

二流体噴流に着目した環境に優しい洗浄装置の開発

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（H30～R1年度）

短期実用化研究（H31～R3年度）

環境規制対策と高品質を両立する樹脂めっき技術の開発（R4年度）

企画調整部 ○坂村喬史

材料技術部 宮腰康樹、飯野 潔、中嶋快雄、可児 浩、瀬野修一郎、細川真明
北海道大学、HUG パワー(株)、北海道立工業技術センター、(有)コムテック

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及び内燃機関など、大型産業機器のメンテナンス関連企業は道内で170社以上ある。これらの、メンテナンス現場では大量の薬剤が使用されているが、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。また、近年、道内では植物工場の設立に伴う、農業資材の洗浄も課題としてあげられている。

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）に着目して実施した、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。また、農業資材の発泡スチロールなど樹脂機材に対するマイルドな洗浄方法として、空気+水二流体洗浄（以下、空気二流体洗浄）を用いた専用装置の開発についても併せて報告する。

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につながる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 HUG パワーで開発された。本手法はボイラーにて蒸気を発生させ、図1の専用の二流体ノズルを用いて少量の水をノズル上部で混合させ、蒸気の噴出する勢いに乗せることで、水滴をマイクロメートルサイズに微細化し高速で噴出させるものである。従来あるスチーム洗浄とは異なり、この高速に噴出された水滴が、対象物と衝突する際に発生するラメラと呼ばれる衝撃波やキャビテーションにより、高い洗浄力を発揮すると考えられている¹⁾。この蒸気二流体を金属表面に噴射させると、キャビテーションによる金属の壊食（エロージョン）が確認されている²⁾。図2(a)に樹脂めっきをした純アルミニウム板に対して120 s 蒸気二流体を噴射した試料の

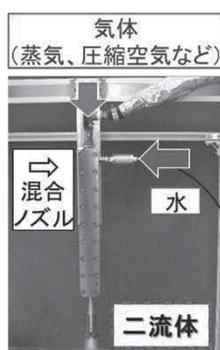


図1 二流体ノズルの外観写真

外観写真を示す。Al板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。マイクロメートルサイズの凹凸が連続している壊食が確認でき、すなわちキャビテーションの発生が示唆された。

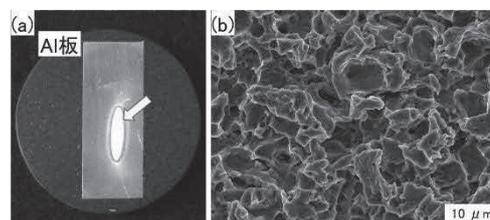


図2 (a) 蒸気二流体洗浄を噴射後のAl板の外観写真、(b) (a)中矢印点のSEMによる拡大像

3. ハイパワー・グローブボックス型洗浄装置の開発

当初は半導体洗浄用の蒸気二流体洗浄装置を用い、産業用機械汚れの洗浄実験を行っていたが、適用にあたって以下の4つの課題が上がった。

- ① 半導体洗浄では、ほこりなどの微粒子の除去が中心だが、産業用機械の汚れは油が酸化し、硬く、強固に密着した汚れである。
- ② 産業用機械はピストンヘッド、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。
- ③ 産業用機械は鉄製品が多く、洗浄中に錆が発生する。
- ④ 洗浄中、従事者を蒸気や汚れの飛沫から守る、安全性の確保が必要。

これらの課題を、以下のそれぞれの手法で解決した。①蒸気の圧力を0.2 MPaから0.5～1.0 MPaに高圧化させてハイパワー化を図った。②二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手洗浄できるように開発した。③ pH12以上のアルカリ性の洗浄水を用いることで鉄の赤錆びの発生を抑制した。④グローブボックス型の洗浄装置を開発した。図3(a)に②の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。樹脂だけでは蒸気圧や熱に対

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パテを使用した。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た。図3 (b) にグローブボックス型の洗浄装置の外観写真を示す。装置上部に蒸気二流体噴出用の電磁バルブを設置し、グローブボックス内に上からハンドガンが吊るされている構造である。また、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、背面には排気ファンを取り付け、蒸気を逃がすことで作業中の視覚を良好にした。

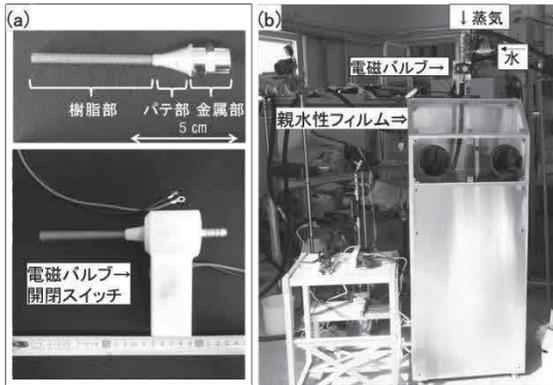


図3 (a) 3D プリンターにて試作したハンドガン
(b) グローブボックスの外観写真

4. 空気二流体による樹脂機材の洗浄

植物工場で行われている、水耕栽培で使用する発泡スチロールには、アオコ、ぬめり（バイオフィーム）汚れの洗浄のニーズがある。この汚れに対して、蒸気二流体洗浄を試みたが、発泡スチロールが融解してしまい、不適となる結果となった。蒸気二流体は蒸気の噴出であるためノズル出口温度を測定すると約100℃を示し、発泡スチロールの融点：約90℃より高いためである。高圧洗浄も検討したが、発泡スチロールの損傷が確認されたため、マイルドな洗浄方法が新たに必要になった。そこで図4の空気二流体洗浄の適用を考え、北海道立工業技術センター及びコムテック社と共同で空気二流体洗浄装置の研究開発を行った。

この装置は、コンプレッサーから圧縮空気を導入し、ポンプを利用して水道水より高い水圧を生成し、ノズルで合わせる機構となっている。発泡スチロールに対する洗浄実験を行った結果、水圧を高めても発泡スチロールを損傷させず洗浄できることを確認した。

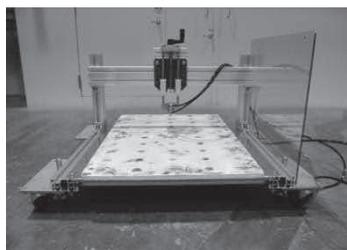


図4 試作した空気二流体洗浄装置 (2019年 ver.)

5. 加熱空気+温水による二流体のバリエーション

加熱空気と温水を用いた二流体のバリエーション²⁾装置を開発した。空気加熱用ヒーターをノズル直前に取り付けて、最高300℃の加熱空気を送入できるようにし、添加する水も90℃の温水を使用した。次に、本装置を用いて各二流体の組み合わせによる洗浄実験を行った。模擬汚れとして、ポリエチレン樹脂板（以下、PE）に油性ペンを塗り、自動送り機構で1 mm/sの速度で1パス走査させる洗浄実験を行った。その結果を図5に示す。洗浄後の汚れ除去の面積率を画像解析し併せて載せた。図5(a)の空気+水二流体は除去率が14%と低かったが、図5(c)、(d)の加熱空気を用いると除去率が上がり、図5(d)の170℃加熱空気+90℃温水の組み合わせでは除去率100%が得られた。この条件で除去率が最も高くなった理由は、2つの流体がノズル内で混合される際に加熱空気の熱で水蒸気が発生し、蒸気二流体に変化し、洗浄力があがったと考えられる。前述のHUGパワーの蒸気二流体と異なる部分として、ノズル出口の温度があげられる。蒸気二流体は約100℃であるが、170℃加熱空気+90℃温水の二流体は2つの流体の温度より低い約60℃であった。この理由として、液体と気体とで熱伝導率が大きく異なり、熱伝導の高い液体側の温度を選択的に計測してしまうこと、そして、水蒸気が発生する際に液体側は気化熱を奪われ、60℃まで冷却されたと考えられる。

また、出口温度が低いことから樹脂基材にも対応できることを確認した。

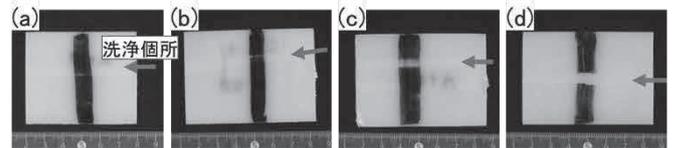


図5 洗浄後のPE、(a)室温の空気+水（除去率：14%）、
(b)空気+90℃温水（12%）、(c)170℃加熱空気+水
(83.8%)、(d)170℃加熱空気+90℃温水（100%）

6. おわりに

産業用機械の汚れに対応可能な、ハイパワー・グローブボックス型の蒸気二流体洗浄装置を開発した。蒸気圧1 MPaまで上げ、複雑形状にも対応可能な新型ノズルとハンドガンを試作した。

また、樹脂基材に対してマイルドな洗浄方法として、空気二流体洗浄装置を開発した。空気を加熱することで洗浄力をパワーアップすることができ、樹脂基材を融解させることなく洗浄できることを確認した。

引用文献

- 1) Y. Sakurai, K. Kobayashi, T. Fujikawa, T. Sanada and M. Watanabe, Jpn. J. Multiphase Flow, Vol. 26(2), 164-171 (2012).
- 2) T. Sanada, M. Watanabe, M. Shirota, M. Yamase and T. Saito, Fluid Dynamics Research, vol.40, 627-636 (2007).

(連絡先：sakamura-takasi@hro.or.jp)