

国際航空ネットワークの評価に関する基礎的研究*

A Study on Evaluation Method for the International Air Transport Network

屋井鉄雄** ・ 高田和幸***

By Tetsuo YAI and Kazuyuki TAKADA

1. はじめに

近年アジア太平洋地域においては、国際航空需要の急増と共に航空ネットワーク網も急速に拡大している。このことがハブ機能獲得競争に見られるような空港間競争問題や、地方空港国際化により生じた空港間の機能分担問題等の新たな問題を生じ、我が国においてもこれらの問題解決に向けて航空ネットワークの定量的分析が必要となっている。

これまでのネットワーク評価では適当な評価主体・評価項目が設定され、多くの場合これらを何らかの指標により示し整備水準等の評価を行うこととなる¹⁾。

本研究では航空ネットワーク上のノードである空港を評価主体、また各空港が有するネットワーク(路線、頻度等)を評価項目と設定し、ネットワークの特性を示す指標作成を通じてネットワークの定量的評価を行う。

本研究では2章でネットワーク評価に関する既往研究と本研究との関係を述べ、3章にて各空港の特性を示す指標の作成を行う。つぎに4章では3章で作成した指標とその指標が併せ持つ特性に対応する異なるデータとの関連性を考察し、作成した指標の意味付けの検討を行う。最後に5章で本研究の成果をまとめる。

2. ネットワーク評価の既存研究と本研究の位置づけ

ネットワークの評価に関しては、ネットワークの信頼性、代替性、リンクの重要度等の評価手法の開発^{2) 3) 4)}等多方面から研究され、多くの研究成果が発表されているが、これらの多くは主に道路ネットワークを対象として行

れてきている。

本研究で定量化を行うノードの機能特性やノード間の関係の分析は岡田⁵⁾によると、計量社会学のネットワーク問題に対応づけられる。その社会学におけるネットワーク分析の理論的背景は安田⁶⁾に詳しい。安田によるとネットワーク全体の代表的な評価尺度は規模、範囲、密度であり、ネットワーク規模はノード数、範囲はネットワーク内部におけるノード数またはノードの質における多様性の程度、また密度はネットワーク内部のリンクの分布に関する指標としている。さらに安田はノードのネットワーク特性について、その特性の計測にはネットワーク内部に存在する他のノードとの相対的な関係を考慮する必要性があると述べている。本研究ではこのノード間の相対的關係を「空港間の競争指標」を作成して示した。

一方、航空ネットワークを対象とした研究はネットワークの形成原理の分析とネットワーク形態による効果計測に大きく分けられる。

まずネットワークの形成原理を分析したものとして Chawn-Yaw. et. al⁷⁾があげられよう。Chawn-Yaw はネットワーク形態を決定するパラメータの抽出とモデル化を行い需要はロストップフライトに対し正のインパクトを、また都市数、ネットワークサイズはロストップフライトに対して負のインパクトを与えることを示した。

また Ken Hendricks. et.al.⁸⁾は独占航空会社がある制約条件下(同一 OD では旅客全員が同一経路を利用、各 OD の需要規模は同一等)で利潤最大化を行った時には、その構成されるネットワーク形態は Hub & Spokes 型か、全てのノードを結ぶ Point to Point 型であることをグラフ論を用いて示した。

中条⁹⁾はハブ形成の主要因はターミナルダイヤドであり、空港間競争については、その主要パラメータが路線数と頻度であること等を述べているが、定量的な分析を行っていない。

また轟¹⁰⁾はグラフ理論に基づく指標を用いて国内

*キーマン：国際航空、ネットワーク評価

**正会員：工博 東京工業大学土木工学科助教授

***学生員：工修 東京工業大学土木工学科

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

FAX: 03-(3726)-2201, TEL: 03-(5734)-2693

航空ネットワーク形態の変遷を説明した。

一方、ネットワーク形態の評価に関して、Hansen. et. al¹¹⁾ は異なるネットワーク形態(Hub & Spokes 型と Point to Point 型)をもつ 2 社の頻度の決定問題を解いた。

また Yai. et.al¹²⁾ は国際旅客のエアライン選択モデルを用いてサービスの変化による利用者便益の計測を試みているが、実用的なレベルには達していない。

このように航空ネットワーク評価に対する必要性が高まっているにもかかわらず、研究はあまり進んでいない。そこで本研究では安田と同様の評価尺度を用い指標の作成を通してネットワークの定量分析を行う。また空港間の相対的な関係を示す新たな方法を導入し、アジア地域における空港間の競合状態を示す。本研究はアジア地域における各空港のネットワーク評価の実証研究と

して位置づけられる。

3. 国際ネットワーク形態の評価

本章ではネットワークを評価する指標の作成を行う。はじめに各空港における国際線ネットワークの特性を示す指標を作成し、空港間の評価値の考察を行う。つぎに空港間の競合関係を示す指標を作成し、近年の空港間の置かれている状況が変化していることを示す。

なお本研究における評価対象空港は東アジア 10 ヶ国の首都圏空港に大阪空港を加えた 11 空港とし、また指標の評価値の算出は OAG 国際航空時刻表('81, '87, '93)¹³⁾ に基づくサービスデータを用いている。

(1) ネットワーク特性

空港を中心とするネットワークは図 1 に示す 2 つの特性軸を用いて評価することが可能である。図中の横軸はネットワークの物理的規模を評価する軸であり、各空港が有するネットワークが時空間的に大きければ、それだけ広域性も大きくなるものとする。一方縦軸はネットワーク密度の評価軸であり、密度が濃い場合には図中の上側半分に示されるようなハブの性質を強くもつものとする。以下指標の作成方法とその計測結果を示す。

(a) 利便性指標(FRI, CTI)

各空港機能の利便性を頻度(FRI)、就航都市数(CTI) 2 つの指標を用いて評価した。FRI は各空港における週間国際線頻度、また CTI は各空港からハブ空港へ到達可能な就航都市数である。

図 2 は FRI の計算結果である。いずれの空港においても国際線頻度が増加しており、特にアジア地域のハブ化が進んでいる香港、シンガポールにおいてその伸びは顕著である。一方、図 3 は CTI の計算結果である。いずれの空港においても FRI 同様、CTI も増加しているが、特に成田では増加傾向が他に比べて鈍いことが分かる。この理由としては成田は世界の主要な空港へ既に路

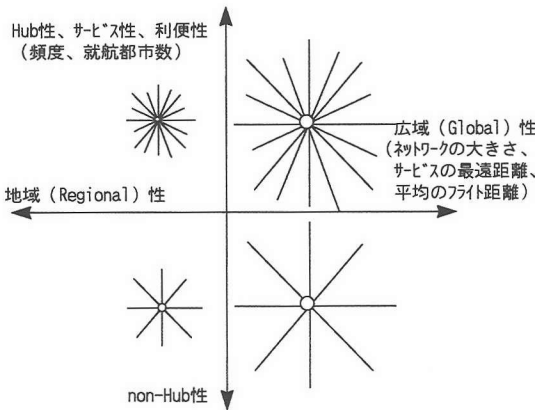


図1 空港の機能特性

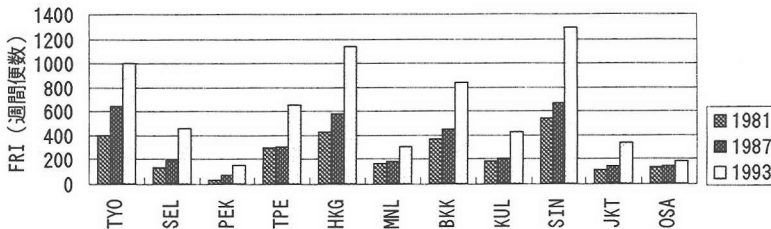


図2 FRIの経年変化

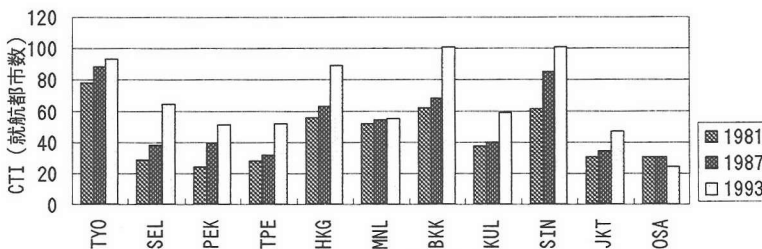


図3 CTIの経年変化

線を開設していること、また空港の容量制約のため路線開設が困難な状況であること、さらに日本がアジアの北東部に位置するため、諸外国に取り囲まれている香港やシンガポールのように他国の地方部への路線を開通しづらいこと等が考えられる。

(b)ポテンシャル指標(PI)

空港の活動量を評価する指標の作成を行う。これは各空港と第一目的地までの距離を全便の渡り足し合わせることで算出される(式(1))。本研究ではこの指標をポテンシャル指標(PI)と称す。

$$PI_i = \sum_j f_{ij} l_{ij} \quad \dots(1)$$

PI_i : i 空港のポテンシャル指標

f_{ij} : 空港 i, j 間の週間頻度

l_{ij} : 空港 i, j 間の距離(マイル)

そこでまずはじめに各空港におけるフライトの距離帯別頻度の分布を調べ、空港間の傾向の相違を調べた。図4～7は東京(成田+羽田)、ソウル、香港、シンガポールにおける距離帯別頻度のシェアを示している。東京は近距離のフライトの割合が他の空港に比べ著しく小さく、北米やヨーロッパ方面への頻度の多さ('93の方面別頻度の内訳は北米[20.6%]、ヨーロッパ[15.0%])を反映し長距離帯の割合が大きい。さらにその傾向は3時点を通してより強くなってきている。一方ソウルでは、'81には約80%のフライトが1000マイル以下の近距離であったのに対し、年を追って長距離の割合が増加している。逆に、香港、シンガポールではフライトの多くはアジア地域内の空港と結ばれており('93の香港ではNIES[23.5%]、ASEAN[25.8%]、中国[20.1%]、またシンガポールではNIES[10.0%]、ASEAN[57.5%])、近距離帯の割合が高い。図8にPIの算出結果を示す。東京では先述した通り欧米への頻度の多さを反映し大きいPI

が得られる。また近距離のフライト割合の大きい香港、シンガポールにおいても、多頻度を反映し比較的大きいPIとなっている。

(c)広域性指標(GRI)

本研究では1フライトの平均航続距離を各空港のネットワークの大きさを評価する指標と考え、これを広域性指標(GRI)と称す。GRIは、

$$GRI = PI / FRI$$

... (2)

で求まる。

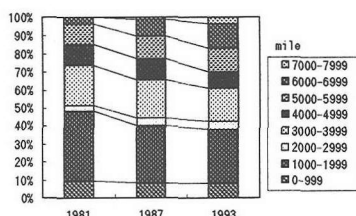


図4 フライトの距離帯別シェア(成田)

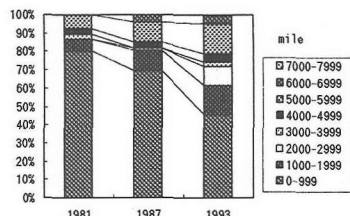


図5 フライトの距離帯別シェア(ソウル)

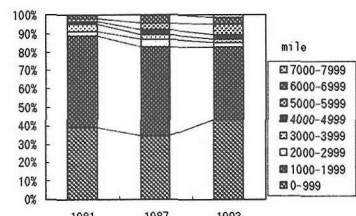


図6 フライトの距離帯別シェア(香港)

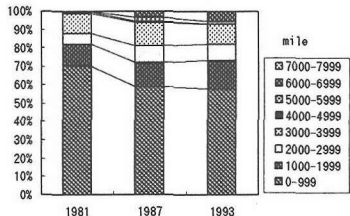


図7 フライトの距離帯別シェア(シンガポール)

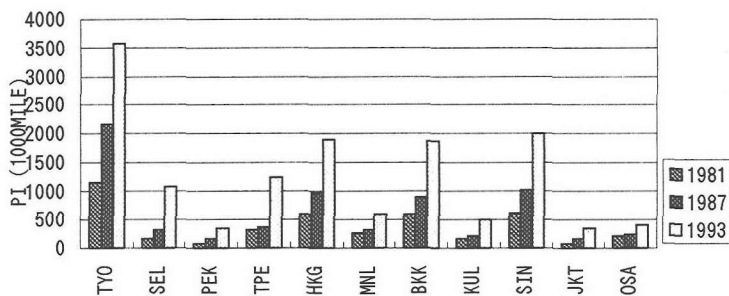


図8 PI(ポテンシャル指標)

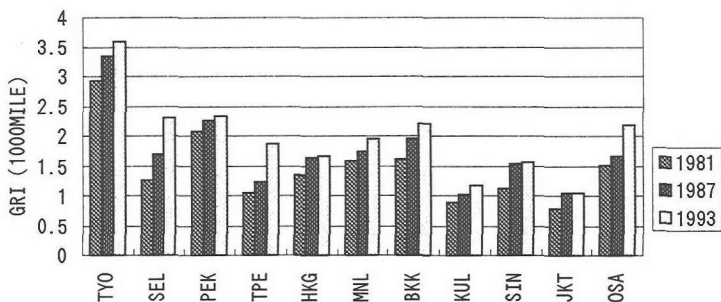


図9 GRI(広域性指標)

図9に計算結果を示す。東京の広域性が他の空港に比べ高く、羽田、台北では北米方面へのサービス増加(欧米方面への頻度の割合は'81から'93にかけて羽田では4.6%から21.4%、台北は1.7%から13.3%に増加)を反映しGREは増加傾向にある。一方香港、シンガポールのGRIは顕著な増加を示していない。PIの増加に対しGRIの増加が小さいのは、これらの空港の頻度増加が短距離帯に多いためといえる。

(2) 空港間の競合指標

航空ネットワークの評価は、リンクを形成する路線(ネットワーク)のみならず、ノードを形成する空港間においても行う必要がある。現在日本国内およびアジア地域において空港間競争が議論されており、各空港がどのような状況に置かれているのかを定量的に認識する必要がある。そこで本研究では2空港の関係を各空港の有するネットワークに基き評価する競合指標(CI)を考え、アジアの空港間競合の状態を示す。

CIの計算方法を説明する。今、図10に示す2つのノードAとBの関係を考える。 n_{ab} はノードA、Bに直結するノードの数、また n_a はノードAのみに直結するノード数、 n_b はノードBのみに直結するノード数とする。また n_a 、 n_b にはノードA、Bに対して設定したダミーノード(図中では破線で示す)を含めることにする。また n_{ab} に含まれる各ノードをAに直結する部分とBに直結する部分に分けて考え、それぞれのノード数を n_{ab}^A 、 n_{ab}^B ($n_{ab}^A=n_{ab}^B=n_{ab}$)とする。本研究で対象とするODパターン数は表1のマトリックス中に示され、

$$2(n_a + n_{ab})(n_b + n_{ab}) \quad \dots(5)$$

となる。

ここで共通ノードからは対象とする全てのノードに対してAB間のリンクを利用することなく到達可能であり、そのODパターン数は、

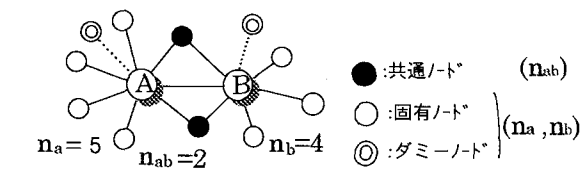


図10 CI算出における概念図

表1 CI算出の対象とするOD

	A固有ノード (n_a)	B固有ノード (n_b)	A側共通ノード (n_{ab}^A)	B側共通ノード (n_{ab}^B)
A固有ノード (n_a)		$n_a n_b$		$n_a n_{ab}$
B固有ノード (n_b)	$n_a n_b$		$n_b n_{ab}$	
A側共通ノード (n_{ab}^A)		$n_b n_{ab}$		$n_{ab} n_{ab}$
B側共通ノード (n_{ab}^B)	$n_a n_{ab}$		$n_{ab} n_{ab}$	

$$n_{ab}(n_a + n_b + 2n_{ab}) \quad \dots(4)$$

となる。さらにA、Bの各固有ノードからは共通ノードへのみAB間のリンクを利用せずに到達することが可能であり、そのODパターン数は

$$n_{ab}(n_a + n_b) \quad \dots(5)$$

つまりABを利用せずに到達可能な全ODパターン数は(4)と(5)の合計数だけ存在する。そこでCIは全ODパターン数のうち、AB間のリンクを利用せずに到達可能なODパターン数の割合として算出される。

$$CI = \frac{n_{ab}(n_a + n_b + n_{ab})}{(n_a + n_{ab})(n_b + n_{ab})} \quad \dots(6)$$

ここで全ノードがA、Bに直結していれば両空港は完全競合関係($CI=1, n_a=n_b=0$)、またA、B双方に直結するノードが無ければ完全補完関係($CI=0, n_{ab}=0$)の状態となる。

なお本指標の算出過程においてのみ各空港の国内線ネットワークも考慮した。計算結果の一例を図11に示す。この図は81、93における各空港のCIが最大となる空港を矢印で示している。近年においては空港間の競合状態が成田、羽田、台湾の北米方面へネットワークを拡大している空港群と、シンガポール等のアジア地域内ネットワークを拡大している空港群との2地域化の様子が示されている。

これまで定性的な議論でしかなかった、空港間競争やハブ機能流出等の問題に対し、PI指標を通して定量的に空港間の競合・補完状態を示すことで、実際に各空港の置かれている状態を捉えることが可能となった。

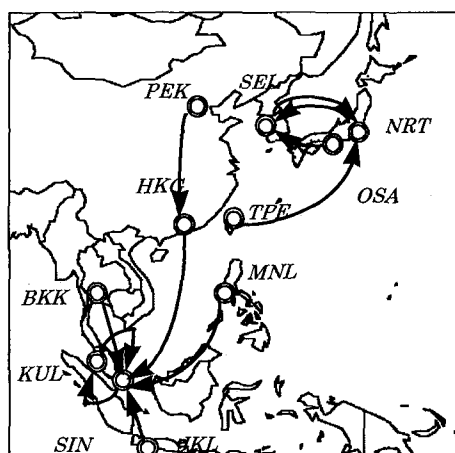
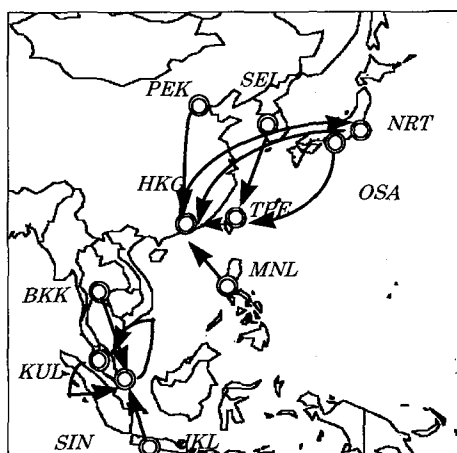


図11 CIの算出結果(最大競合空港に矢)

4. 評価指標の特性に関する検討

3 では数種のネットワークの評価指標を作成しネットワークの特性および形態がどのように変化してきたのかを示した。そこで本章では先に作成した指標と他の経済指標データ等との関連性を考察し、評価指標の特性の検討を行う。

(1) 利便性指標と旅客需要との関連

利便性の評価指標(頻度, 就航都市数)と国際旅客需要との関連性の検討を行った。ここでは国際旅客数¹⁴⁾(外国人入国者, 本国籍出国者)と頻度および就航都市数との関連を調査した。図12は各空港の3時点(81, '87, '93)のFRI(頻度)と入国者数の関係を示している。概ね頻度と入国者数には正の相関があることが読み取れる。一方, 頻度と出国者数の間にはこのように際立った相関関係は見受けられなかった。これは香港やシンガポール等は人口規模が小さいにもかかわらず, 航空ネットワーク整備が積極的に図られており, 頻度あたりの出国者数が他国に比べて大きいためである。

(2) 利便性指標と経済水準との関連

(1)同様に利便性と経済水準との関連性を調べた。経済水準を表わすものとして本研究ではGDP¹⁵⁾および一人当たりGDPを用いている。後者とFRI(頻度)の関連を図13に示す。両者の間には相関関係があることが図より分かる。

一方図14は1人当たりGDPとCTI(就航都市数)の関係を示している。図より経済水準の向上と伴に就航都市数は増加しているが, 各国を通しての顕著な共通性は見受けられない。特に東京においては空港の容量制約により新規の路線開設ができないこと, また成田をベースとする日本のエアラインがアジア地域の地方都市部に対し積極的にネットワークを構築していないことを背景として, ここ12年間における都市数の伸びは経済成長の伸びに比べ極端に低いものとなっている。

(3) ポテンシャル指標と貿易との関連

ここではPIと貿易額との関連を調べた。これは各空港のPIが他の全空港に対しどれ程の影響力を有しているかを示すものであるのに対し, 貿易額も当国が他の国に対しどれ程関与しているかを示すものであり, これら両者のデータが似た特性を有すると考えられるからである。図15は3時点の各国の輸出入総額¹⁶⁾とPIの関係を示した図である。図より物の移動量を表わす貿易額と交通トラフィックの総移動量を表わすPIの間には相関があることが読み取れる。香港, シンガポールでは人口規模に対しPIおよび貿易額双方他国に比べて大きく, 航空サービスのみならず貿易に関してもハブ機能を有していることが推測できる。またバンコクでは貿易額に比べてPIが相対的に大きな値となっている。これはバンコクがヨーロッパ方面のフライトにおける東南アジアのゲートウェイの機能を果たしているためと考えられる。

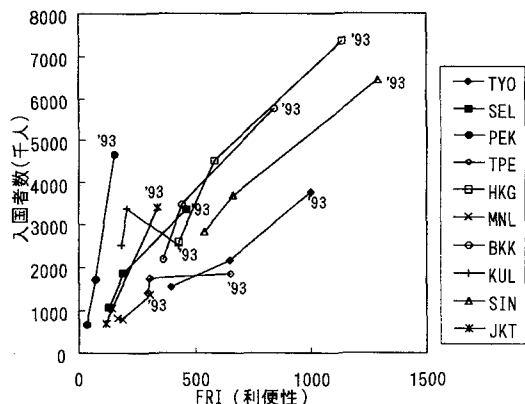


図12 利便性(FRI)と旅客需要の関連

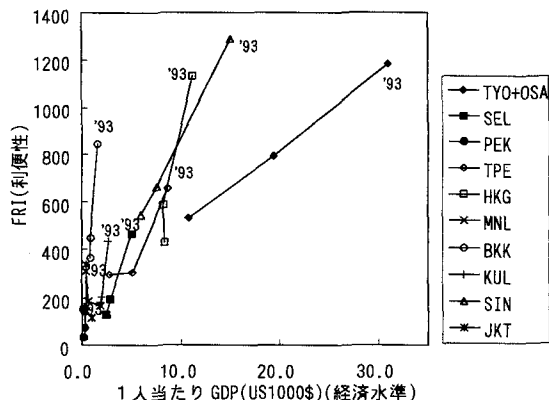


図13 経済水準と利便性 (FRI) の関連

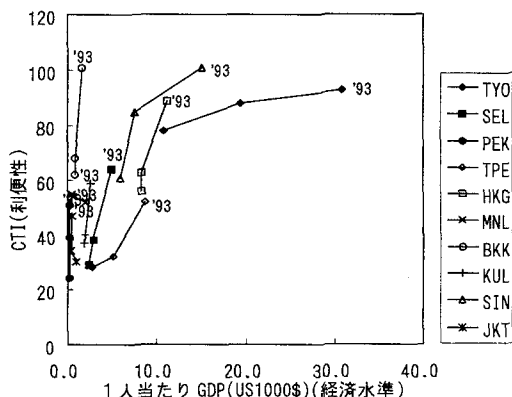


図14 経済水準と利便性CTIの関連

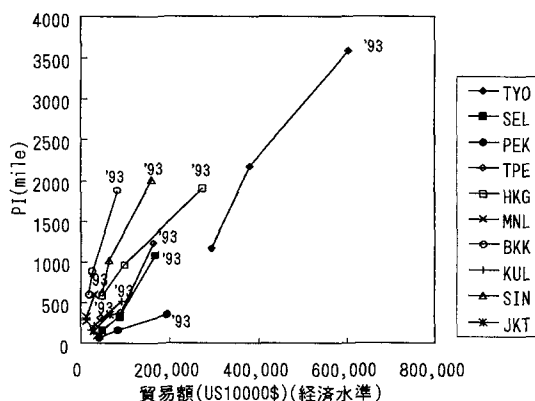


図15 貿易額とポテンシャル指標の関連

(4) 評価指標によるネットワーク特性の考察

3章で作成した指標を用いて空港の特性の考察を行った。図1に新たにネットワークの特性を評価する軸を2本加える(図16)。1本は広域性とハブ性の間に引かれ、これはネットワークが広域かつハブ性を有することから、グローバルハブ的な特性を示す軸と考えられる。もう1本は地域性とハブ性の間に引かれ、これはネットワークの特性が地域的かつハブ性を有するためリジョナルハブ的な特性を示す軸と考えられる。

これらの新たな評価軸は、グローバルハブ軸に関してはネットワーク形態が広域であり、かつサービス水準が高くと大きくなるPIが利用可能である。一方リジョナルハブ軸については追加的な地域に対してサービス水準が高ければ値が大きくなる評価尺度が適当である。そこで本研究ではサービス距離(SD)当たりの頻度(FSD)や就航都市数(CSD)を採用する。ここで空港iにおけるサービス距離(SD_i)とは、i空港から直行フライトで到達する事が可能な他の空港までの距離の総和であり、

$$SD_i = \sum_j d_{ij} \quad (7)$$

d_{ij} : 直行便フライトのある空港i, 空港j間の距離(マイル)

で表わされる。また空港iのFSD_i, CSD_iは(7)と

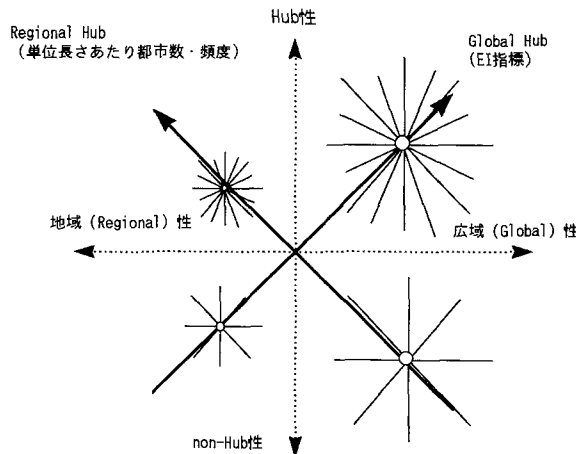


図16 空港の機能特性

3.(1)における FRI および CTI を用いて、

$$FSD_i = FRI_i / SD_i \quad (8)$$

$$CSD_i = CTI_i / SD_i \quad (9)$$

と表わせる。

つまり FSD は単位サービス距離当たりの頻度を示し、CSD は単位サービス距離当たりの都市数を示すものとする。FSD は近距離への頻度増加により大きくなり、CSD は近距離に就航都市を開設することで大きくなる性質を持つ評価尺度である。

図 17 には広域性と hub 性を表わす評価指標を用いてネットワークの特性の経年的な変化を示した。一方図 18 は PI と FDS をそれぞれ各年度別に正規化し、同様に各空港のネットワークの相対的な特性の変化を示している。

図 18 から東京は PI が大きくグローバル性が強いことが分かる。また香港、シンガポールは垂直方向に対して位置が相対的にポジションが上昇しており、リージョナル性が強くなってきていることが分かる。また横

軸方向に対し顕著な増加傾向を示しているのは YUL であり、ネットワークのグローバル化が示される。ただし、以上行ったネットワークの特性評価は指標を標準化しているため対象空港間でのみ相対的評価が可能であり、対象とする空港が変化するとこれらの特性評価も異なるものになる。すなわち対象空港をアジア地域の国際線の就航する地方空港にまで拡大した時には、マニラやクアラルンプールにおいてもグローバル化の特性が強まることを意味する。

(5) CI 指標と旅客需要との関連

CI は 2 空港間の競合度を表わす指標であり、得られた指標と旅客需要との関連を調べるには、本来ならば空港選択や経路選択の結果と照らし合わせる必要がある。しかしアジア地域内の国際旅客純流動データは存在しない。そこで本研究では対象とする両国間の旅客流動量および貿易量を代用し、各空港の属する国別に以上の変量の順位と CI の大きさの順位との順位相関の検定を行ったが、顕著な傾向は得られなかった。つまり両国の経済成長は双方向の旅客需要、貿易量、および航空ネットワークを拡大を引き起こすが、必ずしも当該空港間の競合関係が強くなるわけではない。本研究では確認することができなかった CI の適応性の検討も十分行う必要がある。

5. 結論

本研究では国際航空ネットワークの評価指標を作成し、実際の航空サービスデータを用いてアジア地域内における主要空港の特性の比較、また作成した指標の説明力を他の需要データ、経済・貿易データや指標同志の関連性の検討を行った。

本研究で作成した評価指標は航空ネットワークに特有なノードの特性、およびノード間の相対的関係を表現可能とするものであり、アジア地域内の競争および国内空港間の機能分担等の議論に対する定量的分析の可能性を示すものである。

今後は、作成した指標の改良を含め新たな指標の開発やネットワーク効果計測手法の開発を行う必要がある。

また本研究ではネットワークの形態をそのノードの連結の有無からのみ行ったが、実際にネットワークの構築を考えるには今後利用者視点からのネットワーク評価手法を行う

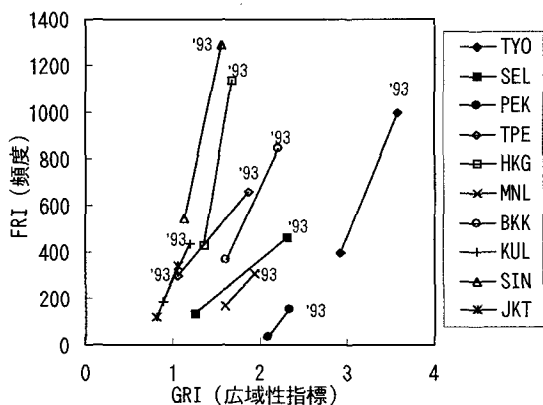
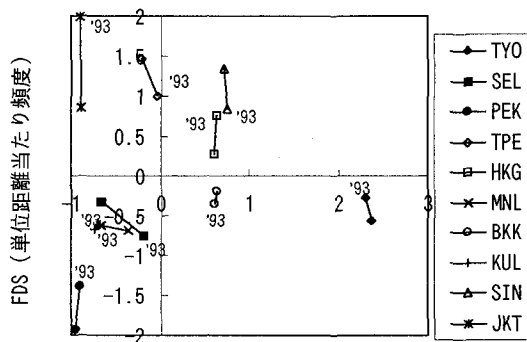


図17 広域指標とハブ指標の関係



PI (ポテンシャル指標)

図18 ポテンシャル指標とハブ指標の関係

必要がある。

本研究を進めるの当たってはデータを提供して下さった運輸省航空局をはじめ、研究に協力していただいた関係者各位に感謝致します。

[参考文献]

- 1)土木計画学講習会テキスト:交通ネットワークの分析と計画,土木学会土木計画学研究委員会編,1987
- 2)朝倉康夫,柏谷増男,熊本仲夫: 交通量変動に起因する広域道路網の信頼性評価,土木計画学研究・論文集 7,pp235-242
- 3)南正昭: 都市間道路ネットワークの代替性評価に関する研究,土木計画学研究・講演集, No.14(1), pp295-300, 1991
- 4)吉武哲信, 樗木武, 外井哲志, 河野雅也: 道路網の構成とOD交通量を考慮したリンク重要度評価,土木計画学研究・講演集, No.15, pp129-136, 1992
- 5)岡田憲夫, 田中成尚: ネットワーク特性を考慮した道路機能水準の計量指標化に関する研究,土木学会論文集, 389, pp65-74, 1988
- 6)安田雪: 社会ネットワーク分析: その理論的背景と尺度, 行動計量学, 21-2, pp32-39, 1994
- 7)Chawn-Yaw Jeng: An Idealized Model for Understanding Impacts of Key Network Parameters on Airline Routing, Transportation Research Record, 1158, pp5-13, 1987
- 8)Ken Hendricks, Michel Piccion, and Guofu Tan: The Economics of Hubs: The Case of Monopoly, Review of Economic Studies, 62, pp83-99, 1995
- 9)中条潮: ハブ競争と空港政策, 運輸と経済, 53-8, 9, 10, 11, 1993
- 10)轟朝幸: 規制緩和に伴う国内航空ネットワークの計画手法に関する基礎的研究, 日本大学大学博士論文, 1993
- 11)Mark Hansen and Adib Kanafani Transportation Research, vol.24A, pp217-229, 1990
- 12)Tetsuo Yai, Kazuyuki Takada: Analysis of International Passenger Demand in the Pacific- East Asia Region, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.1, No.1, pp171-186, 1995
- 13)Official Airline Guides, Worldwide Edition('81', '87, '93)
- 14)Annual Statistic Report, Pacific Asia Travel Association
- 15)Socioeconomic Timeseries Access and Retrieval System, World Bank
- 16)Direction of Trade, IMF

航空ネットワークの評価に関する基礎的研究

屋井 鉄雄・高田 和幸

本研究では、まずアジア地域内の主要国際空港の広域性、ハブ機能性等の空港特性を評価する指標をネットワークデータ(頻度、就航都市数、路線距離)をもとに作成した。さらに空港のネットワーク形態により2空港間の関係が変化する競合指標を作成し、近年のアジア圏域の空港間競争の状態を示した。つぎに各国の経済指標(GDP、貿易額)や需要データ(出国者、入国者)と先に作成した評価指標との関連性を、経年的な変化を空港間の比較を通して行い、指標の意味付けの検討を行った。また作成した指標の特性を考慮して各空港特性をネットワーク形態の観点から類型化を行い、空港間の相対的な位置づけを示した。

A Study on Evaluation Method for International Air Transport Network

By Tetsuo YAI and Kazuyuki TAKADA

We analyzed the international air transportation network in East Asian region. Firstly, some indices which represent characteristics of airports were developed using network data(frequency, num.of cities, flight mileage). Competitive index was produced in order to explain a relationship between airports. Secondly, we examined the relevancy between some indices such as GDP, amount of trade and passenger demand and some indices measured in former section. Finally, airports were classified in terms of its network attributes using indices represent facilities and characteristics of each airport.