

国際空港の立地モデルに関するゲーム論的考察 *

*A Game-theoretic Analysis on the Development of the International Airport **

藤村秀樹**, 溝上章志***, 柿本竜二****

By Hideki Fujimura**, Shoshi Mizokami*** and Ryuji Kakimoto****

1. はじめに

東アジア諸国においては、航空の自由化や超大型化・次世代超音速旅客機の開発に対応して先を競うように、ハブ空港の整備が進められている。我が国においても国際ハブ空港を含む拠点空港の整備に力が注がれており、成田・関空および新たに着手される中部圏のハブ空港等によって伸び続ける国際需要に対応しようとしているところである。これまで、公共施設や物流拠点等の立地モデルは、輸送費用の最小化や効用の最大化などの最適化問題として取り扱われるのが一般的であった。しかし、国際空港の配置問題のように、各自治体の利害が複雑に絡み合っており、かつ建設に際して他の自治体との協同化が不可欠であるような問題の解決には、ゲーム理論による考察が有効な場面が存在する。例えば、ゲーム論においては、外部環境の変化によるプレイヤー間の提携化や協同化をゲームに取り入れることが可能であり、この外部環境の変化を各プレイヤーの利得の変化として表せるという特色を有している。本研究では、プロジェクトの推進と効率化のために協同体制が形成されることが望ましいにも関わらず、必ずしも適切な共同化が形成されるとは限らない現実の問題の解決を目指して、外部環境を変化させながら集団の意志決定過程についての考察を行う。

以下では、本研究の流れについて説明するとともに、ゲーム環境の設定とその条件について取りまとめる。次いで、設定した需要関数と費用関数のもとで利得表を作成し、各自治体の個人合理性基準等を設定する。さらに、設定した条件下における展開型ゲームの均衡解を求め、各自治体の戦略について考察する。

2. ゲームの設定と均衡点の考え方

(1) ゲームの設定と考え方

本研究は、国際空港の立地に際して経済的・社会的環境の異なる各自治体間が、自らに最も有利なように空港を誘致しようとして種々の戦略を展開したり、外部環境の変化に対応したゲームを非協力ゲームとして設定する。そして、この非協力ゲームの均衡解としてナッシュ均衡点を採用すると共に、設定した外部環境に対応した均衡点の推移の状況から、外部環境の変化に伴うプレイヤーの最適行動の予測を行うと共に、協同化の為の政策を立案する。次に、この本研究の考え方と具体的な計算手順を図-1に示し、以下で説明する。

STEP-I: 別途定める一般化費用と需要関数に基づき、各都市 $i(i=1,2,3)$ から空港 $j(j=1,2,3)$ 間の利用需要を予測する。

STEP-II: 各空港とアクセス施設の建設費⁽¹⁾の一定割合を地元負担額 C_j として設定し、各都市の市民所得 C_i ⁽²⁾との割合 $R_{ij} = c_j/c_i$ を算定する。

STEP-III: 各都市をプレイヤーとして捉え、この組み合わせを考える。3人ゲームであるから、以下の5通りの組み合わせが考えられる。

$(\{1\}\{2\}\{3\}), (\{1,2\}\{3\}), (\{1,3\}\{2\}), (\{2,3\}\{1\}), (\{1,2,3\})$

STEP-IV: 需要量 V_{ij} と費用負担割合を、利得関数 $f_1(V_{ij})$ と $f_2(R_{ij})$ を用いて点数化し、利得表を作成する。各戦略型ゲームの利得表から min max 値を求めることで、個人(i)・提携(s)・全体(N)の各合理性基準を確立する。

STEP-V: 部分提携(s)した場合の配分解を次の二つの場合に分けて計算する。⁽³⁾

・コアが存在しない場合 (ナッシュ解の考え方)

$$X_i = \max_{x_i \in A} \{ \sum_{j \in s} (v_j - x_j) : st. x_i < v_j \} \quad (1)$$

・コアが存在する場合 (仁の考え方)

$$X_i = \min_{x_i \in A} \max \{ \sum_{j \in s} x_j - v_s \} \quad (2)$$

ここに、 A^* は、配分解の集合を表す。

STEP-VI: 設定した条件下における展開型ゲームを設定し、各プレイヤーの利得を計算する。

* キーワーズ: ゲーム理論, 均衡点, 施設立地モデル,

** 正員 博士 (工学), 北九州市役所 (〒803-0813 北九州市小倉北区城内 1-1 TEL093-582-2644, FAX093-582-2503)

*** 正員, 工博, 熊本大学工学部教授

**** 正員, 博士 (学術) 熊本大学助教授

STEP-VII: 展開型ゲームの利得から次式によりナッシュ均衡点を求め、制約条件の異なるゲームにおける均衡点を比較しゲームの外部環境と均衡点の関係を把握する。

$$f_i(s^*) = \max_{s_i} [f_i(s_i, s_{-i}^*)]$$

STEP-VIII: ゲームの協同化を成立させる為、各プレイヤーが取るべき戦略およびゲームに関連する第三者の政策の検討を行う。

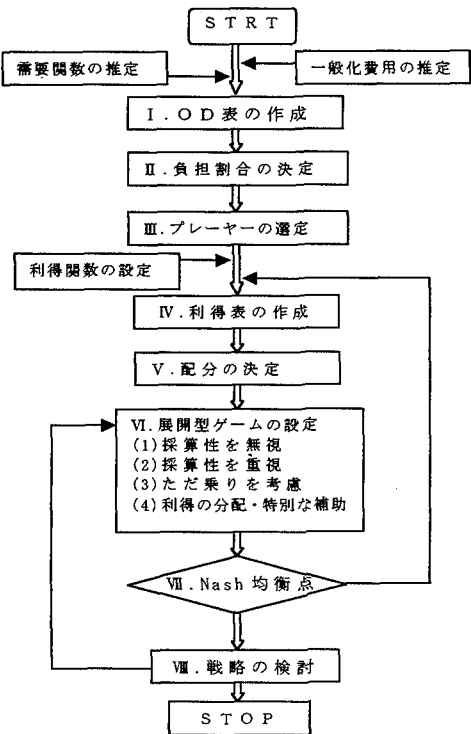


図-1 ゲーム設定のフローチャート

(2) 戦略の選定と均衡点の考え方

展開型ゲームにおけるプレイヤー (p, q, r) の行動戦略を $S = (p_i, q_j, r_k)$; $0 \leq p_i \leq 1, 0 \leq q_j \leq 1, 0 \leq r_k \leq 1$ とする。ここで p_i, q_j, r_k は、他のプレイヤーと協同する行動を取る確率である。以下では、簡単にプレイヤーの行動を (p_i, q_j, r_k) と表す。一方、プレイヤーの利得を $B_s = (B_p, B_q, B_r)$ と表すと、ゲームの解は一般的に以下のように表される。

$$G_m = (\{S\}, \{B_s\})$$

ここで、 m は設定した条件の違いによるゲーム番

号を表す。図-2は展開型ゲームの構造を表わし、表-1は、ゲームの環境条件を表わしたものである。本研究においては、外部環境の違いによる均衡点の差を明らかにするため、以下の4ケースの外部環境の異なるゲームを設定し、各々の均衡点を求め、その特性について考察する。

Game1は、各自治体の採算性を考慮しない場合であり、Game2は、空港の採算性の確保を利用人口が20万人以上で、市民所得に対する建設費の負担割合 R_y が10%以下のように定めた場合である。Game3は、各自治体が負担金なしで他の空港を利用できる一種のただ乗りが可能な状況を設定しており、Game4では、均衡点のパレート最適化を目指して、プレイヤー間で利得の再配分が可能な状況である。

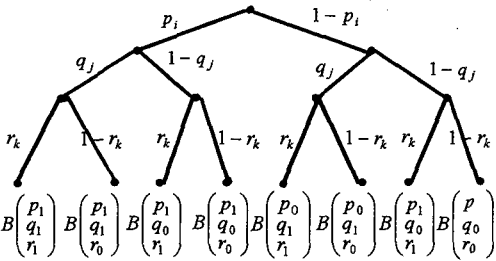


図-2 展開型ゲームの構造

表-1 設定したゲームの環境

ゲームの種類	設定したゲームの条件
Game1	各自治体は空港経営において、採算性を考慮しなくてよい環境にあり、縮小均衡を求めて、バラバラに行動することが許容される状態。
Game2	各自治体の空港運営に採算性の確保を義務付け、一定水準以下のプレイヤーの利得は、ゼロとして均衡点を求める。
Game3	各自治体は選択した提携構造において、採算の悪い空港は閉鎖し、負担金無しで他の空港を利用できる一種のただ乗り戦略を採れる状態。
Game4	G_3 の状態において、均衡点の成立を目的として、プレイヤー間での利得の再配分を許容したり、均衡点のパレート最適化の目的で中央政府から特別な補助金(サイド・ペイメント)の支給を許容する状態。

各プレイヤーの期待利得は以下のように計算される。

$$E_{p_i} = \sum_{j=0}^1 \sum_{k=0}^1 q_j r_k B_{p_i}(q_j, r_k) \quad \forall i=0,1 \quad (3)$$

$$E_{q_j} = \sum_{i=0}^1 \sum_{k=0}^1 p_i r_k B_{q_j}(p_i, r_k) \quad \forall j=0,1 \quad (4)$$

$$E_{r_k} = \sum_{i=0}^1 \sum_{j=0}^1 p_i q_j B_{r_k}(p_i, q_j) \quad \forall k=0,1 \quad (5)$$

表-2にナッシュ均衡点の条件式を掲載する。

表-2 プレーヤーの戦略の選択確率と期待利得の条件式

戦略の確率 (PL-1)	期待利得の条件式 (PL-1)	戦略の確率 (PL-2)	期待利得の条件式 (PL-2)	戦略の確率 (PL-3)	期待利得の条件式 (PL-3)
$p_i = 0$	$E_{p_i}(q_j, r_k) \leq E_{1-p_i}(q_j, r_k)$	$q_j = 0$	$E_{q_j}(p_i, r_k) \leq E_{1-q_j}(p_i, r_k)$	$r_k = 0$	$E_{r_k}(q_j, p_i) \leq E_{1-r_k}(q_j, p_i)$
$0 \leq p_i \leq 1$	$E_{p_i}(q_j, r_k) = E_{1-p_i}(q_j, r_k)$	$0 \leq q_j \leq 1$	$E_{q_j}(p_i, r_k) = E_{1-q_j}(p_i, r_k)$	$0 \leq r_k \leq 1$	$E_{r_k}(q_j, p_i) = E_{1-r_k}(q_j, p_i)$
$p_i = 1$	$E_{p_i}(q_j, r_k) \geq E_{1-p_i}(q_j, r_k)$	$q_j = 1$	$E_{q_j}(p_i, r_k) \geq E_{1-q_j}(p_i, r_k)$	$p_k = 1$	$E_{r_k}(q_j, p_i) \geq E_{1-r_k}(q_j, p_i)$

3. 数値計算例

(1) 設定と利得表の作成

図-3に示すような3都市が各々の近くに国際空港を立地させたいと考えている状況を設定し、以下の手順により利得表を作成する。

(M1) 国際線の旅客数は、人口 y_i 、市民所得 D_i 、一般化費用 P_{ij} により、

$$V_{ij} = \mu \ln y_i + \nu \ln D_i + \delta \ln P_{ij} \quad (6)$$

で表され、一般化費用は交通費用 P_{ij}^* 、所要時間 T_{ij} 、運行本数 F_{ij} により

$$P_{ij} = \alpha \sum_{A_j \in M} p_{ij} + \beta \sum_{A_j \in M} T_{ij} + \gamma F_{ij} \quad (7)$$

で表される。

(M2) 表-3のように仮定した需要予測モデルから、各々図-3に示す $p_{ij}, T_{ij}, F_{ij}, y_i, D_i$ の値を用いて、各空港立地点に対する各都市からの利用需要を求めたものを表-4に示す。

(M3) 非協力ゲームにおいては、最も近い空港整備計画に対し、全体事業費の10%の地元負担金を支払うものとする。但し、提携(s)や協同(N)が形成された場合には、これを旅客の数により按分する。

(M4) 各プレーヤーは利得の最大化を目指して行動するが、利得は次式で表されるものとする。

$$B_i = \{ f_1(V_{ij}) + f_2(R_{ij}) \} \quad (8)$$

Game1における利得表を表-5に示す。ここで、利得の換算値は、文献1)に示関係の成立は、ナッシュ均衡点に基づき判断するがされた値を用いた。

(M5) 各プレーヤー間の競争はナッシュ的に行われ、利得の最大化を求めて提携関係が成立する。

(M7) 提携関係(s)が成立した場合には、各プレーヤーは提携により得られる利得を、式(1)のように利得の積が最大となるような利得の配分ないし、式(2)

のように仁による配分を受け入れるものとする。

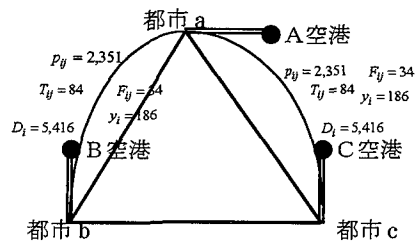


図-3 空港立地モデルの模式図

表-3 需要予測モデル

項目	係数	項目	係数
交通費(α)	0.986 (18.9)	都市人口(μ)	1.048 (5.22)
所要時間(β)	14.51 (7.31)	市民所得(ν)	2.131 (2.04)
アクセス(γ)	6.00 (1.11)	一般化費用の最小値(δ)	-0.104 (-1.54)

() はt値を示す。

表-4 利用需要の予測値 (単位：千人)

空港の立地点	都市a	都市b	都市c	合計
A空港	334	112	96	542
B空港	257	135	89	480
C空港	231	94	110	435

表-5 Game1における利得表

ケース	プレーヤー			提携構造
	1	2	3	
1	10	7	5	{1, 2, 3}
2	7.5	4.5	4	{1, 2}{3}
3	8.5	6	3.5	{1, 3}{2}
4	8	6	4	{1}{2}{3}
5	8	5.5	3.5	{2, 3}{1}
6	8	6	4	{1}{2}{3}
7	8	6	4	{1}{2}{3}
8	8	6	4	{1}{2}{3}

表-6 均衡点と提携構造

ゲーム番号および 外部環境	プレイヤーの利得			提携構造	戦略 (p_i, q_j, r_k)	備考
	PL1	PL2	PL3			
Game1 (採算性無視)	8	6	4	$\{1\}, \{2\}, \{3\}$	$(0, 0 \leq q_j \leq 1, 0)$	
	10	7	5	$\{1,2,3\}$	$(1, 1, 1)$	
Game2 (採算性考慮)	10	7	5	$\{1,2,3\}$	$(1, 1, 1)$	
	8	5.5	3.5	$\{2,3\}, \{1\}$	$(0, 1, 1)$	
Game3 (タダ乗り許容)	8	8	5	$\{1\}, \{2\}, \{3\}$	$(0 \leq p_i \leq 1, 0, 0)$	
	8	8	5	$\{1\}, \{2\}, \{3\}$	$(0, 1, 0)$	
Game4 (利得の移譲あり)	9	8	5	$\{1,2,3\}$	$(1, 1, 1)$	プレイヤー $\{1\}$ からプレイヤー $\{2\}$ へ利得を分割

(2) 数値計算事例の考察

図-2における各プレイヤーの戦略の組み合わせによって得られる利得がナッシュ均衡点であるためには、表-2に示した各プレイヤーの戦略の確率が期待利得の条件式を満足する必要がある。表-6は各ゲームにおける均衡解を掲載したものであり、以下にこれらについての考察を行う。

Game-1 採算性を考慮しない場合は、協同化が成立するケース $G_1 = (\{1,1,1\}, \{0,7,5\})$ と単独で行動する $G_1 = (\{0, 0 \leq q_j \leq 1, 0\}, \{8,6,4\})$ が均衡点である。部分提携によるメリットが小さい場合（劣加法性）における均衡点の収束の方向としては、プレイヤーが協同(N)で行動するか、バラバラに行動するか2つのタイプに分けられることが明らかとなった。

Game-2 空港として成立する最低条件を空港の利用客数を20万人以上かつ財政負担指数が10%以下のように設定する($\min B(p, q, r) \geq 7$)と、協同化(N)が成立するケースと同様に部分提携(s)が成立するケース $G_2 = (\{0,1,1\}, \{8.5,5.3,3.5\})$ が均衡点となる。しかし、いずれのプレイヤーも部分提携 $\{2,3\}$ によって得られる利得は、協同化(N)で得られる利得よりも小さいので、この提携戦略(s)の選択は望ましいものではない。

Game-3 負担を伴わず個々の利得が上昇するようなゲームにおいては、各人がバラバラに行動する $G_3 = (\{0 \leq p_i \leq 1, 0, 0\}, \{8.8,5\})$ と $G_3 = (\{0, 1, 0\}, \{8.8,5\})$ の二つのタイプの均衡点が存在し、提携(s)や協同化(N)が実現する事はない。

Game-4 上記Game-3の環境において、協同化を進める手だてとしては、利得に余裕のあるプレイヤー $\{1\}$ からプレイヤー $\{2\}$ への利得の配分が考えられる。この場合、 $G_3 = (\{1,1,1\}, \{9,8,5\})$ が唯一の均衡点として成立する。

4. まとめ

ゲーム理論による分析において大切なことは、設定した条件に対する均衡解をどのように理解し、取り扱うかということである。本研究でも明らかとなったようにゲーム理論の均衡解は、設定する外部条件により様々に変化していく。この変化とその背景にある環境条件の関係を的確に把握し、解決を迫られている現実の問題に対し、プレイヤーの合理的な行動の指針や政策立案の為の有用なケース・スタディを提供することが、ゲーム理論を用いる最も大きな成果である。以下に、本研究による結果を考察する。

- (1) 採算性を考慮しないゲームにおいては、各自治体がバラバラに空港を運営する案と協力が成立する案の二種類の均衡点が存在する。
- (2) 各自治体に一種のただ乗りを許すゲームにおいても、各自治体は協力体制を取らず、ただ乗り戦略が均衡点となり提携関係は形成されない。
- (3) ゲームの均衡点の改善としては、利得に余裕のある都市aから都市bへの利得の分轄により、提携関係を緊密にすることが有効であると考えられる。
- (4) 現状を打開する方策としては、空港建設に伴う各自治体と利用者の負担額やアクセスの建設に伴う採算性の問題等を明らかにする「情報開示」により、自治体と市民の合理的な行動を明らかにする事も有力な手法であると考えられる。

参考文献：

- 1) 九州国際空港に関するワイズメンコミッティ：九州国際空港に関する候補地の総合評価，1996，10.
- 2) 経済企画庁経済研究所編：県民経済計算年報，1998，10.
- 3) 藤村秀樹，溝上章志，柿本竜治：連絡橋プロジェクトにおける合意形成型費用配分法の有用性の考察，土木計画学研究講演集 (2) pp371～pp374，1998，10
- 4) 岡田章：ゲーム理論，有斐閣，1997，6