

令和 2 年 5 月 29 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B)（特設分野研究）

研究期間：2015～2019

課題番号：15KT0014

研究課題名（和文）次世代高速鉄道のためのトンネル圧縮波変形メカニズムの数理科学的研究

研究課題名（英文）Mathematical study of micro pressure waves for developments in modern high-speed trains

研究代表者

坂上 貴之（Sakajo, Takashi）

京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：10303603

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 9,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題は、数学研究者のグループと鉄道総合技術研究所の研究者との密接な連携により、近年、速度向上が著しい高速鉄道がトンネル進入時に生成する圧縮波（微気圧波）について研究を行った。その成長を記述する小澤方程式の高精度な数値計算法を提案し、その数値解析により圧縮波の成長メカニズムの理解が促進された。また、鉄道総研から提供された実測値データのデータ解析によりトンネル開口部対策と微気圧波成長の関係が理解できた。微気圧波が起こす様々な深刻な障害への対策の基盤を作り出すことができた。加えて、微気圧波以外の多様な鉄道技術に関する問題の発掘とその数学的検討を行い、今後の共同研究契約締結に繋げることもできた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題の意義は、数学研究者と鉄道技術開発の研究者グループが密接に協働することで、高速鉄道の微気圧波の起こす様々な障害という現実的な課題に対して、従来にない新しい数理的手法や視点を持ち込むこと（シーズ展開）に成功して、鉄道開発の現場の要請を解決することに一定の成果を得たことである。同時に鉄道総研が抱える様々な課題を数理的な問題として検討する（ニーズ探索）を実現して、今後の継続的な共同研究事業へと引き継がれた点にも意義がある。これ得られたノウハウは広く数理科学者からの諸分野・産業への連携探索に利用できるものとして本特設分野研究の趣旨にも応えることができた。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we investigate the dynamics of micro pressure waves generated by modern high-speed trains in tunnels by organizing a joint group among mathematicians and researchers in Railway Technical Research Institute (RTRI). We have proposed a new numerical scheme for a one-dimensional integro-differential nonlinear equation (Ozawa equation) describing the development of micro pressure waves, thereby we understand their dynamics in detail. Also, we have conducted comprehensive data analysis for real measured pressure data offered by RTRI to understand the relation between the shape of tunnel entrances and pressure wave developments. As a consequence, we have created mathematical foundations to deal with severe practical problems caused by micro pressure waves. In addition, we have successfully explored new problems with regard to train technologies in RTRI. The joint research will be continued under joint research contract with RTRI after the project ends.

研究分野：応用数学（数理流体力学）

キーワード：応用数学 流体力学 交通計画・国土計画 関数方程式論 関数論

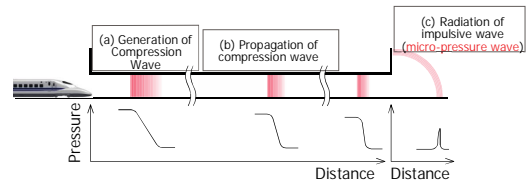
様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

我が国における高速鉄道である新幹線は、営業運転の速度向上を継続して実施しており、開業当時は 210 km/h だったものが、現在では 300km/h を超えて運行されている。また、首都圏と名古屋圏に超伝導リニア方式による中央新幹線の建設も始まっており、その営業運転が 500km/h になることも視野に入れる必要がでてきた。このような列車の高速化とともに、従来見えなかった高速鉄道に関する空気力学的な問題が顕在化している。特に我が国では都市間を長大なコンクリート製のトンネルで結んで設計されることが多く、そのような環境ではトンネル内に高速で進入した列車の生成する圧縮波(トンネル圧縮波)がトンネル内部で成長しながら伝播し、その出口に到達したときに開口端反射することで膨張波となってトンネル内を再伝播する。その際にトンネル出口の外部にはパルス状の圧力波(トンネル微気圧波)が放出される。トンネル微気圧波は、その発生原因となるトンネル圧縮波のトンネル内部での発達が大きいと、トンネル外部で発破音となって聞こえること、またその振動が周辺家屋に伝わることなどから、高速鉄道における深刻な環境問題の一つとなっている。

トンネル微気圧波の現象は次の三つのステップによって起こることが知られている(下図)[1]。

- 【圧縮波の形成】列車のトンネル突入時にトンネル内に圧縮波が形成される過程
- 【圧縮波の伝播】トンネル圧縮波が減衰することなくトンネル内部で伝搬する過程
- 【微気圧波の放射】トンネル出口での開口端反射による微気圧波の放射過程



トンネル微気圧波の低減に向けては、Howe ら[2]の音響学的手法による圧縮波形成の理論に基づいて、トンネルの開口部の緩衝口設計および突入する高速鉄道の先頭形状の最適化などが行われている。これは、突入時に形成されるトンネル圧力波をできるだけ小さくする(a)への対策である。しかしながら、そのような対応も限界に近づいていると見られ、リニア時代における鉄道のさらなる高速化を見据えた新しい対応策が求められている。そのためにとりうる方策は(b)と(c)への対応であるが、我が国のようにトンネル内に進行方向の異なる列車が同時に走るようなシステムでは入口と出口が区別できないため、(c)の対応は本質的に難しい。そこで、ステップ(b)に対応する対策が効果的であると考えられる。一方で、トンネル内部での圧縮波の伝播は強い非線型現象であり、トンネル内部で大きく成長し波面が切り立つことが知られているが、この圧力波の成長過程の原理は未解明な部分が多く、現地試験結果や経験則による対策がとられているのが現状である。トンネル微気圧波はトンネル圧縮波の圧力最大変動量から山本[3]の方法によって求められるため、トンネル圧縮波の伝播過程の数理的理解による効果的低減手法の確立が有望な対応策の1つであると考えられる。また、本課題では現実的な問題への応用を念頭においているため、その低減手法の開発と現場への実装も同時に進めることも望まれている。研究代表者(坂上)は、鉄道総合技術研究所(鉄道総研)環境工学研究部、熱・空気流動研究室との事前の研究交流を通じて、本問題の重要性を認識するに至り、鉄道微気圧波の数理的理解を目指した本格的な連携研究を目指すことになったのが、本研究課題の背景である。

2. 研究の目的

本研究課題の目的は、トンネル内を伝播する圧縮波の非線型成長のメカニズムを数理的に理解して、鉄道総研環境工学研究部熱・空気流動研究室との本格的な連携を通してトンネル微気圧波への新しい対策への道筋を作り出すことである。具体的には以下の課題解決を目指す。

【課題 A トンネル圧縮波成長のモデル方程式の数理解析・数値解析】

小沢・宮地[1,4,5]は粘性・圧縮方程式からトンネル内の伝播状態において成立しているスケールの違いに注目して、伝播する圧縮波の音圧 p に対する空間 1 次元偏微分方程式(小沢方程式、下)を導出している。(ただし、 α, β, γ はパラメータである)

$$\frac{\partial p}{\partial t} = \frac{\gamma+1}{2} p \frac{\partial p}{\partial x} - \alpha p - \beta \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\partial p}{\partial t} \frac{1}{\sqrt{t-s}} ds$$

これは非線型項と時間遅れの影響を持つ積分項を持つ非線型方程式である。この方程式を非線型微分方程式論と数値計算、また力学系理論の枠組みを用いて数理解析を行う。解の一意存在性という基本的な数学的性質や、初期波形に対する圧縮波の非線型性による切り立ち現象のメカニズムを明らかにする。

【課題 B トンネル圧縮波の計測データの予測式による簡易予測手法の提案】

鉄道総研における現地実測試験結果データベースを用いた圧力変動の予測式の提案を行い、微気圧波対策の現場でも利用できる簡易予測手法の開発を行う。具体的には計測によって得られる各時刻における圧力の関係から、微気圧波の大きさに強く関係する圧力最大変動量を算出する式について、課題 A で得られる小沢方程式による圧縮波の成長特性の知見も取り込んで、その簡易予測式を導出し、現場作業員の携行可能な計算機への実装を目指す。

【課題 C 鉄道総研との連携による成果のフィードバックと、連携の強化に伴う新課題発掘】

課題 A や課題 B で得られた知見が単なる数学的な理論研究にとどまらず、その成果を鉄道技術

の研究開発現場である鉄道総研へフィードバックすることが重要である。また本特設分野全体に関わる課題として、数学のシーズを鉄道技術開発のニーズと結びつける強力かつ向上的な連携研究体制の構築を目指す。

《参考文献》

- [1] 宮地徳蔵, トンネル微気圧波に関する理論的および実験的研究, 大阪府立大学博士論文 (2012)
- [2] M.S. Howe, M. Iida, T. Maeda and Y. Sakuma, Rapid calculation of the compression wave generated by a train entering a tunnel with a vented hood, J. Sound and Vibr., 297 (2006) 267-292
- [3] 山本彬也, トンネル出口からの微気圧波, 日本物理学会予稿集 1977 年
- [4] 小沢智, トンネル出口微気圧波の研究, 鉄道技術研究所報告 1121 1979 年
- [5] 宮地徳蔵, 小澤智, 福田傑, 飯田雅宣, 新井隆景, 新幹線スラブ軌道トンネル内を伝播する圧縮波の変形の基礎方程式, 日本機械学会論文集(B 編)(2011)
- [6] B. Lombard and Jean-Francois Mercier, Numerical modeling of nonlinear acoustic waves in a tube connected with Helmholtz resonators, J. Comp. Phys. 239 (2013) 421-443.

3. 研究の方法

【研究体制】本研究課題は、数理流体力学・非線型偏微分方程式論を専門とする研究者(坂上貴之, 大縄将史, 岡本久)が中心になって推進する。数理流体力学の研究手法を用いて、トンネル圧縮波の成長や減衰を記述する小沢方程式の数値解析・力学系理論からの取り扱いを目指す。また、これまで、鉄道総研との連携を坂上とともに進めてきた中野直人とも密に連携を図る。また、実際の高速鉄道の開発のための基礎研究を行う公益財団法人鉄道総合技術研究所(鉄道総研)環境工学研究部 熱・空気流動研究室の齊藤実俊室長および宮地徳蔵副主任研究員らと緊密な連携を図りながら研究を進める。なお、期間途中に岡本久教授が研究分担者から連携研究者に変更、鉄道総研からは大久保秀彦研究員が研究体制に加わった。

【研究の進め方】期間の前半は「連携研究の強化」を基本方針として研究を進める。基礎研究で主に課題 A の小沢方程式の解の特性解明のための数理科学的研究の先行研究の評価や課題 B に資するデータ解析手法の開発に集中して研究を進める。連携研究においては、鉄道総合技術研究所と問題に付随する学術的な知識や問題意識の共有化のため鉄道総研と定期的な打ち合わせを開催するなどの協働体制の強化を図る。

期間の後半は「鉄道技術へのフィードバック」を念頭に研究を進める。課題 A で得られた知見を基にして、課題 B と課題 C を並行して進める。課題 B では、鉄道設計の現場において利用可能な簡約な予測式の提案を行う。課題 C ではトンネル圧縮波の問題の新しい解決策に向けた連携研究へとフィードバックを行い、今後の対応策の実現性などを検討する。連携研究においては、鉄道総合技術研究所との定期的な検討会などを行い研究成果の還元に向けた共同研究の可能性を模索する。

全期間を通じて、鉄道総合技術研究所との定期ミーティングを実施し、研究成果のフィードバックを適宜受けると同時に、この緊密な連携を通じ、トンネル圧縮波の問題のみならず、それに付随した様々な新しい鉄道技術に関する問題の探索も行う。

4. 研究成果

本研究計画で設定した各課題で得た成果は以下のようにまとめられる。

【課題 A トンネル圧縮波成長のモデル方程式の数理解析・数値解析】

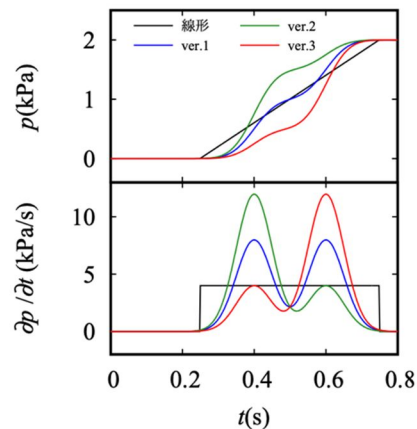
(先行文献調査とモデルの妥当性の検討)まず、トンネル微気圧波の非線型効果による切り立ちを記述するモデル方程式である小沢方程式について、関連する先行研究の文献調査を行った。この方程式は非整数階微分を含む 1 次元移流方程式であるが、類似の微分項を持つ方程式に関する結果を考慮すると、解の漸近挙動は $1/\sqrt{t}$ となることがわかる。この知見と鉄道総研のこれまでの現実のトンネルでの観測ともよい一致を見せることを確認した。また、こうした比較を通じてスラブ軌道トンネルの場合は、ショックを初期値とした解の挙動が大切であることもわかってきた。次に、モデル方程式としての小沢方程式の妥当性について検討を加えた。三次元の圧縮性の流体方程式に物理的仮定を課して一次元の小沢方程式を導出する過程を詳細に検討した。第一近似としては実地試験とよい近似が得られていることや、その物理的仮定の妥当性から、本研究課題にてターゲットとする方程式として適切であると判断した。ただし、将来的には流体方程式の数値計算との比較や実地試験との対応も踏まえることが重要であるとの点も確認された。

(小沢方程式の数理解析)上記先行研究とモデル方程式の妥当性の検討を受けて、大縄は小沢方程式の差分陰解法を提案し、それが安定的に解の正值性を保証する形で計算できることを数学的に示した。このスキームによりトンネル入り口における緩衝口の開け方が微気圧波に及ぼす影響を評価した結果、数 km 程度以下のトンネルであれば入口で窓が塞がっている方が強い微気圧波が出るという予想しやすい結果が得られる一方で、トンネル長が 10km 程度を超えると、入口

で窓が塞がっている方がむしろ微気圧波が弱くなるという意外な結果を得ることもできた。また、定常摩擦項をなくした場合でも波形の急峻化には限界があり、伝播距離が 10km 程度を超えると微気圧波が減衰することが見出された。トンネル入り口において圧力およびその微分値も同一の値を持つ単純な入口波形に対して、微気圧波の強さを数値的に評価した。特に、圧縮波形成前半に圧力が急上昇し、後半に上昇速度が緩和される場合とその逆のケースを比較すると、前半に圧力が急上昇するケースの方が格段に高い微気圧波を生ずることが分かった。これは履歴効果によるものと考えられ、列車形状が大きく影響を及ぼすことを示唆するものである。また、さらなる詳細な圧縮波の形成と成長について論じるには、この手法では十分な精度が出ないこともわかってきた。

(小澤方程式の新数値解法の開発) 小澤方程式の数値計算法の困難は-1/2 解微分の特異積分作用素の高精度計算にある。前記の手法では、この部分の近似が十分でないことに起因して精度が出ていないことも確認された。そこで、この特異性に伴う近似精度向上の困難を解消すべく、坂上と中野は Lombert と Mecrier[6]が提案した補助関数を使った数値解法の導出を試みたが、変換後に得られる無限区間の計算に困難を生じることが明らかになった。そこで、特異積分作用素を二重指数型積分公式と関数近似を用いて差分近似したところ、鉄道総研側が満足できる精度と速度で計算が可能になることが判明した。

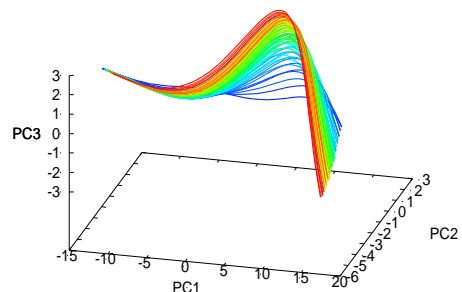
また別の新しい数値解法として、大縄は体積法とラプラス変換に基づく数値スキームを考案し、こちらも良好な数値計算結果を得た。この手法は鉄道総研の従来手法で得られる結果に比べて、圧縮波の不連続面の位置や、応用上重要な量である圧力時間微分の最大値の変動において違いが見られた。そこで、これをさらに改良して、小澤方程式の持つ移流項と特異積分による散逸項の二つの非線型項を分離して二つの非線型方程式とし、移流項部分は特性曲線にそった解析解を使い、散逸項部分は圧縮波を区分的に一次関数近似することによって得られる解析解を利用して、交互に空間積分を行うことで数値解を構成した。これを Splitting 法と呼ぶことにし、鉄道総研の従来手法と遜色ない精度で数値結果が得られることを見いだした。この数値解法の性質を理解し、その精度改善を図るため微気圧波の初期形状を用いて数値計算を多数実施した結果、現在鉄道総研が利用している数値コードとほぼ同精度の数値計算結果が得られるまで改善がすすみ、今後の実際の利用が見込めることが確認できた。その解析結果例が右図である。現場の要請に応えられ、数学的に性質のよい数値解析が可能になったことが課題 A における大きな成果となった。



(小澤方程式に対する新しい数理解析手法の探索) 数値解析の開発と同時進行で非線形波動の方程式を解の持つ複素空間内での pole の挙動として捉える手法を用いて、この方程式が扱えないか検討を加えたが、非整数階微分の扱いの部分に困難があることが確認され、この方向での検討はこれ以上行わないこととした。また、小澤方程式への応用を念頭にして流体方程式の解のフィードバック制御の理論的研究を実施し、Kelvin-Helmholtz 不安定にともなう渦層の不安定化や複雑境界に閉じ込められた定常点渦の安定性制御に関する線形フィードバック制御の数理解析の研究を行った。これは小澤方程式における圧縮波切り立ちを制御するパラメータ決定などの問題へ適用することを目指すものとして、継続的に研究を続ける予定である。

【課題 B トンネル圧縮波の計測データの予測式による簡易予測手法の提案】

(トンネル微気圧波のデータ解析) 中野はトンネル微気圧波の実データに主成分分析を用いたデータ解析を行い、主成分の特徴から微気圧波の特性の理解を可能にした。坂上はトンネル開口部の窓の開閉を 0 と 1 の二進列と見なすことでその離散的構造を力学系として距離を導入する方法を提案し、これらをあわせてこの微気圧波データと開口部データとの相関を検討した。その結果、鉄道総研提供の微気圧波データの解析について、中野が行った主成分分析(右図)における主要 3 成分(寄与率 98%)とトンネル緩衝口の窓の開閉パターンを二進表示したビット列の同値類の間に強い相関が見いだされ、このビット列に順序を入れることでその解析が進むことが明らかになった。本成果は鉄道総研の内部でも利用される解析結果となった。



(Reservoir Computing による波形伝播エミュレータの作成と予測) 再帰型ニューラルネットワーク (Recurrent Neural Network, RNN) の一つである Reservoir Computing(RC)を用いて、トンネル微気圧波データセットに対して時間波形の空間伝播エミュレータの作成を機械学習的手法により行った。学習済みエミュレータによる波形の再現性は非常に良く、時間波形の空間発展予測性能も非常に高いことが判明した。そのため、RC によるエミュレータはトンネル微気圧波の

伝播特性をデータだけから捉えられることが示唆された。

(圧縮波形成のUQ研究)課題Aの手法との組み合わせによるUQ(不確実性定量化)の研究に取り組んだ。特に、generalized Polynomial Chaosと上記Splitting法を用いた小澤方程式の数値解析の研究に着手し、初期波形の不確実性が圧縮波形成時にどう影響するかを丹念に調べた。この研究は本基盤研究による支援によって生まれた新しい切り口として、現在も継続中であり、まだ確定的な成果はでていないが、本研究計画終了後も継続する予定である。

【課題C 鉄道総研との連携による成果のフィードバックと、連携の強化に伴う新課題発掘】

(共同研究契約の締結) 鉄道総研が持つトンネル微気圧波の実地観測結果の開示を受けるため、平成28年6月に研究参加者が所属する大学および鉄道総研の間に共同研究契約を締結した。それに基づいて鉄道総研側からの微気圧波の実データの提供を受け、これを元にトンネル開口部の形状の微気圧波への影響を調べることができた。共同研究契約はその後毎年更新され、本研究経費の支援終了後の令和2年度においても継続して共同研究契約を締結している。

(定期的な連携ミーティングの開催) 鉄道総研とは研究成果や関連情報を交換する研究打ち合わせを定期的実施した。一回のミーティングは半日から1日におよび、必要に応じて鉄道総研内の鉄道模型実験室(国立市)や風洞実験室(米原市)などにも訪問した。これらの定期的かつ緊密な打ち合わせを通じて、微気圧波以外の高速鉄道に関わるトンネルでの科学的諸問題(トンネル火災など)について検討を加えることができ、本連携数理の研究を推進する核として補助期間全体を通して有用に機能した。

(鉄道総研との共催) 平成29年7月に、鉄道総研とドイツDBが主催する国際研究集会Expert Exchange on Micro-Pressure Wavesを開催。坂上は招待講演・パネルディスカッションを行い、研究成果の発表だけでなく、トンネル微気圧波に関する日独の企業研究者との有意義な情報交換が可能となった。こうした活動を受けて共同研究契約は来年度も継続となった。

(新しい課題の発掘) 本研究機関を通じて行われた連携探索の結果二つの問題が今後取り組むべき課題であることがわかった。一つは高速鉄道先端部の形状最適化問題である。これについては、鉄道先端形状の近似パラメータについて提案を行い、それに基づいて現在研究が進行中である。もう一つは枝抗のあるトンネル内部での微気圧波の解析である。この問題に取り組むには、Howeの音響理論を基本にして複雑形状をした境界をもつヘルムホルツ方程式とラプラス方程式を解く必要があるが、解析解を求めることは一般に困難である。そこで、本問題はWiener-Hopf法によりRiemann-Hilbert問題として数学的に定式化して、これを解く数値計算手法の研究へ進む必要がある。最終年度に坂上は英国ケンブリッジ大学ニュートン研究所に長期滞在した機会に、この手法に関する現在の先端研究動向を知る機会に恵まれたため、この解析法の数学的基礎のサーベイを行い、数学的な定式化を完成させることができた。これらの研究は最終年度に開始したばかりあるため、本研究経費の支援終了後も共同研究課題として、鉄道総研との間で共同研究契約を締結して、来年度以後も継続することになっている。

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 2件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Protas Bartosz, Sakajo Takashi	4. 巻 852
2. 論文標題 Harnessing the Kelvin-Helmholtz instability: feedback stabilization of an inviscid vortex sheet	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 146 ~ 177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm.2018.523	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 該当する

1. 著者名 Sakajo Takashi, Yokoyama Tomoo	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Tree representations of streamline topologies of structurally stable 2D incompressible flows	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IMA Journal of Applied Mathematics	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/imamat/hxy005	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 Nelson Rhodri, Protas Bartosz, Sakajo Takashi	4. 巻 827
2. 論文標題 Linear feedback stabilization of point vortex equilibria near a Kasper Wing	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 J. Fluid Mech.	6. 最初と最後の頁 121--154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/jfm2017.484	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 該当する

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 4件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 Takashi Sakajo
2. 発表標題 One-dimensional Hydrodynamic model for turbulence with cascade and singular solutions
3. 学会等名 The Univ of Manchester
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sakajo Takashi
2. 発表標題 Mathematical research on Micro-Pressure Waves
3. 学会等名 Expert Exchange on Micro-Pressure Waves (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上貴之
2. 発表標題 渦の科学研究とその 魅力・働き~なぜ科学者は渦に魅せられるのか~
3. 学会等名 鳴門海峡の渦潮世界自然遺産推進合同交流研修会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 坂上貴之
2. 発表標題 Kasper翼まわりの定常点渦の安定化を実現する線型フィードバック制御
3. 学会等名 日本数学会年会2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takashi Sakajo
2. 発表標題 Mathematical models of cascading phenomena in turbulence
3. 学会等名 Workshop on Scientific Computing Across Scales: Extreme Events and Criticality in Fluid Mechanics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sakajo
2. 発表標題 Classification of Streamline Topologies for Hamiltonian vector fields and its applications to Topological Flow Data Analysis
3. 学会等名 SIAM Conference on Applied Algebraic Geometry (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takashi Sakajo
2. 発表標題 Linear feedback stabilization of point vortex equilibria near a Kasper Wing
3. 学会等名 International Congress of Industrial and Applied Mathematics (ICIAM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂上貴之
2. 発表標題 非粘性渦層におけるKelvin-Helmholtz不安定のフィードバック制御
3. 学会等名 第65回理論応用力学講演会・第22回土木学会応用力学シンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>本経費で開催した国際研究集会</p> <p>(1) Japan-Taiwan Joint workshop on Numerical Analysis, 台北(台湾), 2016年11月25日~2016年11月28日</p> <p>(2) Control and Estimation Problems in Fluid Mechanics and Fields, ICIAM2019 Mini-symposium, バレンシア(スペイン), 2019年7月17日</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
研究分担者	大縄 将史 (Ohnawa Masashi) (10443243)	東京海洋大学・学術研究院・准教授 (12614)	
研究分担者	岡本 久 (Okamoto Hisashi) (40143359)	学習院大学・理学部・教授 (32606)	2017年3月27日削除
連携研究者	中野 直人 (Nakano Naoto) (30612642)	京都大学・国際高等教育院・特定講師 (14301)	