

# 圧 力 波 伝 播 実 験

第2報 中間熱交換器モデルにおける試験結果

1973年2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)

1973年2月6日

## 圧力波伝播実験

## 第2報 中間熱交換器モデルにおける試験結果

報 告 者 菱 田 誠 \*

佐 藤 健 \*\*

堀 雅 夫 \*\*

期間 1971年4月1日～1972年12月20日

目的 蒸気発生器内でナトリウム-水反応事故が起つ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、中間熱交換器について圧力波伝播を調べた。

要旨 原型炉二次系の構成機器のうち、圧力波伝播に関して二次系の安全性上、最も重要な機器である中間熱交換器をとりあげ、実物の約1/12.5の縮尺モデルについて圧力波伝播試験を行なつた。

## 試験条件は

- (1) 圧力波伝播媒体として水を使用した。
- (2) 立上り時間約 1.5 msec 波高値約 2.2 Kg/cm<sup>2</sup>～7.0 Kg/cm<sup>2</sup>の第一パルス波を有する入力波形を使用した。

試験結果から次の事が判つた。

- (1) 入力波形の第一パルス波は中間熱交換器で波高値が約 $\frac{1}{4}$ に減少する。
- (2) 計算結果と実験結果では圧力波の形状は大体一致しているが波高値は計算値の方が高く約1.5倍の値を示す。
- (3) 従つて、実際の二次系の圧力波伝播を検討する場合、計算結果を採用して検討するのが安全側であると考えられる。
- (4) 中間熱交換器を5つの計算モデルで計算したが、その結果にあまり差がなかつた。
- (5) 今後中間熱交換器の計算モデルの改良が必要であると考えられる。

\* 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. 実験装置と実験方法 .....	1
3. 実験結果 .....	2
3.1 実験条件 .....	2
3.2 圧力波伝播速度測定結果 .....	2
3.3 各測定点における第一パルス波の波高値の減少 .....	3
4. 実験結果と計算結果の比較 .....	6
4.1 計算モデル .....	6
4.2 計算結果と実験結果の比較 .....	13
5. 本試験結果の実物中間熱交換器への適用性について .....	5
6. 結 論 .....	16

## 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）事故が起ると、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。

従つて、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、二次系構成機器のうち圧力波伝播に関して安全性上、最も重要な機器と考えられる中間熱交換器をとりあげ、実物の約1/1.25の縮尺モデルについて行なつた試験結果について記した。

## 2 実験装置と実験方法

図2-1に実験装置の概略構成図を示す。

実験装置は、大別して下記のものにより構成されている。<sup>(1)</sup>

- (1) 圧力波発生系統
- (2) 給水系統
- (3) 中間熱交換器モデル試験部
- (4) 圧力波計測系統

上記4つの系統のうち(1)、(2)、(4)は、第一報で記したものと全く同一であり、詳しくは、第一報<sup>(1)</sup>に記してある。

中間熱交換器モデル試験部の概略見取図を図2-2に記す。平面図、立面図を図2-3、図2-4に示す。圧力計取付位置を図2-5に示す。此の試験装置は、中間熱交換器単体に着目して圧力波伝播の試験を行う事を目的としているので、中間熱交換器モデルの出口配管の構成は、出口配管部での圧力波の反射等が、中間熱交換器モデル近辺での測定圧力波形にできるだけ影響を及ぼさない様に、（すなわち、圧力波伝播に及ぼす中間熱交換器単体の影響のみを測定できる様に）実際の二次系構成配管とは異なつている。図2-6に、中間熱交換器モデルの図を示す。

実験方法は、第一報で扱つた、分岐、ベンドの場合と全く同一である。

すなわち、圧力波の発生は、ラブチャーディスクを破壊する事により、窒素ガス部屋中の窒素ガス圧を圧力波発生管の上部自由液面に加える事により行なう。自由液面上に加えられたガス圧は、圧力波発生管の水中に伝わり、圧力波発生管下部分岐により試験部に伝えられる。

試験部に伝わる圧力波形の代表例を図3.2.3の⑫に示す。

試験部各部の圧力波形の測定は、豊田工機製半導体歪ゲージ式圧力計（フルスケール10Kg/cm<sup>2</sup>、固有振動数50KHz以上、受圧面直径5mmφ）により行なつた。圧力波伝播媒体としては、給水系統を通す事により充分脱気した水道水を使用した。

### 3 実験結果

#### 3.1 実験条件

実験条件を表3.1.1に示す。第一報で取り扱つた分岐、ベンドの場合とほとんど同一である。試験供試体である中間熱交換器モデルは実物の約1/1.25の寸法を有する。圧力波伝播媒体としてはナトリウムの代わりに水を使用した。水とナトリウムの物性値で圧力波伝播に影響を及ぼすと考えられる物性値の比較を表3.1.3に示す。入力波形としては、図3.2.3の⑫にその代表例を示す。

表3.1.2に本試験に使用した熱交換器のモデルと、モデル製作に際して対象とした中間熱交換器の比較を示す。（原型炉二次系第一次概念設計書を参考とした。）

モデルの決定にあつては、概略の形状を模擬し、上部プレナム、下部プレナムの形状等で細かい部分は模擬されていない。また、実際の二次系では、一次系側（すなわち、シエル側）にはナトリウムが流れ、上部に自由液面があるが、本試験ではシエル側には水を充満させ、自由液面は有していない。

#### 3.2 圧力波伝播速度測定結果

図3.2.6に圧力波伝播速度の測定結果を示す。圧力波の伝播速度は、2点間を圧力波の立上り時点、あるいは、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①-③、①-④、⑱-⑳、㉑-㉒、①-②、⑫-⑬、⑫-①、⑫-⑤、⑫-⑥、①-⑤、①-⑥、①-⑱、①-㉑、①-⑰、①-㉑、⑫-④、⑫-①⑥、の間隔を利用した。測定値は、かなりのバラツキを有しているが、これは、2点間の距離が短いと、圧力波の立上り部分の判定がむずかしい事によるものと考えられる。表3.2.1に示す値は、各データの平均値である。平均値と計算値の誤差は最大の場合でも約3%と両者の一致は極めて良い。計算式としては、第一報と同様、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。

アリエビの式

$$V_{tr} = \sqrt{\frac{1}{\frac{W}{g} \left( 1 + \frac{C_1 D}{K E e} \right)}} \quad (3.1)$$

$V_{tr}$  ; 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 =  $9.8 m/sec^2$

$C_1$  ; 配管の固定条件によつて決る定数で  $C_1 = 0.95$  とした

(第一報参照)

$D/e$  ; 配管の直径と肉厚の比

$K$  ; 水の体積弾性係数 ( $Kgf/m^2$ )

$E$  ; 配管材料の縦弾性係数 ( $Kgf/m^2$ )

### 3.3 各測定点に於る第一パルス波の波高値の減少

図 3.2.7 に各測定点に於る第一パルス波の波高値の減少の様子を示す。図 3.2.4 に中間熱交換器前方、後方での代表的な測定波形を示した。図から判る様に前方での測定波形では第一パルス波を区別できるが、中間熱交換器部、及び、中間熱交換器後方では第一パルス波をはつきり区別する事はむずかしい。しかし、各実験に於ける入力波形を単純化して書くと、下図(図 3.2.8)の如き波形となる。

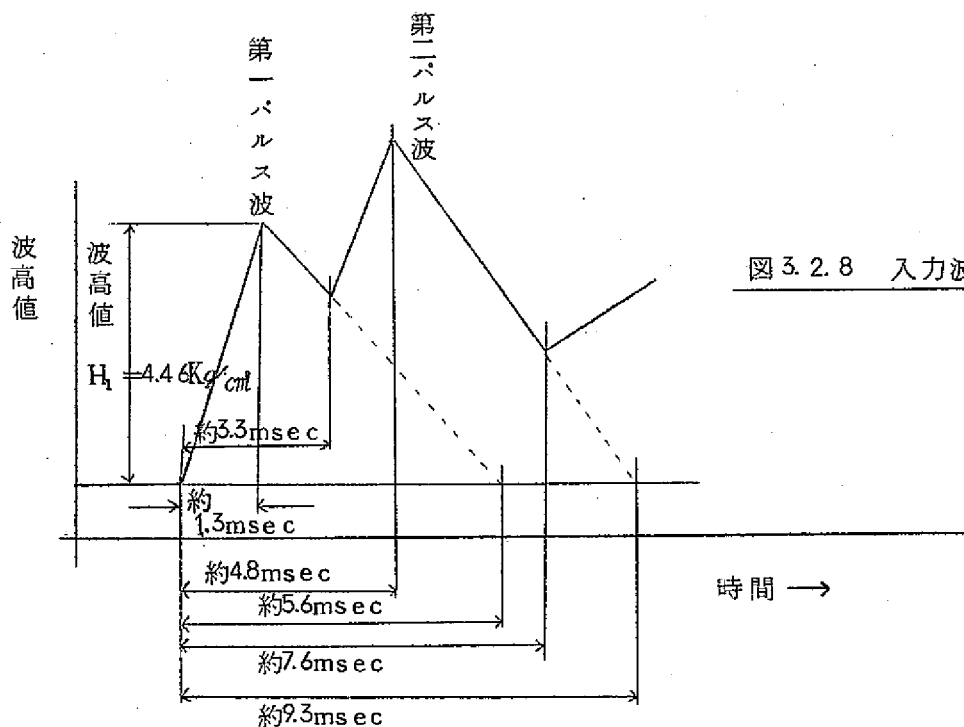


図 3.2.8 入力波形

ところで、中間熱交換器部、及び、中間熱交換器後方では、代表的な測定波形は下図（図3.2.9）の如き波形となる。

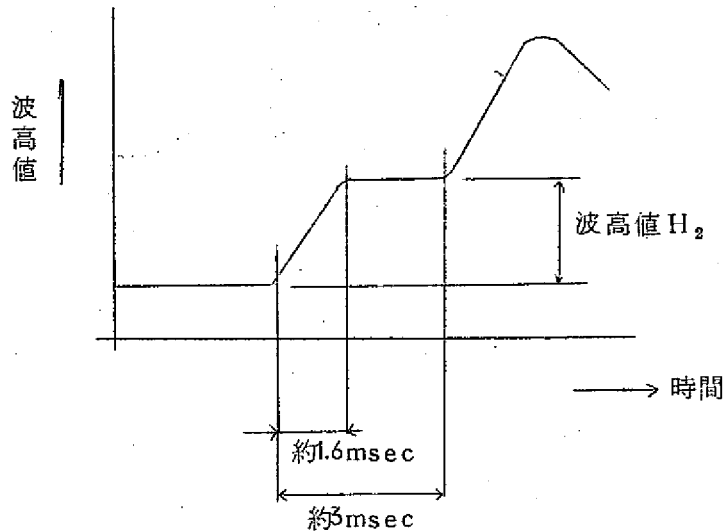


図 3.2.9 中間熱交換器部及び中間熱交換器後方での測定波形

図3.2.9に於て第二パルス波の影響を受け始めるのは約3 msec以降であるから波高値 $H_2$ は、第一パルス波のみの影響であると考えられるが、念の為、図3.2.10(i)に示す様に第一パルス波のみを有する波形を入力波形とした場合と、(ii)に示す様に第一および、第二パルス波を有する波形を入力波形とした場合の中間熱交換器上部プレナム及び下部プレナムでの圧力波形の計算結果を図3.2.11に示す。波高値 $H_2$ は両者の間で、相違はない。すなわち、波高値 $H_2$ は、第二パルス波の影響は受けていないと考えられる。従つて、図3.2.7に示す各点はナトリウム-水反応事故時の圧力波形の様に第一パルス波のみを有する圧力波形が伝播する場合、中間熱交換器前後、及び、プレナムでの圧力波高値を示していると考えられる。

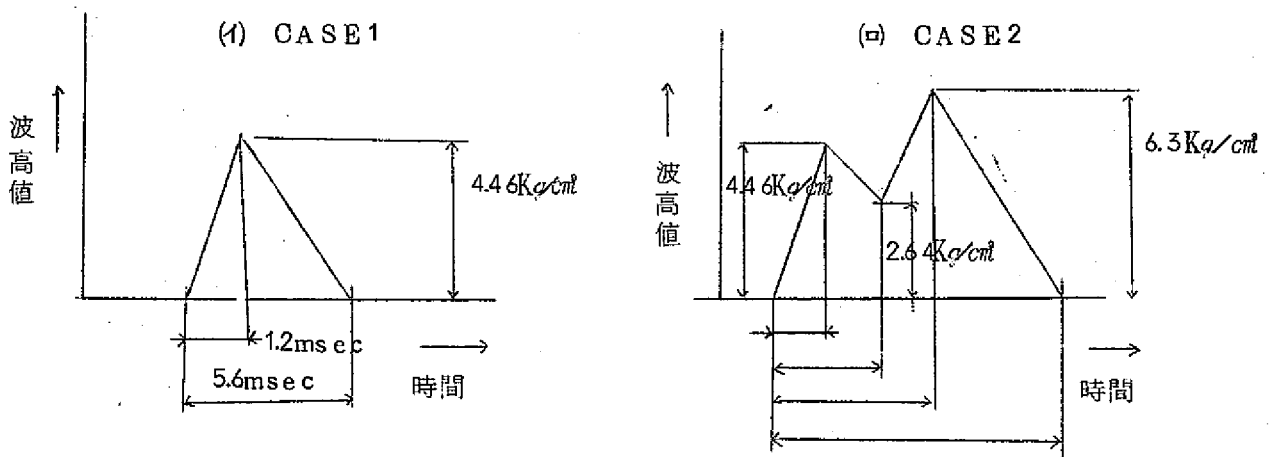


図 3.2.10 計算に用いた入力波形（2 ケース）（FD-30 のモデル化）



図 3.2.1 2～図 3.2.1 4 には、代表的な実験例 3 つにつき（実験番号 F O-6, F O-1 4, F D-3 0), 第一パルス波, 第二パルス波までを実験で得られた入力波形を用いて計算した結果を示す。此の場合も当然の事であるが, 波高値  $H_2$  には第二パルス波の影響は入らない。又, 入力波形を図 3.2 の如く簡単化しても, 得られる圧力波形にはそれ程大きな差異はない。又, 波高値  $H_2$  と入力波形の第一パルス波の波高値  $H_1$  との比  $H_2/H_1$  は, どの計算でも約 0.5 であるのに対し, 実験では約 0.2 5 と差異があるが, 此の点については次章で若干の検討を加える。

## 4 実験結果と計算結果の比較

3. で得られた実験結果と従来の一次元的解析方法との比較をおこなった。解析は、動燃事業団からの依託研究として川崎重工業株式会社に作成を依頼し、既に納入されている圧力波伝播解析コードSWAC-5, 及び当該試験室で作成した計算コードWAVE-01を用いておこなった。SWAC-5計算コードについては報告書<sup>(2)</sup>を参照され度い。(WAVE-01の計算式, 計算方法はSWAC-5とほとんど同じである。)

### 4.1 計算モデル

計算モデルとしては、実験装置全体を図4.1.1に示す如きモデルについておこなった。モデル化にあたっては下記の考え方に沿っておこなった。

- (1) ベンドは、すべて直管として扱う。
- (2) 中間熱交換器出口後方の3分岐部は、ベンドと分岐の組み合わせと考えられるが、この部分のモデルとしては、一次元的取り扱いのできる等径3分岐とした。
- (3) 圧力波発生面としては、圧力波発生管下部3分岐点(図中④)を圧力波発生面とした。計算コード上の圧力波発生面は、自由液面、あるいは、断面積比が無限大な異径管等に相当し、圧力波発生面では、圧力波は波高値が入射波と同一で符号が反対の反射波として反射される。本試験装置では④で圧力波の符号は反対であるが、波高値は入射波 $f$ の0.82倍の反射波 $f'$ として反射される。又、入力波形として用いた測定点①での測定波形にも入射波 $f$ の透過波 $f''$ の影響を受ける。従つて、試験部への入射波 $F$ が試験部のある場所で反射され反射波 $f$ となり、この $f$ 波が図4.1.1に示す④に達するまでは、④での測定波形を入力波形と考えて良いが、それ以降は、正確な意味では、入力波形とはなり得ない。しかし④に於ては圧力波は計算コード上の圧力発生面の様に完全に負の反射波となつて反射されないが、約82%は反射されるから $f$ 波の影響を受け始めた後でも、大まかには圧力発生面として取り扱つて良いと考えられる。

$f$ 波の影響を受け始める時点は、ベンドで圧力波が反射されると考える場合と、反射されないと考える場合とで異なる<sup>(1)</sup>。ベンドで圧力波が反射されると考えた場合は、厳密に言えば各測定点の圧力波の立上り時点から7 msec後までしか圧力発生点として取り扱い事ができず、計算結果と実験結果の比較も、此の時点までしか行えないと言える。しかし、ベンドで例え圧力波が反射されると考えた場合でも、もともとベンドでの反射波 $f$ は小さく<sup>(1)</sup>、④点を圧力波発生面として取り扱つてほとんど問題ないと考えられる。ベンドで圧力波が反射されないと考える場合は、 $F$ 波は、中間熱交換器モデルの下部プレナムで始めて反射される事となり、④点に於て $f$ 波の影響を受け始める

のは、圧力波の立上り時点より約  $1.4 \text{ msec}$  後である。従つて此の時点までは厳密に圧力波発生面として取り扱う事ができる。しかし、 $1.4 \text{ msec}$  以降に於ても、上述の如く計算モデルの圧力発生面との差は小さく、大まかには圧力発生面として取り扱つて良いと考えられる。

(4) 中間熱交換器のモデル化

中間熱交換器は、下記の如く、5つのモデルを考えて計算を行い、実験結果と比較した。

(i) CASE 1

図 4.1.2 ① に示す様に、中間熱交換器の上部、及び下部プレナムを無視し、伝熱管部の影響が支配的であると考えたモデル化。また伝熱管は合計 82 本あり、これらを忠実にモデル化する為には、82 分岐にする必要があるが、計算コードでは、82 分岐を扱う事ができないので図の如く伝熱管部は一本の管路におきかえた。この管路の断面積は伝熱管 82 本の断面積の総数に等しくとる。まさつ損失係数等の計算に必要な直径としては、模擬管路の断面積に相当する直径を採用した。圧力波伝播速度は配管壁の肉厚と直径の比の影響を受けるので計算には一本の模擬伝熱管中の圧力波伝播速度を採用した。

上記の如き計算モデルを採用した事について簡単に考察してみる。まず第一に上部及び下部プレナムを無視した事について考える。

上部及び下部プレナムを考慮に入れた次元計算モデルの図を図 4.1.2 (b) に示すが、単純には、これらは実験モデルの図を参考にして、距離の短い異径管と考える事ができる。今中間熱交換器からはなれて一本の直管の途中に図 4.1.3 に示す如き短い異径部がある場合の圧力波伝播を考える。

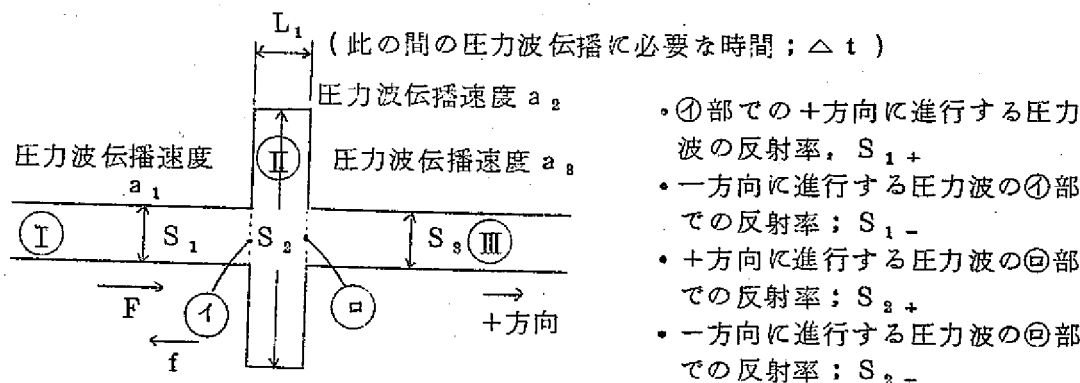


図 4.1.3 短い異形管部を有する直管

- +方向に進行する圧力波の①部での反射率  $r_{1+}$   
透過率  $S_{1+}$
- +方向に進行する圧力波の②部での反射率  $r_{2+}$   
透過率  $S_{2+}$
- 方向に進行する圧力波の①部での反射率  $r_{1-}$   
透過率  $S_{1-}$
- 方向に進行する圧力波の②部での反射率  $r_{2-}$   
透過率  $S_{2-}$

図 4.1.3 において，異径部左方より F 波が入射した場合，異径部①，②で反射，透過の影響を受けて，一方向に進む後退波 f と進行波 F との間には観測点①において次の関係がある。

$$\begin{aligned}
 f(t) &= r_{1+} \cdot F(t) + S_{1+} \cdot r_{2+} \cdot S_{1-} \cdot F(t-2\Delta t) \\
 &\quad + S_{1+} \cdot r_{2+} \cdot r_{1-} \cdot r_{2+} \cdot S_{1-} \cdot F(t-4\Delta t) \\
 &\quad + S_{1+} \cdot r_{2+} \cdot r_{1-} \cdot r_{2+} \cdot r_{1-} \cdot r_{2+} \cdot S_{1-} \cdot F(t-6\Delta t) \\
 &\quad + \dots \\
 &= r_{1+} \cdot F(t) + \sum_{n=0}^{\infty} (r_{1-} \cdot r_{2+})^n \cdot S_{1+} \cdot r_{2+} \cdot S_{1-} \cdot F(t-2\Delta t-2n\Delta t) \\
 &\dots\dots\dots (4.1.1)
 \end{aligned}$$

上式は， $\Delta t \rightarrow 0$  の極限では，

$$\begin{aligned}
 f(t) &= r_{1+} \cdot F(t) + \sum_{n=0}^{\infty} (r_{1-} \cdot r_{2+})^n \cdot S_{1+} \cdot r_{2+} \cdot S_{1-} \cdot F(t) \\
 &= r_{+} \cdot F(t) \dots\dots\dots (4.1.2)
 \end{aligned}$$

(ここで， $r_{+}$  は広がり部③がないとした場合の①，②から成る異径部での反射率である。)

(4.1.1) 式において，

$r_{1+} + S_{1+} \cdot S_{1-} \cdot r_{2+} \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (r_{1-} \cdot r_{2+})^n$  の収束の程度は， $A_1 / A_2$ ， $A_2 / A_3$  により異なる。 $A_1 = A_3$ ， $a_1 = a_2 = a_3$  の場合についての計算結果を図 4.1.4 に示す。

図から判る様に， $A_2 / A_1$  の比が小さくなるに従って早く収束する。中間熱交換器のモデルでは  $A_2 / A_1$  は約 20 程度である。従って，例えば入力波形として図 4.1.5 ①に示す様なパルス波が入射したとすると，点①で観測される波形は②の如

き波形となる。

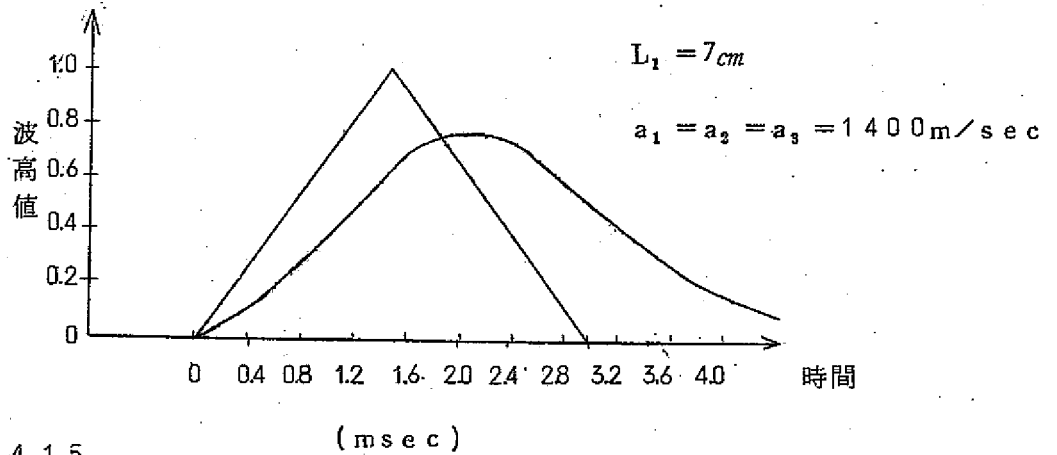


図 4. 1. 5

すなわち，パルス波の頂部の観測時刻は遅れ，頂部の波高値も低目の値となるが，時間の遅れ及び波高値の減少もそれ程なく，異径部②の影響はほとんど受けていないと考えられる。

すなわち，図 4. 1. 2 (b) に示す様なモデルでも，中間熱交換器をある程度模擬できると考えられる。

次に伝熱管 82 本を総断面積が等しい 1 本の直管（異径管）におきかえる事の妥当性について考える。

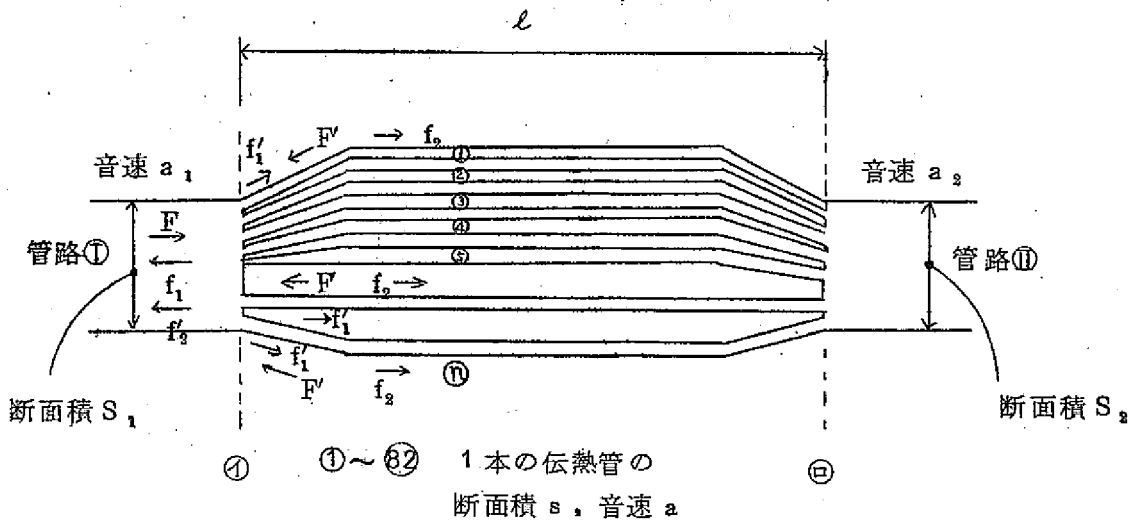


図 4. 1. 6

図 4.1.6 に示す様に中間熱交換器の伝熱管と同様、一般に断面積が等しく長さが等しい  $n$  本のパイプで構成されている  $n+1$  分岐について圧力波の伝播を考える。まず進行波  $F$  (ここで進行波とは、管路①あるいは②から伝熱管に向かつて進む圧力波を指す。) の①部での透過率  $S_{\oplus}$ 、及び反射率  $r_{\oplus}$  は①面で断面積の急拡大、及び急縮小に伴う圧力波のエネルギー減衰、及びエネルギー減衰に伴う圧力波の反射がないとすれば、

$$\left. \begin{aligned}
 S_{\oplus} &= \frac{2 \frac{S_1}{a_1}}{\frac{S_1}{a_1} + \frac{s}{a} \times n} \\
 r_{\oplus} &= \frac{\frac{S_1}{a_1} - \frac{s}{a} \times n}{\frac{S_1}{a_1} + \frac{s}{a} \times n}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.1.3)$$

である。

ところで上記の  $S_{\oplus}$ 、 $r_{\oplus}$  は伝熱管の総面積に等しい面積を有する異径管があるとした場合と全く同一の値である。すなわち進行波  $F$  は図中①において異径管がある場合と同じ反射波  $f_1 = r_{\oplus} F$  の反射波を反射しそれぞれの伝熱管中に異径管におきかえた場合透過される透過波  $f_2 = S_{\oplus} F$  と同じ透過波が透過される。

次に、それぞれの伝熱管中を進む後退波  $F'$  (ここで後退波とは伝熱管中を着目している  $n+1$  分岐点に向かつて進む圧力波である。) の①部での反射及び透過を考える。

1本の伝熱管中を進行してきた後退波  $F'$  の透過率及び反射率は

$$\left. \begin{aligned}
 S'_{\ominus} &= \frac{2 \frac{s}{a}}{n \frac{s}{a} + \frac{S_2}{a_2}} \\
 r'_{\ominus} &= \frac{(2-n) \frac{s}{a} - \frac{S_2}{a_2}}{n \frac{s}{a} + \frac{S_2}{a_2}}
 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (4.1.4)$$

である。

従つて  $n$  本の伝熱管を進行してきた後退波  $F'$  のうち管路①へ透過される透過波は、

$$f'_2 = n \cdot S'_\Theta F' \dots\dots\dots (4.1.5)$$

となり

管路①への見掛上の透過率  $S'_\Theta$  は

$$S'_\Theta = \frac{2n \frac{s}{a}}{n \cdot \frac{s}{a} + \frac{S_2}{a_2}} \dots\dots\dots (4.1.6)$$

次に1本の伝熱管中に進行波  $f'_1$  として伝播される見掛上の反射波  $f'_r$  は

$$f'_r = \left\{ (n-1) \cdot S'_\Theta + r'_\Theta \right\} \times F' = \frac{n \cdot \frac{s}{a} - \frac{S_2}{a_2}}{n \cdot \frac{s}{a} + \frac{S_2}{a_2}} \times F' \dots\dots (4.1.7)$$

である。すなわち①部での見掛上の反射率  $r'_\Theta$  は

$$r'_\Theta = \frac{n \cdot \frac{s}{a} - \frac{S_2}{a_2}}{n \cdot \frac{s}{a} + \frac{S_2}{a_2}} \dots\dots\dots (4.1.8)$$

となる。ところで上記の  $S_\Theta$ 、 $r_\Theta$  は伝熱管の総断面積に等しい面積を有する異径管におきかえた場合と全く同一である。以上の事から伝熱管82本を総断面積が等しい1本の直管(異径管)におきかえる事には妥当性があると考えられる。

(b) CASE 2, 及びCASE A-3

(i)の計算モデルに入口, 出口プレナム室を考慮した計算モデル図4.1.2(b)に示す寸法形状を有する。入口, 出口プレナムは実験モデルと同一の寸法を有する異径管とした。

(c) CASE 3

図4.1.2(c)に示す様に(i)の計算モデルと同様入口, 出口プレナム室は無視し伝熱管のみが支配的であるとして伝熱管を一本の異径管でおきかえた計算モデル。(i)と異なる点は, 異径管部の断面積として伝熱管の総断面積の2倍を与えた点である。此の点について定性的な考察をくわだてる。(i)のモデル化のところでも考えた様に,  $n$ 本の伝熱管を断面積が等しい異径管におきかえた場合後退波に対する見掛上の透過率  $S_\Theta$  及び見掛上の反射率  $r_\Theta$  は  $n+1$ 分岐の場合と同じであるという結果が得

られたが、この様な結果が得られるのは各伝熱管中を伝播する圧力波の位相が等しい場合である。ところで試験対象である中間熱交換器モデルでは、図 4. 1. 2 の実験モデル図を参照して判る様に、等しくないと考える事ができる。各伝熱管中を伝わる後退波の位相が異なる場合には、 $n + 1$  分岐での見掛上の透過波及び反射波は式 ( 4. 1. 5 ) , ( 4. 1. 7 ) では表わせなくなり、次式に依らねばならない。

$$f'_2 = S'_{\ominus} \sum_{n=1}^n F'(t - \Delta t_{n,m}) \dots\dots\dots ( 4. 1. 9 )$$

$$f'_{1m} = r'_{\ominus} F'(t) + S'_{\ominus} \sum_{n=1}^{m-1} F'(t - \Delta t_{n,m}) + S'_{\ominus} \sum_{n=m+1}^n F'(t - \Delta t_{n,m}) \dots\dots\dots ( 4. 1. 10 )$$

ここに、 $\Delta t_{n,m}$  は  $m$  番目の伝熱管を伝わる圧力波を基準とした他の伝熱管中を伝わる圧力波の位相差  $F'$  が図 4. 1. 5 に示される本試験第一パルス波の様に三角波の場合上式で求められる  $f'_2$  ,  $f'_{1m}$  , は  $\Delta t_{n,m}$  により当然異なるが、その形状は大ざつばに言つて三角波がなまづた形となり、ピーク値は、式 ( 4. 1. 5 ) , ( 4. 1. 7 ) で表わされる値より低い値を与える事となる ( 位相が遅れている場合も進んでいる場合も ) 。

次に④のモデル化のところで述べた様に、上部及び下部プレナムを無視する事によりそれ程影響を受けないとは言うものゝ、図 4. 1. 5 に示す様に入力波形である三角波の形状はなまづりピーク値は低い値を与える。上述の如く、伝熱管中の圧力波の位相差及び上、下部プレナム室の影響を考慮した1つの試みとして本計算モデルでは、伝熱管部と断面積が2倍の異径管で模擬した。(断面積が2倍の異径管によつてピーク値の低下する傾向は模擬できるが波形のなまづりは模擬できない。又、上、下部プレナムは、③のモデル化と同様、異径管で模擬すれば良いという疑問が生じるが実験モデルの図から判る様に異径管におきかえた場合、異径部の  $L/D$  が小さく此の異径部を一次元的に取り扱つて良いかどうか判らない。従つて本計算モデルでは上述の如くプレナム室及び位相差の効果を一本の断面積の大きい異径部に含めて考えた。)

(=) CASE 4

図 4. 1. 2(=) に示す様に入口、出口プレナムを有し伝熱管部の断面積が実際の場合の2倍の断面積を有する計算モデル。



此の計算モデルは、伝熱管両端の83分岐を異径管におきかえた事により見掛の透過率 $S_{\Theta}$ 及び反射率 $r_{\Theta}$ が、実際の場合と異なる事を伝熱管部の総断面積に考慮に入れ、伝熱管部の総断面積を実際の場合の2倍にした計算モデル。

(※) CASE 5

図4.1.2(※)に示す様に、中間熱交換器下部プレナムの底部フランジでの圧力波の反射を考慮し下部プレナムの長さを2倍にした計算モデル。

以上、(イ)、(ロ)、(ハ)、(ニ)、(ホ)の計算モデルについて計算を行い、実験結果FE-2Aとの比較を行つた。

#### 4.2 計算結果と実験結果の比較

図4.2.6～図4.2.16に実験結果と計算結果の比較を示す。図4.2.6～図4.2.11にはSWAC-5で計算した計算結果と実験結果の比較を示し、図4.2.12～図4.2.16にはWAVE-01で計算した計算結果と、実験結果の比較を示す。図4.2.6、図4.2.12には、それぞれ圧力発生面の入力波形として用いた波形を示す。両者とも、測定場所02に於る実験値FE-2Aの波形を使用しているが圧力波の立上り部分に多少の差がある。これはインプット・データ作成者の個人差によるものである。

図4.2.8、図4.2.13から判る様に中間熱交換器直前での測定点(4)に於る圧力波形は実験値と計算値は比較的良い一致を示している。又、(4)に於ては、計算モデルの相違によつて得られる波形にはほとんど差がない事が判る。

図4.2.11、及び図4.2.16から判る様に、中間熱交換器後方での測定点(10)における圧力波形は、実験値と計算値とを比較した場合圧力波形は良く似ているが値は計算値の方が全体的に高い値を示し、大まかに言つて実験値の約1.5倍の値を示していると言えよう。

中間熱交換器上部プレナム(測定点12)での圧力波形は図4.2.10、4.2.15から判る様に(10)の場合と同様圧力波形は良く似ているが値は大まかに言つて計算値の方が約

1.5倍の値を示している。

測定点16及び測定点12に於る圧力波形の計算結果は両者とも圧力波の立上り部分にみられる波形の相違を除いて全体的な波形、波高値は計算モデルの相違によつてあまり差がないと言えよう。但しCASE A-2の場合が圧力波の立上り部分の波形及び波高値が他の計算モデルの場合よりわずかに実験値に近いと言えよう。

図4.2.9, 図4.2.14から判る様に, 中間熱交換器下部プレナム(測定点5)に於る圧力波形は, 他の測定場所に於る結果と比較して計算結果と実験値で波形が多少異なっている。測定点5の圧力計取付場所は図2.5, 2.6に示す様に下部プレナムの底部板に取り付けられている。他の測定場所がすべて管壁で圧力を測定しているのに比較して異なっている。従つて, 計算モデルを考える場合中間熱交換器下部プレナムでは分岐とし測定点5は3分岐の内の1分岐管の固定端と考えるのが妥当かもしれないが今後検討する必要がある。

しかし, 大まかにみれば圧力波形は計算値と実験値で大體一致していると考えられる事もできる。

波高値は, 他の場合と同様計算値は実験値の約1.5倍を示していると考えられる。また, 計算モデルの相違によつて得られる圧力波形には, ほとんど差がないと考えられる。

以上, 中間熱交換器の計算モデルとして, 5つの一次元計算モデルを考え, 実験結果との比較を行なつたが, 計算モデルの相違によつて得られる圧力波形はほとんど変わらない。また全体的に言える事は計算結果によつて得られる圧力波形の形は実験結果と似ており波高値は実験結果の約1.5倍程度である。

今回, 取り扱つた計算モデルはいずれのモデルを採用しても計算結果にあまり差がないが, 測定点(12), (16), の立上り部分の波形が実験値に似ている事, 及び他の計算モデルより全体的に波高値が小さい事よりCASE A-2の計算モデルが他の計算モデルより多少実験値に近い結果を与える。

計算結果と実験結果の相違は中間熱交換器上部プレナム, 下部プレナムに於る圧力波の三次元的伝播挙動及びそれに伴う伝熱管部のモデリングに起因すると考えられる。今後更に計算モデルの改良が必要であろう。しかし, 一般に計算結果の方が実験値よりも高い値を与える事は実際の二次系の圧力波伝播を検討する場合二次系の安全性という立場からは計算結果を採用して検討すれば良いと考えられる。

## 5 本試験結果の実物中間熱交換への適用性について

本試験条件の下でおこなった試験結果が実際の中間熱交換器内の圧力波伝播にどの程度適用可能か若干の検討を以下に行なう。

非定常の流れの基礎式は、

## (1) 連続の式

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \cdot \frac{\partial U_i}{\partial X_i} = 0 \quad (5.1)$$

( $i$ については、1, 2, 3のすべての和を表わす。)

## (2) 運動の式 (外力、及び壁面でのまさつ損失を考えない場合)

$$\frac{D(\rho U_i)}{Dt} = - \frac{\partial P}{\partial X_i} \quad (5.2)$$

通常の場合を考える場合は、

$$U_x \ll a, \quad U_y \ll a, \quad U_z \ll a$$

なる関係が成立するから、此の関係を用いて、(5.2)を書き直すと

$$\frac{\partial(\rho U_i)}{\partial t} = - \frac{\partial \rho}{\partial X_i} \quad (5.3)$$

となる。

## (3) 波動方程式

(5.1), (5.3)より、波動方程式として、

$$\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial X_i^2} \quad (5.4)$$

が得られる。

流体の圧縮率、音速の関係式を用いて(5.4)を書き直すと、波動方程式として、

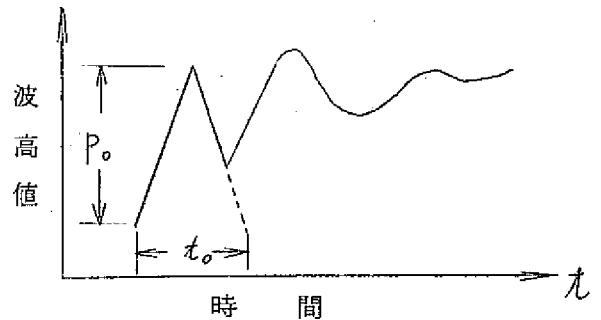
$$\frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = a^2 \cdot \frac{\partial^2 P}{\partial X_i^2} \quad (5.5)$$

が得られる。

上式を入力波形を表わす代表的な値、(例えば、本試験に用いた入力波形の場合は、図5.1に示す様な第1パルス波の波高値 $P_0$ 、パルス巾の時間 $t_0$ )、及び対象とする流路の基準長さ $L_0$ を用いて無次元化とすると、

$$\frac{\partial^2 P'}{\partial t'^2} = \frac{a^2 t_0^2}{L_0^2} \cdot \frac{\partial^2 P'}{\partial X_i^2} \quad (5.6)$$

$$\left. \begin{aligned} P' &= P / P_0 \\ t' &= t / t_0 \\ X'_i &= X_i / L_0 \end{aligned} \right\} \quad (5.7)$$



従つて、実物の熱交換器と、本実験装置とで、

$$\frac{a_1 t_{01}}{L_{01}} = \frac{a_2 t_{02}}{L_{02}}$$

(添字 1 は実物の場合を表わし、添字 2 は本試験の場合を表わす。)

が成立すれば、両者の  $P'$  は等しい値となる。

今回の試験では、 $a_1$ 、 $a_2$ 、 $L_{01}$ 、 $L_{02}$  の間には大体次の関係がある。

$$a_1 / a_2 = 2,400 \text{ m/sec} / 1,480 \text{ m/sec} = 1.62$$

$$L_{01} / L_{02} = 12.5$$

従つて、 $t_{01} / t_{02} = 7.72$  であれば、両者の  $P$  は等しくなる。すなわち、実物の中間熱交換器で、入力波形として本試験に用いた波形の時間軸を 7.72 倍にした圧力波が伝播する場合には、今回の試験で得られた各測定点での  $P'$  は、実際の場合の  $P'$  に等しい。

(但し、実際の場合と、本試験装置とでは、圧力発生面と、装置の最終端での境界条件が異なるので両者の  $P'$  が等しくなるのは、境界での影響を受けるまでの時点といえよう。更に、境界条件として、壁面の弾性率の影響について考えると、圧力波が平面波として伝播される直管部等については、弾性率の影響は音速の中に含めて考える事ができるが、二次元、三次元的伝播をする場所での弾性率の影響については、本試験装置でどの程度模擬されているか検討する必要がある。)

上記の如く、 $t_{01} / t_{02} = 7.72$ になる様な入力波形に対しては、 $P'_1$ と $P'_2$ とは等しくなるが、実際のナトリウム-水反応事故の場合の波形と $P'_2$ とは等しくない。従つて本試験で得られた $P'_2$ は、そのままナトリウム-水反応事故の場合の $P'_1$ と考える事は出来ない。しかし、ナトリウム-水反応事故の時発生すると予想される第一パルス波の伝播については、本試験で用いた入力波形の第一パルス波の伝播結果を適用できると考えられる。すなわち、本試験結果で、第二パルス波の影響を受け始める時点までについては、実物の場合に適用して良いと考えられる。

また、第二パルス波以降の時点についても、計算結果と実験結果を比較する目的の為に、本試験条件で充分であろう。(此の事は、二元次、三元次の伝播をする場所での弾性率の影響についても言えよう。)

次に、管壁との摩擦損失、断面積の急拡大部、急縮少部、分岐部に於る諸損失量について若干の考察をしてみる。これ等諸量は、レイノルズ数、波高値により影響を受けると考えられるので、本試験条件(パルス波高値  $2.3 \text{ Kg/cm}^2 \sim 7.0 \text{ Kg/cm}^2$ )では充分模擬されていないと考えられる。しかしながら、油中で圧力パルスのピーク値が  $100 \text{ Kg/cm}^2$  程度のパルス波で分岐損失を求めた実験結果によれば、波高値が  $100 \text{ Kg/cm}^2$  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。

急縮少部、急拡大部における損失量については検討を行なう必要があると考えられるが、分岐の結果から考えて、わずかであると考えられる。

## 6 結 論

原型炉二次系の構成機器のうち、圧力波伝播に関して二次系の安全性上、最も重要な機器と考えられる中間熱交換器を取りあげ実物の約 $1/1.25$ の縮尺モデルについて圧力波伝播実験を行ない、計算コードSWAC-5, WAVE-01での計算結果との比較等より、下記の事が分つた。

- (1) 入力波形の、第一パルス波は中間熱交換器で波高値が約 $1/4$ に減少する。(実際の二次系でナトリウム-水反応事故が起つた時、立上り時間が約 $12\text{ msec}$ 程度のパルス波が発生する場合は、本試験結果が適用できると考えられ、中間熱交換器では波高値が約 $1/4$ に減少すると考えられる。)
- (2) 計算結果と実験結果では、圧力波の形状は大体一致しているが、波高値は計算値の方が実験値より高く、約 $1.5$ 倍の値を示す。
- (3) 従つて、実際の二次系の圧力波伝播を検討する場合、二次系の安全性という立場からは計算結果を採用して検討すれば良いと考えられる。
- (4) 中間熱交換器の計算モデルとして、5つの計算モデルを考え計算を行つたが計算結果にあまり差がない。
- (5) 今後、中間熱交換器の計算モデルとして、実験結果に近い値を与える計算モデルの改良を必要とする。

参 考 文 献

- (1) 菱 田 誠 " 圧力波伝播実験第1報 "  
堀 雅 夫 動燃所内報告書 SN941 72-20
- (2) 坂 野 他 " 圧力波伝播計算コードの開発研究 ( I ) "  
- 計算コードの説明 -
- (3) 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 ㊟68103 1969
- (4) 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1報  
電力中央研究所報告 ㊟68021 1968

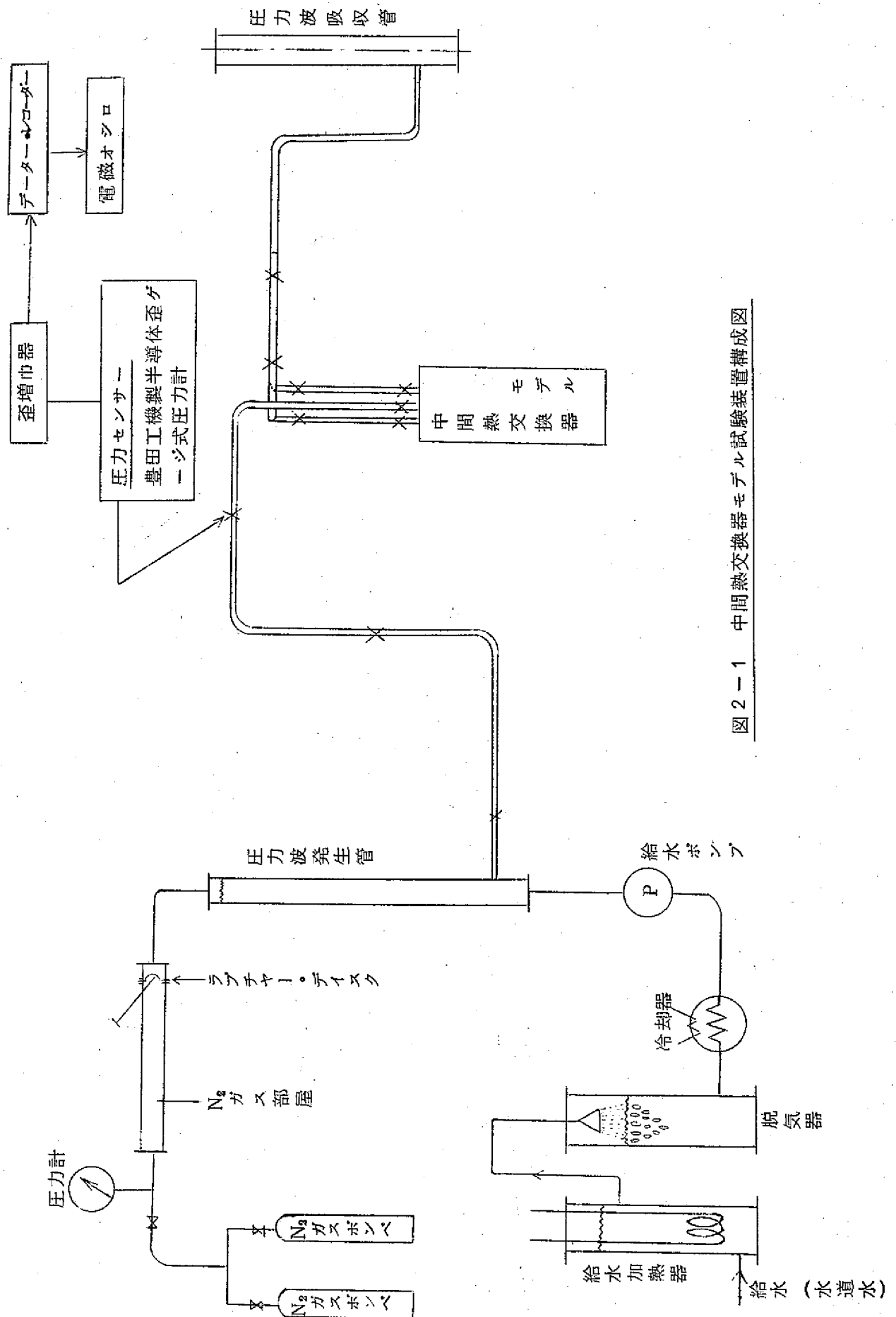


図 2-1-1 中間熱交換器モデル試験装置構成図



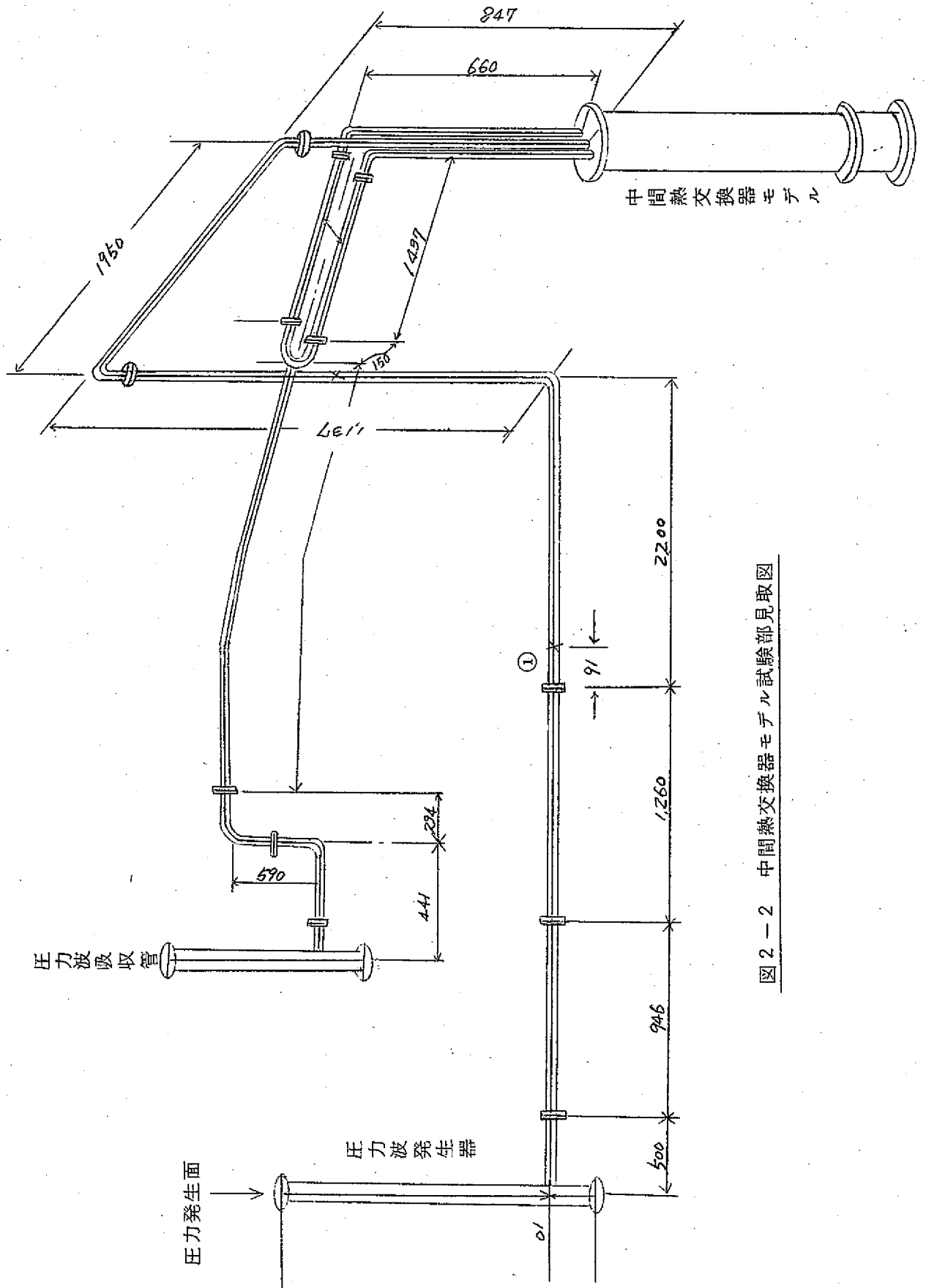


図 2-2 中間熱交換器モデル試験部見取図

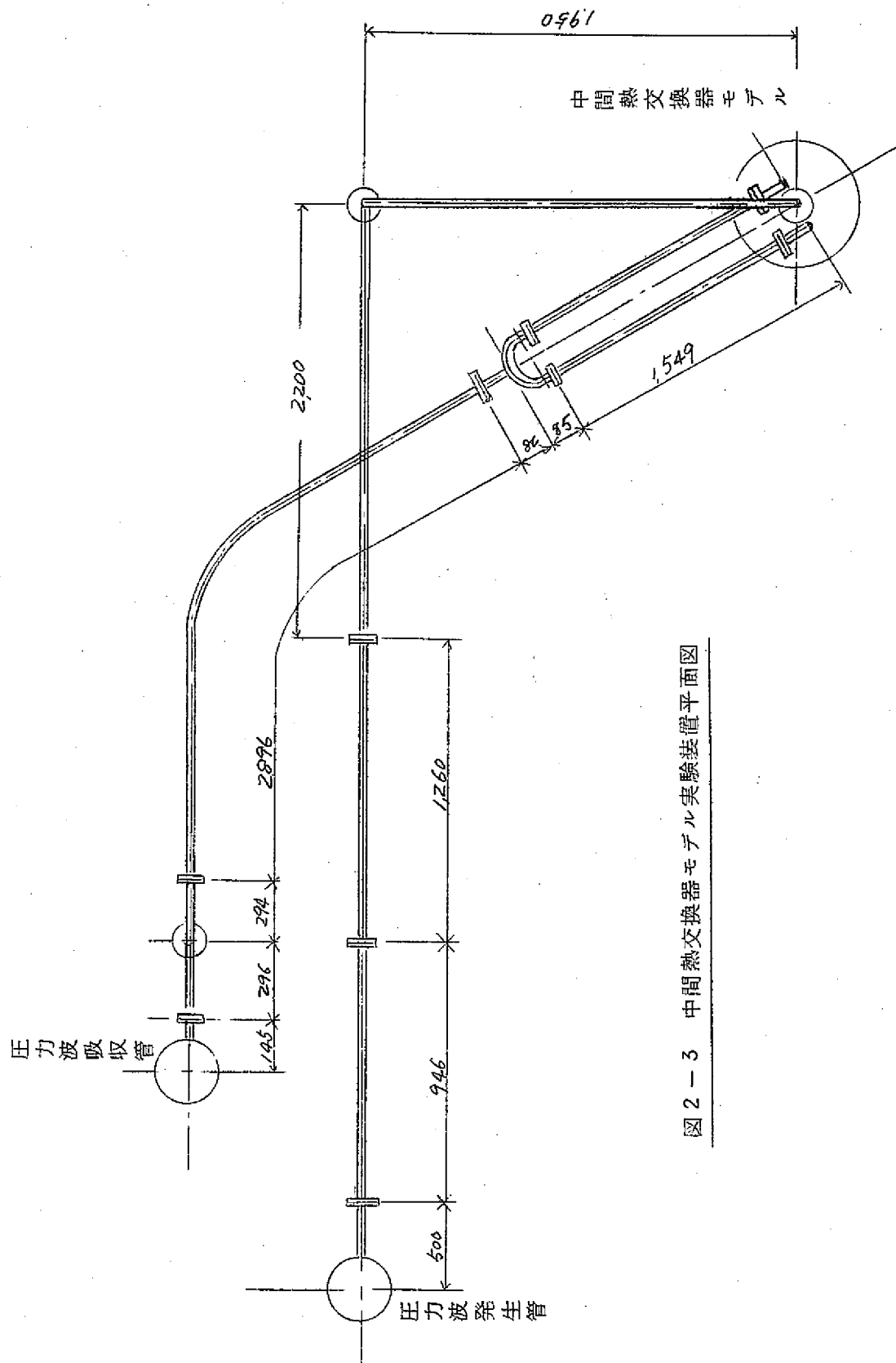


図 2-3 中間熱交換器モデル実験装置平面図

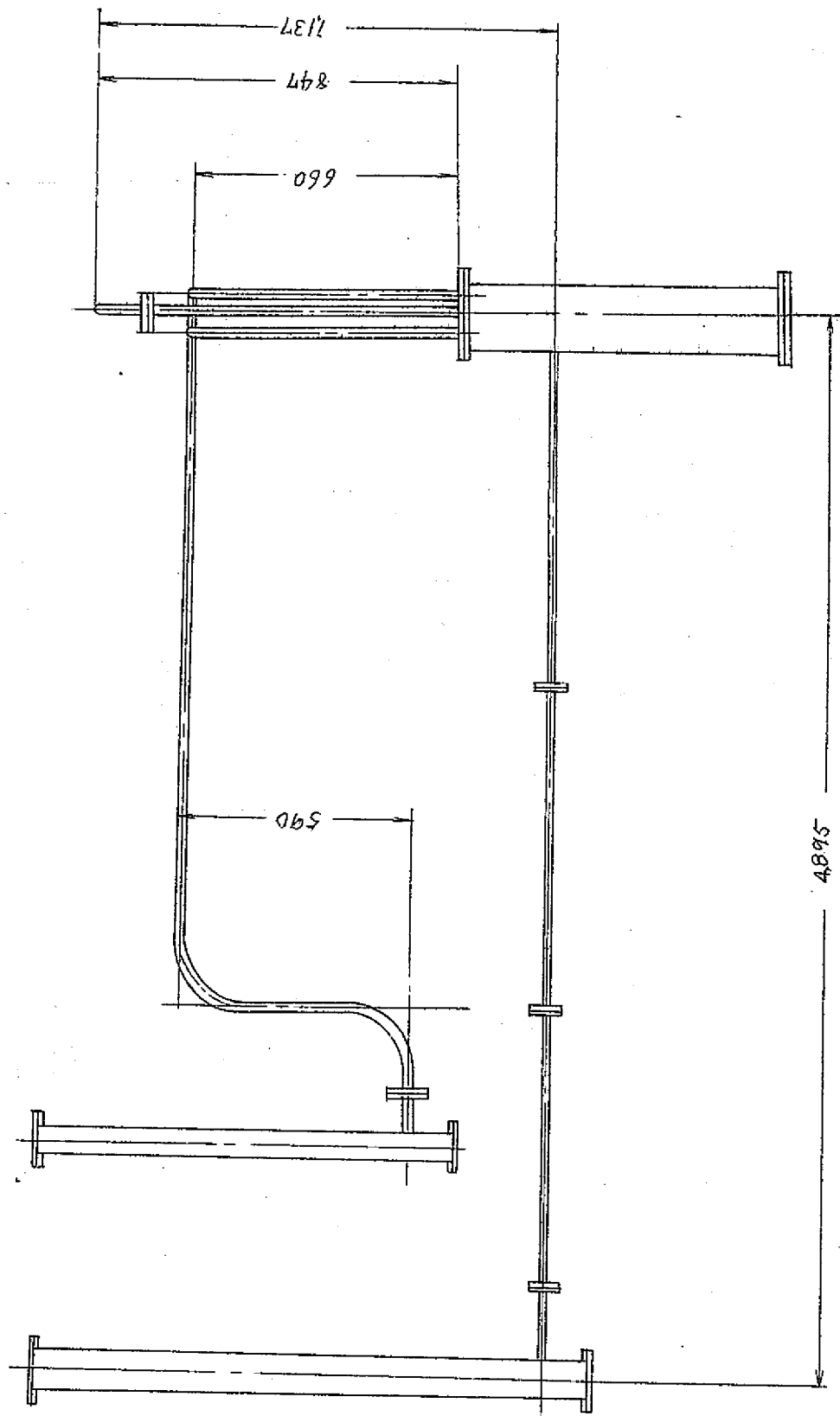


図 2-4 中間熱交換器モデル実験装置立面図

图 2-5 中间热交换器モデル試験装置，圧力測定場所

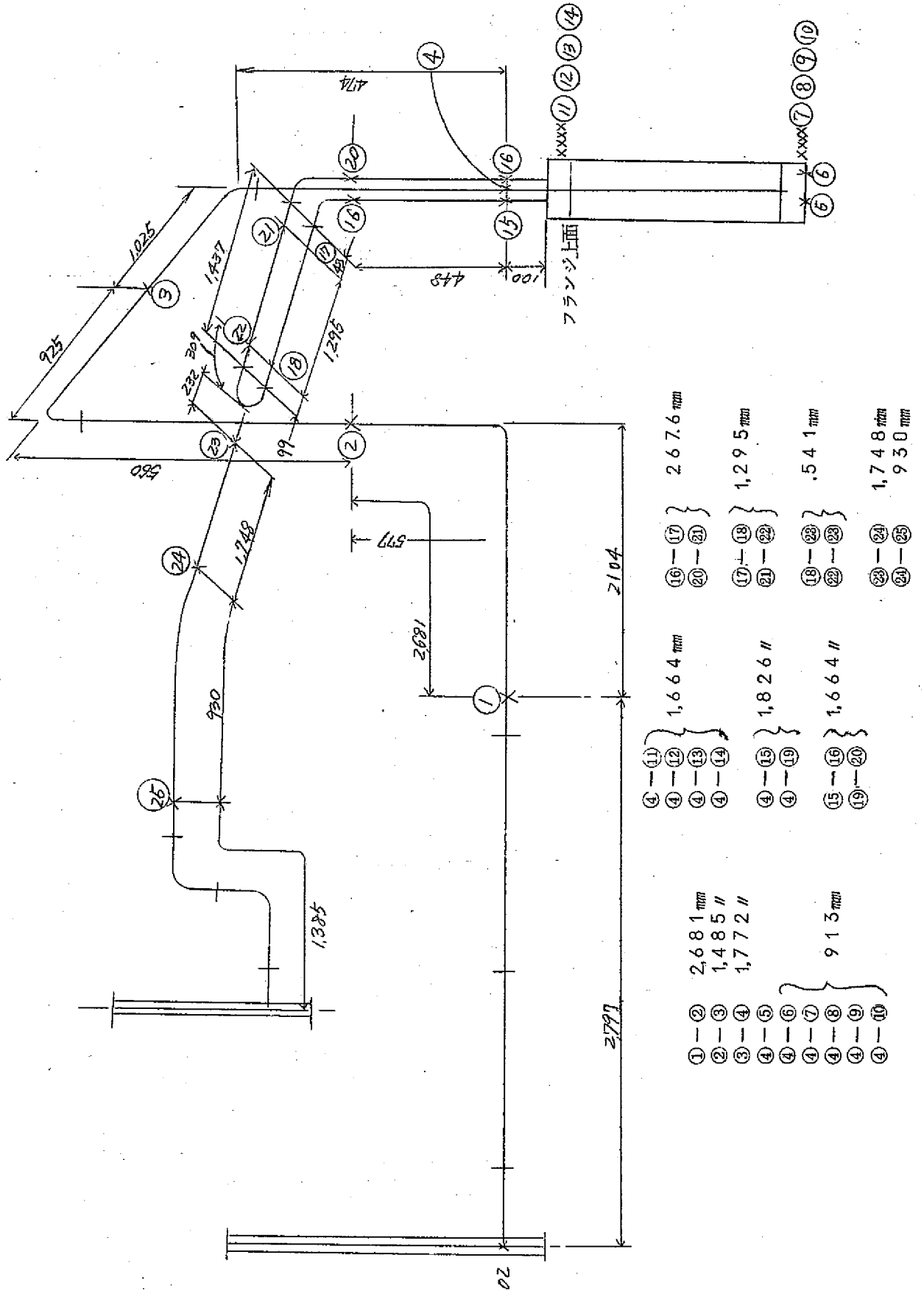




表 3. 1. 1 実験条件表

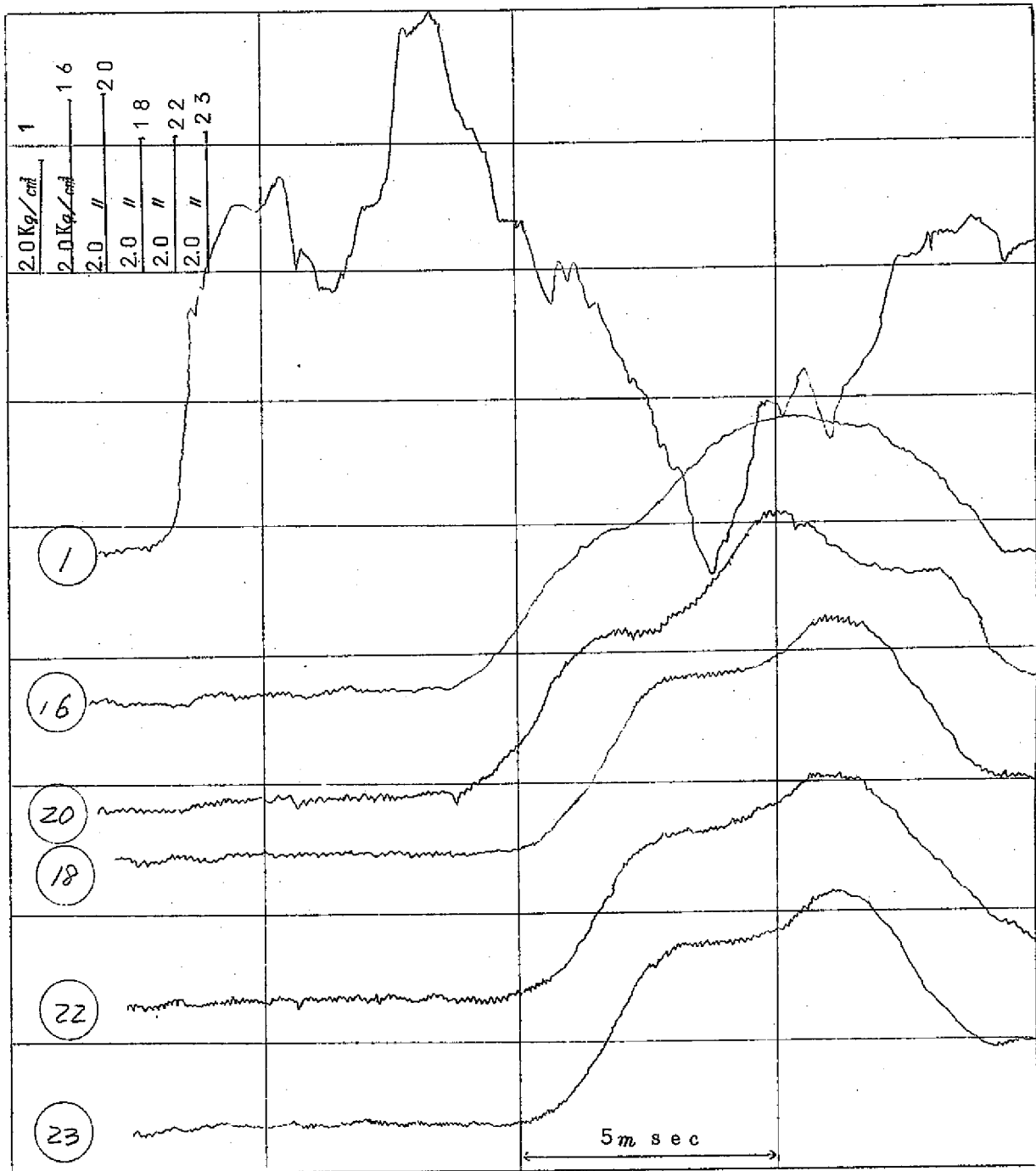
実験シリーズ番号	水温	伝播速度	入力圧力波高値	入力波立上り時間
FA	20℃	1387m/sec	3.0Kg/cm <sup>2</sup> ~6.2Kg/cm <sup>2</sup>	約1.5msec
FB	20℃	1387m/sec	2.5Kg/cm <sup>2</sup> ~7.0Kg/cm <sup>2</sup>	"
FC	18℃	1381m/sec	2.4Kg/cm <sup>2</sup> ~6.4Kg/cm <sup>2</sup>	"
FD	23.2℃	1394m/sec	2.4Kg/cm <sup>2</sup> ~5.5Kg/cm <sup>2</sup>	"
FE	23℃	1394m/sec	2.3Kg/cm <sup>2</sup> ~5.2Kg/cm <sup>2</sup>	"

表 3. 1. 2 実物中間熱交換器と試験モデルとの寸法比較表

		第一次設計仕様	本試験モデル	寸法比
中間熱交換器高さ		10,000 mm	800 mm	1/12.5
二次系	直径	2,000 mm	155.2 mm	1/12.8
入口プレナム	高さ	920 mm	75 mm	1/12.3
二次系	直径	2,730	203.3 mm	1/13.4
出口プレナム	高さ	950 mm	80 mm	1/11.9
二次系 入口ノズル 内径		457.2 mm	36.7 mm	1/12.5
二次系 出口ノズル 内径		355.6 mm	36.7 mm	1/9.7
伝熱管	内径	19.3 mm	9 mm	
	本数	3339本	82本	
	総面積	976836.8 mm <sup>2</sup>	5216.6 mm <sup>2</sup>	
	相当直径	111.5 mm	81.5	1/13.7

表 3. 1. 3 水(常温)とナトリウム(300℃)の物性値の比較

	ナトリウム(300℃)	水(20℃)
音速	2400m/sec	1480m/sec
比重量	880Kg/m <sup>3</sup>	998Kg/m <sup>3</sup>
動粘性係数	0.392×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec	1.01×10 <sup>6</sup> m <sup>2</sup> /sec
粘性係数	0.3515×10 <sup>4</sup> Kgsec/m <sup>2</sup>	1.03×10 <sup>4</sup> Kgsec/m <sup>2</sup>



時間

図 3.2.1 実験結果の 1 例 (FD-42)

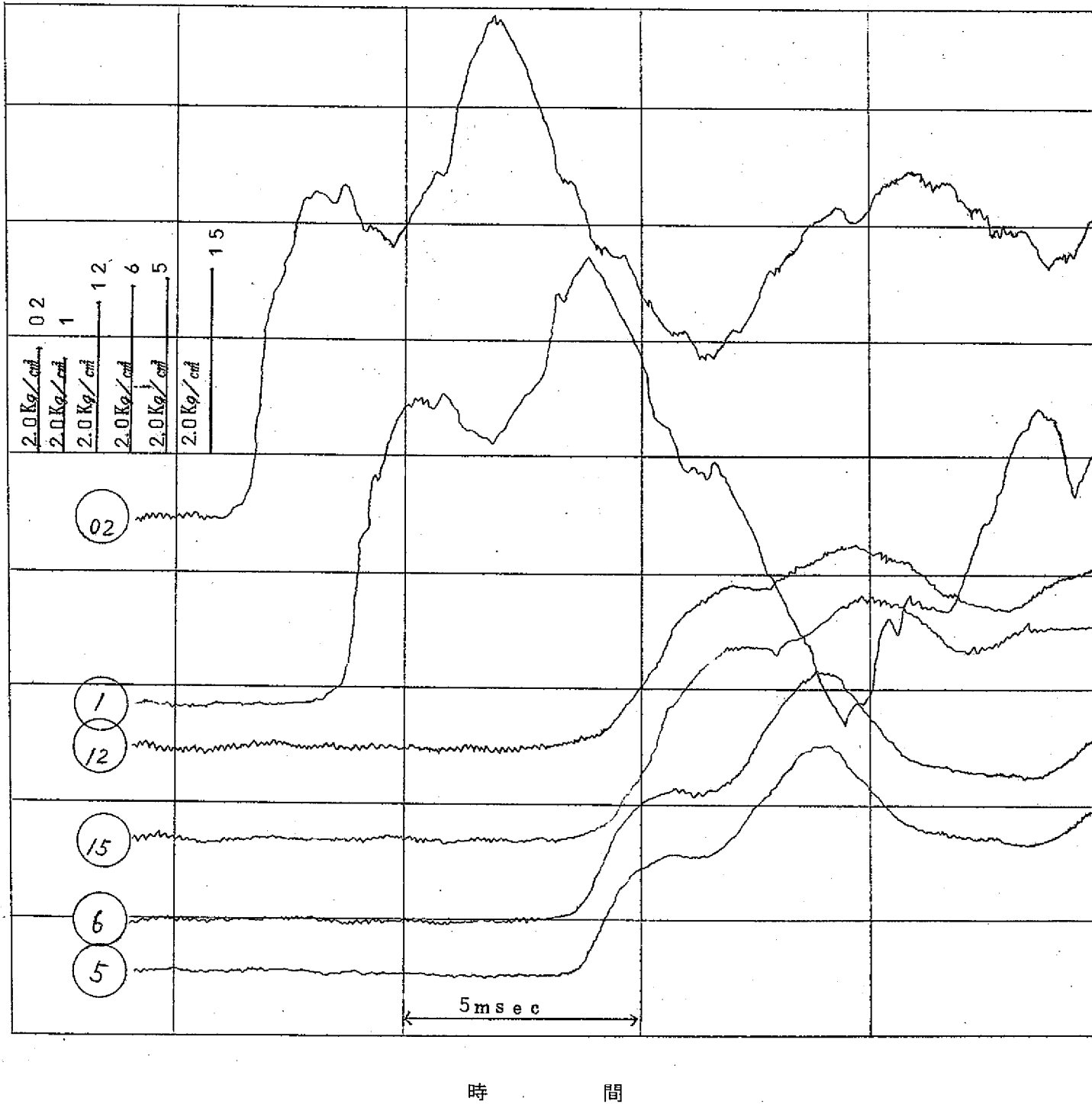


図 3.2.2 実験結果の 1 例 (FC-6)



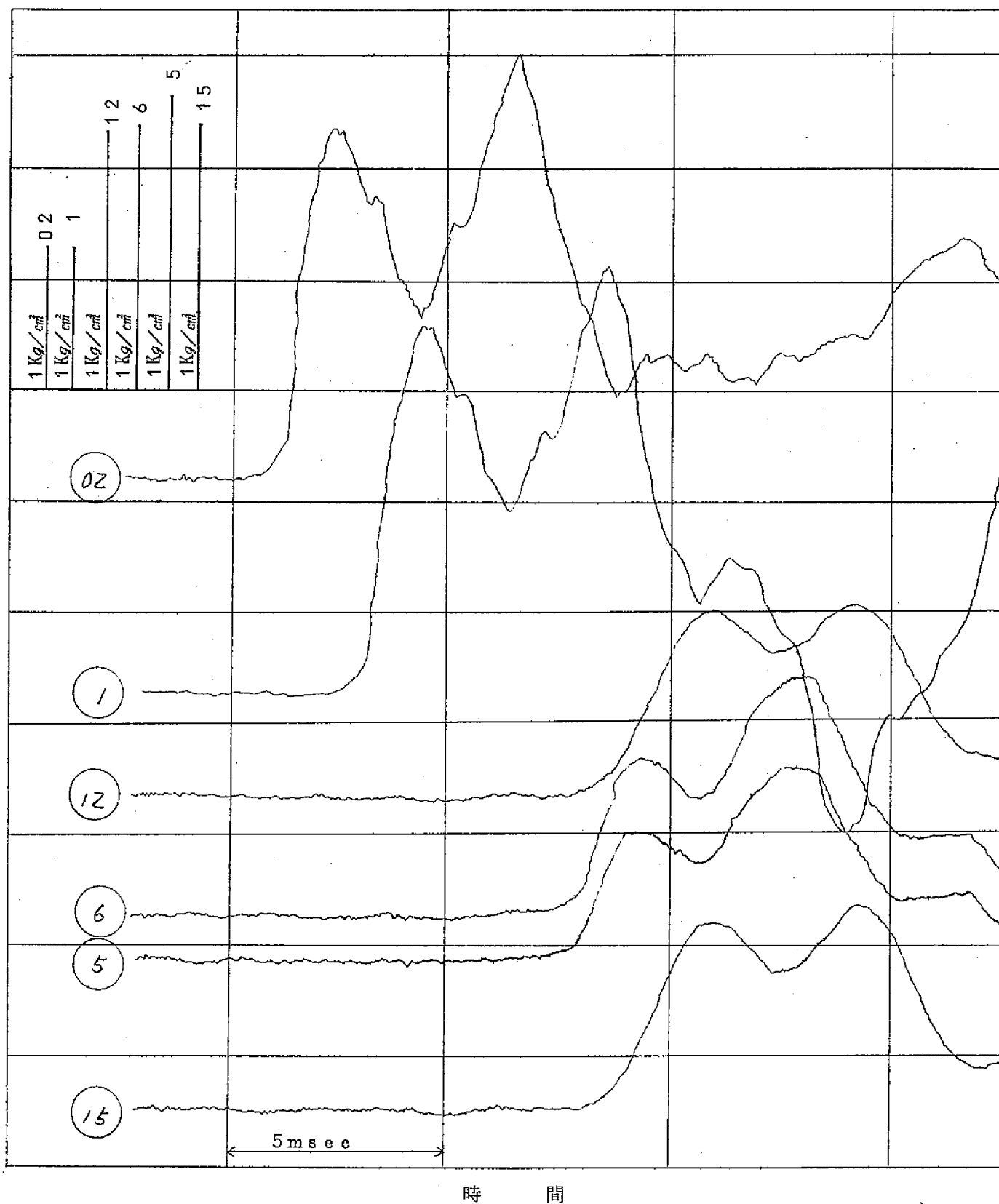


図 3.2.3 実験結果の 1 例 (FC-14)

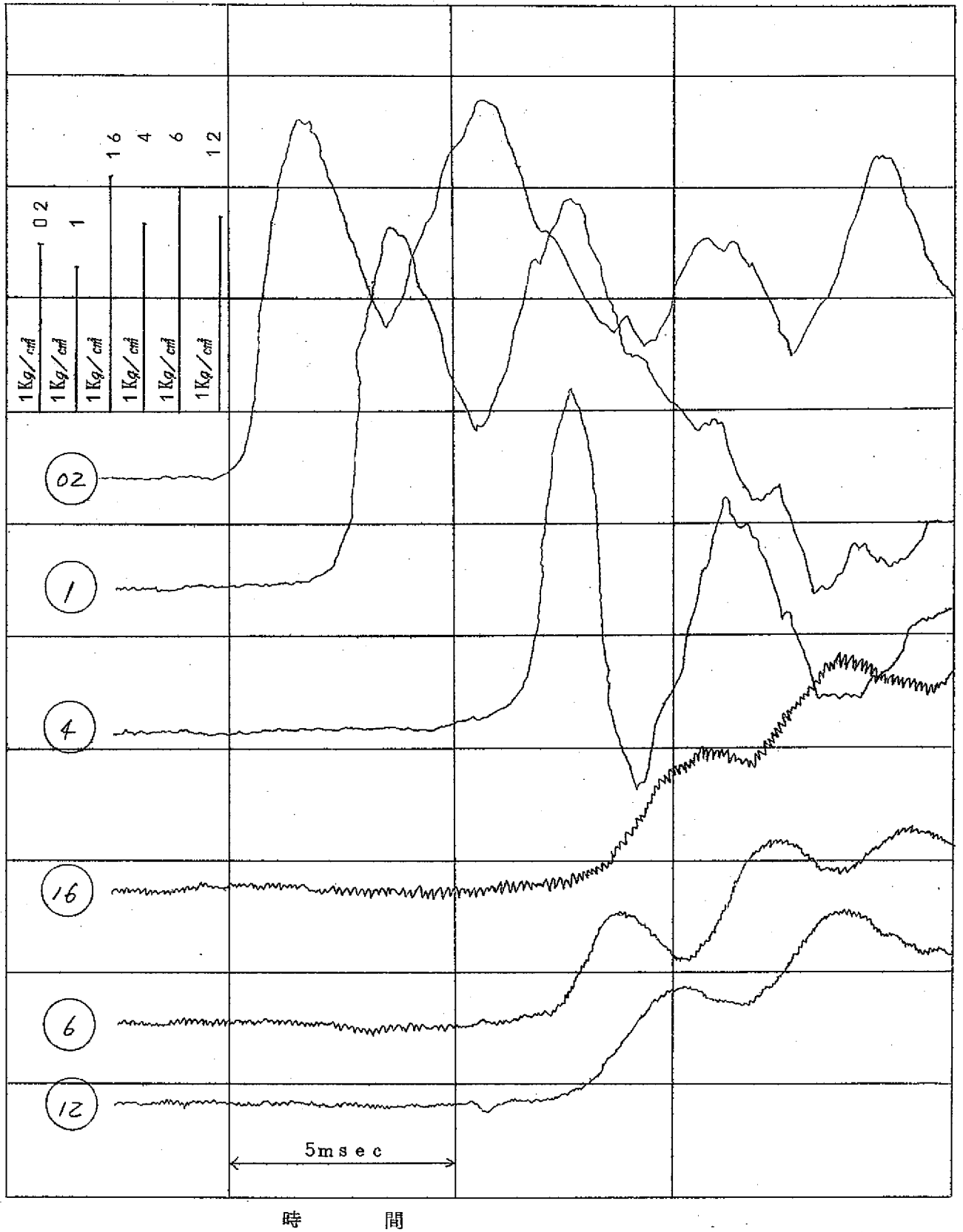


図 3.2.4 実験結果の 1 例 (FE-2A)

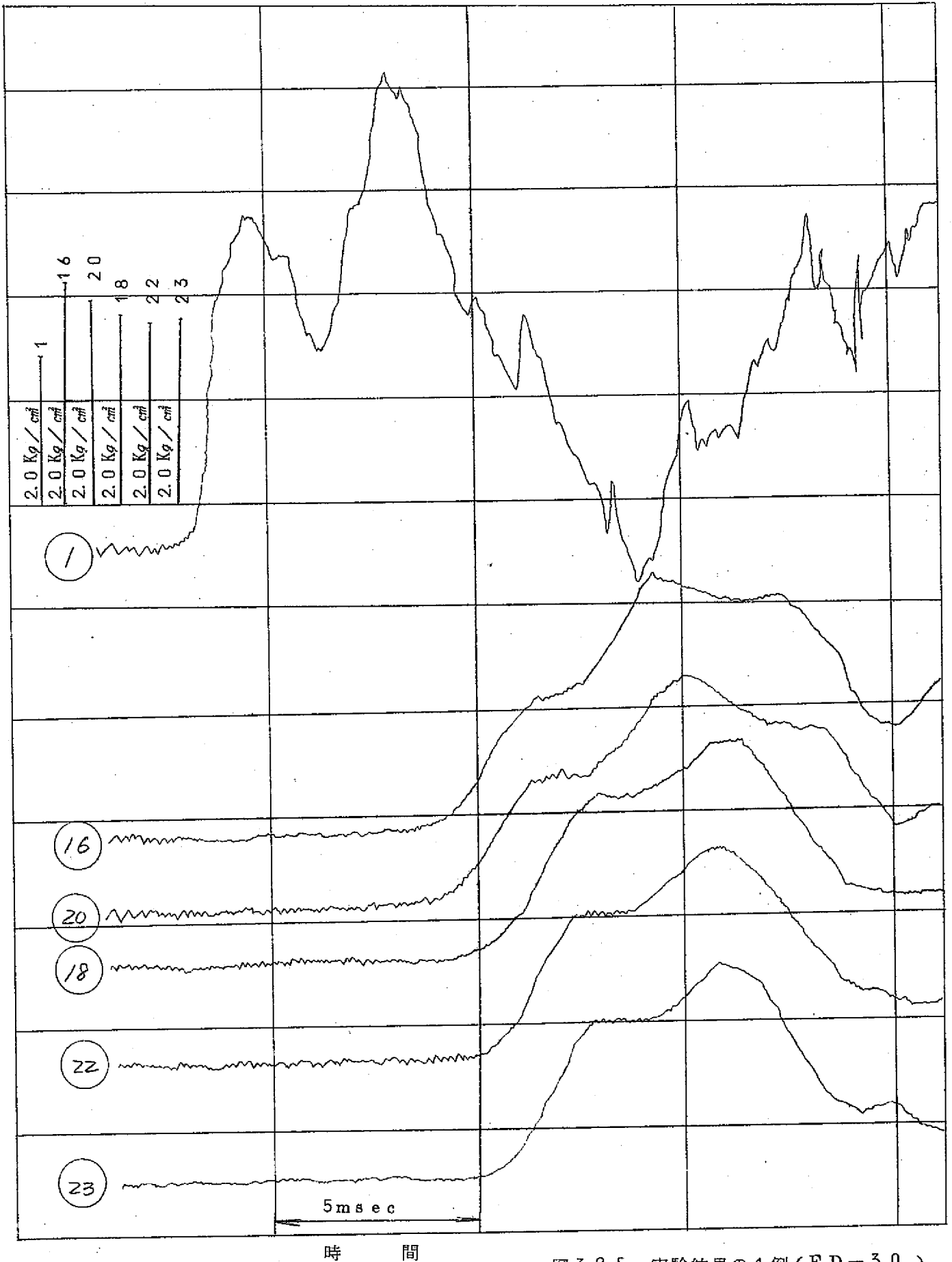


図 3.2.5 実験結果の 1 例 (FD-30)

表 3.2.1 圧力波伝播速度の測定結果

実験シリーズ番号	記号	計算値	実験値	誤差
FA	○	1387.0 m/sec	1402.3 m/sec	+1.1%
	×	1387.0 //	1348.7 //	-2.9%
FB	●	1388.0 //	1360.0 //	-2.0%
	○	1387.0 //	1373.4 //	-1.0%
FC	○	1381.0 //	1379.4 //	-0.1%
FD	●	1396.0 //	1394.0 //	-0.14%
FE	○	1394.0 //	1396.0 //	+0.36%
	●	1395.0 //	1386.4 //	-0.62%

- 中間熱交換器前方配管内の音速
- 中間熱交換器前方配管及び伝熱管内音速の平均値
- ×
- // 後方配管内の音速

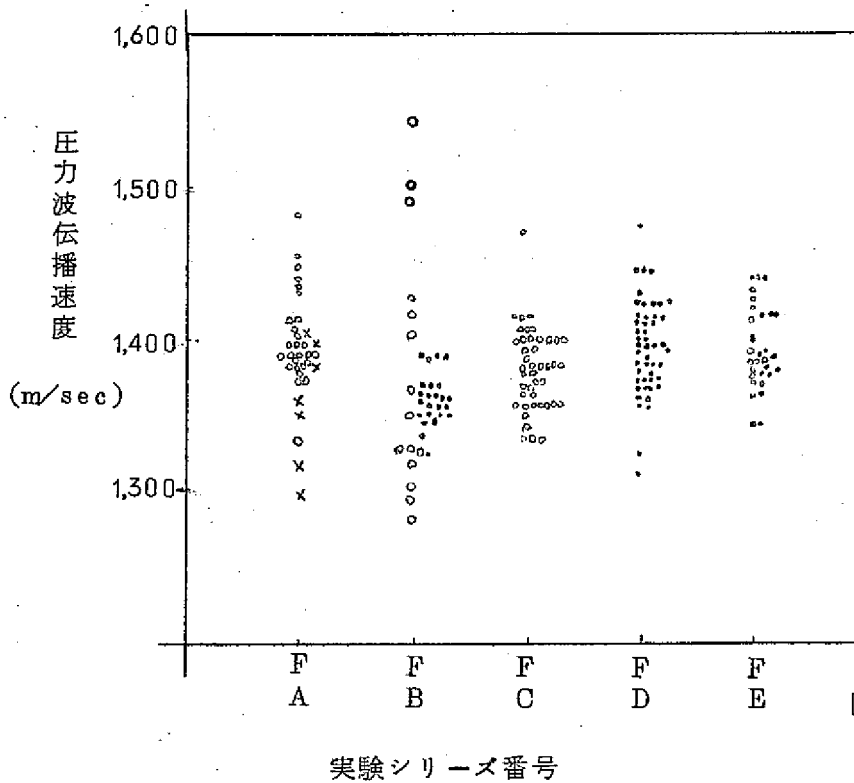


図 3.2.6 圧力波伝播速度の測定結果

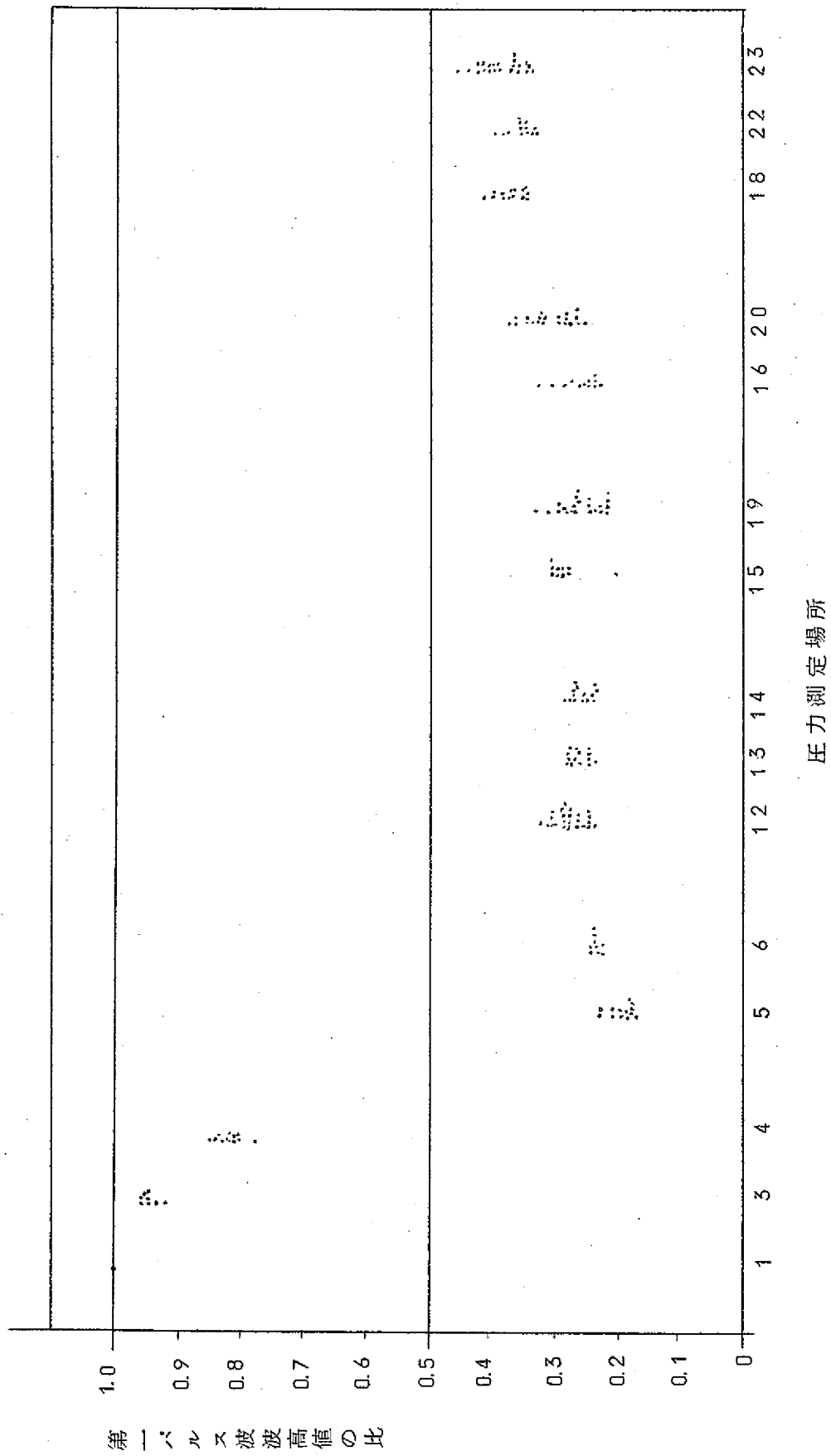


図 3.2.7 第一パルス波の波高値の各場所での測定結果

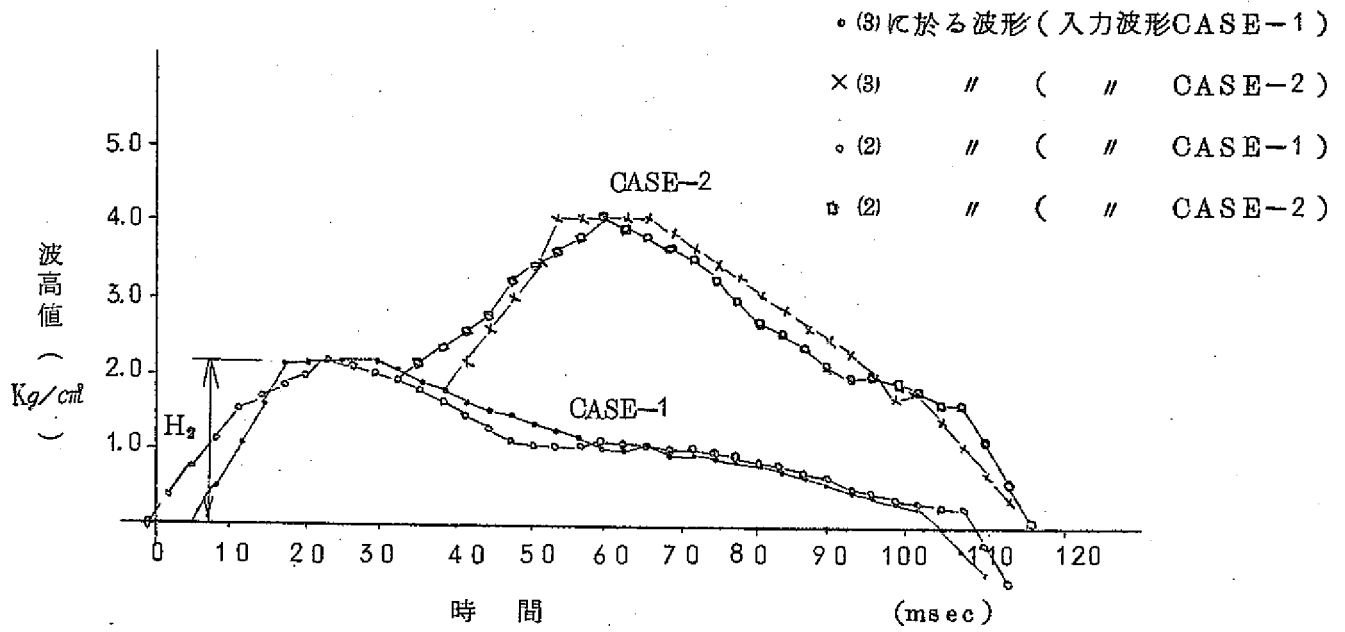
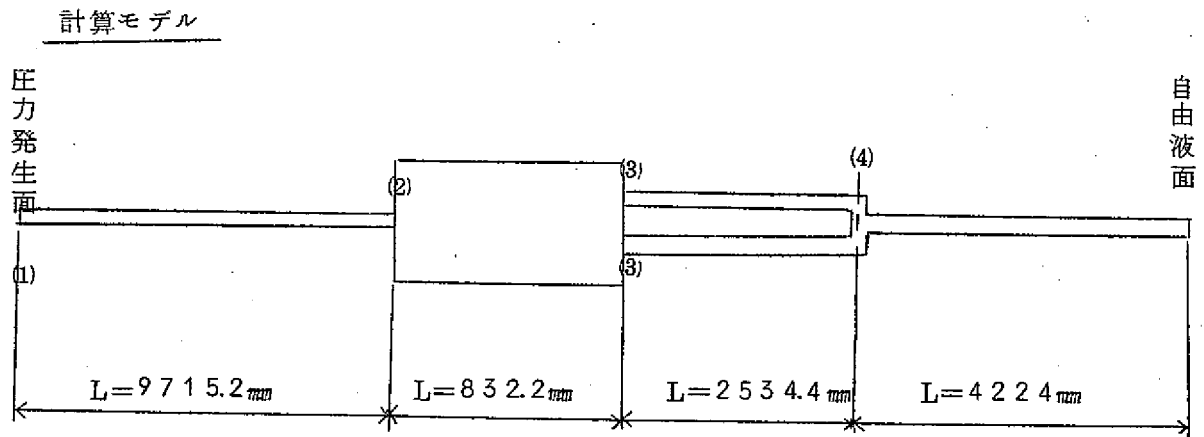


図 3.2.11 入力波形がCASE 1, CASE 2 の場合の中間熱交換器上部プレナムの波形



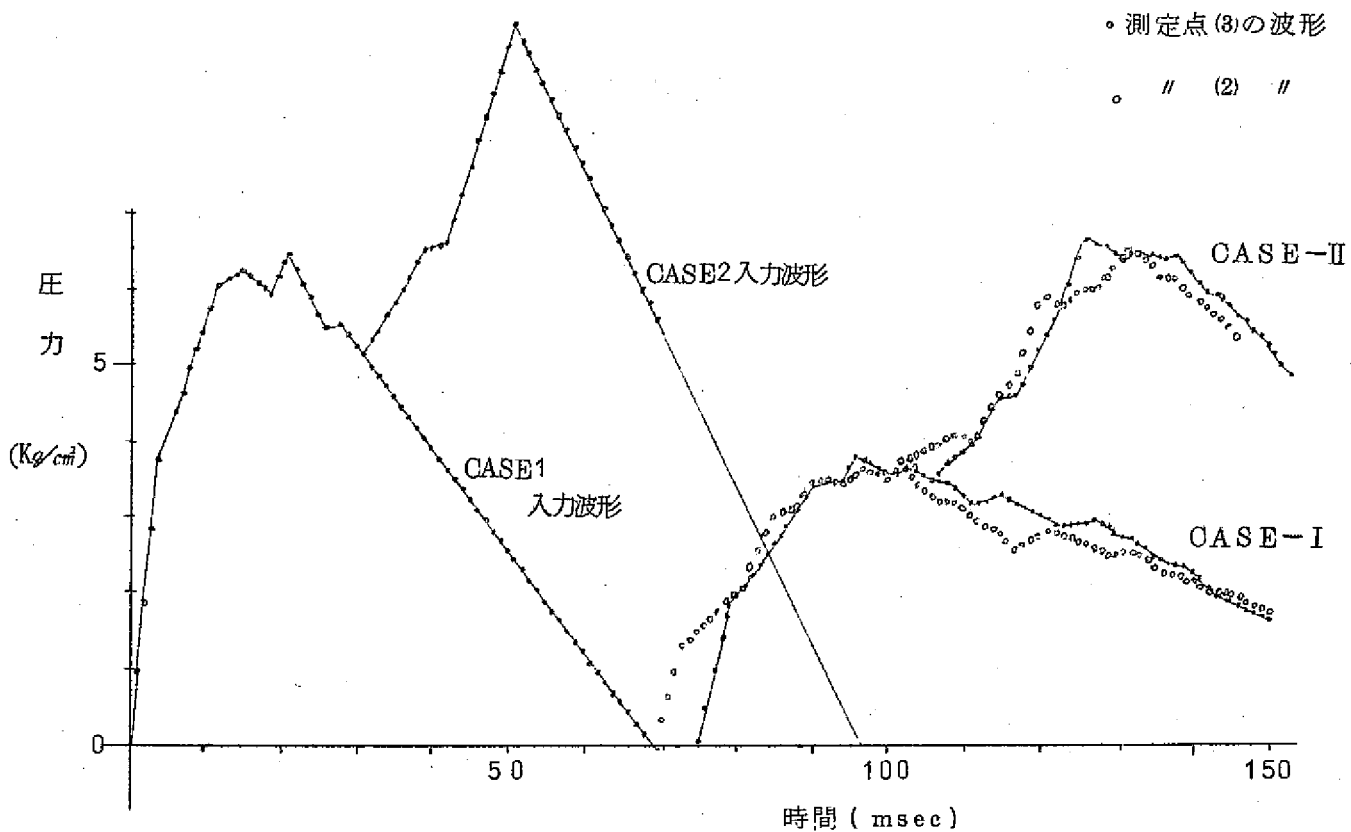


図 3.2.1 2 実験番号 FC-6

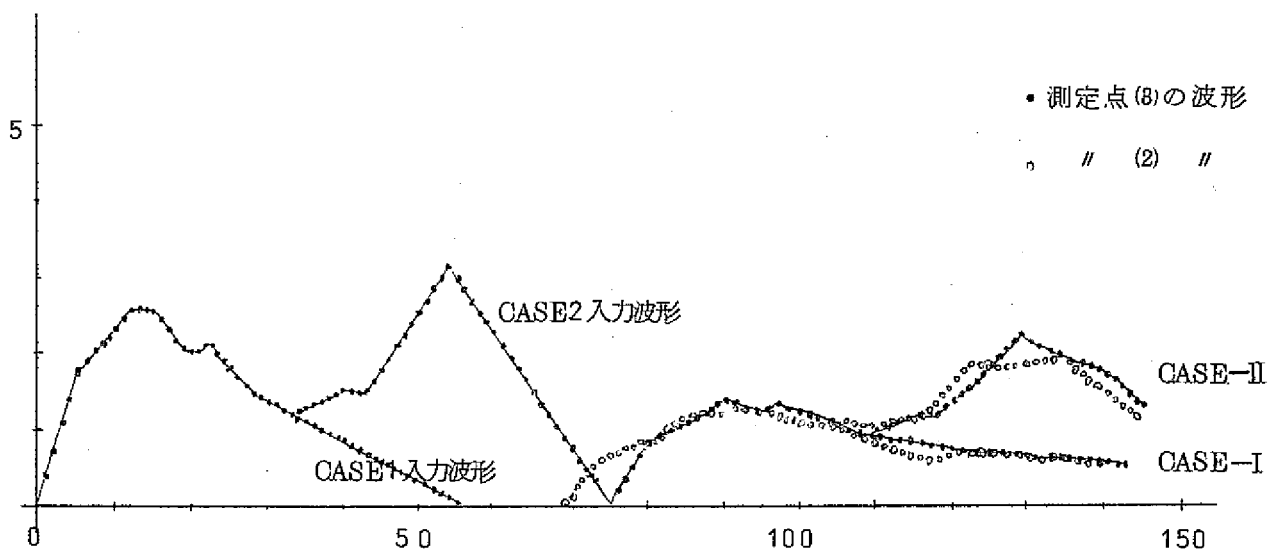


図 3.2.1 3 実験番号 FC-14

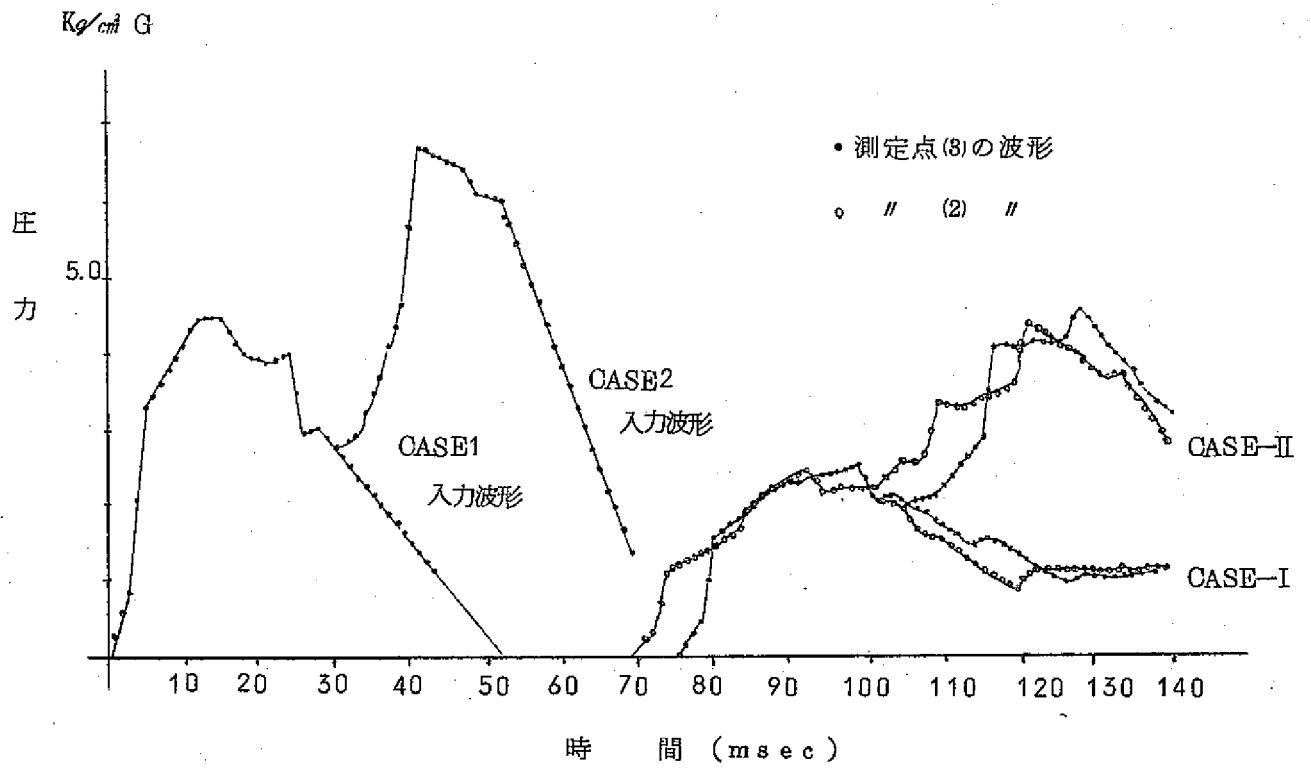


図 3. 2. 1 4 実験番号 FD-30



図 4.1.1 実験装置の計算モデル化

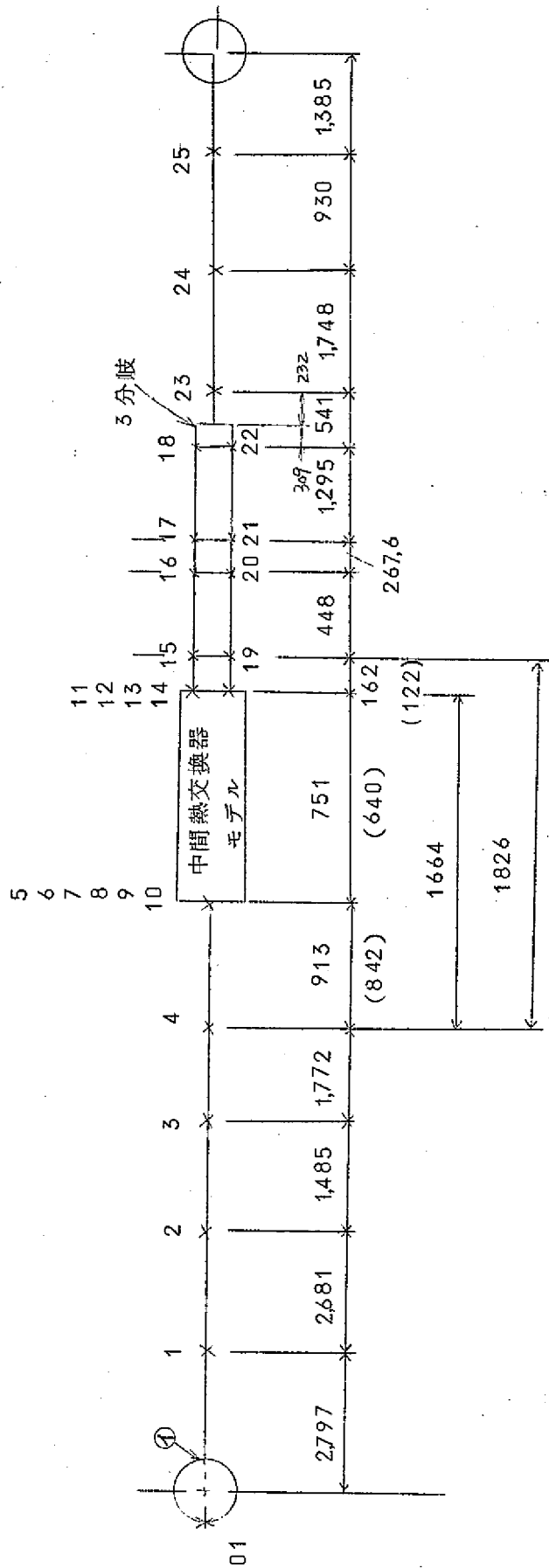
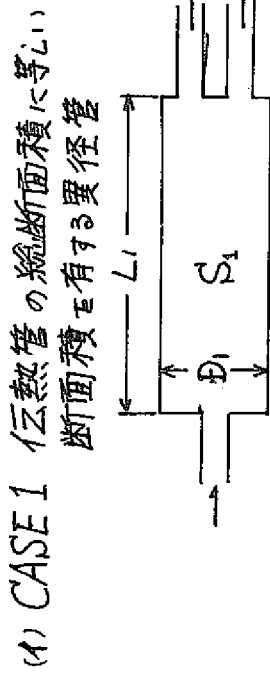
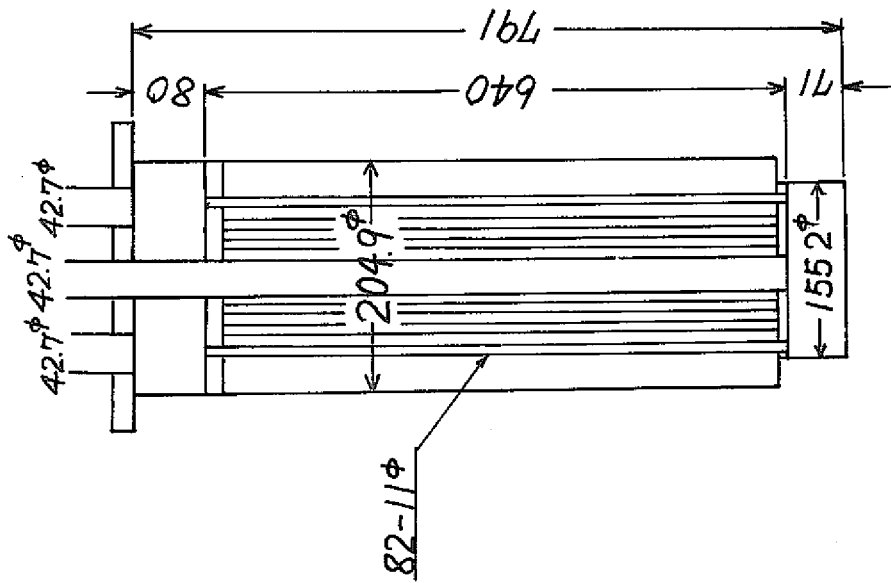


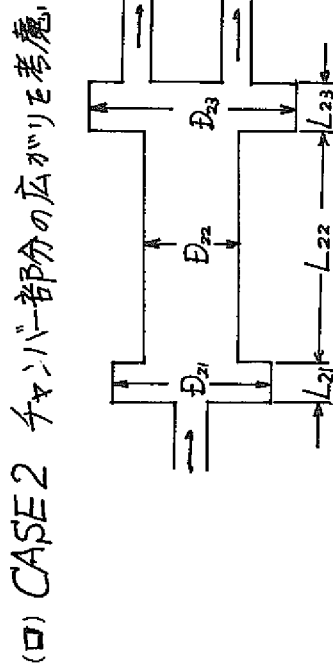
図 4.1.2 中間熱交換器のモデル化



$$L_1 = 791$$

$S_1 =$  伝熱管の断面積の総計

$D_1 = S_1$  に相等する直径



$$L_{21} = 71$$

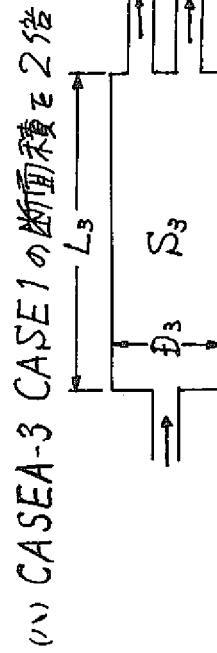
$$L_{22} = 640$$

$$L_{23} = 80$$

$$D_{21} = 155.2$$

$$D_{22} = \text{CASE 1 に 同心}$$

$$D_{23} = 204.9$$



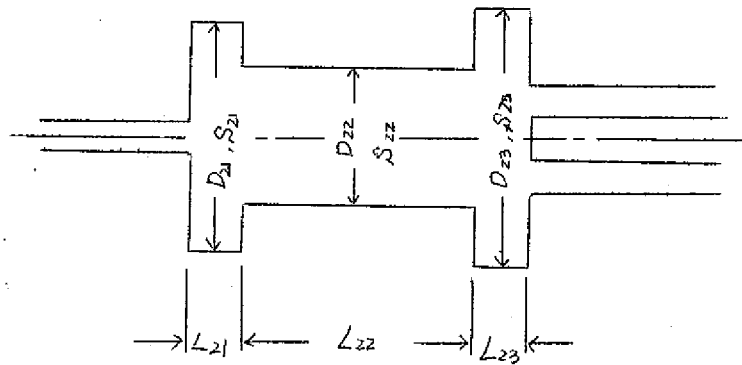
$$L_3 = L_1$$

$$S_3 = 2S_1$$

$D_3 = S_3$  に 相等する直径

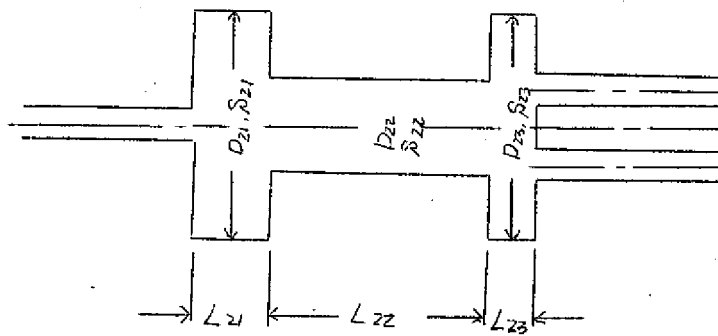
IHX の 実験モデル

(=) CASE A-2



- $L_{21} = 6.6.8 \text{ mm}$
- $L_{22} = 633.6 \text{ mm}$
- $L_{23} = 80.22 \text{ mm}$
- $S_{21} = 0.01892 \text{ m}^2$
- $S_{22} = 0.01069 \text{ m}^2$
- (実際の2倍)
- $S_{23} = 0.03103 \text{ m}^2$

(+) CASE A-4



- $L_{21} = 133.7 \text{ mm}$
- $L_{22} = 704.0 \text{ mm}$
- $L_{23} = 66.85 \text{ mm}$
- $S_{21} = 0.01892 \text{ m}^2$
- $S_{22} = 0.00522 \text{ m}^2$
- $S_{23} = 0.03010 \text{ m}^2$

図 4.1.2 中間熱交換器のモデル化

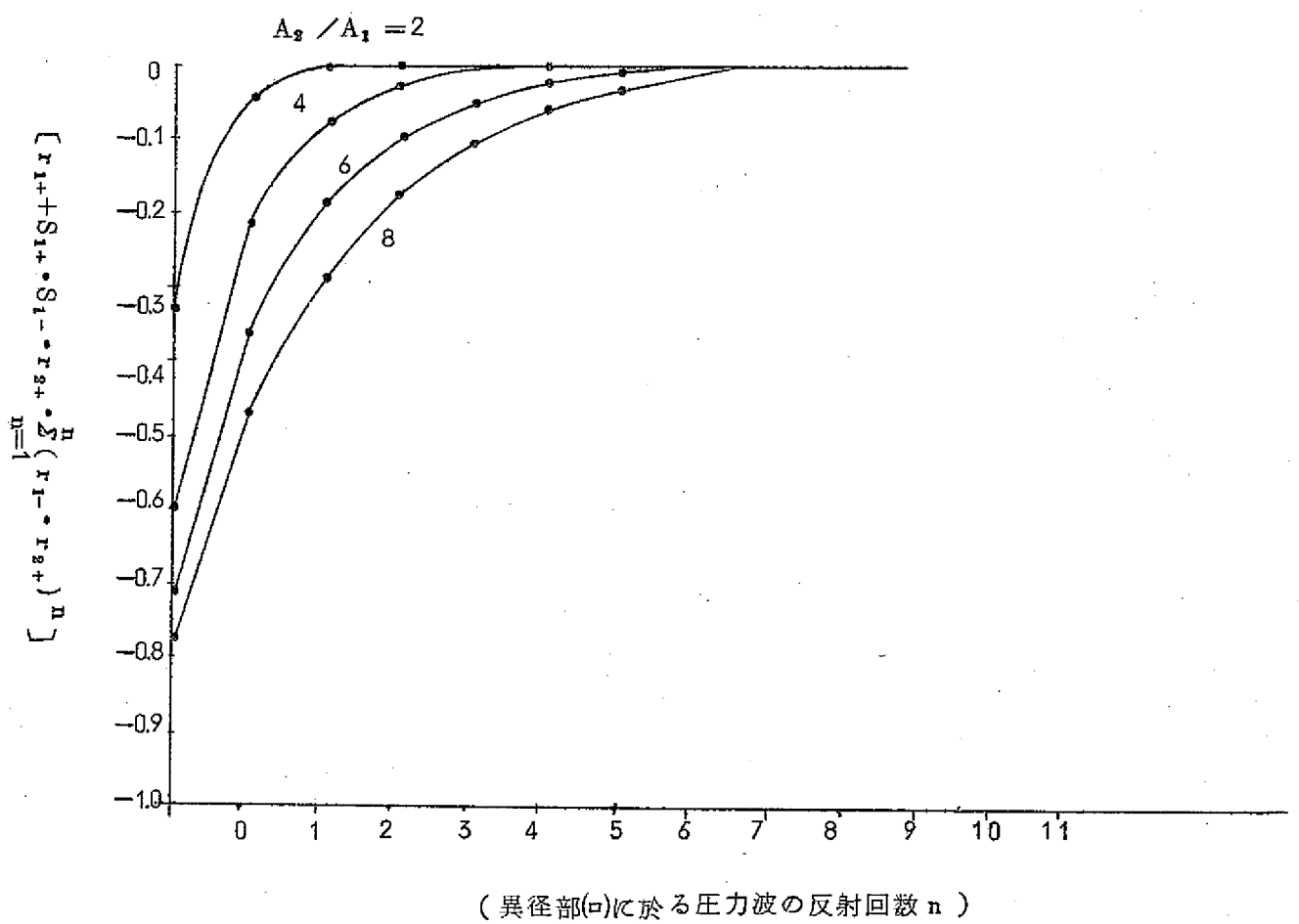


図 4. 1. 4

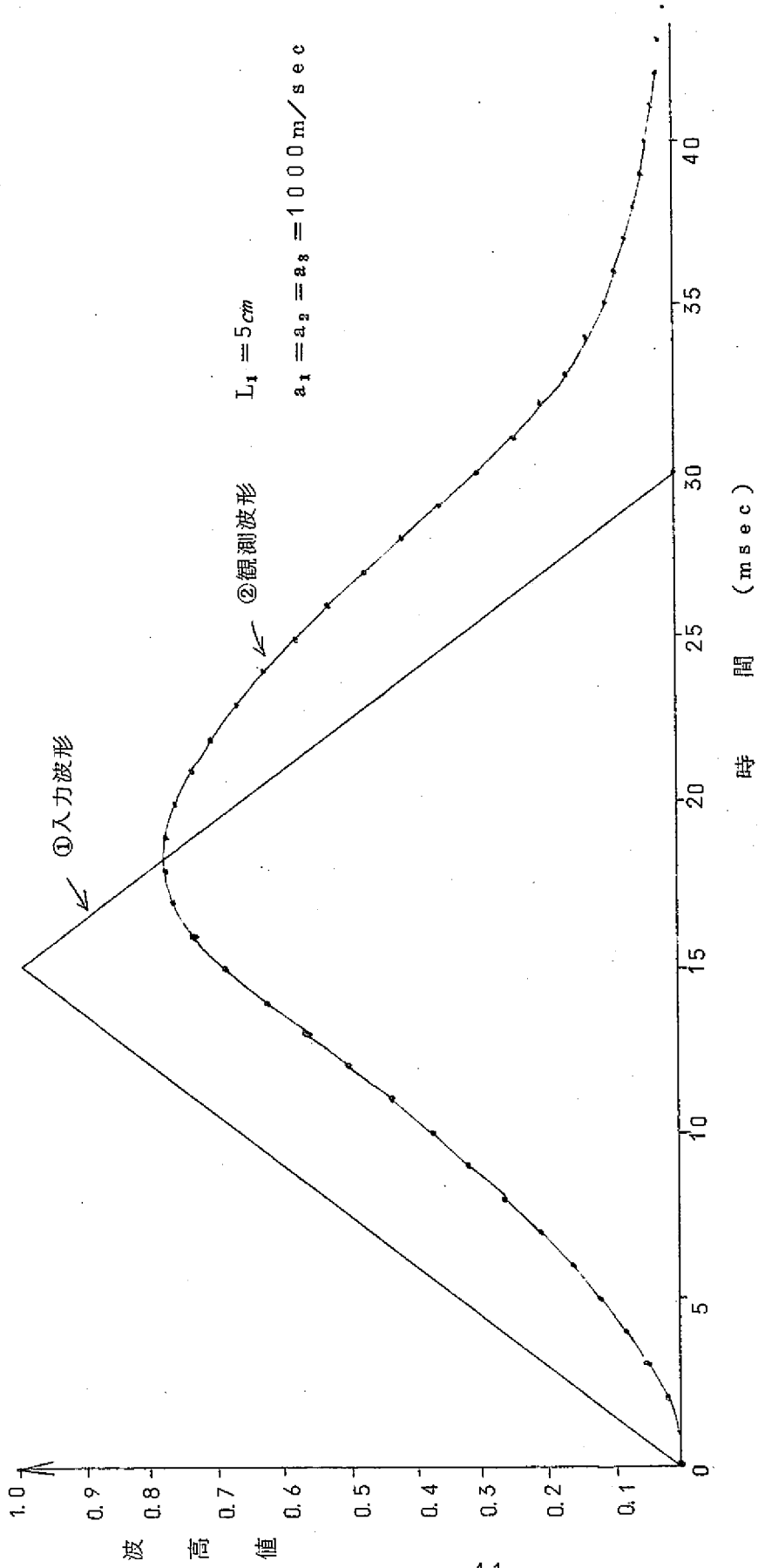


図 4.1.5

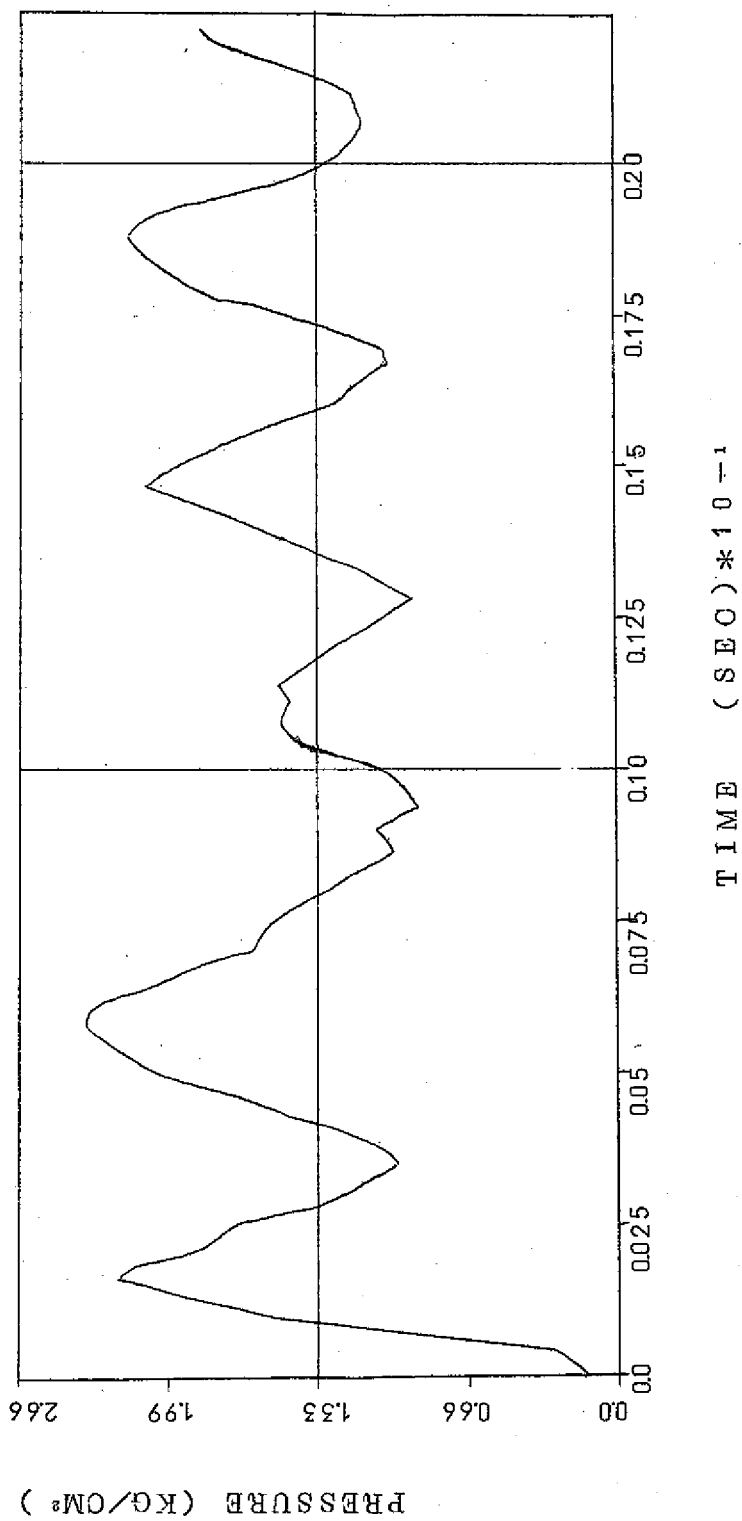


图 4.2.6 入力波形 (実験値) (P02) (SWAC-5)

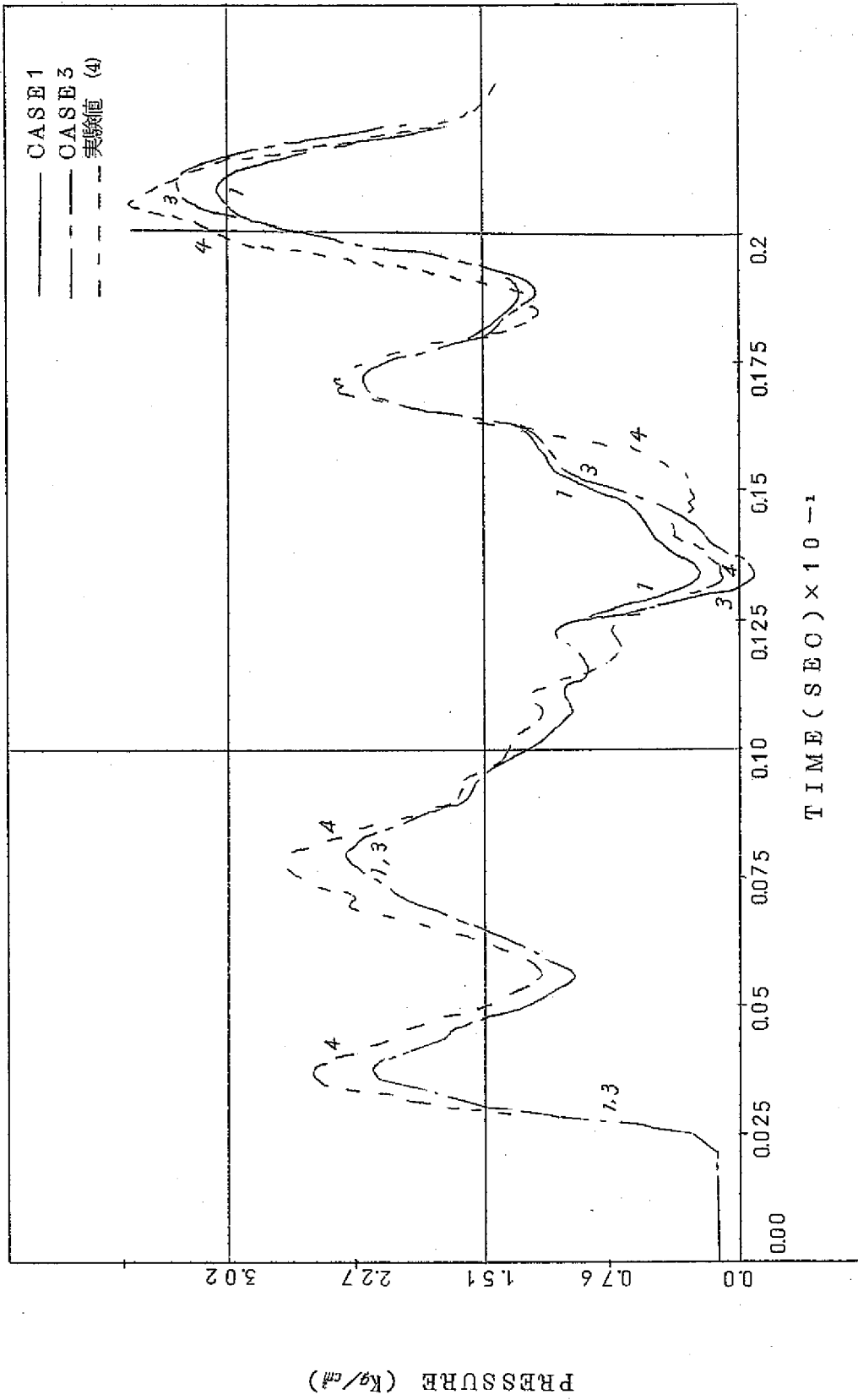


図 4.2.7 P 1 に於る圧力波形の比較

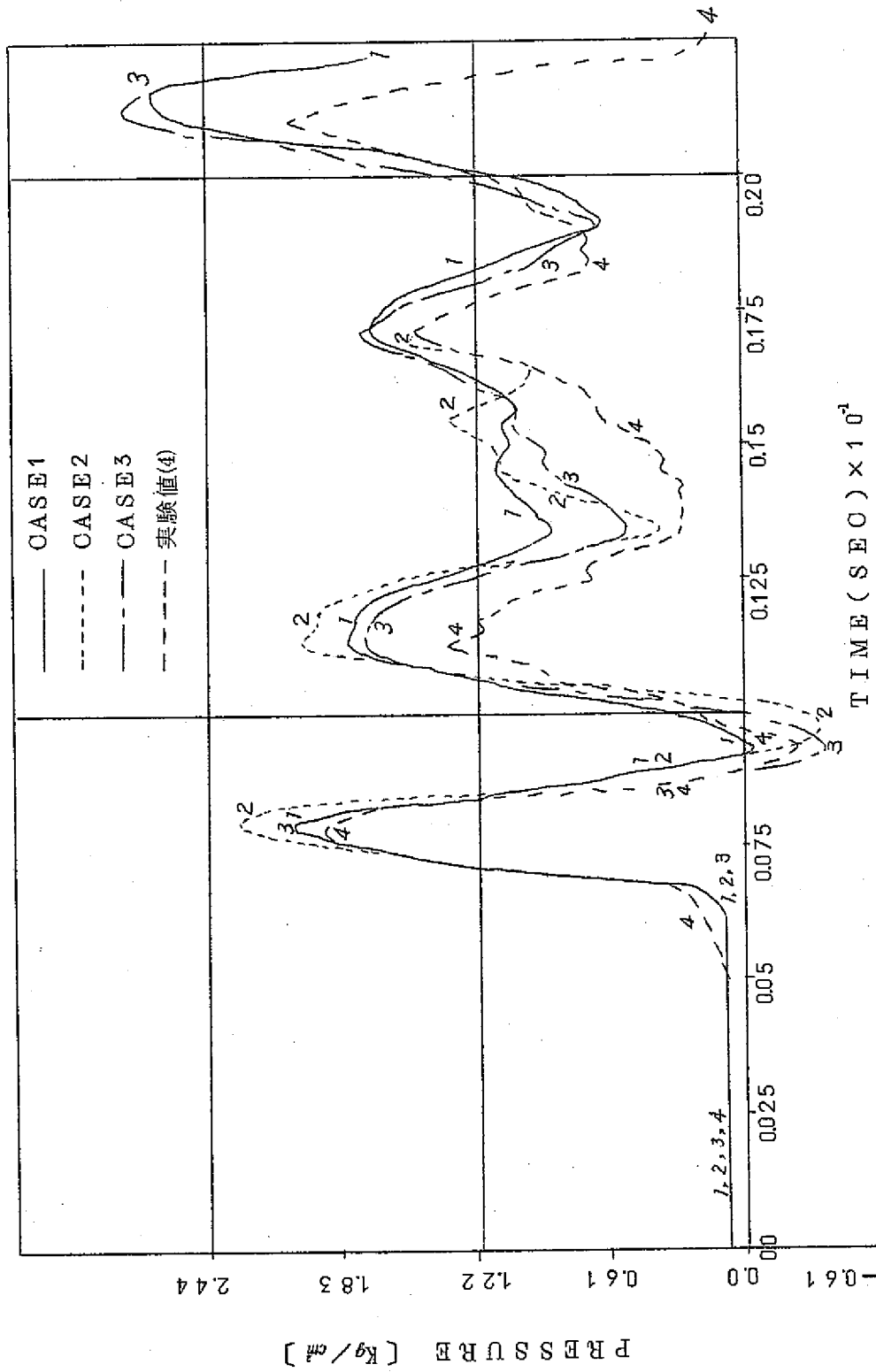


図 4.2.8 P-4 に於る圧力波形の比較



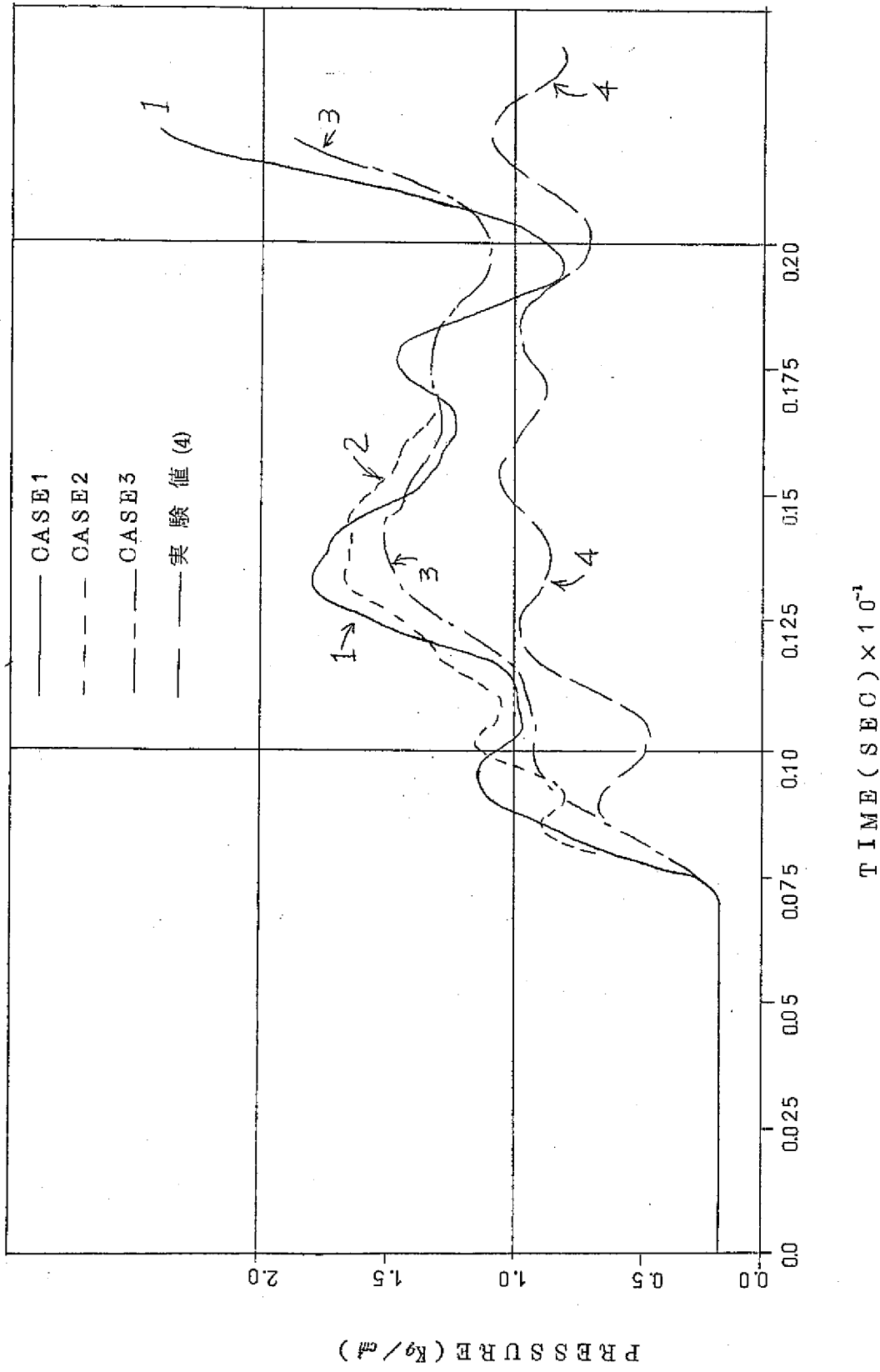


図 4.2.9 P-5 における圧力波形の比較

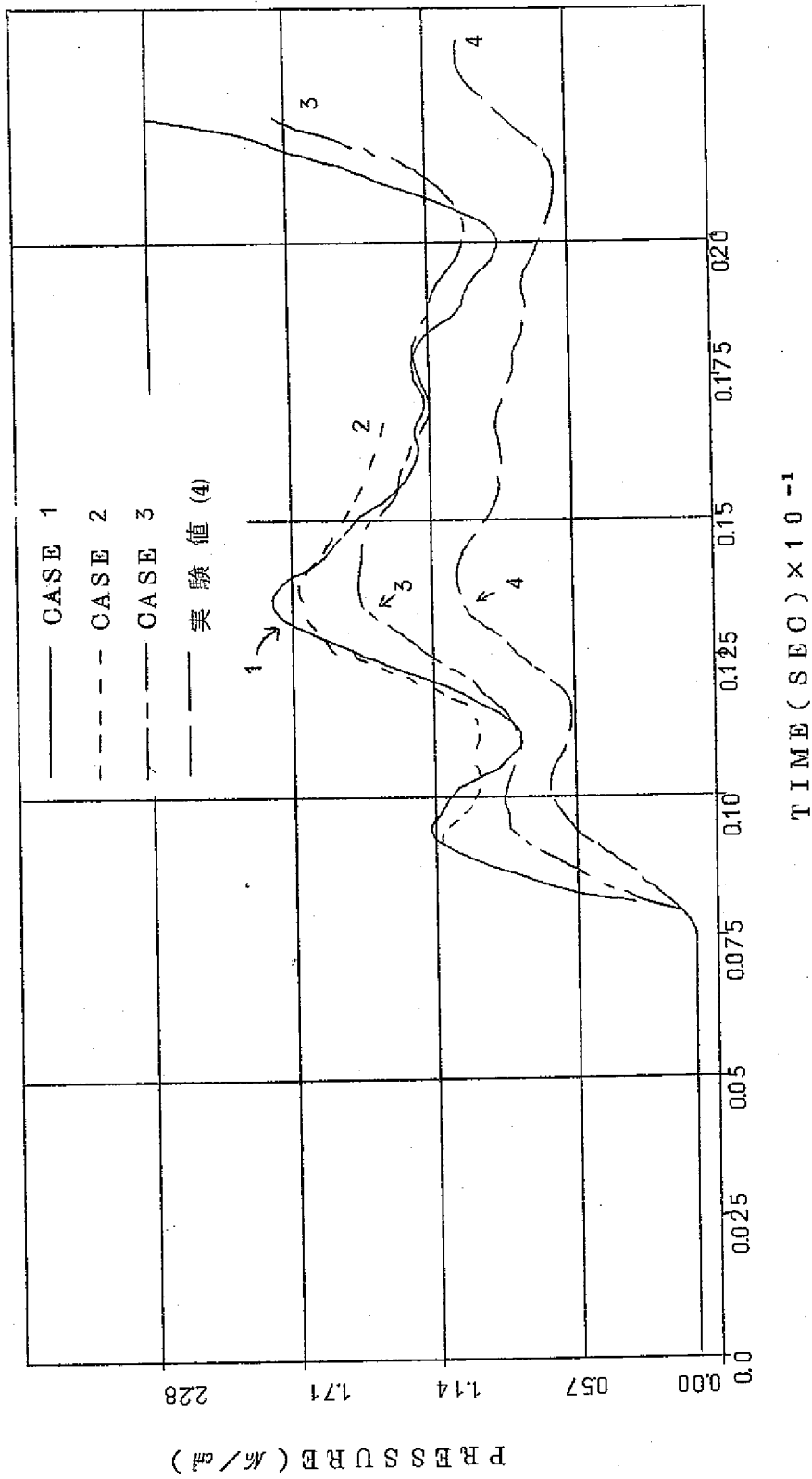


図 4.2.10 P-12における圧力波形の比較

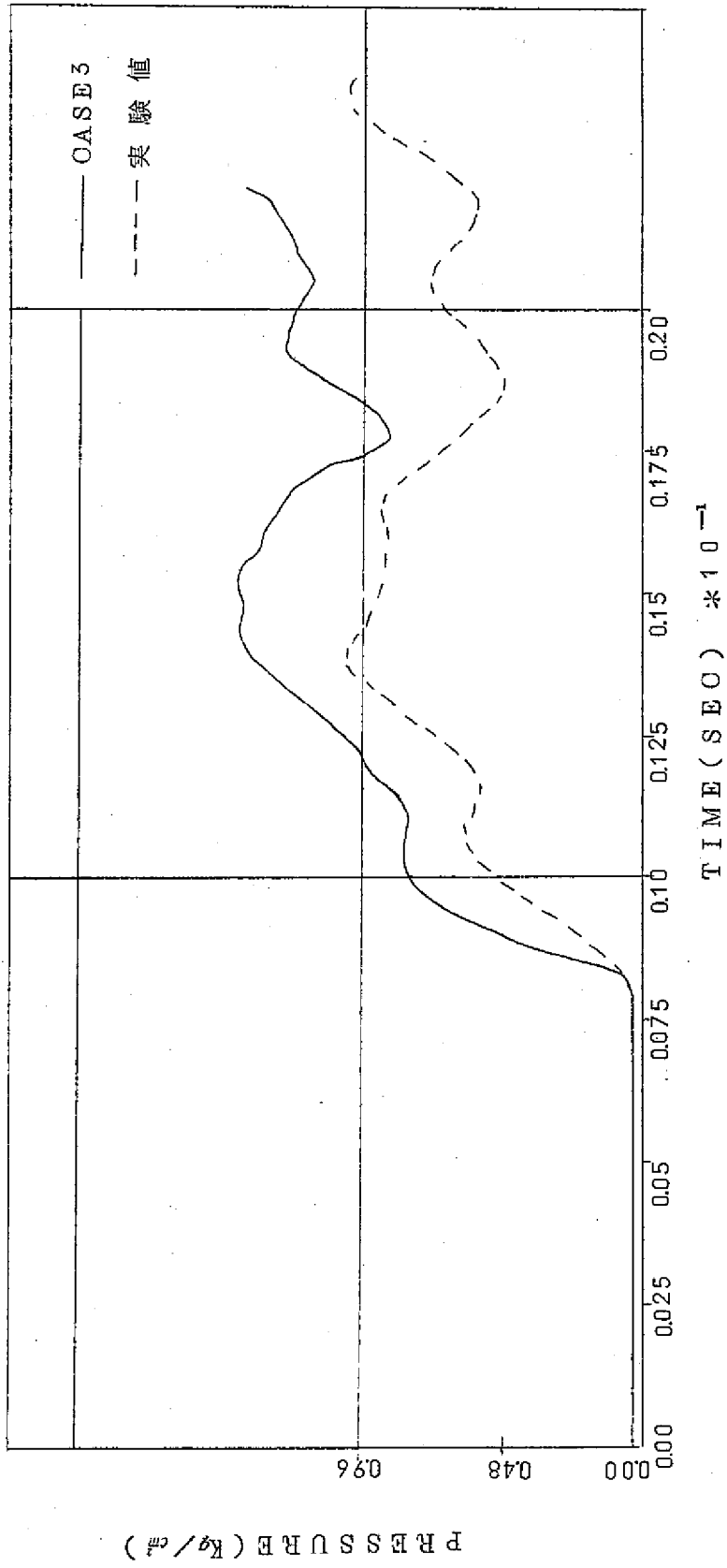


図 4.2.1.1 P-16 於る圧力波形の比較

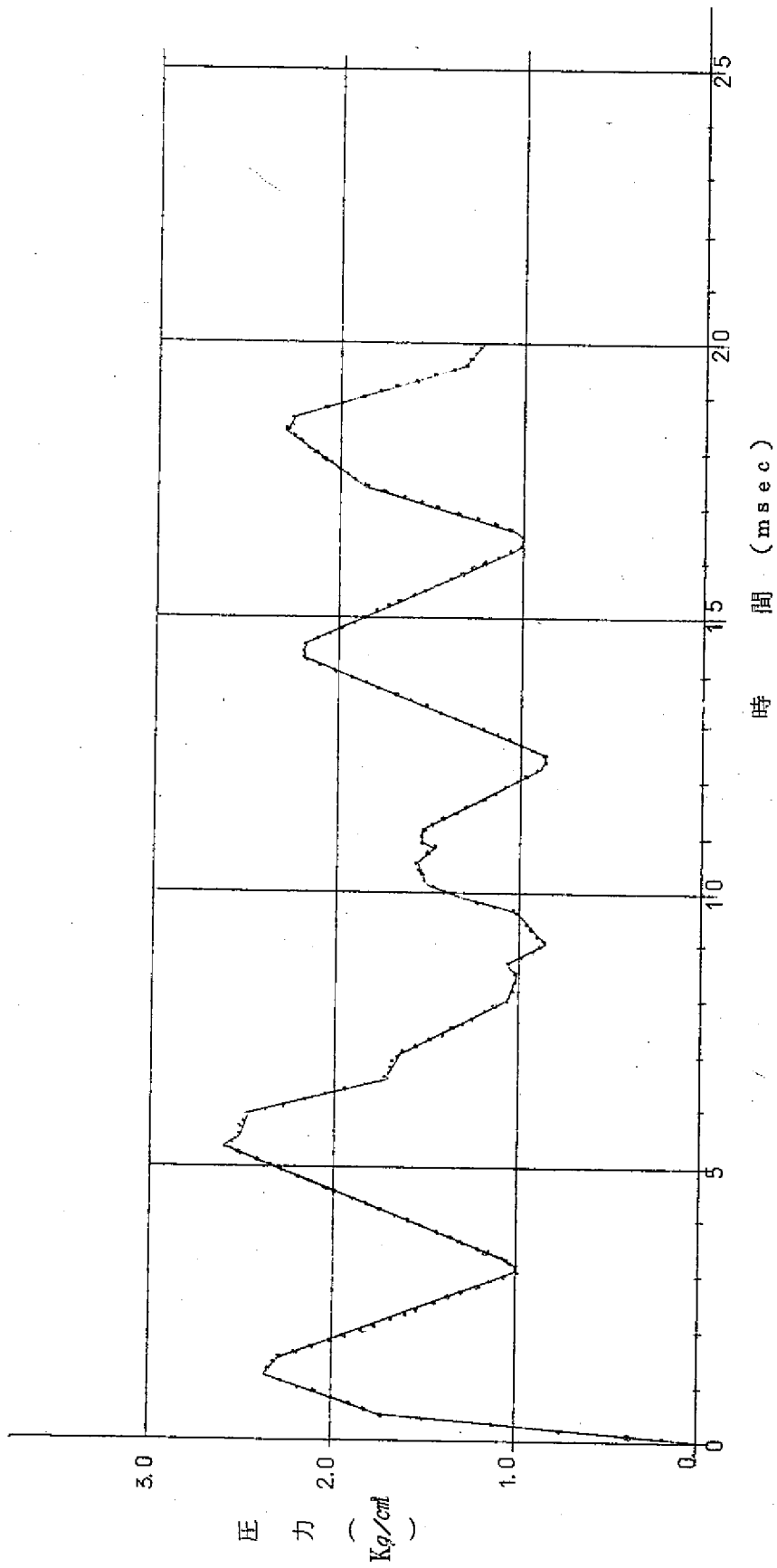


図 4.2.12 入力波形 (WAVE-01)

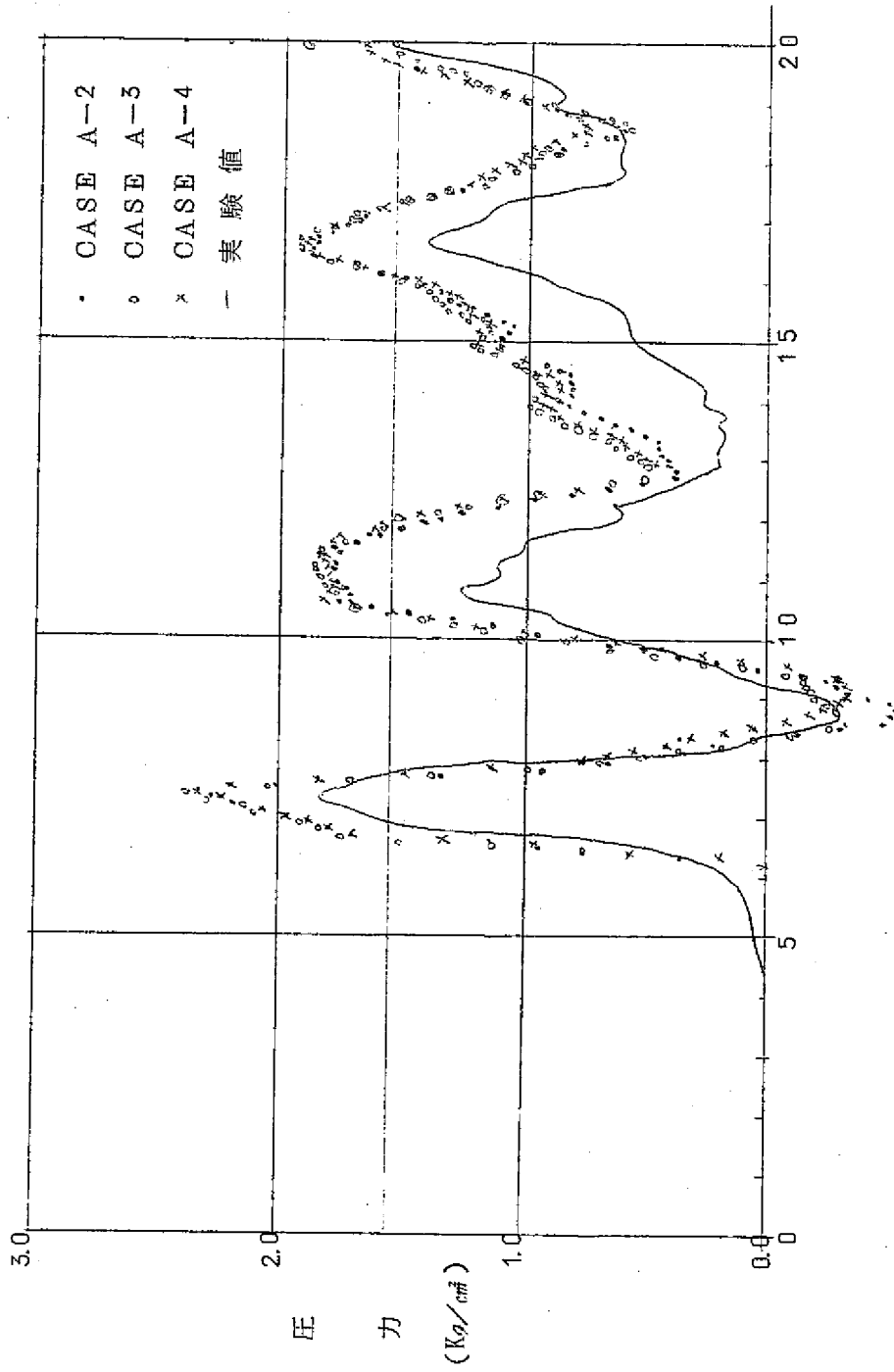


図 4.2.1.3 圧力測定位置(4)における実験値と計算値の比較

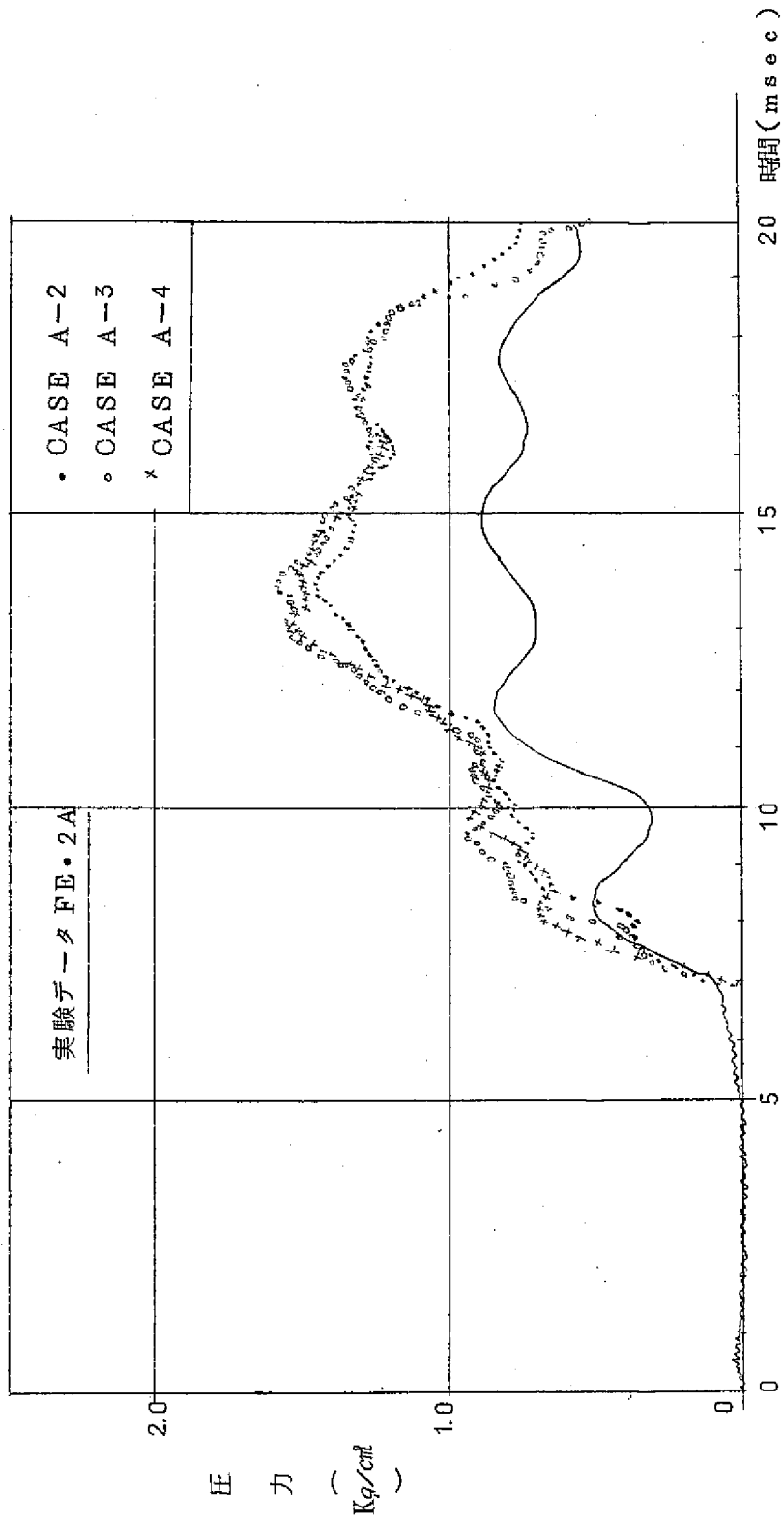


図 4.2.1.4 圧力測定位置 5 に於る実験値と計算値の比較

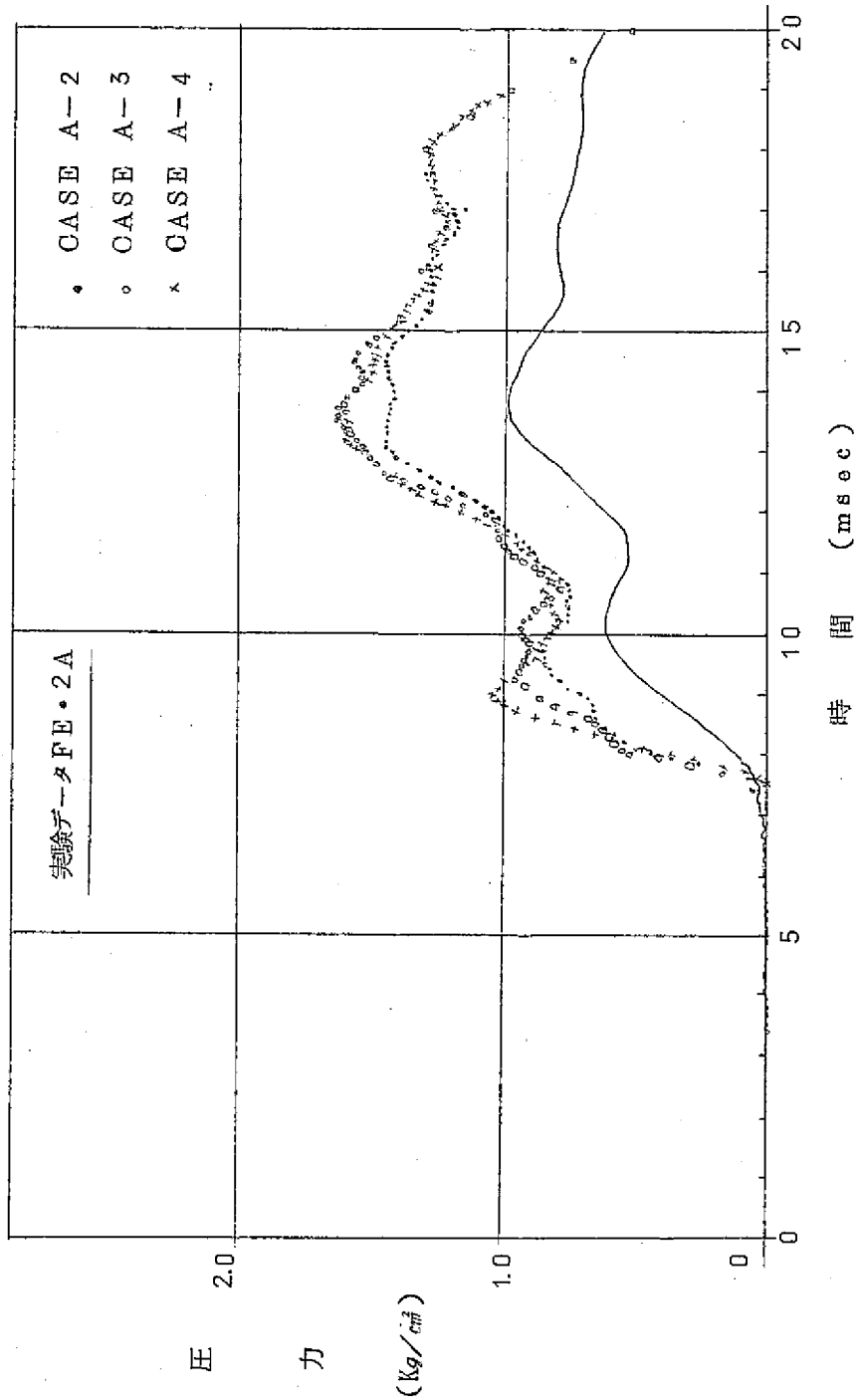


図 4.2.15 圧力測定位置 1 2 に於る実験値と計算値の比較

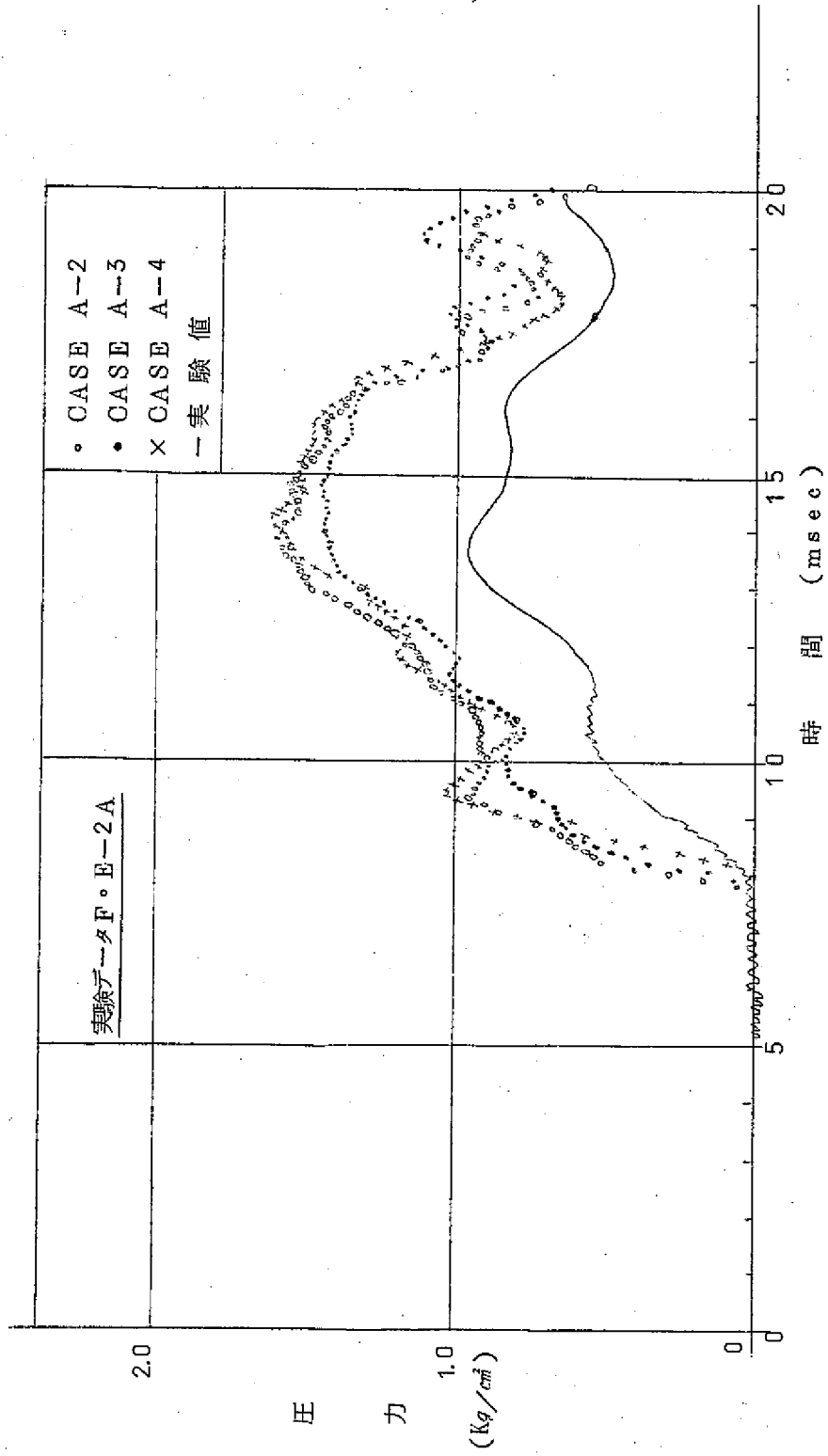


図 4.2.1.6 圧力測定位置 16 における実験値と計算値の比較



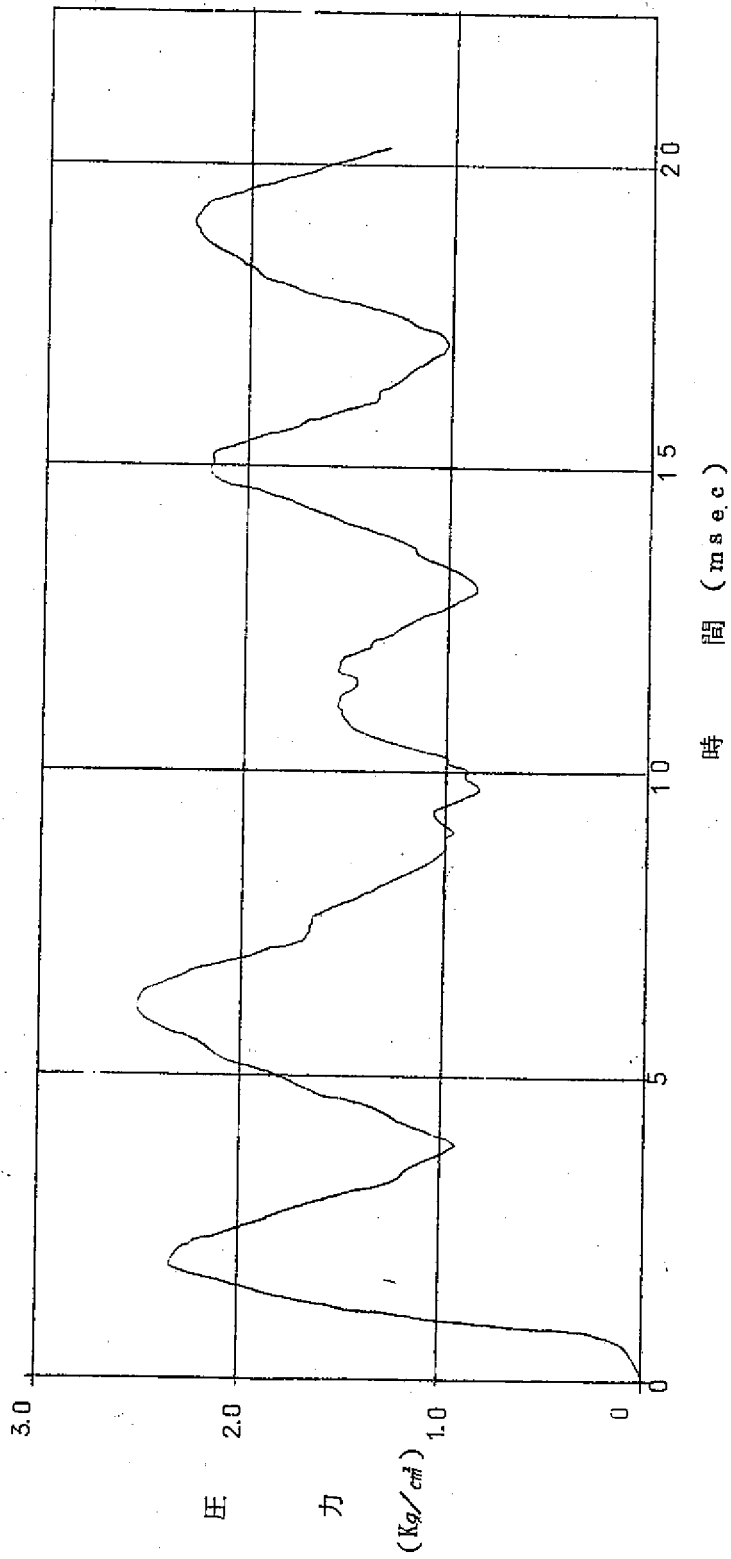


图 4.2.1 7 入力波形 (実験値)