

アフリカ航空ネットワーク効率化の可能性

永野 雄貴¹・紀伊 雅敦²・中村 一樹³・清水 裕康⁴

¹学生会員 香川大学大学院 工学研究科安全システム建設工学専攻
(〒761-0396 香川県高松市林町221-20)

¹正会員 香川大学准教授 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)
E-mail: kii@eng.kagawa-u.ac.jp

³正会員 香川大学助教 工学部安全システム建設工学科 (〒761-0396 香川県高松市林町221-20)
E-mail: knaka@eng.kagawa-u.ac.jp

⁴非会員 三菱重工業株式会社 交通・輸送ドメイン 先進事業開発推進室 (〒108-8215 東京都港区港南2-16-5)
E-mail: hiroyasu_shimizu@mhi.co.jp

本研究では、新たな航空ネットワーク分析手法を作成し、アフリカでの航空ネットワークの効率改善可能性を分析した。その結果、搭乗率向上、運賃低下、待ち時間短縮を図りうることが示された。改善ネットワークでは、路線数は減少する一方、総便数が増加している。また、長距離路線は集約され多頻度の短距離路線と接続するハブ&スポーク型に近い形状が得られた。特に、北アフリカの都市を欧州とアフリカを結ぶハブとして位置づけることで、ネットワーク効率が高まる可能性が示された。2030年を想定した需要増加ケースでは、長距離ダイレクト路線の採算性が向上し、その結果、アフリカ域内の乗り継ぎ需要を減少させ、アフリカの都市はハブとしての順位を下げると同時に、ロンドン、パリ等の欧州での乗り継ぎ需要を増加させると推計された。

Key Words : Aviation Demand, Africa, Efficient Network

1. はじめに

世界の航空需要は高まっており航空旅客数は年々増加している。JADC¹⁾(日本航空機開発協会)の予測では2013年から2032年の20年間で世界全体の航空旅客需要は年平均4.9%の伸びが予測されている。同資料によると、航空機の開発には、計画段階から初号機の納入まで10年近い期間と数千億円を超える開発費を要し、開発された航空機は十数年に渡り生産が続けられる。また、納入された機体は10数年以上運航に供される。すなわち、航空機の開発には、超長期的な市場動向を見据えた戦略とともに、空港インフラへの開発投資との連動が必要となる。

現在、欧州、北米の航空市場は成熟しつつあり、今後は、アジア、アフリカ、中東、中南米、旧共産圏での旅客需要の増加が顕著になると予想されている。特に、アフリカでは今後インフラの整備も平行して行う必要がある、戦略的な開発投資が求められるであろう。

2014-2033年の航空旅客需要予測では、アジア、中東、中南米、アフリカといった新興国を結ぶ路線の伸びが大

きくなると考えられている。特に、アフリカでは近年資源開発が進みつつあることから経済成長が著しく、アフリカー中東、アフリカーアジア間の需要が大きく増加すると見込まれている¹⁾。

アフリカの航空路線ネットワークは、欧米の成熟した市場のネットワークと比較すると、域内路線が少なく、欧州の旧宗主国との長距離ダイレクト路線が多いことが特徴である。長距離路線では必然的に機材が大型化し、このため、需要を長距離路線に集約できなければ、搭乗率が低く経済効率が低くなると考えられる。また、需要が低ければ、頻度を上げることもできないため、利便性が低下し更に需要を抑制することになると考えられる。

一方、欧米を中心に形成されてきた、ハブ&スポーク型(H&S)ネットワークは、長距離路線の搭乗率改善と接続路線における機材の小型化により効率を向上する効果を持つ。すなわち、航空サービスの供給コスト削減のためにはH&S型が望ましいと言える。一方、旅客にとっては、乗り換えの手間や待ち時間がかかり、加えて、経路を迂回することによる追加時間がかかることになるた

め、ダイレクトフライトが望ましいことになる。しかし上述の通り、ダイレクトフライトで十分な需要を確保できなければ搭乗率が低くなり、その低いパフォーマンスは運賃や頻度に反映されることになるであろう。従って、H&S型ネットワークによるインダイレクトフライトが、利用者にとってどの程度の追加的負担をもたらし、一方でどの程度のコスト削減に寄与するかを比較考量することが必要となる。アフリカの航空路線ネットワークにおいて、どのようなネットワークが効率的かを分析することは、今後の航空市場見通し、およびインフラ整備戦略において重要な情報になるであろう。

本研究は、アフリカ発着路線を対象に、シミュレーションにより効率的な航空ネットワークを導き、現在のネットワークと比較することで、アフリカにおける効率的ネットワークの特徴を把握することが目的である。このシミュレーションでは、航空サービスの供給構造を簡略化した上で、路線レベルのコストを旅客が運賃で負担すると仮定し、そのような状況下での旅客の経路選択を最短経路探索により求める。この旅客の経路選択は、各路線の需要を変化させるため、運賃並びに運航頻度を変化させ、これが各路線のサービス水準にフィードバックされる。この経路選択とサービス水準が変化しなくなるまで繰り返し、定常状態を求める。この状態では、全てのODにおいてより安価な経路がないという意味で局所最適となっている。このネットワークを均衡ネットワークと呼ぶ。

ここで、OD需要は固定されている。得られたネットワークと現況ネットワークを、運賃、待ち時間、総コスト、および使用機材数などについて比較し、アフリカにおける効率的なネットワークの特徴を把握する。

以下、2章では、既往研究と本研究の位置づけを整理する。3章では本研究で使用する航空関連データを整理し、4章では航空ネットワーク再編シミュレーションの方法を説明する。5章は現在の需要の下での均衡ネットワークを導出する。6章では、想定した2030年需要の下での均衡ネットワークを導出する。7章は結論である。

2. 既往研究と本研究の位置づけ

これまで、H&Sネットワークに関しては多くの研究が行われている。経済学の立場からは、密度や範囲の経済性²⁴⁾、ハブ・プレミアム^{5,8)}、参入障壁⁹⁾、アライアンスにおけるH&Sネットワークの役割^{10,12)}など、その視点は様々である。また、オペレーションズリサーチの立場からは、空間的なH&Sネットワークを最適化するハブの配置に関する研究^{13,15)}がなされている。また、実証分析の立場から、H&Sネットワークの空間的広がりを評価し

た研究^{16,19)}や、H&Sネットワーク上のスケジュール構造を取り上げ、ダイレクトフライトとインダイレクトフライトの差を比較する研究^{20,26)}がなされている。ただし、実証研究では、運賃は様々な要因の影響を受けることから、直接的な変数として考慮されていない。

日本における研究として、轟ら²⁷⁾は、インドネシアの航空ネットワークの改善のため、H&Sネットワークを導入した際の効率性改善の評価を行っている。H&Sネットワークの構築問題を、各空港の方向別移動量は所与とし、ネットワークの総移動量を最小とする最適化問題として定式化を行っている。また、点在する空港のうち、1港をハブ空港として利用するパターンと第1のハブ空港を配置したネットワークをもとに、第2、第3のハブ空港を配置するパターンを比較分析している。その際の需要データはインドネシア国内における1984年の旅客移動量のデータをもとにしており、航空ネットワークの評価はエアラインのコストに基づいている。

佐々木²⁸⁾の研究ではハブ空港の配置モデルについて、これまでのモデルの発展について解説している。様々な拡張モデルについて解説しているが、多くのモデルは需要を固定的に与えている。今後の課題として供給側の条件だけを考えてネットワークを構築した結果、利用者にとって不便なルートになる場合には、利用者の意思によって、利用されないかもしれず、実用的なモデルを構築する上で乗客の意思を反映する必要があると述べている。

ここでは、手法としてのネットワーク最適化の研究について、佐々木²⁸⁾に基づき、ハブ空港配置モデルの概要を紹介する。

ハブ空港配置モデルは、ハブでない空港がハブ空港に接続する方法によって、Single Allocation ModelとMultiple Allocation Modelの2つに大きく分けられる。

Single Allocation Modelでは、ハブでない空港は唯一のハブ空港にのみ接続可能であり、ハブ空港間はずべて直接接続している。従って、異なるハブに接続している空港間の移動に際しては必ず2つのハブ空港を経由することになり、同じハブに接続している空港間の移動の場合は、1つのハブ空港を経由して移動することになる。ディスカウントファクターとは、ハブ空港間の輸送費用の割引率を表すパラメータであり、スケールエコノミーの程度を表している。Multiple Allocation Modelでは、ハブでない空港は複数のハブ空港に接続可能である。そのため、Single Allocation Modelに比べると、運航する路線の数は多くなるが、乗客にとっては移動距離が短くなるという利点がある。モデルの決定変数は、各空港がハブ空港であるか否か、および、ハブ以外の空港がいずれのハブ空港に接続するか、またはあるOD需要が特定のハブ空港を経由するか否かの離散値であり、離散変数の組み合わせ最適化問題として定式化されている。このことから、

様々な組み合わせ最適化による解法が研究されてきた。

ここで、目的関数は総輸送費用であるが、輸送費用は人数当たりの費用として固定的に定義されているため、需要の変化による搭乗率の改善がもたらす影響は考慮されていない。すなわち、供給コストを直接定義している訳ではないため、人数が増えるほどコストが高くなる構造となっている。O'Kellyら¹⁵⁾はディスカウントファクターを需要により変化させることを提案しているが、これは、ハブ空港間のみに適用される。また、利用者にとってのコスト要因である運航頻度や待ち時間はこの枠組みでは考慮されていない。すなわち、上記問題は需要を固定した下での、供給者にとってのコスト最小化問題として定式化されており、それが利用者にとってどのような効果・影響を持つかは考慮されていない。

一方、利用者の利便性等を考慮した実証モデル^{16,27)}では、ネットワークを予見とした上で乗り継ぎ等を考慮した利用者の利便性をパフォーマンス指標として評価しているが、前述の通り、運賃については十分考慮されていない。

以上の既往研究で見たように、最適化研究では供給者コストを最小化するネットワークの導出に主眼があるが、これは必ずしも利用者の行動や利用者にとっての評価を反映していない。加えて、計算困難な組み合わせ最適化を解くために、一部のコスト条件等は簡略化されている。このため、アフリカのようにインフラ整備を含む中長期的な戦略立案のツールとして用いるには、利用者へのメリットや、より詳細なコスト評価などを組み込んだ柔軟な評価手法が必要である。一方、実証分析では運航に関わる時間やコスト等の詳細な条件を全てあるいは部分的に考慮しているものの、与えられたネットワークや供給構造の下での分析であり、望ましいネットワークを導出するためのものとはなっていない。

本研究は、上記の最適化研究とは異なり利用者コストの観点に基づき、ネットワークの再編をシミュレートする。また、実証モデル分析とも異なり、運賃については発生ベースのコストを利用者が支払うことを仮定する。本研究ではH&S型ネットワークを必ずしも前提とせず、現況ネットワークをベースとして、利用者行動と供給構造の相互作用の結果として導かれるネットワークを評価する新たな方法を提示する。

3. 使用データ

(1) 航空OD需要データ

本研究ではICAOのOFOD統計を使用する。このデータは、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

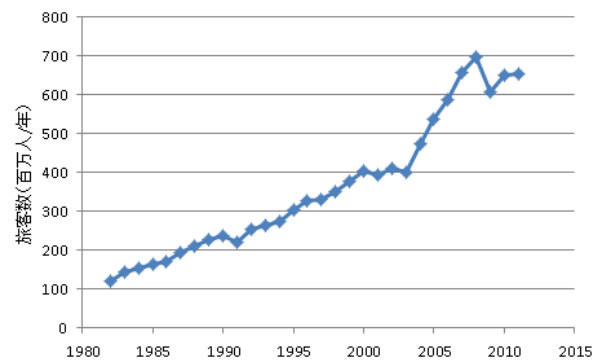


図-1 世界全体の年別都市間旅客数の推移

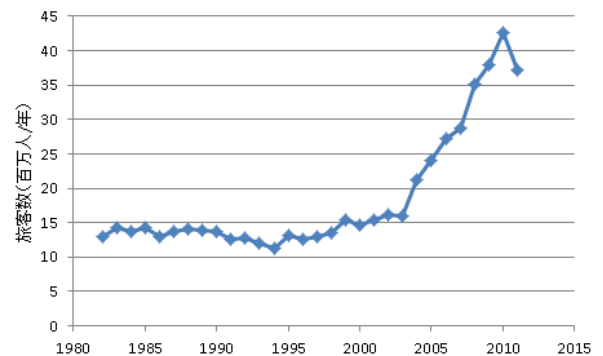


図-2 アフリカ発着の年別旅客数の推移

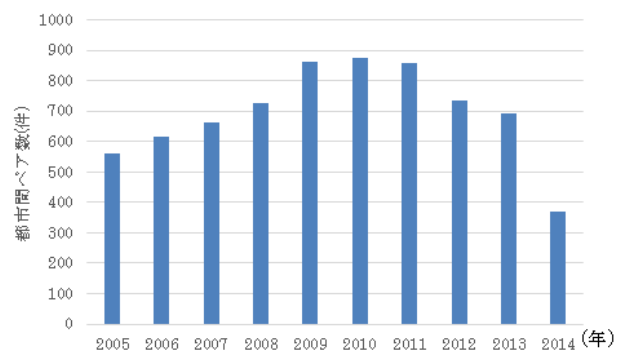


図-3 ICAOデータのアフリカ発着都市間ペア数

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。

OFOD統計は出発国・出発都市→到着国・到着都市ペアの年間航空旅客数が掲載されているが、国内線の需要は掲載されていない。乗り継ぎがある場合には、OFOD統計はそれぞれのフライト毎に需要をカウントするため、出発地から乗り継ぎ地点、乗り継ぎ地点から目的地のそれぞれの需要をOD需要として集計している。このため、真のODを表しているわけではないことに留意が必要である。寺崎ら²⁹⁾の研究では、東京発の9つの都市圏間でOFOD旅客数と真のOD旅客数の一致比率は平均すると48%と推計している。また、OFOD統計を代替的にOD旅客数として用いると27~33%程度過大推計する可能性が

あるとしている。ただし、これもあくまでも推計値であり、真のOD旅客数を求めるためには、SabreやAmadeusといった大規模な電算予約システムのデータを用いる必要がある。ただし、こうしたデータは通常入手が困難であるため、ここでは、OFOD統計をOD旅客数として代替的に用いることとする。

年間OD旅客数データは2015年1月9日に入手した。年代は1982年から2014年の32年間、発着国数は191ヶ国、発着都市の数は1637都市であり、総レコード数は約31万件である。ただし、年間旅客数がゼロのODは除いている。また、ICAO需要データは要請ベースで航空会社から取得しているため、年代が新しくなるにつれOD需要データの取得ができていない可能性がある。取得データを見たところ、前年比の旅客数変化はリーマンショックの2009年が13%減なのに対し、2012年以降は20%以上の減少となっている。このため、2012年以降はデータが十分取得されていないと想定し、以下では2011年までのデータを用いる。

図-1は都市間旅客数の推移を表している。旅客数は2009年までは増加基調にあり、2009年にはリーマンショックの影響で大きく落ち込んでいるが、その後回復基調にあることがわかる。また、図-2はアフリカ発着の旅客数の推移を示している。こちらは、2004年まではおおむね横ばいだったのに対し、それ以降は、旅客数は大きく増加し、2010年にピークをつけていることがわかる。

図-3は需要がゼロのODペアを除いたアフリカ発着のODペア数を示している。これより2010年が最大のODペア数を与えており、2012年以降は大幅に減少している。この結果から、新しい年代では統計の捕捉漏れの可能性が示唆される。以上より、本研究では、2010年がアフリカ発着統計の漏れが最も少ないと判断し、現状のネットワーク分析には2010年の航空OD需要データを使用する。

(2) OpenFlightsデータの概要³⁰⁾

本研究では、航空路線のデータとして、Open database licenseのOpenFlightsのデータをもとにしている。データは大きく3つに分けられる。

1つ目は空港データで、2012年1月の時点では6977ヶ所の空港についての空港ID、空港名、都市、国、IATAコード、ICAOコード、緯度、経度、標高、タイムゾーン、Daylight saving timeが記載されている。2つ目は航空会社のデータで内容は、同じく2012年1月の時点で5888の航空会社についての航空会社名、IATAコード、ICAOコード等が記載されている。3つ目はルートデータ(図-4)で航空会社531社について3209空港間59036路線についての航空会社ID、航空会社名、出発空港、出発空港ID、到着空港名、到着空港ID、コードシェア、フライトでの停止回数、機器コードが記載されている。本研究では、都市

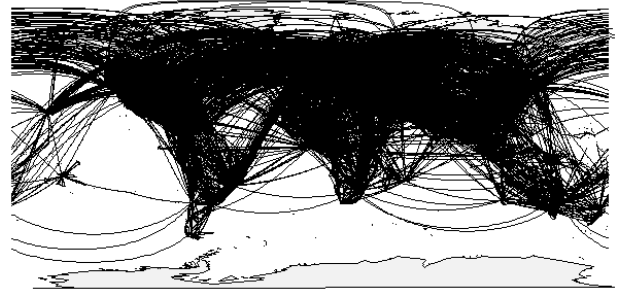


図-4 OpenFlightsのルートデータ

間の航空ネットワークの再編をシミュレーションするため、空港別のデータを都市別に集約し、地理座標から都市間ルートの大圏距離を求めた。

4. 均衡ネットワークの導出方法

ここでは、ユーザーコストに基づきネットワークの効率性を定義し、シミュレーションにより、OD需要が定常状態となる均衡ネットワークを導出する方法を提案する。均衡ネットワークは、それ以上コストを下げるルートが解近傍で存在しないという意味で、局所最適解となっている。

(1) ユーザーコストと運航コストの定義

ユーザーはOD間移動の一般化費用を最小化する経路を選択すると考える。ここで、都市*i*と*j*間のODの一般化費用 c_{ij} を次式で定義する。

$$c_{ij} = \sum_{a \in \Omega_{ij}} \{P_a + P_t(T_a^l + T_a^w)\} \quad (1)$$

ここで、 a は路線番号、 Ω_{ij} は*i*と*j*間の費用最小経路上の路線集合、 P_a は路線*a*の運賃、 P_t は時間価値、 T_a^l は移動時間、 T_a^w は待ち時間(24/便数)である。ただし、運賃は、路線の運航コストを乗客数で除したもの、移動時間は都市間距離を航空機で除したもの、待ち時間は24時間を1日当たりの便数で除し更に2で割ったものと定義する。2で割るのは期待待ち時間とするためである。

この定義においては、航空会社は十分競争的と仮定し、路線毎の乗客当たりの平均費用が運賃に等しいと想定する。すなわち、運航コストが変わらなければ、搭乗率が低いと運賃が高くなり、逆に搭乗率が高ければ運賃は低くなる。加えて、需要の増加に応じて便数も増加すると想定する。すなわち、1日の需要量を機材定員で割った商+1を便数と定義する。便数が少ないと待ち時間が長くなるため待ち時間に関わるコストは増加する。なお、航空機で除したものは822km/h、旅客の時間価値\$20/hourと仮定する。旅客機の運航コストはSwan and Adler³¹⁾の以下の式を用いる。

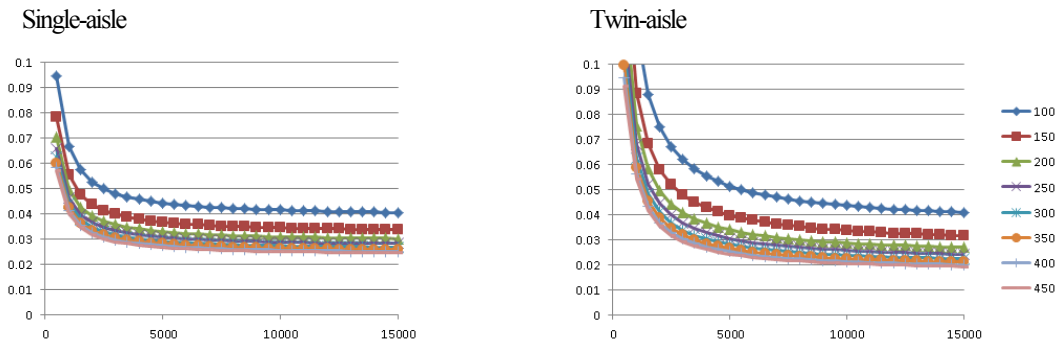


図-5 運航距離に対する人キロ当たりのコスト

Single-aisle $C=(D+722)\times(S+104)\times\0.019 (2)

Twin-aisle $C=(D+2200)\times(S+211)\times\0.0115 (3)

Cは運航コスト、Dは運航距離、Sは座席数である。座席数を100席から400席まで変化させたときの、運航距離に対する旅客人キロ当たりのコストを図-5に示す。ここでは、空港間距離が3000km以下ではシート数が同一であればSingle-aisleのほうがコストが低くなる。このため、ここでは運航距離が3000km以下ではSingle-aisleを使用、3000km以上の路線についてはTwin-aisleを使用すると仮定する。また、座席数は、Single-aisleで100席、Twin-aisleで400席とする。需要が座席数より少ない場合、上記運航費用を乗客数で割ったものを平均運賃とする。

(2) 均衡ネットワークの導出手順

前節で定義したように、利用者は一般化費用が最小となるように経路を選択し、運賃と便数は旅客需要量により決まると仮定している。運賃は一人当たりの運航コストのため、需要が増えるほど低下し、また便数も需要が増加するほど増えることになる。便数の増加は待ち時間を減少させるため、運賃の低下と相まって一般化費用を減少させる。すなわち、ある路線の需要が増えるほど、当該路線を利用する一般化費用が低下し、利用経路として選択される可能性が高まり需要が更に増加することになる。このため、この問題は凹問題となり、コスト最小化を目的関数とすると解は複数存在する可能性がある。

ここでは、上の定義の基づく最適化問題としてネットワークの解法を定式化する代わりに、利用者の経路選択とネットワークコストのシミュレーションにより定常状態を導くことを考える。シミュレーションは次の手順で行う。

- ① 初期状態における各路線のコストとして、全席満席の場合の運賃と、待ち時間ゼロ ($T_a^0=0$) を仮定する。
- ② 与えられた各路線のコストの下で、最短経路探索により、OD需要を経路、路線へと割り当てる。
(搭乗率、必要便数の決定)

- ③ 割り当てられた需要の下で、需要が変化した路線については、搭乗率、必要便数を算定し、それに基づき運賃と待ち時間を算定する。ただし、需要がゼロとなる路線については、運賃、待ち時間は変化させない。
- ④ 従前の各路線の需要と推計された需要に差があれば②に戻る。変化していなければ、需要がゼロの路線の便数をゼロに設定して、得られたネットワークを均衡ネットワークとして出力し終了。

このシミュレーションによるネットワーク更新の概念を図-6に示す。まず、与えられたネットワークコストの下で最短経路探索により各路線に需要を割り当てる。すると、需要が変化した路線については、運賃、待ち時間が変化する。次に、変化した運賃、待ち時間の下で、再び最短経路探索を行う。ネットワークコストの変化により最短経路が変化するならば、路線の需要が変わる。図では、 $i2 \rightarrow j$ の需要はダイレクト便からkを経由する便に変化している。この需要変化は再びネットワークコストを変化させる。このとき、 $i1 \rightarrow j$ のダイレクト便よりも、kを経由する方が安くなるならば、この需要もkを経由するようになる。最終的に、需要変化が無くなるまで繰り返し、得られた定常状態を均衡ネットワークと定義する。このアルゴリズムは、総ユーザーコストの最小化を保証するものではない。しかし、均衡状態においては、全てのODにおいて、より安価な経路は存在しないことから、総コストで見た場合に局所最適になっていると考えられる。

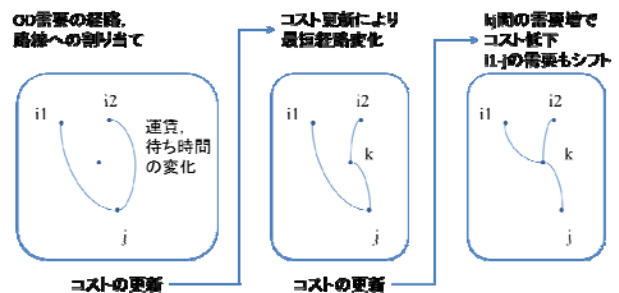


図-6 ネットワーク更新の概念図

なお、初期状態では全ての路線で費用は下限値が与えられており、実際に需要が割り当てられると費用は増加することになる。このため、シミュレーションにおいて、費用の観点から選択される可能性のある路線は、少なくとも一度は最短経路として探索されると期待される。このため、このアルゴリズムは大域的な最適性を保証するものではないが、解の初期値依存性は緩和されているものと考えられる。

5. 現状のネットワーク分析

本研究ではOpen Flightsにおける航空路線データのうち、発着地点がアフリカのものだけを対象としている。その際、ICAOの航空OD需要データにおける発着地は都市単位であるため1つの都市につき1つの空港しかないものと仮定する必要がある。一つの都市に複数の空港が存在する場合は、接続する空港が多い空港または国際空港を抽出している。また、航空OD需要データは都市間の年間航空旅客数であるため1年365日とし1日あたりの航空旅客数を求めて使用する。

(1) 現況ネットワークの分析

ここではまず現況ネットワークを分析する。2010年のICAOの航空需要データが存在するアフリカの発着都市は151都市で404路線が存在している。供給データを入手していないことから、ここでは便数を都市間の旅客数を座席数で除したものをを用いる。ただし、座席数は3000km以下の路線は100席、それ以上では400席と仮定し、それぞれ小型機、大型機と記載する。また、運賃は運航コストを一便当たりの需要で除したものとし、移動時間コストは都市間の距離を航空機の世界平均速度(822km/h)で除したものに旅客の時間価値(\$20/hour)を乗じて算定している。待ち時間コストは期待待ち時間を(24h/2) / 便数とし、これに時間価値を乗じることで算定している。総コストは運賃、移動時間コスト、待ち時間コストの和である。

表-1と表-2、表-3に2010年の現況ネットワークの各指標の算定結果を示す。まず、路線数を見ると、アフリカ発着路線では小型機と大型機が同程度である。便数は短距離路線の方が長距離より5倍程度多いと算定されている。なお、繰り返しになるが、この便数は旅客需要と座席数から算定したものであり、実際の供給便数とは異なる可能性がある。人キロで見た需要は、大型機は長距離路線でかつ座席数も多いことから、小型機よりも多くなっている。

次に、一人当たりフライト当たりのコストを見ると(表-2)、路線長を反映して運賃、移動時間も小型機が低くなっている。また、路線当たりの便数は小型機の

表-1 現況ネットワークの路線数・便数・需要

	小型機	大型機	合計
路線数	203	201	404
便数(日)	197	43	240
需要(百万人キロ/日)	32	85	117

表-2 現況ネットワークの1人当たりコスト

	小型機	大型機	平均
運賃(\$/回)	135	620	359
移動時間(\$/回)	40	123	78
待ち時間(\$/回)	106	212	155
総コスト(\$/回)	281	955	592

表-3 現況ネットワークの全旅客コスト

	小型機	大型機	合計
運賃(百万\$/日)	2.65	10.43	13.08
移動時間(百万\$/日)	0.79	2.07	2.86
待ち時間(百万\$/日)	2.09	3.56	5.65
総コスト(百万\$/日)	5.53	16.06	21.59

方が多いため、推計される待ち時間も、小型機の方が短くなっている。

また、トータルの運賃を見ると、大型機は小型機の4倍程度であり、一人当たり運賃の10倍程度と比較すると小さくなっている。すなわち、搭乗者数で見た需要そのものは小型機の方が大型機よりも大きいことになる。移動時間コストを見ると、大型機は小型機の3倍程度である一方、大型機の運賃は小型機の4倍程度であることから、距離当たりの運賃は大型機の方が高く算定されている。これは、大型機の効率が低いことを反映している。

(2) 最適化後のネットワークの分析

現況ネットワークに対して第5章で示した方法で均衡ネットワークを導出した。表-4、表-5、表-6は2010年の均衡ネットワークにおける各指標の算定結果を示す。

これより、現況と比較し、均衡状態では路線数は減少し、特に大型機の路線数は大幅に減少している。一方、便数は大型機ではそれほど変化しておらず、小型機ではむしろ2倍程度に増加している。これは、路線数を絞り、1路線当たりの頻度を向上することで、待ち時間を低下させることが、利用者のコストを削減することに寄与していることを示している。また、輸送人キロを見ると、1割増増加しており、乗り継ぎが増加し、それに伴い迂回する経路の利用が増えていることを示している。

次に、一人当たりのコストを見ると、小型機、大型機ともに、現況ネットワークと比較して運賃が低下し、特に大型機では1/3程度に大幅に減少していることがわかる。これは、搭乗率が高まり、一人当たりの運賃負担が大幅に低下することを意味している。また、移動時間コ

表-4 均衡ネットワークの路線数・便数・需要

	小型機	大型機	合計
路線数	172	32	204
便数	410	31	441
需要 (百万人キロ/日)	68	61	129

表-5 均衡ネットワークの1人当たりコスト

	小型機	大型機	平均
運賃 (\$人回)	103	188	123
移動時間 (\$人回)	40	121	59
待ち時間 (\$人回)	59	131	75
総コスト (\$人回)	203	440	257

表-6 均衡ネットワークの全旅客コスト

	小型機	大型機	合計
運賃 (百万\$/人日)	4.24	2.3	6.54
移動時間 (百万\$/人日)	1.66	1.48	3.14
待ち時間 (百万\$/人日)	2.4	1.59	3.99
総コスト (百万\$/人日)	8.3	5.37	13.67

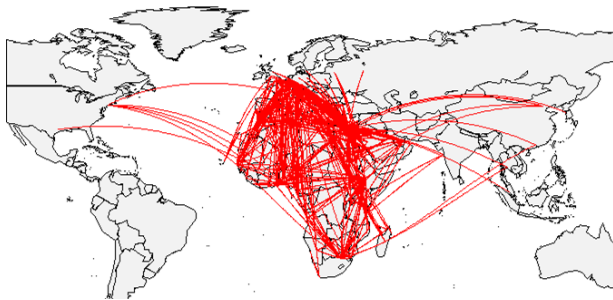


図-7 現況ネットワーク路線図



図-8 均衡ネットワーク路線図

ストは小型機，大型機毎に見ると，現況ネットワークとそれほど変わらないが，平均値を見ると，一定程度減少している。これは大型機から頻度の高い小型機の乗り継ぎにシフトしていることを示唆している。また，待ち時間は大幅に短縮されており，路線数は大きく減少するが，路線当たりの便数が増加していることがわかる。総コストは小型機は3割弱の減少だが，大型機ではコストは半分以下となっている。また，平均値で見ても50%以上のコスト削減となっており，大型機のコスト削減と合わせて，小型機へのシフトが平均コストを下げていることが読み取れる。

需要の変化を反映して，運賃総額も現況ネットワークから大きく変化している。大型機の運賃収入は大きく減少し，小型機で2倍弱に増加している。トータルでは半分程度に減少している。なお，これは総運航コストが減少したことを反映している。一方，移動時間は小型機で増加し，大型機で減少し，トータルでは増加している。すなわち，利用者の移動距離は増加したものの，搭乗率の増加により運航の経済性が向上したことを反映して運賃総額は減少している。また，頻度向上に伴い総待ち時間が減少し，結果として，利用者の総コストは4割ほど減少している。

(3) 現状のネットワークの効率性の改善の評価

以上は，現況ネットワークと均衡ネットワークの集計的な違いを評価した。両者の路線図をそれぞれ図-7，8に示す。図を見ても，路線数が大幅に減少しており，特に長距離路線で減少していることが読み取れる。

より詳細に見るために，まず路線数の多い上位10都市を現況ネットワークと均衡ネットワークで比較したものを表-7に示す。これより，均衡ネットワークでは路線は集約され，いずれの都市でも現況と比較して少なくなっていることがわかる。路線数の最も多い都市は，現況ネットワーク，均衡ネットワークのいずれのケースもエジプトのカイロである。一方，2位以下の都市は，現況ネットワークと均衡ネットワークで順位が大きく入れ替わっている。

路線数で見ると，現況ネットワークでは，3位にパリ，6位にロンドンと欧州の都市が上位に現れており，両都市からアフリカ各都市へのダイレクト航路が多いことがわかる。一方，均衡ネットワークではパリは6位，ロンドンは10位となり，欧州-アフリカダイレクト航路は減少している。対して，モロッコの2都市が上位となり，欧州から比較的近いアフリカの都市をハブとするネットワークが形成されている様子が見える。

表-8は各都市におけるアフリカ発着便の旅客数を示している。ここでは，当該都市を発着する全ての旅客数を示しており，乗り継ぎも含まれる。現況ではカイロに次いで，ロンドン，パリ，ドバイ，ジッダの旅客数が多く，これらの都市がアフリカ各都市へのハブの役割を果たしていると推察される。一方，均衡ネットワークではカサブランカ，マラケシュといった，欧米に近い都市の旅客数が大きく増加しており，アフリカ域内にハブを置くことが効率的であることを示唆している。一方，ロンドン，ドバイ，ジッダは順位を落とし，モロッコの2都市とともに，ナイロビ，アディスアベバが順位を上げており，アフリカに複数のハブを置くことが効率性を向上する可能性が示唆される。

表-7 路線数の多い上位都市

現況ネットワーク				均衡ネットワーク		
Rank	City	Country	Routes	City	Country	Routes
1	Cairo	Egypt	63	Cairo	Egypt	48
2	Addis Ababa	Ethiopia	32	Johannesburg	S. Africa	16
3	Paris	France	30	Casablanca	Morocco	15
4	Johannesburg	S. Africa	26	Marrakech	Morocco	14
5	Lagos	Nigeria	21	Addis Ababa	Ethiopia	13
6	London	UK	20	Paris	France	11
7	Nairobi	Kenya	19	Nairobi	Kenya	11
7	Sham El Sheikh	Egypt	19	Tripoli	Libya	9
9	Casablanca	Morocco	16	Lagos	Nigeria	7
10	Dar Es Salaam	Tanzania	15	Accra	Ghana	6
10	Dakar	Senegal	15	Benghazi	Libya	6
10	Luxor	Egypt	15	Entebbe	Uganda	6
10	Marrakech	Morocco	15	London	UK	6

表-8 旅客数の多い上位都市

現況ネットワーク				均衡ネットワーク		
順位	都市	国	旅客数(千人/年)	都市	国	旅客数(千人/年)
1	Cairo	Egypt	4,880	Cairo	Egypt	8,201
2	London	UK	1,492	Paris	France	2,366
3	Paris	France	1,442	Casablanca	Morocco	1,905
4	Dubai	UAE	1,102	Marrakech	Morocco	1,779
5	Jeddah	Saudi Arabia	1,100	Nairobi	Kenya	1,696
6	Johannesburg	S. Africa	1,078	Addis Ababa	Ethiopia	1,592
7	Lagos	Nigeria	806	London	UK	1,503
8	Nairobi	Kenya	712	Lagos	Nigeria	1,362
9	Casablanca	Morocco	700	Johannesburg	S. Africa	1,297
10	Addis Ababa	Ethiopia	656	Dubai	UAE	1,262

6. 需要変化に対する感度分析

上記のネットワーク分析は、当然のことながら需要パターンが変化すると異なる結果をもたらす。例えば、ここでは、運賃は搭乗率が高まれば安くなり、また需要が増加すれば頻度も増加すると仮定している。従って、航空需要が増加するならば、ハブ&スポーク型ではなく、ダイレクト航路が効率的になる可能性もある。

本章では、2010年のICAOの航空OD需要に毎年5.7%の伸び率を与えたものを2030年の航空OD需要と仮定し、その下での現況ネットワークと均衡ネットワークのパフォーマンスを比較する。ここで、2010年のアフリカ発着の航空旅客数は54万人/日だが、上記伸び率を単純に適用すると、2030年には165万人/日と3倍程度に増加する。

(1) 現況ネットワークの分析

現況ネットワークの下での推計結果を表-9、表-10、

表-11に示す。まず、表-9より、便数、輸送量ともに需要増加に応じて3倍程度に増加する。一方、表-10を見ると、一人当たり運賃は減少し、特に大型機では2010年と比較して60%程度減少している。これは、需要増加に伴う搭乗率向上により、一人当たりの運航コストが低下したことを反映している。移動時間は変わらないが、待ち時間は運航頻度の増加により、大幅に減少している。その結果、総コストは、小型機では33%、大型機では47%、平均では43%程度コストが減少している。

(2) 均衡ネットワーク

均衡ネットワークのパフォーマンスを表-12、表-13、表-14に示す。2010年の均衡ネットワークと比較すると、小型機、大型機ともに路線数は増加しており、需要の増加に伴いダイレクト路線の効率性が向上することが示唆される。特に大型機での増加率が高く、長距離路線の拡充が推計されている。便数は小型機、大型機ともに2010

表-9 現況ネットワークの路線数・便数・需要(2030)

	小型機	大型機	合計
路線数	203	201	404
便数	596	127	723
需要 (百万人キロ/日)	98	258	356

表-10 現況ネットワークの1人当たりコスト(2030)

	小型機	大型機	平均
運賃 (\$人回)	100	242	166
移動時間 (\$人回)	40	123	78
待ち時間 (\$人回)	48	142	92
総コスト (\$人回)	188	509	336

表-11 現況ネットワークの全旅客コスト(2030)

	小型機	大型機	合計
運賃 (百万\$/人日)	5.98	12.37	18.35
移動時間 (百万\$/人日)	2.38	6.28	8.66
待ち時間 (百万\$/人日)	2.87	7.26	10.13
総コスト (百万\$/人日)	11.24	25.92	37.16

表-12 均衡ネットワークの分析結果(2030)

	小型機	大型機	合計
路線数	193	56	249
便数	912	112	1024
需要 (百万人キロ/日)	146	223	369

表-13 均衡ネットワークの1人当たりコスト(2030)

	小型機	大型機	合計
運賃 (\$人回)	93	136	107
移動時間 (\$人回)	39	122	66
待ち時間 (\$人回)	36	89	53
総コスト (\$人回)	168	346	226

表-14 均衡ネットワークの全旅客コスト(2030)

	小型機	大型機	合計
運賃 (百万\$/人日)	8.49	6.05	14.54
移動時間 (百万\$/人日)	3.56	5.42	8.98
待ち時間 (百万\$/人日)	3.25	3.94	7.19
総コスト (百万\$/人日)	15.31	15.41	30.72

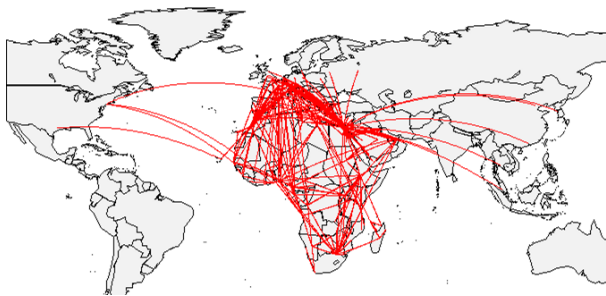


図-9 均衡ネットワーク路線図(2030年)

年の2倍以上となっており、また、輸送量は小型機で2倍程度、大型機では3倍強と、特に長距離路線での輸送量が増加することがわかる。

次に、一人当たりのコストを見ると、2010年の均衡ネットワークと比較しても、運賃は、小型機、大型機ともに減少しており、規模の経済性が働くことがわかる。また、長距離ダイレクト便が増加することから、小型機の移動時間はやや減少し、大型機の移動時間は若干増加している。待ち時間は、便数が大きく増加することから、大幅に減少している。その結果、一人当たりの総コストは小型機で17%、大型機で21%減少することになる。

なお、表-11と表-14より、2030年の需要の下での現況ネットワークと均衡ネットワークを比較すると、搭乗率の改善により総運賃は減少する一方、乗り継ぎに伴う迂回距離の増加により移動時間はやや増加する。ただし、頻度が増加するため、乗り継ぎは増えるものの、待ち時間は減少し、総コストは17%減少する。

(3) 2030年需要の下でのネットワークの効率性評価

2030年の均衡ネットワークの路線図を図-9に示す。図-8と比較すると、欧州から西アフリカへのダイレクト路線が増加している傾向が読み取れる。

次に、6章と同様に路線数の多い都市を表-15に示す。ここで、現況ネットワークは表-15に示したものと同一である。均衡ネットワークを2010年と比較すると、カイロが最も路線数が多くなっており、他の多くの都市でも接続路線数が増加している。また、パリが4位と順位を上げている一方、カサブランカとマラケシュは順位を下げている。マラケシュは接続都市数が減少している。これは、需要増加に伴うダイレクト路線の増加に伴い、アフリカのハブ機能が低下することを示唆している。

都市別の旅客数の順位を見ると、2010年と比較して、カイロが1位であることは変わらないが、ロンドンが2位と旅客数を大幅に増加させている。これは、欧州—アフリカの需要増加とともに、アフリカ域内の乗り継ぎからダイレクト便にシフトすることで、相対的に旅客数の順位が上昇したと解釈できる。

7. おわりに

アフリカでの航空路線ネットワークの効率改善の可能性を分析するため、シミュレーションによる新たなネットワーク分析手法を作成した。この方法では、利用者は一般化費用が最小となるように経路を選択する一方、運賃と便数は旅客需要量によって決まると仮定している。このため、需要側と供給側が相互に影響を与える構造となっている。この相互作用を繰り返し、需要側の経路選択が変化しなくなった状態を均衡状態とし、その状態に

表-15 路線数の多い上位都市(2030年)

順位	現況ネットワーク			均衡ネットワーク		
	都市	国	路線数	都市	国	路線数
1	Cairo	Egypt	63	Cairo	Egypt	55
2	Addis Ababa	Ethiopia	32	Johannesburg	S. Africa	19
3	Paris	France	30	Addis Ababa	Ethiopia	17
4	Johannesburg	S. Africa	26	Paris	France	16
5	Lagos	Nigeria	21	Casablanca	Morocco	15
6	London	UK	20	Lagos	Nigeria	13
7	Nairobi	Kenya	19	Nairobi	Kenya	10
7	Sham El Sheikh	Egypt	19	Marrakech	Morocco	10
9	Casablanca	Morocco	16	Tripoli	Libya	10
10	Dar Es Salaam	Tanzania	15	Entebbe	Uganda	9
10	Dakar	Senegal	15	Luanda	Angola	9
10	Luxor	Egypt	15	London	UK	9
10	Marrakech	Morocco	15	Sham El Sheikh	Egypt	9

表-16 旅客数の多い上位都市(2030年)

順位	現況ネットワーク			均衡ネットワーク		
	都市	国	旅客数 (千人/年)	都市	国	旅客数 (千人/年)
1	Cairo	Egypt	14,788	Cairo	Egypt	20,081
2	London	UK	4,520	London	UK	4,852
3	Paris	France	4,370	Paris	France	4,777
4	Dubai	UAE	3,340	Lagos	Nigeria	4,243
5	Jeddah	Saudi Arabia	3,333	Nairobi	Kenya	4,206
6	Johannesburg	S. Africa	3,267	Johannesburg	S. Africa	3,725
7	Lagos	Nigeria	2,444	Addis Ababa	Ethiopia	3,705
8	Nairobi	Kenya	2,157	Dubai	UAE	3,340
9	Casablanca	Morocco	2,123	Jeddah	Saudi Arabia	3,333
10	Addis Ababa	Ethiopia	1,988	Casablanca	Morocco	2,896

におけるネットワークを均衡ネットワークとして導出した。

また、ICAOのOFOD統計に基づきアフリカ発着路線のOD需要を設定し、この分析方法を適用した。その結果に基づき、2010年のアフリカを発着する現況ネットワークと均衡ネットワークのパフォーマンスを比較した。

その結果、現況のネットワークと比較して均衡ネットワークでは、路線数は減少する一方、便数が増加している。ただし、大型機が減少し、小型機が増加している。これにより、頻度が増加するとともに、搭乗率が改善し運賃が低下し、待ち時間が短縮されている。

また、そのネットワークを見ると、長距離路線は集約され、多頻度の短距離路線と接続するハブ&スポーク型に近づいていることがわかる。特に、カイロ、カサブランカ、マラケシュなど、北アフリカの都市を、欧州とアフリカを結ぶハブとして位置づけることにより、ネットワークの効率が高まる可能性がある。

一方、旅客需要が変われば効率的なネットワークも変

化すると考えられる。そのため、2030年を想定した需要が3倍程度に増加するケースの感度分析を行った。その結果、2010年の需要と比較して、需要増加に伴い、いくつかの長距離ダイレクト路線の採算性が向上し、均衡ネットワークにおける路線数が増加した。これは、アフリカ域内の乗り継ぎ路線の需要を相対的に減少させるため、例えば、マラケシュなどはハブとしての順位を下げ一方、ロンドン、パリと言った欧州での乗り継ぎ需要を増加させている。

上記は様々な仮定の下での分析結果であり、それらの前提条件を変更すると当然結果も変わりうるが、ここでは簡略化した状況の下でパフォーマンスを改善するネットワークの導出方法を提案した。

本研究で提案した手法は簡易的なものであり、様々な点で手法を改善する余地がある。主な改善点として、最適化手法と入力データの改善が挙げられる。

最適化手法に関しては、最短経路探索と供給条件の更

新を逐次的に行っており、また、規模の経済が働くことから、凹問題であるため、得られた結果は局所最適となっている可能性がある。これに対応するには、供給条件の更新に焼き鈍し法やMCMCを用いるなど工夫が必要になると思われる。

また、最適化は現況ネットワークを対象としており、新たな路線の開設は考慮していない。このため、計算量は増加するが、全ての空港間を結ぶ路線を初期条件として与えたケースについても分析が必要である。

さらに、路線別に使用する機材の最適化も考えられる。機材については、距離により小型機と大型機を分けているが、需要が多ければ短距離でも大型機を運用する方が運航コストを削減しうる。このため、3000km以下の路線でも需要に対して両者のコストを比較して、利用者にとってより安価な機材を選択するモデルが必要である。

入力データに関して、待ち時間は、出発地の待ち時間と、乗り継ぎ地の待ち時間を同じ時間価値で評価している。出発地での待ち時間については、十分長ければ他の活動に当てることも可能となるため、待ち時間としての価値は必ずしも等しくなるとは限らない。また、飛行距離に対して乗り換えに対する負担感も変化するとのも研究もあり、時間認識に関する既往研究の成果を考慮することも必要である。加えて、本分析の時間単位は1日であり、路線があると最低1日1便は運航していること仮定している。これを1週間単位などにすると、また異なる評価が得られると考えられる。

また、発着地需要のODデータについては、ICAOのOFOD統計に依拠しているため、真のODとは乖離している可能性が高い。効率的な乗り継ぎ地点の設定のためには真のODが必要となるが、それにはより詳細なデータを用いることが必要である。

さらに、感度分析では単純に一定の割合で需要が増加すると仮定したが、実際には各都市の人口や経済活動、資源ポテンシャルなどに基づく戦略的なネットワーク形成が必要となるだろう。それらの研究との接続も必要である。今後これらの点で手法を改善することで、航空ネットワーク評価手法開発の更なる発展が期待される。

謝辞：本稿は香川大学と三菱重工業株式会社との共同研究の成果をとりまとめたものである。研究実施に際して、貴重なデータを提供いただき、かつ有益な議論を持つことができた。また、本研究は科研費（25281071、15H02869）の助成を受けている。

参考文献

- 1) JADC(日本航空機開発協会):民間航空機に関する市場予測 2013-2032, 2013.
- 2) Braeutigam, R. R."Learning about Transport Costs. Essays

- in *Transportation Economics and Policy* , J. A. GomezIbanez, W. B. Tye and C. Winston (eds.) , A Handbook in honor of John R. Meyer., Brookings Institution Press, pp.57-98, 1999.
- 3) Brueckner, J. K. and P. T. Spiller, "Economies of Traffic Density in the Deregulated Airline Industry", *Journal of Law and Economics*, Vol.37, pp.379-415, 1944.
- 4) Caves, R. E., L. R. Christensen and M. W. Tretheway,"Economies of Density versus Economies of Scale: Why Trunk and Local Service Airline Costs Differ", *The RAND Journal of Economics*, Vol.15, No.4, pp.471-489, 1984
- 5) Berry, S., M. Carnall and P. T. Spiller, "Airline Hubs: Costs, Markups and the Implications of Customer Heterogeneity", *National Bureau of Economic Research.*, 1996
- 6) Borenstein, S., "Hubs and High Fares: Dominance and Market Power in the U.S. Airline Industry", *The RAND Journal of Economics*, Vol.20, No.3, pp.344-365, 1989.
- 7) Lijesen, M. G., P. Rietveld and P. Nijkamp, "Do European Carriers Dominate their Hubs?", *The 4th ATRG Conference*, Amsterdam, 2000.
- 8) Oum, T. H., A. Zhang and Y. Zhang, "Airline Network Rivalry", *Journal of Economics*, Vol.18, No.4a, pp.836-857, 1995.
- 9) A. Zhang, "An Analysis of Fortress Hubs in Airline Networks", *Journal of Transport Economics and Policy*, Vol.30, No.3, pp.293-308, 1995.
- 10) Dresner, M. E. and R. J. Windle, "Alliances and Code-sharing in the International Airline Industry", *Built Environment*, Vol.22, No.3, 201-211, 1995.
- 11) Oum, T. H., J.-H. Park and A. Zhang, "Globalization and Strategic Alliances. The Case of the Airline Industry", *Pergamon*, 2000.
- 12) Pels, E., "A Note on Airline Alliance", *Journal of Air Transport Management*, Vol.7, pp.3-7, 2001.
- 13) O'Kelly, M. E. and H. J. Miller, "The Hub Network Design Problem", *Journal of Transport Geography*, Vol.2, No1, pp.31-40, 1994.
- 14) O'Kelly, M. E., "A Geographer's Analysis of Hub-and-spoke Networks", *Journal of Transport Geography*, Vol.6, No.3, pp.171-186, 1998.
- 15) O'Kelly, M. E. and D. L. Bryan, "Hub Location with Flow Economies of Scale", *Transportation Research B*, Vol.32, No.8, pp.605-616, 1998.
- 16) Bania, N., P. W. Bauer and T. J. Zlatoper, "U.S. Air Passenger Service: A Taxonomy of Route Networks, Hub Locations and Competition", *Transportation Research E*, Vol.34, No.1, 53-74, 1998.
- 17) Burghouwt, G., J. R. Hakfoort and J. R. Ritsema-Van Eck, "The Spatial Configuration of Airline Networks in Europe", *Journal of Air Transport Management*, Vol.9, No.5, pp.309-323, 2003.
- 18) Ivy, R. J., " Variations in Hub Service in the US Domestic Air Transportation Network", *Journal of Transport Geography*, Vol.1, No.4, pp.211-218, 1993 .
- 19) Shaw, S.-L., "Hub Structures of Major US Passenger Airlines", *Journal of Transport Geography*, Vol.1, No.1, pp.47-58, 1993.
- 20) Burghouwt, G. and J. G. de Wi, "Temporal Configurations

- of Airline Networks in Europe", *Journal of Air Transport Management*, Vol.11, No.3, pp.185-198, 2005.
- 21) Dennis, N. P., "Scheduling Strategies for Airline Hub Operations", *Journal of Air Transport Management*, Vol.1, No.2, pp.131-144, 1994.
- 22) Dennis, N. P., "Airline Hub Operations in Europe", *Journal of Transport Geography*, Vol.2, No.4, pp.219-233, 1994.
- 23) Reynolds-Feighan, A. J., "Traffic Distributions in Low-cost and Full-service Carrier Networks in the US Air Transport Market", *Journal of Air Transport Management*, Vol.7, No.5, pp.265-275, 2001.
- 24) Veldhuis, J., "The Competitive Position of Airline Networks", *Journal of Air Transport Management*, Vol.3, No.4, pp.181-188, 1997.
- 25) Burghouwt, G. and Veldhuis, J., "The Competitive Position of Hub Airports in the Transatlantic Market", *Journal of Air Transportation*, Vol.11, No.1, pp.106-130, 2006.
- 26) ヤップドゥウィット・ヤンフェルトハイス・ギオー
ムブルハウト・松本秀暢, "日韓主要 4 空港における
航空ネットワーク・パフォーマンスの評価ー日本に
とって最大のハブ空港はどこか？ー", 「東アジアへ
の視点」 Vol.18, No.4, pp.27-38, 2007.
- 27) 轟朝幸, 榛沢芳雄, 梅沢史章: 国内航空ネットワ
ークの構築に関する基礎的研究ーインドネシアの航空
事情を踏まえてー, 土木計画学研究発表会講演集,
Vol.14, No.1, pp.85-90, 1991.
- 28) 佐々木美裕: ハブ空港の配置モデル, オペレーショ
ンズ・リサーチ: 経営の科学 Vol.45, No.9, pp.437-443,
2000.
- 29) 寺崎淳也, 鹿島茂, 谷下雅義: 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, 運輸政策研究,
運輸政策研究機構, Vol.13, No.2, pp.14-23, 2010.
- 30) <http://openflights.org/data.html>
- 31) Swan, W.M., Adler, N., Aircraft trip cost parameters: A
function of stage length and seat capacity, *Transportation
Research Part E* Vol.42, pp.105-115, 2006.

(2009.7.1 受付)

EFFICIENCY IMPROVEMENT POTENTIAL OF AIRLINE NETWORK IN AFRICA

Yuki Nagano, Masanobu KII, Kazuki NAKAMURA and Hiroyasu SHIMIZU

In this study, a novel analytical method of airline network efficiency is developed and is applied to African airline network. The results suggest that the improvement of load factor, lower fare, and waiting time can be achieved by aggregation of flight routes. The improved network has fewer routes but a larger number of flights compared to the current network. In addition, long-distance routes would decline, but short-distance routes would increase, which would generate the improved network with the hub and spoke form. Especially, the network efficiency can be improved by using some of North African cities as hubs of the network connecting Europe and Africa. In the scenario of demand increase in 2030, some long-distance direct flights can be more profitable than connection flights demand. It would make African cities lose their significance of the hub roles, increasing connection demand through European cities.