

自律高空帆走発電のカイト翼におけるテーパー形状の効果

岡山大学大学院 学生会員 ○中居 大地
 岡山大学大学院 正会員 比江島 慎二

1. はじめに

従来の風車を用いた洋上風力発電に対し、図1のように、水流タービンを搭載した浮体からカイトを上空に揚げ、上空の風力を捉えて浮体を曳航することで発電する自律高空帆走発電を提案している。自律高空帆走発電では、カイトを上空で8の字飛行させることで、静止飛行よりも大きな揚力を発生させ、より強い曳航力で浮体を帆走させて水流タービンの発電能力を高める。本研究では、カイトの曳航性能向上のため、カイト翼形状にテーパーを付けたときの効果を検討した。

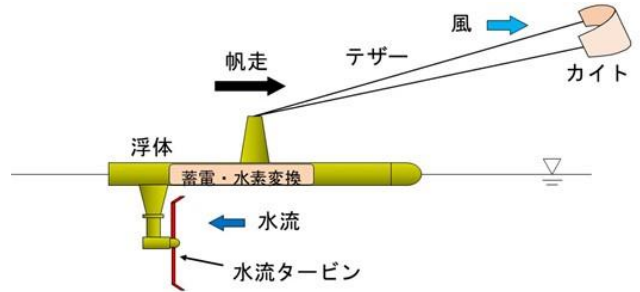


図1 自律高空帆走発電

2. テーパー付きカイトの空力特性に関する風洞実験

カイトはラムエア型を想定し、翼前縁から見たとき図2に示すような曲率 1/130、中心角 90deg の円弧状の湾曲を与える。テーパーなしと円錐曲線のテーパーを付けたカイトについて、図2の5種類の樹脂製のカイト模型を作成した。テーパー付きについては円錐曲線の強弱により $\rho = 0.50$ と $\rho = 0.75$ の円錐曲線パラメータを用いた。さらに、片側にのみテーパーを付けたカイト模型については、テーパーを前縁側にした場合と後縁側にした場合の2種類の空気力を測定した。

各カイト模型の迎角 α に対する揚力係数 C_L 、抗力係数 C_D 、揚抗比を風洞実験で測定した結果を図3に示し、表1にはそれぞれのカイトの空気力や空気力係数の最大値を示す。いずれのテーパー付きカイトも、テーパーなしのカイトより揚抗比の最大値が高くなり、最も高かったのは(b)前縁側に円錐曲線テーパー ($\rho = 0.50$) を付けたカイトであった。また、大きな曳航力を得るには揚力係数が重要であるが、(b)前縁側あるいは(d)両側に $\rho = 0.50$ の円錐曲線テーパーを付けたカイトの揚力係数が高い。テーパーを与えることで、テーパーなしに比べて翼端渦を抑制し、翼端損失が低下するため翼性能が向上したと考えられる。

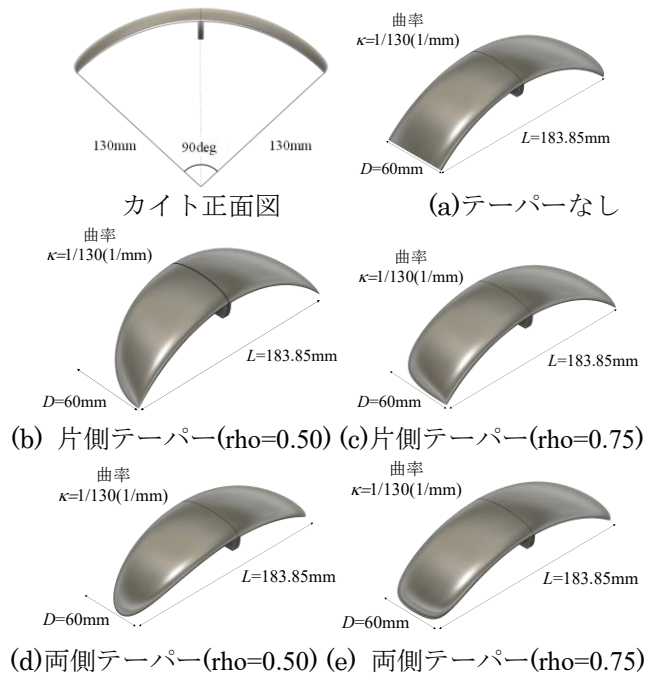


図2 風洞実験に用いたカイト模型

表1 風洞実験における空気力・空気力係数の最大値

カイト	(a)	(b)前縁	(c)前縁	(b)後縁	(c)後縁	(d)	(e)
迎角(deg)	12	16	16	12	12	16	16
揚抗比	6.78	8.06	7.50	7.70	6.95	8.01	7.53
揚力(N)	0.62	0.53	0.57	0.50	0.54	0.53	0.58
揚力係数	1.01	1.10	1.02	1.03	0.97	1.10	1.03
抗力(N)	0.67	0.54	0.63	0.63	0.64	0.56	0.71
抗力係数	1.09	1.12	1.14	1.12	1.14	1.16	1.17

キーワード 洋上風力発電, 高空風力発電, カイト, テーパー

連絡先 〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1 岡山大学大学院環境生命自然科学研究科

mail : p7t46ap4@s.okayama-u.ac.jp

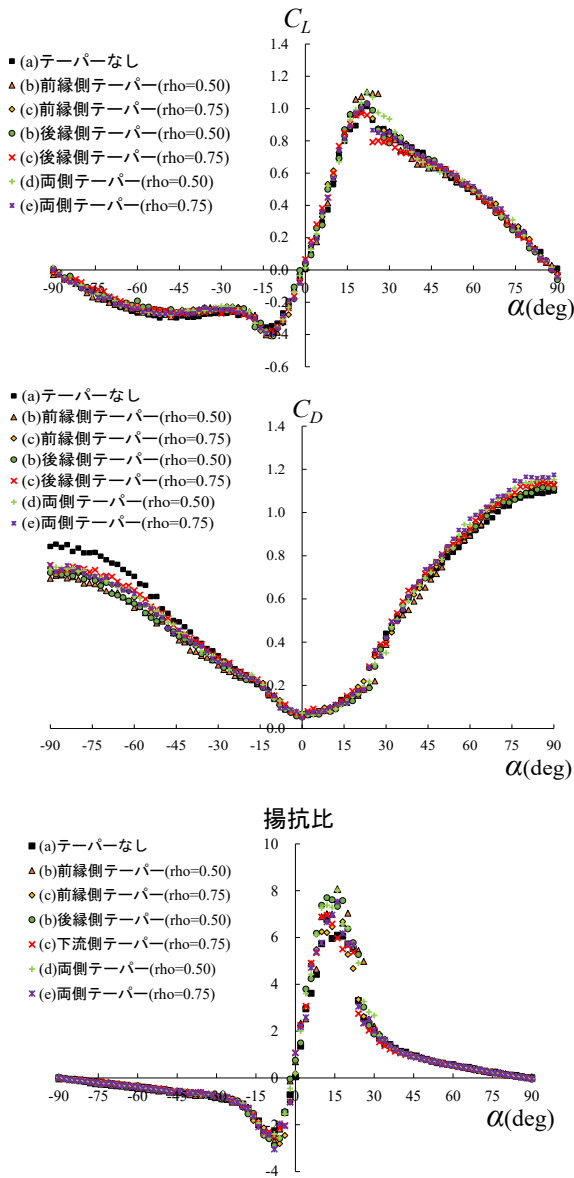


図3 風洞実験によるカイトの空力特性

3. カイトの8の字飛行制御方法

カイト両端に接続されたテザーを操作することによりカイトにロール角 ψ を与えると、ロールで傾けた方向にカイトが旋回するため、ロール角 ψ を交互に反転させればカイトを8の字飛行させることができる。アクチュエータを備えた制御装置でこのテザー操作を行えば、自動的に8の字飛行が可能になる。

本研究ではカイトの自動飛行制御法として以下の方式を用いる。つまり、図4に示すように旋回軌道の最下点にカイトが達した時点からアクチュエータを作動してロール角 ψ の反転を開始し、既定のロール角限界 ψ_{limit} に達するまで一定の角速度 $\dot{\psi}$ でロール角 ψ を変化させる。一方、旋回中はロール角 ψ を一定のままアクチュエータは作動させない。

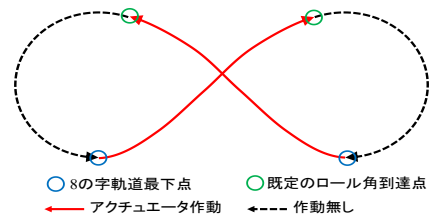


図4 8の字飛行制御法

さらに、ロール角限界 ψ_{limit} とロール角速度 $\dot{\psi}$ の組み合わせには、8の字飛行が可能な最適値が存在すると考えられ、風速変化などの外乱によってその最適値が変化すると、安定した8の字軌道を保持できなくなる恐れがある。そこで、カイトの旋回ごとに ψ_{limit} を修正することにより、カイトの旋回半径を調整することで8の字軌道を保持する手法を用いた。具体的には、ロール角反転時に $\psi = 0\text{deg}$ となる位置を8の字軌道の中心位置と見なしてその仰角を $\theta_{\psi=0}$ とすると、 $\theta_{\psi=0}$ を8の字中心の目標仰角 θ_{target} に近づけるように ψ_{limit} を修正する。すなわち、式(1)のように $(i-1)$ 回目の制御ステップの $\psi_{limit,i-1}$ にロール角修正量 $\Delta\psi_{limit}$ を与えることで、 i 回目の制御ステップの $\psi_{limit,i}$ を決定する。

$$\begin{cases} \psi_{limit,i} = \psi_{limit,i-1} - \Delta\psi_{limit} \\ \Delta\psi_{limit} = \psi_{mod}(\theta_{\psi=0} - \theta_{target}) \end{cases} \quad (1)$$

$$|\theta_{\psi=0} - \theta_{target}|_i > |\theta_{\psi=0} - \theta_{target}|_{i-1} \quad (2)$$

このとき、修正量 $\Delta\psi_{limit}$ は、 θ_{target} に対する $\theta_{\psi=0}$ の乖離量に一定のロール角修正率 ψ_{mod} を乗じて求める。なお、この修正は式(2)のように、 i 回目の制御ステップにおいて $(i-1)$ 回目の制御ステップよりも $\theta_{\psi=0}$ が目標仰角 θ_{target} から遠ざかる場合にのみ行う。本研究では $\theta_{target} = 20\text{deg}$ とする。ところで、ロール角限界値 ψ_{limit} を旋回ごとに修正する代わりに、ロール角速度 $\dot{\psi}$ を修正する手法も考えられるが、ロール角限界 ψ_{limit} の修正に比べて、8の字飛行の安定化効果はそれほど高くないことが別途明らかになっている¹⁾。

4. カイトの8の字飛行シミュレーション

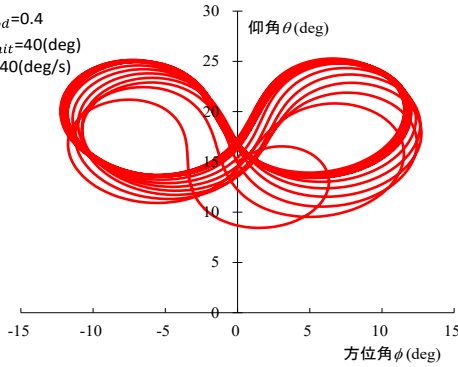
2章の風洞実験の空力特性を元に(a)テーパーなしのカイトと最も揚抗比が高かった(b)前縁側テーパー付きカイトについて、8の字飛行シミュレーション²⁾を行った。質量と投影翼スパンは両者で統一した(表2)。また、自然風の高度 Z における風速 W_0 は対数則分布を仮定して式(3)により求めた。ここでは、 $Z_{ref} = 8\text{m}$, $U_{ref} = 10\text{m/s}$, $Z_0 = 0.0001\text{m}$ とする。

表2 カイトとテザーの諸元 (シミュレーション)

テーパー	なし	あり
カイト質量	0.27kg	
カイト投影翼面積	0.626 m ²	0.495 m ²
カイト投影翼スパン	1.345 m	
カイト翼ピッチ角	0deg	
テザー密度	970 kg/m ³	
テザー長さ	18 m	
テザー直径	0.001 m	
テザー抗力係数	1.2	

【テーパーなし】

- ・ $\psi_{mod}=0.4$
- ・ $\psi_{limit}=40(deg)$
- ・ $\dot{\psi}=240(deg/s)$



【テーパーなし】

- ・ $\psi_{mod}=0.4$
- ・ $\psi_{limit}=46deg$
- ・ $\dot{\psi}=320deg/s$

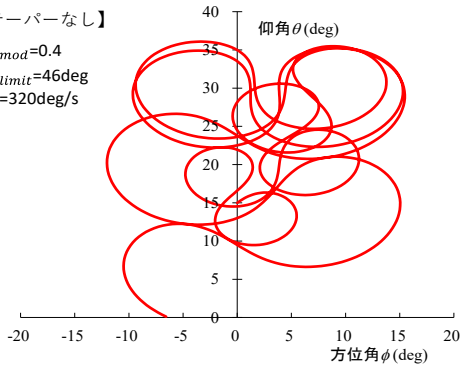
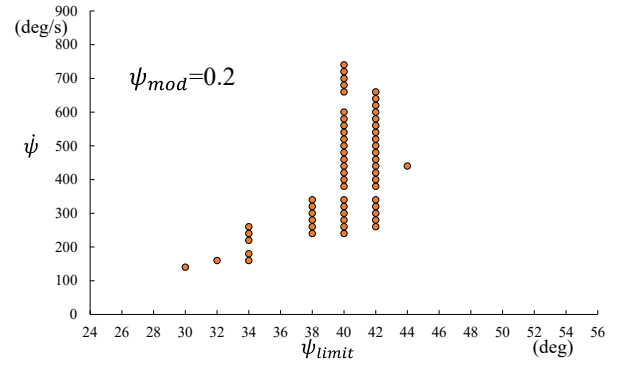


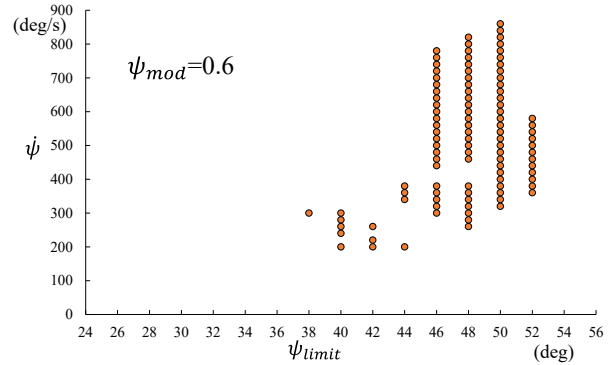
図5 8の字飛行の成功例と失敗例の軌道

$$W_0 = U_{ref} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) / \ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right) \quad (3)$$

3章の飛行制御法に基づいて、カイトに与えるロール角限界 ψ_{limit} を 2deg ごと、ロール角速度 $\dot{\psi}$ を 20deg/s ごとに変化させた様々な ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせで解析した。このとき、(a)テーパーなしカイトではロール角修正率 $\psi_{mod} = 0, 0.1, 0.2, 0.25, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 1.0$, (b)前縁側テーパー付きカイトでは $\psi_{mod} = 0, 0.1, 0.2, 0.4, 0.5, 0.55, 0.6, 0.7, 1.0$ を与え、ロール角限界 ψ_{limit} を旋回ごとに修正しながら制御した。図5は8の字飛行の成功例と失敗例のカイト軌道を示している。成功例ではきれいな8の字軌道を描けているが、失敗例では解析時間150sの途中でカイトが墜落している。



(a) テーパーなし



(b) テーパーあり

図6 8の字飛行が成功した ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせ

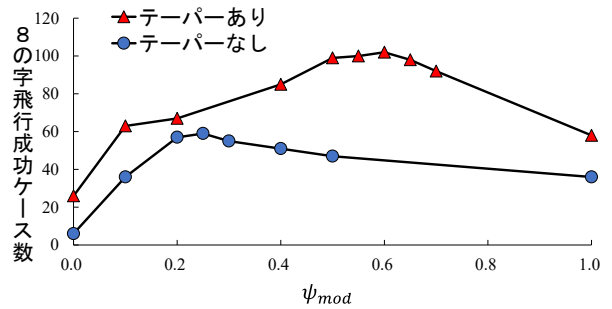


図7 ψ_{mod} による8の字飛行成功ケース数の変化

図6には、それぞれのカイトにおいて、8の字飛行が成功した、ロール角限界 ψ_{limit} とロール角速度 $\dot{\psi}$ の組み合わせを示している。いずれも、飛行が成功した ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせ数が最も多かったロール角修正率 ψ_{mod} のケースである。テーパーありのカイトはテーパーなしに比べて飛行に成功する ψ_{limit} の値が全体的に大きいことから、テーパーなしに比べると小さな旋回半径の8の字を描きながら飛行していると考えられる。さらに、その他のロール角修正率 ψ_{mod} のケースについても解析し、やはり8の字飛行が成功した ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせ数を調べた結果を図7に示す。テーパーありのカイトの方が成功した組み合わせ数が多く、安定的に8の字を描きやすいと言える。

5. 8の字飛行によって生じるテザー張力

図8は8の字飛行が成功したすべてのケースについて、ロール角限界 ψ_{limit} に対する平均テザー張力を示したものである。ここでは、8の字飛行が成功したすべての ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせにおける、すべての ψ_{mod} のケースをまとめて示してある。テザー張力の平均値は150s間のシミュレーションのうち、経過時間90s~150sの時間平均として求めた。テーパーありに比べてテーパーなしの方が、平均テザー張力が大きいことがわかる。これに関連して表1の(a)テーパーなしと(b)前縁側テーパー付きを比べると、テーパーなしの揚力係数はテーパー付きより低いものの、揚力そのものはテーパー付きよりも大きい。これは、テーパーなしの方が、カイト面積が大きいのが原因と思われる。テザー張力は揚力による寄与が大きいため、カイト面積が大きいテーパーなしの方がテザー張力も大きくなった可能性がある。

また、図8によると、テーパーの有無に関係なく、 ψ_{limit} が小さいほど平均テザー張力が大きくなる傾向がある。つまり、より大きな旋回半径の8の字を描いて飛行した方が、より大きなテザー張力が得られることが示唆される。テーパーなしの場合は、テーパー付きよりも ψ_{limit} が小さいため、より大きな旋回半径の8の字を描いて飛行することで、より大きな平均テザー張力が得られた可能性がある。

一方、テーパーの有無によるカイト面積の違いの影響を排除するため、図8と同じケースについて、カイトの単位面積当たりの平均テザー張力で示したのが図9である。単位面積当たりのテザー張力の最大付近で見ると、テーパー有無による違いはあまりないことが分かる。また、ロール角限界 ψ_{limit} とロール角速度 $\dot{\psi}$ の組み合わせに対して、図9と同じケースについてカイトの単位面積当たりのテザー張力を階級表示したのが図10である。ロール角限界 ψ_{limit} だけでなくロール角速度 $\dot{\psi}$ も小さい方が、テザー張力が大きくなる傾向が見て取れる。

参考文献

- 1) 竹村: 自律高空帆走発電のためのカイトのリアルタイム飛行制御法, 岡山大学修士論文, 2022.
- 2) 比江島, 遠藤, 山本: 自律高空帆走発電の提案とそのエネルギー取得性能の試算, 日本風力エネルギー学会論文集, Vol.45, No.1, pp.10-21, 2021.

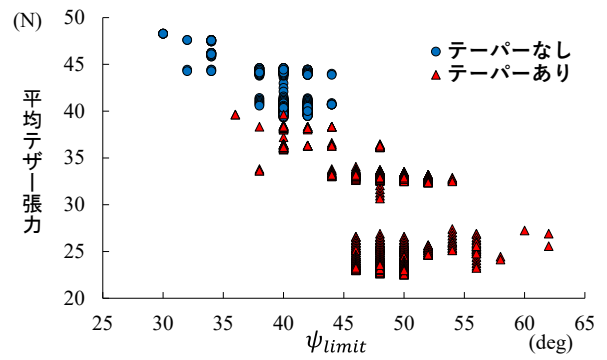


図8 ψ_{limit} に対する平均テザー張力

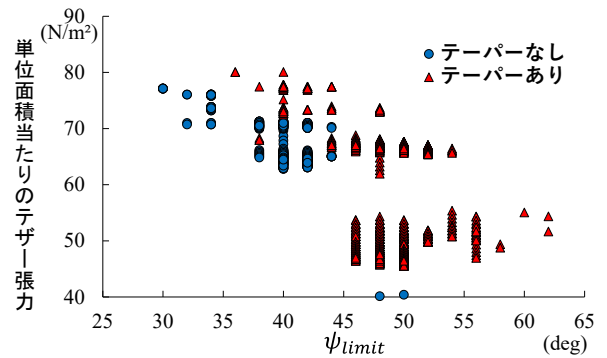
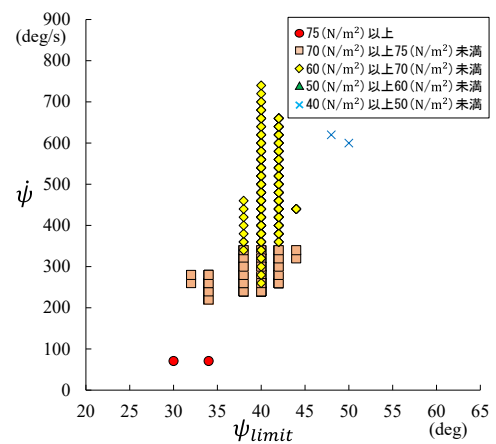
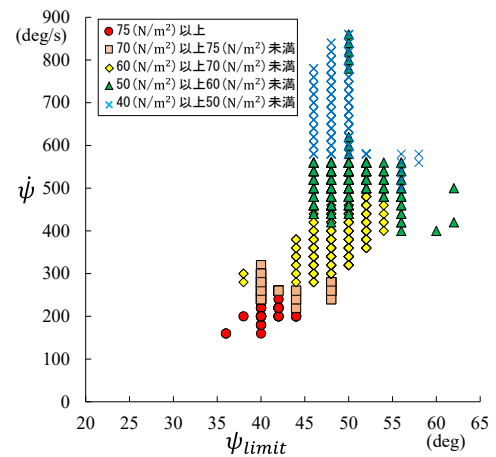


図9 ψ_{limit} に対する単位面積当たりテザー張力



(a) テーパーなし



(b) テーパーあり

図10 ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせに対する単位面積当たりテザー張力の階級表示