

令和 6 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01540

研究課題名（和文）流れ中で回転する円柱周辺の運動量伝搬に関する研究

研究課題名（英文）Research on momentum transfer around a rotating cylinder in a flow

研究代表者

林 昌奎（RHEEM, CHANGKYU）

東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：70272515

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：ドリルパイプのような流れ中において回転する円筒型線状構造物の挙動評価を行った。形状の異なる複数の剛体円柱を用いた水槽実験により、揚力・抗力の法線方向流体力、及び摩擦力の接線方向流体力、並びに円柱周辺の流れ場の詳細を調査し、（1）回転する円柱周りの流動及び流体力における円柱表面の粗度影響、（2）流れ中で回転する円柱周辺の流れ場、並びに周辺流体への運動量の伝搬、（3）流れ中で回転する円柱に働く流体力の特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、流れ中で回転する円柱に働く流体力、並びに回転する円柱が周りの流体場に与える影響について調査し、その特性を明らかにした。得られた主な成果として、円柱から流体場への運動量の伝搬は有限の範囲に限られ、その範囲は円柱の回転速度及び周りの流速に依存せず一定である。また、回転によって生ずる揚力も有限である。このような現象は、学術的にこれまで殆ど知られておらず未知に近いものであった。今後このような現象のエネルギーや流体制御分野への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The behavior of rotating cylindrical linear structures, such as drill pipes, in flowing water has been evaluated. Through water tank experiments using multiple rigid cylinders with different shapes, The details of the normal direction fluid force (lift and drag forces), the tangential direction fluid force (frictional force), and the flow field around the cylinders have been investigated, and clarified the followings.

(1) The influence of the roughness of the cylinder surface on the flow and fluid force around the rotating cylinder, (2) The flow field around the cylinder rotating in the flow and momentum propagation to the surrounding fluid, (3) The characteristics of fluid force acting on a rotating cylinder in a flow.

研究分野：海洋環境工学

キーワード：回転円柱 流体力 運動量伝搬

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

流れ中で回転する円柱には、マグヌス効果と言われる流れに対して垂直方向の力(揚力成分)が働き、完全流体中での揚力は流れの流速、回転速度、円柱直径の二乗に比例する。実流体中において回転する円柱に働く流体力については、150年以上前から研究が行われているが、レイノルズ数、円柱の周速と流れの流速との比、円柱のアスペクト比、端部形状、表面粗度、流れの乱流強度など、結果におけるパラメータの影響が強く、未だに不明なところが多い。海洋科学掘削、並びに海底資源開発の初期段階掘削作業において、ライザーを用いないライザーレス掘削が用いられ、掘削中にドリルパイプが切断される事故も発生している。また、ドリルパイプの働く流体力の変化や振動は、掘削ビットの働きにも影響を及ぼす。現実には、巨大地震の発生メカニズムの理解のために行われた南海トラフ地震発生帯掘削など、流れの速い海域でのライザーレス掘削が実施されているが、回転がドリルパイプの挙動に及ぼす影響に対する理解は殆ど進んでいない。

2. 研究の目的

ドリルパイプのような流れ中において回転する円筒型線状構造物の挙動評価のために、流れ中で回転する円柱に働く法線方向(揚力と抗力)及び接線方向(摩擦力)の流体力、円柱周辺の流れ場、並びに円柱から周辺流体への運動量の伝搬について調査し、そのメカニズムを明らかにする。

3. 研究の方法

形状の異なる複数の剛体円柱を用いた水槽実験により、揚力・抗力の法線方向流体力、及び摩擦力の接線方向流体力、並びに円柱周辺の流れ場の詳細を調査した。水槽実験は、剛体円柱を水中に入れ、流れの流速と円柱の回転速度を変化させたときの円柱に働く法線方向の流体力を検力計で計測し、軸に取り付けたトルク計により接線方向流体力を計測した。円柱周辺の流れ場の変化は、電磁流速計と熱線流速計による直接計測方法と粒子画像流速測定法(Particle Image Velocimetry, PIV)を用いた間接計測方法を併用して調査した。水槽実験は、主に東京大学生産技術研究所千葉実験所の幅10m、水深5mの海洋工学水槽と、幅1.8m、最大水深1.2mの風路付造波回流水槽にて実施し、剛体円柱は円柱のアスペクト比及び端部影響などの3次元性を観るため、長さや直径の異なる数種類の円柱を用いた。

4. 研究成果

本研究の成果を以下にまとめる。

(1) 回転する円柱周りの流動及び流体力における円柱表面の粗度影響について

- ・ 静止流体中において円柱のみが回転している場合、円柱表面粗度の影響は強くみられ、円柱表面の粒度が粗いほど流速の勾配が強くなり、レイノルズ応力は全体的に増加する。
- ・ 流れ中では、円柱の回転によって減速する側と増速する側共に円柱表面粗度の影響は微小であり、流れ場の変化はあまり見られない。

- ・円柱表面粗度が回転円柱の法線方向の流体力（揚力と抗力）に与える影響はあまり見られない。
- ・円柱の回転によって減速する側と増速する側共に、円柱の回転速度が上昇するにつれて、流速は一定の速度分布に収束していく。また、それに伴い回転円柱の流体力の変動は弱まり、線形的な変化となる。
- ・円柱の回転によって減速する側では、円柱模型の回転によってレイノルズ応力が作用する範囲が拡大していき、円柱表面からの距離と円柱半径との比である無次元距離 R' が 3.5 から 4.5 付近で範囲の拡大が弱まる。
- ・円柱の回転によって増速する側では、無次元距離 R' が 0.5 を境に、円柱表面側の流れの乱れが強い層、その外側の流れが整っている層に分かれている。PIV 実験においては、今までのポイント計測で得られた流速から推定していた回転する円柱周りの流速分布の全体状が確認できた。

(2) 流れ中で回転する円柱周辺の流れ場、並びに周辺流体への運動量の伝搬について

- ・流れ中における回転円柱周りの流れ場は、円柱の回転によって流れが減速する側及び増速する側共に代表流速の違いによる流速分布の顕著な差は見られず、回転比ごとに評価することができる。
- ・円柱の回転によって流れが減速する側では、円柱の回転の影響によってレイノルズ応力が増大し、見かけ上の粘性が大きくなる。それによって流体が流れにくくなり、流速分布は全体的に減少する。
- ・円柱の回転によって流れが増速する側では、減速側からの流れが加わり、全体的に流速が増大する。また、円柱表面近傍では円柱の回転の影響による流れの乱れが強い層が形成される。その層の内側には減速側からの流れが流入せず、一様流と静止流体中における回転円柱周りの流速分布の線形的な重ね合わせによる流速分布と一致する。

(3) 流れ中で回転する円柱に働く流体力について

- ・法線方向流体力（揚力と抗力の合力）は、流れの流速に対する円柱表面速度の比である周速比がある値になるまでは増加するが、ある値を超えるとほぼ一定の値となる。
- ・揚力の極限值(最大値)と抗力の極限值はほぼ同じ値となるが、揚力が極限值に達する周速比は抗力が極限值に達する周速比より小さい。揚抗比は周速比 15 付近で最大(2.3 程度)となり、周速比が大きくなると減少する。
- ・回転が流場に与える影響が十分に発達する高周速比の回転による流場が卓越する領域では、流れのない回転のみの流場特性に近づくが、流れの影響を受けて加速側と減速側で流れの流速を正と負とする非対称な流速分布となり、揚力は作用し続ける。
- ・回転による流場が卓越する領域において、流れによる流速成分は回転による流速成分に吸収されその運動量を失う。失われた流れの運動量は回転円柱に働く抗力に相当する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Suzuki Masahiro, Ikoma Tomoki, Aida Yasuhiro, Rheem Chang-Kyu	4. 巻 38
2. 論文標題 流れ中における回転円柱周りの流れ場の性状に関する基礎的研究	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers	6. 最初と最後の頁 109 ~ 116
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2534/jjasnaoe.38.109	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 Chen Wei, Bao Yanxu, Chai Wei, Li Jie, Rheem Chang-Kyu, Lin Yongshui, Li Xiaobin	4. 巻 35
2. 論文標題 Investigation of the combined effect of control rods and forced rotation on a cylinder	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physics of Fluids	6. 最初と最後の頁 103605
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0167449	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 Bao Yanxu, Lin Yongshui, Chen Wei, Rheem Chang-Kyu, Li Xiaobin	4. 巻 262
2. 論文標題 Numerical investigation of wake and flow-induced vibrations of a rotating cylinder in flow	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Ocean Engineering	6. 最初と最後の頁 112207 ~ 112207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.oceaneng.2022.112207	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 Wei Chen, Siying Wang, Xiaotao Shi, Chang-Kyu Rheem, Yongshui Lin, Erpeng Liu	4. 巻 14
2. 論文標題 Numerical simulation of surface roughness effects on the vortex-induced vibration of a circular cylinder at a subcritical Reynolds number	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Int. J. Naval Arch. and Ocean Eng.	6. 最初と最後の頁 100430
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijnaoe.2021.100430	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13件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 M. Suzuki, T. Ikoma, C.K. Rheem, Y. Aida
2. 発表標題 Experimental Investigation of Roughness Effect on Flow Field Around Cylinder in Steady Flow
3. 学会等名 OMAE2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. Suzuki, T. Ikoma, Y. Aida, C.K. Rheem
2. 発表標題 Experimental Study on the End Effect and the Effect Due to the Difference in End Shape of the Fluid Force Acting on a Rotating Cylinder in a Uniform Flow
3. 学会等名 OMAE2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 林昌奎
2. 発表標題 流れ中における円柱の回転による運動量伝播特性について
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第37号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 井上朝哉, 金子達哉, 鈴木博善, 林昌奎, 和田良太, 勝井辰博
2. 発表標題 ドリルパイプダイナミクスに関する研究の取り組み
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第37号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 流れ中における回転円柱周りの流速分布とレイノルズ応力に関する実験的研究
3. 学会等名 2023年度日本建築学会大会学術講演梗概集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 林昌奎
2. 発表標題 流れ中における円柱の回転による運動量伝播特性に関する実験的研究
3. 学会等名 第30回海洋工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福永佳晏, 鈴木雅洋, 居駒知樹, 譚雷, 林昌奎
2. 発表標題 一様流中の回転円柱に作用する流体力に流速分布が与える影響に関する実験的研究
3. 学会等名 第30回海洋工学シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 福永佳晏, 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 回転円柱に作用する流体力に与える流速分布の影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本沿岸域学会研究討論会概要集、第36号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 流れ中における円柱の回転が流速分布に与える影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第36号
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 流れ中における回転円柱周りの流量変化に関する実験的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第35号
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福永佳晏, 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 PIV による回転円柱まわりの流れ場の可視化とレイノルズ 応力に関する研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第35号
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 回転円柱周りの流れ場に与える円柱表面粗度の影響に関する実験的研究
3. 学会等名 第29回海洋工学シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鈴木雅洋, 居駒知樹, 相田康洋, 林昌奎
2. 発表標題 一様流中で回転する円柱に働く流体力の振動成分と固有振動数の影響に関する実験的研究
3. 学会等名 日本船舶海洋工学会講演会論文集、第32号
4. 発表年 2021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		
中国	Wuhan University of Technology		