

空港のターミナルエプロン計画について

——新北海道空港への適用——

正員 小川 博三*

正員 五十嵐 日出夫**

正員 ○清水 浩志郎***

1. 緒 言

近年わが国の産業構造の近代化，所得水準の向上など経済，社会構造の変革は航空輸送量（主として旅客）の急激な需要の増大を招来し，民間航空会社では逸早くジェット機など新鋭機材の投入，運航便数の増加などが行なわれている。これに対処するためにも複数滑走路，滑走路の延長，平行高速誘導路，各種エプロン，ターミナルビル，自動車駐車場，航空保安施設など空港施設整備，新設の強化が要請される。

近年 OR (Operations Research) の手法が計画，管理の手段として急速に発達して以来，交通計画の分野でも広く応用されだした。

OR の一手法である待ち合わせ理論 (Queuing Theory) を滑走路¹⁾，ターミナルビルの改札業務²⁾ など空港計画に適用した研究もあるが，わが国において土木工学とくに交通計画的見地よりこの分野での研究は民間航空輸送の歴史が浅いこともあってあまり活発には行なわれていない。

この研究では空港けい留施設とくにターミナルエプロン施設計画に待ち合わせ理論，計量経済学の分野で広く用いられている W. Leontief の くもの巣型³⁾ モデルを応用し，最適所要バース数を求め，その後軍民共用，札幌との遠隔，幹線とローカル線との分離など複雑な問題を有する千歳空港の代替空港建設時に適用した。

2. ターミナルエプロン

ターミナルエプロンとはターミナルビルに近接して設けられ，主として旅客の乗降のために航空機が地上でけい留される場所をいい，普通航空機一機分の駐機面積を1バースという。

ターミナルエプロンのバース配置方法による分類は次のようである。

(1) フロント方式 (Frontal System)

(2) オープンエプロン方式 (Open Apron System)

(3) フィンガー方式 (Finger System)

(4) 衛星方式 (Satellite System)

3. ターミナルエプロン最適所要バース数 選定のための算定方法

ターミナルエプロンの所要バース数算定にはその空港のピーク発着回数，けい留時間，発着航空機種の3要素が必要で，その後バース配置方式が決定される。

従来バース数算定には運輸省航空局⁴⁾ では1時間当り平均運航便数，けい留時間より図式的に求め，R. Horonjeff⁵⁾ は1時間当り空港の発着可能容量と平均けい留時間より所要バース数を導いている。

この研究では待ち合わせ理論を応用し，バース数が不足の結果生じる待ち合わせのための損失時間を民間航空会社側の損失費用として求め，その後この損失費用とエプロン提供側のエプロン建設費用の和を最小とするバース数を所要バース数とした。

3.1 待ち合わせ損失時間算定モデル

着陸機1機当りの平均待ち損失時間算出モデル作成の前に次の条件を仮定する。

- イ) 着陸機がバースでサービスされる順番には優先権がなく，全て到着順にサービスが受けられる。
- ロ) 着陸機には到着予定時刻が決まっているが，到着予定時刻は大幅に変わるので単位時間当り平均入機のポアソン到着とする。
- ハ) 着陸機のバース占有時間(サービス時間)は $1/\mu$ の指数分布に従う。

なお着陸機がバースでサービスされる方法として次の3つの型を考える。

(1) 専用サービス方式

路線別に専用バースにけい留する方式で，例えば幹線，ローカル線それぞれ専用のバースでサービスする。

* 北海道大学工学部教授 理博

** 北海道大学工学部助教授

*** 北海道大学工学部

(2) 併用サービス方式

任意の空いているバースでけい留する方式、例えば全てのバースを面積の大きい幹線用とし、幹線、ローカル線とも共通してサービスする。

(3) 特定サービス方式

ある着陸機は全てのバースにけい留できるが、特定の着陸機には特定のバースでしかけい留できない方式で、例えば着陸機を幹線、ローカル線の2種類を考えた場合、ローカル線は全てのバースでサービスされるが、幹線は幹線用バースでしかサービスされない。

これら3種の型についてモデル化する。

専用、併用サービス方式は複数チャンネルの平均待ち合わせ時間⁶⁾を求める式としてモデル化できる。

今着陸機1機当りの平均待ち損失時間は

$$\bar{t}_f = \frac{\mu \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^C}{(C-1)! (C\mu - \lambda)^2} P_0 \quad (1)$$

P_0 はシステム中に単位が存在する確率

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{C-1} \left(\frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right) + \frac{1}{C!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^C - \frac{C\mu}{C\mu - \lambda}} \quad (2)$$

ただし

λ : 単位時間当りの平均着陸機数

μ : 1バース当りの平均サービス率

C : バース数

の式で求められる。

特定サービス方式は複数チャンネル、特別サービスのある待ち合わせとしてモデル化できる。

このモデルは着陸機が数種類(国際線、幹線、ローカル線など)あり、そのうちのある着陸機は全てのバースでけい留できるのに対してある他の着陸機は特定のバースでしかけい留できない。そのような着陸機を含むものである。

着陸機が幹線、ローカル線の2種類の場合について考察してみる。

当然このモデルを解くためには先着順という前述の仮定を立てるが、もし特定バースが全て塞がっている時、後から来たローカル線航空機は特定バースが空くまで待っている幹線航空機より先に着陸できるものとする。

この方式による着陸機1機当りの平均待ち損失時間はまだ理論的に解かれていない。そこで E. Koenigsberg⁷⁾ が解いた近似解を用いてモデル化した。

次のように λ_1, λ_2 を仮定する。

$$\left. \begin{aligned} \lambda_1 &= \lambda \cdot r + \frac{m}{C} (1-r) \lambda \\ \lambda_2 &= \frac{C-m}{C} (1-r) \lambda \\ \lambda &= \lambda_1 + \lambda_2 \quad r = \lambda' / \lambda \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ただし

C : バース数

m : 特別バース数

λ : 単位時間当り平均着陸機数

λ_1 : m バースに対する単位時間当りの平均着陸機数

λ_2 : $(C-m)$ バースに対する単位時間当りの平均着陸機数

λ' : 単位時間当りの幹線着陸機数

これら λ_1, λ_2 を複数チャンネル、指数型サービス時間として E. C. Molina の式⁸⁾に代入する。

$$\bar{t}_f = \int_0^\infty t \frac{d(P(>t))}{dt} dt = \frac{h}{C-\rho} P(>0) \quad (4)$$

$P(>0)$ はサービス待ちを生じる確率

$$P(>0) = \frac{\left(\frac{\rho}{C} e^{-\rho} \right) \left(\frac{C}{C-\rho} \right)}{1 - P(C, \rho) + \left(\frac{\rho^C e^{-\rho}}{C!} \right) \left(\frac{C}{C-\rho} \right)} \quad (5)$$

$$P(C, \rho) = \frac{\rho^C}{C!} \exp(-\rho)$$

ただし

h : バース占有時間 ($1/\mu$)

ρ : バース利用率 $\lambda \cdot h$

3.2 総損失費用の算定

損失費用として前述した2要因の他に旅行時間の長短による航空機利用側(旅客、貨物など)の受ける損失、エプロンの用地費なども考慮しなければならない大きな問題である。しかしこれら費用は利用階層、場所によって大きく変化し、計量することには非常に困難を伴う。また仮りに計量できたとしてもその数字の信憑性はきわめて乏しい。従って本研究ではエプロン提供側のエプロン建設費、待ち損失時間によって生じる民間航空会社の損失費用の2要因について考察した。

このうちエプロン建設費用の算定は比較的正確に得られるが、民間航空会社の損失費の算定は困難である。そこでここではバース数不足のために生じる待ち合わせ時間は全て空港の上空待機するものとし、航空機1機当り単位時間当りの変動費を損失時間に乗じることによって民間航空会社側損失費用とした。

a. エプロン提供側損失費用

エプロン提供側の損失費用としては一般の土木構造物の償却費計算と同様にして求めることが出来る。

$$R = \frac{X(1+i)^Y + MY}{Y} \quad (6)$$

ただし

R : 1バース当りの償却費

X : 1バース当りの建設費

i : 建設費に対する利率

Y : 耐久年数

M : 維持補修費

b. 民間航空会社側損失費用

民間航空会社側の損失費用としての変動費とは航空機を稼働させるために要する費用で人件費、燃油費、保険費、償却費、整備費などより求められ、単位時間当り b とする。

3.3 最適所要バース数の算定

待ち損失時間 $\bar{t}_f$ は (1), (4) 式より求めることができ、幹線 $\bar{t}_{f1}$ 、ローカル線 $\bar{t}_{f2}$ になったとする。この待ち損失時間によって生じる民間航空会社側の損失費用は次式で表わされる。

$$B = b_1 \bar{t}_{f1} + b_2 \bar{t}_{f2} \quad (7)$$

ただし

b_1 : 幹線用航空機単位時間当り変動費

b_2 : ローカル線用航空機単位時間当り変動費

また、エプロン提供側の損失費用としては次式で表わされる。

$$S = C_1 R_1 + C_2 R_2 \quad (8)$$

ただし

C_1 : 幹線用バース数

C_2 : ローカル線用バース数

従って総損失費用は

$$H = B + S \quad (9)$$

で表わされる。

次に (7), (8) 式についてみると、まず (7) 式はバース数の増加に従い損失費用 B は減少し、(8) 式は逆にバース数増大に伴って損失費用 S は増加する。

これら両者の関係は W. Leontief が用いたもの渠型モデルを用いて説明できる。

すなわち、(7), (8), (9) 式はいずれもバース数 (C) の関数として表わすことができ、とくに (9) 式はあるバース数が C_n の場合総損失費用を最小にするような曲線である。

(9) 式の最小値 $C_n (= C_1 + C_2)$ がこの場合最も損失費用を最小にする経済的な所要バース数となる。

4. 新北海道空港における適用

北海道における航空輸送は昭和 27 年 1 月東京～三沢～札幌線が日本航空株式会社によって運航されて以来、路線の拡張、新設、運航便数の増加など毎年行なわれ、以後非常な発展をみた。

とくに、北海道の場合には青函海峡によって本州と隔離されているという地理的な悪条件および北海道内の陸上交通網の不足など将来航空機交通の利用度合は益々増大するであろう。それに加えて軍民共用、札幌との遠隔、さらに

は幹線、ローカル線分離など色々複雑な問題を有する千歳空港の代替空港、また第 18 回冬季オリンピック札幌開催など新北海道空港建設計画⁹⁾ が各方面でなされている。

これら計画による新北海道空港建設時最も経済的なターミナルエプロン施設計画を行なうために前述の最適バース算定方法を応用して所要バース数を算出した。

4.1 発着回数とバース占有時間の算出

ターミナルエプロンの所要バース数を算出するためには発着回数とバース占有時間がインプットデータとして必要である。

発着回数は航空輸送量、航空保安施設、就航航空機種など、またバース占有時間は路線就航航空機種などによって大きく変化する。

a. 発着回数

発着回数は一般に次式で表わされる。

$$\text{発着回数} = \frac{\text{年間航空旅客数}}{\text{航空機座席数} \times \text{利用率}}$$

将来就航予定機種として運輸省航空局で予想している幹線 B-727 型、CV-880 型、ローカル線 YS-11 型とした¹⁰⁾。

また利用率としては昭和 39 年の実績を基にして、幹線 75%、ローカル線 70% と仮定した。

なお将来航空旅客の推計値としては著者らの別の研究¹¹⁾ によって昭和 50 年幹線 319 万人 (東京～札幌間 290 万人、大阪～札幌間 29 万人)、ローカル線 86 万人 (北海道内ローカル 39 万人、北海道・本州間ローカル 47 万人) と推計されている。

以上の数値によって年間発着回数は算出されるが、次の問題として単位時間当りの着陸機数を算出しなければならない。この値は月、週、日、時によって大きく変化する。

一般的に交通施設は旅客需要のピークを考慮して設けねばならない。ピークは交通機関の種類によりその期間は色々と考えられるが、航空輸送とくに北海道という地理的な条件を考慮し、ここでは 1 年を期間とした季節変化をとらえ、そのピークについてフーリエの級数で分析した¹²⁾。その結果 (図-1) のようになった。

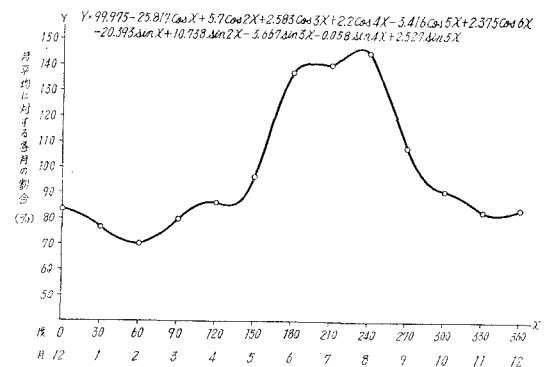


図-1 着陸機の季節変化 (千歳空港)

表-1 平均1時間当り着陸機数算出表

路 線		将来航空 旅客推計 (A)	就 航 予 定 航 空 機			年 間 発着回数 $D = \frac{A}{B \times C}$	ピーク月着陸機数 $E = \frac{1}{2} \left(1.45 \frac{D}{12} \right)$	ピーク月平均 1日当り 着 陸 機 数 $F = \frac{E}{30}$	平均1時 間当り 着 陸 機 数 $G = \frac{F}{17}$
			機 種	座席数 (B)	利用率 (C)				
幹線	東京～札幌 大阪～札幌	290万人 29	B-727 CV-880	130人	75%	32720回	1980回	66回	4回
ローカル 線	北海道内 北海道・本州	39 47	YS-11	60	70	20480	1240	42	3

用いた資料は千歳空港における昭和38～40年の3カ年間の月別着陸機数(定期,不定期路線)で年平均を100とした場合の指数(%)である。

これによれば8月がピーク月となり着陸機数は月平均の1.45倍となる。

ここではピーク月の日平均を取り,それを空港実質使用時間(ここでは東京,大阪両国際空港の実績に基づいて1日17時間と仮定した。)で除した数値を単位時間当りの平均着陸機数(λ)とした。

上述したことを一括すれば(表-1)のようになり,単位時間当りの平均着陸機数は

幹 線 4回/時

ローカル線 3回/時

となる。

b. バース占有時間

バース占有時間は千歳,丘珠両空港の実績(昭和40年1月～8月)より幹線,ローカル線とも1時間(60分)とした。

4・2 待ち損失時間のために生じる総損失費用の算出

総損失費用を求めるためにはエプロン提供側のエプロン建設費用(R),航空機変動費(b),所要バース数(C),民間航空会社の待ち損失時間(t_f)の4要素が必要である。

a. エプロン建設費用

運輸省航空局ではまだエプロンの償却について明確に規定していないので道路建設時の資料を用いた。

これによると $i=6$ 分, $Y=20$ 年となり,これを使用して計算すると平均1日当りの損失費用は次のようになる。

(北海道開発局空港課調べ)

幹 線 (B-727 用)…… $R_1=10.03$ 千円/日

ローカル線 (YS-11 用)…… $R_2= 3.36$ 千円/日

なおこの1バースの建設費償却の中にはターミナルビルとのクリアランスなどを含んでいる。

b. 航空機変動費

航空機変動費は航空機種,使用航空会社によって大きく変る。

また YS-11 による関係費用はまだ使用年数が少ないこともあって正確には捕えにくい。ここでは航空機の価格,座席数などが大体同じと思われる DC-4 について取った。

表-2 航空機変動費

機 種			CV-880 (千円)	DC-4 (千円)
人	件	費	4.2	2.4
燃	油	費	119.1	20.5
保	険	費	34.8	2.3
償	却	費	97.6	20.0
整	備	費	137.3	28.9
合 計			393.0 千円/時 6.55 千円/分	74.1 千円/時 1.24 千円/分

なお B-727 についても同じような理由により CV-880 について取りその資料とした。

用いた資料は日本航空株式会社の所有機についてである。その結果は(表-2)に示すとおりである。

c. 待ち損失時間

待ち損失時間は3種のバース使用方式によってそれぞれ異なった数値が得られる。

(i) 専用サービス方式による場合

この場合の単位時間当りの平均着陸機数は

幹 線 4回/時

ローカル線 3回/時

バース占有時間 1時間(60分)

これら3数値を(1),(2)式に代入すれば,求める待ち損失時間が計算できる。

バースと平均待ち時間の関係は(表-3)に示すようになった。

(ii) 併用サービス方式による場合

この場合も(i)と同じモデルによって計算できるが,ただ単位時間当り平均着陸機数は幹線のそれとローカル線の和,すなわち7回/時となる。

これを(1),(2)式に代入すればバースと待ち時間が求められる。

この関係は(表-4)に示すようになる。

(iii) 特定サービス方式による場合

この方式による場合,単位時間当り平均着陸機数は(ii)

と同様7回/時、そのうち特別サービスを要する着陸機数、
すなわち着陸機が幹線であるものは4回/時である。
従って、 $r=4/7$ を(3)式に代入して、 λ_1, λ_2 を求め、パー

ス占有時間は当然1時間(60分)として(4),(5)式に代入し
て計算すると、幹線用バースの増加によるバース数と待ち
損失時間の関係が求まる。

表—3 専用サービス方式による場合の総損失費用

a. 幹線用バース					
バース数 (C)	平均待ち時間 $\bar{t}_f$ (分)	1日平均待ち時間 $T_D=66\bar{t}_f$ (分)	1日当り損失費用 $B=6.55T_D$ (千円/日)	エプロン建設費用 $R=10.03C$ (千円/日)	総損失費用 $H=B+R$ (千円/日)
8	0.89	58.74	384.75	80.24	414.99
9	0.29	19.14	125.37	90.27	215.64
10	0.04	2.64	17.29	100.30	117.59
11	0.03	1.98	12.97	110.33	123.30
12	0.01	0.66	4.32	120.36	124.68

b. ローカル線用バース					
バース数 (C)	平均待ち時間 $\bar{t}_f$ (分)	1日平均待ち時間 $T_D=42\bar{t}_f$ (分)	1日当り損失費用 $B=1.24T_D$ (千円/日)	エプロン建設費用 $R=3.61B$ (千円/日)	総損失費用 $H=B+R$ (千円/日)
7	0.56	23.52	29.16	25.27	54.43
8	0.16	6.72	8.33	28.88	43.93
9	0.04	1.68	2.08	32.49	34.57
10	0.01	0.42	0.52	36.10	36.62
11	0.006	0.25	0.31	39.71	40.02

表—4 併用サービス方式による場合の総損失費用

バース数 (C)	平均待ち時間 $\bar{t}_f$ (分)	1日平均待ち時間 $T_{D_1}=66\bar{t}_f$ $T_{D_2}=42\bar{t}_f$ (分)	1日当り損失費用 $B_1=6.55T_{D_1}$ $B_2=1.24T_{D_2}$ (千円/日)	エプロン建設 $R=10.03C$ (千円/日)	総損失費用 $H=B_1+B_2+R$ (千円/日)
14	0.12	7.92	52.01	140.42	198.77
		5.16	6.34		
15	0.05	3.30	21.62	150.45	174.74
		2.15	2.67		
16	0.017	1.13	7.40	160.48	168.79
		0.73	0.91		
17	0.0006	0.04	0.26	170.51	170.81
		0.03	0.04		
18	0.0002	0.01	0.07	180.54	180.62
		0.01	0.01		

(注) 上段 幹線 下段 ローカル線

表—5 特定サービス方式による場合の総損失費用

バース数			1日平均待ち時間		1日当り損失費用		エプロン建設費用		総損失費用
幹線 (C ₁)	ローカル線 (C ₂)	合計	幹線 T_{D_1} (分)	ローカル線 T_{D_2} (分)	幹線 $B_1=6.55T_{D_1}$ (千円/日)	ローカル線 $B_2=1.24T_{D_2}$ (千円/日)	幹線 $R_1=10.03C$ (千円/日)	ローカル線 $R_2=3.61C_2$ (千円/日)	$H=B_1+B_2+R_1+R_2$ (千円/日)
15	3	18	1.47	14.88	9.64	18.45	150.45	10.83	189.37
15	4	19	1.20	3.31	7.84	4.10	150.45	14.44	176.83
15	5	20	0.80	0.66	5.24	0.82	150.45	18.05	174.66
15	6	21	0.66	0.14	4.32	0.17	150.45	21.66	176.60

その結果は (表-5) に示すようになる。

d. 総損失費用の算出

以上のようにして算出される4要素 (R , b , C , $\bar{t}_i$) を用いて、民間航空会社側の損失費用、エプロン提供側損失費用を求めた。

その結果は(表-3~5) に示してある。

4・3 最適所要バース数の算出

それぞれ3種の異ったバース使用方式について、総損失費用を最小にする所要バース数が次のように計算された。

専用サービス方式	19 バース
併用サービス方式	16 バース
特定サービス方式	20 バース

なお所要バース数、総損失費用ならば所要エプロン面積の関係を (表-6) に一括してある。

表-6 各サービス方式による所要バース数

サービス方式	所要バース数			総損失費用 (千円/日)	所要エプロン面積 (m^2)
	幹線	ローカル線	合計		
専用サービス方式	9	10	19	152.16	97,840
併用サービス方式	16	0	16	168.79	124,160
特定サービス方式	15	5	20	174.66	130,400

一般的に年間発着回数が多くなり、利用航空旅客が増加するに従い乗場を間違たり、乗継ぎを不便にしないために路線別に専用バースを設けて空港の機能を良くする専用サービス方式にした方が合理的である。

一方併用サービス方式、特定サービス方式は地方の中・小規模のローカル空港にたびたびみることができる。

本研究による結果も (表-6) にみられるように専用サービス方式にした方が経済的でもあり、またエプロン必要面積も小さくできる。

以上の観点より新北海道空港建設時のターミナルエプロン施設計画では専用サービス方式を採用することが最も経済的となる。従って専用サービス方式によって算出された所要バース数を最適所要バース数とする。

すなわち新北海道空港での最適所要バース数は

幹線	9 バース
ローカル線	10 バース
エプロン面積	97,840 m^2

となる。

参考までに従来運輸省航空局で使用していた方法で所要バース数を算出すると 27 バースとなる。

なお、この計算に必要な単位時間当たり平均便数、バースけい留時間は本研究で使用した数値を用いた。

5. 結 論

本研究ではターミナルエプロン計画に待ち合わせ理論、

くもの単型モデルを用いて最適所要バース数を理論的に算定した。

その方法はバース不足のために生じる待ち損失時間を民間航空会社側の損失費用とし、この損失費用とエプロン建設費の和を最小ならしめるバース数を所要バース数として求め、その後新北海道空港計画に適用した。

その結果、対象年次昭和 50 年での最適所要バース数は

幹線	9 バース
ローカル線	10 バース

合計 19 バースとなり、従来の方法で算出される所要バース数 27 より約 30% の減少をみた。

なお今後の問題点として、単位時間当りの平均着陸機数の選定、この研究ではエプロンという単一のサービス段を考えたが、本来空港の能力は滑走路によって決定されるものであり、その意味においても滑走路-エプロン-滑走路というサービス段が複数でフィードバックのある待ち行列、優先権のある単位到着などについても考察しなければならないであろう。

参 考 文 献

- 1) Kaufmann, A.: Methods and Models Operations Research Prentce Hall, 1963.
- 2) Sasieni, M., Yaspan, A. and Friedman, L.: Operations Research Methods and Problems John Wiley & Sons, 1959.
- 3) 横山勝義: 輸送・運搬における OR 技法, 培風館, 昭和 39 年.
- 4) Allen, D.: Mathematical Economics. (安井, 木村訳 数理経済学, 紀伊国屋書店, 1963).
- 5) 運輸省航空局: 空港基本計画, 航空局, 昭和 37 年.
- 6) Horonjeff, R.: Planning and Design of Airports McGrow Hill, 1962.
- 7) 本間鶴千代: 待ち行列の理論, 理工学社, 1966.
- 8) Koenigsberg, E.: Queuing with Special Service. Journal of the Operations Research Society of America, Vol. 4, 1956.
- 9) Molina, E. C.: Application of the Theory of Probability to Telephone Trunking Problems. The Bell System Technical Journal Vol. 6, 1927.
- 10) 横道・小川・伊福部・尾崎: 北海道における幹線空港に関する調査報告, 北海道, 昭和 41 年.
- 11) 運輸省航空局: 空港整備事業関係資料, 航空局, 昭和 40 年.
- 12) 清水浩志郎: 航空旅客需要推定に関する研究, 北海道大学工学部交通計画研究室, 昭和 41 年.
- 13) 小川博三: 航空旅客需要とその季節変化について, 日本交通学会 1966 研究年報, 1966.