

論文の内容の要旨

世界の平均気温はすでに産業革命前から 1°C 上昇して来た結果、世界中の国や地域が、記録的な嵐や森林火災、干ばつ、サンゴの白化、熱波、洪水に見舞われてきた。政府は、2018 年の「エネルギー基本計画」において、再生可能エネルギーの主力電源化を目指して取り組む方針を明示している。資源エネルギー庁は、2030 年度の再生可能エネルギー比率を 22~24% と見通しており、この水準を実現し、再生可能エネルギーを主力電源としていくことが表明されている。しかし、2016 年度現在では、我が国の電源構成に占める再生可能エネルギー比率は約 15% となっており、ドイツやイギリスといった諸外国と比べて、低い水準になっている。太陽光や風力といった再生可能エネルギーの多くは、発電量が季節や天候に左右されることが多く、需要と供給のバランスが崩れると、大規模な停電などが発生するおそれがある。この中で、再生可能エネルギー比率を 22~24% にするためにどうすればいいのか、太陽光、風力、地熱、水力、バイオマス等、買取価格が決まっているものだけでなく、波力、潮流、潮汐等、あらゆる可能性を拓いてゆくことが急務になっていると言える。本論文では、波エネルギーから電力を得る波力発電の実用化に寄与することを目的として行った研究について記した。

Falnes 他の発見であるポイント・アブソーバ効果（アンテナ効果）は、波の波長に比べて十分小さい装置の場合、装置幅以上の波エネルギーを取得できるというものである。ポイント・アブソーバでは理論的には、波を受ける幅とは無関係に、波長/ 2π 相当の波エネルギーが取得できることになる。これを導き出した Falnes の共振の概念が多くの波力発電方法の基本原理になっていることと、それにもかかわらず、共振を実現する制御方法（リアクティブ制御）がいまだ理論の段階にしかないことを確認した。次に Salter に触発されて筆者が理論化した吸収造波理論が、波力発電の方法としても適用できていることを示した。この二つの概念、Falnes の共振と Salter の吸収とが、どのような関係にあるかを明らかにするとともに、波力発電に新しい制御方法を提供することを目指して研究を行うこととした。

波力発電で実際に使用されることの多い、前後運動と上下運動の二種類の運動に関して、共振と吸収とを検討し、比較した。その結果、運動の種類にかかわらず、速度ポテンシャル理論から導かれる吸収という概念と、強制振動（ばねマス・ダンパー）理論から導かれる共振という概念とが、同一のものであることが証明された。さらに制御システムを検討し、入射波形に比例した速度で運動を行うと、入射波形から運動物体の位置の位相を $\pi/2$ 遅らせることができ、さらに反射波と透過波が等しくなるように振幅を決めれば、最適な波エネルギーの捕捉が可能になることがわかった。入射波と運動物体との位相の関係は、Falnes のいうリアクティブ制御（複素電力でいうリアクティブ・パワー＝無効電力の制御）であり、平均値がゼロとなる二つのリアクティブな力、慣性力と復元力を相殺させることに他ならない。ここで提案される方法では、振幅を決める係数に近似値を使用している、この係数は反射と透過の割合を決める係数であるが、波エネルギーが波高の二乗に比例するため、近似誤差が与える影響は小さいことも判明した。

各種形状（三角断面浮体、円柱浮体、箱型浮体）の上下浮体模型を用いて水槽実験を実施し、制御方法がいずれの場合にも有効であることを確認した。茨城県大洗港の防波堤の外側 100m の位置に、一辺がほぼ 3 m の箱型上下浮体を持った波力発電機を設置して行った実証試験について考察した。その結果、Falnes が理論解を示したリアクティブ制御を実海域の実証試験で実現できた。波周期 4 秒～13 秒の広い周期範囲で、電氣的共振を起こすことに成功し、大きな発電が得られた。ただし、コストを含めた各種の課題があり、これらを克服して、本格的な実用化に繋げていくことが今後の課題である。

論文審査の結果の要旨

1. 博士学位請求論文

吸収と共振に基づく波力発電の研究

2. 論文審査の結果の要旨

(当該分野での位置づけ, 論文構成, 独自性及び成果, 課題, 評価等)

半世紀近い波力発電の歴史の中で、三人の先駆者、益田善雄、Salter および Falnes の業績があるものの、世界で唯一波力発電の商業化に成功した益田の業績のあと、多くの努力にもかかわらず、波力発電に関する研究は、停滞していた。

そのため、本研究では、Falnes 他の発見であるポイント・アブソーバ効果（アンテナ効果）を理論的に考察し、実用的に実現する方法を提案し、かつ、それを現地試験で実証したものである。

1 章では、研究の背景について記述し、Falnes の共振と Salter の吸収とが、どのような関係にあるかを明らかにしている。

2 章では、制御システムを検討し、入射波形に比例した速度で運動を行うと、入射波形から運動物体の位置の位相を $\pi/2$ 遅らせることができ、さらに反射波と透過波が等しくなるように振幅を決めれば、最適な波エネルギーの捕捉が可能になり、最適な捕捉方法は、入射波エネルギーの $1/4$ を反射し、 $1/4$ を透過し、 $1/2$ を捕捉することであることを示した。

3 章では、各種形状（三角断面浮体、円柱浮体、箱型浮体）の上下浮体模型を用いて水槽実験を実施し、第 2 章で得られた制御方法について検証している。世界でも例のない箱型浮体であったが、入射波の入射角を正面と斜め 45 度の二方向からあてて試験したところ、入射角に依存しない良好なエネルギー捕捉結果を得ている。これは、大型の円筒形は設備の揃った大型工場でしか製作できないという制約があるためであり、経済性を考慮すると製作の容易な箱型浮体が一番の選択肢になりうるため、今後の実用化を見据えている。

4 章では茨城県大洗港の防波堤の外側 100m の位置に、一辺がほぼ 3m の箱型上下浮体を持った波力発電機を設置して行った実証試験について考察し、高波浪時の安定性ととも、理論の実証を試みている。台風が多い日本では、荒天時対策が必須であるが、この装置では、浮体内部に設けたバラストタンクの注排水によって、天候に応じて浮上と沈降が選択できる構造が機能することを実証している。試験の結果、発電機トルクに余裕がある場合には、捕捉幅比が 1 を超えており、水槽実験と同等あるいはそれ以上の結果がでていることが実証され、十分実用に足る性能を発揮したことを証明した。

上下浮体の場合、構造的に、背面にも波を造らざるを得ない。つまり入射波の半分を吸収し、50%波高を反射し、50%波高を透過するように制御するしかないが、それにもかかわらず、浮体の幅以上のパワーを吸収できているところが重要であり、本研究ではそれを実現し、その理由が、ポイント・アブソーバ効果により、自分の幅以上のパワーが集まるためであることを証明した。また、箱型形状は鋼板の溶接のみで製作できるため製造が容易であり、今後、波力発電の普及を促進する上でこれはきわめて重要な要素であろう。

以上より、本博士学位請求論文は吸収と共振に基づく波力発電の研究に関して、世界にも通用する貴重な成果を残しており、今後、実用化されていくことが期待され、海岸・港湾工学に対し重要な貢献をしていると認める。さらに、口述試問の試験結果もふまえ、審査員一同は川口隆氏の博士学位請求論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値を有するものと判断した。