浮体式垂直軸型風車を利用した湾内廃棄物の 環境改善に関する一考察*

金子 憲一**

Studying Ways to Improve Bay Waste Management Using Floating Off-shore Vertical Axis Wind Turbines

By Ken-ichi KANEKO

In recent years, on the problem of environmental pollution caused by suspended garbage in coasts and bays, sedimented sludge and milliplastics have a serious impact on the environment. In particular, hypoxia caused by eutrophication in the bay is a factor that deteriorates aquaculture productivity. In this study, we developed a helical pump driven by a floating vertical axis wind turbine that can be moored and towed by a ship, and proposed a method of removing the slurried volume of sediment from the sea floor by removing it. Therefore, we report the results of an experiment to investigate the pumping performance of the helical screw pump with respect to the suction capacity.

1. はじめに

近年、沿岸や湾内の浮遊ゴミによる環境汚染問題において、沈殿した汚泥物やミリプラスチックにより環境への影響が深刻化している。特に湾内の富栄養化による低酸素化が養殖業の生産性を悪化させる要因ともなっている。そこで、本研究では、係留と船舶で曳航移動が可能な浮体式垂直軸型風力タービンで駆動する螺旋ポンプを開発し、沈殿物としてスラリー化した体積物を海底より吸い上げて除去する方式を提案し、そのために螺旋スクリューポンプの吸い上げ能力に関するポンプ性能を調査するための実験を行った結果を報告する。

2. 浮体式風力タービンと提案したアルキメデススクリューポンプ (ASP)

浮体式に用いた試験用垂直軸型風力タービンは、セミサブ浮体式構造にマッチングが容易で回転軸の構造が容易で風向に依存しないとともに、湾内に構築できることを目的とし安定性があり浮体式の構造として優位性があると考え。図1は浮体式試験モデル (1/5

モデル) 1)適用のクロスフロータイプ (以下風車) は風車直径 300, 高さ 290, 翼枚数 18 枚, 翼取り付角 60° のアルミ製仕様を用いた実験装置を使用した。

図1 クロスフロー型風力タービン

その浮体式垂直軸型風力タービンにギアを介して螺旋ポンプ (アルキメデススクリューポンプ (以下 ASP)) を設置し、水面直下で駆動する提案モデルを図2に示す。過去にエンジンと発電機でポンプを駆動する海洋肥沃化装置 2)も実用試験されているが燃料を使用する点に問題もある。この構想モデルは、海上の風力を連結した2基の風車で駆動させる ASP を水中に設置し、水深 10m の海底のスラリーや沈殿物を吸い上げるシステムを提案する。

*原稿受付 令和 元年 12 月 20 日。

**正会員 大阪府立大学大学院工学研究科 (堺市中区学園町 1-1)。

図2 浮体式垂直軸風力タービン利用 ASP 構想モデル

2.2 ASPの設計指針

ASP は、インペラを回転させてブレード間にあるガスや液体などの流体を連続的に上方へ移動させ、流れを生み出す流体機械である。螺旋の幾何学形状は Chris Rorres³⁾らの論文を参考にして最適設計を行った。アルキメデススクリューの形状を決定する上で必要な量は、ブレード外周半径 R_o [m]、ブレード内周半径 R_i [m]、羽根 1 枚当たりピッチ長さ Λ [m]、ブレード取り付け角 β [rad]、羽根枚数 N である。これらの量を定めるために運搬する液体の粘性、ポンプの回転速度を無視した幾何学的な構造決定を行った。次の図 3 に羽根枚数 $N=3$ の時、必要な量と場合のポンプ内を流れる液体の占める範囲を示す。

図3 アルキメデススクリュー形状決定に必要な幾何学パラメータ

まず、実験装置(水槽)の制約条件から外周半径 R_o を決めると、半径比率 ρ^* から R_i が決まる。

$$R_i = \rho^* \times R_o \quad (1)$$

本体の傾きを決めることでピッチ比率 λ^* からピッチ長

さ Λ が決まる。

$$\Lambda = \frac{2\pi R_o \lambda^*}{K} \quad (2)$$

スクリュー軸とブレード外側、内側のなす角をそれぞれ α, β とすると、それらはブレード外周半径、内周半径から定まる。

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi R_o}{\Lambda} \right) \quad \beta = \tan^{-1} \left(\frac{2\pi R_i}{\Lambda} \right) \quad (3)$$

2.3 実験装置と実験方法

本システムは海上での風力により ASP を駆動するため、供給電源が必要ない。試作モデルを検討し、その性能を明らかにするため、まず、屋内の水槽により検証実験を開始した。今回の検証試験は、風洞の制約から風力タービンの代用としてポンプの駆動は AC モー

図4 ASPのインペラとケーシングおよびチップクリアランス

タを使用し、その入力大きさにより回転数を変化させた。また、回転軸にトルク計を介することで、回転数とトルクから ASP の入力 (W) を読み取ることが出来るようにした。さらに、流量計(タービン式)を吸入部、吐出部それぞれに設置することで出力 (W)、および性能を評価できるように設計した。提案する ASP 羽根形状を図 4 に示す。このインペラ (アルミ製) はスラリーの吸い上げに適した螺旋の羽根形状をケーシング内に設置した構造になっている。また、高い圧力上昇を得るために、回転数および迎角、インペラの取り付け角、インペラの枚数などを最適化する必要がある。なお、垂直軸型風車と ASP の配置は、できる限り簡単

にしなければならない。しかし、高い回転数を要求できない抗力型風車において、ASPの最適化をどのように行い、実際にどのような性能を示すのか、予測するのは極めて困難である。本研究では、限られた回転数の中で、必要となる揚程を得られるASPを製作し実験的に性能を明らかにし、その性能を改善することを目的とする。ASPは通常垂直な状態で使用することはほとんどないため、作動角度による性能が比較できるように実験装置全体に傾斜をつけ、傾斜角を測定できるように実験を行った。なお、実験に用いた水槽およびポンプケーシングはASPの動作を可視化するために、透明アクリル製とした。なお、ASPの基本性能からにおいて水槽の取り扱いやサイズや制約から、先ず最初に $\tan^{-1} 1.5 = 0.98[\text{rad}] = 56.3[^\circ] \geq \theta$ 傾斜範囲でのみASPの傾きを変化させることにした。従って実用上を考慮した場合の浮体風車取り付け位置等を想定した場合、ASPの傾斜角 $\theta = 57^\circ, 63^\circ, 75^\circ, 85^\circ, 90^\circ$ と変化させ、それぞれの場合について揚水可能な最小の回転数は150から50rpmずつ上昇させ、モータ最大回転数の1000rpm(ACモータの限界入力)まで実験を行った。図5にASP試験装置の全体図ならびに図6にその概略図を示し、ここで計測するデータは、回転数およびトルク、電圧、電流、水の流量等である。ASPを駆動させた場合の水中でのキャビテーションの発生、振動による接触などあらゆる動作を想定し、数値の記録とともに、それらの可視化も行った。

図5 ASP試験装置(垂直配置)

図6 ASP試験装置の概要

2.4 ASPの性能評価

ASPを海水(濃度約3.5%)と真水中で駆動させ、回転数200rpmから50rpmずつ1000rpm(ACモータの限界入力)まで上げ、回転トルク T 、流量 Q を計測した。本実験においては全揚程 $H[\text{m}]$ を実際の揚水高さとした。ASPの吸込口から吐出口までの長さを $L[\text{m}]$ とすると

$$H = L \sin \theta \quad (4)$$

流量が $Q[\text{L/s}]$ のとき必要な動力 $P_o[\text{W}]$ は

$$P_o = \frac{\rho g H Q}{1000} \quad (5)$$

回転数が $n[\text{rpm}]$ のとき、角速度 $\omega[\text{rad/s}]$ は

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (6)$$

必要となったトルクが $T[\text{N} \cdot \text{m}]$ のとき、軸動力 $P_s[\text{W}]$ は

$$P_s = T \cdot \omega \quad (7)$$

式(2)および(4)より、このときの全効率 η_a は、

$$\eta_a = \frac{P_o}{P_s} \quad (8)$$

また、モータに繋いだ電流計と電圧計により計測した電流 $I[\text{A}]$ とかかった電圧 $V[\text{V}]$ のとき、力率を $\cos \phi$ とすると、入力電力 $P_i[\text{W}]$ は

$$P_i = VI \cos \phi \quad (9)$$

式(4)および(6)より, このときのポンプ効率 η_p は

$$\eta_p = \frac{P_o}{P_i} \quad (10)$$

と表せる.

3. 実験結果

3.1 流量と傾斜角およびチップクリアランスの比較検討

図 7 はポンプの回転数 n に対する流量(実測値) Q を示す. 回転数と流量はほぼ比例関係にあり, $n = 1000\text{rpm}$ を超えてもさらに流量は上昇することが予想される. ここで outlet $\theta = 90^\circ$, inlet $\theta = 90^\circ$ は ASP の傾斜角 90° の時の吐出口と吸入口を示す. モータの限界入力からこれ以上の回転数を調べることはできなかったが, 漸近的に収束し, それ以上大きな値を得られなく, 更に回転数を上昇させていくと粘性の影響あるいは流量限界が存在することが考えられる.

図 7 各傾斜角における回転数に対する流量

一方, 吸入口における流量だけ他の値を下回っていることも読み取れる. 通常ポンプの圧力上昇から, 流体が漏れ出ることがあっても吐出口の流量が大きいことはほぼない. つまり, 本設計において流体が漏れ入っていることが分かる. これは, 上部からの回転軸周りのチップクリアランスからの流入と考えられる. 一般に, ガスや液体を扱う回転機械の翼とケーシング等のチップクリアランスは, その影響により性能が大きく左右される. 即ち, チップクリアランスが大きすぎると漏れ流れや損失が多くなり, 小

さすぎると回転するブレードとケーシングが干渉するため, 重要なファクターと言える. 本実験と同様の低比速度領域における流体機械の性能の研究⁴⁾によると, 低比速度領域におけるポンプのケーシング基礎円内径 D_c をブレード外径 D_B の 105~110%程度にするとよいことが明らかになっていることから, そこで本実験においてケーシング基礎円内径はブレード外径平均の 107.5%の 86mm (インペラ直径 80mm を基準) とした. さらにチップクリアランスを詰めたほうが損失が少ないと考え, D_c はそのままチップクリアランスを 2mm とした. したがって図 8 はチップクリアランスを 3mm から 2mm に詰めた場合の ASP の全効率を回転数に対して示した結果, チップクリアランスを縮小することにより, 低回転数領域(回転数 150~400rpm)において, 大幅に全効率の向上が見られる. しかし, これ以上チップクリアランスを詰めるとインペラの回転軸の精度による偏心が起こり, ケーシングと接触する可能性があるものでこれ以上は中止した.

図 8 チップクリアランスと回転数に対する全効率比較

3.2 全効率における比較検討結果

図 9 に各傾斜角 θ における回転数 n [rpm] に対する全効率 η_a [%]を示す. ポンプ本体の傾斜角が小さい程全効率はむしろ下がり, 垂直に近づけていくほど効率が上がるという結果を得た. また, すべての傾斜角において, 回転数の上昇に伴って全効率は急激に上昇し, $n=300\sim 350\text{rpm}$ の間でピークを迎え, 再び緩やかに低下していくという様相を呈した. 全効率は, $\theta=90^\circ$ 流出口において ASP 回転数が $n=350\text{rpm}$ の時, $\eta_a=15.27\%$ であった. 傾斜角の小さい領域では, 回転軸の共振音がより大きく聞こえていたことから, 傾斜角の傾斜角の上昇とともに共振による軸ブレが減少し

図9 傾斜角 θ 変化と回転数 n に対する全効率

ていったものであると考えられる。垂直軸型風車との相性を考えると、ASPは、水中においてケーシングに収納するほうが良好な結果といえる。

4. 海底の汚泥を模した砂を含む揚水試験

人工海水が入った水槽に、観賞魚用コーラルサンド（シンセー コーラルサンド パウダー（0番：5kg））を2袋入れ、実際の海底の汚泥や堆積物を想定した。ASPの流入口にホースを取り付け、スピードコントローラーで200rpmから徐々に回転数を上げていき、その様子を観察した。図10は、ポンプ下部から吸い上げた砂を含む海水が、ポンプの中のスクリューによって持ち上げられる様子を示す。砂は水面近くで吐き出された後、水中をゆっくり沈んでいき、また水槽底に堆積していた。このことから、粒子を含む液体でも持ち上げられるという、前節で述べたASPの特徴が明かされた。ASPを湾内で用いる想定とマッチすると考

図10 回転中のASP

えられる。一方、このように砂を含んでも十分に揚水できたのは、600rpm以上のときであった。

5. 揚程を変化させた揚水実験

吐き出し口までの距離を稼ぐことを想定し実験を行った。実験に使用したアクリル製円形水槽は直径2m、水槽高さ5m(水槽の制約条件)であり、その全体の写真を図11に示す。なお、この写真は水を充填途中の写真である。ASPの全長は1,090mmあり、水槽への設置器具との関係から、水槽の底からASP流入口までの高さは最大で3,850mm確保できた。そこである程度の実用を踏まえ、より深度の高い水槽にてASP吸込み口にホースを接続し、ここでの揚程(水槽底面からの距離)を吸込みホースなしを0(揚程を0.45m)、基本として吸込みホース長さに対する揚程は表1のような条件に設定した。ホースについて、吸込み口から4m~0mの間で1mずつ切断することによりその性能を比較し評価した。

図11 揚水実験装置

表1 ホース長さに対する揚程

吸込ホース長さ[m]	ASP 揚程[m]
4	3.85
3	3.45
2	2.45
1	1.45
0	0.45

図 12 揚水高さに対する流量の関係

この水槽縁部に ASP を設置し前述の条件にて、これまでと同様な実験を行った結果、図 12 にホースの長さを変化させた場合の回転数 n と流量の関係を示す。この範囲においてポンプ回転数と流量の緩やかな比例関係はほとんど前述の実験と変わらないことが分かる。設置器具による制約から傾斜角 $\theta=84.5^\circ$ において固定した値を記録した。また、ほとんどの回転数においてホースの長さが 4m の時の流量は、ホースを接続しない場合の揚程に比べて 8 割程度となった。さらに水深 10m の揚水実験は実際の湾内で検証実験を行うことが必要である。

6. おわりに

本研究の結果として、以下のことが明らかとなった。

- ・通常水平に近い傾斜において汚泥などの粘性流体を扱う ASP も、水中で、全被覆型のケーシングを施すことによって、垂直の状態で使用でき、むしろ回転軸が垂直に近い状態の方が高効率となることが分かった。垂直軸型風車との接続を考えると、良好な結果といえる。

- ・インペラとケーシングのチップクリアランスを 3mm から 2mm へと小さくすることによって、回転数の低い領域においてより高効率を得ることができた。

- ・今後の課題として、実用的な浮体構造物の適切なサイズやポンプのサイズを更なる実験から計算により求める必要がある。

参考文献

- 1) 二瓶泰範 ほか 3 名, 多基連結垂直浮体式風車の挙動に関する研究, 第 16 回佐賀大学海洋シンポジウム, (2018), 13-18.
- 2) 宮部宏彰, 他. 海洋肥沃化装置「拓海」(たくみ). 日本マリ学誌, 4-3, (2005), 82-87.
- 3) Chris Rorres, The Turn of The Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw, Journal of Hydraulic Engineering, 126, (2000), 72-82.
- 4) 香川 修作ほか 2 名, 円形ケーシングを用いた極低比速度遠心ポンプの性能. 機論(B 編), 71-707, (2005), 1821-1829.

著者紹介

金子 憲一

- ・日本マリンエンジニアリング学会 正会員
- ・1954年生
- ・大阪府立大学大学院工学研究科
- ・博士(工学) 大阪府立大学
- ・大阪工業大学工学部
- ・風力タービン・ファン・伝熱装置