

気象条件に対応した後方乱気流管制方式と効果

航法システム領域 ※吉原 貴之, 藤井 直樹
航空交通管理領域 瀬之口 敦, 山田 泉, 虎谷大地, 青山 久枝

1 はじめに

航空機の飛行に伴って左右の翼端から後方に一對の向きが異なる渦が生じるが、これは後方乱気流と呼ばれ、生成時の強さは航空機の重量に比例し、速度に反比例することが知られている。一般に、後方乱気流は時間の経過に伴って下降し、減衰・消滅する特性をもつ。また、周囲の気象条件によっても変化し、例えば風が強い場合には減衰・消滅過程が早まったり、風下に流されたりする。そのため、複数の航空機が同一経路を飛行するような場合には、先行する航空機（先行機）の生成した後方乱気流が、後続する航空機（後続機）の安全運航に影響を与えない程度に減衰している、あるいは飛行経路上から十分離れた場所に移動していることが必要となるため、適切な間隔を設定する後方乱気流管制方式が適用される。

本発表では、滑走路の安全かつ効率的な運用に着目し、現在の後方乱気流管制方式の背景、課題、並びに将来構想とともに、国際的にも導入されつつある向い風が強い気象条件下での運航効率の改善が見込まれる TBS（Time-Based Separation）と呼ばれる時間に基づく管制間隔基準による運用について紹介する。また、国内の混雑空港を対象として気象条件および空港・空域条件を考慮した TBS 導入に関わる便益評価や、技術的要件の明確化、並びに必要な安全性評価の視点から検討したのでその結果を報告する。

2 後方乱気流管制方式と TBS の位置づけ

2.1 概要と将来構想

先行機の後方乱気流の影響を回避するための安全な離隔間隔は、先行機の生成する後方乱気流の強さとともに、後続機が許容可能な強さも関係する。そのため、航空機を主に重量によって区分し、先行機と後続機の航空機区分の組合せに応じた最低基準となる間隔を設定し、それ

表 1 ICAO 航空機 4 区分

航空機区分	最大離陸重量 M (kg)
Super (J)	560,000 程度
Heavy (H)	$136,000 \leq M \leq 560,000$
Medium (M)	$7,000 < M < 136,000$
Light (L)	$M \leq 7,000$

表 2 航空機 4 区分の最低基準 (単位: NM)

		後続機			
		J	H	M	L
先行機	J		5	7	8
	H		4	5	6
	M				5
	L				

を保つように交通制御することで、後続機の安全運航を確保する後方乱気流管制方式が、航空航法サービスの手順を示す文書である PANS-ATM (ICAO Doc 4444) [1] に定められている。具体的には、重量による4つの航空機区分を表1に、最低基準例として進入および出発フェーズの航空交通業務の監視サービス下での距離に基づいた最低基準を表2に示す。

この後方乱気流管制方式に関する今後の方向性については、ICAO がとりまとめている将来構想 GANP (Global Air Navigation Plan) [2] の ASBUs (Aviation System Block Upgrades) に WAKE-B2, B3 として記載があり、表3のように航空機区分の詳細化や最低基準の設定に関わるアイテムと、近接平行滑走路（滑走路中心線の間隔が 760m 未満）に関連したアイテムに分類できる。前者に関しては、本発表の主題である TBS 運用に加えて、航空機区分をさらに詳細化して安全性水準を維持しつつ後方乱気流管制間隔を短縮可能な組合せを検討する静的ペアワイズ (S-PWS: Static Pair-wise) 運用、並びに TBS と S-PWS を複合した運用が含まれる。一方、後者のアイテムに関しては、近接平行滑走路において滑走路進入端の水平位置にずれやそ

表3 ICAO ASBU の WAKE 関連

WAKE	概要	PANS-ATM 改訂
航空機区分と最低基準		
B2/1	7つの航空機区分と最低基準	2020年
B2/2	最終進入における時間に 基づく最低基準 (TBS)	2024年
B3/3	静的ペアワイズ (S-PWS) 運用	2030年
B3/6	出発機に対する S-PWS に 基づいた TBS	2030年
近接平行滑走路 (中心線間隔 760m 未満)		
B3/1	従属な平行進入	2028年
B3/2	独立な平行運用	2028年
B3/4	拡張された従属な平行進入	2030年
B3/5	拡張された独立な平行運用	2030年
B3/7	時間間隔に基づく従属な平行進入	2030年
B3/8	時間間隔に基づく独立な平行運用	2030年

それぞれの進入経路に高さ方向の差がある場合の計器進入を想定している。「従属な平行進入」は滑走路間で後方乱気流に関わる間隔付けが独立ではない運用を、「独立な平行運用」は後方乱気流が風に流される等の効果を利用してそれぞれの滑走路において出発機、到着機の間隔付けを行う運用をそれぞれ示している。また、「拡張された」については、主に航空機区分の詳細化等の要素が付加された運用を示している。

2.2 後方乱気流管制間隔の短縮と意義

混雑空港では周辺空域を含めて、航空機間の最低基準となる間隔が滑走路運用と密接な関係にあり、安全性水準を維持しつつ間隔の短縮を図ることは、効率化に寄与すると考えられる。この最低基準に関連する3つの主要な要素として後方乱気流管制方式における間隔、レーダー管制間隔 (MRS: Minimum Radar Separation)、並びに滑走路占有時間 (ROT: Runway Occupancy Time) が挙げられる。これら3つの要素のうち、最大のものが間隔として設定されるが、その値を小さくすれば滑走路運用の効率化につながると考えられる。表2の航空機4区分の後方乱気流管制方式における最低基準と他の要素を比較して考察すると、日本においては進入および出発フェーズのレーダー管制間隔が3NMであるため、空欄を除く間隔はいずれも後方乱気

流管制間隔が大きい。また、滑走路占有時間について先行研究によれば、成田国際空港を例にすると到着機の実測値 (平均値) は滑走路毎に異なっているが105~124秒程度である [3]。対地速度を75m/秒と仮定して距離に変換すると4.3~5.0NM程度となり、後方乱気流管制間隔の短縮によって、滑走路運用の効率化につながる可能性がある。

2.3 航空機区分の詳細化による短縮

表2における各航空機区分の組合せに対応した間隔については、先行機として生成する後方乱気流の強さはその航空機区分の中で最大のものを想定している。一方、後続機として許容できる後方乱気流の強さは、航空機区分の中で最小のものを想定している。そのため、航空機区分を細分化することで、安全水準を維持しつつ最低基準の短縮が期待できる。

航空機の重量と翼幅によって詳細化した7つの航空機区分を表4に、それら航空機区分の組合せに対して進入および出発フェーズの航空交通業務の監視サービス下での最低基準を表5に示す。橙色および水色のセルはそれぞれ細分化により短縮、および安全性の見直しで延長された組合せである。ただし、航空機区分 M から F になった航空機もある。この新たな基準は表3の ASBU WAKE-B2/1 に対応し、2020年11月に発効した PANS-ATM に盛り込まれており、本発表では RECAT (Re-Categorization) と呼ぶこととする。RECAT は日本においても PANS-ATM 改訂と同時に東京国際空港、並びに成田国際空港に導入された。将来的には、さらなる航空機区分の詳細化を進める WAKE-B3/3 に対応した S-PWS の検討もなされている [4]。

2.4 TBS の概要と国際動向

後方乱気流管制方式における最低基準の見直しとして TBS が注目されている。これは距離に基づく最低基準の間隔 (DBS: Distance-Based Separation) であると、図1のように向風が強い場合に対地速度が低下するため、同じ距離間隔でも飛行する時間が増加して時間あたりの処理機数の低下を招く。しかしながら、弱風時の DBS と同等な安全性水準とした TBS を強風時に導入することにより、この時間あたりの処理機数の低下を軽減できる。このように、TBS

表4 ICAO 航空機7区分

区分	最大離陸重量 M (kg)	翼幅 s (m)
A	136,000 ≤ M	74.68 < s ≤ 80
B		53.34 < s ≤ 74.68
C		38.1 < s ≤ 53.34
D	18,600 < M < 136,000	32 < s
E		27.43 < s ≤ 32
F		s ≤ 27.43
G	M ≤ 18,600	-

表5 航空機7区分の最低基準（単位: NM）

		後続機						
		A	B	C	D	E	F	G
先行機	A		4	5	5	6	6	8
	B		3	4	4	5	5	7
	C				3	3.5	3.5	6
	D							4
	E							4
	F							
	G							

の目的は、強風時における単位時間あたりの着陸機数低下の軽減、あるいは維持となっている。この TBS は英国のヒースロー空港に 2015 年 3 月に初めて導入され、2018 年 3 月には TBS と欧州の航空機区分と最低基準の見直しである RECAT-EU と複合した運用が開始されている。その後、TBS は 2022 年 5 月にカナダのトロント空港に、2023 年 1 月にはオランダのスキポール空港に導入されており、今後も国際的に導入空港が増加するものと考えられる。

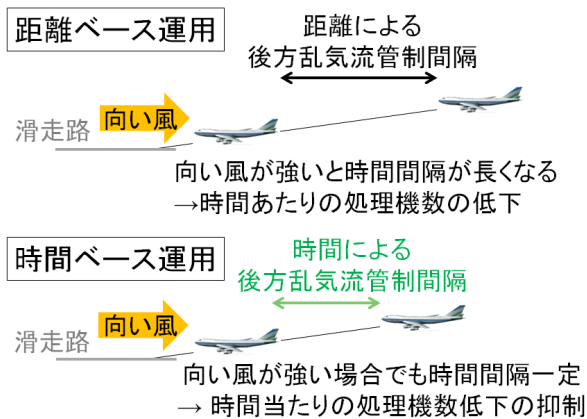


図1 後方乱気流管制間隔に関する距離ベース運用と比較した時間ベース運用の利点

この TBS は ASBU WAKE-B2/2 に対応しており、2024 年の PANS-ATM 改訂に盛り込まれることが想定されているが、航空機区分の組合せに対応した具体的な時間に基づく間隔は導入空港の気象条件や交通流の特性（機種構成や進入速度プロファイル等）に合わせて設定されるべきものである。また、滑走路進入端において先行機と後続機の安全な間隔を確保するため、航空管制官に対して予測および警報機能を持ったリアルタイム間隔付け支援システムが必要であり、導入前に安全性評価を行う必要がある。EUROCONTROL は、TBS に関わる安全性評価文書 [5]、導入にあたり検討すべき事項をまとめたガイドライン [6] を公開している。次の第3章では、これら文書を参考にしつつ、国内混雑空港への TBS 導入検討に必要な便益評価、航空管制官支援システムの要件と軌道予測に関する検討、および安全性評価の概要を述べる。

3 国内混雑空港への TBS 導入に関わる検討

3.1 便益評価

TBS 導入効果の評価は、RECAT が導入された成田国際空港を対象として計算機上で交通流を模擬して検討した。実際の航跡データに基づいてシナリオを作成して解析を行うこととしたが、2020 年 4 月以降は新型コロナウイルスの影響により便数が減少したこと等を考慮して、RECAT 導入前の南風および北風運用のそれぞれについて、強風および弱風日を選定した。

これらの日について、空港面の交通流模擬とターミナル空域の交通流模擬とをそれぞれの計算機ツールで行い、それら結果を統合することとした。空港面に関しては、電子航法研究所で開発している GRACE と呼ばれるツールを用い、レーダー航跡に基づく現実模擬、RECAT 適用模擬、TBS 模擬の 3 つを実施したが、一例として強風時の模擬に用いた TBS 最低基準を表 6 に示す。桃色のセルは航跡データをもとに設定した強風時の滑走路占有時間（113 秒）が他の 2 つの要素、すなわち TBS とレーダー管制間隔よりも優位であることを示している。

この空港面とターミナル空域での交通流模擬との接続では、レーダー航跡によるターミナル空域への入域時刻に対して、最短経路と速度プ

ロファイルから滑走路進入端までの最短飛行時間を算出して、両者から最早滑走路進入端通過時刻を求め、表6の最低基準をGRACEで適用して先行機との間隔を短縮した滑走路進入端通過時刻に間に合う場合には早着可能な便として扱うこととした。現在、検証の最終段階にあり、結果については発表時に紹介することとしたい。

3.2 航空管制官支援システムの要件と軌道予測に関する検討

航空管制官に間隔付けの目安を示す支援ツールに関しては、先行研究等を参考に軌道予測に基づく支援情報として表示する簡単な計算アルゴリズムと表示手法を開発した [7]。また、実際のレーダー航跡に試作プログラムを適用し、計算されたインジケータがどの程度、滑走路末端において正確な間隔を示すことができているかを評価した。その結果、TBS支援ツールに要求される機能としては各航空機の状態取得、予測軌道計算、支援情報計算、支援情報の表示という4つの機能と実装への課題を特定した。

3.3 安全性評価の手順と解析結果

安全性評価においては、向い風が強い時に適用するTBSによる後方乱気流のリスクが弱風時におけるDBSと同等以下であることが担保されることを示す必要がある。そのため、後方乱気流が進入経路上に残存することによる遭遇リスク評価とともに、向い風条件下で航空機間隔が無風時の時間間隔分布から逸脱することに起因する後方乱気流との遭遇リスクの2つのリスク評価が必要となる。前者に関しては、東京国際空港におけるLIDARによる後方乱気流観測データを用いて乖離事例がないことを確認 [8]、後者に関しては東京国際空港でのADS-B受信データを中心とした事例解析を行っている。

4 まとめ

本稿では、滑走路の安全かつ効率的な運用に着目し、国際的にも導入されつつある向い風が強い気象条件下での運航効率の改善効果が見込まれるTBS運用を主題として、現在の後方乱気流管制方式の背景、課題、将来構想とともにTBS運用の概要と実施した主な検討項目について記載した。発表では、TBS運用を国内混雑空港に導入する際に必要となる便益評価、航

表6 強風時TBSの最低基準（単位：秒）

		後続機						
		A	B	C	D	E	F	G
先行機	A	113	113	130	135	160	170	210
	B	113	113	113	113	140	160	190
	C	113	113	113	113	113	113	170
	D	113	113	113	113	113	113	120
	E	113	113	113	113	113	113	120
	F	113	113	113	113	113	113	113
	G	113	113	113	113	113	113	113

空管制官支援システム要件の検討、および安全性評価の詳細を中心に報告する予定である。

参考文献

- [1] ICAO: The Procedures for Air Navigation Services - Air Traffic Management (PANS-ATM), Doc 4444, 16th Edition, Amendment 9, November 2020.
- [2] ICAO: Global Air Navigation Plan, the 7th Edition, <https://www4.icao.int/ganpportal/>, (参照, May 2023).
- [3] 北河涉, 泊尚志, “「首都圏空港機能強化検討調査～成田国際空港について～」(第35回研究報告会報告)の補遺”, 運輸政策研究, Vol.18, No.2, pp.80-85, 2015.
- [4] EUROCONTROL: Approach and Departure Optimised Wake Turbulence Re-Categorisation and Pair-Wise Separation minima -RECAT-EU-PWS scheme-, Edition 1.0, May 2022.
- [5] EUROCONTROL: Time-Based Separation (TBS) Principles as Alternative to Static Distance-Based Separation for Final Approach, Edition 1.1, September 2020.
- [6] EUROCONTROL Guidelines on Time-Based Separation (TBS) for Final Approach, Edition 1.0, May 2021.
- [7] D. Toratani et al., “Investigation of Support Algorithm for Air Traffic Controllers’ Arrival Separation Management,” CTS, 2021.
- [8] 藤井ほか, “羽田空港における航空機の進入時の後方乱気流に対するLIDAR観測結果について”, 電子情報通信学会宇宙・航行エレクトロニクス研究会, 2023年1月.