

「泡で金属をたたいて強くする」

Cavitation S Peening®

S : Shotless, Shockwave, Smooth, Soyama

教授 祖山 均
〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01
東北大学大学院工学研究科ナノメカニクス専攻
材料メカニクス講座 知的計測評価学分野

泡で金属をたたいて強くするとは、キャビテーションという泡が水に戻るときに発生する衝撃力により、金属材料をたたいて強くする方法です。ふつうは小さな鉄球(ショット)を用いるのでショットピーニングと呼びますが、泡を使う場合はショットを用いないので、ショットレス(ショットなし)ピーニングと呼びます。キャビテーションピーニングでは、キャビテーション噴流により、キャビテーションの力を制御しています(図1参照)。

泡(キャビテーション)とは、水の速度の増大に伴い、圧力が下がり、水が泡になる現象です。高い山では100℃以下で沸騰(図2参照)します。温度が上がって水が泡になる場合を沸騰と呼びますが、速度の増大に伴う圧力の低下により水が泡になる現象をキャビテーションと呼びます(図3参照)。速度が下がって、泡が水に戻るときに、泡の一部が変形してマイクロジェットを生じたり、ごく短時間で泡が再び大きくなるために衝撃波を発生して、金属も凹ますような力を発生します。特に小さな泡が集まったキャビテーションは、大きな力を生じるようです(図4参照)。弱いキャビテーションはメガネの洗浄などにも使われています。

エネルギー保存則

【速度のエネルギー】+【圧力のエネルギー】=一定

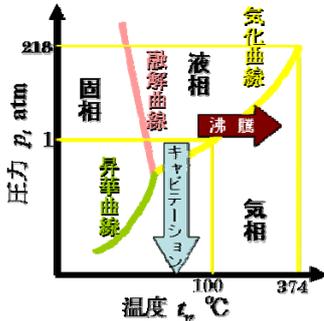


図3 水の状態図

泡でたたいて強くする利点は、以下の点があげられます。

- (1) ショットを用いないので表面が滑らか(図5参照)。
- (2) ショットを用いないのでゴミが出ない。
- (3) ショットを分けたり回収する必要がない。
- (4) 硬い材料も加工できる。
- (5) 管の内部や狭い部分なども処理できる。
- (6) 加工時に熱を発生しない。
- (7) 凹みの形状(凸部少)から摩擦特性がよい(図6参照)。
- (8) 水のみで処理できる。
- (9) アルミニウムなどを処理した後に化学洗浄をする必要がない。
- (10) ウォータージェットよりも低圧のポンプで処理できる。
- (11) ウォータージェットよりも加工範囲が広い。

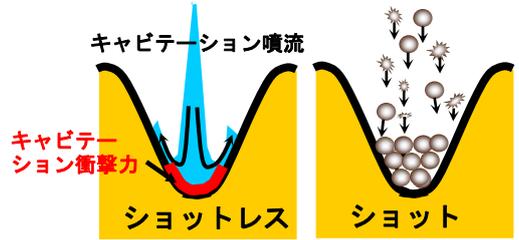


図1 ショットレスピーニングとショットピーニング

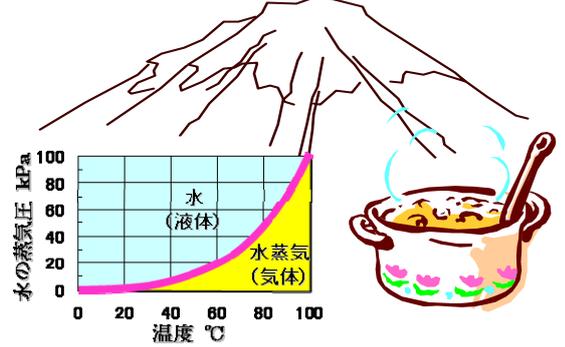


図2 高い山では100℃以下で沸騰

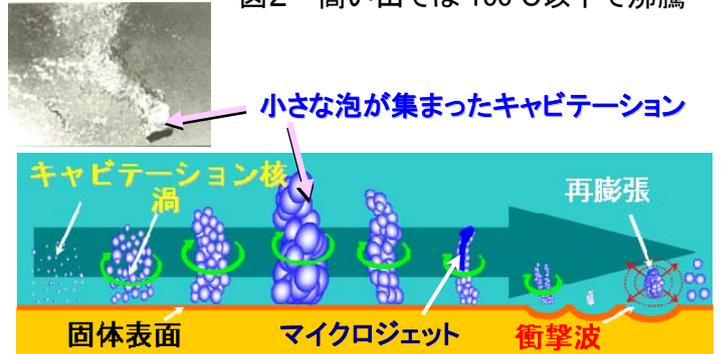


図4 キャビテーションの説明図

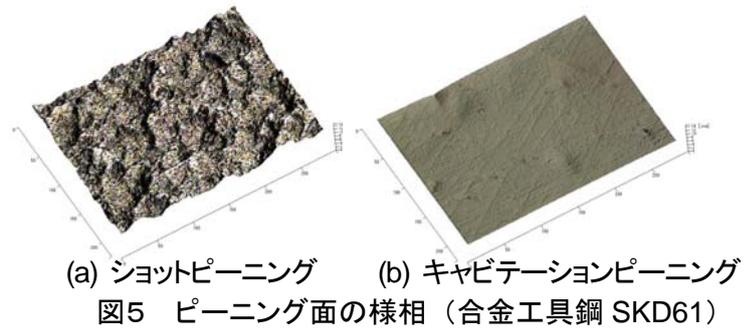


図5 ピーニング面の様相(合金工具鋼 SKD61)

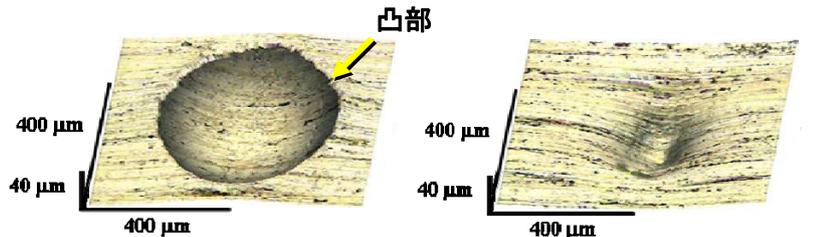


図6 アルミ上の凹みの形状(凹部の体積と深さが等しい場合)

キャビテーション噴流

とは、水中にウォータージェットを噴射したときに生じるキャビテーションを伴う噴流です。ウォータージェットのまわりに渦が発生し、その渦中心部の圧力が低下して渦キャビテーションが生じます。これが下流に流れるときに合体して大きなキャビテーション気泡雲を形成します。加工する面にキャビテーション気泡雲が衝突するとリング状に広がった後、水に戻ります(図7で白く見えるのがキャビテーションです)。大気中に低速のウォータージェットを噴射して、その中心部に高速のウォータージェットを噴射することにより、大気中にキャビテーション噴流を形成でき、これを気中キャビテーション噴流と呼びます。これに対して、水中にウォータージェットを噴射した場合を、水中キャビテーション噴流と呼んでいます。なお、最適噴射条件の気中キャビテーション噴流は、水中キャビテーション噴流よりも加工能力が高いことがわかっています。

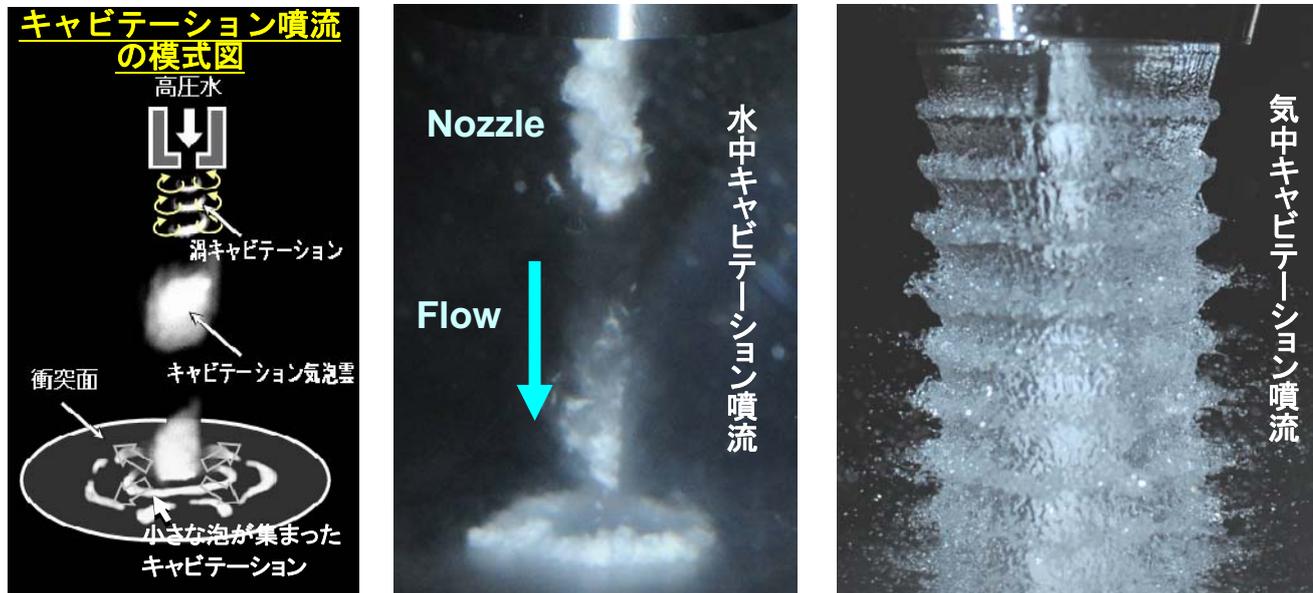


図7 キャビテーション噴流の概要ならびに様子

図8には、ウォータージェットの噴射圧力を同じにして、同じノズルを用い、一定時間、最適なスタンドオフ距離においてアルミニウム製の試験片に、それぞれの噴流を噴射した様子を示します。壊食量大きいほど、噴流の加工能力が大きいとすれば、ウォータージェット(気中水噴流)よりも水中キャビテーション噴流や気中キャビテーション噴流のほうが加工領域が広いので、ピーニングに適しているといえます。また気中キャビテーション噴流が最も加工能力が大きいといえます。なおピーニング時は、壊食を生じる前に加工を終るので、損傷は生じません。

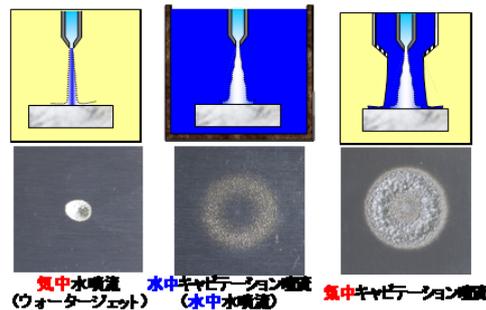


図8 各種噴流の加工領域と加工能力

疲労強度向上

について、図9に示します。キャビテーションピーニングの方がショットピーニングよりも107回における疲労強度を向上できます。主な理由は、図10に示すように、キャビテーションピーニングの方が、ショットピーニングよりも表面が滑らかなためです。



図10 加工面の様相

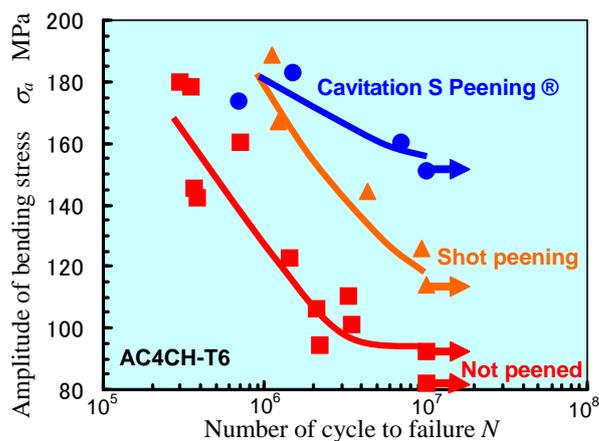


図9 疲労強度向上

- H.Soyama et al., Use of Cavitating Jet for Introducing Compressive Residual Stress, *J. Manufacturing Science and Eng., Trans.ASME*, Vol.122, 2000, pp.83-89.
- H.Soyama et al., Peening by the Use of Cavitation Impacts for the Improvement of Fatigue Strength, *Journal of Materials Science Letters*, Vol.20, 2001, pp.1263-1265.
- H.Soyama et al., Improvement of Fatigue Strength of Aluminum Alloy by Cavitation Shotless Peening, *J. Eng. Materials & Technology, Trans.ASME*, Vol.124, 2002, pp.135-139.
- H.Soyama, Introduction of Compressive Residual Stress Using a Cavitating Jet in Air, *J. Eng. Materials & Technology, Trans.ASME*, Vol.126, 2004, pp.123-128.
- H.Soyama et al., Fatigue Strength Improvement of Gears Using Cavitation Shotless Peening, *Tribology Letters*, Vol. 18, 2005, pp.181-184.
- H.Soyama, High-speed Observation of Cavitating Jet in Air, *J. Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol. 127, 2005, pp. 1095-1101.
- H.Soyama, Improvement of Fatigue Strength by Using Cavitating Jets in Air and Water, *J. Mater. Sci.*, Vol. 42, 2007, pp. 6638-6641.
- H.Soyama et al., Improving the Fatigue Strength of the Elements of a Steel Belt for CVT by Cavitation Shotless Peening, *J. Mater. Sci.*, Vol. 43, 2008, pp. 5028-5030.
- H.Soyama and N.Yamada, Relieving Micro-Strain by Introducing Macro-Strain in a Polycrystalline Metal Surface by CSP, *Mater. Lett.*, Vol.62, 2008, pp.3564-3566.
- H.Soyama and Y.Sekine, *International Journal of Sustainable Engineering*, Vol. 3, No. 1, 2010, pp. 25-32.
- H.Soyama et al., *Surface & Coatings Technology*, Vol. 205, 2011, pp. 3167-3174.
- H.Soyama and O.Takakuwa, *Journal of Fluid Science and Technology*, Vol. 6, 2011, pp. 510-521.

平成24年12月4日
次世代自動車宮城県エリア 人材育成プログラム
Advance phase 基礎

金型や部品の疲労寿命向上に役立つ表面強化技術 一泡で金属を叩いて強くする

東北大学大学院工学研究科
祖山 均

祖山ほか, 自動車技術会論文集, Vol. 34, No. 1, 2003, pp. 101-106. 【自動車技術会論文賞受賞】

祖山ほか, 機論, 60B, 1133 (1994).

H.Soyama, J. Fluids Eng., 127 (2005)

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

- はじめに
ショットを使わないピーニングCavitation S Peening®
- キャビテーション
強力なキャビテーション一列キャビテーション
キャビテーション噴流
ウォータージェットとの相違
- Cavitation S Peening®の効果
特徴: 衝撃波による加工
疲労強度向上
ショットピーニングとの比較
マクロ歪とマイクロ歪
- Cavitation S Peening®の支配因子
- おわりに

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

ショットを使わないピーニング キャビテーション・ショットレス・ピーニングCSP

Cavitation S Peening®

Shotless Shock wave Smooth surface SOYAMA
登録年月日: 平成14年6月21日

ショット・ピーニング
キャビテーション
ピーニングCP
泡で叩いて強くする

Rough ショットピーニング Smooth ショットレスピーニング

泡で叩いて強くする

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

「キャビテーション」とは?

水中 キャビテーション気泡 再膨張
固体表面 マイクロジェット 衝撃波

減圧 加圧
キャビテーションの発達・崩壊の模式図

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = \text{const}$$

速度 圧力 揚程

圧力 P_i , atm
温度 T , °C

昇華曲線 融解曲線 凝縮曲線
単一球状気泡 L.A.Crum, J. Phys., C8-285 (1979).

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of

キャビテーションの発生方法とは?

→キャビテーション噴流

自由噴流の様相

群列キャビテーション
リング渦キャビテーション
せん断層内の渦キャビテーション

高速水噴流

ノズル キャビテーション気泡雲
衝突面

衝突噴流の様相
祖山, 材料, 47 (1998), pp. 381-387.

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

Cavitation S Peening®の効果 鍛造用金型の表面改質

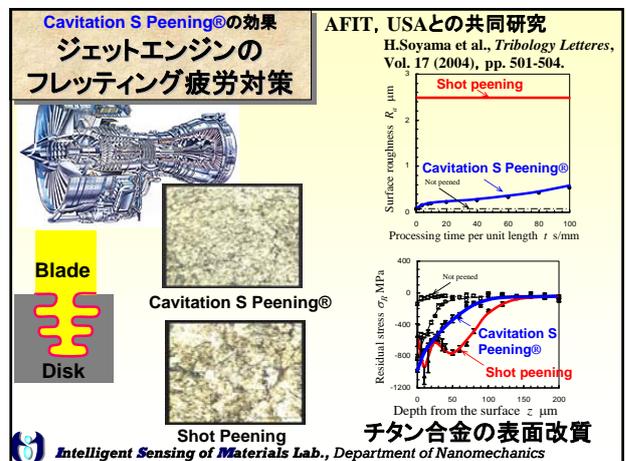
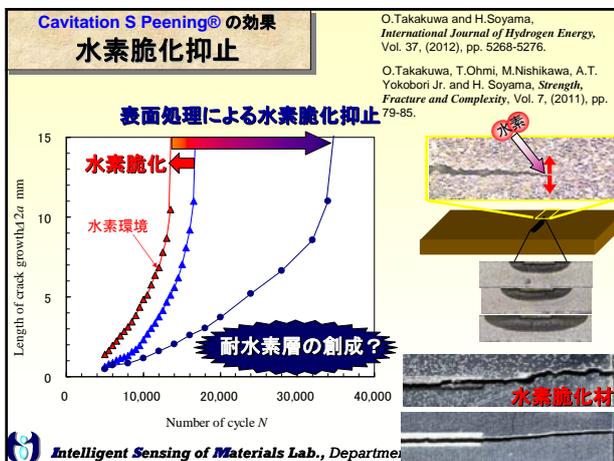
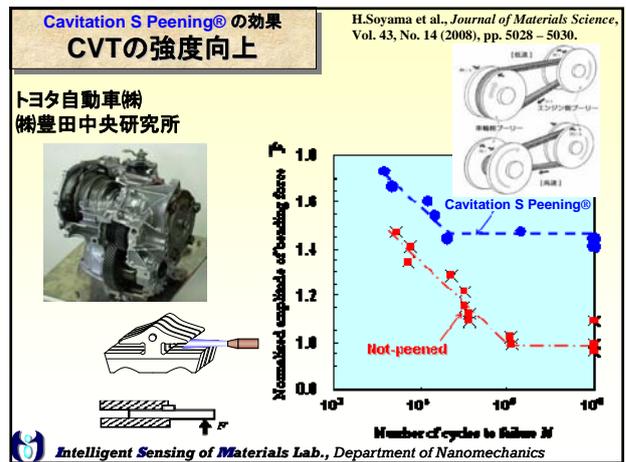
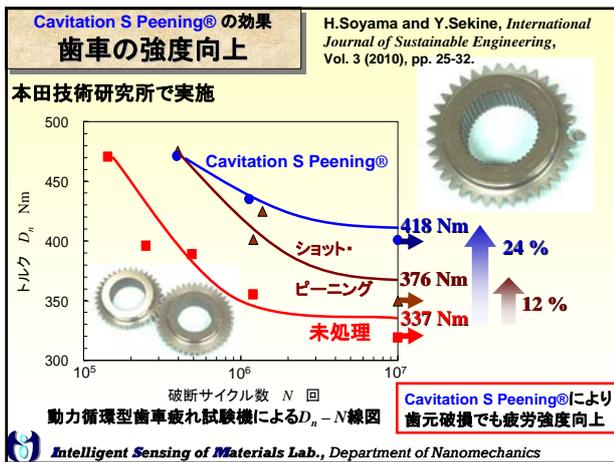
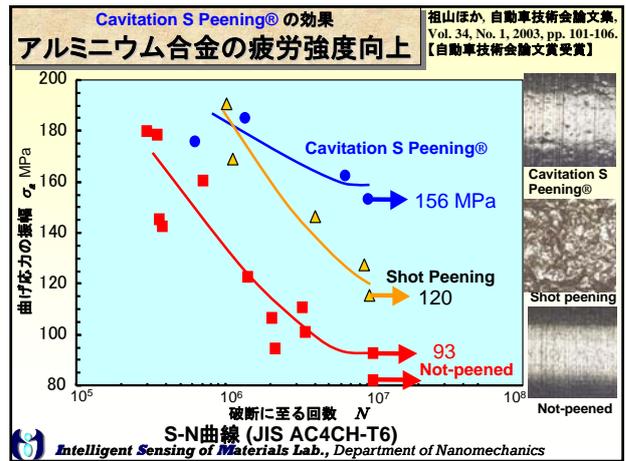
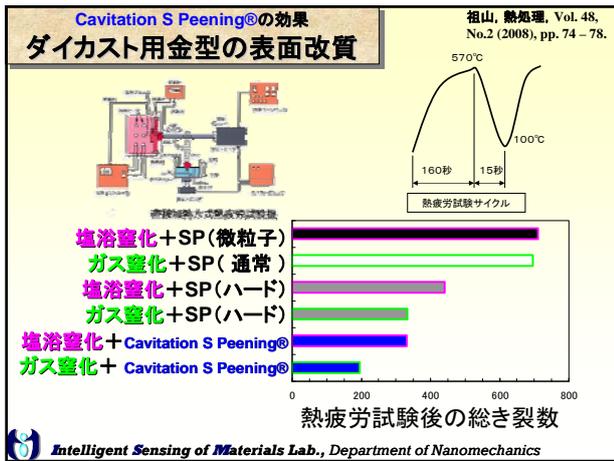
祖山ほか2名, 鍛造技報, 82 (2000), pp. 53-57.

Forging die 疲労き裂 圧縮残留応力の導入
Material 鍛造材
Forging die 摩耗 加工硬化

Peened area

金型寿命の向上

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics



Cavitation S Peening®の用途 電磁鋼板の降伏応力向上

O. Takakuwa, M. Nishikawa and H. Soyama
Technique for Partially Strengthening Electrical Steel
Sheet of IPM Motor Using Cavitation Peening,
Materials Science and Technology, (2011)

ハイブリッドカー、電気自動車のモータ性能の向上

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

ノズル形状の影響

H. Soyama et al., *Proc. 21st International Conference on Water Jetting*, (2012)
H.Soyama, *Wear*, DOI:10.1016/j.wear.2012.11.008

Mass loss changing with erosion time of various nozzles
(SUS316L, $p_1 = 30\text{MPa}$, $p_2 = 0.42\text{MPa}$, $\sigma = 0.014$)

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

噴射圧力とノズル径の影響

H. Soyama and O. Takakuwa
Journal of Fluid Science and Technology, 6 (4), (2011), 510-522

Residual stress σ_k (MPa)

Depth from the surface z (μm)

Not-peened

Peened surface

Standoff distance

Damage

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

気中キャビテーション噴流

H.Soyama, *Journal of Fluids Engineering, Trans. ASME*, 127 (2005), pp. 1095-1101.

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

キャビテーション衝撃力の計測

H.Soyama and H.Kumano, *J. Testing and Evaluation*, Vol. 30 (2002), pp. 421-431.
H.Soyama et al., *J. Fluids Eng., Trans. ASME*, Vol. 120 (1998), pp. 712-718.

キャビテーション衝撃力計測装置

計測した衝撃エネルギーと壊食率種の相関

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

まとめ

キャビテーションを活用すれば、シットなしで金属材料の強度(疲労強度, 降伏応力)を向上できる。群列キャビテーションの衝撃力が大である。水槽を用いない気中キャビテーション噴流が実現可能で、しかも加工能力が大きい。キャビテーションピーニングでは表面粗さの増大が少ない。キャビテーションピーニングにより、圧縮残留応力を導入しながら、マイクロ歪を低減できる。キャビテーションピーニングでは、高噴射圧力・小口径のキャビテーション噴流よりも、低噴射圧力・大口径のキャビテーション噴流が好適である。

祖山 検査

Intelligent Sensing of Materials Lab., Department of Nanomechanics

平成 24 年 12 月 4 日

工学研究科 系横断型研究会「表面力学設計研究会」

代表者 教授 祖山 均 (ナノメカニクス専攻)
世話人 教授 澤田恵介 (航空宇宙工学専攻,
研究企画会議委員)

下記の系横断型研究会を企画いたしました。ご興味をお持ちの方は奮ってご参加ください。

開催日時：平成 25 年 1 月 29 日(火) 13:30~17:00

開催場所：工学研究科総合研究棟会議室 2 (205)

<http://www.eng.tohoku.ac.jp/map/?menu=campus&area=c&build=10>

研究会次第：

研究会代表挨拶

13:30~13:40

研究会の概要

ナノメカニクス専攻 祖山 均 教授

13:40~14:40

「ショットピーニングの現状」

新東工業株式会社 小林 祐次 氏

(休憩)

15:00~15:40

「電磁現象を用いた材料評価技術の開発」

量子エネルギー工学専攻 遊佐 訓孝 准教授

15:40~16:20

「オーステナイト系低炭素ステンレス鋼溶接境界部における応力腐食割れ進展・停留挙動」

量子エネルギー工学専攻 阿部 博志 助教

16:20~17:00

「コーティングによる表面の機能化」

ナノメカニクス専攻 竹野 貴法 助教

なお、29日夕方より講演者を交えた懇親会を企画しています。

表面力学設計

検索



ご参加希望の方は、祖山(soyama@mm.mech.tohoku.ac.jp)宛に、1月18日(金)までに、
御参加者の御所属と御氏名を御連絡ください。

問い合わせ先：工学研究科ナノメカニクス専攻

祖山 均 (soyama@mm.mech.tohoku.ac.jp)