

# 非接触型変位計を用いた小口径配管の 振動応力測定方法の開発（第3報） —実機適用のための振動実験—

Development of Method to Measure Vibrational Stress of  
Small-Bore Piping with Multiple Contactless Displacement Sensors  
—Vibration Test to Apply the Proposed Method to Practical Use—

辻 峰史 (Takashi Tsuji)\*<sup>1</sup>      高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)\*<sup>1</sup>  
前川 晃 (Akira Maekawa)\*<sup>1</sup>      野田 満靖 (Michiyasu Noda)\*<sup>2</sup>

**要約** 原子力発電所では振動による配管の疲労損傷を未然に防止するために、配管の振動応力測定が行われており、簡便に効率良く実施できる方法が求められている。著者らはこれまでに透過型LED方式の非接触型変位計を用いた振動応力測定方法を提案し、提案方法に基づいた振動応力測定装置を開発した。本論文では、提案する測定方法の実機適用のために実施した実験結果について報告する。実機配管の振動挙動を模擬した複雑形状の配管系試験体の振動測定により精度検証し、非接触型変位計を用いた振動応力測定方法は従来から採用されているひずみゲージと比較して実用上問題のない精度で振動応力を測定できることを明らかにした。

**キーワード** 原子力発電所, 疲労破壊, 振動応力, 非接触型変位計, 振動実験, 小口径配管

**Abstract** In nuclear power plants, measurement of vibrational stress of piping are being performed to prevent fatigue failures, and an easier and more efficient method of estimating vibrational stress is desirable. The authors have proposed a new method to estimate vibrational stress using multiple contactless displacement sensors with transmission LED system, and have developed a system to measure vibrational stress based on it. In this study, we present the result of experiment to apply the proposed method to practical use. To examine the accuracy of the proposed method, we conducted an experiment on measuring vibrations by the developed system using a complex formed mock-up piping system with a complex arrangement which simulates actual vibrations. From the result of the experiment, it was shown that the stress measured by the developed system agreed well with that measured by strain gauges.

**Keywords** nuclear power plant, fatigue failure, vibrational stress, contactless displacement sensor, vibration test, small-bore piping

## 1. はじめに

原子力発電所に設置された配管のうち口径が2~3インチ以下の小口径配管では、プラント運転中にポンプ等から発生する機械振動や流体振動を原因とする疲労破壊によるトラブルが数多く報告<sup>(1)~(6)</sup>されている。これらの振動トラブルの未然防止策の一つとして、配管に生じる振動応力を測定し、健全性を評価する振動応力評価が行われている。しかしながら、疲労破壊が生じる可能性が高い小口径の配管は

プラント内に数多く存在するため、振動応力の測定に多くの時間や労力を要する。そのため、現場での測定時間や労力を削減できるような、より効率的な振動応力評価手法の開発が望まれている。

配管のような梁状の構造物の場合には、振動による曲げ変形により主に曲げひずみが発生しており、このひずみを測定することにより振動応力を求めることができると考えられる。

配管に生じる振動応力を測定する方法は数多く提案されている。まず、振動応力を接触方式で測定す

\*1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

\*2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 関西電力(株)

る方法として、小口径配管を単純形状にモデル化して得た評価式に、可搬式振動計で測定した値を代入して振動応力を求める方法<sup>(7)</sup>や、ひずみゲージを対象物に直接貼付して振動応力を求める方法<sup>(8)</sup>、対象物を中心に広範囲にわたって取り付けた加速度計で測定した値から配管系の振動モードを同定し、演算によって振動応力を求める方法<sup>(9)</sup>などがあり、光ファイバーを用いた振動センサーの研究も進められている<sup>(10)</sup>。

しかし、可搬式振動計を用いる場合には、振動計の押し付け力や押し付け方向等により振動の状態が変化するために、測定精度が測定者の力量に依存することや、小口径配管の形状により評価式を適用できない場合があるなどの問題がある。ひずみゲージや加速度計を用いる方法は精度の高い測定が可能であるが、振動の生じている時には貼り付けられず、測定器の準備や後片付けに関する作業が煩雑であり、必ずしも効率的な方法ではない。光ファイバーを用いた方法では、配管振動状況の常時モニタリングが可能であるが、事前に対象物にセンサーを設置し、測定網を施設内に張り巡らす必要があるため、測定器が複雑かつ大掛かりになるという問題がある。

配管系に生じる振動応力を非接触方式で測定する方法として、レーザー光などを光源とした干渉を利用した測定方法<sup>(11)</sup><sup>(12)</sup>や CCD (Charge Coupled Device) イメージセンサーで取り込んだ情報を基にするデジタル画像相関法<sup>(13)</sup>などがある。

しかしながら、前者はレーザーにより高精度な測定が可能であるが、装置の設置の際に防振装置が必要な場合もあることから現場への適用は難しく、後者は測定対象物表面のランダムな模様を利用するため事前準備が必要であるといった問題がある。

このように従来の測定方法による振動応力評価は、時間や労力の面で必ずしも効率的ではないと考えられる。そこで、著者らは現場での取扱いが簡単で、結果も迅速に得られる効率的な振動応力測定方法として、非接触型変位計を用いた振動応力測定方法を開発した<sup>(14)~(16)</sup>。この方法は、複数台の非接触型変位計による変位測定値を用いて、対象物の比較的狭い範囲に生じる変形状態（曲率半径）を簡単な理論式により近似的に求めて振動応力を算出する方法である。この方法の特徴として、理論式が単純なため表計算ソフトを用いた簡単な演算により振動応力を算出できると、非接触方式であるため測定前後の作業が不要であり機動的かつ効率的な振動応力測

定が可能であることなどが挙げられる。

これまでに、表面が平らな対象物に対しては、反射型レーザー変位計を用いた方法により梁理論に基づく静的な変形に対する誤差検討や板梁を用いた振動実験により適用性を確認した<sup>(14)~(16)</sup>。また、振り回り振動や表面に曲率を持つ配管に対しては、発光ダイオード透過方式の非接触型変位計を用いて、配管梁を用いた正弦波加振実験により適用性を確認した<sup>(17)</sup>。さらに、小口径配管において振動応力が最大となる小口径配管と母管との接続部については、測定範囲内に振動モードの変曲点が存在せず、振動モードの振幅が変位分解能よりも大きければ、線形外挿により実用上十分な精度で振動応力を求めることが可能であると確認した<sup>(18)~(20)</sup>。

本論文では提案する方法を実機へ適用するために実施した振動実験の結果について報告する。実機配管を模擬した配管ループを実機と同様な振動状態にして既報で用いた振動応力測定装置で振動測定を行い、従来法のうち測定精度の高いひずみゲージにより得られる振動応力との比較により、本測定方法の精度を確認した。

## 2. 振動応力測定方法

### 2.1 測定器の概要

本研究で用いた非接触型変位計は既報<sup>(12)</sup>で用いた変位計より質量 50%、体積 60% 削減した小型のものを使用した。これは測定器の取扱いをより容易にするためである。図 1 および表 1 に非接触型変位計の概要および仕様を示す。本方法では、投光部と受光部の間に測定対象物である小口径配管を挟み込み発光ダイオード (LED) により振動の変位を測定する。投受光間距離が約 60mm であり、2 インチ程度の配管の測定が可能である。図 2 に振動応力測定装

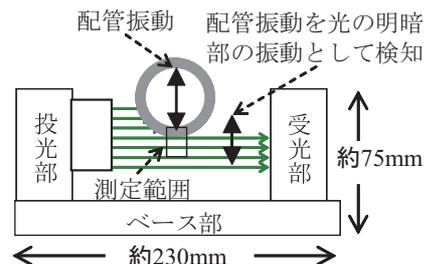


図 1 非接触型変位計の概要図

表1 非接触型変位計の仕様

項目	仕様
メーカー	(株)キーエンス
測定範囲	0.04~6mm
最小検出物体	0.04mm
投受光間距離	60±5mm
光源	GaN グリーン LED
測定精度	±0.5μm
繰り返し精度	±0.06μm
サンプリング回数	2400 回/秒
質量	700g/基



図2 振動応力測定装置

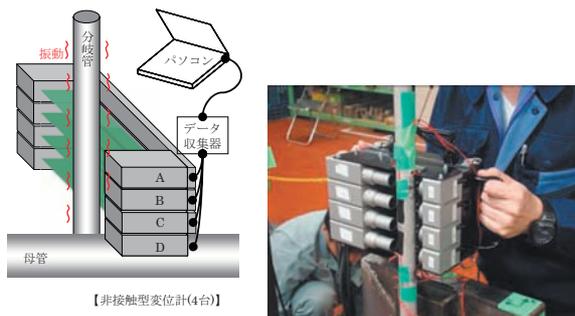


図3 振動応力測定装置による測定の概要

置の概要を示す。本研究では、非接触型変位計を4台組み合わせ、これをデータ収集器およびパソコンと接続することにより変位の測定から振動応力の測定までの一連の流れを容易に行えるようにした。図3に振動応力測定装置による配管測定の概要を示す。非接触型変位計の台数を4台にすることにより、同時に複数の位置について測定し、小口径配管の振動

応力評価で必要となる小口径配管と母管との接続部に生じる振動応力を一度の測定で線形外挿により求めるようにした。

## 2.2 振動応力の算出方法

振動応力測定方法については、既報<sup>(11)(12)</sup>で説明したが、概略を示す。配管に曲げモーメントを作用させた場合に生じる曲率および振動応力は、梁理論に基づき式(1)および式(2)でそれぞれ表わされる。

$$\frac{1}{R} = \frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (1)$$

$$\sigma = \frac{M}{Z} \quad (2)$$

ここで、 $R$ は配管に生じる曲率半径、 $y$ は任意の $x$ 点におけるたわみ、 $M$ は曲げモーメント、 $E$ はヤング率、 $I$ は配管の断面二次モーメント、 $\sigma$ は振動応力、 $Z$ は配管の断面係数をそれぞれ表わす。式(1)および式(2)をまとめると、振動応力は式(3)として得られる。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = -\frac{E}{R} \cdot \frac{I}{Z} \quad (3)$$

配管の内径を $d$ 、外径を $D$ とすると、 $I$ と $Z$ との比は式(4)で表わされ、 $\sigma$ は式(5)となる。

$$\frac{I}{Z} = \frac{\frac{\pi}{64}(D^4 - d^4)}{\frac{\pi}{32} \frac{(D^4 - d^4)}{D}} = \frac{D}{2} \quad (4)$$

$$\sigma = -\frac{E}{R} \cdot \frac{D}{2} \quad (5)$$

式(5)において、 $E$ および $D$ は配管の仕様で決まる既知の値であり、 $R$ のみが未知数である。本測定方法では、非接触型変位計により未知数 $R$ を近似的に求め、振動応力を算出する。

図4に、X-Y平面内で振動する配管に生じる $R$ の算出方法の概念図を示す。図の測定範囲における変形状態を1つの円弧に近似すると、幾何学的な条件から式(6)~式(8)が成立する。振動応力で問題になるのが低次の振動モードであることや、図に示す測定範囲が12cm程度と比較的狭いことを考慮すると、配管の変形状態を1つの円弧に近似することは

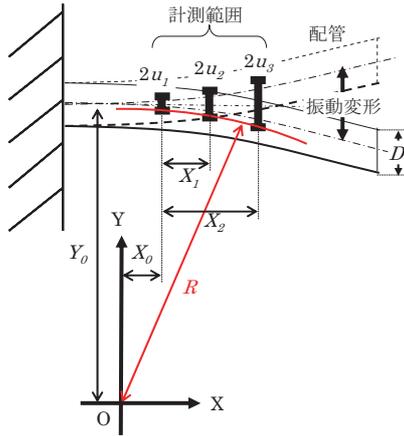


図4 曲率半径Rの算出方法の概念図

妥当だと考えられる。

$$(X_0)^2 + (-u_1 + Y_0)^2 = R^2 \tag{6}$$

$$(X_1 + X_0)^2 + (-u_2 + Y_0)^2 = R^2 \tag{7}$$

$$(X_2 + X_0)^2 + (-u_3 + Y_0)^2 = R^2 \tag{8}$$

各測定点の振動による変位を  $u_i$  ( $i=1,2,3$ ) とすると、 $X_0$ はRの中心Oから $u_1$ の測定位置までのX方向の距離、 $Y_0$ はOから配管の中心軸までの距離、 $X_1$ および $X_2$ は変位を測定する間隔（以下、測定間隔）をそれぞれ表わす。測定間隔は任意の長さでも構わないが、本研究では測定間隔 $\Delta X$  ( $=X_1=X_2/2$ )とする。式(6)から式(8)を $X_0$ と $Y_0$ について整理すると、式(9)および式(10)が得られ、これらを式(6)から式(8)のいずれかに代入すると、 $R$ は $u_i$  ( $i=1,2,3$ ) で表わされるので、非接触型変位計によって $u_i$ を測定することで $R$ を求めることができる。

$$X_0 = \frac{X_2^2(u_2 - u_1) - X_1^2(u_3 - u_1) + (u_3 - u_2)(u_2 - u_1)(u_3 - u_1)}{2\{X_2(u_1 - u_2) - X_1(u_1 - u_3)\}} \tag{9}$$

$$Y_0 = \frac{X_1 X_2 (X_2 - X_1) + (u_3^2 - u_1^2) X_1 - (u_2^2 - u_1^2) X_2}{2\{X_2(u_1 - u_2) - X_1(u_1 - u_3)\}} \tag{10}$$

### 3. 実験方法

これまでの研究<sup>(18)</sup>では、図3に示す単純形状の片持ち配管を試験体として1方向加振による振動試験を実施し振動応力測定装置（以下、本装置と記載する。）の適用性検討を行ってきた。本報告では、振動応力測定装置の実機適用を目指すため、実機配管が振動して疲労損傷を生じるときの状態を模擬し、その状態での振動測定を行った。検証に用いる試験体は、ポンプの圧力脈動および気柱共鳴との共振が生

じる設計とした。配管の機械的な固有振動数は、サポート位置を調整することにより流体の固有振動数と一致させて、配管が圧力脈動によって加振されるようにした。このように設計することで実機配管が振動疲労を受ける典型的な状態を再現した。

試験体概要を図5に示す。試験体全体の大きさは、概ね4.0m × 4.5m × 1.2mである。ポンプには、3連のプランジャポンプを使用した。配管材質はSUS304、口径は試験部が3/4B sch40、中央の固定部が1B sch40であり、配管全長は約40mである。本実験で用いた試験体の写真を図6に示す。配管はポンプ出口および固定部配管のエルボ部をUバンドにて固定支持し、他の部位ではUボルトを介してピン支持した。Uボルトは図7に示すとおり移動式とし、サポート位置を調整できる仕様とした。タンク入口に圧力調整弁を設置し、配管系の圧力を調整した。

本装置は、エルボB1の上流側300mmの箇所およ

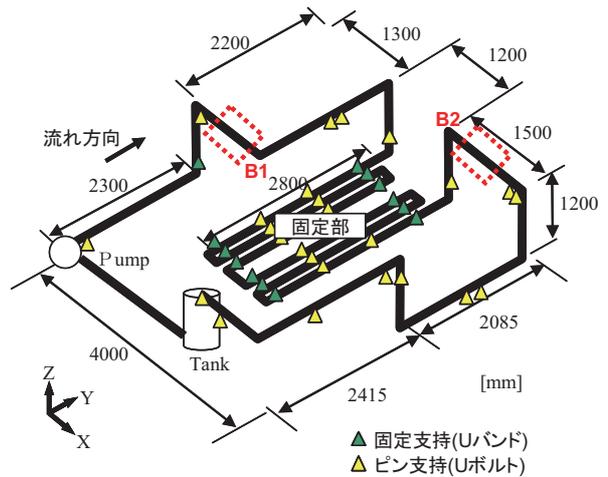


図5 試験体概要図

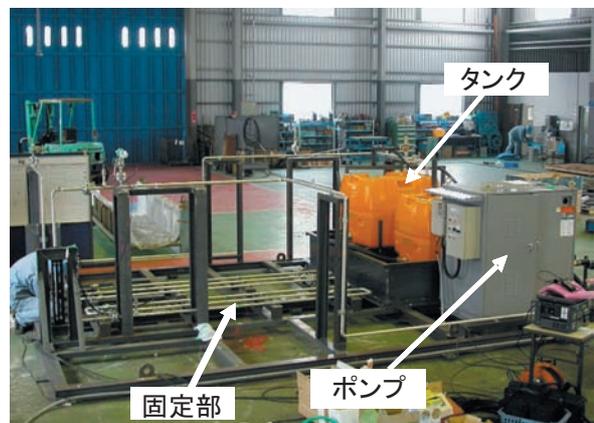


図6 試験体概観写真

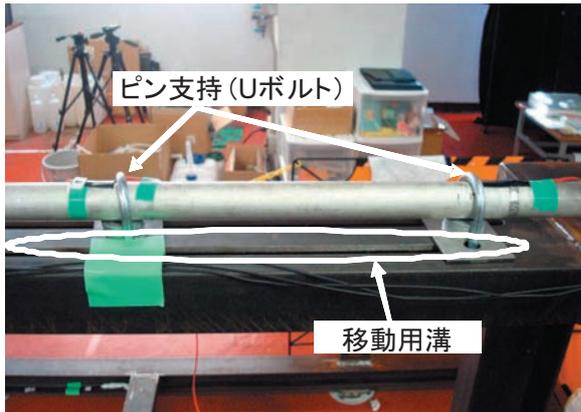


図7 ピン支持部

びエルボ B2 の下流側 425mm の箇所（それぞれ図 5 の点線の枠部分）の測定を行った。振動測定の方法は、エルボ B1 側が Z 方向とし、エルボ B2 側は Y 方向とした。測定のサンプリング周期は既往研究<sup>(13)</sup>に基づき 2ms とした。本装置で得られた応力測定結果の精度検証を目的としてひずみゲージにより測定した振動応力値との比較を行うため、本装置での測定箇所と同じ箇所にひずみゲージを貼り付け、ひずみ測定による振動応力評価を行った。

実機配管での疲労破壊は小口径配管と母管との接合部（付根部）で多数報告されている。本研究では、付根部に相当するエルボ B1, B2 近傍のサポート取付け部についても配管の応力測定を行った。本装置での外挿手法により求められる応力評価結果と、ひずみ測定での応力評価結果とを比較した。

実験は、ポンプ回転数を連続的に 150rpm から 450rpm へ変化させる SWEEP 運転において、圧力脈動と配管振動との共振条件を確認したのち、一定回転数での定格運転の実験を行った。試験条件をそれぞれ表 2, 表 3 に示す。まず、SWEEP 試験を実施し、そのときの各エルボ部の振動応力をひずみゲージにより測定し、共振状態により大きな振動応力が発生するポンプ回転数を確認した。その共振状態付近において、振動応力が大（共振状態）、中、小の三種類となるように回転数を選定した。なお、試験結果については、全ての回転数における振動応力値をまとめて整理した。本装置での測定は 2s 間と 30s 間で行った。

本装置では、測定結果から以下のような手順にて応力を算出した。本装置は治具等を用いて固定するのではなく手持ちにて測定するため、得られた振動変位に対して手持ち揺らぎによる振動変位を除去す

表2 SWEEP 試験での実験条件

回転数 (rpm)	150 → 450
脈動周波数 (Hz)	7.5 → 22.5
Sweep 速度 (rpm/s)	1
圧力 (MPa)	1, 3

表3 一定回転数での実験条件

圧力 (MPa)	1	3
回転数 (rpm)	207, 210, 211 212, 355, 368 427, 436, 440	352, 370, 373

る目的でハイパスフィルタを適用した。次に得られた振動変位を 2.2 で説明した方法により応力に変換した。さらにノイズを除去する目的でローパスフィルタを適用し、応力の実効値を算出した。

#### 4. 実験結果

定格運転時のエルボ B1, B2 でのひずみゲージにより測定したひずみ測定結果について、周波数分析した結果を図 8 に示す。また、本装置にて振動測定した結果を周波数分析したものを図 9 に示す。

図 8 および図 9 から脈動により配管が加振されている振動数を読み取ることができる。エルボ B1 のひずみゲージでの周波数分析結果によると主な周波数成分は 22.6Hz である。本装置で測定した振動波形を周波数分析したところ主な周波数成分は 22.6Hz であり、両者は一致した。エルボ B2 のひずみゲージでの周波数分析結果によると主な周波数成分は 19.3Hz であり、本装置での周波数分析結果による主な周波数成分も 19.4Hz であり、両者はほぼ一致している。このことから、本装置はひずみゲージを用いた場合と同等に振動の周波数分析が行えることを確認できた。

一方、固有振動数を調べるために行った各エルボ部の打撃試験結果を表 4 に示す。測定は加速度センサーにより実施し、その結果を周波数分析した。図 8, 図 9 で示したエルボ B1, エルボ B2 での主な周波数成分と、表 4 で示した各エルボ部での固有振動数結果とを比較すると、エルボ B2 ではそれらが明確に一致していることが確認できる。すなわち、ポンプによる圧力脈動の周波数と固有振動数とが一致しており、共振状態により実機配管が振動疲労を受ける典型的な状態が再現できているといえる。一方、

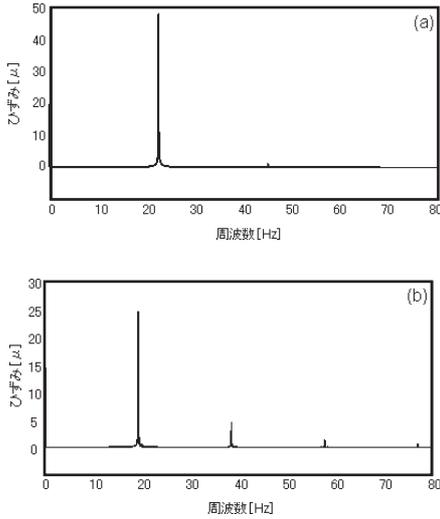


図8 定格運転時 ひずみゲージによる振動測定結果 (FFT) ((a) エルボ B1, (b) エルボ B2)

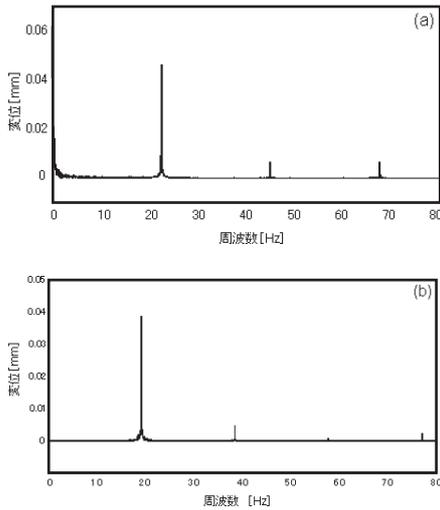


図9 定格運転時 本装置による振動測定結果 (FFT) ((a) エルボ B1, (b) エルボ B2)

表4 測定点 B1,B2 における固有振動数測定結果

測定点	固有振動数 (Hz)	減衰比
B1 (Z 方向)	18.8	$5.40 \times 10^{-3}$
B2 (Y 方向)	11.0	$4.47 \times 10^{-3}$
	19.5	$5.39 \times 10^{-3}$

エルボ B1 では、ポンプによる圧力脈動の周波数と固有振動数は比較的近い値であり、共振に近い状態で配管振動が生じているといえる。

本装置およびひずみゲージの測定結果より得られた振動応力の実効値 (RMS 値) を算出した。本装置

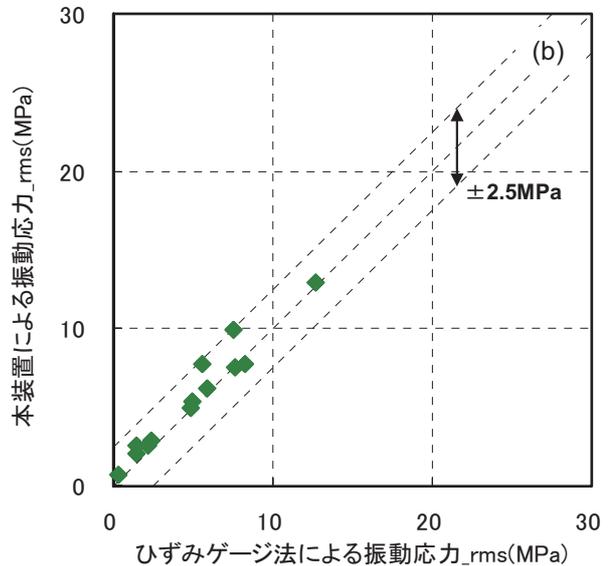
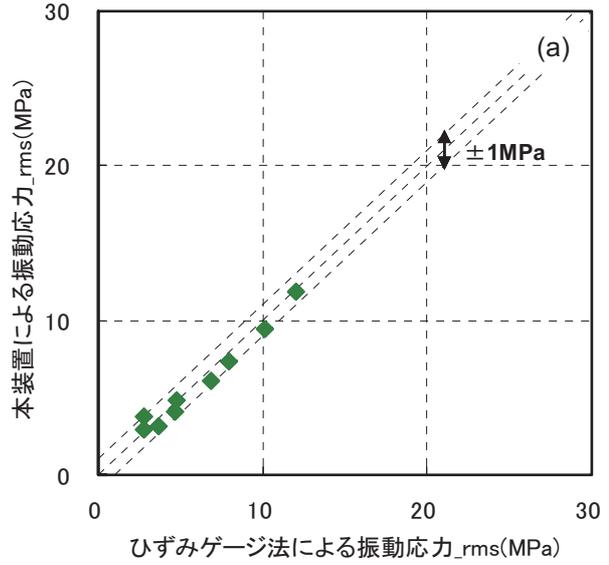


図10 定格運転時 本装置による振動応力とひずみゲージによる振動応力の比較 ((a) エルボ B1, (b) エルボ B2)

での実効値は 30s 間のデータから求めた。本装置にて算出した振動応力値とひずみゲージから求まる値とを比較したものを図 10 に示す。エルボ B1 では、両者の差は  $\pm 1.0\text{MPa}$  程度であり、エルボ B2 での両者の差は  $\pm 2.5\text{MPa}$  程度の範囲内に収まる結果が得られた。

## 5. 考察

### 5.1 本装置の測定精度

サンプリング周期 2ms, ポンプ回転数一定の条件

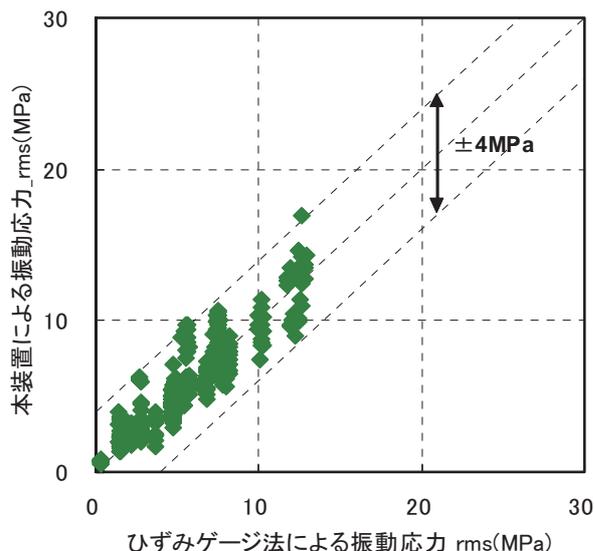


図 11 定格運転時 本装置による振動応力とひずみゲージによる振動応力の比較 (エルボ B1 および B2：回転数一定：測定時間 2s)

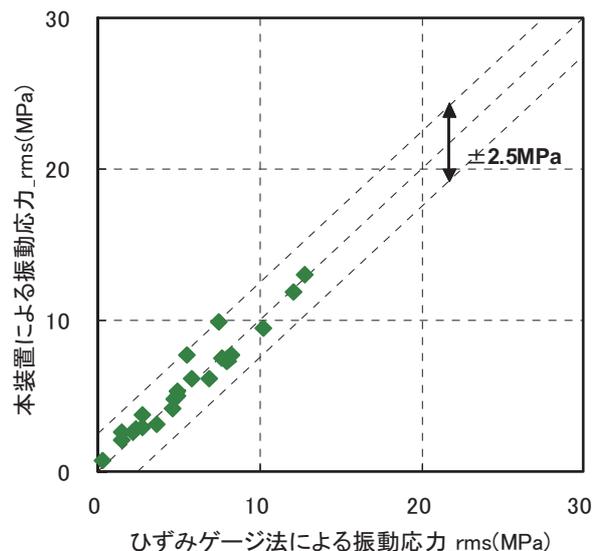


図 12 定格運転時 本装置による振動応力とひずみゲージによる振動応力の比較 (エルボ B1 および B2：回転数一定：測定時間 30s)

での測定から得られたエルボ B1, エルボ B2 での振動応力について, 本装置とひずみゲージの結果を比較して示す. 図 11, 図 12 はそれぞれ測定時間を 2s 間, 30s 間としたものである.

測定時間が 2s 間の条件では, 本装置による振動応力値とひずみゲージから求まる値との差は  $\pm 4\text{MPa}$  であった. 測定時間が 30s 間の場合には, 両者の値の差は  $\pm 2.5\text{MPa}$  の範囲内に収まっている. 小口径配管の許容応力は, 疲労限に安全率を考慮して得られ, その値は数十 MPa であり, 今回の実験で得られた振動応力の差は, いずれも許容応力と比較して一桁小さい.

ただし, 本装置での振動応力の測定精度は, その測定時間に依存することから, より高精度の測定結果を得たい場合にはできるだけ長く測定時間をとることが望ましい.

## 5.2 付根部応力の算出方法

実機における振動問題として, 小口径配管と母管との接合部における疲労破壊が数多く報告されている. そこで小口径配管の振動応力評価では, 母管との接合部に生じる応力 (付根部応力) を求める必要がある. 本装置では直接接合部の振動を測定することができないが, これまでに, 離れた箇所の応力から付根部応力を線形外挿で算出する方法を考案している<sup>(16)~(18)</sup>. 本装置の 4 台の変位計を用いて, 一度に

3 箇所の応力を算出できることから, これら 3 つの応力値を使用して付根部応力を算出する方法である.

本実験では, 小口径配管の付根部応力を想定して, エルボ B2 の下流側においてサポートとの接点にて配管に生じる応力の評価を行った. 測定時間 2s 間の条件で行った. 本手法による振動応力とひずみゲージによる振動応力との比較を図 13 に示す. 本手法による応力はひずみゲージから求まる値に対して  $\pm 4\text{MPa}$  程度の範囲に収まる結果を得た. 今回の実験

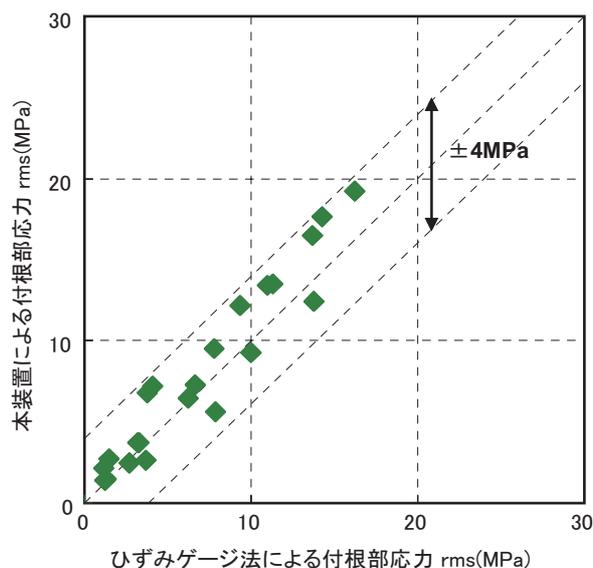


図 13 定格運転時 本装置による振動応力とひずみゲージによる振動応力の比較 (エルボ B2 下流サポート部：回転数一定：測定時間 2s)

で得られた振動応力の差は許容応力と比較して一桁小さく、許容できる範囲内と考えられる。従って、許容応力から誤差分 ( $\pm 4\text{MPa}$ ) を差し引いて応力評価をすることにより、提案手法を用いた振動応力測定は実機配管の応力評価に適用可能と考えられる。

## 6. 結論

透過型 LED 方式の非接触型変位計を用いた振動応力測定法を提案し、圧力脈動による配管振動を模擬した配管口径 3/4B のモックアップ配管を用いて実機配管への適用性を考察した。

- ・本装置にて振動の周波数分析を高精度で行えることを確認した。
- ・本装置による振動応力値とひずみゲージによる振動応力値がよい相関を示すことを確認した。
- ・両者の差が  $\pm 4\text{MPa}$  程度に収まることを確認した。

以上の結果から、提案手法が実機配管の振動応力評価へ十分適用可能であることを明らかにした。

## 7. 今後の予定

本装置を用いて、現在までに数回実機測定を行っており、全て実用上十分な精度で良好に測定できることを確認した。今後は、更なる実機測定を行い、実績を蓄積していく予定である。

## 文献

- (1) Spencer H. Bush, Mark J. Do, Antoinette L. Slavich, Alan D. Chokie, "Piping Failure in United States Nuclear Power Plants: 1961-1995," SKI Report 96: 20, January 1996.
- (2) Gosselin, S. R. and Fleming, K. N., "Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment," Proc. ICON 5, 2641, pp. 1-9 (1997).
- (3) Mitman, J., "Revised Risk-Informed In-service Inspection Evaluation Procedure," EPRI TR-112657 Rev. B-A Final Report (1999).
- (4) Lydell, B. O. Y., "A Database System Supporting the Evaluation of Piping Reliability on the Basis of Operational Experience," SKI Report, RSA-R-2001-01.12 (2002).
- (5) 関西電力株式会社, "美浜発電所 2 号機の化学体積制御系統の空気抜き配管溶接部からの漏えいに係る原因と対策について," 2010 年関西電力プレスリリース, 関西電力ホームページ, (<http://www.kepco.co.jp/pressre/2010/0402-2j.html>).
- (6) 関西電力株式会社, "高浜発電所 2 号機 発電機水素ガス冷却器冷却水系統のドレン配管付根からの漏れについて," 2010 年関西電力プレスリリース, 関西電力ホームページ, (<http://www.kepco.co.jp/pressre/2010/0520-2j.html>).
- (7) Noda, M., et al., "Methods of Evaluating Vibration-Induced Stress of Small-Bore Piping," ASME-PVP, PVP2006- ICPVT- 11-93198, pp. 1-9 (2006).
- (8) Silva, C. W., "Vibration: Fundamentals and Practice," CRC Press, Boca Raton, Chap. 8, pp. 456-476 (1999).
- (9) Tanaka, M., et al., "Development of a Diagnostic and Monitoring System for Vibration Pipes," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol. 33, pp. 278-281 (1997).
- (10) Kageyama, K., et al., "Development of a New Fiber-Optic Acoustic/Vibration Sensor: Principle, Sensor Performance, Applicability to Health Monitoring and Characteristics at Elevated Temperature," International Workshop on Structural Health Monitoring 2003, pp. 1-8 (2003).
- (11) Jean-Pierre Chambard, et al., "Pulsed TV-holography recording for vibration analysis applications," Optics and Lasers in Engineering, Volume 38, Issues 3-4, pp. 131-143 (2002).
- (12) Reder, C. et al., "Non-contacting strain measurements of ceramic and carbon single fibres by using the laser-speckle method", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Volume 34, Issue 11, pp. 1029-1033 (2003).
- (13) Chen Junda, et al. "Applications of Digital Correlation Method to Structure Inspection", Tsinghua Science & Technology Volume 12,

- Issue 3, pp. 237-243 (2007).
- (14) 野田満靖, 前川晃, 鈴木道明, 新谷真功, “レーザー変位計を用いた小口径配管の振動応力計測方法の開発”, INSS JOURNAL, Vol. 14, p. 126 (2007).
  - (15) Noda, M., Maekawa, A., Suzuki, M. and Shintani, M., “Development of Evaluation Method of Vibrational Stress in Piping System Applying Multiple Laser Displacement Sensors,” Proc. 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP 2007-26453, (2007).
  - (16) Shintani, M., Noda, M., Maekawa, A. and Suzuki, M., “Experimental Study of Evaluation Method of Vibrational Stress in Piping System Applying Multiple Laser Displacement Sensors,” Proc. 2007 ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference, PVP 2007-26454, (2007).
  - (17) 野田満靖, 高橋茂, “非接触型変位計を用いた小口径配管の振動応力計測方法の開発—配管を用いた振動実験による適用性の検討—”, INSS JOURNAL, Vol. 15, p. 88 (2008).
  - (18) 野田満靖 “非接触型変位計を用いた小口径配管の振動応力計測方法の開発 (第2報) —振動実験および解析的手法による適用性の検討—”, INSS JOURNAL, Vol. 16, p. 103 (2009).
  - (19) Maekawa, A., and Noda, M., “Development of Methods to Measure Vibrational Stress of Small-Bore piping with Multiple Contactless Displacement Sensors,” Proc. 23<sup>rd</sup> Int . Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, (2010).
  - (20) 野田満靖, 前川晃, 高橋常夫, “非接触型変位計を用いた振動応力測定方法の開発 (振動試験による適用性検討)”, 日本機械学会 第15回動力・エネルギー技術シンポジウム, (2010).