

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 — 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 —

Development of Method to Measure Vibrational Stress of Small-Bore Piping with Multiple Laser Displacement Sensors — Examination of Applicability by Error Analysis and Vibration Test Using a Plate —

野田 満靖 (Michiyasu Noda)*¹ 前川 晃 (Akira Maekawa)*¹
鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)*² 新谷 真功 (Masanori Shintani)*³

要約 ポンプ等の加振源が多数存在する原子力発電所の配管系において、振動応力評価を効率良く実施することは、原子力発電所の安全運転を継続するうえで重要である。本報告は、複数のレーザー変位計を用いて効率的な振動応力計測方法を開発することを目的として、梁理論や振動試験により適用性の検討を行なったものである。まず、梁理論に基づき本方法により生じる誤差について検討を行ない、本方法の適用可能性を確認した。次に、板梁を用いて正弦波とランダム波による加振試験を行ない、ひずみゲージで計測した応力と本方法により演算した応力とを比較した。正弦波加振試験の結果から、本方法により ± 5 MPa程度の誤差が生じることが分かった。ランダム波加振試験の結果から、本方法で演算した応力とひずみゲージで計測した応力との傾向が良く一致することを確認した。

キーワード 原子力発電所, 疲労破壊, 振動応力, レーザー変位計, 梁理論, 振動試験, 小口径配管

Abstract In a nuclear power plant, where many piping are connected to vibratory sources like pumps, it is important to estimate vibrational stress efficiently to keep the plant operating safely. The purpose of this study is to develop a method to measure vibrational stress by multiple laser displacement sensors. The effectiveness of the method is discussed applying the beam theory and the applicability of the method is verified by vibration tests. First, an error analysis based on the beam theory was examined; thus the feasibility of the method was confirmed as a whole estimation process for vibrational stress. Next, the stresses calculated by the proposed method were compared with the result obtained from strain gauges for the vibration tests of a plate applying sinusoidal and random waves. The stress calculated by the method had the errors of about ± 5 MPa compared with the stress obtained from strain gauges for the vibration tests applying sinusoidal wave. And the tendency of vibrational stress obtained from strain gauges were in good agreement with the stress calculated by the method for the vibration test applying random wave.

Keywords nuclear power plant, fatigue failure, vibrational stress, laser displacement sensor, beam theory, vibration test, small-bore piping

1. はじめに

原子力発電所に設置された配管系において、プラント運転中にポンプ等の機械振動を原因とする振動疲労による損傷事例が数多く報告^{(1)~(3)}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、取扱いが容易で、迅速に結果が得られる現場での振動計測技術や評価技術の開発が望まれている。

原子力発電所に設置された配管には、プラント運転中の機械振動によりひずみが生じている。配管の

ような梁状の構造物の場合には、曲げ変形を主体とするひずみが発生しており、これらのひずみを計測することにより振動応力を求め、構造の健全性を評価することができる。

現在、配管系に生じる振動応力を計測する方法として、接触式の振動計を用いる方法⁽⁴⁾やひずみゲージを振動している対象物に直接貼付する方法⁽⁵⁾、対象物を中心に広範囲にわたって多数の加速度計を取り付け、加速度計の計測値から対象物の振動モードを把握し、演算によって対象部位に発生しているひ

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現在 カワサキプラントシステムズ(株)

* 3 福井大学大学院工学研究科

ずみおよび応力を求める方法⁽⁶⁾がある。

しかし、何れの計測方法にも難点がある。接触式振動計を用いる場合、接触共振現象を考慮する必要がある。さらに、振動計の押し付け力等により振動が変化するため、計測精度が計測者の力量に依存する。ひずみゲージを用いる場合は、計測装置のセッティングに関する作業が必要である。さらに、対象物が高温となる場合には適用し難い。加速度計を用いる場合は、計測装置のセッティングに関する作業が必要であり、さらに得られたデータを解析する必要があるため、作業時間だけでなく熟練した振動解析技術も必要とする。

一方、上記の問題を解決するものとして、例えば、光ファイバーを用いた振動センサーの研究開発が行われている⁽⁷⁾。この技術は、光ファイバー内に光が通過するとき、外的刺激（ひずみ・振動・衝撃・超音波など）に応じて光の周波数が変化することを利用したものである。

この技術は高温の場所の計測が可能であることや計測周波数が広帯域であるという利点を有するものの、対象物にセンサーを設置し、計測網を施設内に張り巡らす必要があるため、計測装置が複雑かつ大掛かりになるという難点がある。

これまでに述べた従来の振動応力の計測方法の問題点を解決する方法として、本報告ではレーザー変位計を用いて振動応力を演算する方法を提案する。厚み測定や形状測定など主に距離を測定するレーザー変位計を用いて、動的な振動応力の計測方法を提案した文献は見当たらないため、新しい方法であると考えられる。この方法では、まず、配管などの梁状の構造物に生じる曲げ振動に伴う変位を複数のレーザー変位計を用いて計測する。次に、計測した変位、レーザー変位計の設置間隔や梁の材質・形状を入力値として、梁理論に基づく式を用いて振動応力を求める。本方法は非接触方式であるため、計測装置のセッティングも短時間済み、高温や高放射能の対象物の振動応力の計測も可能である。また、演算も比較的簡易であるため、短時間で振動応力を得られる。

本報告では、複数のレーザー変位計を用いた振動応力の計測方法の概要と本方法を用いた場合に予想される誤差について報告する。また、板梁を用いた振動試験の結果に基づき、本方法の適用性についても報告する。

2. 振動応力の計測方法

2.1 振動計測器の概要

本報告で用いた振動計測器の概要とレーザー変位計の主な仕様を図1および図2にそれぞれ示す。本計測器は、3基のレーザー変位計を一定間隔で一つの支持具に取り付け、振動する梁状の対象物の軸方向に沿って支持具を設置することで、対象物の異なる3点に生じる変位振幅を計測する。支持具への取り付け間隔や変位分解能は、レーザー変位計の仕様によって依存する。次に、対象物の形状や材質、レーザー変位計の取り付け間隔および計測した変位の値から、対象物に生じる振動変形によるひずみを演算する。

本計測器は、複数のレーザー変位計を1つの支持具に固定することで、レーザー変位計の据付条件により生じる誤差を低減できる。また、非接触式であるので、計測器と対象物との接触による影響がない。さらに、コンピュータによりその場で計測結果を確認できることや、本報告で用いた試作器においても持ち運びできることを考慮すると、小型化するなどにより、一層実用性のある振動計測器の開発が期待できる。

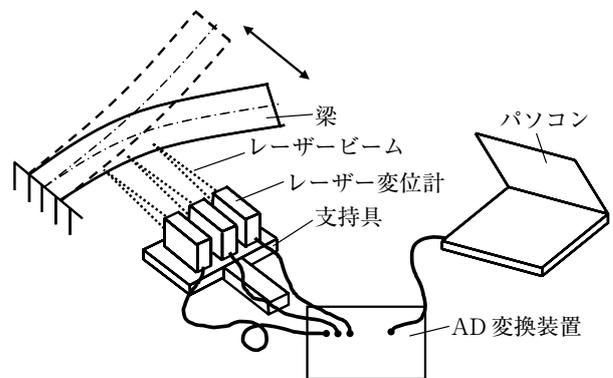


図1 レーザー変位計を用いた振動計測器の概要図

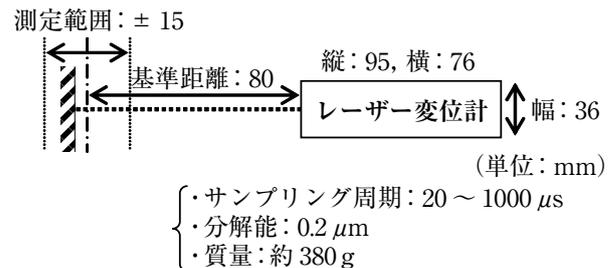


図2 本報告で用いたレーザー変位計の仕様

2.2 振動計測方法の原理

配管などの梁状の構造物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曲げ応力は、梁理論に基づき式(1)および式(2)でそれぞれ表わされる。

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

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

ここで、 R は梁に生じる曲率半径、 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 は梁の断面二次モーメント、 σ_b は曲げ応力、 Z は梁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、曲げ応力は式(3)で表わされる。

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

E 、 I および Z は梁の材質と形状から得られ、梁の形状が平板(幅 b 、厚さ h)または配管(内径 d_1 、外径 d_2)における、 I と Z は表1⁽⁸⁾のとおりである。 h および d_2 を梁の厚さ D とすると、 σ_b は式(4)で表わされる。したがって、梁に生じる R を求めることで、曲げ応力が求められる。

表1 平板および配管の梁における I と Z との関係

| 断面形 | I | Z | I/Z |
|---|---------------------------------|--|-----------------|
|  | $\frac{1}{12}bh^3$ | $\frac{1}{6}bh^2$ | $\frac{h}{2}$ |
|  | $\frac{\pi}{64}(d_2^4 - d_1^4)$ | $\frac{\pi}{32} \frac{(d_2^4 - d_1^4)}{d_2}$ | $\frac{d_2}{2}$ |

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

図3は、X-Y平面内で曲げ振動をする梁を、本方法で計測している状況の概念図を表わす。

ここで、 R' は本計測方法で用いる梁の曲率半径、 u_1 、 u_2 および u_3 はレーザー変位計(#1、#2、#3)で計測する振動変位の振幅、 X_0 は R' の中心からレーザー変位計(#1)までの距離、 Y_0 は R' の中心から梁の中心軸までの距離、 X_1 および X_2 はレーザー変位計の計測間隔をそれぞれ表わす。

図3の設置条件と計測した変位振幅との関係から、式(5)から式(7)が成り立つ。

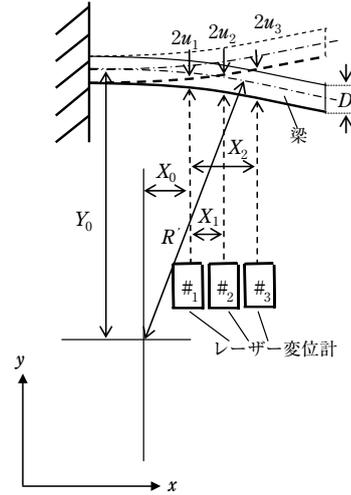


図3 振動応力計測方法の概念図

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

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

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

ここで、 R' は梁に生じる曲率半径を円弧で近似した値であり、#2のレーザー変位計で計測した位置に生じる R の近似値である。式(5)から式(7)を、 X_0 と Y_0 について整理すると、次式が得られる。

$$X_0 = \frac{X_2^2(u_2 - u_1) - X_1^2(u_3 - u_1) + (u_3 - u_2)(u_2 - u_1)(u_3 - u_1)}{2\{X_2(u_1 - u_2) - X_1(u_1 - u_3)\}} \quad (8)$$

$$Y_0 = \frac{X_1 X_2 (X_2 - X_1) + (u_3^2 - u_1^2) X_1 - (u_2^2 - u_1^2) X_2}{2\{X_2(u_1 - u_2) + X_1(u_1 - u_3)\}} \quad (9)$$

ここで、式(8)および式(9)を式(5)に代入することで、 R' は式(10)で求められる。

$$R' = \sqrt{(X_0)^2 + (Y_0 - u_1)^2} \quad (10)$$

式(10)を式(4)に代入することで、#2のレーザー変位計で計測した位置に生じる σ_b の近似値が求められる。本方法は、図3に示されるような単純な曲がり形状、つまりレーザー変位計の計測範囲内に変曲点が存在しない梁の変形形状の時に成り立つ。また、計測範囲内の梁に曲げ変形が生じていない時には、式(5)から式(10)に示す演算を行なうまでもなく、 σ_b の値は0となる。

3. 計測方法の適用性の検討

3.1 振動計測器に生じる誤差の要因

十分に微小な範囲の曲線を円弧に近似した時の曲率半径が R である。本計測方法で用いる R' は、計測範囲に生じる曲線に対して、誤差を含む3点の変位振幅を用いて円弧に近似して求められる。したがって、以下の2つを主要な要因とする誤差が生じると考えられる。

第1に、図3の X_1 および X_2 で表わされる、変位を計測する間隔により生じる誤差（以下、計測間隔誤差）がある。この概要を図4に示す。微小な曲線ではなく、計測範囲内の曲線を円弧に近似するために、計測間隔誤差は生じる。図4に示すように、計測間隔誤差の特徴は R に比較して R' が過大評価、つまり曲率が過小評価となることである。曲線の曲率が大きくなるほど、この傾向は大きくなると考えられる。

第2に、レーザー変位計の分解能による誤差（以下、分解能誤差）が考えられる。この概要を図5に示す。図5で示す変位を計測した場合に、本方法においては破線で示す1つの曲線から R' を求める。しかしながら、実際には計測変位の分解能誤差の範囲内で、実線で示す曲線を代表とした任意の曲線が存在しており、この差により分解能誤差が生じる。図5に示すように、分解能誤差の特徴は、 R に対して R' がある範囲内で過大評価と過小評価の両側にばらつくことである。

上記のように、レーザー変位計の仕様に依存して微小な範囲の曲線の円弧を正確に求めることができないため、本計測方法で用いる R' には二種類の誤差が含まれることが予想される。これらの誤差の傾向は、レーザー変位計の計測範囲内に変曲点が存在しない変形形状の時に同様に成り立つと考えられる。これらの誤差の影響については、次節で具体的な条件に基づき検討を行なう。

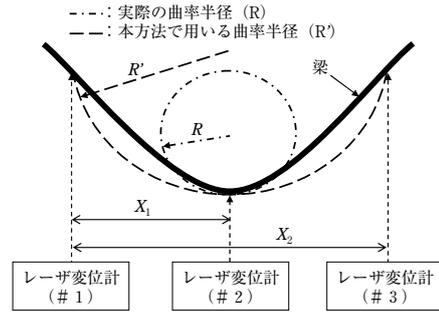


図4 計測間隔誤差の概要

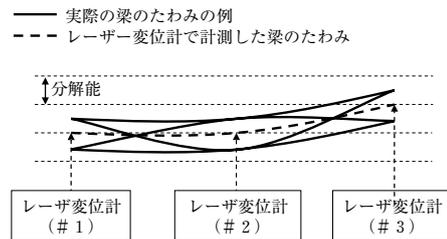


図5 分解能誤差の概要

3.2 誤差の影響の検討

3.2.1 検討方法

本計測方法により演算する曲げ応力は、式(4)で示すとおり曲率に比例する。そこで、以下の三つの曲率を比較することで、計測間隔誤差と分解能誤差の影響について検討を行なう。検討手順および検討条件は、図6および表2に示すとおりである。静荷重については、梁に生じる最大たわみに換算した。

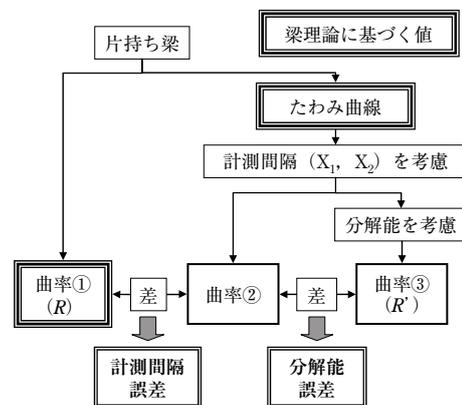


図6 誤差の影響の検討手順

表2 板梁を用いた誤差の影響の検討条件

| 項目 | | 条件 | |
|------------|---------------|---|--------------|
| レーザー変位計 | 計測間隔(X_1) | 18, 36*, 72, 144 (mm) (X_2 は X_1 の2倍) | |
| | 分解能 | 10^{-12} , 0.1, 0.2*, 1 (μm) | |
| 梁の形状 | 板 | 長さ | 500 (mm) |
| | | 幅 | 30 (mm) |
| | | 厚さ(D) | 2 (mm) |
| 材質 | ステンレス鋼 | ヤング率(E) | 195000 (MPa) |
| 静荷重(W) | 梁に生じる最大たわみ | 最大 100 (mm) | |

*本報告で用いたレーザー変位計の条件

- 曲率①：梁理論に基づく曲率 (R)
- 曲率②：計測間隔を考慮した曲率
- 曲率③：計測間隔と分解能を考慮した曲率 (R')

曲率①は、図7に示すように片持ち梁の自由端に静荷重を与えた時の曲率を用いた。梁理論に基づく曲率は式(11)のとおりである。

曲率②および曲率③は、図7に示す片持ち梁に生じるたわみを、表2に示すレーザー変位計の仕様に基づき計測した時の曲率を用いた。曲率②はレーザー変位計の分解能が十分に小さい ($10^{-12} \mu\text{m}$) 時の曲率、曲率③はそれ以外の分解能 (0.1 μm , 0.2 μm および 1 μm) の時の曲率を用いた。梁理論に基づく静たわみ曲線を式(12)に示す。このたわみ曲線は、振動により生じる梁のたわみ曲線とは異なるが、誤差の影響を定量的に検討するために用いた。

$$\frac{1}{R} = \frac{Wx}{EI} \tag{11}$$

$$v = \frac{Wl^3}{3EI} \left(1 - \frac{3x}{2l} + \frac{x^3}{2l^3} \right) \tag{12}$$

ここで、 v はたわみ、 W は静荷重、 l は梁の長さ、 x は梁の自由端からの距離をそれぞれ表わす。

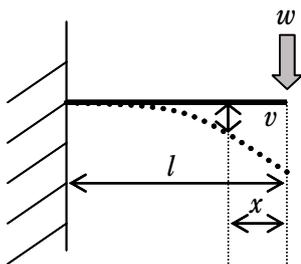


図7 片持ち梁の概要

3.2.2 検討結果

まず、 X_1 を36 mm、曲率③で用いる分解能を0.2 μm として、梁に生じる最大たわみが0.5 mmの時のたわみ曲線を用いて検討を行なった。

図8は、自由端からの距離と曲率の関係を表わす。曲率②は、曲率①と良く一致している。また、曲率③は多少のばらつきは見られるものの曲率①とほぼ一致している。

図9は、曲率②から曲率①を引いた計測間隔誤差を表わす。計測間隔誤差は、常に負の値であることから曲率②は、曲率①に対して過小評価の傾向を持つことが分かる。また、梁の中心部近傍で最も過小評価となる傾向があることも分かる。

図10は、曲率③から曲率②を引いた分解能誤差を

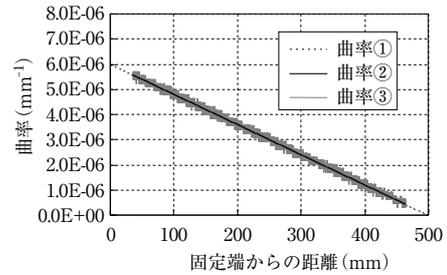


図8 固定端からの距離と曲率の関係

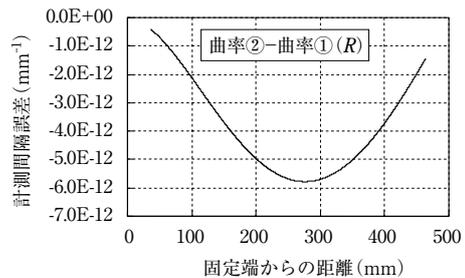


図9 固定端からの距離と計測間隔誤差の関係

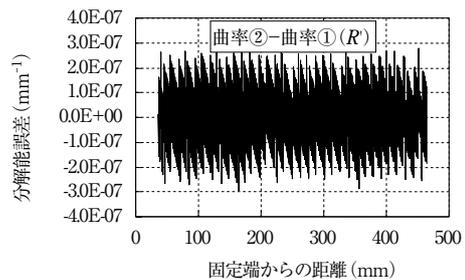


図10 固定端からの距離と分解能誤差の関係

表わす。分解能誤差は、自由端からの距離に依存せず、正と負の両側にばらつく。

これらの誤差の傾向は、3.2節の誤差の要因で予想したとおりであり、表2で示す検討条件の範囲内で同様の傾向を持つことを確認した。

次に、 X_1 を36mmで一定とし、梁に生じる最大たわみと曲率③で用いる分解能を変化させた場合の誤差の検討を行なった。各検討条件における計測間隔誤差の代表値として、図9に示されるような梁に生じる計測間隔誤差の最小値（絶対値）を用いた。同様に、分解能誤差の代表値として分解能誤差の最大値と最小値（絶対値）の平均値を用いた。その結果を図11に示す。また、分解能誤差について整理した結果を図12に示す。

図11から、たわみの増加に伴い計測間隔誤差は増加することが分かる。また、たわみが増加しても、分解能誤差はほぼ一定であり、図12に示すように分解能に依存することが分かる。したがって、本計測方法により生じる誤差は、梁に生じるたわみが小さい時は分解能誤差の影響が大きく、大きい時には計測間隔誤差の影響が大きくなる。つまり、対象とする梁に生じる変形の程度から、どちらの誤差の影響が大きいかを把握することが重要となる。

さらに、曲率③で用いる分解能を $0.1\mu\text{m}$ 、最大たわみを10mmで一定とし、 X_1 を変化させた時の誤差の検討を行なった。その結果を図13に示す。

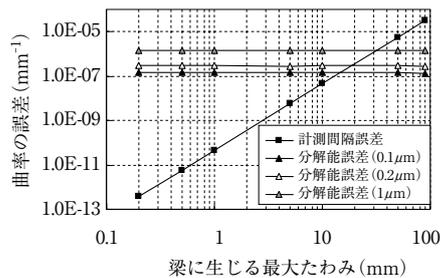


図11 最大たわみと曲率の誤差の関係

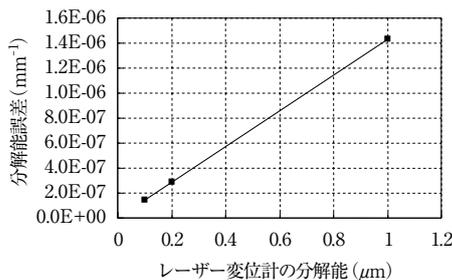


図12 レーザー変位計の分解能と分解能誤差の関係

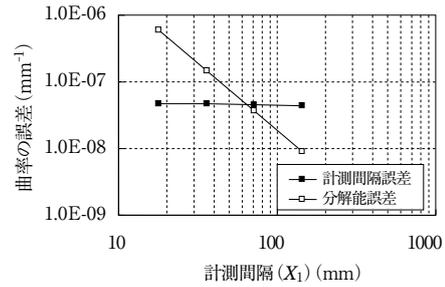


図13 計測間隔と誤差の関係

図13から、計測間隔の増加に伴い、計測間隔誤差は変化しないが、分解能誤差は低下することが分かる。これは梁に生じるたわみ曲線が同じであれば、計測間隔の増加に伴い、計測変位が大きくなり、分解能による影響が相対的に小さくなるためである。

3.3 適用性の検討

前節においては、本計測方法により生じる誤差の影響について、厚さ2mmの板を計測対象にして検討を行なった。実際の配管はこの板に比較して外径が大きいので、応力の対象範囲が同じでも梁に生じるたわみ量は大幅に低減する。本節では、配管状の梁に生じる曲げ応力を求め、前節と同様の手順により誤差の大きさを定量的に評価することで、本計測方法の適用性の検討を行なう。検討条件を表3にまとめる。静荷重の大きさは、梁に生じる最大応力に換算して与えた。配管の外径を3インチ以下としたのは、原子力発電所で生じる振動トラブル事例が、主に小口径の配管で生じるためである。梁理論に基づく曲げ応力は、式(13)により得られる。

$$\sigma_b = \frac{Wx}{Z} \tag{13}$$

表3 配管状の梁を用いた適用性の検討条件

| 項目 | | 条件 | |
|------------|-------------------------|--------------------------------|--------------|
| レーザー変位計 | 計測間隔(X_1) | 36(mm) (X_2 は X_1 の2倍) | |
| | 分解能 | 0.2 (μm) | |
| 梁の形状 | 配管 | 長さ | 0.1(m)~10(m) |
| | | 外径(D) | 3インチ以下 |
| | | 肉厚 | 各種肉厚 |
| 材質 | ステンレス鋼 | ヤング率(E) | 195000 (MPa) |
| 静荷重(W) | 梁に生じる最大応力(σ_b) | 最大100(MPa) | |

表3に示す配管の形状は、60種類程度の組み合わせが考えられる。前節の検討結果から、計測間隔誤差が最大になるのはたわみが最大の時であり、分解能誤差が最大となるのは、配管外径が最大の時に分解能誤差が最大になる時である。そこで、たわみが最大となる1/8B-5S配管と、たわみが最小になる3B-160S配管とを梁として用いて検討を行なった。梁の長さは0.5mで固定し、梁に生じる最大応力を変化させた。その結果を図14に示す。

図14から、計測間隔誤差に比較して分解能誤差の影響が大きく、その値は2.5MPa程度であった。

図14において、1/8B-5S配管では計測間隔誤差と分解能誤差の値が比較的近接しており、梁の条件により計測間隔誤差の方が大きくなる可能性が考えられる。そこで、1/8B-5S配管を用いて、梁の長さを最大10mと仮定した時の誤差の影響について検討を行なった。その結果を図15に示す。

計測間隔誤差と分解能誤差が等しくなるのは、梁の長さが約1.8m、誤差の大きさが約0.3MPaの時である。この時に生じるたわみは約10cmである。実際のプラントにおける状況を考慮すると、10cmもの振動振幅が生じている場合には、追加でサポートが設置されると考えられる。従って、計測間隔誤差が分解能誤差よりも大きくなることは現実的ではないと考えられる。

以上のように、小口径配管の振動応力評価に本計

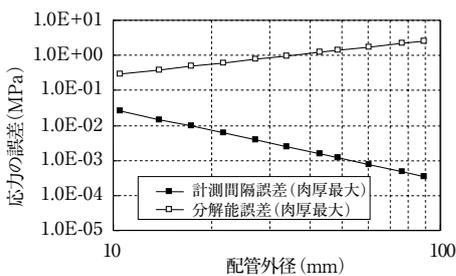


図14 最大応力と誤差の関係

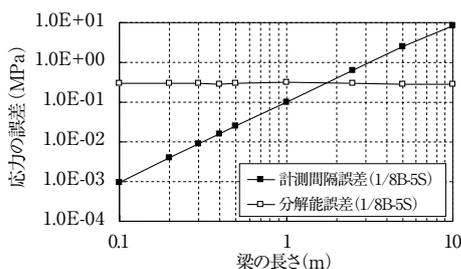


図15 梁の長さとは応力誤差の関係

測方法の適用を想定した場合には、分解能に依存して最大で±2.5MPa程度の誤差が発生すると予想される。この値は、振動モードに基づくたわみ曲線ではなく、梁理論に基づく静たわみ曲線を用いた検討結果である。しかしながら、±2.5MPa程度という誤差は振動応力評価を行なう上で十分に小さく、本計測方法を配管の振動応力評価に適用できる見込みがあると考えられる。

4. 振動試験による適用性の検討

4.1 振動試験の概要

本章の目的は、梁に発生させた振動に伴って生じるたわみを用いて、本報告で提案する計測方法の適用性を検討することである。具体的な手順として、本計測方法により計測された曲げ応力（以下、計測応力）とひずみゲージにより計測された曲げ応力（以下、ひずみ応力）との比較を行なう。また、梁に生じる最大曲げ応力を推定する振動応力評価方法についても検討を行なう。

図16に試験装置の概要を示す。また、表4に試験条件をまとめる。板梁の一次および二次の固有周波数は、事前解析により6.6Hzおよび41.1Hzとの結果が得られており、この結果を踏まえて加振周波数を設定した。ひずみゲージは、計測応力と比較するひずみ応力を計測するためのA～D点と、梁の最大応力が生じる付根部の曲げ応力（以下、付根応力）を計測するためのO点との、合計5点に貼付した。レーザー変位計は、計測応力の演算に3基、加振振幅の計測に1基を用いた。各加振条件において、レーザー変位計については全4基の変位データを収

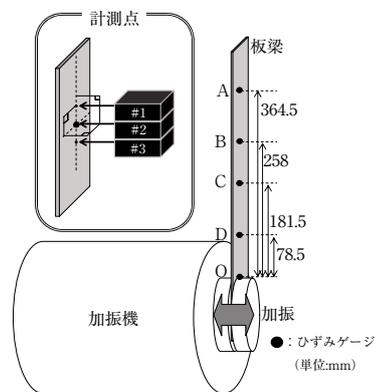


図16 試験装置の概要

表4 振動試験の条件

| 項目 | | 仕様 |
|--------|----------|---|
| 梁 | 長さ | 500 mm |
| | 幅 | 30 mm |
| | 厚さ(D) | 2 mm |
| | 材質 | 軟鋼(E = 200 GPa) |
| 加振波形 | 正弦波 | 周波数: 6 Hz 振幅: 31, 60, 94, 135, 173 μm (ピーク値) |
| | ランダム波 | 周波数: 0 ~ 50 Hz 振幅: 318, 414, 536, 691, 897 μm (RMS 値) |
| サンプリング | サンプリング周期 | 1 ms |
| | サンプリング時間 | 最大 65.5 s(4.096 s \times 16) |
| 計測点 | レーザー変位計 | 4 基 |
| | ひずみゲージ | 5 点 |

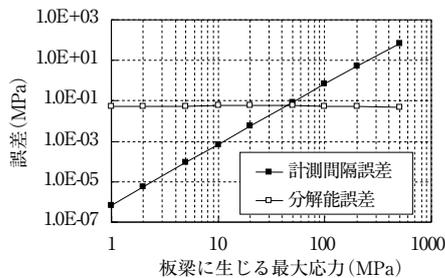


図17 板梁を対象とした最大応力と誤差の関係

集し、ひずみゲージにおいては0点と計測応力と同じ点(A~D点のいずれか1点)の2点のデータのみを収集した。

振動試験で用いた板梁を対象として、第3章で用いた検討手順にしたがって、誤差の検討を行なった。その結果を図17に示す。

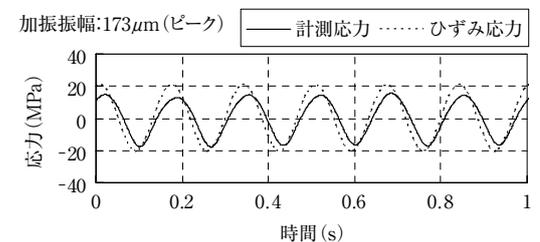
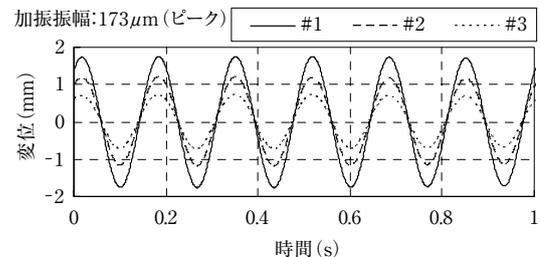
図17から、最大応力が小さい時は分解能誤差の影響が大きく約0.06 MPaであるが、最大応力が約44 MPaの時を境に計測間隔誤差の影響が大きくなる。

4.2 試験結果

4.2.1 正弦波加振試験の結果

図18に、加振振幅が173 μm の時のD点における変位および応力の時刻歴波形を示す。#1~#3は、レーザー変位計の設置位置を表す。

図18から、変位は3点とも正弦波を描いており、計測応力の波形もひずみ応力の波形とよく一致して

図18 変位と応力の時刻歴波形(D点, 173 μm)

いることが分かる。なお、計測応力とひずみ応力の位相がずれているのは、安定した変位を得るために変位計測時に移動平均処理機能を設定したためである。

A~D点における全ての試験結果を用いて、約16.5秒の時刻歴波形を4つの区間に分割し、各区間におけるひずみ応力のピーク値と計測応力のピーク値とを比較した。その結果を図19に示す。また、加振振幅が173 μm の条件において、板梁の固定端からの距離を横軸に、計測応力、ひずみ応力および付根応力を縦軸として整理した結果を図20に示す。

図19から、板梁の自由端に近いA点やB点における計測応力は、ひずみ応力に対して過大評価の傾

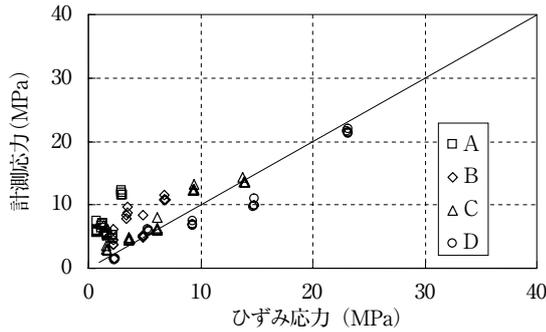


図 19 ひずみ応力と計測応力の関係

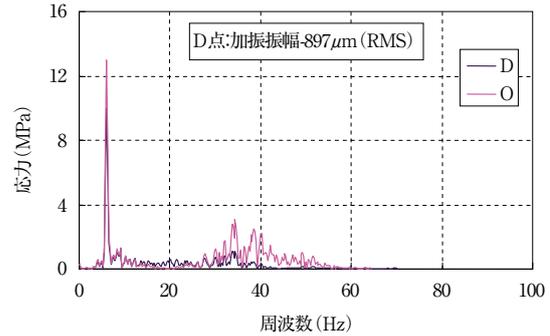


図 21 D 点および O 点における周波数分析結果

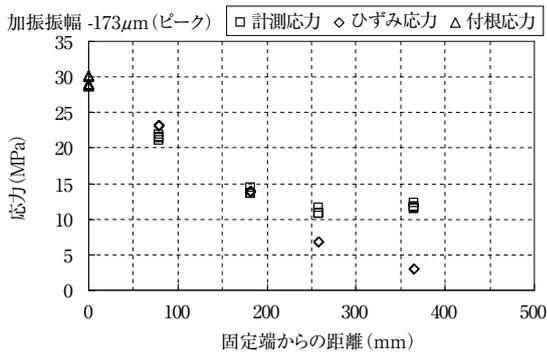


図 20 固定端からの距離と曲げ応力の関係 (D 点, 173 μm)

向が見られるが、固定端に近い C 点や D 点においては、広い範囲の応力に対して良く一致しており、その差は ± 5 MPa 程度であることが分かる。図 17 で示すように分解能誤差は 0.1 MPa 未満であることから、この誤差は静たわみ曲線と振動モード形状の差から生じる計測間隔誤差であると考えられる。また、図 20 から、同じ加振力で加振した場合、固定端に生じる応力が最大になることが確認でき、付根部近傍においては、ひずみ応力および計測応力の両方に比例関係が見られる。

4.2.2 ランダム波加振試験の結果

正弦波試験の結果を踏まえて、O 点と D 点に生じる一次モードの振動応力に着目して、ランダム波加振試験を行なった。まず、応力成分に含まれる周波数成分を確認するため、周波数分析を行なった。その結果を図 21 に示す。

図 21 から、板梁の一次モードと二次モードにあたる 6 Hz と 35 Hz のピークがみられるものの、一次モードの影響が明らかに大きいことが確認できる。

次に、D 点における一次モードの曲げ応力について、

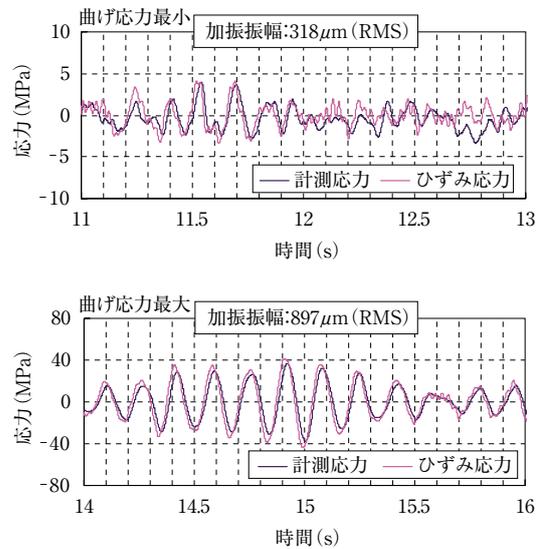


図 22 D 点における応力の時刻歴波形

て、計測応力とひずみ応力との比較を行なった。計測結果の中から、曲げ応力が最大および最小となった時の結果を図 22 に示す。

図 22 から、発生応力の大小により多少のずれはみられるものの、全般的に計測応力はひずみ応力の傾向をよく一致していることが分かる。

4.3 適用性の検討

振動応力評価を行なう際には、最大応力が生じると考えられる配管付根部の応力を評価する必要がある。しかしながら、本計測方法においてはレーザー変位計の計測間隔により配管付根部の応力を直接求めることができないため、配管付根部の応力を推定する必要がある。

正弦波加振試験の結果である図 20 から、配管付根部近傍の 2 点の計測応力を用いて、配管付根の応力を外挿により推定できると考えられる。この計測範

囲は高々十数 cm であり、通常の配管系ではこの範囲に変曲点を有すること考え難く、より高次の振動モードについても同様に推定できると考えられる。

ランダム波加振試験の結果から、配管付根部近傍の一次モードにより生じる振動応力については、計測応力とひずみ応力はよく一致することが確認できた。配管付根部に生じる応力には、一次モードの振動応力の割合が高いことも確認されており、正弦波試験と同様の手順により配管付根部の応力を推定できると考えられる。

したがって、本計測方法は小口径配管の曲げ応力を対象とした振動応力評価手法として適用できると考えられる。

5. まとめ

複数のレーザー変位計を用いて、梁の振動により生じる変位振幅を計測し曲げ応力を演算する振動計測器の開発を行ない、その方法の適用性について検討を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 梁理論に基づく静たわみ曲線を用いて、本計測器に生じる誤差について検討を行なった。その結果、レーザー変位計の設置間隔に依存する誤差とレーザー変位計の分解能に依存する誤差とに分類されることが分かった。小口径配管を対象とした誤差の検討の結果、レーザー変位計の分解能に依存して ± 2.5 MPa 程度の誤差が生じることを確認した。この誤差は振動応力評価手法を行なう上で十分な精度と考えられ、本計測方法を振動応力評価手法として適用できる見込みを得た。
- (2) 板梁を用いて振動の一次モードを対象とした正弦波加振試験を行なった。その結果、曲げ応力が大きい配管付根部近傍において、ひずみゲージにより計測した応力と本計測方法により計測した応力がほぼ一致し、その誤差は ± 5 MPa 程度となることを確認した。
- (3) 板梁を用いて二次モードまでの周波数成分を含むランダム波加振試験を行なった。その結果、配管付根部に生じる応力には一次モードの振動応力の影響が大きいことを確認した。また、その一次モードの振動応力について、配管付根部近傍において本計測方法とひずみゲージにより計測した応力がよく一致することを確認した。
- (4) 本計測方法を用いて配管付根部近傍の振動応力を計測することで、最大応力が生じると考えられる配管付根部に生じる振動応力を推定することができる。

今後は、小口径配管を対象とした振動試験により適用性の検討を行なうと共に、モックアップ試験体等を用いた振動計測による検証を行なう予定である。

文献

- (1) Gosselin, S.R. and Fleming, K.N., 1997, "Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment," Proc. ICON 5, 2641, pp.1-9.
- (2) Mitman, J., 1999, "Revised Risk-Informed Inservice Inspection Evaluation Procedure," EPRI TR-112657 Rev. B-A Final Report.
- (3) Lydell, B.O. Y., 2002, "A Database System Supporting the Evaluation of Piping Reliability on the Basis of Operational Experience," SKI Report, RSA-R-2001-01. 12.
- (4) Noda, M., et al., 2006, "Methods of Evaluating Vibration-Induced Stress of Small-Bore Piping," ASME-PVP, PVP2006-ICPVT-11-93198, pp.1-9
- (5) Silva, C.W., 1999, "Vibration: Fundamentals and Practice," CRC Press, Boca Raton, Chap.8, pp.456-476.
- (6) Tanaka, M., et al., 1997, "Development of a Diagnostic and Monitoring System for Vibration Pipes," Mitsubishi Heavy Industries Technical Review, Vol.33, pp.278-281.
- (7) Kageyama, K., et al., 2003, "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.
- (8) 日本機械学会編, 機械工学便覧 A4 材料力学, (1997).