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3報 高度処理機能を有する実用センサの開発)

正員 新 宅 英 司* 正員 藤 本 由紀夫*
 竹 薮 直 紀** 学生員 Gernot Pirker*
 正員 伊 藤 久***

Study of a Simple Sensor for Stress History Measurements of a Structural Member
 using a Piezoelectric Element
 (Part 3 Development of a Practical Sensor with Higher Operational Function)

by Eiji Shintaku, *Member* Yukio Fujimoto, *Member*
 Naoki Takeyabu Gernot Pirker, *Student Member*
 Hisashi Ito, *Member*

Summary

This paper describes a measuring device using piezoelectric material, which was developed to monitor features of the stress history of a structural member. The device counts the number of cycles of the fluctuating stress by the level crossing count method and the rain flow method. Microcomputers are used in this device to perform operations of those counting methods. The device can also display the operation results and the stress level of the monitored structural member with the liquid crystal display (LCD).

In order to see the performance of the test manufacture of the measuring device, experiments were carried out using a fatigue testing machine. The strain detector using piezoelectric polymer film was bonded onto a smooth specimen and multiple repeated stresses were applied to that specimen. As the result, the stress history measuring device can operate under a stress range from 110 MPa to 110 MPa, and a frequency over 1 Hz. Then, the device using the level crossing count method and the rain flow method can count accurately the number of cycles of the fluctuating stress.

1. 緒 言

船舶および海洋構造物などの鋼構造物では使用期間中に種々の応力が生じる。この応力を測定して把握することは、構造物の安全管理上きわめて重要である。

従来から構造物の応力測定にはひずみゲージ法が一般的に使用されているが、ひずみゲージ、ブリッジボッ

クス、増幅器、記録計、電源等の装置が必要となる上に、ひずみゲージの設置配線作業、装置の設置作業、測定作業、測定結果の処理作業など様々な作業が必要となり、測定費用がかさむという問題がある。このため、応力測定は一部の限られた構造部位に対して限定された期間しか実施できないのが現状である。

そこで著者らは、構造物の応力を収集する方法として、圧電材料を使用した簡素化された応力測定方法、および装置を開発した^{1),2)}。

提案した応力測定装置は、応力の検出に使用する圧電材料を含めた全ての部品をケース内に納めて一体化、小型化したことにより、測定の際は装置を構造物に接着するだけで作業が完了し、測定に必要な費用が従来と比較

* 広島大学大学院工学研究科

** 三井造船(株)(研究当時 広島大学大学院)

*** NKK エンジニアリング研究所

Fig.1 Configuration of the first test manufacture of the stress history measuring device and explanation of the function of the device.

して少なく済むという利点がある。また、決められたレベル以上の応力レベルが発生した回数を計数するという簡素化された応力測定法を採用したため、測定後の処理が簡単になり、ひずみゲージによる測定方法における測定装置の設置の問題と測定後のデータ処理の問題を解決している。

一方で解決すべき課題も残されており、本研究は前報で提案した応力測定装置において、圧電材料で検出した応力信号の処理に関する問題について検討したものである。

前記装置では設定応力レベルの超過回数の計数に専用回路を使用しているため、設定応力レベルを多段階化が回路の複雑化につながり、実用的な装置の開発が困難であるという問題がある。また、前記装置によって得られる情報は、構造物に負荷された応力の概略を知るためには有効であるが、構造物の疲労強度などの推定には直接利用できないという問題がある。

本研究は、上記の問題を解決するため、応力測定装置の信号処理にマイクロコンピュータ（マイコン）を使用し、装置全体を簡素な構成のままで設定応力レベルの多段階化を実現し、さらに疲労強度に関する情報取得法として広く利用されているレインフロー法を使用する応力測定装置を開発した。さらに、実験を行って試作機の測定性能を検討した。

2. 従来型応力履歴測定装置

2.1 従来型装置の概要

著者らが第1報、第2報において提案した応力測定装置は、(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つの機能を限定することにより、装置を小型化し、装置の設置作業を容易にすることを試みたものである。

Fig.1 に従来型測定装置の概要を示す。装置の主要部分は、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、装置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。装置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。圧電素子はケース底面内側に接着されており電気配線で信号処理回路に接続されている。装置表面には、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ッシングカウンタがある。

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。Fig.1 左上図に示すように応力測定範囲を等分割した応力レベルを設定し、構造物に負荷される応力値が設定応力レベルを超過したときに各レベルに対応するLEDが発光する仕組みになっている。また、応力レベルクロッシングカウンタは、各LEDの点灯回数を記録し液晶表示器に数値を表示する。各応力レベルの発生回数を測定すれば、簡単な応力履歴を得ることができる。

装置内部は、Fig.2 に示すように圧電材料、電荷増幅回路、応力レベルメータ用回路、応力レベルクロッシングカウント回路で構成される。構造物にひずみが生じると、これに比例して圧電材料が電荷を発生する。電荷増幅回路は、圧電材料が発生した電荷を増幅し、発生電荷量に比例した電圧信号を出力する。応力レベルメータ回路は電荷増幅回路の出力信号を各設定応力レベルと比

Fig.2 Block diagram of the former device.

較する電圧比較回路と、発光ダイオードを用いた表示回路で構成される。また、応力レベルクロッシングカウント回路は各設定レベルの発光ダイオードの点灯回数を計数するカウント回路と、カウント数を表示する液晶表示器で構成される。

2.2 従来型装置の問題点

前節で述べた従来型装置は、小型で設置が容易であり、簡易測定を行うというコンセプトの点で非常に有用な装置であるが、装置を実現するための回路構成、特に測定信号の処理に問題がある。

前節の回路構成に従い、測定結果を詳細に処理するために設定応力レベルを多段階化するためには、前記応力レベルメータ回路、応力レベルクロッシングカウント回路を設定レベル数だけ増設する必要がある。この結果、設定レベルの多段階化は回路の複雑化、装置の大型化の問題を生じる。このため、前報の試作装置は、設定応力レベルを引張・圧縮各2段階とせざるを得ず、応力レベルクロッシングカウント回路は1回路を搭載するのみで4つの設定応力レベルの1つを選択して計数する機能しなかった。

また、従来装置によって得られる測定情報に問題がある。Fig.3は変動応力波形の例を示している。Fig.3(a)は、平均応力の変動がなく振幅が変化する完全両振りの応力波形であり、Fig.3(b)は、平均応力の変動が生じた

Fig.3 Wave forms of the fluctuating stress. (a) shows completely reversed stress, (b) shows fluctuation of the mean stress.

振幅一定の応力波形である。設定応力レベルの超過回数を計数する応力レベルクロッシングカウント法では、(a),(b)の計数結果は同じとなるが、構造物の疲労強度を考える際には(a),(b)の波形は異なるものとして処理する必要がある。

この外に測定装置の使用上の問題として、装置の形状の問題がある。測定装置を小型化・一体化するため、ケース内部に必要な回路、部品を全て収納している。測定時、ケースは構造物に強く接着されるため、測定結果を回収するために測定装置を構造物から取り外す際に、装置を破壊する恐れがある。

さらに、第2報において、本応力測定装置を、曲面形状を有する構造部材に適用するため、ひずみ検出部に高分子圧電フィルムの使用を試みたが、圧電セラミックスと比較して出力の小さい圧電フィルム用の電荷増幅回路を開発することが課題として残されていた。この点については、その後の研究の結果、電荷増幅回路の特定数を調整することでフィルム用の電荷増幅回路の開発に成功している。

以上の問題点を踏まえ、応力測定装置の改良を試みた。

3. 高度処理機能を有する応力頻度測定装置

3.1 装置の改良点

2.2節で述べた信号処理に関する問題解決のため、本研究では応力測定装置にマイクロコンピュータ（マイコン）を使用する。マイコンは中央演算処理回路(CPU)において演算処理を記述したプログラムを実行して演算処理を行う。従って、機能を固定した信号処理回路を使用する測定装置とは異なり、C言語などのプログラミングによって測定対象物や測定状況に適した信号処理法を採用することが可能である。このため、応力レベルクロッシングカウント法の設定応力レベルの多段階化が容易に実現するだけでなく、これ以外の高度な信号処理法が採用可能であり、測定対象物や測定状況に応じてプログラムを柔軟に変更することが可能である。

3.2 回路構成

Fig.4は、応力測定装置の内部構成を説明するブロック図である。構造物に発生したひずみは、ひずみ検出器に装備した圧電材料で検出され、圧電材料は構造物のひずみに比例した電荷を発生する。この電荷を応力測定装置本体内の電荷増幅回路で処理し、構造物のひずみの大きさに比例した出力電圧を得る。

電荷増幅回路からの出力信号は、AD変換回路、CPU、ROM (Read Only Memory)、RAM (Random Access Memory)、その他入出力回路を備えた演算処理回路によって処理する。演算処理回路には、上記全てを備えたワ

Fig.4 Block diagram of the circuit of the new model of the stress history measuring device.

ンチップマイコン、あるいは同等の機能を有するマイコンボードを使用する。まず、前記増幅回路からの出力信号は、AD変換回路においてアナログ信号からデジタル信号へ変換される。すなわち、ひずみに比例した電圧値が数値に変換される。前記数値に変換されたひずみ信号はCPUを用いて応力レベルクロッシングカウント法、あるいはレインフロー法によって演算処理されて、構造物の変動応力履歴情報を得る。RAMにはこの変動応力履歴情報が保存される。マイコンチップのRAMの代わりに不揮発性メモリ(フラッシュメモリ)を使用した場合は、測定装置の電源が消耗して機能を停止しても前記応力履歴情報は消去されることなく保存される。

また、前記応力履歴情報は応力測定装置本体付属の液晶表示器によって数値表示されるので、設置現場で応力測定装置本体の動作確認ができる。さらに、応力測定装置本体表面の表示切り替えスイッチを操作すると、リアルタイムの構造物の応力レベルをレベルメータ表示すること、あるいは測定開始からの経過時間を確認することができる。

応力測定装置本体によって得られた構造物の変動応力履歴情報は、本体に装備した外部出力端子を通じて電

気配線でパーソナルコンピュータに接続し、数値信号として送信することも可能である。信号送信にはRS232Cなどのシリアル通信を使用する。

3.3 装置の形態

Fig.5は圧電材料を使用した応力測定装置の応力測定装置本体、および、ひずみ検出器の形態例を示す。Fig.5左図は装置の正面図であり、Fig.5右図はその側面図である。

ひずみ検出器は薄い金属ケースで作られ、ケース内部底面に接着してあるセラミック圧電材料、あるいは高分子圧電材料を機械的、電磁氣的に保護する。前記圧電材料は電気配線が接続してあり、配線を通して応力測定装置本体に接続される。ひずみ検出器は内部に圧電材料が取り付けられている面を構造物の表面に接着する。

応力測定装置本体はタバコの箱程度の寸法を有する装置で、内部にひずみ検出器の出力信号の処理回路と電池による電源を備えるとともに、装置正面に演算処理結果を簡易表示するための簡易表示器、表示の内容を切り替えるための表示切り替えスイッチ、装置の電源スイッチを備える。

Fig.6に応力測定装置の構造物への設置例を示す。ま

Fig.5 Configuration of the proposed stress history measuring device.

Fig.6 Installation image of the proposed device.

ず、応力測定装置のひずみ検出器は構造物の測定が必要な場所に接着する。複数箇所の測定が必要な場合はひずみ検出器を複数使用し、これらを応力測定装置本体に接続する。応力測定装置本体も同様に構造物に設置するが、測定終了後にひずみ検出器と分離して装置を回収することも可能である。

3.4 処理機能

本研究で開発した応力測定装置は、2節で述べた応力レベルクロッシングカウント法と、レインフロー法^{3),4)}を使用する。

マイコンに搭載する応力レベルクロッシングカウント処理機能は、従来型の測定装置から利用している手法で、Fig.1 左上図に示すように電荷増幅回路によって測定できる応力測定範囲を等分割し、レベル1、レベル2というように適切に番号を割り振る。そして各レベルについて、測定した応力信号が設定応力レベルを正方向あるいは負方向に超過し、応力信号が前記設定応力レベルよりも降下あるいは上昇すると、これを1回として加算する。この操作を繰り返すことで、Fig.1 左下図に示すように、構造物のレベル超過回数分布が得られる。回数分布は、マイコンのRAM 内部に表形式で保存される。本処理方法によって詳細な応力履歴情報を得ることはできないが、構造物にどの程度の大きさの応力が何回発生したかという概略情報を、簡単な処理で得ることができ、比較的低能力のCPU と低容量のRAM を搭載するマイコンで実現可能である。

次に、マイコンに搭載するレインフロー法を使用した応力頻度計数機能について述べる。レインフロー法は構造物の疲労損傷に関するデータを収集する場合に一般的に使用される手法の一つであり、応力とひずみのヒステリシスループの応力範囲と平均応力の頻度分布をカウントする。Fig.7 はレインフロー法によるカウント法を表しており、上図はひずみの時系列図であり、下図は時系列図に対応する応力-ひずみ線図である。レインフロー法は、ひずみ変動あるいは応力変動を、屋根を伝わる雨だれの動きに例えたもので、極大値、あるいは極小値に達するまで流れを止めない。時系列図においては、0→1→3の流れと、3→4→6→8の流れがこれに当たる。応力頻度分布の応力範囲をカウントする際は、応力-ひずみ線図のヒステリシスループでループが閉じている3つのループ、1→2、4→5、6→7を各1サイクルとして計数する。このとき各応力範囲の平均応力も計算する。以上の処理を長時間行うことにより、Fig.8 に示すような応力とひずみのヒステリシスループの応力範囲と平均応力の頻度分布を表す一覧表を得る。これは応力測定範囲を引張側・圧縮側それぞれを8分割した場合に、行

Fig.7 Counting method of the rain flow method.

Fig.8 Stress history data obtained by rain flow method.

方向が応力の変動範囲を表し、列方向が平均応力の大きさを表している。

本応力測定装置では、まず、変動応力のピーク値を検出する。次に各ピーク値を、応力測定範囲を等分割した応力レベルに当てはめた後、レインフロー法を使用して、応力範囲と平均応力の頻度分布を求める。レインフロー法を使用する場合には、レベルクロッシングカウント法よりも多くの演算処理と、大容量のRAM を必要とする。

3.5 試作機の概要

試作装置の写真をFig.9, Fig.10に示す。Fig.9はレベルクロッシングカウント法を使用した装置であり、Fig.10はレインフロー法を使用した装置である。各装置

Fig.9 Test manufactured circuit using the stress level crossing count method.

共通の電荷増幅回路は、ひずみ検出器に高分子圧電フィルムを使用することを前提として設計した。

演算処理回路には、マイクロチップテクノロジー社のワンチップマイコン PIC16C715, および PIC16F877 を使用した。小型で省電力の PIC16C715 は、レベルクロッシングカウント法を用いる演算処理回路に使用し、大型で RAM 容量の大きな PIC16F877 はレインフロー法を用いる演算処理回路に使用した。なお、各マイコンに搭載する AD 変換回路の分解能は、PIC16C715 が 8bit であり、PIC16F877 が 10bit である。

応力レベルクロッシングカウント法をプログラミングした演算処理回路においては、引張応力範囲と圧縮応力範囲を合わせた全測定範囲を 12 分割し、応力レベルを 12 段階設定した。レインフロー法用マイコン回路では、マイコンに搭載する RAM 容量に制限があり、測定範囲の分割数を 5 分割程度と少なくすると、応力範囲と平均応力の両方を測定する 2 次元レインフロー法が搭載可能である。しかし、装置の実用性を考慮した場合、低分解能の 2 次元レインフロー法を搭載するよりも高分解能の 1 次元レインフロー法を搭載した方が良いと判断した。そこで、試作装置では測定範囲の分割数を 11 とし、応力の変動レンジを 10 段階定義した 1 次元レインフロー法を使用し、応力変動範囲の頻度分布を記録する。

また、各装置の測定結果表示のため、16 文字を 2 行表示可能な液晶表示器を使用し、計測開始からの測定時間と、リアルタイムの応力レベルのレベルメータ表示、変動応力履歴の計数結果を切り替えて表示できるようにした。

4. 実験による応力頻度測定装置の性能

4.1 試験方法

前述の応力測定装置を試作し、実験を行って試作装置

Fig.10 Test manufactured circuit using the rain flow method.

の性能を確認した。実験には軟鋼 SS400 材で製作した長さ 320mm, 幅 70mm, 板厚 6mm の平滑試験片を使用した。ひずみ検出のため、長さ 25mm, 幅 25mm, 厚さ $40\mu\text{m}$ の高分子圧電フィルム(呉羽化学工業(株)製 KF ピエゾフィルム)を平滑試験片中央表面にエポキシ樹脂を用いて接着し、フィルムを電気配線により応力測定装置に接続した。試験片は油圧サーボ式の疲労試験機で変動荷重を負荷し、荷重の記録と同時に応力測定装置の電荷増幅回路の出力電圧、レベルクロッシングカウント法、およびレインフロー法の演算処理結果を測定した。

4.2 完全両振り試験結果

Fig.11 は応力レベルクロッシングカウント処理機能を搭載した応力測定装置による測定結果を示している。Fig.11 上図は試験片に負荷された応力の波形であり、片応力振幅 20MPa, 40MPa, 60MPa, 応力速度 1Hz の

Fig.11 Time history of the completely reversed stress and the output signal of the amplifier used in the level crossing count method.

Fig.12 Measured result of the completely reversed stress using the level crossing count method.

波形を完全両振りて負荷した。応力の負荷回数は合計 255 回で、各応力振幅につき 5 波形、合計 15 波形の合成波を 17 回繰り返した。Fig.11 下図は、電荷増幅回路の出力電圧である。本装置に搭載した電荷増幅回路とひずみ検出の圧電フィルムの組み合わせでは、応力測定範囲は引張 80 MPa、圧縮 -80 MPa の間である。図中、横軸方向に引いた複数の実線は、演算処理回路で設定している応力レベルを表し、応力測定範囲を 12 分割している。Fig.11 上図と Fig.11 下図を比較すると、電荷増幅回路が反転式であるため、波形の上下が反転しているが、2 つの図の波形形状は一致していることから、電荷増幅回路は正常に動作したことが分かる。

Fig.12 はレベルクロッシングカウント法による演算処理結果である。グラフの縦軸は設定応力レベルを実際の応力値に換算している。上記の応力負荷方法を応力レベルクロッシングカウント法で正確に計数した場合、各設定応力レベルのカウント値は 20 MPa 以下で 255 回となり、20 MPa 以上 40 MPa 以下のレベルで 170 回、40 MPa 以上 60 MPa 以下のレベルは 85 回である。図より応力値の小さい 20 MPa 以下の各レベルで僅かながら誤差を生じているものの、この外の応力レベルにおいては負荷された応力の大きさと回数を正確に計数しており、試作した装置が正常に動作することを示している。

次に、レインフロー法による処理機能を搭載した装置を使用した実験結果を Fig.13, Fig.14 に示す。Fig.13 上図に示すように、試験片に負荷した応力波形は Fig.11 と同様、片振幅 20 MPa、40 MPa、60 MPa で応力速度 1Hz の波形の合成波で完全両振りである。応力の負荷回数は合計 600 回で、各応力振幅につき 5 波形、合計 15 波形の合成波を 40 回繰り返した。Fig.13 下図は電荷増幅回路の出力電圧であり、図中の横実線は応力測定範囲 80 MPa から -80 MPa を 11 分割した設定応力レベルを示している。

レインフロー法による測定結果を Fig.14 に示す。グラフの縦軸は応力値に換算した応力の変動範囲を示す。

Fig.13 Time history of the completely reversed stress and the output signal of the charge amplifier used in the rain flow method.

Fig.14 Measured result of the completely reversed stress by using the rain flow method.

1 次元レインフロー法で上記の応力負荷方法を正確に計数した場合、各設定応力レベルのカウント値は変動応力範囲約 120MPa、80MPa、40MPa で 200 回となり、これ以外は 0 回となる。図より、僅かながら誤差を生じているものの、上記に該当する応力変動範囲で正確に計数していることが分かる。

以上、応力の負荷条件が平均応力の変動が全くない両振り試験の場合、レベルクロッシングカウント法とレインフロー法ともに応力の負荷状態をカウント結果から推定することは容易である。

4.3 平均応力の変動を有する応力波形による試験結果

次に、試験片に平均応力が変動する変動応力が負荷された場合について、応力レベルクロッシングカウント法とレインフロー法それぞれを搭載する測定装置を使用して実験を行った。

Fig.15, Fig.16 は応力レベルクロッシングカウント処理機能を搭載した応力測定装置による測定結果を示している。Fig.15 上図は試験片に負荷された応力の波形であり、平均応力変動を模擬した片応力振幅 66.7 MPa、

Fig.15 Time history of the stress and the output signal of the charge amplifier used in the level crossing count method.

Fig.16 Measured result of the stress with fluctuation of mean stress using the level crossing count method.

応力速度 1Hz の波形と片応力振幅 38.1 MPa, 応力速度 5 Hz の波形を合成した変動応力を 80 秒間負荷した。応力の負荷回数は応力速度 1Hz の波形が 80 回, 5 Hz の波形が 400 回である。Fig.15 下図は、電荷増幅回路の出力電圧である。図中、横軸方向に引いた複数の実線は、演算処理回路で設定している応力レベルを表す。本節で使用する電荷増幅回路は 4.2 節で使用了回路と異なり応力測定範囲を引張 110MPa, 圧縮 -110MPa に拡大している。

Fig.16 はレベルクロッシングカウント法による演算処理結果である。グラフの縦軸は設定応力レベルを実際の応力値に換算している。図より変動応力のピーク値付近の 3 応力レベル, 84MPa, 60MPa, -84 MPa と原点付近の 2 応力レベル $\pm$ 12MPa については、上記応力負荷方法に対応する回数をカウントしているが、これ以外の応力レベルでは負荷された応力の実状を反映していないカウント数となっている。従って、処理結果である Fig.16 から実際に負荷された応力 Fig.15 を推定する

Fig.17 Time history of the stress and the output signal of the charge amplifier used in the rain flow method.

Fig.18 Measured result of the stress with fluctuation of mean stress using the rain flow method.

ことは困難である。

次に、レインフロー法による測定結果を Fig.17, Fig.18 に示す。Fig.17 上図は、試験片に負荷した応力波形であり、平均応力の変動を模擬した片振幅 38.1MPa, 応力速度 0.2Hz の低周波波形と片振幅 38.1MPa, 応力速度 1Hz の波形との合成波形を負荷した。応力の負荷回数は、応力速度 0.2Hz の低周波応力が 50 回, 応力速度 1Hz の波形が 250 回である。Fig.17 下図は電荷増幅回路の出力電圧であり、図中の横実線は測定範囲を 11 分割した設定応力レベルを示している。演算処理回路では、図中に白四角印で示す波形の頂点を検出し、これをもとに各応力レンジの頻度分布を計数している。

レインフロー法による演算処理結果を Fig.18 に示す。グラフの縦軸は応力値に換算した応力の変動範囲を示す。1 次元レインフロー法で上記応力波形を正確に計数した場合、各応力範囲のカウント値は最大応力範囲 165 MPa で 50 回、ピーク値付近の応力変動範囲 83 MPa で 50 回、ピーク値の前後で発生する応力範囲 66 MPa で 200 回となり、これ以外は 0 回となる。図より、最大応

力範囲 165MPa では正確にカウントし、応力変動範囲 83MPa で僅かながら誤差を含んでいる。これ以降の応力範囲 66MPa ではカウント数がかなり少なく 140 回となり、本来発生していないはずの 17MPa レンジで 41 回カウントしている。以上の結果から変化範囲の大きいレンジについてはほぼ正確にカウント可能であるが、変化の小さいレンジについては誤差が発生している。

上記の結果について考察すると、Fig.17, Fig.18 の場合、負荷した応力は、応力速度 0.2Hz で他の実験よりも低周波であるため、ひずみ信号の時間あたりの電圧変化は小さくなる。これに加え、測定装置の応力レベルメータ表示機能により、AD 変換回路で取得したひずみ信号に応力変動レベル 1 の高周波ノイズが重畳されていることを確認しており、本来検出したいひずみ信号に対してノイズが相対的に大きく、無視できない状態になっている。レインフロー法を使用するマイコンは、前記のような電荷増幅回路および AD 変換回路で発生するノイズをひずみ信号から除去するため、微小な変動を無視するようにプログラミングされている。このため、低周波で小振幅の信号はノイズとして処理してしまいカウント数に誤差を生じたものと予想される。

以上、平均応力が変動する場合、測定誤差を生じる問題はあるが、レインフロー法を使用することにより、応力の負荷状態をカウント結果から推定することは容易である。

5. 考察

本研究で開発した応力履歴測定装置において、測定対象を船舶および海洋構造物とする場合、装置の応力測定範囲と測定周波数について考察する必要がある。

本研究で開発した装置の応力測定範囲は最大 ±110MPa である。船舶海洋構造物では測定される応力レベルが 300MPa から 400MPa となることもあり、測定装置の使用状況によっては現在よりも高応力の測定が必要となるケースも予想される。また、逆に低応力の測定範囲で精密に測定する必要がある場合など様々な状況が予想される。この点については、測定用途に応じて、ひずみ検出の圧電材料の種類および寸法を変更したり、電荷増幅回路の時定数を切り替えて増幅率を調整することが有効である。

例えば、現在の装置で 300MPa の高応力を測定するためには、ひずみ検出の圧電材料に高分子圧電フィルムを使用し、圧電フィルムの面積が 4 節の実験で使用したフィルムの 3 分の 1 となるように、長さ 14mm、幅 14mm とする。これにより、圧電フィルムのひずみに対する出力電圧が 3 分の 1 となり、単位電圧あたりの応力検出値

が 3 倍の 300MPa となることで、ひずみ検出の感度を低下させることができる。このとき信号処理回路やプログラムに変更は必要なく、測定結果において、フィルムサイズ変更前に応力測定範囲片側 110MPa であったときに設定応力レンジ 1 段階が約 20MPa に相当したものが、応力測定範囲片側 300MPa の場合は設定応力レンジ 1 段階が約 60MPa となるだけである。

次に、測定周波数範囲について述べる。海洋波浪の場合、0.2Hz 以下の低周波変動応力が主となり、現在の装置は 0.2Hz 程度の低周波応力に対して測定誤差が生じる。誤差発生の原因について 4.3 節で考察したが、対策としては次の 2 点が挙げられる。まず、測定回路のバッテリーや使用部品、電気配線を見直し、電荷増幅回路およびマイコンの AD 変換回路の耐ノイズ性を向上するとともに混入する高周波ノイズを除去するローパスフィルター回路を使用することが挙げられる。また、現在の測定装置のサンプリング周波数が 100Hz であるので、サンプリング周波数をより低周波にすることで、ひずみ信号の時間あたりの変動電圧量を大きくし、ノイズに対するひずみ信号の比を大きくすることも有効であると考えられる。

次の検討項目として、作用応力が多軸応力である場合の主応力成分とせん断応力成分の分離の可能性について述べる。この問題は、第 2 報から指摘されており、本論文においても未解決の課題である。本論文でひずみ検出のために使用している高分子圧電フィルムは異方性材料であり、フィルム製造時の延伸方向と厚さ方向に強い圧電性を示し、延伸方向と直角となるフィルムの幅方向の出力電圧は延伸方向の約 30% である。フィルムの異方性を利用し、ひずみゲージの 3 軸ゲージと同じ要領で、サイズと同じ 3 枚の圧電フィルムを 0 度、45 度、90 度と角度を変えて構造物に接着して測定し、測定値をマイコンで処理すれば上記の課題を解決する可能性がある。本課題については、引き続き検討を進めたい。

上記の外、提案する装置を実用化するために検討すべき項目は数多くある。測定応力範囲の分割数の問題、および、測定データ処理の高度化の問題、さらに、装置の電源寿命の問題、電荷増幅回路のドリフトの問題などである。測定応力範囲の分割数を増加し、測定をより詳細に実施する必要がある場合、あるいは、レインフロー法において、変動応力範囲の平均応力分布も記録する 2 次元レインフロー法を必要とする場合、現在使用しているマイコンでは RAM の容量が不足する。この問題は、より大容量の RAM を搭載するマイコンに変更するか、現在の回路に RAM を増設することで解決する。

本応力装置を様々な用途に使用できるように機能を

拡張することは困難ではないが、機能拡張は装置の大型化、高価格化を招く。本装置の実用化にあたっては、本来開発目標としている装置の小型化・低価格化による測定作業の簡素化を考慮して、必要とする機能・性能を検討し、両者のバランスを取ることが重要である。上記の様々な点に配慮しつつ、装置の改良を進めていきたい。

6. 結言

本研究は、圧電材料を用いた応力頻度測定装置にマイクロコンピュータを使用することで、応力レベルクロッシングカウント法による応力頻度計数処理の詳細化を図るとともに、レインフロー法による処理機能を付加し、前報で提案した装置の問題点を解決するとともに、より実用的な応力履歴測定装置を開発した。

応力履歴測定装置の測定範囲は引張応力 110MPa から圧縮応力-110MPa の間であり、応力レベルクロッシングカウント法を使用する測定装置は、測定範囲を 12 分割する応力レベルを定義し、各レベルの発生頻度分布を測定する。さらに、1 次元レインフロー法による処理機能を搭載する測定装置は、測定範囲を 11 分割する応力レベルを定義し、応力の変動範囲の頻度分布を測定する。実験により、2 つの測定装置はともに、応力速度 1Hz 以上の変動応力に対してはこれを正確に測定可能であることを示した。

本研究における圧電材料を用いた応力履歴測定装置を用いることにより、構造物に作用する変動応力履歴情報を数日間にわたり測定し、応力レベルクロッシングカウント法による処理あるいはレインフロー法による処理を行ない、上記装置に測定情報を記録・保存することができる。また、上記応力測定装置は電池で動作し自己完結性を有するので、従来のひずみゲージ法による応力測定における、装置設置作業の繁雑さの問題、電源確保の問題を解決し、また装置の小型化を実現した。これらによって現場で使い勝手の良い応力測定を可能とし、構造物の使用中の安全管理に貢献することができる。

謝 辞

本研究は、造船学術研究推進機構の平成 12 年度造船学術研究に関する交付金の補助を受けて行なわれたことを付記し、ここに謝意を表する。

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) 新宅英司, 藤本由紀夫, 濱田邦裕, 武内哲也, 竹藪直紀: 圧電素子による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), 日本造船学会論文集, 第 186 号, (1999), pp.401-411.
3) 遠藤達雄, 松石正典, 光永公一, 小林角市, 高橋清文: 「Rain Flow Method」の提案とその応用, 九州工業大学研究報告, No.28, (1974), pp.33-62.
4) 日本材料学会編: 疲労設計便覧, 養賢堂, (1995), pp.208-210.