

# 経済社会環境データを用いたリスク計量と最適化: 航空機ネットワークの経路問題への応用

佐藤彰洋 (京都大学) 澤井秀文 (情報通信研究機構)

Risk estimation and optimization using socioeconomic-environmental data

\*A.-H. Sato (Kyoto University), H. Sawai (NICT)

**Abstract**— This article proposes a multi-objective optimization procedure to find a balance among risk, economy, convenience and environmental load. To do so, we attempt to link socioeconomic data and environmental data. The risk is assumed to be described as multiplication in terms of hazard, exposed value and vulnerability. The hazard is a frequency for a specific kind of disaster to happen. The exposed value is a socioeconomic loss by a considered type of disaster. The vulnerability is a degree of technological protection to reduce a damage from the disaster. We use a method to estimate risks of world-wide air transportation system from tsunami run-up events. Moreover, we discuss a procedure to find trade-off of air transportation network among risk, economy, convenience and environmental load from a comprehensive point of view.

**Index terms**— Risk, extremal events, air transportation network, tsunami

## 1 背景

物理的観点から社会や経済の様々な分野に対してデータに基づき研究を行える環境が整いつつある<sup>1, 2)</sup>. このような研究はデータ中心科学と呼ばれる新しい研究分野を形成しつつある.

データ分析の最終的な目的は意思決定へのデータの活用であるので、データから得られた知見を用いることによる実環境での設計や計画への最適な利用がデータ分析の最終的なゴールとなる. しかしながら、現実世界における最適性の概念は評価関数が互いに相反するため現実的には多目的最適化問題の様相を呈する. これはトレードオフを考慮した多目的最適化問題である.

本研究では現実の世界航空機ネットワークにおけるリスクと経済性を評価する方法を提案し、これらの評価尺度からリスク、経済性、利便性を考慮した世界航空機ネットワークの経路問題に対する多目的最適化問題の定式化について議論する. ここでは、データに基づき空間リスクを定量的に計測する方法として物理的エクスポージャーに着目し、自然災害データおよび世界人口に関する 2.5 分刻みのメッシュデータと 1 分刻み標高データとを結合することにより世界空港の物理的エクスポージャーの空間分布の推計をおこなった.

自然災害に対する空間リスクの評価は近年損害保険や生命保険の分野において興味をもたれている<sup>3, 4)</sup>. Swiss RE は自然災害に対する都市の世界的なリスクのランキングを発表している<sup>3)</sup>, Munich RE は世界の主要都市のリスク指標を提案している<sup>4)</sup>. これらの値は世界的な自然災害による損害のリスクを分散するために利用されている.

本稿では、世界的な旅客機による移動のネットワークに対するリスクを分散しつつ、経済性と利便性を考慮した航空機ネットワークの構造について議論する. 最適化を行うために対象とする現実の航空機ネットワークの構造について調査を行い、稀頻度事象のリスクを評価する方法について考察する. 実際の世界航空機ネットワーク (72,406 路線) に基づく世界 3,425 空港の物理的エクスポージャーの推計を行い、重力モデルから計算さ

れる旅客数推定値を用いることにより、世界的な旅客機ネットワークのリスクと経済性について定量分析を行う.

本報告では自然災害として特に空港閉鎖期間が長期化する津波被害に着目し、過去 1000 年分の記録に関するカタログデータを用いて津波の被害に関係する物理的エクスポージャーについて調べる. 日本国内線の津波リスクに対する物理的エクスポージャーについて著者らは国土交通省航空輸送統計と総務省統計局国勢調査メッシュデータを用いた分析を行ってきた<sup>7)</sup>. 国内線で開発した方法を本研究では世界の航空機ネットワークへと拡張する.

本研究では、データリンケージと呼ばれる異なる目的で収集されたデータを相互に結合する方法を積極的に用いる. データリンケージを用いると単独でデータを利用するよりもより多くの情報を得ることができる<sup>5)</sup>. 本研究では、位置情報を用いることにより異なるデータの結合をおこなう.

## 2 リスク指標

Table 1 は旅客機運行に支障を来す出来事とその影響期間についてまとめたものである. この中で津波によるものは長期間の空港閉鎖を伴う自然災害である. 2011 年 3 月 11 日の東日本大震災で仙台空港が被災したときには、その後最初の旅客機の離発着がおこなえるまで約 1ヶ月の期間を要した.

Table 1: 旅客機運行に支障を来す出来事とその影響期間

原因	出来事	閉鎖期間	被害対象
自然災害	津波	長期間	空港
自然災害	地震	中期間	空港
自然災害	火山噴火	中期間	空港・路線
自然災害	洪水	中長期間	空港
自然災害	台風	短期間	空港・路線
自然災害	大雪	短期間	空港・路線
自然災害/人災	感染症	短中期間	空港・路線
人災	ストライキ	短期間	空港
事故	停電	短期間	空港

リスク  $R$  は

$$R = F \times Vul \times Pop \quad (1)$$

として計算される。ここで、 $R$  は人的被害の期待値 [killed person/year] であり危険の可能性 (Hazard) を表現している。 $Vul$  は脆弱性 (Vulnerability) に対応し 0 から 1 の間の値を取る因子である。 $Pop$  は考察する災害に影響を受ける人口 [person/event] であり、危険に晒される経済価値 (Exposed values) に対応する。特に、災害頻度  $F$  と考慮する災害イベントに影響を受ける人口  $Pop$  の積

$$PhExp = F \times Pop \quad (2)$$

は物理的エクスポージャー (Physical Exposure) と呼ばれ最悪状況 ( $Vul = 1$ ) における損害の期待値を表現する<sup>6)</sup>。

### 2.1 空港周辺の津波ハザードの計算

位置  $r$  における物理的エクスポージャー  $PhExp(r)$  は災害の起りやすさを示すハザード  $F(r)$  と災害が発生した場合に生じる経済的損失  $EV(r)$  の積

$$PhExp(r) = F(r)EV(r) \quad (3)$$

として表現される。空港  $i$  の年間利用者数  $Pass_i$  を危険にさらされる経済的価値であるとし、空港  $i$  での標高  $H_i$  以上の波高の津波が上陸する確率  $\Pr[X \geq H_i]$  から求められる頻度

$$F_i = \frac{N_{(i)}}{T} \Pr[X \geq H_i] \quad (4)$$

を用いて空港  $i$  における物理的エクスポージャー

$$PhExp_i = Pass_i F_i \quad (5)$$

により空港のリスクの推計を行った。ここで、 $N_{(i)}$  は空港  $i$  の  $D_{th}$  近傍において過去  $T$  期間の間に発生した津波の観測回数である。

津波波高の累積確率として一般化パレート分布 (Generalized Pareto Distribution)

$$\Pr(X \geq x; \xi, \mu, \beta) = \left(1 + \frac{\xi(x - \mu)}{\beta}\right)^{-\frac{1}{\xi}} \quad (6)$$

を仮定した。ここで  $\xi$  を形状パラメータ、 $\beta$  をスケールパラメータ、 $\mu$  を位置パラメータと呼ぶ。一般化パレート分布は片側分布であり、 $\xi = 0$  において指数分布

$$\Pr(X \geq x; \mu, \beta) = \exp\left(-\frac{x - \mu}{\beta}\right) \quad (7)$$

と一致する。

津波高さ  $x$  と発生頻度に対して注目点近傍における津波の観測データを用いて一般化パレート分布の母数推定を行った。今注目する空港  $i$  において、観測期間  $T$  の間に  $D_{th}$  圏内で確認される津波被害の総データ数を  $N_{(i)}$  とし、津波規模 (水位) に関するデータを  $x_k (k = 1, \dots, N_{(i)})$  とする。このデータからパラメータ推定値  $\hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta}$  が得られたとすると、標高  $H_i$  において津波の被害が発生する確率は

$$\Pr(X \geq H_i; \xi, \mu, \beta) = \left(1 + \frac{\hat{\xi}(H_i - \hat{\mu})}{\hat{\beta}}\right)^{-\frac{1}{\hat{\xi}}} \quad (8)$$

として与えられる。ある閾値  $\lambda$  以上の標本データ  $x_k (k = 1, \dots, N_{(i)})$  に対して一般化パレート分布のパラメータ ( $\xi, \beta, \mu$ ) の推定をおこなう方法は超過法 (Exceedance method) と呼ばれる。データ数が十分量ある場合にはパラメータは最尤推定法を用いて求められる。データ数が少ない場合には最尤法のパラメータ推定値が不安定になることため、確率重みモーメント法 (PWM) によりパラメータの推定を行う。その結果、空港  $i$  の頻度 (Hazard)  $F_i$  は

$$F_i = \frac{N_{(i)}}{T} \Pr(X \geq H_i; \hat{\xi}, \hat{\mu}, \hat{\beta}) \quad (9)$$

として計算できる。

## 3 重力モデル

### 3.1 空港周辺人口の計算

空港の周辺人口の計算には NASA Socioeconomic Data and Applications Center が提供する 2.5 分刻みの 2010 年時点での人口グリッドデータ<sup>8)</sup>を用いた。このデータには南緯 58 度から北緯 85 度までの 2.5 分 (約 5km) 格子における人口推計値 29,652,480 メッシュのデータが存在している。この人口メッシュデータと Air-line Route Mapper<sup>9)</sup> による 2014 年 6 月 28 日時点における空港ネットワーク (72,406 リンク) で表われる 3,425 空港の位置 (緯度と経度) とのデータを用いることにより、周辺の人口の計算をおこなった。Fig. 1 に幾つかの空港の周辺人口を空港からの半径  $d[\text{km}] (1 \leq d \leq 100)$  の関数として表わした図を示す。

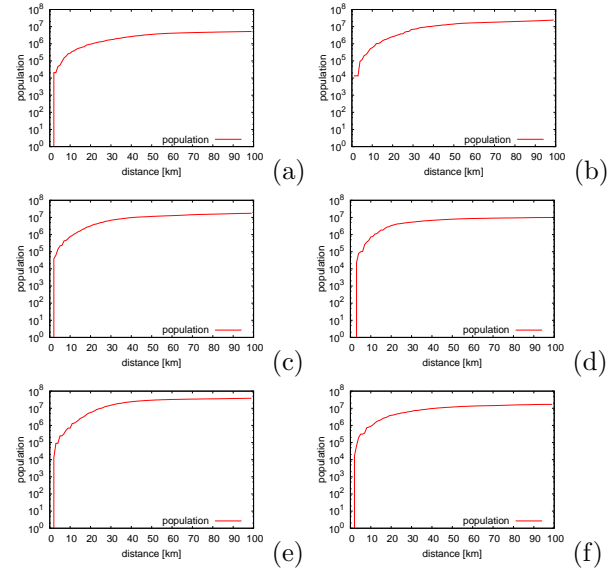


Fig. 1: (a) 米国・アトランタ空港, (b) 中国・北京空港, (c) イギリス・ヒースロー空港, (d) 米国・シカゴ空港, (e) 日本・羽田空港, (f) 米国・ロサンジェス空港

### 3.2 空港間移動量の推計と空港の exposed value の見積り

世界規模での空港間移動量のデータは現時点では存在していないため、重力モデルに基づくパラメータ推定を世界のトップ 30 空港の年間利用乗客数から推計した重力モデルとは輸送分野において仮定されるモデルであり、2 地点間の人の移動量が出発地点と到着地点の人口とその移動距離の関数として表現されると考えるモデルである。

一般的には、重力モデルでは空港  $i$  から空港  $j$  への移動量  $J_{ij}$  を

$$J_{ij} = cx_i^{\alpha_1}(d)x_j^{\alpha_2}(d)D_{ij}^{\alpha_3} \quad (10)$$

としてモデル化する。ここで、空港周辺人口  $x_i(d)$ ,  $x_j(d)$  と 2 点間距離  $D_{ij}$  とする。そして、空港  $i$  を利用する乗客数を

$$Pass_i = \sum_{j \in Edge_{out}(i)} \hat{J}_{ij} + \sum_{j \in Edge_{in}(i)} \hat{J}_{ji} \quad (11)$$

として近似する。ここで  $Edge_{out}(i)$  は空港  $i$  から出発するフライトの到着空港のリスト,  $Edge_{in}(i)$  は空港  $i$  に到着するフライトの出発空港のリストである。

ACI<sup>10)</sup> が発表する 2011 年世界のトップ 30 空港<sup>1</sup> の年間乗客数データ  $Pass_{t(i)}$  を用いて二乗誤差

$$S(c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, d) = \sum_{i=1}^{30} (Pass_{t(i)} - Pass_{t(i)}^*)^2 \quad (12)$$

を最小とするパラメータ  $(c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, d) = \arg \min_{c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, d} S(c, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, d)$  の推計を行った。ここで  $t(i)$  は利用順位  $i$  番目の空港インデックスを表わす。  $Edge_{out}(i)$  と  $Edge_{in}(i)$  は Airline Route Mapper の 2014 年 6 月 28 日における世界の航空経路情報 (3,425 ノード, 72,406 リンク) を用いることにより (Fig. 2 参照) 求められる。このパラメータ推定値  $(\hat{c}, \hat{\alpha}_1, \hat{\alpha}_2, \hat{\alpha}_3, \hat{d}) = (0.92266, 0.76133, 0.63470, -1.66617, 70)$  を用いることにより任意の空港  $i$  における利用乗客数を推定することができる。

Fig. 3 は推計値と実際の値との間の主要空港における関係を示したものである。実際の値と予測値との間で単回帰分析  $(y = a_0 + a_1x)$  をおこなったところ  $a_0 = 0.9994$ ,  $a_1 = 0.3330486$  となった。重力モデルによる流量予測についてはパラメータ推定における目的関数の多峰性や、説明変数の選択について課題が多い。

#### 4 計算結果

現在の航空機ネットワークの構造とパラメータ推定値を仮定することによって得られるリスクがどの程度であるかを推計してみる。

Fig. 4 は  $D_{th} = 20$  (km) 近傍とした場合の過去 1,000 年間に観測されている津波上陸記録から計算されたハザードを用い、空港流量として重力モデルからの推定値を使った場合の物理的エクスポージャーの空間分布である。赤は物理的エクスポージャーが 0 ではない空港

<sup>1</sup>ATL, ATLANTA(GA,US); PEK, BEIJING(CN); LHR, LONDON(GB); ORD, CHICAGO(IL,US); HND, TOKYO(JP); LAX, LOS ANGELES(CA,US); CDG, PARIS(FR); DFW, DALLAS/FORT WORTH(TX,US); FRA, FRANKFURT(DE); HKG, HONG KONG(HK); DEN, DENVER(CO,US); CGK, JAKARTA(ID); DXB, DUBAI(AE); AMS, AMSTERDAM(NL); MAD, MADRID(ES); BKK, BANGKOK(TH); JFK, NEW YORK(NY,US); SIN, SINGAPORE(SG); CAN, GUANGZHOU(CN); PVG, SHANGHAI(CN); SFO, SAN FRANCISCO(CA,US); PHX, PHOENIX(AZ,US); LAS, LAS VEGAS(NV,US); IAH, HOUSTON(TX,US); CLT, CHARLOTTE(NC,US); MIA, MIAMI(FL,US); MUC, MUNICH(DE); KUL, KUALA LUMPUR(MY); FCO, ROME(IT); IST, ISTANBUL(TR).

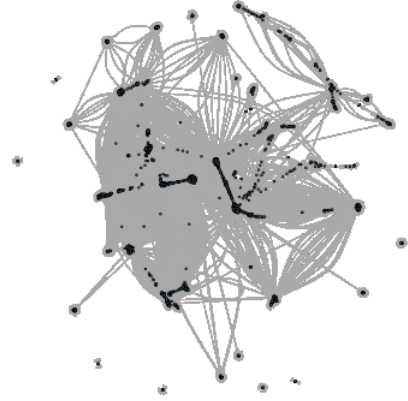


Fig. 2: 2014 年 6 月 28 日時点での世界の航空経路ネットワーク (3,425 空港, 72,406 経路) からなる。

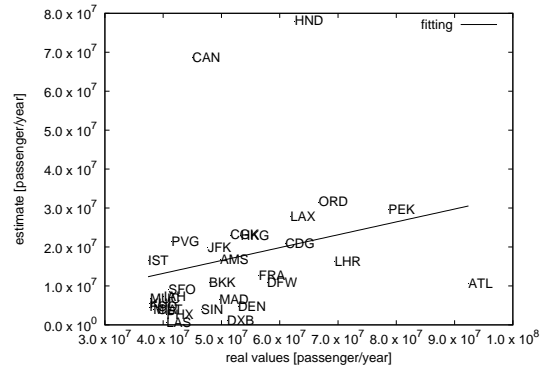


Fig. 3: 主要空港に対する重力モデルを用いた推定値 ( $d=70$ [km]) と実際の値との関係。

を表している。世界的には物理的エクスポージャーの高い空港は太平洋沿岸の空港に点在していることがわかる。

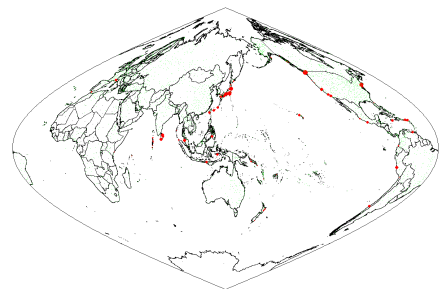


Fig. 4: 2014 年 6 月 28 日のフライトに基づき推計された世界の 3,425 空港の物理的エクスポージャーの空間分布。赤の丸が大きいほど大きな物理的エクスポージャーを有する空港であることを意味する。

#### 5 多目的最適化

リスク, 経済性, 利便性を考慮した世界航空機ネットワークの最適化問題において以下の 3 つの評価関数に対する拘束条件付き多目的最適化問題を定式化する。我々の制御可能変数は世界の航空機ネットワークに対するフライト数  $F_{ij}$  である。この  $F_{ij}$  の変化を通じて乗客

数  $J_{ij}$  が制御される。実際のリスク、経済性、利便性は乗客数により決定される。ネットワーク全体におけるリスクは航空機ネットワーク全体での物理的エクスポージャーの合計値とする。経済性は輸送される経路長当りの人数とする。さらに、利便性は乗り換え回数と経路長当りに輸送される乗客数の全経路に渡る平均値とする。

乗客数  $J_{ij}$  を調整するために制御できる意思決定は、ある2地点間  $i$  と  $j$  との間で旅客機を何機飛ばすかであり、これを  $F_{ij}$  として表記する。またどれぐらいの頻度で旅客機を飛ばすかを選択することができる。実際に路線を設定した後に乗客がその路線を利用しなければ乗客数は決まらないため、経路設計段階においては乗客数  $J_{ij}$  は予測値を用いる必要がある。さらに、2地点間の乗客数はどこまでも増やすことができるものではなく、2地点の人口に依存して実際に可能な流量の上限が存在している。ここでは、乗客数予測として重力モデルを用いることにより上限流量を設定する。そのため、世界航空機ネットワークにおける多目的最適化問題は、 $N$  を空港数、 $M$  をコネクション数として、不等制約付きの多目的最適化問題として、次式のように定式化する。

リスク：旅客機ネットワーク全体の物理的エクスポージャー

$$R(J_{ij}) = \sum_{i=1}^N F_i \left( \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} J_{ij} + \sum_{j \in \text{Edge}_{in}(i)} J_{ji} \right) \quad (13)$$

経済性：経路長当りの乗客数の平均

$$E(J_{ij}) = \frac{1}{M} \sum_i \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} \frac{J_{ij}}{F_{ij} D_{ij}} \quad (14)$$

利便性：経路長・乗り換え回数当りの乗客数の平均

$$C(J_{ij}) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i,j,i \neq j} \sum_{(k,l) \in \text{path}(i,j)} \frac{J_{kl}}{l_{kl} D_{kl}} \quad (15)$$

ここで、 $l_{ij}$  は空港  $i$  と  $j$  とを結ぶ最短ステップ数、 $\text{path}(i, j)$  は  $i$  と  $j$  を結ぶ最短経路の集合である。

これら3つの目的関数  $R, E, C$  を重力モデルで予想される乗客数  $\hat{J}_{ij}$  と  $\hat{F}_{ij}$  を拘束条件として最適化する問題として定式化する。すなわち、

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Objective functions :} \\ \max_{J_{ij}} (R^{-1}(J_{ij}), E(J_{ij}), C(J_{ij})) \\ \text{subject to :} \\ J_{ij} \leq J_{ij}^{max}, F_{ij} \leq F_{ij}^{max} \\ F(i) = \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} F_{ij} + \sum_{j \in \text{Edge}_{in}(i)} F_{ji} \leq F(i)^{max} \\ Pop(i) = \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} J_{ij} + \sum_{j \in \text{Edge}_{in}(i)} J_{ji} \leq Pop(i)^{max} \end{array} \right. \quad (16)$$

となる。

独立変数は、各フライトルート  $i \rightarrow j$  でのフライト数  $F_{ij}$  であり、乗客数  $J_{ij}$  は機材の大きさと座席占有率で決まるので、 $J_{ij} = J_{ij}(F_{ij})$  となる。これらの値にも上限値  $J_{ij}^{max}, F_{ij}^{max}$  が存在する。この関数は、ルート上のフライトあたりの乗客数の平均値として、過去の実績データから統計的に決定する。フライトルートのな

い場合は、重力モデルに基づいて  $F_{ij}, J_{ij}$  を推定する。制御パラメータとして、ネットワークの改編により、各空港  $i$  における処理可能なフライト数と乗客数には空港施設（滑走路数、収容面積、スタッフ数等）の制約から、必ずと上限があると考えられる。すなわち、 $F(i) = \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} F_{ij} + \sum_{j \in \text{Edge}_{in}(i)} F_{ji} \leq F(i)^{max}$ 、および  $Pop(i) = \sum_{j \in \text{Edge}_{out}(i)} J_{ij} + \sum_{j \in \text{Edge}_{in}(i)} J_{ji} \leq Pop(i)^{max}$  を制約条件として課す必要がある。

## 6 まとめ

本研究では世界規模での航空機ネットワーク、人口メッシュデータ、津波上陸カタログデータを用いることにより航空機ネットワークのリスクを計量した。さらに、航空機ネットワークにおけるリスク、経済性と利便性を考慮した多目的最適化の方法について議論した。今後の課題としては制約条件付きの多目的最適化問題を数値的に解き、3つの目的関数に対する有効フロンティアの計算が挙げられる。

## 謝辞

本研究は、日本学術振興会科研費基盤研究(C)(#25390152)の財政的支援を受けて行われています。また、本研究はHPCIシステム利用研究課題(統計数理研究所提供)の成果によるものです(課題番号:hp140076)。This research used computational resources of the HPCI system provided by (Institute of Statistical Mathematics) through the HPCI System Research Project (Project ID:hp140076).

## 参考文献

- 1) システム/制御/情報, Vol. 56, No. 10 「経済・社会物理学の展開-経済・社会システムのネットワーク構造と機能」特集号
- 2) システム/制御/情報, Vol. 57, No.3 「データ中心科学の発展」特集号
- 3) Swiss RE, Mind the risk: A global ranking of cities under threat from natural disasters [http://www.swissre.com/rethinking/climate\\_and\\_natural\\_disaster\\_risk/Mind\\_the\\_risk.html](http://www.swissre.com/rethinking/climate_and_natural_disaster_risk/Mind_the_risk.html)
- 4) Munich RE, Statistics and natural hazard risk for 50 selected megacities. [http://www.munichre.com/app\\_pages/www/@res/pdf/media\\_relations/press\\_releases/legacy/pm\\_2005\\_01\\_11\\_01\\_en.pdf](http://www.munichre.com/app_pages/www/@res/pdf/media_relations/press_releases/legacy/pm_2005_01_11_01_en.pdf)
- 5) 椿広計, 討論:統計的データリンケージの可能性と方法, <http://www.nii.ac.jp/userimg/workshop/h21/4-5.pdf>
- 6) P. Peduzzi, H. Dao, C. Herold, and F. Mouton, "Assessing global exposure and vulnerability towards natural hazards: the Disaster Risk Index", Nat. Hazards Earth Syst. Sci., Vol. 9, 1149-1159 (2009)
- 7) A.-H. Sato and H. Sawai, "Geographical Risk Assessment from Tsunami Run-up Events based on Socioeconomic-environmental Data and its Application to Japanese Air Transportation", Procedia CIRP, Vol. 19, 27-32 (2014)
- 8) Center for International Earth Science Information Network - CIESIN - Columbia University, and Centro Internacional de Agricultura Tropical - CIAT. 2005. Gridded Population of the World, Version 3 (GPWv3): Population Density Grid. Palisades, NY: NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC). <http://dx.doi.org/10.7927/H4XK8CG2>. Accessed 24 July 2014.
- 9) Airline Route Mapper <http://arm.64hosts.com>. Accessed 14 June 2013.
- 10) Airports Council International <http://www.aci.aero>