

平成 29 年 6 月 3 日現在

機関番号：32641

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420025

研究課題名(和文) 内部方向に勾配を有する残留応力と塑性特性の同時計測インデンテーション法

研究課題名(英文) Indentation based measurement of residual stress and plastic properties with gradient distribution

研究代表者

米津 明生 (YONEZU, Akio)

中央大学・理工学部・教授

研究者番号：40398566

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：環境助長割れや疲労破壊のような経年的な劣化や損傷を誘発する残留応力は、材料内の不均質なひずみ分布によって生じるため、数結晶レベルのような微小スケールにおける塑性ひずみと残留応力分布の計測が材料健全性評価として必要である。本研究では、インデンテーション法(押し込み試験)を用いて残留応力と塑性特性を同時に計測できる方法を開発した。この方法は、パラメトリック有限要素解析結果を整理した無次元関数に、押し込み試験の結果を代入することで、容易に残留応力と塑性特性の二つの材料特性を推定できる特徴を有する。さらに、材料特性が深さ方向に勾配をもつケースや、ピーニング処理や溶接材、各種コーティング材料なども検討した。

研究成果の概要(英文)：This study proposed a method to evaluate the residual stress and plastic properties using micro-indentation test. This method deals with the materials that obeys the Ludwick work hardening law and involves in-plane equi-biaxial residual stress. Numerical experiment with finite element method (FEM) was carried out in order to simulate indentation test having various plastic strain and residual stress. It was found that indentation force increases with the increasing in plastic strain as well as compressive residual stress. Next, parametric FEM study by changing of residual stress and plastic strain was conducted in order to deduce relationship between indentation curve and materials parameters. This relationship can be expressed by dimensionless function with simple formulae. Thus, the present method can estimate plastic strain (plastic properties) and residual stress for various materials, such as stainless steel, engineering metallic and polymers.

研究分野：材料力学

キーワード：材料強度 塑性ひずみ 残留応力 有限要素法 インデンテーション法

1. 研究開始当初の背景

構造材料の残留応力は、環境助長割れや疲労といった経年的な劣化や損傷を引き起こす場合があり、その定量的評価が必要である。これらの残留応力は、材料の接合や加工、表面処理などで生成する塑性ひずみの不均質性から発生する場合があり、従来はひずみゲージを用いた穿孔法やX線応力測定などが行われているが、塑性ひずみや塑性特性を同時に測定できない。そこで、結晶粒レベルの微小領域における残留応力および塑性特性評価が必要である。

2. 研究の目的

簡易で局所的な材料試験法である押し込み法(インデンテーション法)は塑性特性の評価に有効であり、最近では残留応力測定法に関する検討もなされているが、ステンレス鋼のような顕著な加工硬化を示す材料は想定されておらず、また塑性ひずみの同時評価も検討されていない。そこで、本研究ではマイクロインデンテーション(微小押し込み)法から、簡便に残留応力と塑性特性(塑性ひずみ)を同時に測定できる方法を構築することを目的とした。始めに、広く使用されているステンレス鋼を検討したのち、各種材料評価への展開、さらには材料特性が深さ方向に勾配をもつケースを検討することで、ピーニング処理や溶接材、各種コーティング材料などの様々な材料の評価研究に応用することを目指した。

3. 研究の方法

(1) オーステナイト系ステンレス鋼：はじめに工業的に広く用いられている低炭素オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を対象とし、塑性変形領域では Ludwik 型硬化則にしたがうと仮定した。これは、降伏応力 σ_Y 、加工硬化係数 K 、加工硬化指数 n で表される。塑性ひずみが付与されると、母材の応力-ひずみ線図 (S - S 曲線) において、そのひずみ量分、加工硬化する(塑性ひずみ量分、 S - S 曲線が右側にシフトする)という条件を設け、この塑性ひずみ量が予ひずみ量に相当する。そのため、本ケースの塑性特性は塑性ひずみ量(予ひずみ ϵ_{pre})のみで記述できることから、予ひずみ量と残留応力の2つのパラメータを推定することが目標となる。一方、残留応力については、面内等二軸状態の引張り・圧縮応力が付与されている状態を仮定した。

有限要素解析は二次元軸対称モデルとして、バーコピッチ圧子を模擬するために円錐角 70.3 度の円錐圧子を用いた。予ひずみ ϵ_{pre} は 0, 5, 10, 20, 30, 40, 60, 100% の 8 種類とし、一方、残留応力 σ_{res} は降伏応力に対する比 σ_{res}/σ_Y を -0.75, -0.25, 0, +0.25, +0.75 の 5 種類として、合計 8×5 の 40 通りのパラメトリック解析を行った。なお、ヤング率 E は 195 GPa, ポアソン比は 0.3 で固定してい

る。解析結果の代表例を説明する。残留応力を付与せず、予ひずみ量を様々に変化させたときの押し込み曲線は、予ひずみ量が大きくなるほど、塑性変形しにくく、押し込み力が増加していた。一方、予ひずみ量を 0% で固定して残留応力を変化させた場合は、残留応力が圧縮方向へ大きくなるほど押し込み力が増加することがわかった。このことから、押し込み曲線は予ひずみ量と残留応力にそれぞれ大きく依存することがわかった。

FEM 解析より得られる押し込み曲線の模式図を Fig.1 に示す。押し込み曲線の面積は仕事量に相当し、図のように全仕事量 W および除

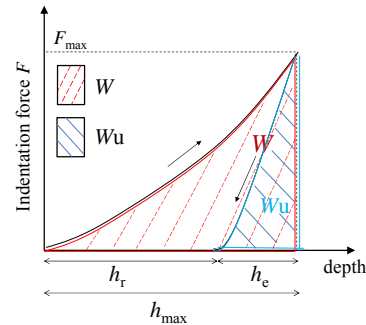


Fig.1 Definition of work volume in indentation curve

荷の弾性回復に相当する弾性仕事量 W_u に着目した。本研究では、これらのパラメータと材料特性(予ひずみ量と残留応力)を一意に関連付ける無次元関数を Π 理論に基づいて構築する。ここで、全仕事量 W および弾性仕事量 W_u は図 1 に示した面積であり、また $h_{max} - h_r$ を h_c とした。

(2) その他の材料：上記手法は SUS316L のみを対象としていたが、その他の金属材料や高分子材料の評価手法も検討した。推定するパラメータは、残留応力と塑性特性(2つ以上)になるため、前述のケースよりも増えてしまう。そのためバーコピッチ圧子のみではなく、球状圧子も用いて新たな評価手法の確立を検討した。広範囲な材料特性(ヤング率 E 、降伏応力 σ_Y 、加工硬化係数 K 、加工化指数 n) および残留応力を対象にするため、合計 1134 通りのパラメトリック FEM 解析を実施し、先に述べたような無次元関数 Π を構築した。

4. 研究成果

(1) オーステナイト系ステンレス鋼の結果
押し込み曲線における全仕事量 W について、 Π 理論に基づき、 σ_Y と h_{max} を独立変数に選ぶことで、 $W/(\sigma_Y h_{max}^3) = \Pi_1(E^*/\sigma_Y, \sigma_{res}/\sigma_Y)$ の無次元関数 (Π_1) が得られる。つぎに、弾性仕事 W_u についても同様に、 $W_u/(\sigma_Y h_c^3) = \Pi_2(E^*/\sigma_Y, \sigma_{res}/\sigma_Y)$ の無次元関数 (Π_2) が得られる。それぞれの関数に基づいて、FEM のパラメトリック解析結果を整理した。ここでは、 σ_{res}/σ_Y ごとに整理した結果を図 2 および図 3 に示す。両関数ともに、 E^*/σ_Y および σ_{res}/σ_Y

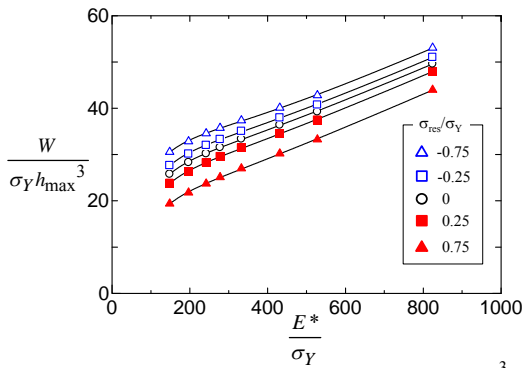


Fig.2 Relationship between $W/\sigma_Y h_{\max}^3$ and E^*/σ_Y at each $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$

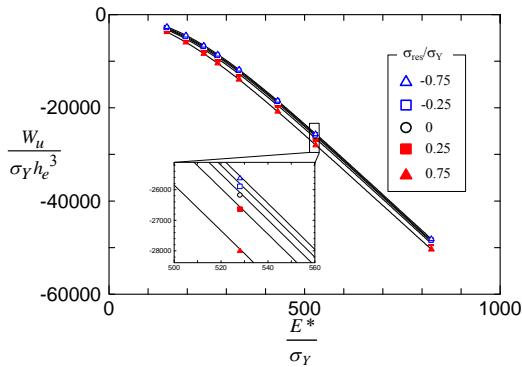


Fig.3 Relationship between $W/\sigma_Y h_e^3$ and E^*/σ_Y at each $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$

に依存した関数であるが、それぞれ単調増加、もしくは単調減少の傾向であった。そして、各 $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$ ごとのデータを多項式近似した結果を図に実線で併記した。これらの近似曲線の各係数を $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$ で表すことで、任意の $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$ における関数が得られる。このように、図 2 および図 3 で近似した曲線が、 Π_1 および Π_2 の無次元関数の具体形である。

押し込み試験の結果より W , W_u , h_{\max} , h_e が得られ、それらを無次元関数の Π_1 および Π_2 のに代入すると、それぞれ独立した $E^*/\sigma_Y - \sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$ 曲線を求めることができる。その 2 曲線の交点が解となり、 E^*/σ_Y と $\sigma_{\text{res}}/\sigma_Y$ が求まる。また、 E^* は既知のため、 σ_Y および σ_{res} が推定でき、Ludwick 構成式から予ひずみ ϵ_{pre} を求めることができる。

最後に、様々な材料ケースの数値実験結果を用いて、本手法の推定精度を検証した。具体的には、42 種類の予ひずみ ϵ_{pre} と残留応力 σ_{res} の組み合わせに対して、押し込み試験の FEM 解析を行い、本手法によって σ_{res} と ϵ_{pre} を推定した。その推定結果は、予ひずみ量については 10% 以内、残留応力については 20% 以内で推定できた。

本手法の有効性を実験的に検証するために、5 種の SUS316L 試験片に対して押し込み試験を行った。具体的には納入材 (AR), 3 種の冷間圧延加工材 (CR), ショットピーニング材 (SP) であり、CR 材の圧延率は 5%, 10% および 20% である。あらかじめ引張試験によって CR 材の予ひずみ ϵ_{pre} 量を測定した結果、

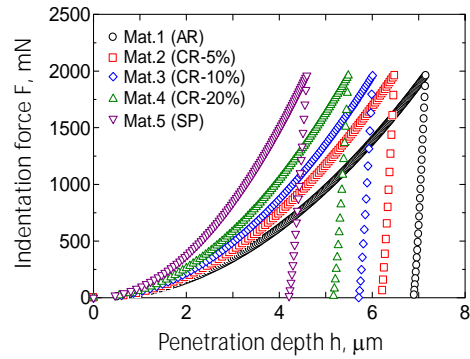


Fig.4 Indentation curves of SUS316L with cold rolling process and shot peening treatment

Table 1 Comparison of residual stress and pre-strain estimated by inverse analysis and those measured by X-ray diffraction and tensile test

Material	Solution*		Estimation	
	ϵ_{pre}	σ_{res} , MPa	ϵ_{pre}	σ_{res} , MPa
Mat. 1 (AR)	0	0	0	8
Mat. 2 (CR-5%)	0.042	0	0.039	-11
Mat. 3 (CR-10%)	0.089	0	0.103	15
Mat. 4 (CR-20%)	0.199	0	0.202	-32
Mat. 5 (SP)	Unknown	-450 ± 138	0.444	-494

* "Solution" is the material property obtained from the experiment. For Mat.2-4 of cold rolled steel (CR), the pre-strain ϵ_{pre} was obtained by tensile test. For Mat.5 of shot peening steel (SP), the residual stress was measured by X-ray diffraction.

圧延率 5% で $\epsilon_{\text{pre}}=0.042$, 10% で $\epsilon_{\text{pre}}=0.089$, 20% で $\epsilon_{\text{pre}}=0.199$ であった。一方、SP 材は直径 0.6 mm のジルコニア球を圧力 0.45 MPa でピーニングした後、機械研磨で鏡面に仕上げた試験片である。X 線回折法による応力測定を用いて面内 2 方向の残留応力 σ_{res} を測定した結果、両者はほぼ等しく、平均で -450 ± 138 MPa であることがわかった。なお、この SP 材の ϵ_{pre} は不明である。

ダイナミック超微小硬度計 (DUH-510S, 島津製作所製) を用いて押し込み試験を行った。得られた押し込み曲線を図 4 に示す。この図より AR 材 (Mat. 1) の押し込み深さが最も深く、つぎに CR 材 (Mat. 2~4), そして SP 材 (Mat. 5) の順で押し込み深さが浅くなるのがわかる。なお、CR 材の中では予ひずみが大きくなるほど押し込み深さが浅くなり、硬化していることがわかる。これらの押し込み曲線の W , h_{\max} , W_u , h_e を本手法に代入し、予ひずみ ϵ_{pre} および残留応力 σ_{res} を推定した。その結果を表 1 に示すが、本手法を用いて推定した結果 (ϵ_{pre} および σ_{res}) は X 線応力測定や、引張試験の結果とおおよそ一致していることがわかる。

2) その他の材料の結果: 上述のとおり、FEM 解析結果を用いて無次元関数や評価手法を確立する。しかしながら、本ケースでは高分子材料のような金属材料とは大きく異なる材料も対象とするため、まずは FEM モデルの有効性を検証した。Fig.5 に実験の様子

を示す．透明なポリマー材料を対象にし，2軸の残留応力を付与しながら，押し込み試験が行える装置を開発した．ひずみゲージを用いて，負荷ひずみ（残留応力）を管理することが可能であり，また単軸残留応力状態も再現できる治具となっている．この装置を用いて検討した結果を Fig.6 に示す．ここで，降伏応力 σ_Y に対する残留応力 σ_{res} 値を示しているが，全ての結果において実験と FEM 結果は良く一致した．このようなモデルを用いて合計 1134 通りのパラメトリック FEM 解析を実施して，無次元関数を構築した．詳細は割愛するが，Fig.2 および Fig.3 に類似した関数となっている．これらの関数を用いて残留応力および塑性特性を推定した結果，概ね一致した傾向が得られた．これにより，金属材料や高分子材料の塑性特性および残留応力の同時推定法が確立できた．

さらに，深さ方向に分布を持つ残留応力の推定も行うため，Fig.5 の治具を用いて検討を進めた．研究目的のとおり，表面加工材やショットピーニング材などは，試験片深さ方向（内部方向）に特性の分布を持つことが知られている．Fig.5 の治具は曲げ負荷のため，試験片厚さ方向に応力勾配を持たせることが可能であり，これを用いて検討した．推定法の確立までには至っていないが，材料特性の傾斜性を捉える押し込み試験法を考案したため，この特徴を利用した評価手法の確立を今後は検討していく予定である．

5．主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 13 件)

Noriyuki Inoue, **Akio Yonezu**, Yousuke Watanabe, Hiroshi Yamamura, Baoxing Xu, Prediction of asymmetric yield strengths of polymeric materials at tension and compression using spherical indentation, Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of ASME), Vol.139 (No.2), 021002(11pages) 2017 (査読有) DOI:10.1115/1.4035268

Shoichi Fujisawa, **Akio Yonezu**, Masafumi Noda, Baoxing Xu, Evaluation of elastoplasticity dependent creep property of magnesium alloy with indentation method: A reverse numerical algorithm and experimental validation, Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of ASME), Vol.139 (No.2), 021004(9pages) 2017 (査読有) DOI:10.1115/1.4035280

Shouichi Iio, Kazuki Hasegawa, Shugo Fushimi, **Akio Yonezu**, Xi Chen, On compressive deformation behavior of hollow-strut cellular materials, Materials & Design, Vol.105 (2016) pp.1-8 (査読有) DOI:10.1016/j.matdes.2016.05.048

Yousuke Watanabe, Shoichi Fujisawa, **Akio Yonezu**, Xi Chen, Quantitative evaluation

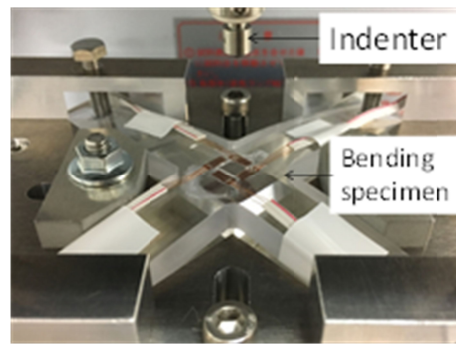


Fig.5 Photograph of micro-indentation onto polymers with bending strain (bi-axial residual stress state)

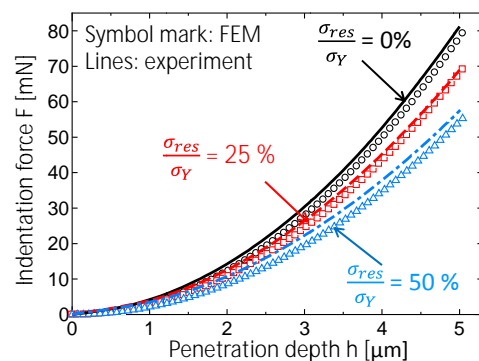


Fig.6 Indentation curves of polymer having different residual stress

of adhesion quality of surface coating by using pulse laser-induced ultrasonic waves, Surface and Coatings Technology, Vol.286(2016) pp.231-238 (査読有) DOI:10.1016/j.surfcoat.2015.12.026

Shouichi Iio, **Akio Yonezu**, Hiroshi Yamamura, Xi Chen, Deformation modeling of polyvinylidene difluoride (PVDF) symmetrical microfiltration hollow-fiber (HF) membrane, Journal of Membrane Science, Vol.497(2016) pp.421-429 (査読有) DOI:10.1016/j.memsci.2015.09.048

Akio Yonezu, Keita Hirayama, Hiroshi Kishida, Xi Chen, Characterization of the compressive deformation behavior with strain rate effect of low-density polymeric foams, Polymer Testing, Vol.50(2016) pp.1-8 (査読有) DOI:10.1016/j.polymertesting.2015.11.021

Noriyuki Inoue, **Akio Yonezu**, Yousuke Watanabe, Takeo Okamura, Kouji Yoneda, Baoxing Xu, Prediction of viscoplastic properties of polymeric materials using sharp indentation, Computational Materials Science, Vol.110 (2015) pp.321-330 (査読有) DOI:10.1016/j.commatsci.2015.08.033

Hidehiko Toyama, Michihiro Niwa, Jun Xu, **Akio Yonezu**, Failure assessment of a hard brittle coating on a ductile substrate subjected to cyclic contact loading,

Engineering Failure Analysis, Vol.57 (2015) pp.118-128 (査読有)
DOI:10.1016/j.engfailanal.2015.07.039
Akio Yonezu, Michihiro Niwa, Xi Chen, Characterization of hydrogen-induced contact fracture in high strength steel, Journal of Engineering Materials and Technology (Transactions of ASME), Vol.137 (2015-4) 021007 (7 pages) (査読有) DOI:10.1115/1.4029530
Michihiro Niwa, Taiki Shikama, **Akio Yonezu**, Mechanism of hydrogen embrittlement cracking produced by residual stress from indentation impression, Materials Science & Engineering A, Vol.624 (2015) pp.52-61 (査読有) DOI:10.1016/j.msea.2014.11.008
Akio Yonezu, Ryota Kusano, Tomohiro Hiyoshi, Xi Chen, A method to estimate residual stress in austenitic stainless steel using a microindentation test, Journal of Materials Engineering and Performance (American Society for Metals), Vol.24(1), (2015-1), pp.362-372 (査読有) DOI:10.1007/s11665-014-1280-5
草野涼太, **米津明生**, ナノ・マイクロインデンテーション法を用いた高温高圧水環境で生成する酸化皮膜の力学特性評価, 材料試験技術, Vol.59, No4, (2014) pp.203-208 (査読有)
<http://ci.nii.ac.jp/naid/40020279111>

[学会発表](計20件)

池嶋大貴, **米津明生**, 高分子材料の引張変形に関する分子動力学シミュレーション, 日本機械学会 関東支部第23期総会・講演会, 講演番号 OS0703-03, 2017年3月17日, 東京都・葛飾区
池嶋大貴, 安保佳祐, 宮本和典, **米津明生**, 分子動力学法を用いた高分子材料のナノインデンテーション挙動, 日本機械学会, 関東学生会第56回学生員卒業研究発表講演会, 講演番号 1104, 2017年3月16日, 東京都・葛飾区
遠山英彦, 渡邊耀介, **米津明生**, 繰返し接触負荷を受ける脆性材料の疲労き裂進展特性, 日本非破壊検査協会, 第48回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, pp.55-60, 2017年1月21日, 東京都・江東区
Hidehiko Toyama, **Akio Yonezu**, Experimental and Numerical Investigations of Fatigue Crack Growth of Brittle Solids under Cyclic Contact Loading, ASME2016 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Technical Presentation (IMECE2016-66385), p.160, 2016年11月17日, フェニックス(アメリカ)
Hidehiko Toyama, Takuya Dobashi, Shoichi

Fujisawa, **Akio Yonezu**, Evaluation of mechanical properties of steam coating layer on magnesium alloy, The 10th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS2016, The Far East and Oceanic Fracture Society), CO-5, 2016年8月30日, 東京都・葛飾区
Noriyuki Inoue, Yousuke Watanabe, **Akio Yonezu**, Evaluation of viscoplastic properties and asymmetric yield strengths of polymeric materials using indentation method, The 10th International Conference on Fracture and Strength of Solids (FEOFS2016, The Far East and Oceanic Fracture Society), EI-5, 2016年8月30日, 東京都・葛飾区
藤澤翔一, **米津明生**, インデンテーション法による弾塑性特性およびクリープ特性の推定法, 日本機械学会 2016年度年次大会, J0410304.pdf, 2016年9月14日, 福岡県・福岡市
赤堀智紀, 渡邊耀介, **米津明生**, インデンテーション法による塑性特性と残留応力の同時推定, 日本非破壊検査協会 第47回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, pp.73-76, 2016年1月9日, 東京都・港区
藤澤翔一, **米津明生**, マグネシウム合金における微視組織のクリープ特性評価, 日本非破壊検査協会 第47回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, pp.1-6, 2016年1月9日, 東京都・港区
Shoichi Fujisawa, Ryo Miura, Yousuke Watanabe, **Akio Yonezu**, Evaluation of Microscopic Creep Behavior of Magnesium Alloy Using Indentation Test, ASME2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Technical Presentation (IMECE2015-51279), 2015年11月19日, ヒューストン(アメリカ)
Hidehiko Toyama, Michihiro Niwa, **Akio Yonezu**, Characterization of Cyclic Contact Fracture of Hard Coating on Steel Substrate, ASME2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Technical Presentation (IMECE2015-51354), 2015年11月18日, ヒューストン(アメリカ)
Noriyuki Inoue, **Akio Yonezu**, Evaluation of Viscoplastic Properties of Polymer Materials Using Microindentation Test, ASME2015 International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Technical Presentation (IMECE2015-51284), 2015年11月16日, ヒューストン(アメリカ)
井上法行, **米津明生**, 微小押込み法による高分子材料の応力ひずみ曲線と負荷速度依存性の評価法, 日本非破壊検査協会 平成27年度非破壊検査総合シンプ

ジウム, SSM 部門, 2015 年 6 月 3 日, 東京都・江東区

米津明生, インデンテーション法を用いた表面・局所領域における力学特性計測法, 表面技術協会 ナノテク部会講演 (表面技術要素展 SURTECH 2015), 2015 年 1 月 28 日, 東京都・江東区
井上法行, **米津明生**, マイクロインデンテーション法によるポリマー材料の粘塑性特性評価, 日本非破壊検査協会 第 46 回応力・ひずみ測定と強度評価シンポジウム, 2015 年 1 月 10 日, 東京都・江東区

Ryota Kusano, Tomohiro Hiyoshi, **Akio Yonezu**, Estimation method of residual stress and plastic strain in austenitic stainless steel by single indentation test, The Asian-Pacific Conference on Fracture and Strength 2014 (APCFS-2014) and the International Conference on Structural Integrity and Failure (SIF-2014), Recent advances in structural integrity analysis: (APCF/SIF-2014), pp.555-559, 2014 年 12 月 12 日, シドニー (オーストラリア)
草野涼太, 日吉智宏, **米津明生**, 押し込み法によるステンレス鋼の塑性特性と残留応力推定法, 2014 年度日本機械学会年次大会, 2014 年 9 月 8 日, 東京都・足立区

草野涼太, **米津明生**, 高温高圧水環境で生成するサブミクロン酸化皮膜の破壊強度評価, 日本材料学会関東支部 2014 年度学生研究交流会, 2014 年 8 月 30 日, 神奈川・平塚市

井上法行, **米津明生**, マイクロインデンテーション法を用いた高分子材料の塑性特性とひずみ速度依存性評価, 日本材料学会関東支部 2014 年度学生研究交流会, 2014 年 8 月 30 日, 神奈川・平塚市

草野涼太, 日吉智宏, **米津明生**, 微小押し込み試験法を用いたオーステナイト系ステンレス鋼の残留応力推定, 日本非破壊検査協会 平成 26 年度春季講演大会講演予稿集, p.149-150, 2014 年 6 月 4 日, 東京・千代田区

米津 明生 (YONEZU AKIO)
中央大学理工学部・教授
研究者番号: 40398566

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 0 件)

取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://mater.mech.chuo-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者