

# 圧 力 波 伝 播 実 験

第〔I〕報 分岐, ベンドにおける試験結果

1972年10月

動力炉・核燃料開発事業団  
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団 大洗工学センター

システム開発推進部 技術管理室

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor  
and Nuclear Fuel Development Corporation 4002, Narita O-arai-machi Higashi-  
Ibaraki-gun, Ibaraki, 311-14, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation)

1972年11月10日

## 圧力波伝播実験

## 第1報 分岐，ベンドにおける試験結果

報告者 菱 田 誠<sup>\*</sup>  
堀 雅 夫<sup>\*\*</sup>

期 間 1971年4月1日 ～ 1972年9月30日

目 的 蒸気発生器内でナトリウム-水反応が起こった時の圧力波が二次系に伝播する様子を調べるための実験で，まず二次系配管構成要素のうちベンド，分岐についての圧力波伝播を調べた

要 旨 原型炉二次系中の圧力波伝播を調べるため，まず最初に二次系配管構成要素のうち，分岐，ベンド，をとりあげ，分岐，ベンド各々，2種類のモデル試験体（管径縮尺約1/12.5）について圧力波伝播実験をおこなった。

試験条件は，

- (1) 圧力波伝播媒体として水を使用した。
- (2) 圧力波のパルス立上り時間・約1.5 msec, 波高値・約0.5 kg/cm<sup>2</sup>～6.0 kg/cm<sup>2</sup>の  
入力波を使用した。

試験結果から次の事が判った。

- (1) 分岐部，及び，ベント部を圧力波が伝播する場合の圧力波形，及び，波高値を分岐部近辺，ベント部近辺について場所的に細かく調べたが，従来の一次元取り扱い法による結果とほぼ一致した。
- (2) 分岐部に於る圧力波のエネルギー損失は，本試験条件の範囲内では，ほとんど無視できる。
- (3) ベンドについては，圧力波がベント部を伝播する際，何らかの影響を受けると考えられるが，この点については更に検討を要する。

\* 現在 日本原子力研究所

\*\* 大洗工学センター ナトリウム技術部高速炉安全性試験室

## 目 次

§ 1	まえがき	1
§ 2	圧力波伝播実験の必要性と試験項目	1
2.1	圧力波伝播実験の必要性	1
2.2	試験項目	2
§ 3	実験装置と実験方法	3
§ 4	試験結果	5
4.1	試験条件	5
4.2	分岐〔Ⅰ〕〔Ⅱ〕の試験結果及び検討	6
4.2.1	配管中の圧力波伝播速度	7
4.2.2	分岐部での圧力波の反射・透過，及び， 分岐部近辺における圧力波形	8
4.3	ベンド〔Ⅰ〕〔Ⅱ〕の試験結果及び検討	10
4.3.1	配管中の圧力波伝播速度	11
4.3.2	ベンド部近辺における圧力波形	11
§ 5	結 論	13

## § 1 まえがき

高速原型炉の蒸気発生器内でナトリウム-水反応（大リーク・ナトリウム-水反応）が起ると、ピーク圧の高い圧力波が発生し、此の圧力波が二次系中の各機器（たとえば、中間熱交換器、再熱器、ポンプ、弁、配管など）に伝播し、破損させる恐れがある。

機器の破損はナトリウム火災の発生、プラント利用率への悪影響はもち論のこと、万一中間熱交換器が破損し、一次系の放射化されたナトリウムが二次系中に混入する事になると、原子炉システムの安全性上問題となる。

従ってナトリウム-水反応事故が生じた時の圧力波が二次系中の各機器にどのように伝播するかを検討する事が必要である。

（本報告書は、§ 2 で圧力波伝播実験の概要を記し、§ 3 以下、ベンド、分岐についての試験結果を記す。）

## § 2 圧力波伝播実験の必要性と試験項目

### 2.1 圧力波伝播実験の必要性

液体中を伝わる圧力波についての実験、および、理論的取り扱いは、古くから水力発電所の送水管、あるいは、種々の給送水管路系でバルブの開閉や、ポンプのトリップに伴い生ずる水撃の問題<sup>(1)(2)(3)</sup>、軽水炉の一次冷却系破断時の圧力波伝播<sup>(4)</sup>、油圧ケーブル中の接地事故時の圧力波伝播<sup>(5)(6)</sup>に関連しておこなわれている。

蒸気発生器中でナトリウム-水反応事故の結果生じた圧力波が二次系中を伝わる場合も、圧力波の発生原因は異なるが、伝播現象は本質的に同じであり、同様の取り扱いが可能と考えられる。しかしながら、現在まで主として水撃関係等で取り扱われているのは、対象が、直管、分岐管、バルブ等比較的簡単な配管要素を組み合わせた系に対してであり、また、これらの系に対する実験、および、理論計算も、一次元的な取り扱いの範囲でしかおこなわれていないと考えられる。

従って、原型炉二次系中の圧力波伝播を従来の手法で解析する場合、以下の事が問題である（あるいは、実験的検証が必要である。）と考えられる。

- (1) 二次系中に含まれる中間熱交換器、蒸気発生器、再熱器等、比較的複雑な形状を有する機器中の圧力波伝播を一次元的に取り扱えるであろうか？また、一次元的に取り扱うには、どのようなモデルを考えたら良いか？
- (2) 二次系中には、ベンド、分岐等が数多く使われている。これら、ベンド、分岐が互いに接近してつけられているが、これらを単体のベンド、分岐の組み合わせと考えると良いか？すなわち、前方のベンド、分岐が後方のベンド、分岐に影響を及ぼさないか？
- (3) ベンド、分岐、バルブ、異径管等二次系配管構成要素単体についても、これらを場所的に

細かくみた場合、伝播される圧力波形はどのようになるか？

- (4) ベンド部、分岐部、流路断面積の急拡大部、急縮少部での圧力波のエネルギー損失はどの程度あるか？
- (5) 直管部の摩擦損失係数として実験値が確立されていない。

などの問題が考えられ、これらに対して実験的に把握、あるいは、検証をする必要があり、圧力波伝播実験が計画された。

(此の外にも、水撃関係で既に取り扱われているように、圧力波の反射に伴い、部分的に負圧になる事があり、負圧になると、水柱分離(ナトリウム柱分離)が起る。水柱分離(ナトリウム柱分離)が起ると、その再結合の際、高い圧力波が発生する事がある。<sup>(7)</sup>)

水柱分離が起る場合の圧力波の取り扱いは、確立されているとはいえず、<sup>(7)</sup>この検討も必要であろう。しかし、ナトリウム柱分離については、今回の試験では計画の中に含まれていない)

## 2.2 試験項目

2.1に記した(1)~(5)の項目を総て検討する為の実験を行なう事は、技術的にも難しい点があり、また、実験回数も膨大な量となるので、困難であると考えられる。従って試験を進めるにあたっての方針として、まず、ある一つの二次系モデルを考え(図2.1参照)、(此のモデルを決めるにあたっては、前項(1)~(5)の検討ができるだけ可能な様に選定する。)此のモデルについて実験結果と従来の解析方法との比較、検討をする事とした。しかし、此の二次系モデルは各構成要素単体の組み合わせで処理できるという考えかた、及び、実験結果との比較、検討をしやすい為、また、二次系モデルだけでは、検討不可能な部分については、単体で試験するという考えかたにそって、具体的には下記項目について実験を行なう事とした。

- (1) 二次系構成要素の内、分岐、ベンド、を取りあげ、代表的な寸法、形状を有する分岐、ベンドについて実験を行ない、下記(イ)、(ロ)について大まかな目安を得る。
- (イ) 分岐部、ベンド部での圧力波の伝播を局所的に調べ、2.1の(2)(3)について大まかな目安を得る。
- (ロ) 分岐部、ベンド部、でのエネルギー損失の大まかな目安を得る。(2.1の(4)の一部)
- (2) 二次系構成機器のうち、比較的複雑な形状をしていると考えられる中間熱交換器、蒸気発生器などは単体について実験をおこない、2.1の(1)(2)について検討する。
- (3) 二次系の縮尺モデル、ループについて実験を行ない、次元解析方法との比較をする。(2.1の(1)(2)項の検討が主となる。)

§3以下はこの内、(1)について検討する為におこなった実験結果について記す。

### § 3 実験装置と実験方法

実験装置の概略系統図を図 3.1 に示す。

実験装置は大別して下記の如き 3 つの部分から成り立っている。

- (1) 給水系統
- (2) 圧力波発生系統
- (3) 試験部

給水系統は充分脱気した水を試験部に供給する為のものであり、水加熱器、脱気器、冷却器等で構成されている。水中にわずかな気泡が含まれていても圧力波伝播に影響を及ぼすと考えられるので<sup>(9)</sup>給水中の脱気には充分注意を払い、下記に示す如き脱気器により給水中に含まれる気体の脱気をおこなった後、実験装置に給水した。

水加熱器は脱気を容易にする為に給水（水道水）を加熱する為のもので、内挿式電気加熱器（容量 12KW）で加熱する。水は出口温度で約 60°C～80°C まで加熱される。

脱気器は、加熱器から出てきた温水中に含まれる気体成分を真空脱気するものである。図を 図 3.2 に示す。温水は、脱気器の上部にあるジョウロ状の入口から水滴状となって散布され、ラシヒリング表面を流下する。その間に、温水中に含まれていた含有気体は脱気され、真空ポンプで排気される。含有気体が少なくなった水は底部に溜り、実験装置に送られる。

冷却器は、脱気器から出る温水を冷却して試験部に給水する為につけられており、二重管式の水冷却器である。

真空ポンプは、脱気器からの離脱気体の排気、及び、試験部に水を給水する際試験部を真空に引く為のものである。

圧力波発生装置は、窒素ガスボンベ、窒素ガス部屋、ラブチャーディスク、ラブチャーディスク破壊針、圧力波発生管等で構成されている。ラブチャーディスク、ラブチャーディスク破壊針はガス部屋に設けられており、図 3.3 にその構造を示す。圧力波発生管は試験部への入力波形を得る為のもので、図 3.4 に大体の形状を示す。

圧力波の発生方法は、ガス圧を水面に加える事により、水中に圧力波を発生させる方法を採用した。すなわち、ラブチャーディスクで仕切られた窒素ガス部屋にあらかじめ窒素ガスを満たしておき、（ガス圧 0.5kg/cm<sup>2</sup>G～7kg/cm<sup>2</sup>G 程度）ラブチャーディスクを破壊針で破ることにより、窒素ガス部屋の中のガス圧を圧力波発生管の上部の水面に加え圧力波発生管中に圧力波を発生させる。圧力波発生管中に発生した圧力波は、圧力波発生管の底部近辺にある分岐管で分岐し、試験部に導かれる。圧力波発生管上部の液面に加えられる圧力波の波形は図 3.11 に示す様にほゞステップ状と考えられるが、圧力波発生管底部、及び、自由液面での圧力波の反射により、試験部に導かれる圧力波の波形は第一波がほゞパルス状に近い圧力波となる。

（図 3.12）

圧力波の波高値を変えるには、窒素ガス部屋にかける窒素ガス圧を変えると同時に、所要の圧力値近辺で破裂するラブチャーディスクを選ぶ。(材質、及び、板厚で破裂する圧力が異なる。)ラブチャーディスクの破裂時刻を制御する為、ラブチャーディスクの破壊は破壊針で行なう。

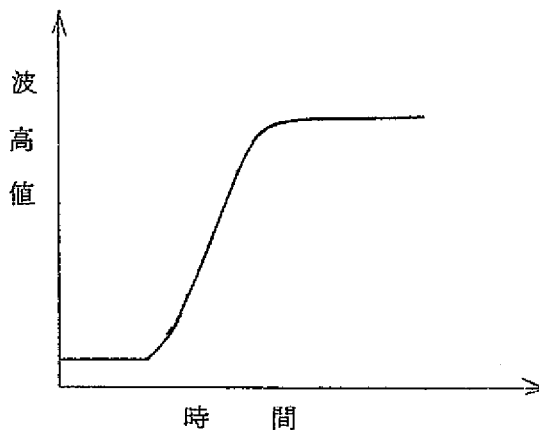


図 3.11 圧力波発生管液面上に加えらるる圧力波形の概形

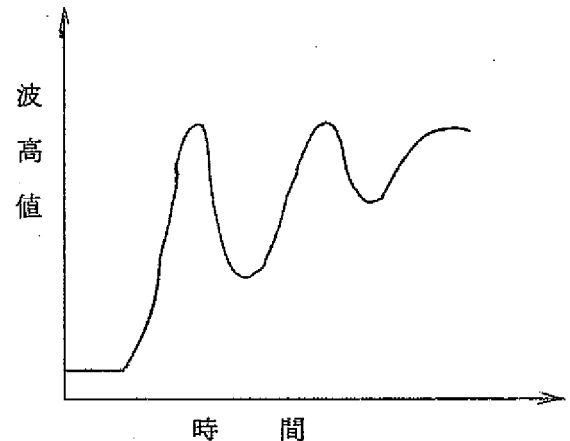


図 3.12 試験部に伝わる圧力波形の概形

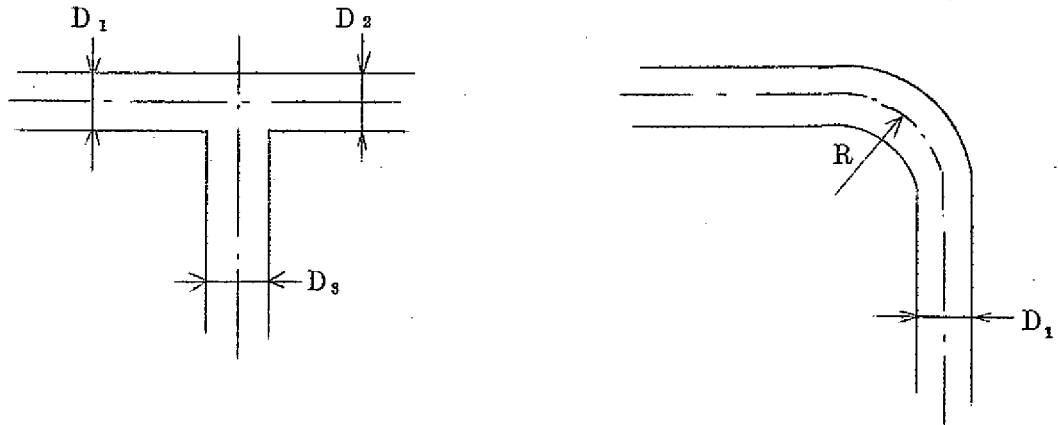
試験部は、試験を行なう供試体と、前後の必要な配管系で構成される。図 3.1 には分岐部の試験をおこなった時の概略系統図が示されている。試験部終端には、圧力波吸収管と称する 3 インチの円管を設けた。圧力波はここで負の反射波となって試験部に戻る。今回試験をおこなったのは、分岐〔I〕、分岐〔II〕、ベンド〔I〕、ベンド〔II〕である。それぞれの試験部構成図を図 3.4、図 3.5 に示す。供試試験体の詳細寸法、及び、圧力計取り付け位置を図 3.6～図 3.9 に示す。表 3.1 に試験体の代表寸法をまとめて示す。分岐〔I〕は 1½ パイプに同径のパイプを分岐としてつけたものである。分岐〔II〕は 1½ インチのパイプに ¾ インチのパイプを分岐としてつけたものである。ベンド〔I〕、〔II〕は、パイプの径は同じであるが、ベンド部の曲率半径  $R$  とパイプの径  $D$  との比  $R/D$  が異なり、ベンド〔I〕では  $R/D = 1.34$ 、ベンド〔II〕では  $R/D = 3.76$  である。

圧力測定系統は、圧力計センサー、歪増巾器、データー・レコーダー、電磁オシログラフから成る。圧力計センサーとしては、豊田工機製半導体歪ゲージ式圧力計 (フルスケール 2.0  $\text{Kg/cm}^2$ , 10  $\text{Kg/cm}^2$ , 固有振動数約 40  $\text{KHZ}$  以上) を使用した。圧力計センサーの取り付け方法を図 3.10 に示す。圧力変換器からの出力信号の増巾には、豊田工機製 THA-2 型直流増巾器を使用した。増巾器からの出力信号は、データーレコーダー (アンベックス社製 FR-1300, 又は、TEAC 社製 ANALOG-7) に記録し、電磁オシロ (横河電機製 2902) で再生した。



表 3.1 試験対象物

供試試験体	寸法
分岐 [I]	$D_1 = 42.6 \phi, D_2 = 42.6 \phi, D_3 = 42.6 \phi$
分岐 [II]	$D_1 = 42.6 \phi, D_2 = 42.6 \phi, D_3 = 22.2 \phi$
ベンド [I]	$D_1 = 42.6 \phi, R/D_1 = 1.34$
ベンド [II]	$D_1 = 42.6 \phi, R/D_1 = 3.76$



§ 4 試験結果

4.1 試験条件

試験条件を表 4.1 に示す。今回試験をおこなったのは、二次系を構成している配管要素の中で、分岐、ベンドをとりあげ、その中でも代表的な寸法、形状を有する、分岐、ベンド、各々二種類のモデルについて試験をおこなった。対象とした二次系は、原型炉第一次概念設計書の中の一社から出された二次系である。分岐 [I] は、蒸気発生器の出入口近辺での等径三分岐のモデルである。分岐 [II] は、主配管から再熱器部への異径分岐のモデルである。一次設計では、ベンドの曲率半径までは決めていないので、 $R/D = 1.34, 3.76$  の二種類を選んだ。モデルの寸法は管径で約  $1/125$  とした。圧力波測定点は、図 4.2.1, 図 4.2.2, 図 4.3.1, 図 4.3.2 に示す。

圧力波伝播の媒体としては、ナトリウムの代わりに常温の水を選んだ。水とナトリウムで圧力波伝播現象に関係のある物性値の相違は表 4.1.1 に示す。

表 4.1.1 水 (常温) とナトリウム (300 °C) の物性値の比較

	ナトリウム (300 °C)	水 (20 °C)
音 速	2400 m/sec	1480 m/sec
比 重 量	880 kg/m <sup>3</sup>	998 kg/m <sup>3</sup>
動粘性係数	$0.392 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$	$1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$
粘性係数	$0.3515 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$	$1.03 \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{sec}/\text{m}^2$

圧力波の入力波形としては、図 4.2.3 の 02 の圧力波形にその代表例を示すが、圧力波の立ち上り時間（ピーク値までの時間）が約 1.5 msec、波高値が  $0.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{G} \sim 7.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \text{G}$  の第一パルス波を有し、その後もいくつかのパルス波を有する波形を入力波形として使用した。

上記の如き試験条件で試験をおこなった本試験装置と実際の二次系では、分岐、バンドでの分岐損失、及び、バンド損失に差異があると考えられる。すなわち主として圧力値が異なる事により、分岐損失、バンド損失は、本試験装置での結果は低い値となると考えられる。従って、特に分岐損失、バンド損失に関する本試験結果については今回の試験条件の範囲内を越えた場合については、その適用にあたって考慮を要する。しかしながら、油中で圧力パルスのピーク値が  $100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  程度のパルス波で分岐損失を求めた実験結果<sup>(6)(7)</sup>によれば、波高値が、 $100 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  程度でも分岐損失は 2～3% 程度であり、実際の二次系でも、分岐による圧力波のエネルギー損失はわずかであると考えられる。

#### 4.2 分岐〔I〕、〔II〕の試験結果及び検討

図 4.2.1 に分岐〔I〕の圧力波測定点を、図 4.2.2 に分岐〔II〕の圧力波測定を示す。これら測定点の圧力波形を一度に総て測定する事は、圧力計の数に制限があつてできないので、別々に分けて測定し、基準点との比較により、実験点相互の比較をした。図 4.2.3～図 4.2.8 に分岐〔I〕での測定結果、図 4.2.9～図 4.2.14 に分岐〔II〕での測定結果を示す。図の左端に示す番号が、それぞれ測定位置の番号に対応する。図 4.2.3 について実験装置内を圧力波が伝播される様子を説明すると、まず 01 で測定される圧力は、圧力波発生管の自由液面下約 40 mm～45 mm の位置での測定結果であり、この圧力波形が圧力波発生管への入力波形となると考えられる。02 で測定される圧力波形は 01 で与えられた圧力波が圧力波発生管の下部固定端、及び、上部自由液面での反射の影響を受けた圧力波形となる。（細かく言えば、圧力波発生管下部にある試験部への分岐部による反射、透過の影響も受けるが、此の影響は少ない。）02 での圧力波形（または 03）での圧力波形が試験部への入力波形となる。

分岐部前方①で測定される圧力波形は、圧力波の立ち上り開始時より 0～2 msec の間は試験部への入力波形そのままを測定するが、約 2 msec 後（図中①）には、分岐部での反射波の影響を受け、4.76 msec 後（図中②）には、此の反射波が、更に、圧力波発生管で反射した圧力波の影響を受ける。更に 6.45 msec 後（図中③）には、圧力波吸収管〔I〕での反射の影響を受け、7.2 msec 後（図中④）には圧力波吸収管〔II〕の影響を受ける。その後は、各場所で、反射、透過した圧力波の影響を受けた複雑な波形となる。

分岐部後方⑤で測定される圧力波形は、0～4.5 msec の間は、試験部への入力波形が分岐部を透過してきた圧力波形のみを測定し、4.5 msec 後には（図中⑤）、圧力波吸収管〔II〕での反射波の影響を受ける。その後は①と同様、各場所で反射、透過した圧力波の影響を受けた複雑な波形となる。その他の測定場所における圧力波形も同様に説明される。

従って試験部で測定される圧力波形で、圧力波の立ち上がり開始から約2 msecの間は、(第一パルス波のピーク値を過ぎるまで)少なくとも試験部である分岐部のみの影響を受け、他の場所での反射波の影響は受けない圧力波形を測定している。すなわち、第一パルス波のみについて実験結果を整理すれば、その結果は、分岐部のみの影響をとらえている事になる。

#### 4.2.1 配管中の圧力波伝播速度

配管中を伝わる圧力波の伝播速度は、2点間を圧力波の第一ピーク値が通過する時間を測定する事により求めた。2点間としては、分岐部〔I〕では、⑫-②, ⑬-⑥, ①-⑧, ⑬-⑤, ①-⑦, ①-⑨, ⑫-⑨, ①-⑨, ⑫-⑨ の間隔を利用した。分岐部〔II〕では、⑫-②, ⑫-⑥, ①-②, ④-⑥, ①-⑥, ⑫-①, ④'-⑥' を利用した。伝播速度の測定結果を図4.2.12に示す。

分岐〔I〕, 分岐〔II〕のいずれにおいても、各測定点は、計算値  $1387 \frac{m}{sec}$  のまわりに $\pm 5\%$ 以上のバラツキを有しているが、これは、2点間の距離が短い為、圧力波の通過所要時間が短くて実験データから所要時間を読み取る際の計測誤差に起因するものと考えられる。図4.2.12の表に示す値は、各データの平均値であり、その値は、分岐〔I〕で  $1384 \frac{m}{sec}$ , 分岐〔II〕で  $1390 \frac{m}{sec}$  である。計算値は  $1387 \frac{m}{sec}$  であり、測定値の誤差は $-0.2\%$ と両者の一致は極めて良い。

計算式として用いた式は、伝播速度に影響を及ぼす、配管材料の弾性率、配管の固定条件、配管の肉厚と直径の比を考慮に入れたアリエビの式を使用した。

$$V_{tr} = \sqrt{\frac{1}{\frac{w}{g} \left( \frac{1}{K} + \frac{C_1 D}{E e} \right)}} \quad (4.2.1)$$

$V_{tr}$  : 圧力波の伝播速度 ( $m/sec$ )

$w$  : 流体の比重量 ( $kgf/m^3$ )

$g$  : 重力加速度 =  $9.8 \frac{m}{sec^2}$

$C_1$  : 配管の固定条件によって決る定数で、 $C_1 = 0.95$  とした

$C_1$  の値は管の固定条件によって下記の如く異なる値をとる。

(A) 管の上端が固定され、また伸縮継手が設けられていない場合

$$C_1 = \frac{5}{4} - \mu \quad \mu : \text{管材料のポアソン比}$$

(B) 管の全長にわたり縦方向の移動ができないように固定されている場合

$$C_1 = 1 - \mu^2$$

(C) 伸縮継手が設けられている管路の場合

$$C_1 = 1 - \mu/2$$

本試験装置の場合が上記(A)(B)(C)のうちいずれに相当するかは、はっきりし

ない。(A)(B)の中間に相当すると考えられるが、固定条件の選び法による伝播速度に及ぼす影響は少なく(A)(B)のいずれで計算しても結果はほとんど変わらない。

$D/e$  : 配管の直径と肉厚の比

$K$  : 水の体積弾性係数  $[kg/m^2]$

水の体積弾性係数は、水の音速の実験式

$$u = 1402.736 + 5.03358T - 0.0579506T^2 \\ + 3.31636 \times 10^{-4} \times T^3 - 1.45262 \times 10^{-6} \times T^4 \\ + 3.0449 \times 10^{-9} \times T^5 \quad (B)$$

( $u$  :  $m/sec$        $T$  :  $^{\circ}C$ )

から求めた。

$E$  : 配管材料の縦弾性係数 ( $kg/m^2$ )

#### 4.2.2 分岐部での圧力波の反射・透過、及び、分岐部近辺における圧力波形

分岐部〔I〕における分岐部近辺（分岐部前方1D、分岐点、分岐部後方1D、2D、3D、4D、5D、10D、）の測定結果例を図4.2.3～図4.2.8に示す。分岐部〔II〕における分岐点近辺（分岐部前方1D、分岐点、分岐部後方1D、10D）の測定結果例を図4.2.9～図4.2.11に示す。図から判る様に、分岐点近辺では、各測定点に於る圧力波形は、反射波の影響を受けるまではほとんど同一波形を示している。（図で各測定点に印したⓐはベンドで圧力波の反射があるとした場合のベンドからの反射波の影響を受ける時点であり、ⓑは圧力波吸収管〔I〕または〔II〕からの反射波の影響を受ける時点である。ベンドからの反射波はもしあるとしても、極くわずかであると考えられるから、圧力波の立上り時点からⓑまでの間の波形を比較する。）

また、以下に記す如く、第一パルス波の波高値は図4.2.13、図4.2.14に示す如く、各測定点でほとんど同じ値をとる。（±3%以内）従って、分岐点近辺では、圧力波は、その波形、及び、波高値が同一の値で伝播されると考えられる。

分岐部で圧力波は一部反射し、残りは透過される。図4.2.13、図4.2.14には第一パルスのピーク値の各場所での測定結果を示す。分岐部前方①におけるピーク値との比で示してある。従って分岐点以降の測定点では、（測定点③～⑨、④～⑨）伝達率  $s = F_{tr}/F_{in}$  ( $F_{tr}$  : 分岐点を通じた圧力波、 $F_{in}$  : 分岐部に入射する圧力波、 $S$  : 伝達率)を示している。測定点②における値は

$$\frac{F_{in} + F_{ret}}{F_{in}} = 1 + r = s$$

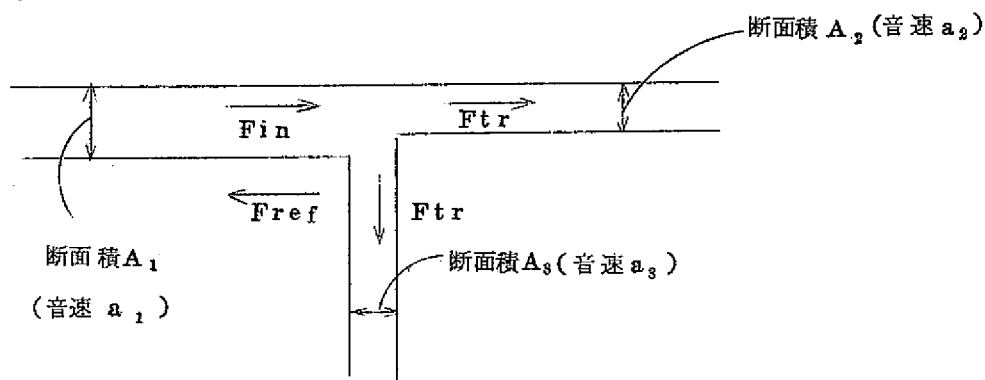
( $F_{ret}$  : 反射波,       $r$  : 反射率)

すなわち、②においても圧力波の伝達率を示している事になる。(図の値から1を引けば反射率が得られる。)

分岐〔I〕、〔II〕での測定値は、ほとんどの値が計算値(それぞれ0.66, 0.88)の±3%以内に入っている。両者の一致は極めて良好であると言える。計算式としては、壁との流体摩擦による圧力波の減衰、分岐点に於る分岐損失による圧力波の減衰を無視した場合の分岐点における圧力波の反射率、及び、伝達率を与える次式を用いて計算した。

$$S = \frac{2 A_1 / a_1}{A_1 / a_1 + A_2 / a_2 + A_3 / a_3} \quad (4.2.2)$$

$$r = 1 - S \quad (4.2.3)$$



(4.2.2)式で計算した値と、実験値が極めて良い一致を示している事から分岐点における圧力波の減衰、及び、分岐損失に伴う圧力波の反射はほとんど無視できる事が判る。

以上、分岐〔I〕、〔II〕の実験結果から以下の事が判った。

- (1) 分岐部を圧力波が伝播する場合、その波形、及び、波高値は場所に依らず、ほぼ同一である。従って分岐に接近して他の配管要素が設けられていても、分岐については単体として処理できる。
- (2) 分岐部、及び、分岐部近辺に着目して圧力波伝播を考える場合でも、二次元的(あるいは三次元的)な圧力波形の相違を考える必要がなく、一次元的な取り扱いができると考えられる。
- (3) 分岐部に於る圧力波の減衰、及び、分岐損失に伴う圧力波の反射については本実験範囲内ではほとんど無視できる。

また、分岐部近辺に於る圧力波形がほとんど同一である事から

- (4) 分岐の角度が90°以外の分岐に於ても、圧力波は90°分岐の場合と同じ様に伝播する

事が予想される。

#### 4.3 ベンド〔I〕、〔II〕の試験結果、及び検討

図 4.3.1 にベンド〔I〕の圧力波測定点、図 4.3.2 にはベンド〔II〕の圧力波測定点を示す。圧力波の測定は分岐の場合と同様、圧力計の数に制限があり一度に出来ないので、別々に分けて測定し、基準点との比較により実験点相互の比較をした。

図 4.3.3～図 4.3.8 にベンド〔I〕での測定結果、図 4.3.9～図 4.3.12 にベンド〔II〕での測定結果例を示す。

図の左端に示す番号が、それぞれ、測定位置の番号に対応する。

図 4.3.3 を例にとって、後に示す様に圧力波がベンド部で影響を受ける（一部反射される）とした場合の各測定点での圧力波形をみると、まず⑤での圧力波形は分岐の試験に於て測定場所⑫における圧力波形と同じ波形を示し、此の波形が試験部への入力波形となる。①で測定される圧力波形は、分岐部前方約 1400mm に於る圧力波形である。もし、ベンド部で圧力波の反射があるとすれば、圧力波の立上り開始時より約 2 msec 後（図中①）までは試験部への入力波形をそのまま測定する事になるが、2 msec 後には試験ベンドでの反射波の影響を受け、約 4.2 msec 後（図中②）には後方のベンド部での反射波の影響を受ける。更に 5.97 msec 後（図中③）には、前方のベンド（試験ベンド）で反射した反射波が、圧力波発生管で再び反射した圧力波の影響を受ける。その後は、各場所で反射した圧力波の影響を受け複雑な波形となる。分岐部後方⑥での圧力波形は、0～2.1 msec の間は、圧力波発生管から試験部へ伝播した圧力波のうち、試験ベンドを通過してきた圧力波形のみを測定し、2.1 msec 後（図中④）には、後方のベンドでの反射波の影響を受ける。その後は①の場合と同様、各場所での反射波の影響を受けた波形となる。測定点⑩に於る波形は、圧力波立上り開始後わずか 0.1 msec 後（図で⑤）に後方のベンドでの反射波の影響を受け、3.12 msec 後（図で⑥）には、試験部終端の圧力波吸収管での反射波の影響を受けた圧力波形となる。

以上は、ベンド部で圧力波が反射されたとした場合の事であるが、ベンド部で圧力波が全然影響されない場合は、各測定点に於る圧力波形は、試験部最終端にある圧力波吸収管での反射波の影響を最初に受ける。影響を受け始める時間は、各測定点により異なり（各測定とも、図で⑦に示す時刻より影響を受け始める。）一番早く影響を受け始めるのは、測定点⑩であり、圧力波の立上り開始時より 3.12 msec 後より影響を受け始める。一番遅く影響を受けるのは、測定点①であり、圧力波の立上り開始後 7.14 msec 後にはじめて影響を受ける。従ってベンド部での圧力の反射がないとした場合は各測定点に於る測定波形で少なくとも第一パルスは、反射波の影響を受けない波形である。ベンド部での反射があるとした場合も測定点⑩を除き、第 1 パルスは反射波の影響を受けない波形である。

#### 4.3.1 配管中の圧力波伝播速度

圧力波伝播速度は、分岐部の場合と同様、2点間を圧力波の第一ピーク値が通過する時間を測定する事により求めた。2点間としては、ベンド〔I〕では、⑤-①, ⑤-②, ⑤-⑩, ⑤-⑦, ⑥-⑩, ①-⑩, ①-⑦, ⑤-⑧, ①-②, の間隔を利用した。ベンド〔II〕では、⑤-②, ⑤-⑬, ⑤-⑳, ①-②, ①-⑬, ①-⑳, ①-⑤, ①-⑥, ①-⑦ の間隔を利用した。伝播速度の測定結果を図4.2.12に示す。

ベンド〔I〕,〔II〕,のいずれの結果も、各測定点は計算値  $1387 \text{ m/sec}$  のまわりに $\pm 5\%$ 以上のバラツキを有しているが、これは、分岐での実験結果と同様、2点間の距離が短い為、圧力波の通過所要時間が短くて、実験データから所要時間を読み取る際の計測誤差に起因するものと考えられる。図4.2.12の表に示す値は、各データの平均値であり、その値はベンド〔I〕で  $1384 \text{ m/sec}$ , ベンド〔II〕で  $1354 \text{ m/sec}$  である。計算値は  $1387 \text{ m/sec}$  であり、測定値の誤差は、ベンド〔I〕で $+0.2\%$ , ベンド〔II〕で $-2.4\%$ と両者の一致は極めて良い。計算式としては、(4.2.1)式を使用した。

#### 4.3.2 ベンド部近辺における圧力波形

ベンド〔I〕についてベンド部近辺での圧力波の測定結果例を図4.3.3～図4.3.8に示す。

(図4.3.4, 図4.3.5は各測定点の圧力スケールはほぼ同じであるが、他は測定点によって圧力スケールが異なる。)

ここに、ベンド近辺とは、測定点②, ③, ④, ⑤, ⑥, ⑦, ⑧を示す。図から判る様に、これら測定点の圧力波形は圧力波吸収管からの反射波の影響を受ける時刻(図で $\textcircled{t}$ )まではほぼ同一の波形である。また図4.3.5～図4.3.8から判る様に入力波形の形に依らず同一波形をしている。図4.3.13には後述する様に各測定点に於る第1パルス波のピーク値の値を示すが、ベンド近辺では、ほとんどが、平均値の $\pm 5\%$ 以内に入っている。

従って、ベンド近辺では、圧力波は、その波形及び、波高値も同一の値で伝播されると考えられる。

ベンド〔II〕についてのベンド部近辺における圧力波形・測定結果の一例を図4.3.9～図4.3.12に示す。(各図とも、圧力スケールは測定点によって異なる。)ベンド近辺とは、測定点、②, ⑤, ⑥, ⑦, ⑪, ⑫, ⑬, ⑮, ⑯, ⑰の事である。図から判る様に、これら測定点の圧力波形は、ほとんど同一波形をしている。しかし、ベンド〔II〕に於ては、測定点②を除いては、試験部終端の圧力波吸収管からの反射波の影響を受け始める $5.1 \text{ msec}$ 後(図で $\textcircled{t}$ )についても、ほとんど同一波形を示しているが、測定点②については、反射波の影響を受ける $5.4 \text{ msec}$ 後(図で $\textcircled{t}$ )は他の測定波形と多少異なった波形を示している。この原因は、反射波の影響を受け始める時間に差がある為と考えられるが、更に検討を要する。いずれにしても、反射波の影響を受け始めるまでは、各測定点とも、ほとんど同一波形であると考えられる。後述する如く、

図4.3.14には、各測定点に於る第一パルスのピーク値の値を示すが、ベンド近辺では、ほとんどの値が、平均値の±3%以内に入っている。従ってベンド〔Ⅱ〕についてもベンド部近辺に於て圧力波は、その波形、及び、波高値は同一値で伝播すると考えられる。

図4.3.13,図4.3.14には、ベンド部を伝播する圧力波のうち、第一パルス波のピーク値の測定結果を示す。ベンド部前方①に於るピーク値との比で示してある。図から明らかな様に、ベンド〔Ⅰ〕、〔Ⅱ〕のいずれにおいても、ベンド部近辺での波高値は測定場所に依らず一定で、ベンド前方①の波高値の約0.92~0.93倍の値を示している。従って上記の如く圧力波がベンド部を伝播する際、ベンド部近辺においては、圧力波形及び、波高値は、場所によって異ならずほとんど同一の値を保って伝播すると考えられる。

ところで、ベンド〔Ⅰ〕の実験結果に於ても、ベンド〔Ⅱ〕の実験結果においても、ベンド部近辺での波高値は、ベンド前方の波高値と比較した場合、約0.92~0.93と低い値を示している。従来、水撃関係等ではベンド部は直管と同様に取り扱われてきたが、本実験結果では、ベンド部は直管とは異なり、圧力波が伝播する際ベンド部で何らかの影響を受ける事を示している。ベンド部で圧力波がどのような影響を受けるかについては現段階では、良く判らないが、ベンド部直前、及び直後に於ける圧力波高値の値が同一である事から考えると、ベンド部に於て圧力波がエネルギー損失を受けるのではなく、ベンド部に於て圧力波が一部反射されるのではないかと考えられる。ベンド部において圧力波が影響を受ける事については、分岐〔Ⅱ〕に於る実験結果で、分岐部後方にあるベンドの直前(図4.2.7に於て⑥、⑥')に於る測定値が分岐直後の測定値よりも低目にでている事からも、何らかの影響を受けるのではないかと考えられる。しかし図4.3.13に於て測定点⑩に於る測定値が、他の測定点と同じ値を示している(測定点⑩では、後方のベンドの影響を受けなければならないから試験ベンド部での測定値より低目の値が測定されるはずである。)事は、ベンド部で圧力波が影響を受けるという事と矛盾する事である。従って此の点については今後更に検討をする必要があると考えられる。

以上、ベンド〔Ⅰ〕、〔Ⅱ〕について実験結果から以下の事が判った。

- (1) ベンド部を圧力波が伝播する場合、その波形、及び、波高値はベンド部近辺の場所によらず、ほとんど同一である。従って、ベンドに接近して他の配管要素が設けられていても、ベンドについては単体として処理できる。
- (2) ベンド部及びベンド部近辺に着目して、圧力波伝播を考える場合でも、二次元的(あるいは三次元的)な、圧力波形の相違を考える必要がなく、一次元的な取り扱いができると考えられる。
- (3) ベンド部に於る圧力波のエネルギー損失は、本実験範囲内では、ほとんど無視できると考えられる。
- (4) ベンド部を圧力波が伝播する場合、圧力波は何らかの影響(例えば一部反射される)を受



けると考えられるが、この点については更に検討をする必要がある。

## § 5 結 論

原型炉二次系の配管構成要素のうち、代表的な寸法、形状を有すると分岐、及び、ベンド、それぞれのモデルについて立上り時間が約 1.5 msec, 波高値  $0.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2} \sim 7.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$  の入力波で圧力波伝播実験を行い、下記の事が判った。

(1) 分岐部、及び、ベンド部を圧力波が伝播する場合、その波形、及び、波高値を分岐部近辺、ベンド部近辺について場所的に細かく調べたが、ほとんど同一であり、従来の取り扱い法による結果と一致した。

従って、分岐部及び、ベンド部の極く近辺に着目して圧力波伝播を考える場合でも、二次元的（あるいは3次元の）な圧力波形の相違を考える必要がない。

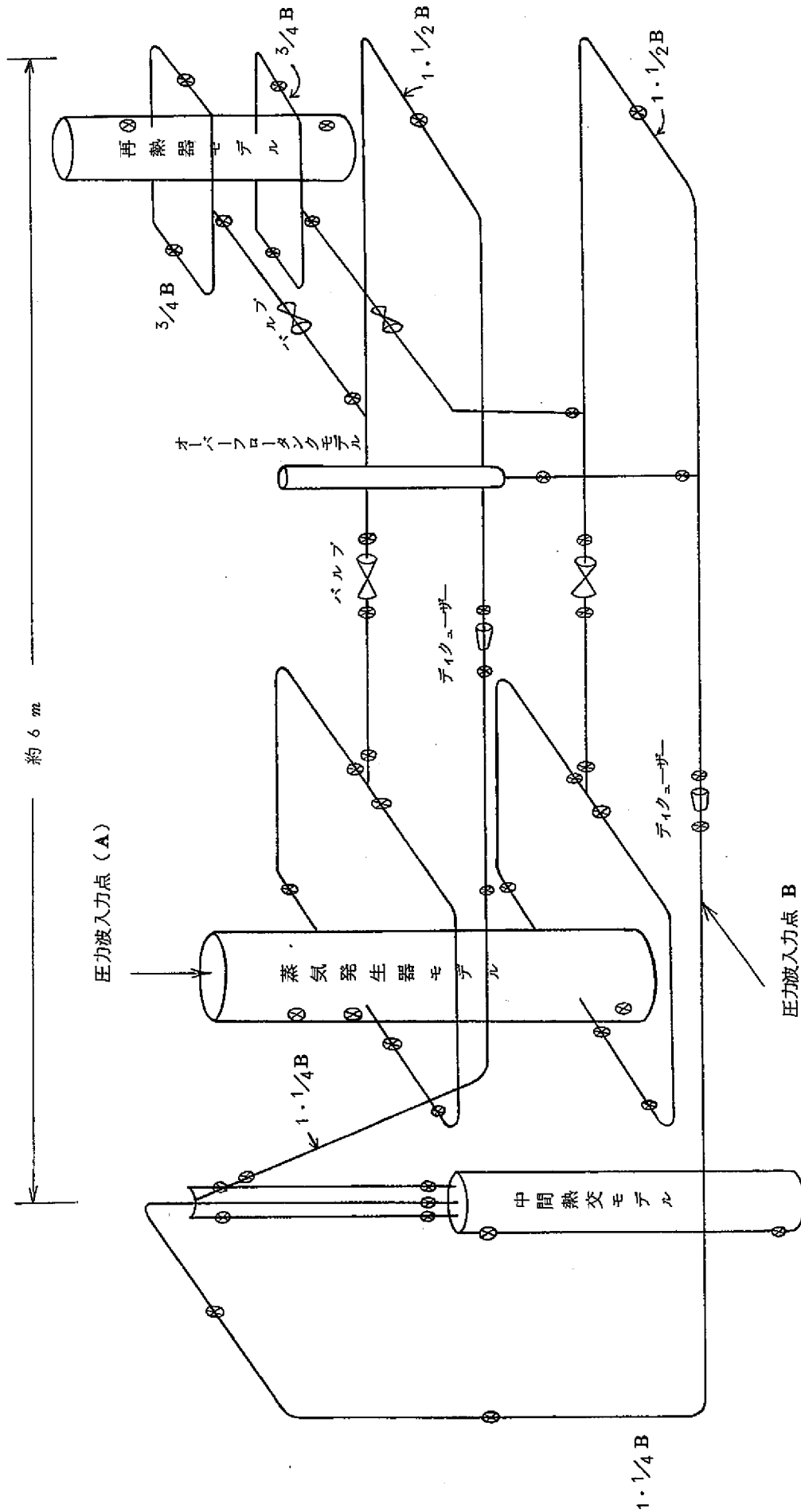
(2) 従って、分岐、ベンドに接近して他の配管要素がつけられている場合にも、分岐、ベンドは単体として処理できる。

(3) 分岐部に於る圧力波のエネルギー損失は、今回の実験範囲内では、ほとんど無視できる。また、ベンド部についてもベンド部でのエネルギー損失は今回の実験範囲内ではほとんど無視できると考えられる。

(4) ベンドについては、ベンド部を圧力波が伝播する場合、何らかの影響を受けると考えられるが、この点については、更に検討をする必要がある。

参 考 文 献

- (1) 小堀, 横山 訳  
J. Parmabian “水撃解析法” コロナ社  
“Water hammer Analysis” Dover
- (2) Streeter, Wylie “Hydraulic Transient” McGraw Hill Comp
- (3) 官代 裕 “ポンプ系の水撃の解析”  
日本機械学会誌 Vol 70 No 578
- (4) H. Gdding “An analytical - experimental comparison of  
the initial transient response of high  
enthalpy water during decompression”  
American nuclear society annual meeting,  
Toronto, June 9 - 13 1968
- (5) 原 崎 堯 “高油圧パイプケーブル地絡時の圧力上昇に関する研究”  
電力中央研究所報告 No 68103 1969
- (6) 原 崎 堯 “高油圧パイプケーブル地絡時の圧力上昇に関する研究”  
第一報  
電力中央研究所報告 No 68021 1968
- (7) 官代 裕 “ポンプ系の水撃に関する二, 三の問題”  
日本機械学会誌 Vol 72 No 609 P. 36
- (8) 和田 八三久著 “音波物性” 共立出版 P. 75
- (9) 官代 裕他 “導水管内の圧力波の伝わり速度について”  
日立評論 昭和30年10月 P. 1407



⊗印………圧力測定位置

図 2.1 原型炉二次系縮尺モデル概略図

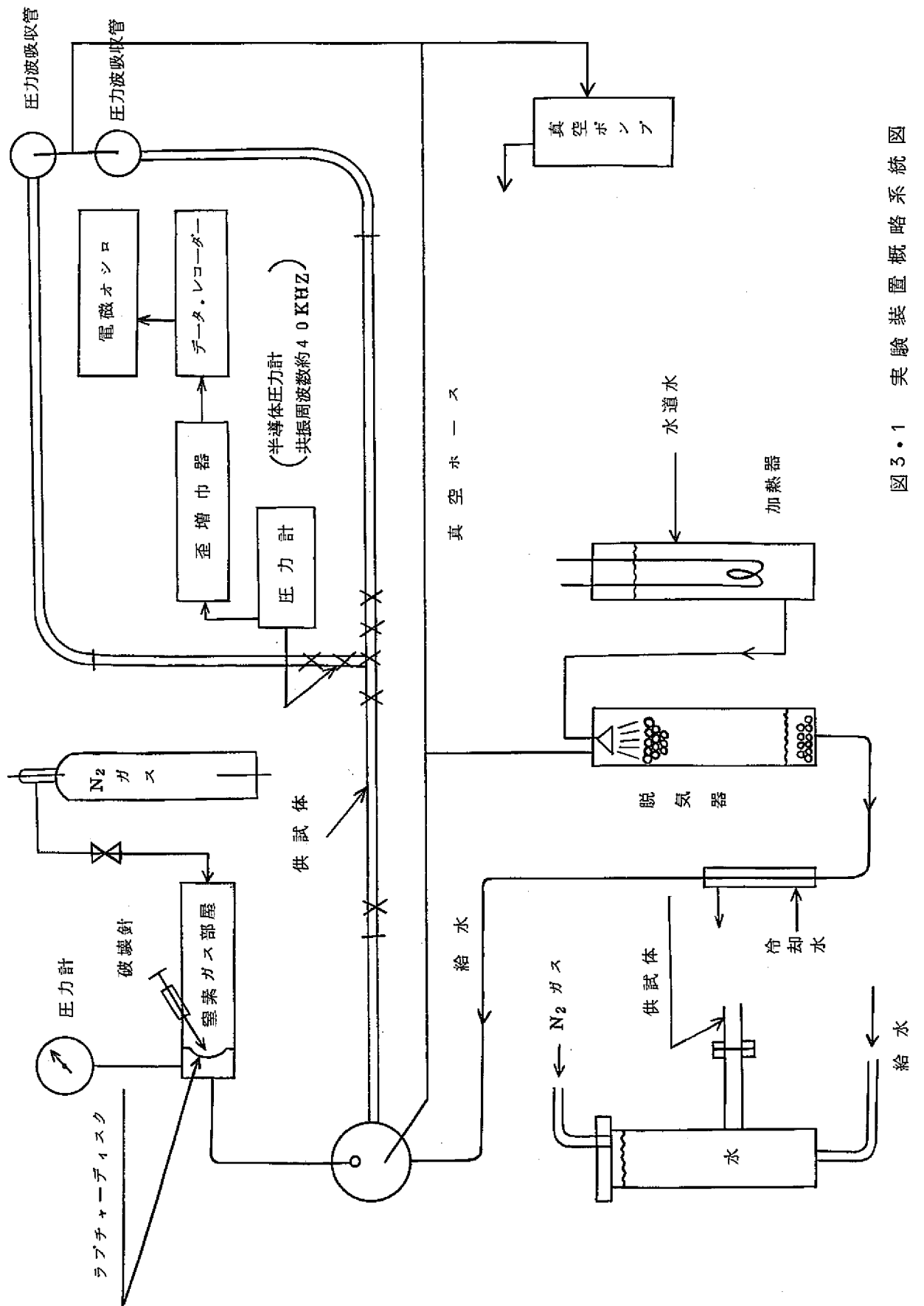


図 3・1 実験装置概略系統図



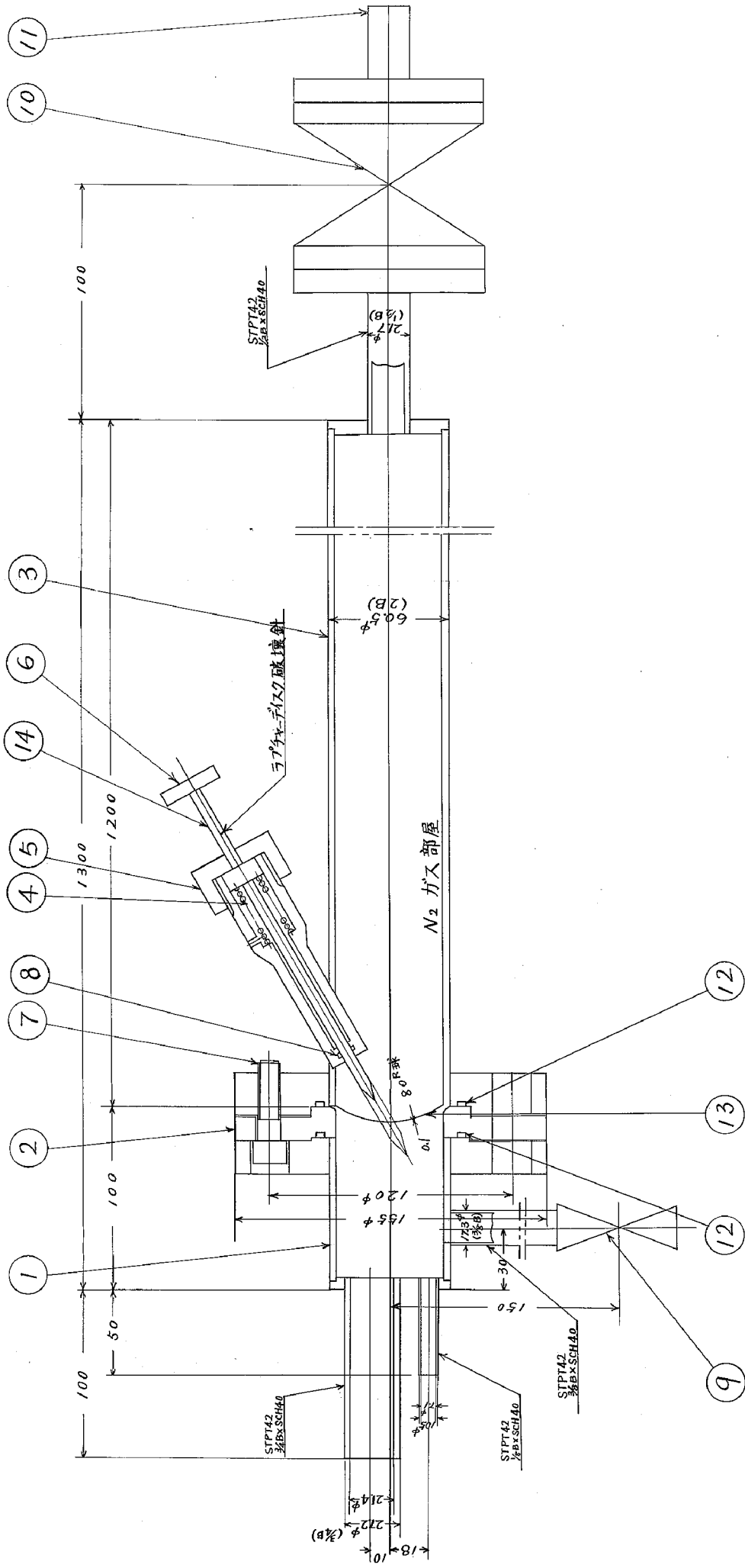
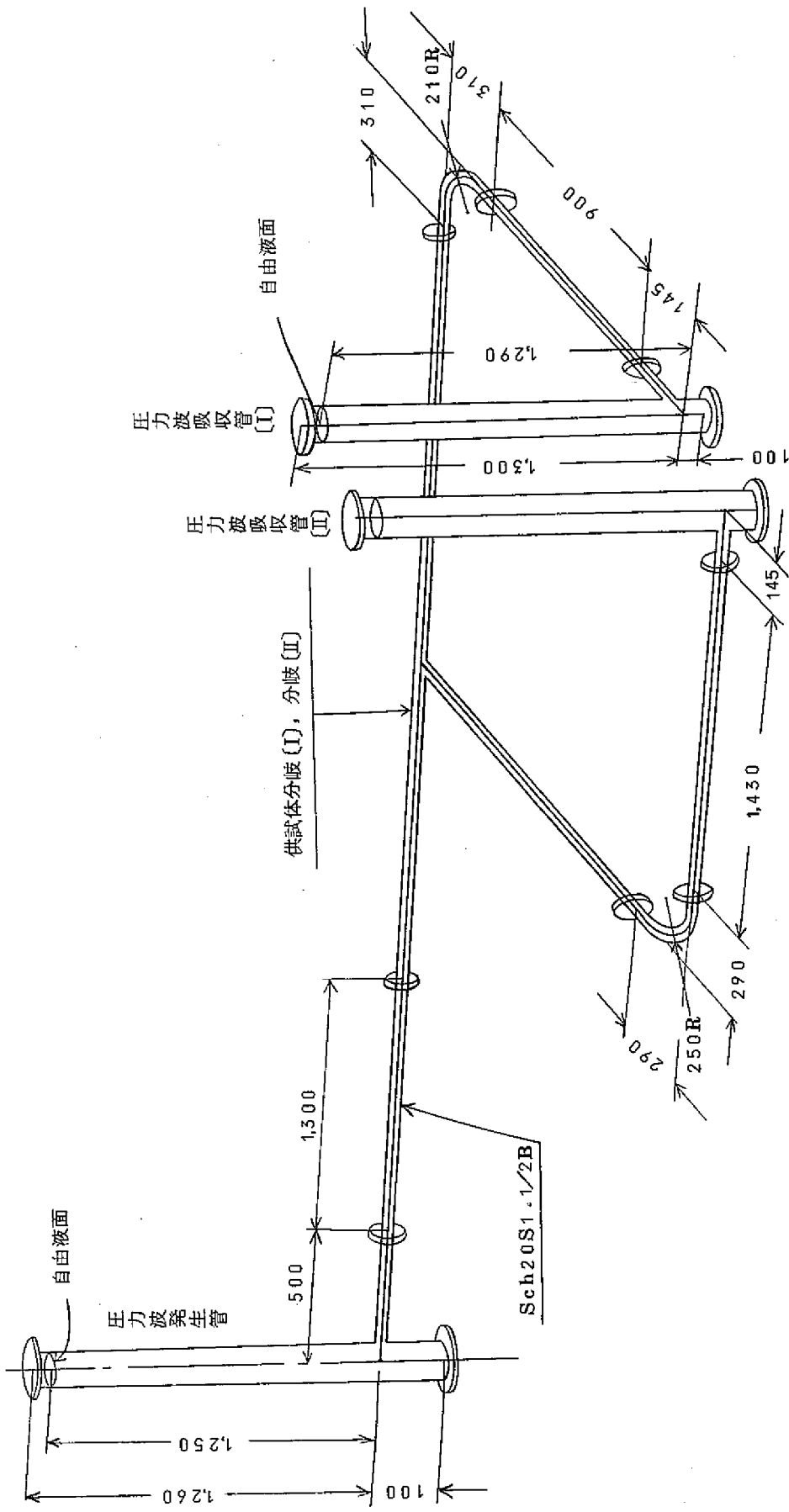


図3.3 窒素ガス部屋、ラブチャ-ティスク、ラブチャ-ティスク破壊針



圧力波吸収管 (I), (II) の寸法は全く同一

図 3.4 分岐管 (I), (II) の試験部見取図

圧力波発生管	SUS 27	4B Sch 20 S
圧力波吸収管 (I)	SUS 27	3B Sch 20 S
圧力波吸収管 (II)	SUS 27	3B Sch 20 S
その他のパイプ	SUS 27	1・1/2B Sch 20 S

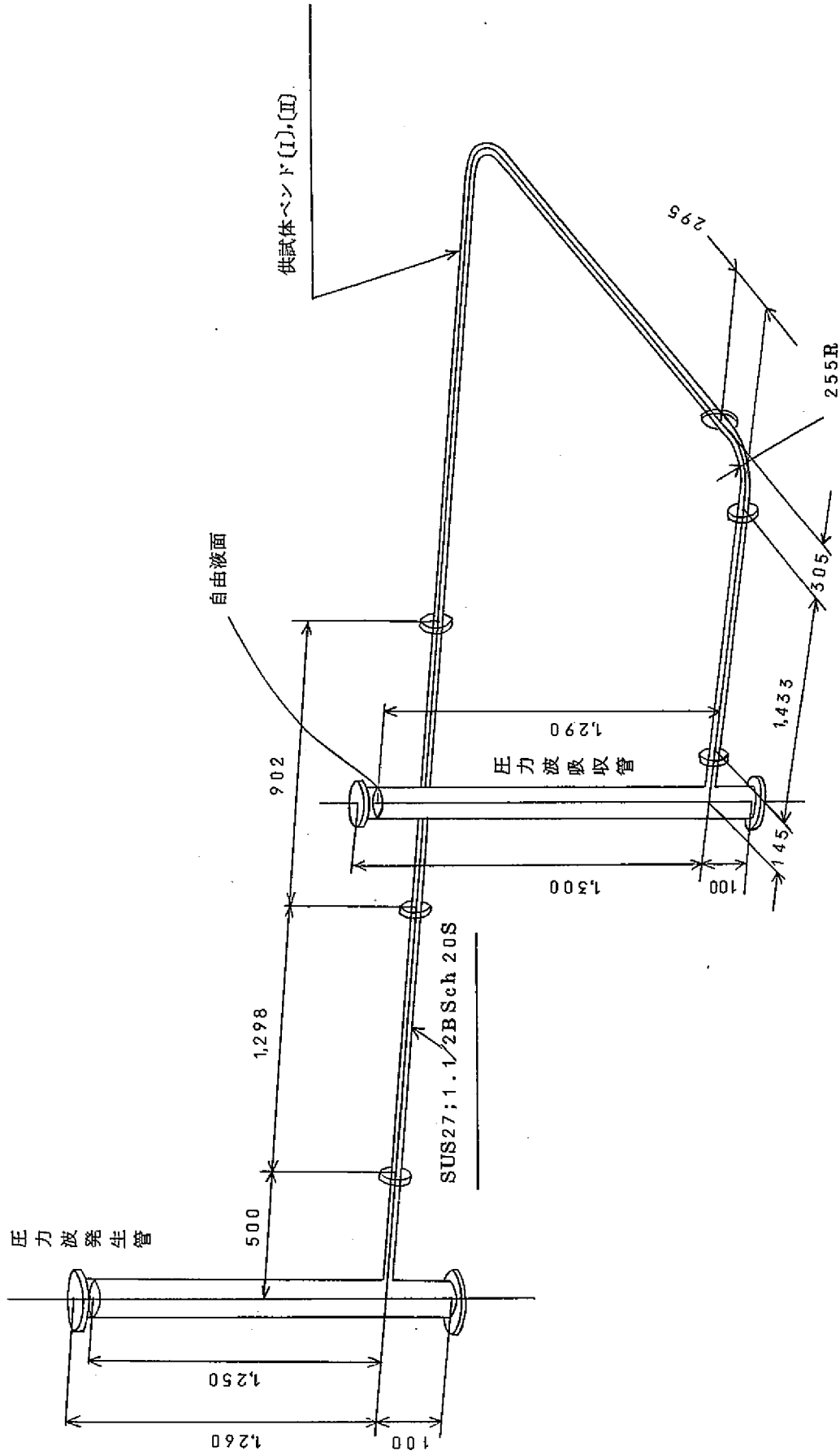


図 3・5 ベンド (I), (II) の試験部見取図



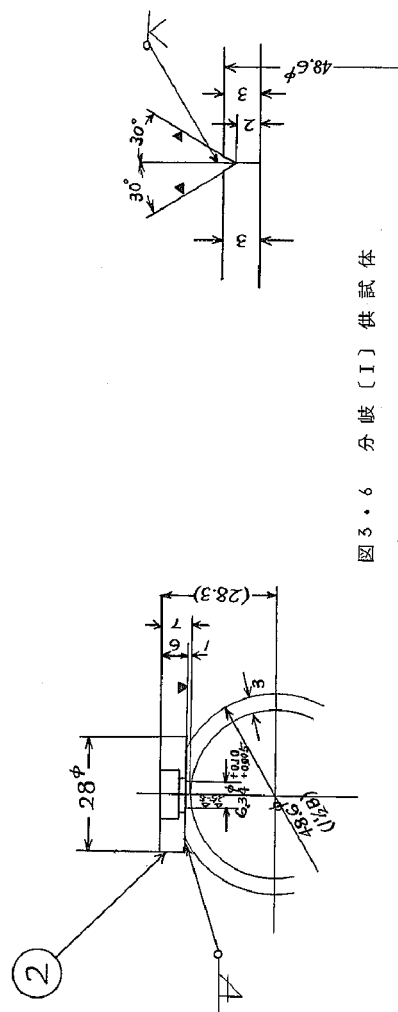
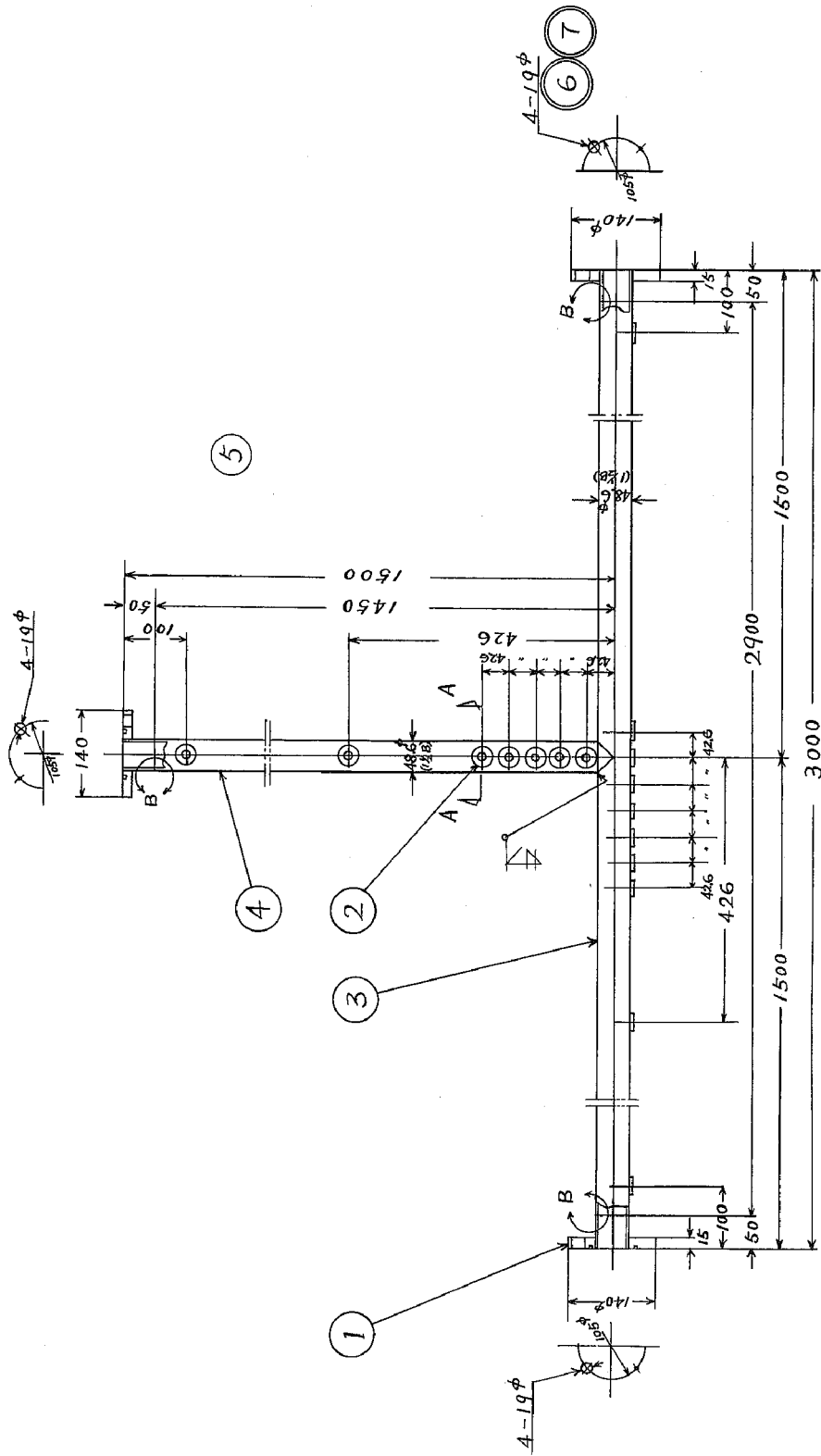


图 3·6 分岐 (I) 供試体



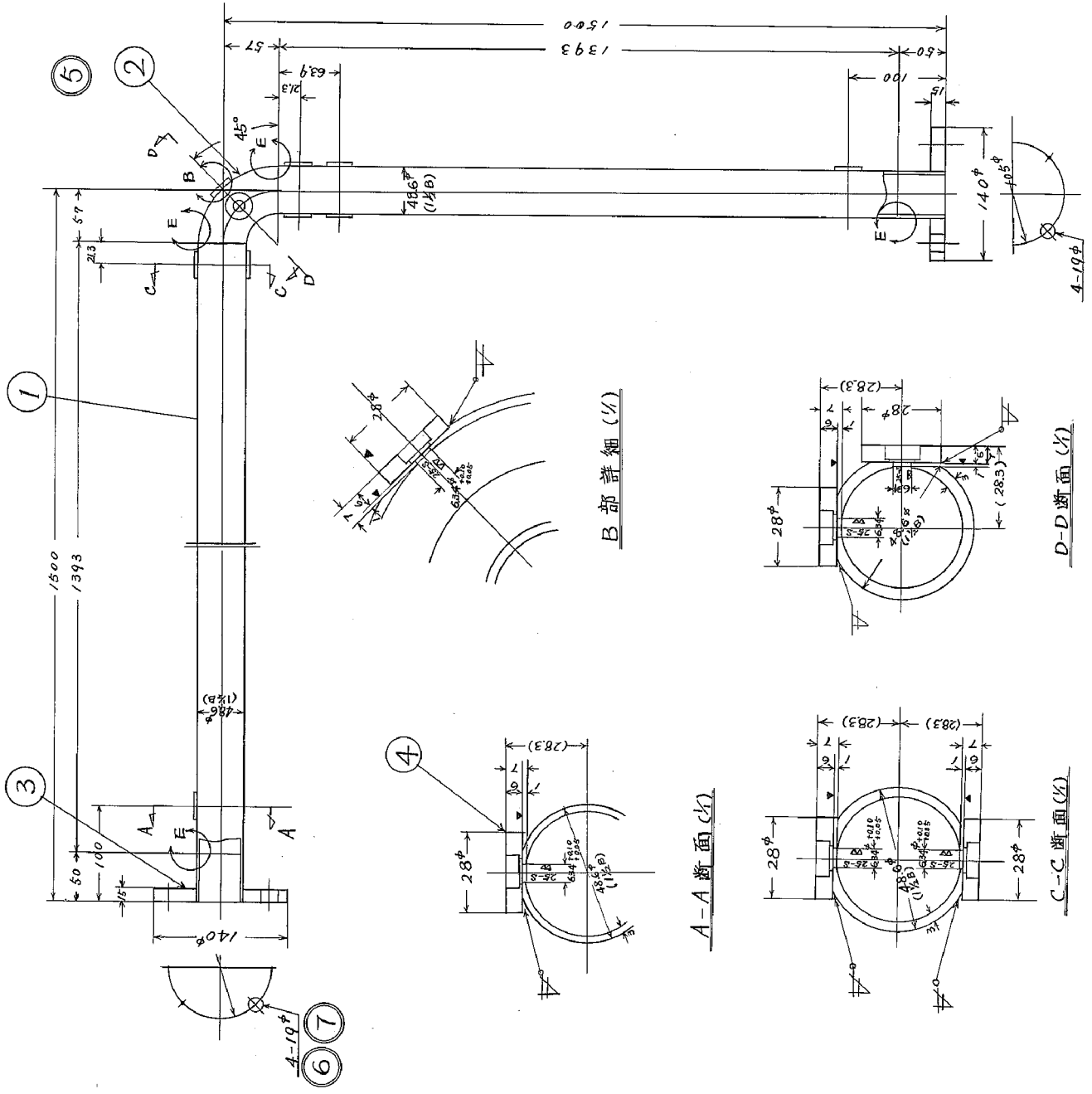


図 3・8 ベンド (I) 供試体

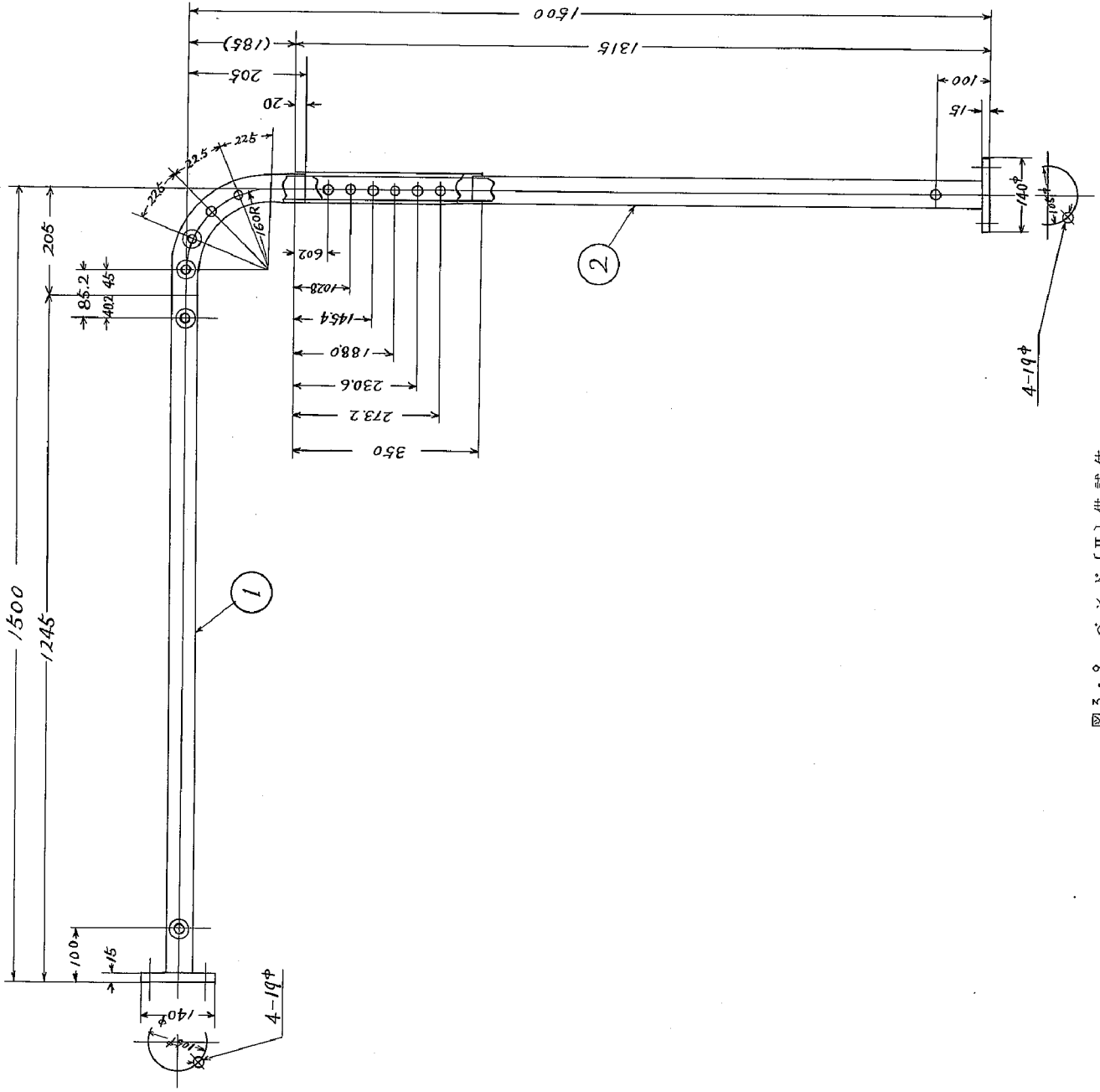


図3・9 ベンド(Ⅱ)供試体

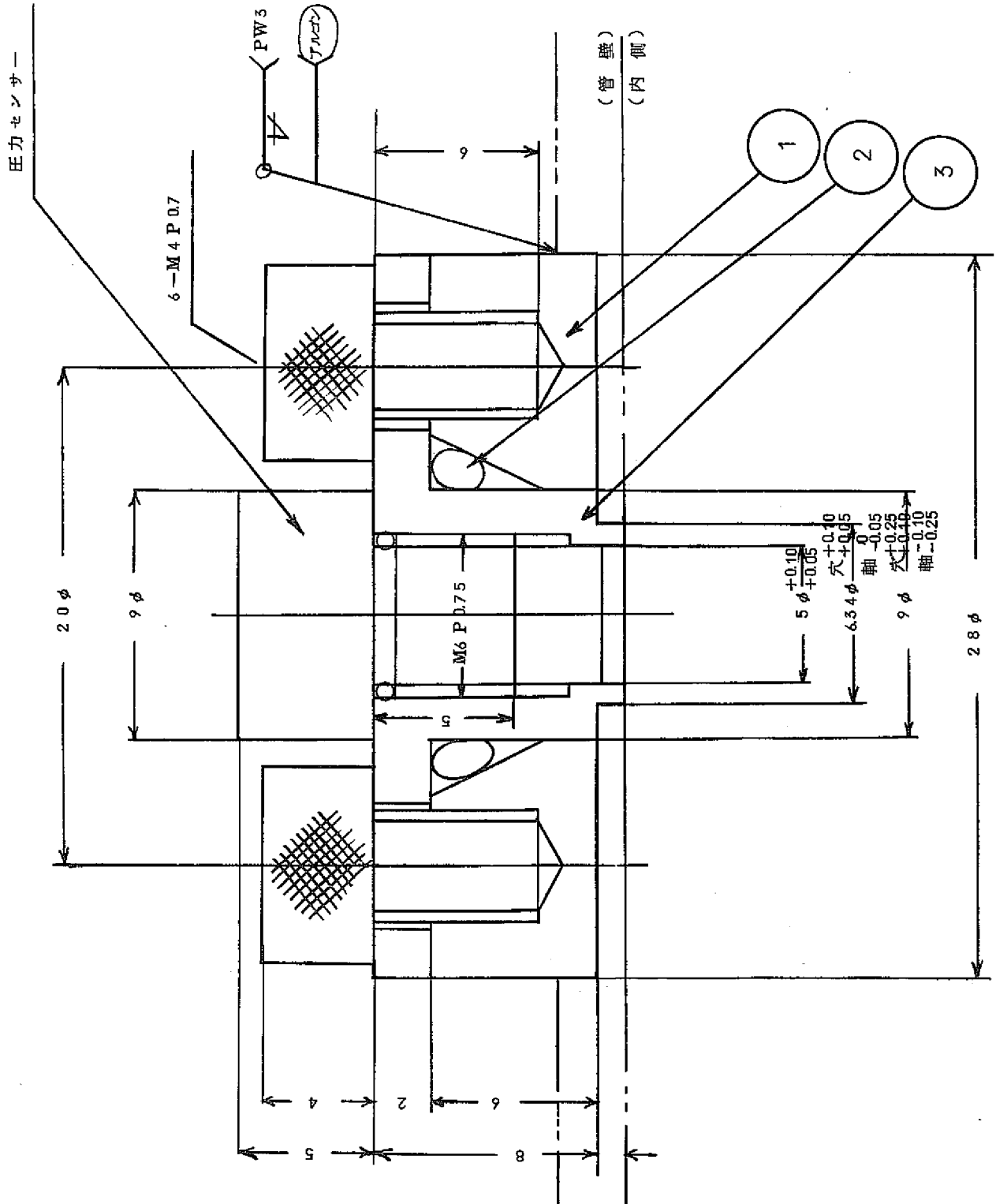


図3・10 圧力計取付図

表 4-1-1, 試験条件表

供試体種類	管 経	水 温	圧力範囲	圧力パルス 立上り時間
分岐管〔I〕	42.6φ 42.6φ 42.6φ	25.5°C	0.5Kg/cm <sup>2</sup>   3.0Kg/cm <sup>2</sup>	約 1.5msec
分岐管〔II〕	42.6φ 42.6φ 22.6φ	25.5°C	0.8Kg/cm <sup>2</sup>   3.5Kg/cm <sup>2</sup>	約 1.5msec
ベンド〔I〕	42.6φ R=57mm	25.5°C	0.7Kg/cm <sup>2</sup>   4.7Kg/cm <sup>2</sup>	約 1.5msec
ベンド〔II〕	42.6φ R=160mm	25.5°C	0.7Kg/cm <sup>2</sup>   6.0Kg/cm <sup>2</sup>	約 1.5msec

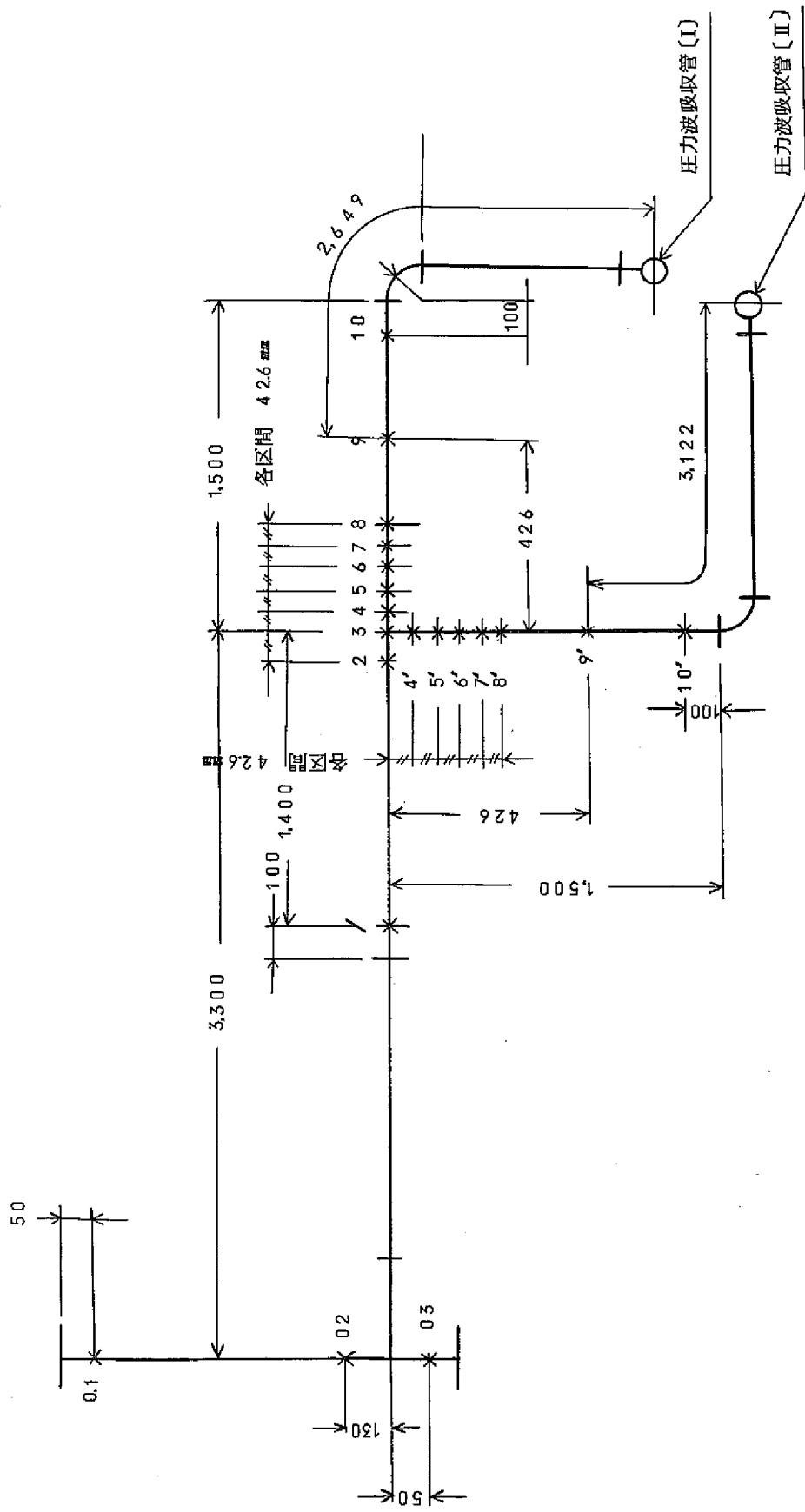


図 4・2・1 分岐部 (I) の压力波测定场所





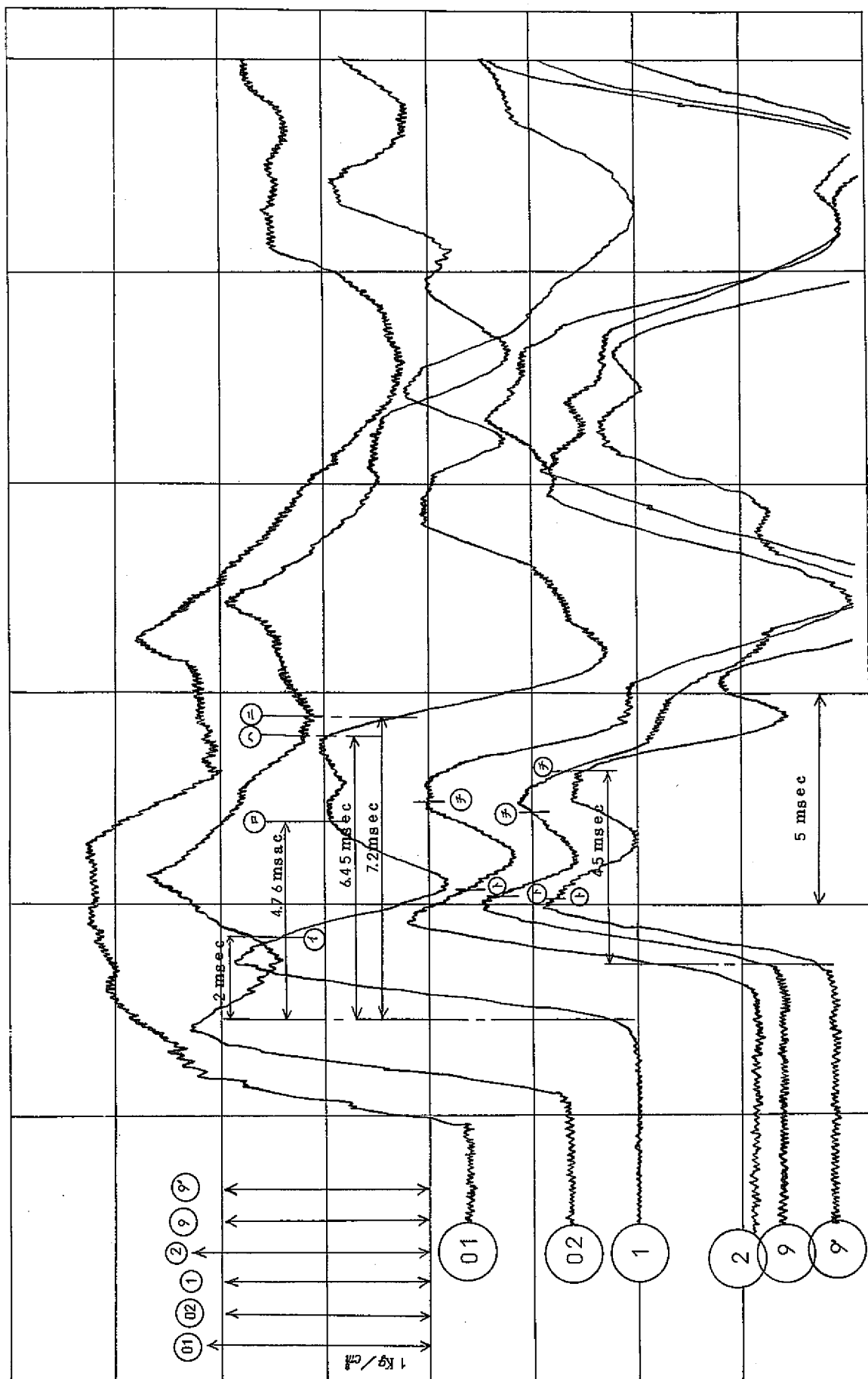


図 4・2・3 分岐 (I) の測定結果

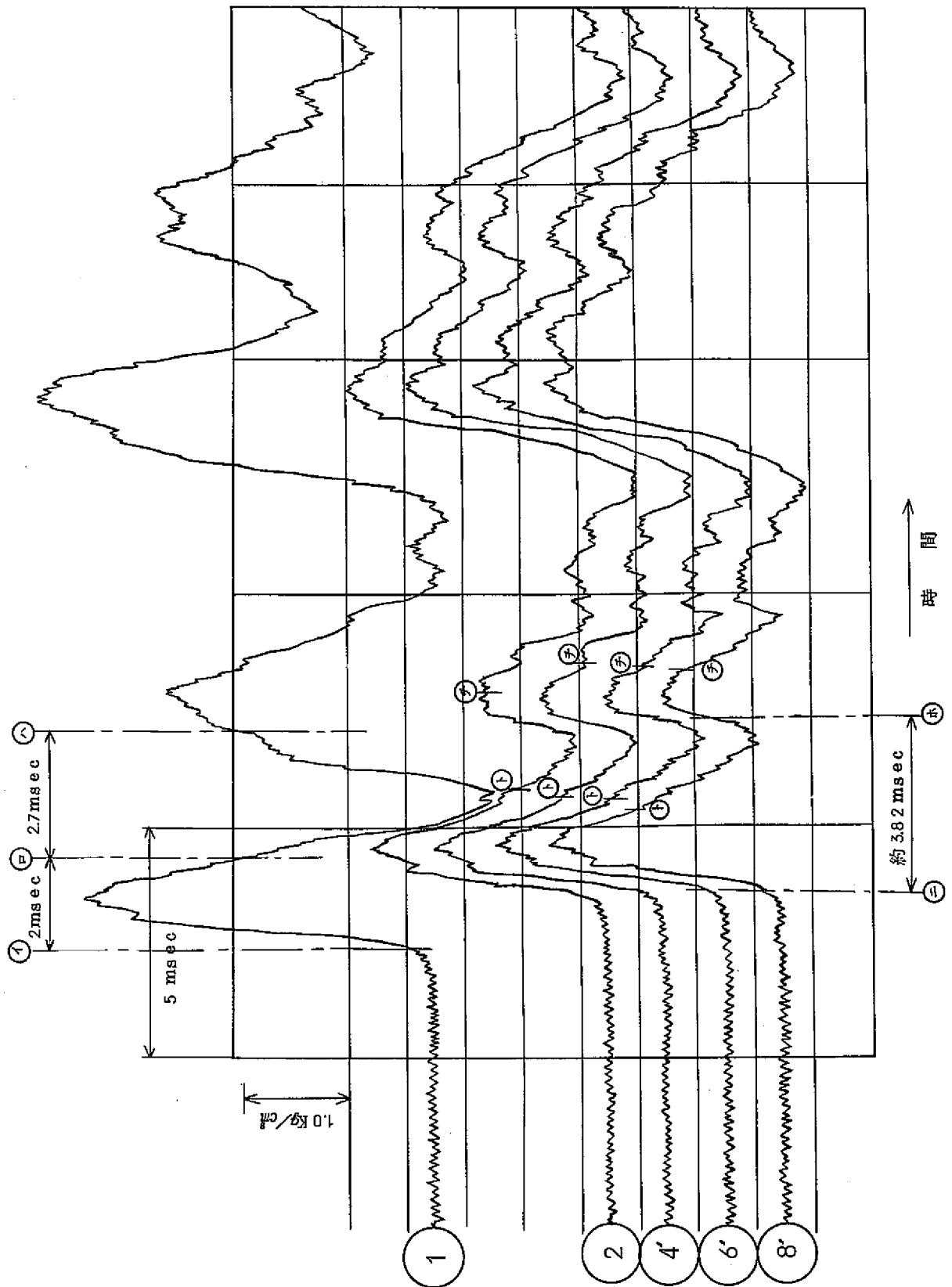


図 4・2・4 分岐 [I] の測定結果

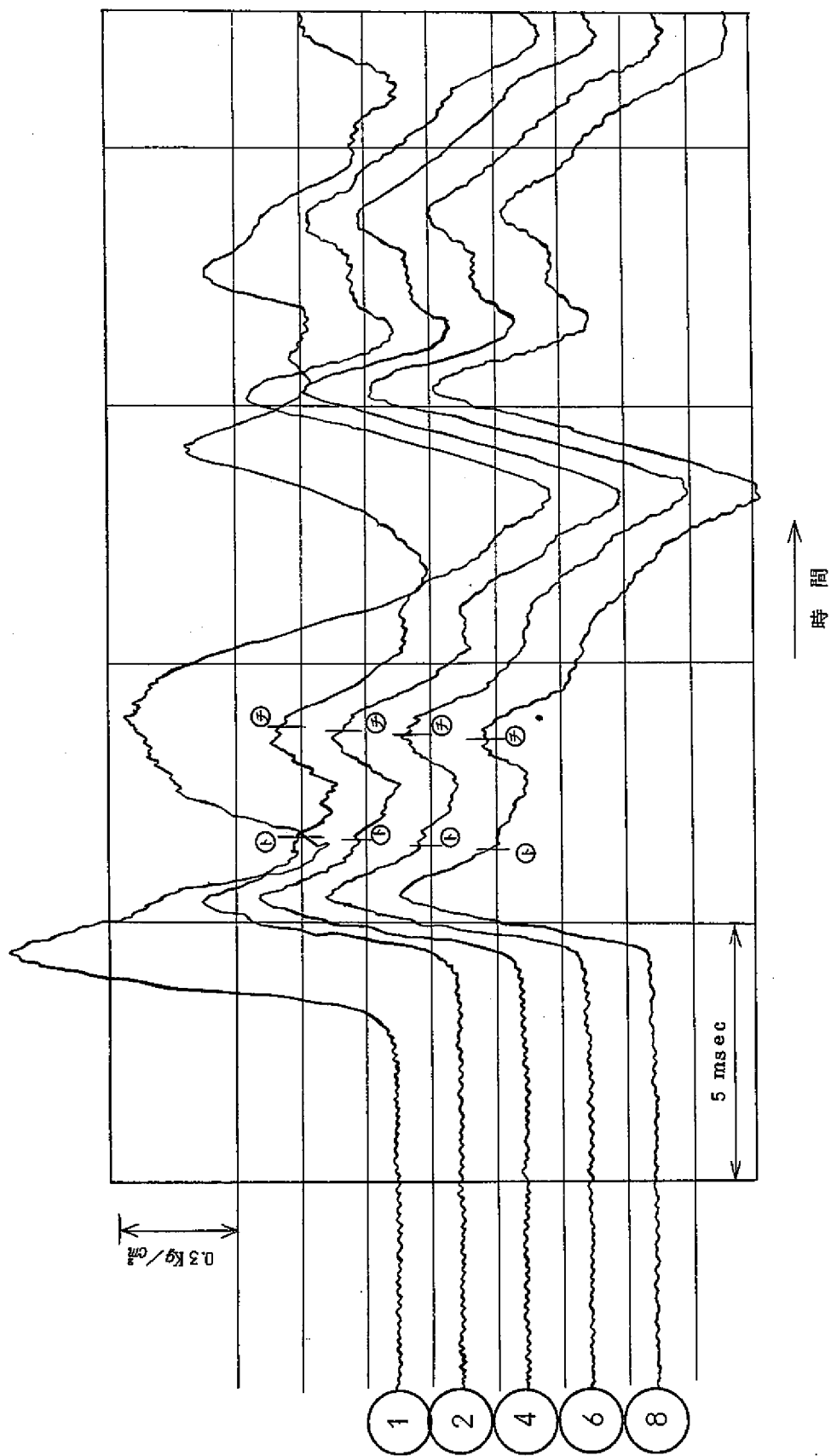


図 4・2・5 分岐 (I) の測定結果

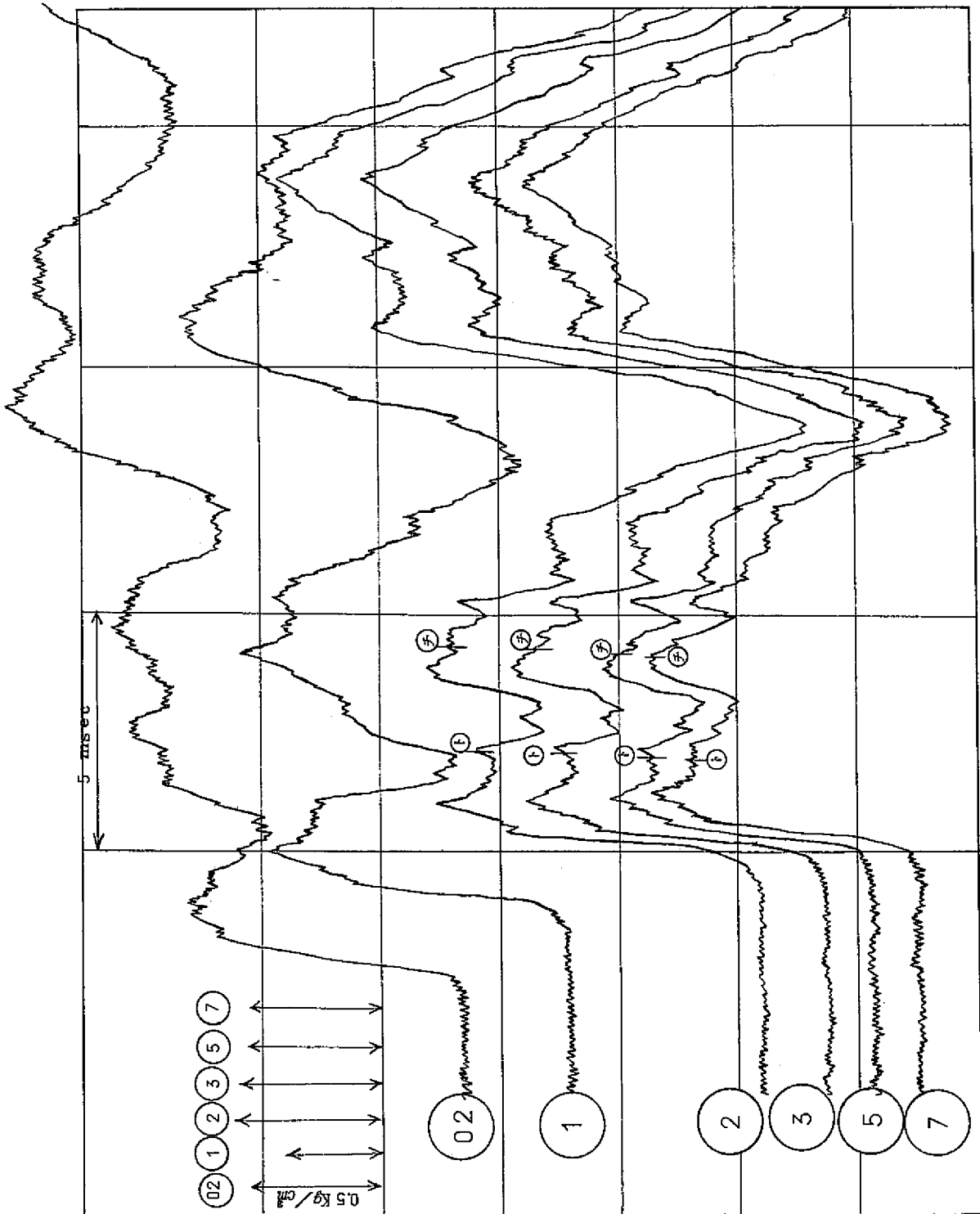


図 4・2・6 分岐 (I) の測定結果

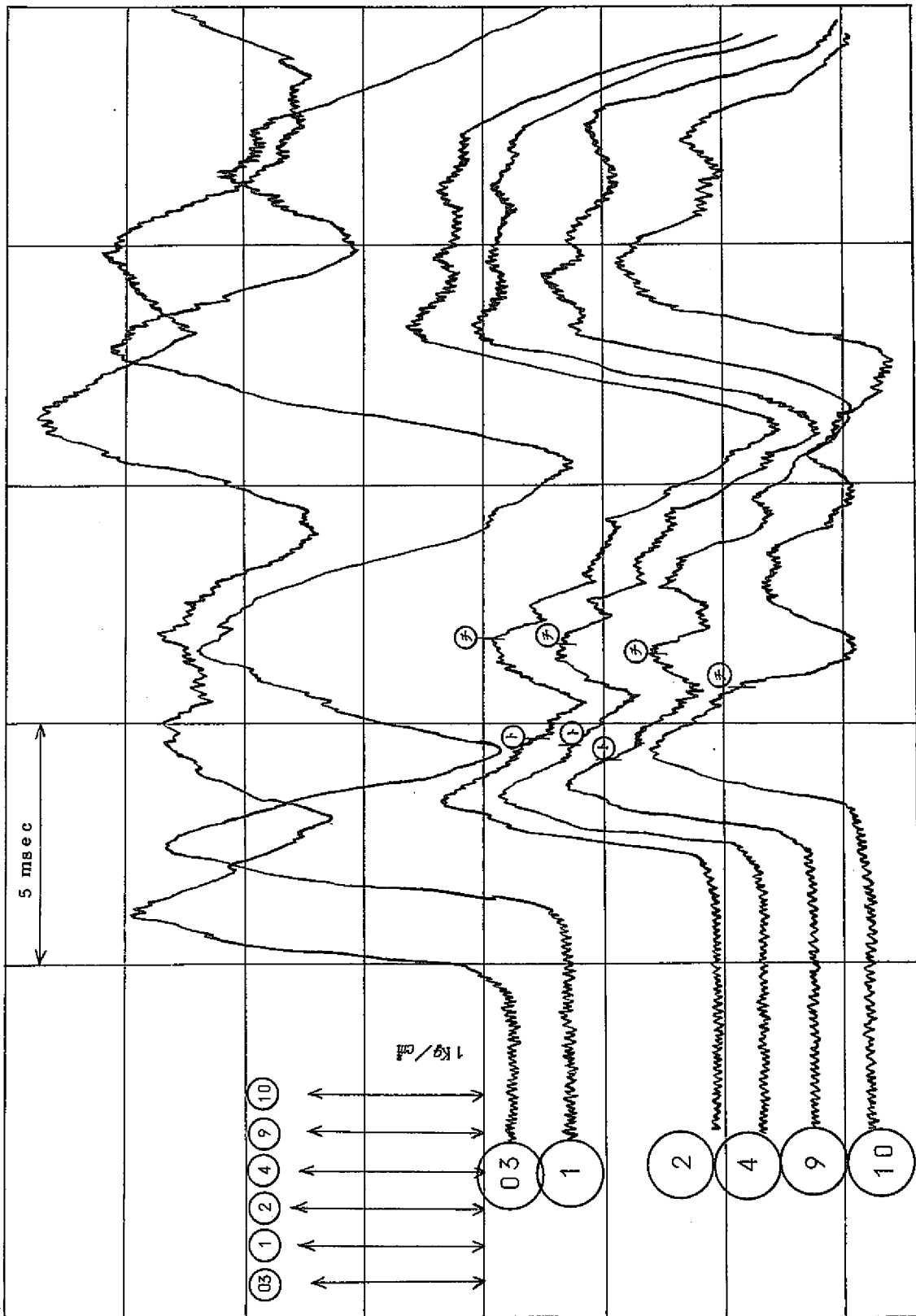


図 4.2.7 分岐 [I] の測定結果

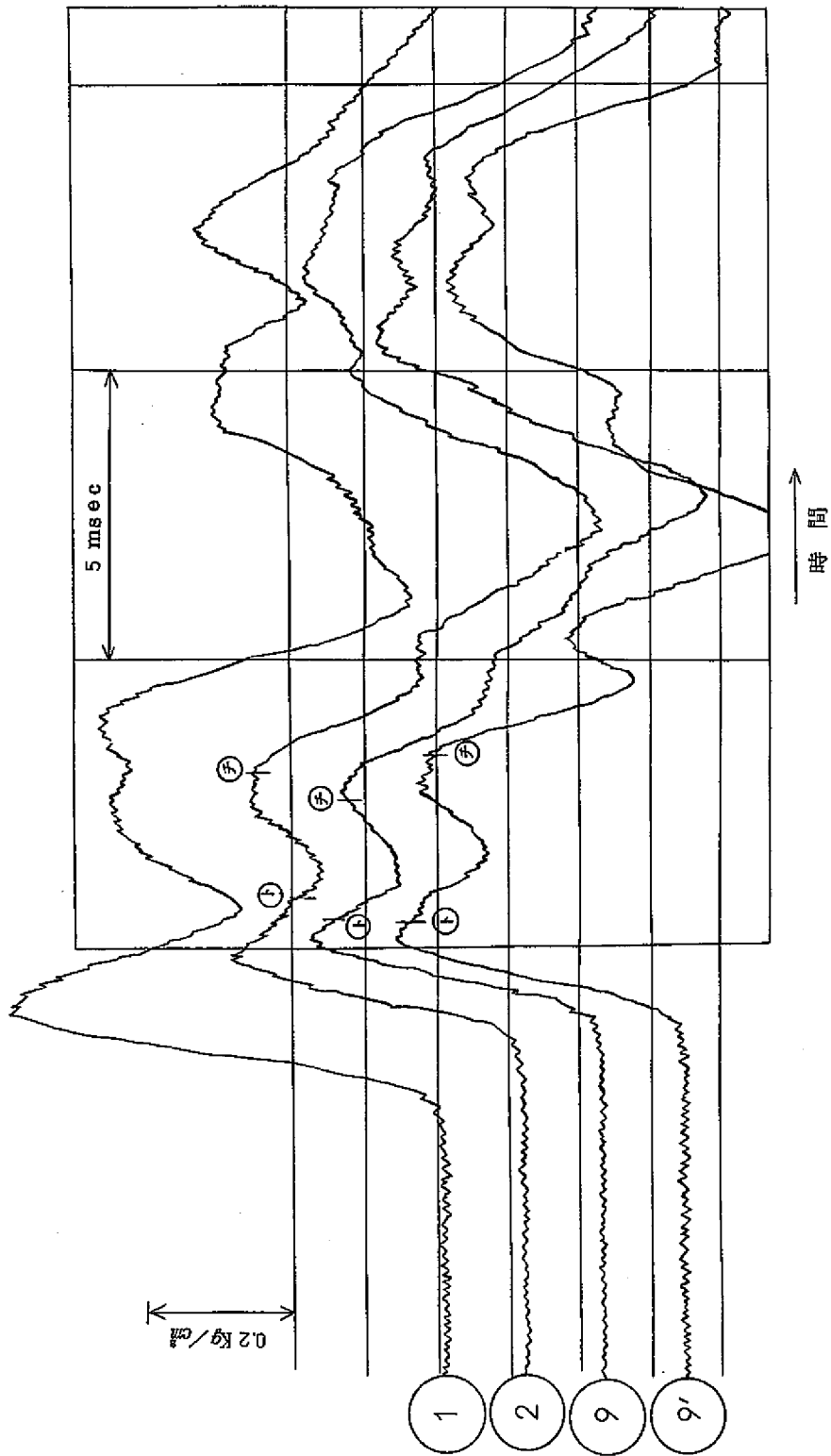


図 4・2・8 分岐 [I] の測定結果

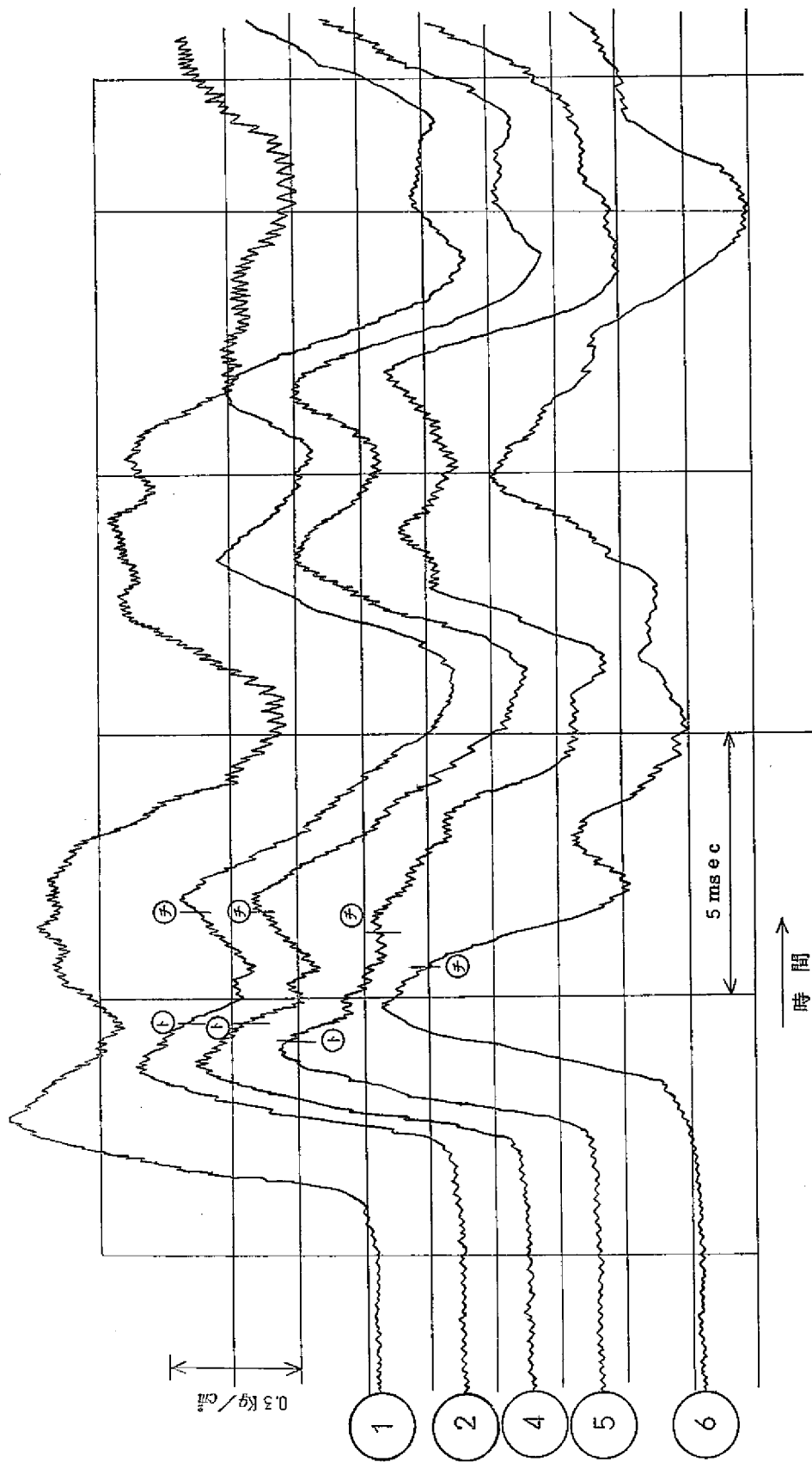


図 4・2・9 分岐 (II) の測定結果

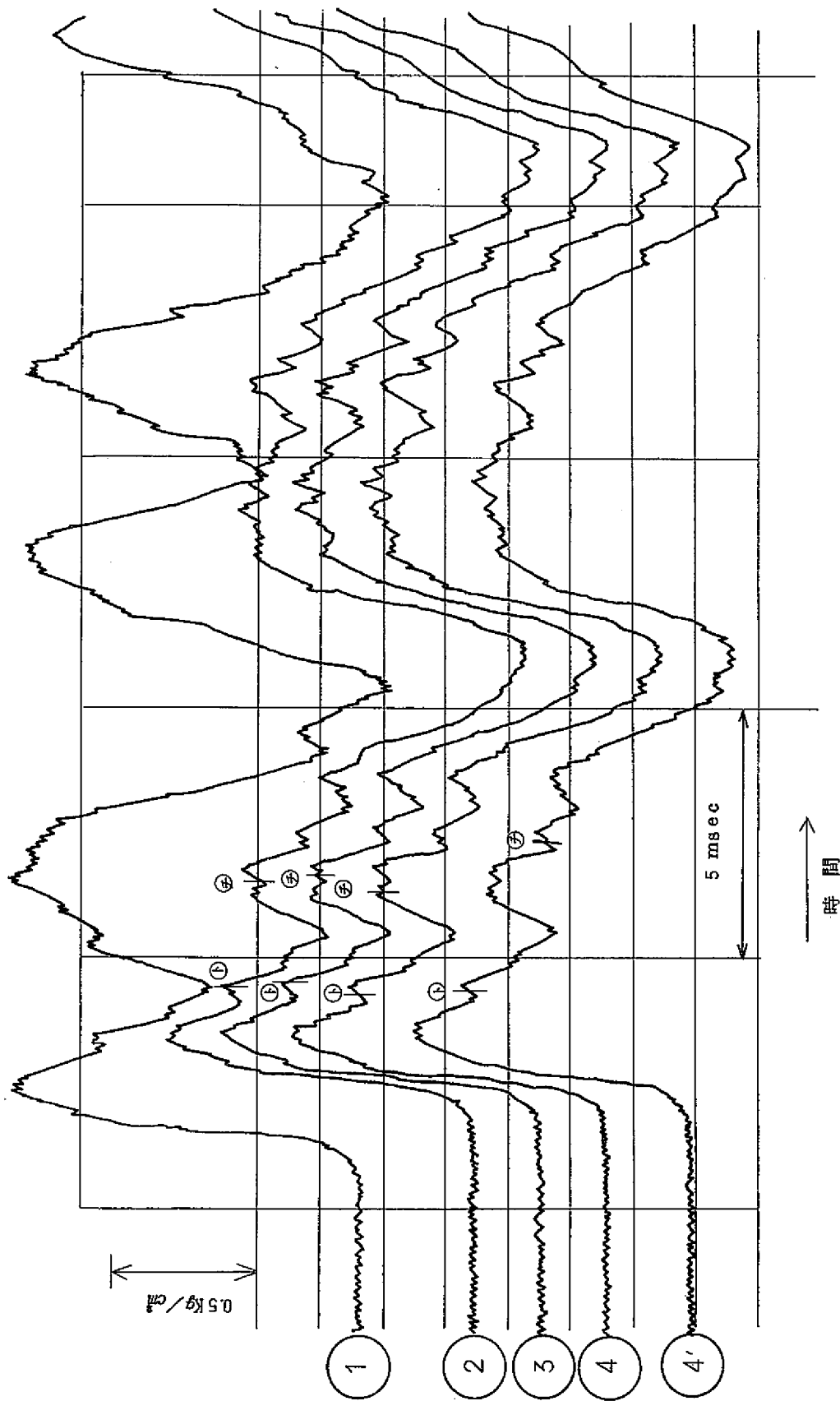


図 4・2・10 分岐〔II〕の測定結果



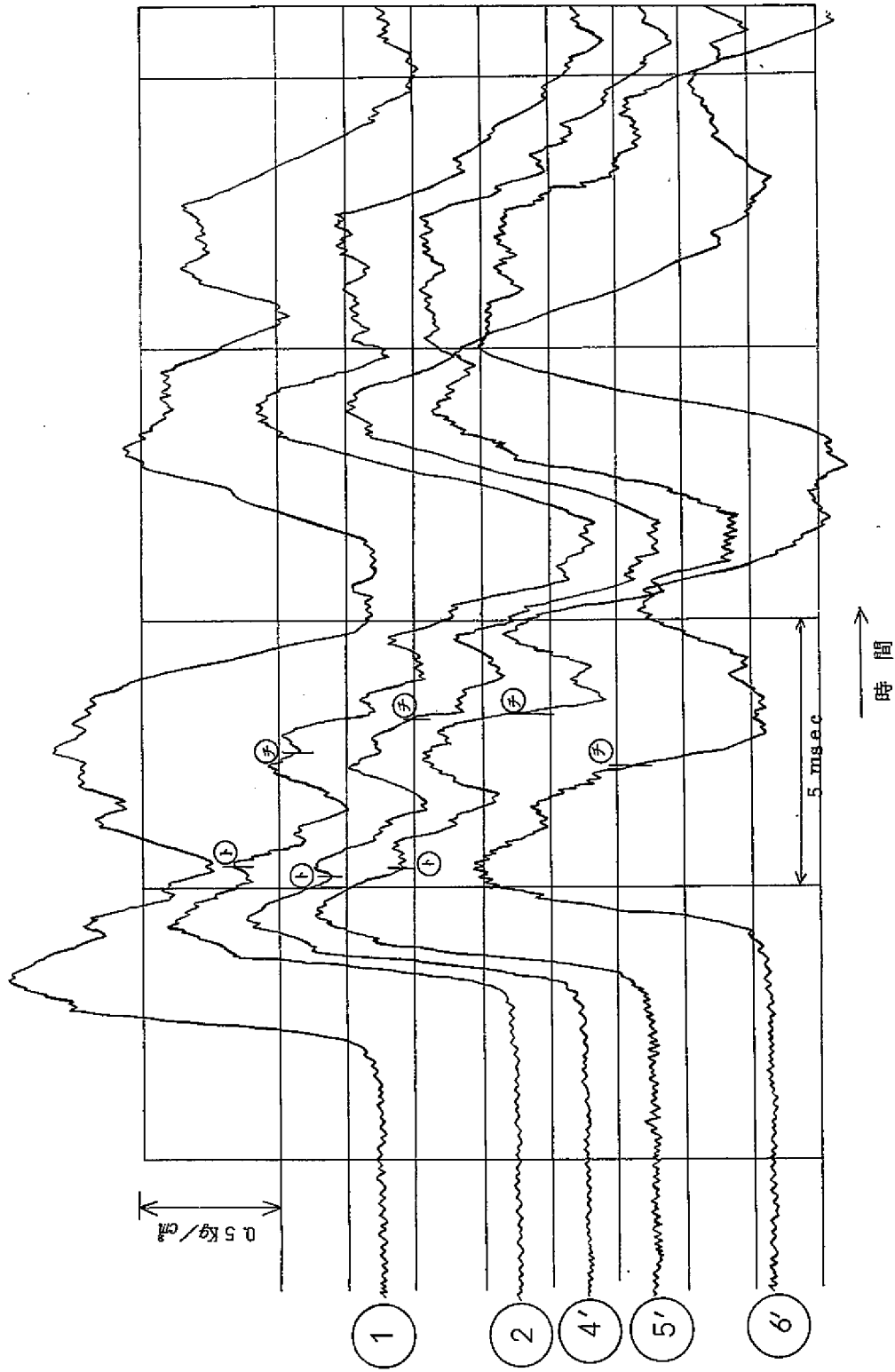


图 4.2.11 分岐 (II) の測定結果

実験対称物	測定値	計算値	誤差
分岐 (I)	1,384 m/s	1,387 m/s	-0.2%
分岐 (II)	1,390 m/s	1,387 m/s	+0.2%
ベンド (I)	1,384 m/s	1,387 m/s	+0.2%
ベンド (II)	1,354 m/s	1,387 m/s	-2.4%

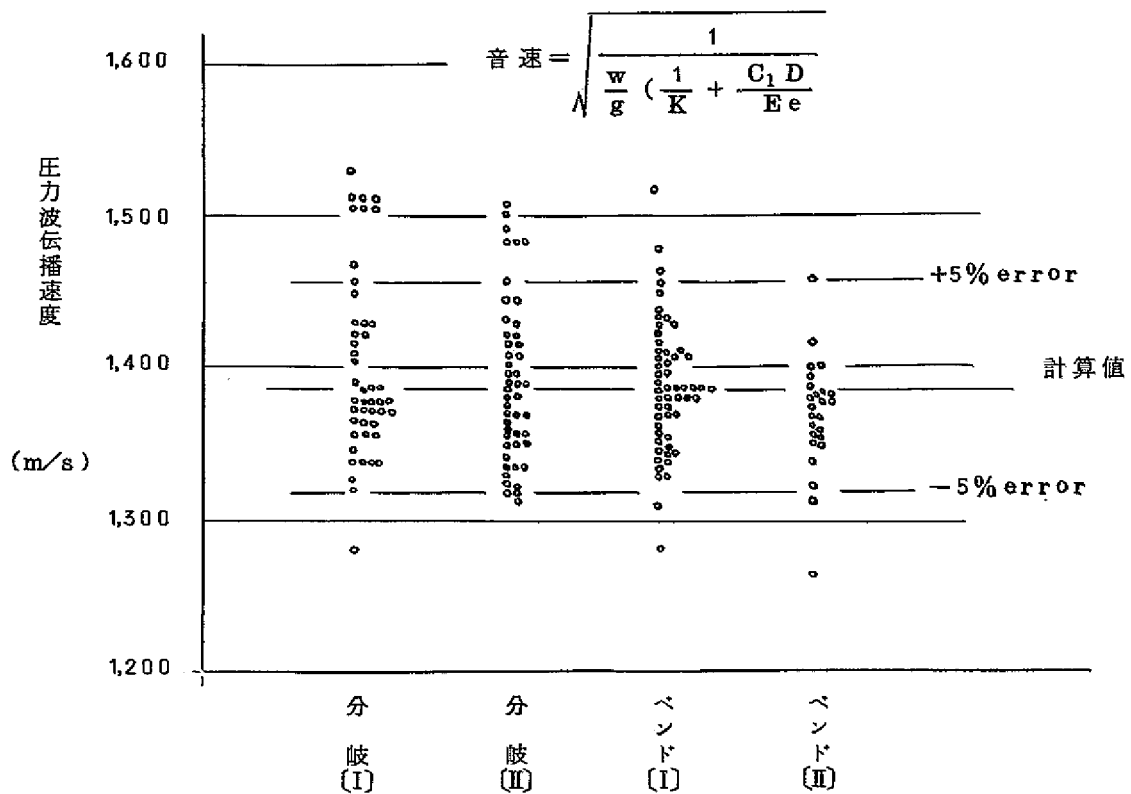


図 4.2.12 圧力波伝播速度測定結果

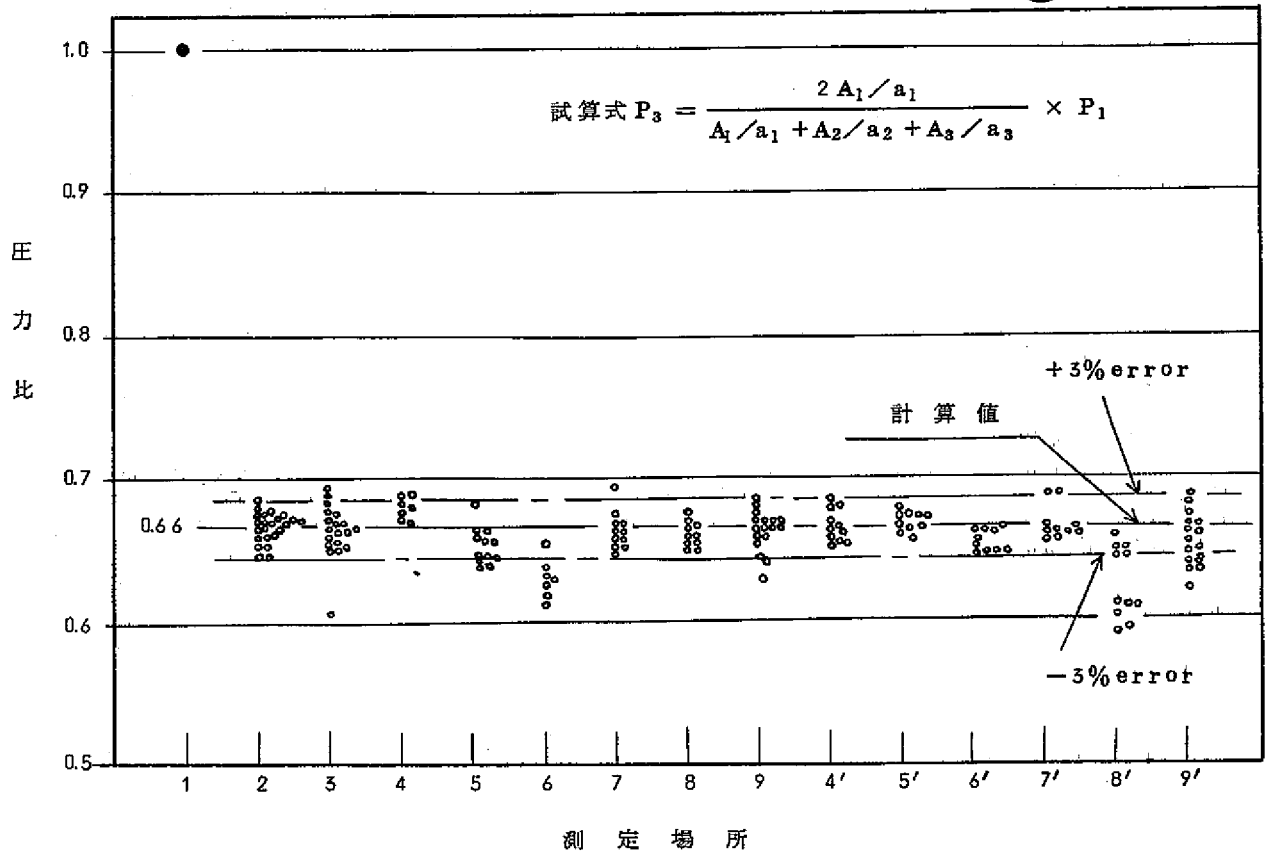
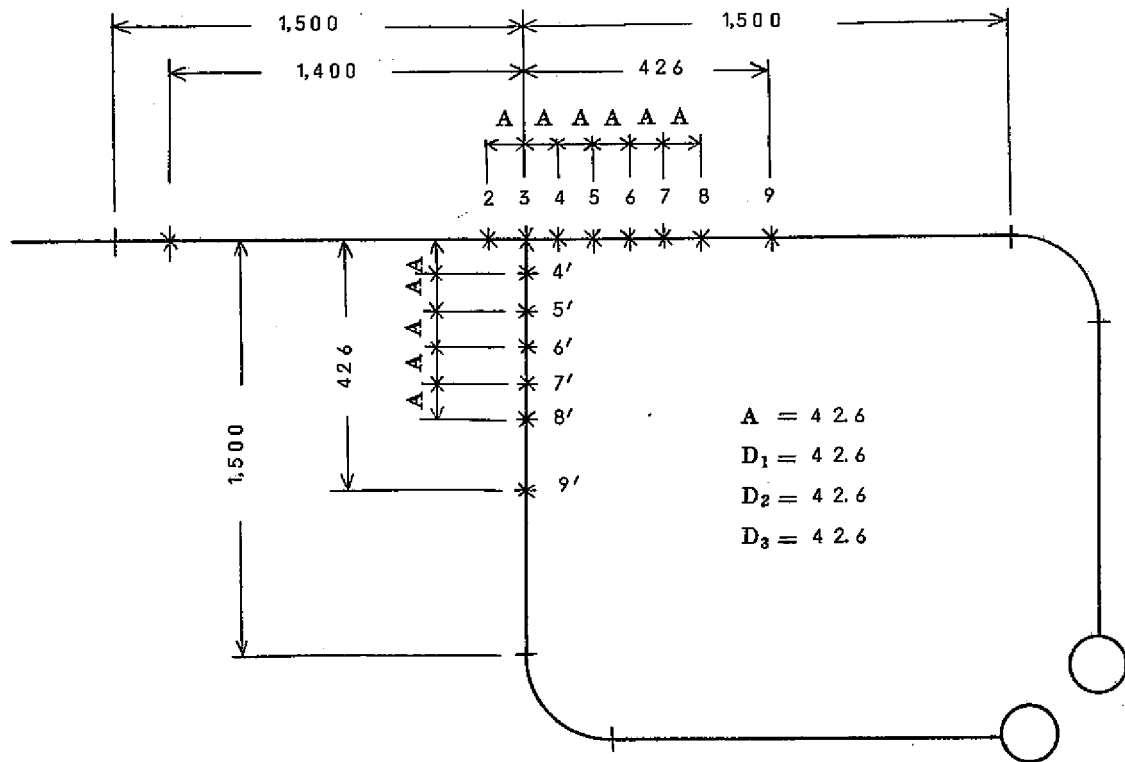


図4.2.13 分岐 [I] での実験結果

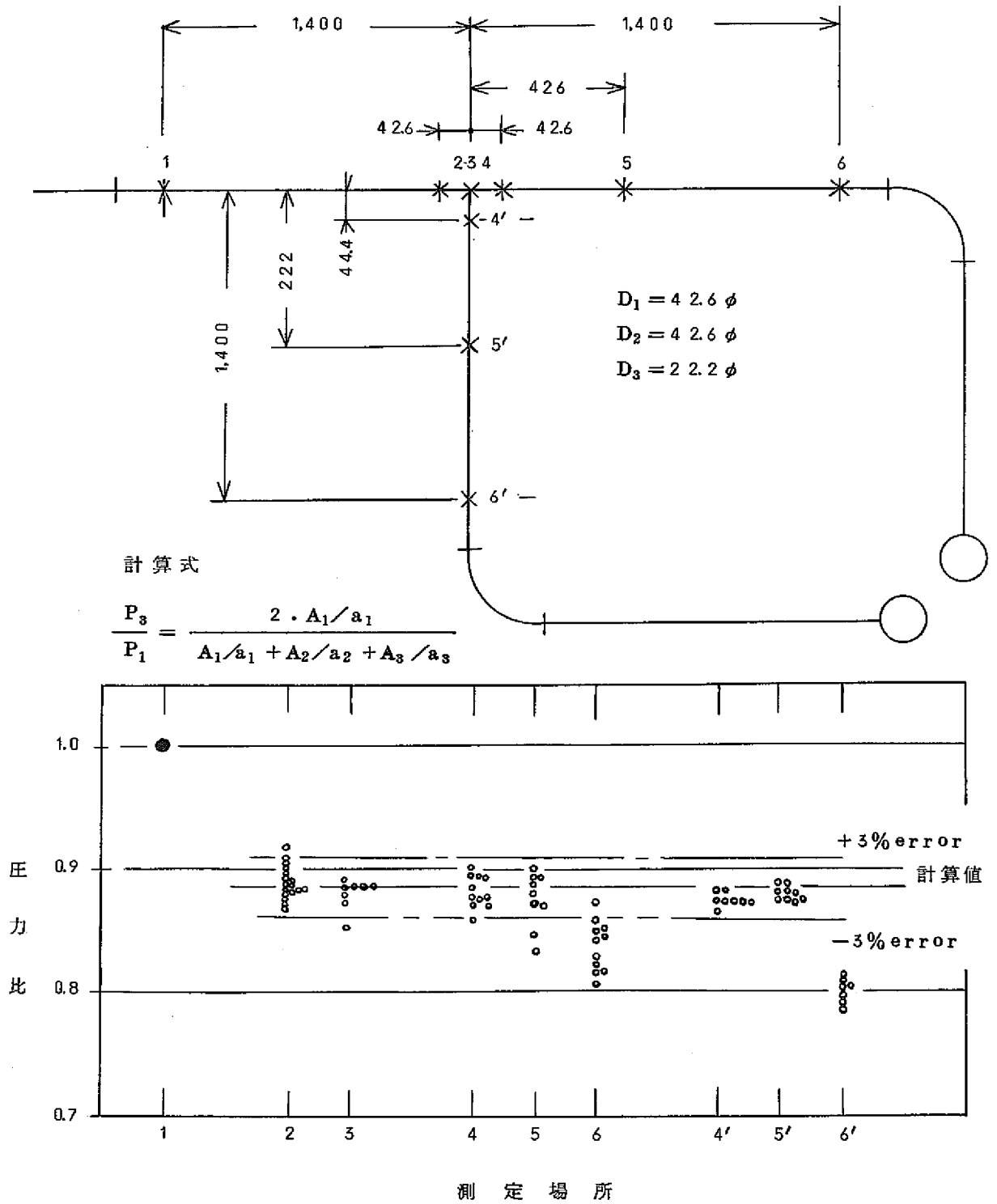


図4.2.14 分岐〔II〕での実験結果

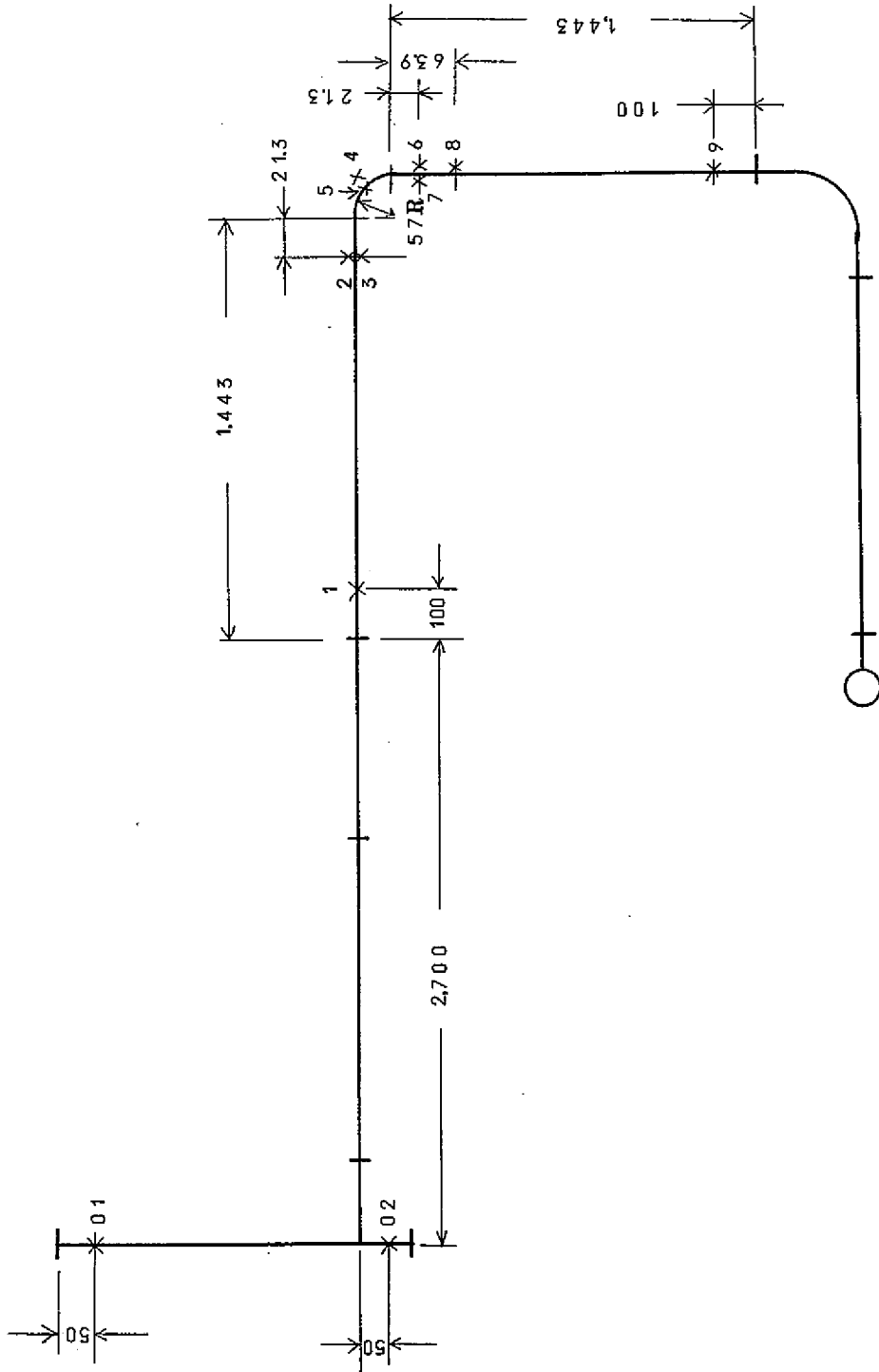


図 4.3.1 ベンド [I] の圧力測定場所

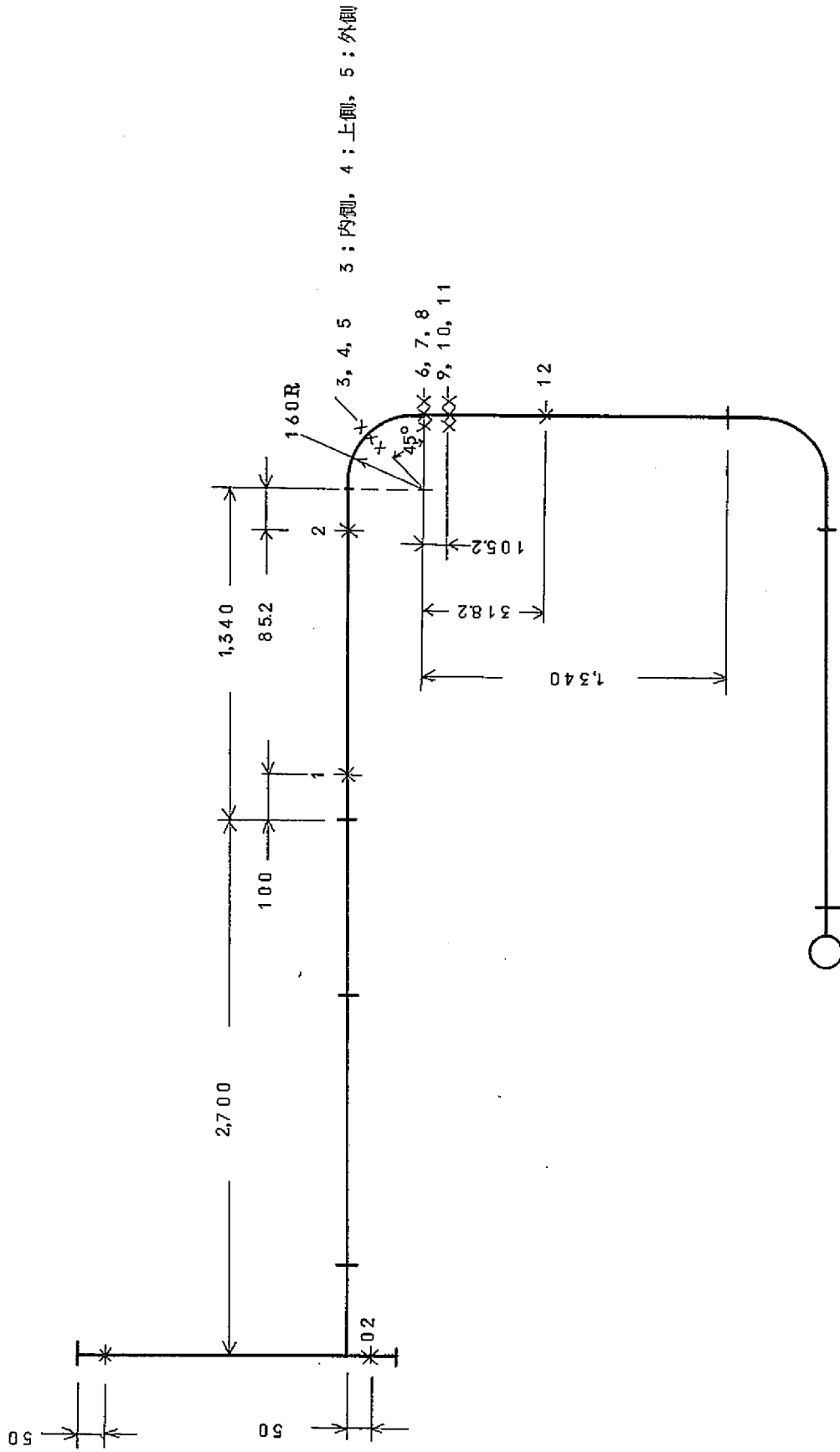


図 4.3.2 ベント N〔II〕の圧力測定場所

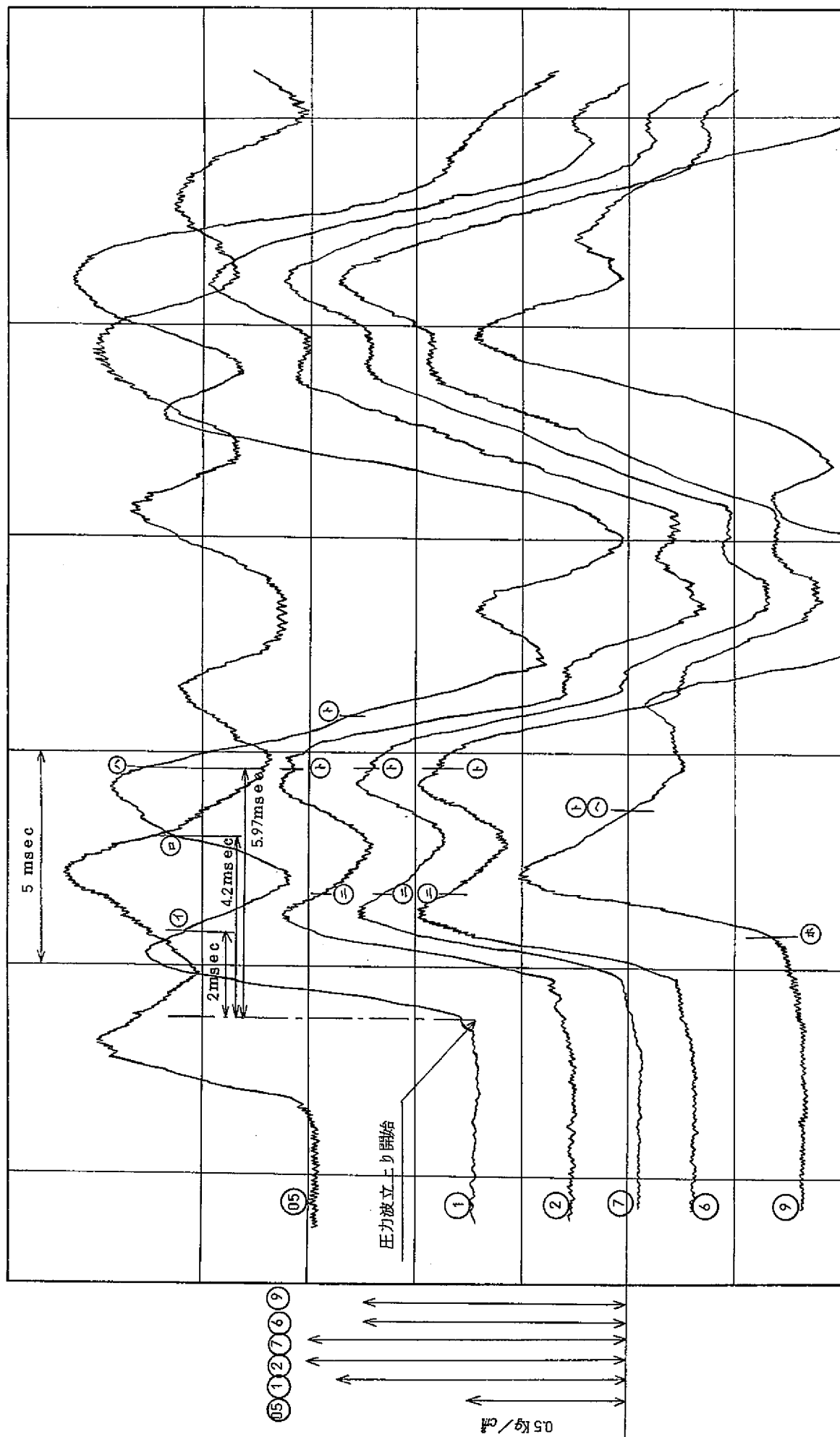


図 4・3・3 ベンド (I) の測定結果

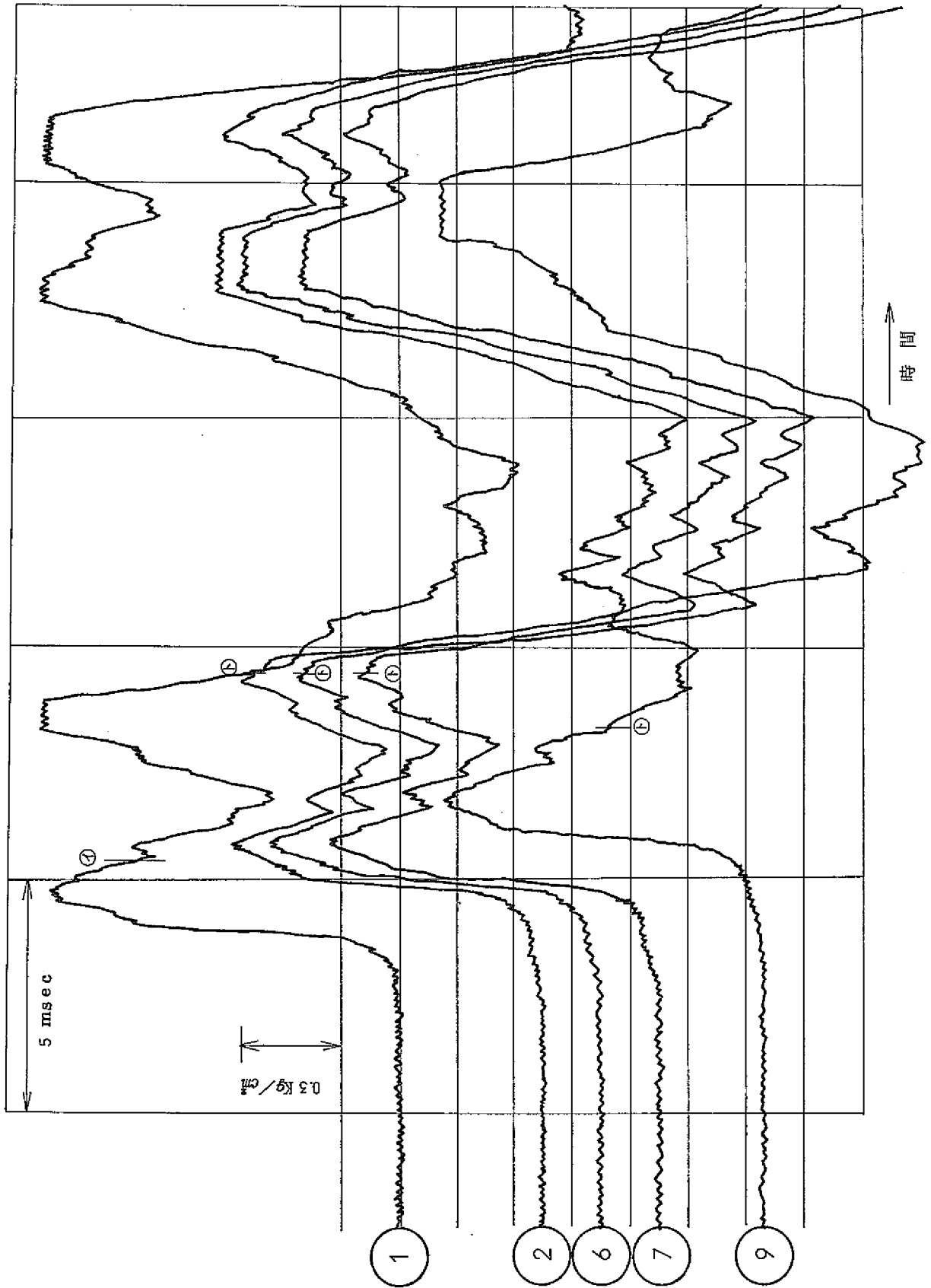


図4・3・4 ベンド [I] の測定結果



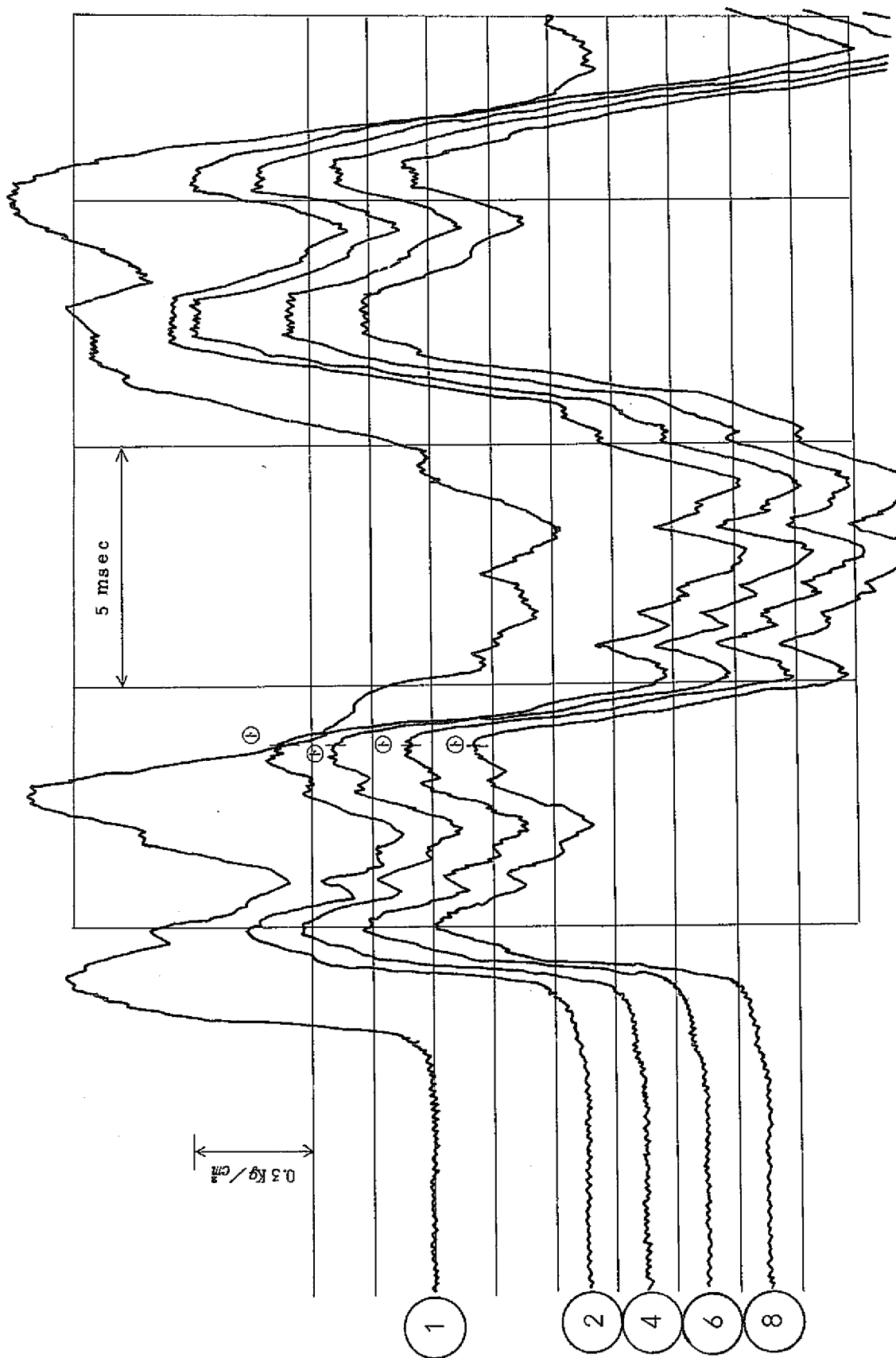


図4.3.5 ベンド[I]の測定結果

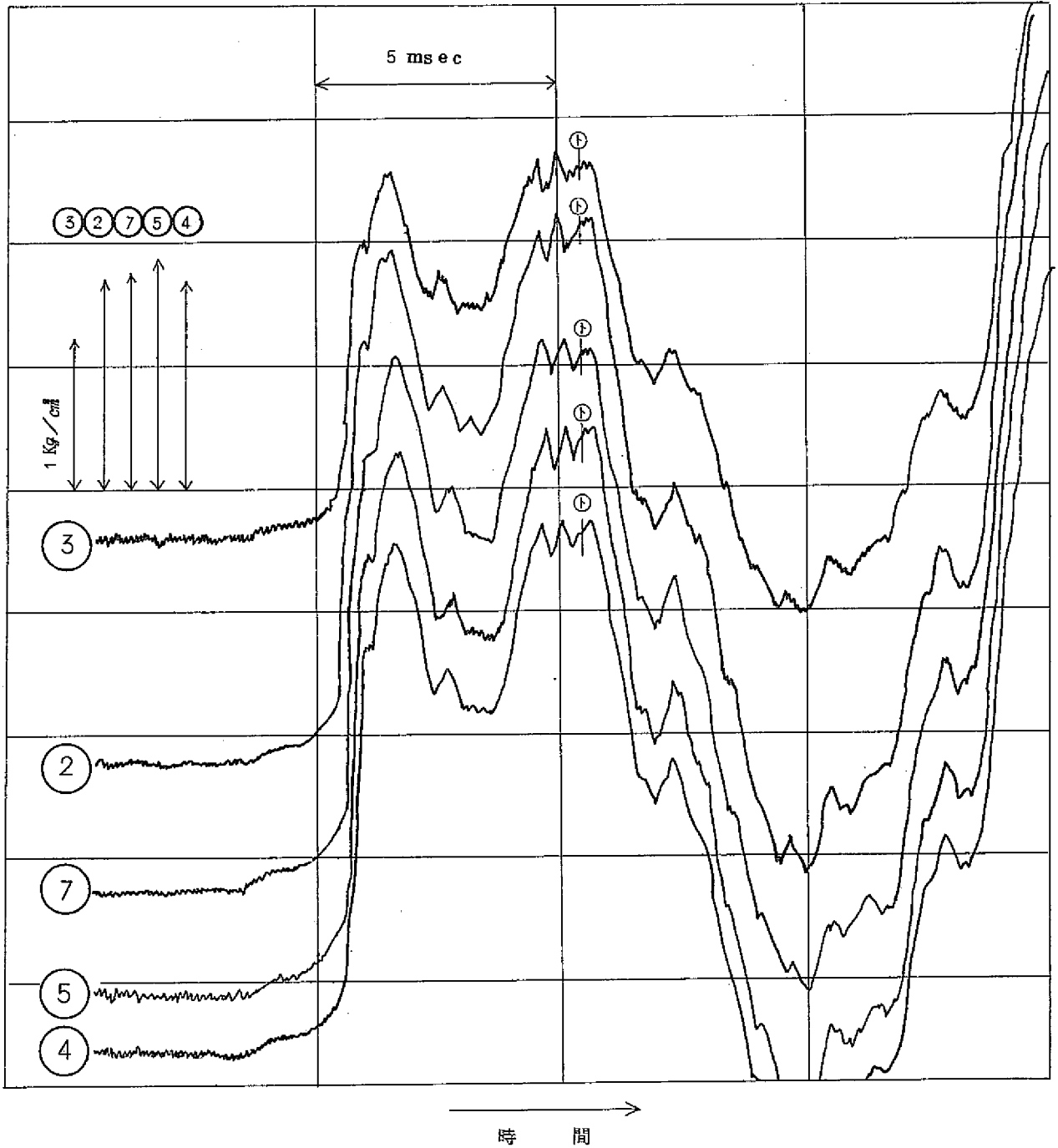


図 4.3.6 ベンド [I] の測定結果

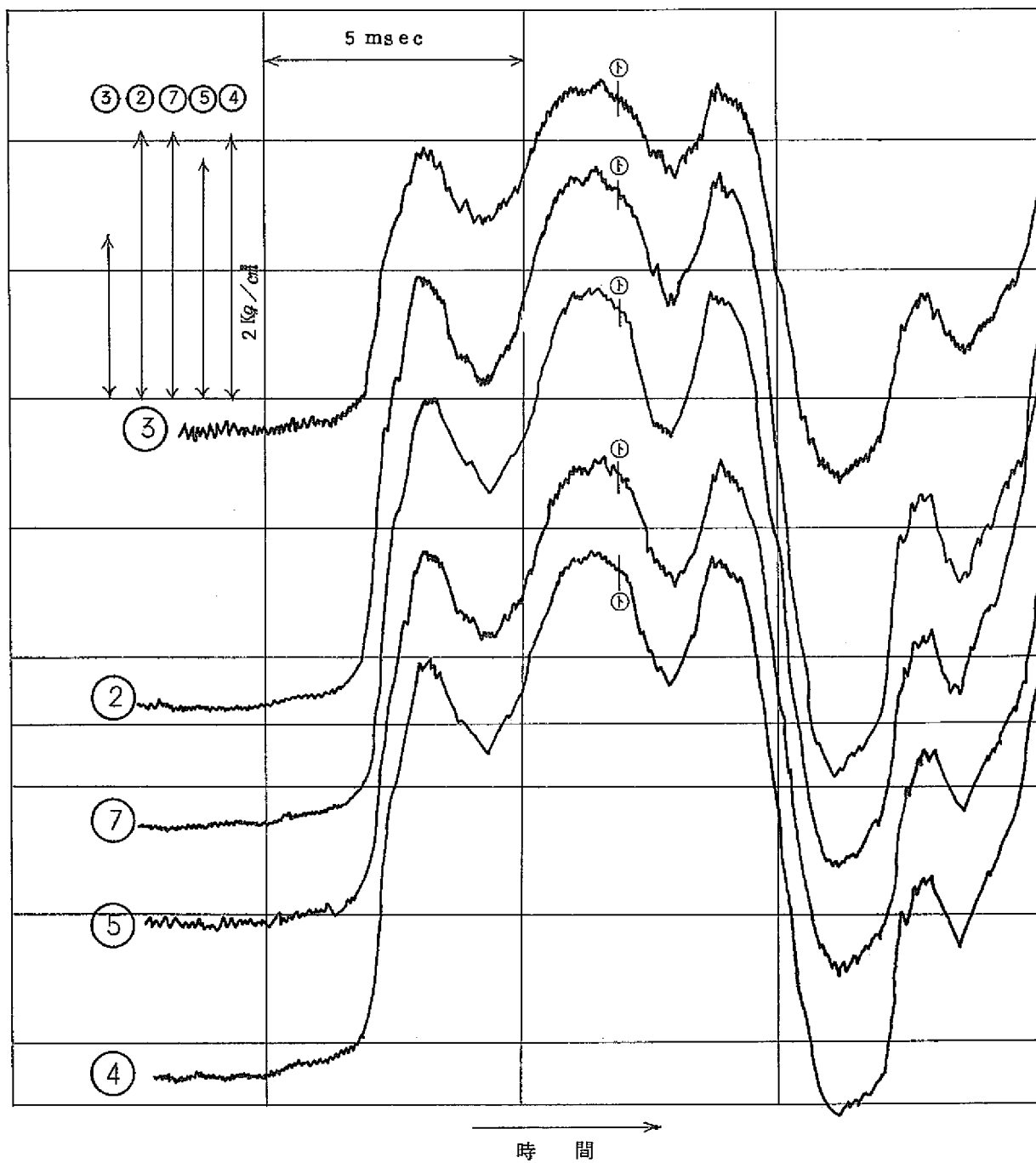


図4.3.7 ベンド [I] の測定結果

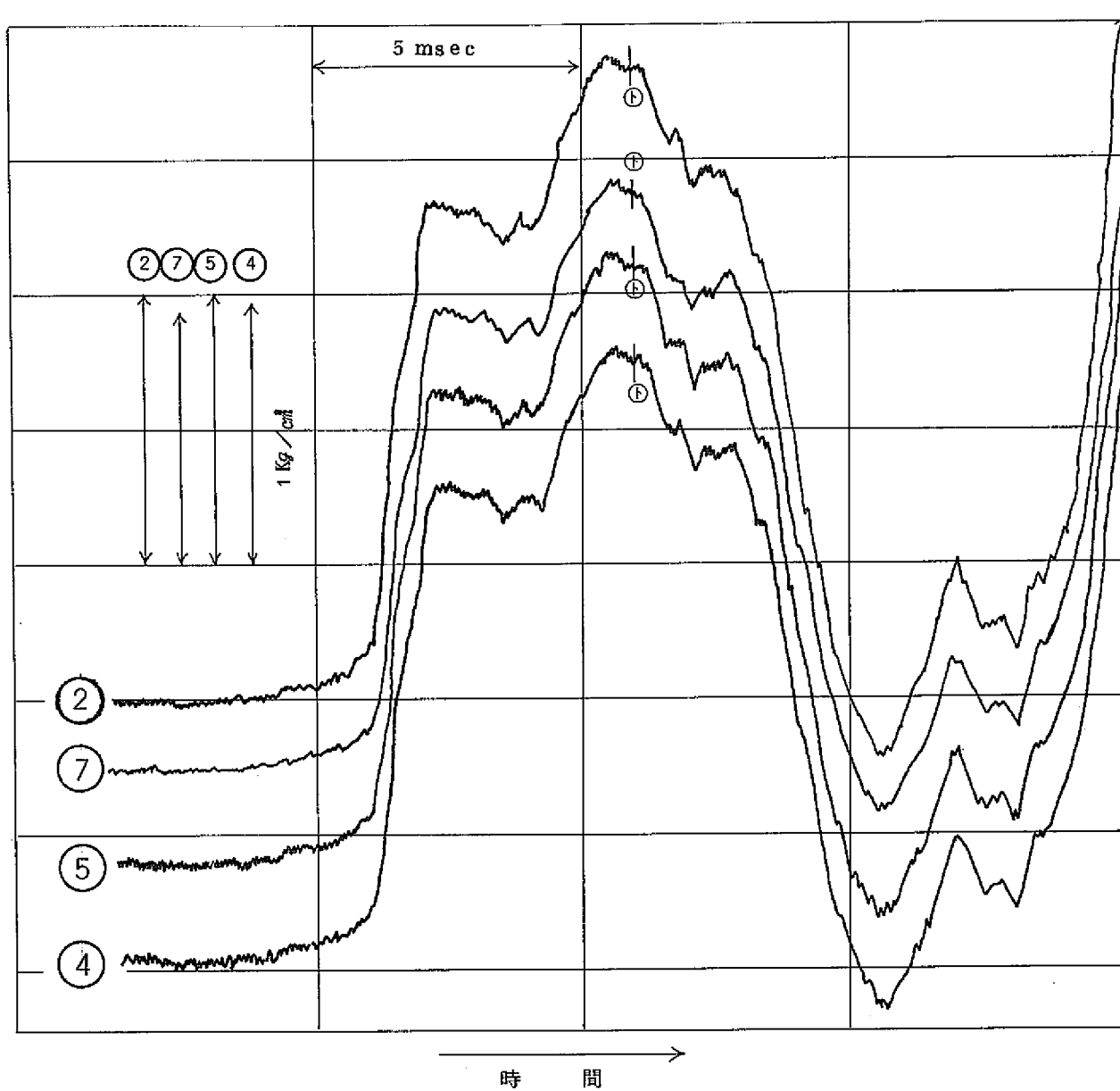


図4.3.8 ベンド [I] の測定結果

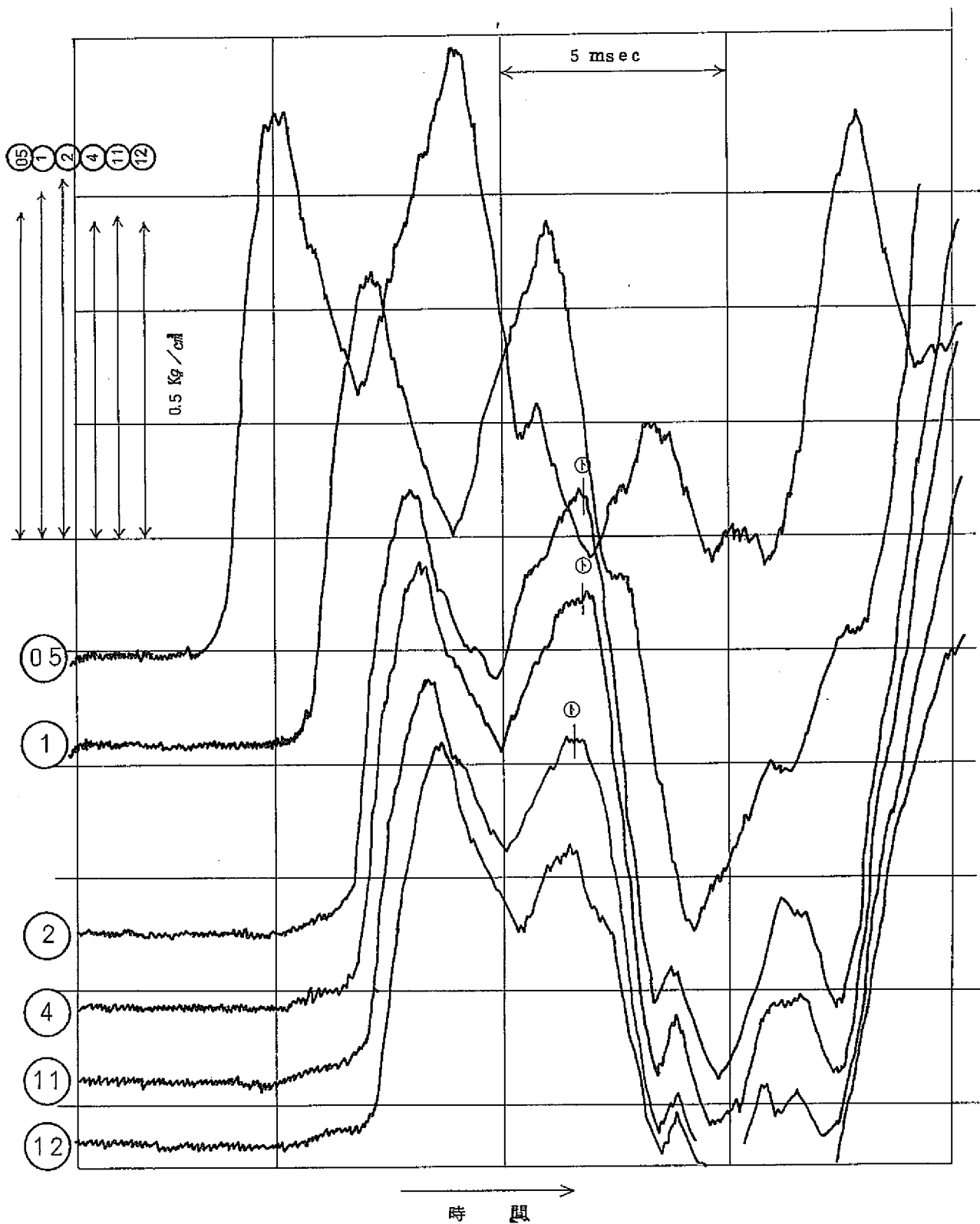


図4.3.9 ベンド [II] の測定結果

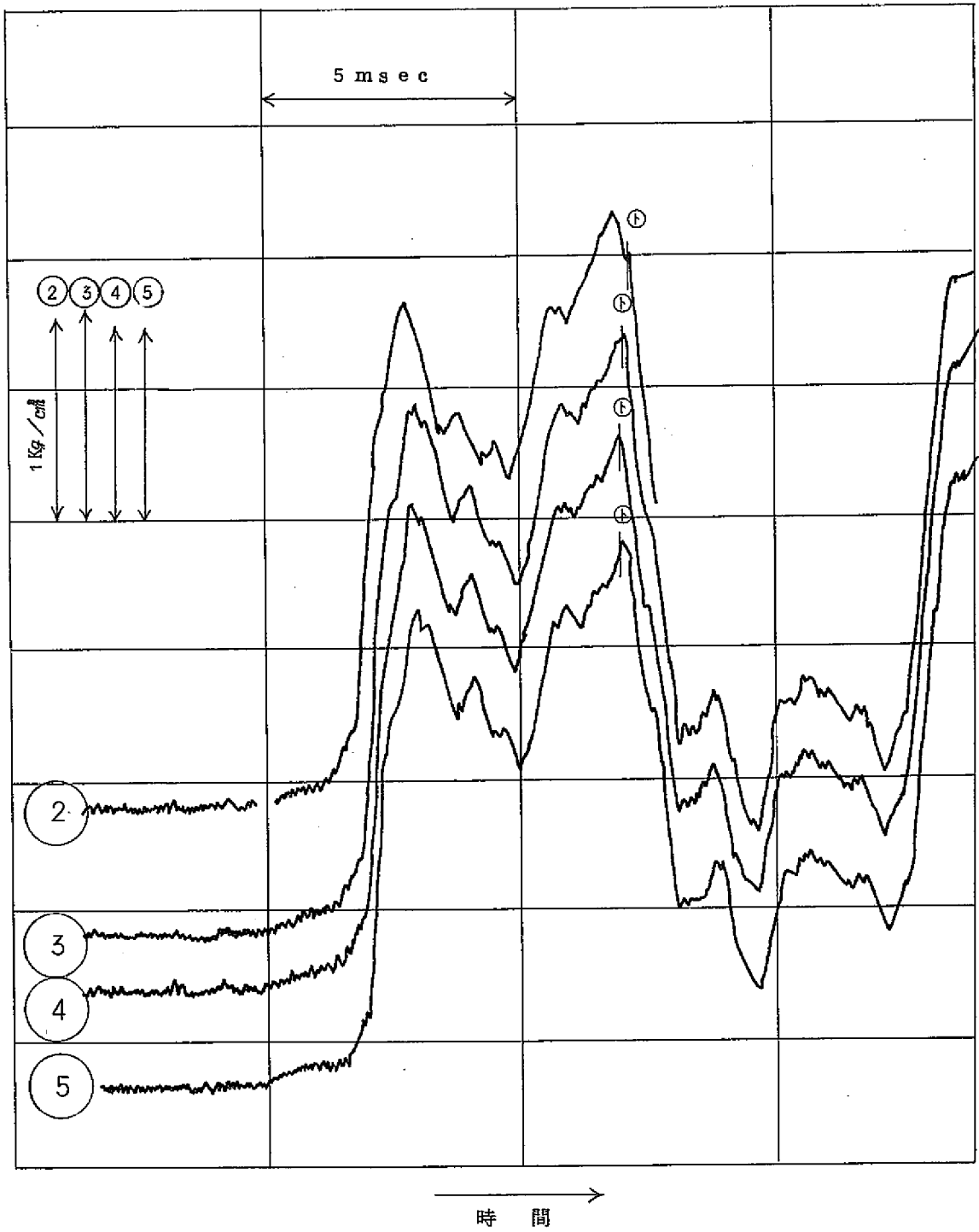


図4.3.10 ベンド [II] の測定結果

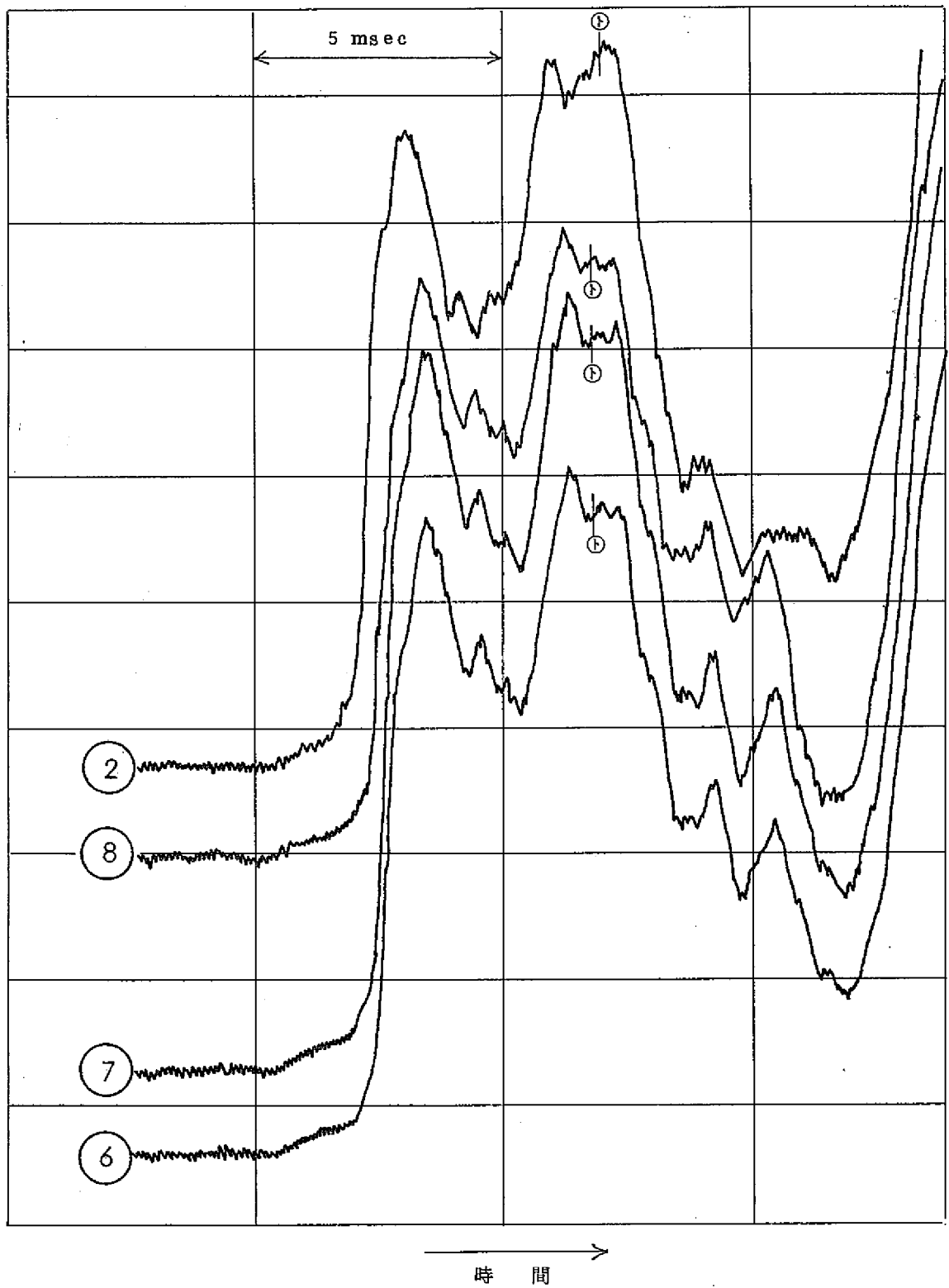


図4.3.11 ベンド [II] の測定結果

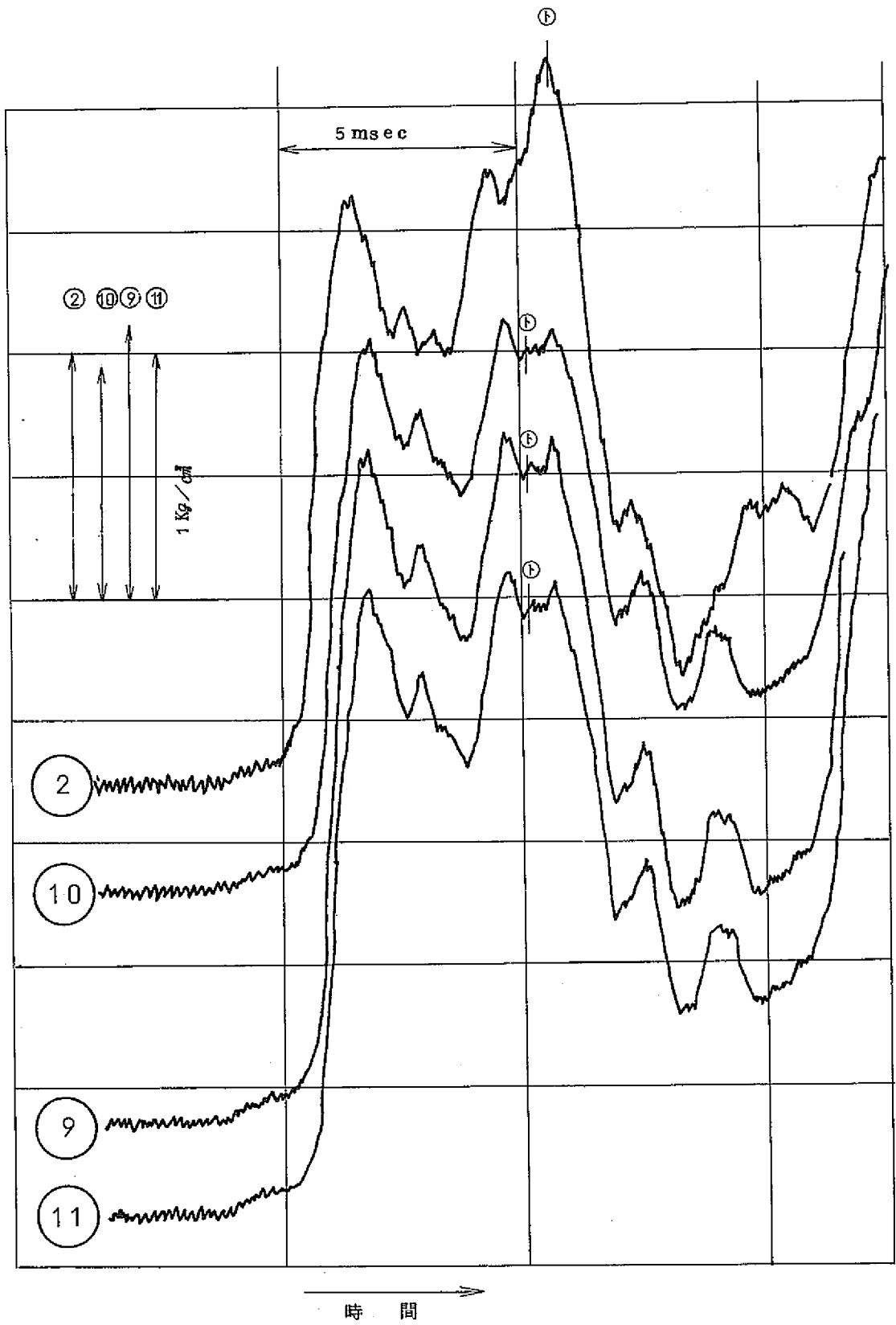


図 4.3.12 ベンド [II] の測定結果



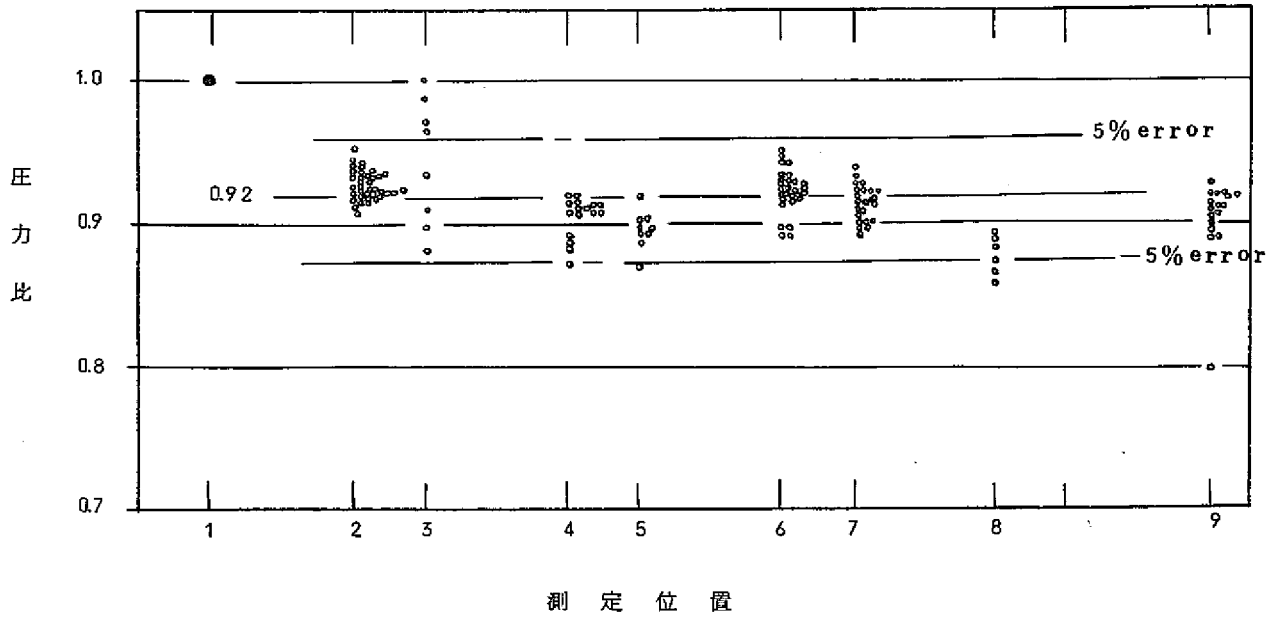
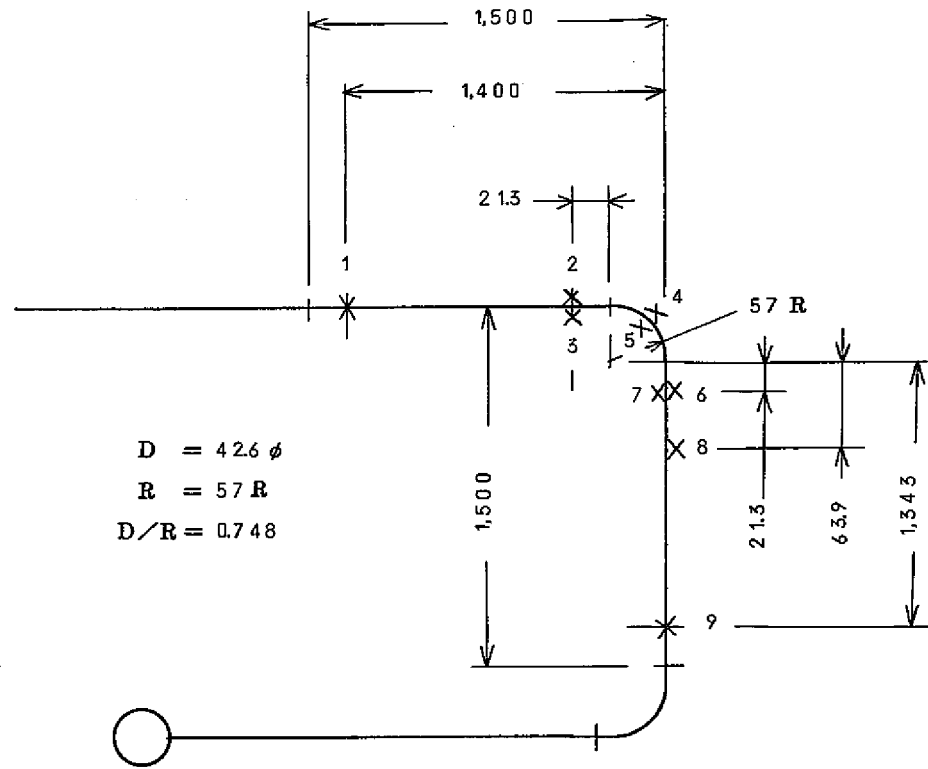


図 4.3.13 ベンド [I] での実験結果

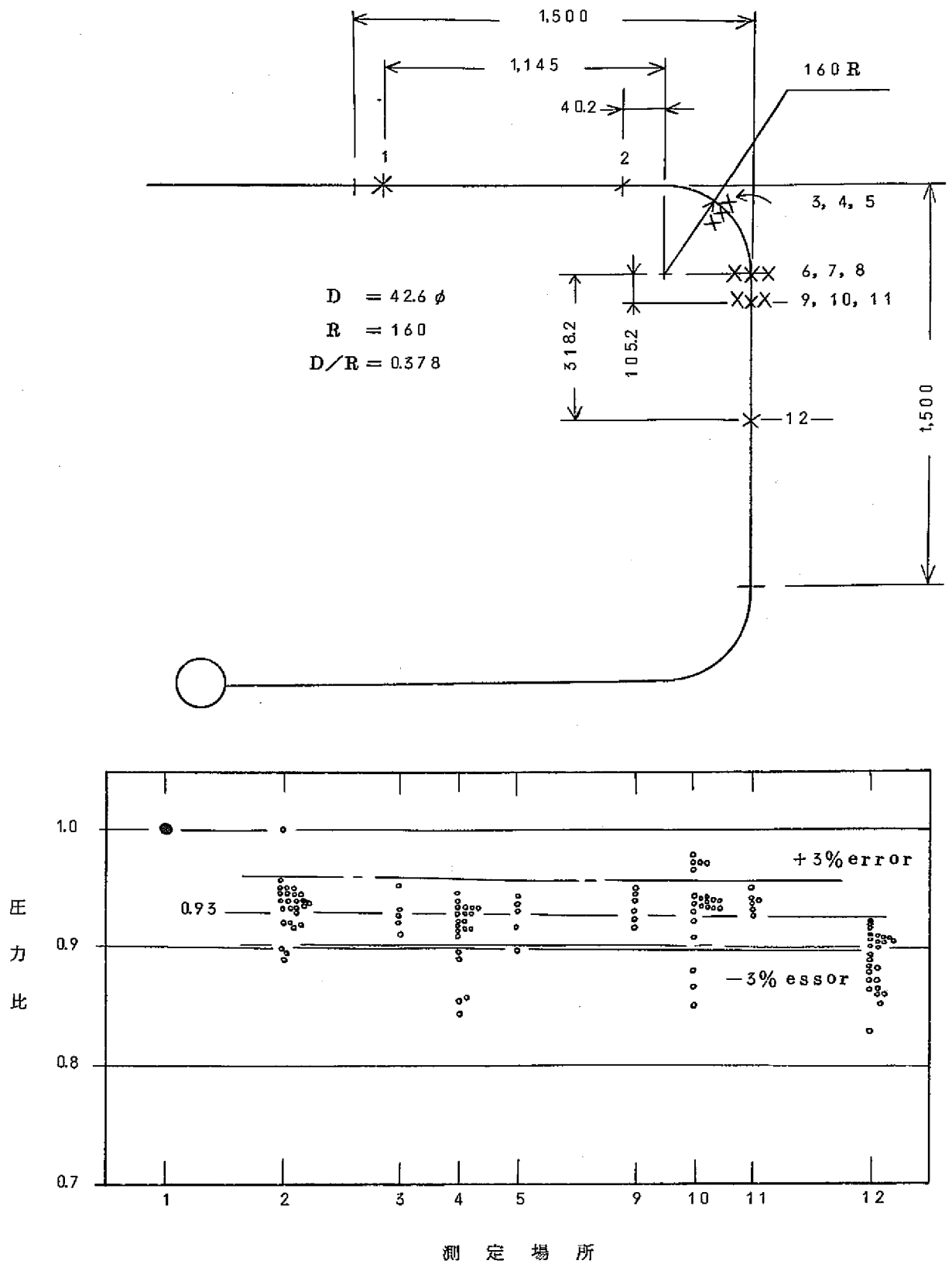


図 4.3.14 ベンド [II] での実験結果