

高レイノルズ数及び高シュミット数自由せん断流における スカラー混合のフラクタル特性

Fractal Characteristics of Scalar Mixing in Free Shear Layer at High Reynolds and Schmidt Numbers

○ 松川 一樹, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, kmatsuka@navier.mes.titech.ac.jp
 福島 直哉, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, nfukushim@navier.mes.titech.ac.jp
 志村 祐康, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, mshimura@navier.mes.titech.ac.jp
 沈 永三, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, yshim@navier.mes.titech.ac.jp
 店橋 護, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, mtanahas@navier.mes.titech.ac.jp
 宮内 敏雄, 東工大院, 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1, tmiyauch@navier.mes.titech.ac.jp
 Kazuki MATSUKAWA, Naoya FUKUSHIMA, Masayasu SHIMURA, Youngsam SHIM,
 Mamoru TANAHASHI and Toshio MIYAUCHI
 Dept. of Mechanical and Aerospace Engineering, Tokyo Institute of Technology,
 2-12-1 Ookayama, Meguro-ku, Tokyo, 152-8550, Japan

Direct numerical simulations (DNSs) of temporally developing mixing layer with non-reactive and reactive scalar transport up to $Re_{\alpha 0} = 900$ and $Sc = 30.0$ have been conducted to investigate fractal geometry of scalar surfaces in turbulence. Effects of Reynolds number (Re), Schmidt number (Sc) and chemical reaction on scalar mixing are discussed by applying fractal analysis for scalar surfaces. For higher Sc , two fractal dimensions D_1 and D_2 can be defined, while only one fractal dimension D can be defined for lower Sc . The fractal dimension D_1 corresponds to relatively large scales. D_1 gives close agreement with D of lower Sc case in the inertial subrange and is around 2.5. The fractal dimension D_2 corresponds to small scales and shows larger values. D_2 depends on Schmidt number and rises to about 2.8 for $Sc = 30.0$. As for the case with chemical reaction, all fractal dimensions show lower values. In all cases, D , D_1 and D_2 are independent of Reynolds number.

1. 緒論

各種燃焼器や反応器における流体混合には、自由せん断流が幅広く用いられており、流れ場の乱流遷移に伴い熱・物質混合が急激に促進されることが知られている。乱流遷移に伴う混合遷移現象の解明は乱流制御による高効率化、モデルの構築などにおいて非常に重要である。最も基本的な自由せん断流である乱流混合層におけるスカラー輸送については、従来から多くの研究が行われており、乱流中のスカラー等値面には明確なフラクタル特性があることが示されている⁽¹⁾。しかし、それらに対するレイノルズ数やシュミット数及び化学反応の有無による影響等は明らかではない。本研究では、混合遷移期を含む乱流混合層の直接数値計算(DNS)を行い、乱流中のスカラー等値面のフラクタル特性を明らかにすることを目的としている。

2. 乱流混合層のフラクタル特性

レイノルズ数とシュミット数及び化学反応のフラクタル特性への影響を明らかにするために、主流速度差と初期渦度厚さに基づくレイノルズ数 $Re_{\alpha 0} = 500, 900$, シュミット数 $Sc = 0.6, 3.0$ 及び $A + B \rightarrow 2P$ の不可逆二次反応を仮定した場合の反応速度定数 $Rc = 0, 1$ の場合に対して DNS を行った。

図1は十分発達した $t = 150$ でのスカラー Y_A の x - y 断面における分布を示している。レイノルズ数の増加に伴い速度の最小スケールが小さくなり、 Sc の増加に伴いスカラー拡散の影響が小さくなるため、スカラー変動の最小スケールも小さくなっている。化学反応が存在する場合、化学種 A のせん断層内における濃度が減少しており、分布の形状も滑らかになっている。

図2は $Y_A = 0.5$ の等値面に対して 3D box counting 法を適用し求めたフラクタル次元の時間変化を示している。化学反応が存在しない $Sc = 0.6$ の場合、流れ場の発達に伴いフラクタル次元は増加し、乱流遷移後はほぼ 2.5 の値を示す。この結果は Mandelbrot の理論値⁽²⁾とよく一致する。 $Sc = 3.0$ の場合、二つのフラクタル次元 (D_1, D_2) が定義できる。大きなスケールで定義される D_1 は約 2.5 に漸近していき、微細スケールで定義される D_2 は 2.65 程度となる。化学反応が存在する場合、全ての場合でフラクタル次元は低い値を取り、乱流遷移後 D は 2.4, D_1 は 2.35, D_2 は 2.6 程度の値となる。乱流遷移後のフラクタル次元はレイノルズ数に依らず、シュミット数及び化学反応の有無に応じた特定の値へ漸近する。

図2は $Y_A = 0.5$ の等値面に対して 3D box counting 法を適用し求めたフラクタル次元の時間変化を示している。化学反応が存在しない $Sc = 0.6$ の場合、流れ場の発達に伴いフラクタル次元は増加し、乱流遷移後はほぼ 2.5 の値を示す。この結果は Mandelbrot の理論値⁽²⁾とよく一致する。 $Sc = 3.0$ の場合、二つのフラクタル次元 (D_1, D_2) が定義できる。大きなスケールで定義される D_1 は約 2.5 に漸近していき、微細スケールで定義される D_2 は 2.65 程度となる。化学反応が存在する場合、全ての場合でフラクタル次元は低い値を取り、乱流遷移後 D は 2.4, D_1 は 2.35, D_2 は 2.6 程度の値となる。乱流遷移後のフラクタル次元はレイノルズ数に依らず、シュミット数及び化学反応の有無に応じた特定の値へ漸近する。

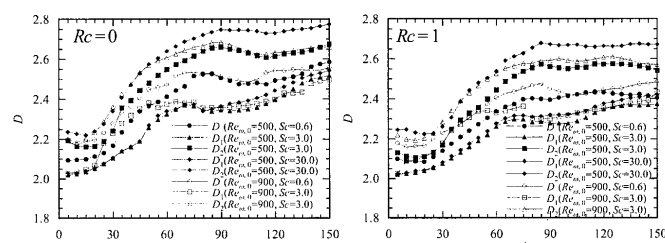


Fig. 2 Temporal development of fractal dimension.

参考文献

- (1) Sreenivasan, K. R. and Prasad, R. R., "New results on the fractal and multifractal structure of the large Schmidt number passive scalars in fully turbulent flows," Physica, D38 (1989), pp. 322-329.
- (2) Mandelbrot, B. B., "On the geometry of homogeneous turbulence, with stress on the fractal dimension of the iso-surfaces of scalars," J. Fluid Mech., 72 (1975), pp. 401-416.

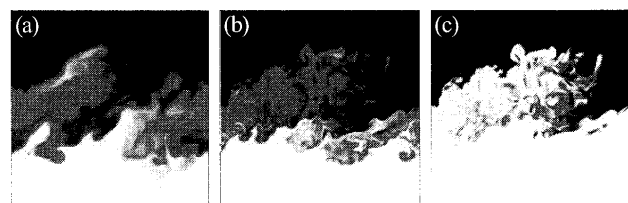


Fig. 1 Distributions of scalar mass fraction on a x - y plane. (a): $Re_{\alpha 0} = 500, Sc = 0.6, Rc = 0$, (b): $Re_{\alpha 0} = 900, Sc = 3.0, Rc = 0$, (c): $Re_{\alpha 0} = 500, Sc = 3.0, Rc = 1$.