

# レーザ誘起湿式表面改質法の開発と それを用いた医療用ステンレス鋼の 摩擦摩耗特性の向上

## 江面 篤志\*

キーワード:レーザ,表面改質,摩擦摩耗

## 1. 研究の目的と背景

近年,内視鏡を用いた腹腔鏡下手術では,患者の負担軽 減のために体にあける孔の小径化が進んでおり,それに伴 い,挿入する鉗子などの手術用器具は細径化している.組 織の把持,切断,縫合などの作業を行うため,鉗子は,曲 げやひねりなどの運動機能の付与が必要である.このため, 鉗子には微小歯車が使用されており,その摺動面には高い 耐摩耗性が求められている.鉗子の長寿命化のため,摺動 面には各種コーティングや熱処理などの表面改質を施す 必要があるが,小型鉗子に用いられる微小歯車は高精度形 状が要求されるため,基材全体を対象とした従来の表面改 質法では,要求精度を満たすことが難しい.そのため,歯 車の形状変化を最小限に留め,なおかつ表面改質処理が行 える局所改質法が求められている.

局所領域を対象とした表面改質には,局所加熱が行える レーザを用いたものがある<sup>1),2)</sup>. 例えば, 川澄ら<sup>3)</sup>は S45C 材に対しレーザによる焼入れ処理を行い,入熱量と焼入れ 深さの関係について明らかにしている. また, K.Nishinoら 4)は,窒素雰囲気中で純 Ti 材に対しレーザ照射による窒化 処理を行い、表面硬度が向上することを示した.しかし、 これらの研究事例で使用しているレーザは出力が大きく, 形成される改質層の厚さは数100 µm~数 mm のオーダー であるため、細径鉗子に用いられる歯車にとっては、過大 な処理となってしまう. このため、より局所的な表面改質 法の確立が必要である. 100 µm 以下の領域の表面改質に は低出力レーザを用いる必要があるが,低出力レーザによ る表面改質では, 改質層を形成する成分の供給が困難であ る. レーザによる窒化処理では、窒素ガス雰囲気が必要と なり, また, 粉末やめっきなど, 固体の状態での供給では 基材表面まで十分に加熱することができない. そのため, 拡散成分を溶液中に溶解させて供給する湿式法による新 たな表面改質法の提案を行う.

本研究では、細径鉗子などの医療機器に用いられるオー ステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 材に対する表面改質 を目指す.オーステナイト系ステンレス鋼は、焼入れによ る表面硬化及び耐摩耗性の向上が望めないため、異元素拡 散による表面改質処理が行われている.その中でも Al 成 分の拡散は多くの利点がある.熱処理を経て形成される Al-Fe金属間化合物やスピネル構造を有するFeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>など, Fe 成分とAl 成分を含む物質は,表面の硬さ<sup>5)~8)</sup>の上昇が 見込め,耐摩耗性<sup>9)~13)</sup>の向上が期待できる.本研究では, Al 成分を含む硝酸アルミニウム(Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>)水溶液に浸漬 させた SUS316L 材に対し,レーザ照射を行うことで,Al 成分を拡散させるレーザ誘起湿式表面改質法の開発を目 的として基礎実験を行い,形成される改質面の摩擦摩耗特 性について検討した.

## 2. 実験方法

#### 2・1 試験片と溶液

本研究では、試験片として表1に示す組成を有するオー ステナイト系ステンレス鋼 SUS316L を用いた. 同材を φ 15 mm×t4 mm の円盤形状に機械加工した後、耐水研磨紙 およびアルミナ懸濁液を用いた研磨により鏡面仕上げを 行った. 同材表面に Al 成分を拡散させた改質層の形成を 試みるため、Al イオンを含む Al(NO3)3 水溶液を用いるこ ととした. 溶液の濃度は 10 mass%とした.

		表	1 試懸	試験片の組成			(mass%)		
С	Si	Mn	Р	S	Ni	Cr	Мо	Fe	
0.018	0.28	1.25	0.037	0.023	12.0	16.25	2.00	Bal.	

#### 2・2 レーザ誘起湿式表面改質システムの構築

本研究で開発を目指すレーザ誘起湿式表面改質法は,基 材の変形を防止するため 10~30 µm 程度の改質層の形成 を目指すものである.そのため,低出力のパルス発振ファ イバーレーザユニット(YLP-1 IPG.co, 波長 1064 nm, パ ルス幅 100 ns)を用いた.当該装置は小型かつ軽量である ため,マシニングセンタなどの加工機に取り付けて使用で きる利点がある.図1のように当該ユニットを超精密加工 機(LINIMAX 東洋工学)に取り付け,加工機の駆動機構 を利用して図2に示すパターンでレーザ走査を行った.ま た,SUS316L試験片は図1のようにステージ上面に取り 付け,Al(NO<sub>3</sub>)<sub>3</sub>水溶液中に浸漬させた.基材が取り付けて あるステージは,治具に対しネジ部を介して挿入・固定さ れており,高さの微調整が可能である.本実験ではこの機 構を利用して試験片上面からの液面高さを 1 mm に設定 した.また、レーザ照射に伴い、溶液が蒸発し、液面高さ が変化するため、溶液浴には液送ポンプを接続し、液面高 さが一定となるようにしてある.



図1 改質処理システムの概略

#### 2・3 レーザ照射条件及び照射面の評価方法

本研究では、試料表面への入熱量の影響について調べる ため、レーザのデフォーカス量を変化させて実験を行った. レーザ照射条件の詳細を表2に示す.レーザ照射後、SEM を用いて試験片表面の観察および元素分析を行った.また、 照射面から深さ方向への拡散層の拡がりを観察するため、 照射面を切断し、SEM により断面方向の元素分析を行っ た.さらに形成した拡散層内のAl成分、Fe成分、O成分 の状態について検討するため、X線回折法(XRD)により 構造解析を行った.

表2 レーザ	照射条件
Wavelength	1064 nm
Pulse width	100 ns
Repetition frequency	35kHz
Power	9 W
Scan rate	50 mm/min
Focal distance	30 mm

つぎに被処理面の耐摩耗性を調べるため,往復摺動式 摩擦摩耗試験機を用いて摩擦摩耗試験を実施した.往復摺 動方式の摩擦摩耗試験の模式図を図3に示す.また,試験 条件を表3に示す.試験中には,試験機に搭載されたロー ドセルにより摩擦力を測定し,摩擦係数の推移を測定した.



図3 摩擦摩耗試験の模式図

試験後は,SEM を用いて摩耗痕を観察し,各試験片の摩 耗特性について検討を加えた.摩擦摩耗試験には,デ フォーカス量を 0,1,2 mm としてレーザ照射を施した 試験片のほか,比較として,レーザ照射を施していない試 験片と純水中でレーザ照射を施した試験片を用いた.

表 3	摩擦摩耗試験条件
Load	0.1 N
Friction width	3 mm
Friction speed	300 mm/min
Sliding distance	54000 mm

#### 2・4 傾斜面および円筒面へのレーザ照射実験

本研究では、実製品への適用のため、複雑形状に対して 処理を施すことを想定し、レーザ照射角が被処理面に及ぼ す影響について検討した.その後、照射角の影響を考慮し て円筒面へのレーザ照射処理を行った.図4のように処理 システムの傾斜治具に試験片を取り付け、溶液に浸漬させ た状態でレーザ照射を施した.レーザ照射角が90,80,70, 45 deg となるよう、0,10,20,45 deg の傾斜を有する治具 を金属粉末床積層造形装置によりそれぞれ製作した.この ときデフォーカス量が改質面に及ぼす影響について検討 するため、0.25~1.2 mm までデフォーカス量を変化させ てレーザ照射を施した.さらにφ15 mm の円柱形状の SUS316L 材を切り出し、図5に示すように液中処理シス テムに固定した.図6に示すレーザ走査パターンにてレー ザ照射を行い、処理面の表面粗さの評価を行った.レーザ 照射条件については表2と同様の条件を用いた.



図4 傾斜面へのレーザ照射実験の外観



図5 円筒面へのレーザ照射 実験の外観



## 3. 結果および考察

## 3・1 レーザ照射による改質層形成

溶液濃度10 mass%, レーザ出力9W, 走査速度50 mm/min デフォーカス量1 mm の条件でレーザ照射実験を行った. レーザ照射面に対し, EDX による成分分析を行った結果 を表4に示す.同表では, Al, O, Fe, Cr, Niの各元素を 足し合わせた値を100%とし, それぞれの元素の存在割合 を濃度換算している.表5より, 未照射領域と比較して, レーザ照射領域では, Al 成分, O 成分の割合が増加し, SUS316L 材を構成する Fe, Cr, Ni 成分が減少しているこ とがわかる.基材に最も多く含まれる Fe 成分と比較して, 溶液由来の Al および O 成分の割合が多くなっていること から,基材表面において反応が生じ,組成が大きく変化し たことが分かる.

表 4	表4 試験片表面の EDX 分析結果(%)							
	Al	0	Fe	$\mathbf{Cr}$	Ni			
Un-treatment area	-	1	68	16	15			
Treated area	33	47	14	4	2			

#### 3・2 X線回折法による改質層構成物の同定

前述の試験片で形成した拡散領域での各元素の結合状 態を調べるため,XRD による構造解析を行った.得られ た回折ピークを図7に示す.同図中の○で示したピークは SUS316L 由来のピークである.記号のあとの括弧内の数 値は,それぞれの回折ピークと対応する結晶方位である. 同図では○で示した SUS316L 由来のピーク以外に◆で示 した複数のピークが存在することがわかる.このピークは, レーザ照射により生成された物質の回折ピークであると 考えられる.データベースによると,これらの回折ピーク はスピネル構造を有する Fe と Al の酸化物である FeAbO4 の持つ回折ピークであることがわかった.Fe と Al のスピ ネル型酸化物は,高硬度かつ耐食性に優れることが知られ ており<sup>11)~13</sup>,本手法により形成された拡散層も同等の機 能を有すると推察され,耐摩耗性の向上が期待できる.

#### 3・3 デフォーカス量が改質層形成に及ぼす影響

つぎに、レーザエネルギ密度が変化した際の影響を明ら かにするため、0~3 mm までデフォーカス量を変化させて レーザ照射を行った試験片の断面を SEM により観察・分 析した.その結果を図8に示す.同図より、デフォーカス を0 mm とした場合では、基材表面が大きく加工され、大 きな凹凸が形成されていることがわかる.また、EDX 分 析結果から Al 成分は基材表面に存在するものの、明確な 改質層が形成されていないことがわかる.一方、デフォー カスを1 mm とした試験片では、デフォーカスを0 mm と した際よりも基材表面が加工されておらず、Al 成分が基 材表面に局在しており、明確な改質層が均質形成されてい ることがわかる.これは、焦点をずらすことで、エネルギ 密度が低下し基材の溶融を抑制しつつ,均一な加熱が行われたことを示している.また,デフォーカス量を2mmとした場合では,デフォーカスが1mmの時よりも薄い改質層が形成されていることがわかる.これはエネルギ密度の低下に伴い,基材への入熱量も低下したためであると考えられる.このことは,デフォーカス量の調整により,改質層の厚さを制御することができることを示している.また,デフォーカス量を3mmとした場合では,A1成分はほとんど検出されず,改質層が形成されていないことがわかる.このことにより,改質層が形成されるデフォーカス量の閾値は2から3mmの間に存在することがわかった.



図7 レーザ照射を施した試験片のX線回折パターン



図8 試験片断面の SEM 観察および EDX map 分析結果

#### 3・4 摩擦摩耗試験結果

溶液濃度10 mass%, レーザ出力9W, 走査速度50 mm/min の条件でデフォーカス量を0,1,2 mm としてレーザ照射 を施した試験片に対し,摩擦摩耗試験を実施した.摩擦摩 耗試験中の摩擦係数の推移を図9に示す.なお,同図には, 比較のため,レーザ照射処理を施していない試験片の摩擦 摩耗試験結果も示した.図9より,デフォーカス量を1お よび2 mm としてレーザ照射を施した試験片の摩擦係数は 小さく,デフォーカス量0 mm 及び,未処理材の摩擦係数 が大きいことがわかる.このことから,デフォーカス量を 1 および2mmとしてレーザ照射を施すことで,摺動性に 優れた改質面を形成できることがわかる.

また、摩擦摩耗試験後の摩耗痕について、SEM を用い て観察した結果を図10に示す.同図より、デフォーカス 量を1および2mmとしてレーザ照射を施した試験片に形 成された摩耗痕の幅は狭く、デフォーカス量0mmおよび 未処理材に形成された摩耗痕の幅が広いことがわかる.こ のことから、デフォーカス量を1および2mmとしてレー ザ照射を施すことで、高い耐摩耗性を有する改質面を形成 できることがわかった.





(c) デフォーカス量2 mm(d) 未処理材図10 摩擦摩耗試験後の摩耗痕の SEM 観察結果

#### 3・5 傾斜面へのレーザ照射実験結果

傾斜治具を用いて, 試験片表面に対するレーザ照射角を 45, 60, 70, 80, 90 deg として Al(NO<sub>3</sub>)3 水溶液に浸漬させた SUS316L 試験片に対してレーザ照射を施した.レーザ照 射後の被処理面の表面形状を調べるため, それぞれの試験 片に対して SEM を用いて観察を行った.その結果を図1 1に示す.同図より, レーザ照射角の減少とともに被処理 面に形成される凹凸の幅が大きくなり, 照射角が 45 deg の ときの被処理面はなめらかであることがわかる。これは, レーザ照射角の減少に伴い, レーザの反射率が大きくなり,



試験片表面へのレーザの吸収率が低下し,試験片の溶融が 抑制されるためであると考えられる.

次に,各レーザ照射角度におけるデフォーカス量の影響 について検討するため、デフォーカス量を 0.25 から 1.2 mm まで変化させてレーザ照射を施した.レーザ照射領域 の算術平均粗さ Ra を測定した結果を図12に示す.同図 より、全ての照射角において、デフォーカス量の増大に伴 い、被処理面の表面粗さが低下することがわかる.これは、 デフォーカス量の低下により、レーザスポット内のエネル ギ密度が低下し、試験片表面への入熱量が減少したためで あると考えられる.

3.3 項では、デフォーカス量を変化させ、レーザエネル ギ密度を低下させることで,形成される改質層の厚さが減 少することを明らかにしている.このとき、エネルギ密度 の低下に伴い, 被処理面の表面粗さも低下した. レーザ照 射角を変化させてレーザ照射を施した被処理面の表面粗 さも低下しており,形成された改質層の厚さも低下してい ることが推測される.レーザ照射角が連続的かつ不規則に 変化するような複雑形状を有する被処理物に対して,レー ザ誘起湿式表面改質法を適用し,均質な改質層の形成を試 みる場合には、照射角とともに変化するレーザ吸収率の変 化に合わせ、試験片表面に入力されるエネルギ量を均一に 保つ手法が必要である.デフォーカス量と形成される被処 理面の表面粗さの相関を示した図12から,同等の表面粗 さを有する被処理面を形成可能なデフォーカス量を読み 取ることができる.図13に被処理面の算術平均粗さ Ra が 0.8 µm 程度(図12中破線)となるデフォーカス量を プロットした結果とプロット点から求められる近似曲線 を点線で示す. 求められた近似曲線の方程式を式(1)に示 す.

#### $D = 0.0003\theta^2 - 0.0235\theta + 0.915 \tag{1}$

式中の θ はレーザの照射角, D は各照射角において被処 理面の Ra が 0.8 µm となるデフォーカス量である. 複雑 形状に対応する場合には,レーザが照射される箇所の照 射角 θ を式(1)に代入することで求められるデフォーカス 量 D となるようレーザの焦点位置を調整しながら処理を 施すことで,均質な改質層を形成することができると考 えられる.

## 3・6 円筒面に対する改質処理

円筒形状を有する SUS316L 材に対して,前項で求めた 補正式により求められるデフォーカス量となるよう走査 経路を補正してレーザ照射を施した.図14にレーザ照射 後の被処理面に対して表面粗さ測定を行った結果を示す. なお,同図には補正を行わず,一定のデフォーカス量で レーザ照射を施した結果についても示した.同図(a)より, 補正を行っていない試験片の表面粗さは均一ではなく, レーザ照射角が 90 deg となる円筒の頂点付近で最も大き く,頂点から離れ,レーザ照射角が減少する部位では,表 面粗さが低減していることがわかる.一方,図14(b)より, デフォーカス量の補正を行ってレーザ照射を施した試験 片の被処理面は比較的均一な表面粗さが得られており,補 正の効果が見られた.

#### 3・7 ミスト供給方式レーザ誘起湿式表面改質処理法

これまで取り扱ってきた浸漬方式(導入したい成分を含 む溶液中に浸漬させた基材に対してレーザ照射を施す方 式)のレーザ誘起湿式改質法は,導入元素を安定的に供給

できるため、改質層形成メカニズムの解明や各パラメータ が改質層に及ぼす影響などを検討する場合には有用な手 法であると言える、しかし、歯車やクランクシャフトなど の機械部品は複雑な形状を有しており,浸漬方式を用いる ことを想定すると, 被処理材の形状に合わせた専用の溶液 浴が必要であること, さらに溶液中にて被処理材を回転お よび揺動させる機構を付加しなければならないことなど 課題が多い. そこで, 実製品に適用するため, 溶液をミス ト状にして供給するミスト供給方式を考案した 14), 15). 構 築したミスト供給システムの概略を図15に示す.同図中 のコンプレッサから排出される圧縮空気はノズル内で溶 液と混合され,突出されることにより溶液をミスト状にし てレーザ照射領域に供給することが可能である.このとき, 溶液は試験片表面上を直径 100~200 µm 程度の水滴と なって連続的に流れる.この表面改質処理システムは、マ シニングセンタや複合旋盤などの工作機械に容易に搭載 可能であるため、従来の製造プロセスに組み込み、複合的 なプロセスの構築が可能である.

図16にミスト供給システムを用いて、オーステナイト 系ステンレス鋼 SUS316L 材に対して、濃度 10 mass%の Al(NO<sub>3</sub>)3水溶液ミストを供給しながら、出力9W, 走査速 度 50 mm/min, デフォーカス量1mm としてレーザ照射を 施した被処理面の断面に対して SEM による観察および EDX 分析を行った結果を示す. なお比較として、従来の 浸漬方式により処理を施した試験片断面の観察・分析結果 についても示した.ここでは、ミスト供給方式で処理を施 した試験片を MD シリーズ,浸漬方式により処理を施し た試験片を SD シリーズと呼称する. 同図より、溶液の供 給方式とは無関係に、表面近傍のレーザ影響部には、Al お よび O 成分を含む均質な層が形成されていることがわか



図14 円筒面へのレーザ照射後の表面粗さ測定結果

る. 形成された改質層の中には空孔はほとんど認められない. 改質層の厚さに注目すると、ミスト供給方式を用いて 処理を施した MD シリーズの厚さは、浸漬方式で処理を 施した SD シリーズよりも薄い. これは、溶液をミスト状 にして供給した場合には、連続的供給されるミストにより 試験片が冷却され、レーザ照射領域内での反応が抑制され たことから溶液由来の成分の拡散が起こりにくくなった ためものと考えられる.

形成された被処理面の耐摩耗性の検討を行うため、均 質な改質層が形成された MD および SD シリーズと未処 理材に対して,往復摺動式の摩擦摩耗試験を行った.この ときの試験条件は2.3節で示したものと同等である. 試験 により形成された摩耗痕に対して, SEM による観察およ び EDX による分析を行った. その結果を図17に示す. 同図より, SD および MD シリーズの試験片表面に形成さ れた摩耗痕の幅は、未処理材のそれよりも狭いことがわか る.これは、レーザ照射を施した両シリーズの表面に高硬 さの FeAl2O4 層が形成されているためと考えられる.この ことについて検証するため,それぞれの試験片表層の断面 に対し、ナノインデンテーション法(先端角 115°バーコ ビッチ型圧子,試験荷重 1mN)により,押し込み硬さを 求めた. その結果, 未処理材の押し込み硬さは 3,838 GPa, MD シリーズのそれは 12,544 GPa および SD シリーズでは 12.975 GPa であった. このことから MD および SD シリー ズに形成された改質層は,未処理材と比較して高硬さであ り,溶液供給方式の違いは形成される改質層の硬さに大き な影響を及ぼしていないことも明らかとなった.また, MD シリーズとSDシリーズに形成された摩耗痕を比較すると、 その幅は後者の方が狭いことがわかる.また, MD および SD シリーズの摩耗痕に対する EDX 分析の結果より, SD シ リーズの摩耗痕上にはアルミニウム成分が残存しており、 MD シリーズのそれには確認できないことがわかる. すな わち, MD シリーズに対して摩擦摩耗試験を行った場合に は、アルミニウム成分を含んだ改質層が完全に除去され、 基材が露出し、摩耗が進行したものと考えられる.この点 を解決するためには、より厚い改質層の形成が必要と考え られる. 今後は, 液滴の寸法の制御やミスト供給量の最適 化など,処理条件の詳細な検討が必要と考えている.

## 4. おわりに

本研究では、レーザ誘起湿式表面改質法を提案し、オー ステナイト系ステンレス鋼 SUS316L 材を硝酸アルミニウ ム水溶液に浸漬させた状態でレーザ照射を施し、SUS316L 材の耐摩耗性向上を試みた.以下に得られた知見を示す. 1) 硝酸アルミニウム水溶液に浸漬させた SUS316L 材に 対してレーザ照射を施した結果、溶液由来のアルミニ ウムおよび酸素成分を含んだ改質層が形成された.



図15 ミスト供給方式レーザ誘起湿式表面処理シ ステムの概略



図16 ミスト供給および浸漬方式によりレーザ照 射処理を施した試験片の縦断面に対する SEM 観察および EDX 分析結果



図17 ミスト供給および浸漬方式により形成され た被処理面の摩擦摩耗試験後の摩耗痕に対 する SEM 観察結果

- デフォーカス量の増加に伴い、改質層の厚さは低減する.また、デフォーカス量を3mmとしてレーザ照射を施した場合には、改質層の形成は見られなかった
- 3) 摩擦摩耗試験の結果、デフォーカス量を0mmとして レーザ照射処理を施した試験片および未処理材と比較 して、デフォーカス量を1および2mmとしてレーザ 照射を施した試験片の摩耗量は減少することが明らか となった。
- 4) レーザ照射角の減少とともに、試験片への入熱量が低下し、被処理面の粗さは低減することが明らかとなった.デフォーカス量を調整し、入熱量の減少分を補正することで、円筒面に対して均質な被処理面を形成することが可能である.
- 5) 自由度の高いミスト供給方式を提案し、その効果について評価を行った.その結果、浸漬方式と同様の組成および耐摩耗性を有する改質層を形成することが可能であることが明らかとなった.

## 謝 辞

本研究は(公財)天田財団の支援を受けて実施いたしま した.ここに記して深謝いたします.また,本研究は,筆 者が栃木県産業技術センターに在籍していた当時に実施 したものです.栃木県庁ならびに産業技術センターの職員 の皆様に深く感謝の意を申し上げます.また,本研究の遂 行にあたっては,慶應義塾大学 小茂鳥潤教授並びに国立 研究開発法人理化学研究所 片平和俊専門研究員に,多大 なご助言をいただきました.心から感謝申し上げます.

## 参考文献

- H.Niino and A.Yabe : Surface modification and metallization of fluorocarbon polymers by excimer laser processing, Appl. Phys. Lett. 63, (1993), 3527.
- 田辺郁男、山口直也、水谷淳之介、渡辺哲也、板垣薫: YVO4 レーザ加工機を用いたステンレス鋼とチタンへの発色加工、日本機械学会論文集(C編),69,685(2003), 2470.
- 川澄博通,新井武二:レーザを用いた表面硬化における熱源の影響(第一報),精密機械,47,6(1981),669.
- K.Nishio, T.Yamaguchi, H.Era, and M.Katoh : Surface Modification of Titanium using Laser Beam, Materials Transactions, 45, 5(2004), 1613

- M.Potteser, T.Schoeberl, H.Anterwitsch, and J.Bruckner : The Characterization of the Intermetallic Fe-Al Layer of Ateel-Alumiinum Weldings, The Minerals, Matels and Materials Society, (2006), 167.
- S.Tomida and K.Nakata : Fe-Al Composite Layers on Aluminum Alloy Formed by Laser Surface Alloying with Iron Powder, Surface and Coatings Technology 174-175(2003), 559.
- 佐々木朋裕,八高隆雄:アルミニウム箔を利用した軟鋼のアルミナイズ処理,鉄と鋼,89,12(2003),1227.
- 有川秀一, 宗木政一, 大久保弘, 阿部富士雄, 八高隆 雄:炭素窒素無添加 Fe-12Ni-9Co-10W 系オーステナ イト合金のアルミナイズ処理による Fe-Al 合金皮膜形 成過程, 日本金属学会誌, 73, 9(2009), 695.
- W.Kai and R.T.Huang : The Corrosion Behavior of Fe-Al Alloys in H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>S/H<sub>2</sub>O Atmospheres at 700-900°C, Oxidation of Metals, 48,1-2(1997), 59.
- 10) 八高隆雄,小林重昭,佐々木朋裕: Fe-Al 系金属間化合物の2元アブレシブ摩耗,鉄と鋼,89,11(2003),1178.
- 11) Y Yang, DR Yan, YC Dong, XG Chen, L Wang, Z.H. Chu, J.X. Zhang, J.N. He : Effect of metal oxide additives on the microstructure and properties of the FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> matrix composite coatings prepared by plasma spraying, Surface and Coatings Technology, 235(2013), 417.
- 12) Y Yang, DR Yan, YC Dong, XG Chen, L Wang, Z.H. Chu, J.X. Zhang, J.N. He : Effects of Plasma-spraying Powers on Microstructure and Microhardness of In-Situ Nanostructured FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> Composite Coatings, Journal of thermal spray technology, 22.6(2013), 1002.
- 13) P. Gupta, D. Kumar, O. Parkash and A. K. Jha Sintering : Sintering and Hardness Behavior of Fe-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Metal Matrix Nanocomposites Prepared by Powder Metallurgy, Journal of Composites 2014 (2014), Article ID 145973.
- 14) 江面篤志,大川弘暉,片平和俊,小茂鳥潤:ミスト状硝酸アルミニウム溶液を用いた SUS316L 鋼のレーザ誘起湿式表面改質,砥粒加工学会誌, Vol.61, No.5(2017), pp.269-274.
- 15) A.Ezura, K.Katahira, J.Komotori : Generation of Biocompatible Titanium Alloy Surfaces including Calcium and Phosphorus Elements by Laser-Induced Mist Spraying Wet Treatment, International Journal of Automation Technology, Vol.14(2020) No.4, pp.575-581.