

称号及び氏名 博士（工学） 増本 彰

学位授与の日付 平成21年3月31日

論文名 「A Study on Surface Waves Diffracted by Circular Docks」
(円柱型浮体によって回折される波に関する研究)

論文審査委員 主査 奥野 武俊

副査 池田 良穂

副査 馬場 信弘

論文要旨

地球表面の3/4を占める広大な海洋空間は、無限の可能性を秘めた海洋資源の宝庫であり、これを持続可能な形で開発し利用することは人類にとって非常に重要な課題である。国土面積が狭い我が国はこのための海洋開発に期待を寄せるところが大きく、排他的経済水域における深海底資源の調査・開発、大深度海域における掘削・開発などが注目を集めている。このような海洋の開発・利用のためには、船舶のみならず様々な形式の海洋構造物が用いられる。例えば、石油やガスの開発・生産が浅海域で行われる場合には、海底に直接支持される形の固定式・着定式構造物が用いられ、深度が大きくなるにつれて浮遊式プラットフォームも用いられ、その深度は2000mにも達するほどになっている。この際に重要な技術は、海洋構造物の位置を保つための制御技術であり、そのためには波浪や流れに対する構造物の応答を的確に把握し、それを吸収することになる。また、沿岸域における波浪を利用した発電のための特殊な構造物の開発、風力発電のためのローター建設、さらに最近では、メガフロートと呼ばれる大規模な構造物を空港などに利用する試みが研究されてきた。これらの構造物の基本的な形状は円柱もしくは角柱の柱状体であり、それに対する流体力学的な研究が多数行われ、その結果、回折波を生じない、いわゆる“波なし形状”なども明らかにされてきた。

波浪中にある浮遊式構造物が発生する回折波を理論的に求めるために、最も一般的に用いられる手法はグリーン関数を使うもので、任意の3次元形状の構造物を特異点の分布によって表現して数値計算を行うことである。しかしながら、形状を円柱に限れば円柱座標を使うことが可能であり、回折波やそれによって誘起される流体力を解析的に求めることができ、構造物の形状と、それによる波、流体力、漂流力などとの関係を、流体力学的現

象としての視点から一意的に把握することが可能となり、その設計や設置に非常に有用である。しかしながら、そのような解を求めるためには非常に煩雑な理論展開や手順が必要であることもあって、そのための研究はほとんど行われてこなかった。

本論文は、このような背景のもとに行われたもので、浮遊式構造物の基本形状が円柱座標を使える形状であるとの認識に立って、その物体によって回折される重力波および流体力を古典的な線形理論によって解析解を明らかにし、それらの物理的特性と設計パラメータとの関係を求めたものである。論文は6章で構成されており、それぞれの内容を以下に要約する。

第1章では、まず、海洋開発のために用いられる海洋構造物を概観し、対象とする海洋構造物の形状に関しては、まだ十分な研究が行われていないことを指摘し、多数の円柱型浮体によって支持される大規模構造物の波浪外力あるいは円柱型中空構造物の波浪外力および内部波等の問題点を整理した上で、設計上の課題が残されていることを明らかにした。つぎに、本研究で用いる古典的線形理論を海洋構造物によって回折される波動を求める問題に適用する場合の解法についての手順について明らかにし、本研究の背景と目的について述べた。

第2章では、標準的形状である単体の円柱型浮体によって回折される波動問題を非粘性、非圧縮、微小運動の古典的線形理論に基づいて定式化した。入射波を円柱座標で表示すると第一種ベッセル関数（素成波）の級数展開式で表示でき、回折波も各素成波に対する回折波の重ね合わせとした級数展開式で表示できる。まず、流体領域を物体の垂直壁を含む垂直面で分割し、分割された各領域の速度ポテンシャルを変数分離形の固有関数の級数展開式として求めた。ここで、どのような固有関数を選択するかは隣接する領域が攪乱を有しているか否かによって決定できるが、級数展開式の係数は各分割面で各領域の速度ポテンシャルとポテンシャルを結合する式を解いて求められることを示し、この結合式の解法として、最小自乗法、ガラーキン法の他にフーリエ級数理論に基づく決定論的方法があることを明らかにした。これにより、古典的線形理論の適用が全て級数論に基づくという首尾一貫した解析手法が求められた。線形流体力については次数が零と1の回折波で解析解が求められることを示し、非線形流体力についても設計上必要な定常力については古典的線形理論によって圧力の数値積分式を示し、漂流力については運動量理論による解析解を示した。さらに、定常力についても実験結果との比較により古典的線形理論の適用が有効であることを示した。

第3章では、まず、円柱型単独浮体の形状が凸状である場合の解を求めるために、流体領域を浮体の垂直壁を含む垂直面で外部領域、マット部上面領域、底領域の3領域に分離した。ここで注意すべき点は、底部領域での速度ポテンシャルの級数式が外部領域のそれとは異なることである。これは採用する固有関数が増加することによる。また各領域での速度ポテンシャルは、選択採用された固有関数による級数展開式として求め、その係数は各速度ポテンシャルと速度を分割面で結合した式を解いて得られることを示し、ガラーキン法で求めた結果を示した。

つぎに、得られた単独浮体に対する解を用いて、浮体を多数配置した場合の発散波の解析解を求めた。ここでは、要素浮体間の局所波の干渉が無視できると仮定して発散波の干渉

を表す級数式を求め、収束の早い数値計算用の級数式に変換した。また波浪外力と波漂流力の解析式を示し、計算結果は実験結果と良好な一致を示すことを確認して、実験が困難である巨大構造物の計画の手段として、本手法が有効であることを示すとともに、構造物計画のための設計情報を明らかにした。

第4章では、円柱型浮体が中空になっている場合についての解析解を求めた。ここでは、中実の円柱型浮体に対する解に、中空部の流体領域の速度ポテンシャルが追加される形となるが、底領域での速度ポテンシャルの級数式は中実の円柱型浮体の場合のそれとは異なること、および外部領域と内部領域の固有関数は常数を含まないものの底領域の固有関数は常数を含む点が重要であることを指摘した。一方、各領域の流体運動を求めるには、未知数の関係から通常、分割面での速度と速度ポテンシャルの結合を条件式として設定されるが、そのうち速度ポテンシャルの結合条件がエネルギー保存則となっていることを明らかにした。また本問題の特殊例として、厚さ零の円筒型浮体（浮き港湾）を考え、この場合には、分割面での結合条件が非常に重要な問題となり、たとえ厚さが零でも表と裏を考える必要があることを示し、この問題については、接合条件式で厚さを零に漸近させることにより解析解を求めた。結合条件から速度ポテンシャルの級数展開式における係数を求める計算には、垂直方向変数の固有関数を直交・正規化することによってフーリエ級数理論を適用した。これによって得られた複素連立一次方程式が、変形ベッセル関数についての定理によって、係数ベクトルの1要素のみが複素数、他の要素が全て実数となる連立一次方程式に変換できることを示し、解の物理的特性の把握を容易にした。更に、速度ポテンシャルを表す級数展開式の項数による精度について検討を行い、項数は6で実用上十分であることを解析的に示し、計算結果でも確認した。計算結果により波浪外力は中実の円柱型浮体より小さく、波無し形状の中実の円柱型浮体と同様に大型化に適した形状であることがわかった。古典的線形理論による速度ポテンシャルの解析解は外部領域については発散波と局所波、内部領域については定常波と局所波が陽に分離されて記述される物理現象の把握に非常に有効である。内部波高については、定常波と局所波が打ち消しあってあまり大きな波高が期待できないことが判明した。局所波は喫水に反比例することが解析的に示され、喫水を小さくすることで入射波からの波振幅利得を大きくできることが判明した。

第5章では、内部形状が階段状内部壁である場合についての解析解を求めた。前章までと同じように速度ポテンシャルの解析解を示し、波振幅、波漂流力の解析式を示した。更に、内部波振幅の解析式は定常波と局所波で表示されているので、複数項ある局所波について主要項のみを考慮して、内部波振幅の近似解析式を示した。その結果、内部波振幅が浮体の水線面積勾配によって増加するという関係を簡単に示すことが可能となり、本形状を採用すれば、入射波からの波振幅利得を大きくする可能性が大であることが判明した。更に、波漂流力は他の形状に比べて小さいことが判明した。

第6章では、本論文の総括を行い、得られた結論を要約した。本研究は、海洋構造物の基本形状の一つである円柱型物体によって回折される重力波を古典的な線形理論を用いて解析解を求めることを主な目的にして行われたもので、従来は、設計パラメータによる性能検討を数値計算や実験によって行っていたものを解析的に行えるようにしたものである。求められた解析解は設計パラメータと波高、波浪外力、漂流力の関係が解析的に陽に示されているので、多様な海洋構造物の構想設計には有用であることが、種々の海洋構造

物への適用によって示された。

本論文によって明らかにされた解析手法および回折される重力波と設計パラメータの関係についての解析結果は、非常に基本的なものであるだけに、さらなる応用展開が可能であり各種の海洋構造物の設計への利用が可能となり、円柱型浮遊物体によって回折される重力波に関する十分な検討が行えたものと言える。

審査結果の要旨

本論文は、浮遊式海洋構造物の基本形状である円柱型浮体によって回折される波および流体力に関する解析解を古典的な線形理論によって求め、流体力学的な物理現象と浮体形状との関係などを明らかにしたもので、つぎのような成果を得ている。

- (1) 円柱型浮体によって回折される波動現象を線形理論で定式化するために、流体領域を適当に分割し、それぞれの領域で求められた速度ポテンシャルを結合する手法を示し、回折波が素成波の重ね合わせになっていることを級数展開式によって陽に示した。
- (2) 円柱型浮体の外部形状が階段状になっている場合の速度ポテンシャル級数式は分割した領域によって異なる原因を明らかにした上で、この浮体を多数配置した場合の発散波の解析解を示した。
- (3) 円柱型浮体が中空になっている場合の速度ポテンシャルは、中実の円柱型浮体に対するものとはかなり異なること、またその際の外部領域と内部領域の固有関数には常数が含まれないものの、底領域では常数が含まれることを明らかにした。この結果、個別に定式化された内部領域の速度ポテンシャルにはエネルギー保存則を満たすために常数が付与されることを明らかにした。
- (4) 速度ポテンシャルの解析解は、浮体まわりの外部領域では発散波と局所波、内部領域においては定常波と局所波が陽に分離された形になっているので、物理現象の把握が容易であり、内部領域における波高は定常波と局所波が打ち消し合うために、大きな波高にならず静穏域が形成されることを明らかにした。
- (5) 中空の円柱型浮体の波浪外力は、実運用の波長域で中実の浮体より小さくなるので、波無し形状の構造物と同様に多数浮体による大型化に適していることを明らかにした。
- (6) 内部形状が階段状になっている場合には、内部波の振幅が浮体の水線面積勾配によって増加することを明らかにし、条件によっては内部領域における波高を入射波の波高より大きくできる可能性を示した。

以上の成果は、円柱型浮体まわりに生じる流体現象を理論的に解明しており、海洋構造物の効果的な設計・開発に大きく寄与し、この研究分野に対する貢献が大きいこと、さらに、申請者が自立して研究活動を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。

本委員会は、本論文の審査ならびに最終試験の結果から、博士（工学）の学位を授与することを適当と認める。