

疎水性表面間に生じるマイクロバブルによる引力的相互作用

筑波大学 学生会員 ○坂入 信之

非会員 石田 尚之

正会員 京藤 敏達

1. 研究の背景と目的

近年の環境問題への意識の高まりから、河川、湖沼の水質への関心が高まっている。特に湖沼の様な閉鎖性水域では、流れがないことから浮遊物質が長時間にわたって滞留し、水質を悪化させる原因となっている。浮遊物質は主に、粘土粒子などのコロイドが凝集体を形成することにより構成されている。そのような物質の凝集分散挙動は静電的な反発力と van der Waals 引力に依存するとした DLVO 理論によって説明されてきた。しかし、疎水性の高い表面間に作用する引力は、DLVO 理論によって導出される力よりも 1 オーダー程大きく、この引力の発生原因については、矛盾のない説明を与える理論は存在しなかった。

近年、石田らによる一連の研究から、疎水性の高い表面上にはナノメートルオーダーの大きさの気泡（以下、ナノバブル）が存在し、このナノバブルが二つの表面を架橋することによって、強い引力が生じることが実験的に確認された [1, 2]。しかし、理論的計算ではその実験結果に対してよく一致するものは未だ示されていない。

また、これと類似の現象に気相中の固体表面を水が架橋し、引力を発生させる現象（液架橋）があるが、これら架橋による引力を統一的、かつ理論的に説明した研究はなされていない。既往の研究に於いて二表面間の架橋による引力を理論的に説明した研究はない。そこで、本研究では二つの表面が架橋されることによって生じる引力を理論的に評価し、実験と比較することを目的とした。

2. 理論

理論的な計算は界面を表現する Young-Laplace 方

程式が解析的に解を得ることが困難であることから数値解析により解析を行った。

二流体間の界面（以下、メニスカス）は Young-Laplace 方程式によって決定される。Young-Laplace 方程式は直交座標系では非線形で、解析解を得ることが困難であるため本研究では数値計算により解を求めた [3]。数値計算は図 1 に示す座標系で行った。またこの座標系での Young-Laplace 方程式の表式は

$$\begin{aligned}\frac{d\alpha}{ds} &= -\frac{\sin \alpha}{y} + \Delta p \\ \frac{dy}{ds} &= \cos \alpha \\ \frac{dz}{ds} &= \sin \alpha\end{aligned}$$

である。ここで、 $y, z, \Delta p, \alpha, s$ はそれぞれ無次元化された水平方向の距離、鉛直方向の距離、流体間の圧力差、偏角、メニスカスの弧長である。それぞれの変数は表面張力係数と図 1 に示した球の半径により無次元化した。

境界条件として、平板上での条件 $\alpha|_{s=0}=\theta_c, y|_{s=0}=y_0, z|_{s=0}=0$ を用いた。ここで、 θ_c は接触角である。この境界条件下で、 y_0 と Δp をパラメータとして変化させた。それらの条件下で球面上での偏角が接触角と等しくなるものが架橋しているメニスカスの解であるとした。

上の方法で解いた Young-Laplace 方程式の解から界面上での圧力差 Δp と体積の間の関係を求め、それと気体の構成則が一致する点での条件が物理的に存在している条件であるとした。ここで気体の構成則として、体積一定と等温変化を仮定した。こうして得られた条件から無次元化された架橋力は

$$F = \pi \sin^2 \phi \Delta p + 2\pi \sin \phi \sin \alpha$$

から算定される。ここで ϕ は図 1 に示すメニスカス

キーワード：マイクロバブル, Young-Laplace 方程式, 気体の構成則

連絡先：〒305-8573 つくば市天王台 1-1-1, 筑波大学水圏環境工学グループ 京藤研究室

E-mail: s0323332@ipe.tsukuba.ac.jp

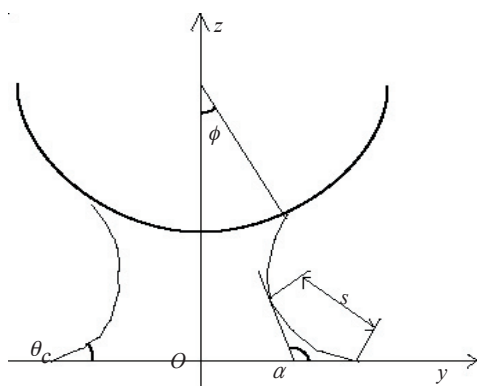


図 1: 計算に用いた座標系

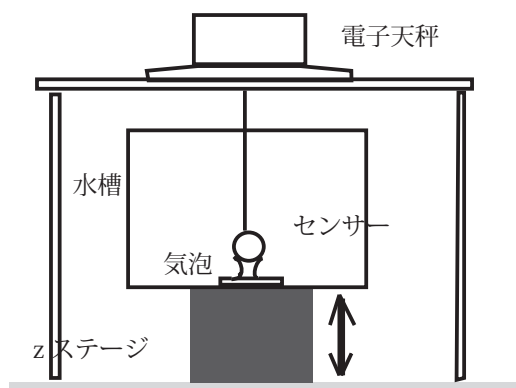


図 2: 実験装置の概略

と球の接点の間の仰角である。

3. 実験

実験装置の模式図を図 2 に示した。シリコン平板とガラス球をモデル表面として用い、シランカップリング剤により表面を修飾し、液架橋には接触角 67 度、気泡の架橋には接触角 108 度のものを用いた。

平板上に気泡、または水滴をシリンジにより付着させ、その平板を電動ステージにより z 方向に移動させる。チャンバの上部から電子天秤より球をつり下げ、これを平板上の水滴または気泡に接触させて、表面間の架橋を作成した。そこから z ステージを平板と球が接触するまで上方へ移動させ、平板と球が接触した時点で z ステージの移動を下方へ切り替えることで二つの表面を引き離した。このときの引力を架橋力とした。

4. 結果と考察

接触角 67 度の液架橋の、108 度の気泡による架橋の結果をそれぞれ図 3, 4 に示した。表面間の距離

に対して架橋力が単調に減少する傾向が実験結果と計算結果ともに得られた。図中の横軸は二つの平板間の距離、縦軸はセンサーの半径と表面張力係数によって無次元化された引力を示す。

図 3 に示した液架橋の理論と実験の結果から液架橋に於いては架橋による引力の理論計算と実験結果は傾向が一致する。

図 4 に気泡による架橋の場合は理論計算が実験値を大きく上回ることが示されているが、これは気相中での液体の接触角と、液相中での気泡の接触角が異なることに起因すると考えられる。

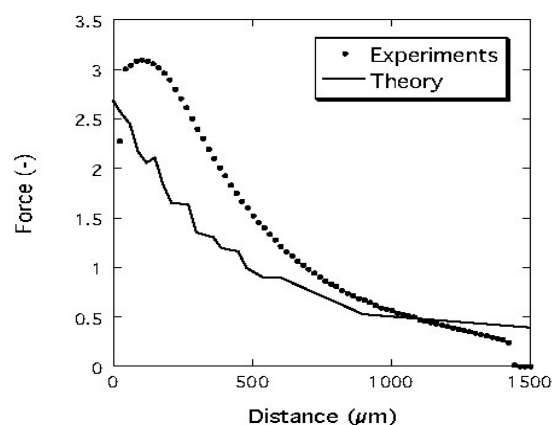


図 3: 接触角 67 度での液架橋の結果

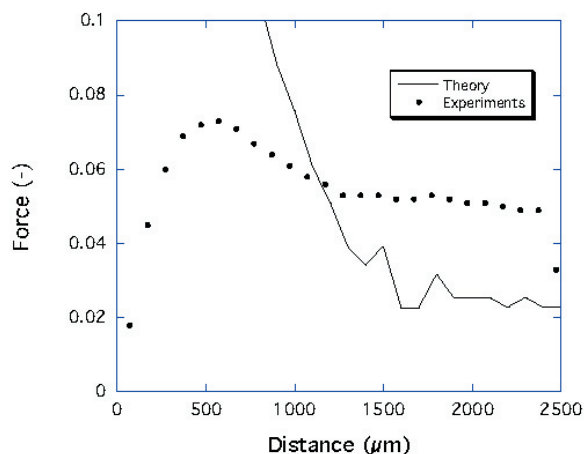


図 4: 接触角 108 度での気泡の架橋の結果

参考文献

- [1] N. Ishida et al., Langmuir, vol. 16, no. 16, pp.6377-6380 (2000)
- [2] N. Ishida et al., Langmuir, vol.16, no.13, pp.5681-5687 (2000)
- [3] E. Pitts, J. of Fluid Mech., vol. 63, part 3, pp.487-508 (1974)