

航空ネットワーク分析へのシュタッケルベルグ均衡モデルの適用評価

平井一人[†], 黒田勝彦[‡], 竹林幹雄[‡]

[†] 神戸大学自然科学研究科地球環境科学専攻

[‡] 神戸大学工学部建設学科

本研究では、空港整備の評価を行うために開発された国内航空旅客流動モデルの性質を明らかにし、具体的な政策分析を可能とするための近似解法を議論する。このモデルは国内航空旅客の行動をシュタッケルベルグ計画問題と仮定した航空ネットワークを対象とする集計型モデルである。その定式化が離散組合せ最適化問題となり計算時間が長大であるため、政策分析に対応すべく分枝限定法を遺伝的アルゴリズム (GA) に置換する試みを行う。そのための計算アルゴリズムを示し、GAによる現状再現計算や政策分析によるモデルの適用評価を報告する。

Evaluation of Aviation Network Analysis

Using Stackelberg Equilibrium Model

Kazuto HIRAI[†], Katsuhiko KURODA[‡], Mikio TAKEBAYASHI[‡]

[†] Division of Global Development Science, Graduate School of Science and Technology, Kobe University

[‡] Department of Civil Engineering, Kobe University

This paper presents the application of genetic algorithms on the model to evaluate the impact on the domestic air passengers' flow in response to aviation policy scenarios. The air passengers' flow can be regarded as the gaming so called Stackelberg equilibrium between the airlines and the passengers in the transportation market. As the formulation is expressed as discrete combinatorial optimization problems, genetic algorithms are adopted to rapidly obtain the approximate solution instead of branch-and-bound method as the heuristic solution. This paper evaluates calculations by genetic algorithms to comparable domestic air network in 1991, and analyzes the influences of some aviation policy scenarios in 2010.

1. はじめに

1.1 研究の背景

日本の国内航空旅客需要は、今後 21 世紀を迎えるにあたって、全国整備新幹線の導入など国内航空ネットワークを取り巻く環境が大幅に変化すると考えられる。また、国内の拠点国際空港は東アジア各国との空港間競争のため、空港整備が急がれる状況にある。さらに莫大な公的資金導入と高い効率性を必要とする空港整備はその妥当性が問われる。

日本の場合、国土の制約から個別空港の大幅な拡張や新規の大規模空港建設は困難である。有力な解決策として、「既存空港をネットワーク化して全体として空港容量の制約を解決していく方法」が有効と考えられる。この考えに沿い、黒田・大橋¹⁾は 1993 年に航空ネットワークを構成する主体に着目したシュタツケルベルグ均衡モデルを提案した。その後、筆者らはこのプロトタイプモデルを改良する形で、国内航空旅客および国際航空旅客を対象とする将来政策分析の研究を行ってきた²⁾³⁾。

1.2 研究の目的

筆者らが構築してきた国内および国際航空旅客モデルの目的は、航空ネットワーク解析を公表されている統計データなどの集計量を変数として、政策対応に役立てることにある。

国内モデルは新幹線との競合を考慮し、需要に対応した国内航空旅客の最適なネットワーク（便数パターン）を推定する。国際モデルは主に東アジア各国のハブ空港と呼ばれる大規模拠点空港と国内の成田等の拠点空港との競合関係を分析し、ハブ空港の成立可能性を評価する。

このうち国際モデルは、現時点ではかなり限定された表現力しか持っていない³⁾。そこで本稿では国内モデル（以下、国内航空旅客流動モデルと呼ぶ）に焦点を当てる。

1.3 本稿の構成

本研究では最初に航空旅客市場の構造を分析し、シュタツケルベルグ均衡による国内・国際航空旅客市場へのモデル化を述べる。次いで、国内航空旅客流動モデルの行動規範と定式化を述べる。また、定式化が離散型組合せ最適化問題のためにヒューリスティックな分枝限定法による解法を説明する。そして計算時間の短縮を図るために GA（遺伝的アルゴリズム）を採用

した経緯とその計算アルゴリズムを示す。その後、実際の航空ネットワークへの GA による実験結果を報告し、適用評価を行う。

2. 航空旅客市場の構造とモデル化

2.1 航空旅客市場の構造とゲーム理論

2.1.1 市場の主体

航空旅客市場の構造を主体から考えてみる。主体は航空会社（キャリアー）、旅行者（ユーザー）、政府ならびに空港管理者が対応し、競合交通機関を考慮すれば鉄道も主体である（図-1）。このうち活動主体はキャリアーと旅行者である。

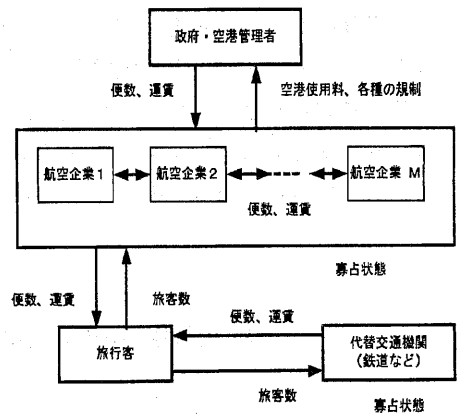


図-1 航空旅客市場の構造

2.1.2 上位・下位の構造

先にキャリアーが自己の利潤の最大化を行い運行頻度等を決定する。その後、旅行者が、キャリアーの提示した運行頻度、所要時間、運賃、機材容量をもとに自己の経路選択を行うと考えられる。ここで、OD交通量がキャリアーの戦略の影響を受けないと仮定すれば（OD交通量が与件）、キャリアー間の競争関係を上位問題、キャリアーと旅行者との関係を下位問題と見なすことが可能になる。このような主体間の関係は、先手と後手の区別を設けた非協力ゲームであるシュタツケルベルグ(Stackelberg)計画問題として知られている。

シュタツケルベルグ均衡は、元来は経済学で企業の複占状態を説明するために使われてきたが⁴⁾、近年はゲーム理論の方面⁵⁾や通信ネットワーク分野でも応用研究がある⁶⁾。

2.1.3 航空ネットワーク分析の解

本研究ではOD交通量を与件とし、運賃を含む運航費用や空港利用料も外生的に与えている。解はリンク別、ルート別の便数（航空頻度）と旅客数である。図-2にその概念図を示す。

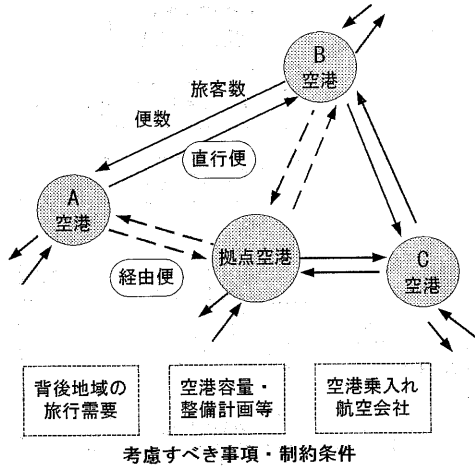


図-2 航空ネットワーク分析の概念図

2.2 国内航空旅客流動モデルのモデル化

主体として、航空会社、旅行者と主な代替機関である鉄道会社を加えた3者とし、政府ならびに空港管理者の行動は外生的に与える（図-3）。航空会社は利潤を最大化すること、旅行者は自己の経路選択行動を最適化（時間最短）することを各々の行動目的と考える。

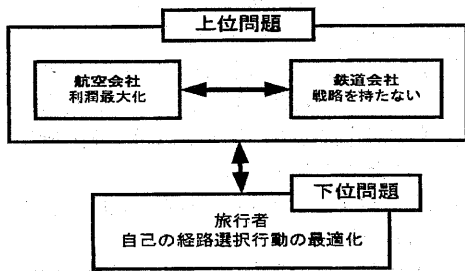


図-3 主体間の関係<国内航空旅客>

3. 国内航空旅客行動モデルの定式化

3.1 航空会社の行動モデルの定式化

行動規範は2.2に従うとする。

$$\max B(f_l) = \sum_i \sum_j \sum_k \left(\sum_k p^l \cdot \delta_k^l \cdot x_{ij}^k \right) - \sum_l f_l \cdot (AC^l + \delta_h^l \cdot LC^h) \quad [1]$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{l \in L} \delta_h^l \cdot f_l \leq CA^h \quad [2]$$

$$f_l = f_{\bar{l}} \quad [3]$$

$$f_l \geq 0 \quad [4]$$

and 旅行者の条件式

$$\text{s.t.} \quad \left. \begin{array}{l} \text{OD 保存式} \\ \text{機材容量制約式} \\ \text{非負条件式} \end{array} \right\} \text{旅行者の制約条件式}$$

ここで、

x_{ij}^k : ij 間 k 経路の旅行者数(人)、 δ_k^l : クロネッカーデルタ (ij 間 k 経路がリンク l を通るとき1、そうでないとき0)、 p^l : リンク l の運賃(円/人・回)、 f_l : リンク l の往路の運行頻度(回/日)、 $f_{\bar{l}}$: リンク l の復路の運行頻度(回/日)、 AC^l : リンク l の運行費用(円/回)、 LC^h : 空港 h を使用するときの1回あたりの着陸料(円/回)、 δ_h^l : クロネッカーデルタ(リンク l が h 空港を通るとき1、そうでないとき0)、 CA^h : 空港 h の空港容量(便/日)、 L : 路線の集合。

3.2 旅行者の行動モデルの定式化

行動規範は2.2に従うとする。

$$\begin{aligned} \min T(x_{ij}^k) &= \sum_i \sum_j \sum_k x_{ij}^k \cdot t_{ijk} \\ &= \sum_i \sum_j \sum_k x_{ij}^k \cdot \left\{ t_{ijk}^a + \sum_{l \in L} \delta_k^l \cdot t^l + \sum_{h \in H} \delta_{2k}^l \cdot \delta_{2h}^l \cdot \frac{OT^h}{2 \cdot f_l} \right. \\ &\quad \left. + \sum_{l \in L} \sum_{h \in H} \delta_{3k}^l \cdot \delta_{2h}^l \cdot WT \right\} \end{aligned}$$

[5]

$$\text{s.t.} \quad \sum_k x_{ij}^k = X_{ij} \quad [6]$$

$$\sum_i \sum_j \sum_k \delta_k^l \cdot x_{ij}^k \leq f_l \cdot CP^l \cdot \lambda \quad [7]$$

$$x_{ij}^k \geq 0$$

[8]

ここで、

X_{ij} : ij 間の旅行者数(人/日)、 δ_{2k}^l : クロネッカーデルタ(リンク l が ij 間 k 経路の第 1 リンクであるとき 1、そうでないとき 0)、 δ_{3k}^l : クロネッカーデルタ(リンク l が ij 間 k 経路の第 1 リンクであるとき 1、そうでないとき 0)、 δ_{2h}^l : クロネッカーデルタ(リンク l の出発空港が h であるとき 1、そうでないとき 0)、 CP^l : リンク l の機材容量(人/便)、 t_{ijk} : ij 間 k 経路の総旅行時間(分)、 t_{ijk}^{ai} : ij 間 k 経路のアクセス

4. 国内航空旅客行動モデルの解法

4.1 離散型組合せ最適化問題

シュタツケルベルグ計画問題に関して、厳密解法は志水(1982)によって示されている⁹⁾。しかし、厳密解を求める計算時間などの困難さが指摘されている。本研究でのシュタツケルベルグ計画問題は、解法としては類似研究⁷⁾の解法と同じくヒューリスティックな解法が適用できる。しかし、上位の目的関数の決定変数たる運航頻度 f_i は非負の整数値という離散値である。このため本研究のシュタツケルベルグ計画問題は、離散型組合せ最適化問題となる。そのために各旅行者の選択するリンクのうち、航空リンクだけを絞り込んで探索した。このリンク探索アルゴリズムでは分枝限定法の考え方を取り入れた。図-4に全体の計算手順を示す。

4.2 遺伝的アルゴリズム導入の必要性

離散型組合せ最適化問題のため、解空間を絞った分枝限定法を用いてもなお長大な計算時間を要した。1996年当時の最速機でも全体の計算時間(elapsed time)は5日間程度であった。計算時間のボトルネックは分枝限定法を用いている最適運航頻度(便数)パターンを探索する部分である。運航頻度の組合せ試行回数が多いほど固定計算時間である線形計画法の計算回数が増える。したがって、無駄なリンク探索を避ける解法が要求され、本研究では遺伝的アルゴリズム(GA)⁹⁾を導入したのである。

一方、土木・交通計画分野では、筆者の知る限り、国内ではGAを輸送ネットワーク問題に適用した事例は極めて少ない⁹⁾¹⁰⁾。その意味で

本研究は端緒の1つとなるものである。

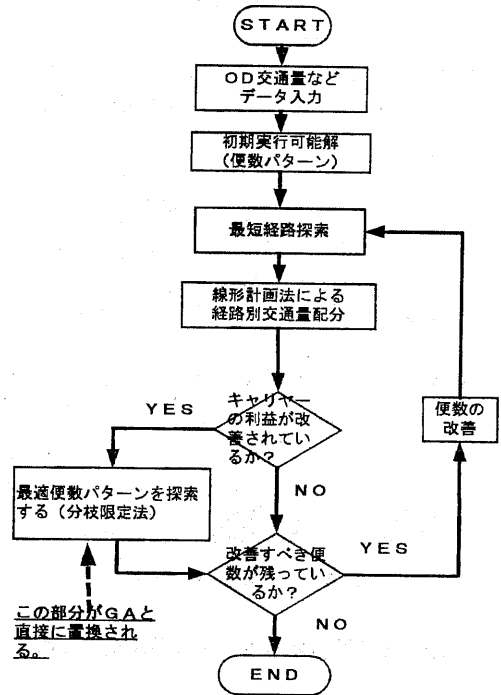


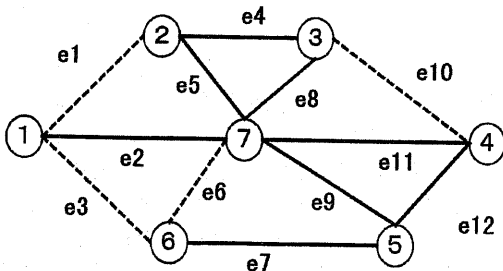
図-4 国内航空旅客流動モデルの計算手順

5. 国内航空旅客流動モデルとGA適用設計

5.1 GAの適用

最適運航頻度(便数)パターンを探索する部分をGAで置換し、図-4の全体計算フローの制御を一部変更するのがGA適用の要点である。GAによる適用概略を次に示す。

- ① 手法としては単純GAを用いた。
- ② 遺伝子のビット列を直接に求めたい便数とし、乱数発生で生成した(図-5参照)。
- ③ 選択操作にはルーレット選択、交叉操作は一点交叉法を用いた。
- ④ 適合度関数は航空会社の運行頻度で決まる利潤の式とした。
- ⑤ 遺伝子数、世代数の設定値は不明なので、テスト計算を行い、そのパフォーマンスから初期設定値を決める。
- ⑥ GA適用結果を評価するために、従来研究で扱った1991年の現状再現計算を行なう。
- ⑦ 政策分析を行うために将来ケース(2010年)のシミュレーションを行う。



エッジ番号	e1	e2	e3	e4	e5	e6	e7	e8	e9	e10	e11	e12
連結有無	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
便数(回)	0	5	0	2	3	0	2	8	10	0	4	2

図-5 遺伝子表現とネットワークとの対応

5. 2 GAを用いた計算アルゴリズム

計算手順の概略を次に示す。

- 【STEP1】 旅行者が利用可能な経路探索を行う。
- 【STEP2】 初期個体 (運行頻度パターン) M 個を乱数発生により作成する。
- 【STEP3】 それぞれの個体について旅客を分割配分法 (All or Nothing 法) および線形計画法により経路別に配分し、個体の利潤を計算する。
- 【STEP4】 世代数 n が規定値 N に達したならば、最も利潤の高い個体を最適解として終了する。達していないならばSTEP5に進む。
- 【STEP5】 利潤の高い個体ほど次世代に残れるよう、ルーレット選択法により交叉に用いる親個体を選択する。
- 【STEP6】 選ばれた M 個の個体をもとに交叉を行い次世代の個体を M 個生成させる。
- 【STEP7】 打ち切り条件以内なら STEP3 に戻る。

6. 計算アルゴリズムの評価

6. 1 現状再現性テストとGAの評価

6.1.1 使用データの設定概略

(a) ネットワークと空港

各都道府県を1つのゾーンとし、ジェット機が就航する空港を選び、乗り継ぎ可能な空港は2空港 (羽田・伊丹) のみとした。

(b) OD交通量データ

現況 (1991 年) OD交通量データは、国内航空旅客者数データと運輸経済研究センターの「幹線旅客純流動調査」に基づいて作成した。

(d) 運行費用データ

各航空会社の総営業トンキロと総営業費用から回帰分析で算出を行った。

(e) 空港使用料データ

就航している機材を1種類と仮定し、その機材の重量より空港使用料を求めることとする。

(f) その他のデータ

各路線の運賃、運行時間、駅-空港間のアクセス・イグレス時間ならびに費用は1997年度の時刻表掲載の値を用いた。

6.1.2 再現性の評価

1991年時点でのネットワークを対象としてGAを組み込んだ国内航空旅客流動モデルシステムの現状再現を検証した。

GAの計算時間[Elapsed Time]であるが、使用したDOS/V機 (CPU:233MHZ) においてVC++ (Releaseモード) で計算時間は7時間程度であった。また、より高速の計算機ではより時間短縮できることは確認した。

実績値と推定値の相関関係を図-6、GAの挙動を図-7に示す。

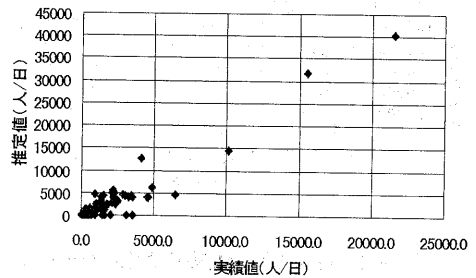
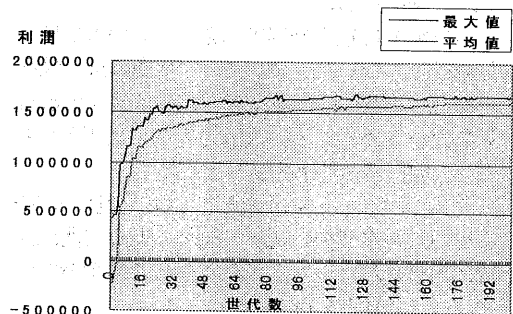


図-6 実績値と推定値の相関関係



(注意) 利潤の単位は「千円」である。

図-7 現状再現のGAの挙動例

この結果、相関係数は 0.9490 と高い値が得られた。ただし、拠点空港（成田、関西国際空港）と千歳空港間を中心として実績値より過大推定となった。これは離散値である便数による変動が大きく、GAによる計算制御方法で十分に扱えていないこと、システム最適の行動規範で拠点空港に旅客が流れたと解釈される。また、最大利潤はおおよそ 1,700 百万円水準である。これは従来研究の値より多い。

6.2 2010年の政策分析

2 ケースを設定した。ケース1は現在推移、ケース2は整備新幹線の導入の場合である。両ケースとも乗り継ぎ可能な空港は4空港（羽田、関空、伊丹、中部）とした。図-8に将来ケース1と2に対するGAの挙動（利潤の変化）を示す。

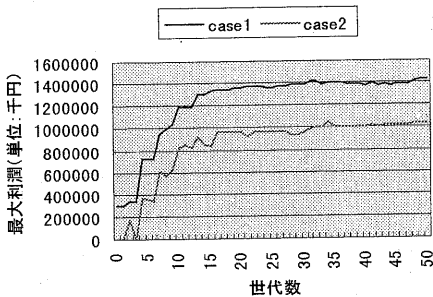


図-8 GAによる利潤の変化(ケース1, 2)

7. おわりに

本研究では航空旅客市場をゲーム論の立場から分析し、シュタッケルベルグ均衡の適合性を示した。また、国内航空旅客流動モデルの政策対応力を高めるために遺伝的アルゴリズムを導入し、解探索の効率評価を行った。

全体のパフォーマンスとしては、分枝限定法を用いた従来研究と比べて全体の計算時間は大幅に短縮された。また、現状再現でも全体的には良い適合結果を得た。

ただし、現状再現において、全体への影響が大きい拠点空港の推定結果の変動が大きい傾向が見られた。遺伝子表現で用いたリンク別の便数（離散値）に対応する乱数の制御が不十分

だったと思われる。今後はネットワークに適したGAのパラメータのチューニングや理論的な面からの設計法の吟味を続ける必要がある。

次に、国内航空旅客流動モデルの政策対応力としては多くの課題を残している。それは、大きな課題としては、キャリアの複数化や、OD交通量の内生化、旅行目的の区別（観光とビジネス）およびゾーン設定の明確な基準化である。また、概略しか論じなかった国際航空旅客のモデルは、全く異なった仮定に基づくモデル化を現在進めている。

参考文献

- 1) 黒田勝彦, 大橋忠宏: 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, 土木計画学研究・講演集, No. 16(1), pp. 737-743, 1993.
- 2) 黒田勝彦, 竹林幹雄, 三保木悦幸: シュタッケルベルグ均衡による国内航空ネットワークの最適化, 土木計画学研究・講演集, No. 19(1), pp. 265-268, 1996.
- 3) 三保木悦幸, 黒田勝彦, 竹林幹雄, 正木智也: キャリアと旅行者との均衡を考慮した国際航空旅客需要予測モデルに関する基礎的研究, 土木学会第52回年次講演概要集, pp.414-415, 1997.
- 4) ロバート・ギボンズ (福岡正夫, 須田伸一訳): 経済学のためのゲーム理論入門, 創文社, 1995.
- 5) 志水清孝: 多目的と競争の理論, 共立出版, 1982.
- 6) Yannis A. Korilis, Aurel A. Lazar, and Ariel Orda: Achieving Network Optima Using Stackelberg Routing Strategies, IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 5, no. 1, pp. 161-173, February 1997.
- 7) 佐々木 綱, 朝倉康夫: OD需要の変動を内生化した最適道路網計画モデル, 土木学会論文集, No. 383 / IV-7, pp. 93-102, 1987.
- 8) 坂和正敏, 田中雅博: 遺伝的アルゴリズム, 朝倉書店, 1995.
- 9) 田村 亨, 杉本博之, 上前孝之: 遺伝的アルゴリズムの道路備順位決定問題への適用, 土木学会論文集, No. 482, IV-22, pp. 37-46, 1994.
- 10) Gen, M., Cheng, R.: Genetic algorithms and engineering design, John Wiley & Sons, 1997.