

JAERI-Tech

96-028



もんじゅ 温度計ウエルの流動励起振動に関する水流実験

1996年6月

安濃田良成・黒田 猛・近藤昌也・村田秀男

日本原子力研究所
Japan Atomic Energy Research Institute

本レポートは、日本原子力研究所が不定期に公刊している研究報告書です。
入手の問い合わせは、日本原子力研究所研究情報部研究情報課（〒319-11 茨城県那珂郡東海村）あて、お申し越してください。なお、このほかに財団法人原子力公済会資料センター（〒319-11 茨城県那珂郡東海村日本原子力研究所内）で複写による実費頒布をおこなっております。

This report is issued irregularly.

Inquiries about availability of the reports should be addressed to Research Information Division, Department of Intellectual Resources, Japan Atomic Energy Research Institute, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-11, Japan.

© Japan Atomic Energy Research Institute, 1996

編集兼発行 日本原子力研究所
印 刷 (株)高野高速印刷

もんじゅ温度計ウェルの流動励起振動に関する水流実験

日本原子力研究所東海研究所原子炉安全工学部

安濃田良成・黒田 猛・近藤 昌也

村田 秀男

(1996年5月29日受理)

平成7年12月8日、動力炉・核燃料開発事業団の高速増殖原子炉もんじゅの2次主冷却系においてナトリウム漏洩事故が発生した。漏洩は2次主冷却配管に設置された温度計ウェルの先端部が折損し生じたものであるが、折損の原因は後流渦による流動励起振動によるものと考えられている。原研では、科学技術庁原子力安全局の「もんじゅナトリウム漏えい事故調査・検討タスクフォース」による原因究明に資するため、温度計ウェルの流動励起振動に関する水流実験を行った。

実験は、もんじゅ温度計ウェルが使用された条件を含む広範な条件について実施し、後流渦パターンとウェルの振動モードとの関係及び変位応答における減衰パラメータの影響を明らかにした。

Water Flow Simulation of the Flow-induced Vibration Phenomenon
of the Thermowell in the Prototype-FBR "Monju"

Yoshinari ANODA, Takeshi KURODA, Masaya KONDO
and Hideo MURATA

Department of Reactor Safety Research
Tokai Research Establishment
Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received May 29, 1996)

On December 8, 1995 a sodium leak event occurred in the secondary heat transport system (SHTS) of the prototype fast breeder reactor (FBR), Monju, owned and operated by the Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation (PNC). The direct cause of the leak was a break of a thermowell installed in the loop piping of the SHTS. The break of the thermowell is now believed to have resulted from the flow-induced vibrations due to vortex shedding from the thermowell subjected to a crossflow of sodium. The Japan Atomic Energy Research Institute has conducted a series of water flow model experiments on the flow-induced vibrations of the thermowell to contribute to the post-facto analyses of the event conducted by the Investigation Taskforce on the Sodium Leak Accident in Monju which was established by the Science and Technology Agency (STA) after this event.

The experiments were performed for a wide range of experimental conditions including the condition corresponding to the operating condition of the Monju's thermowell and showed the relationship between the vortex shedding pattern and the vibration mode as well as influence of the damping (stability) parameter on the amplitude of vibration.

Keywords : Karman Vortex, Flow-induced Vibration, Monju, Sodium Leak

目 次

1. まえがき	1
2. 実験装置	2
2.1 試験流路	2
2.2 試験体	2
2.3 測定系	2
2.4 流れの可視化	3
3. 特性試験	3
3.1 変位-ひずみ較正試験	3
3.2 固有振動数, 減衰率測定試験	3
4. 流動試験	4
4.1 実験条件	4
4.2 振動波形	4
4.3 変位応答	5
4.4 加速度応答	5
4.5 周波数スペクトル	5
4.6 渦パターン	6
4.7 流動試験結果のまとめ	6
5. 結 論	6
謝 辞	7
文 献	7
付録 A 1 データ処理手順	61
付録 A 2 加速度センサ特性試験結果	63

Contents

1. Introduction	1
2. Test Facility	2
2.1 Water Tunnel	2
2.2 Model Thermowell	2
2.3 Measurements	2
2.4 Flow Visualization	3
3. Model Characterization Tests	3
3.1 Calibration of Strain Gauge	3
3.2 Natural Frequency and Damping	3
4. Water Flow Test	4
4.1 Test Conditions	4
4.2 Time History of Vibrations	4
4.3 Amplitude Response	5
4.4 Acceleration Response	5
4.5 Frequency Spectrum	5
4.6 Vortex Patterns	6
4.7 Summary of Results	6
5. Conclusions	6
Acknowledgement	7
Reference	7
Appendix A1 Data Processing	61
Appendix A2 Characteristics of Accelerometer	63

1. まえがき

平成7年12月8日、動力炉・核燃料開発事業団（動燃）の高速増殖原型炉もんじゅの2次主冷却系においてナトリウム漏洩事故が発生した。漏洩は2次主冷却配管に設置された温度計ウエルの先端部が折損し生じたものであるが、折損の原因は後流渦による流動励起振動によるものと考えられている。原研では、科学技術庁原子力安全局の「もんじゅナトリウム漏えい事故調査・検討タスクフォース」による原因究明に資するため、温度計ウエルの流動励起振動に関する水流実験を行った。

一様流中に置かれた円柱の後流に規則的な渦が発生することは良く知られており、一般にカルマン渦と呼ばれている。T. von Karman [1]は、直列及び対称並列の渦配置はいずれも不安定で、交互渦のみが安定であることを理論的に示した。交互渦の放出振動数 f_s (Hz) は、ストロハル数 $St = f_s D / V$ (D : 直径、 V : 流速) で表すと、レイノルズ数 $Re = VD / \nu$ (ν : 動粘性係数) の関数として実験的に定まり、静止円柱の場合、 $500 < Re < 2 \times 10^5$ の範囲で $St = 0.18 \sim 0.21$ であることが知られている (図 1.1) [2]。

渦が成長しつつある側では円柱を過ぎる流速は反対側より速くなり、ベルヌーイの定理から圧力が低くなる。このため、円柱には渦の放出振動数 f_s に等しい変動揚力とその2倍の振動数の変動抗力が働く。従って、円柱が剛体でない場合、系の固有振動数 f_n が f_s に一致すると流れに直角（揚力）方向の振幅が極大になり、 $2f_s$ に一致すると流れ（抗力）方向の振幅が極大になる。このことは、 $St \cong 0.2$ と仮定すると、無次元速度 $V_r = V / f_n D \cong 5 (f_s / f_n)$ が、5のとき揚力方向の振幅が極大になり、2.5のとき抗力方向の振幅が極大になると言い換えることができる。一方、これらが強制振動系の共振現象に相当するのに対して、 $V_r \cong 2$ において自励振動（あるいは流体-構造連成振動）的な抗力方向の発振現象があり、特徴的な対称渦が観察されることをKing [3] が報告している。

事故後に動燃が行った調査の結果、もんじゅ温度計ウエルの先端部分（直径10 mm、長さ154 mm）が単純はりの1次モードで振動する場合の固有振動数 f_n は約260 Hzであることが確認された。また運転履歴から、定格100%流量（温度200℃、流速5.0 m/s）の運転期間（720時間）中に亀裂が発生したものと推定されている。動燃は、これらの条件が $V_r \cong 2$ に相当すること及び流体-構造連成振動解析の結果から、最初に亀裂発生の原因となった振動は対称渦による抗力方向の振動であったと結論づけた [4]。また、亀裂の進展により固有振動数が低下し、流量が一定であっても V_r が徐々に増加したものと考えられている [5]。

一方、実際の破断は100%流量時ではなく、40%流量（温度485℃、流速2.17 m/s）の試験運転時に破断が発生した。すなわち、固有振動数の低下により、このような低流速においても有意な振動が生じていたと考えられる。金属材料研究所（金材研）に

よる破面観察の結果、5～6回の段階的な亀裂進展を経て破断に至ったことがわかっており、今後、動燃は、亀裂発生から破損に至るまでの推移について、破壊力学的検討及び水中疲労確認試験により調査するとのことである [5]。

これらの状況を踏まえ、原研では、もんじゅ温度計ウエルが使用された条件を含む広範な条件において、後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係、及び変位応答における減衰パラメータの影響を明らかにするための実験を行うこととした。

2. 実験装置

2. 1 試験流路

図 2.1 に、本実験に用いた流路を示す。流路は、高さ 25 cm、幅 10 cm の透明アクリル製の水平ダクトで、入口から 2.5 m の位置に模擬温度計ウエルを設置した。流路の出入口には大容量のタンクを有し、渦巻きポンプにより常温の水を循環させることにより、試験部の流速を 2～6.4 m/s の範囲で任意に変化させることができる。流路の入口にはスムーズな曲面で構成される導入部を設けている。

2. 2 試験体

本実験において、Type-1、Type-2、Type-A、Type-B と呼ばれる 4 種類の試験体（模擬温度計ウエル）を用いた。Type-1 は、もんじゅ温度計ウエルとほぼ同一の外形寸法であるが、細管部の肉厚が約 1 mm と実物より薄い。Type-2 は、Type-1 の細管内にハンダを充填し、固有振動数を意図的に低下させたものである。これによって、同時に減衰パラメータが増加した。Type-A は、もんじゅ温度計ウエルをできるだけ忠実に模擬したものであり、Type-B は、Type-A の太管部が流路内に露出しないように、管台の高さを伸ばしたものである。なお、いずれもウエル内の熱電対は模擬していない。写真 2.1 に、左から Type-1、Type-A、Type-B を示す。また、図 2.2～2.4 に、Type-1、Type-A、Type-B の製作図を示す。

2. 3 測定系

模擬温度計ウエルの振動は、先端部に内蔵した加速度センサと段付き部近傍の細管表面に接着したひずみゲージによって測定した。加速度センサは、図 2.5 に示すように 2 対の圧電セラミック素子をエポキシ接着剤で充填固定した。ひずみゲージは、防水型（共和電業 KFWS-2N-120-C1-16 L3M2R）を使用し、流れ方向 2 面（上下流）と流れに直角方向 2 面の 4 箇所に着着した。流動試験において、ひずみゲージを接着する前と接着後の加速度変化を比較してひずみゲージの影響を確認した結果、有意な差は認められなかった。これら振動データを、ポンプ出口流量及び水温と共に、高速デジタルデータ収録器によってサンプリング速度 5 kHz で 2 分間収録した。周波数スペクトル分析等のデータ処理はオフラインで行った。付録 A1 にデータ処理手順を記述した。また、付録 A2 に加速度センサの特性試験結果を示す。

よる破面観察の結果、5～6回の段階的な亀裂進展を経て破断に至ったことがわかっており、今後、動燃は、亀裂発生から破損に至るまでの推移について、破壊力学的検討及び水中疲労確認試験により調査するとのことである [5]。

これらの状況を踏まえ、原研では、もんじゅ温度計ウエルが使用された条件を含む広範な条件において、後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係、及び変位応答における減衰パラメータの影響を明らかにするための実験を行うこととした。

2. 実験装置

2. 1 試験流路

図 2.1 に、本実験に用いた流路を示す。流路は、高さ 25 cm、幅 10 cm の透明アクリル製の水平ダクトで、入口から 2.5 m の位置に模擬温度計ウエルを設置した。流路の出入口には大容量のタンクを有し、渦巻きポンプにより常温の水を循環させることにより、試験部の流速を 2～6.4 m/s の範囲で任意に変化させることができる。流路の入口にはスムーズな曲面で構成される導入部を設けている。

2. 2 試験体

本実験において、Type-1、Type-2、Type-A、Type-B と呼ばれる 4 種類の試験体（模擬温度計ウエル）を用いた。Type-1 は、もんじゅ温度計ウエルとほぼ同一の外形寸法であるが、細管部の肉厚が約 1 mm と実物より薄い。Type-2 は、Type-1 の細管内にハンダを充填し、固有振動数を意図的に低下させたものである。これによって、同時に減衰パラメータが増加した。Type-A は、もんじゅ温度計ウエルをできるだけ忠実に模擬したものであり、Type-B は、Type-A の太管部が流路内に露出しないように、管台の高さを伸ばしたものである。なお、いずれもウエル内の熱電対は模擬していない。写真 2.1 に、左から Type-1、Type-A、Type-B を示す。また、図 2.2～2.4 に、Type-1、Type-A、Type-B の製作図を示す。

2. 3 測定系

模擬温度計ウエルの振動は、先端部に内蔵した加速度センサと段付き部近傍の細管表面に接着したひずみゲージによって測定した。加速度センサは、図 2.5 に示すように 2 対の圧電セラミック素子をエポキシ接着剤で充填固定した。ひずみゲージは、防水型（共和電業 KFWS-2N-120-C1-16 L3M2R）を使用し、流れ方向 2 面（上下流）と流れに直角方向 2 面の 4 箇所に着着した。流動試験において、ひずみゲージを接着する前と接着後の加速度変化を比較してひずみゲージの影響を確認した結果、有意な差は認められなかった。これら振動データを、ポンプ出口流量及び水温と共に、高速デジタルデータ収録器によってサンプリング速度 5 kHz で 2 分間収録した。周波数スペクトル分析等のデータ処理はオフラインで行った。付録 A1 にデータ処理手順を記述した。また、付録 A2 に加速度センサの特性試験結果を示す。

2. 4 流れの可視化

後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係を明らかにするため、流れの可視化を行った。レイノルズ数 Re がかなり高い ($Re \approx 10^5$ 程度) ため、渦を明瞭にとらえるのが難しかったが、以下の2つの手法によって比較的良好な映像を得た。

(1) 粒子トレーサ・レーザ光シート法

ポリスチレン粒子 (平均粒径 0.1 mm、比重 1.02) を混合した水を試験体の 1 m 上流に注入し、レーザ光シートにより流れ場全体の様子を観察した。1000 フレーム/秒の高速ビデオでは光量不足のため撮影できなかった。(イメージ・インテンシファイヤを使用する必要があったが、実験期間中に入手できなかった。) しかし、静止写真によって粒子の流跡をとらえることができた。

(2) コンデンスミルク法

Type-1 試験体を用い、先端から 15 mm で流れに直角位置に設けた直径 0.5 mm の2つの小孔からコンデンスミルクを注入し、渦の発生及び放出 (Shedding) の様子を観察した。1000 フレーム/秒の高速ビデオにより、渦生成の1サイクルを 10~16 フレームの連続画像としてとらえることができた。

3. 特性試験

3. 1 変位-ひずみ校正試験

流動試験によって発生する振動は、基本的に試験体の先端部分が単純はりの1次モードで振れ、高次モードの寄与は無視できる。また、微小変形のため分布加重と集中加重の違いが無視できるものとして、以下のような静的加重による変位-ひずみ校正試験を行った。図 3.1 に、変位-ひずみ校正試験の要領を示す。試験体を測定用治具に固定した後、試験体の一点にマイクロメータによって変位を与え、マイクロメータの読み (mm) と、各ひずみゲージの出力 (V) を記録した。校正試験は、各試験体共、流れに平行な正負方向と、流れに直角の正負方向の全ての変位について行った。図 3.2 に、ひずみゲージの取付け位置と変位を与えた位置を各試験体について示す。写真 3.1 は、試験体を治具に取付けた状況を示す。

変位-ひずみ校正試験結果を表 3.1~3.3、及び図 3.3~3.14 に示す。本校正曲線から得られる変位は加重点の変位である。ウエル先端の変位は、微小変形のため線形外挿で求められ、Type-1、Type-2、Type-A について係数 1.41、Type-B について係数 1.08 を乗じる。

3. 2 固有振動数、減衰率測定試験

図 3.15 に、固有振動数、減衰率測定試験の要領を示す。本試験は、試験体を実際にダクトに設置し、空気中で行った。試験体の先端に水平方向の初期変位を与え、これ

2. 4 流れの可視化

後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係を明らかにするため、流れの可視化を行った。レイノルズ数 Re がかなり高い ($Re \approx 10^5$ 程度) ため、渦を明瞭にとらえるのが難しかったが、以下の2つの手法によって比較的良好な映像を得た。

(1) 粒子トレーサ・レーザ光シート法

ポリスチレン粒子 (平均粒径 0.1 mm、比重 1.02) を混合した水を試験体の 1 m 上流に注入し、レーザ光シートにより流れ場全体の様子を観察した。1000 フレーム/秒の高速ビデオでは光量不足のため撮影できなかった。(イメージ・インテンシファイヤを使用する必要があったが、実験期間中に入手できなかった。) しかし、静止写真によって粒子の流跡をとらえることができた。

(2) コンデンスミルク法

Type-1 試験体を用い、先端から 15 mm で流れに直角位置に設けた直径 0.5 mm の2つの小孔からコンデンスミルクを注入し、渦の発生及び放出 (Shedding) の様子を観察した。1000 フレーム/秒の高速ビデオにより、渦生成の1サイクルを 10~16 フレームの連続画像としてとらえることができた。

3. 特性試験

3. 1 変位-ひずみ較正試験

流動試験によって発生する振動は、基本的に試験体の先端部分が単純はりの1次モードで振れ、高次モードの寄与は無視できる。また、微少変形のため分布加重と集中加重の違いが無視できるものとして、以下のような静的加重による変位-ひずみ較正試験を行った。図 3.1 に、変位-ひずみ較正試験の要領を示す。試験体を測定用治具に固定した後、試験体の一点にマイクロメータによって変位を与え、マイクロメータの読み (mm) と、各ひずみゲージの出力 (V) を記録した。較正試験は、各試験体共、流れに平行な正負方向と、流れに直角の正負方向の全ての変位について行った。図 3.2 に、ひずみゲージの取付け位置と変位を与えた位置を各試験体について示す。写真 3.1 は、試験体を治具に取付けた状況を示す。

変位-ひずみ較正試験結果を表 3.1~3.3、及び図 3.3~3.14 に示す。本較正曲線から得られる変位は加重点の変位である。ウエル先端の変位は、微少変形のため線形外挿で求められ、Type-1、Type-2、Type-A について係数 1.41、Type-B について係数 1.08 を乗じる。

3. 2 固有振動数、減衰率測定試験

図 3.15 に、固有振動数、減衰率測定試験の要領を示す。本試験は、試験体を実際にダクトに設置し、空気中で行った。試験体の先端に水平方向の初期変位を与え、これ

を開放した時に生じる自由振動波形から固有振動数 f_n と対数減衰率 δ を測定した。一例として、図 3.16 に、Type-A 試験体の振動波形を示す。Type-A 試験体の対数減衰率は 0.015 (減衰係数 0.2%) と測定されたが、この値は、もんじゅ温度計ウエルの熱電対シースが挿入されていない場合の実測値 [4] に相当する。表 3.4 に、各試験体の測定結果、及びこれらを基に計算された水流動試験条件における減衰パラメータ K_s ($K_s = 2m\delta / (\rho D^2)$ 、 m : 単位長さあたりの質量、 ρ : 流体密度) を示す。

4. 流動試験

4. 1 実験条件

表 4.1 に実験条件を示す。実験は、大気圧下で約 20℃ の水を用いて行った。表 4.2 に示すもんじゅの各種運転時の流体条件 [4] と比較すると、 Re 数はやや低いものの、流速範囲はカバーしており、また、図 1.1 に示すように、この程度の Re 数の差では、 St 数はほぼ等しいと考えられる。但し、最初に述べたように、本実験は、もんじゅ温度計ウエルを直接模擬するというより、より広範囲な条件において後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係、及び変位応答における減衰パラメータの影響を明らかにすることを目的としており、そのため、意図的に固有振動数や減衰パラメータを変えた試験体を用いた。

4. 2 振動波形

実験は、流速を段階的に変化させ、各ステップで振動データを 2 分間収録した。図 4.1、4.2 に Type-1 試験体 ($f_n = 200$ Hz、 $K_s = 0.19$) の振動波形を示す。図 4.1 は、無次元流速をパラメータにして、ウエル先端の流れ方向変位と流れに直角方向の変位の時間変化を示している。また、図 4.2 (a)~(f) にウエル先端変位の 2 次元軌跡 (リサーチ) を示す。これらの図で、変位はウエル細管部直径 ($D = 10$ mm) に対する無次元変位で表されている。 $V_r = 1.5$ では殆ど振動せず、 $V_r = 1.8 \sim 2.4$ において主に流れ方向の振幅が大きくなった。図 4.2 (b)~(d) で、流れ方向振動にほぼ比例して直角方向の振動も増加しており、あたかも流れ方向に一定の角度で振動しているように見えるが、これはひずみゲージの取付け角度の誤差によるものと思われる。さらに、 $V_r = 2.7$ 以上では流れに直角方向の振幅が顕著になった。ここでは、流れ方向振動が流れに直角方向振動の 2 倍の振動数で生じているため、変位軌跡が 8 の字を描いている。

同様に、図 4.3、4.4 に Type-2 試験体 ($f_n = 120$ Hz、 $K_s = 0.82$) の振動波形を示す。この場合、 $V_r = 1.5$ では殆ど振動せず、 $V_r = 2.0$ において流れ方向の振幅が幾分大きくなったが、 $V_r = 2.5$ において一旦減少し、 $V_r = 2.8 \sim 3.0$ において再び流れ方向の振幅が大きくなった。 $V_r = 3.5$ 以上では流れ方向の振幅が小さくなり、流れに直角方向の振幅が非常に大きくなった。

を開放した時に生じる自由振動波形から固有振動数 f_n と対数減衰率 δ を測定した。一例として、図 3.16 に、Type-A 試験体の振動波形を示す。Type-A 試験体の対数減衰率は 0.015 (減衰係数 0.2%) と測定されたが、この値は、もんじゅ温度計ウエルの熱電対シースが挿入されていない場合の実測値 [4] に相当する。表 3.4 に、各試験体の測定結果、及びこれらを基に計算された水流動試験条件における減衰パラメータ K_s ($K_s = 2m\delta / (\rho D^2)$ 、 m : 単位長さあたりの質量、 ρ : 流体密度) を示す。

4. 流動試験

4. 1 実験条件

表 4.1 に実験条件を示す。実験は、大気圧下で約 20℃ の水を用いて行った。表 4.2 に示すもんじゅの各種運転時の流体条件 [4] と比較すると、 Re 数はやや低いものの、流速範囲はカバーしており、また、図 1.1 に示すように、この程度の Re 数の差では、 St 数はほぼ等しいと考えられる。但し、最初に述べたように、本実験は、もんじゅ温度計ウエルを直接模擬するというより、より広範囲な条件において後流渦パターンとウエルの振動モードとの関係、及び変位応答における減衰パラメータの影響を明らかにすることを目的としており、そのため、意図的に固有振動数や減衰パラメータを変えた試験体を用いた。

4. 2 振動波形

実験は、流速を段階的に変化させ、各ステップで振動データを 2 分間収録した。図 4.1、4.2 に Type-1 試験体 ($f_n = 200$ Hz、 $K_s = 0.19$) の振動波形を示す。図 4.1 は、無次元流速をパラメータにして、ウエル先端の流れ方向変位と流れに直角方向の変位の時間変化を示している。また、図 4.2 (a)~(f) にウエル先端変位の 2 次元軌跡 (リサーチ) を示す。これらの図で、変位はウエル細管部直径 ($D = 10$ mm) に対する無次元変位で表されている。 $V_r = 1.5$ では殆ど振動せず、 $V_r = 1.8 \sim 2.4$ において主に流れ方向の振幅が大きくなった。図 4.2 (b)~(d) で、流れ方向振動にほぼ比例して直角方向の振動も増加しており、あたかも流れ方向に一定の角度で振動しているように見えるが、これはひずみゲージの取付け角度の誤差によるものと思われる。さらに、 $V_r = 2.7$ 以上では流れに直角方向の振幅が顕著になった。ここでは、流れ方向振動が流れに直角方向振動の 2 倍の振動数で生じているため、変位軌跡が 8 の字を描いている。

同様に、図 4.3、4.4 に Type-2 試験体 ($f_n = 120$ Hz、 $K_s = 0.82$) の振動波形を示す。この場合、 $V_r = 1.5$ では殆ど振動せず、 $V_r = 2.0$ において流れ方向の振幅が幾分大きくなったが、 $V_r = 2.5$ において一旦減少し、 $V_r = 2.8 \sim 3.0$ において再び流れ方向の振幅が大きくなった。 $V_r = 3.5$ 以上では流れ方向の振幅が小さくなり、流れに直角方向の振幅が非常に大きくなった。

4. 3 変位応答

図 4.5～4.8 に、各試験体の無次元流速とウェル先端の無次元変位の関係（変位応答線図）を示す。図 4.5 (a) は Type-1 試験体の平均変位（振動中心）、図 4.5 (b) はウェル先端の流れ方向振幅と流れに直角方向の振幅を示す。以下同様に、図 4.6 (a), (b) に Type-2 試験体の平均変位と振幅、図 4.7 (a), (b) に Type-A 試験体の平均変位と振幅、及び図 4.8 (a), (b) に Type-B 試験体の平均変位と振幅を示す。平均変位は、試験体が流体から受ける抗力の時間平均に比例すると考えられる。本実験の流速範囲内では、いずれの試験体においても実験値より求めた C_d/k_e (C_d : 抗力係数、 k_e : 等価バネ定数) はほぼ一定となり、抗力が振幅の影響を受けるような傾向は見られなかった。一方、振幅は V_r によって大きく変化し、ピーク点では平均変位の数倍から 10 倍にも達する。図 4.6 (b) より、Type-2 試験体 の場合には、 $V_r \approx 2$ と 3 の 2 箇所流れ方向振動のピークがあり、 $V_r \approx 5$ で流れに直角方向の振動が非常に大きくなることがわかる。図 4.9、4.10 に全試験体に対する流れ方向及び流れに直角方向の変位応答線図の比較を示す。図 4.9 より、 $V_r \approx 2$ において全ての試験体の流れ方向振幅が大きくなること、また、減衰パラメータが大きいほど振幅が減少することが明らかである。

4. 4 加速度応答

図 4.11 と 図 4.12 に、それぞれ Type-A と Type-B 試験体における無次元流速とウェル先端の加速度振幅（流れ方向及び流れに直角方向）の関係を示す。これらは、変位応答線図（図 4.7 (b)、図 4.8 (b)）と相似であることがわかる。

4. 5 周波数スペクトル

図 4.13 (a) に Type-1 試験体の流れ方向変位の周波数スペクトル、図 4.13 (b) に流れに直角方向変位の周波数スペクトルを、いずれも無次元流速をパラメータにして示す。但し、個々の密度関数はピーク値で正規化され、縦軸をずらしてプロットされている。同様に、図 4.14 (a), (b) に Type-2 試験体、図 4.15 (a), (b) に Type-A 試験体、図 4.16 (a), (b) に Type-B 試験体の流れ方向変位及び流れに直角方向変位の周波数スペクトルを示す。図 4.13 (a) から、Type-1 試験体の流れ方向の振動は、 $V_r = 1.8 \sim 2.1$ では主として固有振動数である 200 Hz で振動しており、 $V_r = 2.7 \sim 3.0$ では渦周波数の 2 倍の振動数で振動していることがわかる。また、 $V_r = 2.4$ はちょうど遷移領域にあたり、固有振動数と渦周波数の 2 倍の振動数が同程度の強さで現れている。また、図 4.13 (b) より、 $V_r = 2.7 \sim 3.0$ では流れに直角方向の振動が卓越していることが明らかである。

無次元流速と試験体の主振動数及び渦周波数との関係は、図 4.17～4.20 によって、より明瞭に示される。縦軸は、主振動数及び渦周波数を各試験体の固有振動数との比で表している。図中 ① と表示した斜線は、 $St = 0.2$ （一定）と仮定した場合の渦周波数の変化を示しており、② と表示した斜線は、その 2 倍の周波数を示している。また、対応する流速範囲における振動モード（代表的な変位軌跡形状）を付記した。Type-1 試験体の場合、 $V_r = 2.4$ 以後、試験体が $2f_s$ と共振し、渦周波数がロックインの傾向を

示している（図 4.17）。Type-2 試験体の場合も同様に、 $V_r=2.4\sim 3.2$ において、試験体が $2f_v$ と共振し、渦周波数がロックインしている。さらに、 $V_r=4.5$ 以上で試験体が渦周波数と共振しているのがわかる（図 4.18）。Type-A 及び Type-B 試験体の場合は、振動の発生（ $V_r=1.4$ 以上）に伴って渦周波数が $St=0.2$ の線からほぼ平行にシフトしている。但し、試験体の主振動数は常に固有振動数に一致している（図 4.19、図 4.20）。

4. 6 渦パターン

写真 4.1 及び写真 4.2 は、無次元流速 $V_r=1.8$ 及び $V_r=2.5$ において、Type-1 試験体周りの流れを粒子トレーサ・レーザ光シート法によって可視化したものである。それぞれ、(a) は、ウェル先端から約 3 cm 高の水平面をレーザ光シートで照射し、下流側上方より撮影（ $f4.5$ 、 $1/60$ 秒、ASA800）、(b) は、ウェル先端部の垂直面をレーザ光シートで照射し、側方より撮影した。管軸にほぼ平行に渦管が放出されており、約 $5D$ （ D ：直径）後方で消失しているのがわかる。

写真 4.3～4.5 は、無次元流速 $V_r=2$ 、 2.4 及び 3 において、Type-1 試験体から放出される渦パターンをコンデンスミルク法によって可視化したものである。画像間の時間間隔は 1 ms で、左上から右下に時間が進んでいる。写真 4.3 より、 $V_r=2$ の時に対称渦が発生しており、ウェルの流れ方向振動と同期していることがわかる。また、 $V_r=2.4$ の時（写真 4.4）、交互渦によって流れ方向振動が発生し、 $V_r=3$ の時（写真 4.5）、交互渦によって流れに直角方向の振動が発生していることが確認された。

4. 7 流動試験結果のまとめ

以上のように、4 種類の試験体について行った流動試験の結果を表 4.3～4.6 にまとめた。これらの表において、主振動数及び渦周波数は、図 4.13～4.16 の変位の周波数スペクトルから推定した。なお、主振動モードについて、流れ方向振動をインライン、流れに直角方向の振動をクロスフローと記述している。

5. 結論

- (1) $V_r \doteq 2$ 前後において、対称渦により励起された流れ方向の振動が発生する。この振動の周波数は模擬ウェルの固有振動数に等しい。本実験で用いた試験体では、 $V_r=1.3\sim 1.5$ からこのような振動が開始した。
- (2) $V_r \doteq 2.7$ 前後において、交互渦により励起された流れ方向の振動が発生する。この振動の周波数は渦周波数の 2 倍に等しい。
- (3) $V_r \doteq 2.7$ 前後において、 $K_s = 0.19$ の場合は、流れ方向に渦周波数の 2 倍、流れに直角方向に渦周波数の振動が増大した。一方、 $K_s = 0.82$ の場合は、流れに直角方向の振幅は微少であった。

示している（図 4.17）。Type-2 試験体の場合も同様に、 $V_r=2.4\sim 3.2$ において、試験体が $2f_v$ と共振し、渦周波数がロックインしている。さらに、 $V_r=4.5$ 以上で試験体が渦周波数と共振しているのがわかる（図 4.18）。Type-A 及び Type-B 試験体の場合は、振動の発生（ $V_r=1.4$ 以上）に伴って渦周波数が $St=0.2$ の線からほぼ平行にシフトしている。但し、試験体の主振動数は常に固有振動数に一致している（図 4.19、図 4.20）。

4. 6 渦パターン

写真 4.1 及び写真 4.2 は、無次元流速 $V_r=1.8$ 及び $V_r=2.5$ において、Type-1 試験体周りの流れを粒子トレーサ・レーザ光シート法によって可視化したものである。それぞれ、(a) は、ウェル先端から約 3 cm 高の水平面をレーザ光シートで照射し、下流側上方より撮影（ $f4.5$ 、 $1/60$ 秒、ASA800）、(b) は、ウェル先端部の垂直面をレーザ光シートで照射し、側方より撮影した。管軸にほぼ平行に渦管が放出されており、約 $5D$ （ D ：直径）後方で消失しているのがわかる。

写真 4.3～4.5 は、無次元流速 $V_r=2$ 、 2.4 及び 3 において、Type-1 試験体から放出される渦パターンをコンデンスミルク法によって可視化したものである。画像間の時間間隔は 1 ms で、左上から右下に時間が進んでいる。写真 4.3 より、 $V_r=2$ の時に対称渦が発生しており、ウェルの流れ方向振動と同期していることがわかる。また、 $V_r=2.4$ の時（写真 4.4）、交互渦によって流れ方向振動が発生し、 $V_r=3$ の時（写真 4.5）、交互渦によって流れに直角方向の振動が発生していることが確認された。

4. 7 流動試験結果のまとめ

以上のように、4 種類の試験体について行った流動試験の結果を表 4.3～4.6 にまとめた。これらの表において、主振動数及び渦周波数は、図 4.13～4.16 の変位の周波数スペクトルから推定した。なお、主振動モードについて、流れ方向振動をインライン、流れに直角方向の振動をクロスフローと記述している。

5. 結論

- (1) $V_r \doteq 2$ 前後において、対称渦により励起された流れ方向の振動が発生する。この振動の周波数は模擬ウェルの固有振動数に等しい。本実験で用いた試験体では、 $V_r=1.3\sim 1.5$ からこのような振動が開始した。
- (2) $V_r \doteq 2.7$ 前後において、交互渦により励起された流れ方向の振動が発生する。この振動の周波数は渦周波数の 2 倍に等しい。
- (3) $V_r \doteq 2.7$ 前後において、 $K_s = 0.19$ の場合は、流れ方向に渦周波数の 2 倍、流れに直角方向に渦周波数の振動が増大した。一方、 $K_s = 0.82$ の場合は、流れに直角方向の振幅は微少であった。

- (4) $V_r \div 4.5$ 以上で、交互渦により励起された流れに直角方向の振動が発生する。この振動の周波数は渦周波数に等しい。
- (5) 流れ方向振動の振幅は、減衰パラメータの影響を受けやすい。本実験では、 $K_s = 0.19$ と 0.82 の場合を比較すると最大振幅が約 $1 : 10$ になった。
- (6) 上記(1)の振動の振幅が亀裂の進展に必要なレベルを上回っている場合、亀裂の進展によってウェルの固有振動数が連続的に低下し、それゆえに V_r が連続的に増加する可能性がある。この場合、(2)~(4)の状態に接近して振動が過大となる可能性が生ずる。

謝辞

試験体の製作及び実験の実施にあたり、原子力エンジニアリング（株）山田、高崎、矢内、薄井、安部各氏の協力を得た。心より感謝の意を表する。

文献

1. Karman, T. von, "Ueber den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Koerper in einer Fluessigkeit erfahrt," Gottinger Nachrichten Math.-Phys. Klasse (1912) pp.547-556.
2. 日本機会学会編、機械工学便覧、A5-99.
3. King, R., Prosser, M. J. and Johns, D. J., "On vortex excitation of model piles in water," J. Sound Vibration 29 (1973) pp.169-188
4. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第3報）—100%流量状態の検討（その3）—、（平成8年3月5日付タスクフォース資料）
5. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第4報）—き裂発生以降破損に至るまでの検討—、（平成8年3月18日付タスクフォース資料）

- (4) $V_r \div 4.5$ 以上で、交互渦により励起された流れに直角方向の振動が発生する。この振動の周波数は渦周波数に等しい。
- (5) 流れ方向振動の振幅は、減衰パラメータの影響を受けやすい。本実験では、 $K_s = 0.19$ と 0.82 の場合を比較すると最大振幅が約 $1 : 10$ になった。
- (6) 上記(1)の振動の振幅が亀裂の進展に必要なレベルを上回っている場合、亀裂の進展によってウェルの固有振動数が連続的に低下し、それゆえに V_r が連続的に増加する可能性がある。この場合、(2)~(4)の状態に接近して振動が過大となる可能性が生ずる。

謝辞

試験体の製作及び実験の実施にあたり、原子力エンジニアリング（株）山田、高崎、矢内、薄井、安部各氏の協力を得た。心より感謝の意を表する。

文献

1. Karman, T. von, "Ueber den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Koerper in einer Fluessigkeit erfahrt," Gottinger Nachrichten Math.-Phys. Klasse (1912) pp.547-556.
2. 日本機会学会編、機械工学便覧、A5-99.
3. King, R., Prosser, M. J. and Johns, D. J., "On vortex excitation of model piles in water," J. Sound Vibration 29 (1973) pp.169-188
4. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第3報）－100%流量状態の検討（その3）－、（平成8年3月5日付タスクフォース資料）
5. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第4報）－き裂発生以降破損に至るまでの検討－、（平成8年3月18日付タスクフォース資料）

- (4) $V_r \cong 4.5$ 以上で、交互渦により励起された流れに直角方向の振動が発生する。この振動の周波数は渦周波数に等しい。
- (5) 流れ方向振動の振幅は、減衰パラメータの影響を受けやすい。本実験では、 $K_s = 0.19$ と 0.82 の場合を比較すると最大振幅が約 $1 : 10$ になった。
- (6) 上記(1)の振動の振幅が亀裂の進展に必要なレベルを上回っている場合、亀裂の進展によってウェルの固有振動数が連続的に低下し、それゆえに V_r が連続的に増加する可能性がある。この場合、(2)~(4)の状態に接近して振動が過大となる可能性が生ずる。

謝辞

試験体の製作及び実験の実施にあたり、原子力エンジニアリング（株）山田、高崎、矢内、薄井、安部各氏の協力を得た。心より感謝の意を表する。

文献

1. Karman, T. von, "Ueber den Mechanismus des Widerstandes, den ein bewegter Koerper in einer Fluessigkeit erfahrt," Gottinger Nachrichten Math.-Phys. Klasse (1912) pp.547-556.
2. 日本機会学会編、機械工学便覧、A5-99.
3. King, R., Prosser, M. J. and Johns, D. J., "On vortex excitation of model piles in water," J. Sound Vibration 29 (1973) pp.169-188
4. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第3報）—100%流量状態の検討（その3）—、（平成8年3月5日付タスクフォース資料）
5. 動燃、流体力による温度計の振動について（中間報告第4報）—き裂発生以降破損に至るまでの検討—、（平成8年3月18日付タスクフォース資料）

表 3.1 変位-ひずみ特性試験結果 (Type-1試験体)

Type-1 試験体 荷重の方向	マイクロメータ の読みmm	アンプゲイン100		1.0V/100 μ			
		変位 Δ mm	ひずみ計の出力V(v)				
			CH1	CH2	CH3	CH4	
CH2 \rightarrow CH1	7.88	0	-0.005	0.008	0.008	0.002	
	7.73	0.15	-0.486	0.485	0.061	-0.060	
	7.57	0.31	-1.015	0.987	0.106	-0.124	
	7.42	0.46	-1.545	1.493	0.100	-0.168	
	7.26	0.62	-2.045	1.985	0.114	-0.193	
	7.09	0.79	-2.584	2.488	0.228	-0.303	
	6.96	0.92	-2.963	2.982	-0.158	0.088	
CH1 \rightarrow CH2	8.57	0	0.054	0.024	0.038	0.045	
	8.45	0.12	0.489	-0.416	0.110	-0.008	
	8.30	0.27	0.987	-0.932	0.164	-0.044	
	8.16	0.41	1.475	-1.429	0.202	-0.072	
	8.02	0.55	1.985	-1.852	-0.092	0.232	
	7.89	0.68	2.487	-2.301	-0.248	0.410	
	7.72	0.85	2.981	-2.975	0.382	-0.225	
CH3 \rightarrow CH4	3.83	0	0.009	0.009	0.010	0.005	
	3.70	0.13	-0.191	0.076	0.492	-0.482	
	3.56	0.27	-0.296	0.028	0.984	-0.991	
	3.42	0.41	-0.431	0.018	1.493	-1.505	
	3.27	0.56	-0.377	-0.202	1.997	-2.036	
	3.14	0.69	-0.746	0.046	2.498	-2.543	
	3.01	0.82	-0.939	0.087	2.990	-3.054	
CH4 \rightarrow CH3	6.89	0	0.012	-0.004	0.017	0.006	
	6.76	0.13	0.223	-0.069	-0.429	0.482	
	6.63	0.26	0.393	-0.101	-0.974	0.975	
	6.49	0.40	0.623	-0.183	-1.380	1.473	
	6.35	0.54	1.011	-0.420	-1.850	1.970	
	6.21	0.68	1.183	-0.448	-2.338	2.478	
	6.07	0.82	1.240	-0.365	-2.809	2.965	

実際の水の流動方向はCH2からCH1の方向

表 3. 2 変位-ひずみ特性試験結果 (Type-A試験体)

Type-A 試験体		アンプゲイン200		0.5V/100 μ			
荷重の方向	マイクロメータ の読みmm	変位 Δ mm	ひずみ計の出力V(v)				
			CH3	CH4	CH5	CH6	
CH4~CH3	7.77	0	0.006	0.008	0.006	0.004	
	7.69	0.08	-0.225	0.247	0.058	-0.009	
	7.60	0.17	-0.459	0.488	0.099	-0.013	
	7.51	0.26	-0.720	0.745	0.022	0.104	
	7.42	0.35	-0.934	0.977	0.175	-0.013	
	7.33	0.44	-1.185	1.233	0.201	0.003	
	7.24	0.53	-1.423	1.480	0.246	-0.005	
CH3~CH4	6.49	0	0.008	0.008	0.008	0.006	
	6.40	0.09	0.242	-0.224	-0.025	0.008	
	6.32	0.17	0.485	-0.465	-0.036	-0.017	
	6.23	0.26	0.743	-0.720	-0.010	-0.083	
	6.14	0.35	0.990	-0.954	0.170	-0.301	
	6.06	0.43	1.244	-1.202	0.217	-0.386	
	5.98	0.51	1.489	-1.443	0.262	-0.468	
CH5~CH6	6.55	0	0.008	0.008	0.010	0.004	
	6.47	0.08	0.027	0.004	0.244	-0.237	
	6.37	0.18	0.032	0.015	0.511	-0.507	
	6.28	0.27	0.035	0.028	0.755	-0.754	
	6.20	0.35	0.008	0.070	1.003	-1.002	
	6.11	0.44	-0.075	0.168	1.259	-1.247	
	6.03	0.52	-0.171	0.280	1.489	-1.462	
CH6~CH5	5.55	0	0.012	0.009	0.001	0.003	
	5.47	0.08	0.019	0.004	-0.238	0.240	
	5.38	0.17	0.007	-0.022	-0.479	0.480	
	5.29	0.26	0.011	-0.040	-0.731	0.736	
	5.20	0.35	0.258	-0.299	-1.005	0.980	
	5.11	0.44	0.343	-0.398	-1.269	1.239	
	5.03	0.52	0.411	-0.476	-1.512	1.478	

実際の水の流動方向はCH4からCH3の方向

表 3.3 変位-ひずみ特性試験結果 (Type-B試験体)

Type-B 試験体 荷重の方向	マイクロメータ の読みmm	アンプゲイン200		0.5V/100 μ			
		変位 Δ mm	ひずみ計の出力V(v)				
			CH3	CH4	CH5	CH6	
CH4~CH3	8.49	0	0.006	0.007	0.006	0.004	
	8.31	0.18	-0.231	0.243	0.027	-0.027	
	8.17	0.32	-0.476	0.488	0.029	-0.040	
	8.03	0.46	-0.728	0.740	0.009	-0.030	
	7.88	0.61	-0.987	1.001	0.016	-0.048	
	7.74	0.75	-1.227	1.245	0.046	-0.087	
	7.61	0.87	-1.473	1.491	-0.011	-0.042	
CH3~CH4	6.78	0	0.006	0.006	0.005	0.004	
	6.65	0.13	0.250	-0.243	0.064	-0.053	
	6.53	0.25	0.495	-0.496	0.114	-0.087	
	6.42	0.36	0.756	-0.755	0.170	-0.140	
	6.30	0.48	1.000	-1.001	0.228	-0.189	
	6.18	0.60	1.244	-1.250	0.302	-0.252	
	6.06	0.72	1.499	-1.506	0.352	-0.292	
CH5~CH6	7.14	0	0.006	0.009	0.009	0.007	
	7.01	0.13	0.031	-0.012	0.248	-0.239	
	6.89	0.25	0.053	-0.035	0.478	-0.474	
	6.75	0.39	0.085	-0.057	0.751	-0.749	
	6.62	0.52	0.117	-0.083	1.000	-1.002	
	6.49	0.65	0.137	-0.099	1.249	-1.255	
	6.37	0.77	0.153	-0.112	1.497	-1.509	
CH6~CH5	3.97	0	0.006	0.006	0.040	0.004	
	3.84	0.12	0.050	-0.047	-0.237	0.242	
	3.72	0.25	0.084	-0.083	-0.475	0.498	
	3.59	0.38	0.089	-0.092	-0.715	0.747	
	3.48	0.49	0.142	-0.152	-0.954	0.990	
	3.35	0.62	0.189	-0.204	-1.206	1.251	
	3.24	0.73	0.260	-0.279	-1.432	1.486	

実際の水の流動方向はCH4からCH3の方向

表 3.4 固有振動数, 減衰率測定試験結果

	Type-1	Type-2	Type-A	Type-B
固有振動数 f_n (Hz)	200	120	250	240
対数減衰率 δ	0.05	0.07	0.015	0.028
単位長さ質量 m (kg/m)	0.185	0.585	0.574	0.574
減衰パラメータ K_s^*	0.19	0.82	0.17	0.32

*注) 減衰パラメータ: $K_s = 2m\delta / (\rho D^2)$

ρ : 流体の密度

表4.1 実験条件

流体	水			
温度 (°C)	20			
密度 (Kg/m ³)	1000			
速度 (m/s)	2.0~6.4			
レイノルズ数: Re	10 ⁴ ~3x10 ⁴			
ウェル外形寸法(mm) (太管部/細管部)	直径: φ 22 / φ 10 長さ: 31 / 154		直径: φ 22 / φ 10 長さ: 0 / 154	
細管部肉厚(mm)	1	1*	3	3
固有振動数 f _n (Hz)	200	120	250	240
減衰パラメータ: K _s	0.19	0.82	0.17	0.32

* 細管内にハンダを充填

表4.2 もんじゅ運転条件

	100%流量試験 (200°C)	100%流量試験 (325°C)	40%流量試験 (485°C)
流体	ナトリウム		
温度 (°C)	200	325	485
密度 (Kg/m ³)	904	874	836
速度 (m/s)	5.0	5.2	2.17
動粘性係数 (m ² /s)	5.1×10 ⁻⁷	3.7×10 ⁻⁷	3×10 ⁻⁷
レイノルズ数*	1.0×10 ⁵	1.4×10 ⁵	7.2×10 ⁴
無次元流速*	1.95	2.1	0.86

*注) レイノルズ数: $Re = VD/\nu$ 、無次元流速: $Vr = V/f_n D$

表 4.3 実験結果；Type-1試験体（ $f_n=200\text{Hz}$, $K_s=0.19$ ）

No.	流速 V(m/s)	無次元 流速 V_r *	渦周波数 f_s	ストロハル 数 St *	主振動数 (Hz)	主振動 モード	渦パターン
4	2.4	1.2				振動なし	
5	3.0	1.5	59	0.20	200	微少	
6	3.6	1.8	67	0.19	200	インライン	対称渦
7	4.2	2.1	74	0.18	200	インライン	対称渦
8	4.8	2.4	83	0.18	188/201	インライン	交互渦
9	5.4	2.7	94	0.17	94/188	インライン +クロスフロー	交互渦
10	6.0	3.0	95	0.16	95/190	インライン +クロスフロー	交互渦

*注) 無次元流速： $V_r=V/f_n D$ 、 ストロハル数： $St=f_s D/V$

表 4.4 実験結果 ; Type-2試験体 ($f_n=120\text{Hz}$, $K_s=0.82$)

No.	流速 V(m/s)	無次元 流速 Vr	渦周波数 f_s	ストロハル 数 St	主振動数 (Hz)	主振動 モード
26	1.8	1.5	35.5	0.20		振動なし
27	2.4	2.0	46.5	0.19	119.2	微少
38	2.88	2.4	59.3	0.21	120	インライン
28	3.0	2.5	60.2	0.20	121	インライン
39	3.12	2.6	59.9	0.19	120	インライン
40	3.36	2.8	60.0	0.18	120	インライン
41	3.6	3.0	60.1	0.17	120	インライン
42	3.84	3.2	60.5/74.5	0.19	121.5	インライン
43	4.08	3.4	80.0	0.20	116.2/122.8	微少
30	4.2	3.5	82.0	0.20	117/123	振動なし
44	4.32	3.6	84.0	0.19	115.5/123.2	微少
45	4.56	3.8	88.0	0.19	115.5/123.7	クロスフロー
46	4.8	4.0	94.0	0.20	114.5/124	クロスフロー
32	5.4	4.5	105.0	0.19	112	クロスフロー
33	6.0	5.0	111	0.19	111	クロスフロー

表 4.5 実験結果；Type-A試験体 ($f_n=250\text{Hz}$, $K_s=0.17$)

No.	流速 V(m/s)	無次元 流速 V_r *	渦周波数 f_s	ストロハル 数 St *	主振動数 (Hz)	主振動 モード
120	2.4	0.96	47	0.20		振動なし
121	2.64	1.056	52	0.20		振動なし
122	2.88	1.152	56.5	0.20		振動なし
123	3.12	1.248	62	0.20		振動なし
126	3.36	1.344	63	0.19	250	微少
127	3.6	1.44	63	0.18	250	インライン
128	3.84	1.536	63	0.16	250	インライン
129	4.08	1.632	70	0.17	250	インライン
130	4.32	1.728	77	0.18	250	インライン
131	4.56	1.824	81	0.18	250	インライン
132	4.8	1.92	85	0.18	250	インライン
133	5.04	2.016	87	0.17	250	インライン
134	5.28	2.112	92	0.17	250	インライン
135	5.52	2.208	94.5	0.17	250	インライン
136	5.76	2.304	102.5	0.18	250	インライン
137	6.0	2.4	106	0.18	250	インライン

表 4.6 実験結果 ; Type-B試験体 ($f_n=240\text{Hz}$, $K_s=0.32$)

No.	流速 V(m/s)	無次元 流速 V_r *	渦周波数 f_s	ストロハル 数 St *	主振動数 (Hz)	主振動 モード
87	2.4	1.0	46	0.19		振動なし
88	2.64	1.1	49	0.19		振動なし
89	2.88	1.2	55	0.19		振動なし
90	3.12	1.3	59	0.19		振動なし
91	3.36	1.4	62	0.18	238	微少
92	3.6	1.5	60	0.17	238	インライン
93	3.84	1.6	61	0.16	238	インライン
94	4.08	1.7	65	0.16	238	インライン
95	4.32	1.8	74	0.17	238	インライン
96	4.56	1.9	78	0.17	238	インライン
97	4.8	2.0	81	0.17	238	インライン
98	5.04	2.1	83	0.16	239	インライン
99	5.28	2.2	90	0.17	239	インライン
100	5.52	2.3	95	0.17	239	インライン
101	5.76	2.4	97	0.17	240	インライン
102	6.0	2.5	104	0.17	240	インライン

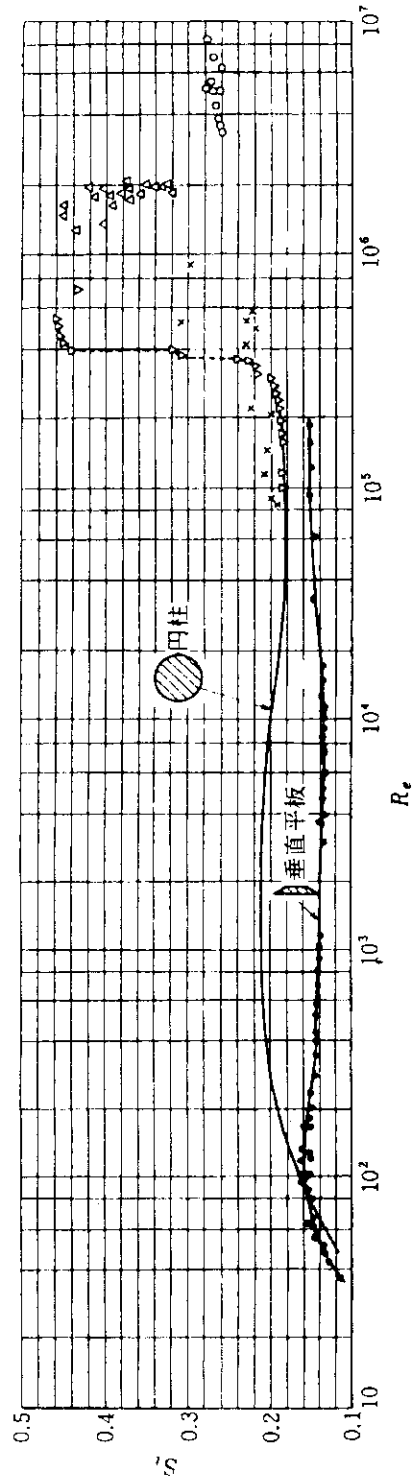


図1.1 凹柱, 垂直平板のストロークハル数 (機械工学便覧 [2])

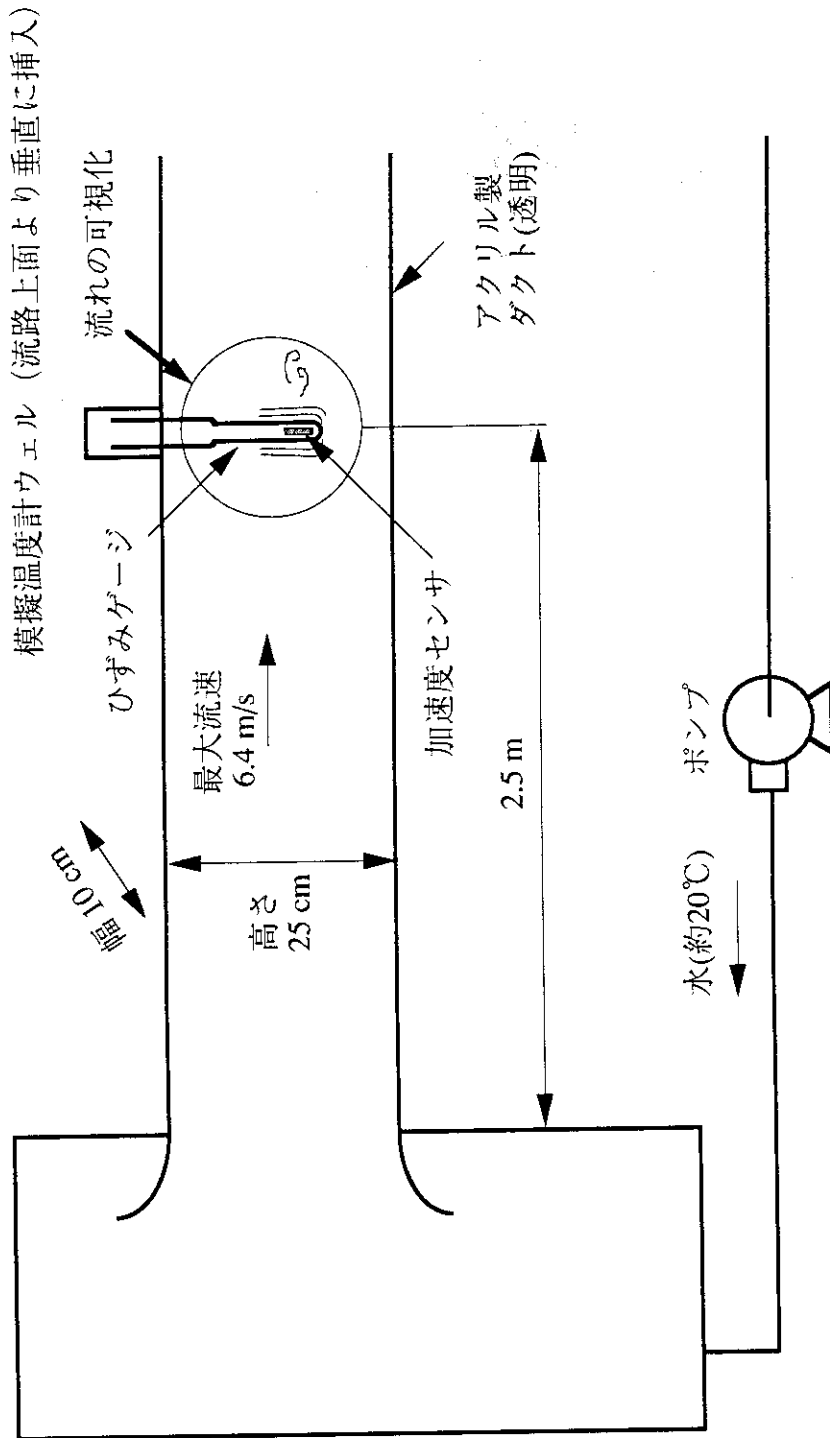


図2.1 試験流路

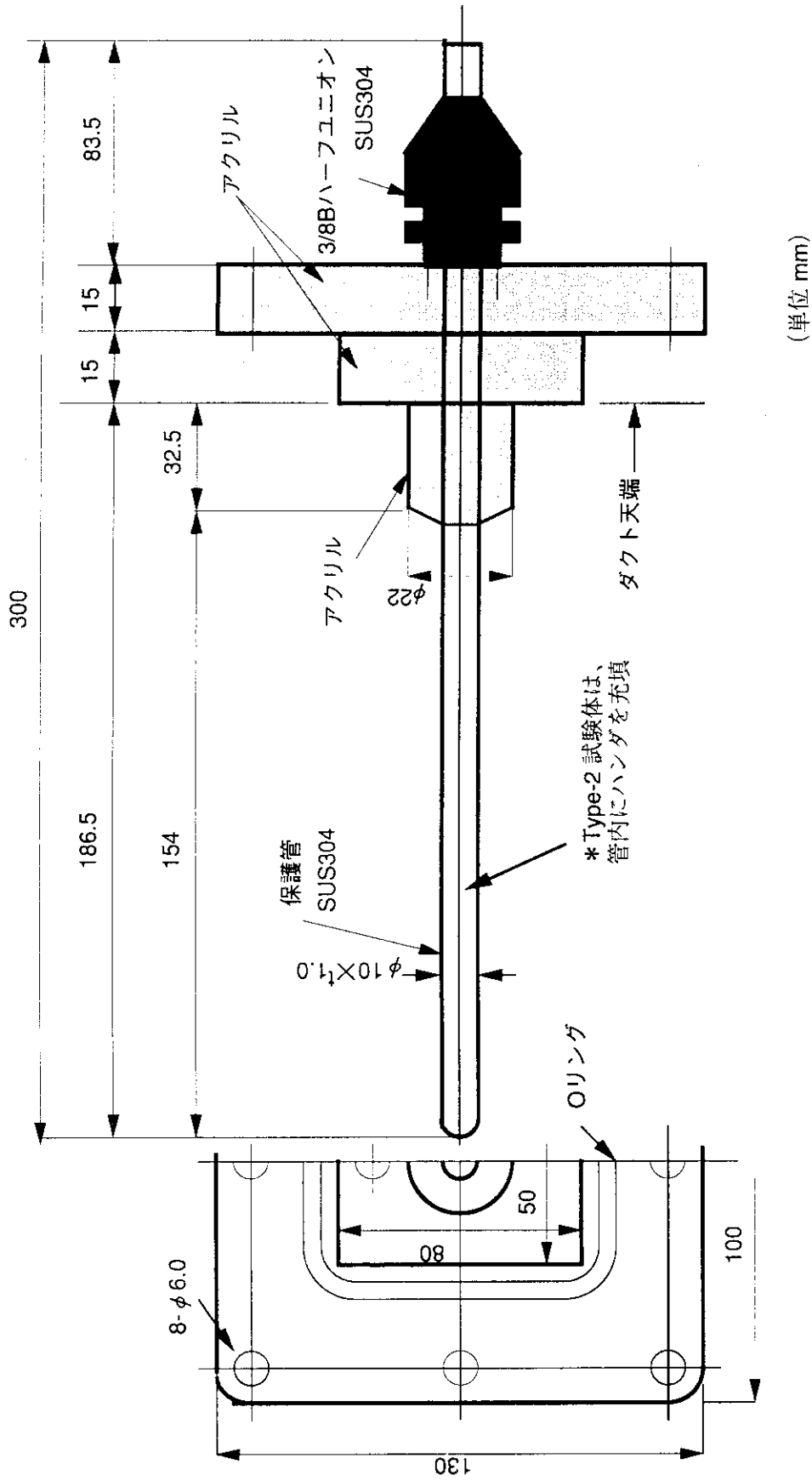


図 2.2 Type-1, Type-2試験体

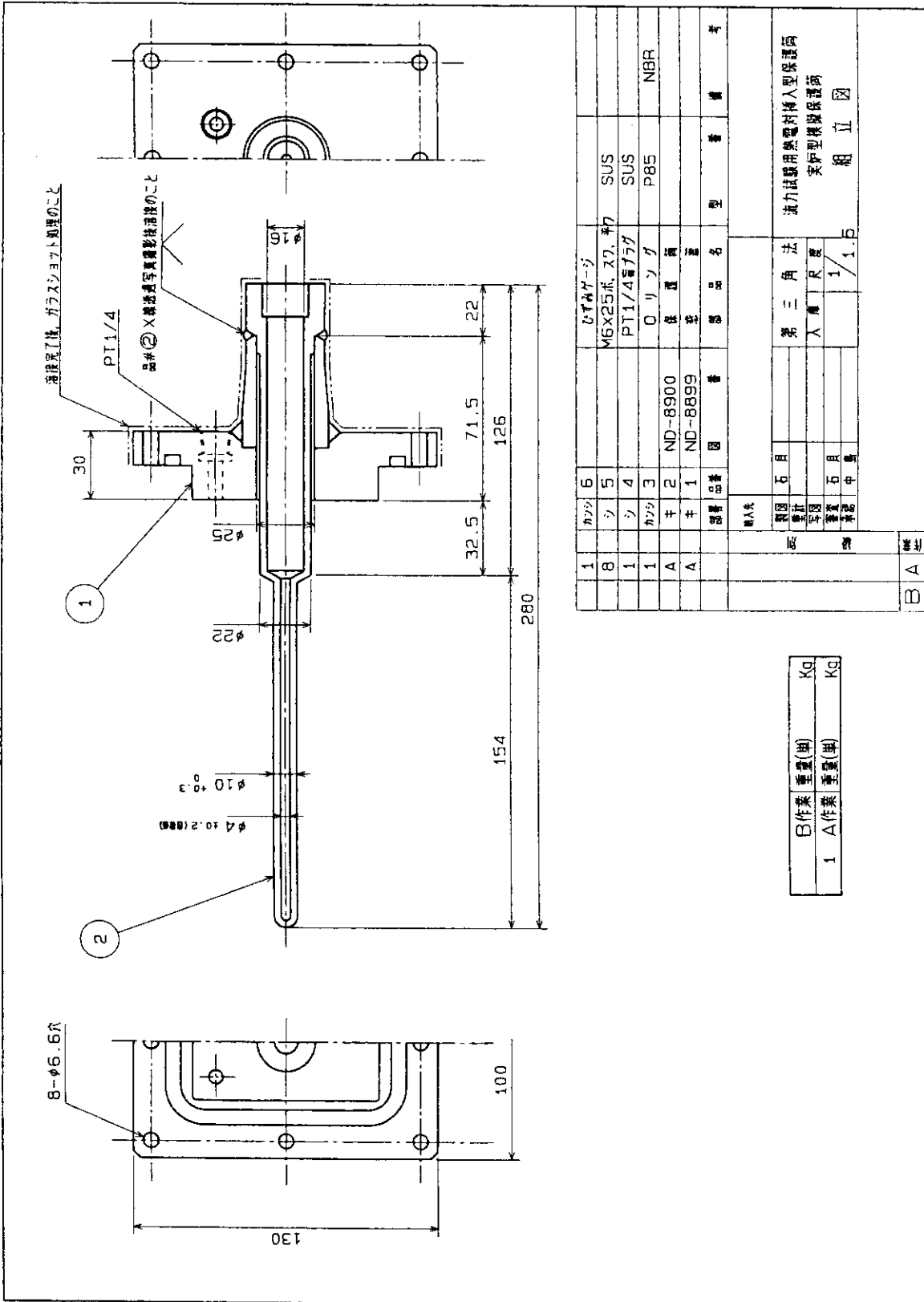


図 2.3 Type-A試験体

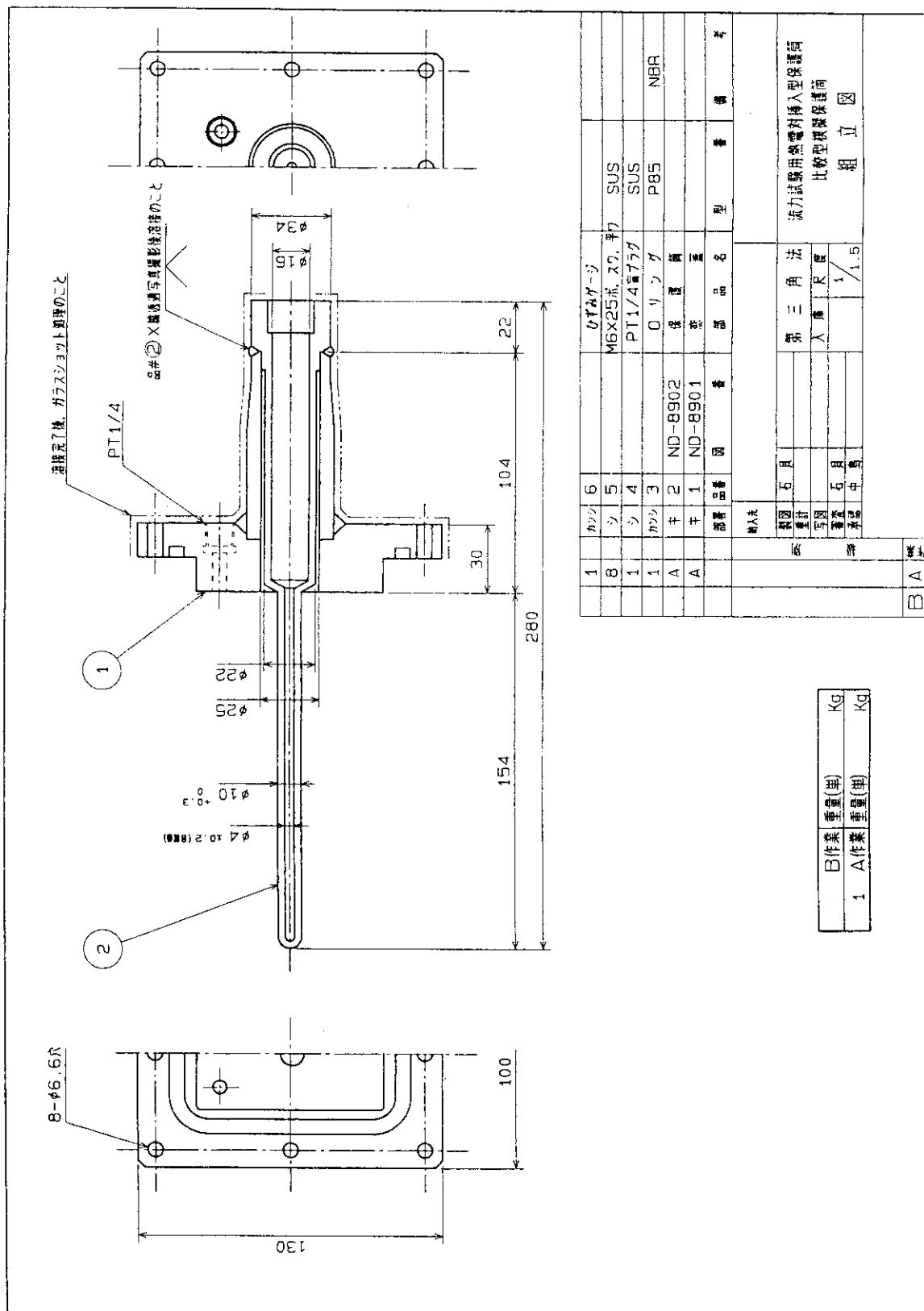


図 2.4 Type-B 試験体

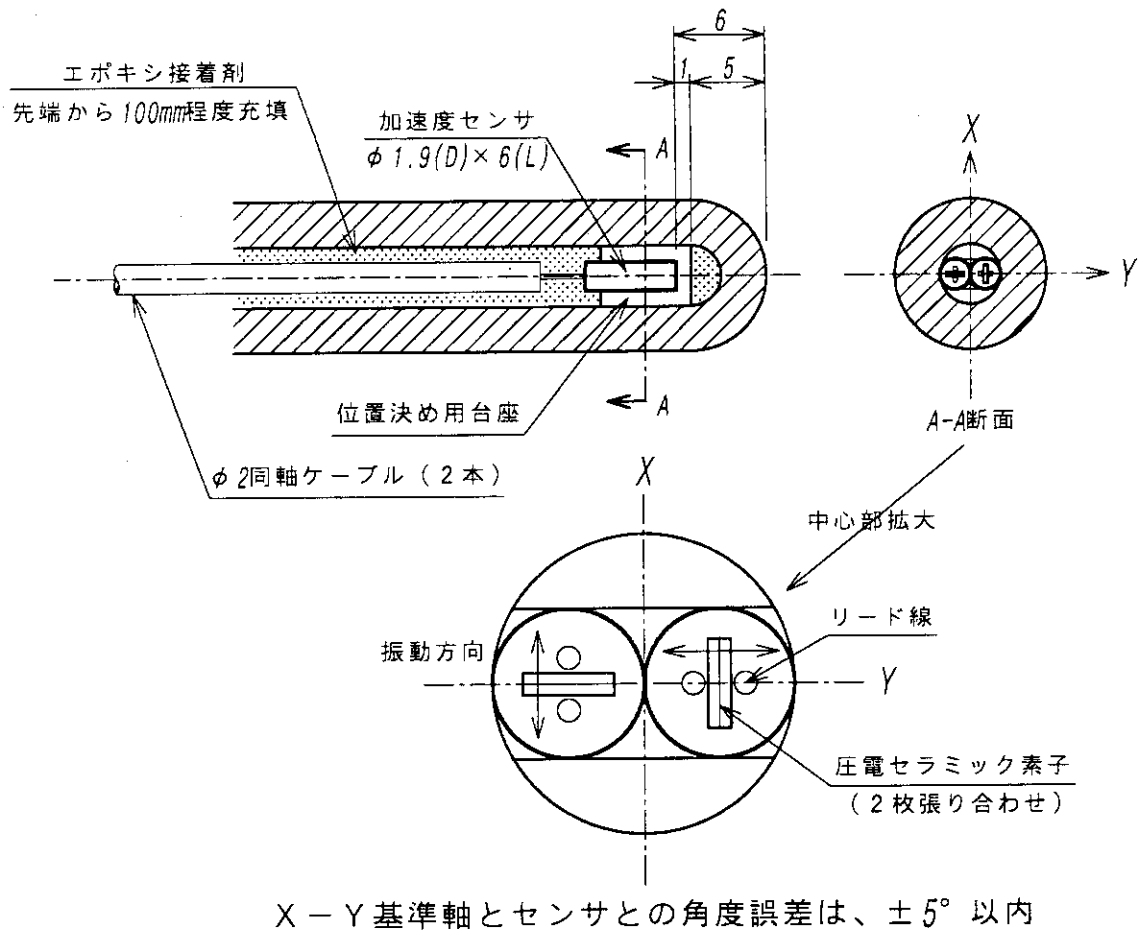


図2.5 加速度センサ

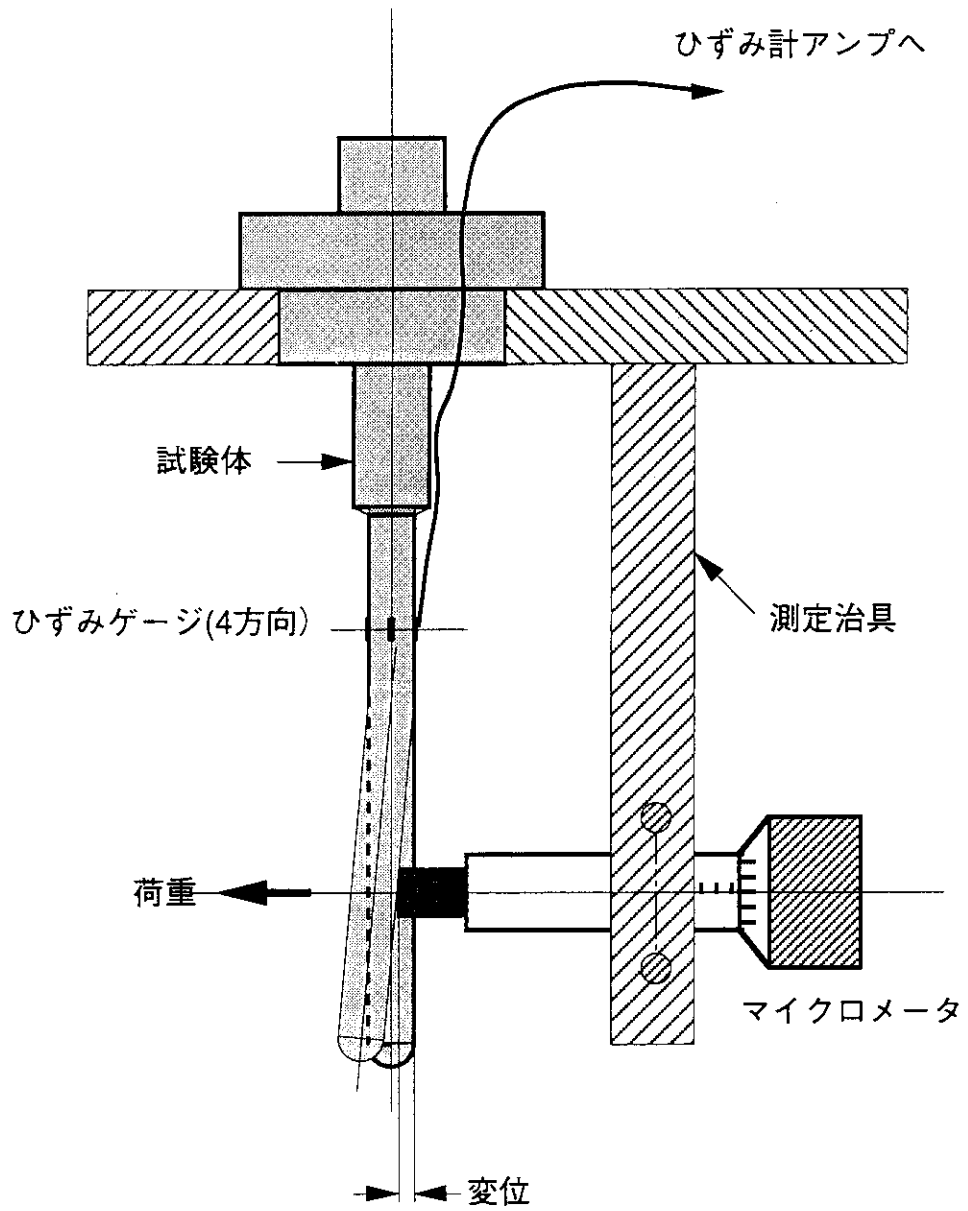
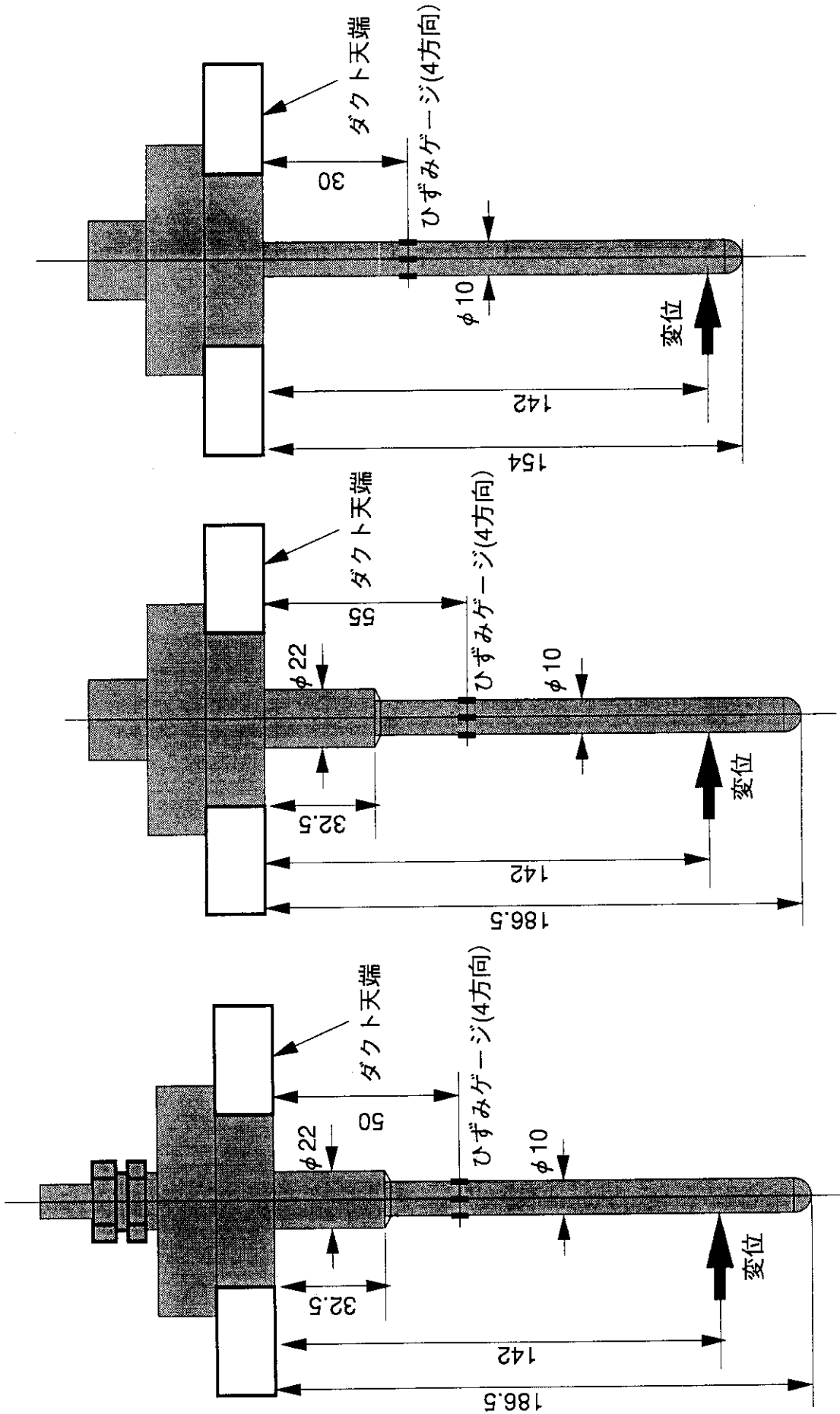


図 3.1 変位-ひずみ較正試験要領



試験体：Type-1

試験体：Type-A

試験体：Type-B

図 3.2 ひずみゲージ貼付け位置および変位位置

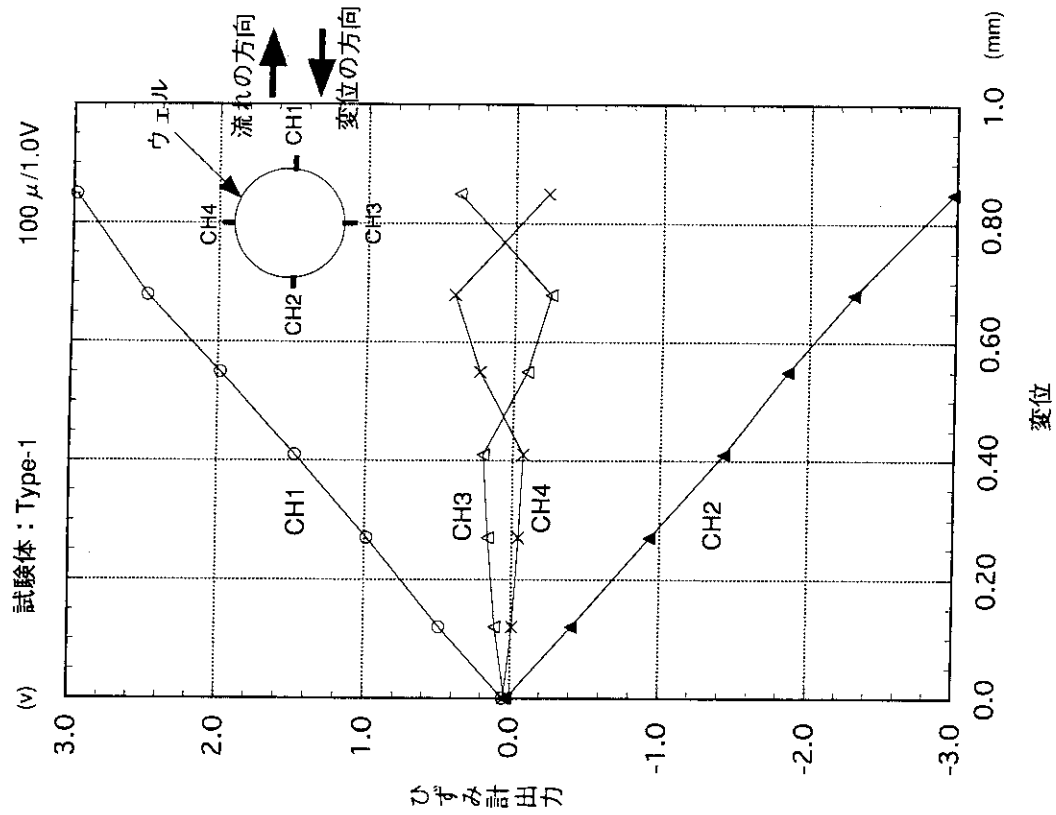


図 3.4 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-1, 流れ方向負変位)

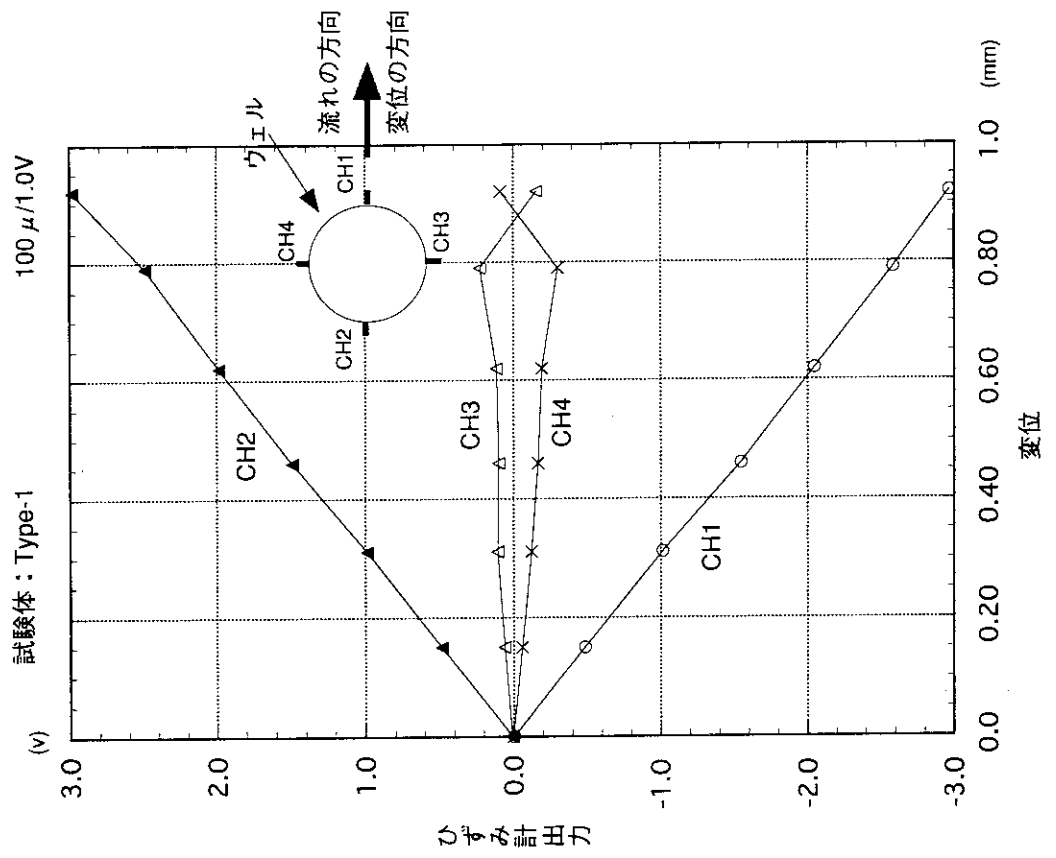


図 3.3 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-1, 流れ方向正変位)

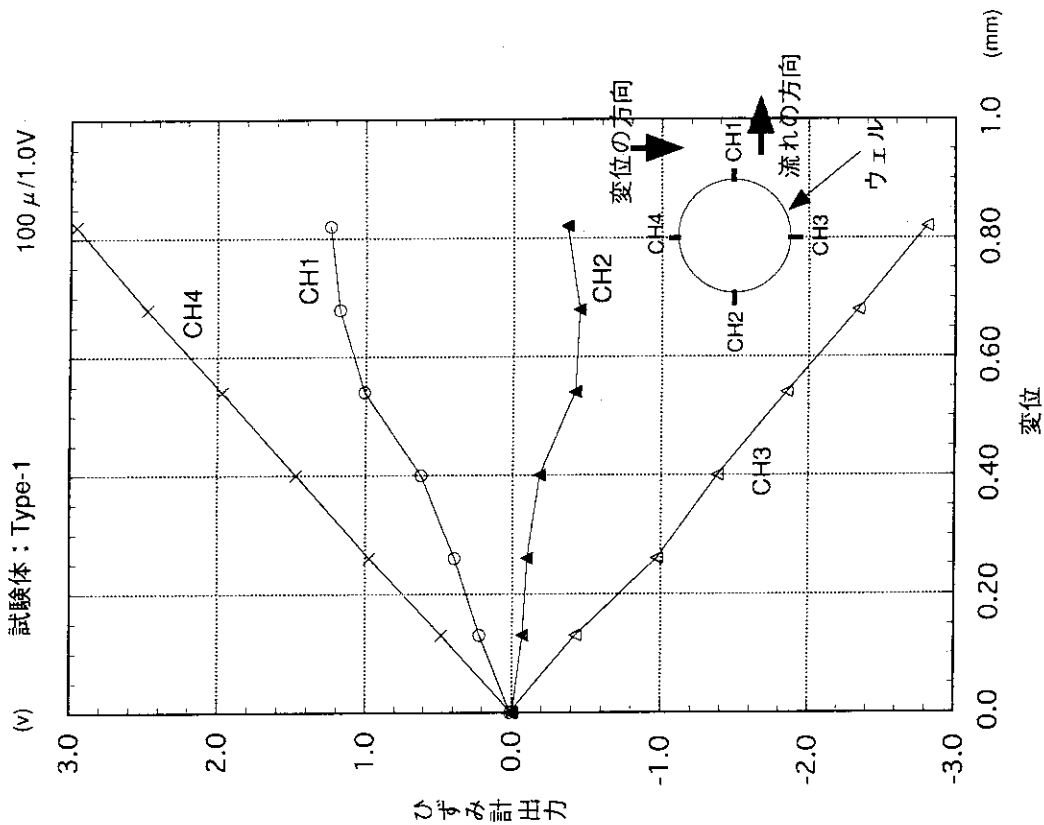


図 3.6 変位—ひずみ較正試験結果 (Type-1, 直角方向負変位)

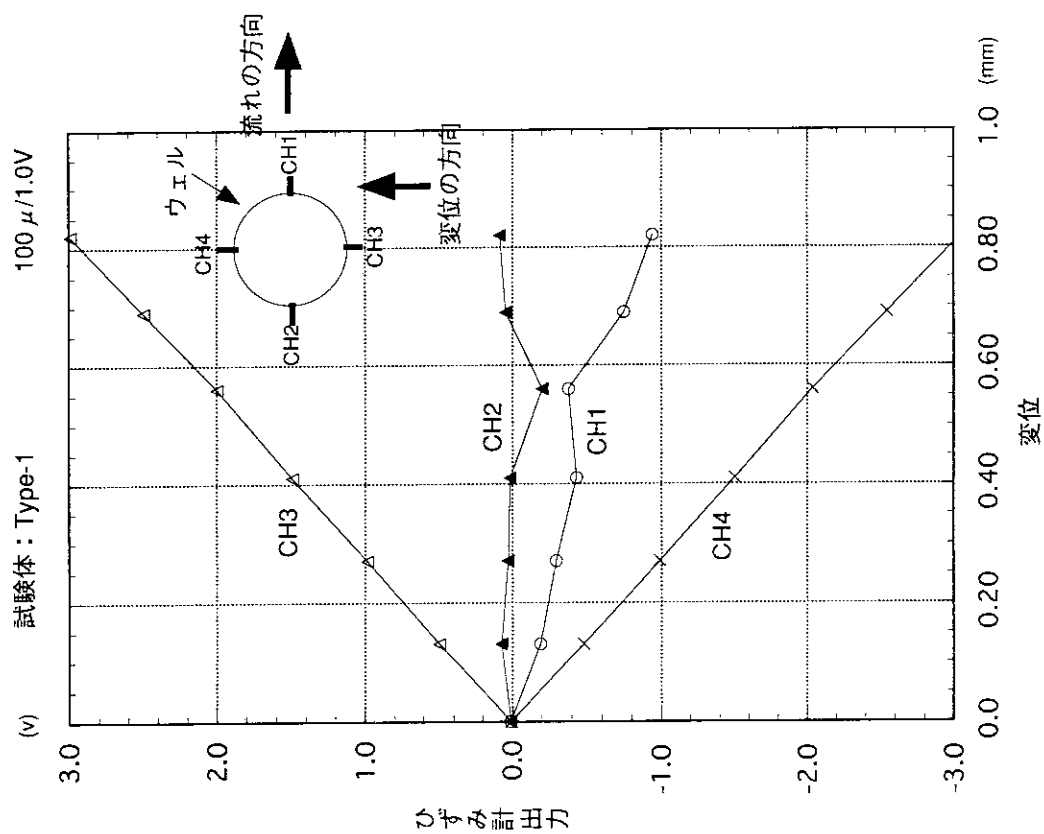


図 3.5 変位—ひずみ較正試験結果 (Type-1, 直角方向正変位)

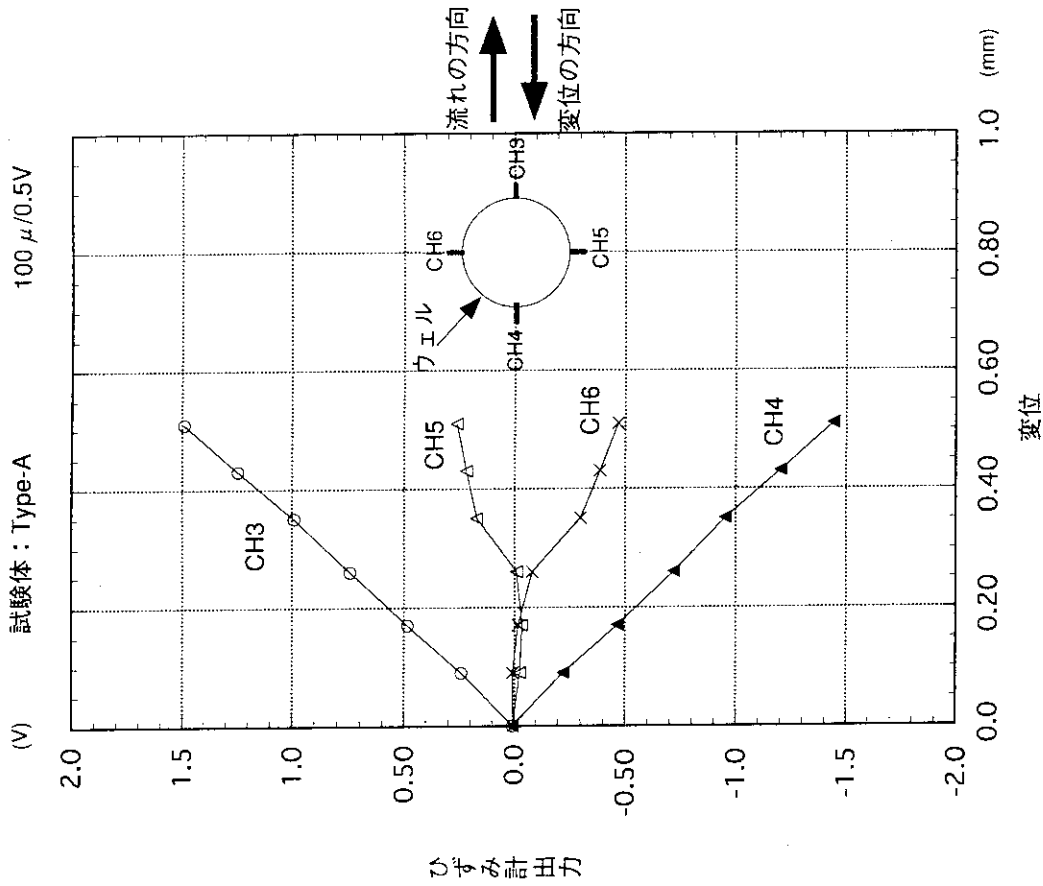


図3.8 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-A, 流れ方向負変位)

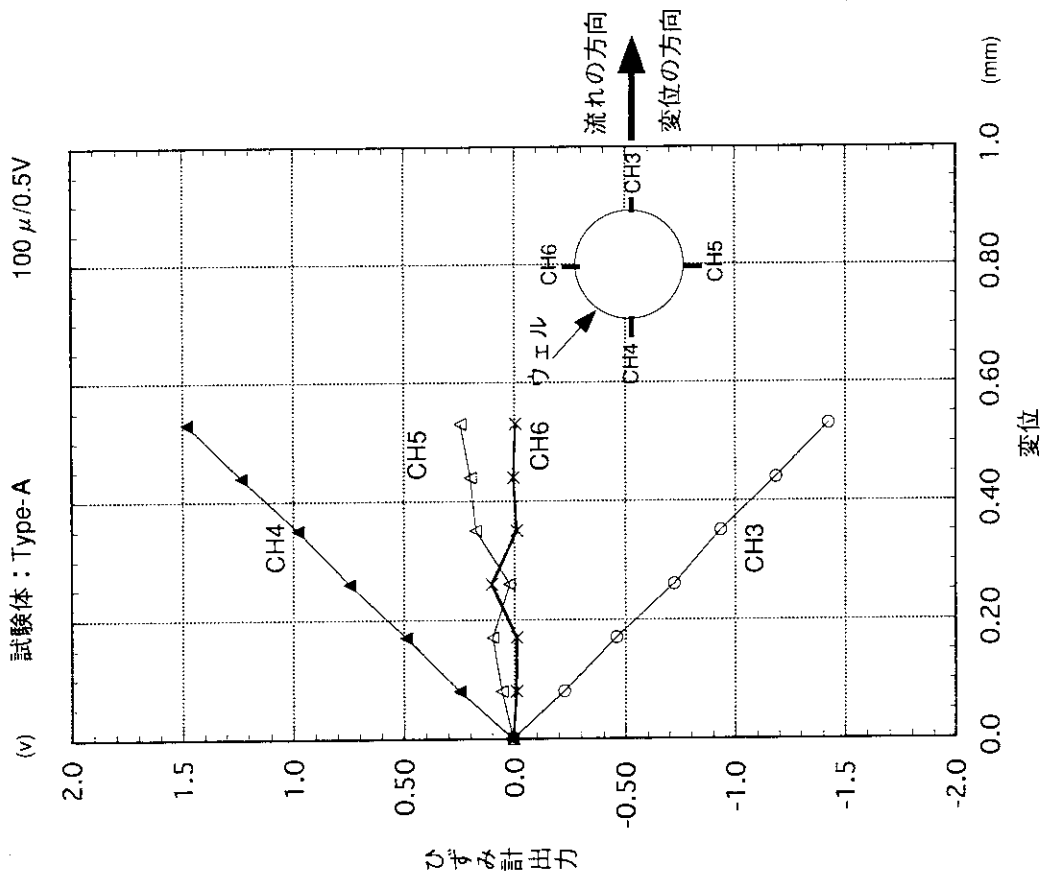


図3.7 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-A, 流れ方向正変位)

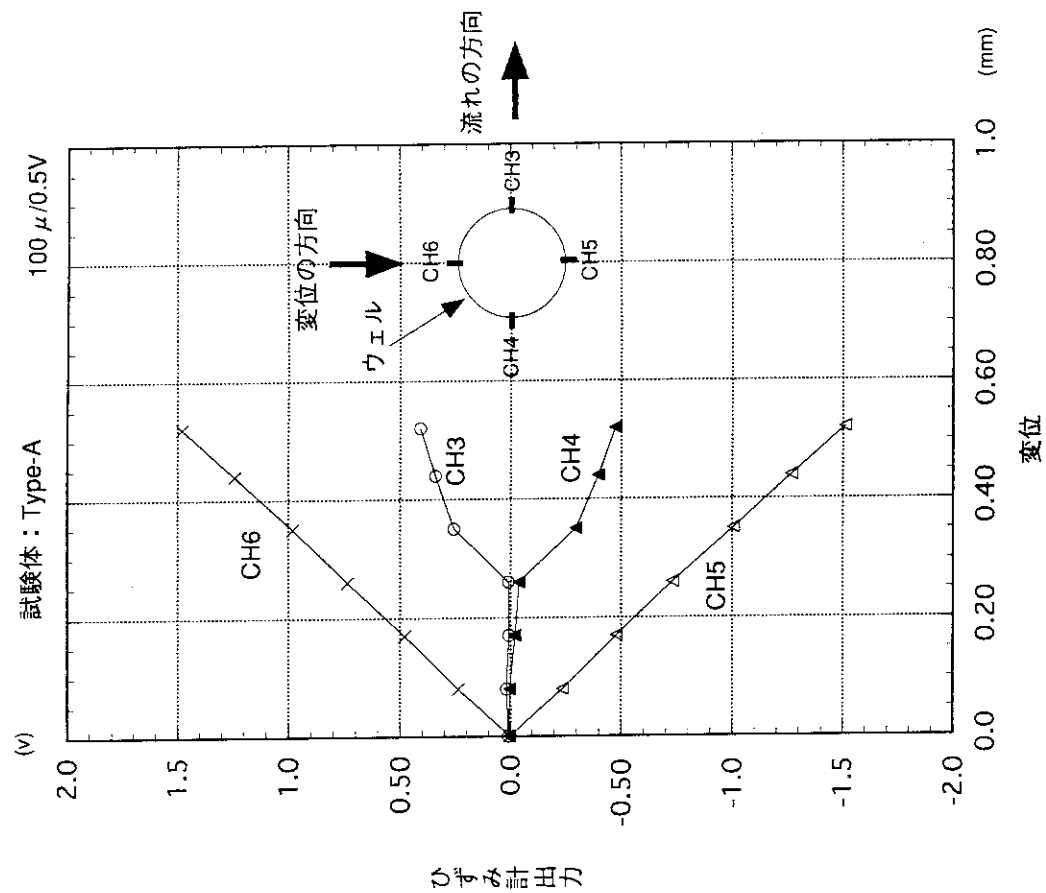


図 3.10 変位一ひずみ較正試験結果 (Type-A, 直角方向負変位)

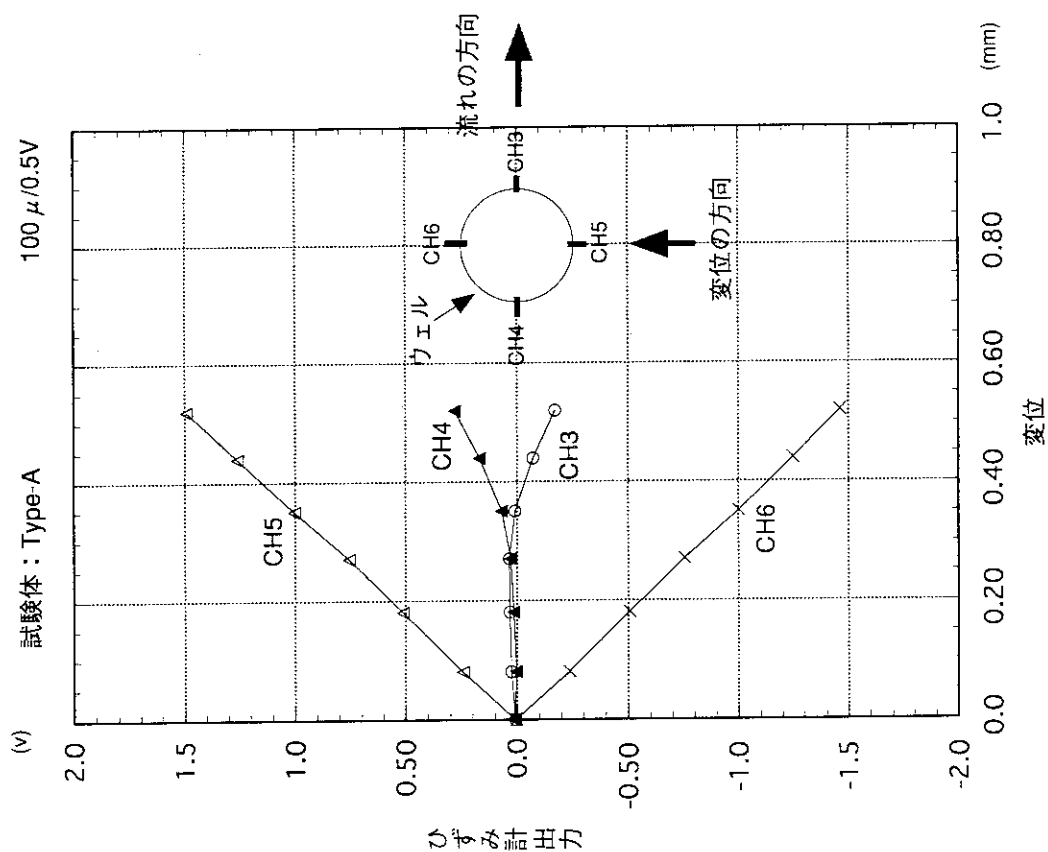


図 3.9 変位一ひずみ較正試験結果 (Type-A, 直角方向正変位)

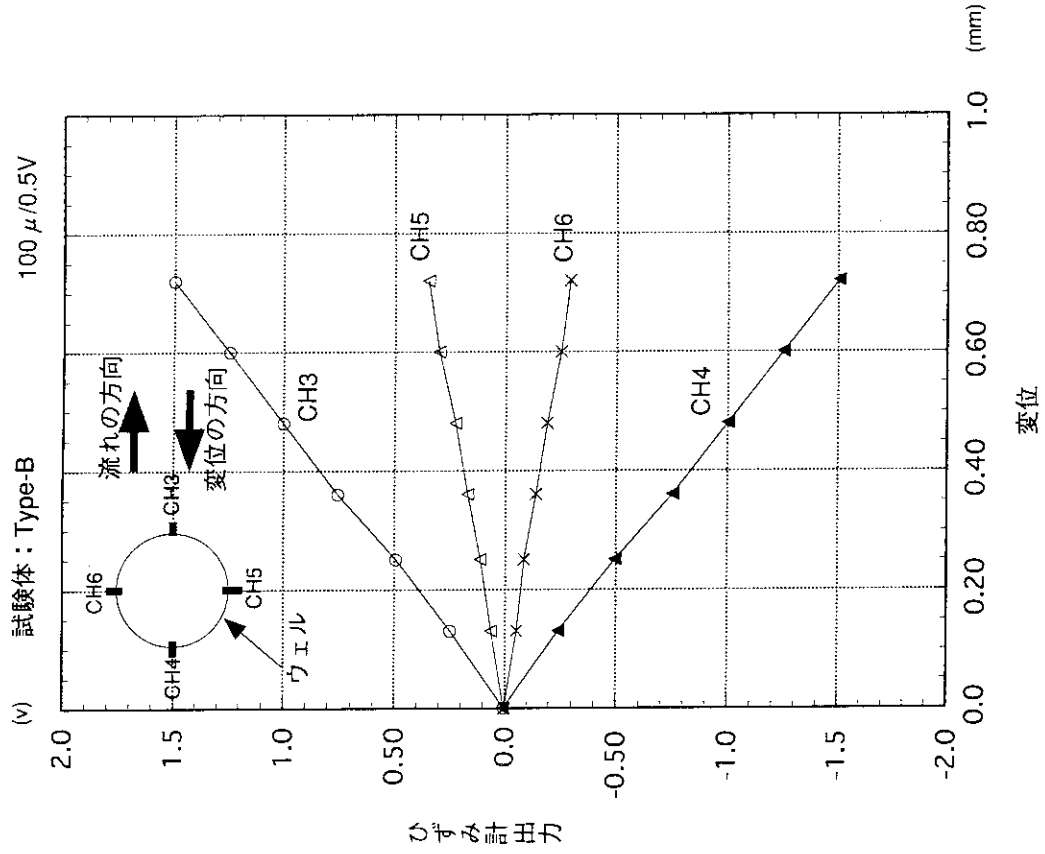


図3.12 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-B, 流れ方向負変位)

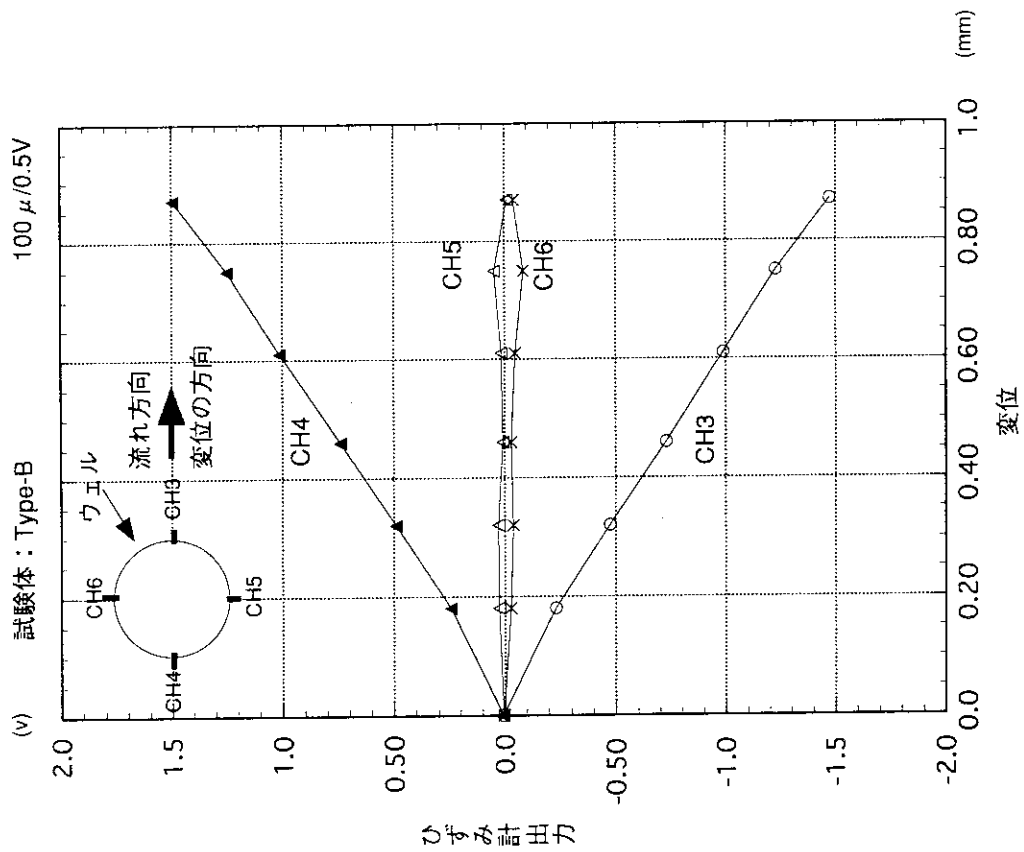


図3.11 変位-ひずみ較正試験結果 (Type-B, 流れ方向正変位)

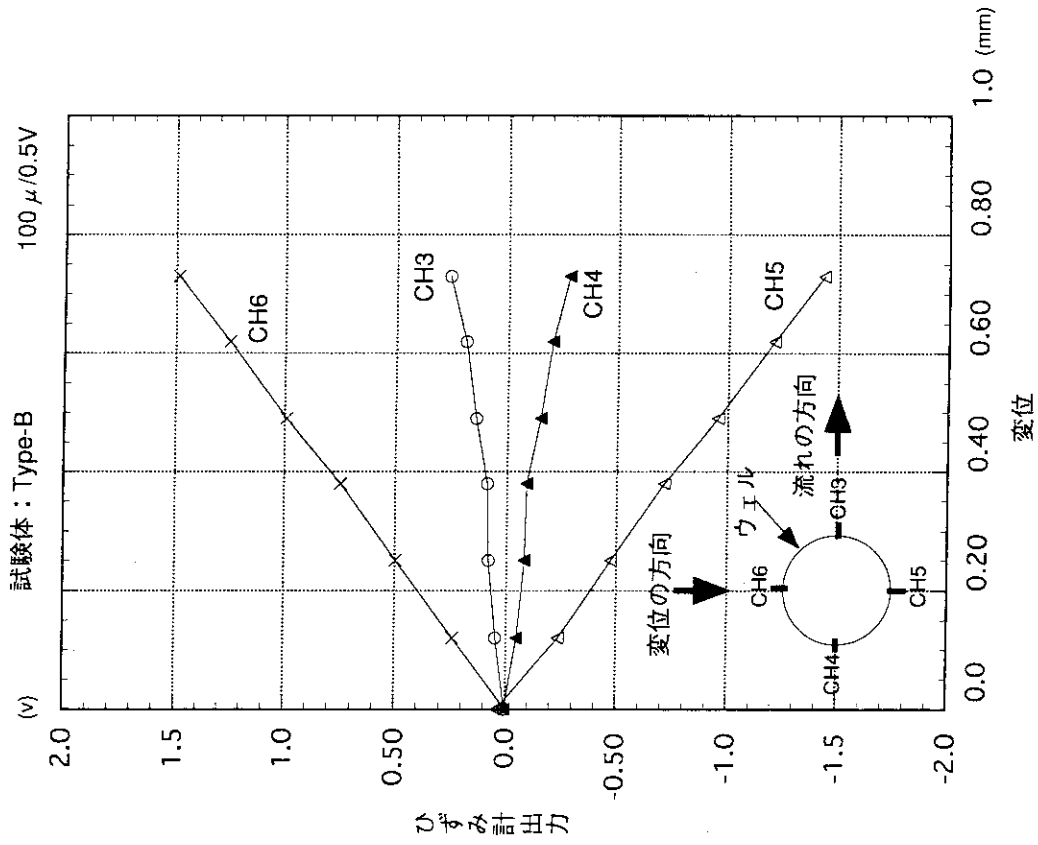


図 3.14 変位一ひずみ較正試験結果 (Type-B, 直角方向負変位)

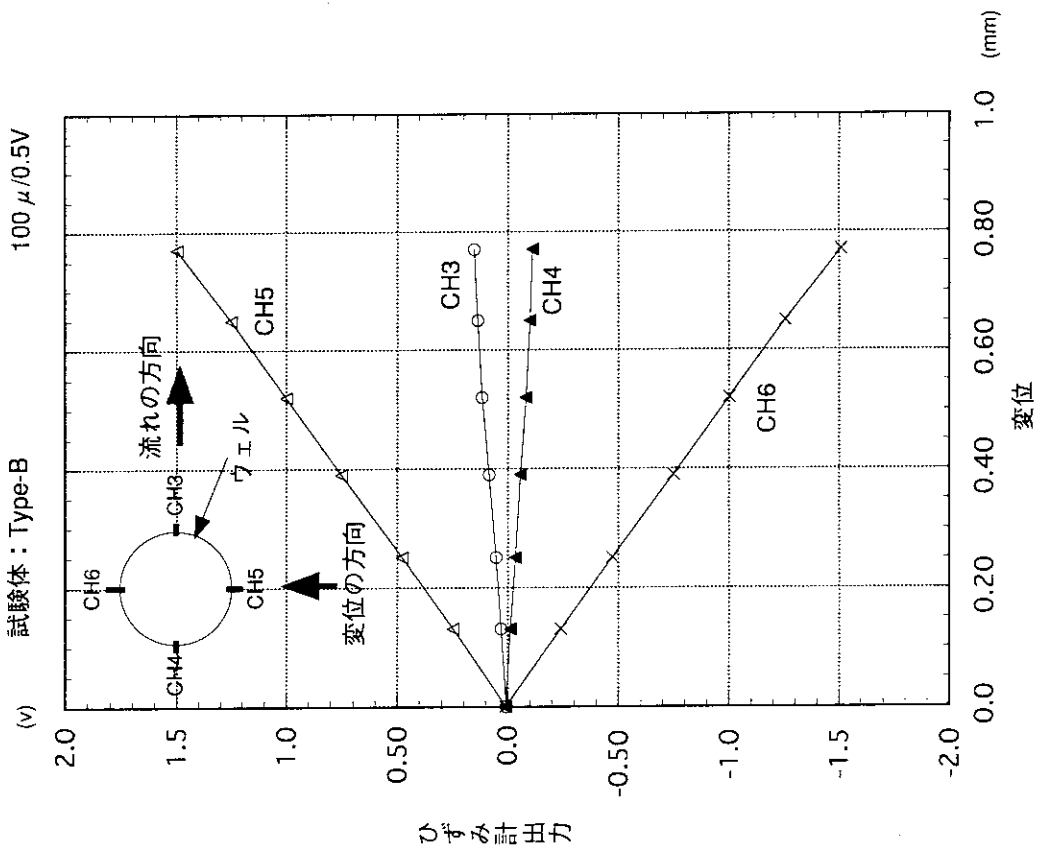


図 3.13 変位一ひずみ較正試験結果 (Type-B, 直角方向正変位)

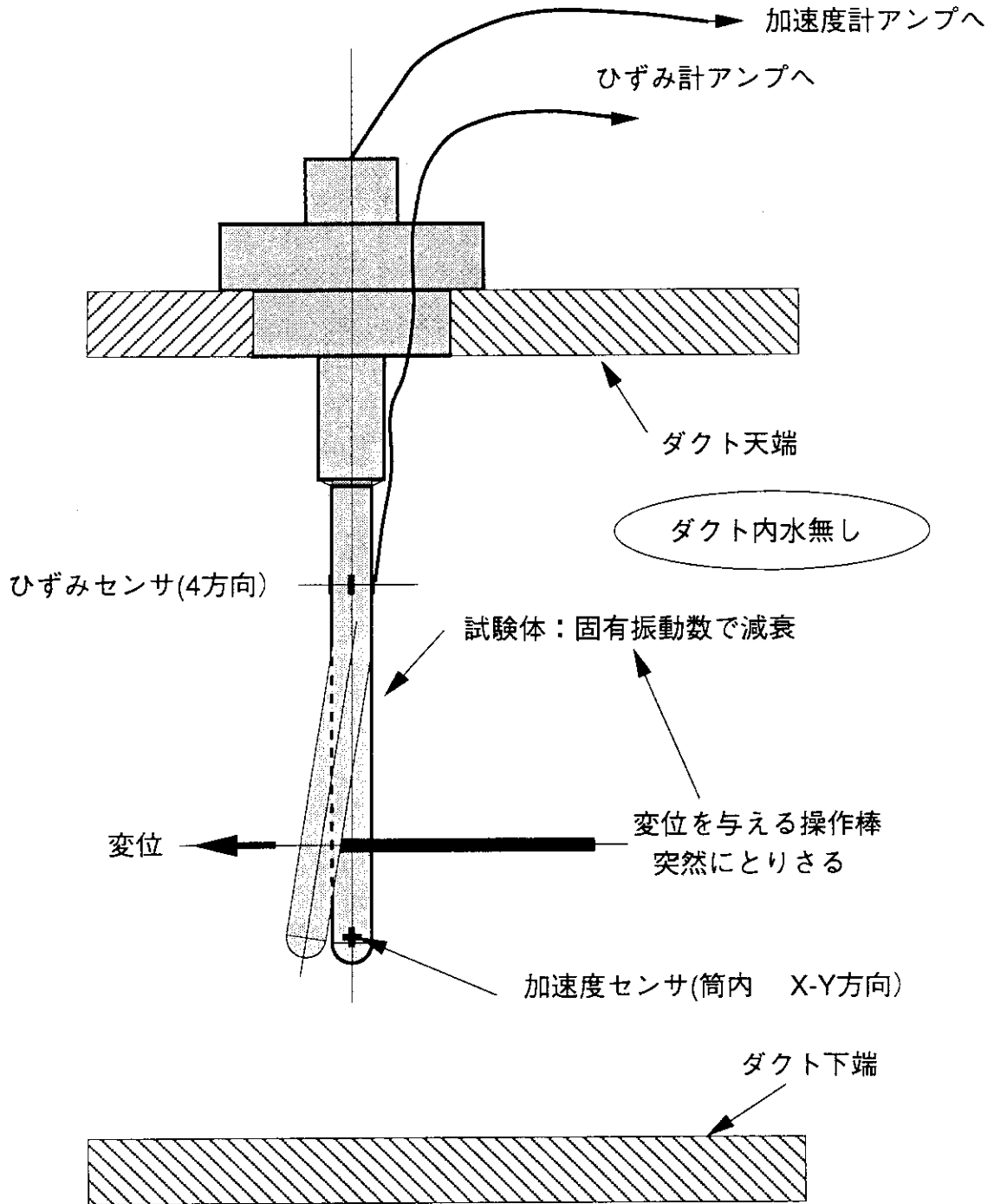


図 3.15 固有振動数，減衰率測定試験要領

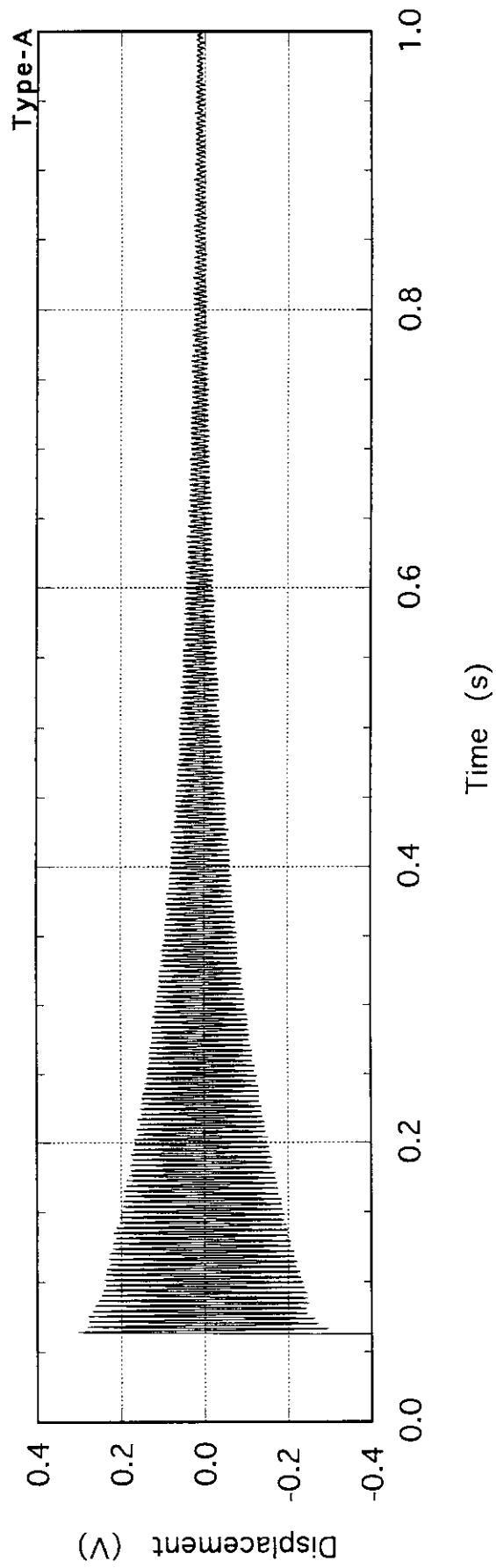


図 3.16 固有振動数，減衰率測定試験における振動波形 (Type-A試験体)

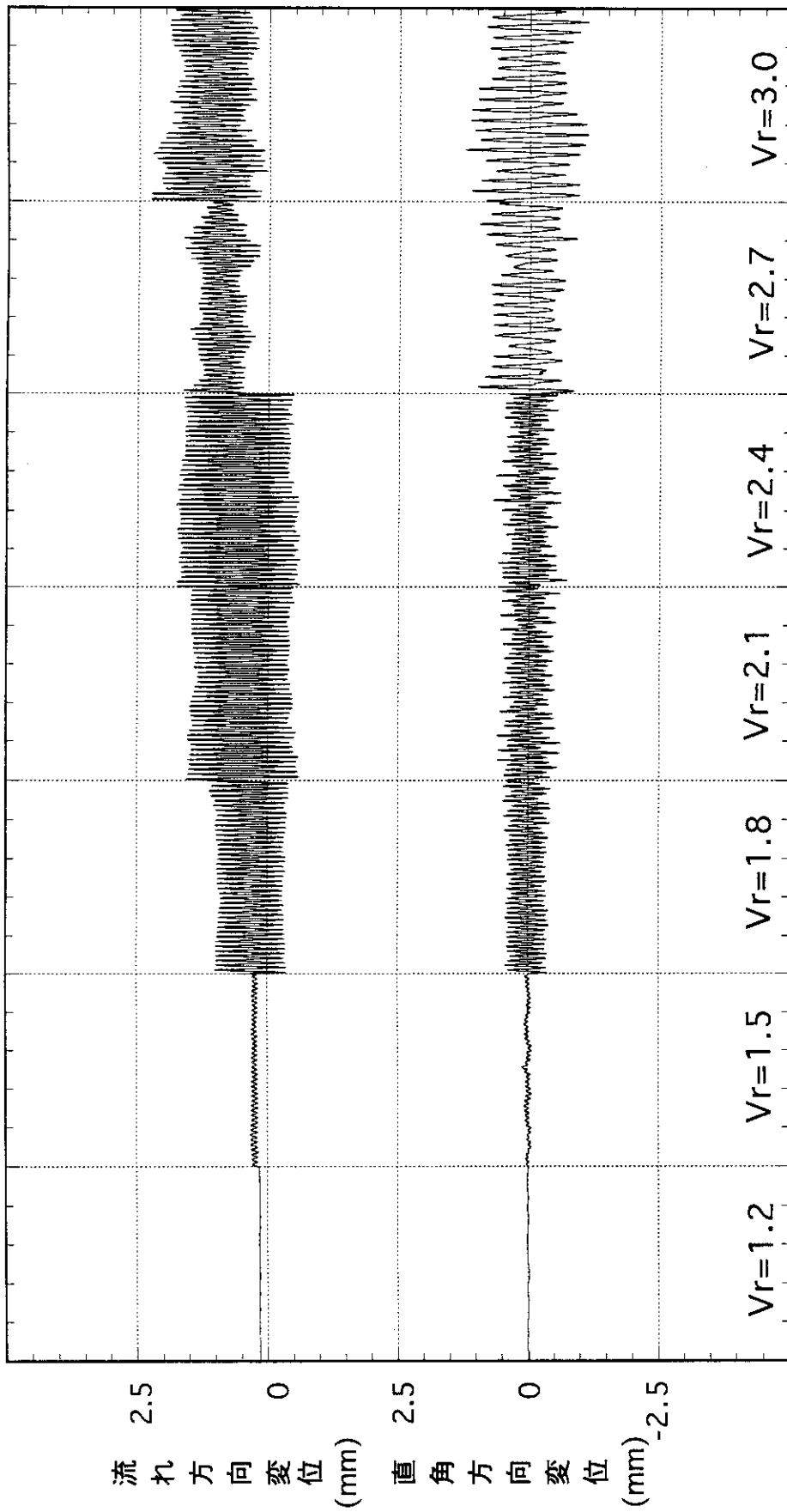


図4.1 Type-1試験体振動波形

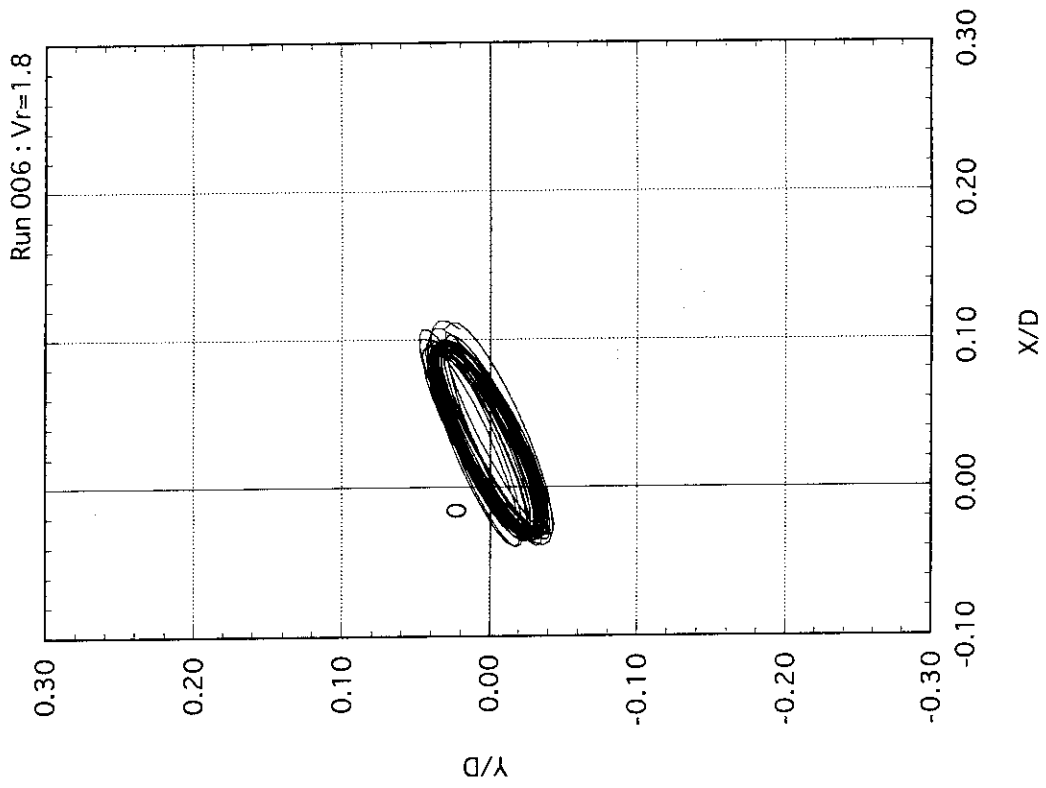


図 4. 2 (b) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=1.8$)

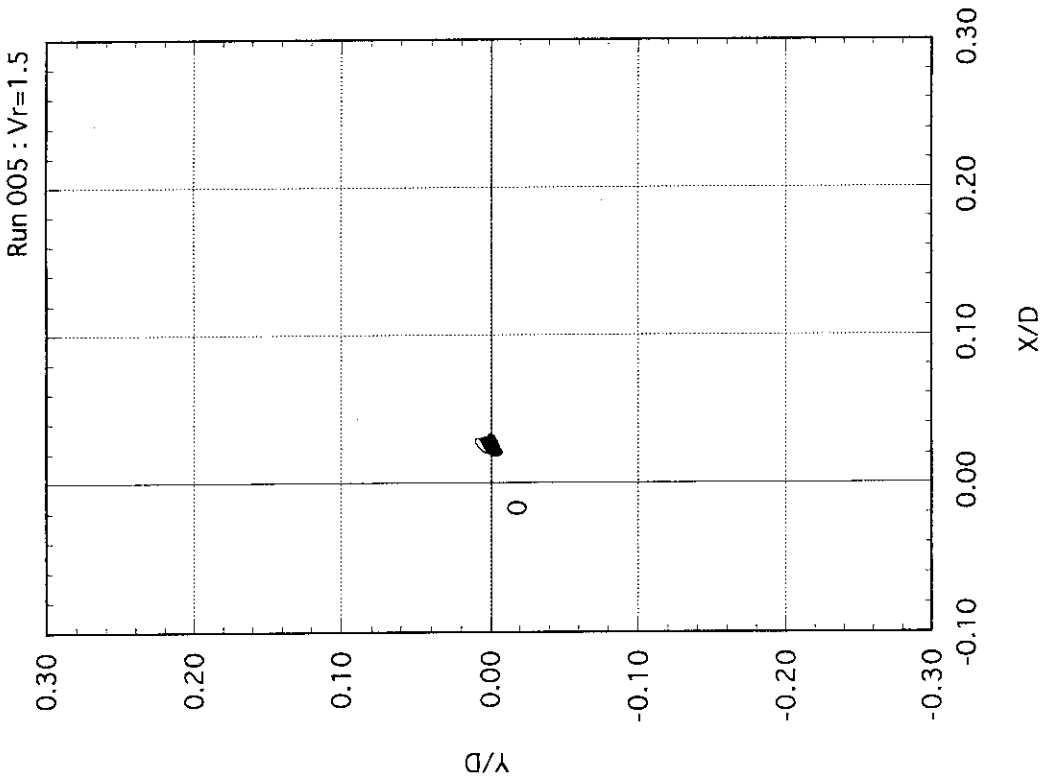


図 4. 2 (a) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=1.5$)

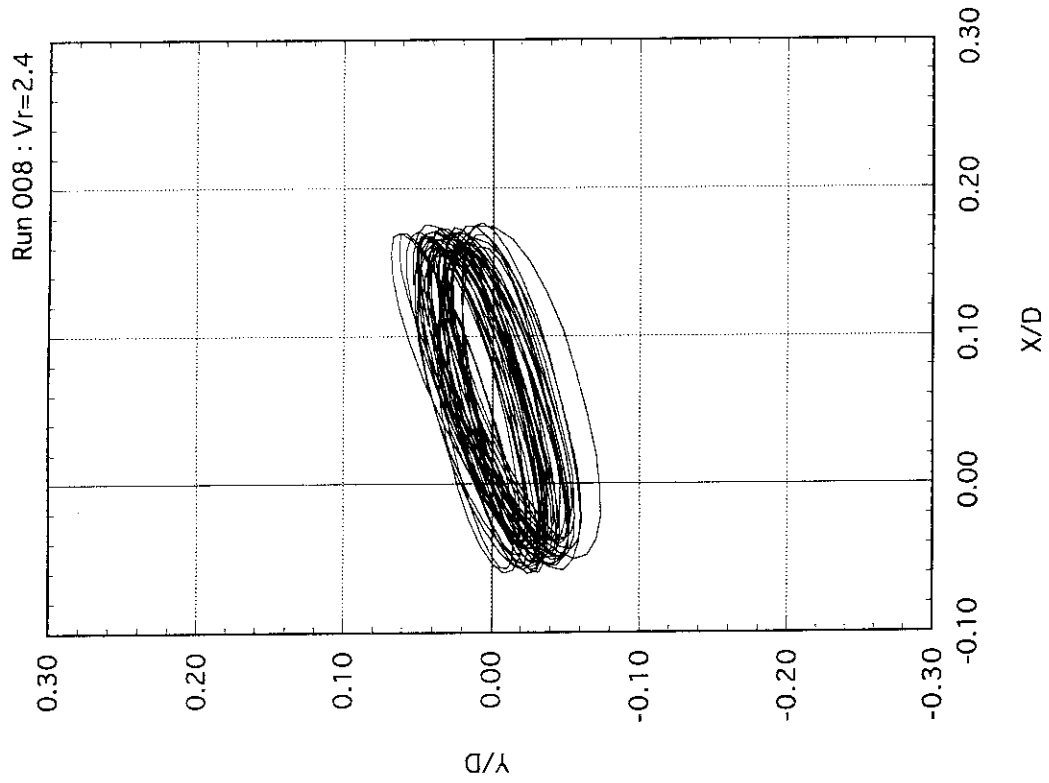


図 4. 2 (d) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=2.4$)

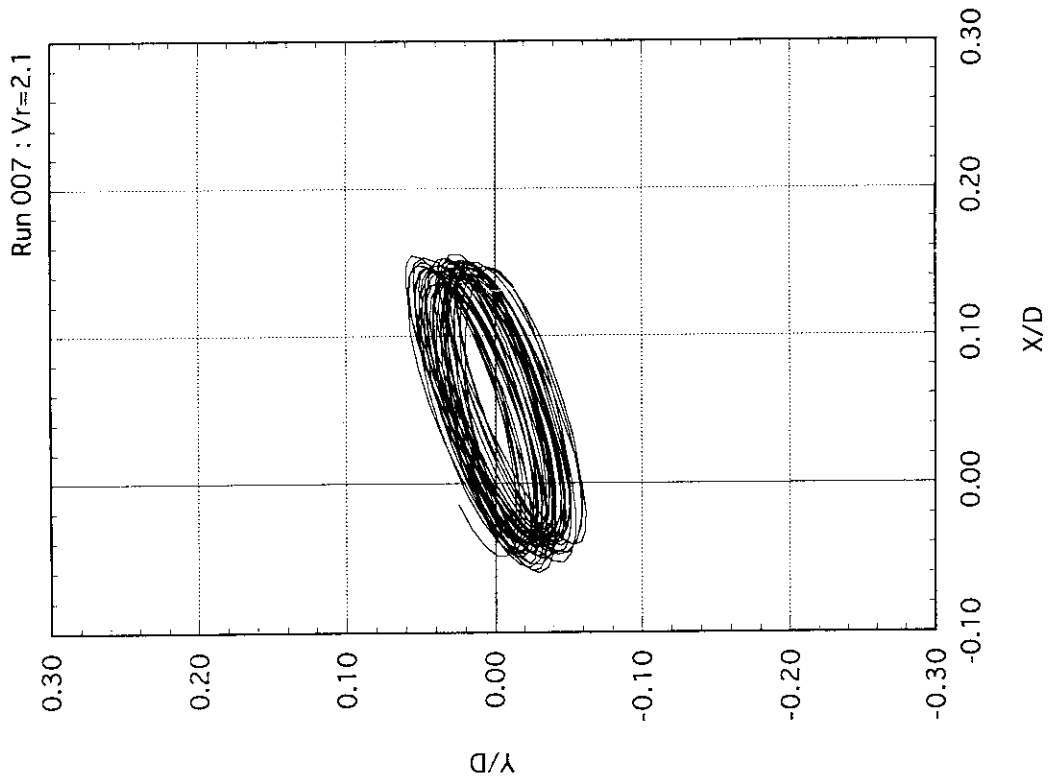


図 4. 2 (c) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=2.1$)

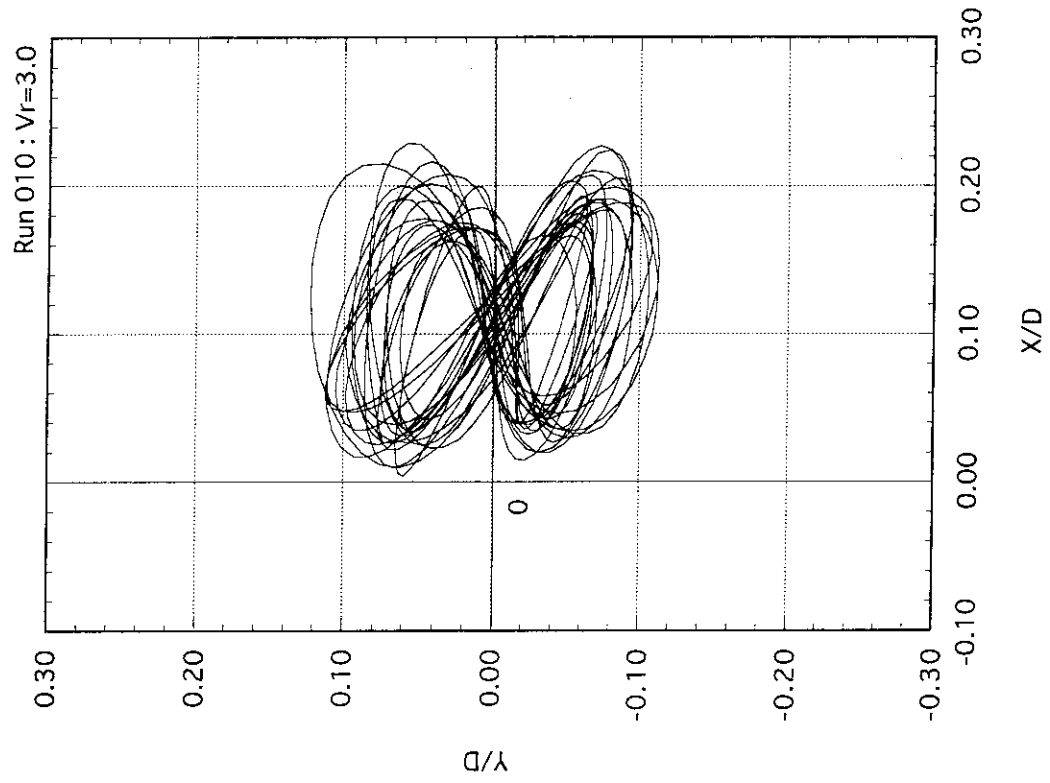


図 4. 2 (f) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=3.0$)

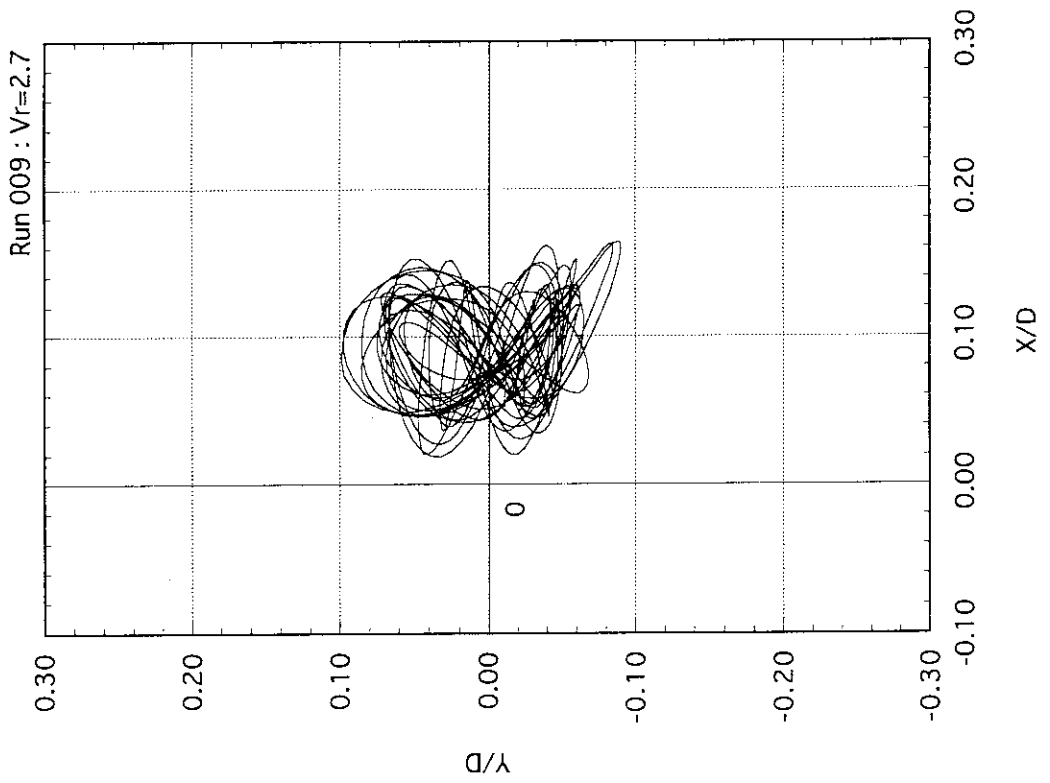


図 4. 2 (e) Type-1ウエル先端変位 ($V_r=2.7$)

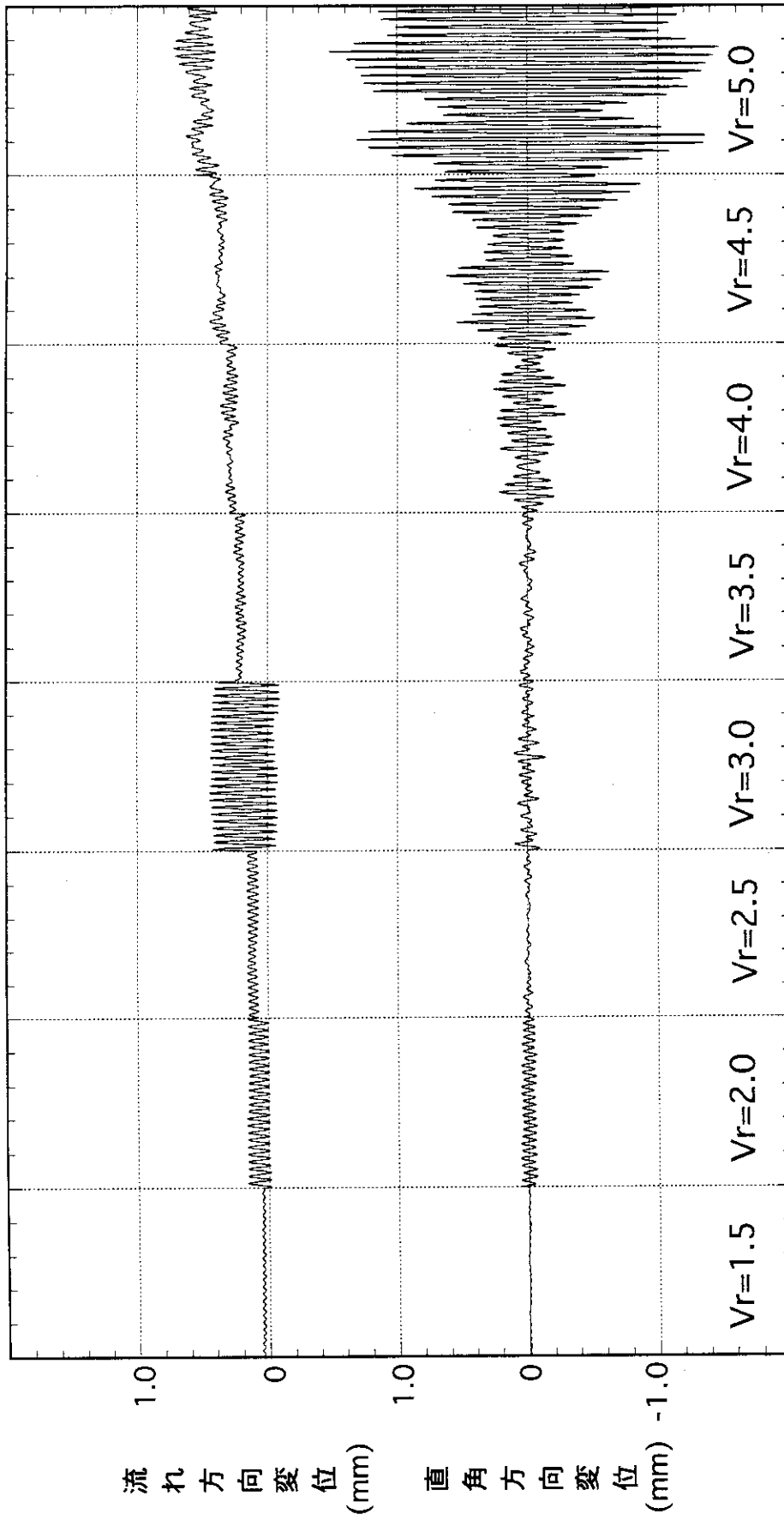


図 4.3 Type-2 試験体振動波形

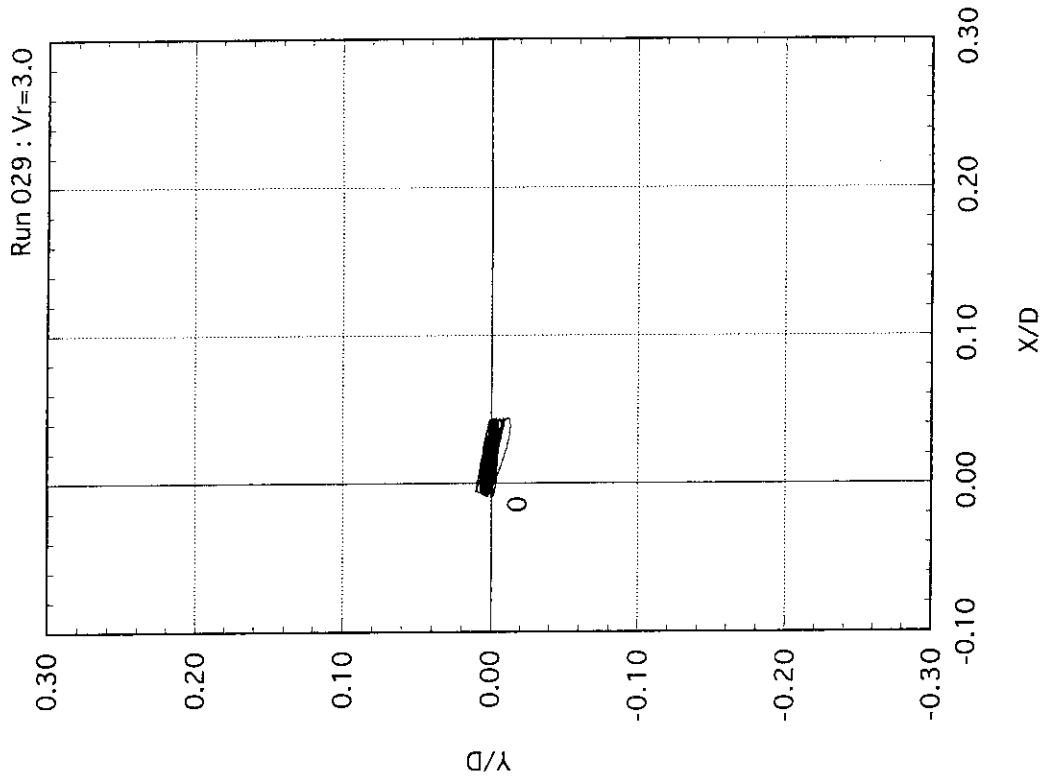


図4.4 (b) Type-2ウエル先端変位 (Vr=3.0)

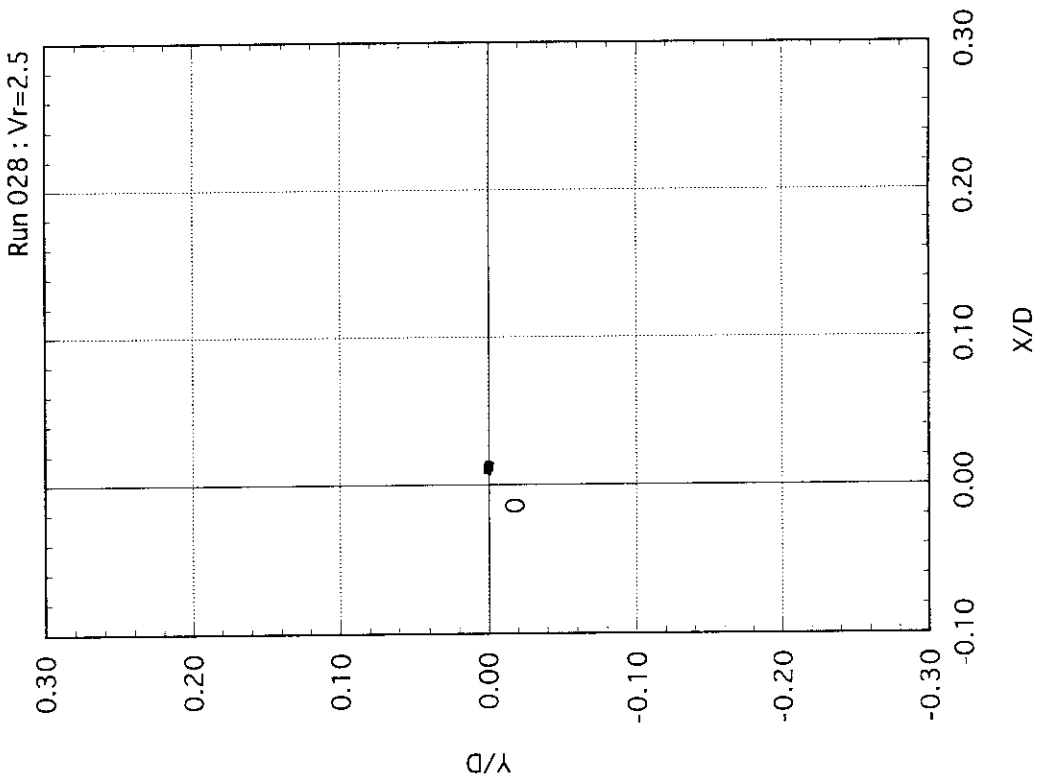


図4.4 (a) Type-2ウエル先端変位 (Vr=2.5)

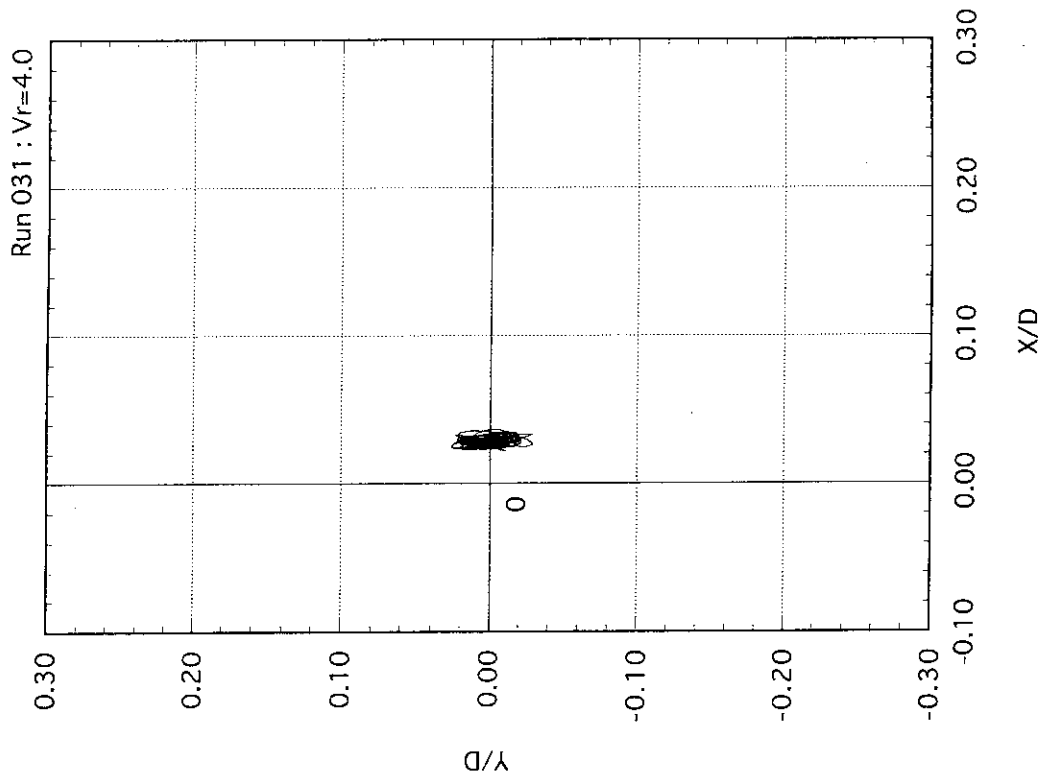


図 4. 4 (d) Type-2ウエル先端変位 (Vr=4.0)

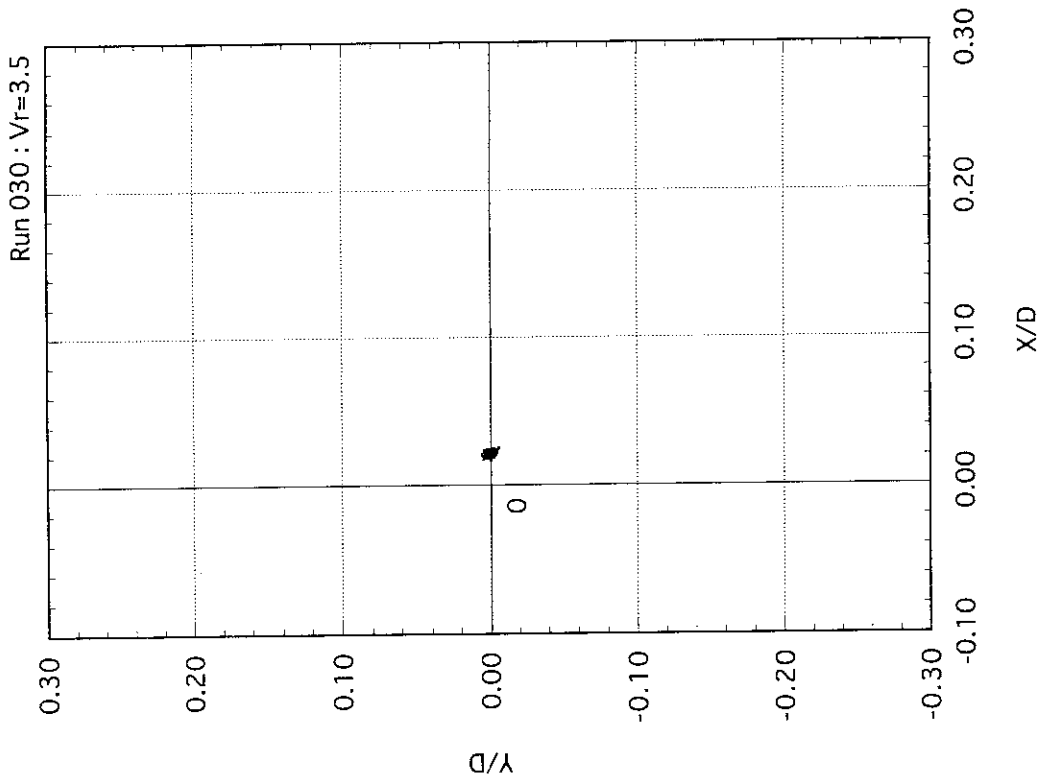


図 4. 4 (c) Type-2ウエル先端変位 (Vr=3.5)

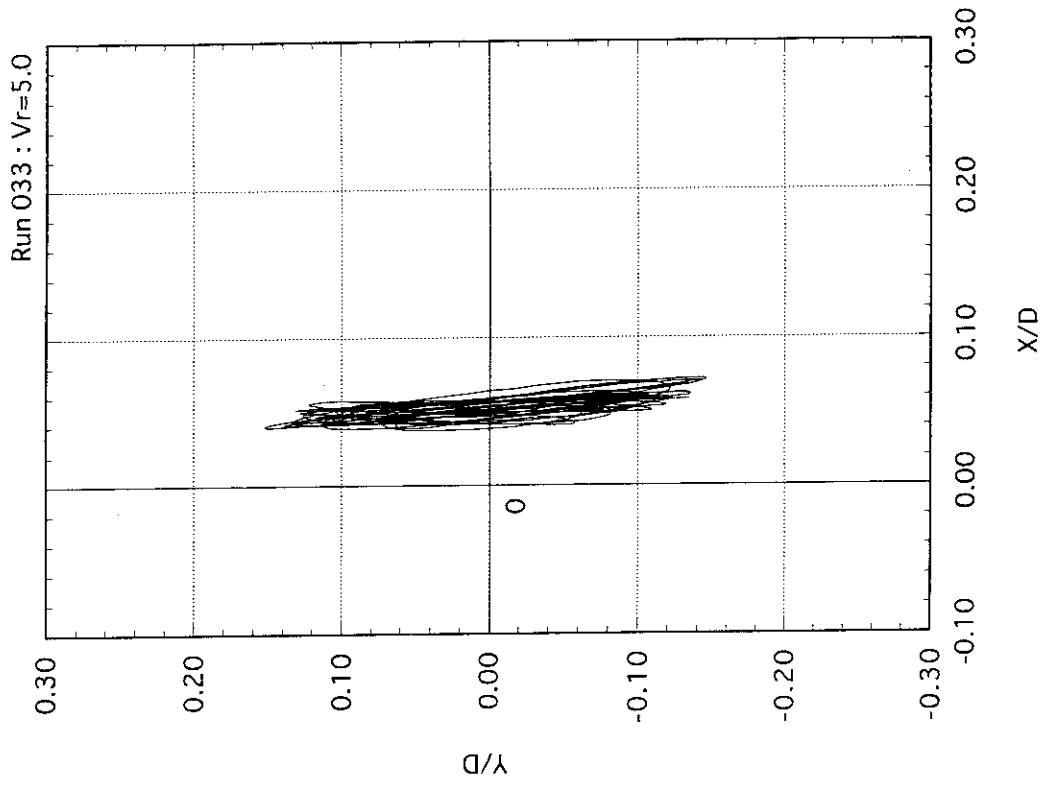


図 4. 4 (f) Type-2ウエル先端変位 (Vr=5.0)

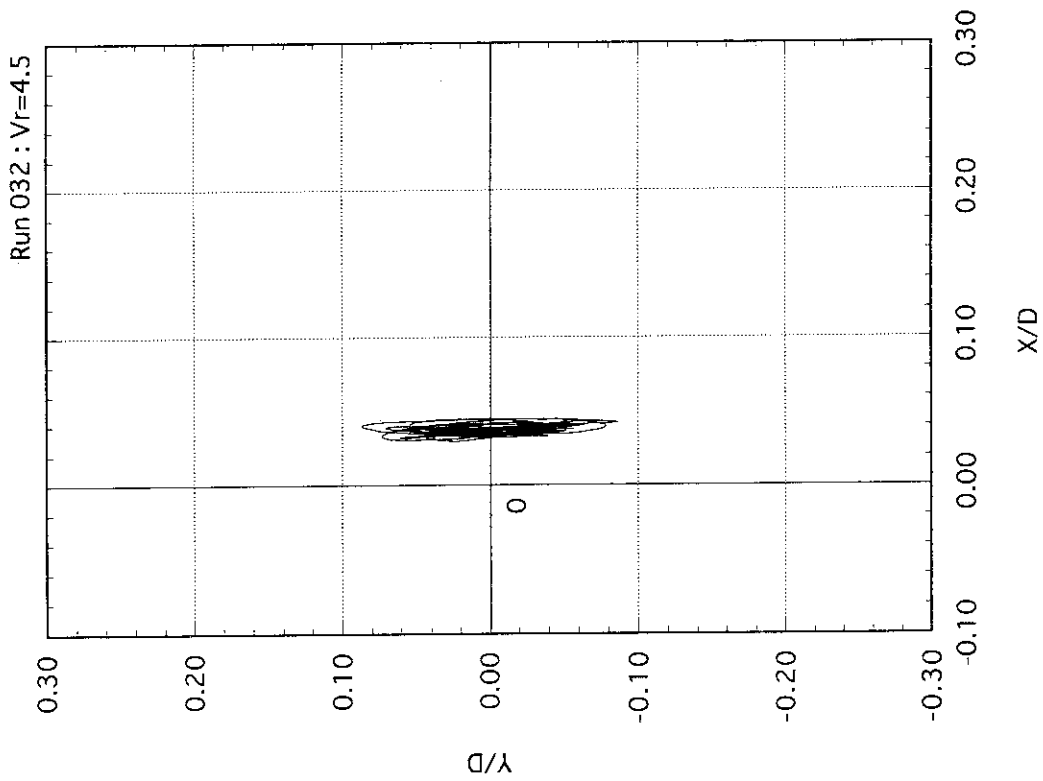


図 4. 4 (e) Type-2ウエル先端変位 (Vr=4.5)

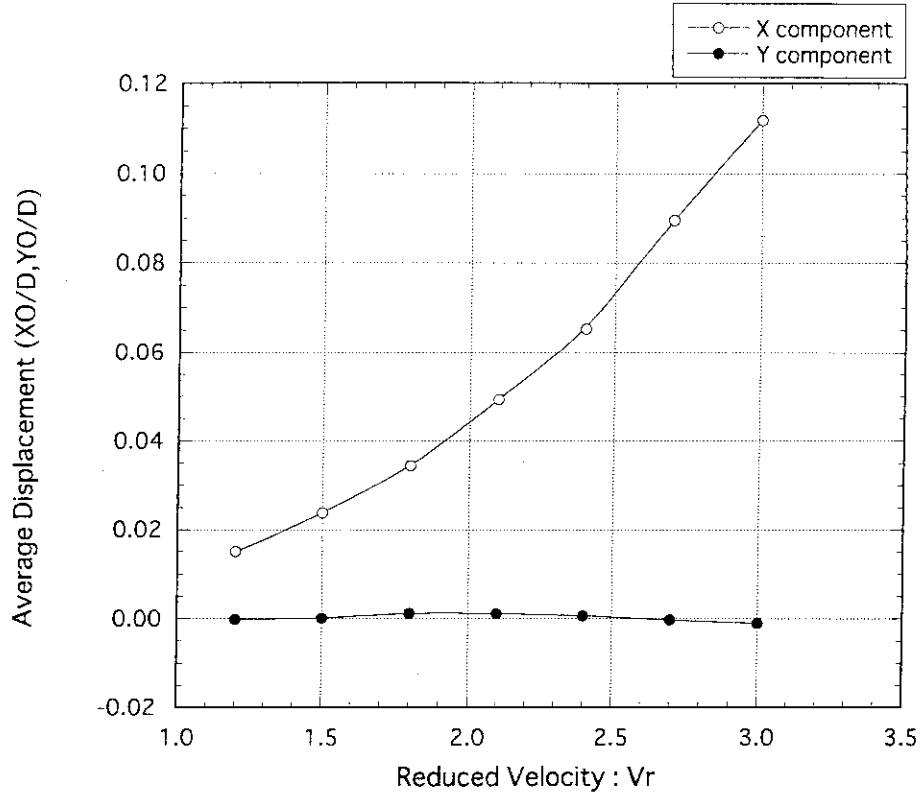


図 4.5 (a) 変位応答線図 (Type-1, 平均変位)

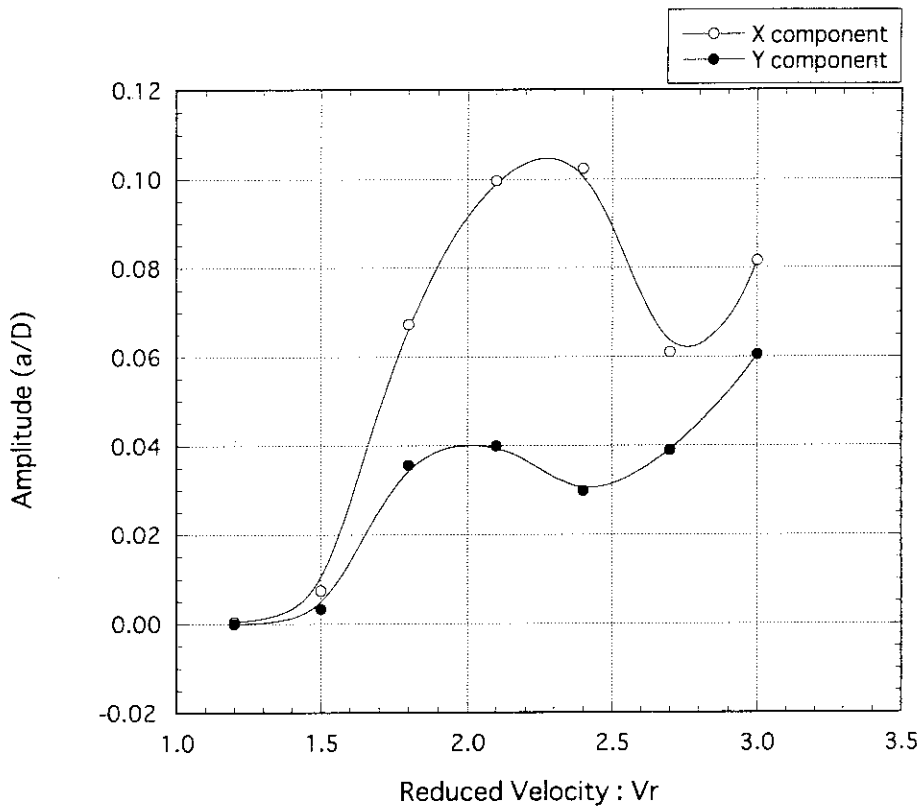


図 4.5 (b) 変位応答線図 (Type-1, 振幅)

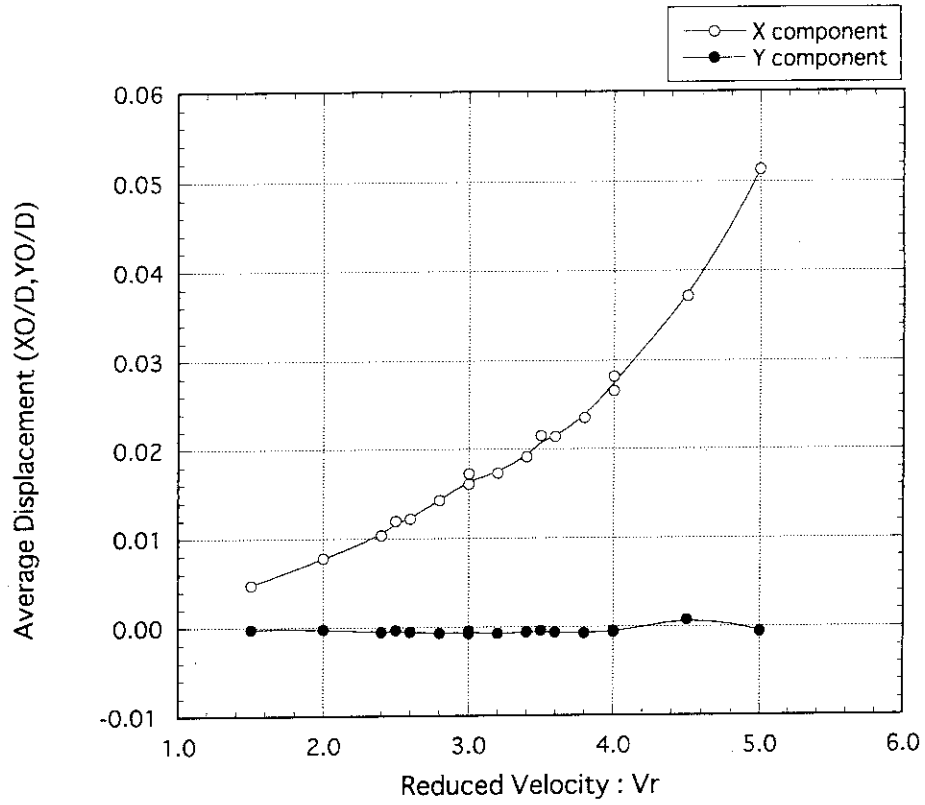


図 4.6 (a) 変位応答線図 (Type-2, 平均変位)

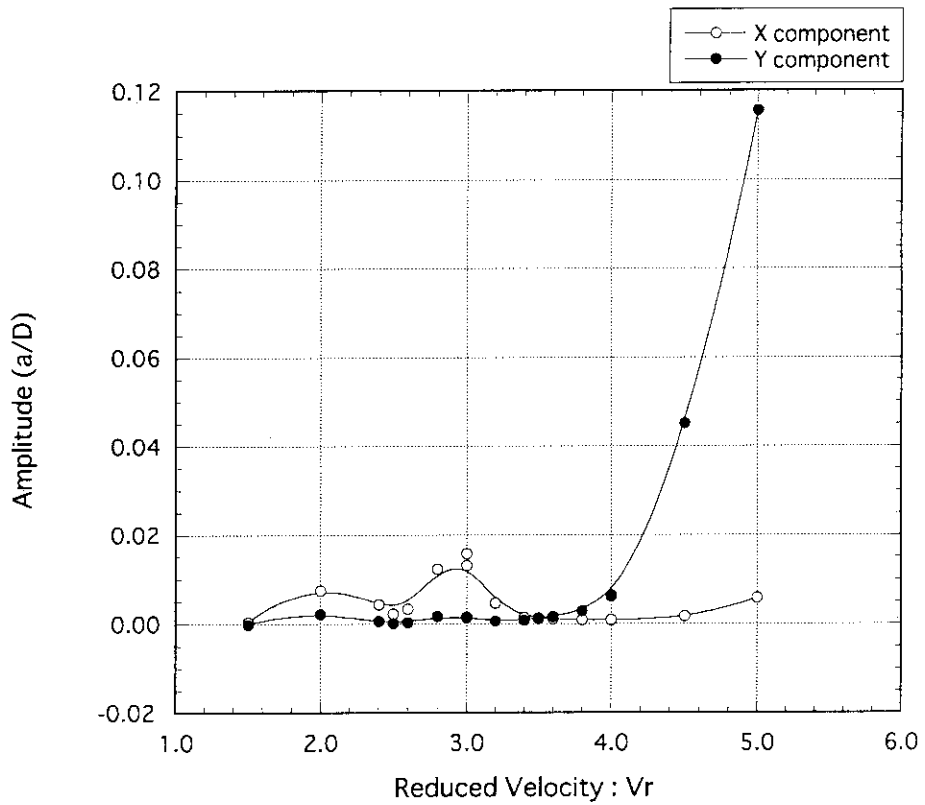


図 4.6 (b) 変位応答線図 (Type-2, 振幅)

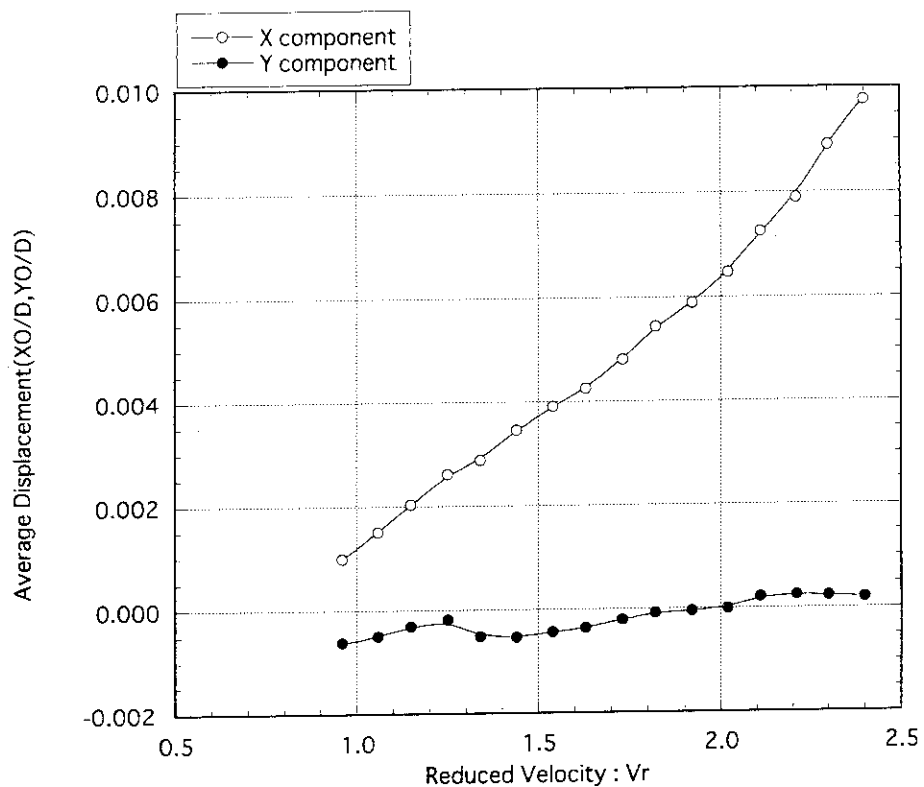


図 4.7 (a) 変位応答線図 (Type-A, 平均変位)

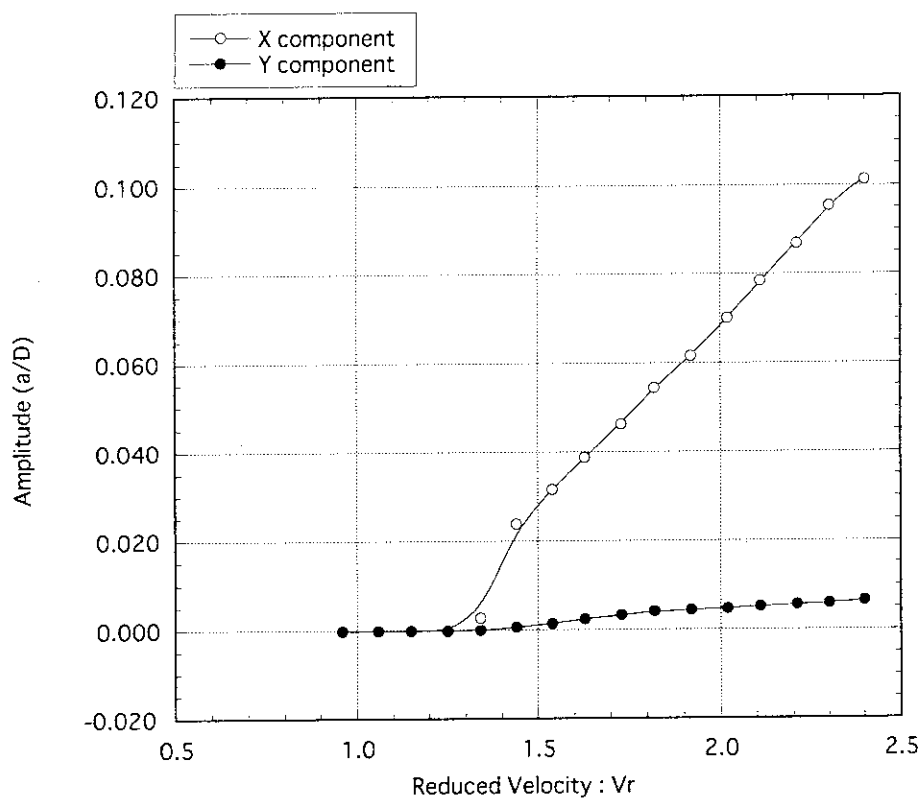


図 4.7 (b) 変位応答線図 (Type-A, 振幅)

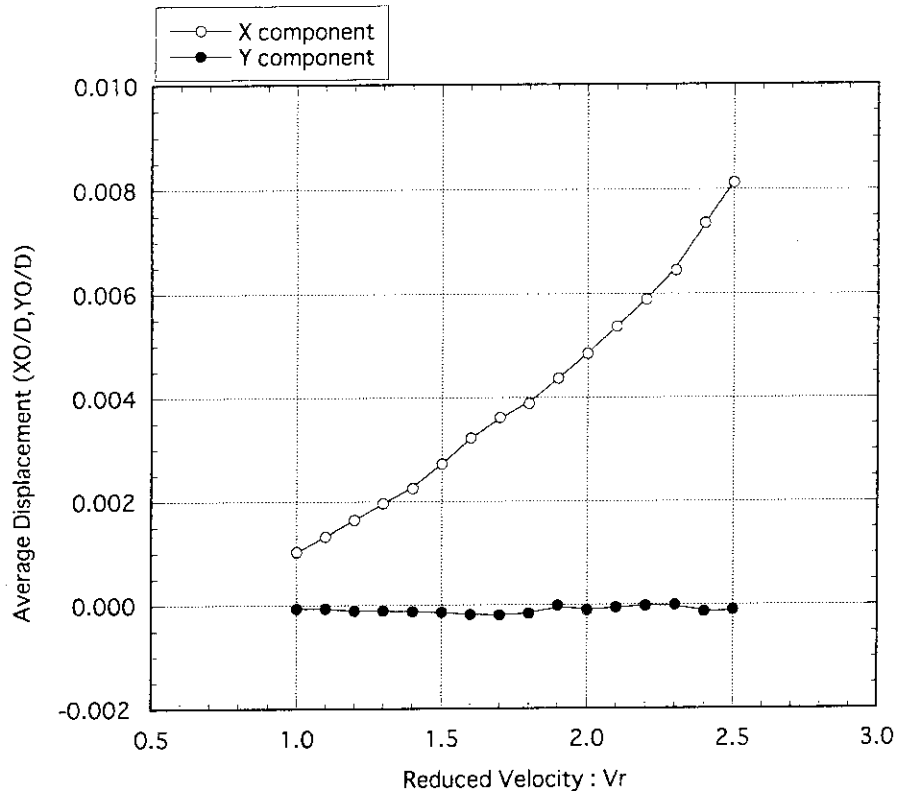


図 4.8 (a) 変位応答線図 (Type-B, 平均変位)

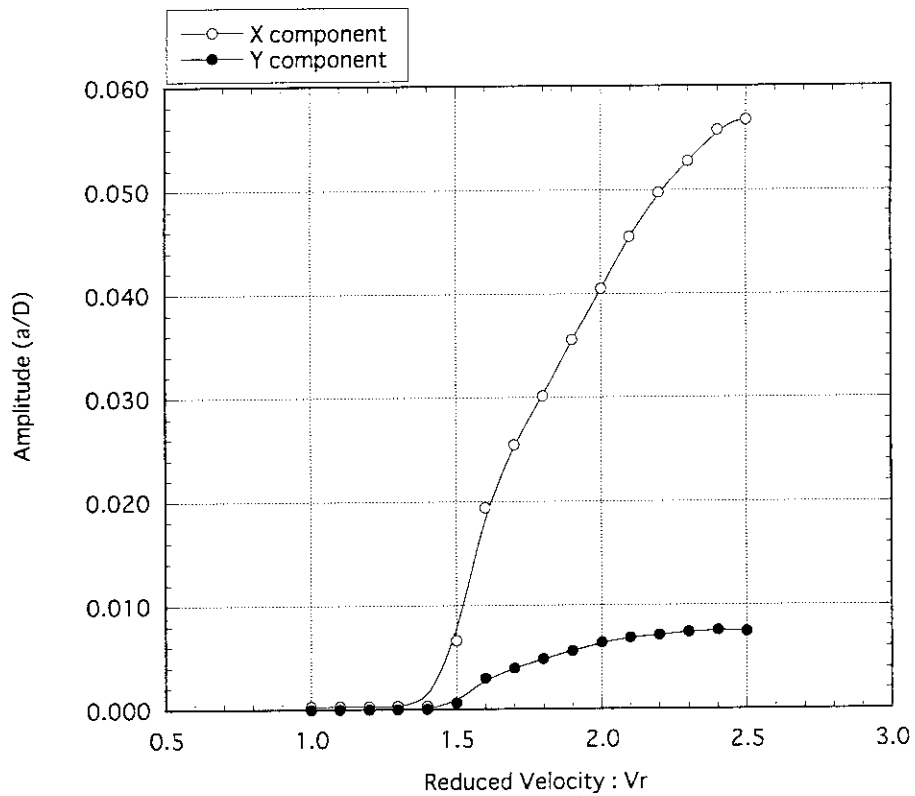


図 4.8 (b) 変位応答線図 (Type-B, 振幅)

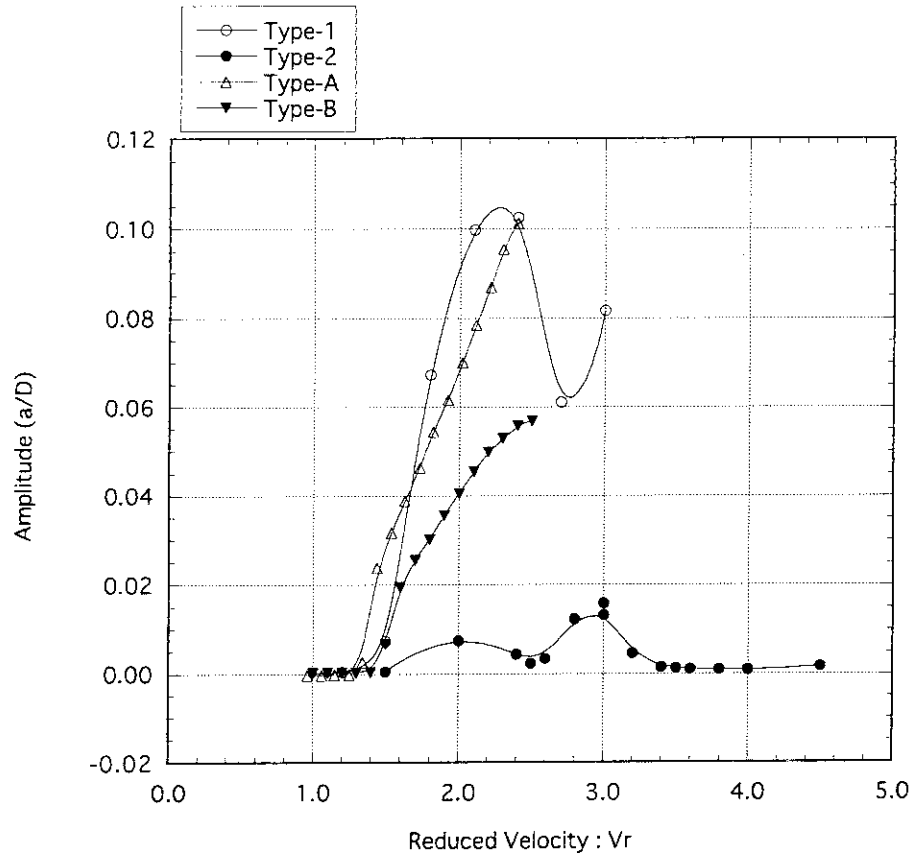


図 4.9 各試験体の変位応答（流れ方向振幅）の比較

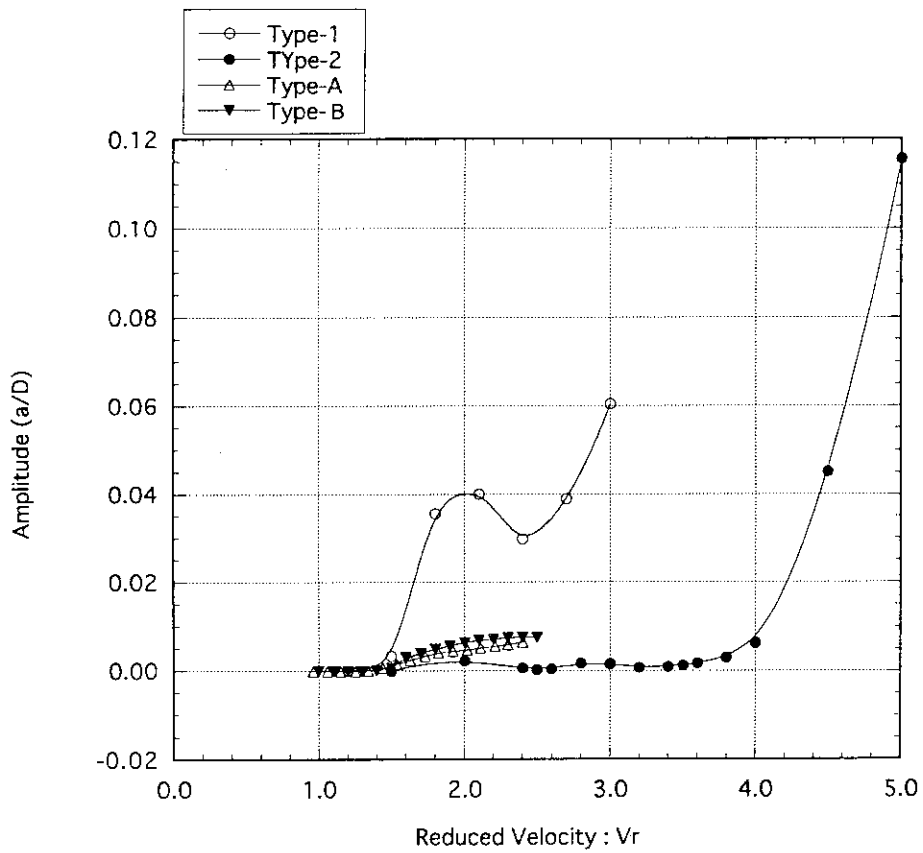


図 4.10 各試験体の変位応答（直角方向振幅）の比較

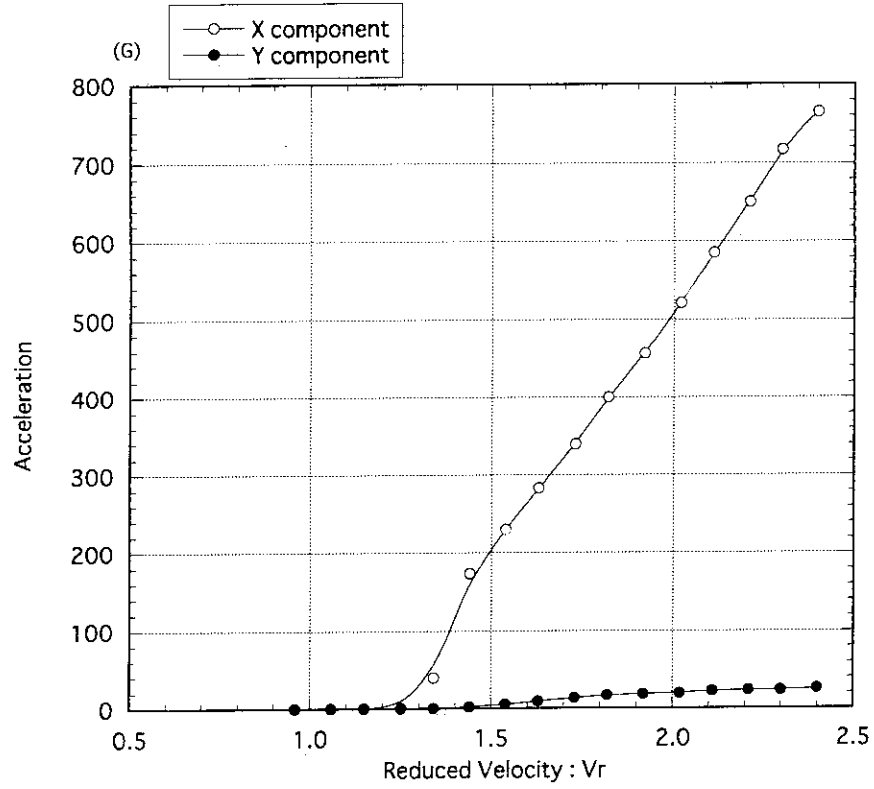


図 4.11 加速度応答線図 (Type-A)

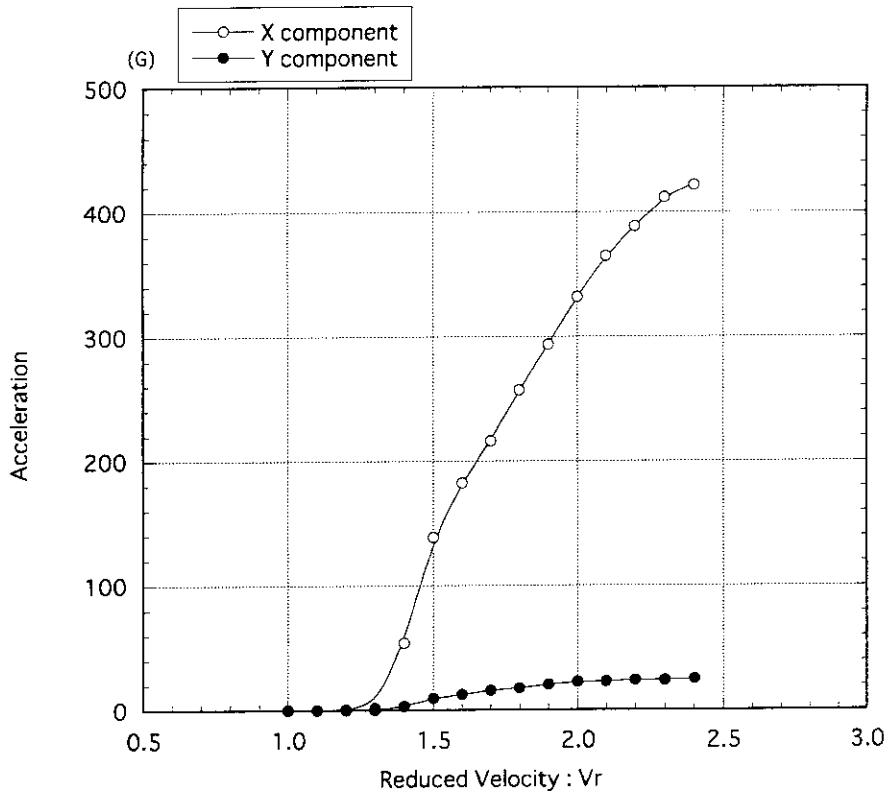


図 4.12 加速度応答線図 (Type-B)

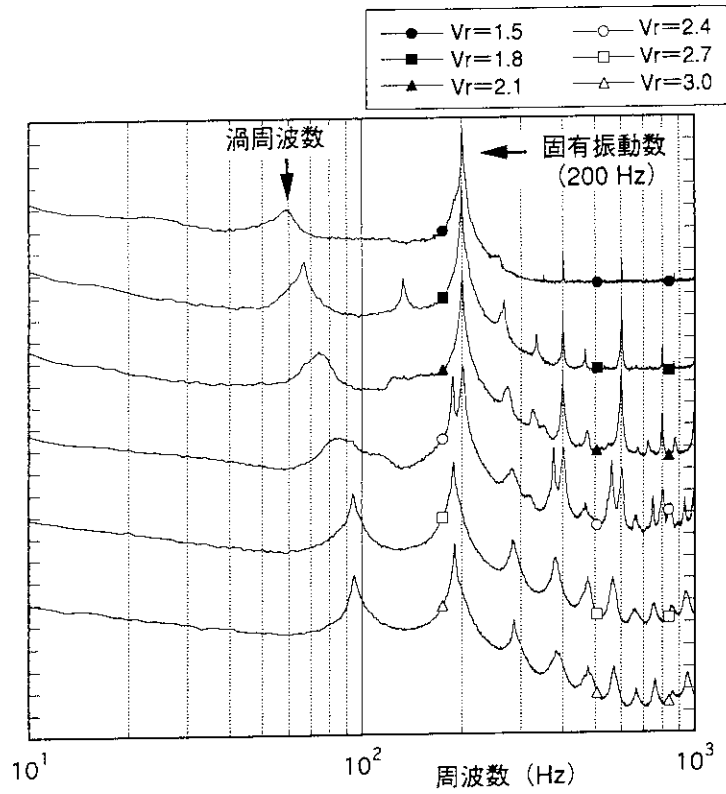


図 4.13(a) 周波数スペクトル (Type-1, 流れ方向)

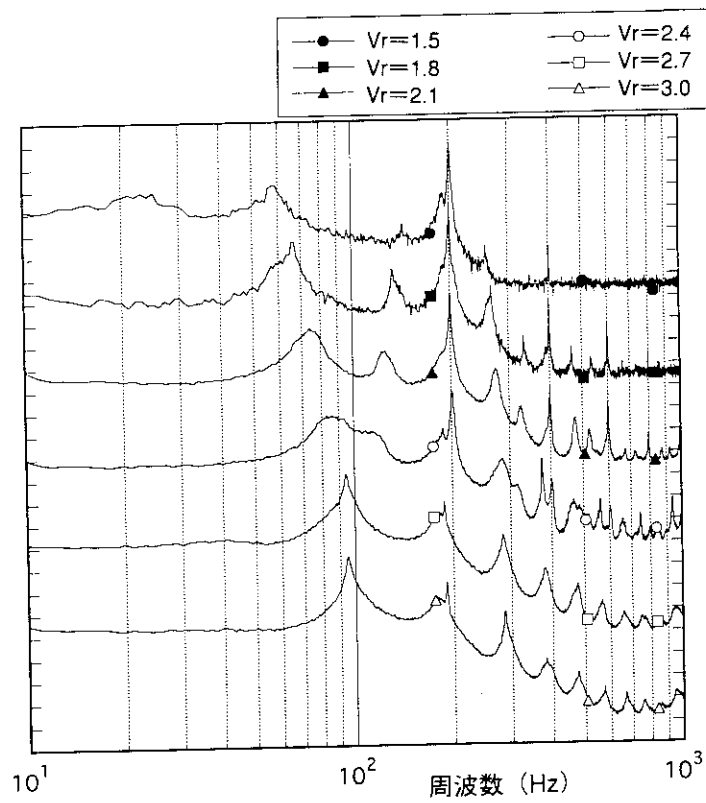


図 4.13(b) 周波数スペクトル (Type-1, 直角方向)

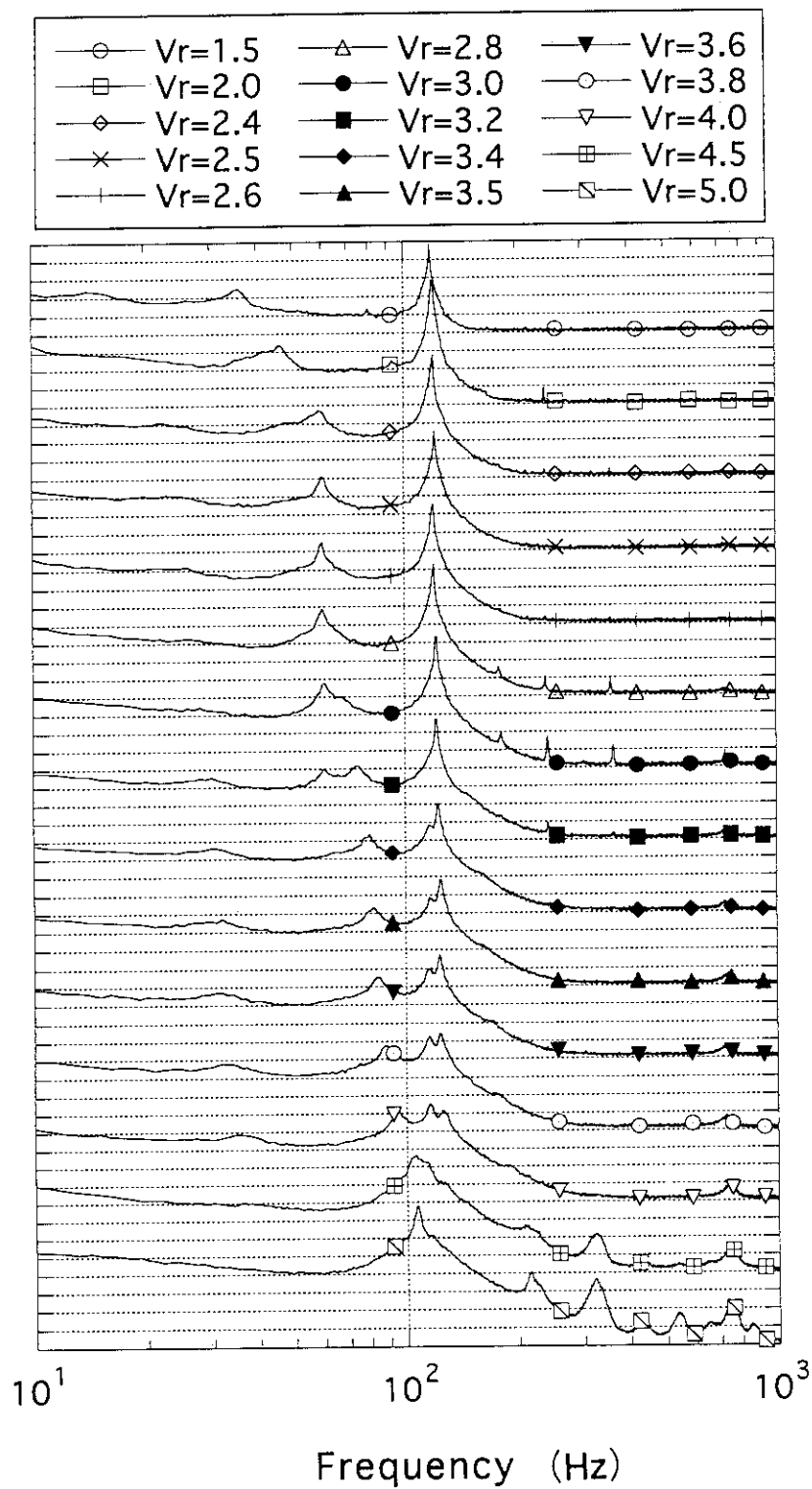


図 4.14(a) 周波数スペクトル (Type-2, 流れ方向)

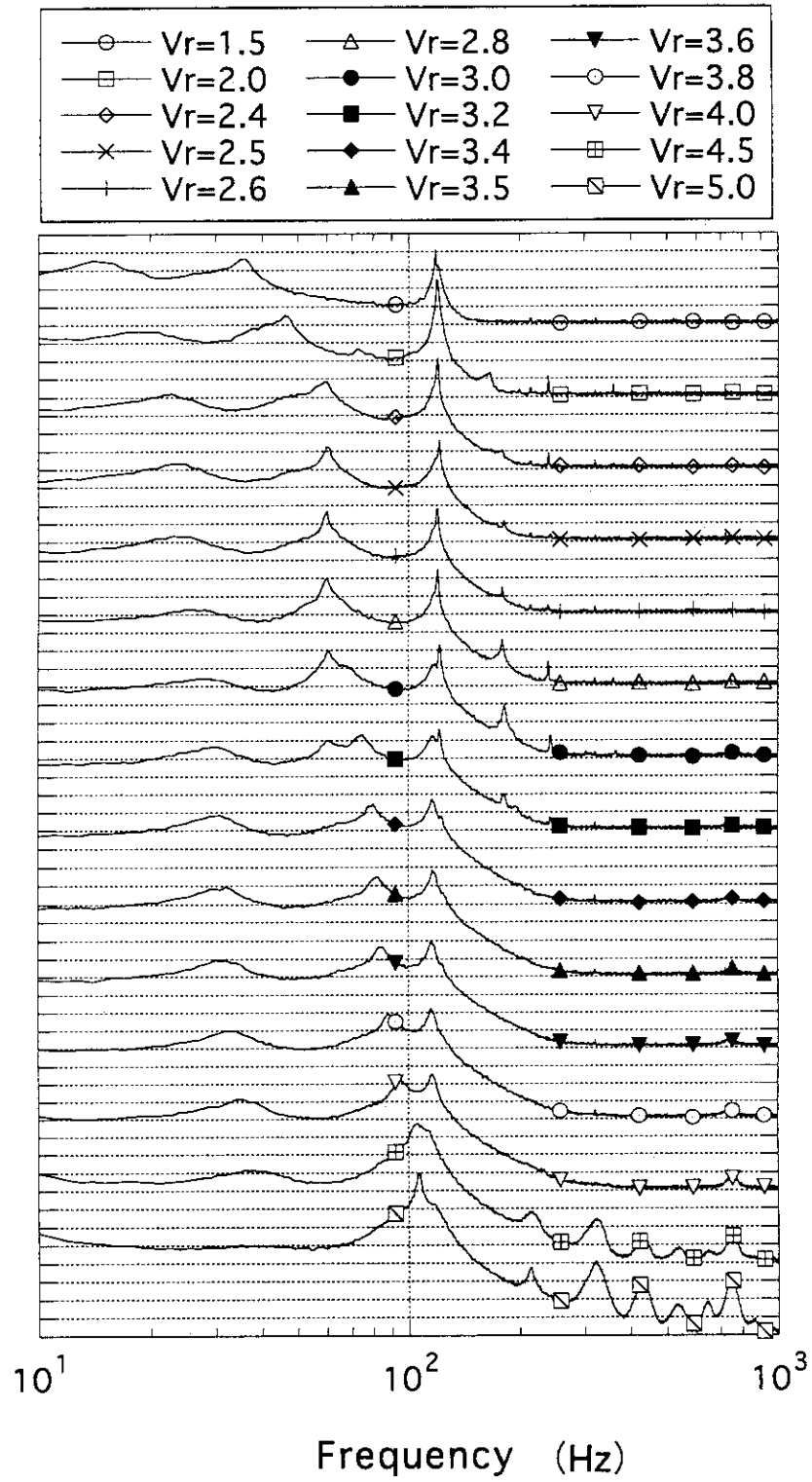


図 4.14(b) 周波数スペクトル (Type-2, 直角方向)

- | | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| ○ Vr=0.96 | + Vr=1.344 | ◆ Vr=1.728 | □ Vr=2.112 |
| □ Vr=1.056 | △ Vr=1.44 | ▲ Vr=1.824 | ▣ Vr=2.208 |
| ◇ Vr=1.152 | ● Vr=1.536 | ▼ Vr=1.92 | □ Vr=2.304 |
| × Vr=1.248 | ■ Vr=1.632 | ○ Vr=2.016 | ○ Vr=2.4 |

Type-A

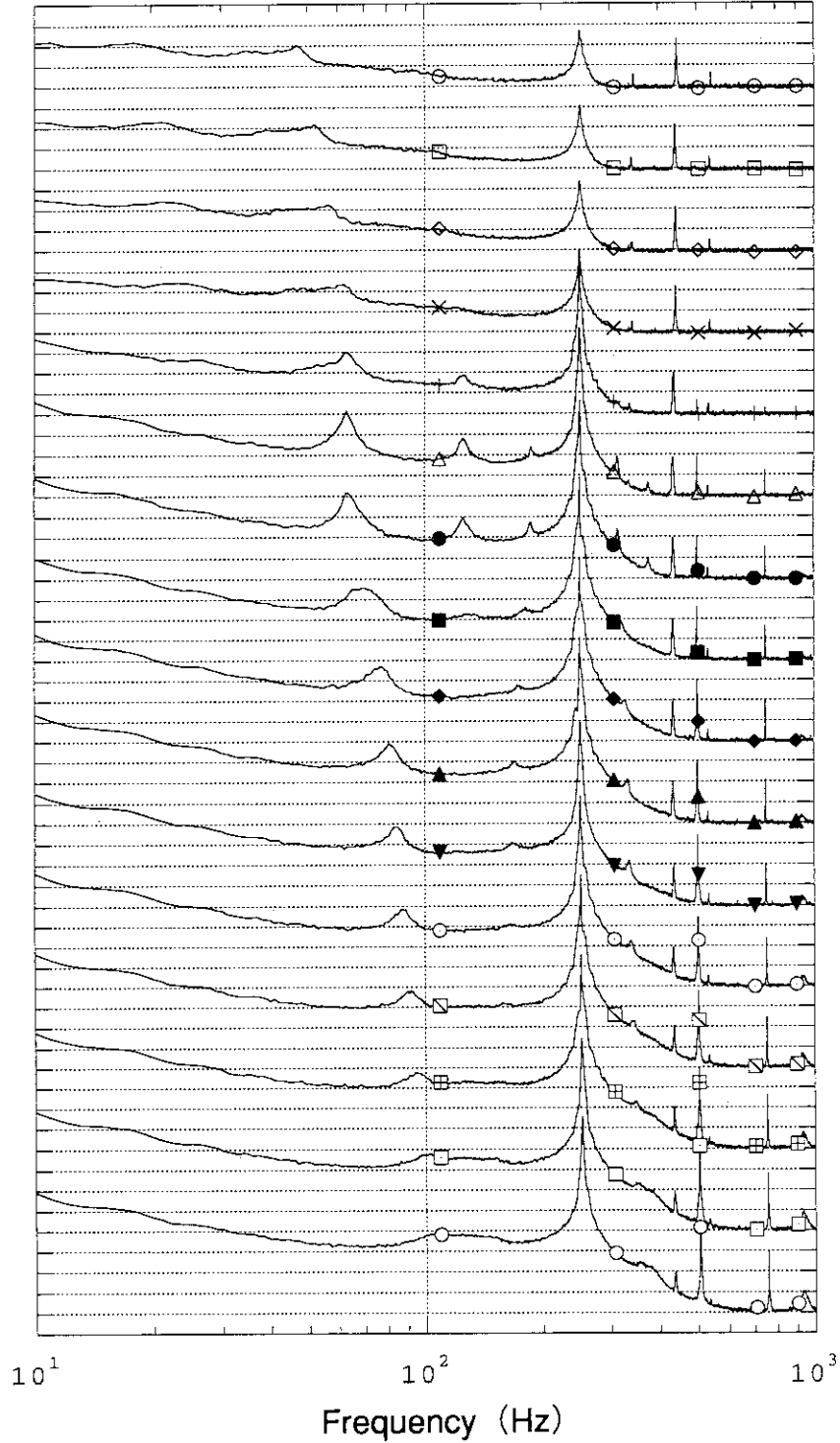


図 4.15(a) 周波数スペクトル (Type-A, 流れ方向)

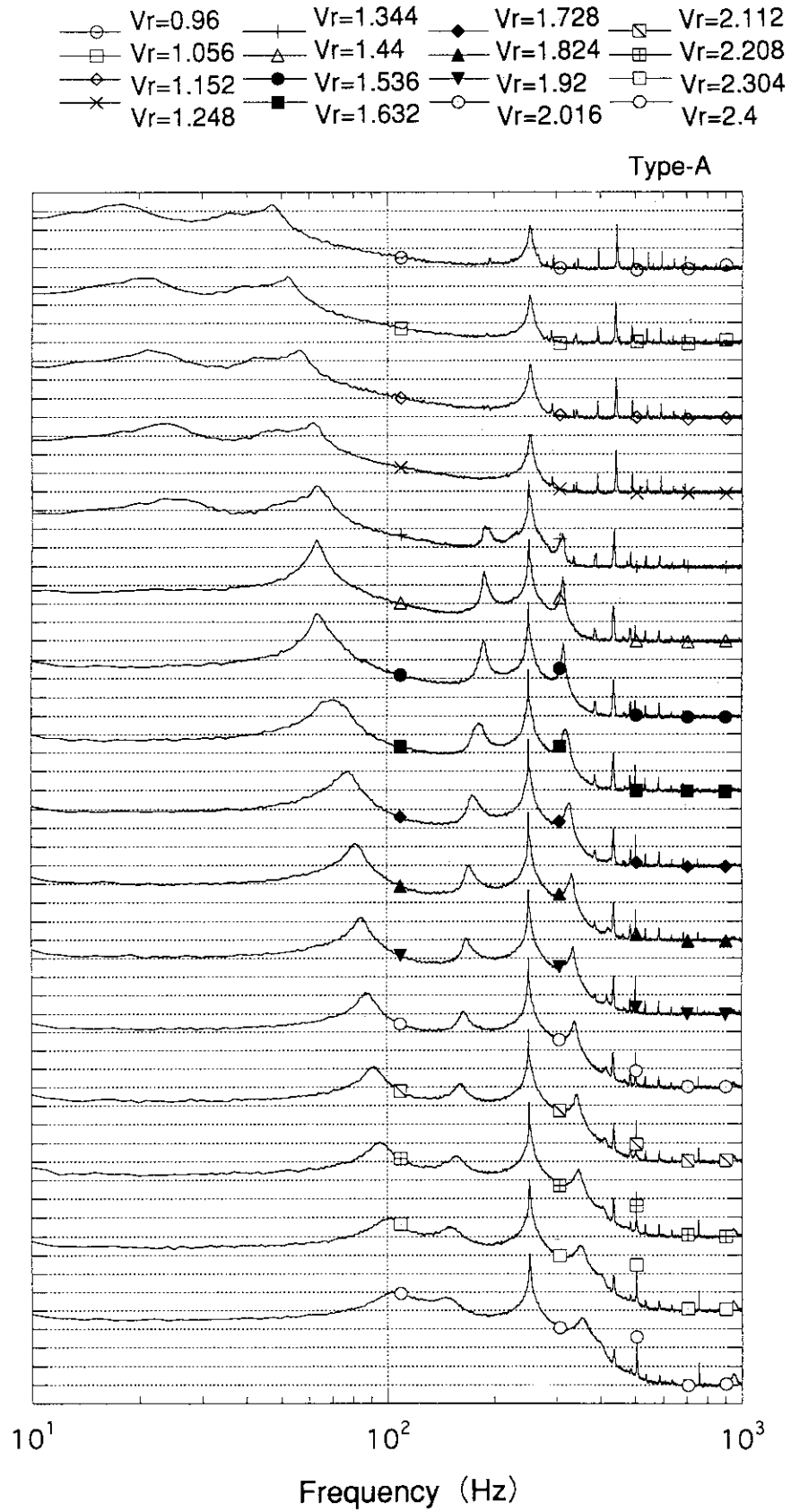


図 4.15(b) 周波数スペクトル (Type-A, 直角方向)

- | | | | | | | | |
|---|----------|---|----------|---|----------|---|----------|
| ○ | Vr=0.96 | + | Vr=1.344 | ◆ | Vr=1.728 | □ | Vr=2.112 |
| □ | Vr=1.056 | △ | Vr=1.44 | ▲ | Vr=1.824 | ▣ | Vr=2.208 |
| ◇ | Vr=1.152 | ● | Vr=1.536 | ▼ | Vr=1.92 | □ | Vr=2.304 |
| × | Vr=1.248 | ■ | Vr=1.632 | ○ | Vr=2.016 | ○ | Vr=2.4 |

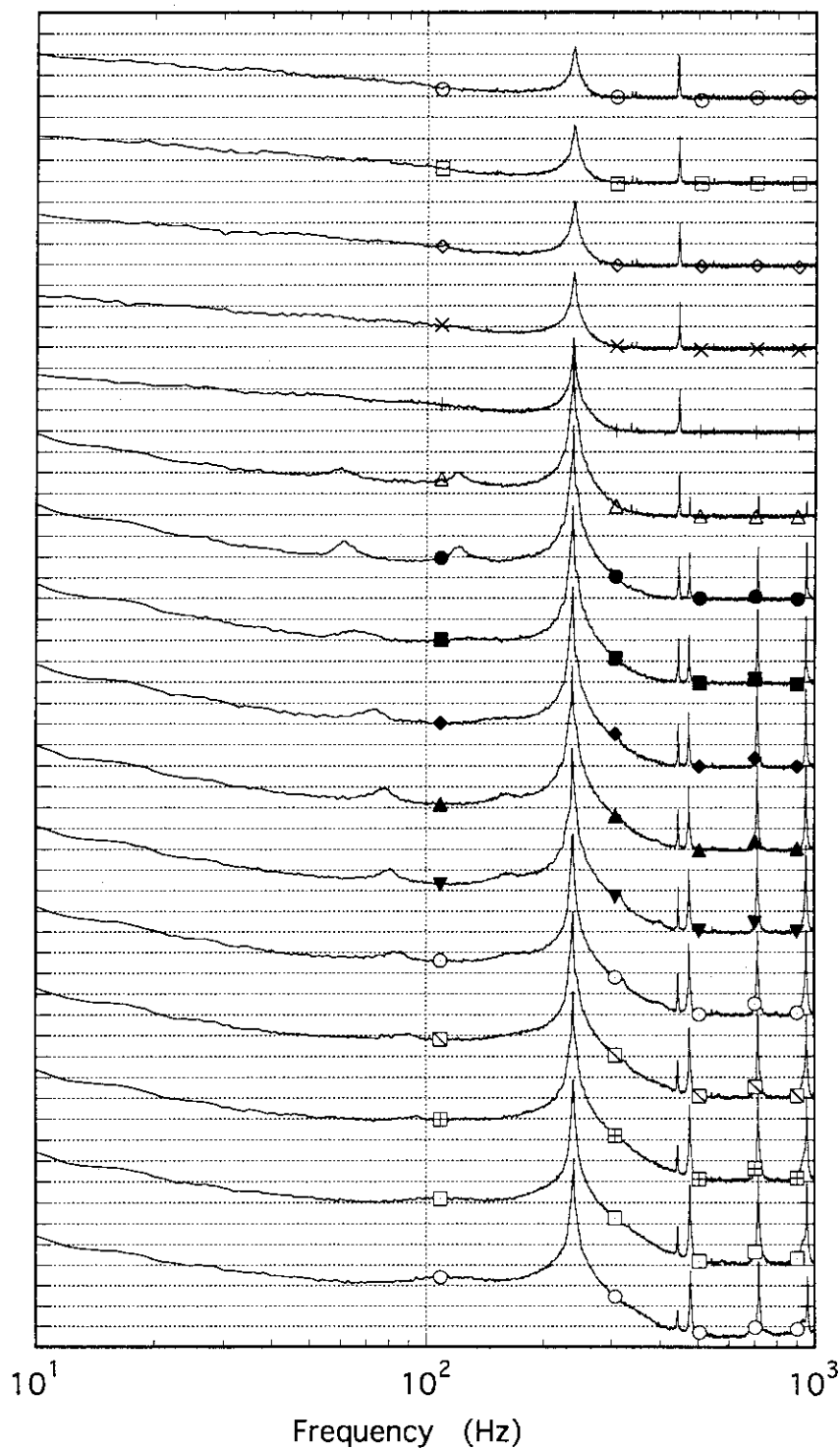


図4.16(a) 周波数スペクトル (Type-B, 流れ方向)

- | | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| ○ Vr=0.96 | ⊥ Vr=1.344 | ● Vr=1.728 | □ Vr=2.112 |
| ⊠ Vr=1.056 | △ Vr=1.44 | ▲ Vr=1.824 | ⊞ Vr=2.208 |
| ◇ Vr=1.152 | ● Vr=1.536 | ▼ Vr=1.92 | □ Vr=2.304 |
| × Vr=1.248 | ■ Vr=1.632 | ○ Vr=2.016 | ○ Vr=2.4 |

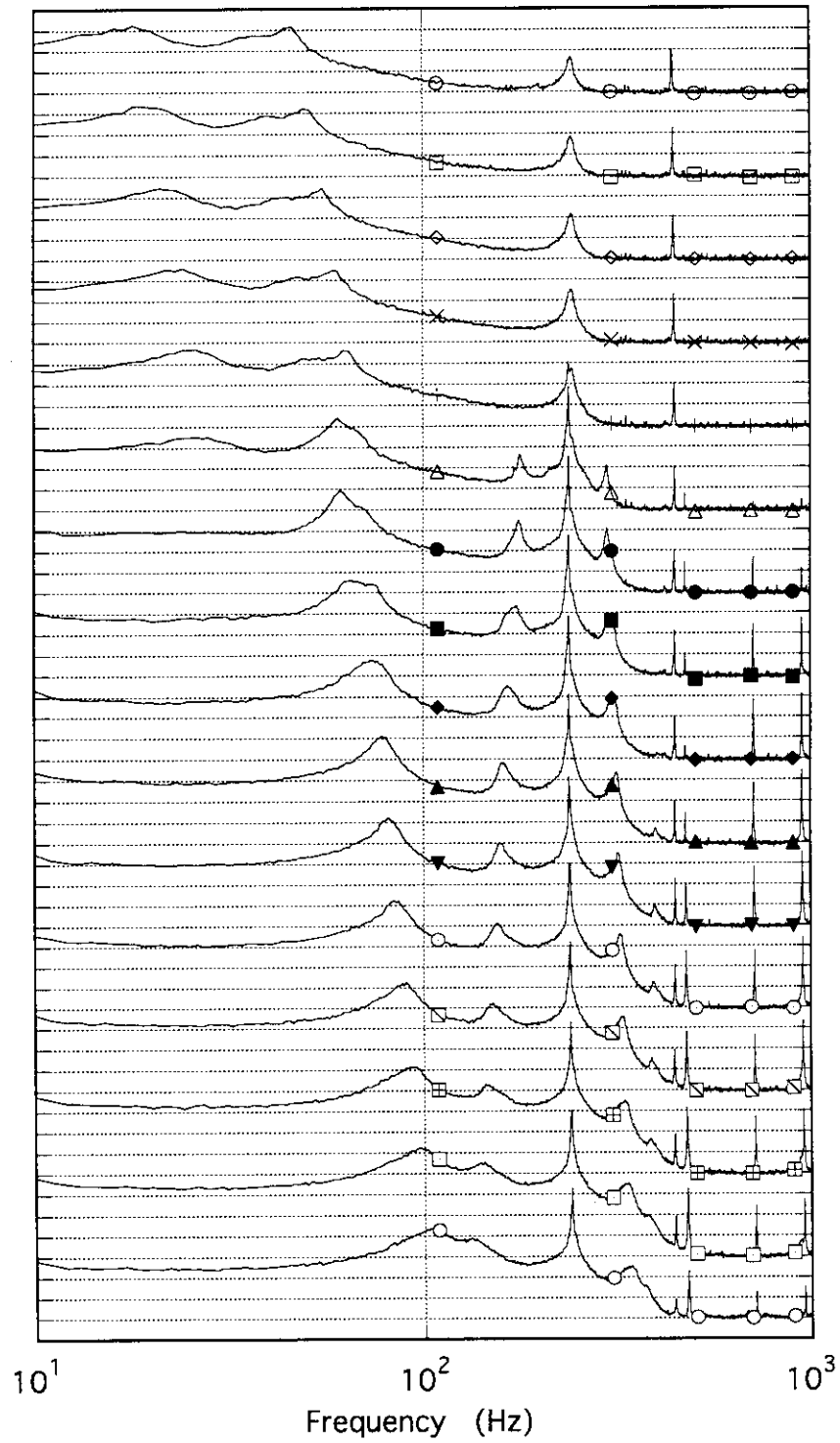


図4.16(b) 周波数スペクトル (Type-B, 直角方向)

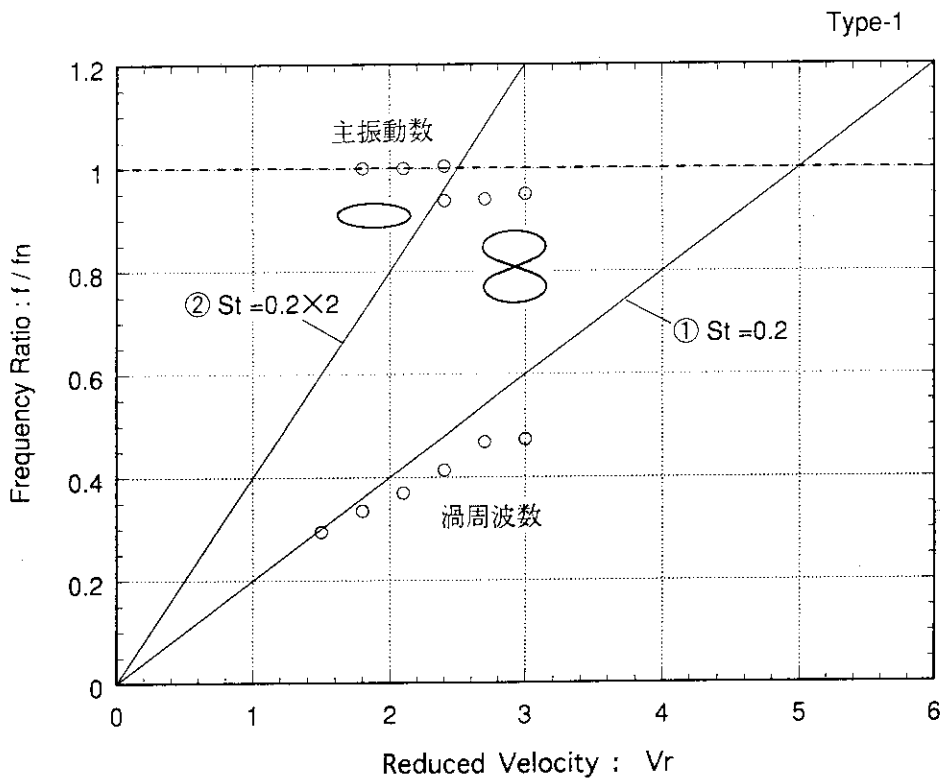


図 4.17 主振動数及び渦周波数 (Type-1)

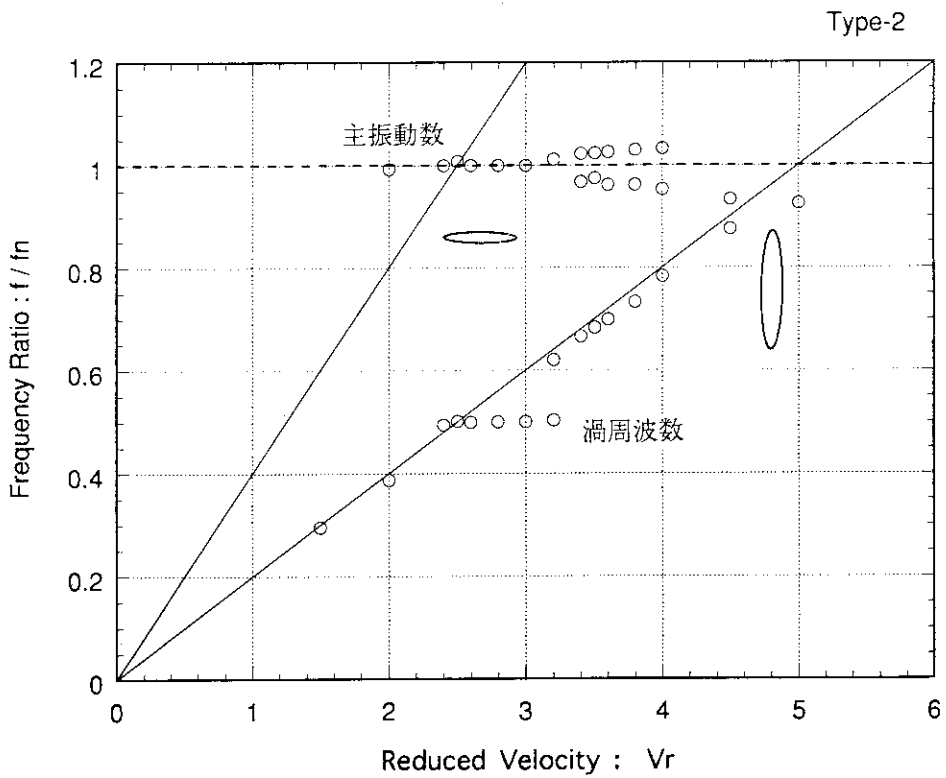


図 4.18 主振動数及び渦周波数 (Type-2)

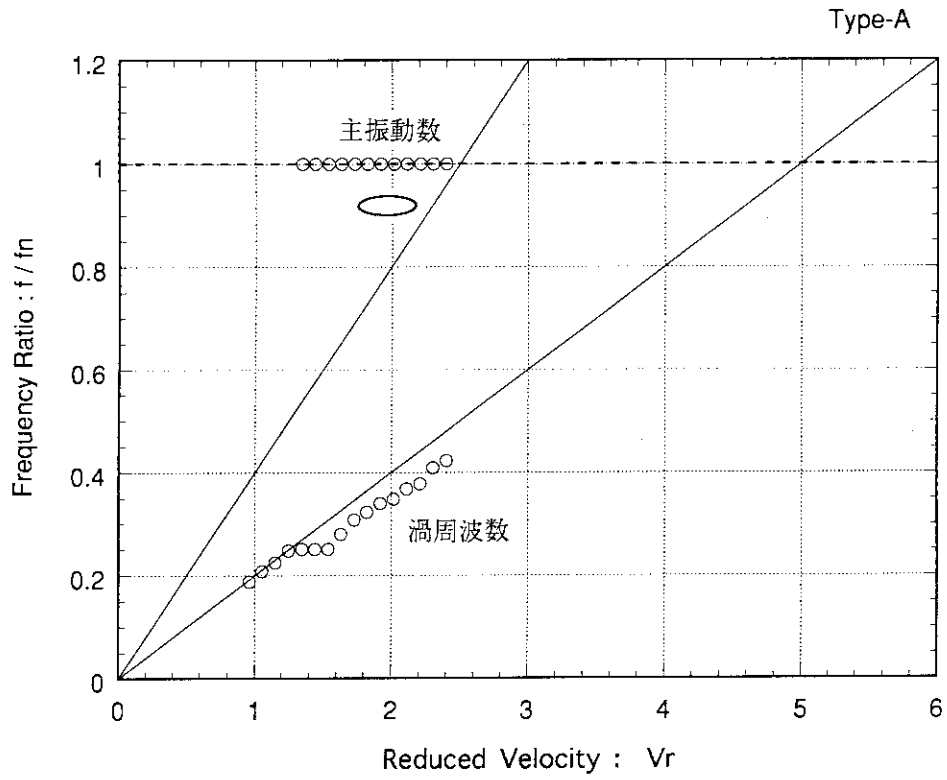


図 4.19 主振動数及び渦周波数 (Type-A)

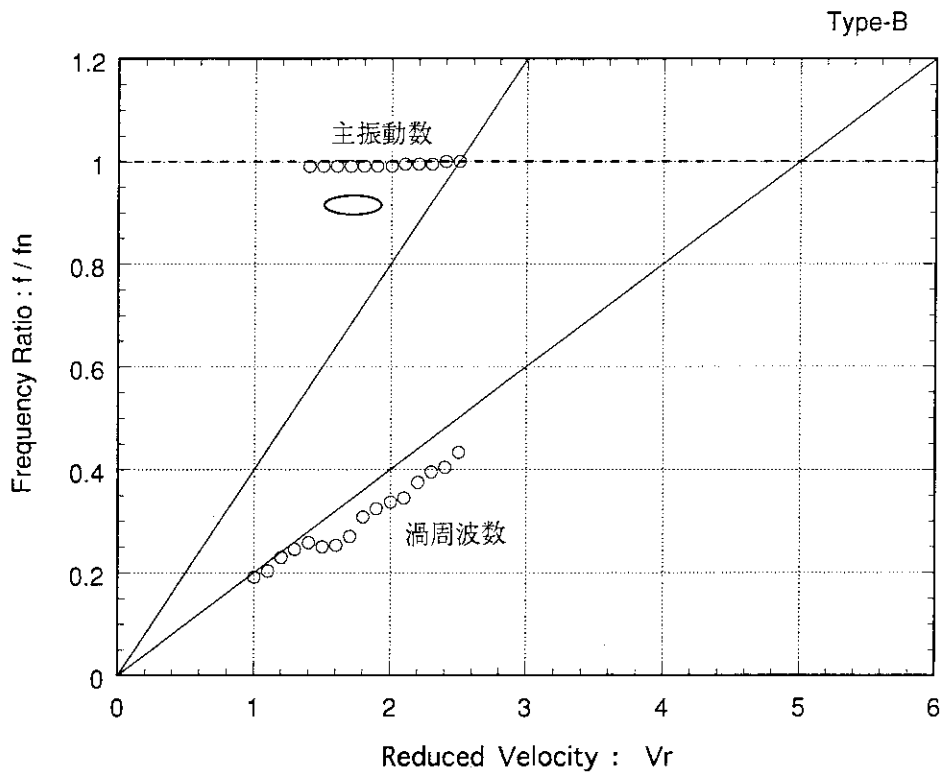


図 4.20 主振動数及び渦周波数 (Type-B)

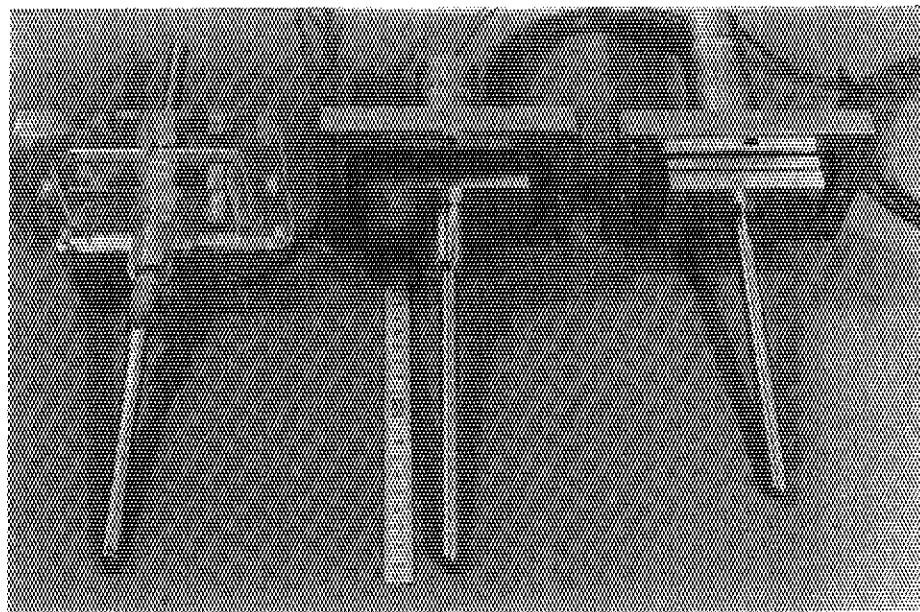


写真 2.1 Type-1, Type-A, Type-B試験体

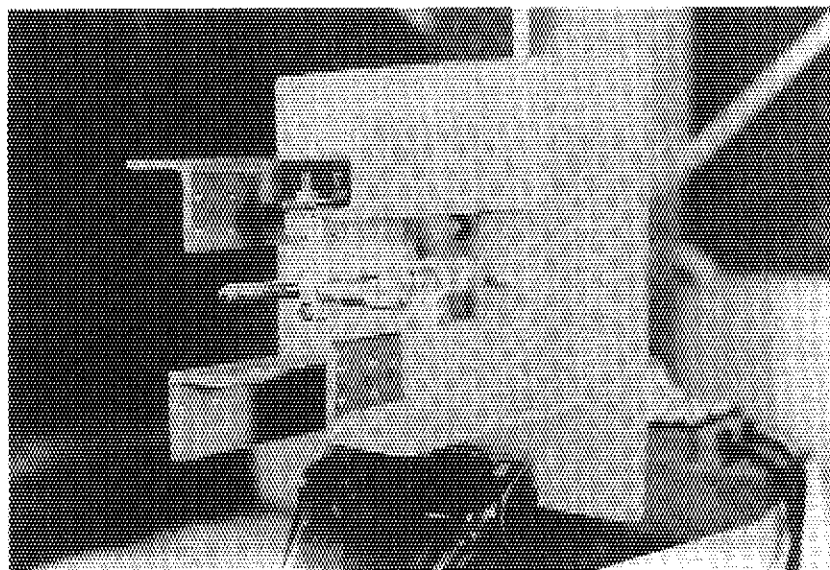


写真 3.1 変位-ひずみ校正試験

↓
流れ方向



流れ方向

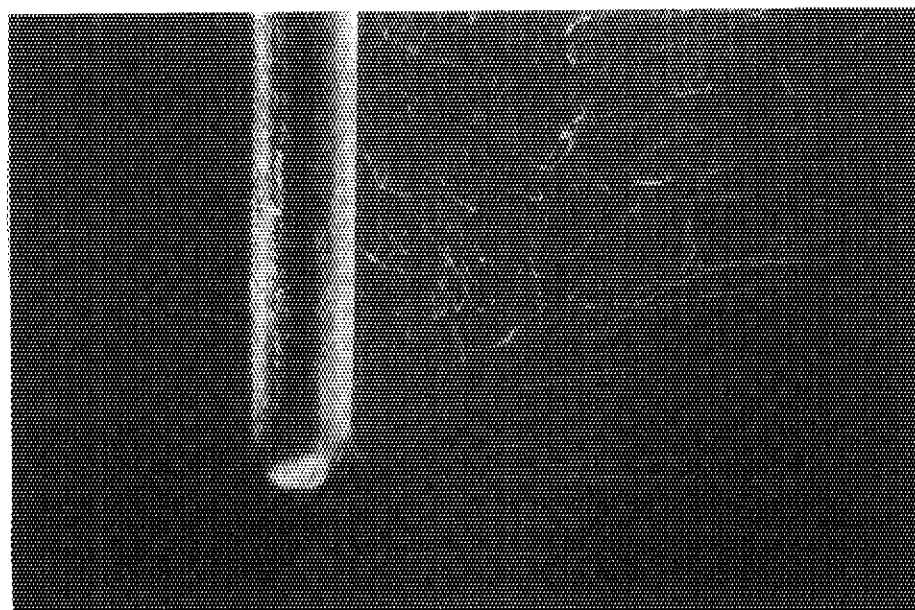


写真 4. 1 Type-1試験体周りの流れ ($V_r=1.8$)

↓
流れ方向



流れ方向
→

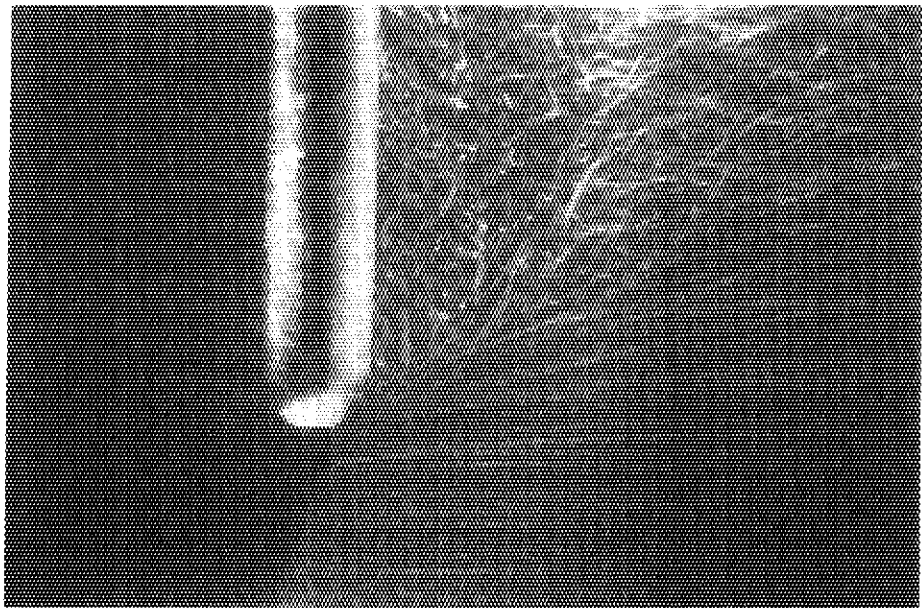


写真 4. 2 Type-1試験体周りの流れ ($V_r=2.5$)

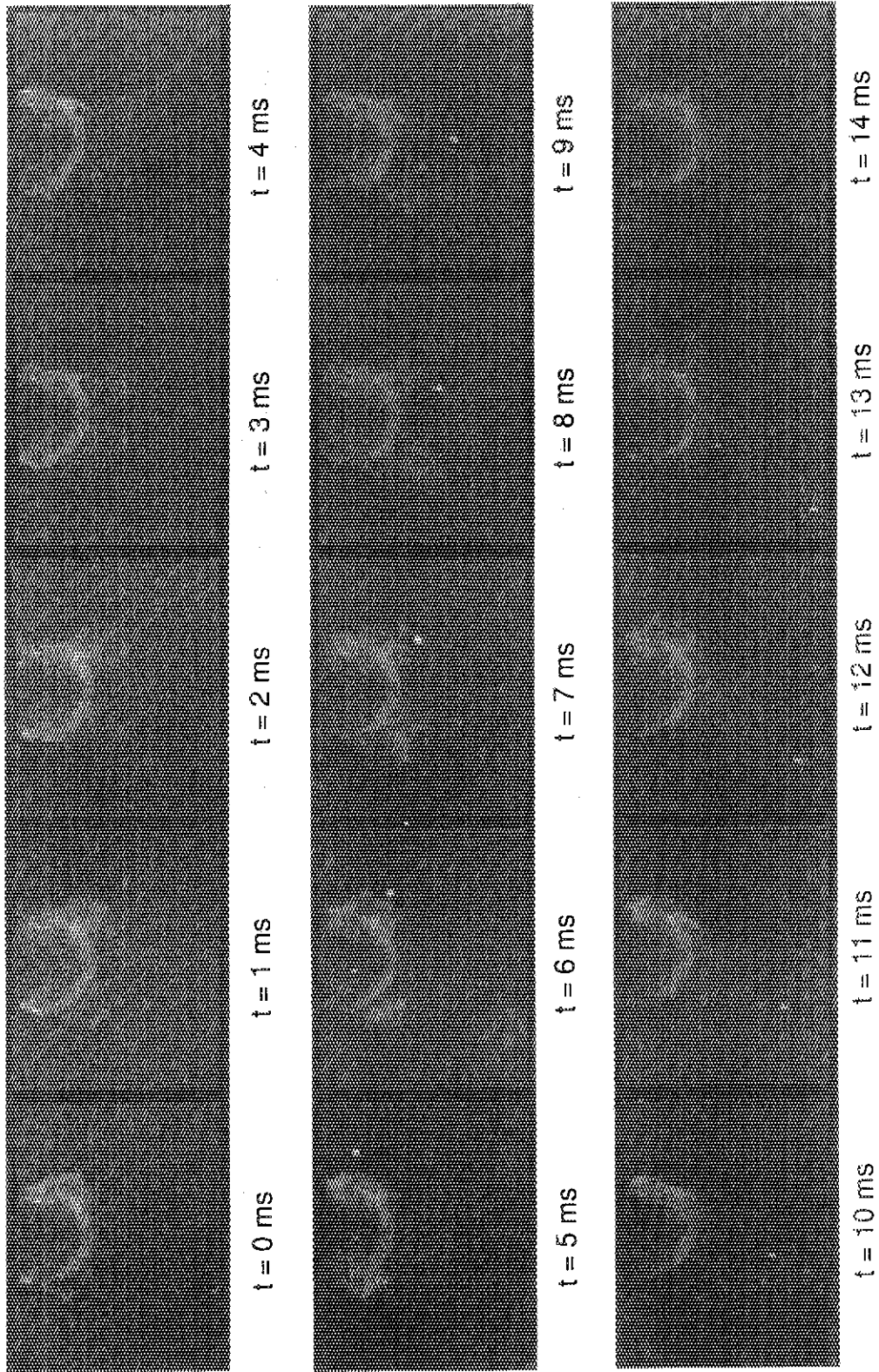


写真 4.3 対称渦 (Type-1, $Vr=2.0$)

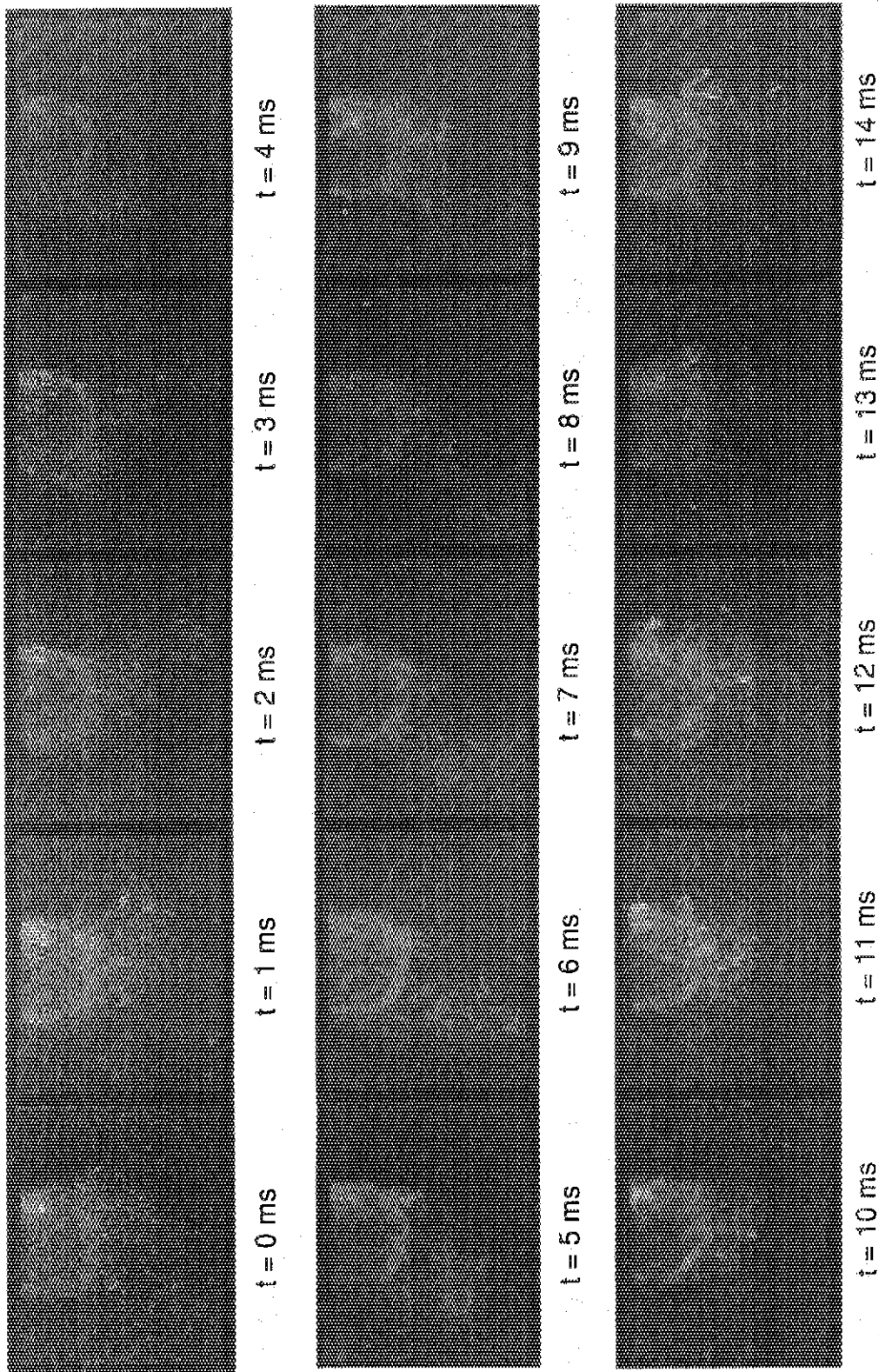


写真 4.4 交互渦 (Type-1, $V_r=2.4$)

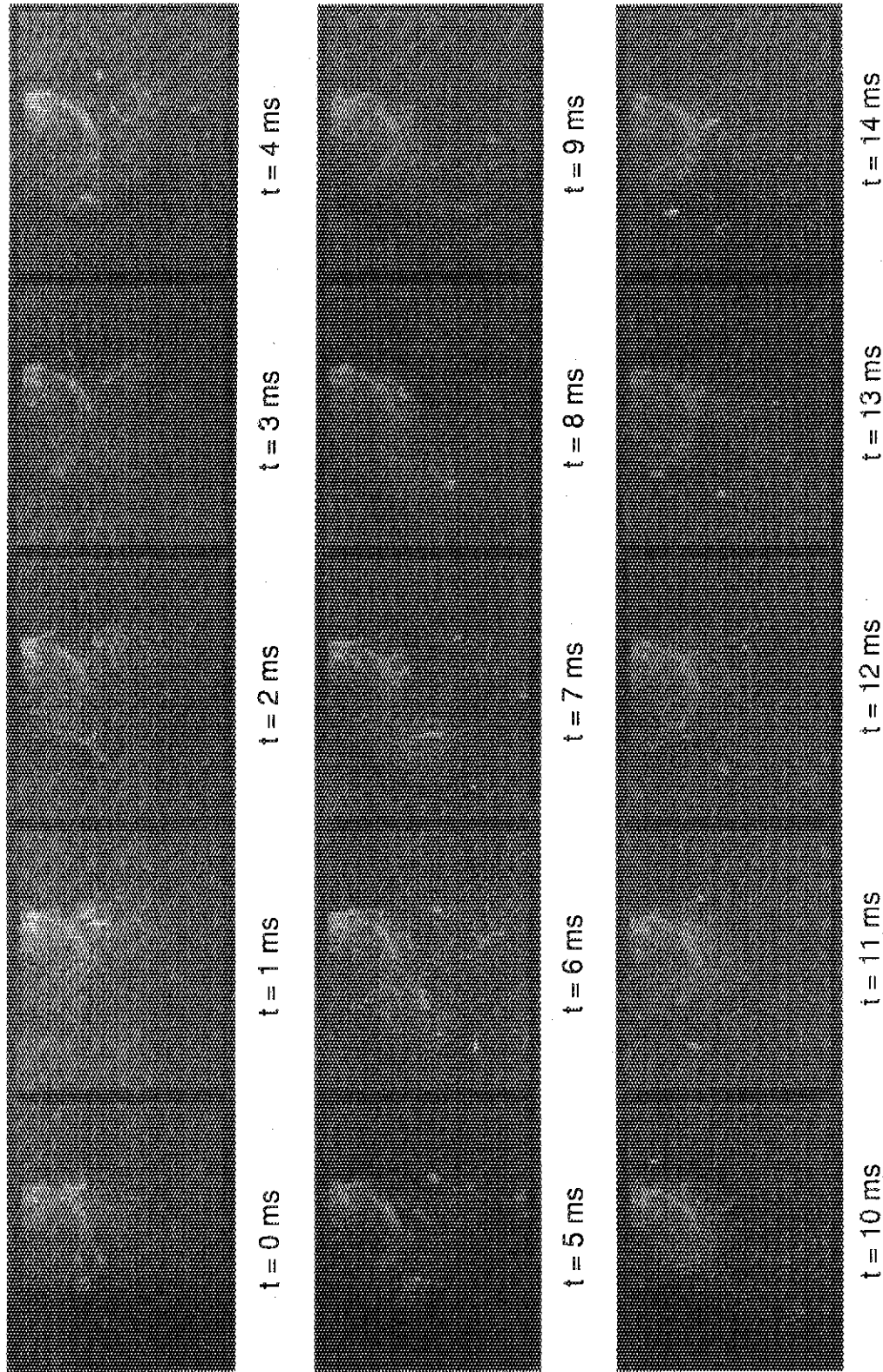


写真 4.5 交互渦 (Type-1, $V_r=3.0$)

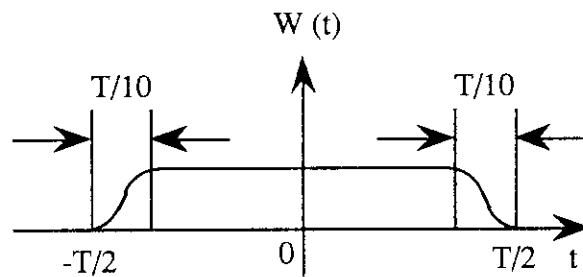
付録 A 1 データ処理手順

周波数解析

周波数解析はすべて 5 kHz の収録周波数で 2 分間収録した 600000 点の振動データを対象に以下の手順で行った。

1 データウィンドーによる振動データの分割

パワースペクトル密度関数を分割平均によって平滑化するために評価する周波数域 (10 ~ 1000 Hz) を考慮し、振動データを 5000 点 (1 秒に相当) ずつの 120 のデータに分割、その各々に対してフーリエ解析を行うこととした。なお、振動データ $x(t)$ の分割は収録データは両端を cosine 型に滑らかにしたデータウィンドー $W(t)$



によって行った ($T=1$ 秒; 5000 点)。

$$x_i(t) = x(t) W_i(t) \quad (i = 1, 2, \dots, 120) \quad (\text{A.1})$$

A.2 フーリエ変換によるパワースペクトル密度関数の導出

分割された振動データ $x_i(t)$ の各々に対し、パワースペクトル密度関数 $P_i\left(\frac{k}{T}\right)$ は定義に従って、次式によって求めた。

$$P_i\left(\frac{k}{T}\right) = \mu \frac{T}{N^2} E[A_{i,k}^2 + B_{i,k}^2] \quad (\text{A.2})$$

$$A_{i,k} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_i(t(j)) \cos \frac{2\pi}{N} kj \quad (k = 0, 1, \dots, N/2) \quad (\text{A.3})$$

$$B_{i,k} = \frac{2}{N} \sum_{j=0}^{N-1} x_i(t(j)) \sin \frac{2\pi}{N} kj \quad (k = 1, \dots, N/2-1) \quad (\text{A.4})$$

ただし、 μ はデータウィンドーによる減少分の補正係数 ($\mu = \frac{1}{0.875}$)、 N はデータの点数 ($N = 5000$)、 E はアンサンブル平均を意味する。

A.3 パワースペクトル密度関数の平滑化

パワースペクトル密度関数を平滑化するため、分割された振動データの各々から求めたパワースペクトル密度関数の平均を求め、これを振動データのパワースペクトル密度関数とした。

$$P\left(\frac{k}{T}\right) = \frac{1}{120} \sum_{i=1}^{120} P_i\left(\frac{k}{T}\right) \quad (\text{A.5})$$

付録 A 2 加速度センサ特性試験結果

圧電型加速度センサの特性

NO.	電荷感度 pC/G	横感度 % (0-90° 角度の感度比)
1	0.63	0.7
2	0.74	測定できず
* 3	0.67	4.3
* 4	0.73	7.4
** 5	0.70	3.5
** 6	0.69	2.1

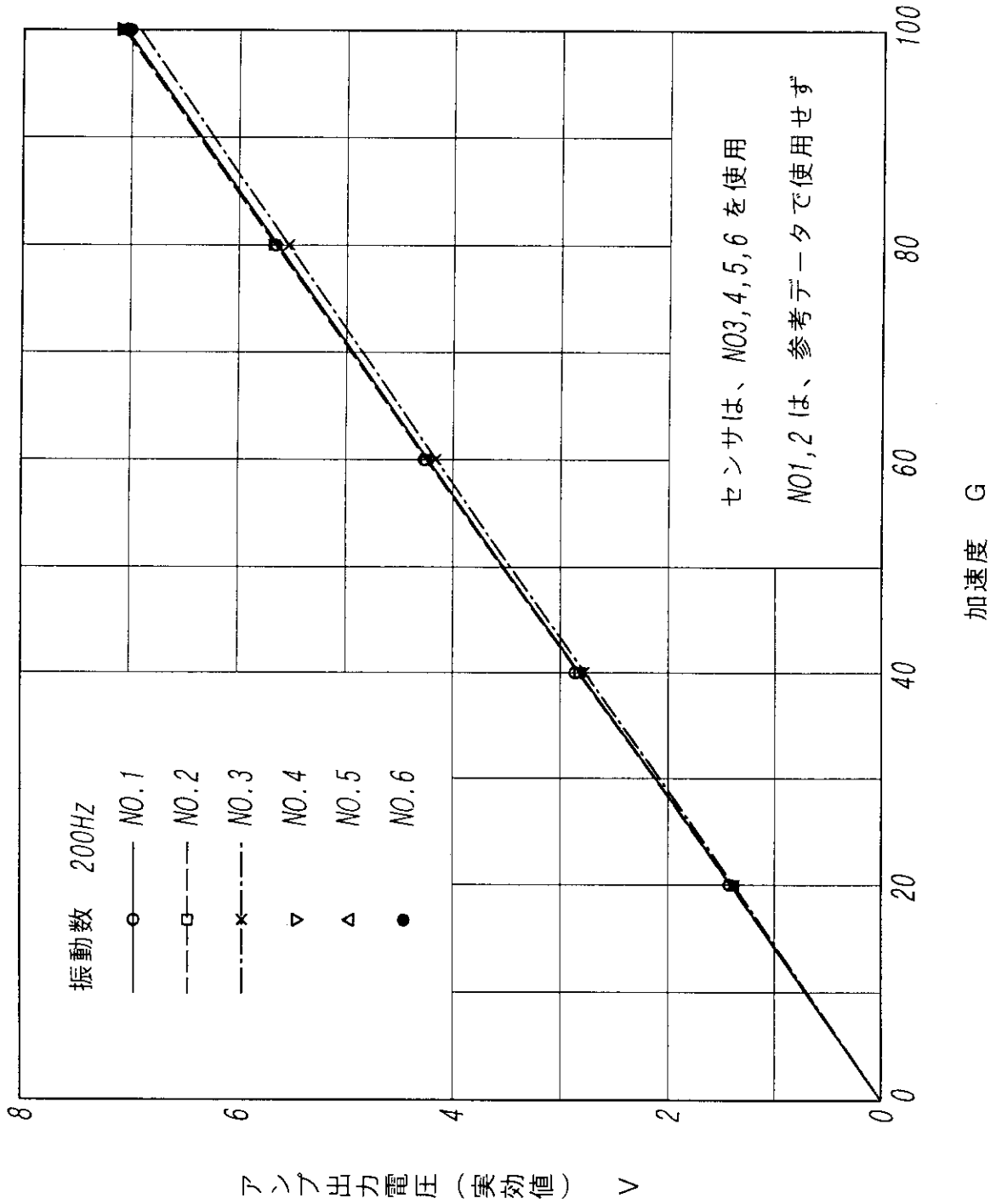
*印、**印同士を組み合わせて使用しました

NO1,2は、参考データで使用せず

圧電型加速度センサの標準仕様

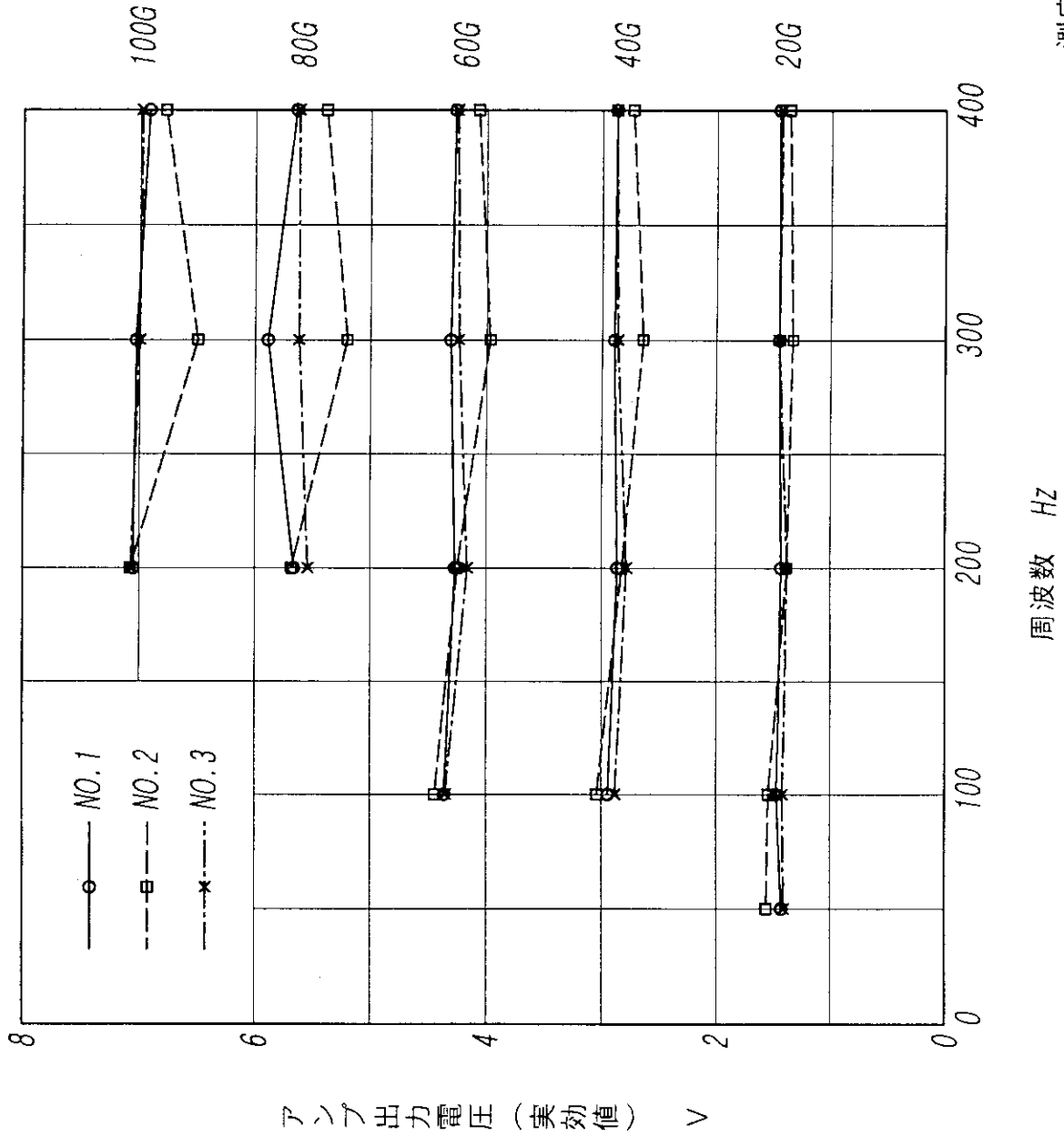
項 目	単位	定 格	備 考	
1	電荷感度	pC/G	(0.77)	at.100Hz
2	電圧感度	mV/G	3.5~5.4	電圧感度 = 電荷感度 / 静電容量
3	共振周波数	kHz	10以上	
4	周波数範囲	Hz	約9~2000	
5	静電容量	pF	170±20%	at.1kHz
6	絶縁抵抗	$M\Omega$	1000以上	at.DC50V リードケース間
7	最大加速度	G	500	
8	使用温度範囲	$^{\circ}C$	-40~+70	
9	本体自重	gr	0.1以下	
10	ピックアップ方式		圧電・片持梁型	
11	素子材質		$Pb(Zr,Ti)O_3$ 系圧電セラミック	
12	外形寸法	mm	$\phi 1.88 \times 6(L)$	

圧電型加速度センサの特性



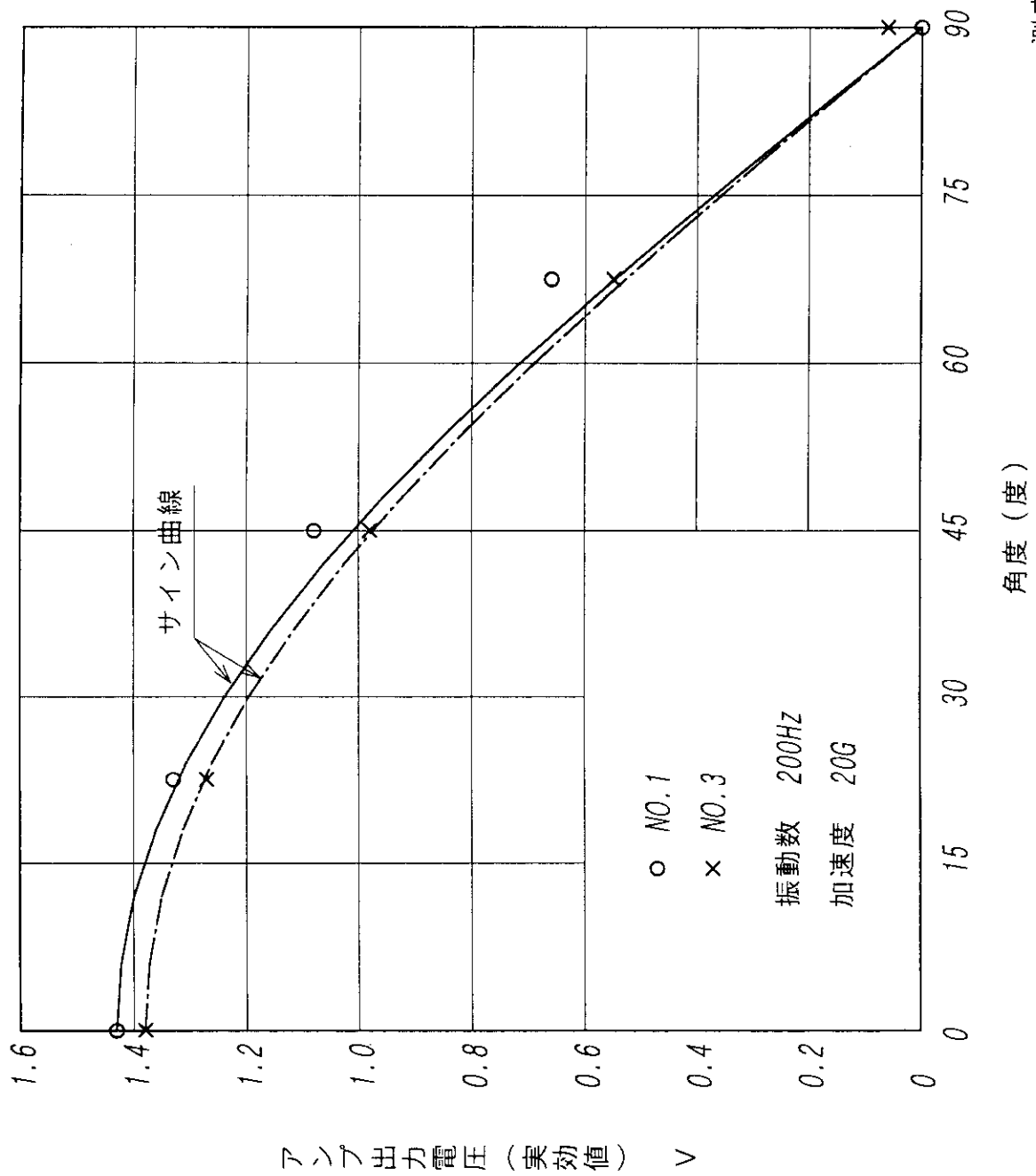
測定 H8.3.17

圧電型加速度センサの特性



測定 H8.3.17

圧電型加速度センサの横方向特性



測定 H8.3.17

測定データ (測定値はすべて実効値です)

1. 製品番号 3

2. 単体テスト (測定 96.3.17)
<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G	1.41V	1.42	1.38	1.45	1.43
40	/	2.88	2.78	2.86	2.87
60	/	4.35	4.16	4.24	4.25
80	/	/	5.54	5.62	5.62
100	/	/	7.07	7.02	6.98
最大 (140)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0度	22.5	45	67.5	90
20 G	1.38V	1.27	0.98	0.55	0.06

周波数は200 Hzとします。

3. 組み込み品テスト (測定 96.3.19)

<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G	1.49V	1.24	1.43	1.63	
40	/	2.41	2.90	3.32	
60	/	3.48	4.31	4.93	
最大 (75)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0	90
20 G	1.43V	0.20V

周波数は200 Hzとします。

測定データ (測定値はすべて実効値です)

1. 製品番号 4

2. 単体テスト (測定 96.3.17)
<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G			1.36V		
40	/		2.78		
60	/				
80	/	/			
100	/	/	7.10	6.47	6.75
最大 (140)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0度	22.5	45	67.5	90
20 G	1.36V				0.10

周波数は200 Hzとします。

3. 組み込み品テスト (測定 96.3.19)

<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G	1.42V	1.29	1.35	1.59	
40	/	2.48	2.76	3.22	
60	/	3.60	4.10	4.79	
最大 (75)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0	90
20 G	1.35V	0.16

周波数は200 Hzとします。

測定データ (測定値はすべて実効値です)

1. 製品番号 5
2. 単体テスト (測定 96.3.17)
<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G			1.41V		
40	/				
60	/				
80	/	/			
100	/	/	7.08	6.72	6.90
最大 (140)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0度	22.5	45	67.5	90
20 G	1.41V				0.05

周波数は200 Hzとします。

3. 組み込み品テスト (測定 96.3.19)

<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G			1.48V		
40	/				
60	/				
最大 (75)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0	90
20 G	1.48V	0.18V

周波数は200 Hzとします。

測定データ (測定値はすべて実効値です)

1. 製品番号 6

2. 単体テスト (測定 96.3.17)

<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G					
40	/				
60	/				
80	/	/			
100	/	/	7.01V	6.75	7.02
最大 (140)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0度	22.5	45	67.5	90
20 G	1.41V				0.03

周波数は200 Hzとします。

3. 組み込み品テスト (測定 96.3.19)

<出力テスト>

加速度 \ 周波数	50 Hz	100	200	300	400
20 G	1.55V	1.38	1.60	2.19	4.55
40	/	2.52	3.21	4.42	7.04
60	/	3.60	4.76	6.46	
最大 (75)	/	/			

<横加速度>

加速度 \ 角度	0	90
20 G	1.60V	0.15

周波数は200 Hzとします。

アンプの設定について

フルスケール 250G で測定を行う場合

㊸レンジ設定スイッチ

100 に合わせます

㊸ピックアップ感度設定スイッチ

別紙データの電荷感度の値から計算します

$$\text{設定値} = \text{電荷感度} \times 250G / 100G$$

例えば、NO3 の場合

$$\text{設定値} = 0.67 \times 250 / 100$$

$$= 1.675$$

表示を 168 に合わせます

㊸ピックアップ感度切換スイッチ

ピックアップ感度設定スイッチと併用して、設定値の位取りをします

例えば、NO3 の場合

$$1.68 = 168 \times 0.01 \text{ だから、スイッチを } 0.01 \text{ に合わせます}$$

上記設定において、250G で ±10V_{p-p} (実効値 7.07V) の出力が得られます

アンプ前面パネル

