

令和 6 年 6 月 24 日現在

機関番号：13601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20406

研究課題名（和文）回転円錐上の乱流遷移における遠心力の効果

研究課題名（英文）Effect of the centrifugal force on laminar-turbulent transition on a rotating cone

研究代表者

加藤 賢太郎 (Kato, Kentaro)

信州大学・学術研究院工学系・助教

研究者番号：40967163

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：軸流中で回転する円錐上の境界層における乱流遷移を、流れの可視化実験と、遠心力を表す尺度であるゲルトラー数を用いた評価によって調べた。可視化実験では流れ構造が円錐の母線に沿って発達し、崩壊して遷移することが観察された。軸流中での遷移位置は局所の壁速度と半径に基づくレイノルズ数によって決定され、これは粘性速度で無次元化された軸流速度に依存する。しかし静止流体中での遷移レイノルズ数は一意に決定されないことがわかった。また、層流相似解を仮定したゲルトラー数は、幅広い軸流と半頂角における遷移を支配していることがわかった。これは、回転円錐上の境界層遷移において遠心効果が重要な役割を果たしていることを示している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、流体機械、輸送機械上に発達する三次元的な境界層流れの単純化されたモデルとして回転する円錐上の乱流遷移を可視化実験により観察し、これまで知られていなかった乱流遷移へ影響を与える因子を明らかにした。また、これまでの遷移研究で一般的に用いられてきたレイノルズ数に加えて、遠心力に注目したゲルトラー数で流れを評価することの有用性を示した。

研究成果の概要（英文）：Laminar-turbulent transition in the boundary layer on a rotating cone in axial flow is investigated through flow visualization and evaluation of Goertler-number scaling, which is known as a measure representing the centrifugal force. The visualizations show that flow structures develop along the generating line, collapse and lead to transition. In the axial flow, the transition location is determined by Reynolds number based on the local wall velocity and radius that depends on the axial velocity normalized by the rotational rate and kinematic viscosity. In still fluid, however, transition Reynolds number on the cone rotating is not determined uniquely. On the other hand, Goertler number dominates transition for a wide range of axial flow and half-cone angle, assuming the laminar similarity solution. This indicates that the centrifugal effects play an important role in the boundary-layer transition on rotating cones.

研究分野：流体力学

キーワード：三次元境界層 乱流遷移 流れの不安定性 光学計測 流れの可視化 渦

1. 研究開始当初の背景

滑らかな流れ(層流)から乱れた流れ(乱流)への遷移は、壁面摩擦、熱伝達、流れの剥離などの流れの性質を著しく変えるため、流体機械、輸送機械の効率に直結する問題として研究されてきた。これらの製品は高度な研究開発を経て複雑な曲面を有し、その表面上には三次元的な境界層流れが発達する。しかし、このような曲面上に発達する境界層流れの一般的な乱流遷移条件、詳細な遷移過程は分かっておらず、関連製品に関する最適設計の障害になっている。

三次元境界層の特性を理解するための基礎研究の一つとして、静止流体中や一様流中で軸周りに回転する円錐上に発達する流れの研究がある。Fig.1 に示すように、円錐形状は半頂角 ψ のみで決まり、極限的には円柱($\psi = 0^\circ$)や円盤($\psi = 90^\circ$)を含む。円錐が回転すると壁面上の流体は加速されるが壁面から離れると速度が低下し、壁面近傍に境界層と呼ばれる剪断流れが発達する。軸付近では流体の速度は小さく層流であるが、半径方向外側では速度が増加し、ある半径でまず特定の時空間スケールを持つ乱れに対し不安定になり(1次不安定性)、さらに半径が大きくなると、様々な乱れに対し不安定になり、乱流へと遷移する。これまで、この乱流遷移の指標には、レイノルズ数 $Re_r = r^* \Omega^* / \nu^*$ が一般的に用いられてきており(ここで、 r^* は局所の半径、 Ω^* は回転角速度、 ν^* は動粘度である)、頂角 ψ が比較的大きい扁平な円錐に関しては、よく一致した遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ が様々な実験から報告されている他、近年の実験、計算から得られた定量的なデータを用いて、詳細な乱流遷移過程が議論されてきた[1]。一方で、頂角 ψ が小さい細長い円錐に関しては、遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ の報告も多くなく、また限られた実験データに関しても、大きなばらつきがあった。このばらつきにより、曲率半径が小さい曲面の境界層に関しては、そもそもどこで乱流遷移が起きるかがわからない、また遷移位置を実験において求める場合、なぜ遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ が定まらないのか分からず、三次元境界層の遷移予測、現象解明にむけた課題となっていた。

近年、静止流体中で回転する ψ が小さい円錐上の遷移レイノルズ数のばらつきに関しては、局所の流体要素(Fig.1 中の赤線)に働く遠心力の効果を表すゲルトラー数

$$G = \frac{r^* \Omega^* \delta^*}{\nu^*} \sqrt{\frac{\delta^*}{r^*}}$$

を用いることが提案され、1次不安定性による渦の成長や遷移点がゲルトラー数で決まることが示されている[2](ここで、 δ^* は境界層厚さ)。しかしながら、これが軸流中における回転円錐上の遷移にも有効な指標なのかはわかっていない。

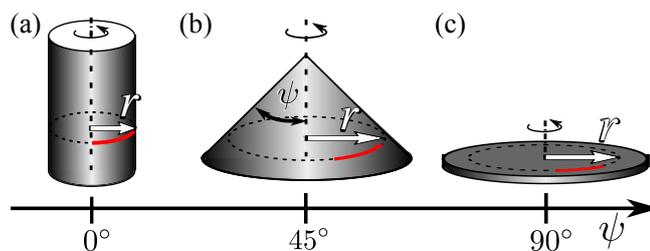


Fig.1 Cone geometry determined by the half-apex angle ψ and fluid element attached on the surface (red)

2. 研究の目的

本研究では、比較的单純な曲面として円錐体の曲面を選択し、静止流体中・軸方向流れ中で回転する円錐上の境界層遷移における遷移点を求める。特に報告が少ない細長い円錐上について回転数、軸方向速度、流れの領域広さを変えて可視化実験を行い、遷移を特徴づける1次不安定性の流れ構造を明らかにする。また、レイノルズ数 $Re_{r,t}$ を用いて遷移点を明らかにすると共に、実験によって得られた遷移レイノルズ数のばらつきを評価する。加えて、軸流中における回転円錐上の遷移ゲルトラー数を求め、ゲルトラー数の乱流遷移指標の有効性を確認する。

3. 研究の方法

半頂角 $\psi = 7.5^\circ$ の円錐をFig. 2に示すように静水中で回転させながら曳航させることで、回転円錐に対して相対的な軸方向速度 U_∞ を与え、流れの剪断方向に配向するパール顔料を用いて円錐周囲の流れを可視化した。可視化実験は、円錐の回転角速度および、軸方向速度を変化させて行い、1次不安定性の流れ構造の発達、および崩壊による乱流遷移点を観察し、レイノルズ数 $Re_{r,t}$ で遷移点を評価した。また、遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ のばらつきが大きい軸流がない場合(静

止流体中) に関しては, 同じ回転円錐装置を用いて Fig. 3 に示す小型水槽で同様の実験を行った. 両水槽を用いた実験において, レーザーシートを用いて円錐の母線上を照明し, 半径方向に設置したカメラで撮像を行った.

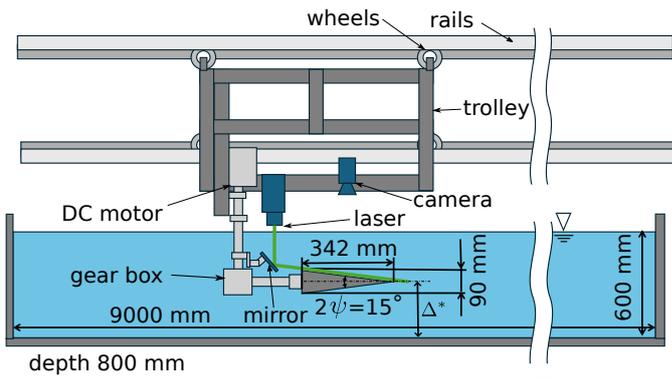


Fig.2 Side view of experimental setup with the rotating cone in the towing tank.

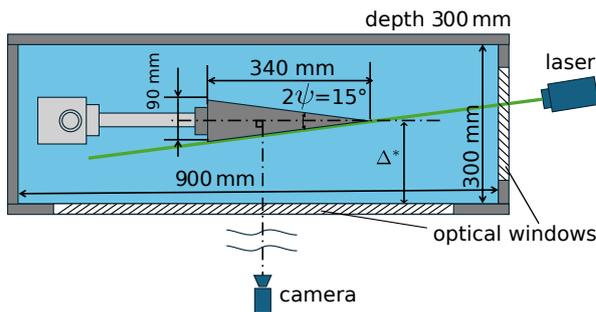


Fig.3 Top view of the experimental setup with the rotating cone in still water.

遷移ゲルトラー数の評価に関しては, これまでの計測により報告されている遷移レイノルズ数から遷移位置 r_t^* を求め, 遷移前の層流における相似解が存在することを仮定して求めた境界層厚さ δ^* を用いて遷移ゲルトラー数を算出し, 遷移指標としての有効性を評価した.

4. 研究成果

Fig.4 に, (a)静止流体中, および(b)曳航速度 $U_\infty^*=0.07$ m/s における可視化画像を示す. 写真上部の頂点付近では流れは層流であり, フレーク上のパール顔料が表面に沿うように配向するため, 流れのパターンは確認できない. 写真の黄色線で示す点付近で周期的な流れのパターンが観察され始め, これは黄色線で示される方向に渦軸をもつ1次不安定性の流れ構造を示していると考えられる. (a)にみられる構造は, [2]で示唆された渦構造に類似するものであり, (b)でみられる構造は, [3]で報告されている渦構造に類似したものと考えられる. また, さらに下方では, 赤線で示す点で, 明確な周期的パターンが観察できなくなる. 本研究では, この点を遷移点 r_t^* とし, この地点におけるレイノルズ数を遷移レイノルズ数 $Re_{r,t} = r_t^{*2}\Omega^*/\nu^*$ とした.

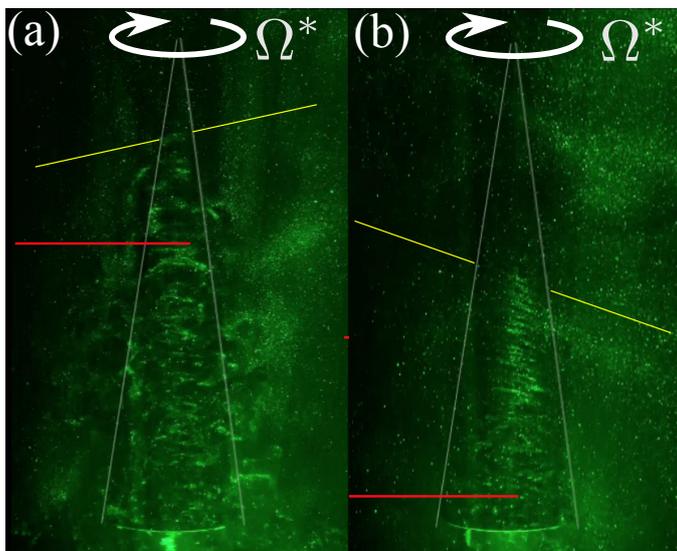


Fig.4 Examples of flake flow visualization in (a) still fluid and (b) with a towing velocity $U_\infty^*=0.07$ m/s for a cone rotating at 60 rpm. The red line corresponds to the estimated transition location.

Fig.3 に円錐の回転角速度と曳航速度 U_∞^* を変えた可視化実験から求めた遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ を示す. 曳航速度 U_∞^* が大きい場合, Fig.3 に示すように, 遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ は回転角速度 Ω^* と動粘度 ν^* で無次元化された軸方向速度 $U_g = U_\infty^*/\sqrt{\Omega^*\nu^*}$ の関数になり, U_g により $Re_{r,t}$ は一

に決定できる．この結果は，[3]と一致する．一方，曳航速度 U_{∞}^* が小さくなっていくと，遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ は U_g だけの関数ではなくなり， $U_g = 0$ では，回転角速度が大きいほど，遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ が小さくなる．この傾向は，[2]と一致する．

この静止流体中における遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ の回転角速度依存性のさらなる調査として，曳航水槽 (Fig.1) に加えて，小型の水槽 (Fig.2) で同様の可視化実験を行った．得られた遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ は，Fig.6 に示すように，粘性長さスケール $\sqrt{\nu^*/\Omega^* \sin \psi}$ で無次元化した流れ領域の大きさ (Figs. 2, 3 で示す円錐の軸からそれぞれの水槽壁までの距離 Δ^*) $L = \Delta^*/(\sqrt{\nu^*/\Omega^* \sin \psi})$ に強く依存することが明らかになった．

従来，回転円錐上の境界層遷移には，円錐表面の粗度など，境界層内のパラメータによる影響が主に研究されてきたが，本研究では，流れ場全体の大きさが細長い円錐上の乱流遷移に大きく影響していることを示している．この結果は，これまで報告されている遷移レイノルズ数 $Re_{r,t}$ のばらつきや，回転角速度による依存性を説明できる．一方で，なぜ，この効果が扁平な円錐上では遷移位置に影響を与えないのか，またこの効果のメカニズムに関しては，今後の研究課題である．

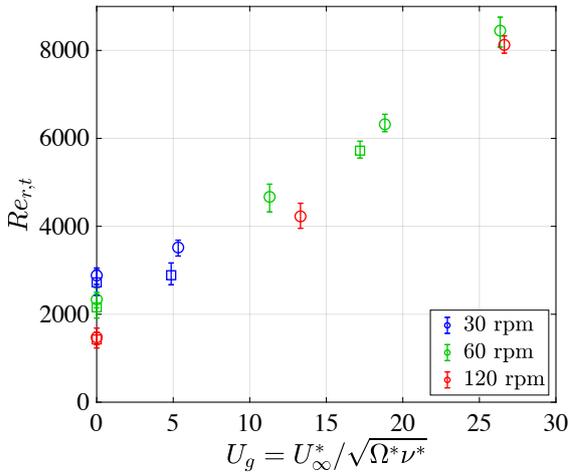


Fig.5 Estimated transition Reynolds number $Re_{r,t}$ as function of the normalized towing velocity U_g . The square and circles show the data obtained by the repeated experiments with different water temperature. The error bars indicate rms of the obtained from 5 video frames.

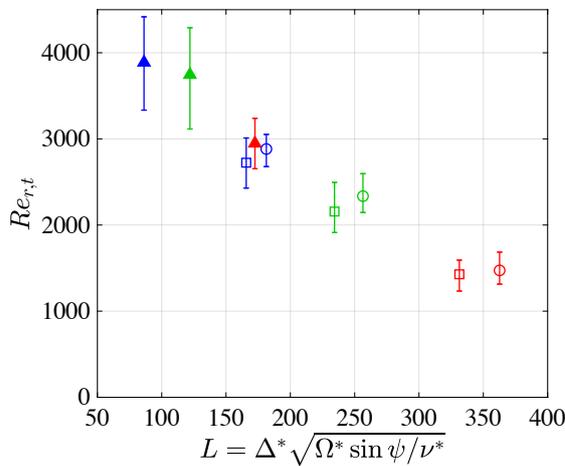


Fig.6 Estimated transition Reynolds number $Re_{r,t}$ on the rotating cone in still fluid as a function of the normalized tank size $L = \Delta^*/(\sqrt{\nu^*/\Omega^* \sin \psi})$. The square and circles show the same data shown in Fig.4. The filled triangles show the data obtained by the experiment using the small tank (Fig.3).

加えて，比較的，遷移レイノルズ数のばらつきが少ない軸流が強い場合における遷移点を，ゲルトラー数 G を用いて評価した．これらの流れは，従来，軸方向のレイノルズ数 $Re_l = l^*U_e^*/\nu^*$ と $S = r^*\Omega^*/U_e^*$ を用いて評価されてきた (ここで， U_e^* は境界層外縁における母線方向速度，および l^* は円錐頂点からの母線方向距離) [3]．Fig.7(a)に，様々な半頂角 ψ における遷移点のデータを Re_l と S を用いて示す．ここで，Criticalは，一次不安定性による渦構造の成長開始が観察された点，またMax. amplificationはその渦による変動が最大値になる点であり，その後，乱流へと遷移する(turbulence onset)．計測方法の違いもある中で，Fig.7(a)は，複数の計測結果において一貫して軸方向のレイノルズ数 Re_l が乱流遷移の各段階で S に強く支配されることを示している．一方，同じデータをゲルトラー数 G と S で評価したものを Fig.7(b,c)に示す．Fig.7(b)は， $\psi = 15^\circ$ においては， S に依らず，ゲルトラー数 G が一定になる点で一次不安定性および乱流遷移が起きていることを示している．これは，一次不安定性および遷移が軸方向速度に影響を受けづらく，ゲルトラー数によって支配されていることを示唆している． $\psi = 30^\circ, 50^\circ$ に関しては，Fig.7(b)

に示すように一次不安定性(critical)のゲルトラー数 G は S に依存するものの、遷移後期(Max. amplification, turbulence onset)に関しては、ゲルトラー数 G が S に依らずほぼ一定となる。これらの結果は、円錐半頂角や幅広い軸流速度の範囲で、遠心力が乱流遷移において重要な働きをしていることを示している[4].

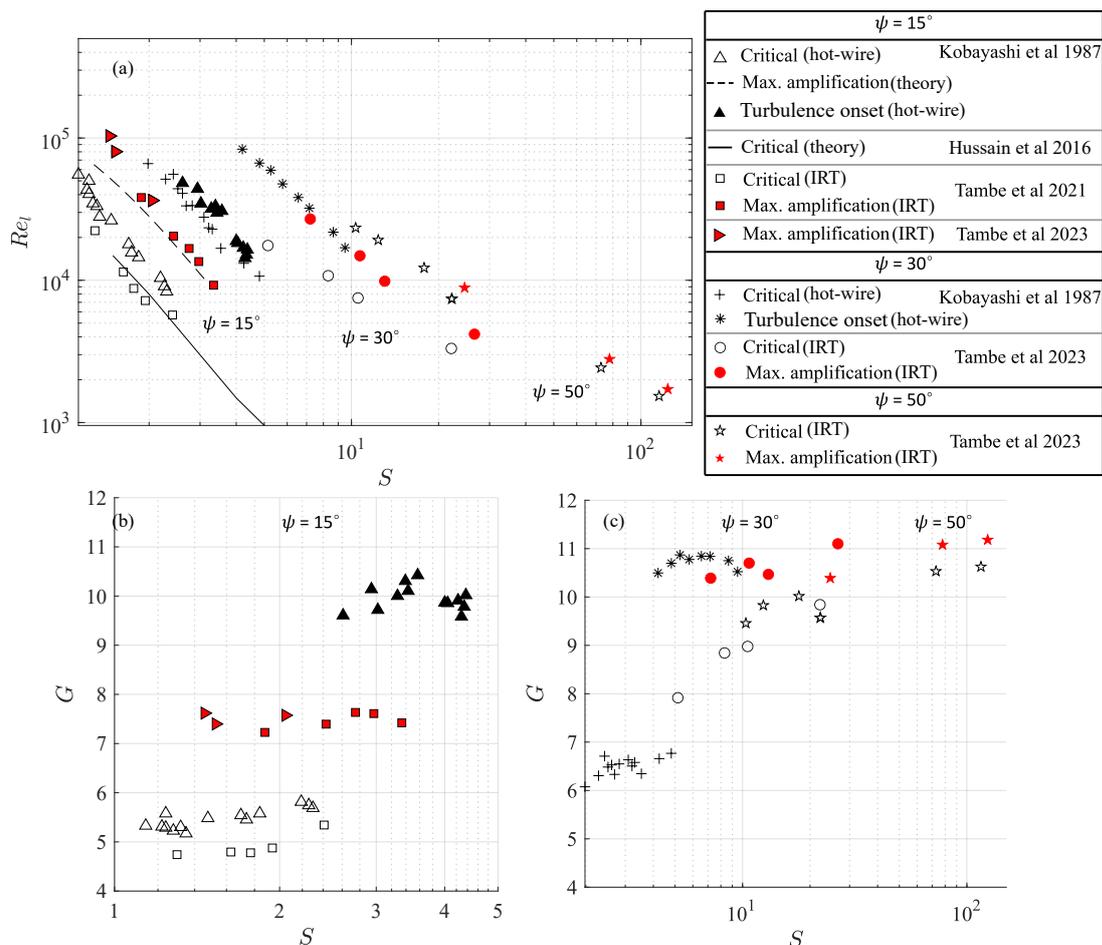


Fig. 7 The boundary-layer transition on rotating cones with a half-apex angle of $\psi = 15^\circ, 30^\circ,$ and 50° in two different parameter spaces: (a) axial Reynolds number and rotational speed ratio ($Re_l - S$), and (b,c) Görtler number and rotational speed ratio ($G - S$).

[1] Alfredsson, P.H., Kato, K. and Lingwood, R.J., (2024) Flows over rotating disks and cones. Annu. Rev. Fluid Mech. vol. 56, 45-68.

[2] Kato, K., Segalini, A., Alfredsson, P.H. & Lingwood, R.J., (2021) Instability and transition in the boundary layer driven by a rotating slender cone. J. Fluid. Mech. vol. 915, R4.

[3] Kobayashi, R., Kohama, Y, Arai, T. and Ukaku, M., (1987), The boundary-layer transition on rotating cones in axial flow with free-stream turbulence, JSME Int. J. vol. 30, 261, 423-429.

[4] Tambe, S., Kato, K. and Hussain, Z., (2024) Görtler number-based scaling of boundary-layer transition on rotating cones in axial inflow. J. Fluid. Mech. vol. 25, R3

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 3件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 KATO Kentaro, LINGWOOD Rebecca J., ALFREDSSON P. Henrik	4. 巻 18
2. 論文標題 Rotating disks and cones a centennial of von Karman 's 1921 paper	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Science and Technology	6. 最初と最後の頁 JFST0003
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/jfst.2023jfst0003	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 該当する

1. 著者名 Alfredsson P. Henrik, Kato Kentaro, Lingwood R.J.	4. 巻 56
2. 論文標題 Flows Over Rotating Disks and Cones	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Annual Review of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 45 ~ 68
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1146/annurev-fluid-121021-043651	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 該当する

1. 著者名 Tambe Sumit, Kato Kentaro, Hussain Zahir	4. 巻 987
2. 論文標題 Görtler-number-based scaling of boundary-layer transition on rotating cones in axial inflow	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Fluid Mechanics	6. 最初と最後の頁 R3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/jfm.2024.379	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 該当する

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 1件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 加藤賢太郎, 山田恭介, 高原宏祐, 松原雅春
2. 発表標題 Flow instability and transition on a rotating slender cone in a confined space
3. 学会等名 第69回「乱流遷移の解明と制御」研究会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 山田 恭介, 高原 宏祐, 加藤 賢太郎, 松原雅春
2. 発表標題 回転円錐上の三次元境界層における遷移と不安定性の可視化実験による観察
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2024年合同講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 高原 宏祐, 山田 恭介, 加藤 賢太郎, 松原 雅春
2. 発表標題 回転円錐上の三次元境界層における遷移の可視化実験
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2024年合同講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Kentaro Kato, P. Henrik Alfredsson, Rebecca J. Lingwood
2. 発表標題 Scalings for eccentric Taylor-Couette-Poiseuille flow
3. 学会等名 International Couette-Taylor workshop (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kentaro Kato, P. Henrik Alfredsson, R. J. Lingwood
2. 発表標題 Scaling for onset of instability and transition in rotating-cone boundary layers
3. 学会等名 第67回「乱流遷移の解明と制御」研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 加藤 賢太郎
2. 発表標題 回転円錐周りの流れ
3. 学会等名 日本機械学会北陸信越支部 2023年合同講演会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 K. Kato, P. H. Alfredsson, P. Schlatter, R. J. Lingwood
2. 発表標題 テイラー・クエット流れの不安定性への軸方向流れと偏心の影響
3. 学会等名 日本流体力学会年会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 K. Kato, P. H. Alfredsson, P. Schlatter, R. J. Lingwood
2. 発表標題 Instabilities and scalings for eccentric Taylor-Couette-Poiseuille flow
3. 学会等名 第 66 回「乱流遷移の解明と制御」研究会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 X. Song, T. Okuda, M. Iwanaga, S. Yamauchi, K. Kato, M. Matsubara
2. 発表標題 Measurement of Lagrangian acceleration in two-dimensional channel flow using dynamic-hue particle tracking velocimetry
3. 学会等名 19th International Conference on Flow Dynamics (国際学会)
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			
スウェーデン	KTH Royal Institute of Technology			
インド	Indian Institute of Science			
英国	University of Leicester			