風力エネルギーによる水質浄化システムに関する実験的研究*

(第1報, 低風速域における特性改善)

本郷 博邦^{*1}, 杉山 渉^{*1}, 田村 オリエ^{*1}, 中村 雅英^{*1}

Experimental Study on the Water Purification System by Using the Wind Energy (1st Report, Improvement of the System Performance in a Low Wind Velocity Region)

Hirokuni HONGO^{*1}, Wataru SUGIYAMA
Orie TAMURA and Masahide NAKAMURA

^{*1} Graduate School of Engineering and Resource Science, Akita University,
1-1 Tegatagakuen-cho, Akita-city, Akita, 010-8502 Japan

In recent years, pollution of the water in eutrophic lakes and marshes become an important problem. To improve this situation, we developed the water purification system by using the wind energy. In the present system, the Savonius wind turbine with the guide vane was used and the micro bubble was generated by this wind turbine to purify the quality of water. The most important characteristic of this system is to possess the wind energy conservation apparatus. That is, the wind was converted into the water pressure by using the accumulator to make the most use of the weak wind energy. To clarify the effectiveness of the present system, the field test was carried out. Test results showed that the micro-bubble was generated intermittently even in relatively low wind velocity condition, and the generation frequency of the micro-bubble was in proportion to the cube of the wind velocity.

Key Words : Wind Turbine, Energy Storage, Micro-Bubble, Aeration, Wind Energy, Environmental Engineering

1. 緒 言

風車から得られた動力を直接利用する試みは古くから行われており, 風力発電が主流となった現代においても井戸水や灌漑用水の汲み上げといった場面で見られる⁽¹⁾. この風車で直接ポンプを駆動させる手法は, 電気エネルギーに変換する方法に比べて, エネルギー効率が優れているといった報告がある⁽²⁾⁽³⁾. また, システムが単純になることによる保守性の向上も注目すべき点である⁽³⁾. さて, 近年では環境意識の高まりから, 貧酸素状態となり水質が低下した水域に対して, 風力エネルギーを直接利用して水質浄化を行う研究が開始されており⁽³⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾, これらは今後の風力の利用拡大が期待される分野であると考えられる. 水域の貧酸素状態は, 富栄養化による植物プランクトンの大量発生とその分解に大量の酸素が消費されることで引き起こされ⁽⁶⁾, 特に夏季, 閉鎖性の高い水域の底部においては著しい酸素濃度の低下が起こる場合があるとされる. しかし, 水質浄化が必要な場所は必ずしも風況の良い場所であるとは限らない. そのため現状においては, 風力エネルギーを利用して水質浄化を行うことが可能になる場所が限られることは容易に予想できる. 事例は少ないがこれまでの研究によると, 想定する風況によって使用する風車や水質浄化の方法が異なっていることが分かる. 良い風況下を想定した研究では, 高速で回転するプロペラ型風車を利用し, ポンプを利用したエアレーションが行われている. 例えば, 西沢ら⁽⁴⁾はプロペラ型風車と簡単な構造のポンプを組み合わせ, 散水により曝気を行うシステムを開発している. しかしこれは風力発電が十分に可能な良い風況を想定し設計されており, 風力利用には向かないとされる 3m/s 未満の風

* 原稿受付 2011 年 11 月 25 日

^{*1} 正員, 秋田大学 大学院 工学資源学研究科 (〒010-8502 秋田県秋田市手形学園町 1-1)
E-mail: d9511007@wm.akita-u.ac.jp

況下⁷⁾での運用に対しては十分な考慮がなされているとは言えない。一方で、低風速下での運用を想定した研究では、抗力型風車を用いたものがあり、風車軸に攪拌翼を取り付け水域表層で回転させ、水を循環させるものが報告されている。例えば奥山ら⁶⁾は、サボニウス型風車を用いてそのようなシステムを開発している。これらは低風速下において駆動はするものの、前者に比べると積極的な曝気が行われているとは言い難い。風力エネルギーによる水質浄化をさらに普及させるためには、低風速域における風のエネルギーを、より効率よく利用することが不可欠と考えられる。近年、通常では利用されることのなかった弱いエネルギーに注目し、それを活用する試みが積極的に行われており、エネルギーハーベスティング⁸⁾と呼ばれている。本研究は、通常では利用されることのない低風速の領域での風力エネルギーの利用に着目するため、エネルギーハーベスティングに属する研究と捉えることもできる。

さて、酸素濃度の低い水域における水質改善に関する研究によると、微細気泡（マイクロバブル）による曝気が、水域内の溶存酸素量の向上に非常に効果的であることがこれまでに明らかにされている^{9) (10)}。この手法は、水域内を循環させ酸素濃度の異なる水を混合させる方法に比べても有効であることが実際の研究例から分かっている⁽¹¹⁾。このような理由から本研究では、低風速という悪い風況下において、マイクロバブルの発生を風力エネルギーを用いて行うことを試みた。低風速域においては、風の持つエネルギーは小さくなるため、そのような風況下で風車の回転により直接マイクロバブルを発生させることは非常に困難である。そこで本研究では、得られたエネルギーを何らかの方法で蓄積することを考えた。すなわち、アキュムレータを用いて風力エネルギーを圧力の形で蓄積し、蓄積された圧力がマイクロバブルの発生条件を満足したときに放出されることで、マイクロバブルを間欠的に発生させる方法を考案した。

さらに本研究では風車として、低風速下での始動性が良いサボニウス風車にガイドベーンを取り付けたものを使用し、悪い風況下で実際にテストを行った。そして、その結果から本システムの特性を明らかにし、低風速域における有効性について考察した。

2. 記号

P	: アキュムレータ吐出圧（マイクロバブル発生装置への導入圧）[MPa]
Q	: アスピレータ吸気量 [ml/min]
t	: 時間 [min], [s]
U	: 1 日平均風速 [m/s]
P_{max}	: 最大アキュムレータ内圧力 [MPa]
V	: 10 分平均風速 [m/s]
N	: 風車回転数 [revolution/hour]
f	: マイクロバブル発生周波数 [1/hour]
W	: マイクロバブル発生間隔に対する平均風速 [m/s]

3. 実験装置及び方法

3・1 マイクロバブルの発生方法

マイクロバブルの発生にはいくつかの手法があり⁽¹²⁾、多くの製品が出回っている。本研究では、旋回液流方式に属する市販のマイクロバブル発生装置（バブルタンク、BT-50）を用いる。本装置は内部が空洞の卵型の形状をしており、長径軸上の装置両端には気泡噴出孔が空いている。ポンプで水と空気からなる気液二相流体を導入すると、両端の孔からマイクロバブルが噴出される。本装置は幅広い導入圧力下で使用することができるが、導入圧が 0.20MPa を超えるとより溶存効果の高いバブルが発生できるとされている。なお、導入する水の流量は 7 ～ 20l/min、空気の量は 20ml ～ 400ml 程度の範囲が望ましいとされる。さらに、本装置は気液二相流体を一本のパイプから導入すればよいため、取扱いが容易でありシステムの構造を簡単にできるという利点もある。

3・2 風車概要

本研究で製作され使用されるサボニウス風車の形状を図1に示す。風車直径1000mm、高さ900mm、バケット直径350mmである。軽量化とメンテナンスの容易さから天板、ブレードにそれぞれ厚さ3mm、1mmのアルミニウム板、軸には直径35mm長さ2600mmのステンレス丸棒を使用している。また、2組のバケット対が上下で90°位相がずれるように設置されており、風向の変化に対応しやすい構造となっている。サボニウス風車は以前より出力の向上や回転機構に関する研究の対象となってきた⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。それらの研究によると、風車周囲へのガイドベーンの設置が出力の向上に寄与するという結果が得られている。よって本研究では、図2に示されるように風車の周囲には4枚のガイドベーンを設置することで低風速下での始動性と出力の向上を図っている。寸法と配置は小川らの文献⁽¹⁴⁾を参考にし、高さ1000mm、幅500mm、厚さ2mmのアルミニウム板を用いて製作した。

Fig. 1 Savonius wind turbine

Fig. 2 Arrangement of guide vane

3・3 水質浄化システム

本水質浄化システムの概略図を図3に示す。水の流れと共にシステムの各構成要素の働きについて述べる。風によりサボニウス風車が回転し、その回転は歯車により1/2に減速されダイヤフラムポンプへと伝達される。風車の回転数は常に一定とはならないため、本システムでは、軸1回転につきほぼ定量の水を輸送可能なダイヤフラムポンプを用いる。使用したポンプは1回転当たりの吐出量が5ml、吐出圧は最大1.0MPaである。ポンプによって吸い揚げられた水は下流に設置されたアキュムレータ（NOK, ET20）へと輸送される。アキュムレータ内の圧力 P が0.30MPaまで上昇すると管路の下流に設置された圧力スイッチ（三和電機製作所, SPS-18）が入り電磁弁（ベン, WS-15）が開く。これにより、アキュムレータに蓄圧されていた水は管路を通り下流に設置されたアスピレータへと流入する。アスピレータは、内部を通過する水流によって生じる負圧によって気体を吸入し、水流とともに排出させる器具である。本システムではアスピレータを利用し管路に空気を吸入させることで、マイクロバブルの発生に不可欠となる気液二相流体の生成を行う。本研究ではアスピレータからの吸気量 Q を200ml/minになるように調節した。生成された気液二相流体はマイクロバブル発生装置へと流入し、微細化され水槽内へと放出される。水が流出することによりアキュムレータ内圧力 P が0.22MPaまで下降すると、圧力スイッチが切れ、電磁弁は再び閉鎖される。風車が回転する限り、断続的にマイクロバブルの発生に適した圧力範囲（0.22MPa～0.30MPa）で水の放出が行われ、マイクロバブルが放出される。なお、本システムの配管には内径13mmの塩化ビニル管を使用した。また、作動流体は水道水である。

3・4 システムの設置環境

本研究は低風速下での風車の稼働状況を調査するために行われる。よってサボニウス風車と水質浄化システムは、多くの建造物が立ち並ぶ秋田大学構内の敷地内に設置された。風車とガイドベーンは高さ3000mm、幅1600mm×1600mmの直方体の鉄骨製の外枠に支持されており、風車の中央の天板までの高さは地上2000mmである。

3・5 データの取得方法

本実験ではシステムの蓄圧、風車の回転に関するデータの取得のため、図3に示されるように、圧力センサ（横河電機、FP103-GC2）と電磁式回転計（小野測器、TM-2130 デジタル回転計）を設置した。それぞれの値は5秒毎に計測される。また、風向、風速（平均・最大瞬間）の測定のため風向風速計（Davis Instruments, Weather Station）を風車の南西2.0mの地点高さ3.0mの場所に設置した。計測は2.5秒ごとに行われ、自動的に1分毎の値が算出され記録される。

Fig. 3 Schematic model of the water purification system

4. システム動作試験

電動機を直接ダイヤフラムポンプに接続し、屋内にて本水質浄化システムの動作試験を行った。このときポンプの軸は24rpmで回転し、120ml/minの吐出量を生じる。吐出量はそのままではマイクロバブルを発生させるにはあまりに小さいが、本システムはアキュムレータに水を一旦蓄積させることで必要な流量を吐出することができるはずである。動作試験では吐出された水の流量、アスピレータの吸気量 Q 、アキュムレータの吐出圧 P について測定し、それぞれの値がマイクロバブル発生装置の動作範囲内であることを確認した。なお、水槽は容積35lに対し水30lを入れたものを用意し、マイクロバブル発生装置は水槽内中央部の水深約200mmの位置に固定した。また実験時の水槽内の水温は20℃である。

動作試験の結果について示す。図4に動作試験時のアキュムレータ内圧力 P の時間変化を示す。グラフが急激に落ち込んでいる箇所ではマイクロバブルが発生している。発生間隔は約7分であった。ポンプの吐出量が120ml/minであることから、本研究での設定ではマイクロバブルを1回発生させるには0.8l程度の水が必要であり、ポンプは約170回転する必要があることが分かる。図5に電磁弁が解放してから閉鎖するまでのアキュムレータ内圧力 P の変化、図6にその時のアスピレータの吸気量 Q の変化を示す。水の放出時間は12秒間であった。また、水の平均流量は10.0l/minであった。図5より吐出圧 P は圧力スイッチの設定により、マイクロバブルの発

生に適した 0.20MPa 以上で変化していることが分かり、図 6 より吸気量 Q は圧力変化の下降にかかわらずほぼ一定の 200ml/min を保っていることがわかる。よってマイクロバブル発生装置は適切な環境の下で使用されることが可能であるといえる。

また、図 7 にマイクロバブル発生時の写真の一例を掲載する。この写真はマイクロバブル発生装置の気泡噴出孔を横からとらえたものである。写真には $100\mu\text{m}$ 程度の気泡と雲状に広がった数十 μm 程度気泡が写っている。

Fig. 4 Charge of pressure in the accumulator with time

Fig. 5 Change of the discharge pressure with time

Fig. 6 Change of the intake volume with time

Fig. 7 Micro bubble generated by the water purification system

5. 水質浄化システムのフィールド試験結果

本システムのフィールド試験は 2010 年 6 月 11 日から 11 月 30 日まで行われた。この期間は夏期（6 月～8 月）と秋期（9 月～11 月）に大別できる。安全確保のため、データの収集は平日の日中 6 時間に限って行い、夜間は風車を停止させておいた。水槽の容積、マイクロバブル発生装置の水中での位置は 4 章で示した条件と同じであ

る。水質浄化システム内には予めアキュムレータ内圧力が 0.22MPa となるように水を封入しておいた。これはアキュムレータ内が空の状態から蓄圧を始めた場合、最初のマイクロバブルの発生まで非常に時間がかかるためである。

図 8(a)に実験期間中の日毎の平均風速 U 、風車回転数 N 、図 8(b)にアキュムレータ内圧力 $P_{\max}$ 、マイクロバブルの発生回数 f を示す。 N と f は 1 日の総数を時間平均にしたものである。 $P_{\max}$ は日毎の最大値であるが、長期的な蓄圧の履歴を分かりやすくするため最大値を示す。

(a) Rotation number of wind turbine and wind speed

(b) Maximum pressure in the accumulator and generation frequency of micro bubble

Fig. 8 Results of field test (Jun. 11th to November. 27th)

図 8(a)において 10 月 19 日から 23 日にかけて圧力が電磁弁の閉鎖圧である 0.22MPa を下回っている日があるが、これはシステムのメンテナンスを行ったためである。実験期間中の平均風速は 0.9m/s であった。図 8(a), (b)より平均風速が 1.0m/s 程度の日にはアキュムレータへの蓄圧が見られ、平均風速が 1.5m/s 程度の日にはマイクロバブルの発生が期待できるといえる。また、風速が低く、蓄圧が望めない場合でも、例えば 10 月 1 日～10 月 15 日のように約 2 週間に渡って圧力は減少せず維持されていることが分かる。なお、この間の微小な圧力変化は気温の変化によるものと考えられる。実験期間中 104 日間において、計 55 回マイクロバブルの発生が確認された。平均

的に見れば2日に1回程度マイクロバブルが発生していることになるが、図8(b)から分かるように、1日に複数回発生している場合もあれば、十数日に亘って発生が見られない場合もあり、発生頻度は一定ではなく、大きくばらついている。しかし、例えば実験開始日である6月11日から、最初にマイクロバブルが発生した6月24日までの圧力変化を見ると、のべ7日間かけて少しずつ蓄圧がなされてきたことでマイクロバブルの発生に至ったということが分かる。よってアキュムレータを備えた本システムは、風力エネルギーの密度が非常に小さい期間であってもそのエネルギーを蓄積し密度を高めることで、エネルギーをマイクロバブルの発生に使用できるといえる。また季節ごとの発生回数は夏期13回、秋期42回となった。夏期の日本海側の地方は風速が一般に小さいとされ⁽¹⁵⁾、風車の稼働にはやや不利となるが、このような悪条件下でもマイクロバブルの発生が可能であることがこの結果から分かる。

続いて1日の風速と蓄圧の関係について考察する。図9に7月27日の10時30分から16時30分までの(a)風速 V 、(b)アキュムレータ内圧力 P 、風車回転数 N の結果を示す。 V は10分毎の平均値を示し、 N は10分毎の総回転数を1時間あたりに換算したものである。また、 P は、1分毎の値を使用している。測定期間の平均風速は1.8m/sであった。実験期間中マイクロバブルは4回発生した。一般に風力エネルギーの利用を考えた際、対象となる風速は3m/s～15m/sの範囲にあるとされる⁽⁷⁾。図9より、本システムは平均風速3m/s未満という風車の稼働には非常に不利な風況であるにもかかわらず、実験期間全域に亘って風車が回転し、蓄圧がなされていることがわかる。すなわち本システムは一般的な発電用風車ではエネルギーを利用できない範囲の風速域であっても、稼働しエネルギーを蓄積できるといえる。これは、今後の風力を直接利用した水質浄化の普及促進へつなげる結果であると考えられる。

Fig. 9 Results of field test (July 27th)

風速の違いによってマイクロバブルがどのような頻度で発生しているかを調べるために、図10(a)に平均風速 W と1時間あたりのマイクロバブル発生回数(マイクロバブル発生周波数) f との関係を示す。この結果は、マイクロバブルの発生の1サイクル(電磁弁閉鎖から開放)を抽出し、その間の時間の逆数で表される発生周波数 f とその時の平均風速 W より求めたものである。これより、風速2.5m/sを境に、 f が1を超えることが分かる。図

10(a)の風速軸を3乗したものを図10(b)に示す。データ要素が直線的に分布することが分かり、マイクロバブルの発生周波数も風速の3乗に比例する。マイクロバブルの発生周波数 f と風速 W の関係は式(1)のようになる。

$$f = 0.08W^3 \quad (1)$$

この関係式より、本水質浄化システムは風速による1時間当たりのマイクロバブルの発生回数がある程度予測することができる。発生回数は風速の3乗、すなわち風が持つエネルギーに比例することがわかる。よって、発生回数を増やすためには、風況の良い場所を選ぶことは言うまでもないが、風車が取得できるエネルギーは風車の受風面積にも比例するため、同じ風況下においても大型の風車を利用することが有効であると考えられる。

本研究では、低風速下でマイクロバブルを発生させることが可能であることが分かった。実際に水質浄化を行う場合、マイクロバブルの発生回数や水中に導入する空気量は、水域の規模に合わせて検討を行う必要があり、これに対しては水中の溶存酸素量の変化を調査する必要があると考えられる。図10の考察からも言えるように風車の大きさを拡大し、アキュムレータの容量を変化させることで曝気的能力を高めることは可能であると考えられる。また、高風速域向きの曝気システムや、他のエネルギー源により駆動する曝気システムと併用することによって、本システムは有効に活用することができると考えられる。また、本研究で提案したエネルギーの貯蔵方法は、風力分野におけるエネルギーハーベスティングの発展に寄与するものであると期待される。我々が現在直面しているエネルギー事情を考えると、このような研究は今後さらに重要性が増すものと思われる。

Fig. 10 Wind speed vs. generation frequency of micro bubble

6. 結 言

本研究では風力エネルギーを用いてマイクロバブルを発生させ、水質を改善させるシステムを製作し、動作試験並びにフィールドテストを行った。以下の結果が得られた。

- (1) 本水質浄化システムはアキュムレータを備えることで、一般的に風力発電には適さない低風速域においても風力エネルギーを利用可能であることを示した。
- (2) 本水質浄化システムはマイクロバブルの発生が可能であった。これは風力エネルギーを直接利用した水質浄化を実用的に行うために有効であると考えられる。
- (3) 本システムのマイクロバブルの発生回数は風速の3乗に比例しており、設置場所の風況データから事前に発生回数を予測することが可能であると考えられる。
- (4) 本システムは規模を変え、他の水質浄化システムと組み合わせることで、様々な大きさの水域に対応可能であると考えられる。

文 献

- (1) Michael Cloutier, Paul Rowley, “The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-Saharan Africa: A case study for Central Nigeria”, *Renewable Energy*, Vol. 36, No. 8 (2011), pp. 2220-2226.
- (2) Hammad, M.Ahmad, “Photovoltaic, wind and diesel. A cost comparative study of water pumping options in Jordan”, *Energy Policy*, Vol. 23, No. 8 (1995), pp. 723-726.
- (3) Kirke, Brian K, “Wind-powered aeration for wastewater treatment, aquaculture and lake destratification”, *Wind Engineering*, Vol. 19, No.1(1995), pp. 1-12.
- (4) 西沢良文, 牛山泉, 根本泰行, 渡部富治, “小型風車とケースレスポンプによるエアレーションシステムの研究”, 日本機械学会関東支部ブロック合同講演会講演論文集, (2005), pp.19-20.
- (5) 奥山武彦, 片山秀策, 五島眞宏, 小綿寿志, “小型風車を用いた攪拌曝気装置の開発”, 農業工学研究所技報, 198号(2000), pp. 33-42.
- (6) 工藤勝弘, 河上智行, 山田正, “ダム貯水池内における栄養塩および植物プランクトンの挙動について”, 水文・水資源学会誌, Vol. 17, No. 2(2004), pp. 134-149.
- (7) 牛山泉, 風車工学入門(2002), p. 22, 森北出版株式会社.
- (8) 篠原真毅, “バッテリーレス社会に向けたエネルギーハーベスティング技術”, 電子情報通信学会誌, Vol. 92, No. 8 (2009), pp.695-699.
- (9) 松尾克美, 前田邦男, 大成博文, 都並結依, 大成博音, “マイクロバブル技術によるダム貯水池の水質浄化”, 混相流研究の進展, Vol. 1(2006), pp. 279-286.
- (10) 南川久人, 道奥康治, 山田哲史, 安田孝宏, “酸素マイクロバブルを用いた貯水地深層曝気実験における水質改善効果の検討”, 実験力学, Vol. 10, No. 1(2010), pp. 39-44.
- (11) 大成博文, マイクロバブルのすべて(2006), pp.59-61, 株式会社日本実業出版社.
- (12) 柘植秀樹, マイクロバブル・ナノバブルの最新技術(2007), pp. 15-30, 株式会社シーエムシー出版.
- (13) 沢田雅, 中村雅英, 鎌田信, “サボニウス風車の翼に作用する力の測定と翼まわりの流れの可視化”, 日本機械学会論文集 B 編, Vol. 51, No. 471 (1985), pp.3743-3747.
- (14) T. Ogawa, K. Tahara, N. Suzuki, “Wind Tunnel Performance Data of the Savonius Rotor with Circular Guide Vanes”, *Bulletin of JSME*, Vol. 29(1986), No. 253, pp. 2109-2114.
- (15) 文献(7)の p. 24.