

低層風情報を利用した 航空機運航の効率性・安全性の向上について

又吉 直樹¹, 飯島 朋子²

¹ 非会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 主幹研究開発員 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1)
E-mail: matayoshi.naoki@jaxa.jp

² 非会員 宇宙航空研究開発機構 航空技術部門 主任研究開発員 (〒181-0015 東京都三鷹市大沢 6-13-1)
E-mail: ijijima.tomoko@jaxa.jp

航空機の運航は風の影響を強く受ける。特に離着陸においては、乱気流によって安全性が脅かされると共に、航空機自身が起こす後方乱気流のために離着陸間隔を長くする必要があり、運航の効率性を落としている。これに対応するため、空港周辺の低層風を観測・予測し、パイロットへの周知や航空機間隔を動的に調整することにより、風の影響を低減する運用が進みつつある。本稿では、低層風の情報を航空機に提供する低層風情報提供システムの国内での開発・運用状況を紹介すると共に、低層風の情報を利用して離着陸間隔を動的に短縮する運用について、国内外の開発・運用状況を紹介する。

Key Words: Aircraft operation, Reduced separation, Wake vortex, Windshear, Turbulence

1. はじめに

大気中を飛行する航空機の運航は、風の影響を強く受ける。特に、風の変化が激しい地表面付近を飛行し、かつ飛行速度が遅い離着陸フェーズではその影響が顕著である。離着陸経路上で発生する風擾乱は、航空機事故や着陸復行（着陸のやり直し）等の原因となり、航空機運航の安全性や効率性に影響する。表-1 に示すように、風擾乱が関係していると考えられる大型機の着陸時の事故は数年毎に断続的に発生している。また成田空港で発生する着陸復行の 90%以上は、ウィンドシア（風向や風速の急激な変化）、乱気流、強風・横風などの低層風の擾乱が原因とされている¹⁾ (図-1)。さらに、航空機自身が起こす後方乱気流（翼の後方に発生する一対の強い渦流、図-2）は、離着陸間隔を長くする一因となっており、航空機運航の効率性を落としている。

一方、空港には上空の風を観測可能なリモートセンサ（レーダやライダー（レーザレーダ））が配備されつつあり、離着陸経路上の風を常時観測することが可能になっている。この観測した風情報を航空機に提供したり、離着陸の管制に活用することにより、航空機運航の効率性や安全性を向上させることができる。宇宙航空研究開発機構（JAXA）では、低層風の情報をパイロットに伝える低層風情報提供システムの開発や、低層風情報を用いて後方乱気流の残留時間を予測し離着陸間隔を動的に短縮する技術の開発を進めており、その一部は実運用に供

されて航空機運航の効率性や安全性の向上に寄与している。本稿では、海外の動向も含めて JAXA の取り組みを紹介する。

表-1 風が関係していると考えられる大型機の着陸時の事故例
(1990年以降)

発生年	場所	機種	状況
2014	長崎空港	DHC-8	強い横風下でタッチアンドゴー訓練中、接地時に機体が中破。死傷者なし。
2012	成田空港	B767-300	強い突風を伴う横風の状況下でハードランディングし、機体が中破。軽傷者 4 名。
2009	成田空港	MD-11F	風向風速の変化や気流の乱れが間接的な要因となり、着陸の際にバウンドを繰り返した後、横転して炎上。死者 2 名。
2002	函館空港	A321	ウィンドシアにより胴体後部が接触し、機体が中破。軽傷者 3 名。
1994	鹿児島空港	A320	風が変動する状況下でピッチが安定しないまま接地し、滑走路に尾部を接触させ機体が中破。死傷者なし。
1993	花巻空港	DC-9	ウィンドシアによりハードランディングし、機体が中破して炎上。重傷者 3 名。
1990	成田空港	L1011	風向・風速が大きく変動する横風の状況下でハードランディングし、機体が中破。重傷者 2 名。

出典：運輸安全委員会ホームページ
(<http://www.mlit.go.jp/jtsb/index.html>)

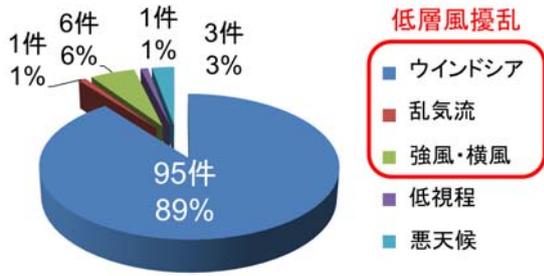


図-1 成田空港での着陸復行の原因 (2008年、文献1)



図-2 煙で可視化された後方乱気流 (出典：NASA)

表-2 低層ウインドシア情報の種類と発表基準

種類	発表基準
WSA : Windshear Alert	局地的に 20kt 以上の向かい風成分の増加または減少が観測されたとき
MBA : Microburst Alert	局地的に 30kt 以上の向かい風成分の減少が観測されたとき

2. 低層風情報提供システムの開発

(1) 背景

我が国では離着陸経路上で風擾乱が発生しやすい空港が数多く存在し、航空機事故や着陸復行等の原因となっている。その対策として、風観測リモートセンサ（空港気象ドップラーレーダ、ライダ）が整備された一部の空港においては、航空機事故に直結しうる顕著なウインドシアやマイクロバースト（積乱雲からの強い下降気流が地表付近で放射状に広がりウインドシアを起こす現象）に関する情報が低層ウインドシア情報として気象庁から提供され、管制官を通じてパイロットに伝えられており、事故防止に寄与している²⁾。しかし、低層ウインドシア情報の発表基準（表-2）に達しない風変化でも飛行に悪影響を与え、着陸復行に至るケースは少なくない。そこで JAXA では、風情報をパイロットに常時提供することにより、悪天時の安全性向上だけでなく、非悪天時の日常運航の効率向上にも貢献することを目指し、空港設置の風観測リモートセンサで観測した着陸経路上の風情報を旅客機に装備されたデータリンクを用いてパイロットに提供する低層風情報提供システムを開発した³⁾。

(2) 空港低層風情報 ALWIN

空港低層風情報 ALWIN (Airport Low-level Wind Information) は、航空機の着陸経路上における風の情報（風向・風速、ウインドシアや乱気流など）をリアルタイム

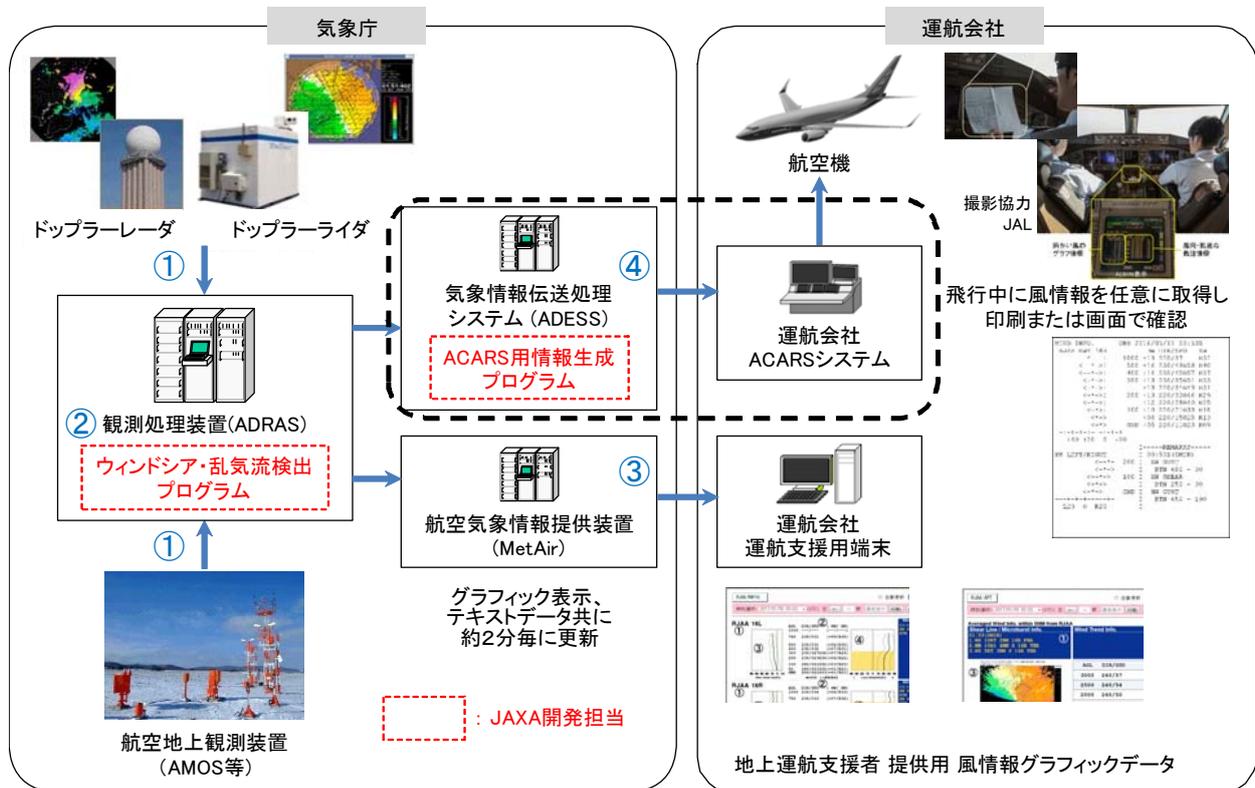


図-3 ALWIN の情報提供の流れ

で提供するサービスである。JAXA と気象庁が共同で開発し、2017年4月より羽田・成田の両空港で実運用されている。着陸経路上の風情報を飛行中の航空機にリアルタイムで提供するサービスの実運用は海外でも例がなく、世界初の事例と考えられる。

ALWIN の情報提供の流れを図-3 に示す。①気象庁の空港気象ドップラーレーダおよび同ライダーなどの観測データから、②着陸経路上のウィンドシアなどを自動的に検出し、③画像形式で気象庁の航空気象情報提供システム (MetAir) 上に配信するとともに、④大半の旅客機が有する ACARS データリンクで送信可能なテキスト形式で航空会社に配信する。パイロットは、所属する各運航会社の ACARS データリンクを用いて ALWIN の風情報を飛行中に参照可能である (図-4)。



図4 飛行中にALWINを参照している様子 (JAL 提供)

WIND INFO.		OBS 2017/04/19 06:47Z			
RJAA RWY 34L			HW	DIR/SPD	XW
* I	1000	+27	320/27	L06	
* I	500	+22	320/23	L07	
* I	400	+20	320/21	L07	
* I	300	+19	310/21	L11	
* I		+17	300/21	L12	
* I	200	+16	300/19	L11	
<-*->I		+14	300/17G27	L09	
<-*->I	100	+12	310/14G25	L07	
<-*->		+09	310/10G24	L04	
<-*->	GND	+08	320/09G23	L03	
+-----+					
	+40	+20	0	-20	
I-----REMARKS-----					
XW LEFT/RIGHT		I	06:47Z (0MIN)		
*	200	I	HW GUST		
<-*->		I	BTN 140 - 30		
<-*->	100	I			
<-*->		I			
<-*->	GND	I			
+-----+					
L20	0	R20			

図5 ALWINの着陸経路上の風情報 (FNL テキスト)

ALWIN が提供する風情報は、滑走路毎の着陸経路上の風情報 (FNL テキスト) と空港代表風の情報 (APT テキスト) の2種類がある。情報の更新間隔は、両情報共に約2分半である。FNL テキストは、各滑走路の着陸経路上の高度 1,000ft 以下における正対風、横風の高度分布がグラフ化されていると共に、飛行に悪影響を与えうるウィンドシアやガスト (突風) の発生高度帯の情報を REMARKS として提供する (図-5)。風分布がグラフ化されていることで、風の変化を短時間で直感的に理解することができる。また、ウィンドシアやガストの発生高度帯を自動で抽出することにより、飛行に影響する風変化の見落としを防いでいる。一方、APT テキストは、空港周辺約 5NM 以内の高度 3000ft 以下の平均風の風向/風速を数値で提供している。

(3) ALWIN の利用状況

ALWIN を利用したパイロットへのアンケート調査で得られた代表的なパイロットコメント (表-3) に基づき、ALWIN の代表的な利用例を紹介する。

a) 着陸経路上の風の状況把握

着陸経路上の風の状況や対応操作を具体的にイメージし、機長・副操縦士間で共有するツールとして利用されている (コメント①~④)。また、情報を複数回取得することにより、ALWIN が提供していない風の時間変化の傾向まで把握しているケースもある (コメント④)。

b) 着陸空港、滑走路の選択

複数の滑走路の情報を比較することで、着陸滑走路の選択の参考としている (コメント⑤~⑦)。また、強風時に羽田空港と成田空港の情報を比較し、代替飛行場の選定の参考にした事例もあった。

表-3 ALWIN に対する主なパイロットコメント

利用状況	主なコメント
着陸経路上の風の状況把握	① 事前のイメージ作りに非常に有効 ② 着陸経路の風の状況を具体的にイメージし、両パイロット間で共有するツールとして役に立った ③ フレア (着陸間際の引き起こし操作) までのクロスコントロール (横方向の操縦) のイメージが作りやすかった ④ 数回取得することで時間変化の傾向分かった。何 ft 以下で注意すべきか予測もできた
着陸空港、滑走路の選択	⑤ 複数滑走路の風の情報を取得し、滑走路間で風が全く異なっていたので、シアーラインを予想できた ⑥ VERY ROUGH AIR (100ft 以下) のパイロット報告があったが、時系列に傾向を見ることができ、滑走路選択の判断材料として使った ⑦ 乱気流 (格納庫の後流) が発生している滑走路への着陸を回避する決定の一助となった

以上のように、ALWIN は着陸経路上の風の状況を伝えることにより、パイロットが対応操作を事前に計画できて安全運航に寄与しているだけでなく、着陸空港や滑走路の選択における判断材料ともなっており、運航の効率性の向上にも寄与している。

3. 低層風情報を利用した離着陸間隔の短縮

(1) 背景

航空交通量の増大に対応するためには、交通流が集中する混雑空港の離着陸回数を増やす必要があり、このためには離着陸間隔の短縮が有効である。離着陸間隔を長くしている要因の一つが、後方乱気流管制間隔と呼ばれる間隔である。これは、後方乱気流に後続機が遭遇することを避けるために設けられた間隔であり、先行機と後続機の重量に応じて設定されている(表4)。後方乱気流管制間隔が適用されない場合の離着陸間隔 3NM (1NM=1852m) に比べて、後方乱気流管制間隔 4~6NM は長い間隔のため、同間隔を短縮することが離着陸間隔の短縮に直結する。

このため気象情報(特に風)を用いて後方乱気流管制間隔を短縮する運航方式の研究開発が世界各国で行われている。国内では、JAXA が後方乱気流の残留時間が気象条件により変化する事に着目し、気象条件に応じた動的な後方乱気流管制間隔の研究を進めている⁴⁾。

表4 後方乱気流管制間隔(レーダ管制時)

先行機	後続機		
	ヘビー	ミディアム	ライト
ヘビー	4NM	5NM	6NM
ミディアム	なし	なし	5NM
ライト	なし	なし	なし

ヘビー: 重量 136 トン以上, ミディアム: 重量 7~136 トン, ライト: 重量 7トン未満

(2) 横風を用いた離着陸間隔の短縮

米国では、近接平行滑走路(滑走路間隔が 2500ft 以下の平行滑走路)を持つ混雑空港が多いため、近接平行滑走路の離発着で課される後方乱気流管制間隔(従来基準では単一滑走路と同じ制約が課される)を短縮する動きが進んでいる。低層風情報を用いる方式としては、横風が一定の強さ以上になると近接平行滑走路の離着陸間隔を短縮する WTMD (Wake Turbulence Mitigation for Departure, 図-6) と呼ばれる運用を行っている⁵⁾。すなわち、横風が強い場合は、風上側の滑走路運用において、風下側の離着陸機との後方乱気流管制間隔を設定しない運用を行い、滑走路処理容量を増やしている。一方、単一滑走路

における横風時の離着陸間隔の短縮は、欧州で検討されたが⁶⁾、まだ規格化/実運用には至っていない。

(3) 向かい風を用いた離着陸間隔の短縮(時間ベースの管制間隔の導入)

レーダ監視下における現在の管制間隔は、距離ベースで定められているが、向かい風が強いと時間間隔が広がってしまう(図-7)。従って、着陸時の管制間隔を時間ベースで行う TBS (Time Based Separation) の導入が主に欧州で進んでいる⁷⁾。即ち、向かい風が強い場合に、距離ベースの航空機間隔を減じる運用である。一般に、後方乱気流は生成からの経過時間に応じて減衰していくので⁸⁾、後方乱気流管制間隔の観点からも時間ベースの管制間隔が適している。TBS は英ヒースロー空港で 2016 年から実運用が行われており、運用に必要な向かい風の情報として、高解像度気象予測モデルに基づく予測風や航空機が観測した風のダウンリンクデータが使われている。

Wake Turbulence Mitigation for Departures (WTMD)

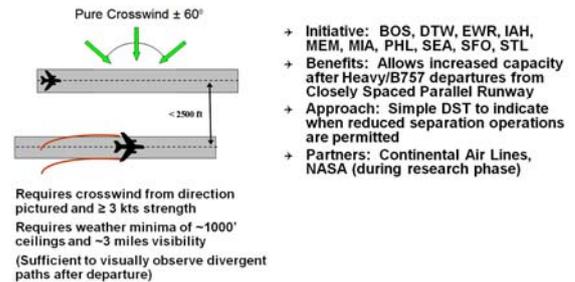


図-6 WTMDの運用コンセプト(文献5)

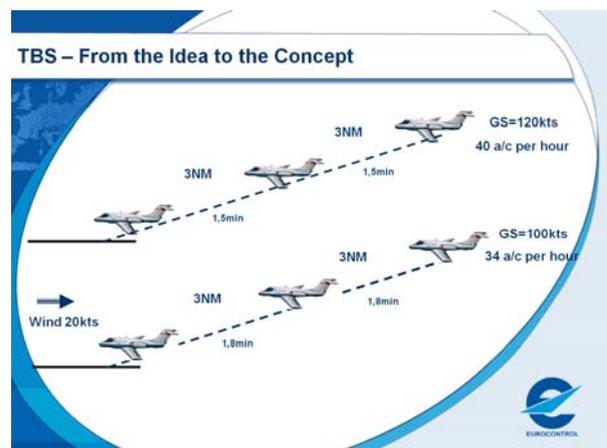


図-7 距離ベースの管制間隔の問題点

(向かい風が強い場合は図中の下の例のように時間間隔が広がってしまう, 文献7)

(4) 動的な後方乱気流管制間隔の設定による離着陸間隔の短縮

JAXA では、低層風を含む空港周辺の気象情報を用いて後方乱気流が着陸経路上に残留する時間をリアルタイムに予測する後方乱気流予測モデルの開発を進めている。後方乱気流は、気象条件によってその残留時間が大きく変化するが、気象条件によらず一定の後方乱気流管制間隔を適用する現行方式(表4)では、後方乱気流が最も長く存続しうる最悪条件を基準に間隔設定がなされている。このため、気象条件に応じて後方乱気流の残留時間を予測し、それに基づいて動的に後方乱気流管制間隔を設定することによって、大半の気象条件下では後方乱気流管制間隔を短縮することができる。

JAXA は、後方乱気流予測に基づく動的な後方乱気流管制間隔の安全性、および導入時の短縮効果を評価するため、成田空港で後方乱気流の計測を行った⁴⁾。成田空港 B 滑走路近傍にライダーを設置し、2013 年 10 月～2014 年 8 月の期間中の計 140 日間で 4189 機の離着陸機の後方乱気流を計測した(図-8,9)。この内着陸機 3320 機を対象に、後方乱気流予測モデルを用いて動的な航空機間隔を算出し、当該間隔における後方乱気流の有無を確認した。その結果、3320 機中 1624 機(49%)において間隔短縮が可能と算出され、短縮した間隔における後方乱気流の残留は確認されなかった。この結果は、動的間隔の安全性を実証すると共に、動的間隔の導入による間隔短縮の機会が十分あり得ることを示している。JAXA はこの実証結果を、後方乱気流管制間隔の規格化を行う国際民間航空機関(ICA0)のワーキンググループ(Wake Turbulence Working Group)に継続的に報告し、動的な後方乱気流管制間隔の規格化を支援している。

4. おわりに

本稿では、低層風情報を利用した航空機運航の効率性・安全性を向上する取り組みとして、低層風の情報をパイロットに伝える低層風情報提供システムの開発、および低層風情報を用いた後方乱気流管制間隔の短縮に向けた研究開発の動向を紹介した。現在、低層風情報の利用は、風観測リモートセンサが既に設置されている大規模空港で主に進んでいるが、センサの低価格化や低層風情報利用の便益の定量化が進めば、今後は小規模の地方空港でもリモートセンサを設置して運航の効率性・安全性の向上を図ることができると考えられる。JAXA では、地方空港での早期の実運用を目指して、低価格の風観測リモートセンサであるドップラーソーダを用いた低層風情報提供システム SOLWIN の開発を進めている。



図-8 成田空港での後方乱気流計測

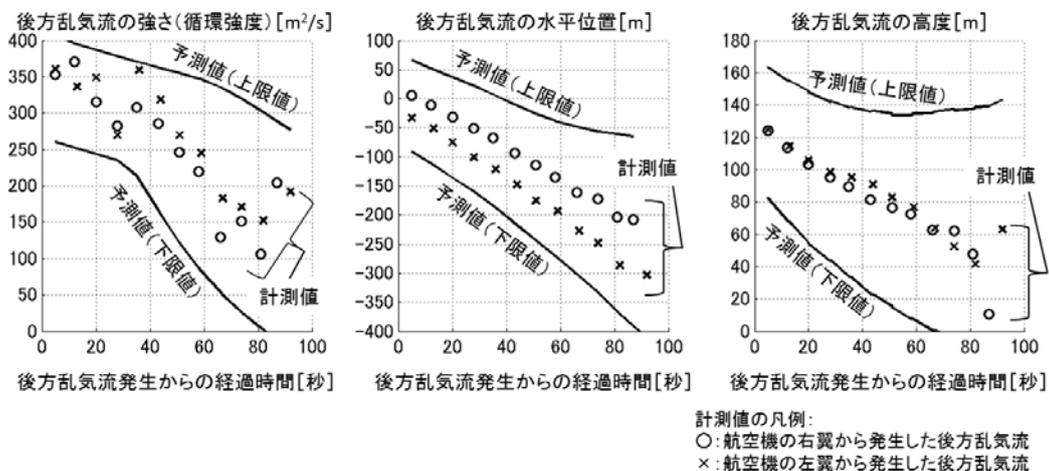


図-9 ライダによる後方乱気流の計測結果と予測結果の比較例

参考文献

- 1) (財) 航空保安研究センター：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，2009.
- 2) 原：航空気象業務の現状と今後の計画について，日本航空宇宙学会第 41 期年会講演会，2010.
- 3) Matayoshi, N., Iijima, T., Yamamoto, K. and Fujita, E.: Development of Airport Low-level Wind Information (ALWIN), AIAA 2016-4362, 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Denver, U.S.A., 2016.
- 4) Matayoshi, N. and Yoshikawa, E.: Dynamic Wake Vortex Separation Combining with AMAN/DMAN Concept, AIAA 2015-3397, 15th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, Dallas, U.S.A., 2015.
- 5) S. Lang: Wake Turbulence Mitigation for Departures (WTMD) and Wake Turbulence Mitigation for Arrivals (WTMA), 1st Global Wake Conference, 2009.
- 6) Treve, V: Crosswind dependent separations (CROPS), Wakenet 3 Specific Workshop 'WV Concepts & Capacity,' 2011.
- 7) Treve, V: EUROCONTROL Wake Program, Wakenet Europe Workshop, 2015.
- 8) Gerz, T. and Holzapfel, F.: Aircraft Wake Vortices: A Position Paper, Wakenet, 2001.

MORE EFFICIENT AND SAFER AIRCRAFT OPERATION
USING LOW-LEVEL WIND INFORMATION

Naoki MATAYOSHI and Tomoko IJIMA

Aircraft operations are strongly affected by the wind. Especially in takeoff and landing, the operational safety can be threatened by windshear or turbulence and the aircraft separation needs to be extended due to wake turbulence caused by the aircraft itself, which impairs the operational efficiency. In order to mitigate such wind influences, the advanced aircraft operations are being introduced including providing pilots with wind information in real-time and dynamically adjusting aircraft separation according to surrounding atmospheric condition. In this paper, we briefly describe the development of the low-level wind information system that provides low-level wind information to the aircraft in real-time, and also introduce the research activities towards dynamic wake vortex separation.