

UDC 531.781 :
539.319 :
53.082.1

航空宇宙技術研究所資料

TECHNICAL MEMORANDUM OF NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

TM-209

試作接着面応力センサの較正試験

大竹邦彦・遠藤修司・野口義男

1971年11月

航空宇宙技術研究所
NATIONAL AEROSPACE LABORATORY

既 刊 資 料

TM-160	極超音速風洞計測装置について	1969年7月	長洲秀夫, 吉沢昭 松崎貴至
TM-161	燃料蒸発管に関する研究(Ⅱ) —加熱蒸発管の燃料未蒸発分捕集—	1969年8月	鈴木邦男, 田丸卓 乙幡安雄
TM-162	境界層内圧力変動および板の振動変位の測定	1969年9月	藤森義典, 山崎浩
TM-163	ある双発プロペラ STOL 機の動安定風洞試験	1969年9月	別府護郎, 鈴木友昭
TM-164	ブレードのフラッピング運動をバネで拘束したロータのピッチダンピングについて	1969年10月	別府護郎, 岡遠一
TM-165	フェノール系複合材の環境試験結果	1969年11月	古田敏康, 野口義男
TM-166	ガスタービン用缶形燃焼器における燃焼領域のガス組成と燃焼状態	1969年11月	大塚貞吉, 齋藤隆吉 堀内正司, 本間幸吉 宮坂彰
TM-167	YS-11 A-300 型輸送機の胴体疲労試験 —中部胴体前方大型貨物口部および後方乗降口部付近—	1970年1月	竹内和之, 川島矩郎 熊倉郁夫, 松岡陽一
TM-168	ダンピングメータの試作	1970年2月	柳沢三憲
TM-169	ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの測定(Ⅰ) —冷却フィルムプローブによる方法—	1970年2月	相波哲朗
TM-170	JR エンジンの燃焼器に起きた振動燃焼	1970年2月	鈴木邦男, 石井浅五郎 山中国雍
TM-171	缶形燃焼器(低圧, 低温系)試験設備による航空計器の水結(着氷)試験	1970年3月	鈴木邦男, 相波哲朗 本間幸吉, 服部宣夫
TM-172	自動追尾型風向風速測定器	1970年3月	川幡長勝, 中谷輝臣
TM-173	FA200 改機の動安定微係数	1970年3月	遠藤浩, 林良生 海老沼幸成, 中谷輝臣
TM-174	遷音速風洞動安定測定装置の構造と作動	1970年4月	小橋安次郎, 河野長正 西武徳, 宮沢政文
TM-175	NAL-16・31 D型ロケットの研究試作	1970年5月	宇宙研究グループ
TM-176	非対称自由流線の—計算法	1970年5月	高橋 侖
TM-177	小型固体ロケットモータの振動燃焼実験 —パルス法による中周波振動燃焼の研究—	1970年5月	五代富文, 伊藤克弥 西村久男, 湯沢克宜 柴藤羊二
TM-178	大型低速風洞動安定微係数測定装置	1970年5月	廣岡貫一, 遠藤浩 戸田亘洋, 岡部祐二郎
TM-179	風洞天秤の試作	1970年5月	金成正好, 北出大三
TM-180	ジェットエンジン燃焼器出口ガス流の乱れの測定(Ⅱ) —レーザのドップラ効果を利用する方法—	1970年5月	相波哲朗
TM-181	航空機の乗り心地について	1970年6月	幸尾治朗
TM-182	排気系障害板の模型実験	1970年9月	田辺義一
TM-183	ロケット模型の大型低速風洞試験	1970年9月	近藤洋史, 高橋宏 桑野尚明
TM-184	金属線へ衝突する液滴の現象	1970年9月	田丸卓, 乙幡安雄
TM-185	推進エンジン用空気取入口の予備実験	1970年9月	近藤博, 石賀保正
TM-186	NAL-25・31 型ロケットの試作と飛しよう試験	1970年11月	宇宙研究グループ
TM-187	推力 300 kg ジンバル液体ロケットエンジンの揺動特性(Ⅰ)	1970年11月	橋崎哲二, 中野富雄 橋本亮平, 竹花真一郎

試作接着面応力センサの較正試験*

大竹邦彦**・遠藤修司**・野口義男***

Evaluation of New Type Stress Sensor Capable of Measuring Radial Bond Stresses Between Solid Propellant and Rocket Motor Case

By Kunihiro OHTAKE, Shuji ENDOH and Yoshio NOGUCHI

For the purpose of measuring the radial bond stresses between the solid propellant and the rocket motor case, a new type of stress measuring sensor was made and tested. The sensor is an application of a diaphragm type small size pressure transducer using electric foil strain gages. The input-output relations of the sensor, including its temperature characteristics, were examined. Numerical solutions were also obtained by the finite element method. It was found that there was a satisfactory agreement of the bond stresses between the test results and the numerical solution.

1. はしがき

宇宙開発の手段として、わが国では従来固体ロケットモータが大きな役割をはたしてきた。そして最近ではより性能のすぐれたロケットをめざす努力から構造重量軽減の上で有利な“直墳式”ロケットモータを採用するようになった。しかし直墳式製造法をとり入れたことにより、構造強度の面で新たな問題を生じた。それはロケットモータの製造、保存時に推進薬内部に発生する熱応力である。この熱応力は主としてモータケースと推進薬との熱膨張の差によるもので、金属モータケースを採用した場合にとくに大きいのであるが、ロケットの性能向上のために充填率を高めるほど増大するというやっかいな性質があり、試作段階でそのためにモータが破損した実例も少なくない。

この問題を解決するために、推進薬の機械的性質の向上とならんで、推進薬の内部や表面に生ずる応力およびひずみを知る努力がつけられている。応力およびひずみの解析は、理論および実験の両面から行なわれているのであるが、推進薬に顕著なきわめて柔らかく変形しやすい粘弾性特性のためにいろいろな困難がある。ことに推進薬内部あるいは表面に発生する応力を直接測定することはこれらの研究の上で最大の焦点の一つである。^{1),2),3)}

筆者らは箔ひずみゲージを使った超小型圧力ピックアップを応用して推進薬とケースとの接着面での応力

測定センサの試作を進め、粘弾性的な熱応力測定の目的に必要な較正試験を行なってきたが、実用化の見通しを得たので、ここにその結果を報告する。本センサは接着面での半径方向応力を測定するものであるが、測定の意義は二つある。一つは半径方向の応力が接着面での推進薬とケースとの剝離の原因となり、モータを破損にいたらしめる可能性があることであり、もう一つは理論計算あるいは間接的な実験解析（例えば光弾性解析等）によって得られた推進薬内の応力分布を測定点においてチェックすることにより、解析の裏付けを行なうことである。端末部分や推進薬の光ぼう先端等応力集中のはげしい部分は応力を直接測定しにくいので、このことの意義は理解されよう。さらにくわしくは文献(1)を参照されたい。筆者らはさらにこのセンサをモータに内圧がかかるときの推進薬の応答の解析や、推進薬の破壊試験へ応用することも考えている。

較正試験はピックアップエレメント自体の温度特性試験および、粘弾性固体に接着して引張応力をはかるときの出力感度の測定試験をおこない、後者については数値解析を試みて、得られた出力感度の検討をおこなった。

2. 較正試験

ここではひずみゲージをもちいた小型圧力変換器の受圧面にやわらかい固体である推進薬を接着して、引

* 昭和46年9月30日受付

** 機体第一部，宇宙研究グループ併任

*** 機体第一部

張力を加えた時の入出力の関係を調べる事が主たる目的である。図1にセンサを組込んだ較正用の試験片の形状を示す。

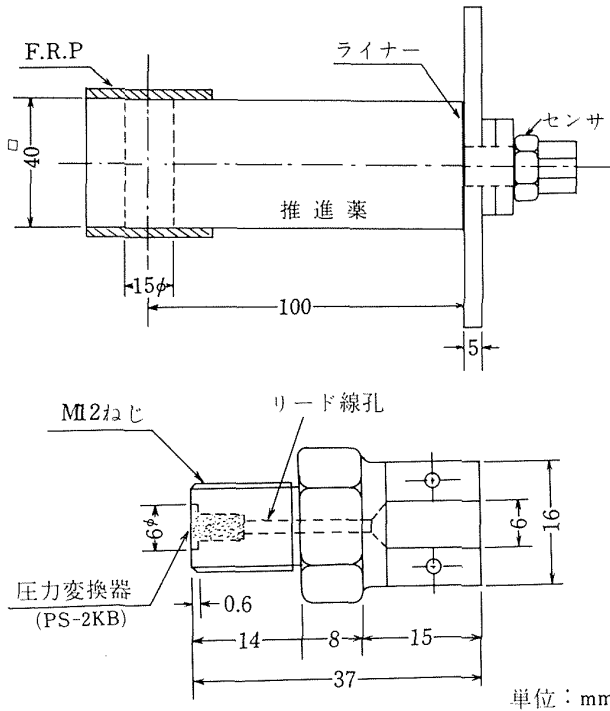


図1 (上) センサを組込んだ較正用試験片
(下) センサ部詳細

一方この接着面応力センサの測定条件(熱応力の測定)を考える時には、時間に対する安定性および温度による出力変化や零点移動が測定値に与える影響は非常に重要であるので、その面の較正もあわせて行なった。

2.1 圧力変換器の構造

接着面での応力検出エレメントは共和電業(株)より超小型圧力変換器(PS-2KB)として市販されているものである。

この変換器は片面受圧型で、受圧ダイヤフラムは外径6mm、有効径5mm、板厚0.1mmのベリリウム銅製で、周辺はリングに接着固定されている。ダイヤフラムの裏面には特殊なパターンの箔ひずみゲージが接着されている。このゲージは4辺のホイートストンブリッジを構成しており、分布荷重(流体圧)を受けたときにダイヤフラムのたわみによって生ずる円周方向ひずみおよび半径方向ひずみを検出することにより圧力を逆算する⁴⁾。定格容量 2kg/cm^2 (ただし定格容量の150%まで許容される)で、定格負荷を受けた時のダイヤフラム中央部のたわみは $5/100\text{mm}$ に設計されている。圧力変換器の仕様を表1に示しておく。

この圧力変換器をM12のねじを切った取付治具内

に接着し、リード線用の端子板をとりつけて接着面応力を測定するセンサを作った。図2にエレメントおよび完成したセンサを示す。

表1 圧力変換器のおもな仕様(PS-2KB型)

容 量	2kg/cm^2
入出力抵抗	120Ω
非直線性	1% F.S.*
ヒステリシス	1% F.S.
零点の温度影響	$0.2\% \text{ F.S./}^\circ\text{C}$
出力感度の温度影響	$0.2\% \text{ F.S./}^\circ\text{C}$
許容温度範囲	$-30\sim+80^\circ\text{C}$

注)* F.S. は室温(20°C)で定格圧力(2kg/cm^2)を加えた時のセンサ出力感度をあらわす。

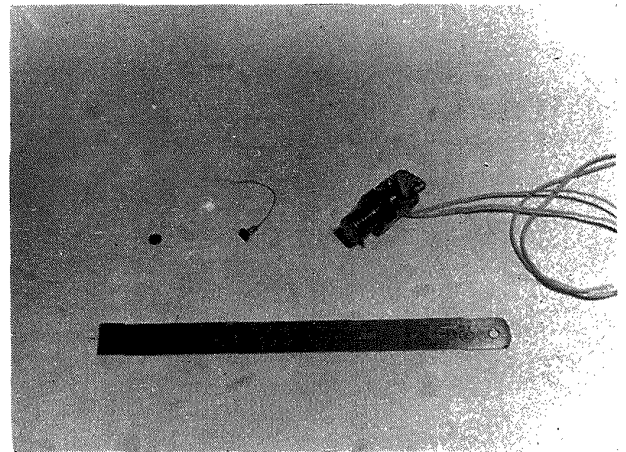


図2 (左) 受圧ダイヤフラム (中) 圧力変換器
(右) 完成したセンサ

2.2 試験に使用した器材

試験に供したセンサは3個で1, 2, 3の番号づけをおこなっている。

入力用圧力源として、室温では定油圧発生機(長野計器製基準分銅式標準圧力計)を用いた。これは精度において秀れているが、低温では油がグリース化してしまう事、および恒温槽内で使用しにくい事から、高低温用には小型エアコンプレッサ(日立製BP-10T)を使用した。また引張試験用荷重はクリープ試験機の分銅を治具を介して試験片に吊り下げた。

恒温槽は温度特性試験のためには静的粘弾性測定装置用恒温槽を、また引張試験のためには荷重負荷の都合で下部に穴のあいた万能試験機用恒温槽を用いた。恒温槽の温度精度はいずれも約 $\pm 2^\circ\text{C}$ である。

出力の長時間連続測定には動ひずみ計(新興DS6-RX)を用いてペン記録計(東亜電波EPR-3T)に記録した。また瞬間的な測定には静ひずみ計(共和SM-

4J) を使用した。これらを使用した試験方法は図3のようになる。

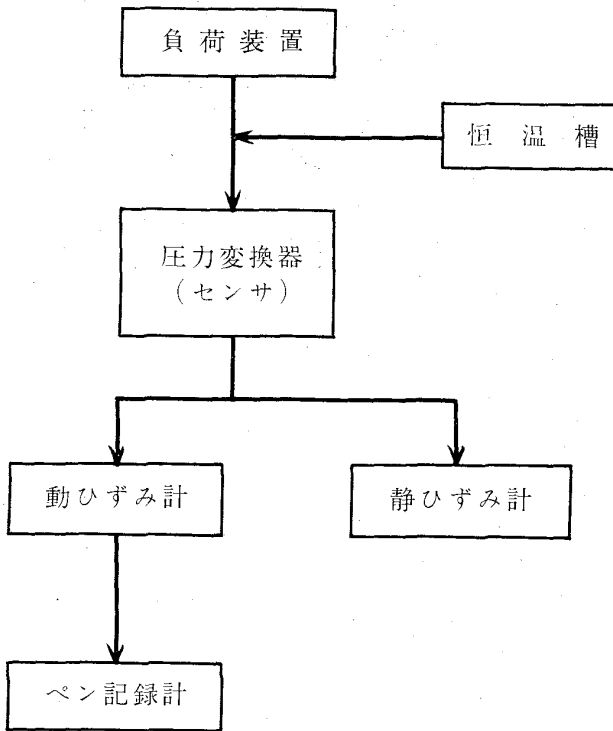


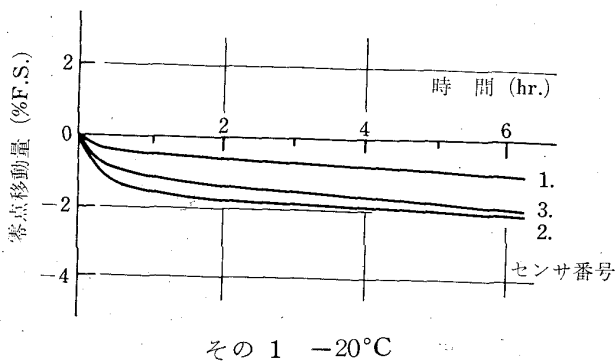
図3 試験器材の接続

2.3 温度特性試験

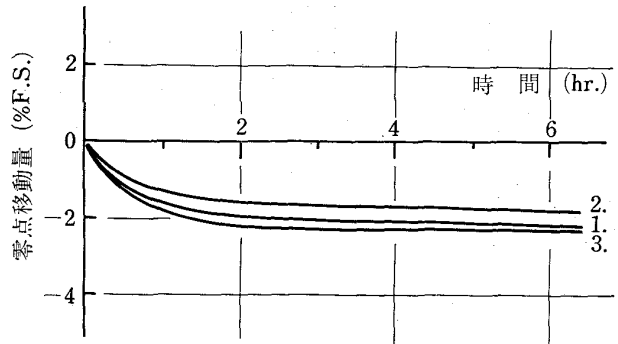
2.3.1 零点の安定性

抵抗線ひずみゲージにブリッジ電流を通じたとき、抵抗線に生ずる熱のためにゲージ温度が上昇し、ゲージの零点に変動をおこす。これは抵抗線ひずみゲージの自己加熱による零点移動として知られているが、本センサについてこの点がどのように問題となるかチェックした。

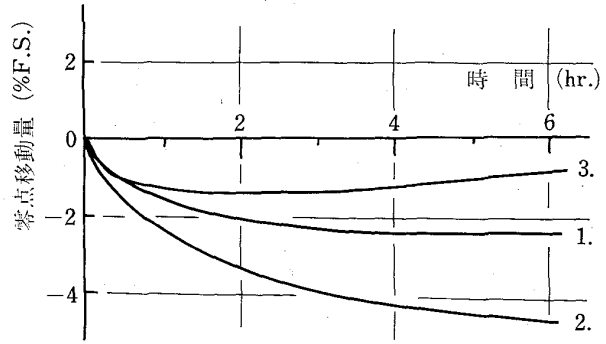
一定温度 (-20, 20 および 60°C) に保った恒温槽内にセンサを入れ、約1時間放置して温度の安定をはかった後、圧力変換器への入力電圧を 0V から 2.5V にステップ的に変化させ、その後約6時間にわたって動ひずみ計とペン記録計により零点の移動を計測した(図4)。



その1 -20°C



その2 20°C



その3 60°C

図4 時間に対する零点の安定性 (ブリッジ電圧 0V~2.5V)

ひずみゲージの自己加熱によると思われる零点の移動が約2時間あるが、その後各センサとも安定した値をとる。60°CでのNo. 2, 3の結果がやや安定を欠くが他は全て定格出力の2%ほどの値で安定している。

静ひずみ計で短時間内に計測するときは零点の安定性について問題とならないが、動ひずみ計を用いて長時間連続計測する場合にはあらかじめ入力電圧を加えておき、零点の安定を待って計測を行なう必要がある。安定時間の目安は約2時間である。

2.3.2. 温度による零点の移動

熱応力測定の場合、測定中にセンサの温度が変化するので、センサを構成する各部分の膨張係数の差により、みかけの出力を生ずる。これを打消すため、本センサエレメントも材料や回路に工夫をした自己温度補償型になっているのであるが、小型であるので完全な補償はむずかしい。したがって温度による変動の程度を調べておく必要がある。

試験方法は基準の 20°C において零点を記録した後恒温槽内を -20, 0, 40, 60°C の各温度に約1時間保ってから零点の変化を調べた(図5)。変動幅はメーカー仕様 (0.2% F.S./°C) にほぼおさまっているとはいえ、かなりバラついた変化の状態を示している。また再現性を調べるために3回試験を行なったところ、

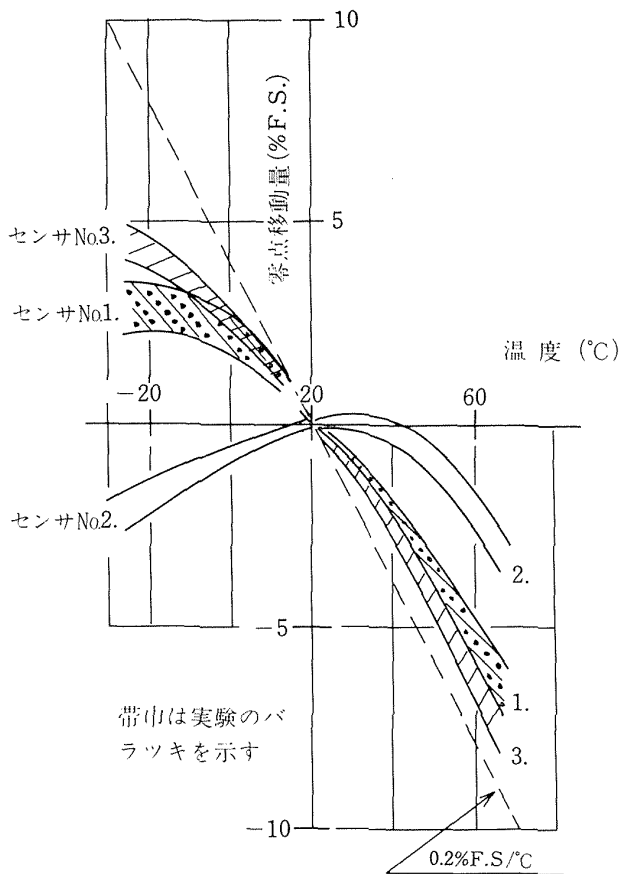


図5 温度による零点の移動

1% F.S. の幅におさまることが確かめられた。

零点の移動は温度変化に比例した変動量とならず、各変換器ごとに異なった曲線を示しているため、温度変化域での使用については各変換器ごとにあらかじめ補正曲線を作っておくのが望ましい。

2.3.3 出力感度の温度影響

温度が変化するとき、センサエレメントの抵抗値が変化し、出力感度を変化させる。そこで圧力校正を $-20, 20, 60^{\circ}\text{C}$ の各温度で行ない、出力感度の温度による影響について調べた。2.2でのべたごとく、 20°C 室内で油圧発生機を用いて $1.0, 2.0\text{ kg/cm}^2$ の圧力に対する出力を測定した。次にエアコンプレッサを加圧源として、2系統に同時に加圧が行なえるように配管を行ない、一方を恒温槽内に、他方を室内においてその端末ターミナルに室温ですでに出力検定したセンサを取付けた。恒温槽を $-20, 60^{\circ}\text{C}$ の各温度にセットし、約1時間放置した後加圧を行ない、室温側センサの出力を基準にして $1, 2\text{ kg/cm}^2$ の各圧力で各温度に対する出力感度を記録した。図6は試験器材の配置を示す。図7に 2 kg/cm^2 の圧力校正の結果を示す。

出力感度は温度に対しほぼ線型の変化を示し、変化方向および変化量は各センサとも同様である。したがって補正量は比較的簡単に求めることが出来る。



図6 温度変化によるセンサ出力感度校正のための試験装置

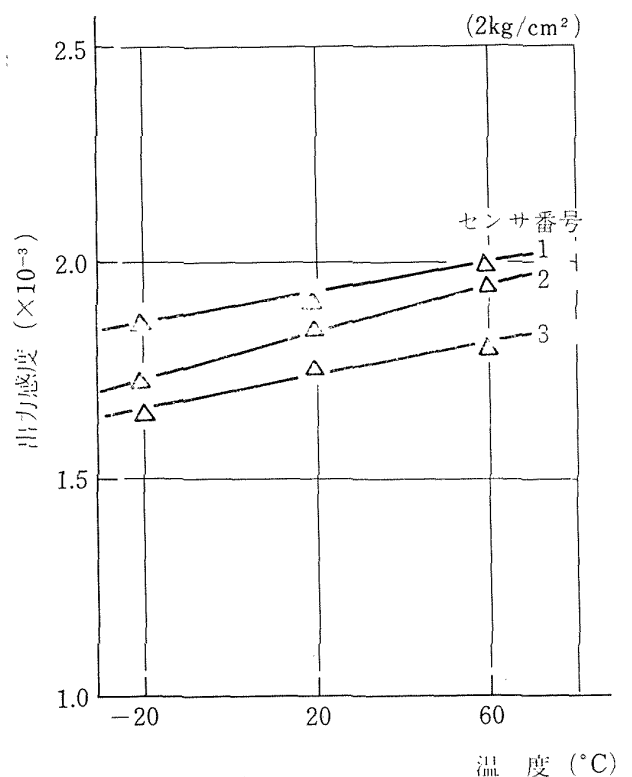


図7 温度に対するセンサの出力感度

2.4 温度特性のまとめ

本センサを用いて熱応力の測定を行なう時に、温度変化が測定値に及ぼすであろう影響について試験の結果次のようなことがわかった。

(1) 長時間ブリッジ電圧をかけておくと、センサの自己加熱による零点移動があるが、約2時間でおちつく。安定後の移動量は2% F.S.程度である。計測方法によってはこのことを考慮する必要がある。

(2) 温度変化にともなう零点移動は、その特性が各センサ毎にまちまちであり、測定温度域(-20 から 60°C まで)でもフルスケールの10%以上になり無視しえないが、再現性は1% F.S.と比較的良好なので、各

センサについて補正曲線を作っておくのがよい。

(3) 出力感度の温度による変化は線型があり、また各センサごとの差もあまりないが、使用に際しては補正曲線を必要としよう。

2.5 入出力比の測定

2.5.1 引張試験片

100×100×5 mm のジュラルミン平板の中央部にねじ穴 (M12, P1.5) をあけ、センサを固定した。この時センサの受感面と取付け平板の接着面が一致するように座金を用いて調整した。

一方固体推進薬 (ポリブタジェン系 BP-17A) をフライス盤で加工し、40×40×120 mm のブロックに仕上げ、その一端より 20 mm の中央部に引張用のピン穴として 15.5 mm ϕ の穴をあけた。さらに補強用として FRP 製平板 (40×40×7 mm, 中央部に 15.5 mm ϕ の穴) をピン穴の両側にエポキシ樹脂で接着し、引張試験の際に応力が断面の各部分で一樣になるように、またピン穴よりの切断がおこらないようにした。この固体推進薬ブロックを液状ライニング材により平板のセンサが取付いた中央部に接着した。ライナの硬化条件は 60 $^{\circ}$ C, 4 日間である。接着ライナの厚さは約 0.5 mm である。出来上がった引張試験片を図 8 に示す。

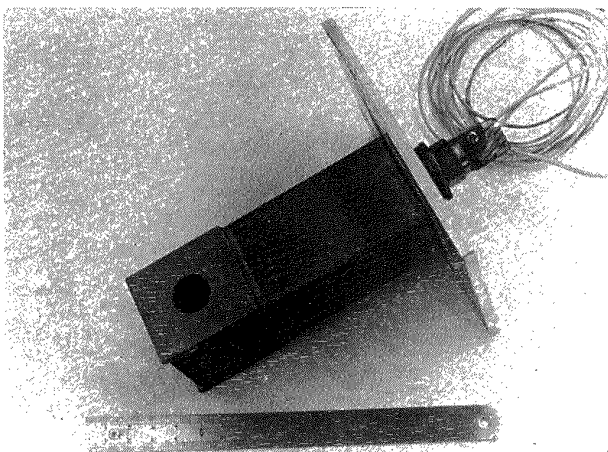


図 8 入出力比較正のための引張試験片

2.5.2 引張試験

引張試験片を保持するために、L 型鋼材により 45 mm 角の枠をつくってこの中に引張試験片を固定した。ピン穴に 15 mm ϕ のピンを差込み、このピンを介して引張荷重が加えられるように分銅受けを取付けた。図 9 に試験のためのセットを示す。この状態で計測器の零バランスを調整し、分銅受けに 8, 16, 24, 32 kg の負荷分銅をのせて、0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kg/cm 2 の各応力を得るようにして出力感度を測定した。-20 および 60 $^{\circ}$ C の出力感度の測定に際しては、万能試験機用

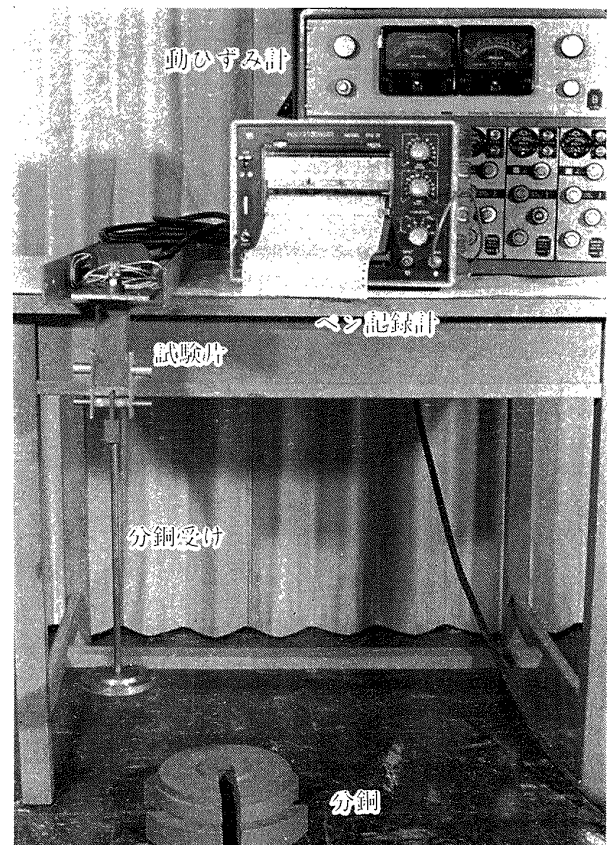


図 9 入出力比較正のための試験装置

恒温槽に試験片を保持具ごとに入れ、分銅受けのみ槽外に出しておき、槽内温度を所定温度に約 1 時間保ってから測定を行なった。

さらに引張と圧縮との差をみるために、倒置した No. 2 の試験片の上端に分銅をのせ、圧力をかけてみた。同一応力での出力感度は符号が異なるだけで有意差はみられず接着の具合やダイヤフラムのたわみ方向の差による出力差のないことが確かめられた (図 10)。

2.5.3 引張試験の結果

図 11 に引張試験の結果の一例を示す。図中の Δ 印は 2 kg/cm 2 の流体圧力を加えた時のセンサ出力感度である。測定点が直線に並んでいることは、試験が十分正しく行なわれたことのあらわれとみてよい。この出力感度を圧力較正による出力感度と比較してセンサの示す引張応力を計算し、入力荷重との比 (これを実測入出力比とする) として表わした (図 12)。

図 12 によれば、センサの接着面に引張応力が働く場合の較正試験による実測入出力比は室温で約 75%、温度が高く、したがって推進薬の弾性率が小さいときは入出力比は大となり、低温で弾性率が大きいときは入出力比は小となる。この原因には土圧計でいうところの Arching-Effect* があると推察したが、測定面の接着固定の影響も考えられるので、さらにくわしく入出力比のメカニズムを調べるために、次節に有限要素

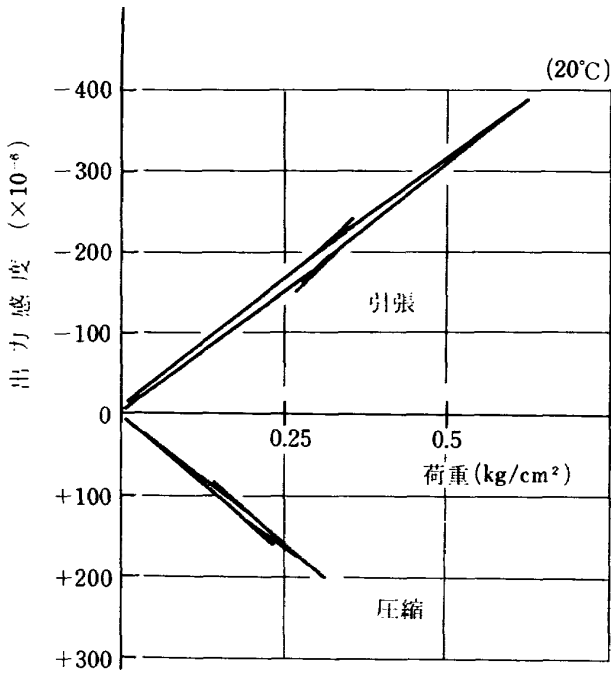


図 10 引張と圧縮による出力感度の差 (センサ No. 2)

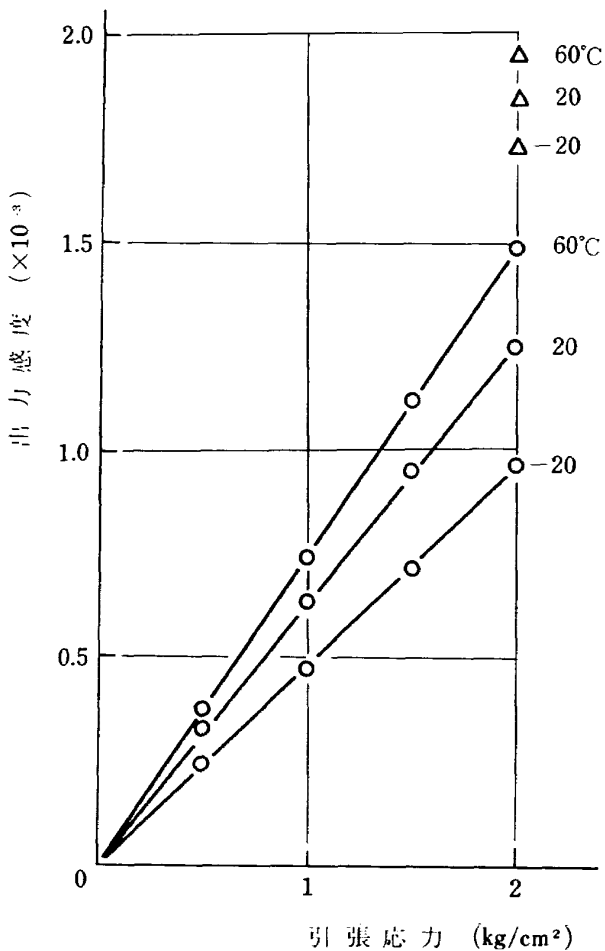


図 11 引張試験によるセンサ出力感度の測定 (センサ No. 2)

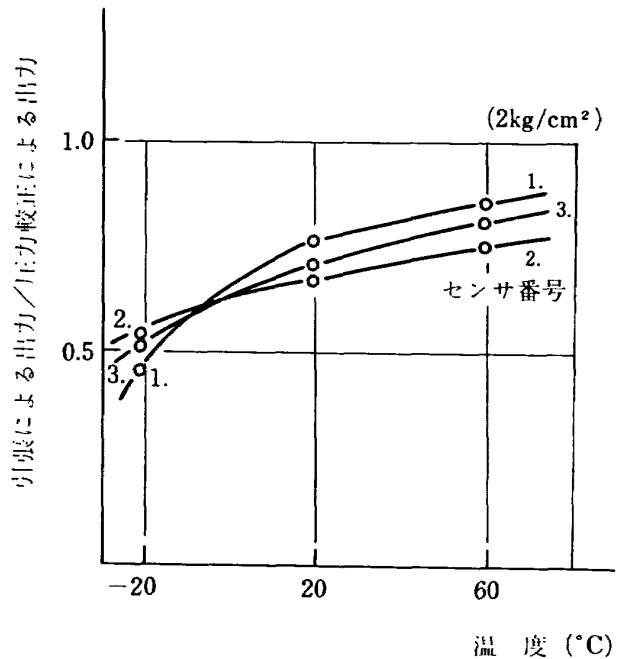


図 12 温度に対するセンサの入出力比

法を用いて数値解析をこころみた。

注)* 受圧板のたわみの応力状態への影響。次節参照。

3. センサ入出力比についての数値解析

前節図 12 でみたような較正試験の結果を吟味するために、有限要素法を用いて解析をこころみた。

センサに組込まれた圧力変換器は前節 2.1 で示したようにダイヤフラムタイプのもので、受圧板に荷重を受けるときに生ずるたわみを、ひずみゲージで測定し、これを圧力に換算するものである。ところで受圧板が変形に対する抵抗のない流体による圧力を受けるときのセンサの入出力比を 1 とすると、本実験のように固体中の応力を測定する場合には、受圧板の変形によって被測定物内の応力分布が局所的に変化し、応力を過小に測定するために、入出力比が 1 より小さくなるのが考えられる。これは土圧計で Arching-Effect と呼ばれているものである。土圧計ではこれを極力さけるために、受圧面の径と最大たわみの比を 2,000~10,000 以上にとっているのであるが、本センサの場合その比は 100 程度にすぎず、さらに受圧板の剛性や被測定物の弾性の問題もあるので、この影響を積極的に考慮する必要がある。

3.1 計算方法

本実験においては試験片の作りやすさや、荷重荷方法の問題から、正方形断面の角材試料をもちいた。この実験条件をそのまま解析するためには、三次元要素を用いた解析を行なうことになるが、一般に三次元

解析プログラムは大容量の剛性マトリックスを要し、計算機容量や計算時間の点で不利である。そこで、ここでは角材をその断面積に等しい丸棒で置換し、外側境界の変化の影響をおさえながら、軸対称解析プログラムを用いて計算を進めた。

次にダイヤフラムは圧力の大きさに比例してたわみ量を増すので、固体推進薬ブロック側からみた境界条件は、ダイヤフラムとの接触面ではあらかじめ与えられてはいないことになる（一種の接触問題となる）。そこで本解析ではダイヤフラムのたわみ量をまず仮定し、その時の推進薬とダイヤフラムとの接触面に生ずる推進薬内の応力を負荷荷重に対して計算し、その値とダイヤフラムたわみ量に対するセンサ自体の出力値とがバランスする値をもって本校正試験におけるセンサ出力値とした。

図 13 は 2 kg/cm^2 の荷重を負荷した場合の計算例である。すなわち図 13 の右上りの直線はダイヤフラムのたわみを得るのに必要な応力をあらわし、一方右下りの曲線は 2 kg/cm^2 の荷重が負荷されているとき、ダイヤフラムのたわみ量を仮定した場合のダイヤフラム面での平均応力を示しており、両者の交点为实现するたわみおよび応力の状態であると考えられる。

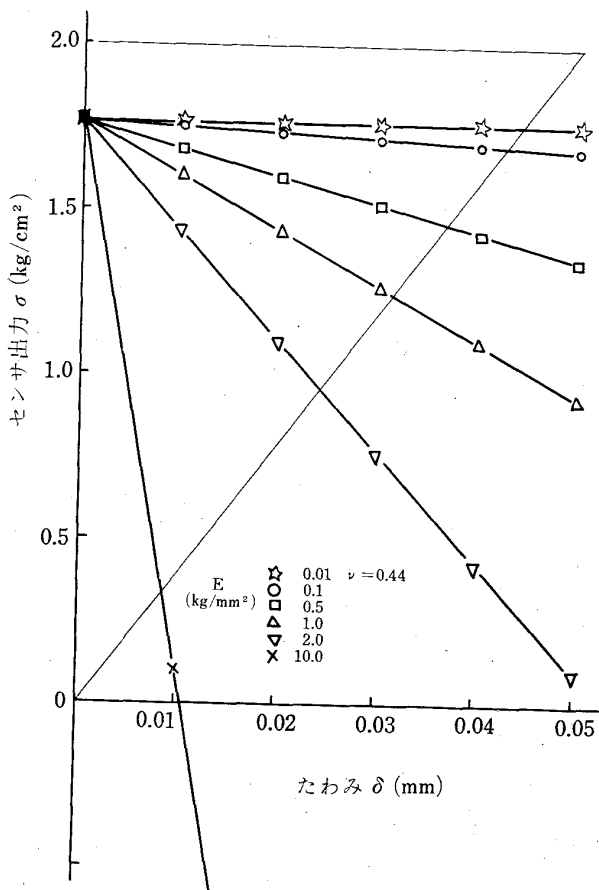


図 13 センサ出力を求めるグラフ

グラフはポアソン比 0.44 の場合について弾性率を変化させた場合について示している。また縦軸との交点は試験片の端末を接着固定していることに原因するのであるが、接着面中央（センサ受圧板のところ）では受圧板のたわみがなくても（荷重/断面積）であらわされる平均応力より低い応力状態にあることを示している。

3.2 計算に用いた有限要素パターン

計算は99節点、160要素で軸対称解析プログラムを用いて行なった。その要素分割パターンを図 14 に示してある。応力は今までの経験から図 14 (a), (b) の対称な両パターンで得られた値の平均値を採用した。また別に図 15 のようなパターンについても試みたが、これは細かいメッシュと粗いメッシュとのつなぎ目のところで幾分不自然な計算結果が導かれ、また実測との対応も図 14 に劣った。ここでは図 14 に示すパターンから得られた結果にもとづいて検討を行なう。

また応力が加わるときのダイヤフラムは周辺固定とすると図 16 (a) に示すような変形になるのであるが、近似計算の便宜上 (b) のように変形するとして境界条件を定めた。なお実際ダイヤフラムが推進薬に接するところは図 14 の細かいメッシュの中央部の2つで、かっこをつけて示してある。

3.3 センサ入出力比低下の原因

3.1 の計算方法に従って得られたセンサ入出力比（ここではこれを“みかけの入出力比”と呼ぶことにする）と実測入出力比との比較を図 17 に示す。

図 17 のグラフは推進薬のポアソン比をパラメータとして、推進薬の縦弾性率の変化に対してプロットしてある。実測入出力比は $-20, 20, 60^\circ \text{C}$ の各温度に対応して得られているので（図 12）、これを弾性率の変化にひきなおすため、それぞれの温度に対応する推進薬の弾性率の値として、 $2.0, 0.5, 0.35 \text{ kg/mm}^2$ をとった。これは試料に用いられた推進薬に荷重を負荷してから1分後のひずみから得られる弾性率に対応する（図 18）。

図 17 をみると、計算値と実測入出力比とはかなり良好な一致をみせており、センサ入出力比低下の原因が本質的に受圧板のたわみによる応力の逃げに起因すること、およびここに示した計算方法によりその程度を十分によく評価出来ることがわかった。

ところで図 13 でふれたように、推進薬ブロックが金属板に接着され、半径方向に拘束されているために、接着面に特有の応力状態を生じて、かなりの大きさでみかけの入出力比に影響することがわかった。接

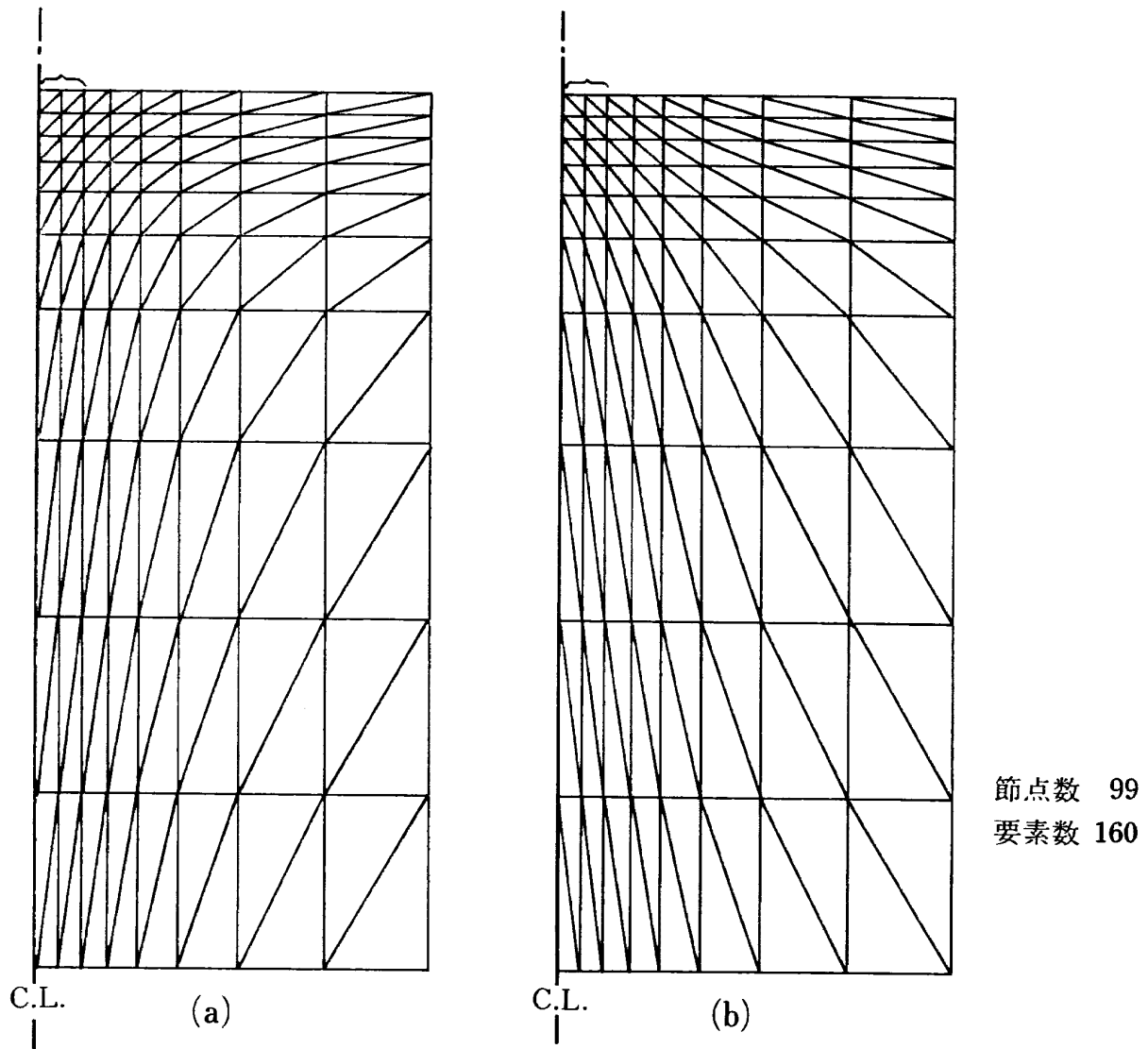


図 14 計算に用いた有限要素パターン (その 1)

着面での応力状態を計算すると図 19 のようになっている。このことは半径方向の拘束を取除いた計算では接着面での応力が一様になることによっても確かめられた。

以上により較正試験で示されたセンサ入出力比低下の原因は、

- (a) センサ受圧板のたわみによる局所的な応力の逃げ。
- (b) 推進薬と金属板とが接着されて、半径方向に拘束されているために、接着面に特有な応力分布が生じ、中央面の応力は(荷重/断面積)で示される平均応力より低くなる。この影響はポアソン比が 0.5 に近いために割合大きく出やすい。

の二つによるものであることがわかった。しかし(b)項はセンサ自体の入出力比という面では無関係なものであり、ここで必要なのは(a)の応力の逃げがどの

程度になるかということである。そこで(b)の分を差引いた計算による入出力比較正カーブを図 20 に掲げる。以下図 20 についての考察を若干進める。

3.4 センサ入出力比に及ぼす推進薬の弾性率およびポアソン比の影響

予期したように、図 20 によると、センサの入出力比は推進薬の弾性率が大になるほど低下し、センサ受圧板のたわみによる応力の逃げの影響が著しくなることを示している。あまり入出力比が小さいことは、実測に際し誤差を生みやすくなり、好ましいことではない。入出力比の限界を 0.5 とすると、弾性率 2.0 kg/mm² 程度が使用限界の目安となるが、現在用いられているポリブタジエン系推進薬は十分この範囲に入る。応力の逃げの影響を減らすためには、剛性の大きな受圧板を用いるとよいのであるが、推進薬の弾性率が高々 1~2 kg/mm² であることを考慮して図 13 をみ

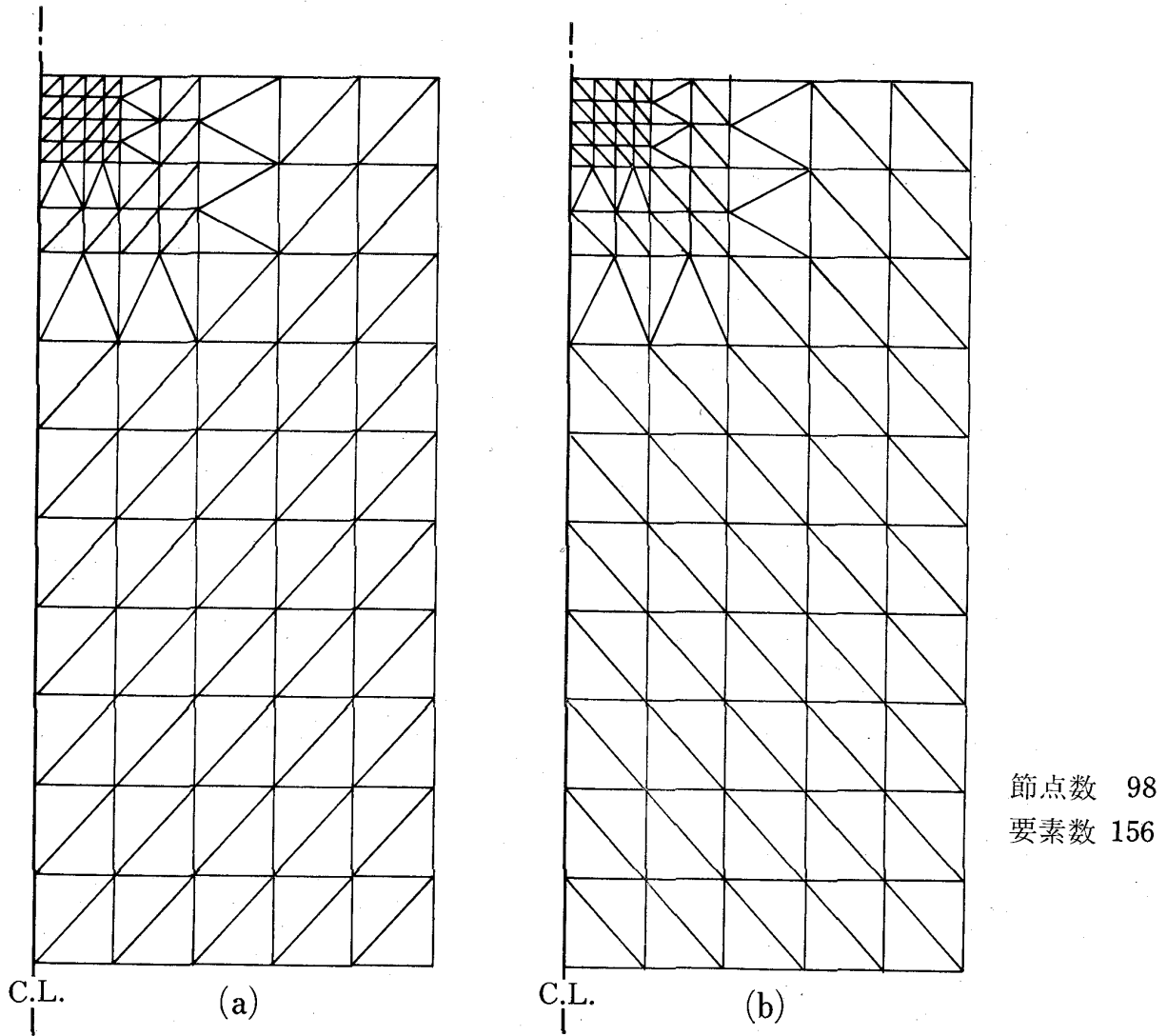


図 15 計算に用いた有限要素パターン (その2)

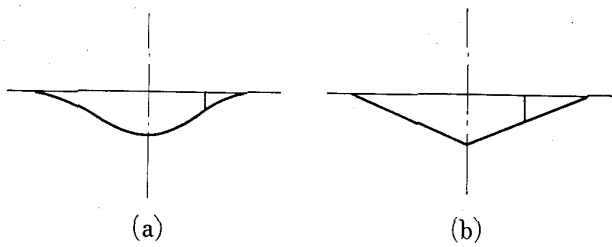


図 16 ダイアフラムの変形

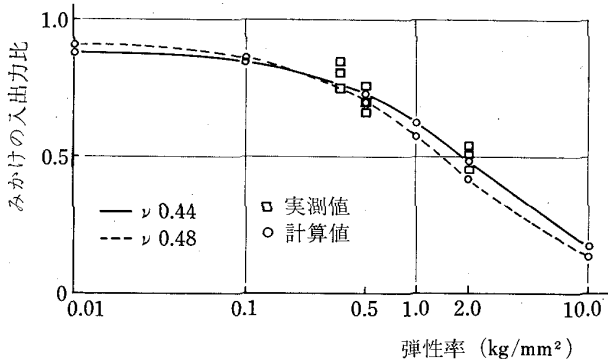


図 17 みかけの入出力比 (計算値と実測値との比較)

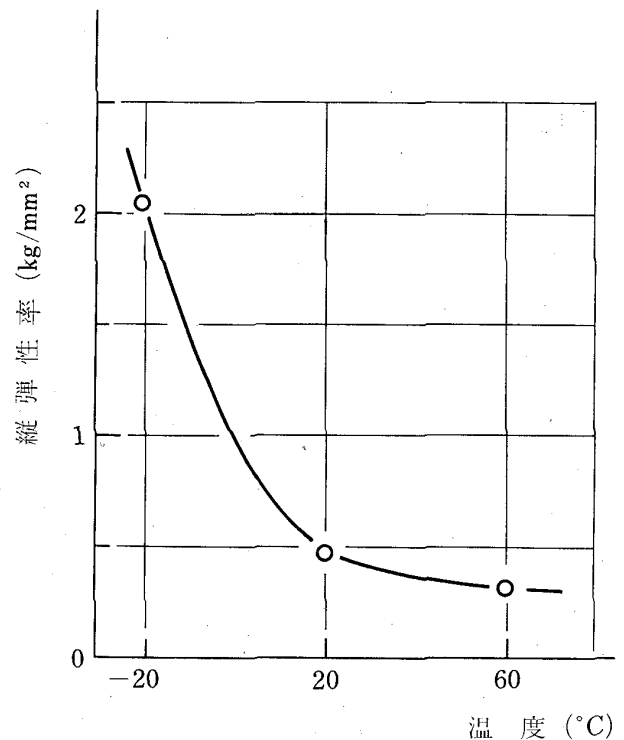


図 18 固体推進薬の温度に対する縦弾性率 (ステップ負荷し1分後)

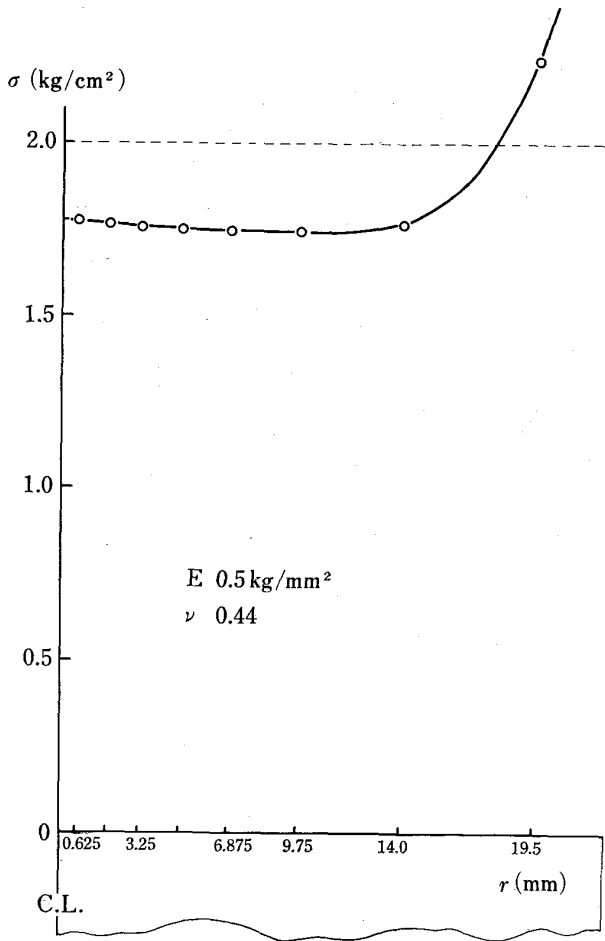


図 19 接着面での推進薬の応力分布

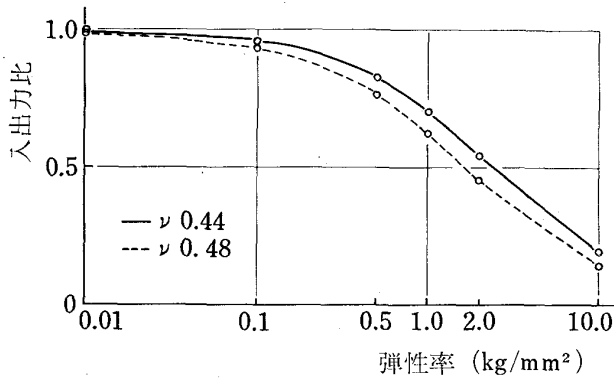


図 20 真のセンサ入出力比

ると、ダイヤフラムの最大たわみを 1/100 mm 程度におさえれば、この点でかなり満足すべき結果が期待出来そうである。

次にポアソン比の影響は体積弾性率におきかえると考えやすい。受圧板のたわみは局所的な体積変化となってあらわれるから、ポアソン比が 0.5 に近く体積変化しにくいものほど、センサ受圧板のたわみによる応力の逃げは大きな影響をうける。

4. まとめ

固体ロケット推進薬とモータケースの推着面に発生する熱応力を測定する目的で、超小型圧力ピックアップを応用した応力センサを試作し、温度特性試験および引張による入出力比の測定と解析を行なった結果、本センサが実用になりうること、および本論文での方法により入出力比を解析しうることがわかった。得た結果をまとめると次のようになる。

(1) 温度変化にともなう零点の移動や出力感度の変化については、あらかじめ補正曲線を作っておくことが望ましい。

(2) 固体表面での応力測定に際しては、センサ受圧面がたわんで被測定物内部の応力が逃げる結果、与えた入出荷重に対するセンサの出力感度は低目に出る。

(3) 第(2)項による応力の逃げは、有限要素法を用いた解析結果とよく一致する。

本研究を行なうにあたり、試験片の製作について宇宙研究グループ種村利春技官の協力を得た。

おわりに本センサの試作に対する日産自動車 K.K. 上野善衛氏の御教示に感謝の意を表す。

参考文献

- 1) A.J. Durelli; Experimental Strain and Stress Analysis of Solid Propellant Rocket Motors "Mechanics and Chemistry of Solid Propellant" Pergamon Press 1967 pp. 381~443
- 2) G.M. Dick, J.H. Thacker; Shear Strain Measurement in Solid Propellant Rocket Motors. AIAA Paper No. 64-506
- 3) W.H. Miller; Experimentally Measured Radial Bond Stresses in a Full Scale Motor, AIAA Paper No. 68-510
- 4) 渡辺 理; ひずみゲージとその応用, 日刊工業新聞社 1968 pp. 290~291

TM-188	自由飛行模型 FFM-10 の空力微係数におよぼす機体弾性変形の影響について	1970年11月	河崎俊夫, 河本巖 戸田勸
TM-189	燃料蒸発管に関する研究 (Ⅲ) —管内の燃料・空気二相流への熱伝達—	1970年12月	田丸卓, 乙幡安雄 鈴木邦男
TM-191	大型電子計算機プログラム・ライブラリ	1970年12月	戸川隼人, 磯部俊夫
TM-192	極超音速風洞 M9 ノズル較正試験	1971年1月	長洲秀夫, 橋本登 穂積弘一, 松崎貴至
TM-194	航空機の STOL 性に関する一考察	1971年1月	田辺義一
TM-195	曲面壁上の噴流に対する噴出孔形状, 配列の効果について	1971年1月	西村英明, 白井弘 井上重雄, 三村富嗣雄
TM-196	NAL-16 H 型ロケットの研究試作	1971年1月	宇宙研究グループ
TM-197	二次元煙風洞について	1971年1月	高橋宏, 戸田亘洋 白井正孝
TM-198	等高線を描かせるプログラム	1971年1月	磯部俊夫
TM-199	航空機用ヒーターの燃焼器の開発実験	1971年2月	堀内正司, 本間幸吉
TM-202	単発 STOL 実験機に関する研究 —テレメータ実験局の電界強度測定—	1971年6月	幸尾治朗, 小野孝次 矢沢健司, 塚野雄吉
TM-203	固体ロケットの比推力測定の標準化	1971年6月	五代富文, 岡部祐二郎 清水昭紀, 伊藤克弥 西村久男
TM-204	サーボ機構の過渡応答改善用デジタルコントローラについて	1971年7月	小川鉦一, 島村正人 (日本大学)
TM-205	自由飛行模型 FFM-10 の動安定微係数の推定について	1971年7月	河崎俊夫, 河本巖
TM-206	静止衛星の軌道保持シミュレーションシステムの構成 (I) —地球の重力場による摂動—	1971年8月	松島弘一
TM-207	対称スピン衛星用ニューテーション・ダンパの解析	1971年9月	村上力, 狼嘉彰
TM-208	薄板継手構造の強度についての実験 —接着およびリベット継手—	1971年11月	池田為治, 熊倉郁夫 竹内和之

注：欠番は配布先を限定したもの

航空宇宙技術研究所資料 209 号

昭和 46 年 11 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)44-9171(代表)☎182

印刷所 有限会社啓文堂 松本印刷
東京都文京区水道 2-7-5
