

音場浮遊させた液滴の蒸発および析出挙動の遷移過程

Transition process of evaporation and precipitation behavior of droplet by acoustic levitation

丸山 侑太郎¹⁾

指導教員 長谷川 浩司²⁾

1) 工学院大学大学院 工学研究科 機械工学専攻 混相流工学研究室

2) 工学院大学 工学部 機械工学科 混相流工学研究室

キーワード：音場浮遊，液滴，蒸発，析出， d^2 -law

1. 緒言

音場浮遊法は任意の空間に音響定在波を形成することにより，定在波の節付近に液滴を浮遊させることが可能な非接触技術の1つである^[1,2]。この手法は，容器壁面に起因する不均一核生成および汚染の回避が可能なため，材料創成や創薬などでの無容器プロセッシング技術としての応用が期待されている^[2]。しかしながら，この手法は超音波により試料を浮遊させることに起因し，浮遊液滴周りに流動が生じ，この流動が液滴の物質輸送に影響を与えていることが示されている^[3]。高精度な非接触制御技術の確立に向けて，音場浮遊液滴の蒸発および析出挙動の現象理解が必要となるものの，非線形音場と浮遊試料の相互作用による動的挙動や液滴内外部に発生する音響流，またそれらの複合現象に起因する複雑さゆえ，析出を伴う液滴の蒸発における実験的知見が乏しいのが現状である。

本研究では音場浮遊液滴の蒸発および析出挙動の現象を理解し，高精度な非接触制御を行うことを目的としている。本報では析出を伴う液滴の蒸発挙動の実験的評価と既存の理論を拡張し比較した結果を報告する。

2. 実験装置および実験条件

Fig.1に本研究で用いた実験装置の全体概要図および浮遊液滴の動的挙動の可視化観測体系を示す。まず関数発信機にて発信された正弦波信号をアンプで増幅し，パワーメータを介して超音波振動子に入力する。超音波振動子に接続された下部ホーンから超音波を発信し，リフレクターに反射させ

ることによりホーン-リフレクタ間に音響定在波が形成される。また液滴はシリンジにて注入し定在波の節付近に浮遊する。浮遊させた液滴はハイスピードカメラで撮影し，同時に放射温度計を用いて液滴の界面温度の計測も行った。関数発信機によって発信する正弦波は19.3 kHzとし，室温および相対湿度は25°C，50%とした。試験流体は溶質濃度20wt%のNaCl水溶液を使用した。

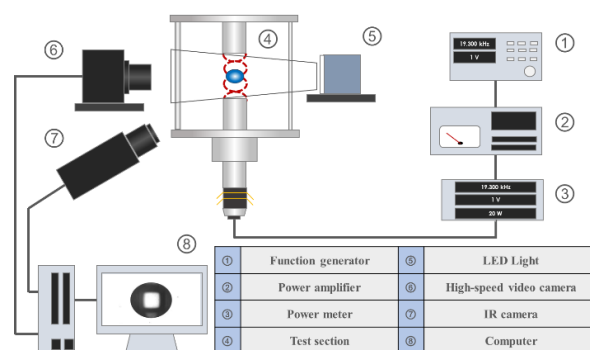


Fig. 1 Schematic of experimental setup.

3. 実験結果および考察

Fig. 2にNaCl水溶液の蒸発過程を示す。図中の画像が各時刻における可視化画像である。また図中の横軸が時間，縦軸は各時刻における液滴等価直径を初期液滴等価直径で除し二乗した無次元面積を示す。図中のプロットが実験値であり，液滴の初期体積等価直径 d_{0l} は1.6 mmとした。可視化画像から液滴は時間経過とともにNaClの析出が確認でき，約1860 s 以後液相が確認できなくなった。また実験結果の蒸発過程は約1860 sまで無次元表面積が減少し，それ以後一定となる2段階の蒸発過程を示した。これらの原因は，時間経過とともに液滴の水

成分が蒸発し、約1860 sでNaClが完全に析出したためだと考えられる。また実験結果と理論との比較を行った。単成分液滴の蒸発を表す式として、式(1)の d^2 -lawが示されている^[4]。NaCl水溶液は水分のみが蒸発するため、式(1)を用いて算出した。

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 = 1 - \frac{8DM}{\rho_l R} \left(\frac{P_s}{T_s} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \times \frac{RH}{100} \right) \frac{t}{d_0^2} \quad (1)$$

ここで、 D は拡散係数、 M は分子量、 ρ は密度、 R は気体定数、 P は蒸気圧、 T は温度、 t は時間、 d_0 は初期等価直径、添え字の s は液滴界面、 ∞ は周囲気体を示している。液滴の界面温度 T_s は放射温度計による実測値を代入した。Fig. 2の実線が式(1)より導いた理論値である。実験値と理論値を比較すると大きく乖離している。これは不揮発性物質の溶解による蒸気圧降下の影響が考えられる。NaCl水溶液は蒸気圧降下により純粋な水よりも蒸発速度が遅くなるため乖離したと考えられる。

式(1)の応用として蒸気圧降下を考慮する理論式の式(2)が示されている^[5]。そこで実験結果と式(2)とを比較した。

$$\left(\frac{d}{d_0}\right)^2 = 1 - \frac{8DM}{\rho_l R} \left(\frac{P_s(1 - i \cdot x_u)}{T_s} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \times \frac{RH}{100} \right) \frac{t}{d_0^2} \quad (2)$$

ここで x_u は溶質モル分率、 i はVan't Hoff factorを示す。 i は2^[5]とした。また式(2)中の x_u は溶質のモル分率であり、使用するためには各時刻のモル分率を推定する必要がある。

Fig. 3に各時刻の濃度の推定結果を示す。図中横軸が時間、縦軸が質量濃度を示す。濃度の推定方法は実験結果から1860 sで水分が完全に蒸発したと仮定し、質量分率の式から算出した。その結果、約560 sで飽和水溶液になることが推定された。

推定結果を用いて各時刻の x_u を計算し、式(2)に代入し理論を算出した。Fig. 4に実験値と蒸気圧降下を考慮した理論との比較を示す。図中の破線が新たに算出した理論である。実験値と理論値を比較すると約1300 sまで一致を示した。

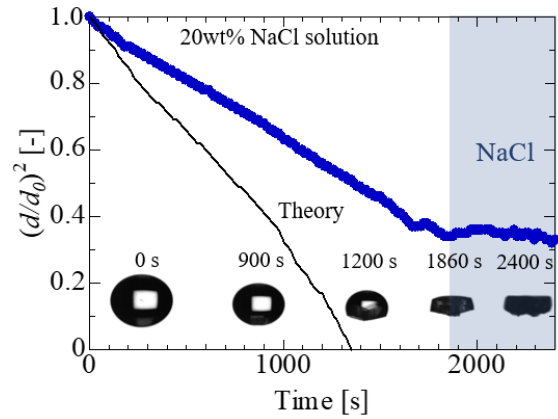


Fig. 2 Evaporation process of NaCl solution droplet.

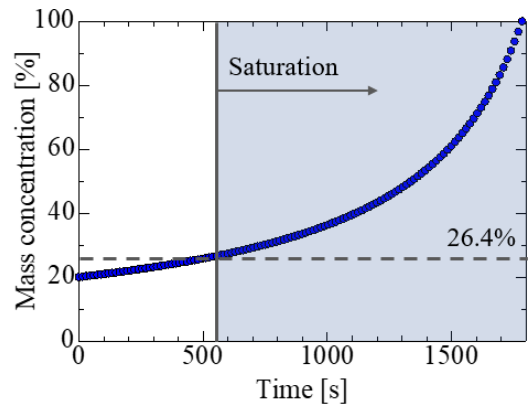


Fig. 3 Estimation of mass concentration.

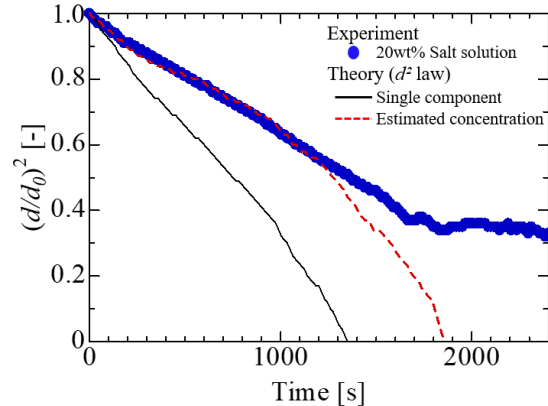


Fig. 4 Comparison of theory and experiment considering vapor pressure depression.

参考文献

- [1] Vandaele, V. et al, *Precis. Eng.*, **29** (2005) 491.
- [2] Foresti, D. et al., *PNAS*, **110**, (2013) 12549.
- [3] Yarin, A. L. et al., *J. Fluid Mech.*, **399**, (1999) 151.
- [4] Frohn, A., & Roth, N., *Springer Science and Business Media*, (2012).
- [5] Combe, N. A., & Donaldson, D. J., *J. Phys. Chem. A*, **121**, (2017) 7204.