

2022年度共同利用研究報告書

2023年05月14日

所属・職名 愛媛大学大学院理工学研究科・准教授

松浦 一雄

		整理番号		2022a023	
1.研究計画題目		階層的渦クラスタリングを用いた遷移乱流一般渦に対する新安定性理論の開発			
2.新規・継続		継続			
3.種別		一般研究			
4.種目		短期研究員			
5.開催方法		対面開催			
6.研究代表者		氏名	松浦 一雄		
		所属 部局名	愛媛大学大学院理工学研究科	職 名	准教授
7.研究実施期間		2023年01月17日(火曜日)～2023年01月18日(水曜日)			
8.キーワード		流体力学, 渦, 機械学習, 層流一乱流遷移, 圧縮性Navier-Stokes方程式, 直接計算			
9.参加者人数		2人			

10.本研究で得られた成果の概要

圧縮性混合層流れおよび旋回流れのLarge-Eddy Simulation解析を実施し、過去にIMI共同利用において開発した「階層的渦クラスタリング法」をこれら多彩な流れに適用し、その渦構造の捕獲特性について、より発展・深化した研究を行うことが出来た。

ここで、階層的渦クラスタリング法は、瞬時流れ場において局所連結する体積的渦構造のタグ付き自動トラッキングを可能にする技術である。この方法を使うと、一般的な流れ中の局所的にある程度の大きさを有する渦体積領域を自動捕獲し、各々個別の体積領域がどのように変形するか、機械的に評価するという、これまで出来なかったことが行えるようになる。2022年度中に、下記論文として出版された。

Kazuo Matsuura, Yasuhide Fukumoto, "Hierarchical clustering method of volumetric vortical regions with application to the late stage of laminar-turbulent transition," Phys. Rev. Fluids, 7, 054703, 2022.

■ 本研究の目的と成果概要

流れが層流から乱流に遷移する際の非線形力学挙動の正確な予測と信頼性の高い法則に基づく「遷移・乱流デザイン」は流体力学における中心課題の一つである。境界層遷移は、ガスタービン、航空機、パイプラインなど様々な産業上の場面で効率、機体安定性、騒音・振動に関連して問題となる。運動量輸送やエネルギー散逸によるエントロピー増大に関わり、境界層剥離の抑制、離散周波数騒音の低減、熱・物質移動の迅速化や摩擦抵抗の増大など工学的にメリット・デメリットなど相反する効果を持つため、乱流状態を如何に活用するのかロバストな法則に裏打ちされた事前設計が重要となる。これまで、さまざまな線形・非線形安定性解析、直接シミュレーション(DNS)やラージエディシミュレーション(LES)により遷移過程が調べられてきたが、強い非線形性や大規模自由度のため、今なお乱流の発生とその維持機構には曖昧さが残る。Navier-Stokes方程式に基づく遷移シミュレーションと機械学習などビッグデータサイエンスの一層の融合が遷移やそれに続く乱流挙動の法則発見とその理解に繋がると期待される。そこで本研究は、圧縮性 DNS や LES を実施し、得られる大規模非定常データをデータマイニングし、層流—乱流遷移における動的渦群の普遍的な局所力学挙動の発見に加え、統一的な安定性解析を可能にする機械学習理論の開発を行うことが目的である。今年度は、圧縮性混合層流れおよび旋回流を伴うラジアル燃焼器流れなど、これまで開発した階層的渦クラスタリング法¹⁾を多様な流れに適用し、渦構造の捕獲特性について研究した。

● 圧縮性混合層の安定性に関する研究

✓ 線形安定性解析

まず、線形安定性解析を行い、Mach 数の影響を調べた。平均流が、混合層上下において主流方向速度が反対に向いている系を対象に、非粘性、平行近似、圧縮性、3次元、完全ガスの過程のもと解析を行った。混合層上側および下側での速度はそれぞれ、 $+x$ 方向の Mach 数 $\times$ 音速、 $-x$ 方向の Mach 数 $\times$ 音速である。

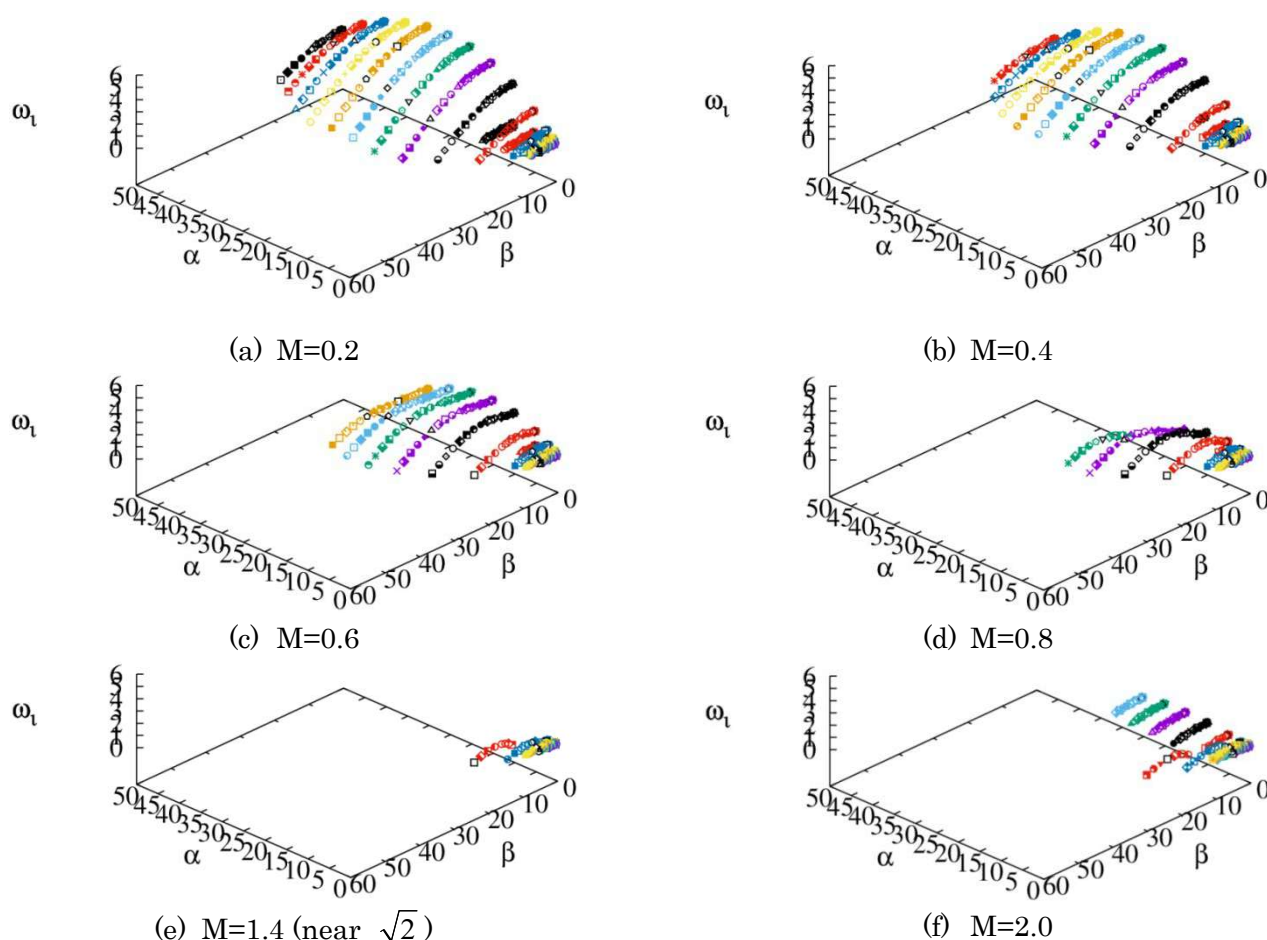
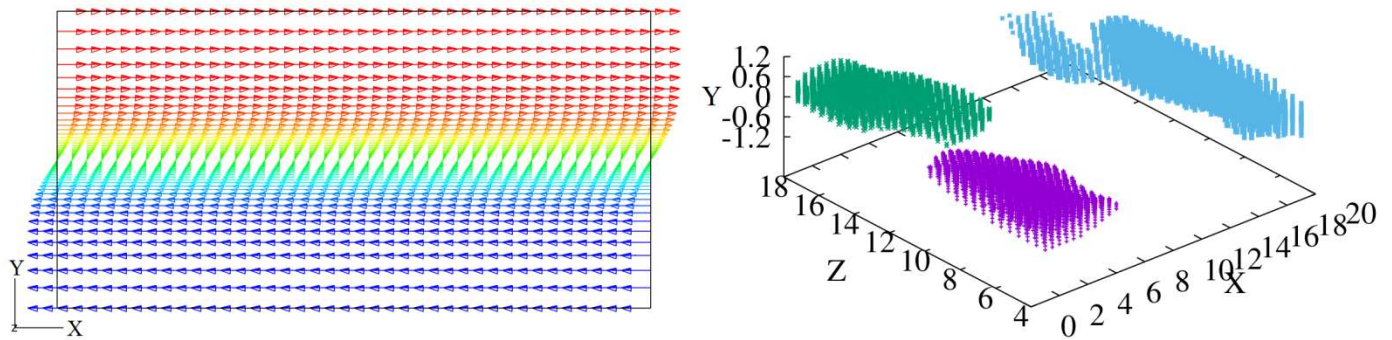


図 1. 不連続せん断層の線形安定性解析の結果、Mach 数 M が大きくなるにつれ、 $\beta=0$ 付近の増幅率 ω_i が小さくなり、2次元擾乱が安定化している傾向が見られる。Mach 数を大きくしても、ある $\beta \neq 0$ で ω_i の極大値が見られる。



(a) 高さ方向(y 方向)における速度分布, 色は Mach 数表す(赤: $M=1.4$, 青: $M=-1.4$) (b) 渦度の絶対値が大きい体積領域 (super-cluster)

図 2. $M=1.4$ のケースにおける流れ場の結果

✓ 数値流体力学(CFD)解析

Mach 数が 0-2.0 の範囲内で, せん断層の CFD 解析を行った。計算では, 完全圧縮性 Navier-Stokes 方程式 (粘性項考慮) を, 高次精度差分法により, 時間発展させて解いた。図 2 に, $M=1.4$ のケースにおける流れ場の結果を示す。図 2(a) に形成されるせん断層領域で形成される高渦度領域を図 2(b) のように個別の連結体積領域として抽出することに成功した。

● ラジアル燃焼器の LES 解析

図 3 に示すラジアル燃焼器の LES 解析を行った。周囲から取り込まれた空気は, 円周方向に設置された流入ガイドベーン群の間を通り, 中心に集まった後, 先細末広ノズルを通り, 対称軸(z 軸)方向に放出される。解析条件に関し, 流量は $Q_{in}=24 \text{ m}^3/\text{h}$ で, 燃料ガス流入および燃焼反応を伴わず, ベーン取付角は $\alpha=0^\circ$ (スワールなし), 59.5° , 77° (強スワール条件) の 3 ケースである。メッシュは Ansys fluent 2023R1 により生成した非構造多面体メッシュであり, セル数およびノード数はそれぞれ約 39 万セル, 約 138 万点である。計算には数値流体力学ソフトウェア OpenFOAM を利用した。図 4 に各取付条件における瞬時渦構造を示す。計算領域全体における擾乱の発達および分布の計算(擾乱発達によるベーン入口からノズル出口までの機能的な強い連結性の特定)に成功した。また, 全てのベーン角度において, ノズル出口遠方ではらせん渦構造が形成され, ノズル出口近傍の擾乱構造によらず下流ではらせん渦構造が見られることが分かった。特に, $\alpha=77^\circ$ のケースでは, ノズル出口直後で実験的に知られているらせん渦の予測に成功した。一般的に, Q 値(速度勾配テンソルの第 2 不変量)等値面の描画では渦群の深部にある中核的渦が埋もれて本質的な渦挙動の抽出が困難な場合が殆どである。本計算結果を使い, これまで著者らが構造格子に基づいて開発し上述の問題に対する強力な解決手段であり, 局所連結する体積的渦構造のタグ付き自動トラッキング技術である階層的渦クラスタリング法¹⁾を非構造格子に拡張する見通しが得られた。

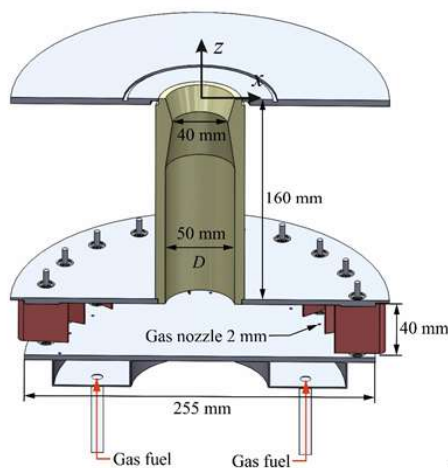


図 3. 本研究で用いるラジアル燃焼器

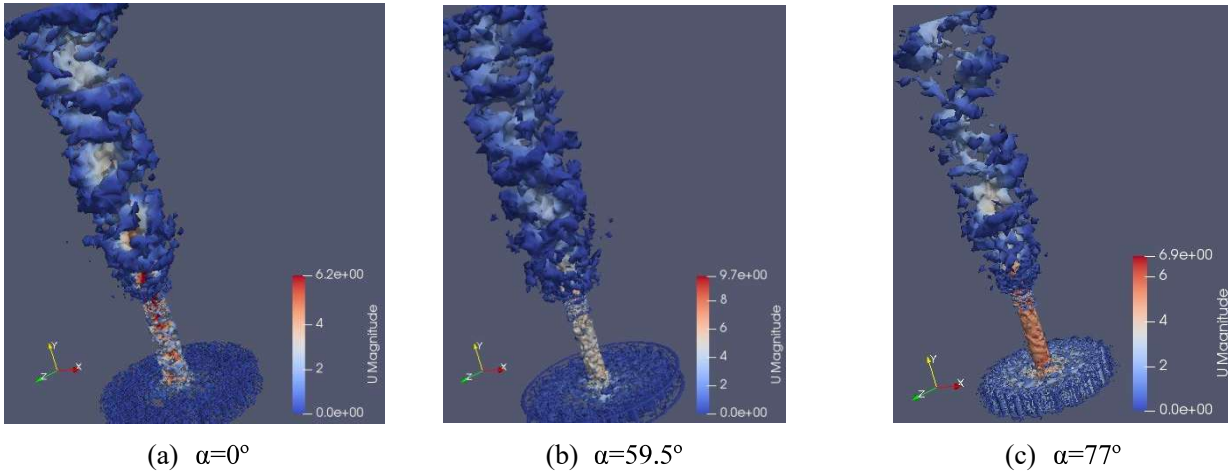


図 4. Q 値等値面で表示された瞬時渦構造(色は速度の大きさを表す)

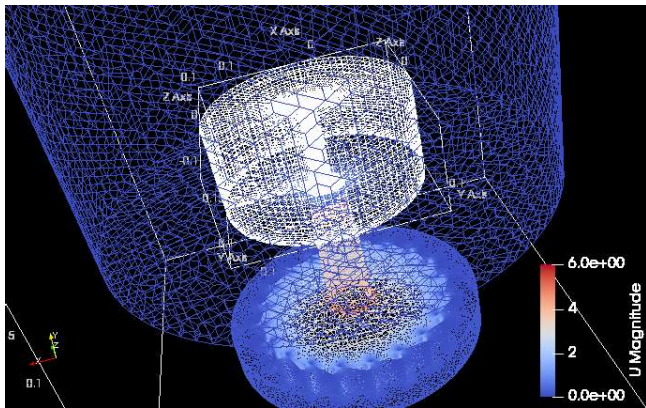


図 5. ノズル出口で階層的渦クラスタリング分析をするために導入された、円柱座標に基づく部分構造格子(シミュレーション自体は背景の非構造格子を利用)

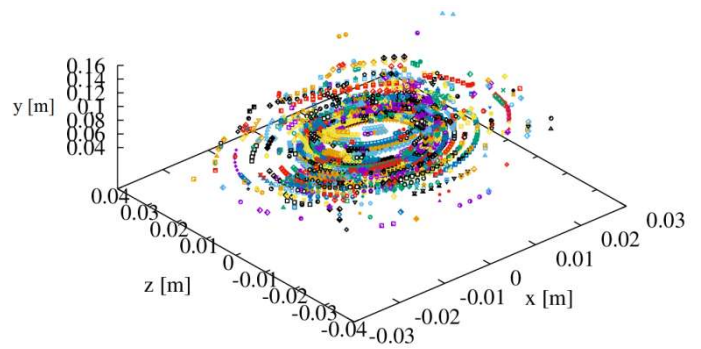


図 6. 円管ノズル出口における連結渦体積領域点の空間分布, 同色で繋がった記号列が各 **super-cluster** を示す。

図 5 に、ノズル出口で階層的渦クラスタリング分析を行うために導入された、円柱座標に基づく構造格子の部分空間格子を表す。図 6 に、円管ノズル出口近傍における連結渦体積領域の点を表す **super-cluster** の空間分布を示す。分析に当たっては、元々の流れ場の計算が非構造格子を用いて行われたため、構造格子を流れ場に導入し、背景となる非構造格子場からその構造格子場へ **radial basis function** 補間によって速度場の変数を補間した。その上で、構造格子上で従来開発された階層的渦クラスタリングを実施した。このようなアルゴリズムに基づき、非構造格子に基づく流れのシミュレーションを行っても、**p-cluster** の構築を可能にする新手法を提案した。また、図 6 に見て取れるように、らせん渦に対応する非軸対称の連結渦領域の抽出に成功している。別途行われている実験でもらせん渦が確かに確認されている。

■ 成果発表

1. Kazuo Matsuura, Yasuhide Fukumoto, “Hierarchical clustering method of volumetric vortical regions with application to the late stage of laminar-turbulent transition,” *Phys. Rev. Fluids*, 7, 054703, 2022.
2. Kazuo Matsuura, “The present status of the simulations for the experimental helical vortex,” *International Workshop on Turbulence, Vorticity Dynamics and Wind Energy*, 5-9th, Sept., Calgary, Canada (2022).

■ 参加者リスト

松浦一雄，愛媛大学

福本康秀，九州大学マスフォアインダストリ研究所