

シュタッケルベルグ問題としての 空港ネットワーク最適化モデル

Optimal Airport Network Model by Stackelberg Problem

黒田 勝彦* 大橋 忠宏**

by Katsuhiko KURODA, Tadahiro OHASHI

Recently the airtransportation demand shows a rapid increase in Japan. Then it is becoming a serious problem that the demand for the airports particularly with the large hinterland overflows their capacity. Under these circumstances, a rational planning method of extension and/or construction of airport is necessary. However in the past researches, problems about planning of airport's location and capacity, and carrier's operational planning of aircrafts, and analysis of passengers flow have been independently treated. The present paper proposes a new idea to treat the above mentioned problem as an equilibrium problem about the government as the planner of airport, aircraft carriers and passengers as the users. The idea is also shown by a simple numerical example.

1. はじめに

わが国の航空輸送は、日本経済の高度成長と航空機のジェット化・大型化を契機として、短期間のうちに急速に発達し、航空輸送に対する需要は増加の一途を辿っている。この傾向は、将来にわたって続くものと思われる。

しかしながら、現在わが国では空港容量の不足が問題となっている。すなわち、国内線も国際線も航空企業が参入を希望する路線は東京、大阪を中心に展開しているが、現状では東京国際空港、大阪空港、新東京国際空港の3港とも容量はほぼ限界に達して

いると言われている。また、国内航空輸送の78.5%が、東京、大阪に集中している現状¹⁾においては地方空港の整備によって3空港の容量の不足を補うことはできず、かえってその容量不足を深刻化させている。こうした状況の中で、このような容量の逼迫している空港もしくは将来的に容量が逼迫するであろう空港では、早急な空港の拡張、新規の代替空港の建設が必要となってくるであろうと思われる。また、今後の航空需要の動向、並びに航空機材の運用計画、新規空港建設の際の最適立地点の評価方法等が重要になるとと思われる。

しかしながら、これまで、航空ネットワークに関する研究としては、航空需要、運行計画、空港立地計画が各々独立な問題として扱われる場合が多く、各問題を包括的な問題として捉えることはほとんどなかったように思われる。

そこで、本研究では空港ネットワークを構成する主体として空港立地計画を行う政府、運行計画を行

キーワード: 航空ネットワーク, シュタッケルベルグ均衡
航空旅客

*正会員 工博 熊本大学教授 工学部土木環境工学科

**学生会員 熊本大学大学院工学研究科

(〒860 熊本市黒髪2-39-1)

う航空会社（キャリアー）及び路線選択を行う空港利用者（ユーザー）をとりあげ、お互いの行動がそれぞれ均衡状態にあると仮定して、これら3者の行動から均衡解を導き、空港の拡張や新規空港を建設する際の一提案となるようなモデルの開発を目的とする。

2. 航空旅客に関する既存研究

これまで航空旅客に関する研究としては、例えば九州国際空港必要性等調査報告書²⁾や轟ら³⁾による研究がある。

前者は航空需要並びに航空ネットワークについて述べられている。需要予測については4段階推定法による分析、航空ネットワークについては幾つかの便数比率を設定し分析が行われている。しかしながら、便数比率については評価が行われていない。また、超過需要の配分方法にも多少問題がある。

後者は、航空需要について4段階推定法により分析後、航空市場モデル（需要関数、費用関数、利潤関数から構成）を構築し、航空ネットワーク上でシミュレーションを行い、供給座席数を最適化している。しかし、ネットワークを評価する上ではスケジュール頻度を最適化するような問題を構築した方が望ましいのではないと思われる。

3. 空港ネットワークの捉え方

本研究では空港ネットワークを構成する主体として、政府、キャリアー（航空会社）及びユーザー（空港利用者）を取り挙げる。ここでは、政府は空港立地計画、キャリアーは機材の運行計画、ユーザーは空港及び路線の選択の最適化を目的とし、また3者の関係を（図-1）のように仮定し、3者それぞれの行動についての説明を以下に示す。

①政府は、キャリアーの運行計画、ユーザーの路線選択行動が最適化されることを前提条件として、総走行時間と空港建設費を最小化することによって、空港の位置、空港容量を決定する。

②キャリアーは、空港の位置、容量を知った上で、利用者の路線選択行動が最適化されることを前提条件として、自己の利潤を最大化するように行動し、その結果として航空路線のスケジュール頻度、航空機材容量を最適化する。

③空港利用者は、空港の位置とキャリアーのスケジュール頻度、航空機材の容量のみを知らされて自己の路線選択行動を最適化する。その結果、ゾーン別路線選別需要量が求められる。

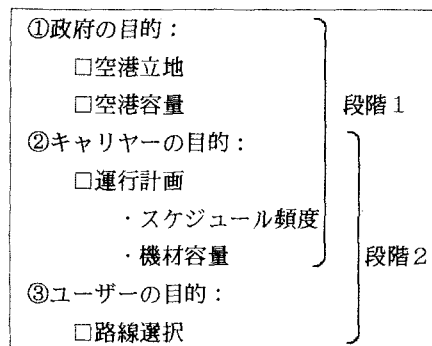


図-1 2段階均衡問題

上記のような①～③のような視点の異なる一連の関係は、経済学でいうところの均衡問題と類似しているといえる。そこで、本研究ではこれら一連の問題を2段階均衡問題と呼ぶこととし、今後の定式化はこの2段階均衡問題について行うものとする。しかしながら、後で触れるが今回の仮想ネットワークでの分析では各主体間の関係をクールノー的な均衡状態として扱っている。

4. 空港ネットワーク最適化モデルの構築

この章では、前章において政府、キャリアー、ユーザーのそれぞれについての位置づけを明らかにした2段階均衡問題について各主体ごとの行動についてモデルの構築を行っていく。

(1) 政府の行動の定式化

政府にとっては、公平性、公共性の概念の下に所得再配分が公平になされるようにすることが最善の目的であろうと思われる。したがって、政府はユーザー、キャリアーが最適化行動を行うという条件の下での総走行時間と空港建設費を最小化する問題⁴⁾として表すことができると考えられる。これらのことを踏まえて定式化を行ったものを以下に示す。ただし、今回の定式化では容量が逼迫している空港として空港1を想定し、空港1について新規の代替空港建設案を想定する。

政府の最適行動モデル

$$\begin{cases} \text{MIN. } G = C_c(t_{A11}, t_{A21}, F_1) \\ (t_{A11}, t_{A21}, F_1) \\ + \xi \left(\sum_k \sum_i t_{F_{k1}} \cdot f_{k1} + \sum_k \sum_i t_{A_{ik}} \cdot X_{ik1} \dots \right. \\ \left. + \sum_j \sum_l t_{I_{lj}} \cdot X_{lj1} \right) \quad (1) \\ \text{S.t.} \\ t_{A11}, t_{A21}, F_1 \geq 0 \quad (2) \\ f_{k1} = \sum_m f_{m1}^{k1} \quad (3) \\ f_k = \sum_i (f_{k1} + f_{lk}) \leq F_k \quad (k=1) \quad (4) \end{cases}$$

上の式において、

(1)式：第一項は空港建設費、また $\xi(\cdot)$ の部分は
総走行時間を表している。

(2)式：非負条件式

(3)式：路線運行頻度の関係式

(4)式：空港容量についての関係式。即ち、新規空港
で見込まれる路線運行頻度をまかなえるだけの空港
容量を確保するという式。

ここで、

$C_c(d_{11}, d_{21}, F_1)$ ：空港建設費、

ξ ：空港建設費に対する時間の重
み

$t_{F_{k1}}$ ：フライト時間

f_{k1} ：路線頻度

$t_{A_{ik}}$ ：アクセス時間

X_{ik1} ：($= \sum_j \sum_l X_{ik1j}$) i ゾーンから
 k 空港利用者数

$t_{I_{lj}}$ ：イグレス時間

X_{lj1} ：($= \sum_k \sum_i X_{ik1j}$) l 空港から j
ゾーンへの利用者数

F_k ： k 空港最大離発着数

である。しかしながら、上記の行動の結果として得
られる空港容量は必要最小限の空港容量となるため、
どれだけの容量が必要なのかということに関しては
検討の余地がある。

(2) キャリヤーの行動の定式化

通常、キャリヤーは企業であるから「企業の究極
の目的は利潤を最大化する」⁵⁾ ことにあるといえる。
しかし、一般の不完全競争企業と異なり、国内にお
いては価格(この場合、航空運賃)を自由に変化さ
せることは困難である。したがって、キャリヤーに

とってどれだけの路線運行頻度を設定し、どの機材
を投入するか、またそれによってどれだけの需要を
獲得し、最終的にどれだけの利潤をあげられるのか
が問題となってくる。

そこで、キャリヤーの目的としては、ユーザーが
空港選択を最適化したという条件の下での利潤の最
大化問題が考えられる。ここでは、キャリヤーが自
己の利潤の最大化を図ることによって、路線の運行
頻度を最適化するような問題を考える。

上記のことをふまえて定式化を行ったものを以下
に示す。

キャリヤーの最適行動モデル

$$\begin{cases} \sum_m \text{MAX. } C_F \left(\sum_k \sum_i f_{m1}^{k1} \right) \\ (f_{m1}^{k1}) \\ = \sum_k \sum_i \{ (X_{m1}^{k1}) P_{F_{k1}} - (C_{F_{k1}} \times f_{m1}^{k1}) \} \quad (5) \\ \text{S.t.} \\ f_{m1}^{k1} \geq 0 \quad (6) \\ \sum_m X_{m1}^{k1} = X_{k1} = \sum_j \sum_l X_{ik1j} \quad (7) \\ C_{AP_{k1}} \cdot \sum_m f_{m1}^{k1} \geq X_{k1} \quad (8) \end{cases}$$

上の式において、

(5)式：キャリヤーの利潤を示し、第1項はキャリヤ
ーの総収入、第2項は総費用を示している。

(6)式：非負条件式

(7)式：路線別需要量の関係式

(8)式：路線の需要量を満たす路線運行頻度を確保す
るという式

ここで、

f_{m1}^{k1} ： m 社の路線運行頻度

$P_{F_{k1}}$ ：路線運賃

$C_{F_{k1}}$ ：路線運行費用

$C_{AP_{k1}}$ ：機材容量

である。

(3) ユーザーの行動の定式化

ユーザーの空港、路線選択結果がWardrop均衡状態
となるためには、以下のような仮定が成立していな
ければならない。

①確立的効用最大経路選択

②完全情報

③集計的行動

しかし、現実には、これらがすべて成立している

とはいいがたく、実際にはランダムな経路選択と、等時間経路選択との中間に位置するような状態で均衡していると考えられる。⁶⁾

そこで本研究では、上記のことを考慮してユーザーの空港選択を、C. Fiskが提案したロジット型の確立均衡配分モデル⁷⁾で表すことができると考え定式化を行い、それを以下に示す。

ユーザーの空港選択モデル

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{MIN. } Z = \frac{1}{\theta} \cdot \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l X_{iklj} \ln X_{iklj} \\ \quad + \sum_k \sum_l \int_0^{V_{kl}} t_{kl}(v) dv \quad (9) \\ \text{S.t} \\ \sum_k \sum_l X_{iklj} = X_{i..j}, \quad \forall i, j \quad (10) \\ X_{iklj} \geq 0, \quad \forall i, k, l, j \quad (11) \\ V_{kl} = \sum_i \sum_j \sum_l \delta_{iklj} X_{iklj}, \quad \forall k, l \quad (12) \end{array} \right.$$

(9)式：第1項はエントロピー項で、等確率で配分しようとする項。第2項は等時間原則で配分しようとする項。したがって、 $\theta \rightarrow +\infty$ であるとZの第1項が0に近づき、第2項が卓越し、Wardrop均衡問題と等価になり、 $\theta \rightarrow 0$ であるとZの第1項の路線交通量の関するエントロピー項が卓越するため、各路線に関して等確率な配分問題となる。

(10)式：OD保存方程式

(11)式：経路交通量の非負条件式

(12)式：リンク交通量と経路交通量の関係式

ここで、

X_{iklj} : i ゾーンから j ゾーンへの k 路線
通過交通量
 θ : パラメーター
 $t_{kl}(v)$: コスト関数
 δ_{iklj} : i j 間で k 路線を通過するとき、
1をとるダミー変数
* : 最適解を示す
 V_{kl} : 路線別交通量

である。

上記の最適化問題において、ラグランジュ関数をつくり、Kuhn-Tucker 条件より最終的に以下の条件が導き出せる。

$$\therefore X_{iklj}^* = X_{i..j} \cdot \frac{\exp(-\theta C_{iklj})}{\sum_k \sum_l \exp(-\theta C_{iklj})}$$

ここで、 $C_{iklj} = \sum_k \sum_l \delta_{iklj} t_{kl}(V_{kl})$ とおく。

C_{iklj} は、 i j ODペア間第 k l 路線のコストである。

また、今回の分析では C_{iklj} を以下のように表す。

$$C_{iklj} = \alpha_1 t A_{ik} + \alpha_2 t F_{kl} + \alpha_3 t I_{ij} \\ + \alpha_4 P A_{ik} + \alpha_5 P F_{kl} + \alpha_6 P I_{ij} + \alpha_7 f_{kl}$$

ここで、 α_n , ($n=1, \dots, 7$) : パラメータ

$P A_{ik}$: アクセス費用

$P I_{ij}$: イグレス費用

である。

5. 仮想ネットワークの設定と分析方法

この章では、前章で定式化を行ったモデルを仮想ネットワークへ適用する際の仮定とその分析方法について述べる。

(1) 分析にあたっての仮定

モデルの仮想ネットワークへ仮定するためにいくつかの仮定を行った。以下にその仮定を列挙する。

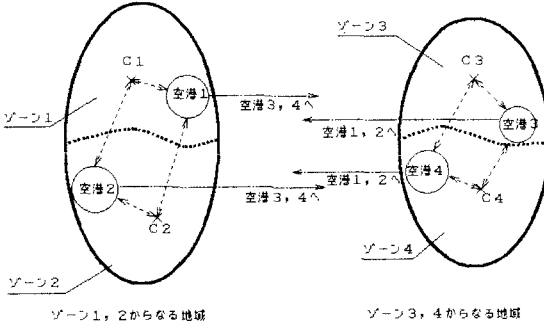
1. 仮想ネットワークでの分析は、将来需要、現況需要を設定して行う。
2. 将来ゾーン間ODを用いた分析では、既存の空港1のままの状態では、路線の航空需要の増加に対して対策を施さない場合と超過需要を最寄りの空港へ振り分けて配分する場合の2つのケース、新規空港を想定する場合として2つの代替案としてのケース設定を行う。
3. 機関別ゾーン間ODは与件として扱う。
4. 空港建設費は同一とする。

これらの仮定のうち、1.と2.に関しては仮定というよりは設定に近いものといえる。仮定3.については、現実では航空以外にも代替輸送機関等も考えられるため検討の余地が残されている。また、4.の仮定については実際のケース・スタディについて分析を行う際には必要となってくると思われるが、今回の分析はあくまで仮想データについてであるため敢えてこの様な仮定を行った。

(2) 仮想ネットワークの設定と分析方法

ここでは、(図-2)の仮想ネットワークに4章で定式化を行った最適空港ネットワークモデルを適用し分析を行うことを試みる。そのデータとしては(表-1)の数値例を用い、使用機材としてはDC10

程度の中型機材（定員 300人、平均ロード・ファクタ 60%）を想定している。また、（表－1）の数値例に関しては意図的に空港 1 が容量超過となるように設定した。



図－2 仮想ネットワーク

ここで、平均ロード・ファクタに関して、実際どの程度の値をとるのかは運輸白書（平成4年版）⁸⁾によれば70% 強であることから、検討の余地が残されている。

今回の分析では先に述べた2段階均衡問題について、各主体間の関係をクールノー的に行動していると仮定している。その分析方法について、分析フローを（図－3）に示し、以下に各ステップごとについての説明を行う。

<手順>

- Step1. 路線運行頻度の初期値の設定を行う。
- Step2. ユーザーの空港選択問題を解く。
- Step3. キャリアーの運行計画問題を解く。
- Step4. STEP3.で得られた解を初期値としてユーザーの空港選択問題を解く。
- Step5. Step2で得られた解とStep4.で得られた解とが等しかったらStep6.へ、そうでなかったらStep2.へ。
- Step6. 各空港の路線頻度の和を計算し、空港1の離発着量を調べ超過しているようだったらStep7.へ、各空港容量よりスケジュール頻度の方が小さかったら計算終了。
- Step7. 同一ゾーン内で、容量が超過している空港以外でアクセス時間の最も短い代替可能空港の探索。
- Step8. 超過分のスケジュール頻度の計算を行う。
- Step9. 代替可能な空港へ超過需要分を各路線へ比例配分。

Step10. 代替空港へ比例配分させた結果、代替空港でも容量が超過する場合は新規の代替空港を設定して（既存の超過需要のする空港を撤廃して）、Step11.を経由した後Step13.へ進む。

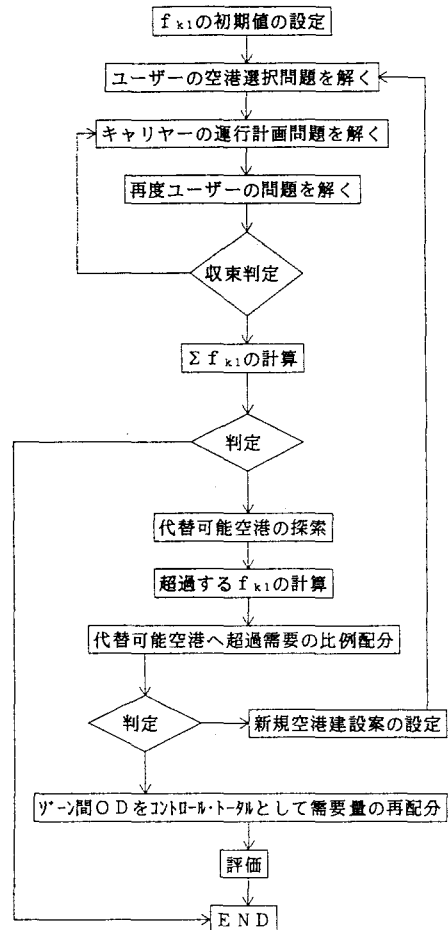
Step11. ゾーン間ODをコントロール・トータルとして需要量を再配分。

Step12. 新規空港の場所の設定、もしくは他の新規空港代替案を設定し、Step1.からの繰り返し計算。

Step13. 政府の空港立地問題を解く。

Step14. 総走行時間、空港建設費による政府の行動モデルの評価。

計算終了。



図－3 分析フロー

また、実データを用いた分析の際には、Step1.以前にユーザーの空港選択モデルにおいて、パラメー

タの推定を行う必要がある。

表-1 数値例

OD (万人/年)

0	1	2	3	4	Σ
0					
1		-	400.0	500.0	900.0
2	-		250.0	200.0	450.0
3	400.0	250.0		-	650.0
4	500.0	200.0	-		700.0
Σ	900.0	450.0	650.0	700.0	2700.0
	1300.0	550.0	900.0	950.0	3700.0

上段が現況需要 下段は将来需要

アクセス・イクス時間 (分), 費用 (万円) アクセス・イクス時間 (分), 費用 (万円)

ゾーン	空港	時間	費用
1	1	現況	40 0.05
		ケース2	60 0.07
		ケース3	40 0.05
1	2	60 0.07	
2	1	現況	70 0.08
		ケース2	60 0.07
		ケース3	100 0.11
2	2	90 0.10	
3	3	60 0.07	
3	4	90 0.10	
4	3	80 0.09	
4	4	40 0.05	

既存の場合の空港容量

空港	容量 (回/年)
1	100000
2	100000
3	120000
4	120000

6. ネットワークの評価

仮想ネットワークでの分析結果を(図-4, 5), (表-2)に示す。ここでは, ケースごとにゾーン別路線別需要量, 路線別運行頻度, 空港需要量, 総走行時間の順にまとめている。

航空輸送は公共交通手段であるため, 政府はキャリアー, ユーザーの利便性を考慮しなければならない。したがって, キャリヤーにとっては, コストは距離に関係があると考えると, 同じ需要量を輸送するのにより短い距離を輸送した方が好ましく, 空港利用者にとってもほぼ同様の理由で走行時間は短い方が好ましいといえる。しかしながら, 政府にとっては空港建設費も考慮に入れる必要があると思われる。そこで, 本研究では4章でも触れたが目的関数を総走行時間と空港建設費の最小化問題として定式化を行っている。

政府の行動の評価については, 今回は空港建設費を同一と仮定しているため, 総走行時間のみで比較すると新規空港の建設にはケース3の方がふさわしいといえることができる。また, 空港の拡張が可能な場合にはケース1の方がふさわしい可能性もある。

また, 実際には空港建設費の変化率と総走行時間の変化率を加味した上での評価が必要となる。

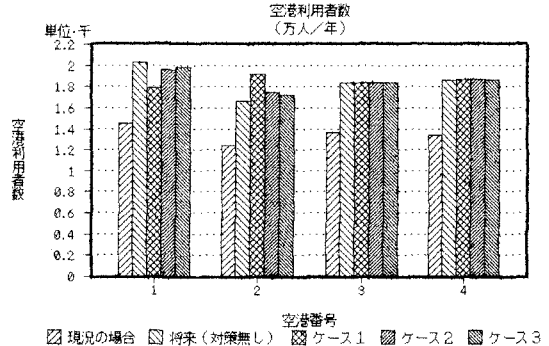


図-4 空港利用者数

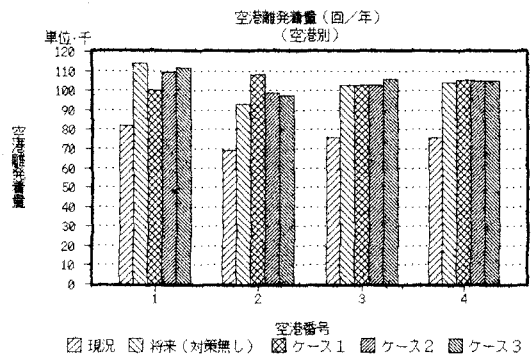


図-5 空港離発着量

表-2 総走行時間

	総走行時間(分/日)
現況需要	1.48E8
将来需要 (対策無し)	2.01E8
将来需要(ケース1)	2.03E8
将来需要(ケース2)	2.10E8
将来需要(ケース3)	2.08E8

7. おわりに

以下に本研究で得られた主な成果をまとめる。

- 1) 空港ネットワークを政府, キャリヤーおよびユーザーの3者の行動と見なすことにより, これらを二段階均衡問題として定式化できることの足がかりとした。
- 2) 今回の仮想ネットワークでの分析により, 簡易なネットワークにおいて容量に限界のある空港での代替空港案を提案することができることがわかった。

また, 前章で得られた結果と上述の成果を考慮し

た上で、今後この研究を進めるにあたっての理論の確立、定式化の完成、分析方法についての留意、検討すべき課題を列挙する。

- 1) 今回の分析では2段階均衡問題の3者の行動の関係をクールノー均衡の状態にあると仮定して行った。しかしながら、実際には各主体間の関係はシュタッケルベルグ均衡の関係にあるようにも思われる。したがって、今後分析を行う際には2段階均衡問題の各主体間の関係がクールノー均衡状態なのか、それともシュタッケルベルグ均衡状態にあるのかについての議論を進め、それを踏まえた上で、分析方法の開発、改善を進める必要がある。また、今回の主体間の行動がシュタッケルベルグ均衡の状態にある場合には政府の行動モデルの制約条件にキャリアーの最適行動、キャリアーの行動モデルの制約条件にユーザーの空港選択モデルが組み込まれる。
- 2) 今回の分析では、機関別ゾーン間ODを与件として分析を行っているが、実際にはアクセシビリティの変化による機関別需要量の変化や新規空港建設による土地利用の変化に伴う需要量の変化が予想されるため、これらを考慮するための機関分担モデルの開発や土地利用モデルの開発が必要となってくると思われる。
- 3) 今回のような定式化では乗り継ぎ客が考慮されないため、今後分析を進める際には乗り継ぎ客をどのように扱うのかをモデルに取り込む必要がある。

これらのことを考慮して、今後の分析を行うことにより、これまで、独立した問題として扱われてきた航空需要予測、運行計画、空港立地、整備計画が一体となって分析することができるようになるため新規空港建設の際の空港施設整備、空港ネットワークの整備、またそれに伴う空港アクセス施設の整備等の一助となり得るであろうと思われる。

参考文献

- 1) 遠藤他：国際化への空港構想（大月書店、p.104 1993年）
- 2) 岡野他：九州国際空港必要性等調査報告書（平成4年1月）
- 3) 轟他：航空ネットワークの評価方法に関する一

考察～空港市場モデルの適用について～
（土木計画学研究・講演集 No15(1) pp. 609-614 1992年11月）

- 4) 朝倉：交通ネットワーク均衡を考慮した道路網と土地利用の最適計画モデル（京都大学学位論文 pp.64-73 1987年3月）
- 5) ハンダーソン他：現代経済学（創文社、pp.84-86 1973）
- 6) 溝上他：Fiskモデルにおける θ の推定方法および実用可能性に関する一考察（土木計画学研究・講演集 No12 pp.511-518 1989年12月）
- 7) C.Fisk: SOME DEVELOPMENTS IN EQUILIBRIUM TRAFFIC ASSIGNMENT (Transpn Res.-B Vol.14B pp.243-255 1980年)
- 8) 運輸省：国内線航空旅客輸送実績（運輸白書 参考資料pp.14 平成4年）