

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—

Development of Method to Measure Vibrational Stress of Small-Bore Piping
with Multiple Contactless Displacement Sensors
—Examination of Applicability by Vibration Test Using a Pipe—

野田 満靖 (Michiyasu Noda)* 高橋 茂 (Shigeru Takahashi)*

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、振動応力計測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。本研究では、複数の非接触型変位計を用いた振動応力計測方法の適用性について実験的に検討した。(1)本計測方法により、従来のひずみゲージ法と同程度の振動応力を計測できることを確認した。本計測方法の精度は、非接触型変位計を設置する間隔に大きく依存し、その間隔が38mmの場合は $\pm 7\text{MPa}$ 程度、76mmの場合は $\pm 2\text{MPa}$ 程度の誤差であることを確認した。(2)計測器を手持条件で振動応力計測を実施した場合、過大評価やばらつきが多少見られるが固定条件とほぼ同じ結果が得られた。(3)本計測方法は、小口径配管の効率的な振動応力計測方法として適用できる。

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 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. In this study, the applicability of the method to measure vibrational stress by multiple contactless displacement sensors was examined. (1) It was shown that the stress calculated by the proposed method was good agreement with the stress measured by strain gauges. The accuracy of the method depended greatly on the measuring interval of the displacement sensors, and the errors were about $\pm 7\text{MPa}$ and $\pm 2\text{MPa}$ respectively when the intervals were 38mm and 76mm. (2) When we measured the vibrational stress with the instrument in the hand, the stress was almost the same as that with the instrument fixed though having a few overestimation and differences. (3) The method can be applied as an efficient vibration stress measurement method for small-bore pipes.

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系では、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振動トラブルが数多く報告^{(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、配管に生じる振動応力の評価が行われている。しかしながら、これらのトラブルが主に生じる小口径配管は、プラント内に数多く存在し、その形状も多種多様であり、計測に時間や労力を要することから、現場で簡単に取扱いができ、迅速に結果が得られるような振動応力の計測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等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応

* (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

力を求める方法⁽⁶⁾がある。

しかし、接触式振動計を用いる場合には、接触共振現象を考慮する必要があり、振動計の押し付け力等により振動の状態が変化するため、計測精度が計測者の力量に依存するといった問題点がある。ひずみゲージや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、必ずしも効率的ではない。また、ひずみゲージは高温の対象物への適用が難しく、加速度計は得られたデータを解析する必要があるため、事後の作業だけでなく熟練した振動解析技術も必要である。

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には外的刺激（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はあるものの、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。

また、非接触で構造物に生じるひずみや応力を計測する方法として、レーザー光などを光源として干渉を利用した計測方法⁽⁸⁾⁽⁹⁾やCCD（Charge Coupled Device）イメージセンサで取り込んだ情報を基にするデジタル画像相関法⁽¹⁰⁾などがある。しかしながら、前者はレーザーの種類により高精度な計測も可能であるものの、レーザー干渉を利用するため振動に弱い計測方法である。後者は測定対象物表面の模様を利用した方法であるため、事前の準備が必要である。

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、著者らは反射型のレーザー変位計を用いた振動応力計測方法を開発した⁽¹¹⁾。この方法は対象物の比較的狭い範囲に生じる変位をレーザー変位計で複数点計測し、対象部位に生じる相対変位を用いた簡単な演算により振動応力を算出する方法であり、対象部位に生じる振動応力を直接的かつ迅速に計測できる。また、非接触の計測方法であるため、計測装置のセッティングに必要な時間が短時間であること、計測位置や計測方向の変更が容易であることなどから、より効率的に振動応力を計測できると考えられる。これまでに、はり理論に基づく誤差の検討や板梁を用いた適用性の検討を行い、表面が平らな対象物に対しては非接触の振

動応力計測方法としての適用性を確認している。しかしながら、配管の振り回り振動を考慮すると、振動による変位と配管表面の曲率による変位とを区別することが難しいため、反射型レーザー変位計を用いた場合の配管への適用は難しいと考えられる。

そこで、本研究では反射型レーザー変位計に替わり、発光ダイオード透過型方式の非接触型変位計を用いた振動応力計測方法について、配管を用いた振動実験による適用性の検討結果を報告する。

2. 振動応力の計測方法

2.1 計測器の概要

本研究で用いた発光ダイオード透過型方式の非接触型変位計の概要と、それらを組み合わせた振動応力計測器の概要を図1および図2にそれぞれ示す。この非接触型変位計は、対象物の振動を光の明暗部の振動として検知する方式の変位計であり、測定範囲の中心部ほど精度が良く、反射型のレーザー変位

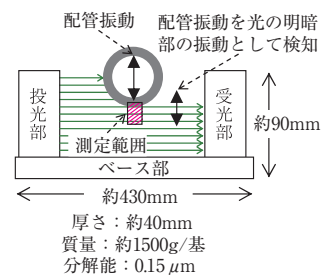
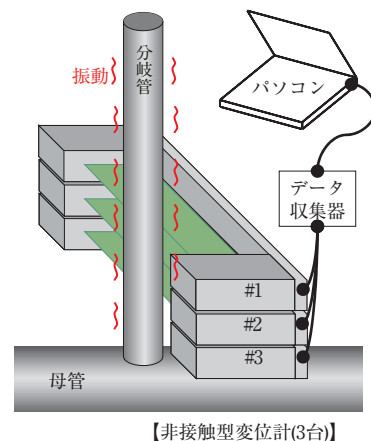


図1 非接触型変位計の概要



【非接触型変位計(3台)】

図2 振動応力計測器の概要図

計に比較して配管表面の曲率の影響を受けにくいという特徴がある。振動応力計測器は、配管軸方向に沿って並べられた3基の非接触型変位計と、データ収集器およびパソコンで構成される。非接触型変位計で計測した変位、配管形状や材質に関する値、非接触型変位計を設置する間隔（以下、計測間隔）を用いて、対象配管に生じる振動変形によるひずみを演算し、振動応力を算出する。

2.2 振動応力計測方法の原理

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。

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

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

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、 σ_b は曲げ応力、 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、曲げ応力は式(3)で表わされる。

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

E 、 I および Z は配管の材質と形状から得られ、 I と Z の比は配管の内径を d 、外径を D とすると式(4)となり、 σ_b は E 、 D および R により式(5)で表される。

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

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

次に、曲率半径 R の演算方法を説明する。図3は、 X - Y 平面内で振動する配管に生じる振動応力を、本計測方法により算出する場合の概念図を表わす。

ここで、 R' は本計測方法で用いる曲率半径の近似値、 u_1 、 u_2 および u_3 は非接触型変位計で計測した3箇所の変位、 X_0 は R' の中心から u_1 の計測位置までの X 方向の距離、 Y_0 は R' の中心から配管の中心軸までの距離、 X_1 および X_2 は非接触型変位計の計測間

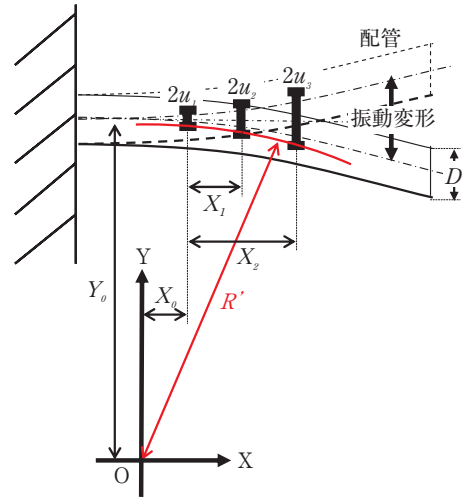


図3 振動応力計測方法の概念図

隔をそれぞれ表わす。

図3に示した幾何条件により、式(6)から式(8)が成り立つ。

$$(X_0)^2 + (-u_1 + Y_0)^2 = R'^2 \quad (6)$$

$$(X_1 + X_0)^2 + (-u_2 + Y_0)^2 = R'^2 \quad (7)$$

$$(X_2 + X_0)^2 + (-u_3 + Y_0)^2 = R'^2 \quad (8)$$

ここで、 R' は変位計測を行なった配管部分に生じる変形を円弧で近似した時の曲率半径であり、3点の変位計測点の中心部分の曲率半径の近似値と考えられる。式(6)から式(8)を、 X_0 と Y_0 について整理すると、次式が得られる。

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

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

ここで、式(9)および式(10)を式(6)から式(8)のいずれかに代入して R' を求め、 R' を式(5)に代入することで σ_b の近似値が得られる。このとき、配管に曲げ変形が生じていない条件、つまり $u_1 = u_2 = u_3 = 0$ および $(u_2 - u_1)/X_1 = (u_3 - u_1)/X_2$ の場合は、 σ_b は0となる。また、本計測方法は3点の計測点内に変曲点が含まれない限り、高次の振動モードにおいても適用できると考えられる。

3. 振動実験による適用性の検討

3.1 振動実験の概要

本章では、配管試験体を用いた正弦波加振による振動実験の結果に基づき、本計測方法の適用性について検討する。従来法と本計測方法とで振動応力の比較を行うが、最初に、振動応力計測器を固定した状態で振動実験を行い、基礎的なデータを取得した。次に、実機での効率的な振動応力計測を想定して、振動応力計測器を手に持った状態で振動実験を行い、データを取得した。これらのデータに基づき、本計測方法の適用性について検討を行った。

3.2 配管試験体

配管試験体は、1インチ、2インチおよび3インチ（以下、1B、2B および 3B）の3種類の配管を鉛直方向に設置して配管の下端を固定、上端に加振機およびおもりを設置した構成であり、各配管試験体の固有振動数を打撃試験により求めた。配管試験体の概要を表1にまとめる。また、配管試験体の例として3B配管試験体の写真を図4に示す。本実験では、偏心質量を持つモーターを回転させて加振力を発生させる機構の加振機を用いた。

図5に、各種センサーによる計測位置をまとめる。従来の振動応力計測方法として、A～Eまでの5点に38mm間隔でひずみゲージを貼付し、配管に生じる振動応力を直接的に計測した。一方、本計測方法として、非接触型変位計の計測間隔が38mmの場合はC～Eの3点、76mmの場合はA、C、Eの3点で変位を計測した。

表1 配管試験体の概要

	1B	2B	3B
配管外径(mm)	34.0	60.5	89.1
配管肉厚(mm)	4.0	1.5	2.0
配管長さ(mm)	1000		
材質	SUS304		
ヤング率(MPa)	195000		
おもり(kg)	0.0	6.3	13.3
固有振動数(Hz)	10.5	11.5	13.2



図4 3B試験体概要

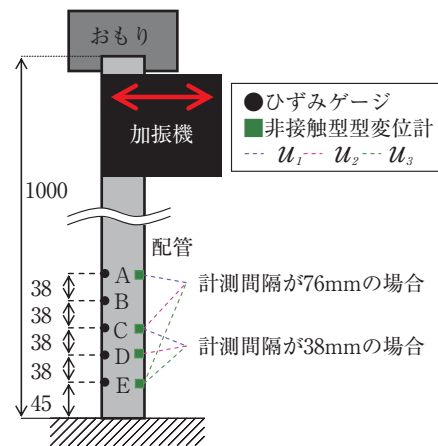


図5 計測位置

3.3 実験方法

実験条件を表2にまとめる。加振振動数は、表1に示す固有振動数よりも低い振動数で、0.5Hz間隔6条件とした。加振振動数を固有振動数に近づけることで、固定端近傍に生じる振動応力は増加する。また、振動応力計測器の条件として、計測間隔を38mmと76mmの2条件、設置方法を固定と手持の2条件を設定した。

本実験では、従来法のひずみゲージ法による振動応力（以下、ひずみ応力）と、本計測方法による振動応力（以下、計測応力）とを求め、その結果について比較検討を行った。具体的には、計測間隔38mmの時は計測応力とD点のひずみ応力を比較

表2 実験条件

		1B	2B	3B	
加振振動数 (Hz) (0.5Hz 間隔)		6.5~9.0	7.5~10.0	10.0~12.5	10.0, 11.5
加振波形		正弦波			
サンプリング周期 (ms)		1			
サンプリング時間 (s)		4.096			
計測点	ひずみゲージ	5点			
	変位	3点			
非接触 変位計 条件	計測間隔 (mm)	38, 76		76	
	設置方法	固定		手持	

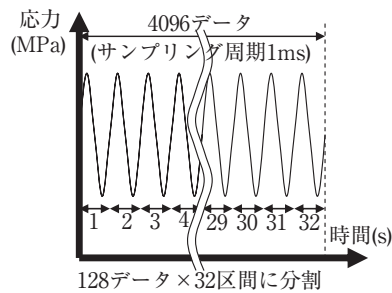


図6 波形とデータ処理区間の例

し、計測間隔 76mm の時は計測応力と C 点のひずみ応力を比較した。

振動実験で得られたひずみ応力と計測応力の波形は、バンドパスフィルタにより 5~30Hz の振動成分を抽出したうえで、図 6 に示すように波形を 32 区間に分割する。そして、各区間におけるピーク値および RMS 値 (Root Mean Square) を算出し、それらの平均値をひずみ応力または計測応力の値とし、標準偏差を誤差とした。

3.4 実験結果

3.4.1 計測器固定時の振動実験結果

振動応力計測器を固定した条件において、計測間隔を 38mm および 76mm とした時のひずみ応力と計測応力の関係を図 7 および図 8 に示す。また、横軸をひずみ応力、縦軸をひずみ応力と計測応力の差として整理した結果を図 9 および図 10 に示す。

まず、1B 配管および 2B 配管の結果に着目する。図 7 から、計測間隔 38mm の場合、ひずみ応力が小さいときに計測応力は過大評価を示すものの、ひずみ応力の増加に伴い計測応力はひずみ応力と一致する傾向が見られる。また、ピーク値に比較して RMS

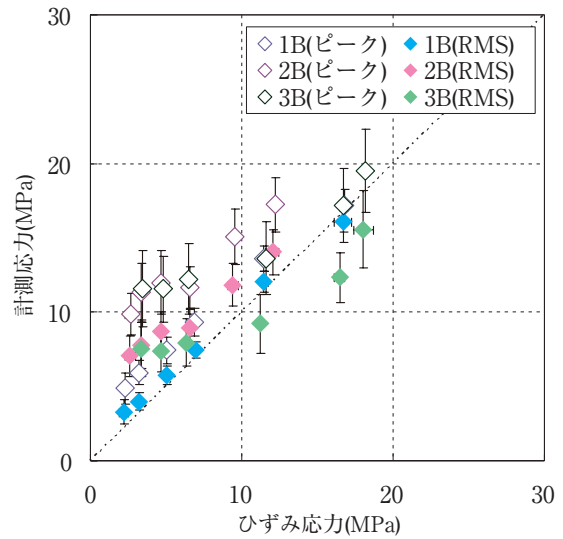


図7 ひずみ応力と計測応力の関係 (固定, 計測間隔 38mm)

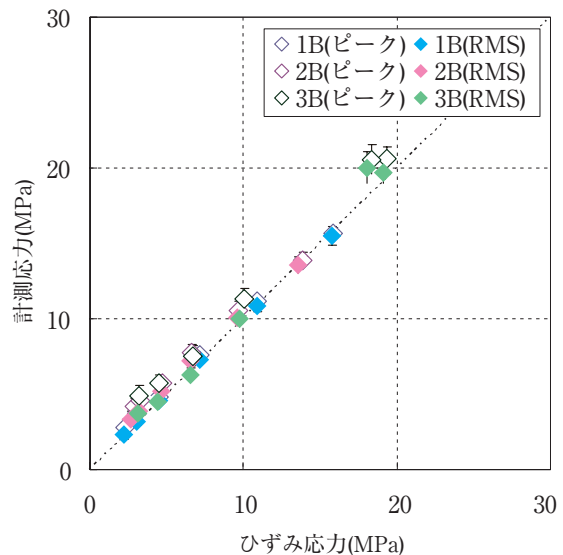


図8 ひずみ応力と計測応力の関係 (固定, 計測間隔 76mm)

値の方が安定した結果を示している。図 8 から、計測間隔 76mm の場合、全ての範囲において計測応力とひずみ応力が非常に良く一致することが分かる。図 9 および図 10 により、同様の傾向をより明確に確認できる。

次に、3B 配管の結果に着目する。図 7 および図 9 から、ひずみ応力が小さい場合には、計測間隔 38mm および 76mm の両方において、1B 配管および 2B 配管における結果と同様の傾向が見られる。しかしながら、ひずみ応力が大きくなると、計測間

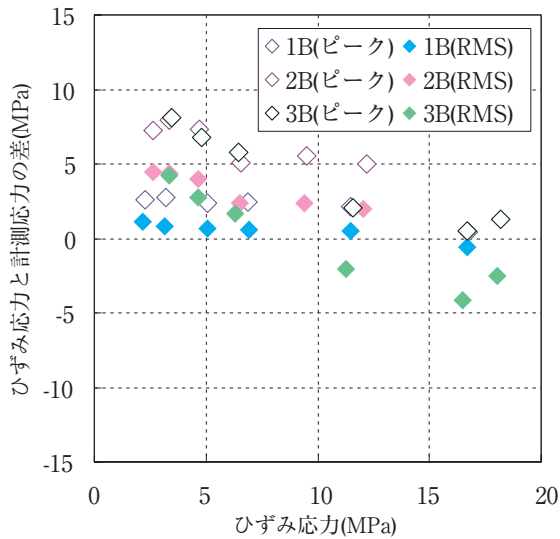


図9 曲げ応力と応力差の関係
(計測間隔 38mm)

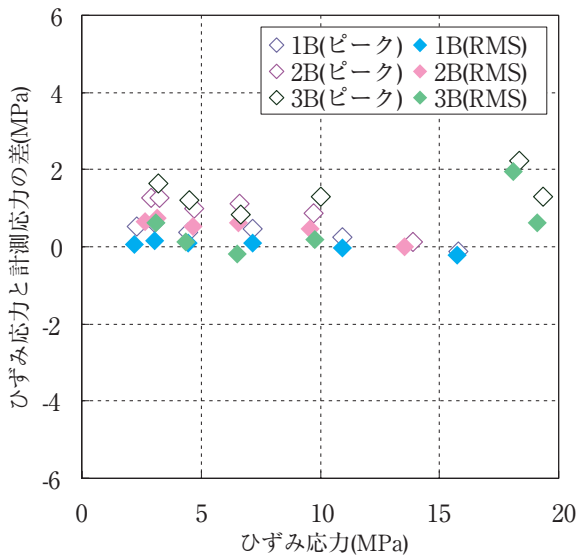


図10 曲げ応力と応力差の関係
(計測間隔 76mm)

隔 38mm の場合は計測応力が過小評価の傾向を示し、計測間隔 76mm の場合は計測応力が過大評価の傾向を示している。このように異なる傾向を示した原因として、配管試験体と振動応力計測器の間の振動絶縁が不十分であったために、振動応力計測器も振動し、計測応力の精度が低下したものと考えられる。3B 配管が共振状態に近づくことで、大きな加振力が生じたためにこの影響が現れたと考えられる。したがって、高精度の振動応力計測のためには、振動応力計測器の振動による影響を抑制または除去する必要があると考えられる。

図9および図10に示すひずみ応力と計測応力の差

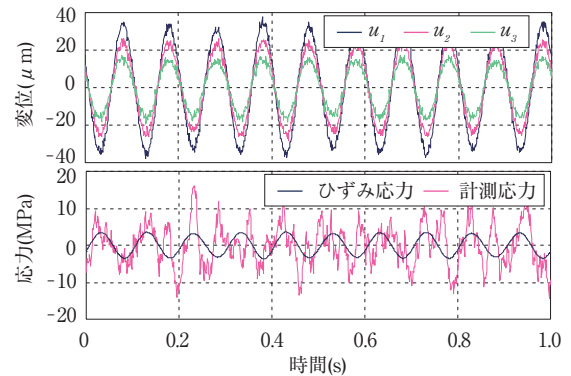


図11 計測器固定時の波形 (3B)
(計測間隔 38mm, 10.0Hz 加振)

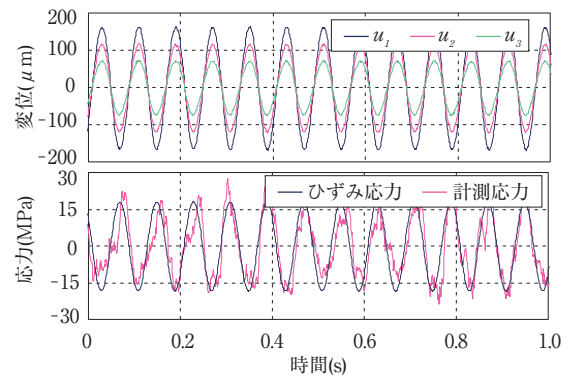


図12 計測器固定時の波形 (3B)
(計測間隔 38mm, 12.5Hz 加振)

を本計測方法の誤差とすると、計測間隔 38mm の場合には、ピーク値で $\pm 7\text{MPa}$ 程度、RMS 値で $\pm 5\text{MPa}$ 程度の誤差が生じている。一方、計測間隔 76mm の場合には、ピーク値および RMS 値ともに $\pm 2\text{MPa}$ 程度の誤差に減少している。さらに、誤差が大きくなるのは、全般的にひずみ応力が小さく曲げ変形により生じる変位が小さい時である。これらの結果は、計測範囲が広く、曲げ変形により生じる変位が大きい時の方が、本計測方法の精度が向上することを示している。

図11から図14に、計測器固定時の応力波形の例として、3B配管の振動実験でひずみ応力が小さい条件(10.0Hz加振)とひずみ応力が大きい条件(12.5Hz加振)の実験結果を示す。計測間隔38mmにおける実験結果は図11および図12に、計測間隔76mmにおける実験結果は図13および図14にそれぞれ示す。各図における上図は変位、下図は応力の波形を表す。

変位波形に着目すると、全ての波形において自由

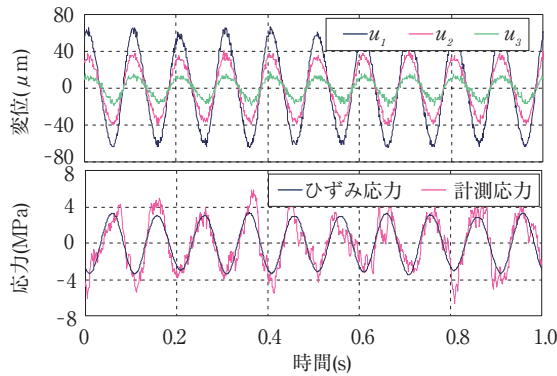


図 13 計測器固定時の波形 (3B)
(計測間隔 76mm, 10.0Hz 加振)

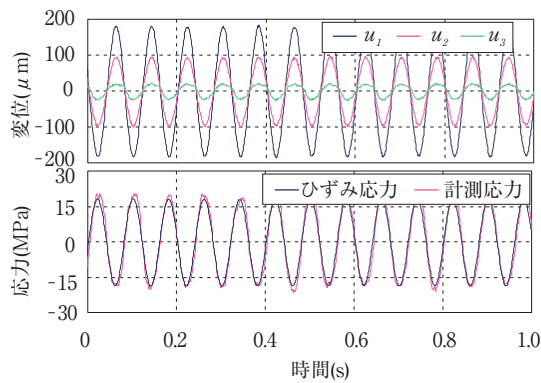


図 14 計測器固定時の波形 (3B)
(計測間隔 76mm, 12.5Hz 加振)

端に近い u_1 で振幅が大きく、固定端に近い u_3 で振幅が小さい正弦波波形を示すことが分かる。また、ひずみ応力が小さい場合、変位波形の中に細かいノイズが確認できる。

応力波形に着目すると、計測間隔が広く、ひずみ応力が大きい方が、計測応力とひずみ応力の波形は良く一致しており、図 7 から図 10 で得られた結果と同様の傾向を確認できる。しかしながら、図 11 に示した、計測間隔 38mm でひずみ応力が小さい条件における応力波形を見ると、他の応力波形と比較して、計測応力とひずみ応力は一致していない。

3.4.2 計測器手持時の振動実験結果

振動応力計測器を手に持った条件において、計測間隔を 76mm とした時のひずみ応力と計測応力の関係を図 15 に示す。また、図 16 および図 17 に変位および応力の波形を示します。

図 15 と図 8 により、振動応力計測器の固定方法に

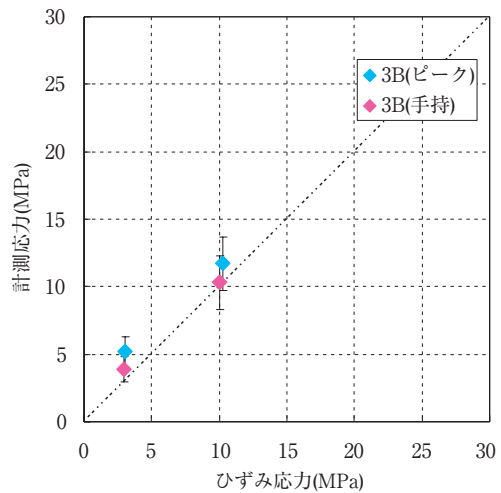


図 15 ひずみ応力と計測応力の関係
(手持, 計測間隔 76mm)

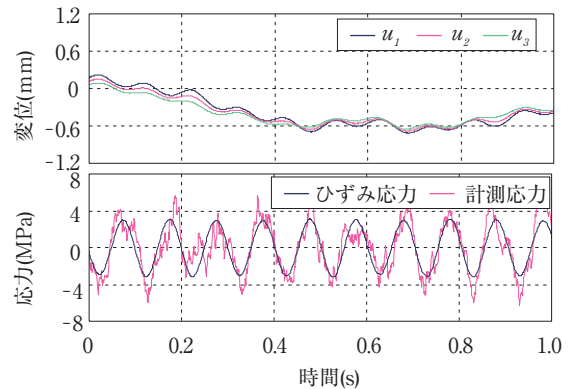


図 16 計測器手持時の波形 (3B)
(計測間隔 76mm, 10.0Hz 加振)

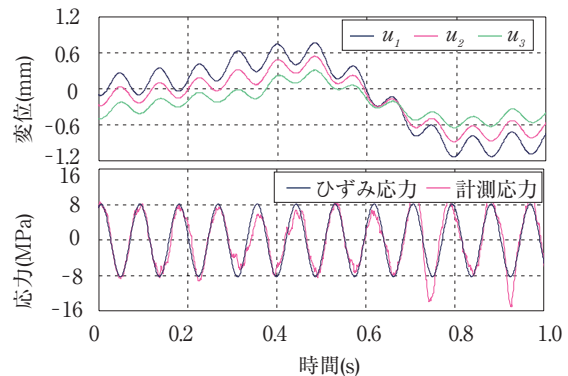


図 17 計測器手持時の波形 (3B)
(計測間隔 76mm, 11.5Hz 加振)

よる影響を比較すると、手持時の方が計測応力のばらつきが大きいことが分かる。また、手持時においても計測応力とひずみ応力の値はほぼ一致している

ものの、固定時の結果と比較すると計測応力に過大評価の傾向が見られる。

変位波形に着目すると、図 16 および図 17 において、振幅が大きい成分に、一定周期の成分が加わった波形となっている。振幅が大きい成分は人の揺らぎ、一定周期の成分は加振機による振動成分をそれぞれ表す。人の揺らぎの成分は、X、Y および Z の 3 方向への平行移動と、X 軸、Y 軸および Z 軸廻りの回転移動に分解できる。平行移動のうち、配管軸方向の平行移動は計測位置の変化、それ以外の方向への平行移動は計測中心部からずれることによる変位分解能の低下や、極端な場合には計測範囲からの逸脱といった影響が生じる。また、回転移動のうち、配管軸廻りの回転移動は計測方向の変化、それ以外の回転移動は変位に影響を与えられらる。

応力波形に着目すると、バンドパスフィルタにより人の揺らぎの影響が除去されて、計測応力とひずみ応力の波形の傾向は全般的に一致している。図 13 に示す計測器固定時の波形と比較しても、多少ばらつきが大きいように見えるが、ほぼ同等の波形が得られたと考えられる。

3.4.3 計測応力の誤差発生原因の検討

本節では、ひずみ応力が小さい時に計測応力とひずみ応力が異なる傾向を示した原因について検討を行う。具体的には、非接触型変位計で計測される変位の成分のうち振動応力に寄与する変位（以下、信号変位）と、各種ノイズによる変位（以下、ノイズ変位）との比、いわゆる S/N 比（Signal to Noise Ratio）の影響について検討を行う。

図 11 から図 14 に示す計測器固定時の変位波形から、隣り合う非接触型変位計で計測された変位の差 ($u_2 - u_1$ および $u_3 - u_2$) を求め、両者の差 ($(u_2 - u_1) - (u_3 - u_2)$) を信号変位とした。これら 3 種類の波形を図 6 に示すように応力波形と同様に処理し、ピーク値の平均値を求めた。その結果を表 3 に示す。同様に、図 16 および図 17 に示す変位波形から、計測器手持時における信号変位のピーク値の平均値を求めた。その結果を表 4 に示す。

次に、計測間隔 38mm の条件における各試験体の無加振時の変位波形を取得した。これらの波形を上記と同様に処理し、信号変位にあたる波形をノイズ変位とした。さらに、ノイズ変位により生じる見かけ上の応力（以下、ノイズ応力）も求めた。その結

果を、図 18 から図 20 に示す。ここで、上図はノイズ変位、下図はノイズ応力の波形をそれぞれ表す。計測間隔 76mm におけるノイズ応力は、計測間隔 38mm におけるノイズ変位を用いて算出した。これらの結果を表 4 にまとめるとともに、配管外径とノイズ応力の関係を図 21 にまとめた。

信号変位に着目すると、表 3 および表 4 からひずみ応力の増加および計測間隔の拡大により、信号変

表 3 計測器固定時(3B)の信号変位

計測間隔 (mm)	加振振動数 (Hz)	変位差 (μm)		
		$u_2 - u_1$	$u_3 - u_2$	信号変位
38	10.0	8.0	7.5	1.9
	12.5	48.6	46.4	3.2
76	10.0	16.3	14.1	3.2
	12.5	87.5	74.7	13.7

表 4 計測器手持時(3B)の信号変位

計測間隔 (mm)	加振振動数 (Hz)	変位差 (μm)		
		$u_2 - u_1$	$u_3 - u_2$	信号変位
76	10.0	14.2	12.6	3.4
	11.5	54.7	48.6	7.8

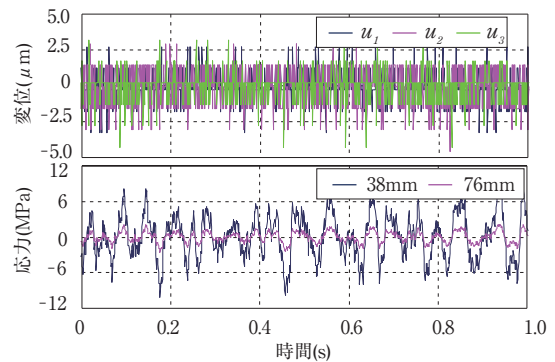


図 18 無加振時の波形 (1B)

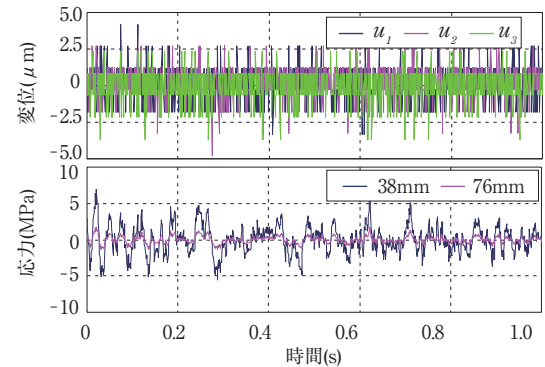


図 19 無加振時の波形 (2B)

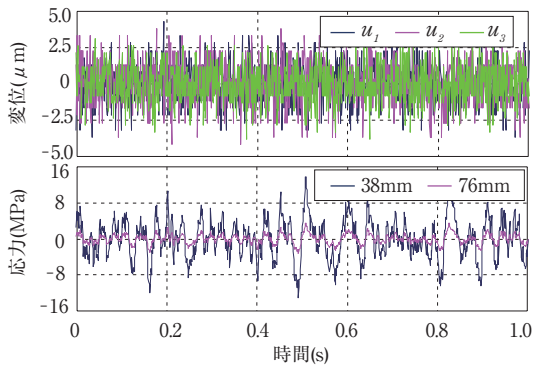


図 20 無加振時の波形 (3B)

表 5 ノイズ変位

計測間隔 (mm)	試験体種類	変位差 (μm)		
		$u_2 - u_1$	$u_3 - u_2$	ノイズ変位
38	1B	0.8	0.8	1.5
	2B	0.8	0.8	1.3
	3B	1.0	1.0	1.7

位が大きくなること分かる。これらの結果は、3.4.1 節と同様の結果である。また、10.0Hz 加振時における計測器固定時と計測器手持時の信号変位を比較すると、 $3.2\mu\text{m}$ と $3.4\mu\text{m}$ であり大きな差は生じておらず、3.4.2 節の結果を裏付ける結果となった。

ノイズ変位およびノイズ応力に着目すると、図 18 から図 20 および表 5 において、ノイズ変位の配管外径による影響は見られない。一方、図 21 から、計測間隔が広く、配管外径が小さい時に、ノイズ応力が低下する傾向が見られる。計測間隔が広い時にノイズ応力が低下するのは、計測間隔の拡大によりノイズ変位がノイズ応力に与える影響が相対的に小さくなるためだと考えられる。また、配管外径が小さい時にノイズ応力が低下するのは、式(5)に示すように計測応力は配管外径に比例するためだと考えられる。また、図 21 に示すノイズ応力の値は、計測間隔 38mm の時に 10MPa 程度、76mm の時に 2.5MPa 程度であり、3.4.1 節で得られた計測応力の誤差と概ね一致している。したがって、本計測方法の誤差はノイズ応力による影響が大きいことを示している。

さらに、信号変位とノイズ変位の値に着目すると、10.0Hz 加振の条件におけるノイズ変位の値は $1.7\mu\text{m}$ 、計測間隔 38mm の時の信号変位は $1.9\mu\text{m}$ 、計測間隔 76mm の時の信号変位は $3.2\mu\text{m}$ であり、信号変位とノイズ変位の差は、それぞれ $0.2\mu\text{m}$ と

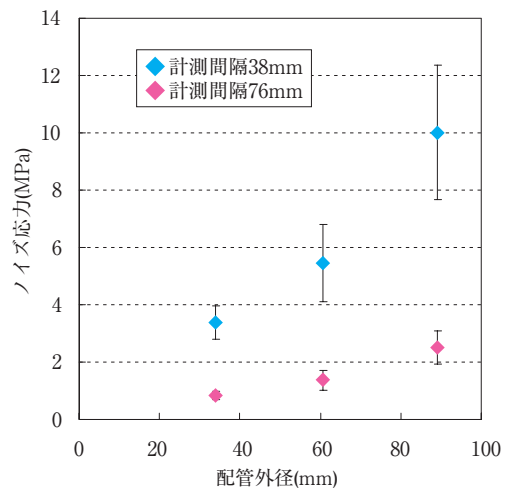


図 21 配管外径とノイズ応力の関係 (ピーク値)

$1.3\mu\text{m}$ である。非接触型変位計の分解能が $0.15\mu\text{m}$ であることを考慮すると、計測間隔 38mm の時には S/N 比が小さい、つまりノイズ応力の影響が大きかったために、計測応力とひずみ応力の傾向が一致しなかったと考えられる。

以上の検討結果から、本計測方法で高精度の振動応力を計測するためには、S/N 比が大きくなる条件で計測を行なう必要がある。計測間隔の拡大は、信号変位の増加と共にノイズ応力の影響を相対的に低減するため、S/N 比の向上の点から効果が高い対策と考えられる。また、非接触型変位計の高分解能化による、ノイズ変位およびノイズ応力の低減も期待できる。

3.5 適用性の検討

本研究で実施した振動実験の結果から本計測方法の誤差は、非接触型変位計の計測間隔が 38mm の場合には $\pm 7\text{MPa}$ 程度、76mm の場合には $\pm 2\text{MPa}$ 程度となることが分かった。それに対して、小口径配管の疲労破壊防止のための許容応力は、概ね数十 MPa であり、計測間隔 76mm の場合には、本計測方法により十分な精度で振動応力を計測できると考えられる。計測間隔 38mm の場合には、曲げ応力が小さい時に誤差が大きくなるが、本計測方法から得られる値は過大評価の傾向を示すため、疲労破壊の未然防止の観点からは安全側の評価となり、評価上の問題はないと考えられる。

振動応力計測の効率化を図るため、本研究では振動応力計測器を手持計測した場合の振動実験も実施

し、ばらつきは多少大きくなるものの、固定計測した場合と同程度の結果が得られることを確認した。手持計測の導入により、従来法と比較して振動応力計測の効率化が期待できる。

本研究では、ひずみゲージ法から得た結果との比較により本計測方法の精度確認を行なった。しかしながら、本計測方法を実機適用し、効率的な振動応力計測を行なうためには、ひずみゲージ法とは異なる方法で本計測方法の精度確認を行なう必要がある。その方法の一つとして、3.4.3節で検討したS/N比を用いた方法が考えられる。そこで、本研究の全ての結果について、横軸を加振振動数、縦軸を信号変位またはノイズ変位として図22にまとめた。さらに、横軸をS/N比、縦軸を計測応力の誤差として図23にまとめた。

図22から、加振振動数の増加や計測間隔の拡大による信号変位の増加の傾向を確認できる。また、図23から、S/N比の増加に伴う計測応力の誤差減少を確認できる。図23から、S/N比が2以上であれば、計測応力の誤差は計測間隔38mmで ± 5 MPa程度、計測間隔76mmで ± 2 MPa程度となることが予想される。このように、S/N比は計測応力の精度を確認する際の判断基準になると考えられる。

以上の検討結果から、本計測方法は誤差の大きさを考慮したうえで、小口径配管の振動応力計測方法として適用できると考えられる。

本計測方法を原子力発電所における小口径配管の振動応力計測に適用した場合に想定される問題点を以下にまとめる。

- (1) 狭隘部のため、対象配管に振動応力計測器を近づけられない
- (2) 対象配管が多数あるため、作業時間を十分に確保できない
- (3) 単純な正弦波振動ではなく、複数の振動モードが合成されたランダム振動である

(1)に対する解決策としては、非接触型変位計の小型化を図る必要がある。小型化に伴い狭隘部の計測は可能になるものの、計測間隔も狭まることも予想されるため、非接触型変位計の小型化と高精度化を同時に進める必要があると考えられる。

(2)に対する解決策としては、本研究で実験を行なった手持計測による対応が考えられる。本計測方法は非接触計測であり設置時間は非常に短く、計測時間やデータ処理時間も短時間であるため、計測位

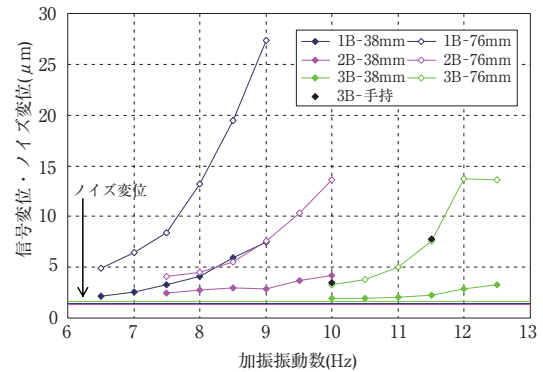


図22 加振振動数と信号変位およびノイズ変位の関係

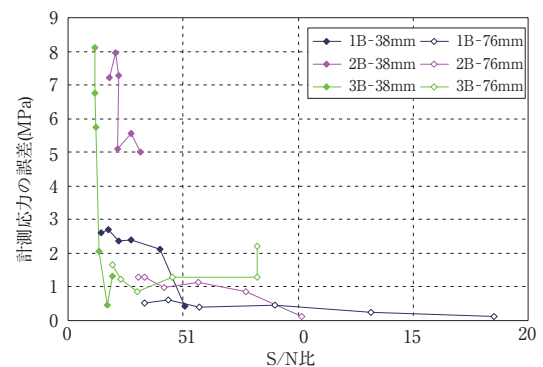


図23 S/N比と計測応力の誤差の関係

置や計測方向を変えて効率よく振動応力を計測することができると考えられる。

(3)に対する解決策としては、これまでに板はりを用いたランダム波加振実験を通じて本計測方法の適用性は示されている⁽¹¹⁾。しかしながら、板はりに比較して配管のランダム振動では、信号変位が非常に小さくなることや、振動応力に寄与しない変位成分も付加されることなどにより、S/N比の低下が懸念される。また、近接した複数の振動モードが存在することもあるため、高精度のフィルタ処理が必要となる可能性がある。これらについては、ランダム波加振実験や実機計測データの蓄積などを通じて、適用性を検討していく予定である。

4. まとめ

1, 2および3インチの配管を対象として正弦波加振による振動実験を行い、複数の非接触型変位計を用いた振動応力計測方法の適用性の検討を行なった。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 非接触型変位計を固定した状態で振動応力計測

を行なった場合、従来のひずみゲージ法と同程度の振動応力を計測できることを確認した。本計測方法により生じる誤差は、非接触型変位計の計測間隔に大きく依存し、計測間隔が38mmの場合は $\pm 7\text{MPa}$ 程度、計測間隔が76mmの場合は $\pm 2\text{MPa}$ 程度となることを確認した。

- (2) 非接触型変位計を手に持った状態で振動応力計測を行なった場合、過大評価やばらつきの増加などが多少見られるものの、計測器を固定した時とほぼ同じ結果が得られた。手持計測による振動応力計測により、計測位置や計測方向の変更が容易になり、より効率的な振動応力計測を実施できる見込みが得られた。
- (3) 本計測方法は、小口径配管の振動応力計測方法として適用できる。

今後は、本計測器のプロトタイプを製作し、実機配管の計測によるデータ蓄積と実機適用性の検討を進める予定である。

文献

- (1) Gosselin, S. R. and Fleming, K. N., "Evaluation of Pipe Failure Potential via Degradation Mechanism Assessment," Proc. ICON 5, 2641, pp.1-9 (1997).
- (2) Mitman, J., "Revised Risk-Informed Inservice Inspection Evaluation Procedure," EPRI TR-112657 Rev. B-A Final Report (1999).
- (3) 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).
- (4) Noda, M., et al., "Methods of Evaluating Vibration-Induced Stress of Small-Bore Piping," ASME-PVP, PVP2006-ICPVT-11-93198, pp.1-9 (2006).
- (5) Silva, C. W., "Vibration: Fundamentals and Practice," CRC Press, Boca Raton, Chap. 8, pp. 456-476 (1999).
- (6) 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).
- (7) 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).
- (8) 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).
- (9) C. Reder, 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).
- (10) Chen Junda, et al. "Applications of Digital Correlation Method to Structure Inspection", Tsinghua Science & Technology Volume 12, Issue 3, pp.237-243 (2007).
- (11) 野田満靖ら, "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).