

浮体式波エネルギー吸収装置による 圧縮空気生産に関する実験的研究

煤田 真也¹・大貝 秀司²・石田 啓³

¹正会員 金沢大学准教授 理工研究域環境デザイン学系 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:umeda@t.kanazawa-u.ac.jp

²LWJ株式会社 (〒555-0001 大阪府大阪市西淀川区佃3-13-22)

E-mail:s_ogai@lwj.co.jp

³フェロー 金沢大学名誉教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail:hishida@se.kanazawa-u.ac.jp

波エネルギーを利用して港湾や水産施設等における水質改善のためのエアレーション等に使用可能な圧縮空気を直接的に生産するために、振動浮体型の波エネルギー吸収装置、波力水車ギア機構及びピニオンクランク式コンプレッサを組み合わせた圧縮空気生産システムを開発した。波浪条件の違いによる空気出力の変動特性や浮体挙動の変化、及びそれらに及ぼすシステム負荷や不規則波の影響を実験的に調べた。その結果、波パワーが同じでも周期が異なると空気出力は大きく変化すること、出力効率がピークになる波の周期は浮体全体が重複波の腹部に位置する条件とほぼ一致すること、波パワーがある程度以上になると浮体の存在によって波の反射率を1/2~1/3程度に減少できること等が分かった。本実験で得られた最大効率は20%を超え、従来の大規模な波力発電と同程度の総合効率であり、既存の海岸護岸や堤防に低コストで容易に設置できる小型装置としての利用が期待される。

Key Words : *floating wave energy converter, oscillating body, power take-off, compressed air generation, renewable energy*

1. 序論

海の波の平均的なエネルギー輸送率(波パワー)は世界の海岸で約25億kW、日本周辺でも約3600万kWと見積もられ^{1,2)}、環境負荷の少ない再生可能なエネルギー資源の一つである。波エネルギーを利用するための様々な一次変換装置が古くから考案されてきたが^{3,4)}、大部分の装置の動作原理は次の3方式に分けられる⁵⁾。水面の上下運動による空気室の容積変化に伴う空気流を利用する水柱振動方式、水面や水中に設置した物体が波の運動に伴って振動することを利用する振動物体方式、及び周辺の平均的な水面より少し高い位置に越波した水塊を利用する越波方式がある。また、それぞれは本体の構造形式によって固定型と可動型(浮体・没水)の2種類に概ね分けられる。本研究で考案した波エネルギー吸収装置は、図-1に示すように防波堤や護岸付近で形成される重複波によって浮体を主に上下振動させることで動力を得るもので、本体は構造物上に固定するため、固定型の振動物体方式に分類できる。

従来、水柱振動方式の波エネルギー吸収装置による波

力発電に関する研究が活発であったが、近年は出力効率が比較的高い振動物体方式を対象とした研究が増えている。本研究と同様に、波による浮体の振動を動力源として波エネルギーを吸収する装置の研究開発も進んでいる。例えば、飯島ら⁶⁾は2つの浮体を組み合わせたユニークな装置を考案し、浅海域における進行波のエネルギーを吸

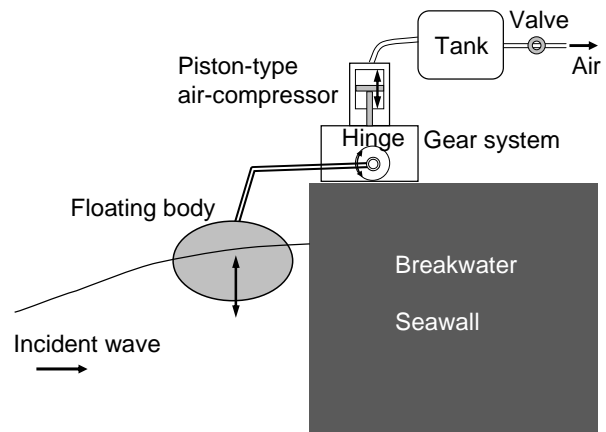


図-1 浮体式装置による圧縮空気生産システムの概要

収する実験を行っている。羽田野ら⁷⁾は単一浮体とおもりをワイヤーで接続したつるべ式の装置を考案し、その挙動やエネルギー吸収性能等について実験的・理論的検討を進めている。渡辺ら⁸⁾は浮体式波浪制御構造物の運動を利用して波エネルギーを吸収し発電するための基礎実験を行っている。Falcaoら⁹⁾は単一浮体の波による上下動を利用してピストンを動作させるシステムについて解析的な検討を行っている。

波エネルギー利用技術を高め、実用化に繋げるには、一次変換装置によって得られた動力を電力に変換して利用するのみでなく、最終的な利用形態に応じて最適な変換方法を考える必要がある^{10, 11)}。本研究では、港湾や水産施設等における水質改善のためのエアレーション及び機械類の動力源に利用可能な圧縮空気を生産する。圧縮空気の利用は、一般的な電力利用に比べて、発電機の水に対する脆弱さや変換効率の問題を回避できること、経済的で安全に貯留可能であること、及び吸収装置の設置場所と圧縮空気の利用場所が接近して効率化が期待できること等の利点が多い。そこで本研究では、浮体式波エネルギー吸収装置を用いた圧縮空気生産システムについて、波浪条件による空気発生量や圧力の変動特性、浮体の運動と消波効果およびシステム負荷と出力効率の関係を明らかにすることを目的とする。

2. 浮体式装置を用いた圧縮空気生産システム

本システムによる圧縮空気を生産する過程は、まず浮体が水面変動に従って概ね上下方向に往復運動し、浮体に接続したアームの軸において左右交互の回転運動になる(図-1参照)。次に交互回転はギア機構によって一定方向の回転に変換され、エアコンプレッサを駆動させて圧縮空気を生産できる。圧縮空気の放出管に取付けたバルブの開き具合を調節することで、タンク内に圧縮空気を貯留したり、放出量や圧力を変化させたりして、システム負荷を容易に変えられる。

本研究で開発した装置を図-2に示す。ギア機構及びコンプレッサには、著者ら¹²⁾が開発した波力水車及びリニアクランク式のピストン型コンプレッサを適用して、二次的な変換効率の向上を図った。コンプレッサが効率的に働くように、浮体の回転軸周りの運動は大型のギア及び波力水車等を用いて、ピストン回転軸では約130倍に増速した。本装置は耐久性の確保、維持管理や製作が容易なシンプルな構造であると共に、既存の海岸堤防や護岸を利用して据え付けられるので、装置本体のみでなく全体のコストも低く抑えられる。また、浮体接続用アームの長さを調節したり、浮体内に海水等を注入するなどして固有周期を変え、波浪条件に応じた調整が可能にな

るため、従来の方法より高い汎用性が期待できる。

3. 実験方法及び条件

実験は図-3に示すように断面二次元造波水槽(長さ22m, 幅1m, 深さ1.6m)に本装置を設置して行った。浮体部分は半円筒形で、半径 $r_f=0.3\text{m}$ 、波向き直角方向の幅 $B=0.8\text{m}$ である。水槽側壁面からのクリアランスは両岸とも0.1mとした。水深は0.5m、浮体の喫水深は0.21mとした。水槽の岸側端部を海岸構造物の岸壁と見なし、浮体中心部は岸壁からの距離 $\lambda=1.2\text{m}$ の地点に配置した。

規則波及び不規則波を造波し、浮体と造波板の間で水面変動を容量式波高計W1~W3で測定した。波の周期は $T=0.8\text{秒} \sim 2.8\text{秒}$ 、入射波高は $H_w=5 \sim 20\text{cm}$ で、波パワーは $P_w=2.4 \sim 72\text{W}$ の範囲であった。本装置により発生した圧縮空気の流量及び圧力を放出管に取付けた機器で同時に計測して、圧縮空気のパワー(以下、空気出力と呼ぶ)を求め、波パワーとの比より出力効率を求めた。空気出力及び波パワーの定義は従来研究と同様であり、例えば高橋ら¹³⁾及び高橋²⁾にそれぞれ示されている。浮体の運動は目視観察及びビデオ撮影し、上下方向の振動範囲を測定した。



図-2 浮体式波エネルギー吸収装置

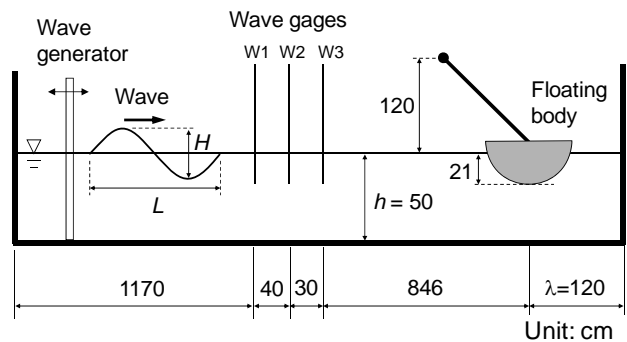


図-3 断面二次元造波水槽における圧縮空気生産実験の設定

4. 圧縮空気生産実験の結果及び考察

(1) 波浪条件に対する空気出力の変動特性

まず、水面と空気出力の時間的な変動状況を把握するため、周期 $T=1.8$ 秒、入射波高 $H_{in}=16.1$ cmの規則波における水面変動や発生空気の圧力、量及び出力の時間変化を図-4に示す。水面変動は波高計W3での値、圧力や流量は 20°C 大気圧換算した値である。バルブを40%閉じてシステム負荷を固定した状態で、反射率約0.3の部分重複波が形成された。浮体は周辺の水面変動に追随するように振動し、静水面付近を通過する際に加速度の絶対値が大きくなり、生産される空気の量や圧力も増加する。空気量、圧力及び出力変動の基本周波数は水面変動の2倍である。波力水車によって浮体が波峰から波谷及び波谷から波峰への兩位相において一方向の回転に変換されるため、同程度の圧縮空気を安定的に発生していることが分かる。

次に、様々な周期や波高の規則波における空気出力の時間平均値の変化を図-5に示す。空気出力は波パワーの増加に伴い増加するが、波パワーが同じでも、波の周期によって空気出力は大きく異なる。周期 $T=1.2$ 秒及び 1.4 秒付近の波に対して本装置は効率的であることが分かる。

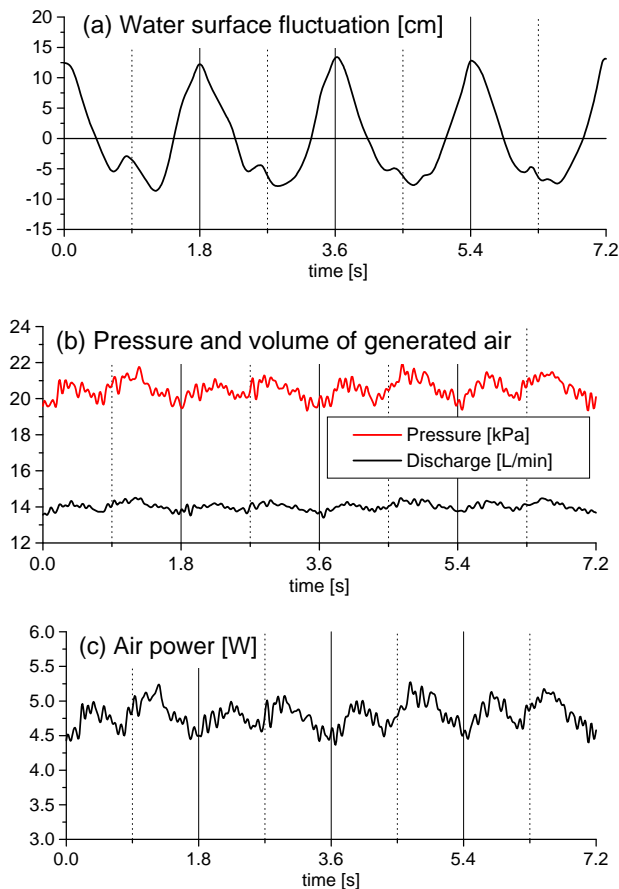


図-4 水面変動と生産空気の圧力・流量・出力の時間変化 (規則波, $T=1.8$ 秒, $H_{in}=16.1$ cm, システム負荷40%)

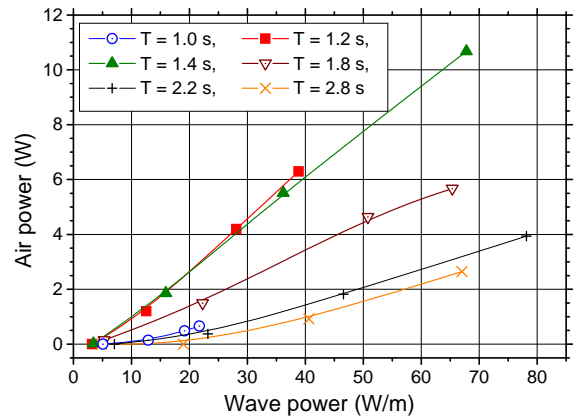


図-5 平均空気出力と波パワーとの関係 (システム負荷40%)

周期 1.2 秒の場合と比較すると、周期 1.0 秒や 2.2 秒の波に対する空気出力は四分の一程度まで減少しており、出力は波の周期の影響を強く受ける。

(2) 波浪条件と浮体の挙動の関係

波の周期及び波高の違いにより浮体の運動がどのように変化するかを把握するため、規則波実験で得られた入射波高・周期と浮体の上下振動の範囲との関係を図-6に示す。浮体の振動範囲の上限 y_{top} と下限 y_{bottom} の位置は静水面を基準にしている。波高の増加に従って、浮体の振動範囲が拡大する。周期 $T=1.4$ 秒以下の波においては、浮体は静水面を中心にほぼ上下対称に振動する。波の周期が長くなると、浮体振動の上限位置が低下するため、静水面に対して上下非対称な振動になる。この理由は、長周期の波の場合、浮体背後にある岸壁からの反射波が強く、浮体の上に反射波が乗り上げて、浮体の浮上が抑えられるためである。入射波高が大きいくほど、浮体に乗り上げる水塊が多くなり、上下振動の非対称性が顕著になる。一方、波の周期が比較的短い場合、入射波が浮体背

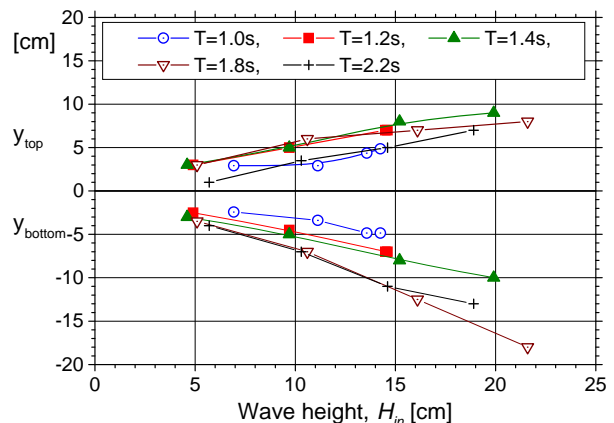


図-6 波による浮体の振動の上限・下限位置の変化 (システム負荷40%)

後へ透過しにくく、岸壁からの反射波は小さいため、浮体の上に水塊が大量に乗り上げることはなく、浮体は周辺の水面の上下動に追従した挙動を示す。

浮体の上下動の範囲と波高、周期との関係については、**図-7**に示すように、周期 $T=1.2$ 秒以上の波に対する浮体の振動範囲は入射波高とほぼ同じかそれ以上であることが分かる。入射波が浮体及び岸壁に衝突して反射し、重複波が形成されるため、水面変動が腹付近では入射波以上に増大して、浮体の振動を活発にすると考えられる。そこで、浮体と重複波の腹・節の位置関係を**図-8**に示す。本実験では、浮体を岸壁から $\lambda=1.2$ mに設置した(**図-3**参照)ため、微小振幅波理論によると波の周期が約1.3, 0.9, 0.7秒などの場合に、浮体中心が重複波の腹部に位置する。ただし、浮体の大きさ(半径 $r_f=0.3$ m)を考慮すると、浮体全体が重複波の腹付近に納まるには、周期 $T=1.3$ 秒前後の波の場合のみである。この条件は、前述の効率的に空気出力が得られる条件($T=1.2\sim 1.4$ 秒)と良く対応する。一方、浮体の大きさに比べて、重複波の腹・節が接近するような波長の短い波の場合、浮体を振動させる波力が十分得られず、振動範囲は小さくなり、出力効率も低下する。このような状態は本実験条件の設定では周期 $T=1.0$ 秒以下の場合に確認された(**図-5**)。

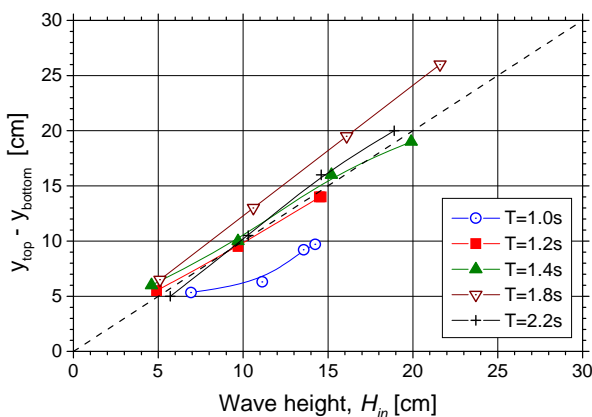


図-7 浮体の上下動の範囲と波高、周期との関係

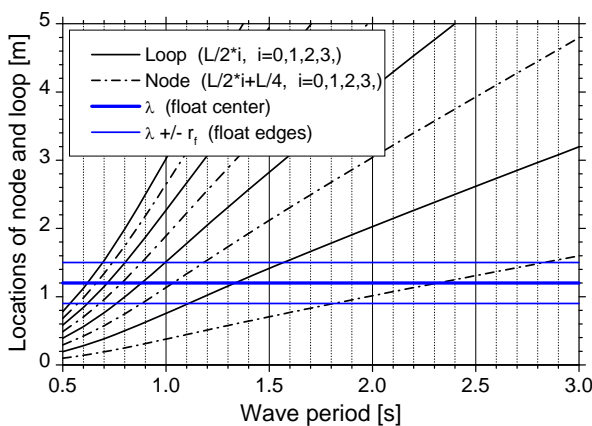


図-8 浮体と重複波の腹・節の位置関係(水深 $h=0.5$ m)

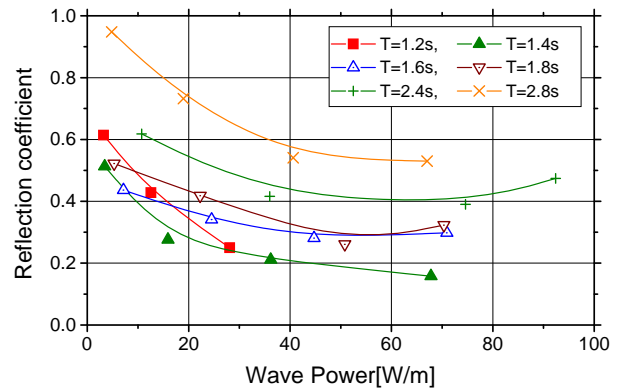


図-9 波の反射率と波パワー、周期との関係
(システム負荷40%)

本装置による反射波の低減効果を把握するため、**図-9**に波高計W1~W3の計測結果から求めた反射率と波パワーや周期との関係を示す。本実験条件の範囲では、波の周期は短く、波パワー(波高)は大きくなるにつれて、波の反射率は減少する傾向がある。本装置を水槽から取り除いた場合の反射率は約0.9~1.0で、完全反射に近い状態であることから、本装置には $T=1.2\sim 2.8$ 秒の幅広い周期の波に対して反射を低減する効果が認められる。出力効率が高い周期の波に対して、本装置による反射波の低減効果も高いようである。周期一定では、波高が大きくなるにつれて、本装置による反射率の低減量は増加するものの、ある程度以上の波高になると、低減量は周期毎に一定値に近づく傾向にある。この場合の反射率の低減量は0.4~0.7程度ある。波高がある程度大きくなると、本装置による波エネルギーの吸収効果が得られるとともに、浮体と岸壁の間及び浮体付近で入・反射波が激しく衝突して砕波し、水面波形が複雑に乱れるため、浮体の沖側へ反射される波の成分を低減する効果が顕著になる。

(3) システム負荷による出力性能の変化

ある一定の波浪条件において、システム負荷の調整により空気出力や効率がどのように変動するかを把握するため、システム負荷に対する空気発生量、空気圧及び出力効率の変化をそれぞれ**図-10**~**図-12**に示す。システム負荷はタンクに接続した空気放出管に取り付けたバルブの開度に対応する。前述の負荷を固定して波浪条件を変化させた結果の中で、出力効率が比較的高い2ケースの波を対象とした。バルブを閉めて負荷を増加させると、空気発生量は減少するものの、圧力は上昇する。両者の積で得られる空気出力は負荷が約80%付近でピークをとる。2ケースとも、ピーク時の空気出力は無負荷状態での空気出力に比べて約1.5倍に増幅できることが分かる。出力効率の最大値は周期 $T=1.4$ 秒、入射波高 $H_{in}=20$ cmの

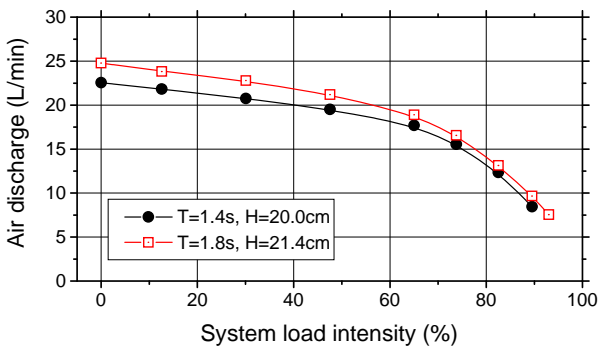


図-10 システム調整負荷に対する空気発生量の変化

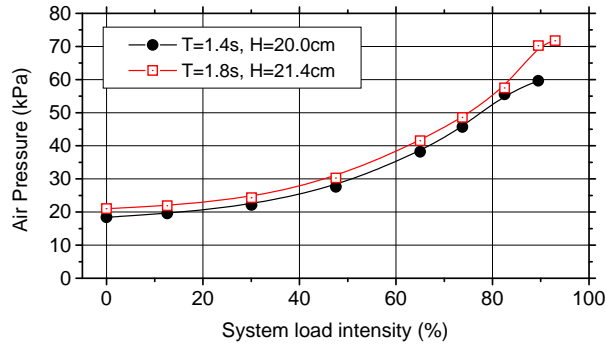


図-11 システム調整負荷に対する空気圧の変化

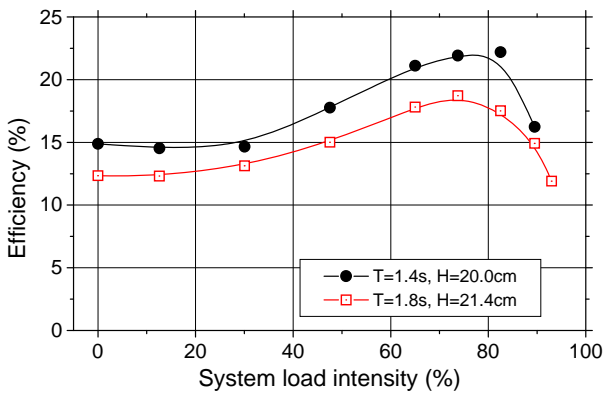


図-12 システム調整負荷に対する出力効率の変化

規則波に対して約22%に達する。この出力効率は、波エネルギーを動力に変える1次変換と動力を直接利用する圧縮空気に変える2次変換を含んだ総合効率であることを考慮すると良好である。

(4) 不規則波における出力性能

最後に、不規則波浪に対する本装置の出力性能を把握するため、システム負荷を80%に固定した状態で、有義周期 $T_{1/3} \div 1.0 \sim 1.8$ 秒、有義波高 $H_{1/3} \div 9.5 \sim 17.6$ cmの範囲の不規則波に対する空気出力の変化を調べた。不規則波のスペクトル型はBretschneider・光易型とした。図-13は波パワーに対する本装置で得られた空気出力の比で定義した出力効率と波の周期との関係を示すものである。図中

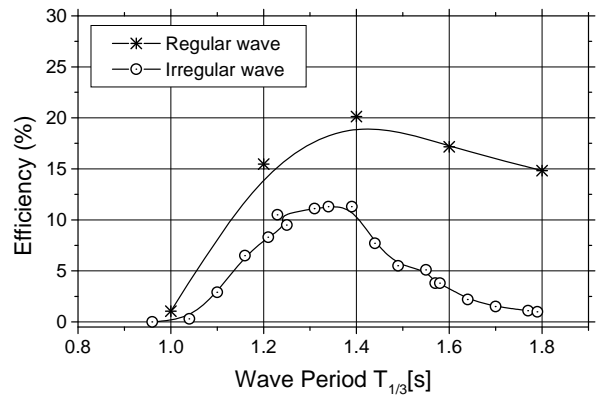


図-13 不規則波及び規則波における出力効率と波の周期との関係 (システム負荷80%)

には、不規則波の場合と同程度の波パワーを持った規則波における本装置の出力効率も比較のため表示した。不規則波における出力効率は平均的に規則波の場合の半分程度になるものの、出力効率が高くなる周期帯は規則波の場合と同程度であることが分かる。

本装置はバルブを全開にして強制的なシステム負荷が無い状態であっても、浮体振子に波力などの強制外力が作用し続けなければ、直ちに静止するような過減衰の状態にある。また、前述のように浮体が重複波の腹に位置する場合、波パワーが同じでも浮体の振動が激しく、出力効率も高くなる傾向が確認されている。従って、現設定における出力効率は、浮体振子の固有周期の影響よりも岸壁付近に形成される重複波の腹・節と浮体の位置関係の影響を強く受けていると考えられる。

5. 結論

本研究では、波エネルギーを利用して圧縮空気を生産するための振動浮体型の波エネルギー吸収装置を開発し、波浪条件の違いによる空気出力の変動特性や浮体挙動の変化、及びそれらに及ぼすシステム負荷や不規則波の影響を実験的に調べた。その結果、本実験条件・波エネルギー吸収装置設定の範囲において、以下の結論を得た。

- (1) 生産された空気量や空気圧の時間変動の基本周波数は水面変動の2倍であり、浮体が静水面をアップクロス及びダウンクロスする際に瞬間的な空気出力が増加する。
- (2) 波パワーが同じでも、周期が異なると、空気出力は大きく変化する。出力効率がピークになる波の周期は、浮体全体が重複波の腹部に位置する条件とほぼ一致する。
- (3) 浮体は短周期の波では静水面を基準にほぼ上下対称に振動するが、周期が長くなると、半円筒形の浮体

上に水塊が乗り上げるため、振動上限値が下がり、上下非対称で複雑な振動へと変化する。周期がある程度長い場合、浮体の振動範囲は入射波高と同程度である。

(4) 本装置による反射波の低減効果は波の周期や波高に依存するものの、波高がある程度大きい場合には、浮体の存在によって反射率を1/2~1/3程度に減少させることができる。

(5) 空気生産システムへの負荷を調整することで、空気圧を増大させると共に、出力効率を無負荷の場合に比べて約1.5倍に増幅可能である。最大効率は20%を超え、総合効率としては従来の大規模な波力発電^{14), 15)}と同程度である。既存の海岸施設に低コストで容易に設置できる小型装置としては高い効率を得ている。

(6) 不規則波に対する本装置の出力効率は規則波での値に比べて半分程度に低下するものの、高い出力効率が得られる波の周期帯は規則波とほぼ同じである。

謝辞：実験計測の際は、金沢大学の斎藤武久教授、当時水工学研究室大学院生の松田良介君、松村翔平君、学部生の東秋絵さんにご協力頂いた。また、本研究の一部は、科学研究費補助金（基盤研究C）の補助を受けたものであり、ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Isaacs J D, Seymour R J. The ocean as a power resource. *Int. J. of Environ Studies*, Vol.4, pp.201-205, 1973.
- 2) 高橋重雄, 安達崇: 日本周辺における波パワーの特性と波力発電, 港湾技術研究資料, No.654, 1989.
- 3) Leishman, J. M. and Scobie, G.: The development of wave power –A techno-economic study, Department of Industry, National Engineering Laboratory, UK, 67p, 1976.
- 4) 高橋重雄: 波エネルギー利用への再挑戦, 海洋開発論文集, 第24巻, pp.7-12, 2008.

- 5) Falcao A. F. O., Wave energy utilization: A review of the technologies, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.14, pp.899-918, 2010.
- 6) 飯島徹, 田谷年樹, 渡部富治, 近藤淑朗, 横内弘宇, スダッド・ブラサナ・グナバルデーニ: H&P ブイ型浮体式波浪エネルギー変換システムの二次元波浪特性, 海洋開発論文集, 第16巻, pp.239-244, 2000.
- 7) 羽田野袈裟義, 種浦圭輔, 渡邊誠, 中野公彦, 斉藤俊, 松浦正己: 浮体式波力エネルギー変換の力学, 土木学会論文集 B, Vol.62, No.3, pp.270-283, 2006.
- 8) 渡辺洋輔, Peng WEI, 水谷法美: 浮体式波浪制御構造物による波エネルギー回収システムに関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.513-518, 2010.
- 9) Falcao A. F. O., Pereira, P. E. R., Henriques, J. C. C. and Gato, L. M. C.: Hydrodynamic simulation of a floating wave energy converter by a U-tube rig for power take-off testing, *Ocean Engineering*, Vol.37, pp.1253-1260, 2010.
- 10) 堀田平, 宮崎武晃, 鷺尾幸久: 波エネルギーを利用した沿岸環境浄化システムの提案, 海洋開発論文集, 第7巻, pp.393-398, 1991.
- 11) 喜島恭彦, 安西俊直, 小宮俊夫, 堀江俊郎, 近藤信雄, 森田博夫, 高橋重雄: 防波堤利用による波力発電の実用化に関する研究 –波エネルギー利用のケーススタディー, 海洋開発論文集, 第12巻, pp.207-212, 1996.
- 12) 大貝秀司, 榎田真也, 石田啓: 自然力利用の振り子式波力水車による圧縮空気自動製造に関する実験的研究, 海洋開発論文集, 第25巻, pp.383-388, 2009.
- 13) 高橋重雄, 小島朗史, 鈴木諭司: 不規則波に対する波力発電ケーソンの空気出力に関する理論と実験, 海岸工学論文集, 第32巻, pp.712-716, 1985.
- 14) 大沢弘敬, 宮崎剛, 鷺尾幸久, 堀田平, 宮崎武晃: 波浪エネルギー利用技術の研究開発 –沖合浮体式波力装置「マイティール」の開発, 386p, JAMSTEC, 2004.
- 15) White, Dan G.: Ocean Energy in the U.S.: The State of Technology, *Marine Technology Society Journal*, Vol.42, No.1, pp.9-14, 2008.

COMPRESSED AIR GENERATION USING A FLOATING WAVE ENERGY CONVERTER

Shinya UMEDA, Shuji OGAI and Hajime ISHIDA

This study describes a novel system of compressed air generation using a floating wave energy converter installed in a coastal defense structure. The system produces compressed air instead of electricity. This is because it is not desirable to convert wave energy directly into electric power in large amounts due to both low energy conversion efficiency and the consequent irregularity of the electric output. Compressed air is easy to store and safe to use in coastal areas. The objective of this study is to understand how much energy from the incoming waves can be captured for use by the system. Laboratory experiments were carried out to determine the effects of wave and system load conditions on energy conversion efficiency and hydrodynamic characteristics for the system. The test results show that the system can operate with a high degree of efficiency under loops of the standing wave formed in front of a structure. A reduction of wave reflection can be achieved by the system under a wide range of wave conditions.