A222 フラクタル次元解析による非定常噴流の形状特性

星野 真宏[○] (東京電機大学大学院)
長田 安司 (東京電機大学)

犬塚 優 (東京電機大学)
国吉 光 (東京電機大学)

The Characteristic of an Unsteady Jet Shape by the Fractal Dimension Analysis

Masahiro HOSHINO , Yasushi OSADA
Yu INUZUKA , Hikaru KUNIYOSHI

ABSTRACT

Explanation of injected fuel and air mixture formation process in combustion chamber is necessary to reduce exhaust gas of a car. The shape of fuel jet is shown quantitatively by fractal dimension. And the unsteady jet shape characteristic is clarified. Till now, helium jet has been visualized by the Schilieren method. By this method, the three dimensional data on a jet is photography in two dimensions, and it cannot extract only the outline of a jet. So water jet with tracer is injected into a water, and the two dimensional section of a jet was visualized by the laser light sheet method. The photograph of jet is taken by high speed camera. The outline of jet was extracted by image processing. The jet shape characteristic was found by searching for a fractal dimension. And it becomes clear that the jet shape characteristic changes with differences in nozzle shape (diameter and length).

Keywords : Fractal dimension, Image processing, Laser

1. 緒言

人々が社会生活をする上で、自動車は欠かすことのできない交通手段であり、生活に豊かさを与えている。そのため、年々自動車の保有台数の増加に伴い、走行距離が増加している。近年では、環境への意識の高まりから、人体に悪影響を及ぼす自動車の排出ガスの問題が深刻化してきた。そこで、排出ガス削減対策としては、有毒物質を取り除くためのフィルタが開発されている。また、内燃機関の低公害対策としては主に燃焼過程の改善であり、シリンダ内へ噴射される燃料噴流の形状・空気との混合気形成過程の改善が、有害物質の削減に有効である。このことから、燃料噴流と空気との混合気形成過程や着火時の燃焼特性の解明は不可欠であり、非定常噴流の乱流混合特性を明らかにすることは重要である。

噴流形状の解析の際に、観察によって評価すると、研究者により見方などの違いが生じる。そこで、本研究では、噴流形状の複雑さを定量化できるフラクタル次元を用いることにした。撮影画像から、フラクタル次元を求める場合、そのしきい値の選定により左右される。そのため、しきい値の違いによる影響を求め、最適なしきい値を選定することにした。そして、燃料噴流形状の複雑さをフラクタル次元により定量的に示して評価し、ノズル形状(内径・長さ)の違いによる形状特性への影響を明らかにする。

2. 本研究におけるフラクタル次元解析の推移

著者^①は、これまでにシュリーレン法を用いて、ヘリウム噴流を可視化してきた。この方法では、噴射が高速であるため、解析が困難であった。噴流の3次元情報を2次元的に撮影しているので、Fig.1のようにシュリーレン法により可視化した気体噴流を解析していくと、噴流の輪郭のみを抽出することができない。そこで、流れの相似則により、レイノルズ数 Re を一致させて、液中に液体を噴射する液中噴射法により低速噴流にした。レーザライトシート(LLS)法を用いることにより、噴流の輪郭のみを抽出し、より正確なフラクタル次元を求めた。その結果、シュリーレン法で可視化した場合では、濃度別にフラクタル次元を算出することができなかったが、LLS法を用いることにより可能となった。

Fig.1 Analyzed process (Schilieren method)

3. 実験装置および方法

本研究では、液体を液中に噴射する液中噴射法とし、レーザライトシート法を用いて噴流全体を可視化した。この実験装置を Fig.2 に示す。圧縮機①により圧縮された空気は、圧力調整器②とデジタル圧力計③で圧力を調整してから、アキュムレータ④に入る。噴射用のトレーサとして濃度 5ppm の修正液(粒径約 1 μ m)を使用する。そのトレーサをアキュムレータ内に入れ、電磁弁⑤を開閉させることでノズル⑥からトレーサを含んだ水が水槽 ($W800\times D400\times H420$ mm)内に水平に噴射される。

出力 2W の Ar⁺レーザ⑦により発せられたレーザ光を、プローブ⑧によりシート状にしてノズル軸上に照射し、2 次元断面として可視化する。その噴流画像を高速度カメラ⑨(480 $\times$ 420pixel, 8bit)で撮影して、パソコン⑩へ取り込み解析する。レイノルズ数 Re を一定($Re=1.18\times10^4$)とし、Table1 に示したノズル形状(内径・長さ)が、噴流全体のフラクタル次元に及ぼす影響を調べる。

4. 解析方法

4.1 解析の流れ

撮影から得られた噴流画像からフラクタル次元を解析するイメージを Fig.3 に示す。はじめに、噴流画像から背景画像、均一濃度場から背景画像を減ずることで、ノイズを除去する。ピクセルごとにノイズ除去した噴流画像について、均一濃度場で割ることにより無次元化してレーザライトシートの影響を補正する。つぎに、噴流と周囲との境を判別するために適当なしきい値(詳細は、4.2 を参照)を基準として 2 値化処理を行い、噴流形状の輪郭を示すエッジ抽出を行う。算出には Box Counting 法を用い、噴流全体のフラクタル次元 D を求めた。このように、シュリーレン法とは異なり噴流の輪郭のみを抽出できた。

4.2 しきい値の選定

しきい値の選定は、これまでのシュリーレン法を用いた場合、Fig.4 のように、無次元濃度分布上のフラクタル次元の最大値をしきい値(以下最大値法と呼ぶ)としていた。この方法では、無次元濃度 C/C_{max} に対してしきい値をとっており、しきい値が噴射開始からの時間 t により異なってしまう。

Fig.4 Fractal dimension by Concentration

Fig.2 Image processing system

Table 1 Nozzle shape			
Nozzle number	Nozzle length l (mm)	Nozzle diameter d (mm)	l/d
N49/7	49	7	7
N140/7	140	7	20
N180/9	180	9	20

Fig.3 Analyzed process (LLS method)

LLS 法で研究を始めた当初⁽²⁾⁽³⁾は、mode 法を用いてしきい値を算出した。mode 法を用いた場合、フラクタル次元のばらつきが大きく、しきい値の決定が困難である。そこで、無次元濃度別に噴流の輪郭を抽出できることから、無次元濃度別にしきい値とする。理論空燃比が約 15 であることから、無次元濃度 $ClC_{max}=0.06$ として解析を試みた。無次元濃度を 0.06 とした場合では、Fig.5 のように背景にノイズが残ってしまい、正確なフラクタル次元が求められない。無次元濃度をしきい値とし値を増加させていくと、背景のノイズが少なくなるので、無次元濃度 0.20 をしきい値とした。そのため、最大値法と無次元濃度が 0.20 の 2 つの条件についてしきい値を比較・検討した。

4.3 噴流全体の長さと体積の算出方法

噴流全体を 2 つの条件のしきい値を用いて、2 値化処理し、その画像の噴流の先端を噴流長さとした。噴流全体の体積は、その 2 値化した画像をノズル軸中心に回転させて求めた。

5. 非定常噴流の形状特性

フラクタル次元の比較・評価には、高階調・高解像度の高速度カメラが必要である。本撮影条件に対しては、現在市販されている解像度が高い高速度カメラでも十分な結果が得られないので、所有している高速度カメラ (480×420pixel, 8bit) で撮影した。以下に解析結果を示す。

5.1 噴流長さの推移

噴流全体の成長を Fig.6 に示す。噴流初期では、マッシュルーム型の層流状の噴流である。それ以降、時間の経過とともに乱流へと遷移するため、噴流と周囲との混合が活発になっていく。そのため、乱流噴流全体は、複雑な形状をしている。また、ノズル出口付近では、比較的乱れることなく発達し、噴流先端にかけて乱れが増加している。

噴流長さ z の成長をノズル内径 d で無次元化し、両対数で示したもののについて、しきい値の選定を最大値法とした場合を Fig.7、無次元濃度 0.20 とした場合を Fig.8 に示す。無次元噴流長さは、いずれの条件でも、その特性はほぼ同じである。噴射開始後、噴流長さは増加するが、ノズル内径 7mm の N49/7 と N140/7 は 0.3s 付近、ノズル内径 9mm の N180/9 は 0.4s 付近を境に傾きが約 1.1 から 0.6 へ減少する。理論的には、層流状態で 1.0、乱流状態で 0.5 である。これは、噴射開始後は、層流で発達するが、各時間付近から乱流に遷移して、その後、完全に乱流になるためである。ノズル内径 7mm と同じ N49/7 と N140/7 は、無次元噴流長さがほぼ変わらない。同じ $d=20$ の N140/7 と N180/9 を比較するとノズル内径が大きい N180/9 の方が乱流に遷移するのが遅れている。これは、 Re を一定としたため、噴射速度が遅くなったものである。

Fig.5 Extract edge image by threshold

Fig.6 Jet image in the growth process (N140/7)

Fig.7 Jet length in the growth process (Maximum method)

Fig.8 Jet length in the growth process ($ClC_{max}=0.20$)

5.2 噴流全体の体積推移

噴流全体の体積の推移について、しきい値の選定を最大値法とした場合を Fig.9, 無次元濃度 $C/C_{max}=0.20$ とした場合を Fig.10 に示す。最大値法とした場合の体積は、ノズルの違いによりほとんど差がない。これは、しきい値が変動するため、2 値化画像が噴射ごとに異なり体積がばらつくので、この方法は適していない。無次元濃度 0.20 をしきい値とした体積推移を検討する。ノズル内径 7mm の N49/7 と N140/7 の噴流長さの成長は、ほぼ同じ値であったが、体積は、ノズル長さが短い方が大きい。これは、ノズル長さが短いほど、噴流は半径方向に広がるためである。同じ $d=20$ の N140/7 と N180/9 を比較すると、ノズル内径 9mm の N180/9 の方が体積は大きい。これは、レイノルズ数 Re を一定としたので、噴射速度は遅くなり、噴射する流量が増加したためである。

5.3 噴流全体のフラクタル次元推移

噴流全体のフラクタル次元の推移について、しきい値の選定を最大値法とした場合を Fig.11, 無次元濃度 0.20 とした場合を Fig.12 に示す。両者を比較すると、フラクタル次元の値は違うものの、各ノズルの値の大小は同じであった。ノズル内径 7mm の N49/7 と N140/7 とを比較すると、ノズル長さが短い N49/7 の方がフラクタル次元は大きい。これは、ノズル長さが短いほど、噴流は半径方向に広がったため、混合拡散が活発になった。同じ $d=20$ のノズル N140/7 と N180/9 を比較するとノズル内径が大きい N180/9 の方が、フラクタル次元は小さくなる。これは、 Re を一定としたので、噴射速度は遅くなったため、混合拡散が活発になるのが遅くなった。無次元濃度 0.20 をしきい値としたフラクタル次元の推移では、各ノズルとも遷移領域付近でフラクタル次元が増加し始める。これは、最大値法と無次元濃度 0.20 の 2 つの条件はしきい値が違うためにフラクタル次元の特性が異なった。

6. 結言

液体を液中に噴射し、その噴流の 2 次元断面をレーザーライトシート法により可視化し、以下の結果を得た。

- (1) 体積の結果から極大法を用いた場合は、適していない。
- (2) レイノルズ数およびノズル内径が一定でノズル長さを短くすると、噴流全体のフラクタル次元および噴流体積は大きくなるが、無次元噴流長さは変わらない。
- (3) レイノルズ数および d が一定でノズル内径を大きくすると、噴流が乱流に遷移するのが遅くなり、噴流全体の体積は小さく、噴流全体のフラクタル次元は小さくなる。

参考文献

- (1) 粕谷義介, フラクタル次元解析による非定常気体噴流の形状特性, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集, No.010-2(2001-9), 215-216.
- (2) 相沢真理, フラクタル次元解析による非定常噴流の形状特性, 関東学生会第 42 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, (2003-2), 219.
- (3) 星野真宏, フラクタル次元解析による非定常噴流の形状特性, 関東学生会第 43 回学生員卒業研究発表講演会講演前刷集, (2004-2), 365-366.

Fig.9 Volume in the growth process (Maximum method)

Fig.10 Volume in the growth process ($C/C_{max}=0.20$)

Fig.11 Fractal dimension in the growth process (Maximum method)

Fig.12 Fractal dimension in the growth process ($C/C_{max}=0.20$)