

## ディーゼル噴霧におけるノズル近傍での拡がり角に関する研究

## Measurement of Diesel Spray Angle near the Nozzle Exit

石川 直也	辻村 欽司
(Naoya ISHIKAWA)	(Kinji TSUJIMURA)
いすゞ自動車 (株)	千葉工業大学
(Isuzu Motors Ltd.)	(Chiba Inst. of Tech.)

The characteristics of diesel fuel spray angle near the nozzle exit are described in this paper. The spray angle was measured by observing the magnified images of a free spray illuminated by a ruby laser light sheet. Two spray spreading angles were defined depending on the observation distance from the nozzle hole exit ( $0 < z < 7\text{mm}$ ), first one is near the nozzle hole exit ( $0 < z < 3d$ ;  $d$ : nozzle hole diameter) which is called spray cone angle in this study, another is downstream from the nozzle hole exit ( $20d < z < 7\text{mm}$ ). The effects of injection velocity, ambient gas density and nozzle hole configurations on the spray spreading angle were studied, as a result, it was found that the spray spreading angle in the region of  $20d < z < 7\text{mm}$  was affected only by the injection velocity and ambient pressure, in spite of the spray cone angle difference, and a simple function was derived from the experimental results.

*Key Words:* Diesel Engine, Fuel Spray, Spray Angle, Atomization, Momentum Theory

## 1. 緒言

直噴ディーゼル機関は熱効率の高さから、ほとんどの大型の商業車の動力源として採用されている。その反面、環境保全の立場から、更なるPM, NO<sub>x</sub>等の排ガスの低減や燃費の向上が望まれている。ディーゼル機関は、噴霧燃焼であるために、燃料の微粒化や噴霧への空気導入によって、その排出物特性が左右され、その特性を把握することが燃焼改善の上で重要である。しかし、ディーゼル機関の燃料噴射が小径のノズルから高圧で行われるために、高速かつ微細な現象となり、燃料微粒化や噴霧形成の様子を詳細に調べることが困難であった。これまでに、著者らは噴孔近傍の拡大撮影<sup>(1)</sup>、レーザーシートを用いた噴霧の構造の計測<sup>(2)</sup>、噴霧粒径の計測<sup>(3)</sup>等を行い、噴霧特性について多くの知見を得てきた。

噴霧の拡がり特性や噴霧の構造は、燃料液滴の分散

を表す指標であり、多くの研究者によってその特性が調べられてきた<sup>(4-9)</sup>。最近では、段ら<sup>(10)</sup>によって噴孔近傍での噴霧の拡がり角が調査されている。また、シミュレーションではディーゼル噴霧の計算が盛んに行われており、計算精度向上のためにも噴霧の拡がり特性を詳細に調査することが必要となっている。

本研究では、ルビーレーザーのシート光を用い、準定常状態のディーゼル噴霧の噴孔近傍部を拡大撮影することにより、噴霧の拡がり特性を調べ、燃料噴射速度や雰囲気圧力、ノズル形状等が及ぼす影響について調査した。その結果、噴霧の拡がり特性はノズル噴孔出口部近傍とその下流部では異なり、特に下流部については噴霧角を燃料噴射速度と雰囲気密度によって表せることを見いだした。

## 2. 実験装置及び方法

本試験では、燃料噴射装置に蓄圧タイプの電子制御インジェクタを用いた。この噴射装置は蓄圧部に高圧

燃料を貯めておき、インジェクタに取り付けた三方弁 (TWV) のオンオフにより、噴射の開始や終了を制御できるもので、噴射開始と終了を除いて噴射期間中噴射率がほぼ一定という特徴がある。燃料噴射は、 $\phi 100\text{mm}$ の観察窓を持った一辺の長さが $220\text{mm}$ であるSUS製の立方体容器内に窒素ガスを充填して鉛直下向きに行なった。ルビーレーザーのシート光を光源として、噴霧からの散乱光をレーザーシートの90度側方から $35\text{mm}$ カメラで撮影した。撮影装置の概略図を図1に示す。カメラのシャッター、レーザーの発振および燃料噴射はすべて電氣的に制御されタイミングコントローラの信号により毎回同じタイミングで撮影されるようになっている。燃料噴射の制御装置には実機エンジン用を用い、擬似的にエンジンパルスを送ることにより駆動した。それら動作のタイミングチャートを図2に示す。カメラは図3に示すように3軸ステージ上に取り付

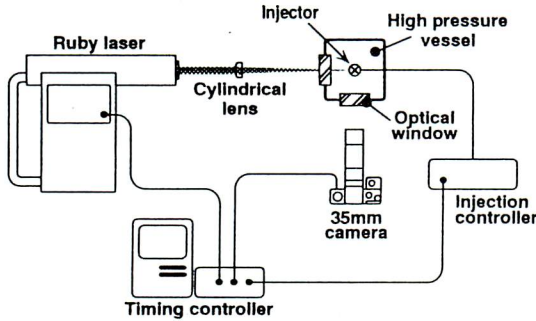


Fig.1 Schematic of experimental apparatus

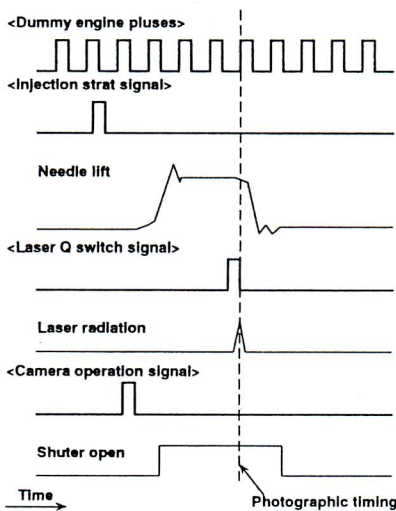


Fig.2 Timing chart

けられ、位置調整やピント合わせはマイクロメータを用いて行った。レーザーシートは焦点距離 $800\text{mm}$ の円筒レンズを用い観察範囲内でシートの厚さが $0.1\text{mm}$ 以下になるようにした。レーザーシートを用いた計測では、カメラの絞りやレーザーの出力によって、撮影される噴霧の幅が変わってしまう。正確な噴霧の幅を求めるために予備試験として、カメラとレーザーシートの焦点位置の調整、レーザーの出力、絞りなどの調整を行い、レーザーシート内の燃料粒子が確認できるような状

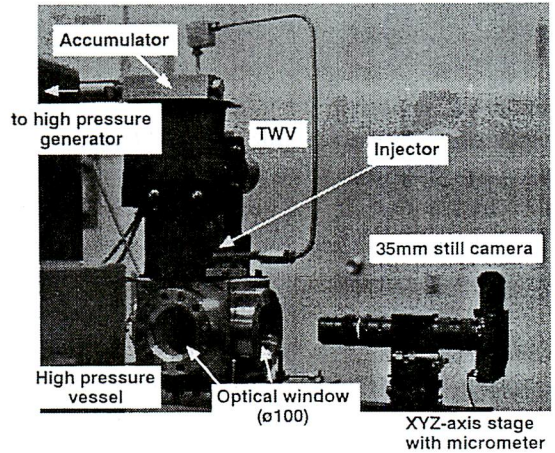


Fig.3 Experimental setup (Photograph)

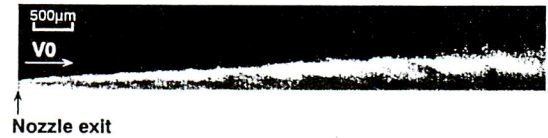


Fig.4 Example of magnified laser-sheet scattered spray image ( $\phi 0.17$ ,  $V_0=400\text{m/s}$ ,  $\rho_a=17.3\text{kg/m}^3$ , quasi-steady flow)

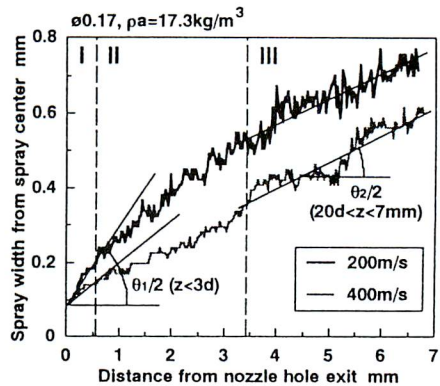


Fig.5 Spray width measurements and definition of the spray spreading angle

態にて計測を行った。撮影されたディーゼル噴霧の噴孔近傍の拡大写真の一例を図4に示す。図の上方からレーザーシートを入射しており、写真は噴霧の上半分を表している。

得られた35mmネガフィルムをスキヤナで読みとって、画像処理ソフトウェアで二値化し、噴霧がつながっている範囲を噴霧の幅として計測した。解析の一例を図5に示す。図中には燃料噴射初速度200m/sと400m/sのものを掲載した。図より噴霧の拡がり特性は、ノズルから噴射された直後の領域と、その後流の領域では異なっていることがわかる。400m/sの場合には、3mmより下流で凹凸が発生している様子が読みとれる。

本報では、噴霧の拡がり特性を計測するに当たり、約7mmの計測視野を次の三領域に分けて定義した。

- I. 噴孔内部の状態によって拡がりが決まる領域 (0<z<3d) d:噴孔径
- II. 遷移領域 (3d<z<20d)
- III. 噴霧と周囲気体によって拡がりが決まる領域 (20d<z<7mm)

計測条件を表1に試験変数を表2に示す。この噴射装置は噴射中の噴射率がほぼ一定であるという特徴から、燃料の噴射初速度は、噴孔内部では速度分布がな

く噴孔部で縮流は起こらないものとして、平均噴射率を噴孔面積で割ることにより求めた。また燃料噴射の開始から時間がたち準定常となった状態のディーゼル噴霧を対象とした。

本研究は、小酒ら<sup>(4)</sup>の $\theta_{s1}$  (0mm<z<10mm) や段ら<sup>(10)</sup>の $\theta_c$  (2mm<z<10mm) を更に細かく観察して領域分けをしたことに対応している。

### 3. 実験結果及び考察

前節で定義した領域において、領域Iの噴霧の拡がり角を $\theta_1$ 、領域IIIの角度を $\theta_2$ として計測した。角度は、二値化した画像から噴霧の輪郭線を数値化し、図5のように変動部分の中心を直線近似し、各条件について三回計測した値から求めた。

#### 3.1 噴射速度の影響

噴霧の拡がりを与える噴射速度の影響を調べた。雰囲気密度が1.15kg/m<sup>3</sup>の場合を図6に、17.3kg/m<sup>3</sup>の場合を図8に示す。両方の図において、 $\theta_2$ は $\theta_1$ より小さくなっている。つまり噴霧角は噴孔出口部で噴出した角度より下流の方が小さくなっている。これは噴霧の下流の領域では周囲気体の流動によって、拡がり角が噴射した直後より小さくなるためであると考えられる。横田ら<sup>(6)</sup>によると、噴霧角は初期に最大値をと

Table 1 Experimental conditions

Injection system	Accumulator type unit injector
Nozzle	Single hole nozzle
Fuel	JIS #2 diesel oil
Ambient gas	Nitrogen
Ambient gas temperature	Room temperature
Light source	Laser-sheet of ruby laser
Camera	Nikon F3 + magnified optics

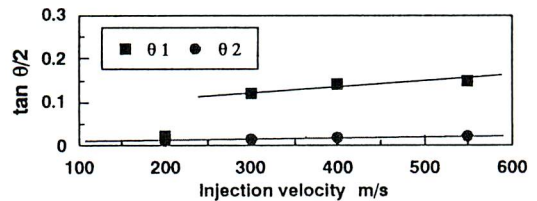


Fig.6 Effects of injection velocity on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $\phi$ 0.17,  $\rho_a$ 1.15kg/m<sup>3</sup>, case E, F, G, H in table 2)

Table 2 Experimental parameters

Case	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Injection velocity (m/s)	200	300	400	550	200	300	400	550	400	←	←	←	←	400	400	←
Injection pressure (MPa)	27	60	106	201	27	60	106	201	106	←	←	←	←	106	106	←
Ambient gas density (kg/m <sup>3</sup> )	17.3	←	←	←	1.15	←	←	←	0.12	11.5	23.1	34.6	17.3	←	←	←
Ambient gas pressure (MPa)	1.5	←	←	←	0.1	←	←	←	0.01	1.0	2.0	3.0	1.5	←	←	←
Nozzle hole diameter (φmm)	0.17	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	0.155	0.244	0.17	0.17
Nozzle hole L/D	7.82	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	←	8.39	5.25	5.44	3.39

り、その後小さくなり定常値になると報告されている。これは燃料噴射は最初静止気体中に噴射されるので噴霧はそのまま進み噴霧角が大きくなり ( $\theta_1$ )、その後噴霧流によって周囲気体の流動が誘起され、噴霧に沿った流れが生じることによって、噴霧の拡がり角が抑制されるようになり、拡がり角が小さくなる ( $\theta_2$ ) ものと解釈できる。

雰囲気密度が低い場合 (図6) には、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ ともに噴射速度が速くなると噴霧角が大きくなる傾向がある。200m/sの場合には $\theta_1$ が小さく不連続になっているが、これは図7に示すように噴流の速度が小さいために噴霧流となっていないためである。その場合においても、 $\theta_2$ は噴射初速度の増加とともに連続的に変化している。このとき、 $\theta_2$ は噴射初速度に対して線形であるとして実験式を求めると式 (1) のようになる。

$$\tan(\theta_2/2) = 2.7 \times 10^{-5} V_0 + 6.0 \times 10^{-3} \quad (1)$$

(Case E, F, G, H)

雰囲気密度が17.3kg/m<sup>3</sup>の場合 (図8) には、 $\theta_1$ は噴射速度の上昇により小さくなっている。既報<sup>(2)</sup>では、噴射速度の増加により、噴霧の拡がり角が抑制されると報告したが、これは、噴射速度の増加により、 $\theta_1$ が小さくなったことが原因と思われる。 $\theta_2$ を見ると速度の増加とともに、逆に若干ではあるが大きくなっている。 $\theta_2$ の実験式は式 (2) のようになる。

$$\tan(\theta_2/2) = 3.1 \times 10^{-5} V_0 + 6.5 \times 10^{-3} \quad (2)$$

(Case A, B, C, D)

図8中で $\theta_1$ は速度の増加とともに連続的に減少している。噴射速度と $\theta_1$ の関係を調べるために、両対数グラフにプロットした。その結果を図9に示し、このとき $\theta_1$ は式 (3) のように表せる。

$$\tan(\theta_1/2) = 16 V_0^{-0.802} \quad (3)$$

(Case A, B, C, D)

### 3.2 雰囲気密度の影響

雰囲気密度が異なる場合の噴霧の拡がり角 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ の変化を図10に示す。雰囲気密度が大きくなると、 $\theta_1$ は僅かに小さくなり $\theta_2$ は大きくなる。雰囲気密度の上昇とともに噴霧角が大きくなる特性は、既に多くの研究者によって報告されている。本試験でも図中に示すように、雰囲気密度の増加により噴霧の拡がり角は大

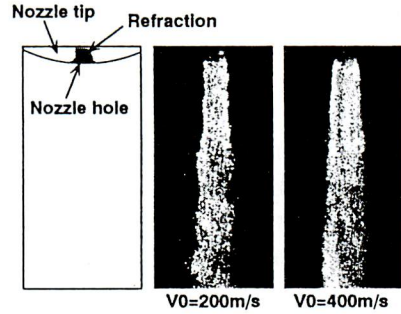


Fig.7 Effects of injection velocity on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $\phi 0.17$ ,  $\rho_a=17.3\text{kg/m}^3$ , case E, F, G, H)

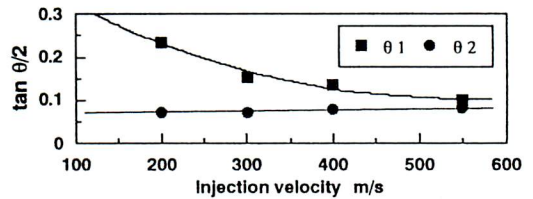


Fig.8 Effects of injection velocity on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $\phi 0.17$ ,  $\rho_a=17.3\text{kg/m}^3$ , case A, B, C, D)

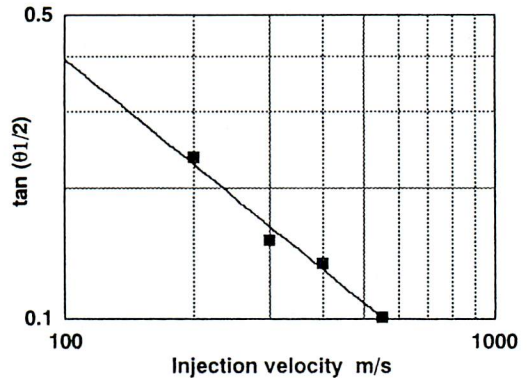


Fig.9 Effects of injection velocity on  $\theta_1$  ( $\phi 0.17$ ,  $\rho_a=17.3\text{kg/m}^3$ )

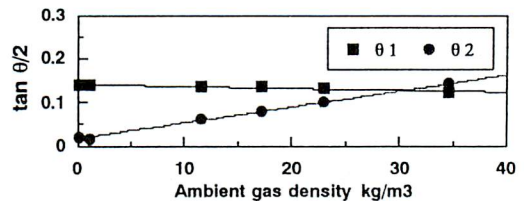


Fig.10 Effects of ambient gas density on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $\phi 0.17$ ,  $V_0=400\text{m/s}$ , case C, G, I, J, K, L)

きくなり、 $\theta_2$ は雰囲気気密度に対して比例関係にある。雰囲気気密度が $30\text{kg/m}^3$ 越えると、 $\theta_2$ が $\theta_1$ より大きくなり、噴孔からの噴出角度より広がっている。

雰囲気気密度と噴霧角の関係を定式化すると式(4)のようになる。

$$\tan(\theta_2/2) = 4.9 \times 10^{-1} p_a + 1.6 \times 10^{-2} \quad (4)$$

(Case C, G, I, J, K, L)

### 3.3 噴孔径やL/Dの影響

図11に噴孔径(D)が同一で、噴孔長(L)が異なる場合、図12にLが同一でDが異なる場合の噴霧の広がりの変化を示す。

両図より噴孔長や噴孔径が異なると、ノズルより噴出する角度 $\theta_1$ は大きく変化している。これは噴孔内部での縮流や再付着などの噴孔内部の状況が異なっているためであると考えられる。それに比べ $\theta_2$ は、 $\theta_1$ が変わってもほぼ同一の値となっている。これより広がり角 $\theta_2$ は、噴孔内部の状況によらず、噴流と周囲気体との相互作用により決まっていると考えられる。

### 3.4 噴霧の広がり角( $\theta_2$ )を表す実験式

前項までに求めた結果と表2に示す試験変数の試験結果より、噴霧の広がり角を表す式を算出した。

$$\tan(\theta_2/2) = (1.4 \times 10^{-7} V_0 + 3.6 \times 10^{-3}) p_a + 2.9 \times 10^{-5} V_0 + 1.9 \times 10^{-3} \quad (5)$$

(All cases in Table 2;  $20\text{d} < \theta_2 < 7\text{mm}$ )

式(5)に示すように噴霧の広がり角は噴射速度と雰囲気気密度によって表せる。式(5)より求めた値と計測値を比較した様子を図13に示す。実験結果と式(5)はよく一致している。また式(5)においては、 $V_0$ による寄与は小さく、噴霧の広がり角はほぼ雰囲気気密度によって決まるといえる。 $V_0=300\text{m/s}$ として、値を代入し $\tan(\theta_2/2)$ を $p_a$ の関数の式として表すと次のようになる。

$$\tan(\theta_2/2) \approx F(p_a) = 3.7 \times 10^{-3} p_a + 1.1 \times 10^{-2} \quad (6)$$

### 3.5 従来の研究結果との比較

本試験で求められた実験式(5)と従来の研究により与えられた噴霧角を表す式<sup>(4,6)</sup>との比較を行った。それらの結果を図14,15,16に示す。噴霧の広がり角の計算は、各研究報告の試験条件を超えない範囲になるように配慮を行った上で条件を設定した。図14に噴霧

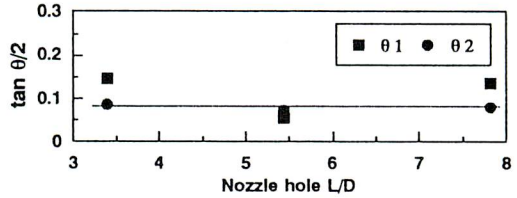


Fig.11 Effects of nozzle hole L/D on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $\phi 0.17$ ,  $V_0=400\text{m/s}$ ,  $p_a=17.3\text{kg/m}^3$ , case C, O, P)

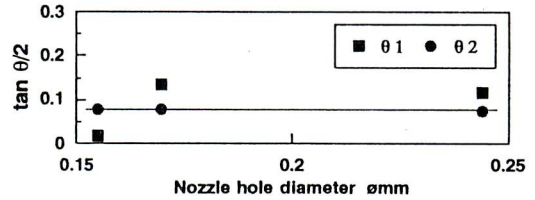


Fig.12 Effects of nozzle hole diameter on  $\theta_1$  and  $\theta_2$  ( $V_0=400\text{m/s}$ ,  $p_a=17.3\text{kg/m}^3$ , case C, M, N)

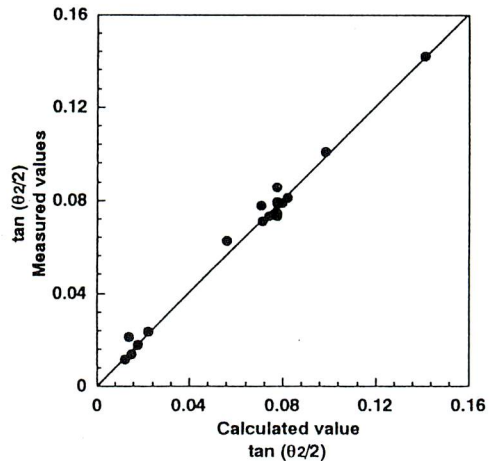


Fig.13 Relationship between measured and calculated  $\theta_2$

の広がり角に与える噴射初速度の影響、図15に雰囲気気密度の影響、図16に噴孔径の影響をそれぞれ示す。

それぞれの図を見ると、今回の計測結果はどの図でも従来研究に比べて小さな値になっている。これは、噴霧角の定義の違いによるものであると考えられる。

従来研究では、噴霧の外郭線を噴霧角として計測しているが、本研究では噴霧外周部の変動部分の中心を噴霧角として定義して計測したために噴霧の広がりが

小さくなっているのである。ディーゼル噴霧を詳細に観察すると図17, 18に示すように、噴孔近傍での拡がり角を中心にして噴霧と周囲気体との間で凹凸が発生し、下流に行くにしたがって凹凸が成長して大きくなり、やがて大規模渦に成長する様子が観察される<sup>(2)</sup>。(このような過程によりディーゼル噴霧に現れる枝構造が生成されるという考え方は段らによっても報告されている<sup>(10)</sup>(図19))。

噴孔近傍において噴霧と周囲気体との剪断層で生成される不安定は、噴射速度や噴孔径(噴射率)、あるいは噴孔内部での乱れによって変化し、その結果生成される大規模渦もこれらの条件によって変化すると考えられる。従って、今までのように噴霧角の定義を噴霧の外郭線とすると、噴霧角は今回の計測結果より大きな値を示し、なおかつその大きさは噴射速度や噴孔の形状によって変化するものと考えられる。

再び従来研究との比較を見ると、本研究で求められた式(5)は和栗らの研究結果に値やその傾向が近く、噴霧の拡がり角( $\theta/2$ )は主に運動量の交換により決定しているものと思われる。他の研究報告結果では、雰囲気気圧による影響の効果のみ同様の傾向を示すものの、噴射速度の影響および噴孔径による影響は異なる傾向を示している。この違いは、噴射速度や噴

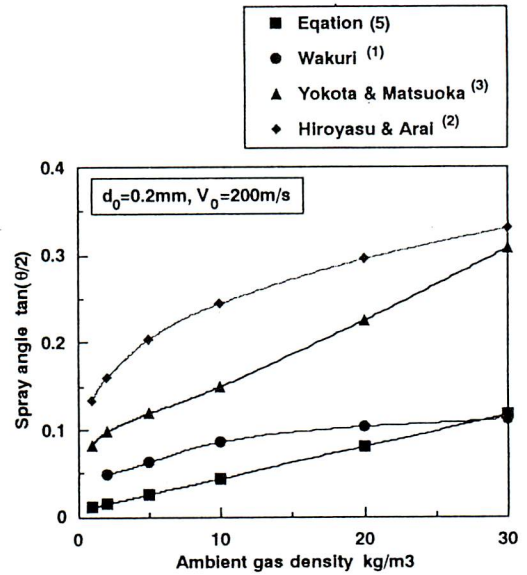


Fig.15 Comparison of various experimental data (Effect of ambient gas density)

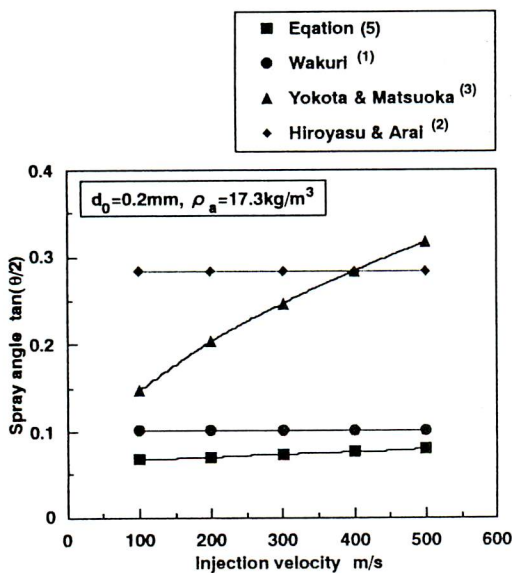


Fig.14 Comparison of various experimental data (Effect of injection velocity)

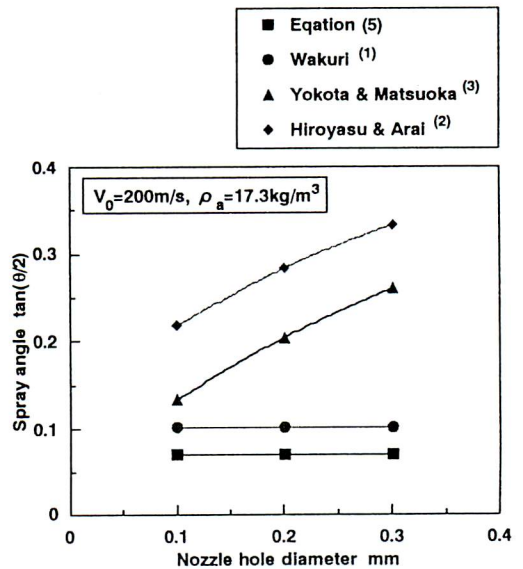


Fig.16 Comparison of various experimental data (Effect of nozzle hole diameter)

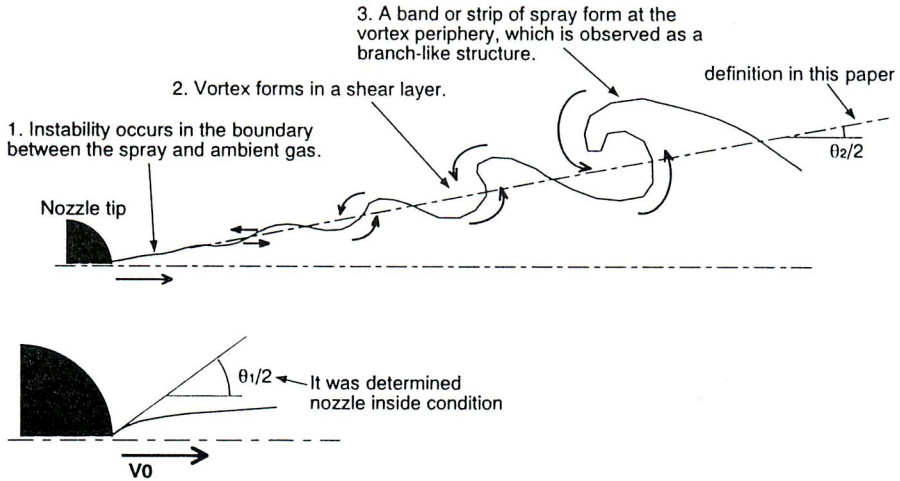


Fig.17 Schematic of branch-like structure formation process (Lagrangian view)<sup>(2)</sup>

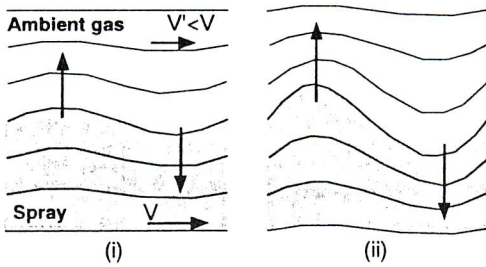


Fig.18 (i) Instability occurs in the shear layer near the nozzle hole exit. Negative pressure is generated at the dense part of stream line. (ii) Instability grows as it moves downstream (Helmholtz's instability)<sup>(2)</sup>

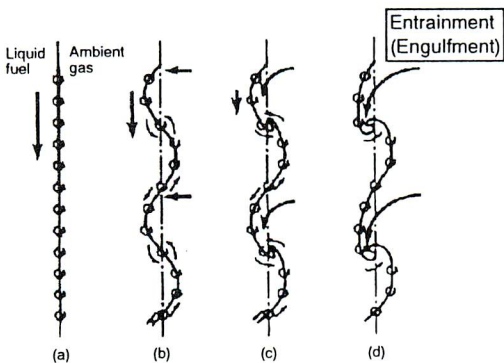


Fig. 19 Mechanism of vortex generation<sup>(10)</sup>

孔径等を変えることによって、噴霧外周部に形成される乱れが異なることで噴霧の拡がり特性が変化するためと考えられる。また和栗らの研究結果と本研究結果が近かったのは、和栗の理論では噴霧に生成される乱れの効果を考慮していないためであると考えられる。

このようにディーゼル噴霧は、噴流と周囲気体との密度比による拡がりに加えて乱流混合によっても噴霧が拡がっており、今までのように外郭線で噴霧を計測して特性を調べるのではなく、乱流による変動分を分けて式(7)のように考えた方が特性を把握できると思われる。

(噴霧の拡がり) = (乱流混合による変動成分)

x (噴流と周囲気体との密度比による拡がり) (7)

今後、ディーゼル噴霧の外周部に形成される乱流による変動成分の特性や大規模渦の生成に及ぼす各種のパラメータの影響を調べることにより、ディーゼル噴霧の拡がり特性および形成過程をより明らかにできるものと考えている。

#### 4. まとめ

ルビーレーザーのシート光を用いて、準定常状態のディーゼル噴霧の噴孔近傍部 (~7mm) を拡大撮影し、噴霧の拡がりについて詳細に調べ、噴霧の拡がり特性を  $\theta_1$  ( $0 < z < 3d$ ),  $\theta_2$  ( $20d < z < 7mm$ ) と定義し調べた。その結果、次のことがわかった。

(1) 燃料の噴射速度を増加させると、 $\theta_2$ は噴射速度に比例してわずかに増加する。

(2) 霧囲気圧力が増加すると、 $\theta_2$ は霧囲気圧力に比例して増加する。

(3) 燃料噴射ノズルの径やL/Dを変えても、 $\theta_2$ は変化しない。

(4)  $\theta_1$ は燃料噴射の条件やノズルの形状によって変化し、噴孔内の流れを明らかにしないと予測できないが、 $\theta_2$ は噴射速度と霧囲気圧力で表すことができる。

(5) 本研究結果と従来の研究との比較を行うと、和栗らの結果と傾向が一致しており、噴霧の拡がりは運動量の交換によるものと考えられる。

(6) 実際の噴霧の拡がりには、まとめ(5)の運動量の交換による拡がりに加え、噴霧外周部での乱れによる乱流混合による拡がりがある。今後、乱れによる拡がり特性を明らかにしていく必要がある。

最後に、本研究の噴霧観察試験は当時(株)新エィシーイー研究員上嶋節男氏によって行われたことを記し、感謝の意を表す。

### 文 献

- (1) 石川直也, 小森正憲, 辻村欽司: ディーゼル噴霧の初期形成過程に関する研究, 機論B, 62-598 (1996), 2528~2533.
- (2) Ishikawa, N., Niimura, K.: Analysis of Diesel Spray Structure Using Magnified Photography and PIV, SAE paper, No.960770 (1996).
- (3) 石川直也, 新村恵一, 辻村欽司: 二次元レーザ誘起蛍光法を用いたディーゼル噴霧粒子の粒径計測に関する研究, 機論B, 63-615 (1997), 3783~3790.
- (4) 和栗雄太郎, 藤井勝, 網谷竜夫, 恒屋礼二郎: ディーゼル機関燃料噴霧の到達距離に関する研究, 機論, 25-156 (1959), 820~826.
- (5) 広安博之, 新井雅隆: ディーゼル噴霧の到達距離と噴霧角, 自技論, 21 (1980), 5~11.
- (6) 横田克彦, 松岡信: ディーゼル機関の実験的研究, 機論, 43-373 (1977), 3455~3464.
- (7) 畔津昭彦, 四辻淳一, 染谷常雄, 及川親: ディーゼル噴霧の構造とその形成過程に関する研究 -噴射パラメータが噴霧構造に及ぼす影響-, 第9回内燃機関合同シンポジウム講演論文集 (1991), 391~396.

(8) 津江光洋, 服部廣司, 齊藤晃, 角田敏一: 噴射ノズル近傍におけるディーゼル噴霧の内部構造, 機論B, 59-564 (1993), 2584~2589.

(9) 小酒英範, 小林治樹, 神本武征: 非定常噴霧の噴口近傍部構造に関する研究, 機論B, 55-519 (1989), 3587~3592.

(10) 段智久, 高岸佐代, 大石直巳, 千田二郎, 藤本元: ディーゼル噴霧構造に与える霧囲気粘度の影響, 機論B, 62-599 (1996), 2867~2873.



石川直也

いすゞ自動車(株)エンジン設計

第二部ディーゼル実験第1Gr

〒252-8501

神奈川県藤沢市土棚8番地

Tel. 0466-45-2651

Fax. 0466-45-4794

e-mail. naoya-ishikawa@isuzu.co.jp

略歴: 1991年東海大学大学院理学研究科物理学専攻修士課程修了。同年(株)いすゞ中央研究所に入社。1992年10月より3年間(株)新エィシーイーへの出向を経て、1998年10月より現職に出向。主として、自動車用ディーゼルエンジンの開発に従事。



辻村欽司

千葉工業大学機械工学科教授

〒275-0016

千葉県習志野市津田沼2-17-1

Tel. 047-478-0276

Fax. 047-478-0299

e-mail. p10tujim@co.it-chiba.ac.jp

略歴: 1962年東京大学数物系研究科機械工学専攻博士課程修了。1961年いすゞ自動車(株)に入社。1998年10月より現職。主としてディーゼル機関の研究開発に従事。