

四球体間に付着した静的液架橋による毛管力の評価

Estimation on the capillary force of a liquid bridge adhered to four spheres

応用化学専攻 藪下 和宏
YABUSHITA Kazuhiro

諸言

流動層造粒において液架橋力は他の粒子間力に比べ支配的である。そこで、正四面体に配位した4粒子間の空隙が全て満たされているCapillary状態における静的液架橋の液架橋力(毛管力)の評価を行った。

1. 理論

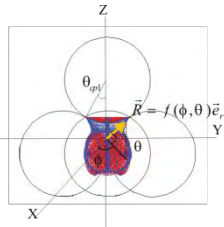


Fig.1 Coordinate system 液架橋形状の球座標系を示した。液架橋形状の決定は、一定体積条件の液架橋に対するポテンシャルエネルギーを最小とする事で静的液架橋形状を決定した。その際、(1)式を用いて $[0 \leq \phi \leq \pi/3, -\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2]$ の領域で計算した。

$$E = \int_{\pi/2}^{-\pi/2} \int_0^{\pi/3} f[(f^2 + f_\theta^2) \cos^2 \theta + f_\phi^2]^{1/2} d\phi d\theta + B_0 \int_{\pi/2}^{-\pi/2} \int_0^{\pi/3} \frac{f^4 \cos \theta \sin \theta}{4} d\phi d\theta + K \left[V - \int_{\pi/2}^{-\pi/2} \int_0^{\pi/3} \frac{f^3 \sin \theta}{3} d\phi d\theta \right] \quad (1)$$

1.2 毛管力の決定

上記の数値計算によって得られた液滴形状から液架橋表面の曲率と接触角度から毛管力を計算する。静的液架橋の毛管力 F_c は(2)式を用いて、液表面の圧力差 ΔP と液滴表面の表面張力の二成分の和によって表される。液架橋表面の圧力差は液滴表面の曲率 $2H$ で表され、Young-Laplace 方程式を解くことによって決定される。

$$F_c = 6 \left[\int_0^{\pi/3} \Delta P (r^2 \cos \theta_{cp1} / 2) d\phi + \int_0^{\pi/3} r_c \cos \theta_{cp1} \sin(\theta_{cp1} + \theta_c) d\phi \right] \quad (2)$$

2. 実験

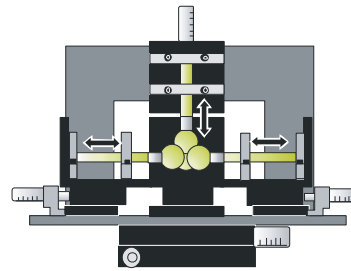
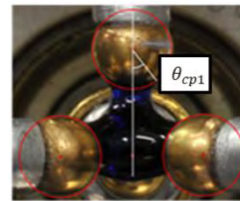
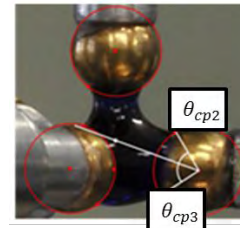


Fig.2 Experiment apparatus

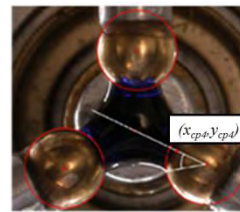
Fig.2 の装置図を用いて液架橋体積、形状を測定した。球には真鍮球(半径 $R=1.00[\text{mm}], 1.60[\text{mm}], 2.38[\text{mm}], 3.175[\text{mm}]$) テフロン球(半径 $R=1.587$



(a) y-z plane



(b) x-z plane



(c) x-y plane
Fig.3 Filling angle for each views

[mm], 2.40[mm], 3.175[mm]) を使用した。マイクロシリンジを用いて青色に着色したイオン交換水で4球体間に液架橋を形成し、液架橋体積を増加させ、液架橋を維持できなくなるまで測定した。その際、液架橋を形成する最小・中間・最大液架橋体積を測定し、それぞれの体積でデジタルカメラ(Nikon D700)を用いて Fig.3 のように3方向から撮影した。得られた画像からデジタルイザ(Calcomp Drawing Board3)を用いて液架橋形状及び充填角度($\theta_{cp1}, \theta_{cp2}, \theta_{cp3}$)を測定し、得られた角度は数値計算によって液滴形状用いて液架橋形状及び充填角度($\theta_{cp1}, \theta_{cp2}, \theta_{cp3}$)を測定した。得られた3つの充填角度は接触点を決め数値計算によって液滴形状を決定する際に使用した。今回、無次元数として重力と表面張力の比を表す Bo 数($Bo = (\rho_L - \rho_G)gR^2/\sigma$)を用いた。

3. 結果及び考察

3.1 4球体間に付着する液架橋体積

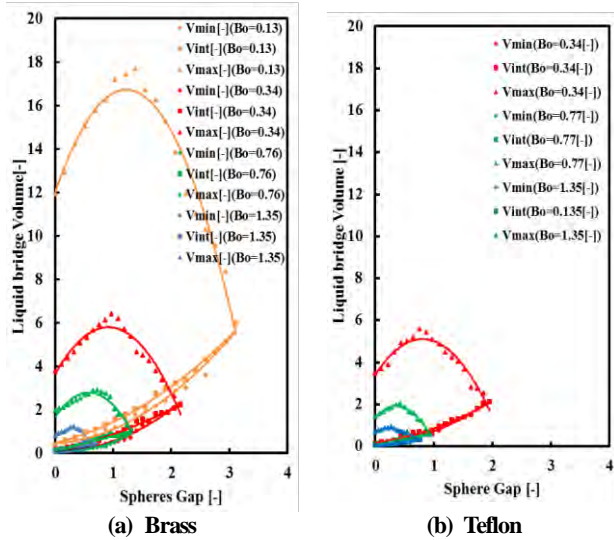


Fig.4 Liquid bridge volumes at the limited condition and the critical point at the capillary state

Fig.4(a)に真鍮球、(b)テフロン球を用いた時の、各 Bo 数における無次元液架橋体積の限界条件及び臨界球間距離と無次元球間距離の関係を示した。各曲線の交点は Capillary 液架橋状態における臨界球間距離を示している。(a)(b)共に Bo 数が小さくなるにつれ、無次元液架橋体積及び臨界球間距離が増加することが分かった。これは、Bo 数が小さくなるにつれ重力の影響が小さくなるからだと考えられる。真鍮球とテフロン球で材質を変え、似た Bo 数で液架橋体積及び臨界球間距離を比較したところ、テフロン球の方が小さくなった。これはテフロン球の方が真鍮球よりも撥水性が大きいからだと考えた。

3.2 充填角度の測定

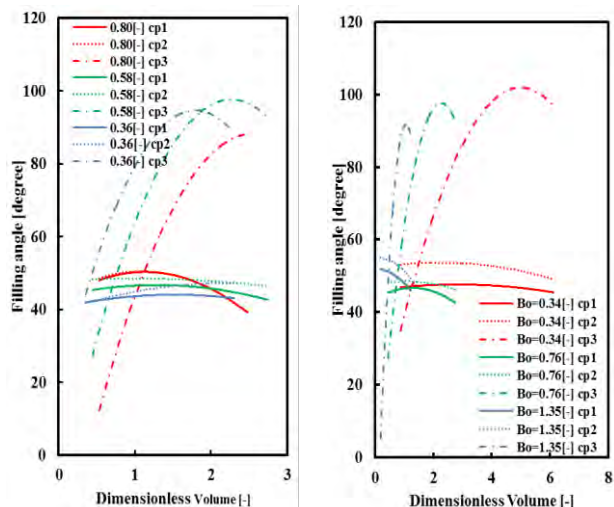


Fig.5 Effect of sphere gaps on three filling angles

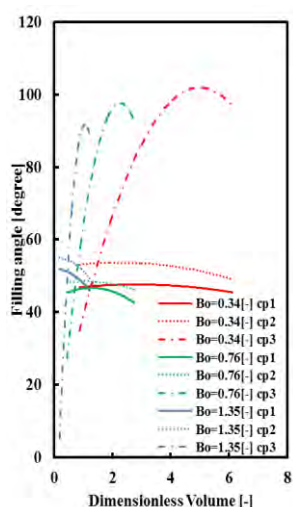


Fig.6 Effect of Bo number on three filling angles

Fig.5 に Bo=0.76[-]と一定とした時の異なる球間距離、

Fig.6に異なる Bo 数の3つの充填角度($\theta_{cp1}, \theta_{cp2}, \theta_{cp3}$)に対する影響を示した。 $\theta_{cp1}, \theta_{cp2}$ は無次元液架橋体積を増加させても大きな変化はせず、共に似た角度をとる事が分かった。また、 θ_{cp3} は重力の影響を大きく受けることから液架橋体積が増加するにつれて大きく変化した。

3.3 数値解析による毛管力の測定

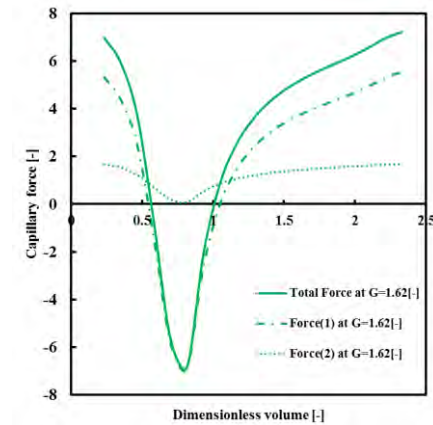


Fig.7 Effect of bridge volume on the capillary force

Fig.7に Bo 数(Bo=0.34[-])及び、3つの充填角度($\theta_{cp1}, \theta_{cp2}, \theta_{cp3}$)を $\theta = 30[\text{degree}]$ に一定とした際の無次元液架橋体積と毛管力の関係を示した。無次元液架橋体積を増加させるにつれて(2)式の表面張力項はあまり変化しなかった。しかし、液滴形状が凸型となることから曲率が負の値をとり、全毛管力の値が負となった。

4. 結言

4球体間に付着する静的液架橋による毛管力の評価をするために、実験及び数値解析を行った。

- Bo 数や球の濡れ性による液架橋体積及び臨界球間距離の相違を明らかにした。
- Bo 数を一定とした時の各球間距離及び、Bo 数を変化させた時の、充填角度の分布の相違を明らかにした。
- 数値計算から液滴形状を決定し、そこから毛管力を明らかにした。
- 充填角度($\theta_{cp1}, \theta_{cp2}, \theta_{cp3}$)を同じ値にし、無次元球間距離を変化させた時の計算可能範囲及び毛管力を明らかにした。

5. 参考文献

- K.Yabushita et al, MMPE, Kanazawa (2011) L-20
- K.Murase et al, WCPT6, Germany (2010) 132