

流体物理洗浄(1)

基本概念と微粒子の付着力

Physical Fluid Cleaning (1) General concepts and adhesion of fine particles

静岡大学 大学院工学研究科 機械工学専攻 准教授 真田 俊之

Sanada Toshiyuki (Associate Professor)

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Shizuoka University

北海道大学 大学院工学研究院 機械宇宙工学専攻 教授 渡部 正夫

Watanabe Masao (Professor)

Division of Mechanical and Space Engineering, Faculty of Engineering, Hokkaido University

1. はじめに

これから数回に渡って、流体物理洗浄という、著者らがこの10年近く取り組んでみたが、未だ出口が見えず、さらにこれからも取り組むであろう洗浄技術について、分かったことや分からないこと、分かりかけていることを紹介する。

洗浄と言うと、薬液、すなわち洗浄液が一番に頭に浮かび、化学反応が主だと思われる方も多いと思うが、ここでは、機械工学、特に流体工学を専門とする著者が、流体の物理的作用に着目し、貴重な洗浄液をより有効に活用する手法を紹介したい。後に詳細を述べるが、取り除きたい被洗浄物の表面への付着力よりも大きく、かつ対象物にダメージを与えない程度の物理的作用であれば、原理的には洗浄液無しで、表面洗浄が可能である。家庭における洗浄液の誤飲や事故、労働中の危険な洗浄液による病気、排水、廃液、排ガスによる地球環境問題、さらに各種規制など、現在、社会は安全・安心な洗浄への要望が高まっている。流体物理洗浄という低環境負荷な洗浄技術の開発を通じて、より安全・安心な社会の構築への一助となれば幸いである。なお、これまで半導体や太陽電池、LEDなどの電気・電子デバイス産業、自動車産業、光学部品、住宅設備機器等の分野における共同研究等を中心として得た知見を元に執筆するが、洗浄は日々の生活から最先端の工業製品まで幅広い分野での基本技術であるため、なるべく特定の洗浄技術に偏らず、普遍的な知見を記述したいと考えている。まず本報では、流体物理洗浄の基本概念として、どのような条件で洗浄が可能なのか、また被洗浄物とし

て微粒子を想定してどのような力で付着しているのか、さらに除去する際の基本的な指針について紹介する。

2. 基本概念:用語

まず流体物理洗浄の基本概念について述べる。流体物理洗浄とは、流体、すなわち、気体と液体の物理的作用を利用した洗浄である。プラズマなど特殊な状態を除き、世の中の物質は、固体・液体・気体に分けられるが、その液体と気体を合わせて一般に流体と呼ぶ。その流体の流れや圧力変化等を利用して被洗浄物を取り除くのである。なお、気体の流れ、液体の流れが正しい日本語であるように、流体(気体と液体)の流れは正しい表現である。流れを用いた洗浄の例として、家庭用の掃除機は、表面の異物をダクトへの流れや圧力によって吸い込み除去する。コンプレッサなどを用いたエアガンは、高圧の気体を利用して高速気流を生み出し、その気流によって表面での被洗浄物を吹き飛ばす。産業で使用されている超音波洗浄やレーザー洗浄、ジェット洗浄等も流体力学を利用している。

このような物理的作用を利用した洗浄が可能であるかは、その物理的作用と被洗浄物の対象表面への付着力および対象表面の強度を考えるとわかりやすい。表面に存在する粒子が流れによって表面から離れる現象は、洗浄を始めとする工業プロセスから、海洋、河川、砂などの飛散など幅広い分野で見られるため、膨大な研究がされている。最近のレビュー記事¹⁾では、300を超える文献を引用して、その複雑な機構や様々なモデルを紹介している。なお、このように幅広い分野で

研究されている知見のため、分野が異なると、その専門用語まで変わってしまう。表面に存在する粒子の流れによる移動を述べた、おそらく最も利用されている専門用語は「resuspension」だと思う。Suspensionとは日本語で懸濁液と訳され、液体中にコロイドよりも大きな粒子が分散した状態を示すが、表面に存在する粒子が液体中（ただし、resuspensionという表現では気体の場合も多い）へと戻っていく様を示していると考えられる。日本語では再飛散という言葉が用いられるが、再飛散という言葉は英訳するとre-entrainmentとなる場合が多い。周囲が気体の場合にはaerosol、エアロゾルと呼ぶ。また流れに着目すると、固液二相流（固体と液体）もしくは固気二相流（固体と気体）と呼ばれ、この英語はparticle-laden flowsなどと呼ばれる。固体粒子を含む流れはGranular flowsと呼ぶ場合もあり様々である。これらの用語はWebなどで検索する際のキーワードになると思う。

さて話を洗浄に戻す。上述したresuspensionの世界では、粒子が残るか、飛散するかが重要であるが、洗浄を考えた際には、表面を綺麗にすることが目的であるため、物理的作用によって、表面を傷つけてはならない。そのためプロセスウィンドウと呼ばれる考え方が非常に有効である。そこでまずそのプロセスウィンドウについて紹介する。

3. 基本概念:プロセスウィンドウ

プロセスウィンドウは、工業の現場で良く使用される考え方であり、ある工程の最適条件があるとする、その条件が変化した場合に、その工程での目標達成が実現できる許容範囲のことをいう。図1にKimら²⁾によって提案されているプロセスウィンドウの考え方を示す。Resuspensionの分野においても、粒子飛散の基本的な考え方というのは、粒子と表面との付着力より大きな作用（流れなど）があれば表面から粒子が飛散するというものであり、このプロセスウィンドウにおいてもこの点は同じである。このプロセスウィンドウとResuspensionとの違いは、対象物表面の強度が加わっている点である。図1に示されるように洗浄において対象物にダメージ（損傷）を与えてはいけなため、ダメージを与えない程度の作用で、かつ被洗浄物の表面への付着力を超える作用であれば除去できる、というものである。図1の場合、点線で示され

るプロセスウィンドウより幅広い分布の実線で示される物理的作用の場合には一部、材料の損傷などが発生してしまう可能性がある。すなわち、スプレーなどの液滴を噴霧する場合には、液滴径や速度の分布が、物理的作用、すなわち洗浄力の分布を生じてしまい、結果として部分的に損傷などを生じてしまう。そのため、最近では、より制御された液滴列などで、一定の物理的作用を狙う手法が報告されている³⁾。

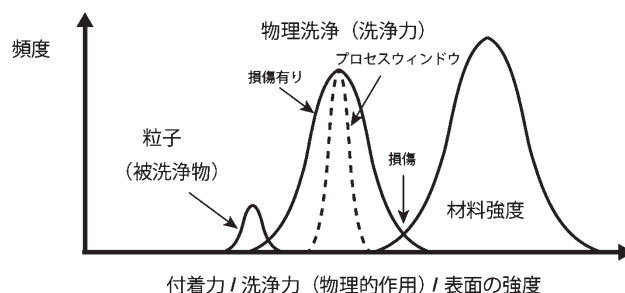


図1 プロセスウィンドウ(Kimら²⁾を参考に筆者により作成)

このプロセスウィンドウの考え方は、物理洗浄に洗浄液を使用する際にも適用可能である。図2にその概念図を示す。例えば、被洗浄物（粒子が表面に付着している状況を考える）の付着力が表面の強度と同程度だった場合、原理的に物理洗浄は不可能である。しかし、洗浄液など様々な処理をすることによってその付着力を軽減することができれば、より洗浄は容易になる。すなわちプロセスウィンドウは広がる。そのわかりやすい例を示す。

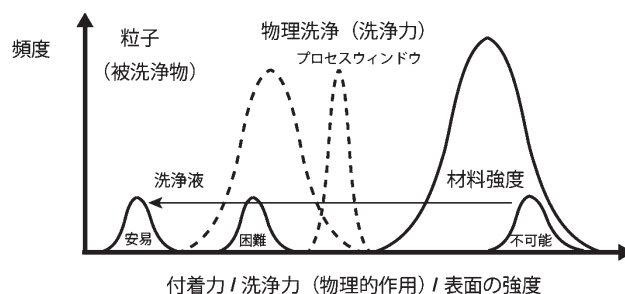


図2 物理洗浄における洗浄液の役割

ウォーターマークと呼ばれる、水が蒸発した後に形成される汚れで、この汚れにも液体の種類や雰囲気によって様々なものがある。その中でも家庭で最も良く見られる、水垢すなわち、スケールと呼ばれるものを考える。これは硬水や井戸水などの場合に発生しやすく、カルシウムやマグネシウムなどの成分が析出したものだが、かな

り強固に対象物に付着している。このような対象物を物理的作用によって除去しようとしても、表面を削らない限りは除去することはできない。すなわちダメージを与えてしまう。しかし酸性の液体を使用すれば、非常に弱い力でも除去することができる。

雪道などで使用される融雪剤である塩化カルシウムが車などに付着すると、場合によっては結晶を作ってしまう場合もあり、その付着力は非常に大きい。しかし水に溶ける塩化カルシウムは、水分を加えることによってその付着力を激減させることができる。

毛管凝縮と呼ばれる、大気中の水分が付着している微粒子などの周囲に凝縮した場合、後述するが、その表面張力によって付着力が激増する場合がある。このような場合には、その気液界面が存在することが問題であるため、液体を用いる、つまり湿式(Wet)洗浄にすれば良い。

このように洗浄液、場合によっては水のみもありえるが、なんらかの前処理によって付着力を減少させることができる例は枚挙にいとまがない。

我々も半導体製造工程における硬化した膜除去や微細ホール内の残渣にこの考え方を適用して、水のみ、もしくは洗浄液使用量の減少に成功した^{4),5)}。除去したい膜を溶解すること無しに、付着力のみを減少させることができれば、物理洗浄によって簡単に除去することができる、というわけである。

このように、洗浄を行う際に、付着している物体(被洗浄物)は何で、それがどのような機構によって付着しているのかを理解できれば、物理洗浄による洗浄の可能性は高くなる。一方で、制御されている環境(工場のラインなど)を除けば、日常生活などのほとんどは、何を洗浄しているのかが分からないことも多く、それゆえ洗浄は難しい。次に被洗浄物がどのように付着しているかについて述べる。

4. 微粒子の付着力

それでは、物理洗浄の鍵を握る微粒子の付着力について紹介する。これらに関しては日本語でも優れたレビュー記事^{6),7)}や教科書⁸⁾があるためにそちらも参照していただきたいが、ここではその代表的な力について紹介する。一般的に我々が生活しているスケールでは、重力が支配的であり、板の上に物を置いてひっくり返したら、その物は落下する。当たり前である。しかし、その重

力 mg は後述するように体積力であるため、体積が小さくなると劇的に小さくなる。すなわち粒子半径 r の3乗に比例して小さくなる。

$$mg = \rho g V = \frac{4}{3} \rho g \pi r^3$$

ここで、 m は質量、 ρ は密度、 V は体積、 g は重力加速度である。

一方、分子間力の一つであるファンデルワールス力 F_w では、球と表面との相互作用の場合、力は粒子径に比例する⁸⁾。

$$F_w = \frac{Ar}{6D^2}$$

A は Hamaker 定数で約 10^{-19} [J]、 D は表面間距離で 0.2 [nm] などの値がよく採用される⁸⁾。ここでファンデルワールス力とは、分子を凝縮させる力として(気体の状態方程式など)有名だが、その起源は原子と原子が近づく際に原子の中の原子核と電子が存在することによる相互作用なので、中性の原子でも働き、どのような物質の間でも作用する(静電気力は、電荷が表面にトラップされないと作用しない)。このような、我々が普段感じることもない分子間力であっても、微細な粒子では重力よりも支配的となる。図3に重力とファンデルワールス力の比較を示す。ミリメートルよりも小さな世界では、重力よりも桁違いにファンデルワールス力が大きくなる。そのため、微細な粒子を載せた板をひっくり返しても粒子は落ちない。

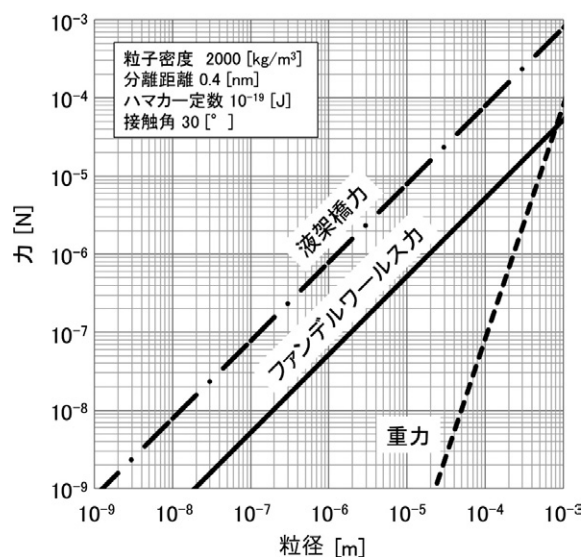


図3 ファンデルワールス力、水に対する液架橋力と重力
(後藤⁶⁾を参考に著者により作成、ここでは分離力ではなく重力を示している。) ミリメートルより小さな世界では重力の影響は小さくなる。

付着力には、その他毛管凝縮による液架橋力や静電気力など状況によって様々な力があるが、大気中で特に重要なのは液架橋力である。分子間力と同じ程度、もしくはそれを超えるオーダーの付着力を発生させる。

この液架橋力は、平面と球との間に液体(一般的には水)が凝縮することによって発生する(液膜に粒子を散布し加熱して、液膜のほとんどが蒸発しても架橋だけが残るということも考えられる)。通常の大気中ではその相対湿度は100%よりも十分に低いが、液体の界面が局面を持ち表面が凹型になっている場合には、その液面での飽和蒸気圧は平面より低くなる。そのため相対湿度が100%に達していなくても凝縮水は安定して存在することができる。球と平面との間に働く液架橋力による力 F_c は、表面張力を表現するラプラス圧力によって求められる⁹⁾。

$$F_c = 2\pi r\sigma(\cos\theta_1 + \cos\theta_2)$$

ここで σ は表面張力、 θ は球と平面それぞれの接触角である。図3にこの液架橋力を加えると、水は液体の中でも比較的高い表面張力を持つため、ファンデルワールス力よりも大きな付着力となる。そのためこの液架橋力の影響を消すことができるWet洗浄は有効なのである。なお、原子間力顕微鏡(AFM)による測定によれば、真空中であってもこの液架橋力は存在し、加熱することによってのみ除去できるとの報告がされている⁹⁾。また、ファンデルワールス力は、表面間距離 D の2乗に反比例するため、ナノスケール程度の表面粗さがある場合であっても急激に減少する。一方で液架橋力は、ナノメートル程度の粗さの影響を受けない⁹⁾。そのため接触角を変更するのが、最も有効な対策となる。

なお、この液架橋力の影響を消すためにWet洗浄が有効だと述べたが、Wet洗浄には必ず乾燥工程が必要となる。この表面張力は、洗浄後の乾燥工程でも厄介な存在であり、半導体デバイスの微細パターン崩壊やMEMSでのスティクションの原因となるため注意が必要である。

次に洗浄で対象となる微粒子の付着モデルについて紹介する。洗浄対象となるような微粒子は、微細であること、またその体積に比較して付着力が相対的に大きくなることから(体積は r の3乗、付着力はファンデルワールス力では1乗に比例)、粒子自身に変形してしまい、その変形の影響も考慮した付着力が広く提案されている。最も有名で幅広い分野で使用されているのはJKR

理論と呼ばれるものである¹⁰⁾。以下に概略を説明する。

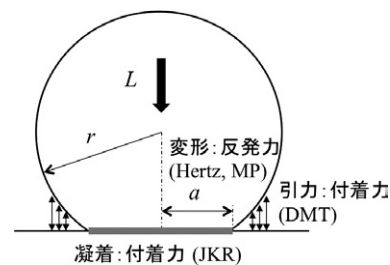


図4 球と平面との付着

弾性体の半径 r の球が平板に接触するとき、接触した部分は変形する。その接触円の半径 a は通常ヘルツの式を使用して求められる⁹⁾。

$$a^3 = \frac{rL}{K}$$

ここで、 K はそれぞれの材料物性から決まる定数であり、 L は荷重である。このヘルツの式では、変形させた後に荷重 L をゼロにすると、弾性変形のみを考慮しているため、接触面積もゼロになる。一方で、実際に弾性体を平板に押し付け変形させ、その後荷重を下げ、平板から離れそうとしても、荷重ゼロの状態でも接触面積はゼロとならない。これは凝着力が働いているためである。そこで、JKR理論では、図4及び式に示すように、接触面積に比例した凝着エネルギー(付着力)や蓄積された弾性エネルギー(反発力)等を考慮してモデル化されている。引離し力(=付着力)は接触面を引離すのに必要な力となる。

JKR理論は、比較的 r の大きな物体で金属などの分子間力が大きい、すなわち表面エネルギーが大きな場合に、実験と非常に良く一致する。しかし、万能ではなく、様々な材料の組み合わせや条件によって、異なったモデルが提案されている。JKR理論と同様に有名なものにDMTモデル¹¹⁾がある。このモデルは接触面積周囲の引力を考慮している点が特徴的である。このDMTモデルは、表面エネルギーが低い場合など、JKRとは異なる条件で使用可能な場合が多く、そのどちらのモデルが適用可能か、といったパラメータも提案されている¹²⁾。その他、塑性変形を考慮したMPモデル¹³⁾や、JKR-DMTの両方が成立しない領域でのTPLモデル¹⁴⁾など様々なモデルが提案されている。

5. 付着力(洗浄力)の測定例

次に、微粒子をプレートに付着させ、その付着力の測

定や除去実験の結果から、これまで説明したモデルの適用性や洗浄での対策を考える。洗浄力の評価には、そのサンプルの作成が必要とされるが、まずはそのサンプル作りに困難が伴う。散布する粒子を分散させること、湿度や温度を同一条件にすること、など様々な工夫が必要となる。今回紹介するサンプルは、比較的安価で手に入り、その物性(弾性係数等)が明らかにされているなどの理由から、JIS Z 8901 試験用粉体で、材質がソーダライム・シリケートのガラスビーズ、粒子径が 30 ± 1.0 、 41 ± 1.0 、 $59 \pm 1.0 [\mu\text{m}]$ のものを、同じ材質のスライドガラスの上へと散布し、作成した。粒子の散布密度は1平方ミリメートルあたり4個以下となるようフィルターやふるいを使用して散布した。粒子の散布密度がこれ以上増加すると、粒子間の相互作用により洗浄効率は上がるが、実験再現性は下がってしまう。

サンプルの作成においては、対象となる洗浄手法に応じた付着力が必要となる。今回紹介するサンプルの粒子の付着力は $O(10^{-7} \sim 10^{-6}) [\text{N}]$ 程度であり、図3とほぼ同じ値を示している。これは空気などの流れを利用した洗浄のサンプルに向いている一方で、高速二流体ジェット洗浄のように、物理的作用の強い手法には、この程度の付着力のサンプルでは、粒子をすべて除去してしまい、洗浄条件による洗浄力の評価は困難となる。なお、そのような場合には、硬化させ密着させた粒子や、密着力の高い膜などを使用して除去効率などを評価することも可能である。金属蒸着膜や高分子レジスト膜は $O(10^{-3}) [\text{N}]$ 程度の密着力がある¹⁵⁾。

さて、このようなサンプルに対し、図5に示すような複数の手法で除去を試み、定量的に比較した結果¹⁶⁾を紹介する。なお、吹き出し気流によっても除去試験を行ったが、この程度の付着力のサンプルは容易に完全除去が可能だった。図6に吸い込み試験による試験後のサンプルの様子を示す。ノズル先端とサンプルが比較的近い(a)において、ノズル径程度の範囲において粒子が除去されている。一方で距離を離れた(b)ではほとんど除去されていない。また、これらの結果を粒子径もしくは距離ごとに整理したグラフを図7に示す。ここで S_r は除去前と除去後の粒子数をカウントし、それから求めた除去率を示している。除去には最適距離($h=1\text{mm}$)が存在し、大きな粒子ほど除去しやすい。

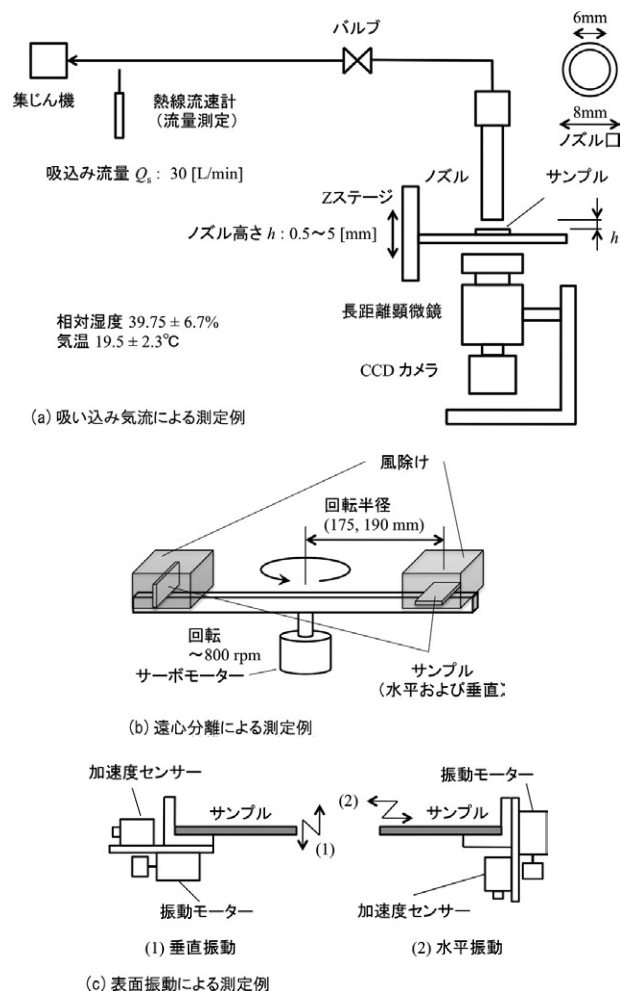


図5 付着力もしくは除去力の測定例、(a)吸い込み気流、(b)遠心分離、(c)表面振動

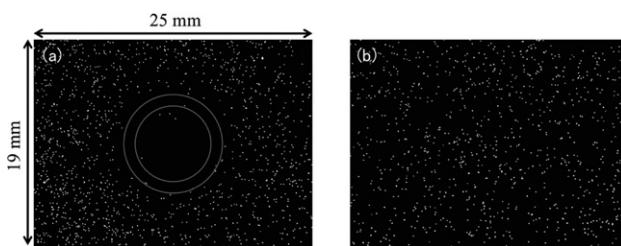


図6 吸い込み試験(図5(a)に相当)における除去の様子、(a) $h=1\text{mm}$ 、(b) $h=5\text{mm}$ 、(a)の白い丸はノズルの内径と外径を示す。

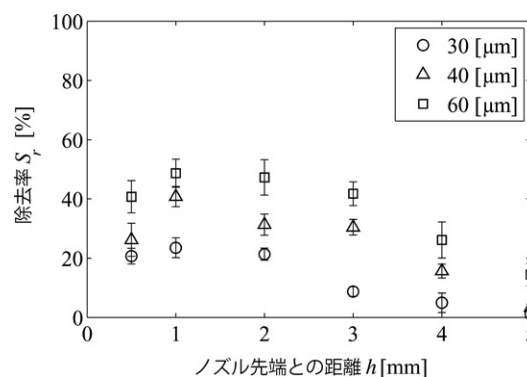


図7 吸い込み試験による粒子除去率

次に、サーボモーターによって回転させ、遠心力を作用させた場合や、振動モーターによって表面を振動させ、表面から除去した結果を示す。表面振動の試験では、表面から粒子を除去できない程度の気流で粒子を集塵する。図8は粒子径30 μm の際の結果で、遠心分離および表面振動の場合共に、加速度の増加に伴い除去率も増加している。この試験は、プレート平面に沿った向きへ加速度を印加しており、プレート設置の向きも重要である(詳細は図5を参照)。なお、ここで示したいのは、ある手法ではこの程度の除去率になる、ということではなく、丁寧に準備して再現性があるサンプルであっても、その除去手法によって、除去率が異なるということである。例えば図8では、同じサンプルにもかかわらず、同程度の加速度であっても除去率は異なっている。この理由は今のところ筆者には分からない。またこのような除去率を先ほど紹介したJKRやTPLモデルで予測することも頻繁に行われる。図8にモデルによる予測値も直線で示してある。表面振動の試験結果に着目すれば、TPLモデルは200 m/s^2 程度の加速で除去可能であり、このとき実験結果はおおよそ除去率50%程度となっている。この結果のみを用いて理論的に予測できたと言えるのであろうか。例えばモデルは遠心力の結果とは一致しない。また結果は省略するが、同程度の加速度でプレートに対し垂直方向の表面振動もしくは遠心力を加えてもある程度粒子は除去可能であるにも関わらず、モデルによる予測値はこの表に入らない程高い値となってしまう。そのため、これでは予測できているとはいえないと考える。

現在、多くのモデルにおいて、パラメータが導入されており、一見モデルと実験が一致するように見えるが、あくまでも結果を見て再現した程度であり、著者の考えで

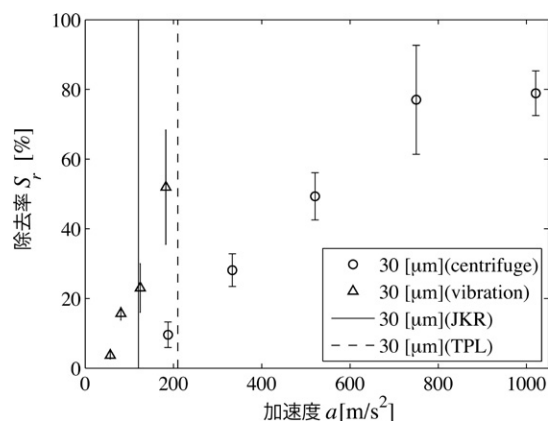


図8 表面振動および遠心分離によるRolling(横方向)による粒子除去率

は、実験をする前にその付着力や除去力を予測できるまでには、科学は発展していない。すなわち、まだ我々には理解していない事項が残されていると考えている。そもそも、除去率が存在するという段階で、付着力を除去力が上まれば除去できるというモデルは、破綻している。そのため、図1のプロセスウインドウにおいて、付着力にも分布が存在する。もちろん、この点に関しても様々なモデル(乱流エネルギーの蓄積、粒子径分布、表面粗さ等)を考慮してある程度の予測が可能になっているが、必ず何らかのパラメータを入れて実験値とモデルを一致させている。

6. 洗浄の対策

それでは、どうすれば良いのか、力学的な立場から洗浄の対策について考えたい。まず、流体の流れを使用して微粒子を除去する際、どのようなメカニズムで除去されているか、現状広く使用されているモデルを紹介する。図9は、せん断流れによって粒子が除去される際、粒子にどのような力が働くかを示したものである。粒子は前述のようにある面積を持って表面に付着する、という考え方が一般的である。このとき、流体は表面では速度ゼロ、離れるに従って速度が増加する速度勾配を持っている。そうすると、粒子には3つの移動の可能性がある。その中でも最も起こりやすいのが、Rollingと呼ばれる粒子の回転運動である。前述した振動や遠心力を印加した試験においても、粒子に表面と同一方向へと加速度を印加した方が除去率は高い。その他、飛行機が揚力を得て浮き上がるのと同じように、粒子の上の流れが早く、圧力が下がり上向きの力が働くのがLifting、付着したまま横に移動するのがSlidingである。力の概算評価¹⁷⁾によれば、微粒子ではLiftingやSlidingはRollingに比べ起こりにくい。このように、外力を加える際に、粒子が回転するように力を印加すると取れやすい。

次に検討したい点として、体積力と表面力が挙げられる。流体中に物体が存在するとき、物体に働く力として、体積力と表面力という2種類の力に分けて考えることができる。体積力とは、その名の通り存在する体積に働く力のことを示し、重力や電磁力、見かけの力である遠心力等が挙げられる。一方、表面力とは、物体の表面を介して作用する力のことで、分子衝突の運動量交

換による。表面に垂直な方向に働く圧力や表面に沿った方向に働くせん断力などが挙げられる。次に、物体の体積と表面積を考える。例えば半径 r の球の場合、体積は $4/3\pi r^3$ なのに対し、表面積は $4\pi r^2$ と、物体が小さくなるほど表面積の割合は大きくなる。そのため、微細粒子除去には物理的作用が、体積力なのか、あるいは表面力なのか重要となる。例えば遠心力は体積力である。そのため、比較的体積の大きなものには有効であるが、小さなものにはあまり作用しない。一方で、圧力は面積力であるため有効である。圧力振動を利用すれば、気流では除去が困難な微粒子も、除去可能である¹⁸⁾。

次に誤解が多いのは、付着力と粒子径の傾向である。図7で示したように、一般的に小さい粒子は除去しにくい。例えば先端半導体では、数ナノから数十ナノメートルの微粒子を除去する必要があると聞く。同時に、強い洗浄力が必要だ、との声も聞く。しかし勘違いせずに、もう一度、図3を見なおして欲しい。付着力は粒子径が小さい程、小さくなるのである。ナノスケールでは、桁違いに小さい。一方で、そのようなナノスケールの微粒子へ、物理的作用を印加することも難しいのである。例えば図9で示しているように、壁面近傍は流れも小さい。粒子が小さいため、体積力を印加しても、体積は無視できるほど小さい。そのため除去しにくいのである。相対的に大きくなる表面力を使用するのが賢明である。例えば、衝撃波のように不連続の圧力面を作成できる手法などは、微細粒子除去に有効である。圧力は表面力であるためである。ナノ粒子の移動にはレーザーなどが頻繁に使用されるのは、以上のような理由だと考えられる。

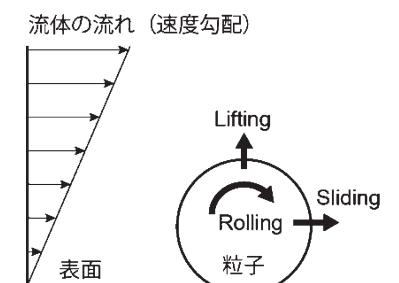


図9 流体の流れによる粒子除去モデル

7. まとめ

今回、流体物理洗浄と呼ばれる洗浄手法の基礎概念と粒子の付着力について紹介した。どの話題も悪く言

えば当たり前の話であり、大学低学年程度の学問レベルかもしれない。一方で実用を考えた際には、経験に頼りがちな洗浄では、このような検討すらされないのが現実ではないかと思う。読者に少しでも参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) Henry, C.; Minier, J.P. Prog. Energy Combust. Sci. 2014, 45, 1-53.
- 2) Kim, T-G.; Wostyn, K.L.; Mertens, P.; Busnaina, A.A.; Park, J-G. ECS Trans. 2007, 11 (2), 123-129.
- 3) Okorn-Schmidt, H.F.; Holsteyns, F.; Lippert, A.; Mui, D.; Kawaguchi, M.; Lechner, C.; Frommhold, P.E.; Nowak, T.; Reuter, F.; Pique, M.B. Cairos, C.; Mettin, R. ECS J. Solid State Sci. Technol. 2014, 3 (1), N3069-N3080.
- 4) Sanada, T.; Watanabe, M.; Hayashida, A.; Isago, Y. Solid State Phenomena. 2009, 145, 273-276.
- 5) Hayashida, A.; Seki, A.; Mashiko, T.; Sanada, T.; Watanabe, M. ECS Trans. 2009, 25 (5), 249-256.
- 6) 後藤邦彰. 化学工学. 2014, 78 (3), 171-174.
- 7) 新戸浩幸. 混相流. 2014, 28 (4), 458-465.
- 8) イスラエルアチヴィリ, J.N. “分子間力と表面力”. 大島広之訳. 朝倉書店, 2013, 600p.
- 9) 安藤泰久. “マイクロライポロジー入門”. 米田出版. 2009, 210p.
- 10) Johnson, K.L.; Kendall, K.; Roberts, A.D. Proc. R. Soc. Lond. A. 1971, 324 (1558), 301-313.
- 11) Derjaguin, B.V.; Muller, V.M.; Toporov, Y.P. J. Colloid Interface Sci. 1975, 53 (2), 314-326.
- 12) Muller, V.M.; Yushchenko, V.S.; Derjaguin, B.V. J. Colloid Interface Sci. 1980, 77 (1), 91-101.
- 13) Maugis, D.; Pollock, H.M. Acta Metallurgica. 1984, 32 (9), 1323-1334.
- 14) Tsai, C-J.; Pui, D.Y.H.; Liu, B.Y.H. J. Aerosol Sci. 1991, 22 (6), 737-746.
- 15) Mashiko, T.; Sanada, T.; Nishiyama, I.; Horibe, H. Jpn. J. Appl. Phys. 2012, 51 (6), 067101 1-6.
- 16) 田中拓也, 真田俊之. “空気を用いた非接触微小粒子除去における流量及び対象物振動の影響”. 第91期日本機械学会流体工学部門講演会論文集. 福岡, 2013-11-9/10. 日本機械学会, 2013, 0602, (USB).
- 17) Zoetewij, M.L.; van der Donck, J.C.J.; Versluis, R. J. Adhes. Sci. Technol. 2009, 23 (6), 899-911.
- 18) Katoh, K.; Song, S.; Wakimoto, T.; Soemoto, K.; Yamashita, T. Journal of Fluid Science and Technology. 2014, 9 (3), JFST0032.