

平成 30 年 5 月 14 日現在

機関番号：53401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K06472

研究課題名(和文) フェムト秒レーザーによるナノ構造付与高機能低温表面改質合金の創製

研究課題名(英文) Development of the high performance alloys surface-treated at relatively low temperature due to femtosecond-laser-induced nanostructuring

研究代表者

安丸 尚樹 (YASUMARU, Naoki)

福井工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号：90158006

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：系ステンレス鋼の低温硬化層(浸炭・窒化)、純チタン、硬質薄膜の表面にフェムト秒レーザーを照射し、ナノ構造を各種サイズで平面状に均一加工する条件を明らかにした。耐食性に優れる低温硬化層は熱影響を受けやすいが、ナノ構造を加工しても耐食性がほとんど劣化しないことを確認した。また、照射面の腐食電流密度がフルーエンスに依存して変化することが判明し、ナノ構造形成による表面積の増加割合を評価する新手法として応用できることを示した。チタンの低強度照射面には偏光方向に平行な超微細な周期構造が観察され、通常のナノ構造形成面には化学合成が困難なセルロース系の有機膜が形成することを見出した。

研究成果の概要(英文)：Femtosecond-laser-induced nanostructuring of low-temperature hardened (nitrided or carburized) austenitic stainless steels, pure titanium and hard thin films are reported. The polarization curves were measured for these stainless steels ablated by fs-laser pulses, and it turned out that the passive current density increased by the laser irradiation because of the increase of surface area due to the formation of the nanostructure and the corrosion resistance hardly changed. It should be noted that the measurement of the polarization curve can be applied as a simple method to evaluate the rate of increase in surface area due to the formation of the nanostructure. For fluences slightly below the ablation threshold (Fth), ultrafine nanostructures were produced on Ti aligned parallel to the laser polarization direction. For fluences above Fth, the ordinary perpendicular-oriented nanostructures were formed and covered with a substance similar to a cellulose derivative.

研究分野：材料工学、表面改質、レーザー加工

キーワード：フェムト秒レーザー アブレーション ナノ構造 ステンレス鋼 低温窒化 低温浸炭 チタン トライボロジー

1. 研究開始当初の背景

申請者らは、フェムト秒レーザーを応用し、DLC（ダイヤモンド状炭素）等の硬質薄膜表面に周期的微細構造（ナノ構造）を簡便に加工する先進技術を開発し、特許化した。さらにこのナノ構造の形状を制御し、均一に大面積加工する技術とトライボロジー分野に応用する基盤技術の開発を継続して実施してきた。また、研究代表者は、鉄合金の窒化層表面に硬質薄膜を被覆する複合処理や高靱性窒化物膜の開発により、耐久性を向上させる研究を行ってきた。

2. 研究の目的

本研究では、過去の研究成果を基に、チタンおよび鉄合金の低温窒化・浸炭層および窒化物薄膜表面にナノ構造を各種パターンで加工する技術、さらに DLC 等の固体潤滑膜を被覆する複合表面改質技術を開発し、耐摩耗性、耐疲労性、摺動性、離型性、耐かじり・焼付き性、耐食性、生体親和性、低反射率等に優れ、環境負荷物質を低減した先進的高機能表面改質技術の開拓を目的としている。

3. 研究の方法

γ 系ステンレス鋼（SUS304、SUS316）の低温硬化層（浸炭・窒化）や純チタン、一部はさらに窒化物膜（CrN、TiN 等）や固体潤滑膜（DLC）を被覆し、表面にフェムト秒レーザーを照射する。まず、レーザーのスポット固定照射により形成される照射痕の形状を SPM により計測し、各種材料の加工速度やアブレーション閾値を求める。また、ナノ構造の形状変化および間隔のフルーエンス依存性を FE-SEM により計測する。さらに、機械的特性を調べるために必要な、ナノ構造を平面状に均一に加工する条件を確立する。平面状のナノ構造に対してもナノ構造の間隔を計測し、フルーエンス依存性等を明らかにする。

ナノ構造の機械的特性については、応用面で期待される SUS316 ステンレス鋼の低温硬化層（浸炭・窒化）や DLC 膜との複合改質層について、特に本研究で購入した電気化学計測システムにより耐食性を重点的に評価する。まず、自然電位とアノード分極曲線を測定し、熱影響による耐食性の劣化が懸念される低温浸炭・窒化層に対しては、レーザー照射による耐食性の変化を詳細に測定する。

平成 27 年度に純 Ti の低強度照射時に偶然見出したレーザーの偏光方向に平行な超微細な周期構造については、物性評価を継続して行い、未処理または低温窒化・浸炭されたステンレス鋼、TiN や CrN 等の窒化物膜や DLC 膜でも同様な現象が確認されないか検証実験を行う。また平成 28 年度に、Ti に加工されたナノ構造表面に、セルロース系の有機物膜が形成されていることを見出したため、X 線光電子分光分析装置 XPS や飛行時間型二次イオン質量分析装置 ToF-SIMS を用いて、詳細な表面分析を実施する。

得られた研究結果は取りまとめ、国内外の学会等で複数回研究成果の発表を行う。

4. 研究成果

γ 系ステンレス鋼（SUS304、316）の低温硬化層（浸炭・窒化）およびステンレス鋼や純 Ti に被覆した窒化物膜（CrN、TiN 等）や固体潤滑膜（DLC）の表面にフェムト秒レーザーを照射し、ナノ構造を平面状に均一に加工する条件を明らかにした。

ナノ構造の特性は、SUS316 鋼の低温浸炭・窒化層を重点的に調べた。電気化学測定システムを用いた分極曲線測定による耐食性評価については、低温硬化層は通常の窒化層に比べてはるかに耐食性に優れ、未処理のステンレス鋼とほぼ同等であること、低温窒化より低温浸炭の方が耐食性に優れることなどを明らかにした。また、熱影響を受けやすい低温硬化層に対し、フェムト秒レーザーによりナノ構造を加工しても耐食性がほとんど劣化しないことを確認した。さらに照射面の腐食電流密度が、レーザーフルーエンスに依存して変化することが判明し、ナノ構造形成による表面積の増加割合を評価する新規手法として応用できることを示した。

純 Ti の低強度照射面で見出したレーザーの偏光方向に平行な超微細な周期構造については、XPS や ToF-SIMS による表面分析により、表面状態としては未処理面に近いこと、通常のナノ構造形成面には化学合成が困難なセルロース系の有機膜が形成されることを見出し、欧文論文誌に投稿し掲載された。また、この超微細なナノ構造は、未処理のステンレス鋼には加工されるが、表面硬化層や DLC 等の硬質薄膜では形成されないことが判明した。

得られた研究成果は、海外の国際会議で 2 件、国内の学術講演会等で 7 件の講演発表を行った。新たに見出した (1) 偏光方向に平行な超微細周期構造とセルロース系有機膜のレーザー合成、(2) 低温浸炭・窒化層のナノ構造と (3) ナノ構造形成面の電気化学的手法による表面積増加割合の評価法については、今後も研究を継続し、国際会議や論文等に発表する。

特に、(1) の有機膜合成に関する論文が、国際的な先端研究紹介 Web サイト AIE に掲載された。また、(2)、(3) の一部は、6 月末に開催されるレーザー精密加工国際シンポジウム LPM2018（英国エジンバラ）にて発表する。

以下に (1)、(2)、(3) に関する論文の概要を順に掲載する。

(1) 偏光方向に平行な超微細周期構造とセルロース系有機膜のレーザー合成

(1)-1. 緒言

アブレーション閾値以上のフルーエンスで観察される通常のナノ構造は、レーザーの偏光方向に垂直に形成され、その間隔 D の最小値は、無機化合物ではレーザー波長 λ の $1/10 \sim 2/5$ 程度と小さい¹⁾。金属では、一般に $1/2\lambda$

以上を示す場合が多いが、純チタンおよびステンレス鋼では $1/3 \sim 2/5\lambda$ 程度になっている。一方、一部の金属において、アブレーション閾値以下のフルエンスで照射すると、偏光方向に平行な $D \sim 1/10\lambda$ 程度の超微細なナノ構造が形成されることが最近報告された。本研究では、純チタンで形成される超微細で平行なナノ構造と通常のナノ構造の相違点、及びナノ構造上に生成される有機層について、各種表面分析を用いて明らかにする。

(1)-2. 実験方法

試料は、鏡面仕上げした市販の純チタン板（厚さ 2 mm）を用いた。試料表面に、フェムト秒レーザーパルス（波長 $\lambda = 800$ nm, パルス幅 180 fs, くり返し周波数 1 kHz）を $F = 0.06 \sim 0.16$ J/cm² のフルエンスで、直径約 250 μ m のスポットで平面状に照射し、ナノ構造が形成された照射面を SEM, SPM, XPS, ToF-SIMS 等により分析した。SEM ではナノ構造の平均間隔 D を求めフルエンス依存性を調べた。SPM では照射面の表面粗さ, XPS では照射面の結合状態の変化を調べ, ToF-SIMS では照射面に形成された有機物の構造解析を行った。

(1)-3. 結果および考察

フェムト秒レーザーを (a) 0.07 と (b) 0.1 J/cm² のフルエンス F で照射したチタン表面のナノ構造の SEM 写真を 図 1 に示す。アブレーション閾値 F_{th} 以下の低フルエンスで照射された (a) では、レーザーの偏光方向に平行で、ナノ構造の間隔 D は約 66 nm と $1/10\lambda$ 程度の超微細なナノ構造が観察された。一方 F_{th} 以上の (b) では偏光方向に垂直な通常のナノ構造が形成され、ステンレス鋼より少し大きく $D \approx 350$ nm であった。

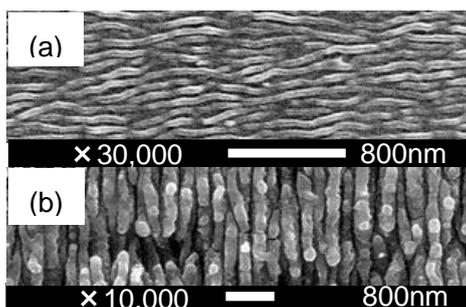


図 1 偏光方向に平行なナノ構造 (a) 0.07 J/cm² と垂直なナノ構造 (b) 0.1 J/cm².

この超微細なナノ構造と通常のナノ構造の違いを明らかにするために、SPM でレーザー照射面の粗さ R_{max} と R_a の変化を調べた。その結果、 R_{max} は平行で超微細なナノ構造が形成される 0.07 J/cm² で約 5 nm と未処理面より若干大きい程度であり、通常の垂直なナノ構造となる 0.1 J/cm² では約 60 nm と大幅に増加した。 R_a においても、 R_{max} の 1/4 程度の値で、同様な関係を示していた。

次に、 $F =$ (a) 0 (未照射), (b) 0.07, (c) 0.08,

(d) 0.1 J/cm² で照射された Ti 表面の結合状態を XPS により調べた。まず、Ti 2p スペクトルの比較から、試料表面には 5 nm 以上の TiO₂ のみが形成されていると判断された。

また、同じ 4 つの試料に対し行った C 1s スペクトルの比較を 図 2 に示す。この図より、 $F =$ (b) 0.07, (c) 0.08 J/cm² のスペクトルは (a) の未照射と同じで、大気由来の C-C と C-H 結合で構成されていた。一方、 $F =$ (d) 0.1 J/cm² では C-O 結合の高いピークが観察され、大気中に存在しない有機物が形成されていることが判明した。スペクトルピークの強度比から表面の有機膜の膜厚を見積もると、 $F =$ (a) 0, (b) 0.07, (c) 0.08 J/cm² では約 1.5 nm, $F =$ (d) 0.1 J/cm² では約 4.5 nm となり、3 倍程度に膜厚が増加していた。

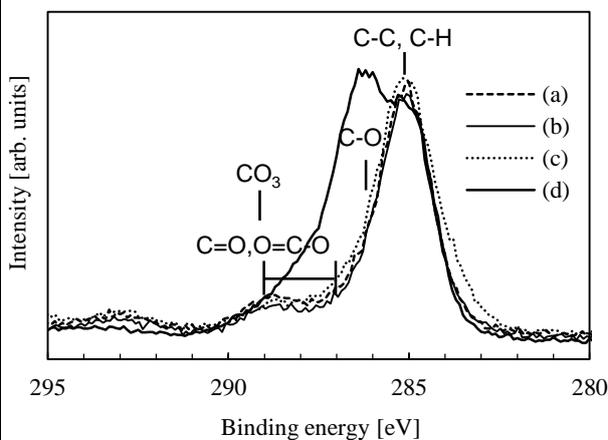


図 2 レーザー照射された Ti 表面の C 1s スペクトルの比較; $F =$ (a) 0, (b) 0.07, (c) 0.08 and (d) 0.1 J/cm².

この有機膜の化学的構造を明らかにするために、レーザー照射面の ToF-SIMS による表面解析が行われた。

図 3 は、 $F =$ (a) 0.07 と (b) 0.1 J/cm² の照射面で得られた負イオン ToF-SIMS スペクトルを示している。(a) の超微細で平行なナノ構造の方は CH-系や PO-系の保存環境に存在するフラグメントが観察されており、未照射面のスペクトルとほぼ同じであった。なお、TiO₃H は TiO₂ からのフラグメントである。

一方、(b) の通常の垂直なナノ構造の方は、主に CHO-系のフラグメントが観察されており、この結果は図 2 の XPS の結果と一致している。さらにこのスペクトルをエチルセルロースやアセチルセルロースの標準試料から得られた負イオン ToF-SIMS スペクトルと比較すると、ほぼ同じであることが判明した。従って、(b) の通常のナノ構造上に形成された有機膜は、セルロース誘導体に類似の有機物であると判断される。セルロースはバイオ技術を用いた製造法が報告されているが、通常の化学的合成法では困難なことが知られている。今回観察されたナノ構造上の有機膜は、レーザーによる新たなセルロース合成法の可能性を示唆している。

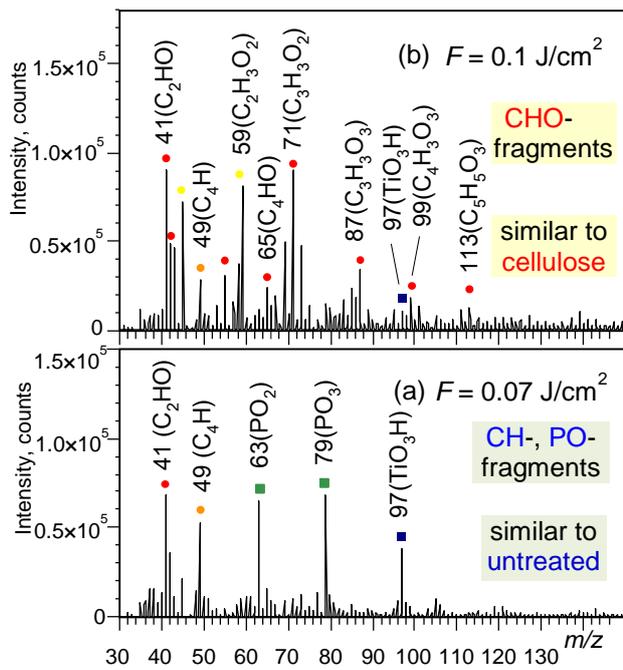


図3 レーザー照射されたTi表面の負イオンToF-SIMSスペクトルの比較; $F = (a) 0.07, (b) 0.1 \text{ J/cm}^2$.

(1)-4. 結言

純チタンでは、アブレーション閾値 F_{th} 近傍の低フルーエンスで、偏光方向に垂直な通常のナノ構造が形成され、 F_{th} より少し低いフルーエンスでは、偏光方向に平行な $D \approx 1/10\lambda$ 以下の超微細な周期構造が観察された。この超微細なナノ構造の表面物性が未処理表面に近いことから、通常のナノ構造と形成機構が異なると判断される。また、通常のナノ構造の表面にはセルロース系の有機層が存在することが判明した。

<引用文献>

- 1) 安丸尚樹, 宮崎健創, 木内淳介; レーザー研究, **33**, 519 (2005); 同 **37**, 504 (2009)。

(2) 低温浸炭・窒化ステンレス鋼のナノ構造

(2)-1. 緒言

本研究では、ステンレス鋼部品の耐久性や耐かじり性を向上させるために、ステンレス鋼に耐食性が劣化しない比較的低温で浸炭・窒化による表面硬化処理を行い、処理前後の試料表面にフェムト秒レーザーパルスを各種条件で固定照射し、形成されるナノ構造の形態の変化を詳細に比較分析した。

(2)-2. 実験方法

市販の γ 系ステンレス鋼 (SUS304, 板厚 2mm, 硬さ HV300, 以下未処理材) に比較的低温によるガス浸炭と窒化処理を行い、表面を硬化 (以下浸炭材 HV750, 窒化材 HV1000)

した。各試料表面を鏡面研磨処理後、フェムト秒レーザーパルス ($\lambda=800\text{nm}$, 180fs, 1kHz) をスポット径 $250\mu\text{m}$ に集光し、レーザー強度 P を 150mW から 500mW, パルス数 N を 10 から 500 まで変化させて固定照射した。次に、各試料表面に形成されるナノ構造の形態を SEM により観察した。特に、ナノ構造の平均間隔 D を求め、照射パルス数および強度依存性を調べた。

(2)-3. 実験結果および考察

各試料表面に、強度 P とパルス数 N を変化させてフェムト秒レーザーを照射し、表面に形成されるナノ構造を SEM により観察した。

図4に150mWの低強度時の、未処理材のナノ構造のSEM画像を示す。なお、図中矢印はレーザーの偏光方向を示す。図4(a)の低パルス数 $N=50$ では、偏光方向と平行で間隔 $D=70\text{nm}$ (約 $1/10\lambda$) の超微細なナノ構造が照射面全体で観察された。次に、 $N=200$ から偏光方向に垂直な通常のナノ構造が現れ、図4(b)の $N=300$ で $D=320\text{nm}$ を示した。 $P=200\sim 500\text{ mW}$ の高強度においては、パルス数 N に関係なく、偏光方向に垂直なナノ構造しか確認できなかった。

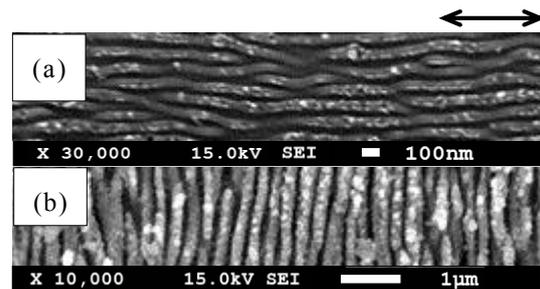


図4 150mW, $N = (a) 50$ and $(b) 300$ パルスで未処理材に形成されたナノ構造。

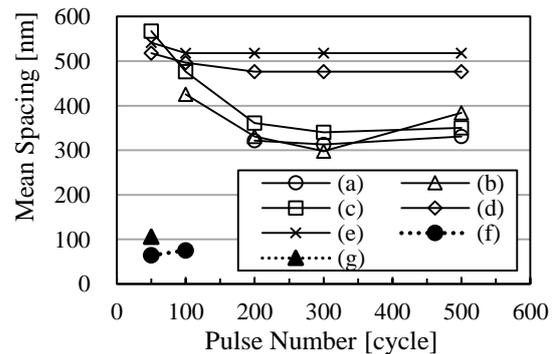


図5 $P = (a, f) 150, (b, g) 170, (c) 200, (d) 300, (e) 500\text{mW}$ で未処理材に形成されたナノ構造の平均間隔のパルス数依存性。

未処理材のパルス数 N に対する構造間隔 D の変化を図5に示す。図中の(f), (g)は偏光方向と平行な超微細構造の間隔を表している。なお、浸炭及び窒化材においては、どの条件においても超微細構造は確認できなかった。

次に高強度時には、未処理材と表面処理材でナノ構造の形態に違いが生じた。例として未処理と低温浸炭の 500mW, $N=500$ の SEM 画像を図 6 に示す。図 6 (a) のように、未処理では表面が熔融し平坦になり間隔 $D=520\text{nm}$ (約 $3/5\lambda$) 程度であるのに対し、(b)の低温浸炭の表面には熔融の痕跡は見られず、ナノ構造の凹凸と間隔がかなり大きくなり、 $N=500$ では $D=850\text{nm}$ (約 λ) と未処理の 1.6 倍に大きくなっていった。

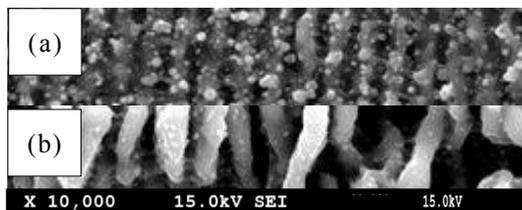


図 6 500mW, $N=500$ で(a)未処理材, (b)低温浸炭材に形成されたナノ構造。

(2)-4. 結 言

①SUS304 鋼の未処理材では、低強度、低パルス数において偏光方向に平行な超微細構造 ($D\sim 1/10\lambda$) が形成され、パルス数の増加と共に垂直なナノ構造へと変化していった。

②500mW の高強度時には、未処理材は熱影響で表面が平坦になり間隔 D が約 $3/5\lambda$ になるが、低温浸炭・窒化材では、ナノ構造の凹凸と間隔がかなり大きくなり、 D は λ と同程度になった。

(3) 電気化学的手法による耐食性評価とナノ構造形成面の表面積増加割合の評価

(3)-1. 緒 言

γ 系ステンレス鋼に高温または低温での窒化や浸炭処理を行い、電気化学測定システムにより分極曲線を求めて、腐食電流密度の変化から各試料の耐食性を評価した。さらにレーザーを照射し、低温窒化層や浸炭層表面にナノ構造を付与した場合の耐食性を分析した。また、レーザー強度を変化させて測定した腐食電流密度を比較し、ナノ構造付与による表面積増大効果について、簡便に評価する新手法としての可能性を検討した。

(3)-2. 試料及び実験方法

試料は、市販の鏡面研磨された板厚 2mm の γ 系ステンレス鋼 SUS304 (18Cr-8Ni) と SUS316 (17Cr-10Ni-2Mo) を用いた。一部は、低温窒化・浸炭処理により表面を硬化させた。処理方法としては、ガス窒化・ガス浸炭 (処理温度; $410^\circ\text{C}\cdot 470^\circ\text{C}$) により低温窒化・浸炭処理を行った。なお、比較のため通常の高温窒化 (処理温度 500°C) も行い、試料表面はダイヤモンドで鏡面仕上げを行った。

次に、窒化・浸炭後鏡面研磨した試料にフェムト秒レーザーを大気中で試料表面に照射した。照射条件としてスポット径 $250\mu\text{m}$ 、照射面積を 100mm^2 、レーザー出力を 170, 200, 500 mW とした。

上記の各種条件に対し、試料表面を測定面積

(25mm^2) だけ残してエポキシ樹脂で被覆し、電気化学測定システム (北斗電工(株), HZ-7000) により、1 規定 (N) 硫酸中で水銀硫酸水銀の照合電極に対し、自然電位とアノード分極曲線を測定 (走査速度; $20\text{mV}/\text{min}$) した。

(3)-3. 実験結果及び考察

(3)-3.1 窒化・浸炭による耐食性への影響

耐食性の評価は、主に不働態保持電流密度 (以下 I_p 値)、活性化電流密度 (以下 I_f 値)、自然電位 (以下 E_M 値) の変化によって評価する。

SUS304 鋼の未処理、低温窒化 (以下 LN)、高温窒化 (以下 HN)、低温浸炭 (以下 LC) の 4 つの試料に対し、1N 硫酸中での分極曲線を図 7 に示す。 I_p 値が最大の HN と最小の未処理を比較すると、HN の I_p 値は未処理の数 100 倍大きい。同様に、LN の I_p 値は未処理の約 5 倍大きく、LC はほとんど同じである。なお LC の特長として、自然電位 E_M 値が LC のみ約 200mV 増加し、 I_f 値は未処理より約 1 桁小さくなっていった。従って、LC の耐食性が最も良く、その次は未処理で、LN はさらに少し劣化し、HN は大幅に劣化する。

HN は処理中に CrN が析出し、Cr の固溶量が減少したため耐食性が低下した。LN や LC は窒素や炭素が過飽和に固溶し Cr の固溶量が減少しないため、未処理とほとんど耐食性は変わらない。

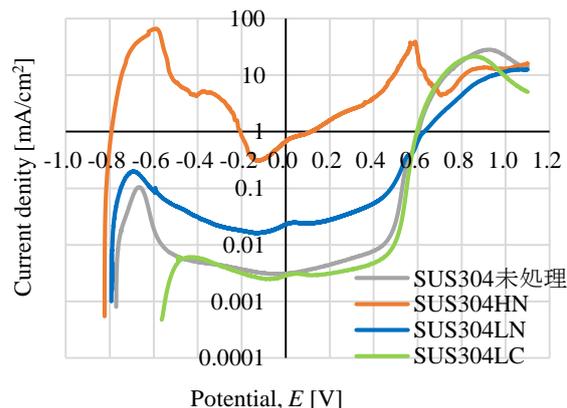


図 7 SUS304 未処理と HN, LN, LC の比較。

(3)-3.2 未処理材へのレーザー照射の影響

SUS304 鋼の未処理材にレーザーを強度 200mW, 500mW で照射した試料 (以下 L200, L500) に対し、同様な分極曲線のグラフを図 8 に示す。

図 8 で最大の I_p 値は、未処理に 500mW で照射した未処理+L500 で、次に未処理+L200, 未処理と続く。この結果から、強度が強いほど I_p 値が大きくなるのが分かる。レーザー照射時に I_p 値が変化するのは、試料表面にナノ構造が形成され、その凹凸により表面積が増加するからであり、表面積つまり腐食面積が大きいと I_p 値も大きくなる。また、レーザー強度が強くなると、試料表面のレーザー痕の深さやナノ構造の凹凸も大きくなる。そのため、レーザー強度が強くなると試料の表面積 (腐食面積) が増加し、L200 で 1.4 倍、L500 で 2.0 倍になった。従って、 I_p 値の変化は表面積の増加によるものであり、耐食性は変化しないと考えられる。

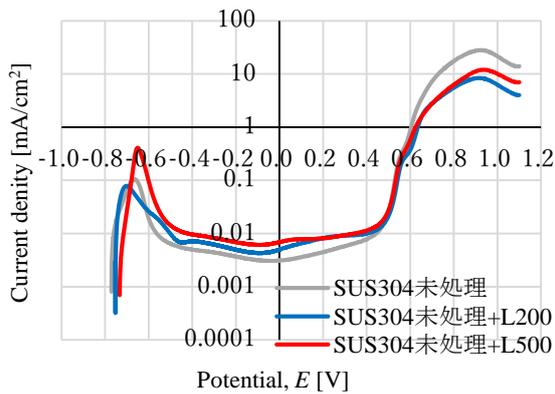


図8 SUS304 未処理へのレーザーの影響。

(3)-3.3 窒化・浸炭材へのレーザーの影響

SUS316 鋼に関し、LN, LN+L170, LN+L500 及び LC, LC+L200, LC+L500 の分極曲線を求め、 I_p 値のレーザー照射による変化の傾向を調べた。

LN については、LN+L170 は LN の約 3 倍、LN+L500 は約 5 倍 I_p 値が大きくなった。一方、LC についても、LC+L200 は LC の 1.7 倍、LC+L500 は約 3 倍大きくなったが、この傾向はナノ構造による表面積の増大が主な原因と考えられる。

(3)-4. 結 言

窒化 (高温と低温) 及び低温浸炭処理後の γ 系ステンレス鋼にフェムト秒レーザーを照射し、1 規定硫酸中の分極曲線の比較により以下の結論を得た。

①高温窒化は、未処理と比べ耐食性が大幅に劣化するが、低温窒化・浸炭処理した材料の耐食性は、未処理とほとんど変わらない。

②未処理と窒化の自然電位はほとんど同じであるが、低温浸炭では増加傾向を示す。

③フェムト秒レーザーを照射した全試料で、不動態保持電流密度 I_p 値が増加した。これは、試料表面の面積が、レーザーによるナノ構造形成により増加したためと考えられる。

④レーザーを照射した低温窒化や低温浸炭の I_p 値は高温窒化のように上昇しないことから、熱影響をほとんど受けないと考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 10 件)

- ① N. Yasumaru, E. Sentoku and J. Kiuchi: Formation of organic layer on femtosecond laser-induced periodic surface structures, 査読有, *Applied Surface Science*, Vol. 405, 2017, 267-272.
DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.084

- ② N. Yasumaru, E. Sentoku, H. Haga and J. Kiuchi: Surface analysis of femtosecond-laser-induced nanostructure, *Proceedings of LPM2016*, 査読無, 2016, 1-4.

〔学会発表〕 (計 9 件)

- ① N. Yasumaru, E. Sentoku and J. Kiuchi: Cellulose derivative film formed on femtosecond laser-induced periodic surface

structures: *ICASS2017 - The 2nd International Conference on Applied Surface Science*, 2017 年 6 月 14 日, 大連, 中国。

- ② N. Yasumaru, E. Sentoku, H. Haga and J. Kiuchi: Surface analysis of femtosecond-laser-induced nanostructure: *LPM2016 - The 17th International Symposium on Laser Precision Microfabrication*, 2016 年 5 月 24 日, 西安, 中国。

〔その他〕

国際的な先端研究紹介Webサイト"Advances in Engineering; AIE" に、研究成果; ナノ構造上の有機膜のレーザー合成 (*Applied Surface Science*, 405 (2017) 267) が、2017年10月より以下のURLで紹介されている。

<https://advanceseng.com/general-engineering/formation-organic-layer-femtosecond-laser-induced-periodic-surface-structures/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

安丸 尚樹 (YASUMARU, Naoki)

福井工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号: 90158006

(3) 連携研究者

加藤 寛敬 (KATO, Hirotaka)

福井工業高等専門学校・機械工学科・教授

研究者番号: 30311020

千徳 英介 (EISUKE, Sentoku)

福井工業高等専門学校・機械工学科・准教授

研究者番号: 10436834

宮地 悟代 (GODAI, Miyaji)

東京農工大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 30378905

(4) 研究協力者

木内 淳介 (KIUCHI, Junsuke)

アイテック㈱