

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月21日

独立行政法人日本学術振興会理事長 殿

[日本側代表者所属機関・部局]
名古屋大学大学院工学研究科
[職・氏名]
教授・長田孝二
[課題番号]
JPJSBP 120219916

1. 事業名 相手国: フランス (振興会対応機関: OP) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) 非平衡・非Kolmogorov乱流の探求とモデル化

(英文) Investigation into non-equilibrium, non-Kolmogorov turbulence and its modeling

3. 共同研究実施期間 2021年4月1日 ~ 2023年3月31日 (2年0ヶ月)

【延長前】 年 月 日 ~ 年 月 日 (年 月 日)

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

French National Centre for Scientific Research (CNRS) ・ Senior
Researcher ・ John Christos Vassilicos

5. 委託費総額(返還額を除く)

本事業により執行した委託費総額		3,800,000 円
内訳	1年度目執行経費	1,900,000 円
	2年度目執行経費	1,900,000 円
	3年度目執行経費	- 円

6. 共同研究実施期間を通じた参加者数(代表者を含む)

日本側参加者等	9 名
相手国側参加者等	17 名

* 参加者リスト(様式 B1(1))に表示される合計数を転記してください(途中で不参加となった方も含め、全ての期間で参加した通算の参加者数となります)。

7. 派遣・受入実績

	派遣		受入
	相手国	第三国	
1年度目			()
2年度目	1		()
3年度目			()

* 派遣・受入実績(様式 B1(3))に表示される合計数を転記してください。

派遣:委託費を使用した日本側参加者等の相手国及び相手国以外への渡航実績(延べ人数)。
受入:相手国側参加者等の来日実績(延べ人数)。カッコ内は委託費で滞在費等を負担した内数。

8. 研究交流の概要・成果等

(1)研究交流概要(全期間を通じた研究交流の目的・実施状況)

乱流場においてエネルギーは大スケールにおいて注入され、一定の割合(流束)で小さなスケールへと輸送されるというエネルギー輸送の平衡性が仮定されている。その場合、粘性散逸率 ε は $\varepsilon = C u'^3 / L$ (u' :速度変動rms 値、 L :積分スケール)と表すことができ、レイノルズ数が十分高い場合には係数 C (無次元散逸率とも呼ばれる)は一定値($C \sim 1$)をとる。これは乱流の第ゼロ仮説とも呼ばれる重要な関係式であり、多くの商用数値解析コードにおいてこの関係式が用いられている。ところが近年の研究でこの関係が成立しない、非平衡乱流の存在が確認されている。本交流事業では、相手国研究グループと協働し、非平衡なエネルギー輸送現象の解明とそのモデル化を目指す。

初年度は、名古屋大学に新規に導入された非定常風洞の基礎性能評価、動的格子を用いた非定常格子乱流実験、乱流境界層の風洞実験、および直接数値計算による非平衡乱流場(無せん断乱流混合層)におけるエネルギー輸送現象の解明を行った。相手国との交流に関しては、当初の計画では日本側メンバーが相手国(フランス)に出張してワークショップの開催並びに共同研究に関する打合せを行う予定だった。しかし、新型コロナウイルス感染拡大防止のため(所属機関の方針として)海外出張ができなかった。そのため、オンラインでのワークショップを外部からの招待講演を含めてリモートで合計4回実施した。

表:2021 年度二国間ワークショップ(オンライン開催)の実施状況

実施日	発表者 1	発表者 2	発表者 3
9 月 28 日	J. Chen (仏)	Y. Zhou (招待)	Y. Zheng (日)
11 月 10 日	J. Rolland (仏)	Sarp Er (仏)	Y. Ito (日)
12 月 6 日	K. Iwano (日)	T. Yasuda (招待)	A. Apostolidis (仏)
3 月 29 日	F. Alves Portela (仏)	S. Goto (日)	T. Watanabe (日)

日:日本側メンバー、仏:相手国メンバー、招待:外部からの招待講演

二年目は、初年度に実施した実験と数値計算結果を踏まえて、以下の課題に集中的に取り組んだ。

1. 非定常乱流場、非一様乱流場における粘性散逸率のスケールリング則の解明
2. 動的格子により生成される乱流特性と運動エネルギー減衰則の解明
3. 無剪断乱流混合層におけるエネルギー輸送機構の解明

相手国との交流に関しては、当初の計画では日本側メンバーが相手国(フランス)に出張してワークショップの開催並びに共同研究に関する打合せを行う予定だった。しかし、新型コロナウイルス感染拡大防止のため、複数人数での海外出張を見合わせた(日本側参加者1名が相手国を訪問し、相手国代表者と本交流事業に関する討論を行った)。初年度と同様に、相手国と日本メンバーの学術交流と情報交換のため、オンラインでのワークショップを実施した。一方で、2022 年度は国内の移動制限がかなり緩和されたため、日本側参加者が一同に会して名古屋大学において国内ワークショップ(オープン)を開催した。これらのワークショップを通して本課題に関する討論を十分な時間をかけて行うことができ、本研究課題に関する理解を深めることができた。

表:2022 年度日仏ワークショップ(オンライン開催)の実施状況
(実施日 2022 年 12 月 1 日)

発表者	発表タイトル
<u>X. Chen</u> (招待), Q. Ye, and Z. Feng	Amplitude modulation in turbulent boundary layer over a structured porous wall
<u>T. Kitamura</u> (日)	Geometry of small scale structures of turbulence
<u>R. Onishi</u> (日) and J. Hirai	Multiscale simulations of particle growth in cloud turbulence
<u>I. Kanshana</u> (仏), J. Rolland (仏), A. Barlet, P. Bragança (仏), and C. Cuvier (仏)	Stochastic bistable wake past two square cylinders
<u>T. Huret</u> (仏), J. C. Vassilicos (仏), G. Tanguy, L. Jacquin, and Q. Gallas	Prediction of turbulence generated by non-homogeneous grids for applications to atmospheric boundary layer experimental generation
<u>P. Beaumard</u> (仏), J. C. Vassilicos (仏), P. Bragança (仏), C. Cuvier (仏), J. M. Foucaut, and K. Steiros	Turbulence non-homogeneity and rotation in a confined flow analyzed with two-points framework

下線は発表者。日:日本側メンバー、仏:相手国メンバー

表:2022 年度国内ワークショップの実施状況
(実施日 2022 年 12 月 22, 23 日 開催場所 名古屋大学東山キャンパス)

発表者	発表タイトル
<u>大西 領</u> (日)	マイクロスケール気象現象に潜む非平衡現象に対する数値研究
<u>北村 拓也</u> (日)	乱流構造の幾何
<u>後藤 晋</u> (日)、松元 智嗣、犬伏 正信	機械学習による乱流モデルの可能性
<u>赤尾 拓海</u> 、渡邊 智昭(日)、長田 孝二(日)	鉛直方向運動の束縛により発生する超大規模構造に関する数値解析

下線は発表者。日:日本側メンバー、仏:相手国メンバー

(2)学術的価値(本研究交流により得られた新たな知見や概念の展開等、学術的成果)

本交流事業は、非平衡なエネルギー輸送現象解明、その普遍性の探求、モデル化という観点から学術的に重要であり、流体力学および流体物理学の発展に寄与するものである。既述したように、乱流場においてエネルギーは大スケールにおいて注入され、一定の割合(流束)で小さなスケールへと輸送されるというエネルギー輸送の平衡性がこれまで仮定されてきた。この場合、粘性散逸率 ε は $\varepsilon = Cu'^3/L$ (u' :速度変動 rms 値、 L :積分スケール)と表すことができ、レイノルズ数が十分高い場合には無次元散逸率 C は一定値($C \sim 1$)をとる。これに対して、本研究交流により、 C が一定とならない非平衡スケールリングが様々な場で確認された。特に、これまでは長時間平均した場(グローバル)での無次元散逸率が議論され、格子乱流場においては格子近傍場で $C \sim Re^{-1}$ (Re は Taylor マイクロスケールと速度変動 rms 値で定義されるレイノルズ数)の非平衡スケールリング則、遠方場で C =一定の平衡スケールリング則が成立すると言われてきた。しかし、短時間平均した局所の統計量をみると、格子遠方場で長時間平均した場が平衡スケールリング則に従う場合であっても、 $C \sim Re^{-1}$ の非平衡スケールリング則に従っていることが初めてわかった(Y. Zheng et al., Unsteady dissipation scaling in static and active grid turbulence, *Journal*

of Fluid Mechanics, 956, 2023, A20, 10.1017/jfm.2022.937)。今後、これらのグローバル／ローカル統計量に普遍性があるのか否か、様々な乱流場で検証する必要があり、今後の研究の展開が期待される。

(3)相手国との交流(両国の研究者が協力して学術交流することによって得られた成果)

相手国と情報交換をすることにより、当該研究テーマを強力に推進することができた。相手国からは角柱後流における無次元散逸率の非一様スケーリング、チャンネル流れにおける非平衡スケーリング、層流／乱流遷移、噴流場における乱流／非乱流界面、非一様な開口部を有する格子下流の流れ、攪拌容器内の非一様回転流れなど様々な場における乱流特性に関する最新の実験／数値計算結果が提供された。日本側からも同様に様々な乱流場における非平衡現象に関する最新の研究成果を発表することにより、特定の流れ場における特定の現象解明に終始することなく、普遍的な特性の理解を深めることができた。特に、非平衡／非一様な場での無次元散逸率のスケーリング則に関する理解が深まり、モデル化の指針も得られた。このような成果は両国から多数の研究者が一同に会して情報交換や議論を行うことで初めて得られるものである。

(4)社会的貢献(社会の基盤となる文化の継承と発展、社会生活の質の改善、現代的諸問題の克服と解決に資する等の社会的貢献はどのようにあったか)

乱流場を正確に予測し制御することは、例えば自動車や航空機の抵抗低減、燃焼器の効率向上などに大きく貢献し、省エネルギー問題解決にもつながるものである。あるいはもっと直接的には、自然エネルギーを得るための風車などの高効率化も期待できる。このような実用的な流れは一般に高いレイノルズ数(慣性力と粘性力の比)を有するため、流体運動の支配方程式である Navier-Stokes 式をそのまま解くことは現実的ではない。そのため、通常は、乱流モデルを用いて時間平均した方程式を解く手法が用いられる。その代表的なモデルである $k-\varepsilon$ モデルからもわかるように、乱流エネルギー k およびその散逸率 ε は乱流場を特徴付ける重要な物理量である。よって様々な乱流場において散逸率がどのように振る舞うかを調べることは非常に重要であり、上述した乱流モデルの改良にも貢献することができる。その結果、乱流場を正確に予測することで工業機器の最適設計が可能となり、現代社会が直面しているエネルギー問題解決に貢献できることが期待される。

(5)若手研究者養成への貢献(若手研究者養成への取組、成果)

日本側研究グループには博士後期課程学生 1 名と 35 歳以下の若手研究者 3 名を含んでおり、相手国研究グループにも博士課程学生 2 名とポスドク 2 名が含まれることから、本交流事業は若手研究者養成にも貢献するものである。また、2022 年に開催した国内ワークショップにおいては博士課程進学予定の修士課程学生に発表と討論の機会を与えた。このワークショップには多くの学生も参加し、若手(学生)の研究への関心を深めることができたものと期待される。

(6)将来発展可能性(本事業を実施したことにより、今後どのような発展の可能性が認められるか)

乱流場における非平衡なエネルギー輸送現象の解明とそのモデル化は当該分野において今後も重要課題であり続けられると思われる。本事業を実施したことにより、相手国と研究者と、または国内研究者同士でのつながりがより深まり、さらなる共同研究の実施や現象解明が期待される。国内研究者間ではすでに新規の共同研究が複数開始されており、その成果の一部は共著論文として著名国際誌に投稿済みである。

(7)その他(上記(2)～(6)以外に得られた成果があれば記載してください)

例: 大学間協定の締結、他事業への展開、受賞など

現時点での成果としては特にありませんが、今後も同様の枠組みで国際交流を継続したいと思っています。