

蒸気二流体洗浄技術を用いた産業機械部品用洗浄装置の開発

坂村 喬史, 米田 鈴枝, 斎藤 隆之, 飯野 潔, 中嶋 快雄
板橋 孝至, 高橋 英徳, 可児 浩, 宮腰 康樹
渡部 正夫*, 砂金 養一**

Development of Cleaning Equipment for Industrial Machinery Parts Using Steam Two-fluid Cleaning Technology

Takashi SAKAMURA, Suzue YONEDA, Takayuki SAITO
Kiyoshi IINO, Yoshio NAKAJIMA, Koji ITABASHI
Hidenori, TAKAHASHI, Hiroshi KANI, Yasuki MIYAKOSHI
Masao WATANABE*, Yoichi ISAGO**

抄 録

大型産業機械部品のメンテナンス企業から、内燃機関部品のススや電動機部品のコイル上に付着した塵埃などを主体とした汚れの洗浄工程に対し、作業工程の省力化と環境負荷軽減や将来的な人手不足への対応が強く要望されている。現状の洗浄作業工程では大量の有機溶剤が用いられたり金ブラシなどを用い手作業で行われたりしていることから、省力化可能な環境調和型洗浄技術の開発が必要とされている。

本研究では半導体用精密洗浄技術である蒸気二流体洗浄に着目し、産業用機械の洗浄用に対応させるため洗浄の諸条件、防錆対策、および高蒸気圧によるハイパワー化を検討した。その結果、高蒸気圧に対応した新型洗浄ノズルを3Dプリンターを用いて試作するとともに安全性と操作性に優れたグローブボックス型洗浄装置を開発した。

キーワード：蒸気二流体洗浄，液滴衝突，洗浄装置，産業機械，メンテナンス

Abstract

From the companies that maintains large industrial machine parts, there is a strong demand for labor saving of work processes, reduction of environmental load, and future labor shortage in the cleaning process cleaning soot of internal combustion engine and dust of electric motor parts. In the current cleaning process, a large amount of organic solvent is used, and it is conducted manually using a wire brush, etc. Therefore, it is necessary to develop an environment-friendly cleaning technology that can save labor.

In this research, it focused on steam two-fluid cleaning, which is a precision cleaning technology for semiconductors, and examined various cleaning conditions, corrosion inhibition, and high power by high vapor pressure stream in order to clean of industrial machinery. As a result, a new cleaning nozzle for high vapor pressure stream using a 3D printer was prototype, and a glove box type cleaning device with excellent safety and operability was developed.

KEY-WORDS : Steam Two-fluid Cleaning, Droplet Impact, Cleaning Equipment, Industrial Machinery, Maintenance

* 北海道大学, * Hokkaido University

** HUGパワー株式会社, ** HUG POWER Co., Ltd.

事業名：重点研究

課題名：大型産業機械部品のメンテナンスに向けた環境調和型洗浄技術の開発

1 はじめに

道民の暮らしや仕事を支える電力の発電機、船舶などの輸送機械で使用される電動機および内燃機関など、大型産業機械のメンテナンス関連企業は道内で170社以上あり、これらのメンテナンス現場において共通する重要な課題は洗浄工程の省力化と環境負荷の軽減である。特に内燃機関部品のススや電動機部品の塵埃の洗浄工程では、大量の有機溶剤が用いられ、ジェットタガネ、グラインダー、金ブラシなどを用い手作業で行われたりしており、作業環境の改善、将来的な人手不足への対応を図るため、省力化可能な環境調和型洗浄技術の開発が強く要望されている。

本研究では、いくつかの環境調和型の洗浄技術の中から半導体用精密洗浄技術である蒸気＋水二流体洗浄（以下、蒸気二流体洗浄）に着目し、メンテナンス現場で最も苦労しているスス汚れ、および電動機の塵埃汚れに対応するための洗浄の諸条件、洗浄時の防錆対策、および洗浄能力のハイパワー化や専用グローブボックス型の装置開発について報告する。

2 蒸気二流体洗浄のメカニズム

蒸気二流体洗浄は、半導体洗浄用としてデバイスの微細化や環境問題などから薬液などの使用量を減らし、かつ効果的な洗浄技術が必要とされていることから開発された。本手法は二流体スプレー洗浄に分類される洗浄手法であり、噴流の担い手として使用される窒素ガス等の高圧ガスを蒸気に変えた一成分系の二層流が特徴である。その装置構成を図1に示す。蒸気ボイラーにて蒸気を発生させ、これと水をノズル上部で混合させ洗浄対象物に噴射するものであり、洗浄においては、この高速に噴出される水滴が対象物と衝突する際に発生する衝撃波やキャビテーションなどが洗浄力として発揮すると考えられている¹⁾。

Sanadaらの研究では噴射される蒸気二流体中の水滴を計測した結果、直径：15～30 μm 、速度：150～300m/sであり²⁾、蒸気圧：0.1～0.2MPaの噴出で水滴を音速程度まで加速できることが判明している。また、この蒸気二流体を金属表面に噴射させると金属の壊食（エロージョン）が確認されている。しかし、空気＋水などの他の二流体の噴出時においては、水滴の径、および速度には有意な差は観察されないが

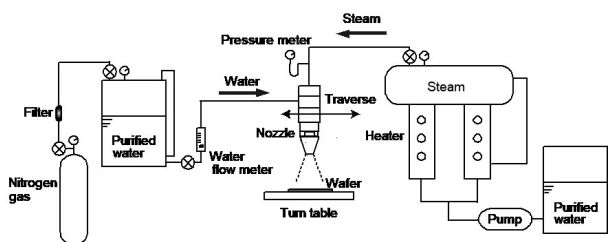


図1 蒸気二流体洗浄装置の模式図¹⁾

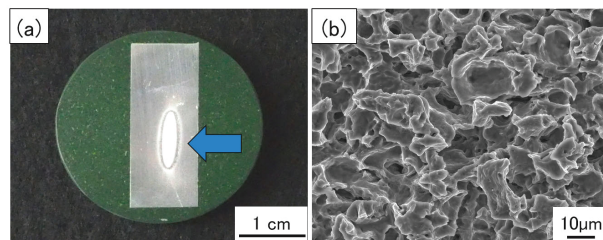


図2 蒸気二流体洗浄を噴射後のアルミニウム片、(a) 外観写真、(b) SEMによる圧痕部分の拡大像

金属表面の壊食の大きさには差が確認されており、蒸気二流体が最も壊食させることが確認されている²⁾。

図2(a)に樹脂埋めをした純アルミニウム片に対して2min蒸気二流体を噴射した試料の外観写真を示す。アルミニウム片上の蒸気二流体が噴射された箇所には、ノズル出口形状である楕円形の圧痕（図2(a)中矢印）が確認できる。この箇所をSEMにて拡大観察した結果を図2(b)に示す。同図より10 μm 程度の凹凸が連続した壊食が確認できる。これよりキャビテーション発生の可能性が認められた。

図3に液滴衝突時の密度分布および応力の時系列変化に関するシミュレーション結果を示す。図3(a)は密度分布の時系列変化をシミュレーションしており³⁾、図3(b)は応力の時系列変化を示している⁴⁾。真球状の径10 μm の水滴が速度200m/sで衝突する瞬間（ $t=20.0\text{ns}$ ）、接地点に高い応力が発生する。その応力が伝播し、 $t=27.7\text{ns}$ のときに水滴中心部に $-1.5 \times 10^8\text{Pa}$ の負の応力を、図3(a)において同様の箇所では水よりも低い密度である950 kg/m^3 を表しており、つまり気泡の発生と消滅が起きていることが言える。このシミュレーション結果からも高速の水滴が衝突する際にキャビテーションが発生することが示唆される。

その他に液滴衝突時の現象として図4中に示すようなサイドジェットと呼ばれる壁面に対して横方向に衝突速度よりも速い速度で流れる現象がある。このサイドジェットには図4(a)の飛び散る様なスプラッシュという形状と、(b)の壁面に広がる様なラメラという形状がある。この形状の形成には液体の物性や速度などの衝突条件が影響されるが、その他に周囲の気体の種類や圧力にも影響され、ラメラは真空中で起きやすいことが報告されている⁵⁾。図4ではエタノールを用い、チャンバー内を空気若しくはエタノール雰囲気満たし、チャンバー内で液を一滴、重力落下させ壁面に衝突する瞬間を高速カメラ撮影したものである。この2条件ではサイドジェットの形状が異なり、図4(a)ではスプラッシュ、図4(b)からはラメラが観察されている⁶⁾。

これらの結果より、雰囲気と液滴が同一成分であるときにラメラが形成していることから蒸気二流体洗浄中においてもラメラが形成され、この壁面に沿うように流れるサイドジェットが壁面に存在する汚れを除去し、洗浄効率の向上に寄与していると考えられる。

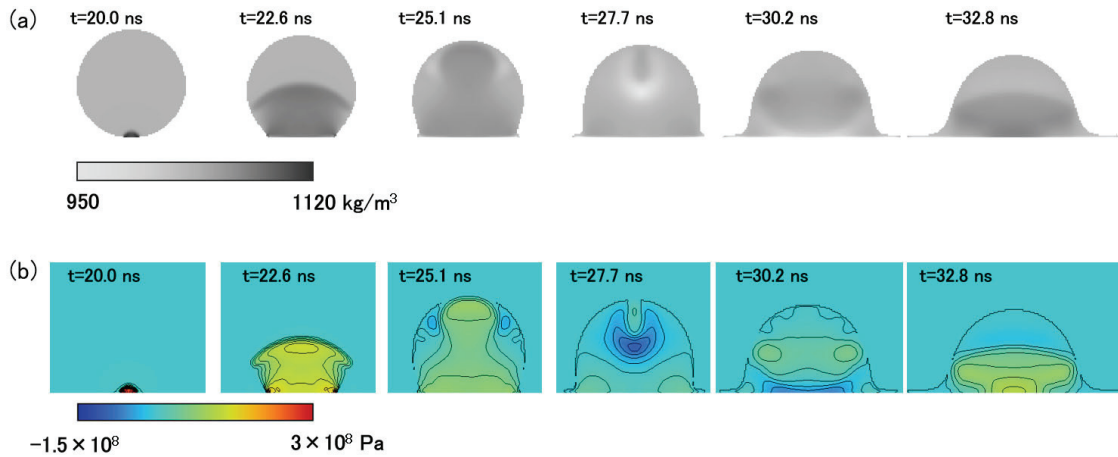


図3 液滴衝突のシミュレーション結果, 水滴直径: $10\mu\text{m}$, 速度: 200 m/s ,
 (a) 密度分布の時系列変化³⁾, (b) 応力の時系列変化⁴⁾

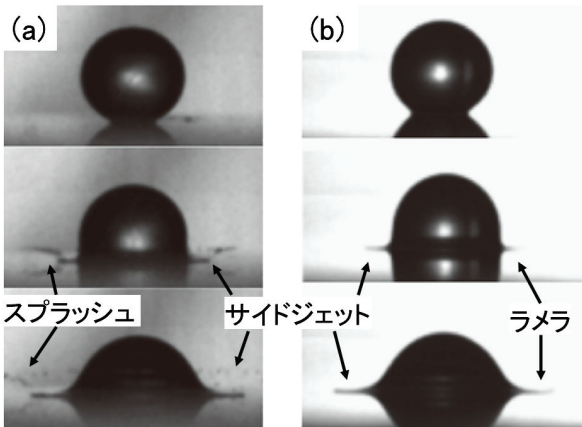


図4 雰囲気制御したチャンパー内でエタノール滴を衝突させた際のサイドジェット形状観察, 速度: 3.0 m/s ,
 (a) 空气中, (b) エタノール雰囲気中⁶⁾

3 半導体洗浄用蒸気二流体洗浄装置での実験および結果

蒸気二流体洗浄の産業機械の汚れに対する洗浄能力を確認するために、自動車のガソリンエンジン、およびディーゼルエンジンのスス汚れと電動機のコイル上に付着した塵埃汚れを対象として、図5(a)に示す半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置を用いて洗浄能力を評価した。この洗浄装置は洗浄用ノズルがXY軸テーブルに取り付けられており、一定の速度でノズルを移動させながら洗浄を行うことができる構成となっている。本装置により汚れの対象物に対してライン状に洗浄を行った。また、汚れの分析としてSEM-EDSによる組成分析を行った。

ガソリンエンジンのピストンヘッドの汚れに対しては、蒸気をゲージ圧力: 0.25MPa , 移動速度: $1.0, 2.5\text{mm/s}$ の2条件洗浄し、移動速度の影響を調べた。洗浄後のピストンヘッ

ドの外観写真を図5(b)に示す。洗浄箇所を図中に矢印で示している。目視観察では移動速度: 2.5mm/s のときは洗浄箇所上に汚れが残っており、 1.0mm/s のときは大部分の汚れが除去されていることを確認した。このことから 1.0mm/s 以下の速度で洗浄すれば十分に汚れを除去できることを確認した。ディーゼルエンジンに対しては、移動速度: 1.0mm/s , 圧力: $0.2, 0.3\text{MPa}$ の2条件で洗浄し、蒸気圧の影響を確認した。洗浄後のピストンヘッドの外観写真を図5(c)に示す。2条件ともに洗浄した後はピストンヘッド端の部分からは汚れが除去され基材の金属色が確認できる。しかし、ピス

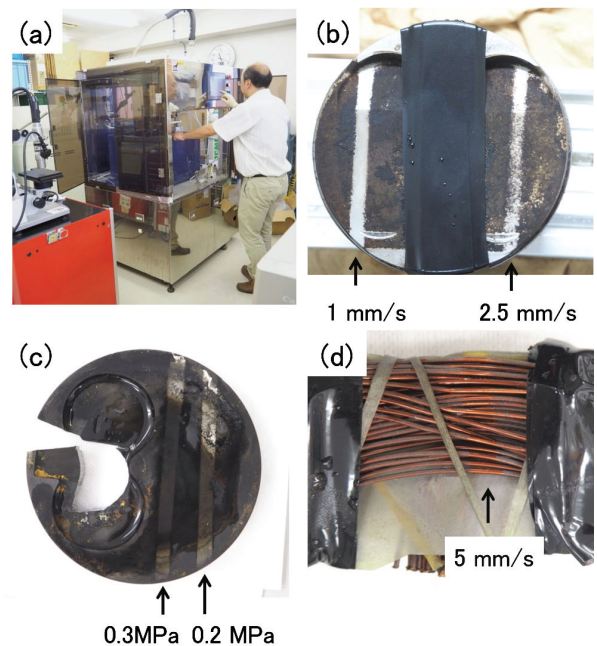


図5 半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置, および洗浄後の試験片, (a) 装置の外観写真, (b) ガソリンエンジンのピストンヘッド, (c) ディーゼルエンジンのピストンヘッド, (d) 電動機のコイル

トンヘッド中央部は黒い箇所が残っている。そこで、この黒い箇所、およびスス汚れを対象にSEM-EDSを用いた組成分析を行った。スス汚れの成分の大部分は炭素(C)であるが、他に少量の酸素(O)、アルミニウム(Al)、硫黄(S)、鉄(Fe)が検出された。一方で、ピストンヘッド上の黒い汚れからは酸素(O)、アルミニウム(Al)、硫黄(S)、とケイ素(Si)が検出されたことから、洗浄後に残った黒い箇所はピストンヘッドのアルミニウム基材の腐食生成物であることが確認された。したがって、洗浄後に残った黒い箇所もスス汚れは洗浄されていることが認められた。次にコイル上の塵埃汚れに対しても同様に洗浄を圧力:0.2MPa、移動速度:5 mm/sの条件で行った。洗浄後のコイルの外観写真を図5(d)に示す。コイルは装置に入るように切断してある。洗浄箇所は塵埃汚れが除去され、コイルのエナメル線の塗装には傷がないことを確認した。図2に示したアルミニウム片に対しては壊食を及ぼしたが、移動速度を上げ洗浄時間を短くすることで基材のコイルにダメージを与えず、目的の汚れだけを除去できることを確認した。

これらの結果より、蒸気二流体洗浄が産業機械の汚れに対して有効であるという知見を得た。しかし、多品種、多形状である産業機械に対しての洗浄のしやすさ、および洗浄時間の短縮、防錆対策などの課題が見つかった。

4 汚れの分析および模擬汚れ試験片の作製

3章では実機の汚れを用い実験を行ったが、実験を多く行っていく上では同じ仕様の供試材を大量に要する。そこで汚れを模倣した試験片の作製を検討した。まず、大型船舶(フェリー)の内燃機関部品からC重油由来のスス汚れや電動機のコイル上の塵埃汚れを採取し分析を行った。分析機器はSEM-EDS、ラマン分光分析、XRD、ガスクロマトグラフ

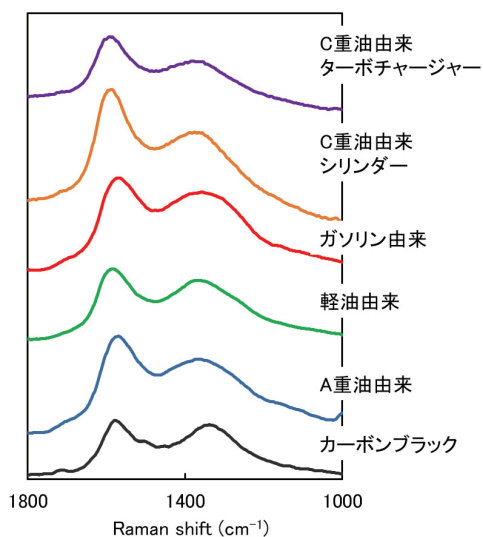
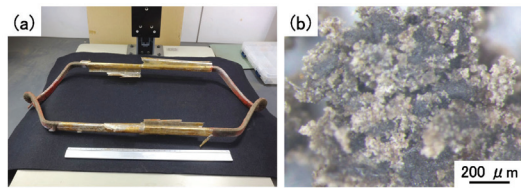


図6 各燃料由来のスス汚れのラマンスペクトル



コイル全体写真 塵埃付着部拡大写真

図7 電動機のコイル (a) 全体の外観写真、(b) 付着していた塵埃の実体顕微鏡写真

分析(GC/MS)、TG/DTAを用いた。

C重油由来のスス汚れに対してEDS分析を行った結果、その主成分は炭素(C)が主体であり、その他に硫黄(S)などが検出された。また、ラマン分光分析より炭素(C)の化学状態を調べた。その際のラマンスペクトルを図6に示す。図6では大型船舶の内燃機関部品のターボチャージャー、およびシリンダー部から採取したC重油由来のスス汚れを示す。また、小型船舶の内燃機関部品から採取したA重油由来のスス汚れや3章の洗浄実験に使用したガソリンエンジンおよびディーゼルエンジンのスス汚れ、比較材としてのカーボンブラックのラマンスペクトルも合わせて示している。ラマンスペクトルよりすべてのスス汚れはカーボンブラックに近い状態であることが確認された。さらにTG/TDAを用い、C重油由来のスス汚れを熱分解させた結果、分解後の残渣質量から汚れ中のススの割合が50wt%程度であった。GC/MSではC重油とスス汚れの両方を分析した結果、スス汚れからはC重油と比較して揮発成分が少なく、高分子量の成分が多く存在していることを把握した。

電動機のコイルの一部の外観写真を図7(a)に示す。コイル上には図7(b)に示すような黒い粒子が確認できる。この黒い粒子はコイル上に軸受けグリスによって付着していることが確認された。この粒子を採取し分析した結果、EDS分析からは炭素(C)、酸素(O)、カルシウム(Ca)が主体であり、XRD分析からは炭酸カルシウムが検出された。炭酸カルシウムは製紙工場で使用されている填料が浮遊し排気用電動機へと取り込まれ付着したと考えられる。

これらの結果をもとに、洗浄実験で用いる模擬汚れ試験片を製作した。製作条件としてC重油スス模擬汚れ試験片についてはC重油とカーボンブラックとの混合比、混合後の加熱

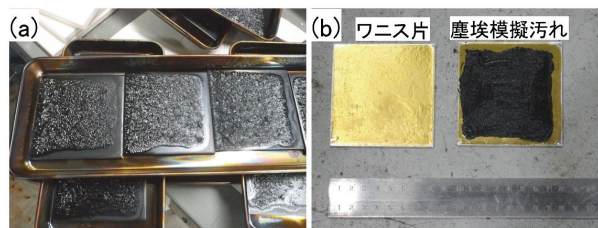


図8 各模擬汚れ試験片の外観写真 (a) C重油スス模擬汚れ試験片、(b) 基材のワニス片と塵埃模擬汚れ

焼成条件を検討した。その結果、C重油とカーボンブラックを重量比9：1で混合したものを80mm角の鋼板に2g塗布し、炉にて250℃、1h乾燥させることで揮発成分を蒸発させ強固な固着状態となるC重油スス模擬汚れ試験片の製作条件を見出した(図8(a))。

塵埃模擬汚れ試験片の製作については、はじめに180℃に加熱した80mm角の鋼板に対してワニス(3ml)を均一に塗布し予備硬化をさせる。これを炉にて180℃、3h加熱し硬化させることでワニス片とし、冷却後その上に軸受け用グリス、炭酸カルシウムと汚れの視認性を高めるために黒色顔料としてカーボンブラックを重量比5：1：1で混合したものを0.5g塗布することで塵埃模擬汚れ試験片を製作した(図8(b))。

5 鋳鉄製部品などへの防錆対策

産業用機械の洗浄では、鋳鉄などの腐食しやすい機械部品を対象としているため、実際のメンテナンス現場においても腐食には細心の注意が払われている。各機械部品を水洗した後に直ちに乾燥、オイル浸漬し防錆対策をしている。そこで防錆対策として、洗浄液にアルカリ性の水溶液に注目し、ここでは防錆作用の有無を浸漬試験により評価した。水溶液としては純水、アルカリ性電解水(レドックステクノロジー製、pH 11.4)、およびメンテナンス現場で使用されているアルカリ性洗浄水(北海精機製、北海スーパー400倍希釈液、pH 12.3)に対して、FC200とFCD490の2種類の鋳鉄を24h、20℃にて浸漬試験を行った。浸漬後の試験片の外観写真を図9に示す。アルカリ性洗浄水に浸漬させた試験片のみ変化が見られず、他の試験片からは錆の発生が確認された。これより防錆にはアルカリ性洗浄水が有効であることが確認された。

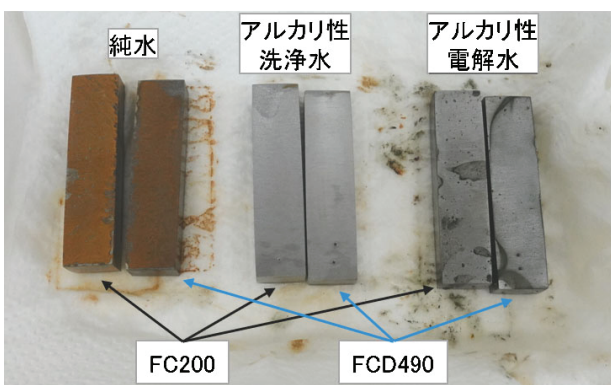


図9 浸漬試験後の各鋳鉄試験片の外観写真

6 ハイパワー蒸気二流体洗浄装置の開発

6.1 高蒸気圧二流体洗浄での実験および結果

3章では半導体用洗浄装置を用い低蒸気圧下での洗浄実験を行ったが、洗浄速度の向上や強固な重油由来のスス汚れの

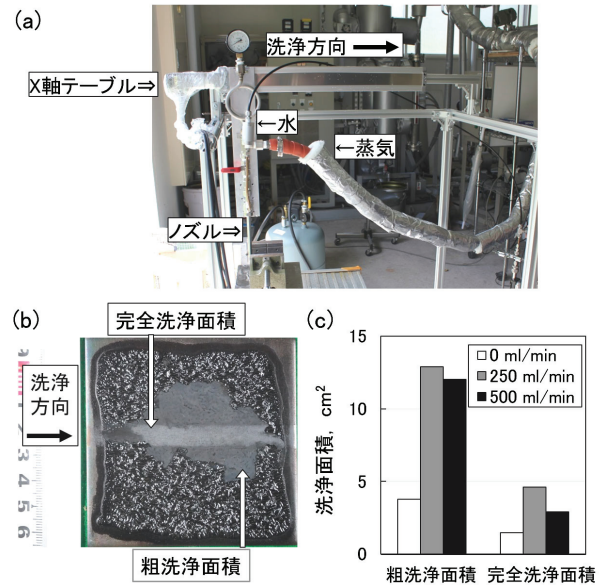


図10 自動X軸テーブルを用いた洗浄実験、(a)装置の外観写真、(b)洗浄後の模擬汚れ試験片の外観写真、(c)各水量における洗浄面積のグラフ

洗浄に対応させるため、蒸気を0.5~1.0MPaに高圧化させて蒸気二流体の洗浄実験を行った。図10(a)に蒸気二流体洗浄装置の外観写真を示す。実験用蒸気ボイラー(日本電熱製、EB-10、蒸気圧：Max.4.0 MPa)と蒸気二流体用ノズルを接続し高蒸気圧仕様の装置を試作した。また、X軸テーブルにノズルを取り付けC重油スス模擬汚れ試験片に対して洗浄実験を行った。実験条件は蒸気のゲージ圧力：0.5、1.0MPa、ノズル先端と汚れ試験片との距離は10mm以下とし、蒸気に対しての添加水量：0、250、500ml/minと変えて、水の添加量と洗浄力の関係を調査した。洗浄力の評価はX軸テーブルを用い0.1~1.0mm/secの速度でノズルを走査しライン状の洗浄を行い、洗浄後の汚れの除去面積から評価した。さらに高速度カメラで蒸気二流体の噴射の様子の撮影を行った。

ゲージ圧力：0.5MPaで洗浄実験後の試験片の外観写真を図10(b)に示す。洗浄箇所は金属素地が現れ、その周辺部では汚れの剥離がみられるが、素地上に薄く汚れが残っている。ここで金属素地まで達した面積を完全洗浄面積、周辺の薄い汚れが残存している箇所を含むすべての箇所を粗洗浄面積として、添加水量と洗浄面積の関係を比較したグラフを図10(c)に示す。図10(c)より添加水量：250ml/minのとき双方の洗浄面積において高い値を示し、洗浄力が高いことが分かる。

添加水量が洗浄面積に影響した原因を調査するために、高速度カメラを用い蒸気二流体の噴出の様子を撮影した。図11にゲージ圧力：0.5MPa、添加水量：250、500ml/minのときの高速度撮影の写真を示す。写真は50,000fpsで撮影した動画から抜粋した連続写真である。写真上部にあるノズルから蒸気二流体が噴出していることが黒い影として観察できる。その流体の噴出方向を図中に実線の矢印で示している。洗浄

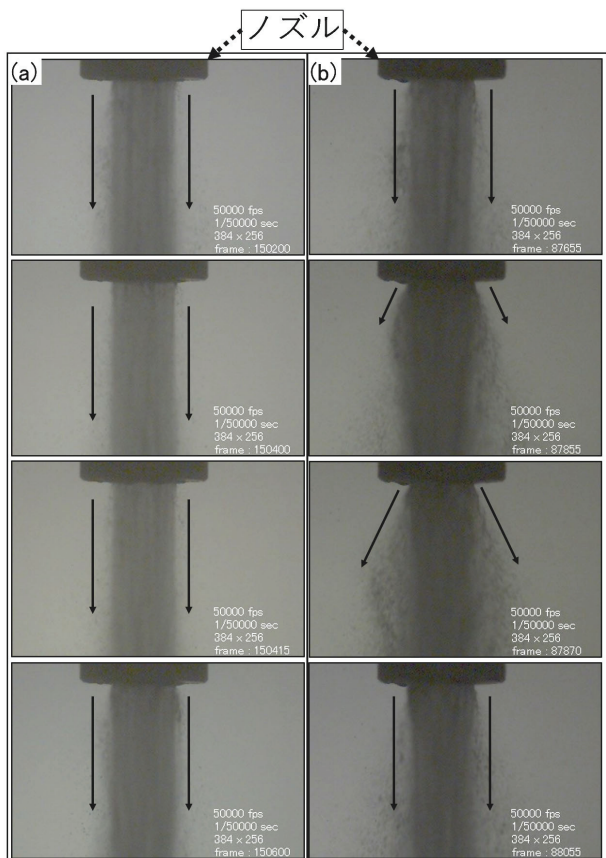


図 11 高速度カメラ撮影による蒸気二流体の噴出の様子，(a) 250ml/min，(b) 500ml/min

面積が最も大きかった添加水量：250ml/minのときは、流体が直線的に噴出して、それが連続的に安定していることが観察される。しかし、500ml/minのときは直線的な噴出が安定せず、断続的に発散するように噴出していることが確認された。このように添加水量が多くなることで噴出が不安定になることで洗浄面積に影響したと考えられる。また、同様にゲージ圧力：1.0MPaでも実験を行ったが、添加水量：500ml/minのとき洗浄面積が高い値を示す結果となった。

次にX軸テーブルの移動速度と洗浄面積との関係を調査した。ゲージ圧力：0.5MPa，添加水量：250ml/minとし、移動速度：0.1，0.5，および1.0mm/sの条件で行った結果を図12(a)に示す。図12(a)より移動速度が速くなると洗浄面積が小さくなるのがわかる。つまり洗浄に時間をかけるほど、より汚れを除去できることが言える。同図には移動速度：1.0mm/sで同じ箇所を10回連続で洗浄を行った結果も合わせて示した。ここで、移動速度：0.1mm/sで1回と移動速度：1.0mm/sで10回、この2つの洗浄面積を比較すると完全洗浄面積に関しては大きな差が見られない。このことからノズルの移動速度でなく、洗浄にかけた時間と洗浄面積との間に相関があることがわかる。次にゲージ圧力：1.0MPa，添加水量：500ml/minで洗浄実験を行ったときの洗浄面積を図12(b)に示す。こちらの結果では、移動速度：0.1～1.0

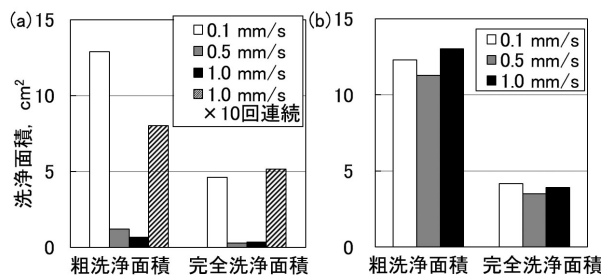


図 12 X 軸テーブルの移動速度と各洗浄面積の関係のグラフ，(a) 圧力：0.5MPa，(b) 圧力：1.0MPa

mm/sの間で同等の洗浄面積を得られた。ゲージ圧力：0.5MPa，移動速度：0.1mm/sのときとゲージ圧力：1.0MPa，移動速度：1.0mm/sのときを比べると、洗浄面積に顕著な差がないことから、圧力を2倍にすると洗浄速度を10倍程度まで速くできることがわかった。

6.2 3Dプリンターを用いた新型ノズルの試作

6.1節の移動速度と洗浄面積の結果から、蒸気二流体洗浄にて大型産業機械を洗浄するためには、よりハイパワー化させる必要がある。そこでまずボイラーの蒸気圧を1.0MPa以上に上げることを検討したが、市販の蒸気ボイラーは最高蒸気圧1.0MPaのものが大半であり、そのため、市販の蒸気配管なども1.0MPaまでのものが多いことから蒸気圧をさらに上げることは現実的ではないと考えた。ここで二流体洗浄はノズルの入口直前で蒸気と水を混合しノズル内で流速を加速させ噴射させるため、ノズル形状の違いによって加速が異なり、洗浄力が変化することがわかっている。6.1節では、従来の精密洗浄用二流体ノズルを使用して実験を行ってきたことから、0.5MPa以上の蒸気圧に対応したノズルの設計をすることでハイパワー化ができると考えた。そこでノズルの長さ、内径、内部のテーパ角度の検討を行い、3Dプリンターを用い複数のノズル形状を設計・試作を行った。3Dプリンターを用いて内部テーパを変えて試作したノズルの例を図13(a)に示す。樹脂だけでは蒸気の圧力に対して強度不足が懸念されたため、圧力のかかる箇所には金属部品を樹脂との接合には耐熱性のパテを使用した。ノズルの評価は噴出

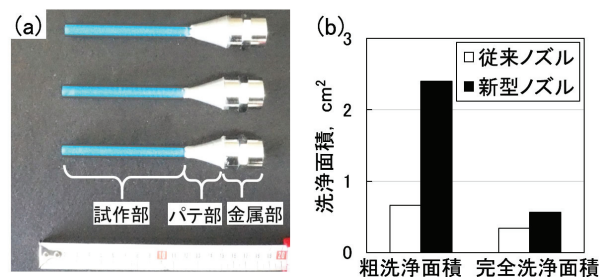


図 13 3D プリンターにて試作した新型ノズル，(a) ノズルの外観写真，(b) 洗浄面積のグラフ

する蒸気温度測定や蒸気流量計測などを行い、これらの結果をもとに二流体の噴出が最も加速する形状を選定した。図13 (b)にその3Dプリンター製の新型ノズルをX軸テーブルに取り付け洗浄実験の結果を示す。ゲージ圧：0.5MPa、添加水量：250ml/min、移動速度：1.0mm/sの条件での洗浄実験を行った結果図12(a)の結果と比較して粗洗浄面積が3倍以上となった。

6.3 グローブボックス型洗浄装置の開発

図5 (a)の半導体洗浄用の装置では平面状の洗浄物を対象としていたため、XY軸テーブルによる自動送り機構での全自動洗浄機が開発されてきたが、産業用機械においてはピストンヘッド、バルブやターボチャージャーなどの多品種、多形状を洗浄しなければならない。そこで二流体ノズルをグリップに組み込んだハンドガンを考案し、対象が複雑形状であっても洗浄できるようにした。図14(a)に3Dプリンターを用いて試作したグリップとノズルを合わせたハンドガンの外観写真を示す。グリップには蒸気二流体を噴出させるための電磁バルブの開閉スイッチを取り付けている。また、ハンドガンによる蒸気二流体洗浄を行う上では安全性と作業性の問題があげられ、開放状態での洗浄では蒸気や洗浄液などが作業員に対して飛び散り、除去された汚れにより作業現場が汚染されるなどの課題が生じることがわかった。そこで、安全性と作業性の観点からグローブボックス型の洗浄装置を考案した。図14(b)に装置の外観写真を示す。図14(b)中に示すように装置上部に蒸気二流体の噴出用電磁バルブを設置し、図14(c)に示すようにグローブボックス内上部からハンドガンが吊るされている構造である。グローブボックスの窓には曇り防止のため親水フィルムを貼り、背面にはファンを取り付け、蒸気を逃がすことで作業中の視覚が良好になるように設

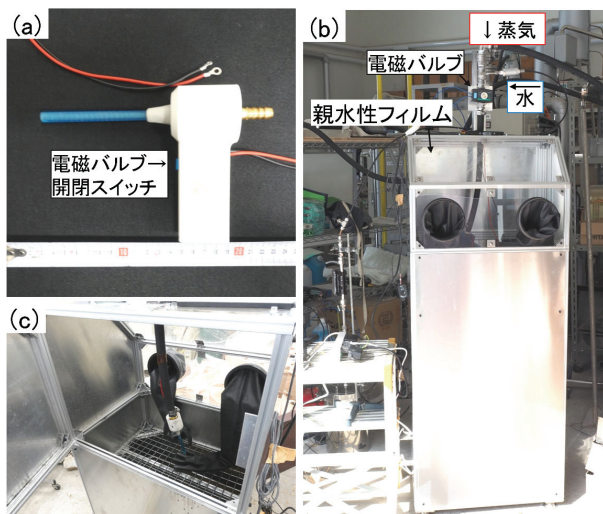


図14 グローブボックス型蒸気二流体洗浄装置、

- (a) 3Dプリンターにて試作したハンドガン、
- (b) グローブボックスの外観写真、
- (c) 装置内部とハンドガン

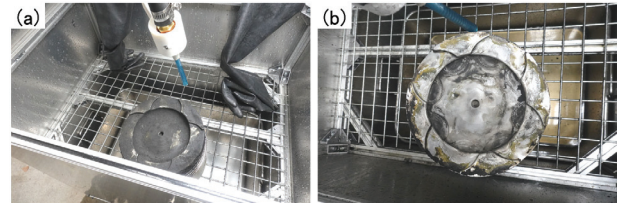


図15 グローブボックス型洗浄装置にて洗浄前後のピストンヘッドの外観写真、(a) 洗浄前、(b) 洗浄後

計した。

このグローブボックス型洗浄装置の安全性と作業性の確認実験を行った。図15(a)に示すように発電用に使用されるA重油用の中型のディーゼルエンジンピストンを洗浄の対象として用いた。洗浄実験では視界も良好に洗浄ができ、ピストンの複雑な形状に追従した洗浄が行え操作性に優れており、また汚れの飛び散りや蒸気を浴びることなく安全に洗浄作業を行えることを確認した。4 min 洗浄後のピストンの外観写真を図15(b)に示す。洗浄後のピストンヘッド表面を実体顕微鏡で観察すると洗浄箇所は汚れが除去され金属素地が確認でき、基材のアルミニウム合金には壊食がないことを確認した。

また、模擬汚れ試験片を用いた洗浄速度の実験も合わせて行った。塵埃模擬汚れ試験片の洗浄実験は蒸気のゲージ圧：0.5MPa、添加水量：250ml/minおよび1.0MPa、500ml/minの2条件で行った。図16(a)に1.0MPa、500ml/minの条件で洗浄後の試験片の外観写真を示す。塵埃模擬汚れが除去されており、下地のワニスを確認できた。0.5MPa、250ml/minの条件でも洗浄時間が長くなるものの同様に下地のワニスを確認できた。試験片1枚あたりの洗浄時間は0.5MPaのとき平均123sec、1.0MPaのとき平均13secであった。蒸気圧を2倍にすることで図12のとき同様に洗浄時間が10倍速くなる結果を得た。C重油スス模擬汚れ試験片に対しては、ゲージ

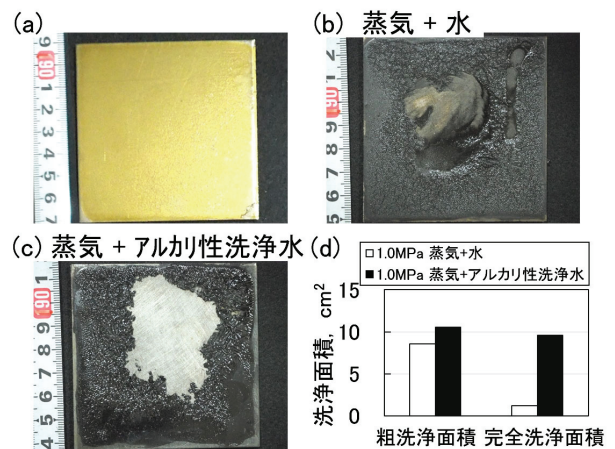


図16 模擬汚れ試験片を用いた洗浄速度の実験

- (a) 洗浄後の塵埃模擬汚れ試験片の外観写真、
- (b) (c) 各洗浄条件で洗浄後のC重油スス模擬汚れ試験片の外観写真、
- (d) 洗浄面積のグラフ

圧力：1.0MPa、添加水量：500ml/minの条件で水、およびアルカリ性洗浄水を添加し比較した。グローブボックスにより、飛散するアルカリ性洗浄水を浴びることなく安全に洗浄をすることができた。各洗浄条件にて150sec洗浄後の試験片の外観写真を図16(b)(c)に、洗浄面積のグラフを図16(d)に示す。水とアルカリ性洗浄水の洗浄面積を比較すると、アルカリ性洗浄水のときの洗浄面積は粗洗浄面積で1.2倍、完全洗浄面積8倍に拡大した。これは蒸気二流体が粗洗浄である固い汚れを除去し、さらにアルカリ性洗浄水の界面活性材の効果が働き素地上に薄く汚れが残った汚れを除去したと考えられる。このことから添加する水を洗浄水に変えることで洗浄面積が拡大する、つまり洗浄力が上がる結果を得た。

これらの結果より、グローブボックス型洗浄装置の安全性と作業性が確認され、実機ピストンヘッドの洗浄実験においてピストンの汚れが除去されていることから蒸気二流体洗浄を産業機械部品の洗浄に適用できる可能性を得た。

7 まとめ

本研究では環境調和型の洗浄技術の中から、半導体用精密洗浄技術である蒸気二流体洗浄に着目し、メンテナンス現場から強く求められているスス汚れ、塵埃汚れに対応するための洗浄の諸条件、防錆対策、および高蒸気圧化によるハイパワー化を検討し、専用グローブボックス型洗浄装置の開発を行い、以下の結果を得た。

- 1) アルミニウム片に蒸気二流体を噴射すると侵食が観察され、また蒸気二流体の液滴衝突時の応力と密度のシミュレーション結果からもキャビテーションの発生の可能性が認められた。
- 2) 既存の半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置を用いて、ガソリンエンジンとディーゼルエンジンのピストンヘッド汚れ、および電動機コイルの塵埃汚れに対する洗浄能力を評価した。その結果、蒸気二流体洗浄が産業機械の汚れに対して有効であるという知見を得たが、多品種、多形状である産業機械に対しての洗浄のしやすさ、および洗浄時間の短縮、防錆対策などの課題が判明した。
- 3) C重油由来のスス汚れや塵埃汚れの分析結果をもとに模擬汚れ試験片の製作方法を考案した。
- 4) 鋳鉄への防錆対策としてはアルカリ性洗浄水が有効であることが確認された。
- 5) 蒸気圧を2倍にすると洗浄速度は10倍程度まで速くなり、洗浄速度の向上には高蒸気圧化が有効であることが確認された。
- 6) 添加水量には最適値があることが洗浄面積から確認された。高速度カメラ撮影による撮影から最適水量のときは安定的に蒸気二流体が噴射されている様子が観察された。
- 7) 3Dプリンターを用い新型ノズルの設計、試作を行い、従

来ノズルと比較して粗洗浄面積が3倍となる性能を得た。

- 8) 多品種、多形状に対応するためハンドガン、および安全性と作業性の観点からグローブボックス型洗浄装置を開発した。

今後はメンテナンス現場での利用や洗浄効果の確認をして、装置の改良や他の汚れへの適用について更なる研究開発を進める予定である。

謝辞

本研究を進めるにあたり、静岡大学 真田俊之准教授には多くの助言と実験の協力を頂きました。

また、本研究で使用した電子顕微鏡は公益社団法人JKAの機械振興補助事業により整備されました。

ここに記して感謝いたします。

引用文献

- 1) 真田俊之・齋藤隆之・林田充司他：蒸気と水の混合噴流による洗浄技術の開発、噴流工学, vol.24-3, pp.4-10, (2007).
- 2) T. Sanada・M. Watanabe・M. Shirota et al. : Impact of High-speed steam-droplet spray on solid surface, Fluid Dynamics Research, vol.40, pp.627-636, (2008)
- 3) 渡部正夫, 真田俊之, 山瀬雅男：固体表面への高速液滴衝突過程の数値解析(キャビテーション発生についての検討), 日本機械学会論文集B, 74巻744号, pp.1717-1724, (2008)
- 4) M. Watanabe・T. Sanada・M. Shirota et al. : Thermofluid dynamic study of high speed liquid droplet impacts on solid surface, The 1st International Colloquium on Dynamics, Physics and Chemistry of Bubbles and Gas-Liquid Boundaries, (2007).
- 5) 櫻井泰貴, 小林一道, 藤川秀俊他：固体表面に衝突する単一液滴変形過程の観察(液滴物性, 対象物表面粗さおよび周囲気体圧力の影響), 混相流, 26巻2号, pp.164-171, (2012)
- 6) 真田俊之, 渡部正夫：二流体ジェット法における気体種の影響, エアロゾル研究, 29巻4号, pp.236-240, (2014)