振動水柱型波力発電装置用マグナスタービンの開発

Development of a Magnus Turbine for an Oscillating-Water-Column Wave Energy Converter

1. はじめに

波浪エネルギーはエネルギー密度が高く変動予測がしやすいため、次世代の海洋再生可能エネルギーのひとつとして期待されている[1]。波浪エネルギーを用いた波力発電には、様々な方法が提案されており、波とともに動作する浮体や受圧板の運動を利用して発電する「可動物体型」、波の上下運動により生ずる空気流を利用して発電する「振動水柱型」、越波により蓄えた海水の位置エネルギーを利用して発電する「越波型」等がある[2]。なかでも振動水柱型の波力発電装置は堅牢で、タービン等が海上に設置されるため、メンテナンス性に優れている。同装置のタービンには、往復流体に対してタービンが同一方向に回転できるウェルズタービンや衝動タービンが用いられている。ウェルズタービンはシンプルな構成となるが効率がやや低いという欠点があり、衝動タービンは構造が複雑になる問題がある[3, 4]。筆者らはこれら 2 種のタービンに対し、比較的構造が簡単で高効率な駆動が期待できるマグナスタービンに注目し、同タービンを振動水柱型波力発電装置に適用したシステムを提案している。

本研究では提案する振動水柱型マグナス波力発電装置に適した高効率なマグナスタービンの開発を目的とし、マグナスタービン動作機構やタービンの設計指針に関する検討を行う。まず、動作機構については、タービンの効率を重視し、マグナスブレードを駆動するモータを省略できる方法について検討する。次いで、供試マグナスタービン及び実験用風洞の製作を行い、これらを用いてタービンの諸特性に及ぼすパラメータの影響を把握することにより、設計指針を明らかにする。

2. 振動水柱型マグナス波力発電装置

図 1 に振動水柱型マグナス波力発電装置の構成を示す。本装置は浮力室や空気室をもつ本体に波を流入させることにより、波のエネルギーを往復の空気流に変換し、これを用いて空気タービン（マグナスタービン）を駆動する発電装置である。図中のマグナスタービンは、円柱形状で自転可能なブレード（マグナスブレード）を有しており、ブレードの自転と往復気流により生ずるマグナス効果（流体中におかれた回転体に揚力が発生する現象）による揚力で駆動する。ブレードに作用するマグナス効果について図 2 を用いて説明する。同図は、流体中のマグナスブレードを先端から見たものであり、図中にブレードの回転方向

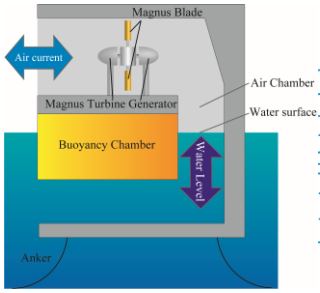


図 1 振動水柱型マグナス波力発電

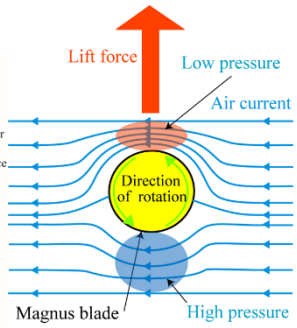


図 2 マグナス効果

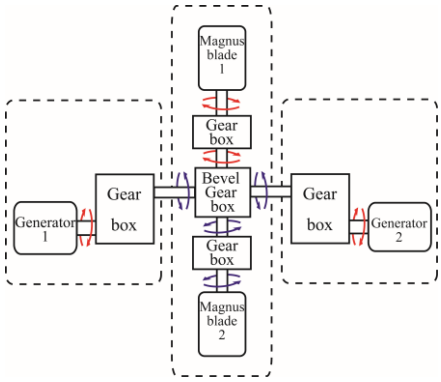


図 3 マグナスタービン動作機構

や揚力の向きなども示してある。流体の向きやブレードの回転方向が図示の方向となる場合、ブレードの上側は流体の向きと回転方向が同方向となり、下側は逆方向となる。その結果、ブレードの上下にベルヌーイの定理で知られる圧力差が生じ、ブレードは上方向の揚力を得ることとなる。マグナスタービンは往復気流に対してマグナスブレードの自転方向を切り替えることにより、ウェルズタービンや衝動タービンのように同一方向に回転することができる。

3. マグナスタービン動作機構に関する検討

本装置のマグナスタービンは、波の運動に対し、マグナスブレードの自転を制御する必要がある。マグナスブレードの駆動方法として最も簡単なものに、モータ駆動が挙げられるが、同方式を用いた場合、モータの入力電力は発電電力の一部となることから、変換回数に基因する損失が大きな問題となる。そこで、モータを使用せずマグナスタービンを駆動する動作機構について検討を行う。図 3 はそのひとつで、モータを発電機に置き換え、2 台の発電機の回転数の差でマグナスブレードを駆動する動作機構である。図示のように 2 台の発電機のシャフトは減速ギアボックスを介し、中央の傘歯車で複数のマグナスブレード

（マグナスブレードはさらに増速ギアボックスを介して接続される）と接続される。2 台の発電機のトルクを制御することにより、上下の傘歯車の回転数に差が生じ、これにより、マグナスブレードの自転を制御することができる。

4. タービンの設計指針に関する検討

タービンの特性に及ぼすパラメータ（ブレード半径やブレード長さなどの仕様だけでなく回転数などの諸量を含む）の影響を把握するため供試マグナスタービン及び実験用風洞（最大風速 9.4m/s）を製作した。

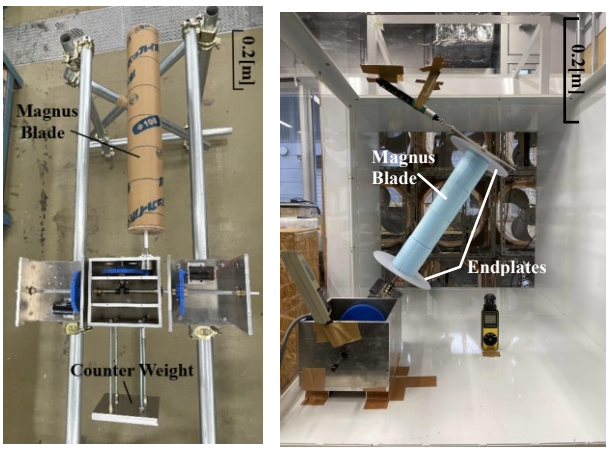
図 4a は製作した供試マグナスタービン（1 号機）の写真である。同装置の設計指針は以下の通りである。クッタ・ジューコフスキーの定理に基づき、ブレードの周速度を流速の 2 倍となるようにギア比を選定した。また空気流を用いて発電を行うため、タービンは低トルク高回転型となることを想定し、タービンの周速比（タービン周速度と風速の比）を 1.3 程度とした。なお、ブレード本数は 1 本である。同供試装置を用いて動作試験を行ったところ、タービンの回転を維持することができなかった。同装置に対し一方の発電機をモータとして駆動すると、ブレードに揚力が発生しタービンが駆動したことから、製作した 1 号機はブレードの動作機構（図 3）から得られるブレードの周速度が不足していると考えられる。ブレードの周速度はブレード半径やブレード駆動用の増速ギアの比によって大きくすることができる。そこで、これらを改良した 2 号機の製作を行った。

図 4b に改良した供試マグナスタービン（2 号機）を示す。同装置はギア比を 1 号機の 1.8 倍としているだけでなく、ブレード本数も 2 本としており、十分な揚力が得られるものと考えられる。また、ブレード半径を増やすことによっても周速度を増やせることから、2 号機に接続するマグナスブレードの形状についても検討を行った。

図 5 はその一例で、通常の円筒形状のブレード（長さ 0. 58m）の揚力係数を示したものである。また、マグナスブレードにエンドプレートと呼ばれる円盤状のプレートを取り付けると揚力が増加することが報告されている[5]。同図にはエンドプレート（直径 0.2m）をブレードの両端に取り付けた場合の揚力係数実測値も示してある。図 5 より、周速比が大きいほど、マグナスブレードの揚力係数も大きくなることが分かる。また、エンドプレートを採用することにより、揚力係数が大きくなることが実験的検討により明らかとなった。

5. おわりに

本研究ではマグナス効果によって駆動するタービンを採用した振動水柱型波力発電装置を提案し、高効率なマグナスタービンの開発を目的に



（a）1 号機　　（b）2 号機

図 4　供試マグナスタービン

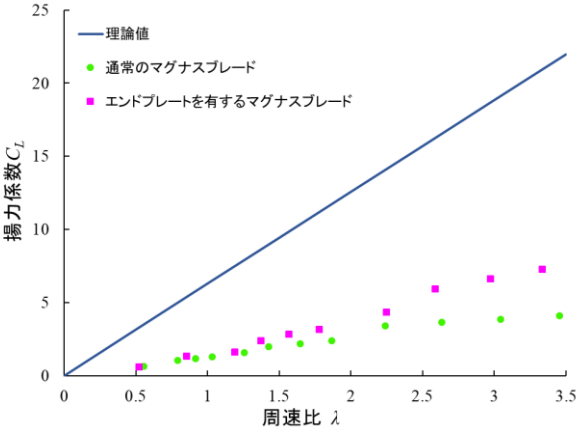


図 5 周速比に対するマグナスブレード揚力係数の変化

マグナスタービン動作機構やタービンの設計指針に関する検討を行った。その結果、発電機を 2 台使用することにより、マグナスブレードを制御できること、マグナスタービンを駆動するためには十分なブレードの周速度が必要となること、同装置のタービンにおいてもブレードのエンドプレートが有効であることなどが明らかとなった。

今後残された課題として、エンドプレートを採用した供試マグナスタービン 2 号機を用いた実験的検討があげられる。

文　献

[1] 木下健, “海洋再生可能エネルギーの市場展望と開発動向”, サイエンス＆テクノロジー,（2011）
[2] 井上俊司, 石田茂資, 梅田隼, 他, “海洋開発工学概論 海洋再生可能エネルギー開発編改訂第 1 版”, 国土交通省,（2017）163
[3] 井上雅弘, 金子賢二, 他, “ウェルズタービンに関する研究(第 2 報, 定常特性試験によるロータ形状の選定)”, 日本機械学会論文集（B 編）,（1984）2599-2605
[4] 瀬戸口俊明, 金子賢二, 他, “自己可変ピッチ案内羽根を有する波力発電用衝動タービンに関する研究(動翼形状と案内羽根節弦比の影響)”, 日本機械学会論文集（B 編）,（1993）3482-3486
[5] John Scheffey, “Numerical simulation of the Magnus effect and its application”, Johns Hopkins University,（2020）