
文
論
稿
投

Paper

空港滑走路の極限容量の推定方法に関する研究

A METHOD TO ESTIMATE AIRPORT RUNWAY CAPACITY

則 武通彦*

By Michihiko NORITAKE

Current air traffic control rules require that the fixed distance separations between aircraft operations be maintained on a runway. The runway capacity is inversely proportional to the time headway between operations. In such a case that the distance separation is settled, the time headway could be reduced by increasing the approach speed of aircraft. However, as the approach speeds increase, the runway occupancy times of landing aircraft will increase, and consequently, the runway capacity will decrease. In order to maximize the runway capacity under the above-mentioned conditions, in this paper, a method is proposed to match approach speeds of aircraft with distance separations by using the mathematical optimization techniques. Based on the numerical results obtained, the factors that restrict the further increase of runway capacity are made evident.

Keywords : runway capacity, airport, optimization, Kuhn-Tucker condition

1. 緒 言

空港の滑走路容量の推定ならびにその増強に関して、從来から多数の研究がなされてきている。その背景には、航空輸送需要の増大に比べて滑走路の離着陸処理能力の向上が立ち遅れたため、各國の主要空港において航空機の混雑あるいは遅れが顕在化し、深刻な事態になってきたことが挙げられる。

一般に滑走路の容量とは、滑走路が一定の時間内に処理することのできる航空機の離着陸数を意味しており、滑走路容量に影響する要因としては以下のようなものがある¹⁾。

- ① 滑走路および誘導路の数と配置
- ② 航行援助施設、着陸援助施設の整備状況
- ③ ローディング・バースの数
- ④ 航空機の機種および離・着陸機の割合
- ⑤ 風向、風速、視程などの気象条件
- ⑥ 進入方式および出発方式
- ⑦ 航空交通の管制施設と管制方式

上記の項目のうち、空港の滑走路容量を増すために採用される最も直接的な方法は滑走路の増設である。しか

し、近年多くの国では厳しい経済上ならびに環境上の制約により、現存する滑走路などの空港施設を拡張することはますます困難になってきている。そのため本研究では、滑走路の処理能力を向上させるための手段の1つとして、離陸機と着陸機のオペレーションの特性に着目した航空交通管制システムの改善について検討する。具体的には、滑走路に連続的に離着陸する航空機相互間で保持されなければならない距離間隔を規定した航空交通管制方式基準を、航空機のタイプ、性能と関連づけて分析する。そして、パイロットと航空交通管制官の緊密な連携によって滑走路容量の増大を図るという新しいタイプの航空交通管制システムの設計について考察する。

なお、滑走路の使用形態としては離陸専用、着陸専用、離着陸共用の3種類がある。これらのうち、離陸専用滑走路の容量は着陸専用の容量よりも大きくなり空港滑走路容量の隘路とはならないので²⁾、本研究では離陸専用滑走路の場合は扱わない。

2. 滑走路容量の定義

滑走路を使用する航空機のオペレーション (operations; 着陸と離陸の総称) の数が増加するにつれて空港での航空機の混雑は激化し、各航空機が被る遅れも増大する。そのようなオペレーション数と航空機の平均遅れ

* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科
(〒564 吹田市山手町 3-3-35)

(average delay)との間の関係に基づいて、空港の滑走路容量は従来から2通りの方法によって定義されている³⁾。

それらのうちの1つは、1960年以来、アメリカ合衆国の連邦航空局(Federal Aviation Administration)によって使用されてきた定義であり、“許容できるレベル(acceptable level)の航空機平均遅れに対応した1時間当たりのオペレーション数である”というものである⁴⁾。この概念は実用容量(practical capacity)と称されており、滑走路の混雑の程度や航空機の遅れを、かなり実際の現象に即して反映しているという利点をもっている。しかし、この定義の欠点は、すべての空港に適用可能な“許容できるレベルの平均遅れ”を特定化することが困難なこと、また滑走路を使用する航空機の輸送需要のパターンが変動すれば平均遅れも変化するという点にある。したがって、実際の空港計画において滑走路の実用容量を求めるためには、想定される輸送需要パターンに対して多数の計算が必要になる。

他方、最近になって多くの支持を得てきたもう1つの容量は、極限容量(ultimate capacity)あるいは飽和容量(saturation capacity)とよばれている。その定義は“滑走路に対して連続的な需要が発生するときに、滑走路が1時間当たりに処理することのできる最大のオペレーション数である”というものである⁵⁾。ここに連続的な需要とは、離陸あるいは着陸の準備ができる航空機が常に存在するということである。したがって、極限容量は滑走路が絶えず使用されているときの処理能力を意味し、混雑の程度や航空機の遅れを計測することはできない。しかし、空港の施設規模が不变であれば極限容量の値は一意的に決定されるので、代替的な施設計画案を比較できるという大きな利点をもっている。

以上の理由により、本研究では極限容量の定義に従って滑走路の処理能力を計測する。

3. 航空交通管制方式基準

空港に離着陸する航空機相互間の衝突を防止し、航空交通の円滑な流れを維持するために、航空交通管制業務が行われる。

一般に、航空機の飛行方式は有視界飛行方式(visual flight rules)と計器飛行方式(instrument flight rules)とに大別される。前者は視界の良好なときにパイロットが目視により地表面や他の航空機を確認して飛行する方式であり、後者は気象状態の良否に関係なく計器のみを使用して飛行する方式である。わが国などでは、定期航空運送事業に従事する航空機は空港周辺空域で計器による飛行を義務づけられているので、本研究では計器飛行方式を前提とする。その場合、航空機をサービスする航

空交通管制官は、計器飛行方式のもとで遵守しなければならないいくつかの管制方式基準をもっているが、それらのうちで滑走路容量に影響するものは次のとおりである。

① 連続して到着する2機の着陸機は、進入経路(approach path)上のすべての点で3海里^{注1)}(5.6 km)以上離れていなければならない。よって、この基準は、後続機の進入速度の方が先行機の速度よりも小さい場合は進入ゲートの所でチェックされ、逆の場合には滑走路進入端(threshold)の所でチェックされる(図-1参照)。

② 300 000 ポンド(136 tf)以上の最大離陸重量をもつ大型ジェット機は、飛行中に航跡乱気流(wake turbulence)を生じて後続機に悪影響を及ぼすので、上記①の基準を厳しくする。すなわち、連続して到着する2機のうち先行機が大型機の場合、後続機も大型機ならば4海里(7.4 km)以上、また後続機が中型機あるいは小型機ならば5海里(9.3 km)以上の機間距離を確保しなければならない。

③ 滑走路に着陸あるいは離陸しようとしている航空機が存在するときには、その滑走路に他の航空機が進入してはならない。よって、到着機が滑走路から誘導路に脱出するまで出発機の離陸は許可されない。また、2機の航空機が同一の出発フィックス(departure fix)に向かって連続して離陸する場合には、少なくとも空中で3海里的距離間隔が確保されなければならない。

④ 出発機の離陸は、後続の到着機が滑走路進入端から一定の距離以上離れていなければ許可されない。この距離はアメリカ合衆国で2海里(3.7 km)、わが国では3海里とされている。一般に、この距離が大きいほど滑走路での航空機事故に対する安全性は増大するが、逆に滑走路容量は減少する。

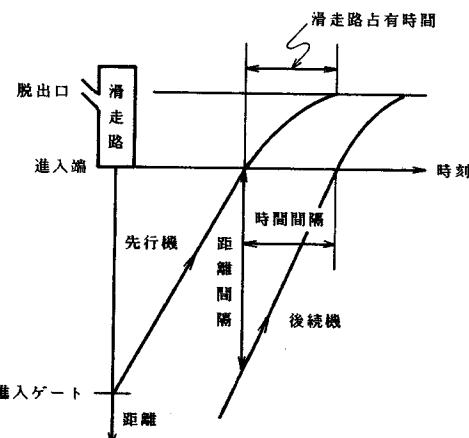


図-1 着陸機の時間間隔と距離間隔

注1) 1海里(nautical mile)=1.852 km.

なお、上記の管制方式は主としてアメリカ合衆国の基準^{2), 6)}に基づいており、わが国の基準⁷⁾では「先行機が滑走路を離脱する時刻において、当該機は滑走路進入端から3海里離れていること」を原則としている。したがって、わが国では2機間の実際の時間間隔は、さらに先行機が滑走路を占有する時間だけ長くとられて運用されている。しかし本研究では、理想的な条件の下での最大の滑走路容量を算出するための方法論の開発を主眼としているので、アメリカの基準に倣って、先行機のこの種の滑走路占有時間は考慮に入れないものとした。よって、以下で算定される滑走路容量の値は、わが国の空港で現実に観測される値よりかなり過大であることに注意する必要がある。

4. 着陸専用滑走路の容量

本章では、着陸機のみをサービスする1本の滑走路の容量について考察する。

(1) 基本的考察

いま、着陸するために滑走路に連続して到着する航空機の進入速度^{注2)}を v (ノット^{注3)})、機間距離を d (海里) とすれば、2 機間の時間間隔 h_1 (秒) は

となる。式(1)における h_1 と v の間の関係は、 d をパラメーターとして図-2のような双曲線として示される。

また、滑走路容量 C (オペレーション/時間) は

によって計算される。式(2)より、滑走路容量を増すためには、進入速度 v の増大と機間距離 d の短縮が有効である。しかし機間距離の短縮は前章の管制方式基準に抵触するので、本研究では進入速度の増大について検討する。その場合、次の点に注意する必要がある。

一般に、着陸機の進入速度が増せば滑走路での減速ならびに誘導路への脱出に要する時間、すなわち滑走路占有時間 (runway occupancy time) t_a (秒) が長くなる。もちろん滑走路占有時間は各空港の風、視程、滑走路の舗装状態、脱出口の位置、パイロットの技量などにも依存するが、最大の影響要因は航空機の进入速度である。そして t_a と v の間の関係は、次のような 1 次式によって表わされる⁶⁾。

ここに、 a , b は正の定数である.

注2) 一般的には、航空機の進入速度は、進入ゲートの所と滑走路進入端の所とでは幾分異なると考えられる。しかし、ここでは簡単化のために、それらの値は等しいものとした。

注3) 1ノット (knot)=1.852 km/h.

最大の滑走路容量は、着陸機の滑走路占有時間 t_a が到着機間の時間間隔 h_1 に等しい場合、すなわち

のときに得られるから、上式(4)に式(1), (3)を代入すれば、 $v > 0$ という必要条件を満たす進入速度 v は

となる。たとえば、Kanafani⁶⁾によって報告されているDC9 タイプの航空機に対応する $a=0.431$, $b=1.0$ という値を式(2), (5)に代入すれば、各機間距離に対する進入速度と滑走路容量は表-1 のカッコ内のように計算される。

(2) 許容解の検討と最適解

前節の考察では航空機の進入速度にいかなる制約も課されなかったが、実際には事故に対する安全性の面から、進入速度には次のような下限値と上限値が設定される。

このうち下限値は航空機の失速を回避するための条件、また上限値は着陸機が滑走路内で停止することができるための風、視程、滑走路の長さ・舗装状態などの条件から出てくる⁷⁾。

式(6)の制約条件を考慮した進入速度と滑走路容量は、表-1に示されている。機間距離が3海里の場合のみ、式(5)によって計算された進入速度が式(6)の範囲内に入っているが、それ以外の場合には進入速度が

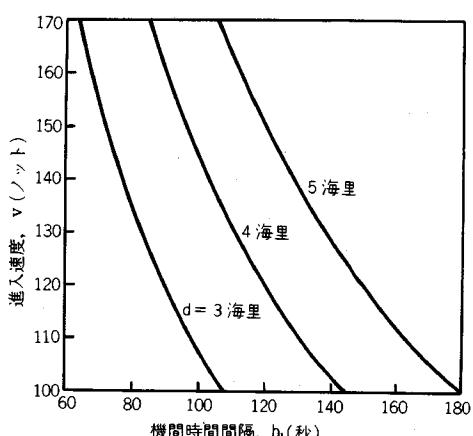


図-2 進入速度と機間時間間隔の関係

表-1 着陸専用滑走路の容量

機間距離 (海里)	進入速度 (ノット)	滑走路容量 (オペレーション/時間)
3	157	52
4	170(182)	43(45)
5	170(203)	34(41)

(注) カッコ内には、進入速度に制限がない場合の値が示されている。

上限値の 170 ノットに制限されるので、滑走路容量は減少する。表一より、滑走路容量を増やすためには現行の平均的な進入速度（120～140 ノット程度）よりも高速が望ましいこと、しかも、その傾向は機間距離が長い場合ほど顕著になることが明確である。

5. 離着陸共用滑走路の容量

1 本の滑走路を離着陸共用として使用すれば、離陸専用あるいは着陸専用として使用する場合よりも容量が増大するので、わが国をはじめ世界の主要空港ではこの使用形態が多い。離着陸共用滑走路は、出発機の離陸と到着機の着陸が交互に行われるときに容量が最大になることが明らかにされているので²⁾、本研究ではそのようなオペレーションを前提とする。

（1）基本的考察

いま、出発機が離陸するために滑走路を占有する時間 t_a (秒) とすれば、それぞれ 1 機ずつの出発機と着陸機が滑走路を占有する時間の合計 t_t (秒) は、式(3) の関係を考慮して

$$t_t = t_a + t_d = av + b + t_d \quad (7)$$

となる。そして、滑走路の最大容量は、上式(7)の滑走路占有時間 t_t が到着機間の時間間隔 $h_2 (= 3600 d/v)$ に等しいとき、すなわち

$$t_t = h_2 \quad (8)$$

のときに得られる。したがって、このときの進入速度 v は、 $v > 0$ という必要条件を考慮すれば

$$v = \frac{-(b + t_d) + \sqrt{(b + t_d)^2 + 14400 ad}}{2a} \quad (9)$$

となる。

（2）許容領域の検討と最適解

出発機が滑走路を占有している時間 t_a の間に、後続の到着機が進入する距離を d_2 (海里) とすれば

$$d_2 = (v \cdot t_a) / 3600 \quad (10)$$

となる。3. の管制方式基準④によると、 d_2 は 2 海里あるいは 3 海里以上でなければ、連続して到着する 2 機の着陸機の間に 1 機の出発機を挿入することはできない。

しかし、式(9)によって算出される v の値を用いて式(10)の d_2 を計算した場合、その d_2 の値が管制方式基準を満足しているという保証はない。よって以下では、上述のすべての制約を考慮に入れた滑走路容量の最大化問題を数理計画手法で定式化して解く。

a) 定式化

後述の二次元の幾何学的分析を容易にするため、与えられた制約条件と目的関数を 2 個の独立変数 v 、 t_a によって記述する。いま、制約条件は次の 4 つである。

- ① 着陸機の進入速度
式(6)を再記する。

$$100 \leq v \leq 170 \quad (6)$$

② 離陸機の滑走路占有時間

従来の実績⁷⁾より、大型機に対して 60 秒、それ以外の中型機あるいは小型機に対して 50 秒とする。

$$t_a \geq 50 \text{ or } 60 \quad (11)$$

③ 連続して到着する着陸機間の距離間隔

3. の管制方式基準①、②より、先行機と後続機の機種（大型、その他）のおのおのの組合せに対して

$$d \geq 3 \text{ or } 4 \text{ or } 5 \quad (12)$$

となる。上式(12)に式(1)、(7)、(8)の関係を用いれば、次式が得られる。

$$t_a \geq \frac{3600d}{v} - (av + b) \quad (13)$$

(ただし、 $d = 3$ or 4 or 5)

④ 離陸機と着陸機の間の距離間隔

3. の管制方式基準④より、

$$d_2 \geq 2 \text{ (アメリカ) or } 3 \text{ (日本)} \quad (14)$$

である。上式(14)に式(10)を代入すれば、次式が得られる。

$$(v \cdot t_a) \geq 7200 \text{ (アメリカ) or }$$

$$10800 \text{ (日本)} \quad (15)$$

一方、目的関数は次のようになる。

⑤ 滑走路容量

時間間隔 t_t の間に離陸と着陸がそれぞれ 1 回ずつ行われるから、滑走路容量 C の最大化は式(7)を用いて

$$\max C = \frac{2 \times 3600}{t_t} = \frac{7200}{av + b + t_d} \quad (16)$$

と書くことができる。しかし本研究では以下の分析を容易にするため、 C の逆数の最小化、すなわち

$$\min \frac{1}{C} = \frac{av + b + t_d}{7200} \quad (17)$$

を採用する。

以上によって、式(6)、(11)、(13)、(15)の制約条件のもとで式(17)の最小値を求めるという滑走路容量の最適化問題が定式化された。

b) 問題の幾何学的特徴

前項 a) の定式化において、パラメータ d 、 d_2 、 t_d に関する制約のレベルはそれぞれ 3, 2, 2 個であるから、全体では表一の 12 ケースとなる。また、表三には、上述の各制約条件の境界を表わす式ならびに目的関数に対応する曲線（直線も含む。以下同様。）の式の形と番号を示している。表三より明らかなように、これらの曲線はいずれも v 、 t_d という 2 变数によって表わされるので、平面座標系に図示することができる（図一-3）。

図一-3には、表三に示された曲線番号に従って、すべての制約条件の境界を表わす曲線が描かれており、また

表-2 ケースの分類

ケース番号	制約条件		
	$d \geq$	$d_2 \geq$	$t_d \geq$
1	3	2	50
2	3	2	60
3	3	3	50
4	3	3	60
5	4	2	50
6	4	2	60
7	4	3	50
8	4	3	60
9	5	2	50
10	5	2	60
11	5	3	50
12	5	3	60

(注) 各ケースとも $100 \leq v \leq 170$.

表-3 曲線の式と番号

曲線番号	曲 線 の 式	関係する式
①	$v = 100$	(6)
②	$v = 170$	
③	$t_a = 50$	(11)
④	$t_a = 60$	
⑤	$t_a = (10800/v) - (0.431v + 1.0)$	
⑥	$t_a = (14400/v) - (0.431v + 1.0)$	(13)
⑦	$t_a = (18000/v) - (0.431v + 1.0)$	
⑧	$v \cdot t_a = 7200$	
⑨	$v \cdot t_a = 10800$	(15)
⑩	$\frac{1}{C} = \frac{(0.431v + 1.0) + t_a}{7200}$	(17)

(注) 曲線番号と制約条件の対応関係は、次のとおりである：

$$\textcircled{5} \ d = 3, \ \textcircled{6} \ d = 4, \ \textcircled{7} \ d = 5, \ \textcircled{8} \ d_2 = 2, \ \textcircled{9} \ d_2 = 3.$$

一例として表-2のケース番号11, 12に対応した許容領域が斜線で塗られている。図-3より、表-2の12ケースに対する許容領域はすべて凸領域になることがわかる。

一方、目的関数（式（17））は図-3において一定の傾き（-0.431）をもつ直線として表わされるので、その最小値は許容領域の端点あるいは目的関数と許容領域の接点において与えられる。端点解と接点解の判別は、目的関数（直線）の平行移動により検討される。図-3には、目的関数（直線⑩）が上記の許容領域に点Cで接するようすが例示されている。表-4は目的関数の最小値が得られる端点と接点のリスト（A-F）であり、それらの点は図-3に示されている。なお、表-4において h_2 は連続して到着する2機間の時間間隔を意味し、その値は t_k （= $t_a + t_s$ ）に等しい。

c) 問題の一般的解法

本項では、数理的手法を用いて最適解を得る。

(1) 目的関数が許容領域の端点と交わる場合

この場合の最適解は、端点を構成する1組の曲線の式を連立して解けば求められる。たとえば、図-3における点Bの座標は、直線④と曲線⑧の交点であるから

より、

$v=120$ (ノット), $t_d=60$ (秒)

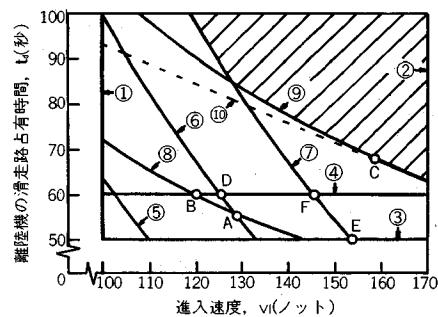


図-3 許容領域と最適解

となる。これらすべての端点解 B, D, E, F の座標とそれらに対応した諸量は、表-4 に示されている。

(ii) 目的関数が許容領域に接する場合

図-3より明らかのように許容領域はすべてのケースに対して凸領域になり、また目的関数は直線であるから、この場合はキューン-タッカー (Kuhn-Tucker) の定理を使うことができる⁸⁾。そのため、一般に2変数 v , t_d の関数

という条件のもとで、同じく 2 変数の関数 $f(v, t_d)$ の値を最小にする問題を考える。いま、式 (19) を等式条件に変えるため新たな変数 z を導入すれば、次式のラグランジュ (Lagrange) 関数を定義することができる。

$$L(v, t_d, \lambda, z)$$

表-4 端点と接点の座標と変数の値

点	点の種類	点の座標		変数の値				ケース番号	
		v (ノット)	t _d (秒)	t _a (秒)	h _b (秒)	d _e (海里)	d (海里)		
A	曲線⑧に直線⑩が接する	129	56	57	112	2*	4.0	64	1, 5
B	直線④と曲線⑧の交点	120	60*	53	113	2*	3.8	64	2
C	曲線⑨に直線⑩が接する	158	68	69	137	3*	6.0	52	3, 4, 7, 8, 11, 12
D	直線④と曲線⑥の交点	125	60*	55	115	2.1	4*	63	6
E	直線③と曲線⑦の交点	153	50*	67	117	2.1	5*	62	9
F	直線④と曲線⑦の交点	145	60*	64	124	2.4	5*	58	10

(注) 滑走路容量の増大に対して制約となった要因は、*によって示されている

ここに、 λ はラグランジュ乗数である。そして関数 $f(v, t_d)$ の値が最小になるためには、次のキューン-タッカーの条件が成立しなければならない。

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial v} = \frac{\partial f}{\partial v} - \lambda \frac{\partial g}{\partial v} = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial t_d} = \frac{\partial f}{\partial t_d} - \lambda \frac{\partial g}{\partial t_d} = 0 \\ \lambda \cdot g(v, t_d) = 0 \end{array} \right. \quad (21)$$

たとえば、図-3の点Aに対してこの方法を適用すれば、ラグランジュ関数は

$$L(v, t_d, \lambda, z) = \frac{(0.431 v + 1.0) + t_d}{7200} - \lambda [v \cdot t_d - 7200 - z^2] \dots \dots \dots (22)$$

となり、さらにキューン-タッカーの条件は

$$\left| \begin{array}{l} \frac{\partial L}{\partial v} = \frac{0.431}{7200} - \lambda \cdot t_a = 0 \\ \frac{\partial L}{\partial t_a} = \frac{1}{7200} - \lambda \cdot v = 0 \\ \lambda \cdot g(v, t_a) = \lambda [v \cdot t_a - 7200] = 0 \end{array} \right. \quad (23)$$

となる。よって、上式(23)を連立して解けば

$$\lambda = 1.07 \times 10^{-6}$$

という解が得られる。これら 2 つの接点解 A, C の座標とそれらに対応する諸量は、表-4 に与えられている。

表-4に示されている各点の座標ならびに変数の値が最適解を構成していることは、図-3より明らかである。

d) 結果の考察

前項までの分析により、種々の制約条件のもとでの離着陸共用滑走路の最大容量を求めることができた。本項では、得られた結果について考察する。

① 表-4には、滑走路の最大容量を与える諸量の値が12ケースすべてに対して示されている。表-4において*印を付された数値は、滑走路容量の増大に対して制約となった要因を意味している。制約要因の数は接点(A, C)では1個、端点(B, D, E, F)では2個になつており、得られた解は幾何学的にも妥当であることがわかる。

② 表-4より、滑走路容量に対する制約要因が各ケースに対して明確になる。すなわち、接点A, Cでは離陸機と後続着陸機との間の距離間隔 d_2 が制約となり、また、端点Bでは d_2 と離陸機の滑走路占有時間 t_a とが制約となり、さらに端点D, E, Fでは、 t_a ならびに連続して到着する航空機相互の距離間隔 d が制約要因になっている。特に、わが国に関係した6ケース(ケース番号3, 4, 7, 8, 11, 12)では、すべて離陸機と着陸機の間の距離間隔 $d_2 \geq 3$ という条件が容量増大に対

する制約になっている。この点は、 $d_2 \geq 2$ という条件に管制基準を緩和して容量の増大を図っているアメリカの方式と著しく異なる。

③ 上記②の理由により、アメリカの場合の最大滑走路容量は日本の場合の1.11～1.22倍になる（表-4参照）。 d_2 の短縮可能性は今後の検討課題であるが、その場合、航空機離着陸の安全性、航空交通管制業務の難易などの面からの考察も必要である。

④ 着陸機の進入速度 v は、すべてのケースに対しても、その上限値（170 ノット）と下限値（100 ノット）の範囲内にあり、滑走路容量への制約要因にはなっていない。

⑤ 表-1と表-4を比較すれば、滑走路は着陸専用よりも離着陸共用として使用する方が容量の面では有利になることがわかる。

6. 結 言

本研究では、空港滑走路を使用する航空機の離着陸の安全と運航秩序を維持するために規定されている航空交通管制方式基準の制約のもとで、滑走路の離着陸容量を増大するための方法について考察した。その場合、極限容量の定義に従うことにより、滑走路がもつ潜在的な離着陸処理能力を定量的に比較・分析することができた。本研究によって得られた主要な成果と結論は、以下のとおりである。

(1) 計器飛行方式のもとで運用される滑走路の容量に影響する航空交通管制方式基準を、着陸機の進入速度および離・着陸機の滑走路占有時間と関連づけた。その結果、滑走路容量を数理的に取り扱うことが可能になった。

(2) 着陸専用滑走路の容量を増大するためには、現行の平均的な着陸進入速度である 120~140 ノットよりも高速が望ましく、その傾向は、連続して到着する航空機間の距離間隔が大きくなるほど顕著である。

(3) 空陸と着陸が交互に行われる離着陸共用滑走路の容量最大化問題を、非線形制約条件のもとでの最適化問題として定式化した。そして、その問題の幾何学的特徴に着目することにより、一般的な数理解析手法を用いて最適解を得ることができた。さらに数値結果を分析することにより、滑走路容量の増大に対して隘路となっている要因を摘出することができ、今後検討すべき管制方式基準の問題点が明確になった。

(4) 滑走路容量の面では、滑走路を離陸あるいは着陸専用として運用するよりも、離着陸共用として使用する方が有利であることが確認された。

なお、本論文では空港滑走路での航空機のオペレーションと航空交通管制方式基準のみに焦点を合せてい

る。そのため、次の課題が今後に残されている。

① 着陸機の進入速度および管制方式基準の差異が、航空機離着陸の安全性と滑走路容量という対立する2つの目標に対してどのような影響を及ぼすかについて、安全性分析あるいはリスク・便益分析(risk-benefit analysis)が必要である。

② 本研究では、着陸機の進入速度と滑走路占有時間の間の関係を式(3)で表わし、式中の定数 a , b には特定のタイプの航空機に対応する値を用いた。しかし、現実には空港に種々のタイプの航空機が離着陸するので、定数 a , b の値は機種ごとに異なる。したがって、今後の調査により機種(大・中・小型機)別に a , b の値を求めて、タイプ別の極限容量を推定しなければならない。そして、各タイプの航空機が当該空港を利用する割合を考慮して(たとえば、加重平均をとって)、実際的な滑走路容量を求める必要がある。

③ 離着陸共用滑走路の極限容量を推定する場合、本研究では離陸と着陸が交互に行われることを前提とした。しかし、たとえば1日当たりの滑走路容量を算定する場合には、離・着陸機数や離・着陸の順序が容量の値に大きく影響する。したがって、それらの要因を組み込んだモデルの開発が必要である。

しかし本研究により、今後、航空交通管制方式基準には航空機間の距離間隔だけでなく時間間隔による規定も導入すべきこと、また管制官がパイロットに着陸時の進入速度を指示することにより現在の滑走路容量をさらに増大できることなどが明らかになった。

アメリカでは近年、新しいタイプの航空交通管制システムの実現を支援するための技術が相次いで開発されている⁹⁾。それらのうちの1つはAHD(Automated Headway Display)とよばれ、レーダー・スコープ上に到着機相互間ならびに到着機と滑走路進入端との間の距離間隔を連続的、自動的に図示するものである。他方はILM(Integrated Landing Management)とよばれ、到着機の飛行軌跡を追跡して飛行速度と位置を調整する

ことによって、先行の着陸機あるいは離陸機の滑走路占有時間と同調させる技術である。本研究で提示された解析手法は、それらの技術と相まって、空港滑走路容量の増大に寄与するであろう。

参考文献

- 1) 平井磨達夫編著：空港、技報堂出版、pp.41～133, 1984.
- 2) Newell, G. F. : Airport capacity and delays, Transportation Science, Vol. 13, No. 3, pp. 201～241, Aug., 1979.
- 3) Horonjeff, R. and McKelvey, F. X. : Planning and Design of Airports, 3rd ed., McGraw-Hill Book Co., New York, pp. 222～287, 1983.
- 4) Federal Aviation Administration : Airport Capacity Criteria Used in Preparing the National Airport Plan, Washington, D.C., Advisory Circular AC 150/5060-1A, July, 1968.
- 5) Federal Aviation Administration : Techniques for Determining Airport Airside Capacity and Delay, Washington, D.C., Rep. FAA-RD-74-124, June, 1976.
- 6) Kanafani, A. : Operational procedures to increase runway capacity, Proc. of ASCE, Transportation Engineering, Vol. 109, No. 3, pp. 414～424, May, 1983.
- 7) 連輸省航空局編：関西国際空港の規模及び位置(関係資料10、関西国際空港の空域、飛行経路及び空港容量)，1975.
- 8) C. マクミラン, Jr. (一楽信雄ほか訳)：数理計画入門1、東京図書、pp. 97～126, 1972.
- 9) Gosling, G., Kanafani, A. and Hockaday, S. : Measures to Increase Airfield Capacity by Changing Aircraft Runway Occupancy Characteristics, UCB-ITS-RR-81-7, Berkeley, Institute of Transportation Studies Research Report, Berkeley, Calif., 1981.

(1986.12.10・受付)