

固体汚れの洗浄

Washing of Solid Soils

元木 加世・駒城 素子

Kayo MOTOKI, Motoko KOMAKI

(お茶の水女子大学大学院 人間文化研究科 ライフサイエンス専攻)

1. 固体汚れについて

一般的に汚れは、水溶性汚れ、油溶性汚れ、固体汚れの3種類に分けられる。中でも固体汚れとは、水にも有機溶剤にも溶解しない汚れのことであり、親水性汚れと疎水性汚れに分類される。親水性汚れには、泥や鉄分などがある。疎水性汚れの代表格はすすの成分であるカーボンブラックである¹⁾。繊維に付着する固体粒子汚れとしては、粒子径が小さく、かつ着色物質であるという点から、粘土、カーボンブラック、コロイド状酸化鉄などが問題となるであろう²⁾。

付着汚れに対する機械力の寄与は、汚れを繊維から引き離し、さらにその汚れが再付着しないように洗液に運び去るためのエネルギー源となる。界面活性剤などの洗剤の成分は、その機械力の作用を効率的に生かす働きをもつ。したがって、洗浄において汚れを除去するにはいかに効率的な機械作用を与えるかが課題となる。

2. 固体汚れの洗浄理論

2-1. DLVO 理論³⁾

固体汚れの洗浄を科学的に捉える場合、固体汚れ同士、または固体汚れとそれが付着する対象である基質との間の引力と斥力との釣り合い、および機械作用の影響を考える必要がある。引力と斥力から考える理論では、DLVO 理論という疎水コロイドの安定性に関する理論を土台として理解できる。DLVO 理論では、引力が斥力を上回れば粒子は凝集し、斥力が引力を上回れば粒子が凝集することなく安定化すると考える。ここで取り上げる引力とは London-van der Waals 力、斥力とは電気二重層間の反発力のことである。

2-2. London-van der Waals 力

2つの分子間に作用する London-van der Waals 力は分子間距離の7乗に反比例するので、分子間距離が小さくなるとその値は非常に大きくなるが、距離が大きくなると急激に小さくなる。本来は分子レベルで扱われる引力であるが、微小粒子同士、また

は粒子と平面基質との間にも同様の引力が働くと考えられる³⁾。

物体間に作用する London-van der Waals 力のポテンシャルエネルギー V_A は、粒子の大きさに対して粒子間距離の小さい領域では、平行平板単位面積あたり次の式で求められる⁴⁾。

$$V_A = \frac{-A}{48\pi d^2} \quad (1)$$

ただし、 d : 平行平板間距離の1/2、 A : Hamaker 定数(粒子や液体によって決まる定数)。

2-3. 電気二重層間の反発力²⁾⁴⁾⁵⁾

一般に水溶液中では粒子や繊維は電荷を帯びており、それぞれの帯電面付近には電気中性の原理によりこれらを中和するイオン(対イオン)が存在する。対イオンは静電気力によって帯電面に引き寄せられるが、同時に熱運動によって系全体に一樣に分布しようとする傾向をもつため、静電気力とイオンの熱運動とが釣り合ったとき、その分布は拡散的なものになる。一方、同符号イオンは静電気反発力によって表面付近ではその濃度がバルクより低くなり、これも拡散的に分布する。このように対イオンの過剰と同符号イオンの不足によって帯電面の溶液側には拡散電気二重層が形成される。

水溶液中において、粒子同士、あるいは粒子と基質表面が十分離れているときには、両者の電気二重層で囲まれているので静電的反発力は働かないが、二つの物体が接近して、互いの電気二重層が重なり合うと、両者間には反発力が生じる。

平行平板単位面積あたり反発力のポテンシャルエネルギー V_R は、次の式で表される⁴⁾。

$$V_R = \frac{64nkT}{\kappa} r^2 \exp(-2\kappa d) \quad (2)$$

$$r = \frac{\exp(Z/2) - 1}{\exp(Z/2) + 1}, Z = \frac{ue\phi_0}{kT} \quad (3)$$

ただし、 n : イオンの個数濃度、 e : 電子電荷、 u : イオンの原子価、 k : Boltzmann 定数、 T : 絶対温度、 $1/\kappa$: イオン雰囲気(Debye)の厚さ、 d : 平行平板間距離、 ϕ_0 : 粒子の表面電位。また、 κ は次の(4)式で表される。

$$\kappa = \left(\frac{8\pi n e^2 u^2}{c k T} \right)^{1/2} \quad (4)$$

ただし、 ε : 誘電率。

粒子が凝集するかしないかは V_A と V_R との兼ね合いによって決められる。London-van der Waals 力と電気二重層の反発力のポテンシャルエネルギーを、粒子間距離の関数として同じグラフ上に描き、 V_A と V_R の和 (V_t) を求めると、図 1 の中間に描かれた曲線を得る。

粒子の表面電位 ϕ_0 が高いときや電解質濃度 n が低い場合などには、粒子間の全ポテンシャルエネルギー曲線 $V_t = V_A + V_R$ にはポテンシャル障壁 V_{max} が生じる。 V_{max} の高さが粒子の運動エネルギーが上回っていれば粒子は凝集することができない。逆に ϕ_0 が低いときや n が高い場合などには、 V_{max} は消失し、粒子はポテンシャルの谷 V_{min} へ落ち込み凝集を起すことになる。

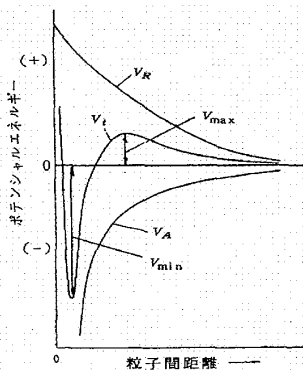


図 1. V_A , V_R , V_t の関係

3. 電気浸透流動による固体粒子汚れの除去²⁾

通常の機械洗浄では、繊維間隙を流れる洗液は Poiseuille 流動を示し、その流速プロフィールは放物線状である(図 2(A)). それゆえ基質表面に付着した微小粒子は、大きな粒子よりも洗液の力学的な流動作用を受けにくいと考えられる。このような微小粒子を除去するためには、基質表面のごく近傍での洗液の流速を大きくする必要がある。そこで固体表面付近に形成された電気二重層に外部から接線方向に電場を加えると、固液界面の拡散電気二重層のイオンが電位勾配によって移動し、これによって水の流動が生じる。この現象を電気浸透と呼び、ここでは通常の洗浄条件では表面から数 10 Å のところで流速は一定になる(図 2(B)). したがって、微小粒子が付着した被洗物を洗液に浸漬し、外部から電圧を加えれば、繊維の間隙で電気浸透が起こるので、汚れ粒子に流体力学的な力が作用し、汚れ

の除去が可能となる。

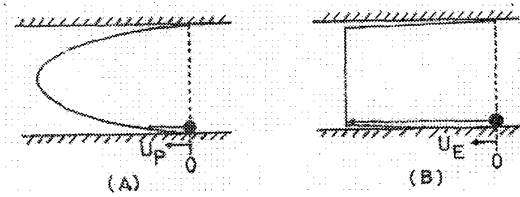


図 2. 繊維間隙の洗液の流動プロフィール

電気浸透速度 U_E は次の式で与えられる。

$$U_E = - \frac{eX}{4\pi\eta} \cdot \zeta \quad (5)$$

ただし、 X : 電場の強さ、 η : 流体の粘度、 ζ : 界面動電位。

田川らは、上記の原理に基づいて装置を試作し、種々の汚染布(木綿標準人工汚染布、泥汚染布、酸化鉄汚染布、ポリスチレンラテックス汚染布)を用いて洗浄実験を行ったところ、繊維からの粒子の除去過程において、電気浸透流動が洗浄の機械作用として有効に働いていることがわかった。図 3 に粒子径 60 nm の酸化鉄粒子を付着させた木綿布を界面活性剤濃度一定で電場の強さを変化させて洗浄したときの布の洗浄効率を示す。粒子に作用する垂直方向の力が U_E^2 に比例することから、横軸には U_E^2 がプロットしてある。このグラフから実際の織物内での電気浸透流動が固体粒子汚れの除去に寄与していることがわかる。

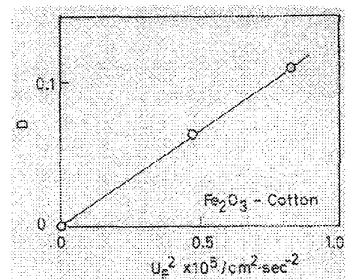


図 3. 電気浸透流動における酸化鉄汚染布の洗浄効率

4. 引用および参考文献

- 1) <http://liv.ed.ynu.ac.jp/kaisetsu/mecha01.pdf>
- 2) 田川美恵子, 繊維製品消費科学, 24(7), 275-279(1983)
- 3) <http://liv.ed.ynu.ac.jp/kaisetsu/mecha03.pdf>
- 4) 臼井進之助, 洗浄に関するシンポジウム 第 20 回記念論文集, 207-211(1988)
- 5) 北原文雄, 洗浄に関するシンポジウム 第 20 回記念論文集, 212-215(1988)