

研究報告

離陸機の騒音軽減運航方式としての上昇勾配に関する考察*

武田 修(航空環境研究センター 主任研究員)

国際民間航空機関(ICAO)が定める騒音軽減運航方式は、航空業務方式の一つである「PANS-OPS VOL1 PART1 Section7 :Noise Abatement Procedures」(以下、「PANS-OPS」)にその記載があるが、日本においても次の7つの方式が定義されている。

- (1)急上昇方式
- (2)カットバック上昇方式
- (3)低フラップ角着陸方式
- (4)ディレイド・フラップ進入方式
- (5)リバース・スラスト制限
- (6)優先滑走路方式
- (7)優先飛行経路

このほかに日本の航空情報(AIP)には記載はないが、実際に行われている方法として着陸地点の移設方式(Displaced Thresholds)がある。

この中で、離陸機に関する騒音軽減運航方式は、急上昇方式が一般的であり多くの空港で採用されている。

航空機が離陸する際発出するエネルギー量は着陸時と比較して数段高く、周辺区域への影響も大きい。この部分を改善できる選択肢が広がれば騒音対策として有効性が期待できる。

この点について本稿では、離陸機が用いる標準計器出発方式(SID)の「方式設計勾配」¹⁾(PDG:以下、「上昇勾配」という)に着目してみた。上昇勾配は、上昇角とも呼ばれるが、「上昇の飛行経路と水平面とのなす角度で、水平距離に対して獲得する高度の割合」(航空実用辞典)である。上昇勾配は標準値が定められてい

るが、それ以上の値を設定することも可能で、障害物との間隔設定や空域上の制限、管制上の目的等から日本国内や欧米でも標準よりも高い値を指定して運用している空港が見られる。また、欧州では騒音軽減を目的として標準値以上の上昇勾配を設定する空港もみられるが、日本の騒音対策としてはまだ光が当たっていない部分である。このため、国内外の例を参考にしつつ同方式の有効性の検証と具体化を検討することは、今後の周辺対策としての寄与度も期待できることから、種々の角度から考察を試みた。

1. 上昇勾配に関する基準

1.1 飛行方式設定基準上の記載

航空機の上昇勾配は、機体の上昇性能としての定めに加え、航空機が計器飛行方式による離陸の際に使用される標準計器出発方式(SID)の要素としても定められている。具体的には、「飛行方式設計基準第I部第3編出発方式」(ベースは国際民間航空機関:ICAOが定めた航空業務方式の一つであるPANS-OPS VOL II)にその規定があり、第

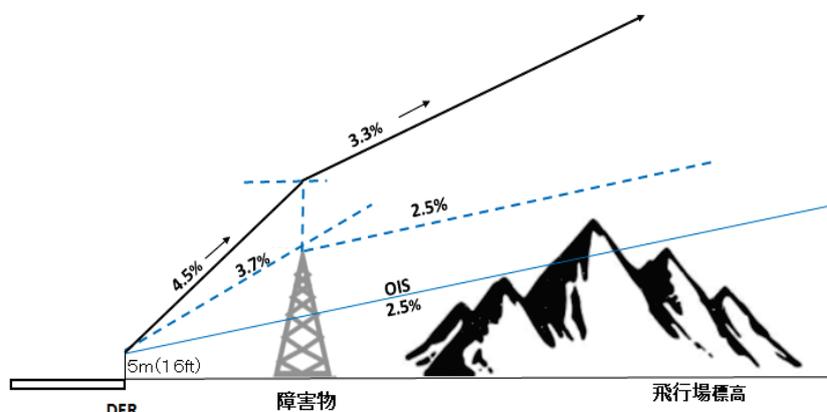


図1 方式設計勾配の概要

* A consideration of the climb gradient for departure aircraft as noise abatement procedure

2章「出発方式の一般的概念」に、上昇勾配の標準値は3.3% (約1.9°)と規定されている。また、これ以上の上昇勾配を設定することも可能であり、5% (約2.9°)を超える値を設定する場合は運航者との協議が必要とされるが、特に上限値は定められていない (図1及び以下条文参照)。

「飛行方式設計基準」(抜粋)

2.7方式設計勾配(PDG)

2.7.1方式設計勾配(PDG: Procedure Design Gradient)は、OIS (障害物識別表面Obstacle Identification Surface)の起点(DER (滑走路離陸末端: Departure end of the runway)上5m (16ft))より計測したノミナル上昇勾配である。OISに突出する障害物がない場合、方式設計勾配(PDG)はOIS勾配及び0.8%の和(3.3%) (航空機区分Hにあつては4.2%)である。

2.7.2 (中略)PDGは3.3%を標準とする。これを運航者との調整なく5.0%まで引き上げることができる。可能、又は、やむをえない場合にあっては、運航者と調整の上、方式設計者が設定できる勾配として7.0%まで引き上げることができるものとする。それを超える値を使用する場合にあっては運航者との協議を要する。』(下線は筆者)

1.2 急上昇方式との違い

前述したように、現在離陸時に騒音軽減運航方式として広く用いられているものは急上昇方式である。ICAOにおいて規定している急上昇方式は、NADP (Noise abatement departure procedure) 1とNADP2がある。NADP1は離陸後800ftで離陸推力から上昇推力に減じ、3000ftまではフラップとスラットのたたみ込みを遅らせるものであり、比較的空港に近い地域への影響を抑える効果がある。

一方、NADP2はフラップとスラットのたたみ込みを既定された800ftに到達した後に行い、上昇を維持

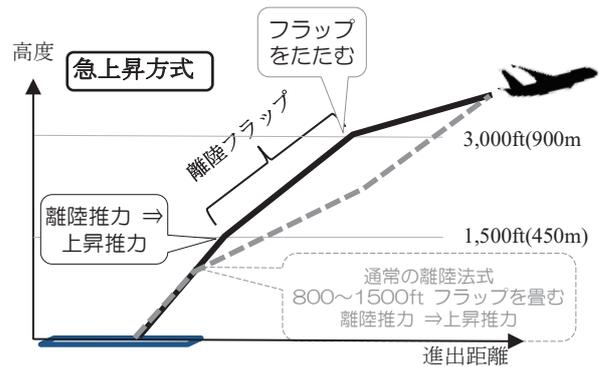


図2 日本での急上昇方式(イメージ図)

しながら手順に従ってフラップとスラットの畳み込みを行う方式で、空港から離れた地域の騒音を緩和する方式である。

図2はNADP1をベースにした日本の方式であるが、1500ft付近で離陸推力から上昇推力に減じ、3000ftまでフラップとスラットのたたみ込みを遅らせることによって上昇性能をたかめ、騒音軽減効果を高める方式であり、上昇勾配の指定はない。上昇勾配の指定は、あくまでSIDにおける指定であり、AIPに併記されている場合は、指定された上昇勾配で急上昇方式を同時に行う必要がある。

2. 国内の標準値以上の上昇勾配導入状況

では、国内空港のSIDに適用されている標準値以上の上昇勾配の状況がどのようなものか、2020年8月時点のAIPをもとに調査した²⁾。国内で定期便が運航されている82空港全てのSIDを調査

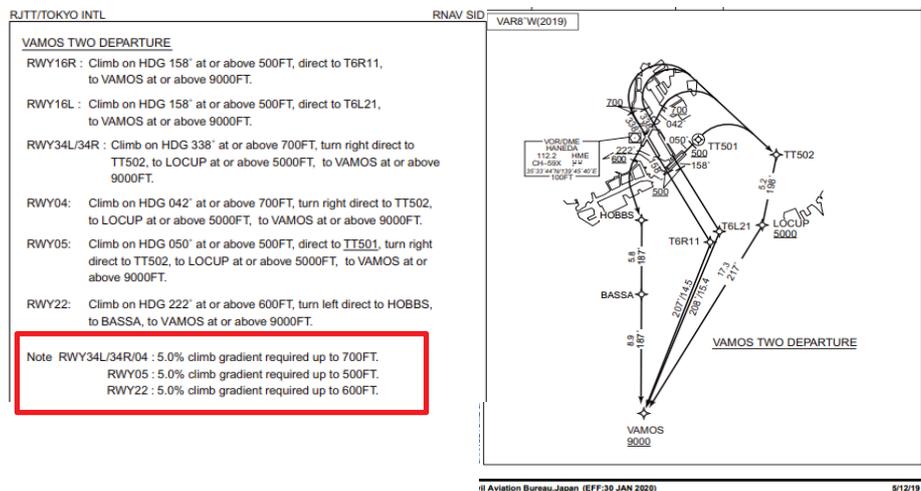


図3 羽田空港のSIDの上昇勾配指定例

表1 日本国内主要空港の上昇勾配適用状況

空港名	指定なし	< 4%	4%	4.1-5%	5.1-6%	6.1-7%
新千歳空港				○		
函館空港			○		○	
仙台空港					○	
東京国際空港				○		
成田国際空港	○					
中部国際空港		○				
小松空港				○		
大阪空港				○		
関西国際空港	○					
広島空港		○		○		
福岡空港					○	○
長崎空港				○		
熊本空港					○	
大分空港				○		
宮崎空港				○		○
鹿児島空港				○		
那覇空港				○		

したところ、SIDが一つでも標準値以上の上昇勾配を指定している空港は、59空港あった。最も多く見られた値は4.1~6.0%台で約8割がこの範囲内であり、特に5%（約2.9°）に集中していた。最も高い上昇勾配が指定されている空港は、福岡空港、宮崎空港、松山空港の7.0%（約4.0°）であり、次いで、与那国空港、壱岐空港の6.7%（約3.8°）、松本空港、高松空港の6.6%（約3.77°）となっている。

表1に主要空港の適用状況を示す。主要空港においても標準値以上を適用している空港はかなりあり、全体の傾向と同様に4.1~6.0%台の上昇勾配が指定されている空港が多く見られる。成田国際空港と関西国際空港は、指定がなかった。

標準値以上の値を適用している理由は、ほとんどが障害物との間隔設定であった。方式設計基準上、空域制限のみによる上昇勾配引き上げの場合は当該理由を明記する必要があるが、調査空港において当該理由を明記している空港は北大東空港と北九州空港であった。

3. 海外における標準値以上の上昇勾配導入状況

海外においても、2020年8月時点のAIPに基づき主要空港22空港のSIDを調査したところ、いずれの空港も標準値以上の上昇勾配を適用しているSIDがあり、日本と同様4.0~7.0%程度の適用が多く見られた。表2に適用状況を示す。7%を超える上昇勾配を適用している空港も多く見られ、日本と比較すると適用値の範囲がかなり広い

表2 海外主要空港における上昇勾配の適用状況

	< 4%	4%	4.1-5%	5.1-6%	6.1-7%	7.1-8%	8.1-9%	9.1-10%	10.1-11%	11.1-12%	12.1-13%	13.1-14%	14.1-15%
ヒースロー		○											
ロンドンシティ					○	○	○						
ガトウィック	○	○		○	○	○							
マンチェスター			○	○					○		○		○
シャルルドゴール				○	○								
スキポール	○	○											
フランクフルト	○		○	○	○	○		○		○			
ミュンヘン			○		○		○						
ハンブルグ			○	○		○	○						
ブリュッセル		○			○								
マドリード			○	○	○	○							
チューリヒ			○	○	○								
シカゴ・オヘア	○												
ワシントン・ダレス	○						○						
ワシントン・ナショナル							○					○	
ラガーディア	○			○	○		○		○				
ジョン・F・ケネディ			○				○						
サンフランシスコ				○		○	○	○					
ロサンゼルス	○						○	○					
シアトル・タコマ					○		○	○					
シドニー			○	○	○								
オークランド(NZ)	○		○	○						○			

ことがわかった。最も高い上昇勾配を適用している空港は、マンチェスター空港の14.6% (約8.3°) で、次いでワシントン・ナショナル空港の13.6% (約7.7°)であった。

海外の空港においても標準値以上の適用理由は障害物対策が多いが、中には「operational requirement」あるいは、「airspace structure」(フランクフルト、ミュンヘンなど)、「ATS gradient」(シャルルドゴール)「ATC and airspace purpose」(ヒースロー)という理由から設定されている空港のほか、4発機に限った指定がされている空港(チューリヒ)もある。

騒音対策上の理由から設定されている空港もあり、ヒースロー空港は出発機の騒音限界値を順守するため最低4%で4000ftをこえるまで、また、ブリュッセル空港は障害物や空域上の制限に加え、「騒音影響を最低限とするため」として全ての出発機は3200ftを超えるまで最低7.0%の上昇勾配を維持するようAIPで明記されている²⁾。

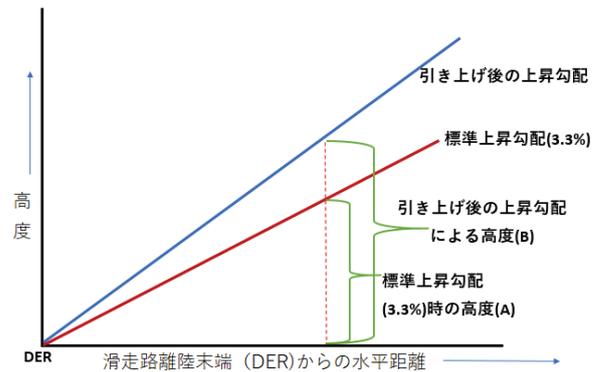


図4 距離減衰のイメージ

フランクフルト空港などの適用理由である「operational requirement」の詳細までは確認できなかったが、騒音対策上の理由も含まれているのではないかと推察される。

4. 上昇勾配の変化による騒音軽減効果

では上昇勾配の変化による騒音軽減効果はどれくらいあるかという点について、航空機の位置を点音源と仮定し計算をおこなった。実際の航空機からの騒音は、伝搬する途中の風、気温、湿度

表3 上昇勾配と騒音減衰量の比較 *航空機の上昇推力等は考慮していない

上昇勾配と高度	上昇勾配(%)	angle	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000
	3.3	1.89	108	217	325	433	541	650	758	866	974	1083
4.0	2.29	131	262	394	525	656	787	918	1050	1181	1312	
5.0	2.86	164	328	492	656	820	983	1147	1311	1475	1639	
6.0	3.43	197	393	590	787	983	1180	1376	1573	1770	1966	
7.0	4.00	229	459	688	918	1147	1377	1606	1835	2065	2294	
8.0	4.57	262	524	787	1049	1311	1573	1836	2098	2360	2622	
9.0	5.14	295	590	885	1180	1476	1771	2066	2361	2656	2951	
10.0	5.71	328	656	984	1312	1640	1968	2296	2624	2952	3280	
11.0	6.27	360	721	1081	1442	1802	2163	2523	2884	3244	3605	
12.0	6.84	394	787	1181	1574	1968	2361	2755	3148	3542	3935	
13.0	7.40	426	852	1278	1704	2131	2557	2983	3409	3835	4261	
横軸は距離：m 縦軸は高度：ft												
騒音減衰量	3.3	1.89	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	4.0	2.29	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7	1.7
	5.0	2.86	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6	3.6
	6.0	3.43	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2	5.2
	7.0	4.00	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
	8.0	4.57	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7	7.7
	9.0	5.14	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7	8.7
	10.0	5.71	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6	9.6
	11.0	6.27	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4	10.4
	12.0	6.84	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2	11.2
	13.0	7.40	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9	11.9

騒音減衰量：dB

などの要素によって変化するため、測定結果はばらつくことがあるが、減衰要素は距離減衰のみと仮定した(図4参照)。また、進出距離の基点は方式設計基準で定義している滑走路離陸末端(DER)である。減衰量は、標準上昇勾配3.3%を基準に、DERから1000m間隔の進出距離における標準上昇勾配の高度(A)と4%から13%まで1%ずつ変化した場合の同地点の高度(B)との差分を計算した。計算式は以下のとおりである。

$$\text{騒音減衰量} = 20 \times \log_{10} (\text{高度B} \div \text{高度A})$$

計算結果を表3に示す。

この計算結果をみると、日本国内で用いられている4%から7%の間でも1.7dBから6.5dBの低減効果が表れることがわかる。さらに、実際の運航にあたってはこれに急上昇方式が加わるため、騒音値としてはもう少し開きが出るのが予想される。なお、基点からの水平距離が変化しても、高度の“比”は一定であるため、上昇勾配の差による音の減衰量は一定である。

5. 実際の離陸機の上昇(羽田空港の例)

これまで、上昇勾配に関する規定と標準値以上の適用例、また騒音軽減効果についてみてきたが、実際の航空機の運航状況についても調査を行った。

具体的には、2020年6月の羽田空港の出発機について、空港に独自に設置したADS-B受信機で得られたデータに基づき高度プロファイルの分析を行った。対象は、RWY34Rの出発機のうち運航機種を6機種(A359、B738、A320、B772、B788、

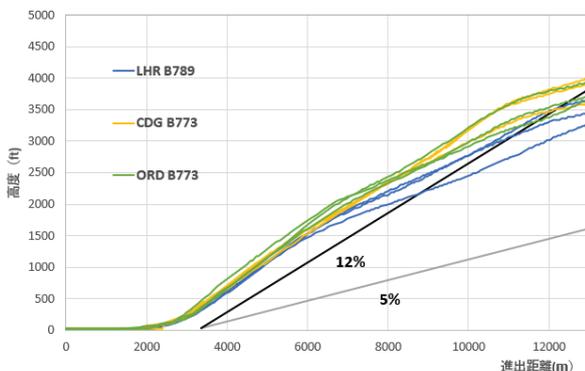


図5 羽田RWY34Rの離陸機(国際線)の上昇

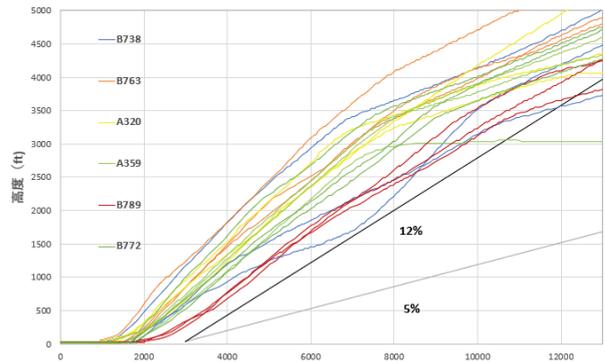


図6 羽田RWY34Rの離陸機(国内線)の上昇

B763)、3便ずつ抽出して離陸滑走開始点から進出距離10km、高度5000ft付近までの上昇を比較してみた。前述のとおり、羽田空港の場合は5%の上昇勾配が各SIDに指定されているほか、RWY34R離陸については北方面の一部時間帯は急上昇もしくはNADP2が指定されている。

また、同月の東京地方の気温は最低気温が17℃～22℃、最高気温は21℃～31℃であった。

RWY34Rからの離陸機については、国際線は長距離便(欧州、北米)が運航されており、国内線とこれらを分けて分析した。

国際線は、3路線(ロンドンB789、パリB773、シカゴB773)それぞれ3便抽出した。RWY34Rからの離陸は、360m内側から離陸滑走を行っている航空機多いが、抽出した3路線はいずれもRWY34R滑走路端から離陸していた。図5に国際線の分析結果を示す。抽出した9便は離陸重量も大きな機体と想定されるが、いずれの機体も12%程度の上昇勾配で上昇をしている。

国内線は、対象機全て滑走路端から360m内側からの離陸であった。結果としては国内線もほぼ12%程度の上昇勾配を維持して飛行しているが(図6参照)、若干上昇プロファイルのばらつきがみられる。比較的高い上昇勾配を示していたのは、A320、B763の機種であった。

この6月のデータはコロナウィルスの影響による緊急事態宣言が解除された直後ということもあり、乗客が少ない時期と推定される。このため、国内線、国際線ともに通常よりも軽量の機体による運航という点は考慮に入れる必要がある。

6. 実際の離陸機の上昇(成田空港の例)

そこで、2016年5月のデータではあるが、成田空港の出発機のデータについても調査を試みた。

内容は、欧州等長距離路線クラスのB77W型機と同クラスのB788型機の別で、それぞれ26機と30機について、RWY16からの離陸の状況を調べたところ、図7と図8の結果となった。また、成田空港では急上昇方式が指定されているがSIDには上昇勾配の指定はない。ちなみに同年同月の千葉県気温は最低気温が13℃～20℃、最高気温は22℃～30℃である。

この結果をみると、どちらも標準的な長距離路線の離陸重量であるが、7%程度の上昇勾配では上昇しているようである。

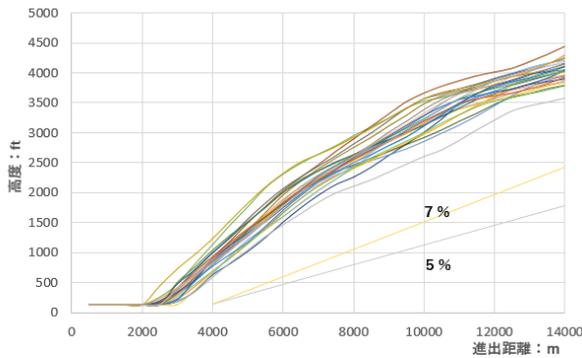


図7 成田空港の離陸機データ(B77W)

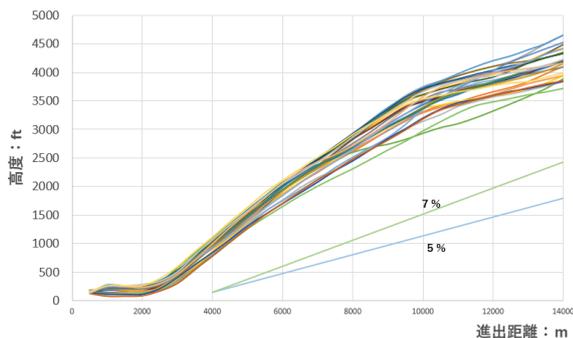


図8 成田空港の離陸機データ(B788)

7. 検討課題

ここまで、標準値以上の上昇勾配に関して様々な角度から見てきたが、課題についても検討を加えておく。

(1) 機体重量による影響

上昇性能に最も影響を及ぼす要素として挙げられるのが離陸時の機体重量である。運航する

路線(搭載燃料)、乗客数、機体自体の重量などが主たる要素となるが、上昇勾配の指定があっても満足できない場合が想定される。実際、諸外国のSIDを見ても、上昇勾配は指定されていても指定された値を満足できない場合は管制機関に報告することとされているものがある。

この点、成田空港では最も離陸重量が大きいと想定されるA380のデータが取得できなかったが、英国民間航空局が出発機の騒音軽減のために行った調査報告(「Departure Noise Mitigation : CAP1691」(2018年6月)³⁾)があり、この中で同型機に関する一定の値が示されている。具体的には、2017年3月から2018年2月の間、シドニー、パリシャルルドゴール、フランクフルト、ロサンゼルス、JFKの5空港でのA380の上昇に関して、ADS-Bデータに基づいた実際の高度プロファイルの分析結果が示されており、その結果をまとめている。図9にその内容を示す。グラフの緑線のプロファイルは5空港で飛行したA380の上昇勾配の平均値で、黒線はそれらの平均値である。このグラフを見る限り、平均の上昇勾配は6%程度で、報告書によれば、一部の便では4%台の上昇勾配の場合もみられたとしている。従って、機体重量の大きい航空機が乗り入れている空港では、標準値程度の上昇性能のケースがあることや同一型式の機体であっても、重量によりばらつきが出ることを念頭に検討する必要がある。

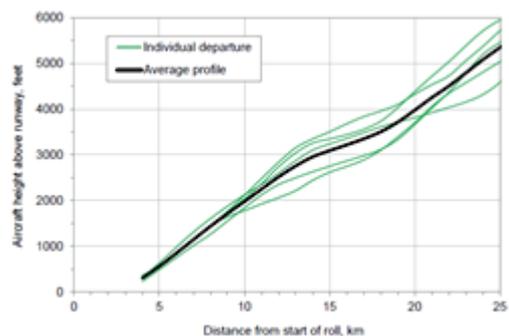


図9 Departure Noise MitigationのA380データ

(2) 気象条件による影響

気象条件も上昇性能に影響を及ぼすこととなるが、特に空気密度はその影響度が大きいと想定される。一般的に空気密度が高いと低速でも多く

の揚力を得ることができるため、航空機の上昇性能は増すといわれており、空気密度が増えるのは気圧が高いときで、飛行高度が上がると気圧が下がり、比例して密度が下がることとなる。

一方、気温が高くなると空気密度が低くなり上昇性能への影響が大きくなる。最近の夏場の平均気温も上昇傾向にあり、2020年の夏季の気温を見ても、最高気温が40℃近くまで上昇するケースもあり、気温に関する検証を行う際も同程度を想定する必要がある。

(3) 上昇勾配と離陸推力の関係

航空機のエンジンの運転条件には、その飛行フェーズによっていくつか分けられるが、離陸に際しては「離陸定格」という用語が用いられる。「定格」とは一定の決められた条件で、エンジンを運転する場合に保証されるエンジンの運転条件のことであり⁴⁾、「離陸定格」は航空機の離陸のために使用できる最大定格出力をいう。ただ、現在の航空機のエンジンは、離陸時の機体重量、滑走路条件、気象条件等により、最大まで推力をあげなくとも、きめ細かく割り引くことが可能となっている。この方式を「Reduced Thrust Takeoff」と呼んで一般的になっており、この効果により騒音影響の減少にも寄与している点がある。このため、上昇勾配を上げることで、離陸推力への影響、そして上昇時の騒音影響の拡大とならないのかという点が懸念される。

8. まとめ

航空機の騒音軽減運航方式としての上昇勾配について考察を行ってきたが、ほとんどの空港で標準値以上の上昇勾配値が指定されている状況にあり、海外においても同様である。また、日本では障害物件をクリアすることを主たる目的に用いられているが、海外では上昇勾配の値も幅広いことや騒音軽減という目的でも用いられている状況、そして机上の計算結果ではあるが距離減衰による効果も確認できた。

こうした状況を見る限り、今後日本においても、上昇勾配の指定による騒音軽減方式も検討する

価値と導入の可能性はあると思料する。ただ、前節でのべたように、型式ごとの比較、路線長の違い等も含めた分析、また、季節による運航状況の違いも想定した実際の高度プロファイルデータ等様々な機体のデータの取得を広範に行ったうえで検討を継続する必要がある。特に、日本に乗り入れている航空機の型式の中にはA380等に代表されるようになりかなり大型のものもあり、今回こうした型式機のデータは取得できていない。また、実際の騒音軽減効果がどれくらい得られるのかという点についても今後さらに検討を行う必要がある。

一方、今後の可能性も含めていけば、諸外国では離陸直後の上昇勾配のみならず、2000ft～3000ft程度の高度を通過したのちも上昇勾配が指定される2段階方式がとられている例がある。騒音軽減対象の範囲が広い場合は、こうした方式の検討も一考である。

また、ICAOでは「継続上昇運用方式」(Continuous Climb Operations: 以下、「CCO」)の検討も行われている。CCOは、離陸後の上昇フェーズにおいて、水平飛行を行わず巡航高度まで達する運用方式である。降下フェーズでは比較的实施されている空港があるが、CCOについては、ほとんど取り入れられていない。

CCOは、騒音軽減のみならず、二酸化炭素排出量の削減にもつながるため、これらの運用方法との組み合わせも今後の重要なテーマと考えている。

参考文献

- 1) 国土交通省、国空制大 111 号 「飛行方式設計基準」
- 2) AIS-JAPAN
<https://aisjapan.mlit.go.jp/html/AIP/html/20200813/frame/index-en-JP.html#efct=20200813>
- 3) 空港振興・環境整備支援機構。航空環境研究特別号「海外空港の環境対策」、2020
- 4) 英国 Civil Aviation Authority 「Departure Noise Mitigation : Main Report」 CAP1691
- 5) 日本航空広報部 「航空実用辞典」
- 6) ICAO 「Continuous Climb Operations Manual」 Doc9993