



音場浮遊液滴の蒸発および析出プロセス

○丸山 侑太郎¹, 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

²工学院大学 工学部 機械工学科

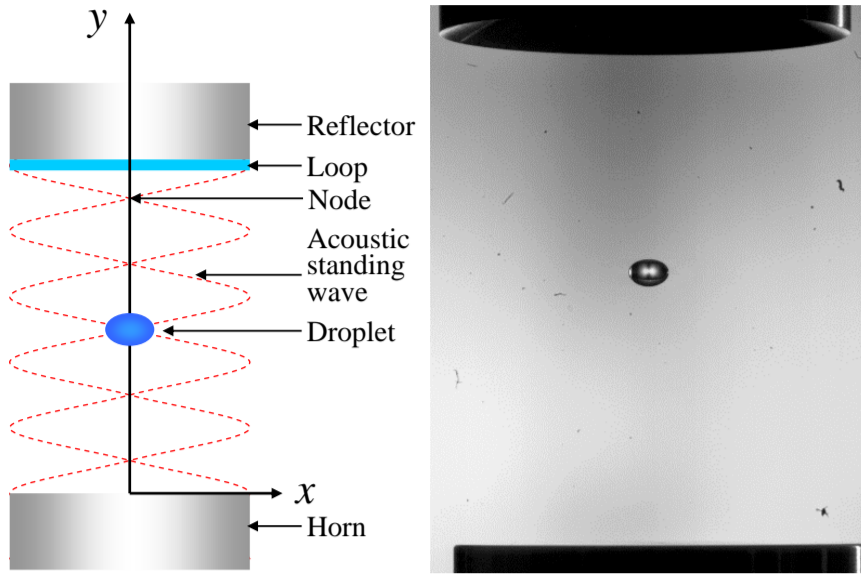
研究背景

音場浮遊法の概要

音場浮遊法

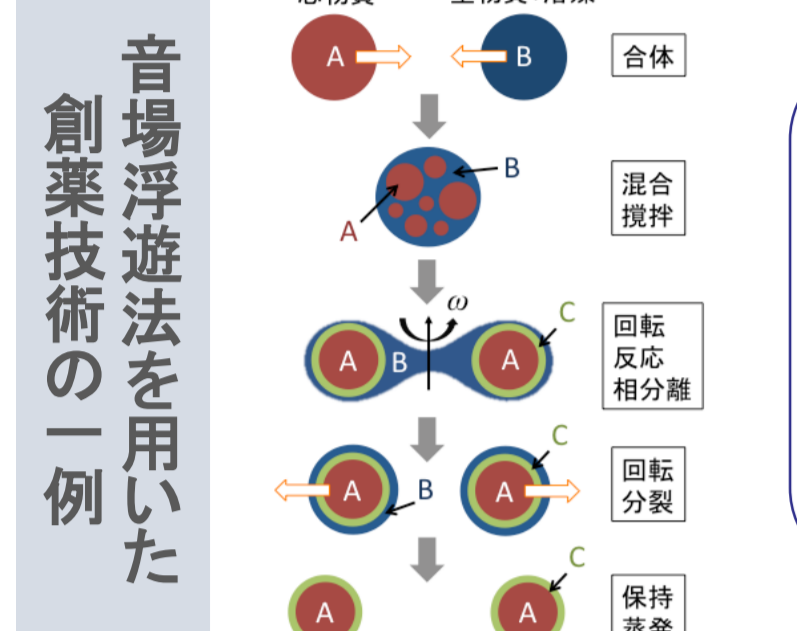
任意の空間内に音響定在波を発生させ、音圧分布を形成させる。

液滴は定在波の節付近で浮遊可能。

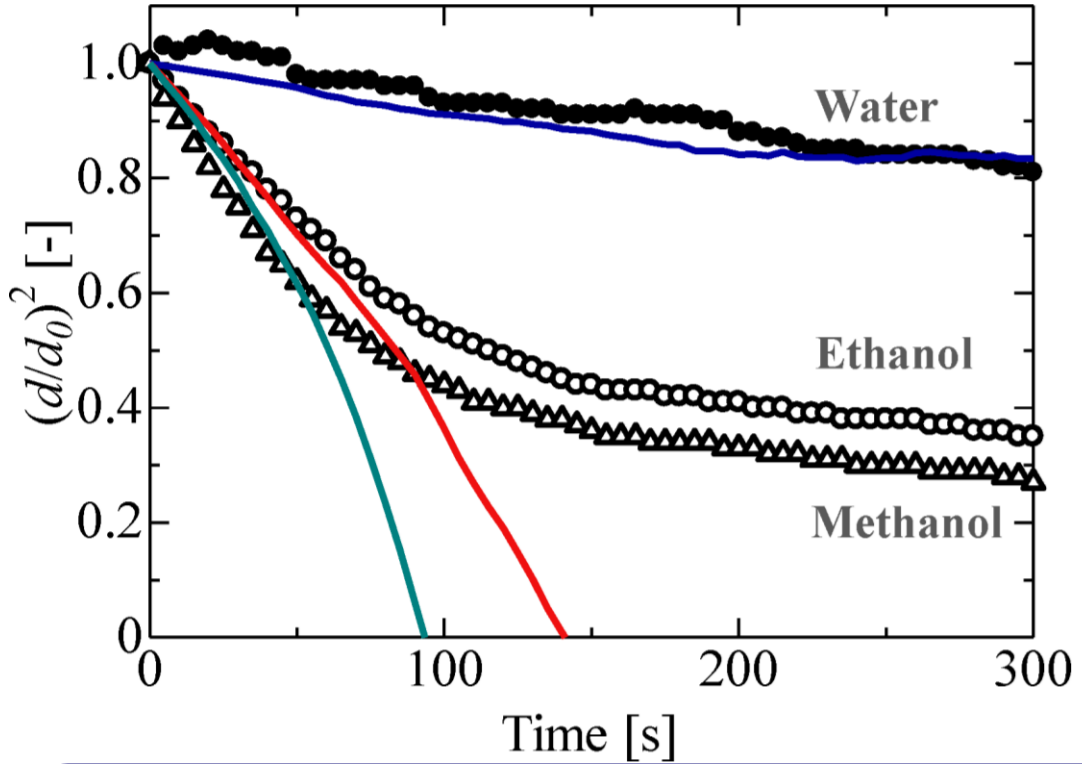


音場浮遊法の応用: 非接触流体制御技術

非接触状態での液体、固体の移動制御、混合、蒸発等を行うことを目的とし、材料創成や創薬などへの活用が期待されており、音場内での高精度な液滴制御が求められる。



先行研究: 多成分液滴の蒸発過程



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

d : Droplet diameter [mm]
 d_0 : Initial droplet diameter [mm]
 D : Diffusion coefficient [m²/s]
 M : Molar mass [kg/mol]
 ρ_l : Liquid density [kg/m³]
 R : Gas constant [J/K·mol]
 P : Vapor Pressure [Pa]
 T : Temperature [K]
 RH : Relative Humidity [%]
 t : Time [s]

高精度な非接触流体制御技術の実現に向けて、多成分液滴の蒸発挙動の詳細理解や予測は行われている。一方で、析出を伴う液滴についても挙動の理解や予測が求められる。

研究目的

課題

音場浮遊させた多成分液滴の蒸発および析出挙動を理解するため、析出を伴う試料の溶質濃度が蒸発過程や析出時刻に及ぼす影響を定量的に予測する必要がある。

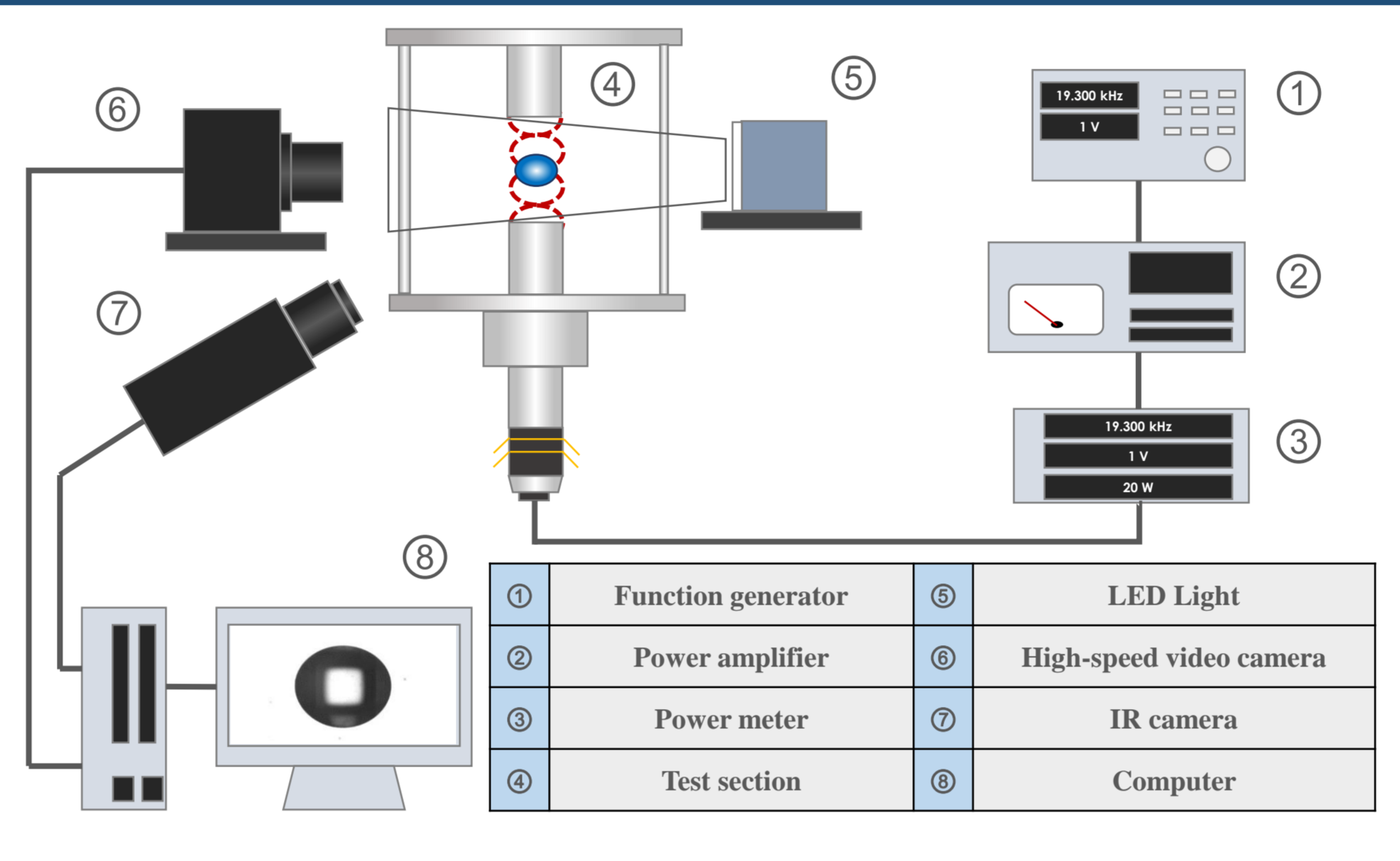
目的

析出を伴う液滴の蒸発による溶質濃度の変化を予測し、溶質濃度が蒸発過程に及ぼす影響を明らかにする。

アプローチ

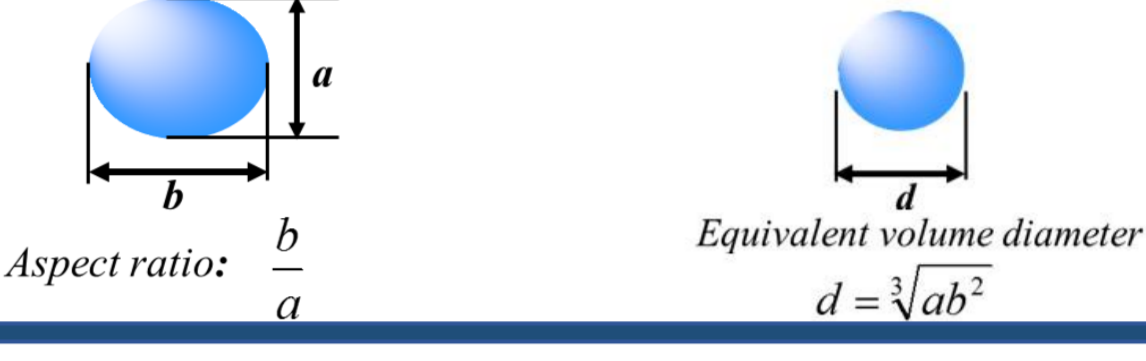
- ✓ 析出を伴う液滴の蒸発過程の観察および評価
- ✓ 実験結果から各時刻塩分濃度の推定
- ✓ 実験結果と蒸発モデル(d^2 -law)との比較

実験装置



実験条件

Reflector type	R36
Distance between the horn and reflector [mm]	48
Input frequency [kHz]	19.3
Sound pressure [kPa]	1.3-1.8
Test sample	Water Salt solution NaCl solution
Temperature [deg. C]	25±2
Humidity [%]	50±7
Equivalent diameter d [mm]	1.0-2.0
Aspect ratio b/a [-]	1.0-1.6
Wave length of sound λ [mm]	18



浮遊試料の物性値

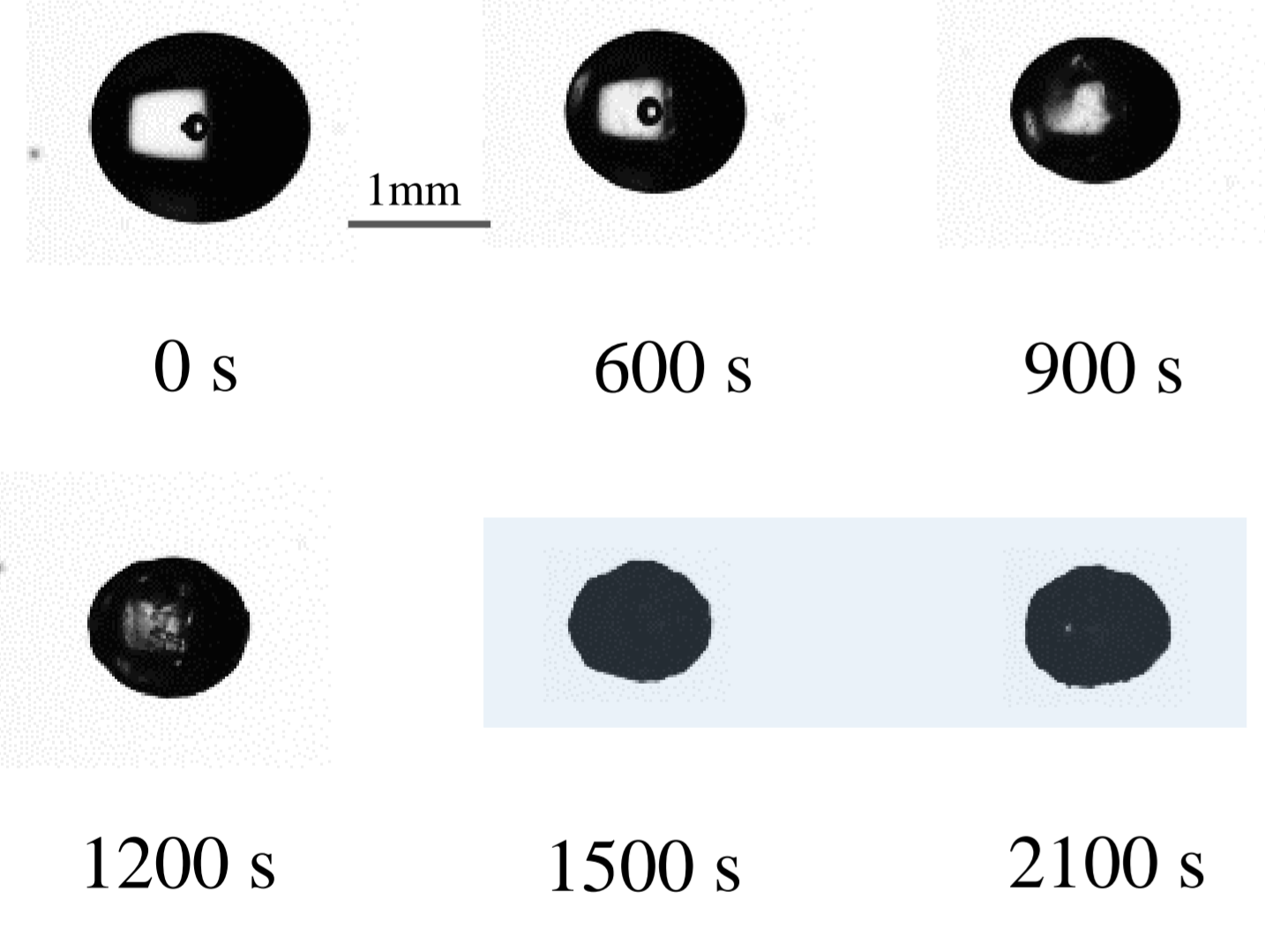
Sample	Density [kg/m ³]	Surface tension [mN/m]	Viscosity [mPa·s]	Saturated vapor pressure [kPa]	Diffusion coefficient [cm ² /s]
Water	998	73	0.89	2.3	0.254
10 wt% NaCl-water	1071	76	1.07	-	-
15 wt% NaCl-water	1109	78	1.19	-	-
20 wt% NaCl-water	1148	80	1.56	-	-
25 wt% NaCl-water	1189	82	1.86	-	-
26.4 wt% NaCl-water (saturation)	1197	-	-	1.8	-

Ref.) [1] 機械学会 流体の物性値集 (1983)
[2] 日本熱物性学会 新編熱物性ハンドブック (2008)
[3] A. Apelblat, The Journal of Chemical Thermodynamics (1998)

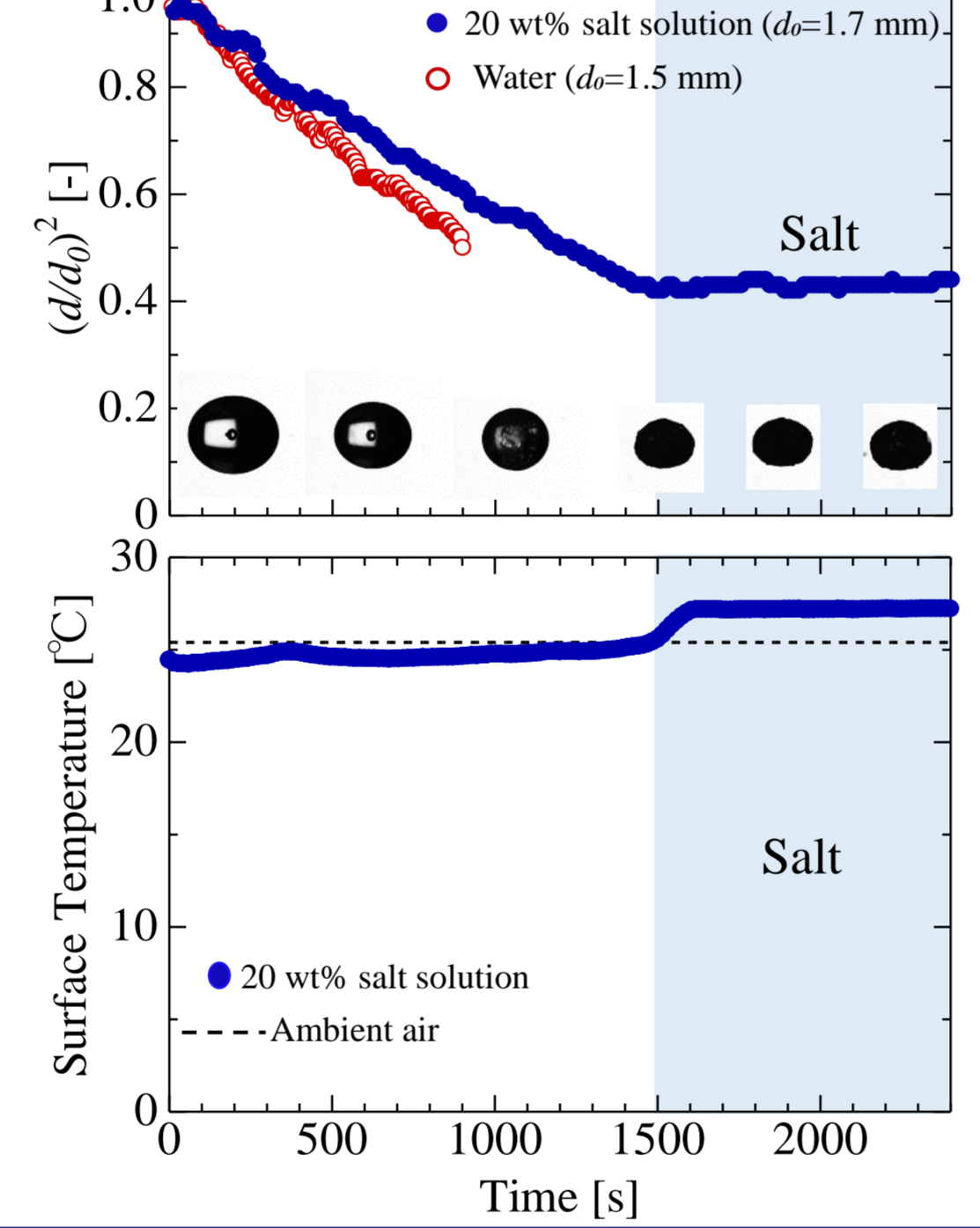
実験結果および考察

浮遊液滴の蒸発過程

食塩水の時系列変化



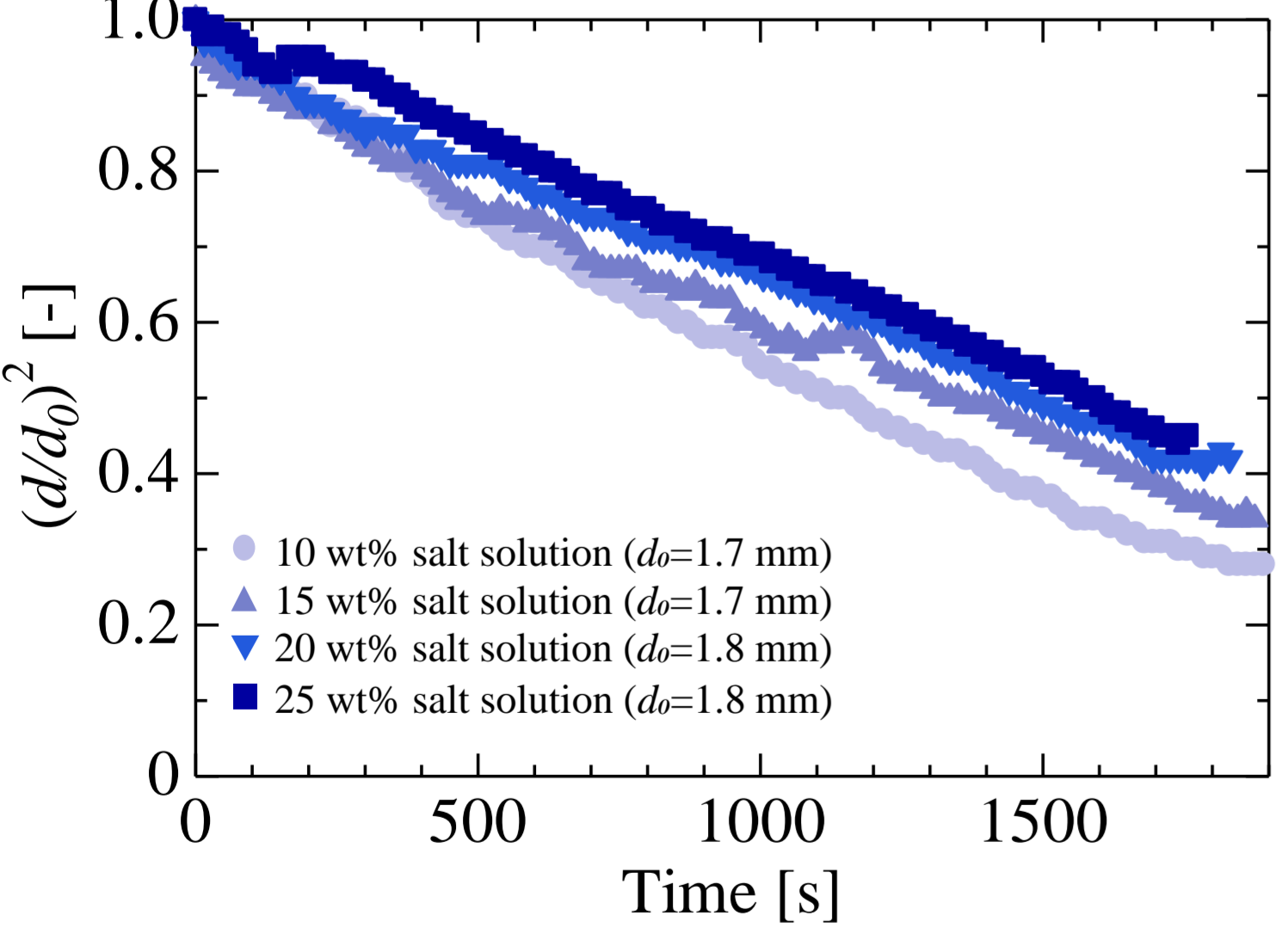
浮遊液滴の蒸発過程



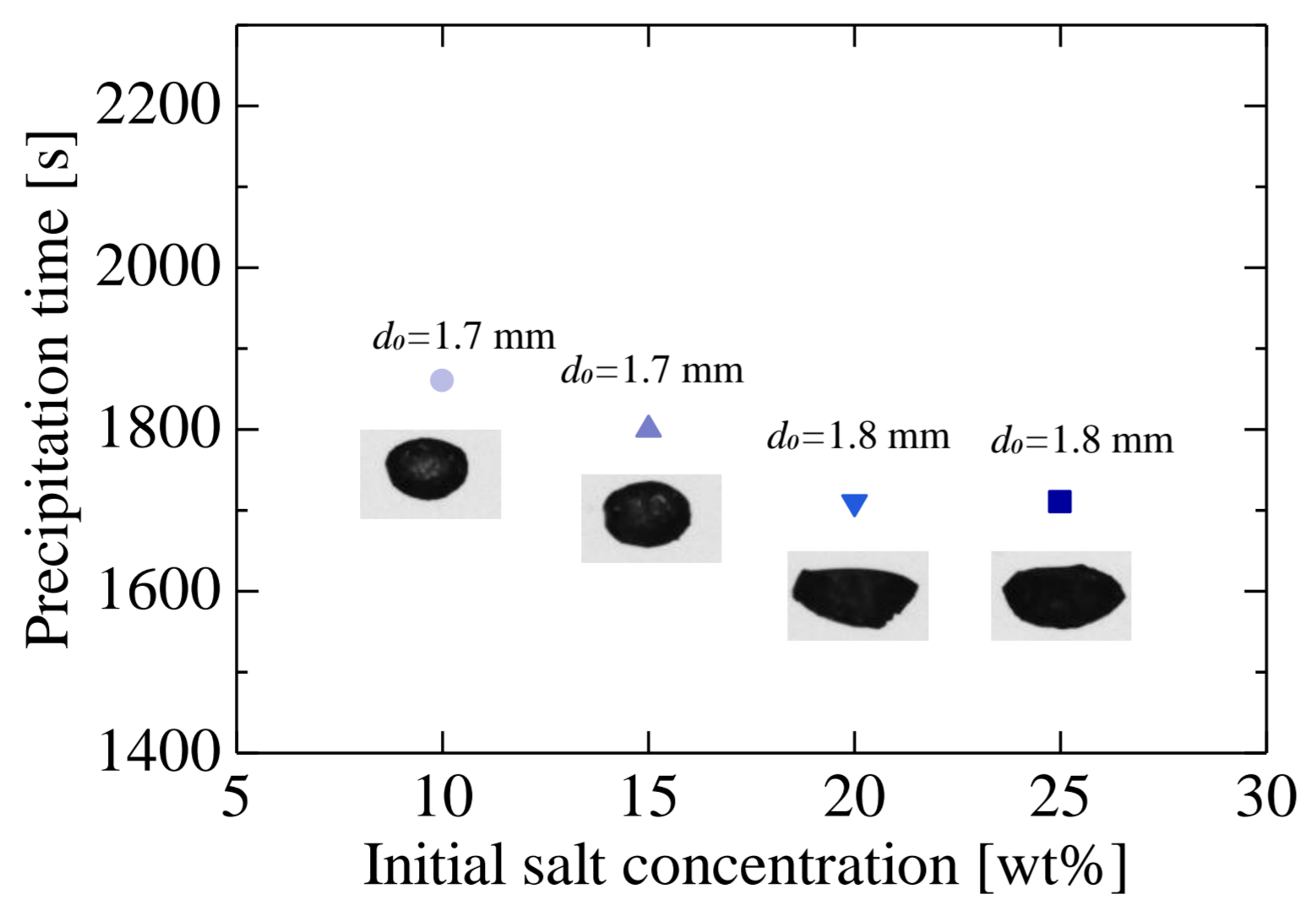
食塩水は1500 sまでは無次元表面積が減少し、それ以後一定となった。これは水成分が蒸発し食塩が完全に析出したため、段階的な蒸発過程を示したと考えられる。

溶質濃度が蒸発挙動に及ぼす影響

溶質濃度が蒸発過程に及ぼす影響



溶質濃度が析出時刻に及ぼす影響



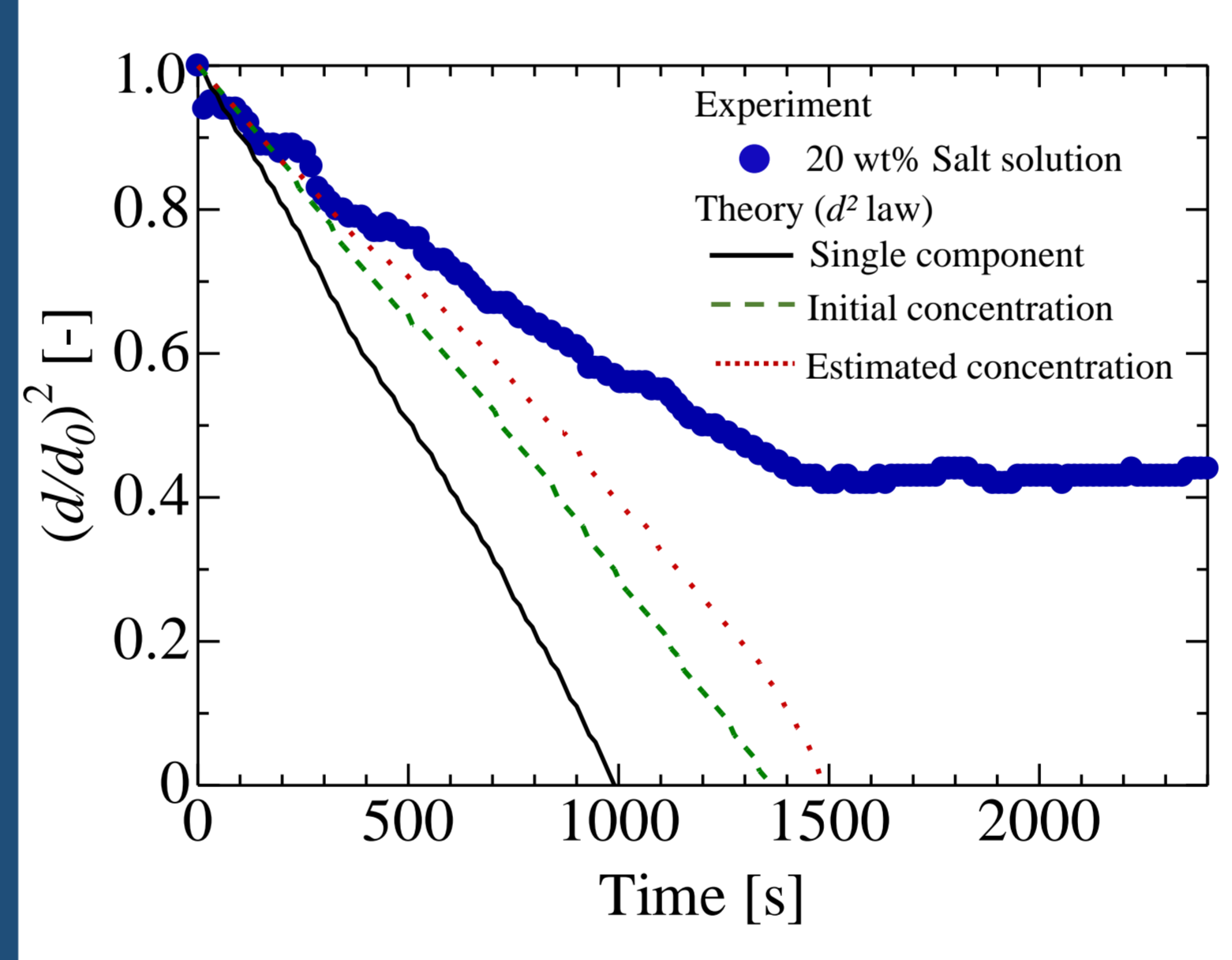
- ◆ 初期濃度の増加に伴う蒸気圧降下の影響によって蒸発速度が減少した。
- ◆ 初期濃度の増加に伴い水の含有量が減少するため、析出時刻は減少すると推測していたものの、蒸気圧降下による蒸発抑制によって時刻は同程度となった。

まとめ

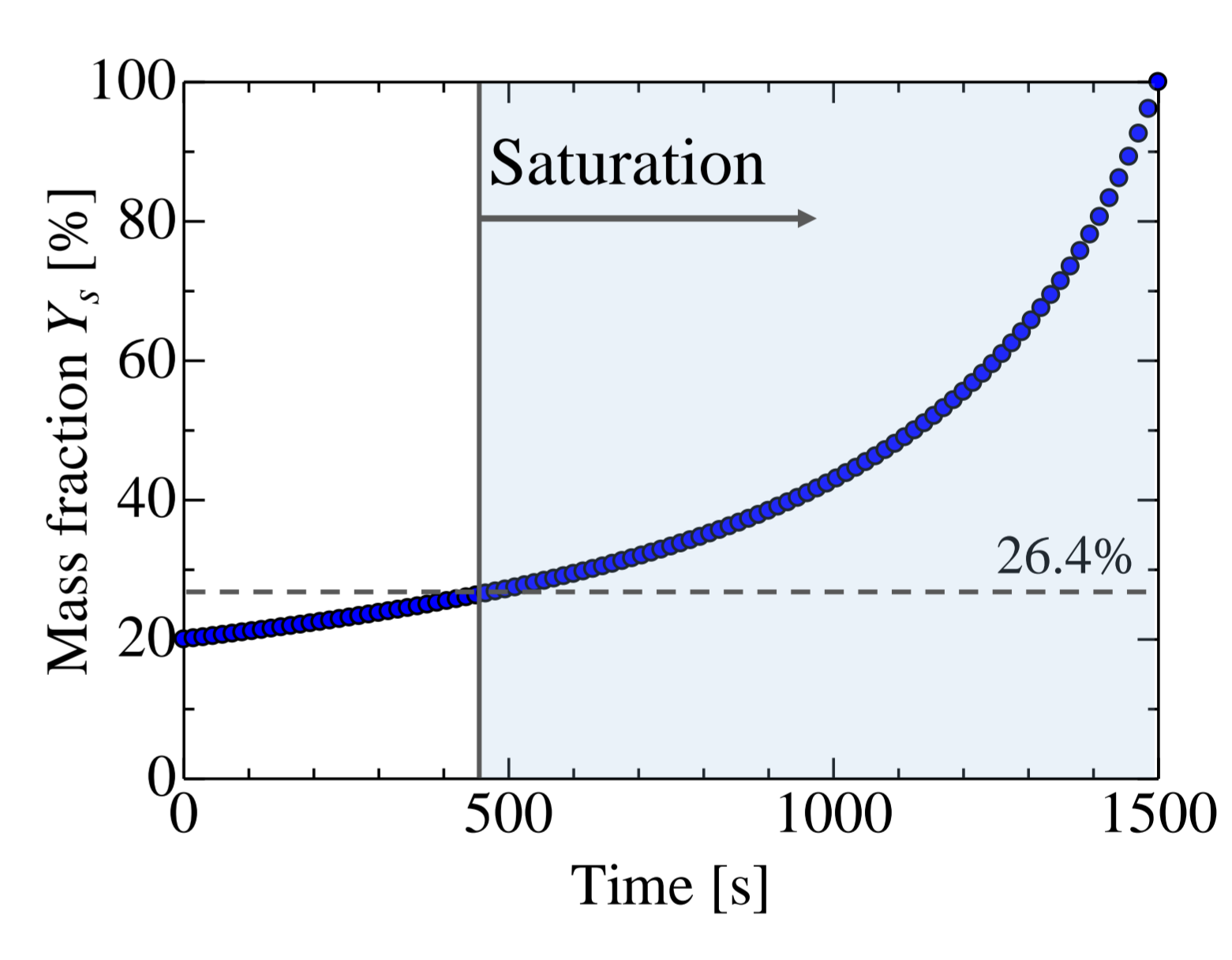
- ◆ 食塩水は水成分の蒸発が蒸発し食塩が完全に析出したため段階的な蒸発過程を示したと考えられる。
- ◆ 初期溶質濃度の増加に伴う蒸気圧降下の影響によって蒸発速度が減少した。
- ◆ 食塩水の実験結果と既存の蒸発モデル(d^2 -law)との比較は蒸気圧降下の影響により乖離を示したものの、それを考慮し拡張したモデル(各時刻の塩分濃度を使用)を用いることで部分的に一致を示した。
- ◆ 拡張した蒸発モデルで塩の析出時刻が予測可能なことが示唆された。

実験結果と蒸発モデル(d^2 -law)の比較

実験結果と蒸発モデル(d^2 -law)との比較



各時刻の塩分濃度の推定



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

d : Droplet diameter [mm]
 d_0 : Initial droplet diameter [mm]
 D : Diffusion coefficient [m²/s]
 M : Molar mass [kg/mol]
 ρ_l : Liquid density [kg/m³]
 R : Gas constant [J/K·mol]
 P : Vapor Pressure [Pa]
 Z_s : Mole fraction [-]
 i : Van't Hoff coefficient [-]
 T : Temperature [K]
 RH : Relative Humidity [%]
 t : Time [s]

塩分濃度の推定方法

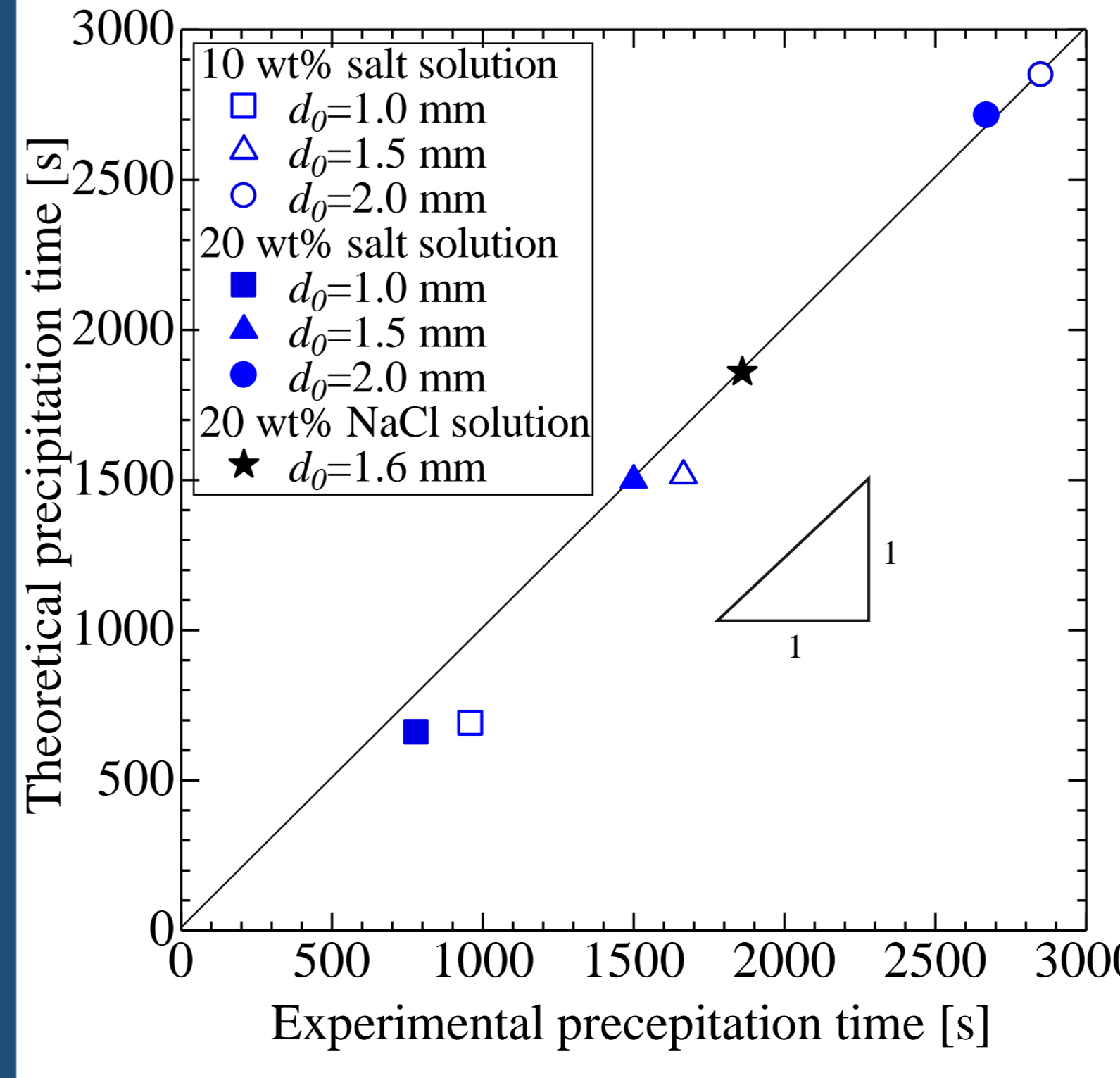
塩成分	水成分
$m_s = \frac{1}{6} \pi d_0^3 \rho \times \frac{x}{100}$	$m_w = \frac{1}{6} \pi d_0^3 \times \frac{(1-x)}{100}$
1500 sで水成分が蒸発完了すると仮定し算出	
$Y_s = \frac{m_s}{m_s + m_w} \times 100$	
m_s : Salt mass [g]	ρ : density [mg/m ³]
m_w : water mass [g]	x : weight percent[wt%]
d_0 : Initial droplet diameter [mm]	Y_s : Mass concentration [%]

A. Frohn and N. Roth, Dynamics of droplets (2000)
N. A. Combe and D. J. Donaldson, The Journal of Physical Chemistry (2017)

実験結果と既存の蒸発モデル(d^2 -law)との比較は蒸気圧降下の影響により乖離を示したと考えられるものの、それを考慮し拡張したモデル(各時刻の塩分濃度を使用)を用いることで部分的に一致を示した。

蒸発モデル(d^2 -law)による析出時刻の推定

実験値とモデル値の析出時刻の比較



析出時刻の推定方法

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

析出を伴う液滴の水成分が蒸発完了($d=0$ mm)した時を析出時刻とする。

$$t_{\text{precipitation}} = \frac{d_0^2}{\beta}$$

$$\beta = \frac{8DM}{\rho_l R} \left(\frac{P_s(1-Z_s \cdot i)}{T_s} - \frac{P_\infty}{T_\infty} \right)$$

本モデルで塩の析出時刻を予測可能なことが示唆された。