

令和 5 年 5 月 17 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04282

研究課題名（和文）乱流の渦拡散近似の空間的・時間的非局所性の解明とモデリング

研究課題名（英文）Analysis and modeling of spatial and temporal non-local properties of turbulent eddy diffusivity approximation

研究代表者

半場 藤弘（Hamba, Fujihiro）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20251473

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：スカラー輸送の渦拡散近似を改良するために、数値計算によるスカラーフラックスの非局所性の解析と、乱流理論による非局所渦拡散率のモデル化を行った。一様等方乱流の速度場と非一様なスカラー場の直接数値計算を行い、平均スカラー勾配が乱流スカラーフラックスに及ぼす空間的・時間的な非局所性効果を解明した。さらに乱流統計理論を用いた考察によって2点速度相関を用いた非局所渦拡散率の関数形を求め、数値データを用いて検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

乱流輸送の非局所性は大気境界層などの気象分野では着目されてきたが、多くの分野の実用的な乱流計算では簡単のため局所的なモデルが用いられてきた。近年機械学習などの大量のデータを用いたモデル手法の進展とともに、乱流の非局所的なモデル化が再認識されている。単に経験的なモデルを立てるのではなく、乱流統計理論の知見を生かし系統的なモデルを導出し数値計算で実証することは、乱流研究の進展に対して重要な役割を果たす。

研究成果の概要（英文）：Non-local properties of scalar flux were analyzed using numerical simulation and a model of the non-local eddy diffusivity was proposed using turbulence theory to improve the eddy diffusivity model for scalar transport. Direct numerical simulation of homogeneous isotropic turbulence with inhomogeneous mean scalar was performed to clarify spatial and temporal non-local effects of the mean scalar gradient on the turbulent scalar flux. A form of the non-local eddy diffusivity expressed by two-point velocity correlation was obtained using turbulence statistical theory and was validated using numerical data.

研究分野：流体物理学

キーワード：乱流モデル 渦拡散率 非局所性

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

乱流モデルにおける空間的非局所性効果の研究としては圧力歪み相関項に関するものが行われてきたが、レイノルズ応力そのものに対する非局所性効果も考察されている。一方、気象学の大気境界層の分野では以前より空間的非局所性を取り入れたスカラー輸送のモデルが考察、開発されている。またプラズマ乱流の分野でも非局所的な輸送現象が考察されている。

最近の機械学習研究の進展により、乱流モデルについても乱流場の大量のデータを用いてモデルを数値的に求める試みがなされてきた。従来の経験的な局所近似にとらわれず、空間的・時間的に大域的なデータを用いたモデリングの可能性が広がった。また最近、非整数階微分を用いた非局所的な微分方程式によって、境界層乱流の平均速度分布が普遍的に記述できることが示された。したがってあらためて乱流の非局所性の解明とそのモデリングの必要性が増大している。

2. 研究の目的

非一様乱流の数値シミュレーションではレイノルズ応力や乱流熱フラックスなどをモデル化する必要がある。しかし渦粘性近似などの局所的近似は本来乱流場では必ずしも成り立たない。局所近似を仮定せず、非局所的な効果を取り込むことによって、乱流のモデル化の改良が期待される。本研究では直接数値計算を用いて非局所的な渦拡散率の空間的・時間的な分布を求め、非局所性効果を物理的に解明する。また乱流統計理論の手法をもとに考察し、非局所渦拡散率の関数形を求めてモデルを提案し、数値データを用いてモデルを検証する。

3. 研究の方法

(1) フィルター平均速度を用いた乱流統計理論の改良

従来の非一様乱流の統計理論では乱流の局所一様性を仮定してフーリエ変換を用いるが、現実の乱流では厳密にはフーリエ変換を課すことができない。そこで本研究では、フーリエ変換ではなくフィルター平均速度を用いて速度をスケール分解し、正確な渦拡散率を求めることを試みる。

(2) 一様等方乱流における非局所渦拡散率の数値的評価

最も基本的な乱流場として定常な一様等方乱流の直接数値計算を行い、一様等方な非局所的渦拡散率の空間的・時間的な分布を数値的に求める。また、同じ乱流場に対し非一様な平均スカラー場を与えて乱流スカラーフラックスを求め、数値的に求めた非局所渦拡散率がスカラーフラックスを再現することを実証する。

(3) 統計理論を用いた非局所渦拡散率の導出

非一様乱流の統計理論を用いて非局所的渦拡散率の関数形の導出を試みる。理論的に得られた非局所渦拡散率の表式を(2)で得られた数値的な分布と比較し検証するとともに、実際の非局所性の効果を考察する。

(4) 渦粘性率・渦拡散率に対する回転効果の解析

座標系や主流の回転を伴う乱流では回転効果によって渦粘性率・渦拡散率が変化する。回転するチャンネル乱流やエクマン境界層の数値計算を用いて乱流ヘリシティの生成や輸送の物理機構を考察する。

4. 研究成果

(1) フィルター平均速度を用いた乱流統計理論の改良

乱流統計理論の改良のために、スケール空間の乱流エネルギー密度の新しい提案とそれを用いた乱流場の解析を行った。フーリエ変換ではなく、フィルター平均速度を用いてスケール分解と物理空間での局所的な扱いを両立させることをめざした。3種類のフィルター平均速度を導入することにより、速度のスケール分解だけでなく、統計理論で重要となる乱流エネルギーや2点速度相関も適切にスケール分解できるように定式化を改良した。この定式化の妥当性を見るために、まず一様等方乱流の直接数値計算データを用い、乱流エネルギーと2点速度相関の分布を考察した。次にチャンネル乱流の直接数値計算データを用い、乱流エネルギーの一様成分と非一様成分の分布とそのスケール依存性を求めた(図1)。特に壁面近くにおいて乱流エネルギーの凹状の分布のため、非一様成分が負の値を示すことがわかった。

(2) 一様等方乱流における非局所渦拡散率の数値的評価

スカラー場の非局所渦拡散を考察するために、定常な一様等方乱流の速度場によって運ばれる非一様なスカラー場の直接数値計算を行い、統計量を解析し考察した。速度場とスカラー場に加えて、グリーン関数の時間発展も求め、それを用いて非局所渦拡散率の空間的・時間的な分布を求めた(図2)。また同じ乱流速度場の上いくつかの異なる平均スカラー場を設定し、それぞれの乱流スカラーフラックスを求めた。各ケースで局所的な渦拡散率の分布は異なり、局所モデルは

スカラーフラックスを過大評価すること、特に平均スカラー場の長さスケールが短いほど過大評価が顕著であることが示された。さらに一部のケースではスカラーフラックスとスカラー勾配が同符号を示す逆勾配拡散現象が起こっていることがわかった。そして非局所渦拡散率を用いれば統一的に正確にスカラーフラックスを説明できることを実証した。すなわち局所モデルの過大評価や逆勾配拡散現象は非局所性によるものであり、スカラー輸送の非局所性効果の重要性を確認した。

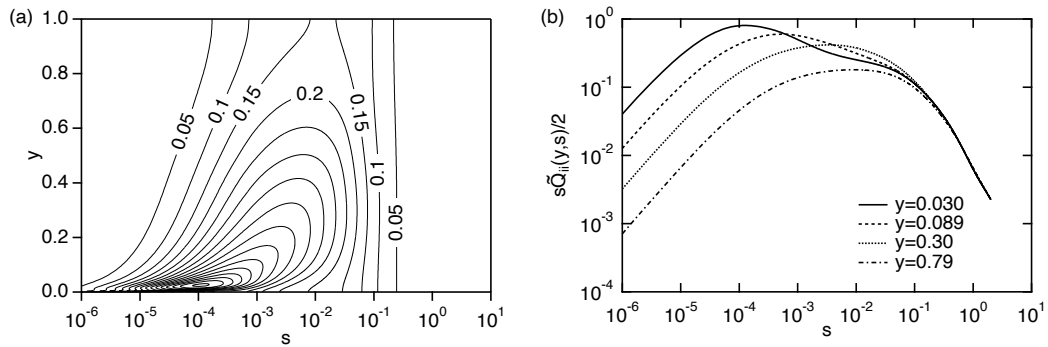


図1 チャンネル乱流のスケール空間エネルギー密度の分布

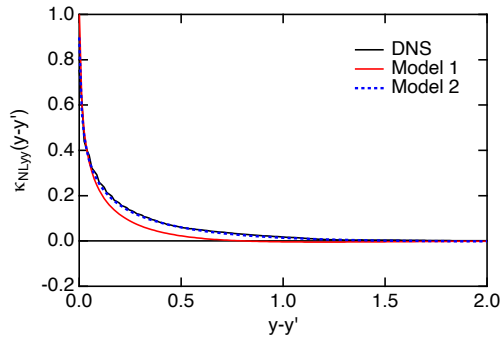


図2 一様等方乱流の1次元非局所渦拡散率の分布

(3) 統計理論を用いた非局所渦拡散率の導出

乱流統計理論を用いた考察によって2点速度相関の重要性を明らかにし、その相関を用いた非局所渦拡散率のモデル式を提案した。さらに数値計算データを用いて2点速度相関や非局所渦拡散率の時間差依存性を調べ、空間に加えて時間的な非局所性についても解析するとともに、非局所渦拡散率の時間依存部分のモデルを改良した。そして数値データを用いて、提案したモデル式を検証し、数値計算から直接求めた非局所渦拡散率とよく一致することを示した(図3)。

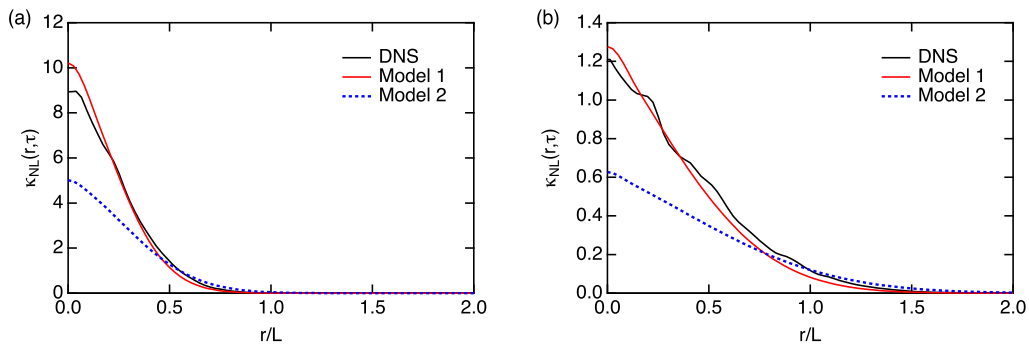


図3 一様等方乱流の3次元非局所渦拡散率の空間分布と時間差依存性

(4) 渦粘性率・渦拡散率に対する回転効果の解析

乱流ヘリシティは乱流の回転効果の特徴づける量として重要である。乱流ヘリシティが渦粘性率や渦拡散率に及ぼす効果に着目し、統計理論やチャンネル乱流の数値計算を用いて乱流ヘリシティの生成や輸送の物理機構を考察した。まず回転チャンネル乱流の数値データを用いてヘリシティの生成機構を調べ、圧力拡散項が重要な役割を果たすことを示した。また、エクマン境界層の数値計算を用いて乱流ヘリシティの生成や輸送を考察した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計15件（うち査読付論文 4件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Hamba Fujihiro	4. 巻 950
2. 論文標題 Analysis and modelling of non-local eddy diffusivity for turbulent scalar flux	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A38
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2022.842	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Inagaki Kazuhiro	4. 巻 926
2. 論文標題 Scale-similar structures of homogeneous isotropic non-mirror-symmetric turbulence based on the Lagrangian closure theory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A14 1~41
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.708	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Hamba Fujihiro	4. 巻 931
2. 論文標題 Scale-space energy density for inhomogeneous turbulence based on filtered velocities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 A34 1~24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2021.1000	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Inagaki Kazuhiro, Kobayashi Hiromichi	4. 巻 32
2. 論文標題 Role of various scale-similarity models in stabilized mixed subgrid-scale model	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 075108 ~ 075108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0012559	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11件(うち招待講演 0件/うち国際学会 2件)

1. 発表者名 F. Hamba
2. 発表標題 Scale-space energy density and inhomogeneous effect in turbulent channel flow
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Horie, F. Hamba
2. 発表標題 Production and transport of turbulent helicity in wall-normal rotating channel flow
3. 学会等名 12th International Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 半場藤弘
2. 発表標題 乱流の非局所渦拡散率の解析とモデリング
3. 学会等名 第36回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 半場藤弘
2. 発表標題 応答関数を用いた乱流の非局所渦拡散率の解析
3. 学会等名 日本物理学会2023年春季大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 半場藤弘
2. 発表標題 フィルター平均速度を用いたスケール空間エネルギー密度
3. 学会等名 日本流体力学会年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江真惟人, 半場藤弘
2. 発表標題 回転チャンネル流における乱流ヘリシティの生成輸送と粘性散逸
3. 学会等名 第35回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 堀江真惟人, 半場藤弘
2. 発表標題 回転チャンネル流のLESによる乱流ヘリシティの解析
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 半場藤弘
2. 発表標題 フィルター平均速度相関を用いた非一様乱流の定式化の試み
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀江真惟人, 半場藤弘
2. 発表標題 壁垂直軸周りの回転を与えたチャネル乱流における乱流ヘリシティの生成と輸送
3. 学会等名 第34回数値流体力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京大学 生産技術研究所 半場研究室 研究内容 http://www.iis.u-tokyo.ac.jp/~hamba/research.html</p>

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
研究協力者	稲垣 和寛 (Inagaki Kazuhiro)		

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
---------	---------