

自律高空帆走発電のための8の字飛行制御法

岡山大学大学院 学生会員 ○茨木 颯太
岡山大学大学院 正会員 比江島 慎二

1. はじめに

我々は新型の洋上風力発電として自律高空帆走発電を提案している(図1)。洋上の浮体から上空に揚げたカイトで洋上風力を捉えて帆走し、浮体下部に搭載した水流タービンで発電するドローン船である。発電した電力は浮体内の電池に蓄電し、送電ケーブルに接続しないため、送電コストが不要で離岸距離30km超の膨大な遠洋風力も獲得できる。さらに、浮体を固定せず洋上を自由に帆走できるため海域を占有せず、漁業との競合も避けられる。また、各種の観測装置やセンサーを搭載すれば発電以外の多用途に活用できる。

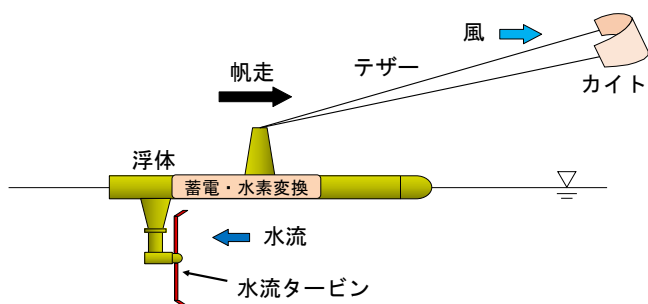


図1 自律高空帆走発電

自律高空帆走発電のカイトは上空で8の字飛行させることにより、カイトに高速の相対風を発生し、静止飛行よりも強い揚力と曳航力を生み出す。本研究では、風洞実験で得た空力特性に基づくカイトの飛行シミュレーションおよび実際のカイトを用いた屋外飛行実験により、新たに提案した8の字飛行制御法の検証を行う。

カイトを用いた風力発電は高空風力発電と呼ばれるが、一般に前縁開口部から取り入れた空気です袋状のカイト全体を膨らませて翼型形状を維持するラムエア型カイトが多く用いられる。しかし、地上からの飛行開始時にカイトが萎んだ状態からの打ち上げとなるため、揚力を得にくく飛行が不安定となりやすい。そこで、本研究では、剛性の高い骨組み構造を有し、打ち上げ時に揚力を得やすいデルタ型カイトを用いた。

2. カイトのリアルタイム飛行制御法の提案

カイト両端から伸びる2本のテザーを伸縮操作することでカイトにロール角を与えると、ロールで傾けた方向にカイトが旋回し、ロール角を交互に反転すれば8の字軌道を描くことができる。2本のテザーをアクチュエータで操作すれば自動的にカイトを8の字飛行させることが可能になる。

本研究で提案する飛行制御法では、図2のように8の字の巡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開始し、ロール角 ψ が限界値 ψ_{limit} に達するまで一定の角速度 $\dot{\psi}$ で徐々にロール角を反転させる。一方、左右の巡回中にはアクチュエータを作動させずにカイトのロール角 $\psi = \psi_{limit}$ のまま一定に保持する。つまり、飛行中に常時アクチュエータを作動させるのではなく、巡回方向の反転時のみにアクチュエータを作動させるため、アクチュエータへの負荷が低く、高速飛行するカイトのリアルタイム制御に適している。

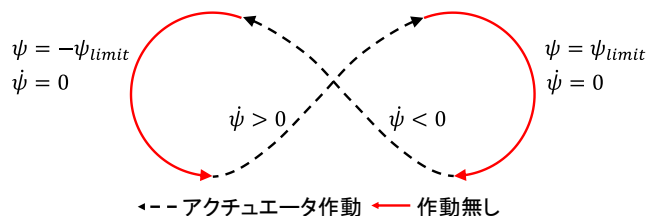


図2 制御時のロール角とロール角速度の与え方

3. シミュレーションによる飛行制御法の検証

天球上のカイト位置を仰角 θ と方位角 ϕ で表した運動方程式¹⁾を時間積分して150秒間の飛行シミュレーションを行った。シミュレーションで想定したカイトとテザーの諸元を表1に示す。カイトの揚力係数 C_L と抗力係数 C_D は事前に風洞実験により求めた(図3, 図4)。自然風の高度 Z における風速 W_0 は対数分布則を仮定し、次式において $Z_{ref} = 8m$, $U_{ref} = 10m/s$, $Z_0 = 0.0001m$ とした。

キーワード 洋上風力発電, 高空風力発電, カイト, Hydro-VENUS

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
plyy3kcs@s.okayama-u.ac.jp

$$W_0 = U_{ref} \ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right) / \ln\left(\frac{Z_{ref}}{Z_0}\right) \quad (1)$$

表1 カイトとテザーの諸元

カイト	質量	0.185 kg
	投影翼面積	0.337 m ²
	投影翼スパン	1.42 m
	翼ピッチ角	0 deg
テザー	密度	970 kg/m ³
	長さ	18 m
	直径	0.001 m
	抗力係数	1.2

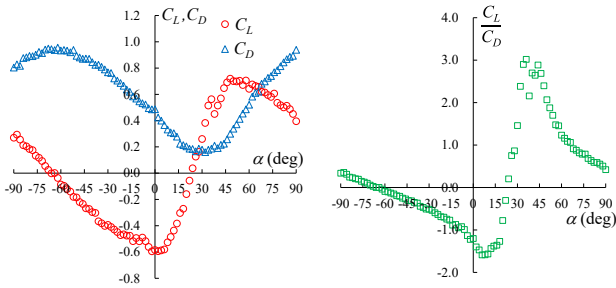


図3 カイトの揚力係数, 抗力係数, 揚抗比(風洞実験)

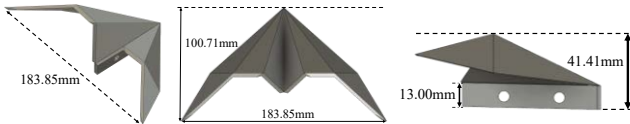


図4 風洞実験で使したデルタカイトモデル

2章の飛行制御法を用いてカイトを飛行させたときの8の字軌道の例を図5に示す. ロール角限界 ψ_{limit} とロール角速度 $\dot{\psi}$ の組み合わせとして, $\psi_{limit} = 41\text{deg}$, $\dot{\psi} = 140\text{deg/s}$ および $\psi_{limit} = 47\text{deg}$, $\dot{\psi} = 300\text{deg/s}$ のケースは8の字飛行の成功例であり, $\psi_{limit} = 44\text{deg}$, $\dot{\psi} = 140\text{deg/s}$ のケースは失敗例である. このように, 制御パラメータである ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせにより, 8の字飛行の成否が分かれる. 同様に, $\psi_{limit} = 2\text{deg}$ ごと, $\dot{\psi} = 20\text{deg/s}$ ごとに様々に変化させた ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせの下で解析したとき, 8の字飛行の成否の結果をまとめたのが図6である. 特定範囲の ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせでのみ8の字飛行が可能であることが分かる.

4. 制御パラメータ修正による飛行制御の安定化

図6に示したように, 8の字飛行が可能なロール角限界 ψ_{limit} とロール角速度 $\dot{\psi}$ の組み合わせは非常に狭い範囲に限られている. 風速変化などの外乱によってこの組み合わせも変化すると考えられることから, 外乱に対して安定的に8の字飛行を維持するには, より広い

範囲の ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせで8の字飛行を可能にするのが望ましい.

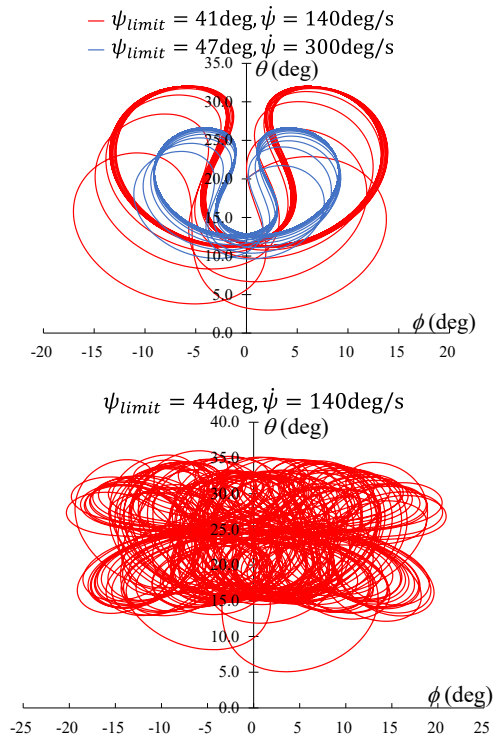


図5 シミュレーションによる8の字軌道の例

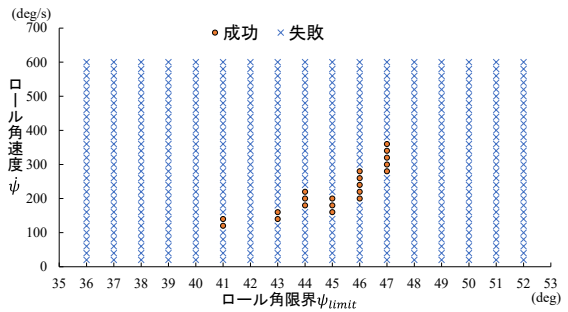


図6 ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせによる8の字飛行の成否

8の字軌道を安定的に描けなくなるのは, 旋回半径が過大あるいは過小だったり, ロール角の反転のタイミングが早すぎたり遅すぎることによって, 8の字軌道の中心位置が徐々に目標位置から乖離するのが原因と考えられる. このとき, 旋回半径はロール角限界 ψ_{limit} , ロール角反転のタイミングはロール角速度 $\dot{\psi}$ によってそれぞれ決まることから, これら2つの制御パラメータを旋回ごとに修正すれば, 常に8の字中心を目標位置付近に保持し, 8の字飛行可能な ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせの範囲を広げられる可能性がある.

そこで, カイトのロール角 ψ の反転時に $\psi = 0\text{deg}$ となる位置を8の字軌道の中心位置とみなし, その時の仰角 $\theta_{\psi=0}$ を目標仰角 θ_{target} に近づけるための制御を試みた. 具体的には, 式(2)のように $(i-1)$ 回目の制御ス

テップのロール角限界 $\psi_{limit,i-1}$ 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ロール角限界 $\psi_{limit,i}$ を決定する。

$$\begin{cases} \psi_{limit,i} = \psi_{limit,i-1} - \Delta\psi_{limit} \\ \Delta\psi_{limit} = \psi_{mod}(\theta_{\psi=0} - \theta_{target}) \end{cases} \quad (2)$$

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。ロール角速度についても同様に、式(3)のようにロール角速度修正率 $\dot{\psi}_{mod}$ を導入し、旋回ごとに 8 の字中心の目標位置からの乖離量に応じてロール角速度を修正する。

$$\begin{cases} \dot{\psi}_i = \dot{\psi}_{i-1} + \Delta\dot{\psi} \\ \Delta\dot{\psi} = \dot{\psi}_{mod}(\theta_{\psi=0} - \theta_{target}) \end{cases} \quad (3)$$

なお、この修正は式(4)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} から遠ざかった場合のみ行う。本解析では、8 の字中心の目標仰角 $\theta_{target} = 20\text{deg}$ に設定した。

$$|\theta_{\psi=0} - \theta_{target}|_i > |\theta_{\psi=0} - \theta_{target}|_{i-1} \quad (4)$$

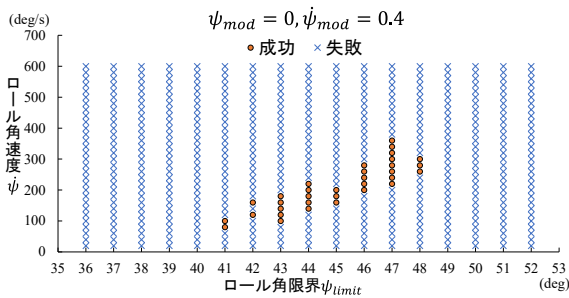
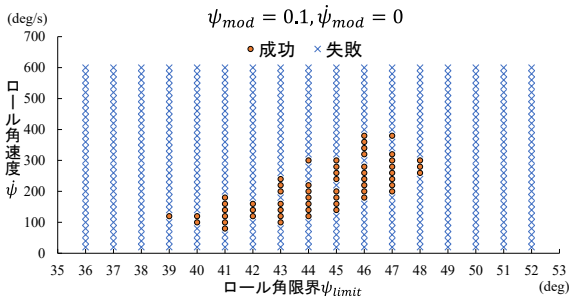


図7 ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の修正制御時の 8 の字飛行の成否

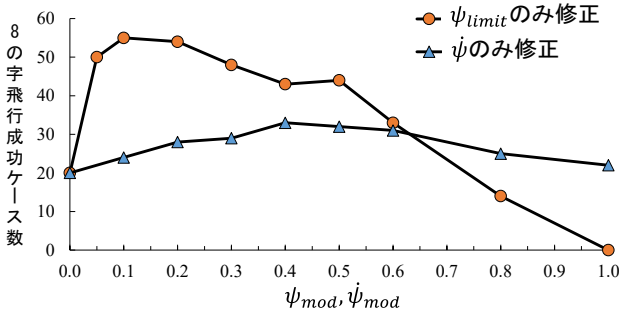


図8 ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の修正制御時の 8 の字飛行成功数

ロール角のみを修正した場合 ($\dot{\psi}_{mod} = 0$) はロール角修正率 $\psi_{mod} = 0.1$ のケース、ロール角速度のみを修正した場合 ($\psi_{mod} = 0$) はロール角速度修正率 $\dot{\psi}_{mod} = 0.4$ のケースについて、8 の字飛行成否の結果をまとめたのが図7である。いずれも 8 の字飛行が成功した ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせ数が最も多い修正率のケースに相当する。また、その他の修正率を与えたときも同様に解析し、8 の字飛行成功数をまとめたのが図8である。図8の $\psi_{mod} = \dot{\psi}_{mod} = 0$ あるいは図5に比べて、修正制御により、飛行可能な ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせ数が増加し、特にロール角限界 ψ_{limit} を修正する手法は大きな改善効果が見られる。

5. ロール角限界値とロール角速度の収束値

4章の修正制御法では、ロール角限界 ψ_{limit} あるいはロール角速度 $\dot{\psi}$ はカイトの旋回ごとに修正を繰り返しながら、それぞれ一定の値に収束する傾向が見られた。 ψ_{limit} のみを修正および $\dot{\psi}$ のみを修正したときのそれぞれのケースについて解析し、8 の字飛行が成功した ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせについて、それらの初期値と 150s 経過時の収束値を比較したのが図9である。いずれも、 ψ_{limit} のみを修正した場合には $\psi_{mod} = 0, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$ 、 $\dot{\psi}$ のみを修正した場合には $\dot{\psi}_{mod} = 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0$ の結果をすべてまとめて示してある。

初期値に対して収束値は指数関数的な曲線に沿って分布しているように見えることから、収束値の近似曲線も図中に示している。つまり、 ψ_{limit} と $\dot{\psi}$ の組み合わせがこのような指数関数的な関係のときに、安定的に 8 の字飛行できることが示唆される。

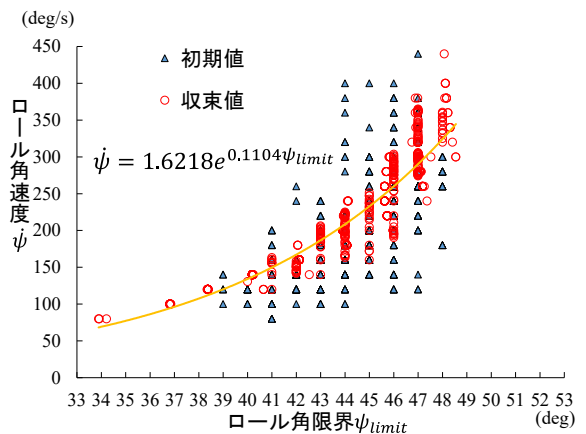


図9 8 の字飛行が成功したロール角限界とロール角速度の組み合わせの初期値と収束値の比較

6. 8の字飛行によって生じるテザー張力

自律高空帆走発電では、主にカイトの8の字飛行によって生じる強い揚力で浮体を曳航し、浮体に搭載された水流タービンで発電する。ここでは揚力等の空気力によってテザーに生じる張力について、150秒間のシミュレーションのうち経過時間90秒~150秒までの60秒間のテザー張力の平均値を評価した。図9に示した ψ_{limit} と ψ の組み合わせの収束値について、テザー張力の平均値を階級表示したのが図10である。 ψ_{limit} と ψ がともに小さいほど、テザー張力の平均値が大きくなる傾向が見られる。つまり、小さく旋回するよりも大きく旋回する8の字軌道を描く方が、より強い曳航力を発生できることが示唆される。

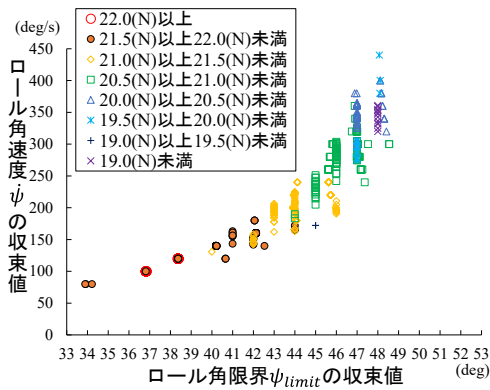


図10 ロール角限界とロール角速度の組み合わせに対するテザー張力

7. 屋外カイト飛行制御実験

別途開発したカイト飛行制御装置(写真1)を荷台に搭載した軽トラックを走行させ、カイトを8の字飛行制御する実証実験を行った。使用したカイト(Flying Wing社製SPIDER Red, 写真1)は表1のシミュレーションとほぼ同じ諸元である。軽トラックは時速20km弱で約70mの距離を走行する。シミュレーションで最も8の字飛行成功数が多かった修正率 $\psi_{mod} = 0.1$, $\psi_{mod} = 0$ の組み合わせを採用し、8の字中心の目標仰角 $\theta_{target} = 20deg$ として全9通りの実験を行った。

実施したケースの結果を表2に示す。また、8の字飛行が成功したケース、失敗したケースのカイト軌道と制御データをそれぞれ図11、図12に示す。成功したケースでは、仰角が $\theta_{target} = 20deg$ に達した時点からロール角の制御が開始され、その後は8の字飛行の最下点(仰角の変動が負から正になる点)に達した直後で再びロール角の制御を適切に開始できている。図11、図

12のどちらのケースもシミュレーション結果と概ね一致したが、カイト飛行制御装置の誤作動や横からの自然風の影響などにより、シミュレーション結果とは異なるケースも見られた。



写真1 カイト飛行制御装置とカイト

表2 カイト飛行実験の結果

ケース	ψ_{limit} の初期値 (deg)	ψ の初期値 (deg/s)	結果
屋外①	40	150	8の字飛行
屋外②	45	80	墜落
屋外③	45	100	飛行
屋外④	45	120	8の字飛行
屋外⑤	45	140	8の字飛行
屋外⑥	45	180	8の字飛行
屋外⑦	45	220	墜落
屋外⑧	45	260	不規則な飛行
屋外⑨	45	300	墜落

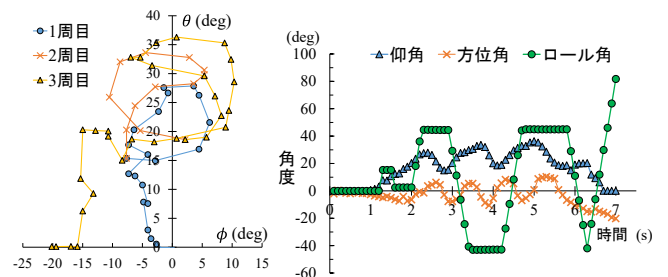


図11 8の字飛行が成功したケース(屋外⑥)

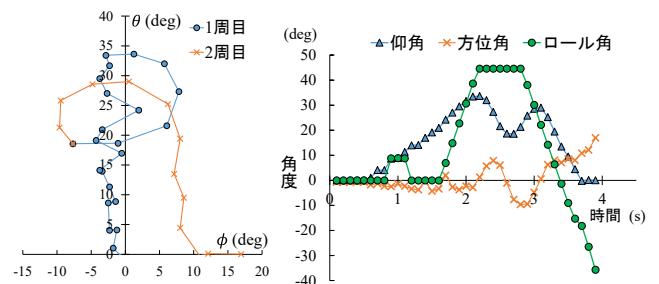


図12 8の字飛行が失敗したケース(屋外②)

参考文献

1) 比江島慎二, 遠藤愛巳, 山本晃大: 自律高空帆走発電用パラフォイルカイトの空力特性試験と飛行シミュレータの構築, 風工学研究論文集, Vol.26, pp.86-95, 2020.