

ドローンを活用した上層気象調査及び大気汚染調査の検証

ムラタ計測器サービス株式会社 福池 晃, 池上 匡, 永島右光
有限会社タイプエス 設楽 丘
八千代エンジニアリング株式会社 河合 徹

1. はじめに

現在、環境アセスメントにおける上層気象観測ではGPSゾンデが多く用いられている。GPSゾンデには気温、湿度センサとGPS受信モジュールが搭載されており、気球に吊り下げて飛揚させることにより地上から高度約30 kmまでの気圧・気温・湿度・ジオポテンシャル高度・風向及び風速を測定することができる¹⁾。気象庁では、全国16か所の気象官署や昭和基地(南極)でGPSゾンデによる観測が実施されており、上層における気象観測の実績が高いツールである。一方で、GPSゾンデは使い捨て製品のため高コストになること、海洋漂流物等のごみになることが課題として存在する。また、近年ではヘリウムガスが希少で入手困難となっている。この他、GPSゾンデは観測後に気球が破裂して落下するため、安全に落下させるという対策が求められる²⁾。

これらの課題に対応するため、気象センサを搭載したドローンが上層気象観測に活用できる精度を確保できるか検証を行った。

GPSゾンデに変えて気象ドローンを利用するメリットは、上述のコストやごみ問題に加え任意の場所で観測ができるという面がある。GPSゾンデの欠点は風の状況により気球が流されることで、任意の測定地点での計測ができない点にある。例えば、風速5 m/sの環境下の場合、GPSゾンデは高さ100 mで横には100 m程度流されていく。

合、GPSゾンデは高さ100 mまで上昇すると同時に、横に100 m程度流されることになる。ドローンであれば、無線で操縦できるため、平面的に同じ場所で観測することも可能となる(図1)。

また、気象センサ以外に大気汚染物質のセンサをドローンに搭載することで、大気汚染物質の鉛直分布を把握することが可能となる(図2)。鉛直分布は、例えば逆転層発生、解消時の大気汚染物質の濃度の移り変わりを把握することが可能になる。このため、ドローンを活用した上空における大気汚染物質(PM2.5)の観測試験を実施した。

2. 調査内容

調査は下記の4種類の内容を行った。

- ① 超音波風向風速計と気象ドローンの比較
- ② GPSゾンデと気象ドローンの比較
- ③ 高度1,000 mの高高度飛行試験
- ④ PM2.5センサ搭載ドローンの飛行試験

3. 使用ドローン

使用したドローン及び搭載したセンサは表1に示すとおりである。調査①～③で使用したタイプエス社のR-SWMのベースドローンは自律制御システム研究所のACSL-PF1であり、プロペラが6枚あるヘキサコプターである(図3)。全長1,120 mm、総重量8.5 kgで航行可能

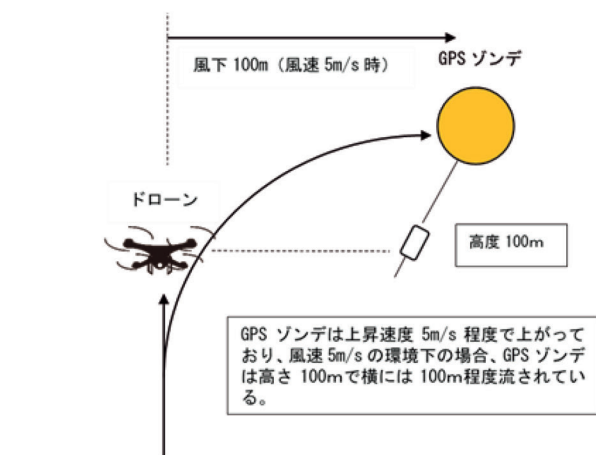


図1 任意の場所で観測可能なドローン

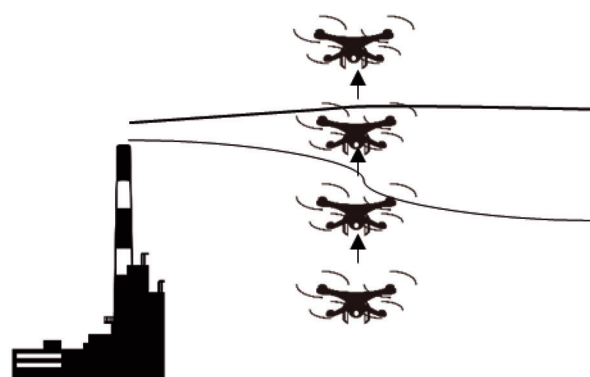


図2 大気汚染物質の鉛直分布把握

時間は気象条件によって異なるが20分程度である。本調査時は風向風速センサをドローンの上部に、温湿度センサをドローンの下部に配置した。

調査④で使用したドローンはDJI社のMatrice100であり、プロペラが4枚あるクアドコプターである。対角寸法660 mm、総重量3.4 kgで航行可能時間は気象条件

によって異なるが16分程度である。産業用ドローンとしては小型の部類であり、ペイロードは1 kgまでしかないが、大型機に比べて取り回しが簡便であることが利点である。大気質や気象センサは近年軽量のものが開発されており、大気質、気象センサを搭載しても1 kg以内に収めることが可能となっている。



図3 ドローン(R-SWM)の外観

表1 調査使用機器

調査 No.	機器名	型番	メーカー	仕様
① ～③	GPS ゾンデ	RS-11G	明星電気	温度センサ:サーミスタ 温度計測精度:0.5℃(日中)、0.4℃(夜間) 温度応答時間:0.4 秒以下(1000 hPa、5 m/s) 湿度センサ:静電容量形 湿度計測精度:5%RH 湿度応答時間:0.2 秒以下(吸湿 1000 hPa 6 m/s 0℃) 風向計測精度:2 度 風速計測精度:2 m/s(対流圏)
	ドローン	R-SWM	タイプエス	自律飛行機能搭載 ベースドローン:PF-1(自律制御システム研究所) 羽根使用:ヘキサコプター 飛行時間:約 10～25 分 全長:1,120 mm 総重量:8.5 kg
	風向風速計	WXT532	ヴァイサラ	風向計測精度:3 度(10 m/s において) 風速計測精度:3%(10 m/s において)
	温度計	HMP110	ヴァイサラ	温度センサ:PT1000 測定精度:±0.2℃ 精度(非直線性、ヒステリシス、繰返し性を含む) 温度範囲 0～+40℃の場合 露点と周囲温度の差が 15℃より小さいとき±1℃ 露点と周囲温度の差が 15～25℃であるとき±2℃
④	ドローン	Matrice100	DJI	自律飛行機能搭載 羽根使用:クアドコプター 飛行時間:約 16 分(ペイロード 1kg) 対角寸法:660 mm 総重量:3.4 kg
	PM2.5 センサ	OPC-R1	Alphasense	・流量:1.6 L/min ・レーザー光散乱センサ式 ・粒径:0.4 to 12.4 μm ・粒径別の個数/s が記録される

4. 超音波風向風速計と気象ドローンの比較

4.1 調査概要

a) 調査期間

2018年7月9日～10日

b) 調査場所

群馬県前橋市金丸町337-1
(旧赤城国際芝スキー場跡地)

c) 調査方法

超音波風向風速計との比較方法は表2に示すとおりである。地上高度7 mに超音波風向風速計を設置し、ホバリング及び上昇時の風速の比較を行った(図4)。

d) 調査結果

試験1(ホバリング時)の調査結果を図5に、試験2(上昇時)の調査結果を図6に示す。

ホバリング時の比較結果を見ると、ドローンの風速の方が0.5～1 m/s程度大きくなっている。上昇時の比較を見ると、瞬時値のため数値にばらつきはあるが、おおよそ同程度の風速結果が得られている。ホバリング時に風速が高くなるのは風向風速センサがプロペラ気流の影響を受けている可能性が考えられる。一方で、上昇時において風速に差が見られなかったのは、上昇することによってプロペラ気流の影響のない自然風を捉えられたことによると考えられる。なお、本調査では検証を実施していないが、ドローンの下降時は自身が起こしたプロペラ気流の中に降りていくことになるため、適切な測定値は得られないものと思われる。

表2 超音波風向風速計との比較

試験	内容
1	高度 7 m においてドローンを 10 分程度ホバリングさせた。1 秒ごとの瞬時値を取得し、10 分平均値の比較を行った
2	上昇速度 1～3 m/s の範囲でドローンを上昇させ、高度 7 m における瞬時値の比較を行った。



図4 超音波風向風速計との並行測定の様子

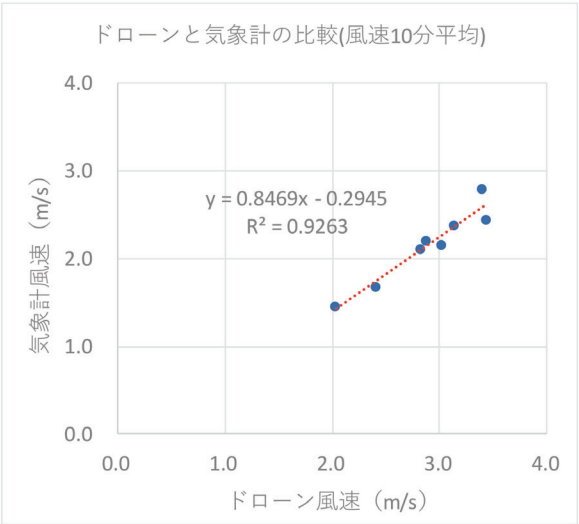


図5 ホバリング時の風速比較結果(10分平均)

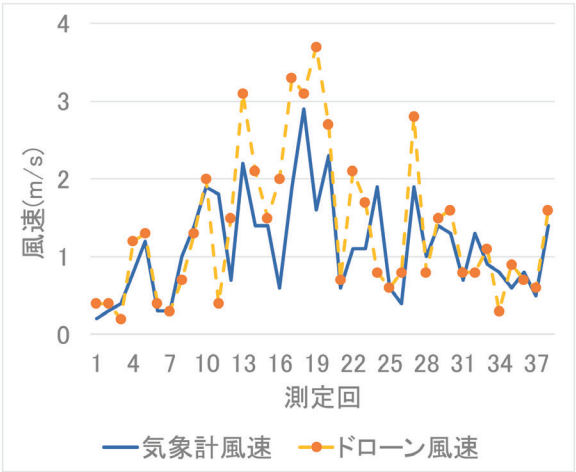


図6 上昇時の風速比較結果(瞬時値)

5. GPSゾンデと気象ドローンの比較

5.1 調査概要

a) 調査期間

秋季：2018年11月6日～11日
冬季：2019年1月31日～2月5日

b) 調査場所

千葉県千葉市若葉区地内
(旧千葉市北谷津清掃工場)

c) 調査方法

GPSゾンデは5 m/sの速度で気球が上昇するよう浮力を調整し、放球を行った。ドローンは2 m/sの速度で上昇するよう設定し(ホバリング無し)、GPSゾンデ放球1分後程度(GPSゾンデが高度300 m程度に到達した後)に飛行を開始した(図7)。ドローンの飛行は手動操縦ではなく、自律飛行で行った。ドローンの飛行高度は150～500 mの範囲とし、高度約5 m間隔で

の気象データの比較を行った。飛行回数は秋季に14回、冬季に11回であり、雨天時はドローンの飛行を中止したため、比較結果は晴れまたは曇りの気象条件下の結果である。なお、調査にあたっては国土交通省東京航空局成田空港事務所に「無人航空機の飛行に関する許可・承認申請書」を申請し、飛行に係る許可を受けて実施した。また、千葉市に本調査場所におけるドローンを用いた試験実施の許可をいただいた。

d) 調査結果

「窒素酸化物総量規制マニュアル(新版)」³⁾に基づいた計算式により風向差による相関解析、風のベクトルによる相関解析を実施した。解析結果を表3に示す。風向差による相関、ベクトル相関共に0.9以上の強い相関を示していた。

GPSゾンデとドローンの相関・差の標準偏差を表4及び図8に示す。風速、気温の相関を見ると両要素と



図7 GPSゾンデとドローンの調査風景

表3 ベクトル相関及び風向差による相関

項目	秋季	冬季
風向差による相関係数	0.961	0.966
ベクトル相関係数	0.981	0.971
データ数	722	530
1方位内度数(割合)	541(74.9%)	418(78.9%)
2方位内度数(割合)	659(91.3%)	510(96.2%)

表4 風速及び気温の相関係数・差の標準偏差

季節	要素	相関係数	差の標準偏差
秋季	風速	0.92	1.27 m/s
	気温	0.93	0.66℃
冬季	風速	0.86	1.02 m/s
	気温	0.90	1.27℃

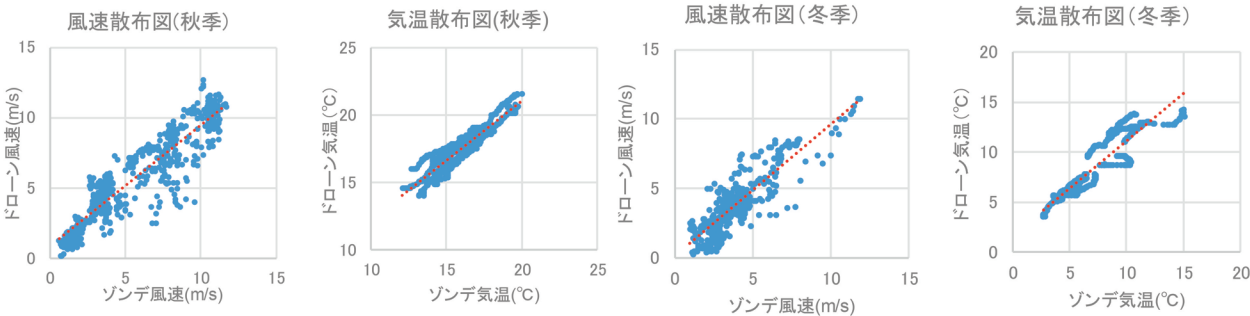


図8 GPSゾンデとドローンの瞬時値の散布図(左：秋季、右：冬季)

も0.9程度の強い相関を示しており、概ね一致した変動パターンを把握できることが窺える。ただし、瞬時値での散布図を見るとばらつきは大きい。次に、風速、気温についてGPSゾンデとドローンの観測値の各回の平均値の比較を行ったものを図9に示す。平均値で見ると、瞬時値での散布図に比べ、ばらつきが小さい。このことから、平均的な数値で見れば、GPSゾンデとドローンでおおよそ同様の傾向を捉えることが可能ということが示唆された。なお、本比較ではドローンは調査地点上空にほぼ垂直に上昇していているのに対し、ゾンデは数mの風に流されながら観測を行っているため、同じ気層を捉えていない可能性があることも留意が必要である。

GPSゾンデとドローンの風配図を図10に示す。両者の結果から秋季はNWが、冬季はSEが主風向であるなどの類似した傾向を把握できることが窺える。

6. 高度1,000 mの高高度飛行試験

6.1 調査概要

a) 調査日

2019年3月20日

b) 調査場所

東京都大島町泉津原野(裏砂漠)

c) 調査方法

対地高度1000 mまでの飛行を2回(1回目:12:52開始, 2回目:14:45開始)実施し、気象データを取得した。ドローンの上昇速度は2 m/sとし、自律飛行によるフライトを実施した。

d) 調査結果

高度1,000 mまでの調査結果を見ると、高度700~800 m以上の高度で気温逓減率が変化している。また、相対湿度についても高度600 m以上で急激に空気が乾燥してきていることが分かる(図11)。

遮蔽物が周囲に無く、周囲に電波等を発生する物が無い環境下においては、高度1,000 mまではデータが欠落することやドローンと基地局の電波の送受信が途絶えることもなく観測が行えることが確認された。なお、本調査時は気象条件が穏やかであり、高度1,000 mまで風速10 m/s未満であった。風速10 m/sを超えるような強風時はドローン飛行の安全確保が難しいことを注意し、ドローン搭載センサから送られる風速データをモニタリングしながらフライトを行う必要がある。

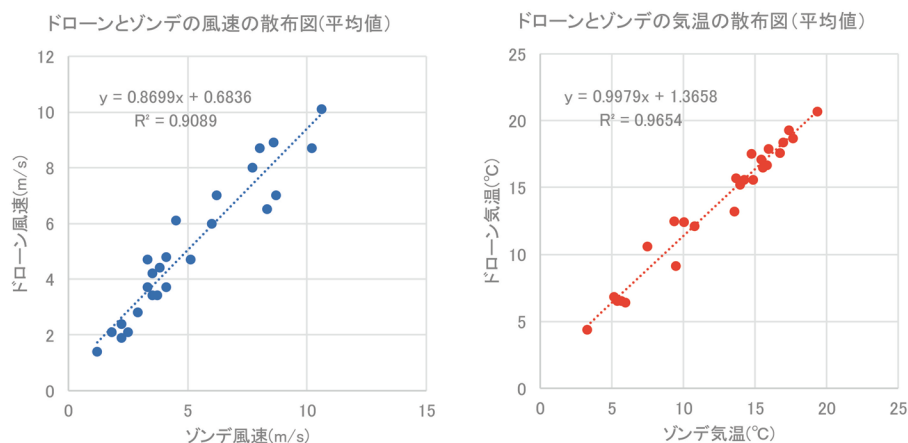


図9 GPSゾンデとドローンの各回平均値の散布図(左図: 風速, 右図: 気温)

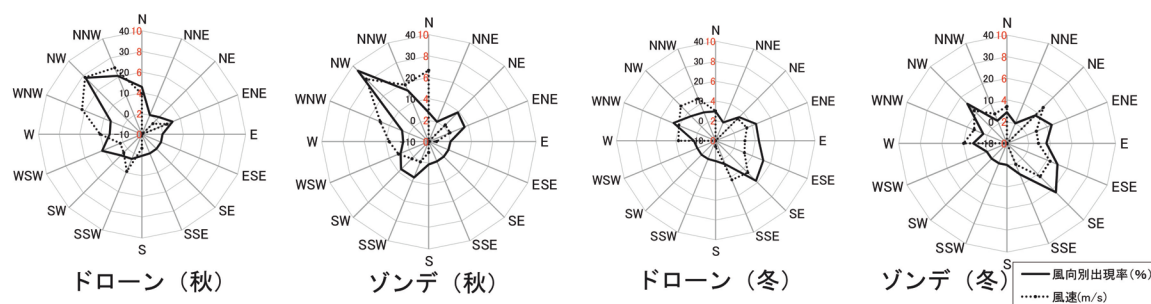


図10 GPSゾンデとドローンの風配図(左: 秋季, 右: 冬季)

7. PM2.5センサ搭載ドローンの飛行試験

7.1 調査概要

a) 調査日

2019年8月9日

b) 調査場所

神奈川県横須賀市長坂5丁目
横須賀市ドローンフィールド

c) 調査方法

対地高度150 mまでの飛行を2回実施し、PM2.5及びPM10のデータを取得した。ドローンの上昇速度は1 m/s程度とし、手動飛行によるフライトを実施した(図12)。

d) 調査結果

PM2.5の調査結果を見ると、1回目は高度70~110 mでやや濃度が上昇しているが、2回目は大きな濃度変化は見られない。一方で、PM10は2回とも高度70

~100 m付近でやや濃度が上昇しているのが捉えられている(図13)。

ドローンの飛行時間は1回につき最大16分程度のため平均的な濃度を押さえることはできないが、上空における高濃度の発生状況を捉えることは可能であることが示唆された。

8. まとめ

超音波風向風速計やGPSゾンデと気象ドローンの比較試験を行った結果、一定スピード(1~2 m/s程度)により上昇した場合、類似した結果が得られることが分かった。また、飛行高度も1,000 m程度までは可能であることが分かり、ごみ焼却施設や小規模な火力発電所、地熱発電所などの環境アセスメントにおける上層気象観測技術として、実用の可能性が示唆された。一方で、本調査では安全面を考慮し、雨天時や強風時(地上付近で風速10 m/s以上)は気象ドローンの飛行を見合わせた。

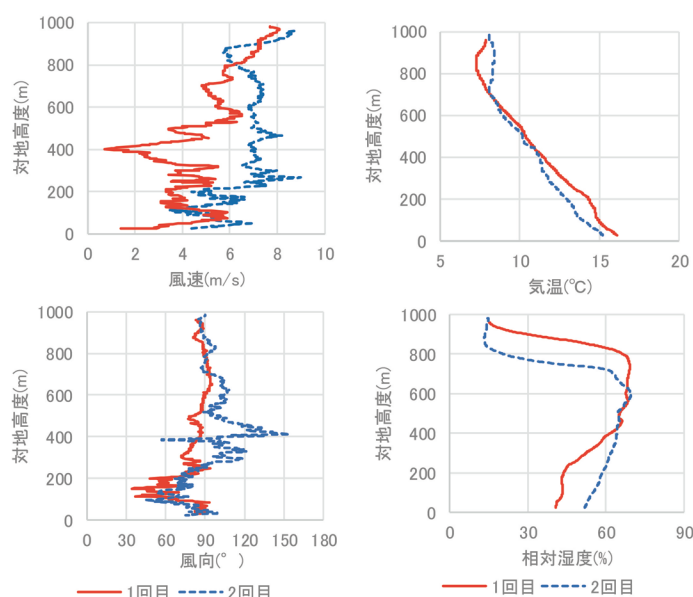


図11 高度1,000 mまでの風向風速・温湿度鉛直分布

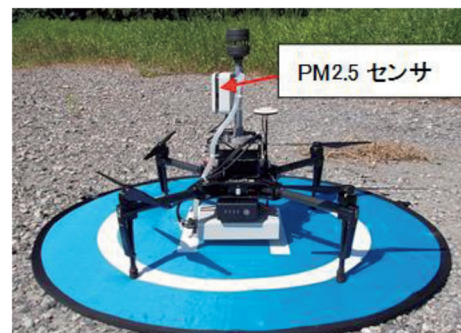


図12 PM2.5センサ搭載ドローン

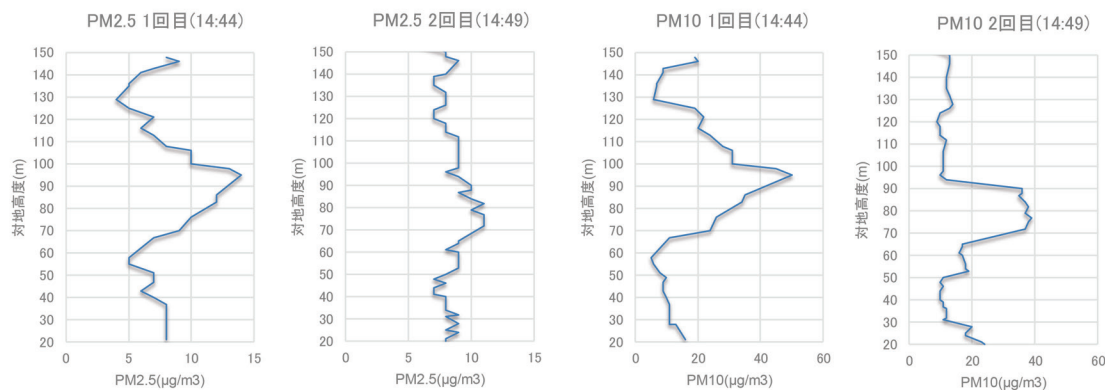


図13 高度150 mまでのPM2.5及びPM10濃度(左: PM2.5, 右: PM10)

IPx4クラスの防沫形ドローンが販売されてきており、一定の雨に対しては対応可能になると思われるが、防水性能は高湿度に対しての保護は保障されていない。気象ドローンは雲入するなどのケースも考えられ、湿度100%に近い高湿度下で飛行を求められることから、ドローンの更なる性能確認が求められる。また、夜間や雲入するようなケースの高高度飛行は航空法の飛行許可を得ることが難しい場合が考えられる。いくつかの障壁があるものの、GPSゾンデから気象ドローンへの置き換えはケースによって使い分けることで十分に可能と考えられる。引き続き、観測コスト縮減と精度確保が両立するよう検証を進め、気象ドローンの実務利用を進めていきたい。

PM2.5センサ搭載ドローンについては、飛行時間が短いため、上空における大気汚染の平均的な状況を捉えることは困難であるが、上空における高濃度の発生状況を捉えるという目的であれば利用可能であることが示唆された。本調査ではPM2.5測定の公定法や準拠する自動測定機器等との比較を行っておらず、測定値の精度に関する検証は行っていないことから、現在はセンサから得られる濃度データの精度等について検証を進めているところである。

地球温暖化による影響が顕在化する中で、精密な解析に資する気象データやエアロゾル濃度等のデータ収集は今後ますます重要となってくると考えている。ドローンはこれらの情報収集に有効なツールであるため、引き続き研究開発を進めていきたい。

本実証試験にあたり、桜美林大学リベラルアーツ学群片谷教孝教授には、実証試験の手法やデータの解析方法などに関して様々なご教示を賜りました。また、GPSゾンデとの比較試験については、千葉市が実施する環境アセスメントの調査と併せて実施する許可をいただき、場の提供及びGPSゾンデのデータの供与を賜りました。

ここに厚く感謝の意を表します。

- 1) 阿保 敏広：高層気象観測業務の解説(改訂版),(財)気象業務支援センター,平成18年3月
- 2) 日本気象学会：気象研究ノート 229号 高層気象観測の発展と現状,平成26年2月
- 3) 公害研究対策センター：窒素酸化物総量規制マニュアル(新版),平成12年12月

■執筆者

福池 晃

ムラタ計測器サービス株式会社

取締役 営業部 部長 兼 東京支店 支店長

〒245-0052 横浜市戸塚区秋葉町15番

TEL：045-812-1811

E-mail：eigyo@murata-s.co.jp