

二国間交流事業 共同研究報告書

令和5年4月17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]
九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所
[職・氏名]
教授 福本 康秀
[課題番号]
JPJSBP 120214812

1. 事業名 相手国: ロシア (振興会対応機関: RFBR) との共同研究

2. 研究課題名

(和文) ジューコフスキーと河田の古典渦回転翼理論の再生可能エネルギーの現代的課題への展開

(英文) Development of classical vortex rotor theories of Joukowsky and Kawada for modern problems of renewable energy

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

4. 相手国側代表者(所属機関名・職名・氏名【全て英文】)

Novosibirsk State University・Researcher・LITVINOV Ivan

(当初: Research Professor・OKULOV Valery Leonidovich)

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		4,409,733 円
内訳	1年度目執行経費	2,375,000 円
	2年度目執行経費	2,034,733 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	6名
相手国側参加者等	3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		0	()
2年度目		8	0(0)
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)

エネルギー問題は我が国における喫緊の課題である。東日本大震災での福島第一原子力発電所の事故以降、脱原発依存は一定の流れとなり、代替エネルギーの確保・開拓が求められている。再生可能エネルギー(自然エネルギー)に大きな期待が寄せられているが、我が国では、風力エネルギーの利用は進んでいない。風力発電は、一年を通して安定的に強風が得られる海岸沿いや山肌に風車を並べて行う。各風車に当たる風の強さはまわりの風車の影響を大きく受ける。現在、単独の風車においても、風力発電の効率を理論的に見積めることは難しい。風車群にあっては、個々の風車の風況すら直ぐ先は読めない。

本共同研究は、風力発電の本場デンマークで活躍する流体力学者率いるロシアチームと渦運動・乱流を中心に流体力学研究の最前線を拓いている日本チームとが力を合わせて、理論・大規模数値シミュレーション・実験の三方から次の問題に取り組む。「らせん渦に立脚した、風車(=回転翼)・風車群による発電効率の見積もりと最適化」

実は、我が国から、戦前、数学の超絶技巧を駆使した「プロペラ理論」が英文論文として発表されていたが、完全に忘れ去られていた。当初ロシア側代表者故 V. L. Okulov 教授と日本側代表者は、D. H. Wood 教授(カルガリー大学、カナダ)と、東京帝国大学航空研究所の河田三治教授(1936)や守屋富次郎教授たちの「プロペラ力学」、その後流構造としての「らせん渦の誘導速度」の先行研究を発掘した[Fukumoto, Okulov & Wood: Appl. Mech. Rev. (2015)]。風車の後流はらせん渦によってモデル化できる。失われた Joukowski や河田のレガシーを現代に甦らせることによって、永年の壁を突破して「らせん渦管の運動理論」を打ち建てるのが大きな目標である。

2020 年初頭にもたげてきた新型コロナウイルス感染拡大は地球全体を覆い、収束の兆候がないまま、2020 年、2021 年と過ぎていき、2022 年の春から、世界各地で徐々に海外渡航が再開されるようになった。2021 年度は対面の交流は全く行えず、代表者間のオンラインによる計画変更の打ち合わせによって、秋にオンライン・ワークショップを開催することを決定し、2022 年春先に日本チームのロシア渡航を選択肢として残した。1 年程度でコロナ禍が過ぎ去ることを望んでいたが、2021 年度中は海外渡航の制限が緩和される見込みはなかったため、3 月もオンライン・ワークショップに切り替えた。

2022 年に入り、コロナ禍に関する様々な規制が緩和され始めて、2022 年度の本格的な事業実施を期待していた矢先、2022 年 2 月、ロシアによるウクライナ侵攻が勃発し、ロシアでの共同研究実施が遠のいた。ウクライナ紛争の短期間での終結を願ったが、1 年以上経過した今日、両国間の戦闘は泥沼の様相を呈しており、終息の形が描けない状態である。2022 年 6 月、ロシア側代表 Okulov 教授と打ち合わせる機会をもった。日露双方の研究者が集える中間的な地としてカザフスタンが浮上し、そこで対面のワークショップを開催する可能性を探ることとした。Okulov 教授が RFBR に問い合わせると、ロシア側は 2022 年度の事業を凍結して 2023 年度に延期するという回答が届いた。事業凍結により、2022 年秋にカザフスタンでワークショップを開催する可能性が立ち消えになった。

我が国でも、2022 年春以降、海外渡航の制限が大きく緩和された。そこで、日・露両代表者の共通の友人にして 3 人の共著論文もあるカルガリー大学(カナダ)の D. H. Wood 教授が 9 月に当地で開催する渦運動と風力エネルギーに関するワークショップに日本側参加者 5 名全員が出席して、本事業の趣旨である研究を一步でも前進させようということになった。ちなみに、Wood 教授は河田三治のらせん渦研究の第一発掘者である。6 月 20 日ごろから、日本側代表者が Wood 教授と e-mail でやりとりして、全員参加の承諾を得て、渡航準備を進めていた。それから間もない頃、7 月 23 日、デンマーク工科大学の Jens Sorensen 教授から、Okulov 教授が数日前に急逝したという悲報が飛び込んだ。「らせん渦の運動」研究の世界的泰斗が逝った大きな喪失である。悲しみに包まれる中、ロシア側は新たに Ivan Litvinov 博士を代表者に立てて、2023 年度に事業を再開する体制を整えた。日本チーム 5 名は、9 月 5 日～9 日、カルガリー大学でのワークショップに参加して、カナダの有力研究者と交流した。この直前、福本と中山は、イタリアで開催されたトポロジカル流体力学に関するワークショップに参加した。11 月下旬には、福本は、米国外からも多くの流体力学研究者が集う米国物理学会・流体力学部門年会(11 月 20 日～22

日)に参加し、欧米の有力研究者と交流し、新たな研究動向に関する情報を得た。

規則により、日本学術振興会の本二国間共同研究は2023年3月31日をもって終了する。本事業において日露双方の研究者が行う共同作業の目玉は、ノボシビルスク州立大学でのらせん渦生成の実験と、日本チームが得意とする数値シミュレーションによって実験をサポートすることである。「室内実験データ」と「数値シミュレーションデータ」を突き合わせる必要があるが、オンラインによる打合せに留まっていたは双方にとって相手方の印象が弱く動機づけが高まらない恐れがある。そこで、Litvinov博士と打ち合わせて、2か年の事業の最後の瞬間に、Almaty(カザフスタン)で対面の打ち合わせを行うことを決めた。ミーティングの日程は、2023年3月27日~29日、会場はAlmaty市内のSADUホテルで、ロシアからLitvinov博士、日本から、中山雄行准教授(愛工大)、松浦一雄准教授と代表者の3名であった。対面のインパクトは絶大で、打ち解けた雰囲気の中で、Litvinov博士から実験の詳細について教授いただき、日本側は、特に、松浦が数値シミュレーション結果を提示し、これらについて活発な研究討議を行った。ロシア側の実験、日本側の数値シミュレーションと数学理論、いずれも道半ばである。対面で交流することによって相手側と信頼関係が築け、親近感が増し、R5年度以降も共同研究を継続することで意気投合した。

(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)

今日、風力タービン・ブレードやプロペラ後流の流れの研究手段はもっぱら実験か大規模数値シミュレーションかに二分されている。らせん渦を骨格として後流を描こうとする理論研究は案外少ない。しかも、日本発のすぐれた財産である河田三治のらせん渦の研究(1936)は埋もれたままであった。ロシアには具体的な問題に根差した数学を深く展開するという伝統があり、カナダのD. H. Wood教授もこの志向を共有する。Joukowskyのアイデアに起源をもつ風車の発電効率の計算に河田・守屋の揚力線理論を絡ませる。そして、らせん渦の有限太さの効果を計算する日本側代表者の理論的扱いを、プロペラの揚力線理論に組み込む道を拓くことができた。

らせん渦を実験室で生成することは容易ではない。この点において、故Okulov教授やLitvinov博士が所属するノボシビルスクの熱物理学研究所は1990年代からリードする。ロシア側での実験によって、ノズル内の直線流にスワール成分を重ね合わせ、スワールを強くすることによって、ノズル出口直前で渦崩壊を起こさせて、自発的に回転しながら延びていくらせん渦の形成を確認した。これによって、らせん渦を生成する新たな方法を獲得した。

(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)

らせん渦の運動速度の漸近理論において、渦核が細い極限では、ロシア側代表者Okulov教授が最先端の結果を有する。渦核の有限太さの効果の扱いでは、日本側代表者が最高水準の技術を有する。この2つの数理技術を掛け合わせて、有限太さのらせん渦管の運動速度を導出する道をつけた。最終ゴールはこれからである。

論文[1] V. L. Okulov and Y. Fukumoto, *Review of analytical approaches for simulating motions of helical vortex*, *Frontiers in Energy Research* **15**, 817941 (6 pages). (2022)

らせん渦の研究の第一人者であるOkulov教授やWood教授との議論により、工業応用を考える場合でのらせん渦のパラメータの値の設定に知見を得た。渦核およびピッチが小さい場合が特に重要であるため、ピッチの値の影響を直接数値シミュレーションにより明らかにした。場合によっては近似的に周期的な渦輪の系に置き換えることも提案された。また、実機においてらせん渦がつくる流れ場の測定は難しいため、直接数値シミュレーションによる解明が期待されることもわかった。これを受けて、平均流れ場と乱れの統計的性質を解明するために、乱流遷移のメカニズムを研究し、渦核が直接乱流化する場合とそうでない場合があることを明らかにした。

Novosibirsk State Universityでの室内実験においてらせん渦が生成できた。渦崩壊を経て流れの軸対称

性が自発的に破れて、直線状に延びる渦がらせんに巻くというシナリオである。不安定性によるらせん渦生成のメカニズムを日本側の数値シミュレーションが明らかにできる。

(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)

風力発電の風車は常時回転していることが前提である。パワーがほんのわずかでも向上できれば、長時間運転に伴う利得が大幅に上昇する。Joukowsky や河田のアイデアを現代に甦らせることによって、回転翼の運動とそれに働く抗力・揚力計算の高精度化が達成できれば、風車の回転が生み出すパワーを高精度で見積もることができる。そして、含まれているパラメータによる変分をとることによって出力を最大にする最適設計が可能になると期待している。こうして、再生可能エネルギー開発に数値シミュレーションのみならず、数学が貢献できることを示せた。

(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)

若手研究者である渡辺は、カルガリー大学でのワークショップで講演を行い、風力エネルギー研究の第一人者 D. H. Wood 教授から、風力タービンのブレードから発生する翼端渦の干渉に対する計算格子解像度、アクチュエータラインの誘起範囲の影響についてコメントをもらった。おかげで、翼端渦の崩壊に伴って後流が乱流化するプロセスを計算で実現することができた。対面ワークショップでの直接的なコミュニケーション無しには達成できなかった。

(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)

本共同研究は、ロシア側代表者の強い要請を受けて、日本学術振興会に申請して実現した。日本側代表者は故 Okulov 教授が「有限太さのらせん渦管の運動速度の漸近理論」構築に並々な情熱を燃やしていたことが強く印象に残っている。この理論を完成させるのは残された日本側代表者の責務と考える。これにより風車後流の理論的扱いが大きく深化させられよう。

ロシア側の新代表者 Litvinov 博士は、1年間のギャップを経て、R5 年度にらせん渦生成の室内実験を再開する。本年 3 月末の Almaty での対面でのミーティングによって、日本側と生データの交換を行い、日本側は数値シミュレーションによってロシア側の実験をサポートする、そして、実験での測定データを日本側でらせん渦管の漸近理論に反映させるなど、R5 年 4 月以降の日・露の相互的な協力体制を築くことができた。

(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

故 Okulov 教授はデンマーク工科大学 (DTU) の風力エネルギー工学科にも所属している。2005 年から、九州大学大学院数理学研究院と部局間の交流協定を締結しているが、2020 年 9 月に、九州大学大学院数理学研究院/マス・フォア・インダストリ研究所と交流協定の最新の更新を行った。本事業は、DTU との交流活動強化の一環でもある。