

# 航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-478

高圧導管用金属製伸縮管について

鈴木正光 ・ 高橋 宏  
鈴木誠三 ・ 野口正芳

1982年10月

航空宇宙技術研究所  
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

## 目 次

1. まえがき .....	1
2. 記 号 .....	1
3. 金属ペローズ型伸縮継手 .....	3
3.1 ペローズ .....	3
3.2 端管およびフランジ .....	3
3.3 コントロールリング .....	4
3.4 スリーブ .....	4
3.5 ガイドボルト(タイロッド, リミットロッド) .....	5
4. 伸縮継手の選定 .....	5
4.1 伸縮継手の形式と用途 .....	5
4.2 伸縮継手の形式選定 .....	5
4.3 材料の選定 .....	10
5. 伸縮継手の変形量 .....	10
5.1 熱膨張による配管の伸縮 .....	10
5.2 内圧による配管の伸び .....	10
5.3 伸縮継手の変形量 .....	12
5.4 伸縮継手の移動量の拘束について .....	21
6. 強度計算 .....	21
6.1 ペローズの応力計算 .....	21
6.2 耐圧強度の計算について .....	21
6.3 伸縮応力 .....	21
6.4 伸縮継手の寿命 .....	21
6.5 板厚の決定 .....	22
6.6 計算結果 .....	23
7. 各種試験 .....	23
7.1 試験の概要 .....	23
7.2 疲労試験 .....	24
7.3 歪測定 .....	28
7.4 現地総合試験 .....	37
8. むすび .....	40
9. 参考文献 .....	42

# 高圧導管用金属製伸縮管について\*

鈴木正光\*\* 高橋 宏\*\*

鈴木誠三\*\* 野口正芳\*\*

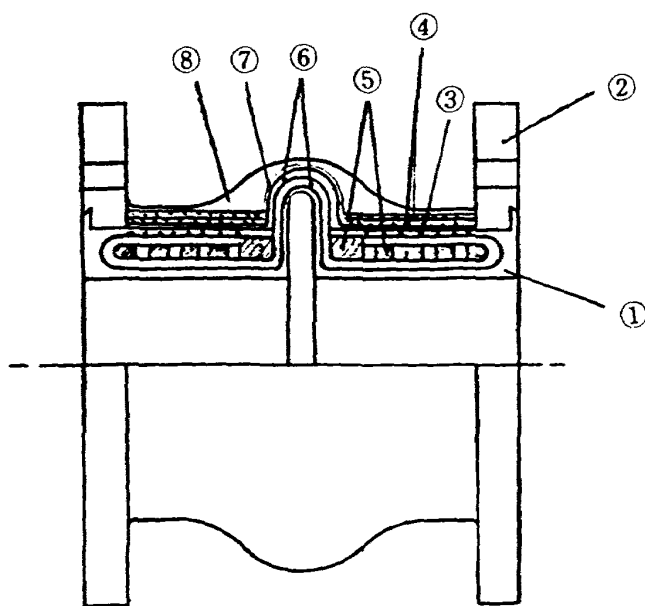
## 1. まえがき

当研究所においては、遷音速風胴をはじめとして各種風胴や試験設備へ供給する乾燥空気（大気圧下換算露点温度 $-60^{\circ}\text{C}$ 以下）を貯蔵するため、直径10mの球型貯気槽2基（通称第1および第2球貯気槽）と直径12mの球型貯気槽1基（第3球貯気槽）を設置している。

これら貯気槽が、空気圧縮機と脱湿装置で構成される高圧乾燥空気製造設備、あるいは、各種風胴や試験設備に対して、共通の管路で接続されているため、温度や内圧の変化による配管の変形や変位を考慮して、配管形状を決定したり要所に伸縮継手を配置して不具合の発生を防止してきた。

伸縮継手については、昭和32年建設当時以来、図1で代表されるゴム製の伸縮継手を採用してきたが、伸縮継手に働く内圧が最大 $20\text{ kgf/cm}^2$ で、そのうえ圧力変化が大きく、変動回数も1日当たり10回に及ぶ場合もあるため、設備計画の当初に予測した2年の寿命が、1年そこそこで補強材の剝離が起ったり、亀裂が生じる結果となった。既設のゴム製伸縮継手は6個で、その配置は図2に示すとおりであり、いずれも特注の単品製品である。第1次オイルショック後の経済上の急変のため、同継手更新の経費が増大し、十分な設備保全を守りきれない状況が予測されたので対応策を検討した。その結果、当時、高圧大口径管に対して、やっと実用化されだした金属ベローズ型伸縮継手を採用することにした。

しかし、金属ベローズは、その当時まだ、高圧大口径管に対する実績が不十分なりえ、強度計算や寿命予測も確立されていなかったため、本継手採用に



- ① 内面ゴム（天然ゴム）
- ② フランジ
- ③ ワイヤ（鋼線）
- ④ ワイヤロープ $3\text{mm}\phi$
- ⑤ 補強リング（鋼）
- ⑥ 補強層
- ⑦ タイクロス（特殊布）
- ⑧ 外面ゴム（合成ゴム）

図1 ゴム製の伸縮管

先立ってそれらを確認する試験を立案、実施してから実用に供した。

これらの試験結果から得られた資料は、今後一般的に金属ベローズ型伸縮継手を設計したり、実用化する上でも十分活用される貴重なものであるから、当該設備における伸縮継手の配置計画の経緯や実用後の作動状況とあわせて報告する。

## 2. 記号

$A$	所要面積	$\text{cm}^2$
$a$	ベローズの波形の半ピッチ	$\text{in}$
$c$	くされ代	$\text{mm}$

\*昭和57年8月4日受付

\*\*空気力学第2部

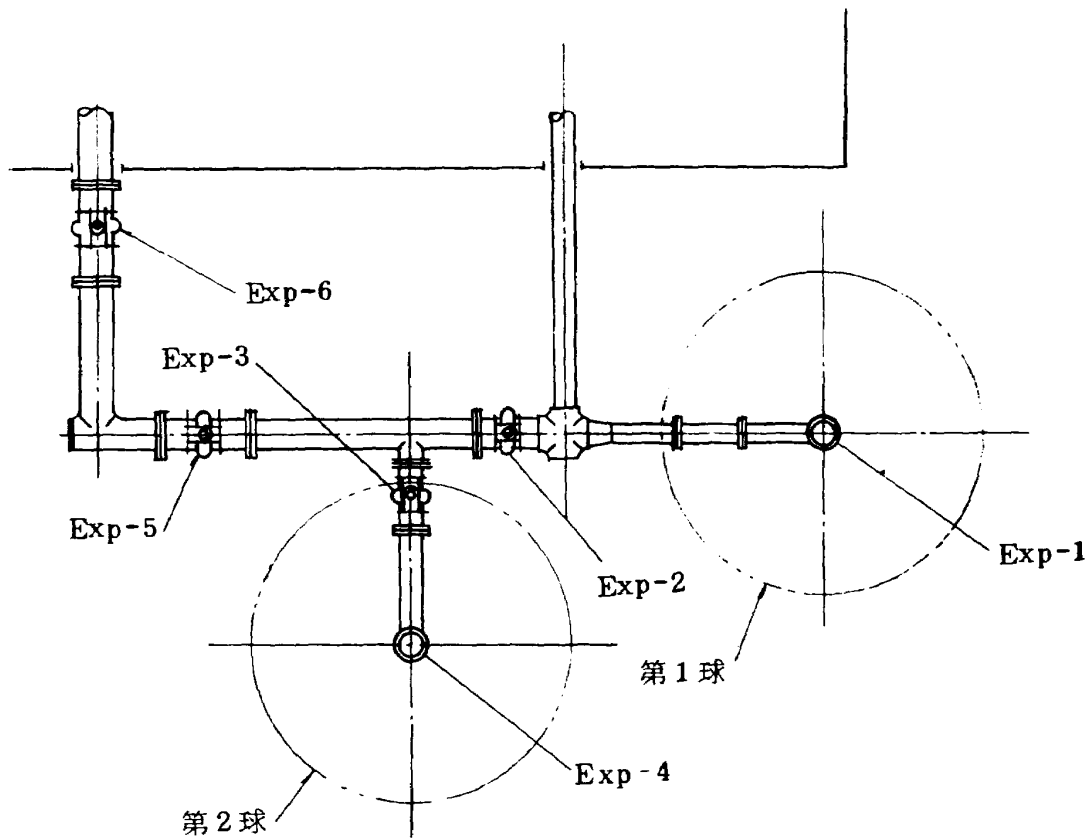


図2 改造前配置図

$D_i$ 管内径	mm	$r$ 円管の半径	mm
$D_m$ ベローズの有効径	mm	$S_{AL}$ 設計温度における許容引張応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$D_o$ 管外径	mm又はin	$S_{AD}$ 設計温度における許容曲げ応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$d$ ボルトの直径	mm	$S_E$ 伸縮応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$E$ 材料の縦弾性係数	kgf/cm <sup>2</sup>	$S_{PD}$ 内圧による円周方向の引張応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$e_x$ 軸方向の伸縮量	mm	$S_{PL}$ 内圧による軸方向の曲げ応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$e_y$ 横方向の伸縮量	mm	$S_R$ 伸縮と圧力による合成応力	psi
$e_\theta$ 角偏位	rad	$S_Y$ 設計温度における降伏点	kgf/cm <sup>2</sup>
$h$ ベローズの高さ	mm又はin	$s$ 横方向の変位	in
$k$ 材質による定数		$T$ 温度	°C
$L$ 短管を含んだベローズの全長	in	$t$ 板厚	mm又はin
$l$ 短管の長さ	in	$z$ ベローズの山数	
$l_t$ タイロットの長さ	mm	$\bar{\alpha}$ 管の平均熱膨張係数(線膨張)	
$L_0$ 20°Cにおける管長	mm	$\delta$ 伸縮長さ	in
$L_1$ $T_1$ °Cにおける管長	mm	$\epsilon$ 管軸方向の歪	
$m$ ポアソン比		$\eta$ 溶接継手効率	
$N$ 繰返し破壊回数		$\theta$ 全変角量	rad
$n$ ベローズの層数		$\lambda$ 管軸方向の伸び	mm
$P_0$ 設計圧力	kgf/cm <sup>2</sup>	$\rho$ ベローズの山の曲率半径	mm
$P_1$ 管内圧力	kgf/cm <sup>2</sup> 又はpsi	$\sigma$ 引張応力	kgf/cm <sup>2</sup>
$p$ ベローズのピッチ	mm	$\sigma_r$ 半径方向の応力	kgf/cm <sup>2</sup>

$\sigma_t$  円周方向の応力                      kgf/mm<sup>2</sup>  
 $\sigma_z$  管軸方向の応力                      kgf/mm<sup>2</sup>

### 3. 金属ベローズ型伸縮継手

#### 3.1 ベローズ

伸縮継手用のベローズの材料は、取扱う流体の種類と圧力によっては、ゴム等も使用されるが、一般には金属が大半で、それぞれ要求される可撓性と耐圧強度に適合したものからえられる。

図3に金属製ベローズの代表的な形状を示す<sup>1)</sup>。上段の2種類は伸縮量が僅かな真空配管や排気管に使用するもので4.5mm～9mmの板厚のものが多いため、疲労破壊や応力腐食に対して十分考慮して設計する必要がある。次の4種類のは、それぞれに形成され薄手の板材で作られ、三角山形、波形、U字形、丸形の形状が一様に連続しているものである。つぎの2種類は外面溶接を省略するように薄手の帯材を使いベローズの1山ごとに形成して組上げたものである。ただしこの場合でも軸方向の縦の溶接継手は必要である。一番下の2種類は薄手の円筒形材料を形成して作ったもので両端の取付部分以外は溶接箇所が皆無である。最後の2種類については、

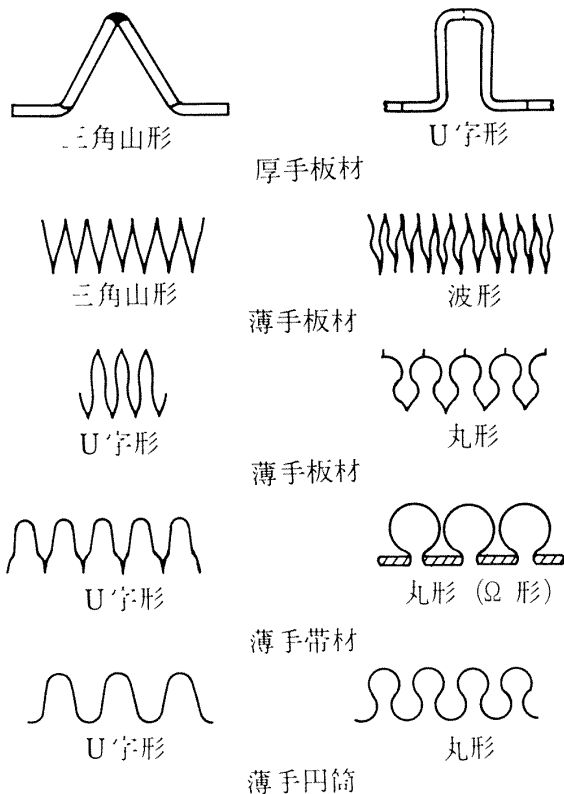


図3 代表的金属製ベローズ形状

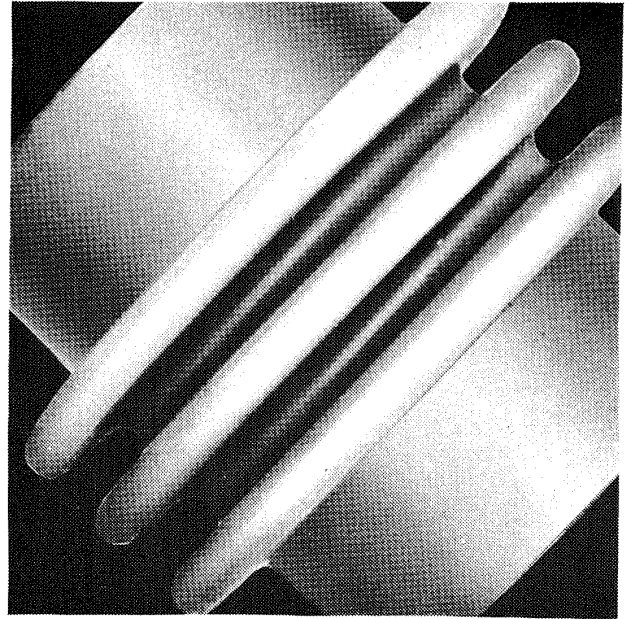


図4・a 金属製ベローズ

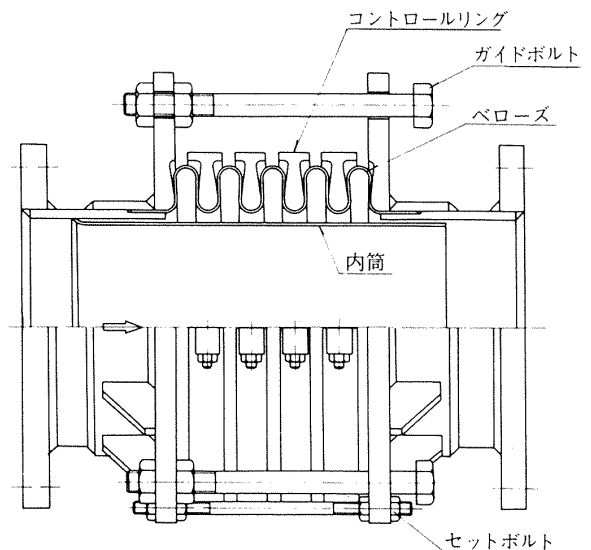


図4・b 金属製伸縮管の概略図

内圧に対応して層数を増すことができるが、接触面をもったときのベローズの正確な挙動の解明はまだ確立していない。接触面で各層が、それぞれ自由になるとすれば、許容移動量は、個々のベローズと同等となり、また圧縮に要する荷重は各ベローズの荷重の緩和になる。各層間の圧力分布の状態を推定する場合も、接触面で自由に移動するものと考えてさしつかえない。図4・aに代表的な金属製ベローズの写真を掲げてある。

#### 3.2 端管およびフランジ

図4・bに示すとおり端管およびフランジは伸縮

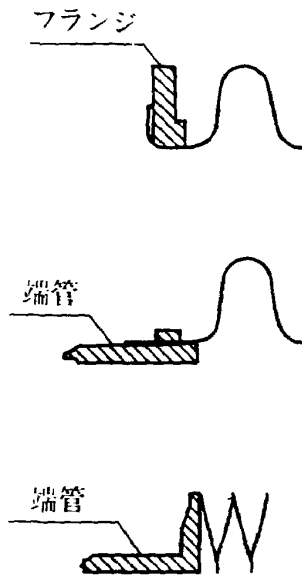


図5 代表的な取付法

継手を管路に接続するためのものである。

金属製ベローズを端管やフランジに取付ける場合は溶接の熱影響を極力避けるよう配慮しなければならない。代表的な取付法を図5に示したが、上の図はベローズの端部を折りひろげ周溶接を避ける構造にしている。中央の図はベローズの長い端部で端管にシール溶接を行い、熱影響を小さくし、その上外側から補強のバンドでおさえるようにしている。下の図は薄板を形成して溶接によって製作したベローズで、端管に直接溶接するため、曲げ圧力が大きい場合には採用できない。結局、曲げ応力が大きく発生する部分での溶接は避け、止むえない場合は、適正な熱処理を施してベローズの寿命の低下を防止する必要がある。

### 3.3 コントロールリング

ベローズの山数が多くなると特定の部分だけが圧縮され軸方向のバックリングや“よじれ”を起すことが考えられる。また、U字形などに形成されるベローズは耐圧強度に限界（一般に30 psi程度）があるため、高压の流体を扱うものはコントロールリングで補強する必要がある。高压下でのコントロールリングとベローズは空気タイヤとチューブの関係になるので、図6の右図のように圧縮状態に近い程効果的である。コントロールリングは鋳鉄製のものが多く、まれには溶接構造のものもある。当然な

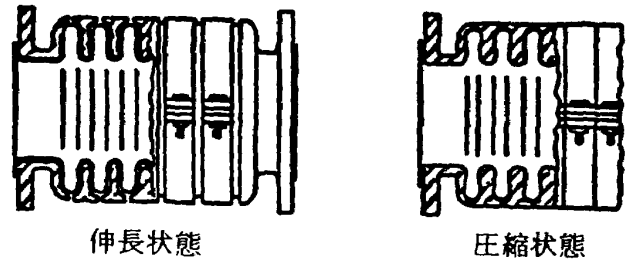


図6 コントロールリング

がら全周に隙間をもつようにボルト締結で組立てられ、所要の圧力に耐えるように作られる。当所で採用したものは、ベローズの材質と適合させてステンレス鋼で製作した。

### 3.4 スリーブ

スリーブ（内筒）は、ベローズを流体による浸食から守るとともに、流体の乱れを防いで損失抵抗を低下させるためのものである。そのため流路断面積を急に狭めないようなめらかな形状にする必要がある。また伸縮を妨げないよう適当な隙間を設けて取付ける。あまり環状の隙間が大きいと異物がベローズの方へ浸入する可能性があるので注意しなければ

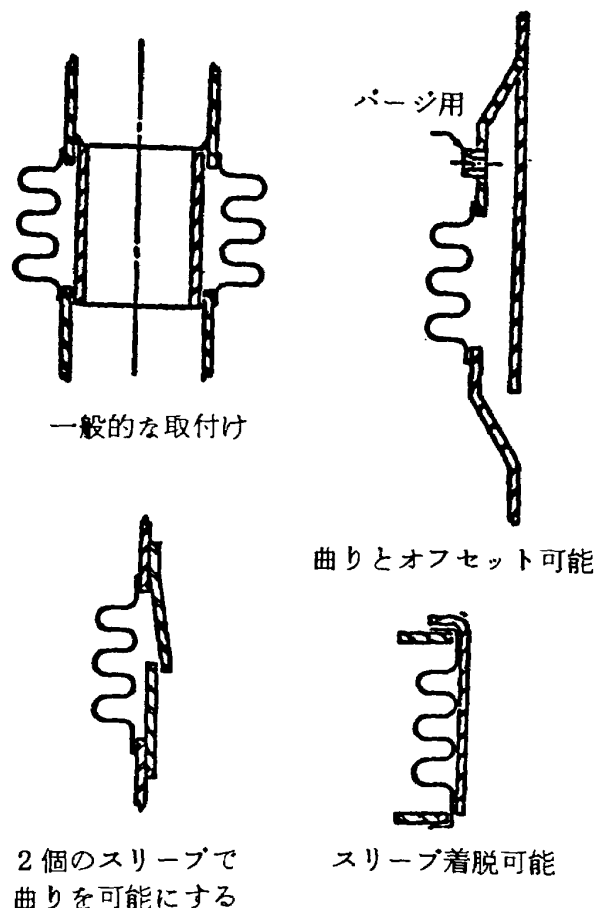


図7 スリーブ取付法

ならない。

図7にスリーブの取付方法の代表的なものを示したが、ベローズを流れに直接当てないように、また異物がベローズ側へはいりこまないようにするには、伸縮継手を垂直方向に取付け、スリーブは上端で溶接する。必要に応じて内圧よりほんの僅か高い圧力でベローズ付近の流体を押し出すように工夫されたものもある(図7右上)。また図7の右下に示すようにまれにはスリーブの取外しを可能にして点検、掃除の便を考慮する場合もある。今回当所で採用したものは、清浄な乾燥空気を扱うため管路内の異物の混入についてはほとんど考慮する必要がなかった。

### 3.5 ガイドボルト(タイロッド, リミットロッド)

圧縮荷重を軸心に作用させる目的のもので伸縮継手の主要部とくにベローズを保護するもので最も基

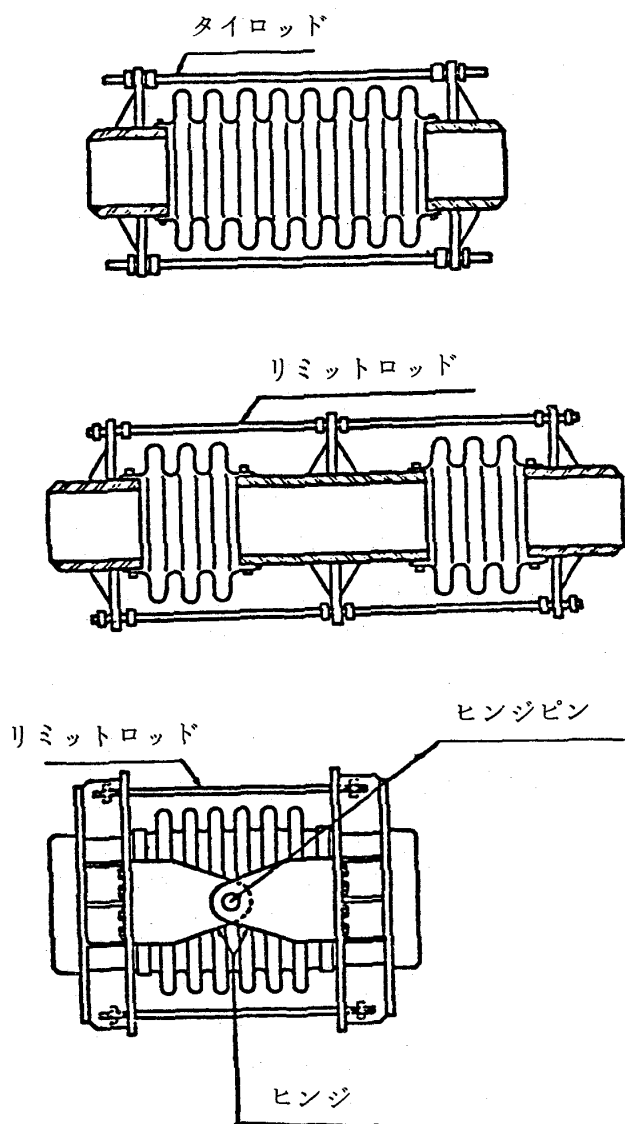


図8 ガイドボルト等の取付側

本的なものは図4に示したとおりである。

複式の伸縮継手においては、中間の円筒部を支え自重によるたわみを防ぐ作用もある。図8に取付例を示した。上の場合はボルトで設計上決められた回転や横方向の移動量をこえないよう制限するものである。また図の下に示すものは、ヒンジタイプの伸縮継手を示すものである。図には溶接型の伸縮継手を示しているが、フランジ型の場合、ヒンジをフランジに取付ける方法をとる場合が多く、ヒンジとボルトに強固な強制力をもたせる必要がある。

なお伸縮継手を取付ける場合、取付時の環境条件に応じあらかじめ固定するためのセットボルトが用意される。これは上記ガイドボルトのように伸縮継手の変位を制限するものではなく、完全に固定するものであるから、継手を管路内に装着後は直に撤去するものである。また伸縮継手の取外しや移送の場合にも再使用するものである。

## 4. 伸縮継手の選定

### 4.1 伸縮継手の形式と用途

金属ベローズ型伸縮継手の形式については前項までに何種類かについて説明してきたが、実用されている種類と用途を分類して表1に示す。

当所における伸縮継手の選定に当っては、配置計画を基に最も適した形式のものを採用することとした。

### 4.2 伸縮継手の形式選定

在来のゴム製品の伸縮継手を金属ベローズ製伸縮継手に更新する計画を進めた当時、第1および第2球貯気槽が設置されていたが、第3球貯気槽は、設置されていなかった。

しかし、伸縮継手を更新するための配管配置の計画にあたっては、第3球貯気槽も考慮することとした。限られた敷地で経済的にしかも有効な伸縮対策が得られるように検討の結果、貯気槽と配管の配置平面図を図9に示すとおり計画した。この配置を基に採用する伸縮継手の形式を選定した。

当所に使用する、金属ベローズ型伸縮継手は、どれも、高圧、大口徑に属するもので、一般的な単式のものほかに、反力の処理を考慮して複式ヒンジ

表1 . 継手の構造と用途の種類

構		造		用	途	
内圧形	自由形	単式	ベローズの両端に端管およびフランジをつけた形	主に軸方向の伸縮を吸収		
		複式	自由形にガイドボルトをつけた形			
	ロッド形	単式	自由形およびロッド形に外筒をつけた形			
		複式	ロッド形複式のアンカーベースをとり除いた形			
	外筒形	単式	自由形にヒンジをつけた形			角変位の吸収
		複式	ベローズを2個以上組合せ内圧推力をバランスさせる形			軸方向の伸縮を吸収
ユニバーサル形	自由形にヒンジをつけた形	角変位の吸収				
外圧形	単式	ベローズの外側から流体の圧力が加わる形				
	複式					

表2 使用伸縮継手の形式

伸縮継手 №	形 式	参考図番号
Exp 1, 4, 10	自由形単式(コントロールリング付)	図 10
Exp 3	ロッド形複式(コントロールリング付)	図 11
	ユニバーサル形(コントロールリング付)	図 12
Exp 5, 6	ヒンジ形(コントロールリング付)	図 13
Exp 2, 7, 8, 9	圧力バランス形(コントロールリング付)	図 14

注 Exp 3はロッド形複式とユニバーサル形の併用

形を採用したり、圧力バランス形を採用して、必要最少限の継手で伸縮処理の完璧を期待した。その結果図9に示す、Exp 1からExp 10の伸縮継手に対し表2にあげた形式のものを選定した。なお各形式の一般的な概略図を図10～14に示す。図10にはロッド形のものを示したが、実際に使用したExp 1, Exp 4, Exp 10は貯気槽と曲管の間に装着するものであるからロッドなしとした。

またExp 3には図11の複式ロッド形と図12のユニバーサル形を併用したものを採用することとした。

なお圧力バランス型には、図14の他に、曲線圧力平衡型等があり、いずれも、内圧推力をバランスさせて、固定点に内圧による推力をかけない方式をとっている。配管の大径化、高圧化に伴い、これら

のバランス型は、必要性が大きいものである。圧力バランス型は、1個のバランス用ベローズを設け、このベローズに内圧を加えその推力を利用して、バランスさせようというものである。

まず2個のベローズ(子ベローズ)の内側に断面積の2倍のベローズ(親ベローズ)1個を設け、内側にクシ状に加工した内管によって外側ベローズと内側ベローズを互に交叉する様に連絡させる。

内圧がかかると内側の大きなベローズに推力が働き、伸びようとする、内管によって接続されている外側のベローズを圧縮する。そこで推力は互いに打消され、固定点に内圧による推力は働かない。図14の型は、直管部に設置する形式のものである。



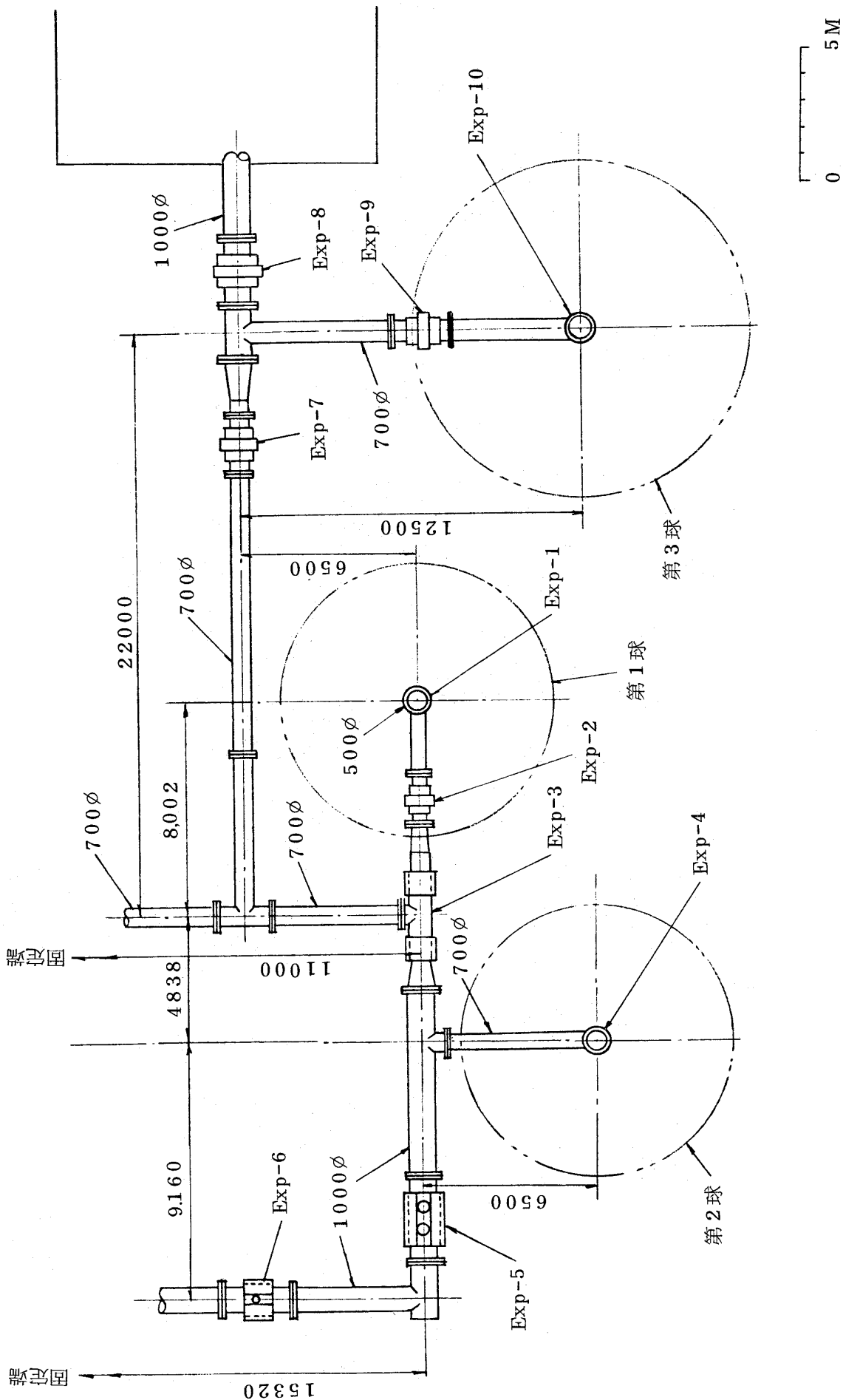


図9 改造後配置図 (配管の長さは、环境温度15℃のとき)

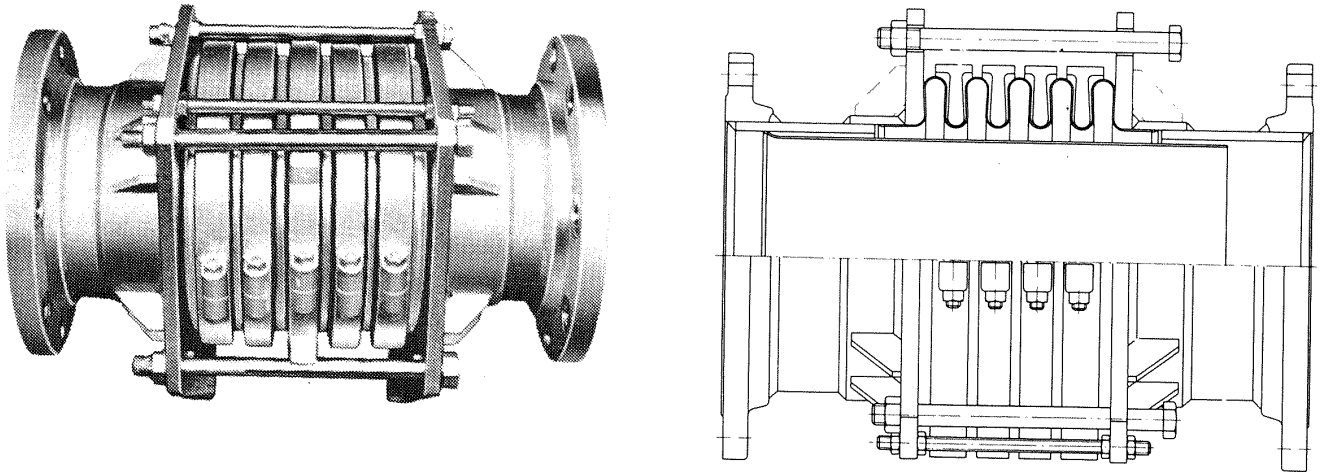


図10 ロッド形(コントロールリング付)

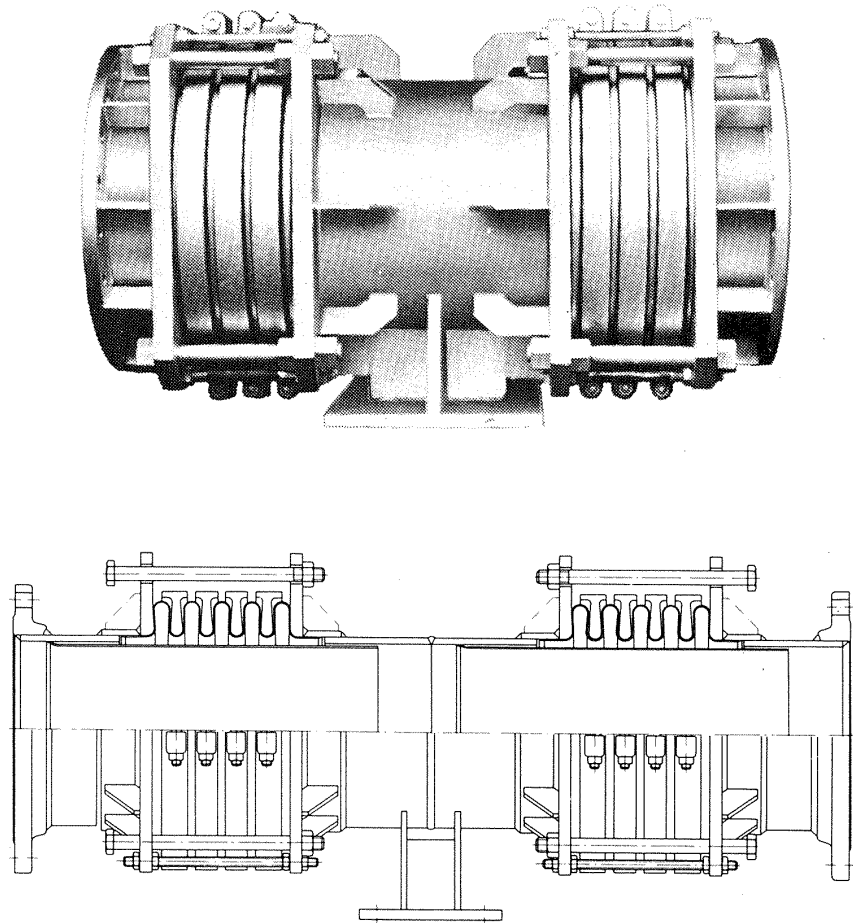


図11 複式ロッド形(コントロールリング付)

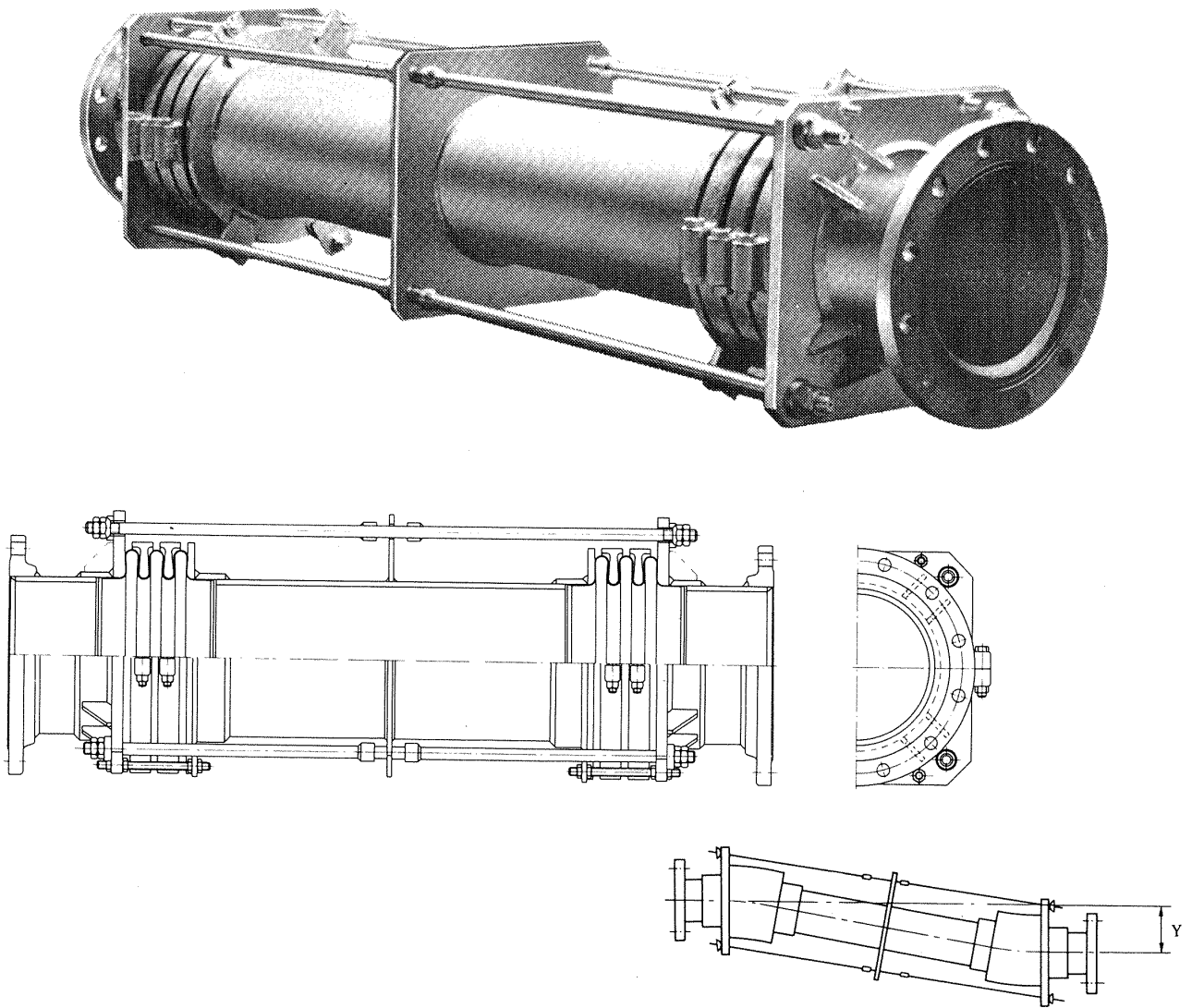


図 1 2 ユニバーサル形 (コントロールリング付)

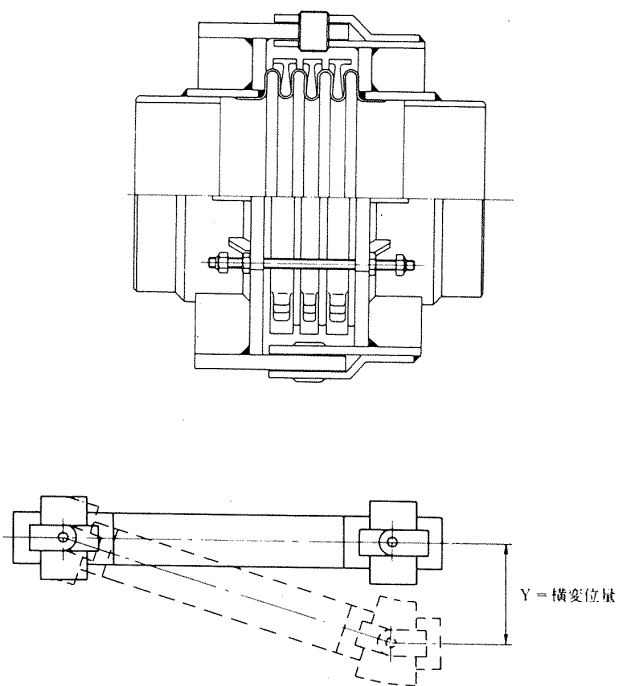


図 1 3 ヒンジ形 (コントロールリング付)

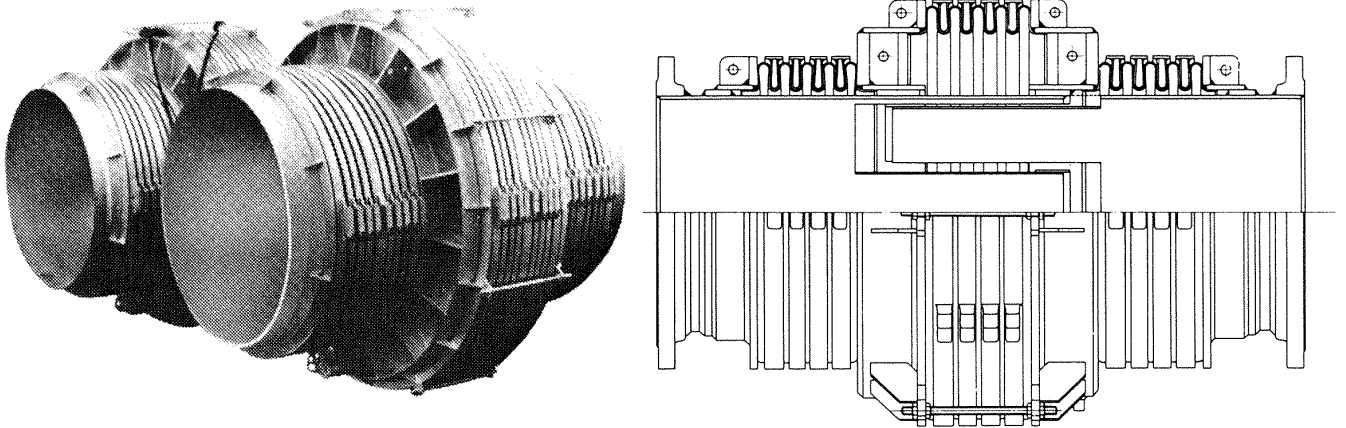


図14 圧力バランス形の一例(軸線圧力平衡型, コントロールリング付)

### 4.3 材料の選定

今回採用したベローズはステンレス鋼の薄板製とし、それに伴ってコントロール・リングもステンレス鋼板で作った。フランジ類はS25Cを用い、パイプ(SM41系)と突合わせ溶接を主とした。又、伸縮接手の支持脚及び支持台は重要な所であり、継手の性能にも影響するところである。支持脚の下面はオイルレスのブッシュを用いて、ステンレス鋼板のベース板の上で必要な移動量が拘束されないように配慮した。なお、従来のものは真鍮のブッシュを用いてグリス注油を行っていた。

## 5. 伸縮継手の変形量

### 5.1 熱膨張による配管の伸縮

配管の温度環境を $-10^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ として各配管の伸び量を計算した。

管の平均熱膨張係数(線膨張)を $\bar{\alpha}$ とすれば

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{L_0} \times \frac{(L_2 - L_1)}{(T_2 - T_1)} \quad (5.1)$$

となる。

ここで $T_1 = -10^{\circ}\text{C}$ ,  $T_2 = 40^{\circ}\text{C}$ とすれば

$$\begin{aligned} L_2 - L_1 &= \Delta l_t \text{ として} \\ \Delta l_t &= (T_2 - T_1) \cdot \bar{\alpha} \cdot L_0 \\ &= \{40 - (-10)\} \bar{\alpha} \cdot L_0 \\ &= 50 \cdot \bar{\alpha} \cdot L_0 \end{aligned}$$

$\bar{\alpha}$ にJISB2352に示される鋼の線膨張係数

$1.13 \times 10^{-6}$ を採用すれば

$$\Delta l_t = 5.65 \times 10^{-4} \times L_0 \quad (5.2) \text{ (mm)}$$

これを用いて計算した結果を図15に示した。

### 5.2 内圧による配管の伸び

管の厚さを $t$ とすれば、これは管の半径にくらべて小さいから

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= 0 \\ \sigma_t &= r P_1 / t \\ \sigma_z &= r P_1 / 2 t \end{aligned} \right\} (5.3)$$

となる。

$$\therefore \sigma_t = 2 \sigma_z$$

又管軸方向のひずみと管軸方向の応力との関係は、次に示す(5.4)'のようになる。

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{1}{E} \left\{ \sigma_z - \frac{(\sigma_t + \sigma_r)}{m} \right\} \quad (5.4) \\ &= \frac{1}{E} \left\{ \sigma_z - \frac{\sigma_t}{m} \right\} = \frac{1}{E} \left\{ \sigma_z - \frac{2 \sigma_z}{m} \right\} \\ & \quad (5.4)' \end{aligned}$$

ポアソン比 $m$ の値を入れて

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{\sigma_z}{E} \left\{ 1 - \frac{2}{3 \sim 4} \right\} \approx \frac{\sigma_z}{E} \{ 1 - 0.5 \} \\ &= 0.5 \sigma_z / E \end{aligned}$$

管軸方向の伸びと管軸方向のひずみとの関係から、

$$\epsilon = \lambda / L_0 \quad (5.5)$$

$$\lambda = \epsilon \cdot L_0 = 0.5 \sigma_z L_0 / E \quad (5.6)$$

となる。この(5.6)式より伸びを求められるが、Exp 5, Exp 6においては、アームによる伸びが加わるので(5.6)式より大きな値となる。又、安全を見積って $\epsilon = \frac{1}{E} \sigma_z$ とすれば(5.6)式は

$$\lambda \approx \sigma_z L_0 / E = \frac{D_i \cdot P_1 \cdot L_0}{4 \cdot t \cdot E} \quad (5.6)'$$

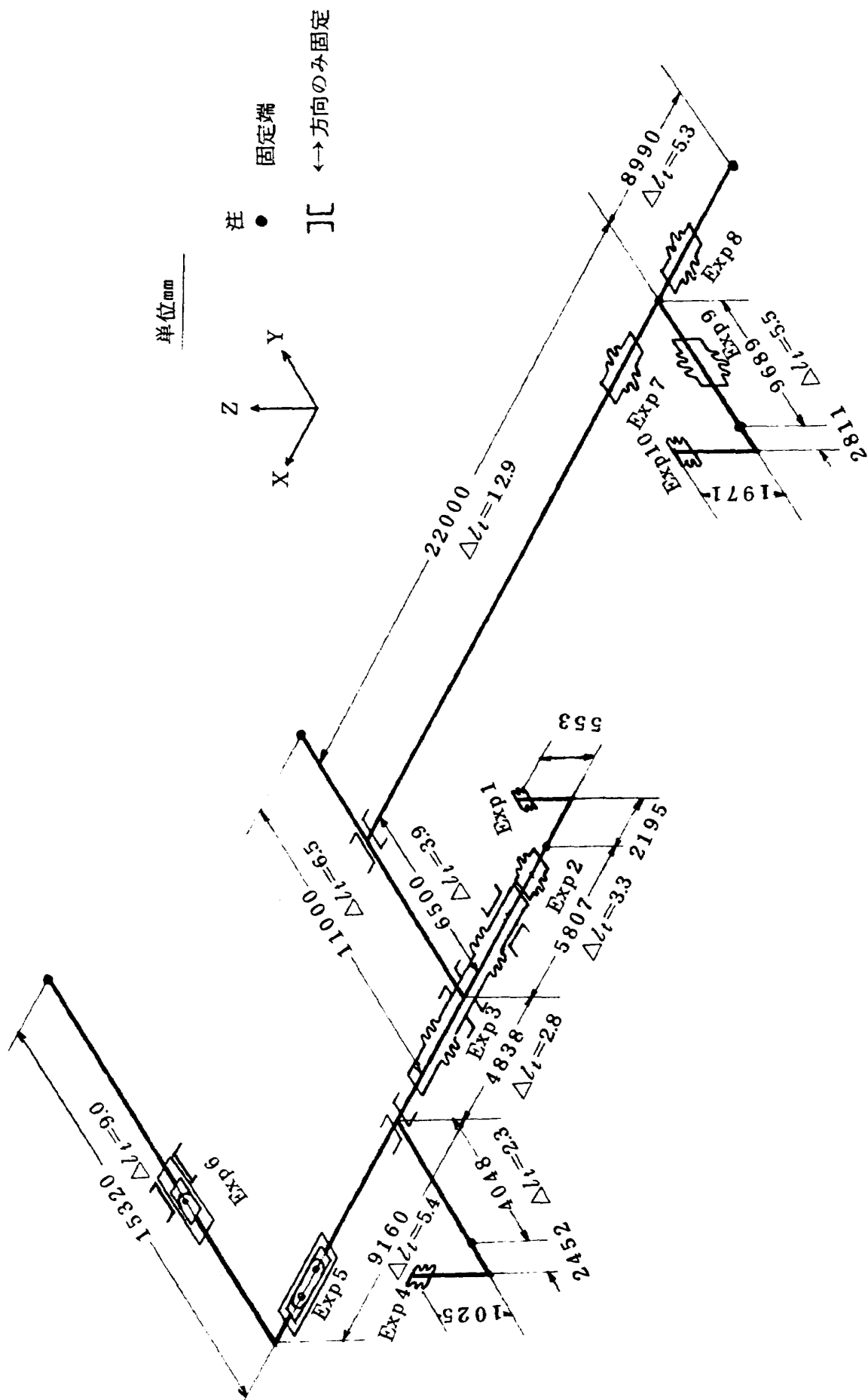


図15 配管の熱膨張による伸び(温度環境-10°C~40°C)

となるので(5.6)'で計算して約2倍の安全を見積ることとした。

5.3 伸縮継手の変形量

以上の計算結果, Exp 1~10の各伸縮継手が分

担すべき最大伸縮量は, 表3のとおりになり, これをもとに使用する伸縮継手の諸元を決定した。各伸縮継手の外形寸法は, 図16~24のとおりのものである。なお表3の各伸縮継手の最大伸縮量の値は計算による伸縮予測値の1.5~2倍になっている。

表3 各伸縮継手の最大伸縮量

伸縮継手No. Exp	軸方向伸縮 mm	横方向伸縮 mm	角変位 deg
1	± 7.5	—	—
2	± 6.0	—	—
3	± 2.3	± 8.2	—
4	± 8.0	—	—
5	—	—	± 38分
6	—	—	± 3分
7	+ 9.5, -14.0	—	—
8	+13.5, -15.0	—	—
9	+ 6.0, - 9.0	—	—
10	+ 5.0, -10.0	—	—

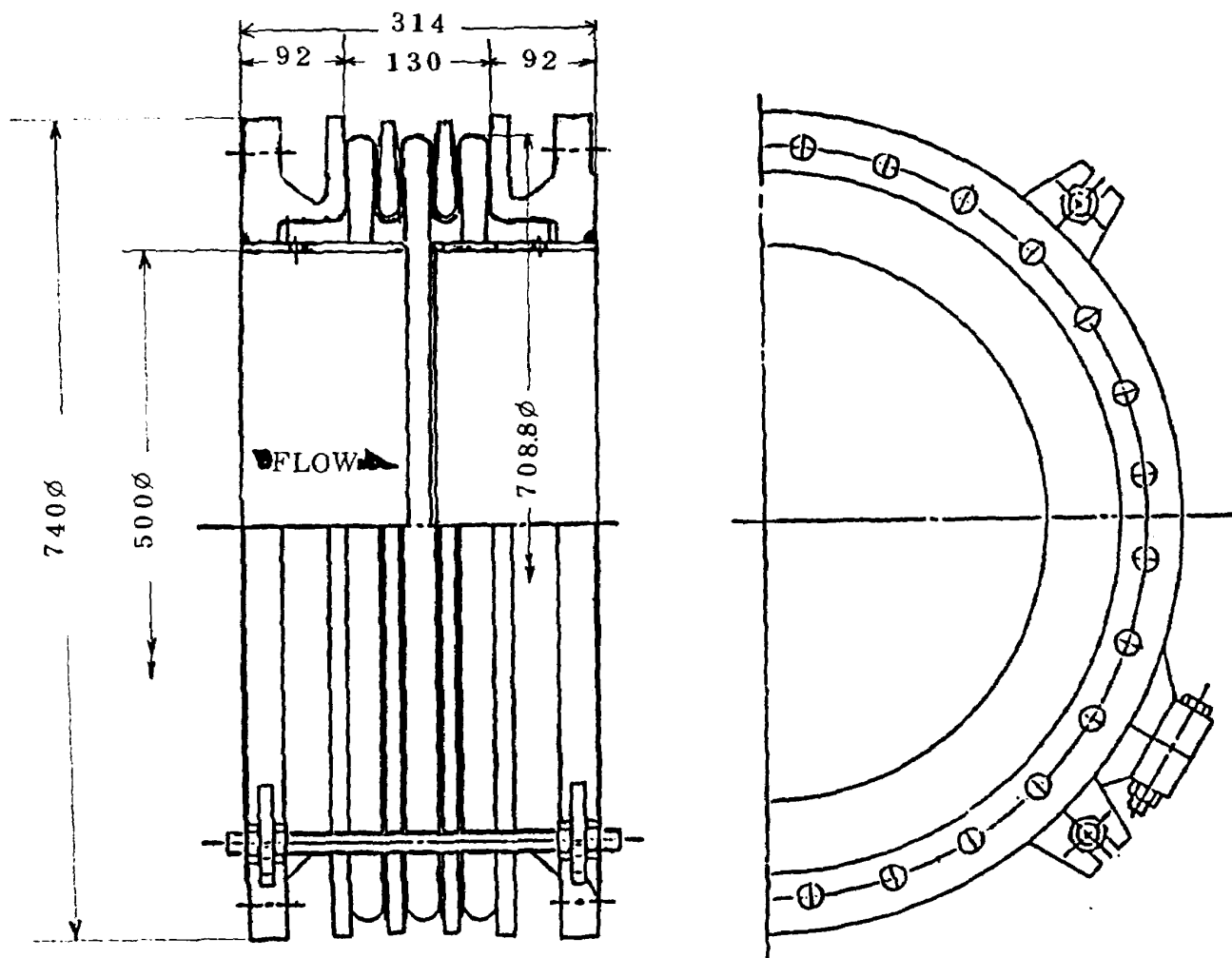


図16 Exp 1 外形図

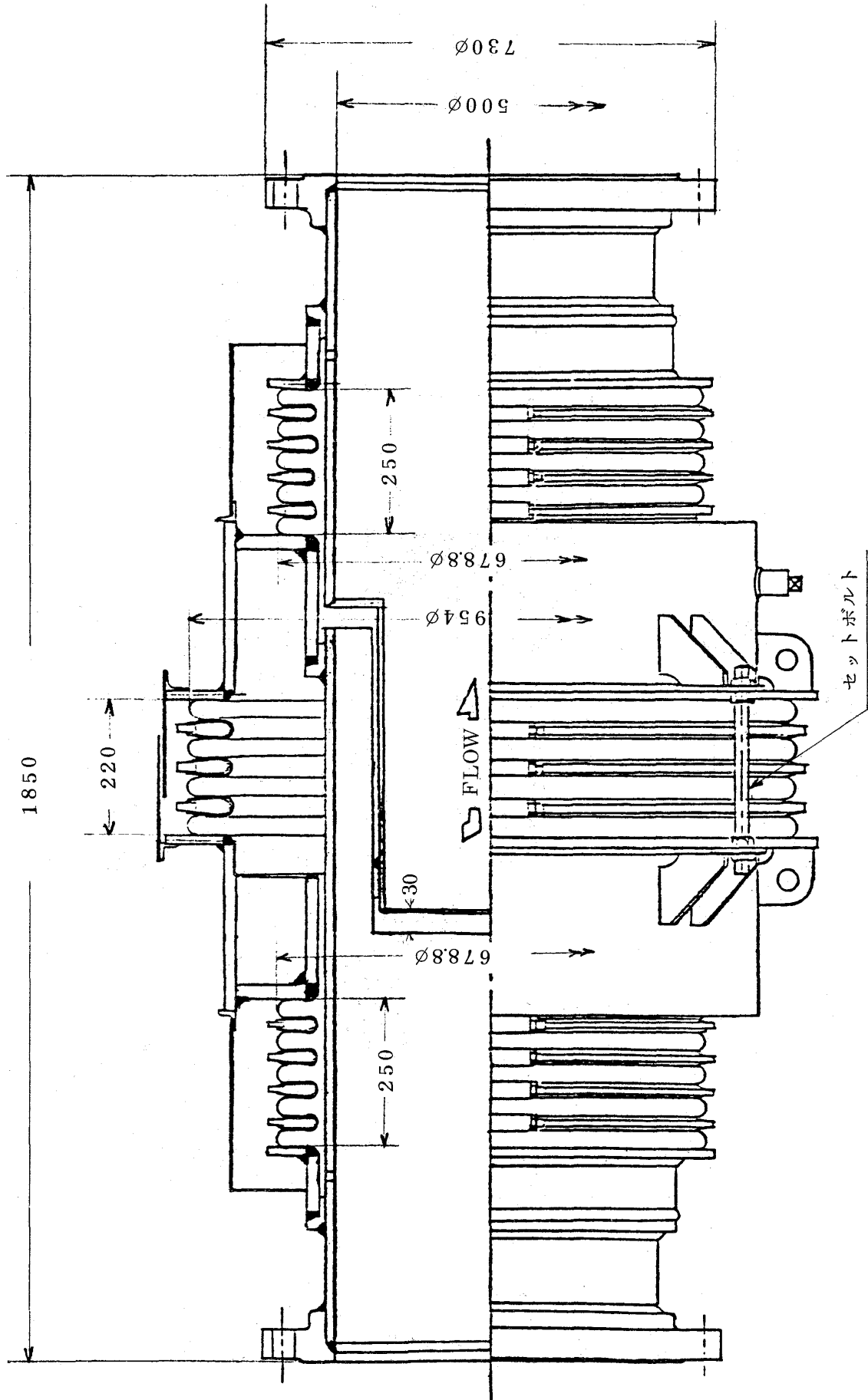


図 17 Exp2 外形図

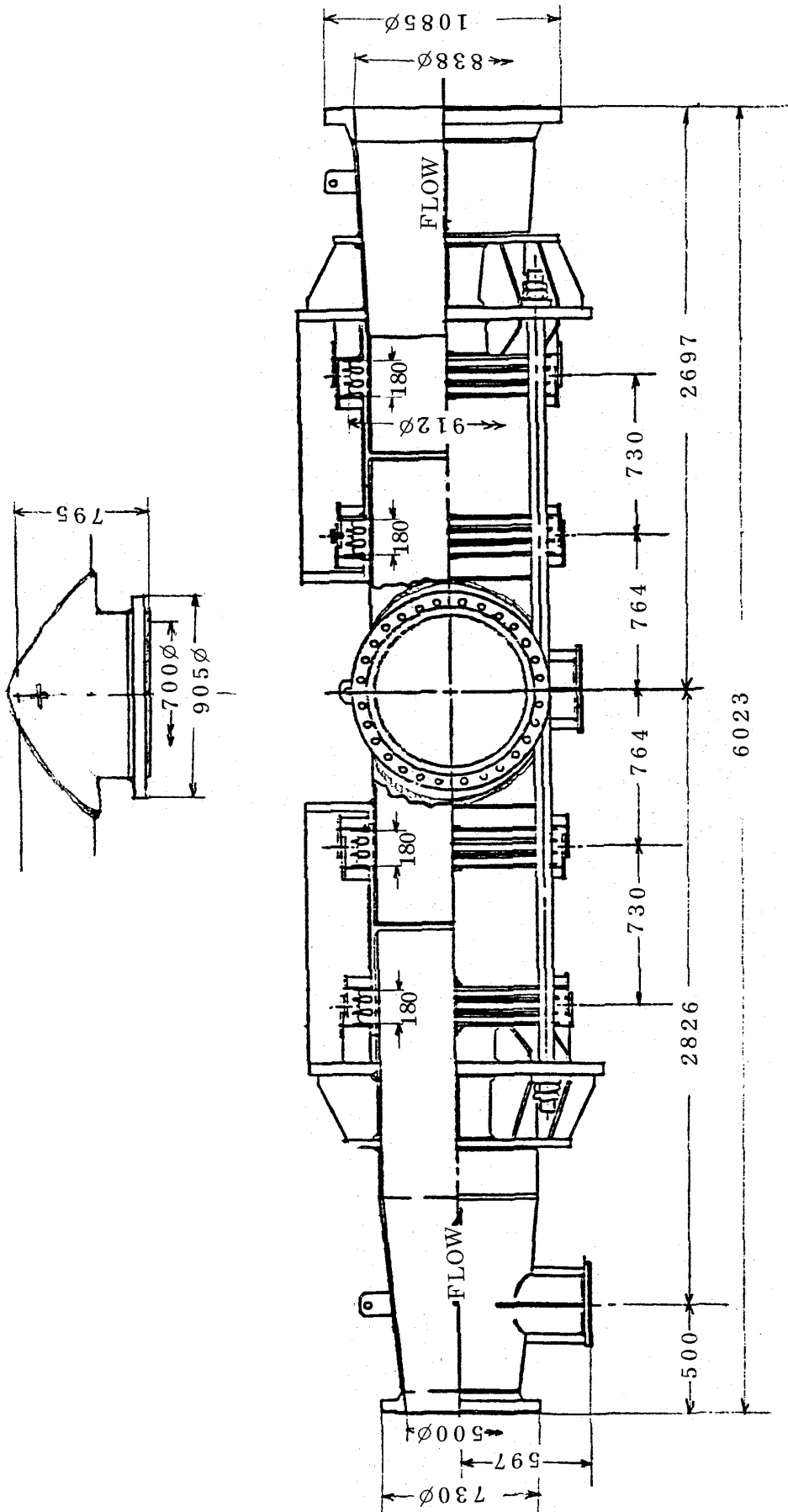


図 18 Exp 3 外形図



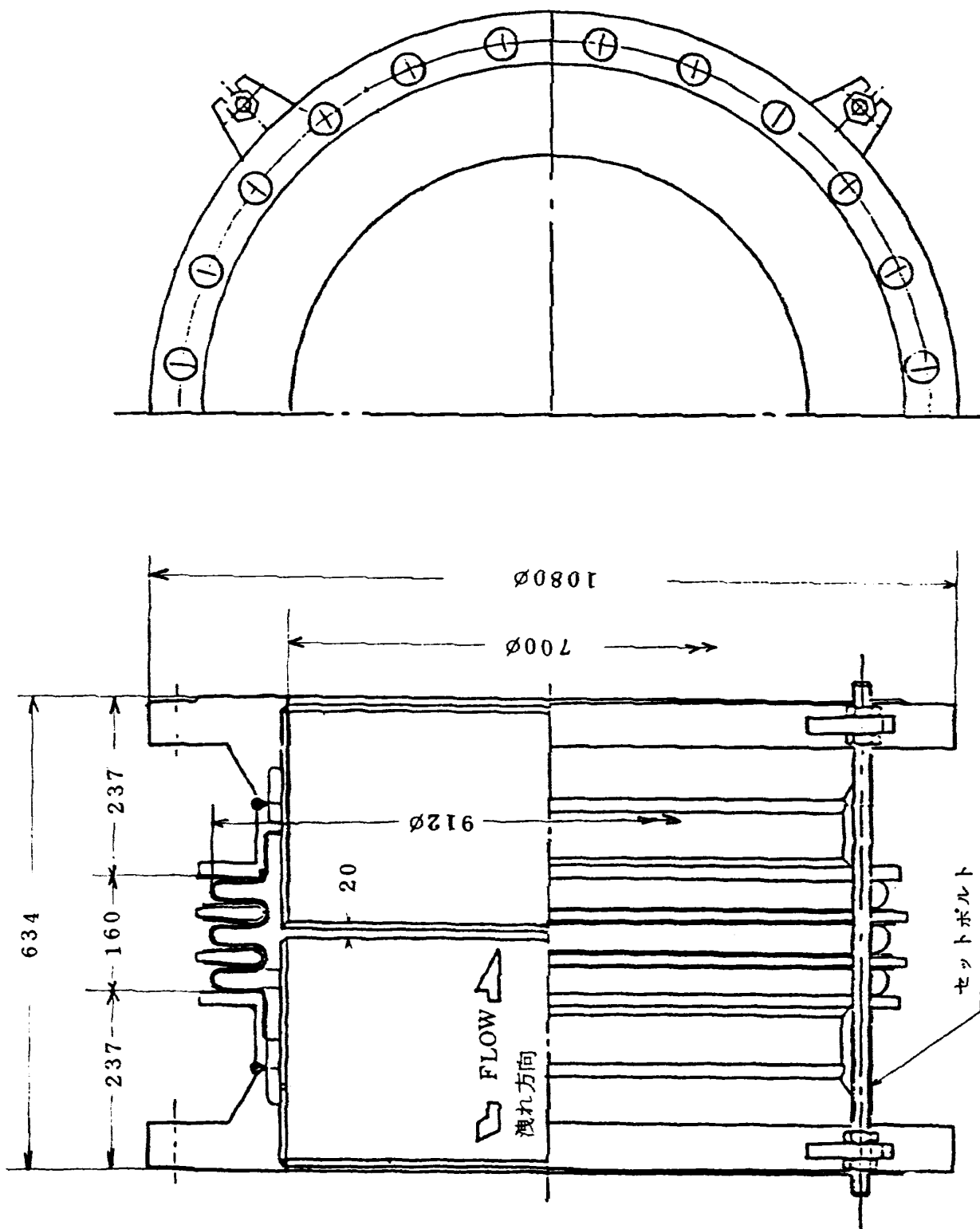


図19 Exp4外形図

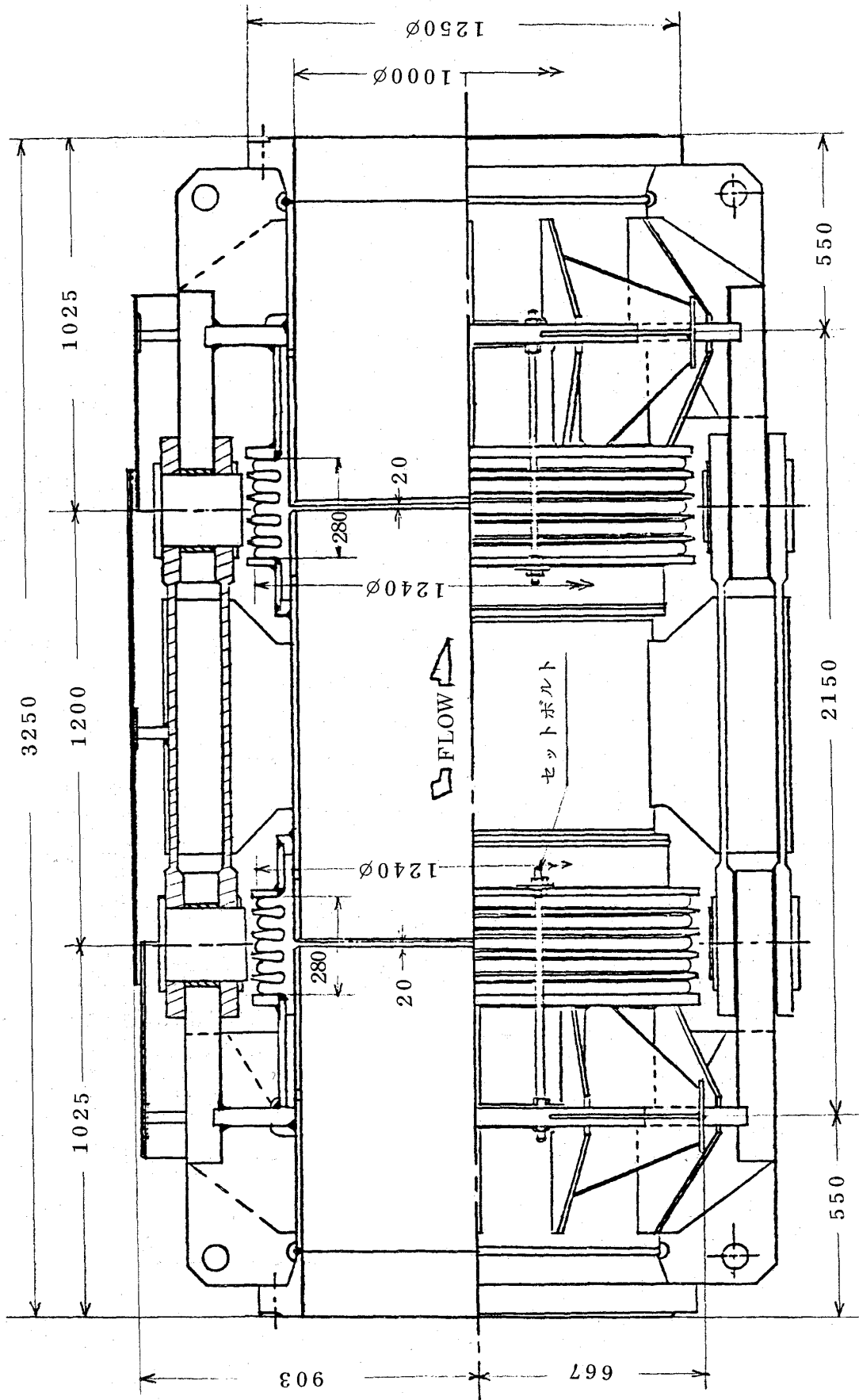


図 20 Exp 5 外形図

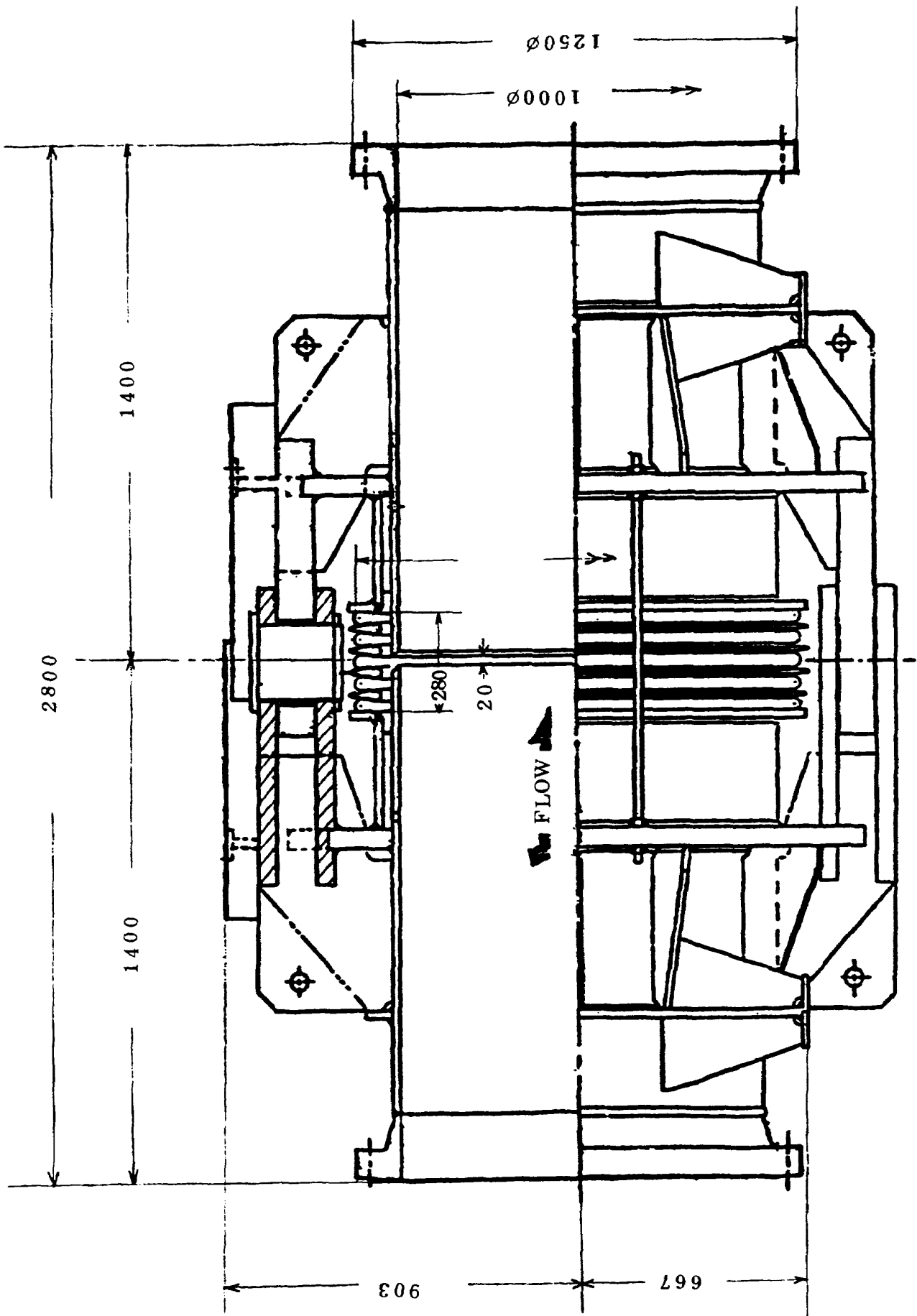


図 2 1 Exp 6 外形図

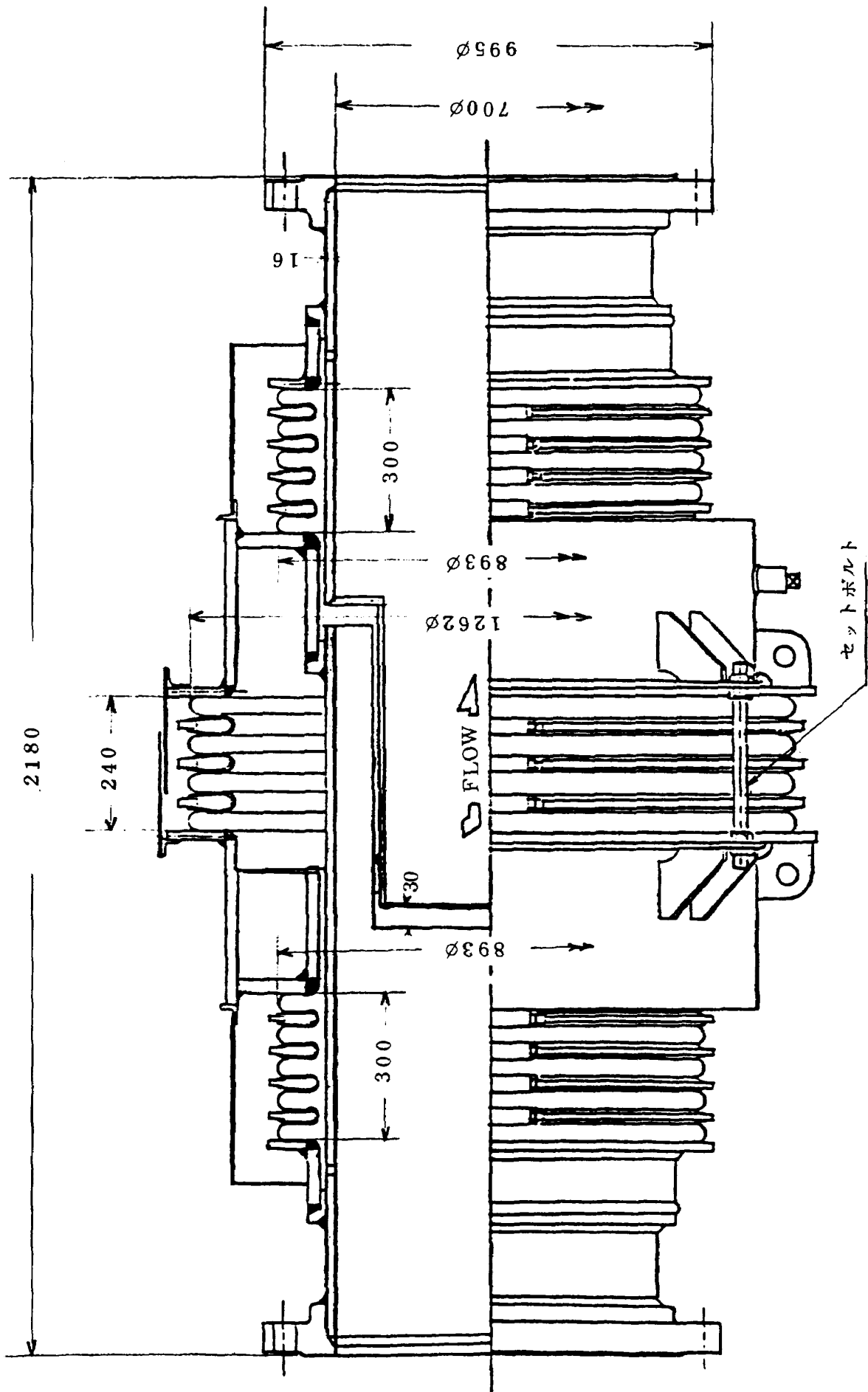


図22 Exp7, 9外形図

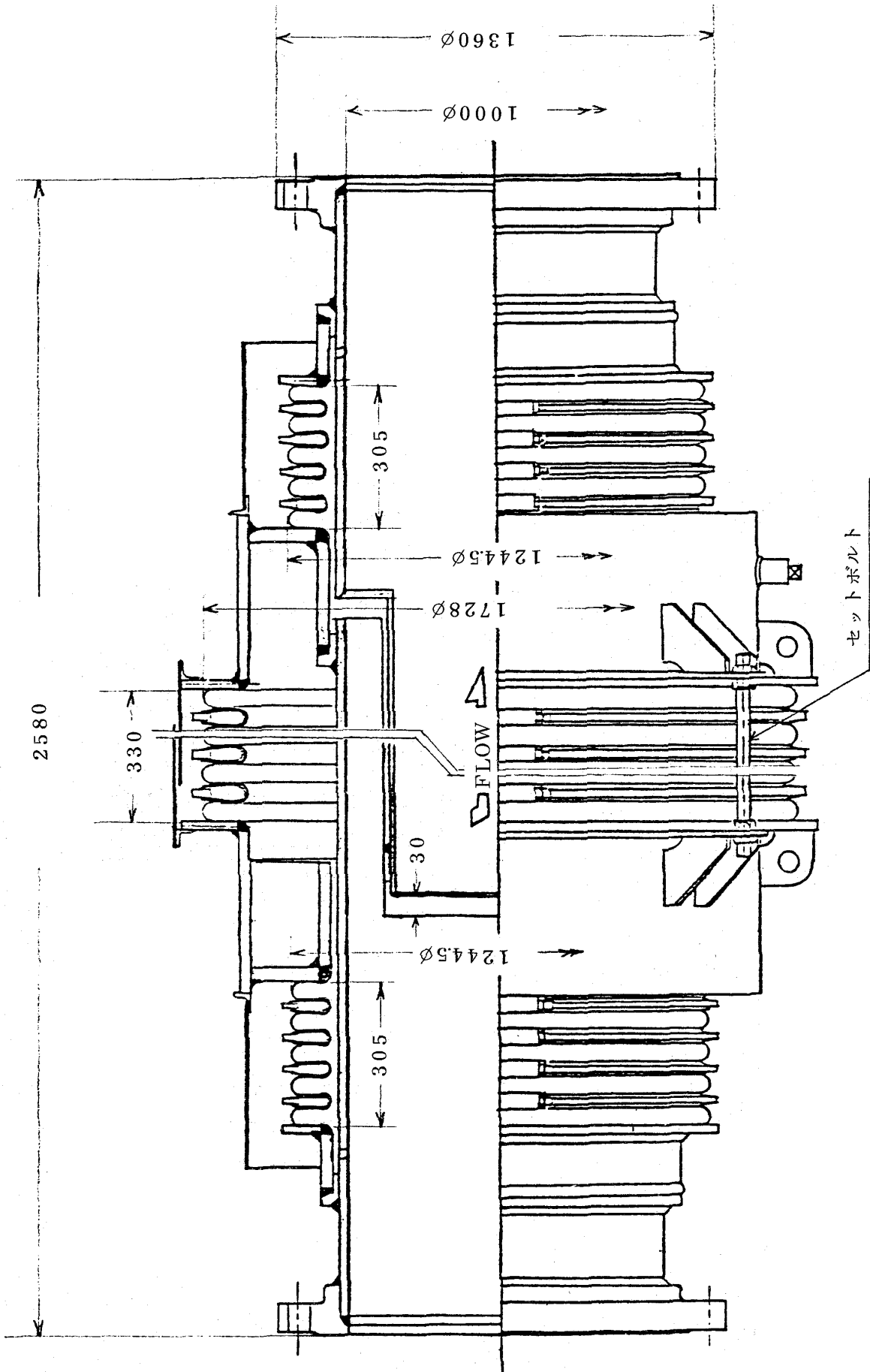


図 23 Exp 8 外形図

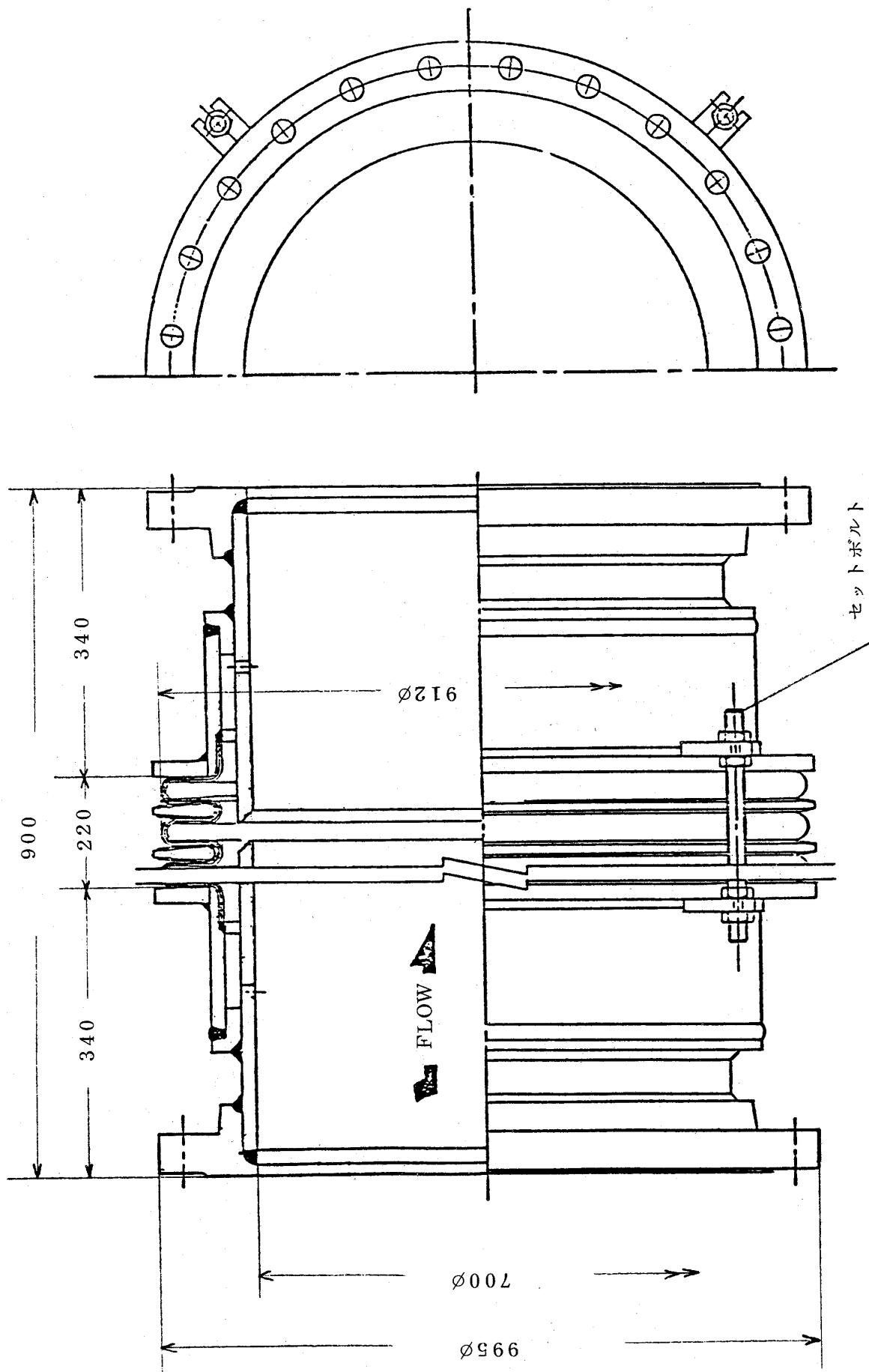


図 24 Exp10 外形図

## 5.4 伸縮継手の移動量の拘束について

伸縮継手の移動については、軸方向、横方向の変位に加え角変位があるので、図15より判るように、配管のある点を完全に固定するものと、軸方向のみ移動可能で、横方向の移動を拘束する等、種々の場合がある。所要の移動量に対しては配管の支持脚、および伸縮継手の支持脚等が、スムーズに移動出来るような構造をとっている。また、絶対に移動しては困る部分は堅固に拘束するような構造をとっている。この関係がくずれると、伸縮継手および配管の破壊につながる問題になるので、以上の点を十分に考慮して設置した。たとえば拘束側には、0.2mm以内の隙間をもつストッパーを設けて拘束し、自由側には20mmの間隙をもつ案内板を設けて摺動を可能にし、さらに伸縮継手の外観検査時等に際して間隙の状態が測定出来るようにした。完全に固定する場合は、支持脚をアンカーボルトで基礎に締結した。

## 6. 強度計算

### 6.1 ベローズの応力計算

文献2には、主として円板状の薄板で製作した低圧用ディスク形ベローズの強度計算法が述べられ、また文献3には、円環状のベローズについての詳細が示されている。しかし、ベローズの強度は、圧力と伸縮によって計算式は様々でない。U形ベローズの場合に関して、JIS2352の解説では実用上、米国のKellogg社が提唱する計算式、あるいは、竹園の式を採用してさしつかえないが、実験により補正確認を行うのが一般的であるとされている。ここでKellogg社の式<sup>4)</sup>を示すと、U形ベローズに関する式は伸縮と圧力による合成応力を $S_R$ とすれば

調整リングのない場合

$$S_R = \frac{1.5 E t \delta}{a^{0.5} \cdot h^{1.5} 2 \cdot z} + \frac{P_1 h^2}{2 t^2} \quad (\text{psi})$$

調整リング付の場合

$$S_R = \frac{1.5 E t \delta}{a^{0.5} \cdot h^{1.5} 2 \cdot z} + \frac{P_1 h}{t} \quad (\text{psi})$$

ただし  $h/3 < a < h$

なおユニバーサル形やヒンジ形の伸縮継手においては次のような軸方向相当の伸縮量を用いる。

$$\delta = D_m \theta / 2 \quad (\text{in})$$

短管をもつ複式ベローズの場合は、

$$\delta = \frac{3 D_m s}{L + l [(l/L) + 1]} \quad (\text{in})$$

ただし  $h/3 \leq a \leq h$

### 6.2 耐圧強度の計算について

ベローズの耐圧強度の計算について、高圧ガス取締法による認定工場である製造業者では、つぎの応力計算式が採用されている。(製作するに当り強度計算の結果を付して、必ず都道府県知事の許可を得ることになっている。)

自由形(コントロールリングなし)の耐圧応力

$$S_{PL} = \frac{P_0 h^2}{200 t^2 n \eta} \leq S_Y \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$S_{PD} = \frac{\rho}{100 t} \cdot \frac{2 D_m P_0}{(2.3 \rho + 2 h) n \cdot \eta} \leq S_{AL} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

コントロールリング有の耐圧応力

$$S_{PL} = \frac{P_0 h}{100 t \cdot n \cdot \eta} \leq S_{AL} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$S_{PD} = \frac{\rho}{100} \cdot \frac{2 D_m P_0}{[(2.3 \rho + 2 h) \cdot t \cdot n \cdot \eta + 0.785 d_c^2]} \leq S_{AL} \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ただし  $d_c$  はコントロールリングの締付ボルトの半径

### 6.3 伸縮応力

伸縮応力についても、いろいろな計算式が提示されているが、6.2と同様、製造業者では次の式を採用している。伸縮応力( $S_E$ )は

$$S_E = \frac{1.5 E \cdot t}{2 a^{0.5} \cdot h^{1.5} \cdot z} \times e \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

ここに  $e$  (伸縮量又は角偏位)は

$$e = e_x + e_y$$

又は

$$e = e_\theta$$

とする。

### 6.4 伸縮継手の寿命

ベローズ型伸縮継手の伸縮回数による寿命につい

てKellog 社では多くの実験結果から、つぎのよう  
な関係式を提唱している。繰返し破壊回数  $N$  は

$$N \propto 1/\epsilon^R \quad (6.1)$$

指数の  $R$  は、ステンレス鋼のベローズの場合 3.3  
~ 4 程度とされているが、3.5 を採用するのが通常  
であるとしている。

また前に述べた合成応力の計算値 [  $S_R$  (psi) ] を  
用いる場合は、実験結果をもとに

$$N = \left( \frac{1,600,000}{S_R} \right)^{3.5} \quad (6.2)$$

が適用できるとしている。

上式の  $S_R$  の単位は psi であるから kgf/cm<sup>2</sup> に換算  
すると

$$N = \left( \frac{1125}{S_R} \right)^{3.5} \quad (6.2)$$

となる。  $S_R$  は合成応力であるから、本報告では、  
内圧による応力  $S_{PL}$  と伸縮による応力  $S_e$  の和とし  
て試算した。

なおKellog 社では、安全を確保する限度を  $N_s$   
とすれば、  $N_s = 0.5 N$  程度とするよう推奨してい  
る。今回の計画では、繰返し破壊回数の目標値を  
 $1 \times 10^5$  とした。これは、今迄、当所における実  
験設備の運転状況から1日の伸縮回数が、多い時で  
10回に達することがあるので1年ではおよそ  
2,500回になる。伸縮継手の寿命を30年以上と  
すれば伸縮の予測回数は  $7.5 \times 10^4$  以上になるの  
で目標は  $1 \times 10^5$  回とした。

以上の計算に使用したベローズ各部の記号の説明  
を図 25 に補足した。

### 6.5 板厚の決定

管の板厚 ( $t$ ) は、一般式より

$$t = \frac{P_1 \cdot D_0}{200 \cdot \sigma \cdot \eta + 0.8 P_1} + C \quad (\text{mm})$$

ただし、高圧ガス取締法の特設設備検査規則第  
14条においては、上式におけるくされ代  $C$  を除外

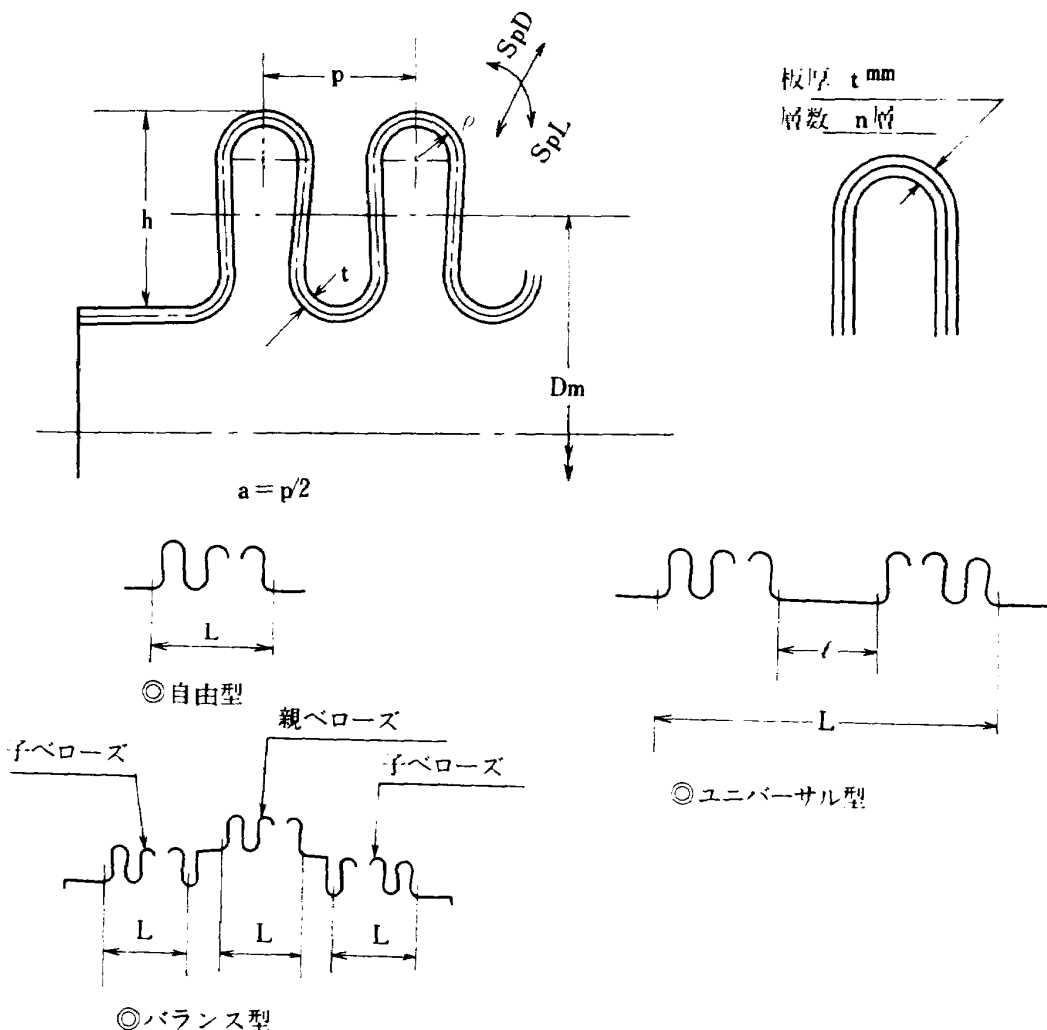


図 25 ベローズ各部の説明図



している。

この式は、伸縮継手の管の板厚を決定するのに使用した。 $\sigma$ は管材の許容応力、 $\eta$ は管の長手溶接効率である。

### 6.6 計算結果

各応力、繰返し破壊回数、その他の強度計算を行うにあたってはつぎの値を採用した。

設計圧力	$P_1 = 2.0 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$
設計外気温度	$T = 4.0 \text{ }^\circ\text{C}$
管の許容応力	$\sigma = 1.03 \text{ kgf/cm}^2$
SUS316 縦弾性係数	$E = 2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$
SUS316 許容引張応力	$S_{AL} = 1.05 \text{ kgf/cm}^2$
SUS316 曲げ応力値	$S_{AD} = 2.10 \text{ kgf/cm}^2$
ベローズの溶接効率	$\eta_B = 0.95$
管の長手溶接効率	$\eta_0 = 0.60$
管のくされ代	$C = 1.0 \text{ mm}$

伸縮と圧力による合成応力  $S_R = S_{PL} + S_e \text{ kgf/cm}^2$

以上の諸条件のもとで実用に供する各伸縮継手の応力、繰返し破壊回数、伸縮量等の計算を行った結果は表4のとおりになった。

各応力については、高圧ガス保安協会「高圧ガスの配管に関する基準」で示される値、すなわち、温

度  $4.0 \text{ }^\circ\text{C}$  における、ステンレス鋼 SUS 316 の許容引張応力  $S_{AL} = 1.05 \text{ kgf/cm}^2$  および許容曲げ応力値  $S_{AD} = 2.10 \text{ kgf/cm}^2$  に対し、その許容範囲にあることが判明した。

又、SUS 316 の機械的性質と化学成分を示すと次のようになる。(JIS G 4305-1972 による)

#### 引張試験

耐力： $2.1 \text{ kgf/cm}^2$ 以上、引張強さ： $5.3 \text{ kgf/cm}^2$ 以上、伸び： $4.0 \%$ 以上

#### かたさ試験

$H_B$ ： $187$ 以下、 $H_{RB}$ ： $90$ 以下、 $H_V$ ： $200$ 以下

#### 化学成分〔%〕

C： $0.08$ 以下、 $S_i$ ： $1.00$ 以下、  
 $M_n$ ： $2.00$ 以下、 $P$ ： $0.04$ 以下、  
 $S$ ： $0.030$ 以下、 $N_i$ ： $1.00 \sim 1.40$   
 $C_r$ ： $1.60 \sim 1.80$   $M_o$ ： $2.0 \sim 3.0$

## 7. 各種試験

### 7.1 試験の概要

実用に供する伸縮継手を製作するのに先立ち、Exp 6 と同形状の単ヒンジ形伸縮継手を製作し、繰返し破壊回数の確認をするため疲労試験を行い、さ

表4 各伸縮継手の強度計算値

Exp No	内径 mm	長さ mm	軸方向応力 kgf/cm <sup>2</sup>	円周方向応力 kgf/cm <sup>2</sup>	伸縮応力 kgf/cm <sup>2</sup>	伸縮寿命回数 N × 10 <sup>4</sup> 回	パイプ板厚 mm	伸縮量		
								軸方向 mm	横方向 mm	角偏位 deg
1	500	314	5.3	4.8	46.2	49	10.3 (16)	± 7.5		
2	500	1850	子ベローズ 4.2	5.4	23.2	44	14.1 (16)	± 6.0		
			親ベローズ 5.5	6.9	18.9	68				
3	700	6023	5.3	6.6	28.9	20	13.6 (16)	± 2.3	± 82	
4	700	634	5.3	6.6	33.7	12.9	13.6 (16)	± 8.0		
5	1000	3250	5.3	9.2	15.4	118	12.4 (19)			± 36分
6	1000	2800	5.3	9.2	1.3	6465	12.4 (19)			± 3分
7	700	2180	子ベローズ 4.6	7.0	36.4	10.8	13.6 (16)	+ 9.5 - 14.5		
			親ベローズ 6.0	9.2	29.1	18.6				
8	1000	2580	子ベローズ 5.4	9.7	33.1	13.5	12.4 (19)	+ 13.5 - 15.0		
			親ベローズ 4.6	9.2	34.2	13.1				
9	700	2180	子ベローズ 4.6	7.0	23.2	42	13.6 (16)	+ 6.0 - 9.0		
			親ベローズ 6.0	9.2	18.6	64				
10	700	900	5.3	6.6	23.7	36	13.6 (16)	+ 5.0 - 10.0		

注 板厚の( )は実物の板厚である。

らに製作後各伸縮継手について加圧による歪を測定した。また、実験上の諸制約のため、応力測定についてはExp 4についてのみ実施した。

それぞれの試験については以下で説明するが、昭和50年当時では、直径700φmm以上で内圧が20 kgf/cm<sup>2</sup>Gの伸縮継手は、まだ使用実績がなかったため、各種試験を行った上、製作における不具合のため不測の欠陥を生じないように、とくに留意して製作することとした。

一般的には高圧ガス取締基準に従って製作するものとしたが、とくに配慮したものとして、次の事柄があげられる。

- (1) ベローズ、パイプ、フランジ、タイロッドおよびヒンジ用ピンの部材はミルシートが照合できるもの。
- (2) ベローズ素管の長手溶接線（自動溶接）はベローズ成形、および熱処理前にピーニングを施行する。
- (3) ベローズの長手溶接線は、溶接線長さの全線にわたってX線透過撮影を行い、JIS Z 3106に基く1級以上に合格する。
- (4) ベローズは、 $1025^{\pm 5}_{-0}^{\circ}$ より急冷する固溶化熱処理を施し、後に、充分なる酸洗を行って表面の清浄を計る。
- (5) 管内面溶接ビード部は、平坦になるようグラインダー仕上げを行う。
- (6) パイプの長手溶接線は、溶接線長さの全線にわたってX線透過撮影を行い、JIS Z 3104に基く判定で2級以上に合格する。
- (7) 管の内径が16mm以上の溶接部は全て、応力除去を施行する。
- (8) 塗装に関しては、ステンレス鋼以外の内外面は全て1種ケレンを施行する。又、内面は下地処理後1回塗り、外面は、下地処理のうえ、錆止め、2回塗り、銀色の仕上塗装を2回塗りを行う。

## 7.2 疲労試験

単式ヒンジ型伸縮継手の繰返し破壊回数を確認するため、Exp 6と同形の伸縮継手を製作して疲労試験を行った。伸縮継手の両端に音フランジを取付けて、水圧により20 kgf/cm<sup>2</sup>Gに加圧し、さらに、油

圧シリンダーによって、±36′の角変位を毎分約10回のサイクルで動かすようにした。繰返し破壊回数の目標値は、角偏位が±36′で $1 \times 10^5$ 回とし、実験は、目標値の回数を超過するまで行うものとした。サイクル表示はカウンタ表示とした。破損検知は、内圧が18 kgf/cm<sup>2</sup>Gに低下したとき作動する圧力検出器にて検知し、同時に試験続行を停止するものとした。試験の途中は目視により亀裂およびベローズの異常変形等の状況を観察した。試験装置の概略を図26、写真を図27に示す。伸縮継手の形状は図21と同じである。

試験中、伸縮継手のベローズの頂点にストレンゲージを貼り、繰返し回数によるひずみ値の変化を、動ひずみ計で記録した。また、ヒンジのアーム及び管胴にストレンゲージを貼り内圧と伸縮の繰返しによる歪測定を行ったがこの部分については初期状態の変化を確認する目的のため繰返し数 $1 \times 10^4$ 回ぐらいまで測定することにした。

以上の計画に従って $1 \times 10^5$ 回まで繰返し試験を行ったが別に異常は発見されなかった。上記のストレンゲージのひずみ値も初期値に対して大きな増加はみとめられず、ベローズの亀裂等も目視では発見されなかった。よって実用に供しても目標値の $1 \times 10^5$ 回の繰返しにおいて破壊しないことが確認された。なお歪測定等は $1 \times 10^5$ 回の繰返しで打切ったが、さらに $3 \times 10^5$ まで繰返し試験を続行し、ベローズの内圧保持状況と外形を観察して異状のないことを確認したうえで、疲労試験を終了した。

参考のため、試験データのうちストレンゲージの諸元を表5に、測定値を表6及び図28に示す。

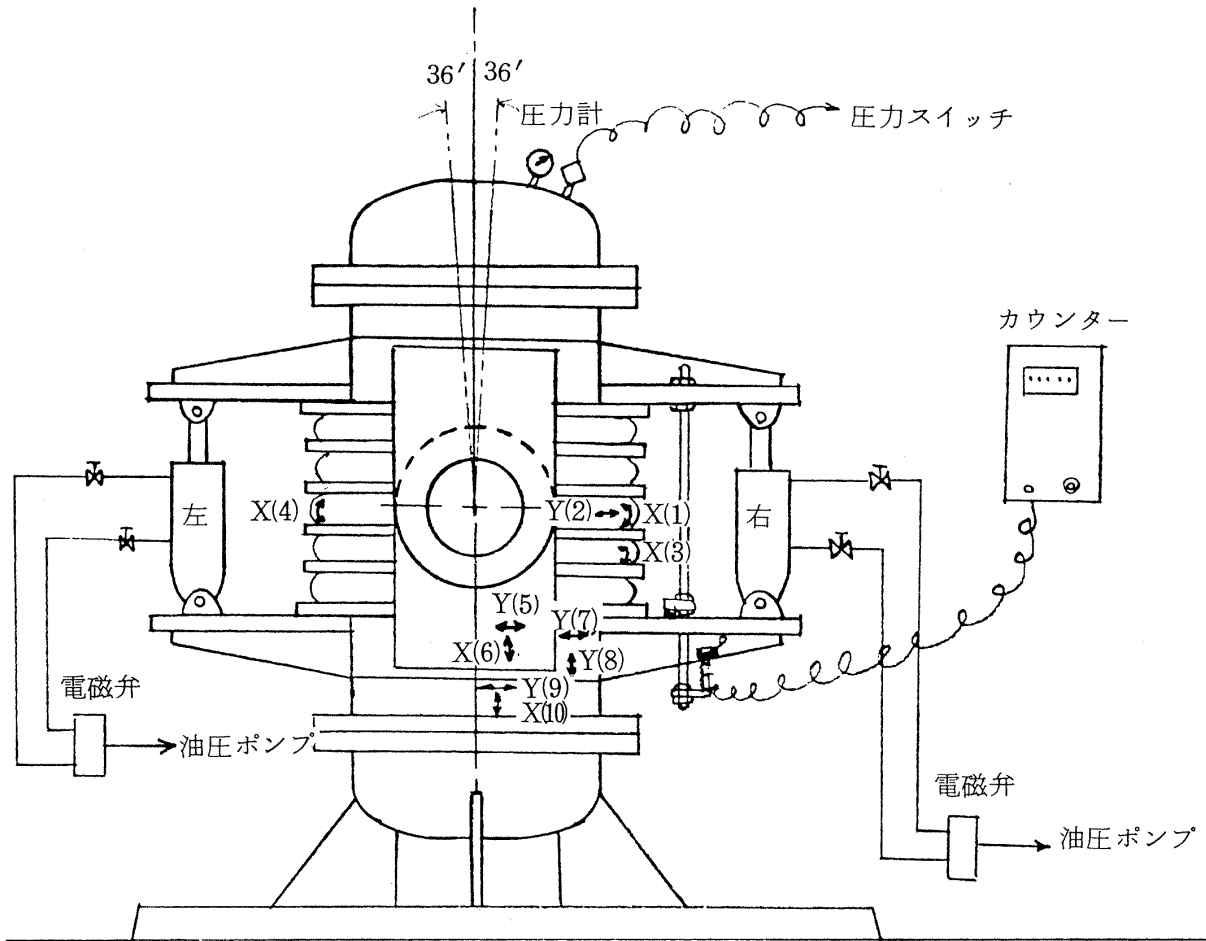
また、実偏位に対する理論応力値と繰返し破壊回数を算定すると、

内圧による耐圧力を $S_{PL}$ は、

$$S_{PL} = \frac{P_1 h}{100 \cdot t \cdot n \cdot \eta} = \frac{20 \times 75}{100 \times 1.5 \times 2 \times 0.95} = 5.3 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

伸縮応力 $S_e$ は、

$$S_e = \frac{1.5 \cdot E \cdot t}{2 \cdot a^{0.5} \cdot h^{1.5} \cdot z} \times e_{\theta} = \frac{1.5 \times 20000 \times 1.5}{2 \times 30^{0.5} \times 7.5^{1.5} \times 5} \times \frac{1162}{2} \times 0.021$$



注 Y(5), X(6)はアームの裏面に貼った。

図 2 6 伸縮継手疲労試験装置概略図

$$= 15.4 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

繰返し破壊回数  $N$  については

$$N = \left( \frac{1125}{S_{PL} + S_e} \right)^{3.5} = \left( \frac{1125}{5.3 + 15.4} \right)^{3.5}$$

$$\approx 11.8 \times 10^5 \quad (\text{目標値は } 1 \times 10^5 \text{ 回)}$$

となる。

これは、(6.3)式を使用して  $N$  を求めたものであるが、今回実施した疲労試験は、 $3 \times 10^5$  回なので、計算結果の 1/3 程度であるが、測定結果の推定から (6.3)式は今回のベローズにも適用出来るものと思われる。

なお、目視による検査の結果、ベローズの頂部は、図 2 9 に示すように内圧  $0 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$  から、 $20 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$  になるにつれて曲率が減少する。その詳細は次項の歪測定で明らかとなりベローズの頂部に貼ったストレングージによる歪測定値が内圧の増加により負の値を示すことで説明できる。

なお (6.1)式の指数  $R$  を 3.3 として計算してみ

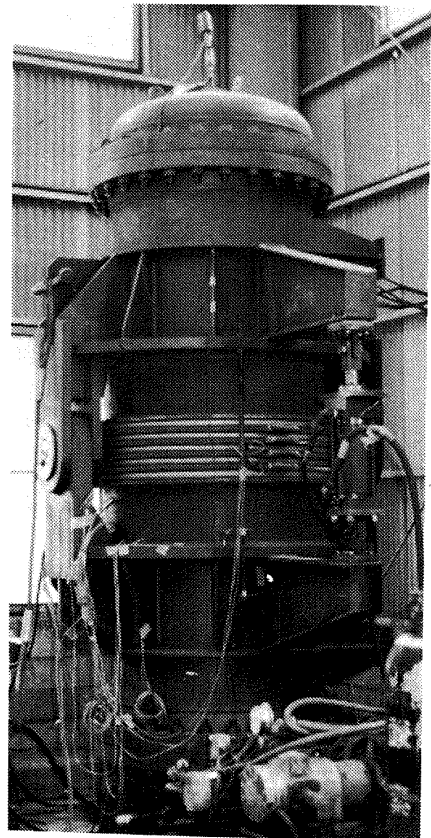


図 2 7 伸縮継手疲労強度試験装置の写真

表5 ストレンゲージの諸元

	測定場所		ストレングージ諸元(共和電業KK製)		
	疲労試験	歪測定	ストレングージ名	抵抗	ゲージファクター
ペローズ頂点	X (1)	Ax~By	KFC-2-C1 -16	120.2	2.09
	Y (2)	(Exp 1)			
	X (3)	A <sub>1</sub> ~F <sub>12</sub>			
	X (4)	(Exp 4) Lx~My (Exp 6)			
管胴部・アーム及びフランジ等	Y (5)	Dx~Cy	KFC-5-D16 -11	120.5	2.10
	X (6)	(Exp 2)			
	Y (7)	Ex~Gy			
	X (8)	(Exp 3)			
	Y (9)	Hx~Ky			
	X (10)	(Exp 5) Nx~Qy (Exp 6)			

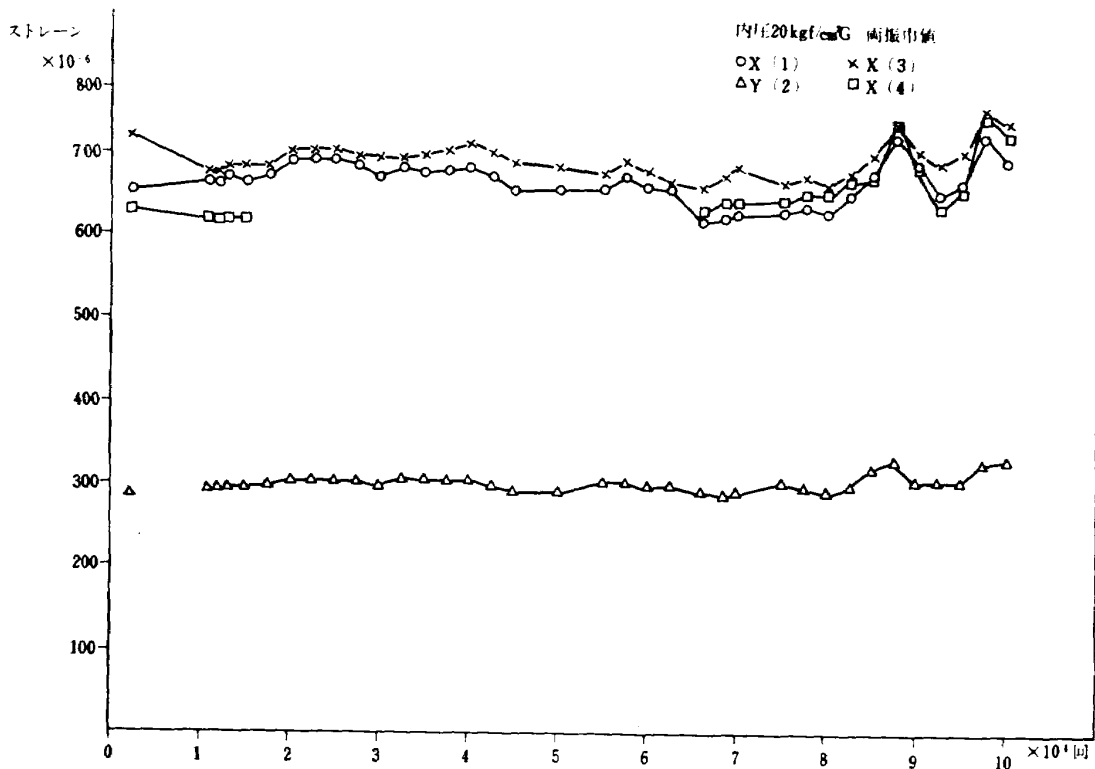


図28 繰返し回数(n)

ると,

$$N' = \left( \frac{1125}{5.3+15.4} \right)^{3.3} = 5.32 \times 10^5$$

となり、安全を確保する限度 $N'_s$ は $N'_s = 0.5 N' = 2.66 \times 10^5$ となる。今回実施した疲労試験で目視

によって確認した最終の繰返し回数は $3 \times 10^5$ 回なので $N'_s$ を上回っていることになる。

又、ペローズの頂点に貼ったストレングージの値から、単純に応力の計算を試みる。ペローズの縦弾性係数 $E$ を $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ としてペローズ伸縮の

表6 疲労強度試験のデータ

繰返し回数	内 圧 kgf/cm <sup>2</sup> G	ピストンの位置	管胴及びヒンジ部 ×10 <sup>-6</sup> ストレイン					
			Y(5)	X(6)	Y(7)	X(8)	Y(9)	X(10)
0~1	0	ピストン中央 0	0	0	0	0	0	0
		左ピストン最小 ✓	0	-10	0	-10	0	0
		右 " ↘	0	-5	0	-10	0	-5
	10	左 " ✓	-75	240	220	60	230	380
		右 " ↘	-70	235	225	60	230	375
	20	左 " ✓	-140	500	430	130	450	660
右 " ↘		-140	485	445	115	455	655	
120	20	左 " ✓	-140	500	430	130	450	660
		右 " ↘	-140	485	445	115	445	655
2100	20	左 " ✓	-150	500	400	130	420	670
		右 " ↘	-150	500	400	120	420	650
9270	20	左 " ✓	-120	450	430	130	470	620
		右 " ↘	-110	440	440	130	470	630

繰返し回数	ベローズの頂点				両振幅値 ×10 <sup>-6</sup> ストレイン				
	X(1)	Y(2)	X(3)	X(4)	繰返し回数	X(1)	Y(2)	X(3)	X(4)
2100	660	290	730	638	55000	665	305	685	-
10700	670	295	625	565	60000	670	300	685	-
15000	670	295	630	570	65000	600	285	650	-
20000	700	305	650	-	70000	630	295	695	650
25000	700	305	650	-	75000	635	305	670	650
30000	680	300	635	-	80000	635	295	670	655
35000	685	305	640	-	85000	685	320	705	675
40000	690	305	720	-	90000	700	305	710	690
45000	665	295	690	-	95000	670	305	710	665
50000	665	295	690	-	100000	700	335	745	730

注 この表は繰返し回数を抜すい。X(4)は途中で断線，70000回で新しくはりなおす。

両振幅巾に対する歪量である  $665 \times 10^{-6}$  と  $690 \times 10^{-6}$  ストレイン(表6, 繰返し回数  $5 \times 10^4$  回の X(1)と X(3) の値および図26参照)から、それぞれの応力  $\sigma_{(1)}$ ,  $\sigma_{(3)}$  を求めると、

$$\sigma_{(1)} = 665 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^4 = 1330 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

$$\sigma_{(3)} = 690 \times 10^{-6} \times 2 \times 10^4 = 1380 \quad (\text{kgf/cm}^2)$$

となり、前記の伸縮応力  $S_E$  の計算結果である  $15.4 \text{ kgf/cm}^2$  に近い値になっている。ただ歪ゲージが示す値は約10%程度低目に出ているのは、ベローズ頂点におけるゲージの貼り方によるものと思われる。

このことから前出の伸縮応力の計算式が今回採用したベローズ又は類似のベローズの伸縮応力を求めるのに十分適用できることが判明した。

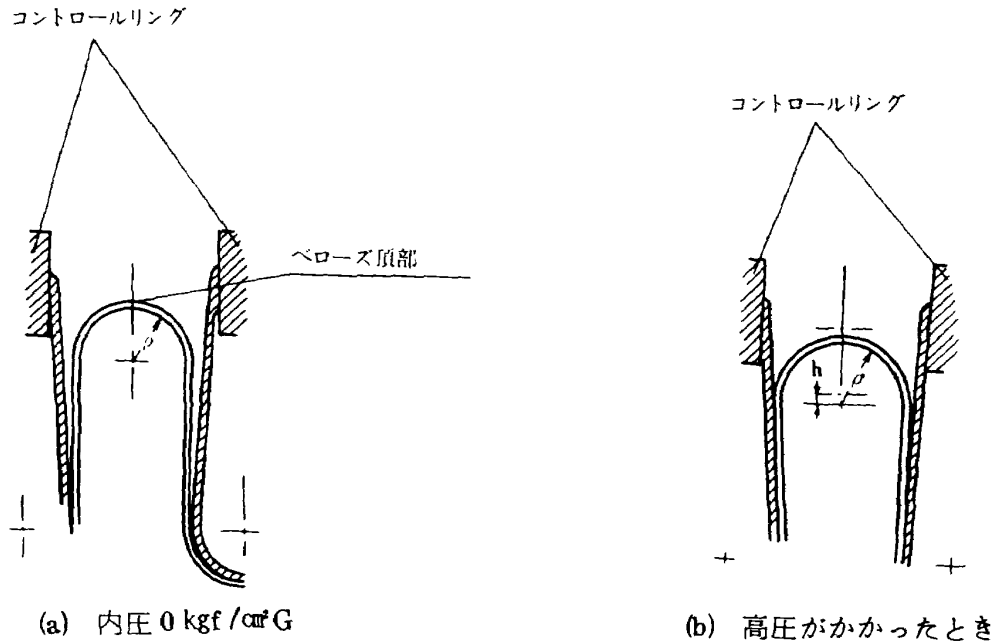


図 29 内圧の変化によるベローズの変形

### 7.3 歪測定

各伸縮継手の内圧による歪量を測定した。ここでは Exp 1, 2, 3, 4, 5 及び 6 の結果について述べる。

ベローズの頂点にストレングージを貼りつけたものは、Exp 1, 4, 6 である。これは、Exp 1, 4 は同じ形式（自由形単式コントロールリング付）で直径が異なるもの（Exp 1 は、内径 500φ、Exp 4 は内径 700φ）でどのような結果が得られるか。又、Exp 1 及び 4 の形式と Exp 6（ヒンジ形）の形式ではベローズの歪はどう変化するか、又疲労試験におけるベローズの動きとどのように異なるかを見るために、Exp 1, 4, 6 のベローズの頂点にストレングージを貼った。

Exp 4 については、周囲温度の変化による伸縮のため、内圧が変化して、ベローズの歪量がどう変化するかを見るため、正常時の寸法の場合と、3mm 伸ばした状態及び 8mm 縮めた状態の 3 つの状態歪測定を行った。又、Exp 1 及び 6 においては、内圧 30 kgf/cm<sup>2</sup>G かけたのち、圧力を大気圧迄もどし、設計値 20 kgf/cm<sup>2</sup>G に再度内圧をかけた場合、ベローズの歪量はどのようにかわるかを見るために行った。

Exp 4 のベローズの頂点に 6 ケ所貼りつけた状態を図 30 に示す。図に示すとおり、180° 反対側に、X 方向（軸方向）と Y 方向（円周方向で X 方向

と直角方向）に 1 組ずつ貼った。図 31 に示すとおり Exp 1 はベローズの 3 山の中央の山の頂点に 1 組ずつ貼り、図 32 に示す Exp 6 も Exp 1 と同様にストレングージを中央の頂点に貼った。

Exp 6 に関しては、さらに伸縮継手の両端のフランジに貼り、フランジ付近の歪も測定した。

Exp 2 は、圧力バランス型なので、親ベロー側のストッパリングの側面と、子ベローズ側のストッパリングの側面の片側に貼りつけ、圧力バランス型によるストッパリング等の歪を測定した。Exp 3 は T 管部をそなえた伸縮継手なので、T 管部の強度をみるつもりで、T 管部に、1 ケ所、X, Y 方向に 1 組貼り、又伸縮継手の片端のフランジ測面に各 1 ケ所ずつ貼りつけた。これはタイロッドボルトが、このフランジの両端で止っているので、フランジの歪等を測定するものとして貼った。（図 31 参照）

Exp 5 は、ダブルヒンジ型なので、ヒンジ部の歪をみるために、ヒンジアームと管胴、およびストッパフランジの側面に貼り付けた。（図 32 参照）

測定は、伸縮継手の両端を盲フランジで閉塞して、伸縮継手内に水張りし空気抜きを行ったのち、水圧ポンプにより、内圧 0 kgf/cm<sup>2</sup>G から 5 kgf/cm<sup>2</sup>G おきに耐圧試験圧力 30 kgf/cm<sup>2</sup>G まで加圧し、各圧力ごとに 5 分間保持して測定を行った。その間目視やスケール等で異常変形の有無及び洩れ等の有無を確認

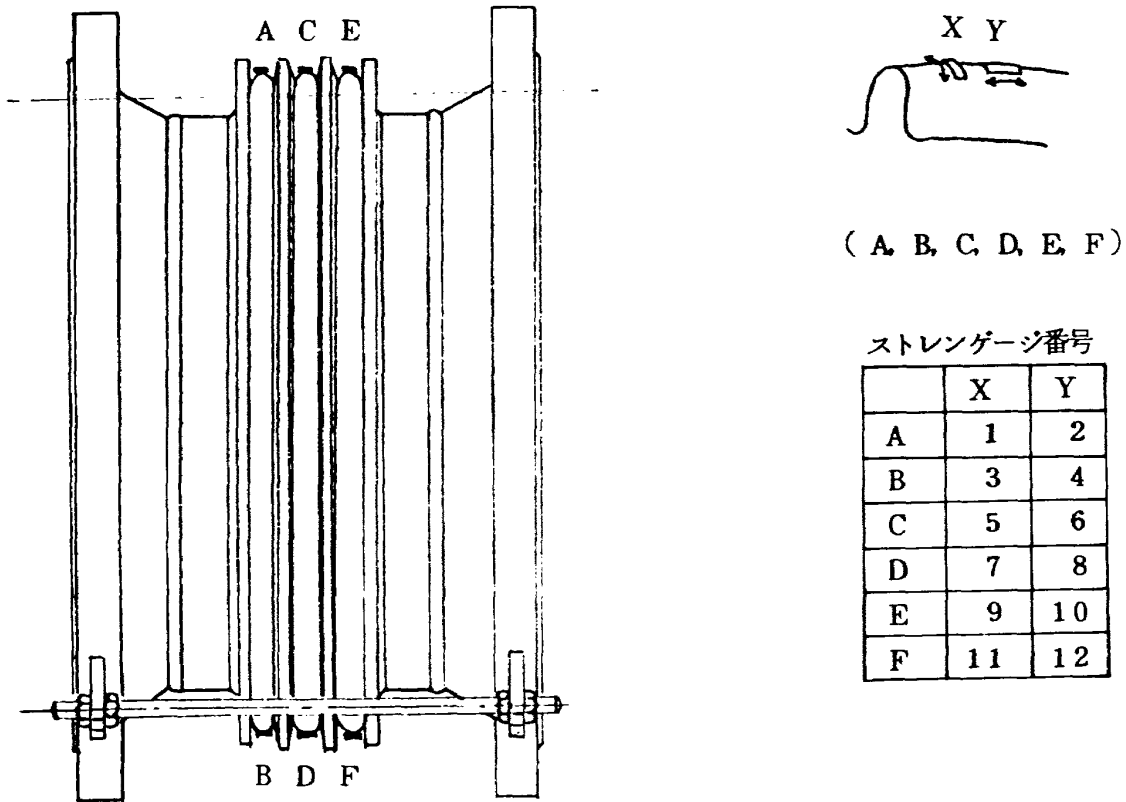


図30 Exp4に貼りつけたストレングージの箇所

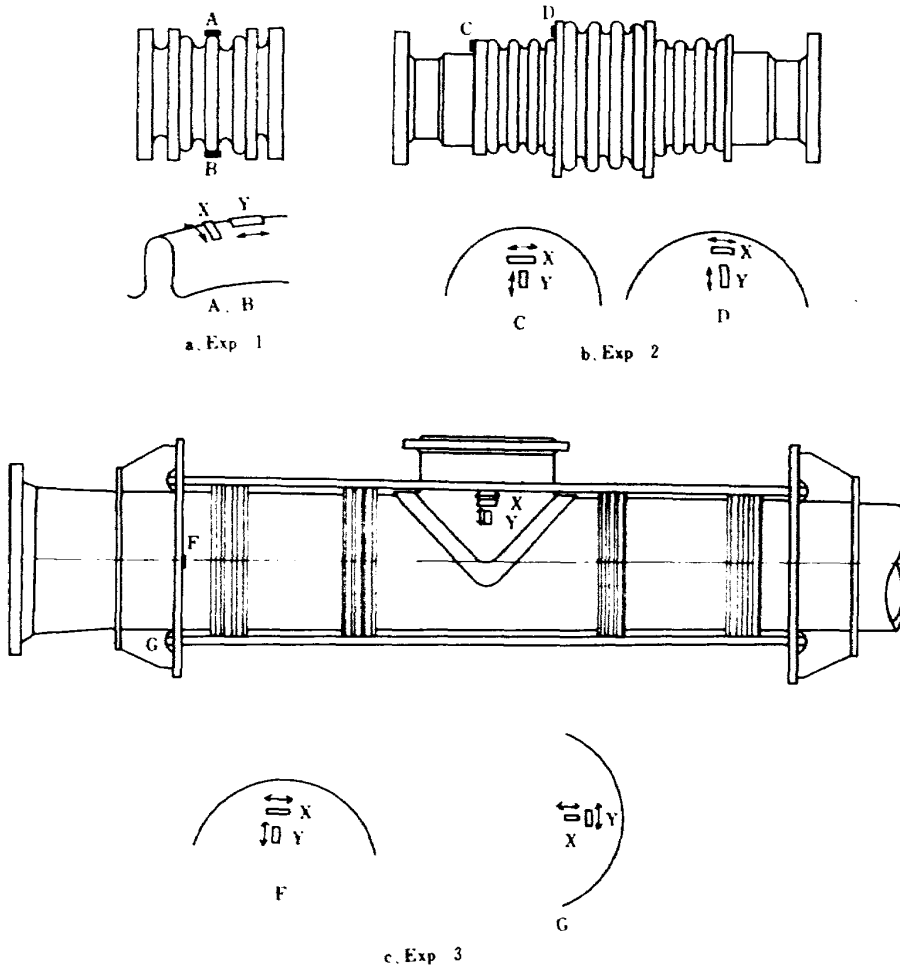
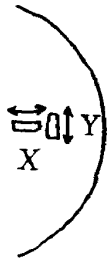
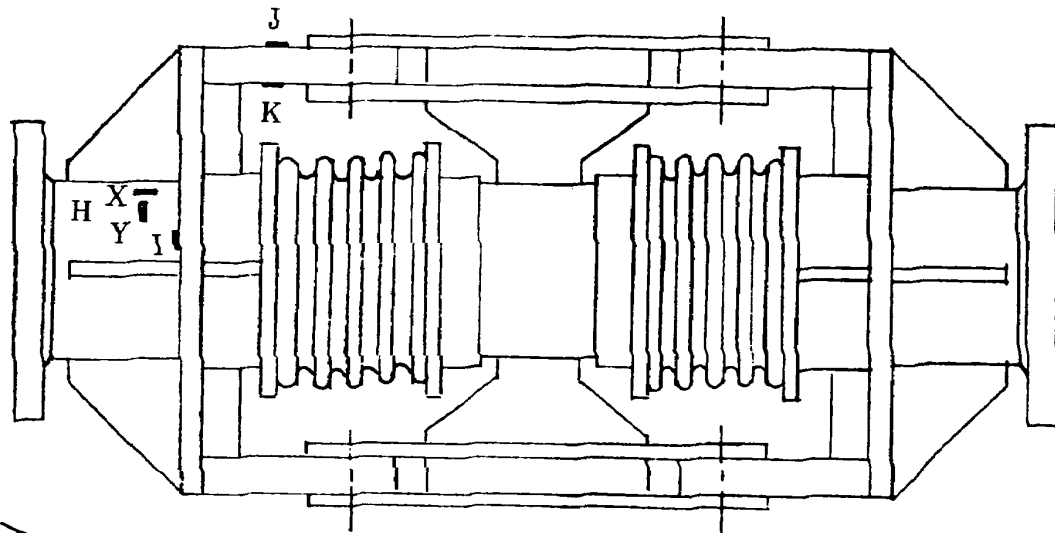
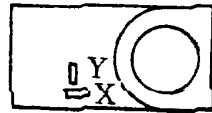


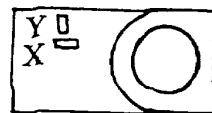
図31 Exp1, 2, 3に貼りつけた図



I

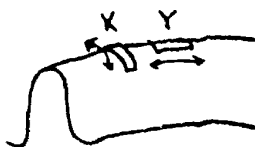
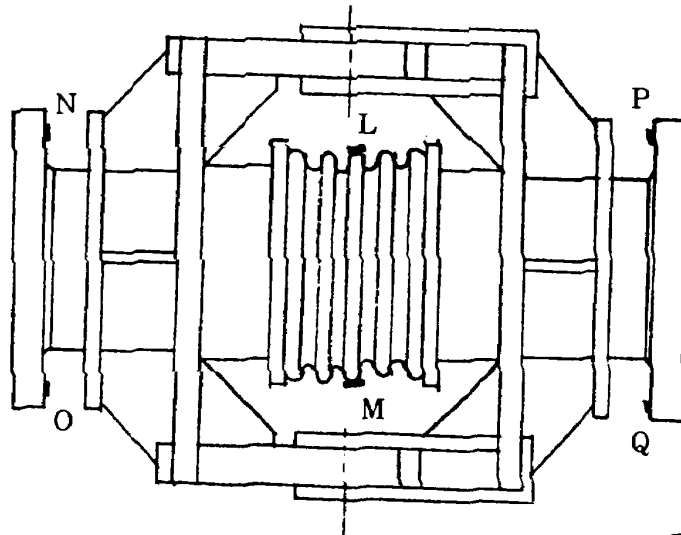


J

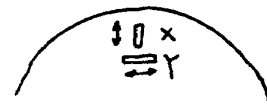


K

a. Exp 5



L, M



N, O, P, Q

b. Exp 6

図32 Exp 5, 6 に貼りつけた図



しながら、データを測定するという手順で行った。

図33以下図47迄、歪測定の結果を示す。

図33は、Exp 1の歪量のデータである。内径500φであるので20 kgf/cm<sup>2</sup>Gで1100×10<sup>-6</sup> ストレン附近であり、30 kgf/cm<sup>2</sup>Gでは1750×10<sup>-6</sup> ストレン附近である。ベローズの頂点軸方向の上下2つ(Ax, Bx)とも同じ様な動きであった。30 kgf/cm<sup>2</sup>G加圧の後大気圧に戻し、再度10 kgf/cm<sup>2</sup>, 20 kgf/cm<sup>2</sup>Gに加圧したデータも同じような値を示しているの、内圧の値が同じならば、ベローズの歪値もほぼ同じ値になっている。

図34は、Exp 2, 3のデータである。ベローズの頂点でないので、ストレン値は小さい。図において、Exp 2の親ベローズ、子ベローズ関係の歪量は、ほとんど変化が見られず、わずかに、親ベローズのストッパーリングのCxの値が内圧30 kgf/cm<sup>2</sup>Gで80×10<sup>-6</sup> ストレンになったくらいである。又実際の各ベローズの伸び量は図35に示した通りである。(ノギスによる測定)、親、子ベローズ共に異常のない値とみなしてよい。測定番号①と④の増分の合計は、測定番号②又は③の値に近い。圧力

バランス型なので、内圧30 kgf/cm<sup>2</sup>Gにおいて、全長がわずかに0.5 mm伸びただけであった。これは、ベローズの付近の配管の伸びが含まれている。

図34のExp 3においては、枝管部分のExの値が内圧によって他の値より大きく増加している。この値は、配管の内圧による周方向の歪の量として考えて良い。

Exp 3のタイロッドに対して、その伸びを計算するため内圧30 kgf/cm<sup>2</sup>Gによる荷重Wkgとすると、

$$W = \pi/4 \cdot D_i^2 \cdot P_1$$

$$= \pi/4 \cdot 70^2 \cdot 30 = 115.5 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

タイロッド4本で、1本当の荷重Wn kgとすると

$$W_n = \frac{W}{4} = 115.5 \times 10^3 \times \frac{1}{4}$$

$$= 28.9 \times 10^3 \text{ (kg)}$$

タイロッド1本当りに働く応力をσとすると

$$\sigma = \frac{W_n}{A} = \frac{W_n}{\left(\frac{\pi}{4} d^2\right)}$$

$$= (28.9 \times 10^3) / \left(\frac{\pi}{4} \times 65^2\right)$$

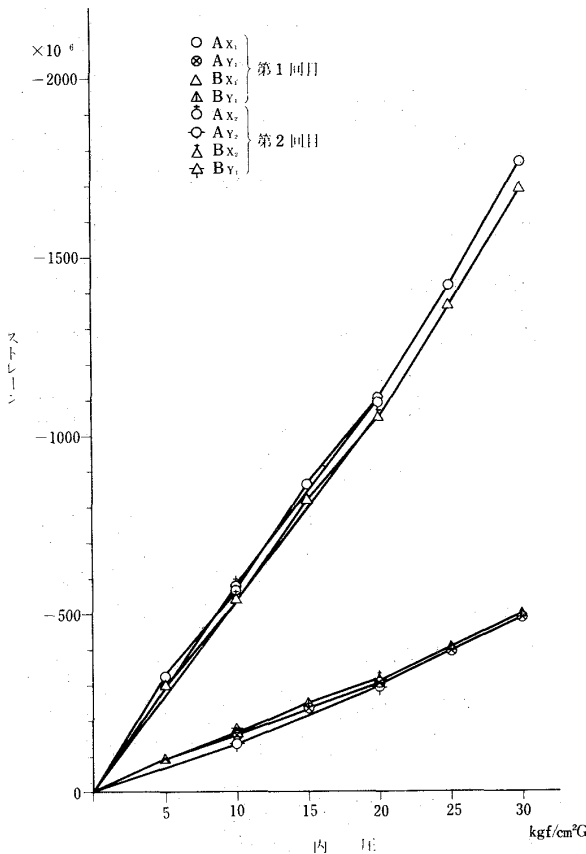


図33 Exp 1の内圧と歪

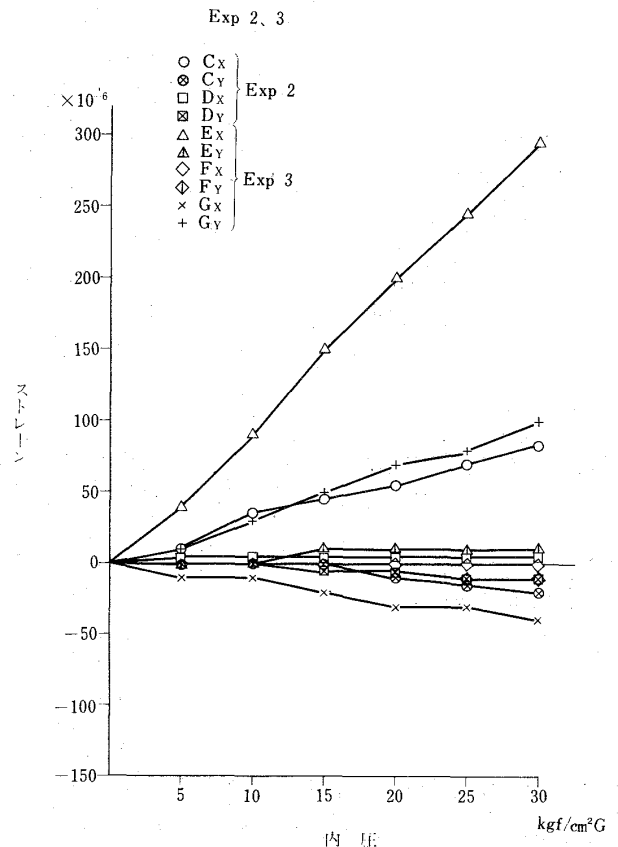
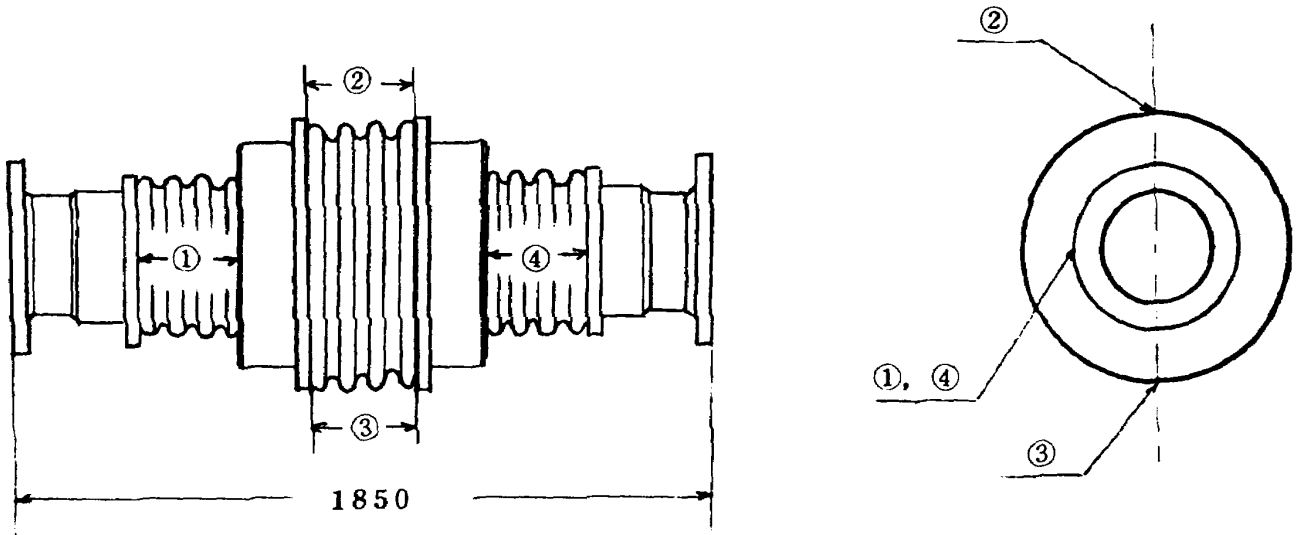


図34 Exp 2, 3の内圧と歪



測定番号	内 圧      kgf/cm <sup>2</sup> G			
	0 (1)	30	0 (2)	30-0 $\frac{(1)+(2)}{2}$
①	245.6	244.3	245.4	1.2
②	224.4	226.8	224.6	2.3
③	223.7	226.2	223.8	2.45
④	241.2	239.7	241.1	1.45

図 35 Exp2 親, 子ベローズ間隙

= 8.71 (kgf/mm<sup>2</sup>)

d : タイロッドの谷径 = 6.5 mm

タイロッドの伸びを λ とし, タイロッドの縦弾性係数 E = 2.1 × 10<sup>4</sup> とすれば,

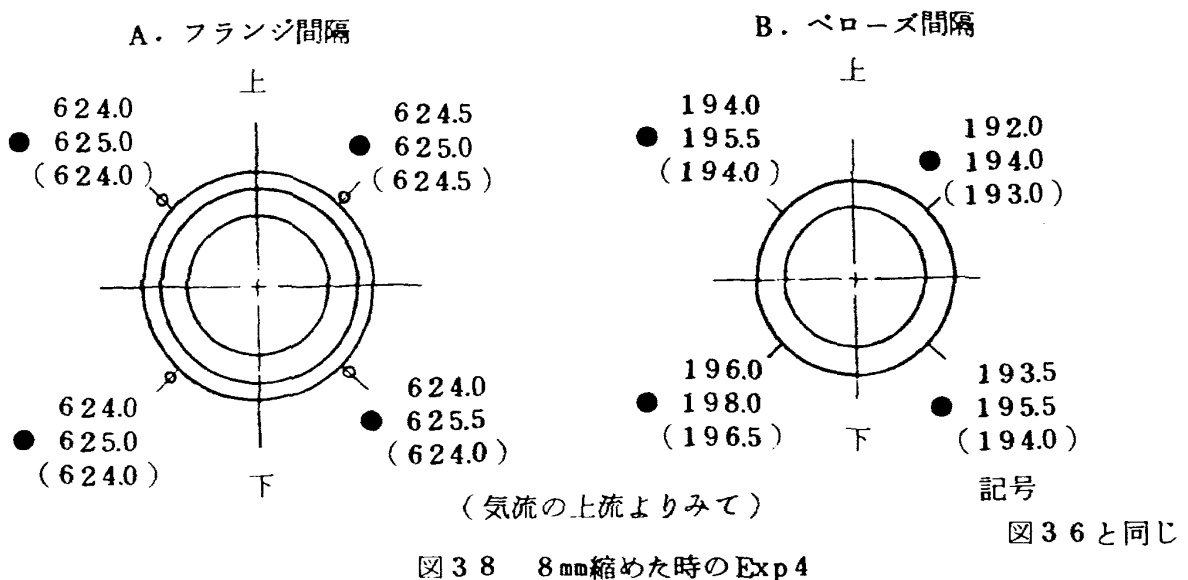
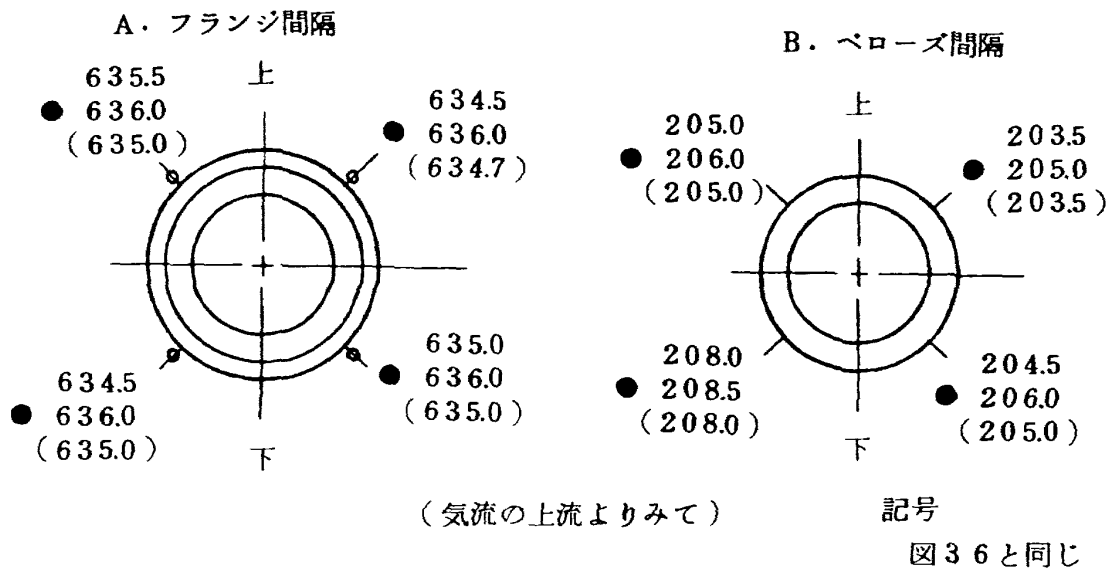
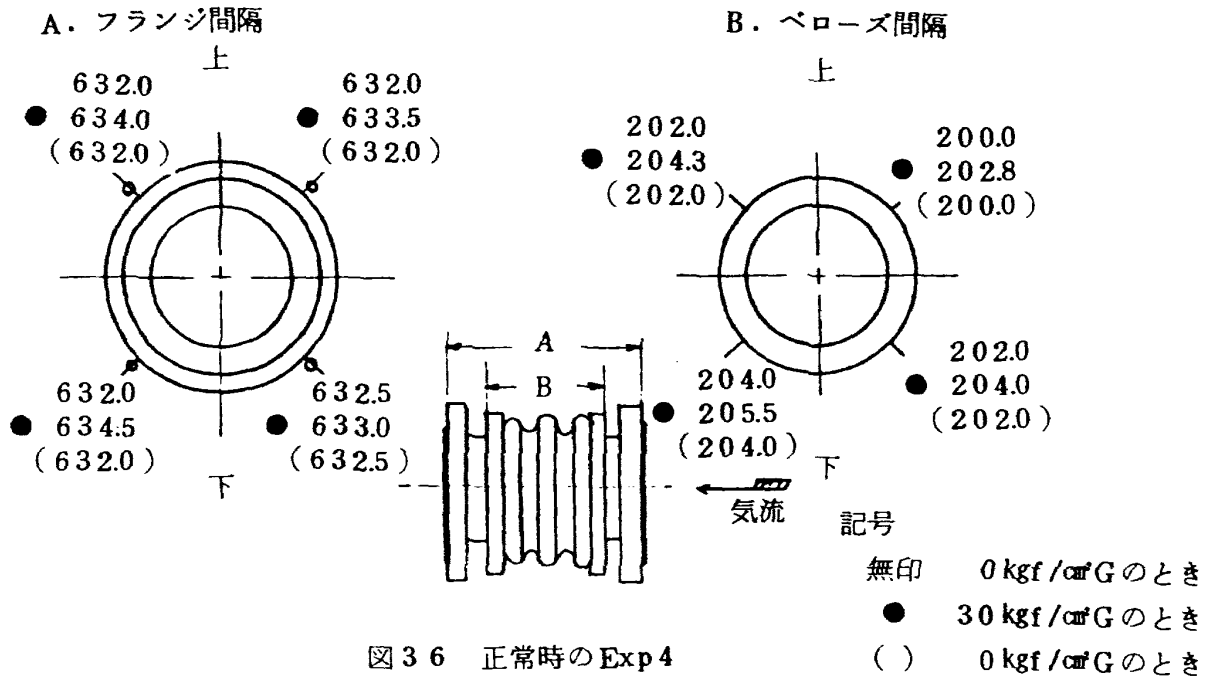
$$\lambda = \sigma \cdot l / E = 8.71 \times 3600 / (2.1 \times 10^4) = 1.49 \text{ (mm)}$$

となる。なお実測値は, タイロッドが内圧 0 kgf/cm<sup>2</sup>G のとき 3600 mm, 内圧 30 kgf/cm<sup>2</sup>G のとき 3601.5 mm で, 伸びは, 1.5 mm であったので, 前記計算結果とよく一致した。

つぎに, 実際の配管に伸縮継手を取付けた場合を考えて, Exp 4 についての試験結果を図 36 から図 45 に示す。図 36 は, 正常時の取付寸法 (フランジ面間距離 63.2 mm) にタイロッドでセットして, 内圧 0 kgf/cm<sup>2</sup>G から 30 kgf/cm<sup>2</sup>G に加圧したときのベローズ間隔 (A および B) を測定した値である。

図 37, 38 にはフランジ面間距離を 3 mm 伸ばしたとき, および 8 mm 縮めたときのベローズ間隔の値を示す。図中無印は, 加圧する前の 0 kgf/cm<sup>2</sup>G のベローズ間隔の値であり, ( ) 内は 30 kgf/cm<sup>2</sup>G に加圧後大気圧 (0 kgf/cm<sup>2</sup>G) に戻したときのベローズ間隔の値である。図 36 ~ 図 38 においては, 内圧を 30 kgf/cm<sup>2</sup>G にしたとき, それぞれのベローズ間隔の増加量はほぼ等しいと考えて良く, 図 37 と図 38 の 3 mm 伸ばしと 8 mm 縮みでの差異はないと考えられる。よって周囲温度の変化によって, フランジ面間距離が伸び縮みした時でも, 内圧の変化によるベローズ間隔は, ほぼ同じ量だけ変化する。

図 39 は, Exp 1, 4 の内圧と歪の図である。同じ形式の伸縮継手において, 大きさの差 (内径 500 φ と 700 φ) によるベローズ頂点の歪みは, どのように変化するかを見るため, 図に示すとおり,



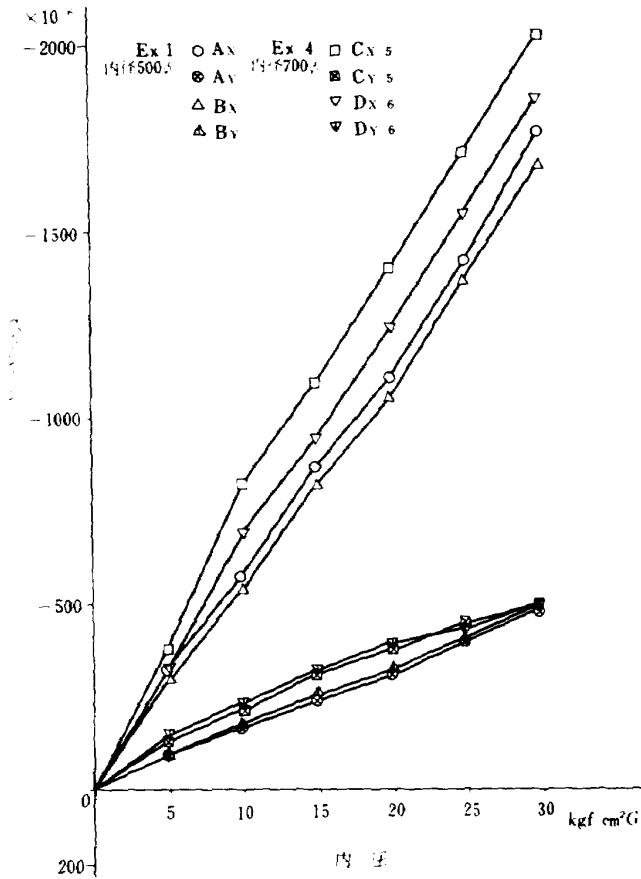


図 39 Exp1, 4 内圧と歪の図

内圧による増加の現象は同じであり、ただ、内径の大きい700φの(Exp 4)の方が大きい値を示している。(X方向とY方向共に)。

どの伸縮継手のものもベローズの頂点に貼ったストレングージの軸方向の方が、周方向より大きい値を示しているが、これは目視でも確認できる程である。内圧が0 kgf/cm²Gのときは、ベローズの頂部は、図 29(a)のようになっているが、内圧が徐々に増加すると両肩が張ってきて、内圧が30 kgf/cm²Gになると図の(b)のようになる。ベローズ半径  $\rho$  が(a)のときは小さくて、内圧が高くなる(b)で大きくなり頭が平になる感じである。ベローズの頂部の応力は、複雑であるが、簡単に考えて、ちょうど薄肉円筒に生ずる円周方向の応力と考えると、ベローズの各ピッチ間が大きい方が薄肉円筒の半径に相当するベローズの曲率半径が大きくなり、伸縮継手の内径が大きい方がピッチが大きいのと同じ形式でもベローズ頂部の歪は大きいと考えられる。なお、ベローズ側面の応力は、コントロールリングに拘束されて、ベローズの頂点程大きく変形しない。この応力は、

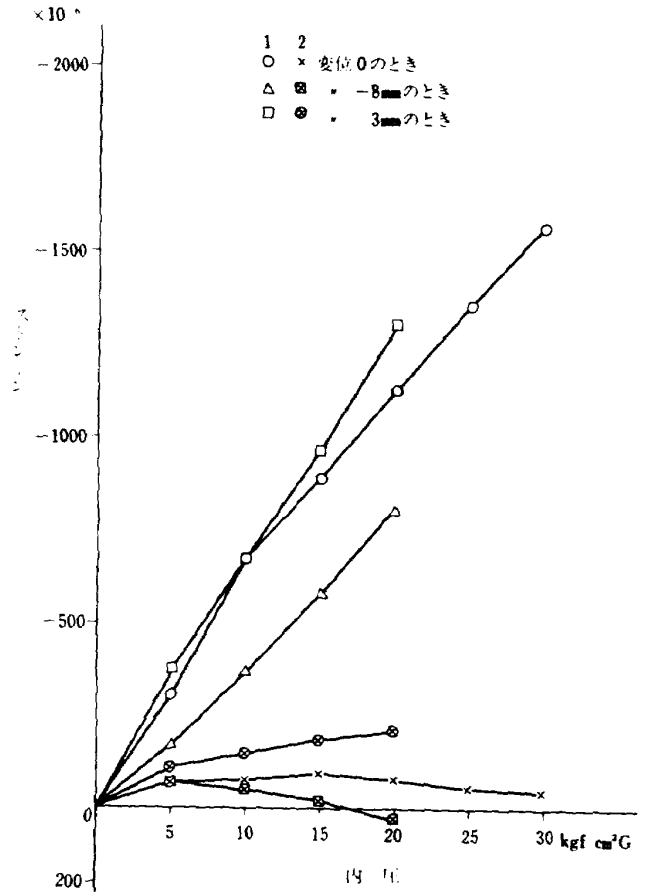


図 40 Exp4 ストレングージ 1, 2

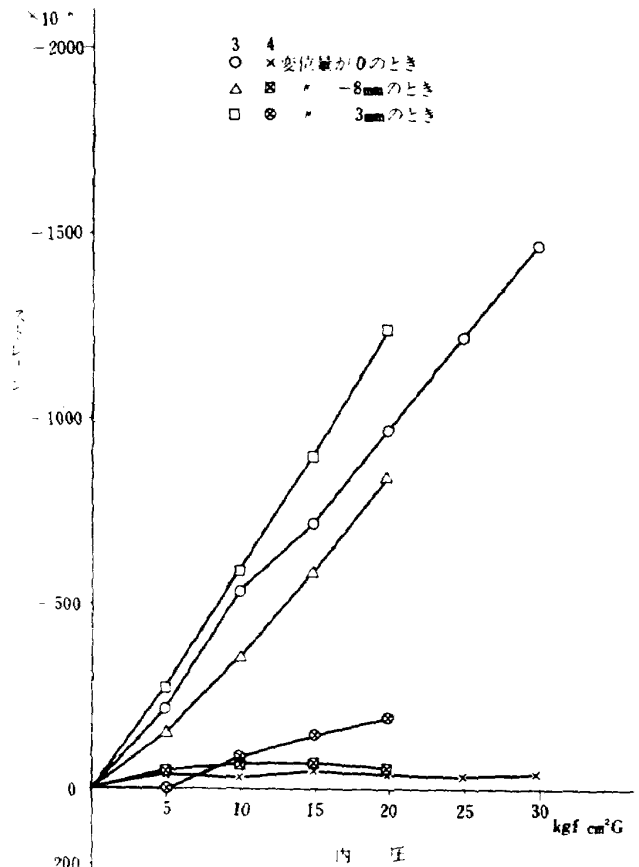


図 41 Exp4 ストレングージ 3, 4

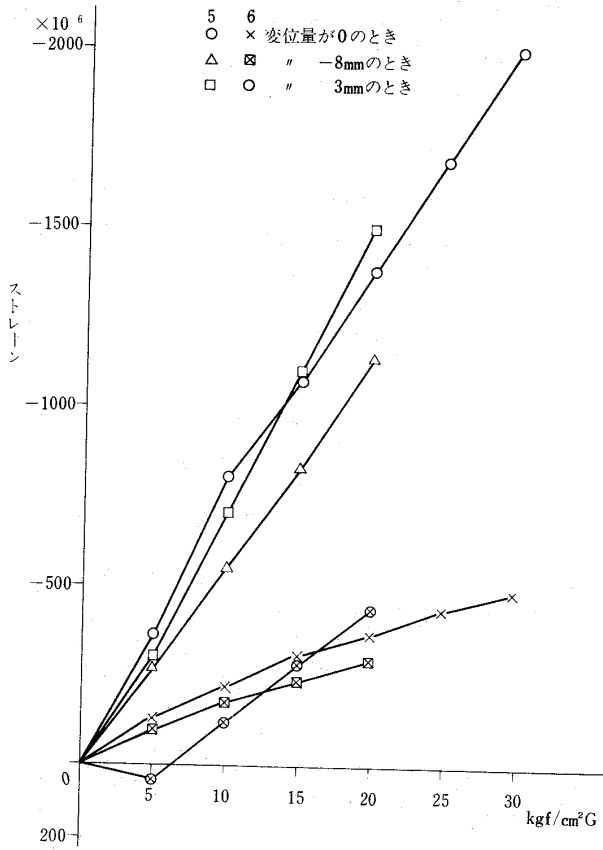


図 4 2 Exp4 ストレンゲージ 5, 6

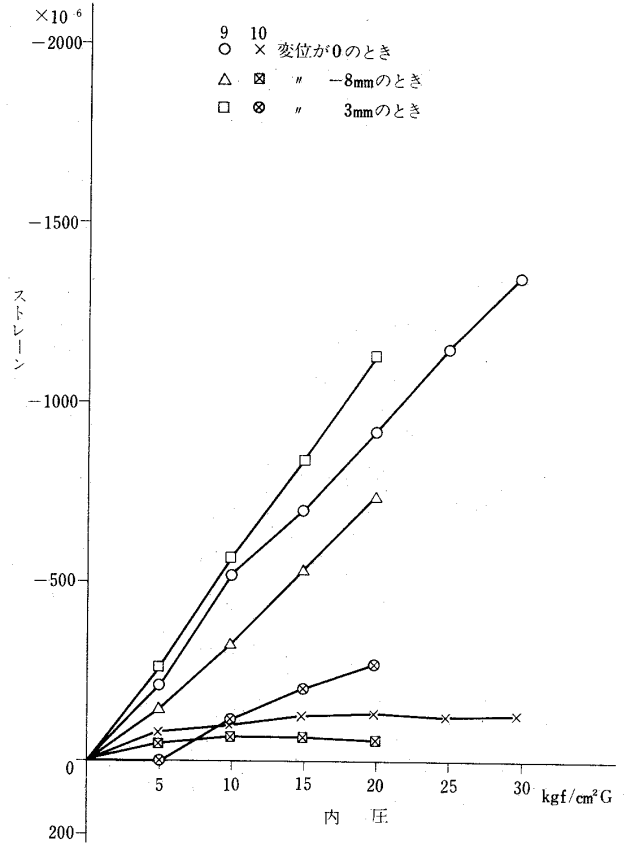


図 4 4 Exp4 ストレンゲージ 9, 10

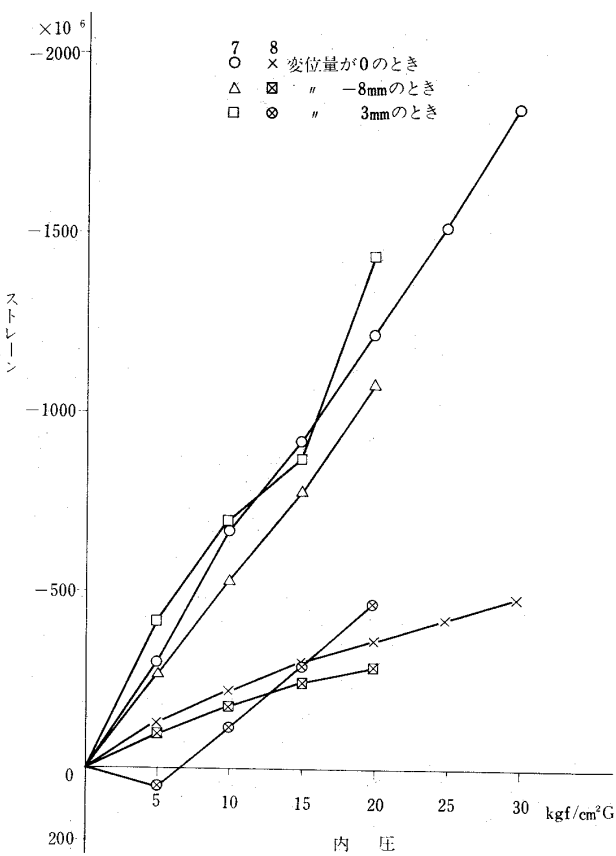


図 4 3 Exp4 ストレンゲージ 7, 8

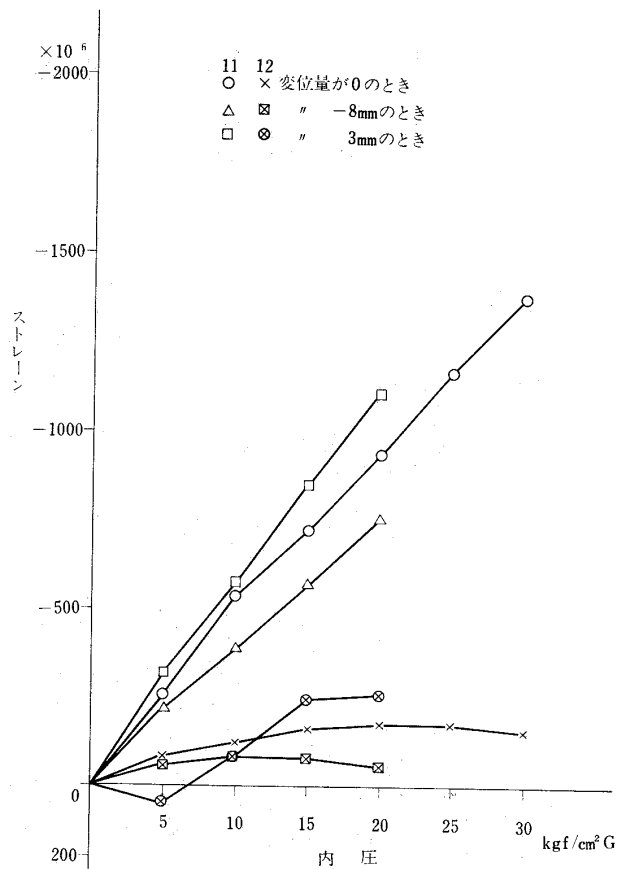


図 4 5 Exp4 ストレンゲージ 11, 12

図 25 に示す応力の  $S_{PL}$  と考えて良い。

図 40 ~ 図 45 は, Exp 4 の, 正常取付寸法の場合と, それよりも 8mm 縮めたときおよび 3mm 伸ばしたときの, 各ペローズの頂部の歪みを示したものであり, 同じ伸縮継手のペローズの山でも中央部のペローズの頂点の歪みの方が大きい値を示している。又, 8mm 縮めたものと他のものを比較しても同じ場所のペローズの歪みは, 8mm 縮めた場合が一番小さく, 次に正常状態時, 3mm 伸ばしの状態の順になっている。このことは, ペローズの頂点の歪について考えたとき図 29 において山の曲率半径  $\rho$  が, 8mm 縮みの状態で一番小さく, 正常状態, 次に 3mm 伸ばしの状態と順次大きくなり, 正常時の曲率半径を  $\rho_0$  とし, 8mm 縮めるときを  $\rho_1$ , 3mm 伸ばしときを  $\rho_2$  とすれば, 概算で  $\rho_1/\rho_0 = 0.95$ ,  $\rho_2/\rho_0 = 1.02$  となる。8mm 縮めの方が変化の割合が大きいですが, 実測結果を示す図 40 ~ 45 においても正常時からの歪の差は, 8mm 縮めの方が 3mm 伸ばしよりも大きく, 出ていることが認められる。

図 46 は Exp 5 のストレングージによる歪測定の結果である。複式ヒンジ型のアームの歪で, アームの下面に貼った  $K_x$  の値は内圧の増加に伴って, 大きく増加している。又, アームのつけ根の管胴に貼

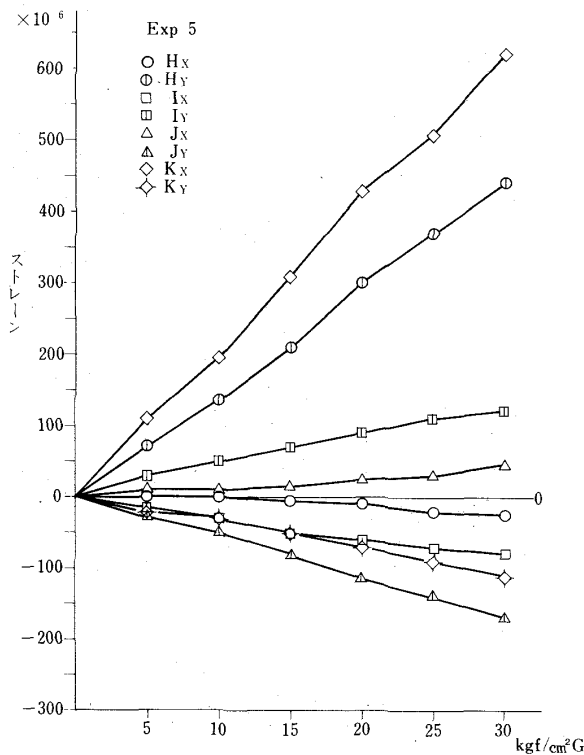


図 46 Exp 5 の内圧と歪

った  $H_y$  は, 同じく大きく増加している。これは, 管の円周方向の応力の増加に伴うものと思われる。アームの下面に貼った  $K_x$  は推力をささえるための応力の増加を示しているものと思われる。アームの上面に貼った  $J_x$  があまり増加していないが現在のところ原因は不明確である。

図 47 は Exp 6 において, 図 33 と同じように 30 kgf/cm²G まで加圧後, 大気圧に戻し, 再度 20 kgf/cm²G 迄加圧したものであるが, 図 33 と同じ傾向を示しており, 内径の大きい Exp 6 の方が歪の値も大きく示している。だが, 内圧を変化させ, 同じ内圧にくりかえしても, ほぼ同じ値を示す傾向は変わらない。よって, これらの伸縮継手を配管に組込んで, 実用に供した場合, 内圧の変化による, ペローズ等の歪の変化量は, 各継手ともほぼ同一の傾向を示すものと思われる。なお, 伸縮の変化においても, 疲労試験等でのべたように, 伸縮量が同じであれば, ペローズ等の歪の量もほぼ同一の値を示すと推定できる。

これらの測定結果からいえることは,

- 1) 伸縮量が, 同じ量のくりかえしであれば, ペローズの頂点にはほぼ同じ歪み量が増えられる。

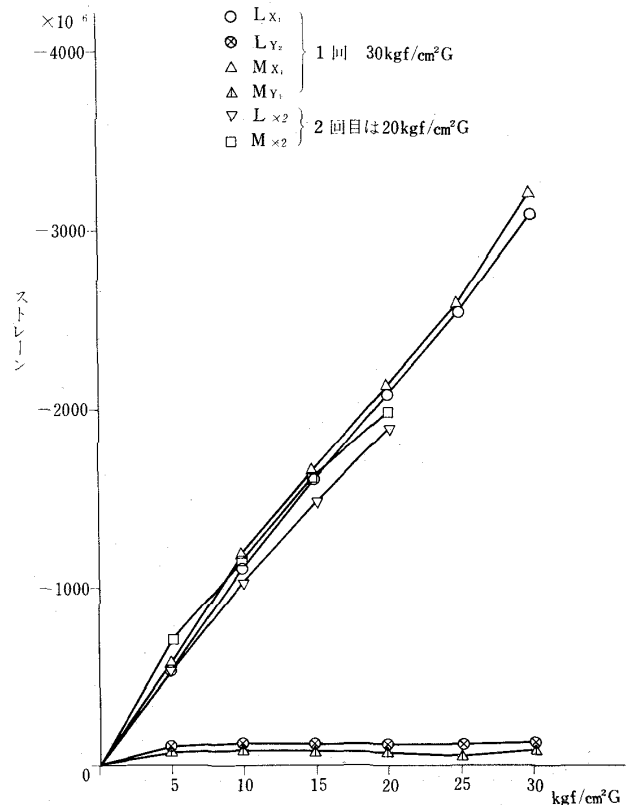


図 47 Exp 6 内圧変化によるペローズの歪み

- 2) 内圧変化においても、同じ内圧変化量であればほぼ一定の歪み量がベローズの頂点に加えられる。
- 3) 伸縮継手の内径の大きい方が、ベローズ頂点の歪み量は大きい。(軸方向)
- 4) 同一の伸縮継手を、正常時状態の取付寸法よりも伸して取付けるよりも縮めて取付けた方が、ベローズの頂点の歪みは小さい。

ただし、3) 項に関する前記6章の $S_R$ の計算式では、ベローズの平均直径(図25に示す $D_m$ )が考慮されていないので、応力には何ら関与しないはずであるが軸方向の歪測定の結果では、平均直径に応じた歪量の変化が認められた。これは、歪ゲージによる測定法によるものか現在のところ原因は不明確のままである。

以上各種試験結果から得られた事柄を列記したものであるが、これらの結果から、実際の配管に組込んで使用しても、十分に、使用条件を満足し、旧形のゴム製伸縮継手よりも数倍も長く使用年数に耐え、確実に伸縮機能を満足するものと判断した。

#### 7.4 現地総合試験

各種試験の結果、異常等がないことが判面したので、各伸縮継手を図9の配置に従って配管に組込み総合試験を行った。

金属ベローズ型伸縮継手を配管に取付けたときは、周囲温度が $15^{\circ}\text{C} \sim 20^{\circ}\text{C}$ であったが、その時の温度条件に合わせてフランジ面間距離を決定し、セットボルトで固定しておいて組込み、伸縮継手に無理な力等を加えないように注意した。

総合試験を行う前に、各配管を目視によって検査し、水平位置や固定端からの各配管のフランジ面までの距離を測定し、その値が図9の値であることを確認した。

配管等に内圧 $0 \sim 19.9 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ に加圧してゆき、それぞれの伸縮継手が異常変形なく、正常に作動することを確認しながら、Exp 2, Exp 3のベローズの歪測定を実施した。その結果は図48に示すとおりである。

伸縮継手単体で試験を行った結果と比較して、異なった動きをしているのは、各配管が内圧により軸方向等は伸縮しているためであり、又、Exp 3におい

ては、フラッタ風胴側の配管等の伸縮が関係して、Exp 3のベローズが均等な応力を受けていないことが認められる。なお内圧を $0 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ に戻しても、ベローズの頂点に歪が残っているのは、各配管及び伸縮継手の自由に移動出来るようにした支持脚の滑り面の摩擦によって、試験前の位置に戻りきれない事によるものと考えられる。図49は線図にしたものであるが実用上支障ないものである。

第2球貯気槽の真下に取付けたExp 4の動きをみるために、図50に示す各部の寸法を測定した。ただし、第2球貯気槽の元弁は固定されているので、貯気槽内の圧力が上昇すると、伸縮継手と元弁の間にある曲り管の動きも合せて、測定してみた。それは、Exp 4の軸芯のずれが許容値以上になれば、Exp 4に害を与えるので、おもにC点のダイヤルゲージの値を重視すると共に、Exp 4の各面距離をも注目した。その結果、表7に示すように、Exp 4に害を与えるような値はなく正常に作用することが確認できた。

他の伸縮継手においても異常な動きは認められず、正常な動きをしていた。又、伸縮継手でオイルレスの支持脚を使用したものは、動きがなめらかで、伸縮継手の動きを拘束していなかった。

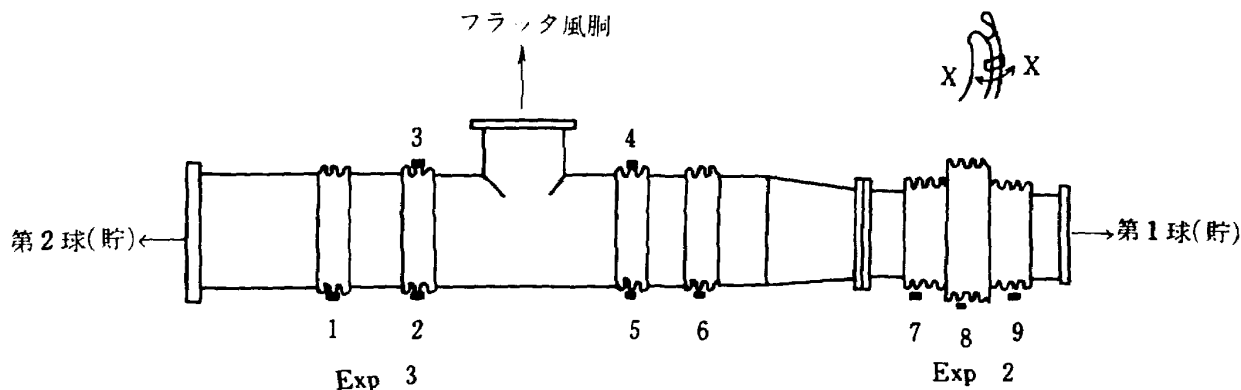
なお、当所で使用する内圧 $20 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ 以下のベローズについて、さきに行なった歪み測定値を用いてベローズの頂点の応力を単純化して

$$\sigma = \delta \cdot E$$

として求めてみた。

ここで $\sigma$ は、ベローズの頂点の軸方向の応力、 $\delta$ はベローズの頂点の軸方向の歪み測定値、ベローズ材料の縦弾性係数 $E$ ( $2 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ を採用する)として、伸縮継手の内径、 $500 \phi$ (Exp 1)、 $700 \phi$ (Exp 4)、 $1000 \phi$ (Exp 6)において、それぞれ伸縮継手の内圧を、 $10 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ 、 $20 \text{ kgf/cm}^2\text{G}$ における $\sigma$ を求めると、表8のようになる。

この $\sigma$ の値から判るように、内圧に比例し、また伸縮継手の内径にも比例していることが認められる。ただし、内径の差による応力のちがいは、歪測定の実測値が前にも述べたとおり平均内径に関係する値を示しているためその原因は不明確のままである。



		内 圧 kgf/cm <sup>2</sup> G					
		0	10	15	16.2	19.9	0
Exp 3	1	0	-470	-600	-620	-690	0
	2	0	-780	-1255	-1340	-1590	-210
	3	0	-480	-605	-620	-685	-15
	4	0	-855	-1370	-1450	-1705	-125
	5	0	-315	-450	-480	-560	+20
	6	0	-600	-880	-950	-1115	-5
Exp 2	7	0	-350	-640	-680	-770	+30
	8	0	-655	-940	-1050	-1300	-150
	9	0	-585	-810	-850	-955	+15

図 4 8 Exp2, Exp3 配管に組込んだ時の歪測定

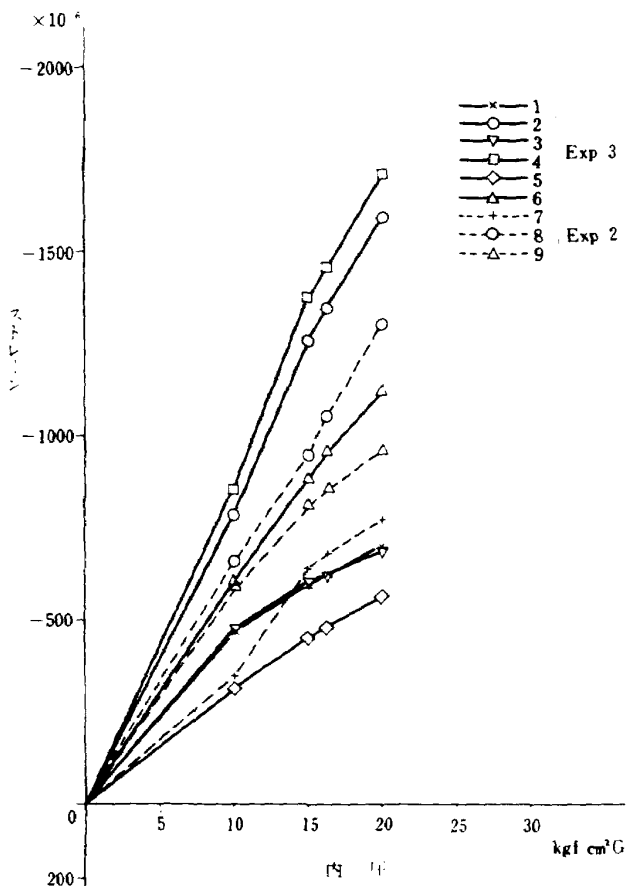


図 4 9 Exp2, Exp3 配管組み込み時歪

ベローズの材料 (SUS 316) の引張り強さは 53 kgf/cm<sup>2</sup> 以上であるので、設計使用圧力範囲においては、十分に使用に耐える応力である。なお以上の計算は軸方向の応力を求めたものであるが、図 40 などでわかるように歪み測定値の結果より、周方向の歪み測定値は小さいので、計算を省略した。

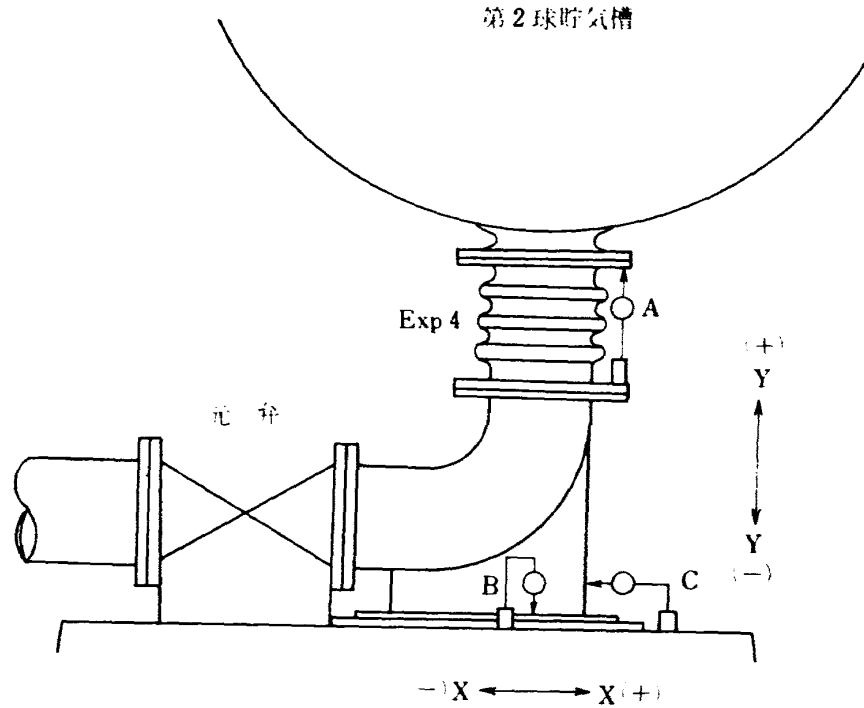
ベローズの成形時においては、大口径のものは、100 kgf/cm<sup>2</sup>G 以上の内圧をかけて成形するので、もし、この成形時の内圧以上で使用すれば、当然ベローズは、永久変形を起すか、ベローズが破壊してしまうことになる。当所で使用する伸縮継手の内圧は、20 kgf/cm<sup>2</sup>G 以下なので、成形時の内圧の約 1/5 程度であるから、内圧によって破壊することは考えられない。

当所で伸縮継手を使用する上でとくに考慮したことは、次の2点である。

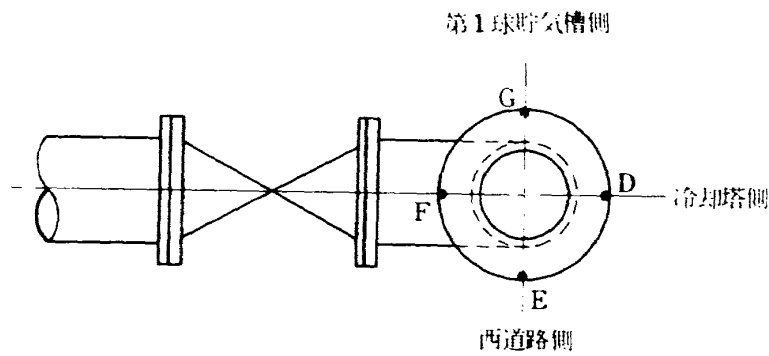
- (1) 伸縮継手の疲労回数
- (2) 伸縮継手の設計値以上の急激な伸縮量

である。





(A、B、Cはダイヤルゲージ)



Exp 4 フランジ間隔測定箇所 (上から見た図)

(D、E、F、Gはスケールにて測定)

図50 Exp 4 配管組込時測定箇所

表7 Exp 4 組込時の各箇所のデータ

単位：mm

測定箇所		内 圧      kgf/cm <sup>2</sup> G								
		0	4	6.5	10	13	15.5	19.9	15	(19.9-0)
ダイヤル ゲージ	A	0	0.33	1.58	0.85	1.04	1.30	1.44	1.25	(1.44)
	B	0	0.13	0.14	0.14	0.15	0.16	0.17	0.15	(0.17)
	C	0	0.03	0.11	0.15	0.20	0.23	0.31	0.20	(0.31)
1m スケール	D	625	625.5	626	626	626	626	626.5	626	(1.5)
	E	627.5	628	628	628.5	628.5	628.5	628.5	628.5	(1.0)
	F	625.5	626	626	626	626	626.5	626.5	626.5	(1.0)
	G	622.5	622.5	623	623	623	623.5	623.5	623.5	(1.0)

表8 伸縮継手の内径と内圧による応力

単位: kgf/mm<sup>2</sup>

伸縮継手の内径mm		内圧kgf/cm <sup>2</sup> G	
		10.0	20.0
500φ	Exp 1	11.4	21.0
700φ	Exp 4	16.0	28.0
1000φ	Exp 6	22.0	41.0

(1)においては、本報告にあるように、各伸縮継手の予測寿命は、伸縮回数が $1 \times 10^5$ 以上であることが判明しているため、 $1 \times 10^5$ 回迄は何ら支障はない。(2)においては、配管及び伸縮継手の固定点及び可動点が十分機能すれば何ら支障はない。ただ配管系統及び伸縮継手等の固定点及び可動点等は、当所の場合屋外にあるので、年に何回かは点検しておく必要がある。

なお、前掲のKellog社以外にペローズの強度計算法として、最近、米国のExpansion Joint Manufacturers Association Inc (EJMA)で提唱<sup>(5)</sup>している式があるが、今回の伸縮継手についてその式を用いて、強度及び寿命の計算を行った結果、Kellog社の計算式の値よりも安全側に求められたので、本報告書ではKellog社の式だけを記載した。

## 8. むすび

高圧導管用金属製の伸縮管を製作し、各試験を行い、当所の各種風洞や実験装置のため十分に実用に耐える結果を得ることが出来た。さらに、高圧導管に取付けて実用に供してから6年を経過し、 $1 \times 10^4$ 回の伸縮回数を越えたので、第1回目の伸縮継手の開放検査を実施した。Exp 4に関しては精密検査を行うため配管から取りはずし、工場にて補強リングをはずし、ペローズ部の入念な染色浸透試験、管胴部の溶接部は磁粉探傷試験を実施した。他の伸縮継手は、配管に取り付けたまま、内圧を除々に上げて目視検査による気密試験等を行い、どの伸縮継手も異常がない事を確認した。この開放検査は、予測くり返し寿命回数からみれば、約1/10の時点で行ったことになるが、懸念された初期故障による異常も全く見つからなかった。その結果、今後十年以上

同じ条件下の使用に耐えられるものと判断することが出来る。今後高圧で大口径の伸縮継手が、つぎつぎ使用されるようになると予測されるが、今回の各種試験のデータ及び $1 \times 10^4$ 回以上の伸縮回数経過後の各伸縮継手の開放点検時のデータは大いに参考となることを確信する。

当所の遷音速風洞等の建設時に取付けてあったゴムの伸縮継手と比較して、金属の伸縮継手の方が製作費が安い上、品質の信頼性が高く、耐久性でも10年以上うまわることが判明した。

なお、昭和50年に、この大口径高圧用金属製伸縮管を採用する際に、寿命計算はもとより、ステンレスのペローズ成形等も、確立されておらず、種々の試験を重ねた結果、採用にふみきったいきさつがあるが、寿命計算等に関しては、高圧ガス取締法やJISの伸縮継手の項目の規定や解説において、より精度の高い手法がされるように期待している。実用に供して6年経過して、伸縮のくり返し回数が $1 \times 10^4$ 回を越え、異常のないことが確認されたことは、大いに意義のあることであり、設備保全上及び経済上の有為性が実証されたものと確信する。

図51～53は、Exp 5, 8, 10を取付けた状態の写真である。

図54～56は、開放点検時の写真である。図55は、Exp 4を工場において、精密検査のうち磁粉探傷試験で溶接部を点検している状況である。図54はExp 3の気密試験及び目視検査を行っている状態で、図56は、Exp 5および6の日覆をはずし、気密試験を行っているところである。

図57は旧型のゴムの伸縮継手(Exp 6に相当)の写真で図58は現在の金属製の伸縮継手(Exp 6)の写真である。

最後に、本研究に際し、機体第一部空力弾性研究室、空気力学第二部超音速風洞研究室、二次元風洞研究室的の皆様の甚大な御協力を得て計画どおり完成した。また、元遷音速風洞第1制御研究室萩原室長には、金属製伸縮継手の配管等の計画当初から完成に至るまで懇切な御指導をいただき、また、空気力学第2部の萱場重男主任研究官や遷音速風洞制御研究室の半沢麻雄技官、馬場滋夫技官、小松行夫技官、唐沢敏夫技官、細江信幸技官、山田建技官には計画

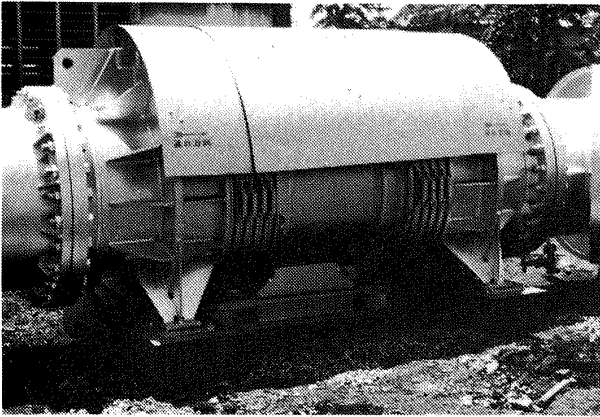


図 5 1 ダブルヒンジ型金属製伸縮継手 (Exp5) の写真

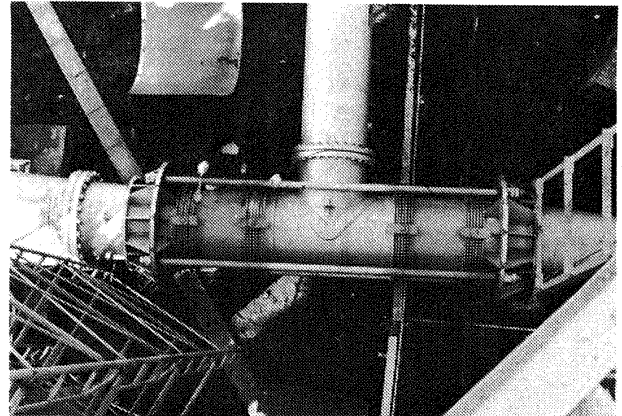


図 5 4 ユニバーサル型金属製伸縮継手 (Exp3) の写真

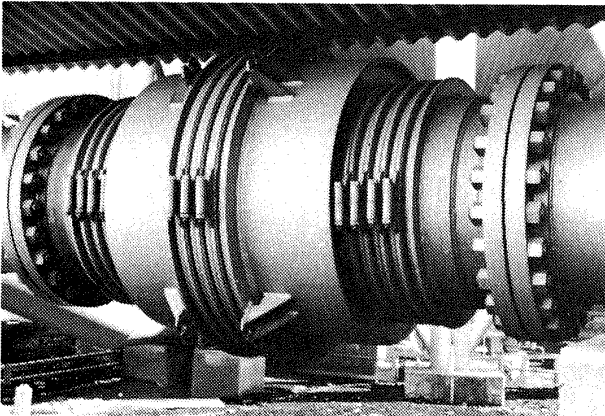


図 5 2 バランス型金属製伸縮継手 (Exp8) の写真

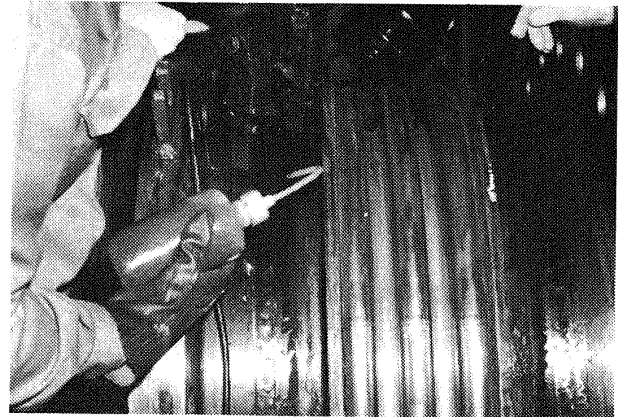


図 5 5 自由型金属製伸縮継手 Exp4 のマグナー検査

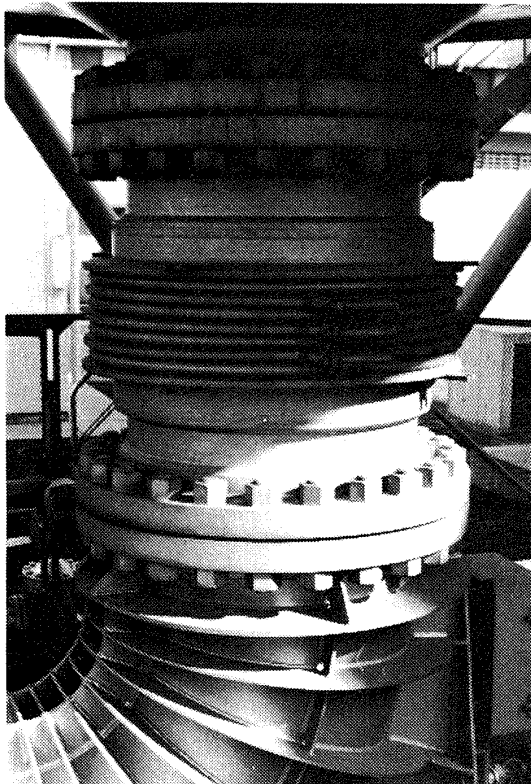


図 5 3 自由型金属製伸縮継手 (Exp10) の写真



図 5 6 金属製伸縮継手 Exp5 及び Exp6 (右端) の開放検査

から開放点検にいたるまで多大な御協力にあずかった。さらに、東洋螺旋管工業株式会社、寺田賢英課長には伸縮継手の製作や取付けに際して御尽力をいただきました。ここに皆様に厚く感謝の意を表します。

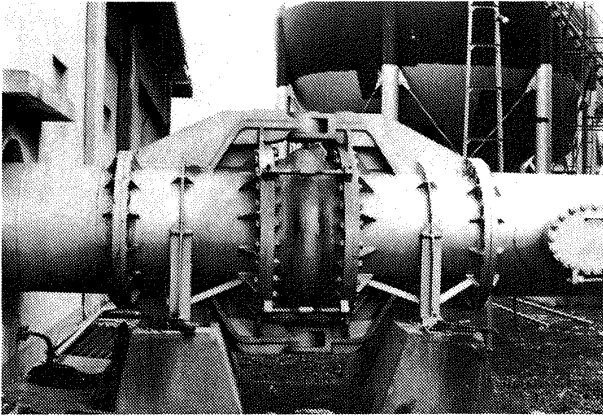


図57 Exp6の旧ゴム製伸縮継手

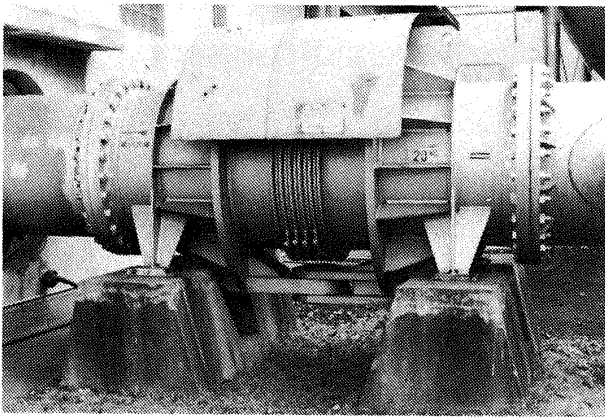


図58 Exp6の新金属製伸縮継手

## 9. 参考文献

1. SABIN CROCKER, M.E. Piping Handbook Revised 4th Ed. McGRAW-HILL. 改訂5版 1973
2. F. J. FEELY, JR., and W. M. GORYL; Stress Studies on Piping Expansion Bellows, Journal of Applied Mechanics, 135-141 (1950)
3. R. A. CLARK; On The Theory of Thin Elastic Toroidal Shells, Journal of Mathematics and Physics Vo. 29 (1950)
4. THE M. W. KELLOG COMPANY, 2nd Ed. Design of Piping System
5. STANDARDS OF THE EXPANSION JOINT MANUFACTURERS ASSOCIATION, INC. (E.J.M.A.)

ほかに、日本機械学会：機械工学便覧第5版

JIS G2352-1973 「伸縮管継手」

JIS G4305-1972 「冷間圧延ステンレス鋼板」

高圧ガスの配管に関する基準 高圧ガス保安協会

---

## 航空宇宙技術研究所資料 478 号

昭和57年10月発行

発行所 航空宇宙技術研究所  
東京都調布市深大寺町 1880  
電話武蔵野三鷹(0422)47-5911(大代表)〒182  
印刷所 株式会社実業公報社  
東京都千代田区九段南4-2-12

---

