

# kW から MW へ — 高性能 UAV による風力発電手法の検討

(株)TMIT 藤井 裕矩, 東京都立大学 富田 匠

TMIT Hironori Fujii, Tokyo Metropolitan University Takumi Tomita

## 1. はじめに

空中風力発電 (AWE: Airborne Wind Energy)は、高空の安定した強い風力エネルギーを用いる発電手法である。AWE には、UAV(Unmanned Aerial Vehicles: 無人飛行機)に風車を装備して(風車有), もしくはそれ自身の空力特性を用いて(風車無), これを地上の境界層(キャノピー)の上に浮揚させる方法がある。さらに、風を横切る(cross-wind)ことによって対気速度が増加するので、さらなる風力エネルギーを得ることが出来る。このため、世界各国で盛んに研究開発されている AWE 手法では、空中に浮遊させるだけでなく cross-wind を利用した手法が最近では主流になってきている。

このような AWE の大きな特徴は、風車や翼を高空に浮かべ、テザー(引き綱:ひも)によって高空の豊富な風力エネルギーを地上に送ることである。また、塔などの構造物を用いて高空に風車を設置する手法と比較すると、良い風況が得られるばかりでなく、重量や構造が数%程度に抑えられる。このように AWE はシンプルな風力発電手法であり、小型軽量の規模で同量のエネルギーを得ることが出来る。さらに、台風や雷雲が襲来した場合には、地上に引き戻して避難することが出来ることも一つの特徴である。このような可搬性や運用の簡便さは、地形の影響で風況の良いところが多く得られず、毎年の台風の来襲が予想される我が国の風力発電の手法としてこそ望ましいものである。

## 2. AWE の手法

AWE は 2007 年ごろ以来多くの手法が提案され研究開発されてきた<sup>1)</sup>。空中風力発電手法については地上での風力発電手法と同様に、環境や発電規模によって最適なものは異なる。風車そのものを、大気境界層部分(キャノピー)を超える、高い空中に浮揚させる場合は、空中に静止させるにしろ、軌道運動をさせるにしろ通常一定の強い風力を得ることが出来て確実に発電できる。一方、UAV の空気力(揚力)を用いて風車翼の役割をさせるものでは、その軌道や姿勢が、大型風車の翼が運動しているように精密に制御される必要がある。空中風力発電の特徴である風の横切り効果を利用すれば、UAV を風車翼として用いるにしろ、風車を装備しているにせよさらに対気速度が加速するので発電効率は向上する。一方で、UAV の飛行制御はより一層複雑、高度化



図1 発電機搭載・風車有型 Makani Power 社



図2 発電機地上設置・風車有型(TMIT)

する。AWE の手法を大別すると、発電機を地上に設置する「発電機地上設置型」と、発電機を UAV に搭載する「発電機飛行型」とに分けることができる。また、風車を UAV に搭載する「風車有型」か、UAV の空力特性を用いて風車翼の代わりにさせる「風車無型」かの 2 種類に大別することもできる。すなわち:

### (1) 風車無(発電機地上設置)型 (woW-Ground-Gen:

Without Windmill Ground Generator) UAV を風車翼として利用し、これによって得られる揚力を UAV に取り付けられたテザーにより地上に伝達する。そして地上に設置された発電機をポンピング運動等によって駆動し発電する手法であり、本特集号ではマドリッド・カルロス3世大学と AmpyxPower 社の寄稿がある。

### (2) 風車有(発電機飛行)型 (W-Fly-Gen: With Windmill Fly Generator)

風車と発電機を同時に高空に浮揚させて、得られた電力を地上に送るものである。米国 Makani power 社(図 1)の方式<sup>2)</sup>は、モーターとしても用いることのできる発電機を浮遊させ、風力エネルギーを電流として地上に送る方法である。またモーター

による推力を離着陸時などに使用することもできる。この手法においては現在では高出力で軽量の発電機の開発が十分でないためシステムが大型になる傾向がある。

(3) 風車有(発電機地上設置)型(W-Ground-Gen: With Windmill Ground Generator) 図2のように性能の良い直線翼風車を UAV に搭載し、テザーで地上の発電機を駆動する方法で、設備稼働率に優れると共に、運搬可能にできるので耐災害性に優れる。したがって、気象変化の大きい我が国独自の手法として優位性がある。

本稿は、この手法と、高性能なグライダー型 UAV を用いることで MW 級発電を目指すための基礎検討を行ったものである。

### 3. テザー型直線翼風車方式

空中風力研究会は、空中風力発電手法の検討を行うとともに、研究のフェーズから開発のフェーズに進むべく研究を進めている<sup>3)</sup>。このため、現在は研究フェーズとして、安全で我国の国情に適したオリジナルなテザー型 AWE システムについて検討を行っている。2020 年 1 月に妻沼グライダー滑空場において行ったフィールド実験の様子を図 3 に示す。ここでは、風直線翼風車を 2 基装備している。この直線翼風車は 600 mm × 600 mm の投影面積をもつ 0.5kW 級の風車であり、確実にかつ容易に発電できる特長を持つ。風車の回転で得られたエネルギーは、テザーによって地上に設置された発電機に伝達される。風洞実験によって得られたテザーのエネルギー伝達効率は約 76~82% である<sup>4)</sup>。

今回のフィールド実験では発電機(SKY HR125)を用い、約 10-30W の発電量を得た<sup>4)</sup>。これにより、テザー型直線翼風車方式の発電システムが実現できることを確認した。本方式は、風車を備えているため確実にかつ連続的に発電が可能であり、50kW 程度までの小規模な発電において有利であると考えている。

### 4. 風横切り効果

空中風力発電の利点は高空の安定した強い風を利用できることと、cross wind を利用できることである。例えば高度 100m では地上に比べて約 1.6 倍の定常的な風速を用いることができる。また風を切る飛行ができるため、さらに 2~3 倍の風速を用いることができる<sup>5)</sup>。これは、風車有型では利用風速を上げることができ、風車無型では揚力とテザー伸展速度の積となる仕事量(Power)を増加させることができることに対応する。いずれも、高空ならびに風切り運動により増加する風速を利用することで効率的な風力発電を行うことが出来る。

風横切り効果による発電量の増加の原理を簡単化して図 4 に示す。UAV やテザーの重力を省略すると、テザーによる張力は UAV に働く空気力の合力と釣り合う。こ



図 3 風吊り下げテザー型直線翼風車フィールド実験 (発電機地上設置・風車有型)

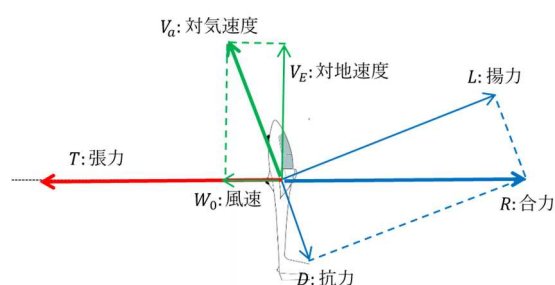


図 4 風横切り効果による風速増加

れらによってつくられる長方形は対地速度と地上風速で構成するものと相似となるので、風横切り飛行によって得られる対気速度の比は、揚抗比にほぼ等しい<sup>5)</sup>。

### 5. MW 級を目指す空中風力発電

テザー型直線翼風車方式は風車を装備し豊富な風力が得られる高空に浮遊させる手法のため、確実に発電を行うことができる利点があり、将来への発展性としてより大規模な発電を期待することもできる。風切りによる風速増加は大規模な発電を目指す上での重要な要素であり、風車を空力特性の良い UAV に搭載して有効な軌道飛行を行わせることによって、kW 級から MW 級の風力発電を目指す上でも必要不可欠である。

本報告は、特に風切による風速増加手法について検討を行ったものである。さらに、世界的に盛んな模型実験によって実験的な検討もおこなっている<sup>6),7)</sup>。

#### 5.1 風力発電のための UAV の飛行軌道

テザーで拘束された UAV の運動は、風の中の乱れに

よって大きく影響を受けるので、長時間の安定した無人飛行を保証するために実時間モデル予測制御などの高度な飛行制御が必要である。現在、モデルの精密な同定とともに制御手法の研究が続けられている。このような AWE の技術開発は、技術レベルが高度で開発も困難であるため、研究開発のためには世界的に共同して開発してゆこうという共通認識があり、かなりの部分がオープンで競争している。これは、参加の容易さと、その反面として実際の開発の難しさを物語るものである。

## 5.2 UAV モデル

風車有型については発電量が飛行速度の 3 乗に比例する。すなわち、発電量を最大にするためには機速を最大にすることになる。最適計算を行う場合、風車無型の場合のように揚力の値が評価関数に入っていないため、飛行中の機体にかかる荷重に制限をかけることができる<sup>8)</sup>。先述のように現在研究チームが用いている UAV は風車有型であり揚抗比はおおよそ 6 程度であるが、実際の飛行状態ではその半分の 3 程度である。対気速度は揚抗比にほぼ等しいので<sup>5)</sup>、風速の 3 乗に比例する風力エネルギーは、掃引飛行をさせる事によって  $3^3=27$  倍程度大きくなる事が予想される。本報告において UAV として用いたグライダーの揚抗比はおおよそ 11 程度であり、得られる風力エネルギーは  $11^3=1,331$  倍程度と見積もることが出来て MW 級の発電能力が期待される。

今回実験に用いた航空機モデルは、XK-A1200RC 飛行機であり、自重:500g, 全長:580mm, 全幅:1200mm, アスペクト比:AR = 7.4, 主翼面積:S = 0.1936m<sup>2</sup>である。なお、数値解析においては、揚力傾斜: $C_{l\alpha} = 5.26$  /rad., 抗力係数: $C_D = C_{D0} + C_L / (\pi e AR)$ ,  $C_{D0} = 0.0069$ , 飛行機効率: $e = 0.72$ , 揚抗比: $C_L/C_D=14$  (迎角  $\alpha = 4$  度)とした。今回は検討していないが、最近提案されているマグナス効果を用いて性能をさらに向上させることもできるであろう<sup>10)</sup>。

## 6. 数値解析

### 6.1 最適飛行経路

ここでは、3次元運動を行う風車有型 UAV の最適な飛行経路を検討した<sup>11)</sup>。定常発電を行うためには飛行経路を閉ループにし、もとの位置に戻るサイクルを構成しなければならない。風車有型の場合、風速の増加のみが発電量の増加につながるため、最大化するのは風速である。ちなみに、風車無型の場合は UAV を取り付けたテザーが引き出されることにより発電機を駆動するので最大化するのはパワー(張力とテザー引き出し速度の積)であり、この結果については Airborne Wind Energy Conference 2019<sup>8)</sup>において報告した。風車無型の場合は UAV に生じる空気が評価関数(仕事量)に関係

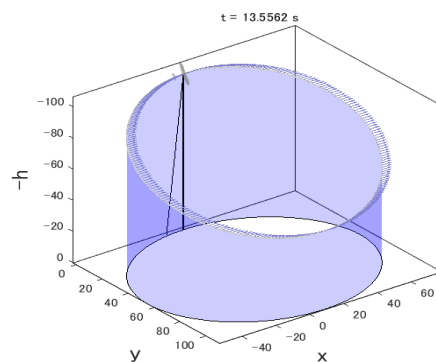


図 5 最適周期軌道 ( $x_0=10m, y_0=0m, z_0=100m$ )

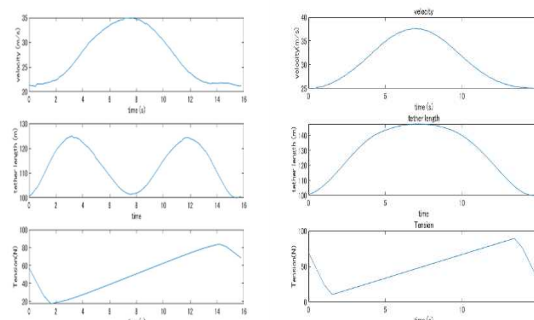


図 6 揚抗比の効果: 上から順に風速, テザー長さ, 張力の時間応答

左図:  $C_L/C_D = 14$  右図:  $C_L/C_D = 3.5$

するのに対して<sup>8)</sup>、風車有型では評価関数に空気力(～張力)が関わらないため、張力 T を低く抑えることができ、風車無型に比較して UAV の構造強度を高める必要がないので UAV の軽量化につながる事ができる。

機速を評価関数として最適計算した閉軌道を図 5 に示す。元に戻るための単一旋回方向の 1 周軌道を示すが、もしもテザーの絡まりを心配するならば、右左交互に旋回を行わせる(すなわち 8 の字軌道)などの対策が必要である。

### 6.2 揚抗比の効果

風車有型の発電性能に及ぼす揚抗比の効果を示したのが図 6 である。左図は揚抗比の高い場合 ( $C_L/C_D=14$ ) であり、右図は揚抗比が低くなった場合 ( $C_L/C_D=14/4$ ) の結果を示している。風車無しの場合は揚抗比の低下は発電量の大きな低下を招いたが<sup>8)</sup>、風車有の場合はその効果は著しくないことがわかる。しかしながら、いずれにしてもこれらの結果から、揚抗比を大きくすることが課題であるのは事実である。

## 7. 飛行実験

今回用いたテザー型 UAV の実験によって得られた飛行の様子を図 7 に示す。最適計算では省略したが、実



際のテザーは空気力によって湾曲する<sup>9)</sup>。このようなテザーの柔軟性を考慮したモデルの表現は難しく、Airborne Wind Energy Conference 2019 においても大いに議論されたことであるが、いずれのチームもまだ解決に至っておらず、今後検討が必要である。

左右交互に旋回飛行を続けるテザー型 UAV の飛行軌跡を図 8 に示し、その時の対気速度の変化を図 9 に示す。現在は手動による制御を行い、位置、速度などの状態量を取得するまでにしか至っていないが、将来は非線形モデル予測制御等の制御則を組み込み、自律飛行による AWE の実現を目標としている。

## 8. まとめと今後の課題

本報告では風力発電の規模を Kw クラスから MW クラスまで引き上げるために、空力的に優れた形状を持つグライダーを UAV として用いたときの発電手法について、数値シミュレーションによる検討結果と、スケール機による飛行実験の準備状況について報告した。今後は飛行制御に非線形モデル予測制御などを適用し、自律飛行による AWE の実現を目指してゆきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) Book of abstracts, Airborne wind energy conference 2019, 15-16 October, University of Strathclyde, Glasgow UK, awec2019.com
- 2) <https://makanipower.com/>
- 3) 藤井, 大久保, 新川, 草谷, Stroeks, 高橋, 遠藤, 渡部, 丸山, 中嶋, 浅生, 関, 「高空風力発電研究の紹介」, 日本風力エネルギー学会学会誌, 第 40 巻, 第 1 号, 通巻 116 号, (2016 年 2 月)
- 4) 大久保博志, 畠山凌, 小野寺未, 佐藤強, 藤井裕矩, 遠藤大希, 丸山勇佑, 岩原誠, 高橋泰岳, 中台章, 関和希, 「テザー型風力発電システムの開発」, 第 8 回高空風力発電研究会全体会議, 2019 年 3 月 19 日, 国立極地研究所, 東京.
- 5) M. L. Loyd, “Crosswind Kite Power”, J. Energy, Vol. 4, No. 3, May-June 1980, pp. 106-111.
- 6) Eva Ahbe, Thomas Stastny, Manuel Dangel, Roland Siegart, Roy S. Smith, “Experimental Validation of Path-Tracking Model Predictive Control for Fixed-Wing Power Kites,” AWEC2019, Book of abstracts p. 46
- 7) Philip Bechtle, Thomas Gehrman, Christoph Sieg, Udo Zillmann, “AWESome: An open-source test platform for airborne wind energy systems, arXiv:1704.08695v1 [cs.SY] 1st May 2017.
- 8) Hironori A. FUJII, Takumi TOMITA, Tairo KUSAGAYA, and Hiroki YAMAMOTO, “Three-Dimensional Flight Trajectories of Tethered UAV for Optimal Energy Generation”, Airborne Wind Energy Conference 2019, 15-16 October 2019, University of Strathclyde, U.K.)



図 7 テザー型 UAV の飛行 (2020 年 6 月 20 日)

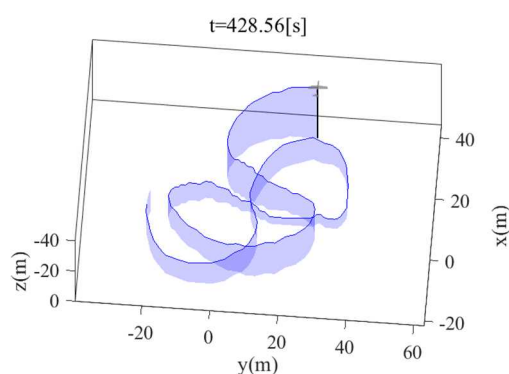


図 8 旋回飛行を続けるテザー型 UAV の飛行軌跡

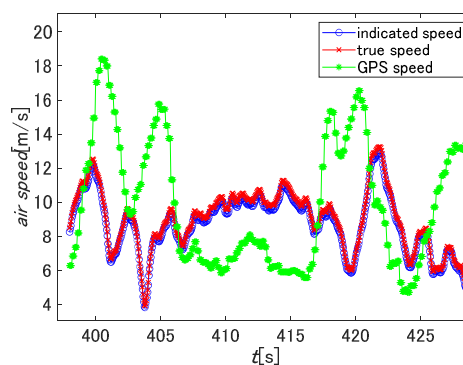


図 9 準備飛行における風速, 地球に対する速度, そして, 実速度の時間応答

- 9) Michiel Kruijff, Powerplane dynamic path tracking simulator in matlab, V3 - 2 October 2013
- 10) Michael Perlberger, “Brainwhere’s AWE System for Harvesting High Altitude Wind Energy”, Brainwhere 109 Wednesday, 16 October 2019 AWEC2019, Book of abstracts, p. 109
- 11) Matthew Kelly, An Introduction to Trajectory Optimization, How to Do You Own Direct Collocation, SIAM REVIEW Society for Industrial and Applied Mathematics Vol. 59, No. 4, pp. 849-904. 2017.