

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K14891

研究課題名(和文) マルチスケール格子乱流中のスカラー輸送のメカニズム解明と革新的混合促進の実現

研究課題名(英文) Elucidation of the mechanism of scalar transport in multi-scale grid turbulence and innovative mixing enhancement

研究代表者

北村 拓也 (Kitamura, Takuya)

長崎大学・工学研究科・助教

研究者番号：30794648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：マルチスケール格子乱流における混合促進および圧力低減を目的とした最適な格子形状の探索を目的に、任意の格子形状を生成するためのアルゴリズムを開発した。  
様々な格子形状に対して直接数値計算(DNS)を実施し、データマイニングを実施した結果、混合促進と圧力損失はトレードオフ関係にあり、混合促進を推進するためには乱流レイノルズ数を増加させる格子配置が重要であり、圧力損失を低減させるためには格子の遮蔽率を低減させればよいことが明らかになった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の学術的意義は、機械学習などの情報技術を利用し、異なる形状のマルチスケール格子により生成された流れ場とスカラー輸送の関係性を整理し、乱流の持つ輸送能力の本質に迫ることである。  
混合促進や圧力損失低減が可能となる格子形状の探索は、高性能混合デバイスや低圧力損失オリフィスなどの工業装置の開発といった社会的意義を有す。

研究成果の概要(英文)：We have developed an algorithm for generate arbitrary grid geometries for the purpose which archives mixing enhancement and pressure reduction in multi-scale grid turbulence.

We performed direct numerical simulations for various grid geometries and we found by means of data mining the trade-off relationship between mixing enhancement and pressure reduction. Our results indicate that grid configuration which increases the turbulent Reynolds number is important to promote mixing enhancement, while a reduction of grid solidity improves the reduction of pressure drop.

研究分野：流体工学

キーワード：乱流 スカラー輸送 多目的最適化 直接数値計算

### 1. 研究開始当初の背景

流体工学的なアプローチとしての乱流分野に共通する研究課題は、混合促進といった利点を伸ばしつつ、騒音低減や圧力損失低減といった問題点を抑える工業装置の開発であり、その抜本的な技術革新が社会のニーズとして求められている。

Hurst and Vassilicos (*Phys. Fluids*, **19** (2007), 035103)の実験に始まり、従来の正方格子乱流に比べ、フラクタル格子乱流の方が乱れ強さが大きいこと、圧力損失が小さいこと、騒音が小さいことが報告されており、乱流の問題点を抑え、利点を生かした最適な格子形状が存在することが示唆されている。最適形状のマルチスケール格子を用いた工学的アプリケーションとして、高性能混合デバイス等の工業装置への応用、航空機におけるエアスポイラーや低圧力損失オリフィスなどが挙げられる。しかしながら、用途に適した格子形状の最適化はこれまで遂行されていないのが現状である。また、マルチスケール格子乱流は、乱流構造、乱流の生成過程およびエネルギー輸送過程のメカニズムにおいて従来の正方格子乱流とは異なる未解明な点が多い。

一方で、近年ニューラルネットワークやクリギングモデルを応答曲面として用いた高効率な多目的最適化手法が熱流体工学デバイスへ適用され、産業界において注目されている。熱流体工学デバイスに関する形状最適化は、これまで様々な既往研究がなされてきたが、レイノルズ数が低い流れ場や乱流モデルを用いた流体機械などに限られている。実問題で見られる流れ場はレイノルズ数が高い場合が多いことから、乱流モデルを用いた最適化がなされているが、乱流モデルの不確定性などにより最適化結果と実験結果が整合しないことが多く、最適化の信頼性において懐疑的な点が挙げられる。

### 2. 研究の目的

上述の背景をもとに、本研究の目的はマルチスケール格子乱流における混合促進および圧力低減を目的とした最適な格子形状の探索であり、機械学習などの情報技術や理論解析を通して乱流の持つ輸送能力の本質に迫ることである。

### 3. 研究の方法

#### (1) 格子生成法

任意のマルチスケール格子を生成させるためには、トポロジー、形状および寸法すべてを最適化できるアルゴリズムが要求される。図1に遺伝的アルゴリズムを用いたマルチスケール格子の生成手法を示す。図1(a)に示すように正方格子をシフト、枝狩り、調整することによりフラクタル格子が生成できることが分かる。したがって、図1(b)に示すように、マルチスケール格子を構成する要素に対して二進数で要素の存在や並進移動、厚さ変更が表現可能であり、遺伝的アルゴリズムが適用可能である。実際のアルゴリズムでは、連結数などの制約条件を課すことにより制約付き多目的最適化問題を解くことにより形状探索が可能である。しかしながら、本最適化問題は自由度が $2^{99} \sim O(10^{29})$ と非常に大きく制約条件も強いため、このまま最適化問題を解くのは現実的ではない。したがって、大量のマルチスケール格子を生成したあと、変分オートエンコーダーを用いて潜在空間をクラスタリングすることで格子形状を大きく分類し、代表的な格子形状に対して直接数値計算(DNS)を実行した。

#### (2) 流体乱流の計算方法

支配方程式は、非圧縮性三次元 Navier-Stokes 方程式および移流拡散方程式である。移流項、圧力勾配項および粘性(拡散)項は、四次精度中心差分を用いた。ポアソン方程式の解法には、高速フーリエ変換および直接法を用いて、効率的に解いた。時間積分には三次元精度低用量 Runge-Kutta 法を使用した。複雑な形状を有すマルチスケール格子における境界条件に対しては簡易直接埋

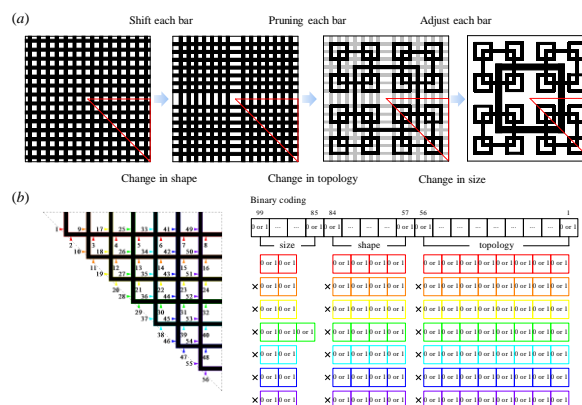


図1 マルチスケール格子の生成法

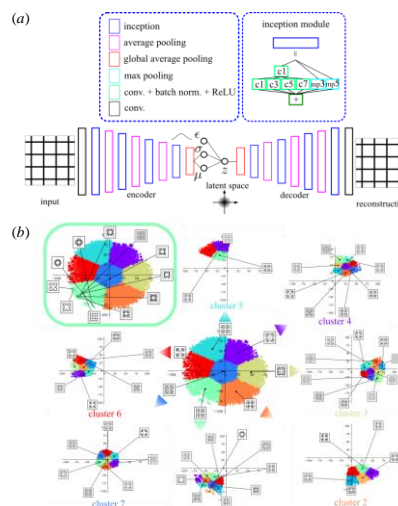


図2 代表的な格子形状の抽出

め込み境界法を適用し、任意の格子形状に対して計算が実行できるように改良している。また、移流拡散方程式で記述されるスカラー場では、誤差関数で流入条件が与えられるスカラー混合層を対象とした。計算コードは、Message Passing Interface と OpenMP を用いて並列化を行った。

#### 4. 研究成果

上述した手法を用いて代表的な格子形状を抽出したあと、それらの形状に対して DNS を実施した。混合を定量的に評価する指標として混合パラメータ  $M_p$  を検討した (Tseng and Ferziger, *J. Turbul.*, **2** (2001), 014)。図 3 に混合パラメータの空間発展の様子を示す。フラクタル格子の  $M_p$  が正方格子のそれに比べ大きいことから、フラクタル格子が正方格子に比べ混合促進に関して優れていることが評価できる。紙面の都合上省略するが、異なる混合の指標に対しても同様の傾向が得られた。

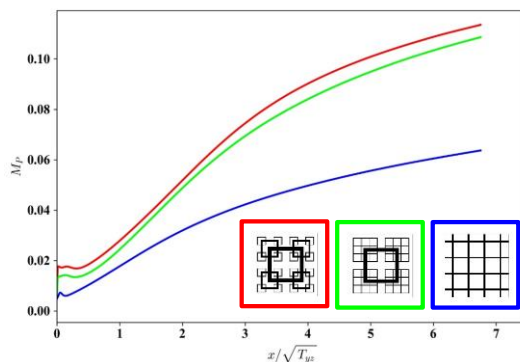


図 3 混合パラメータの空間発展

図 4 に圧力損失と混合促進を目的関数とした散布図を示す。図 4 に示すように混合促進と圧力損失低減にはトレードオフ関係が見られ、混合促進と圧力損失低減を同時に満たすことができないことが示唆されている。フラクタル格子は混合性能に特化した乱流格子であるのに対して、正方格子は圧力損失が小さい乱流格子であることがわかる。また、フラクタル格子と正方格子の両方の特徴を有す格子は、流体力学的性能がバランス良い格子としてパレートフロント上に存在する。

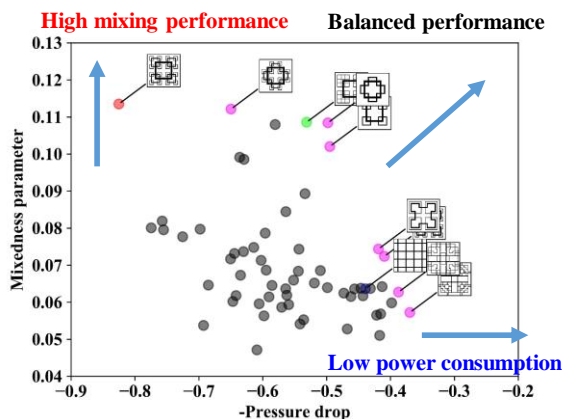


図 4 代表的な格子形状に対する混合促進と圧力損失の関係

これらのパレートフロント上にある代表的な格子形状における渦構造およびスカラー場の様子を図 5 に示す。フラクタル格子から生成された渦構造は正方格子のものに比べ下流まで分布しており、生成された渦が混合促進に活発に貢献している様子が見られる。

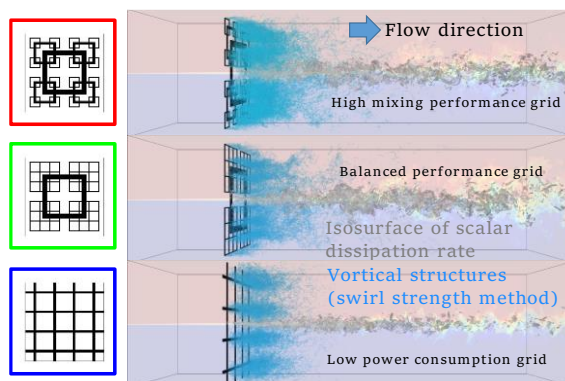


図 5 代表的な格子形状およびその流れ場の様子

さらに様々なデータマイニングを実施した結果、混合促進を推進するためには乱流レイノルズ数を増加させる格子配置が重要であり、圧力損失を低減させるためには格子の遮蔽率を低減させればよいことが分かった。また、図 3 に示すようにスカラー混合層の空間発展は単調増加な振る舞いを示すことから流れの初期条件で混合促進を定性的に予測できることが推測される。したがって、一様等方性に近い格子乱流におけるスカラー輸送現象は、一様等方性乱流中の平均スカラー勾配が存在するスカラー場の性質から定性的に説明することができ (T. Kitamura, *J. Fluid Mech.*, **923** (2021), A28), 研究開始当初に想定していた非平衡な乱流場の性質がスカラー場に反映されるという予想とは異なるものであった。このことから、大域的最適化を行ったところで、新しい知見を得ることが難しいと予想されたため、大域的最適化の実施に至ることができなかった。そこで、マルチスケール格子乱流から情報を抽出する技術の開発等に時間を費やした。したがって、大域的最適化の実施は次年度以降の課題となった。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Takuya Kitamura	4. 巻 898
2. 論文標題 Single-time Markovianized spectral closure in fluid turbulence	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A8 (1-20)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/JFM.2020.415	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Takuya Kitamura	4. 巻 6
2. 論文標題 Constant-energetics control-based forcing methods in isotropic helical turbulence	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Fluids	6. 最初と最後の頁 044608 (1-24)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevFluids.6.044608	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Kitamura Takuya	4. 巻 923
2. 論文標題 Spectral theory of passive scalar with mean scalar gradient	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A28 (1-45)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.559	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 北村拓也
2. 発表標題 混合促進に向けた乱流格子の形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会年次
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Takuya Kitamura, Koji Shimoyama
2. 発表標題 multi-objective optimization of multiscale grid using deep learning
3. 学会等名 17th International conference on flow dynamics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 北村拓也
2. 発表標題 高レイノルズ数流れを目的とするマルチスケール格子の形状最適化
3. 学会等名 日本機械学会 流体工学部門2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村拓也
2. 発表標題 小さい格子の乱流への影響とその最適配置
3. 学会等名 第33回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北村拓也, 下山幸治
2. 発表標題 高混合性能を実現するための乱流格子作成の試み
3. 学会等名 日本機械学会年次2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鳥飼 凌太郎, 北村 拓也
2. 発表標題 一様等方性乱流のよどみ点の検出
3. 学会等名 九州学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上 久哉, 北村 拓也
2. 発表標題 低圧力旋回渦による流れの可視化
3. 学会等名 九州学生会第53回学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------