

論文審査の結果の要旨

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

審査委員：（主査） 教授 居 駒 知 樹

（副査） 教授 村 松 旦 典 特任教授 近 藤 典 夫

東京大学教授 林 昌 奎

海洋における石油・天然ガス開発や科学調査などを目的として海底下を掘削することが行われる。この掘削は数百 m から 2000 m を超える超大水深域で行われ、さらに海底下の掘削深度も最大で 3000 m を超える。このような掘削はドリルビットを先端に取り付けたドリルパイプによって実現される。しかしながら、海底表面から掘削を始めるため海中にドリルパイプがむき出しになる。これを避けるための技術としてライザー掘削がある。10 cm 前後しかない直径のドリルパイプを最大でも直径 50 cm 程度のライザーパイプの中を通して海底まで伸ばして掘削が行われる。ライザー掘削では水深分の長さのライザーパイプを用意する必要があり、それを掘削船に搭載するキャパシティとドリルパイプの上げ下げとは別にライザーパイプそのものの上げ下げの作業工程と時間が必要となる。作業工程の簡素化のためにライザーパイプを使用せずにドリルパイプのみを直接海底まで降ろして海底掘削を行うライザーレス掘削も行われる。

海域によって海流などの流れが存在した場合、ライザーパイプやむき出しのドリルパイプのような直径の小さな細長体が海中に存在するときに渦放出によって渦励振が構造体全体に発生することがよく知られている。海中における流れによって静止あるいは振動によって揺れているライザーパイプ周りで、どのような渦が発生し、結果としてどのような荷重によって構造振動現象が発生するのかはすでにメカニズムも含めてほぼ説明されている。また、渦励振を防ぐ方法も実用化されている。しかしながら、海中にむき出しとなったドリルパイプは掘削作業中には回転しており、それによる周辺流場の状態が分からず、流体荷重の発生の状態やそのメカニズムの詳細が解明されていないため、結果として発生するドリルパイプ全体や局所的な構造振動性状を予測することができないのが現状である。そのため、ライザー掘削では発生しない事故が起きており、坑井口でのドリルパイプの衝突による破損や破断によるパイプ全体の脱落なども発生している。

このような背景のもと、本論文の提出者は海中で回転するドリルパイプ周辺の流場の性状やその形成状態を説明できないことに根本的な問題があると指摘している。その上で、現在のライザーパイプのような精度での挙動予測を実現するためには、まず流体力特性を理解することと、なぜそのような特性となるのかを客観的に説明できることが重要だと考えた。そのため、喫緊の課題は回転円柱周りの流場の状態とそこに作用する流体力の特性を関連付けて理解することと、その流場性状を説明することであると指摘した。しかしながら後の第 1 章で指摘するように関連する既往研究は非常に少なくまた実設計に応用できるだけの知見はほぼないということ調べた。その結果、提案者は以下の 2 つを研究目的として本論文を作成している。1) 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ながらその関係を明らかにすること、2) 円柱の回転による周辺の流速場に与える影響やその特性を調査しながら流速場の形成過程を明らかにすること。大きな社会的背景に対して、実際の設計レベルに落とし込むための基礎研究として、流場性状を考察するための物理量を流速に絞り込み、そこから課題解決へ繋げていくという発想と社会的重要性の観点からも十分な問題認識と課題設定が行われていると評価できる。

以上の研究目的を達成するために本論文は以下の 6 つの章によって構成される。以下それぞれの章ごとに評価する。

第 1 章は序章としての内容であり、4 つの節を通して海洋底掘削とその掘削方法の概要をライザー掘削とライザーレス掘削について解説し、それぞれの設計の実情と問題点を示しながらライザーレス掘削技術と挙動予測技術向上の必要性を述べている。あわせて回転円柱が流体中に置かれた場合のマグヌス効果と本論文で対象とするドリルパイプとの関連を述べながら、現象の把握のために必要な物理パラメ

ータと実際に調査できる可能性の高い流速の重要性について解説している。また、回転円柱周りの流場性状や特性を考察する研究や流体力に関する研究のレビューを行いながら、対象とする問題に対していかに関連研究が少なく実情にあった知見が揃っていないかを説明した上で、先述の研究目的を誘導している。本論文の当該分野での位置づけと必要性が明確になっており、十分な現状把握が行われていると評価できる。

第2章は回転円柱周りの流速場に関する流体力学的問題を渦放出のメカニズムと数学モデルの構築の観点で、モデルごとに詳細を説明している。さらに数値計算力学的に扱われる際のモデル化の意味合いとそれぞれの課題について解説している。最後に本論文で最終的に流場特性や渦放出状態を考察するに必要で、根拠となる境界層の取り扱いや考え方について解説している。以上は本論文で扱う円柱周りで渦放出を伴う流場形成の取り扱い方法を広く網羅して解説しながら、これまでの考えの延長だけでは本論文で対象とする回転円柱周りの問題を容易に説明するに至れない根拠となることであり、対象とする問題の整理の観点から重要な解説であると評価できる。

第3章は静水中での水槽実験法の詳細が述べられている。また、実験結果が示され、考察が次のように行われている。水槽実験は後の一様流中で実施する場合と同じ回流水槽で流れを発生させない状態で行われており、実機のスケールに近い直径の剛な円筒模型が使われている。モーターによって回転させながら水平方向に作用する流体荷重を計測できるように設置が工夫されている。模型周辺の流速分布を電磁流速計で空間的に細かく計測している。回転円柱は端部影響が殆ど出ないほどの隙間を水槽底との間につくって設置された。困難な実験であるが実験法は十分に妥当であると評価する。実験結果を評価するために計測された流速データ群からレイノルズ応力を算定し、円柱表面の周速をパラメータとした回転比に対して表している。また、円柱表面からの距離による分布についても示しながら流速場性状について解説している。単なる流速分布ではなく、流場の乱れ成分と時間的な勾配による運動量の伝達状態を示すレイノルズ（摩擦）応力に着目して流場性状を分析しており、その手法は妥当であり詳細な考察をするための情報を抽出していることを高く評価できる。

第4章では第3章の実験装置に一様流を流入させた実験を行ったものであり、実験条件の詳細な解説と共に、流場の様子をより詳細に可視化するためのPIV計測法で用いられる高速度カメラによる計測法との併用についても述べられている。結果としてトレーサの解析から流線を可視化しており、レイノルズ応力の平面的分布特性と流線の視覚的状态との対比により、よりイメージしやすい結果を表示しながら流場性状の回転数増大に伴う分布特性の変化を解説している。主な考察として、レイノルズ応力の増大と見かけ上の粘度が上昇することに伴う乱流状態の促進について説明されている。流場の形成状態とそこに至る理由についての考察であり、本論文で解明しようとしている流場の挙動や性状に至る過程が説明されており、研究目的の一部が明らかになったと判断できる。

第5章では特に第4章での実験結果からの考察に第2章で指摘していた流体力学的取り扱いにおける問題点を考慮しながら、回転円柱周りの流場の状態について、流速場の結果からその性状の詳細と特性について総合的に考察している。流速場の形成は大きく3つのパターンに分類できるとしており、低回転比である領域①では渦剥離位置が流速の増大側で後方（流れの下側）に移動するが減少側ではその移動が起らず後流域の幅が狭まる。領域②では流速の減速側が主流に逆らって流れの上側に移動することで後流幅が広がる。領域③とした高回転比域では円柱周囲を循環する流れが形成されるようになり流場性状が変化しにくくなる。結果として領域①では抗力は低下、領域②では抗力が増加に転じ、その大きさは無回転円柱の抗力よりも遥かに増大することになる。また領域③では後流幅の変化がなくなるため抗力が増大する傾向が弱まっていく。これは揚力についても同様であるとしている。本論文における第一の目的である流場性状と流体力の関係を明確に説明することについて、それが示されている。また、理屈としては矛盾がなく現象の説明が行われている。さらにこれを実験結果から定性的だけでなく定量的な情報で説明していることを高く評価できる。

第6章では特に第4章から第5章の結果と考察から得られた成果が結論としてまとめられている。さらに、本論文における研究成果は数値解析の検証データとしても十分に活用されることが期待されることや回転体を数値計算力学的に扱う場合の境界層の取扱いの新たな検討のための物理データになりうることを述べている。このことは、本論文が当初の背景となったライザーレス掘削技術向上に貢献する基礎研究であるだけでなく、回転を伴う物体の流体力学的取り扱いの発展に対しても大きく寄与できることを示唆している。

以上より、本論文で指摘された海洋開発や海洋科学調査における問題の抽出から課題の設定、そしてそれを明らかにするための手法の選択と結果の作成方法は十分適切であると判断した。また、それらの結果から説明される結論は当初の目的を満足するものであり、本論文が学術的に十分に価値のあるものであると評価する。

このことは、本論文の提出者が自立して研究活動を行い、又はその他の行動な専門業務に従事するために必要な能力及びその基礎となる豊かな学識を有していることを示すものである。

よって本論文は、博士（工学）の学位を授与されるに値するものと認められる。

以 上

令和6年2月15日