

## 間欠的に中圧噴射される液化ブタン噴霧の解析

## Spray Dynamics Simulation of Liquefied Butane Injection

黄 華 中島 健  
(Hua HUANG) (Tsuyoshi NAKAJIMA)  
神戸大学  
(Kobe Univ.)

The purpose of this study is to predict droplet breakup characteristics and spray characteristics of intermittent butane injection. In this study attention was paid to the breakup of liquids and the droplet collision in order to quantify the spray formation and development in a furnace. The predicted results were compared with the experimental results obtained by a phase Doppler anemometry and could clarify the spray pattern, the arrival distance, the droplet diameter distributions, the Sauter mean diameter, and the vapor concentration in the butane injection.

Key words: Spray Characteristics, Fuel Injection, Butane, Droplet Size, Droplet Velocity, Spray Dynamics Simulation

## 1. はじめに

自動車用ガソリン機関やディーゼル機関においては、間欠的に噴射される非定常の噴霧が燃焼を支配する要因である。間欠噴霧の場合においては、噴霧の形状、分裂長さ、到達距離、噴霧角、粒度分布、平均粒径などの時間的、空間的变化が噴霧特性と考えられる。また、間欠噴霧においては、液滴の分裂、衝突、合体、蒸発、空気力学的特性、また乱流混合特性などを考慮した高精度のシミュレーションコードが少ないのが現状である。

間欠噴霧において、燃料液滴の蒸発は混合気生成過程において重要な因子であり、噴霧の到達距離および分散と緊密な関係がある。本研究では液化ブタンを-10 mmAq (ゲージ圧力)の窒素ガス中に間欠噴射した際の液滴情報について位相ドップラ流速計(PDA)による計測を行い、得られた噴霧構造の結果と解析結果を比較することによって、解析手法の妥当性を検討するとともに間欠噴霧の飛行特性、乱流混合特性、特に液体燃料の液膜と液滴の蒸発特性の検討を行う。

## 2. 実験条件と解析方法

## 2.1 実験条件

0.98MPaに、液化ブタン(室温)を加圧し、間欠噴

射を行うシステムを構成した(図1)。使用した噴射弁はJECsのEGI用である(図2)。液化ブタンは噴射弁よりチャンバー内に噴射された。このチャンバー内は窒素雰囲気となっており、ブローアで吸引され大気圧より約10mmAq (98.0Pa)の負圧になっている。1回当りの燃料噴射量は10mgである。燃料の噴射期間を2.5ms、噴射の繰り返し時間間隔を100ms(10Hz)と固定した。

計測には1000コマ/秒の高速ビデオカメラとPDAを用いた。表1に使用したPDAの仕様をまとめた。数組の光学系の設定を行い、予備実験を行ったところ、噴射圧力0.98MPaの条件下で噴霧液滴の最大速度は約50m/s(噴射弁近傍)、最大液滴径は約80~90 $\mu$ mであることが分かった。そこで、計測時のデータレートが最大となるよう光学パラメータの最適化を行った。

表1 Specifications of PDA

Focal length (mm)	600
Spot diameter ( $\mu$ m)	180
Fringe spacing ( $\mu$ m)	8.17
Fringe number	22
Maximum measurable diameter ( $\mu$ m)	157.3
Maximum measurable velocity (m/s)	73.5
Minimum measurable velocity (m/s)	-24.5
Wavelength (nm)	514.5
where	
Focal length of receiving optics	310 mm
Bandwidth of signal processor	12 MHz
Frequency shift	40 MHz

原稿受付: 1997年7月9日

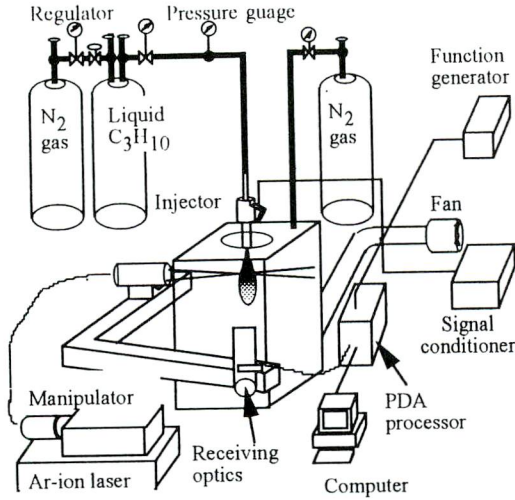


Fig. 1 Schematic of experimental apparatus

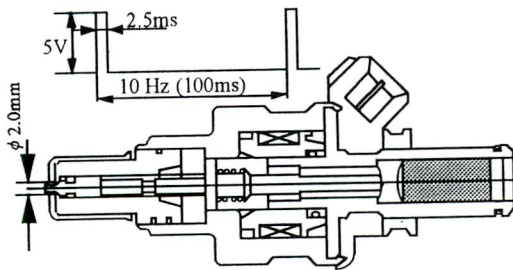


Fig. 2 Test injector

### 2.2 計算手法

本研究では市販の計算コードKIVA3に、分裂モデル、大きな液滴の分裂モデルを加えて、液化ブタン燃料の間欠噴射時の噴霧のシミュレーションができるように改良した。本解析では2次元円筒座標を用いた。計算領域はφ400×400mmであり、その格子分割を(20×40)とした。1回の燃料噴射量を10mg、噴射角度を20°と固定した。噴射弁の上部からのガスの流れは0.25m/sの定常流を仮定し、乱流モデルとしてk-ε方程式モデルを用いた。噴射弁出口の噴霧初期粒度分布は実験値よりRosin-Rammler分布関数で仮定し、計算を行った。液滴が飛行する時に大きな液滴については棒状と傘状の分裂モデルを考慮した<sup>(1)</sup>。液滴と液滴との衝突、合体はpdf (probability density function) 法<sup>(2)</sup>で計算し、またラグランジュ法で液滴の軌跡を計算した。

### 2.3 分裂モデル

噴射弁から噴出した液体噴流は液膜を形成し、気液界面で激しく乱れ、噴流表面から微細な液糸が無数発

生じて、液滴に分裂するとともに、液体噴流自身も大きく変形しながら下流で分裂していく。一次分裂で生成した比較的大きな液滴は、さらに二次、三次と分裂を繰り返す、最終的にはある粒度分布をもつ液滴粒群すなわち噴霧が生成される<sup>(3)</sup> (図3)。

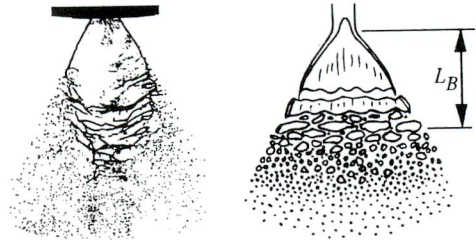


Fig. 3 Disintegration of swirling liquid film and liquid break-up model<sup>(3)</sup>

本研究の液滴の分裂過程のモデルを図3に示す<sup>(3)</sup>。このような液体燃料の分裂、液滴の生成過程を考慮して、微粒化過程のモデルを作成し、シミュレーションを行う。図3のように、噴射弁から噴射する液体が液膜、液柱あるいは液糸として存在する長さを分裂長さという。分裂長さL<sub>B</sub>の計算式<sup>(4)</sup>を次のように示す。

$$L_B = 2.56 \times 10^3 \times D_n \times W_{eg}^{-0.1} \times R_{dl}^{-0.3} \times (\rho_l / \rho_g)^{0.08} \quad (1)$$

$W_{eg} = \rho_g D_n V_l^2 / \sigma$  : ガスに対する Weber 数,  
 $R_{dl} = \rho_l D_n V_l / \mu_l$  : 液体に対する Reynolds 数,  
 $\rho_l, \rho_g$  : 液体とガスの密度,  $D_n$  : 噴射弁の出口直径,  
 $V_l$  : 噴射弁出口からの燃料噴射速度,  $\sigma$  : 液体燃料の表面張力,  $\mu_l$  : 液体燃料の粘性係数である。

液体燃料が分裂長さL<sub>B</sub>以内の領域で、液膜あるいは液柱、液糸が混在するとき、これらを大きさの異なる楕円形をした液滴と仮定する。噴射軸上では、ある距離xの断面における液滴数は、次式のように噴射弁出口からの距離xの2乗に比例するとする。

$$P = INT(A \times x^2) \quad (0 < x \leq L_B) \quad (2)$$

Pは距離xの断面における液滴数、Aは分裂長さL<sub>B</sub>の所で測定した液滴の平均粒径と燃料噴射流量から定まる定数、xは噴射中心軸上の噴射弁からの距離である。INTは整数への変換関数と定義する。

$$A = (Q \times \Delta t) / \left( \frac{1}{6} \pi \bar{d}_l^3 \right) / L_B^2 \quad (3)$$

ここで、Qは燃料の噴射流量、Δtは計算の時間増量、

$\bar{d}_{L_B}$ は分裂長さの断面上で測定した平均粒径である。

液滴数が  $x^2$  に比例するので、 $x$  断面の平均粒径  $\bar{d}_x$  は次式のように示す。

$$\bar{d}_x = \bar{d}_{L_B} (L_B^2 / x^2)^{1/3} \quad (4)$$

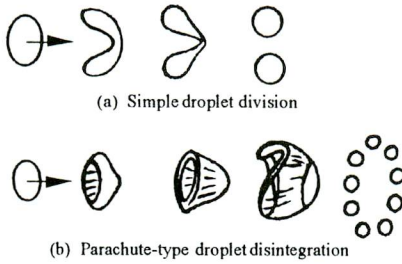


Fig. 4 Simple drop and parachute-type drop disintegration<sup>(1)</sup>

分裂長さ  $L_B$  以上の領域では、液膜は存在せず液滴のみが存在すると仮定する。分裂長さ  $L_B$  以内の領域で、各断面における液滴群の粒径分布は実験結果とよく似ている次の Rosin - Rammler の分布関数で計算する。

$$G(D_p) = 1 - \exp\{-(D_p / \sigma_G)^n\} \quad (5)$$

$\sigma_G, n$  は分布関数における適合係数である。

飛行する液滴は周囲空気による剪断力の作用で形が変化し、液滴の慣性力と表面張力のバランスが崩れて、小さな液滴状に分裂する。変形した液滴の模様は図4の(a), (b)に棒状と傘状に分けて示されている。分裂条件は次式で与えられた<sup>(1)</sup>。

$$(a): 10 < W_e \leq 80 \text{ and } 0.1 < W_e R_e^{-0.5} \leq 0.8 \quad (6)$$

$$(b): 80 < W_e \leq 10^3 \text{ and } 0.8 < W_e R_e^{-0.5} \leq 10.0$$

$R_e = \rho_l d_0 V_l / \mu_l$  : 液滴の Reynolds 数,

$W_e = \rho_d d_0 V_l^2 / \sigma$  : 液滴の Weber 数,

$d_0$  : 液滴の直径である。

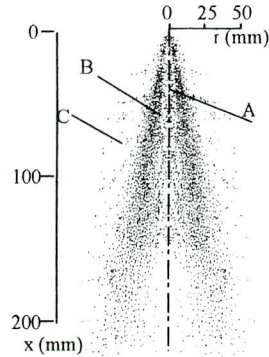
### 3. 解析結果と実験結果

#### 3.1 噴霧形状

解析結果について、30ms間の0.1ms時間間隔ずつの液滴位置を図5に示す。形成された噴霧は大きく3つの領域に分けることができる。すなわち、噴射弁直下のホロコーンの内部A、液滴濃度が濃く、速度の大きい噴霧

内部B、周囲気体との接触により減速され、かつ周囲気体を巻き込む周辺部Cの3つの部分である。

図6は噴射後の時刻10msから0.5ms時間間隔ずつの周辺部Cにおけるある液滴の軌跡を示す。図6に矢印で示す液滴の軌跡とその速度ベクトルからも分かるように、外側に存在する液滴は周囲空気の巻き込みを示すような運動を行っている。



30ms after injection  
Fig. 5 Spray pattern and droplet distribution

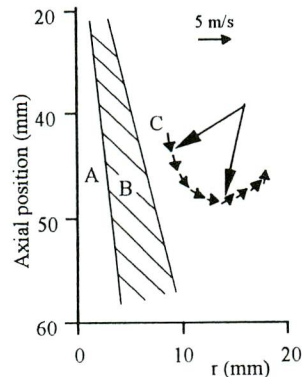


Fig. 6 Trajectory and velocity vector of droplets

#### 3.2 噴霧の時間変化 (空間上の一点)

噴射弁下流( $x=10\text{mm}$ )における半径方向( $r$ )の2点のPDA計測結果と解析結果を図7に示す。 $r=1.5\text{mm}$ の地点は噴霧内部に相当し、 $r=5\text{mm}$ は噴霧の外周に相当する。図7中の(1)は液滴速度の時間変化である。(1)の $r=1.5, r=5\text{mm}$ の2つのグラフを比較すると噴射後急に速度が立ち上がり、ピークを迎えた後約2.5ms後に速度が急激に下がる。これは噴射時間の2.5msとほぼ等しい。計算結果は実験結果とよく一致している。 $r=5\text{mm}$ では約2ms後に速度が30m/sまで立ち上がった後、0m/sに戻り4ms後に再び10m/s程度まで立ち上がっている。これは噴射弁からの噴霧が外周で波打っており、 $r=5\text{mm}$ の位置を間欠的に液滴が通過することを示している。同様な現象

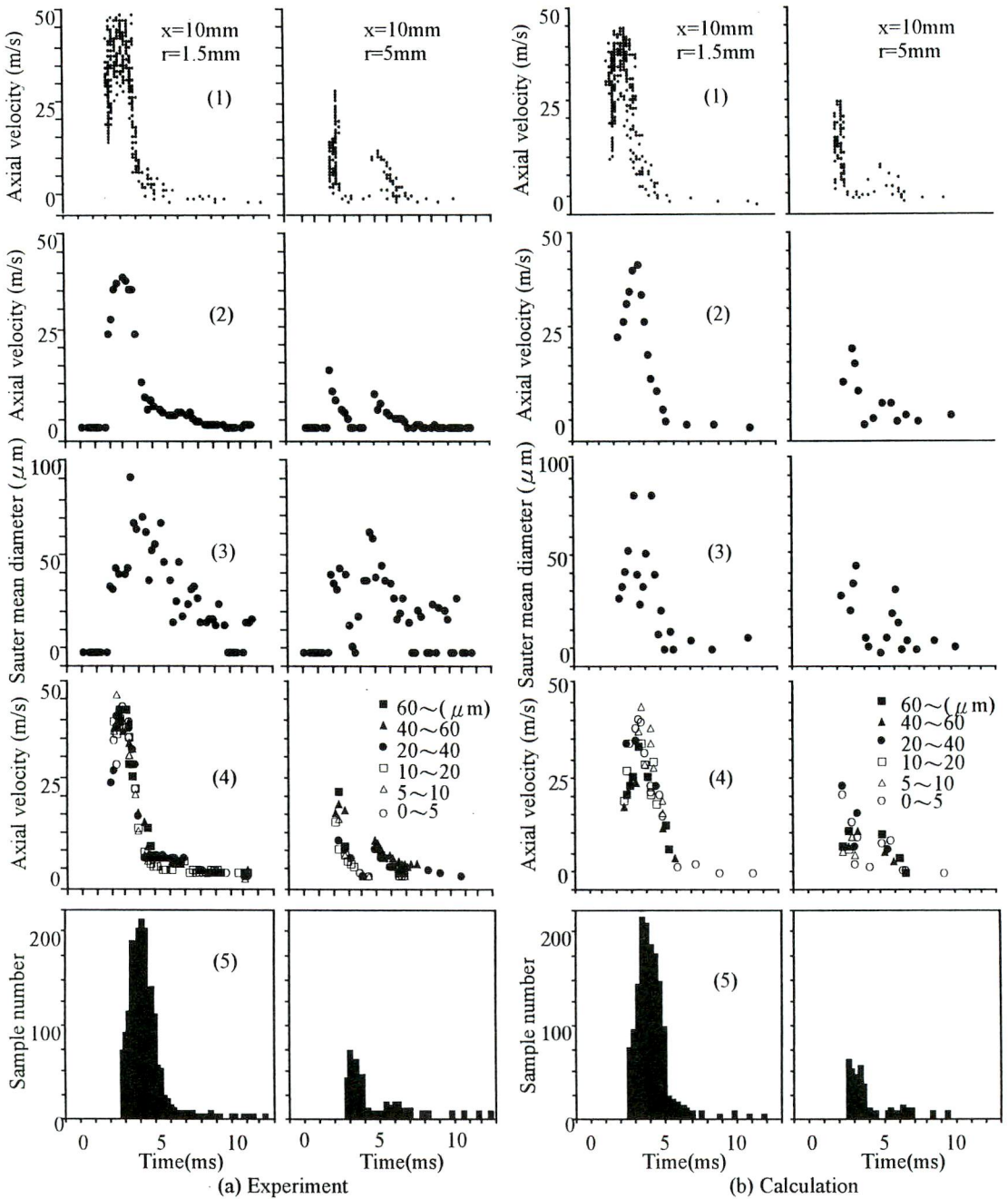


Fig. 7 Change of droplet velocity, Sauter mean diameter and sample number with time ( $x=10$ ,  $r=1.5, 5.0$ mm)

は計算結果でも見られるが、巻き込む液滴の数は図7の(5)のように実験値より少ない。これは解析の方が少し蒸発速度が速いためと思われる。平均粒径をもつ液滴の速度変化を図7(2)に示す。 $r=5$ mmでの巻き込み現象は実験結果の方が計算結果より顕著である。図7(3)

にザウタ平均粒径(SMD)の時間変化を示す。ザウタ平均粒径(SMD)は実験結果と計算結果がほぼ一致している。解析結果では $20\mu\text{m}$ 以下の液滴が噴射時に高速度で飛行し、噴射終了5ms以後に液滴の数が図7(b)の(5)のように少ない。実験結果では噴射終了5ms以後に液滴の

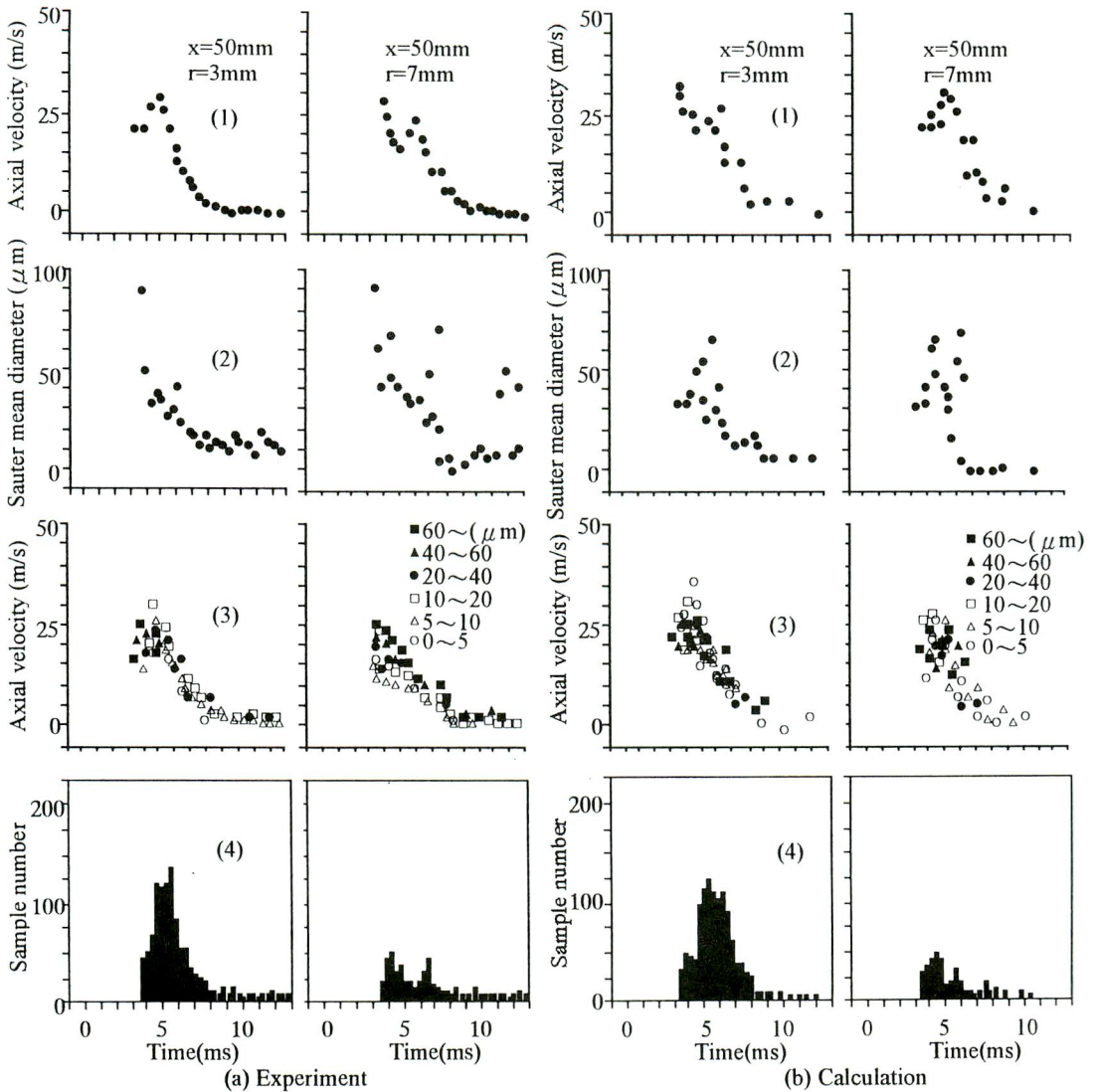


Fig. 8 Change of velocity, Sauter mean diameter and sample number with time ( $x=50, r=3.0, 7.0\text{mm}$ )

数は図7(a)の(5)のように、計算結果に比べて少なく、粒径も $10\mu\text{m}$ ぐらいとほぼ一定である。図7の(4)に液滴径群ごとにグループ分けて、そのグループ内の液滴の平均速度の変化を調べた結果を示す。

$x=50\text{mm}$ における半径方向の2点のPDA計測結果を図8に示す。 $x=50\text{mm}$ では、噴射後約 $3.5\text{ms}$ で速度が立ち上がり、液滴が飛行している間に空気との運動量交換により速度が減少している。 $r=3\text{mm}$ では全粒径平均速度のピークが約 $35\text{m/s}$ で、 $r=7\text{mm}$ では全粒径平均速度のピークが約 $25\text{m/s}$ 程度である。 $r=3\text{mm}$ と $r=7\text{mm}$ で異なるのは、噴霧の内部に相当する $r=3\text{mm}$ ではグループ分け

した液滴の速度に大差はないが、 $r=7\text{mm}$ の噴霧外周では外周気体との運動量交換により大きな液滴より小さな液滴の方が減速が大きいからである。また、噴霧が広がっているため、液滴が蒸発しやすくなり、ザウタ平均粒径(SMD)は時間とともに小さくなっている。

### 3.3 横断面における液滴情報の時間変化

噴射弁下流 $x=10\text{mm}$ 、 $x=50\text{mm}$ の各断面における情報（全液滴平均の軸方向速度と粒径でグループ分けした液滴の軸方向速度）の時間変化を図9、10に示す。 $x=10\text{mm}$ 断面における噴射開始後の2, 4, 6, 8msごとの

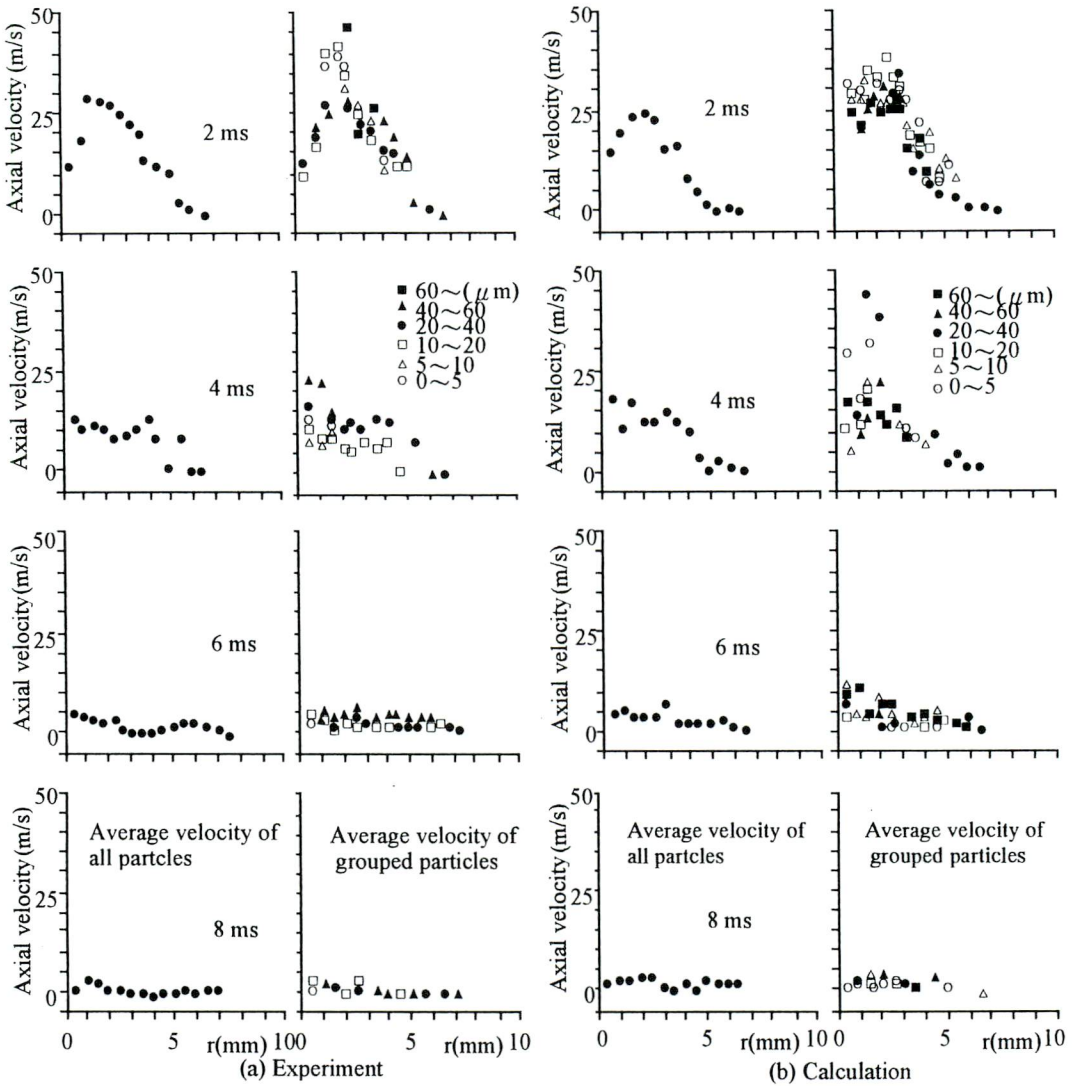


Fig.9 Distributions of droplet velocity and Sauter mean diameter in the radial direction ( $x=10\text{mm}$ )

液滴情報を図9に示す。実験結果の図9の(a)より2msでは、速度ピークは $r=2\sim 3\text{mm}$ の位置にあることが分かる。ピーク速度の内側では、 $20\mu\text{m}$ 以下の液滴（白印）が大液滴より高速で飛行しているのに対し、ピーク外側では $20\mu\text{m}$ 以上の液滴（黒印）が小液滴より高速で飛行していることが分かる。この $x=10\text{mm}$ 断面では2, 4, 6, 8msと時間が経過するにつれて、噴霧液滴の速度は減速している。

$x=10\text{mm}$ 断面の $r=1.5\text{mm}$ の地点の液滴の速度と大きさの時間変化の実験結果より（図7(a)の(1)）ピーク速度の内側 $r<2\sim 3\text{mm}$ の位置である $r=1.5\text{mm}$ では、噴霧通

過時刻は約2.5msである。また、ピークの外側 $r>3\text{mm}$ における噴霧の外周の変動は巻き込みによる時間的変動であることが分かっている。またピークの外側では図7(a)の(4)に示すように、時間的に変動している液滴には、小液滴はほとんどなく、大液滴のみ（黒印）が含まれている。すなわち小液滴は外側では蒸発により消失し、大液滴のみまだ残っていることを示している。

$x=50\text{mm}$ 断面の図10においては、3msまでは噴霧の到達はない。図8の(1) $r=3\text{mm}$ ,  $r=7\text{mm}$ における噴霧情報の時間変化より、約3.5ms後に噴霧が到達し、約4.5~5msで最大速度に達し、その後7msで噴霧は通り過ぎて

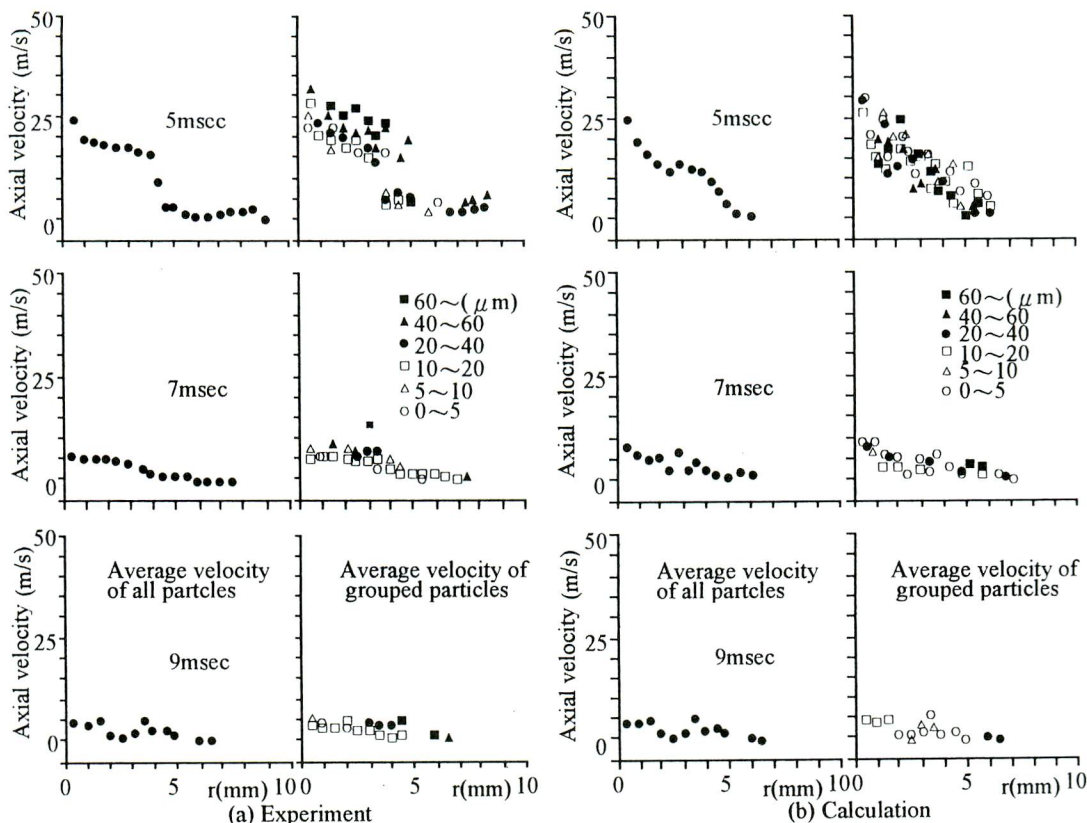


Fig.10 Droplet velocity and Sauter mean diameter for radial position ( $x=50\text{mm}$ )

いる。図9に示すように、 $x=10\text{mm}$ 断面の2msの時刻に、液滴の最大速度は30m/sであるが、図10では、 $x=50\text{mm}$ 断面の5msの時刻に液滴の最大速度は25m/sに減少された。 $r>4.5\text{mm}$ では大液滴ほど高速で飛行しているが、 $20\mu\text{m}$ 以下の液滴は極端に減速され、液滴速度がほぼ0m/sとなっている。図9、10を見ると、噴霧の外側では、液滴の減速が顕著に見られるが、これは噴霧液滴が周囲の気体と接触し、運動量を交換する効果によると思われる。

### 3.4 液滴位置と蒸気濃度分布

液滴の蒸発は混合気生成過程において重要な因子であり、噴霧の到達距離と密接な関係がある。3, 4, 5, 6, 8msごとの液滴位置と濃度分布を図11, 12に示す。図11より液滴密度が高いところは噴霧の前面で、すなわち噴霧の輪郭を表す位置である。図11, 12を比べると分かるように、ボタン蒸気の拡散は液滴より遅く、蒸気濃度の高いところは1ms前の液滴塊の中心に対応している。蒸気濃度の拡散は噴射の前期では中心軸方向に、噴射の終了直前では液滴の飛行速度が遅くなっ

て、半径方向に広がっている。

### 4. まとめ

間欠ボタン噴霧の解析結果と実験結果はほぼ一致した。得られた知見を以下に示す。

1. 噴霧の形成は噴霧情報の特徴により、分類すると、噴霧内側、噴霧内部、噴霧外側の3つ部分に分けることができる。
2. 噴霧内部では、噴霧液滴が速度ピークをもっており、燃料濃度が高く、蒸発が起こりにくい。
3. 横断面における液滴情報の時間変化から、噴霧が周囲の気体と接触し、運動量を奪われ減速し、液滴周囲の燃料蒸気濃度が薄いので、蒸発が速くなる。噴霧外側では小液滴の存在する時間が短くなって、また巻き込む液滴は $20\mu\text{m}$ ぐらいのものが多く見られる。
4. 蒸気の拡散は液滴より遅く、噴射前期では中心軸方向の拡散が速く、噴射後期では液滴が蒸発し消滅する前に半径方向に拡散する。

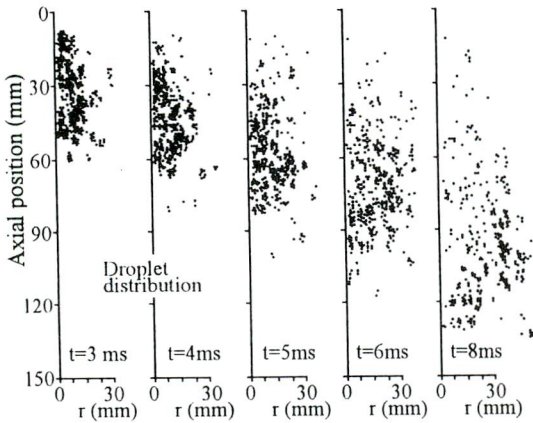


Fig. 11 Calculated droplet distribution at various time after injection

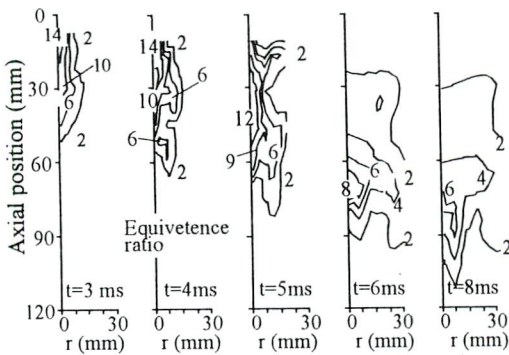


Fig. 12 Calculated vapor concentration of butane



**黄 華**  
 神戸大学,自然科学研究科,  
 生産科学専攻,博士課程後期  
 Tel : 078 - 803 - 0149  
 Fax : 078 - 845 - 2736  
 略歴 : 1985年中国山東工業  
 大学修士課程修了.  
 主に、噴霧燃焼シミュレ  
 ションに関する研究に従事  
 e-mail : kou@ms-5.mech.  
 kobe-u.ac.jp



**中島 健**  
 神戸大学 工学部 教授  
 Tel : 078 - 803 - 1103  
 Fax : 078 - 845 - 2736  
 略歴 : 1967年京都大学大学  
 院工学研究科博士課程修了.  
 主に、燃焼や伝熱における  
 レーザーによる燃焼診断及  
 びシミュレーションの研究  
 に従事  
 e-mail : nakajima@mech.  
 kobe-u.ac.jp

参考文献

- (1) L. Bayvel, Z. Orzechowski. : Liquid Atomization, Taylor and Francis..(1993), 69-81.
- (2) A.A. Amsden, P.J. O'Rourke, T.D. Butler. : KIVA-II., (1992) 7-22.
- (3) L. Bendig. : ICLASS-94 Rouen, France July., (1994), 39-55.
- (4) A. J. Yule, D.G. Salters. : ICLASS-94 Rouen, France July., (1994), 236-243.