

# 低剛性荷重変換器の開発に関する基礎的研究<sup>†</sup>

宮下 秀樹\* 曹 西\*\*

## BASIC RESEARCH TO DEVELOP A LOW-RIGIDITY LOAD TRANSDUCER

Hideki MIYASHITA\* Xi CAO\*\*

A low-rigidity load transducer (LRLT) is developed. A laminated plate consisting of rubber and metal plates is designed as primary converter to sense and transduce load into strain. The load can be estimated from the strain measurements of the middle metal plate in the LRLT. A series of basic experiment results reveal that the strain of the metal plate is influenced by the hydrostatic pressure behavior of the sideward expansion pressure acting on the edge of the laminated rubbers, but rarely influenced by rubber compressive strain non-linearity. The strain is linear and reversible. The sideward pressure shows a hysteresis according to stress routes of loading and unloading, with the variation of rubber-type Poisson's ratio, which has about 2% effect on LRLT output. Under normal temperature condition, 2% creep caused by rubber's viscous-elastic property should be taken into account for LRLT output. It is desired to use LRLT under static or sluggish loading condition to reduce the loss of measurement accuracy due to creep.

**Key Words :** low-rigidity load transducer (LRLT), laminated rubber, rubber-type Poisson ratio, creep and visco-elastic property

### 1. はじめに

力を直接計することは難しく種々の工夫が必要である。いわゆる力計は、力の作用を受けて変形した弾性体のひずみを測定して、作用した力の量を求めるものである。この場合に、作用する力を直接感受するものが、起歪体と称される弾性体素子である。この起歪体のひずみを測定するために、抵抗線、半導体などを接着剤で貼り付け、抵抗の変化を電気的に測定して力を求めている。このように、ある力学量を測定する場合、入力である物理量をそれとは異なる種類の物理量に変換して計測することが多い。入力物理量を弾性体のひずみに変換する起歪体のような部分を一次変換機構といい、ひずみを電気抵抗の変化に変換するひずみゲージのようなものを二次変換機構と称す。この物理量の変換機構を有する測定器を変換器と称し、入力物理量を力としたものを荷重変換器という。したがって、ある力学量を測定する場合には、測定目的と測定対象の環境に適合した物理量の変換技術が必要となる。特に一次変換機構は、入力側の物理現象と直接係わる部分であることから、計測で被測定物の状態を乱さない変換技術の採用が必要となる<sup>1)</sup>。

また、ひずみゲージ式荷重変換器は、出力電圧を大きくすると分解能を増すことができることから、受感部断面積を小さくして発生ひずみを大きくするものが多く、荷重は点として支持される場合が多い。形状や質量が大きな荷重体の荷重を計測する場合には、荷重体の支持が不安定となる危険性があり、受圧部を面構造として被測定物である荷重体の支持の安定を図ることに合理性がある。著者らは、金属板とゴム板からなる積層板を起歪体素子とした、剛性の低い面的な支持機構を有する荷重変換器（以下、低剛性荷重変換器<sup>2)</sup>または、LRLTという）を考案し、橋梁の支承反力を計測する荷重検知機構付加型ゴム支承<sup>3)</sup>や、土の圧力を測定する土中土圧計<sup>4)</sup>の開発を行っている。ここに、低剛性荷重変換器は、起歪体の一部にゴム材料を使用していることから、ゴム物性が荷重変換結果に与える影響を評価する必要があり、7種類の荷重変換器を試作して、基本的な動作特性を確認した。本論文では、低剛性荷重変換器について、最初に荷重検知原理を示した後、基礎実験より得られた変換器出力の特性を示す。つづいて今回試作した低剛性荷重変換器の長期クリープ特性に考察を加え、本変換器の実用性を評価する。

### 2. 低剛性荷重変換器の荷重検知機構

#### 2.1 低剛性荷重変換器の構造

低剛性荷重変換器は、ひずみゲージを貼布した中間金属板（以下、受圧板という）を積層の中心に置き、

<sup>†</sup> 土木学会第58回年次学術講演会で一部発表

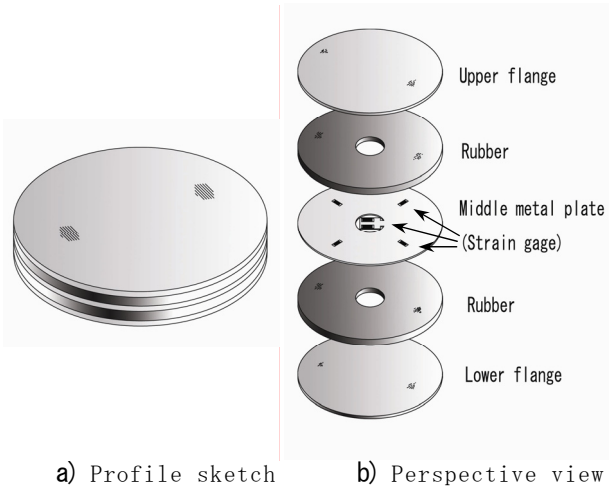
\*株式会社守谷商会 技術研究室 長野市南千歳町878番地

\*\*信州大学工学部土木工学科 長野市若里4-17-1

\*MORIYA CORPORATION, Construction Engineering Research Laboratory

\*\*Shinshu University, Faculty of Engineering

(Received September 5, 2008)



a) Profile sketch      b) Perspective view

Fig. 1 An embodiment of LRLT

その上下にゴム板を接着したものに、剛性の大きい鋼製フランジを最外縁に接着した構造を有する荷重変換器である。積層数に制約はないが、受圧板を積層の中心として、上下に対称となる積層構成が望ましく、平面形状は円形が基本となる。その概観をFig. 1に示す<sup>2)</sup>。

## 2.2 低剛性荷重変換器の荷重検知機構<sup>3),5)</sup>

ゴム材料は非圧縮性を有し、ポアソン比  $\nu$  は0.5に非常に近い値を示す。積層ゴムのように上下面が拘束された円柱状のゴムブロックを、上下方向から一軸圧縮すると、軸方向に収縮した体積に見合う側方膨出を生じ、体積が変化しない。ゴムを上下面の鋼板で拘束した場合の側方膨出部の変形は、拘束のない場合のものとは異なり、Fig. 2のようになる。弾性論に従えば、ゴム層内の圧力  $p$  の分布を (1) 式のような放物線で表すことができる。

$$p = 2 \left( 1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \sigma_c \quad (1)$$

$$\sigma_c = \left( 1 + \frac{R^2}{2t_R^2} \right) E_0 \cdot \varepsilon = (1 + 2S_1^2) E_0 \cdot \varepsilon \quad (2)$$

ここに  $\sigma_c$ : ゴムの平均支圧応力度

$$S_1: 1 \text{ 次形状係数} = \frac{\text{載荷面積}}{\text{自由表面積}} = \frac{R}{2t_R} = \frac{D}{4t_R}$$

$$E_0: \text{ゴムの縦弾性率} = 2(1 + \nu) \cdot G$$

$$\nu: \text{ゴムのポアソン比} \approx 0.5, \quad D: \text{直径}$$

$$G: \text{せん断弾性係数}, \quad R: \text{半径} = D/2$$

$$\varepsilon: \text{ゴムの圧縮ひずみ}, \quad t_R: \text{ゴム板厚}$$

次に、Fig. 3のような中心孔がない受圧板を、積層の中間に挟み込んだ場合の応力を求める。受圧板に生じる応力  $\sigma_r, \sigma_\theta, \sigma_z$  は、(3) 式で与えられる。このように積層板に一軸圧縮力が作用すると、受圧板には (3) 式に示した応力が発生する。これは、軸方向の圧縮力の大き

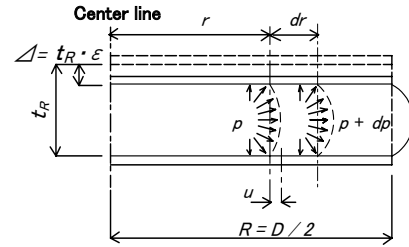


Fig. 2 Lateral evagation of laminated rubber<sup>5)</sup>

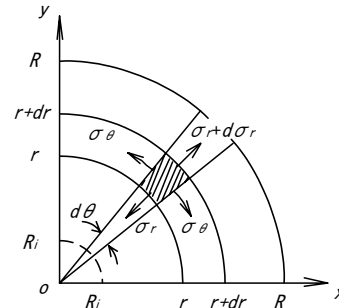


Fig. 3 Stress state in middle metal plate<sup>5)</sup>

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_c \frac{3 + \nu_s}{2} \frac{t_R}{t_s} \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \\ \sigma_\theta &= \sigma_c \frac{3 + \nu_s}{2} \frac{t_R}{t_s} \left\{ 1 - \frac{1 + 3\nu_s}{3 + \nu_s} \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \\ \sigma_z &= -2\sigma_c \left\{ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right\} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに  $\nu_s$ : 受圧板材料のポアソン比  
 $t_s$ : 受圧板の板厚

小を、受圧板のひずみで検知できることを意味するものである。本荷重検知機構は、この受圧板のひずみを、受圧板に貼り付けたひずみゲージで計測して、軸圧縮力を検知する荷重変換装置である。

## 3. 起歪体材料の物性について

### 3.1 ゴムのポアソン比と荷重変換原理

低剛性荷重変換器は、起歪体の主要部位にゴムを使用するものである。ゴムは、金属材料のようなエネルギー弾性起因の完全弾性に近い材料とは異なり、工学的に取り扱いがやっかいなエントロピー弾性を有する材料である。ゴムは、外力を取り除いても変形が残る可塑変形性、ひずみの回復が緩慢な弾性余効性や過去の載荷履歴の影響を受けた履歴効果などを有する。このように、完全弾性体とは言い難いゴム材料を主体とした起歪体の力学挙動が、計測の信頼性を担保できるのか検討する必要がある。

低剛性荷重変換器の起歪体は受圧板とゴム板の積層部材からなるが、真の起歪部は受圧板であり、ここで「カー変位」変換<sup>6)</sup>が成される。よって、計測の信頼性

は、受圧板にフック則に従う「応力-ひずみ」関係を有する金属板を使用することで担保できる。ゴム板の機能は、その低弾性と非圧縮性による側方膨出で、作用した力のベクトルを90°変換して金属板に張力を与えるものである。これは「力-力」変換<sup>6)</sup>であり、「応力-ひずみ」関係にHooke則が成立するか否かの問題ではなく、荷重作用による軸方向圧縮力と側方膨出力との間の「力-力」関係が線形かつ可逆であることが重要で、これにより計測の信頼性が担保されることになる。この側方膨出圧は静水圧的な挙動をすることが知られている<sup>7)</sup>。ここで、軸方向圧縮圧と側方膨出圧の比にはゴムのポアソン比が重要な役割を果たす。よって、軸方向圧縮力の載荷過程や環境温度の変化でゴム弾性に変動が生じることでポアソン比が変動すると、変換器としての精度も変動することになる。したがって、その関係を定量的に把握することが重要である。

### 3.2 ゴム弾性とポアソン比の関係

ゴムのポアソン比  $\nu$  は0.5に極めて近い。これはゴムの一つの特徴である。ゴムの弾性率は数多くの工学材料のなかで最も低く、室温域で1~10MPa程度と小さい。それに反してゴムの圧縮率（体積弾性率の逆数）は他と比べて弾性率ほどの差はない。すなわち、ゴムはその伸縮変形に際して体積の変化がなく、かつ弾性率が小さいということで、引き伸ばすのに要する力は非常に小さい。一方、これを圧縮して体積を変化させるにはかなりの力を必要とし、普通の伸縮ではこの変化が伴わない。よって、そのポアソン比  $\nu$  は、0.5に極めて近い値を示す<sup>8)</sup>。(4)式はその関係を示したものである。

$$\nu = -\frac{E_0 \cdot x}{6} + \frac{1}{2} = -\frac{3 \times 10^6 \times 54 \times 10^{-11}}{6} + 0.5 \cong 0.5 \quad (4)$$

ここに  $E_0$ : ゴム弾性率 Pa

$x$ : ゴムの圧縮率 Pa<sup>-1</sup>

ゴムのような高分子鎖の挙動に起因する弾性では、一般的にエネルギー弾性とエントロピー弾性の二つの弾性が同時に発揮される。エネルギー弾性とは、主鎖分子中の原子価角、原子間隔または、分子自身の変形、あるいは分子相互間の変位に基づいて生じる弾性であり、内部エネルギーに対応する弾性である<sup>9)</sup>。エントロピー弾性とは、高分子鎖が最も安定な屈曲状態を取ろうとして発現する弾性である。この二つの弾性の関係は、(5)式で示される。

$$k = \left(\frac{\partial U}{\partial \ell}\right)_T - T \cdot \left(\frac{\partial S}{\partial \ell}\right)_T = \left(\frac{\partial U}{\partial \ell}\right)_T + T \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial T}\right)_\ell \quad (5)$$

ここに  $k$ : 弾性力  $U$ : 内部エネルギー  $S$ : エントロピー  $T$ : 温度  $\ell$ : 部材長

温度が非常に高いか、または荷重作用による変形が大きい時は、(5)式において右辺第1項が $(\partial U/\partial \ell)_T \approx 0$ となり、第2項が一定値となる。したがって、

$$k = T \cdot \left(\frac{\partial k}{\partial T}\right)_\ell = T \cdot \beta \quad (6)$$

となり、これが一般的なゴムのイメージである。ここで、ゴム材料の温度が非常に低い、または荷重作用による変形が小さい時は、(5)式において右辺第1項は一定値となる。そして第2項は、 $(\partial k/\partial T)_\ell \approx 0$ と無視でき、(7)式となる<sup>9)</sup>。

$$k = \left(\frac{\partial U}{\partial \ell}\right)_T = \alpha \text{ (一定)} \quad (7)$$

よって、伸縮率が小さい領域では、エネルギー弾性が支配的であり、Hooke則が適用可能な範囲とみなすことができる。ここで、一般的なゴム工業用品において材料非線形性の取り扱いが必要なひずみ領域は、10%を超える場合と考えられている<sup>10)</sup>。

このようなことから、低剛性荷重変換器に生じるゴム圧縮ひずみを10%以内に限定することにより、ゴム弾性の非線形性の影響は排除できると考えられるが、環境温度の変動によるゴム弾性の変動は無視できない。また、ゴムの粘弾性挙動も経時的な弾性の変動と捉えらると、起歪体を構成するゴム板の弾性は常に変化していると考えなければならない。ここで、使用ゴム板の弾性率が $3.0 \times 10^6$  Pa から $1.5 \times 10^6$  Pa に変動した場合のポアソン比を、(4)式を用いて算出してみると、0.499730から0.499865と変化するにすぎない。これは、弾性率が-50%変動したのに対して、ポアソン比の変化は+0.027%ということになる。つまり、ゴム弾性が何らかの要因で変動しても、ポアソン比に有意な変動は見られないことになる。

これらより、ゴムの粘弾性による見かけの弾性の変動や温度依存による弾性の変動が生じていても、それはゴムの圧縮率に比して極わずかである。よって、ポアソン比の変動として現れず、受圧板に作用する膨出圧は静水圧的に作用し、一次荷重変換器としての出力変動に与える影響が小さいものと考えられる。

ただし、ゴムのポアソン比はゴムの大変形の過程で変動するといわれている<sup>11),12)</sup>。ゴムのポアソン比は、伸張もしくは圧縮途中の各瞬間の微小変形を考える場合は $\nu \cong 0.5$ で正しいが、変形が大きくなるに従い0.5から徐々に減少する。その値を関口ら<sup>11)</sup>は見掛けのポアソン比と称し、加硫天然ゴムのものとして(8)式を示した。

$$\log_{10} \nu_{ap} = 0.0204\lambda^{-2} - 0.2618\lambda - 0.0628 \quad (8)$$

ここに  $\lambda$ : 伸張比または圧縮比

吉田<sup>12)</sup> は、 $\lambda$  が $-0.5 \sim 2.0$ の範囲におけるポアソン比を(9)式で示し、これをゴム状ポアソン比と称している。

$$(\nu_R) = \frac{1-1/\sqrt{\lambda}}{\lambda-1} \quad (9)$$

いずれの場合も、変形の進行に伴いポアソン比が非線形的に変化することを示していて、低剛性荷重変換器の出力に影響を及ぼす恐れがある。ただし、起歪体の $\lambda$ を $-0.1$  (圧縮ひずみ10%) 以下とした場合のポアソン比の変動は限定された範囲内にあり、計測精度に与える影響は少ないものと考えられる。

#### 4. 低剛性荷重変換器の試作

低剛性荷重変換器の一次変換機構を構成する、接着剤、ゴム物性、ゴム形状が変換器出力に与える影響を確認するために、Table 1~3に示す組合せにより7種類の変換器を試作し载荷試験を行った<sup>13)</sup>。Table 1のグループでは、接着剤の適否を確認する目的で、使用ゴムをクロロプレンゴム65°  $t_R=5\text{mm}$ に固定して、3種類の接着剤を用いて変換器を試作した。Table 2のグループでは、接着剤を加硫接着、1次形状係数  $S_1=4$ 程度に固定し、3種類の弾性の異なるゴムを使用した。Table 3のグループでは、接着剤を加硫接着、使用ゴムをクロロプレンゴム80° に固定し、ゴム厚の異なる3種類の変換器を試作した。試作変換器の概観をPhoto 1に示す。受圧板は、Fig. 4に示す厚さ0.2 mmのアルミ板(JIS A1050 H24)で、外径が120 mmである。中心には、配線用に6mmの穴を開けてある。ゴム板は、外径120mm、内径

40mmのものを受圧板上下に積層した。中心孔がある場合の受圧板ひずみの計測位置は、最大ひずみを示す1/2半径付近が適するが、試作器では、ゴム板の中空部でゴムのせん断ひずみの影響を直接受けない受圧板中央部のひずみを計測した。ゲージ長3mm、幅2 mm、抵抗値350  $\Omega$ 、線膨張係数 $23 \times 10^6$ の箔ゲージを、半径10 mmの中心点对称位置に上下面それぞれ4枚を貼布した。ひずみゲージの接着は、1液タイプのフェノール接着剤を使用し、ゴム板と金属板との接着はTable 1で示した3種類とした。また、ひずみの測定は、データロガーを用いた3線式結線法によった。

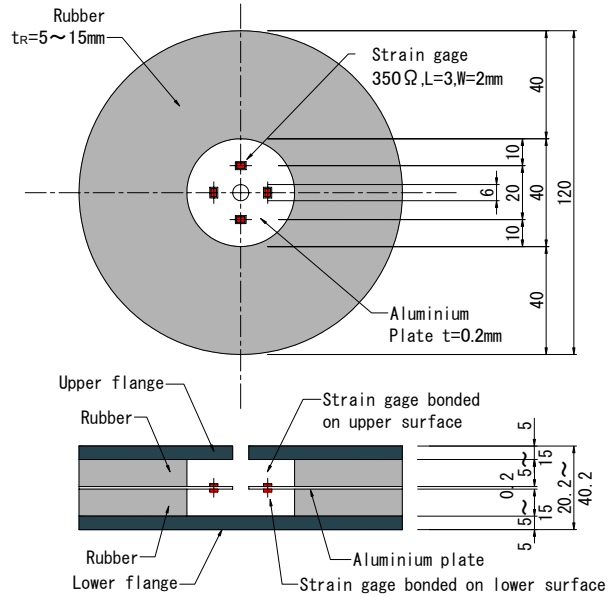


Fig. 4 Sketch of load testing device

Table 1 Prototype LRLTs for basic experiments to investigate the effects of adhesives<sup>13)</sup>

LRLT code	The used adhesives		Rubber parameters			Rubber dimension	
	Material	notes	Material	Hardness $H_S$	Shear modulus $E$	Thickness $t_R$	First shape factor $S_1$
2P-1	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber65°	64	1.72 (N/mm <sup>2</sup> )	2@5.22(mm)	3.83
2P-2	Epoxy adhesive	Nagase Chemtex AW-106	Chloroprene rubber65°	64	1.72 (N/mm <sup>2</sup> )	2@5.49(mm)	3.62
2P-3	Elastic curing type adhesives	Cemedine EP-001	Chloroprene rubber65°	64	1.72 (N/mm <sup>2</sup> )	2@5.48(mm)	3.68

Table 2 Prototype LRLTs for basic experiments to investigate the effects of rubber's physical properties<sup>13)</sup>

LRLT code	The used adhesives		Rubber parameters			Rubber dimension	
	Material	notes	Material	Hardness $H_S$	Shear modulus $E$	Thickness $t_R$	First shape factor $S_1$
2P-1	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber65°	64	1.72 (N/mm <sup>2</sup> )	2@5.22(mm)	3.83
2P-4	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Natural rubber65°	67	1.25 (N/mm <sup>2</sup> )	2@4.88(mm)	4.12
2P-5	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber80°	82	3.24 (N/mm <sup>2</sup> )	2@4.97(mm)	4.00

Table 3 Prototype LRLTs for basic experiments to investigate the effects of rubber's first shape factor<sup>13)</sup>

LRLT code	The used adhesives		Rubber parameters			Rubber dimension	
	Material	notes	Material	Hardness $H_S$	Shear modulus $E$	Thickness $t_R$	First shape factor $S_1$
2P-5	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber80°	82	3.24 (N/mm <sup>2</sup> )	2@4.97(mm)	4.00
2P-6	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber80°	82	3.24 (N/mm <sup>2</sup> )	2@10.55(mm)	1.89
2P-7	Vulcanizing adhesive	Metaloc XF-636	Chloroprene rubber80°	82	3.24 (N/mm <sup>2</sup> )	2@15.40(mm)	1.28

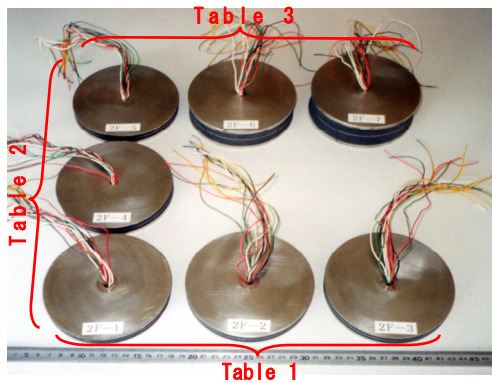


Photo 1 Lineup of prototype LRLTs

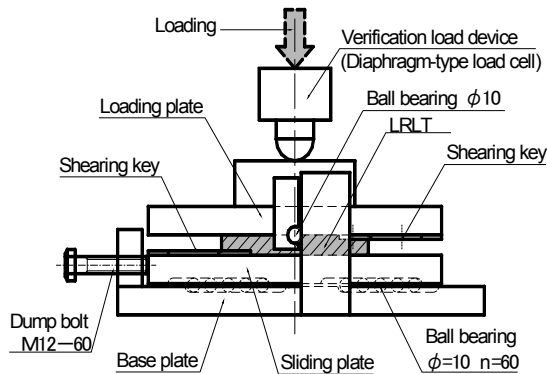


Fig 5 Detail of prototype LRLT

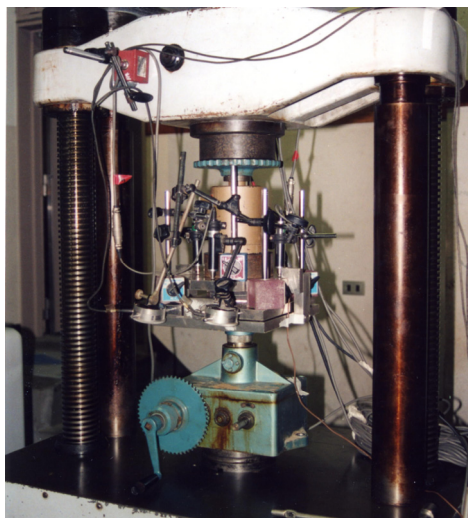


Photo 2 Load testing status

## 5. 基礎実験の方法と低剛性荷重変換器の出力特性

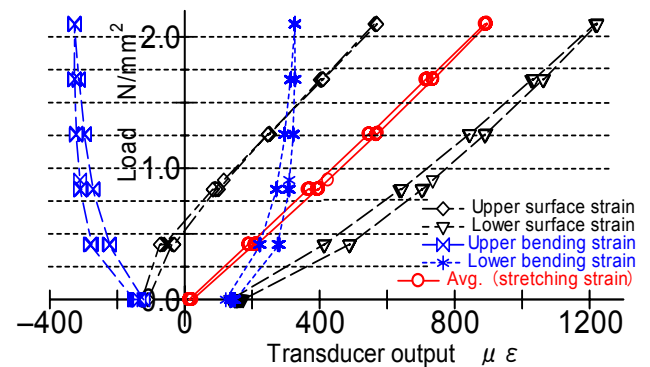
### 5.1 基礎実験の方法

荷重試験装置は、Fig 5に示したものを製作して、軸圧縮力の荷重を行った。試験は室温において行い、その気温は17~25 °Cの範囲にあった。加圧装置は手動スクリージャッキ(50kN)を使用し、ひずみゲージ式ロードセル(50kN)を用いて荷重の計測をした。軸方向圧縮変位は、荷重板上面位置において、精度1/1000 mmのひずみゲージ式変位計4本を使用して計測した。荷重荷重は、最大荷重2.0 N/mm<sup>2</sup>を5段階に

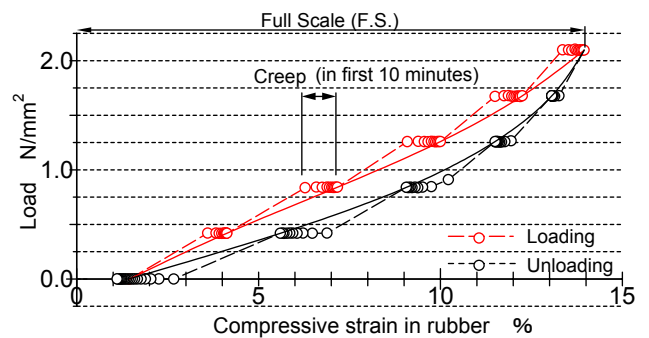
分け、3サイクル載除荷を繰り返した。1段階の荷重保持時間は10分とした。Photo 2に試験状況を示す。

### 5.2 変換器出力の特徴

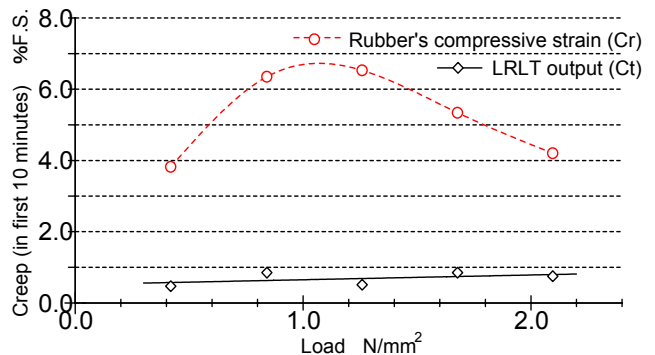
荷重を載荷した場合の変換器出力挙動の例を 2P-7 変換器で示す。Fig 6. a)に出力と荷重の関係を、Fig 6. b)に軸方向圧縮変位をゴム総厚で除したゴム圧縮ひずみと荷重の関係、Fig 6. c)に荷重とゴム圧縮ひずみおよび出力の10分間のクリープ値を示す。クリープ値は、各荷重ステップ10分間の特性値の変動を、最大荷重時の特性値に対する百分率で表し、ゴム圧縮のものを(Cr)、出力のものを(Ct)で示す。載除荷を3サイクル繰り返した試験結果は、1サイクル載荷目の最大出力を1とすると2サイクル載荷目で-1.13%、3サイクル載荷目で-0.71%の出力変動が認められた。ここでは3サイクル載荷時の結果を示し、それを基に考察を加える。



a) Relationships between load and LRLT output



b) Relationships between load and compressive strain in rubber



c) Relationships between load and creep of LRLT output  
Fig 6 Example of LRLT output characteristics (2P-7)

Fig 4 で示した受圧板に貼付けたひずみゲージで計測した実測ひずみ値は、受圧板上下面で大きく異なり、かつ荷重の増減に対し非線形性を示している。この上下面の実測ひずみを平均して曲げ成分を消去したものを、Fig 6. a)中に平均(引張りひずみ)として示した。これを低剛性荷重変換器の出力という。出力は上下面の実測ひずみに対し、非直線性、ヒステリシス、0点移動などの特性が優れている。また、図中に示した上下面の曲げひずみは、実測ひずみより引張り成分を消去したものである。実測ひずみの非線形性、0点移動などの多くは、この曲げ成分であることが分かる。(1)式で示される積層ゴムの圧力は放物線分布となり、ゴム圧縮ひずみも断面内で不均一となることから、受圧板には上下フランジの拘束度に応じた曲げ変形が生じることとなる。特に载荷初期における曲げ挙動が大きいことから、ゴム板および接着剤層の厚さの不均一により生じた製作時の受圧板のゆがみが、曲げ変形の主因と思われる。この曲げひずみの影響を完全に除去するためには、ひずみゲージ貼り付けの位置精度を向上させる必要がある。

つぎに、Fig 6. b)で示した荷重と積層ゴム圧縮ひずみの関係を見ると、大きな非線形性と粘弾性的な挙動が認められる。ゴム圧縮ひずみの挙動に連動し側方膨出ひずみも非線形かつ粘弾的に挙動していると考えられるが、Fig 6. a)で示した変換器の出力の非直線性は、Fig 6. b)で示したゴム圧縮ひずみの各荷重段階最大値を载荷時、除荷時毎に別途回帰演算処理をして求めた2次曲線における非直線性の1/23、出力のヒステリシスは、同1/8と小さく線形かつ可逆的で、ゴムの変形挙動との間に直接的な連動は認められない。さらに、Fig 6. c)に示した荷重と圧縮ひずみの10分間クリープ挙動の関係から、ゴム圧縮の粘弾性的挙動は、変換器出力の挙動と相関が低いことが分かる。変換器の出力クリープ挙動の多くは、受圧板引張りひずみのクリープもしくはひずみ計測技術に付随する要因であると思われる。

ゴム圧縮クリープは、载荷過程中間部で最大値となっている。これは他の6種の試作器も同様の傾向を示しているが、いずれの出力のクリープにもこの傾向は認められない。ゴム圧縮クリープが载荷過程中間部で最大値を示す理由は、上下フランジで拘束された積層ゴムのレオロジー特性の一つと考えられるが、今後の検証が必要である。以上のことから、今回試作器で確認したゴム圧縮ひずみ(10%程度以下)レベルにおいては、変換器の出力は、積層ゴムの側方膨出の静水圧的挙動に支配されており、ゴムの非線形弾性的および粘弾性的な挙動の影響は比較的小さいといえる。

### 5.3 接着剤の選定

接着剤が変換器出力特性に及ぼす影響を調べるために、Table 1に示した3種類の接着剤を使用して変換器(2P-1, 2P-2, 2P-3)を製作した。接着剤の種別と出力の関係をFig 7に

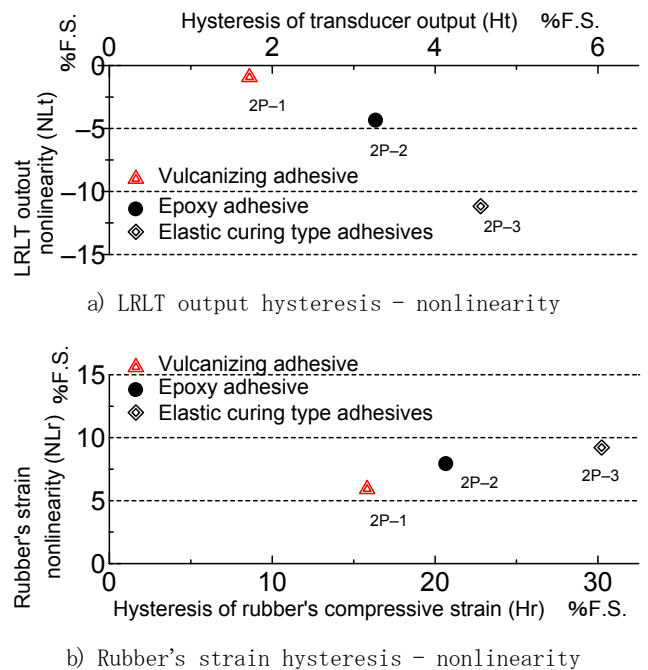
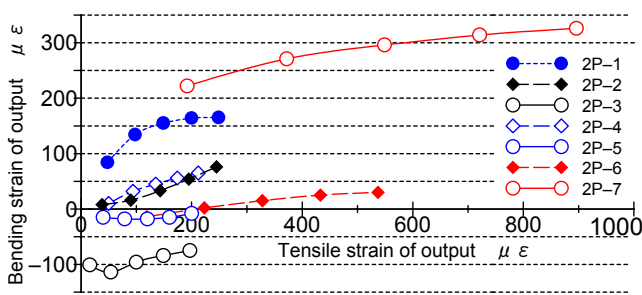


Fig 7 Relationships between adhesive bonds and output characteristics

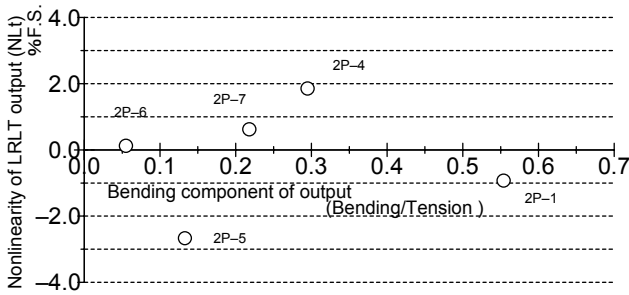
示す。Fig 7. a)は、変換器出力のヒステリシスと非直線性との関係、Fig 7. b)がゴム圧縮ひずみのヒステリシスと非直線性との関係を示している。変換器出力、ゴム圧縮の双方で、非線形性、ヒステリシスともに加硫接着剤が優れる。ここに非直線性は、計測値を载荷時、除荷時毎に2次曲線に回帰演算処理をしたものと、0点と最大値とを結ぶ直線との最大偏差を最大値に対する百分率で表わし、出力のものを(NLt)、ゴム圧縮のものを(NLr)で示す。ヒステリシスは、载荷時、除荷時の2次回帰曲線の最大差を最大値に対する百分率で表し、出力のものを(Ht)、ゴム圧縮のものを(Hr)で示す。

### 5.4 曲げひずみの影響

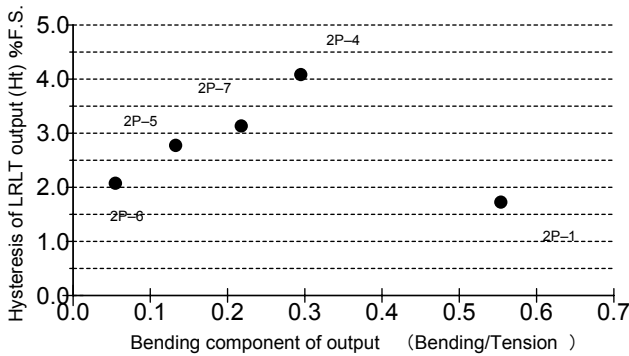
Fig 8. a)に、出力の引張り成分と曲げ成分の関係を示す。測定された曲げひずみは、各変換器で異なる値を示し、ゴム材質、変換器寸法などの特性との相関は見られない。Fig 8. b)~e)に出力の曲げと引張りの成分比が出力特性に与える影響を示す。ここにクリープは、载荷ステップ中の最大値を図中に示した。出力の0点移動は、除荷時の10分後の計測値を最大荷重時の10分値に対する百分率で表し(Zt)で示し、ゴムの残留ひずみを(Zr)で示した。出力の曲げ成分比と、出力の非直線性およびヒステリシスには、相関が認められないが、出力のクリープおよび0点移動との関係に相関が認められる。このとき、出力の曲げ成分比と、ゴム圧縮ひずみのクリープ、ならびにゴムの残留ひずみの間の相関は小さい。ゴム圧縮変形の断面内の不均一分布により受圧板には曲げひずみが生じる。これに、ゴム板および接着剤層の厚さの不均一性や積層材料の寸法精度のばらつきに起因する曲げが加わるが、ゴムの弾性が大きいほど、また1次形状係数が大きく積層した金属板の拘束が大きいほど曲げ成分は減少する。拘束度の増加で曲げ成分が小さくなる



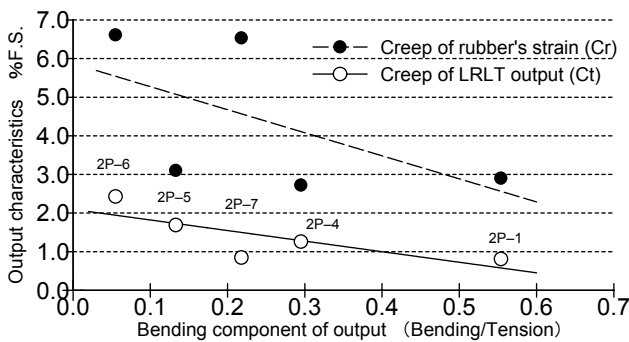
a) Tensile strain of output - bending strain of output



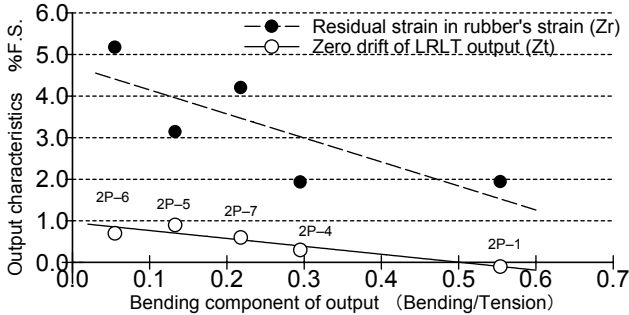
b) Bending component of output - output nonlinearity



c) Bending component of output - output hysteresis



d) Bending component of output - output creep



e) Bending component of output - zero drift of LRLT output

Fig. 8 Relationships between bending component of output and output characteristics

と、ゴムの粘弾性的な性質が顕在化して応力伝達に遅れが生じ、出力のクリープならびに0点移動が大きくなる傾向にある。このように、低剛性荷重変換器の出力クリープには、ゴムの粘弾性に起因する応答の遅れが含まれていると考えられるので、その使用を比較的荷重変動の緩慢な荷重計測に限定するのが良い。

## 6. 起歪体物性が低剛性荷重変換器出力に及ぼす影響

### 6.1 ゴム弾性の影響

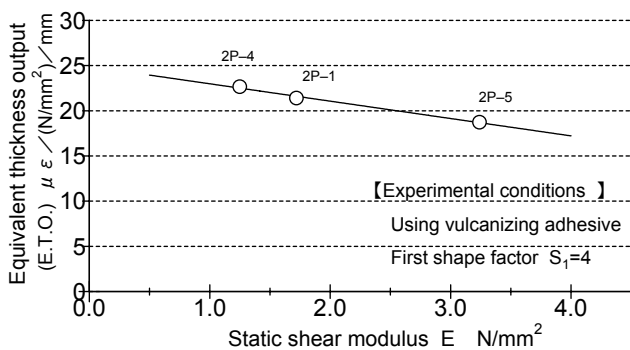
変換器出力におけるゴム弾性の影響を検証するために、Table 2に示す弾性が異なる3種類のゴムを用いて変換器(2P-1, 2P-4, 2P-5)を製作し、载荷試験を行った。変換器の1次形状係数は $S_1=4$ とし、ゴムと金属板の接着は加硫接着とした。Fig. 9. a)に静的せん断弾性率(E)と変換器出力の関係を示す。ゴムの板厚が各変換器で若干異なるので、出力をゴム総厚で除したものを等厚換算出力(E.T.O.)として縦軸に示した。この出力は静的せん断弾性率に負の相関がある。側方膨出に伴うゴム局部せん断ひずみ $\epsilon_c$ は(10)式で与えられるが、せん断弾性率の増加に伴いゴムの局部せん断ひずみは減少する。これと、Fig. 9. a)の結果は一致している。

$$\epsilon_c = 6 \cdot S_1 \cdot \frac{\sigma_c}{E_0(1 + 2S_1^2)} \quad (10)$$

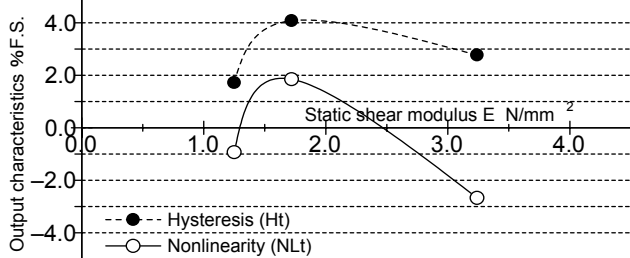
ここに  $E_0 \cong 3 \cdot G$

弾性理論(3)式に従うと、受圧板引張ひずみは、ポアソン比が一定であれば平均支圧応力度とゴム厚に比例し、ゴム弾性の影響を受けないと考えられたが、実際にはゴム弾性の変動の影響を受けることがわかった。よって(3)式は、実現象を十分に表現していないことになる。(3)式には、ゴムは完全非圧縮体、膨出変形は微小、1次形状係数が大きい、ゴム板が薄いとした仮定が背景にあり、これと試作器の実態に差異があることが、弾性理論式と試験値の相違の一因となっているものと考えられる。故に、5.2節で示したようにゴム圧縮ひずみが小さい範囲ではゴム弾性の非線形の影響が小さいが、環境温度の変化でゴム弾性が変動する場合には、計測中に出力が変動することになり、弾性変動に配慮が必要である。これには、変換器出力の温度校正試験を実施して、環境温度に対する演算的な補正が必要になる。

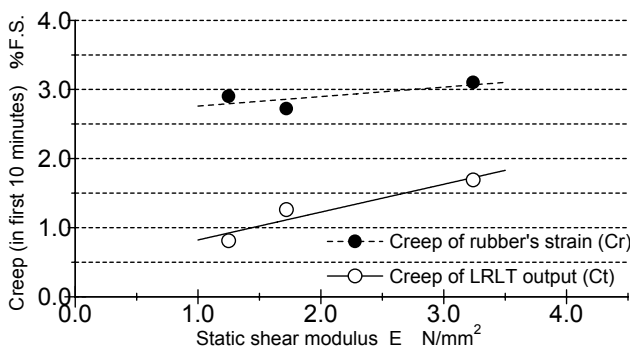
ゴムの静的せん断弾性率と変換器の出力特性の関係をFig. 9. b), c)に示す。出力の非直線性、ヒステリシスともにゴム弾性との相関は認められない。クリープ量は、出力およびゴム圧縮ひずみの双方でゴム弾性に比例して増加する傾向がある。ゴムの静的せん断弾性率と除荷後の変換器出力0点移動およびゴムの残留圧縮ひずみの関係をFig. 9. d)に示す。出力の0点移動、ゴムの残留圧縮ひずみともにゴム弾性との相関が強い。よって、これらの特性を改善するには、弾性の低いゴム材を積層するのが良い。



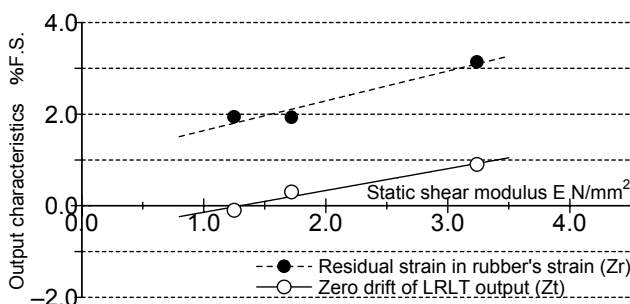
a) Rubber's shear modulus - equivalent thickness output



b) Rubber's shear modulus - hysteresis and nonlinearity of output



c) Rubber's shear modulus - output creep

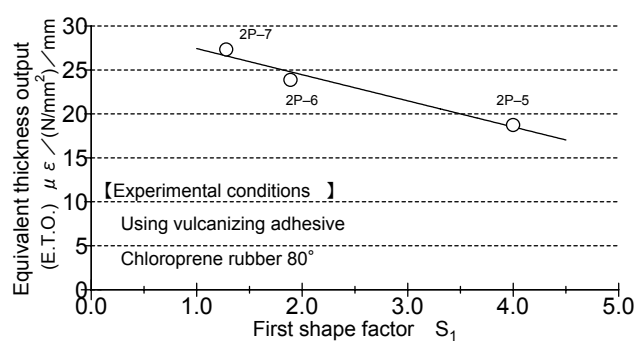


d) Rubber's shear modulus - zero drift of LRLT output

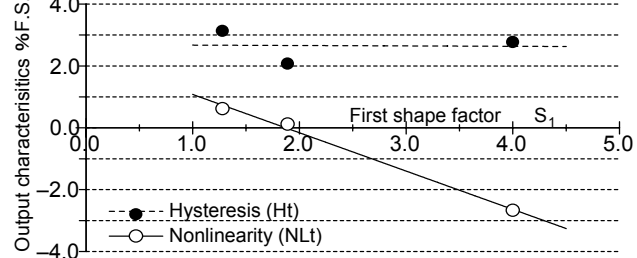
Fig. 9 Relationships between rubber's static shear modulus and output characteristics

## 6.2 寸法効果

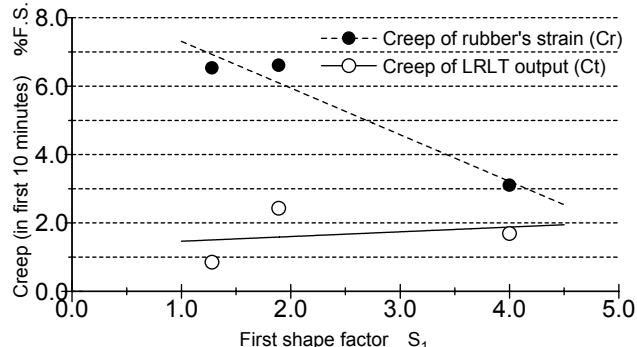
積層寸法比と変換器出力との関係を検証するために、1次形状係数の異なる変換器(2P-5, 2P-6, 2P-7)の载荷試験結果をFig. 10に示す。Fig. 10. a)に、1次形状係数と変換器の出力との関係を示す。等厚換算出力は、1次形状係数に負の相関がある。このことは、(10)式が示すものと同じである。1次形状係数と変換器の出力特性の関係をFig. 10. b)~d)に示す。出力の非直線性は1次形状係数と負の相関があるが、ヒステ



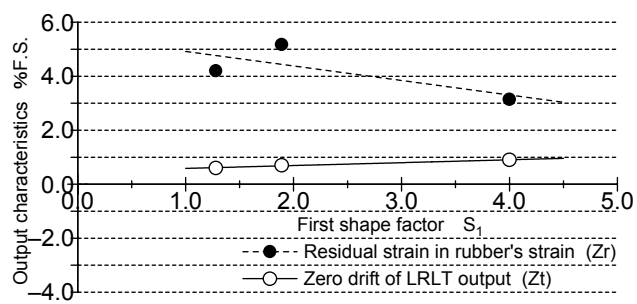
a) First shape factor - equivalent thickness output



b) First shape factor - hysteresis and nonlinearity of output



c) First shape factor - output creep



d) First shape factor - zero drift of LRLT output

Fig. 10 Relationships between first shape factor and output characteristics

リスと形状係数との相関は認められない。形状係数とゴム圧縮ひずみのクリープおよび残留ひずみは負の相関をとるが、出力のクリープ量および0点移動との関係は比例する。変換器出力の特性を改善するには、扁平な積層構造を避ける必要があり、1次形状係数を小さくすることが望ましい。

## 6.3 有限変形中のポアソン比の変動

5.2節に、変換器出力のヒステリシスおよび非直線性は、



ゴム圧縮ひずみのものと比べて小さく、ゴムの変形挙動との間に直接的な連動は認められないことを示したが、ここでは、3.2節で示した、大変形下で生じるゴム状ポアソン比の変動が、変換器出力のヒステリシスに与える影響について検証を行なう。

2P-7変換器の3サイクル载荷時の圧縮変形量をもとに、(8)式および(9)式で示したゴム状ポアソン比を求めたものが、Table 4の $\nu_{ap}$ および $(\nu_R)$ である。弾性論に従えば、拘束条件を無視した場合の側圧 $\sigma_3$ は、軸方向圧力 $\sigma_1$ とポアソン比を用いて(11)式で算出できる。

$$\sigma_3 = \sigma_1 \cdot K = \sigma_1 \cdot \frac{\nu}{1-\nu} \quad (11)$$

このポアソン比 $\nu$ に $\nu_{ap}$ および $(\nu_R)$ を代入したものが、Table 4の $\sigma_{3(\nu_{ap})}$ および $\sigma_{3(\nu_R)}$ である。このゴム状ポアソン比の変動が側方膨出圧の変動につながるものとする、その応答である受圧板ひずみも変化する。この応答のヒステリシスは2%程度となり、Fig. 6.a)に示した変換器出力のヒステリシスに近いものとなる。

以上のことより载荷により、積層ゴム内に静水圧的に生じた側方膨出圧はゴム状ポアソン比の変動により、載・除荷の応力経路に応じたヒステリシスを示す。出力ヒステリシスの要因の一つに、このゴム状ポアソン比の変動の影響があるものと考えられる。

Table 4 The calculated lateral pressure depending on rubber-type Poisson ratio

$\sigma_1$	$\lambda$	$\nu_{ap}$	$\sigma_{3(\nu_{ap})}$	$(\nu_R)$	$\sigma_{3(\nu_R)}$
0.000	1.0000	0.4964	0.0000	0.5000	0.0000
0.420	0.9732	0.5058	0.4299	0.5103	0.4377
0.842	0.9428	0.5168	0.9005	0.5225	0.9214
1.260	0.9145	0.5274	1.4061	0.5345	1.4468
1.679	0.8920	0.5362	1.9411	0.5445	2.0071
2.097	0.8750	0.5430	2.4916	0.5524	2.5880
1.679	0.8839	0.5394	1.9662	0.5482	2.0372
1.267	0.8995	0.5332	1.4472	0.5411	1.4940
0.840	0.9239	0.5239	0.9243	0.5305	0.9491
0.420	0.9585	0.5111	0.4391	0.5161	0.4479
0.000	1.0003	0.4963	0.0000	0.4999	0.0000

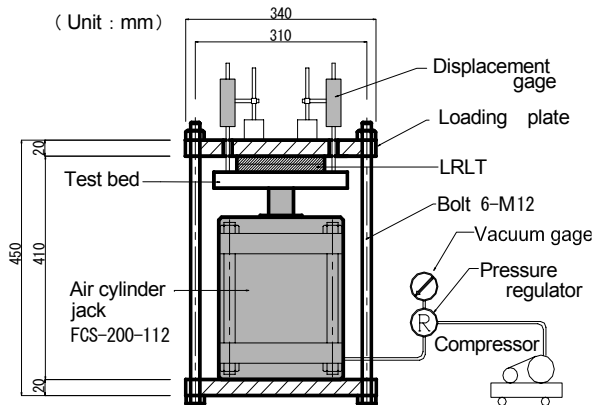


Fig. 11 Loading device and set-up for long-term creep tests

## 7. 長期クリープに対する追加検討

前節で示したように低剛性荷重変換器の起歪体には、ゴムの粘弾性に起因した、変換器出力の応答の遅れが顕在する。これが出力の長期安定に与える影響を見極めることが重要である。ここでは、ゴム材料の粘弾性特性が変換器出力に与える影響について、長期クリープ試験結果とFEM解析結果により考察する。

### 7.1 長期クリープ試験概要

製作した荷重変換器の長期クリープ特性を検証するため、Fig. 11で示す载荷装置に装着した変換器(2P-7)を、恒温恒湿装置内にセットし温度負荷と荷重負荷を与えた。载荷装置は温度による熱伸縮の影響で载荷荷重が変動しないようにするため、空気シリンダージャッキを使用し、恒温恒湿装置外に設置したレギュレータで空気圧を一定にコントロールした。これにより恒温恒湿装置内において任意の温度環境で、長期の荷重载荷を可能とした。空気シリンダージャッキのシリンダー有効面積は29,600 mm<sup>2</sup>で、変換器の総面積は9,726 mm<sup>2</sup>であるので、シリンダー内の空気圧を0.493 N/mm<sup>2</sup>にコントロールして、変換器に荷重1.50 N/mm<sup>2</sup>を载荷した。試験温度は、293K、313Kおよび333Kとし、各々の温度で前記荷重を504 hr (21日) 以上連続载荷した。载荷中の変換器の鉛直変位を、载荷台と载荷板の間隔をひずみゲージ式変位計(精度1/1000mm)で計測し圧縮変位とした。

Fig. 12に、ゴム圧縮変位量と受圧板引張ひずみのクリープ状況を示す。ゴムの圧縮変位量は、ゴムの弾性の温度依存性に支配され、高温になるに従い大きくなる。このクリープ量は、2次(定常)クリープ速度がほぼ同程度であるが、1次(遷移)クリープ速度は低温時の方が大きくなっている。一方、受圧板引張ひずみは、1次・2次クリープ共に、高温になるに従いクリープ速度の増大が顕著である。よって受圧板引張ひずみのクリープ、すなわち変換器の出力クリープ(以下、出力のクリープと称す)と、ゴム圧縮ひずみのクリープ(以下、ゴムのクリープと称す)の間の相関は小さいと判断する。



Photo 3 A view of long-term creep testing

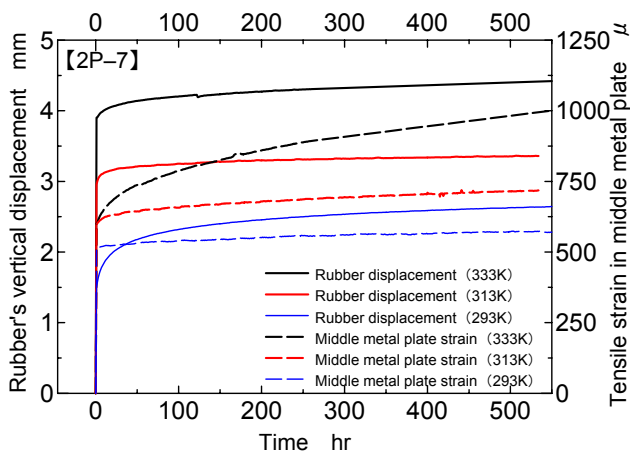


Fig. 12 Creep of rubber's compressive strain and LRLT output

## 7.2 FEMクリープ解析による検証

7.1により出力のクリープとゴムのクリープとの間の相関は低いことがわかったが、なぜ大きな出力クリープが発生するのか見極める必要がある。よって長期クリープ試験を補足する目的で、MSC/NASTRAN(Ver.4)を使用して3次元FEM解析を実施した。Fig. 13に解析モデル図を、Table 5, 6に解析に使用した物性値を示す。ここに全ての要素をソリッド弾性体要素でモデル化し、ゴム物性のみクリープ特性を付与した。解析は、NASTRANのMaxwell-kelvinレオロジーモデルに基づく非線形解析を実施した<sup>19)</sup>。ゴムのクリープ特性は、Fig. 12で示した長期クリープ試験で得られたゴム圧縮特性を、クリープ速度を応力のべき数で表現したNorton則に準拠した(12)式で近似した。その値を示したものがTable 6である。

$$\varepsilon^c(\sigma, t) = a \cdot \sigma^b \cdot t^d$$

ここに  $\varepsilon^c$ : クリープひずみ  
 $\sigma$ : 作用応力 (12)  
 $t$ : 経過時間  
 $a, b, d$ : 係数

解析荷重は、クリープ試験と同様に、受圧面と垂直な方向に1.50 N/mm<sup>2</sup>を载荷した。その解析結果の一部をFig. 14に示す。この時、ゴムはクリープにより体積変化を生じないものと仮定してポアソン比は一定として解析を実施した。

Fig. 15に変換器の圧縮変位量を示す。図中○印で示したFEM解析値と実線で示した実験値は、ほぼ同一の値を示している。これにより、ゴムのクリープ特性をFEM解析モデルに定量的に反映できたことを確認した。このときの出力変動をFig. 16に示す。出力のクリープは载荷初期に増大し、その後定常状態となる。その500hr後のクリープ量は、温度60℃の時、初期ひずみの0.5%、温度20℃のとき同1.1%未満である。これに対して、Fig. 12で示した長期クリープ試験結果では、そのクリープ量は、温度60℃の時、初期ひずみの52.6%、温度20℃のとき同11.7%で、低温のものの方が大

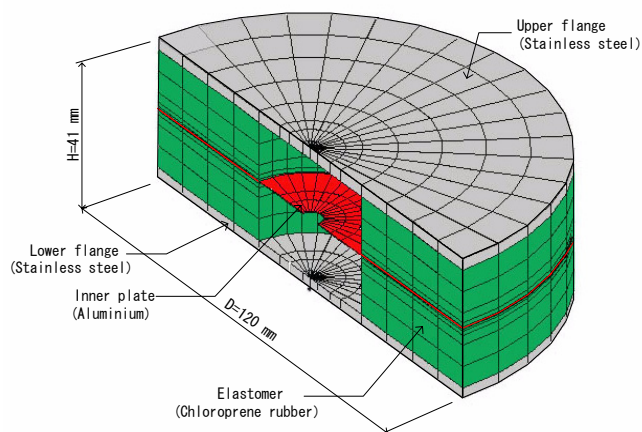


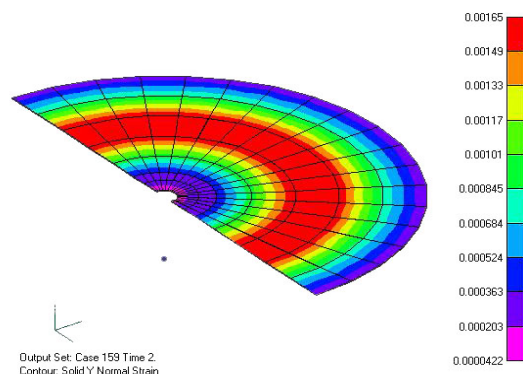
Fig. 13 Profile sketch of 3D FEM analytical model

Table 5 Metal materials and physical properties used in 3D FEM analysis

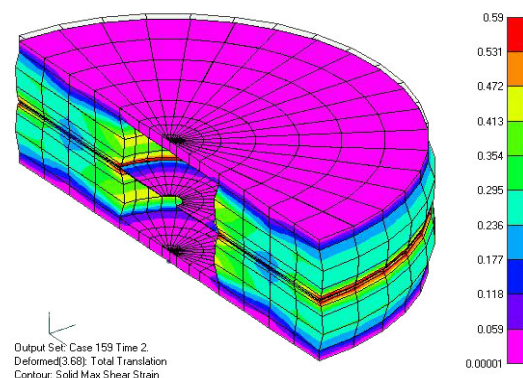
member	material	Young's modulus N/mm <sup>2</sup>	Poisson ratio
Outside flange	Stainless steel	199,000	0.30
Middle plate	Aluminium	70,600	0.33

Table 6 Rubber materials and physical properties used in 3D FEM analysis

Temperature	Young's modulus N/mm <sup>2</sup>	constant of steady state creep rate		
		a	b	d
293K	960	0.0270	1.0000	0.188
313K	430	0.0055	1.0000	0.253
333K	3.15	0.0033	1.0000	0.355



a) The circumferential tensile strain in 2P-7 middle metal plate



b) 2P-7 Total deformation and solid shear strain  
 Fig. 14 Results of 3D FEM analysis

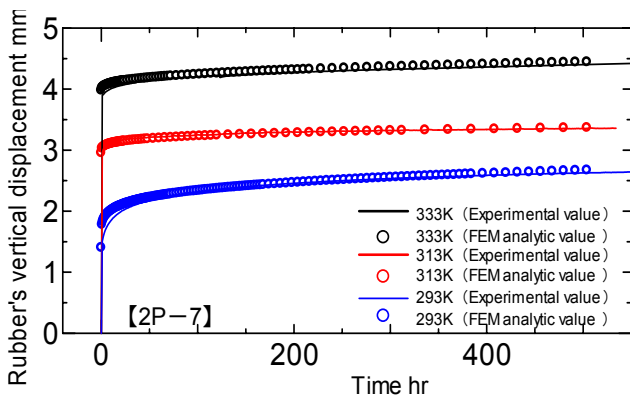


Fig 15 Comparison of rubber's vertical displacements obtained by experiments and by 3D FEM analysis

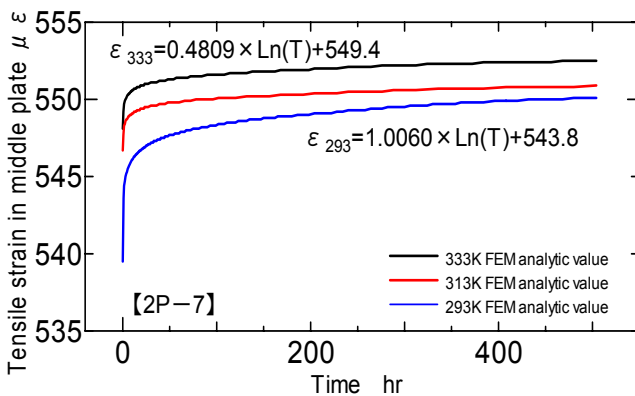


Fig 16 Tensile strain in middle metal plate obtained by 3D FEM analysis

きい。一方、ゴムのクリープ量は、温度60℃の時、初期ひずみの11.4%、温度20℃のとき同74.6%で、低温のものの方が小さい。出力のクリープがゴムのクリープに支配されていると考えると、このゴムのクリープの温度依存による大小関係に、出力のクリープの温度依存は、FEM解析値が正の対応で、実験結果が逆の対応を示していて相関が無い。故に、出力のクリープは、ゴムのクリープ挙動に起因したものではないと判断する。

### 7.3 変換器出力の長期クリープに関する考察

次に、出力のクリープの主因について考察する。出力クリープの誘因としては、①ゴム材料の粘弾性挙動、②受圧板材料のクリープ、および③ひずみゲージ計測技術上のドリフトやクリープ挙動が考えられる。

まず①の要因で発生するクリープ量をもう一度、FEM結果より定量的に把握する。FEM解析で求めた受圧板ひずみを、対数式で近似してFig 16中に示した。この式により1,000時間経過後のひずみを算定すると、温度333Kで553μとなり1時間値549μの0.7%、温度293Kは551μで1時間値544μの1.3%の増加となる。さらに低室温環境ではクリープが増加することが考えられるので、低剛性荷重変換器の出力には、2%程度のゴムの粘弾性によるクリープを見込む必要があるものの、大きな値を示すものではないことがわかる。

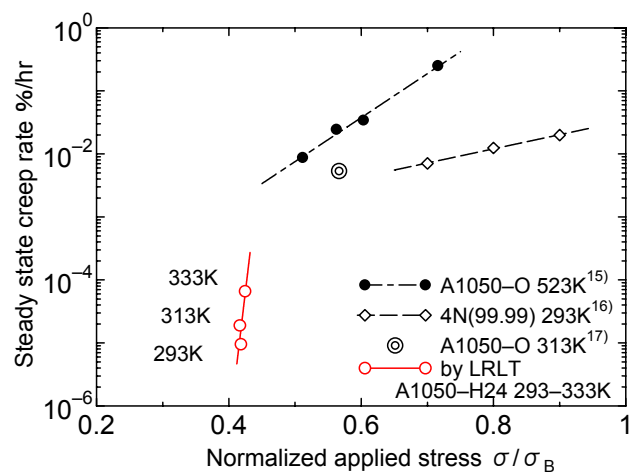


Fig 17 Relationships between normalized stress and steady state creep rate in pure aluminium

ただし、この値は起歪体を構成するゴム材質および1次形状係数により個別の値となる。

②については、純アルミニウムは大きなクリープ挙動を示すことが報告されている。小林ら<sup>15)</sup>は、温度523K環境におけるA1050材のクリープ試験を、前原ら<sup>16)</sup>は、純度99.99%の4N材のクリープ試験を実施している。また金枝ら<sup>17)</sup>は、今回受圧板に使用したA1050材が、室温域において大きなクリープを示すことを報告している。ここでは、今回の長期クリープ試験で認められた出力のクリープ量の全てをアルミニウムの応力起因のクリープと仮定して、その定常クリープ速度を算定し評価を行う。純アルミニウムは、成分および純度の違いにより引張強さ $\sigma_B$ が異なるので、作用応力 $\sigma$ を引張強さ $\sigma_B$ で除した応力度比 $\sigma/\sigma_B$ と、定常クリープ速度との関係をFig 17に示した。ここに受圧板の応力は、先に示したFEM解析の結果による。純アルミニウムのクリープ特性に関する既往の研究データ<sup>15-17)</sup>を基に定常クリープ速度を算定したものを図中に併記した。Fig 17を見ると、純アルミニウムのクリープは、室温域においても大きい値を示すことから、今回の長期クリープ試験で認められた出力のクリープは、アルミニウムのクリープと捉えても妥当な範疇に有る。よって出力クリープの主因は、純アルミニウムのクリープと考える。前原ら<sup>16)</sup>は、純アルミニウムに関して応力度比 $\sigma/\sigma_B$ を0.4以下にすれば、クリープの発生を抑えられるとしている。Fig 17に示した低剛性荷重変換器出力のクリープ特性も、応力度比 $\sigma/\sigma_B=0.4$ に向かい暫減してそれを支持している。故に今後は、受圧板材料選定にクリープに対する配慮や、定格荷重設定時の受圧板応力レベルの引き下げが必要である。

一方で、Fig 17に示した低剛性荷重変換器出力のクリープ特性は、応力度比の変化の割合に比べクリープ速度の変動が大きく、出力における温度変化の影響を排除できない。これには、③のひずみゲージ計測技術上のドリフトの影響やクリープ挙動も含まれているものと考えられる。長期間のひずみ計測では、ひずみゲージの吸湿や環境温度の

変化等で、計測指示値にドリフトやクリープが発生する。今回製作した変換器はプロトタイプということで、ひずみ計測上のドリフト対策等を実施しておらず、ドリフトに起因する出力変動が発生し、クリープ挙動を助長していることが考えられる。今後は、ひずみゲージ変換器としての既知のドリフト対策技術を適用することでひずみ計測の安定化を実現する必要がある。

## 8. 結論

弾性論に従えば、低剛性荷重変換器は、金属とゴムとの積層板から成る起歪体素子に作用する荷重を、受圧板のひずみで検知できる。しかしながらゴム材料は、弾性と粘性を共有しており、受圧板のひずみに及ぼす影響等について、検討を重ねる必要があり、種々なる基礎実験を行った。その結果、以下の変換特性を確認することができ、荷重変換器の一次変換機構としての基本的な出力特性が判った。

- (1) 積層ゴム板による一次変換機構は、ゴムの低弾性と非圧縮性による側方膨出で、作用した力のベクトルを $90^\circ$ 変換して受圧板に張力を与えるものである。この側方膨出圧は静水圧的な挙動を示す。ゴム圧縮ひずみを10%程度以下に限定した使用条件のもとでは、受圧板の上下面のひずみから曲げ成分を相殺した引張りひずみと圧縮荷重との関係は、線形的で可逆的な挙動を示し、一次変換機構として有効である。
- (2) 弾性論より見た場合、受圧板応力に与える弾性の影響は少ないと考えられたが、実験結果に有意な影響が認められる。弾性理論解には、ゴムは完全非圧縮体、膨出変形は微小、1次形状係数が大きい、ゴム板が薄いと仮定が含まれており、これと試作器の実態に差異があることが、弾性理論解と試験値の相違の一因となっているものと考えられる。ここで、低変形圧縮の範囲では、ゴムの弾性は線形的で変動は少ないが、温度依存による弾性変動の影響は無視できない。よって、温度変化に対した出力の演算的な補正が必要となる。
- (3) 積層ゴム内に静水圧的に生じた側方膨出圧は、ゴム状ポアソン比の変動により、載・除荷の応力経路に応じたヒステリシスを示す。低剛性荷重変換器の出力には、この影響が2%程度含まれる。
- (4) ゴム弾性が大きいほど、1次形状係数が大きいほどゴムの粘弾性的挙動が顕在化し、出力の応答に遅れが生じ、クリープおよび0点移動が大きくなる。室温環境における低剛性荷重変換器の出力には、2%程度のゴムの粘弾性によるクリープを見込む必要がある。低剛性圧力変換器は、この影響による計測精度低下を減じるために、比較的荷重変動の緩慢な荷重計測に適用することが望ましい。

謝辞：本研究を行うに当っては、三井康司元信州大学教授に貴重なご意見とご指導を頂戴した。ここに感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、社団法人計量管理協会：センサの原理と使い方 2, 16, コロナ社(1984)
- 2) 宮下秀樹：荷重計・圧力センサおよび圧力センサの較正装置, 特許第3001577号(1999)
- 3) 宮下秀樹, 三井康司：荷重検知機構付加型ゴム支承に関する基礎的研究, 土木学会構造工学論文集, **46A**, 1203/1212(2000)
- 4) 宮下秀樹, 中村三昭, 曹西：低剛性土圧計の開発とその動作特性, 土木学会論文集C, **64-3**, 696/711(2008)
- 5) 多田秀之, 高山峯夫：4秒免震への道, 206, 理工図書(1995)
- 6) 社団法人計量管理協会：センサの原理と使い方 2, 112, コロナ社(1984)
- 7) 例えば、日本道路協会：道路橋支保便覧(改訂版), 142, 丸善(2004)
- 8) 久保亮五：ゴム弾性(初版復刻版), 76, 裳華房(1996)
- 9) 村上謙吉：レオロジー基礎理論, 23, 産業図書(2003)
- 10) 関 互：ゴム製品に対する有限要素法への応用 2, ゴムの力学入門コース 97, 日本ゴム協会ゴム製品性能評価研究分科会, 89/103(1997)
- 11) 関口久美, 柿内正昭, 森元時夫, 藤本邦彦, 吉村信哉：加硫天然ゴムの伸張時のポアソン比について, 日本ゴム協会誌, **40-9**, 719/725(1967)
- 12) 吉田 昇：ゴム状物質の実用弾性率について, 日本ゴム協会誌, **56-6**, 358/368(1983)
- 13) 宮下秀樹, 曹西, 三井康司：試作した低剛性荷重変換器の出力特性, 土木学会 58 回年次学術講演会概要集, **VI-186**, 371/372(2003)
- 14) MSC/NASTRAN ユーザーガイド 非線形解析ハンドブック, 6-40, 日本エムエスシー(1991)
- 15) 小林謙一, 久米賢二：密度変化率とポイド面積比による工業用純アルミニウムの第3次クリープ損傷評価, 日本機械学会論文集(A編), **57-539**, 124/128(1991)
- 16) 前原正孝, 石川圭介, 小林康男：低温における純アルミニウムの初期クリープ挙動, 東洋大学工学部研究報告, **34**, 55/59(1998)
- 17) 金枝敏明, 野口浩二：純アルミニウム材の引張試験ならびにクリープ試験によるレビンダー効果の有無, 岡山理科大学紀要, **38A**, 165/172(2002)

## [ 著 者 紹 介 ]

### 宮 下 秀 樹(正会員)



1976年長野工業高等専門学校土木工学科卒業。同年、株式会社宇谷商会入社、技術研究開発に従事。現在、技術研究室長。2001年より長野工業高等専門学校非常勤講師。土木学会、地盤工学会会員、技術士(建設部門)。

### 曹 西



中国西北工業大学卒業後、中国飛行試験研究院に勤務。1990年東海大学訪問研究員・中国国家公派訪問学者。1991年大阪府立大学共同研究員・中国国家公派訪問学者。1994年信州大学博士課程入学。1995年信州大学に勤務、現在に至る。工学博士。