

博士論文の要旨

吸収と共振に基づく波力発電の研究

川口 隆

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。

第 1 章では、研究の背景について記述し、さらに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 の業績を見直した。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停滞している日本の現状を振り返る。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。風力エネルギーの大きさは、受風面積当たりで定義されるのに対し、波は波を受ける幅当たりのエネルギーで定義される。風力の場合、受風面積を超えるエネルギーを取得することは不可能であるが、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 $/2\pi$ 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。

第2章では、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。運動物体の背面に水があるか無いかで、前提が大きく異なってしまう。背面で波を造るのはそれだけエネルギーを消費することになるため、できれば背面に壁面を設けることが望ましいが、経済性を考えるとあまり現実的ではない。裏側に壁が無いと、運動の方向が一方だけの場合、入射波を 100% 捕捉させる運動は、浮体背面で入射波と同一の波を造波することになり、捕捉できるエネルギーはゼロになってしまう。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。

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。

第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がいずれの場合にも有効であることを確認した。もともと **Falnes**

の理論は、円柱などの軸対称浮体に対するものである。しかし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、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が得られた。規則波での試験においては、Falnes がリアクティブ制御で予言した発電波形と同一の波形が得られており、周期によって捕捉幅比が 1 を超える結果も得られている。これは浮体の幅以上の、波エネルギーを捕捉できたことの証左である。この捕捉幅比とは、捕捉エネルギーを入射波エネルギー（単位幅あたり波エネルギー×装置幅）で除したものである。もともと入射エネルギーの 1/2 を捕捉しようという狙いであるので、これが 1 を超えるのは、まさにポイント・アブソーバ効果を実証したことになる。

第 4 章は、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たものである。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た。この形状で振幅を決定する係数を数値計算で求めたところ周波数依存性があり、一定値（近似値）を使用すると±30%程度の誤差を持つことがわかったが、波高振幅で 30%の誤差があっても、エネルギー捕捉では、10%以下の影響しか与えないことも示され、性能として十分であると判断された。入射波のピーク周期が、4 秒、9 秒、11 秒、13 秒の 4 種類の波で発電データが得られた。浮体の固有周期が 4 秒程度であるため、長い波になるほど、復元力が支配的になり、それをキャンセルするために発電機のトルクにかかる負担が大きくなっている。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。

最後に第 5 章では、第 1 章から第 4 章までで得られた主要な知見を以下のようにまとめて、本論文の総括とした。

まず、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。装置の幅は、2.5 mであるが、自分の幅以上の大きな波パワーを得る例もあった。

この方法として、著者が、造波装置の制御方法として、理論づけた吸収（無反射）造波制御が、波エネルギー変換にも使用できることが証明された。この方法は、波形センサーが検出した入射波形信号を速度指令にフィードバックすることで、浮体の位相が、入射波に対して $\pi/2$ 遅れるため、共振条件が容易に実現でき、制御係数は、事前に計算可能であるため、装置設置後、すぐに使用可能である。さらに、学習機能を付加することにより、卓越周波数にあわせて最適値を取得することも可能である。この吸収造波制御の吸収の概念と、Falnes の考える共振の概念とは、同一の事象を指すことが証明できた。吸収は、速度ポテンシャル理論から導き出される概念であるが、共振は、強制振動理論から導き出される概念である。

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ある。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。風力発電では、自分の受風面積の約 60%が上限になる（ベッツの法則）ので、これは、波力発電特有の長所と言える。

本来、軸対称浮体が使用されるべきポイント・アブソーバに、箱型浮体を使うという試みに成功した。直径が 2m を超える鋼管は、鋼板を大型プレスで曲げた後に溶接するが、これを製作できる工場は限られている。これに対し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る。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。

沿岸型波力装置は、水深が浅い沿岸域に設置する着底式の波力発電装置である。沿岸域で波がやや小さいなどの不利な点もあるが、装置の設置や海底ケーブルの施工は、比較的容易になる。メンテナンスについても同様で、かつインフラ等が整備された港湾等に設置することで多くのメリットが存在する。

浮体が沈降する仕組みにより、装置に損傷を与えかねない大きな波から受ける外力を避けることに成功した。ただし防波堤外の厳しい外洋に設置することで、コストを含めた各種の課題がある、これらを克服して、本格的な実用化に繋げていく必要がある。