

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 1 日現在

機関番号：16101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420124

研究課題名(和文)新しくコルモゴロフ複雑度の概念を応用した流体混合測度と乱流遷移測度とその応用研究

研究課題名(英文) A new measure using Kolmogorov complexity and its application for fluid mixing and turbulent transition

研究代表者

一宮 昌司 (ICHIMIYA, Masashi)

徳島大学・ソシオテクノサイエンス研究部・准教授

研究者番号：50193454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：流体混合の進行過程と変動が増加する乱流遷移過程に対して、流体速度信号の時系列変化の複雑度を求めた。噴流と周囲流体間の混合層、平板を過ぎる流れと平板間の摩擦によって形成される速度の遅い境界層、そして円管内部の流れに適用した。混合層では混合過程と乱流遷移過程の進行を定量的に表示することができた。平板境界層と円管内流れでは従来の指標による判断をほぼ支持した。加えて乱流遷移完了後も従来の指標では区別できない乱流領域内部の複雑さを区別することができた。

研究成果の概要(英文)：For the fluid mixing and turbulence transition process, the complexity of time sequence of fluid velocity signal was obtained. It was applied into three flow fields: a mixing layer between jet and surrounding fluid, a boundary layer in which the velocity of the fluid decreased due to the friction, and pipe flow. In the mixing layer, the complexity was able to show the progress of the mixing and turbulence transition processes quantitatively. In the flat-plate boundary layer and pipe flow an objective judgment based on the complexity mostly supported the subjective conventional criterion. Additionally, with the aid of the complexity we could distinguish the complexity within the turbulent region, but with the conventional way, we could not.

研究分野：工学

キーワード：乱流 境界層 混合層 複雑さ

### 1. 研究開始当初の背景

今後の我が国のエネルギー政策が議論されている。エネルギー政策が変更されれば、実際には発電効率のさらなる向上や空調設備のなほ一層の効率化が従来以上に切実な問題となる。また、放射能汚染の拡散と予測の問題は、流体の混合拡散の重要性を改めて認識させることとなった。

この種の問題を扱うには流体の混合の測度を客観的に、かつ実用的に使いやすい形で定める必要がある。混合の測度にはさまざまな提案があるが、これらとは異なる観点から、新しくコルモゴロフ複雑度が混合の測度となり得ると考えた。そして本研究はコルモゴロフ複雑度の混合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)まず、混合層流と平板境界層流及び円管流における不規則さ、ランダムさ自身の変化や分布である。

これまで流体工学においてランダムさに注目した研究はわずかであり、混合層流や円管流においてコルモゴロフ複雑度を取り入れた研究は行われていなかった。コルモゴロフ複雑度を求めることによって、下流や横方向へのランダムさの発達を表わすことができる。

(2)次に、流体混合の測度としてのコルモゴロフ複雑度の妥当性である。

混合の進行と共にランダムさは増すものと思われるが、混合とコルモゴロフ複雑度との関係が適切なものかを確認する。混合進行の目安としては、二流体間の異なる速度が一樣化する過程であることに基づき、速度の垂直方向勾配を用いる。それによって本研究が目指す第一の目的である混合の測度としてのコルモゴロフ複雑度の妥当性が明らかになる。

(3)最後に、自由せん断流と壁面せん断流の乱流遷移過程の測度としてのコルモゴロフ複雑度の有効性を検証する。

自由せん断流の乱流遷移進行の測度として、コルモゴロフ複雑度の有効性を検討する。また壁面せん断流では、乱流の時間比である間欠係数が用いられることが多かった。これに対してコルモゴロフ複雑度のようなランダムさに注目する測度は、乱流遷移進行の新たな観点を与え、時間比との優劣を議論することによって新たな視点を与える。

### 3. 研究の方法

噴流下流の混合層の静止流体への混合過程と、平板境界層と円管内流体の乱流遷移過程について実験を行う。

噴流下流の混合層では、噴流は幅 310mm、高さの 2 次元ノズル出口から静止流体中に噴出される。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。

平板境界層の実験では、測定部は断面 400 × 150 mm、測定板は全長 2m である。この平板上に円柱形 (直径=高さ=2mm) の単一突起を、中心軸が平板に垂直になるように平板中心線上の前縁から 100mm 下流の位置に設置した。突起を設置していないときのこの位置の境界層は層流で、突起高さはほぼ境界層厚さの程度である。また突起位置からくさび形の乱流くさびが形成される。

円管内流れの実験では、直径 60mm、全長約 6.2m の円管を用いた。管直径と管断面平均速度に基づくレイノルズ数を 10000 とした。吸込ベルマウス曲率が 0 となる位置 107mm 下流において管壁に垂直にあげた直径 2mm の一つの孔から、空気噴流を管半径方向に周期的に噴出することによって孤立した乱流塊が発生する。

全流れ共に熱線風速計による速度測定を行い、得たデータを windows パソコン上で圧縮プログラムを用いて圧縮する。その圧縮後容量から、データの複雑度を表わす近似コルモゴロフ複雑度 AK や、2 データ間の非類似度を表わす正規圧縮距離 NCD を求め、混合の進行過程を定量化する。データ圧縮形式は 7z 形式を用いる。

### 4. 研究成果

(1) 2 次元ノズル出口下流に形成される混合層の乱流遷移過程の数値データを圧縮プログラムで圧縮して、近似コルモゴロフ複雑度 AK や正規化圧縮距離 NCD を求めた結果、AK は層流の規則性や乱流のランダムさを定量的に表示することができた。また混合層の自然遷移過程における熱線風速計出力データの NCD は下流方向に単調に変化して、遷移進行の測度となり得た。図 1 は NCD の側面から見たコンターマップである。下流に進んで乱流遷移が進行するに従って NCD は単調に増加している。

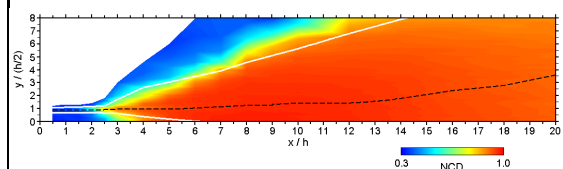


図 1 混合層の NCD のコンターマップ

(2) 平板上の単一突起によって下流に発生したくさび型の乱流領域内外の変動速度とその時間微分係数の時系列データに対しては、変動速度やその時間微分係数の AK の変化は、変動速度や間欠係数の変化と完全には一致しないが、大まかには合い、コルモゴロフ複雑度に基づく乱流遷移進行の客観的な判断は、従来の間欠係数による判断をほぼ支持した。

(3)変動速度やその時間微分係数の AK を用いることにより、間欠係数では区別できない乱流領域内部の複雑さを区別することができた。

(4)変動速度の AK 分布と変動速度の時間微分係数の AK 分布は類似しており、これは複雑さの微分に関する類似性を示した。

(5)非乱流よりも乱流の方が AK は大きい、その乱流中でも、組織構造が発生しているときは AK は小さく、従来の方法で検出された組織構造の熱線信号は外見上ランダムであるが、コンピュータで表現したときのアルゴリズムの長さは短いという意味で、アルゴリズム的に組織的であった。

(6)乱流と非乱流間における NCD の差異は、変動速度に関するものよりも、その時間微分係数に関するものの方が大きく、変動速度よりも変動渦度の方に複雑さの差異がより表れた。図 2 は流れに垂直な断面における NCD のコンターマップである。左下が乱流領域、右上が非乱流領域である。(a)は変動速度に関するものであるが、これよりも(b)の変動速度の時間微分係数に関するものの方が、乱流領域と非乱流領域間の値の差が大きい。

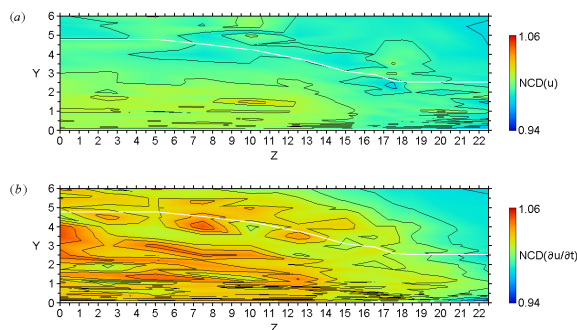


図 2 平板上境界層 NCD のコンターマップ  
(a)変動速度, (b)変動速度の時間微分

(7)円管内流れに対しては、不規則変動速度の AK の変化は、不規則変動速度自身や間欠係数の変化と完全には一致しないが、孤立乱流塊が平板境界層乱流斑点型である間は大きかには合った。

(8)下流に進んで孤立乱流塊が円管発達流の乱流スラグ型になると、乱流塊外で間欠係数や不規則変動速度が小さくても、AK や NCD が大きい領域が壁面近くで存在して、変動の複雑度を反映した。図 3 は半径一定の同心円上に NCD のコンターマップを切り開いたものである。NCD が大きい領域は図中の白線外(こ

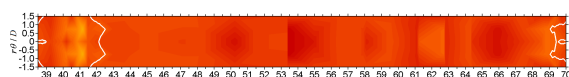


図 3 円管内流れ NCD のコンターマップ

こでは間欠係数や変動速度が小さい)よりも広い。すなわち乱流塊外でも NCD は大きい。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 4 件)

コルモゴロフ複雑度による乱流のランダムさ表現(周期的吹き出しによる円管助走部境界層の乱流遷移の場合)、一宮昌司、中村育雄、田村和大、日本機械学会論文集、査読有、第 81 巻第 828 号、2015、No. 15-00172、DOI:10.1299/transjsme.15-00172

コルモゴロフ複雑度による乱流のランダムさ表現(平板上単一突起下流の乱流くさびの場合)、一宮昌司、中村育雄、原達彦、日本機械学会論文集、査読有、第 80 巻第 813 号、2014、No. FE0117、DOI: 10.1299/transjsme.2014fe0117

Randomness Representation in Turbulent Flows with Kolmogorov Complexity (In Mixing Layer), Masashi Ichimiya and Ikuo Nakamura, Journal of Fluid Science and Technology、査読有、Vol. 8, No. 3, 2013, 407-422、DOI: 10.1299/jfst.8.407

自由せん断流の乱流遷移過程の新しい測度について、一宮昌司、ながれ、査読有、第 32 巻第 6 号、2013、413-416。

〔学会発表〕(計 7 件)

一宮昌司、中村育雄、田村和大、円管助走部境界層の強制遷移過程における複雑さ解析、日本流体力学会年会、2015 年 9 月 28 日、東京工業大学(東京都目黒区)。

河津沢哉、一宮昌司、平板上単一突起下流の乱流くさびの複雑さ解析、日本機械学会第 92 期流体力学部門講演会、2014 年 10 月 25 日、富山大学(富山県富山市)。

一宮昌司、中村育雄、原達彦、平板境界層の強制遷移過程における複雑さ解析、日本流体力学会年会、2014 年 9 月 17 日、東北大学(宮城県仙台市)。

一宮昌司、コルモゴロフ複雑度を用いた乱流の複雑さ解析、日本機械学会第 91 期流体力学部門講演会、2013 年 11 月 10 日、九州大学(福岡県福岡市)。

Masashi Ichimiya, A New Measure for the Laminar-Turbulent Transition Process in Free-Shear Flows, 4th International Conference on Jets, Wakes and Separated Flows, Nagoya, Japan, 2013 年 9 月 18 日、名古屋大学(愛知県名古屋市)。

一宮昌司、自由せん断流の乱流遷移過程の新しい測度について、日本流体力学会年会、2013 年 9 月 14 日、東京農工大学(東京都小金井市)。

一宮昌司、自由せん断流の乱流遷移進行に対する新しい測度、第 11 回日本流体力学会

中四国・九州支部総会・講演会、2013年6月  
16日、広島工業大学（広島県広島市）。

6．研究組織

(1)研究代表者

一宮 昌司 (ICHIMIYA, Masashi)  
徳島大学・大学院ソシオテクノサイエンス  
研究部・准教授  
研究者番号：50193454