

# 光学式変位計を用いた配管振動の非接触測定法と測定装置の開発

Development of Contactless Measurement Methods Using Optical Displacement Sensors for Piping Vibration and Measurement Instruments

前川 晃 (Akira Maekawa) \*<sup>1</sup>

**要約** 原子力発電所では振動による配管の疲労損傷が数多く報告されてきた。この振動疲労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きた。従来から、発電所内に数多く存在する配管を簡便に効率良く測定できる方法が求められてきた。本研究では、光学式非接触変位計を用いた2種類の振動応力測定法を提案し、提案した方法に基づいて測定装置を開発した。モックアップ試験および実機測定による検証の結果、提案した方法は、実用上十分な測定精度で従来法に比べてはるかに短時間で測定できた。これらの結果から、提案した方法が発電所の実機配管の振動応力を十分に評価可能であり、かつ効率的に実施できることを明らかにした。

**キーワード** 非接触振動測定法, 光学式非接触変位計, 発光ダイオード, LED, 配管振動, 振動応力測定, 小口径配管, 短時間測定, 簡便性, 可搬式測定装置

**Abstract** In nuclear power plants, a number of failure events of piping due to vibration fatigue were reported. Vibration stress of piping is measured to prevent its fatigue failures. Easier handling and more efficient measurement methods have been still desirable for evaluating a number of piping in the plants. The present studies have proposed two kinds of methods to measure vibration stress using optical contactless displacement sensors and have developed devices to measure the vibration stress based on the proposed methods. As a result of verification using mock-up piping system and actual piping in the nuclear power plants, the measurement accuracies of the proposed methods and the current method were nearly equal and the proposed methods provided further faster measurement than the current method. These results revealed the proposed methods could evaluate the vibration stress in the actual piping of plants sufficiently and efficiently.

**Keywords** Contactless vibration measurement, Optical contactless displacement sensor, Light-emitting diode, LED, Piping vibration, Vibration stress measurement, Small-bore pipe, Short time measurement, Handy handling, Portable measurement instrument

## 1. 緒言

原子力発電所ではドレン管, ベント管, 計装配管など外径3インチ(75mm)以下の小口径配管が多数存在する(図1)。これらの小口径配管において, ポンプや圧縮機などの回転機器の運転に伴う機械振動や流体振動を原因とする疲労損傷のトラブルが数多く報告されている<sup>(1)-(6)</sup>。これらの報告では, 原子力発電所の配管系トラブルのうち20%程度が振動疲労であると述べられている。国内の原子力発電所においても毎年10件から20件の振動疲労による

トラブル事例が報告<sup>(7)</sup>されており, 振動疲労は依然として原子力発電所の保全管理の主要な課題である。振動疲労を原因としたトラブルの未然防止策として小口径配管と母管との接続部の強度補強や配管支持構造物の追設による機械振動や流体振動との共振回避が対策として行われているが, 振動事象発生原因の40%以上が保守不良や設計不良である<sup>(7)</sup>ことからハード対策だけでは保全管理として十分でなく, 疲労損傷対策の一つとして, 小口径配管に生じる振動応力を測定し健全性を評価する方法が取られている。

\*1 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現関西電力(株)

振動応力を測定する従来の方法としてひずみゲージを配管に貼付して振動応力を求める方法<sup>(8),(9)</sup>や配管系に広範囲にわたり取り付けられた加速度計にて測定した値から同定した振動モードを利用して振動応力を求める方法<sup>(10),(11)</sup>がある。これらの方法は精度の高い測定が可能であるが、測定装置の設置に関する作業時間や熟練した振動応力測定技術を必要とする。

疲労損傷が発生する可能性が高い小口径配管は発電所内に数多く存在するため、従来の方法に代わる、より効率的な振動応力測定方法の開発が望まれている。

従来から新しい振動応力測定技術として光ファイバー<sup>(12)-(14)</sup>やレーザードップラー振動計<sup>(15)</sup>を利用したシステムの提案が行われてきている。これらの技術は振動測定を専門とする技術者に求められる高度な専門知識や技術を前提としたものであり、発電所運営などの専門が異なる技術者であっても扱える振動測定技術は著者の知る限りでは提案されていない。このような技術では、測定精度とともに測定の効率性や取り扱いの簡便性が必要である。

これまで小口径配管を対象にして、効率的かつ簡便な振動応力測定方法を研究<sup>(16)-(20)</sup>してきた。これらの研究では、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、非接触変位計を用いた振動応力測定方法を提案<sup>(21)-(36)</sup>した。この方法は、光学式非接触変位計を用いて得られた変位測定値により、配管の比較的狭い範囲に生じる変形状態（曲率半径）を近似的に求めて振動応力を直接算出する。この曲率半径を非接触で測定できれば、配管の振動応力を非接触で測定できることになる。

これまで曲率半径の非接触測定法として二つの方法を考案することで2種類の配管振動応力の非接触測定法を提案した。まず、本稿では提案した2種類の非接触振動応力測定法について述べる。これらの方法の特徴として、振動応力算出式の単純化と非接触測定方式の採用により測定前後の作業を不要にして機動的かつ効率的な振動応力測定を可能としたことなどが挙げられる。次に、提案した方法を基に開発した測定装置を示す。最後に、実機の振動挙動を模擬できる配管系モックアップを用いた振動試験や発電所実機での測定を行い、提案した方法の実用性や適用性を検証した結果を示す。

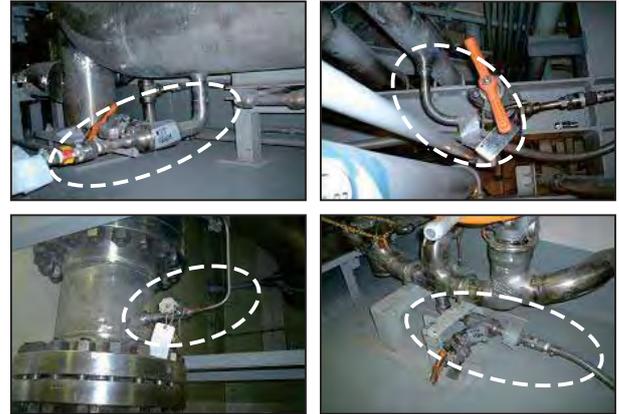


図1 小口径配管の例

## 2. 提案した非接触振動応力測定の原理

原子力発電所の配管系は3次元複雑形状をしているため振動モードも複雑である。しかしながら、振動による疲労破損を起こす部位は、母管に接続されている小口径配管がほとんどであり、破損箇所も母管と小口径配管の接続部、つまり小口径配管の付根部である。したがって、付根部に着目して一端を固定端とした梁振動に近似して配管振動を評価できると考えられる（図2）。この梁振動により生じる変位を測定して、梁のたわみに対応する曲率半径を求め、梁の1次の振動モードに近似すれば、振動応力を求めることができる。この方法は、非接触で変位測定をすれば直接的に振動応力を測定できることを示す。従来提案されていないこのような配管振動応力の非接触測定方法の原理を以下に示す。

図2は配管振動状態における配管の曲げ変形状態の模式図を示している。振動による曲げモーメントが配管に作用し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)でそれぞれ表され、これらを整理すると、振動応力は式(3)として得られる。

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

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

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

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。

配管に発生する振動応力  $\sigma$  は配管外径を  $D$  として式(4)となる。

$$\sigma = -\frac{E}{R} \cdot \frac{D}{2} \quad (4)$$

式(4)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。したがって、曲率半径  $R$  を非接触で求めることができれば、振動応力を非接触で測定できる。この方法は測定範囲内に振動モードの変曲点が存在しない場合に有効<sup>(33)</sup>である。

曲率半径を求めるための非接触振動変位測定は、レーザー変位計や発光ダイオード(LED)変位計で可能である。レーザー変位計では遠方から振動変位測定が可能である(例えば、高放射能を有する配管に近づかなくても測定ができる)が、レーザー光を配管の振動方向に平行に照射して反射光を測定することから、測定精度が測定位置ずれに伴う配管表面の曲率の影響を大きく受ける。これに対して、LEDは配管の振動方向に垂直に光の帯を照射して振動する配管により遮られる領域から振動変位を見積るため、測定精度が配管形状の影響を受けない。本稿では、レーザー変位計を用いた非接触振動応力測定<sup>(17)-(20)</sup>に比べ、精度の良い振動変位測定が可能なLED変位計を用いた非接触振動応力測定について述べる。

LED変位計を用いて曲率半径を求める方法は

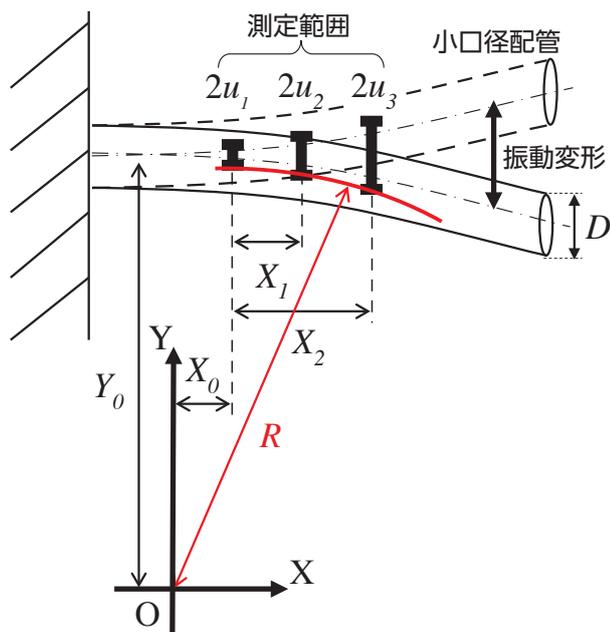


図2 提案した配管振動応力の非接触測定法

くつかあるが<sup>(27)</sup>、測定精度の良好な2種類の方法について以下に述べる。一つ目は複数のLED変位計を用いる非接触振動応力測定法<sup>(21)-(25),(31)-(34)</sup>であり、ここでは標準LED式非接触振動測定法と呼ぶことにする。もう一つは一台のLED変位計を用いる方法<sup>(26)-(31),(35),(36)</sup>であり、改良LED式非接触振動測定法と呼ぶことにする。

### 3. 振動応力測定方法 (標準LED式非接触振動測定法)

#### 3.1. 標準LED式非接触振動測定法における曲率半径算出

標準LED式非接触振動測定法では3台のLED非接触変位計を用いて曲率半径  $R$  を求め、測定位置での振動応力を求める。次に、次節で述べるように4台のLED非接触変位計を用いることにより、異なる3箇所にて求めた振動応力を使って振動疲労の発生しやすい配管付根部の振動応力を推定することができる<sup>(22)-(24),(32)</sup>。

本節では、標準LED式非接触振動測定法の曲率半径算出方法について述べる。図2において、振動応力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(5)~式(7)が成立する。

$$(X_0)^2 + (-u_1 + Y_0)^2 = R^2 \quad (5)$$

$$(X_1 + X_0)^2 + (-u_2 + Y_0)^2 = R^2 \quad (6)$$

$$(X_2 + X_0)^2 + (-u_3 + Y_0)^2 = R^2 \quad (7)$$

各測定点の振動による変位を  $u_i$  ( $i=1,2,3$ ) とし、 $X_0$  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。非接触型変位計によって  $u_i$  を測定することにより式(5)~式(7)から  $R$  を求めることができ、求めた  $R$  を用いれば式(4)から振動応力を算出することができる。

### 3.2. 配管付根部の振動応力測定方法

小口径配管の振動応力評価では、母管との接続部に生じる応力（以下、付根部応力）を求める必要がある。3.1節に示した測定方法では、測定範囲の中心位置の振動応力が算出されるため、付根部応力を直接求めることはできないが、非接触変位計の測定点を4点とすることで付根部応力を外挿により求めることとした。図3に、本研究で用いた付根部応力外挿方法の概要と手順を示す。付根部応力 $\sigma_o$ の算出式を式(8)に示す。

$$\sigma_o = \frac{(\sigma_C - \sigma_B)}{\Delta X} \cdot X_{BC} + \sigma_{BC} \quad (8)$$

ここで、 $\sigma_B$ 、 $\sigma_C$ および $\sigma_{BC}$ はB点、C点およびBCの中点における振動応力、 $\Delta X$ は測定間隔、 $X_{BC}$ は付根部から $\sigma_{BC}$ までの距離をそれぞれ表す。

提案した測定方法では、3つの変位測定データから1つの振動応力を算出できる。したがって、4つの変位測定データがあれば、そのうち3つの変位測定データを組み合わせることで4通りの振動応力を算出できる。図3では、この4通りの振動応力を $\sigma_B$ および $\sigma_C$ 、 $\sigma_{BC-1}$ 、 $\sigma_{BC-2}$ で表わしている。ここで、 $\sigma_{BC}$ は、ABDとACDの2通りの変位測定データの組み合わせから求めた振動応力 $\sigma_{BC-1}$ と $\sigma_{BC-2}$ の平均値である。

この方法の妥当性は、数値解析を用いた時刻歴応答解析結果により評価を行った。時刻歴応答解析は、梁要素により図2の形状を模擬した解析モデルを用いて、汎用構造解析コードNastranにより実施した。解析で得られた各節点の変位波形にランダムなノイズを加えてモデル付根部近傍の仮想的な変位計測値を作成した。次に、仮想的な計測値を式(4)に代入して振動応力を算出し、さらに式(8)により付根部応力を推定した。これらの値を標準LED式非接触振動測定法で求めた振動応力と付根部応力として、元の数値解析から直接求めた振動応力と付根部応力を真値として比較した。図4に加振振幅100  $\mu\text{m}$ （二乗平均平方根（rms）値）、計測間隔（図2における $X_1$ と $(X_2-X_1)$ ）を38 mm、付加するノイズ振幅を0~5  $\mu\text{m}$ とした条件における $\sigma_B$ の振動応力計算結果を示す。図4の横軸は数値解析から直接求めた振動応力である。縦軸は標準LED式非接触振動測定法に基づいて算定した振動応力であり、数値解析で求めた振動変位にノイズを付加することで変位計により測定した振動変位のような測定誤差を含んだ条

件にした。この振動変位から標準LED式非接触振動測定法により振動応力を算定することで変位計の測定誤差の影響を解析的に評価した。測定位置の振動応力値はノイズ振幅に比例して大きく影響を受けることがわかる。この影響度は計測間隔に依存するが、ここでは明確に影響が見られる38 mmの場合を示している。図5は式(8)を用いて付根部応力 $\sigma_o$ を計算した結果を示す。ノイズの影響が低減された。ノイズの大きさに依存せず $\pm 5\text{MPa}$ 程度のばらつき範囲に収まっており、理論的に生じ得る測定誤差を示唆した。この解析的検証から、式(8)の方法を用いることで付根部応力の測定値はノイズの影響を受けにくく測定精度が一定になっていることがわかる<sup>(32),(34)</sup>。この結果から式(4)により振動応力を求めて、式(8)により付根部応力を求めるという標準LED式非接触振動測定法の妥当性を明らかにできた。

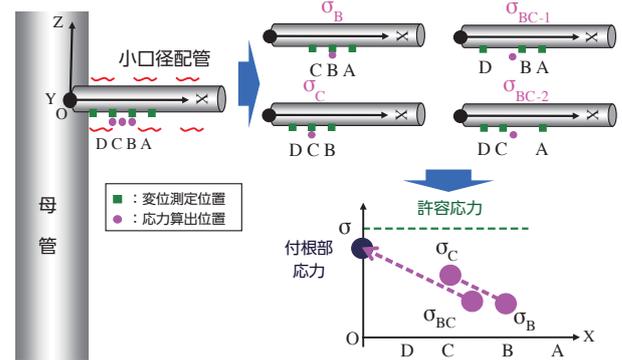


図3 標準LED式非接触振動測定法における小口径配管の付根部応力を求める方法

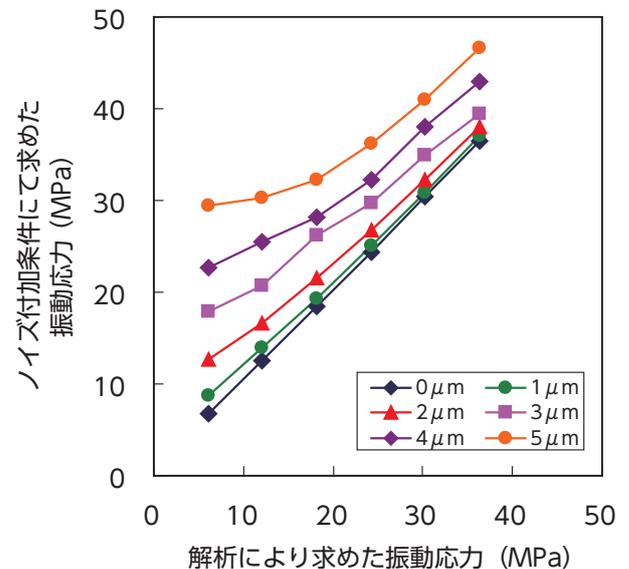


図4 ノイズが振動応力測定に与える影響

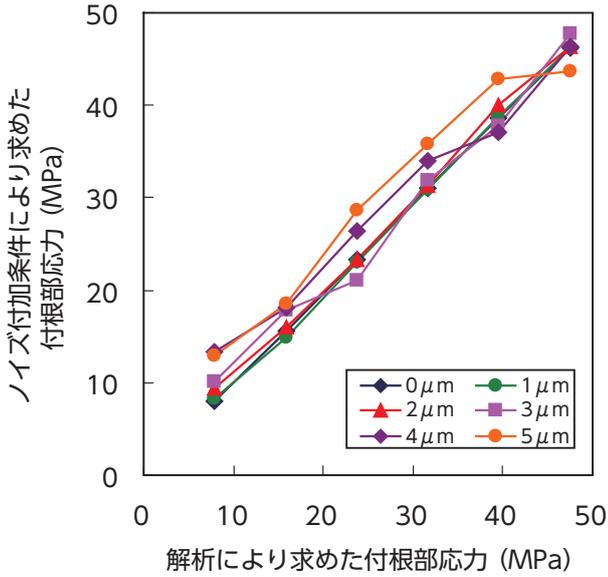


図5 ノイズの影響を低減した付根部応力推定の実現

### 3.3. 標準LED式非接触振動測定法に基づく測定装置の開発

提案した測定方法を実現するために、LEDを用いた光学式非接触変位計を用いた測定装置を開発<sup>(24),(25)</sup>した。この変位計は、図6に示すように投光部と受光部の間に振動している小口径配管を挟み込み、配管が振動することによって生じる投光部から発した光の遮りや透過を受光部で測定することにより、光の明暗境界部の移動量を振動による変位として測定する。このLED式の非接触変位計を4台組み合わせて測定部とし、コントローラー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をシステム化した(図7)。図8に非接触変位計4台を用いた振動応力測定装置による配管測定の概要を示す。非接触変位計の台数を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付根部応力を一度の測定で求められるようにした。

図9には配管振動測定のデモンストレーションの様子を示す。図9に示すように振動している配管を測定部で挟み込みLED光を当てることで振動応力を測定することができる。変位計により測定した変位測定値に対して信号処理によって配管振動に基づく振動変位のみを抽出するため、手持ちで測定することによる手ぶれの影響は小さい。

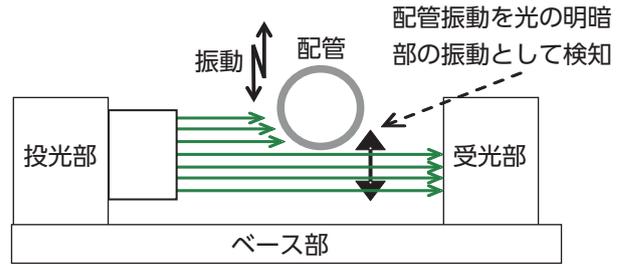


図6 発光ダイオード(LED)を用いた非接触変位計の振動測定原理

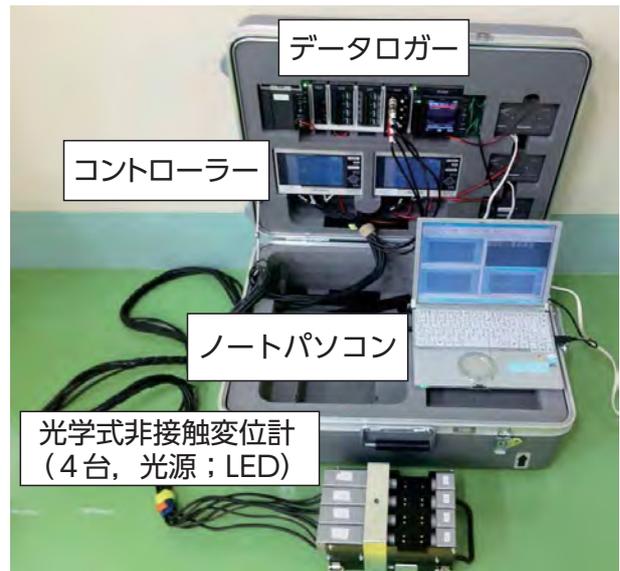


図7 標準LED式非接触振動測定法に基づいて開発した振動応力測定装置

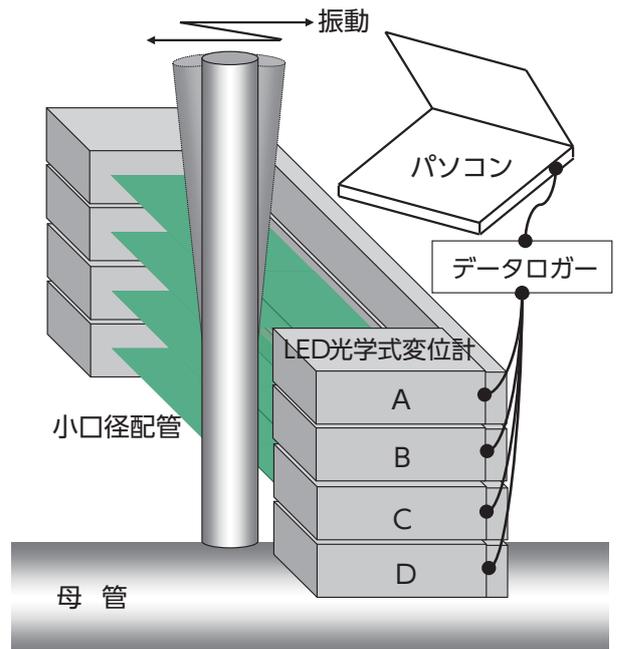


図8 標準LED式非接触振動測定法の振動応力測定装置による測定方法



図9 標準LED式非接触振動測定法の振動応力測定装置による測定デモ

#### 4. 振動応力測定方法 (改良LED式非接触振動測定法)

##### 4.1. 改良LED式非接触振動測定法による振動応力測定

前述の方法は、測定精度を得るために測定間隔を大きくする必要<sup>(32)</sup>があり、その結果としてある程度の長さの測定領域を必要とする。しかし、図10に示すように発電所には直管部の短い、いわゆる狭隘部を持つ配管がある。前述の方法はこのような配管の振動応力測定に不向きである。また、LED非接触変位計を4台使用する方法であることから小型化や軽量化に制約があった。測定領域を小さくして狭隘部の配管の振動応力を測定するためや測定装置の小型化と軽量化を推し進めるために上述の方法を改良した。この改良した方法は、数mmの範囲内で16箇所の振動変位測定が可能な変位計を1台のみ使用し、2章で述べた測定原理に基づいて測定する方法である<sup>(26),(27)</sup>。

配管曲げ状態における小口径配管を一本の円弧とみなし、円の中心は母管軸上にあると考える。すると、図11に示す三角形が描ける。16点の変位測定位置の中心位置をA、変位測定データを直線近似したものが母管軸上の線と交わる点をD、母管と分岐管が接続されている付根部をB、点Aから母管軸上に垂直に下ろした点をC、円弧の中心をOとする。 $\triangle DAB = \theta_1$ 、 $\triangle BAC = \theta_2$ 、 $\triangle AOC = x$ とおく。 $\triangle ACO$ と $\triangle ACB$ はともに直角三角形であることから $\triangle CAO = (90^\circ - x)$ 、 $\triangle CBA = (90^\circ - \theta_2)$ である。

点Aと点Bはいずれも円弧上の点であり、円の中

心Oと点A、点Bを結ぶそれぞれの直線AO、BOはいずれも円の半径(曲率半径 $R$ )となり等しいことから、 $\triangle ABO$ は二等辺三角形となる。したがって、 $\triangle ABO$ と $\triangle BAO$ は等しくなるから以下のようになる。

$$(90^\circ - \theta_2) = \theta_2 + (90^\circ - x) \quad (9)$$

$$x = 2\theta_2 \quad (10)$$

また、 $\triangle ACD$ と $\triangle OAD$ は相似な三角形であるから $\triangle DAC = \triangle DOA$ であり、以下のようになる。

$$\theta_1 + \theta_2 = x \quad (11)$$

式(10)と式(11)より、 $\theta_1 = \theta_2$ である。したがって、測定位置Aと付根部Bを結ぶ直線ABの傾きは測定位置Aにおける接線(直線AD)の傾きの1/2になる。

直線ADの傾きを変位測定データから求められれば、直線ABの傾きを求めることができる。直線ACの長さが分かれば、直線ABの傾きから点Bの座標と直線BCの長さが求められる。直線ACと直線BCの長さが求めれば、 $\triangle ACO$ についての三平方の定理から曲率半径 $R$ を求めることができる。

$$R = \frac{\overline{BC}^2 + \overline{AC}^2}{2BC} \quad (12)$$

式(12)で得られた曲率半径 $R$ を用いて、式(4)から振動応力を算出することができる。この方法(以下、改良LED式非接触振動測定法と呼ぶ)は配管狭隘部の振動応力を付根部に近い位置で算出することから、算出値を付根部応力として近似できる。

##### 4.2. 改良LED式非接触振動測定法に基づいた測定装置の開発

改良LED式非接触振動測定法に基づいて、図12に示すような1台のLEDを用いた光学式非接触型変位計を用いた測定装置を開発<sup>(35)</sup>した。この装置では、1台で最大16箇所の振動変位を同時に測定できる非接触型の変位計を用いることにより、測定精度を低下させずに装置測定部の小型化を実現できた。この方法により配管直管部が約4 cmしかない狭隘箇所の測定を可能とした。内蔵電源とコントローラー、タブレット型のパソコンと接続すること



図10 狭隘部を持つ小口径配管

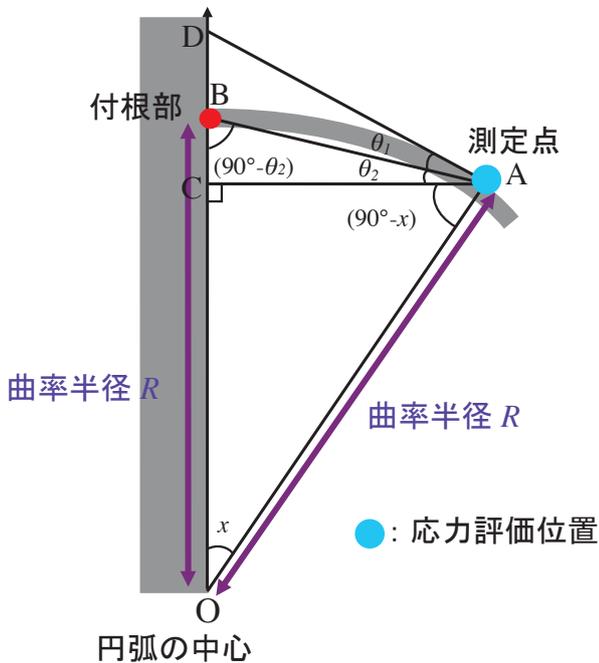


図11 改良LED式非接触振動測定法による曲率半径算出方法

により振動変位の測定から振動応力の測定までをシステム化するとともに可搬性の高い測定装置とすることができた。図13は改良LED式非接触振動測定法に基づいた振動応力測定装置の測定概要を示す。LEDを1台使用するだけなので、システムも単純化された。

図14には配管振動測定のデモンストレーションの様子を示す。図に示すように振動している配管を測定部で挟み込みLED光を当てて振動応力を測定することができる。この変位計でも測定した変位測定値に対して信号処理により配管振動に基づく振動変位を抽出するため手ぶれによる影響は小さ

い。1台のLED非接触変位計を使用するだけなので、片手で測定を行いながら他方にてタブレット型パソコンで操作をすることができるという取扱いに優れた装置を開発することができた。

このように、改良LED式非接触振動測定法により配管振動応力の非接触測定法の適用範囲の拡大と可搬性の向上が達成できた。

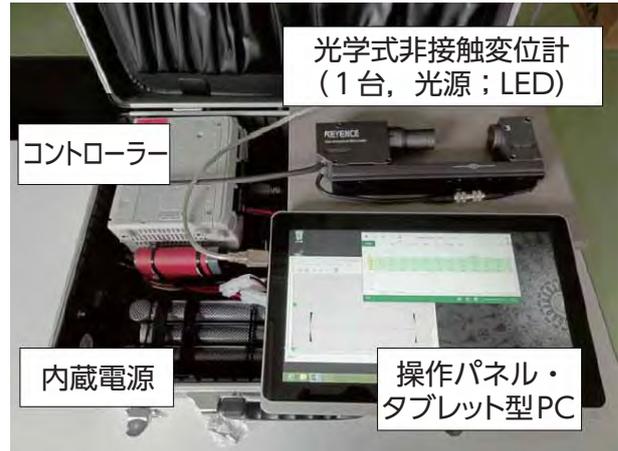


図12 改良LED式非接触振動測定法に基づいて開発した振動応力測定装置

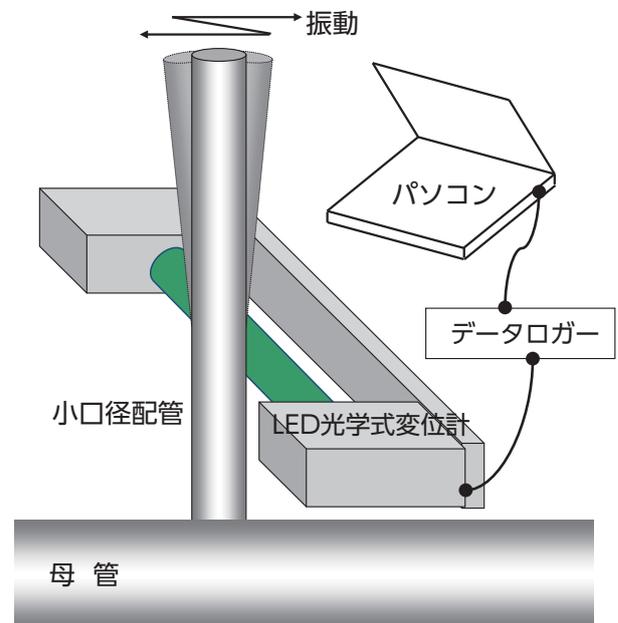


図13 改良LED式非接触振動測定法の振動応力測定装置による測定方法



図14 改良LED式非接触振動測定法の振動応力測定装置による測定デモ

## 5. モックアップ試験および発電所での測定による精度検証

### 5.1. 配管系モックアップの振動測定

提案した振動応力測定法の実機適用性を明らかにするため、実機配管が振動して疲労損傷を生じる状態での振動応力測定の可能性を検証した。モックアップ試験では、ひずみゲージにより測定した振動応力値と開発した装置で得られた応力測定結果を比較することにより提案した方法の精度検証<sup>(25)-(36)</sup>を行った。検証に用いる配管系モックアップは、実機配管が振動疲労を受ける典型的な配管振動状態を再現した。まず、ポンプ回転数を調整することにより配管内圧力脈動周波数を変化させて、配管の振動状態を変化させた。このようにして、ポンプの圧力脈動周波数および液柱共振周波数が一致する液柱共振状態を起こした。さらに、配管の機械的な固有振動数を、サポート位置を調整することにより液柱共振周波数と一致させて、配管を圧力脈動によって振動させた。

配管系モックアップの全体写真と測定箇所の写真を図15に示す。モックアップ全体の大きさは、概ね4.0m×4.5m×1.2mである。ポンプには、3連の往復動ポンプを使用した。配管材料は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。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ボルトは移動式とし、サポート位置を調整することによりモックアップの固有振動数が

ポンプの脈動周波数と一致するように変化させた。振動応力測定は、前述した二つの方法を用いて図15の黄色線の枠部分に示す箇所で行った。実機配管での疲労損傷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、エルボ近傍のサポート取付け部を付根部と想定して（図15で測定箇所と示した部分）、配管の振動応力測定を行った。同じ位置で従来から使用されている測定精度が高いと言われているひずみゲージ法による振動応力測定を行い、提案方法による測定値とひずみゲージ法による測定値を比較することで、提案方法の測定精度検証を行った。

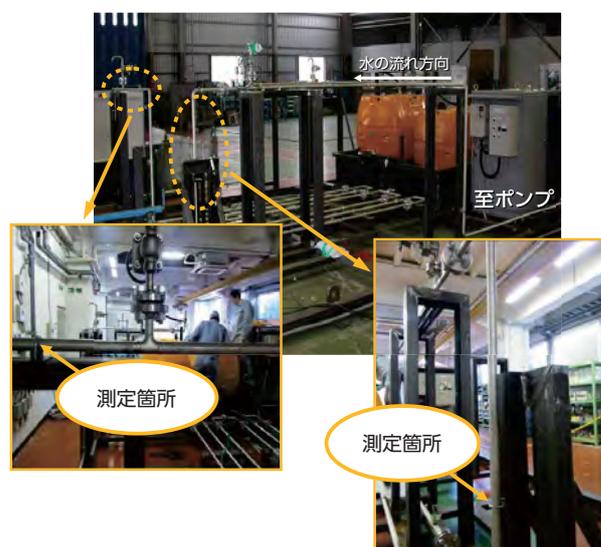


図15 配管系モックアップの概観と振動測定箇所

### 5.2. 発電所の実機配管での振動測定

発電所の実機配管においても振動応力を測定し、提案した方法を検証<sup>(31),(34)</sup>した。測定は標準LED式非接触振動測定法の測定装置を用いて行った。測定位置は、ポンプ付近の機械振動や脈動振動の発生しやすい箇所や制御弁下流のランダム振動が生じやすい箇所とした。具体的には図16と図17に示す給水ブースタポンプの小口径配管と補助蒸気系の小口径配管を測定対象に選択した。同時にひずみゲージによる測定も行い、提案した方法により測定した振動応力と比較を行った。



図16 実機配管の測定箇所  
(給水プースタポンプ系小口径配管)



図17 実機配管の測定箇所 (補助蒸気系小口径配管)

## 6. 測定精度検証結果

### 6.1. 配管系モックアップでの検証結果

配管系モックアップにおいて、提案した方法により測定した振動応力と従来法のひずみゲージを用いて測定した振動応力との比較を図18に示す。小口径配管の疲労損傷に関する振動応力の許容値は20～30MPaであり、それ以下の測定精度であれば実用上は十分である。振動応力測定装置により測定した応力は、標準LED式非接触振動測定法および改良LED式非接触振動測定法により測定した振動応力ともいずれも、ひずみゲージ法の応力値と比較して $\pm 4.5\text{MPa}$ の精度<sup>(25),(27),(28),(31)</sup>であった。この精度は、許容応力<sup>(37),(38)</sup>と比較すると一桁小さく、許容値に含まれる設計係数を考慮すると許容できる範囲内の十分小さい値である。よって、この誤差分

を考慮して応力評価をすることにより提案した振動応力測定法は実機測定に十分適用できると考えられた。少なくとも、測定値が許容値を逸脱する可能性を判断する配管振動評価の一次診断には十分に使用できる方法であることは明らかである。したがって、提案した方法が狭隘部を含めて色々な配管形状の振動応力測定に利用できることが示された。

なお、図18の二つの提案した方法による測定時間は1回あたり10秒とした結果である。この条件の測定精度は4.5MPaであった。これらの方法では振動変位を測定して振動応力を算出する過程で測定信号の平均化処理や統計処理を実施<sup>(22),(27),(36)</sup>していることから、測定時間を長くすることで測定精度の向上が期待できる。図19は測定時間を変化させた場合の測定精度を示す。測定時間を2秒から

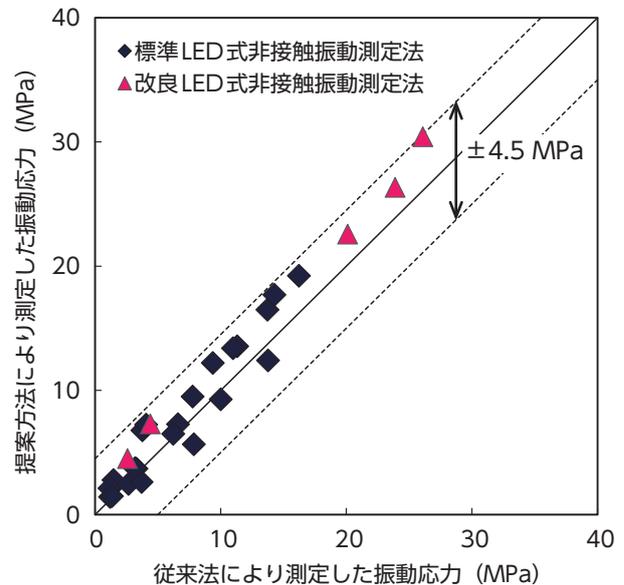


図18 提案した方法（標準法と改良法）と従来法（ひずみゲージ法）により測定した振動応力の比較

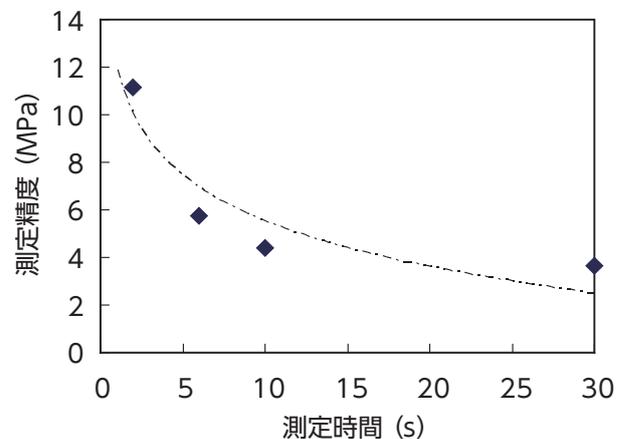


図19 測定時間と測定精度との関係

30秒とすることで、測定精度は10MPaから2.5MPaへ向上<sup>(33)</sup>していることがわかる。標準的な測定時間と測定精度として10秒で4.5MPaとすれば十分であろうと考えるが、現場測定での必要な測定精度は測定時間の運用により調整することを提案する。

## 6.2. 発電所の実機配管での検証結果

表1に、発電所の実機配管での測定結果を示している。実機では振動応力の大きな箇所は少なく、全体的に応力値の低いところでの比較となった。実機測定での振動応力測定装置の応力はひずみゲージでの応力と比較して $\pm 2.0$ MPaの範囲内であった。検証データが少ないが、モックアップ試験での精度と同程度と推定される<sup>(34)</sup>。また、実機での測定作業において、提案した方法による振動応力測定に要する時間（装置の設置から測定と測定後の振動応力値の算定までの全測定工程の時間）は、1回の測定あたり20秒程度であり、従来のひずみゲージ法を用いて同じように測定する全測定工程の時間と比べるとはるかに短時間で測定できた。なお、今回は標準LED式非接触振動測定法による変位計4台を使用した装置で測定を行ったが、図18の二つの方法の測定精度比較から改良LED式非接触振動測定法に基づく測定装置でも同様の結果が得られると考えられる。

これらの結果は、提案した二つの方法が実機配管の振動疲労診断に活用可能であることを示す。

表1 実機プラントでの測定結果

測定箇所	提案した手法 (MPa)	ひずみゲージ法 (MPa)	測定誤差 (MPa)
給水プースタポンプ系 小口径配管	4.9	3.3	1.6
補助蒸気系 小口径配管	0.5	0.9	-0.4

## 7. 開発した測定装置を用いた運用の提案

開発した測定装置を用いた配管振動の非接触測定は取扱いの簡便さと測定の効率化に長所がある。振動検知器を配管に設置するという技術を要求する作業の必要がなく、LED光を測定したい部位に当てただけで振動測定ができるという簡便さを達成するとともに、1回の測定時間が数十秒という他の振動

測定技術と比較して大幅な測定作業効率化を図った。

ただし、上記の長所を発揮させるために、装置には測定に必要な測定精度があれば良いと妥協もした。従来から配管振動測定に使用しているひずみゲージ法では、測定精度は約0.2MPaである。それに対して開発した装置における測定精度は4.5MPaであり、測定精度のみを比較すれば劣る。これは振動応力許容値が20MPaに対して真の振動応力が16MPaであっても許容値を逸脱しているという測定結果を示す可能性を意味する。ひずみゲージ法と比べてこのような許容値逸脱の判断が明確にできないグレーゾーンが拡大する。

しかしながら、開発した方法と測定装置の目的は、現場での配管振動測定と測定結果評価を迅速に行い、保守作業を効率化することである。開発した測定装置を用いて振動問題がありそうな配管に対してサーベランスを行い（一次診断）、許容値逸脱の可能性のある配管を抽出して、そのみをひずみゲージ法を用いて詳細な測定（二次診断）を実施すれば、合理的および経済的に配管振動の保守管理を達成できると考えられる。

## 8. 結論

非接触変位計を用いた配管振動応力の非接触測定法を提案した。さらに、LEDを用いた光学式非接触変位計を使用して提案した方法に基づく振動応力測定装置を開発した。次に、配管系モックアップおよび実機配管を用いて提案した方法の測定精度検証を行った。結果、提案した方法による振動応力と従来法のひずみゲージを用いて測定した振動応力との差が $\pm 4.5$ MPa程度に収まることが分かった。これは、配管振動疲労に至る応力に比べ小さく、実用上問題がないと考えられる精度である。少なくとも配管振動評価の一次診断には十分に使用できる。また、実機測定ではひずみゲージを用いた従来法と比べてはるかに短時間で測定作業（装置の設置から振動測定とその後の振動応力の算定）ができることも確認した。これらの結果から、提案した方法が狭隘部を含めて様々な形状の発電所実機配管の振動応力を十分に測定可能であり、かつ効率的に実施できることを明らかにした。

開発した非接触測定法と測定装置では、測定精度は従来から使用しているひずみゲージ法の測定精度

に比べ劣るが、測定作業性や測定効率性が大幅に向上した。この特徴を踏まえて、開発した測定装置による振動する配管をサーベランスして一次診断を行い、抽出された許容値逸脱の可能性のある配管に対してのみひずみゲージ法などで詳細測定をするという配管振動の保守管理運用法を提案した。

## 9. おわりに

本稿で述べた非接触測定法と測定装置の開発では、標準LED式非接触振動測定法の開発に野田満靖研究員（現関西電力）が取り組み、辻峰史研究員（現関西電力）が改良LED式非接触振動測定法の開発を担当した。また、高橋常夫主任研究員（現川崎重工業）の多大な貢献があった。研究開始当初は非接触で配管振動の振動応力を測定することは不可能だと言われていた技術を実現し実用化まで発展できたことは彼らの貢献によるところが大きく、ここに記して謝意を表する。

なお、この研究成果は平成27年3月に機械工業に著しい功績がある技術開発に贈られる日本機械学会北陸信越支部賞（技術賞）を受賞した（図20）<sup>(39)</sup>。

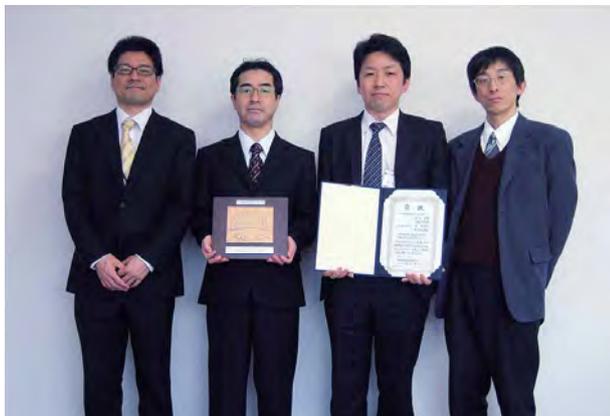


図20 日本機械学会北陸信越支部賞（技術賞）受賞

## 参考文献

(1) Bush, S.H., "Statistics of Pressure Vessel and Piping Failures," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.110 (1988), pp.225-233.  
 (2) Gamble, R.M. and Tagart, S.W.J., "A Method to Assign Failure Rates for Piping Reliability Assessments," *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, San

Diego, CA., PVP-Vol.215 (1991), pp.3-12.  
 (3) Bush, S.H., "Failure Mechanisms in Nuclear Power Plant Piping Systems," *Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol.114 (1992), pp.389-395.  
 (4) Gosselin, S.R. and Fleming, K.N., "Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment," *Proceedings of 5th International Conference on Nuclear Engineering (ICONE 5)*, ICONE-2641 (1997).  
 (5) Mitman, J., "Revised Risk-Informed Inservice Inspection Evaluation Procedure," EPRI TR-112657 Rev.B-A Final Report (1999).  
 (6) Park, J.S. and Choi, Y.H., "Application of Piping Failure Database to Nuclear Safety Issues in Korea," *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol.90-91 (2012), pp.56-60  
 (7) 藤木隆夫, "国内原子力発電所の振動に関する不具合事象の傾向分析," *INSS Journal*, Vol.18 (2011), pp.275-279.  
 (8) Bauernfeind, V., Bioem, Th., Pache, W. and Diederich, H.J., "Vibration Monitoring of the Primary Piping System During the Hot Functional Tests of the Mulheim-Karlich PWR," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.133 (1992), pp.17-21.  
 (9) Hofstotter, P., "In-Service Measurements on Piping Systems and Components in Nuclear Power Plants," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.147 (1994), pp.369-374.  
 (10) Tanaka, T., Suzuki, S., Nekomoto, Y. and Tanaka, M., "The Development of a Diagnostic and Monitoring System for Vibrating Pipe Branches," *Nuclear Engineering and Design*, Vol.143, No.3 (1994), pp.455-461.  
 (11) Kunze, U. and Bechtold, B., "New Generation of Monitoring Systems with On-Line Diagnostics," *Progress in Nuclear Energy*, Vol.29, No.3/4 (1995), pp. 215-227.  
 (12) Chitnis, V.T., Kumar, S., and Sen, D., "Optical Fiber Sensor for Vibration Amplitude Measurement," *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 7, No. 4 (1989), pp. 687-691.

- (13) Ovren, C., Adolfsson, M., and Hok, B., "Fiber-Optic Systems for Temperature and Vibration Measurements in Industrial Applications," *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 5 (1984), pp. 155-172.
- (14) Garcia, Y.R., Corres, J.M., and Goicoechea, J., "Vibration Detection Using Optical Fiber Sensors," *Journal of Sensors*, Vol. 2010 (2010), pp. 1-12.
- (15) 猫本善統, 田中将憲, 西村護達, 松本健次, 大島榮次, "非接触センサーを用いた高サイクル疲労診断システムの開発," *日本機械学会論文集C編*, Vol. 70, No. 695 (2004), pp. 2095-2102.
- (16) Noda, M., Suzuki, M., Maekawa, A., Sasaki, T., Suyama, T., and Fujita, K., "Methods of Evaluating Vibration-Induced Stress of Small-Bore Piping," *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, Vancouver, BC, Canada, PVP2006-ICPVT-11-93198 (2006).
- (17) 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-誤差の検討と板梁を用いた振動試験による適用性の検討-", *INSS Journal*, Vol.14 (2007), pp.126-135.
- (18) Noda, M., Maekawa, A., Suzuki, M., and Shintani, M., "Development of Evaluation Method of Vibrational Stress in Piping System Applying Multiple Laser Displacement Sensors," *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference*, San Antonio, TX, PVP2007-26453 (2007).
- (19) 前川晃, 野田満靖, 新谷真功, 鈴木道明, "レーザー変位計を用いた振動応力計測方法の開発," *日本機械学会論文集C編*, Vol.78, No.794 (2012), pp.3552-3556.
- (20) Maekawa, A., Noda, M., Shintani, M. and Suzuki, M., "Development of Noncontact Measurement Methods Using Multiple Laser Displacement Sensors for Bending and Torsional Vibration Stresses in Piping Systems," *International Journal of Pressure Vessels and Piping* (2015), in Press.
- (21) 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測定方法の開発 -配管を用いた振動実験による適用性の検討-", *INSS Journal*, Vol.15 (2008), pp.88-98.
- (22) 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測定方法の開発 (第2報) -振動実験および解析的方法による適用性の検討-", *INSS Journal*, Vol.16 (2009), pp.103-117.
- (23) Maekawa, A. and Noda, M., "Development of Methods to Measure Vibrational Stress of Small-Bore Piping with Multiple Contactless Displacement Sensors," *Proceedings of 23rd International Congress on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management (COMADEM2010)*, (2010), pp.637-644.
- (24) 前川晃, 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評価法," *日本機械学会論文集C編*, Vol.77, No.789 (2010), pp.3025-3035.
- (25) 辻峰史, 前川晃, 高橋常夫, 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測定方法の開発 (第3報) -実機適用のための振動実験-", *INSS Journal*, Vol.17 (2010), pp.113-121.
- (26) 辻峰史, 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," *日本原子力学会2012年春の年会*, G45 (2012), p320.
- (27) 辻峰史, 前川晃, 高橋常夫, "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4報) -実機適用に向けた改良-", *INSS Journal*, Vol.19 (2012), pp.84-94.
- (28) Tsuji T., Maekawa, A., Takahashi, T., "Development and Validation of a Method to Measure Vibrational Stress of Small-Bore Piping Using Contactless Displacement Sensors," *Proceedings of 1st International Conference on Maintenance Science and Technology for Nuclear Power Plants (ICMST-Tokyo 2012)*, Japan Society of Maintenology, (2012), pp.47-48.
- (29) 辻峰史, 前川晃, 高橋常夫, "非接触型変位計を用いた小口径配管の振動応力評価手法の開発," *日本原子力学会2013年春の年会*, M37

- (2013), p591.
- (30) 辻峰史, 前川晃, 高橋常夫, “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5報) -分岐配管を用いた振動実験による精度確認-,” INSS Journal, Vol.20 (2013), pp.95-108.
- (31) 辻峰史, 前川晃, 高橋常夫, 野田満靖, “配管振動応力の非接触測定法の開発,” 火力原子力発電別冊平成24年度火力原子力発電大会論文集, (2013), pp.163-169.
- (32) Maekawa, A., Tsuji, T., Takahashi, T., and Noda, M., “A Method Using Optical Contactless Displacement Sensors to Measure Vibration Stress of Small-Bore Piping,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.136 (2014), pp. 011202-1-011202-10.
- (33) Maekawa, A., Takahashi, T., Tsuji, T. and Noda, M., “Experimental Validation of Non-Contacting Measurement Method Using LED-Optical Displacement Sensors for Vibration Stress of Small-Bore Piping,” Measurement, Vol.71 (2015), pp.1-10.
- (34) Maekawa, A., Takahashi, T., Tsuji, T. and Noda, M., “Noncontact Measurement Method of Vibration Stress Using Optical Displacement Sensors for Piping Systems in Nuclear Power Plants,” Journal of Nuclear Engineering and Radiation Science, Vol.1 (2015), pp. 031002-1-031002-10.
- (35) Maekawa, A., Tsuji, T. and Takahashi, T., “Development of a Contactless Measurement Method Using an LED-Optical Displacement Sensor for Vibration Stress of Piping Systems,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2015-45094 (2015).
- (36) 前川晃, 辻峰史, 高橋常夫, “LED光学式変位センサーを用いた配管振動の非接触測定法,” 日本機械学会機械力学計測制御部門講演会 Dynamics and Design Conference 2015 (D&D2015), 723,(2015).
- (37) Higuchi, M., Nakagawa, A., Hayashi, M., Yamauchi, T., Saito, M., Iida, K., Matsuda, F. and Sato, M., “A Study on Fatigue Strength Reduction Factor for Small Diameter Socket Welded Pipe Joints,” Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Montreal, QC, Canada, PVP-Vol. 338 (1996), pp.11-19.
- (38) Higuchi, M., Nakagawa, A., Iida, K., Hayashi, M., Yamauchi, T., Saito, M. Sato, M., “Experimental Study on Fatigue Strength of Small-Diameter Socket-Welded Pipe Joints,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.120 (1998), pp.149-156.
- (39) 日本機械学会北陸信越支部ニューズレター, No.18 (2015). ([http://www.jsme.or.jp/hs/05\\_newsletter/NL-NO.18-2015.pdf](http://www.jsme.or.jp/hs/05_newsletter/NL-NO.18-2015.pdf))