円錐形状浮体の送水特性に関する実験的研究

Experimental Study on Water Flow Characteristics of Conical Floating Structure

田中博通1•住田哲章2•鈴木厚志3•真鍋安弘4

Hiromichi TANAKA, Akinori SUMITA, Atsushi SUZUKI, Yasuhiro MANABE

In this research, an experimental study was conducted regarding the water flow characteristics of a conical floating body which possesses wave-absorbing and water-flow features. The conical floating body is a conically-shaped floating structure which is comprised of 12 sheets of convergence banks and a cylindrical tank in the center to catch the overtopping waves. The experiment employed the No.3 machine model to investigate the water flow characteristics for the two water-flow methods of a) the flow of water to the receiving tank, and b) free discharge, by changing the following parameters: wave condition, wave overtopping head, and duct length. The results obtained indicated that the maximum water-flow efficiency was 45%, and that water-flow efficiency was altered by duct length.

1. はじめに

日本沿岸の波エネルギーの賦存量は、全国平均で6M W/mと推測されているが(宮崎・矢野、1996)、この波エ ネルギーは我が国においてほとんど利活用されていない のが現状である.私たちは、閉鎖性水域の水循環を目的 とした再生可能エネルギーである波エネルギーによる送 水方法に着目し、5年間に渡り、消波機能と送水機能(ポ ンプ機能)を兼ね備えた円錐形状浮体を開発し、用途に 合った改良を重ねてきた(田中ら、2004、2005).

本研究では,写真-1に示す円錐形状浮体を開発した. 浮体の形状は波向に左右されにくい円錐形で,斜面に中 央部より等間隔に放射状に伸びた収斂堤,越波した水が 入る受水枡,装置下部に水粒子の運動エネルギーを散逸



写真-1 3 号機模型

 1 正 会 員 工博 2 正 会 員 工修 3 学生会員 4 	東海大学海洋学部 教授 株式会社水圏科学コンサルタント 東海大学大学院海洋学研究科海洋工学専攻 大洋プラント株式会社
---	---

することを目的とした網目状のスカートと頂部の穴から 下方に伸びた送水管で構成されている.

現象的には、浮体が波によって上下運動するポンプ作 用によって波エネルギーを位置エネルギーに変換し、そ の落差によって送水する装置である.また、ウェイトで 越波揚程を調整することで,各波高に対する消波率と送 水効率を最適にすることが可能である.

この装置により,酸素を豊富に含んだ上層水を下層に 送ることができ,貧酸素状態となりうる底層の水質改善 が期待できる(小松ら,1999).波エネルギーを利活用し たこの装置を開発することで,閉鎖性海域等の水質改善 に役立つとともに,更には送水エネルギーを利用した軸 流タービン方式による越波型(重力式)波力発電装置へ展 開できるものと考えられる.

2. 実験内容

本研究は,斜面勾配が1:1の急勾配の図-1に示す3号 機模型を使用した.送水流量は,送水管を実験用の受水 槽に接続し,その水位変化より求めた流量と,送水管内 に取り付けた2次元流速計によって計測した流速から求 めた流量の2つの流量を求めた.また,波高計によって 計測した有義波高から算定した入射波エネルギーと流量 から算定した送水エネルギーより送水効率を求めて,浮 体の送水特性について検討した.

送水特性実験は、図-1に示す3号機模型を用いて東海 大学臨海実験所第一水理実験棟内の平面水槽(22m×23 m×1.2m)を用いて行った。実験に用いた3号機模型の仕 様を表-1に示す。

実験模型縮尺はフルードの相似則を用い,1/17と設定 した.図-2に送水特性実験の実験概要図を,図-3(a),図-3(b)に実験ケース概要図を示す.図-3(a)は実験水槽内に 設置した受水槽と3号機模型を送水管で接続した接続ケー ス,図-3(b)は送水管を実験水槽内に自由放流とした自 由放流ケースである.また,送水管長変化ケースは自由 放流ケースと同様の装置で,送水管長を4ケースに変化 させて実験を行った.表-2に送水特性実験の各ケース概 要を,表-3に実験に用いた実験条件及び実海域値を示す.

受水槽への接続ケースでは揚程及び波浪条件を変化さ せ、送水量の変化を調べた.送水量は、受水槽内に設置 した水位計の変位と受水槽の断面積から求めた.

自由放流ケースは送水管長を5.03mとし,送水枡接続 ケースと同じ実験を行いそれぞれのケースの違いを比較 し,送水量の関係を調べた.

なお,送水管長変化ケースでは,自由放流ケースの結 果より効率の良かった揚程と波高を1ケースに絞り,周 期と送水管長を変化させることで送水量の変化を調べた.



図-1 3 号機模型図



図-2 送水実験特性実験概要図

表-1 3 号機模型仕様

模型縮尺	1/17
外径	1.537m
収斂堤の枚数	12枚
斜面勾配	1:1
受水枡容積	0.194m [*]

表-2 送水特性実験ケース概要

実験ケース名	実験条件
S	送水枡に接続
А	送水管長2.43m
М	送水管長5.03m
Т	送水管長7.28m
K	送水管長9.53m



図-3(a) 送水特性実験装置接続図



図-3(b) 送水特性実験装置接続図

表-3 実験条件及び実海域値

実験条件 実海域値 5.00 cm 85 cm 波高 8.00 cm 136 cm 10.00 cm 170 cm 1.00 sec 4.12 sec 1.25 sec 5.15 sec 周期 1.50 sec 6.18 sec 1.75 sec 7.22 sec 2.00 sec 8.25 sec 2<u>.00 cm</u> 0.34 m 4.00 cm 0.68 m 越波揚程 6.00 cm 1.02 m 8.00 cm 1.36 m 41.31 m 2.43 m 5.03 m 85.51 m 送水管長 7.25 m 123.76 m 162.01 m 9.53 m

3. 解析方法

受水槽接続ケースの解析手順として、図-4に示すよう な波形データから、送水実験用水槽内に設置した水位計 (6ch)に着目し、その水位の増加が安定し始めた時を t_i 、 終わりを t_i とした.そして、その間の増加分 Δt より送水 量Qを求め、(1)式より送水エネルギー(P)を求めた.ま た、沖波に相当する波高計1ch、2chの合成波の $H_{I,3}$ 、 $T_{I,3}$ を合田(1984)の入射波エネルギー(P_w)式に適用して入 射波エネルギーを求め、この値をもとに送水エネルギー 効率を算出した.また、送水管中に取り付けた2次元電 磁流速計より送水管内の平均流速 \overline{u} を求め、送水管の 断面積 A_i より流量 Q_m を求めた.



$$\begin{vmatrix} Q_{m} = 60 \cdot Q & \left(\frac{m^{3}}{\min}\right) \\ P = \rho \cdot g \cdot Q_{t} \cdot h & (kW) \\ P_{W} = 0.44 H_{1/3}^{2} \cdot T_{1/3} \cdot B & (kW) \\ \eta = \frac{P}{P_{W}} & (\%) \\ Q_{t} = 60 \cdot \overline{u} \cdot A_{2} & \left(\frac{m^{3}}{\min}\right) \end{vmatrix}$$
.....(1)

ここで、Q:送水量(m³/s)、 Q_m :送水量(m³/min)、 Q_m : 送水量(m³/min)、 A_l :送水枡の断面積(cm²)、u:送水 管内の中心流速(m/s)、 $\Delta t : t_2 - t_1$ 、 $\Delta h : h_2 - h_1$ 、 $h_l : t_l$ のときの6chの波高(cm)、 $h_2 : t_2$ のときの6chの波高(cm)、 P:送水エネルギー(kW)、Pw:入射波エネルギー(kW)、 ρ : 1.0×10³(kg/m³)、h:越波揚程(m)、 $H_{l/3}$:平均波高 (m)、 $T_{l/3}$:周期(s)、B:浮体長(m)、 η :エネルギー効 率(%).

自由放流ケースの解析手順は、送水管中に取り付けた 2次元電磁流速計より送水管内の平均流速を算定し、送 水管の断面積 A_1 より流量 Q_i を求め、(2)式に代入し送水 エネルギーを求た.また、1ch、2chの合成波の $H_{1/3}$ 、 $T_{1/3}$ を(2)式に代入して不規則波の入射波エネルギーを求め、 これらの値からエネルギー効率を算出した.

$$\begin{cases}
Q_t = 60 \cdot \overline{u} \cdot A_2 \quad \left(\frac{m^3}{\min}\right) \\
P = \rho \cdot g \cdot Q_t \cdot h \quad (kW) \\
P_W = 0.44 H_{1/3}^2 \cdot T_{1/3} \cdot B \quad (kW) \\
\eta = \frac{P}{P_W} \quad (\%)
\end{cases}$$
.....(2)

ここで, *u* :送水管内の中心流速(m/s), *A*:送水管断面 積(m²), *B*:浮体幅(m), *Q*:送水量(m³/s), *h*:揚程 (cm), *P_w*:入射波エネルギー(kW), *P*:送水エネルギー (kW), η:エネルギー効率(%).

4. 実験結果

送水特性実験の主要な実験結果を以下に示す.

図-5~図-7は周期1.25sで、越波揚程をパラメータに した時の波高と送水量の関係を示したものである。受水 槽接続ケースの送水量として定義したQmとQmはほぼ同 様の傾向を示している。Qmの値が若干大きくなってい るが、これは受水槽への送水の時点で管の湾曲などによ るエネルギー損失によるものと考えられる。しかしなが ら、その値は非常に小さいため、ほぼQm=Qmであると いえる。自由放流ケースにおいては送水量QがQm、Qm に比べ大きくなっている。これは、受水槽に接続せず自 由放流を行うことで、受水槽への送水時のエネルギー損 失分がなくなり、送水量が増加したものと考えられる。 また、越波揚程に対して入射波高が高くなるにつれ送水 量が増加している。これは、入射波高が高ければ、単純 に浮体を越波する際に得られる位置エネルギーが大きく なるためであると考えられる。





図-7 入射波高と送水量(Q₁)の関係(Mケース)

図-8~図-10は越波揚程4cmで周期をパラメータにした時の波高と送水量の関係を示したものである。越波揚程をパラメータにしたときと同様、QmとQmの傾向が等しいことがわかる。この結果より、Qm=Qmであるといえる。同様に、自由放流ケースと受水槽接続ケースの送水量の比較からも先に述べたことを証明している。周期において、1.25sにおいて、最も送水量が多く、逆に周期が長くなるに従い送水量は低下している。これは、3号機模型の固有周期に関係していると考えられる。3号機模型の固有周期に約3.0s前後であり、周期が長くなり3号機模型の固有周期に近づくことで共振を起こし、波



動に浮体が連動し、上下動揺による入射波の越波量が少 なくなるためである。

図-11は, 揚程4cmで周期をパラメータにした時の波 高と送水効率の関係を示したものである. 周期が長くな るにつれ送水効率は減少している.また,入射波高が高 くなるにつれ送水効率が減少している.これらの結果よ り,周期が長く波高が大きくなるにつれ,送水効率が減 少する.この原因として2つの原因が考えられる.1つ目 は,浮体自体が波に連動し,越波量が減少するため,2 つ目は,越波はするものの,浮体の受水枡に水が満杯に 入り,入りきれない量の越波分が背後へと流出してしま うためである.このため,受水枡の容量を超える越波が 見込まれる場合,揚程を調節し,受水容積を増やすこと が必要となる.

図-12は揚程4cmの場合の周期をパラメータにしたときの送水管長と送水量との関係である. どの周期においてもほぼ一様に送水管長が7.28mの場合に送水量が最低値になっている. 逆に,周期1.25s,送水管長が2.43mにおいては送水量が0.37m³/minとなっている.



図-13は揚程4cmの場合の周期をパラメータにしたと



管長 L(m)

図-11 入射波高と送水効率の関係(揚程4cm)





図-13 送水管長と送水効率の関係

きの送水管長と送水効率との関係である。周期1.00sの ときに最大の効率を得ており、管長9.53mのとき46.5% と高い値となった.

図-12, 図-13の結果より,送水管長の変化により管内 流が変化し送水効率が変化することがわかった.また, 送水管長が7.28m(実海域値約124m)以上で送水管内の摩 擦抵抗により送水管自体が逆止弁の役割を果たすことに より送水効率が上がるものと考えられる.

図-14は送水管接続ケース,揚程4cm,波高8.00cm, 周期1.25sにおける3号機模型近傍の入射波と主流速の時 系列である.図-15は自由放流ケース,揚程4cm,波高 8.00cm,送水管長2.53m,周期1.25sにおける3号機模型 近傍の入射波と主流速の時系列を拡大したものである。 どちらのケースにおいても流速uと波高H₁₀がほぼ同位相 の波形となっており、送水量は入射波の波高と周期に関 係すると考えられる.また、自由放流ケースにおける流 速は長周期で振動しており、受水槽接続ケースと異なっ た流れが発生していると考えられる.

図-16は受水槽接続ケースにおいて、揚程をパラメー タにした時の送水量*O*_mと*O*mの関係である。揚程に関係



1000

٥

n

1000

2000

3000

図-16 送水量QmとQmの関係

 $Q_{tm}(cm^3/s)$

4000

5000

田中博通・長津安洋・真鍋安弘(2004):浮遊渚の消波特性と送水 特性について、海洋開発論文集、第20巻、pp. 455-460.

田中博通・長津安洋・真鍋安弘(2005):「浮遊渚(円錐形状浮体) の消波特性及び送水特性に関する実験的研究」、海洋開発論 文集, 第21巻, pp.553-558.

宮崎武晃・矢野賢二(1996):4.波浪,(近藤編:海洋エネルギー利 用技術), 森北出版.

なく(3)式の線形の関係がある.

 $Q_m = 0.9442 Q_{tm} + 338.7 \quad (Q_m, Q_{tm}: \text{cm}^3/\text{s}) \quad \cdots \quad (3)$ この関係式を用いることにより、管内流速値から送水流 量をを算定することが可能となる.

5. 結 論

本研究は、種々の水域環境問題への対応と再生可能エ ネルギーとしての波エネルギー利活用をめざし、円錐形 状浮体を開発し、その送水特性について実験により求め た.以下に主要な結論を述べる.

- 1) 円錐形状であるために波向きに左右されず入射波高 と入射波周期により送水効率は左右される。特に送水 量は送水管内中心流速と浮体近傍波高の関係からわか るように波高と周期によって左右される.
- 2) 浮体の持つ固有周期に波の周期が近づくにつれ送水 効率は低下する. これは、波動に浮体が連動するため 越波量が減少するためである.
- 3) 浮体の受水枡の容積の関係上, 揚程に対して高すぎ る波高条件下においては受水枡上を越波してしまうた めに効率が低下する.
- 4) 本実験条件下においては, 越波揚程4cm, 波高 8.00cm, 周期1.00s, 送水管長9.53m時の送水効率46.5% が最高値となった.
- 5) 受水槽で実際に求めた送水量(Qm)と送水管中心流速 から求めた送水量(Om)の関係より,自由放流時の放 流量が(3)式により算定可能となった.しかし、白由 放流時と受水槽接続時とでは管内流速が異なっている ことが本実験により明らかとなったため、今後、管内 振動流の物理的な解析を行うことでより正確な送水量 の算定が可能になる.

謝辞:本研究を行うにあたり、東海大学海洋学部海洋建 設工学科の学生諸氏に実験等に協力していただいた. こ こに記して謝意を表す.また、本研究は、科学研究費補 助金基盤研究(C)(No.18560813)による成果であること を付記する.

文 老 献

- 小松利光・岡田知也・中村由行・中島信一・長谷部崇・藤田和夫・ 井芹寧(1999):閉鎖性水域底層への表層水供給による水質改 善効果,海岸工学論文集,第46巻, pp.1111-1115.
- 合田良実(1984):沿岸波浪の統計的性質,第1回波浪エネルギー 利用シンポジウム,海洋科学技術センター, pp. 19-31.

1320