

磁気異方性を利用した鋼管応力測定・評価技術

Non-destructive Method for Stress Evaluation of Linepipes Using Magnetic Anisotropy Sensor

境 禎明 SAKAI Yoshiaki JFE エンジニアリング エンジニアリング研究所 生産技術研究部
卯西 裕之 UNISHI Hiroyuki JFE エンジニアリング ガス技術部 技術室
八幡 輝男 YAHATA Teruo JFE 工建 ガス配管技術部 メンテ診断室

要旨

JFE エンジニアリングは非破壊応力測定法の 1 つである、磁気異方性を利用した応力測定技術の研究と、これを利用した各種応力評価システムの開発に取り組んでいる。本報告ではこの測定法の原理と、既設パイプラインの維持管理のために開発した応力評価システムについて、各種実験結果を交えて述べる。最後に本システムの現場への適用例を紹介する。

Abstract:

JFE Engineering has developed a unique and non-destructive stress measuring method using a magnetic anisotropy sensor, and has also developed many applications for the method. In this paper, the authors introduce the principles of the measuring method, and, through some experimental results, prove the usefulness of this method which can be used to evaluate the stress level of pipelines under working conditions for the purpose of maintenance.

1. はじめに

維持管理の観点から配管系の安全性を評価するには、応力状態を知ることが有効である。構造物に対する応力測定は、ひずみゲージ法によるものが一般的であるが、既設配管系の応力状態をひずみゲージ法で測定するためには、応力解放作業をとらなければならない、いわゆる破壊検査でないと難しい。しかしながら供用下の配管系の多くは、このような破壊検査を行うことは不可能であり、おのずとその適用範囲は限られていた。

以上のような背景から、著者らは現場の配管系の応力を非破壊的に、かつ簡便に測定・評価できる手法として、磁気異方性を利用した応力測定法（以下、磁歪法^{1,2)}）に着目し、その利用技術を開発してきた。

本稿ではその概要と展望について紹介する。

2. 磁歪法による応力測定の原理

磁歪法では Fig. 1 に示すような磁気異方性センサ（以下、磁歪センサ）を測定対象物上に置いて測定する。いま、Fig. 1 に示すような応力状態にセンサがおかれている場合の動作原理を説明する。被測定物の透磁率とよばれる磁気的な性質は、引張応力方向に僅かに大きくなり、磁気的な

異方性が生じる。このとき、コア E に巻いたコイルに電流を流すと、センサの足 E₁ から出た磁束のうち大部分は最短距離で直接 E₂ へ向かうが、E₁, D₁ 間および D₂, E₂ 間は E₁, D₂ 間および D₁, E₂ 間に比べて透磁率が $\mu_X - \mu_Y$ だけ大きいために、一部は矢印で示す様にコア D の中を流れる。

以上の磁気回路を交流磁界で形成すると、コア D に巻いたコイルには誘導電流が流れ、ある電圧が生じることになる。

この電圧 V は、

$$V = K_0 \cdot (\mu_X - \mu_Y) \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

K_0 : 励磁条件、コイルの条件、材料の磁気的特性などにより定まる定数

と表すことができる。

透磁率の異方性 $\mu_X - \mu_Y$ は直交する 2 軸の応力差 $\sigma_X - \sigma_Y$ に比例するため、結果として (1) 式は、

$$V = K \cdot (\sigma_X - \sigma_Y) \dots\dots\dots (2)$$

ただし、

K : 励磁条件、コイルの条件、材料の磁気的特性などに

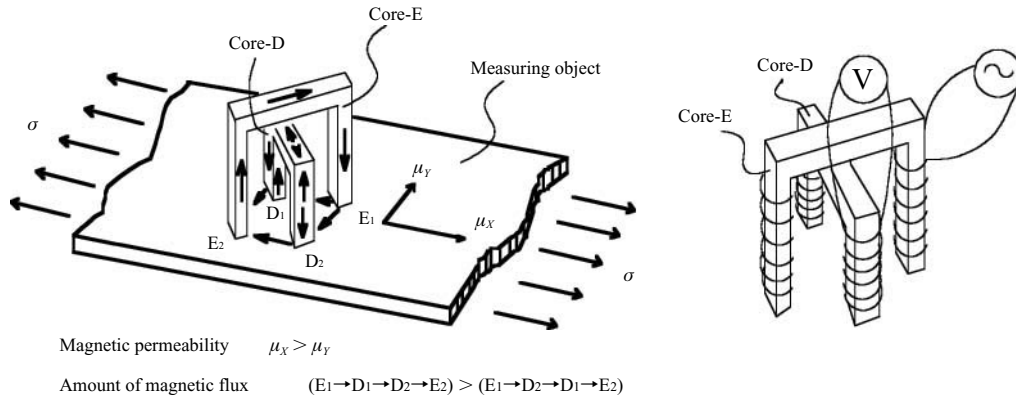


Fig.1 Principle of magnetic anisotropy sensor

より定まる定数

と書き換えることができる。したがって比例定数にあたる K (以下、磁歪感度) が分かれば、磁歪センサの出力によって応力差を求めることができる。

なお原理上、センサを測定対象物上で回転させたときの出力は 180° 周期の正弦波状のものとなり、最大になる方向が最大主応力方向となる。このとき測定対象の応力が 1 軸応力場、もしくは 1 軸応力場に近い場合には、近似的に主応力が測定されることになる。

また磁歪センサで求められる応力はその原理から、絶対的な応力、すなわち残留応力成分と負荷応力成分の総和が測定されることになる。

3. 磁歪法を用いた管の曲げ応力測定法

以上のような原理と特徴をもつ磁歪法であるが、これを利用して配管の曲げ応力測定システムを開発した。

3.1 曲げ応力測定の原理

磁歪センサの出力電圧は、測定対象物のもつ残留応力レベルの場所による違いによって、ある程度のばらつきをもっている。したがってこのような場合、局所的な測定によって、全体に作用する負荷応力を推定することは困難である。そこで、以下に示す「 \cos カーブ近似法」とよぶ

力推定法を考案した。

一般に曲げモーメントが作用している管に発生する軸方向応力成分の分布を管の全周についてみると、**Fig. 2** のような \cos カーブ状となる。したがって、このような管に対して全周を磁歪センサで測定すると、同様な \cos カーブ状の電圧出力を得ることができる。この電圧出力 V は、

$$V = A + B \cdot \cos(\theta - C) \dots\dots\dots (3)$$

ただし、

θ は管の周方向角度、 A, B, C はパラメータと表すことができる。そこで磁歪センサの出力を統計処理し、(3) 式に回帰することによって、曲げ応力の大きさをパラメータ B (振幅成分) として抽出、評価することが可能となる。なおパラメータ A は管の表面に均一に分布する、いわばオフセット成分で、管の軸力、内圧による応力、残留応力、および磁歪センサの電気的オフセットなどの総和であり、これを個々に分離することは非常に難しい。またパラメータ C は磁歪センサの計測開始点からの位相角に相当し、管の曲げの方向を表すことになる。

3.2 実験結果

前述した原理を実験によって確認した。供試体は SGP150A の管で、同一測定断面を無負荷状態すなわち曲

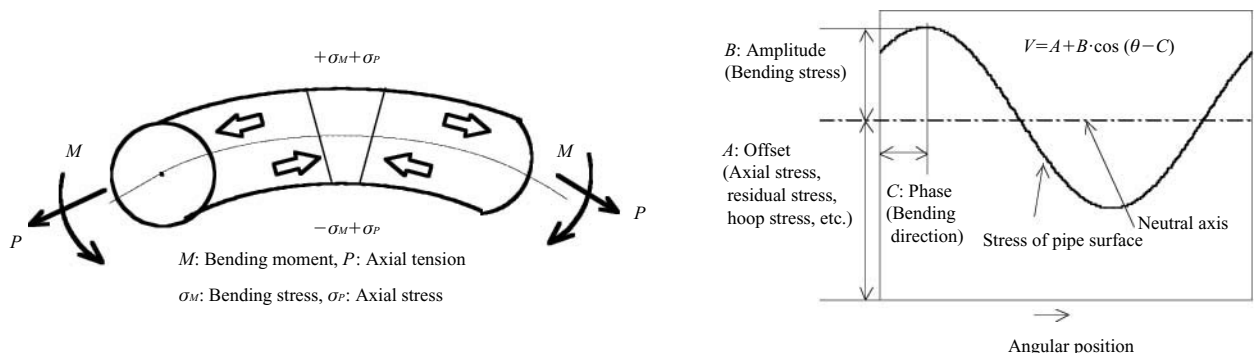


Fig.2 Conceptual illustration of stress distribution of pipe surface under bending load

げ応力のない状態と、150 MPa 相当の曲げ応力を負荷した状態をそれぞれ磁歪センサによって管の周方向に 5° ピッチで測定した。また測定結果は最小自乗法によって (3) 式に回帰し、パラメータ A, B, C を求めた。実験結果を Fig. 3 に示す。

これらによると、無負荷状態においても磁歪センサの出力には残留応力に起因したある程度のばらつきが存在する。しかし、最小自乗法によって求めた \cos カーブの振幅であるパラメータ B 、すなわち曲げ応力成分は十分小さいものとなっており、このばらつきの影響をほとんど受けていない。一方曲げ応力を負荷した状態での測定結果は、無負荷時の残留応力のばらつきを残しながらも、全体としては前述した理論のようにきれいな \cos カーブ状の分布になっており、残留応力の影響を受けずに、曲げ応力成分の抽出に成功している。

なお本実験では 90°-270° 位置が中立軸になるように、すなわち 0°-180° 方向に曲げモーメントを加えたが、曲げの方向を表すパラメータ C は 353° で、おおむね曲げモーメントの負荷方向とほぼ一致している。またオフセット成分であるパラメータ A が僅かに変化しているが、これは載荷方法によって若干の軸力成分が加わったことによると考えられる。

このようにして求めた、負荷応力とパラメータ B の関係を Fig. 4 に示す。パラメータ B は曲げ応力に対してほぼ線型関係にあり、パラメータ B が曲げ応力の大きさを的確に表すパラメータであるといえる。

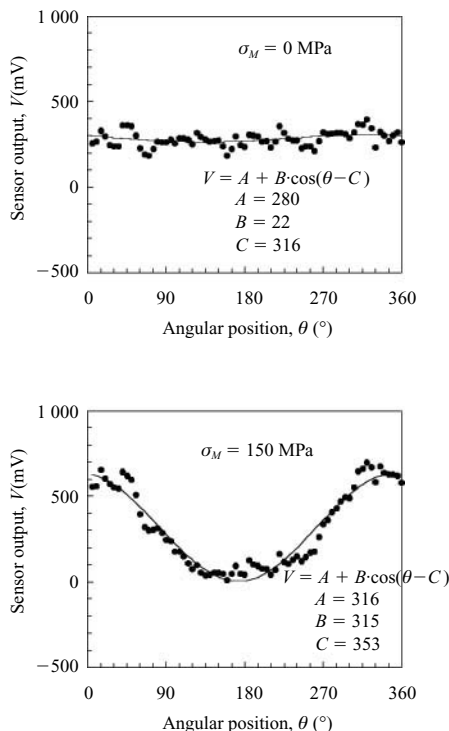


Fig.3 Sensor output distribution on pipe surface

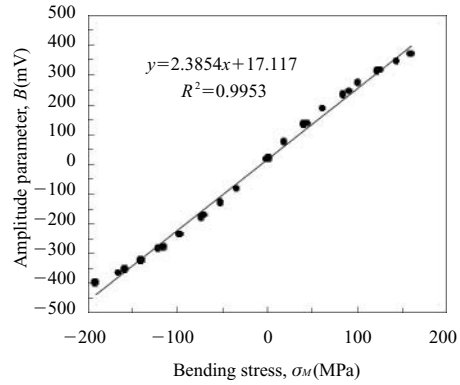


Fig.4 Relationship between bending stress and amplitude parameter, B

なお、Fig. 4 における傾きが前述した磁歪感度に相当し、パラメータ B をこの磁歪感度で除することによって曲げ応力の大きさを求めることができる。また、Fig. 4 は実管に対してモーメントを負荷して磁歪感度を求めているが、管の一部より切り出した小型の試験片を用いて簡易的に磁歪感度を求める手法も確立している。

3.3 曲げ応力測定システムの開発

以上のように磁歪センサの出力を \cos カーブに回帰することによって、残留応力の影響を除去して、曲げ応力の大きさとその方向を精度良く抽出できることが確認された。そこでこの原理に基づいて、現場で簡便に測定できる「磁歪式鋼管曲げ応力測定システム」を開発した。

開発したシステムは管径に応じた測定ルールと、ルールに沿って磁歪センサを走査する走行装置、およびこれらを制御し、測定結果を解析するノート型パソコンなどで構成されている。磁歪センサは走行装置によって管の周囲を自動走行し、管表面の応力分布を測定する。測定結果はリアルタイムでパソコンによって解析処理され、曲げ応力の大きさと、曲げの方向が表示される。

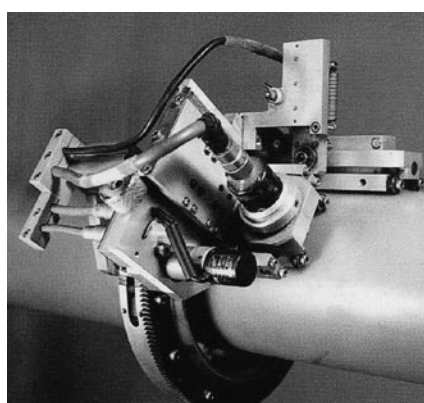
なお磁歪感度はリフトオフとよばれるセンサと管表面との距離によって変化するが、本システムではリフトオフ量を検出する機構を備えており、リフトオフに対する磁歪感度補正を自動的に行うことができる。

システムには GYK-S 型、H 型、M 型の 3 種類のバージョンがある。GYK-S 型は塗装鋼管および PLP 鋼管などの最大 6 mm 程度の塗覆装を有する小・中径管を対象としている。また GYK-H 型は大径管を対象として最大 15 mm の重塗覆装鋼管まで、これら塗覆装を除去することなくその上から測定することが可能である。

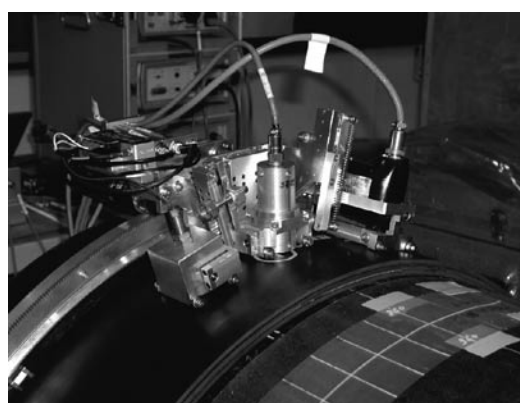
測定時間は管径によるが、最小ルールサイズの 100 A の場合で約 2 min、最大ルールサイズの 750 A の場合約 4 min で測定から解析までを完了する。またルールの取り付けが困難な場合は、マニュアル型の GYK-M 型で対応す

Table 1 Specifications of the bending stress measurement system for linepipes

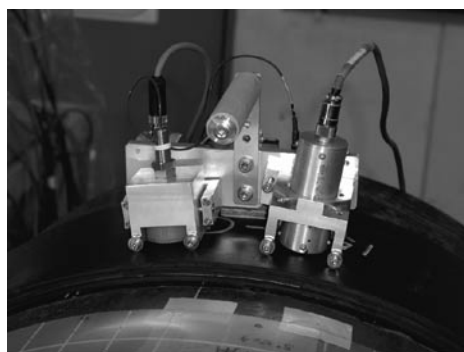
Controller	Weight	20 kg
	Dimensions	W335×D345×H485 mm
	Operating system	Windows 98, Windows Me, Windows 2000
	Power source	AC100 V, 50/60 Hz, 0.5 kVA
Scanning head	Weight	1.6 kg (GYK-S), 4.4 kg (GYK-H), 1.1 kg (GYK-M)
	Dimensions	W180×D210×H150 mm (GYK-S)
		W300×D300×H150 mm (GYK-H)
W200×D160×H140 mm (GYK-M)		
Tracking rail	Applicable pipe size	100 A, 150 A, 200 A, 300 A, 400 A, 600 A, 750 A (GYK-S) 600 A, 750 A (GYK-H) 80 A \geq , Using hand-held jig (GYK-M)



(a) Type "GYK-S"



(b) Type "GYK-H"



(c) Type "GYK-M"



(d) System controller and lap-top PC

Photo 1 Types of bending stress measurement system for linepipes

ることも可能である。

システムの仕様を **Table 1** に、システムの外観を **Photo 1** に示す。

4. 磁歪法を用いた曲管部の偏平応力評価法

直管部の曲げ応力評価については、前述した「cos カーブ近似法」が有効である。一方、実際の配管系ではこのような直管部だけでなく、エルボやバンドなどよばれる曲管部を含むことが多い。これら曲管部を含む配管系にモーメントが作用する場合、曲管部では断面の偏平化によって

過大な応力が発生することがある。

ここでは、曲管部の偏平応力測定への取り組みについて紹介する。

4.1 Kármán の偏平応力理論

モーメントが作用する曲管部に発生する偏平応力を理論的に説明したものとして Kármán の偏平応力理論(以下、Kármán の式)が知られている³⁻⁵⁾。

Kármán の式によれば、管軸方向応力 σ_L 、管周方向応力 σ_C は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_L &= \frac{kMr}{I} \left\{ \sin\phi - \frac{6}{5+6\lambda^2} \sin^3\phi + \frac{9\nu\lambda}{5+6\lambda^2} \cos 2\phi \right\} \\ \sigma_C &= \frac{kMr}{I} \left\{ \nu (\sin\phi - \frac{6}{5+6\lambda^2} \sin^3\phi) + \frac{9\lambda}{5+6\lambda^2} \cos 2\phi \right\} \\ \lambda &= \frac{tR}{r^2} \\ k &= \frac{10+12\lambda^2}{1+12\lambda^2} \end{aligned} \right\} \dots(4)$$

ただし、

- λ：パイプ係数
- k：たわみ係数
- ν：ポアソン比
- R：曲管の曲率半径
- r：管半径
- t：管の肉厚
- I：管の断面2次モーメント
- M：曲管に作用するモーメント
- φ：管の周方向角度（曲管側部を0°）

で表される。また、これを修正した高次近似解や内圧の影響を考慮した式⁶⁾も提唱されている。

そこでモーメントによって偏平応力が発生している曲管部の表面を磁歪センサで全周にわたって測定し、測定結果を統計処理によって、(4)式に回帰することによって偏平応力分布を評価することが可能と考えられる。

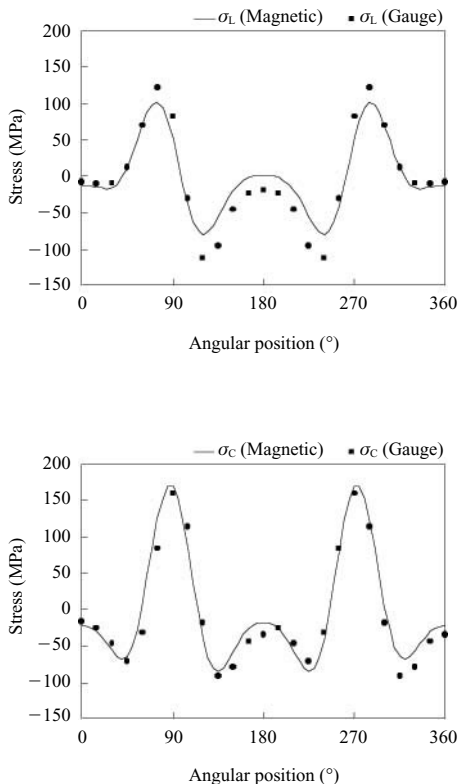


Fig.5 Stress distribution on curved pipe surface under bending load

4.2 実験結果

Kármán の式によって曲管の偏平応力を磁歪法で評価できることを実験によって確認した。供試管は、300 A の90° ロングエルボで、試験機によって面内変形荷重を負荷し、このときの曲管中央における応力をひずみゲージと磁歪法で測定比較した。

一例として内曲げ（曲管を閉じる方向）時の測定結果を、曲管の背側（外側）を0°、腹側（内側）を180°として整理したものを Fig. 5 に示す。磁歪法の測定結果を Kármán の式に回帰することによって、曲管のもつ残留応力の影響を受けずに、ひずみゲージで求めた応力とおおむね一致した結果が得られている。

5. パイプラインの安全性評価

実際のパイプラインの場合、いろいろな諸条件によって応力測定を実施できる箇所が制限される。したがって磁歪法による直接的な応力測定・評価と FEM 計算とを併用することが有効である。以下に磁歪法の適用方法の例を紹介する。

5.1 橋梁管の場合

一般にパイプラインは地中に埋設されているが、河川横断部では Fig. 6 のように道路橋あるいは専用橋に添架されている。橋梁部では橋台、あるいは橋脚の基礎が堅固であるが、橋台の背面部では地盤の圧密により、いわゆる不等沈下が発生する場合がある。このような場合、パイプラインは橋台貫通部を支点の1つとして曲げモーメントを受け、管に曲げ応力が発生する。

橋梁部では管が、塗装、あるいは塗覆装が施された状態で暴露しており、計測のためのアクセスが容易である。

そこで、

- (1) 橋梁部①、②、…の応力を磁歪法で測定・評価する。
- (2) FEM 計算によって橋台背面に沈下量を与え、橋梁部

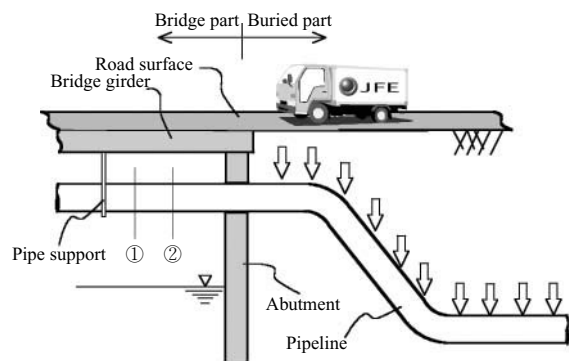


Fig.6 Conceptual illustration of application to pipeline across the river

で発生する応力が測定値と一致する沈下量を求める。

(3) (2) の沈下量が実際の沈下量であるとして、配管系全体の応力分布を照査する。

また、より簡易な方法として、年1回など定期的に橋梁部の同一ヶ所を磁歪法で測定・評価し、曲げ応力の進行状態をモニタして、維持管理方針決定の参考とするなどの利用も有効である。

5.2 サポート調整の場合

工場内の諸配管や、各種プラントの配管、共同溝内に敷設されたパイプラインなどではサポートによって管が基礎に固定されている。これらの配管系でも、不等沈下などによって曲げ応力、あるいは偏平応力が発生することがある。

従来は配管系の沈下量を測量によって管理し、得られた沈下量から FEM 計算によって応力を推定して、推定された応力が管理値を越えた場合にサポート部のレベルを調整（応力解放）するといった手法がとられていた。

このような対象についても、磁歪法を用いて塗覆装の上から任意の位置の曲げ応力、あるいは偏平応力を評価することによって直接的に評価・管理することが可能である。また、応力解放時にも磁歪法を併用することによって、リアルタイムに応力の変化をモニタすることができ、応力解放作業の適正化とその効果の確認を行うことが可能である。

6. おわりに

磁歪法を利用した配管系の応力測定技術について、その測定原理と各種応用システムの紹介、これらによる確性実験結果、さらに本技術の適用対象などを紹介してきた。

最後に、磁歪法の優れた特徴をまとめると次のようになる。

- (1) 塗覆装の上から直管部の曲げ応力を測定・評価することができる。
- (2) 塗覆装の上から曲管部の偏平応力を評価することが可能である。
- (3) 測定作業が簡便で、極めて短時間のうちに評価を行うことができる。
- (4) 全体システムが軽量、コンパクトにまとめ上げられて

おり、現場での機動性に優れている。

以上のような磁歪法の特徴を活かして、これまでにガスパイプライン、プラント配管、上水パイプライン、導水管、鋼管杭など、さまざまな現場での適用を行い、その実績は2002年度末で約450現場にもなる。

配管系の応力管理はこれまでの施工年代、地盤条件、環境条件、沈下量などのいわば間接的な情報に加えて、本技術による直接的な応力の情報によって、より高度で適切な維持管理が可能となる。今後も継続して本技術の改良を行い、適用範囲の拡大を図っていきたい。

なお、末筆ながら本技術の検討及び適用にあたり、現場のご提供、多くの貴重なご意見、ご指導をいただいた、大阪ガス(株)殿、東京ガス(株)殿、東邦ガス(株)殿、関係者の皆様に謝意を表します。

参考文献

- 1) 小川安雄, 境禎明ほか. “磁気異方性を利用した応力測定システムの開発”. 第23回応力・ひずみ測定シンポジウム講演会, 1991, p.132-137.
- 2) 小川安雄, 境禎明ほか. 磁気異方性を利用した鋼管自動応力測定システム. センサ技術, vol.12, no.8, 1992, p.76-81.
- 3) 飯村正一, 境禎明. “磁歪応力測定法の曲管偏平応力への適用検討”. 土木学会第57回年次学術講演会, 第VI部門, 2002, p.477-478.
- 4) 中原一郎. 材料力学・下巻. 養賢堂, 2000, p.183-188.
- 5) 鶴戸口英善ほか. 薄肉彎曲部の応力と変形について. 高圧力, vol.6, no.3, 1968, p.1329-1336.
- 6) Rodabaugh, E. C.; George, H. H. et al. “Effect of Internal Pressure on Flexibility and Stress-Intensification Factors of Curved Pipe or Welding Elbows”. Transactions of ASME, 1597, p.939-948.



境 禎明



卯西 裕之



八幡 輝男

本報に記載している会社名・製品名は、各社所有の商標もしくは登録商標を含む。