

# 空気中に噴霧された水粒子の挙動解析に関する基礎的研究 Fundamental Study on Behavior Analysis of Droplet Sprayed in Air

○安井 さおり (大阪大学)      山中 俊夫 (大阪大学)  
相良 和伸 (大阪大学)      甲谷 寿史 (大阪大学)  
桃井 良尚 (大阪大学)  
Saori YASUI\*<sup>1</sup> Toshio YAMANAKA\*<sup>1</sup> Kazunobu SAGARA\*<sup>1</sup>  
Hisashi KOTANI\*<sup>1</sup> Yoshihisa MOMOI\*<sup>1</sup>  
\*<sup>1</sup> Osaka University

It is necessary to figure out behavior of droplet for evaluation of the effect of mist cooling, spray deodorizer and the other usage. The purpose of this study is to figure out the basic behavior of droplet in air. It is considered that the droplet behavior including life and achieving distance vary with air temperature, humidity and droplet radius. Images of sprayed droplet are taken by a high-speed camera in order to clarify the angle of spray and induction air to spray jet. Then analysis considering evaporation, temperature change and velocity of droplet in static air is conducted and their interaction is reported.

## はじめに

ドライミストや霧吹き型の除菌・消臭剤など、日常の生活で液体粒子の噴霧が行われることが多い。これらの効果を評価するためには、空気中における液体粒子の挙動の把握が不可欠であるが、粒子の寿命や到達距離などの性状は、周囲の温湿度や粒子径によって様々であると考えられる。古芝ら<sup>1)</sup>は、次亜塩素酸水噴霧による悪臭物質の気中濃度減衰効果について、実験及び数値計算を行い、初期粒子径が大きいほど、消・脱臭効果が大きいことを示した。本研究では、用途に応じて効果的な噴霧を行うため、水粒子の基本性状把握を目的とする。本報では、霧吹きによる水粒子の挙動をハイスピードカメラで撮影し、噴霧流の広がり等の性状について把握した上で、静止空気中における水粒子の挙動解析を行い、水分の蒸発・粒子の温度変化・噴霧速度等が相互に及ぼす影響について検討した結果を報告する。

## 1. ハイスピードカメラによる噴霧粒子の性状把握

### 1.1 測定概要

手動式スプレー及び蓄圧式スプレーの2種類の霧吹きを測定対象とし (Fig.1)、水を噴霧する。いずれも1流体式のノズルを持ち、蓄圧式



Figure1 Sprays

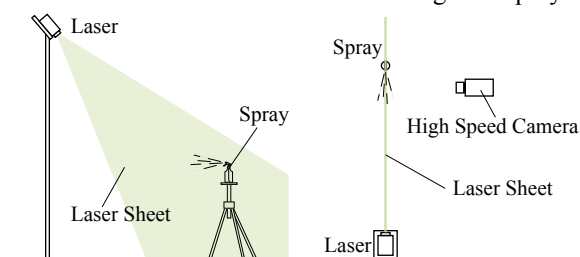


Figure2 Measurement Plan and Elevation

スプレーについては連続噴霧が可能である。測定機器及び霧吹きの配置図を Fig.2 に示す。実験室には暗幕を設置し、室外からの光を遮断する。光源にはレーザー (CW:YAG レーザ /CW532-600M、出力 649mW、KANOMAX 社製) を使用し、上方から霧吹きの噴霧口に垂直に投射した。そして、レーザーシートに垂直となる方向から、ハイスピードカメラ (FASTCAM-OCI R2 1K) により水粒子の噴霧画像を撮影した。また、この画像を用いて PIV 解析 (Particle Image Velocimetry) を行い、噴霧粒子速度と向きを把握した。各種条件を Table1 に示す。

## 1.2 結果と考察

手動式スプレー及び蓄圧式スプレーの噴霧可視化画像、風速ベクトル分布、風速スカラー分布を Fig.3 に示す。なお、蓄圧式スプレーの噴霧画像 (b) - (i) については 1 フレームに存在する粒子の数が少ないため、50 フレーム (0.2 秒間) の画像を重ねて示す。手動式の噴霧画像及び風速分布については、瞬時の結果を示す。Fig.3(a),(b) - (i) より、噴霧の広がり角度は手動式、蓄圧式ともに約 45 度であることがわかる。蓄圧式スプレーでは水粒子が落下していく様子が見られ、粒子による水平到達距離のばらつきが大きい。このばらつきは、粒子径の違いによるものと考えられる。

Table1 Setup for PIV Measurement

Total Number of Frame	544
Time Interval of Pulse [μs]	4000
Sampling Time [s]	2.176
Camera Frame Size [pixel]	512×480
Program	DaVis 8.0 (LaVision)
Algorithm	FFT Cross-Correlation Method
Interrogation Window Size	Pass1 : 32×32 Pass2 : 16×16
Overlap[%]	50

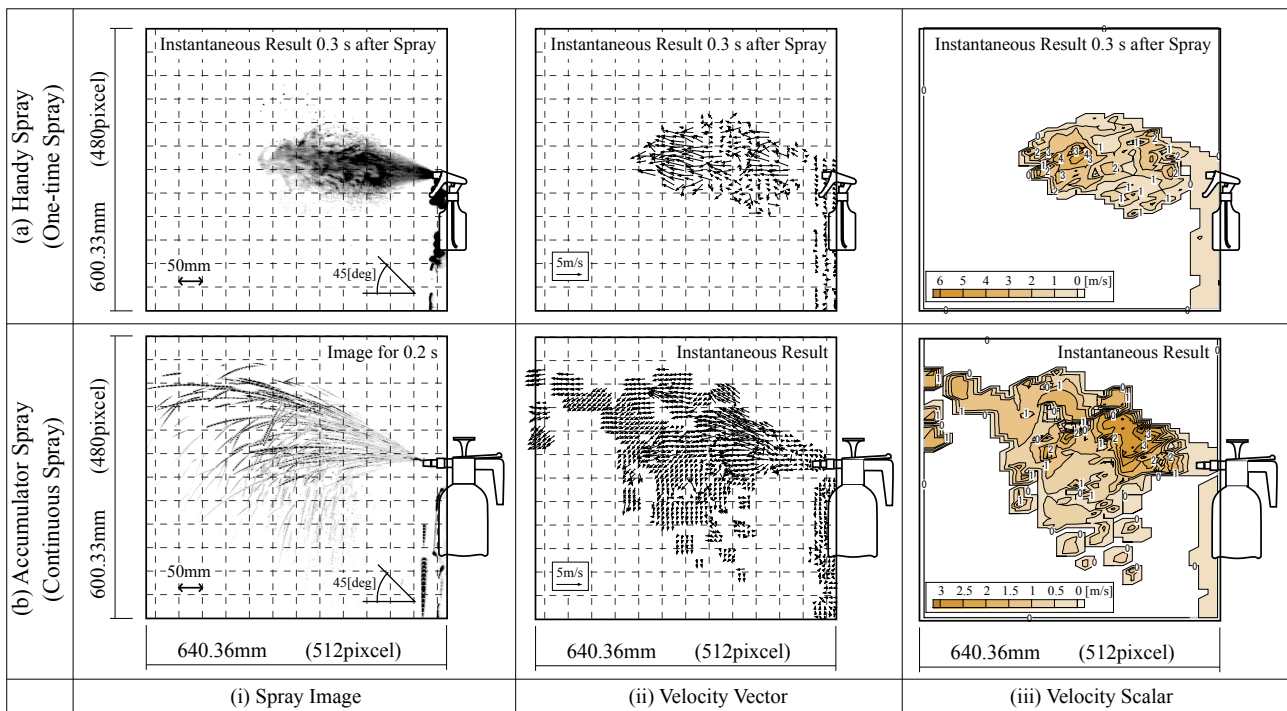


Figure3 Spray Image and Velocity

Fig.3(a) - (ii),(iii) より、手動式スプレーについて、噴霧口の中心線上は水平方向への速度が比較的大きいが、周辺は速度が小さく、向きにもばらつきが見られる。撮影した動画で確認したところ、この現象は水粒子の流れが周辺の空気を巻き込む影響であると考えられる。一方 Fig.3(b) - (ii),(iii) について、水粒子の落下速度は、水平速度に比べて小さい。

本測定では、霧吹きによる噴霧流の広がり及び大まかな速度は把握できたが、噴霧口周辺については粒子速度が大きく、うまく撮影することができなかった。噴霧口付近の挙動を明らかにするとともに、粒子径別の速度分布を把握することが課題である。

## 2. 水粒子の水平噴霧モデル

霧吹きでの噴霧を想定し、Fig.4 のように静止空气中で蒸発する水粒子に水平初速度を与えた場合の、半径・温度・速度の変化について解析を行う。

### 2.1 熱収支式

水粒子内部の温度分布は一様で、空気温度は変化しないと仮定すると、粒子1個に対する熱収支式は、

$$\frac{4}{3}\pi c_{pw}\rho_w \frac{d(r^3\theta_w)}{dt} = 4\pi r^2\alpha(\theta_a - \theta_w) + 4\pi r^2\rho_w L \frac{dr}{dt} \quad (1)$$

となる。左辺は粒子内部のエネルギー変化、右辺第

一項は空気と粒子表面における熱伝達、第二項は蒸発潜熱を表す。熱伝達率 $\alpha$ はNu数の定義より、

$$\alpha = \frac{\lambda_a}{2r} Nu \quad (2)$$

### 2.2 質量保存式

Fig.5 に示すように、水粒子表面外側の微小空間において、蒸発により表面から流入する水蒸気量と、表面近傍から流出する水蒸気量が等しいとすると、

$$-4\pi r^2\rho_w \frac{dr}{dt} = 4\pi r^2\rho_a k_c \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right) \quad (3)$$

となる。ここで、 $B = \ln\left(1 + \frac{Y^* - Y}{1 - Y^*}\right)$  は、伝達数・推進力と呼ばれる無次元数 (Spalding's mass transfer number) である<sup>2)</sup>。理想気体を仮定すると、水蒸気の質量分率 $Y$ は以下のように書ける。

$$Y = \frac{M_{H_2O}}{M_{H_2O} + M_a \left(\frac{P}{P_a} - 1\right)} \quad (4)$$

水粒子表面の質量分率 $Y^*$ については、空気中の水蒸気分圧 $P_a$ の代わりに、水粒子表面温度における飽和水蒸気圧 $P_{as}$ を用いればよい。

物質伝達率 $k_c$ はSh数の定義より、

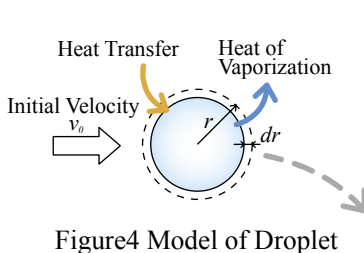


Figure4 Model of Droplet

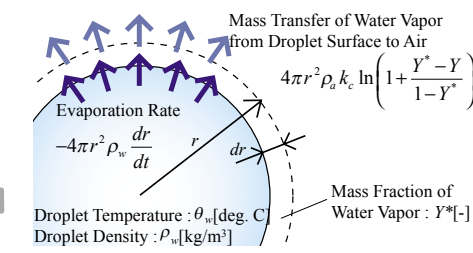


Figure5 Mass Transfer at Surface of Droplet

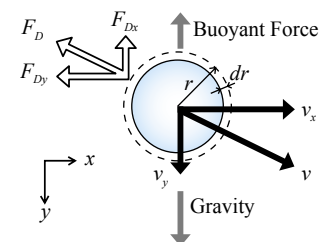


Figure6 Velocity and Force on Droplet

Air Temperature : 20[deg.C]	Initial Horizontal Velocity : 10[m/s]
Relative Humidity : 50[%]	Initial Radius of Droplet : 10, 25, 50, 75, 100[μm]

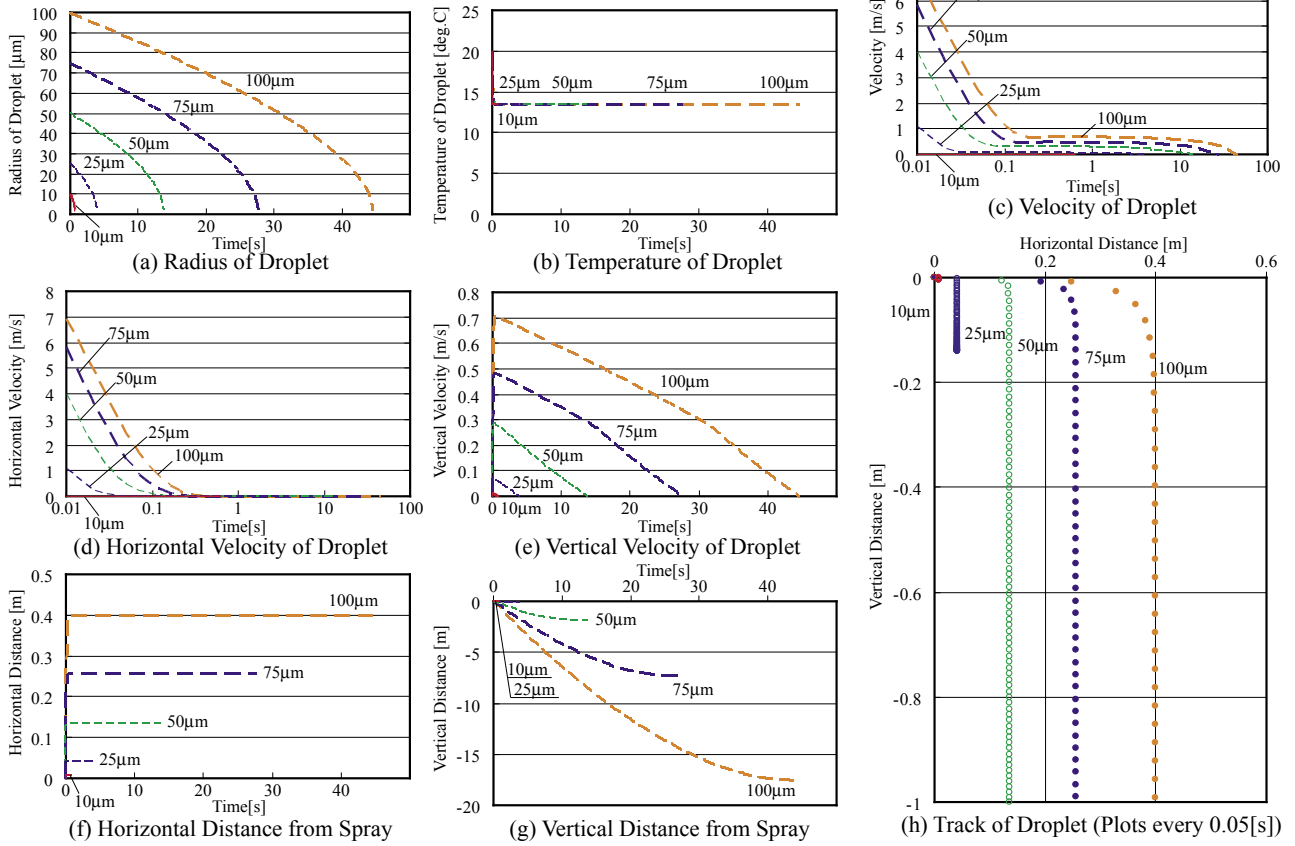


Figure7 Behavior of Droplet from Numerical Analysis

$$k_c = \frac{D}{2r} \text{Sh} \quad (5)$$

### 2.3 運動方程式

粒子が運動する際に受ける空気の抵抗力  $F_D$  は、

$$F_d = \frac{1}{2} C_D A \rho_a v^2 \quad (6)$$

であり、球形粒子の場合、抵抗係数  $C_D$  は

$$\bullet \text{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \text{ のとき} \quad C_D = \frac{24}{\text{Re}} \quad (7)$$

$$\bullet 1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ のとき} \quad C_D = \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \quad (8)$$

$$\bullet 32 < \text{Re} < 500 \text{ のとき} \quad C_D = \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (9)$$

と表される<sup>3)</sup>。式(7)はストークスの式、式(9)はアレンの実験式、式(8)は、式(7)と(9)の間の遷移領域を、文献3)に記載の実験値を近似することにより作成した。式(7)～(9)より、抵抗力  $F_D$  は

$$\bullet \text{Re} < 1.2^{\frac{10}{3}} \text{ のとき} \quad F_D = \frac{1}{2} \frac{24}{\text{Re}} \pi r^2 \rho_a v^2 = 6\pi \mu_a r v \quad (10)$$

$$\bullet 1.2^{\frac{10}{3}} < \text{Re} < 32 \text{ のとき} \quad F_D = \frac{1}{2} \frac{20}{\text{Re}^{0.7}} \pi r^2 \rho_a v^2 = 10\pi (rv)^{1.3} (0.5\mu_a)^{0.7} \rho_a^{0.3} \quad (11)$$

・  $32 < \text{Re} < 500$  のとき

$$F_D = \frac{1}{2} \frac{10}{\sqrt{\text{Re}}} \pi r^2 \rho_a v^2 = \frac{5}{2} \pi (rv)^{1.5} (2\mu_a \rho_a)^{0.5} \quad (12)$$

とそれぞれ表される。

Fig.6に示すように、 $x$ 方向、 $y$ 方向それぞれについて運動方程式を立てると、

$$\frac{4}{3} \pi \rho_w \frac{d(r^3 v_x)}{dt} = -F_{Dx} \quad (13-a)$$

$$\frac{4}{3} \pi \rho_w \frac{d(r^3 v_y)}{dt} = \frac{4}{3} \pi r^3 (\rho_w - \rho_a) g - F_{Dy} \quad (13-b)$$

となる。なお、

$$F_{Dx} = F_D \frac{v_x}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}}, \quad F_{Dy} = F_D \frac{v_y}{\sqrt{v_x^2 + v_y^2}} \quad (14)$$

### 2.4 結果と考察

#### (a) 初期粒子半径の影響

式(1), (3), (13)を用い、周辺空気温度20℃、相対湿度50%で一定とし、噴霧の水平初速度を10m/sとしたときの、水粒子挙動の解析結果をFig.7に示す。水粒子の初期温度は、周辺空気温度と同じ20℃とする。初期粒子半径は、10, 25, 50, 75, 100 μmの5条件とする。Fig.7(c),(d)についてのみ時間を対数表示とし、(h)の粒子の移動軌跡については、0.05秒毎の位置をプロットした。

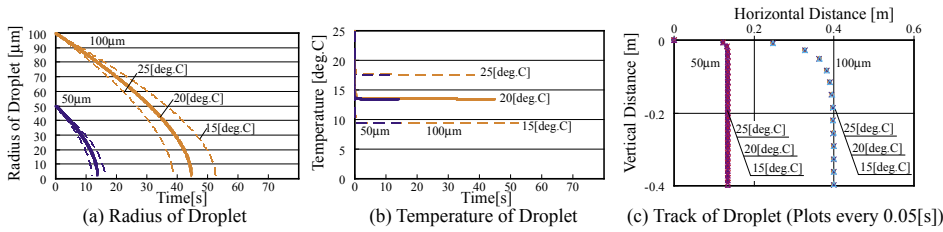


Figure8 Influence of Air Temperature ( $\theta_a$ : 15, 20, 25[deg.C], RH : 50[%])

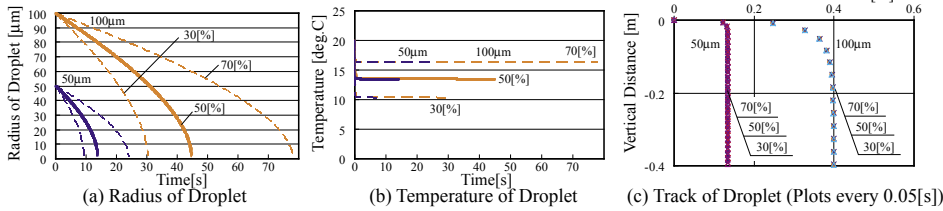


Figure9 Influence of Relative Humidity ( $\theta_a$ : 20[deg.C], RH : 30,50,70[%])

Fig.7(a),(b),(f) ~ (h) より、水粒子の初期半径に、粒子の寿命と移動距離は大きな影響を受けるが、温度変化にはほとんど差がないことがわかる。噴霧後すぐに、対流による熱取得と蒸発による熱損失が平衡して一定の温度となる。また、この水粒子の平衡温度は、周辺空気の湿球温度とほぼ一致する。Fig.7(h) について、粒子の水平速度は噴霧後すぐに低下し、その後の運動は自由落下といえる。Fig.3(b) - (i) で示した、水平運動から落下運動に転じる挙動をうまく再現できたといえる。また Fig.7(e),(g) より、初期半径が大きいほど落下速度が大きく、半径 50 $\mu$ m 以上の大きな粒子の場合、室内での噴霧であれば、水粒子の多くが蒸発して消える前に、床に付着すると考えられる。

### (b) 周辺空気温度と相対湿度の影響

周辺空気温度と相対湿度が異なる時の、水粒子の半径、温度変化及び移動距離を Fig.8,9 に示す。水平初速度はいずれも 10m/s で、空気温度については、15, 20, 25 $^{\circ}$ C (相対湿度 50%) の 3 条件、相対湿度については、30, 50, 70% (空気温度 20 $^{\circ}$ C) の 3 条件とした。Fig.8,9(a),(b) より、周辺空気の温湿度により粒子の温度も変化し、蒸発による半径も大きな影響を受けるが、(c) より、水平到達距離への影響は小さいことがわかる。

### 【記号表】

$r$  : 粒子半径 [m]  
 $t$  : 時間 [s]  
 $L$  : 蒸発潜熱 [J/kg] =  $2.258 \times 10^6$  J/kg  
 $Y$  : 空気中の水蒸気質量分率 [-]  
 $M_a$  : 乾き空気モル質量 [kg/mol]  
 $P_{as}$  : 飽和水蒸気圧 [Pa]  
 $F_D$  : 空気抵抗 [N]  
 $A$  : 粒子の投影面積 [m $^2$ ]  
 $\mu$  : 粘性係数 [Pa  $\cdot$  s]  
 $Nu$  : ヌッセルト数 [-]  
 $Re$  : レイノルズ数 [-]

$\theta$  : 温度 [deg. C]  
 $\rho$  : 密度 [kg/m $^3$ ]  
 $\lambda$  : 熱伝導率 [W/(mK)]  
 $Y^*$  : 粒子表面の水蒸気質量分率 [-]  
 $P$  : 大気圧 [Pa] =  $1.013 \times 10^5$  Pa  
 $D$  : 空気中の水蒸気の拡散係数 [m $^2$ /s]  
 $C_D$  : 抵抗係数 [-]  
 $v$  : 水粒子の相対速度 [m/s]  
 $g$  : 重力加速度 [m/s $^2$ ] =  $9.8$  m/s $^2$   
 $Sh$  : シャーウッド数 [-]

$c_p$  : 定圧比熱 [J/(kgK)]  
 $\alpha$  : 熱伝達率 [W/(m $^2$ K)]  
 $k_c$  : 物質移動係数 [m/s]  
 $M_{H_2O}$  : 液滴のモル質量 [kg/mol]  
 $P_a$  : 空気中の水蒸気分圧 [Pa]

[添字]

$a$  : 周辺空気  
 $w$  : 水粒子  
 $x$  : 水平成分  
 $y$  : 鉛直成分

### (c) 初期水平速度の影響

水平初速度が異なる時の、水粒子の半径及び移動軌跡を Fig.10 に示す。空気温度 20 $^{\circ}$ C、相対湿度 50% とし、水平初速度は 1, 5, 10, 15m/s の 4 条件とした。水平初速度が大きいほど水平到達距離は長くなるが、瞬時に減速するため液滴の半径、すなわち蒸発速度にはほとんど影響がない。

### 3. まとめ

ハイスピードカメラによる噴霧性状の把握と、水粒子 1 個についての挙動解析を行った。水粒子の初期半径がその運動に及ぼす影響は大きい、一方で粒子速度は噴霧後すぐに平衡状態となるので、運動が粒子半径の変化に及ぼす影響は小さい。今後は粒子密度の高い噴霧流について、周辺空気の巻き込みを考慮するとともに、噴霧消・脱臭を想定し、空気中の浮遊物質と液体粒子の反応について検討する予定である。

### 【参考文献】

- 古芝他：次亜塩素酸水噴霧による悪臭物質の消・脱臭効果に関する研究 その 1 メチルメルカプタンに対する気中濃度減衰効果の定量化、空気調和・衛生工学会近畿支部学術研究発表会論文集, pp. 33-36, 2009. 3
- D. B. Spalding, 藤縄勝彦訳：物質移動論, 産業図書, 1967. 7
- 日本機械学会, 機械工学便覧 基礎編  $\alpha$  4 流体工学, p. 81, 2006. 1