

特 集

自然の流体エネルギーの開発

波力発電の研究状況

The Present State of Wave Power Generator

益 田 善 雄*

Yoshio Masuda

1. はじめに

海の表面に存在する波の力で発電する波力発電の研究は最近の自然エネルギー利用の一つとして、各方面で実施している。

波力発電の研究状況を説明するにあたり、まずその歴史を振り返ってみる。波力発電の研究が始まったのは今から150年位前である。多くの発明があるが、海上実験は今日までに30回以上繰返されて、ようやく、実用化の段階へ近づいてきた。

最初に波力発電の採用に成功したのは、日本の海上保安庁で航路標識ブイの電源である。写-1に示すように、ブイの中央に設けた中央パイプの上に小型の空気タービン発電機を取付けたもので、昭和40年以来現在まで多数のブイで波力を利用している。

このブイでの18年の実用経験にもとづき、大型化して大出力の波力発電を目指した研究が、海明プロジェクトで、海洋科学技術センターで昭和51年以来取組んでいる。

英国でも、同じ頃、エチンバラ大学のソルター氏がダックと呼ばれる新しい波力発電機を提案し、その効率の高い特性は英国における波力研究のブームを呼ぶこととなり、異なった8種類の波力システムを同時に研究する波力発電研究の黄金時代を迎えることになった。

この外、ノルウェーは波力研究が英国につづいて強力であり、多くの成果が見られる。

この5年～7年間における各国政府の波力発電に対する研究費の支出は大体次の額と言われる。

| | |
|-------------------|-----------|
| 日 本 | ……11億円 |
| 英 国 | ……40億円 |
| ノルウェー | ……20億円 |
| 米, 佛, スウェーデン | ……各国2～3億円 |
| 加, アイルランド, フィンランド | ……各1億円 |



写-1 波力発電付, 航路標識ブイ

最近、再生可能エネルギーへの研究熱が低下した影響を受けて、少し研究のスローダウンが見られたが、この新年になって、日本で海明第2期研究が充足し、また新技術開発事業団のテーマとして海岸固定式の波力発電の実験が始まるなど、再び日本のリードで波力研究が盛んになろうとしている。なお、海明の第2期計画もIEA(国際エネルギー局)の共同研究テーマとして、第1期と同じように国際共同研究として、英・米・加・アイルランドなどの協力を得て実施する予定である。

2. 海明実験よりの教訓

海洋科学技術センターで波力発電船「海明」の建造に着手したのは昭和51年である。

長さ80m、巾12m、高さ5mの船型ブイの中に50m²の広さを持つ空気室が10ヶあり、海明は波のくる方向に向けて係留される。このように、波のくる方向に向ける方式を英国ではアテニューエーターと呼んでいる。

各空気室の上には弁箱がつき、波による空気室内の波面の上下は往復する空気流を起こすが、これは4枚の

* 海洋科学技術センター 研究主幹

〒237 横須賀市夏島2-15



写2 海明海上実験状況

弁の作用により、同一方向の空気流に変えられ、直径1.2mの衝動タービンを回転し発電機（100kw容量）を回転し発電した。

海明の上には日本製7台、英国製1台計8台の発電装置が搭載され、海上テストされた。

実験場所は山形県鶴岡市由良沖水深40mの地点であり、実験は昭和53年7月1日より、昭和55年7月末までの2年間であった。

以下、成果の概要につきのべる。

2.1 安全係留の実証

波高10mを越す日本海の大波を経験したが、その時の係留力は100ton程度であった。これは予想の約1/3の値であり、安全係留が実証された。

2.2 発電実績

無故障運転が行われた。発電出力は船首と船尾が一番高く、中央はその半分、他は1/4と低い値であった。最もよく発電した船尾の9号機で、波高6mで最大出力300kw、平均出力50kwであった。

年間発電量が20万kWh程度であり、予想よりかなり低い発電量で性能の向上が必要と結論された。

2.3 空気弁箱の比較

4枚弁方式と、2枚弁方式とを比較し、4枚弁方式が約2倍と効率がよい事を確認した。しかし、弁は年間10%位、故障が起り、無弁タービンの研究が必要と結論された。なお小型ながら、無弁式のウェールズタービンのテストも成功裏に行われた。

2.4 陸上送電の成功

1台の波力発電機（2号機）の陸上送電を冬期3ヶ月間行って成功した。

2.5 実海域実験と水槽実験との相似則

海波は不規則波であるが、これをスペクトル分析し、一方、水槽で得た、各周波数毎の利用効率と、タービン・発電機の効率を用いて計算した予想発電出力に対

し、実測した発電出力は等しいか、1.5倍位で実海域実験と、水槽実験との相似則を証明することが出来た。

3. 波エネルギーの特性

海の波は海上を吹く風エネルギーにより起こされる。波は風浪とうねりとは大別されるが、うねりは、風によって起こされた波が遠く伝播して来るものである。

海明実験で2ケ年間波の観測を続けた。特に、ウェーブライダーと呼ばれるブイ式波高計など4種類の波高計を用いて多くの波データを得た。1年を通じ一番多くある波は波高1m、周期6.5秒で比較的低い波である。大荒の波は波高4~6m、周期8~10秒であり、最大波高は10mを越す値であった。

波エネルギーは日本海の由良沖水深40mの地点で年平均13~11kw/mであり、冬期の平均では30kw/mであった。

波力を発電に利用する場合に問題となるのは、波の変動性である。波運動は往復する運動であり、その周期は4~14秒である。次に波の大きさが1分から2分位の周期で変動する問題がある。これは波のグループ性にもとづくものであり、広い中の波力を合わせれば打消し合い一定化されるが、一ケの波力発電ではこれが平滑化は一つの問題である。

この外、数日から1週間を周期とする気象変動、また冬、夏などの季節変動がある。

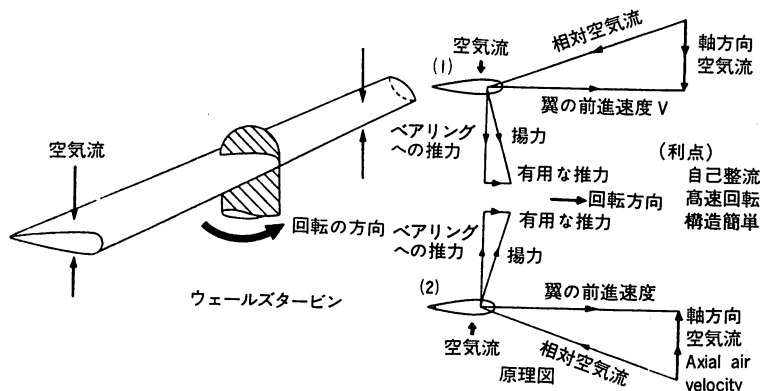
基本的に言って、変動性が少ないのは、うねりの波であり、外洋に面する海では、うねりの波力が、全体の波力の40%を占めるところもある。

いま、日本の沿岸の海岸線長を6,000kmとし、その1/3を波力発電に利用したとすると、10kw/mとみると2,000万kwの波力となる。これは年平均であり、冬期の30kw/mとみると、6,000万kwとかなりのエネルギー資源となり得る。

一方、日本沿岸でなく、本州東方海域の西太平洋上を将来のエネルギー資源とみると、沿岸の5~10倍も大きなエネルギー密度であり、広大な西太平洋は将来のエネルギー資源として魅力が大である。

4. 海明第2期計画

海明第1期実験は世界で最初の大型波力発電機の実験として、無事2年にわたる実験を終了できたのは喜ばしいことであった。しかし、波力発電の発電単価は350円/kWhと予想外に高く、これを1/10以下に低減させるには、再度の研究努力を要すると痛感された。



対称翼をもったウェルズタービンに往復する空気流が作用する場合、揚力の前進方向の成分が同じ方向であるため、空気流の方向にかかわらず常に同一方向に回転できる。本タービンは第1期海明実験の際、直径60cmの4翼タービンにより小規模実験を行ったが、その結果、①自己起動で高速回転に入る、②60%近くの利用率が得られる、との有望なデータが得られた。また基礎研究の結果も良好である。

図-1 ウェルズタービンの原理

海明を由良沖より撤回回航した。昭和55年7月以来3ケ年間基礎研究をつづけたが、海明の第2期計画は昭和58年度より再開されることになり、喜んでいる。出力向上に対する研究は当初、日本海の長い波に対して効率よく発電するために、船長を80mから120mにのばす事が検討されたが、費用が大きく、中止された。

次に、空気出力を向上させるために、底板をつけ、波を下からでなく、前からと横から取入れる底板付の船形が研究された。水槽テストの結果、良好な効率を得られたが、係留力が急増するので採用は中止となった。

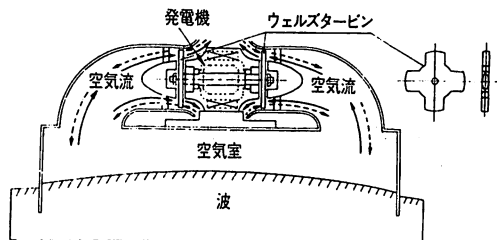
第2期計画では、船体は海明の船体そのままを使い、主に発電装置について海上実験を行う事となった。

無論、新しい船体についての研究は水槽で続けて行く予定である。

新しい発電装置として考えているのは、タンデム無弁式タービンの採用である。これは英国のクインズ大学の発明になるもので、原理はダリウス風車と同じで、対称翼に作用する揚力の前方向の力で回転する。このタービンは英国で発明されたが、海上実験を行わないまま眠っていたものを日本側で注目し、実用化しようと言うものである。

英国は余りに多くの波力テーマを同時に研究したため、多くのアイデアが海上テスト出来ずに眠ることになっている。ウェルズタービンはその1つである。

このウェルズタービンは高速であるが、軸受の設計が軸方向推力が大きいため問題であり、これが対策



ウェルズタービン単一翼ではベアリングへの推力が大きく、その方向も変わりベアリング破損の原因となる。これを打消すため、2つの翼をタンデムに配し、同一軸で結んだタンデム配置が考案された。

図-2 タンデム無弁式タービン

のため、2ケのウェルズタービンをタンデムに配し軸推力を相殺する図-2のタンデム無弁式タービンが採用され、テストされる。

この外、多くのタービンを軸で連結し、発電機を1ケにする等の改良により、発電装置のコストを低下する努力が必要である。

出力・効率向上のチャンピオンとして採用するのは空気流位相制御法である。これはノルウェーのトロンヘム大学のブダ教授が、ポイントアブリーバーと言う、上下するプイに採用した方法を空気タービンに応用するものである。

空気タービンの出口に弁を設け空気流を開閉するので、外部波面が上昇して、内面と大きな差が出来るまで弁を閉じ、大きな圧力差が生じた時に弁を急に開くと、内部波面は急激に上昇し、共鳴状態で大きな利

用効率が得られる。

この方式で、出力の3倍向上が可能と考えられており、海明の出力向上に役立つであろう。

今のところ、海明の海上実験を昭和60年に行う予定で進んでいる。

5. 固定波力発電システム

海明のような浮体形式のものではなく、海岸に固定し波力発電を行う研究が盛んに行われている。

海明第1期試験が進行していた頃、海洋産業研究会は防波堤に空気室を組込んだ、図-3の方式の研究を始めた。これは、海明と同じ空気タービン方式であり、防波堤の前面にテトラポットを置くかわりに、空気室で波エネルギーを消耗させる考え方である。

これと同じ研究が、港湾研究所でも行われており、この方式は実用化できる次の波力方式の一つである。

防波堤に組込む波力発電には異なった方式がある。その一例に、北海道の増毛町でテストされた、受圧板式の波力発電であり、波の衝撃的波力を受圧板に受けて油圧ポンプを駆動し、油圧タービンを回転し発電させる。実験は現在故障で中止状況にある。この研究は、日立造船KKと室蘭工大により行われている。

海洋科学技術センターでも、この海岸固定の波力発電装置には早くから注目しており、岩場に空気室を固定し、離島などの電力とする「海岸固定式波力発電の研究」を新技術開発事業団にテーマ申請をしていた。

最近、本テーマが採用されることになり、富士電機KKと、三井造船KKが受託企業として担当することになった。

実験を計画している岩場は山形県鶴岡市三瀬海岸で天然の岩の切れ目に巾8m、奥行5mの40m²の空気室を建造する。

西の大波が入ってくる場所であるので、100～50kw

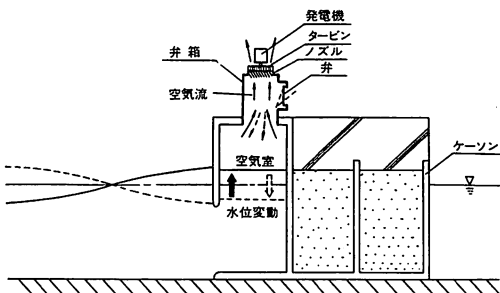


図-3 防波堤に組込んだ空気室と空気タービン発電装置

の一定電圧の発電を行う予定である。

空気室の建造は昭和58年6月頃、海上試験は58年の冬に予定している。

以上のように、岩場固定式を新技術開発事業団のテーマとして、防波堤組込方式を港湾研究所等の研究として進んでいる。

海岸の地形が適当な海岸や、防波堤の建設が計画されている地点では、これ等、固定式波力発電の実施は非常に有用であろう。

英国でも、この防波堤方式は着実に研究が進んでいる。最近、エネルギー省の波力研究費が年に1.5億円と減少したにもかかわらず、現在、NEL (National Engineering Laboratory) は工業省と会社の資金も得て、4,000kw出力のものを、北アイルランドの太西洋岸に建設する計画であり、成功が待たれる。

6. ターミネーター型波力発電システム

海明をアテニューエーター型と呼ぶが、防波堤のように、波に対し、直角におく浮体型の多くの提案がなされている。これをターミネーターと呼ぶ、このターミネーター船体が波に対して動かなくなるには、その長さが波長の3.5倍以上ある必要があり、ソルターダックなどではその長さが500m以上を考えている。

ターミネーターは波がまともに当たるので、大きな係留力が予測され、また、長い船長にかかる曲げモーメントが大であり、これに耐える船体設計は容易でないと考えられる。

英国において、この種、長大なターミネーターの諸提案が実行されずに眠っているのも、これ等の観点からと思われ、何等かの改善策を必要としよう。

7. ポイントアブゾーバー型波力発電機

長いブイでなく、1ヶ、1ヶは小さいブイであるが、これを離して多数浮ることにより、広い巾の波力を少ないブイ資材により経済的に吸収する考え方でポイントアブゾーバーがノルウェーなどで研究された。

この方式はブイが動くので、ケーブル連結などに研究すべき問題はあるが、改善すれば経済性に秀れた方式と思われる。

8. 後曲げダクトブイ式波力発電機

Backward Bent Duct Buoy (BBDB) は最近発明された新しい波力ブイである。今日まで航路ブイの波力発電に用いられたのは、長いパイプをブイの中央

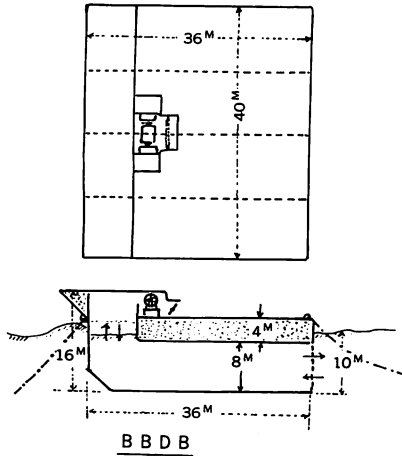


図-4 実海域の後曲げダクトブイの例

に持った中央パイプブイで、深い海面でなければ使えなかった。

浅い吹水のブイでも波力発電が出来るように、中央パイプを後に曲げたのが、このBBDBブイの考案である。

最近、このBBDBは小型のブイだけでなく、新しいターミネーターのブイとして発展が見込まれてきた。

このBBDBを図-4に示す。これは波力発電と波消しを目的としたもので、いま横巾40m、縦巾36m、深さ10mと仮定する。この1/20のモデルテストのデータをもとに、実海域の発電出力と発電単価を推定してみた。

この方式は、空気タービン式の波力発電機で、空気室は後方向に曲げられて、船尾にて海水に開放してある。私は長い年月、波力発電の水槽テストを繰り返して来たが、一番大きな空気圧力を出すのは小型ながら中央パイプブイであった。その後、海明を含む多くのブイのテストでは空気圧力は中央パイプブイの1/2~1/4と低かった。それが、後曲げダクトブイで15年振りに、中央パイプブイよりも高い空気圧力を発生する新しいブイを見ることが出来た。

このブイを日本海の高明を係留した海面に浮べて1年間発電したとして、発電出力量を計算すると、海明第一期実験の発電量の6.5倍の130万kWh/年と予測せられる。

次に最も特異なことは、係留力が非常に小さくなることである。これは、ダクトから後へ向って水がジェット流となって噴き出されるので、その反力で前進の推力が発生し、波による後退力を打消すからである。

経済性を検討してみると、kWh当り30円に近い低い発電単価と波消しの効果が予測される。

この方式は、ターミネーターとして波エネルギーを効率よく吸収すると共に、余り長くせず、ブイは波で上下にポイントアブゾーバーのように運動することにより、波による曲げモーメントを小さくできる。

このように、ターミネーターや、ポイントアブゾーバーの長所を集めた波力システムが、後曲げダクトブイ(BBDB)であり、海明の第二期計画で開発するタンデム無弁式空気タービン発電機を搭載することにより、経済的な波力発電を指向できると考えている。

9. 波力エネルギー利用の構想

波力エネルギーの利用で実用になっているのは、ブイ用電源であり、60 watt級が1,000台位実用されてきた。最近出力も1kw位の大きな波力ブイが10台位使用され好評を得ている。

このブイ用は後曲げダクトブイ(BBDB)の採用により、中央パイプブイに限られていたのを、外の船型やジスクブイにも採用されよう。

58年度、海上保安庁は灯台用の大型波力発電の研究を開始する。

離島用の電源などを目標にして、海岸固定型の波力発電が利用されよう。これは、発電単価で100円/kWh以下になれば実用の見通しが得られよう。

防波堤を別に計画している場合には、防波堤に組込んだ波力発電機が活用され、消波と動力を利用して、各種の地域エネルギーに役立つであろう。

海明を初めとする浮体式の波力発電装置は、波力から経済性ある電力を得ることを目標とし、電力を系統に接続する構想であり、エネルギーの有事に備えて研究をまず完成させておく必要がある。

浮体式の波力発電で最も経済的な方式は、BBDBの新しいターミネーター型ブイで、係留力が小さくなり、かつ発電出力が大きい。これと波消しの効果も併用して、発電だけでなく、海域の総合的な利用も計るべきである。

以上は、もっぱら沿岸へ押寄せる波力の利用である。波力は沿岸だけでなく、沖合にも広く分布している。外洋の波力は予想以上に大きい。日本沿岸では年平均10kw/m程度であるものが、本州東方海域では80~100kw/mと極めて大きくなる。

大きな波力発電船をつくり、沖合に出て大規模な波力発電により、より安価な電力を得て、各種用途に使

用する考え方は将来の波力利用の有力な構想である。

海明第一期実験のときに、旭化成KKと石川島播磨重工KKは、海明にチタン酸バリウム（BaTiO₃）の袋をつるして波運動による海水中のウラン吸着の実験を行った。

実験成績は良好であり、ポンプガラム方式の70%位の海水ウランの吸着速度を得た。

最近、吸着剤の改良が進んで、イオン交換樹脂系の吸着剤はチタン系の10倍の吸着性能をもち、これをネット状に加工できるとのことであるので、ネットにして船につり下げ、波による船体の上下運動でネットを海水と相対運動させ、海水中のウランを吸着する。海明の第二期実験では、これが予備テストは実施する予定であり、一つの波力利用法である。

海洋は広く、海水中の化学成分と、海上くまなく存在する波力を利用して海上工場船を動かす考え方は有力な将来の発展の方向である。

同じ海洋エネルギーである、海水の温度差発電では、発電出力を利用して、アンモニアの合成や、人工石油

の合成も考えているとのことで参考になる。

波力利用の別の提案として、UKのクッカーエール方式の波力発電では、ポンプの力を利用して、海水から真水をつくり、それを砂漠の地方の真水供給に利用するとの考え方で研究を進めていた。

波力ポンプは大きなトルクを発生するので、造水プラントとして、オーストラリアの西岸等、波の高い海域に有望であろう。

海明の海上試験で経験されたこととして、大型ブイが良好な集漁設備となり、附近に魚の大群が集まってくる現象である。

これを有効に利用すれば、海域を総合的に利用し、漁業者との協力を保ちつつ波力発電の実施が可能となる。

これらの多くの利用分野を用うべく、まず海明の第二期計画と、海岸岩場固定の波力発電の実験の成功に努力する所存であり、各位の御指導をお願いするものである。

