

沿岸固定式波力発電システムの開発研究*
(偏心揺動弁を用いた圧力および流れ方向制御)丹 省 一*¹, 福 士 正 幸*², 清 水 幸 丸*³Studies on the Shore-Fixed Air Chamber for Wave Power Generation
(Pressure and Flow Direction Control for a Turbine with a Swaying Valve)

Shoichi TAN, Masayuki FUKUSHI and Yukimaru SHIMIZU

The air chamber system is a kind of method for transformation from wave energy to mechanical energy. In this system, wave energy operates periodically in the wave power generation plant. In order to improve this system, we propose a new technology with one-way flow and restriction of turbine input. The former is applicable to an impulse turbine, and the latter saves the excess power from the air chamber. In this system, the air duct has a bypath with a turbine. Pressure and flow direction are controlled with only one swing plate valve in the air duct. This paper describes both experimental results at a site of sea-side, and the analytical result of the plant performance.

Key Words: Ocean Engineering, Alternative Energy, Wave Energy, Air Chamber, Safety of Plant

1. 結 言

波力発電システムの一つである沿岸固定式空気室はよく知られている手段である⁽¹⁾。この空気室と大気間を往復する気流で駆動するウエルズタービンと、衝動タービンは実用化に向けた研究がなされている⁽²⁾。前者は無弁のタービンであるが、後者は一部⁽³⁾を除けば、流れ方向を一定にする必要性から方向制御弁を備えている。いずれの場合もタービン定格を超える入力対策に圧力制御弁を用いている⁽⁴⁾⁽⁵⁾。これはすでに実用化されているブイ形⁽⁶⁾と異なり、固定式空気室が緩衝機能をもたない装置の結果である。波力発電船「海明」⁽⁷⁾のように大きな装置の場合も、方向制御弁ならびに圧力制御弁に対する負担が大で故障の原因にもなる⁽⁸⁾。

本報では、流れの方向制御を必要とする衝動タービンに対して、タービンに加わる圧力の制限とタービン内気流の方向制御を1枚の弁で行う方法を提案した。さらに小形の装置を製作し、定常流下での実験と鶴岡

市三瀬の「沿岸固定式波力発電用空気室」に設置しての実海域実験を行った。また、弁の挙動について理論解析を行った。その理論解析結果と実験結果はほぼ一致した。本報で示す一枚弁方式は、偏心弁の気流によるトルクを利用している。実験結果、タービンに作用する圧力の制限および流れの方向制御を十分に行い得るものと判断できた。なお、本方式は総合効率が少し低くなる。しかし、波力発電装置が設置される場所は辺地かつ危険で、常時監視とメンテナンスの難しい場所が多く、何にもまして安全性と耐久性が優先する。したがって、著者らの提案する一枚偏心揺動弁方式による圧力と方向制御は実用性の高い有益な方法と考えられる。

2. おもな記号

- A : 本装置入口面積 (=0.28 m×0.135 m)
 B : 本装置入口幅 (=0.28 m)
 E : 発電機出力電圧の D. C 変換後の値 V
 I_v : 弁とおもりの慣性モーメント kg・m²
 p_{AC} : 空気室内圧力, 送風機試験時は装置入口総圧 (ゲージ圧力) Pa
 p_{TB} : タービン前後差圧 Pa
 Q_{AC} : 装置に送り込まれる総風量 m³/s

* 原稿受付 平成6年4月15日。

¹ 正員, 鶴岡工業高等専門学校 (〒997 鶴岡市井岡字沢田 104)。² 鶴岡工業高等専門学校。³ 正員, 三重大学工学部 (〒514 津市上浜町 1515)。

- Q_{TB} : タービン内通過風量 m^3/s
- T_F : 気流が制御弁に作用するトルク $N \cdot m$
- T_G : 制御弁の復元トルク $N \cdot m$
- θ : 弁が水平位置から傾いた角度(気流流出時に弁が傾く方向を正とする) 度, または rad

係 数

- C_F : 気流による弁開きトルク係数
- C_G : 弁の復元トルク係数 $N \cdot m$
- C_P : 圧力利用率 $= p_{TB}/p_{AC}$
- C_Q : 気流利用率 Q_{TB}/Q_{AC}

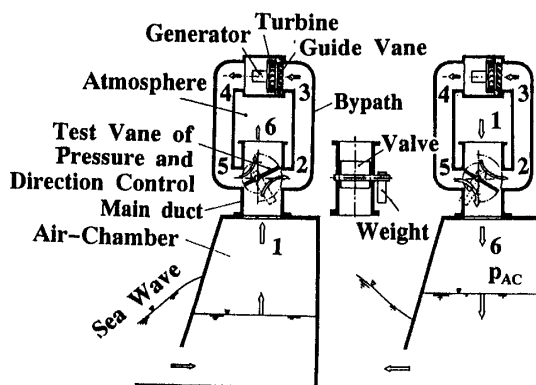
添 字

- m : 実海域試験時の半周期ごとの平均値で, 0.05 s 間隔でサンプリングし数値積分のうえ求めた値
- p : 実海域試験時の半周期ごとのピーク値

3. 偏心揺動弁の原理および実験装置

3.1 原理と特徴 図1に著者らの開発提案している調圧と方向制御の原理を示す。空気室と外気間で、装置の主管を通して気流が往復する。主管内には弁があり、重すい(錘)によって水平に保たれている。弁の揺動軸は偏心させてあり、弁は主管内の気流によって生じるトルクで傾き、気流をわき路に導く(図1中番号は流れの順序を表す)。これによって、わき路内に設置したタービン内の気流の方向は常に一定に保たれる。装置入口総圧(実海域では空気室内圧力)が設定値を超えるとき、弁が大きく開き、わき路内のタービンに対する入力を制限する。弁がその慣性で垂直位置を超えようとするときは、気流による逆トルクが作用して、流路壁との接触を防ぐ。この作用によって、弁と主管壁面の衝突による騒音と破損を防止する効果が生じる。

3.2 実験装置 図1の揺動弁の偏心量は、本装



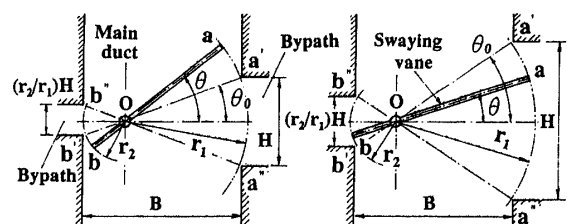
(a) 寄せ波時 (b) 引き波時

図1 調圧と方向制御の原理図

置の機能を左右する量である。偏心量に対する弁と両わき路高さの関係を図2に示す。弁端 a とわき路入口端 a'(または a'') および、弁の他端 b とわき路出口端 b'(または b'') が同時に最接近する寸法にしてある。このときの弁揺動角度は、気流を最大限にわき路に導く値であり、この弁角度を θ_0 で表し、弁設定角度と呼ぶ。偏心量が大なる場合は、気流による弁トルクが大となるが、両わき路高さ H および $(r_2/r_1)H$ の差も大になる。狭い側のわき路高さを大にして寸法差を小さくすると、弁端とわき路端にすきまが生じ、装置に流入する全気流のうち、わき路内に導入される割合を低下させる。この点は、図2(b)のように弁を長くしても同じである。偏心量が小の場合は両わき路高さの差を小にすることができるが、気流による弁のトルクが期待できなくなる。以上を考慮し、経験的判断に基づいて、本研究では弁軸を幅の2:1の位置とし、さらに弁端と両わき路端が接近する位置に幅をもたせた。その構造を図3に示す。この2:1の値の妥当性についての理論的考察は、まだ行っていない。

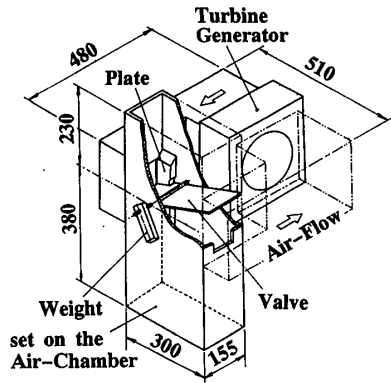
図3(a)に本実験で用いた装置の全体図を示す。本装置は主管(図1)とタービン発電機を組み込んだわき路(図1)から成る。タービン発電機は緑星社(株)のTG-1⁽⁶⁾で、タービン入口ノズルで気流の圧力を速度に変換している。ノズルの流路断面積は、流路全断面積の10.6%(ノズル比)である。図3(b)のA形弁は矩形弁である。図3(c)のB形弁は主管の片側流路幅(タービン出口わき路側)を狭め、併せて弁の片側面積を減らした場合である。これは気流による弁トルクをA形よりも大にするためである。いずれの場合も弁の揺動軸中心は弁全長の1/3に位置する。弁がわき路端に最も接近したときの弁角度 θ_0 は約25°で、図3(b)の弁位置がそれにあたる。

図4に実海域実験を行うために使用した沿岸固定式波力発電用空気室⁽⁷⁾を示す。この空気室は新技術開発事業団が鶴岡市三瀬に実証実験を行うために設置したもので、本実験はこの装置を借り受けて行われた。

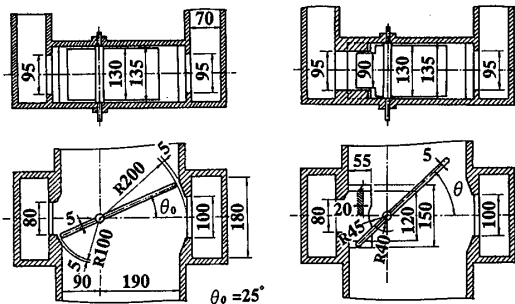


(a) 弁端とわき路端 (b) 弁を長くした場合

図2 弁揺動軸の偏心量とわき路の位置関係



(a) 全体図



(b) A形弁

(c) B形弁

図3 圧力制御実験装置

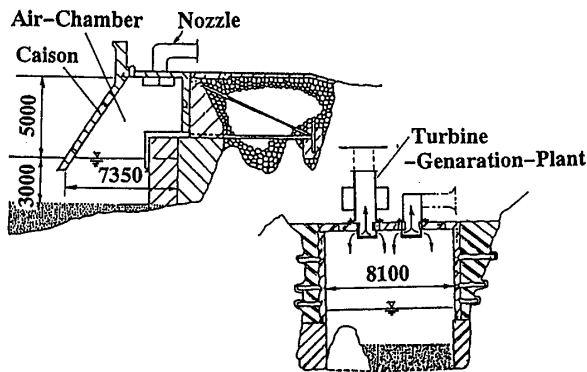


図4 沿岸固定式波力発電用空気室

3.3 定常流下における実験装置各構成要素の諸特性

空気室内での弁の挙動が準定常であると考え、本装置を送風機吐出し側に接続し、定常流下での実験を行った。装置を出た気流は大気に放出され、気流のもつすべてのエネルギーが失われるものとして扱った。この実験において、装置に対する作用は波力発電用空気室内の水位上昇時(図1の寄せ波時)に相当する。流れが逆の場合(図1の引き波時)も同一の結果が得られるものとする。

3.3.1 タービン発電機の特性

本装置わき路に設置したタービン発電機の特性実験結果を図5に示

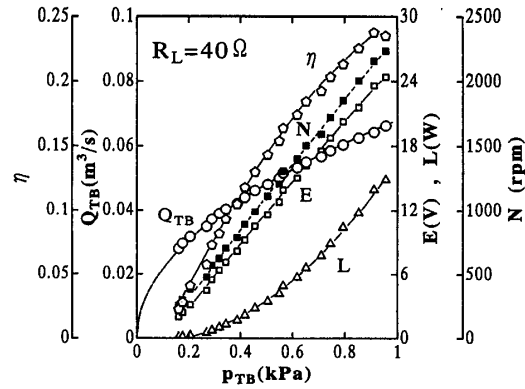


図5 タービン発電機の特性

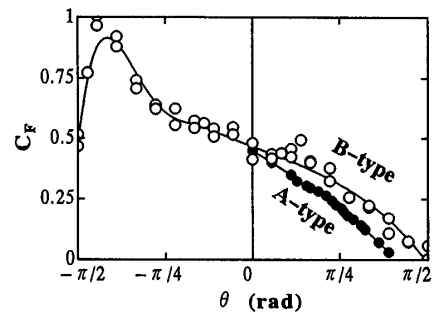


図6 気流による弁トルク係数

す。発電機はA.C三相出力であるが、全波整流後抵抗負荷に接続して行った実験結果である。図5には最も高い効率を得た負荷抵抗値40Ωの場合を示す。以後の実験はこの抵抗値で行った。図5中LおよびEは、それぞれ発電機出力および電圧のD.C変換後の値、Nはタービン発電機回転数、ηはタービン発電機効率を表す。同一負荷ではタービン出力は p_{TB} に依存し、タービン入力制限効果は p_{TB} の値から判断できる。タービン回転数によるタービン内通過風量変化は認められなかった。これは、タービン入口ノズルにおける圧力降下量が大なるためと思われる。 Q_{TB} は式(1)で近似できる。

$$Q_{TB} = 0.084 \cdot 1 \cdot (\pi/4) d_i^2 (p_{TB}/\rho)^{0.5} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 d_i はタービン外径(0.19 m)、 ρ は空気密度(1.225 kg/m³)である。

3.3.2 弁のトルク

$$T_c = C_c \sin \theta \dots\dots\dots (2)$$

C_c [N・m]は揺動部の重量と重心位置による値である。本報ではおもにB形弁の次の2例について示し、以後図中では(a)の場合を M_1 、(b)の場合を M_2 で表す。

$$(a) C_c = 0.64 \text{ N}\cdot\text{m}, I_v = 0.0135 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \dots (3)$$

$$(b) C_G = 1.47 \text{ N}\cdot\text{m}, I_V = 0.0190 \text{ kg}\cdot\text{m}^2 \dots (4)$$

次に、気流により弁を開く側に生じるトルク T_F を、弁開きトルク係数 C_F を定義して次式で表す。

$$T_F = C_F A (B/2) \rho_{AC} \dots (5)$$

C_F の実験結果を図6に示す。図6よりA形弁の場合は θ が $\pi/2$ より小なる値で C_F が零となり、主管内気流のみでは弁が完全に開ききれないことがわかる。B形弁の場合は $\theta < 0$ つまり、弁(図2のo-a側)が上流側に傾いたときには C_F が大となり、弁を下流側に向かわせる。これは弁に作用するトルクの作用点が常に図2のo-a側にあることを意味している。この作用点の偏りによって、弁は $-\pi/2$ から $\pi/2$ の間で揺動する。図6からB形弁の C_F は次式で近似できる。

$\theta < -\pi/6$ の領域では、

$$C_F = 0.449 - 0.404\theta + 2.11\theta^2 + 2.74\theta^3 + 3.90\theta^4 + 1.491\theta^5 \dots (6)$$

$\theta \geq -\pi/6$ の領域では、

$$C_F = 0.467 - 0.1727\theta - 0.00352\theta^2 - 0.0402\theta^3 - 0.01045\theta^4 + 0.00351\theta^5 \dots (7)$$

3.3.3 弁角とタービン前後差圧および流量

弁角により空気室内圧力とタービン前後差圧の割合が異なる。これを C_P で表す。またこのときの気流利用率 C_Q を次式で定義し、図7に実験結果を示す。ここで、 Q_{TB} は測定値 p_{TB} から式(1)を用いて算出した値である。

$$C_P = p_{TB} / p_{AC} \dots (8)$$

$$C_Q = Q_{TB} / Q_{AC} \dots (9)$$

C_P , C_Q ともに最大となるのは、弁端がわき路端と最も接近したときである。主管に比べてタービンを設置したわき路の流動抵抗が大なるために C_Q は全般に小さい値を示している。構造上、弁と主管壁との間げきを減じると、弁設定角における C_Q はより大となり得るものと考えられる。A形弁はB形弁に比較して、 θ が弁設定角度を超えても C_P の低下は緩やかで、圧力制限効果が低い。図7よりB形弁の C_P は次式で近

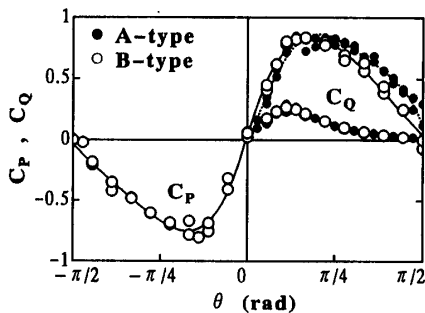


図7 弁角度と C_P , C_Q

似できる。

$\theta < 0$ 領域では、

$$C_P = 0.0454 + 3.62\theta + 5.10\theta^2 + 2.33\theta^3 + 0.1400\theta^4 - 0.1215\theta^5 \dots (10)$$

$\theta \geq 0$ 領域では、

$$C_P = 0.0454 + 3.30\theta - 4.24\theta^2 + 1.759\theta^3 - 0.234\theta^4 - 0.01326\theta^5 \dots (11)$$

以上、B形弁のほうがA形弁よりも流れ方向、圧力制御効果の面で優位にあると認められる。以後B形弁についての実験結果を示す。

4. 偏心揺動弁の運動方程式

弁には空気室と外気間を流れる往復気流により弁を開こうとするトルク T_F と、弁自身と復元重すいの重力による復元トルク T_G が作用する。このとき、弁の運動方程式は次式となる。

$$I_V (d^2\theta/dt^2) + C(d\theta/dt) + C_G \sin \theta = T_F \dots (12)$$

左辺第2項は粘性減衰項で、 C は粘性減衰モーメント係数 ($\text{N}\cdot\text{ms}$) である。粘性減衰項を加味しない計算結果には、圧力変動周期に沿った弁の揺動上に短周期の弁固有振動が強く現れた。これは実海域実験では見られなかったものである。 C に式(13)に示す微小振動の場合の臨界粘性減衰係数値 $C_c^{(9)}$ を用いた場合、実海域実験結果に近い値が得られた。本報には、この値で求めた結果を示した。

$$C_c = 2(G_G \cdot I_V)^{0.5} \dots (13)$$

5. 実海域実験結果と理論解の比較

本実験で使用した沿岸固定式波力発電用空気室は出

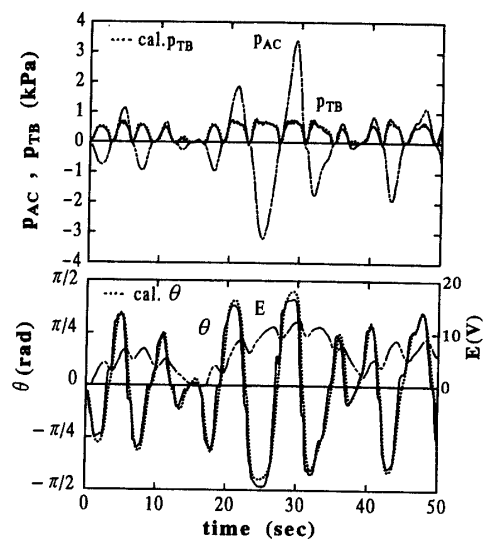


図8 実海域実験結果と理論値

力 40 kW 用で大きく、その上部には 700 mm × 700 mm の気流流入出孔が 2 箇所ある。この流入出孔の一方は解放し、残る一方に本装置を設置して実験を行った。これは空気室出力と本装置の能力に大差があり、本実験装置に対する過剰圧力を防ぐとともに、高波時に空気室内圧力上昇による空気室本体の負担を軽減するためでもある。

図 8 は実海域実験結果と理論値で、二点鎖点で示した p_{AC} 変動に対する各部の応答例である。弁の復元トルクは式(4)の場合である。図 8 中実線は実験値を表す。点線は p_{AC} の時間変動値を式(12)に代入し、Runge-Kutta 法で θ を求めた値である。理論値 p_{TB} は p_{AC} と θ によって決定されるものとして式(8)、(10)および式(11)から算出した。 p_{TB} の実験値と理論値は近い値を示し、図 8 の大部分で重なり合っている。 E は発電機出力電圧で、周期流れ下でタービンが自身の慣性で連続回転していることを表している。外海の波の周期は約 8 s が多く⁽¹⁰⁾、波による空気室内圧力変動周期も同じであった。弁の動きがタービン前後

差圧を制限し、わき路内気流の方向を一定にしていることがわかる。わき路内の気流はタービンに対して空気室内圧力変動の 1/2 周期で作用する。この点は四枚弁方式⁽⁶⁾⁽⁷⁾の場合と同じである。

図 9 および図 10 に p_{AC} ピーク時、ならびに半周期である $p_{AC} > 0$, $p_{AC} < 0$ 領域の平均値を示す。 p_{TB} は常に正の値となるが、 p_{AC} と θ は正負となる。図 9, 10 の縦軸は絶対値で示してある。図 9, 10 中実線は定常実験時の値である。図 8 から知られるように、 p_{AC} 変化はほぼ三角波形で、 p_{AC} の平均値はピーク値の約 1/2 であった。一方 θ および p_{TB} 変化は台形波に近く、 p_{AC} が大なる領域で顕著であった。図 9 は、 p_{AC} の増に伴い θ が増して p_{TB} を抑えることを表している。図 10 は、 p_{TB} の p_{AC} に対する割合が θ のみに依存することを表している。いずれの場合もピーク値は定常実験結果に近い値を示した。これは p_{AC} の上昇および下降時には θ に遅れがあるが、 p_{AC} のピーク点ではこう配が零になることに起因するものと思われる。図 9 および図 10 より、弁復元トルクを大にするほど θ を小さく、 p_{TB} の上限値を高くすることができる。

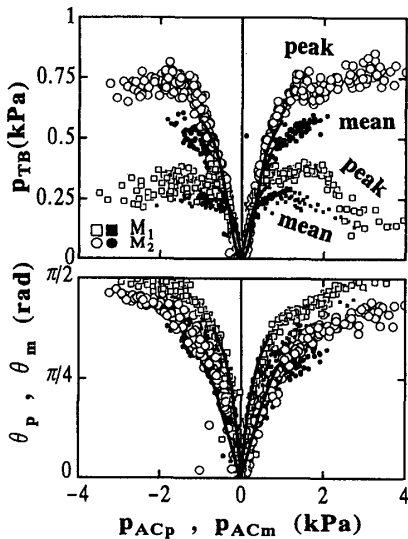


図 9 弁による制圧

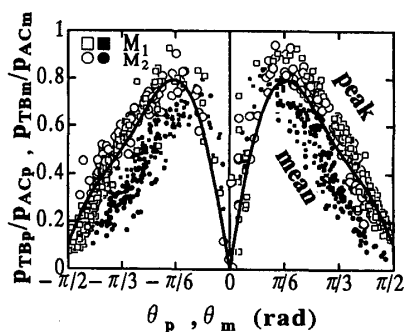


図 10 弁角度とタービン前後差圧

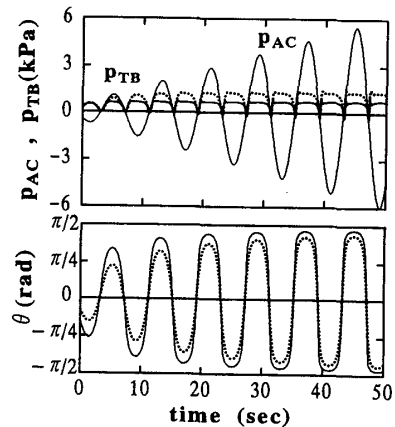


図 11 p_{AC} が次第に増加する場合

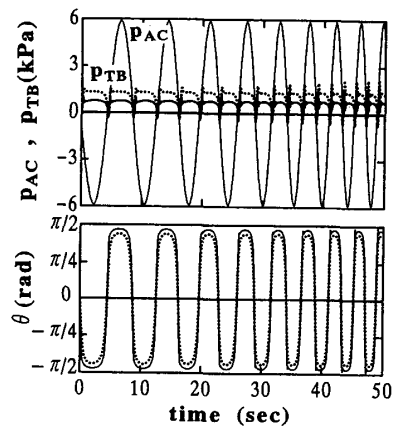


図 12 周期が次第に短くなる場合

6. 本方式の評価(本装置の諸条件下での追従性)

図8に示したように実海域実験結果と式(12)に基づいた理論値は近い値を示した。ここで、他の条件下による弁の追従性についての理論値を示す。

図11は実海域で最も多い周期8sで、 p_{AC} が増す場合である。図11中実線は図8と同じ復元力、慣性モーメントの場合で、点線は重すいの復元力、慣性モーメントが共に2倍の場合である。図11より、 p_{TB} のピーク値は抑えられるが、右下がりの傾向をもつ。 p_{AC} の高い領域では弁の挙動が慣性により p_{AC} 変動から遅れるために、弁設定値角付近で瞬間的に高い p_{TB} を示す。これらの結果は、図8の実験結果にも見られる。図12は周期に対する応答である。 p_{AC} 周期が短くなると、 θ および p_{TB} 変化曲線に弁の慣性による突起が明りように現れる。この点は図8の出力電圧変動に見られるようにタービン自身の慣性により、大きな問題にはならないものと思われる。また図8に示した実測結果のように、実海域では p_{AC} が大なるほど周期は長い。つまり実海域での圧力こう配は本条件よりも緩やかである。したがって、この理論値は実海域と比較して厳しい状況設定下にある。

7. 結 び

波力発電装置において、主管内に設けた1枚の偏心揺動弁により、わき路に設置したタービン内通過気流の方向を一定にするとともに、タービン前後差圧を抑える方法を示した。要約すると、次のとおりである。

(1) 偏心揺動弁を用いた波力発電実験を実海域で行った結果、設計どおりのよい結果が得られた。

(2) 偏心揺動弁の挙動を理論的に解析し、実海域実験結果と比較検討した。その結果、両者はよい一致が見られた。

(3) 本方式は、構造が単純であり、管理も容易である。

(4) 偏心揺動弁は、効率は少し低くなるが、弁が流路壁と接触しないので、衝突による騒音および故障が生じない。したがって、地理的に不利な地域に設置されることが多い波力発電装置としては、メンテナンス面で有意さを見ることができる。

終わりに、本研究遂行にあたり海洋科学技術センターの工藤君明氏、堀田平氏、三井造船(株)の小宮俊夫氏、緑星社(株)の益田善雄氏ら多くの方々々に適切なご助言、資料提供をいただいた。ここに謝意を述べたい。なお、本研究は文部省特定研究経費で行ったものである。

文 献

- (1) 土木学会ほか編、波エネルギー利用技術の現状と将来展望(1991), 102.
- (2) 瀬戸口・ほか4名、機論, 56-532, B (1990), 177.
- (3) Weiskopf, F.,ほか3名, *Alternative Energy Source*, V, Part C (1983), 255, Elsevier Science (Amsterdam).
- (4) 平本・ほか2名, 第1回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集, (1984-11), 403.
- (5) 鹿籠・ほか9名, 第3回波浪エネルギー利用シンポジウム講演集, (1991-1), 181.
- (6) 赤根・ほか1名, 第3回国際海洋開発会議論文集, 2 (1975), 103.
- (7) 海洋科学技術センター, 波力発電装置「海明」第II期計画研究報告書, (1987).
- (8) 前田, エネルギー・資源, 6-6 (1985), 45.
- (9) 斉藤, 機械力学, (1970), 24 朝倉書店.
- (10) 石井・ほか5名, *JMSTEC-TR*, 14 (1985), 55.