ドップラーライダと温度センサーを付けたドローンによる同時観測

吉崎正憲* 坂田啓朗**

キーワード:ドローン,おんどとり,ドップラーライダ

1. はじめに

現在(2018年11月),立正大学・地球環境科学部の気 象分野には、地上気象観測システム、ドップラーライダ (DL),高層観測システム(GPSゾンデ)があり、これ らを利用して立正大学・熊谷キャンパスや長野市で精 力的に観測を行っている.DLはレーザー光を発し大気 中のエアロゾルから後方散乱で戻ってきた反射光の周 波数の変化により視線方向の風を観測する測器である (Fujiwara and Fujiyoshi 2014,水谷ほか 2014).これに より、100mから数kmの風の細かい構造を見ることがで きる.

大気境界層内では、対流が活発な昼間では温位や水 蒸気が鉛直方向に混合された対流混合層が形成される (光田・水間 1964,近藤・植田 1982,花房 1987,近藤 1999,森脇ほか 2003,八木ほか 2014).鉛直シアのあ る一般風が吹く中で対流が起こると、対流による鉛直流 の移流によって、上昇流のところでは下層からの弱風、 下降流のところでは上層から強風が出現することが予想 される(Asai 1970, Asai 1972).そうした流れをDLで 観測すると、強弱のある水平風が交互に並ぶパターンと なる.高咲ほか(2016)は、立正大学・熊谷キャンパス においてこうしたロール状の対流パターンを捉えた(図 1).ところが、実際に観測されたのは視線方向の風だ けであり、気温分布などはわからなかった。

当大学でこれから期待される観測測器として,ドローンは有望な測器の一つである(国土交通省2017).ドローンとはコンピュータ制御で自立飛行する無人飛行機の総称であり,Unmanned aerial vehicleの頭文字を取って,UAVとも称される.ドローンはGPSと機体を制御するコンピュータを搭載することで自立飛行が可能となる.ドローンは,高度は限られるが,水平方向に面的に飛ぶことができる(佐々木ほか2016).

そこで, 立正大学・熊谷キャンパス上空の大気を観測

** 日本気象(株)



図1 高咲ほか(2016)において観測された風の概念図. 2次元ロールは対流の循環を表し、水平に一様に並んでいる.面Aは高さ約50mの建物のDLを通る面であり、面Bは面Aから200mほど離れている.赤点線はDLからの高度角0度の線を表す. 面Bの白抜きの矢印は高度角0度でみたときの水平風を表す.

するために, ドローンを用いた気温観測とDLによる風 観測を行った.これによって, 対流混合層の構造につい て風と気温による同時観測を行うことが本研究の目的で ある.

2. 観測手法・ドローンの飛行概要・観測日時

(1) 観測手法

本研究では、三つの観測測器を用いた.1つ目は、立 正大学のDLシステム(三菱電機:LS-SID2GA)であり、 立正大学・熊谷キャンパスのユニデンス屋上(地上高約 45m)に設置してある.DLは、走査型ライダーで最大 180°の水平走査が可能である.詳しくは高咲ほか(2016) を参照してほしい.図2に設置場所と観測範囲を示す.

2つ目はドローンであり,DJI社のPhantom3である. Phantom3は,全長・全幅350mm,全高200mm,重量 は1280g (バッテリーとプロペラを含む)であり,小型・ 軽量である.ペイロードは約200gであり,動力源とし て,4480mAhのリチウムポリマーバッテリーを使用す

^{*} 立正大学地球環境科学部

る。最大飛行時間は約23分である. また無風のときの飛 行速度は約5m s⁻¹である.

3つ目は簡易型の温度計であり,T&D社のおんどと り(TR-5106フッ素樹脂被覆サーミスタセンサー)で ある.本体サイズは,全長62mm,全幅47mm,全高 19mmと小型であり,Phantom3にも搭載可能である. 観測できる項目は温度だけであり,0.1℃単位で記録で きる.本体ロガーからセンサーが伸びており,その長さ は50cmである.先端の約1cm部分がセンサーとなって いる.こうして,おんどとりをドローンに2台搭載し, 1秒毎に観測を行った.

ドローンは飛行中にバッテリーなどから熱を発してい る. この熱が観測値に影響を及ぼさないように、本研究 では、Phantom 3 のアームに約30cmの"はり"を4 方 向に取り付けた. おんどとりを2 台搭載し、センサー部 は進行方向後方の"はり"の先端2箇所に設置した(写 真1).

(2) ドローンの飛行概要

ドローンの飛行エリアは、安全上から、立正大学・熊 谷キャンパス内の陸上競技場上空とした(写真2).陸 上競技場は、DLが設置してあるユニデンスから北に約 300mの場所にあり、DLとは約50mの高度差がある。陸 上競技場の大きさは、東西約100m、南北約200mである。 この中で、地上50mと100mの二つの高度でM字形の飛 行を行った.図3(a)に示すように、飛行は陸上競技場 中央部から離陸して上昇しながらポイントaに移動し、 そこから高度を保ちながらM字形の飛行を行い、ポイン トbに達する。それから垂直に高度100mまで上昇して ポイントcまで移動し、そこから同じ高度を保ちながら 50mのときとは逆向きにポイントdまで達する。上から 見ると、図3(b)のようにM字形のコースを飛行するこ とにより、DLで捉える(であろう)ロール状対流の走 行と比較できるようにした。



 図2 DLの観測範囲. DLは熊谷キャンパス内の学生寮 (ユニデンス)の屋上に設置してある(三菱電機: LS-SID2GA).本研究では、1台のDLで大学側 の半円のみを観測対象とした.陸上競技場は斜線 域で示す.



写真1 おんどとりを搭載したPhantom3.4方向に "はり"を取り付け,進行方向の後方2箇所に センサーを取り付けた.



写真2 2017年9月13日9時48分ユニデンス屋上より北方向を撮影.赤枠内はドローンが飛行する観測領域を示す.





図3 (a)ドローン飛行ルートのイメージ図. 陸上競技 場中央で離陸したドローンは,高度50mに上昇 してポイントaに移動する.そこから等高度をM 字飛行を行い,ポイントbまで移動する.それ から垂直に高度100mまで上昇してポイントcか ら等高度を折り返してポイントdまで移動する. (b)赤枠はドローンの飛行範囲,黄色はドローン の飛行ルートを表す.

(3) 観測日時

2017年8月から12月にかけて12回観測した. 観測実施 日は,8月1日,2日,29日,30日,9月13日,10月18 日,11月15日,21日,22日,12月3日,5日,6日であ る.このうち,11月21日と12月5日は夕方,その他は全 て朝の観測である.12月3日の観測を除き,Phantom 3 を使用して観測した.他の日時も計画したが,陸上競 技場上空の使用時間の制限があったり,雨天や強風など により中止になったりすることから,上記の観測日時と なった.

3. 観測結果

観測を実施した12日間のうち,8月1日,8月2日, 8月29日,8月30日は観測中に風が極めて弱かった。同 時刻のDLによる観測でも風速は全領域でほぼ0m s⁻¹ であり、ロール状対流の構造は見られなかった.また10 月18日以降の観測については、DL観測はなく、ドロー ンが観測した気温分布とDLと比較することができな かった.そのため、ここでは両者の観測があった2017年 9月13日の事例について述べる.

(1) 天気概況

2017年9月13日朝9時は、台風18号が先島諸島に接近 する一方、北海道と沖縄から九州南部にかけては低気圧 や前線の影響で雨や曇りであった.しかしながら、関東 地方では気圧傾度はゆるやかで概ね晴れていた(図4). 熊谷キャンパスの北東4.9kmにある熊谷地方気象台にお ける観測では、最高気温は32.2℃と9月としては高温で あり相対湿度は8時では28%と非常に乾燥していた(図 5(a)).一方、風は朝6時頃では1ms⁻¹程度と弱かっ たが、次第に強まり9時には7ms⁻¹に達した.このと きの風向は西南西-北北西であった(図5(b)).

(2) ドローンによる気温観測の結果

当日は、ドローンにより6時28分-6時40分(1回目), 7時28分-7時40分(2回目), 8時00分-8時12分(3 回目)と計3回の観測を行った.図6は、ドローンが離 陸してから着陸するまでの気温の変動を示す.プロット した気温の時系列は二つの観測値の平均である.これに よると、1回目の観測(図6(a))では高度50mの気温



図4 2017年9月13日09時00分の地上天気図.





図5 熊谷地方気象台における2017年9月13日6時~17時の(a)気温と相対湿度と(b)風速(実線)と風向(丸 点)の時系列.



気温の時系列.

より地上気温が低く,接地逆転層があったことがわかる. 同一高度における気温の変動幅に着目すると,1回目の 観測(図6(a))では高度100mの一部を除き,気温変 動は0.3℃程度と小さく小刻みでランダムに見えた.と ころが,2回目(図6(b))と3回目(図6(c))の観 測では,気温の変動幅は0.5℃程度と大きく,高い部分 と低い部分がはっきりと分かれていた.このときはなん らかの規則性があったといえる.

(3) ドローンによる気温の水平分布

ドローンは高度50mの観測を行った後に上昇して高 度100mの観測を行っているため,進行方向は逆となる. また高度50mと高度100mとの観測時刻には数分のズレ がある.ここではDLの解像度が30mとなるように合わ せて,気温の観測間隔を30m間隔とした.

2回目の観測の高度50mにおける気温の水平分布を図 7(a),高度100mにおける気温の水平分布を図7(b), 3回目の観測の高度50mにおける気温の水平分布を図7 (c),高度100mにおける気温の水平分布を図7(d)に 示す.これによると、2回目の高度100mの場合(図7 (b))を除き,高温域と低温域が交互に並んでいたよう に見えた.しかし、3回目の高度50mと100mの気温分 布(図7(c),図7(d))は、低温域と高温域は南北に 逆であり、気温分布は図中に矢印で示したドローンの進 行方向と相関があるように見えた.つまり、ドローンが 北西に進んでいるときは相対的に高温、南東に進んでい るときは相対的に低温になっていた.

(4) DLによる風観測との比較

図8は、DL高度角0°で観測された8時00分から8時 12分までの6分ごとの視線方向の風の分布である.風向 は全ての時間を通して、北-北西であった.陸上競技場 の南西側になるアカデミックキューブ付近では弱風域が 線状に伸びており、対流のロール状パターンのようにも 見えたが、DLの電波は観測範囲に届かず、陸上競技場 での対流のロール状パターンまでは確認できなかった. ドローンが飛行した時間帯では観測範囲は200m前後と さらに狭く、陸上競技場上空の風の分布はわからなかっ た(図略).陸上競技場までDLが見通せなかった一つの 理由として、前日の雨により9月13日の朝は空気が澄ん でおり大気中のエアロゾルが少なくて、観測範囲が小さ くなったためと考えられる.



図7 (a)7時29分-7時32分の高度50m,(b)7時32分-7時36分の高度100m,(c)8時01分-8時04分 の高度50m,(d)8時05分-8時09分の高度100mにおける気温の水平分布.



図8 2017年9月13日8時00分~8時12分までの6分ごとのDL視線方向の風速の水平分布.

4. 議論

(1)風向とドローンの進行方向と気温の関係

対流混合層について、さまざまな数値実験がある (Nakanishi 2000, Fujiwara et al. 2011, 中西 2013). 例 えば、中西(2013)の理想化された数値実験例を見る と,対流活動によって混合層が再現され,内部に対流 セル構造が見られた、温位分布をみると、混合層内で は対流セルの上昇流と下降流の間では1Kぐらいの温位 差があった.これから、混合層内での水平方向の気温 差は0.5~1℃が観測されると考えられた. また, 気温 の水平分布における高温域と低温域は、50mと100mの 高度では同じような位置にあると予想された. しかし. 3.(3)節で述べたように、50mと100mの高度で高温 域と低温域の位置はずれており、むしろドローンの進行 方向と相関があるように見えた.このずれの一因とし て、Phantom3に搭載した温度計のセンサー部が直射日 光に当たっていた可能性があった. 直射日光が当たる場 合, センサーは温められ周囲の気温より少なからず観測 値は高くなると予想できる.もし、この状態で強い風が 吹けばセンサー部より温度が低い空気がドローンの動き に応じてセンサー部にぶつかることになり、センサー部 は無風時に比べて空気による冷却効果が大きくなると思 われる. そうなると、向かい風のときに低温となり追い 風のときには高温となると想像される、しかし、観測値 では,北西に進んでいるとき,つまり向かい風のときに 高温であり、南東に進んでいるとき、つまり追い風のと きに低温となっていた.つまり、想定される気温変化と は逆であり、直射日光は高温域と低温域のずれの主因で はなかったと結論された.

気温を測定するために使用したおんどとりの空気に対 する時定数は約80秒であり、ドローンの無風時の飛行速 度は約5m s⁻¹である. 無風の場合,おんどとりを装着 したドローンが約400m (= 5 m s⁻¹×80秒)以上離れ ると物理的に意味のある観測ができるようになるが、今 回のドローン観測では最大直線距離は高々約140m (M 字の中の1直線)であり、直射日光の問題や気温の時定 数に関しては問題が多かったと思われる.

(2) ドローン観測にかかわる問題点

今回の観測からいくつか問題点がわかってきたので, それらをリストしておく.

1つ目は、ドローンによる観測の手法が確立されてい なかった点である.またPhantom3の積載容量の不足等 により、予定通りの飛行実験が実施できなかった.まず は前段階として、風洞実験や気象観測鉄塔などを用いて 比較検証を行うべきであった.(本学にそのような設備 はない).またドローンの飛行速度と移動方向、一般風 との関係、おんどとりのセンサーの通風や日射の問題な どをまず明らかにすべきであった.

2つ目は,対象としている対流によるロール状パター ンの発生頻度が低い点である.ロール状の対流が発生 したとしても、それをDLで観測できる最低条件として、 晴天であること、上空にある程度の風が吹いており鉛直 シアがあること、空気中に適度な量のエアロゾルが存在 すること、などがある.しかしながら、それらすべてを 満たすのは非常に難しかった.

3つ目は、実際のフィールドには気温や風を決定する 要因が多数にあり、それぞれが複雑に絡まり合って様々 な乱流が発生したことである. 熊谷キャンパスの東側か ら南側にかけては森林や田畑が広がるが、西側は住宅や 工場が立ち並んでいる. こういった周辺環境は気温分布 にさまざまな影響を与えていたと想像される.

5. おわりに

本研究の狙いは、図1に示されたような対流混合層の 構造(温度や風の分布)を観測することであった.しか しながら、今回のトライアルでは大気中のエアロゾルが 少なくてDLの電波はドローンの飛行領域まで届かず観 測は不十分となり、期待したような対流混合層内での風 と気温の構造までは得られなかった.しかし、本研究は、 ドローン観測という新しい手法で、対流混合層における ロール状対流を直接観測しようとした試みであり、先駆 的なものであった.また、9月13日のドローンの観測か ら、気温の変動幅が0.5℃ぐらいの規則性のある構造を 捉えることができた.これは一つの大きな成果である. 今後さらなる発展を期待したい.

謝辞

本研究を進めるにあたり,データの取得,解析方法な ど多大な援助をして頂いた院生の高咲良規氏,ドローン の運用に関してご協力頂いた後藤真太郎先生には心から 感謝いたします.助言などを頂いた総観気象学研究室の 森泉慎一氏,春原光希氏,田中洋祐氏,梅澤僚太氏,小 川吉史氏,石島裕一氏,矢野雄大氏,岩崎翔氏,渡辺洋 平氏,また本研究において協力頂いた方々にも感謝しま す.

参考文献

- Asai T., 1970: Three-dimensional features of thermal convection in a plane Couette flow. J. Meteor. Soc. Japan, 48, 18-29.
- Asai, T., 1972: Thermal instability of a shear flow turning the direction with height. *J. Meteor. Soc. Japan*, **50**, 525-532
- Fujiwara, C. and Y. Fujiyoshi, 2014: Detection of invisible waterspout 3D scanning Doppler lidar. SOLA, 10, 127-130.
- Fujiwara. C., K. Yamashita, M. Nakanishi and Y. Fujiyoshi, 2011: Dust devil like vortices in an urban area detected by a 3-D scanning Doppler lidar. *J. Appl. Meteor. Climatology*, **50**, 534-547.
- 花房龍男,1987:地表面付近の風と温度のふるまい.日本気 象学会北海道支部機関紙「細氷」,33,45-68.
- 国土交通省: 無人航空機(ドローン・ラジコン機等)の飛行 ルール. http://www.mlit.go.jp/koku/koku_tk10_000003. html (2017.12.23閲覧)
- 近藤次郎, 植田洋匡, 1982: 大気境界層内の乱流輸送現象, ながれ, 1, 21-34.
- 近藤純正, 1999:風はどのように吹くか. 大気境界層の気象, 天気, 46, 21-30.
- 光田寧,水間満郎, 1964:超音波風速計とその試作, *天気*, 11, 33-40.
- 水谷耕平・石井昌憲,森一正,藤吉康志・藤原忠誠,2014: 高層気象観測の発展と現状,*気象研究ノート*(水野量・上 窪哲郎,定村努編集),229,83-122.
- 森脇亮,神田学,木本由花,2003:都市接地層における乱流 プロファイルの大気安定度依存性,水工学論文集,47,1-6.
- Nakanishi, M., 2000: Large-eddy simulation of radiation fog. Bound. - Layer Meteor., 94, 461-493.
- 中西幹郎,2013:大気境界層,地球環境の事典(吉崎正憲, 野田彰編集),94-95.
- 佐々木寛介,河見博文,町田駿一,小島啓美,井上実,辻本 浩史,渡辺豊,名取悦朗,平坂直行(2016):ドローンを 用いた高層気象観測技術の開発,水文・水資源学会,セッ ションID:20.
- 高咲良規, 吉崎正憲, 渡来靖, 中川清隆, 蓜島徹也, 武井祐 興, 2016:立正大学・熊谷キャンパスにおけるドップラー ライダによる水平風の観測, *地球環境研究*, 18, 49-55.
- 八木綾子,稲垣厚至,神田学,藤原忠誠,藤吉康志(2014): 相似則に基づいた大気境界層における水平乱流場の分類, 土木学会論文集B1(水工学),70,1_325-1_330.

Combined observation of a Doppler lidar and a drone with temperature sensors

Yoshizaki Masanori*, Sakata Hiroaki**

* Faculty of Geo-environmental Science, Rissho University ** Japan Weather

Abstract:

Doppler lidar (DL) observations by Takasaki et al. (2016) suggested that roll-shaped convections might occur early morning in the Kumagaya campus of the Rissho University. In order to reconfirm such disturbances, a combined observation of DL and a drone with temperature sensors was conducted in a fair morning on 13 September 2017. The drone's flights followed an M-shaped course covering an area of 100 x 200 m at two flight levels (50 and 100 m above the ground). The observed temperature showed alternate patterns with high and low temperatures of about 0.5 degrees difference. However, DL observation was not obtained due to insufficient amount of aerosols, preventing from the DL to cover the drone's flight area.

Key words: temperature sensor, drone, Doppler lidar