

# ドローンを用いた大気流速場の局所計測

山田琢磨<sup>A</sup>、杉田暁<sup>B</sup>、佐々木真<sup>C</sup>、荒川弘之<sup>D</sup>、稲垣滋<sup>E</sup>

<sup>A</sup>九州大学基幹教育院、<sup>B</sup>中部大学中部高等学術研究所 国際 GIS センター、

<sup>C</sup>日本大学生産工学部、<sup>D</sup>九州大学医学研究院、<sup>E</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 1. はじめに

地表付近（～地表から 100 m 程度）の現象である微気象は我々の生活・環境に直結する重要なデジタルアースデータであり、その大気の流れを測定することは非常に有益である。例えば、都市部におけるヒートアイランド現象や PM2.5 等の微粒子状の大気汚染物質の人体への取り込み（文献：1）やビル風による突風、また農業においては作物の生育や霜による冷害などが考えられる。産業分野においては、風力発電の効率に影響を及ぼすことが考えられる。これらの現象の解明には、地表面近傍（～地表 100 m 程度）の 3 次元的大気の流れを測定する必要がある。本研究ではドローンに搭載したセンサー群を用いることで大気の局所的な 3 次元の流れを測定することができることに着目し、従来の観測手法である衛星観測装置や地上のドップラー・レーダーやフェーズドアレイ・レーダーを用いるよりも安価で分解能の高い測定を目指す。求めた局所的な大気の流れはデジタルアース上に重ね合わせて可視化することが目標である。

今年度は、昨年度までに校正が済んだドローンを使って野外で実地計測を行い、スペクトル解析手法の確立と地形による風速のスペクトルの違いの検証を行い、来年度以降の研究へと繋げる。

## 2. 方法

ドローンの Mavic Mini (DJI 社製) を用いて野外で風速の実地計測を行った。Mavic Mini は前年度の研究で、九州大学応用力学研究所の風洞での校正、および屋外でドローンを等速で往復させる野外校正手法によって、風速測定の校正が済んでいる。ドローンによる風速の測定は、ドローンが空間中に静止してホバリング状態を維持しようとする機能を利用する（文献：2）。ドローンはプロペラが回転することで重力により落下することを防いでいるため、鉛直方向の風が吹いた場合はプロペラの回転数が増減する。また水平方向からの風に対してはドローンが風の上流に向かって傾き、プロペラの回転数を増加させることで空間位置を維持しようとする。そのため、3 次元の風速はドローンのプロペラの回転数と傾きから求めることができる。もちろん予め既知の風速をあてて校正を行う必要がある。

野外での実地計測には図 1 で示す地形の異なる 2 地点を選択し、地形による風速の挙動の違いを検証した。1 地点目は福岡県糸島半島西側（福岡県糸島市）の日本海に面した「海岸」（標高 0 m）である。海岸では日中は海風により、地表付近では比較的安定して海側からの風が常に吹くことが予想される。2 地点目は福岡県と佐賀県の県境に東西にそびえる脊振山系の西側に位置する「峠」である。峠では日中、日本海から福岡県に吹き込んだ海風が脊振山系を駆け上って佐賀県側に抜けようとするため、比較的風が乱流傾向になると予想される。峠の頂上の位置では木が多く測定に適さなかったため、実際の測定位置は峠より佐賀県唐津市側に 1 km ほど進んだ位置の標高 294 m（文献：3）の空き地を選択した。

本研究は大気の東西・南北方向に鉛直方向を含めた 3 次元の流れを測定することが目標であるが、今年度に関してはまずは絶対値が大きく解析が容易と予想される水平（東西・南北）方向の 2 次元風速を求め、スペクトル解析を行うこととした。解析手法が確立するとともに「海岸」と「峠」で風速のスペクトルに明確な違いが現れれば、今後の研究目標の設定に大いに役立つ。

2 次元の風速が得られた後は風速の絶対値を求めてスペクトル解析を行うことができるが、本研究では東西・南北を複素平面として扱い、風速を複素数として表したままスペクトル解析を行うという手法も合わせて試みた。



図 1 ドローンで計測をした地点：「海岸」（福岡県糸島市）と「峠」（佐賀県唐津市）

### 3. 結果

図2に「海岸」と「峠」で測定した水平方向の風速の結果を紹介する。左が「海岸」、右が「峠」についての結果で、それぞれ地表面から10 m、20 m、30 mの高度で測定した。上段が風速の絶対値の時間変化、下段が風向(0°が東向き、90°が北向き)の時間変化である。

まず「海岸」の方が「峠」より風速が強い。また、「海岸」では風向がどの高度でも比較的安定していたのに対し、「峠」では風向が目まぐるしく変化した。これは海岸の方が海風がより強く安定して吹くからと考えられる。次に、「海岸」では高度と風速に有意な相関は見られなかったのに対し、「峠」では10 mのときだけ風速が強かった。これは脊振山系という障害物に対して風が吹き込むため、峠の地表付近で風が強くなったとも考えられる。以上の説明はたった一回ずつの測定で容易に結論付けられるものではなく予想に過ぎないが、納得のいく説明にはなっていない。今後何度も測定、あるいはドローンを複数台使って同時測定することで検証する必要がある。なお、「峠」であっても上空100 m程度であれば風速は10 m/s以上と非常に強くなった。

図3に、2次元風速の絶対値の時間変化をスペクトル解析した結果を紹介する。「海岸」よりも「峠」の方がパワースペクトルに高周波成分が多く、より乱流状態が強いことが示唆される。ただしこの解析法では風向の変化までは考慮に入れずに計算していることになる。

図4では、2次元風速の東成分を実部、北成分を虚部にとって複素数で表し、複素数のままスペクトル解析を行った結果を紹介する。パワースペクトルの周波数は正負で非対称となり、正の周波数は風向が東→北→西に回転していく変化を表し、負の周波数は逆向きの回転を表す。結果として「峠」の方が「海岸」より高周波で、正負で非対称の成分が顕著となった。より風向が目まぐるしく変化していたことが分かる。

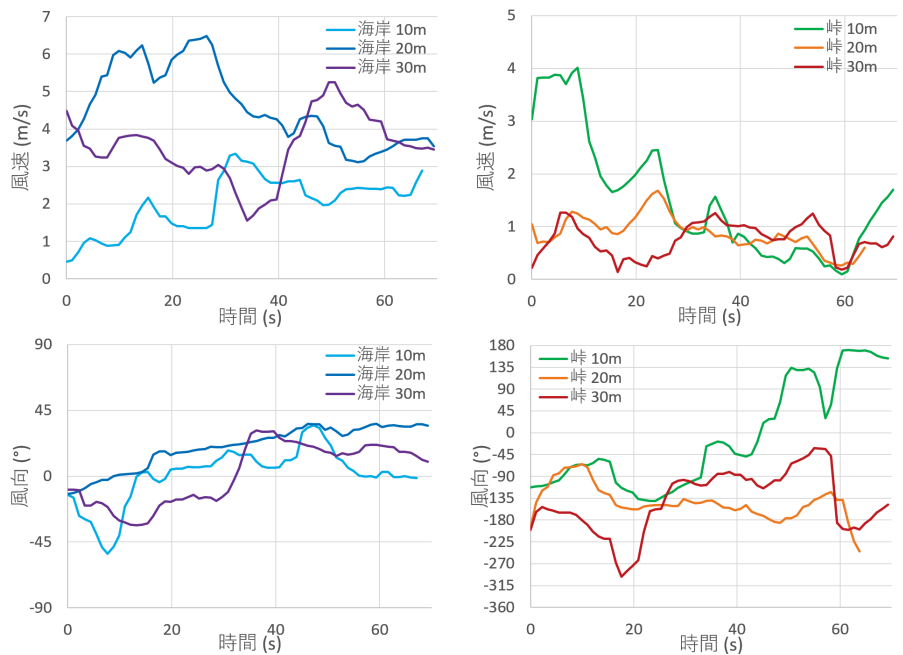


図2 ドローンで測定した水平方向の風速の絶対値(上段)と風向(下段)。左が「海岸」、右が「峠」である。風向は0°が東向き、90°が北向き。

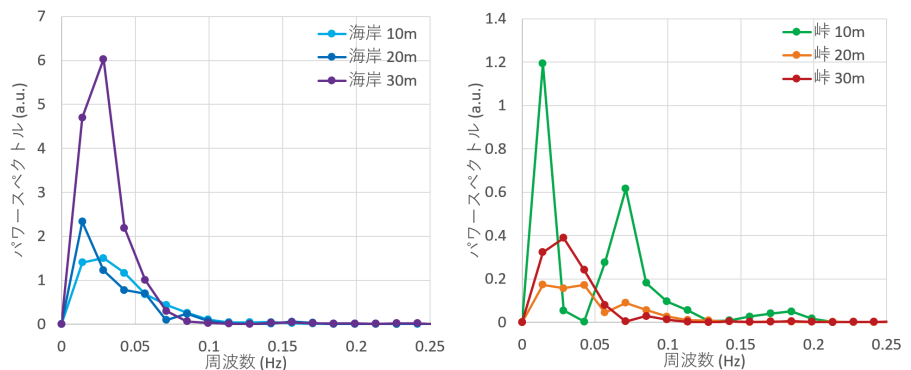


図3 ドローンで測定した水平方向の風速の絶対値のパワースペクトル。左が「海岸」、右が「峠」である。

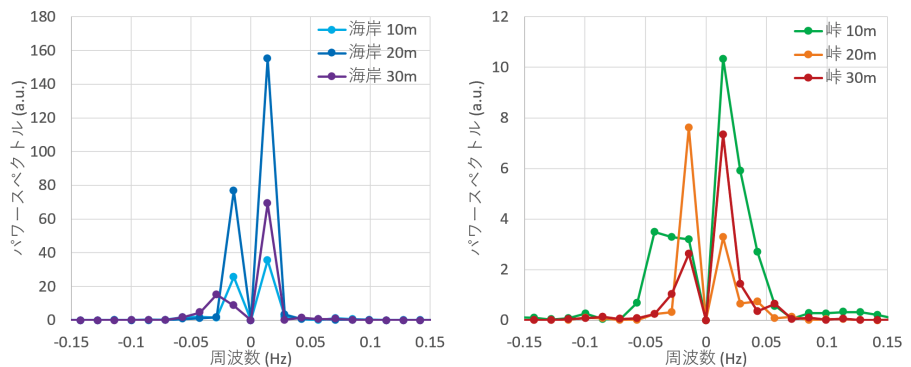


図4 ドローンで測定した水平方向の風速を複素数(実部=東成分、虚部=北成分)で表したときのパワースペクトル。左が「海岸」、右が「峠」である。

#### 4. 考察

ドローンのプロペラの回転数は約 1 秒ごとにしか変化しないため、求められたスペクトルは非常に低周波となった。また計測を 1 分程度でしか連続で行わなかったため、スペクトルは非常に粗いものとなった。今後スペクトルの詳細を得るためには 10 分程度か、バッテリーがもつ限りの長時間の測定が必要であることが分かった。

風速を複素数として表してスペクトル解析を行う手法は、風向の変化まで考慮に入れて計算しているため、有効な解析方法となりえることが分かった。また図 3 と図 4 を比較すると、「峠」の 10 m での 0.07 Hz 程度のピークが図 4 で消えているため、偽ピークだった可能性があり、風速を複素数として扱った解析の方がより現象を正しく理解できる可能性がある。自然界では風向が常に東→北→西→南→東→と変化し続けることはないと思われるが、今後風力発電の風車近傍で測定を行い、ドローンのフロント方向を風向きに合わせ、サイド方向を実部、鉛直方向を虚部にとって複素解析を行えば、常に風向が同じ回転方向に変化し続ける様子が観測できるかもしれない。今後、数値計算結果と連携して実験計画を立てていく予定である。

#### 5. まとめ

構成済みのドローン (Mavic Mini) を用いて地形の異なる 2 地点 (「海岸」と「峠」) で水平方向の 2 次元風速を測定してスペクトル解析を行い、地形による風速・風向・スペクトルの違いを考察した。2 次元風速を複素数で表し、風向の変化も考慮に入れたスペクトル解析を行うことの有用性も確認することができた。この手法は風車近傍での測定にも役立つことが期待される。今後はより長時間の測定や風車近傍での測定も計画し、鉛直方向も含めた 3 次元流速場の測定も目指す。

#### 6. 謝辞

本研究の一部は、中部大学問題複合体を対象とするデジタルアース共同利用・共同研究 IDEAS202232 の助成を受けたものです。

#### 参考文献・データ

1. 環境省, 微小粒子状物質健康影響評価検討会報告書, 2008.
2. P. Neumann and M. Bartholmai, *Sensors and Actuators A* **235**, 300–310 (2015).
3. 国土地理院地図 (標高)  
[https://maps.gsi.go.jp/index\\_m.html](https://maps.gsi.go.jp/index_m.html)