

VII-32

クロスフロー型膜ろ過の付着・剥離モデル化について

○ 東北大学大学院 正会員 後藤光亀

1. はじめに

本報告は、前報告で示したクロスフロー型膜ろ過の付着・剥離モデルに粒子間に働く分子間力を考慮した場合を検討する。

2. 粒子間に働く分子間力

地面に垂直に膜を置きた場合のクロスフロー型膜ろ過を考える。粒子に働く力は、流体力学的な力としてクロスフロー流速による抗力と揚力、透過流束による抗力、そして重力と浮力である。また DLVO 理論による電気的反発力及び van der Waals 力を考慮する。本モデルでは粒径 d_p [m] の球状粒子が膜面又はケーキ層上にある場合に、その粒子が堆積するかについて議論する。着目する粒子のクロスフロー方向前方には障害物が存在し、それを簡略化し、高さ h [m] の直方体であると仮定し、この点での力のモーメントの釣り合いから堆積確率を求める（詳細は文献を参照）。

クロスフロー流速による抗力 F_{p1} 、重力・浮力 F_{p2} 、透過流束による抗力 F_{p3} 、クロスフロー流速による揚力 F_{p4} は前報告と同様で、電気的反発力 F_{q3} と van der Waals 力 F_{q4} は次のようになる。

表面間距離が D 離れた粒径 d_p の粒子の電気的反発力 F_{q3} [N] および電気的反発力 F_{q4} は次式に示される。

$$F_{q3} = F_R(D)_{\text{sphere}} = -\frac{32\pi R T C_e \psi^2 d_p}{\kappa} \exp(-\kappa D) \quad \kappa^2 = \frac{2n z_i^2 e^2}{\epsilon k T} \quad \psi = \frac{\exp\left(\frac{z_i e \psi_\delta}{2kT}\right) - 1}{\exp\left(\frac{z_i e \psi_\delta}{2kT}\right) + 1}$$

$$F_{q4} = F_A(D)_{\text{sphere}} = -\frac{A d_p}{24 D^2}$$

R: 気体定数 [J/mol/K], T: 温度 [K], C_e : モル濃度 [mol/m³], D: 表面間距離 [m], n: 電解質濃度 [mol/m³], z_i : 電解質の価数 [-], e: 電気素量 [C], ϵ : 誘電率 [C/V/m],

k: ボルツマン定数 [J/K], ψ_δ : 表面電位 [V], A: ハマーカ一定数 [J] と表される。

3. 結果および考察 クロスフロー流速が 0.5m/s、透過流束が 1m/d、表面電位-30mV の場合に粒子に働く力と粒径の関係を図-1 に示す。粒径が大きくなると電気的な反発力 (F_{q3}) および van der Waals 力 (F_{q4}) が小さくなるが、粒径が $1\mu\text{m}$ 付近より小さくなるとその影響は無視できなくなる。このとき、流体力学的な力 F_{p1} , F_{p2} と透過流束方向の力 F_{q1} ($=F_{p1}+F_{p2}$) と透過流束の反対向きの力 F_{q2} ($=F_{q3}+F_{q4}$) と粒径の関係を図-2 に示す。粒径が約 $0.8\sim 1.5\mu\text{m}$ では $F_{q1}>F_{q2}$ となるため堆積する可能性があるが、粒径がそれ以上小さくなると F_{q2} の流体力学的以外の力すなわち電気的な反発力が卓越し、 $F_{q1}<F_{q2}$ となるため堆積することができない。一方、粒径が大きい場合には流体力学的な力（クロスフローによる揚力が卓越し、 $F_{q1}<F_{q2}$ となるので堆積ができない。以上より、粒径が大きい領域では流体力学的な力が、粒径が小さい領域では電気的斥力が卓越するとき粒子は堆積できない領域が存在する。

図-3 は、前述のすべての力のモーメントの釣り合いから堆積確率を求めたものである。同図には、2つの粒子間力を考慮しない場合も示した。粒子間力を考慮しないと透過流束による抗力が卓越するので粒径が小さいほど堆積し易くなる。これに対し、2つの粒子間力を考慮すると $0.4\sim 1.4\mu\text{m}$ の範囲では堆積するが、それより小さい粒径では電気的斥力が、大きい粒径では流体力学的力が卓越して堆積しなくなる。

図-4,5 は粒子のゼータ電位を変化させた場合の各 F_q と粒径の関係を示す。図-4 より透過流束方向のみの力を考えると、 F_{q1} と F_{q2} はゼータ電位の低下によって堆積できる範囲が拡大する。特に、図-5 に示すようにゼータ電位がゼロの場合電気的斥力がないので、粒径が $0.2\mu\text{m}$ より小さくなると van der Waals 力が他の透過流束方向の項より大きくなり、堆積できる確率が上昇する。本計算の仮定の上では $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 周辺の粒径が流体力と粒子間力の影響を左右する結果を示した。砂ろ過の砂層内での砂粒子と流入微細粒子の付着過程も $10\sim 100\text{m/d}$ （ここでのクロスフロー流速よりはるかに小さい）のろ過速度のとき、 $0.5\sim 1\mu\text{m}$ 付近で捕集効率（砂粒子と微細粒子の衝突合一現象）が最小になると試算されている。この様に対象とする水理学的環境が異なっても、 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 周辺の粒子径が界面への付着過程を考える上で興味深い寸法である。環境水中の微粒子のゼータ電位は-30mV よりもやや小さい値を示すことがあり、特に下水放流口の下流のように、イオン強度が高いとさらに低くなる。したがって、図-4,5 に示したようにクロスフロー型膜ろ過では膜面に堆積する確率は高くなる。

4. おわりに 今回のような理想的粒子状態でのモデル計算では、実際の複雑な付着・剥離過程を表現するには十分ではないが、各因子の影響を評価し得る点では十分有効な方法である。また、膜ろ過のファウリングを考える際には、粒子径のさらに小さい有機物質のゲル層形成物質が問題であるのでさらなる評価検討が必要となる。

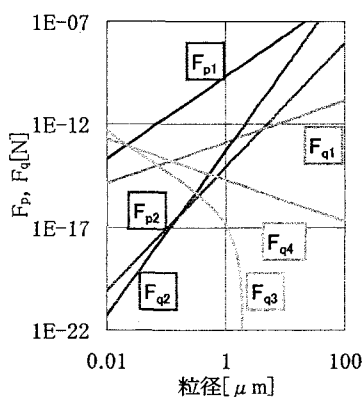


図-1 粒径と F_p, F_q の関係

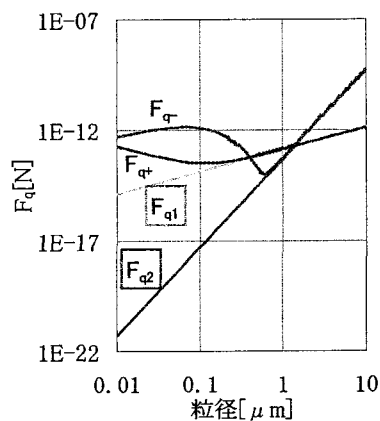


図-2 粒径と F_q の関係

(図-1,2,3: クロスフロー流速 0.5m/s, 透過流速 1m/d、ゼータ電位 -30mV)

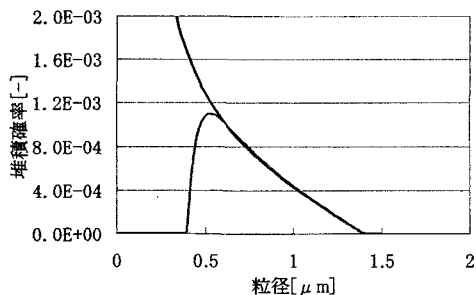


図-3 粒径と堆積確率

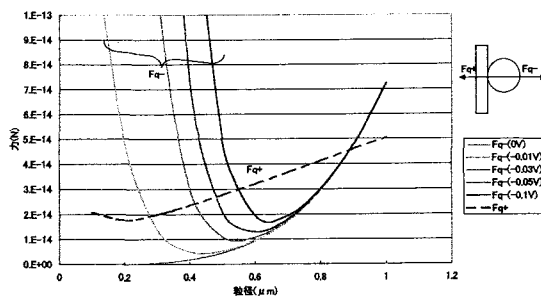


図-4 粒径および粒子のゼータ電位と F_q の関係

(クロスフロー流速 0.6m/s, 透過流速 0.5m/d)

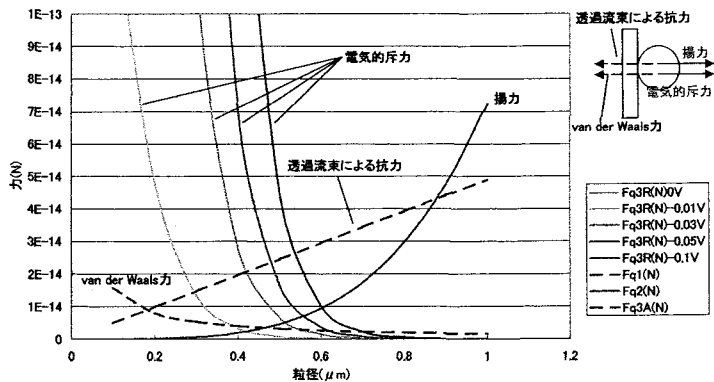


図-5 粒径および粒子のゼータ電位と各 F_q の関係 (クロスフロー流速 0.6m/s, 透過流速 0.5m/d)

- 参考文献: 1) 小粥愛子「クロスフロー型膜ろ過におけるファウリング現象のモデル化に関する研究」東北大学修士論文、2002 年度
2) 小粥愛子他「クロスフロー型膜ろ過における堆積・剥離現象のモデル化」土木学会東北支部技術研究発表会、平成 13 年度