

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：32641

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22710150

研究課題名（和文） 国際航空市場における都市圏間OD旅客数推計モデルに関する研究

研究課題名（英文） A Study on Estimation Model of Origin and Destination Passenger Flow of International Air Transportation

研究代表者

鳥海 重喜 (TORIUMI SHIGEKI)

中央大学・理工学部・助教

研究者番号：60455441

研究成果の概要（和文）：

本研究では、フライトスケジュールデータをもとに、時間の概念を取り入れた航空ネットワーク（以後、時空間ネットワークと呼ぶ）を構築し、空港を単位として現状の航空機の動きを時空間的に分析するとともに、構築した時空間ネットワークを用いて、国際航空市場における都市圏間OD旅客数を推計する数理計画モデルを開発した。さらにそれらの結果をグラフィカルに可視化するツールも開発した。

研究成果の概要（英文）：

In this study, we construct a time-space network which expresses the timetable of flights and covers worldwide area. And we analyze spatial-temporal flight schedule by making an airport into a unit. Furthermore, using the time-space network, we develop a mathematical model of estimating of origin and destination passenger flow of international air transportation. Finally, we develop a visualization tool for estimating results.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：OR，交通計画，地理情報システム，数理工学，社会調査の計画と解析，都市・地域計画

## 1. 研究開始当初の背景

国際航空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資料であるが、現在、国際航空市場におけるOD旅客数を把握できる統計は存在しない。そのため、既存研究では 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客者が存在すると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。

## 2. 研究の目的

本研究では、国際航空市場における都市圏間 OD 旅客数を推計するモデルを開発することを目的とする。本研究と類似の既存研究では、OFOD 統計により得られる旅客数を、旅客者が購入した複数のチケットを結合することで修正して OD 旅客数を推定するモデルを提案されている。このモデルは、推定される OD 旅客数を配分（経路選択）した結果得られるリンク旅客数が、TFS 統計（出発（離陸）から最初の到着（着陸）までの 1 航行の都市圏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、Traffic by Flight Stage）から得られる観測リンク旅客数と近似するように、OFOD 旅客数から修正すべき旅客数を決定するというものである。しかし、このモデルには① TFS 統計がない都市間や国内都市間は考慮することができない、② OFOD 統計が存在していない都市圏間の（修正前）旅客数を簡単な重力モデルで仮定している、③ 研究対象地域が限定されているなど、解決しなければならない問題がある。

そこで本研究では、航空機には発着スケジュールが設定されていることを利用し、世界中のエアラインの時空間ネットワークを構築することで①の問題の解決を図る。また、②の問題に対しては、①の時空間ネットワークに加えて、様々な社会統計データや地理情報などを統合的に扱うことで、修正前旅客数を推計するモデルを新たに開発する。さらに③の問題に対応すべく、対象地域を全世界に拡大する。

## 3. 研究の方法

本研究は、以下の 6 つのフェーズから構成される。

- 航空機の時空間ネットワークを構築する
- 現状の航空機の運航の時空間的に分析する
- 時空間ネットワークの空間的構造および数理的特徴を分析する
- 都市圏間の OD 旅客数を推計するモデルを開発する
- 全世界を対象として都市圏間 OD 旅客数を推計する
- 航空機の運航パターンが変化した場合の影響を分析するツールを開発する

### (1) 航空機の時空間ネットワークの構築

まず、空港の位置（経緯度）を地理情報から取得するとともに、OAG の航空時刻表における空港とマッチングを行う。そして、発空港と着空港をリンクで結び、航空機の空間ネットワークを構築する。次に、同じ航空時刻表をもとにして、空間的には一つの空港を時刻別に分割し、空港での待ち合わせリンクな

どを適宜追加することによって、時空間ネットワークに拡張する。

### (2) 航空機の運航の時空間的分析

時空間分析の一例として、時空間ネットワーク上で最短経路探索問題を解くことで求まる、乗り継ぎ時の待ち時間も含めた最短所要時間が年間を通してどのように変化するか求める。別の例として、新規路線への参入や撤退が与える影響を評価するために、ある空港からの指定時間到達圏域の変化を調べる。

### (3) 時空間ネットワークの空間的構造および数理的特徴の分析

時空間ネットワークにおける位相幾何情報に基づいて、利便性や頑健性等を評価する。利便性の評価指標としては、直線（大圏）距離（時間）とネットワーク上の距離（時間）との比や差などが考えられる。また、頑健性については、ある空港が利用不可能となった場合に、どの程度の迂回を強いられるか、で評価する。

### (4) 都市圏間 OD 旅客数推計モデルの開発

交通計画の分野で多く用いられている四段階推計法をベースに、地理情報から道路延長や鉄道延長などのインフラの整備状況と観光資源に関する情報を抽出し、さらに人口や GDP などの社会統計データを加えて、2 つの都市圏間の OD 旅客数を推計するモデルを開発する。もし都市圏間の OD 旅客数を直接推計することが困難であれば、国間の OD 旅客数を推計した上で、フレーター法を用いて都市圏間の OD 旅客数を間接的に推計する。

### (5) 全世界の都市圏間 OD 旅客数の推計

OFOD 統計および (4) の OD 旅客数を時空間ネットワーク上の経路に配分し、そのリンク交通量が TFS 統計から得られる観測リンク交通量と一致するように、もとの OD 旅客数を修正する。対象とする都市圏が多くなると、考慮しなければならない制約条件が多くなり、計算の手間が増大するので、データ構造とアルゴリズムおよび実装方法を工夫することで計算速度を向上させて対応する。もし、増大する計算量に対処できない場合は、数理計画パッケージを利用する。

### (6) 航空機の運航パターンが変化した場合の影響を分析するツールの開発

Microsoft 社の Windows プラットフォームで稼働するスタンドアロンアプリケーションとして開発する。入力時は空間ネットワーク、修正前の OD 旅客数とし、これらは施策に応じて適宜変更できるようにする。そして、経路配分問題を解くことにより、経路ごとの

流動量を算出する。算出された流動量は地図上に図示されるとともに、表計算ソフトで集計できるように、結果をファイルで出力する機能を持たせる。

#### 4. 研究成果

##### (1) 航空機の時空間ネットワークの構築

###### ①フライトスケジュールデータ

世界の航空旅客便のフライトスケジュールデータとして、Official Airline Guide が提供している“MAX Bureau”を用いる。このデータは、各フライトに対し約 120 項目の情報を有している。購入する際には、その中から必要に応じて任意の項目を選ぶことができる。本研究で利用した主な項目は、以下の通りである。

- ・航空会社（コード，社名，便名）
- ・出発空港，到着空港（コード，都市，州，国，地域）
- ・出発時刻，到着時刻（ローカルタイム）
- ・出発曜日，到着曜日，有効期間
- ・飛行時間，空港待機時間，飛行距離
- ・乗り継ぎ（回数，空港）
- ・機材
- ・旅客便/貨物便の区別
- ・コードシェアの区別

データの期間は 2007 年 4 月 1 日から 9 月 30 日までの 6 ヶ月間で、総レコード件数は約 267 万である。原則として、1 レコードが 1 フライトを表すが、経由便の場合は、離着陸する空港のペアごとにレコードがある。例えば、SFO→ORD→CDG という経由便の場合、SFO→ORD、ORD→CDG、SFO→CDG という 3 つのレコードで表される。実際の航空機の移動を表すには、経由地で分割した SFO→ORD、ORD→CDG という 2 つのレコードのみを用いる必要がある。また、フライトの有効期間や出発曜日などによっても、1 フライトが複数のレコードに分かれていることがあるので注意が必要である。

###### ②時空間ネットワークの構築

フライトスケジュールデータには、出発/到着空港のコードが含まれているが、それらの空港の位置（経緯度）はわからない。本研究では、空港コードと経緯度が 1 対 1 に結び付けられた空港の空間データを別途用意し、フライトスケジュールデータに対して空間上の位置を特定する。

次に、時間軸上の位置を特定する。フライトスケジュールデータの離着陸時刻、曜日は現地のローカルタイムで表されている。したがって、全世界を対象として時空間ネットワークを構築するには、時差を考慮せねばならず、そのままでは処理が煩雑になってしまう。そこで、空港の離着陸時刻を予め世界標準時に補正しておく。本研究では American Digital Cartography 社の World Map におけ

る Time Zone ポリゴンを利用し、空港の経緯度をもとに点位置決定問題を解いて、それぞれの空港に時差を割り当てる。ローカルタイムに時差を加えることで世界標準時に補正し、時間軸上の位置を特定する。

そして、時空間ネットワークモデルについて説明する。まず、各フライトに対し、出発空港での離陸を表す出発ノード（図 1 の青色の点）と目的空港への着陸を表す到着ノード（図 1 の赤色の点）を作成し、それらを結ぶ飛行リンク（図 1 の黒色の矢印）を設定する。次に、空港ごとに出発ノードを時刻順に並べ、隣り合う出発ノードどうしに待ちリンク（図 1 の青色の矢印）を張る。さらにそれぞれの空港において、到着ノードと到着ノードから 60 分経過した最初の出発ノードとを結ぶ乗継リンク（図 1 の赤色の矢印）を張る。ただし、そのような出発ノードが存在しない場合は乗継リンクを張らない。ここで 60 分は、フライトを乗り継ぐ場合に必要最低時間として設定したパラメータである。時空間ネットワークモデルを図 1 に示す。

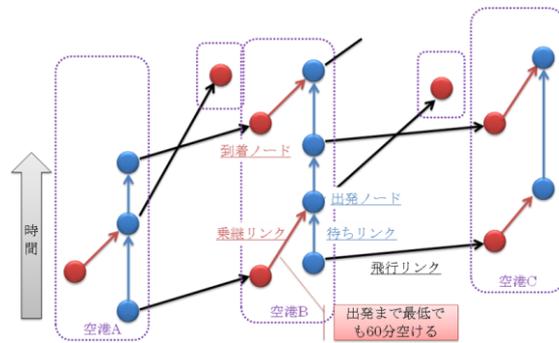


図 1. 時空間ネットワークモデル

時空間ネットワークモデルに基づき、時空間ネットワークを構築する。ただし、フライトスケジュールデータの全ての期間を対象とすると、ネットワークの規模（ノード数やリンク数）が膨大になってしまう。そこで、航空旅客便は 1 週間を単位としてスケジュールが組まれていることが多いことを考慮し、1 週間のフライトスケジュールデータに対して時空間ネットワークを構築する。例として、米国の国内線を対象として（アラスカ、ハワイを除く）、構築した時空間ネットワークを図 2 に示す。図 2 におけるリンクの色は提供座席数に基づいて設定されている。456 空港、約 19 万フライトに対して、ネットワークの規模を表すノード数は約 31 万、リンク数は約 50 万である。

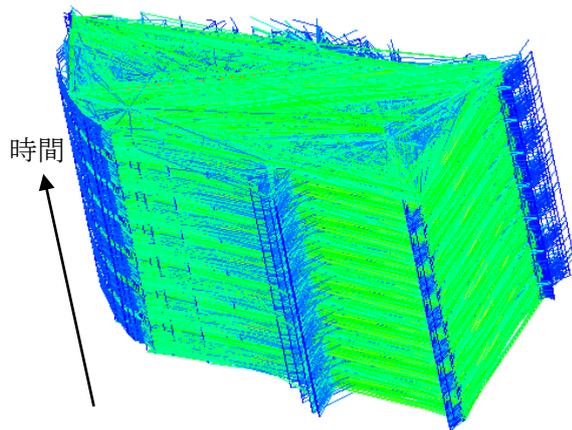


図 2. 米国内線の時空間ネットワーク

### (2) 航空機の運航の時空間的分析

国内線フライト時間について、日米間の比較を行う。2007年6月1日から6月7日までを集計した結果を図3に示す。図3から、以下のことが読み取れる。

- ・フライト数は米国のほうが圧倒的に多い
- ・米国では2時間を超えるようなフライトが多くみられる
- ・フライト時間でみた運航比率のピークは60分から90分であり、日米間に違いはない

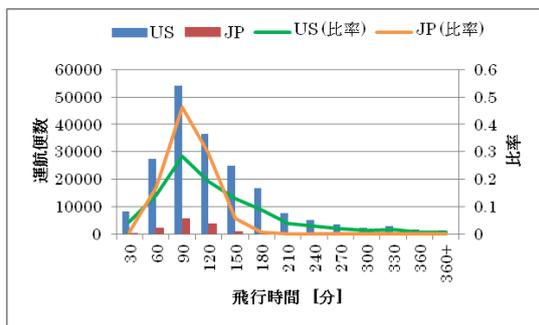
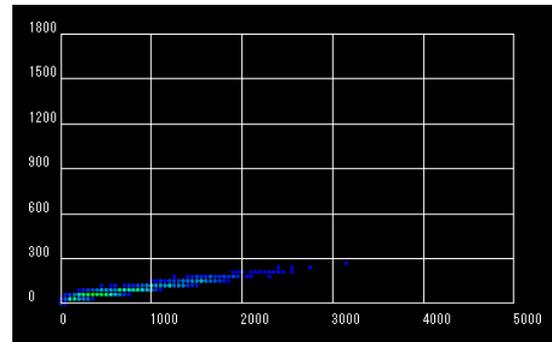


図 3. 国内線フライト時間の日米比較

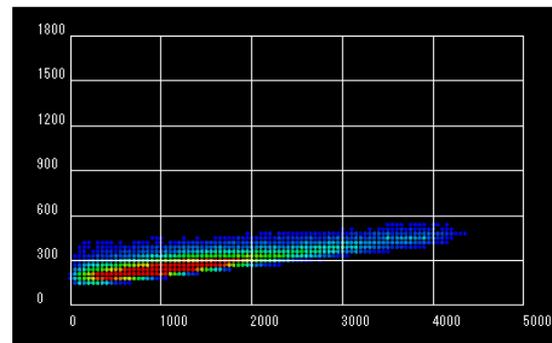
### (3) 時空間ネットワークの空間的構造および数理的特徴の分析

構築した北米本土の航空旅客便の時空間ネットワークを用いて、456空港に対する全ての空港ペアの大圏距離と最短旅行時間（ただし、A空港からB空港への移動と、その逆方向きの移動とを区別する）を算出する。ここで、最短旅行時間は、各空港ペアに対して毎正時に出発すると仮定して旅行時間を算出し、7日間で最短のものを最短旅行時間とする。また、移動は航空旅客便のみとし、他の交通機関の利用は考えないものとする。対象とした207,480 (=456×455) ペアのうち、旅行時間を算出できた（航空旅客便のみで行き来できた）のは181,067ペアであった。図4に乗り継ぎ回数別（直行便、乗り継ぎ1回、

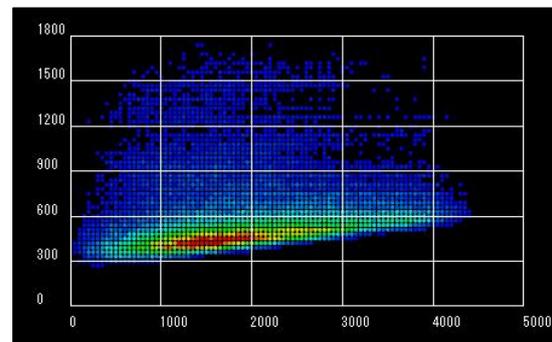
乗り継ぎ2回以上の3つに分類) に分類した大圏距離と最短旅行時間の同時分布を示す。赤い点でプロットされたところは該当する空港ペアが多く、青い点は該当する空港ペアが少ないことを表している。乗り継ぎ回数が増えるに従い、同じ大圏距離でも最短旅行時間のバラツキが大きくなっていることがわかる。



(a) 直行便のみ



(b) 乗り継ぎ1回



(c) 乗り継ぎ2回以上

図 4. 大圏距離と最短旅行時間との関係（横軸：大圏距離[km]，縦軸：最短旅行時間[分]）

### (4) 都市圏間 OD 旅客数推計モデルの開発

本モデルで使用する OFOD 統計および TFS 統計には、集計（報告）対象外の路線が存在することやデータの精度（信頼性）に疑問がある（例えば、ある路線のフライト数は数百にも関わらず、提供座席数や有償旅客数が零となっている）ことから、都市圏間の OD 旅客数を直接推計することは難しい。そこで、

都市圏間のデータを国間に集計し、国間のOD旅客数を推計した後に都市圏間に分解することとする。

また、TFS 統計は、フライトスケジュールデータから得られる座席数を用いて、その精度をある程度評価可能であることから、①TFS 統計に合致するようにOFOD 統計を補正し、②OFOD 統計に合致するようにOD 推計値を補正する、という2段階の数理計画モデルにより国間 OD 旅客数を推計する。モデルの概要は以下の通りである。

■Step1 (経路便旅客数の推計)

TFS 統計とOFOD 統計ならびにフライトスケジュールデータを用いて、国間で集計したOFOD 統計を補正するとともに、OFOD 統計を直行便と経路便に分解する。

■Step2 (第3国乗継ぎ旅客数の推計)

国間 OD 需要と補正したOFOD 統計データを用いて、国間 OD 需要を補正するとともに、国間 OD 需要を第3国での乗継便による移動と直接移動とに分解する。

このとき、国間 OD 需要の初期値は、OFOD 統計を基本とし、OFOD 統計がゼロである国間に対しては、国間距離、GDP をパラメータとした重力モデルにより算出する。

Step1 で定式化したモデル1を以下に示す。

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{k \in C} f_{ik}^2 \quad (1)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in C} y_{ijk} + f_{ik} = ofod_{ik} \quad \forall i, k \in C \quad (2)$$

$$\sum_{j \in C} y_{ikj} + \sum_{j \in C} y_{jik} + y_{i0k} = tfs_{ik} \quad \forall i, k \in C \quad (3)$$

$$0 \leq x_{ijk} \leq v_{ijk} \quad (4)$$

ここで、 $C$  は国の集合を表している。決定変数は国  $i$  を出発地とし、国  $j$  を経由して(第3国を経由しない場合を  $j=0$  で表す) 国  $k$  を到着地とする旅客数  $y_{ijk}$  ならびに国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とする旅客数の誤差  $f_{ik}$  である。また、モデルの入力となるパラメータは、国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とするTFS 旅客数  $tfs_{ik}$ 、国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とするOFOD 旅客数  $ofod_{ik}$ 、国  $i$  を出発地とし、国  $j$  を経由して国  $k$  を到着地とする旅客数の上限  $v_{ijk}$  である。ただし、 $v_{ijk}$  はフライトスケジュールデータから得られる経路便の提供座席数とする。

続けて、Step2 で定式化したモデル2を以下に示す。

モデル1と同様に、 $C$  は国の集合を表している。決定変数は国  $i$  を出発地とし、国  $j$  で乗継ぎして(第3国で乗継ぎしない場合を  $j=0$  で表す) 国  $k$  を到着地とする旅客数  $x_{ijk}$  ならびに国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とする旅客数の誤差  $e_{ik}$  である。

$$\min \sum_{i \in C} \sum_{k \in C} e_{ik}^2 \quad (5)$$

$$\text{s.t.} \sum_{j \in C} x_{ijk} + e_{ik} = od_{ik} \quad \forall i, k \in C \quad (6)$$

$$\sum_{j \in C} x_{ikj} + \sum_{j \in C} x_{jik} + x_{i0k} = ofod_{ik} \quad \forall i, k \in C \quad (7)$$

$$0 \leq x_{ijk} \leq u_{ijk} \quad (8)$$

また、モデルの入力となるパラメータは、国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を目的地とするOD 旅客数  $od_{ik}$ 、国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とするOFOD 旅客数  $ofod_{ik}$ 、国  $i$  を出発地とし、国  $j$  で乗継ぎして国  $k$  を目的地とする旅客数の上限  $u_{ijk}$  である。ただし、 $u_{ijk}$  は3カ国の地理的位置関係等をもとにして0もしくは $\infty$ と定める。

このモデル2で得られた  $od_{ik} - e_{ik}$  が国  $i$  を出発地とし、国  $k$  を到着地とするOD 旅客数となる。

このOD 需要を都市圏間に分割するために、各国の代表的な都市圏(推計人口100万人以上)を列挙し、2つの都市圏の人口の積に応じて按分する。ただし、全ての都市圏間に按分するのではなく、「国  $i$  の国内線、国  $i-k$  間の国際線、国  $k$  の国内線」の3路線で結ばれる都市圏間のみを対象とする(図5、表1)。

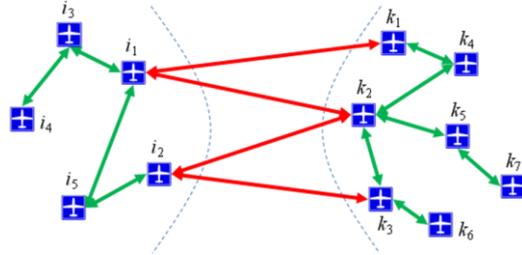


図5. 都市圏間へのOD 旅客の分解例

表1. 都市圏間へのOD 旅客の分解例  
(○: 分解の対象, ×: 分解の対象外)

＼	k <sub>1</sub>	k <sub>2</sub>	k <sub>3</sub>	k <sub>4</sub>	k <sub>5</sub>	k <sub>6</sub>	k <sub>7</sub>
i <sub>1</sub>	○	○	○	○	○	×	×
i <sub>2</sub>	×	○	○	○	○	○	×
i <sub>3</sub>	○	○	○	○	○	×	×
i <sub>4</sub>	×	×	×	×	×	×	×
i <sub>5</sub>	○	○	○	○	○	○	×

例えば、都市  $i_2$  から都市  $k_5$  へのOD 旅客数は、

$$\frac{pop_{i_2} \times pop_{k_5}}{\sum_{\text{分解対象都市 } p} pop_p \times pop_k} (od_{ik} - e_{ik}) \quad (9)$$

で与えられる。

(5) 全世界の都市圏間 OD 旅客数の推計

前項のモデルに対して、2007 年の OFOD 統計、TFS 統計、フライトスケジュールデータを入力として与え、都市圏間の OD 旅客数を推計する。対象とする国を当時の US ドル建て名目 GDP の上位 10 カ国（米国、日本、中国、ドイツ、イギリス、フランス、イタリア、カナダ、スペイン、ブラジル）とする。ただし、対象国以外の国を一つにまとめた仮想的な国を加えることにより、対象国以外へ（から）の旅客の移動も考慮することとする。結果を図 6 に示す。

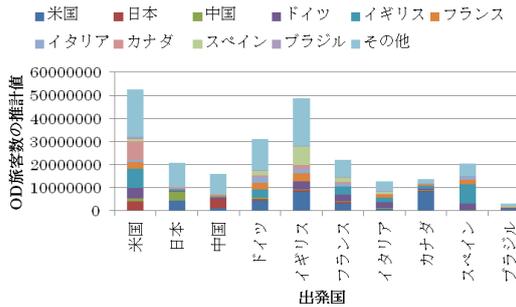


図 6. 国間 OD 旅客数の推計結果

全 OD 旅客は約 3 億 3767 万人（対象とした 10 カ国以外の国を出発国、到着国とする旅客を除く）である。そのうち、出発国と到着国以外の第 3 国で乗継ぎをする旅客は約 35 万人であると推計された。

次に、国間 OD 旅客を都市圏間に分解する一例として、日本からドイツへの旅客を取り上げ、推計を行う。日本を出発国、ドイツを目的国とする旅客は約 51 万人であり、そのうち、首都圏からデュッセルドルフ圏へは約 8.7 万人、ベルリン圏へは約 4.7 万人が移動すると推計された。

(6) 航空機の運航パターンが変化した場合の影響を分析するツールの開発

時空間ネットワークを入力として、任意の時点の航空機の所在を可視化する。その際、航空機の提供座席数もしくは推計される旅客数に応じて色分けして表示する。表示した様子を図 7 に示す。

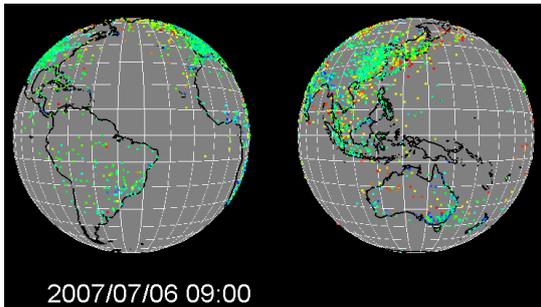


図 7. 航空機のフライトアニメーション

(7) 今後の課題

モデルから得られた都市圏間の OD 旅客数などの程度現実と一致しているのかを評価する必要がある。しかし、評価対象となる実績値を入手することは難しい。アンケート調査などをもとに実績値を別途推計する必要があると考えられる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ①鳥海重喜: 航空旅客便の時空間ネットワーク, 地理情報システム学会講演論文集, 査読無, Vol. 21, 2012, CD-ROM.

[学会発表] (計 3 件)

- ①Ririka Takahashi, Shigeki TORIUMI, and Azuma TAGUCHI: A Study to Analyze the Distribution of Transits Included in Aviation Trips Using Time-space Networks, Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) Annual Meeting 2011, Nov 14, 2011, Charlotte, NC, USA.
- ②Ririka Takahashi, Shigeki TORIUMI, and Azuma TAGUCHI: A Time-space Network Flow Model to Simulate the Trips on International Regular Airlines, 19th Triennial Conference of the International Federation of Operational Research Societies (IFORS), July 12, 2011, Melbourne, Australia.
- ③高橋莉里香, 鳥海重喜, 田口東: 航空における時空間ネットワークの構築, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2010 年秋季研究発表会, 2010 年 9 月 16 日, コラッセふくしま.

[その他]

- ①日本科学未来館「つながり」プロジェクトのジオ・コスモスで上映されるコンテンツに対して、研究成果を提供 (日本科学未来館プレスリリース)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鳥海 重喜 (TORIUMI SHIGEKI)  
 中央大学・理工学部・助教  
 研究者番号: 60455441

以上