

1A09 空飛ぶクルマ離着陸場向け低層風情報提供システム (SOLWIN) の開発

○伊藤芳樹、平井重雄、林孝明、宮崎真（ソニック）、
飯島朋子、跡部隆（JAXA）

Development of SODar-based Low-level Wind INformation (SOLWIN) for eVTOL Vertiport

Key Words: Low-level Wind Information, Wind Shear, Doppler Sodar

Abstract

Small flying objects such as eVTOL fly at low altitudes and at low speeds are much affected by atmospheric turbulence. For flight safety, the authors developed a small prototype of the low-level wind information system named SOLWIN, which is currently in use at local airports, and evaluated its performance in the field test. Comparing wind measurements with a meteorological observation tower, and with feedback evaluations by drone operators we have got hope for practical application, and report in this paper.

1. はじめに

日本の山間部や島嶼部にある地方空港は、滑走路周辺が複雑地形であることが多く、国内 97 ヶ所の空港の内、約 50%にあたる空港において風問題があることが指摘されている¹⁾。

今後事業化が期待される空飛ぶクルマは、小型飛翔体で低空を低速で飛行するために既存の航空機より気流変化の影響を受けやすい。離着陸場上空の気流乱れを検知し運航の安全を確保するために、空港で運用されている低層風情報提供システム SOLWIN を小型化して空飛ぶクルマ離着陸場向けの SOLWIN を開発し、野外実証試験で性能評価を行った。

本稿では気象観測塔との測風値の比較およびドローンサイトにおける操縦者へのリアルタイムの低層風情報提供とその評価フィードバックにより実用化の目途を得たので報告する。

2. 低層風情報提供システム SOLWIN

(1) 空港用 SOLWIN

空港用 SOLWIN は 2016 年に開発され、大分空港での試験運用での評価に基づいて、2019 年より鳥取空港で本運用が開始され、庄内空港では試験運用が継続的に行われている。開発の経緯やこれらの空港での運用評価の結果については文献 2) 3) に報告されている。冬季の季節風が空港周辺の複雑地形で変性されて発生するウィンドシアや乱気流に関する低層風情報を提供することで、着陸操縦の支援に役立つことが認識され、90%以上のパイロットからその有用性を支持されている。

(2) 風観測の方法とシステムの概要

SOLWIN (SODar-based Low-level Wind INformation)

はドップラー音波レーダ (Doppler Sodar) を測風センサとして地上高 70ft から上空 300ft までの低層の気流を 3 次元成分 (正対風、横風、上下流) およびガスト (突風/乱れ強さ) として測定監視できる。

空飛ぶクルマ用の小型 SOLWIN は送受信器 1 台と受信器 2 台が必要な空港用バイスタティック型からフェーズドアレイ型に変更して送受信器 1 台とし、更に高周波化して小型化を実現した。図 1 は小型 SOLWIN のセンサ外観写真である。4 kHz 近傍の周波数に感度のピークを持つ PZT スピーカ (ツイーター) を使用して、12×12 行列配置の高周波アレイを組んでいる。電氣的に位相合成して上空 5 方向に送受信できるため、写真の送受信器 1 台で構成できる。

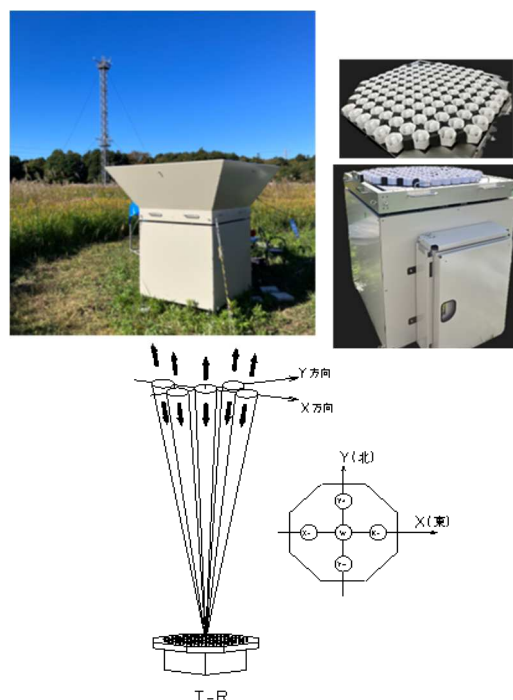


図 1 小型 SOLWIN のセンサ外観写真(上)、ビーム形成図(下)

表 1 SOLWIN の特徴比較（空港用 vs Vertiport 用）

	SOLWIN (空港用)	小型SOLWIN (Vertiport/ヘリポート)
特徴		
1 測定方式	進入滑走路直上上の分布 (バイスタ方式)	設置点上空の空間平均 (モスタ方式)
2 長所の1	乱流計測能力に優れる	設置場所をとらない (アンテナ1台)
3 長所の2	測得率が高い	低価格 (SOLWINの1/2程度)
4 出力仕様	メイン情報画面、ヒストリー、気象庁高解像度降水ナウキャスト	メイン情報画面、ヒストリー画面、(気象庁高解像度降水ナウキャスト)
仕様詳細		
1 測定繰り返し	3秒	6秒
2 平均化時間	2分	5分
3 データ更新	1分	1分
4 測定精度	風向: 5deg 風速: 0.2m/s (鉛直: 5%/水平)	風向: 5deg 風速: 0.2m/s (鉛直: 5%/水平)
5 測定対象高度	300フィート (～MAX600フィート)	250フィート (～MAX500フィート)
6 出力要素	風向・風速・上下流・ガスト	風向・風速・上下流・ガスト

空港用 SOLWIN は 3 台のアンテナを数十メートル離して設置するバイスタ方式のため、狭い Vertiport には使えない。1 点に設置可能で、かつ位相合成技術でアンテナを 1 台にして低コスト化が可能なフェーズドアレイ方式を採用した。表 1 に比較表を示す。

（3）低層風情報の提供

図 2 にシステム系統図を示す。サーバーに 1 分毎にほぼ実時間で格納された風の情報は図 3 のように各高度の測定値のデジタル表示（風向風速、正対風、横風、ガスト）とグラフィック表示の正対風、横風の鉛直分布でインターネット上のブラウザで閲覧できる。1 分毎の 5 分間の履歴および過去 1～12 時間の風向風速、上下流の変化傾向も表示できる。特別なソフトウェアは不要である。

測定点を中心とした半径 5nm(約 10km)の範囲の気象庁高解像度降水ナウキャスト画像も用意しており、低層風と重ね合わせて気象情報を読み取れる。

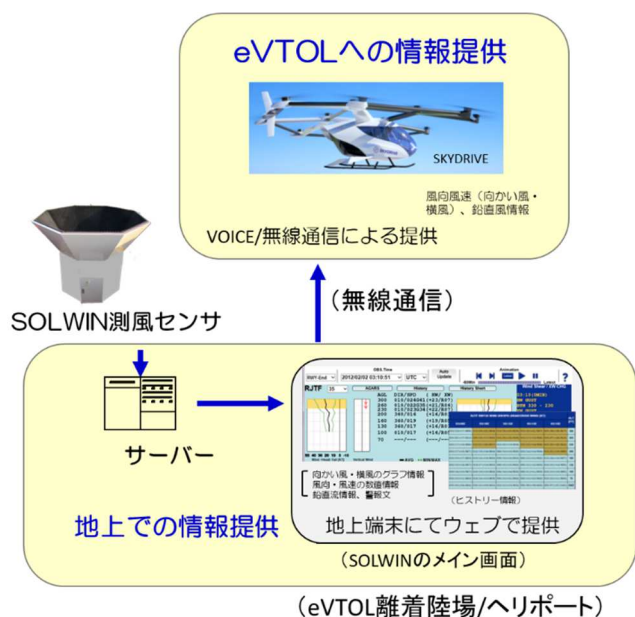


図 2 小型 SOLWIN システム系統図

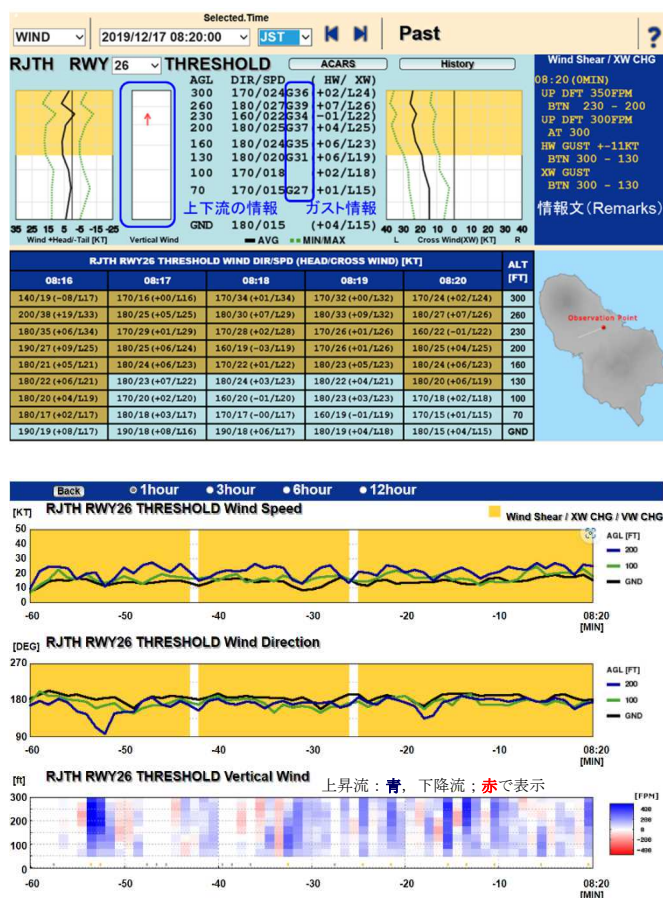


図 3 SOLWIN のメイン画面(上)、履歴画面(下)

メイン画面では詳細なデータや傾向を把握するための数値と表、風の分布が直感的にわかるグラフ、閾値を超える風速シアを注意喚起する情報文出力（該当部分はアンバー色で表示）がある。履歴画面では風速、風向、上下流の過去 1～12 時間切り替えでの変化グラフが、強い風速シアやガスト検出の時間帯のアンバーの背景色とともに表示される。

3. 測風性能の評価

図 4 は筑波大学放射線アイソトープ地球システム研究センターの気象観測露場の高さ 30m 気象観測塔の基準風速計と今回開発した小型 SOLWIN の風向風速の比較である。図 4(a)は 5 分平均の風速風向の時間変化図、図 4(b)は 2024 年 3 月 1 日～3 月 31 日までの 1 か月分を相関散布図にプロットしたものである。相関散布図は約 4000 個のデータを描画しているので、ばらついて見えるように見えるが実際は中央部に集中している。相関係数 0.95 以上で空港用 SOLWIN と同程度の一致度が得られている。

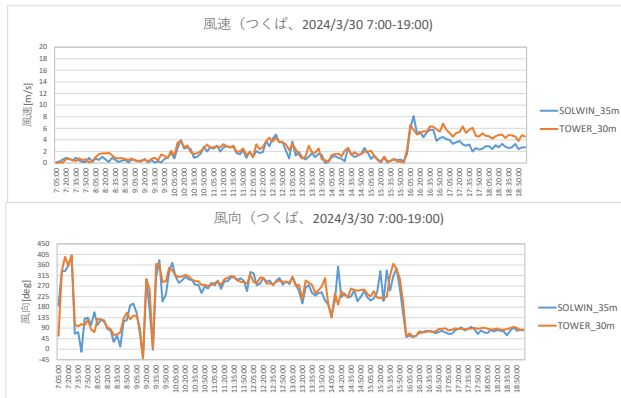


図4(a) 風速(上)、風向(下)の気象鉄塔との時間変化比較

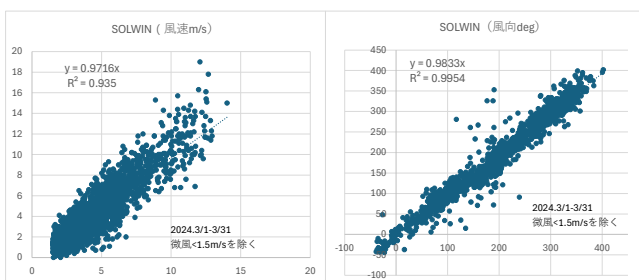


図4(b) 風速(左)、風向(右)の気象鉄塔との相関散布図比較

4. フィールド実証試験

(1) フィールド試験

ドローン操縦への低層風情報提供の有効性の評価のために御殿場ASITE 空間情報技術試験フィールドでの飛行試験を行った(図5)。



図5 ドローンサイト航空写真⁵⁾

(2) 観測データ例

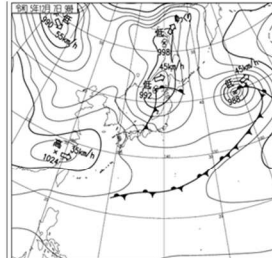
図6は本飛行試験を行った時のデータ例である。期間は2023年12月5日～8日であり、(図6上中)に示すように7日には寒冷前線が通過して強風となった。(図6上右)は8:34～8:45のドローンフライト時の機体の姿勢センサの鉛直速度の時間変化である。(図6下)に示すように今回のSOLWIN実況では8:37, 8:40に高度100FT付近に強い下降流の情報が発出があった。ドローンの鉛直速度にはそれに対応したと思われる急な下降速度が高度30mのフライトで検出されている。今回のドローン実験においては、強い平均風だけでなく気流の乱れや上下流の変化、自重での着陸時の上下流の状態を把握することが軽量機体の操縦には有効であると判断された。

御殿場ドローンサイトでの飛行評価試験

- ・目的 ドローン操縦への低層風情報の有効性の評価
- ・場所 御殿場ASITE 空間情報技術試験サイト
- ・期間 2023年12月5～8日



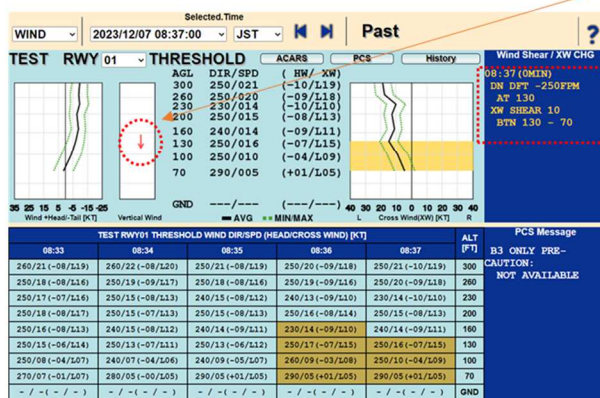
SOLWIN-miniの後方に笠雲が掛かった富士山



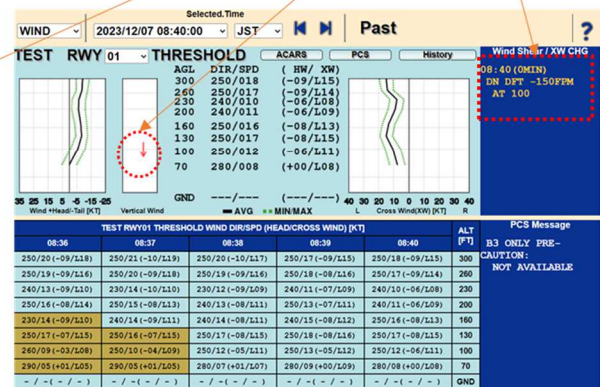
12/7 寒冷前線通過に伴い南西の強風が出現



SOLWINが示す強い下降流域でドローンが急に下降した



SOLWINメイン画面(12/7 8:37) 前5分平均値



SOLWINメイン画面(12/7 8:40) 前5分平均値

図6 御殿場ドローンサイトでの飛行評価試験 (2023年12月7日)

(3) ドローン操縦者アンケート

表2は今回の小型 SOLWIN を利用したドローン操縦者のアンケート結果である。12月7日以外は風が弱くて役立ち度は低いが、強風が吹いた12月7日については、上下流情報があることでドローンの挙動が把握しやすく操縦に役立った。また地表付近で風が舞っていても上空はシアがなく安心して操縦ができた（シア判断に有効である）との評価を得た。

空港用の情報提供を行ったため改善策として、ドローンや eVTOL は進入方向が決まっていないので、空港と異なる表示対応（任意の RWY 方向設定）が必要であること、また表示単位が空港用と違う（高度は feet でなく m、風速は knot でなく m/s）との指摘もあった。SOLWIN が与える直上の風情報だけでなく、水平スキャンのドップラーライダーやCFDとの連携やなど上空の横方向に広がった広域のデータの要望も示唆された。

(4) CFD 解析による地形影響の評価

ドローン操縦者アンケートにもあるように、測定点直上の風分布測定値を与える SOLWIN に対して、上空の水平方向空間の風情報も必要とされている。本実証試験では、気流分布を予め $k-\epsilon$ モデルで計算し、実験日の風向に合わせて図7のような水平および鉛直断面の可視化データとして事前情報とした。

12月7日当日の南西風の場合、南側は崖の吹き上げによる上昇流、その風下では高度 50m 以下（特に図7の高度 35m 付近）で地形影響により強い乱れが存在していることが予測された。実際ドローンの操縦者は高度 30m の水平飛行では機体の揺れを大きく感じており、気流を再現できていたと考えられる。低層の気流の予測は難しいので、Vertiport 周辺の地形や高層建物の影響を予め CFD 解析でデータベース化しておいて実測と補完利用することは有用である。 $k-\epsilon$ モデルの解析条件は表3のとおりである。

表2 ドローン操縦者のアンケート結果

日付	時間	風向 (50m)	風速 (50m)	風変化	役立ち度	役立ち理由	役立ち情報	コメント	対応策
2023/12/6	14:40-15:00	SSW	3.1	弱	×	(弱風のため)	-	-	-
2023/12/6	15:00-15:20	S	2.6	弱	×	(弱風のため)	-	-	-
2023/12/7	9:15-9:40	SW	12.4	強	○	鉛直風を考慮した操作。鉛直風が分かるため、ドローンの挙動が何に起因するものが把握しやすかった。 鉛直風が有効	鉛直風 風向風速分布 ヒストリー	・風速の単位が m/s 表記、高度の単位が m 表記だと分かりやすい。 ・計測範囲が真上だけではなく横にも広がっているとよい。	・ドローン用には風速 knot $\Rightarrow$ m/s、高度 feet $\Rightarrow$ m 表記に変更する ・CFD または他のリモセンとの併用を検討する
2023/12/7	15:10-15:30	SW	5.0	中	○	地上で強い風を感じる事があったが、SOLWIN の方でシア表示がなかったため、安心して運航できた。	-	・CFD 結果と併用して運用できると幅が広がるように感じた。	・CFD との連携は当初からの構想にあり、実施方法について情報提供を取り纏めて配信する気象コンサルと検討中
2023/12/8	10:00-11:30	SSW	1.5	弱	×	(弱風のため)	-	-	広域データとの連携 (CFD or 他リモセン)

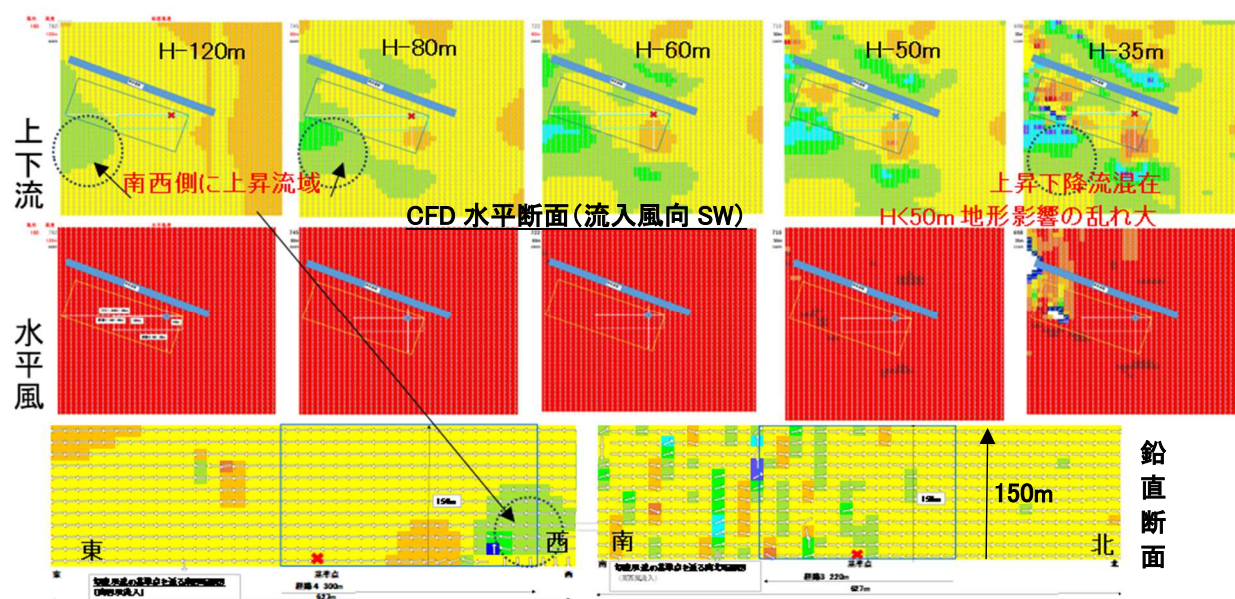


図7 上下流と水平風の CFD 解析～水平断面図および鉛直断面図（流入風向 SW）

表3 k- ε モデルCFD解析の計算条件

計算モデル	k-ε
解析空間	X 5019.5m × Y 5019.5m × Z 1400m
水平分解能	15.68m
高度分解能	11.79m
流入風速	5m/s, 10m/s
流入風速分布	指数関数
計算要素	U, V, W, KE (風速 3 成分、乱流エネルギー強度)

(5) 強風時の SOLWIN の実測風

図8に強風が観測された12月7日午前7時～午前10時20分の間のSOLWIN風の時間-高度断面を色分け表示した。高度20m～130mの水平風、上下流、上下流の乱れ強さである。上空風がドローンの設計風速15m/sを超えて実験を中断した午前10時頃の時間帯には低空まで強風が下りてきて、上下方向の風速シアが大きくなっていることがわかる。

表4 高度30mの風速シアと乱れ強さの比較

	U shear at 30m	U at 30m	σ_w at 30m	ドローン飛行
0840JST	4.9m/s / ±10m	6.2m/s	0.7m/s	○
1000JST	8.3m/s / ±10m	6.7m/s	1.1m/s	×

表4に示すとおり、ドローンが飛行できた8:40と飛行できなくなった10:00のSOLWIN風を比べると、高度30mの風速は6.2m/sと6.7m/sでそれほどの差はないが、上下高度±10mの風速差が各々4.9m/sと8.3m/s、乱れ強さが0.7m/sと1.1m/sと大きく異なる。空港用としても午前10時には注意喚起情報を発信するほどの強いシアとなっている。小型飛翔体ではこのあたりの注意喚起発令のシア閾値をどうするか、今後実践しながら調査を続ける必要がある。

図 8 (中央) は高度 90m、60m、30m のドローンの鉛直速度であるが、その変動の大きさ(標準偏差)は $0.11, <0.13 < 0.20 \text{ m/s}$ で下層ほど揺れが大きく、SOLWIN 実測および CFD 解析と対応していることがわかる。

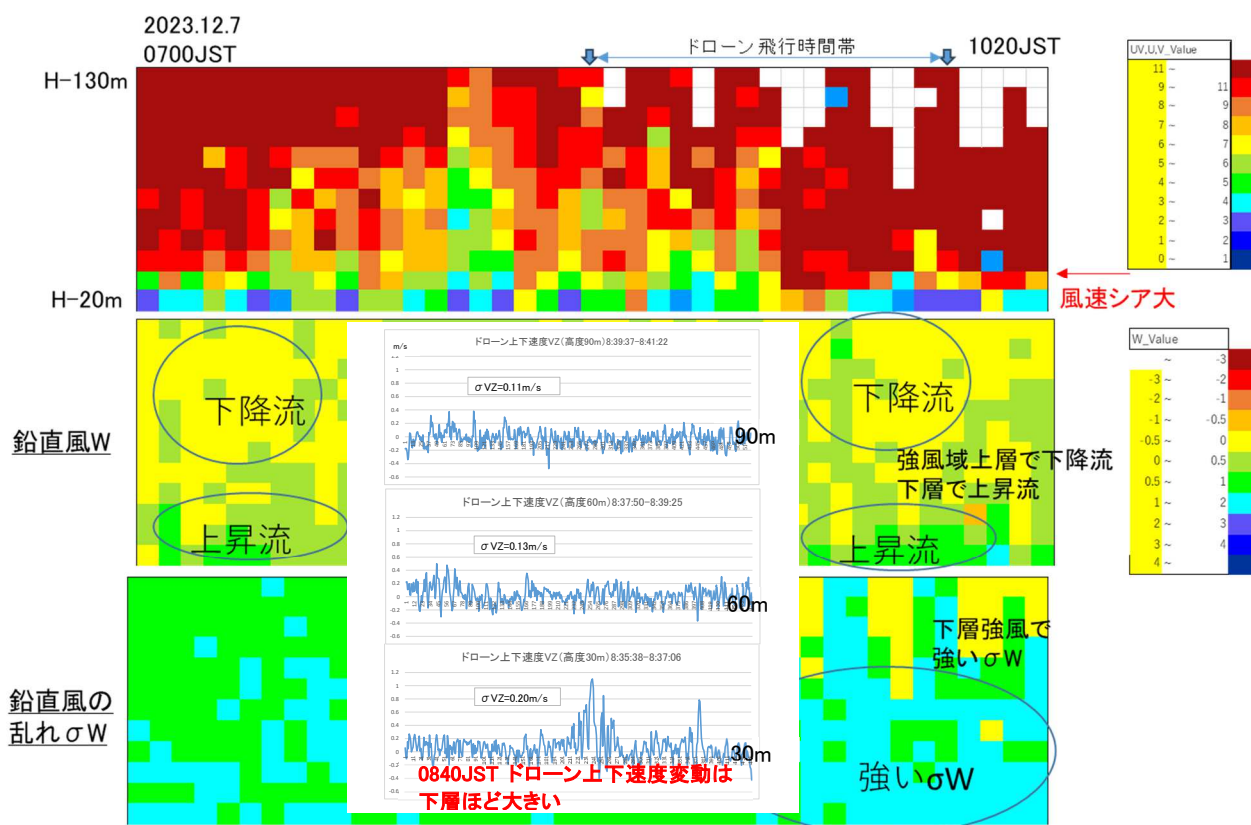


図8 強風時の SOLWIN 風とドローン鉛直速度(中央部) (12/7 07:00~10:20)

5. eVTOL 離着陸場向けの気象情報提供システム

本稿では Vertiport 用の小型 SOLWIN の実証試験の結果を紹介した。離着陸場周辺の地形や建物の影響を受けた複雑な気流乱れの予測は難しく、実測するしかないのが実情である。一方で広域の気象予測情報はすでに天気予報が高精度になっており、気象会

社が提供する広域の気象データ、気象予測と合わせた気象情報として運航関係者にリアルタイムで情報提供することは、余剰推力が小さく離着陸時の気流乱れに影響を受けやすい eVTOL にとっては重要である。図 9 に今後の課題である両者を組み合わせた気象統合情報提供システムの概念図を示す。

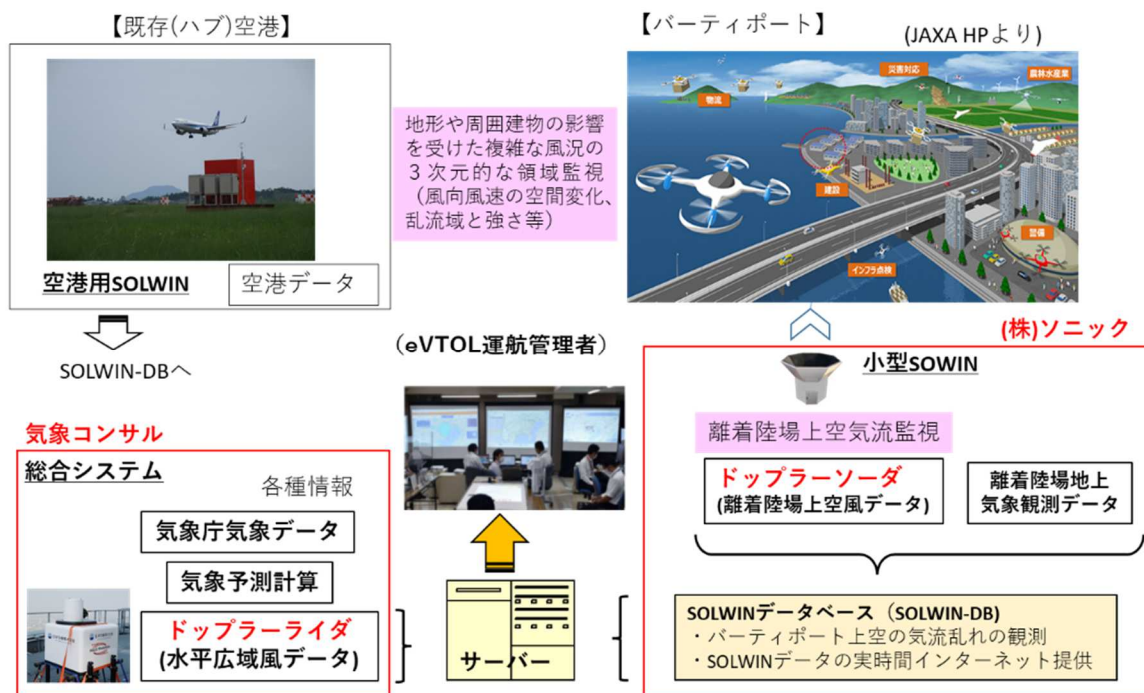


図 9 eVTOL 離着陸場向け気象情報提供システム

6. まとめ

今後事業展開が期待される空飛ぶクルマは、都市間輸送だけでなく、過疎地の公共輸送の補完や災害時の輸送手段として有用である。風問題が予想される山間地域を多く抱える自治体が空飛ぶクルマを運用する場合には、一般的な広域の気象情報や気象予測と組み合わせて、離着陸場付近の領域空間の風情報を提供することが重要である。本稿で紹介した低層風情報提供システム SOLWIN を利用する場合には、以下のような点が検討すべき課題と考えられる。

(1) パーティポート運営事業者との協力

SOLWIN の設置・運営・維持、ビジネスとしての成立性の確立

(2) 気象統合情報としてのサービスの提供

離着陸点周辺および上空の SOLWIN 風情報と気象会社が提供する広域の気象情報の統合

(3) 地域の自治体、事業者との連携インフラ整備

都市間輸送、過疎地の公共輸送、災害時の輸送を担う自治体や事業者との連携とインフラ整備

謝辞

今回開発した SOLWIN の測風性能の評価は筑波大学放射線・アイソトープ地球システム研究センターの一般共同研究にて実施された。CFD 解析は静岡理工科大学名誉教授櫻木俊一氏に実施して頂いた。ドローンの操縦及びアンケートへの協力は武蔵スカイプラス(株)にお世話になり、改めて感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 空港ターミナルエリア内で発生する悪天候の航空機運航への影響調査報告書、財団法人 航空保安研究センター, 平成 21 年 (2009 年) 10 月
- 2) 又吉直樹、飯島朋子、伊藤芳樹: 低層風情報提供システム SOLWIN の開発、第 56 回飛行機シンポジウム講演予稿集、講演番号 2D08、2018
- 3) 強風災害の変遷と教訓 第 3 版(2022) 一般社団法人 日本風工学会 風災害研究会、244-249
- 4) 筑波大学 熱と水収支測定システム <http://doi.org/10.24575/0001.198108>
- 5) 先端空間情報技術評価支援センター (ASITE) HP <https://asite.or.jp/>