

# SWAT-3 放出系配管内流動と配管に作用する力(そのI)

—大リーク・ナトリウム-水反応試験(第5報)—

1977年5月

動力炉・核燃料開発事業団

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)

## SWAT-3 放出系配管内流動と配管に作用する力(その1)

### 一大リーク・ナトリウム-水反応試験 (第5報)

報告者 小石川 秋 三 \*  
高 橋 憲 二 郎 \*\*  
田 辺 裕 美 \*\*  
広 井 博 \*\*  
佐 藤 稔 \*\*  
堀 雅 夫 \*\*

### 要 旨

高速炉蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応事故に対する安全設計データを得るためにSWAT-3試験装置で試験が行なわれている。

本報告は大リーク・ナトリウム-水反応時に放出系配管に生じる作用力の挙動を評価する目的で、SWAT-3 Run-3試験での放出系配管ナトリウム流動や配管に作用する力に関するデータを整理し検討を加えたものである。

- (1) ナトリウムの放出は放出系配管内のラプチャ板破裂後3秒の間にはほぼ完了した。この間の流動は二相流で、最大圧力は  $4.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$ 、最小ボイド率は0.75、最大ナトリウム流量は  $600 \text{ kg/sec}$ であった。
- (2) 配管に作用する力には下記のものがある。
  - (a) 蒸気器の運動による力
  - (b) 曲管部での運動量変化による力
  - (c) 収納容器の運動による力
  - (d) 熱膨張力
- (3) 力(a)は0.22 secから0.77 secの間ではステップ状に変化する。
- (4) 力(b)の最大値は2.9 tonである。
- (5) 力(c)は振動数2.5 Hz及び3.1 Hzを持つ周期的な力である。

---

\* 蒸気発生器開発部高速炉安全性試験室嘱託(川崎重工・原子力技術部)

\*\* 蒸気発生器開発部高速炉安全性試験室

## SWAT - 3 試 験 参 加 者

統 括 者	堀 雅 夫	( 高 速 炉 安 全 性 試 験 室 長 )
注 水 試 験 担 当	大 内 鏡 弘	* ( 高 速 炉 安 全 性 試 験 室 )
	山 田 敏 夫	( " )
	高 橋 憲 二 郎	( " )
	大 高 仁 護	( " )
	佐々木 和 一	( " )
試 験 計 画 担 当	佐 藤 稔	( 高 速 炉 安 全 性 試 験 室 長 代 理 )
	田 中 信 夫	( 高 速 炉 安 全 性 試 験 室 )
	錦 見 正 和	( " )
	吉 岡 直 樹	( " )
	広 井 博	( " )
	田 辺 裕 美	( " )
	小 石 川 秋 三	( 高 速 炉 安 全 性 試 験 室 囑 託 ) ( 川 崎 重 工 ・ 技 術 開 発 本 部 )

---

\* 現 在 原 研

**Mechanical Effects of Discharging Two-phase Mixture on Pressure  
Relief System in SWAT-3 Tests**

**Large Leak Sodium-Water Reaction Test (No. 5)**

Akisou Koishikawa \*

Kenjiro Takahashi \*\*

Hiroshi Tanabe \*\*

Hiroshi Hiroi \*\*

Minoru Sato \*\*

Masao Hori \*\*

**Abstract**

To obtain the data for the safe design of the steam generator system of the prototype fast reactor Monju against the postulated large leak sodium-water reaction, experiments have been carried out using SWAT-3 test facility.

In this report in order to estimate the behaviour of the forces acting on the pressure relief pipes during the large leak sodium-water reaction, the results of the SWAT-3 Run-3 test concerning the sodium flow in the pipes and resulting forces were arranged and examined.

---

\* Nuclear Power Engineering Department, Kawasaki Heavy Industries, Ltd.

\*\* Fast Reactor Safety Section, O-arai Engineering Center, Power Reactor & Nuclear Fuel Development Corporation.

Results are as follows ;

- (1) Sodium expulsion nearly finished within three seconds after the rupture of the disc in the pressure relief pipes. During this term the flow was two-phase consisted of liquid sodium and hydrogen/covers gas, and the maximum pressure was  $4.4 \text{ kg/cm}^2\text{a}$ , the minimum void fraction 0.75, the maximum sodium flow rate 600 kg/sec.
- (2) Forces exerted on the piping are such as
  - (a) force due to movement of a evaporator
  - (b) Fluid-induced force associated with the momentum change through a bend
  - (c) force due to movement of a pressure relief tank
  - (d) force due to thermal expansion of the piping
- (3) The change of the force (2) - (a) is analogous to step function.
- (4) Maximum value of the force (2) - (b) is 2.9 ton.
- (5) The force (2) - (c) is consisted of two components with frequency of 2.5 Hz and 3.1 Hz.

## 目 次

1.	ま え が き .....	1
2.	試 験 概 要 .....	2
2.1	試 験 装 置 .....	2
2.2	試 験 条 件 .....	2
2.3	測 定 方 法 .....	2
3.	測 定 結 果 .....	4
4.	デ ー タ 解 析 .....	5
4.1	管 内 流 の 挙 動 .....	5
4.2	配 管 に 作 用 す る 力 .....	9
5.	解 析 的 検 討 .....	16
5.1	熱 膨 張 力 の 計 算 .....	16
5.2	固 有 振 動 数 の 計 算 .....	17
6.	む す び .....	18
7.	参 考 文 献 .....	20
Appendix 1.	測 定 器 の 概 略 .....	64
Appendix 2.	試 験 Run 2 の 放 出 系 配 管 に 関 す る デ ー タ 整 理 .....	67

## 図 表 リ ス ト

- 図 2.1      Flow diagram for SWAT--3
- 図 2.2      測定点の位置
- 図 2.3      支持部の力の測定部構造
- 図 3.1-1    放出系配管内及びカバーガス部の圧力（初期）
- 図 3.1-2               "                            "                            （全変化）
- 図 3.2      放出系配管内流体のボイド率
- 図 3.3      流量計の出力
- 図 3.4      接触式ナトリウム検知器の位置とナトリウム通過時間の関係
- 図 3.5-1    R6001に作用する力（初期）
- 図 3.5-2    R6004            "
- 図 3.5-3    R6005            "
- 図 3.5-4    R6007            "
- 図 3.6-1    R6009            "
- 図 3.6-2    R6011            "
- 図 3.7-1    R6015            "
- 図 3.7-2    R6016            "
- 図 3.8      放出系配管の管壁近傍のナトリウム温度
- 図 3.9-1    R6001に作用する力（全変化）
- 図 3.9-2    R6002            "
- 図 3.9-3    R6003            "
- 図 3.9-4    R6004            "
- 図 3.9-5    R6005            "
- 図 3.9-6    R6007            "
- 図 3.10-1   R6009            "
- 図 3.10-2   R6011            "
- 図 3.11-1   R6015            "
- 図 3.11-2   R6016            "
- 図 4.1      放出系配管中を流れるナトリウム流量



- 図 4.2 管内流の流動パラメータ
- 図 4.3 配管に作用する流体力の作用点と方向
- 図 4.4 曲管部での流体力
- 図 4.5 熱膨張力 (時間 12 sec に於ける)
- 図 5.1 配管の配列
- 図 5.2-1 R6001の熱膨張力
- 図 5.2-2 R6002 "
- 図 5.2-3 R6003 "
- 図 5.2-4 R6005 "
- 図 5.2-5 R6007 "
- 図 5.3-1 固有モード (1次)
- 図 5.3-2 " (2次)
- 図 5.3-3 " (3次)
- 図 5.3-4 " (4次)
- 図 5.3-5 " (5次)
- 図 5.3-6 " (6次)
- 図 5.3-7 " (7次)
- 図 5.3-8 " (8次)
- 図 5.3-9 " (9次)
- 表 2.1 試験条件
- 表 5.1-1 配管諸元 (その1)
- 表 5.1-2 配管諸元 (その2)
- 表 5.2 拘束条件
- 表 5.3 温度条件
- 表 5.4 放出系配管の固有振動数
- 表 5.5 自由振動成分の振動数

## 1. ま え が き

高速炉用蒸気発生器の大リーク・ナトリウム-水反応事故に対する安全装置である放出系は大リーク・ナトリウム-水反応事故時に高温・高速のナトリウムの流入に伴なり熱的及び流体力学的な力を受ける。反応により発生した圧力を開放し、上記の力に対して健全である放出系配管を設計するためには、管内流の特性及び配管が受ける力を定量的に明らかにすることが必要である。

われわれは動力炉核燃料開発事業団の蒸気発生器安全総合試験装置SWAT-3を用いて行なわれた試験Run-3の放出系配管に関するデータのうち管内流の挙動、配管の温度変化及び支持部に作用する力に基づいて配管に作用する力の説明を試みた。

本報告では、まず試験データを整理し関連データを解析し管内流の挙動及び配管に作用する力をデータをもとに明らかにした。その結果配管の支持部に作用する力は管内流の流動変化による流体力、及び熱膨張力が重ねられたものであることが判明した。試験データのみから管内流の流動変化による流体力及び熱膨張力を分離して各々の変化及び大きさを評価することはできない。従って解析的に各々の力を評価するため熱膨張力及び固有振動数の計算を行ない試験結果と照合した。また本検討の過程で不足した情報は今後測定すべき項目として6章に記した。

SWAT-3試験装置は原型炉「もんじゅ」の二次冷却系の $1/2.5$ 規模の縮尺模型であるが、試験Run3における注水率は、実機伝熱管1本ギロチン破断時の水漏洩率とほぼ等しい。したがって実機伝熱管1本破断時の配管に作用する力は本試験の結果とオーダー的には同じと考えて良い。

放出系配管の支持部に作用する力の測定は試験Run2より始められたが、同試験ではボイド率など管内流に関するデータが得られておらず、放出系配管に作用する力の定量的な評価難しいため、データ整理の結果得られた知見のみをまとめ、参考データとしてAppendix(2)として本報告に付した。

## 2. 試 験 概 要

### 2.1 試 験 装 置

装置の概略を図 2.1 に示す。図に示すように放出系配管は蒸発器のカバーガス領域にある側壁から出て圧力開放タンクに至るライン及び過熱器頂部から出てそれと接続するラインから構成される。

### 2.2 試 験 条 件

試験条件を表 2.1 に示す。ナトリウム-水反応は蒸発器の下部で発生する。反応時には蒸発器と放出系配管の間に設置されているラブチャ板が破裂し、ナトリウム及び反応生成物が配管に流入し収納容器に流れ込む。

### 2.3 測 定 方 法

試験では下記の項目が測定されている。

管内流に関する測定項目

- I) 圧 力
- II) ボイド率
- III) 流 量
- IV) 初期ナトリウム流速

配管に作用する力に関する測定項目

- I) 支持部の力
- II) 管壁近傍のナトリウム温度

上記項目の測定方法の概略を記す。

#### (1) 圧 力

測定点は図 2.2 の P 6 0 3 1, P 6 0 3 3 及び P 6 0 3 6 である。測定は配管側壁からパイプを引き出し、その先端部の圧力センサーで行なう。これは温度急変によるドリフト防止のためパイプ中にはあらかじめナトリウムが挿入されている。

#### (2) ボイド率

測定点は配管上一点で図 2.2 の G 6 0 0 1 である。測定は r 線透過式ボイド率計で行なう。

(3) 流 量

測定点は配管上一点で図 2.2 の P6038 である。

測定は高温ナトリウムの流量測定用に開発されたドラッグ式流量計で行なう。

(4) 初期ナトリウム流速

測定点は図 2.2 の L6031, L6032, L6033, L6034, L6002 及び L6003 である。ナトリウムが各測定点を通過する時間が接触式ナトリウム検知器で測定される。初期ナトリウム流速は隣接する測定点間の距離と各々の点をナトリウムが通過する時間の差の比として求める。

(5) 支持部に作用する力

測定点は図 2.2 の下支持部 (R6015, R6016), 中間支持部 (R6001, R6002, R6003, R6004, R6005, R6007), 上支持部 (R6009, R6011) である。図 2.3 に示すように測定は配管から直角にアームを出し, このアーム上で圧縮型荷重変換器を用いて行なう。

(6) 管壁近傍のナトリウム温度

測定点は図 2.2 の T6003, T6004, T6005, T6006, T6033, T6034 及び T6035 である。測定は熱電対で行なう。

圧力センサー,  $\gamma$ 線透過式ポイド率計, ドラッグ式流量計, 接触式ナトリウム検知器及び圧縮型荷重変換器の概略を一括して Appendix (I) に示す。

### 3. 測 定 結 果

測定結果を図 3.1 から図 3.11 に示す。

測定結果は注水系配管途中に設けられたタービン式流量計に第 1 パルスが発生した時刻を時間軸の零として整理する。

## 4. データ解析

3 章で示したデータを解析し、管内流の挙動及び配管に作用する力を調べる。

### 4.1 管内流の挙動

管内流の挙動を明確にするためには管内流の圧力、ボイド率及び速度を知ることが必要である。圧力は配管に沿って測定されている。

ボイド率は配管上ただ一点で測定されているにすぎず、配管に沿ってのボイド率の変化は正確には知ることはできない。しかし一点での測定結果をもとにボイド率の概略の推定は可能である。

速度はラプチャ板破裂直後に配管へ流入する初期ナトリウム流速が測定されているにすぎず、速度の時間変化は知ることはできない。しかし配管上の一点に設けられた流量計の出力の時間変化から流量の概略は推定できる。以下にデータをもとにした現象の説明を記し流量計の出力から流量の推定を行なう。

#### 4.1.1 現象の説明

##### 4.1.1.1 圧力のデータ

図 3.1-1 及び図 3.1-2 より以下のことが判る。

- ① 配管内の圧力 (P6031, P6033, P6036) は 0.77 sec から増加し始めている。このことは 0.77 sec から流体が配管へ流入し始めることを意味する。
- ② 配管内の圧力は 1.2 sec で初期の値にもどる。このことは 1.2 sec 以後は管内流が無いことを意味する。
- ③ ①及び②を考慮すると管内流は 0.77 sec から 1.2 sec の間に存在することになる。
- ④ 最大圧力は 2.5 sec で発生し、その値は  $4.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$  である。

##### 4.1.1.2 ボイド率のデータ

図 3.2 は図 2.2 の Q6001 でのボイド率変化であり、ボイド率は 0.8 sec と 1.2 sec で 1.0 より小さいこと、特に 0.8 sec と 3.6 sec の間が小さく、1.7 sec に最低値 0.75 となることを示している。ボイド率は配管に沿って変化し、このデータのみから詳細を知ることは不可能であるが、このデータからボイド率の低いつまりナトリウムを多く含んだガスは配管を流体が流れてい

る時間のうち初期段階に流れてしまうことが判る。

ボイド率測定用に使用された $\gamma$ 線透過式ボイド率計は Appendix (H) に示されるようにボイド率を配管断面積としてではなく、ビーム方向の直線としてとらえているので配管断面上のボイドの分布により測定結果は異なってくる。つまりボイドが配管断面上に均質に分布していれば測定結果はそのままボイド率となるが、ボイドが配管断面状に不均一に分布していれば測定結果はそのままではボイド率とはならない。すなわち、図 3.2 のボイド率の値は配管断面のボイド分布を考慮に入れて評価しなくてはならない。この点に関しては 4.1.2 項で述べる。

#### 4.1.1.3 流量計の出力データ

図 3.3 は図 2.2 の D6038 での流量計の出力データである。

流量計は Appendix (H) に示すように配管中に円板をその面が流れと直角となるように置き、この円板が流れにより受ける力を測定するものであり、流量計の出力とはこの円板に作用する力のことである。流量計の出力は次の時間でピークをもちながら 11 sec まで存在し、特に 0.8 sec と 3.6 sec の間が大きいことが判る。

ピーク No	ピーク発生時間 (sec)
1	0.86
2	1.5
3	1.9
4	2.8
5	3.4
6	4.7
7	5.6
8	6.4
9	7.3
10	8.5

流量計の出力と流量の関係は 4.1.2 項で記す。

#### 4.1.1.4 初期ナトリウム流速のデータ

図 3.4 は各接触式 Na 検知器のラプチャ板からの距離と、最初に Na を検知した時間とを示す。この実線の勾配から Na の初期流速は 3.5 m/sec である事がわかる。ここで用いた検知器は一度 Na と接触して短絡すると、その後水素ガスが来

ても短絡したままである場合が多いので、この流速は初期流速としての意味しかない。また Appendix (D) に示すように、この検知器の信号が出るためには配管中心部に突き出されたロッドの先端と配管壁とを同時におおむらような Na の塊の存在が必要であるので、ミストではなく Na の塊の流速を測っていると考えられる。

#### 4.1.2 流量計出力からの流量の推定

試験 Run 3 では蒸発器から配管を通して収納容器へ移動したナトリウムの総重量が反応前後の蒸発器及び過熱器中のナトリウムの変化から測定されている。この項では 4.1.1 項で示した流量計出力及びボイド率にもとづいて流量を計算し、この流量より得られる収納容器へ移動したナトリウムの総重量を測定値と比較する。

流量計出力から流量を推定するためには流量計出力と流量の関係式が必要となる。この関係式は管内流のボイド率、ボイド分布、及びスリップ比等に依存し、放出系配管に見られるような過渡的な流れでは、ボイド分布及びスリップ比等の推定は現状の測定技術では困難である。

さらに今回の試験ではボイド率は配管上一点で測定されているのみである。したがってボイド率、ボイド分布、及びスリップ比に関して仮定を設け流量を計算することとする。

##### 4.1.2.1 仮 定

- I) 管内流は均質流である (スリップ比 = 1.0)
- II) ボイド率及び流量は図 2.2 に示すように配管に沿って一点のみで測定されている。ボイド率は図 3.2 に示すように 1.7 sec で最小となる。一方流量計の出力は図 3.3 に示すように 1.9 sec で最大となり、ボイド率が最大となる時間より 0.2 sec 遅れている。この遅れはボイド率測定点が流量測定点より上流にあるためで、ナトリウムのスラグがまず 1.7 sec にボイド率測定点を通過し、その後 1.9 sec に流量測定点を通過することを意味する。

厳密には流量測定点のボイド率はボイド率測定点でのそれと異なるが、ボイド率及び流量の測定点は近いので同じ変化をするものと考える。ただし先記したように流量測定点でのボイド率はボイド率測定点でのボイド率と時間的遅れが存在するので、図 3.2 に示すボイド率が最小となる時間を流量計の出力が最大となる時間 1.9 sec とするよう時間軸をずらす操作をした。



4.1.2.2 流量の計算

均質流であれば流量計の出力：Fは(1)式で与えられる。

$$F = \lambda \frac{1}{2} \rho U^2 S_D \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\rho = \rho_s (1 - a) + \rho_g a \quad \dots\dots\dots (2)$$

- F : 流量計の出力
- $\lambda$  : 抗力係数
- $\rho$  : 流体のみかけの密度
- $\rho_s$  : ナトリウムの密度
- $\rho_g$  : ガスの密度
- U : 流速
- $S_D$  : 抗力測定用円板の面積
- a : ボイド率

$\rho_g \ll \rho_s$ であるので、(2)式は(2)'式となる。

$$\rho = \rho_s (1 - a) \quad \dots\dots\dots (2)'$$

流量：Wは(3)式で与えられる。

$$W = \rho_s g (1 - a) U S_p \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし、 $S_p$  : 配管流路断面積

(1)式からUを求め(3)式へ代入すると

$$W = g S_p \sqrt{\frac{2 F \rho}{\lambda S_D}} \quad \dots\dots\dots (4)$$

となる。

- $\lambda = 1.0$  [1]
- $\rho_s = 87.4$  [kg/m<sup>3</sup>] [sec<sup>2</sup>/m]
- $S_D = 7.05 \times 10^{-8}$  [m<sup>2</sup>]
- $S_p = 7.30 \times 10^{-2}$  [m<sup>2</sup>]

を(4)式へ代入すると(5)式となる。

$$W = 1.13 \times 10^8 \sqrt{(1-a) F} \quad \dots\dots\dots (5)$$

(5)式を用いて計算したナトリウム流量の時間変化を図4.1に示す。

4.1.2.3 ナトリウムの総移動量の測定値と計算値の比較

ナトリウムの総移動量：Mは(5)式を時間積分することにより得られ、次のようになる。

$$M = \int_0^{12} W dt = 614 \quad [\text{kg}]$$

一方、ナトリウムの総移動量の測定値は910kgであり、上記の計算より多い。

今後、ボイド率測定技術及び流量測定技術の向上が必要と思われる。

#### 4.1.3 管内流の挙動のまとめ

図 4.2 に圧力、ボイド率及び流量の変化を模式的に示す。この図をもとに以下のことが得える。

- ① 圧力の最大値は 2.5 sec の  $4.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$  である。圧力変化は 0.77 sec より 1.2 sec までの間で変化しており、管内流の変化はこの時間中に存在すると考えられる。
- ② 管内流は二相流で 2 sec (ラプチャ板破裂後 1.2 sec) 前後に大きなナトリウムのスラグが流れる。ボイド率の最小値は均質流を仮定すると 1.7 sec の 0.75 であった。
- ③ 均質流を仮定すると、ナトリウムは 0.8 sec と 3.6 sec の間 (ラプチャ板破裂直後 2.8 sec の間) でほとんど流れ流量の最大値は  $600 \text{ kg/sec}$  であった。

#### 4.2 配管に作用する力

配管に作用する力を予測するデータとして支持部に作用する力及び管壁近傍のナトリウム温度が存在する。

支持部に作用する力は管内流が存在する 0.77 sec ~ 1.2 sec の時間帯の前後でも存在し、それぞれ特徴のある変化をしている。このことは配管に異なる力が作用していることを意味する。したがって反応開始時間 (初期スパイク発生時間 0.22 sec) 以後の全過程を、

- ① 反応開始時間 (0.22 sec) ~ 流体が配管へ流入する時間 (0.77 sec)
- ② 管内流が存在する時間帯 (0.77 sec ~ 1.2 sec)
- ③ 管内流が消滅した時間帯 (1.2 sec ~)

の 3 ステップに分割し、各ステップ毎に配管に作用する力を調べる。

##### 4.2.1 反応開始時間 (0.22 sec) ~ 流体が配管へ流入する時間 (0.77 sec)

図 3.5-1 ~ 図 3.7-2 に示すように支持部に作用する力は時間 0.22 sec から規則正しい周波数で振動している。反応開始時間 0.22 sec より支持部の力が発生していることから配管に作用する力は反応時の衝撃による蒸発器の運動が原因と推定される。

蒸発器に作用するこの力の評価は困難であるが、一般に振動系に力が作用すると振動系の初期挙動は力と同一の振動動数を持って時間変化をする強制振動成分

に系の固有振動数で振動する自由振動成分が重畳されたものとなるので、測定された支持部の力の強制振動成分から蒸発器の運動に伴い配管に作用する力の時間変化特性を予測できる。

図 3.5-1～図 3.7-2 の周期的な変化が自由振動成分であり、周期的な変化の振幅の中心の変化が強制振動成分である。図 3.5-2 を例にとると強制振動成分は図中の破線で示され、この破線の変化より蒸発器の運動に伴なり力は 0.22 sec と 0.77 sec の間でステップ状に変化をすることがわかる。他の図からも同様のことが言える。

#### 4.2.2 管内流が存在する時間帯 ( 0.77 sec ~ 1.2 sec )

この時間帯では配管は管内流のため熱膨張力と流体力を受ける。したがって測定された支持部の力には両方の力の影響が重畳されている。熱膨張力及び流体力に関して図 3.1.1 から図 3.1.4 をもとに導かれる事項及び流体力の評価を以下に記す。

##### 4.2.2.1 データから導かれる事項

###### 1) 熱膨張力

熱膨張力は流入した高温の管内流による管壁温度上昇が原因であり、温度変化は図 3.8 に示すように緩慢に変化しているので、熱膨張力は温度変化に追従した緩慢な変化を示すものと予測される。

従って、支持部に作用する熱膨張力は緩慢に変化すると考えられ支持部の力の平均値の変化に寄与していることになる。この平均値の変化より以下のことがわかる。

- ① R6001での熱膨張力は図 2.2 の座標系に従うと、図 3.9-1 に示すように  $-y$  軸方向に作用していることになる。
- ② R6002, R6003, R6005 及び R6007 の熱膨張力は①と同様の座標系に従うと図 3.9-2, 図 3.9-3, 図 3.9-4 及び図 3.9-5 に示すように R6002 で  $+y$  軸方向, R6003 で  $-y$  軸方向, R6005 で  $+y$  軸方向, R6007 で  $-x$  軸方向に作用していることになる。

###### 2) 流体力

流体力には、

- ① 流体の自重
- ② 運動量変化による力

があり、その大きさ及び変化は管内流の大きさ及び変化と密接に関係する。

4.1.1.2項の流量の計算で管内流は0.77 secから3.6 secの間で大きく、変化も激しいことがわかっているため、流体力も、この時間で大きく、変化も激しいと予測される。

従って上記流体力と配管系の振動特性に依存して決まる流体力による支持部の力は0.77 secから3.6 secの間で大きく、振動するものと考えられ、1)で記したような緩慢に変化する熱膨張力による支持部の力とは異なる。

0.77 secと3.6 secの間の支持部の力の変化から流体力の変化を予測し以下に記す。

- ① R6001では流体力は図2.2の座標系に従うと図3.9-1に示すように $-y$ 軸方向に作用していることになる。
- ② R6003, R6004及びR6005では流体力は各々図3.9-3, 図3.9-4及び図3.9-5に示すように $-y$ 軸方向に作用していることになる。またR6007では図3.9-6に示すように $-x$ 軸方向に作用していることになる。
- ③ R6001での力は図3.9-1に示すように2.0 secで最大となり、幾つかのピークを持つ。そして、このピーク発生時間は4.1.1.3項に示した流量計の出力のピーク発生時間と相関のあることがわかる。R6003, R6004及びR6005での力からも同様のことが言える。
- ④ 各図を比較するとR6001及びR6004に大きな流体力が作用していることがわかる。
- ⑤ R6009及びR6011では流体力は図3.10-1及び図3.10-2に示すように $+y$ 軸方向に作用していることがわかる。
- ⑥ R6009での力は図3.10-1に示すように2 secから2.5 Hzの一定振動数で振動している。同様にR6011での力は図3.10-2に示すように3.6 secから3.1 Hzの一定振動数で振動している。このことはR6009及びR6011には2.5 Hz及び3.1 Hzを持つ力が存在することになる。この振動はR6001, R6003, R6004, R6005及びR6007での力には現われていない。

#### 4.2.2.2 流体力の評価

上支持部(R6009, R6011)の力が一定振動数で変化しているのは、上支持部には周期的な力が作用しているためと思われる。この力は今後確認する必要がある。

あるが、収納容器及びその支持架台が流入する流体のため力を受けて運動するために生じたものと考えられる。

上支持部の力に現われている上記の振動が中間支持部（R6001, R6003, R6004, R6005, R6007）に見られないのは、両支持部の間に存在する伸縮継手の剛性が低いいためその振動が伝達されなかったためと考えられる。

ここでは4.1項の管内流に関する測定結果を用いて流体力を計算する。次に流体力の計算値の妥当性を検討するため流体力による中間支持部の力を計算し、測定結果と比較する。

1) 流体力の計算

流体力には流体の自重と曲管部での流速方向変化に因る力があるが、前者は後者に比して小さいので、以下では後者のみを考慮する。

図4.3は曲管に作用する流体力の作用点及び方向を示す。上述したように伸縮継手の剛性が低いため図4.3の $F_1$ 及び $F_2$ は中間支持部には作用せず、上支持部のみ作用すると考えられる。従って中間支持部には $F_3$ ,  $F_4$ 及び $F_5$ が作用することになる。

曲管部では二方向に各々 $F_f$ が作用し $F_f$ は

$$F_f = \rho U^2 S_p \dots\dots\dots (6)$$

但し、 $\rho$  = 流体密度

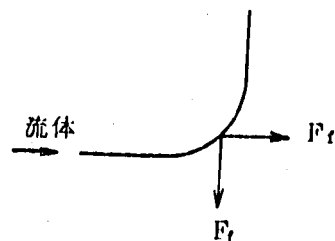
$U$  = 流 速

$S_p$  = 管の流路断面積

で与えられる。各曲管部で $\rho U^2$ がわかれば $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ 及び $F_4$ は計算できるが、各曲管部での $\rho U^2$ はわからない。しかし4.1項で記したように図4.3の曲管部③と曲管部④の間の配管上のF6038で流量が測定されており、流量計の出力 $F$ と $\rho U^2$ の間には(1)式が成立する。

$$F = \lambda \frac{1}{2} \rho U^2 S_D \dots\dots\dots (1)$$

従って曲管部④での $\rho U^2$ はF6038での $\rho U^2$ と等しいとすると、曲管部④での $\rho U^2$ は(1)式から評価できる。 $\lambda = 1$ として(1)式から $\rho U^2$ を求め、(6)式へ代入すると曲管部④での $F_f$ は(7)式となる。



$$F_i = \frac{2 F S_p}{S_D} \dots\dots\dots (7)$$

図 4.4 は(7)式より計算した曲管部④での  $F_i$  である。

$F_1$ 、 $F_2$  および  $F_3$  はその点での  $\rho U^2$  が不明なため評価できないが、速度及び密度が配管中軸方向に一様に変化しないものとするれば  $F_1$ 、 $F_2$  及び  $F_3$  は  $F_4$  とは時間遅れを持つだけで同一の変化をすると考えることができる。各曲管部での流体力の時間遅れは、

$$[ \text{時間遅れ} ] = \frac{[ \text{曲管部間距離} ]}{[ \text{管内流速} ]}$$

で与えられる。管内流速として初期流速 = 3.5 (m/sec) を用いると時間遅れは、

$$F_1 \text{ と } F_2 \text{ では } 4.3 \times 10^{-2} \text{ sec}$$

$$F_2 \text{ と } F_3 \text{ では } 8.4 \times 10^{-2} \text{ sec}$$

$$F_3 \text{ と } F_4 \text{ では } 1.3 \times 10^{-1} \text{ sec}$$

となる。図 4.4 の流体力の変化の程度と、上記の時間遅れを比較すると  $F_1$  と  $F_2$ 、 $F_2$  と  $F_3$ 、 $F_3$  と  $F_4$  では時間遅れは無視できる。

結局

$F_1$  の z 成分と  $F_2$  の z 成分

$F_2$  の y 成分と  $F_3$  の y 成分

$F_3$  の x 成分と  $F_4$  の x 成分

は各々方向が逆で同じ大きさであるため互いに相殺し、配管の運動を誘起する力とはならない。

結局、配管の運動を誘起する流体力は図 4.4 のように変化する  $F_1$  の x 成分及び  $F_4$  の y 成分である。

2) 流体力による中間支持部の力の計算

中間支持部に作用する力は先に求めた流体力に対する配管の動的応答解析より計算できる。しかし中間支持部の力の時間変化及び図 4.4 に示す流体力の時間変化より、

① 力を受けた時の配管の運動の振動数は 10 Hz 程度である。

② 配管に作用する流体力の振動数は 1 Hz 程度である。

ということが判る。このように配管に作用する力の振動数と、その力に対する配管の運動の振動数の差が大きいため、中間支持部に作用する力は流体力が静的に作用するものとして計算できる。更に図 4.3 の曲管部④は中間支持部に近いので、曲管部④に

作用する - y 軸方向の流体力  $F_1$  は、そのほとんどが中間支持部に作用すると考えられる。従って中間支持部の力は図 4.4 の曲線とみなすことができる。

### 3) 流体力による中間支持部の力の測定値

中間支持部の力の測定結果は流体力と熱膨張力の影響の和になっているので、流体力による中間支持部の力の測定値を知るには熱膨張力による中間支持部の力を求め測定結果から除去することが必要となる。熱膨張力による支持部の力の詳細な計算は 5 章で記すこととし、ここではそれを流体力が消滅する時間 12 sec で中間支持部に残留する力 ( 4.2.3 項に記すようにこの力は熱膨張力による力である。 ) で評価することとする。こうして中間支持部での力が最大となる時間 2.0 sec での流体力によるこの支持部での力を求めると図 3.9-1, 図 3.9-3, 図 3.9-4 及び図 3.9-5 より、

R6001 で	0.57 ton	( - y 軸方向 )
R6003 で	0.6 ton	( - y 軸方向 )
R6004 で	0.8 ton	( - y 軸方向 )
R6005 で	1.2 ton	( - y 軸方向 )

であるから上記の力の和をとることにより 3.2 ton となる。

### 4) 流体力による中間支持部の力の計算値と測定値の比較

1.9 sec での流体力による中間支持部の力の計算値は、図 4.4 の曲線から 2.9 ton である。この値は先に求めた計算値 3.2 ton に近い。ここでの議論は粗いものではあるが、この比較により配管に作用する流体力は図 4.3 の  $F_1$  の x 成分及び  $F_4$  の y 成分であり、図 4.4 の曲線で示される変化をすることが判った。

#### 4.2.3 管内流が消滅した時間帯 ( 12 sec ~ )

配管に作用する力は熱膨張力のみである。各支点での熱膨張力を図 4.5 に示す。

#### 4.2.4 配管に作用する力のまとめ

- ① 反応発生時の衝撃により蒸発器の運動が生じ、このため配管は力を受ける。この力は 0.22 sec から 0.77 sec の間ではステップ状に変化をされると考えられる。
- ② 中間支持部に作用する流体力は - y 軸及び - x 軸方向である。この流体力は曲管部での方向変化による力であり、図 4.4 に示すように変化し、1.9 sec で最大値 2.9 ton となる。
- ③ 上支持部に作用する流体力は + y 軸方向である。この流体力は曲管部での方向

変化による力及び 2.5 Hz 及び 3.1 Hz の振動数を持つ周期的外力である。

- ④ この周期的外力は流入するナトリウムによる収納容器の運動が原因と思われる。
- ⑤ 配管には熱膨張力も作用し、中間支持部で大きく上支持部では小さい。



## 5. 解 析 的 検 討

解析的検討として熱膨張力計算と固有振動数の計算を行なう。

### 5.1 熱膨張力計算

#### 5.1.1 解析条件

配管の配列を図 5.1 に示す。

配管諸元を表 5.1-1 及び表 5.1-2 に示す。

拘束条件を表 5.2 に示す。

温度条件に関しては次のようにする。

- ① 過熱器放出系配管の温度は変化しない。
- ② 支持部の力測定用アームの温度は変化しない。
- ③ 蒸発器放出系配管の温度変化を表 5.3 に示す。

表中に示されていない点の温度変化は表中の値から内挿して求める。

#### 5.1.2 解析手法

表 5.3 に示す 2 sec, 4 sec, 10 sec 及び 20 sec の各時間毎に計算コード NASTRAN<sup>[2]</sup> を用いて静的な解析を行なう。

#### 5.1.3 解析結果

R6001, R6002, R6003, R6005 及び R6007 での熱膨張力による力の計算値及び試験値を図 5.2-1 ~ 図 5.2-5 に示す。

#### 5.1.4 考 察

図 5.2 は測定結果と解析結果が合わないことを示している。特に R6001 及び R6002 では方向が逆である。この理由として

- ① 測定点が少なく蒸発器側壁からの配管の温度分布を正確に評価出来ない。
- ② 過熱器頂部からの配管の温度分布がわからないためその熱膨張力の影響を考慮していない。
- ③ 系に含まれているスプリングハンガーの初期状態を確認していない。

が考えられる。

## 5.2 固有振動数計算

### 5.2.1 解析条件

5.1 と同じ配管系とした。

### 5.2.2 解析寸法

計算コード NASTRAN を用いてキブンス法で計算した。

### 5.2.3 計算結果

1 次から 20 次の固有振動数を表 5.4 に示し、1 次から 9 次の固有モードを図 5.3-1 から図 5.3-9 に示す。

### 5.2.4 考 察

配管系の固有振動数に関するデータは図 3.5-1 ~ 図 3.7-2 の支持部の力の変化のみである。これらの図の支持部の力の自由振動成分の振動数を表 5.5 に示す。この振動数は測定点で卓越する系の固有振動数を示す。表 5.5 の 1 次から 5 次のモードは z 方向の変化の大きいモードであり、このモードに対応する振動数成分が支持部の力の変化に無いのは、本試験では支持部で z 方向の変化の大きいモードを測定していないためと考えられる。また上記測定点で卓越する固有振動数は 6 次から 8 次のモードに対応するものと考えられる。

今後、配管の詳細な動的応答解析を行なうためには、予備試験を実施し配管の固有振動数固有モード及び減衰係数を測定する必要がある。

## 6. む す び

S W A T 3 の試験 Run 3 で測定されたデータのうち、放出系配管に関するデータ

- ① 圧 力
- ② ボイド率
- ③ 流 量
- ④ 初期ナトリウム流速
- ⑤ 支持部の力
- ⑥ 管壁近傍のナトリウム温度

を考察した。また、熱膨張力及び固有振動数について計算を行ない測定値と比較した。

主な結果を以下に記す。

管内流の挙動に関して、

- ① 圧力の最大値は 2.5 sec の  $4.4 \text{ kg/cm}^2 \text{ a}$  である。圧力変化は 0.77 sec より 1.2 sec までの間で変化しており、管内流の変化はこの時間中に存在すると考えられる。
- ② 管内流は二相流で 2 sec (ラプチャ板破裂後 1.2 sec) 前後に大きなナトリウムのスラグが流れる。ボイド率の最小値は均質流を仮定すると 1.7 sec の 0.75 であった。

配管に作用する力に関して

- ③ ナトリウム-水反応に伴ない配管に
  - a. 蒸発器の運動による力
  - b. 曲管部での流速方向変化による力
  - c. 2.5 Hz 及び 3.1 Hz の振動数を持つ周期的外力
  - d. 熱膨張力

が作用するものと考えられる。

- ④ 蒸発器の運動による力は 0.22 sec から 0.77 sec の間ではステップ状である。
- ⑤ 曲管部での流速方向変化による力は測定されたナトリウムの流れに追従した変化をし 1.9 sec で最大値 2.9 ton となる。
- ⑥ ナトリウム流動の測定値より求めた中間支持部の力は最大 2.9 ton で測定結果にほぼ一致する。
- ⑦ 2.5 Hz 及び 3.1 Hz の周期外力は、流入するナトリウムによって収納容器が力を受けて運動するために生じたものと考えられる。

④ 熱膨張力は中間支持部で大きい。

今後測定すべき項目として

⑤ 詳細な流体のボイド率，配管断面上のボイド分布及び流量。

⑥ 過熱器頂部からの配管を含めた全放出系配管の温度変化。

⑦ スプリングハンガーに作用している初期荷重。

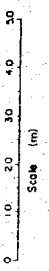
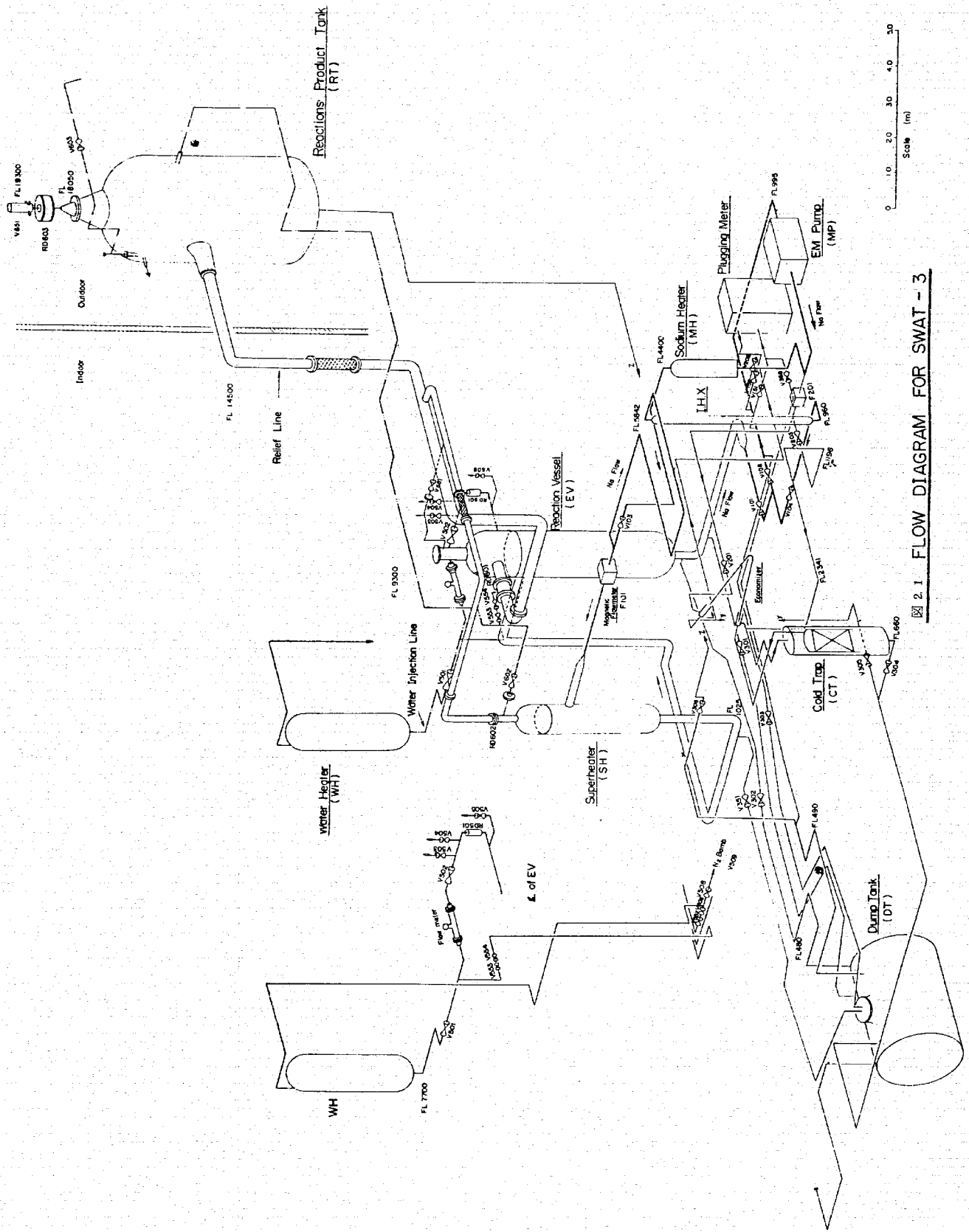
⑧ 配管系の固有振動数固有モード及び減衰係数。

がある。

最後に本試験の実施に際し，直接・間接に御協力いただいた諸氏及び報告書をもとめるに当たって適切な助言を寄せられた川崎重工・坂野耿介氏に心から感謝の意を表する。

## 7. 参 考 文 献

- [1] 「機械工学便覧」改訂第5版, 日本機械学会
- [2] McCormick, O.W. "The NASTRAN User's Manual" NASA SP-222  
(01) National Aeronautics and Space Administration, Washington  
D.C., 1972



2.1 FLOW DIAGRAM FOR SWAT - 3

表 2.1 Run 3 試 験 条 件

項	目	単 位	Run 3
試 験 年 月 日			S. 51 - 9 - 16
反 応 容 器 内 部 構 造 物 形 式	反 応 容 器		蒸 発 器
	内 部 構 造 物 形 式		ヘリカル・[H]
	反 応 点 位 置		ヘリカル下部5層目 P.L. 3100
注 水 条 件	注水孔・ラブチャ板形式		円筒型・19P×2以上
	ラブチャ板設定圧		
	RD501	kg/cm <sup>2</sup>	100 (500 (?))
	RD502	kg/cm <sup>2</sup>	82 (300 (?))
	平 衡 注 水 率	kg/sec	8.7 ~ 7.7
	全 注 水 量	kg	84.9
	注 水 配 管 温 度	°C	約 300
	水 加 熱 器 温 度	°C	300
	" 圧 力	kg/cm <sup>2</sup> (G)	147
	" 初 期 給 水 量	kg	390
	注水弁 (V502) 弁間時間	sec	9.5
	ナトリウム系条件	ナトリウム 温 度	°C
ナトリウム 流 量		ℓ/sec	静 止
カバ ー ガ ス 圧			
蒸 発 器		kg/cm <sup>2</sup> (G)	0.5
過 熱 器		kg/cm <sup>2</sup> (G)	0.5
カバ ー ガ ス 使 用 ガ ス			アルゴン
放 出 系 条 件	ラブチャ板設定圧		
	RD601	kg/cm <sup>2</sup>	3 (480°C)
	RD602	kg/cm <sup>2</sup>	3 (515°C)
	RD603	kg/cm <sup>2</sup>	1.5 (150°C)
	放出系配管取出し位置		側 部
	運 転 温 度		
	放 出 系 配 管	°C	248 ~ 320
	収 納 容 器	°C	360
	カバ ー ガ ス 圧 ( 収 納 容 器 )	kg/cm <sup>2</sup> (G)	0.5
	カバ ー ガ ス 使 用 ガ ス		アルゴン
ドレン系条件	運 転 温 度		
	ダンプタンク	°C	285
	ドレン配管	°C	313 ~ 396

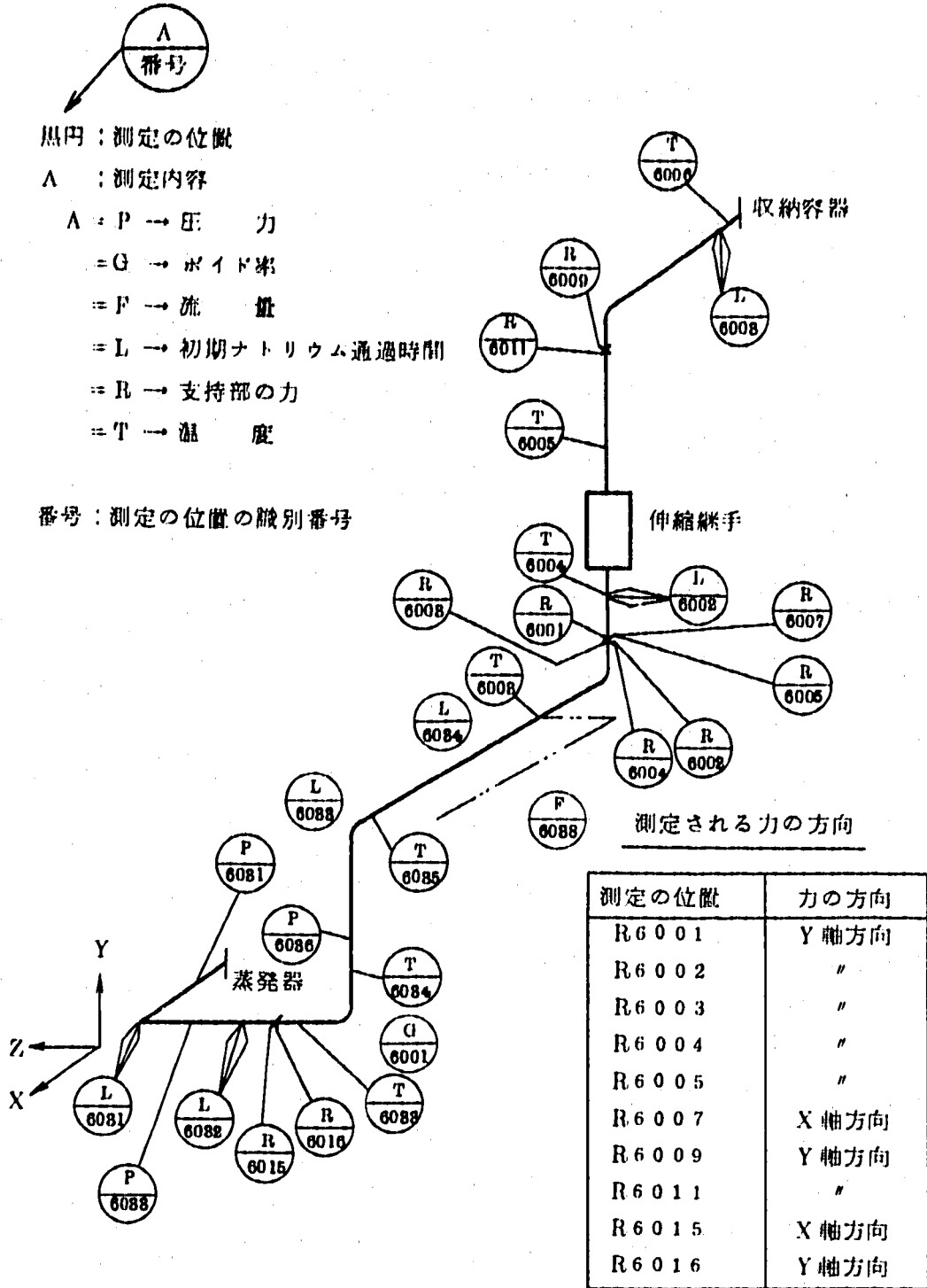


図 2.2 測定点の位置



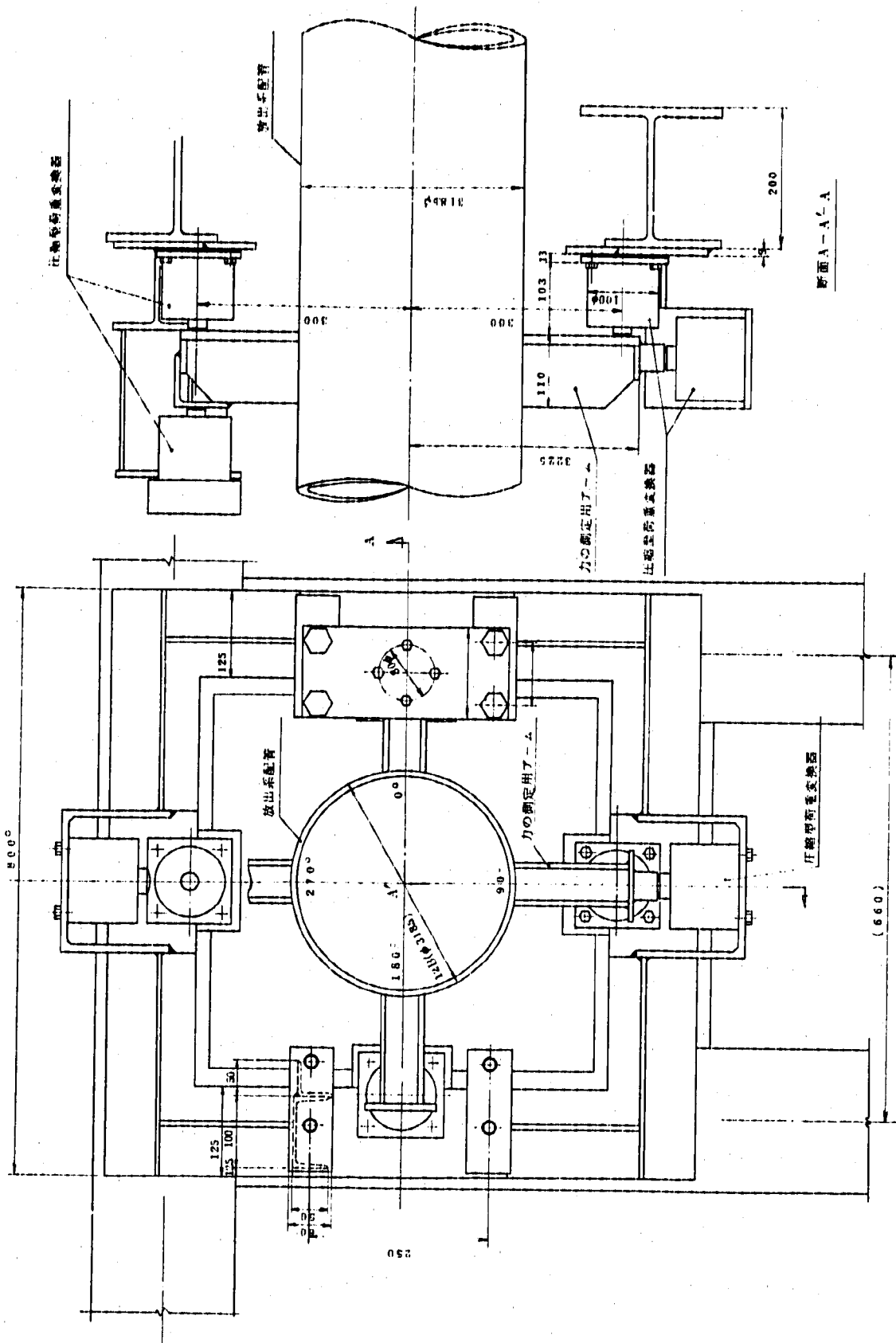


図 2.3 支持部の力の測定部構造

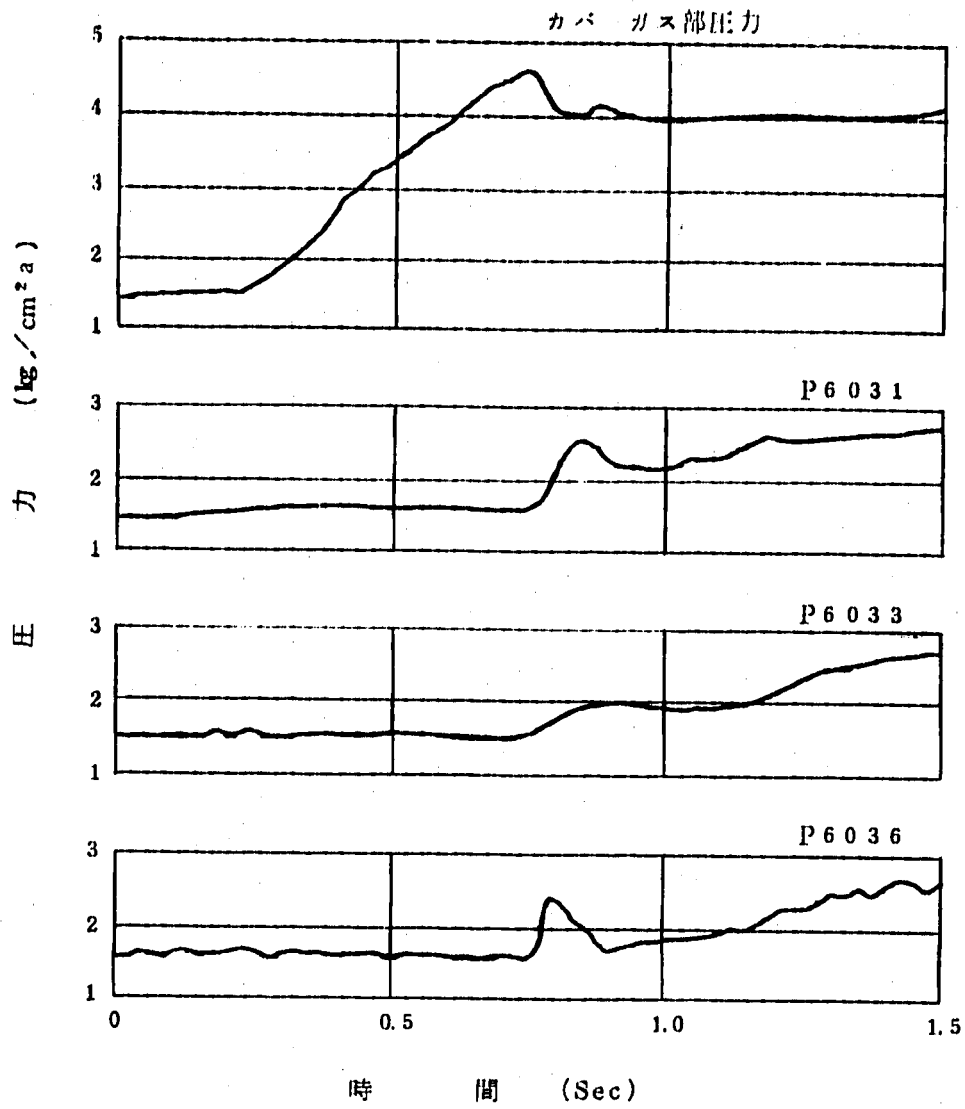


図3.1-1 放出系配管及びカバーガス部の圧力(初期)

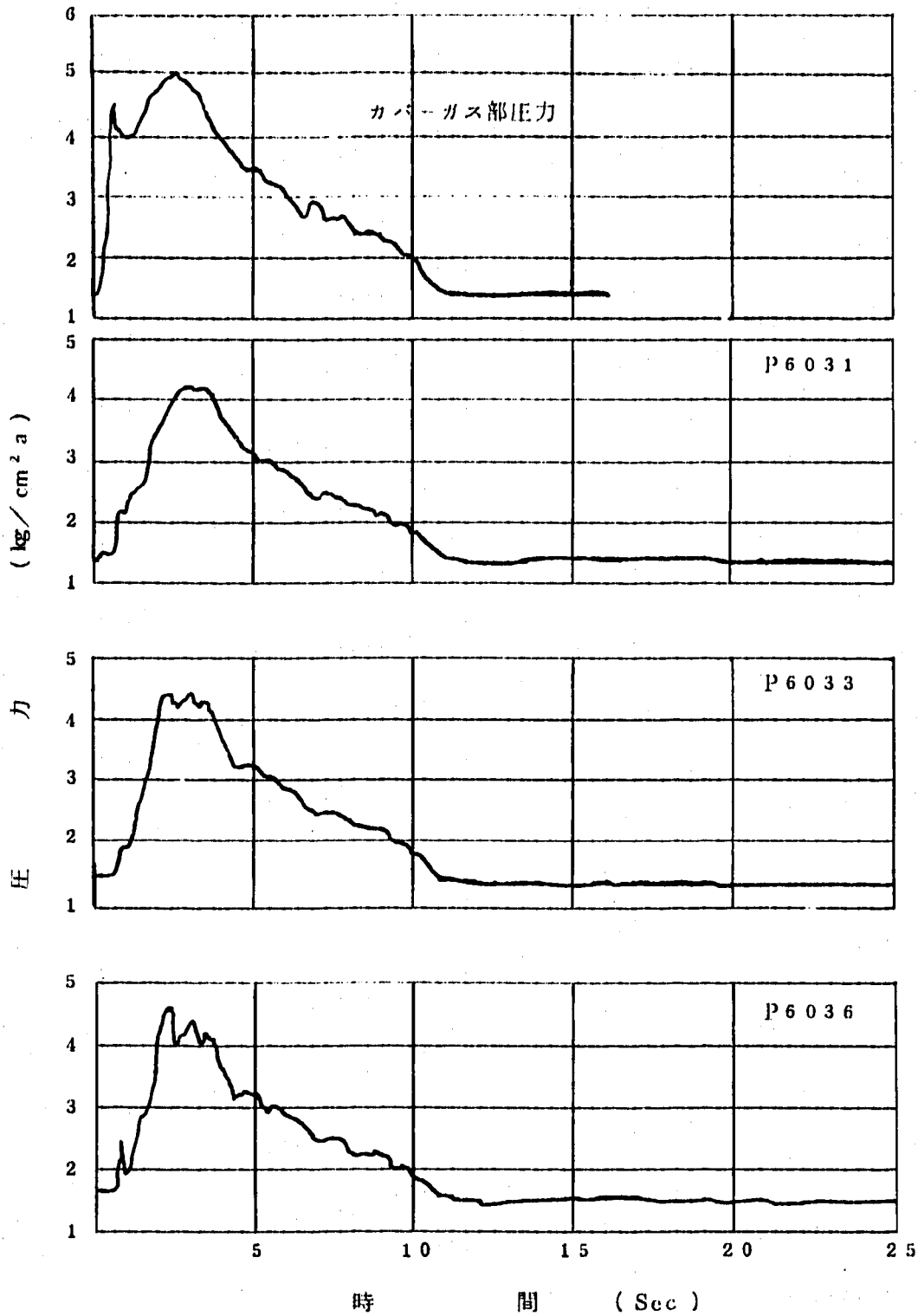


図 3.1 - 2 放出系配管及びカバーガス部の圧力 (全変化)

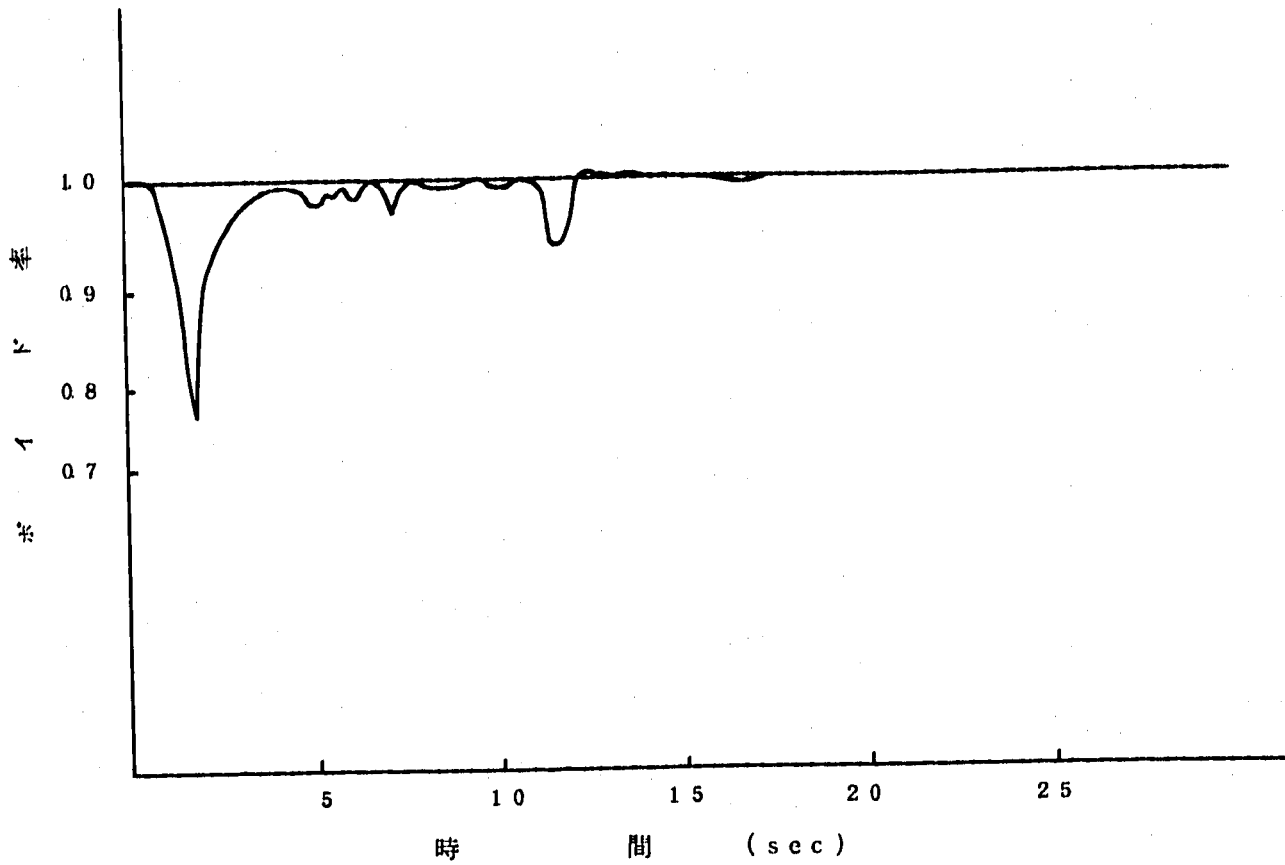


図 3.2 放出系配管内流体のボイド率

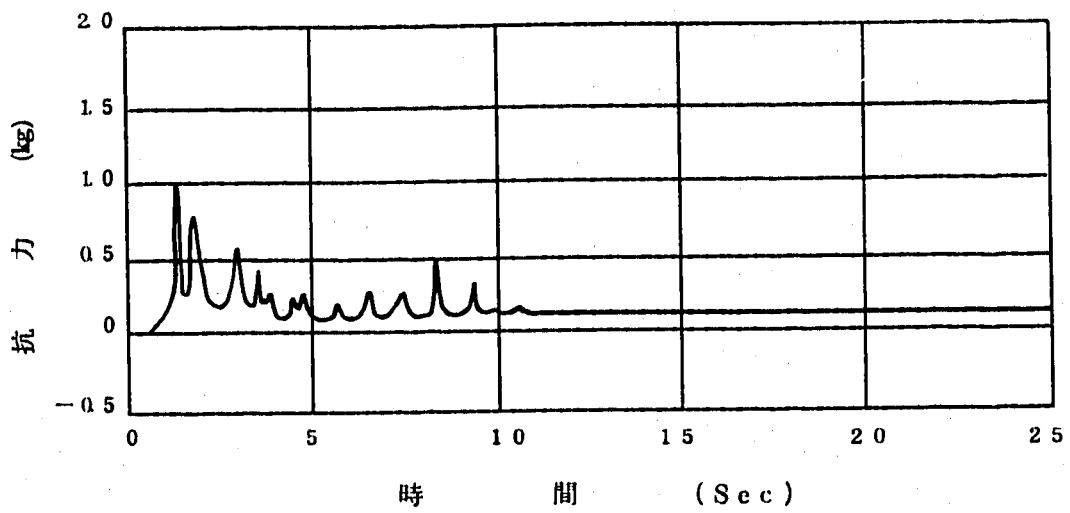


図 3.3 流量計の出力

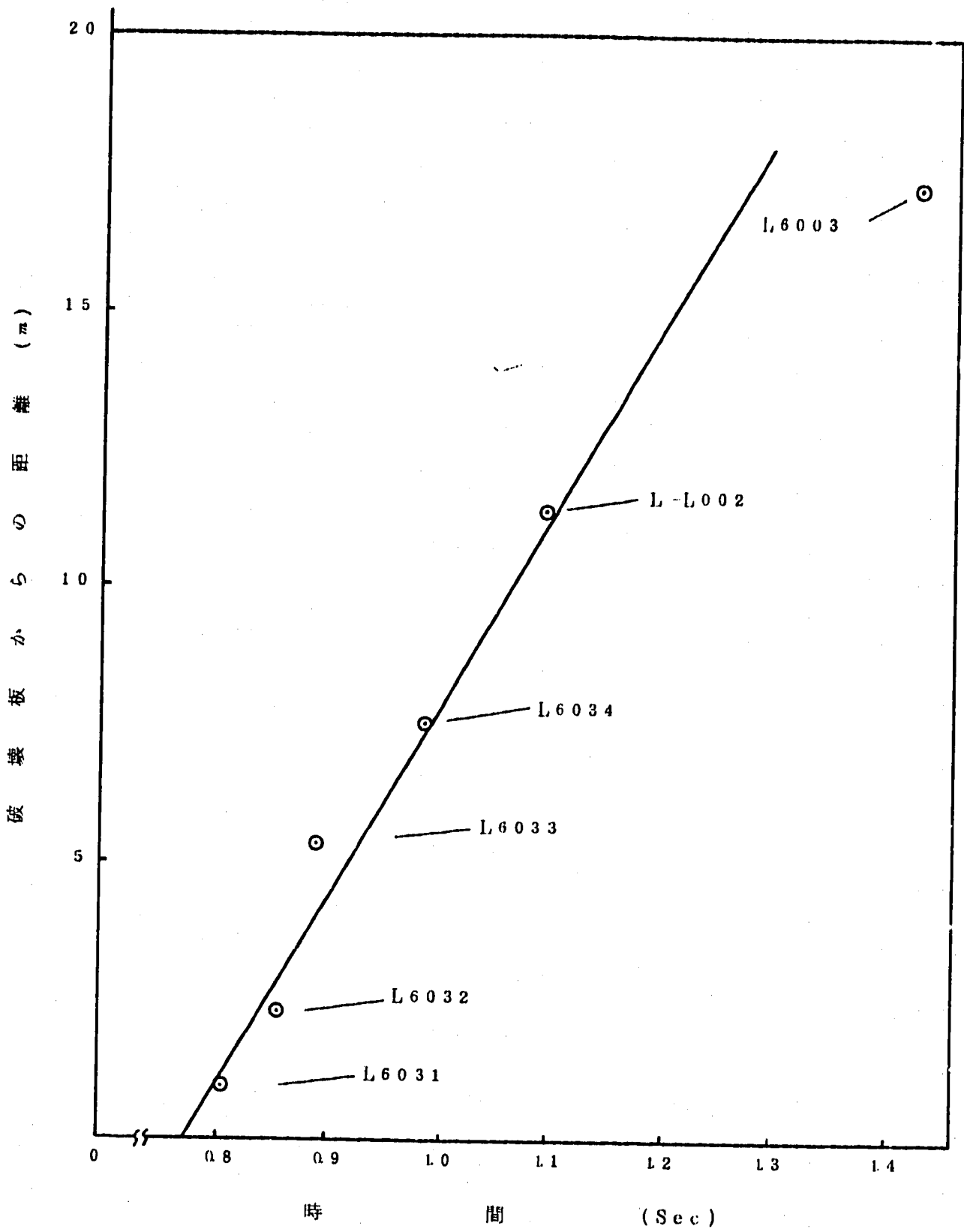


図 3.4 接触式ナトリウム検知器の位置とナトリウム通過時間の関係

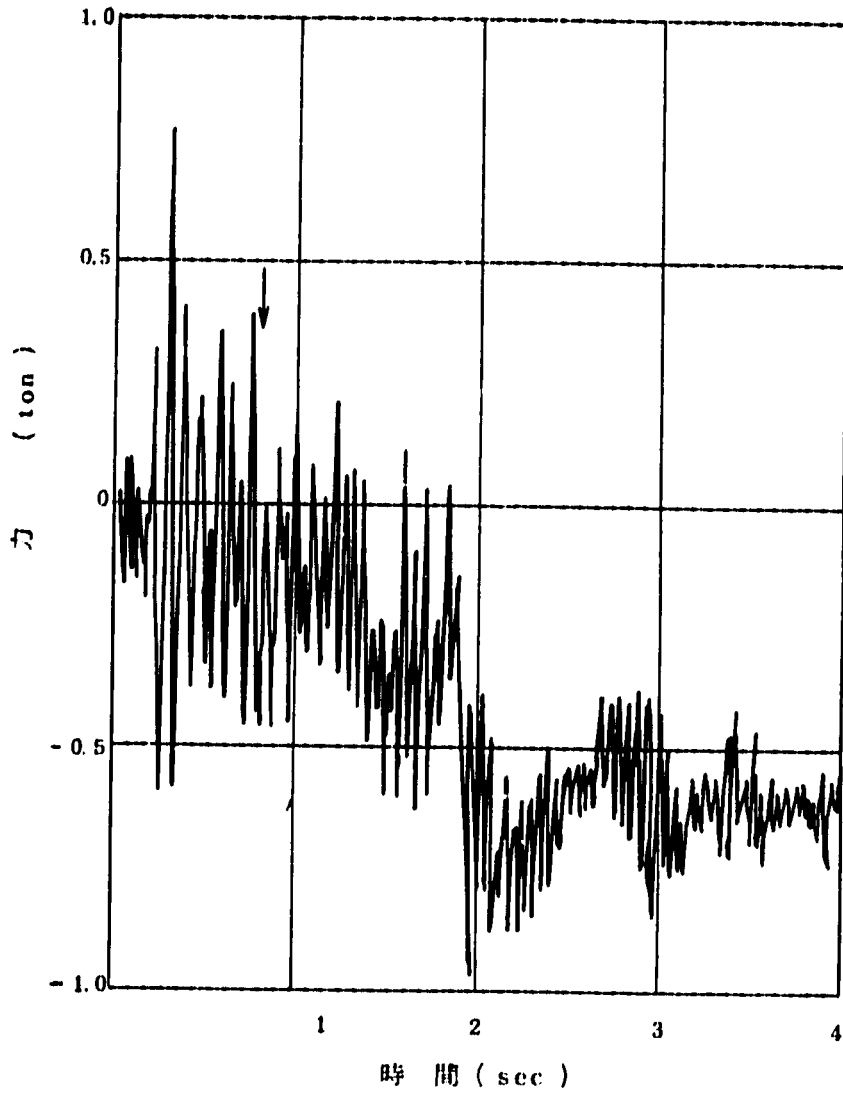


図 3.5 - 1 R6001 が受ける力 (初期)

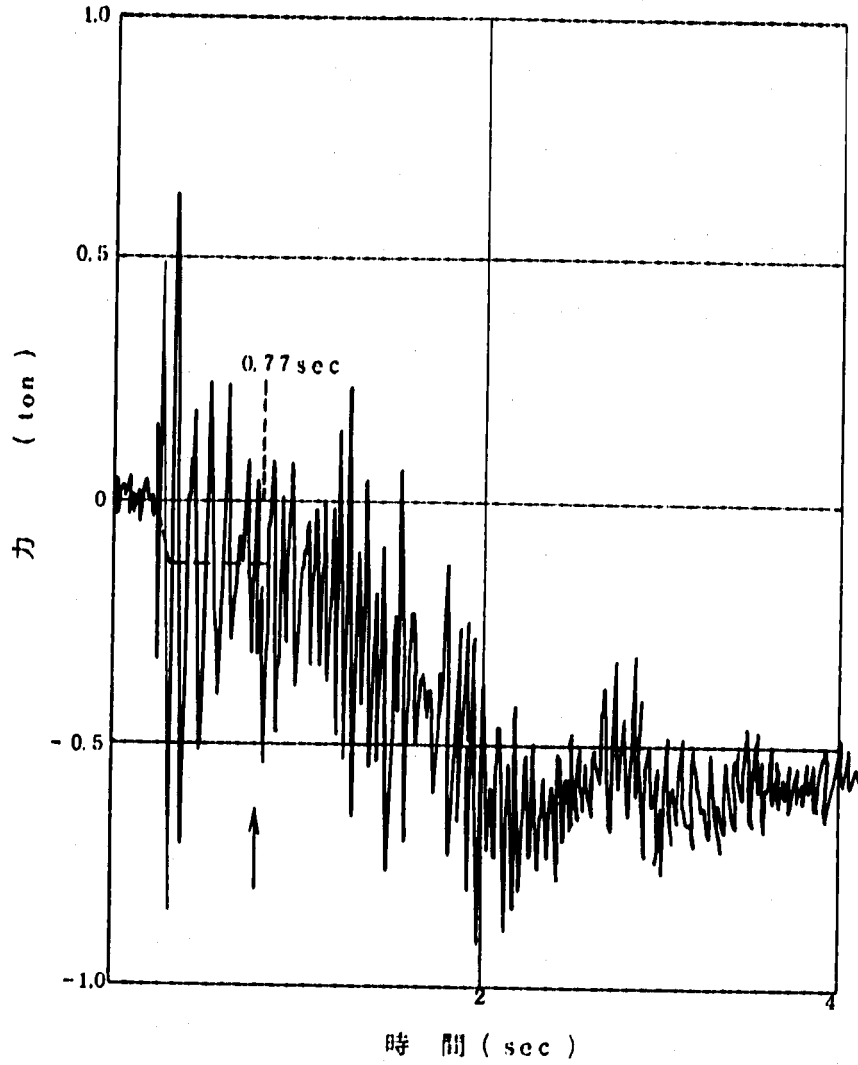


図 3.5-2 R6004 が受ける力 (初期)

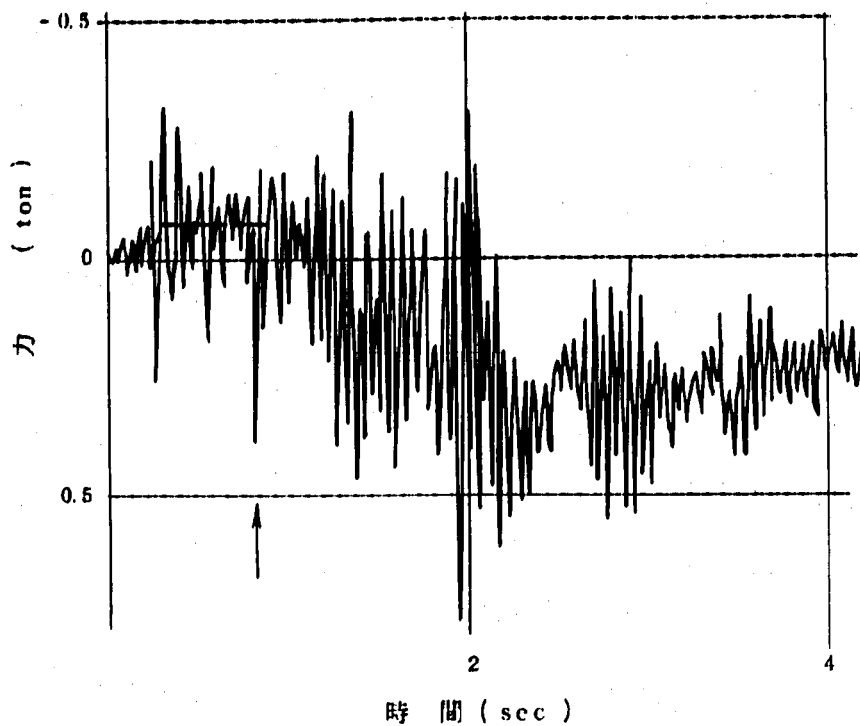


図 3.5 - 3 R6005 が受ける力 (初期)

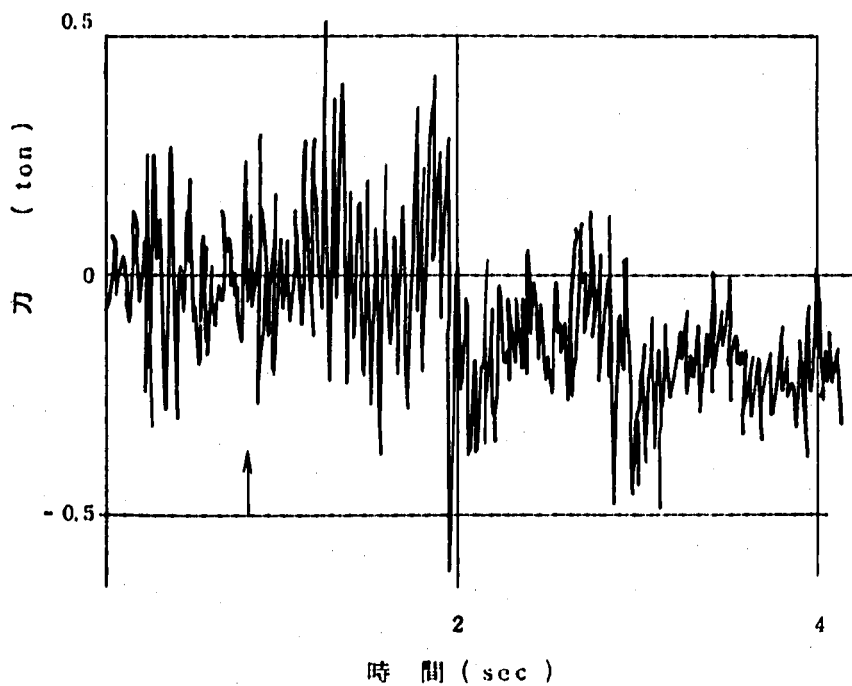


図 3.5 - 4 R6007 が受ける力 (初期)



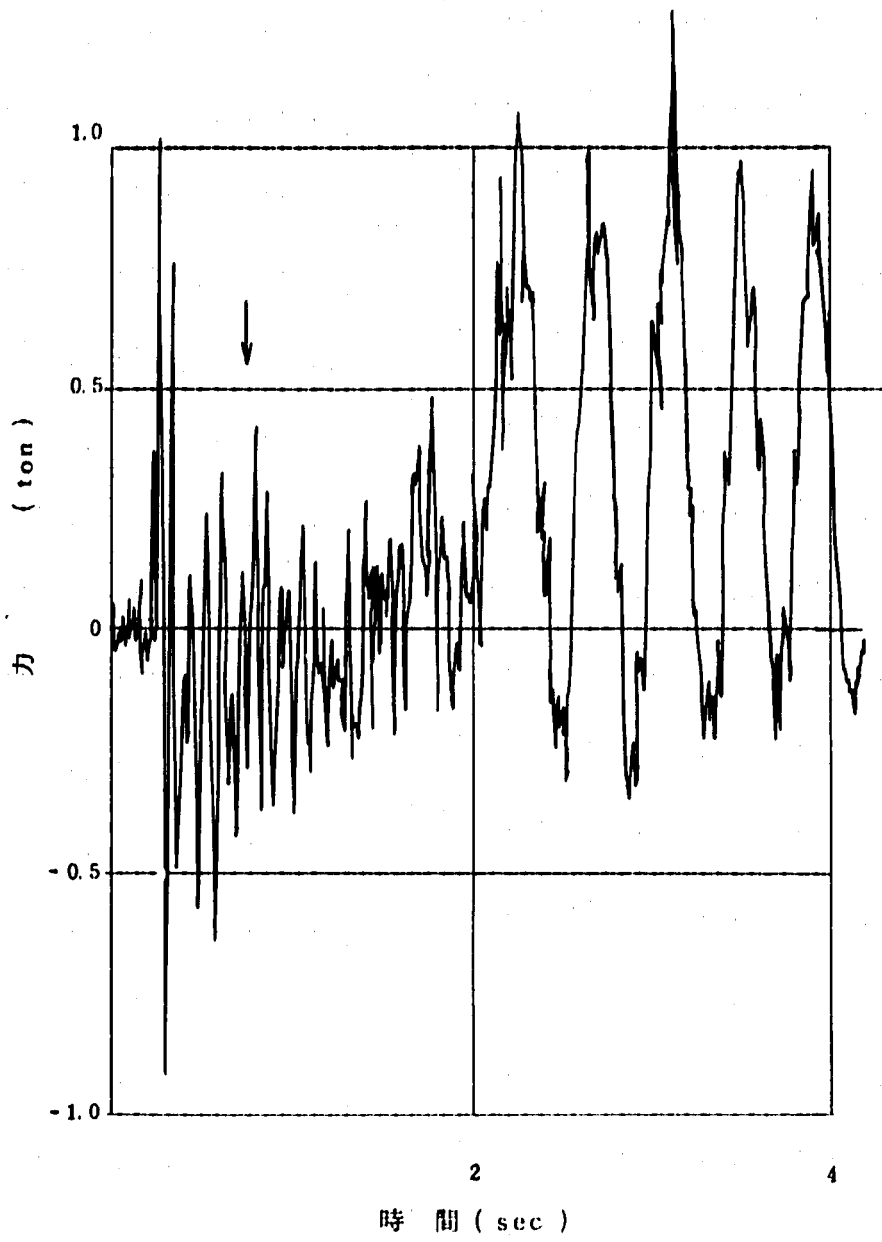


図 3.6 - 1 R 6 0 0 9 が受ける力 ( 初期 )

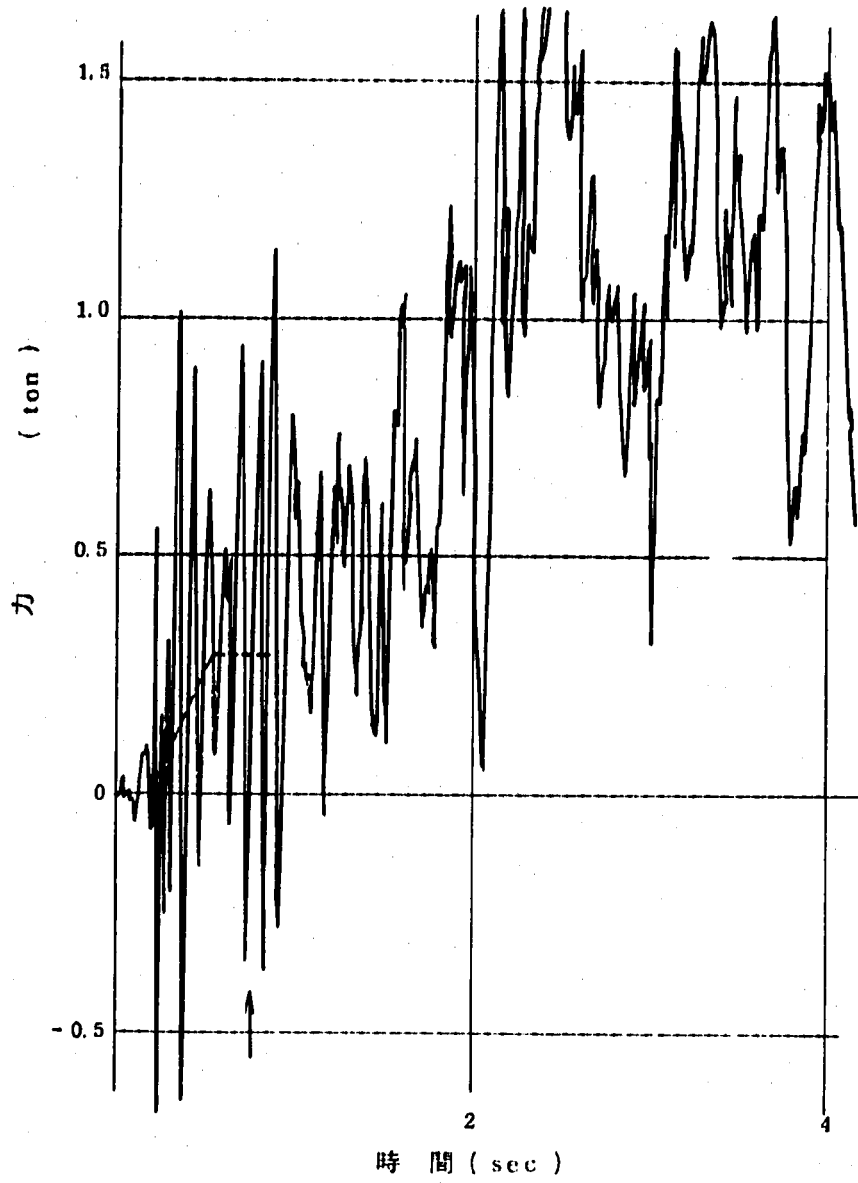


図 3.6 - 2 R 6 0 1 1 が受ける力 ( 初期 )

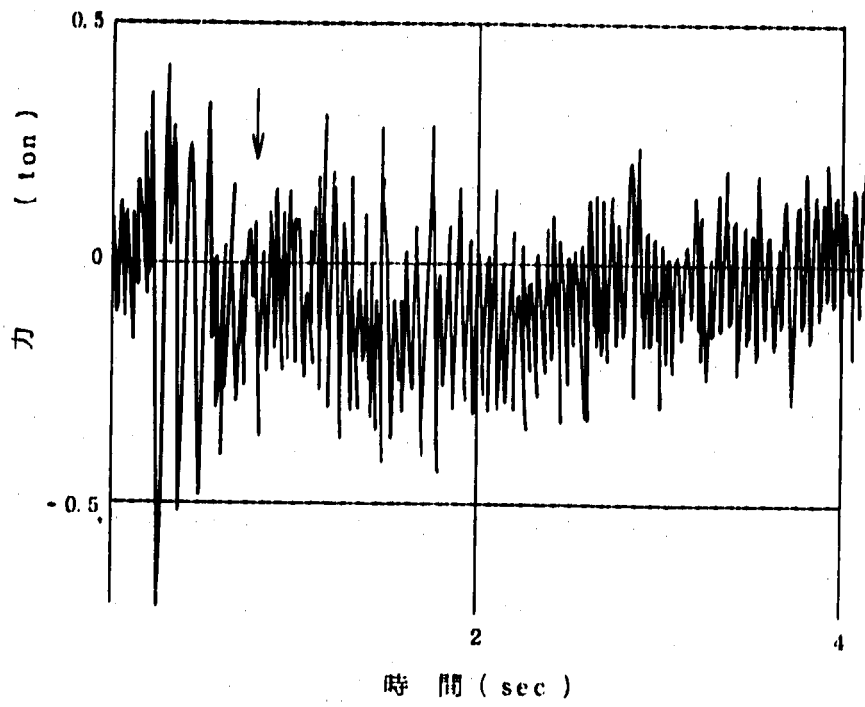


図 3.7 - 1 R6015が受ける力 (初期)

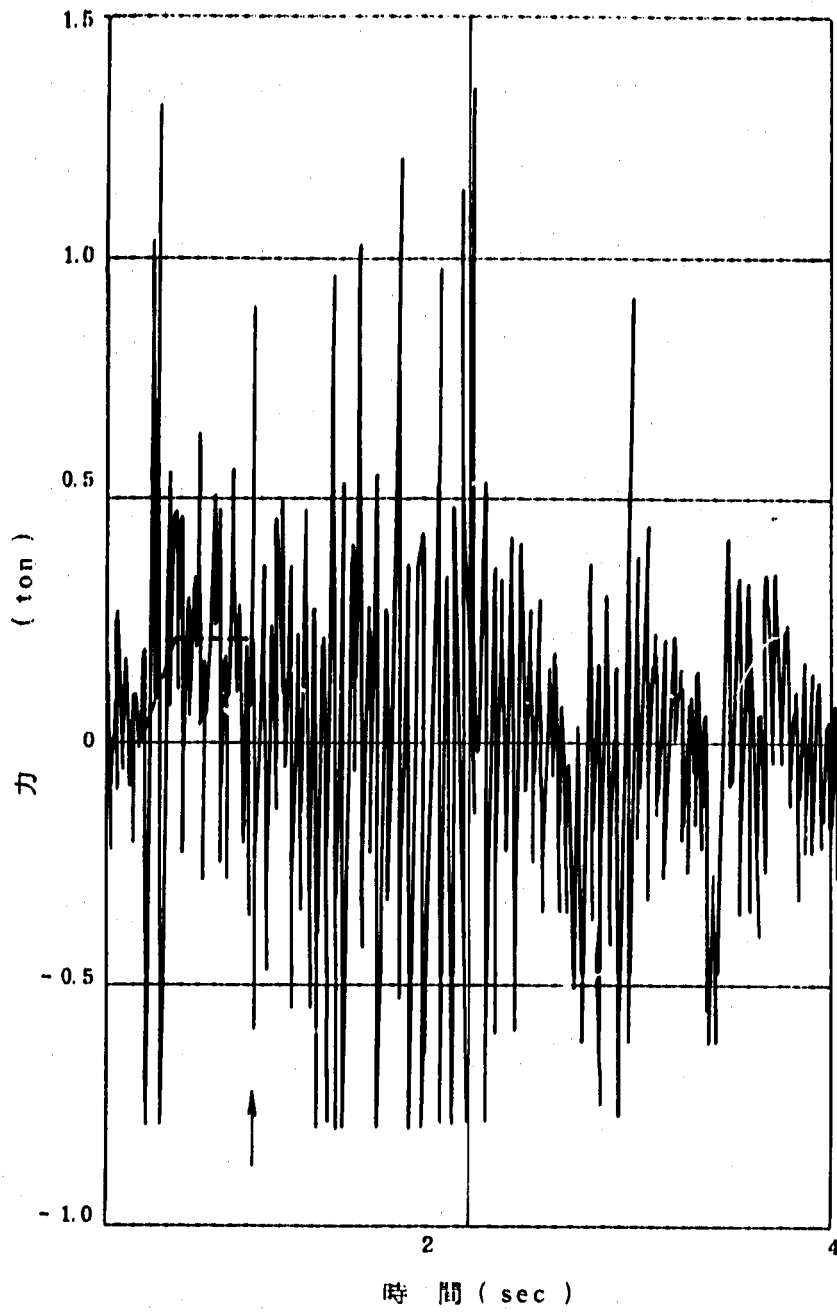


図 3.7-2 R6016 が受ける力 (初期)

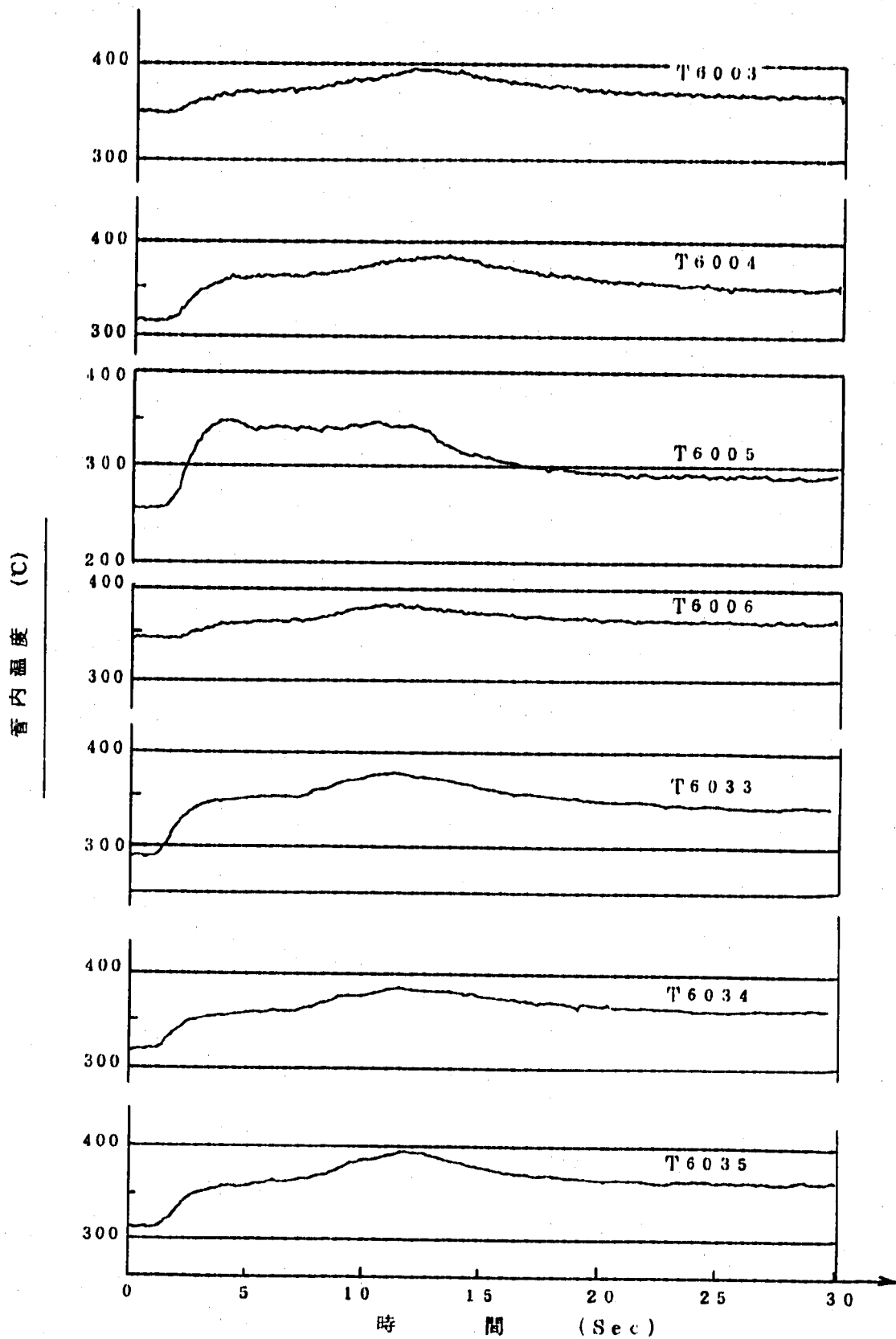


図 3.8 放出系配管の管壁近傍のナトリウム温度

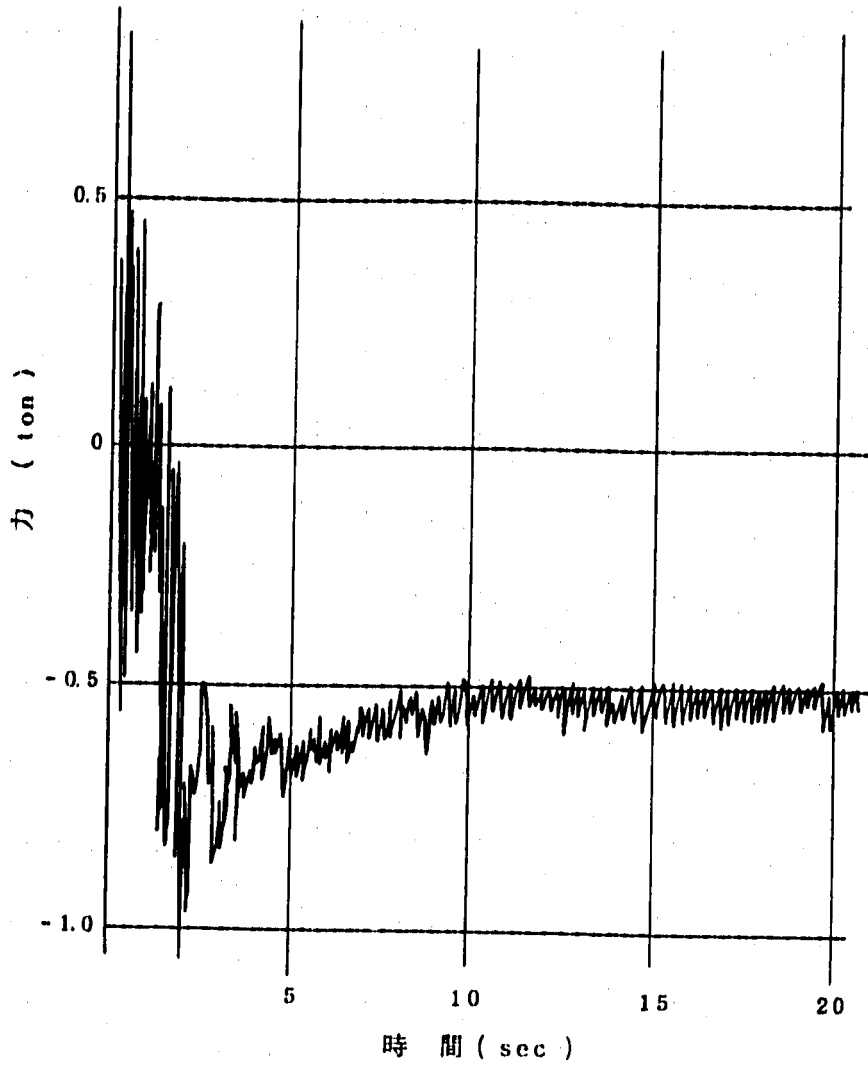


図 3.9 - 1 R 6 0 0 1 (全変化)

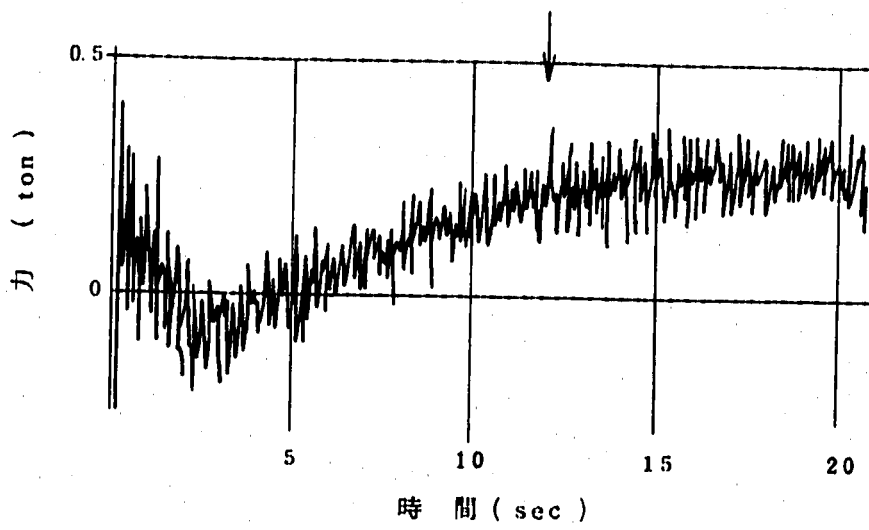


図 3.9 - 2 R 6 0 0 2 (全変化)

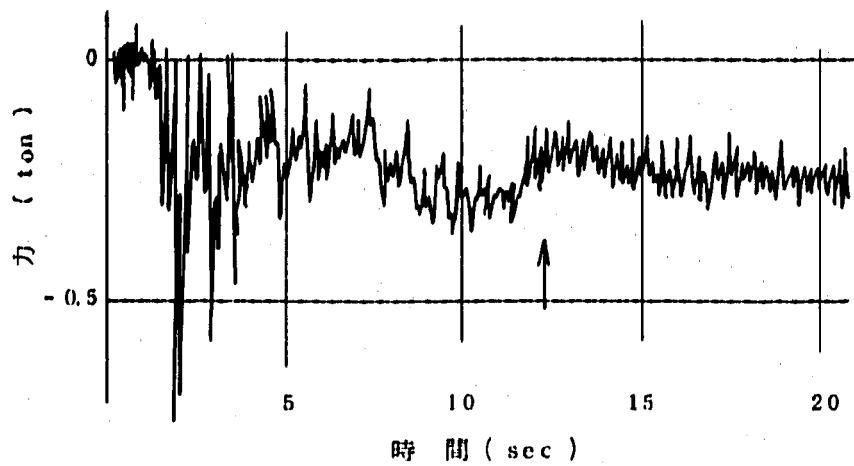


図 3.9 -- 3 R 6 0 0 3 ( 全変化 )

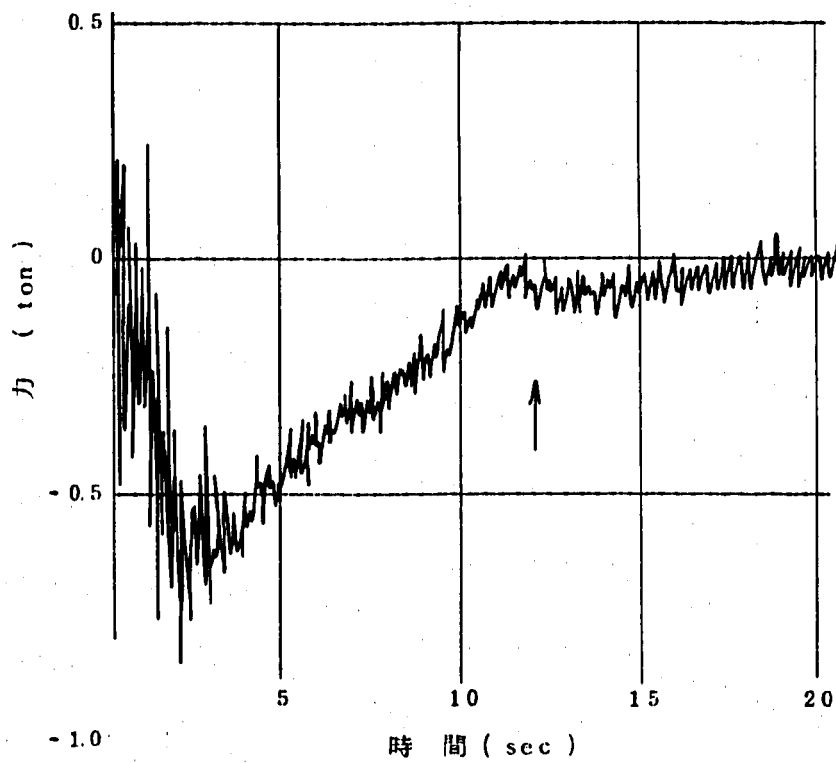


図 3.9 -- 4 R 6 0 0 4 ( 全変化 )

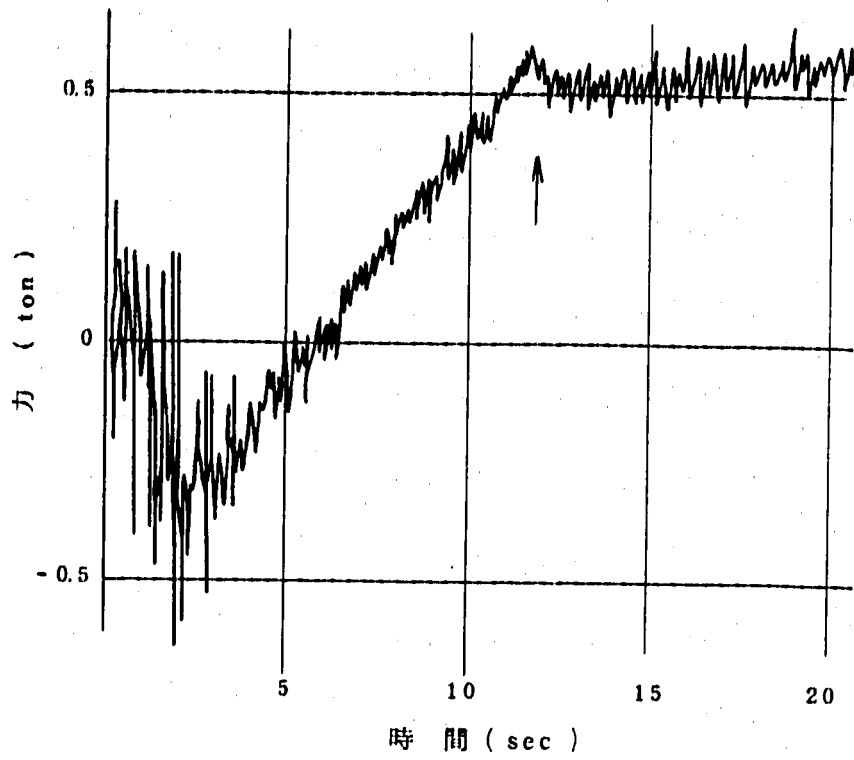


図 3.9 - 5 R 6 0 0 5 (全変化)

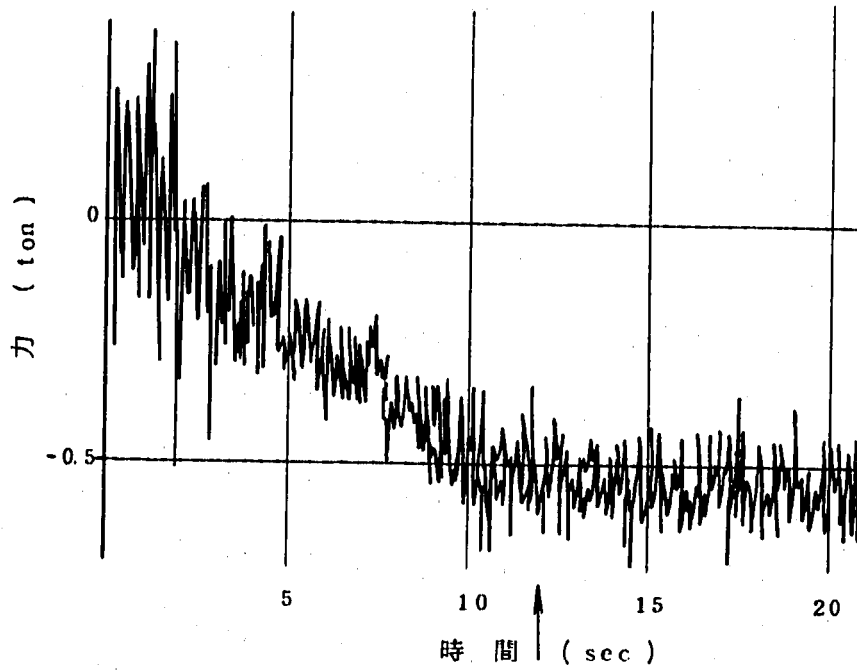


図 3.9 - 6 R 6 0 0 7 (全変化)



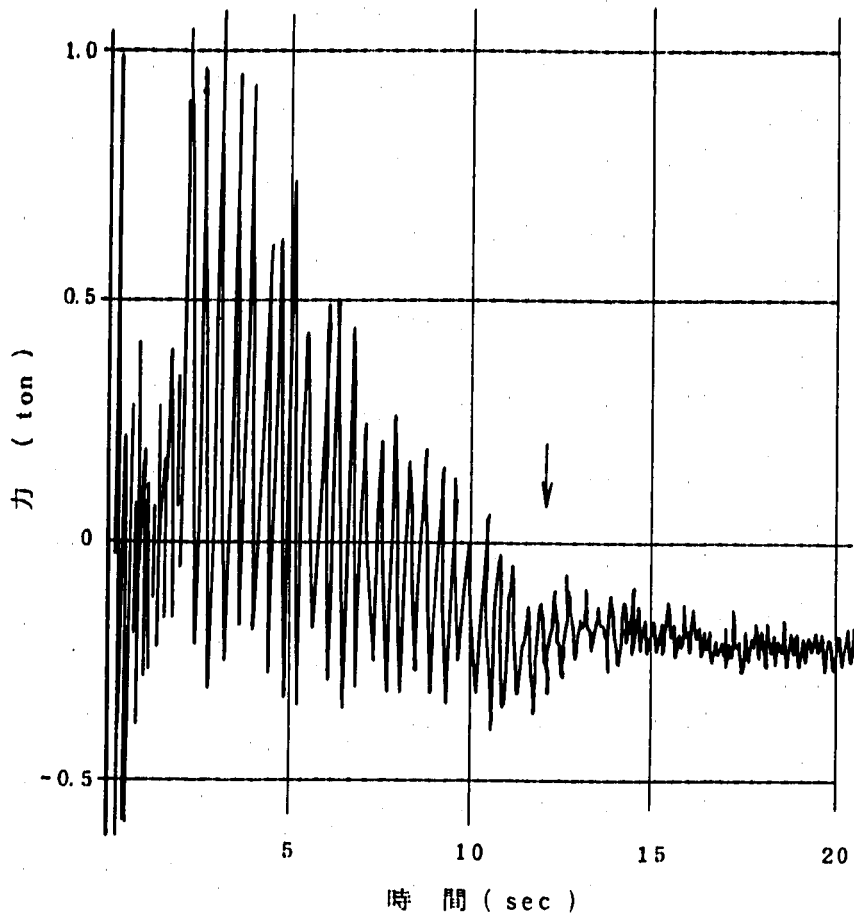


図 3.10 - 1 R 6 0 0 9 ( 全変化 )

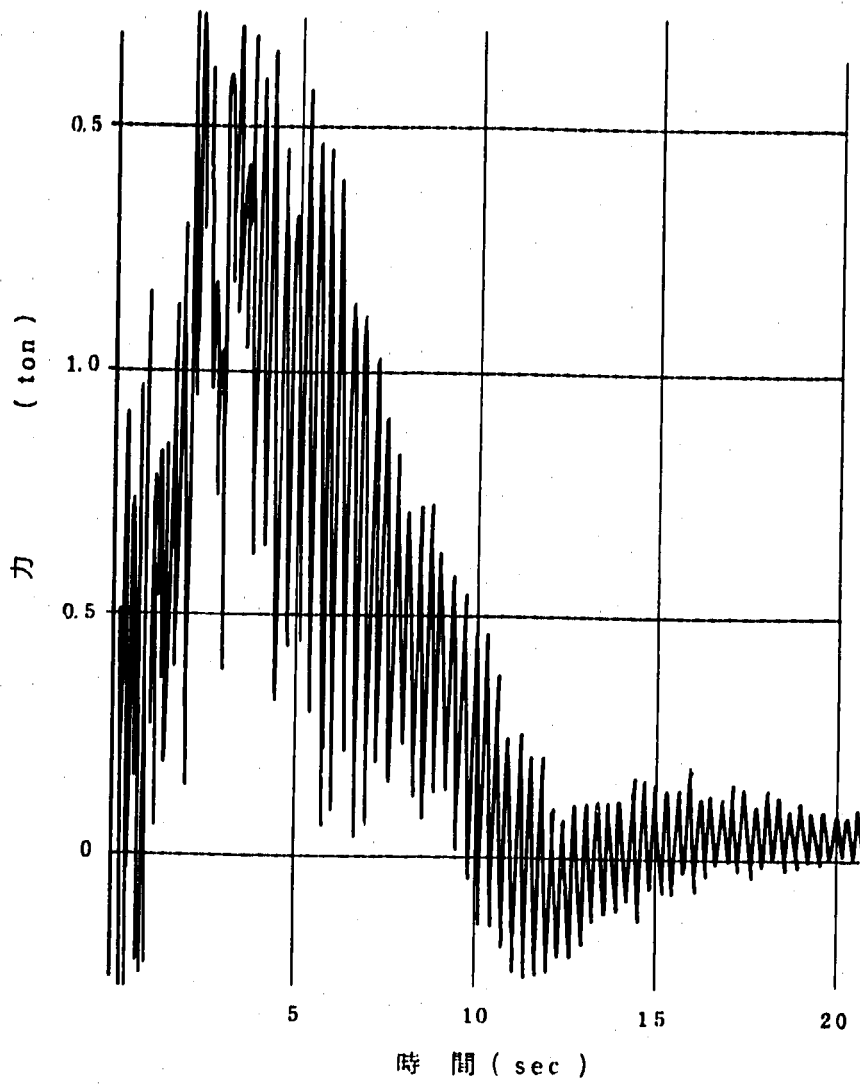


図 3.10-2 R6011が受ける力 (全変化)

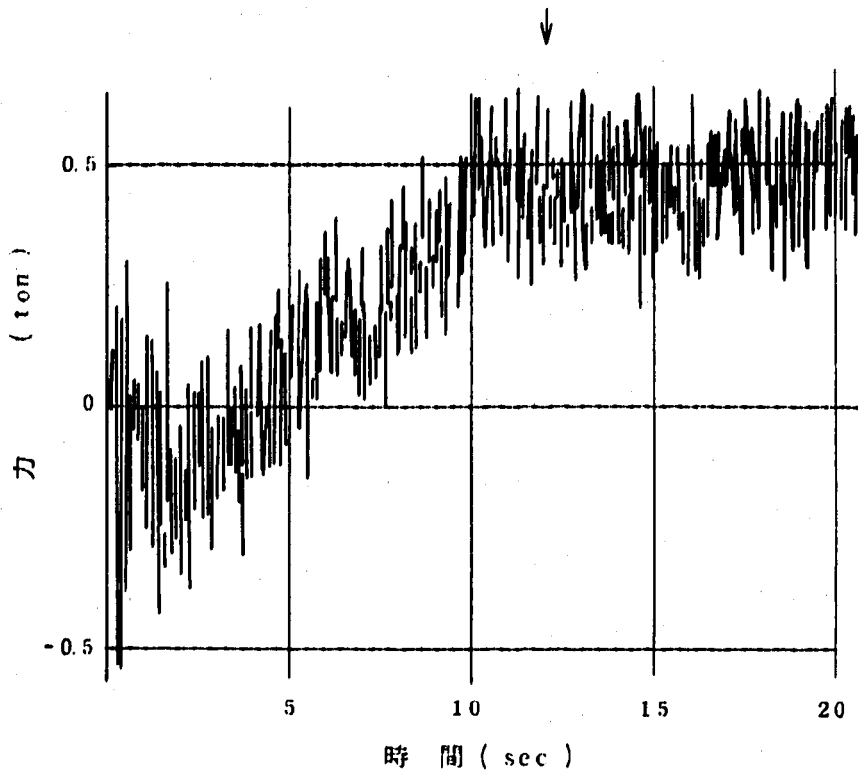


図 3.1 1 - 1 R 6 0 1 5 が受ける力 (全変化)

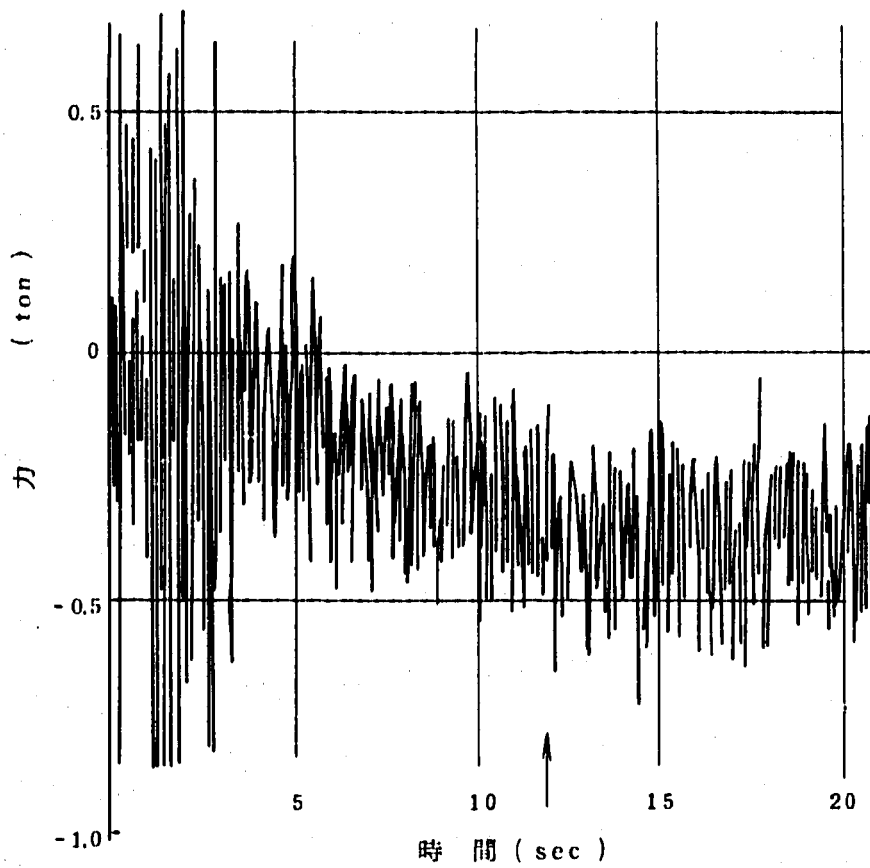


図 3.1 1 - 2 R 6 0 1 6 が受ける力 (全変化)

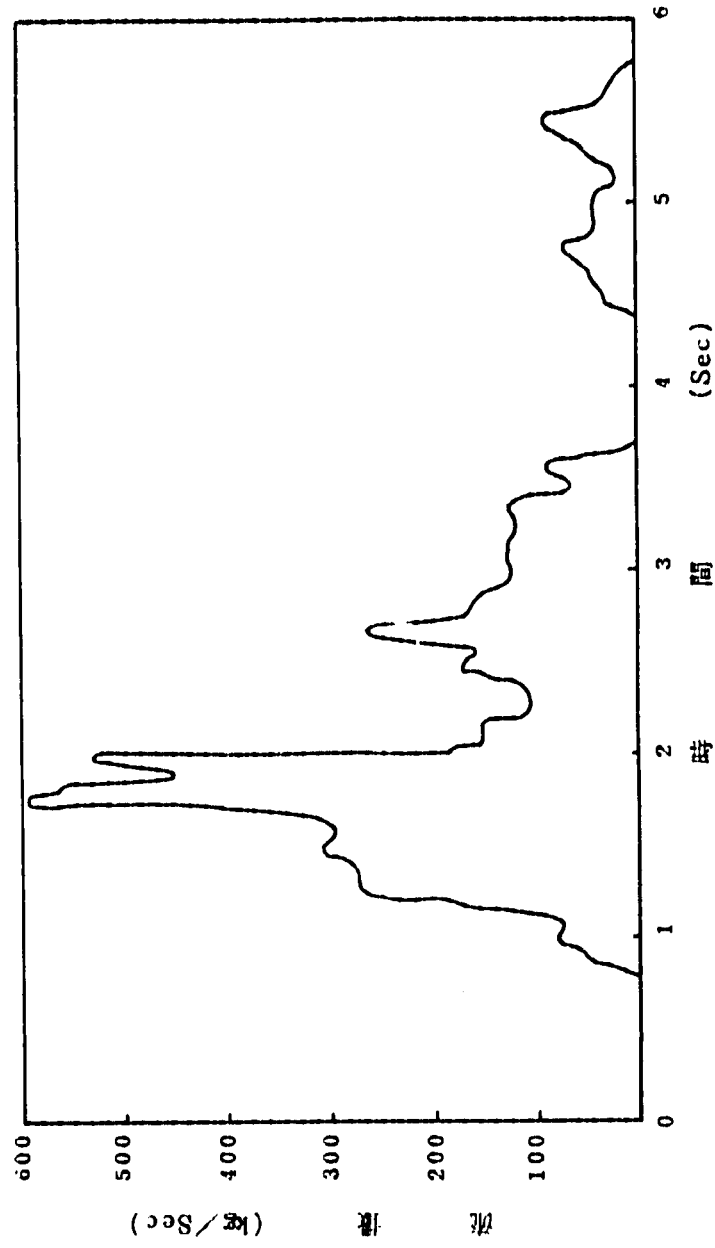


図 4.1 放出系配管中を流れるナトリウム流量

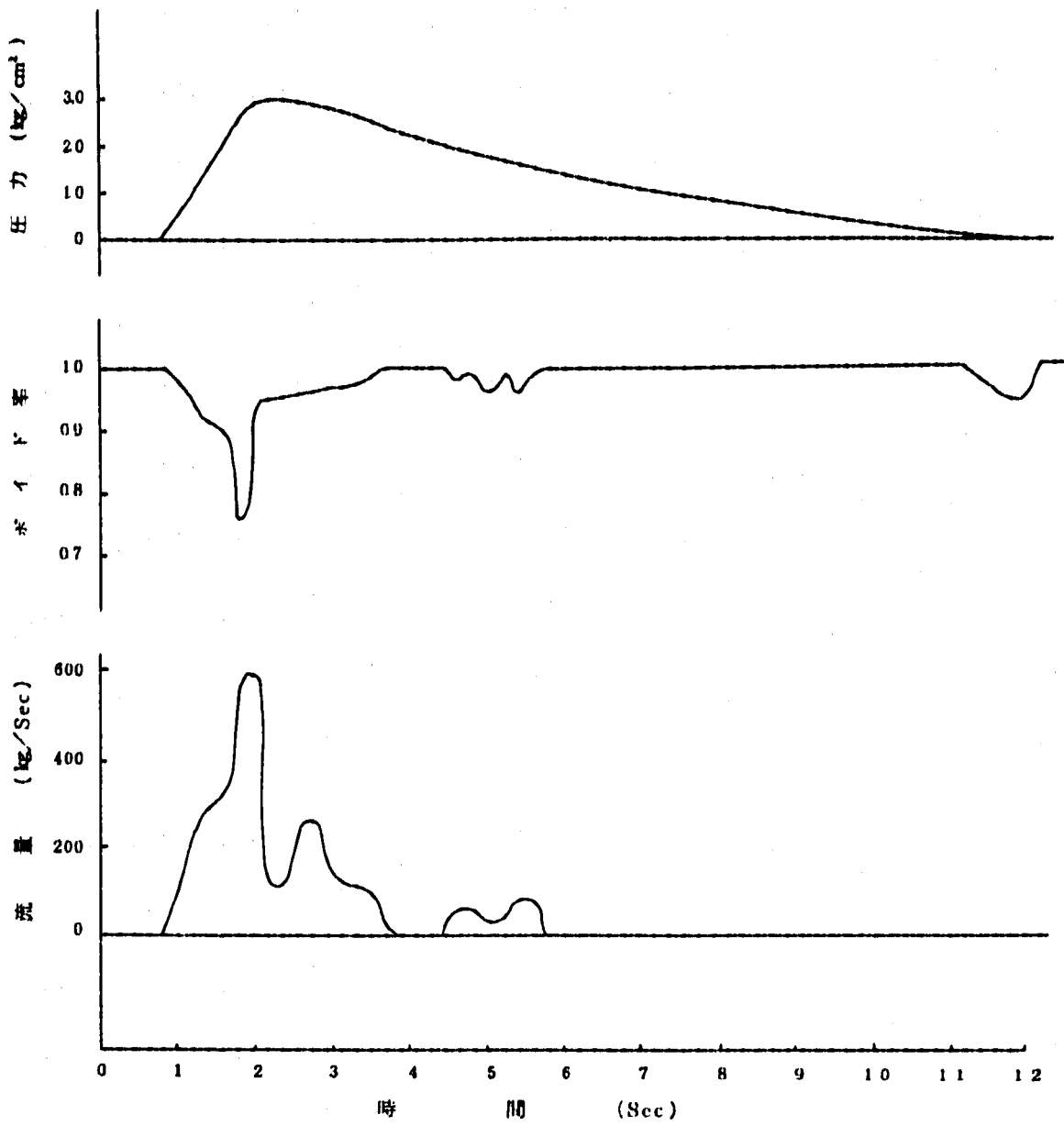


図4.2 管内流の流動パラメータ

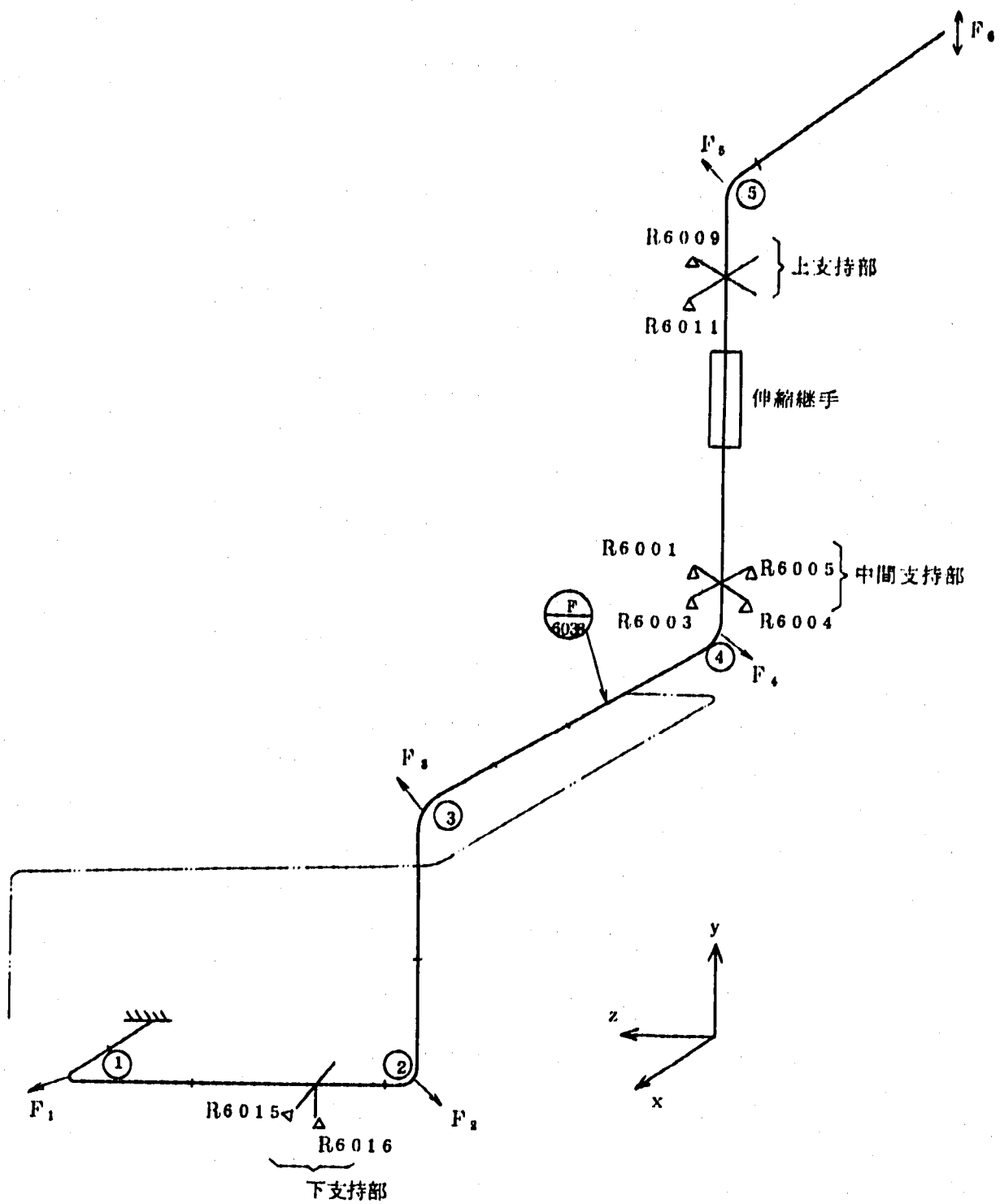


図 4.3 配管に作用する流体力の作用点と方向

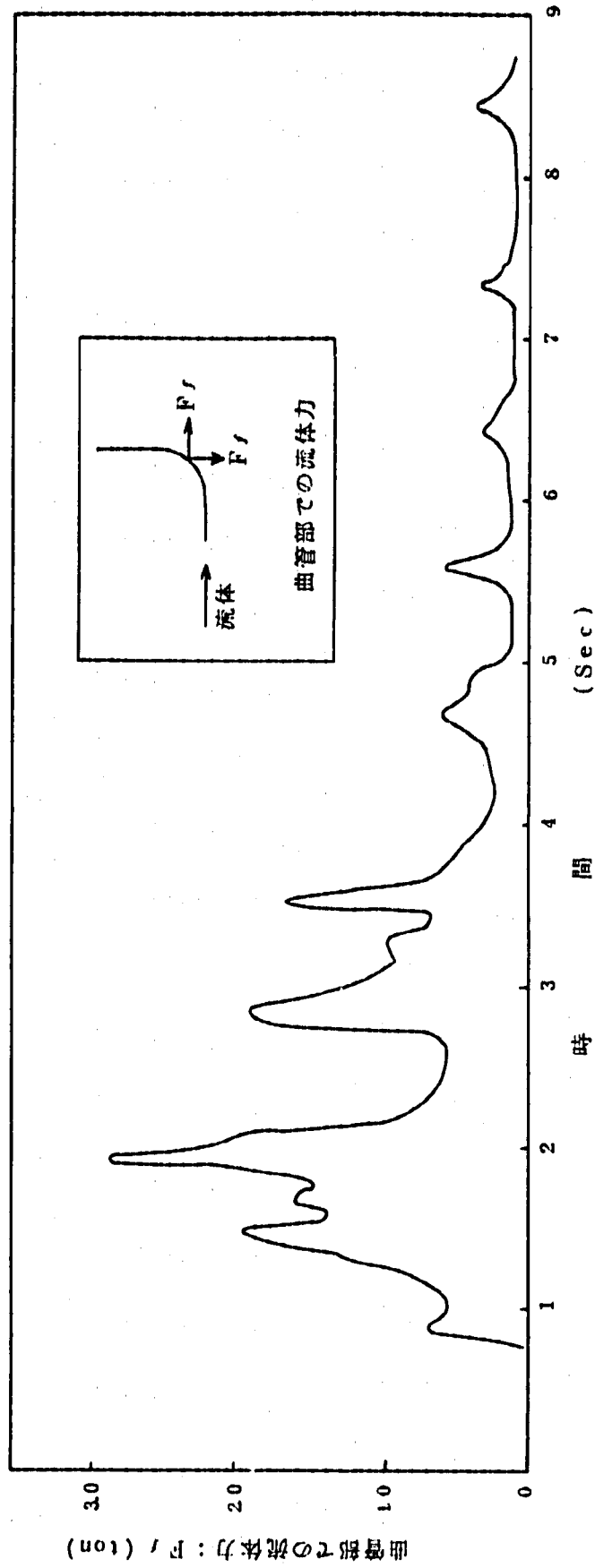


図 4.4 曲管部での流体力

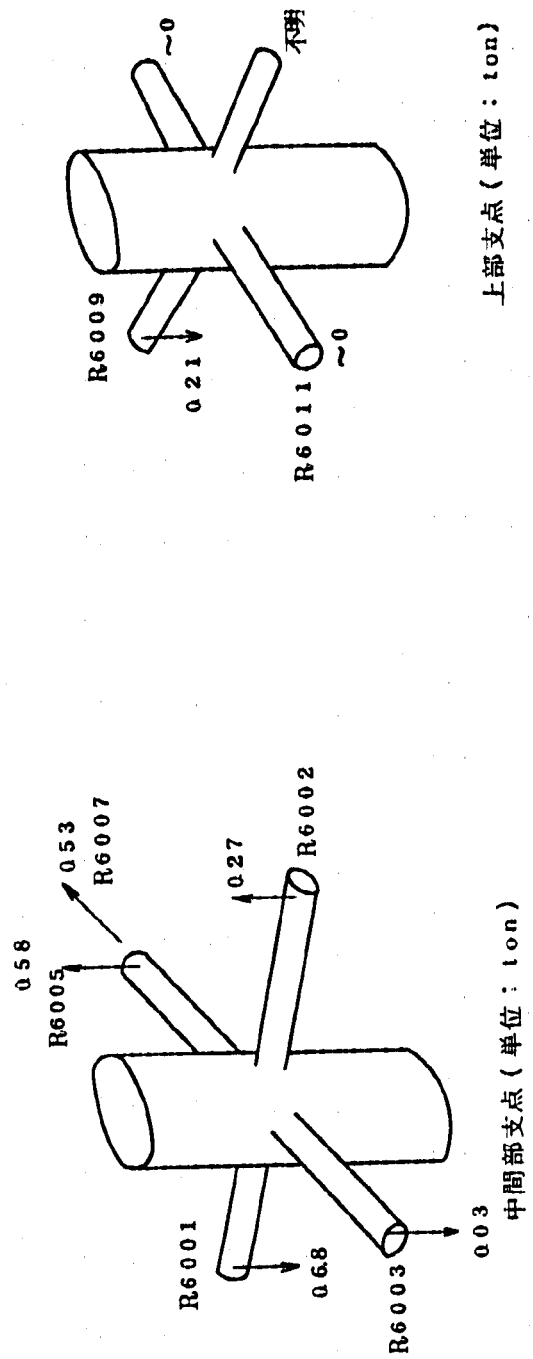


図 4.5 熱膨張力 (時間 12 sec)



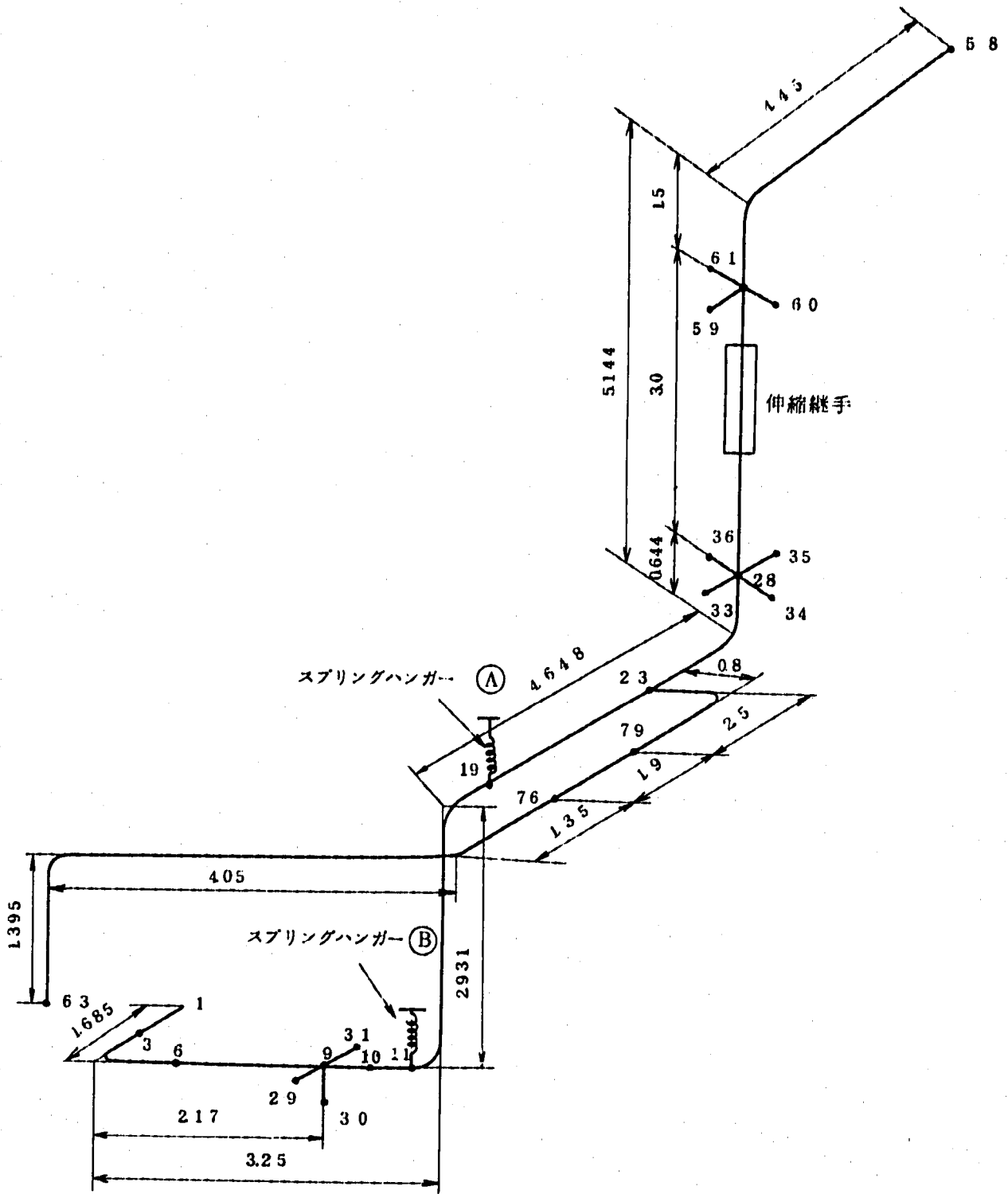


図 5.1 配 管 の 配 列

表 5.1 - 1 配 管 諸 元 ( その 1 )

項 目	単 位	蒸 発 器 放 出 系 配 管	過 熱 器 放 出 系 配 管
配 管			
外 径	m	0.318	0.165
内 径	m	0.310	0.151
材 料	-	$2 \frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo	$2 \frac{1}{4}$ Cr - 1 Mo
密 度	kg/m <sup>3</sup>	$7.3 \times 10^3$	$7.3 \times 10^3$
ヤング率	kg/m <sup>2</sup>	$1.89 \times 10^{10}$	$1.89 \times 10^{10}$
熱膨張率	1/°C	$4.74 \times 10^{-6}$	$4.74 \times 10^{-6}$
保 温 材			
外 径	m	0.478	0.303
内 径	m	0.318	0.165
材 料	-		
密 度	kg/m <sup>3</sup>	100	100
ヤング率	kg/m <sup>2</sup>	0	0
熱膨張率	1/°C	0	0

表 5.1 - 2 配 管 諸 元 ( その 2 )

項 目	単 位	値	備 考
伸 縮 継 手			
軸 方 向 バ ネ 定 数	kg/mm	5.51	
横 方 向	kg/mm	1.46	
スプリングハンガー			図 5.1 を 参 照
Ⓐ の バ ネ 定 数	kg/mm	1.33	
スプリングハンガー			
Ⓑ の バ ネ 定 数	kg/mm	2.4	

表 5.2 拘 束 条 件

位 置 第 図中の 番号で示す	拘 束 条 件
1	固定支持
1 1	バネ支持
1 9	バネ支持
2 9	x 軸方向変位のみ拘束
3 0	y 軸方向変位のみ拘束
3 1	x 軸方向変位のみ拘束
3 3	y 軸方向変位のみ拘束
3 4	y 軸方向変位のみ拘束
3 5	x 及び y 軸方向変位のみ拘束
3 6	y 軸方向変位のみ拘束
5 8	固定支持
5 9	y 軸方向変位のみ拘束
6 0	y 軸方向変位のみ拘束
6 1	y 軸方向変位のみ拘束
6 3	固定支持
7 6	x 軸方向変位のみ拘束
7 9	x 軸方向変位のみ拘束

表 5.3 温 度 変 化

位 置 図 5.1 中の 番号で示す	時 間 ( sec )				
	0	2	4	1 0.	2 0.
3	0.0	5 0.	7 5.	9 0.	5 5.
1 0	0.0	4 0.	6 5.	8 5.	6 5.
1 9	0.0	2 0.	4 0.	7 0.	4 7.
4 8	0.0	4 0.	1 0 0.	9 0.	4 0.
5 7	0.0	0.0	1 8.	3 5.	2 5.

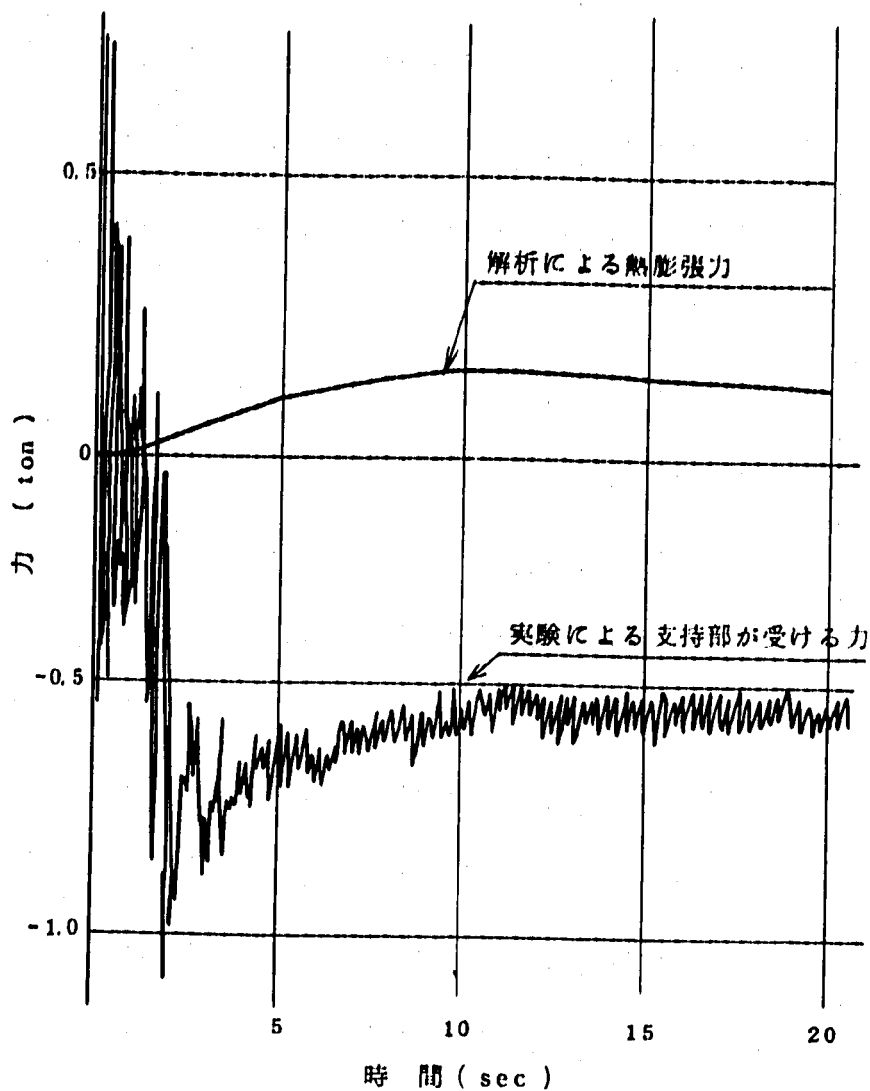


図 5 2 - 1 R6001 の熱膨張力

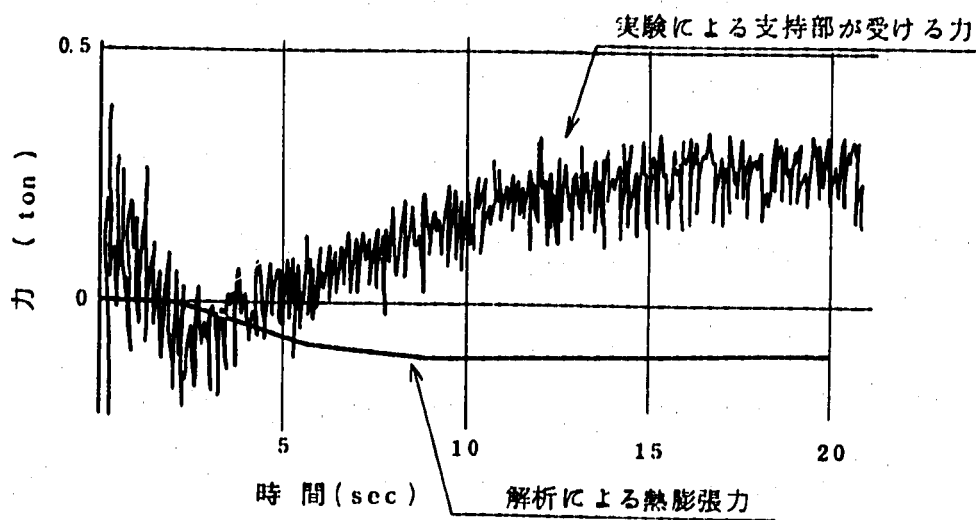


図 5 2 - 2 R6002 の熱膨張力

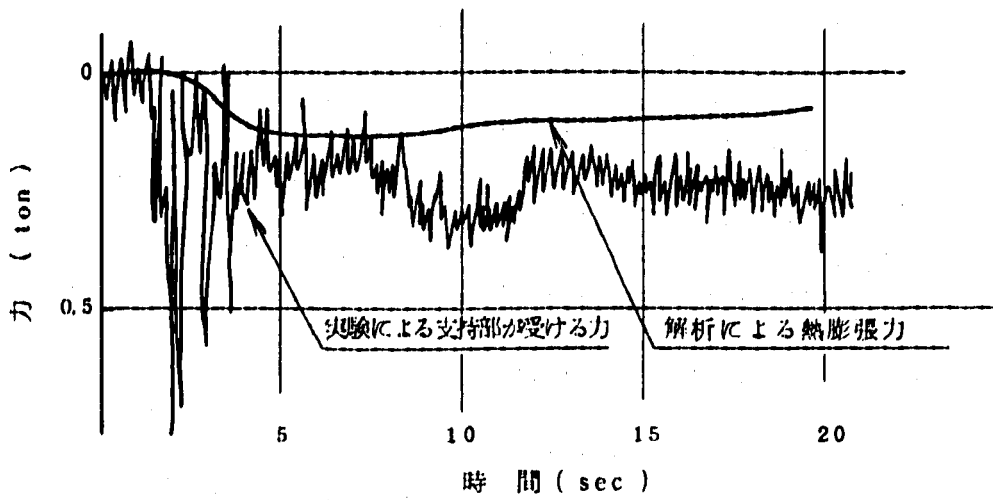


図 5.2 - 3 R6003 の熱膨張力

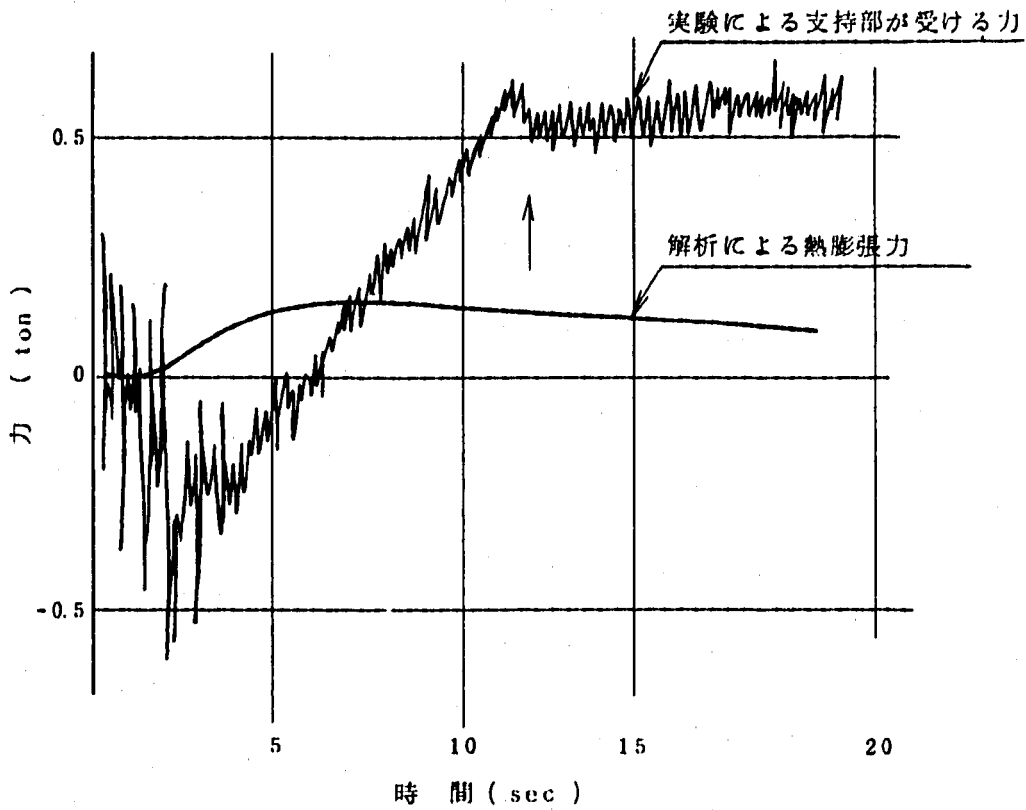


図 5.2 - 4 R6005 の熱膨張力

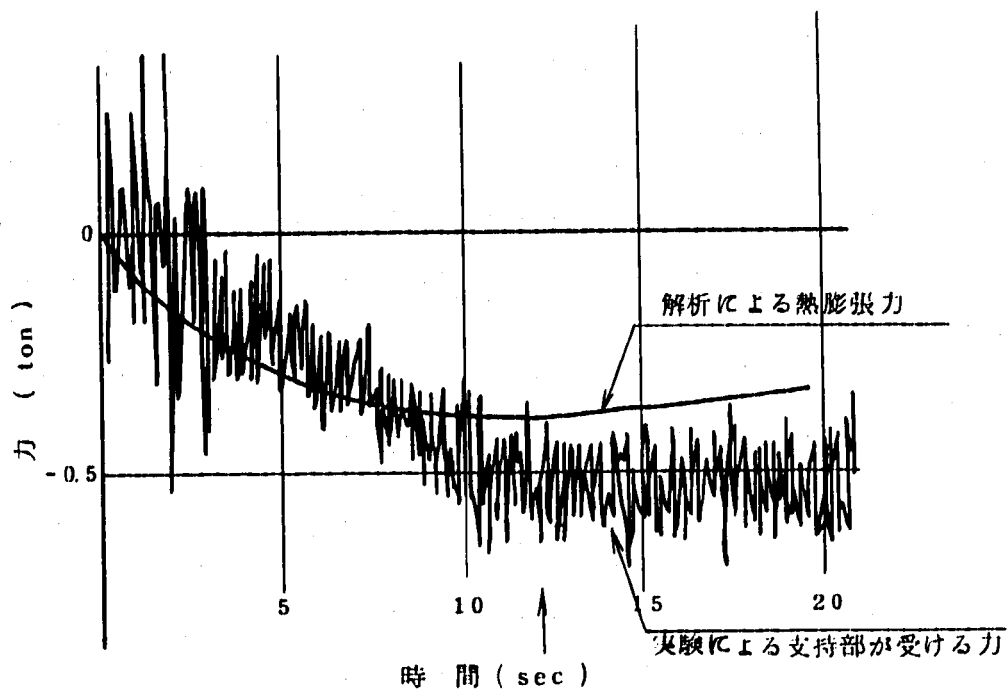


図 5.2 - 5 R6007 の熱膨張力

表 5.4 放出系配管の固有振動数

モード次数	固有振動数 (Hz)
1	3.58
2	3.78
3	5.92
4	7.06
5	81.03
6	11.9
7	12.9
8	16.1
9	18.4
10	21.4
11	23.2
12	27.2
13	29.3
14	39.7
15	40.0
16	41.3
17	45.6
18	46.5
19	50.9
20	61.3

表 5.5 自由振動成分の振動数

ロードセル名	振動数 (Hz)
R6001	15
4	15
5	15
7	12.5
9	12.5
10	12.5
11	12.5
12	12.5
15	9.3
16	9.3

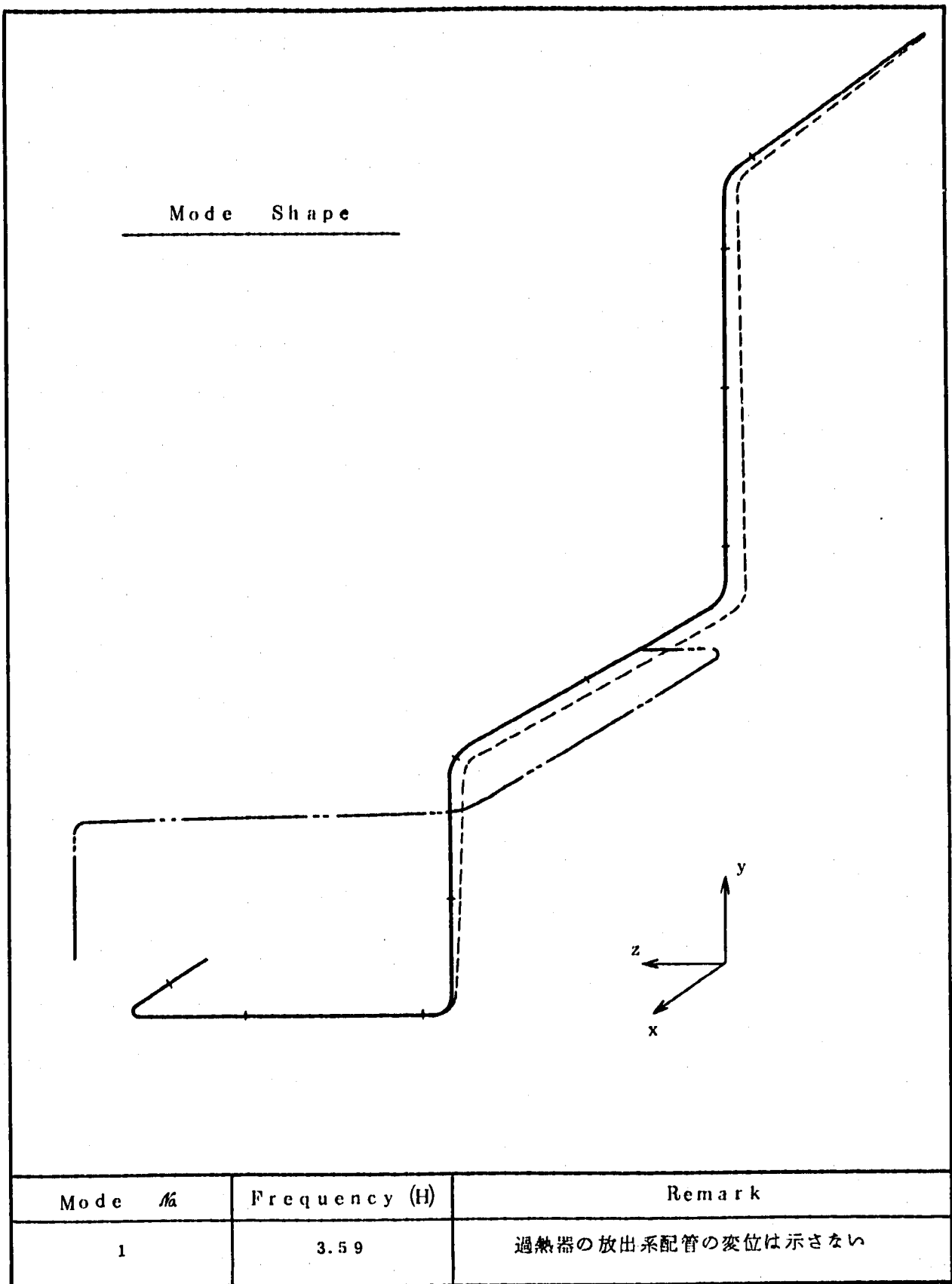


図 5.3-1 固有モード (1 次)



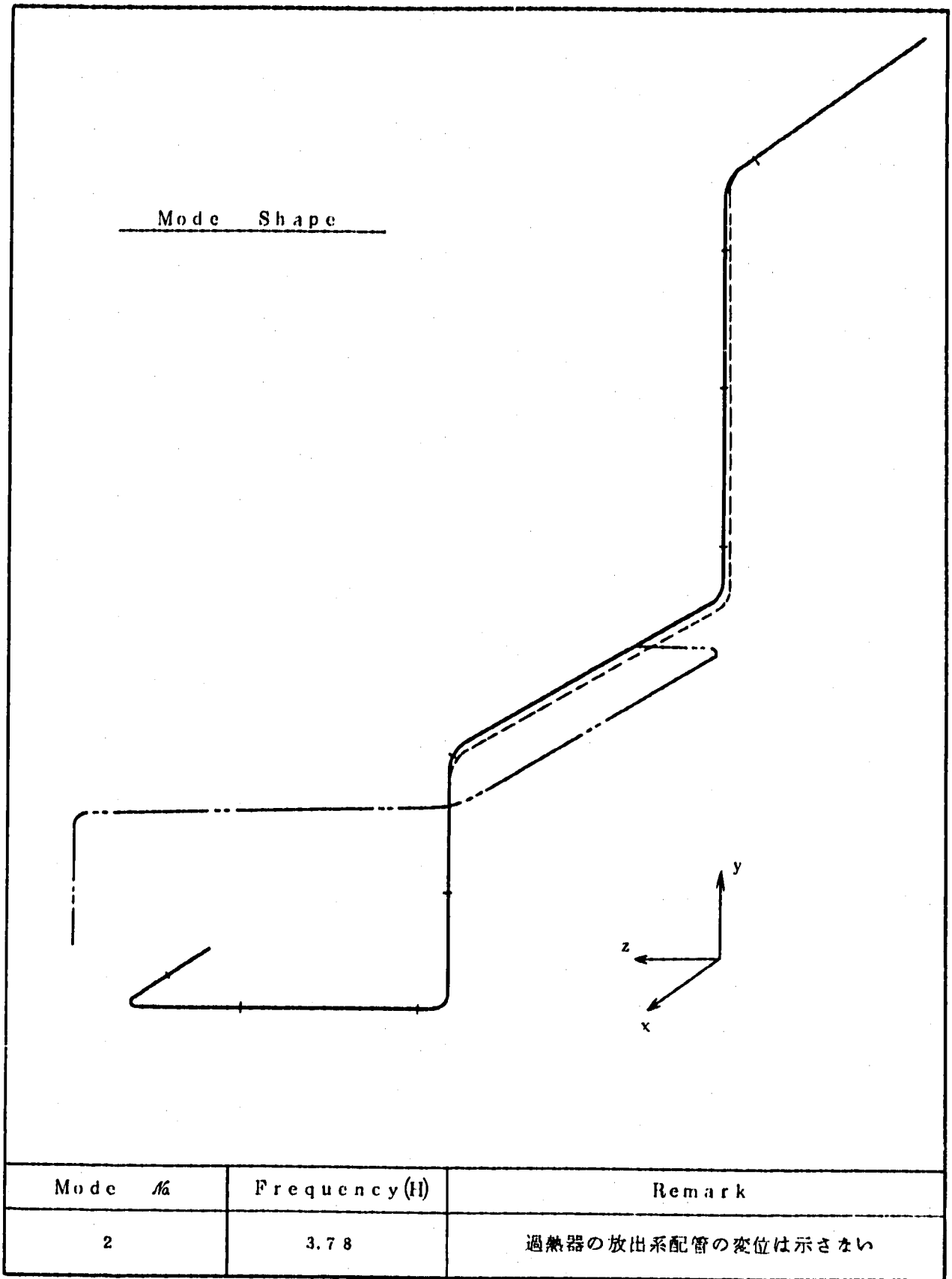


図 5.3-2 固有モード (2 次)

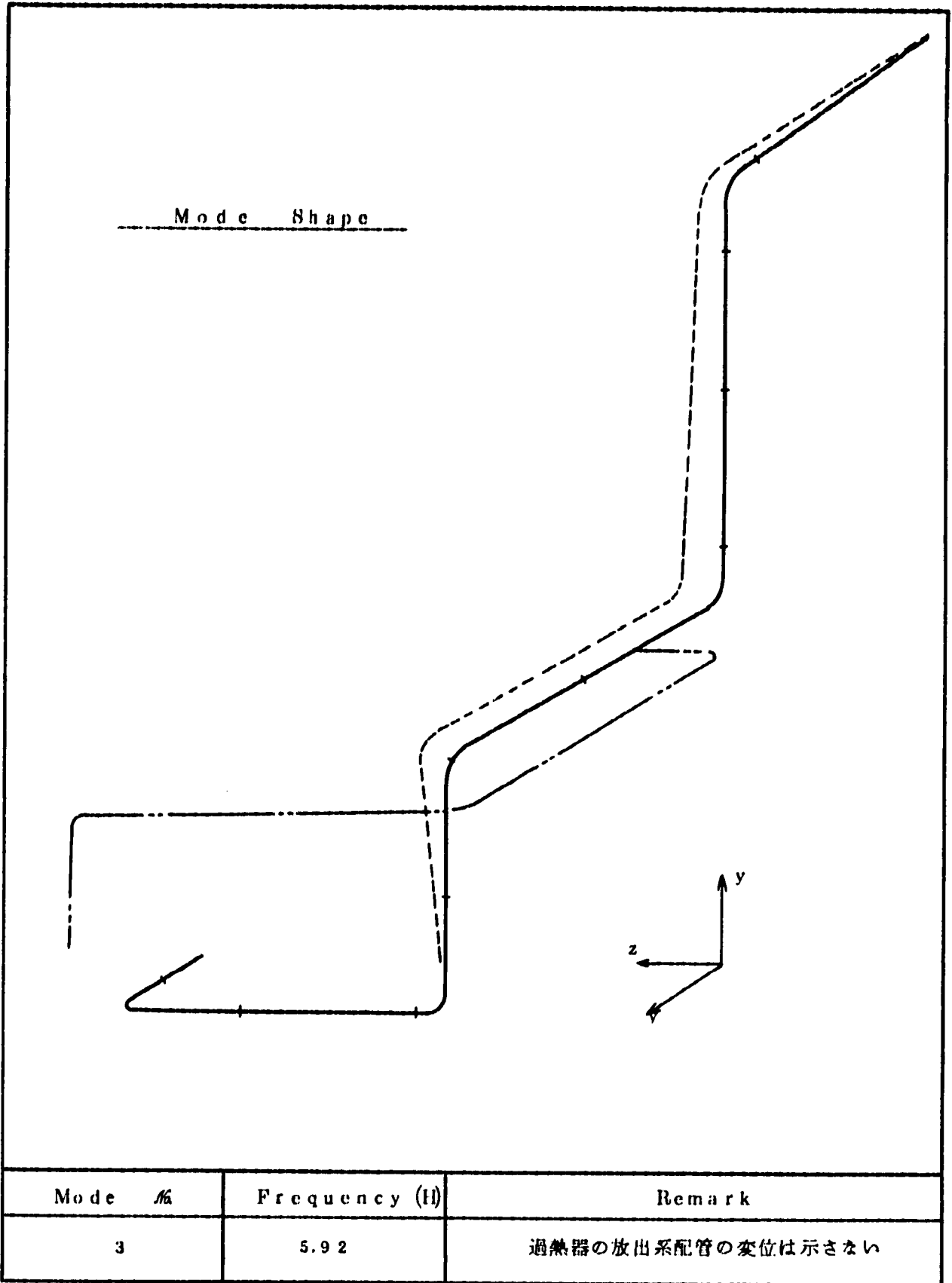


図 5.3-3 固有モード (3 次)

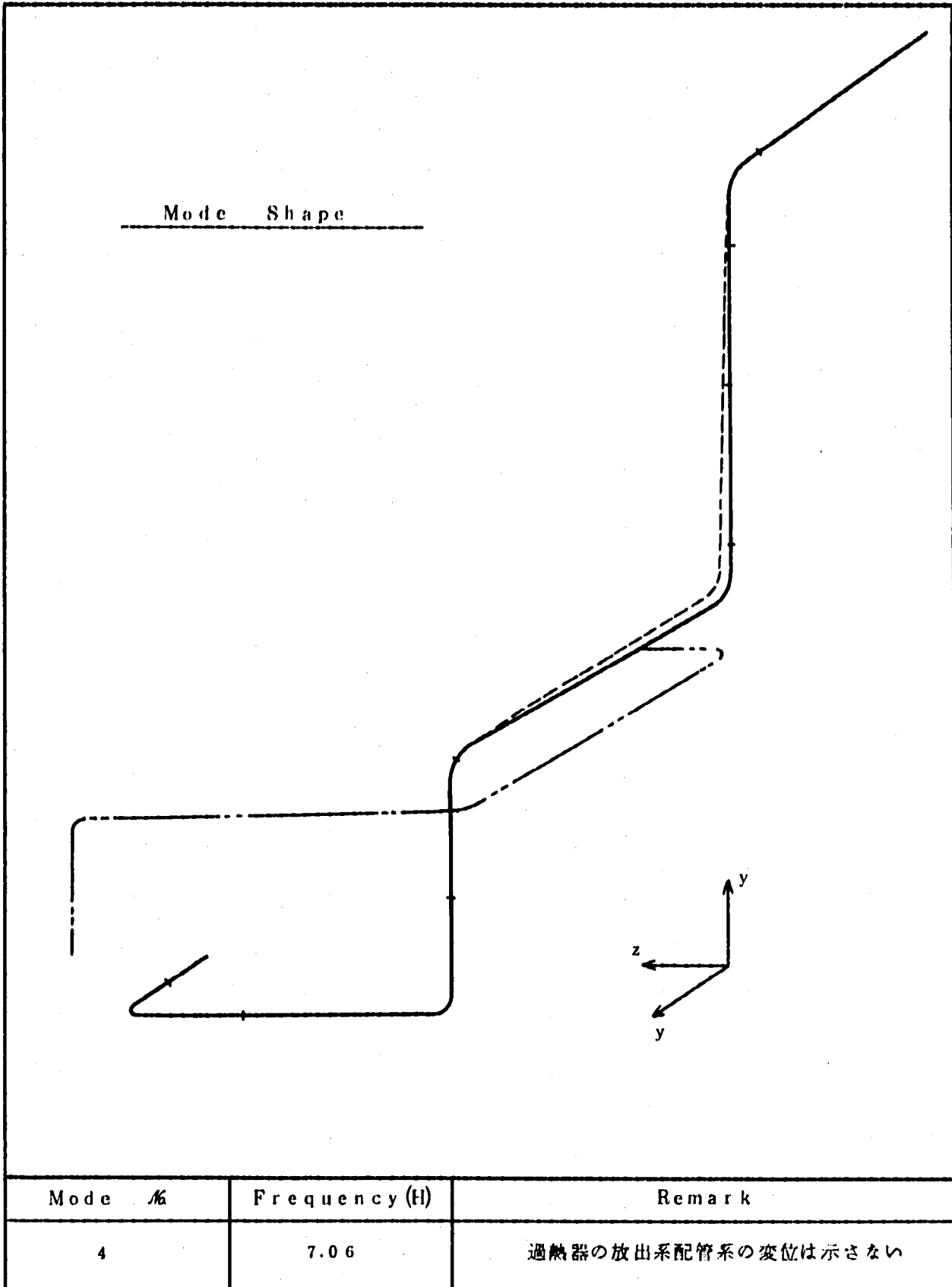


図 5.3-4 固有モード (4 次)

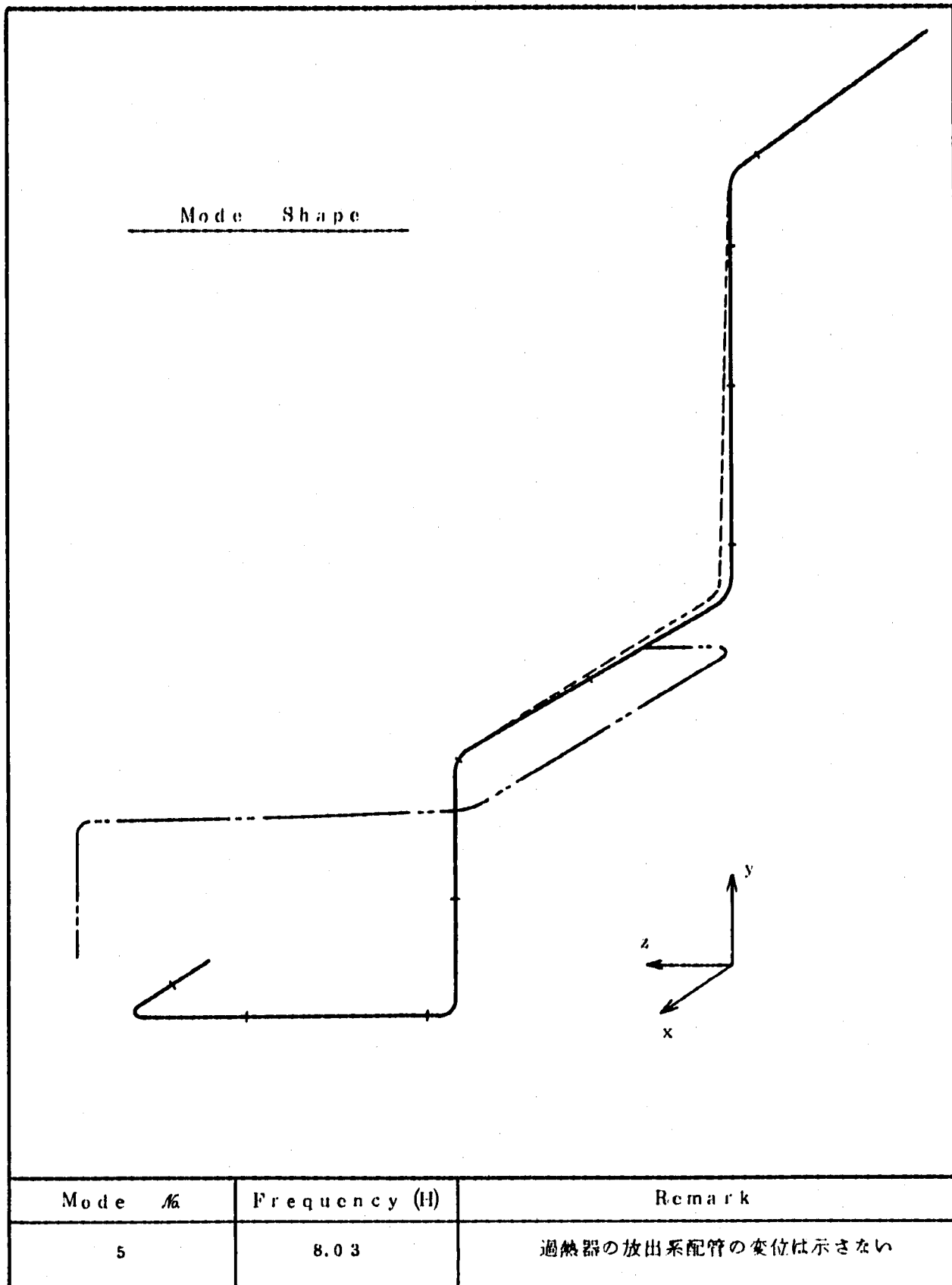


図 5.3-5 固有モード (5 次)

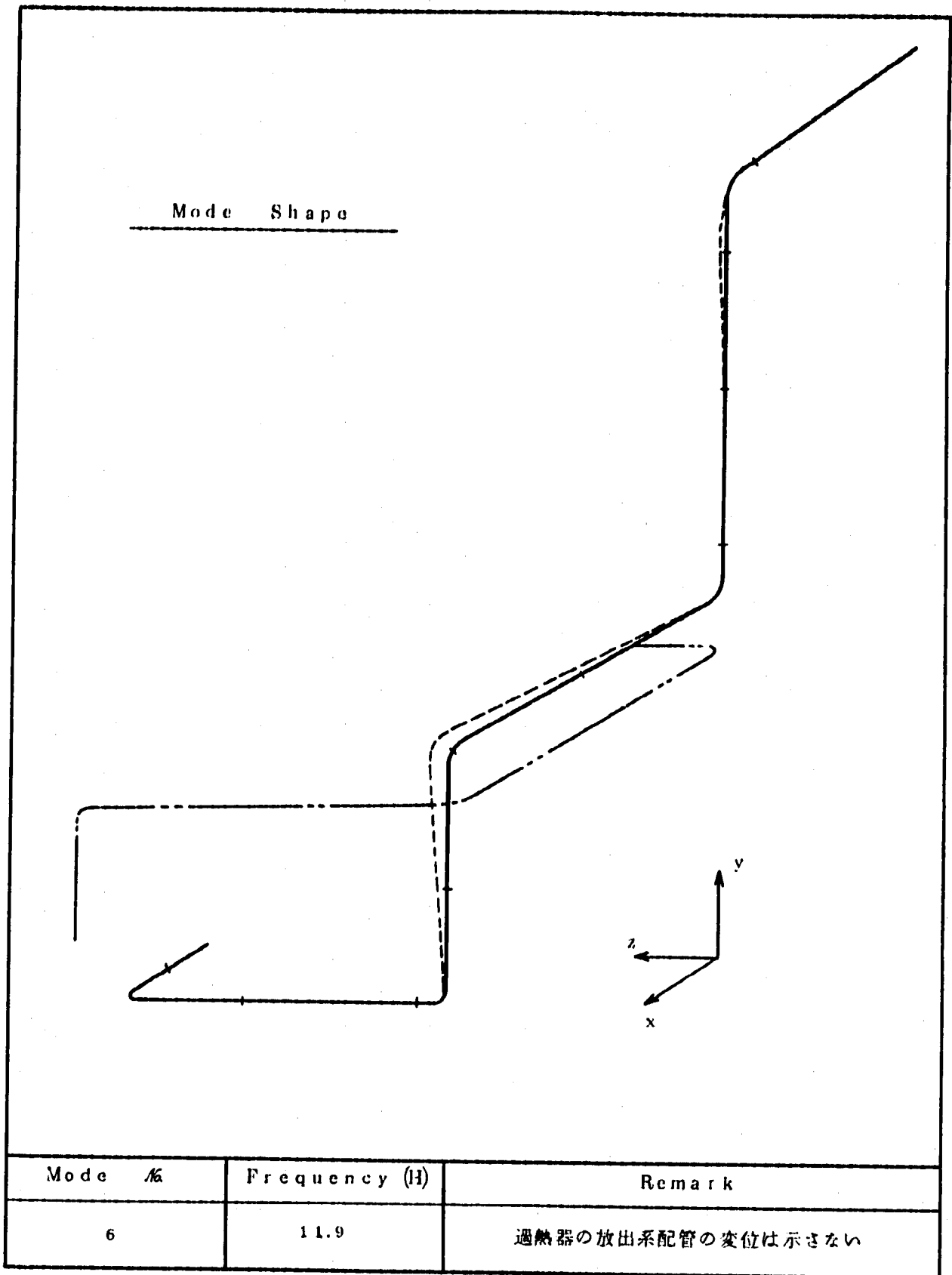


図 5.3-6 固有モード (6 次)

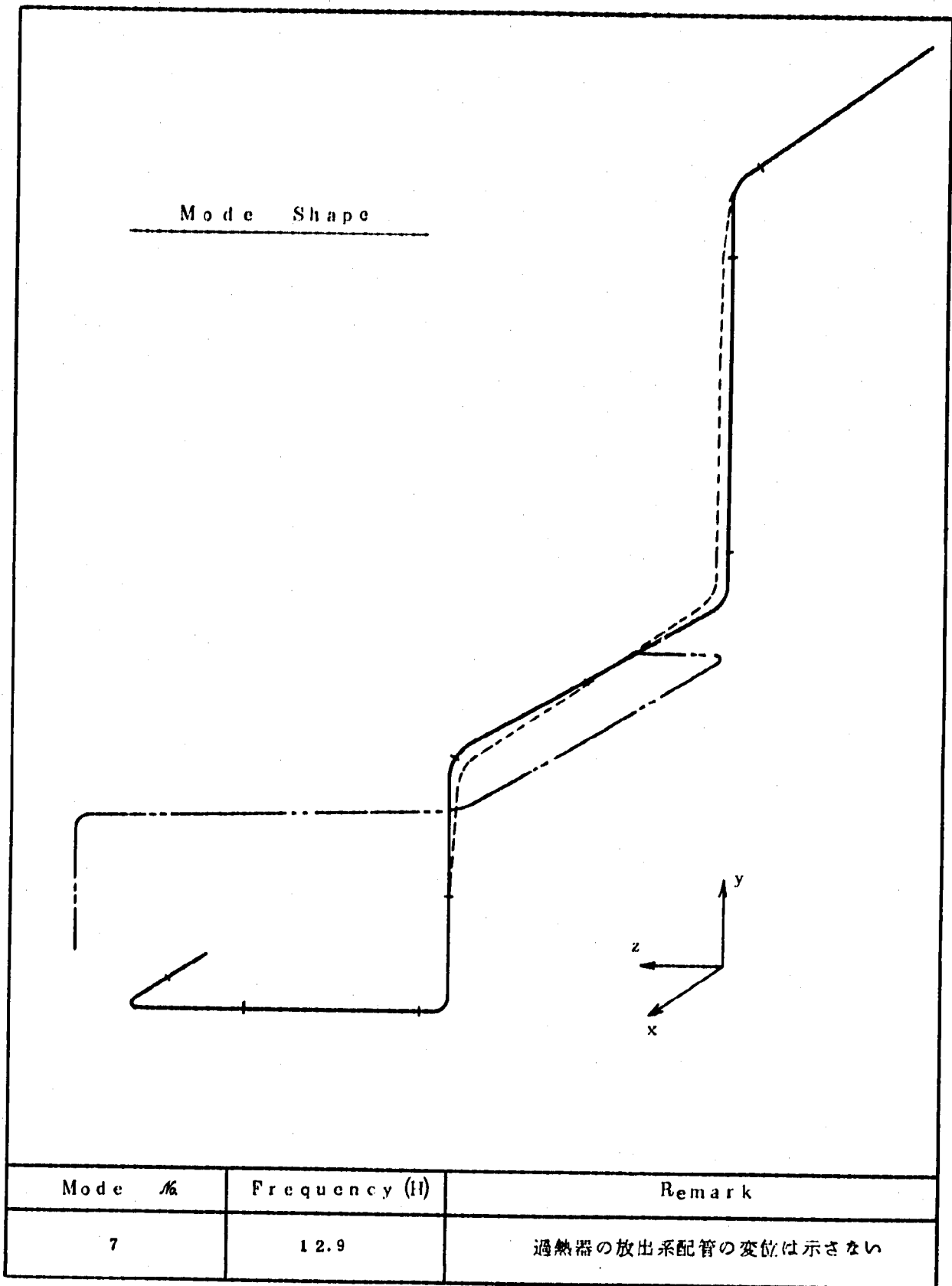


図 5.3-7 固有モード (7 次)

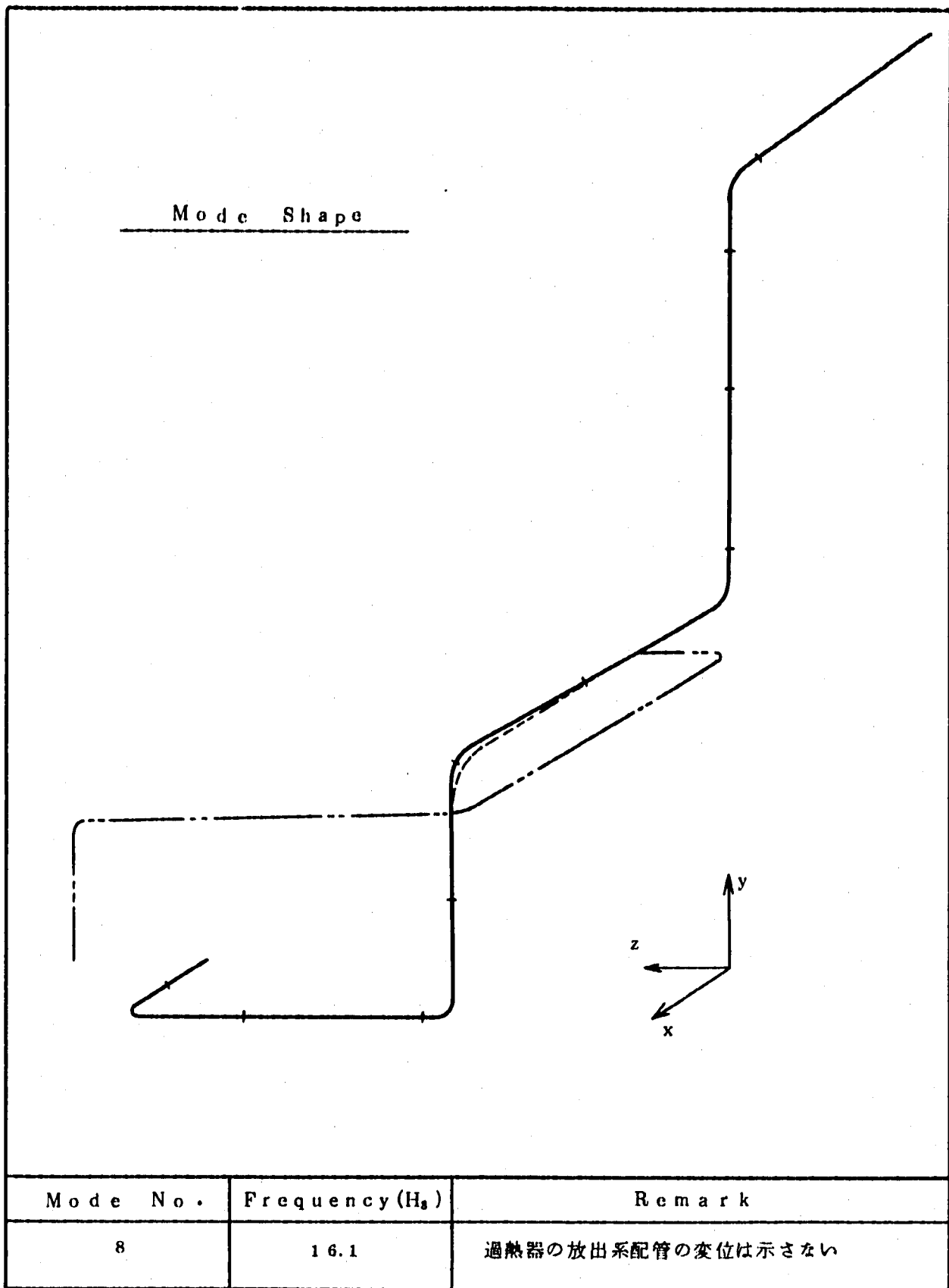


図 5.3-8 固有モード (8 次)

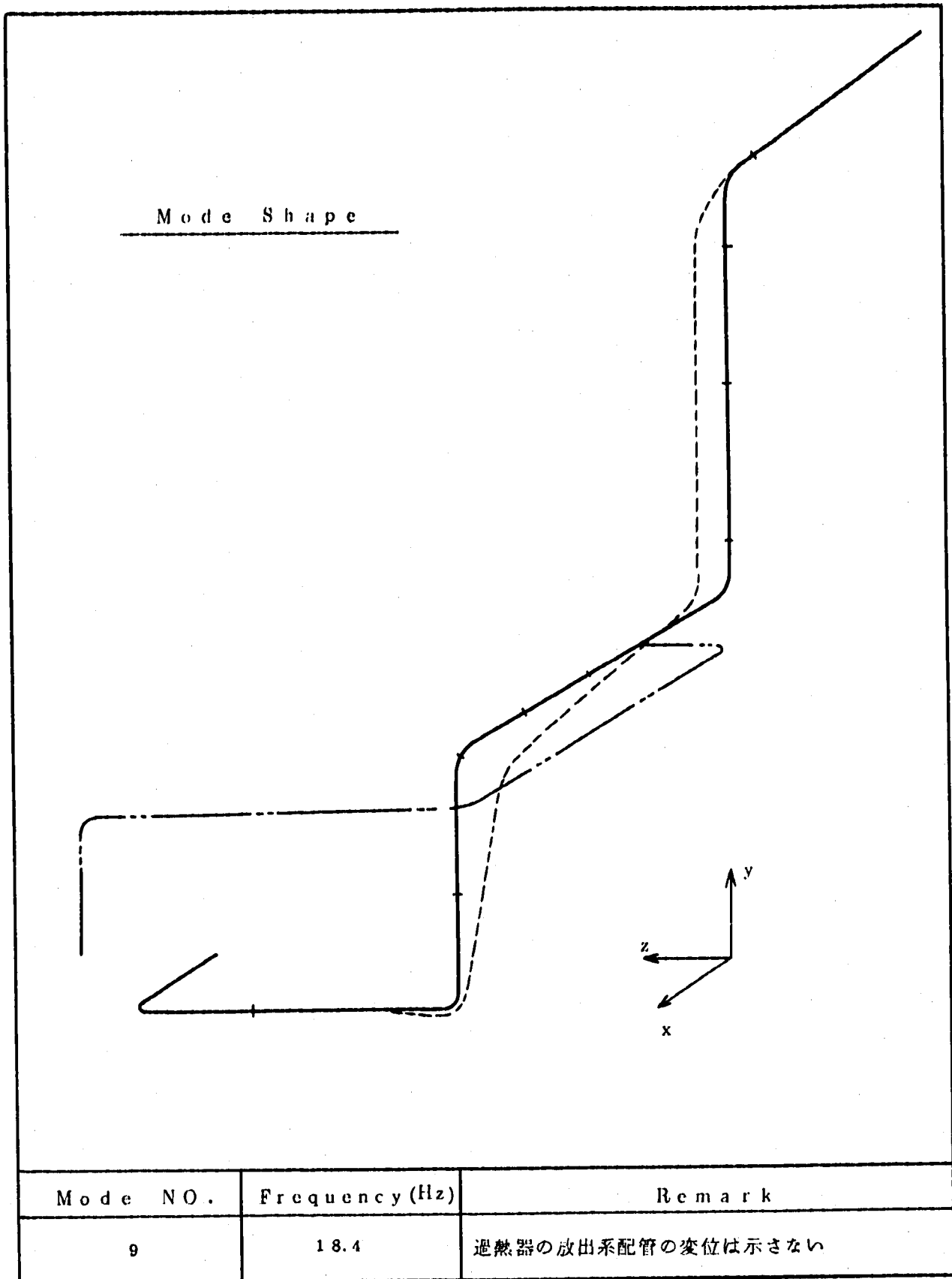


図 5.3-9 固有モード (9 次)



## Appendix 1 測定器の概略

### 1) 圧力センサー

圧力センサーは無冷却型高温用圧力計であり、その仕様を表-1に示す。

表-1 圧力センサーの仕様

定 格 容 量	20, 50, 100, 200kg/m <sup>2</sup>
出 力 電 圧	1mV/VFS
過 負 荷	120%FS
非 直 線 性 ( & ヒステリシス )	1%FS
再 現 性	0.5%FS
温 度 特 性 ( Zero & Sens )	0.05%FS/°C
使用温度範囲	(-200)~+500°C
入出力抵抗	120Ω
ブリッジ電圧	6VDC or AC (Max)
応答周波数	10KHz以上
取付ねじ	M18P1.5
コ ー ド	φ6 特殊コード 0.3m (PHT-S & E) φ3.2MI コード 4 or 7m (PHT-D)
外 形 寸 法	40φ (フランジ部) × 50 (PHT-S)

### 2) γ線透過式ボイド率計

ナトリウムと水素ガスのγ線に対する透過率の差を利用してボイド率を測定するもので、図1にγ線透過式ボイド率のブロック図を示し、表-2にその仕様を示す。

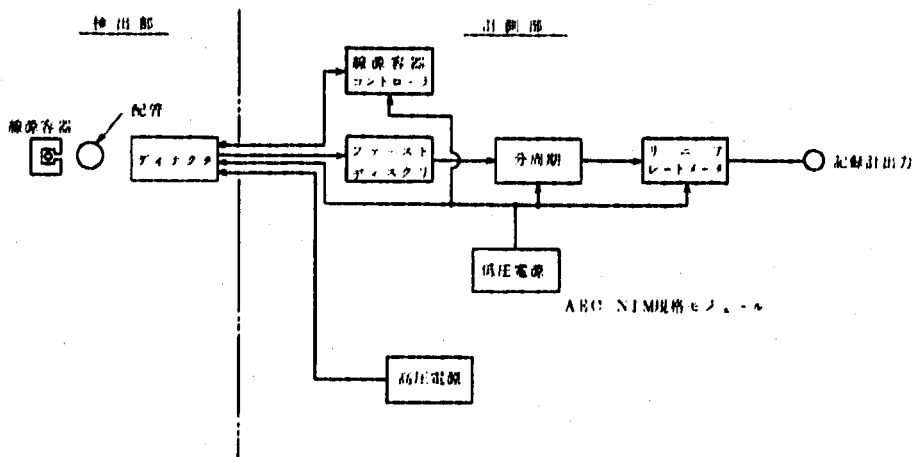


図2 γ線透過式ボイド率計のブロック図

表-2 r線透過式ガイダ率計の仕様

線 源	Cs-137 500mCi 密封 ビーム径 7.3φ
ディテクタ	シンチレータ: プラスチック 1"φ×1"
ファスト ディスクリミネータ	ディスクリ.レベル -0.15V ダブルパルス分解能 10n sec
分 周 期	ダブルパルス分解能 100n sec
リアレートメータ	計数レンズ: 10 <sup>8</sup> cpm 時 定 数 0.01 sec

3) ドラグ式流量計

図2に示すようにドラッグディスクを管が流れと直角となるように置き、このドラッグディスクが流体から受ける力を測定するものであり、流量はこの力から換算して求めなくてはならない。表-3にドラッグ式流量計の仕様を示す。

表-3 ドラグ式流量計の仕様

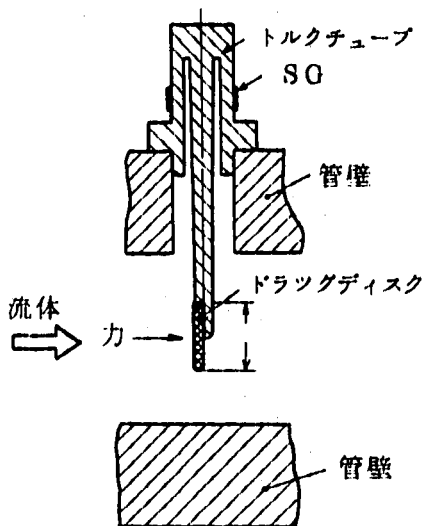


図2 ドラグ式流量の概略

型 名	FHT-5 -10 -20
定格容量	5m/sec 10 20
出力電圧	1mV/VFS (速度の二乗特性)
過負荷	120%FS
非直線性 (& ヒステリシス)	1%FS (荷重校正)
再現性	0.5%FS
温度特性	0.05%FS/°C
使用温度範囲	(-200)~+500°C
入出力抵抗	120Ω
ブリッジ電圧	6VDC or AC (MAX)
応答周波数	1KHz~(1による)
取付ネジ	M18P1.5
コード	7φ特殊コード30cmSTD 先端コネクタ付
外形寸法	40φ×100 (本体)

4) 接触式ナトリウム検知器

図3に示すように導電性のロッドをその先端が配管中心部に至るまで挿入する。このロッド及び配管の壁は電源及び電圧計と接続され、閉じていない電気回路を構成する。流入して来るナトリウムがロッドをおろりと電気回路が閉じ回路に電流が発生する。このことによりナトリウムが検知器の設置場所を通過したことを検知する。

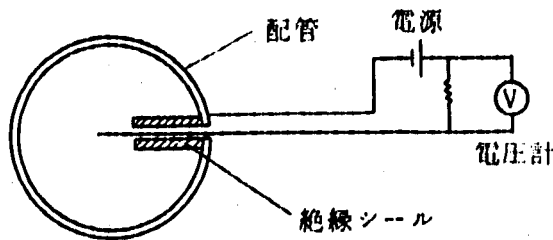


図3 接触式ナトリウム検知器

5) 圧縮型荷重変換器

荷重変換部にひずみゲージを接着し、これをブリッジに組んで荷重に比例した電気的出力を取り出す。表-4に圧縮型荷重変換器の仕様を示す。

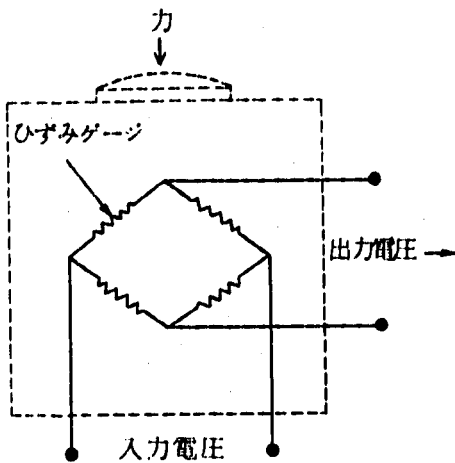


表-4 圧縮型荷重変換器の仕様

出力電圧感度	2mV/V ± 0.2%
非直線性	0.2%FS
ヒステリシス	0.2%FS
繰返し性	0.2%FS
推奨ブリッジ電圧	1~12V AC又はDC
最大許容ブリッジ電圧	15V AC又はDC
零点の温度影響	±0.007%FS/°C
出力の温度影響	±0.005%FS/°C
入出力抵抗	350Ω ± 1.75Ω
保証温度範囲	-10~+70°C
許容負荷	120%FS
初期不平衡	±3%FS

Appendix 2 試験 Run 2 の放出系配管に関するデータの整理

図 表 リ ス ト

図 2.1	試 験 装 置
図 2.2	測 定 点 の 位 置
図 3.1	配 管 内 の 圧 力 の 時 間 変 化
図 3.2	R6001に作用する力(初期)
図 3.3	R6002           "
図 3.4	R6003           "
図 3.5	R6004
図 3.6	R6007           "
図 3.7	R6009           "
図 3.8	R6010           "
図 3.9	R6011           "
図 3.10	R6001に作用する力(全変化)
図 3.11	R6002           "
図 3.12	R6003           "
図 3.13	R6004           "
図 3.14	R6007           "
図 3.15	R6009           "
図 3.16	R6010           "
図 3.17	R6011           "
図 3.18	R6012           "
表 2.1	試 験 条 件
表 4.1	支 持 部 の 力 の 自 由 振 動 成 分 の 振 動 数
表 4.2	圧 力 の ピ ー ク 発 生 時 間
表 4.3	圧 力 の 各 ピ ー ク の 全 振 幅
表 4.4	熱 膨 張 力 の 大 き さ

## 1. 目的

実験データを解析し大リーク・ナトリウム-水反応に伴ない配管が受ける力の種類、発生原因、時間変化及び管内流との関係を明らかにする。

## 2. 試験概要

装置の概略を図 2.1 に示す。蒸発器の放出系配管は蒸発器の頂部から出ている。試験条件の主要項目を表 2.1 に示す。また図 2.2 に測定点の位置を示す。

## 3. 試験データ

データ解析に用いるデータは管内流の圧力変化及び支持部の力であり、各データを図 3.2 ~ 図 3.18 に示す。

## 4. 現象の説明

反応点近傍の圧力変化からナトリウム-水反応の開始時間は 0.31 sec であることがわかっている。また管内流の圧力変化の図 3.1 から管内の圧力変化が大きくなる時間は 1.1 sec であり、消滅するのは 1.2 sec である。支持部の力の図、例えば図 3.10 を見ると各々の時間を境として支持部の力が異っている。これは、各々の時間を境として配管に別種の力が作用すると考えられるからである。

したがって、ナトリウム-水反応の開始以後の過程を

- i) ナトリウム-水反応の開始時間 (0.31 sec) ~ 管内の圧力変化が大きくなる時間 (1.1 sec)
- ii) 管内の圧力変化の大きい時間帯 (1.1 sec ~ 1.2 sec)
- iii) 管内の圧力変化が消滅した時間帯 (1.2 sec ~)

の三段階に分割し各段階毎にデータを解析する。

### 4.1 ナトリウム-水反応の開始時間 (0.31 sec) ~ 管内の圧力変化が大きくなる時間 (1.1 sec)

支持部の力の初期変化の拡大図である図 3.2 ~ 図 3.9 を参照とする。図におけるこの時間帯の支持部の力の変化は反応発生時に衝撃的な力が配管に作用することを示す。この衝撃的な力は蒸発器内でのナトリウムのスラグの加速に起因する蒸発器の運動によると考えられる。ナトリウムの運動は圧力波の伝播及び水素気泡の成長によるものである。

一般に振動系に時間的に変化する力が作用すると、振動系の初期挙動は力の時間変化と類似の時間変化をする強制振動成分に系の固有振動数で振動する自由振動成

分が重畳されたものになるので、強制振動成分からは力の時間変化が推測でき、自由振動成分からは測定点で卓越する系の固有振動数が推測できる。

図 3.1～図 3.9 における強制振動成分は図中の破線で示され、また自由振動成分は破線を中心とした振動で示される。

図中の破線の変化より蒸発器の運動に因る力はスナッフ関数と類似の変化をすること、また振動成分の変化より各支持部の力の周波数は表 4.1 のようであり、測定点で卓越する配管系の固有振動数は 12 Hz～15 Hz 近傍にあることがわかる。

表 4.1 支持部の力の自由振動成分の振動数

支 点 反 力	振 動 数 (Hz)
R6001	12
R6002	15
R6003	15
R6004	15
R6007	15
R6009	15
R6010	12
R6011	12

#### 4.2 管内流の圧力変化の大きい時間帯 (1.1 sec～12 sec)

図 3.1 は管内流の圧力変化に関して以下の事柄を示す。

- ① 圧力は 1.1 sec と 12 sec の間を振動しながら変化する。
- ② 圧力のピーク発生時間は表 4.2 のようである。
- ③ 圧力は 4.1 sec で最大となり、その値は 4 kg/cm<sup>2</sup> である。
- ④ 圧力変化の各ピークの全振幅は表 4.3 のようである。
- ⑤ P6005 及び P6006 の圧力は P6001, P6002, P6003 及び P6004 の圧力と異なる。

圧力変化の周期性及び P6005 及び P6006 の圧力が P6001, P6002, P6003

表 4.2 圧力のピーク発生時間

ピーク番号	時間(秒)
1	1.59
2	2.38
3	3.41
4	4.48
5	5.24
6	6.47
7	8.65
8	10.2

表 4.3 圧力の各ピーク的全振幅

ピーク番号	P6001	P6003	P6005
	P6002	P6004	P6006
1	2.79	3.18	1.3
2	2.76	3.21	1.1
3	2.79	3.06	1.3
4	1.88	2.24	0.8
5	1.6	1.82	0.6
6	1.0	1.06	0.3
7	1.0	1.18	0.48
8	0.91	1.0	0.36

(単位 kg/cm<sup>2</sup>)

及び P6004 と異なる理由として

- ① 注水率の変化
- ② ラブチャ板（完全に開口していない）通過時の流動変化
- ③ 配管水平部と鉛直部との流動パターンの差異

が考えられるが、明解な説明は得られていない。後述するように配管内の流動状態は流体力評価上、明確にすることが必要であるので、今後の検討を要する。

次に図 3.10～図 3.18 に示す支持部の力のこの時間帯の変化を調べる。この変化は蒸発器の運動に因る力以外の力が配管に作用していることを示す。

その力は熱膨張力と流体力である。熱膨張力は高温の流体の流入による配管の熱膨



張及び収納容器の熱膨張による移動によって生じ、また流体力は配管へ流入する流体の運動量変化により生じる。

熱膨張力と流体力は配管に同時に作用するが、

- ① 熱膨張力は滑らかに変化する。
- ② 流体力による支持部の力は流体力の時間変化と配管の振動特性に依存し、その挙動は振動的である。

を考慮すると、測定されている支持部の力のうち変化の激しい成分は流体力による支持部の力と見做すことができる。さらに、この流体力による支持部の力から流体力についても定性的に調べることができる。

中間支持部 (R6001, R6002, R6003, R6004, R6007) と上支持部 (R6009, R6010, R6011, R6012) で力の挙動が異なるので、以下では別々に記す。

#### 1) 中間支持部

中間支持部での力は図 3.10～図 3.14 である。この時間帯の力の変化を図 3.1 の配管内圧力変化と比較するとピークの発生時間、平均値が最大に達する時間及び変化が消滅する時間は同一である。

このことと先記した時間的に変化する力を受ける振動系の挙動を考慮すると、流体力の時間変化は図 3.1 の圧力変化と同様であると考えることができる。

#### 2) 上支持部

上部支点での支点反力は図 3.15～図 3.18 である。この時間帯の各支持部での力の挙動について記す。

R6009 (図 3.15)

中間支持部の力程、顕著ではないが図 3.1 の圧力変化と類似の変化をしている。

R6010 (図 3.16), R6012 (図 3.18)

図 3.1 の圧力変化と類似の変化をしている。

R6011 (図 3.17)

圧力変化とは異なった変化をしている。特に  $t =$  約 4.8 s 以後は約 2.5 Hz の振動数で振動している。

以上の上部支持部の力の変化より、上部支持部には管内圧力変化と類似の流体力以外に 2.5 Hz の振動数を持つ力が作用していることがわかる。

上述の中間支持部及び上支持部の流体力による力の変化をもとにして、以下のことが計える。

- ① 中間支持部に作用する流体力は管内流の圧力変化と良く似た変化をする。
- ② 上支持部に作用する流体力は管内流の圧力変化と類似の変化をする力及び2.5Hz及び3.3Hzの振動数を持つ周期的な力である。
- ③ 上記の周期的な力は収納容器が流入する流体により力を受けて運動する結果と考えられる。
- ④ 上支持部で測定されている2.5Hzの変化が中間支点には無い。これは伸縮継手の剛性が低いとと考えられる。

#### 4.3 管内流の圧力変化が消滅した時間帯（12 sec～）

図3.10～図3.18に示す $t = 12$  s以後の支持部の力は熱膨張力と $t = 12$  sまでに配管が受けていた力によるものである。 $t = 12$  sでは系の温度は定常状態と考えられる

表4.4 熱膨張力の大きさ

支持点	支持部の力測定点	熱膨張力の大きさ (ton)
中間 支 点	R6001	0.06
	R6002	0.16
	R6003	0.06
	R6007	0.07
上 部 支 点	R6009	0.75
	R6010	0.3
	R6011	2.3

ので、熱膨張力による支持部の力は一定値となる。従って $t = 12$  s以後の支持部の力は一定な熱膨張力に $t = 12$  s以前の力の影響による変化が重ねられたものとなる。

各支持部の12 secでの熱膨張力を表4.4に示す。この表より熱膨張力は上支持部で大きく、中間支持部で小さいこと、上支持部でも特にR6011で大きく2.3 tonであることがわかる。

## 5. 結 論

試験データの解析により明らかになった事項を以下に記す。

- ① 管内流の圧力は約 1Hz 程度の周波数で周期的に変化する。
- ② ナトリウム-水反応開始時に蒸発器が運動し、この結果配管はステップ状に変化をする力を受ける。
- ③ 中間支持部は管内流の圧力変化と同様な変化をする流体力を受ける。
- ④ 上支持部は管内流の圧力変化と同様な変化をする力以外に収納容器の運動に起因すると考えられる周波数 2.5 Hz の周期的な力を受ける。
- ⑤ 熱膨張力は上支持部で大きく、中間支持部で小さい。上支持部でも特に R6011 で大きく 2.3 tmm である。

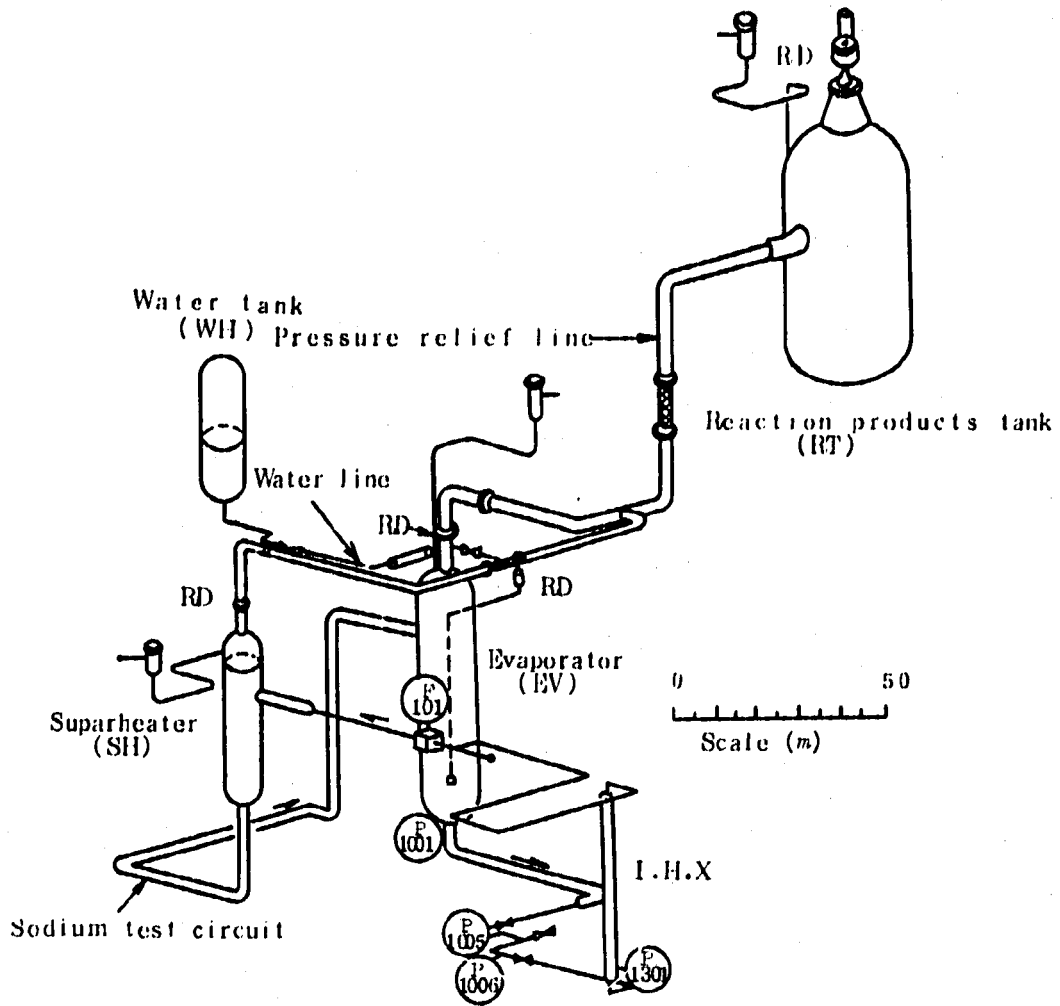
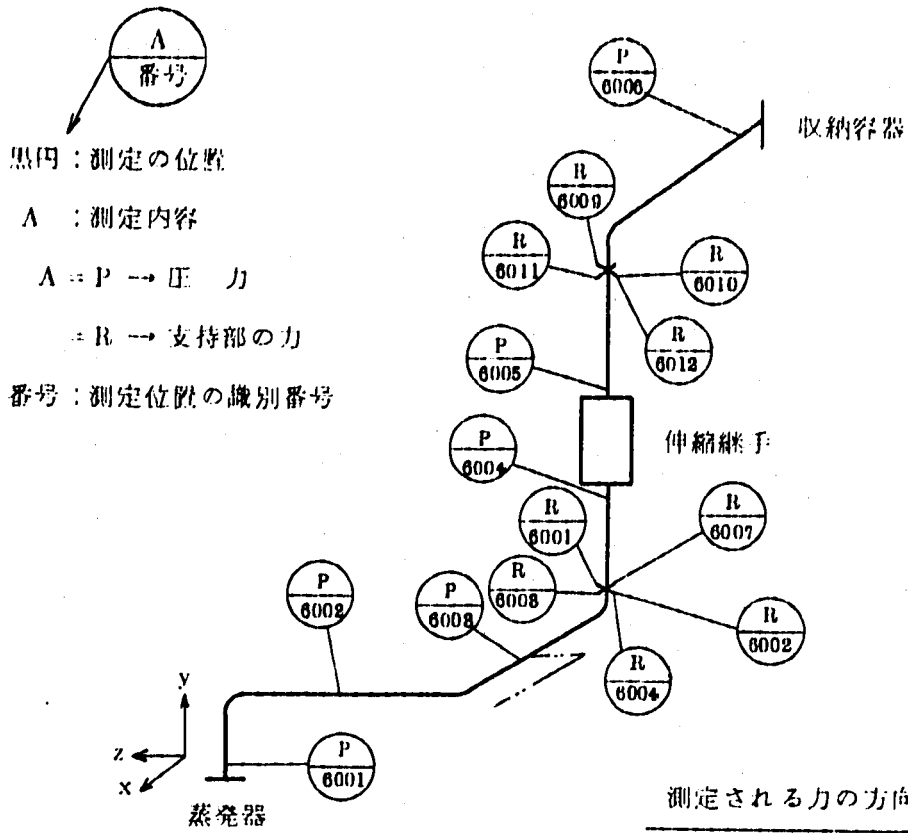


圖 2 1 試 驗 裝 置

表 2.1 Run 2 試 験 条 件

項 目		単 位	Run 2
試 験 年 月 日			S. 51 - 1 - 26
反 応 容 器 内 部 構 造 物 形 式	反 応 容 器		蒸 発 器
	内 部 構 造 物 形 式		ヘリカル, IHI
	反 応 点 位 置		ヘリカル下部5層目 F. L. 3000
注 水 条 件	注水孔・ラブチャ板形式		円筒型 19φ×2以上
	ラブチャ板設定圧		
	RD501	kg/cm <sup>2</sup>	100 (500°C)
	RD502	kg/cm <sup>2</sup>	82 (300°C)
	平 衡 注 水 率	kg/sec	14.2~9.7
	全 注 水 量	kg	122
	注 水 配 管 温 度	°C	約260
	水 加 熱 器 温 度	°C	259
	" 圧 力	kg/cm <sup>2</sup> G	153
	" 初 期 給 水 量	kg	390
	注水弁 (V-502) 弁間時間	sec	9.9
ナトリウム系条件	ナトリウム 温 度	°C	320
	ナトリウム 流 量	ℓ/sec	静 止
	カバ ー ガ ス 圧		
	蒸 発 器	kg/cm <sup>2</sup> G	0.5
	過 熱 器	kg/cm <sup>2</sup> G	0.5
	カバ ー ガ ス 使 用 ガ ス		アルゴン
放 出 系 条 件	ラブチャ板設定圧		
	RD601	kg/cm <sup>2</sup>	3 (515°C)
	RD602	kg/cm <sup>2</sup>	3 (515°C)
	RD603	kg/cm <sup>2</sup>	1.5 (150°C)
	放 出 系 配 管 取 出 し 位 置		頂 部
	運 転 温 度		
	放 出 系 配 管	°C	250
	収 納 容 器	°C	320
	カバ ー ガ ス 圧 ( 収 納 容 器 )	kg/cm <sup>2</sup> G	0.5
	カバ ー ガ ス 使 用 ガ ス		アルゴン
ドレン系条件	運 転 温 度		
	ダ ンプ タ ン ク	°C	280
	ド レ ン 配 管	°C	350



測定的位置	力の方向
R6001	Y 軸方向
R6002	"
R6003	"
R6004	"
R6007	X 軸方向
R6009	Y 軸方向
R6010	Y 軸方向
R6011	Y 軸方向
R6012	Y 軸方向

図 2.2 測定点の位置

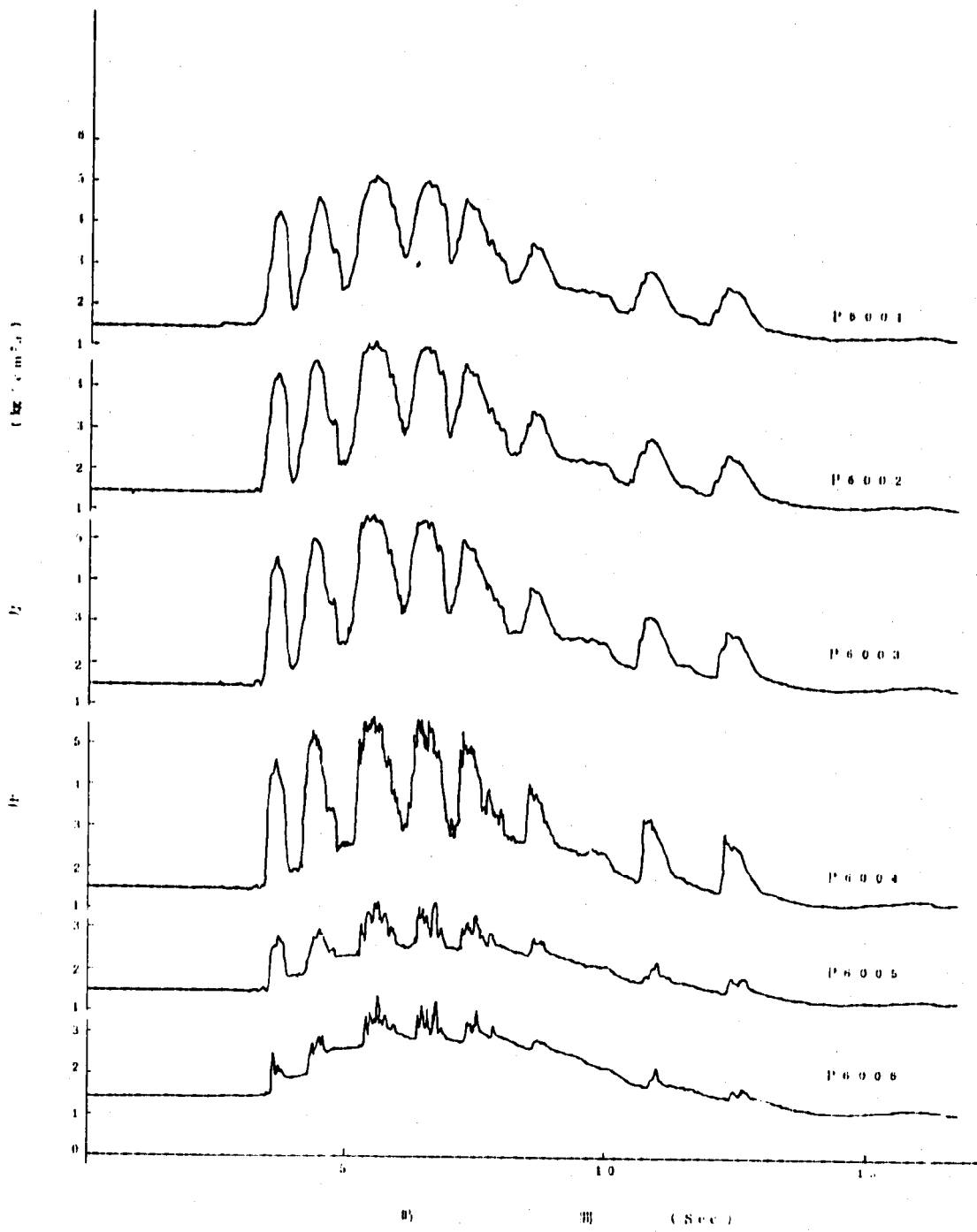


図3.1 配管内圧力の時間変化

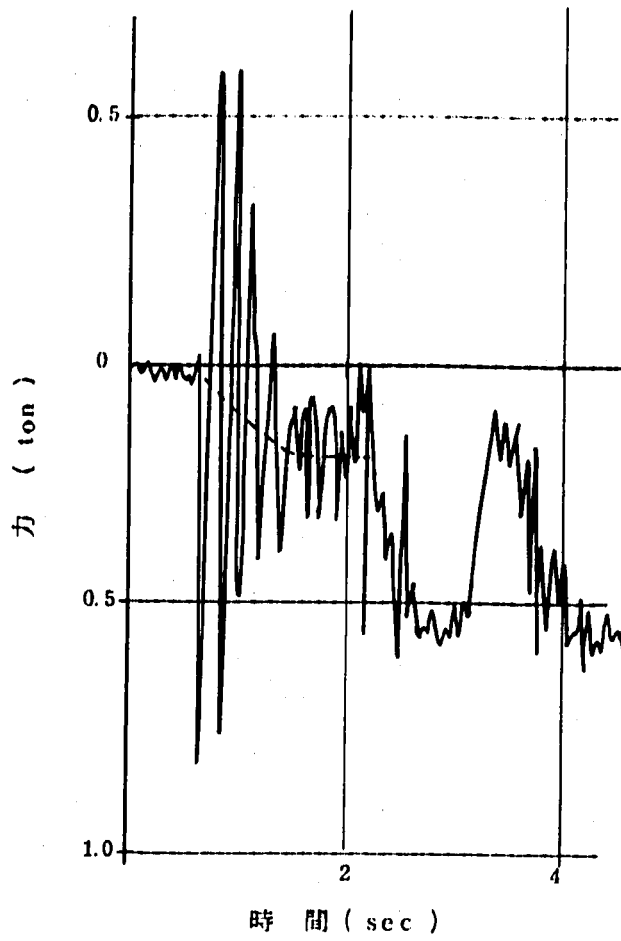


図 3.2 R6001 が受ける力 (初期)

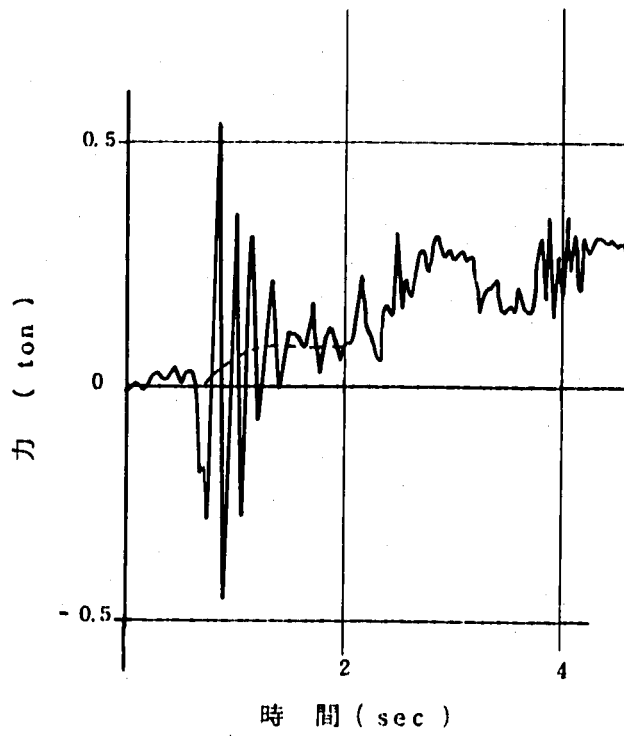


図 3.3 R6002 が受ける力 (初期)



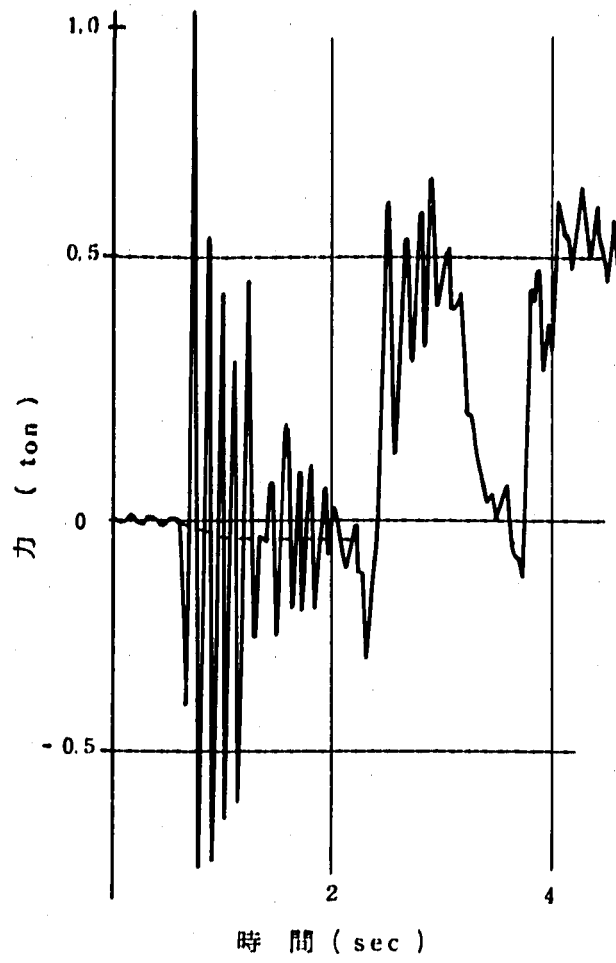


図 3.4 R6003 が受ける力 (初期)

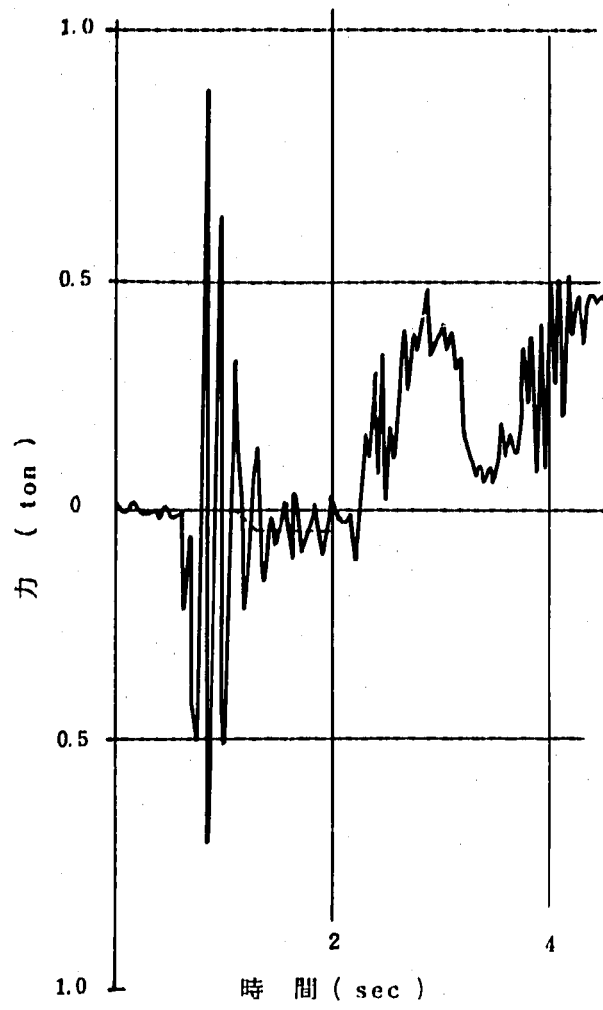


図 3.5 R6004 が受ける力 (初期)

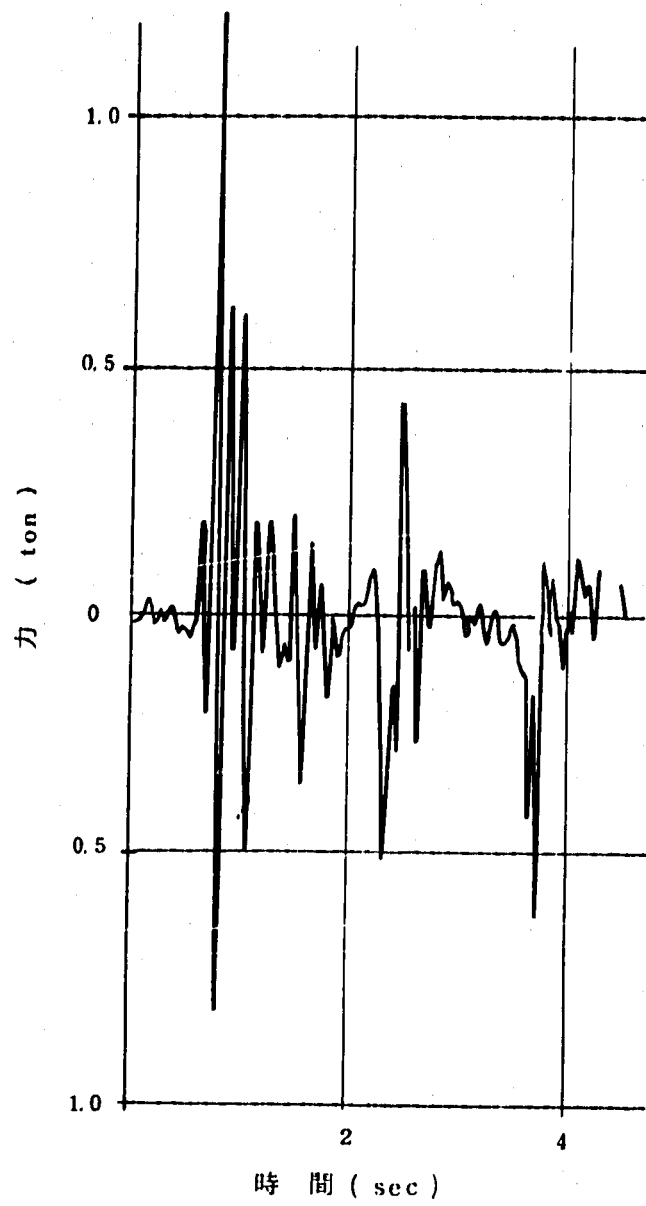


図 3.6 R 6 0 0 7 が受ける力 (初期)

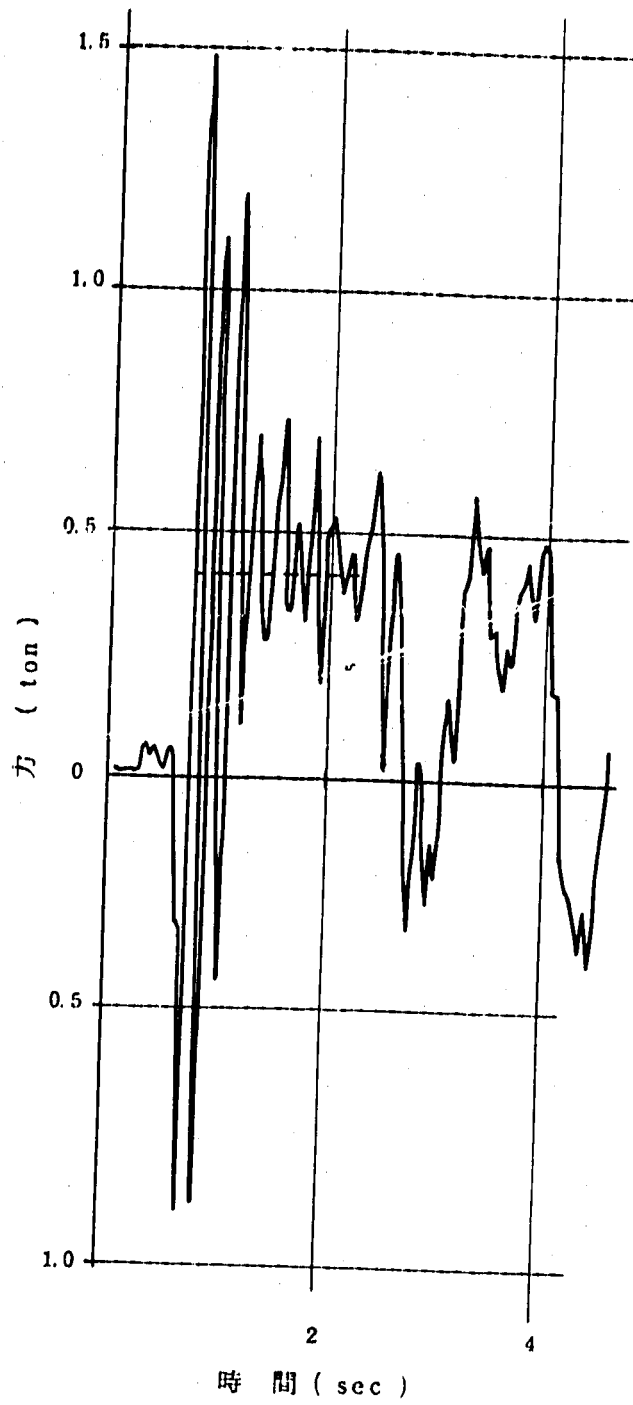


図 3.7 R6009が受ける力 (初期)

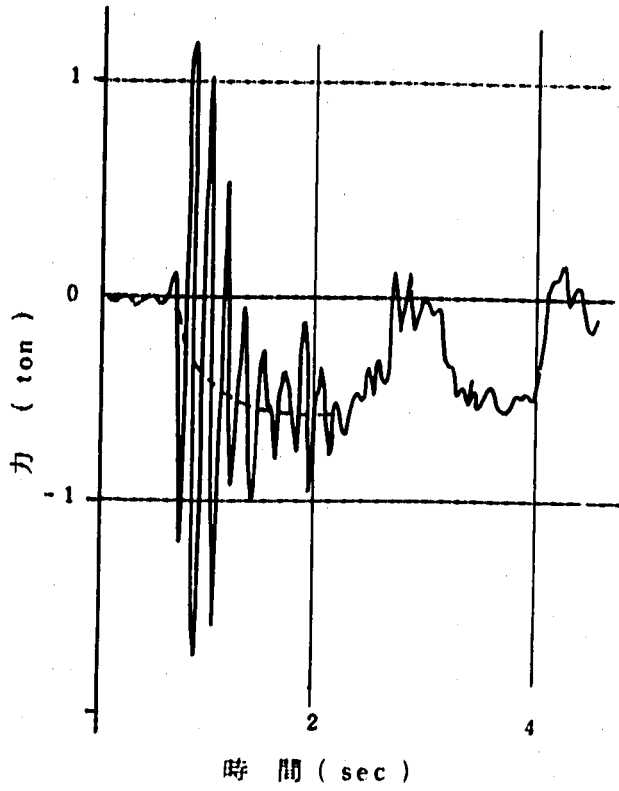


図 3.8 R6010が受ける力(初期)

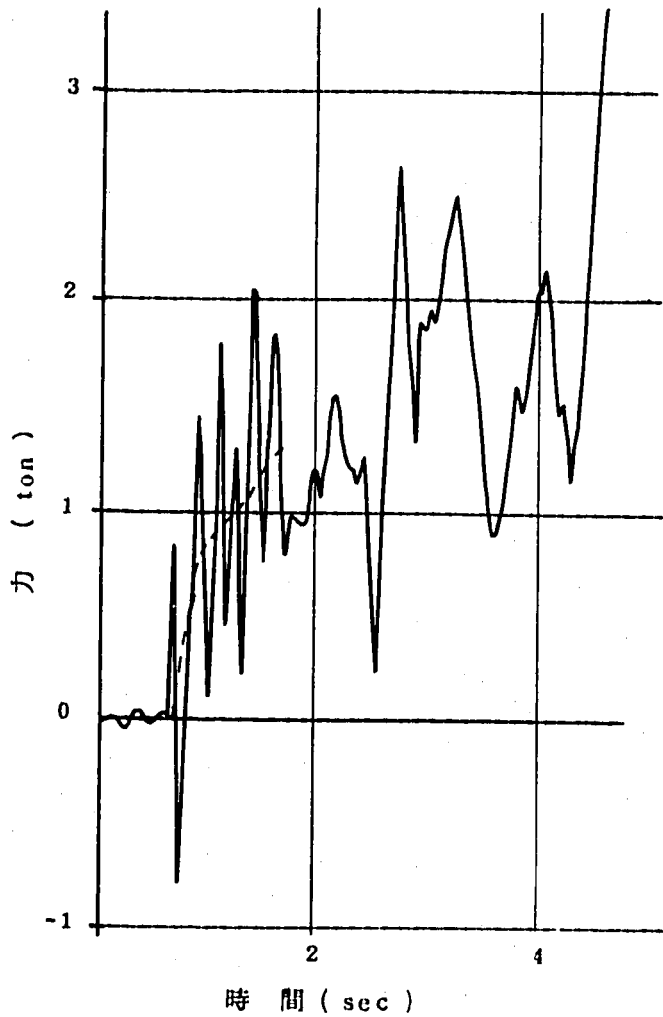


図 3.9 R6011が受ける力(初期)

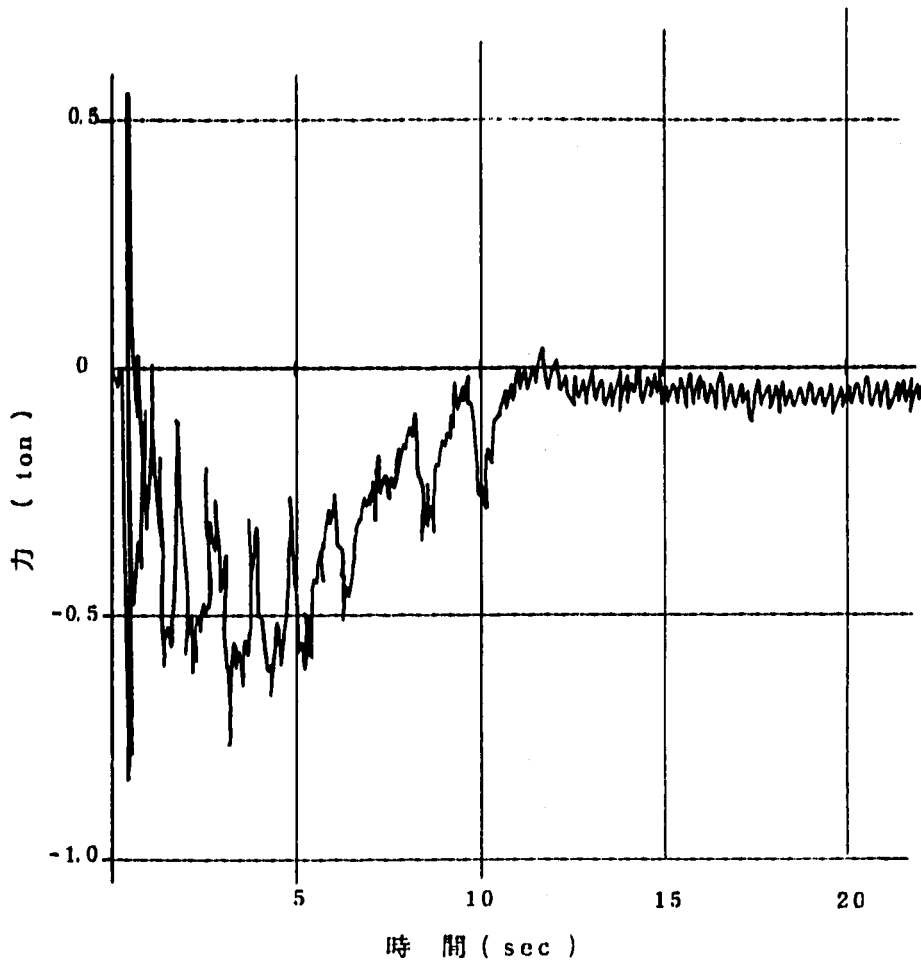


図 3.10 R6001が受ける力(全変化)

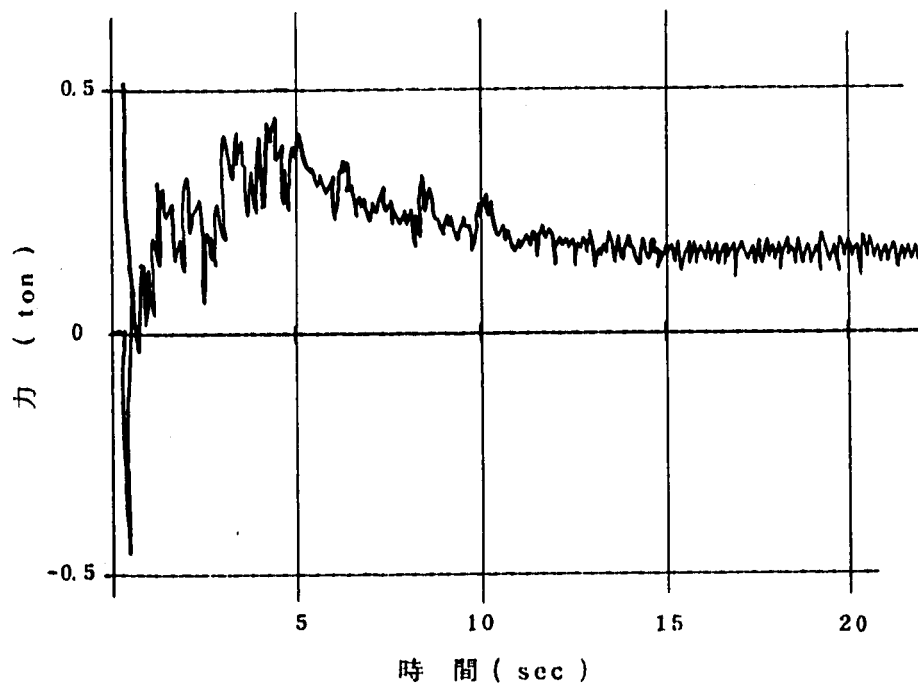


図 3.11 R6002が受ける力(全変化)

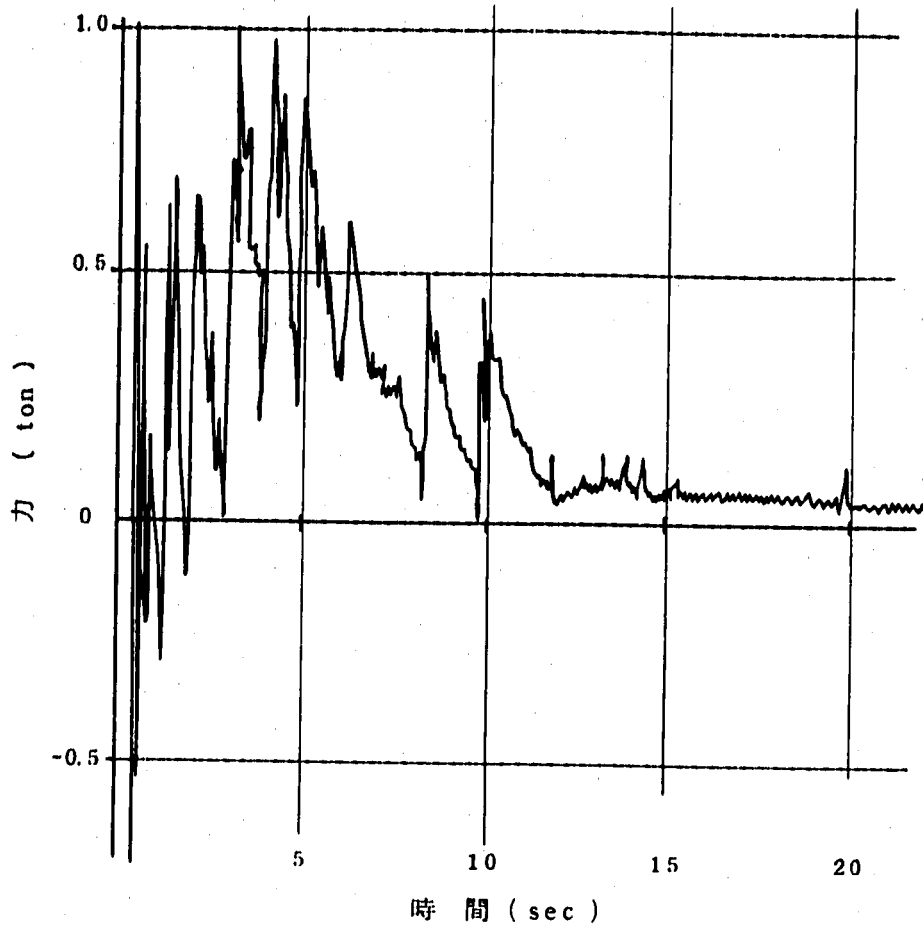


図 3.12 R6003が受ける力(全変化)

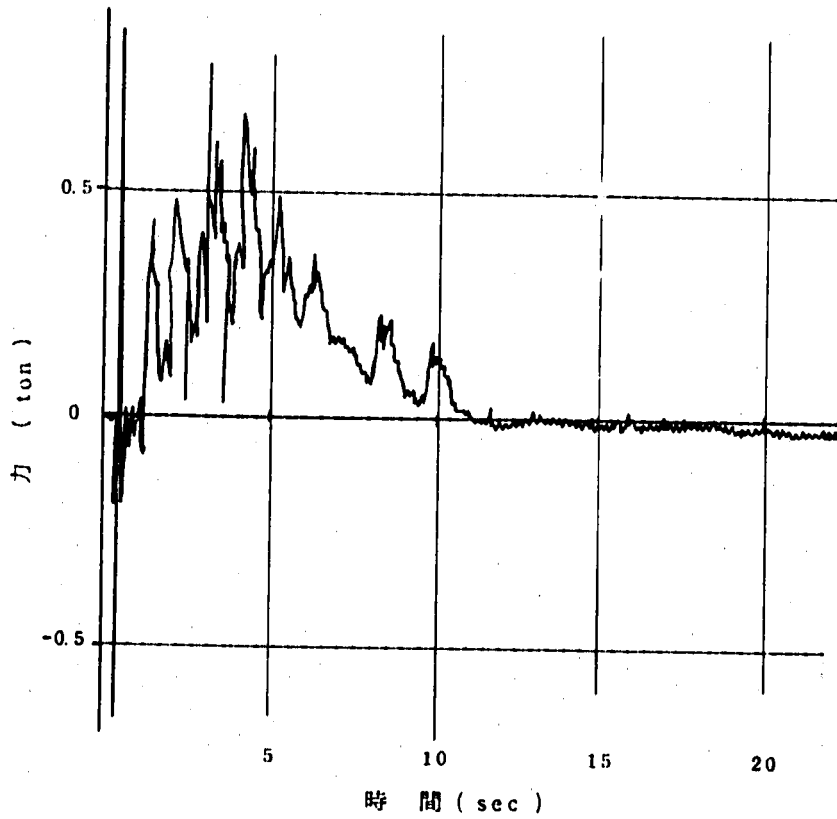


図 3.13 R6004が受ける力(全変化)

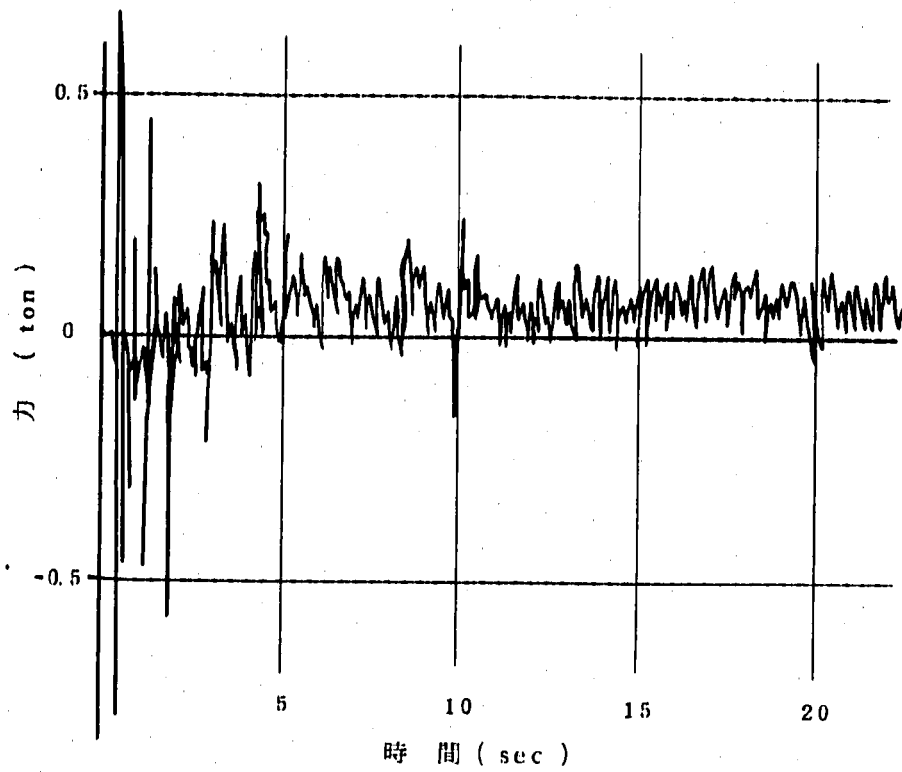


図 3.14 R6007 が受ける力 (全変化)

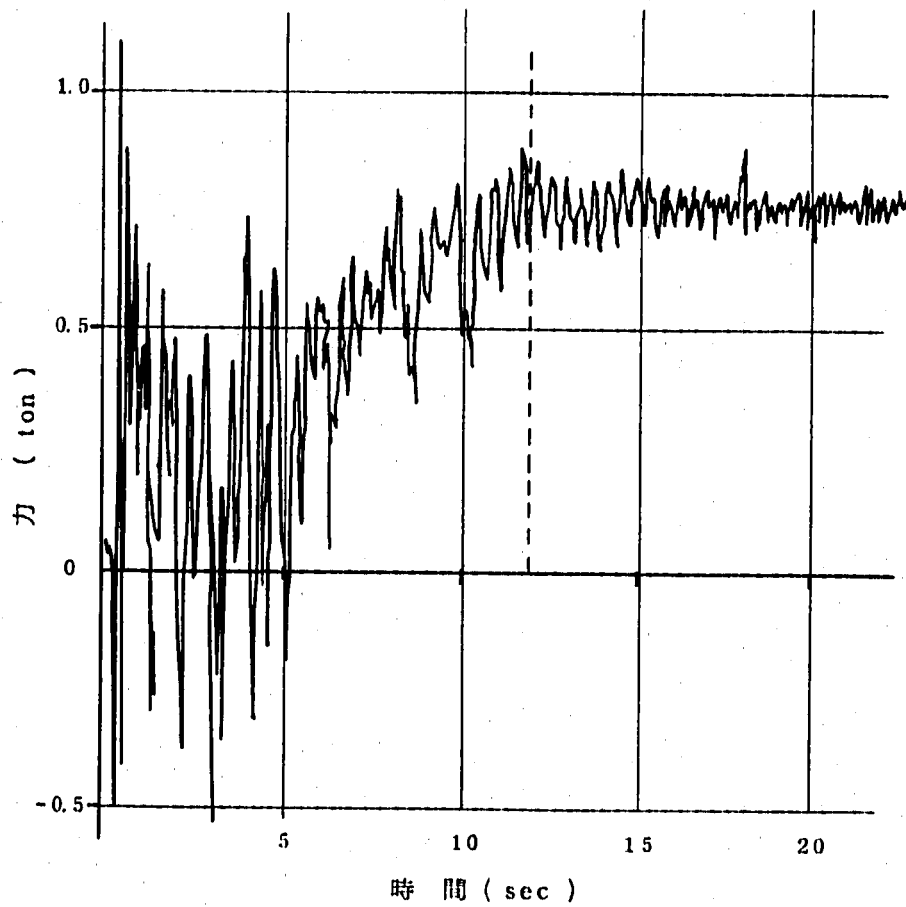


図 3.15 R6009 が受ける力 (全変化)



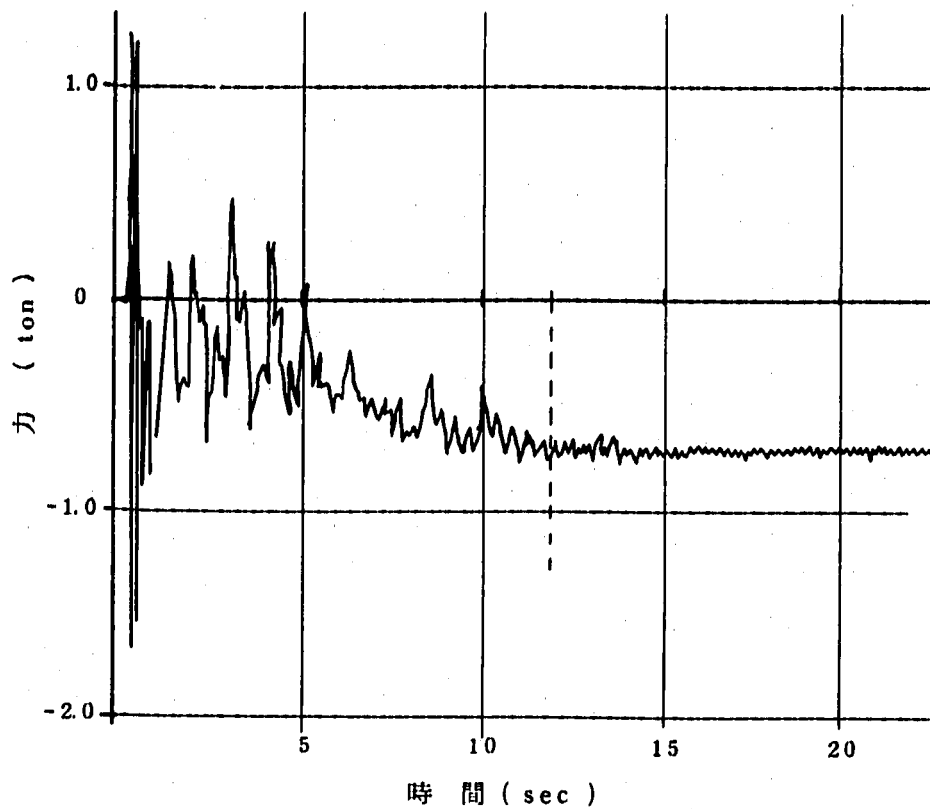


図 3.16 R6010が受ける力(全変化)

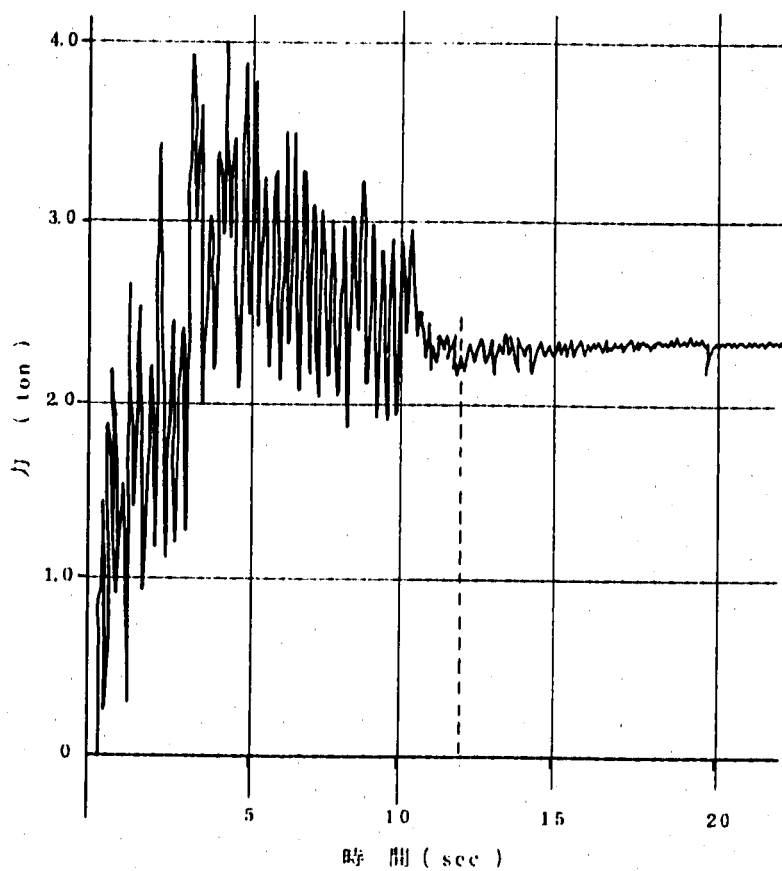


図 3.17 R6011が受ける力(全変化)

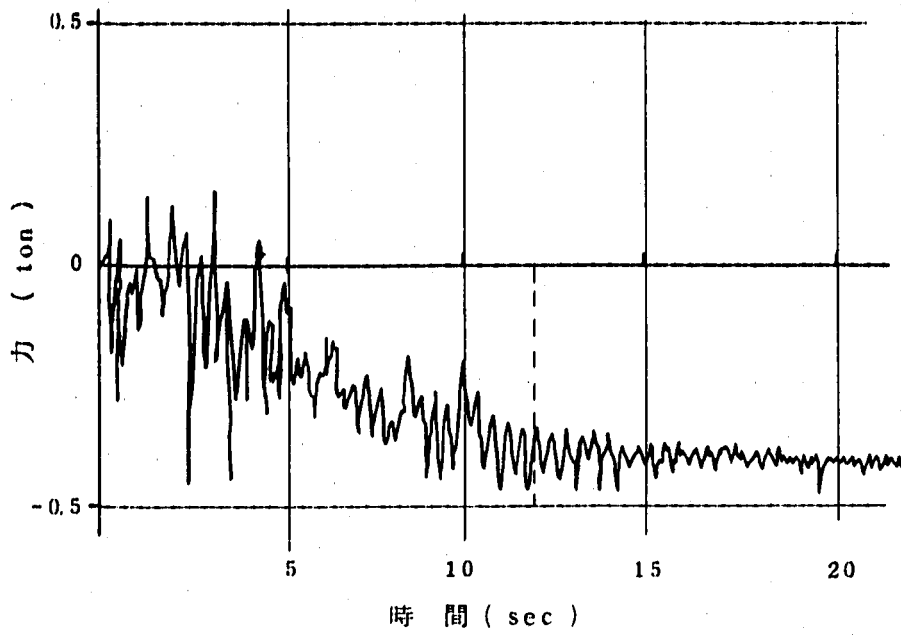


図 3.18 R6012が受ける力(全変化)