無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法による
非等二軸残留応力場の準非破壊計測法の提案岡野 成威^{*1}, 望月 正人^{*1}Proposing a new semi-nondestructive measurement of non-equiaxial residual stress field using
indentation technique without reference value of hardness under non-stress stateShigetaka OKANO^{*1} and Masahito MOCHIZUKI^{*1}^{*1} Department of Materials and Manufacturing Science, Osaka University
2-1 Yamada-oka, Suita-shi, Osaka 565-0871, Japan

Received 15 September 2014

Abstract

A new procedure using indentation technique was proposed in this study for semi-nondestructive measurement of non-equiaxial residual stress field. The stress evaluation formula using the Vickers and Knoop indenters was constructed based on the addition rule. In the newly proposed procedure, the Vickers and Knoop indenters are used so that the procedure does not require the reference value of hardness or indentation load under non-stress state. In this regard, however the proposed procedure requires two constants for stress determination. One is the load ratio between Vickers and Knoop indenters and the other is the conversion factor determining the relation between existing residual stress and load change due to the existing residual stress. The two constants were quantified by the measurement of the indentation load – depth curve and the existing residual stress using X-ray diffraction method. The accuracy of stress determination using the newly developed procedure was validated using welded specimens of high strength steel with different non-equiaxial stress fields. As the results, it was confirmed that the developed stress measurement using indentation technique provided good agreement with the X-ray stress measurement. Thus the newly developed procedure using indentation technique is expected to be a useful semi-nondestructive technique for determining the non-equiaxial residual stress at welds.

Key words : Indentation technique, Semi-nondestructive stress measurement, Non-equiaxial stress field, Weld residual stress, Vickers indenter, Knoop indenter

1. 緒 言

機械・構造物の安全性・信頼性を評価する上で、疲労き裂や応力腐食割れなどの発生・進展に大きく影響を及ぼす残留応力の状態を正確に把握することは重要な技術課題である。近年では非破壊的手法による応力計測に対する需要がますます高まっており、X線回折法（平他, 1962）や中性子回折法（林他, 1996）、DHD法（Leggatt, et al., 1996）などさまざまな応力計測法に関する取り組みが積極的になされている。特に、機械・構造物における損傷・破壊の発生起点となり易い溶接部への適用に向けた取り組み（橋本他, 2011）は今後ますます重要になると考えられる。

本報で取り上げるインデンテーション法は古くから、押込み荷重と圧痕の大きさから求まる“硬さ”を相対的に評価するものであった（Meyer, 1908）が、その後、硬さとの相関関係を利用した降伏強度や引張強度の評価法へと応用された（Tabor, 1951）。近年では、圧子押込み過程における荷重と深さを連続的に計測して押込み荷重-深さ曲線を得ることが可能となり、この曲線を用いたヤング率（Oliver and Pharr, 1992）や真応力-真ひずみ曲線（Sneddon, 1965, Ahn and Kwon, 2001）などの機械的特性の評価法が提案されている。また、セラミックスなどの脆性材料を主な対象として破壊強度（市川他, 1994）や残留応力（酒井他, 2004）の評価法も提案されており、

現在では残留応力の評価法は鉄鋼材料にも展開されている。これらの手法では、対称形圧子であるビッカース圧子や球圧子の利用をベースとしており、表面ひずみ計測に基づく方法（小澤他, 2013）も提案されているものの、その多くが“硬さ”などの無応力下での基準値からの変化量に基づいた方法（Lee and Kwon, 2004, 祖山, 芳賀, 2006）である。近年では、ヌープ圧子を利用した非等二軸応力の分離方法も提案され（Han, et al., 2007）、溶接残留応力のような非等二軸な応力場の計測への展開も図られている。しかしながら、溶接金属や熱影響部組織に起因する硬化・軟化が生じた溶接部あるいは供用中に何らかの事故などによって塑性損傷（加工硬化）を受けた部位への適用に際しては、その都度その状態における無応力下での基準値の取得が必要となることがインデンテーション法による応力計測法の実用に向けた極めて大きな課題であった。

本報では、無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法による新しい非等二軸応力場の準非破壊計測法を提案する。まず初めに、ビッカース圧子とヌープ圧子を併用することにより無応力下での基準硬さに依存しない非等二軸応力の算出式を構築する。本提案手法では、“無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比”と“一軸応力状態での応力値と荷重変化量の変換係数（ビッカース圧子の場合には一軸応力状態に限定されない）”の二つの定数を予め求めておけば、その都度無応力下での基準値を取得することなく非等二軸応力場の計測が可能になる。これらの二つの定数を実験的に取得した後に、本提案手法を溶接試験体に適用し、X線回折法による測定結果と比較することで精度を検証した。

2. 無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法による非等二軸残留応力計測法の概要

2.1 インデンテーション法を用いた応力計測の基本原則

圧子押し込み時に得られる押し込み荷重-深さ曲線は、図1に示すように、圧子下に存在している応力に応じてさまざまに変化する。同じ押し込み深さ d における荷重値 L を比較した場合、圧縮応力が存在している場合には無応力下と比較して荷重値は大きくなり、引張応力が存在している場合には無応力下と比較して荷重値は小さくなる。このような荷重値の変化を用いることで、圧子下の材料に存在している応力を推定することが可能になる。

Fig. 1 Change of indentation load – depth curve due to existing tensile or compressive residual stress. Indentation load at the same penetration depth becomes larger due to compressive stress and smaller due to tensile stress.

2.2 無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法における応力算出式

本報で提案する無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法による非等二軸応力計測法では、ビッカース圧子とヌープ圧子を併用することによって無応力下での基準硬さに依存しない応力算出式を利用する。

まず、非等二軸応力 σ_x , σ_y が生じている場にビッカース圧子を押込んだ際の押込み荷重 L_v が無応力下での押込み荷重 L_0' を用いて式(1)の加算則で表されるものとする.

$$L_0' - L_v = \alpha_v (\sigma_x + \sigma_y) \quad (1)$$

ここで、 α_v : ビッカース圧子を押込んだ際の応力値と荷重変化量の変換係数, である. これと同様に, 非等二軸応力 σ_x , σ_y が生じている場にヌープ圧子を, 図 2 に示すように, それぞれ異なる角度で押込んだ際の押込み荷重 L_1 , L_2 はそれぞれ無応力下での押込み荷重 L_0 を用いて式(2), (3)で表されるものとする.

$$L_0 - L_1 = \alpha_{//} \sigma_x + \alpha_{\perp} \sigma_y \quad (2)$$

$$L_0 - L_2 = \alpha_{\perp} \sigma_x + \alpha_{//} \sigma_y \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_{//}$: ヌープ圧子の長軸方向と応力方向を並行にして押込んだ際の応力値と荷重変化量の変換係数, $\alpha_{\perp}$: ヌープ圧子の長軸方向と応力方向を垂直にして押込んだ際の応力値と荷重変化量の変換係数, である. このとき, これらの 3 つの式を用いて無応力下での荷重値である L_0 , L_0' を消去すると次の式(4), (5)が得られる.

$$\sigma_{res}^x = \frac{(L_2 - \eta L_v)(\alpha_{\perp} - \eta \alpha_v) - (L_1 - \eta L_v)(\alpha_{//} - \eta \alpha_v)}{(\alpha_{//} - \eta \alpha_v)^2 - (\alpha_{\perp} - \eta \alpha_v)^2} \quad (4)$$

$$\sigma_{res}^y = \frac{(L_1 - \eta L_v)(\alpha_{\perp} - \eta \alpha_v) - (L_2 - \eta L_v)(\alpha_{//} - \eta \alpha_v)}{(\alpha_{//} - \eta \alpha_v)^2 - (\alpha_{\perp} - \eta \alpha_v)^2} \quad (5)$$

ここで、 η : 無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比 ($= L_0' / L_0$), である. 以上より, “無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比” と “一軸応力状態での応力値と荷重変化量の変換係数 (ビッカース圧子の場合は一軸応力状態に限定されない)” が既知であれば, 式(4), (5)を用いることで無応力下での基準値をその都度取得することなく非等二軸応力場の計測が可能となる.

Fig. 2 Difference in change of indentation load – depth curve using Knoop indenter due to non-equiaxial stress field. Indentation load at the same penetration depth varies depending on the directional relation between stress and indenter.

3. 応力計測に必要な二つの定数の取得

3・1 無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比

まず初めに、無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比について検討する。供試材料は、溶接熱サイクルに応じた相変態に伴って溶接部が硬化することが知られている溶接構造用圧延鋼材 JIS SM490YB とし、その化学組成ならびに機械的性質を表 1 に示す。板厚 12mm の小試験片に対して、初期応力を取り除くために 450°C で 3 時間の焼鈍を行った後、機械研磨にて表面を滑らかに仕上げ、機械研磨による加工層を取り除くために、5% 過塩素酸メタノールを用いて電流 13.8A、電圧 61.5V で空冷しながら約 7 分間電解研磨を行った。なお、X 線応力測定法によって電解研磨面における応力を測定した結果、 $\pm 10\text{MPa}$ 程度の応力を生じている箇所もあったが、これを無応力状態とした。

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of SM490YB used.

Chemical compositions (mass%)					Mechanical properties		
C	Si	Mn	P	S	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
0.15	0.28	1.43	0.015	0.005	440	544	26

ビッカース圧子、ヌープ圧子を用いた押し込み試験には Frontics 社製 AIS2100 を用いた。押し込み条件はともに最大押し込み深さを $60\mu\text{m}$ 、押し込み速度を 0.1mm/min とした。また、装置のデータ解析の都合上、除荷回数を 3 回 ($20\mu\text{m}$ 毎)、除荷率を 30%としている。ビッカース圧子、ヌープ圧子を用いた押し込み試験によって得られた押し込み荷重-深さ曲線を図 3 に示す。それぞれ 3 回ずつ試験を行っており、再現性の良い結果が得られていることがわかる。また、同じ押し込み深さにおける荷重値を比較すると、ビッカース圧子に比べてヌープ圧子の場合に明らかに大きくなっている。ヌープ圧子とビッカース圧子を用いた際の荷重値の比率を押し込み深さ毎に評価した結果を図 4 に示す。押し込み深さが $40\mu\text{m}$ 程度より大きくなると荷重比はおおよそ定常となっているが、これより小さい範囲ではやや小さくなっており、表面性状等の影響を受けていることが示唆される。よって、本検討では押し込み深さを $40\mu\text{m}$ として応力計測を行うこととし、このときのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比は 2.32 であった。

Fig. 3 Indentation load – depth curve obtained in indentation test using Vickers and Knoop indenters. Reproducible results were obtained. Indentation load at the same penetration depth is larger in Knoop indenter than in Vickers indenter.

Fig. 4 Ratio of indentation load using Knoop indenter to that using Vickers indenter. The ratio of indentation load becomes almost constant over 40 μm in penetration depth. The value of ratio of indentation load at penetration depth of 40 μm is 2.32.

3・2 ビッカース圧子とヌープ圧子における応力値と荷重変化量の変換係数

続いて、ビッカース圧子とヌープ圧子における応力値と荷重変化量の変換係数について検討する。ヌープ圧子では、一軸応力状態における応力方向に対して圧子の長軸方向が平行、垂直であるときの変換係数 $\alpha_{//}$, $\alpha_{\perp}$ をそれぞれ取得する。ビッカース圧子では、一軸応力状態に限定されないため任意の応力状態に対して変換係数 α_v を取得する。本検討では、板長 200mm, 板幅 60mm, 板厚 12mm の小試験体に対して先と同様の表面処理を施した後、さまざまな応力分布状態を得るために表 2 に示す 4 条件の TIG 溶接にてビードオンプレート溶接を行った。アーク長は 3mm, シールドガスは流量 15l/min の Ar とした。溶接後の試験体中央において表 3 に示す条件で X 線応力測定を行った。なお、本実験に用いた X 線応力測定法は、従来から測定実績が豊富で信頼性の高い応力弛緩法との比較により十分に精度検証されたものである (Sugahara, et al., 2012)。

Table 2 Welding conditions.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Welding current, I (A)	50	50	100	150
Welding speed, v (mm/s)	15	2.5	2.5	2.5

Table 3 X-ray stress measurement conditions.

X-ray tube (characteristic X-ray)	Cr ($K\alpha$)
Voltage & Current	40kV & 40mA
Diffraction plane	(2 1 1)
Collimator size (mm)	2
Count time (s)	50
Oscillation width (deg)	3
Ψ angle (deg)	0, 16.8, 19.5, 24.1, 28.1, 31.8, 35.3, 38.6, 41.8, 45.0

それぞれの小試験体に対する X 線応力測定結果を図 5 に示す。これらの図より、それぞれの溶接入熱条件で異なる残留応力分布を得られたことが確認できる。図中に示すように、溶接線方向応力あるいは板幅方向応力のい

ずれかがほぼ 0 である一軸応力状態となっている点を複数選定してヌープ圧子を用いた押し込み試験を実施した。一方、ビッカース圧子の場合には対称形圧子であり一軸応力状態に限定されないため、残りの測定可能位置の中から一軸応力状態と二軸応力状態である位置をそれぞれ複数選定して押し込み試験を実施した。なお、ここで選定した押し込み位置には、残留応力のみによる荷重変化量を算出する必要があるため、溶接に伴う相変態による硬化域は含まれていない。また、端部効果を受けない試験体中央において残留応力分布が定常となることを利用して、同じ応力値と見なせる点に対して押し込み試験を 5 回実施し、それらの平均値を荷重値として用いた。その際、押し込み位置の間隔は日本工業規格 (JIS) に基づいて決定し、ヌープ圧子の場合には圧痕の中心間の距離が圧痕の長軸の 2 倍、短軸の 3 倍以上離れるように、ビッカース圧子の場合には圧痕の中心間の距離が圧痕の対角長さの 3 倍以上離れるようにした。

(a) Case 1

(b) Case 2

(c) Case 3

(d) Case 4

Fig. 5 Measured distributions of weld residual stress using X-ray diffraction method. The distribution of weld residual stress varies depending on welding heat input conditions. These distributions are used for determining the relation between existing residual stress and change of indentation load due to the existing residual stress.

各圧子を用いた押し込み深さ 40 μ m での荷重値と前節で求めた無応力下での荷重値を用いて変化量を求め、応力値との関係を整理した結果を図 6 に示す。いずれの圧子形状および押し込み方向の場合もおおよそ線形関係を示して

おり、この直線の傾きが変換係数となる。ビッカース圧子を押込んだ場合の変換係数 α_V とヌープ圧子を応力方向と平行、垂直に押込んだ場合の変換係数 $\alpha_{//}$ 、 $\alpha_{\perp}$ はそれぞれ 0.013, 0.052, 0.098 である。これらの変換係数は、圧子先端角度の大きいヌープ圧子の方がビッカース圧子よりも大きくなっており、同じヌープ圧子の場合でも応力方向に対して圧子の長軸が垂直である場合の方が大きくなっている。すなわち、変換係数は応力方向に対する圧子の投影面積に依存していると考えられる。

Fig. 6 Relation between existing residual stress and change of indentation load due to the existing residual stress. The slope of a line corresponds to the conversion factor determining the relation between existing residual stress and load change due to the existing residual stress. The value of conversion factor is larger in Knoop indenter than in Vickers indenter, besides in the same Knoop indenter, larger in vertical to stress direction than in parallel.

4. 提案手法による非等二軸残留応力場の準非破壊計測法の精度検証

4・1 実験要領

本報で提案するインデンテーション法による非等二軸応力場の準非破壊計測法の精度検証のために、先の検討とは別の溶接試験体に本手法を適用し、X線応力測定法による結果と比較した。溶接実験には、板長 250mm、板幅 200mm、板厚 9, 12, 19mm の SM490YB 鋼板を使用し、溶接電流を 200A、溶接速度を 2mm/s、アーク長を 3mm、

シールドガスを流量 20l/min の He とした TIG 溶接にてビードオンプレート溶接を行った。異なる残留応力分布を得るために溶接入熱条件を固定して板厚を 3 種類に変化させた。また一般に、溶接残留応力分布は溶接線に対して対称であるため、図 7 に示すように、一方をインデンテーション法、もう一方を X 線回折法による応力測定に用いた。いずれの測定位置に対してもこれまでと同様に機械研磨、電解研磨により表面性状を整えた。インデンテーション法による応力測定は、溶接線から板幅方向に 0, 12, 20, 30, 40, 80mm の位置で行った。各測定位置について電解研磨の幅 60mm の範囲内でヌープ圧子（並行・垂直方向ともに）とビッカース圧子をそれぞれ 5 回ずつ押し込み、その平均値を用いて応力を算出した。押し込み試験の条件はこれまでと同様である。X 線回折法による応力測定は、表 4 に示す条件で、溶接線から板幅方向に 30mm までは 2mm 間隔、30mm から 50mm までは 5mm 間隔、50mm から 90mm までは 10mm 間隔で行い、 $\sin^2\psi$ 法により応力を算出した。

Fig. 7 Location of stress measurement by indentation technique and X-ray diffraction method. Indentation technique is applied to measure weld residual stress at one side to welding line and X-ray diffraction method is applied at the other side. This is because it is well known that distribution of weld residual stress is almost symmetrical to welding line.

Table 4 X-ray stress measurement conditions.

X-ray tube (characteristic X-ray)	Cr ($K\alpha$)
Voltage & Current	40kV & 40mA
Diffraction plane	(2 1 1)
Collimator size (mm)	2
Count time (s)	50 (at base metal), 100 (at weld metal)
Oscillation width (deg)	3
Ψ angle (deg)	0.0, 13.6, 19.5, 24.1, 28.1, 31.8, 35.3, 38.6, 41.8, 45.0

4・2 実験結果および考察

板厚が異なる 3 種類の溶接試験体に対するインデンテーション法と X 線回折法による残留応力測定結果を板厚毎に比較して図 8 に示す。X 線回折法による応力測定結果を line で、インデンテーション法による応力測定結果を plot で示している。X 線応力測定結果から分かるように、板厚が大きくなるにつれて溶接線方向応力 σ_x が引張応力である範囲の幅が小さくなり、板厚が最も小さい 9mm において板幅端部における溶接線方向応力 σ_x が比較的大きな圧縮応力になっている。これらは、一般的に良く知られている溶接残留応力の分布形態である。また、

インデンテーション法による応力測定結果をこれらと比較して見ると、溶接に伴って硬化している溶接線中央部も含めて全体的な分布傾向は良く一致しており、比較的精度の良い応力計測ができているといえる。

インデンテーション法による応力計測法は、比較的コンパクトな装置を用いた簡便なプロセスによる非破壊的な方法であるため、今後、供用下の機械・構造物に対する現場測定への適用が望まれると考えられるが、その際には本報で構築した無応力下での基準硬さに依存しない新しい非等二軸残留応力の計測法が有用になることが期待される。

(a) Plate thickness is 9 mm

(b) Plate thickness is 12 mm

(c) Plate thickness is 19 mm

Fig. 8 Comparison of measured distribution of weld residual stress between indentation technique and X-ray diffraction method. Results obtained by X-ray stress measurement shows the well-known features of distribution of weld residual stress. Besides, results obtained by indentation technique are in good agreement with that by X-ray diffraction method from a viewpoint of whole distribution characteristics.

5. 結 言

本報では、ビッカース圧子とヌープ圧子を併用することにより“無応力下での基準硬さに依存しない”インデンテーション法による新しい非等二軸残留応力場の準非破壊計測法を提案し、溶接熱サイクルに応じた相変態に

伴って溶接部が硬化することが知られている溶接構造用圧延鋼材 SM490YB を用いて提案手法の精度検証を行った。以下に得られた結論を示す。

- (1) ビッカース圧子とヌープ圧子を併用することにより、無応力下での基準硬さに依存しないインデンテーション法における非等二軸残留応力の算出式を導出した。
- (2) 本提案手法を用いた応力計測に必要な 2 つの定数である“無応力下でのヌープ圧子とビッカース圧子の荷重比”と“一軸応力状態での応力値と荷重変化量の変換係数（ビッカース圧子の場合は一軸応力状態に限定されない）”を実験的に定量化した。
- (3) 本提案手法を溶接構造用圧延鋼材 SM490YB における溶接残留応力の分布測定に適用した結果、一般的によく知られている溶接残留応力の分布形態を示した X 線応力測定結果と全体的な分布傾向に関して良い一致が見られたことから、本提案手法が良好な応力計測精度を有していることが示された。

文 献

- Ahn, J. H. and Kwon, D., Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations, *Journal of Materials Research*, Vol. 16, No. 11 (2001), pp. 3170-3178.
- 林眞琴, 石渡雅幸, 森井幸生, 皆川宣明, 中性子回折による炭素鋼配管突合せ溶接継手の残留応力, *材料*, Vol. 45, No. 7 (1996), pp. 772-778.
- Han, J. H., Lee, J. S., Lee, Y. H., Choi, M. J., Lee, G., Kim, K. H. and Kwon, D., Residual stress estimation with identification of stress directionality using instrumental indentation technique, *Key Engineering Materials*, Vols. 345-346 (2007), pp. 1125-1128.
- 橋本匡史, 岡野成威, 望月正人, X 線回折法によるオーステナイト系ステンレス鋼円周多層溶接配管継手の残留応力測定精度に対する溶接冶金の検討, *材料*, Vol. 60, No. 7 (2011), pp. 610-616.
- 市川昌弘, 大串浩司, 高松徹, 球圧子押込みによるセラミックス表面層の微小破壊強度の評価, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 60, No. 575 (1994), pp. 1538-1544.
- 小澤則彦, 吉澤智明, 渡辺豊, 庄司哲雄, 球状圧子の圧入過程における表面ひずみ計測に基づく残留応力評価手法の開発, *日本機械学会論文集 A 編*, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 1571-1580.
- Leggatt, L. D., Smith, D. J., Smith, S. D. and Faure, F., Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 31, No. 3 (1996), pp. 177-186.
- Lee, Y. H. and Kwon, D., Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 6 (2004), pp. 1554-1563.
- Meyer, E., Untersuchungen über härteprüfung und härte, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, No. 17 (1908), pp. 645-654.
- Oliver, W. C. and Pharr, G. M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *Journal of Material Research*, Vol. 7, No. 6 (1992), pp. 1564-1583.
- Sneddon, I. N., The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 3, No. 1 (1965), pp. 47-57.
- Sugahara, A., Okano, S., Hashimoto, T. and Mochizuki, M., Comparison of weld residual stress measurement results in low alloy welds between X-ray diffraction and stress relief methods, *Journal Physics: Conference Series*, Vol. 379 (2012), 012053.
- 酒井達雄, 田中剛, 七野敬, 圧子圧入法によるファインセラミックスの残留応力測定法に関する一研究, *材料*, Vol. 53, No. 5 (2004), pp. 546-552.
- 祖山均, 芳賀司, ビッカース圧子を用いたインデンテーション法によるステンレス鋼の残留応力の推定, *日本機械学会 材料力学部門講演会講演論文集 2006* (2006), pp. 147-148.
- Tabor, D., *The Hardness of Metals*, Clarendon Press (1951).
- 平修二, 本田和男, 松木健次, X 線による金属材料疲れ破壊に関する研究 (X 線回折線半価幅, 残留応力, 組織および硬さの諸変化について), *日本機械学会論文集*, Vol. 28, No. 194 (1962), pp. 1335-1343.

References

- Ahn, J. H. and Kwon, D., Derivation of plastic stress-strain relationship from ball indentations, *Journal of Materials Research*, Vol. 16, No. 11 (2001), pp. 3170-3178.
- Hayashi, M., Ishiwatari, M., Morii, Y. and Minagawa, N., Residual stress distribution in carbon steel pipe welded joints measured by neutron diffraction, *Zairyo*, Vol. 45, No. 7 (1996), pp. 772-778 (in Japanese).
- Han, J. H., Lee, J. S., Lee, Y. H., Choi, M. J., Lee, G., Kim, K. H. and Kwon, D., Residual stress estimation with identification of stress directionality using instrumental indentation technique, *Key Engineering Materials*, Vols. 345-346 (2007), pp. 1125-1128.
- Hashimoto, T., Okano, S. and Mochizuki, M., Welding-metallurgical evaluation for residual stress measurement accuracy of multi-pass girth welded pipe joint in austenitic stainless steel by X-ray diffraction, *Zairyo*, Vol. 60, No. 7 (2011), pp. 610-616 (in Japanese).
- Ichikawa, M., Ohgushi, K. and Takamatsu, T., Evaluation of microfracture strength of surface layers of ceramics using a spherical indenter, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 60, No. 575 (1994), pp. 1538-1544 (in Japanese).
- Kozawa, N., Yoshizawa, T., Watanabe, Y. and Shoji, T., Development of a residual stress evaluation technique based on surface strain measurements in indentation process of spherical indenter, *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol. 79, No. 807 (2013), pp. 1571-1580 (in Japanese).
- Leggatt, L. D., Smith, D. J., Smith, S. D. and Faure, F., Development and experimental validation of the deep hole method for residual stress measurement, *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 31, No. 3 (1996), pp. 177-186.
- Lee, Y. H. and Kwon, D., Estimation of biaxial surface stress by instrumented indentation with sharp indenters, *Acta Materialia*, Vol. 52, No. 6 (2004), pp. 1554-1563.
- Meyer, E., Untersuchungen über härteprüfung und härte, *Zeitschrift des Vereins Deutscher Ingenieure*, Vol. 52, No. 17 (1908), pp. 645-654.
- Oliver, W. C. and Pharr, G. M., An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments, *Journal of Material Research*, Vol. 7, No. 6 (1992), pp. 1564-1583.
- Sneddon, I. N., The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile, *International Journal of Engineering Science*, Vol. 3, No. 1 (1965), pp. 47-57.
- Sugahara, A., Okano, S., Hashimoto, T. and Mochizuki, M., Comparison of weld residual stress measurement results in low alloy welds between X-ray diffraction and stress relief methods, *Journal Physics: Conference Series*, Vol. 379 (2012), 012053.
- Sakai, T., Tanaka, T. and Shichino, T., A study on residual stress measurement for fine ceramics by indentation fracture method, *Zairyo*, Vol. 53, No. 5 (2004), pp. 546-552 (in Japanese).
- Soyama, H. and Haga, T., Estimation of residual stress on stainless steel by means of indentation method using Vickers indentator, *Proceedings of the 2006 Annual Meeting of JSME/MMD (2006)*, pp. 147-148 (in Japanese).
- Tabor, D., *The Hardness of Metals*, Clarendon Press (1951).
- Taira, S., Honda, K. and Matsumoto, K., X-ray investigation of fatigue damage of metals (On the changes in half-value breadth of X-ray diffraction line, residual stress, micro-structure, and micro-hardness due to stress repetitions), *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, Vol. 28, No. 194 (1962), pp. 1335-1343 (in Japanese).