

論文の内容の要旨

氏名：鈴木 雅 洋

博士の専攻分野の名称：博士（工学）

論文題名：一様流れにおける回転円柱周りの流速場の性状に関する研究

海洋底掘削の掘削方式の一つであるライザーレス掘削では、掘削オペレーション時のドリルパイプの回転によって大きな流体力がドリルパイプに作用する。主要な流体力としてマグナス効果によって発生する揚力が挙げられ、流れ方向の力である抗力の数倍もの大きさで、流れに対して直交方向に作用する。この揚力によるドリルパイプの大変形は、先端のドリルビットの挙動を複雑にし、ドリルビットの回転速度が急激な変化によるドリルビットの異常摩耗や破損等が発生させる。その結果、ドリルビットの取り換えが必要となり掘削効率の低下に繋がる。また、ドリルパイプの大変形によって上部の掘削ツールにドリルパイプが接触し、最悪の場合ドリルパイプの破断に至る。

マグナス効果による揚力の発生について、物理的なメカニズムはある程度明らかとされている。しかしながら、円柱の回転数増加に対して流体力がどのような特性を示すのか、または揚力はどの程度まで増大するのか、未だに明確に示されていない。理由の一つとして、回転円柱周りの流れ場に関する知見の蓄積が不十分であることが挙げられる。これまでに、実験や数値解析によって回転円柱の流体力に関する研究は多く行われてきた。しかし、流れ場の特性について調査した研究事例は限られており、何故そのような流体力の傾向を示すのか説明されている研究は極めて少ない。また、ライザーレス掘削のオペレーション状態を想定すると、主流に対する円柱表面周速の比である回転比が 6.0 付近までの周辺の流れ場に関する知見が必要となるが、それに関する過去の研究ではいずれも回転比が 1.0 から 2.0 付近まで対象にしているものがほとんどである。

ライザーレス掘削による安全かつ効率的な海洋底掘削を実現する上で、回転円柱に働く流体力特性を正しく推定することは重要である。そのためには、円柱周囲の流れ場で起きている現象を正確に把握し、その特性を明らかにする必要がある。本研究では、回転円柱周りの流れ場で起きている現象の把握という部分に重点を置き、以下の二つを研究目的とした。

- 回転円柱に働く流体力特性について、流速場と関連付けた考察を行い明らかにすること。
- 円柱の回転による周囲の流速場に与える影響やその特性について考察し、回転円柱周りの流速場の形成過程を明らかにすること。

本実験目的を達成するために、水槽実験を実施した。実験には、実際のドリルパイプに近い径の円柱模型を使用し、レイノルズ数や回転比もライザーレス掘削オペレーション時に想定される範囲で設定し計測を実施した。

本論文は全 6 章で構成される。以下に各章の概要を記す。

第 1 章 序論

第 1 章では、まず海洋底掘削で用いられるライザー掘削とライザーレス掘削における流体力学的な問題について整理し、設計を行う上での現状の課題点を述べた。特に、ライザーレス掘削時にドリルパイプへ作用するマグナス効果による揚力について不明瞭な点が多く、ライザーレス掘削のオペレーションに支障をきたしている。そこで、回転円柱に働く流体力の実験や数値解析並びに回転円柱周りの流れ場の既往研究についてレビューし、現状明らかとされている内容について取りまとめ、本研究目的を設定した。

第 2 章 回転円柱周りの流れ場の流体力学的問題

第 2 章では、回転円柱周りの流れ場を調査していく上で検討すべきである流体力学的問題の抽出を行った。回転円柱に働く流体力の算定方法として、古くはポテンシャル理論による手法が挙げられる。元々は流れ中に置かれた翼に発生する揚力を説明したものであるが、その過程におけるモデルは流れ中で回転する円柱そのものである。理論上では、流れ中に循環が存在することによって流速差が発生

し、ベルヌーイの定理を適用することによって揚力が求められる。そこで、円柱模型の回転を循環と仮定し、静水中で回転する円柱周りの流速分布と一様流を足し合わせると実際の流れ場にどれほど近づくのか、またはどのような違いがあるのか調査を行う必要がある。

もう一つは回転円柱周りの境界層の発達である。流れ場の数値解析にも繋がるが、数値解析を実施する際に用いられる係数などは、平板上の境界層に関する実験やDNS (Direct Numerical Simulation) の結果を基に決定されている。静水中の回転円柱周りの流れ場を局所的に見れば、無限長さの平板上を流れる条件と同等と捉えることが出来る。その場合、円柱が回転する限り、周囲の流れ場に与える影響範囲は拡大し続ける可能性がある。しかし、実際の流れ場の特性について明確に示されていない。

第3章 静水中における回転円柱周りの流速場の特性に関する水槽実験

第3章では、静水中で円柱が回転している条件の流速場の特性について調査を実施した。単位面積・単位時間あたりの運動量輸送量を示すレイノルズ応力を用いることで、円柱の回転によって流体に伝搬される運動量の評価を行った。

静水中で回転する円柱周りの流速は時間経過によらず、定常的な傾向を示す。そこで、レイノルズ応力と流速の時間平均を算出し評価を行う。レイノルズ応力は、無次元距離が0.8付近まで増加傾向を示し、その後は減少傾向となり無次元距離が約3.5付近で値はほぼゼロになる。流速分布は、対数スケールに従う直線的な減少傾向を示す。また、円柱表面の周速で無次元化することで一定の流速分布となる。円柱表面が粗くなり、表面摩擦応力が増加することによって、回転円柱周りの流速分布の勾配は大きくなる。これは供給される運動量が増加し、円柱表面が平滑な条件と比べて乱流層への遷移が早いことが要因であると考えられる。

第4章 一様流れにおける回転円柱周りの流速場の特性に関する水槽実験

第4章では、一様流れで円柱が回転している条件の流れ場の特性について調査を実施した。

円柱の回転によって流れが減速する側では、回転比が増加するにつれて流速が大きく減速する。それに伴い、レイノルズ応力は増大する。レイノルズ応力は、ブシネスクの仮定より渦動粘性係数との関係式が示されており、レイノルズ応力が増大することに流れ場の見かけ上の粘性が強くなる。その結果、減速側へ流体が流れにくくなり、流速の減少に繋がる。

円柱の回転によって流れが増速する側では、減速側から輸送されてきた分の流体が加算され、流速の増加に繋がる。ただし、円柱表面近傍において不連続な流速分布を示す。また、その領域の流速分布は、静水中の回転円柱周りの流速と一様流を足し合わせた流速分布と一致する。円柱表面近傍では、円柱の回転影響が支配的な領域が形成されており、減速側から輸送されてきた流れが入り込めない状態であると推定される。

第5章 回転円柱周りの流速場の性状

第5章では、第2章で述べた回転円柱周りの流れ場の流体力学的問題を踏まえつつ、回転円柱周りで起きている現象やその特性について総合的に考察した。

回転円柱周りの境界層の発達について、静水中で回転する円柱周りの流れ場では、レイノルズ応力が卓越し、流速分布は無次元距離の対数スケールに従う直線的な減少傾向を示す。このことから、回転円柱周りの流れ場は乱流境界層と同等の状態であることがいえる。

回転円柱周りの流速場の特性と形成過程について、流体力特性における領域①では、流れに沿うように増速側で円柱が回転しているため、剥離点が円柱後方へ移動する。減速側では、主流の影響が強いため、剥離点の変化は見られない。その結果、後流の幅が狭まる。領域②では、減速側における回転影響が主流に勝り、剥離点が円柱前方に移動するため後流の幅が広がる。また、円柱の回転影響と主流が交わり、減速側で乱流促進される。領域③では、円柱周囲を循環するような流速場を形成し、流速場全体が変化しにくくなる。

回転円柱に働く流体力特性と流速場の関係について、領域①では、円柱の回転に伴い後流の幅が狭まるため、抗力は減少する。領域②では、後流の幅が広がるため抗力は増加傾向に転じる。また、見かけ上の粘性が大きくなることで、増速側と減速側の流速差が大きくなるため揚力の増加が強まる。領域③では、流速場全体が変化しにくくなるため、抗力、揚力共に値の変化が弱まる。

第6章 結論

第6章では、本研究で得られた成果について総括した。

回転円柱に働く流体力特性について、流速場の変化と関連付けて考察し、3つの回転比の領域における流体力特性の変化のメカニズムを明らかにした。領域①では、円柱の回転に伴い後流の幅が狭まるため、抗力は減少する。領域②では、後流の幅が広がるため抗力は増加傾向に転じる。また、見かけ上の粘性が大きくなることで、増速側と減速側の流速差が大きくなるため揚力の増加が強まる。領域③では、流速場全体が変化しにくくなるため、抗力、揚力共に値の変化が弱まるという結論を得た。

回転円柱周りの流速場について、流速とレイノルズ応力の分布を水槽実験にて調査し、回転円柱周りの流速場の特性や形成過程を明らかにした。領域①では、増速側の剥離点が円柱後方へ移動するため、後流の幅が狭まる。領域②では、減速側における回転影響が主流に勝り、剥離点が円柱前方に移動するため後流の幅が広がる。領域③では、円柱周囲を循環するような流速場を形成し、流速場全体が変化しにくくなるという結論を得た。

本研究成果は、回転円柱周りの流速場の数値解析結果との定量的な比較や、回転円柱問題を解くための新たなモデルの提案へ活用することが出来る。また、流れ場の特性を明らかにすることによって、回転円柱に働く流体力の低減方法について検討することも可能となる。