

# 高速増殖炉蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応 による圧力波の伝播に関するシュレーション実験

(第2報；蒸気発生器の等価断面積および圧力波の蒸気発生器  
構造材におよぼす影響について)

昭和51年7月

動力炉・核燃料開発事業団  
財団法人 電力中央研究所

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)

# 高速増殖炉蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応による 圧力波の伝播に関するシミュレーション実験

(第二報；蒸気発生器の等価断面積および圧力波の蒸気発生器構造材  
におよぼす影響について)

秋元	徳三 *	堀	雅夫 ***
原崎	堯 *	佐藤	稔 ***
中尾	圭孜 *	田中	信夫 ***
高野	博 **	錦見	正和 ***
前野	陽治 **	広井	博 ***
		斉藤	毅 ****

実施期間 ; 1975年2月1日～1976年1月31日

目的 ; 大リークナトリウム-水反応によって発生する急峻な圧力波の特性および圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響について、十分な説明をおこなうため、液体ナトリウムに代る圧力伝播媒質を用いて模擬試験をおこない、高速増殖炉蒸気発生器の設計および安全性向上に資する。

## 要 旨

動力炉・核燃料開発事業団と電力中央研究所は高速増殖炉蒸気発生器の設計および安全性向上に資する事を目的に「高速増殖炉蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応による圧力波の伝播に関するシミュレーション試験」を行っている。

本研究は、第一次共同研究の成果を基盤に、第二次共同研究として、

(I) 高速増殖炉用蒸気発生器内、内部構造物の等価断面積の評価方法の確立

(II) 圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響

について試験説明を行ったものである。

---

\* 電力中央研究所 エネルギー・環境技術研究所

\*\* 電力中央研究所 土木技術研究所

\*\*\* 動力炉・核燃料開発事業団 高速炉安全性試験室

\*\*\*\* // 高速増殖炉開発本部

(I)項については、蒸気発生器内に内部構造物がある場合の蒸気発生器内の総合等価断面積を求める手法を開発し、試験は高速増殖炉原型炉“もんじゅ”蒸気発生器を対象を絞り、実機と同一ピッチ、同一寸法の伝熱管群部の等価断面積を求め、次に、伝熱管群部とセンターパイプ部を想定した並列管路の場合の等価断面積について検証を行った。

(II)項については、急峻な内圧変化に対する容器壁の動的歪について検討を行った。

Simulation Experiment on Pressure Wave Propagation During  
Large-Leak Sodium-Water Reaction in LMFBR Steam-Generator

(The Second Report; The Equivalent Cross-Sectional Area for a System with  
Inner Structures and Structural dynamic response of  
the SG Shell for Pressure Wave Form)

Tokuzo AKIMOTO\* Takashi HARASAKI\* Keishi NAKAO\*  
Hiroshi TAKANO\*\* Youji MAENO\*\* Masao HORI\*\*  
Minoru SATO\*\*\* Nobuo TANAKA\*\*\* Masakazu NISHIKIMI\*\*\*  
Hiroshi HIROI\*\*\* and Tsuyoshi SAITO\*\*\*\*

Abstract

PNC and CRIEPI have jointly performed a simulation experiment for pressure wave propagation in LMFBR steam generators during sodium/water reaction. The purpose of this work was to contribute to the safe design of the steam generators and from the results of this project the following has been established: (I) Analytical method has been devised to obtain the equivalent cross-sectional area for a system with inner structures, and (II) Structural dynamic response of the shell has been measured for given pressure wave form.

By the simulation experiments, the equivalent cross-sectional areas have been established for Monju SG in its various design alternatives and, moreover, verification was made of the equivalent cross-sectional area for straight pipe intervals. In item (II) above, dynamic strain of the vessel wall was measured for the given simulated pressure pulse.

---

\* Energy and Environment Lab., Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI).

\*\* Civil Engineering Lab., CRIEPI.

\*\*\* Fast Reactor Safety Section, Steam Generator Div., O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corp. (PNC)

\*\*\*\* Fast Breeder Reactor Development Project, PNC.

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 実験概要 .....	2
2.1 実験装置および計測系 .....	2
2.2 実験経過 .....	2
3. 実験結果の検討 .....	4
3.1 蒸気発生器の等価断面積について .....	4
3.1.1 蒸気発生器の等価断面積の解析手法 .....	4
3.1.2 伝熱管群部の実験結果 .....	7
3.1.3 並列管路の場合の実験結果 .....	9
3.2 圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響について .....	9
3.2.1 蒸気発生器外壁の歪測定 .....	9
3.2.2 静圧試験結果とその検討 .....	10
3.2.3 衝撃圧試験結果とその検討 .....	12
4. あとがき .....	14
Reference .....	14
Appendix	
1. 伝熱管部の幾何学的等価断面積計算式〔(3.1.16)式〕の運算 .....	52
2. 伝熱管群部の実験による等価断面積計算式〔(3.1.19)および(3.1.20)式〕 の誘導と数値計算.....	53
3. 並列管路部の等価断面積の計算.....	56

## 図 表

- 図 2.1 伝熱管群部等価断面積測定用試験装置概略図
- 図 2.2 並列管路部等価断面積測定用内部構造物概略図
- 写真 2.1 (a), (b) 伝熱管群部の等価断面積測定用内部構造物外観
- 写真 2.2 (a), (b) 並列管路実験用内部構造物外観
- 表 2.1 計測器仕様
- 表 2.2 実験条件一覧表
- 図 3.1.1 記号説明図
- 図 3.1.2 代表的測定例
- 表 3.1 爆発点の  $I_p$  の分布と実測平均値 (伝熱管群部の場合)
- 図 3.1.3 伝熱管群部における  $L/a_e$  と  $L$  の関係
- 図 3.1.4 伝熱管群が無い場合の軸方向の  $I_p$  の分布
- 図 3.1.5 伝熱管群が 10 段有る場合の軸方向の  $I_p$  の分布
- 図 3.1.6 伝熱管群が 20 段有る場合の軸方向の  $I_p$  の分布
- 図 3.1.7 爆発点の圧力変化の積分値と液柱の上昇速度の関係
- 表 3.2 爆発点の  $I_p$  の分布と実測平均値 (並列管路  $a_e$  測定の場合)
- 図 3.1.8 並列管路の場合の軸方向の  $I_p$  の分布
- 図 3.2.1 圧力および容器壁歪の測定位置, 番号
- 図 3.2.2 静圧による容器外壁の歪
- 図 3.2.3 衝撃圧による歪のピーク値 (円筒部軸方向歪  $\epsilon_x$ )
- 図 3.2.4 衝撃圧による歪のピーク値 (円筒部円周方向歪  $\epsilon_\theta$ )
- 図 3.2.5 衝撃圧による歪の最大値と静圧による歪 (楕円部) 経線方向歪  $\epsilon_\varphi$
- 図 3.2.6 衝撃圧による歪の最大値と静圧による歪 (楕円部) 周方向歪  $\epsilon_\theta$
- 図 3.2.7 ~ 図 3.2.16 衝撃圧と容器壁歪
- 表 3.2.1 衝撃圧の各測定位置における最大値
- 表 3.2.2 容器壁歪の各測定位置における最大値
- 図 3.2.17 容器壁最大歪と容器内最大圧力との関係

## 1. ま え が き

昭和48年度の動力炉・核燃料開発事業団と電力中央研究所との間で実施した第一次共同研究“高速増殖炉蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応による圧力波伝播に関するシミュレーション試験”において、急峻な圧力変化に対する導圧管の影響について調べ、この外にも種々の成果を得た。

本第二次共同研究は、これらの結果を基盤に

(I) FBR用蒸気発生器内、内部構造物の等価断面積の評価方法の確立、

(II) 圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響  
について試験解明を行ったものである。

(I)項については、蒸気発生器内に伝熱管等内部構造物がある場合の蒸気発生器内の総合等価断面積を求める手法を開発し、試験は高速増殖炉原型炉“もんじゅ”蒸気発生器を対象を絞り、実機と同一ピッチ、同一寸法の伝熱管群部の等価断面積を求め、次に、伝熱管群部とセンターパイプ部を想定した並列管路の場合の等価断面積について検証を行った。

(II)項については、破断した管に隣接した管の破壊の問題、および破断後の容器内流体の流動による伝熱管の変形の問題については当初の目的は達せられなかったが、衝撃的内圧変化に対する容器壁の動的歪について検討を行った。



## 2. 実験概要

### 2.1 実験装置および計測系

当実験に用いた圧力容器は動燃事業団における大リーク・ナトリウム-水反応試験 (SWA 1-1) で使用されていたものである。この圧力容器内に実験目的によって内部構造物を変えて挿入し、圧力伝播媒質である水中で火薬を爆発させる事によってスパイク圧を模擬発生させ実験を行った。

行った試験項目は下記の通りである。

- ①；動的歪解析のための容器壁の歪測定。
- ②；伝熱管群部の等価断面積の測定。
- ③；並列管路における等価断面積の検証。

伝熱管群部の等価断面積を求める試験の場合は“もんじゅ”蒸気発生器伝熱管と同一ピッチ、同一寸法の伝熱管群部を模擬した内部構造物を圧力容器内に入れて試験を行った。その試験装置概略図および外観を図 2.1 および写真 2.1 に示す。

この試験の場合、伝熱管群部と伝熱管出入口の付加質量分が加算されて測定されるため、伝熱管群部の厚みを 0 段、10 段、20 段と変えて、出入口の付加質量分を相殺させる様にして試験を行った。

③項については、図 2.2 に示した (その外観写真を写真 2.2 に示す。) 様に、内部構造物を入れられない場合、センターパイプ部を想定した内筒だけの場合、伝熱管群部を想定した外筒部だけの場合、および内外筒部を開にした並列管路の場合について火薬量を一定として試験を行い、各等価断面積を求め、並列管路の場合の理論式の検証を行った。

計測系は一部流速計を改良しただけで前年度と同じであり、その計測系仕様を表 2.1 に示した。また、歪測定の場合は内部構造物を入れずに行った。

火薬は前年度と同じカーリット系火薬で、取扱いは全て、日本発破エンジニアリング株式会社 に依託した。

### 2.2 実験経過

実施実験および実験条件一覧表を表 2.1 に示す。

試験は 7/3 ~ 7/23, 9/25 ~ 10/6, 12/17 ~ 12/25 の 3 回にわたり計 20 日間行った。

第一回目の試験においては、動的歪解析のための歪測定、火薬のラブチャタイプ爆発方式の予備試験および伝熱管群部の等価断面積の測定を行った。しかし、ラブチャタイプの場合、従来のプラスチックケース・タイプの火薬爆発方式に比べて、圧力波形の立ち上がりがシャープで、波形巾が狭いため、容器上部で反射波による負圧が生じ“容器上部における圧力変化の積分値が理論値より大きい”、および内部構造物下部の構造不備による漏洩があったらし

く“伝熱管群部を入れた方の爆発点の圧力変化の積分値が小さい”と云う結果が表われ、動的歪解析のための容器壁の歪測定だけに終わった。

そこで、第一回目の試験の問題解決のため、“爆発点近くにガスを入れ、圧力波形を変える。”および“下部構造を変えて漏洩を防ぐ。”の二方式を採用して第二回目の試験を開始した。ガスを爆発点近くに入れた試験は、ガス挿入部周辺および上部を金属で製作したため、ガスを封入した金属製筒内の水柱の慣性力が大きく、波形立上りを変えるまでに到らなかった。その後、これらの影響をなくすため、直接ビニール袋、タイヤチューブ等を爆発点近くに入れて試験を行ったが、タイヤチューブの破損等に遭遇し成功しなかった。以後（RUN 1112以降）従来のプラスチックタイプ方式を用いて、伝熱管群部の等価断面積の測定、並列管路における等価断面積の理論式の検証試験を行い、当初の目的をほぼ達成したので試験を終了した。

なお、プラスチックタイプの爆発方式の場合、再現性があまり良くないので試験回数を増やし精度を上げるようにした。

### 3. 実験結果の検討

#### 3.1 蒸気発生器の等価断面積について

##### 3.1.1 蒸気発生器の等価断面積の解析手法

###### (1) 基本的な考え方

一般に、通路断面積が変化する管路、あるいは圧力波の伝播速度の異なる管路を接続した管路においては、その変化の点において、圧力波の反射と通過が行なわれる。

それゆえ、その変化の点が多い管路における水撃作用の計算は不可能ではないが容易なことではない。

一般に水力発電所の水圧管は、その経済性のため、下部は比較的小口径にして厚肉の管路、上部は大口径にして薄肉の管路を使用している。それゆえ、下部の鉄管は断面積は小さく、圧力波の伝播速度が速く、上部の鉄管はその逆となる。このような管路において、前述の方法により厳密に計算することは容易ではない。しかし幸にして、上部と下部の異径度、および圧力波の伝播速度の変化の度合はそれほど大きくない。

このような場合には、後述の(3.1.7)式で表されるアリエビーの管路定数( $\rho$ )の単一管路(圧力波の伝播速度、および管路径が同一の管路)とにおいて計算を行なっているが、この方法による計算結果と実測結果とはよく合致している。

$$\rho = \frac{\alpha V_0}{2g H_0} \quad (\text{アリエビーの管路定数})$$

$$= n \theta \quad \dots\dots\dots (3.1.1)$$

$$n = \frac{T_p}{T} \quad \dots\dots\dots (3.1.2)$$

$$T_p = \frac{L V_0}{g H_0} \quad (\text{管路時定数})$$

$$= \frac{M_0 L}{g H_0} Q_0 \quad \dots\dots\dots (3.1.3)$$

$$M_0 L = \int_0^L \frac{dx}{a} \quad (\text{水圧管係数}) \quad \dots\dots\dots (3.1.4)$$

$$\theta = \frac{T}{\mu} \quad (\text{時間定数}) \quad \dots\dots\dots (3.1.5)$$

$$\mu = \frac{2L}{\alpha} \quad (\text{圧力波の往復時間})$$

$$= 2 \Sigma \frac{L_i}{\alpha_i} \quad \dots\dots\dots (3.1.6)$$

$$\begin{aligned} \therefore \rho &= \frac{T_p}{\mu} \\ &= \frac{Q_0}{2gH_0} \frac{\int_0^L \frac{dx}{a}}{\sum \frac{L_i}{\alpha_i}} \dots\dots\dots (3.17) \end{aligned}$$

ただし、

- $Q_0$  : 落差  $H_0$  の時の流量  $m^3/s$
- $g$  : 重力の加速度  $m/s^2$
- $a$  : 管路断面積  $m^2$
- $L_i$  : 圧力波の伝播速度  $\alpha_i$  の管路部分の長さ  $m$
- $T$  : 弁操作時間, 一般に現象が生じている時間  $sec$

一般に、水撃作用の相似性は  $\rho$  および  $\theta$  が等しい場合に成立する。

ここで、管路時定数 ( $T_p$ ) は慣性力を意味するものであり、圧力波の往復時間 ( $\mu$ ) は管路、および水の弾性を意味するものである。

それゆえ、前述の水力発電所などの大口徑管路に使用されている概念は (3.17) 式をみてわかるように、慣性力と水の弾性の比である  $\rho$  が等しい等価的な管路を考え、これによって水撃作用の相似性を保たせているものであるといえる。

このような概念に基づく相似性は、現象が生じている時間が、管径、あるいは圧力波の伝播速度が異なるそれぞれの管路要素の中を圧力波が往復するのに要する時間よりも充分大きい場合には成立するものであるといえるが、その定量的な適用限界は明らかにされていない。

蒸気発生器のような複雑な流路断面のものについては、圧力波の反射と通過を考えて計算しようとするれば、さらに問題は複雑となり、計算が不可能となるものとする。

そこで、上述のように適用限界は明らかではないが、ある程度の根拠に基づく概念を蒸気発生器のような複雑な流路断面に適用することは、最も実用的であり、かつ最も実際に近い結果が得られるものとする。

蒸気発生器の場合には圧力波の伝播速度は一定であるとおける。また、さきの報告書において使用している等価断面積を使用すれば (3.17) 式はつぎのようになる。

$$\rho = \frac{\alpha Q_0}{2gH_0 a_e} \dots\dots\dots (3.18)$$

$$\therefore a_e = \frac{L}{\int_0^L \frac{dx}{a}} = \left( \frac{L}{M_0 L} \right) \dots\dots\dots (3.19)$$

すなわち，前述の概念を用いた場合の水撃作用について相似な単一管路の断面積は (3.1.9)式で表わされる等価断面積であることになる。

(2) 等価断面積

(a) 平行管路の等価断面積

図3.1.1 (a)に示すような，等価断面積  $a_{e1}$ ，および  $a_{e2}$  の平行な管路を考え，その上部および下部において，それぞれ圧力が等しい場合について考える。

この場合の慣性力による圧力差は等しいため，次式が成立する。

$$\frac{L}{\rho H_0} \frac{Q_1}{a_{e1}} = \frac{L}{\rho H_0} \frac{Q_2}{a_{e2}} \quad \dots\dots\dots (3.1.10)$$

また，連続の式から次式が成立する。

$$Q_0 = Q_1 + Q_2 \quad \dots\dots\dots (3.1.11)$$

また，この場合の総合等価断面積を  $a_e$  で表わす。

$$\frac{L}{\rho H_0} \frac{Q_0}{a_e} = \frac{L}{\rho H_0} \frac{Q_2}{a_{e2}} \quad \dots\dots\dots (3.1.12)$$

(3.1.9)，(3.1.10)，および (3.1.11)式から次式が求められる。

$$a_e = a_{e2} + a_{e1}$$

あるいは一般に

$$a_e = \sum a_{ei} \quad \dots\dots\dots (3.1.13)$$

(b) 直列管路の等価断面積

図3.1.1 (b)に示すように等価断面積  $a_{e1}$ ， $a_{e2}$ ，…… の直列管路群の総合等価断面積はつぎのように求められる。

$$\begin{aligned} \frac{L}{a_e} &= \int_0^L \frac{dl_1 + l_2 + l_3 + \dots\dots}{a} \frac{dx}{a} \\ &= \frac{l_1}{a_{e1}} + \frac{l_2}{a_{e2}} + \dots\dots \\ \therefore \frac{L}{a_e} &= \sum \frac{l_i}{a_{ei}} \quad \dots\dots\dots (3.1.14) \end{aligned}$$

(c) 水管部の等価断面積

一般に水管は水平断面において円弧状で傾斜をもっており，垂直断面では，ピッチ間で傾斜をもっているが，この影響を省略して式を求める。

まず，図3.1.1 (c)における斜線の部分の式を導く。

図3.1.1 (d)を参照し、次式が求められる。

$$\int_0^R \frac{R}{a} dx = \frac{1}{S} \int_0^R \frac{dx}{(L_h + 2R) - 2\sqrt{R^2 - X^2}} \dots\dots\dots (3.1.15)$$

(3.1.15) 式を解けば次式が求められる。(App. 1 参照)

$$S \int_0^R \frac{R}{a} dx = -\frac{\pi}{4} + 2 \frac{L_h + 2R}{\sqrt{L_h} \sqrt{L_h + 4R}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_h + 4R}{L_h}} \dots\dots\dots (3.1.16)$$

ゆえに図3.1.1 (c)における斜線の部分の等価断面積  $a_{eR}$  はつぎのように求められる。

$$\begin{aligned} a_{eR} &= \frac{R}{\int_0^R \frac{R}{a} dx} \\ &= \frac{4SR}{-\pi + 8 \frac{L_h + 2R}{\sqrt{L_h} \sqrt{L_h + 4R}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_h + 4R}{L_h}}} \dots\dots\dots (3.1.17) \end{aligned}$$

ゆえに図3.1.1 (c)における四角形の部分の等価断面積 ( $a_e$ ) は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \frac{L_v + 2R}{a_e} &= 4 \frac{R}{a_{eR}} + \frac{L_v - 2R}{(L_h + 2R)S} \\ &= \frac{1}{S} \left[ \frac{L_v - 2R}{L_h + 2R} + \left\{ -\pi + 8 \frac{L_h + 2R}{\sqrt{L_h} \sqrt{L_h + 4R}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_h + 4R}{L_h}} \right\} \right] (3.1.18) \end{aligned}$$

(3.1.18) 式は図面上から求められる等価断面積であり、実際上は付加的な質量により、計算結果より小さくなるのではないかと考える。また、最上段、あるいは最下段においては、中段と異なった付加質量が加わるものとも考えられる。

(d) 計算方法

まず(c)項において述べた式により水管の環状部分の等価断面積を求める(図3.1.1 (e) ①)、つぎに、(b)項で述べた式から上記環状部をつなぎ合わせ円筒状の部分の等価断面積を求める(図3.1.1(e)②)。

上記、円筒状の部分、および中央円柱の部分の等価断面積を(a)項において述べた平行管路の計算式により、全体の等価断面積を求める。

3.1.2 伝熱管群部の等価断面積の実験結果

伝熱管群部の等価断面積、即ち、圧力波の進行方向に対して管路断面積が変化する直列管路の部分の等価断面積を求める実験は“もんじゅ”蒸気発生器伝熱管を対象に行った。

試験対象の伝熱管群部は図2.1に示す通り、“もんじゅ”蒸気発生器伝熱管部と同一寸

法の径 25.4φ, ピッチ 40%, 傾き角約 8° のものである。

この試験の場合, 伝熱管群部の付加質量と出入口の付加質量が加算されたものが求められるため, 伝熱管群部を入れない場合, および伝熱管群部の厚みを 10 段, 20 段と変えた場合について試験を行い, 出入口部の付加質量を相殺させる様にした。

伝熱管群部の付加質量に出入口の付加質量を含めた等価断面積の関係式は, 図 3.1.1(f) の様に記号を定めると (3.1.19) 式で, 伝熱管群部だけの等価断面積は (3.1.20) 式で表わされる。( (3.1.19) 式および (3.1.20) 式の誘導は Appendix 2 に示す。)

$$a_{e,1} = \frac{a}{1 + \frac{H_0}{H_x} \left\{ \left( \frac{I_{px}}{I_{p0}} \right)^2 - 1 \right\}} \dots\dots\dots (3.1.19)$$

$$a_{e,2} = \frac{a}{1 + \frac{H_0}{H_1 - H_2} \left\{ \left( \frac{I_{p1}}{I_{p0}} \right)^2 - \left( \frac{I_{p2}}{I_{p0}} \right)^2 \right\}} \dots\dots\dots (3.1.20)$$

- 但し,  $I_{p0}$  ; 伝熱管群を入れない場合の爆発点の圧力変化の積分値。
- $I_{px}$  ; 伝熱管群を x 段入れた場合の爆発点の圧力変化の積分値。
- $H_0$  ; 爆発点から水面までの長さ。
- $H_x$  ; ( $H_1$  or  $H_2$ ) 伝熱管群部の長さ。
- $a$  ; 容器の断面積

実 験 結 果

伝熱管群部の等価断面を求めめるために行った試験の代表的測定例を図 3.1.2 に, 結果を表 3.1 に示す。

表 3.1 には, 伝熱管群を入れない場合, 伝熱管群を 10 段, および 20 段入れた場合についての, 爆発点の圧力変化の積分値 ( $I_{p-ex}$ ) の分布状況, その平均値と公算誤差, および幾何学的等価断面積が載せてある。

これらの得られた実測値を (3.1.19) 式に代入し, 出入口の付加質量を含めた等価断面積を求めると,  $0.549a \pm 0.022a$  ( $a$  は容器断面積) となり, 伝熱管群部の幾何学的等価断面積 ( $0.644a$ ) の 85.2% (公算誤差 4.1%) となる。又, (3.1.20) 式に代入し, 伝熱管群部だけの等価断面積を求めると,  $0.579a \pm 0.065a$  (数値計算を Appendix 2 に示す。) となり, 幾何学的等価断面積の 89.9% (公算誤差 10.1%) となる。しかし, 伝熱管群部だけの等価断面積を求めると, 変数である測定誤差の数 (Appendix 2, (a.10) 式に於て  $r_{I_{p0}}$ ,  $r_{I_{p1}}$ ,  $r_{I_{p2}}$ ) が多いため伝熱管群部の等価断面積の公算誤差が増え, 伝熱管群部と出入口の付加質量を明確に分ける事が難しい。従って, 出入口の付加質量を含めた伝熱管群部の等価断面積は幾何学的形状から求めた等価断面積の 85% 前後と思われる。

図 3.1.3 は, 伝熱管群を 10 段および 20 段入れた場合の伝熱管群部の水圧管係数(伝熱管

群部の長さを等価断面積で除したものと伝熱管群部の長さの関係をプロットしたものである。図中の各線は前述の結果より求めた出入口の付加質量を含めた伝熱管群部、伝熱管群部だけ、および幾何学的形状から求めた等価断面積を示している。図中の縦軸との交点は出入口部の付加質量分、傾きは等価断面積の逆数を表わしている。

図 3.1.4 ~ 図 3.1.6 は伝熱管群を入れない場合、伝熱管群を 10 段および 20 段入れた場合の容器内軸方向の圧力変化の積分値  $I_p$  と液深の関係をプロットしたものである。各図中の実線は理論値を示したもので、各試験結果とも良く一致している。

### 3.1.3 並列管路の場合の実験結果

並列管路における総合等価断面積は前述 3.1.1 項 (3.1.13) 式で表わされ、各管路の等価断面積の和となる。

本項では、この並列管路部の理論式を検証するために行った実験結果について述べる。

実験は、内部構造物を入れない場合、並列管路の場合、内筒部だけの場合、および外筒部だけを開にした場合の 4 通りについて行った。その各試験条件における結果を表 3.2 に示した。

内部構造物を入れない場合と並列管路の場合、および内筒だけの場合と外側だけ開にした場合の爆発点の圧力変化の積分値  $I_p$  が近い値になる事が予想されるため、内部構造物を入れない場合の幾何学的断面積と“内部構造物を入れない場合”および“並列管路の場合”の爆発点の圧力変化の積分値の測定結果より並列管路の場合の等価断面積を、同様に、内筒部と外筒部の値より外筒部の等価断面積を求めると、各々、 $0.0700 m^2$ 、および  $0.0270 m^2$  となる。(数値計算を Appendix 3 に示す。)

従って、内筒部の幾何学的等価断面積 ( $0.0411 m^2$ ) に、実験で得られた外筒部の等価断面積 ( $0.0270 m^2$ ) を加えると  $0.0681 m^2$  となり、並列管路部の場合の結果 ( $0.0700 m^2$ ) より、約 2.8% 少いだけで良く合致し、3.1.1 項 (3.1.13) 式が成立する事が確められた。また、この場合の公算誤差は 7.3% で前述の値はこの公算誤差範囲内に入っている。

図 3.1.7 は、内部構造物を入れない場合の爆発点の圧力変化の積分値と水柱の上昇速度の結果をプロットしたものであり、良く理論値と一致している。

また、本実験シリーズの内、並列管路の場合についてだけ、軸方向の  $I_p$  と液深の関係を図 3.1.8 にプロットしたが、内、外筒部の測定値とも良く理論値に一致していた。

## 3.2 圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響について

### 3.2.1 蒸気発生器外壁の歪測定

以下に述べる結果は、1975 年 7 月に実施した実験番号 31~40 の 10 ケース (何れも下部爆発、内部構造物無しの場合) ならびに静圧試験に関するものである。

図 3.2.1 に蒸気発生器内壁における圧力と外壁の歪との測定位置および番号を示す。圧力



の測定点は4点 (P<sub>11</sub>~P<sub>14</sub>) , 歪の測定点は9点 (18成分) であり, 容器の円筒部では高さ方向にA1, H1~A5, H5の10成分 (Aは軸方向歪, Hは円周方向歪を表わす) を同一軸線上で, また楕円部ではA6, H6~A9, H9の8成分 (Aは経線方向歪, Hは周方向歪) を同一経線上で測定した。

使用した歪ゲージは共和電業製 KFC-5-D16-11 (直交2成分ゲージ) である。

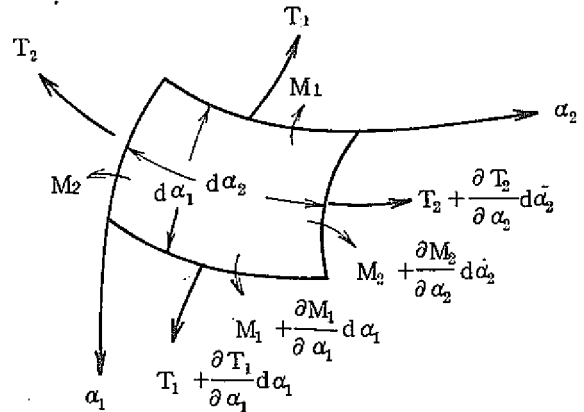
3.2.2 静圧試験結果とその検討

(a) 静内圧を受ける容器の薄肉シェル理論による理論解

本実験で用いた容器のように, 肉厚  $h$  と半径  $a$  の比  $h/a$  が  $1/10$  以下 (又は  $1/20$  以下) の場合には, 薄肉シェルとみなすことができ, Kirchhoff の仮定 (シェルの中立面に直角な面は変形後も中立面に直角で肉厚は変化しない, 中立面に平行な面に作用する直応力は無視できる) に基づく理論的取扱いが可能である。

軸対称荷重によって薄肉シェルの中立面に生じる断面力とモーメントをそれぞれ  $T_1, T_2; M_1, M_2$  (1, 2は中立面で直交する2つの主曲率方向座標軸  $\alpha_1, \alpha_2$  に対応する suffix) で表わせば, 中立面から  $z$  の距離にある面の歪  $\epsilon_1, \epsilon_2$ , 応力  $\sigma_1, \sigma_2$  はそれぞれ次式で与えられる。ただし  $E$ : ヤング率,  $\nu$ : ポアソン比,  $h$ : 肉厚

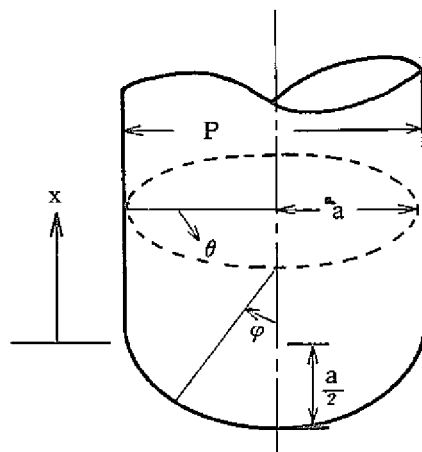
$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= \frac{1}{Eh} (T_1 - \nu T_2) + \frac{12z}{Eh^3} (M_1 - \nu M_2) \\ \epsilon_2 &= \frac{1}{Eh} (T_2 - \nu T_1) + \frac{12z}{Eh^3} (M_2 - \nu M_1) \\ \sigma_1 &= \frac{T_1}{h} + \frac{12z}{h^3} M_1 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_1 + \nu \epsilon_2) \\ \sigma_2 &= \frac{T_2}{h} + \frac{12z}{h^3} M_2 = \frac{E}{1-\nu^2} (\epsilon_2 + \nu \epsilon_1) \end{aligned}$$



本実験で用いた容器のように半径  $a$  の円筒と, 長軸半径  $a$ , 短軸半径  $\frac{a}{2}$  の楕円体とから成る容器が静的な等分布内圧  $p$  を受ける場合には, 右図に示すような座標を用いると,

(i) 円筒部

$$\begin{aligned} T_1 &= T_x = \frac{pa}{2} \\ T_2 &= T_\theta = pa (1 - e^{-\beta x} \cos \beta x) \\ M_1 &= M_x = \frac{p a h}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} e^{-\beta x} \sin \beta x \\ M_2 &= M_\theta = \nu M_x \end{aligned}$$



したがって容器外壁 ( $z = \frac{h}{2}$ ) における歪  $\varepsilon_x, \varepsilon_\theta$ , 応力  $\sigma_x, \sigma_y$  は

$$\varepsilon_x = \frac{pa}{Eh} \left\{ \frac{1}{2} - \nu (1 - e^{-\beta x} \cos \beta x) + \sqrt{3(1-\nu^2)} e^{-\beta x} \sin \beta x \right\}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{pa}{Eh} \left\{ 1 - \frac{\nu}{2} - e^{-\beta x} \cos \beta x \right\}$$

$$\sigma_x = \frac{pa}{2h} \left\{ 1 + \sqrt{\frac{12}{1-\nu^2}} e^{-\beta x} \sin \beta x \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{pa}{h} \left\{ 1 - e^{-\beta x} \cos \beta x + \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \nu e^{-\beta x} \sin \beta x \right\}$$

ただし 
$$\beta = 4 \sqrt{\frac{3(1-\nu^2)}{a^2 h^2}}$$

(ii) 楕円部

$$T_1 = T_\varphi = \frac{pa}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}}$$

$$T_2 = T_\theta = pa \left\{ \frac{1-3\sin^2\varphi}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}} + e^{-\lambda} \cos \lambda \right\}$$

$$M_1 = M_\varphi = - \frac{p a h}{\sqrt{12(1-\nu^2)}} e^{-\lambda} \sin \lambda$$

$$M_2 = M_\theta = \nu M_\varphi$$

ただし 
$$\lambda = 4 \sqrt{12(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{a}{h}} \int_\varphi^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{(1+3\sin^2\varphi)^{5/4}} = \sqrt{2} a \beta \int_\varphi^{\frac{\pi}{2}} \frac{d\varphi}{(1+3\sin^2\varphi)^{5/4}}$$

したがって容器の外壁 ( $z = \frac{h}{2}$ ) における歪  $\varepsilon_\varphi, \varepsilon_\theta$ , 応力  $\sigma_\varphi, \sigma_\theta$  は,

$$\varepsilon_\varphi = \frac{pa}{Eh} \left\{ \frac{1-\nu+3\nu\sin^2\varphi}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}} - \nu e^{-\lambda} \cos \lambda - \sqrt{3(1-\nu^2)} e^{-\lambda} \sin \lambda \right\}$$

$$\varepsilon_\theta = \frac{pa}{Eh} \left\{ \frac{1-\nu-3\sin^2\varphi}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}} + e^{-\lambda} \cos \lambda \right\}$$

$$\sigma_\varphi = \frac{pa}{h} \left\{ \frac{1}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}} - \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} e^{-\lambda} \sin \lambda \right\}$$

$$\sigma_\theta = \frac{pa}{h} \left\{ \frac{1-3\sin^2\varphi}{\sqrt{1+3\sin^2\varphi}} + e^{-\lambda} \cos \lambda - \sqrt{\frac{3}{1-\nu^2}} \nu e^{-\lambda} \sin \lambda \right\}$$

と表わされる。

(b) 静圧試験結果

静圧は約  $10 \text{ kg/cm}^2$  まで加え,  $5 \text{ kg/cm}^2$  から  $10 \text{ kg/cm}^2$  の間で, 4~5 回歪を測定した。図 3.2.2 にその結果を示す。どの位置における歪も圧力の増加に対して直線的に増大し, 圧力と良好な線型関係を有している。円筒部では円周方向歪が大きく, 軸方向歪の 3 倍程度

(A1, H1を除いて)であり、楕円部の歪は全体として小さい。

図 3.2.3～図 3.2.6 に、静圧  $p=10\text{kg/cm}^2$  のときの容器外壁の実験値 (×印) と理論値 (実線) とを示した。円筒部では実験値と理論値は比較的良好な一致を示している。円筒部の歪を与える理論式によれば、楕円部との接合部分から円筒の半径程度 (20cm) 離れると、形状の異なる 2 つの容器を接合したことによる曲げの影響が無視できるほど小さくなり、膜応力状態となる。したがって断面形状や肉厚が一定とみなされる理想的な円筒では、測点 1～4 における歪値 (A1～A4 ; H1～H4) はほぼ同一となる。

本実験で用いた容器には、測点 1 の断面付近の 2 箇所 (180° 間隔) に、容器を支持するための H 型鋼 (150×100) が鉄板を介して溶接されている。そのためこの断面は、軸対称の条件を満足せず、かつ円筒殻の軸方向に見た場合に断面が急変する場所になるので、局所的に膜応力状態が乱される。H1 の実験値が他の場所における値よりやや大きくなっているのはこのためと考えられる。したがって、容器の支持点断面に局所的な応力集中を生じさせないような支持方法が望ましい。

楕円部における歪の分布状態は理論値によるものとやや異なっているが、歪の大きさは理論値に比べかなり小さい。この原因としては、楕円部の底部外壁にはナトリウム保温用のヒーターをセットするための突起物が多く、理論式で仮定している肉厚一定の理想的な半楕円体の条件が満たされていないことが挙げられる。

容器の全体を通じて (ただし、支持点近傍を除く)、歪の最大値は、円筒部の  $\beta_x \approx 1.8$  ( $x \approx 7\text{cm}$ ) の点における円周方向歪 ( $\epsilon_\theta$ )  $\beta_x = 1.8 = 1.13 \frac{p a}{E h}$  であり、理論値と一致する。

以上から静内圧を受ける容器の歪は、全体として薄肉殻理論によって精度良く推定できるが、支持点付近や容器に付属物がついている箇所、あるいは孔が開いている近傍では局所的な応力集中を生じることもあるので、これらの部分ではより詳細な検討が必要である。

### 3.2.3 衝撃圧試験結果とその検討

#### (a) 衝撃圧試験結果

火薬の爆発による衝撃圧およびそれによる容器外壁の歪の波形を各実験ケース毎に図 3.2.7～3.2.16 に、また各ケース毎の圧力および歪の最大値を表 3.2.1, 表 3.2.2 に示す。衝撃圧は各ケースを通じて  $P_{11}$  が最大で、他の箇所における圧力の最大値の  $P_{11}$  の最大値に対する比は各ケースを通じてほぼ一定である。

図 3.2.3～図 3.2.6 に、 $P_{11}$  の最大値を  $10\text{kg/cm}^2$  としたときの衝撃圧による歪の最大値を図示した。(○, ●はそれぞれ 10 ケース中の最大値, 最小値である。)円筒部の軸方向歪は、ほぼ水深に逆比例しており (A4 の最大値のうち 1/3 は他のケースよりもはるかに大きく、波形も特異であるので除外すると)、静圧の場合と明らかに傾向が異なる。ま

た円周方向歪は円筒部下部の爆発点付近が大きくなっている。楕円部では、経線方向歪は周方向歪に比較してやや小さい。全体を通じて衝撃圧による歪が最大なのは、爆発点近傍における円周方向歪 H 4 であるが、H 4 は静圧による歪と比較するとほぼ同程度である。

図 3.2.17 に A 1, H 1 と P<sub>14</sub>, A 4, H 4 と P<sub>12</sub> との関係をプロットしたもの、および静圧試験の結果を示す。

いま、容器のある点における動的応答倍数を、その点に衝撃圧 P<sub>i</sub> が作用したときの歪 ε<sub>i</sub> と、その点に P<sub>i</sub> と大きさの等しい静圧 P<sub>s</sub> が作用したときの歪 ε<sub>s</sub> との比

$$\gamma = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_s}$$

によって定義すれば、図 3.2.17 から明らかなように、γ が最大なのは A 1 で γ<sub>A1</sub> ≃ 5.5 である。

以上から、衝撃圧による歪の最大値は、本実験の場合、爆発点付近の円筒部円周方向歪であるが、動的応答倍数の大きいのは、支持点付近の軸方向歪（これはまた円筒部の長手方向の中心に近いところでもある）である。

P. G. Bhuta は、両端単純支持の長さ ℓ の円筒殻が一定の速度 v で、円筒殻の軸方向に移動する軸対称外圧を受けるときの円筒中央断面の半径方向変位 w<sub>d</sub> と、移動外圧と同じ大きさの静的な外圧が円筒殻全長に一樣に作用したときの中央断面の半径方向変位 w<sub>s</sub> との比

$$\lambda = w_d / w_s$$

で動的荷重係数を定義し、β = ℓ<sup>2</sup>/rh, v\* = πv/ℓp<sub>1</sub>（ただし、r, h は円筒殻の半径、肉厚；p<sub>1</sub> は円筒殻の半径方向軸対称振動の一次固有角振動数）をパラメータとして λ を計算している。本実験で用いた容器の寸法及び v（試験結果から約 1.5 × 10<sup>5</sup> cm/sec）,

$$P_1 (P_1^2 = \frac{E}{\rho} \left[ \frac{h^2}{12(1-\nu^2)} \left( \frac{\pi}{\ell} \right)^4 + \frac{1}{r^2} \right]) \doteq 5.8 \times 10^8 \text{ 1/sec ; } \rho \text{ はシユルの密度}$$

を用いて、上記計算結果に当てはめて考えると、λ は大体 2 程度となる。すなわち変位を用いて定義した動的応答係数（Bhuta の動的荷重係数）は 2 程度という結果が得られる。しかし Bhuta が λ を導く際に用いた基本式は、円筒の半径方向の変位のみを考慮した式であり、境界条件、荷重条件とも本試験のものと異なる。

本試験例のように非常に速い振動（あるいは波動伝播）を考慮するときには、薄肉シユルの場合でも剪断変形や回転慣性を考慮する必要があると考えられ、更に爆発箇所が任意の場合を想定すると非軸対称変形問題ともなる。液体と弾性体の連成振動問題は近年脚光を浴びつつある問題であるが、今後更に詳細な研究を行なわなければならない分野の問題である。

蒸気発生器の安全性を実証するためには、上述のようにより詳細な理論的、実験的検討が必要と考えられる。

## 4. あ と が き

今回の第二次共同研究の試験ならびにその検討によって得られた結果は下記の通りである。

### (I) FBR用蒸気発生器内、内部構造物の有る場合の等価断面積の評価方法について

蒸気発生器内、内部構造物を伝熱管群部とセンタパイプ部に分けて考え、これら並列管路部の場合、および圧力波の進行方向に対し流路断面積が変化する伝熱管群部の評価方法を確立し、シミュレーション試験によって伝熱管群部の等価断面積の測定および並列管路の場合の理論式の検証を行い、次の結果を得た。

- ① 伝熱管群部の等価断面積については、原型炉“もんじゅ”蒸気発生器伝熱管群部と同一ピッチ、同一寸法のものについて求めた。その値は出入口の付加質量分を含めて、幾何学的等価断面積の85.2+4.1%であった。
- ② 並列管路部の等価断面積は各々の管路の等価断面積の和となる。その検証試験を行い、並列管路部の等価断面積の方が約2.8%多いだけで良く一致した。

### (II) 圧力波の蒸気発生器構造材におよぼす影響について

蒸気発生器に、静水圧と火薬の水中爆発による衝撃圧を加えて、内部構造物が無い場合につき次の結果を得た。

- ① 静水圧による容器の歪は、Kirchhoffの仮定に基づく薄肉殻理論による計算値とほぼ一致する。ただし容器支持点近辺や、付属物が取り付けられている個所では、別途検討を要する。
- ② 衝撃圧による容器の歪が最大となるのは、本試験の場合、爆発点付近の円周方向歪であるが、その値は衝撃圧のピーク値と同じ大きさの静水圧による歪値の約1.2倍程度であった。容器の応答性状は、爆発個所や容器の寸法などにより異なるので、蒸気発生器の安全性の実証のためには、今後さらに詳細な実験的、理論的検討を行なう必要がある。

## Reference

- (1) 秋元“FBR用SG内、大リーク時の圧力上昇についての解析的手法による二、三の検討”  
(電研)技一研報告/673082, (昭.49.3)
- (2) 秋元, 堀ほか“高速増殖炉蒸気発生器内におけるナトリウム-水反応による圧力波の伝播に関するシミュレーション実験”  
(電研・動燃共同報告) CRIEPI-74001, J256-74-04 (昭.49.5)
- (3) V.V. Novozhilov “The Theory of Thin Shells”  
P.Noordhoff Ltd. 1959.
- (4) P.G. Bhuta “Transient Response of a Thin Elastic Cylindrical Shell to a Moving Shock Wave”  
Journ. of Acous. Soc. Am. Vol. 35, Jan. 1963

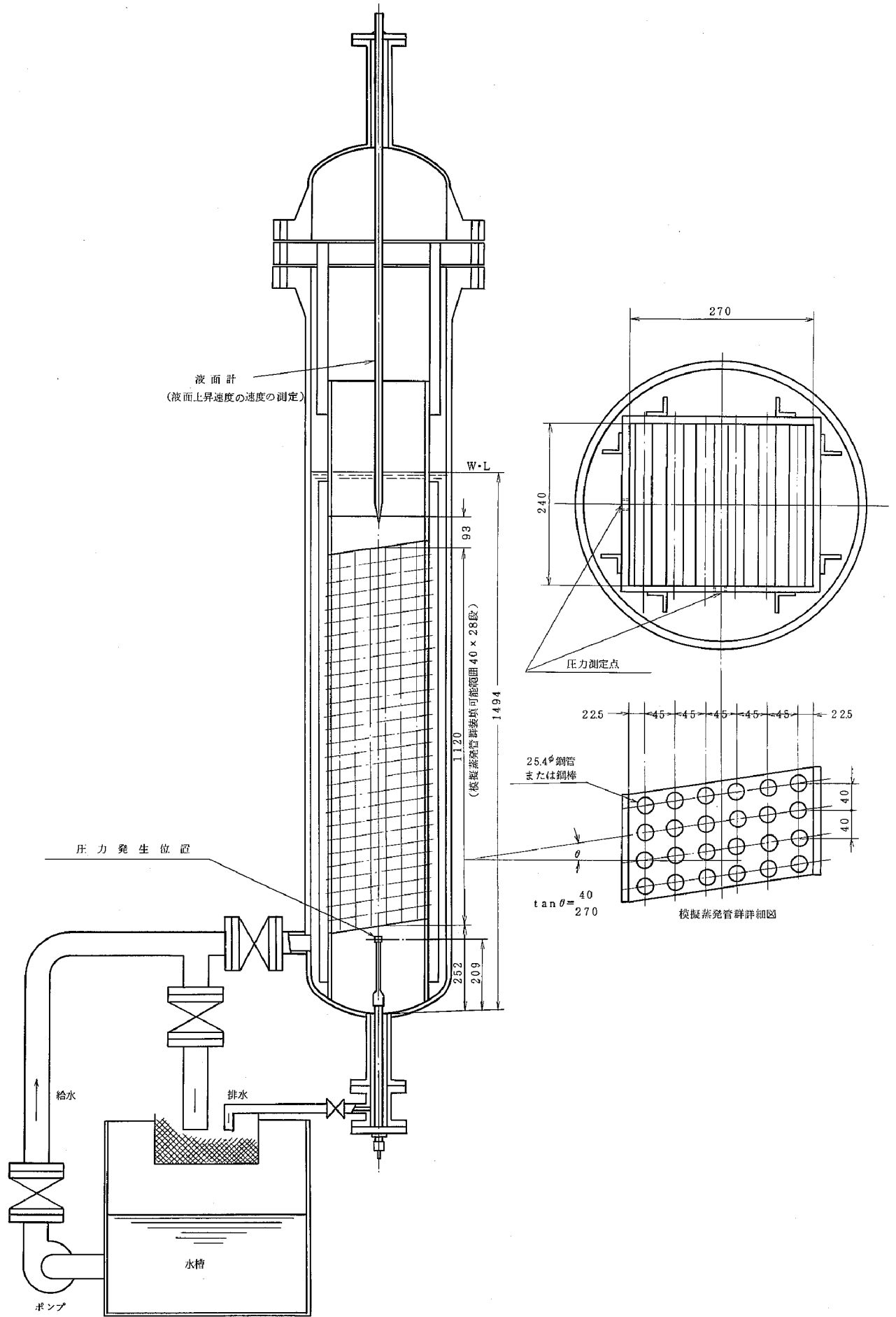


図 2.1 伝熱管群部等価断面積測定用試験装置概略図

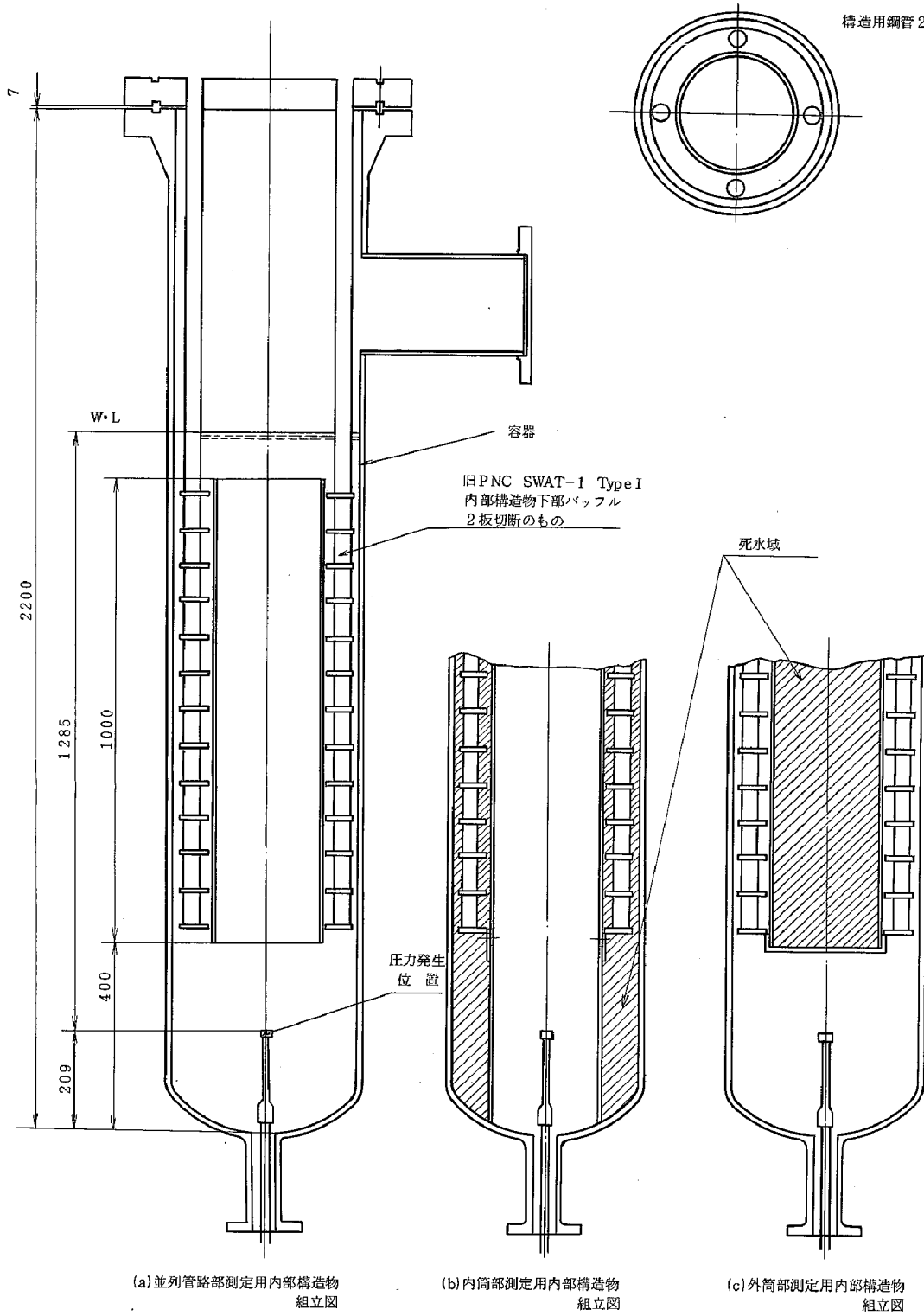
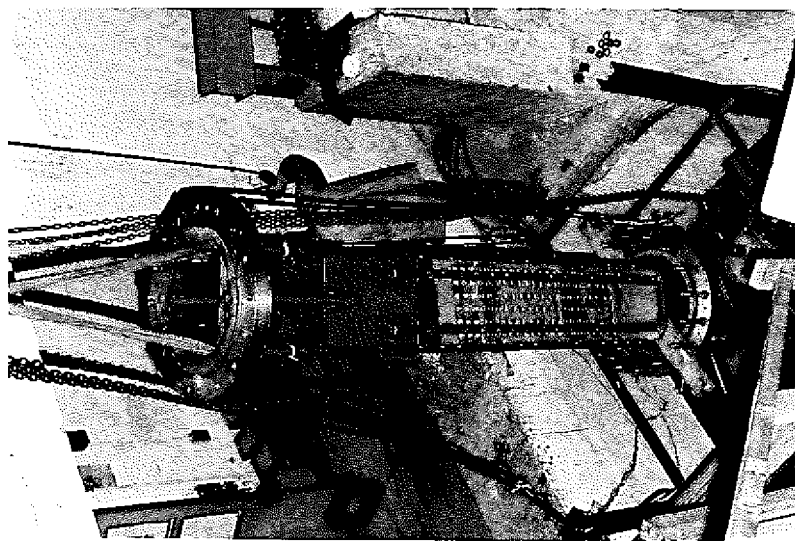
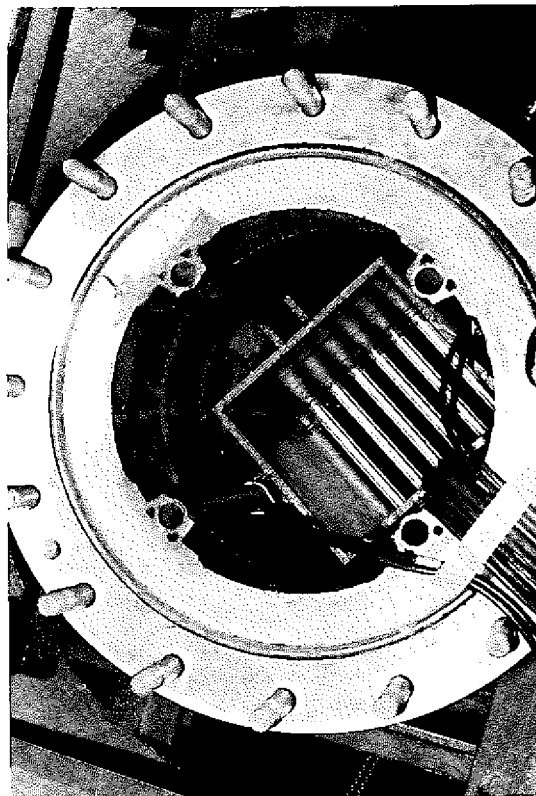


図 2.2 並列管路部等価断面積測定用内部構造物概略図



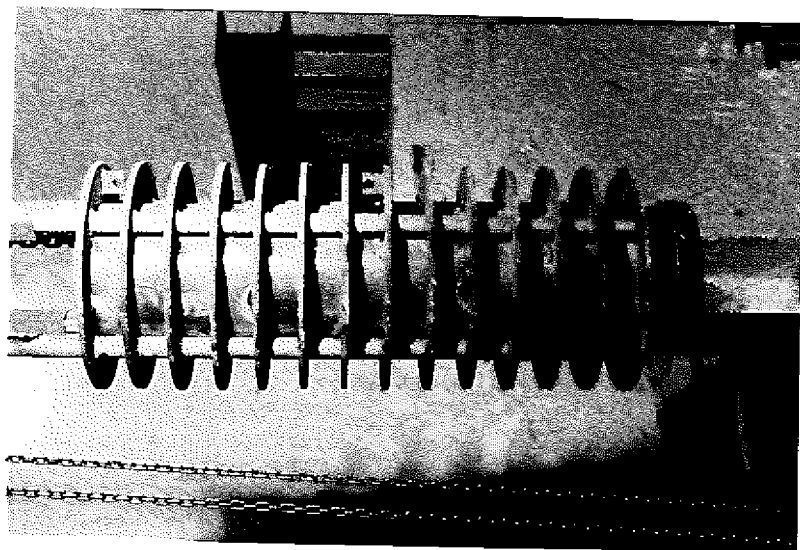
(a) 内部構造物を横から見た所



(b) 伝熱管群部を圧力容器上部から見た所

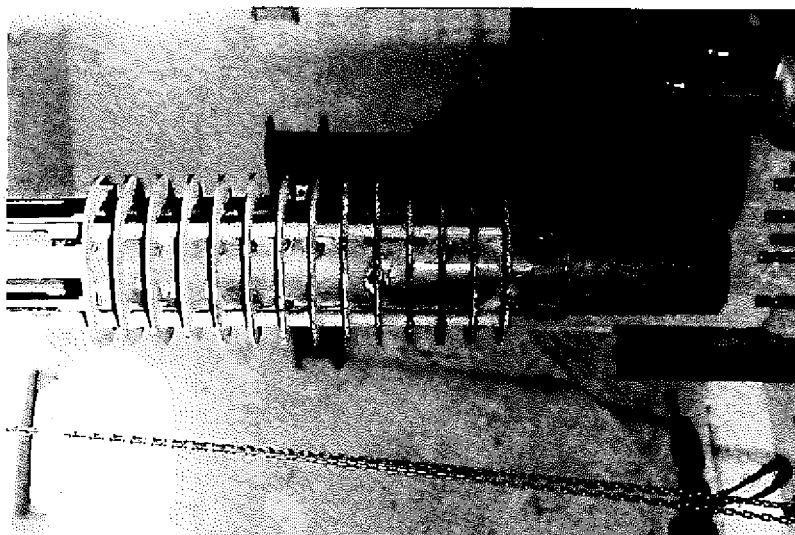
写真 2 1 伝熱管群部の等価断面積測定用内部構造物外観





(a) 外筒部実験用内部構造物

( 並列管路の実験の時には下部盲蓋をはずして行う。)



(b) 内筒部実験用内部構造物

写真 2.2 並列管路実験用内部構造物外観

表 2.1 計測器仕様

## ○増巾器

型式 CUA-101A (6ch × 2台) 共和電業製  
 応答周波数 0~5 KHz

## ○データレコーダー

型式 R-570 (14ch × 1台) ティアック製  
 応答周波数 0~20 KHz  
 テープ送り速度  $1\frac{7}{8}$ ,  $3\frac{3}{4}$ ,  $7\frac{1}{2}$ , 15, 30, 60 in/sec (6段変速)

## ○ローパスフィルター

型式 LF-6B (6ch × 1台) 共和電業製  
 遮断周波数 5~160 Hz (6段)  
 遮断特性  $-18\text{dB} \pm 1\text{dB/oct}$

## ○電磁オシログラフ

型式 2915 横河電機製  
 記録紙速度 5cm/min ~ 200cm/sec (12段変速)

## ○圧力センサ

PG-200KB (5台)	} 容器壁	} 共和電業製
PG-100KB (5台)		
PGM-100KB (5台)	} 容器内部	
PGM-50KB (5台)		

○歪ゲージ KFC-5-D16-11 共和電業製

表 2.2 実験条件一覧表(その1)

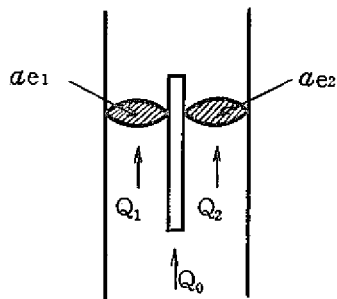
実験 番号	実験 年月	実験条件		目的, 備考	実験 番号	実験 年月	実験条件		目的, 備考
		火薬 種別 方式	内部構造物				火薬 種別 方式	内部構造物	
1	7/3	KA5g, P	なし	歪測定, 従来と点火具が異 っていたため波高 値高く, 巾が狭い ためデータ不採用	46	7/15	KA1g, R	伝熱管0段	伝熱管群部の ae 測定
2	"	"	"		47	"	"	"	"
3	"	"	"		48	"	"	"	"
4	"	"	"		49	"	"	"	"
5	"	"	"		50	"	"	"	"
6	"	"	"		51	"	"	"	"
7	"	"	"		52	"	"	"	"
8	7/4	"	"	P;プラスチックケース 方式 P;ラプチャタイプ方式	53	"	"	"	"
9	"	"	"		54	"	"	"	"
10	"	"	"		55	"	"	"	"
11	"	"	"	56	7/17	"	伝熱管12段	"	"
12	"	KA5g, R	"	ラプチャタイプ予 備試験	57	"	"	"	"
13	"	"	"		58	"	"	"	"
14	7/7	KA2g, R	"		59	"	"	"	"
15	"	"	"	60	"	"	"	"	
16	"	"	"	61	"	"	"	"	
17	"	"	"	62	"	"	"	"	
18	"	KA5g, R	"	水位変化	63	"	"	"	"
19	"	KA5g, P	"		64	"	"	"	"
20	"	KA1g, R	"		65	"	"	"	"
21	7/8	"	"		66	7/18	"	"	"
22	"	"	"	67	"	"	"	"	
23	"	"	"	68	"	"	"	"	
24	"	KA5g, P	"	歪測定	69	"	"	"	"
25	"	"	"		70	"	"	"	"
26	"	"	"		71	"	"	"	"
27	"	KA4g, P	"		72	"	"	"	"
28	"	"	"		73	"	"	"	"
29	"	"	"		74	"	"	"	"
30	"	"	"		75	"	"	"	"
31	7/9	KA1g, R	"	火薬の再現性試験	76	7/22	"	伝熱管24段	"
32	"	"	"		77	"	"	"	"
33	"	"	"		78	"	"	"	"
34	"	"	"		79	"	"	"	"
35	"	"	"		80	"	"	"	"
36	"	"	"		81	"	"	"	"
37	"	"	"		82	"	"	"	"
38	"	"	"		83	"	"	"	"
39	"	"	"		84	"	"	"	"
40	"	"	"		85	"	"	"	"
41	7/11	KA1g, R	伝熱管0段	伝熱管群部の ae の 測定	86	9/29	"	"	"
42	"	"	"		87	"	"	"	爆発点の
43	"	KA2g, P	"		88	"	"	"	Air 量
44	"	KA1g, R	"		89	"	"	"	変化
45	"	"	"		90	"	"	"	"

表 2.2 実験条件一覧表 (その2)

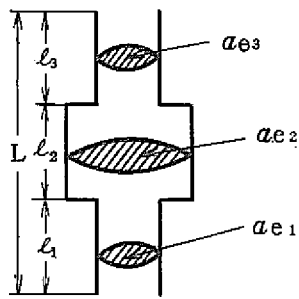
実験 番号	実験 年月	実験条件		目的, 備考	実験 番号	実験 年月	実験条件		目的, 備考
		火薬 種 方式 類 数 式	内部構造物				火薬 種 方式 類 数 式	内部構造物	
91	9/25	KA1 9, R	伝熱管24段	伝熱管群部の $a_c$ の測定	136	10/6	KA3 9, P	伝熱管20段	伝熱管群部の $a_c$ の測定
92	9/26	"	"		137	"	"	"	
93	"	"	"		138	"	"	"	
94	"	"	"		139	"	"	"	
95	"	"	"		140	"	"	"	
96	"	"	"		141	"	"	"	
97	"	"	"		142	"	"	"	
98	"	"	"		143	12/17	"	伝熱管10段	
99	"	"	"		144	"	"	"	
100	"	"	"		145	"	"	"	
101	10/1	"	伝熱管0段	146	"	"	"		
102	"	"	"	147	"	"	"		
103	"	"	"	148	"	"	"		
104	"	"	"	149	"	"	"		
105	"	"	"	150	"	"	"		
106	"	"	"	151	"	"	"		
107	"	"	"	152	"	"	"		
108	"	"	"	153	"	"	"		
109	"	"	"	154	"	"	"		
110	"	"	"	155	"	"	"		
111	"	"	"	156	"	"	"		
112	10/2	KA3 9, P	"	157	"	"	"		
113	"	"	"	158	12/19	"	なし	並列管路の総合等価 断面積の測定	
114	"	"	"	159	"	"	"		
115	"	"	"	160	"	"	"		
116	"	"	"	161	"	"	"		
117	"	"	"	162	"	"	"		
118	"	"	"	163	"	"	"		
119	"	"	"	164	"	"	"		
120	"	"	"	165	"	"	"		
121	"	"	"	166	"	"	"		
122	"	"	"	167	"	"	"		
123	"	"	"	168	"	"	"		
124	"	"	"	169	"	"	"		
125	"	"	"	170	"	"	"		
126	"	"	"	171	"	"	"		
127	10/6	"	伝熱管20段	172	"	"	"		
128	"	"	"	173	"	"	"		
129	"	"	"	174	"	"	"		
130	"	"	"	175	12/23	"	並列管路		
131	"	"	"	176	"	"	"		
132	"	"	"	177	"	"	"		
133	"	"	"	178	"	"	"		
134	"	"	"	179	"	"	"		
135	"	"	"	180	"	"	"		

表 2.2 実験条件一覧表(その3)

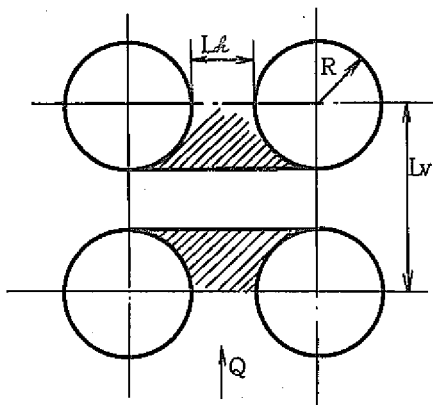
実験 番号	実験 年月	実験条件		目的, 備考
		火薬 種類	方式 内部構造物	
181	12/23	KA39, P	並列管路	並列管路の総合等価 断面積の測定
182	"	"	"	
183	"	"	"	
184	"	"	"	
185	"	"	"	
186	"	"	"	
187	"	"	"	
188	"	"	"	
189	"	"	"	
190	"	"	"	
191	"	"	"	
192	12/24	"	内筒	
193	"	"	"	
194	"	"	"	
195	"	"	"	
196	"	"	"	
197	"	"	"	
198	"	"	"	
199	"	"	"	
200	"	"	"	
201	"	"	"	
202	"	"	"	
203	"	"	"	
204	"	"	"	
205	"	"	"	
206	"	"	"	
207	"	"	"	
208	"	"	"	
209	12/25	"	外筒	
210	"	"	"	
211	"	"	"	
212	"	"	"	
213	"	"	"	
214	"	"	"	
215	"	"	"	
216	"	"	"	
217	"	"	"	
218	"	"	"	
219	"	"	"	
220	"	"	"	
221	"	"	"	
222	"	"	"	
223	"	"	"	
224	"	"	"	
225	"	"	"	



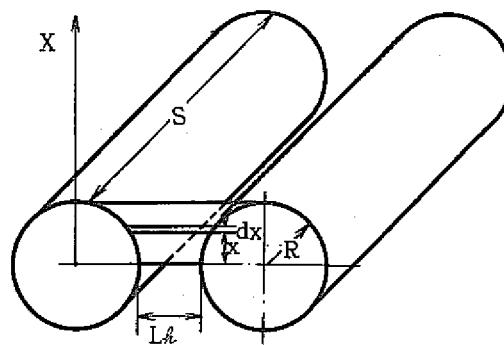
(a) 平行管路の等価断面積



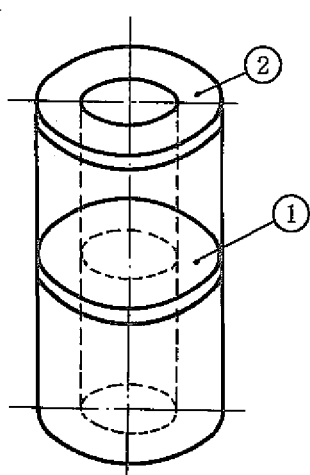
(b) 直列管路の等価断面積



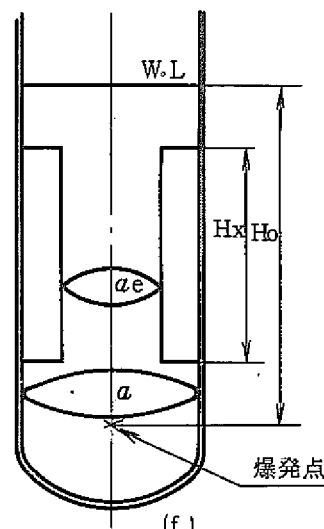
(c) 水管部の等価断面積



(d) 水管部の等価断面積



(e)



(f)

図 3.1.1 記号説明図

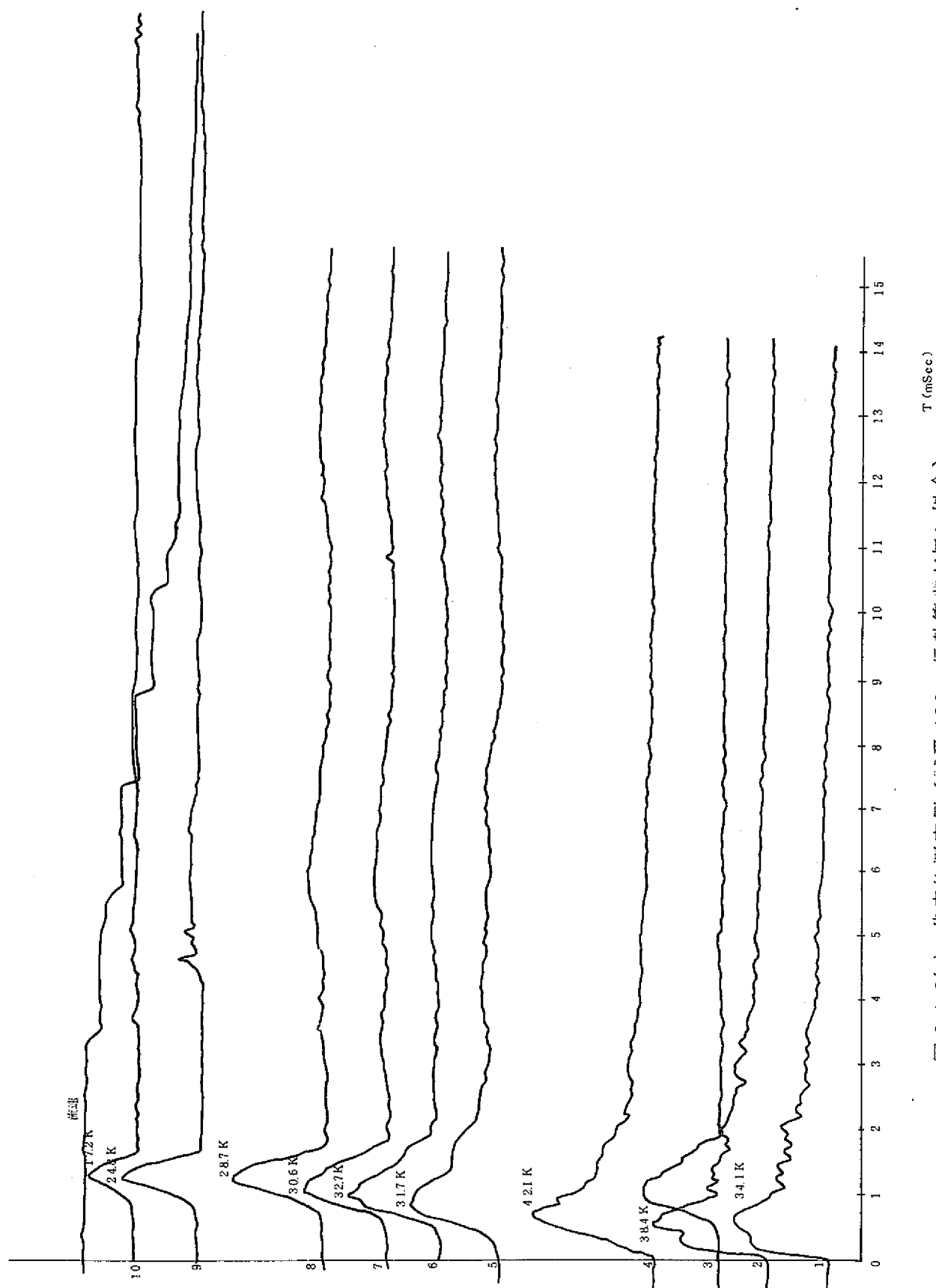


図 3.1.2(a) 代表的測定例 (試番 126, 伝熱管群が無い場合)

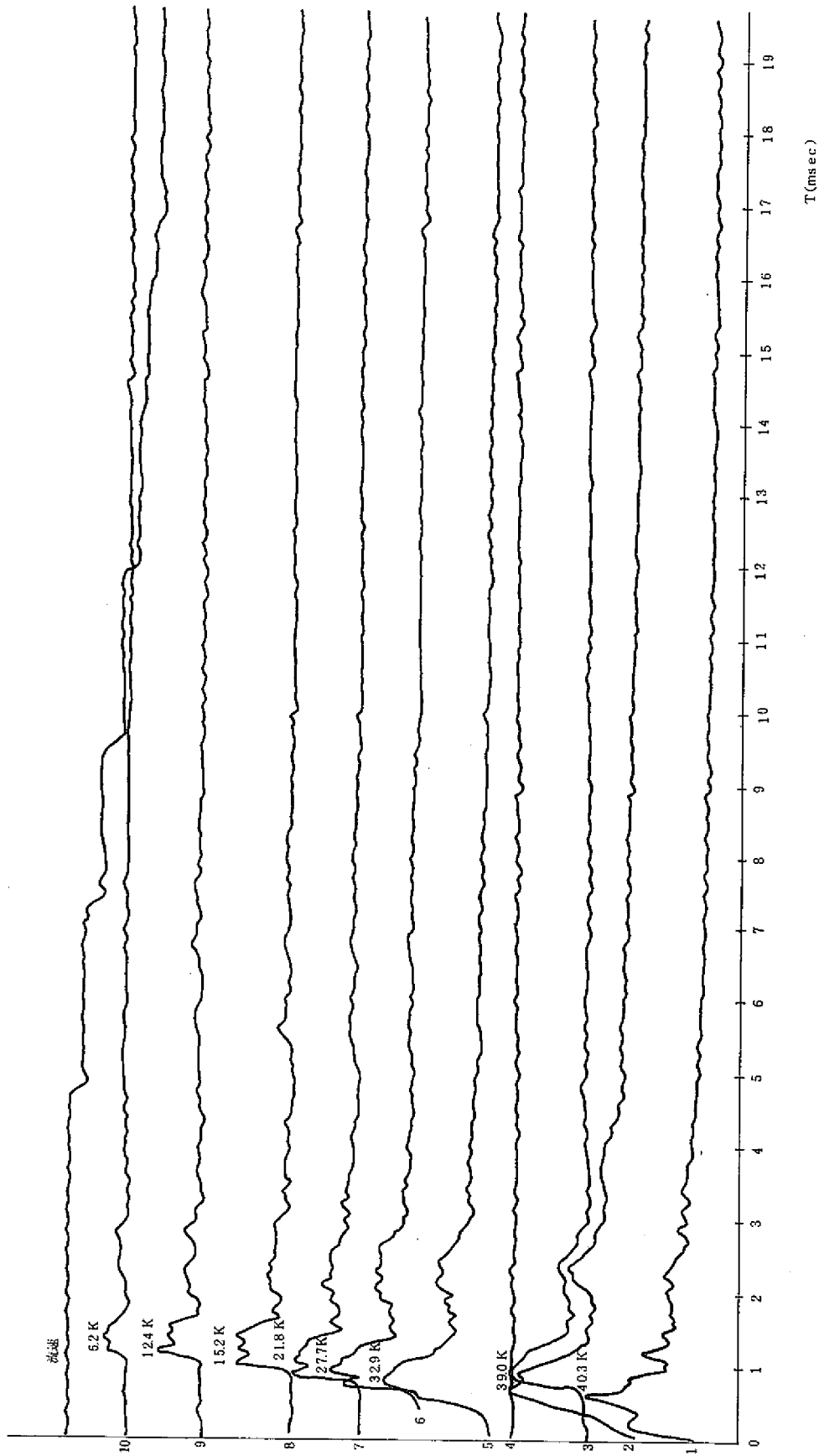


図 3.1.2(b) 代表的測定例 (試番 127, 伝熱管群が 20 段の場合)



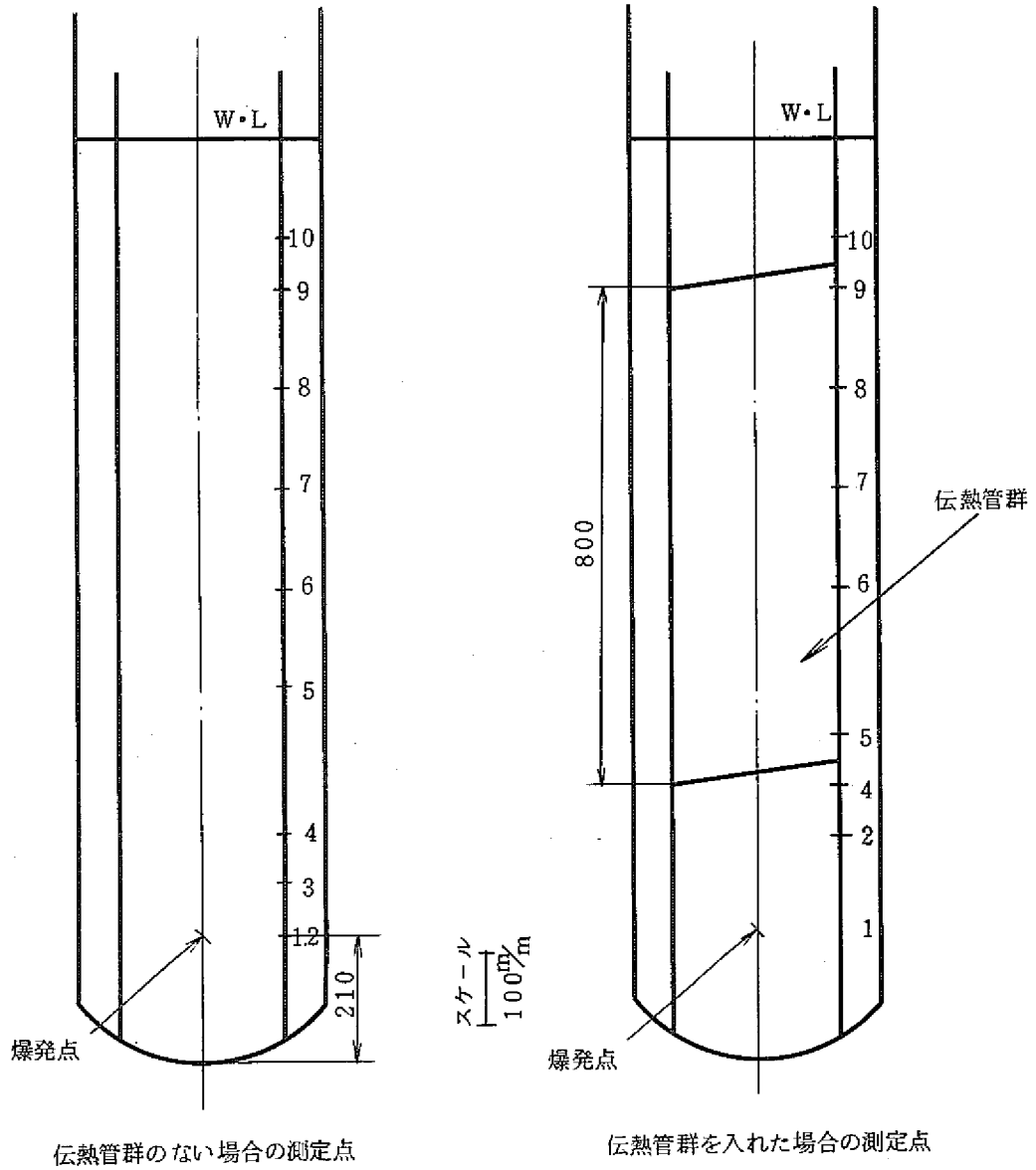


図 3. 1. 2(C) 代表的測定例の測定点位置

表 3.1 爆発点の  $I_p$  の分布と実測平均値(伝熱管群部の場合)

試験条件 項目	伝熱管群なし Test No.112~126 '50 10%	伝熱管群 10 段 Test No.143~157 '50 12/17	伝熱管群 20 段 Test No.127~142 '50 19%
爆発点の $I_p$ の分布			
爆発点の $I_p$ の 実測平均値	818 ± 12 kg·sec/m <sup>2</sup> (15点)	924 ± 17 kg·sec/m <sup>2</sup> (15点)	1003 ± 8 kg·sec/m <sup>2</sup> (15点)
幾何学的形状から 求めた等価面積	a = 0.0648 m <sup>2</sup>	伝熱管群部 0.0417 m <sup>2</sup> (0.644a)	

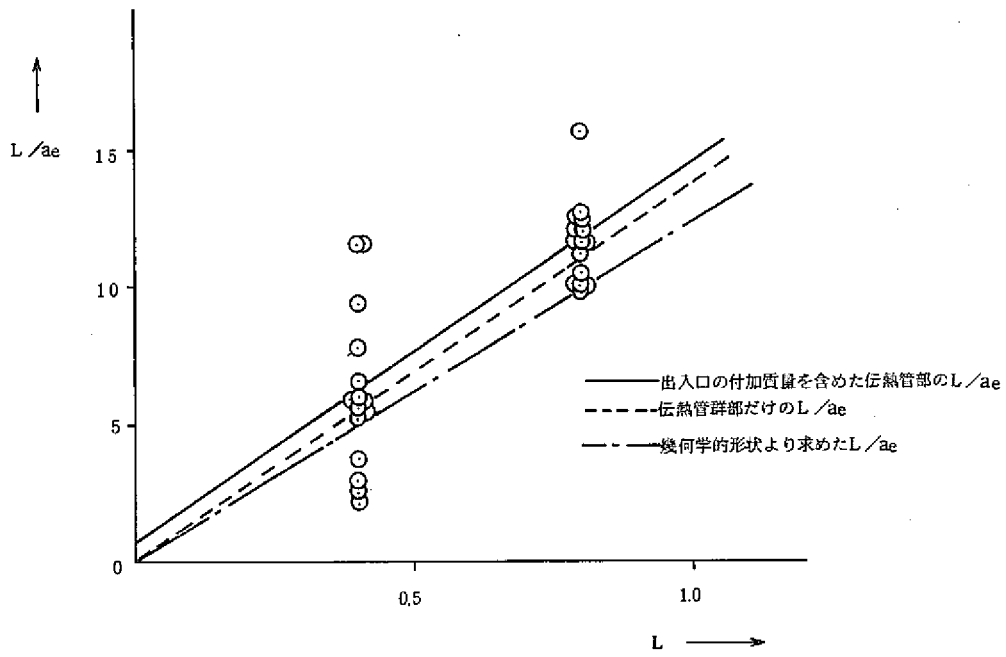


図 3.1.3 伝熱管群部における  $L/ae$  と  $L$  の関係

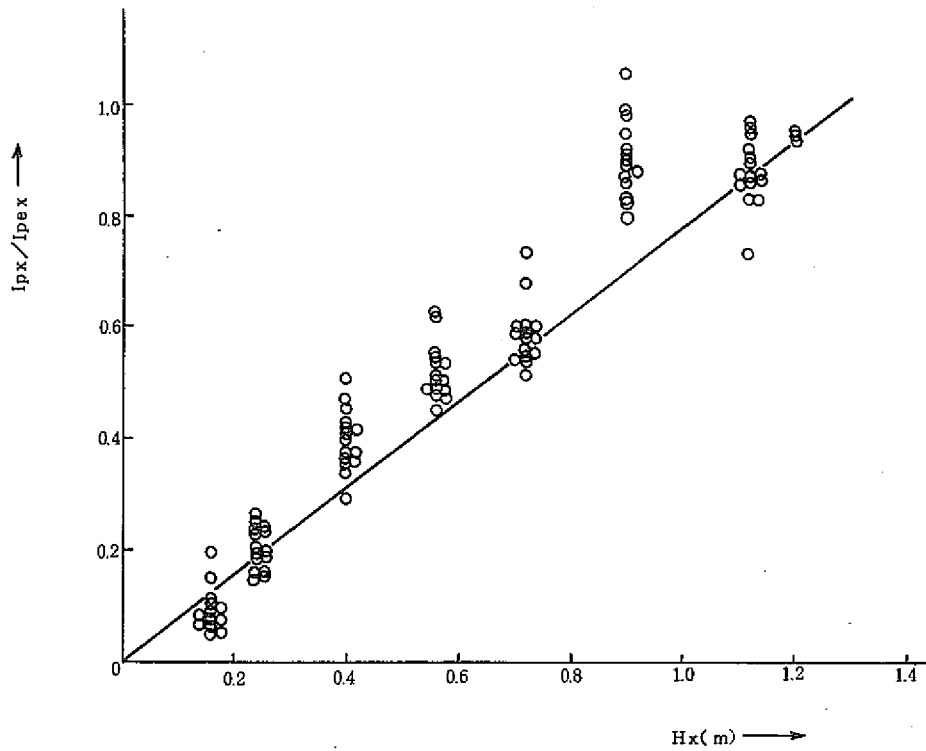


図 3.1.4 伝熱管群が無い場合の軸方向の  $I_p$  の分布

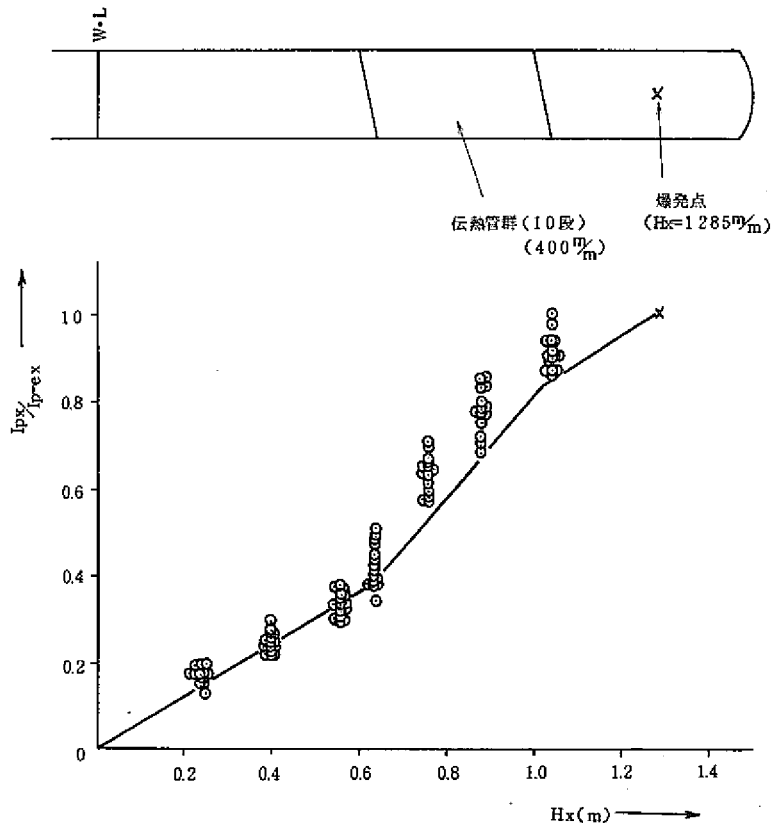


図 3.1.5 伝熱管群が 10 段有る場合の軸方向の  $I_p$  の分布

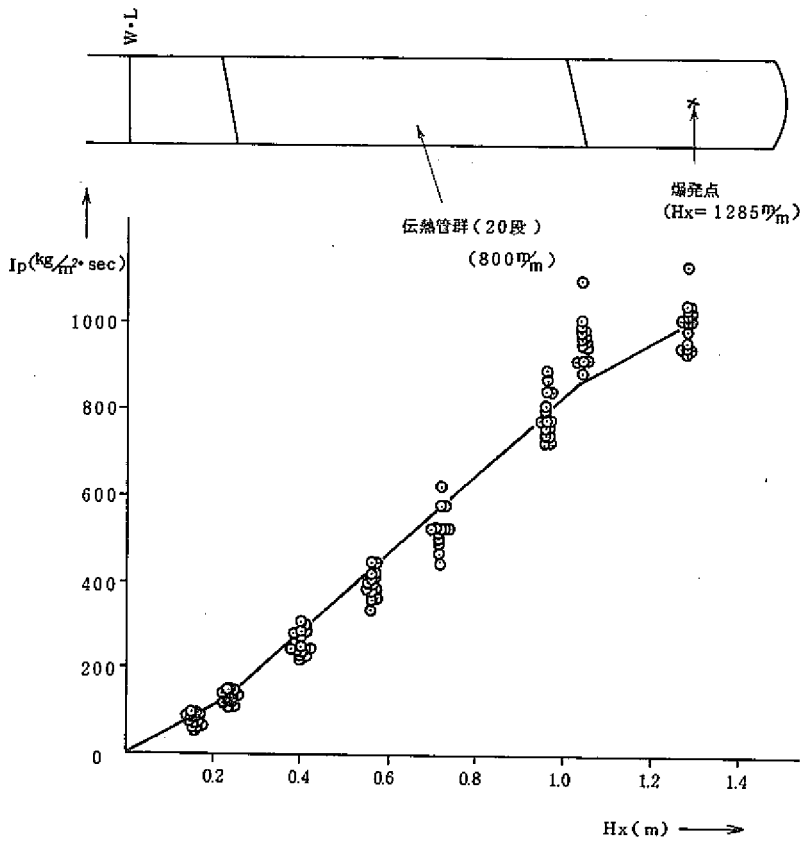


図 3.1.6 伝導管群が 20 段有る場合の軸方向の  $I_p$  の分布

表 3.2 爆発点の  $I_p$  の分布と実測平均値(並列管路  $ae$  測定の場合)

試験条件 項目	内部構造物なし Test No.158~174 '50 12/19	並列管路 Test No.175~191 '50 12/23	内筒 Test No.192~208 '50 12/24	外筒 Test No.209~225 '50 12/25
爆発点の $I_p$ の分布				
爆発点の $I_p$ の 実測平均値	640 $\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ (16点平均)	814 $\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ (17点平均)	945 $\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ (13点平均)	1087 $\text{kg}\cdot\text{sec}/\text{m}^2$ (15点平均)
幾何学的形状から 求めた等価断面積	0.1256 $\text{m}^2$	0.1104 $\text{m}^2$	0.0432 $\text{m}^2$	0.0641 $\text{m}^2$

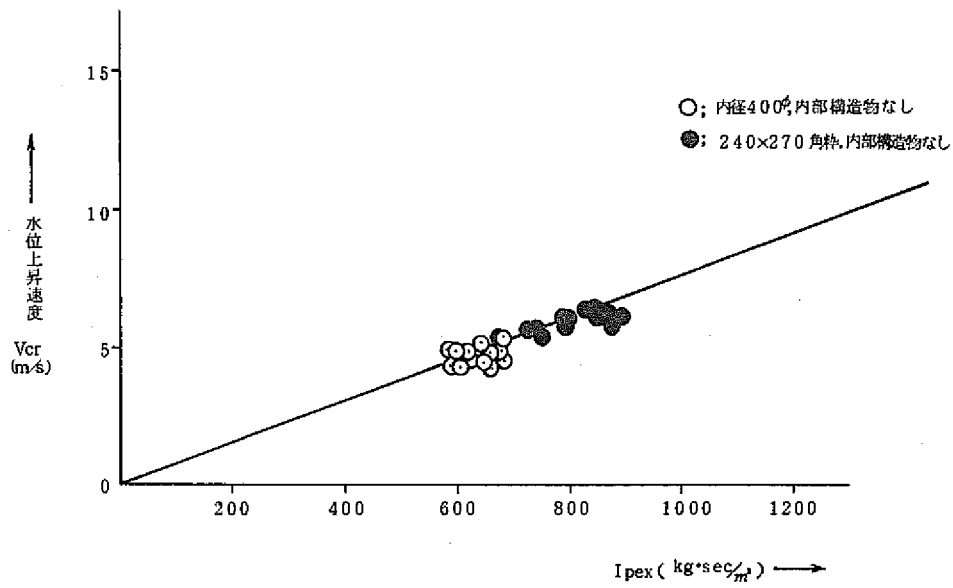


図 3.1.7 爆発点の圧力変化の積分値と液柱の上昇速度

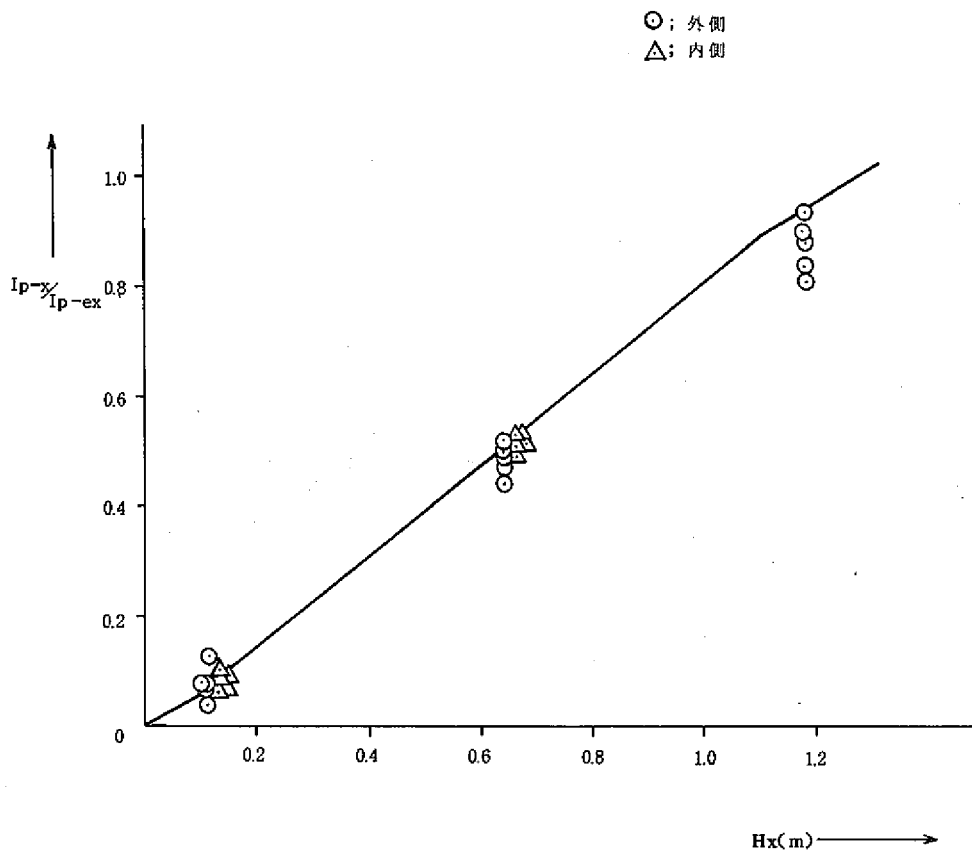


図 3.1.8 並列の場合の深さ方向の  $I_p$  の分布

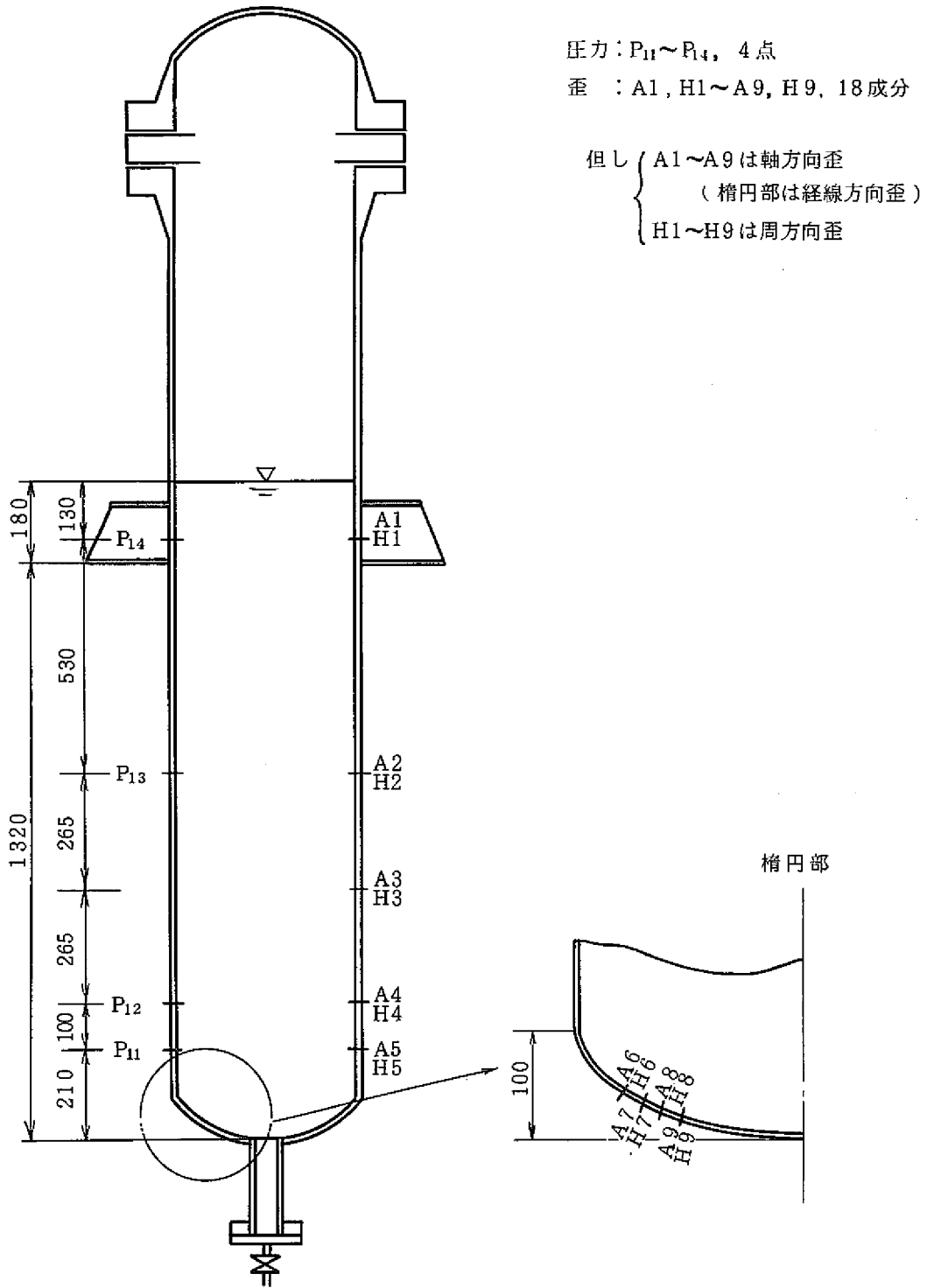


図 3.2.1 圧力および容器壁歪の測定位置，番号

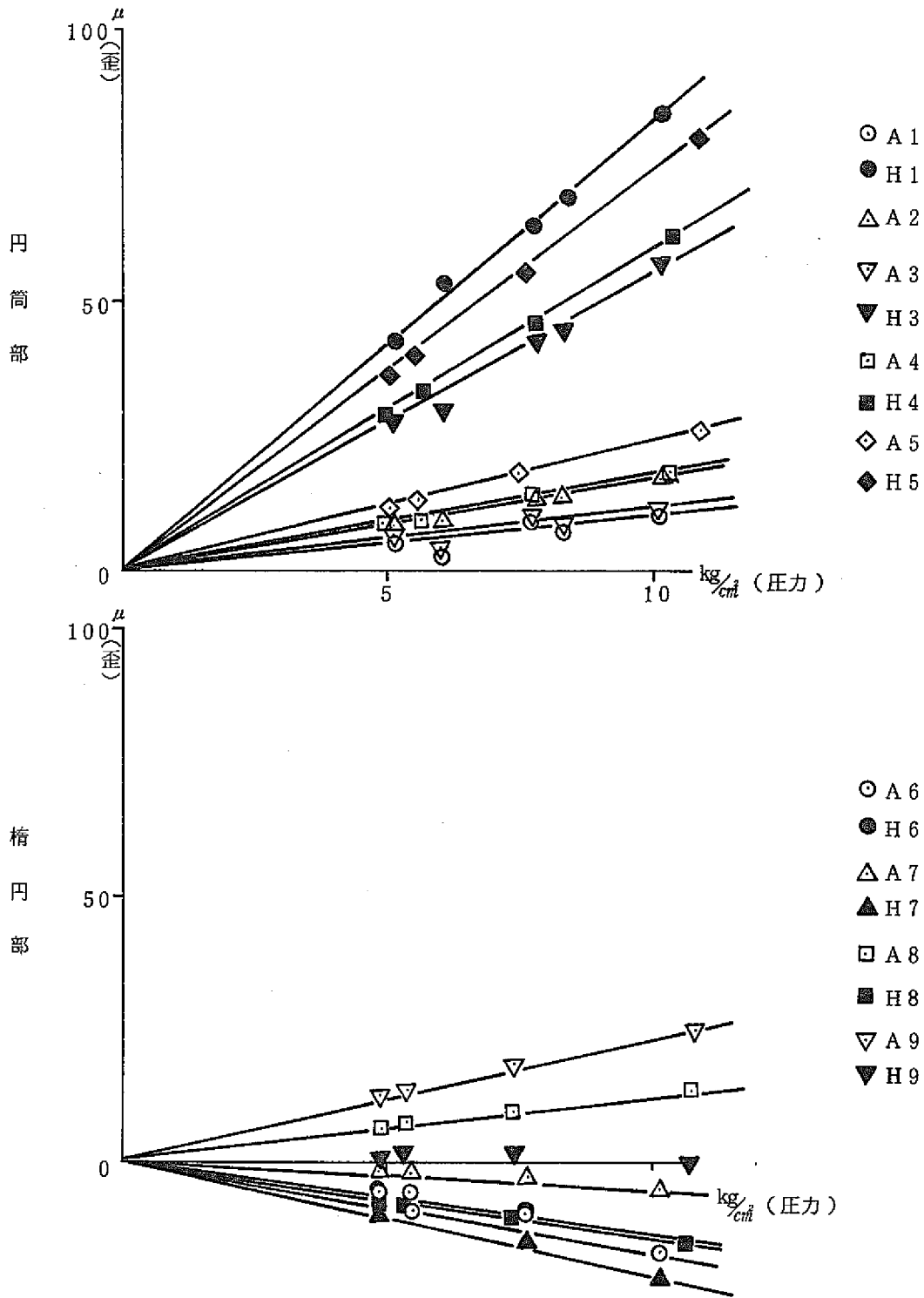


図 3.2.2 静圧による容器外壁の歪



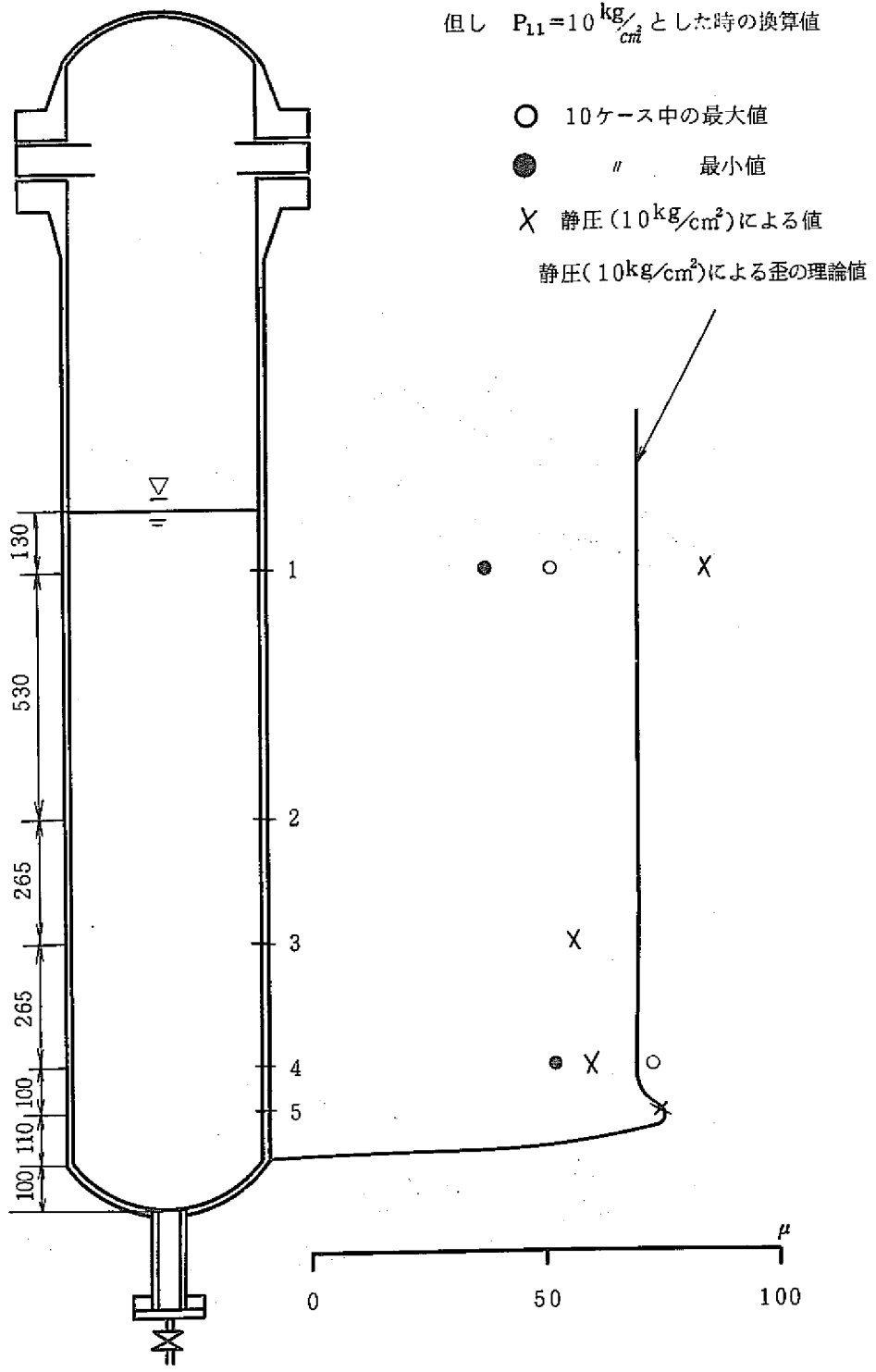


図 3.2.4 衝撃圧による歪のピーク値 (円筒部円周方向歪  $\epsilon_{\theta}$ )

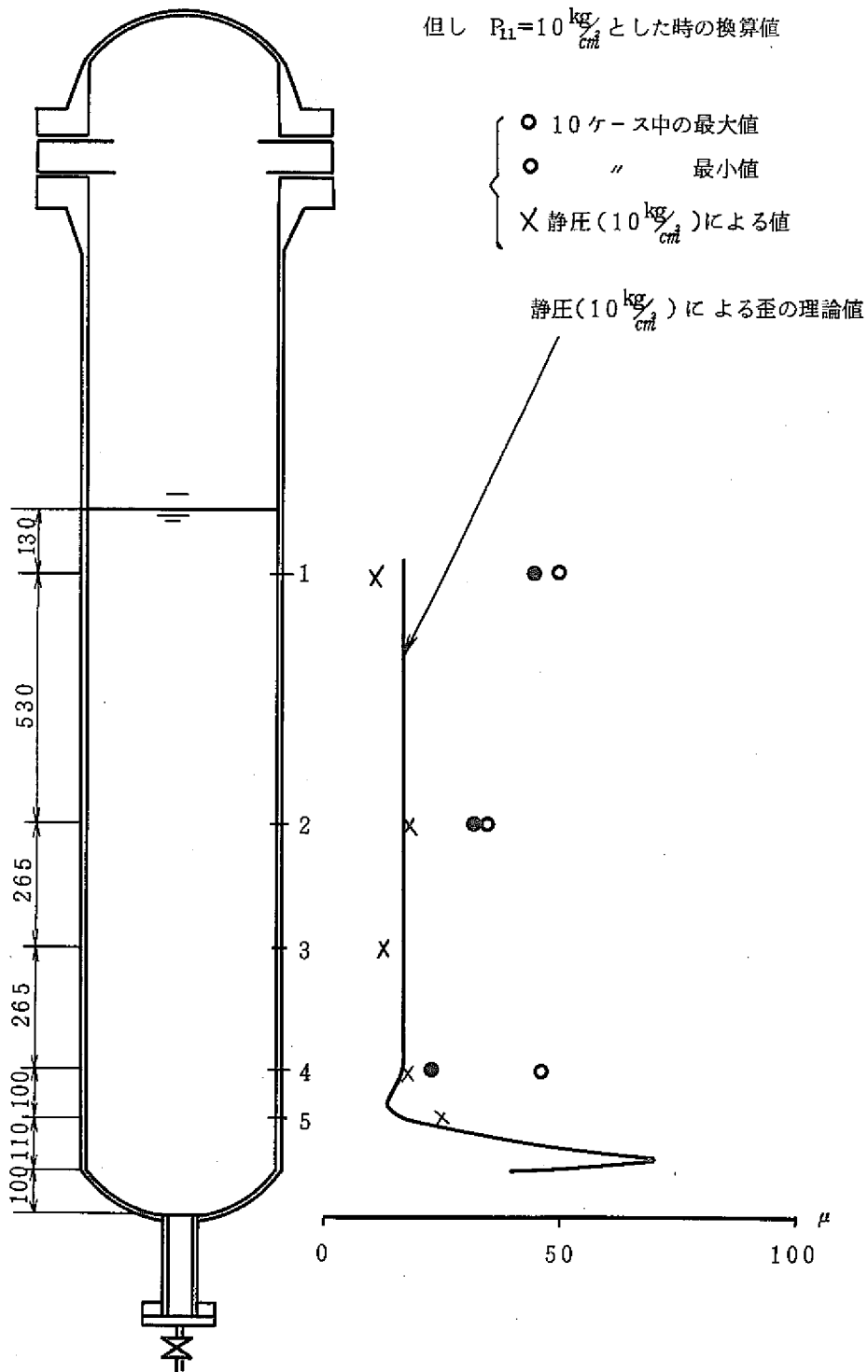


図 3. 2. 3 衝撃圧による歪のピーク値  
 (円筒部軸方向歪  $\epsilon_x$ )

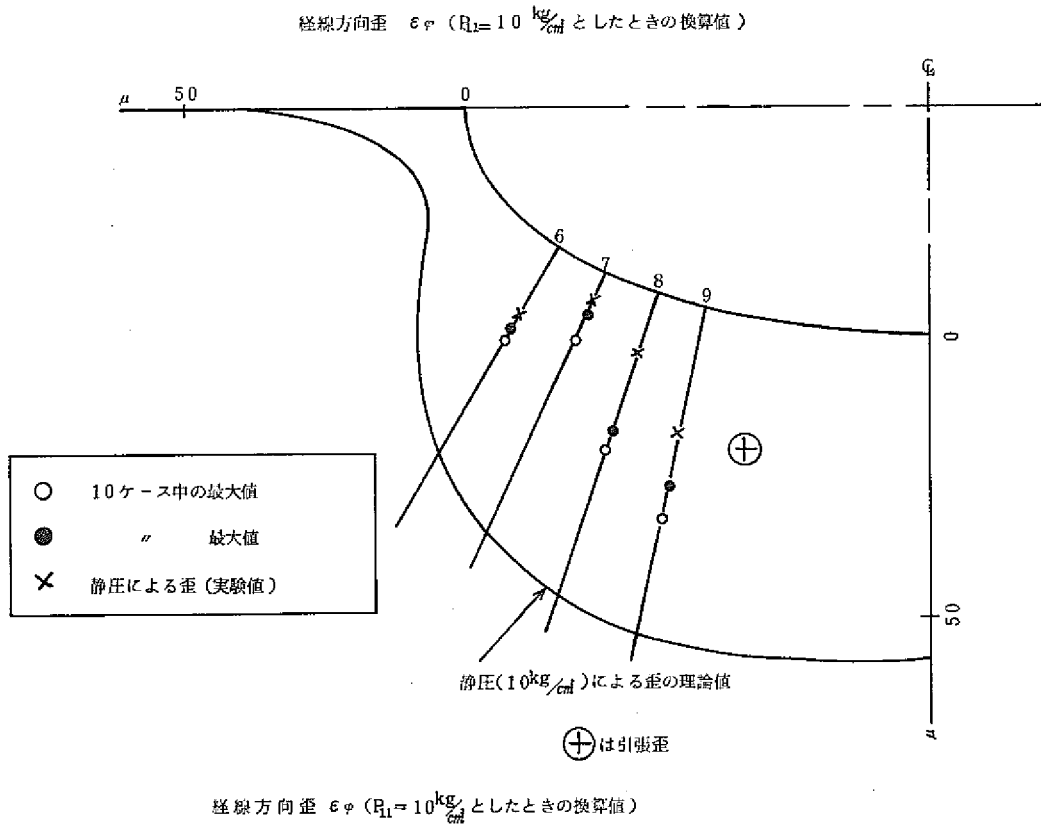


図 3. 2. 5 衝撃圧による歪の最大値と静圧による歪 (楕円部)

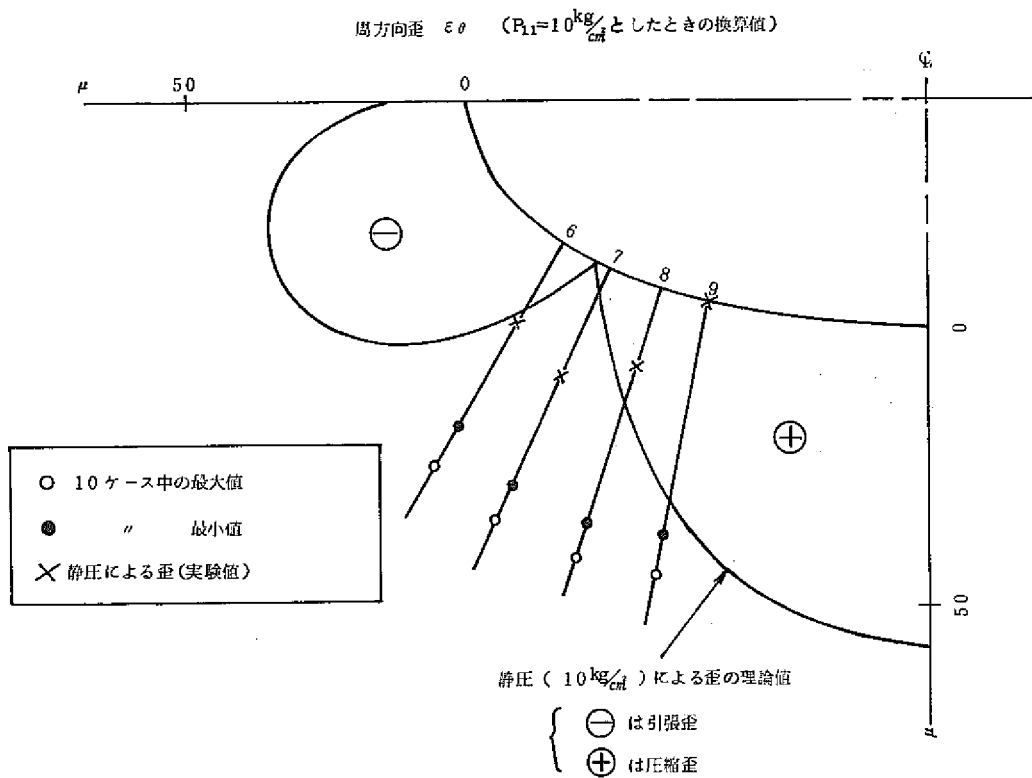


図 3. 2. 6 衝撃圧による歪の最大値と静圧による歪 (楕円部)

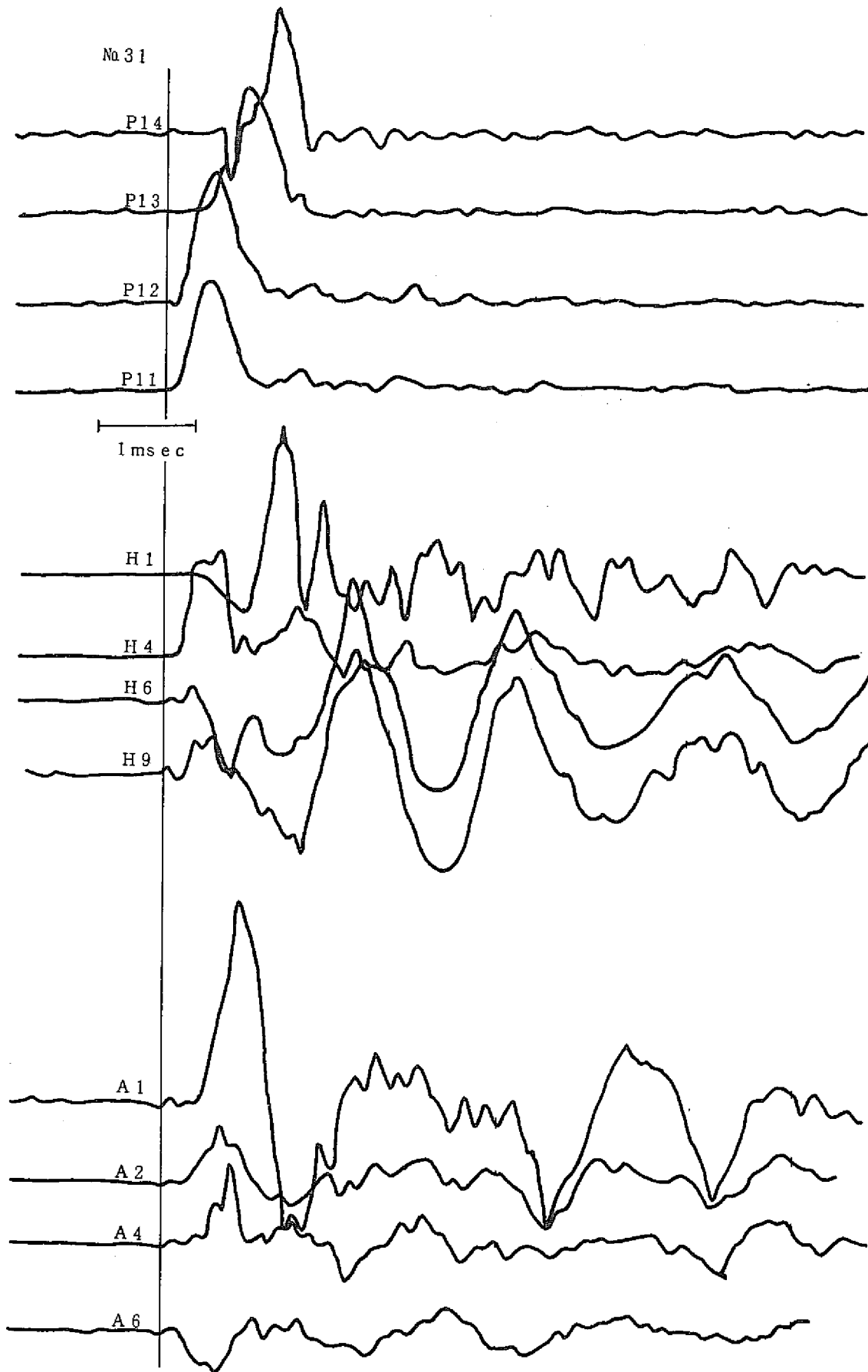


図 3. 2. 7 衝撃圧と容器壁歪

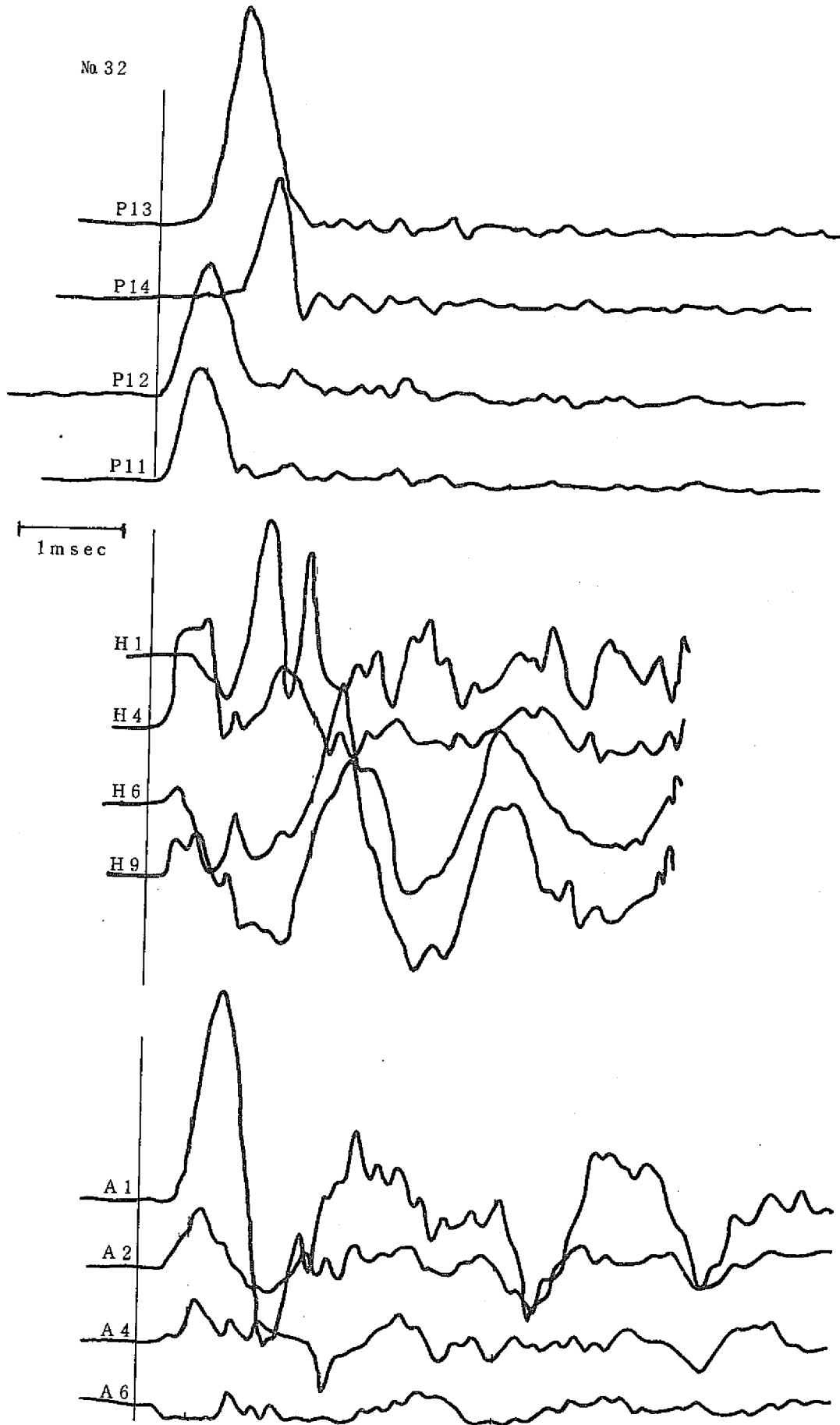


図 3.2.8 衝撃圧と容器壁歪

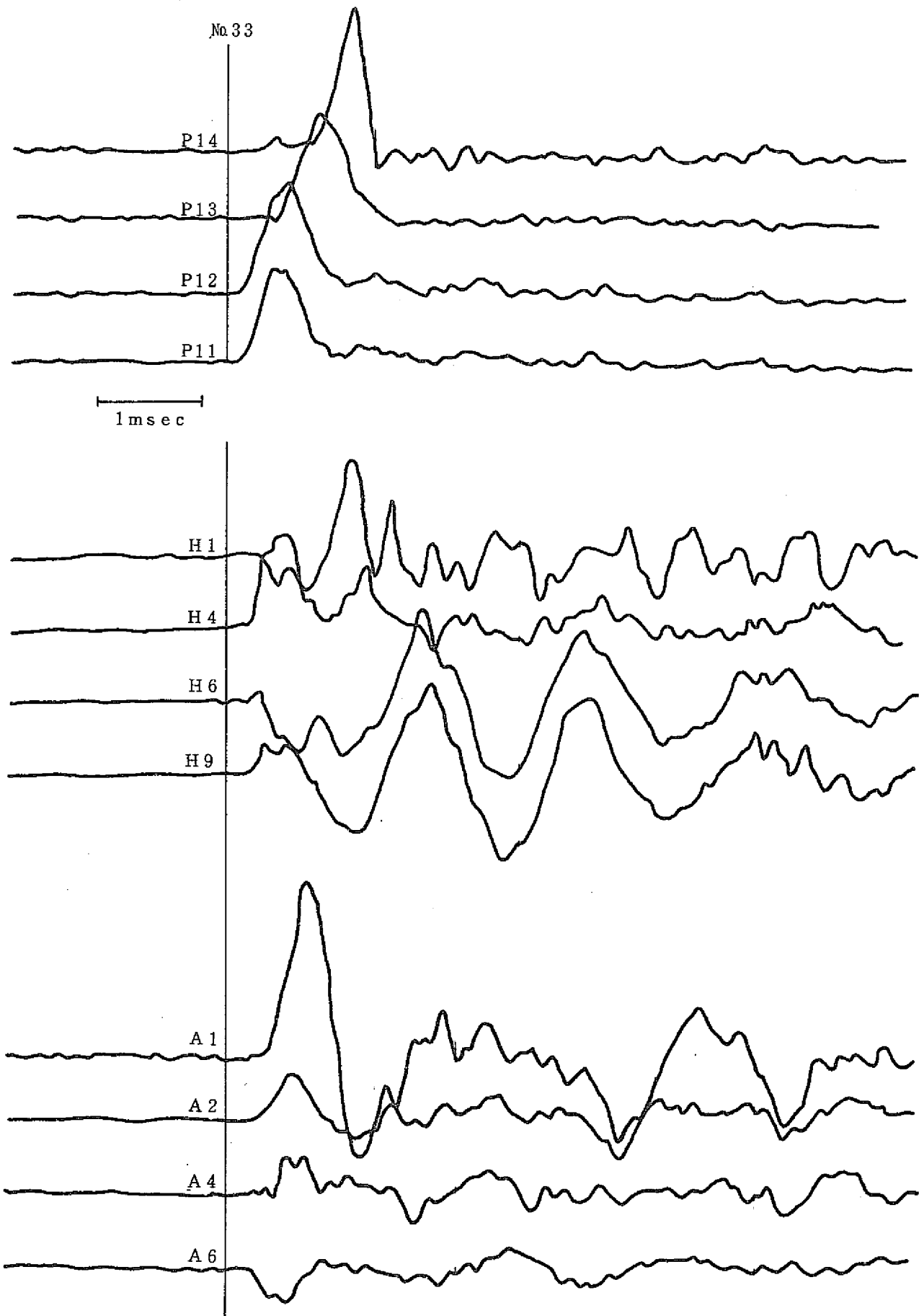


図 3. 2. 9 衝撃圧と容器壁歪

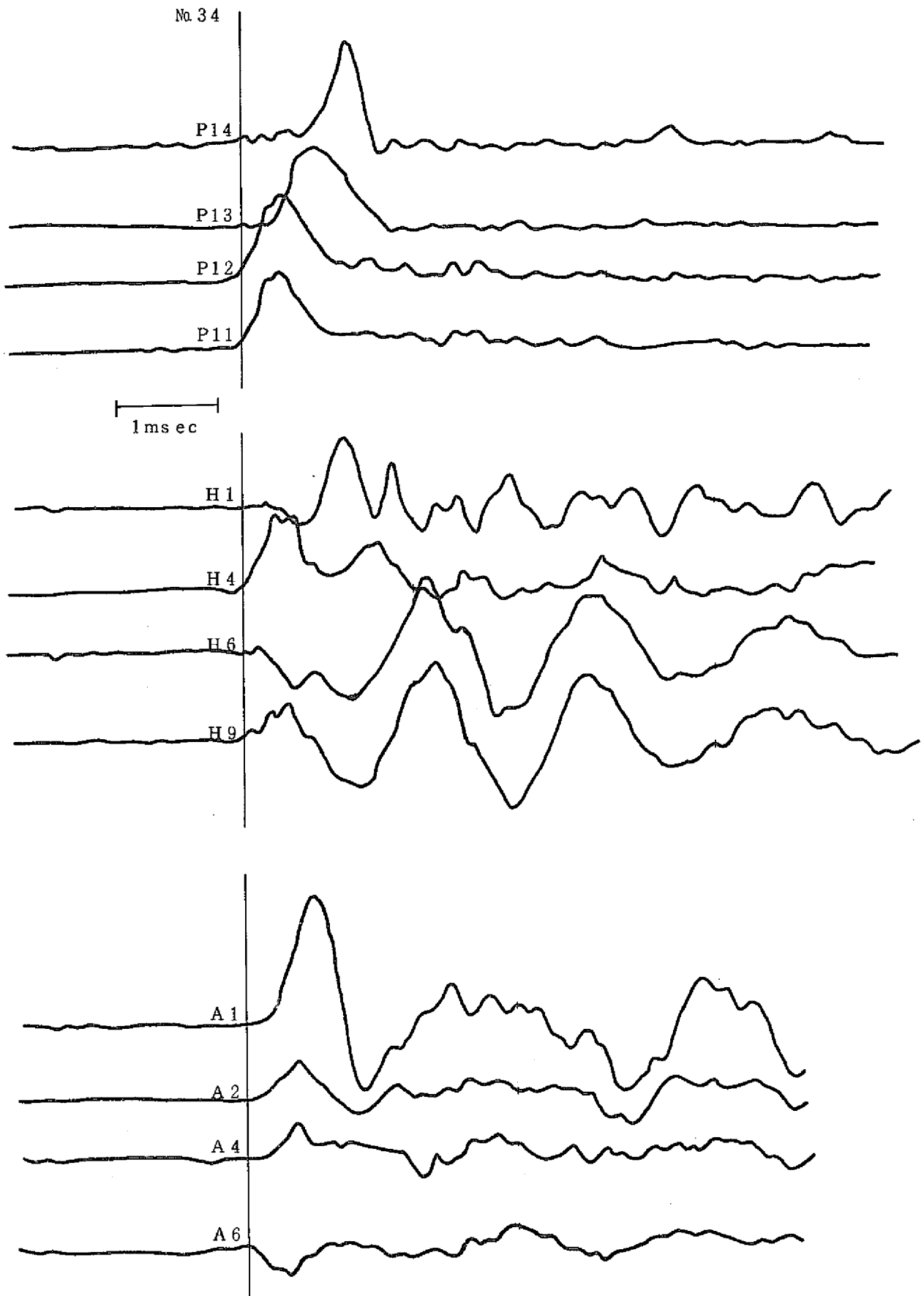


図 3.2.10 衝撃圧と容器壁歪

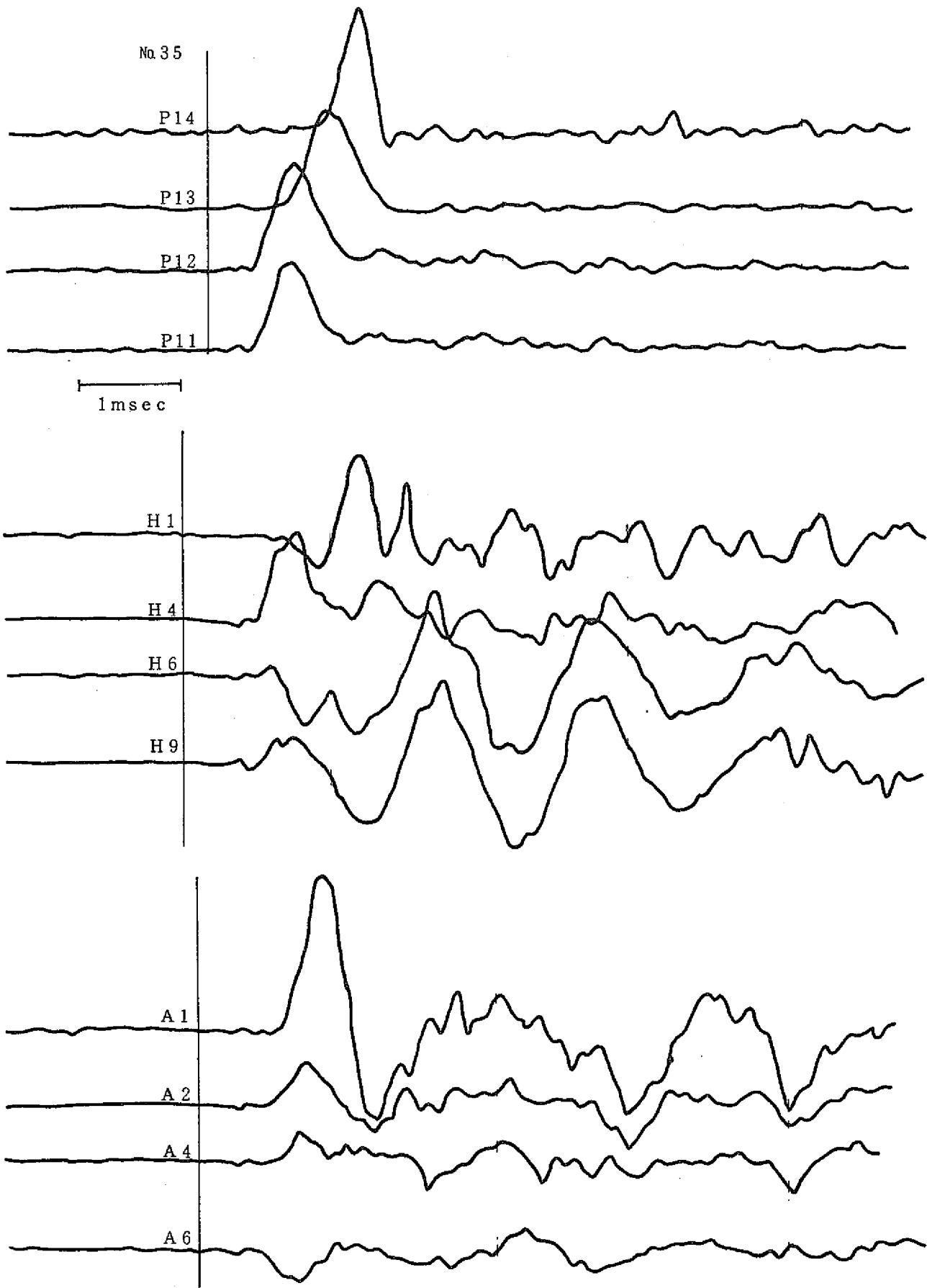


图 3.2.11 衝擊圧と容器壁歪



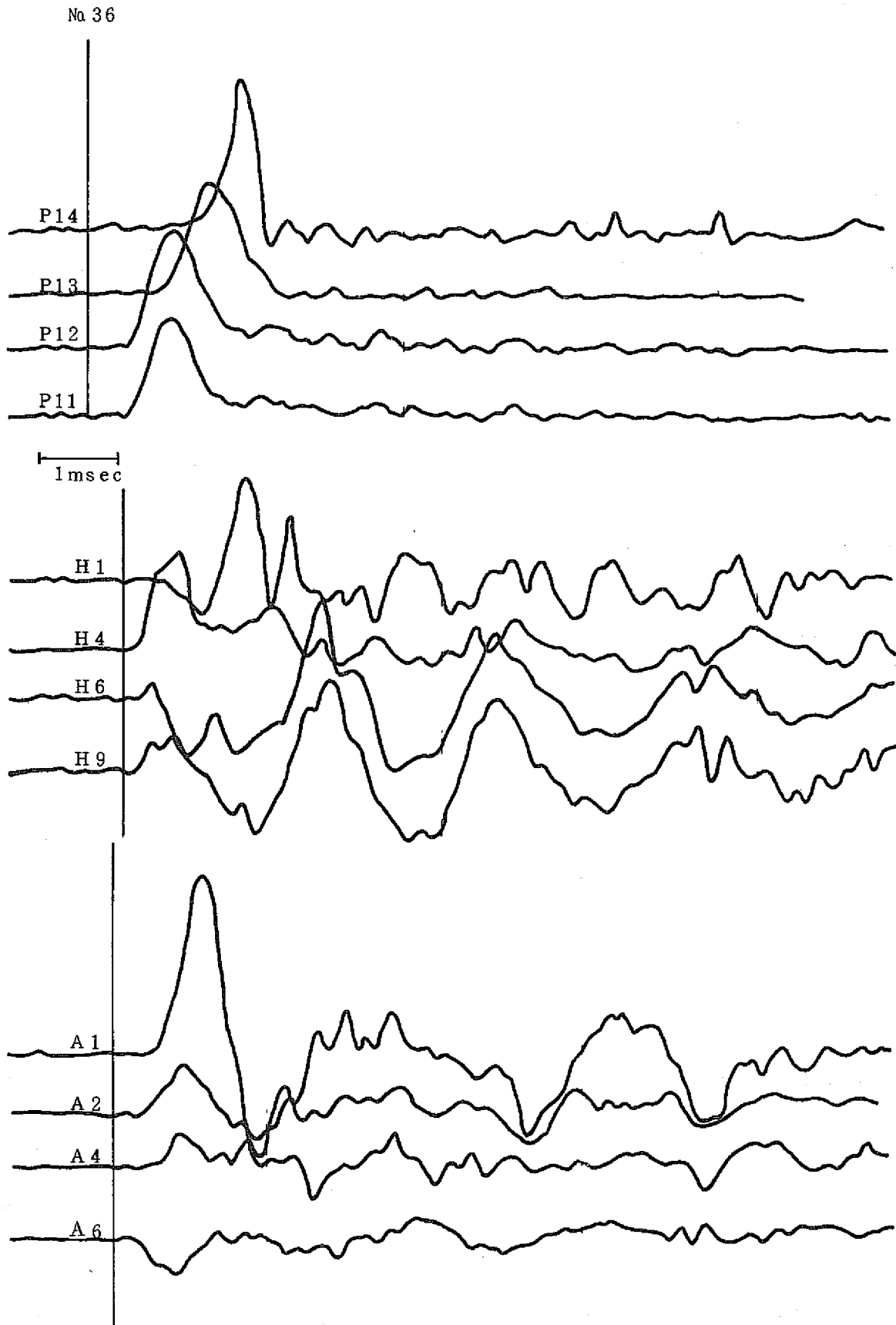


図 3.2.12 衝撃圧と容器壁歪

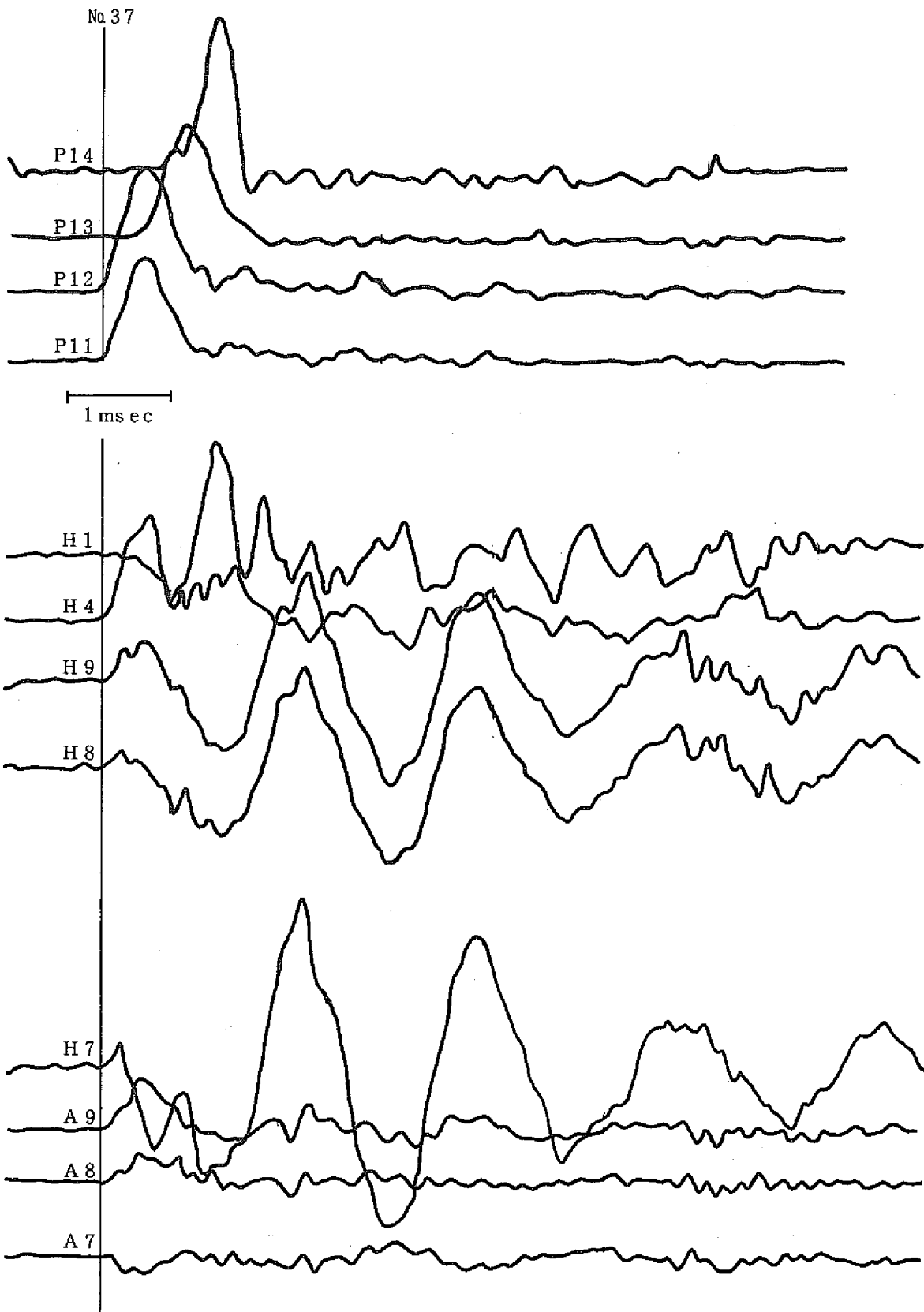


図 3. 2. 13 衝撃圧と容器壁歪

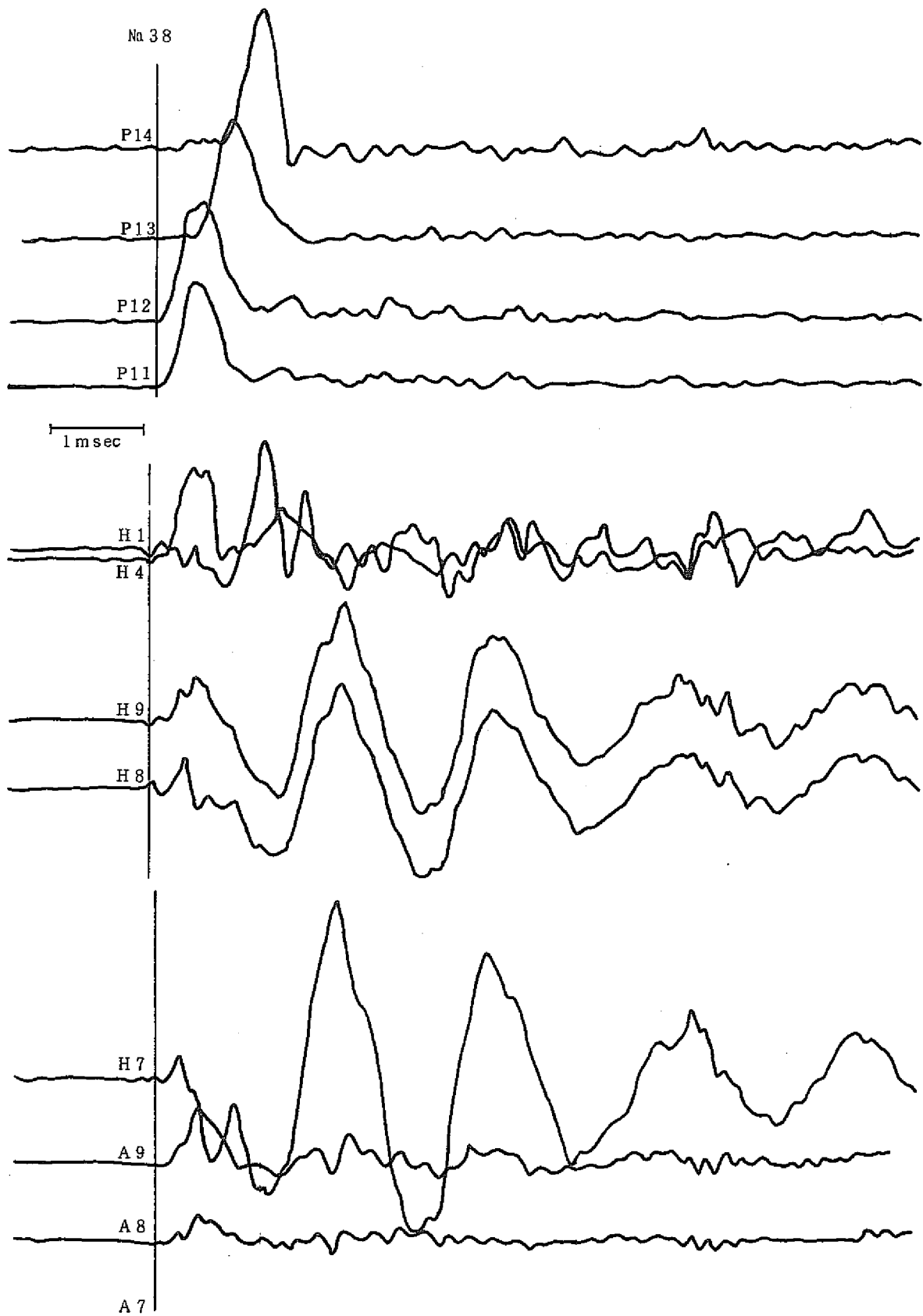


図 3.2.14 衝撃圧と容器壁歪

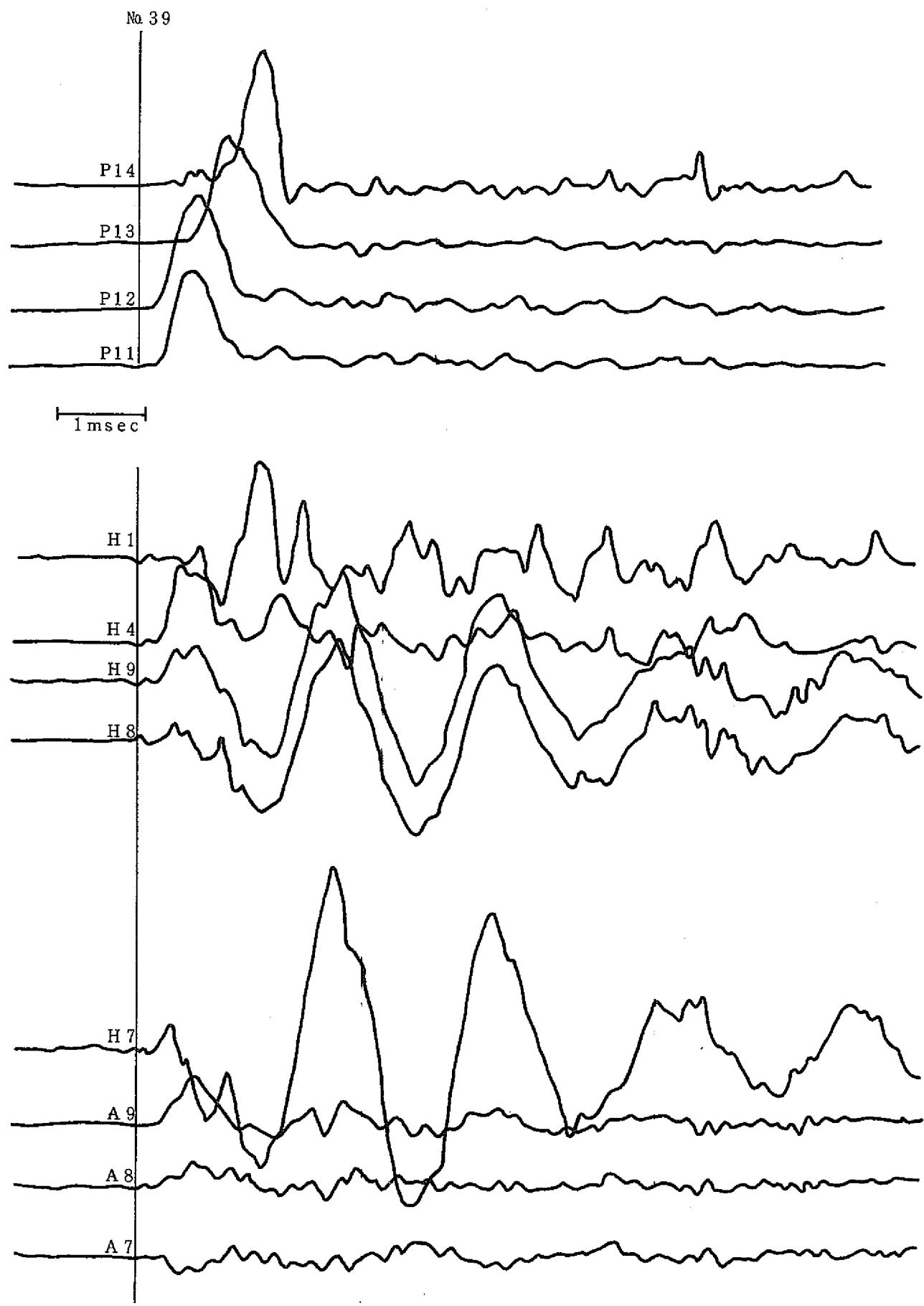


図 3. 2. 15 衝撃圧と容器壁歪

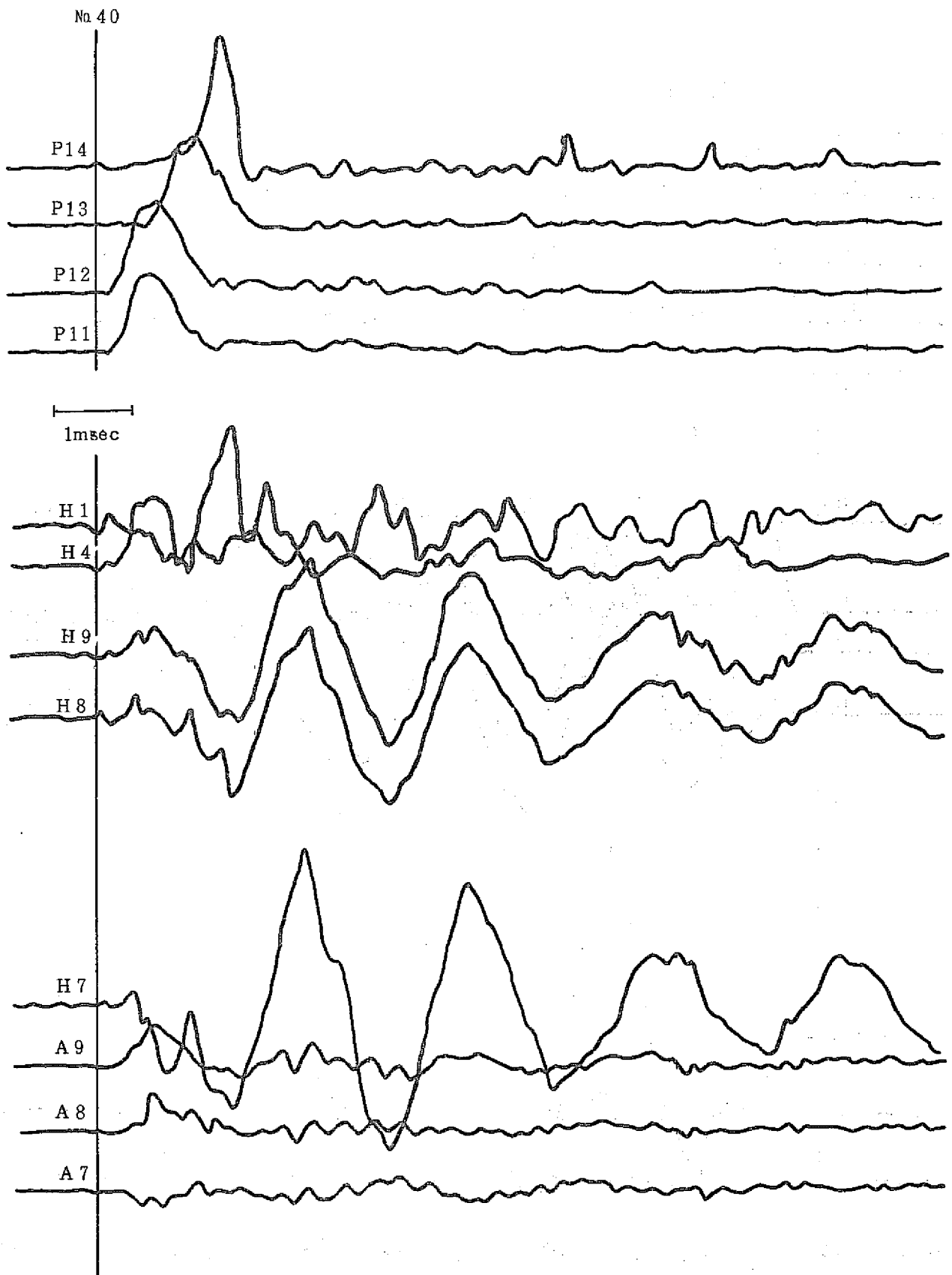


図 3. 2. 16 衝撃圧と容器壁歪

表 3.2.1 衝撃圧の各測定位置における最大値 (kg/cm<sup>2</sup>)

圧力	実験ケース												平均値	
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	kg/cm <sup>2</sup>	P <sub>11</sub> =1		
P <sub>11</sub>	55.3	55.7	48.1	38.6	45.0	46.7	48.9	53.8	48.7	39.9	48.1	1		
	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1				
P <sub>12</sub>	51.0	50.7	42.5	33.1	40.1	42.4	44.5	47.2	44.4	33.1	42.8	0.89		
	0.92	0.91	0.88	0.86	0.89	0.91	0.91	0.88	0.91	0.83				
P <sub>13</sub>	47.8	48.0	40.5	30.1	37.8	40.5	39.7	46.9	42.5	31.1	40.4	0.84		
	0.86	0.86	0.84	0.78	0.84	0.87	0.81	0.87	0.87	0.78				
P <sub>14</sub>	29.2	33.2	23.7	16.3	20.7	23.4	23.3	27.1	22.6	20.7	23.9	0.50		
	0.53	0.60	0.49	0.42	0.46	0.50	0.48	0.50	0.47	0.52				

表 3.2.2 容器壁歪の各測定位置における最大値 ( $\times 10^{-6}$ )

歪	実 験 ヶ ー ス									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
A1	265	275	236	172	210	225				
H1	274	232	208	142		202	214	244	208	201
A1/H1	0.97	1.19	1.14	1.21		1.12				
A2	178	186	154	127	145	152				
H2										
A4	251*	133	115	100	95	103				
H4	323	349	285	227		280	277	303	301	206
A4/H4	0.78	0.38	0.40	0.44		0.37				
A6	-104	-106	-87	-69	-80	-80				
H6	255	254	195	148	182	193				
A6/H6	0.41	0.42	0.44	0.47	0.44	0.42				
A7							-38	-60	-42	-41
H7							208	198	246	203
A7/H7							0.19	0.30	0.17	0.20
A8							77	97	82	115
H8							217	256	249	204
A8/H8							0.35	0.38	0.33	0.56
A9							158	204	177	128
H9							209	248	232	197
A9/H9							0.76	0.82	0.76	0.65

\* 波形が特異

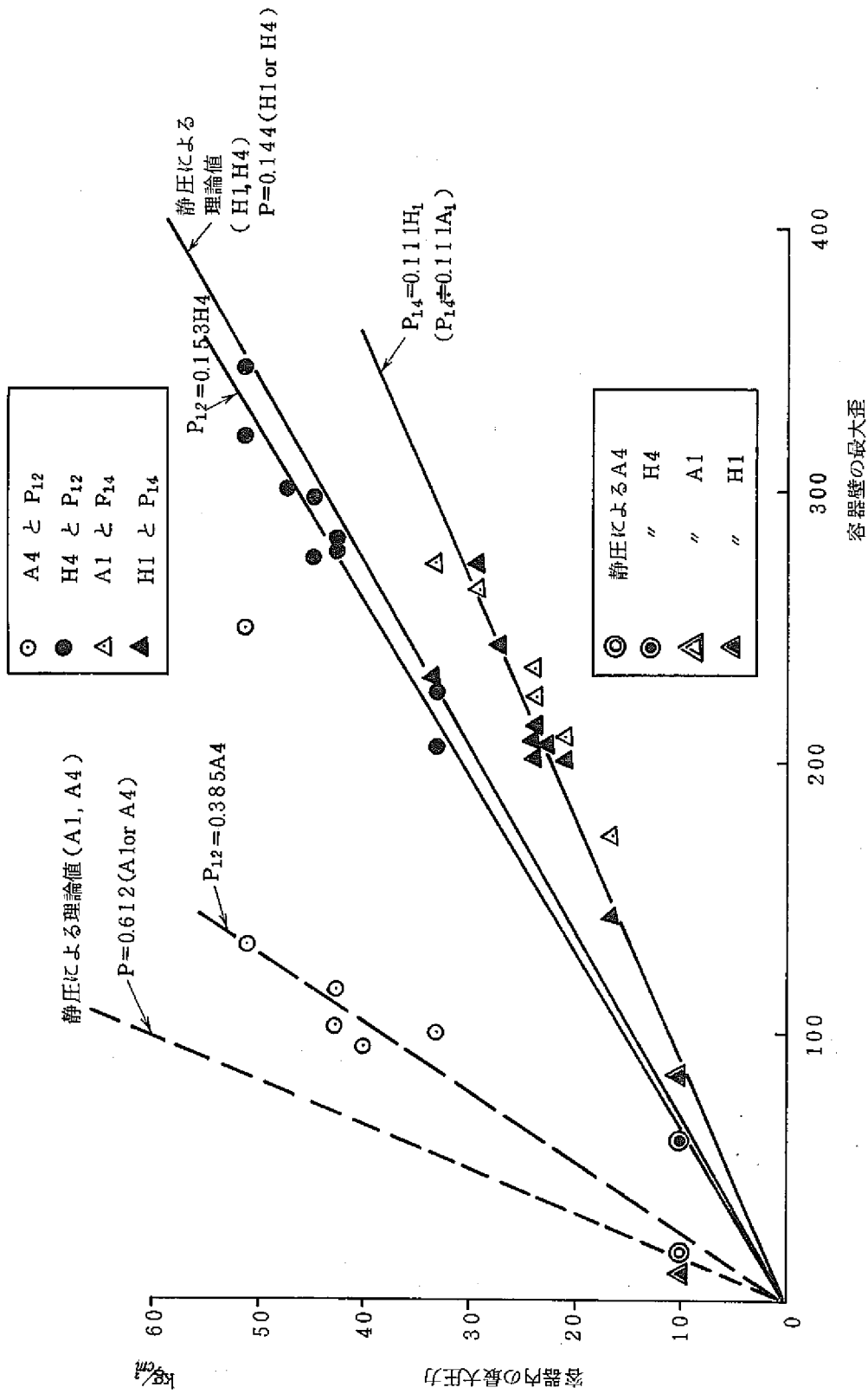


図 3.2.17 容器壁最大歪と容器内最大圧力との関係



Appendix 1. 伝熱管部の幾何学的等価断面積〔(3.1.16)式〕の運算

$$\int_0^R \frac{dx}{a} = \frac{1}{S} \int_0^R \frac{dx}{(L_h+2R) - 2\sqrt{R^2-x^2}} \quad \dots\dots\dots (a.1)$$

よす

$$x = R \sin \theta$$

とおけば、(a.1)式から次式が求められる

$$\begin{aligned} S \int_0^R \frac{dx}{a} &= \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{R \cos \theta d\theta}{L_h+2R-2R \cos \theta} \\ &= -\frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left[ 1 - \frac{L_h+2R}{L_h+2R-2R \cos \theta} \right] d\theta \\ &= -\frac{\pi}{4} + \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{L_h+2R}{L_h+2R-2R \cos \theta} d\theta \quad \dots\dots\dots (a.2) \end{aligned}$$

$$\left. \begin{aligned} \tan \frac{\theta}{2} &= t \\ d\theta &= \frac{2}{1+t^2} dt \\ \cos \theta &= \frac{1-t^2}{1+t^2} \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (a.3)$$

(a.3)式を(a.2)式に代入すれば次式が求められる。

$$\begin{aligned} S \int_0^R \frac{dx}{a} &= -\frac{\pi}{4} + (L_h+2R) \int_0^1 \frac{2 dt}{(L_h+2R)(1+t^2) - 2R(1-t^2)} \\ &= -\frac{\pi}{4} + (L_h+2R) \int_0^1 \frac{2 dt}{L_h + (L_h+4R)t^2} \\ &= -\frac{\pi}{4} + 2 \frac{L_h+2R}{L_h+4R} \int_0^1 \frac{dt}{\frac{L_h}{L_h+4R} + t^2} \\ &= -\frac{\pi}{4} + 2 \frac{L_h+2R}{L_h+4R} - \left[ \sqrt{\frac{L_h+4R}{L_h}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_h+4R}{L_h}} t \right]_0^1 \\ &= -\frac{\pi}{4} + 2 \frac{L_h+2R}{\sqrt{L_h} \sqrt{L_h+4R}} \tan^{-1} \sqrt{\frac{L_h+4R}{L_h}} \quad \dots\dots\dots (a.4) \end{aligned}$$

Appendix 2. (3.1.19) および (3.1.20) 式の誘導および数値計算

(3.1.19)式および(3.1.20)式の誘導

先の報告書に示した通り、爆発点の火薬のエネルギー E は次式で表わされる。

$$E = \frac{g}{2\gamma} \frac{1}{\int_0^{I_{pex}} H_{ex} \frac{dx}{a}} I_{pex}^2$$

- 但し、 $g$  ; 重力の加速度 (  $m/sec^2$  )  
 $\gamma$  ; 液体の比重量 (  $kg/m^3$  )  
 $H_{ex}$  ; 爆発点の深さ (  $m$  )  
 $a$  ; 座標  $x$  の断面積 (  $m^2$  )  
 $I_{pex}$  ; 爆発点における圧力変化の積分値 (  $kg \cdot sec/m^2$  )  
 $x$  ; 液面より垂直方向の座標

図3.1.2 の様に記号を定めると伝熱管群が“有る”場合と“無い”場合のエネルギー  $E_x, E_0$  は上式より (a. 5), (a. 6) 式で表わされる。

$$E_x = \frac{g}{2\gamma} \frac{I_{px}^2}{\frac{H_0 - H_1}{a} + \frac{H_1}{a_{e,1}}} \dots\dots\dots (a. 5)$$

$$E_0 = \frac{g}{2\gamma} \frac{I_{p0}^2}{\frac{H_0}{a}} \dots\dots\dots (a. 6)$$

但し、 $I_{px}, I_{p0}$  は伝熱管が“有る”場合と“無い”場合の爆発点における圧力変化の積分値。

従って、伝熱管が“有る”場合と“無い”場合で火薬のエネルギーが等しい ( $E_x = E_0$ ) とすれば、(3.1.19) 式が誘導される。

$$(3.1.19) \dots\dots\dots a_{e,1} = \frac{a}{1 + \frac{H_0}{H_1} \left\{ \left( \frac{I_{px}}{I_{p0}} \right)^2 - 1 \right\}}$$

出入口の付加質量分を含めない伝熱管群部だけの等価断面積  $a_{e,2}$  は、出入口の縮流、拡大部の等価断面積を  $a_{ei}$ 、その長さを  $\Delta H$ 、伝熱管群部の変化させた長さを  $H_1, H_2$  とすれば前と同様に (a. 7), (a. 8) 式が成立つ。

$$\frac{I_{p0}^2}{\frac{H_0}{a}} = \frac{I_{p,1}^2}{\frac{H_0 - H_1 - \Delta H}{a} + \frac{H_1}{a_{e,2}} + \frac{\Delta H}{a_{ei}}} \dots\dots\dots (a.7)$$

$$\frac{I_{p0}^2}{\frac{H_0}{a}} = \frac{I_{p,2}^2}{\frac{H_0 - H_2 - \Delta H}{a} + \frac{H_2}{a_{e,2}} + \frac{\Delta H}{a_{ei}}} \dots\dots\dots (a.8)$$

但し、 $I_{p,1}$ 、 $I_{p,2}$  は伝熱管群部の長さが  $H_1$ 、 $H_2$  の時の爆発点における圧力変化の積分値。  
 (a.7)および(a.8)式より  $a_{ei}$ 、 $\Delta H$  を消去すれば次式、即ち(3.1.20)式が誘導される。

$$(3.1.20) \dots\dots\dots a_{e,2} = \frac{a}{1 + \frac{H_0}{H_1 - H_2} \left\{ \left( \frac{I_{p,1}}{I_{p,0}} \right)^2 - \left( \frac{I_{p,2}}{I_{p,0}} \right)^2 \right\}}$$

(3.1.19)式および(3.1.20)式に対する公然誤差  $r_{ae,1}$  および  $r_{ae,2}$  は  
 関数  $z = f(z_1, z_2, \dots\dots z_n)$  に対し、

$$r_n = \pm \sqrt{\left( \frac{\partial f}{\partial z_1} \right)^2 r_{z_1}^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial z_2} \right)^2 r_{z_2}^2 + \dots\dots + \left( \frac{\partial f}{\partial z_n} \right)^2 r_{z_n}^2} \left. \vphantom{r_n} \right\} \text{と定義すれば}$$

但し、 $r_{z_1}, r_{z_2}, \dots\dots r_{z_n}$  は  $z_1, z_2, \dots\dots z_n$  の公然誤差

次式で表わされる。

$$r_{ae,1} = \frac{a_{e,1}}{a} \frac{H_0}{H_1} \left( \frac{I_{px}}{I_{p0}} \right)^2 \sqrt{\left( \frac{2a_{e,1}}{I_{p,x}} \right)^2 r_{I_{px}}^2 + \left( \frac{2a_{e,1}}{I_{p,0}} \right)^2 r_{I_{p0}}^2} \dots\dots\dots (a.9)$$

$$r_{ae,2} = \frac{a_{e,2}}{a} \frac{H_0}{H_1 - H_0}$$

$$\sqrt{\left\{ \left( \frac{I_{p,1}}{I_{p,0}} \right)^2 - \left( \frac{I_{p,2}}{I_{p,0}} \right)^2 \right\} \left( \frac{2a_{e,2}}{I_{p,0}} \right)^2 r_{I_{p,0}}^2 + \left( \frac{I_{p,1}}{I_{p,0}} \right)^2 \left( \frac{2a_{e,2}}{I_{p,0}} \right)^2 r_{I_{p,1}}^2 + \left( \frac{I_{p,2}}{I_{p,0}} \right)^2 \left( \frac{2a_{e,2}}{I_{p,0}} \right)^2 r_{I_{p,2}}^2} \dots\dots\dots (a.10)$$

### 数値計算

出入口の付加質量分を含めた等価断面積の数値計算。

(3.1.19)式に表3.1の“伝熱管群なし”および“伝熱管群10段入れた”場合の爆発点の $I_p$ の実測平均値を代入。

$$a_{e,1} = \frac{a}{1 + \frac{1.285}{0.4} \left\{ \left( \frac{924}{818} \right)^2 - 1 \right\}}$$

$$= 0.529a$$

(a.9)式に、同様に $I_p$ の実測平均値および公然誤差を代入。

$$r_{ae,1} = 0.529 \times \frac{1.285}{0.4} \left( \frac{924}{818} \right)^2 \sqrt{\left( \frac{17}{924} \right)^2 + \left( \frac{12}{818} \right)^2} \cdot 2a_{e,1}$$

$$= 0.102a_{e,1}$$

$$\therefore a_{e,1} = 0.529a \pm 0.054a$$

全く同様に“伝熱管群なし”および“伝熱管群20段入れた”場合の数値を代入すると

$$a_{e,1'} = 0.553a \pm 0.025a$$

上記、二数値 $a_{e,1}$ および $a_{e,1'}$ に対して付加加重平均をとると

$$a_e = \frac{a_{e,1} + \left( \frac{r_{ae,1}}{r_{ae,1'}} \right)^2 a_{e,1'}}{1 + \left( \frac{r_{ae,1}}{r_{ae,1'}} \right)^2}$$

$$= \frac{0.529 + \left( \frac{0.054}{0.025} \right)^2 \times 0.553}{1 + \left( \frac{0.054}{0.025} \right)^2}$$

$$= 0.549$$

$$r_{ae} = r_{ae,1'} \sqrt{\frac{\left( \frac{r_{ae,1}}{r_{ae,1'}} \right)^2}{1 + \left( \frac{r_{ae,1}}{r_{ae,1'}} \right)^2}}$$

$$= 0.0409$$

$$\therefore a_e = 0.549a \pm 0.022a$$

Appendix 3. 並列管路部の等価断面積の計算

図 2.2 (a)において、内筒部と外筒部に分かれている並列管路部の長さを  $H_1$  , 爆発点から液面迄の長さを  $H_0$  とすれば、並列管路および外筒の場合の爆発点から液面迄の各々の等価断面積を求めると次の様になる。

$$\begin{aligned} a_{e,H_0,P} &= a_{G,H_0,N} \cdot \left( \frac{I_{P,N}}{I_{P,P}} \right)^2 \\ &= 0.1256 \times \left( \frac{640}{814} \right)^2 \\ &= 0.0776 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} a_{e,H_0,O} &= a_{G,H_0,I} \cdot \left( \frac{I_{P,I}}{I_{P,O}} \right)^2 \\ &= 0.0432 \times \left( \frac{945}{1087} \right)^2 \\ &= 0.0327 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

但し、 $a_{e,Hx,Y}$  ; 深さ  $Hx$ , 実験条件  $Y$  の時の等価断面積

$a_{G,Hx,Y}$  ; 深さ  $Hx$ , 実験条件  $Y$  の時の幾何学的等価断面積

$I_{P,Y}$  ; 実験条件  $Y$  の時の爆発点の圧力変化の積分値

実験条件 suffix  $Y$

$Y=N$  ; 内部構造物を入れない場合

$P$  ; 並列管路の場合

$O$  ; 外側を開けた場合

$I$  ; 内筒の場合

次に、内筒部と外筒部に分かれている部分  $H_1$  における並列管路の場合、および外筒部の等価断面積は次の様になる。

$$\begin{aligned} a_{e,H_1,P} &= \frac{H_1}{\frac{H_0}{a_{e,H_0,P}} - \frac{H_0 - H_1}{a_{G,H_0-H_1,N}}} \\ &= \frac{1}{\frac{1.285}{0.0776} - \frac{0.285}{0.1256}} \\ &= 0.0700 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 a_{e, H_1, O} &= \frac{H_1}{\frac{H_0}{a_{e, H_0, O}} - \frac{H_0 - H_1}{a_{G, H_0 - H_1, N}}} \\
 &= \frac{1}{\frac{1.285}{0.0327} - \frac{0.285}{0.1256}} \\
 &= 0.0270 \text{ m}^2
 \end{aligned}$$