ドローンによる気温観測法の開発

誌名	農業食料工学会誌 = Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery and Food Engineers
ISSN	2188224X
著者名	上野,一喜 太田,俊二
発行元	農業食料工学会
巻/号	78巻3号
掲載ページ	p. 192-195
発行年月	2016年5月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

特集

ドローンによる気温観測法の開発

Development of Meteorological Observation Method Using a Drone

Kazuki UENO, Shunji OHTA

キーワード：観測，放射除け，鉛直気温分布，接地逆転，微気候緩和
Keywords：observation, radiation shield, vertical air temperature, radiation inversion, moderation of micro climate

上野一喜
（うえの　かずき）
1990年2月生
2013年3月早稲田大学人間科学部人間環境科学科卒業，2015年3月早稲田大学大学院人間科学研究科修士課程修了，現在，早稲田大学大学院人間科学研究科博士後期課程・在学中
農業食料工学会非会員
E-mail：uepiece-kaz@suou.waseda.jp

太田俊二
（おおた　しゅんじ）
1967年12月生
1999年4月山梨大学工学部循環システム工学科・助教授，2001年早稲田大学人間科学部・助教授を経て，
現在，早稲田大学人間科学学術院・教授
農業食料工学会非会員
E-mail：shun@waseda.jp

1. はじめに

ドローンによる観測の利点の一つとして，人間（観測者）が容易に立ち入ることができない場所において簡便かつ安定した飛行が可能なことが挙げられる。たとえば，地表面の土地被覆の上端であるキャノピー層や，その上層の地表面から数百mまでの対流が盛んな接地層，河川や湖などの水体の上などである。これらの場所で行う気象観測は，地表面とのエネルギや物質のやりとりの相互作用を明らかにするために重要であり，多岐にわたる分野で行われてきた。

都市気候の分野では，係留気球を使用してヒートアイランドの立体構造を明らかにした研究（Duckworth and Sandberg, 1954）を始め，航空機を使用して都市上空の移動観測を行った研究（Shea and Auer, 1978）がある。観測機器をバルーンや航空機を使って上空に送る以外にも電波塔やビルなど，高層建築物を利用した鉛直気温観測研究（藤野と浅枝，1999）もある。また，都市だけではなく，森林生態系や耕地生態系のキャノピー層でも観測が行われている。長期フラックス観測サイト網であるFLUXNETは，全世界的に森林や農耕地のエネルギおよび物質の交換速度を推定するために，数十mのタワーを設置して，各高度で気象観測を行っている。さらに，気象分野では，局地の気象現象を説明するための鉛直気温観測が行われている。係留ゾンデを使用して，長野県菅平盆地の冷気湖を観測した研究（鳥谷，1985）で指摘されているように，夜間に冷気が窪地の底にたまる現象は農業にも大きな影響を与える。盆地内のイネの冷害を引き起こすことや（Yoshino et al., 1981），暖地農業における柑橘類栽培地の選定に影響を与える（吉野と村上，1973）。加えて，夜間に地表面より比較的暖かい上空の空気を送風することで茶畑の凍霜害を防ぐ方法（高橋ら，1958）が広く行われていることからも，農耕地の上空の気温観測は重要である。

一方，水体上の気温観測は，地表面に比べて大きな比熱を持つ陸域の水体が周囲に与える影響を調べる研究が主である。河川のクールアイランド効果を調べるためゴムボート上で気温と水温，熱収支観測を行った研究（福岡ら，1980），河川の上空まで係留気球で鉛直気温観測した研究（武若ら，1992）がある。また，湖上の気温を船で観測した研究（Shitara, 1967）や，湖上の島を利用した観測（枝川，1986），貯水池でも周辺の移動観測で貯水池が夏季の都市の気温を緩和していることを調べた研究（神田ら，1991）のように貯留している水の影響についても調べられてきた。

しかしながら，これらの研究では，装置が大掛かりかつ高価で，操縦技術が必要な観測方法もある。そのため，多岐にわたる分野で観測はされているが，観測できる場所と時間が限られる。もし，ドローンを使用し，安価かつ簡便な方法で上空や水体上の気象観測ができれば，鉛直気象観測のネットワークの構築も可能になるだろう。そこで，本研究では，ドローンに軽量な放射除けを取り付けることで，十分な精度をもった気温測定の開発を行った。さらに，実際に鉛直方向，水平方向の気温観測を行うことで，具体的な現象を捕捉し，期待されるような結果が得られるのかを確かめた。

2. 観測方法

(1) 使用するドローンの選定

本研究を行うためのドローンに求められる性能は，放射除けを搭載してもバランスを崩すことなく飛行できる

ことである。この条件を満たすドローンとして，本研究ではDJI社製PHANTOM 2を使用した（図1）。より安価なドローンを数種類購入して同様の観測も行ったが，放射除けを取り付けると重心が偏り，微風でもバランスを崩してホバリングできない問題や，離着陸の影響でドローン本体の上部に放射除けを取り付けると，直射日光が当たり，観測した値に大きな誤差が生じる問題があった。一方，PHANTOM 2は機体の足にある，空撮用のカメラを取り付けるための空間（タテ13 cm×ヨコ11 cm×高さ8 cm）が，直射日光を遮り，放射除けをバランスよく設置できるという利点があった。また，100 gのおもりを取り付けた状態で，平均風速3.2 m/s，最大風速6.5 m/sという悪条件で10分以上の安定したホバリングを行うことができた。以上のことから，本機の耐風性能と可能積載重量が十分にあると判断した。

図 1　使用したドローンの近影
本研究で使用したドローン（DJI社 PHANTOM 2）。ドローンの足の間にあるスペースに軽量かつ小型の自作通風式放射除けを取り付けた。気温観測にはおんどとりTR-52i（T&D社製）を使用した。

(2)　小型かつ軽量な放射除けの作成

気温を観測する際には，気温センサをむき出しにはせず，放射除けと呼ばれる周囲からの放射による影響を弾くためシールドの中に入れて行う。機体の足にある空間に入る既製の放射除けがなかったため，本研究では小さく軽量な自然通風式放射除けを自作した。プラスチック製の皿4枚に反射材を巻き，皿と皿の間隔を1.5 cmで作成した。重量は約20 gである。気温観測にはおんどとりTR-52i，温湿度観測にはおんどとりRTR-503（両製品ともT&D社製；重量約50 g）を使用した。以降，この放射除けを自作放射除けと表記する。ドローンによる観測時間間隔はすべて1秒である。

(3)　自作放射除けの校正

地上で既製の自然通風式放射除け（CLIMATEC社製自然通風シェルタCYG-41303）と比較して，自作放射除けの校正を行った。放射除けのドローンへの設置場所が上部から直射日光が当たらないことから，直射日光がほぼ遮られている森林内で2015年6月21日から6日間，30分ごとに連続して計測された瞬間値（n＝271）で比較した。その結果，自作放射除けを用いても十分な精度で気温を観測することができた（図2a）。さらに，ドローン自体の発熱や，巻き起こす風が気温に与える影響を調べた。芝地に5 mのポールを立て，その先端に同じ既製の自然通風式放射除けを取り付け，その真横にドローンを30秒静止させた。この作業を，日中に計27回行った。そのうち5回は曇天時に観測し，残りは晴天時に観測した。5 mポールに取り付けた既製の自然通風式放射除けとドローンで観測された気温を比較した結果，天候に関係なく±0.2℃の誤差内に収まっており，ドローンの発熱や巻き起こす風による影響は無視できることがわかった（図2b）。

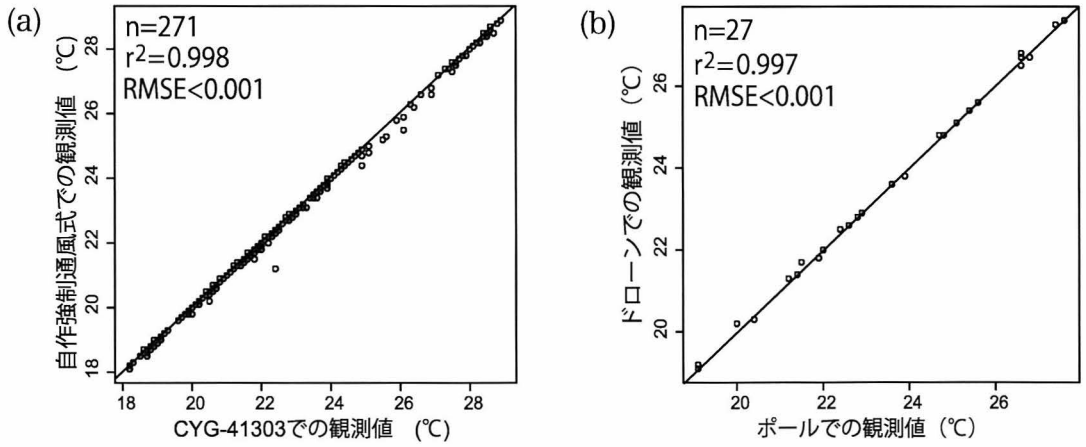

図 2　自作放射除けの校正
(a) は直射日光の当たらない森林内で既製品と自作の放射除けを比較した結果，(b) は，日中に5 mポールに設置した既製品による観測結果とドローンを隣接させるように飛行させ観測した値を比較した結果である。センサの工場出荷時の誤差範囲が0.3℃であることとRMSE（二乗平均平方根誤差）が0.001未満であることから，自作放射除けを取り付けたドローンの観測値に補正をかける必要がないことがわかる。

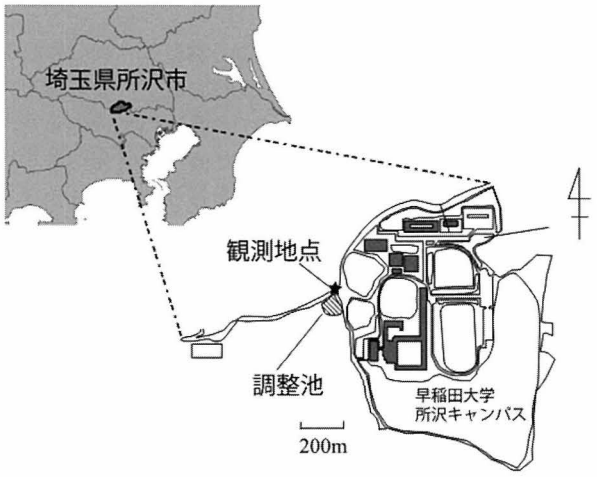

図 3　観測地点概要
早稲田大学所沢キャンパスは埼玉県所沢市の西部に位置し，南側が狭山湖と隣接している。観測地点はキャンパスの西側にあり，付近に約 40 m^2 の調整池がある。

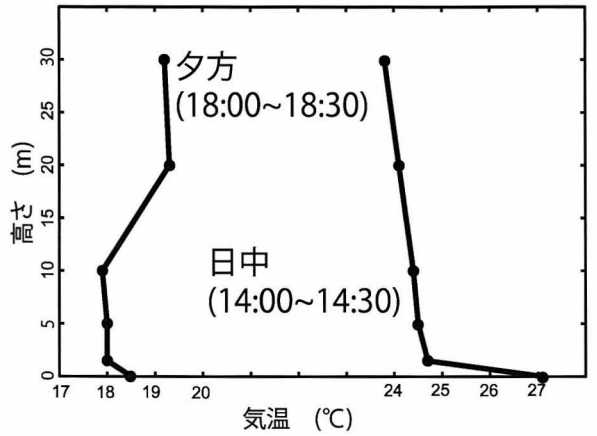

図 4　日中と夕方の鉛直方向の気温分布
観測地点で，弱風晴天日の 2015 年 5 月 21 日の日中と夕方に鉛直方向に気温観測した結果である。日中は地表面付近の気温が高かったが，夕方は放射冷却により地表面付近が冷えて，高度が高い地点の気温の方が高かった。

(4)　観測地点の概要

観測地点は東京都心から約 30 km 離れた典型的な郊外である埼玉県所沢市西部にある早稲田大学所沢キャンパス（図 3）である。南側を都内に水を供給する狭山湖と隣接しているため，周囲の大部分の土地被覆を管理された森林が占めている。本研究で観測した地点は大学敷地内の西側である。この地点は高低差約 60 m の小さな窪地の底になっていて，西側には谷に沿って湿地帯（草丈約 5 m のヨシ（*Phragmites australis*）群落が優占する）が広がっている。また，湿地帯と観測地点の間に約 40 m^2 の調整池があり，コンクリートで舗装された道路や空き地の 5 m ほど下に水面がある。

3. 観 測 例

鉛直方向の気温分布の変化を捉えるために放射による

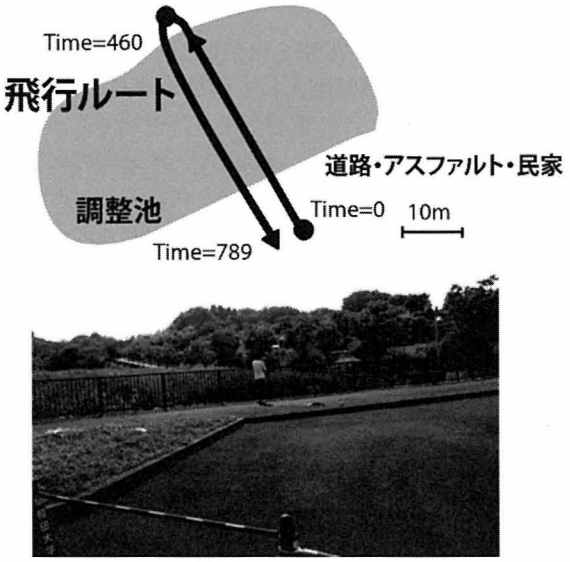

図 5　調整池縦断の飛行ルート
手前のアスファルト面から発着させ，貯水池を縦断し，ヨシ群落に約 5 m 進入したら折り返して，同じルートを戻るように飛行させた。上部のイラストに記載している Time とその値は，図 6 の横軸に対応している。

接地逆転現象を，水平方向の気温分布の変化を捉えるために小さな貯水池の気候緩和効果について，ドローンを用いて観測した。

(1)　接地逆転現象の観測

特に風の弱い晴天日の夕方から夜半にかけ，放射冷却によって地表面付近の気温が低下し，上空の気温の方が高くなる接地逆転と呼ばれる現象がある。つまり，日中は地表面付近の気温が高く上空に行くにしたがって気温が低下していくが，夕方以降は地表面付近のほうが上空に比べて気温が低くなる。この現象をドローンで観測するため，観測地点で鉛直気温観測を行った。観測地点から垂直に高度を上げていき，0 m，1.5 m，5 m，10 m，15 m，20 m，30 m の各高度で 1 分間ホバリングさせた。両端の 0 m と 30 m 地点以外は上昇時，下降時の二回の平均値を採用した。高度はドローンに各高度がマーキングされている凧糸を結びつけて確認した。

弱風快晴日であった 2015 年 5 月 21 日の 14 時と 18 時に観測地点で 30 分間，鉛直方向にドローンを飛行させた結果を（図 4）に示す。日中 14 時は地表面付近の気温が高く，高度が上がるにしたがって気温が下降している。一方，夕方 18 時に同地点で同様の観測をしたところ，地表面付近より高度が高い点の方が気温は 1.2℃ 高くなっていた。加えて，放射冷却が強くない曇天日にも同様の観測を行ったところ，日中も夕方も観測した高度内ではほとんど気温差は観測されなかった。これらのことから，弱風晴天日に発達する放射による接地逆転現象をドローンによる観測で捉えることができたと言える。

(2)　水体による気温緩和効果

都市内の貯水池などの水体がヒートアイランドを緩和

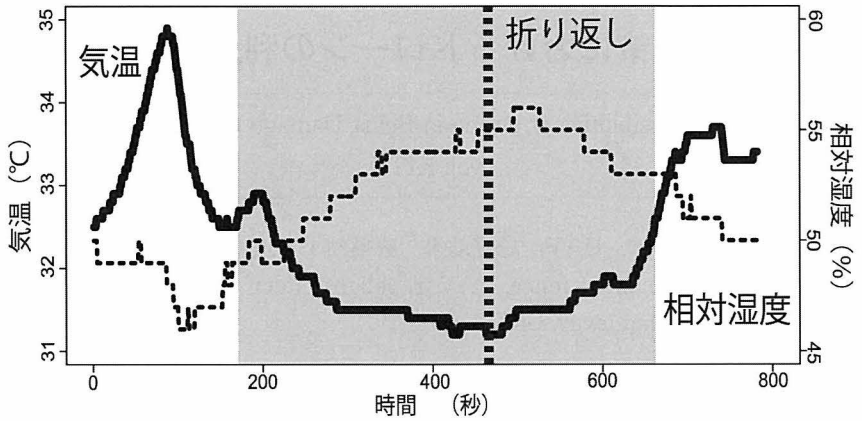

図 6　調整池での温湿度観測結果

弱風快晴日の 2015 年 7 月 21 日 14 時頃に図 5 で示したルートを飛行させた時の結果である。灰色の部分が調整池上空を飛行していた時間帯である。調整池上空を飛行している際は，アスファルト面に比べて気温が低下し，湿度が上昇していることがわかる。

する効果があるという研究は数多く行われてきている。この現象をドローンで捉えるため，観測地点の西に隣接する調整池の上空の温湿度観測を行った。アスファルト面から調整池を直線的に横切ってヨシ群落に 5 m ほど入った地点で折り返し，同じコースを辿ってアスファルト面に戻ってくるコースを常に地表面，水面から 1.5 m の高度を保ちながら飛行させた（図 5）。

弱風快晴日であった 2015 年 7 月 21 日の 14 時から 14 時半にかけて行った結果を図 6 に示す。図の灰色の部分はドローンが調整池上空を飛行していた時間帯であることを示している。この結果から，アスファルト面と貯水池の水面の上空では約 1.0℃の気温差と約 10％の湿度差があることがわかった。約 400 m^2 の比較的小さな池（洗足池）の気温緩和効果が池周辺で約 1.5℃あったこと（神田ら，1991）からも，類似した小規模な水体の気温緩和効果をドローンによって観測できたと言えるであろう。

4. まとめと展望

これらの観測で，理論通りの気温の鉛直プロフィールや水体の気温緩和効果を観測できたことから，本研究のドローンを用いた簡便な気温測定方法は十分な精度をもっていることがわかった。この方法は安価で簡便なことから，観測研究例が増えるだけでなく，今まで機材の問題で一箇所でしか観測できなかった観測が，ドローンを複数台用意することで同時多地点比較することが可能になる。さらに，バルーンなどを使った既存の研究を行う前に，観測地の詳細な予備研究を簡便に行えることにも大いに役立つであろう。

また，この観測は安価で簡便なだけでなく，既存の研究よりも局所的かつ瞬間的な気温の変化を三次元で捉えることができるところに大きな利点がある。この観測結果を用いることで，さまざまな土地被覆の時空間に高解像度な局地気象モデルの精度を向上させる可能性がある。時空間解像度が高い気象データは，細微な気象変化が農産物や土壌の成分に与える影響を明らかにできるだろう。本研究においては，既製の汎用品のドローンをそのまま使用したが，気象観測用に改良したドローン本体を開発し，温湿度だけでなく，風向風速など乱流の気象観測も可能になると，微気象研究がさらに進むことが期待できる。

引用文献

Duckworth F.S. and Sandberg J.S. (1954) The Effect of Cities upon Horizontal and Vertical Temperature Gradients. *Bulletin of American Meteorological Society*, 35, 198–207.

Shea, D. M. and Auer Jr., A. H. (1978) Thermodynamic Properties and Aerosol Patterns in the Plume Downwind of St. Louis. *Journal of Applied Meteorology*, 17, 689–698.

藤野　毅，浅枝　隆（1999）盆地内における湖岸の小都市ヒートアイランド特性について，天気，46 (5)，317–326.

鳥谷　均（1985）長野県菅平盆地における冷気湖の形成と冷気流，地理学評論，58（Ser. A）-2，67–79.

Yoshino M., Tanaka M., Nakamura K. (1981) Formation of a cold air lake and its effects on agriculture. *Journal of Natural Disaster Science*, 3, 1–14.

吉野正敏，村上節太郎（1973）大三島浦戸における塩田跡地みかん園の冷気湖，農業気象，29 (2)，109–112.

高橋恒二，青野英也，田中静夫，築瀬好充（1958）茶樹の凍霜害防除に関する研究（第 2 報）．送風法による茶樹の凍霜害防除について，日本作物学会紀事，27 (1)，135–136.

武若　聡，池田駿介，平山孝浩，島谷幸宏（1992）都市河川が周辺地の微気象に及ぼす効果，環境システム研究，20，33–40.

福岡義隆，松浦謙士，成田健一（1980）都市気候に及ぼす河川水の影響―広島市太田川の場合―，水温の研究，24 (1)，2–9.

Shitara H. (1967) Air Temperature in summer on and around the Lake Inawashiro, Fukushima Prefecture, *The science reports of the Tohoku University. 7th series, Geography*, 16, 69–84.

枝川尚資（1986）琵琶湖上の気候特性について，地理学評論，59（Ser. A）-10，589–605.

神田　学，稲垣　聡，日野幹雄（1991）夏期に森林・水面が果たす気候緩和効果に関する実測とその周辺域への影響伝達機構に関する数値解析による検討，水工学論文集，35，585–590.