研究論文

Log-Hyperbolic粒径分布関数の間欠燃料噴霧への適用性

Application of Log-Hyperbolic Size Distribution Function to Intermittent Fuel Sprays

石間 経章, (Tsuneaki ISHIMA) 群馬大 (Gunma Univ.)
隆 武強, (Wu-Qiang LONG) 日本自動車研究所 (JARI)
細谷 肇, (Hajime HOSOYA) ㈱ユニシアジェックス (Unisia Jecs Corporation)
小保方 富夫 (Tomio OBOKATA) 群馬大 (Gunma Univ.)

Four different distribution functions to match the droplet size distribution of fuel sprays, which had been obtained using phase Doppler anemometer (PDA) by the authors, are compared with each other. The four functions are log-normal (L-N), Rosin-Rammler (R-R), Nukiyama-Tanasawa (N-T) and three-parameter log-hyperbolic (LH3) functions. They are applied to results of unsteady Diesel and gasoline type sprays. It was found that the excellent fitting curves to the experimental data were provided by the three-parameter log-hyperbolic and Nukiyama-Tanasawa fitting functions. For the results which have some peaks in experimental size distribution, the three-parameter log-hyperbolic function provided the best fit curve. The Nukiyama-Tanasawa has problems at that estimation of the best-fit values of the parameters. The three-parameter log-hyperbolic function is simple for the determination of the parameters because they are easily given graphically from the experimental size distribution.

Key Words: Droplet size distribution functions, Fuel injection, Unsteady spray, Phase Doppler anemometer.

1. 緒言

従来，燃料噴霧の評価は，噴霧角度，到達距離，平均粒径および粒径分布などで議論されてきた．特に粒径分布は，微粒化特性をよく表現できるために重要であり古くから多くの研究が行われている[1]．近年，非接触で粒子速度を得るレーザドップラ流速計(LDA)や，流速と粒径が同時測定できる位相ドップラ法(PDA)の利用により，従来法に加え空間的に局所で時系列の噴霧流速および粒径の情報が得られるようになった．しかし，従来の粒径分布関数は定常噴霧全体を評価するために提案されているため，局所的で時間変化を伴うような PDA 測定結果に対する適用性は改めて評価する必要がある．本論文では，最近噴霧粒径分布評価のために再提案された，Log-Hyperbolic 関数[2]を用い，従来から使用されている抜山－棚沢，Log-Normal，Rosin-Rammler 等の分布関数との適用性を比較する．対象噴霧は，著者等の PDA による間欠ディーゼル噴霧[3]および間欠低圧噴霧[4]の時間積分した結果，さらに噴霧を時間分解した各部分[3]とし，これらの関数の適用性を評価した．

原稿受付：1998 年 6 月 30 日

2. 本研究で使用した粒径分布関数

本研究では，Log-Normal (L-N)，Rosin-Rammler(R-R)，抜山－棚沢 (N-T)，および３パラメータ Log-Hyperbolic (LH)の粒径分布関数を使用した[1][2]．各分布関数を表１の式 (1) - (4) に示す．L-N と R-R は２パラメータの関数である．N-T は４パラメータであるが，A, B, α, βは後述の通り互いに関係しており，また A は規格化のための定数として用いるため，実質は２パラメータ関数となる．なお N-T は，$\alpha+4=\beta=s$ の場合，式(2)の R-R を特殊解として与える．Log-Hyperbolic (LH)は，Barndorff - Nielsen[5]によって式(4.1)のように示された．式(4.1)中の $F(\alpha, \beta, \delta)$は関数の規格化のために使用される定数であり[2][5]，LH は$\alpha, \beta, \delta, \mu_{4p}$の４パラメータの関数となる．LH は式(1)の Log-Normal を特殊解として含むが，L-N が単一粒子が分裂した結果を粒径分布としたのに対し，LH は複数の粒径の粒子が分裂した結果の集合として粒径分布を求める点が異なり，いくつかの L-N を重ね合わせた関数形となる[2]．LH は粒径分布をよく表すものの近似が安定しないことが指摘されていた．そこで近年，式(4.2)で表される，a, θ, μ_{3p}の3パラメータの Log-Hyperbolic (LH3)分布として再提案された[2]．LH3は両

Table 1 Distribution functions used in particle sizing.

Log-Normal Distribution (L-N)

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\frac{1}{x}\exp\left[-\frac{1}{2\sigma^2}(\ln x-\mu)^2\right] \qquad (1)$$
$$0<x<\infty$$

Rosin-Rammler Distribution (R-R)

$$f(x)=\frac{s}{\bar{x}\Gamma(1-3/s)}\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^{s-4}\exp\left[-\left(\frac{x}{\bar{x}}\right)^{s}\right] \qquad (2)$$
$$0\le x<\infty$$

Nukiyama-Tanasawa Distribution (N-T)

$$f(x)=Ax^{\alpha}\exp\left(-Bx^{\beta}\right) \qquad (3)$$
$$0\le x<\infty$$

Log-Hyperbolic Distribution (LH)

$$f(x)=F(\alpha,\beta,\delta)\frac{1}{x}\exp\left[-\alpha\sqrt{\delta^2+(\ln x-\mu_{4p})^2}+\beta(\ln x-\mu_{4p})\right] \qquad (4.1)$$
$$0<x<\infty,\quad |\beta|<\alpha,\quad \delta>0,\quad \mu_{4p}\in(-\infty,\infty)$$

Three-Parameter Log-Hyperbolic Distribution (LH3)

$$f(x)=A\frac{1}{x}\exp\left\{-\frac{a}{a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta}\sqrt{(a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta)+(\ln x+\mu_0-\mu_{3p})^2}-\frac{(a^2+1)\sin\theta\cos\theta}{a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta}(\ln x+\mu_0-\mu_{3p})\right\} \qquad (4.2)$$

$$\left(\begin{array}{l}\alpha=\dfrac{a}{a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta}\\[2ex] \beta=-\dfrac{(a^2+1)\sin\theta\cos\theta}{a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta}\\[2ex] \delta=(a^2\cos^2\theta-\sin^2\theta)^{1/2}\\ \mu_{4p}=\mu_{3p}-\mu_0\end{array}\right) \qquad (4.3)$$

対数軸グラフ上で双曲線となり，μ_{3p}が双曲線の頂点位置，a が開き角そしてθ が傾き角を表している[2]．LH と LH3 で使用するそれぞれのパラメータは式(4.3)で示される関係にある．なお，式(4.2)の LH3の中のμ_0は変数変換する時に生じた定数である．LH3は近似の安定性が向上するとともに，各パラメータが粒径分布形状と直接関係していて理解しやすいという長所がある[2]．

各式で使用したパラメータの概念および算出法を表2に示す．L-N と R-R のパラメータは式(5),(6)のように算術平均粒径(D_{10})とその分散($V(x)=(D_{20})^2-(D_{10})^2$)が実験値と等しくなるように選定した[2][6]．N-T は棚沢の方法[1]を用い，$\beta=1$と固定し実測値が表２中のグラフで最も直線に近くなるよう最小自乗近似によりαとBの２パラメータを求めた．LH3では Barndorff - Nielsen[5]と同様に Maximum Likeness Estimation 法を使用した．この方法は，統計学でよく使用される Maximum Likelihood 法を発展させた方法で，LH3($=f(x,\ a,\ \theta,\ \mu_{3p})$)を粒径分布測定結果に適用する場合，Maximum Likelihood 法では以下の式の値が最大のとき最もよく

Table 2 Estimation method of each parameter of distribution function.

Log-Normal (L-N)

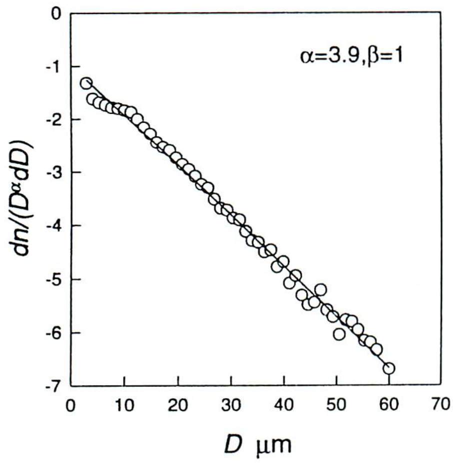
$$D_{10}=\exp\left(\mu+\frac{1}{2}\sigma^2\right)$$
$$V(x)=\exp\left(2\mu+\sigma^2\right)\left[\exp\left(\sigma^2\right)-1\right] \qquad (5)$$

Rosin-Rammler (R-R)

$$D_{10}=\frac{\bar{x}\Gamma(1-2/s)}{\Gamma(1-3/s)}$$
$$V(x)=\frac{(\bar{x})^2\Gamma(1-1/s)}{\Gamma(1-3/s)}-\left[\frac{\bar{x}\Gamma(1-2/s)}{\Gamma(1-3/s)}\right]^2 \qquad (6)$$

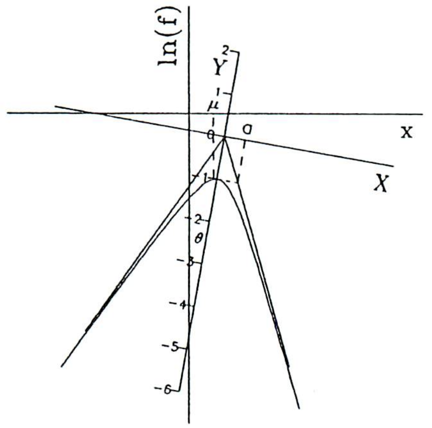
Nukiyama-Tanasawa (N-T)

$$\log_{10}\left(\frac{1}{D^{\alpha}}\frac{dn}{dD}\right)=\log_{10}nA-\frac{B}{2.3}x^{\beta} \qquad (7)$$



Log-Hyperbolic (LH)

$$\sum r_i \ln P_i(\hat{\lambda})$$
$$\left(P_i=\frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x,\lambda)dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x,\lambda)dx} \quad \left(\int_{-\infty}^{\infty} f(x,\lambda)dx=1\right)\right) \qquad (8)$$



一致するパラメータ(a, θ, μ_{3p})が得られる．

$$\sum n_i \ln P_i(a,\theta,\mu_{3p})=\sum n_i \ln\frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx}{\int_{-\infty}^{\infty} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx} \qquad (8')$$
$$=\sum n_i \ln\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx \quad \left(\because \int_{-\infty}^{\infty} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx=1\right)$$

ただし，式中 x_i，n_iは i 番目の代表粒径(横軸;x)での粒数頻度(縦軸; n)を示す．この方法は無限幅とみなせるだけ十分なサンプル数があるときに有効である．粒径分布関数も対数軸表記とした場合無限幅で定義されるべきであるが，実際の粒径測定では限定された範囲でしか頻度分布が得られないため，この方法では十分な結果が得られない．そこで，Maximum Likeness Estimation 法は式(8')を以下のように変形して使用する．

$$\sum n_i \ln P_i(a,\theta,\mu_{3p})=\sum n_i \ln\frac{\int_{x_{i-1}}^{x_i} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx}{\int_{x_{min}}^{x_{max}} f(x,a,\theta,\mu_{3p})dx} \qquad (8'')$$

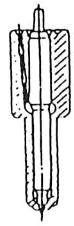
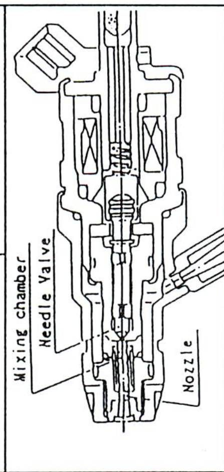
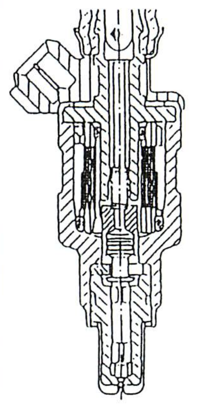
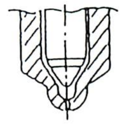
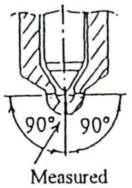
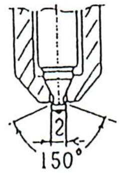
つまり，与えられた関数(LH3)は x_{min} から x_{max} の範囲でのみ定義されるとし，有限幅でしか得られない粒径分布測定結果を粒径分布関数に適用させる方法であり，最小自乗法や Maximum Likelihood 法よりも適切なパラメータを与えることが報告されている[7]．

本研究で使用した全ての分布関数の全パラメータは，実測分布結果を入力すると自動的に最適値が選定されるようにプログラム化して結果を得た．なお，LH3以外の関数には数種類のフィッティング法を試したが，有意な差がでなかったため，従来の方法を使用した．

3．間欠噴霧の実験条件

本研究では，単孔ノズル，単孔＋三孔の四孔ノズルおよび傘状噴霧ノズルによるディーゼル噴霧[1]と，エアアシストインジェクタ，ピントルノズルによる低圧燃料噴霧[4]の実験結果を使用した．各噴霧測定で使用したノズル形状を実験条件と共に表3に示す．測定は，単孔ノズル，エアアシストインジェクタ，ピントルノ

Table3 Specification of five nozzles.

<table>
<tr><td>Cross section of nozzle (whole body)</td><td colspan="3"></td><td rowspan="2">
</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>Cross section of nozzle (nozzle tip)</td><td></td><td>
</td><td>
</td></tr>
<tr><td>Fuel (Valve open) pressure</td><td>(29.4 MPa)</td><td>(29.4 MPa)</td><td>(19.6 MPa)</td><td>147 kPa
(250kPa:Air)</td><td>147 kPa</td></tr>
<tr><td>Flow rate</td><td>19.8
(mm^3/cycle)</td><td>37.3
(mm^3/cycle)</td><td>12.8
(mm^3/cycle)</td><td>6.4
(mm^3/cycle)</td><td>8.2
(mm^3/cycle)</td></tr>
<tr><td>Measurement position</td><td>Z = 50mm
r = 0mm</td><td>Z = 50mm
r = 0mm</td><td>Z = 40mm
r = 0mm</td><td>Z = 50mm
r = 0mm</td><td>Z = 50mm
r = 0mm</td></tr>
<tr><td>Nozzle type</td><td>Single hole</td><td>Single hole
+3holes</td><td>Conical
spray nozzle</td><td>Air assisted
injector</td><td>Pintle
nozzle</td></tr>
<tr><td>Brief mention</td><td>D.S.</td><td>D.4</td><td>D.C.</td><td>A.A.</td><td>PIN</td></tr>
<tr><td colspan="4">Diesel sprays</td><td colspan="2">Gasoline type sprays</td></tr>
</table>

ズルでは噴霧全体について，単孔＋三孔の四孔ノズルでは中央の噴霧，傘状噴霧ノズルでは噴霧の一辺について行った．座標軸は噴霧の進行方向を Z 軸，横方向を r 軸とした．噴霧燃料はディーゼル噴霧においてはJIS2号軽油を，ガソリン噴霧においてはガソリンの代替燃料の Laws を使用した．本研究は，すべて間欠噴霧で行なわれ，エンコーダによって噴霧の位相角度信号を同時に取り込み，非定常噴霧の位相角ごとの粒径と流速を測定している．粒径はカウンタ型の信号処理器を用いた Aerometrics 社の Phase Doppler Particle Analyzer (PDPA)によって計測した．この際入射光線の交差全角はディーゼル噴霧で1.43°および2.7°，ガソリン噴霧で5.4°，測定体積直径は約0.7mm である．特に測定体積直径は粒径誤認を避けるため予想される最大粒子径の5倍程度[8]となるように設定した．

4．粒径分布関数の比較結果及び考察

4.1 間欠噴霧の時間積分値に対する適用性比較

図１は，間欠噴霧の時間的変動を考慮せずに全てのデータを取り込んで時間積分した噴霧粒径分布であり，(a)から(e)まで順に，単孔ノズル(D.S.)，四孔ノズル(D.4)，傘状(D.C.)，エアアシストインジェクタ(A.A.)，ピントルノズル(PIN)噴霧の結果である．例示した粒径分布の測定位置は，(c):(D.C.)は噴孔出口からの噴射方向位置 Z =40mm，Z に直交する半径位置 r =0mm とし，その他は Z =50mm の中心軸上(r =0mm)である．全ての噴霧において各分布関数を比較すると，R-R は小径粒子側を多く見積もる傾向が，L-N は分布幅が狭く極大値が小径粒子側に移行する傾向がある． N-T と LH3は実測値(Exp.)とおおむね良好な一致を示している．N-T と LH3を，実験で得られた粒径分布が複数の極大値を有する場合(図1(a)，(c))で比較すると，N-T が実験結果で示される二つの極大値の中間で極値となる曲線を与える一方で，LH3は分布図の最大値の位置で極大となる曲線を与える傾向がある．本研究の結果では，LH3が最も実験値の分布形状に近い曲線を与えている．

これらの分布関数を基に，平均粒径を再計算した結果を表4に，さらにザウタ平均粒径の小さいものから順に並べた結果を図２に示す．表4と図２には，参考のために使用した PDA の機能である Volume

Correction で補正された粒径分布(Exp.-C)も示してある．Volume Correction は，大径粒子の方が測定体積に補足されやすいという粒径バイアスを補正するため，小粒径粒子数を補う機能である．

表4と図２から，D.4と D.C.のような比較的微粒化が進行し，極値が一つの粒径分布形状では，分布関数によらず実験値と同程度の平均粒径を与えるが，N-T と LH3は粒径を若干大きく，L-N は粒径を小さく評価する結果となった．この時，実験値と算術平均粒径 D_{10} は+10%から-22%で，ザウタ平均粒径 D_{32}は+18%から-3%で一致した．この中で大きな誤差を示したのは D.4噴霧の N-T であり，それ以外では，D_{10}および D_{32} それぞれ+10%～-5%，+3%～-3%と非常によく一致した．N-T による平均粒径が大きく異なった理由は次節で述べる．A.A.においても各分布関数は同程度の平均粒径を与えるが，全ての再計算値が実測値よりも大きく，D_{10}と D_{32}はそれぞれ+22%～+11%，+15%～+8%と誤差が大きい．各分布関数による再計算した両平均値が±5%以内で一致していることから，大径粒子側(図1で右方)での測定値のばらつきが適切に表現できず再計算値に影響がでたためと考えられる．なお D.4においても大径粒子側で測定値のばらつきが観察されるが，A.A.でばらつきが観察されるのは ln(Dμm) = 4付近で粒数頻度 ln(n) = - 3であるのに対し， D.4では ln(Dμm) = 4.3付近で粒数頻度は ln(n) = - 5程度であり，全液滴数に対する比率が小さく平均粒径の再計算値には影響しなかったと考えられる．

一方，大径粒子が多く極大値が複数ある D.S.と PIN の D_{10}と D_{32}は D.S.で+15%～-21%と+7%～-30%，PIN で+24%～-11%と-2%～-15%と大きなばらつきがでた．この傾向は図2からも示される．D.S.において，図1で分布形状が最も妥当と思われた LH3は小径粒子側に極大値を持つため大径粒子の評価が不十分であり，D_{10}は2μm(-6%)，D_{32}は23μm(-30%)実験結果よりも小さい．しかし，図1の結果では，LH3以外の各分布関数は分布形状を十分近似しているとはいえず，算出した平均粒径の信頼性も不十分である．PIN では LH3だけが，D_{10}が+2%，D_{32}が-5%と両者ともによく一致し，他の各関数では D_{10}が大きく異なる結果(N-T;23%,L-N;17%, R-R;-11%)となった．これらの結果から，今回の PIN では LH3が最もよい分布形状を与えたことが分かる．しかし，D.S.および PIN の粒径分布の測定位置は Break-up 長さ(9)から推定して，液柱や非球形粒子が存在し微粒化が十分ではない領域の可能性がある．したがって，全ての粒径範囲で適切な粒径分布を与えることは非常に困難であるばかりでなく，粒径近似関数本来の定義からも逸脱していると考えられる．

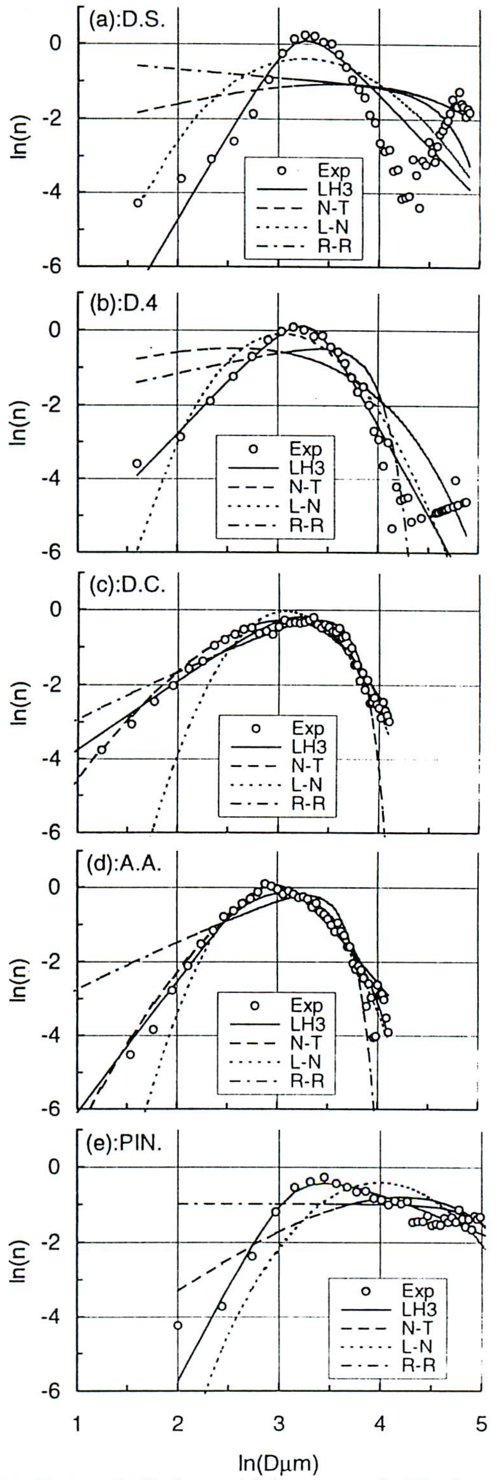


Fig.1 Various distributions and fitting curves for Diesel and gasoline sprays.

Table4 Estimated mean diameters by distribution functions for various fuel sprays.

	D_{10} μm						D_{32} μm					
	Experiment		Estimation					Experiment		Estimation			
	Exp.-C	Exp.	LH3	N-T	L-N	R-R		Exp.-C	Exp.	LH3	N-T	L-N	R-R
D.S.	33	33	31	38	33	26	D.S.	76	76	53	81	61	72
D.4	22	22	23	17	23	21	D.4	31	32	32	38	33	33
D.C.	19	21	22	21	23	22	D.C.	31	32	32	32	31	32
A.A.	16	18	21	22	21	20	A.A.	24	26	30	30	28	29
PIN	47	54	55	67	63	48	PIN	112	118	112	116	100	115

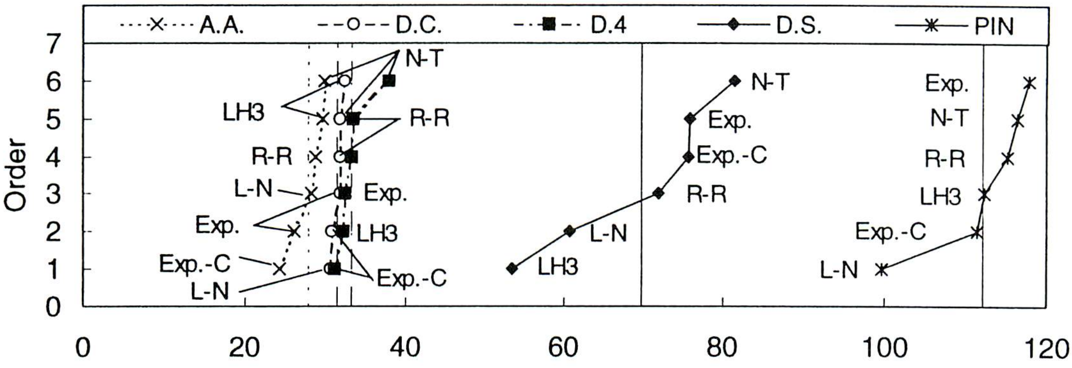


Fig.2 Estimated Sauter mean diameter by various distribution functions.

以上の結果からL-NおよびR-Rでの誤差要因は次のように考えられる．L-Nは，両対数グラフ上で放物線となる．したがって，実験結果が頂点から横軸に垂線を下した対称軸に対して著しく非対称な分布であるD.S.とPINでは誤差が大きくなる．R-Rは，図1に示されるように，小径粒子を多く見積もる傾向があるため D_{32}は妥当な値を与えるものの D_{10}が小さくなる．これらの傾向は，分布関数に固有であり，これらの分布関数を噴霧に使用する際には常に注意が必要となると思われる．

4.2 間欠噴霧の時間分割評価

定常噴霧と間欠噴霧では，その性質が大きく異なることが予想される．既報では，噴霧を時間的に分割して粒径と流速の相関を評価し定常と非定常で結果の異なる理由を言及した[3]．本研究では，非定常傘状噴霧を図3に示すように，噴霧を位相角によって5分割して評価した．各部の決定方法を以下に示す．まず，粒子群の到着時刻を噴霧先端とし，最大流速の半値以上の流速の区間を $t_{0.5}$と定義する．$t_{0.5}$を三等分し，先端から前部(F)，中心部(C)，$2t_{0.5}/3$を後部(R)とし，続く$3t_{0.5}$に相当する区間を尾部(T)，そして残りの部分を後流部(W)とした．

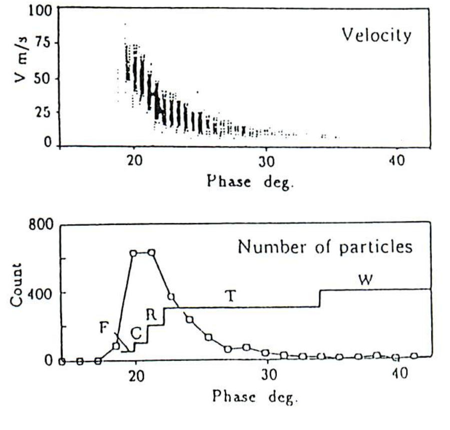


Fig.3 Explanation of each temporal part with time dividing method.

図4と表5に，非定常の傘状噴霧を時間分割した各部分での粒径分布と関数近似の結果を示す．噴霧が測定点に到達した直後すなわち噴霧先端部分(F)では，L-Nが大きく異なるが，その後，中心部(C)，後部(R)，尾部(T)まで，どの分布関数によってもほぼ妥当と思われる近似曲線を与え，間欠噴霧の時間変化に起因す

Table5 Estimated mean diameters by various distribution functions; Time dividing size distribution.

D_{10} μm						
	Experiment		Estimation			
	Exp.-C	Exp.	LH3	N-T	L-N	R-R
F	31	32	32	31	34	32
C	25	25	26	24	27	25
R	19	20	20	19	21	19
T	14	18	19	18	20	18
W	30	31	31	29	33	30

D_{32} μm						
	Experiment		Estimation			
	Exp.-C	Exp.	LH3	N-T	L-N	R-R
F	39	41	41	42	39	41
C	34	34	34	34	33	35
R	27	28	28	28	27	28
T	26	29	30	30	28	29
W	36	36	36	37	36	37

る誤差要因はないようである．後流部(W)では特定の粒径範囲に粒子が集中した分布形状であり，N-T による分布曲線は小径粒子を多くまた極大値を小さく見積もるため，全体的に曲率が大きくなり，実験値の傾向が適切に表現できていない．

表5から，平均粒径は各分布関数ともに±2μm の範囲で一致し，ほぼ妥当な値となる．特に LH3は1μm 以内で一致する．各関数では L-N は常に D_{10}を大きく，D_{32}は小さく，R-R は常に D_{10}を小さく，D_{32}は大きく評価する．この傾向は前述したように L-N が極大値を軸に著しく非対称性の分布 (特に前部，中心部，後流部) では適切な分布形状を表現できず，R-R は常に小径粒子を多く見積もることに起因するものである．さらにこの表では N-T が常に D_{10}を小さく D_{32}を大きく評価し，再計算した平均粒径と実験値との差も大きい．N-T の特殊解で与えられる R-R が噴霧の各時間部分でよりよい再計算値を与えること，および図 4 (e): W (後流部) において，R-R が N-T よりも明らかに適切な分布関数曲線となることから，N-T はパラメータ選定の際に，$\beta = 1$と固定したため最適なパラメータが与えられていないと考えられる．この傾向は，図1(b):D.4や図 4 (e): W (後流部)のような狭い粒径範囲に多くの粒子が集中する分布形状の時に顕著となる．したがって，このような分布形状に対しては N-T のパラメータはβを可変として求める必要があり，これはβを変化させ棚沢の方法[1]を繰り返して最適値を求めるかあるいは他の方法(最小自乗法など)で直接 B, α, β の 3 パラメータを求めることになる．

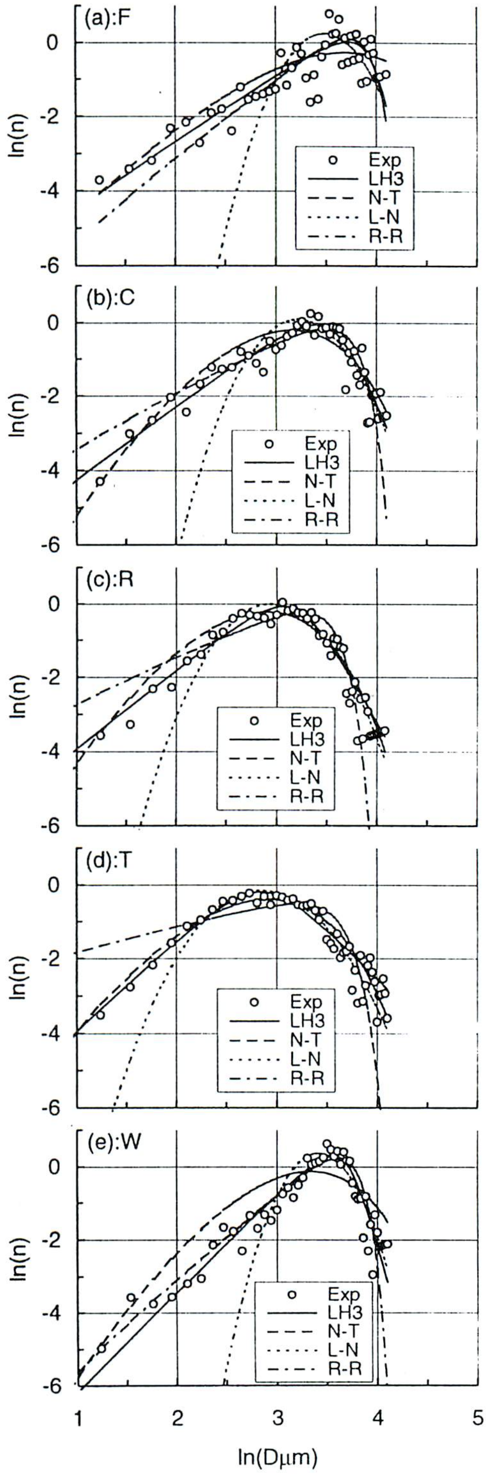


Fig.4 Distribution functions for conical spray.

5．結言

本研究では，３パラメータ Log-Hyperbolic (LH3)，分布関数を位相ドップラ流速計により実測した噴霧粒径分布に適用し，Log-Normal (L-N)，Rosin - Rammler (R-R)，抜山－棚沢 (N-T) の各分布関数と適用性を比較した．対象とした噴霧はディーゼル噴射弁とガソリン噴射弁からの間欠噴霧とし，位相ドップラ流速計による局所で時間的変化がわかる噴霧粒径分布に対する各分布関数の近似性を比較し，以下の結論を得た．

1. 粒径範囲が広く，微粒化が進み極大値が一つの粒径分布形状に対しては，どの分布関数も時間変化，噴霧方式によらず妥当な近似分布曲線を与える．また，各分布関数から平均粒径を再計算した値は±5%程度で一致する．しかし，Log-Normal は両対数グラフ上で放物線となり，Rosin-Rammler は小径粒子を多く見積もるという分布関数に起因する傾向が観察される．
2. 粒径分布の極大値は一つであるが，粒径範囲が狭く，特定の粒子が多数存在する場合，$\beta = 1$としてパラメータを決定した抜山－棚沢の式では十分な近似曲線を得られず，再計算した平均粒径も約20%の大きな差を生じた．このような粒径分布に抜山－棚沢の式を適用する場合，直接各パラメータを設定するなど，簡易的な方法以外の方法により最適パラメータを選定することが必要となる．
3. 微粒化が不十分で，非球形粒子が多数存在する場合は，PDA 測定値そのものの信頼性は低い．しかし粒径分布が得られる測定条件で，粒径分布に複数の極値を持つような場合は，３パラメータ Log-Hyperbolic 関数が最も近い近似曲線を与えた．この場合，再計算した平均粒径は約30%程度の誤差を生じた．
4. 3パラメータ Log-Hyperbolic 関数は，今回使用した粒径分布近似関数の中では最もよい近似曲線を与えた．3パラメータ Log-Hyperbolic 関数は他の関数と比較して，粒径分布の実測値がばらついた場合でも妥当な近似曲線を与える．

最後に本研究の粒径分布自動近似プログラムの作成には当時群馬大学学生，小山哲司君（現在司測研）に多大なる協力を戴いたことを記し，ここに深く感謝します．

参考文献

(1) 棚沢泰：液体噴霧粒群の大きさの表しかた，機械の研究，15-4 (1963), 505-511他.
(2) Xu,T.-H. ほか２名：The Three-parameter Log-Hyperbolic Distribution and its Application to Particle Sizing, ICLASS-91,(1991),315-324.
(3) 隆ほか２名：レーザドップラー法によるディーゼル機関用傘状噴霧流の特性解析，機論 B, 60-576 (1994), 2917-2923.
(4) 石間ほか５名：エアーアシストインジェクタ噴霧流の PDA 測定と評価，機論 B, 61-585 (1995), 1935-1941.
(5) Barndorff-Nielsen: Exponentially Decreasing for the Logarithm of Particle Size, Proc.R.Soc.Lond.A. 353 (1977), 401 - 419.
(6) 細谷肇，小保方富夫：ディーゼル噴霧粒径分布の Log-Hyperbolic 近似による評価，第１回微粒化シンポジウム講演論文集, No.1,(1992),189-194.
(7) Long,W.Q.,ほか６名：Analytical Fanctions to Match Size Distributions in Diesel-Sprays, Proc. of COMODIA'94 (1994), 213-218.
(8) Grehan ほか３名：Evaluation of Phase Doppler System using Generalized Lorenz-Mie Theory, Proc. of Int. Conf. Multiphase Flows, Vol. 2 (1992) 291-294.
(9) Hiroyasu, H. : Diesel Engine Combustion and Its Modeling, Proc. of COMODIA'85 (1985), 53-75.

石間 経章（いしま つねあき）
群馬大学 工学部
機械システム工学科 助手
〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1
TEL 0277-30-1528
FAX 0277-30-1531
e-mail ishima@me.gunma-u.ac.jp

1994 年慶應義塾大学大学院理工学研究科博士課程修了．群馬大学工学部助手．レーザドップラ流速計，位相ドップラ流速計および粒子画像流速計を使用した流れの計測，燃料噴霧の研究に従事．

隆 武強（ろん うーちゃん）
（財）日本自動車研究所
先進動力機構研究室
産業技術研究員
〒 305-0822 つくば市苅間 2530
TEL 0298-56-1111
FAX 0298-56-1169

1981 年湖南大学内燃機関科卒．1990 年大連理工大学博士課程満期退学，1995 年群馬大学大学院博士課程修了．1995 年機械技研の科学技術特別研究員．1984 年から傘状噴霧予混合ディーゼルの研究，現在ハイブリッド電気自動車の研究に従事．

細谷 肇（ほそや はじめ）
（株）ユニシアジェックス
開発本部
動力制御システム開発部
〒 370-0023 群馬県伊勢崎市
粕川町 1671-1
TEL 0270-26-7137 FAX 0270-24-3523

1986 年群馬大学工学部機械工学科卒業，1988 年同大学大学院修士課程修了，日本電子機器（株）勤務，1993 年群馬大学大学院工学研究科博士後期課程修了，1993 年（株）ユニシアジェックス勤務，エンジン制御システム設計に従事

小保方 富夫（おぼかた とみお）
群馬大学 工学部
機械システム工学科 教授
〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1
TEL/FAX 0277-30-1531
e-mail tobo@me.gunma-u.ac.jp

1969 年東海大学第二工学部卒業．東京大学宇宙航空研究所技官・助手，群馬大学工業短期大学部，講師・助教授，群馬大学工学部助教授，教授．流れの可視化，計測とシミュレーション，エンジン及び熱・流体機器におけるレーザ計測に関する研究に従事．