

環境と測定技術

ISSN 0285-3051

2024 Vol.57

No.

5

50th ANNIVERSARY

1970

1974

1975

2000

2024

2030

2060



技術報文

**国内河川の水質条件でみられる
溶存態ニッケルの生態毒性の
変動性**

**水質試料中の
トリチウム分析法の検討**

**気象観測ドローンと
GPSゾンデによる上層気象の
4季観測**

Environment and
Measurement technology



一般社団法人 日本環境測定分析協会
Japan Environmental Measurement and Chemical Analysis Association

気象観測ドローンと GPS ゾンデによる上層気象の 4 季観測

ムラタ計測器サービス株式会社

坂間将純, 池上 匡, 福池 晃

八千代エンジニアリング株式会社

塚川佳介

1. はじめに

火力発電所や廃棄物焼却施設等に係る環境アセスメントでは、混合層高度や大気逆転層の出現状況等を把握し、排ガスの拡散予測条件に反映するため、上層気象観測が必要となる場合がある¹⁾。

現在、環境アセスメントにおける上層気象観測の調査手法では、GPS ゾンデと呼ばれる気象観測器を気球に吊り下げて飛揚させることが一般的である。GPS ゾンデを用いた手法は、高高度の気象状況の観測を行うことができるが、観測に用いる気球や GPS ゾンデが使い捨てになることが多いため、環境負荷が高く、1 回の観測が高コストである。また、ヘリウムガスの高騰や入手の難しさ、自由気球の飛行許可が得られないリスク、GPS ゾンデの落下地点での事故のリスク等も課題として挙げられる。

これらの課題を解決するために、上層気象観測への気象観測ドローンの活用を検討した報告がされている。福池ら (2020) の報告では、気象観測ドローンと GPS ゾンデの間には気温及び風速について、強い相関がみられたが、瞬時値のばらつきが大きいことが示されていた²⁾。岸田ら (2022) の報告では、強制通風ファンを導入することで温度の計測精度が改善され、気象観測ドローンと GPS ゾンデの気温の測定結果はほぼ一致したことが示されている³⁾。

本稿では、4 季にわたって、気象観測ドローンと GPS ゾンデを用いた上層気象の同時観測を実施し、季節による傾向を比較した。それによって、気象観測ドローンの環境アセスメントにおける上層気象観測への活用の検討を行った。

2. 試験の概要

2.1 試験手法

2022 年 10 月から 2023 年 7 月までの 4 季 (秋季: 2022 年 10 月, 冬季: 2023 年 1 月, 春季: 5 月, 夏季: 7 月) における日中 (秋季及び冬季: 9~15 時, 春季及び夏季: 6~18 時) に、3 時間に 1 回の間隔で、各季

12~18 回 (計 54 回) の比較試験を実施した。

環境アセスメントにおける上層気象観測では、4 季各 1 週間の連続観測を 3 時間に 1 回の間隔で行うことが多い。本稿では、気象観測ドローンの安全性を考慮して、飛行条件は晴れまたは曇り、かつ風速が小さい (地上付近で約 10 m/s 以下) こととした。

気象観測ドローンは 2 m/s の上昇速度を設定し、自律飛行で高度 500 m まで直上に飛行させ、1 秒間隔で気象データを取得した。GPS ゾンデは 5~6 m/s の上昇速度を得るように気球にヘリウムガスを充てんして飛揚させ、1 秒間隔で気象データを取得した。

気象観測ドローンと GPS ゾンデによって取得した気象データ (気温、風速、風向) について、地上から高度 500 m までの 5 m 毎にデータの比較を行った。また、環境アセスメントでは 50 m 毎に結果の整理を行うことが多いため、50 m 毎に結果を整理した。

2.2 使用機器

気象観測ドローンは、ACSL 社製のドローンである ACSL-PF2 をベースに気象観測機器を搭載した、タイプエス社製の R-SWM version3 を使用した (図 1)。本稿では、岸田ら (2022) と同様に、温度計を格納した

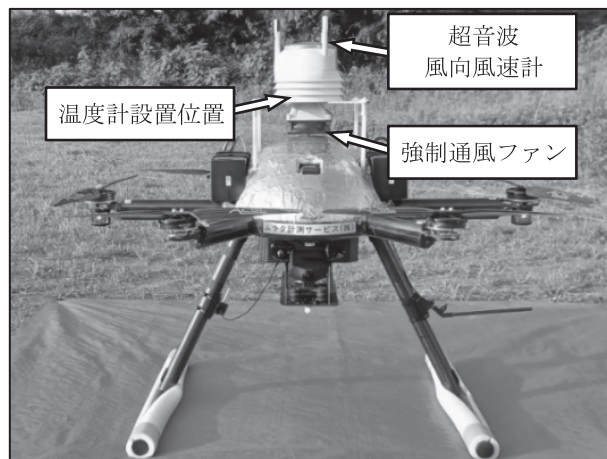


図 1 使用した気象観測ドローン (R-SWM) の外観

シェルタの下部にファンを設置することで、強制通風による温度測定を行った。また、気象観測ドローン自体が日射により熱を持つことを避けるため、機体上部をアルミテープで覆った。

GPS ゾンデは明星電気社製の iMS-100 を使用した。GPS ゾンデには GPS 受信機及び温度計、湿度計、無線送信機が内蔵されており、風速及び風向は GPS 位置情報により算出される。

3. 気象観測ドローンと GPS ゾンデの観測結果の比較

3.1 気温

5 m 毎の高度における全季の気温について、気象観測ドローンと GPS ゾンデの間には強い相関がみられ、気象観測ドローンによる測定結果は GPS ゾンデより約 0.8℃ 高い値であった（図 2）。各季で比較すると、気温の相関係数はすべての季節で 0.99 以上であり、差の標

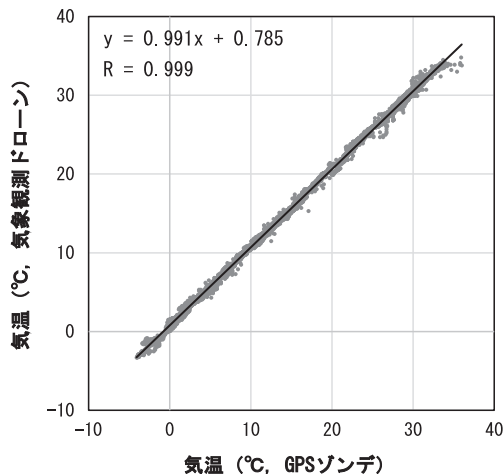


図 2 5 m 毎の高度における気温の散布図(全季)

準偏差は、季節間で大きな差はみられなかった（表 1）。

福池ら（2020）の報告は、気温の相関係数は 0.90～0.93、差の標準偏差は 0.66～1.27℃であったが、本稿では、より強い相関が認められ、測定値の差のばらつきが小さいことが示された。これは、主に温度計を設置しているシェルタ下部にファンを設置し、強制通風を行った効果だと考えられる。

50 m 毎の高度における各季の平均気温をみると、すべての季節で、気象観測ドローンと GPS ゾンデの間には約 0.6℃ の差がみられたが、鉛直分布は同様の変動を示した（図 3）。

日射の影響によりドローンの機体温度が上昇する夏季、機体温度と気温の差が大きい冬季は、機体温度により温度計が高温になり、高度の上昇に伴う気温の変化を捉えることができない懸念がある。これに対して、岸田ら（2022）の報告では、温度測定を強制通風に変更後、気象観測ドローンと GPS ゾンデの気温の測定結果はほぼ一致したことが示されている³⁾。本稿においても、夏季及び冬季を含むすべての季節で、気象観測ドローンは GPS ゾンデと同様の変動を示した。

表 1 気温の相関係数と差の標準偏差

季節	相関係数	気温の差の標準偏差
秋季	0.997	0.29℃
冬季	0.992	0.44℃
春季	0.997	0.33℃
夏季	0.993	0.44℃
全季	0.999	0.40℃

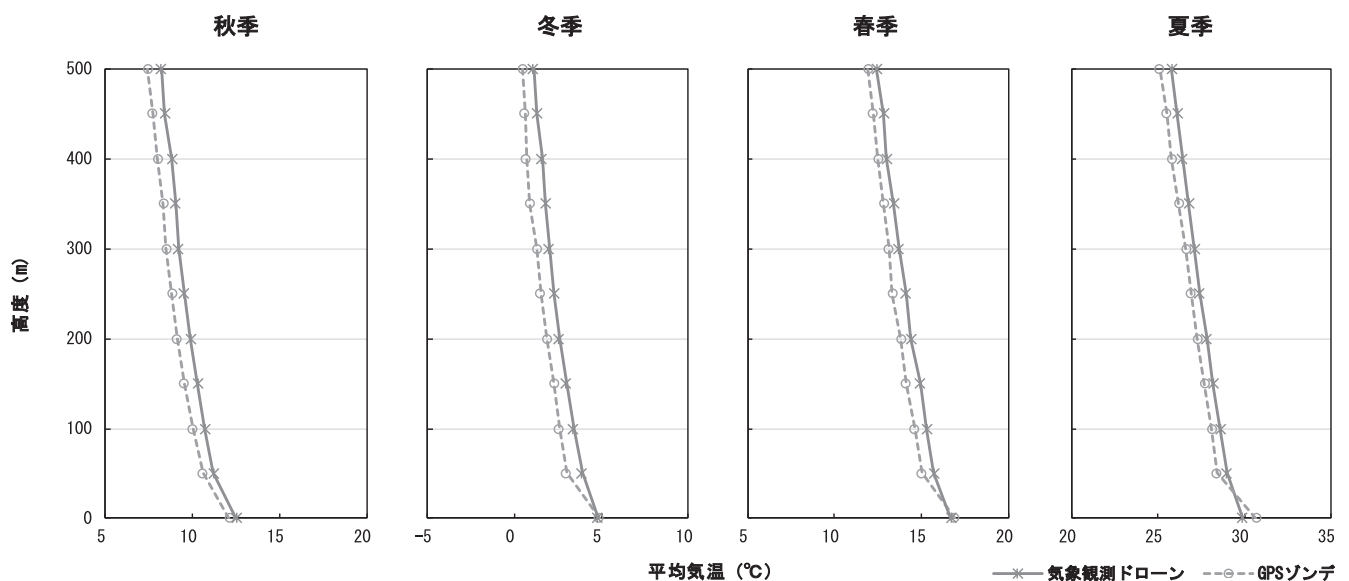


図 3 各高度における各季の平均気温の鉛直分布

3.2 逆転層の把握

環境アセスメントでは、逆転層が発生した際の汚染物質拡散の影響予測のため、逆転層の把握が重要であることから、気象観測ドローンとGPSゾンデで観測された逆転層を集計した。GPSゾンデによって観測された6回の逆転層のうち、5回は気象観測ドローンでも同様に観測ができたが、1回は観測ができなかった(表2)。一例として、気象観測ドローンとGPSゾンデの両方で逆転層が観測されたときの気温の鉛直分布を示す(図4)。気温の値に差はみられるが、高度300~400mで発生した気温の上昇をGPSゾンデと同様に、気象観測ドローンでも捉えることができていた。他の4回についても、気象観測ドローンはGPSゾンデと同様の傾向を示したことが確認された。

表2 逆転層の出現状況

分類	気象観測ドローン		GPSゾンデ	
	度数	頻度(%)	度数	頻度(%)
逆転なし	49	90.7	48	88.9
上層逆転	3	5.6	3	5.6
下層逆転	1	1.9	1	1.9
全層逆転	1	1.9	1	1.9
二段逆転	0	0.0	1	1.9
合計	54	100.0	54	100.0

注1) 逆転層区分高度を300mとして集計を行った。
注2) 上空との気温差が0.1℃以上、かつ層厚が100m以上で観測されたものを逆転とした。

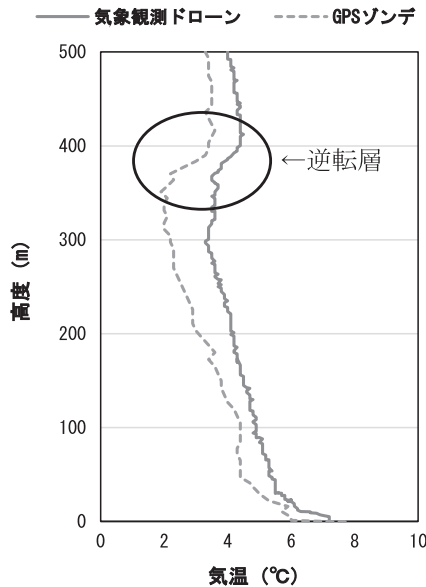


図4 逆転層観測時の気温の鉛直分布の一例

3.3 風速及び風向

5m毎の高度における全季の風速は、気象観測ドローンとGPSゾンデの間で相関がみられたものの、ばらつきが大きい結果であった(図5)。各季で比較すると、風速の相関は春季が最も強く、差の標準偏差については、冬季が最も大きい値であった(表3)。

50m毎の高度における各季の平均風速の鉛直分布をみると、風速の値に差はみられるが、すべての季節で、気象観測ドローンはGPSゾンデと類似した変動を示した(図6)。しかし、各季の平均ではなく、各回の鉛直分布を個別に比較したとき、異なる変動を示した回が複数存在したため、一例を示す(図7)。高度150m以上でGPSゾンデは2~3m/s程度の風速であるが、気象観測ドローンは6~9m/sの風速が観測された。

50m毎の高度における各季の風向のベクトル平均の鉛直分布をみると、春季を除いたすべての季節で、気象観測ドローンはGPSゾンデと同様の風向を示した(図8)。春季については、高度200mでGPSゾンデは西寄りの風向であるが、気象観測ドローンは南東寄りの風向である等、一部の高度で大きく異なる風向を示した(図8)。

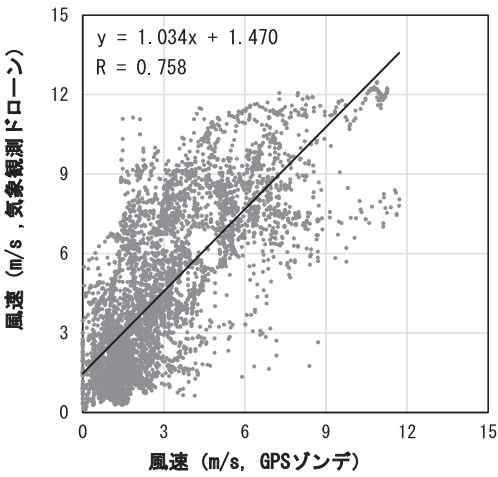


図5 5m毎の高度における風速の散布図(全季)

表3 風速の相関係数と差の標準偏差

季節	風速の相関係数	風速の差の標準偏差 (m/s)
秋季	0.636	2.20
冬季	0.743	2.33
春季	0.851	1.65
夏季	0.755	1.67
全季	0.758	1.98

高度 300 m における各季の最多風向及び平均風速をみると、春季を除いたすべての季節で、気象観測ドローンは GPS ゾンデと類似した方位の最多風向を示したが、最多風向の出現率は差がみられ、平均風速は約 2 m/s の差がみられた（表 4）。

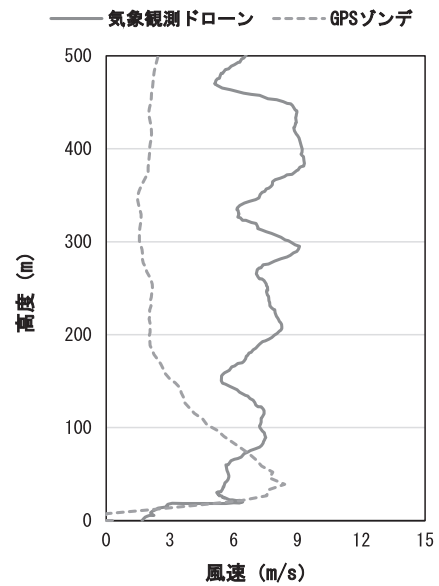


図 7 異なる風速の変動を示した一例

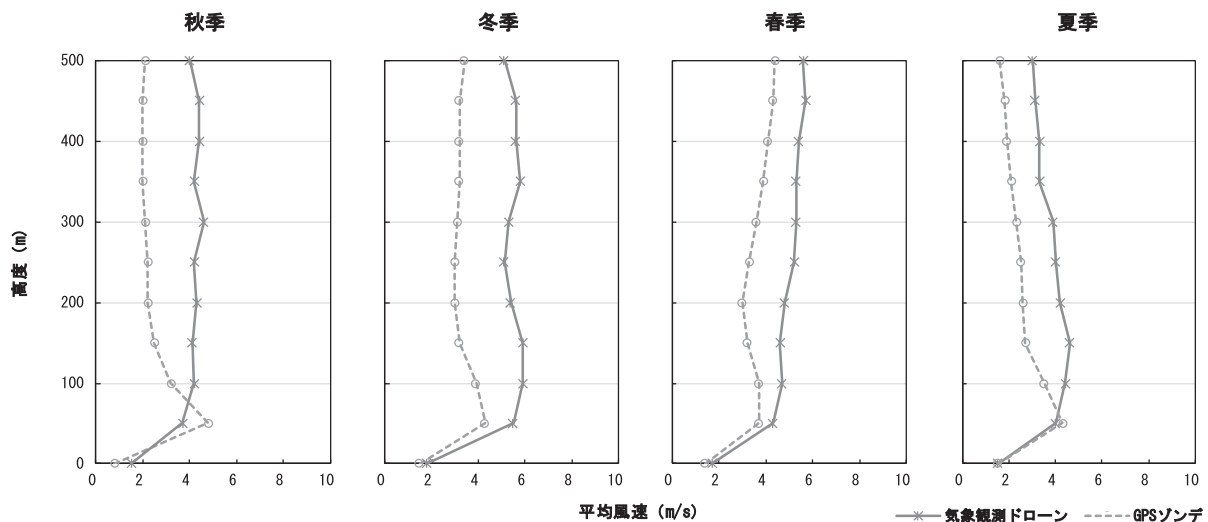


図 6 各高度における各季の平均風速の鉛直分布

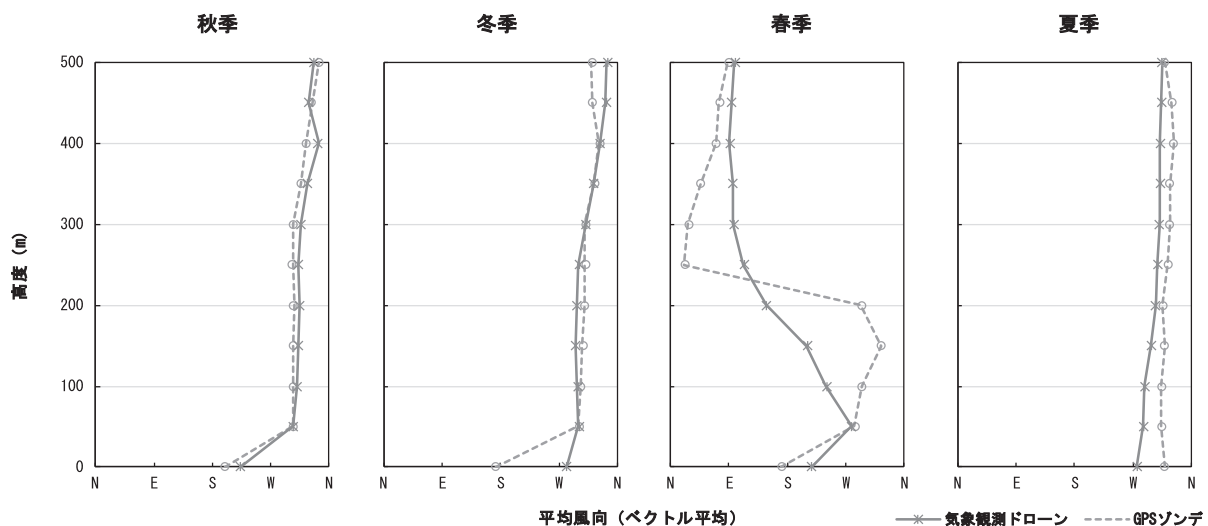


図 8 各高度における各季の平均風向(ベクトル平均)の鉛直分布

表 4 高度 300 m の各季の最多風向と平均風速

季節	気象観測ドローン			GPS ゾンデ		
	最多風向	最多風向の 出現率 (%)	平均風速 (m/s)	最多風向	最多風向の 出現率 (%)	平均風速 (m/s)
秋季	NW	50.0	4.6	NW	25.0	2.1
冬季	NW	33.3	5.3	NW	25.0	3.1
春季	SE	25.0	5.3	WNW	25.0	3.6
夏季	NW	38.9	3.9	NW	27.8	2.3
全季	NW	35.2	4.6	NW	20.4	2.7

3.4 風向相関及び風のベクトル相関

「窒素酸化物総量規制マニュアル [新版]」⁴⁾に基づいた計算式により、風向差を用いた風向相関及び風のベクトル相関を算出した。すべての季節で、風向相関は 0.708~0.827、風のベクトル相関は 0.837~0.920 であり、風向の 2 方位以内の一致率は 62.7~76.4% であった (表 5)。本稿では、気象観測ドローンと GPS ゾンデの風のベクトルの間には、強い相関がみられたが、福池ら (2020) の報告 (0.971~0.981) よりも低い値であり、風向の 2 方位以内の一致率も福池ら (2020) の報告 (91.3~96.2%) よりも低い値であった。

本稿の比較試験を実施した場所は、標高 400 m 程度であり、気象観測ドローンの飛行地点と GPS ゾンデの飛揚地点が河川を挟んで 500 m 以上離れていた。また、周囲は標高 1,000 m 程度の山に囲まれた地点であったことから、周囲の地形の影響により、気象観測ドローンと GPS ゾンデで異なる風が観測された可能性が考えられる。

さらに、本稿の比較試験はすべての回で、ほぼ同時刻に観測を開始したが、気象観測ドローンと GPS ゾンデで上昇速度が異なるため、同時に観測を開始したとしても高度 500 m に到達した際には、少なくとも 2 分以上のずれが生じていた。また、気象観測ドローンは飛行地点の上空へ垂直に上昇して観測が行われたが、GPS ゾンデは常に数 m/s の風に流されながら観測が行われた。鉛直方向や水平方向の観測時間のずれが生じたことから、同一の気層、風況を同時刻に観測できていない回が存在した可能性等も考えられる。

表 5 風向相関と風のベクトル相関

季節	風向相関 ^{※1)}	風のベクトル 相関 ^{※1)}	2 方位以内の 風向一致率 (%)
秋季	0.812	0.916	75.6
冬季	0.708	0.901	65.0
春季	0.827	0.920	76.4
夏季	0.716	0.837	62.7
全季	0.763	0.894	69.1

※1) 「窒素酸化物総量規制マニュアル [新版]」に基づいて算出した。

4. まとめ

本稿では、4 季 (計 54 回) にわたって、気象観測ドローンと GPS ゾンデを用いた上層の気象状況の同時観測を行った。また、得られた気象データの比較を行うことで、気象観測ドローンによる上層気象観測の季節による傾向を確認した。

本稿では、気象観測ドローンで観測された気温の最高値は 34.8℃、最低値は -3.3℃であり、風速の最高値は 12.5 m/s であった。高気温下、低気温下、一時的に 10 m/s を超える強風時であっても異常なく観測を終えることができた。

気温について、すべての季節で、気象観測ドローンは GPS ゾンデよりもやや高い値であったが、両者の間には強い相関がみられた。また、温度の計測方法の改善等により、両者の測定差のばらつきが小さい結果が得られた。逆転層については、GPS ゾンデで観測された 6 回の逆転層のうち、5 回を気象観測ドローンでも同様に観測することができた。本稿では、4 季の比較を行ったところ、季節による違いはみられず、GPS ゾンデと類似

した結果が得られることが示された。よって、気温について、環境アセスメントにおける上層気象観測の調査手法として、気象観測ドローンを活用することは可能であると考ええる。

風速及び風向について、4季の比較を行ったところ、風のベクトル相関は、すべての季節で気象観測ドローンとGPSゾンデの間には強い相関がみられた。風向のベクトル平均は、春季を除いて両方で類似した結果が得られた。しかし、気象観測ドローンとGPSゾンデの風速には約2 m/sの差がみられ、異なる風速または風向の鉛直分布を示した回が確認された。要因として、地形の影響等が考えられ、結果の精査が求められる。

本稿では、風速及び風向は課題が残されたが、気温はすべての季節で、気象観測ドローンとGPSゾンデで類似した結果が得られた。よって、気象観測ドローンは環境アセスメントにおける上層気象観測の調査手法として、GPSゾンデの代替になり得る可能性が示唆された。また、短い観測期間ではあるが、1,000 mを超える高高度飛行や、夜間飛行により気象データを観測した例もいくつか存在する^{2), 3)}。上層気象観測の調査手法に気象観測ドローンを活用し、気象観測ドローンとGPSゾンデ

を使い分けることで、GPSゾンデが持つ課題を低減することができる考える。

今後は、本稿の風速及び風向について、異なる変動を示した回について精査が必要である。また、地形の影響を受けにくい地域において、GPSゾンデと同じ地点で、気象観測ドローンとGPSゾンデによる4季の上層気象観測の比較を行っていきたい。

〈参考文献〉

- 1) 一般社団法人日本環境アセスメント協会，環境アセスメント技術ガイド 大気環境・水環境・土壤環境・環境負荷，2017.
- 2) 福池ら，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，環境と測定技術，Vol. 47, No. 4, 18-24, 2020.
- 3) 岸田ら，気象観測 UAV，ラジオゾンデによる高層気象の同時観測，日本風工学会年次研究発表会・梗概集，85-86, 2022.
- 4) 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]，2000.

■執筆者

坂間将純

ムラタ計測器サービス株式会社 環境部

〒245-0052 神奈川県横浜市戸塚区秋葉町 15 番

TEL：045-812-6411

E-mail：sakama1214@murata-s.co.jp