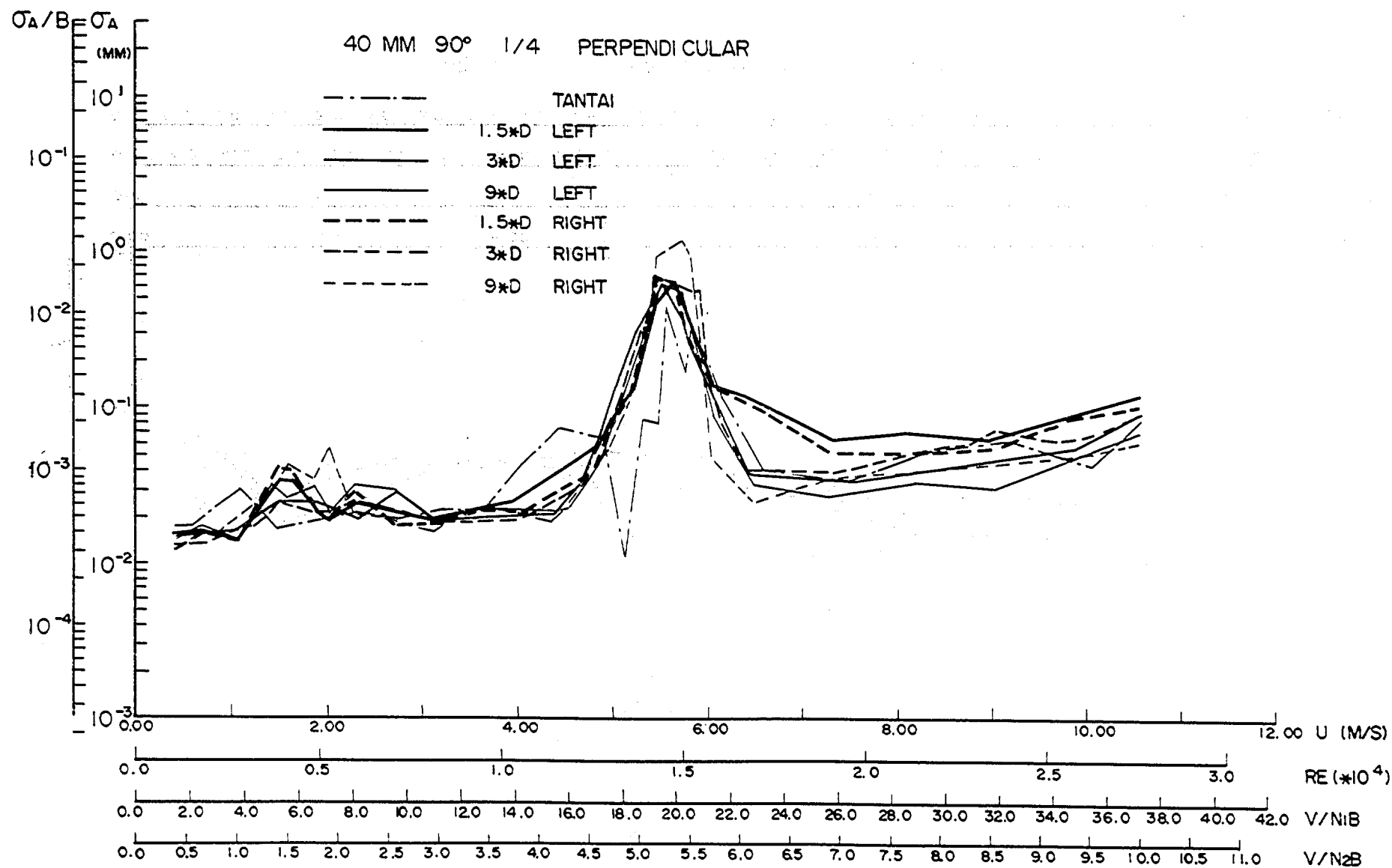
| パイプ直径<br>(mm) | パイプ間隔<br>(*D) | チャンネル | Case No.           | Fig. No. |
|---------------|---------------|-------|--------------------|----------|
| 40            | 1.5           | 1, 5  | 001, 004, 007, 010 | 4-3-1    |
|               |               | 3, 7  |                    | 2        |
|               | 3             | 1, 5  | 002, 005, 008, 010 | 3        |
|               |               | 3, 7  |                    | 4        |
|               | 9             | 1, 5  | 003, 006, 009, 010 | 5        |
|               |               | 3, 7  |                    | 6        |
| 50            | 1             | 1, 5  | 011, 013, 014      | 7        |
|               |               | 3, 7  |                    | 8        |
| 60            | 1             | 1, 5  | 015, 018, 021, 024 | 9        |
|               | 3             |       | 016, 019, 022, 024 | 10       |
|               | 9             |       | 017, 020, 023, 024 | 11       |



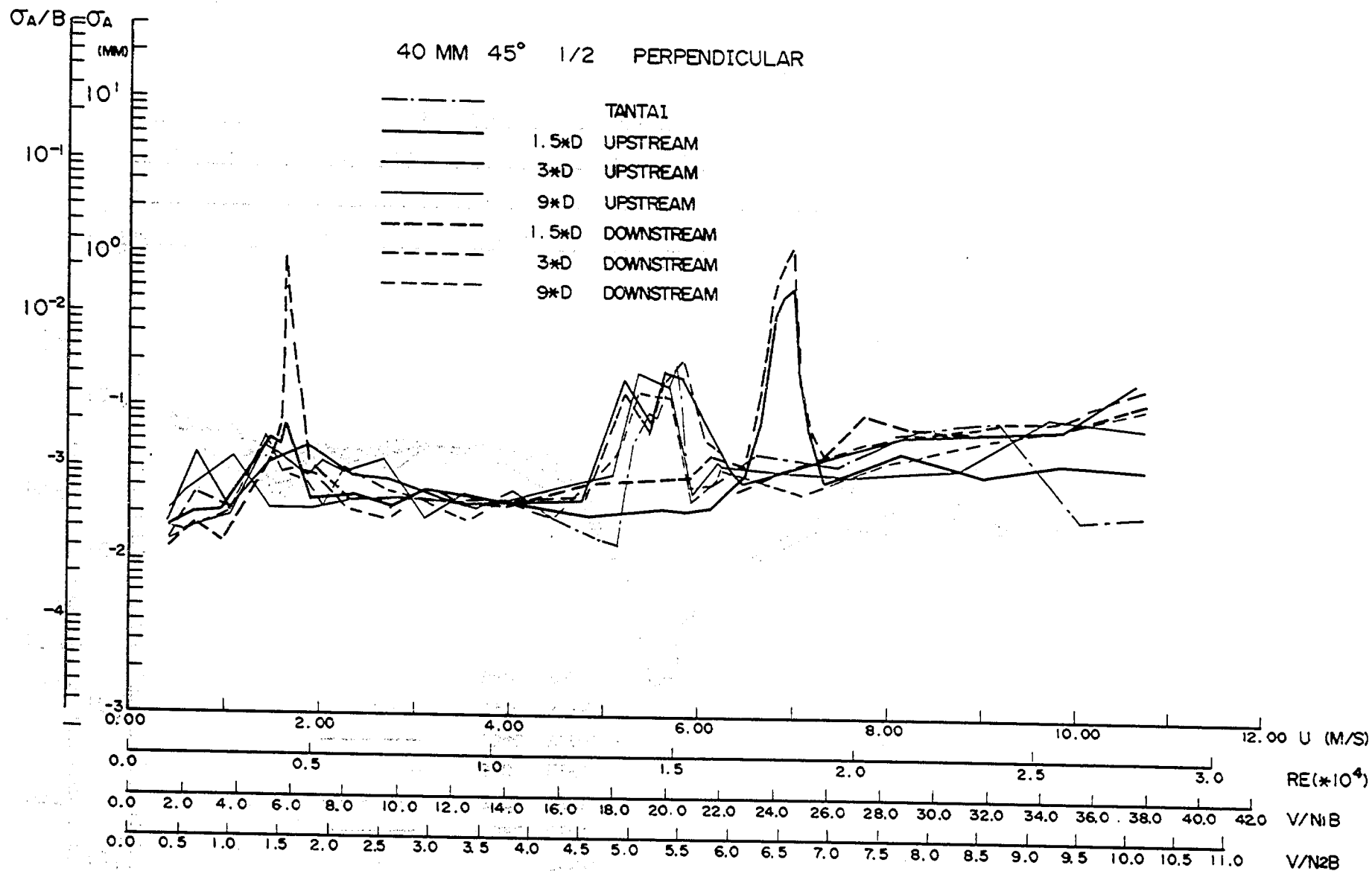
付図 1 - 1 模型の設置位置

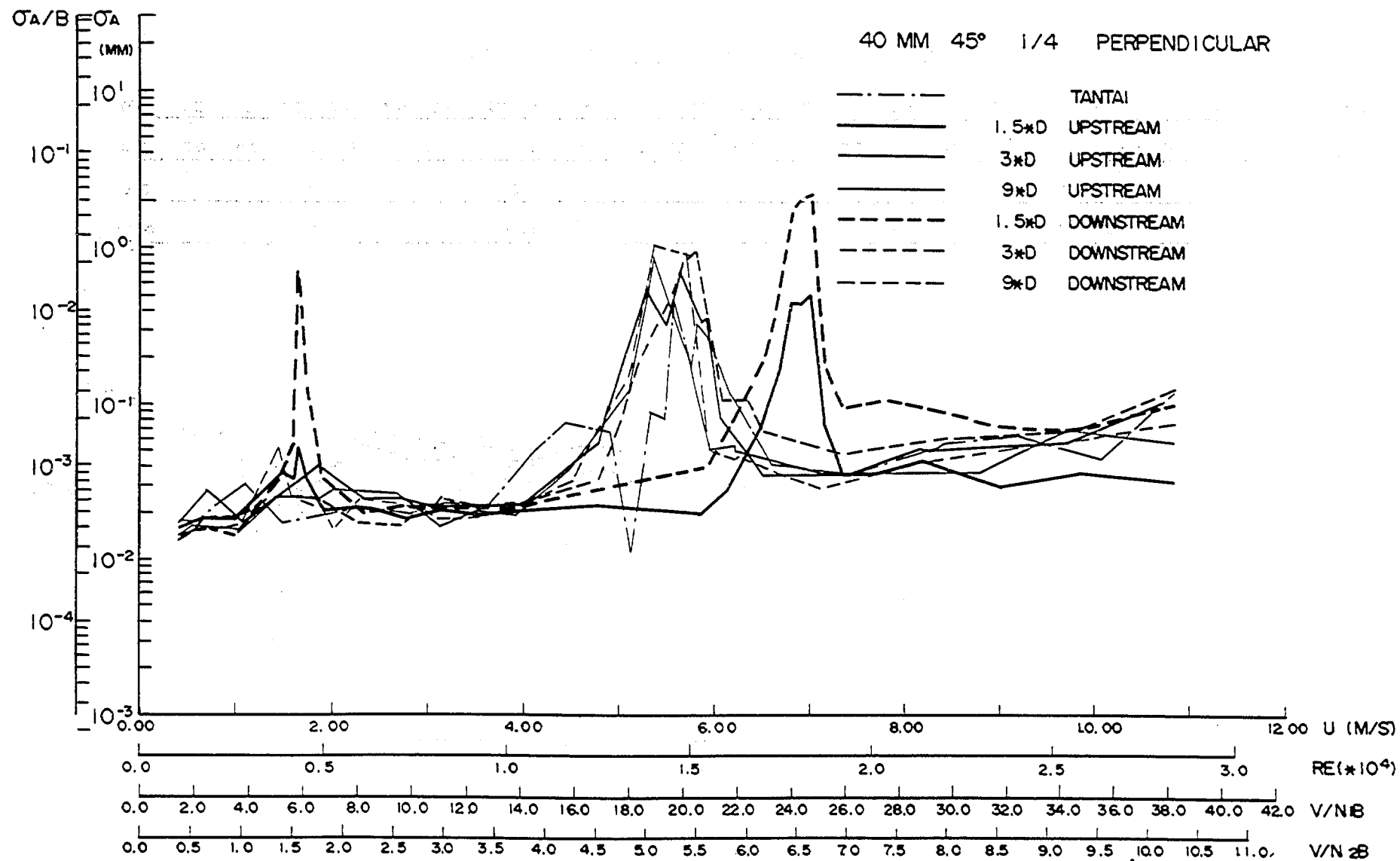


附図 1-2-1 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)

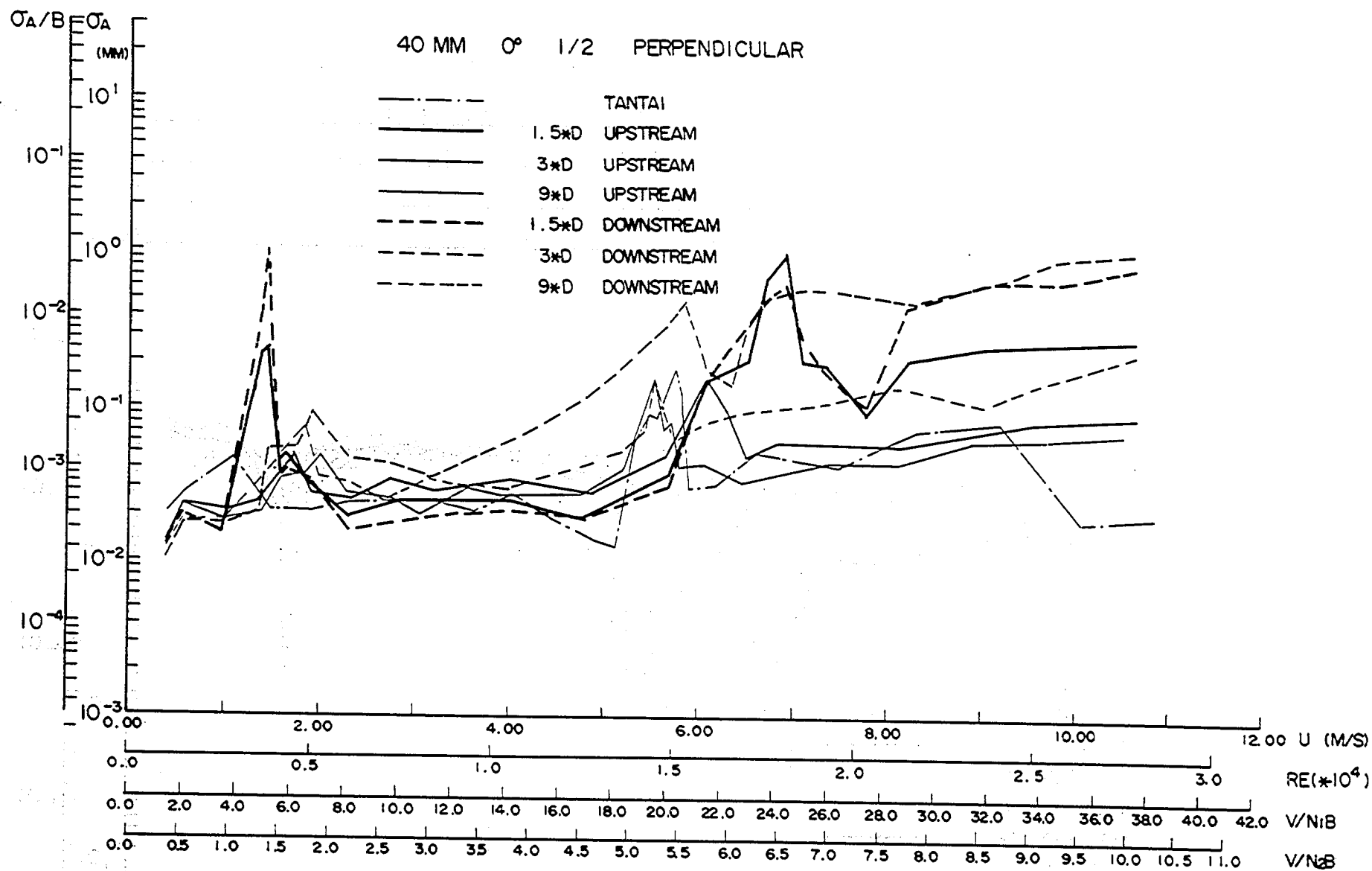


附図1-2-2 流速-振幅図(間隔を変えた場合)

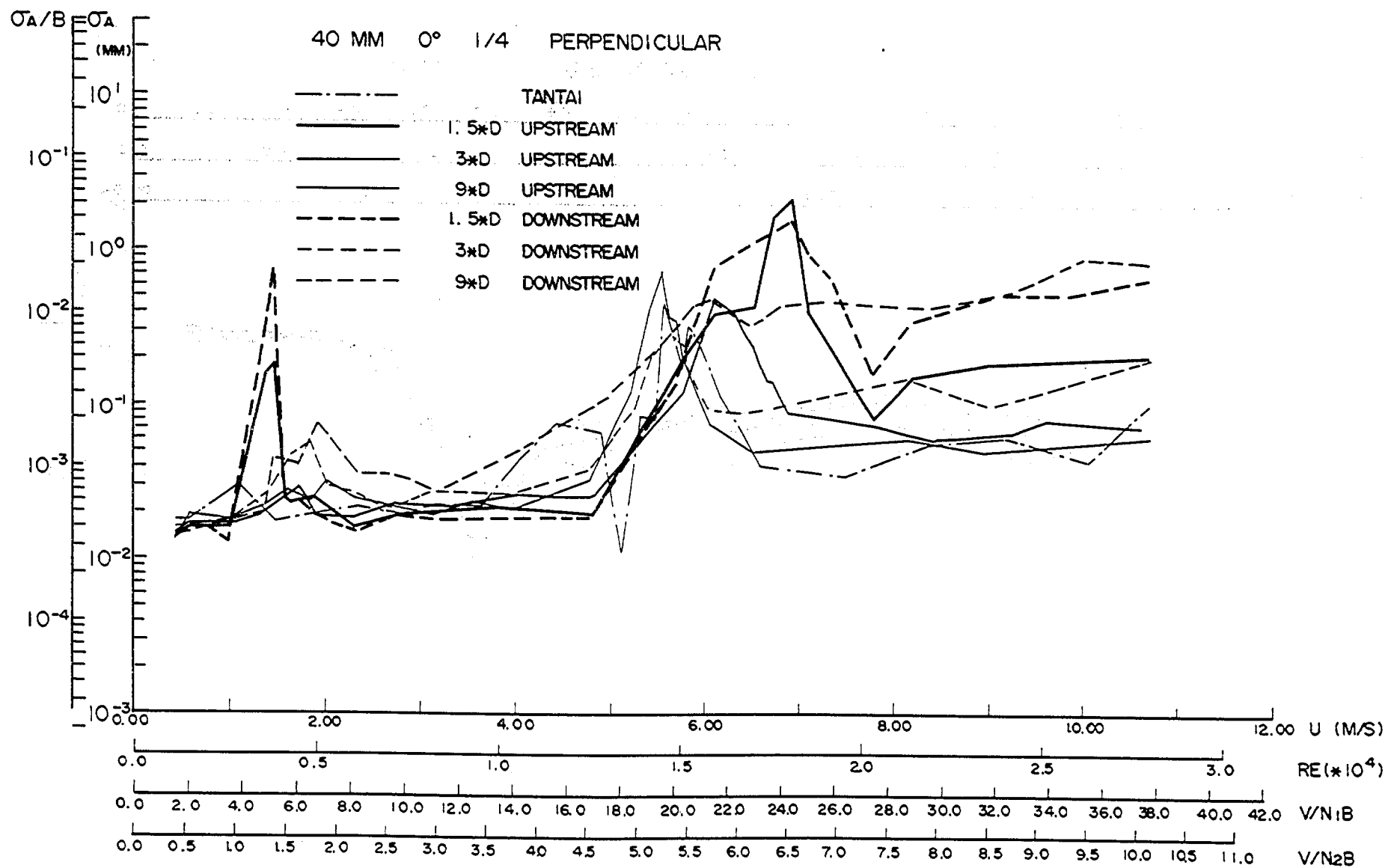




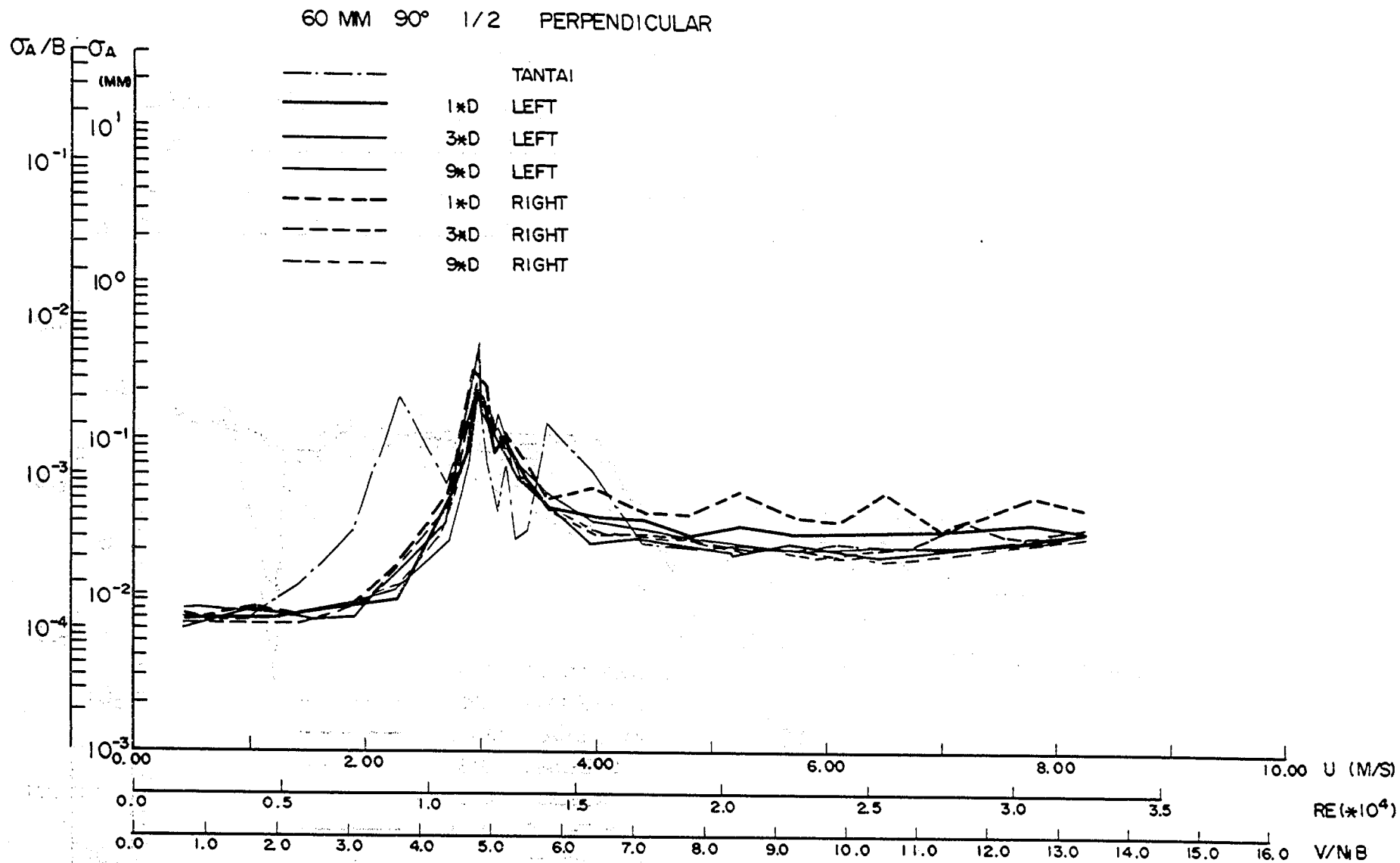
附図 1-2-4 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)



附図 1-2-5 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)

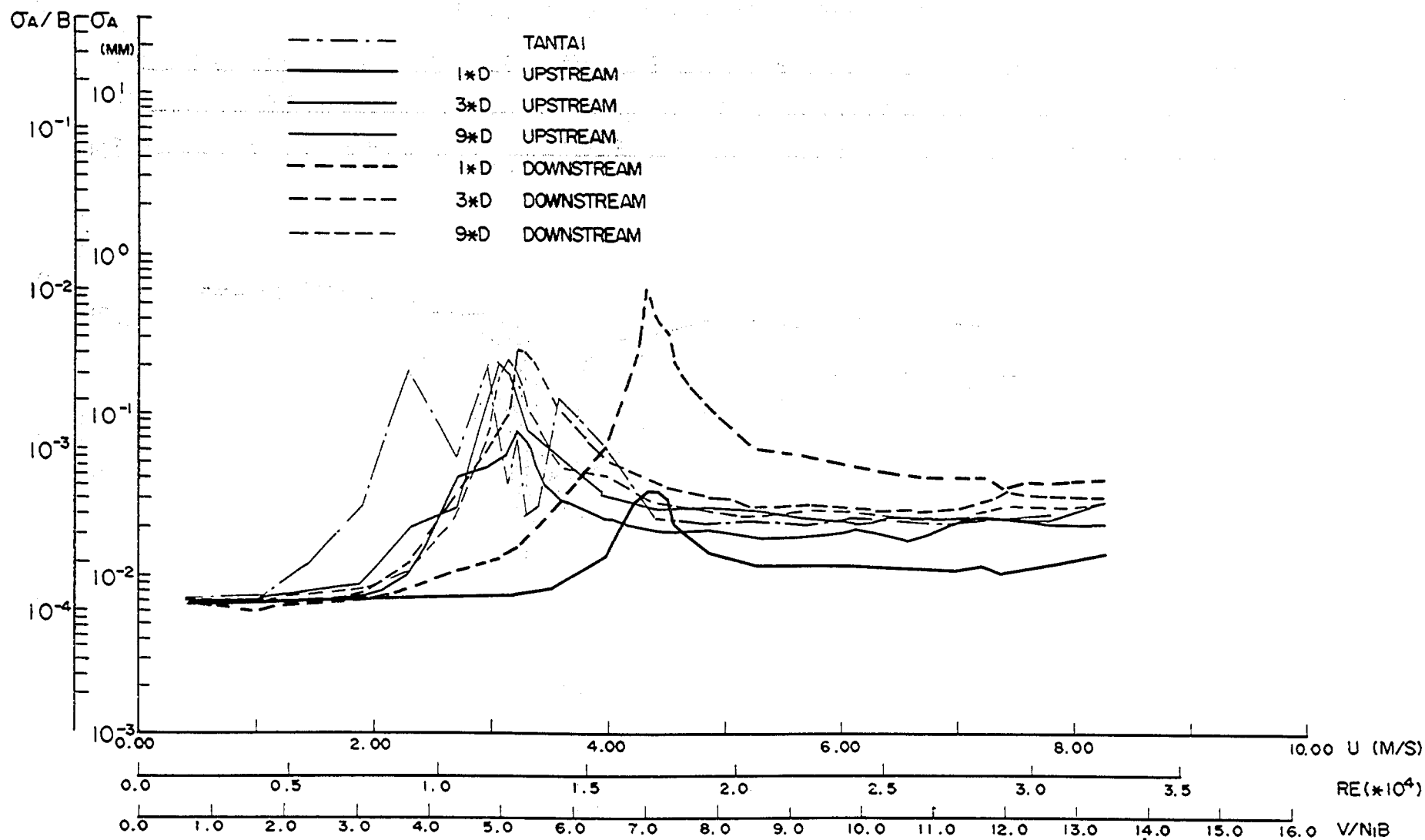


附図 1-2-6 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)

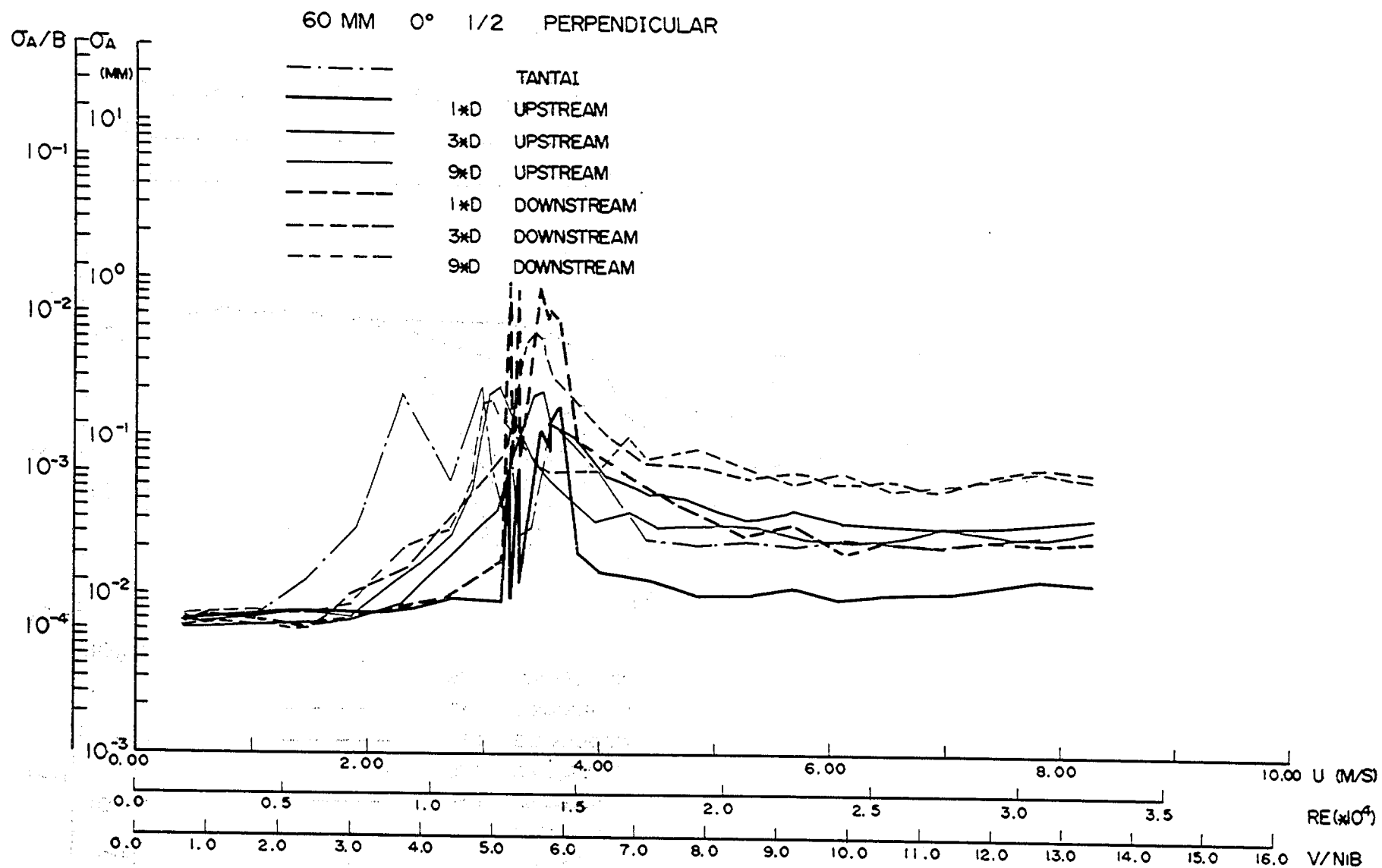


附図 1-2-7 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)

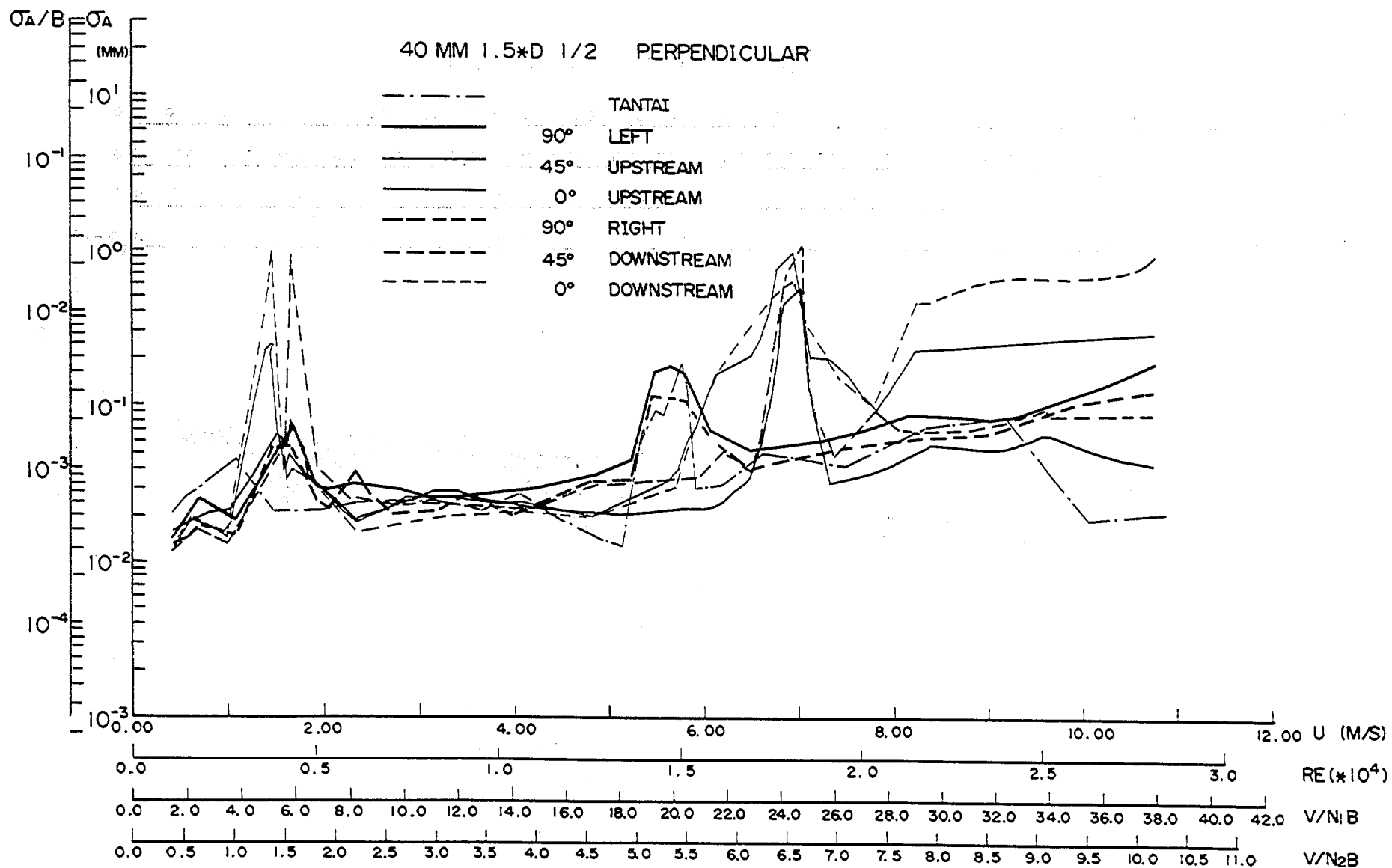
60 MM 45° 1/2 PERPENDICULAR



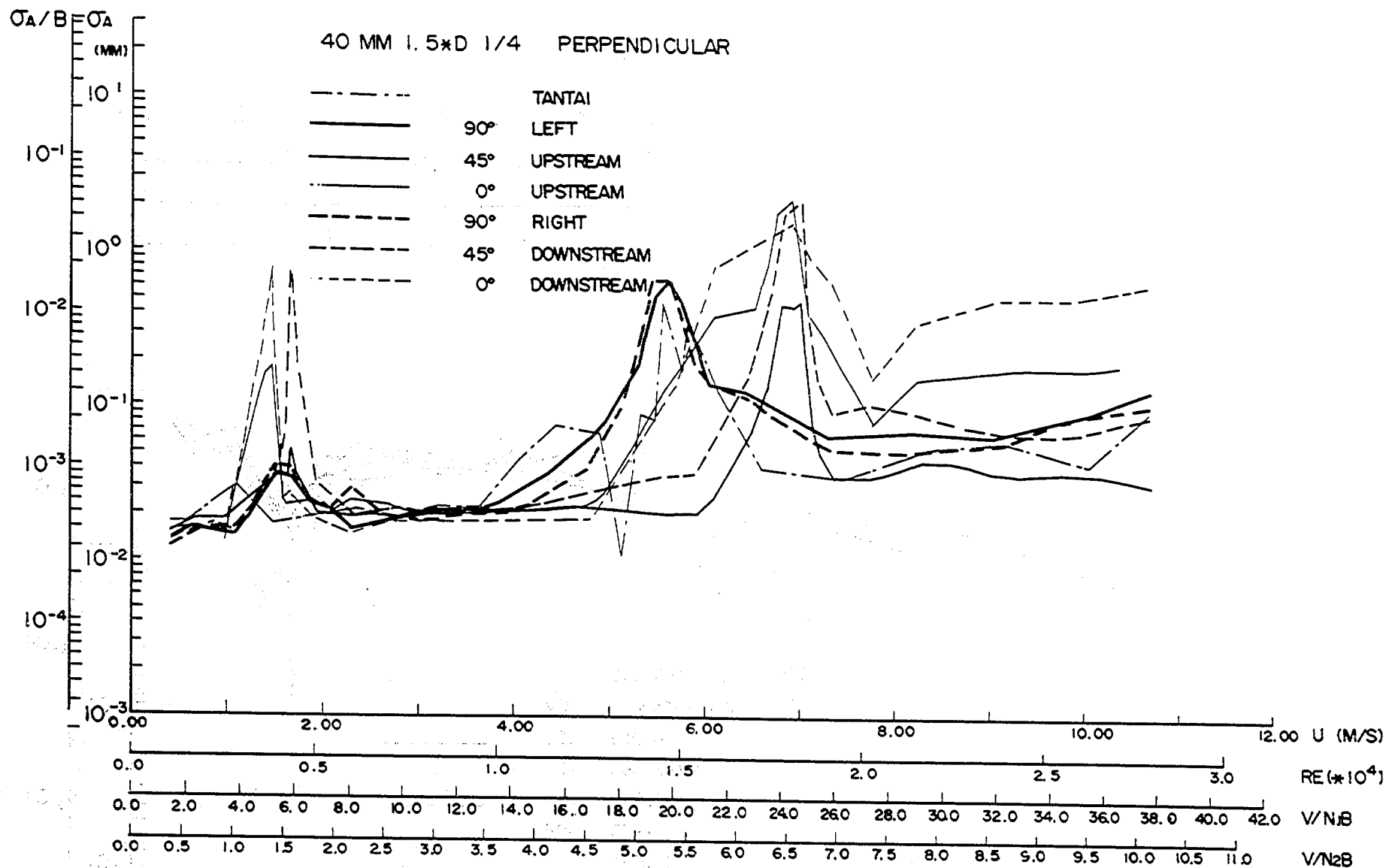
附図 1-2-8 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)



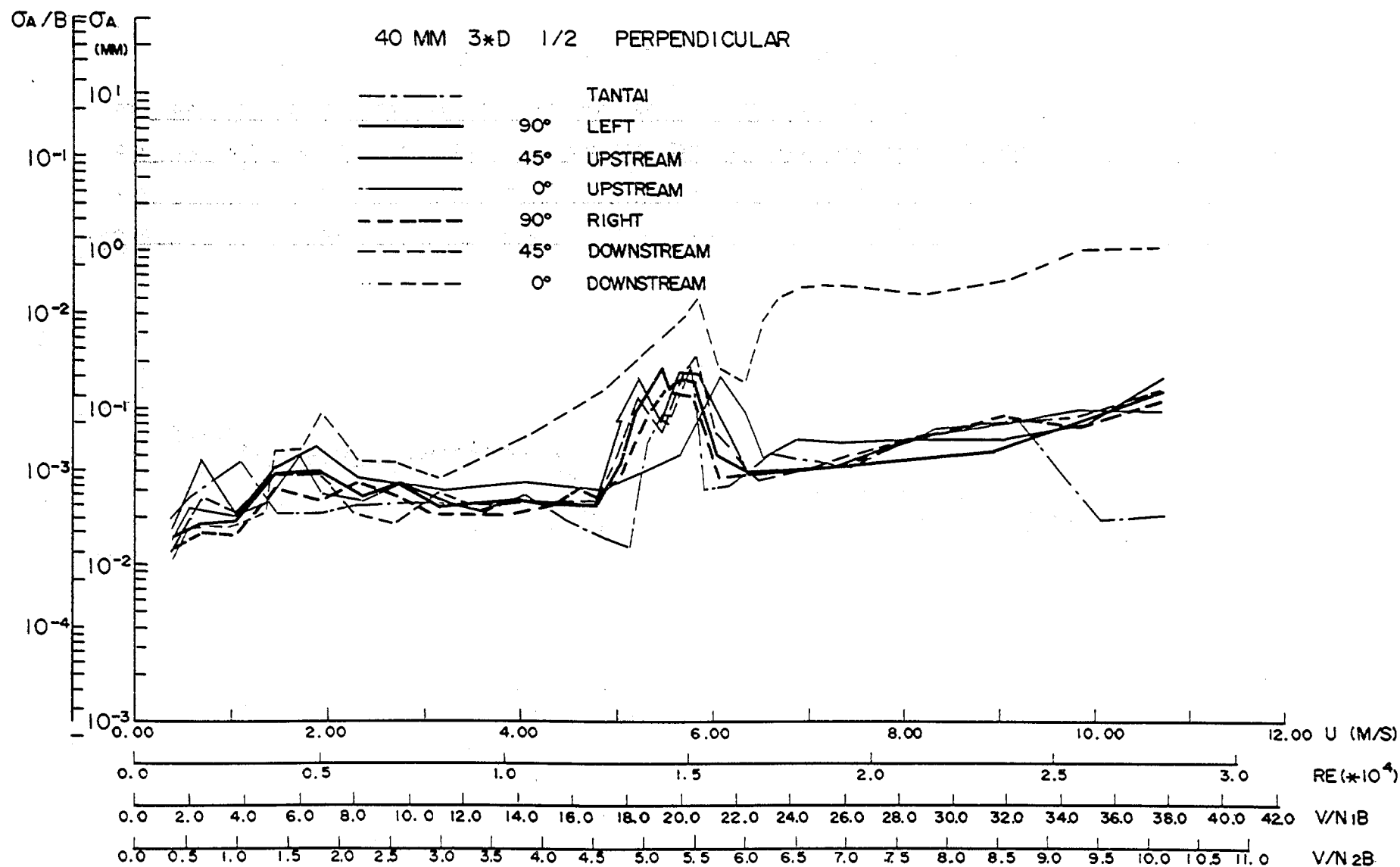
附図 1-2-9 流速-振幅図 (間隔を変えた場合)



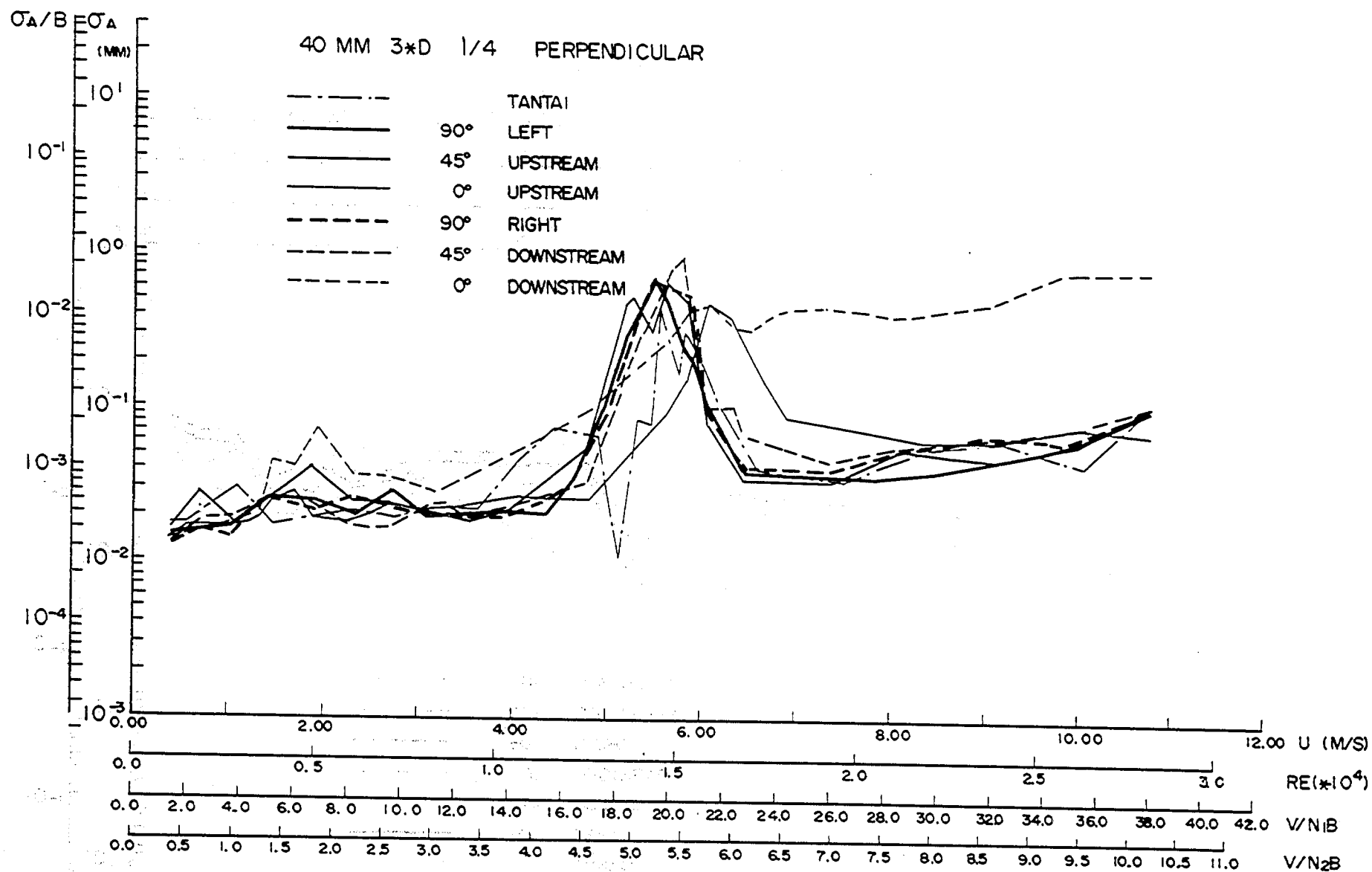
附図 1-3-1 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



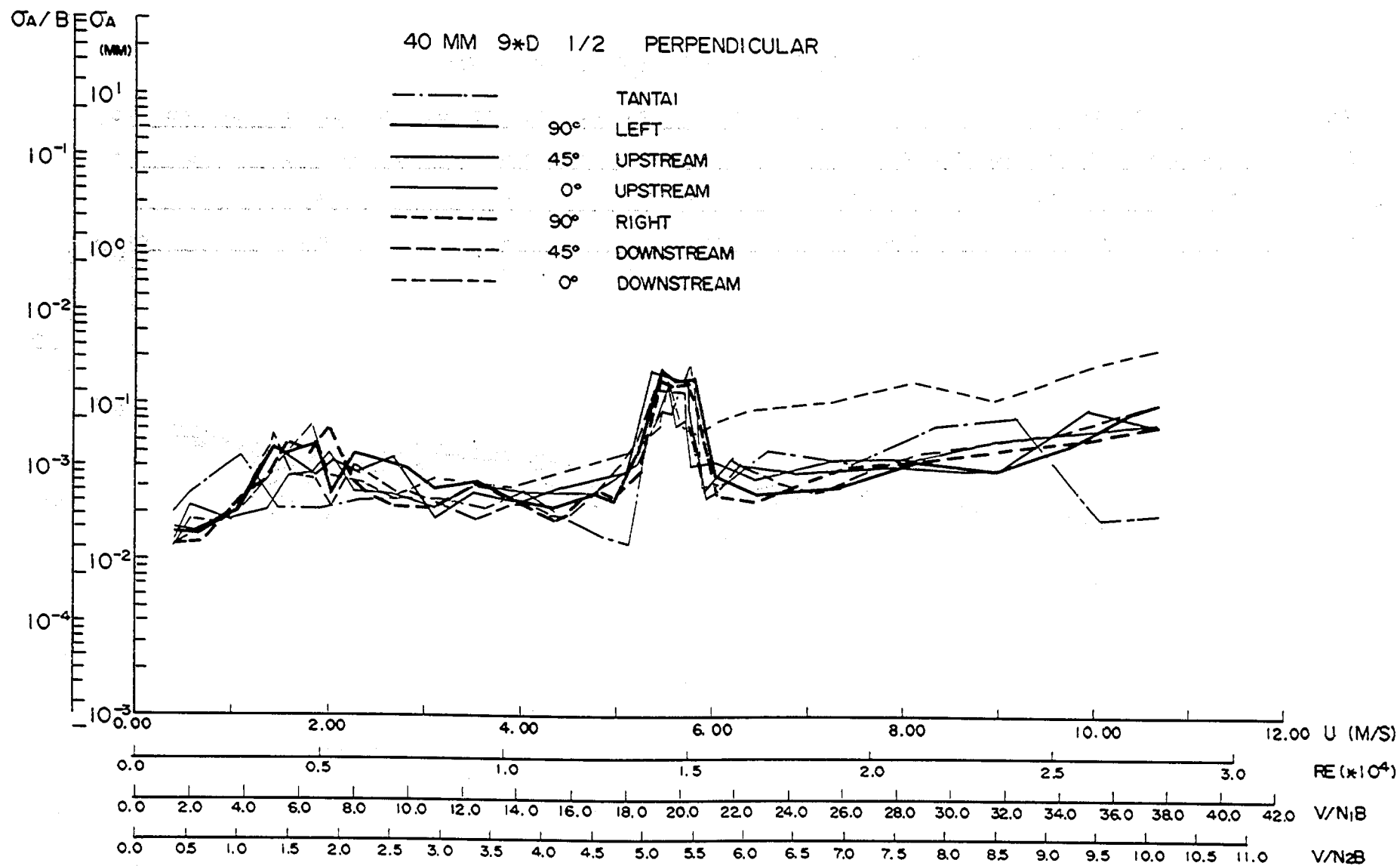
附図 1-3-2 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



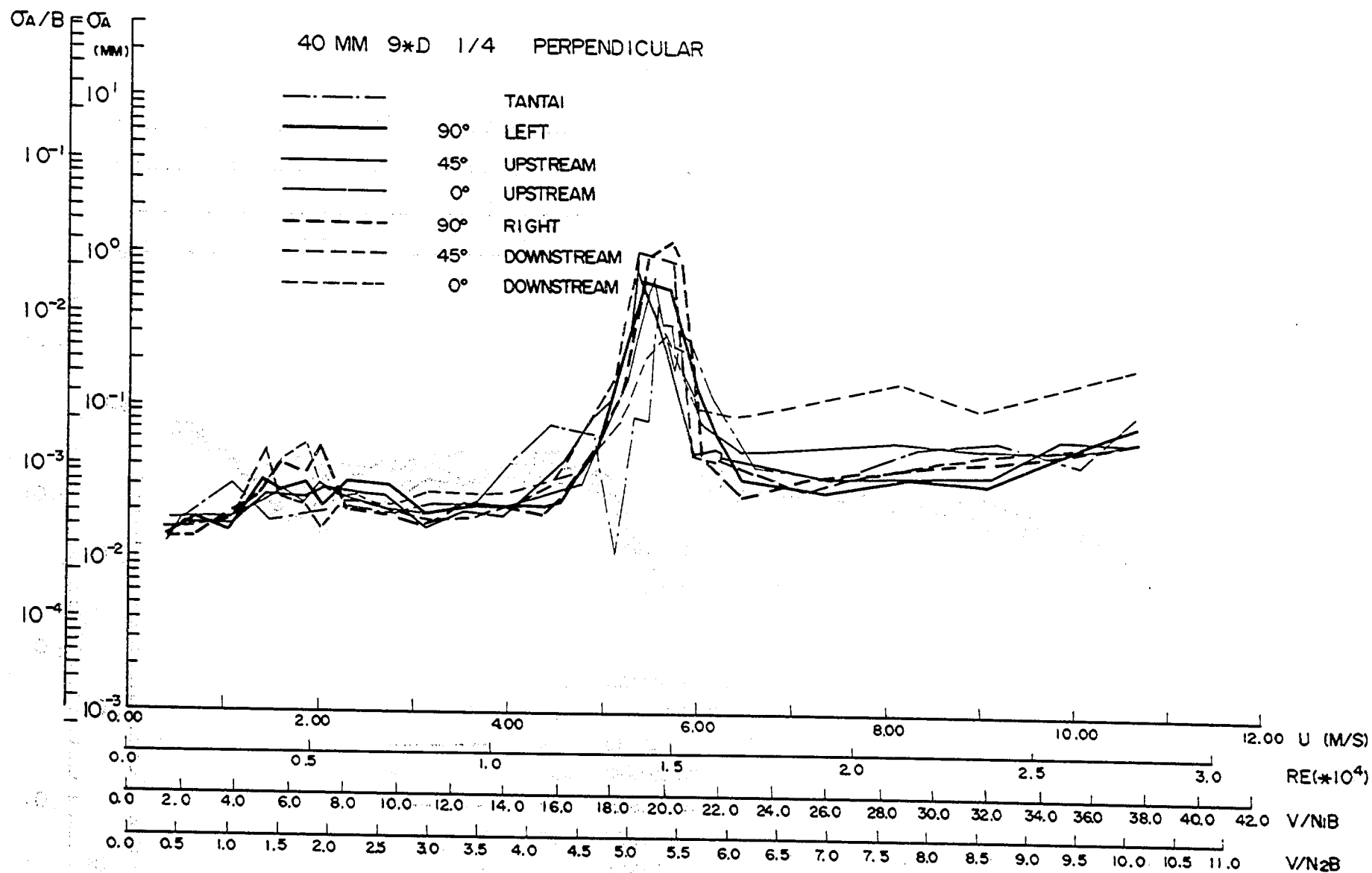
附図 1-3-3 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



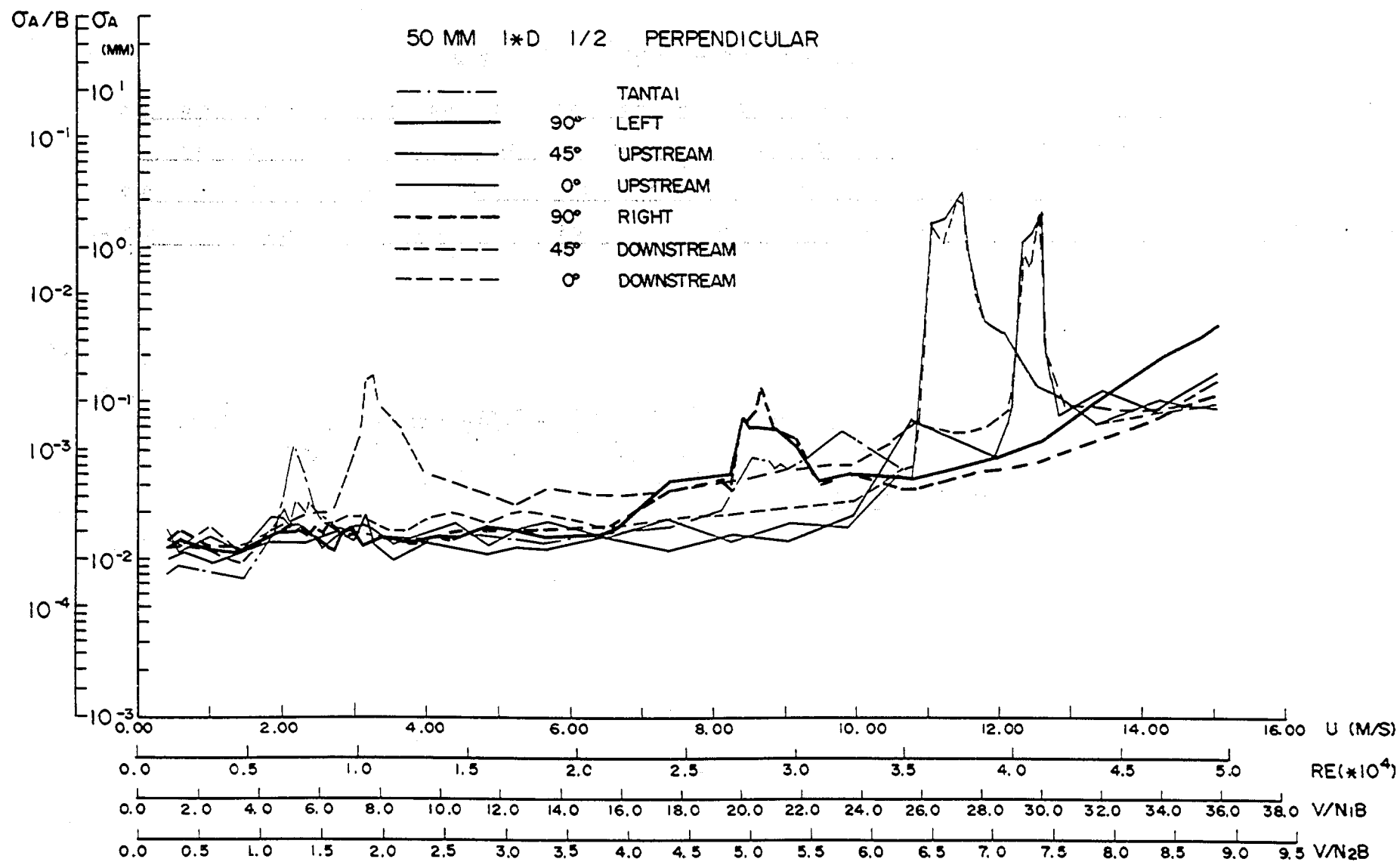
附図 1-3-4 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



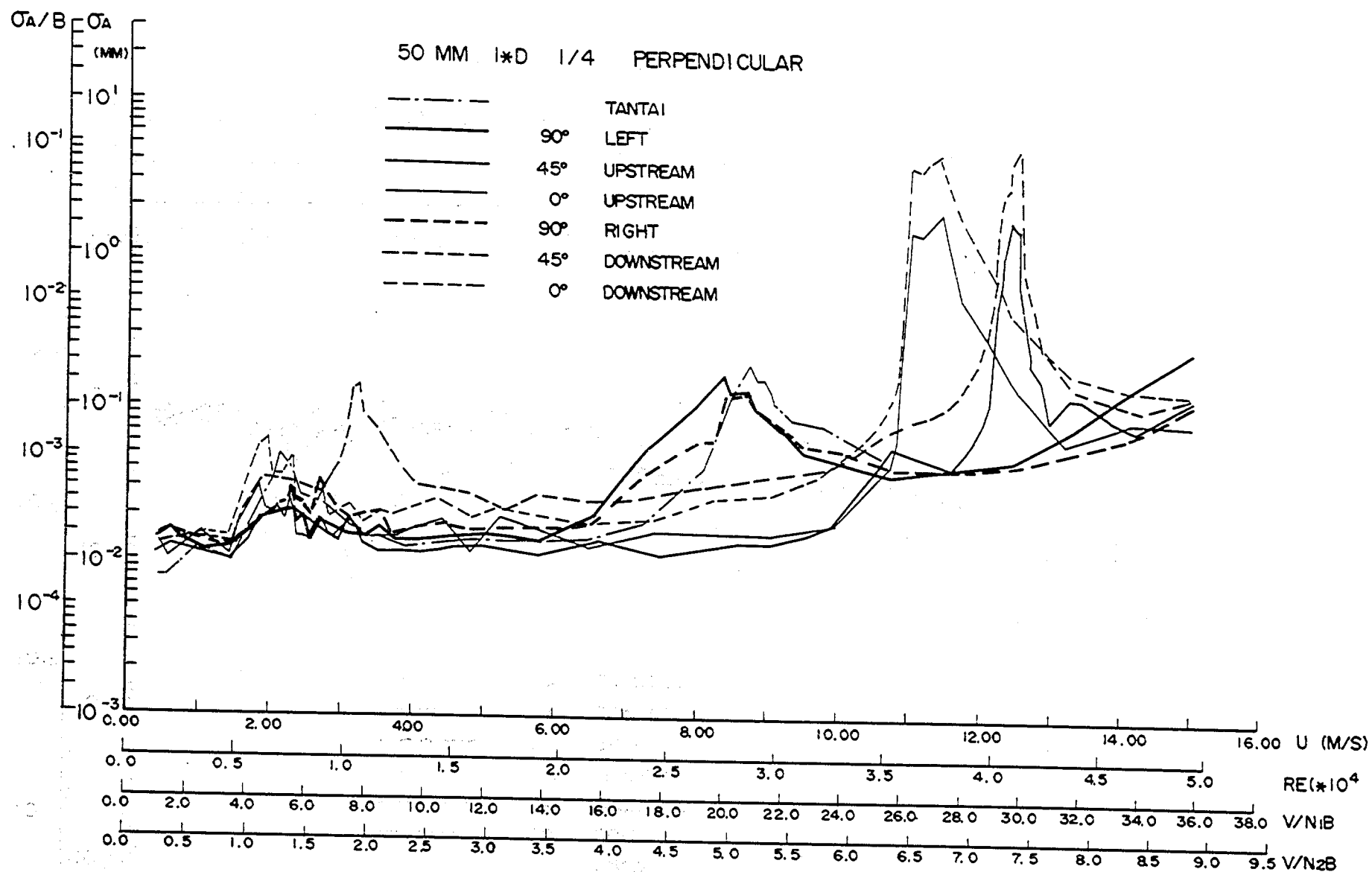
附図 1-3-5 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



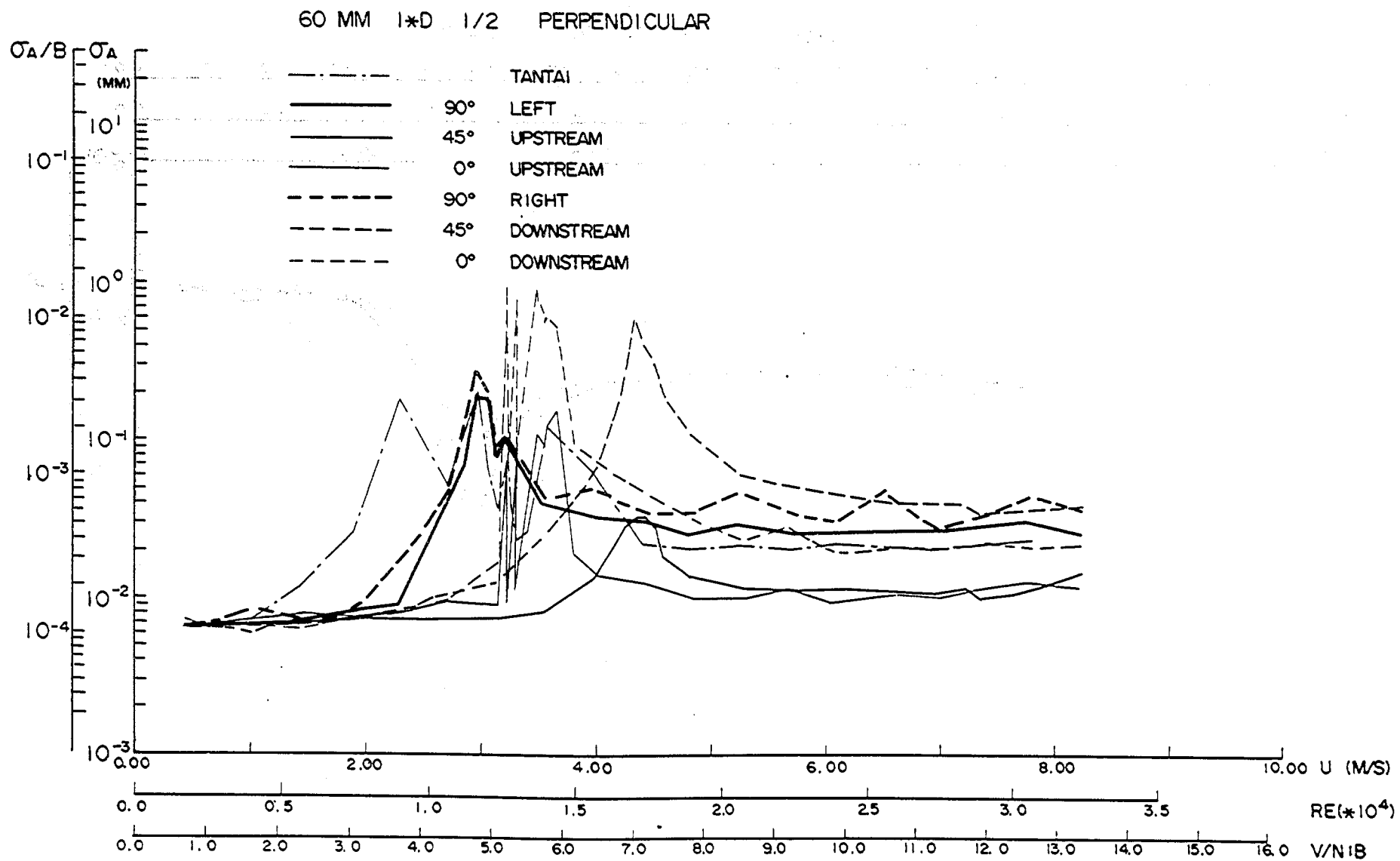
附図1-3-6 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



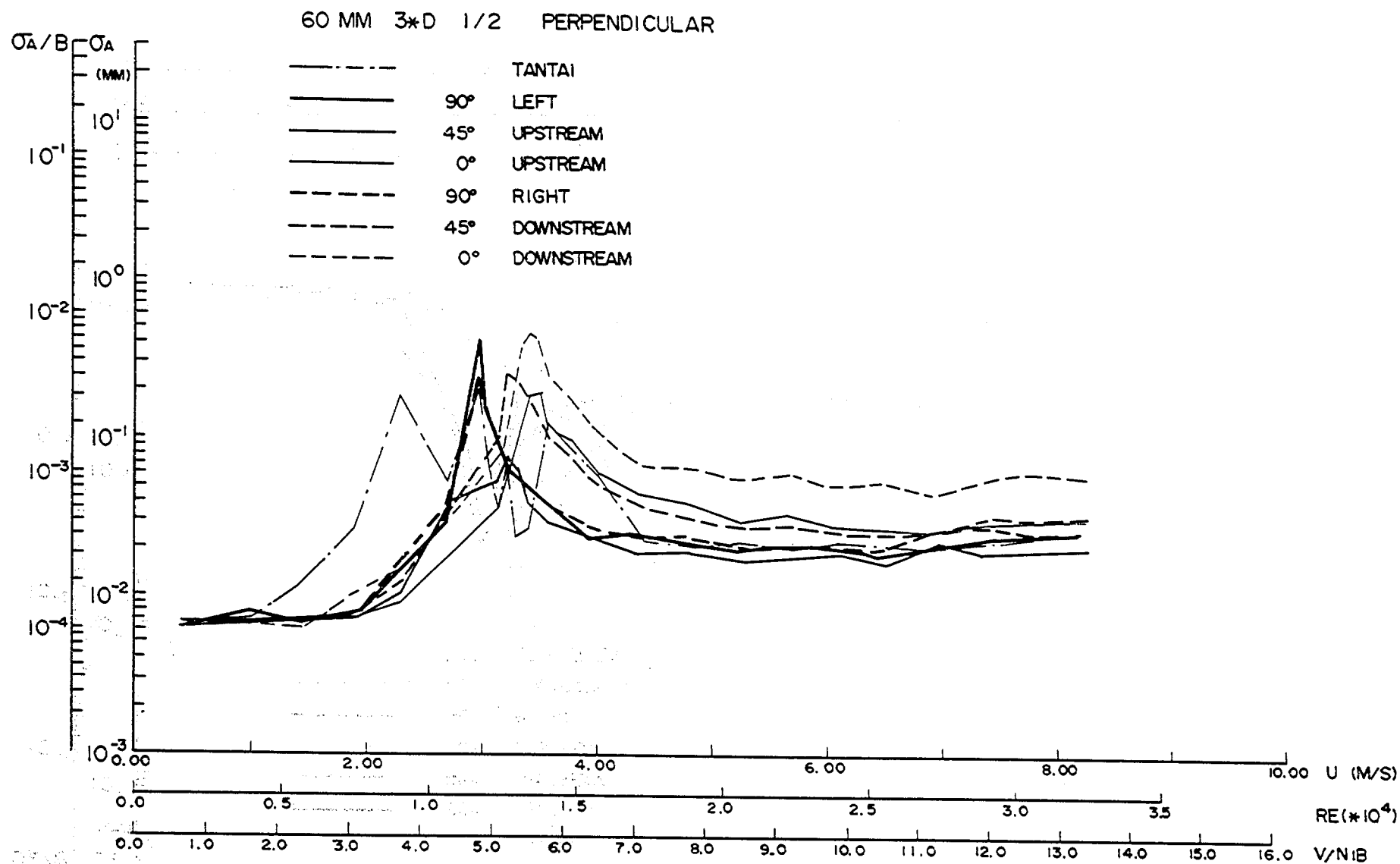
附図 1-3-7 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



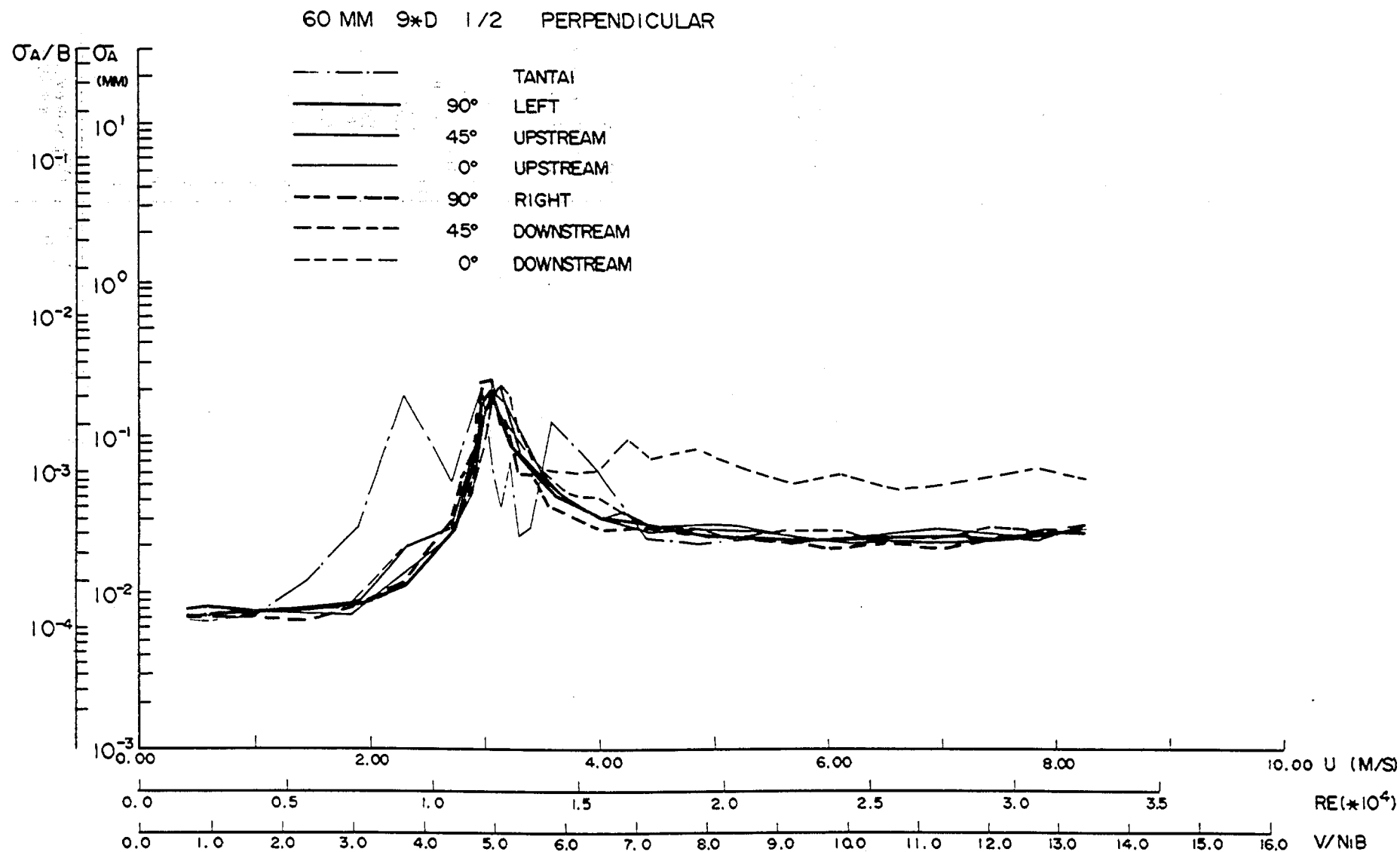
附図 1-3-8 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



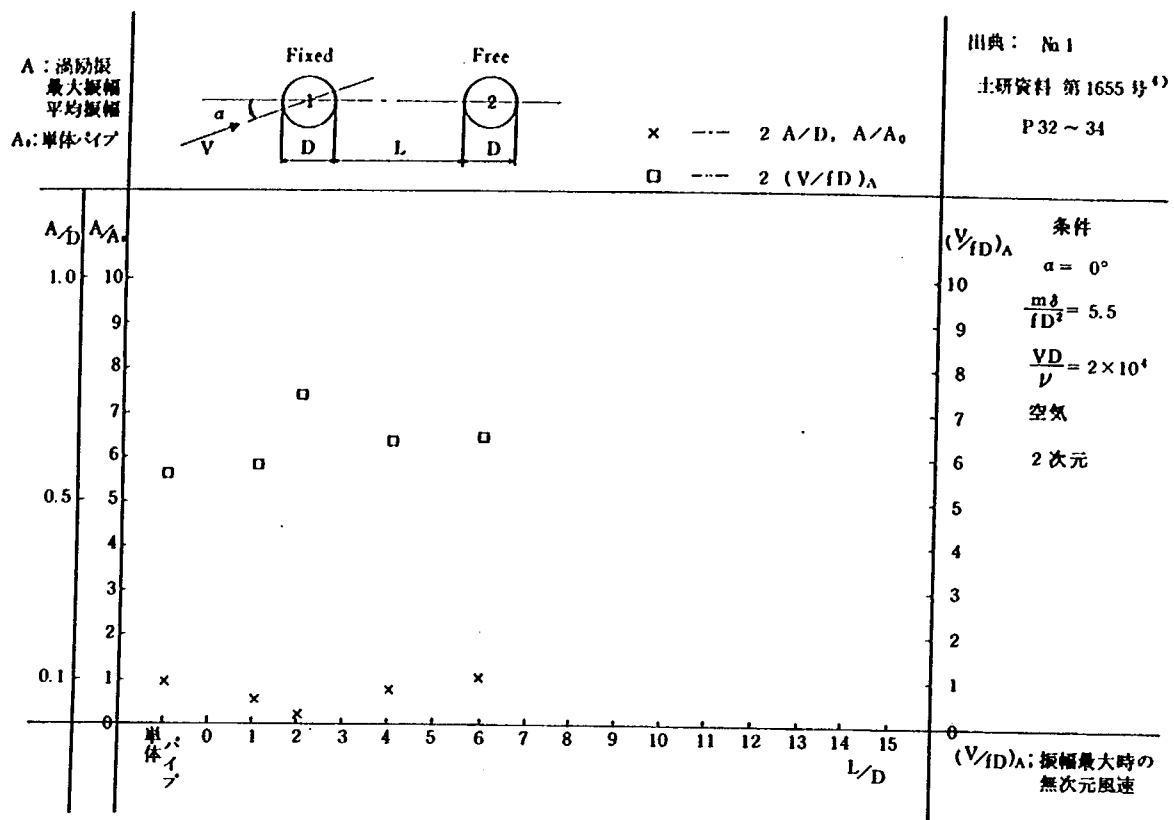
附図 1-3-9 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



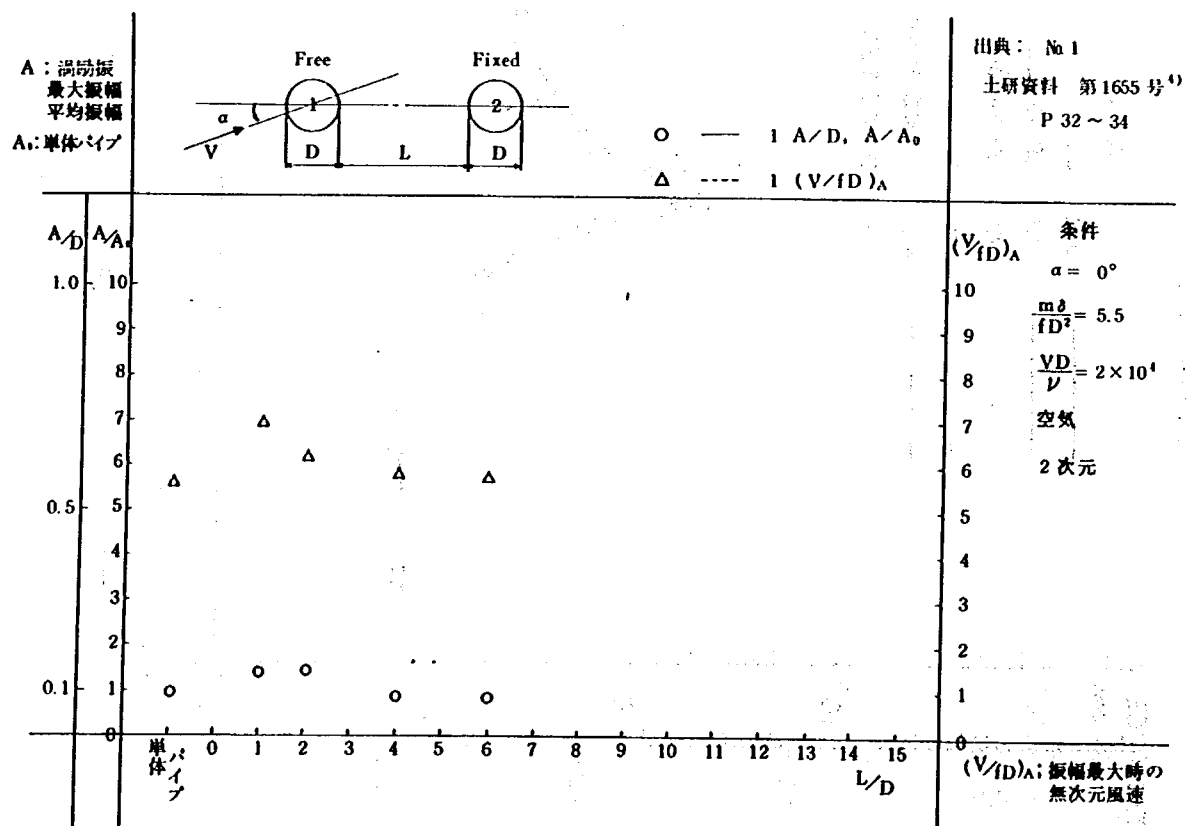
附図 1-3-10 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



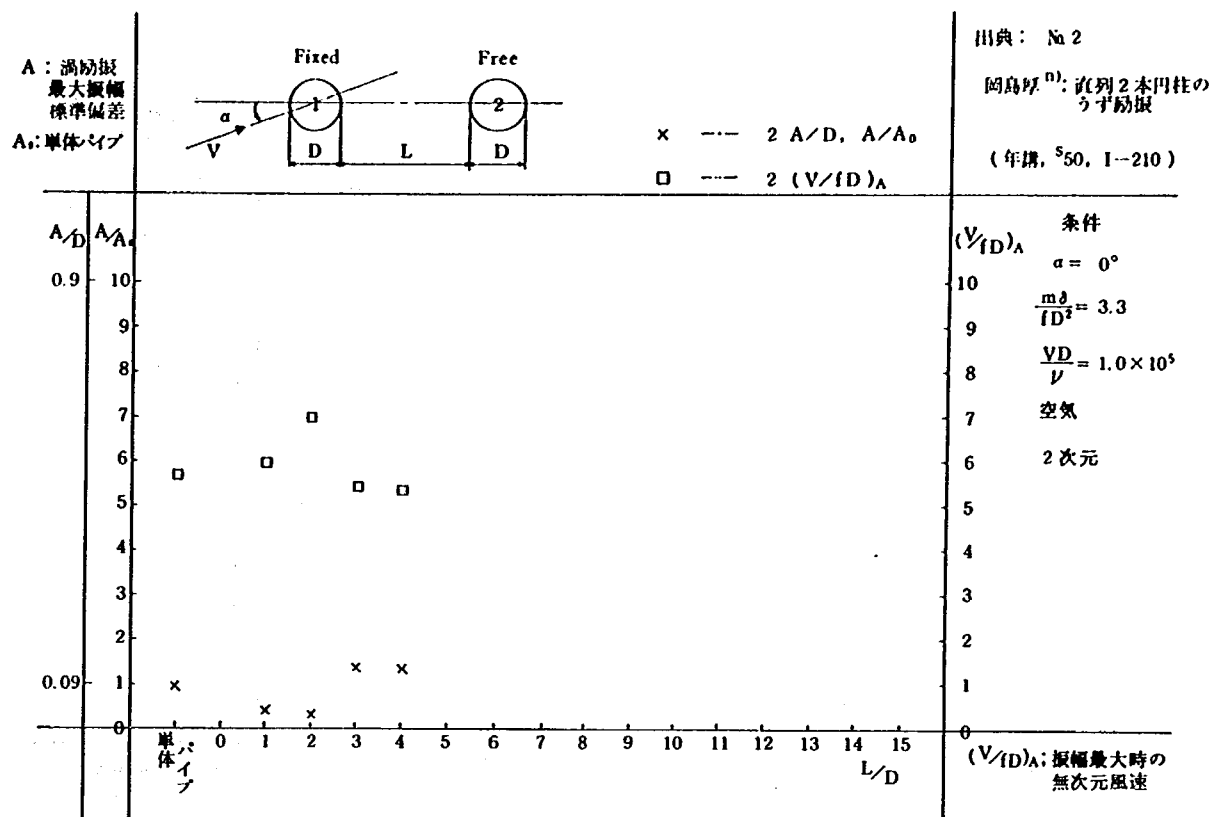
附図 1 - 3 - 11 流速-振幅図 (設置位置を変えた場合)



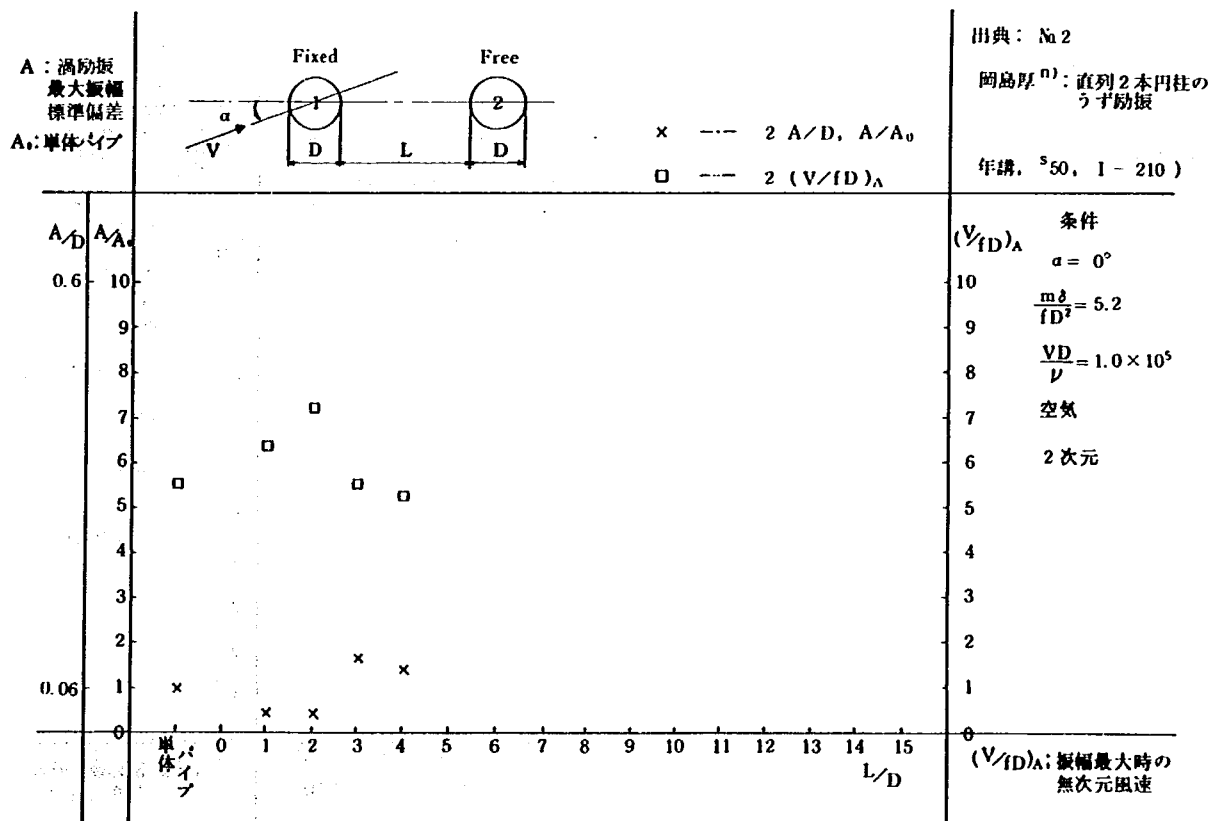
附図 2-1-1 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 100 \text{ mm}$ , 一次)



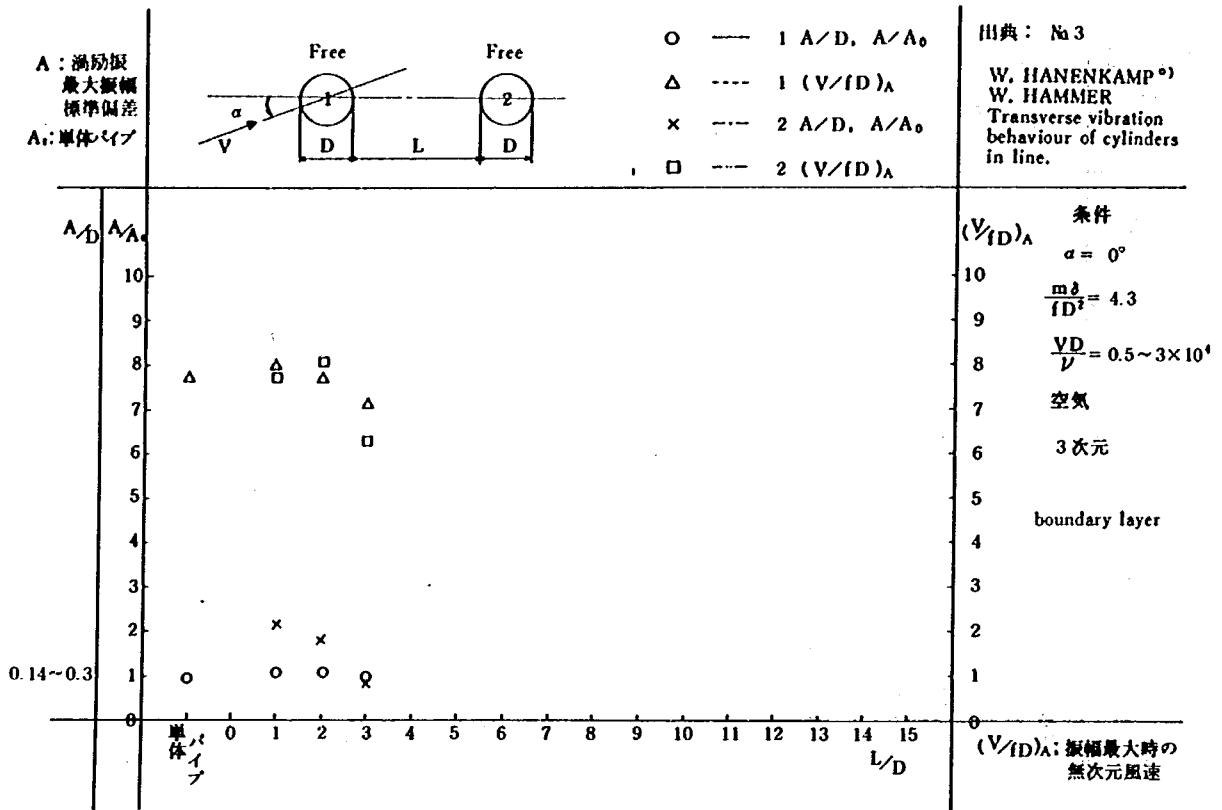
附図 2-1-2 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 100 \text{ mm}$ , 一次)



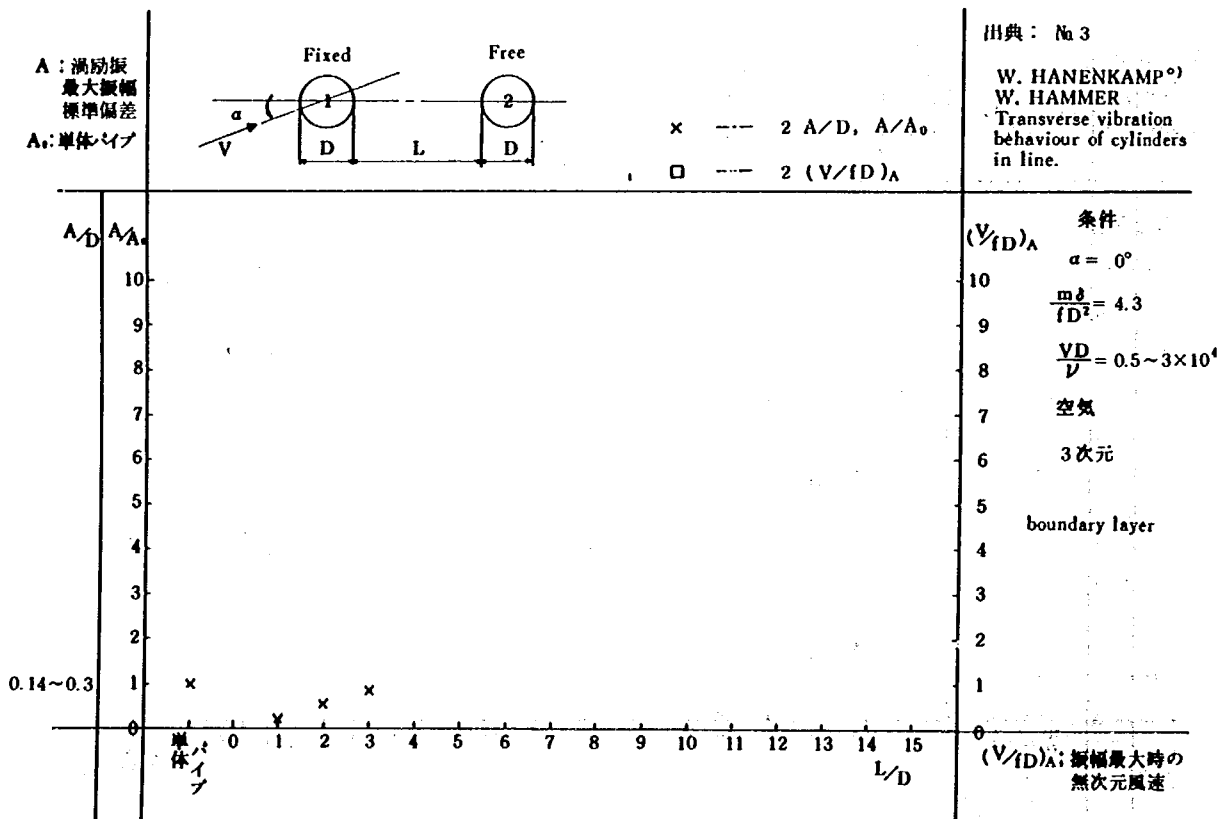
附図 2-1-3 流速-渦励振振幅図



附図 2-1-4 流速-渦励振振幅図

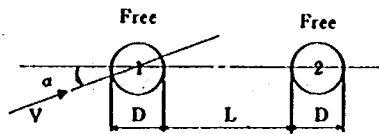


附図 2-1-5 流速-渦励振振幅図



附図 2-1-6 流速-渦励振振幅図

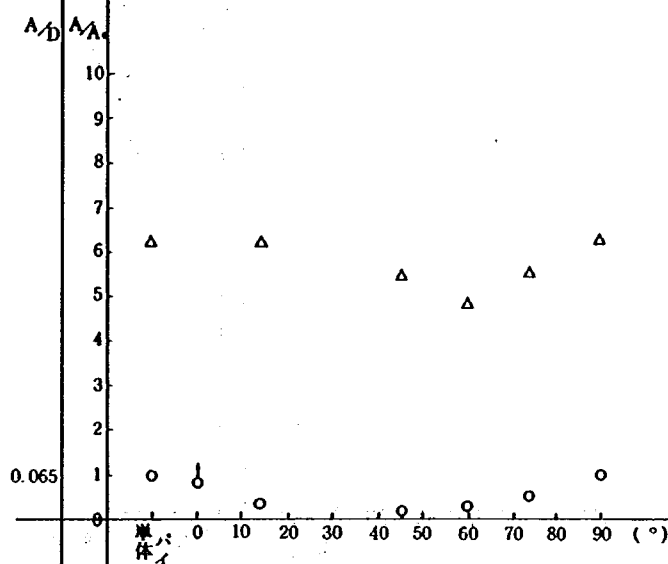
A: 渦励振  
最大振幅  
標準偏差  
A<sub>0</sub>: 単体バイブ



○ — 1 A/D, A/A<sub>0</sub>  
△ ---- 1 (V/fD)<sub>A</sub>

出典: No 4

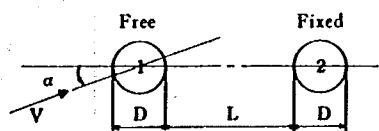
B. E. LEE<sup>1)</sup>; The Wind-induced vibration of a pair of model stacks.



条件  
(V/fD)<sub>A</sub> L/D = 1.3  
 $\frac{m \delta}{f D^2} = 48 \times \delta$   
 $\frac{V D}{\nu} = 1.5 \sim 3 \times 10^4$   
空気  
3次元  
boundary layer  
(V/fD)<sub>A</sub>: 振幅最大時の無次元風速

附図 2-1-7 流速-渦励振振幅図

A: 渦励振  
最大振幅  
平均振幅  
A<sub>0</sub>: 単体バイブ

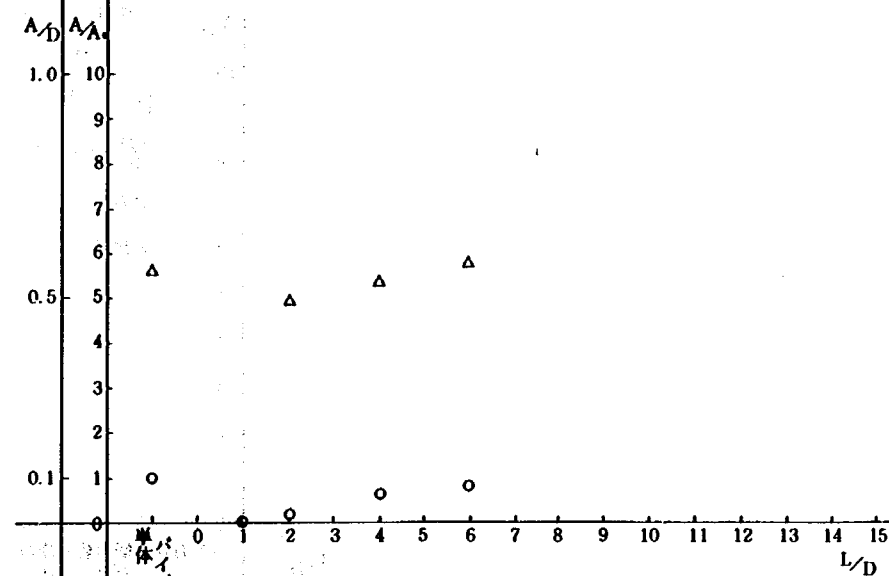


○ — 1 A/D, A/A<sub>0</sub>  
△ ---- 1 (V/fD)<sub>A</sub>

出典: No 1

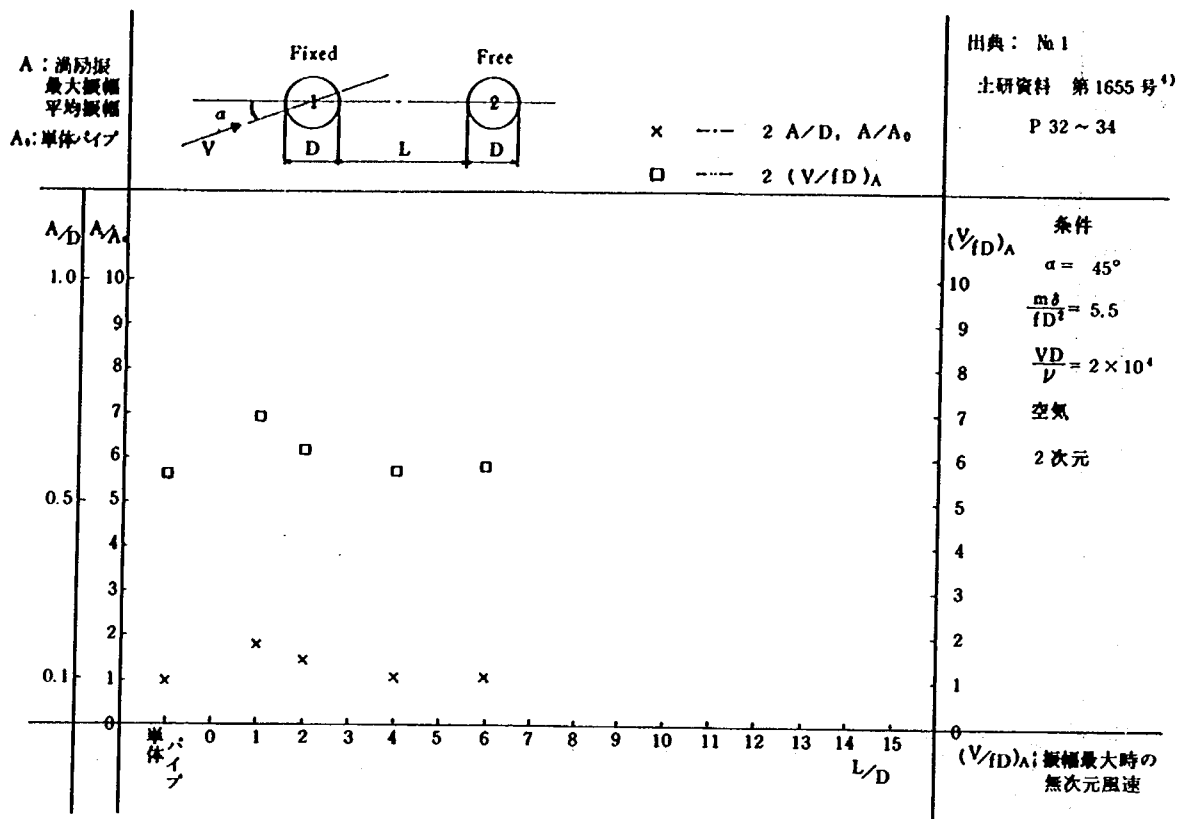
土研資料 第 1655 号<sup>4)</sup>

P 32 ~ 34

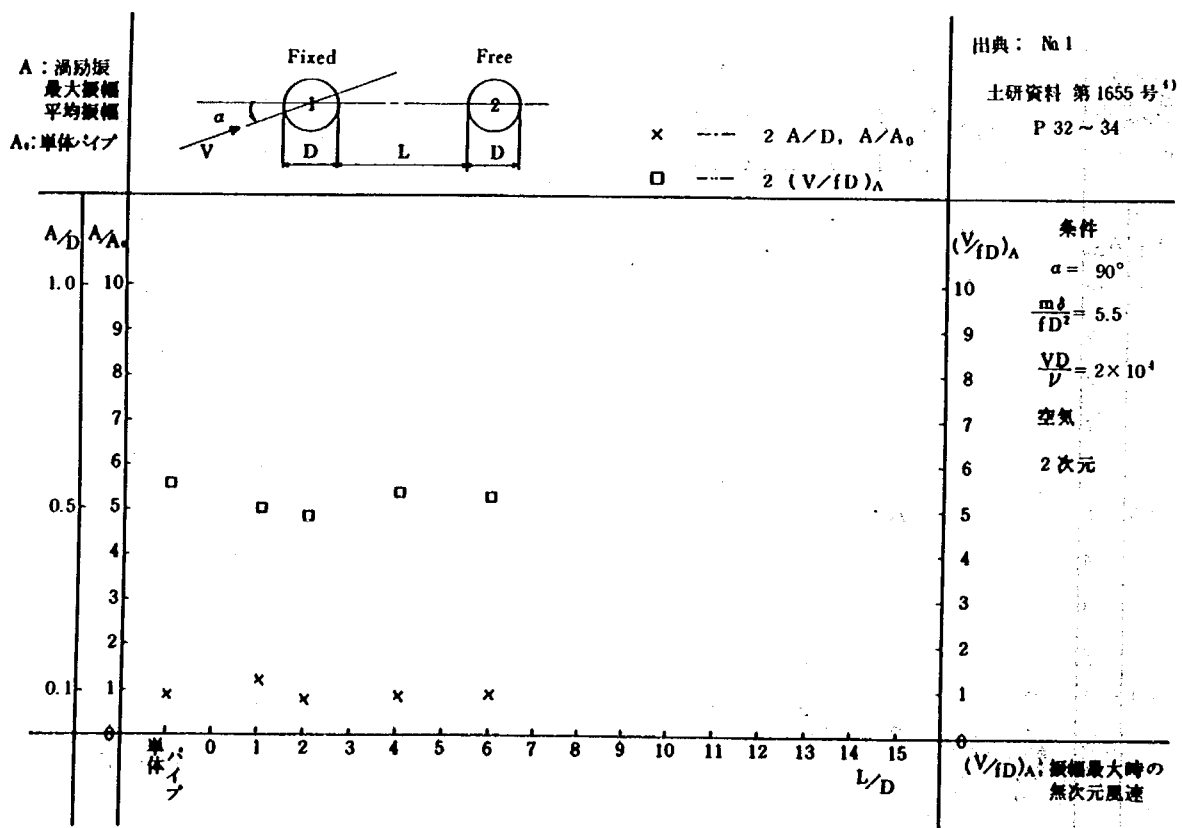


条件  
(V/fD)<sub>A</sub> α = 45°  
 $\frac{m \delta}{f D^2} = 5.5$   
 $\frac{V D}{\nu} = 2 \times 10^4$   
空気  
2次元  
(V/fD)<sub>A</sub>: 振幅最大時の無次元風速

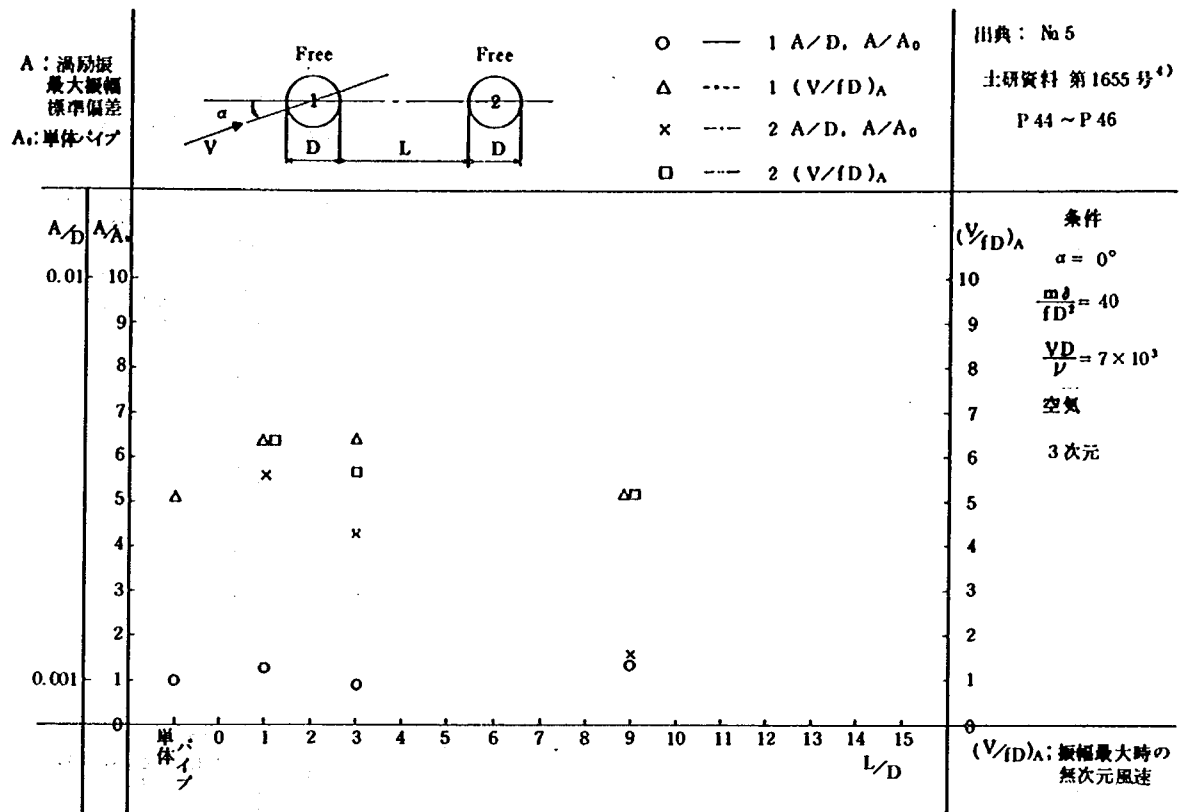
附図 2-1-8 流速-渦励振振幅図 (φ 100 mm, 一次)



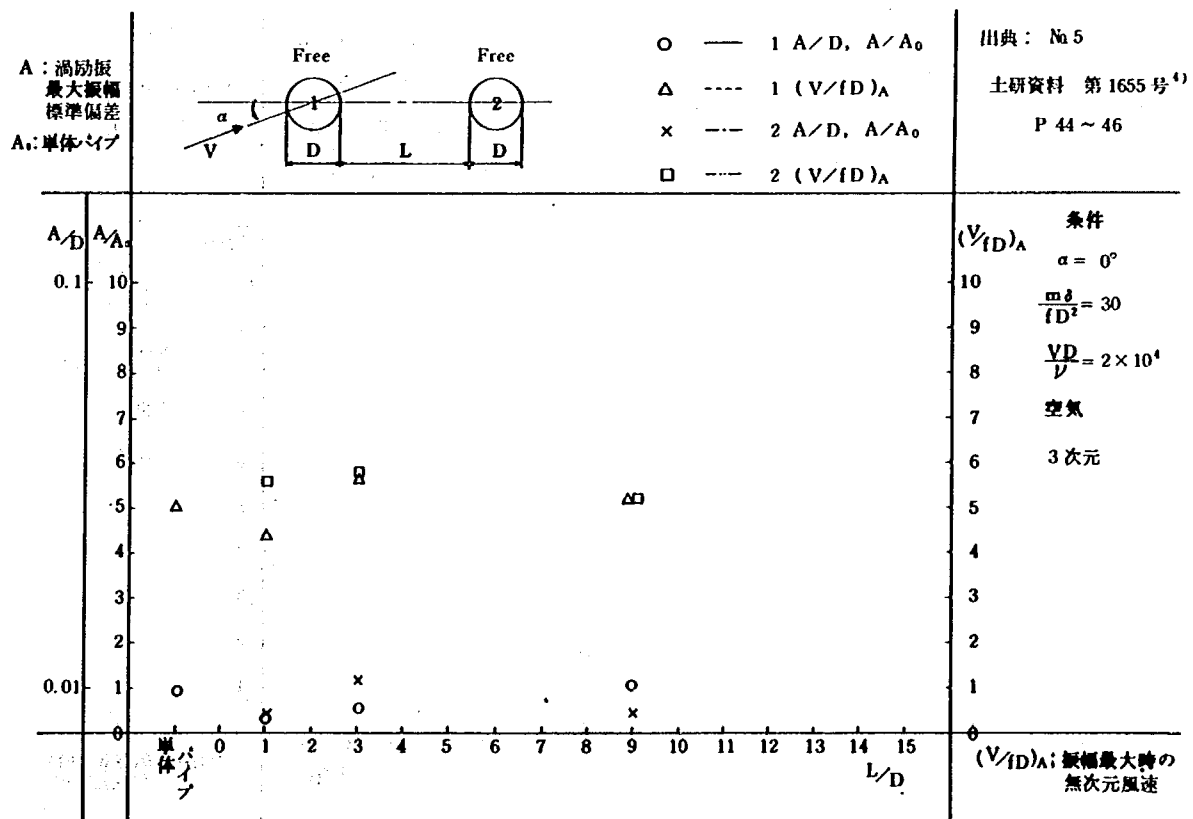
附図 2-1-9 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 100$  mm, 一次)



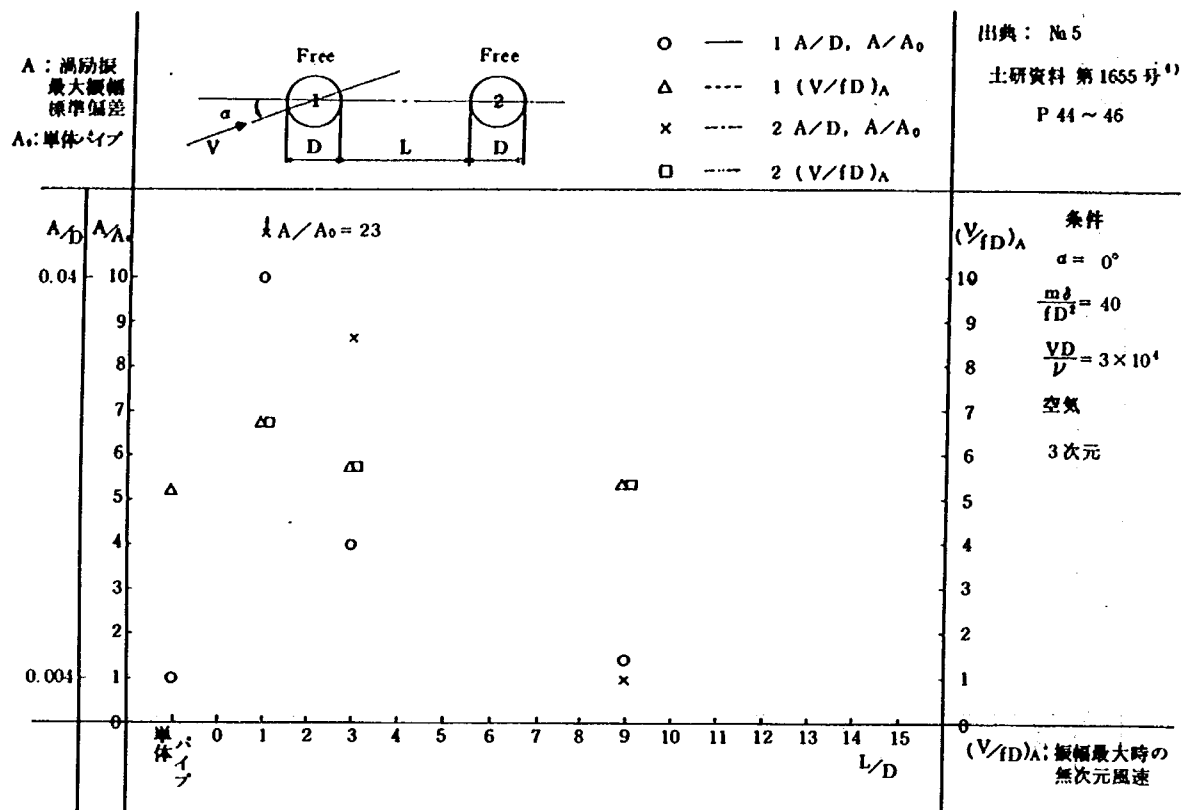
附図 2-1-10 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 100$  mm, 一次)



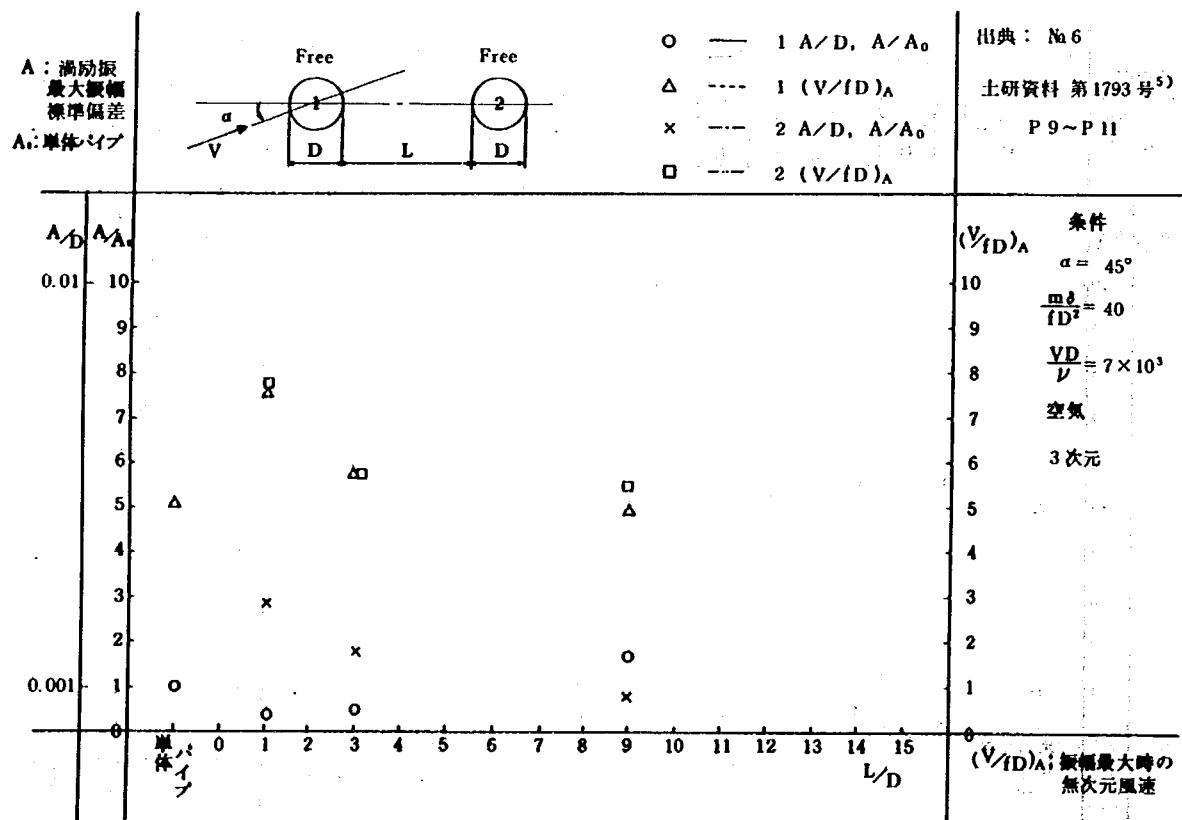
附図 2-1-11 流速-渦励振振幅図 (φ 50 mm, 一次)



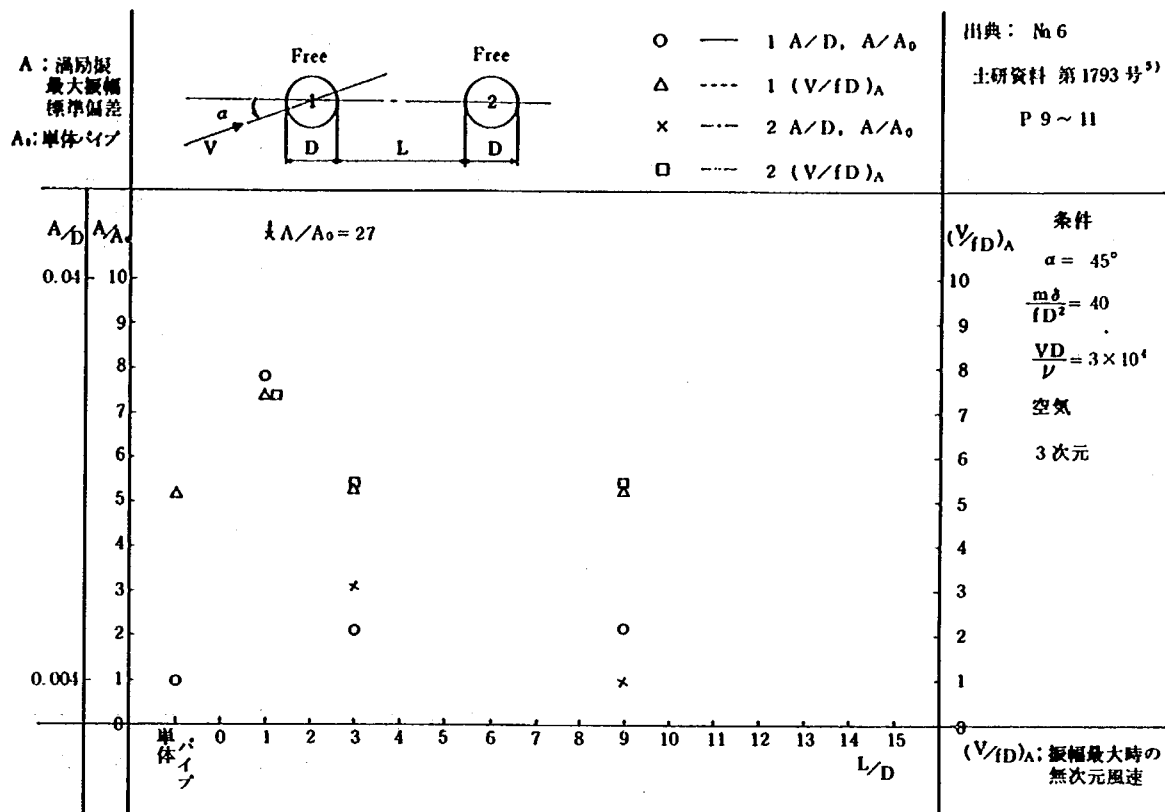
附図 2-1-12 流速-渦励振振幅図 (φ 70 mm, 一次)



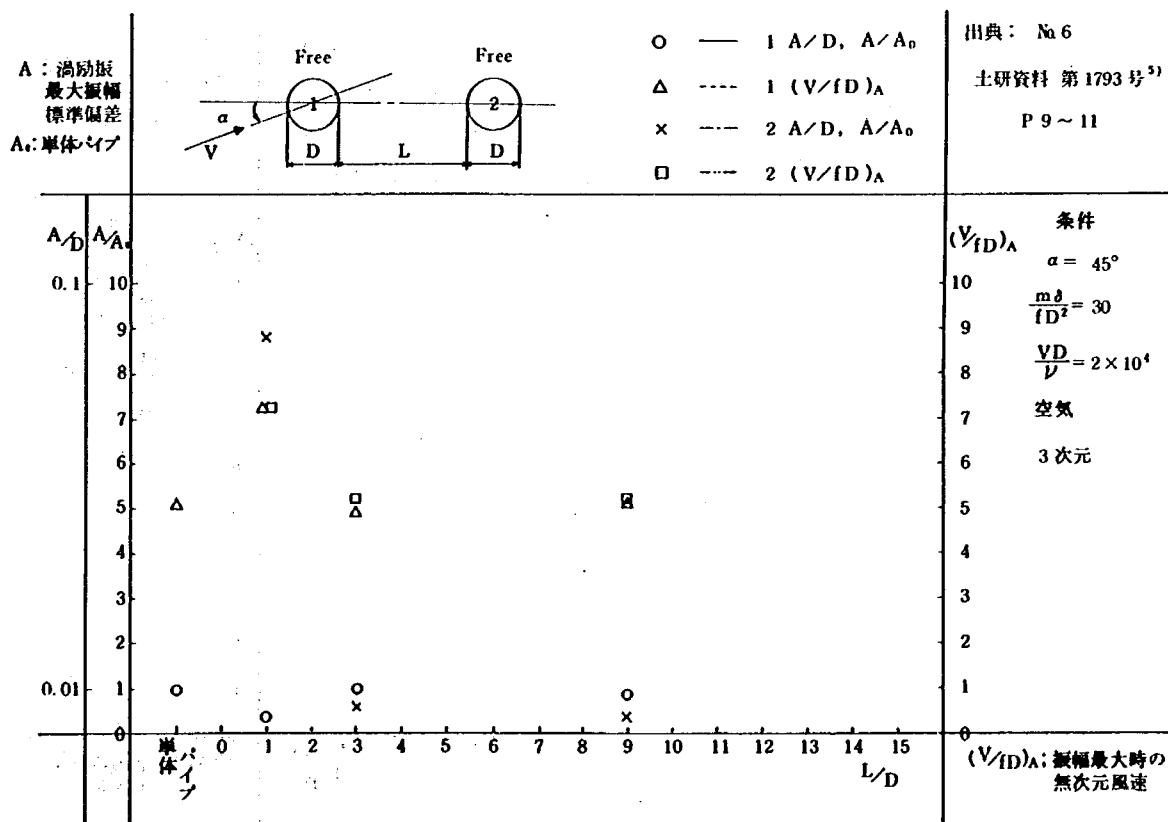
附図 2-1-13 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 50$  mm, 二次)



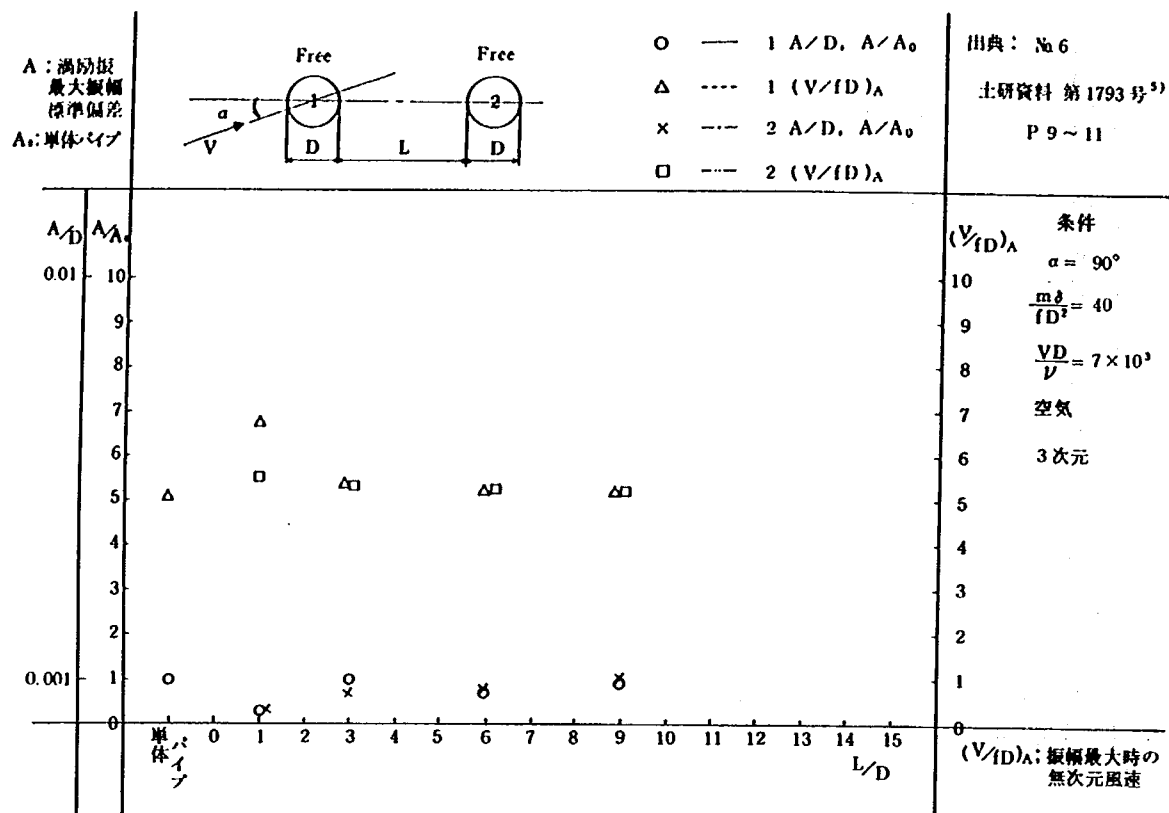
附図 2-1-14 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 50$  mm, 一次)



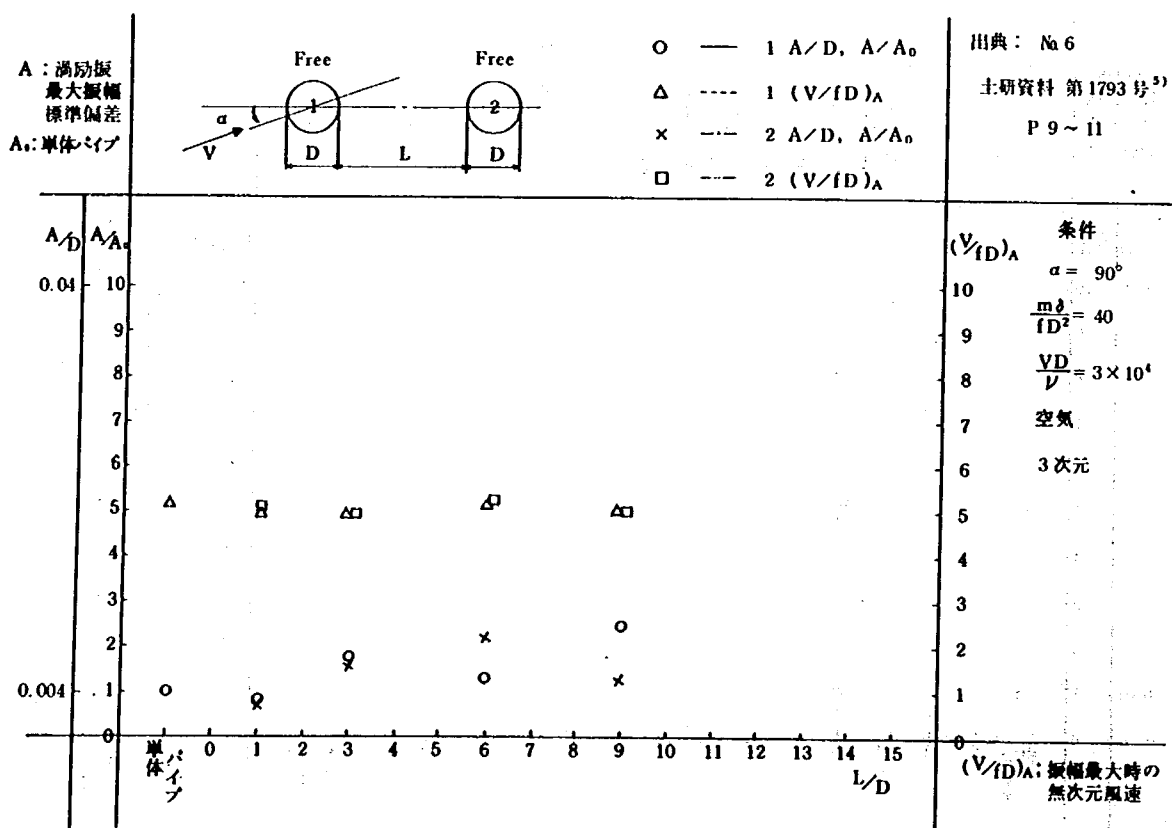
附図 2-1-15 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 50 \text{ mm}$ , 二次)



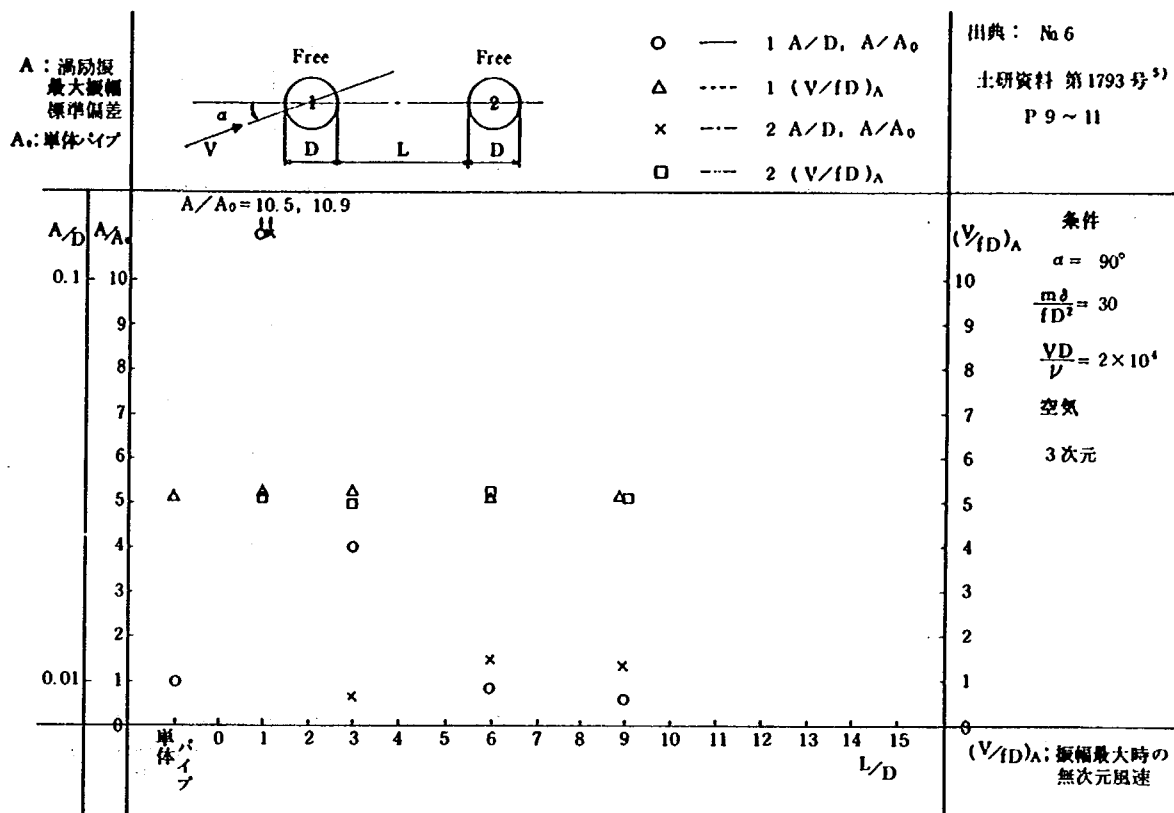
附図 2-1-16 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 70 \text{ mm}$ , 一次)



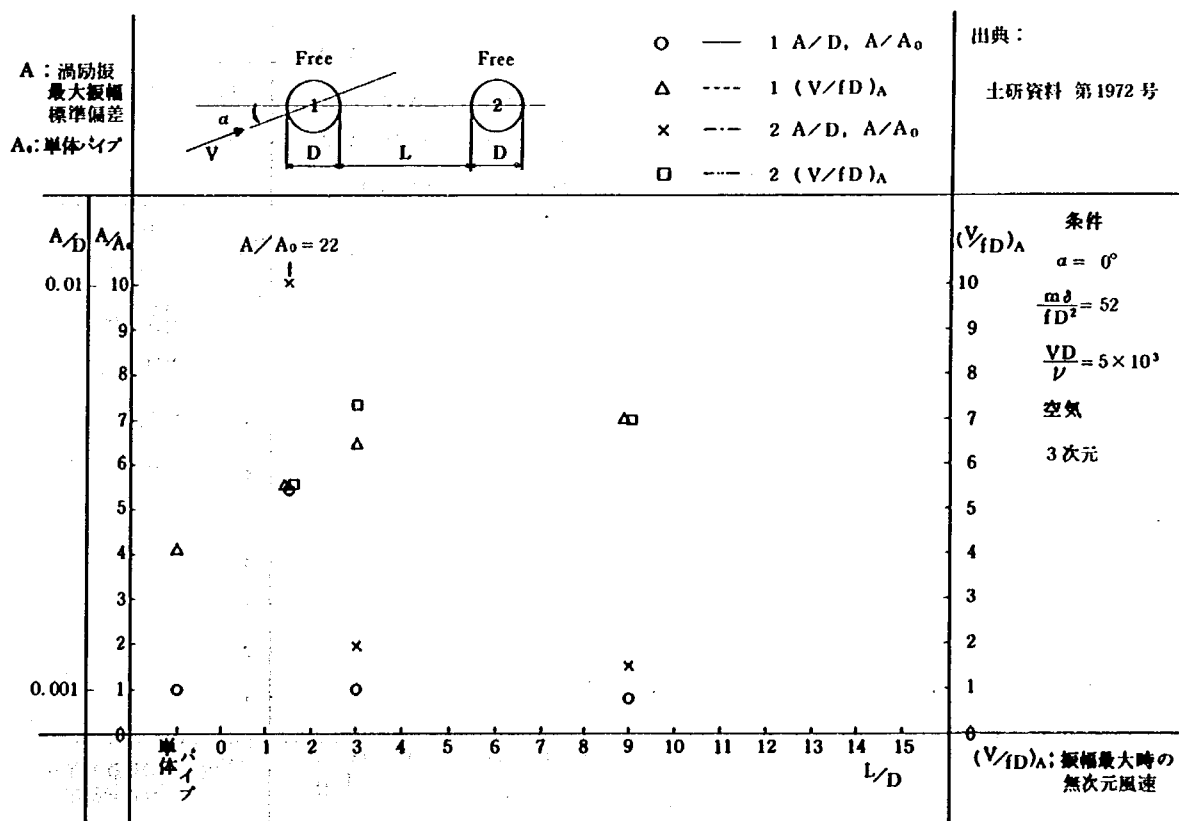
附図 2-1-17 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 50 \text{ mm}$ , 一次)



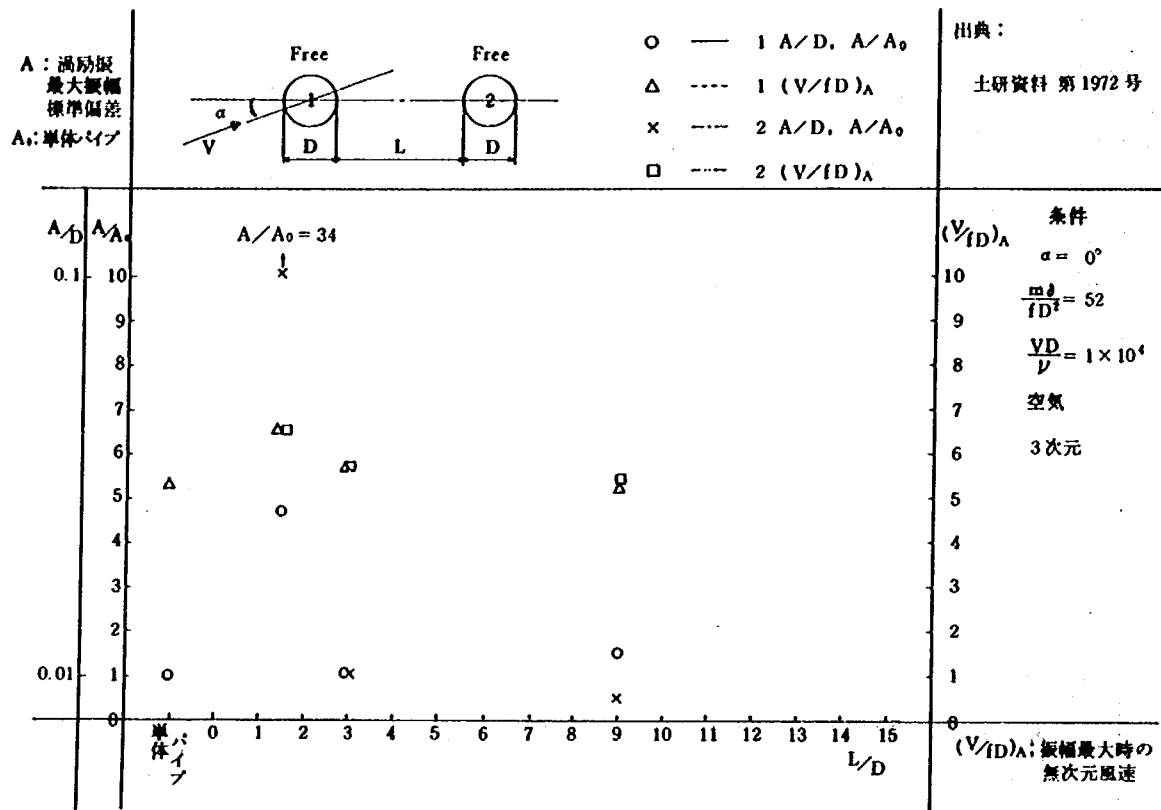
附図 2-1-18 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 50 \text{ mm}$ , 二次)



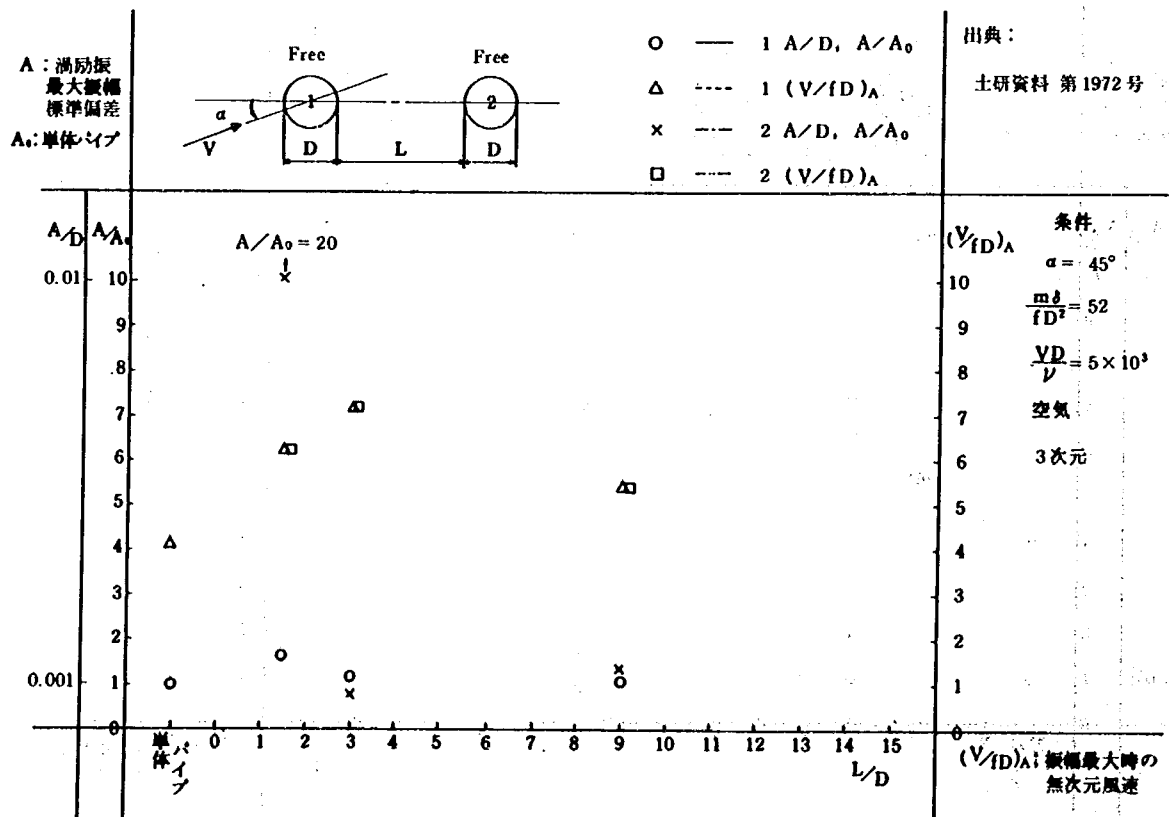
附図 2-1-19 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 70$  mm, 一次)



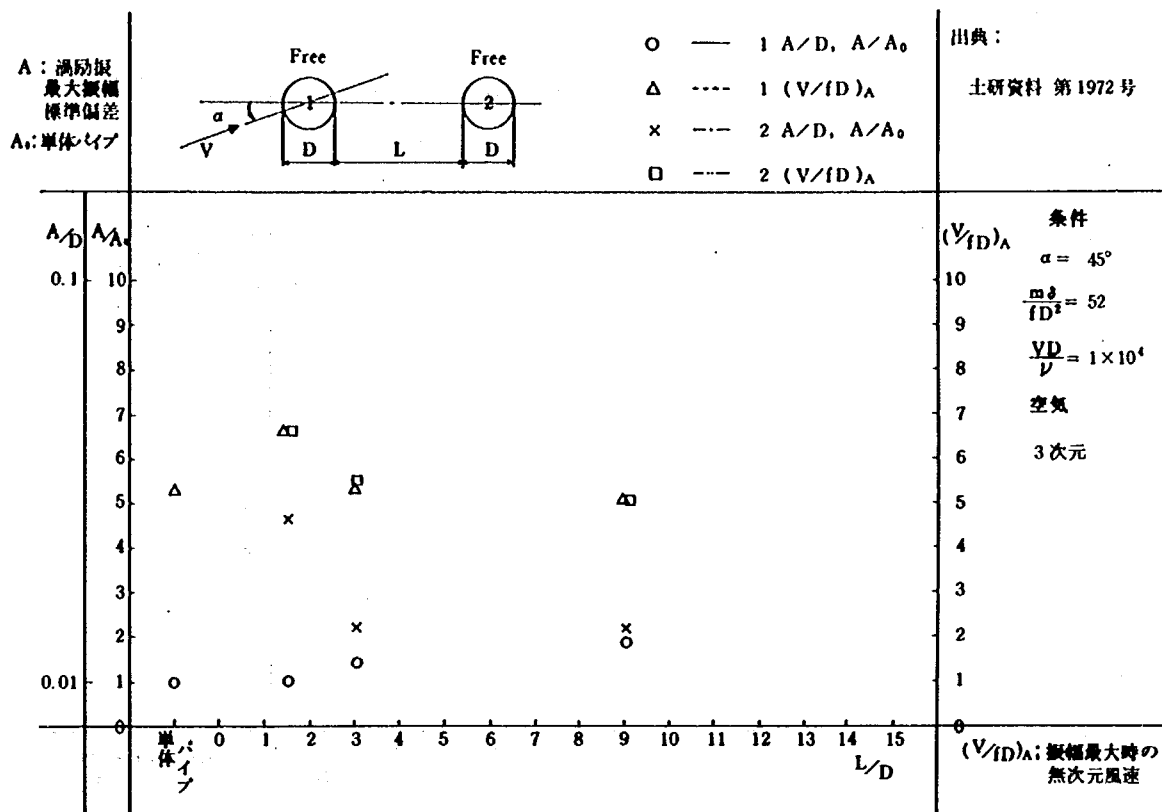
附図 2-1-20 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40$  mm, 一次)



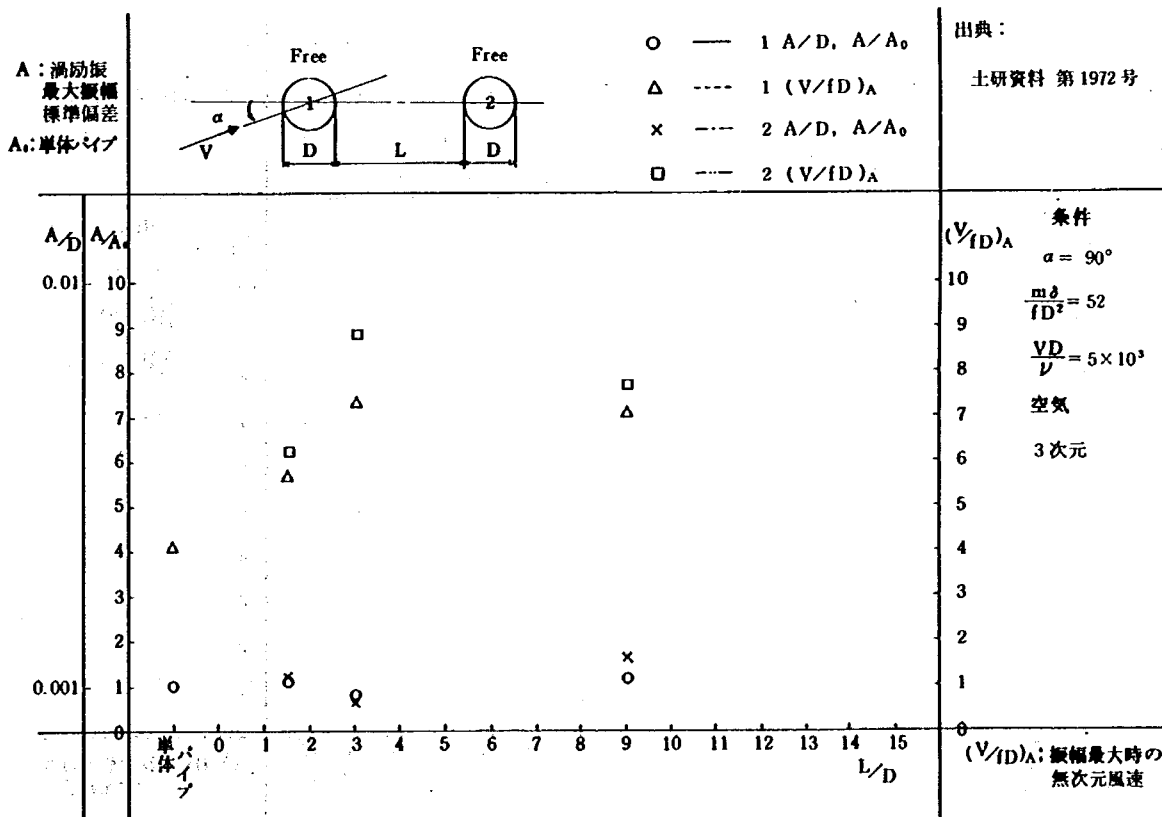
附図 2-1-21 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40 \text{ mm}$ , 二次)



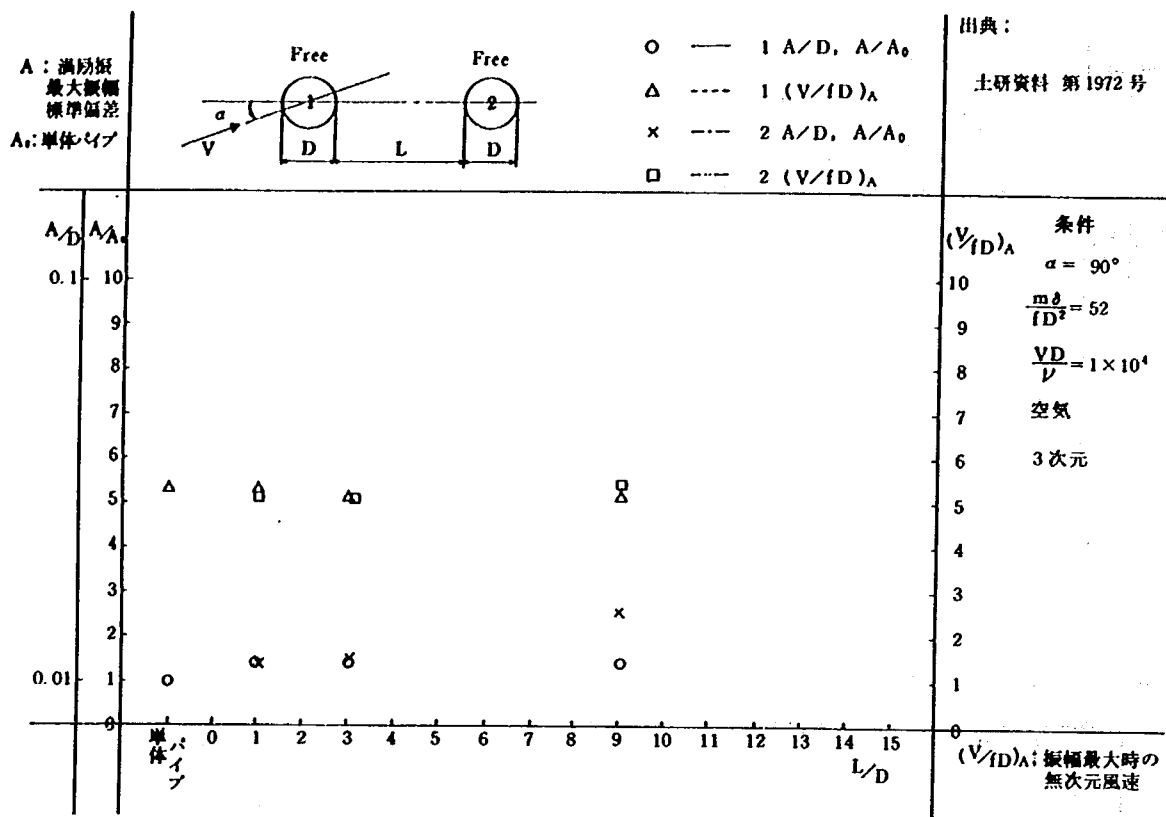
附図 2-1-22 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40 \text{ mm}$ , 一次)



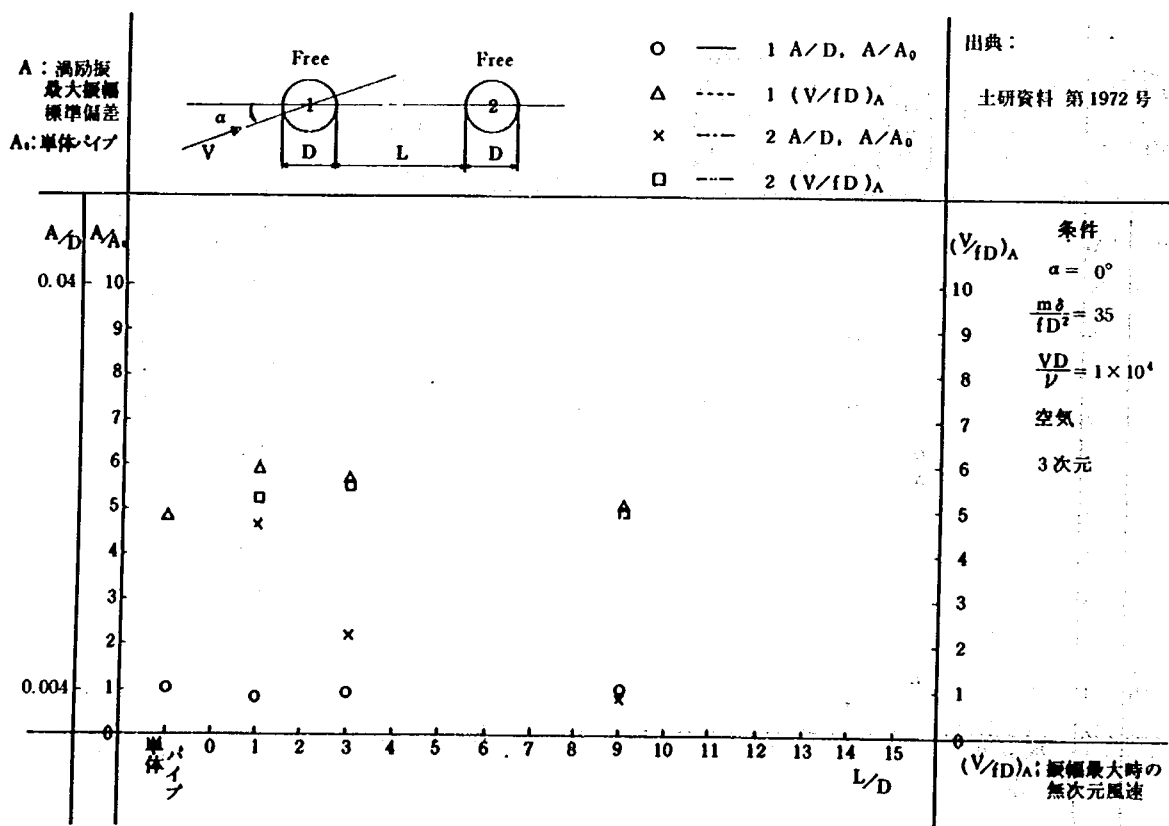
附図 2-1-23 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40$  mm, 二次)



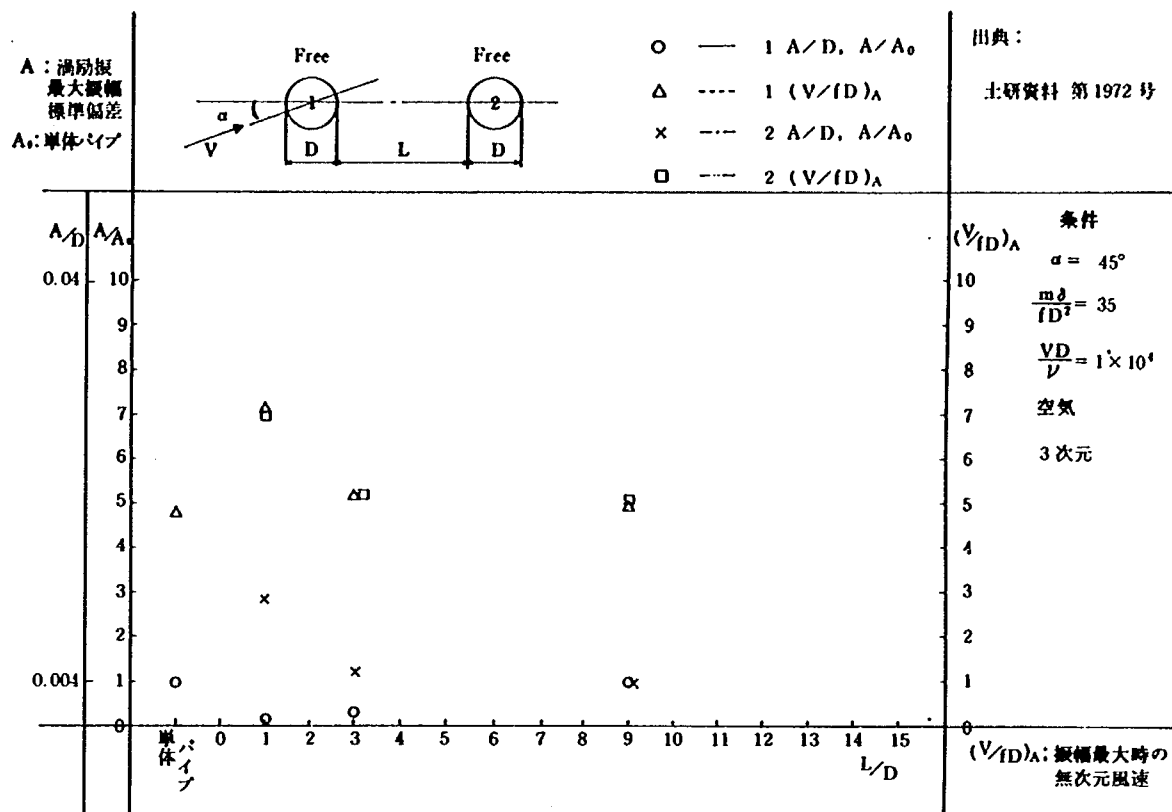
附図 2-1-24 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40$  mm, 一次)



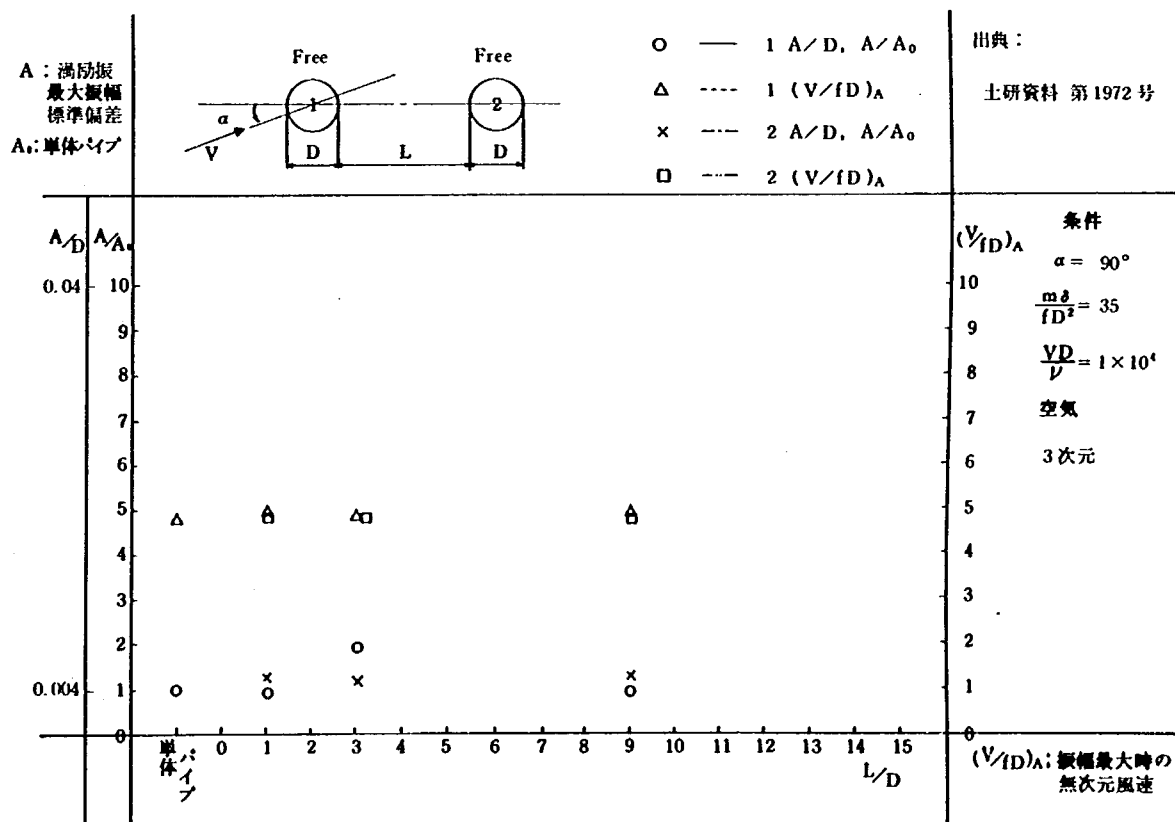
附図 2-1-25 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 40 \text{ mm}$ , 二次)



附図 2-1-26 流速-渦励振振幅図 ( $\phi 60 \text{ mm}$ , 一次)



附図 2-1-27 流速—渦励振振幅図 ( $\phi 60\text{mm}$ , 一次)



附図 2-1-28 流速—渦励振振幅図 ( $\phi 60\text{mm}$ , 一次)

海洋構造物の設計外力及び  
耐荷力に関する研究報告  
(IV-1982)

ISSN 0386-5878  
土木研究所資料第1972号  
昭和58年3月(1983)  
山本邦夫・佐藤弘史  
中神陽一・神崎一夫

キーワード パイプ構造物, 海洋構造物, 潮流力, 渦励振

要 旨

2本の3次元パイプ模型を流れ直角方向および流れに対して45°斜め方向流れ方向に配置させた場合の、渦励振特性を実験的に求めた。

また、潮流に対するパイプ構造物の設計の方法についてとりまとめた。

○

郵便はがき

305-□□

40円切手  
をはって  
下さい。

構  
造  
研  
究  
室  
御  
中

建設省土木研究所

茨城県筑波郡豊里町大字旭一番地

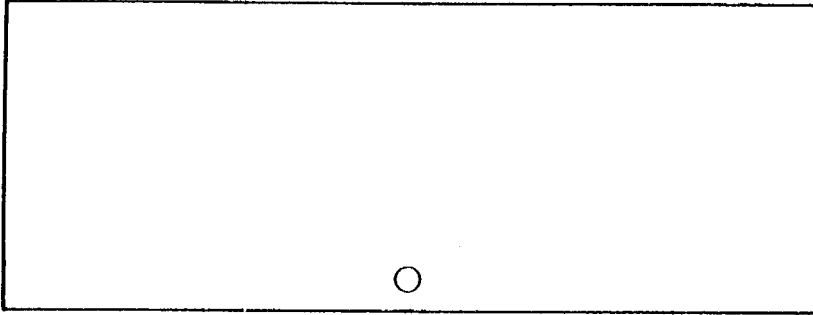
No. 16

No. 16

配布先氏名

配布先住所

○



土木研究所資料第1972号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住 所)

氏 名

⑩

○