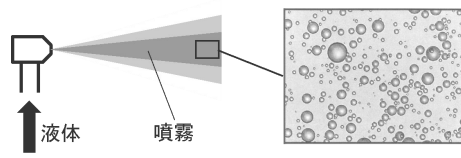




液体の微粒化 (Liquid Atomization) とは？



微粒化 . . . 字面上はsize reduction ?
 Atomize = atom + ize
 ↑ ↑ ~にする, ~化する
 物質を構成し、それ以上分割できない元素

噴霧 = 直径数 μm ~ 数百 μm の液滴群

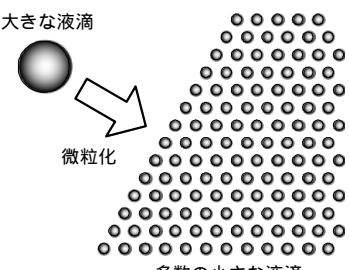
代表的な液体微粒化の応用

内燃機関・燃焼炉	液体燃料の噴霧・燃焼, 排ガス処理
化学工業	吸収塔, 冷却塔, ブラックカーボン製造
塗装	ペイント吹付け
製菓・食品製造	スプレードライ, コーティング(糖衣など)
医療・空調	加湿・調湿器, ネブライザー(気化吸入)
農業	液剤の散布, 噴霧かん水
金属	融液原料の噴霧(⇒固体粒子)
機械	噴霧潤滑, セミドライ加工
その他	消火, 噴霧冷却, 洗浄, 静電気除去...

◎ 各種産業分野の基盤要素技術 ⇒ 共通点が多い
 ※ 相互の交流は必ずしも活発ではない

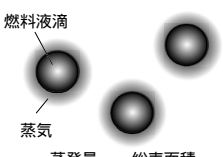
液体微粒化の効果

- (1) 表面積の増加
- (2) 液滴数の増加
- (3) 質量の減少



大きな液滴 → 微粒化 → 多数の小さな液滴

微粒化の効果(1) 総表面積の増加



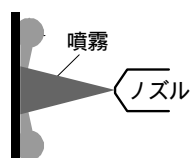
燃料液滴

蒸気

蒸発量 総表面積

液滴径 $1/\alpha$ に微粒化
 総表面積 ⇒ α 倍
 熱物質移動の促進

微粒化の効果(2) 液滴数の増加

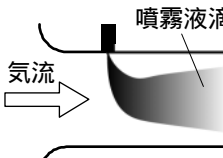


噴霧

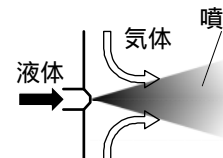
ノズル

液滴径 $1/\alpha$ に微粒化
 液滴数 ⇒ α^3 倍
 広い範囲に均一に分散

微粒化の効果(3) 液滴質量の減少



(a) 液滴の加速



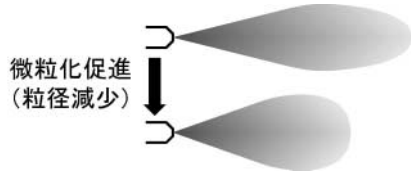
(b) 気体の巻き込み

液滴径 $1/\alpha$ に微粒化
 個々の液滴の質量 ⇒ $1/\alpha^3$ 倍
 運動量交換の促進

微粒化の効果(注意点)

- (1) 表面積の増加 ⇒ 熱・物質移動の促進
- (2) 液滴数の増加 ⇒ 広い範囲に分散
- (3) 液滴質量の減少 ⇒ 運動量交換の促進

※ 3つの効果がセットで発生(選択不能)

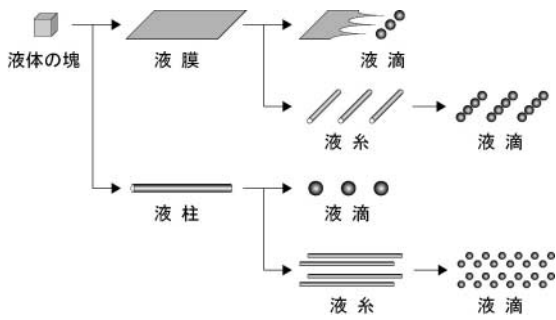
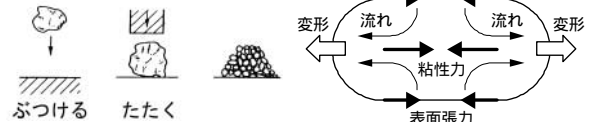


液体微粒化の難しさ

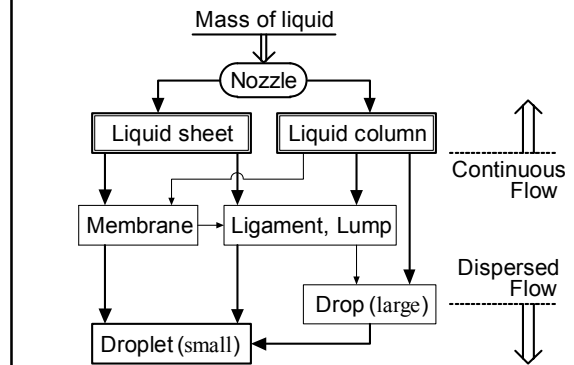
- (1) たたいたりぶつかけたりしてもムダ
固体(脆性材料)の粉碎とは異なる
- (2) 液体には表面張力や粘性がある

粘性 変形抵抗
表面張力 復元力(球体に戻る)

$$[\text{微粒化効率}] = \frac{[\text{表面エネルギーの増加}]}{[\text{加えた動力}]} < 1\%$$



液体の微粒化過程における界面形状の変化



ノズルから噴射された液体噴流の分裂過程

液体微粒化の難しさ

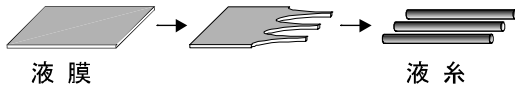
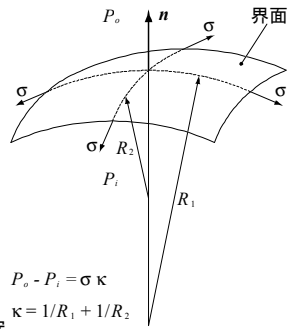
- (3) 微粒化した液滴の保存は困難
 - ・ 放置すると重力沈降 合体して元に戻る
 - ・ 噴霧は使用する現場で生成
- (4) 特定の大きさの液滴のみを作ることは困難
 - ・ 目標よりも大きな液滴も小さな液滴もできる
 - ・ 噴霧液滴のフルイ分級は困難
- (5) 液滴径の直接計測(ノギスなど)は困難
 - ・ 光学的計測が不可欠

液体微粒化の素過程と界面の不安定性

- (1) 表面張力
- (2) 液滴の自由振動
- (3) 液柱の不安定性
 - ・・・ Rayleighの不安定問題
- (4) 相対速度にもとづく不安定
 - ・・・ Kelvin-Helmholtz不安定問題
- (5) 液体噴流の内在不安定性と乱れ
- (6) 加速度にもとづく不安定性
 - ・・・ Rayleigh-Taylorの不安定問題

(1) 表面張力

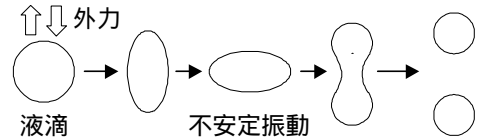
- 液滴内部の圧力は外部より $4\sigma/d$ だけ高い (10 μm の水滴 \Rightarrow 30kPa)
- 液滴は球状を保とうとする
外力を加え変形させても途中で止めると元に戻る
- 液柱や液膜は端部より収縮



(2) 液滴の自由振動・・・表面張力による

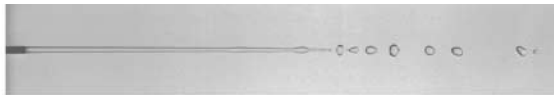
自由振動の角振動数 ω

$$\omega^2 = n(n-1)(n-2) \frac{8\sigma}{\rho d^2}$$



乱れの強い雰囲気では、液滴は振動して再分裂

(3) 液柱の不安定性



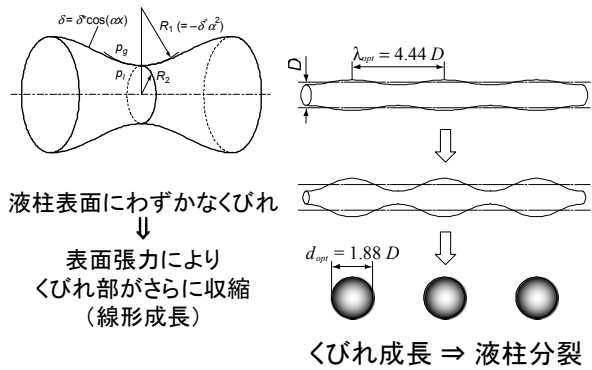
(a) $U_j = 0.56 \text{ m/s}$ $d_n = 1.25 \text{ mm}$ ($Re_j = 700$)



(b) $U_j = 4.02 \text{ m/s}$ $d_n = 1.25 \text{ mm}$ ($Re_j = 5000$)

静止雰囲気中に噴出された円筒状液体噴流の分裂過程

Rayleighの理論



液柱表面にわずかなくびれ

表面張力により
くびれ部がさらに収縮
(線形成長)

くびれ成長 \Rightarrow 液柱分裂

静止雰囲気中に噴出された円筒状液体噴流の分裂過程



単純噴孔ノズル
噴孔径=0.34mm
供試流体: 水道水
雰囲気: 大気

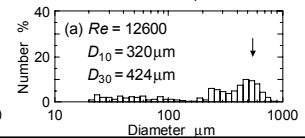
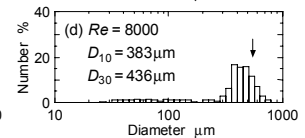
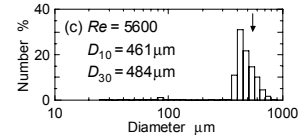
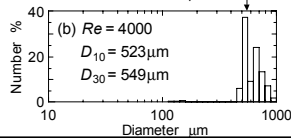
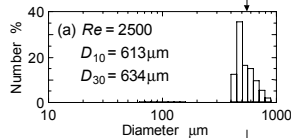
$U_j = 6\text{m/s}$
 $Re = 2500$

$U_j = 14\text{m/s}$
 $Re = 5600$

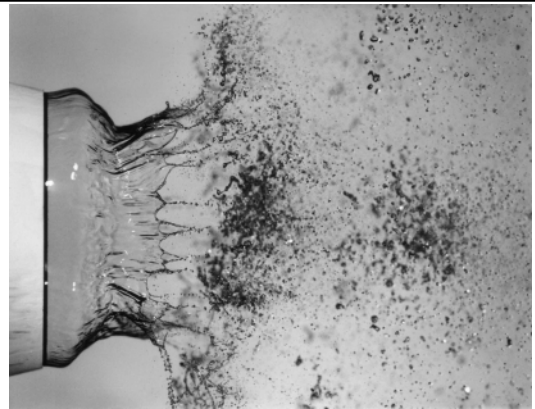
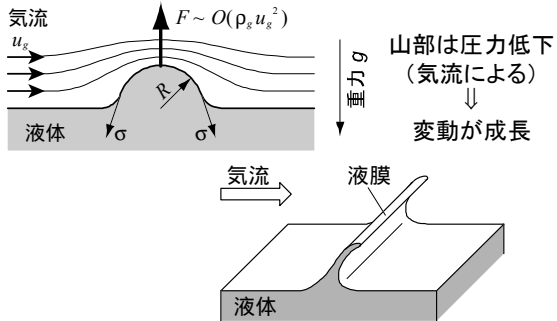
$U_j = 32\text{m/s}$
 $Re = 12600$

円筒状液噴流の分裂により形成される液滴径

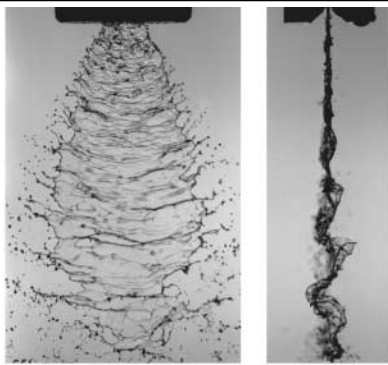
Water Jet from Plane Orifice Nozzle
Diameter of Nozzle Hole 0.34mm
Diameter of Liquid Jet 0.30mm
Theoretical Diameter (Rayleigh's Theory) 0.56mm



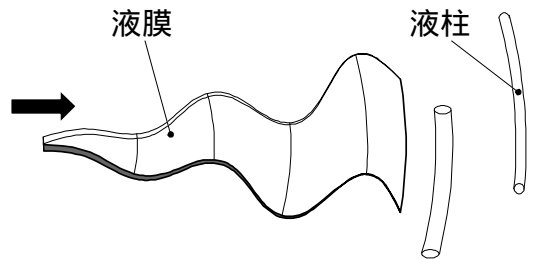
(4) 相対速度にもとづく不安定
Kelvin-Helmholtz不安定



並行気流中の薄い円環状液膜の分裂過程



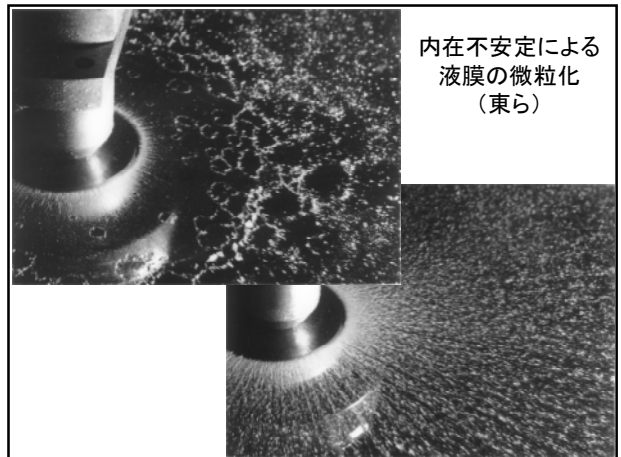
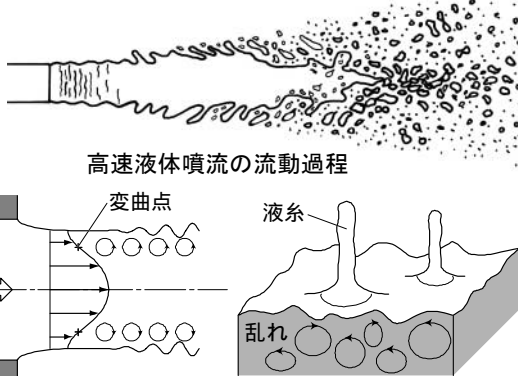
(a) Front View (b) Side View
Spraying Systems TP5001 $\Delta p=0.3\text{MPa}$ Water
扇形液膜噴流の分裂過程(ファンスプレーノズル)



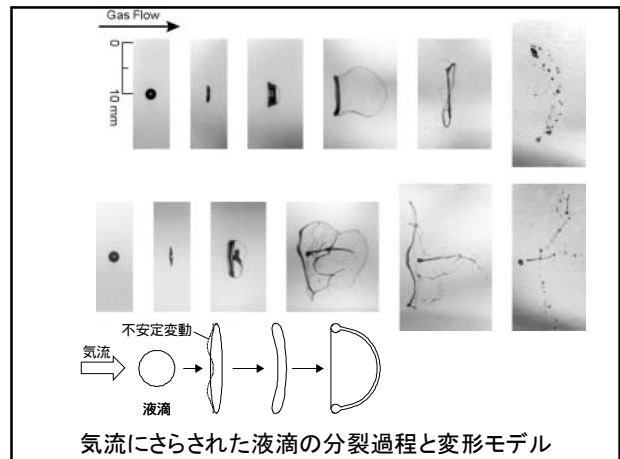
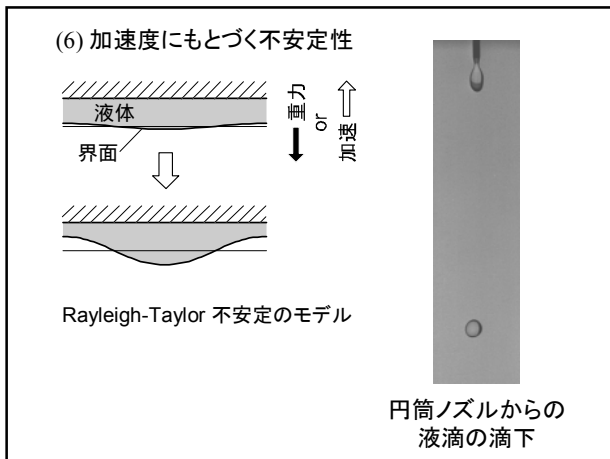
静止雰囲気中に噴出された液膜の変動モデル
N.Dombrowski and W.R.Johns, Chem.Eng.Sci., 18 (1963), p.203.

液膜変動 分裂 液柱 液滴形成

(5) 液体噴流の内在的不安定性と乱れ



内在不安定による
液膜の微粒化
(東ら)



微粒化研究にみられる無次元数

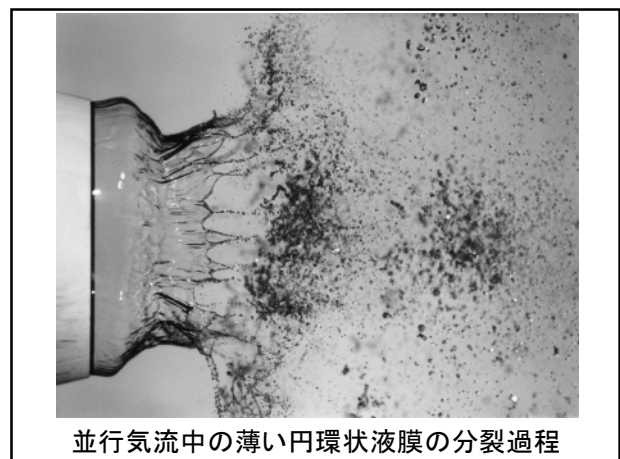
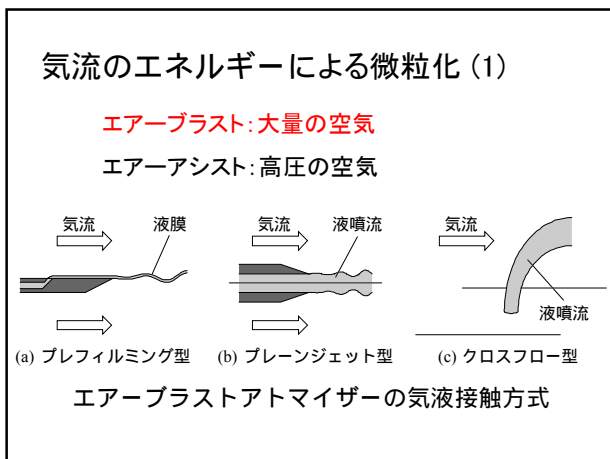
名称	記号	定義式	意味と関連事項
安定数 (Stability number)	Sb Oh	$\frac{\mu}{\sqrt{\rho\sigma L}}$	噴流の安定性を表す無次元数の一つ。 $Sb = Oh = Z = We^{1/2} / Re$
ウェーバー数 (Weber number)	We	$\frac{\rho V^2 L}{\sigma}$	慣性力と表面張力の比
エトベ数 (Eötvös number)	Eo	$\frac{gd^2 \Delta\rho}{\sigma}$	浮力と表面張力の比
キャピラリー数 (capillary number)	Ca	$\frac{\mu V}{\sigma}$	粘性力と表面張力の比
ジェット数 (jet number)	Je	$\frac{\rho \Delta V^2 d_n}{\sigma} \left(\frac{\rho_{gas}}{\rho_{liquid}} \right)^\alpha$	気液の相対速度を考慮したウェーバー数。 α は実験指数
レイノルズ数 (Reynolds number)	Re	$\frac{VL}{\nu}$	慣性力と粘性力の比

- ・日本液体微粒化学会編, アトマイゼーション・テクノロジー, (2001), 森北出版.
- ・鈴木, 微粒化研究に用いられる無次元数について, 微粒化, 9(2000), 242-251.

液体微粒化装置の構造と原理

液体微粒化に用いられる主な動力

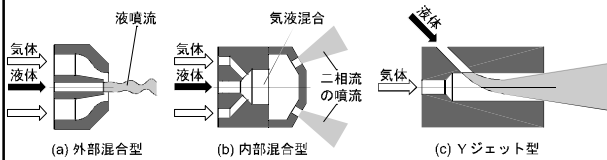
- (1) 気流の運動エネルギー
- (2) 液体の圧力(液体の運動エネルギー)
- (3) 回転運動による遠心力
- (4) その他、静電気、超音波など



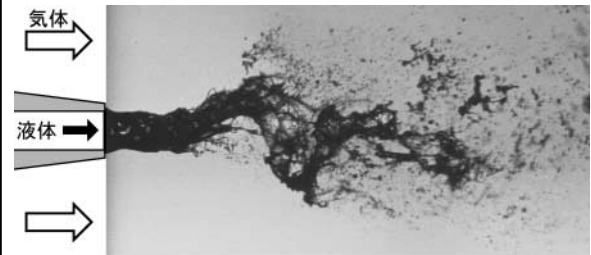
気流のエネルギーによる微粒化 (2)

エアープラスト: 大量の空気

エアアシスト: 高压の空気



代表的なエアアシストアトマイザーの基本構造



$$U_g = 136 \text{ m/s} \quad U_l = 2.3 \text{ m/s} \quad d_n = 1.0 \text{ mm} \quad \text{Water}$$

高速並行気流中の円筒状液体噴流の分裂過程

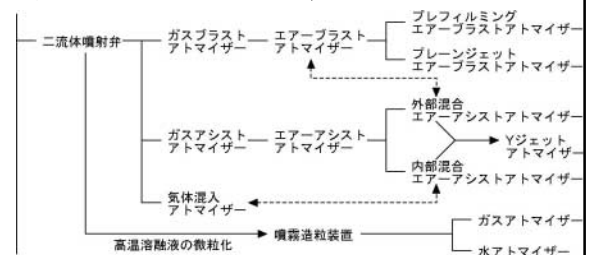
気流のエネルギーによる微粒化 (条件)

エアアシストアトマイザー	$p_a = 16 \sim 160$	(kPa)
(外部混合型)	$v_a = 120 \sim 300$	(m/s)
(内部混合型)	$\dot{m}_a / \dot{m}_l = 0.1 \sim 3$	
(Y ジェット型)	$p_a > 160$	(kPa)
	$v_a > \text{音速}$	
	$\dot{m}_a / \dot{m}_l = 0.01 \sim 1$	
エアープラスタアトマイザー	$p_a = 2 \sim 16$	(kPa)
	$v_a = 30 \sim 120$	(m/s)
	$\dot{m}_a / \dot{m}_l = 15 \sim 20$	

Nukiyama & Tanasawa; for Plain-jet Airblast Atomizer

$$D_{32} = \frac{0.585}{U_R} \left(\frac{\sigma}{\rho_L} \right)^{0.5} + 53 \left(\frac{\mu_L^2}{\sigma \rho_L} \right)^{0.225} \left(\frac{Q_L}{Q_A} \right)^{1.5}$$

代表的な液体の微粒化装置 (1)



ATOMIZER DESIGNS FOR MELTS

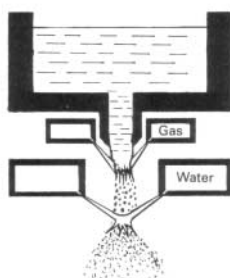


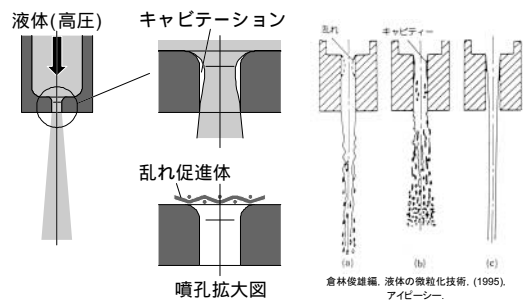
Fig. 6.35 Two-step atomization.

A.J. Yule & J.J. Dunkley,
Atomization of Melts, 1994, Oxford.

液体の圧力による微粒化 (1)

高压: 単純な噴孔から高速で噴射

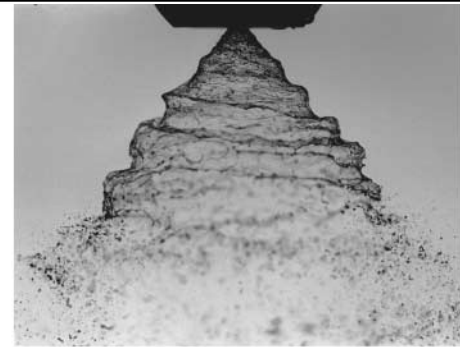
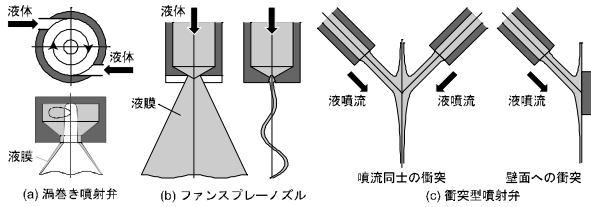
低压: 液体を膜状に噴射



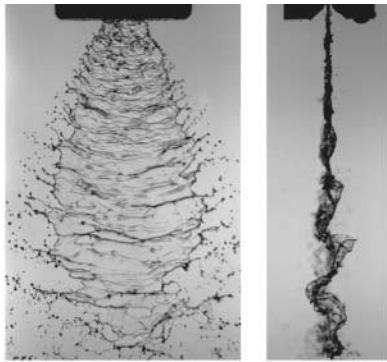
液体の圧力による微粒化 (2)

高圧：単純な噴孔から高速で噴射

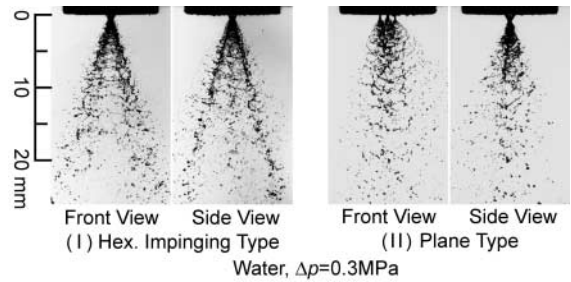
低圧：液体を膜状に噴射



Spraying Systems TX5 $\Delta p=0.3\text{MPa}$ Water
中空円錐状液膜噴流の分裂過程
(渦巻き噴射弁による)



(a) Front View (b) Side View
Spraying Systems TP5001 $\Delta p=0.3\text{MPa}$ Water
扇形液膜噴流の分裂過程(ファンスプレーノズル)



液噴流同士の衝突による微粒化

液体の圧力による微粒化(条件)

単一噴孔ノズル	$p=15\sim 100$	(MPa)
衝突型噴射弁	$p<5$	(MPa)
ファンスプレーノズル	$p=0.2\sim 1.7$	(MPa)
渦巻き噴射弁	$p=0.2\sim 7$	(MPa)

- ・ 噴射圧力大 & 液膜の広がり大 \Rightarrow 噴霧粒径小
- ・ 粘度の高い液体の微粒化には不向き

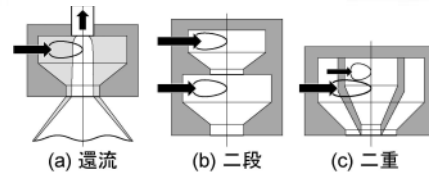
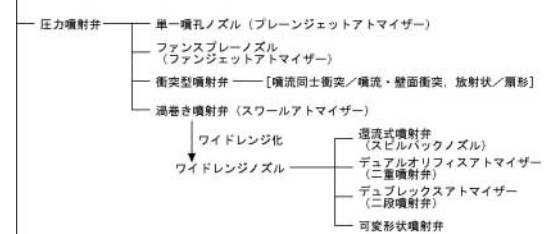
Tanasawa & Toyoda; for Plain-orifice Atomizer

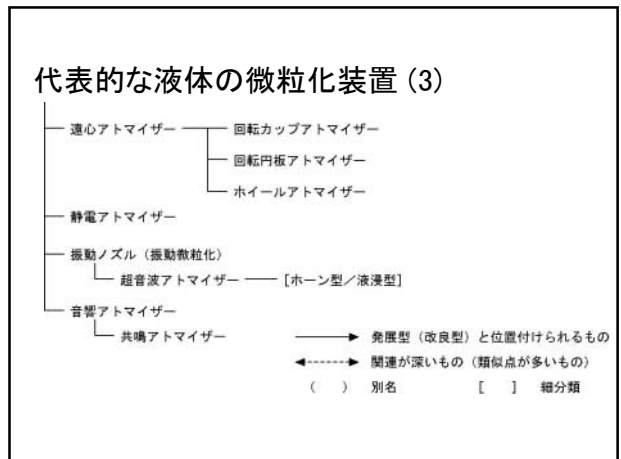
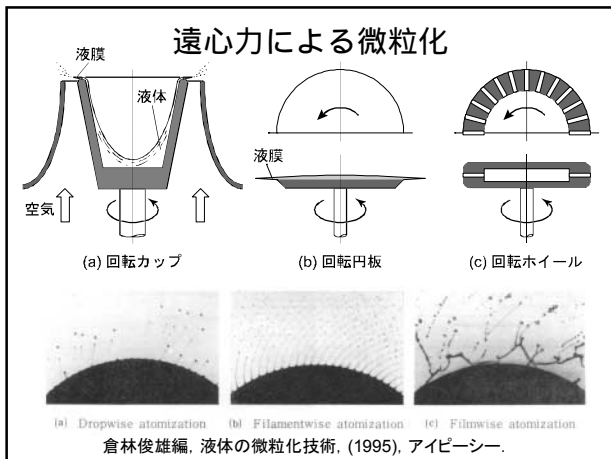
$$D_{32} = 47 \frac{d_0}{U_L} \left(\frac{\sigma}{\rho_G} \right)^{0.25} \left[1 + 331 \frac{\mu_L}{(\sigma \rho_L d_0)^{0.5}} \right]$$

Lefebvre; for Pressure-swirl Atomizer

$$D_{32} = A \sigma^{0.25} \mu_L^{0.25} d_0^{0.5} / \Delta P_L^{0.375} \rho_A^{0.25}$$

代表的な液体の微粒化装置 (2)





超音波振動による微粒化

振動発生器の
コスト&耐久性

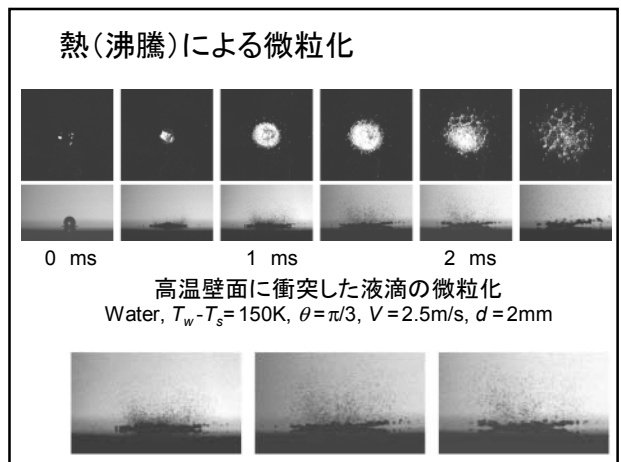
(a) ホーン型 (b) 液浸型

音響・共鳴微粒化

強い音波などを利用して
生成された液滴を微細化

静電微粒化

静電気力により液体表面から多数の
液糸を生成させて微粒化



- ### より詳しくは
- 日本液体微粒化学会編, アトマイゼーション・テクノロジー, (2001), 森北出版.
 - Bayvel, L. and Orzechowski, Z., Liquid Atomization, (1993), Taylor & Francis.
 - Lefebvre, A.H., Atomization and Sprays, (1989), Hemisphere Pub.
 - Yule, A.J. and Dunkley, J.J., Atomization of Melts, (1994), Oxford Univ. Press.
 - 倉林俊雄編, 液体の微粒化技術, (1995), アイピーシー.

