

UAV (Unmanned Aerial Vehicle) を用いた高層気象観測技術の開発

Development upper Air Observation Method Using UAV (Unmanned Aerial Vehicle)

佐々木寛介⁽¹⁾・井上実・小島啓美⁽¹⁾・河見博文⁽¹⁾・町田駿一⁽¹⁾
渡辺豊⁽²⁾・名取悦朗⁽²⁾・福田信行⁽²⁾・平坂直行⁽²⁾

Kansuke SASAKI⁽¹⁾, Minoru INOUE, Hiromi KOJIMA⁽¹⁾, Hirofumi KAWAMI⁽¹⁾, Syunichi MACHIDA⁽¹⁾,
Yutaka WATANABE⁽²⁾, Etsuro NATORI⁽²⁾, Nobuyuki FUKUDA⁽²⁾ and Naoyuki HIRASAKA⁽²⁾

(1) 一般財団法人日本気象協会

(2) ルーチェサーチ株式会社

(1) Japan Weather Association, Japan

(2) Luce Search Co., Ltd., Japan

Synopsis

In recent years, adoption of drone (UAV; Unmanned Aerial Vehicle), represented by radio-controlled helicopter, has rapidly increased and is recognized in such fields as inspection of disaster areas, or maintenance management of bridges in off-limits areas. In this study, assuming the adoption of UAV in the observations of temperature and wind in upper air, the posture stability of UAV in strong wind was investigated. In addition, the relationship between wind speed and pitch angle of UAV was clarified, and feasibility of the estimation method of upper wind from the posture stability data of UAV was studied. In this study, the maximum safe wind speed for observation using UAV was about 15m/s. Moreover, an analysis of the pitch and yaw angle of UAV shows that the possibility of estimation for wind speed and wind direction in upper air.

キーワード: ドローン, 気象観測, 耐風性能, 風速推定

Keywords: drone, weather observation, wind resistance, wind estimation

1. はじめに

近年、マルチコプターに代表されるドローン(UAV; 無人飛行体)が、災害地域における上空からの写真撮影や人が立ち入れないような橋梁部などの保守点検に活用される事例が急増している。一方で、これまで上空1000 m 程度までの気温や風向風速については、ヘリウム充填バルーンに気温やGPSセンサ等を搭載した発信機(ラジオゾンデ)を吊り下げて、上空に放球するゾンデ観測法が採用されることが多い[Photo 1]。ゾンデによる観測法は、気象庁の高層気象観測指針(気象庁, 2004)でも規定されている

手法であり、過去の観測実績も豊富である。また、気象庁検定付のゾンデであれば測定精度についても保証されている。一方で、放球後のバルーンは、上空で所定の観測高度まで上昇した後、破裂してゾンデ発信機は地上に落下する。落下の際はパラシュートが開くように設計されているため、地上落下時の人的および物的被害は最小限になるよう考慮されているが、送電線に接触したり、飛行場や道路上などに落下して通常の施設運用に支障が生じるリスクが少なからず存在している。また、ゾンデ発信機を使い捨てにすることは環境負荷や観測コストの側面からは不利な要素といえる。さらに、近年はバルーンに充

填するヘリウムについて、世界的に需給が逼迫しており、供給不足や価格の高騰といった問題を抱えている。

このような背景から、上空の気象観測にドローンを活用することで、これら従来法（ラジオゾンデによる観測）での問題点が改善されることが期待される。一方で、ドローンによる上空の気象観測については、高度約400 m までの気温の鉛直構造の観測事例が報告されているものの（下山・渡辺, 2016）、これまで報告例がほとんどなく、観測手法について現時点で確立されているものではない。

そこで本研究では、ドローンを活用して上空（最大1000 m 程度を想定）の気温や風の観測を行うことを想定した、適用可能性調査を実施した。

本調査では境界層風洞を用いて、強風時のドローンの姿勢安定性を検証した。これにより、観測の際には重要な情報である、機体の耐風性能について評価した。また、ドローンによる観測では風向風速については、従来法と同じ観測原理では計測できないため、風速とドローンの傾斜角および傾斜方位の関係を整理し、姿勢データから風向風速を *in situ* 測定する手法について検討した。さらに、ゾンデ発信機を搭載したドローンによる、観測データのテレメトリーの際に生じる電波障害の影響についても考察した。



Photo 1 Upper air observation by GPS sonde

2. 調査方法

2.1 ドローンの仕様

本研究で使用したドローンは6枚のローターを有するマルチコプター（SPIDER CS-6; ルーチェサーチ株式会社製）で、搭載されているジャイロセンサやGPSセンサにより自律的な航行やホバリングが可能な機体である[Photo 2].

主な仕様は[Table 1]に示すとおり、機体重量は約3800 g、ペイロード（搭載重量）は最大で約4000 g、飛行可能時間は最大約25分である。ブレードの材質はカーボンもしくはウッドで、17インチのものを使用した。



Photo 2 Drone exterior

Table 1 Drone specification

Brand name	SPIDER CS-6 (Luce Search Co., Ltd.)
Size	950×950×400 mm
Weight	3800 g
Flight Endurance	Max 25 min
Pay load	4000 g

2.2 耐風性能の評価方法

ドローンの耐風性能の評価には、京都大学防災研究所に設置されている境界層風洞施設を使用した。境界層風洞は、人工的に境界層（地面付近で風速や乱れの強さが高さ方向に変化する層）を発達させるために長い測定胴（21 m）を備えた風洞である[Fig. 1]. 本風洞施設は最大25 m/s の風速まで設定可能で、ファンは最大風量125 m³/s の能力を有している。本研究ではドローンの耐風性能の評価の他に、風速とドローン姿勢データの関係調査においても、この風洞施設を利用した。風洞の測定胴内部では、ドローンの自律航行に必須であるGPS信号が受信できないことや、安全にドローンを飛行させるための空間的余

裕が確保できないことから、本研究では風洞下流側の建屋の扉を開放し、屋外で調査をおこなった。このため、一連の実験に先立ち、扉開放時における風洞下流側の建屋屋外における風速分布を計測した。計測は[Fig. 2]に示すとおり、風洞ファンの中心軸上(Y軸方向)へ建屋敷地境界から下流側6.0 mの地表面を基準として、-2.0 m (建屋敷地境界から4.0 m下流) および、0m, +2.0 m (建屋敷地境界から8.0 m下流) における鉛直断面でおこなった。計測点は1断面あたり、X軸方向に1.0m間隔で5点、Z軸方向に0.7m間隔で5点の計25点設定した。風速断面分布の計測は風洞の設定風速を15 m/s にして稼動させた状態で超音波風向風速計(WXT510; ヴァイサラ製)によりおこなった。風速断面分布調査時の様子を[Photo 3]に示す。

ドローンの耐風性能の評価は、風速の断面分布調査結果から、風洞の設定風速とほぼ同等の風速が得られるポイント (詳細は3.1章で述べる) でホバリングさせ、風洞設定風速を変化させた場合のドローンの挙動を目視およびビデオカメラにより観測することによっておこなった。

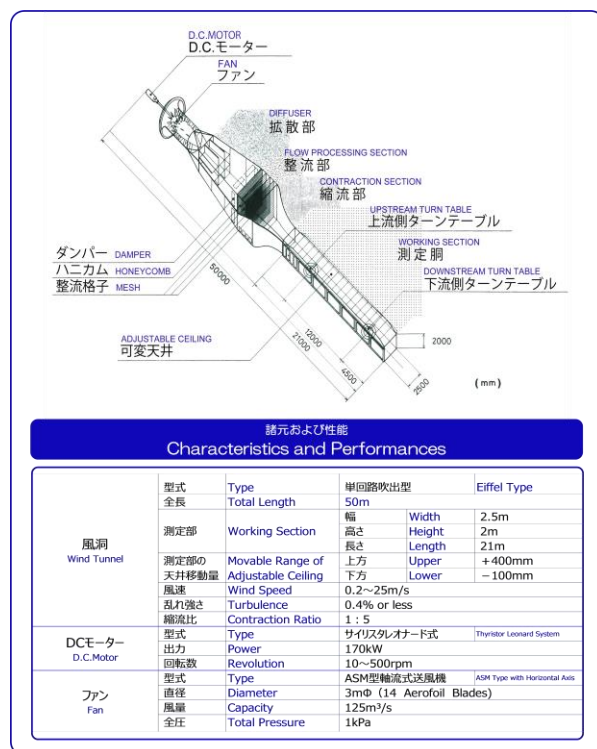


Fig. 1 Schematic diagram of boundary layer wind tunnel and specification

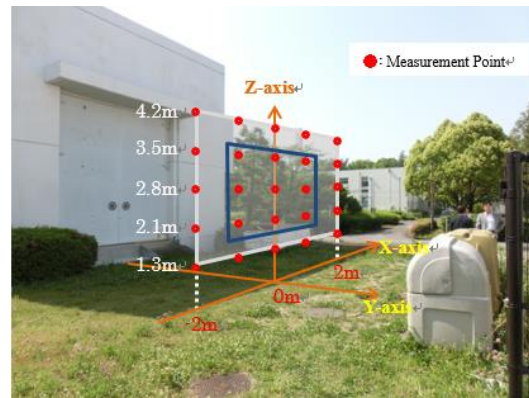


Fig. 2 Geometry of the measurement points for wind speed distribution



Photo 3 Wind speed distribution observation by supersonic anemometer

2.3 風速とドローン姿勢データの関係

ゾンデによる高層気象観測法では、現在はGPSゾンデが主に用いられている。GPSゾンデでは、上空の風向風速は、放球されてからのゾンデ (バルーン) の位置をGPSを利用して追跡し、単位時間当たりの移動方向および移動距離から計算される。したがって、風に流されないことが前提のドローンではゾンデと同様の手法では上空の風向風速は測定できない。

そこで本研究ではドローンがホバリングしている間の機体の傾きの状況 (傾斜角および傾斜方位) から、機体周辺の風向風速を *in situ* 測定する手法を検討した。

本調査では、ドローンにモーションセンサユニット (CSM-MG100CS; 東京航空計器株式会社製) を搭載してホバリングさせ、境界層風洞による設定風速を変化させた場合の姿勢データを取得した。姿勢データは、X, Y, Z の3つの軸に沿った回転に対応する、ロール・ピッチ・ヨーの大きさを100Hzで取得した [Fig. 3]。これら3つの角度から四元数を用いて、ドローンの傾斜角と傾斜している方位を算出した。

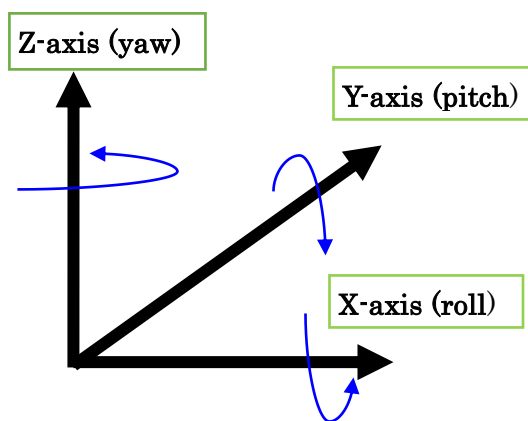


Fig. 3 Relationship between geometrical coordinate system and yaw-pitch-roll rotation

2.4 ドローンからの電磁ノイズの調査

ドローンを活用した上空の気温観測手法として、従来バルーンに吊り下げていたゾンデ発信機をドローンに搭載し、上空の指定高度でホバリングすることで、観測データを取得することが考えられる。

そこで本調査では、ドローンにGPSゾンデ発信機 (RS-11G; 明星電気株式会社製) を搭載して飛ばさせた。そして地上に設置したゾンデ受信機 (RD-08AC; 明星電気株式会社製) で、従来法と同様にテレメトリーにより観測データが取得可能かどうかを調査した。また、ドローンにはモーターをはじめとする電氣的ノイズを発生する可能性のある部品が多数使用されているため、ゾンデの発信周波数付近に干渉する電波の有無についてスペクトラムアナライザ (MS271E; アンリツ株式会社製) を用いて調査した。

3. 結果および考察

3.1 境界層風洞の特性把握

境界層風洞のファン中心軸は、地表面から2.8 mの高さに相当する。そこで、風洞の風速を15 m/sに設定し稼働させ、[Fig. 2] に示したY軸に沿ってX=0 (m), Z=2.8 (m) のポイントで風速を計測した[Fig. 4]。この結果より風洞下流側へ距離が離れるほど、風速は減衰する傾向が見られるが、Y=0 (m) (建屋の敷地境界から6.0 (m) の距離に相当) において、風洞の設定風速とほぼ同等の風速になることがわかった。次に、同じく風洞の設定風速を15 m/sに設定し、Y=0 (m) のX-Z断面で風速分布を測定した結果を[Fig. 5]に示す。[Fig. 5]より、風速が最大となるのは、X=0 (m), Z=2.8 (m) のポイントであることが確認された。また、風速は、X=0 (m) を中心に左右方向に

は、ほぼ対称の分布を示したが、鉛直方向については、Z=2.8 (m) を中心に下側よりも上側の方が風速が小さい、すなわちZ軸上向き方向への距離減衰の方が大きい傾向が示唆された。

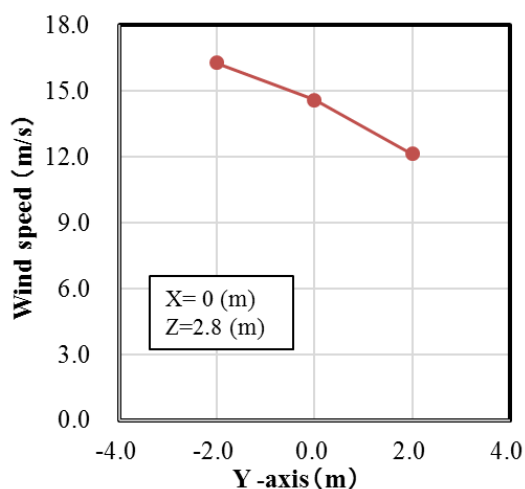


Fig. 4 Variation of wind speed with the distance from wind tunnel (wind tunnel setting is 15 m/s)

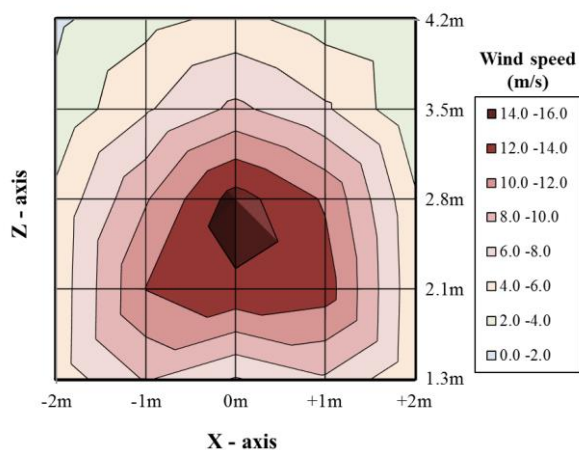


Fig. 5 Wind speed distribution of X-Z plane (Y=0; wind tunnel setting is 15 m/s)

これまでの結果より、境界層風洞を用いた、ドローンの耐風性能の評価および風速とドローン姿勢データの関係調査においては、原則として風洞の設定風速と実風速がほぼ同等となる、X=0 (m), Y=0 (m), Z=2.8 (m) のポイントでホバリングさせることとした[Fig. 6]。また、ホバリング地点の近傍に超音波風向風速計 (SAT-550; 株式会社ソニック製) を設置してホバリング地点近傍の風速を実測した。この観測結果より、本調査の風洞実験実施期間中については、風洞を稼働していない場合の一般風は概ね0-1 m/sの条件であった。

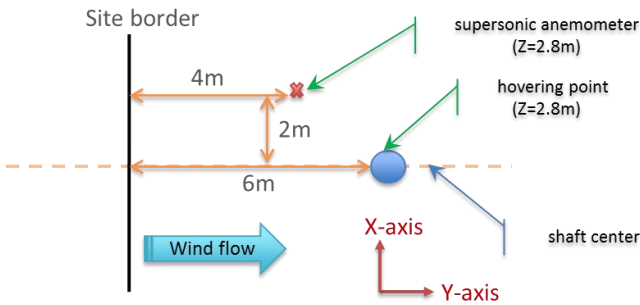
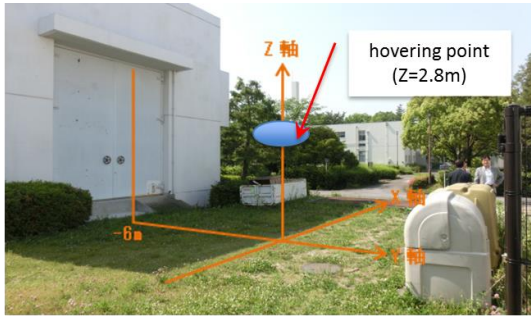


Fig . 6 Hovering point location and experimental geometry (top view)

3.2 ドローンの耐風性能評価

ドローンの耐風性能の評価試験では、[Fig. 6] に示したホバリングポイントでドローンの姿勢が安定するのを確認してから、境界層風洞の設定風速を段階的に引き上げた。

風洞の設定風速を 5 m/s, 10 m/s, 15 m/s とした場合の、ドローンのホバリング時の状況について、ビデオカメラで撮影した動画からキャプチャした画像を[Fig. 7] に示す。[Fig. 7] から、設定風速が5 m/s の場合は、ドローンはほぼ水平を保って、ホバリングをしていることが確認できる。風速が10 m/s の場合は、風上側にやや傾いて(前傾姿勢をとって)、定位置を保持していることが認められる。さらに風速が 10 m/s を超えると、傾きがより大きくなり、機体のふらつきが顕著に見られるようになった。設定風速が 15 m/s に達した時点で、機体のロール・ピッチ・ヨーともに変動が顕著となり、定位置を保持することが困難となった。その結果、地上に墜落したり、風洞下流側に設置した安全対策用のネットに接触する事例が見られた[Fig. 8]。したがって、本研究で使用した機体については、風速15 m/s が飛行限界であると判断される。

また、ローターブレードの材質をカーボンとウッドの2種類で調査を実施したが、ドローンの風速別の挙動はほぼ同様であり、耐風性能についてブレード材質による差は認められなかった。さらに、ドローンに重量が約2 kg の機器を搭載して、同様の調査

を実施したが、耐風性能は機器を搭載ない場合と比較して顕著な差異は認められなかった。

一方、本調査では耐風性能の評価は風洞により人工的に発生させた風でおこなったが、ホバリングポイントでは風洞施設建屋の影響で風に乱れが生じている。このような乱流特性は、実際の上空での風の乱れとは異なっていると考えられ、ドローンの耐風性能に影響を与えている可能性にも留意する必要がある。また、マルチコプターの揚力は空気密度によって変化することから、気温によっても耐風性能は変わる可能性も考えられる。したがってドローンの耐風性能については、乱流強度や気温依存性についてもさらなる調査を実施することが望ましい。

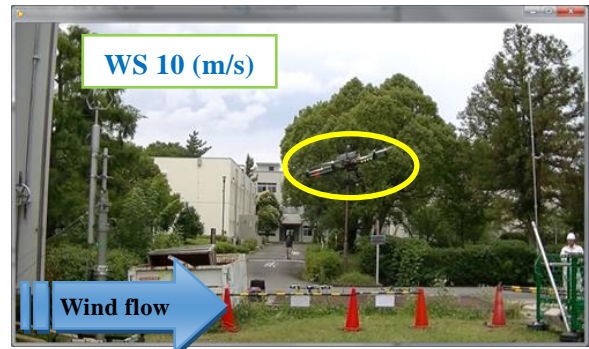


Fig . 7 Screen capture of drone stability at wind speed 5 m/s, 10 m/s and 15 m/s

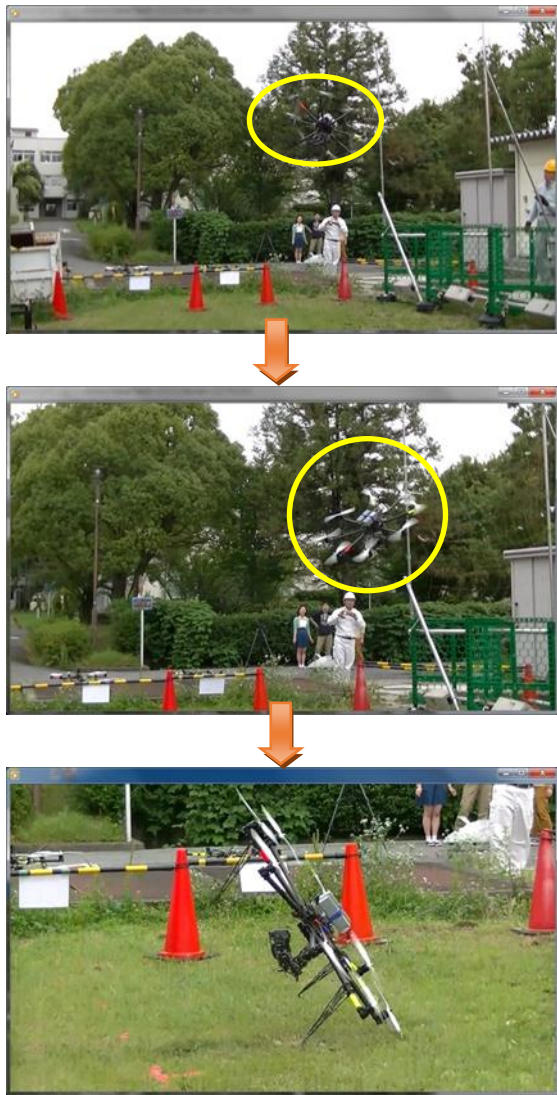


Fig. 8 Transition diagram of drone crash episode at wind speed 15 m/s

3.3 風速とドローン姿勢データの関係

ドローンの耐風性能評価 (3.2章) において、弱風時では、機体はほぼ水平でホバリングしていたが、風が強くなるに従って、風上方向に傾いた状態でホバリング位置を保持する傾向が見られた。そこで、本調査ではドローンにモーションセンサを取り付け、境界層風洞の設定風速と機体の傾斜角、傾斜方位の関係を、定量的に把握した。[Fig. 9] に風洞の設定風速とドローンの傾斜角の関係を示す。ドローンの姿勢データは、各設定風速において2分間計測をおこなった。図中のバーは測定された傾斜角の標準偏差を表す。今回実験を行った風速0-11 m/s の範囲においては、ドローンの傾斜角は風速の増大に伴い、標準偏差が大きくなるものの、平均値は概ね二次関数的に増加する傾向が明らかとなった。また、ドローンに金属製のウェイトを搭載して、積載重量を 2 kg,

4 kg に変化させた場合についても同様の実験をおこなった [Fig. 10]。ただし、設定風速は、0 m/s, 6.0 m/s, 11.0 m/s の3パターンとした。[Fig. 10]より積載重量4 kg, 設定風速11.0 m/s のケースを除いて、風速毎の傾斜角の大きさは積載重量に依存せず、ほぼ同一の値となる傾向がみられた。

さらに、ドローンが最大の傾斜角を示す方位と風向の関係を検証した。設定風速ごとに測定されたドローンの姿勢について、極座標系で傾斜角を動径 r 、傾斜方位を偏角 θ でプロットした結果を[Fig. 11]に示す。今回の調査では、弱風時 (風速 6 m/s 以下) はドローンが最大の傾斜角を示す方位と風上風向にややズレが生じているが、強風時 (風速 9 m/s 以上) には風向とほぼ一致する結果が得られた。これらの調査結果より、ドローンのホバリング時の姿勢データからドローン周辺の上空の風向風速を推定できる可能性があることが示唆された。また、この手法は観測に危険が伴う強風時には、ドローンが自動的に地上に帰還するための判断にも応用できるものと考えられる。なお、弱風時には、風上方向とはややずれた方位に傾く現象については、機体固有のバランスの影響 (例えば、機体の重心が機体中心からズレている) や、ホバリング地点の一般風の影響を受けている可能性、モーションセンサの校正不足などの影響が考えられる。

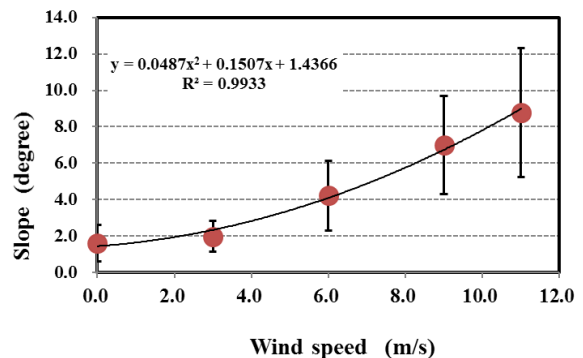


Fig. 9 Variation of slope angle with wind speed

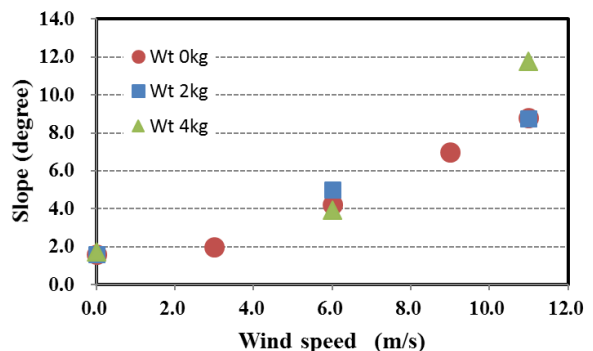


Fig. 10 Relationship between pay-load and slope angle of drone

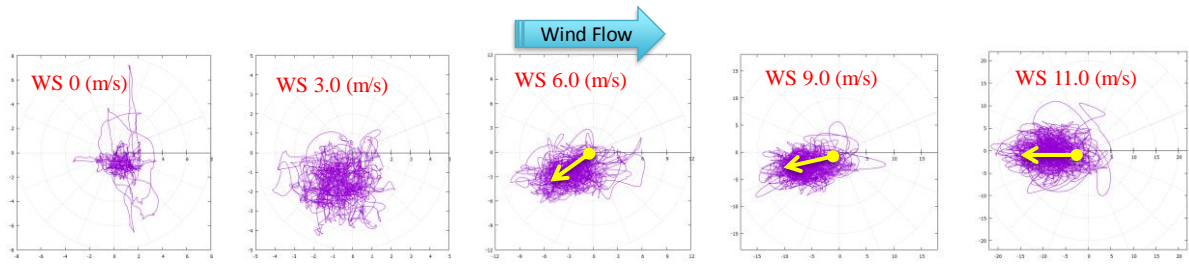


Fig. 11 Variation of slope angle and slope direction with wind speed (r ; slope direction θ ; slope direction)

3.4 ドローンからの電磁ノイズの調査

ドローンを活用した上空の気温観測手法として、従来バルーンに吊り下げていたゾンデ発信機をドローンに搭載し、上空の指定高度でホバリングすることで、観測データを取得することが考えられる。そこで、ドローンの機体中心付近にGPSゾンデ発信機を固定し[Photo 4]、カーボン製ブレードを装着してテストフライトを実施したところ、ゾンデ発信機からの電波が地上の受信機で受信できなくなる事象が発生した。ゾンデ発信機の発信周波数は 404.5 MHz、電波形式は F1D であった。ドローン本体には、ローターを回転させるモーターなど電磁ノイズを発生させる可能性のある部品が多数使用されている。また、このような受信障害はゾンデ発信機を機体から 1 m 以上遠ざけると解消されたことから、ローター回転時に、電磁ノイズが発生しゾンデからの発信電波に干渉している可能性が考えられた。そこで、スペクトラムアナライザを用いて、ドローンのローターを回転させた状態におけるゾンデ発信周波数近傍での、パワースペクトルを計測した[Fig. 12]。この測定結果からは、ゾンデ発信周波数に干渉を生じるような電磁ノイズは確認されなかった。そこで、ブレードの材質をカーボンからウッドに変更しテストフライトを実施した。この場合は、ゾンデ発信電波の受信障害は大幅に軽減されることが判明した。このため、カーボンブレードを用いた場合と同様に、ローター回転時のパワースペクトルを計測したところ、周波数分布は両者でほとんど差は見られなかった[Fig. 12]。

これらの結果から、カーボンブレード使用時に見られる、ゾンデ発信電波の受信障害はドローンからパッシブに発生する電磁ノイズの影響ではないと判断される。一方で、電気伝導性の高いカーボンブレードの代わりに電気伝導性の低いウッドブレードでは受信障害がほとんど生じないことから、この現象はゾンデから発信される電波が回転するブレードにぶつかった際に発生する、遮蔽障害または反射障害に起因するものと考えられる。同様の現象は風力発電所の稼動に伴う、テレビやラジオなどの放送波の

受信障害の発生メカニズムとしても報告されている(日本風力発電協会, 2015)。



Photo 4 Drone equipped with GPS sonde

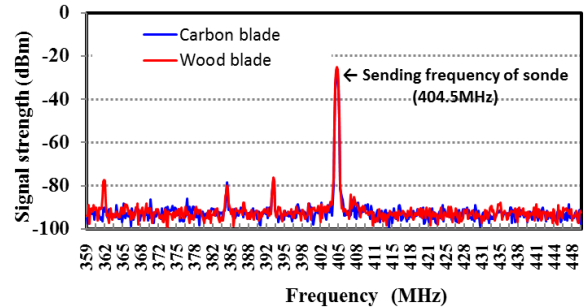


Fig. 12 Power spectrum around sending frequency of GPS sonde

4. まとめ

本研究では、上空1000 m 程度までの高層気象観測にドローンを活用することを念頭に、境界層風洞を用いた、ドローンの耐風性能評価、ドローンの姿勢データによる風向風速の推定手法の検討、GPSゾンデ発信機を搭載した実証試験(電磁ノイズの調査)などをおこなった。本研究により以下の点が明らかとなった。

- ・本研究で用いたドローンについては、最大風速が約15 m/s 以下の条件下で運用する必要がある

- ・ドローンの姿勢データから上空の風向風速を推定できる可能性がある
- ・テレメトリー等でドローンからリアルタイムデータを送信する場合はウッドブレードの使用が望ましい

今後はドローンの耐風性能については、乱流強度依存性や空気密度（気温）依存性の把握、ドローンの姿勢データによる風向風速の*in situ*観測についてはフィールド調査での実証試験が必要であると考えられる。さらには、超小型超音波風速計を搭載したドローンによる上層風の観測手法の確立、火山灰のサンプリング、火山ガスや上空の大気汚染物質の調査など気象分野以外の大気環境観測への活用も検討したい。

謝 辞

本研究は京都大学防災研究所の共同利用・共同研究拠点の助成を受けて実施したことを記し、ここに

謝意を表します。

また、モーションセンサによるドローンの姿勢データの取得にあたっては東京航空計器株式会社の隅田和哉氏、栗原寛典氏には多大な協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 気象庁（2004）：高層気象観測指針，気象庁，251pp.
 下山宏・渡辺力（2016）：ドローンを用いた大気境界層気温分布観測，日本農業気象学会2016年全国大会講演要旨，pp. 69.
 日本風力発電協会（2015）：小規模風力発電事業のための環境アセスメントガイドライン，一般社団法人日本風力発電協会，90pp.

（論文受理日：2016年6月13日）