

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 5 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360040

研究課題名(和文)ハイブリッドピーニングの構築と水素脆化抑止への展開

研究課題名(英文)Research on Hybrid Peening and Its Application for Suppression of Hydrogen Embrittlement

研究代表者

祖山 均(Soyama, Hitoshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90211995

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,300,000円

研究成果の概要(和文)：水素社会の実現に障壁となっている金属材料を水素環境にさらした際に著しく脆化する水素脆化の抑止を目的として、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用したキャビテーションピーニングや、鋼球等の衝突による衝撃力を利用したショットピーニング、レーザーアブレーションによる衝撃力を利用したレーザーピーニングなどの異なる機械的 surface 改質法を組み合わせたハイブリッドピーニングを構築した。実験的に、当該ピーニングによりクロムモリブデン鋼やステンレス鋼の水素脆化を抑止できることを実証した。また、当該ピーニングによる圧縮残留応力導入により、金属材料中へ水素が侵入することを低減して、水素脆化を抑止することを実験的に明示した。

研究成果の概要(英文)：In order to suppress of hydrogen embrittlement of metallic materials, which is an obstacle to realize hydrogen society, "hybrid peening" was established. Here, "hybrid peening" means a mechanical surface treatment which combined with different peening method such cavitation peening, laser peening and shot peening. In the present research, suppression of hydrogen embrittlement of chrome molybdenum steel and stainless steel by the peening was demonstrated by experimentally. It was also revealed that the peening reduced invention of hydrogen into metallic materials by introducing compressive residual stress into the materials and the peening suppressed the hydrogen embrittlement of the metallic materials.

研究分野：知的計測評価学

キーワード：表面改質 表面力学 ピーニング キャビテーション 水素脆化 疲労亀裂進展 応力拡大係数 パルスレーザー

1. 研究開始当初の背景

サステナブル(持続可能)な社会の実現には、CO₂の排出抑制が喫緊の課題であり、そのために、CO₂の排出量の1/4を占める輸送機器のピーニングを用いた構成部品の高強度化・軽量化によるCO₂の排出抑制、さらにはピーニングを活用した水素脆化抑止による水素社会の実現が必要不可欠である。

従来技術のショットピーニング SP に関する国内外の研究では、ピーニングを組み合わせる場合でもショット径や速度を変えて2段階で処理するダブルショットピーニングのみが行われているため、SPの強度向上の支配因子は圧縮残留応力であるとみなし、破壊力学的考察はほとんど行われていない。その一因は、従来の CT 試験片を用いた破壊靱性試験では、母材の評価のみで、表面改質層を評価できないためである。

研究代表者は、平面曲げ式疲労試験を用いたピーニング層の亀裂進展評価法を考案し(引用文献)、同法を用いて、研究代表者が開発したキャピテーションピーニング CP と SP などの異なるピーニングを組み合わせたハイブリッドピーニング HP により、圧縮残留応力が減少するにも関わらず、SPによる疲労寿命の限界よりさらに向上できることを実証した(引用文献)。さらに逆問題解析を用いたインデンテーション法による降伏応力の評価法を考案しており(引用文献)、同法により HP 層の降伏応力を評価することにより、表面改質層の強度向上の支配因子を解明できる。

また従来研究では、亀裂先端などの引張り応力が存在する領域に水素が凝集することが知られていることから、研究代表者は、ピーニングを用いた圧縮残留応力導入による水素凝集抑止を着想して実際に CP により材料の耐水素脆化性を改善できることを示しており(引用文献)、CP やレーザーピーニング LP を組み合わせた HP により耐水素脆化性を飛躍的に改善できる可能性がある。

2. 研究の目的

本研究は、キャピテーションピーニング CP やレーザーピーニング LP、ショットピーニング SP を組み合わせて機器構造物の信頼性および疲労寿命を飛躍的に向上させるハイブリッドピーニング HP による機械的表面改質法の構築と機械的表面改質による水素脆化抑止への展開を目的として以下の項目を実施した。

- (1) 機械的表面改質層の破壊力学的評価法の構築
- (2) CP, LP, SP 等の機械的表面改質法の最適化
- (3) 機械的表面改質層の強度の支配因子の解明
- (4) 機械的表面改質による水素侵入抑止の実証
- (5) 機械的表面改質層の簡易評価法の構築
- (6) 機械的表面改質層の電磁気的非破壊評価法の構築

3. 研究の方法

(1) 機械的表面改質層の破壊力学的評価法の構築

図1に示したような荷重制御型平面曲げ式疲労試験機を試作して、予亀裂を付与した疲労試験片を用いて、応力漸減試験により下限界応力拡大係数範囲を定量的に評価した。

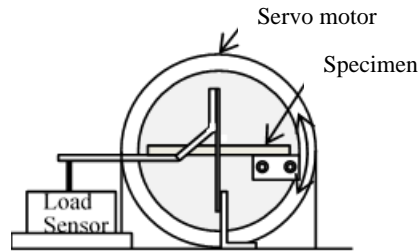


図1 荷重制御型平面曲げ式疲労試験機

(2) CP, LP, SP 等の機械的表面改質法の最適化

CP ではキャピテータやガイドパイプを設置したキャピテーション噴流噴射用ノズル形状を用いてジュラルミン板を処理して、その反り(アーカハイト)からノズル形状を最適化した。また LP では、図2に示すような水中に設置した試験片を波長 532nm、パルス幅 5ns の Nd:YAG レーザで処理するパルスレーザーシステムを試作し、最終段の凸レンズから試験片までの距離 S_{Laser} を変化させてアーカハイトを計測して、最適な S_{Laser} を明らかにした。SP では、図3に示すような水噴流加速式循環型ショットピーニング装置を用いて試験片を処理し、ショット数や処理時間などを最適化した。

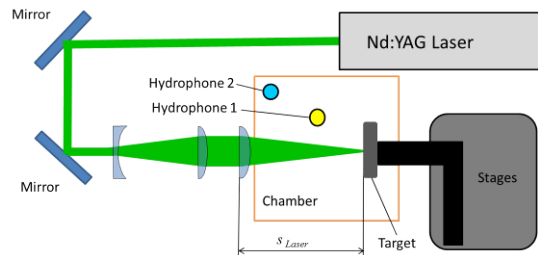


図2 パルスレーザーシステム

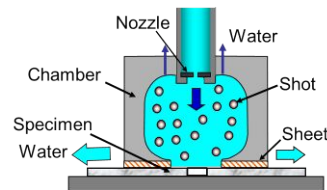


図3 水噴流加速式循環型 SP システム

(3) 機械的表面改質層の強度の支配因子の解明

圧子押し込み試験を用いた逆問題解析による降伏応力の評価やX線回折による残留応力計測等により、CP や LP, SP による表面改質層の機械的特性と疲労強度の相関関係を明らかにして、機械的表面改質層の強度における支配因子を明らかにした。

(4) 機械的表面改質による水素侵入抑止の実証

昇温脱離により機械的表面改質を施した金

属材料の水素侵入量を定量的に評価し、機械的表面改質による水素侵入抑止を実証した。

(5) 機械的表面改質層の簡易評価法の構築

機械的表面改質による圧縮残留応力導入によるピッカース硬さの見かけの硬さの増大を勘案した、ピッカース硬さによる機械的表面改質層の簡易評価法を構築した。

(6) 機械的表面改質層の電磁気的非破壊評価法の構築

CP や LP, SP による機械的表面改質法の実用化を念頭にして、渦電流法による加工度合いの定量的な評価を試み、渦電流法による計測結果と加工度合いの相関関係を明らかにした。

4. 研究成果

(1) 機械的表面改質層の破壊力学的評価法の構築

試作した荷重制御型平面曲げ式疲労試験機を用いて亀裂進展試験を行った結果、図4に示すように、未処理試験片の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は $3.75 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、CP で処理した結果、処理時間 $t_p = 0.25, 0.5, 1, 2 \text{ s/mm}$ の試験片においては、それぞれ $5.43, 5.77, 6.43, 7.35 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、CP による下限界応力拡大係数範囲の向上を実証できた。

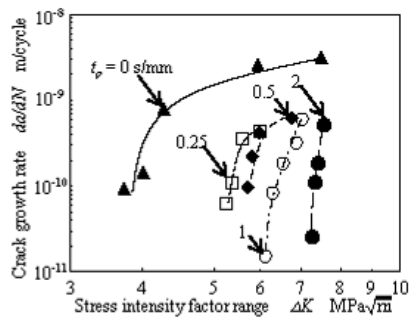


図4 亀裂進展試験結果 (SUS316L)

(2) CP, LP, SP 等の機械的表面改質法の最適化

図5には、CP用のキャビテーション噴射用ノズルにキャビテータとガイドパイプを設置した場合について、それぞれ最適形状を求めた上でジュラルミン板を処理してアークハイトを計測した結果を示す。キャビテータとガイドパイプによりそれぞれ2倍程度加工能力が向上し、両方とも設置した場合には、加工能力が4倍以上向上することを実験的に明らかにした。

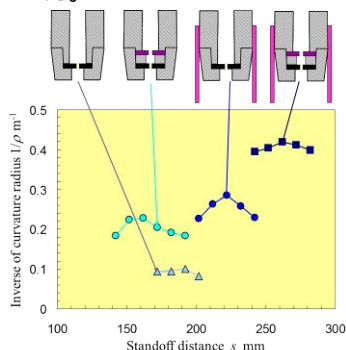
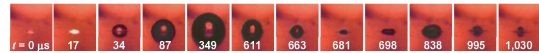
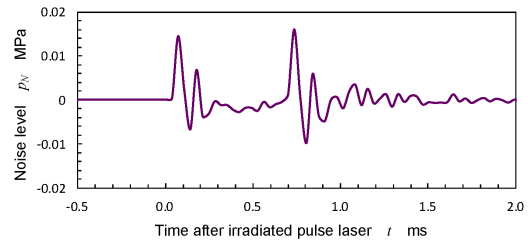


図5 CP用ノズルの最適化

LP において最適な s_{Laser} でパルスレーザを照射してレーザアブレーションとレーザキャビテーション (アブレーション後に発生する気泡) を観察しながら、音響ノイズを計測した結果 (図6参照)、本パルスレーザシステムではレーザアブレーションによる衝撃波よりもレーザキャビテーションによる衝撃波の方が大であることが判明した。



(a) レーザキャビテーションの様相



(b) 音響ノイズの経時変化

図6 レーザアブレーションとレーザキャビテーションに起因した衝撃波の比較

(3) 機械的表面改質層の強度の支配因子の解明

図7には、予亀裂を導入した場合について、圧縮残留応力導入面積 S_c と疲労寿命 N_f の関係を示す。 S_c は残留応力の深さ方向の分布から機械的表面改質により圧縮残留応力が導入された面積を求めた。CP や SP を組み合わせた HP においても、CP (CPW は水中キャビテーション噴流で処理した場合であり、CPA は気中キャビテーション噴流で処理した場合である) や LP, SP においても N_f が S_c に比例していることがわかる。すなわち、亀裂進展においては S_c が支配因子であるといえる。

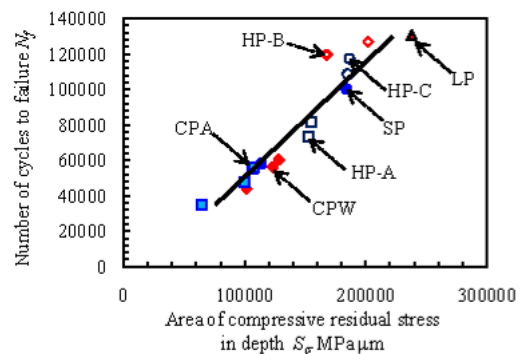


図7 圧縮残留応力導入面積と疲労寿命

(4) 機械的表面改質による水素侵入抑止の実証

図8には、CPを施したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 製試験片と未処理 NP の同種の試験片を、電解チャージにより水素を添加した後、試験片を電気炉に入れて昇温脱離により水素を脱離させ、水素量をガスクロマトグラフにより定量的に評価した結果を示す。横軸はガスクロマトグラフの保持時間 t_r であり、縦軸は水素量の目安となるガスクロマトグラフの出力 I_V である。 I_V の最大値を

比較すると、CPはNPに比べて半減している。すなわち、CPにより水素侵入を抑制できることを実証した。

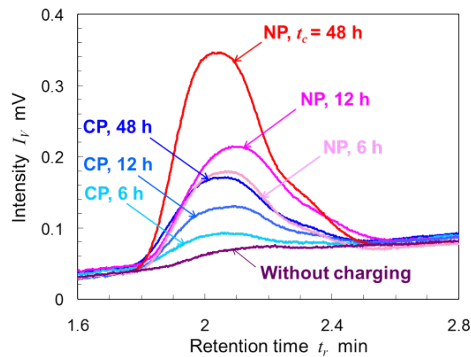


図8 CPによる水素侵入抑制の実証

(5) 機械的表面改質層の簡易評価法の構築

図9には、ピッカース硬さと降伏応力の関係を示す。残留応力を考慮した場合には、ピッカース硬さと降伏応力の相関関係が良くなることわかる。すなわち、残留応力を考慮してピッカース硬さから降伏応力を推定する簡易評価法を構築できた。

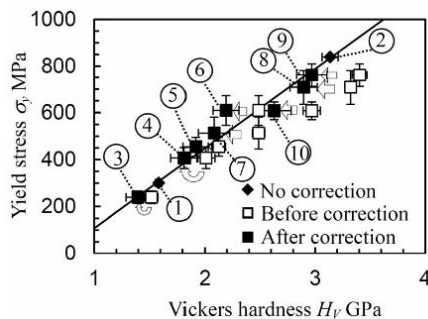


図9 ピッカース硬さと降伏応力の相関関係

(6) 機械的表面改質層の電磁気的非破壊評価法の構築

図10には、CPによる圧縮残留応力導入面積と渦電流法で計測したインダクタンスの関係を示す。200kHz 場合には両者に良好な相関関係が認められる。すなわち、渦電流法による機械的表面改質法の非破壊評価を構築できた。

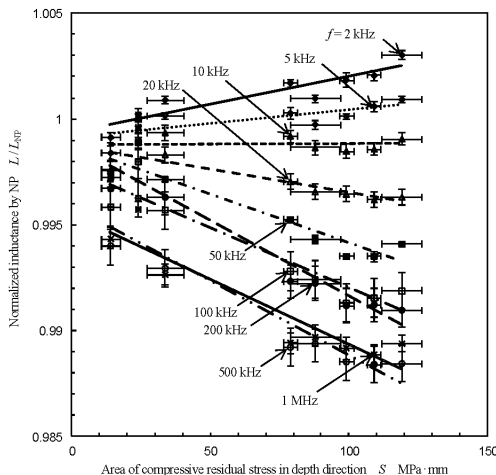


図10 圧縮残留応力導入面積とインダクタンス

<引用文献>

O.Takakuwa, M.Nishikawa and H.Soyama, Suppression of Fatigue Crack Growth in Austenite Stainless Steel by Cavitation Peening, Key Engineering Materials, Vol. 452-453, 2011, 641-644
 内藤暁馬、高桑脩、祖山均、ハイブリッドピーニングによるステンレス鋼 SUS316L の疲労亀裂進展の抑制、日本機械学会東北支部第 47 期秋季講演会講演論文集、2011、164-165
 西川雅章、河原木雄介、祖山均、球状圧子を用いた微小押し込み試験による金属材料の降伏応力の同定法、日本機械学会論文集、Vol. 76A, 2010、1781-1788
 O.Takakuwa, T.Ohmi, M.Nishikawa, A.T.Yokobori Jr. and H.Soyama, Suppression of Fatigue Crack Propagation with Hydrogen Embrittlement in Stainless Steel by Cavitation Peening, Strength, Fracture and Complexity, Vol. 7, 2011, 79-85

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 19 件)

眞野優太、高桑脩、祖山均、微小圧子押し込み試験によるオーステナイト系ステンレス鋼の水素侵入量評価、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 81、2015、paper No. 14-00426

DOI:10.1299/transjsme.14-00426

O.Takakuwa, A.Chiba and H.Soyama, Movement of Dislocations in the Sub-Surface of a Polycrystalline Metal by Cavitation Peening Observed by Transmission Electron Microscopy, Materials Sciences and Applications, 査読有、Vol. 6、2015、140-144

DOI:10.4236/msa.2015.62017

O.Takakuwa and H.Soyama, Effect of Residual Stress on the Corrosion Behavior of Austenitic Stainless Steel, Advances in Chemical Engineering and Science, 査読有、Vol. 5、2015、62-71

DOI: 10.4236/aces.2015.51007

M.Kikuchi, T.Takiguchi, J.Yamada, M.Yamamoto and H.Soyama, Evaluation of the Efficiency of Cleaning Dental Plaque on Titanium Using a Cavitating Jet, Journal of Biomechanical Science and Engineering, 査読有、Vol. 9、2014、Paper No.14-00297、1-8

DOI:10.1299/jbse.14-00297

高桑脩、祖山均、脊椎固定用インプラントロッドへの水噴流加速式循環型ショットピーニングの適用、噴流工学、査読有、Vol. 31、No. 1、2014、20-27

O.Takakuwa, Y.Mano and H.Soyama, Effect of Hydrogen on the Micro-and Macro-Strain Near the Surface of

Austenitic Stainless Steel、Advanced Materials Research、査読有、Vol. 936、2014、1298-1302
DOI:10.4028/www.scientific.net/AMR.936.1298
H.Soyama、The Use of Cavitation Peening to Increase the Fatigue Strength of Duralumin Plates Containing Fastener Holes、Materials Sciences and Applications、査読有、Vol. 5、2014、430-440
DOI:10.4236/msa.2014.56047
O.Takakuwa、Y.Mano and H.Soyama、Increase in the Local Yield Stress near Surface of Austenitic Stainless Steel due to Invasion by Hydrogen、International Journal of Hydrogen Energy、査読有、Vol. 39、2014、6095-6103
DOI:10.1016/j.ijhydene.2014.01.190
高桑脩、左奈田一将、祖山均、荷重制御型平面曲げ式疲労試験機による表面改質層における疲労亀裂進展挙動の定量的評価、日本機械学会論文集、査読有、Vol. 80、2014、Paper No.smm0022、1-17
DOI:10.1299/transjsme.2014smm0022
H.Soyama、Enhancing the Aggressive Intensity of a Cavitating Jet by Introducing a Cavitator and a Guide Pipe、Journal of Fluid Science and Technology、査読有、Vol. 9、2014、Paper No.13-00238、1-12
DOI:10.1299/jfst.2014jfst0001
O.Takakuwa、Y.Kawaragi and H.Soyama、Estimation of the Yield Stress of Stainless Steel from the Vickers Hardness Taking Account of the Residual Stress、Journal of Surface Engineered Materials and Advanced Technology、査読有、Vol. 3、2013、262-268、
DOI: 10.4236/jsemat.2013.34035
祖山均、熊谷直輝、キャビテーションピーニングで加工したクロムモリブデン鋼の渦電流による非破壊評価、査読有、Vol. 26、No. 1、2014、8-15、
S.Kanou、M.Nishikawa and H.Soyama、Analysis of the Formation of Plastic Deformation Layer on the Surface of Polycrystalline Metals Subjected to a Micro-size High-rate Shot Impact、International Journal of Mechanical Sciences、査読有、Vol. 75、2013、316-323、
DOI:10.1016/j.ijmecsci.2013.07.014
O.Takakuwa、A.S.Gill、G.Ramakrishnan、S.R. Mannava、V.K.Vasudevan and H.Soyama、Introduction of Compressive Residual Stress by Means of Cavitation Peening into a Titanium Alloy Rod Used for Spinal Implants、Materials Sciences and Applications、査読有、Vol. 4、2013、23-28、

DOI:10.4236/msa.2013.47A2004
O.Takakuwa、K.Yamamiya and H.Soyama、An Indicator for the Suppression of Fatigue Crack Growth by Hybrid Peening、Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering、査読有、Vol. 7、2013、357-371、
DOI:10.1299/jmmp.7.357
O.Takakuwa and H.Soyama、Optimizing the Conditions for Residual Stress Measurement Using a Two-Dimensional XRD Method with Specimen Oscillation、Advances in Materials Physics and Chemistry、査読有、Vol. 3、2013、8-18、
DOI:10.4236/ampc.2013.31A002
S.Nishimura、O.Takakuwa and H.Soyama、Similarity Law on Shedding Frequency of Cavitation Cloud Induced by a Cavitating Jet、Journal of Fluid Science and Technology、査読有、Vol. 7、2013、405-420、
DOI:10.1299/jfst.7.405
H.Soyama、Effect of Nozzle Geometry on a Standard Cavitation Erosion Test Using a Cavitating Jet、Wear、査読有、Vol. 297、2013、895-902、
DOI:10.1016/j.wear.2012.11.008

[学会発表](計47件)

H.Soyama、Experimental Formula to Estimate Aggressive Intensity of a Cavitation Peening、ASME-JSME-KSME Joint Fluids Engineering Conference 2015、2015年7月26日~31日、ソウル(韓国)
祖山均、武尾文雄、電子ビーム積層造形したチタン合金 Ti6Al4V のキャビテーションピーニングによる疲労寿命改善、日本材料学会第64期通常総会・学術講演会、2015年5月22日~24日、山形大学(米沢)
H.Soyama、Surface Mechanics Design by Cavitation Peening、5th International Conference on Laser Peening and Related Phenomena、2015年5月10日~15日、シンシナティ(アメリカ)
眞野優太、高桑脩、祖山均、昇温脱離分析装置の試作と表面改質したステンレス鋼における水素侵入抑止の実証、日本機械学会東北支部第50期総会・講演会、2015年3月13日、東北大学(仙台)
藤沢拓弥、高桑脩、祖山均、応力測定によるステンレス鋼の局所的水素量評価、2015年3月10日、八戸高専(八戸)
祖山均、三上光弘、アルメンストリップのアーケハイトによるキャビテーション噴流の加工能力の評価、2014年度ウォータージェット技術年次報告会、2015年1月23日~24日、金沢工業大学(金沢)
上野祐幸、祖山均、逆問題解析を用いた機械的表面改質を施したジュラルミンの降伏応力の評価、日本機械学会第27回計算

力学講演会、2014年11月22日～24日、岩手大学(盛岡)

H.Soyama, Surface Mechanics Design of Metallic Materials for Automotive Lightweight Technology、1st International Conference on Modern Auto Technology and Services、2014年10月25日～26日、武漢(中国)

上野祐幸、祖山均、水噴流加速式循環型ショットピーニングによる孔付きジュラルミン板の疲労強度向上、日本機械学会東北支部第50回秋季講演会、2014年9月5日、東北学院大学(多賀城)

祖山均、噴射条件によるキャピテーションピーニングとウォータージェットピーニングの判別、日本混相流学会混相流シンポジウム2014、2014年7月28日～30日、道民センター「かでの2・7」(札幌)

祖山均、武尾文雄、円孔を有するジュラルミン板の疲労強度における機械的表面処理の影響、日本機械学会M&M2014材料力学カンファレンス、2014年7月19日～21日、福島大学(福島)

祖山均、高桑脩、キャピテーションピーニングを用いた残留応力改善によるステンレス鋼の水素脆化抑止、日本機械学会M&M2014材料力学カンファレンス、2014年7月19日～21日、福島大学(福島)

高桑脩、眞野優太、祖山均、オーステナイト系ステンレス鋼の水素侵入に及ぼす表面応力の影響とその相互作用、日本機械学会M&M2014材料力学カンファレンス、2014年7月19日～21日、福島大学(福島)

祖山均、眞野優太、高桑脩、キャピテーションピーニングによるステンレス鋼SUS316Lの水素吸蔵の抑止、第57回日本学術会議材料工学連合講演会、2013年11月25日～26日、京都テルサ(京都)

眞野優太、高桑脩、祖山均、ステンレス鋼表面層のマクロ歪およびマイクロ歪に及ぼす水素の影響、日本機械学会東北支部第49期秋季講演会、2013年9月20日、岩手大学(盛岡)

祖山均、西村怜、キャピテータによるキャピテーション噴流の加工能力の向上、日本混相流学会混相流シンポジウム2013、2013年8月9日～11日、信州大学(長野)
高桑脩、左奈田一将、祖山均、荷重制御式平面曲げ疲労試験による表面改質層の下限応力拡大係数範囲の定量評価、日本材料学会第62期通常総会・学術講演会、2013年5月18日、東京工業大学(東京)
祖山均、実験式によるキャピテーション噴流の加工能力の推定、日本混相流学会年会講演会、2012年8月9日～11日、東京大学(柏)

〔図書〕(計1件)

岡野一清、井関孝弥、阿部竜、児玉竜也、郷右近展之、中村優美子、伊藤直次、市川

貴之、高野俊夫、池田哲史、秋葉悦男、笠井秀明、中西寛、Wilson Agerico Dino、三浦良雄、佐原亮二、水関博志、Marcel H. F. Sluiter、大野かおる、川添良幸、星野公三、高野則之、横堀壽光、大見敏仁、祖山均、高桑脩、亀川厚則、岡田益男、佐藤正志、久慈俊郎、島隆則、侯召民、池田一貴、高木成幸、大友季哉、折茂慎一、西宮伸幸、駒口健治、菅原武、庄野厚、斉藤泰和、藤田健一、山口良平、伊藤靖彦、井上博史、大平勝秀、李海文、経済産業省商務流通保安グループ高圧ガス保安室、エヌ・ティー・エス、水素利用技術集成 Vol.4、2014、332(181-189)

〔その他〕

ホームページ:

<http://www.mm.mech.tohoku.ac.jp/menu12/index2.html>

アウトリーチ活動:

2014年11月18日仙台市立大倉小学校において「泡で金属をたたいて強くする」と題して出前授業を実施。

2014年8月8日ひらめきときめきサイエンス「泡で金属をたたいて強くする」を実施、中学生20名参加。

2014年7月1日仙台市立人來田小学校において「泡で金属をたたいて強くする」と題して出前授業を実施。

2013年11月9日ひらめきときめきサイエンス「泡で金属をたたいて強くする」を実施、高校生8名参加。

2013年10月10日磐城高校において「サステイナブル社会実現のための表面改質技術の開発」と題して出張講義を実施。

2013年9月12日横手高校において「サステイナブル社会実現のための表面改質技術の開発」と題して出張講義を実施。

2013年7月25日夏休み大学探検「泡で金属をたたいて強くする」を実施、中学生8名参加。

2012年10月5日会津学鳳高校において「21世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出張講義を実施。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

祖山均 (SOYAMA HITOSHI)

東北大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90211995

(2) 研究分担者

伊賀 由佳 (IGA YUKA)

東北大学・流体科学研究所・准教授

研究者番号: 50375119

高桑 脩 (TAKAKUWA OSAMU)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 60633518

青柳 吉輝 (AOYAGI YOSHITERU)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 70433737