マグナス効果を用いたポイント・アブソーバ型波力発電装置の開発

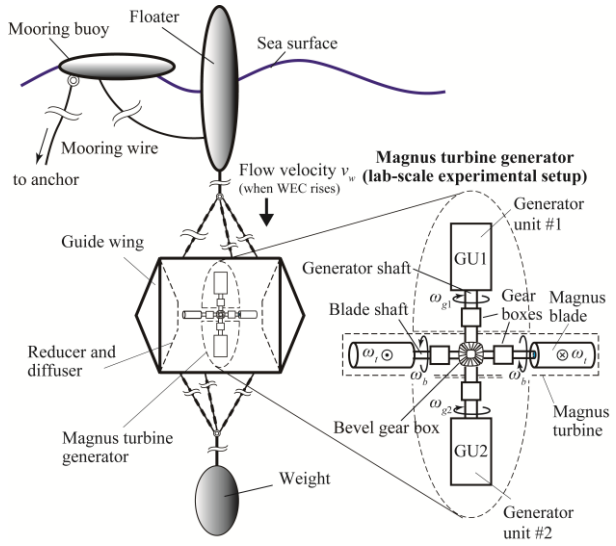
Development of a Point Absorber Wave Energy Converter with Magnus Effect-Based Turbine Generator

1. はじめに

波浪エネルギーは他の再生可能エネルギーと比べてエネルギー密度が高く、波の変動予測が可能であるという利点を有している[1]。また、波浪エネルギーの総容量は年間8×10^6TWh あるとされており、CO_2約 200 万トン分の化石燃料に相当する [2]。そのため同エネルギーの利用については欧州を中心に研究開発が進められているが、波力発電装置の導入量は他の再生可能エネルギーと比べて少ない。これはコストの面において波力発電装置の大容量化が困難であり、台風などによる異常波浪が多発する地域ではこれに加えて堅牢な装置が必要不可欠となるためである。

大容量化に関する問題点の解決策としてはポイント・アブソーバ型波力発電装置が期待されている。同装置は海上に浮かぶ浮体が波によって上下運動することにより発電を行う装置であり、波と装置の動作を共振させることにより波の破壊的な干渉を発生させ、小さな波力発電装置でも大きな波浪エネルギーを吸収することができる[3]。本研究室ではマグナス効果（回転している物体に流体が作用することにより揚力が発生する現象）により駆動するタービン（マグナスタービン）を用いることにより、異常波浪時でも発電できるポイント・アブソーバ型波力発電装置（マグナス波力発電装置）を提案している。マグナスタービンは自転する円柱形状のブレード（マグナスブレード）を有しており、同ブレードにマグナス効果による揚力が発生することによりタービンが駆動する。また、ブレードの揚力の大きさや向きはブレードの自転速度や自転方向で調整することができるため、タービンは波の上下運動に対して常に一方向に回転でき、台風などの異常波浪時にも安定した駆動が可能となる。

提案するマグナス波力発電装置を実用化するためには、システムの定常特性、過渡特性を把握し、有用性を明らかにする必要がある。本研究では同発電装置の実現可能性研究の 1 つとして基本的な動作特性を明らかにすることを目的とする。まず、提案するシステムの過渡方程式を導出し、これを用いてシミュレーションモデルを構築する。また、マグナスブレードに関する基本的な制御系を構築する。次いで、同モデルを用いて動作特性並びに定常特性に関する検討を行い、供試マグナスタービンの設計指針を決定する。さらに、得られた設計値を基に供試マグナスタービンを製作し、同装置を用いて種々な動作試験を行う。



Notes – v_w: relative fluid flow velocity caused by WEC movement, ω_t, ω_b, ω_{g1}, ω_{g2}: angular velocities of the turbine, the blades, and the generator shafts.

図 1 マグナス波力発電システムの構成

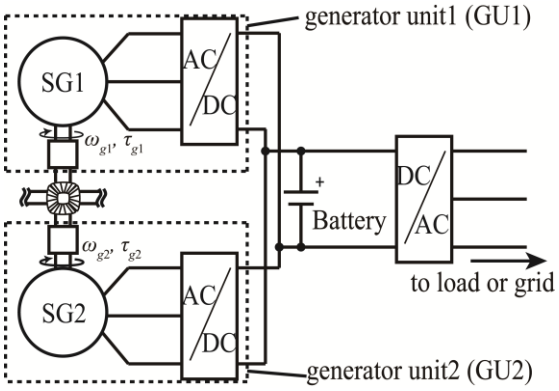


図 2 発電ユニットの構成

2. システムの構成

図 1 に提案するマグナス波力発電システムの構成を示す。本システムは浮体、マグナスタービン発電機、重りなどで構成されるシンプルな構造となっており、図中のマグナスタービン発電機は上下に発電機と制御装置を有する発電ユニット（GU1、GU2）、マグナスブレード、そしてこれらを連結するためのベベルギアなどによって構成されている。マグナスブレードの揚力の向きや大きさに影響を与えるブレードの回転方向及び回転速度は上下 2 台の発電機の角速度（ω_{g1}、ω_{g2}）の差により調整することができる。

図 2 に発電ユニットの構成を示す。図のように 2 台の同期発電機（SG1、SG2）はそれぞれ AC/DC コンバータに接続されており、発電機のトルクは

同コンバータで制御することができる。各 AC/DC コンバータはバッテリーと並列に接続され、インバータを介してグリッドまたは負荷に接続される。

3.マグナスブレードの制御

マグナスタービンのトルクはマグナスブレードの揚力によって決まるため、ブレードの回転速度、回転方向を波の運動に合わせて適切に制御する必要がある。図 3 に同制御の基本的な閉ループ制御系を示す。同図（左）よりブレードを制御するために必要な発電機角速度の指令値（ω_{g1_r}、ω_{g2_r}）はタービン内流速 $G_{rd}v_w$ とタービンの出力係数が最大となるタービン及びブレードの最適な周速比（λ_{t_op}、λ_{b_op}）を用いて算出できる。また、発電機の角速度（ω_{g1}、ω_{g2}）は 2 つの PI コントローラーを用いて発電機のトルクを調整することにより制御することができる。

4. 提案システムの動作特性に関する検討

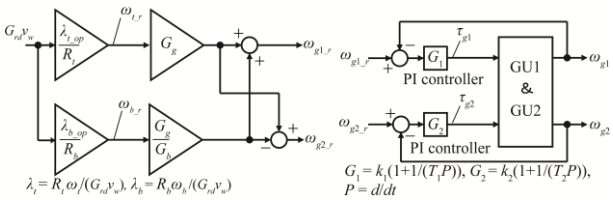
図 1、2 に示したシステムの種々な検討を行うため、過渡方程式を導出し、これを用いたシミュレーションモデルを構築した。ここでは同モデルに図 3 の制御系を組み込み、システムの動作特性について検討を行う。提案システムの過渡応答のシミュレーションに必要なパラメータを表 1 に示す。表 1 のシステムを対象に波高値 1.5m、周期 6.0s の波に対するシミュレーションを行った。図 4 はその結果の一例で波の変位 y、フローターの変位 x、発電機の角速度 ω_{g1}、ω_{g2}、ブレードの角速度 ω_b、タービンの角速度 ω_t の過渡応答計算値を示したものである。なお、これら諸量の正の方向は図 1 に示す通りである。図より、波の変位 y に合わせて各発電機の角速度 ω_{g1}、ω_{g2} を制御することにより、マグナスブレードの角速度 ω_b の回転方向（正負で表記）が適切に切り替わっており、タービンの角速度 ω_t は常に正の値となることがわかる（タービンの回転方向は常に同一方向となる）。

5. 供試装置の設計とこれを用いた実験的検討

システムの動作特性が明らかとなったので、試作機の開発を行う。本研究では試作機の一部となる供試マグナスタービンの製作並びに動作実験を行う。供試装置の設計値はシミュレーションで求めた（表 1）。図 5 に製作した供試マグナスタービンを示す。なお同図には、流速を高めるためのレデューサーも示してある。同装置を用いて動作試験を行った結果、動力伝達の損失が大きく（シミュレーションでは未考慮）、タービンの回転を維持できないことが判明した。現在、動力伝達の機構を再設計した装置の開発を行っている。

おわりに

本研究ではマグナス波力発電装置の基本的な動作特性を明らかにすることを目的とし、シミュレーションモデルを用いた動作特性の検討及び設計値の計算を行った。また、供試マグナスタービンを製作し、これを用いた実験により問題点の抽出を行った。今後残された課題として、問題点を改善した試作機の開発及び実験が挙げられる。



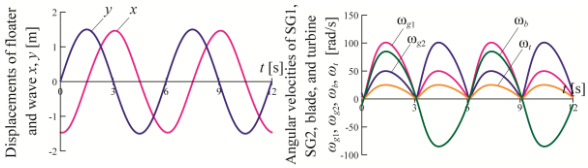
Notes – λ_t: tip speed ratios of the turbine, λ_b: cylinder speed ratio of blades, λ_{t_op}, λ_{b_op}: optimum values of λ_t and λ_b, ω_{t_r}, ω_{b_r}: reference values of ω_t and ω_b, ω_{g1_r}, ω_{g2_r}: reference values of ω_{g1} and ω_{g2}.

図 3 基本的な閉ループ制御系

表 1 シミュレーションに用いたパラメータ

ρ	1025	kg/m^3	D_b	0.0029	Nms/rad
g	9.8	m/s^2	R_b	0.037	m
M	500	kg	N_b	3	–
H_0	2	m	G_{rd}	3	–
R_t	0.18	m	G_g	3	–
J_t	0.025	kg·m^2	G_b	10	–
J_g	0.001	kg·m^2	C_{pmax}	0.345	–
J_b	0.0016	kg·m^2	λ_{t_op}	1	–

Notes – ρ: sea water density, g: gravitational acceleration, M: total mass of the WEC, H_0: draft when buoyancy and gravity are balanced, R_t: tip speed ratio of the turbine J_t: moment of inertia of the turbine, J_g, J_b: moments of inertia on the turbine side of the generators and the blades, D_b: damping torque coefficients of the blades, R_t: turbine radius N_b: Number of blades G_{rd}: speed-up ratio of the flow velocity due to the reducer and diffuser shown in Fig. 1, G_g, G_b: speed-up gear ratios of the generators and blades.



Controller constants: λ_{t_op} =1.0, λ_{b_op} = 0.721, $k_1 = k_2$ = -2.0, $T_1 = T_2$ = 10 [s].

図 4　シミュレーション結果

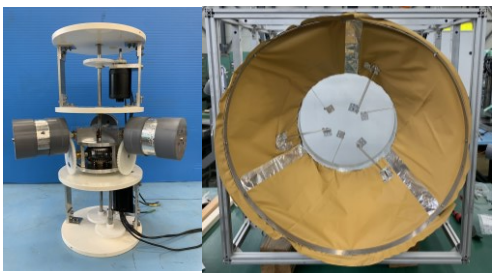


図 5 製作した供試マグナスタービン及びレデューサー

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

[2] Leão Rodrigues, “Wave power conversion systems for electrical energy production”, RE&PQJ, Vol. 1, No.6, 2008

[3] Johannes and Falnes, “OCEAN WAVES AND OSCILLATING SYSTEMS Linear Interactions Including Wave-Energy Extraction”, Cambridge University Press 2002, pp.196-204.