【土木計画学研究・講演集 No.12 1989年12月】

地域航空サービスにおける社会的最適便数についての考察

A STUDY ON SOCIALLY OPTIMAL FREQUENCY OF REGIONAL AIRLINE SYSTEMS

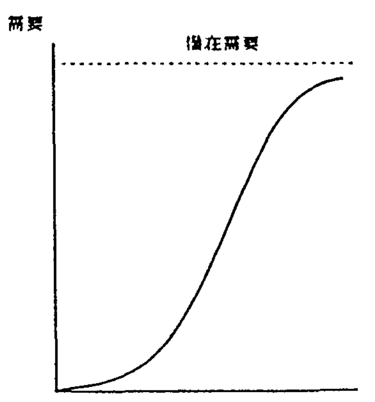
田村 亨*
By Tohru Tamura

Increasing need for high speed transportation, there is a growing number of local municipalities examining regional airline systems in earnest. Regional airlines are most likely to operate 2 to 3 flights daily on many routes, availability of flights at passengers' desired time will greatly influence the demand. Unfortunately, this comfortable view fails to take account of the air passenger demand effect resulting from variation in flight departure time and the effects of flight frequency and load factor on service quality.

In this paper, I introduce and analyze the relation between the demand and the frequency. I shall characterize the price and number of flights which would be chosen by a planner attempting to maximize social welfare, taken to be the sum over all flights of the consumers'surplus areas under the full price demand curve and profit per flight. Here is based upon Panzar's concept of frequency delay and stochastic delay.

I はじめに

今までに、航空需要の予測モデルは数多く構築されてきているが、その多くは運賃との関連を中心としており、運行頻度を問題としたモデルはあまり多く研究されていなかった。また、運行頻度を考える場合は、運行頻度と需要は線形の関係で結ばれるものとして考えられてきた。しかし、最近では運行頻度と需要の関係は線形の直線で表されるものではなく、図I－1のように運行頻度に対してS字形の曲線となるような需要が出てくると考えられ始めている。[1] そして、このS字形の運行頻度－需要曲線は運行距離によって変化するものと考えられている。[1]



図I－1 経験的な運行頻度と需要の関係

このような需要関数の明確化は、需要が小さく運行頻度が少ない地域航空サービスにおいて特に重要となる。一般に、地域航空サービスでは利用する人々の希望出発時刻に合わせた機材運用がなされにくいため、待ち時間が長くなる等の負の便益が利用者に生じ、需要が顕在化しにくいことが予想される。この意味から、一路線当り、最低どの程度の運行頻度を確保すべきかを検討することは重要である。また、現在中型の航空機材を用いて日に2～3便運行している路線においては、使用機材を小型化し運行頻度を増加した場合に需要がどの様に変化するかを調べることは興味深いことである。そこで本研究の目的は、このような運行頻度と需要の関係を考えて、第1に、運行頻度を取り入れて総余剰最大の考えにもとづく需要関数の定式化を行う。第2に、運行頻度を考える上での航空需要と運行頻度の関係についての既存研究のレビューを行う。第3に、ケース・スタディによる、定式化された需要関数の同定を行うものである。

II 最適便数に関する研究レビュー

公共旅客輸送における最適便数に関する研究はこれまでにも多くなされている。Mohring の都市バスに関

* 正会員 工博 筑波大学講師 社会工学系
(〒305 つくば市天王台1-1-1)

する研究（1972）はその代表的なものであり、乗客の停留所での待ち時間の費用とバス企業の運行費の合計を社会的費用と考え、乗客を最小の社会的費用で輸送する最適便数は乗客数の平方根に比例するという原理を示している。[2] この原理を修正したものとして寺田による研究（1984）がある。[3]

航空需要を対象とした研究は、1978年のアメリカ民間航空事業規制緩和法成立を境に多くなされている。その先駆的論文としては Douglas and Miller の研究（1974）がある。[4] この研究では、frequency delay 及び stochastic delay の概念を取り込み、最も望ましい出発時刻と実際の出発時刻との差により生ずる不便に関する時間的支出、最も望ましい便に座席が得られない場合に次便に乗らざるをえないことから生じる不便に関連する時間的支出を考えた最適便数決定プロセスを示している。この研究は、後に、 Devany の研究（1975）[5]、 Panzer の研究（1979,1980）[6]、Olson and Trapaniの研究（1981,1982）[7] へと引き継がれた。これら一連の研究はアメリカにおける規制緩和（路線参入の自由，運賃決定の自由）の是非を検討することに主眼がおかれているが、混雑と便数の関係を明示的に分析に取り込んでいる点及びfull priceの概念を用いている点が本研究を進める上で注目される。

本研究では、その基礎概念を Panzerの研究（1980）においているが、需要と運行頻度の関係を直線的なものではなくＳ字形を仮定している点、及び実証研究としてこれら理論の有効性を検討している点が異なる。特に、実証分析においては、希望出発時刻の特性及び希望出発時刻と実出発時刻との乖離による需要の減少を独自の調査により把握していることが特徴である。

また、社会的最適便数という用語についてであるが、ここでは交通経済学でいうところの社会的厚生を最大にするような最適便数を社会的最適便数と呼んでいる。地域航空サービスを考える場合、わが国では採算性のとりにくい路線（公的助成が必要とされる路線）を含む場合が多いが、公的助成に関する限りその多くを航空会社の費用関数の中に明示的に取り込めると考えている（今回の分析では費用関数は扱っていない）。

Ⅲ　総余剰最大を考えた需要関数・供給関数の定式化

１．概要

余剰には、生産者余剰と消費者余剰の２種類がある。生産者余剰とは企業の利潤であり、消費者余剰とは消費者がそれなしで済ますくらいなら支払ってもよいと考える価格が実際に支払う価格を超過している分を言う。総余剰とはこれら２つの余剰の和である。従って総余剰を最大にするということは企業と消費者双方の利益の和を最大にすることから、社会的最適解を導くと考えられる。このときの需要関数・供給関数の中に運行頻度を取り入れることによって、運行頻度を考慮しての需要および供給数と最適な頻度も表せることになる。そこで、運行頻度による社会的厚生を総余剰として捉えた理論について述べる。

仮定として、希望時刻は全時間帯に等しく分布しているとする。このとき、Ｗを社会的厚生，Ｎを便数，π を企業利潤として、Ｓをfull price需要関数の消費者余剰とすると、

$W=N\cdot S+N\cdot\pi$　と表される。full priceとは、希望時刻の便がない，希望する便に乗れない，運賃、という利用者にとっての負の効用を金額化したものである。ここで、それぞれを $h(t)$, $g(N,L)$, ｐとしておき次式のようにおく。ただし、ｔは出発希望時刻と実出発時刻との差を示す。

$\rho=p+h(t)+g(N,L)$　このとき、Ｌはロード・ファクターである。また、一日の営業時間をＴとして、ディスプレイメント時間を T/2N とすると、一便で運ぶ人数、つまり需要は、

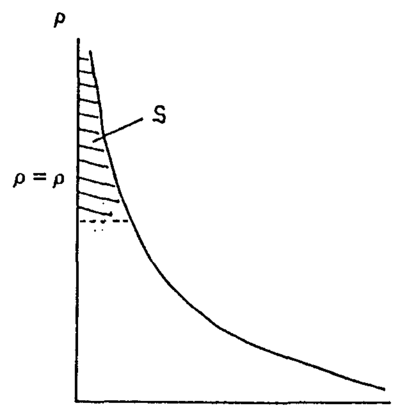
$$q=2\int_0^{T/2N}x(\rho)dt$$

となる。ここでfull price需要曲線が図Ⅲ－１のようになるとき図の斜線部が消費者余剰Ｓとなる。したがって、

$$S=\int_{\rho}^{\infty}\{2\int_0^{T/2N}x(\rho)dt\}d\rho=2\int_0^{T/2N}\int_{\rho}^{\infty}x(\rho)d\rho dt$$

となる。

次に企業利潤 π についてであるが、一般に π は、総収入と総費用の差であるから、ｐを運賃，ｃを乗客一人あたりの費用，ｂを一便あたりのサービス提供等の費用として、一便あたりの利潤は、



図Ⅲ－１　full price需要曲線

$$\pi = p\cdot q - (c\cdot q + b)$$

$$= 2\cdot p\int_{0}^{T/2N} x(\rho)dt - \{2\cdot c\int_{0}^{T/2N} x(\rho)dt + b\}$$

$$= 2\cdot(p-c)\int_{0}^{T/2N} x(\rho)dt - b$$

となる。従ってN便ある時は

$$N\cdot\pi = 2\cdot N\cdot(p-c)\int_{0}^{T/2N} x(\rho)dt - N\cdot b$$

となり、Wは次式のように表される。

$$W = N\cdot S + N\cdot\pi$$

$$= 2\cdot N\int_{0}^{T/2N}\int_{\rho+h(t)+g(N,L)}^{\infty} x(\rho)d\rho dt$$

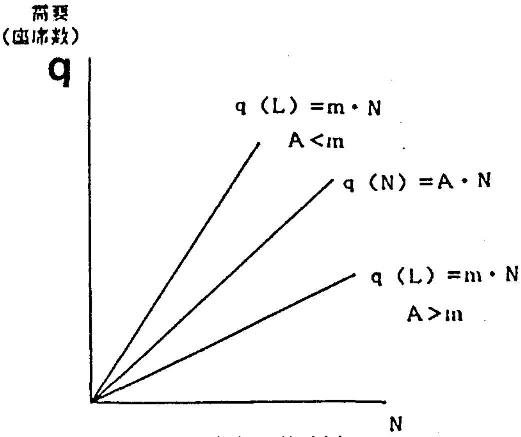
$$+ 2\cdot N\cdot(p-c)\int_{0}^{T/2N} x(\rho)dt - N\cdot b$$

次に、導かれたWにおける需要関数・供給関数を、需要が運行頻度に対して線形でなく、S字形を描く関係にあるという考えのもとで論を進めていく。

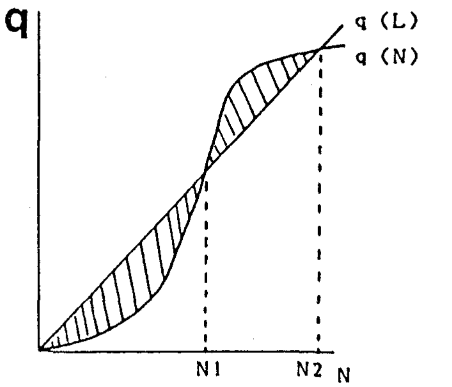
2．需要関数の定式化

まず、需要と運行頻度が線形の場合を考えてみる。このとき需要をq(N)，運行頻度をNとすると、q(N)はNの一次式で表される。その式を仮にq(N)=A·Nとしておく。ここでAはある比例定数とする。図III－2は、需要－運行頻度の直線とロード・ファクターを変えたときの運行頻度－供給座席数の直線（q(L)= m·Nとする）の関係を表したものである。この図において、A<m のとき需要に対して十分な座席数があり、空席数は N·(m-A)となり、一便あたりの平均空席数は m-Aである。A>m のときは、需要と比較して少ない座席数しか供給されない。このとき、不足座席数は N·(A-m)となり一便あたりの平均は A-mである。つまり、ある便において空席がでるかでないかは運行頻度に関係せずロード・ファクターのみに依存することになる。そこで線形の場合は、運行頻度についてはディスプレイメント時間での負の効用による需要変化のみを考えればよかった。

次に、需要が運行頻度に対してS字形を描く関係の場合を考えてみる。図III－3は図III－2と同様な図を需要－運行頻度のS字形曲線について描いたものである。この図において0≦N≦N１の範囲での斜線部は空席の状況を示しており、N１，N２の各交点では収容可能乗客数と需要が一致している。また、N１≦N≦N２の範囲での斜線部は、供給された座席が需要と比較して不足しているためどの便にも乗れない人がいる状況を示している。



図III－2　需要と運行頻度が線形の時



図III－3　需要と運行頻度がS字形の時

運賃pは固定しておき、希望時刻に出発する便がないこと h(t)1，希望する便に乗れないこと h(t)2，どの便にも乗れないこと g(N,L) による３つの負の効用について考える。そこで、１．で表したρの式を修正した次式を考える。

$$\rho = p + h(t)1 + h(t)2 + g(N,L)$$

式中において、希望時刻に出発する便がないことによる負の効用は、最大待ち時間T/2Nで考える。希望する便に乗れないことによる負の効用は、その便における空席のない確率を用いて、最寄りの便に移らねばならないことによる待ち時間を確率的に求めてこれを用いる。まず、確率をprob{h(t)}とおくと、０<N<N１，N２<Nでは、図III－３の記号を用いて

prob{h(t)}＝q(N)／q(L)　となる。この確率が大きいほど h(t)、すなわち負の効用は大きくなり、小さいほど負の効用は小さくなる。そのときの、最寄りの便までの最大待ち時間をＤＴm として、

ｈ（ｔ）＝prob{h(t)}・ＤＴm とする。このようにして、希望の便に乗れず、他の便に乗ることの負の効用を、待ち時間の期待値的な長さとして取り扱うこと

にした。どの便にも乗れないことによる負の効用は、乗客数が提供座席数より大きくなる確率で表す。
これをprob{g(N,L)}とおくと、

prob{g(N,L)}＝（q(N)－q(L)）／q(N) となる。

そこで例えば便数がNxのときの負の効用をρxとして、

$$\rho x = p + h(T/2N) + h(T/2N, prob) + g(N,L)$$

を金額化する。また、そのときの1日需要をq1として次式のようにq1を求める。

$$q1 = Nx \cdot 2\int_{0}^{T/2Nx} x(\rho)dt$$

このような形で、便数Nを変えたときのρ，qを定めていき、需要曲線の推定を行う。負の効用の金額化についてであるが、待ち時間によるh(t)，h(t,prob) は、待ち時間をその人の時間価値の損失と考えることにする。便に乗れないことによる負の効用g(N,L)は、希望の便に乗れないのであれば、運賃に上乗せしてでも乗りたいという上乗せの支払い意思額で考え、空席のない確率にこの支払い意思額を乗ずることにより金額化する。

供給関数としては、サービス供給数と費用の関係を表せばよい。航空会社の経営規模にもよるが、供給関数の具体的な数値が既に一般化されている（※参考文献8）。

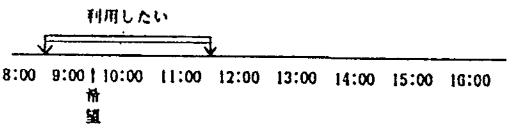
Ⅳ ケース・スタディ

1．調査の概要[9]

ケース・スタディを行うにあたっては、ディスプレイメント時間が需要にどのような影響を及ぼすかということがわかるようなデータが必要である。本研究では昭和61年に丘珠空港で実施した、図Ⅳ－1のようなデータ（180 サンプル）を用いて分析した。ここで、ディスプレイメント時間は置き換え時間と遅れ時間に分けて考えている。置き換え時間は希望時間より早い便で出発する場合であり、遅れ時間は遅い便で出発する場合である。それぞれのサンプルについてディスプレイメント時間と利用希望者数の関係は表Ⅳ－1のようになっている。この関係をグラフ化したものが、図Ⅳ－2である。この図では、全サンプル数に対するあるディスプレイメント時間での利用希望者数の割合を、そのディスプレイメント時間における利用率として捉えてる。

2．需要と運行頻度

需要と運行頻度の関係について考えてみるが、ここでは簡単のために、等時間間隔で運行されているものとしておく。このとき、最大ディスプレイメント時間DTm は、便数Nと営業時間Tによって DTm＝D/2·N と表されるので、ディスプレイメント時間から逆に便数



図Ⅳ－1 希望出発時刻と利用可能な時間帯

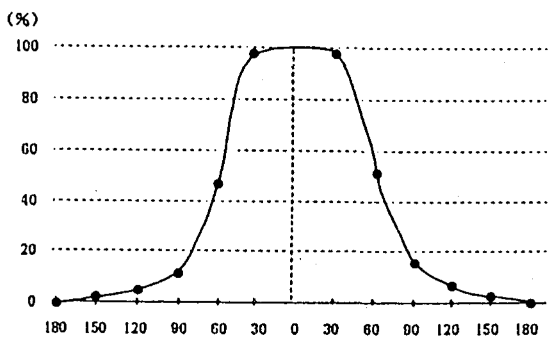
表Ⅳ－1 ディスプレイメント時間と需要の減少

遅れ時間と利用希望者数（全サンプル数156）

ディスプレイメントタイム	利用希望者数	%
0	156	100
30	155	99.4
60	76	48.7
90	19	12.1
120	9	5.8
150	2	1.3
180	0	0

置き換え時間と利用希望者数（全サンプル数103）

ディスプレイメントタイム	利用希望者数	%
0	103	100
30	102	99
60	54	52.4
90	17	16.5
120	5	4.8
150	1	0.97
180	0	0

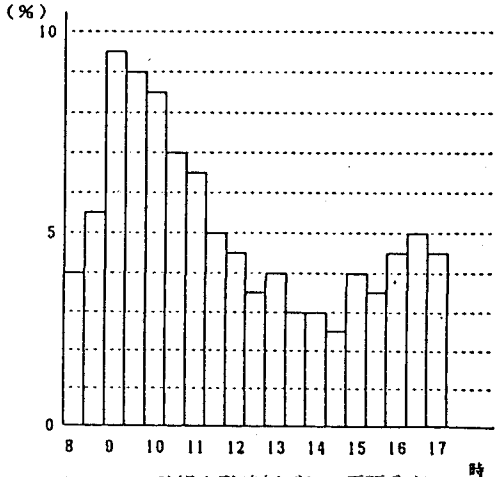


図Ⅳ－2 ディスプレイメント時間による利用率の変化

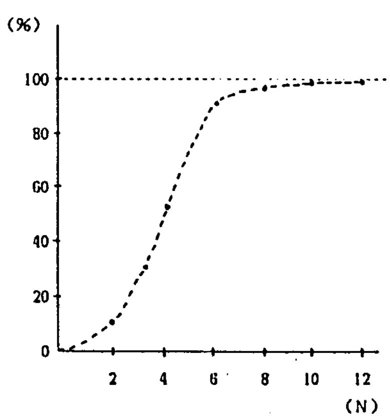
を定めることができる。1日の営業時間を9時間としたときの DTmとNを示したものが表Ⅳ－2である。図Ⅳ－3は、利用したい時間帯というデータを集計して全体に対する割合で表示したものである。これは希望時刻の頻度分布であるとともに潜在的需要の分布割合ともみることができる。定式化での仮定と違い、実際には希望時刻は等分布ではないため、この図を用いて各希望時刻についての需要を考えることにした。これらから、運行頻度ごとの利用率を表したものが図Ⅳ－4である。ここでいう利用率は、その便に乗れる乗れないに関わらず、乗ることを希望する人の割合であるから、運行頻度とそれによって起こる需要の関係を表しているといえる。

表Ⅳ－２　最大ディスプレイメント時間と便数

DTm（分）	便数（N）
120	2
90	3
60	4
45	6
30	10
20	12



図Ⅳ－３　希望出発時刻ごとの需要分布



図Ⅳ－４　運行頻度と需要の顕在化

３．ケース・スタディによる需要関数の推定

ケース・スタディとして、以下のような条件のもとで推定を行なう。

機材：YS-11　64座席／機

ロード・ファクター：90%　58人乗／機

潜在需要：500人

運賃：20000円

時間価値：40円／分 *

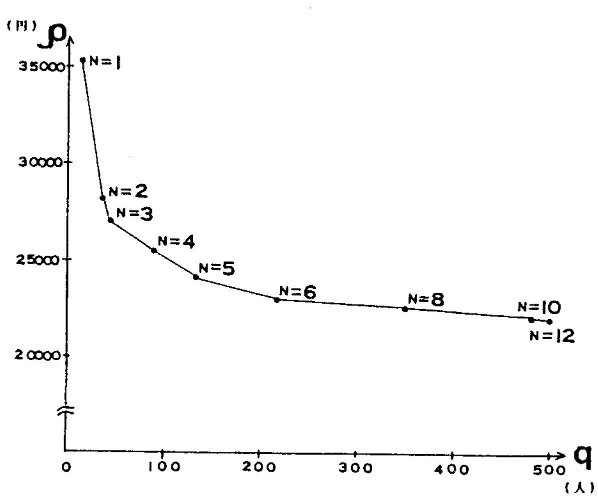
１日の営業時間：９時間［８時～１７時］

* 路線距離200～300km のYS-11路線で航空需要予測モデルを構築した結果、１時間あたりの時間価値が2460円であったことよりこの結果を用いた（参考文献10）。

便数を変化させたときの最大ディスプレイメント時間，供給座席数ｑ（Ｌ），および図Ⅳ－３からｑ（Ｎ）を算出して、prob{h(t)}を求める。負の効用は、Ⅲ章で提示した式で表されるが、計算の簡単のために今回はｇ（Ｎ，Ｌ）の効用は省略して以下の式によって計算を行なった。

$$\rho = p + h(t)1 + h(t)2$$

希望の時間に便がないことによる負の効用ｈ（ｔ）１は、最大ディスプレイメント時間を考えて、その長さに40円／分の時間価値を乗ずることにより求めた。希望の便に乗れないことによる負の効用ｈ（ｔ）２はその前後の便へのディスプレイメント時間の期待値を求めて時間価値を乗ずることにより算出した。その結果を表Ⅳ－３に示してある。ここで、ｑ１は希望の便に乗れない可能性のある人数で、$q1 = q(N) \times \{q(N)/q(L)\}$ とする。ｋは希望の便に乗れないときの待ち時間である、$\{q(N)/q(L)\} \times DTm$ のときの利用率とする。ｑ２はこのときの他の便に乗る人数の期待値で、$q2 = q1 \times (k/100)$ である。$q(N) - q1$ は希望の便に必ず乗れると考えられる人数となる。ｑは、最終的な需要であり、$q = q(N) - q1 + q2$ となる。このようにして算出したρと需要ｑとの関係を描いた需要関数の概形は図Ⅳ－５のようになる。



図Ⅳ－５　ケース・スタディにおける需要曲線

4．考察

需要関数の分析結果を考察すると次のことが言えよう。

①表Ⅳ－3のh（t）1（希望の便に乗れないことによる負の効用）から、便数の増加によって負の効用が漸減するのではなく、3便のとき増加していることがわかる。これは、2便から3便に増加しても、便の出発時間が利用希望時刻に必ずしも一致する方向にないためである。

②表Ⅳ－3のρ（希望の便に乗れない人の負の効用＋待ち時間による負の効用＋運賃）の値は、1便から2便に変化させる効果は大きくそれ以降は5便までの増加は比較的大きな効果をもつが、6便以降の効果は少ない。

③図Ⅳ－5より需要qとρの関係において、消費者余剰は、負の効用が小さく需要が大きくなるほど多くなるのであるが、2便導入時と3便導入時を比較して、3便導入時にはそれほど多くなっておらず、需要の増加割合も小さい。このことから、4便以上の導入がより望ましいことがわかる。

Ⅴ　終わりに

本研究は需要と便数の関係を交通経済学的に分析し、ケース・スタディを通して需要関数を示したものである。本研究の成果をまとめると次のことが言えよう。

①便数の増加が需要に与える影響は経験的に線形ではなく、S字形になっていると言われている。本研究ではそのような場合についての需要関数を交通経済学的に表現する理論式を定式化できたこと。

②実際のデータを用いて、①で述べた需要と便数の関係を確認したこと。

③②のデータを用いて、いくつかの仮定はあるものの、需要関数を描き消費者余剰の点から最適な便数導入の考察ができたことである。

今後の課題は供給関数との関係から、総余剰を考慮したその最適便数決定プロセスを理論化し実証することである。

本研究をまとめるにあたり、北海道大学五十嵐日出夫教授，北海道大学佐藤馨一助教授からは有益な指摘を頂いた。ここに名を記し感謝の意を表します。

表Ⅳ－3　ケース・スタディによる需要関数の推定結果

N（便／日）	1	2	3	4	5	6	8	10	12
DTm（時間：分）	4:30	2:15	1:30	1:07	0:54	0:45	0:35	0:27	0:22.5
q(L)（人）	58	116	174	232	290	348	464	580	696
q(N)（人）	18	48	144	268	360	458	490	497	499
q(N)／q(L)	0.31	0.41	0.81	1	1	1	1	0.86	0.72
q(N)／q(L)×DTm	1:24	0:49	1:13	1:07	0:54	0:45	0:35	0:23	0:16
h(t)1（円）	4320	2880	3600	2680	2160	1800	1400	1080	840
h(t)2（円）	10800	5400	3600	2680	2160	1800	1400	1080	900
ρ（円）	35120	28280	27200	25360	24320	23600	22800	22160	21740
q1（人）	6	20	117	180	225	270	360	427	359
k（%）	8	40	14	50	60	80	99	99.5	99.9
q2（人）	0.48	8	16	90	135	216	356	425	359
q(N)－q1（人）	12	28	27	0	0	0	0	70	140
q（人）	12	36	43	90	135	216	356	495	499

（参考文献）

1)Godly,M.A.,"Estimating Airline Demand with Quality of service variables." FTL.REPORT, M.I.T., 1980

2)H.Mohring, " Optimization and Scale Economics in Urban Bus Transportation." The American Economic Review. Vol62. No.4 September 1972

3)寺田一薫，" 公共旅客輸送における社会的最適便数 " 高速道路と自動車　第27巻，第6号　1984年6月

4)Douglas,G.W. and Miller,J.C.,"Quality Competition, Industry Equilibrium and Efficiency in the Price-Constrained Airline Market. " American Economic Review. Vol64. No.4 September 1974

5)Devany, A.S.,"The Effect of Price and Entry Regulation on Airline Output Capacity,and Efficiency."Bell Journal of Economics, Spring 1975

6)Panzer, J.C.,"Equilibrium and Welfare in Unregulated Airline Markets." American Economic Review. Vol69. No.2 May 1979

7)Trapani, J.M. and Olson, C.V., "An Analysis of Impact of Open Entry on Price and Quality of Service in the Airline Industry." Review of Economics and Statistics, 1982

8)例えば　森地　茂等　" わが国における地域航空サービスの導入可能性" 土木計画学研究・講演集　1984

9)田村　亨等　" 地域航空における機材の最適スケジューリング" 土木計画学研究・論文集　1987

10)森地　茂 " 地域航空の需要予測の手法開発に関する研究" 全国地域航空システム推進協議会　1985年3月