

8. 同一滑走路の到着機交通流における着陸回数

航空交通管理領域 *山本 哲士、岡 恵

1. はじめに

世界的な航空交通量の増加に対応するため、国際民間航空機構（ICAO）が中心となり CNS/ATM 概念が策定され、空域や空港の容量拡大が推進されている。また、近隣のアジア諸国や我が国においても、航空交通量の増加に備え新空港や新滑走路等の整備が推進されている。

空域や空港の容量拡大対策については、運用環境を想定して検討していく必要がある。特に、航空管制が関与する場合には、実際の運用環境に近似させて検討する必要があることから、実時間航空管制シミュレーションが行われている。我が国においても、このようなシミュレーションを用いて、交通容量に関する研究¹⁾、空域の有効利用に関する研究²⁾等が行われている。

本稿では、航空交通量の増加に対応した管制手法の研究の一環として、同一滑走路に着陸する IFR 到着機の航空交通流が、航空路セクタとターミナル空域との間の移管条件の変化に伴い、どのように変化するのか、実時間航空管制シミュレーションの航跡記録等を解析し、同滑走路の単位時間あたりの着陸回数を推定する。

2. 記録の取得

2.1 シミュレーションの概要

シミュレーションは、当研究所の実時間レーダー管制シミュレーション装置を使用し、同一シナリオによる合計8試行の実時間シミュレーションを行った。管制席構成は、航空路セクタとターミナル空域にそれぞれ対空席及び調整席各1席の計4席とした。管制席構成を図1に示す。

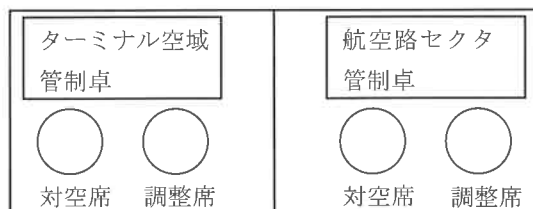


図1 管制席構成

シミュレーションでは、参加した航空管制官が、シナリオの IFR 到着機の航空交通流に対し、模擬的に管制業務を行うことにより介入し、この結果生ずる当該交通流の変化を記録した。

また、当該管制上の介入について、次の条件を付した。航空路セクタからターミナル空域への移管の際の条件は、管轄空域境界線上の移管点において、順序付けにより先行機と後続機との間隔をイントレイル 7NM (nautical mile)、高度 8,000FT (feet)、速度 250knot (KT) (IAS)、最終進入開始点における先行機と後続機との間隔は 5NM とした。

シナリオは、2つのグループに分かれた合計 16 機の到着機ターゲットを、予め設定したそれぞれの飛行経路上に発生させ、当該経路を經由して、最終進入開始地点へ向かい、高度 5,000FT から、ILS 進入方式により、順次、最終進入した後に着陸するものとした。

第 1 グループは 9 機の構成により、平均約 45 秒間隔で、第 2 グループは 7 機の構成により平均約 30 秒間隔でそれぞれ航空路セクタに入域し、第 1 グループ最後尾機と第 2 グループ先頭機との間隔は、それぞれが航空路セクタに入域する時点で約 8 分となるようにした。

各機の航空路セクタ内における飛行経路長は約 80NM、移管点から最終進入開始点までの飛行経路長は約 54NM、最終進入開始点から滑走路進入端までの飛行経路長は、約 15NM とした。空域及び飛行経路を図2に示す。

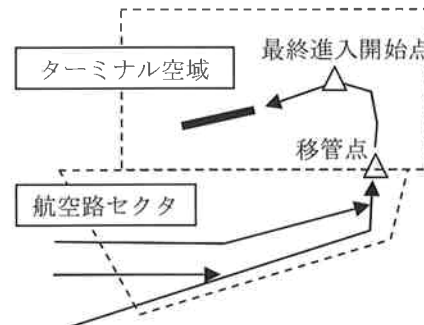


図2 空域及び飛行経路

シナリオでは、ターゲット発生時は高度FL250～270、速度310～270KT (IAS)、最終進入開始点の通過速度を180KT (IAS)、最終進入中の速度を150KT (IAS)、減速率を1KT (IAS) / 1秒にそれぞれ初期値として各機に対し設定した。

風向は、南西、風速は、5,000FT以下では10KT、高度が上がるに連れて、強くなり最大で40KTになるように設定した。

2.2 記録等の取得

当研究所の実時間レーダー管制シミュレーション装置には、個々の航空機ターゲットに係る、シミュレーション時間に対応する位置、飛行高度、速度、針路、累積飛行距離等が4秒毎に記録される。各機の航跡は、時間経過に従って記録された位置を連続的にプロットすることにより作成した。また、この航跡が、予め設定した飛行経路を構成する位置通報点から1NM以内を通過していた場合に、当該位置通報点から最も近い位置で、その上空を通過したものと見なした。

各機相互間の距離等は、同時刻の各機の位置記録から算出した。

シナリオに基づき、2.1に述べた管制上の介入条件を加味して形成される航空交通流に係る主なパラメータ及びその値を表1に示す。

表1 航空交通流パラメータ (シナリオ)

	高度 (FT)	速度(KT)		間隔		飛行距離 (NM)
		IAS	GS	(NM)	(秒)	
- 移管点						
平均値	8,044	250	311	6.3	67	81.9
標準偏差	175	0	1	13.2	133	3.7
最大値	8,700	250	314	53.4	540	87.3
最小値	8,000	250	310	0.3	0	79.1
最終進入開始点						
平均値	4,983	179	184	3.9	67	54.0
標準偏差	22	1	1	8.2	132	0.1
最大値	5,000	180	185	33.0	536	54.2
最小値	4,950	178	183	0.2	4	53.8
滑走路進入端						
平均値	66	133	123	2.6	67	15.3
標準偏差	30	3	3	5.3	132	0.0
最大値	100	142	133	21.6	536	15.3
最小値	25	130	120	0.1	4	15.3

注

間隔：先行機と後続機との間隔を示す。

飛行距離：各地点間の飛行距離、ただし、移管点については、航空路セクタ入城地点から移管点までの飛行距離を示す。

IAS：指示対気速度

GS：対地速度

合計8試行の実時間レーダー管制シミュレーションにより得られた記録のうち、管制上の介入により形成された航空交通流に係る主なパラメータ及びその値を、全試行分まとめて、表2に示す。

表2 航空交通流パラメータ (試行)

	高度 (FT)	速度(KT)		間隔		飛行距離 (NM)
		IAS	GS	(NM)	(秒)	
移管点						
平均値	9,393	254	330	9.0	99	83.7
標準偏差	2,886	13	37	3.3	42	12.7
最大値	20,200	300	481	31.1	264	121.3
最小値	5,000	230	274	4.2	0	57.7
最終進入開始点						
平均値	4,964	180	185	5.7	112	59.1
標準偏差	42	9	9	0.8	17	3.9
最大値	5,000	250	256	8.0	192	70.8
最小値	4,700	158	163	3.8	64	50.5
滑走路進入端						
平均値	63	142	132	4.2	113	15.3
標準偏差	28	1	1	0.8	20	0.0
最大値	100	143	134	8.5	224	15.3
最小値	25	140	130	1.3	36	15.3

3. 記録の解析等

3.1 着陸回数に関する解析

航空機が安全に離着陸する場合には、当該滑走路に離着陸の支障となる他の航空機等が存在しないことが条件である。すなわち、離着陸には、当該離着陸機に対して、当該滑走路の一部又は全部を占有させる必要がある。

このような着陸機に対する滑走路占有時間から着陸回数が決まる。着陸回数を、単位時間内に一定の規則性に従って割り当てた場合、単位時間あたりの着陸回数が算出される。また、単位時間あたりの着陸回数から、当該規則性に基づいた着陸間隔を算出できる。

着陸機の滑走路占有時間は、滑走路面の摩擦係数に係る雨雪や着陸時の対地速度に影響する風等の気象条件を含む航空機の減速性能、高速離脱誘導路の位置やその形状等、接地後の滑走に関するもの等により決まる。

このような、滑走路占有時間は、時間(秒)を単位として用いる場合が一般的である。

着陸間隔は、離陸回数と着陸回数の割合、近接する、又は、交差する他の滑走路に係る離着

陸機や後方乱気流に対する安全間隔確保要件、進入速度等、航空交通流に関する事項に依存する。また、着陸間隔は、時間又は距離（ただし、最終的には、速度を基に時間に換算する。）で表す。着陸間隔は、当然のことながら、滑走路占有時間を下回ることではない。

3.2 航空機の速度に関する解析^[3]

航空機の運航に使用する速度には、大別して次の3種類があり、我が国においては、何れも、ノット（KT）を単位としている。

(1) 指示対気速度（IAS）

その時の動圧と静圧の差から算出され、操縦計器上に表示されて操縦に使用する対気速度である。

(2) 真対気速度（TAS）

IAS は、必ずしも、正確な周囲の空気団に対する速度を示さないため、IAS を気圧補正した周囲の空気団に対する速度である。

(3) 対地速度（GS）

TAS にその時の風の影響を加味した地表に対する速度で、地理上の地点間を移動した際の平均速度や相対速度差を算出するような場合に使用する。

同じ飛行経路上を2機の航空機が前後して飛行している場合、両機が一定のIAS や TAS の値を維持していた場合でも、例えば、先行機だけが旋回して追い風状態になった時には、その影響により、先行機のGS が後続機のGS より大きくなり、両機間の間隔は広がることになる。

2機の航空機が同じ空気団の中を、同高度で同じIAS の値で飛行していたとすると、この2機のそれぞれのTAS の値は、ほぼ同じとなる。しかし、異なる高度で同じIAS の値で飛行していたとすると、この2機のそれぞれのTAS の値は、その高度差分だけ差を生ずる。標準大気におけるIAS と TAS の関係を図3に示す。

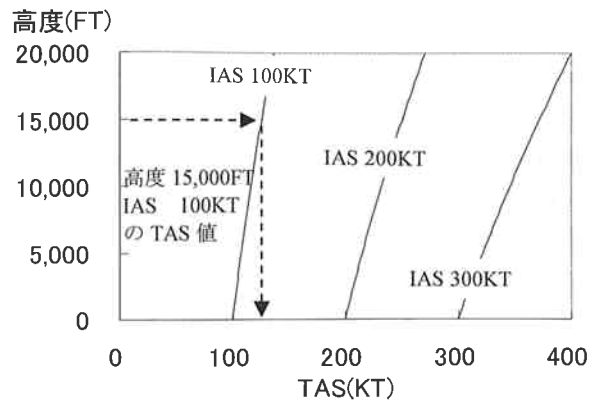


図3 標準大気におけるIAS と TAS の関係

このように、関連する2機の間には、両機が同じ速度（IAS）値を維持していた場合でも相対速度差が生じることがある。例を図4に示す。

IAS: 先行機 = 後続機

TAS: 先行機 < 後続機



図4 高度差による相対速度差が生じる例

3.3 航空交通流の解析

3.3.1 先行機と後続機の間隔

シナリオでは、2.1 に述べたように、移管点及び最終進入開始点における管制上の介入について条件を付した。これらの地点における先行機と後続機との間隔は、それぞれ7NM、5NMの条件に対し、表2では、それぞれ、平均値で9NM及び5.7NM、分布のバラつきを示す標準偏差は、それぞれ3.3NM及び0.8NMであった。

表1及び表2を比較すると、シナリオの航空交通流に対し、管制上の介入を行った結果、当該交通流が大きく変化したことがわかる。特に、各地点における先行機と後続機との間隔の値は、移管条件等が影響した結果を示すものである。

3.3.2 滞留時間

なお、表2について、移管点及び最終進入開始点におけるIASの最大値は、何れの試行で

も、第1グループの先頭の到着機に係る値であり、その他の到着機については、概ね同様の高度及び速度であった傾向を示すものと考えられる。また、移管点及び最終進入開始点における間隔の最大値は、何れの試行でも、第1グループ最後尾機と第2グループ先頭機との間隔であるが、航空路セクタ入域時の間隔であった8分（480秒）は、徐々に減少し、最終進入開始点では、平均値で、約2NM、80秒間上回っているにすぎないことから、これらの傾向は、移管点と最終進入開始点の間で、第2グループは第1グループに、ほぼ追いつくことを示すものである。第2グループが第1グループに追いつくことについては、第1グループの各機に係る各空域の入域間隔が出域間隔より小さいため、各空域内で、これらに間隔設定上の滞留時間が発生することが影響するものと考えられる。

3.3.3 相対速度差

表2の最終進入開始点及び滑走路進入端に係る各パラメータの値から、最終進入中については、後続機との時間差は殆ど変化していなかったことがわかる。これについては、最終進入中の速度に対し管制上の介入を行うことができないことから、表1の同値が示すとおり、2.1に述べたシナリオの設定速度が影響したものと考えられる。また、後続機の距離的な追いつき現象が示されているが、これについては、3.2に述べた高度差による相対速度差が生じたことが影響したものと考えられる。

3.3.4 着陸回数

シナリオでは、最終進入開始点における先行機と後続機との間隔は5NMとしていることから、これを3.1に述べた単位時間あたりの着陸間隔を算出する際の規則性とした。着陸間隔は、シナリオで形成した航空交通流の場合、移管点及び最終進入開始点における、管制上の介入に伴う先行機と後続機との間隔のバラつきを考慮して、4.2NM又は113秒程度となる。この間隔を1時間あたりの着陸回数に換算すると32回程度となる。

なお、移管点で、各機のGSの低速化や7NMに替えて、より大きな間隔に変更した場

合等には、先行機と後続機との時間差が、より大きくなり、最終進入開始点以前において、滞留時間が発生しなくなる程度まで広がることが考えられる。このような場合には、後続機に対する飛行経路のショートカットや大きな相対速度差を用いる等、強制的な追いつき現象を発生させなければ、最終進入開始点における先行機と後続機との間隔は5NMより大きくなり、その結果として、着陸間隔がより大きくなることが考えられる。

4. まとめ

実時間航空管制シミュレーションにより得られた航跡記録等に基づく航空交通流の解析の一例を示した。

着陸間隔と、到着機に係る移管条件、飛行高度等、管制上の介入と、互いに強く影響し合うことから、単位時間あたりの着陸回数を設定する場合には、併せて、管制方式、航空路セクタやターミナル空域等の管制機関相互間における移管条件等、関係する管制上の事項についても、考慮する必要があることがわかった。

本稿では、IFR到着機の航空交通流が同一滑走路に着陸する場合について、実時間航空管制シミュレーションにより得られた航跡記録等を使用した。より多くのシミュレーションにより得られる記録や実運用における各種記録を解析することにより、さらに厳密な航空交通流の解析が可能となる。

参考文献

- [1] 東福寺則保. 航空交通管制シミュレーション実験による交通容量に関する研究
- [2] 東福寺則保、上野徹、松浦司、小野塚幸子、佐藤裕喜. 関東空域の有効利用に関する調査研究. 電子航法研究所
- [3] 翼 醇. 航空力学 第3版、日本航空整備協会発行