

圧電素子による構造物の簡易応力履歴計測に関する研究

(第2報 圧電素子の取付に関する検討)

正員 新 宅 英 司* 正員 藤 本 由紀夫*
 正員 濱 田 邦 裕* 武 内 哲 也**
 竹 薮 直 紀**

Study on Simple Sensor for Stress History Measurement of Structural Member using
 Piezoelectric Element

(Part 2 Investigation on Installation of the Piezoelectric Element to Structures)

by Eiji Shintaku, *Member* Yukio Fujimoto, *Member*
 Kunihiro Hamada, *Member* Tetsuya Takeuchi
 Naoki Takeyabu

Summary

In this paper, a stress sensor using piezoelectric element is developed to monitor the feature of stress history of structural member. The sensor is a rectangular box (90mm long, 60mm width and 25mm thick) made of thin aluminum plate, in which piezoelectric element, electric circuit including integrating circuit, button type battery, make and break switch, stress level meter using light emitting diodes (LED) and stress level cross counter are facilitated. The stress level meter can turn on and off different color diodes according to the change of stress level. The stress level cross counter can display the number of cycles which exceeds a specific stress level during a monitoring period. The sensor is bonded onto the structural member by using adhesive agent. The monitoring period can be determined by the attached switch.

In order to see the influence of the installation method on the performance of the sensor, experiments are carried out using a fatigue testing machine. The sensor is bonded onto a smooth specimen and multiple repeated stresses are applied to the specimen. The output signals of the sensor are investigated by changing wave shape, stress amplitude and frequency. Followings are made clear from the experiments.

- 1) The thickness of the sensor box influences on the measuring performance of the sensor.
- 2) The sensor can operate until the yield point of the mild steel. Upper limit of the measuring by using piezoelectric element is about 260 MPa or 1200 micro strain.
- 3) It is shown the possibility to measure stress of structures which have curved surface by using piezoelectric film (PVDF).

1. 緒 論

船舶や海洋構造物などの大型構造物の安全性維持のために構造部材に働く応力や応力履歴を把握することは非常に重要である。従来からひずみゲージに代表される高精度な測定装置を使用した応力情報の収

* 広島大学工学部

** 広島大学大学院工学研究科

原稿受理 平成 11 年 7 月 9 日

秋季講演会において講演 平成 11 年 11 月 18, 19 日

集が行われている。しかし、測定機器や装置の設置にコストがかかる点や設置作業の複雑さ、膨大な測定データの解析作業など、様々な問題点がある。逆に計測器の測定精度を追求せず、ある程度保証するくらいに止め、機能を限定して装置の小型化や設置の容易なものとする事で従来の測定装置の役割を補完することも考えられる。このような考えに基づき、著者らは簡易型の小型応力履歴センサの開発を行い試作品を完成させ、その性能について検討を行った。本センサは構造物の応力状態を表示するレベルメータと指定した応力レベルの発生回数を計数するカウンタで構成され、構造物への取付は接着により行う。

これまでの研究でセンサの基本構成を確立し、センサの性能と問題点を実験により明らかにした。問題点および要検討項目としては、

- (1) 偶発的に生じるセンサの出力信号波形の乱れ
- (2) 信号処理回路のゼロ点調整
- (3) カウンタ回路の動作問題
- (4) センサの最大許容応力など、実用上必要だが未確認の性能

等がある。上記の問題点は圧電素子を使用して応力を検出した後の信号処理回路に関するものが主である。その後の研究で、項目(1)は回路の電池の消耗によって発生することが明らかになったため、安定した電圧を供給できるように電源回路を改良した。

被測定物に関する情報を取得した後のデータ処理に関しては、様々な取組み方があり用途に応じて適切に構成すればよいが、センサ本来の性能・機能を決定するのは、信号の入り口の部分、つまり応力を検出する圧電素子単体の性能およびセンサの取付方法等の

ハードウェアである。そこで本研究では、上記項目(4)について、センサの基本性能に関わるセンサの取付法について、以下の3項目を検討した。

- (1) ケースの影響など取付法についての検討
- (2) 最大許容応力等の圧電素子単体の性能
- (3) センサの曲面への適用

上記項目について実験的に検討を行い、応力履歴センサの性能を明らかにした。

2. 応力履歴センサの概要

著者らが開発したセンサは、(1)構造物に働く応力の大まかな値を一目で分かるように表示する、(2)その設定した応力レベルが測定期間中に何回発生したかを記録するという2つにセンサの機能を限定することにより、センサの小型化・設置の容易とすることを試みたものである。

Fig.1 に開発したセンサの概要を示す。センサの主要部分は、タバコの箱程度の大きさのアルミケース内に納められており、センサ筐体を接着剤で構造物に貼り付けるだけで測定可能となる。内部は応力を検出する圧電素子と信号処理のための電子回路、および電源回路で構成されている。センサ表面には、応力状態を表示する応力レベルメータと各応力レベルの発生回数を表示する応力レベルクロスカウンタがある。応力レベルメータはオーディオ製品のレベルメータのように発光ダイオード(LED)の点滅によって構造物の応力レベルを表示するものである。また、応力レベルクロスカウンタは、LEDの点灯回数を記録するもので、各応力レベルの発生回数を測定すれば、簡単な応力履歴

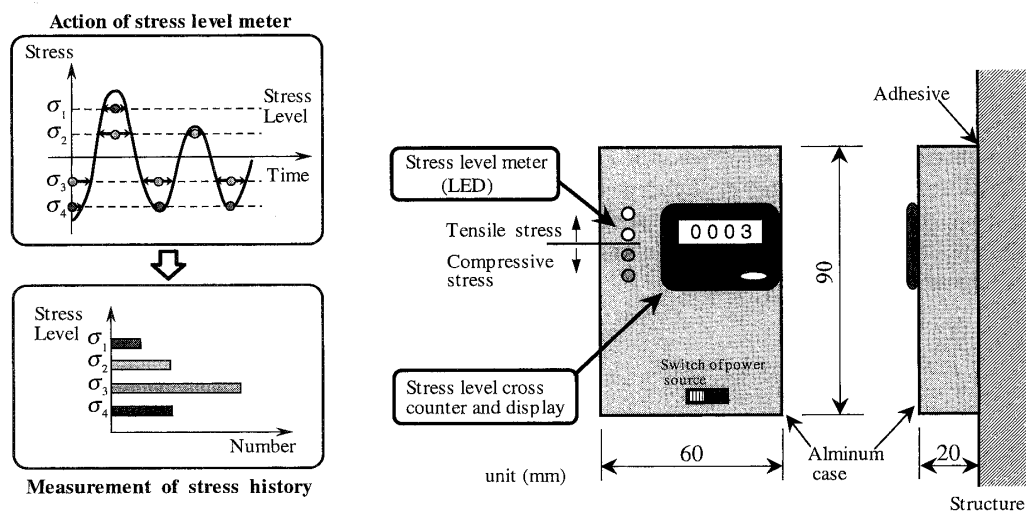


Fig.1 Configuration of the stress history sensor for structures.

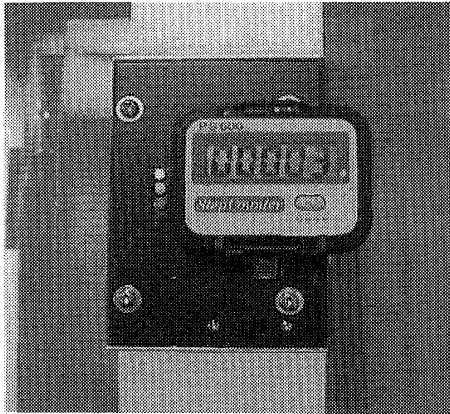


Photo 1 Prototype of stress history sensor.

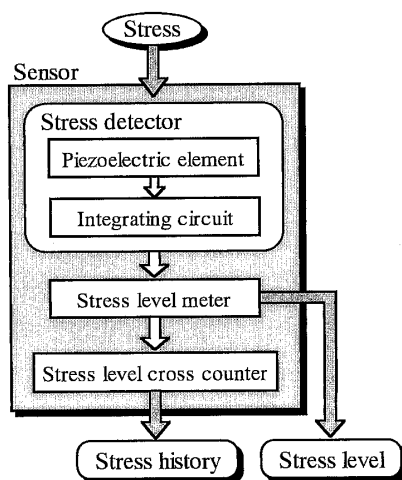


Fig. 2 Inner structure of the sensor.

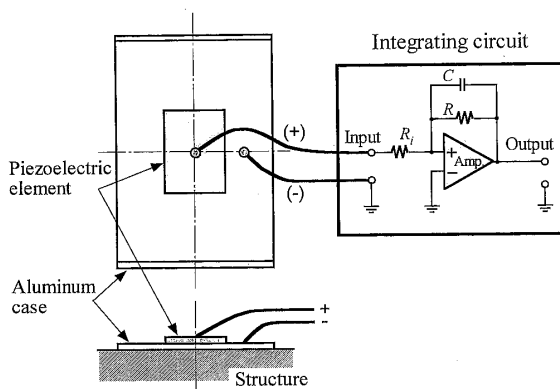


Fig. 3 Installation of the piezoelectric element.

歴を得ることができる。

センサの内部構成を Fig.2 に示す。センサは圧電セラミックスを含む応力検出部、応力レベル検出回路、応力レベルクロスカウンタおよび電源回路から構成される。応力検出部は応力を検出する圧電素子と素子の出力信

号を処理する積分回路で構成する。センサで最も重要な、応力を検出する素材として、圧電セラミックスを使用している。これは超音波振動子や振動計のピックアップ部に使用されている素材で、材料に応力が負荷されてひずみが生じると電界を発生する圧電性を持つ²⁾。この信号出力は比較的大きいため信号処理を簡便なものとなることができ、センサを小型化することが可能となった。本研究で使用する圧電素子は(株)村田製作所製の角板型のもので、チタン酸・ジルコン酸鉛(PbTiO_3 , PbZrO_3)を材料とする圧電セラミックスである。サイズは長さ 32.3mm, 幅 22.3mm, 厚さ 0.3mm である。素子は厚み方向に分極しており、Fig.3 に示すように、素子の(+)極を上面にして市販のアルミケースの内部中央にエポキシ樹脂で接着する。素子を積分回路に配線する際は導電性ペーストを使用し、(+)端子は直接素子の上面に接続して(-)端子はアルミケースから取る。

圧電素子は母材の歪みを電荷に変換し、その出力電圧波形は応力波形を微分したものになる。積分回路は圧電素子が発生する電荷を蓄積して、母材に負荷される応力と圧電素子からの出力信号が比例関係となるように処理する回路である。

本論文では、上記のセンサを標準型センサと呼ぶことにする。

3. センサの取付に関する検討

3.1 接着剤の影響

本センサではセンサの設置作業を容易にするため、さらに構造物に余計な力を加えないように、取付に接着を使用している。接着は圧電素子のアルミケース内部への取付けと、センサ本体の構造物(母試験片)への取付に使用しており、接着による荷重伝達効率の程度によってセンサの測定精度や感度に大きく影響を及ぼすことが予想される。また、センサの設置し易さを考慮すると、同じ接着強度を持つ接着剤であれば、より早く硬化するものの方が望ましい。

そこで数種の接着剤をテストし、センサの取付に適切なものを選定することにした。使用する接着剤はエポキシ樹脂系接着剤 2 種と電気的な接続に有利な導電性接着剤 1 種の合計 3 種類である。接着剤の特長を Table 1 に示す。尚、接着剤 1 については、過去の研究で接着層厚さ 0.25mm で 93%の応力伝達率が得られることが分かっている³⁾。本研究では接着層厚はこれより極めて薄いものとするので伝達効率は 100%に近くなることが予想される。

試験は次のように実施した。圧電素子を平滑試験片中央に上記 3 種類の接着剤を使用して取り付け。圧電素

Table 1 Adhesive agents.

No.	Adhesive	Manufacturer	Product	Curing schedule
1	Industrial epoxy resin adhesive	Konishi Co., Ltd.	Bond E	20°C 12 hrs.
2	Quick-hardening epoxy resin adhesive	Ciba-Geigy AG	Araldite	20°C 10 min.
3	Conductivity paste	Fujikura Kasei Co., Ltd.	Dotite	25°C 3 hrs.

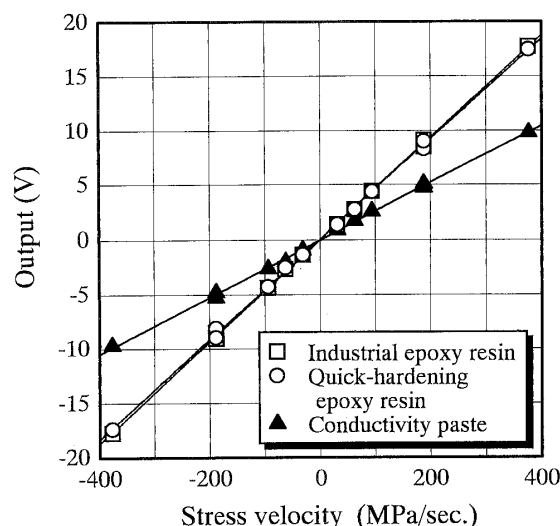


Fig.4 Influence of the adhesive agents on the output voltage of the piezoelectric element.

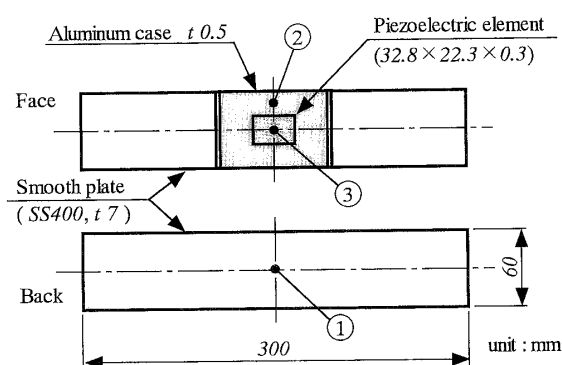


Fig.5 Specimen bonded the stress history sensor.

子は前報と同様に、村田製作所製圧電セラミックス・ピエゾタイト（長さ32.8mm 幅22.3mm 厚さ0.3mm）を使用する。試験片の材質は軟鋼 SS400 であり、寸法は長さ360mm 幅60mm 板厚7mm である。接着後はどの素子もクランプで固定し、乾燥時間を十分にとった後に試験を実施した。試験では油圧サーボ試験機により試験片に周期的な変動荷重を負荷し、圧電素子の出力電圧を測定した。荷重条件は、応力比 $R = -1$ 、応力振幅 10 MPa, 30 MPa, 60 MPa の両振り、振動数 0.5 Hz, 1 Hz であ

る。

結果を Fig.4 に示す。ここで、横軸は応力速度であり、縦軸は圧電素子の出力電圧である。試験片に負荷される応力 $\sigma(t)$ は、応力振幅を A 、振動数を f とすると次式で与えられる。

$$\sigma(t) = A \sin 2\pi ft \quad (1)$$

実際の応力値は試験機に搭載しているロードセルによって検出した荷重と試験片の断面積から計算する。応力速度 $\dot{\sigma}(t)$ は(1)式を微分して(2)式で与えられる。

$$\dot{\sigma}(t) = (2\pi f A) \cos 2\pi ft \quad (2)$$

図中に□印で示した工業用エポキシ樹脂と○印の速乾性エポキシ樹脂の2種類の接着剤については圧電素子の出力電圧に差異は見られなかった。一方、▲印の導電性接着剤は、エポキシ樹脂系接着剤と比較して出力電圧が43%低下した。この試験の結果から、ケースおよび素子の接着は、速乾性エポキシ樹脂接着剤を使用し、導電性接着剤は圧電素子と電気回路の結線にのみ使用することにした。

3.2 ケース厚の影響

応力履歴センサは、取付および取扱いを容易にするため、センサの構成要素の殆どを筐体内に納めており、構造物に負荷される応力はケースを介して圧電素子で検出している。このためケースの材質や板厚がセンサの感度や測定精度に影響することが予想される。そこで最初に標準型センサのケースの荷重伝達率を測定した。標準型センサのケース素材は、加工が容易で軽量であり、鋼と比較して Young 率の小さいアルミニウムを使用した。ケースの板厚は、応力 60 MPa に対してセンサの出力電圧が約 2V 得られるように、0.5 mm としている。

センサ各所における荷重伝達率の測定には、ひずみゲージを使用した。Fig.5 に示すように母試験片表面①、標準型センサのケース内側②と圧電素子表面③の3ヶ所にひずみゲージを貼り、試験片に変動荷重を負荷してそれぞれの場所でのひずみを測定した。

実験結果を Fig.6 に示す。母試験片の歪みと 0.5mm 厚ケースの歪みを比較すると、荷重伝達率は86%であり、応力と歪みの関係は線形的になっている。また、圧電素子表面の歪みは図中に○印で示すように 0.5mm 厚ケースの値と一致しており、ケースと素子間における荷重の伝達損失はないことを示している。

同様に平滑試験片に板厚 1mm のケースを接着し、1mm 厚ケース内側と母試験片表面にひずみゲージを貼って歪みを測定した。Fig.6 より、ケース厚 1mm とし

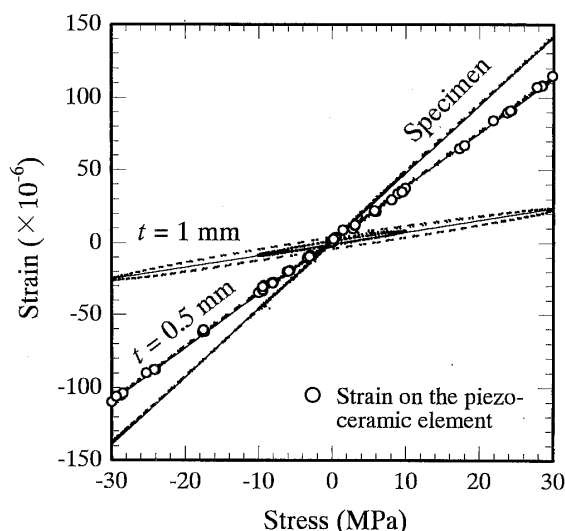


Fig.6 Influence of the thickness of the aluminum case of the sensor.

た場合、ひずみ伝達率は18%に低下し、応力とひずみの関係に履歴現象が見られる。

以上の結果より、測定精度を保ちながら効率良く応力を測定するには板厚0.5mmは適切な値であったことが判明した。アルミケース厚を増厚すると測定特性は悪化するが、本研究で使用した圧電セラミックスの抗折強度は98.9MPaであり、これ以上の応力を負荷された場合には板厚増加により圧電素子を保護することが可能となる。逆に板厚を減少させて歪み伝達率の増加し、センサを高感度化することが考えられるが、センサを取扱う際、ケースの曲げ変形による素子の破壊が予想されるため、取扱いの容易さを優先させて今回は板厚を0.5 mm以下とする場合は検討しなかった。

4. 圧電素子の応力特性

4.1 圧電素子の高応力下での特性

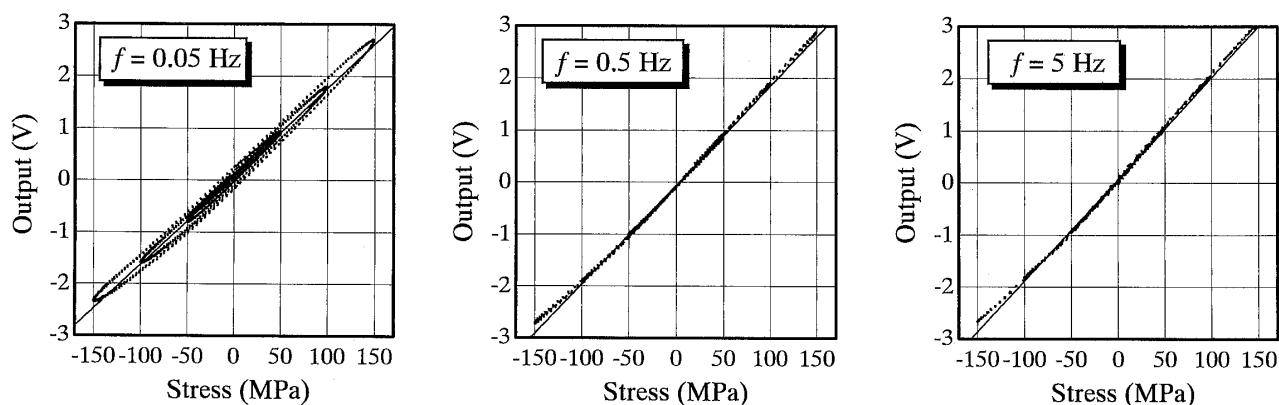


Fig.8 Relation between stress and output voltage of the piezoelectric element bonded on the smooth specimen.

実構造物に働く応力値は、場所によって様々であり、部材によっては100MPaを越える応力が働くことも珍しくない。センサの実構造物での使用を想定して、高応力下における応力履歴センサの出力特性を検討する必要がある。このとき、センサ材料の中で一番強度的に弱い圧電素子の破壊強度がセンサの測定限界となると考えることが出来る。そこで圧電素子単体の応力-出力電圧特性を明らかにした。

圧電素子単体での特性を調べるため、Fig.7に示すように圧電素子を中央にエポキシ樹脂で直に接着した平滑試験片に、油圧サーボ試験機によって正弦波状に変動応力を付加する試験を行った。このとき圧電素子のサイズは縦23mm横17.1mm板厚0.3mmで、素子の長辺を試験片の長さ方向に一致するように接着している。圧電素子のサイズは標準型センサの2分の1の面積で、縦横比は等しい。これは次節の検討項目と試験片を併用したためである。荷重条件は、応力比 $R=-1$ 、応力振幅50, 100, 150 MPa、周波数 $f=0.05, 0.1, 0.5, 1, 5$ Hzの両振り試験とした。結果をFig.8に示す。各図は周波数 $f=0.05, 0.5, 5$ Hzの測定データで横軸に応力を取り、縦軸に圧電素子の出力信号を標準型センサの積分回路を通して応力値に変換したものをプロットしている。図中の直線は測定データを最小二乗法によって近似した直線である。

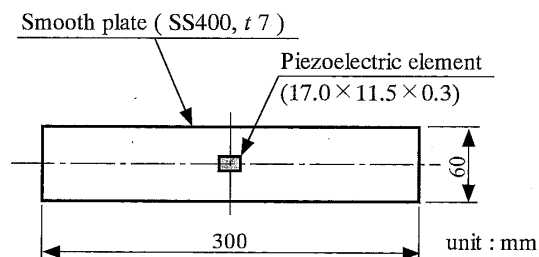


Fig.7 Specimen bonded a piezoelectric element.

図より、引張・圧縮ともに応力と積分回路を使用した圧電素子出力の関係は線形となっている。ただし、測定値は、引張側で実際値よりやや大きめになり、圧縮側で小さくなる傾向がある。また、振動数 0.05Hz (周期 20 秒) の場合、圧電素子の出力電圧が小さいために、履歴現象が見られる。

4.2 応力方向による影響

これまでの実験では、長方形の素子の長さ方向にのみ荷重を負荷して応答特性を調べた。使用したセラミック圧電素子が異方性を持つ場合、応力の方向によって測定値が異なることになる。そうすると新たにセンサの取付方向の問題や測定データ処理の問題等が生じる。そこでセラミック圧電素子の応力・出力電圧特性において異方性を示すのかどうかを確認した。

試験は4.1節と同様にして実施する。ただし素子の長辺を荷重方向に一致させた場合を角度 0° とし、他に 45° 、 90° の角度を付ける。試験片は2本用意した。Fig.9は圧電素子の出力信号を横軸に応力速度と縦軸に出力信号をとって各角度についてプロットしたものである。応力速度の計算には(2)式を使用している。試験片によって出力電圧が異なるが、同一試験片については各角度での圧電素子の特性はほぼ一致しており、角度による出力特性の差は殆ど見られない。試験片1と2における出力の相違は、接着時の処理が原因と思われる。

以上の結果から、本センサによって本実験のように1軸応力を測定した場合、センサの取付方向によらず主応力の値を測定することが可能であるが、主応力の方向を同定することは出来ないことが判明した。

4.3 面積の影響

次に圧電素子の出力電圧と面積の関係について調べた。素子の面積をそれぞれ 3.92cm^2 、 1.95cm^2 であるとき

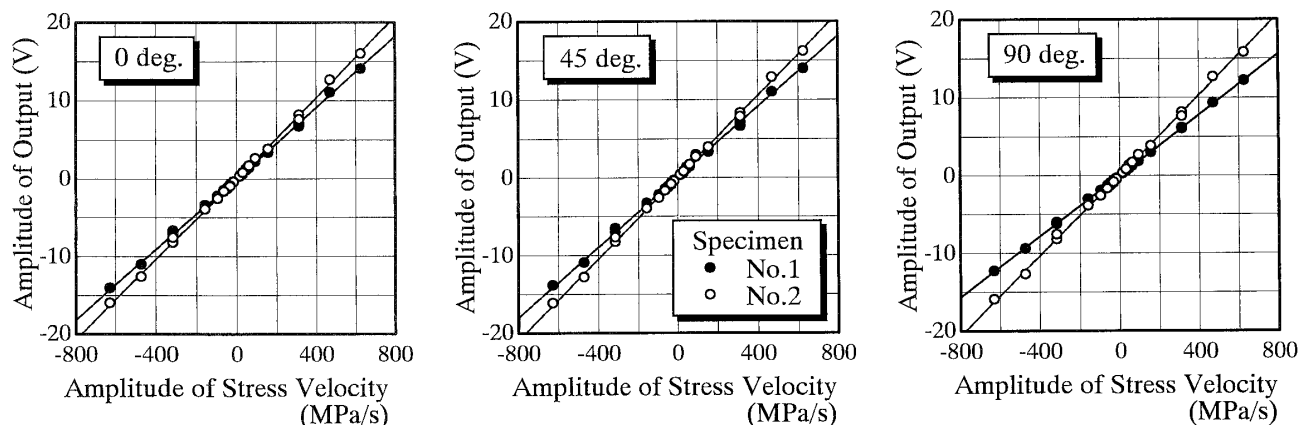


Fig.9 Influence of the direction of stress on the output voltage of the piezoelectric element.

両素子を接着した試験片に応力振幅 100MPa 、振動数 0.1Hz の変動応力を負荷した。このとき積分回路で処理した後の出力電圧はそれぞれ 1.79V 、 0.931V となった。従って、単位面積あたりの出力電圧はそれぞれ $0.46\text{V}/\text{cm}^2$ 、 $0.48\text{V}/\text{cm}^2$ とほぼ等しくなり、圧電素子の出力電圧は面積に比例して得られることが判明した。

4.4 圧電素子による応力の測定限界

4.1節で圧電素子によって応力振幅 150MPa の引張・圧縮応力が測定可能であることを示した。しかしながらセンサとしての測定限界を明らかにするためには、引張試験を行い、試験片を降伏・塑性変形させ、どの段階まで素子が応力を測定できるかを明らかにする必要がある。そこで、圧電素子を直接張り付けた試験片の引張試験を行った。

Fig.10に試験片の寸法を示す。材質はSS400で、サイズは中央部の幅が 40mm 、板厚 5.5mm である。試験片の中央に長さ 17mm 、幅 11.5mm 、厚さ 0.3mm の小型圧電素子を2枚接着した。素子の貼付方向は長辺を試験片の長さ方向に一致させている。2枚の試験片の内、一方は圧電素子の出力電圧を直接測定するために使用し、他方は積分回路により圧電素子の出力を応力に変換した信号を測定する。また、母試験片のひずみを測定するため、ゲージ長 3mm のひずみゲージを取り付けた。

引張試験では、油圧サーボ試験機によって一定荷重速度でランプ状の荷重を試験片に負荷した。このとき応力速度が遅いと素子の出力が小さくなり過ぎて測定できない恐れがあるので、毎秒 15MPa の割合で応力を増加させる。これは4.1節の試験の半分程度の速度で、応力速度 0.01Hz に相当する。試験開始から 15 秒で母試験片の降伏点付近の 225MPa を超え、 20 秒で 300MPa に達する。

実験結果を Fig.11, Fig.12 に示す。Fig.11 は上から試験片に負荷した応力、素子の出力電圧、積分回路を使用した素子の出力電圧、ひずみゲージを使用して測定し

た母試験片のひずみ、それぞれの時刻歴である。Fig.12は、母試験片に負荷される応力と積分回路出力および応力と母試験片表面のひずみの関係を表したものである。

試験の開始から約7秒間、応力値にして100MPaまでは、積分回路出力は応力値に比例した出力が得られており、素子の直接出力もほぼ一定値の0.3Vである。

応力値が100MPa以上240MPa以下となる範囲では、積分回路出力は実際の応力値よりも0～8.5%低い値になるが応力値に比例した測定値は得られている。このとき素子の直接出力は積分回路出力とは逆にやや増加傾向にある。そして試験時間が15秒を経過し、応力が220MPaに達し、母試験片の歪みが1000 $\mu\epsilon$ を越えた直後に素子の直接出力に変化が現れ、出力が低下し波形が乱れが生じている。これに伴い積分回路出力がやや上昇

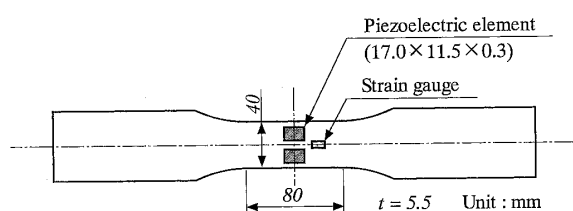


Fig.10 Specimen used in the strength test of the piezoelectric element.

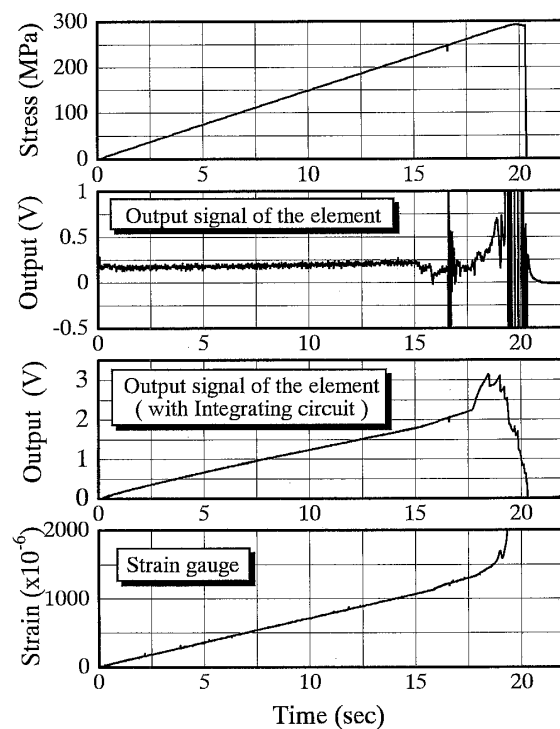


Fig.11 Time histories of the stress, output signal of the element with and without the integrating circuit and strain in the strength test.

する。約1秒後にひずみのグラフにも変化が現れ、それまでの値よりひずみが増加しており、約240MPaで母試験片が降伏点に達したことが分かる。17秒で素子の直接出力にインパルス状の波形が見られるが、これは試験片に加わる負荷が大きくなりチャックが試験片に食い込んだ際に発する衝撃音を拾ったものである。衝撃の影響は積分回路出力には殆ど影響していない。

その後、試験時間17.5秒を境に母試験片の塑性変形が進展してひずみが急激に大きくなり、応力が260MPa、歪みが1300 $\mu\epsilon$ を越えると、素子の直接出力および積分回路出力は急激に上昇し波形が乱れ、19秒で圧電素子に亀裂が生じて出力がゼロとなり測定不可能となった。応力300MPaに達したところで試験を終了した。

試験後の母試験片の様子をPhoto 2に示す。母試験片表面にはリューダース帯が発生しており塑性変形している。一方圧電素子は、1枚の素子表面に細かい亀裂が1, 2本発生しているのが見受けられたが外見上大きな変化は見られない。

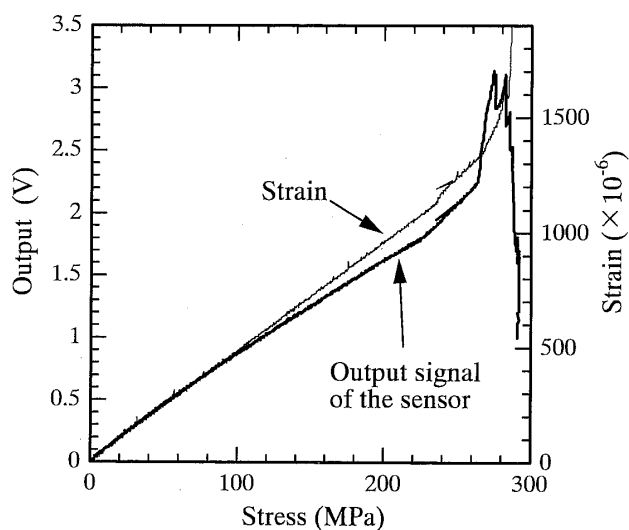


Fig.12 Comparison between the output voltage of the element and the strain.

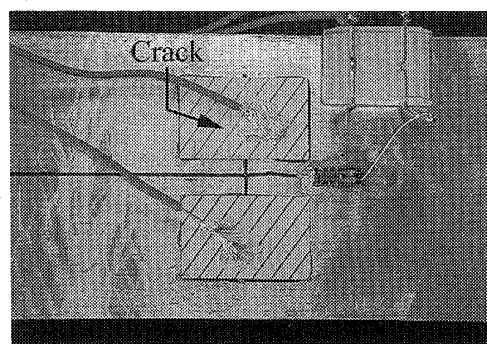


Photo 2 Close-up view of the elements after the strength test.

5. 応力履歴センサの高応力下での測定特性

4節において圧電素子の測定限界について検討した結果、標準型のセンサで軟鋼の降伏点 230MPa 付近までの応力を測定する見通しが得られた。そこで標準型センサの高応力下での測定特性を調べた。

5.1 圧電素子の高応力下での特性

文献 1)では、応力履歴センサを平滑試験片に接着し、応力比 $R=-1$ 、応力振幅 60MPa の両振試験を行った。この結果、応力速度 0.05Hz から 5Hz にわたって応力値とセンサ出力信号の関係は線形になることを示した。本研究では、応力比 $R=-1$ 、応力振幅 50MPa, 100MPa, 150MPa, 応力速度 0.05Hz, 0.5Hz, 5Hz の正弦波状の変動荷重を負荷する実験を行った。このとき試験には標準型センサを使用した。

応力とセンサの出力信号の関係を Fig.13 に示す。図より、応力振幅が 150MPa の場合も応力速度 0.05Hz から 5Hz にわたって、応力振幅 60MPa の低応力下と同様に、応力とセンサの出力信号の関係は線形となることが分かる。ただし、応力振幅が 100MPa を越えると、引張

側で実際よりやや大きい値となり、圧縮側ではやや小さい値となる傾向がある。

5.2 複雑な波形を有する変動応力の測定

これまでの実験では、変動応力としては主として一定振動数（周期）の正弦波形を与えており、この条件下では応力履歴センサは良好な性能を示した。しかし実際にはこのような状況は希で、船舶などの構造物は非常に複雑な波形の応力を受けている。そこで本センサが複雑な波形を持つ変動応力を測定できるかどうかを確認する実験を行った。

試験に使用する応力波形は、Fig.14 上図に示すように、長周期応力に小振幅短周期応力を重ね合わせた波形とした。波形の詳細は Table 2 に示す。試験片は 5.1 節で使用したものと同一である。

応力に対するセンサの出力信号を Fig.14 下図に示す。図より試験片に負荷された応力をセンサが正確に検出していることが分かる。Fig.14 の時刻歴を応力と出力信号の関係に描き直したものを Fig.15 に示す。試験片に負荷された応力に対してセンサの出力との関係は線形

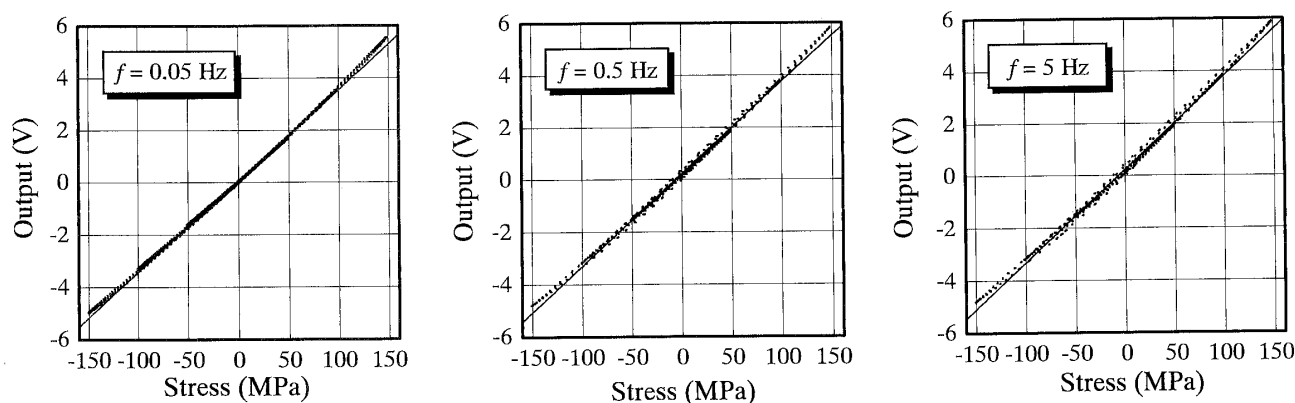


Fig.13 Relation between stress and output voltage of the stress history sensor.

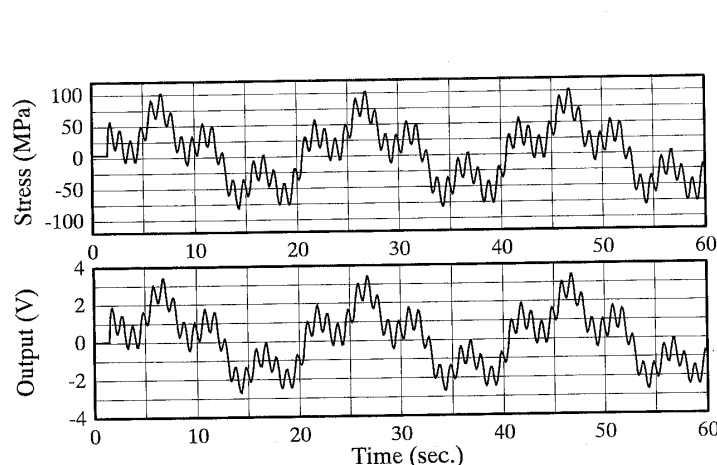


Fig.14 Time history of the output signal of the sensor to the stress which have complex wave form.

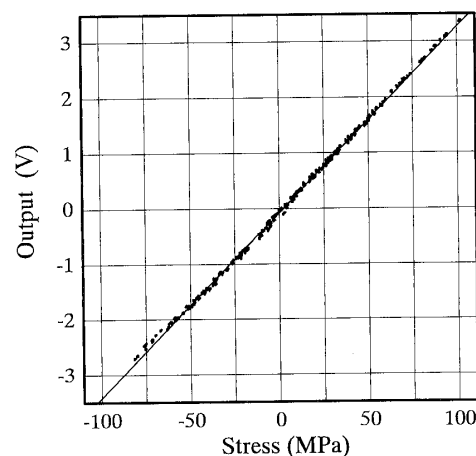


Fig.15 Relation between stress and output voltage of the stress history sensor.

Table 2 Components of the wave form.

No.	Frequency (Hz)	Period (sec.)	Amplitude (MPa)	Phase (degree)
1	0.05	20	50	0
2	0.2	5	30	90
3	1	1	20	0

となっていることが明らかとなった。現実の複雑な応力状況を再現したものではないが、より現実に近い複雑な波形に対しても本センサで測定可能であることを示した。

6. 曲面形状を持つ構造物の応力測定

6.1 圧電フィルムの特性

これまで検討した標準型センサは、測定対象とする構造物の形状は平面に限られていた。これは応力を検出する圧電セラミックスは平板形状のものを使用しており、素材としても脆く柔軟性に乏しい素材であることが理由である。

本研究では、応力履歴計測センサを曲面に取付可能とするため、柔軟な素材である圧電フィルムが応力検出に使用可能であるかを検討した。

実験には呉羽化学工業製のKF ピエゾフィルムを使用した。これはポリフッ化ビニリデン樹脂(PVDF)を材料とする高分子圧電材料である。使用した製品は厚さ $40\mu\text{m}$ でシート状の柔らかい素材であるため成形加工が容易で、曲面に適用することが可能である。本フィルムは一軸延伸極して製造されるため異方性を持ち、延伸方向に強い圧電性を示す。引張強度は延伸方向で約 500MPa 横方向で約 50MPa であり、伸度 4.5% から 5.5% で降伏する⁴⁾。鋼構造物の応力測定には十分な強度を持つ。試験に使用する圧電フィルムは縦(延伸方向) 30mm 、横 20mm のサイズに切断し、SS400材で作成した平滑試験片表面中央にエポキシ樹脂で直接接着した。これにプログラム荷重を負荷する試験を実施し、フィルムの応力-出力電圧特性を測定した。試験片に負荷する応力は、応力比 $R=-1$ とし、振幅を 10MPa 、 30MPa 、 60MPa 、応力速度を 0.5Hz 、 1Hz 、 5Hz とした。

実験結果を Fig.16 に示す。横軸に(2)式で換算した応力速度をとり、縦軸に 1cm^2 当たりの出力電圧をとっている。圧電フィルムの出力は○印で示してあり、比較のために圧電セラミックスのデータを●印で示している。図より圧電フィルムを使用しても、圧電セラミックスと同様に応力速度(応力の微分)に比例した出力が得られる事が判明した。しかしながら圧電フィルムの出力電圧は mV のオーダーで圧電セラミックスと比較すると2桁の違いがあり、非常に小さい。このため、応力速度 0.05Hz 以下では出力電圧が十分得られず測定不可能となった。応力履歴センサに圧電フィルムを使用する場合、回路の

基本構成は標準型と同様のもので十分であるが、圧電フィルムを低周波変動応力の測定に使用するためには、現在のサイズより広い面積のフィルムを使用すると同時に、信号を積分処理する前にフィルムの出力信号を数10倍に増幅する必要がある。

6.2 圧電フィルムによる曲面の応力測定

6.1 節において圧電フィルムの応力に対する基本的な特性は明らかになったので、圧電フィルムによって曲面形状を持つ部材の応力が測定できるかどうかを確認した。

Fig.17 に示すように、試験片は直径 8mm 、長さ 150mm のアルミ円柱の表面に6.1 節と同サイズ(縦 30mm ×横 20mm)の圧電フィルムで円柱を包むようにエポキシ樹脂接着剤で接着している。試験片の材質にアルミニウムを選定した理由であるが、同じ形状を持つ試験片に応力を負荷した場合、アルミニウムの歪みは軟鋼の3倍となり、その分フィルムの出力電圧も大きくなり測定が容易になると予想されるためである。これは軟鋼SS400の縦弾性係数は常温で約 $210 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ であるのに対して、アルミニウムの縦弾性係数は約 $75 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ と軟鋼の約3分の1であるためである。

試験機の試験片固定治具の都合でネジ式万能試験機を使用して引張試験を行った。荷重速度が一定になるよ

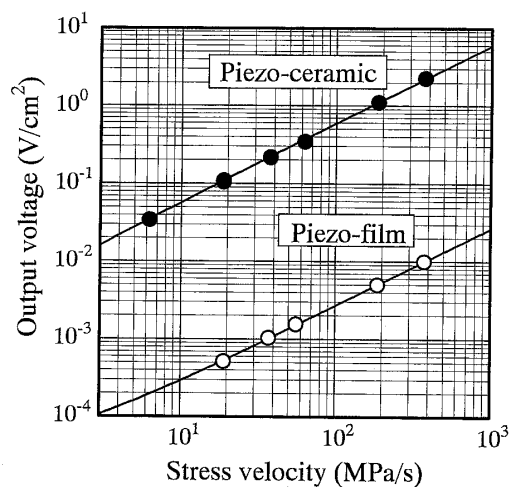


Fig.16 Output voltage per unit area of the piezo-film to the stress velocity.

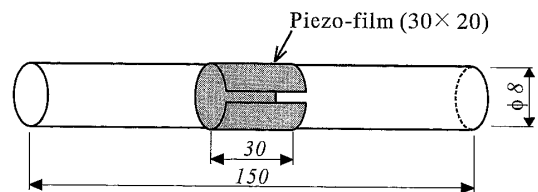


Fig.17 Cylinder specimen for the piezo-film.

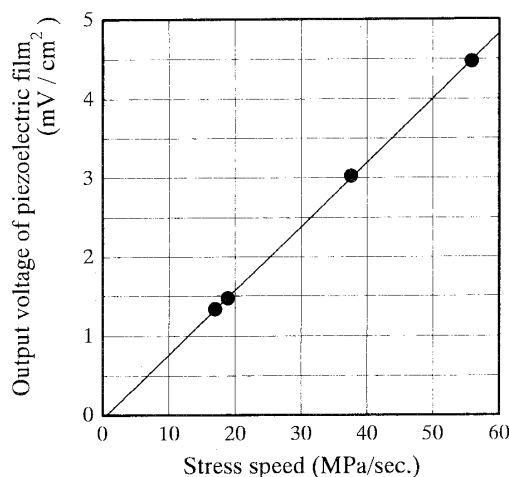


Fig.18 Result of the experiment.

うに試験を行い、応力速度を変えて4回実施した。応力速度は 17.0 MPa/sec., 18.9 MPa/sec., 37.4 MPa/sec., 56.1 MPa/sec. である。試験結果を Fig. 18 に示す。圧電フィルムを平板試験片に接着した場合と同様に、応力速度と出力電圧の関係は線形となっている。以上の結果から、圧電フィルムを応力測定に使用する見通しは得られた。

7. 結 論

本研究では、応力履歴センサの測定精度・特性に大きく関与する圧電素子の取付法について検討を行った。

最初に、接着剤やケース厚、圧電素子単体の性能など、センサの取付に関連する個別要素に関して実験を行い測定に及ぼす影響を明らかにした。さらに、上記の要素を総合した応力履歴センサについては高応力下での応力-出力電圧特性を明らかにした。最後に、本センサの適用範囲を曲面形状を有する構造部材に拡張するため、圧電フィルムの使用可能性について基礎的な検討を行った。研究の結果、以下のことが明らかとなった。

- (1) 圧電素子をセンサ筐体に取り付ける際、エポキシ樹脂接着剤を使用すれば十分な性能と固着強度が得られるが、接着が原因と思われる特性のばらつきが生じた。
- (2) センサ筐体の板厚を 0.5mm とすれば 86%の荷重伝達率を得られる。板厚 1mm となると荷重伝達率は 18%に減少した。従って、ケース厚はセンサの感度に大きく影響することが判明した。
- (3) 1 軸応力が負荷されている場合、センサの取付方向によらず主応力の値を測定することが可能であるが、主応力の方向を同定することは出来ない。
- (4) 圧電セラミック素子により軟鋼 (SS400) の降伏点付近まで応力測定が可能で、これを使用した簡易応

力センサも応力振幅 150MPa 程度もしくはそれ以上の応力を測定可能であることを示した。

- (5) 圧電フィルムを使用して曲面形状を持つ構造部材の応力測定が可能であった。

今後の課題としては、次の3点が挙げられる。

- (1) 前述の結果(3)より、センサの取付方向によらずに主応力値を測定することが可能であることからセンサの設置が容易であるといえる。その反面、本センサによる特定方向の応力成分の測定や、主応力の作用する方向の同定は不可能である。これらを実現するためには、ケース形状および圧電素子の取付法を再検討する必要がある。

この点については、Fig.19 に示すように、センサのケース底面を細長い形状とし、構造物にセンサを取り付ける際には板の両端のみを接着する方法が考えられる。これにより長さ方向の荷重は圧電素子に伝達され、これと直角方向の荷重成分の伝達は減衰させることが期待できる。主応力方向の測定には Fig.19 のようなセンサを複数個使用し、各方向の応力成分を測定する。測定データの解析についてはひずみゲージを使用する場合と同様の手法で主応力方向を同定することが可能であると思われる。

Fig.19 に示すような測定法の有効性を含めて、より現実に近い状況での応力測定が実施できるようセンサの取付法・測定法について検討を進めたい。

- (2) センサの取付法については、ある程度の知見が得られたので、次の段階として、圧電素子によって検出した応力データ処理の問題解決と現在の応力履歴測定法以外の別手法による測定信号処理の高度化について検討したい。
- (3) 圧電フィルムを応力の測定使用する場合、フィルムの出力信号は圧電セラミックスと比較して2桁小さいため、積分処理をする前にフィルムの出力信号を数 10 倍に増幅するなど圧電フィルム用の処理回路を開発する必要がある。また、曲面形状に合わせて

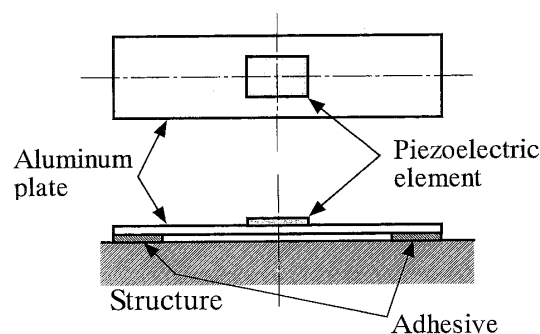


Fig.19 Installation method to restrict the sensor to the measuring direction of stress.

センサ筐体を成型することは困難であるため、測定対象にフィルムを直接貼る必要がある。従って、このときの圧電フィルムの取付法やセンサ筐体の形態等を再考する必要がある。

最後に、本センサの有効性を示すためには、実構造物に適用し現実の使用環境下でセンサ性能を示す必要がある。この点に関しても今後検討していきたい。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、協力して頂いた広島大学工学部荒殿一輝氏に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 新宅英司, 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 武内哲也: 圧電素子による簡易応力履歴計測に関する研究, 日本造船学会論文集, 第 184 号, (1998), pp.339-346.
- 2) 内野研二: 圧電/電歪アクチュエータ, 森北出版, 第 1 版, (1986), pp.51-70.
- 3) 藤本由紀夫, 新宅英司, 金成燦, 高本大世: 構造モニタリングによる疲労損傷の感知と予知, 日本造船学会論文集, 第 178 号, (1996), pp.523-533.
- 4) 呉羽化学工業: KF ピエゾフィルムカタログ.