

洋上型風力・波力複合発電装置

Off-shore type Wind/Wave Compound Power Converter

渡部富治* 鈴木憲男**

Tomiji WATABE, T-Wave C.V., 5-23-3, Misono, Noboribetsu, 059-0036
Norio SUZUKI, Singapore Coach Washing Machine PTE Co. Ltd. 6-3-5, 6-Jou,
Toyo-oka, Asahikawa, 078-8236

Sea Wind generates the ocean waves which have higher energy density than the wind's one. Since the wind blows stronger on the sea than on the lands, if an off-shore wave power station can set wind power generators on it, too, the station efficiently generates electricity by wind and wave.

For this purpose, a mother ship was developed which is stable on the high sea by an active damping with the incident waves in the heave, surge and pitch directions. It has some merits to keep a good energy extraction as same as using a fixed breakwater despite of the ship with a single slack mooring. There are some Japanese patents pending.

Key Words: Wind, Wave, Energy Converter, Off Shore, Compound Power Station

1. はじめに

地球環境の保全から、エネルギーの脱炭素化が急務であり、自然エネルギー利用が理想的であると指摘されてきた。地球規模では、風力エネルギー利用が順調に普及しつつあり、陸上ばかりでなく海上に装置を建設した洋上風力発電も進行している。これに比較し海洋波力発電は、著しく遅れをとり今日にいたった。

海洋波は、海面上を吹く風により発生する。風エネルギーを海水中に蓄積したものが波であり、波エネルギーは、パワー密度が風より大きく、かつ変動性が緩和されている。したがって、風エネルギーに劣らぬ実用性の高い自然エネルギーといえる。しかし、沿岸で防波堤利用の波力発電方式は、防波堤建設費が大きく、発電単価低減が容易でないことが指摘されていた。¹⁾

こうした背景から、ここでは防波堤に代えた特殊船体を使用し、これで洋上発電することによる問題解決の方針をとった。この場合、船体の安定性は、入射波を利用したアクティブダンピング（ヒープ、サージおよびピッチングの3方向に適用）により改善することにした。従来の防波堤に比較し、船体の建造費はは

るかに低く出来るし、船体使用のとき懸念される発電効率低下が避けられる。²⁾

こうした船体に風車を搭載すれば、洋上風力発電における建設コスト問題の緩和にもなる。また複合化による恩恵も生まれる。自然エネルギー利用を加速するものと期待できよう。

2. 洋上複合発電の特徴

最大の狙いは、発電単価の効果的な低減である。そのためには、総合コストが出来る限り低く、取得する電力は出来る限り大きくすることに尽きる。

図1は、筆者らが対象にしている洋上風力・波力発電装置の概念図である。振り子式波力発電装置を装備した船体は、波浪中で静止するように考慮されている（後述）。また船体上部には、1台の風力発電装置が取り付けられている。

船体は、海底に固定した1本の係留索にゆるく繋がれている。風および波の方向に対し、常時、船体が正面を向けるようになる。（凧揚げと同様の理）

嵐のときは、静穏海面に避難できる。

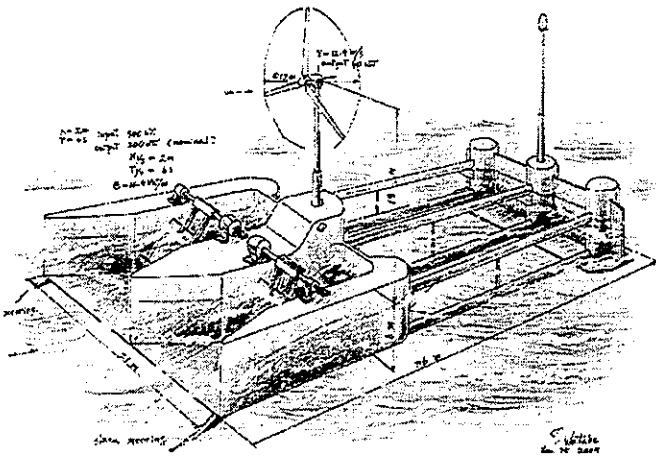


図1 洋上風力・波力複合発電装置の概念図(T-Wave)

風力・波力は相互干渉するものではない。平面的に同一でも垂直方向で海面の上下に住み分けされ、相互のエネルギーは独立している。しかも風と波の進行方向は一致することが多いから、風車と波力発電装置とは、運転中、両者同方向に固定した姿勢で取り付けようであろう。このため両装置は、据付け用の母船を共用するとしても、それによる支障は無い。

洋上波力発電では、波浪中でも船体は揺動しないことが必要である。アクティブダンピングを応用して船体揺動を制止すれば、複数の大型鎖による従来の制止法に比較しはるかに少ない予算ですむ。このように安定した船体を、さらに洋上風力発電にも兼用すれば、一層経済効果を高めることになろう。

洋上複合発電は、上述のように、風力・波力の長所が発揮できるので、発電単価の低減に向け適切な機能を備えた方式である。

3. 母船の安定性が課題

図1により説明する。船体には、風力・波力による外力が働き、これによる船体揺動が発生する。この揺動は、相対的に水室内への入射波パワーを減少させ、結果として発電効率が低下する。これを防止する手段として、図では、入射波に対し、 180° の位相遅れを持つ $1/2$ 波長後方の位置に垂直・水平板を備え、そこへ位相遅れ外力を働かせている。対抗関係の外力同士が一組みになり、常時、両外力が相殺・消滅する。いわゆるアクティブダンピングを導入し、振動原因を除いている。さらに具体的な説明をする。

船体に働く力は、代表的なものとして次がある。

- ①浮力（ヒーピングの発生源）：船体を押し上げる。
- ②水室内の水による重力：船体を押し沈める。浮力を相殺する。
- ③振り子に働く水圧による力（振り子運動の加振源）：振り子を介して船体を水平方向に押し引き

する。同時に振り子軸上にモーメントが生じ、船体ピッチングの加振源になる。

- ⑤水室内の後壁に働く水圧による力：船体に対し、水平方向振動の加振源になる。
- ⑥後方垂直板に働く水圧による力：船体前部に働く水平振動の加振力を相殺する。
- ⑦後方水平板に働く水圧による力：船体前部に働くピッチング加振力を相殺する。
- ⑧風車軸に働く推力：船体に対し転倒モーメントを働かせる。船体後方の3個の浮体は、この転倒モーメントに対し十分な吸収能力がある。

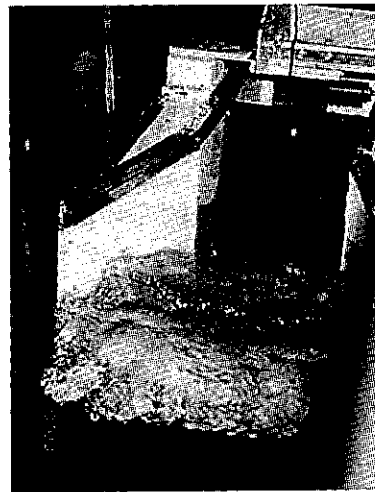


図2 100kW 洋上波力発電装置 1/25 縮尺モデル (T-Wave/室蘭工大)

図2は、実験に用いた 100kW 洋上波力発電装置の 1/25 縮尺モデルである。規則波、2次元水槽による実験から、次が観察できた。固定ケーソン使用時に匹敵する性能である。

- ①アクティブダンピング無しでは、船体揺動が大きいため発電効率が低く、実験対象にならなかった。
- ②アクティブダンピングによる効果は、ヒーブ、サージおよびピッチングの3方向すべてが適正に作用するときのみ期待できる。どれか一つでも不完全なら、発電効率低下が発生する。
- ③実験で測定された一次変換効率の最高値は、 $60\% \sim 69\%$ 。これは、発電装置を固定ケーソンに設置した場合の値に近い。
- ④嵐のときは、波高、周期、波長すべてが大きくなる。アクティブダンピングがミスマッチ状態に陥り船体揺動が発生するようになる。水室内に入射する波のパワーは急減し、発電効率も低下する。(過大入力による事故発生を、未然に防止する作用といえる)
- ⑤船体の係留は、一本のゆるい係留索で足りる。
- ⑥定格時は、船体後方への透過波高が、入射波高

の1/4~1/5程度になる。浮き防波施設としての機能がよい。

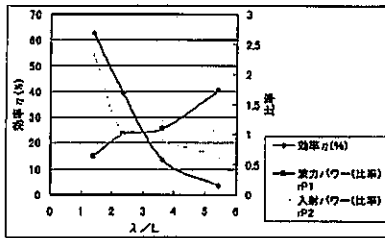


Fig.4-1-4 h=0.6m(改造前), H=0.08m時の効率, 比率

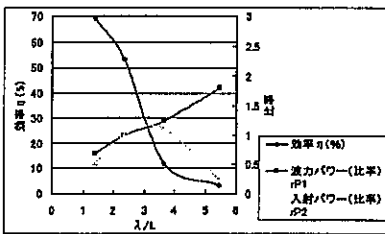


Fig.4-1-5 h=0.6m(改造前), H=0.06m時の効率, 比率

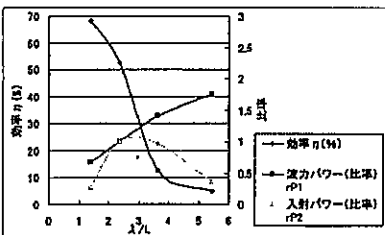


Fig.4-1-6 h=0.6m(改造前), H=0.05m時の効率, 比率

図3 洋上波力発電装置モデルの一次変換効率 (T-Wave/室蘭工大)

図3は、洋上波力発電装置モデルの一次変換効率である。図2のモデルに対して、入射波高を一定として周期T(すなわち波長λ)を変化させた場合である。横軸に無次元波長λ/L、縦軸に一次変換効率ηをとり示してある。正常な波長から嵐の長い波長へ向かい、効率が60%台から10%以下へ急激に低下している。嵐時の入力制限特性を備えていることがわかる。³⁾

4. 新型ピッチ制御装置と高性能小型風車

風力パワーは風速の3乗に比例する。暴風時のパワーは、設計定格パワーの100倍以上になる。これを克服できたのは、プロペラピッチ制御装置の開発により、入力を安全圏内に制限しえたからである。しかし普及が、大型風車に限られていた。

筆者らは、独自のピッチ制御装置につき開発を進めている。プロペラは、航空機翼による揚力を利用し

回転トルクを生み出す。同様にして、ピッチ制御のためのトルクを生み出す手段があるのを発見した。この場合は、揚力が原点になるので、制御動作に必要な“検出信号”・“パワー”が、揚力からえられる。コンピュータもサーボ装置も不要であるし、突風に応答する動特性が備っている。低価格の小型風車用として、大変好都合な装置が誕生する。

こうして小型風車も大型並みのピッチ制御が装備できれば、暴風を意識した過剰な対策風車は不必要である。小型風車に対し、風車本来の特性を生かした構造設計が可能になる。図4に新型ピッチ制御装置を装備した試作風車を示す。群馬県館林市城沼の水質浄化用として、2003年6月以来循環ポンプを駆動中である。図は室蘭の漁港で試運転中のもの。4)、5)

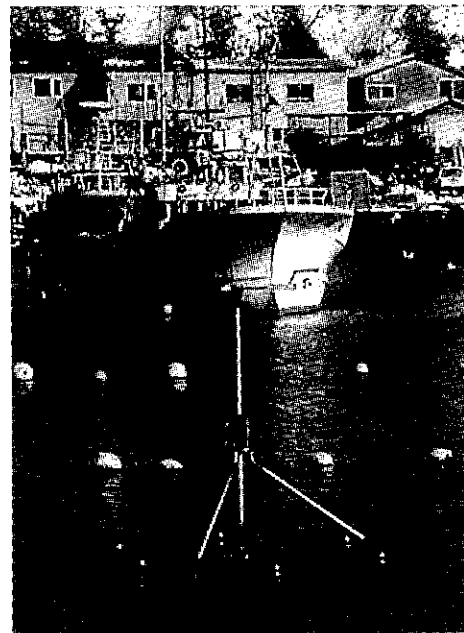


図4 新型ピッチ制御装置を装備した小型風車 (新電機製作所・T-Wave)

図5は、筆者らが計画中の洋上風力発電の実験用モデルである。4個の円筒状浮体④をもつフレームには、中央付近に櫓が立っている。その頂上に風車を取り付き、この動力で発電機③を駆動するもの。浮体④の下部には、水中のダンパープレートがあり、フレーム全体の動揺防止をする。一本の索でゆるく係留される。(アクティブダンピング利用)

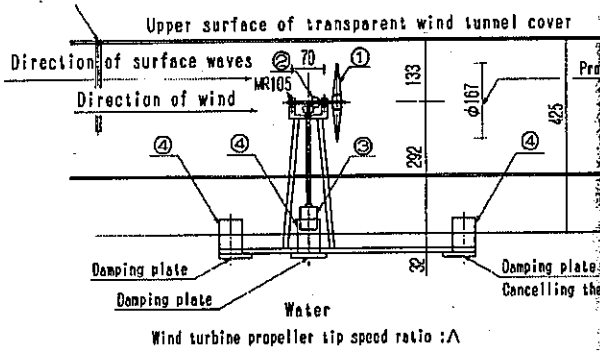


図5 洋上風力発電の実験モデル (小型風車)

5. 振り子式波力発電装置ベンデューラー

海洋波は、有義波の波高・周期からなる規則波に近似することができる。このとき、波力エネルギーの電力変換に対し、電波工学におけるアンテナ理論を適用し、効率的なシステムの構築が可能になる。波の周期的な加振力により振動する物体を、波に共振させ、その振動を定常回転に変換して発電機に伝え、その発電出力として電力をうる。“①共振、②インピーダンスマッチ、③90°位相差”の3条件が整うと、発電効率40%以上が期待できる。⁶⁾

この条件を満足する実存の波力発電方式の一つとして、振り子式がある。水中に平板をもつ振り子が、波と共振して行う振り子運動を利用したもので、室蘭工大を中心に28年あまり研究されてきた。防波堤に設置するとき、防波堤に働く波力を減衰させ、その反射波が消滅するなど、発電に伴う貴重な波及効果がある。しかし、建設費の70%前後が防波堤により占められるので、発電単価の低減には、抜本的な提案が求められていた。

図1は、この背景の下で生まれたものである。防波ケーソンを代用する母船を使用し、発電効率を維持しながら建設費低減を指向した結果の創造物である。振り子式では機械構造の平板が、常時波力にさらされ、耐久性の面から危ぶむ声が聴かれた。しかし、図3の実験結果に見られるように、図1方式は、嵐に向かって入射するエネルギー率が急速に低下するから、防波堤に設置の場合よりはるかに安全で寿命が長くなると思われる。

6. 40kW+200kW 洋上風力・波力複合発電装置の計画

洋上風車は、一基当たりの出力1000kW以上の大型機が関心を集めている。これに対して洋上波力発電は、もっと小容量のところを対象にするのがよいだろうと考え、日本沿岸の波浪：有義波の波高 $H_{1/3}=2\text{m}$ 、

周期 $T_{1/3}=6\text{s}$ 、パワー $E=10.5\text{kW/m}$ の海面を想定して設計したのが、図1の40kW+200kW洋上風力・波力複合発電装置である。入口幅 $B=10\text{m}$ から水室内に波が入射し、振り子幅 $B_p=5\text{m}$ に向かって水室が狭くなり、エネルギー密度を高めている。同形状の水室が2組、振り子も2組設けてある。

波力発電の定格容量は、有義波の波高 $H_{1/3}=2\text{m}$ 、周期 $T_{1/3}=6\text{s}$ と同値の波高 $H=2\text{m}$ 、周期 $T=6\text{s}$ をもつ規則波を対象にして決定する。船内に設けた水室の水深 $h=4\text{m}$ のとき、波高 $H=2\text{m}$ 、周期 $T=6\text{s}$ の規則波による入射パワーは $E=25\text{kW/m}$ である。 $B=10\text{m}$ のとき、一つの水室に入射するパワー $E_0=250\text{kW}$ 、2水室では、 $E_0=500\text{kW}$ 。効率 $\eta=40\%$ を想定すると、定格波力発電出力=200kWになる。⁷⁾

水深 $h=12\text{m}$ の海面に係留するとした場合、周期 $T=6\text{s}$ の波の波長が $\lambda=50.69\text{m}$ である。振り子から後部垂直板までの距離 L が決定され、 $L=\lambda/2=25\text{m}$ に選んである。

水室内の水深 $h=4\text{m}$ では、 $T=6\text{s}$ の波の波長 $\lambda=34.75\text{m}$ なので、振り子から後壁までの距離 d を、 $d=\lambda/5=7\text{m}$ としている。

風車は直径 $D=12\text{m}$ 、風速 $v=12.5\text{m/s}$ のときの出力 $E_t=40\text{kW}$ を予測した。新型ピッチ制御装置により、暴風中も定格運転を継続する。

図1の、風力=40kW、波力=200kW、複合洋上発電の検討例では、船長=36m、船体幅=21m、排水量=800トン、乾燥重量=250トン、である。

7. 実現に向けての考察

今回の装置は、室蘭工大とT-Waveが開発した技術をベースにしているが、まだプロトタイプによる実証が行われていない。また、他の研究機関はほとんど取り上げてこなかったのが実情なので、まず社会から広く認知してもらう努力が必要かとおもう。

実用化に向け核心となるのは、重要機器の開発である。振り子運動を定常高速回転運動に変換する、発電専用の静油圧変速装置の開発は、その代表的課題の一つである。図6は、振り子式波力発電実験機に用いた静油圧変速装置用のロータリベンポンプである。⁸⁾ いろいろな事情があり、結果的に、計画、設計、製作、試験を、室蘭地区の大学と中小企業で取り組み、完成させたものだが、なお向上が指摘されている。⁹⁾

また新型ピッチ制御装置は、小型風車の安全運転を支える鍵になり、この製品化は慎重でなくてはならない。筆者らの経験では、産業界の物作りに関する総合力が、今回の洋上発電装置の開発に対し、強く求められているように感じる。

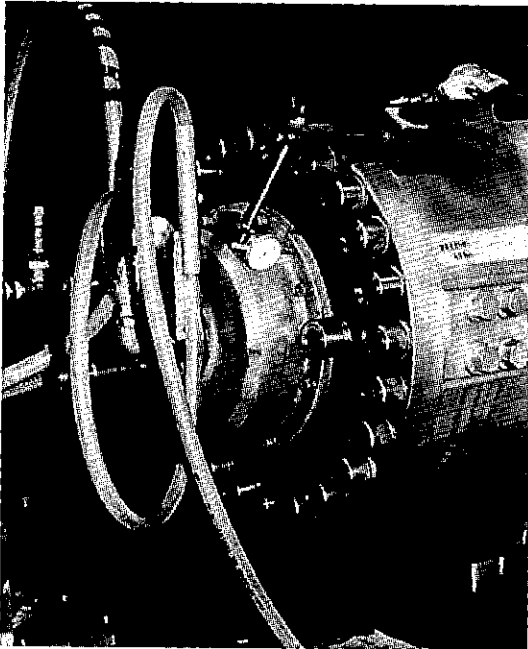


図6 振り子式用のロータリベーンポンプ
(設計：室蘭工大、取りまとめ：楯崎製作所)

8. 結言

次のように結論できる。

海洋波は風力エネルギーの生まれ変わり。密度が濃縮され、変動性が緩和されている。波力は使いやすいエネルギーである。

母船に振り子式波力発電装置を搭載した洋上発電は、従来の防波堤方式より発電単価が低くなり、実用化しやすい。

高効率発電には、母船の安定化が条件。波力利用のアクティブダンピングは、安定化に対し実用的な手法である。

母船に風車を併設すれば、一層経済効果がある。風車の暴風対策に、新型のピッチ制御装置が有効。

風力40kW、波力200kW、複合洋上発電の検討例を示した。船長36m、船体幅21m、排水量800トン。

洋上発電の実現には、広くこの技術が認知されること。また専用機器の開発を推進すること。

洋上波力発電の基礎研究において、室蘭工大 横内弘宇助教授が実験研究を担当した。この間少なからぬ提言・助言を行っている。

新型ピッチ制御装置つき小型風車の試作において、室蘭市の助成を受け、(株)新電機製作所が製作・取りまとめを担当した。

試作風車を利用した水質浄化運転は、(株)共和コンクリート工業により、群馬県城沼で継続中(2005年12月現在)である。

ご協力賜った方々に対し深謝いたします。

9. 参考文献

- 1) T. Watabe, Ocean wave energy converter: Pendulum, Private Publication, June 2000.
- 2) 渡部富治、特願 2003-338775、浮体型波力発電装置、2003-8.
- 3) 新山啓太、宮原卓也、係留型ペンデュラーの性能、室蘭工大卒業論文、2004-2
- 4) 渡部富治、岸浪絃機、特開 2004-353644、暴風対策小型風車、2004-10.
- 5) 渡部富治、環境水の浄化、JOPRE Vol.54、2004-4.
- 6) 渡部富治、近藤一郎、他3名、特許 2539742、振り子式波力発電装置、1996-7.
- 7) 渡部富治、近藤一郎、波力発電、パワー社、2005.
- 8) 渡部富治、近藤一郎、他3名、特許 2573905、揺動型ベーンポンプ、1996-10.
- 9) T. Watabe, H. Kondo et al, A new rotary vane pump for ocean wave power conversion, Proc. ISFP '95, Oct. 1995.

