

令和元年6月6日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06084

研究課題名(和文) 流体混合及び拡散に新しくコルモゴロフ複雑度の概念を応用した測度の開発

研究課題名(英文) Development of a new measure for fluid mixing and diffusion using Kolmogorov complexity

研究代表者

一宮 昌司 (ICHIMIYA, Masashi)

徳島大学・大学院社会産業理工学研究部(理工学域)・教授

研究者番号：50193454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：流体速度信号の時系列変化の複雑度を求めるために、情報量の概念を応用して、情報エントロピー、順列エントロピーを用いて複雑度を求めた。流体混合過程の典型的例として、噴流と周囲流体間の混合層に適用した。変動速度の確率分布の情報エントロピーは、混合層の乱流遷移過程において単調に増加して、乱流遷移の測度となり得た。変動速度の順列エントロピーは下流に進むと、混合層の乱流遷移過程における変動速度の増加や、周期変動から不規則変動への様式の変化を反映して複雑に変化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我が国ではエネルギー技術の一層の革新が求められている。このため発電効率のさらなる向上や空調設備のなお一層の効率化が重要である。また、原子力発電所事故での放射能汚染の拡散と予測に対しては、流体の混合拡散の重要性を改めて認識させた。

このため流体混合の目安つまり測度を客観的に、かつ実用的に使いやすい形で定める必要がある。本研究では新しい観点からコルモゴロフ複雑度に注目し、この混合や拡散の測度としての妥当性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To obtain the complexity of time sequence of fluid velocity signal, information entropy and permutation entropy were applied. They were applied into a mixing layer between jet and surrounding fluid as a typical example of fluid mixing process. The information entropy of the fluctuating velocity increased monotonically within the turbulence transition processes in the mixing layer. Therefore, it was successfully used as the measure for the transition process. The permutation entropy of the fluctuating velocity varied complicatedly because of the increase of the fluctuating velocity and change of the manner of the fluctuation; from periodic to irregular fluctuation.

研究分野：工学

キーワード：複雑さ 乱流 混合層 エントロピー

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国ではエネルギー技術の一層の革新が求められている。このため発電効率のさらなる向上や空調設備のなご一層の効率化が重要である。また、原子力発電所事故での放射能汚染の拡散と予測に対しては、流体の混合拡散の重要性を改めて認識させた。

このため流体混合の目安つまり測度を客観的に、かつ実用的に使いやすい形で定める必要がある。本研究では新しい観点からコルモゴロフ複雑度に注目し、この混合や拡散の測度としての妥当性を明らかにしようとした。

### 2. 研究の目的

(1) 乱流境界層の加速による再層流化過程にコルモゴロフ複雑度解析を適用して、その有効性を明らかにする。

(2) 情報エントロピーが乱流に対して適用された例はあるが、乱流遷移過程に適用された例は無い。このため情報エントロピーの乱流遷移進行の測度の妥当性を検討する。

(3) データの並びの複雑度を考慮する順列エントロピーが提案され、各種の場合に適用が試みられている。また力学系と順列エントロピーの関係が論じられている。しかし、これを乱流場や乱流遷移過程に適用した例は見当たらないので、乱流や乱流遷移過程での妥当性を検討する。

(4) 乱流のシャノンエントロピーの方程式を乱流場の PDF 方程式から導いて、乱流のシャノンエントロピーの物理的特性の理解を試みる。

### 3. 研究の方法

コルモゴロフ複雑度解析は、加速による乱流境界層の加速による再層流化過程について実験を行った。実験は縮小開始位置での主流速度と境界層厚さに基づくレイノルズ数を 12800 として行った。測定には熱線風速計を用いて、X 型熱線プローブの出力電圧をサンプリング周波数 20 kHz で約 26 秒間サンプリングした。熱線風速計で測定された流れ方向変動速度データを、17 進数 3 桁の値に変換し、この数値が一行に 98304 個並べ、windows パソコンにおいて各ファイルを 7z 形式で圧縮し、圧縮前容量と圧縮後容量から、近似コルモゴロフ複雑度 AK と正規化圧縮距離 NCD を求めた。

噴流下流の混合層の静止流体への混合過程と乱流遷移過程について実験を行った。噴流は 2 次元ノズル出口から静止流体中に噴出される。測定は、ポテンシャルコアが消滅して混合層の自己保存が成立する位置よりも十分下流まで行った。実験条件はノズル出口直後の速度とノズル出口高さに基づくレイノルズ数を 5000 とした。測定には各受感部直径 5mm、長さ 1mm の X 型熱線プローブを用い、その出力電圧は、サンプリング周波数 5kHz で 262144 個 (約 52 秒間) サンプリングされた。そのデータから合成された流れ方向変動速度に対応する電圧を解析した。

情報エントロピーは、その電圧に対して確率を計算して求める。確率の計算に当り、電圧の 1 区間の幅を決定した。

順列エントロピーを求めるに当り、要素内に相等しい値が複数あるときの取り扱いは要素内に等しいものがあるという事象も順列に含めることにした。また取り出す数列の要素数の選択であるが、8 とした。これは文献 (Riedl et al., 2013) で調べられている値 2~10 に入っている。最後に、元の時系列の要素数は、サンプリングデータ数の 262144 とした。

### 4. 研究成果

(1) 乱流境界層の再層流化にともなって流れ方向変動速度とその時間微分係数、垂直方向変動速度の AK は減少した。この変化の様相は間欠係数のそれに類似し、乱流境界層の再層流化を裏付けた (図 1)。

また、間欠係数が一定な領域でも、複雑さは変化しており、間欠係数では表現できない乱流の特徴を AK, NCD は表現できた。

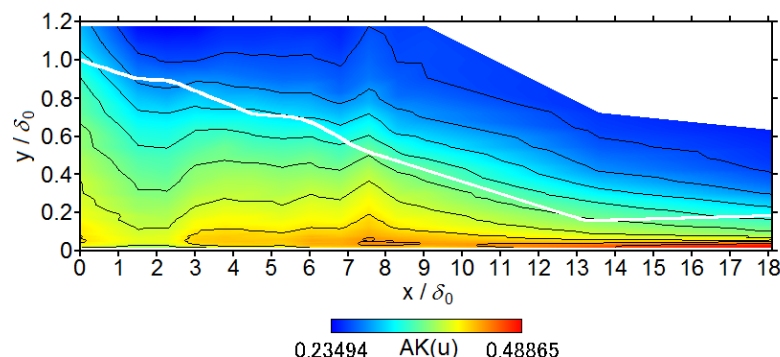


図 1 乱流境界層の再層流化過程における近似コルモゴロフ複雑度のコンターマップ

(2) 混合層の乱流遷移過程における変動速度の確率分布の情報エントロピーは、単調に増加して、乱流遷移の測度となり得た。

情報エントロピーの側面上のコンターマップを図2に示す。層流では小さい。ポテンシャルコアが消滅すると、中心線付近で情報エントロピーは大きい。途中まで単調増加して、以後はほぼ一定となる。ゆえに情報エントロピーは混合層の乱流遷移進行の測度としても有効である。

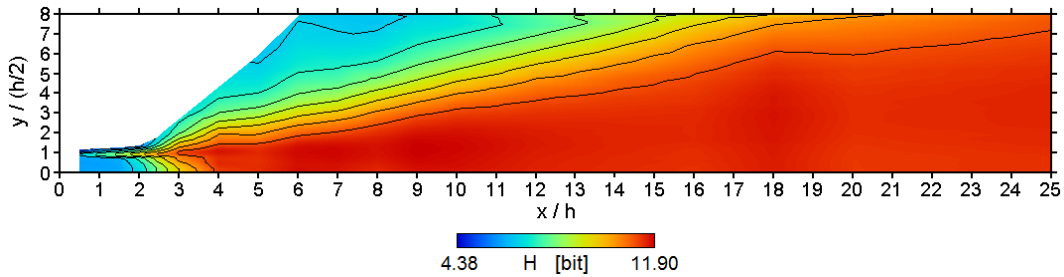


図2 混合層の乱流遷移過程における情報エントロピーのコンターマップ

(3) 変動速度の順列エントロピーは、下流に進むと混合層の乱流遷移過程における変動速度の増加や、周期変動から不規則変動への様式の変化を反映して、複雑に増加、減少、再増加、再減少と変化した。

順列エントロピーのコンターを図3に示す。図2の情報エントロピーに大略似ているが、明確に異なるところがある。

まずノズル直後では、速度変動が小さい。このため変化パターンの種類すなわち順列数が少なく順列エントロピーは小さい。

次に順列エントロピーが少し増加するのは、速度変動が増加するので変化パターン種類すなわち順列数は増加して順列エントロピーは増加する。

極大位置になると、引き続き速度変動の増加するが極めて大きな値にまでは達していないので、変化パターン種類すなわち順列数はさらに増加して順列エントロピーは増加する。

いったん減少して極小になると、引き続き変動の増加により変化パターン種類が減って順列エントロピーは減少する。

再び増加するのは、変動速度には不規則変動が出現する。これが変化パターン種類の増加に寄与して順列エントロピーは増加する。

最大になるのは、変動速度では不規則変動が支配的になるため、変化パターン種類すなわち順列数の増加に寄与して順列エントロピーは増加する。

最後に順列エントロピーは下流方向に減少するのは、変動速度の単調増加や減少の比率が増えるためである。

(4) 変動速度の確率密度関数の Kullback-Leibler のダイバージェンスは、初めは増加するが、

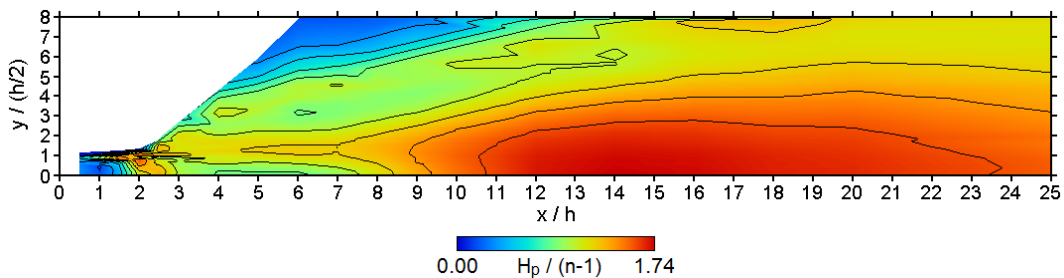


図3 混合層の乱流遷移過程における順列エントロピーのコンターマップ

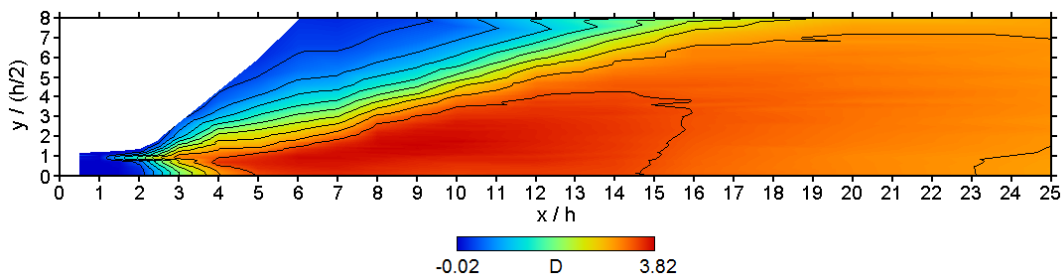


図4 混合層の乱流遷移過程における Kullback-Leibler のダイバージェンスのコンターマップ

最大となった後は下流で減少して、混合層の乱流遷移過程を通して単調には変化しなかった(図4)。

(5) シャンノンエントロピーが乱流場で満たすべき方程式を導き、レイノルズ応力との関連など幾つかの考察を加えた。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計1件)

各種情報量を用いた混合層の層流 乱流遷移過程の解析、一宮昌司、中村育雄、日本機械学会論文集、査読有、第83巻第845号、2017、No. 16-00497、DOI:10.1299/transjsme.16-00497

[学会発表](計8件)

一宮昌司、中村育雄、情報量を用いた混合層の層流 乱流遷移過程の解析、日本流体力学会年会2018、2018年9月6日、大阪大学(大阪府豊中市)。

藪内涼、一宮昌司、周期攪乱に対する二次元混合層の乱流遷移(攪乱振幅の影響)、日本機械学会中国四国支部第56期総会・講演会、2018年3月7日、徳島大学(徳島県徳島市)。

一宮昌司、中村育雄、各種情報量による混合層の層流 乱流遷移過程の解析、日本流体力学会年会2017、2017年8月30日、東京理科大学(東京都葛飾区)。

松原渥樹、一宮昌司、2次元混合層に及ぼす微小周期攪乱の影響、日本機械学会中国四国支部第55期総会・講演会、2017年3月7日、広島工業大学(広島県広島市)。

Masashi Ichimiya, Ikuo Nakamura, Randomness Representation with Kolmogorov Complexity in Laminar-Turbulent Transition Process of Mixing Layer, 20th Australasian Fluid Mechanics Conference, Perth, Australia, 2016年12月6日、Western Australian 大学(オーストラリア連邦Perth市)。

Masashi Ichimiya, Ryotaroh Nakatsu, Laminar-Turbulent Transition in an Inlet Region of a Circular Pipe Induced by the Jet Disturbance, 20th Australasian Fluid Mechanics Conference, Perth, Australia, 2016年12月6日、Western Australian 大学(オーストラリア連邦Perth市)。

松原渥樹、一宮昌司、局所周期攪乱による二次元混合層の乱流遷移(レイノルズ数の差異)、日本機械学会第94期流体力学部門講演会、2016年11月12日、山口大学(山口県宇部市)。

一宮昌司、中村育雄、乱流境界層の再層流化過程における複雑さ解析、日本流体力学会年会2016、2016年9月28日、名古屋工業大学(愛知県名古屋市)。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。