

翼素運動量理論による Hydro-VENUS のエネルギー取得性能の評価

岡山大学 学生会員 ○森谷 尚史, 高松 宏彰, 伊藤 隼

岡山大学 正会員 比江島 慎二

1. はじめに

柱状の剛体振り子を水流で流体励起振動させて発電する Hydro-VENUS (Hydrokinetic Vortex ENergy Utilization System) を開発している^{1)~3)}. 振り子の断面形状として, 長軸に沿って楕円を半分にした半楕円が特に強いギャロッピング振動を生じることが明らかになった⁴⁾. ところが, 半楕円柱振り子のバネを外したところ, 振り子が片方向回転を発生し, 同じ長さの振り子であれば, 振動させるより高い性能が得られることが判明した⁵⁾. 振り子の片方向回転は, ギャロッピング機構に基づいて発生すると考えられるものの, 振り子に作用する揚力が駆動力となる点では通常の翼型タービンブレードと同じである. そのため, 翼型ブレードの性能評価に用いられる翼素運動量理論が Hydro-VENUS の回転振り子 (VENUS ブレード) にも適用できる可能性がある. そこで本研究では, 半楕円柱 VENUS ブレードを対象として翼素運動量理論の適用可能性を検討した.

2. 解析方法

翼素運動量理論はロータの理想的な効率を予想する運動量理論と, ブレードの翼素に作用する流体力は局所的な流れによって決まるという翼素理論を組み合わせたものであり, 風車ブレードの設計などに用いられる. 本研究では, 翼素運動量理論に基づくタービンブレードの設計・解析ソフト QBlade を用いて, ブレード 2 次元断面に作用する定常揚力係数と定常抗力係数を求め, 翼素運動量理論に基づく性能解析を行った⁶⁾.

半楕円柱ブレード 1 枚翼のローターを対象に, ブレードのピッチ角 β を変化させて性能解析を行った (図 1). ブレードの根元から先端まで一定のピッチ角とし, ねじれは与えない. 解析と同じ諸元の半楕円柱ブレードを実際に水流で回転させる水槽実験を別途行い, 性能について解析結果と比較した. 表 1 のブレードの断面アスペクト比 e は, 半楕円の短半径 b に対する長径 (見付幅) $D=25\text{mm}$ の比であり, 水槽実験で高い性能が得られた $e=D/b=6$ とした. ブレード長は $L=80\text{mm}$ である. なお, 半楕円柱ブレードは長径 D に相当する平面部分を上流に向けて配置するときギャロッピングによる強い回転が発生する.

水槽実験で流速 $U=0.5\text{m/s}$ のときのローター回転の周速比を元に, 解析のレイノルズ数 $Re (=UD/\nu, \nu$ は動粘性係数) を設定した. つまり, 半楕円ブレードでは, 水槽実験で性能が高かったピッチ角 $\beta=0^\circ, 1^\circ, 2^\circ, 3^\circ, 4^\circ, 5^\circ, 6^\circ$ のそれぞれにおいて, 最大のパワー係数が得られたときの周速比 $\lambda=4.9, 4.9, 4.8, 4.8, 4.6, 4.6, 4.5\text{rad/s}$ に相当する相対流速から Re を算定し, 平均を取って $Re=53035$ に設定した. 半楕円柱ブレードと比較のために用いた NACA0015 翼型については, ピッチ角 $\beta=0^\circ$ の水槽実験において, 最大のパワー係数が得られたときの周速比 $\lambda=6.6\text{rad/s}$ に相当する相対流速から Re を算定し, それに近い $Re=71841$ に設定した. なお, NACA0015 翼型ブレードは半楕円柱と同じく, 翼弦長 $D=25\text{mm}$, ブレード長 $L=80\text{mm}$ である. また, QBlade では流れが層流から乱流へ遷移する際の擾乱の増幅率を表す NCrit 値を設定するが, 本研究では標準的な NCrit = 9 に設定した.

表 1 ブレード・ローターの諸元と解析条件

e	6
D	25mm
L	80mm
ブレード数	1
ハブ半径	14mm
U	0.5m/s
水密度	1000kg/m ³
ν	$1.141 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$
Re	53035(半楕円) 71841(翼型)
NCrit	9

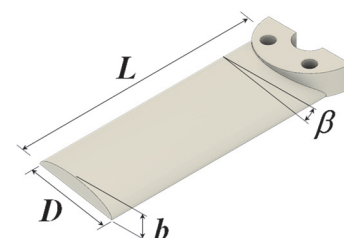


図 1 半楕円柱ブレード

キーワード 潮流発電, 小水力発電, 流体励起振動, ギャロッピング, Hydro-VENUS, 半楕円柱

連絡先 〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3 丁目 1 番 1 号 岡山大学大学院環境生命科学研究科

T E L 086-251-8869

3. 解析結果

(1) ブレードに作用する定常流体力の解析結果

図2はブレード断面周りの2次元流れの定常解析で求めた揚力係数と抗力係数から、迎角 α に対する揚抗比（抗力係数に対する揚力係数の比）を求めた結果である。 $-45^\circ < \alpha < 45^\circ$ で示しているが、実際に解析で解が得られたのは、半楕円断面では $-16.5^\circ < \alpha < 9.6^\circ$ 、NACA翼型断面では $0^\circ < \alpha < 37^\circ$ であり、それ以外の迎角ではQBladeの外挿機能によって求めた。

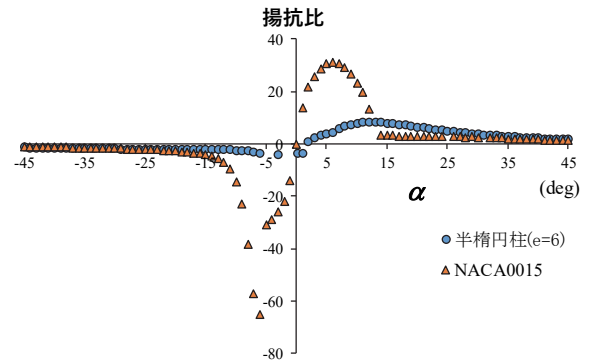
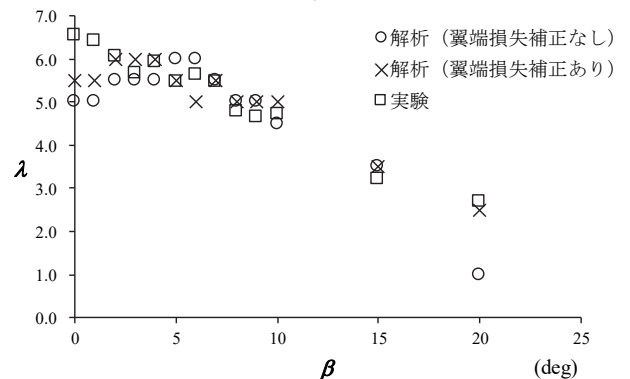
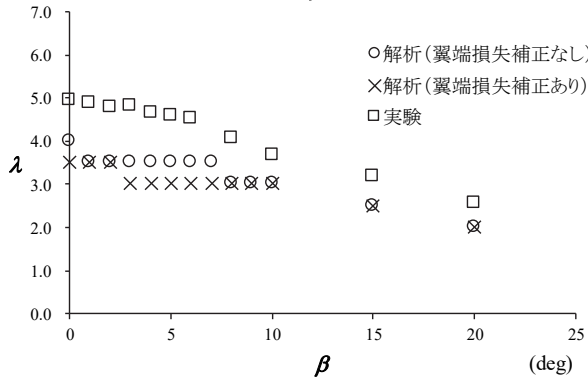
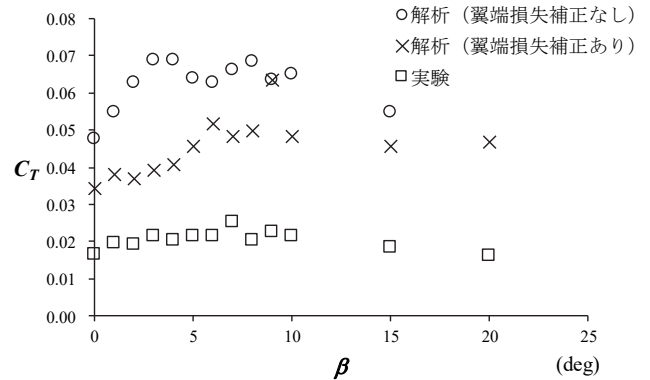
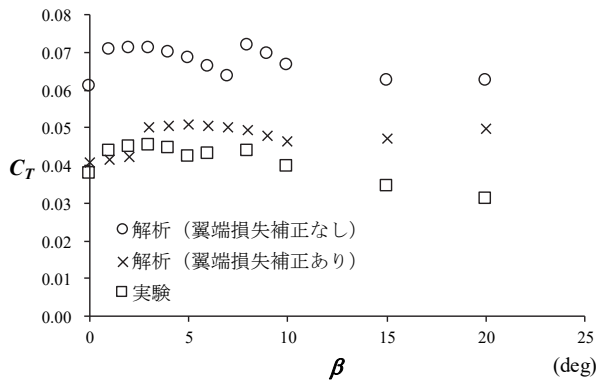
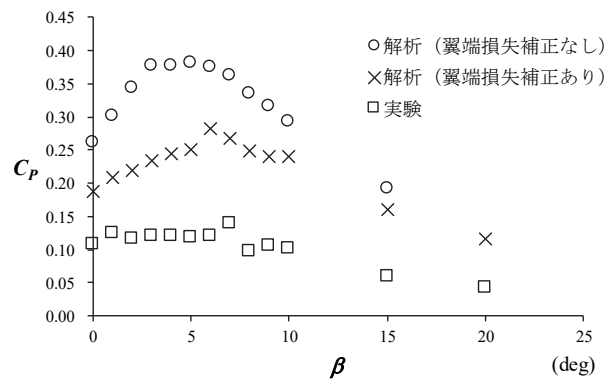
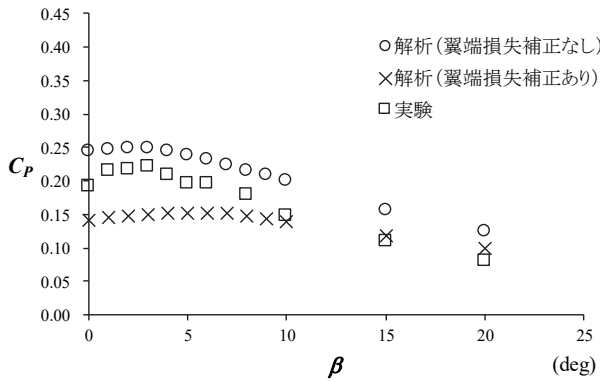


図2 迎角に対する揚抗比の変化

図2の半楕円柱で揚抗比が最大の迎角は $\alpha = 13^\circ$ である。それに対し、別途行った水槽実験において、パワー係数が高かったピッチ角 $\beta = 0^\circ \sim 3^\circ$ のブレード先端付近の迎角は、それに近い $\alpha = 10^\circ \sim 12^\circ$ 程度であった。また、図2の翼型ブレードで揚抗比が最大となる迎角は $\alpha = 6^\circ$ であるのに対し、水槽実験でパワー係数が高かったピッチ角 $\beta = 7^\circ$ のブレード先端付近の迎角は、やはりそれに近い $\alpha = 5^\circ$ 程度であった。つまり、解析で揚抗比が最大となる迎角は、水槽実験においてパワー係数が高いときのブレード先端付近の迎角に近い。



(a) 半楕円柱 (e = 6)

(b) NACA0015 翼型

図3 翼素運動量理論解析と水槽実験のエネルギー取得性能の比較

(2) 翼素運動量理論によるエネルギー取得性能の解析結果

2次元流れの定常解析で求めた揚力係数・抗力係数を元に翼素運動量理論に基づく性能解析を行った。ピッチ角 β ごとに周速比に対する最大のパワー係数 C_P を求め、そのときのトルク係数 C_T と周速比 λ とともに図3に示す。一般に、回転するブレード先端から翼端渦が発生し損失を伴うことから、翼端損失を考慮して補正した解析結果も示している。さらに、解析と同じ条件の下で別途行った水槽実験の結果も示した。

半楕円柱の水槽実験値は、ピッチ角 β が小さい範囲では翼端損失補正なしの解析値に近く、ピッチ角 β が大きい範囲では翼端損失補正ありの解析値に近いことから、 β が小さい範囲では翼端渦の影響が小さく、 β が大きい範囲では翼端渦の影響が大きいと考えられる。また、パワー係数 C_P が最大となったピッチ角 β に着目すると、半楕円柱の翼端損失補正無しの解析では $\beta=2^\circ$ 、翼端損失補正ありでは $\beta=5^\circ$ で C_P が最大となっており、水槽実験で C_P が最大だった $\beta=3^\circ$ に比較的近い。一方、翼型ブレードの翼端損失補正無しの解析では $\beta=5^\circ$ 、翼端損失補正ありでは $\beta=6^\circ$ で C_P が最大となっており、やはり水槽実験で最大だった $\beta=7^\circ$ に近い。

ところで、実験では NACA0015 翼型ブレードは半楕円柱よりもパワー係数 C_P が低いのにに対し、解析では NACA0015 翼型ブレードの方が C_P が高くなっている。また、翼素運動量理論は通常、翼型ブレードの設計に用いられるにもかかわらず、NACA0015 翼型ブレードのパワー係数 C_P の解析値は実験値との差異が大きい。特に、トルク係数 C_T における解析値と実験値の乖離が大きい。このことは、NACA0015 翼型ブレードの水槽実験において、解析では考慮されていない特異な流れやエネルギー損失などが生じている可能性を示唆する。

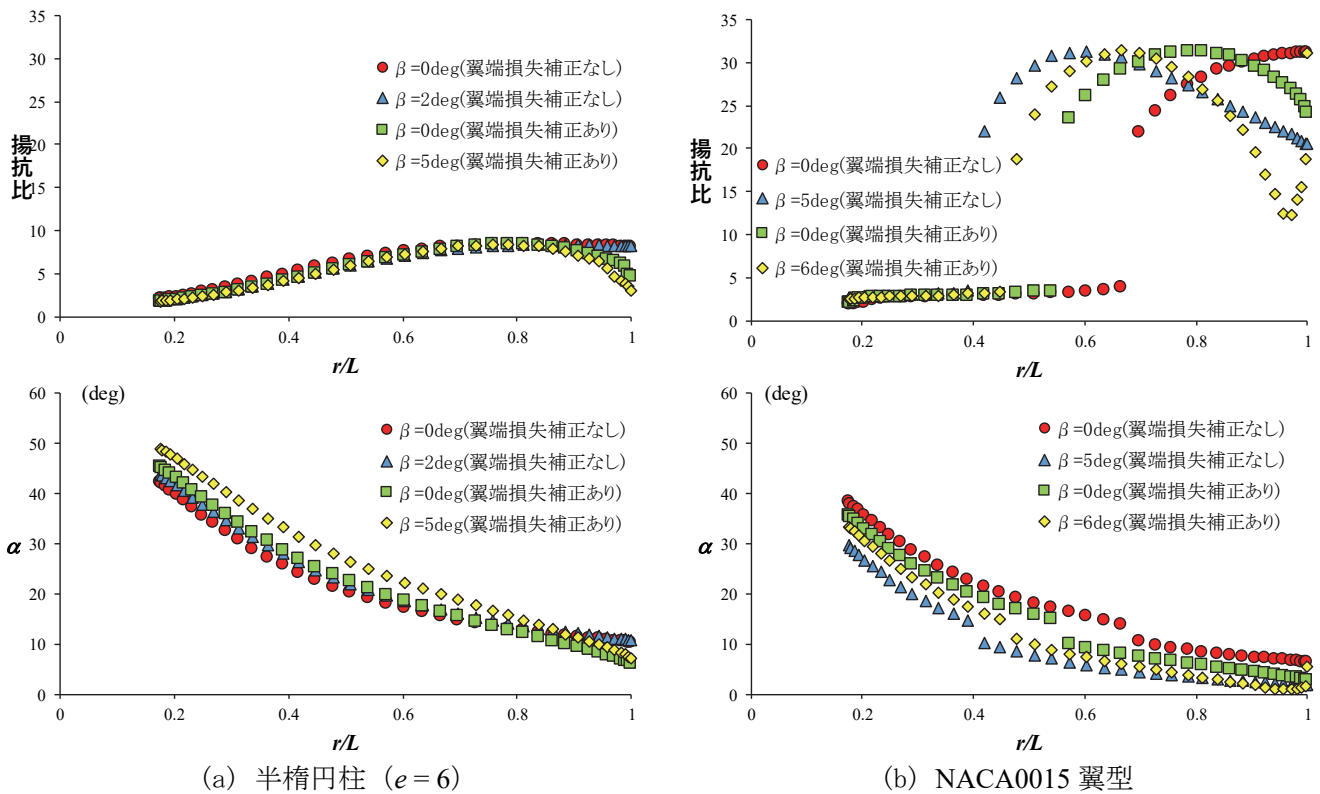


図4 ブレード上の揚抗比と迎角の分布

これに関して、本研究で用いたブレードのアスペクト比は $L/D=3.2$ であり、ブレード長さ L が相対的に短いことから、翼端渦などの影響を受けやすいと考えられる。また、アスペクト比 L/D が低いことでその他の3次元的な流れの影響も受けやすく、翼素運動量理論における2次元流れの前提と乖離したことによって、NACA0015 翼型ブレードの解析値と実験値の差異が大きくなった可能性がある。一方、半楕円柱では、ブレード上のいずれの場所においても、鋭い前縁エッジから剥離した流れによるギャロッピング機構が支配的となり、2次元的な流れが保持されることで、翼端渦やその他の3次元的な流れの影響が相対的に小さかった可能

性がある．図 3 で翼端損失補正した半楕円柱のパワー係数 C_p の解析値が実験値より低いのも，解析で翼端損失を過大評価した結果と考えられ，実験では翼端渦の影響が小さかった可能性を裏付ける．しかし，現段階では流れの詳細については不明であり，今後さらに検討する必要がある．

図 4 は，ローター回転軸からの距離 r におけるブレード上の揚抗比と迎角 α の分布を示している．ピッチ角 $\beta = 0^\circ$ のとき，および図 3 の翼端損失補正なしとありの解析においてそれぞれパワー係数が最大となったピッチ角における分布を示している．翼端損失補正ありの場合，補正なしの場合に比較して翼端での揚抗比が低下していることが分かる．また，翼型ブレードの場合，ブレード根元に近い部分では失速により揚抗比が大きく低下している様子もうかがえる．失速が生じている r/L 位置の迎角を見ると，いずれも $\alpha = 15^\circ$ 付近となっている．図 5 に示す迎角 α に対する揚力係数 C_L の変化を見ると，やはり $\alpha = 15^\circ$ 付近で NACA0015 翼型の揚力係数が急激に低下し失速するのが分かる．一方，半楕円柱ブレードの方は，翼型ブレードのような揚抗比の極端な低下が見られない．

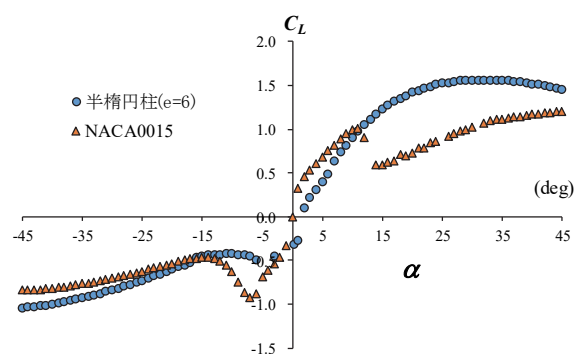


図 5 迎角に対する揚力係数の変化

8. 結論

翼素運動量理論の解析で求めたパワー係数は，必ずしも水槽実験結果に近い値ではなかったが，パワー係数が最大となるピッチ角は比較的近い値が得られた．また，比較に用いた NACA0015 翼型ブレードよりも，むしろ半楕円柱 VENUS ブレードのパワー係数の解析値の方が実験結果に近かった．これは，本実験で用いたブレードのアスペクト比が低かったことで，NACA0015 翼型ブレードでは，翼端渦やその他の 3 次元的な流れの影響を強く受けたのが原因として考えられる．一方，半楕円柱 VENUS ブレードは，鋭い前縁エッジで剥離した流れによってギャロッピング機構が支配的となり，比較的 2 次元的な流れが保持されることで，翼端渦などの影響を受けにくかった可能性が考えられる．しかし，詳細な流れの状況については不明であり，今後さらに検討する必要がある．その他，翼型に比べて失速しにくい VENUS ブレードの特長をとらえることができた．

謝辞：本研究の一部は，国立研究開発法人科学技術振興機構の地域産学バリュープログラム，一般社団法人中国建設弘済会の技術開発支援事業，および日本財団・(株)リバネス共同事業の海底探査技術開発プロジェクトの支援により行われたことを付記し，ここに謝意を表します．

参考文献

- 1) 比江島慎二，岡圭人，林健一，井上治男：倒立振り子を用いた流力振動発電のためのエネルギー取得性能の検討，第 22 回風工学シンポジウム，pp.425-430，2012.
- 2) 比江島慎二，岡圭人，林健一，井上治男：倒立振り子の流力振動を利用した発電のための基礎的実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.69，No.1，pp.12-21，2013.
- 3) 比江島，大熊：振り子式潮流発電機の円柱振り子に作用する流体力特性，土木学会論文集 A1(構造・地震工学)，Vol.72，No.2，pp.315-321，2016.
- 4) 比江島慎二，高松宏彰，大熊広樹，上田剛慈：ギャロッピング振動を用いた振り子式水流発電，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.73，No.1，pp.24-34，2017.
- 5) 比江島慎二，高松宏彰，大熊広樹，上田剛慈：流体励起振動の励振機構を利用した革新的な水流発電用タービンブレード，土木学会論文集 B3 (海洋開発) Vol.74，No.1，pp.1-12，2018.
- 6) 牛山泉：風車工学入門 第 2 版，森北出版株式会社，pp.81~96，2013.