

機関番号：11301

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2008～2010

課題番号：20246030

研究課題名（和文）キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる新機能層創成

研究課題名（英文）New Functional Layer Produced by Cavitation Shotless Peening

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

研究成果の概要（和文）：

キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を用いて金属材料を表面改質するキャビテーション・ショットレス・ピーニングCSPを取り上げ、CSPにより加工硬化させながら縦弾性係数を低減できることを明らかにし、降伏応力向上、疲労強度向上ならびに摩擦磨耗特性改善を実証した。さらに、CSPにより圧縮残留応力（マクロ歪）を導入しながらマイクロ歪を低減できることを明らかにし、CSPによる水素脆化抑止を実証した。

研究成果の概要（英文）：

A surface modification using cavitation impact, which was called cavitation shotless peening, CSP, was proposed. Improvements of yield stress, fatigue strength, wear and hydrogen embrittlement by CSP were proofed, with introducing compressive residual stress and releasing micro strain.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	23,400,000	7,020,000	30,420,000
2009年度	7,700,000	2,310,000	10,010,000
2010年度	7,600,000	2,280,000	9,880,000
年度			
年度			
総計	38,700,000	11,610,000	50,310,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学 ・ 生産工学・加工学

キーワード：表面改質，キャビテーション，歪，ピーニング，残留応力，X線回折，水素脆化逆問題解析

1. 研究開始当初の背景

キャビテーション気泡は、崩壊時に衝撃力を生じ、一般にはポンプやバルブなどの流体機械に致命的損傷を与える「害悪」であるが、逆転発想的な研究により、キャビテーション衝撃力を、ショット・ピーニングのごとく、機械材料の表面改質に有効利用できる。ショットなしでピーニングできるので、キャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP あ

るいは単にキャビテーション・ピーニング CP と呼ばれている(J. Materials Science, Vol. 42, pp. 6638-6641, 2007; までりあ, Vol. 45, pp. 657-663, 2006 など)。

研究代表者の CSP に関する研究は、第1世代 CSP では、圧縮残留応力を導入し、原子炉圧力容器の応力腐食割れ抑止の予防保全策として実用化した(特許第 2878529 号)。第2世代 CSP では、キャビテーション衝撃

力を強化して硬い歯車などの機械部品の疲労強度向上を実現した(Tribology Letters, Vol. 18, pp. 181-184; United States Patent, No. 6,855,208 B1, 2005 など)。

本研究は、被加工物に形成されるマイクロ歪(結晶粒内の歪)という新たな概念に着目し、CSP の摩擦摩耗特性向上への新展開を図る第3世代 CSP の提案である。これまでの研究により、破壊の進展を抑制する圧縮残留応力(マクロ歪)を導入しながら、回折 X 線強度分布の半価幅を低減するという興味深い事実を発見し(Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 126, pp. 123-128, 2004), CSP により破壊の起点となるマイクロ歪が低減する可能性を明らかにした(Proc. 4th Inter. Symp. Mech. Sci. Based on Nanotechnology, pp. 65-68, 2007)。さらに興味深いことに、CSP 処理面の電磁気的特性が変化している事実を発見した。この事実は、電磁気的手法によりマクロ/マイクロ歪を評価できる可能性を示している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を機械材料の表面改質に有効利用するキャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP について、初代 CSP での圧縮残留応力導入による応力腐食割れの抑止、第2世代 CSP でのキャビテーション衝撃力の強化による機械材料の疲労強度向上を踏まえて、被加工物に形成されるマイクロ歪(結晶粒内の歪)という新たな概念に着目し、CSP により破壊の起点となるマイクロ歪を低減して、さらに加工硬化させ、かつ弾性的に軟化させて摩擦摩耗特性の向上を達成する新機能層を創成する第3世代 CSP の構築を目的とし、摩擦摩耗特性が問題となる機械部品などへの展開を図るとともに、CSP 処理面の電磁気的評価法の構築を目指す。そのために本研究では、以下の6項目を実施した。

- (1) マイクロ歪計測法の構築
- (2) CSP 処理面の金属組織学的評価
- (3) CSP 処理面の摩擦摩耗特性の解明
- (4) CSP 処理条件の最適化
- (5) CSP 処理面の電磁気的評価法の構築
- (6) CSP による高機能層創成法の構築

3. 研究の方法

- (1) マイクロ歪計測法の構築

CSP で処理した金属材料を、本研究で購入した粒内ひずみ計測用 X 線回折装置により、ファンダメンタルパラメータ法を用いて、結晶粒の大きさとマイクロ歪を評価した。なお、一般に残留応力として評価されるマクロ歪は、従来法の $\sin^2\psi$ 法と、新規手法の 2D 法により評価した。

- (2) CSP 処理面の金属組織学的評価

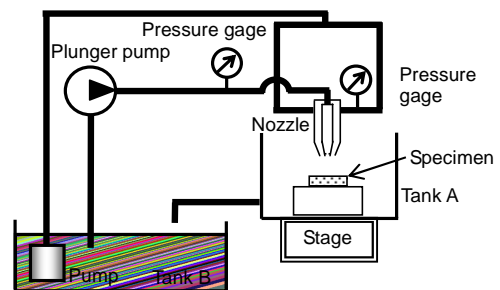
CSP で処理した金属試験片ならびに未処理の試験片から、できるだけ歪を新たに付与しないように透過型電子顕微鏡 TEM 用の試験片を作製し、TEM で観察した。

- (3) CSP 処理面の摩擦摩耗特性の解明

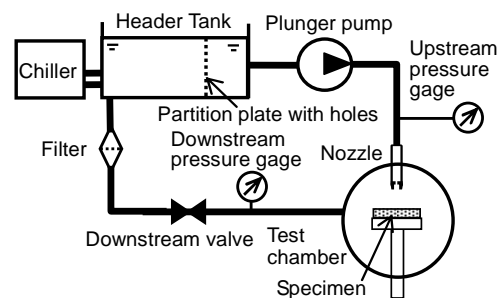
CSP で処理した試験片ならびに未処理の試験片について、摩擦試験ならびに磨耗試験を行った。

- (4) CSP 処理条件の最適化

CSP の実用化を目指し、水中キャビテーション噴流ならびに気中キャビテーション噴流試験装置を用いて、ノズル形状などを変えてキャビテーション噴流の加工能力を評価し、それぞれのキャビテーション衝撃力の強化を行った。図1には、(a) 気中キャビテーション噴流式 CSP 装置と、(b) 水中キャビテーション噴流式 CSP 装置を示す。



(a) 気中キャビテーション噴流式



(b) 水中キャビテーション噴流式

図1 CSP 装置

- (5) CSP 処理面の電磁気的評価法の構築

CSP 処理面の処理の程度を非破壊で把握するために、渦電流法を用いて CSP 処理面を評価した。

- (6) CSP による高機能層創成法の構築

CSP の実用化を念頭にして、キャビテーションに関する流体力学的観点ならびに機械材料などの材料工学的観点を総括して、CSP の最適化と工業的な展開を図った。

4. 研究成果

- (1) マイクロ歪計測法の構築

①金属多結晶材料のマイクロ歪を評価できるように構成した粒内歪計測用 X 線回折装置を購入し、ナノ粒子の結晶粒径や歪の計測に使用されているファンダメンタルパラメ

ータ法を用い、研削仕上げしたステンレス鋼を供試材として CSP で処理してマイクロ歪を計測し、CSP によりマイクロ歪が低減することを明らかにした。

②マクロ歪計測法の構築を目的として、二次元検出器を用いたX線回折により、パイプにねじりを負荷してせん断応力を計測した結果、 $\sin^2\psi$ 法よりも2D法のほうが負荷したせん断応力に近い値を得ることができることを明らかにした。

③平面曲げ式疲労試験に供した試験片のマイクロ歪をファンダメンタルパラメータ法により評価した結果、疲労回数とともにマイクロ歪が増減することが判明した。またステンレス鋼 SUS316L の表面仕上げの状態によっては疲労過程によりフェライト相が生成することが判明した。

(2) CSP 処理面の金属組織学的評価

①合金工具鋼のマイクロ歪をファンダメンタルパラメータ法で計測するとともに、透過型電子顕微鏡で観察し、CSP により転位に関わる歪が低減することを明らかにした。

②微小硬さ試験機を用いて実験的にインデントレーション試験を行って荷重-変位曲線を求め、また弾塑性解析による数値シミュレーションにより、X線回折による残留応力、曲げ試験による縦弾性係数計測と併せて逆問題解析を行った結果、CSP により降伏応力が向上することを明らかにした。

(3) CSP 処理面の摩擦摩耗特性の解明

①工作機械のガイドを模した球状黒鉛鋳鉄を供試材とし、直動型摩擦試験機により摩擦試験を行い、摩擦係数のすべり速度に対する依存性（摩擦係数-すべり速度特性）の負勾配を、CSP により改善できることを明らかにした。

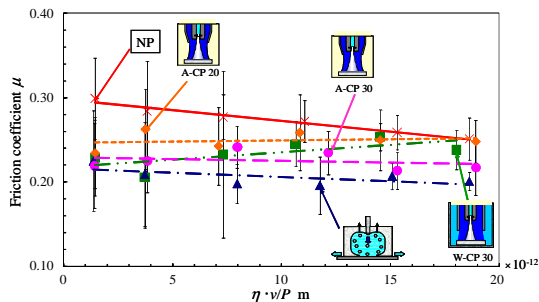


図2 ピーニング処理面の摩擦特性

②CSP で処理したローラなどを摩擦摩耗試験に供し、CSP により摩耗特性を向上できることを実証した。

(4) CSP 処理条件の最適化

①図3に示すようなキャビテーション噴流用ノズルに設けた円筒形状の直径ならびに長さを変えた出口形状を取り上げて、キャビテーション噴流による壊食試験を行い、ノズル出口形によりキャビテーション噴流

の加工能力を強化できることを明らかにした(図4参照)。

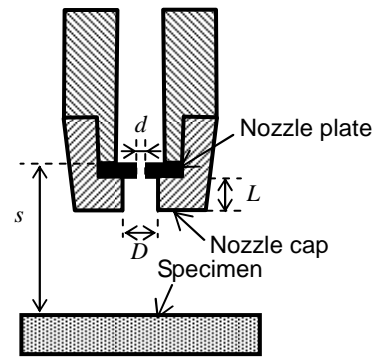


図3 ノズル形状

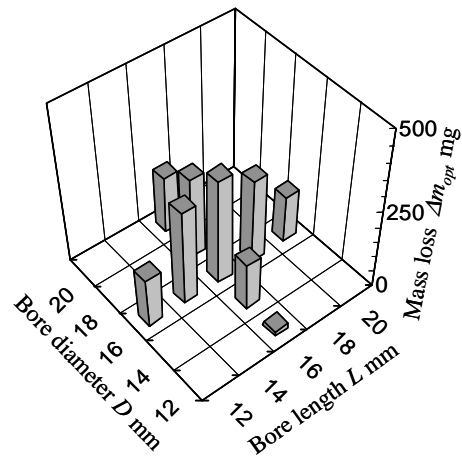


図4 ノズル出口形状による加工能力の変化

②種々の大きさのノズルからのキャビテーション噴流を用いて CSP 処理を行い、残留応力を評価した結果、ノズル口径が大なるほど深くまで圧縮残留応力を導入できることが明らかになった。またキャビテーション噴流の噴射圧力を変えて CSP を行った結果と併せて、噴射圧力を大とするよりもノズル口径を大としたほうが深くまで圧縮残留応力を導入できることが明らかになった。

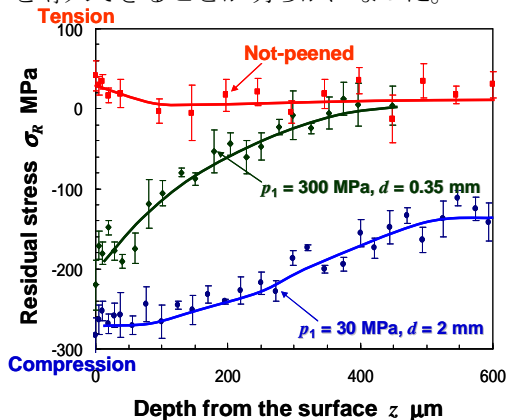


図5 圧縮残留応力導入における噴射圧力とノズル口径の影響

(5) CSP 処理面の電磁気的評価法の構築

①LCR ハイテスタを購入して、渦電流法により CSP で処理した合金工具鋼を計測した結果、CSP により透磁率および導電率が向上することを明らかにした。

②マクロな圧縮応力を付与した合金工具鋼を渦電流法を用いて評価し、マクロな歪を渦電流法で評価できることから残留応力を渦電流法で評価できる可能性が明らかになった。

③CSP による表面改質層の電磁気的特性を渦電流法で計測し、逆問題解析により表面改質層の電磁気的特性を評価して、残留応力の深さ方向の分布と比較し、渦電流法により CSP による表面改質層の深さを非破壊で評価できることを明らかにした。

(6) CSP による高機能層創成法の構築

①CSP 処理時間を変えて疲労試験片を行った結果、処理時間の増大とともに疲労寿命が向上し、やがて飽和することから、最適な CSP 処理時間の指針を得た。

②CSP による処理時間を変えた試験片の亀裂進展試験を行って、CSP 処理時間とき裂進展速度の関係を明らかにし、CSP の処理時間の最適化を行った。

③CSP により金属ベルト式 CVT のエレメントの疲労強度を向上できることを実証した。

④ハイブリッド車などに用いられる IPM モータの電磁鋼板を CSP 処理した結果、CSP 処理により電磁鋼板の降伏応力を向上できることが明らかになった。

⑤CSP によりマイクロ歪を低減しながら圧縮残留応力を導入できていることを明らかにしてきた。一方、水素社会の実現には金属材料を水素環境にさらすと脆化する「水素脆化」の解決が喫緊の課題となっているが、圧縮残留応力の導入により水素脆化を抑止できる可能性がある。本研究において、ステンレス鋼 SUS316L を供試材とし、CSP で処理した試験片と未処理の試験片を水素環境にさらして亀裂進展試験を行った結果、CSP により亀裂進展を抑止できる、すなわち CSP により水素脆化を抑止できることを実証した。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

1. H.Soyama, T.Kikuchi, M.Nishikawa and O.Takakuwa, Introduction of Compressive Residual Stress into Stainless Steel by Employing a Cavitating Jet in Air, *Surface & Coatings Technology*, 査読有, 205 (2011), pp. 3167-3174.

2. H.Soyama and O.Takakuwa, Enhancement of Aggressivity of Cavitating Jet and Its Practical Application, *Journal of Fluid Science and Technology*, 査読有, 6 (2011), pp. 1-12.
3. M.Nishikawa and H.Soyama, Two-step Method to Evaluate Equibiaxial Residual Stress of Metal Surface, *Materials and Design*, 査読有, 32 (2011), pp. 3240-3247.
4. H.Soyama, Corrosion Behavior of Pressure Vessel Steel Exposed to Residual Bubbles after Cavitation Bubble Collapse, *Corrosion*, 査読有, 67 (2011), pp. 025001-1-8.
5. O.Takakuwa, M.Nishikawa and H.Soyama, Suppression of Fatigue Crack Growth in Austenite Stainless Steel by Cavitation Peening, *Key Engineering Materials*, 査読有, 452-453 (2011), pp. 641-644.
6. 祖山均, キャビテーションピーニングの原理と応用, ふえらむ, 査読無, 16 (2011), pp. 221-227.
7. 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*, 査読有, (2011), 印刷中.
8. H.Soyama and Y.Sekine, Evaluation of the Enhanced Cavitation Impact Energy Using a PVDF Transducer with an Acrylic Resin Backing, *Measurement*, 査読有, (2011), 印刷中.
9. O.Takakuwa, M.Nishikawa and H.Soyama, Technique for Partially Strengthening Electrical Steel Sheet of IPM Motor Using Cavitation Peening, *Materials Science and Technology*, 査読有, (2011), 印刷中.
10. O.Takakuwa, M.Nishikawa and H.Soyama, Suppression of Fatigue Crack Propagation in Steel by Cavitation Peening, *Metal Finishing News*, 査読無, 11 (3) (2010), pp. 58-60.
11. 西川雅章, 河原木雄介, 祖山均, 球状圧子を用いた微小押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(A 編), 査読有, 76 (2010), pp. 1781-1788.
12. 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングを受けたステンレス鋼の表面改質層の降伏応力分布と疲労特性の評価, 日本機械学会論文集(A 編), 査読有, 76 (2010), pp. 1367-1372.
13. 高桑脩, 西川雅章, 祖山均, キャビテーションピーニングによる圧縮応力の付与, 砥粒加工学会誌, 査読無, 54 (2010),

- pp. 574-577.
14. H.Soyama and Y.Sekine, Sustainable Surface Modification Using Cavitation Impact for Enhancing Fatigue Strength Demonstrated by a Power Circulating-Type Gear Tester, *International Journal of Sustainable Engineering*, 査読有, 3, (2010), pp. 25-32.
 15. Y.Sekine and H.Soyama, Surface Modification of Alloy Tool Steel for Forging Dies by Cavitation Peening, *Review of Automotive Engineering*, 査読有, 30 (2009), pp. 393-399.
 16. M.Nishikawa and H.Soyama, Indentation Technique for Characterization of the Metal Surface Modified by Cavitation Peening, *Metal Finishing News*, 査読無, 10 (6) (2009), pp. 58-60.
 17. 関根祐一, 祖山均, キャビテーション・ショットレス・ピーニングによる鍛造用金型の表面改質, 自動車技術会論文集, 査読有, 40 (2009), pp. 861-866.
 18. Y.Sekine and H.Soyama, Evaluation of the Surface of Alloy Tool Steel Treated by Cavitation Shotless Peening Using an Eddy Current Method, *Surface & Coatings Technology*, 査読有, 203 (2009), pp. 2254-2259.
 19. H.Soyama, Y.Sekine and Y.Oyama, Improvement of the Fatigue Strength of Stainless Steel SUS316L by a Cavitating Jet with an Associated Water Jet in Water, *ISIJ International*, 査読有, 48 (2008), pp. 1577-1581.
 20. H.Soyama, M.Shimizu, Y.Hattori, and Y.Nagasawa, Improving the Fatigue Strength of the Elements of a Steel Belt for CVT by Cavitation Shotless Peening, *Journal of Materials Science*, 査読有, 43 (2008), pp. 5028-5030.
- [学会発表] (計37件)
1. 高桑脩, 内藤 暁馬, 祖山均, 水噴流加速式循環型ショットピーニングによるステンレス鋼の水素脆化抑止, 2010年度ウォータージェット技術年次報告会, 2011年1月21日, 名古屋.
 2. 祖山均, 流動キャビテーションのけるラジカル反応, キャビテーションに関するシンポジウム (第15回), 2010年11月23日, 堺.
 3. 長坂和哉, 高桑脩, 祖山均, キャビテーション噴流の加工能力におけるノズル部の寸法と噴射圧力の影響, 日本機械学会流体工学部門講演会, 2010年10月31日, 米沢.
 4. 高桑脩, 大見敏仁, 西川雅章, 横堀壽光, 祖山均, 圧縮残留応力付与による水素脆化抑止に関する数値解析, 第54回日本学術会議材料工学連合講演会, 2010年10月26日, 京都.
 5. H.Soyama and T.Muraoka, Chemical Reactor Using Radical Induced by a Cavitating Jet, 20th International Conference on Water Jetting, 2010年10月20日, グラーツ, オーストリア.
 6. 西川雅章, 高桑脩, 山宮康平, 祖山均, キャビテーションピーニングによるステンレス鋼の疲労き裂進展抑制効果に関する数値解析, 日本機械学会 M&M2010 材料力学カンファレンス, 2010年10月10日, 長岡.
 7. H.Soyama and O.Takakuwa, Enhancement of Aggressivity of Cavitating Jet and Its Practical Application, International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, 2010年9月28日, シンシナティ, 米国.
 8. 祖山均, 西澤一登, キャビテーション噴流の非定常特性におけるノズル出口形状の影響, 日本混相流学会年会講演会, 2010年7月17日, 浜松.
 9. 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングを受けたステンレス鋼の表面き裂の疲労進展挙動, 日本材料学会第59期学術講演会, 2010年5月22日, 札幌.
 10. H.Soyama, K.Nishizawa and M.Mikami, Comparison of Abilities of Various Cavitating Jets, 9th Pacific Rim International Conference on Water Jetting Technology, 2009年11月21日, 郡山.
 11. Y. Sekine and H. Soyama, Electromagnetic Properties Varied with Applied Equibiaxial Stress Measured by an Eddy Current Method, 13th Asia-Pacific Conference on Non-Destructive Testing, 2009年11月10日, 横浜.
 12. 西川雅章, 高桑脩, 祖山均, キャビテーションピーニングによる金属表面改質層の降伏応力変化がもたらす疲労特性への影響, 日本材料学会第14回破壊力学シンポジウム, 2009年10月24日, 石垣島.
 13. 西川雅章, 祖山均, キャビテーションピーニングによる表面改質層の圧子押し込み試験を用いた評価, ショットピーニング技術協会シンポジウム 2009, 2009年10月15日, 東京.
 14. 関根裕一, 祖山均, キャビテーションピーニングを施した歯車の渦電流法による評価, 自動車技術会 2009年秋季大会学術講演会, 2009年10月7日, 仙台.
 15. 祖山均, キャビテーション残留気泡に

よる圧力容器鋼の酸化促進作用, 日本機械学会東北支部第 45 期秋季講演会, 2009 年 9 月 26 日, 福島.

16. 祖山均, 進木貴弘, 山口健, 堀切川一男, キャビテーションピーニングによる球状黒鉛鋳鉄の摩擦特性の改善, 日本機械学会 2009 年度年次大会, 2009 年 9 月 14 日, 盛岡.
17. H.Soyama, K.Nishizawa and M.Mikami, Enhancement of Cavitation Aggressivity around a Cavitating Jet by Injecting Low-Speed Water Jet for Cavitation Peening, 7th International Symposium on Cavitation, 2009 年 8 月 20 日, アナーバー, 米国.
18. 祖山均, 小山洋祐, ファンダメンタルパラメータ法によるステンレス鋼のミクロ歪の評価, 日本機械学会 M&M2009 カンファレンス, 2009 年 7 月 26 日, 札幌.
19. 高桑脩, 松本洋明, 千葉晶彦, 祖山均, キャビテーションピーニング処理した合金工具鋼の透過型電子顕微鏡観察, ショットピーニング技術協会講演会, 2009 年 5 月 28 日, 東京.
20. 祖山均, 前田敏之, キャビテーションピーニングによるステンレス鋼の表面改質層の降伏応力向上, 日本材料学会第 58 期学術講演会, 2009 年 5 月 24 日, 松山.
21. 祖山均, キャビテーション場を活用した二酸化炭素の還元に関する基礎的研究, キャビテーションに関するシンポジウム(第 14 回), 2009 年 3 月 19 日, 仙台.
22. 祖山均, X 線回折によるせん断応力の評価, 日本機械学会東北支部第 44 期総会・講演会, 2009 年 3 月 13 日, 仙台.
23. 祖山均, 種々のキャビテーション噴流の加工能力の比較, 2008 年度日本ウォータージェット技術年次報告会, 2009 年 1 月 24 日, 滑川.
24. H.Soyama, N.Yamada, O.Takakuwa, Y.Sekine and M.Mikami, Release of Micro Strain in Tool Alloy Steel by a Cavitating Jet in Air, 19th International Conference on Water Jetting, 2008 年 10 月 16 日, ノッティンガム, イギリス.

[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:

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

アウトリーチ活動:

2011 年 1 月 6 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, 小学 5, 6 年生 27 名参加。

2010 年 12 月 9 日仙台市立作並小学校において「21 世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出前授業を実施。

2010 年 11 月 26 日仙台市立泉ヶ丘小学校において「21 世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出前授業を実施。

2010 年 7 月 21 日夏休み大学探検「泡で金属をたたいて強くする」を実施。

2010 年 3 月 6 日小学生職場見学「自動車の過去・現在・未来」を実施。

2010 年 1 月 7 日ひらめき☆ときめきサイエンス「泡でたたいて強くする」を実施, 小学 5, 6 年生 28 名参加。

2009 年 12 月 17 日仙台市立具森小学校において「21 世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出前授業を実施。

2009 年 10 月 29 日宮城県尚絅学院高校において「21 世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出前授業を実施。

2008 年 9 月 13 日長野県立長野高等学校において「21 世紀型機械のためのナノメカニクス」と題して出前授業を実施。

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

西川 雅章 (NISHIKAWA MASA AKI)
東北大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号: 60512085

(3) 連携研究者

千葉 晶彦 (CHIBA AKIHIKO)
東北大学・金属材料研究所・教授
研究者番号: 00197617

巨 陽 (JU YANG)
名古屋大学・工学研究科・教授
研究者番号: 60312609