臨界点近傍の二成分流体一様相中を並進する液滴まわりの流れ

Flow around a Droplet Moving Translationally in a Near-Critical Binary Fluid Mixture

物理情報工学科　藤谷研究室　60918037　福成 毅

Abstract : The drag coefficient of a liquid droplet in a near-critical binary fluid mixture is changed by the preferential attraction between the droplet and a component of the mixture. It was recently shown that the deviation of the drag coefficient can be negative. We study changes in the flow field associated with the sign change of the deviation term.
Keywords : colloid dynamics, Ginzburg-Landau model, Hadamard-Rybczynski problem

1　背景・目的

粒子が流体中をゆっくり並進運動するとき、受ける力の大きさは速さに比例し、その比例係数を抵抗係数という。大きさ数 μm 程度の粒子が流体中に分散している系をコロイドという。粒子は固体であったり液体であったりする。インクや牛乳がそれぞれの例である。粒子の拡散係数はコロイドの基礎的な物性を表し、粒子の抵抗係数と関連づく。

分散媒が相分離臨界点近くの一様相にある二成分流体であるとき、通常そのうちの一成分と粒子との親和性があり、粒子周りにその成分の濃度が高い領域が現れる。この吸着層のために抵抗係数は変化する。その補正項 δ は親和層の厚さを粒子半径で割った値 ζ_c と液滴内外の粘性係数の比 ψ に依る。最近 ζ_c と ψ によっては δ が負になる、つまり液滴周囲の吸着層が抵抗係数を小さくしうることが示された[1]。これは吸着層の分だけ粒子が周りの流体をひきずるという直感に反する。粒子周りの流れを計算することでこの現象の原因を探ることが本研究の目的である。

2　方法

粒子表面のポテンシャルを $f_s(\varphi) = h_0 - h\varphi$ で表す。φ は流体局所における二成分の密度差、h_0 と h は定数である。$|h|$ が大きくなると吸着層が厚くなる。流体の運動方程式は、

$$0 \;=\; -\nabla(p + p_{\mathrm{osm}}) - \nabla\cdot\Pi_{\mathrm{grad}} + \tilde{\eta}\Delta\boldsymbol{v} \qquad (1)$$

となる。$\mathbf{1}$ は等方性テンソル、p は密度差を考えていなくても加わってくる圧力、p_{osm} は二成分の密度差によって生じる浸透圧であり、Π_{grad} は密度差の勾配から生じる圧力テンソルを示す。また $\tilde{\eta}$ は粒子外部の粘性係数、$\boldsymbol{v}$ は流体の速度ベクトルである。

h を無次元化したパラメータ λ に関して支配方程式を摂動展開し摂動の一次までとると高階の連立微分方程式が得られるが、定数変化法によって解析的に解ける。この解から速度場と応力場を計算できる。応力場から粒子の受ける力も計算できる。尚、p_{osm} や Π_{grad} の表式は系の自由エネルギーから導くが、それは $\zeta_c \ll 1$ で有効と考えられる。

3　結果・考察

δ が ζ_c と ψ によりどのように変わるかを Fig. 1 に示した。実線は δ が 0 になるところを示している。実線より上部の領域は $\delta < 0$、下部は $\delta > 0$ となり、$0 \leq \psi \leq 3$ では δ は全て正である。また、寒色であるところほど δ の値が小さくなっている。$\zeta_c \approx 0.69$ 以上だと全ての ψ において $\delta > 0$ となることがわかった。λ が 0 でないと、吸着層がない場合 $(\lambda = 0)$ から流速場は変化するが、その変化分を $\Delta\boldsymbol{v}$ で表す。

$(\zeta_c, \psi) = (0.4, 10)$ の場合は $\delta < 0$ となるが、この場合の xz 平面上の $x > 0$ の領域における $\Delta\boldsymbol{v}$ の流線を Fig. 2 に示した。点線は粒子の輪郭を表しており、粒子は z 軸正向きに動いている。x 軸上の粒子から遠いところで $\Delta v_z < 0$ となっている。(ζ_c, ψ) の値を変化させて流れを計算し、$x = 200$ における x 軸上の Δv_z の正負を $\pm$ として Fig. 1 に重ね書きすると、この Δv_z と δ　の正負が一致しているということがわかった。$\delta > 0$ の場合は粒子が外側の流体をひきずっているように見える。$\delta < 0$ の場合は、粒子の流体をひきずっているように見えるのは吸着層だけで、そこにできた循環によってその外側の流れが潤滑されていると考えられる。

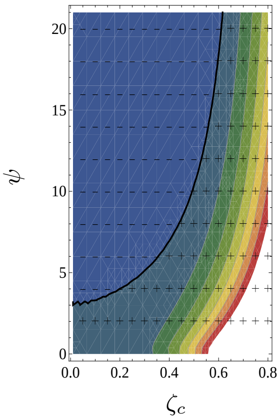

Fig. 1: Dependence of δ on ζ_c and ψ.

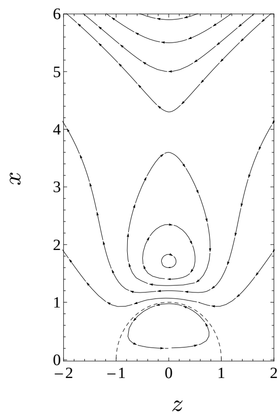

Fig. 2: Deviation flow in $\zeta_c = 0.4$ and $\psi = 10$

参考文献

[1] Y. Fujitani: J. Phys. Soc. Jpn **83** 024401 (2014).

[2] J. W. Cahn: J. Chem. Phys. **66** 3667 (1977).