

国際航空旅客市場における都市圏間純流動旅客数の推定

本論文は、国際航空旅客輸送市場における純流動旅客数を推計する手法を示し、それが現在その代替として広く用いられているOFOD統計とどの程度乖離しているかについて検討するものである。具体的にはOFOD統計をもとに利用者の経路と航空券の種類を選択行動を定式化して推定される空港間の利用者数と、定期国際便の空港間利用者の統計であるTFS統計の空港間利用者との差が最小になるように選択行動のパラメータを推定し、純流動旅客数を推定する。この手法を世界の主要10都市間に適用し、OFOD統計と推計した純流動旅客数が約27~33%乖離している可能性があることを明らかにした。

キーワード | 国際航空旅客輸送, OD旅客数推定モデル, 純流動, OFOD統計

寺崎 淳也
TERASAKI, Junya

修(工) (株)日本航空インターナショナル整備本部

鹿島 茂
KASHIMA, Shigeru

工博 中央大学理工学部都市環境学科教授

谷下 雅義
TANISHITA, Masayoshi

博(工) 中央大学理工学部都市環境学科教授

大根田 洋祐
ONEDA, Yosuke

博(工) (株)シー・エス・ジャパン代表取締役

1—はじめに

1.1 背景と目的

国際航空旅客市場における純流動旅客数(以下,OD旅客数)は、航空会社の経営戦略のみならず、企業の立地戦略そして政府の空港整備計画や航空政策に関する基礎的なデータである。しかし、国際航空旅客市場のOD旅客数を直接把握できる統計は存在しない。そのため、先行研究^{1)~3)}ではOn Flight Origin and Destination(以下,OFOD統計)が代替的にOD旅客数として用いられてきた。しかし,OFOD統計は乗継便を利用する旅行者が存在するとOD旅客数と乖離する。現在、航空会社が進めているHub&Spoke型のネットワーク形態においては乗継便が必然的に増加するため,その乖離は無視できないと考えられるが,どの程度乖離しているのかは明らかにされていない。

そこで、本稿では国際航空旅客市場における都市圏間OD旅客数を推定する方法を提案し,それを世界の主要10都市間に適用してOFOD統計とOD旅客数の乖離の程度について検討することを目的とする。

1.2 本稿の構成

本稿の構成は以下の通りである。まず2章で国際航空旅客市場における輸送量に関する統計をまとめ,OFOD統計をOD旅客数として用いることの問題点を述べる。3

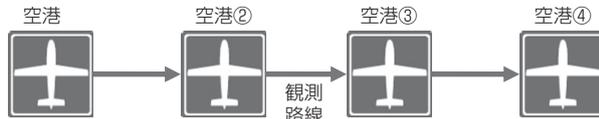
章では本稿で提案するOD旅客数推定モデルについて説明し,4章でモデルを適用し,OFOD統計とOD旅客数の乖離の程度を示す。5章で感度分析の結果を示し,最後に本稿の結論と課題を6章で述べる。

2—ICAO統計とOD旅客数

OFOD統計は、国際民間航空機関(International Civil Aviation Organization, 以下ICAO)が発行する国際航空旅客市場における輸送量であり,当該路線(都市圏間)に複数の航空会社が就航している定期国際便についてチケット(搭乗券)の発券枚数を年間もしくは四半期で集計した統計である。都市圏間別の輸送量であり,航空会社別の輸送量を把握することはできない。

またTraffic by Flight Stage(以下,TFS統計)は、出発(離陸)から最初の到着(着陸)までの1航行の都市ペア(空港ペア)における定期国際便の旅客数を航空会社別運航機材別に年間集計した統計である。

いま図—1に示すように、ネットワーク内を番号の小さい空港から大きい空港へ移動する旅行者を考える。それぞれのODペア別における集計区間は表—1のように整理できる。例えば,ODペア①—③の旅行者の中には、空港②を経由地(空港②前後のフライトが同じ便名による乗換)とする旅行者と、乗継地(空港②前後のフライトが異なる便名による乗換)とする旅行者が存在する。前者は発都



■図—1 分析対象と観測路線の関係

■表—1 移動方法とICAO統計の集計方法

OD Pair	空港②の状態	空港②が 発地	空港②が 経由地	空港②が 乗継地	空港② が着地	備考
①-②	OFOD統計	-	-	-	-②	
	TFS統計	-	-	-	-②	
①-③	OFOD統計	-	-③	-② ②-③	-	
	TFS統計	-	-② ②-③	-② ②-③	-	
①-④	OFOD統計	-	-④ ③-④	-② ②-④ ③-④	-	③が経由地
	TFS統計	-	-② ②-③ ③-④	-② ②-③ ③-④	-	③が経由地
②-③	OFOD統計	②-③	-	-	-	
	TFS統計	②-③	-	-	-	
②-④	OFOD統計	②-④ ②-③ ③-④	-	-	-	③が経由地 ③が乗継地
	TFS統計	②-③ ③-④ ②-③ ③-④	-	-	-	③が経由地 ③が乗継地
③-④	OFOD統計	-	-	-	-	
	TFS統計	-	-	-	-	

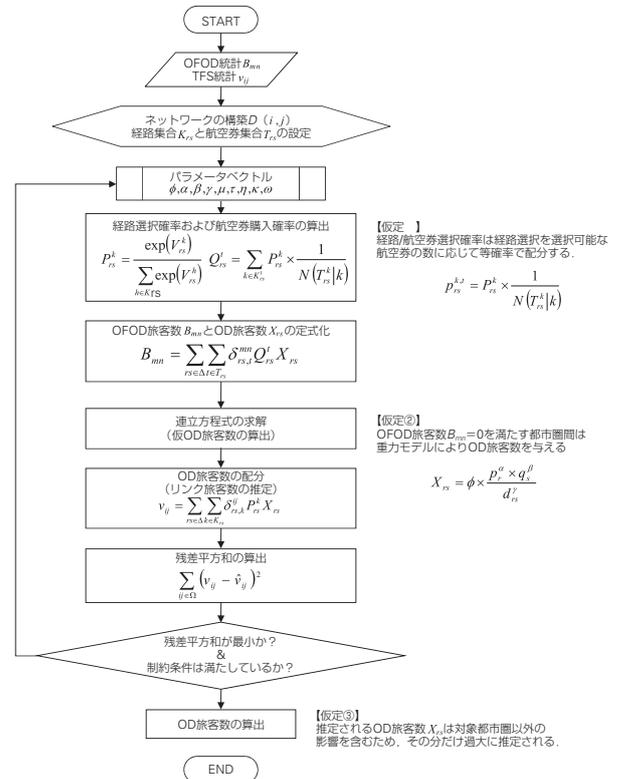
市圏が①，着都市圏が③とする航空券を1枚購入する。一方，後者は発都市圏が①，着都市圏が②という航空券と発都市圏が②，着都市圏が③という航空券の2枚の航空券を購入することになる。

そのため，OFOD統計では①-②および②-③の2つの都市圏間で集計され，TFS統計では両者の場合ともに①-②および②-③の2つの都市圏間で集計される。

OD旅客数とは，はじめの出発地と最終目的地である①-③で集計すべき旅客数であるから，OFOD統計やTFS統計を代替的に使用することは問題がある。

航空会社が行った当該フライト(成田-シカゴ，NH12便)でのアンケート調査⁴⁾によると，OFOD統計に集計される全搭乗者(236名)のうち，ODペアがフライトの発着都市圏間と一致する旅行者は約25%であり，OFOD旅客数とOD旅客数が約75%乖離していた。

Hub&Spoke型のネットワークの進展に伴い，乗継便を利用する旅行者が増加すると，OFOD統計とOD旅客数の乖離が一層大きくなると考えられる。



■図—2 OD旅客数推定モデルのフロー

3—OD旅客数推定モデル

本章では，OFOD統計とTFS統計を組み合わせたOD旅客数推定モデルについて説明する^{注1)}。

OFOD統計により得られる出発都市圏 m ，到着都市圏 n とする都市圏間旅客数 B_{mn} を，旅行者が購入した複数のチケットを結合して修正し，出発地 r と最終目的地 s とするOD旅客数 X_{rs} を推定する。ここで，OFOD旅客数 B_{mn} から修正する旅客数は，修正後得られるOD旅客数 X_{rs} を配分(経路選択)した結果として推定される出発地(離陸) i から最初の到着地(着陸) j までのリンク旅客数 v_{ij} が，TFS統計から得られる観測リンク旅客数 \hat{v}_{ij} とできるだけ一致するように決定する。

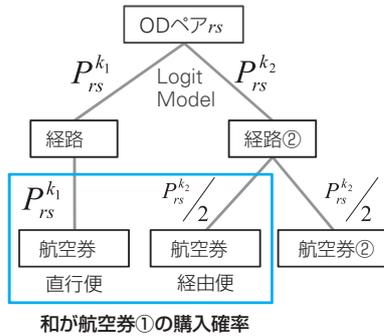
図—2に本稿で提案するOD旅客数推定モデルのフロー図を示し，以下に要点を説明する。

OFOD旅客数 B_{mn} は，求めるべきOD旅客数 X_{rs} と航空券購入確率 Q_{rs}^k を用いて(1)式として定式化できる。 X_{rs} はこの連立方程式を解くことで得られる。

$$B_{mn} = \sum_{rs \in \Delta} \sum_{T_{rs}^k} \delta_{rs,t}^{mn} Q_{rs}^k X_{rs} \quad (1)$$

ここで Δ : ODペア集合, T_{rs}^k : ODペア rs における経路 k での航空券集合, $\delta_{rs,t}^{ij}$ ($\delta_{rs,t}^{mn}$): ODペア rs における経路 k (航空券 t) がリンク ij (チケットリンク mn) を含むとき1, それ以外のとき0となる変数である。

またリンク旅客数 v_{ij} は，OD旅客数 X_{rs} と経路選択確率 P_{rs}^k を用いて(2)式のように定式化できる。



■図-3 経路および航空券の選択構造

$$v_{ij} = \sum_{rs \in \Delta} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{rs,k}^{ij} P_{rs}^k X_{rs} \quad \text{for } \forall ij \in \Omega \quad (2)$$

ここで、 K_{rs} はODペア rs の経路集合を表す。

旅行者の経路および航空券の選択は図-3に示すように、まず経路 k を選択し、選択した経路 k について購入可能な航空券 t のうちいずれかを選択するという2段階の構造であると仮定する。ODペア rs における経路 k および航空券 t の設定方法を注2に示す。

これらの選択においては、航空会社のサービスや乗継もしくは経由する都市圏間での接続時間 (Minimum Connecting Time)、また航空会社を変更する乗継便を利用する場合は運賃などの金銭的費用が説明変数として考えられる。しかし、OFOD統計では旅行者の航空会社選択に関する情報を把握することが不可能である。また、本研究では対象期間を1年としており、時刻表の情報を用いていないため接続時間を考慮することができない。

そこで図-3における上位階層である経路選択確率 P_{rs}^k は既存研究⁵⁾⁻⁷⁾を参考に(3)式のロジットモデル式で、経路の効用確定項 V_{rs}^k は(4)式の線形関数で定式化した。

$$P_{rs}^k = \frac{\exp(V_{rs}^k)}{\sum_{h \in K_{rs}} \exp(V_{rs}^h)} \quad (3)$$

$$V_{rs}^k = \mu t_{rs}^k + \tau f_{rs}^k + \eta \rho_{rs}^k + \kappa D_{rs}^k + \omega s_{rs}^k \quad (4)$$

ここで、旅行者の経路選択要因である t_{rs}^k はODペア rs における経路 k の所要時間、 f_{rs}^k は1週間あたりの頻度の自然対数値を用いる。また、 ρ_{rs}^k はODペア rs における経路 k のロードファクター、 D_{rs}^k は直行便であれば1、乗継便もしくは経由便であれば0とする直行便ダミー定数、 s_{rs}^k は機材サイズを表す^{注3)}。

表-2に期待されるパラメータの符号を示す。なおパラメータ推定においては説明変数間の相関に留意する必要がある。

図-3の下位階層である、航空券購入確率 Q_{rs}^t (旅行者がODペア rs において航空券 t を購入する確率)は、旅行者が購入した航空券 t は選択した経路 k により特定できる

■表-2 旅行者の経路に対する選好

項目		選択要因
所要時間	-	短時間の方が望ましい
運航頻度	+	高頻度の方が望ましい
ロードファクター	-	満席に近いと予約が困難
直行便ダミー	+	経由回数が少ない経路を好む
機材サイズ	+	大型機を好む傾向がある

ことを踏まえて、経路選択確率 P_{rs}^k を用いて(5)式で定式化する。

$$Q_{rs}^t = \sum_{k \in K_{rs}^t} \frac{P_{rs}^k}{N_{rs}^k} \quad (5)$$

ここで K_{rs}^t はODペア rs における航空券 t の経路集合、 N_{rs}^k はODペア rs における経路 k での航空券集合 T_{rs}^k の要素数(図-3における経路②の場合、乗継便と経由便が存在するので $N_{rs}^k=2$)を表す。すなわち、ODペア rs における経路 k のもとの航空券 t の選択確率はすべて等確率と仮定する。なおこの仮定については感度分析で検討する。

経路選択確率 P_{rs}^k および航空券選択確率 Q_{rs}^t を与件として(1)式の連立方程式を解くとOD旅客数 X_{rs} が得られる。したがって、それを(2)式に代入して求まるリンク旅客数の推定値 v_{ij} が、観測値であるTFS統計における有償旅客数 \hat{v}_{ij} と一致するように経路選択確率 P_{rs}^k のパラメータを推定すればよい。しかし、(1)式において、需要が少ないなどの理由により直行便もしくは経由便が就航していない都市圏間はOFOD旅客数 B_{mn} がゼロとなっているため、チケットリンク数 mn がODペア数 rs よりも少なくなり、連立方程式の解の一意性を満足できない。

そこで、本モデルではそれらの都市圏間のOD旅客数 X_{rs} は発着都市圏人口 p_r, q_s と都市圏間距離 d_{rs} を変数とする(6)式の重力モデルに従うと仮定する。

$$X_{rs} = \phi \times \frac{p_r^\alpha \times q_s^\beta}{d_{rs}^\gamma} \quad (6)$$

従って X_{rs} 及びこれを(2)式に代入して得られる v_{ij} はパラメータ $\phi, \alpha, \beta, \gamma, \mu, \tau, \eta, \kappa, \omega$ の関数として推定される。

以上をまとめると、本研究で提案するOD旅客数推定手法は、以下の制約条件付き最適化問題を解いて(4)式、(6)式のパラメータを求める問題として定式化できる。

【リンク旅客数に関する残差平方和最小化問題】

Objective function:

$$\min_{\phi, \alpha, \beta, \gamma, \mu, \tau, \eta, \kappa, \omega} \sum_{ij \in \Omega} (v_{ij} - \hat{v}_{ij})^2 \quad (7)$$

Subject to:

$$B_{mn} = \sum_{rs \in \Delta} \sum_{t \in T_{rs}} \delta_{rs,t}^{mn} Q_{rs}^t X_{rs} \quad (1)$$

$$v_{ij} = \sum_{rs \in \Delta} \sum_{k \in K_{rs}} \delta_{rs,k}^{ij} P_{rs}^k X_{rs} \quad \text{for } \forall ij \in \Omega \quad (2)$$

$$\rho_{ij} \times c_{ij} \geq v_{ij} \quad \text{for } \forall ij \in \Omega \quad (8)$$

$$X_{rs} \geq 0 \quad \text{for } \forall rs \in \Delta \quad (9)$$

ここで、 c_{ij} :リンク*ij*の提供座席数(席)であり、(8)式はリンク旅客数の容量制約、(9)式はOD旅客数の非負条件を表す。

4—OD旅客数推定モデルの適用

4.1 対象都市圏の設定

3章で構築したOD旅客数推定モデルを、国際航空旅客市場において主要空港が存在する10都市圏(表—3)を対象として適用を行った。

対象年次は2006年とし、OFOD統計およびTFS統計も2006年のデータを、そして定期国際便が就航する空港が複数存在する都市圏は全空港の旅客数を用いた。さらに、都市圏人口は文献8)、都市圏間距離は文献9)を用いた注4)。全90ODペアのうち直行便もしくは経由便が就航していない16ペアについては重力モデルによってOD旅客数を与えた。

対象都市圏を限定することで、対象都市圏により構成されるネットワーク(リンクやチケットリンク)において、対象外都市圏をODペアに持つ旅行者が混在し、OD旅客数が過大に推定される可能性があることに留意する必要がある注5)。

4.2 パラメータ推定

リンク旅客数に関する残差平方和最小化問題は、非線形計画問題であるため、パラメータ推定には逐次2次計画法を用いた注6)。

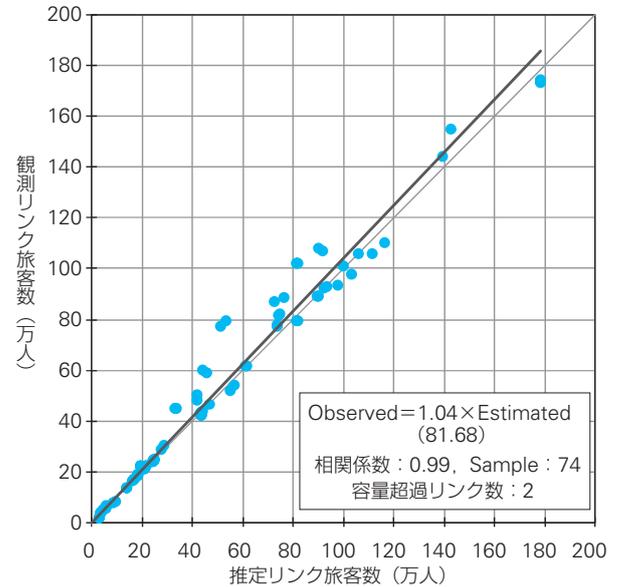
表—4に推定されたパラメータを、図—4にリンク旅客数に関する現況再現性を示す。対象都市圏における経路選択確率の説明変数間の相関係数は最大で0.41であり、多

■表—3 対象10都市圏

No.	都市圏名 (和名)	都市圏名 (英名)	都市圏 コード	国名	地域	人口 (千人)
1	バンコク	BANGKOK	BKK	タイ	アジア・ 大洋州	6,590
2	香港	HONG KONG	HKG	中国	アジア・ 大洋州	7,040
3	ロンドン	LONDON	LON	イギリス	欧州	8,510
4	マドリッド	MADRID	MAD	スペイン	欧州	5,610
5	ニューヨーク	NEW YORK, NY	NYC	アメリカ	北米	18,720
6	パリ	PARIS	PAR	フランス	欧州	9,820
7	ソウル	SEOUL	SEU	韓国	アジア・ 大洋州	9,650
8	シンガポール	SINGAPORE	SIN	シンガ ポール	アジア・ 大洋州	4,330
9	東京	TOKYO	TYO	日本	アジア・ 大洋州	35,200
10	トロント	TORONTO	YTO	カナダ	北米	5,310

■表—4 パラメータの推定結果

経路選択確率		重力モデル	
所要時間	-1.30E-01	定数項	1.43E+03
運航頻度	8.21E-01	発都市圏人口	2.48E-01
ロードファクター	-6.00E-01	着都市圏人口	3.11E-01
直行便タミー	9.00E-01	都市圏間距離	2.01E-01
機材サイズ	6.18E-01		



■図—4 リンク旅客数に関する現況再現性

重共線性の問題は生じていないと判断した。

推定された経路選択確率の効用確定項に関する線形関数のパラメータは、既存研究5)~7)において推定された値と比較しておおむね妥当な結果であると考えられる。

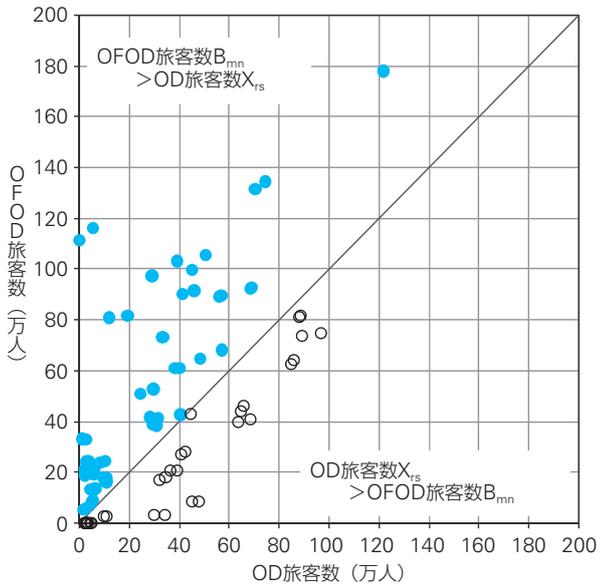
観測リンク旅客数に対するリンク旅客数の残差の比率は、平均が3.1%、標準偏差が14.3%であり、リンク旅客数に関して再現性の高いパラメータが推定されたと考えられる。なお、(8)式の容量制約については、実際には不定期便の存在などにより、提供座席数 c_{ij} を明確に定義するのは困難であること、また解の探索も困難になるため、考慮しなかった。今回の推定では定期便における容量を超過したリンクはマドリッド(MAD)⇄バンコク(BKK)の2本のみであり、その超過率は約30%であった。

4.3 OD旅客数推定結果

図—5にOFOD旅客数とOD旅客数の関係を示す。

OFOD旅客数 B_{mn} がOD旅客数 X_{rs} よりも多い都市圏間が相対的に多いが、これは複数のチケットを結合してOFOD旅客数 B_{mn} を修正することでOD旅客数を推定した結果である。

OFOD旅客数の合計値は約3,900万人であり、OD旅客数の合計値は約2,800万人であった。つまり、約1,100万人(約30%)が乗継便を選択した旅客であり、OFOD統計を



■図-5 OFOD旅客数とOD旅客数の関係

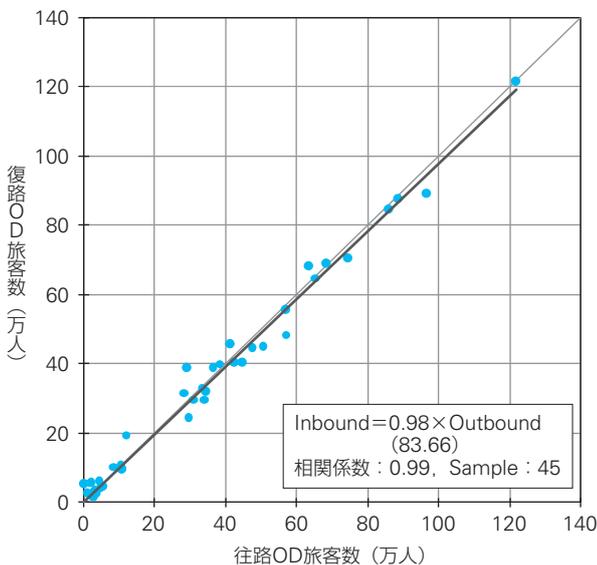
インプットデータとして用いることで約30%の過大評価になる可能性がある」と推定された。

図-6に推定されたOD旅客数の対称性について示す。OD旅客数は十分対称であると考えられ、妥当な推定結果が得られたと判断した。

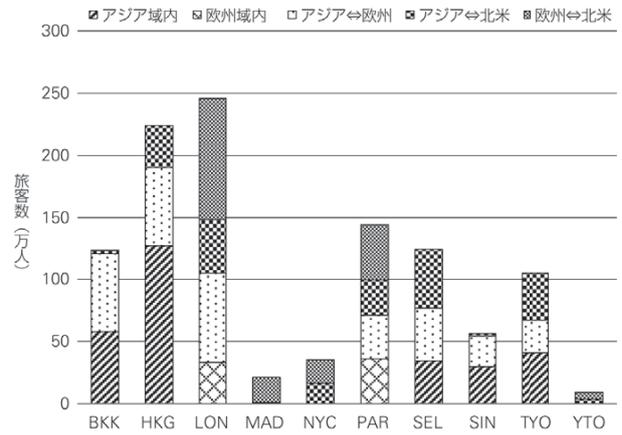
図-7に都市圏別ODペア地域別乗継旅客数を示し、図-8に東京発の各都市圏におけるOFOD旅客数とOD旅客数の関係を示す。

図-7はロンドン(LON)および香港(HKG)が乗継便利用者を多く取り扱っており、対象とした10都市圏により構成されるネットワークにおいて、ハブとしての役割を果たしていることを示唆している。特に、ロンドンは多様なODペアを持つ旅行者が乗継地として利用しており、最もハブとしての機能が強いと考えられる。

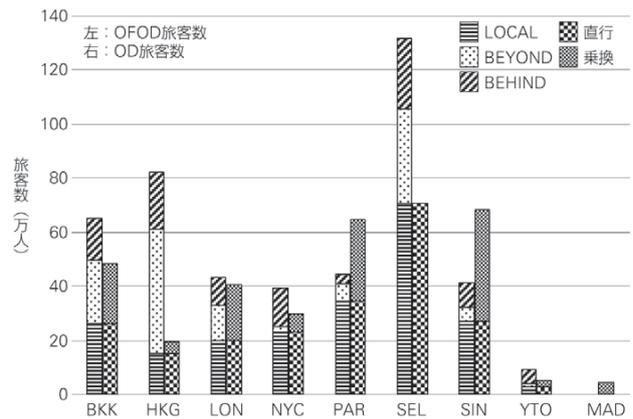
またアジア⇔欧州をODペアに持つ旅行者のおよそ



■図-6 OD旅客数の対称性



■図-7 都市圏別ODペア地域別乗継旅客数



■図-8 OFOD旅客数とOD旅客数の関係(東京発)注7)

50%が乗継便を利用するが、ロンドンおよび香港、バンコク(BKK)を乗継地とする旅行者が多い。そして、アジア⇔北米をODペアに持つ旅行者のおよそ65%が乗継便を利用するが、ロンドンおよび東京(TYO)、ソウル(SEL)を乗継地とする旅行者が多いと推定された。

東京発の各都市圏間において、チケットで指定された発着都市圏間とOD都市圏間が一致する旅行者の比率は平均約48%であり、OFOD旅客数とOD旅客数は約52%乖離している可能性がある」と推定された(図-8)注8)。両者が一致する割合が最も高かった都市圏間は東京-パリ間で約77%であった。一方、最も低かったのは東京-香港で約18%と推定された。これは、香港が需要の大きいヨーロッパや他のアジア都市圏向けの乗継地として、東京が北米地域から香港向けの乗継地として利便性が高く、それぞれ、アジア-欧州、北米間のハブとしての役割を果たしているため、発着都市圏間とOD都市圏間が一致する旅行者の比率が低くなり、OFOD旅客数がOD旅客数よりも多くなったと考えられる。これは、東京-バンコク、ソウルにも同様に当てはまる傾向である。

しかし、以上の結果は3章および4章における諸仮定による可能性もある。そこで次章で3つの仮定に関して感度分析を行った。

5—感度分析

航空券選択確率の仮定、重力モデルのパラメータおよび対象都市圏の設定に関して感度分析を行い、推定されるOD旅客数がどれだけ変化するかについて検討を行った。

5.1 航空券選択確率に関する感度分析

まず、航空券選択確率に関して感度分析を行う。モデルにおいてODペア rs における経路 k のもとの航空券 t の選択確率は経路 k の選択確率を等確率で配分したものを、経由便が就航していることが推測される経路について経由便もしくは乗継便かで重みを付け、OD旅客数の変化の程度について分析した。

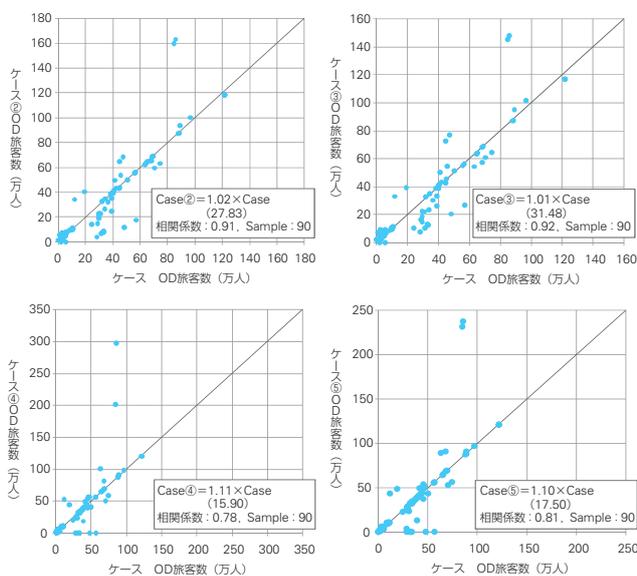
表—5にモデル適用対象都市圏のケースを示し、図—9にそれぞれのケースにおけるOD旅客数とケース①におけるOD旅客数の関係を示す。

各ケースにおいてパラメータはケース①で推定されたパラメータを共通で適用した。そのため、OD旅客数の非負条件を満足しない都市圏間が現れるが、それらの都市圏間におけるOD旅客数はすべてゼロとしている。

図—9より、航空券 t の選択確率は経路 k の選択確率を等確率で配分した場合と比較して、経由便もしくは乗継便

■表—5 設定した重みパラメータ

	経由便	乗継便
ケース (基本ケース)	0.5	0.5
ケース②	0.6	0.4
ケース③	0.7	0.3
ケース④	0.4	0.6
ケース⑤	0.3	0.7



■図—9 ケース別OD旅客数の関係(左上:ケース②, 右上:ケース③, 左下:ケース④, 右下:ケース⑤)

に対していくつかの重みを付けた場合、推定されるOD旅客数の変化率は1%~11%であった。

本稿で対象とした10都市圏では経由便が就航していると推測される経路が少なかったことから、航空券選択確率の変化に対するOD旅客数の変化は限定的であると考えられる。

ただし、ODペア rs の旅行者が経路 k を選択したもとの、選択可能な航空券 t を選択した経路選択確率を等確率で配分するというモデルについては改善の余地が残されている。今後の課題としたい。

5.2 重力モデルに関する感度分析

次に重力モデルの定数項を2倍もしくは1/2倍する感度分析を行った(表—6)。それぞれのケースとケースI(基本ケース)におけるOD旅客数の関係を図—10に示す。なお経路選択確率のパラメータはケースIのパラメータをすべてのケースで共通で適用した。

図—10より、重力モデルの定数項の変化に対して推定されるOD旅客数の変化は、それぞれ2%および1%と小さい値となった。

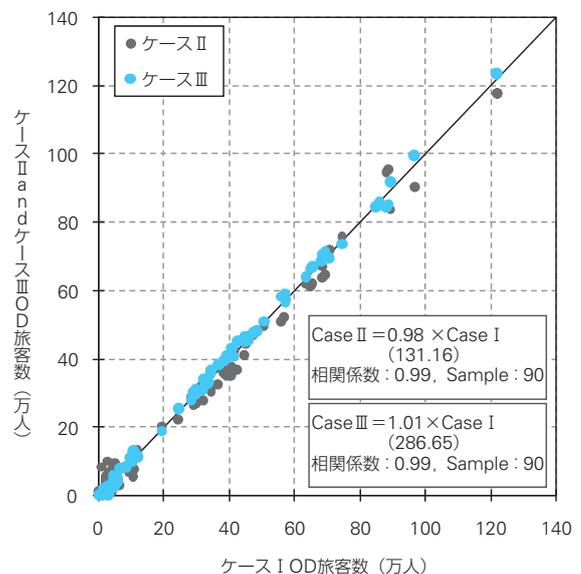
したがって、重力モデルの仮定がもたらすOD旅客数に与える影響が限定的であるといえる。

5.3 対象都市圏に関する感度分析

最後に、モデル適用対象都市圏の変更(拡大)による推定OD旅客数の感度について示す。

■表—6 設定した重力モデルパラメータ

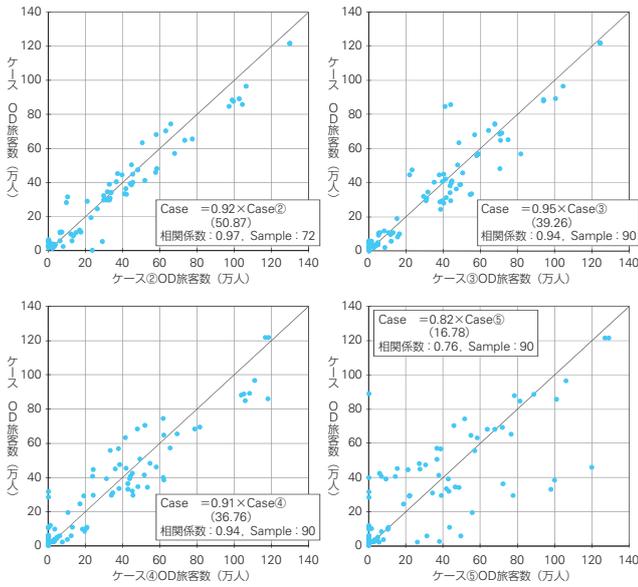
	ケース I 基本ケース	ケース II 定数項を2倍	ケース III 定数項を1/2倍
定数項	1.43E+03	2.86E+03	7.15E+02



■図—10 ケース別OD旅客数の関係

■表一七 対象都市圏設定ケースのまとめ

ケース	対象都市圏	備考
	10	基本ケース
②	10	MAD (マドリッド)→SHA (上海) に置換
③	11	基本ケースにSHA (上海) を追加
④	15	基本ケースにAMS (アムステルダム), CHI (シカゴ), SHA (上海), FRA (フランクフルト), LAX (ロサンゼルス) を追加
⑤	19	ケース④にROM (ローマ), ATH (アテネ), SYD (シドニー), ATL (アトランタ) を追加



■図一十一 ケース別OD旅客数の関係(左上:ケース②, 右上:ケース③, 左下:ケース④, 右下:ケース⑤)

表一七にモデル適用対象都市圏のケースを示し、図一十一にそれぞれのケースにおけるOD旅客数とケース①におけるOD旅客数の関係(各両ケースにおいて共通するOD旅客数の関係)を示す。ここで、ケース①(基本ケース)とは、対象10都市圏で適用した結果である。

各ケースにおいてパラメータはケース①で推定されたパラメータを共通で適用した。そのため、OD旅客数の非負条件を満足しない都市圏間が現れるが、それらの都市圏におけるOD旅客数はすべてゼロとしている。

図一十一より都市圏の変更(拡大)に対して、それぞれ推定されるOD旅客数の変化は10%前後であった。モデルの適用にあたり対象都市圏の設定によってOD旅客数を過大推定する可能性を指摘したが、都市圏を拡大したケース③~⑤のすべてについて、ケース①のOD旅客数の方が大きい結果になった。これは、各ケースにおけるパラメータをケース①で推定されたパラメータを共通に適用したことによるものと考えられる。本来は、各ケースについて3章で示したリンク旅客数に関する残差平方和最小化問題である制約条件付き最適化問題を解いた結果と比較することが望ましいが、この点は今後の課題としたい。

6—おわりに

本稿では、国際航空旅客市場における輸送量に関する統計の整理を通じて、国際航空分野での基礎的データであるOD旅客数としてOFOD統計を用いることの問題点を指摘した上で、OFOD統計とTFS統計を組み合わせることでOD旅客数を推定するモデルを構築し、利用者数が多い世界10都市圏を対象に適用した。またそのモデルの諸仮定やパラメータに関して感度分析を行った。

その結果、2006年において10都市圏のOFOD旅客数の合計値は約3,900万人であるが、OD旅客数の合計値は約2,800万人と推定された。いいかえると、約1,100万人(約30%)が乗継便を選択した旅客であると推定された。感度分析の結果を踏まえると、OFOD統計を代替的にOD旅客数として用いると、約27~33%の過大評価になる可能性があることを明らかにした。

今後の課題として以下の4点が挙げられる。

1点目は旅行者の均質性の緩和である。本稿では、経路選択確率における効用確定項に関する線形関数のパラメータをすべての旅行者に対して共通としている。このことは、モデル適用対象都市圏を拡大するに伴って、制約条件付き最適化問題において制御変数に対して制約条件が多くなり、最適化の探索が困難になることにつながると考えられる。既存研究^{5)~7)}では旅行者を移動目的や旅行者の国籍などでいくつかのセグメントに分割して分析しているように、本稿においてもODペア地域別などでセグメントに分割することが望ましい。

2点目は、航空券購入確率および重力モデルの定式化である。木村ら(2008)¹¹⁾は、旅行者の希望出発時刻分布を時刻表の情報を用いて逆推定している。また、田口(2005)¹²⁾やS.Yan et al.(2002)¹³⁾は時空間ネットワークへ旅行者を配分する方法を提案している。さらに、Soumis et al.(1981)¹⁴⁾は、時刻表へ旅行者を配分するモデルを構築している。このしたモデルを援用し、旅行者の希望出発時刻分布および時空間ネットワークを応用し、旅行者を時刻表に対して配分することで経路および航空券の選択をより明示的に取り扱うことができると考えられる。

3点目は、対象都市圏を設定することによるOD旅客数の過大推定の可能性である。これは対象都市圏の拡大もしくは国際空港が存在するすべての都市圏を設定してモデルを適用することが望ましい。

4点目は、OFOD統計はシングルトラック路線や無償旅客が公表対象に含まれず、また未報告(国)が存在すること、またTFS統計についても同様に未報告(航空会社)および無償旅客が考慮されていないことである。そのため、これらを空港別に集計した値とICAOが発行する空港別

の輸送量統計である Airport Traffic (以下, AT統計)との間にも大きな乖離がみられる。このことも考慮した推定方法を検討していく必要がある。

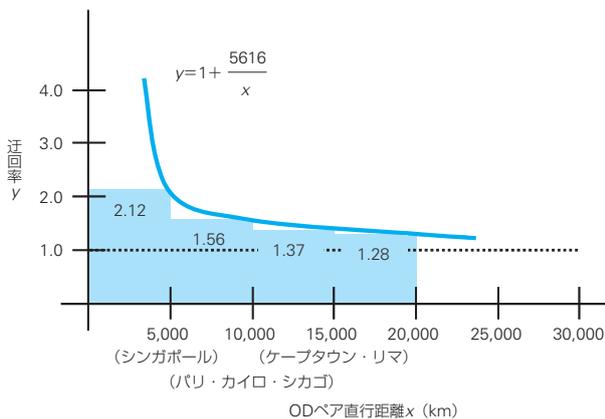
注

注1) 道路交通においては、観測されたリンク交通量データを用いてOD交通量を推定/修正する研究が行われてきている(最近の研究としてMarzano et. al. (2009)¹⁵⁾がある)。本研究との大きな違いは、OFOD統計がチケットの販売ベースのデータであること、そしてチケットの購入方法が複雑であり、直行便や経由便がない場合には都市圏間の移動がゼロであるとなってしまうことである。道路配分では発生集中交通量の周辺分布から内部分布を推定する際、ゼロというデータについてはほぼ考える必要はない。

注2) 本稿では各都市圏間の接続関係より設定された各ODペア rs に対する経路 k を、迂回率を用いて有効経路集合 K_{rs} を設定する。迂回率とは、経路の合計距離の都市圏間距離に対する比率で定義される。本稿では、経路の所要時間が直行便の場合の所要時間よりも6時間以下になるように迂回率の上限値を与えた。また速度計算は以下の方法で行った。音速 v と温度 t の関係は、15℃を基準にすると

$$v = 340.3 \times \sqrt{\frac{273+t}{288}} \quad (m/sec)$$

となる。高度が1,000m上昇すると気温は6.5℃低下するため、高度1万mにおける音速は約306m/secとなる。また航空機の巡航速度は音速に対して70~90%の範囲をとるため、平均巡航速度をMach0.85とすると平均巡航速度は時速約936kmとなる。ODペア距離帯別の迂回率の上限値を図A-1に示す。



■図A-1 都市圏間距離と迂回率(上限値)の関係

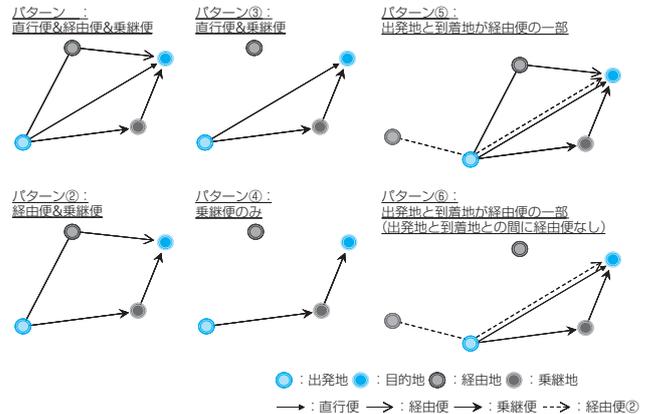
次に、各ODペア rs において設定された経路 k に航空券属性 t を付加する方法について説明する。

OFOD統計は、航空券の発券時に指定された出発 m と到着 n の都市ペアにおける旅客数 B_{mn} である。そのため、OD旅客数 X_{rs} とOFOD統計による旅客数 B_{mn} の関係はどのような航空券 t を購入したのかということと結び付けられる。

ODペア rs について経由地を t とする経由便が就航している場合、経路は $r \Rightarrow t \Rightarrow s$ であるが、経由地 t 以前のフライトと以後のフライトが同一便であるため、航空券は $r \Rightarrow s$ (発都市圏が r 、着都市圏が s で指定される航空券が1枚発券)である。このように、経由便を利用して目的地まで移動した旅客者は、経路の発着($r \Rightarrow t$ および $t \Rightarrow s$)と都市圏間と航空券で指定される発着都市圏間($r \Rightarrow s$)が一致しない。一方、乗継便により目的地まで移動した旅客者は、乗継地以前のフライトと以後のフライトが異なる便名であるため、乗継都市圏 u 以前の $r \Rightarrow u$ と以後の $u \Rightarrow s$ のフライトそれぞれで航空券が1枚ずつ(計2枚)発券されるため、経路の発着($r \Rightarrow u$ および $u \Rightarrow s$)と都市圏間と航空券で指定される発着都市圏間($r \Rightarrow u$ および $u \Rightarrow s$)が一致する。

図A-2に当該都市圏間における移動方法の組み合わせを示し、それぞれのパターンと既存統計(OFOD統計およびTFS統計)の関係を表A-1に示す。

ここで、各ODペアの航空券属性 t を設定するにあたり、経由便が就航しているかどうかを考慮すべき点である。経由便は長距離都市圏間に就航することや以遠権等の関係から、図A-2および表A-1中のパターン⑤を満たす都市圏間では存在しない仮定すると、経由便が就航していると考えられる都市圏間は、パターン①およびパターン②であり、OFOD旅客数>TFS旅客数を満たす都市圏間となる。そして経由便の一部であると考えられる都市圏間は、パター



■図A-2 当該都市圏間における移動方法の組合せ

■表A-1 就航便パターン別統計値の大小関係

パターン	就航便	OFOD統計	TFS統計	統計値の大小関係
	直行便&経由便&乗継便	直行便+ 経由便	直行便	OFOD統計> TFS統計≠0
②	経由便&乗継便	経由便	-	OFOD統計> TFS統計=0
③	直行便&乗継便	直行便	直行便	OFOD統計= TFS統計
④	乗継便	-	-	OFOD統計= TFS統計=0
⑤	直行便&経由便&乗継便 (出発地と到着地が 経由便②の一部)	直行便+ 経由便	直行便+ 経由便②	経由便と経由便② 次第により 大小関係が変化
⑥	直行便&乗継便 (出発地と到着地が 経由便②の一部)	直行便	直行便+ 経由便②	TFS統計>OFOD統計

ン⑥でありTFS旅客数>OFOD旅客数を満たす都市圏間である。つまり、下記の2つの条件を満たす経路は、経由便が就航していると推測される。

- ・ODペア rs がOFOD旅客数 $B_{rs} > TFS$ 旅客数 v_{rs} を満たす。
- ・ODペア rs における経路 k を構成するすべてのリンク ij について $B_{ij} < v_{ij}$ を満たす。

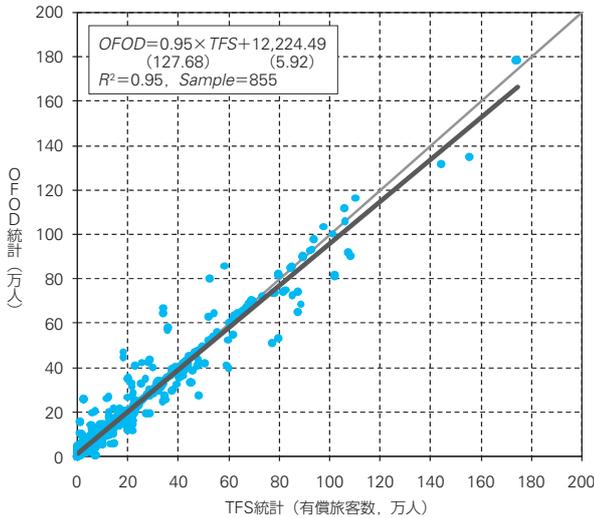
注3) ODペア rs における経路 k の所要時間 t_k は、経路を構成するリンクの所要時間の和とする。ただし、リンクの所要時間はリンク距離 l_{ij} をリンクに就航する機材の巡航速度 v_{ij} を運航便数で重み付けした平均値で除した値とする。また f_{ij} 運航頻度は経路を構成するリンクの運航頻度の最小値、ロードファクター ρ_{ij} は最大値、機材サイズ s_{ij} は便平均提供座席数の平均値とした。

注4) 重力モデルにおける発着都市圏の人口は、参考にした文献8)において、1950年から2015年までの5年おきの人口が公表されているため、直近の2005年人口を用いた。TFS統計において有償旅客数が公表されている都市圏間について、OFOD統計における旅客数が欠損している場合は図A-3よりOFOD旅客数を補完する。

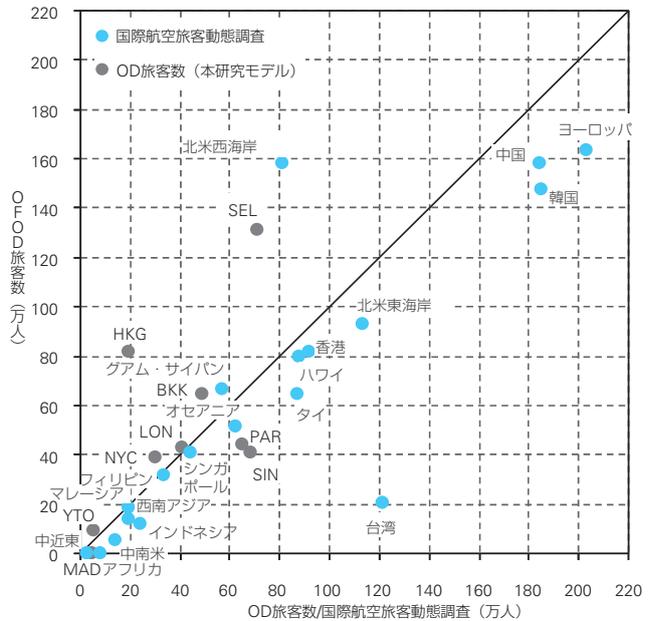
注5) モデルの適用にあたり対象都市圏を設定することで、OD旅客数が過大に推定される可能性がある。これは、対象都市圏により構成されるネットワーク(リンクやチケットリンク)において、対象外都市圏をODペアに持つ旅行者が混在している可能性があることによるものである。図A-4に対象都市圏と推定OD旅客数の関係を示す。

図A-4において、出発地を対象外都市圏である都市圏A、目的地を対象都市圏である都市圏Bとする旅行者が、対象都市圏である都市圏①を乗継地とする経路を選択した旅行者は、リンク旅客数の観測値として用いたTFS統計とOFOD統計において都市圏①-都市圏③で集計されることになる。また、都市圏①を経由地とした旅行者は、TFS統計のみ都市圏①-都市圏③の都市圏間で集計される。このように、モデルに用いたTFS統計やOFOD統計は、適用にあたり対象外都市圏をODペアに含む旅行者が含まれているため、OD旅客数が過大に推定されてしまう可能性がある。

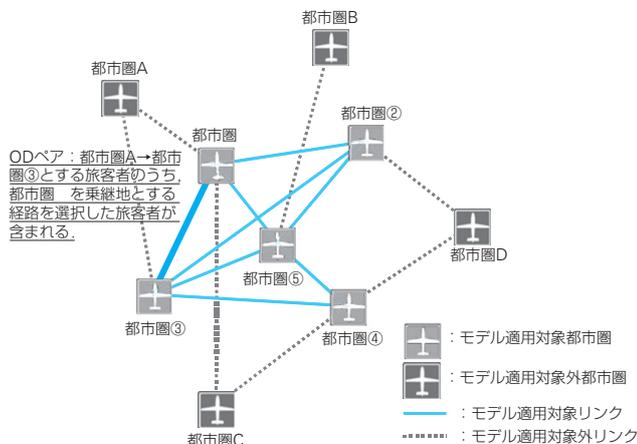
注6) 重力モデルのパラメータは被説明変数をOFOD旅客数、説明変数を発着都市圏人口 pr, qs と都市圏間距離 d_{rs} として推定されたパラメータを用いた。また経路選択確率の効用確定項に関する線形関数のパラメータベクトルは、各パラメータを[0,1]で0.1ずつ計59,049パターンの組み合わせについて目的関数



■図A-3 OFOD旅客数とTFS旅客数の関係(人口300万人以上の都市圏間, 2006年)



■図A-5 国際航空旅客動態調査との比較



■図A-4 対象都市圏と推定OD旅客数の関係

とOD旅客数が非負であるODペア数を評価し, 制約条件を満たしかつ目的関数が最も小さい組み合わせを初期値として, パラメータを1つずつ段階的に逐次2計画法を用いて探索し, 得られた解を再び初期値としてこれを繰り返して, 極値を求めた。

- 注7) 図一8におけるLOCAL, BEYOND, BEHINDの定義は以下の通りである。
- ・LOCAL: 観測路線の出発地がODペアにおける出発地であり, 到着地が最終目的地である場合
 - ・BEYOND: 観測路線の出発地がODペアにおける出発地であるが, 到着地が乗継地である場合
 - ・BEHIND: 観測路線の出発地が乗継地であり, 到着地が最終目的地である場合

注8) 日本を発着とするOD旅客数については, 国際航空旅客動態調査¹⁰⁾から得られる日本人: 出国先別出国空港別旅客数, 外国人: 出発直後別出国空港別旅客数との比較も可能である。

この調査では, ある都市をストップオーバー(24時間以上の滞在)する場合, その都市のある国もしくは地域を最初の訪問国(地域)として, 国(地域)単位で集計した旅客数を公表している。しかし周遊先の情報が把握できないため, 最初の訪問地と最終の訪問地を結びつけることができない。したがって本研究で対象としている都市圏単位のOD旅客数とは定義が異なる。またこの調査では日本以外を発着とするOD旅客数に関する情報も得られない。

これらに留意して, 本研究で推定されたOD旅客数と比較を行った(図A-5)。例えば, 国際航空旅客動態調査の韓国と本研究のSELでは大きな差がみられるが, これは前者がプサンや済州島などの都市(空港)へ向かう旅客者の総計, 本研究で得られたSELはソウル(仁川)のみに向かう旅客者を対象としていること, 前述した到着(訪問)地の捉え方の違い, そして注5で述べたようにモデルの構造として対象都市圏を絞って推定していることでOD旅客数を過大に推定していることによるものであると考えられる。

参考文献

- 1) 石倉智樹[2006], “東アジアの航空ネットワークにおける国際航空旅客流動分析のためのモデル構築”, 「国土技術政策総合研究所資料」, No. 286.
- 2) 竹林幹雄・黒田勝彦・鈴木秀彦・宮内敏昌[2001], “完全競争市場としてみた国際航空旅客輸送市場のモデル分析”, 「土木学会論文集」, 674巻51号, pp. 35-48.
- 3) 深澤清寿・石倉智樹・杉村佳寿・滝野義和[2003], “東アジア内の旅客ODのクロスセクション分析および時系列分析”, 「国土技術政策総合研究所資料」, No. 131.
- 4) ANA総合研究所[2008], 「航空産業入門」, 東洋経済新報社.
- 5) 高瀬達夫・森川高行[1996], “航空会社の便数設定と利用者の空港選択の均衡を考慮した国際航空需要分析”, 「土木計画学研究・論文集」, No. 13, pp. 769-776.
- 6) 屋井鉄雄・高田和幸・岡本直久[1998], “東アジア圏域の国際航空ネットワークの進展とその効果に関する研究”, 「土木学会論文集」, 597巻40号, pp. 71-85.
- 7) 大橋忠宏・宅間丈夫・土谷和之・山口勝弘・堀健一[2004], “ネットワークを考慮した航空旅客市場での空港拡張の効果: 羽田空港を例として”, 「土木学会論文集」, 772巻65号, pp. 131-142.
- 8) United Nations Department of Economic and Social Affairs [2006], “World Urbanization Prospects The 2005 Revision”.
- 9) Research and Innovative Technology Administration U.S. Department of Transportation, “Inter-Airport Distance”, <http://www.transtats.bts.gov/distance.asp>, 2010/05/15.
- 10) 国土交通省航空局[2006], “平成18年度 国際航空旅客動態調査—集計結果—”, 2006年.
- 11) 木村裕介・奥村誠・坂本麻衣子[2008], “航空旅客の希望出発時刻分布の逆推定”, 「土木計画学研究・論文集」, Vol. 25, No. 3, pp. 633-639.
- 12) 田口東[2005], “首都圏電車ネットワークに対する時間依存通勤交通配分モデル”, 「日本オペレーションズリサーチ学会和文論文誌」, 48巻, pp. 85-108.
- 13) S.Yan and C.H.Tseng[2002], “A Passenger Demand Model for Airline Flight Scheduling and Fleet Routing”, *Computer & Operations Research*, Vol. 29, pp. 1559-1581.
- 14) Soumis, François, Jacques-A. Ferland and Jean-Marc Rousseau[1981], “MAPUM: A Model For Assigning Passengers To A Flight Schedule”, *Transportation Research Part A: General*, Vol. 15, pp. 155-162.
- 15) Marzano, Vittorio, Andrea Papola and Fulvio Simonelli[2009], “Limits and Perspectives of Effective O-D Matrix Correction Using Traffic Counts”, *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, Vol. 17, pp. 120-132.

(原稿受付 2009年11月4日)

Estimation of Net Origin and Destination Passenger Flows of International Air Transportation

By Junya TERASAKI, Shigeru KASHIMA, Masayoshi TANISHITA and Yosuke ONEDA

In the international air passenger transport, OFOD statistics based on air tickets published by ICAO is generally used as O-D flows. However, since OFOD statistics counts transfer passengers twice, it is different from net O-D flows. This paper proposes the methodology to estimate the net O-D flows. Assuming route choice behavior and ticket type choice behavior of passengers, we estimate net O-D flows combining OFOD and TFS statistic. Applying this method to 10 metropolises in the world, we showed that about 30% discrepancy was found between OFOD statistics and estimated O-D flows.

Key Words : **International Air Passenger Transportation, Net O-D flows, OFOD statistics**
