エントロピー法によるディーゼル噴霧内の拡散構造解析*

湯山 亮^{*1}, 近久 武美^{*1}, 菱沼 孝夫^{*1}

Entropic Analysis of Microscopic Diffusion Structure in Diesel Sprays

Ryo YUYAMA, Takemi CHIKAHISA^{*2} and Yukio HISHINUMA^{*2} Div. of Mechanical Science, Hokkaido University, N13 W8, Sapporo-shi, Hokkaido, 060-8628 Japan

Rapid mixing of fuel and air is an essential factor in improving combustion and emissions of diesel engines. The paper investigates local diffusion phenomena with focusing on scales of fuel cloud and eddies. To analyze degree of heterogeneity entropic analysis was developed and applied to the diffusion phenomena in turbulent jets and diesel sprays. The result shows the effectiveness of the entropic analysis method for identification of scales of heterogeneity and diffusion intensity. The result of the experiment shows that the diffusion intensity is the highest at the vicinity of the nozzle exit, and size scale of the heterogeneity is the smallest. The scale of the heterogeneity increases gradually along the spray axis towards downstream, with containing smaller scales inside of the large clouds. In the downstream region, small-scale structure diffuses and becomes unclear, while large scale structure remains clearly. The paper reveals microscopic structure of the heterogeneity in diesel sprays, and it demonstrates availability of the entropic method.

Key Words: Spray, Homogeneity, Heterogeneity, Diffusion, Scale, Entropy, Diagnostics

1. まえがき

ディーゼル燃焼に代表される高速拡散燃焼は燃料塊と周囲空気との混合・拡散に主として律速されており、よりクリーンで高効率な燃焼を実現するにはこの拡散現象の制御が極めて重要である。そのためこれまでにディーゼル噴霧中の濃度分布や空気導入に関する研究が数多くなされている。しかし、流体塊の不均一性を定量的に取り扱うための十分な指標はこれまでのところ提案されておらず、噴霧内の拡散構造の把握が充分になされているとはいえない。さらに、混合過程では流体塊と渦の相対スケールが影響するはずであり、例えば風船程度の流体塊の拡散に台風程度のスケールの渦は寄与しないはずであるが、拡散混合過程に関するスケールの影響を論じたものはあまり見当たらない。

そこで、本研究では噴霧中の混合・拡散現象について、先に提案を行った不均一性に関する統計力学的エントロピー解析法⁽¹⁾を用いて、流体塊スケールの分布について解析を行った。その結果、エントロピーにより不均一性の程度と、そのスケールを概ね表現し得ることが示された。また、液-液噴流および噴霧について拡散構造の解析を行った結果、ノズル近傍から下流に移動するにつれて流体塊のスケールが増大するほか、

小さなスケールの流体塊は均一化が進み不鮮明となっていくこと、また大きなスケールの流体塊は下流側でより鮮明に残留していることが確認された。

なお、関連した研究として、噴霧中のマクロ的な空気導入に関する理論的研究⁽²⁻⁵⁾のほか、実験的に空気導入量を直接計測しようとしたもの⁽⁶⁻¹⁰⁾、および噴霧画像の体積計測から空気導入を算出したもの^(11,12)などがある。このほか噴霧内の構造を観察したものとして、鈴木ら⁽¹³⁾は2波長レーザーを用いて蒸発噴霧内の等量比分布を求めているほか、Azetsuら⁽¹⁴⁾は噴霧内にある枝状の不均一構造を観察している。また、高岸ら⁽¹⁵⁾は噴霧画像から渦構造と粒子径の関係および雰囲気気体の取り込み現象について解析しているほか、小酒ら⁽¹⁶⁾は燃料蒸気濃度の定量測定を行い燃料蒸気塊が間欠的、周期的に分布する様子を観察している。

2. 不均一度およびスケールの解析法

2・1 エントロピー解析法

流体塊の不均一性を表す手法として、本節では先に報告を行った統計力学的なエントロピー法⁽¹⁾について概説する。エントロピーは乱雑さを表す物理量であり、混合状態が進行するにつれてエントロピーは増大する特徴がある。空間内をあるサイズで分割したときの、各メッシュ内に含まれる粒子の分散状態の組み合わせ数を $\#$ とした場合、統計力学ではエントロピーは $\#$ の対数で表される。すなわち、エントロピーは粒子の分散状態の確率を表

* 原稿受付 2001年6月20日。

^{*1} 正員、北海道大学大学院工学研究科(〒060-8628 札幌市北区北13条西8)。

E-mail: takemi@eng.hokudai.ac.jp

Fig. 1 Example of entropy values and the analyzed pictures

しており、完全均一化した状態が最も確率が高くなる性質を持っている。これを画像に適用し、各メッシュサイズを画像の最小単位である1ピクセルとし、輝度値をメッシュ内に含まれる粒子数に置き換えると、エントロピーは次式で表される。

$$S^* = \frac{S}{S_1} = \frac{I_t \cdot \ln(I_t) - \sum_i \{I_{(i)} \cdot \ln(I_{(i)})\}}{I_t \cdot \ln(M)} \quad \dots\dots\dots(1)$$

ここで $I_{(i)}$ はピクセル(i)の輝度値、 I_t は画像全体の輝度値の合計、 M は空間のメッシュ分割数である。なお、 S_1 は画像全体の輝度の合計値を一定に保ちながら、完全均一化した際のエントロピー値であり、 S^* はこの値により無次元化したエントロピーを示している。式の導出の詳細については文献(1)を参照されたい。

図1は一例として、トレーサの拡散状態の明らかに異なるエチレン火炎および窒素噴流断面のレーザートモグラフィ写真と、そのエントロピー解析結果である。図の下方に示したエントロピー値から明かなように、トレーサが均一化している窒素噴流の方がエントロピーが高く、本手法を用いると不均一性を簡単な数値として表現しえることがわかる。ただし、その数値的な差は僅かであり、この0.99近傍の微小な数値の差異が拡散状態の違いを示す特徴がある。

2・2 不均一流体塊スケールの解析法 本節ではエントロピー法を発展させ、流体塊のスケール、位置および個数を特定する手法について論ずる。

図2左に示すようにエントロピーを計算する四角い解析対象領域(ウィンドウ)を取り、これを空間内でスキャンすると、図2右のようにエントロピーが変化し、流体塊が存在する位置で極大値を示す(この画像は流体ではないが、本研究では噴霧と空気との拡散を念頭においているため、本文中ではすべて流体塊と呼

Fig. 2 Entropy change in scanning an image

ぶことにする)。さらに流体塊サイズと解析ウィンドウが同程度のスケールの場合に、この極大点におけるエントロピー変化の曲率が最大となる性質がある(図2(b)に相当)。そこで下記のようなエントロピー変化の曲率に関するパラメータを定義し、これをスケール対応度(Degree of Scale Correspondence)と名づけた。

$$\rho = - \frac{\partial^2 S^*}{\partial (x/x_w)^2} \bigg|_{S^* \text{ peak}} = - \left(\frac{x_w}{x_0} \right)^2 \cdot \frac{\partial^2 S^*}{\partial x^{*2}} \bigg|_{S^* \text{ peak}} \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 x_w はスキャンするウィンドウサイズ、 x_0 は画像サイズ、 x^* は画像サイズで無次元化した無次元長さである。前報では x_w を一定としてこの操作を行い、画像全体に対する ρ の平均値をそのサイズに対するスケール対応度とした(図6はその結果の一例)。

一方、上述した手法では画像全体の平均的なスケール対応度を求めることになるが、画像には種々の異なったスケールの流体塊が含まれているので、平均化した解析結果は不明瞭となりやすい。そこで、ウィンドウをスキャンする際、流体塊位置でスケール対応度が極値をとり、しかも対応したスケールで最大値を示す性質を利用して、流体塊の位置、サイズならびに個数を特定することを試みた。

すなわち、まず横方向にウィンドウをスキャンして流体塊の横方向座標を特定し、次に縦方向にスキャンして縦方向の座標を決定する。この操作は何度か繰り返されるのが望ましいが、取り合えず今回は一回の操作のみ行うこととした。こうして流体塊の中心位置を特定できるので、同様な操作を異なったサイズの解析ウィンドウでも行ない、これらのうちスケール対応度が最大なものを採用した。なお、ウィンドウ内に複数の小さな流体塊が存在すると認識された場合には、階層的な構造と判断し、それぞれのサイズの塊をカウン

トするものとした。

以上より、流体塊の位置とスケールを特定できたことになる。さらに、流体塊位置において解析ウィンドウを拡大し、周囲をも取り入れた状態でエントロピーを計算すると、周囲状態から見たこの流体塊の不均一性の程度が解析可能である。そこで上記の方法により特定された位置において、流体塊スケールの2倍（任意に決定）をエントロピー解析領域として、対象流体

Fig. 3 Image applied for examining the number and size scales of objects (left), and analyzed size scales and locations of objects (right)

Table 1 Analyzed results for the picture in Fig. 3

Color	Scale (x_w/x_0)	Num. of Cloud	Ave. Entropy
White	0.06	9	0.736
	0.22	3	0.673
Black	0.24	1	0.667

Fig. 4 Laser sheet picture of a Jet injected into water

塊の鮮明さの程度（エントロピー値が低いほど鮮明で不均一な流体であることを意味する）を解析した。

ここで、上記手法の特性を確認する目的で、図3の左に示すような白色の四角形を空間に分散させた画像を対象として解析を行った。正方形の大きさは解析画像の一辺に対して0.06となっている。なお、エントロピー解析ウィンドウサイズは、スキャンできる自由度の制限から画像サイズの3分の1までとした。

図3の右の図は検出できた塊の位置とサイズを示したものであるが、解析した画像をかなり精度良く再現する事ができている。無次元スケールが0.22の塊は四角い点の集合を一つの流体塊と認識したものである。なお、黒い塊が一つ検出されているが、これはその位置の周囲に白い塊が複数あるために、この部分に黒い塊が存在すると判断したためである。

表1は解析結果であり、「Color」は検出された流体塊の色、「Scale」は流体塊のサイズ（画像サイズ（ x_0 ）に対する無次元スケール）、「Num. of Cloud」は流体塊の検出数、「Ave. Entropy」は解析ウィンドウ幅を2倍にして周囲状態を含めた領域でのエントロピー値の平均である。それぞれのスケールの塊の個数とその近傍を含むエントロピーの値をこのように求めることができる。なおエントロピーの解析領域形状を正方形から円や長方形に変えた場合の影響については後述する。

3. 噴流の内部構造解析

非定常噴霧内の構造解析に先立ち、比較的撮影が容易で、構造が噴霧と類似している噴流画像を対象として、PIV解析による速度や渦度分布解析のほか、上述したエントロピー法を用いた解析を行った。図4は蛍光剤を混入した水を直径0.6mmのノズルから水中に噴射し、アルゴンレーザーシート光（厚さ約0.5mm）を用いて断面濃度分布を可視化したものを、ハイスピードビデオカメラで撮影した結果の一例である。図5は上流、

Fig. 5 Enlarged pictures for the analysis of heterogeneity degree and size scales: x/d_0 is the dimensionless distance from the nozzle with diameter d_0

中流, 下流の各位置において, 噴射開始後 145.8ms に望遠レンズおよびクロズアップレンズを使用して拡大撮影した結果であり, その視野の一边は2.8mmとなっている。

図6はウィンドウサイズを変化させた際の画像全体の平均スケール対応度である。横軸に画像サイズで無次元化したウィンドウサイズ, 縦軸にスケール対応度をとっている。上流では複数の明確なピークがあらわれており, 階層的な不均一構造になっていることがわかる。また, 上流では, 0.15~0.3程度のスケールの不均一性が大きいものに対して, 中流では0.2~0.4, 下流では0.3以上のスケールの不均一性が高くなっている。これらの結果から下流に行くにしたがって小さな流体塊が不鮮明となり, 大きいスケールの不均一性が相対的に鮮明となっていくことがわかる。ただし, 特定のピークが明確に現れているわけではなく, こうしたグラフからさらに多くのことを述べるのは困難である。ここでは前述したように, 特定のウィンドウサイズでスキャンを行う場合, そのサイズに合致していない流体塊に対してもスケール対応度が計算されるので, サイズの特徴が減衰されたためと思われる。

そこで, 次に本報で提案した前述した方法により流体塊のサイズと個数の特定を行った。図7は図5に対して, 流体塊のスケールと個数を解析した結果であり, 横方向に流体塊スケール, 奥行き方向にその近傍のエントロピーの平均値, 高さ方向に流体塊の個数をプロットしている。ここで, エントロピー値が低いことは, より鮮明な流体塊であることを意味している。なお, この図では不均一な流体塊に注目しているため, 個数が多くノイズとなりがちなエントロピー値が0.99以上の流体塊を無視した。

上流ではスケールが約0.2でエントロピー値が0.97程度の流体塊がいくつか認められ, 鮮明でスケールの小さな流体塊の存在が認められる。この他, スケールが0.5程度の比較的鮮明な流体塊の存在も少数認められる。中間流域ではスケールが0.2程度の小さな流体塊の個数が増加する一方, エントロピー値の低い不鮮明な流体塊が増加している。また, スケールが0.4程度のやや大きなスケールの不均一性も多く現われている。さらに下流域になると, 小さなスケールの流体塊の多くはエントロピー値が高く, 均一化が進行して不鮮明となっていることがわかる。一方, スケールが0.4から0.5程度で, エントロピー値が0.97程度の比較的鮮明な流体塊の個数が増加していることがわかる。

以上より, ノズル近傍から下流に移動するにつれて流体塊のスケールが増大するほか, 小さなスケールの

Fig. 6 Comparison of the “degree of scale-correspondence” in the three locations in Fig. 5

流体塊は均一化が進み不鮮明となっていくこと, また大きなスケールの流体塊は下流側でより鮮明に残留しているということができる。

次に, 図8は連続した3時刻の画像を用いて, エントロピー解析ウィンドウをラグランジュ的に追跡し, エントロピーの時間変化を示した図である。対応位置の追跡はエントロピー解析ウィンドウ (サイズ1mm) と同程度の相関解析領域を用いたPIV解析法により行った。エントロピーの変化パターンは図の上部に示したように4通りに分類した。例えば, pattern 1は3画像間でエントロピーが連続的に増加する傾向のもの, pattern 2は一度増加したのち減少するものをそれぞれ示した。データ点数は上流で少なくなっているが, これは速度が速いため3時刻共に連続して追跡できる点数が減少したためである。図9はPIV解析から求めた渦度分布を示した図であり, マスクサイズを解析領域 (2.8mm) の0.33として計算した結果である。

両図を比較しながら眺めてみると, 類似したエントロピー変化パターンが固まって分布しており, さらにこれが渦度と対応した分布となっていることがわかる。したがって, エントロピーの変化は流れと良く対応していると言うことができる。上流ではこのパターンの塊が細かく分割された状態となっており, 下流に進むにつれて大きな構造となっている。これは図7で得られた傾向と一致している。なお, エントロピーは本来増加するべきであるにもかかわらず, 減少する領域が多数存在しているのは, 三次元現象を二次的断面で解析したことによるものと考えられる。ただし, この点はさらに検討が必要である。

表2は図5のおおの位置における視野全体のエントロピー値と, 上述した解析におけるエントロピー変

Fig. 7 Numbers, size scales and clearness of heterogeneous clouds: smaller entropy value indicate clearer boundaries of the cloud with less diffusion

Fig. 8 Distribution of entropy change-patterns with time in the three locations in Fig. 5

Fig. 9 Vorticity distributions in the three locations in Fig. 5

化の平均値を増加・減少のそれぞれに分けて解析した結果である。 ΔS_1 は1時刻目から2時刻目にわたるエントロピー変化、 ΔS_2 は2時刻目から3時刻目にわたるエントロピー変化を示している。表より上流から下流に行くにしたがって視野全体のエントロピー値が高くなり、拡散が進行しているほか、エントロピーの変化が少なくなっており、上流での拡散がより強いことが推定される。なお、エントロピーの変化傾向は正負ともにほぼ同一の傾向となっている。

ここで、流体塊スケールを特定する際の解析領域形状(図2では一辺 x_e の正方形)について検討する。図10は中流において解析領域形状を変えた際の個数を示しており、間隔を $x_e/x_0=0.1$ で区切った。長方形は1:2の辺とし、スケールは短辺を用いた。図より、小さなスケール

Fig. 10 Comparison of number of clouds for different shapes of analysis area

Table 2 Average entropy and its change

	Upstream	Midstream	Downstream
S	0.9678	0.9774	0.9870
ΔS_1 +	0.0038	0.0030	0.0009
-	-0.0023	-0.0037	-0.0006
ΔS_2 +	0.0019	0.0012	0.0009
-	-0.0036	-0.0017	-0.0006

Fig. 11 Location and size of the analyzed windows in the diesel spray

ルでは正方形のものが多く、大きなスケールでは円形の個数が増加している。これは、小さなスケールでは正方形のピクセルに近づく一方、大きなスケールでは円形の流体塊が多くなることに対応しているものと思われる。また、噴流に垂直方向の長方形の個数が顕著に少なく、縞状構造の方向性に対応しているものと思われる。

以上より、解析領域の形状や方向を変えることにより、さらに内部構造の特徴を詳細に解析しえるものと思われる。

4. 高圧雰囲気場の噴霧内構造の解析

次に高圧雰囲気場に噴射されたディーゼル噴霧中の構造について解析を行った。実験では、窒素を圧力2MPaで充填した定容容器内に、噴口径0.23mmの電子制御式高圧噴射ノズルから圧力60MPaで軽油を噴射した。そして、Nd:YAG レーザーの第2高調波によるシート光をプリズムを介して、噴霧側方から時間間隔30 μ sのダブルパルスとして照射した。この連続する2枚の噴霧の散乱光を、PIV用のCCDカメラを用いてそれぞれ記録した。図11は解析に用いた噴射開始1ms後の撮影写真である。図中のWindow 1-6は解析領域を示している。なお、図中下部に示した数字は噴射ノズル出口からの

Fig. 12 Number, size scales and clearness of heterogeneous clouds in Fig. 11

距離である。

図12は前章と同様に、流体塊のスケールと個数、エントロピーを解析した結果である。スケールはウィンドウサイズ6.2mmで無次元化した値を示している。噴霧軸上ではWindow 1から3に移動するにつれて、小さなスケール(0.17以下程度のスケール)のエントロピー値が増加するとともに個数が減少している。これに対して0.22以上の大きなスケールの流体塊では、エントロピー値が0.96程度のものが位置にかかわらず多く維持されているほか、下流ではエントロピー値の低い流体塊が増加している。これは前節で観察した噴流に対する結果と同様であり、下流になるにつれて小さなスケールの混合が進行する一方、大きなスケールの不均一性が際立ってくることを示している。また、外周部に位置したWindow 5では、比較的鮮明な(エントロピーの高い)中程度のスケールの流体塊が見られるのに対して、Window 6の位置では大小さまざまな流体塊が多数あるのがわかる。さらにエントロピー値が0.94程度の比較的鮮明な流体塊が多く存在していることもわかる。

次に、図13は噴霧中心軸上の領域内で種々のサイズのエントロピー解析ウィンドウ(x_w/x_0)を設定し、連続する2枚の画像においてラグランジュ的に対応する領域を濃度関連PIV法で求めて、エントロピー変化の平均値を算出したものである。解析ウィンドウ(x_w/x_0)が0.02程度の小さなスケールでは下流に行くにつれてエントロピー変化量が徐々に低下しており、拡散強度が減少することが示唆されている。これに対してスケールが大きくなるにしたがい、エントロピー変化量が波打ち始め、拡散の強い領域と弱い領域が間欠的に現われている。これは噴霧境界に見られる大規模な渦構造に対応しているものと考えられる。今後、大規模な空気導入構造と局所的な拡散強度分布との関係について解析を試みていきたいと考えている。

5. 結 論

(1)統計力学的なエントロピー概念に基づき、拡散過程における均一状態の程度を定量的に表現する手法を提案した。また、本手法をさらに応用して、不均一流体塊のスケールや位置、ならびに個数を算出する解析法を開発した。

(2)本手法を用いて液-液体噴流の拡散構造を解析した結果、ノズル近傍から下流に移動するにつれて流体塊のスケールが増大するほか、小さなスケールの流体塊は均一化が進み不鮮明となっていくこと、また大きなスケールの流体塊は下流側でより鮮明に残留してい

Fig. 13 Averaged entropy changes along the spray axis

ることが確認された。

(3)同様なパターンのエントロピー変化を示す領域がクラスター状に分布しており、その形状は渦度分布と良く対応していた。

(4)高圧雰囲気中に噴射した液体噴霧の観察を行ったところ、液-液噴流で観察されたと同様な上記(2)のような特徴が観察された。また、小さなスケールの拡散強度(エントロピー変化から推定)は下流にいくにつれて徐々に減少するのに対して、比較的大きなスケールでは噴霧境界に見られる大規模な渦構造に対応した間欠的な強度分布となることが認められた。ただし、拡散強度とエントロピー変化の関係については、さらに検討が必要である。

本研究の一部は文部省科学研究費基盤研究(C)ならびに機械学会研究分科会RC170の一環として行われた。また、本研究の遂行に当たり、牛田博久君、安斉英憲君の協力を得た。

参考文献

- (1) 近久, 他3名, 機論, 65-658, B(2001).
- (2) 和栗, 他3名, 機論, 25-156, (1959), 820-826.
- (3) Nakagawa, H., 他2名, SAE Trans., 726021, (1976).
- (4) Chikahisa, T., Murayama, T., 20th CIMAC, (1993), D47.
- (5) Yamane, K., 他2名, Int. Symp. COMODIA94, (1994), 225-230.
- (6) 河, 他3名, 自技論, No. 44, (1990), 9-13.
- (7) Cho, I. Y., 他5名, SAE, 900447, (1990), 1-16.
- (8) 橋本, 他3名, 自技論, No. 45, (1990), 15-20.
- (9) 細谷, 小保方, 機論, 58-548, B(1992), 270-276.
- (10) Cossali, G. E., 他2名, SAE, 910178, (1991), 1-13.
- (11) 山根, 他2名, 機論, 58-550, B(1992), 1955-1960.
- (12) Li, S., 他2名, SAE, 941924, (1994), 1-9.
- (13) 鈴木, 他2名, 機論, 59-563, B(1933), 2334-2339.
- (14) Azetsu, A., 他3名, Int. Symp. COMODIA90, (1990), 199-204.
- (15) 高岸, 他4名, 機論, 65-631, B(1999), 1128-1133.
- (16) 小酒, 神本, 機論, 59-559, B(1993), 859-864.