

粒子法を用いた液滴追跡のための気液間作用モデルの検討
Study on gas-liquid interaction model for numerical analysis of liquid droplets
using particle method

○ 辻村光樹 (早大・院), 窪田健一 (JAXA), 佐藤哲也 (早大)

要約: 宇宙輸送機燃料などの気液二相流には, 大小様々な大きさの液滴が任意の位置に発生する. その追跡に従来型の数値解析を用いると, 計算負荷の大きい高精度な格子を解析領域の全体に張る必要が生じる. そこで本研究では, 格子法では捉えきれない微小な液滴の追跡に粒子法を使用する手法を有効な解決策と考え, その導入のための気液間運動量交換モデルを開発している. 本講演では, 開発中のモデルを 3 次元液滴に適用したときの影響評価を議論する.

1. 研究背景と目的

宇宙輸送分野には, 例えば燃料噴霧の微粒化や液体燃料のスロッシング, 宇宙カプセルの着水など, 気液二相流が生じ, その制御が問題となる現象が多くある. 理論解析が困難であることから, 数値流体力学がその挙動予測に有効である. 粒子法は流体を動き回る計算点 (粒子) で離散化するラグランジュ型の数値解法であり, 気液界面が滑らかに表現されること, 界面が大変形する現象への適用が容易であることなどから, 気液二相流の有効な数値解析手段として注目されている. 本研究ではさらに, 解析領域中に液滴が多く発生する現象に対して, 格子法と粒子法を併用するハイブリッド手法の使用が有効であると考えている. 格子は粗く設定しつつ, 格子幅以下の液滴を粒子法でラグランジュ的に追跡すれば, 微小液滴の挙動予測と計算点数の削減を両立できると期待される. 本研究では, その際に必要となる気液間の運動量交換モデルの一つとして「空気力モデル」を考案し, 二次元単一液滴の変形解析により妥当性を評価した⁽¹⁾. 本講演では, 三次元単一液滴について同様の評価を行い, 三次元解析への適用可能性について議論する.

2. 空気力モデル

格子法で解析される気流が粒子法で解析される液滴に与える力学的作用を, ニュートン流理論を用いてモデル化した. ニュートン流理論では, ある壁面に衝突した気流の運動量のうち, 壁面の接線方向成分のみが残り, 法線方向成分は壁面への力積になると考える (図 1). 本モデルではこの力積を次式より求め, 気流の上流側にある表面粒子に圧力の境界条件として与える.

$$P = P_{\infty} + \rho_g (\vec{u}_g \cdot \vec{n})^2 \quad (1)$$

ここで $P_{\infty}, \rho_g, \vec{u}_g, \vec{n}$ はそれぞれ大気圧, 密度, 流速, 液滴表面の法線ベクトルである. また, 下流側には大気圧 P_{∞} を与える. 本モデルで評価される抗力は, 円柱では抗力係数 $C_D = 1.3$ であり, $Re = 10^3 - 10^5$ における実験値 1.0 と近い値をとる.

3. 解析結果

本研究では空気力モデルの妥当性評価のため, 液滴変形 (droplet breakup) の解析を行った. これは一様流中に置かれた単一液滴の変形現象であり, 変形様式はウェーバー数で分類できるこ

とが知られている⁽²⁾。気流（空気， $\rho_g = 1.2 \text{ kg/m}^3$ ）は一様流と仮定して解析せず，液滴（水， $\rho_l = 1000 \text{ kg/m}^3$ ， $\nu = 1.0 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ ， $\sigma = 7.2 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ）のみ MPS 法で解析した。2次元で解析すると，液滴は低ウェーバー数で分裂せず，高ウェーバー数では sheet stripping 型の変形となり，実験事実と一致するが，中間ウェーバー数で出現すると期待される bag breakup は再現できない⁽¹⁾。今回は3次元とし，ウェーバー数を 15, 45, 150, 1000 に設定して解析したが，2次元における上記傾向と同様の結果が得られた（図2）。また，2,3次元の結果を見比べると，3次元の方が変形しにくいことがわかった。変形様式を支配するウェーバー数は気流側の慣性力と表面張力の比であるから，液滴変形はこの2者の影響を受ける。前者は， $Re = 10^3 - 10^5$ において2次元円（円柱）と3次元球の抵抗係数を比較するとそれぞれ 1.0, 0.4 であることから，3次元液滴にかかる慣性力の方が小さい。一方で表面張力は，3次元曲面で大きくなる。よって，2,3次元解析間で同じウェーバー数に設定しても，3次元では気流慣性力が小さく，表面張力が大きく評価され，2次元時よりも液滴が変形しにくくなったものと考えられる。2次元での数値解析結果を3次元である実現象と比較する際には，この点に注意が必要である。

4. 結論

本研究で開発中の空気力モデルを3次元単一液滴の変形に適用し，妥当性を評価した。Sheet stripping は再現可能，bag breakup は再現不可であり，2次元で得られている傾向と一致した。同じウェーバー数でも2,3次元解析間には変形のしやすさに違いがあり，2次元での数値解析結果と実現象との比較には注意が必要である。

参考文献

- (1) 辻村他, MPS 法を用いた気流による液滴変形のモデル化, 第 31 回数値流体力学シンポジウム講演論文集, D09-3 (2017).
- (2) Pilch, Erdman, Use of breakup time data and velocity history data to predict the maximum size of stable fragments for acceleration-induced breakup of a liquid drop, *Int. J. Multiphase Flow*, 13, 6 (1987), 741—757.

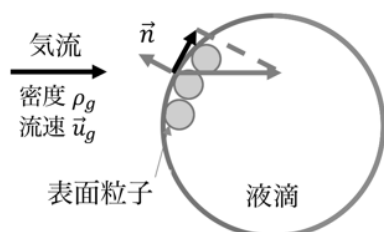


図 1: ニュートン流理論によるモデル化

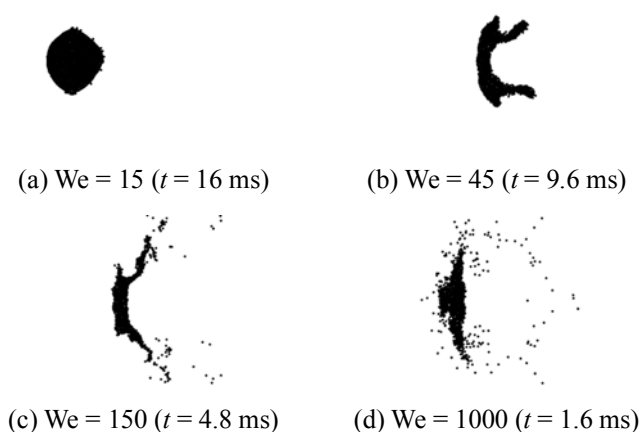


図 2: 液滴変形の解析結果（3次元）