

2次元数値解析による浮体型波力発電装置特性の 妥当性と最適形状の検討*

鈴木正己*¹, 窪木利有*²
永田修一*³, 瀬戸口俊明*³

Investigation of Validity of Characteristics and Optimal Profile Predicted by 2-D Numerical Analysis of Floating Type Wave Power Generating System with OWC

Masami SUZUKI*⁴, Toshiari KUBOKI,
Shuichi NAGATA and Toshiaki SETOGUCHI

*⁴Department of Mechanical Engineering, Graduate School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

A floating type wave power generating system has an Oscillating Water Column (OWC). The device captures the wave energy using the heaving, pitching and surging motion of the device and the heaving motion of OWC. The two-dimensional numerical method for analyzing a floating body with OWC type wave energy conversion device is introduced where the eigenfunction expansion method is described under the condition that the linear water wave theory is applicable. It is confirmed that these solutions give good agreement with the several experimental results in the previous paper. The two-dimensional optimal profiles are eliminated according to the different conditions from the high efficiency, i.e. the minimum size per a unit power and so on.

Key Words : Oscillating Water Column, Wave Power Generating System, Numerical Analysis, Fluid machinery, Ocean Engineering

1. 緒 言

振動水柱(Oscillating Water Column : OWC)型の波力発電装置は空気室と空気タービンにより構成されている。空気室は波浪エネルギーを往復空気流のエネルギーに変換する装置であり、空気タービンはこの往復流により駆動される。空気タービンは構造が簡単で、往復流中でも常に一方に回転できるウェルズタービン⁽¹⁾が主に用いられている。このタービンは一定回転数の下では流量とタービン差圧が比例関係にあり⁽²⁾、空気室からは線形負荷とみなすことができる。空気室特性として、波浪から空気流へのエネルギー変換率(2次元に限り効率とも一致)や空気室内の圧力振幅、室内水面の上下動振幅が重要であり、より小さな浮体で高いエネルギ

ー変換率と高い空気室内圧力が得られる形状の解明が理論と実験により進められている。

微小振幅波の線形理論を基礎とした解析結果^{(3)~(8)}は実験データのバラツキなどを考慮すると実験結果との一致は比較的良好である。ただし、個々の空気室形状に対する特性は模型実験による確認も重要であり、実験と数値解析のそれぞれの利点を活かしつつ研究を進めることが求められている。

本研究では数値解析により浮体型波浪エネルギー変換装置の特性を把握し、最適浮体形状について検討を行う。まず、数値解析結果の妥当性を確認するため、解析対象とする浮体の実験結果と比較し検証を行う。これらの検証を基に、エネルギー吸収特性に加え、建造コスト、すなわち、浮体の小型化も視野に最適浮体形状について検討を行う。

2. 数値解析による推定精度の検証

2.1 検証対象浮体 海洋科学技術センター(現、海洋研究開発機構)が実証実験^{(9), (10)}に先駆けて実施した基礎実験の2次元浮体形状について、領域分割法

*原稿受付 2007年02月28日。

¹ 東京大学大学院工学系研究科(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)。

² 太平洋学会(〒108-0073 東京都港区三田4-15-29 三田東急アパート3F)。

³ 佐賀大学海洋エネルギー研究センター(〒840-8502 佐賀県佐賀市本庄町一番地)。

E-mail : wells@cfd.t.u-tokyo.ac.jp

による数値解析⁽⁶⁾を行い、実験結果との比較により、解析精度の検討を行う。図1は海洋科学技術センターで実施された実験装置の概略図を示している⁽⁷⁾。実験は水槽に浮体を固定した状態と弛緩係留した状態の2種類で実施されている。係留時の浮体は弱い2本のバネで弛緩係留され、無拘束に近い状態になっている。また、浮体の重心は浮心の付近となるように調整が行われている。波高計は船首前方 6m に入射波用、船尾から後方 1m に透過波用が設置され、反射波は船首前方 1m に設置した波高計を上流側へゆっくりと移動し、波の腹と節を計測することにより算出している。波浪エネルギーは浮体前面の空気室で吸収し、往復空気流に変換される構造となっている。空気室内の圧力は浮体前面の空気室上部に設けた圧力孔で計測されている。

模型が小型であるため、空気タービンの代わりに空気室の負荷としてオリフィスが用いられ、実験が行われている。空気室の負荷特性はタービン直径や回転数により変化する。これを評価するため、空気室上部にあるオリフィスの開口比(オリフィスの絞り面積比)を変化させて、負荷特性の影響を検討している。実験は3種類の開口比 1/120(オリフィス径 $\phi 14\text{mm}$)、1/150($\phi 12.6\text{mm}$)、1/200($\phi 10.7\text{mm}$)について実施されている。入射波の目標波高は 20mm と 30mm の2種類で、波周期は 0.5～1.5 秒まで 0.1 秒刻みで計測されている。

船尾にある3つの空気室は1室につき $\phi 25\text{mm}$ の穴が8個開いており、エネルギー吸収用ではないため各室の開口比はそれぞれ 1/20 と大きい。

2-2 数値解析⁽⁶⁾ 図1および図2に示す浮体型波浪エネルギー変換装置の特性は前後揺れ、上下揺れ、縦揺れ、4空気室の室内水面の上下変動に対する合計7つの運動方程式を連立して解かれる。これにより、前後揺れ ξ 、上下揺れ ζ 、縦揺れ θ の変位、エネルギー吸収を行う船首空気室内の水面の上下変位 z と後部3室の水面の上下変位が算出される。運動方程式中には入射波により浮体や空気室に加えらる波浪強制力、浮体や空気室内の水面が動揺することにより浮体や空気室に作用する流体力が現れる。この流体力は微小振幅波の線形理論に基づいた領域分割法により算

出されており、定式化の詳細は前報^{(3),(6)}に記述されている。

本論の数値解析および実験は規則波を対象としているため、計算における入力条件は入射波の波高(または振幅)、係留索のバネ定数、空気室(OWC)の負荷ダンピング係数である。ここでは線形問題として扱っているため、負荷ダンピング係数は定数で、その定義式は

$$D = A_w p / \dot{z} \quad (1)$$

で表され、 A_w : 空気室内の水線面積、 p : 空気室内の圧力、 \dot{z} : 空気室内の水面を空間平均した上下速度である。

実験では空気タービンの代わりに、空気室の負荷として取付けの容易なオリフィスが従来から用いられている。オリフィスの圧力損失は流量の2乗に比例するため、非線形負荷となる。このため、線形負荷と2乗負荷の平均エネルギーが一致するように等価線形化する。オリフィスの圧力損失 p は

$$p = \frac{1}{2} C_p \rho_a \dot{z}^2 \quad (2)$$

で表すことができ、これを式(2)に代入し線形化すると負荷ダンピング係数 D は

$$D = \frac{8}{3\pi} \frac{1}{2} C_p \rho_a |\dot{z}| A_w \quad (3)$$

と表される。ここで、 C_p :オリフィスの圧力損失係数、 ρ_a : 空気の密度、 $|\dot{z}|$: 空気室内水面の上下速度の振幅、 $8/3\pi$ は等価線形化の補正係数である。

タービンを負荷とするとき種類(ウェルズタービンや衝動タービンなど)や運転方法によりダンピング係数が異なってくる。定回転運転するときウェルズタービンはタービン差圧と流量が比例するため、線形負荷となりダンピング係数は波高の影響を受けないが、衝動タービンはオリフィスに近い特性になるため、波高の影響を受ける。また、ウェルズタービンも回転数が増えるときには非線形負荷となる。このように非線形負荷は特性を評価し辛いように思えるが、オリフィスのように等価線形化して負荷ダンピング係数を表すことにより統一的な評価が可能である。実際の洋上では不規則に波高や周期が変化するため、波浪エネルギー変換装置はこの不規則波中で駆動される。そのため、著者ら⁽¹¹⁾は実証実験の解析結果からタービン流量の確率密度分布がガウス分布に近くなることに着目し、タービンのダンピング係数を等価線形化し、不規則波特性を解析する方法も提案している。このような等価線形化による方法は設計などにおいても実用的で有用な方法である。

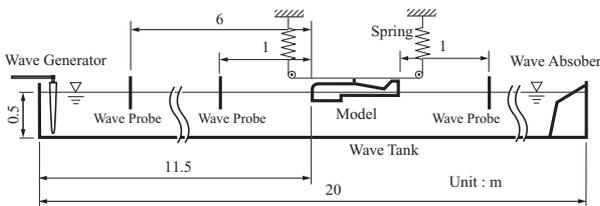


Fig. 1 Experimental apparatus

時間平均した単位幅当たりの空気室出力 W_{owc} は、
空気室奥行きを B とし、

$$W_{owc} = \frac{D|\omega z|^2}{2} B \quad (4)$$

で表され、単位峰幅当たりの入射波の波パワー W_i は、

$$W_i = \frac{\rho_w g^2 a_i^2}{4\omega f(k_0 h)} \quad (5)$$

$$f(k_0 h) = \frac{2 \cosh^2(k_0 h)}{2k_0 h + \sinh(2k_0 h)}$$

であることから、空気室効率(エネルギー吸収効率) η_{owc} は、

$$\eta_{owc} = \frac{W_{owc}}{W_i} \quad (6)$$

となる。ここに、 D :タービンやオリフィスなどの負荷ダンピング係数、 ω :入射波の角周波数、 z :船首空気室内水面の上下変位、 a_i :入射波の振幅、 k_0 :入射波の波数、 h :水深である。

2・3 数値解析結果の検証⁽⁷⁾ 図2は数値解析結果を検証するため示した1例であり、入射波の設定波高20mm($a_i/B=0.063$)、開口比 $R=1/150$ について供試浮体の実験結果と比較されている。実験結果は白丸と黒

丸印、計算結果は破線(拘束状態)と実線(係留状態)で表示している。また、数値解析は実験と同じ波周期について計算し、折線により表示を行っている。入射波の波高は設定した目標波高から多少ずれるため、計測された入射波の振幅 a_i/B も図中に添えている。入射波以外の計測データは空気室内の圧力振幅 $p/\rho_w g a_i$ 、反射波の振幅 a_r/a_i 、透過波の振幅 a_t/a_i である。図中にはこれらに加えて数値解析から得た空気室内の水面変位の振幅 z/a_i も示している。浮体の動揺特性に関しては前後揺れ(surging) ξ 、上下揺れ(heaving) ζ 、縦揺れ(pitching) θ を示し、重心まわりの振幅(ξ, ζ, θ)と位相($\varepsilon_\xi, \varepsilon_\zeta, \varepsilon_\theta$)により表している。位相は空気室前面(船首)位置における入射波の上下変位を基準に表示している。縦揺れは時計回りの角度を正とし、波形勾配(波高と波長の比)で無次元化している。実験による波高および圧力の読取り誤差は 1mm, 1mmAq(10Pa)以下である。しかし、これを超える実験結果のバラツキが生じており、より大きな実験系の総合的誤差が内在することがわかる。このため、数値解析で推定される数値誤差^{(3),(6)}(0.5%以下)とともに実験誤差を踏まえた特性把握を行っている。

実験範囲にある波長 $\lambda/B=2\sim 18$ の間では数値解析

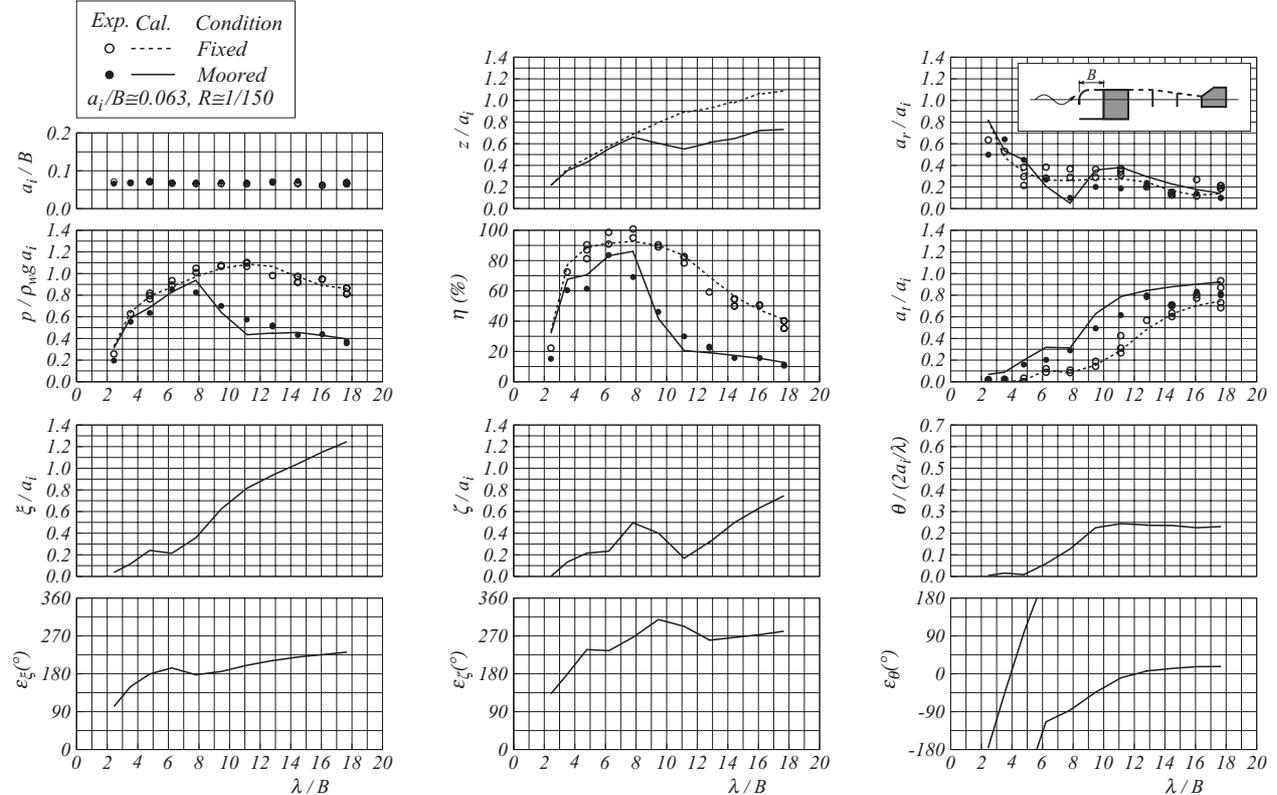


Fig.2 Pressure in the air chamber, elevation of the water surface in the air chamber, efficiency, reflected waves, transmitted waves, surging, heaving, and pitching of the floating body against the wavelength, λ , at the opening ratio of the air chamber, $R = 1/150$.

の結果(実線および破線)は実験データのバラツキ程度に収まっており、空気室内の圧力 p 、反射波 a_r 、透過波 a_t 、効率 η_{owc} は波の振幅 a_i や空気室の開口比 R にかかわらず、実験結果に匹敵する計算精度が得られている。ただし、短波長 ($\lambda/B < 8$) 側では実験と計算結果の差が増大する傾向にある。これは短波長や高波高になる程、波形勾配が大きくなり微小振幅波の線形理論による推定精度が低下するとともに、実験では波の周波数が高くなるため波形が変形し易くなるなど、生成波形や計測など実験系全体の誤差も増大し数値解析と実験結果との差が増す要因になっていると考えられる。また、浮体の角部からのはく離による損失の増加も影響していると予測される。

空気室内の圧力 p は波長 $\lambda/B=8$ 付近に最大値が現れ、負荷ダンピング係数の増加とともに圧力が増加する傾向を示すものの、図2以外の実験結果や計算結果を考察すると波の振幅 a_i/B や開口比 R による負荷ダンピング係数の顕著な影響は受けていない。

最大効率点は波長が空気室奥行き B の 6~8 倍、 $\lambda/B=6\sim 8$ 付近に現れ、図2に示す波の振幅 $a_i/B \cong 0.063$ 、開口比 $R=1/150$ では 80%と高い効率 η_{owc} が得られている。この波長では実験が行われたすべての波高、開口比の条件において、反射波および透過波の振幅が極値となり、一旦小さな値になって効率が向上している。 $\lambda/B=8$ より大きな波長では透過波の振幅は急激に増大することになる。これに対して、反射波は波長が $\lambda/B=8$ より短くなると、その波高が大きくなる。このため $\lambda/B=8$ より短い波長で効率は低下する。また、開口比が小さくなるにつれて、負荷ダンピング係数が過大になるため、効率は低下するようになる。線形負荷であれば波高により負荷ダンピング係数が変化しないため、微小振幅波の線形理論が成立する範囲では波高が変化しても効率は変化せず一定となる。しかし、本研究は、非線形負荷であるオリフィスを用いているため、入射波の振幅が増大すると負荷ダンピング係数が大きくなり、効率の低下につながっている。

図2の下部には浮体の動揺特性を示している。浮体動揺は重心まわりの振幅 (ξ, ζ, θ) と位相 ($\varepsilon_\xi, \varepsilon_\zeta, \varepsilon_\theta$) により表している。位相は空気室前面(船首)位置における入射波の上下変位を基準に表示している。また、 ε_θ は $\pm 180^\circ$ の範囲で表示しているため、表示上 $\pm 180^\circ$ 付近では 360° の跳びが生じる。縦揺れ θ は時計回りの角度を正とし、波形勾配(波高と波長の比)で無次元化している。最大効率点は浮体の固定時、動揺時にかかわらず、波長が空気室奥行き B の 6~8 倍付近に現れているが、8 倍を越えると浮体が固定された状態に比較し、自由に

動揺したときの効率は急激な低下を起している。ここで重要となる運動は上下揺れと縦揺れであり、上下揺れの振幅 ζ は最大効率点で極大値となっている。このときの位相は上下揺れ ε_ζ 、縦揺れ ε_θ ともに -90° であり、合成された浮体前面の上下変位の位相は -90° となるため、浮体前面では入射波に対して位相が 90° 遅れて運動をしていることがわかる。図中には示していないが、このとき空気室内水面の上下変位は固定と動揺状態ともに位相が -80° 前後になっている。

基本的に浮体が固定された状態では、波長(波周期)の影響が少なく、空気室奥行き B に対する波長 λ が 3 倍から 12 倍の間は 50%以上の効率 η_{owc} が得られている。浮体が動揺すると最大効率点よりも長波長(長周期)側では効率が急激に低下する。これは浮体の波乗りが顕著に現れ、縦揺れの位相が入射波と同位相に近づき、波が透過しやすく、透過波の波高が急激に増大するためである。最大効率点よりも短波長(短周期)側では、入射波と空気室内の振動水柱との連成運動が支配的になっており、動揺による透過波の増大はあるものの反射波に顕著な違いはなく、空気室内の圧力 p や効率 η_{owc} は固定時と同様の傾向を示している。

空気室効率について考えると、動揺時においても 80%程度の高い効率が達成されている。そのため、今後重要な点は、さらに長い波長で高い効率が得られる浮体形状の開発である。すなわち、建造コストを低く抑えるためには、より短い浮体で高い効率を得る必要がある。そして、狭い同調点付近のみでなく、広い範囲で高い効率が得られることも必要である。これを踏まえて、次章で種々の形状について検討し、より適切な浮体形状の提案を行う。

3. 浮体形状による特性比較

例えば、無限水深で波周期が 8 秒の波は波長が 100m になり、図2の浮体形状では最大エネルギー吸収効率点 $\lambda/B=8$ で運転すると、約 75m もの浮体長が必要となる。有義波高 2m、有義周期 8sec の波浪エネルギーは単位幅あたり約 16kW/m であることを考慮すると、エネルギー吸収効率を優先した設計は、加えられる波浪エネルギーに比較して非常に大きな浮体を生み出すことになる。このため、高いエネルギー吸収効率を優先するのではなく、浮体サイズを小さくし、建造コストの低減とエネルギー吸収効率を加味した総合的な評価方法の確立が求められる。このため、2つの評価関数

$$Ld / (\lambda_{MAX}^2 \eta_{owc}) \quad (7)$$

$$\lambda_{MAX} / \lambda_{MIN} \quad (8)$$

を導入する. 浮体サイズを表す重要な因子として, 浮体断面積 Ld , 波長 λ_{MAX} , エネルギー吸収効率 η_{OWC} を挙げることができる. 同一浮体形状でのエネルギー吸収率は浮体長と波長の比および浮体形状の影響を受ける. 浮体の喫水と波長の比は浮体のサイズと浮体形状を表す因子でもある. そして, 浮体形状はエネルギー吸収率に影響をおよぼし, 高いエネルギー吸収率では同じエネルギーを得るための浮体幅を狭くでき, 結果として浮体を小型化できることになる. これらを考慮し, 浮体サイズに関する評価関数を導出すると式(7)が得られる. 式(8)は運転範囲を表し, 大きい値ほど広い運転範囲が得られることを示している. 本研究における運転範囲の選定は解析結果から波長の影響を考慮し, エネルギー吸収率が 50%以上としている. なお, 運転範囲中で最も短い波長 λ_{MIN} , 最も長い波長 λ_{MAX} としている.

図3は検討対象とした基本的な浮体形状を示している

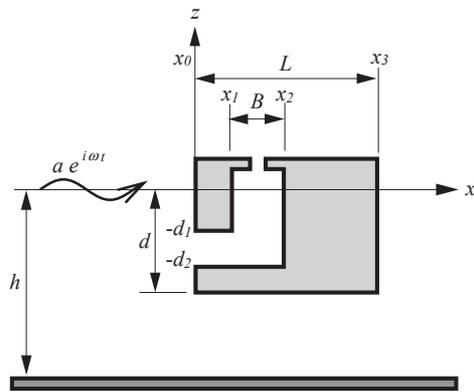


Fig.3 Schematic view of floating device with OWC.

る. 浮体内に空気室が存在する形状で, 空気室を浮体前方に設置した形状と後方に設置した形状について検討を行っている. ここで, 空気室奥行き B , 浮体長 L , 喫水 d , 水深 h としている. また, x_1 の位置を前方, 後方に移動することで, 空気室が船首, 船尾に設置された浮体形状を表現できる.

図4は船尾に空気室を有する浮体特性を示している. 水深 h が空気室奥行き B の 40 倍, 喫水 d を 3 倍とする浮体形状について, 浮体長の影響を検討している. 浮体長 L は空気室奥行き B の 3~12 倍まで変化させ, 波長ごとに負荷ダンピング係数を変化させて最大エネルギー吸収効率を求め, その負荷ダンピング係数 D , 浮体と空気室内水面との相対変位振幅 z_{OWC} , 空気室内圧力振幅 p , エネルギー吸収効率 η_{OWC} , 浮体重心位置の上下変位振幅 ζ , 縦揺れ変位振幅 θ を示している. 最大エネルギー吸収率は全長 $L/B=4$ の浮体で生じ, 波長と空気室奥行きとの比は $\lambda/B=22$ 付近となっている. なお, 作動範囲は浮体長が $L/B=8, 12$ と長くなるほど拡大する.

ここで, エネルギー吸収率が 50%以上を作動範囲として, 式(7), (8)の評価関数により最適浮体形状を考察

Table 1. Typical effects of the length for the device with OWC at stern side, where is over 50% in the efficiency.

L/B	λ/B	L/λ_{MAX}	Ld/λ_{MAX}^2	$\lambda_{MAX}/\lambda_{MIN}$
3	—	—	—	—
4	19.5~28.3	0.141	0.0149	1.45
8	23.0~44.5	0.180	0.0121	1.92
12	29.0~47.0	0.255	0.0163	1.62

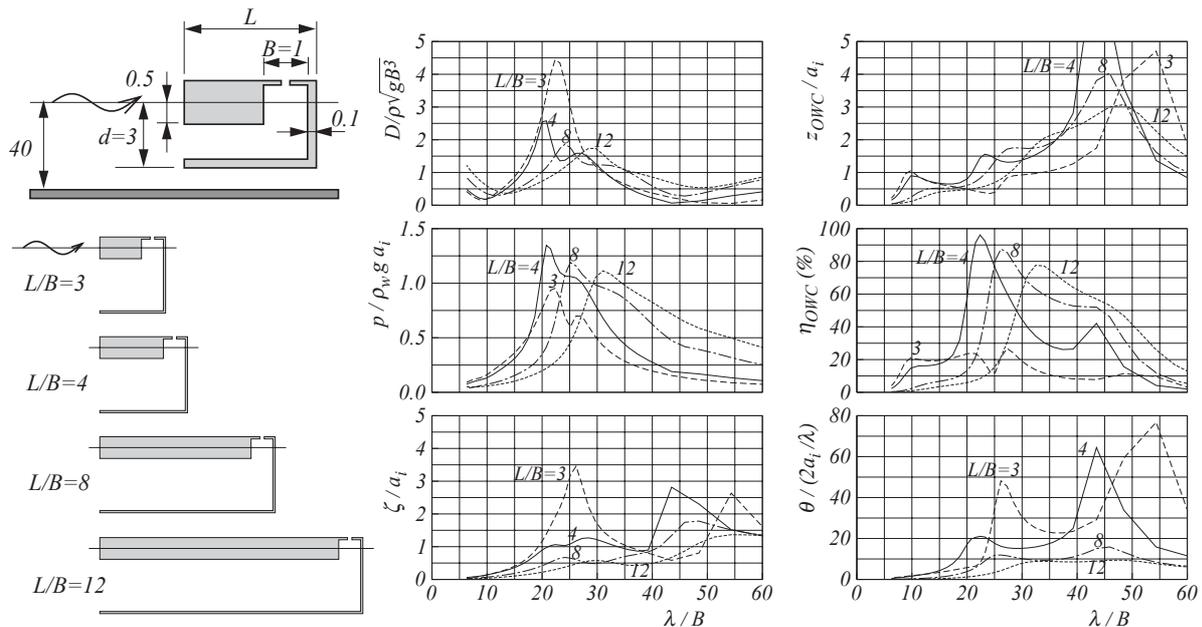


Fig.4 Effect of the length of floating devices which have OWC at stern side.

する。表1はこの結果を表し、 $L/B=8$ の形状が最も小さく、作動範囲も広く、最適な形状となっている。 $L/B=8$ の作動範囲が広がる理由は、動揺により $\lambda/B=45$ 付近の波長にも共振が生じ、効率が向上するためである。

図5は船首に空気室を有する浮体の特性を示している。水深 h が空気室奥行き B の40倍、喫水 d を1倍とする浮体形状について、浮体長の影響を検討している。浮体の全長 L/B は1.2~6.0倍までの5種類とし、波長ごとに、負荷ダンピング係数を変化させて最大エネルギー吸収効率を求め、その負荷ダンピング係数 D 、浮体と空気室内水面との相対変位振幅 z_{OWC} 、空気室内圧力振幅 p 、エネルギー吸収効率 η_{OWC} 、浮体重心位置の上下変位振幅 ζ 、縦揺れ変位振幅 θ を示している。最大エネルギー吸収効率は全長 $L/B=6$ の浮体に生じ、波長と空気室奥行き之比は $\lambda/B=6.2$ 付近に現れる。作動範囲は浮体長が長くなるほど拡大することが分かる。

ここで、式(7)、(8)の評価関数により最適浮体形状を

考察する。表2はこの結果を表しており、エネルギー吸収効率が50%以上を作動範囲としている。この結果、評価関数 Ld/λ_{MAX}^2 は $L/B=1.5$ の形状が最も小さく、作動範囲 $\lambda_{MAX}/\lambda_{MIN}$ は $L/B=6$ が最も広がる。 $L/B=1.2$ は全域にわたってエネルギー吸収効率が50%以下と低くなり、短すぎる浮体は適さないことが分かる。エネルギー吸収効率および作動範囲的には浮体長が長い $L/B=6$ が優れているが、浮体サイズが大きくなるため、経済的には浮体サイズが小さく、作動範囲も2.63倍と十分に

Table 2. Typical effects of the length for the device with OWC at front side, where is over 50% in the efficiency

L/B	λ/B	L/λ_{MAX}	Ld/λ_{MAX}^2	$\lambda_{MAX}/\lambda_{MIN}$
1.2	—	—	—	—
1.5	40~106	0.142	0.0133	2.63
2.0	35~93	0.215	0.0231	2.63
4.0	3.1~10.9	0.367	0.0337	3.57
6.0	3.0~13.0	0.462	0.0355	4.35

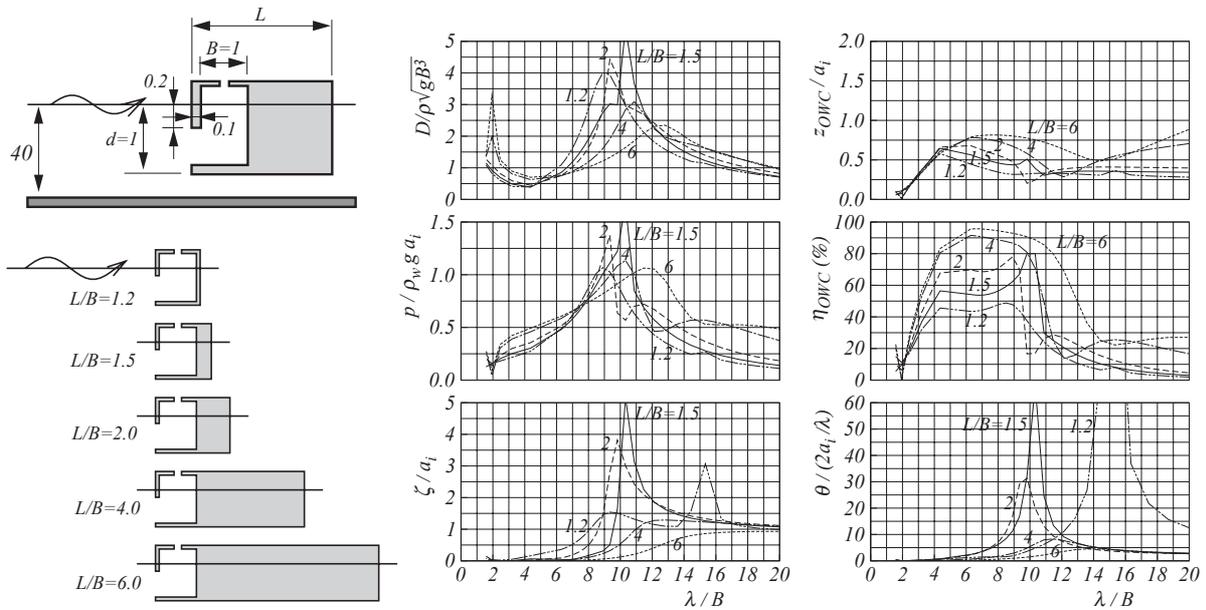


Fig.5 Effect of the length of floating devices which have OWC at front side.

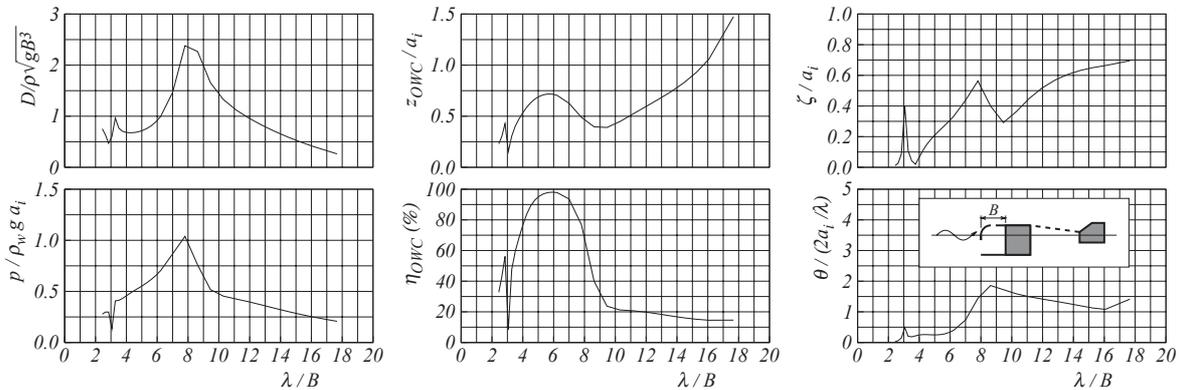


Fig.6 Characteristics of Mighty whale type device.

広い $L/B=1.5$ が最適な形状である。浮体長の短い $L/B=1.5$ で作動範囲が広がった理由は、動揺により $\lambda/B=10.2$ 付近の波長で共振が生じ、効率が向上するためである。図2に示すように一般的には動揺によりエネルギー吸収効率が低下するが、動揺による共振が長波長側で効果的働くと作動範囲が拡大し浮体サイズの低減に寄与できることが分かる。

図6は代表的な浮体形状として、海洋科学技術センターにより実証実験がなされたマイティホエール⁽⁹⁾を挙げ、この浮体形状について2次元数値解析を行った結果である。この浮体形状は高いエネルギー吸収効率98%と広い作動範囲 $\lambda_{MAX}/\lambda_{MIN}=2.59$ を得ることができる。ただし、波長 $\lambda/B=8.6$ 付近に現れる共振によるエネルギー吸収効率の明確な寄与は確認できない。

4. 最適浮体形状の検討

マイティホエール型浮体形状との比較を通して最適浮体形状について考察を行う。図7は3種類の浮体形状、マイティホエール、空気室が船首および船尾にある形状についてサイズ比較を行っている。浮体サイズに影響する最も厳しい条件は運転範囲の中で最も長波長の波であり、この波長に対応した浮体長が最も長くなる。このため、50%以上のエネルギー吸収効率となる波長を作動範囲とし、運転すべき最大波長でのサイズを比較している。最適浮体形状は(b)の空気室が船首に設置された型式で、浮体長と空気室奥行き比が $L/B=1.5$ の浮体である。同一波長の波に対して、浮体断面積で比較すると最適浮体形状はマイティホエール形状の浮体の1/6程度のサイズに抑えられている。ただし、課題も考えられ、小型化とともにタービン発電機などの実装スペースや配置などの面で自由度が少なくなる点や浮体を

動揺させてエネルギーを吸収する構造になるため、大きな動揺により設置機器への強度面での負担が大きくなる点が挙げられる。

このように、より現実的な浮体形状の選定には、機器の実装などを含めた構造、建造コストや入射波の出現率を考慮することが必要である。ただし、初期設計の段階では大まかな形状を決定する必要がある点や小型化の可能性を示すことができるため、ここに示した簡易的な手法は有効である。

5. 結 言

本研究では空気室を有する波浪変換エネルギー装置特性を数値解析により推定し、最適浮体形状について検討を行った。数値解析結果の妥当性を検証するため、水面上に浮体が固定された状態と無拘束に近い状態で動揺するときの基礎特性を実験と比較し、良好な推定精度が得られることを確認するとともに、浮体の動揺特性と空気室特性との関連を把握しつつ、最適浮体形状の提案を行い、以下の結論を得た。

(1) 浮体の動揺特性と付随する空気室の特性は領域分割法により取扱っている。解析は供試体の形状に合わせて、計算領域を8つに分割して実施した。

(2) 実験では空気室内の圧力、反射波、透過波を計測し、空気室内の圧力から空気室効率(エネルギー吸収率)が算出されている。数値解析は実験と同じ項目を算出するとともに、浮体の動揺特性の結果も算出している。これらの数値解析結果は実験結果と比較され、実験が行われた波長の範囲では計算結果と実験結果は全ての実験点で良く一致する結果が得られた。実験データのバラツキや誤差を考慮すると、本解析方法による結果は実験結果に匹敵する精度を期待できる。

(3) 実験結果および計算結果から、空気室内の圧力は波長 $\lambda/B=8$ 付近が最大値となり、最大効率点は波長が空気室奥行き比の6~8倍、 $\lambda/B=6\sim 8$ 付近に現れ、波の振幅 $a_i/B \cong 0.063$ 、開口比 $R=1/150$ では80%と高い効率が得られている。この波長では反射波および透過波の振幅が極小値をとり、一旦、小さな値となり効率の向上に寄与した後、これより大きな波長では反射波および透過波の振幅が急激に増大するため効率は急激に低下する。これに対して、反射波の波高は波長が短くなるにつれ増大し、効率の低下に強く影響を与えている。

(4) 浮体の動揺による影響は最大効率点より長波長側で急激に現れ、透過波および反射波の波高が急増して効率が急激に低下する。これに対して浮体が固定状態のときは効率の変化が非常に緩やかである。最大効率点の位相は上下揺れ、縦揺れともに入射波に対して

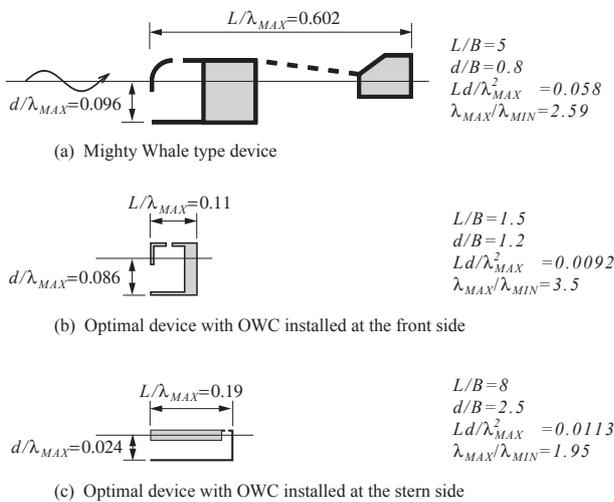


Fig.7 Size Comparison with Mighty whale type device and optimal profile devices

90°遅れて、反射波高、透過波高ともに極小値を取り、特に反射波高はゼロに近い値となっている。最大効率点よりも短波長側は動揺の影響は少なく、固定状態の特性と同じ傾向を波長に対して示している。これは入射波と空気室内の水柱の動揺の関係が浮体動揺に比較して支配的であることを示している。

(5) 最適浮体形状を評価するため、浮体サイズと作動範囲について、 $Ld/\lambda_{MAX}^2\eta_{OWC}$ と $\lambda_{MAX}/\lambda_{MIN}$ なる評価関数を導出した。

(6) マイティホエール形状の浮体は高い空気室効率と広い作動範囲を有しており、最大効率は $\lambda/B=6$ 付近に現れ、99%にも達している。しかし、ここに提案した最適浮体形状に比較して大きな浮体となる。

(7) 提案した最適浮体形状は船首に空気室を有し、 $L/B=1.5$ 、 $d/B=1.2$ であり、サイズを表す評価関数 Ld/λ_{MAX}^2 がマイティホエール型、船尾空気室型に比して、最も小さな値、0.0092となっている。

文 献

- (1) Raghunathan, S., The wells air turbine for wave energy conversion, *Prog. Aerospace Sci.*, Vol. 31 (1995), pp.335–386.
- (2) Suzuki, M. et al., Analysis and Design on Guide Vanes Characteristics of Wells Turbine for Wave Power Generator, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.65, No.636 (1999), pp.2718–2725.
- (3) Suzuki, M., Washio, Y., and Kuboki, A., Characteristics of Floating Type Wave Power Generating System with Oscillating Water Column, *Proc 15th Int Offshore and Polar Eng Conf, Seoul, Korea, ISOPE*, CD-ROM (2005), pp.529–536.
- (4) Suzuki, M. and Arakawa, C., Numerical Methods to Predict Characteristics of Air Chamber for Fixed Terminator Type of Wave Energy Converter, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.62, No.604 (1996), pp.4135–4141.
- (5) Suzuki, M. and Arakawa, C., Numerical methods to predict characteristics of oscillating water column for terminator type of wave energy, *Proc 13th Int Offshore and Polar Eng Conf, Honolulu, Hawaii, USA, ISOPE*, CD-ROM (2003), pp.333–340.
- (6) Suzuki, M., Washio, Y., and Kuboki, T., Analysing Method of Floating Type Wave Energy Conversion Device with Air Chamber, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.718 (2006), pp.1529–1536.
- (7) Suzuki, M. Washio, Y., and Kuboki, T., Characteristics of Floating Type Wave Energy Conversion Device with Air Chamber, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.72, No.722 (2006), pp.2488–2495.
- (8) Maeda, H., Kinoshita, T., Masuda, K. and Kato, W., Fundamental research on oscillating water column wave power absorbers, *Journal of Energy Resource Technology, ASME*, Vol.107 (1985), pp.81–86.
- (9) Washio, Y., Osawa, H., Nagata, Y., Fujii, F., Furuyama, H., and Fujita, T., The offshore floating type wave power device “Mighty Whale”: open sea tests, *Proc 10th Int Offshore and Polar Eng Conf, Seattle, ISOPE*, Vol.1 (2000), pp.373–380.
- (10) Osawa, H., Nagata, Y., Miyajima, S., and Maeda, H., A Design of Mooring System for Floating Wave Energy Converter in Shallow Water, *Journal of the Society of Naval Architects of Japan*, Vol.182 (1997), pp.341–348.
- (11) Suzuki, M. and Arakawa, C., Method of Selection on Wells Turbine Profile for Wave Power Generating System, *Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Series B*, Vol.69, No.683 (2003), pp.1621–1627.