

就航機材を考慮した航空ネットワークの シミュレーション分析

井上寛規

要 約

今日我々の身の回りには様々なネットワークが存在している。インターネットや航空路線などはもちろんタンパク質の相互作用までもネットワークとして捉えられる。グラフ理論においてネットワークはノード(点)とリンク(線)の構造体として捉えられ、ノードを経済プレイヤー(個人, 団体, 都市, 国家), リンクを経済プレイヤー間のつながり(交通網, 情報通信網, 経済地域連携)とすることで経済的なネットワークを考えることができる。

本稿では経済ネットワークの具体例として航空ネットワークを取り上げる。航空ネットワークのモデル化にあたっては Jackson and Wolinsky の connections models に基づいて、ネットワークの利潤関数を定義する。ネットワークの利潤は各路線で得られる利潤の総和である。本稿の「航空ネットワーク最適化問題」では航空業界全体の利潤を最大化するネットワークを見つけ出すことであるが、現実のネットワークにおいて理論的に最適なネットワークを導出することは難しい。そこで、メタヒューリスティクスの1種である進化計算を用いた「航空ネットワーク最適化問題」の解法を提案する。具体的には PBIL (Population-Based Incremental Learning) にローカルサーチを併用したアルゴリズムを応用し、ネットワークの最適化シミュレーションを行う。シミュレーションの対象は日本の国内線、年間利用客 150 万人以上の 19 空港とする。

1. はじめに

今日我々の身の回りには様々なネットワークが存在している。インターネットや航空路線などはもちろんタンパク質の相互作用までもネットワークとして捉えられる。ネットワークの研究は 1736 年に Leonhard Euler によってグラフ理論と呼ばれる学問が創始されたことが契機となり始まったとされる。グラフ理論においてネットワークはノード(点)とリンク(線)の構造体として捉えられ、ノードを経済プレイヤー(個人, 団体, 都市, 国家), リンクを経済プ

レイヤー間のつながり(交通網, 情報通信網, 経済地域連携)とすることで経済的なネットワークを考えることができる。社会学や人類学, 組織論といった分野におけるネットワーク研究では社会的ネットワーク分析が採られることが一般的である。

経済学におけるネットワーク研究にはネットワーク形成ゲーム理論と呼ばれる理論があり, 多くの先行研究が蓄積されている。ネットワーク形成ゲーム理論の中でも Jackson and Wolinsky (1996) と Bala and Goyal (2000a) が代表的な研究として挙げられる。Jackson and Wolinsky (1996) では, 社会的なコミュニケーションネットワークを想定した connections model と研究者同士の共同研究ネットワークを想定した co-author model の2つのモデルについて, リンクが相手との合意の上で形成・分断される協力ネットワーク形成ゲームにおける分析がなされている。Bala and Goyal (2000a) では, リンク形成便益が費用を負担した方のノードのみが得られる一方モデル (one-way flow model) と双方のノードがリンク形成利得を得られる双方モデル (two-way flow model) の2つのモデルについて, リンクを相手との合意なしに形成・分断できる非協力ネットワーク形成ゲームにおける分析がなされている。これらの先行研究では完全 (complete) グラフ, 一極集中型 (star 型) グラフ, 空 (empty) グラフと言った特徴的なグラフが成立する条件について明らかにされている。しかしながら, 現実社会に存在するような多数の異質なノードから成るネットワークにおいては最適ネットワークが完全グラフ, 一極集中型グラフ, 空グラフといった特徴的なグラフに分類することができることは稀であり, 理論的な分析は困難である。本稿では多数の異質なノードから成るネットワークを分析対象として最適なネットワークの形状を明らかにする。

本稿では具体的な分析対象として航空ネットワークを取り上げる。近年, 航空業界は厳しい状況に立たされており, JAL の経営破綻も記憶に新しい。JAL は次々と赤字路線の廃止を発表しているが, その穴埋めを期待される ANA も経営状態は芳しくない。このような状況において利潤を最大化する最適な航空ネットワークを見出すことの意義は大変大きい。航空ネットワークでは乗り継ぎ便の影響を考慮する必要があり, 赤字路線を廃止することで他の路線の利潤にも影響が出る可能性がある。本来ならば, 路線の就航や廃止に際しては直行便だけを考えるのではなく乗り継ぎ便による旅客数の増加や減少といった影響も考慮に入れることが望ましい。そこで, 本稿では乗り継ぎ便からの影響を明示的に考慮した利潤関数を定義し, 利潤を最大化する最適な航空ネットワークを見つけだすことを試みる。航空ネットワークのモデル化にあたっては Jackson and Wolinsky (1996) の connections models をリンクで利潤が発生するモデルへと拡張し, ネットワーク価値関数を定義する。

ネットワーク設計問題はリンクの接続状態を決定する問題であり, リンクの接続状態を表す

変数を設計変数と呼ぶ。ネットワーク設計問題には設計変数が離散値をとるものと連続値をとるものがあり、本稿におけるネットワーク設計問題は前者の設計変数が離散値をとる問題である。例えば、設計変数が0-1の離散値をとるネットワーク設計問題はリンクの有無を考える問題と言い換えることができる。リンクの有無のみを考えるだけとはいえ、ネットワーク規模が大きくなると形成しうるネットワークの組合せ数は指数関数的に増え、コンピュータを用いても現実的な時間内では最適解を求めることが困難となる。これを組合せ爆発と呼び、厳密解を求める効率的なアルゴリズムが存在しない場合には、このような状況では近似解法やメタヒューリスティクスと呼ばれる手法が用いられる。そこで、本稿ではメタヒューリスティクスの1種である進化計算を用いた「航空ネットワーク最適化問題」の解法を提案する。

本稿の構成は以下のとおりである。第2節で航空ネットワークをモデル化する。第3節で「航空ネットワーク最適化問題」の進化計算手法による解法を述べる。第4節ではシミュレーション分析の結果を示す。最後に、第5節を本稿の帰結とする。

2. 航空ネットワーク

本稿では Jackson and Wolinsky (1996) の connections model に基づいて航空ネットワークをモデル化する。Jackson and Wolinsky (1996) では、各ノード (プレイヤー) が新たなリンク (関係) の形成と現在存在しているリンクの切断を戦略的に選択する状況下において、安定的なネットワークはどのようなものかを分析している。Jackson and Wolinsky (1996) によって提案されたネットワーク形成ゲーム理論は、様々な経済主体間の取引の分析を行う際の実質的なフレームワークとなり得る。例えば、国際貿易における自由貿易協定の締結分布の予見、最適な航空路線ネットワークの決定などの分析に応用されている。以下では、まず connections model における効用関数を説明した後、航空ネットワークのモデル化を行う。

2.1 connections model

本稿ではグラフ理論に従い、経済ネットワークを無向グラフ $G=(V, E)$ で表現する。グラフ G は、ノード集合 V とリンク (エッジ) 集合 E からなる。例えば、グラフのノードは、経済プレイヤー (個人, 団体, 都市, 国家) を表し、リンクは交通網, 情報通信網, 経済地域連携などを表す。リンク $e \in E$ は、ノードペア $e = \{i, j\}$ の集合である。これを便宜上 ij と表記する。ノード集合 V からなる完全グラフを K とすると、 $|V|$ 人のノード (プレイヤー) からなる経済ネットワークは、完全グラフ K の部分グラフ G として表現される。 w_{ij} を直接リンク

によってノード j からノード i が得られる固有の価値 (intrinsic value), c_{ij} をリンク ij の維持費用とすると, ノード i がグラフ G において得られる効用は以下ようになる。

$$u_i(G) = \sum_{j=1|j \neq i}^{|V|} \delta^{s_{ij}(G)} w_{ij} - \sum_{j=1|ij \in G}^{|V|} c_{ij} \quad (1)$$

$|V|$: V の濃度 (ノード数)

δ : 利得の残存率

$s_{ij}(G)$: グラフ G における ij 間の最短パス長

w_{ij} : ij 間のリンクでノード i がノード j から得る利得

c_{ij} : ij 間のリンク維持費用

ここで $\delta \in [0, 1]$ は利得の残存率である。 $s_{ij}(G)$ を ij 間の最短パス長とすると, $\delta^{s_{ij}(G)} w_{ij}$ はノード i が最短パスを通してノード j から得られる利得となる。 c_{ij} はリンク維持費用を表し, ij 間に直接リンクが存在する場合にのみ必要となる。グラフ価値 $u_{net}(G)$ (ネットワーク全体の効用) はネットワークに存在するすべてのノードの効用の総和とし, グラフ価値 $u_{net}(G)$ は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} u_{net}(G) &= \sum_{i=1}^{|V|} u_i(G) \\ &= \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1|j \neq i}^{|V|} \delta^{s_{ij}(G)} w_{ij} - \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1|ij \in G}^{|V|} c_{ij} \end{aligned} \quad (2)$$

以上をまとめると, 経済ネットワーク設計問題は以下の様に定式化できる。

$$\arg \max_{G \subseteq K_{|V|}} u_{net}(G) \quad (3)$$

2.2 航空ネットワークモデル

Jackson and Wolinsky (1996) の connections model は様々なネットワークを想定することができるものの具体性に欠けるという問題があった。そこで分析対象を航空ネットワークに絞ることとする。以下では, Jackson and Wolinsky (1996) の connections model に基づいて航空ネットワークをモデル化する。航空ネットワークモデルが connections model の効用関数と大きく異なる点は connections model がノードに着目しているのに対し, リンクに着目している点である。

航空ネットワークモデルではノードとリンクをそれぞれ空港, 路線と考える。航空ネットワークは往路または復路のみが就航されているケースは非常にまれであり, ここでは航空ネットワークをリンクの接続の向きを考えない無向グラフとする。無向グラフのリンク $e \in E$ は, 順序の

ないノードペア $e = \{i, j\}$ ($i, j \in V$ かつ $i \neq j$) の集合である。これを便宜上 ij と表し、 $ji = ij$ であるとする。 r_{ij} をリンク ij 間における収入、 c_{ij} をリンク ij の運行コストとすると、グラフ G においてリンク ij 間で得られる利潤は以下のようになる。

$$\pi_{ij}(G) = \begin{cases} r_{ij} - c_{ij} & \text{if } ij \in G \\ \delta^{s_{ij}(G)-1} r_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

$|V|$: ノード (空港) 数

δ : 1 回の乗り換え毎の収入の残存率

$s_{ij}(G)$: グラフ G における ij 間の最短パス長

w_{ij} : ij 間の直行便における収入

c_{ij} : ij 間の運行コスト

ここで $\delta \in [0, 1]$ は収入の残存率とする。 $s_{ij}(G)$ を ij 間の最短パス長とすると、 $\delta^{s_{ij}(G)-1} r_{ij}$ はノード i からノード j へ向かう乗客から得られる収入となる。 c_{ij} は運行コストを表し、 ij 間に直行便存在する場合にのみ必要となる。 p_{ij} を i, j 間の航空券価格、 q_{ij} を i, j 間の潜在旅客数とする。ここで潜在旅客数という言葉を使ったが、これは i, j 間に直行便が存在した場合の旅客数の意である。

$\delta_1 \in [0, 1]$ を乗り継ぎによる運賃残存率とし、乗り継ぎ回数が増えればなるほど乗客が支払わなければならない運賃は割引かれていくものとする。 $\delta_2 \in [0, 1]$ は直行便がないことによって目減りした旅客数の残存率である。つまり、 $1 - \delta_2$ を直行便がないことによる旅客数の減少率とすることができる。これにより目的地までの乗り継ぎ回数が増えるごとに乗客が徐々に減ってしまうことをモデルに組み込んでいる。

さらに収入を価格と旅客数の積として、 $r_{ij} = p_{ij} q_{ij}$ 、 δ を乗り継ぎ便の運賃残存率 δ_1 と乗り継ぎを要することによる旅客残存率 δ_2 の積 $\delta = \delta_1 \delta_2$ と考えることで、収入を航空券価格と旅客数に分けて式 (4) は次のように書きかえることができる。

$$\pi_{ij}(G) = \begin{cases} p_{ij} q_{ij} - c_{ij} & \text{if } ij \in G \\ \delta_1^{s_{ij}(G)-1} p_{ij} \cdot \delta_2^{s_{ij}(G)-1} q_{ij} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

δ_1 : 乗り継ぎによる運賃残存率

δ_2 : 直行便がないことによって目減りした旅客数の残存率

p_{ij} : i, j 間の航空券価格

q_{ij} : i, j 間の旅客数

本稿では connections model に従って直行便が存在する場合にのみ運行コスト c_{ij} がかかるものとし、直行便が存在しない場合には運行コスト c_{ij} はかからないものとしている。当然間接リンクにも運行コストがかかるとすることもできるが、乗客が増加したとしても新たに便を増やさずにまかないきれると考えるものとする。航空機は常に満席で運航しているわけではなく、主要路線でも搭乗率は 60% 台である。

次に運行コスト c_{ij} について定義する。 c_{ij} を i, j 間の路線 1 年間の運行コストとし、富川ら (2010) のコスト関数を基にして以下の式で求める。

$$c_{ij} = OP_{ij} \cdot FY_{ij} \quad (6)$$

OP_{ij} : i, j 間のフライト 1 便当たりのコスト

FY_{ij} : i, j 間の年間便数

$$OP_{ij} = W(d_{ij} \cdot FU) + B \quad (7)$$

W : 乗客数による重量の変化

d_{ij} : i, j 間の直線距離

FU : 1 km あたりの燃料費

B : 空港着陸料

$$FU = LMX^k (FP + TAX) / RMX^k \quad (8)$$

LMX^k : 航空機 k の最大燃料積載量

FP : ジェット燃料 1 リットルあたりの価格

TAX : 1 リットルあたりの燃料税

RMX^k : 航空機 k の最長航続距離

$$W = \frac{WE^k + PF_{ij} \cdot PW}{WE^k + PMX^k \cdot PW} \quad (9)$$

WE^k : 航空機 k の運用自重

PF_{ij} : i, j 間の 1 便当たりの乗客数

PMX^k : 航空機 k の座席数

PW : 乗客 1 人当たりの重量

グラフ価値 $\pi_{net}(G)$ (航空ネットワーク全体の利潤) はネットワークに存在するすべての路線の利潤の総和とし、グラフ価値 $\pi_{net}(G)$ は次式で与えられる。

就航機材を考慮した航空ネットワークのシミュレーション分析

$$\begin{aligned}\pi_{net}(G) &= \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1}^{|V|} \pi_{ij}(G) \\ &= \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1 \mid j \neq i}^{|V|} \delta^{s_{ij}(G)} r_{ij} - \sum_{i=1}^{|V|} \sum_{j=1 \mid ij \in G}^{|V|} c_{ij}\end{aligned}\tag{10}$$

式 (4) では ij 間に直接リンク (直行便) が存在する場合としない場合とで得られる利潤が異なるが、直行便が存在する場合には最短パス長 $s_{ij}(G)=1$ であり、 $s_{ij}(G)-1=0$ であるので $\delta^{s_{ij}(G)-1}r_{ij}$ としても問題は無い。式 (10) と式 (2) は の指数が $s_{ij}(G)-1$ であることを除けば同じ構造であり、航空ネットワークモデルが connections model の純粋な応用であることがわかる。

以上をまとめると、航空ネットワーク最適化問題は以下の様に定式化できる。

$$\arg \max_{G \subseteq K_{|V|}} \pi_{net}(G)\tag{11}$$

3. 「航空ネットワーク最適化問題」の進化計算手法による解法

非対称なノード (プレイヤー) においてネットワーク全体の効用を最大化するネットワークを理論的に分析することは非常に困難である。そこで本稿ではヒューリスティックスの1種である進化計算手法 PBIL (Population-Based Incremental Learning) にローカルサーチを併用したアルゴリズムを応用し、ネットワークの最適化を試みる。アルゴリズムの基本的な動作は通常の PBIL とほぼ同じであるが、確率ベクトルの更新過程に違いがある。その違いとは確率ベクトルを更新する前に選択された優良個体に基づいて貪欲探索を行う点である。貪欲探索を行った結果、元の優良解よりもさらに良い解が見つければ元の優良解と置き換える。ただし、貪欲探索はハミング距離 1 の範囲を近傍として行うものとする。以下で図 1 にアルゴリズムの模式図を示し、各 Step の処理についての詳細な説明を行う。

Step 1: 確率ベクトル \vec{P} の初期化

確率ベクトル $\vec{P}=(p_1, p_2, \dots, p_{nbit})$ とは遺伝子の各ビットが 1 である確率を示すものであり、探索の開始時にはすべて 0.5 とする。 $nbit$ とは遺伝子長を表し、対象とする問題の規模に合わせて変わる。以降、 t 世代 (サイクル) における確率ベクトルを $\vec{P}^t=(p_1, p_2, \dots, p_{nbit})$ と表記する。

Step 2: 確率ベクトル \vec{P} に従い、個体群を生成

各個体は遺伝子と呼ばれる 0, 1 のビットストリングで表現され、確率ベクトルは 1 の発現確率を単純にベクトルで記述したものである。

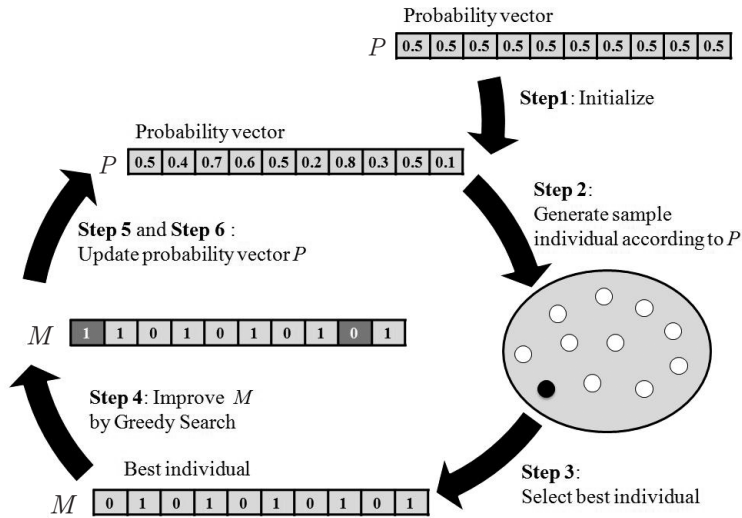


図1 アルゴリズムの模式図

Step 3: 個体群を評価し、優良個体を選択

個体群を評価し、個体群の中で最良の適合度を持つ優良個体を選び出す。選び出された優良個体を $M^t = (m_1^t, \dots, m_{nbit}^t)$ と記す。ここで目的関数値ではなく適合度という言葉を使っているのは、最小化問題か最大化問題かによって目的関数値の良し悪しが異なるためである。最小化問題であれば目的関数値が小さいほど適合度は高いとし、最大化問題であれば目的関数値が大きいほど適合度は高いとする。

Step 4: 選択された優良個体に基づいて貪欲探索

まず、 M^t の遺伝子を 1 ビットだけ変化させた個体群を生成する。次に、新たに生成した個体群の評価値を計算し、元の M^t と新たに生成した個体群のうちで最良の評価値を持つ個体を新たな M^t とする。このとき元の M^t が最良であった場合は貪欲探索を打ち切る。それ以外の場合は新たな M^t を基に再度貪欲探索を行う。ただし、再度貪欲探索を行う際には PBIL から受け取った元々の M^t からすでに変化されているビットを再び変化させることを禁じている。これは貪欲探索を行う回数を制限するためであり、このルールの下での貪欲探索の繰り返し回数は最大でも遺伝子長分である。このようなルールを設けた理由は、ビットの変化を無制限にすると貪欲探索を行う回数が膨大なものとなり、最悪の場合には現実的な時間内での探索がなされないことも考えられるためである。評価値の向上または変化可能なビットが無くなった時点で貪欲探索は打ち切られる。

Step5: 確率ベクトルの更新

貪欲探索により改善された優良個体 M^t を用いて確率ベクトルをヘブ則に従い更新する。

$$p_i^{t+1} = (1.0 - LR)p_i^t + LR \cdot m_i^t \quad (12)$$

ここで LR は学習率 (Learning Rate) を表す。この値が大きいと、その世代の優良個体へと急速に収束することになる。初期収束を回避するためには、小さい値に設定すればよい。ただし、 LR の値が小さくなればなるほど探索に必要な世代数が多くなるため、極端に小さな値に設定することは探索の妨げとなる。

Step6: 突然変異

一定の突然変異確率で突然変異を起こし、Step5 で更新した確率ベクトル \vec{P} の各要素の値を次式に従ってさらに変更する。ここで MR は突然変異による変化の度合い、一様乱数 $rand \in \{0, 1\}$ とする。 MR が大きいほど、確率ベクトルは大きく変化する。

$$p_i^{t+1} \leftarrow (1.0 - MR)p_i^{t+1} + rand \cdot MR \quad (13)$$

Step7: Step2 ~ Step6 の繰り返し

Step2 ~ Step6 の処理を終了条件が満たされるまで繰り返す。PBIL では Step2 ~ Step6 の処理を一度繰り返すことを1世代と定義している。通常、終了条件としては、設定した世代数を経た場合または収束判定により探索の収束が認められる場合に処理を終了するという条件が採用される。

本アルゴリズムを設計変数が0-1の離散値をとる「ネットワーク最適化問題」に適用する場合には図2のようにグラフを遺伝子と対応させる必要がある。グラフを隣接行列で表し、隣接行列を遺伝子型に対応させることでグラフを遺伝子で表現することができる。今、グラフ G (航空ネットワーク) の隣接行列 A とする。隣接行列 A とは $|V| \times |V|$ の行列であり、 a_{ij} は行列 A の第 i 行 j 列の要素を表すものとする。頂点 i, j 間に直接リンク (エッジ) が存在する場合は $a_{ij} = 1$ とし、それ以外の場合は $a_{ij} = 0$ とする。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } ij \in G \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

G-PBIL で設計変数が0-1の離散値をとる「ネットワーク最適化問題」を解く場合、遺伝子長 $nbit = |V|(|V| - 1)/2$ と設定する。アルゴリズムの Step3 において遺伝子を評価する際に、図2のように遺伝子をグラフに直して式(10)を使ってグラフ価値を算出する。算出したグラフ価値を遺伝子の適合度 (評価値) とすることによって、遺伝子を最適化することがグラフを

最適化することになる。

本稿 4.2 節のシミュレーションでは 3 種の就航機材を考慮した航空ネットワークの最適化を試みているが、図 3 のようなコーディング方法で G-PBIL を適用している。一つのリンクを表現するのに遺伝子座を 2 ビット用いる。路線の種類を 0~3 の 4 種類と考え、0:リンク無し、1:小型機、2:中型機、3:大型機とする。図 3 のグラフでは点線で 1:小型機、破線で 2:中型機、実線で 3:大型機を表している。0~3 までの路線の種類を 2 進数で表現することにより、遺伝子の形でグラフを表現することができる。一つのリンクを表現するのに 2 ビット使用するため、問題を解くために必要な遺伝子長は $nbit = |V|(|V| - 1)$ となる。

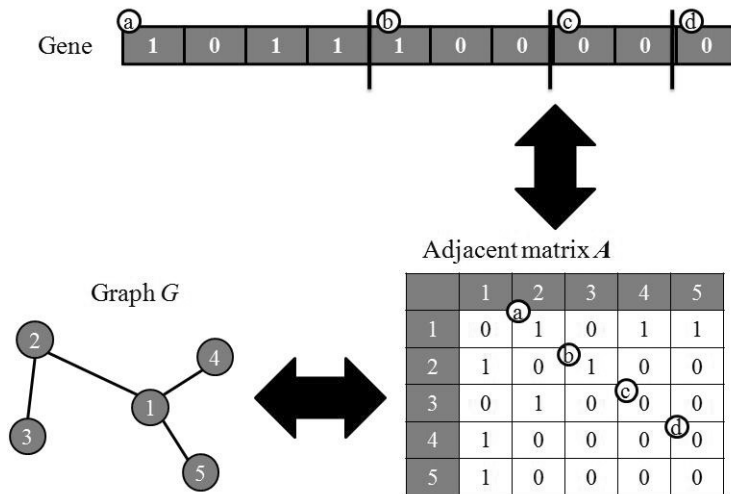


図 2 0-1 設計変数のネットワークグラフのコーディング

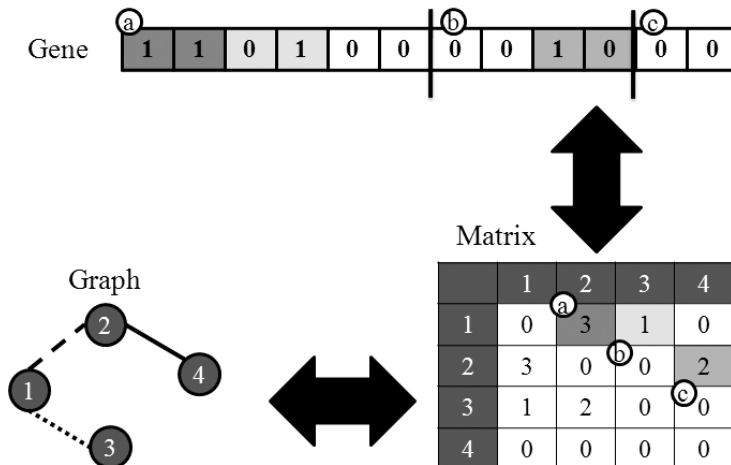


図 3 3 種の就航機材を考える場合のネットワークグラフのコーディング

4. 最適航空ネットワークのシミュレーション分析

ここでは提案アルゴリズムを使ってシミュレーションを行う。シミュレーションの対象は日本の国内線、年間利用客 150 万人以上の 19 空港とする。この 19 空港間で就航されている既存のネットワークを図 4 に示す。

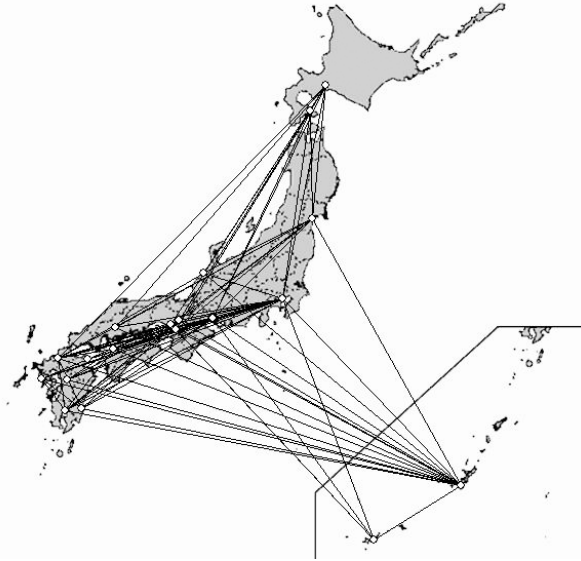


図 4 対象 19 空港の既存ネットワーク

4.1 使用データ

シミュレーションにあたり、 i, j 間の航空券価格 p_{ij} 、 i, j 間の潜在旅客数 q_{ij} 、空港間の直線距離 d_{ij} といったデータが必要となる。まず、 i, j 間の航空券価格 p_{ij} であるが、現在就航されている路線に関しては 1 つ 1 つ航空券価格を調べていけば済む。しかし、現在就航されていない路線に関してはそういったわけにはいかない。そこで現在就航されていない路線の航空券価格は ij 間の直線距離 d_{ij} を説明変数として次の回帰式によって推定する。

$$p = \alpha + \beta d \quad (15)$$

ANA の航空券価格と Google Map に基づく直線距離を用いた単回帰分析を行い、 $\alpha = 15562.75$ 、 $\beta = 21.21$ で相関係数 0.89、決定係数 0.80 と統計的に有意な結果を得た。

次に i, j 間の旅客数 q_{ij} について考える。既存の路線間の旅客数に関してはデータが存在し、国土交通省の『航空輸送統計調査 年報』で知ることができる。現在就航されていない旅客数

q_{ij} は航空の需要予測ではよく用いられる重力モデルによって推定することを試みる。三浦 (2006) によると旅客数は次式によって推定でき、 $a=0$ 、 $b=2.631 \times 10^{-8}$ で相関係数 0.806 となる。ただし、これは距離 300 km 以上の路線に限ってのことであり、距離 300 km 未満の路線の旅客数 q_{ij} は 0 とする。

$$q_{ij} = b \frac{pop_i \cdot pop_j}{d_{ij}^a} \quad (16)$$

pop : 空港の割り当て人口

説明変数として使用するデータは空港間の直線距離 d_{ij} と発着空港それぞれの割り当て人口である。ここで各空港の割り当て人口が必要となるが次のような方法を用いることとする。空港を母点 (ノード) としてポロノイ図を描き、ポロノイ領域に基づいて各空港の割り当て人口を求める。本稿では、各空港を母点 (ノード) としてポロノイ図を描いている。つまり、各地域の住民は最も近場の空港を利用すると考えているのである。本稿では朝日新聞社『民力』エリア分けの図と人口データから、各空港の割り当て人口 (表 1) を求めたが、こういった規模の空港までを母点とするので大きく変わってきてしまう問題がある。そこで実データが存在する路線に関しては『航空輸送統計調査年報』のデータをそのまま使い、重力モデルによって推定したデータは補完的に利用する。

費用関数に使用する各データはジェット燃料価格 $FP=50$ 円/リットル、航空機燃料税 $TAX=26$ 円/リットル、着陸料 $B=40$ 万円、乗客 1 人当たりの重量 $PW=100$ kg とする。

表 1 19 空港の割り当て人口

(単位: 万人)		
Airport name	Airport code	pop
1. Haneda	HND	3302.30
2. New Chitose	CTS	46.73
3. Osaka	ITM	1422.54
4. Fukuoka	FUK	312.09
5. Naha	OKA	134.70
6. Chubu	NGO	980.25
7. Kagoshima	KOJ	213.79
8. Kansai	KIX	188.20
9. Kumamoto	KMJ	184.38
10. Miyazaki	KMI	66.07
11. Hiroshima	HIJ	225.93
12. Sendai	SDJ	220.16
13. Kobe	UKB	337.01
14. Matsuyama	MYJ	122.93
15. Nagasaki	NGS	147.90
16. Komatsu	KMQ	98.09
17. Ishigaki	ISG	1.45
18. Oita	OIT	100.98
19. Hakodate	HKD	49.64

4.2 最適化シミュレーション

1) 就航機材を1種のみとした場合のシミュレーション

まず、使用する機材は1種類のみとしてシミュレーションを行う。使用する機材のデータは主要機材の平均値から算出した値(表2)とする。シミュレーションにより発見された発見された最適ネットワーク候補を図5~図8に示す。

表2 機材データ

	ボーイング 747-400D	ボーイング 777-300	ボーイング 777-200	平均	使用した値
座席数 2クラス	524	451	400	458.33	450
最大燃料積載量 (リットル)	216840	171160	117335	168445.00	150000
最長航続距離 (km)	13450	11135	9696	11427.00	10000
運用自重 (kg)	181000	160000	138000	159666.67	150000

(出典：日本航空機開発協会『平成21年度民間航空機関連データ集 別冊 主要民間輸送機の概要』より作成)

運賃割引率($1-\delta_1$)と旅客減少率($1-\delta_2$)が小さくなるほど、羽田空港に一極集中化することがシミュレーションの結果明らかとなった。運賃割引率($1-\delta_1$)と旅客減少率($1-\delta_2$)が小さくなるとは、すなわち $\delta=\delta_1\delta_2$ が大きくなることである。 δ が大きくなるほどネットワークが一極集中化することは先行研究で明らかとされていることに一致する。図5から図6への変化は乗り継ぎによる旅客の減少率($1-\delta_2$)が小さくなった場合の変化である。このとき本州から那覇空港への直行便が2本減少していることがわかる。図5から図7への変化は乗り継ぎ便の価格の割引率($1-\delta_1$)が小さくなった場合の変化である。本州から那覇空港への直行便が4本減少しており、本州の空港間の直行便も多数減っていることがわかる。さらに図5から図8への変化は乗り継ぎによる価格の割引率と旅客の減少率が共に小さくなった場合の変化である。図5から図7への変化と違いは見られない。

すなわち、運賃割引率($1-\delta_1$)と旅客減少率($1-\delta_2$)では運賃割引率の値の方が最適ネットワークに与える影響が大きいと言える。乗り継ぎ便の運賃割引率($1-\delta_1$)を小さくすれば航空会社は乗り継ぎ便(間接リンク)からも大きな利潤を得ることができるため、直行便の本数が減るものと思われる。しかしながら、運賃割引率と旅客減少率には負の相関関係があることが予想され、運賃割引率を小さくすれば旅客減少率が大きくなるであろう点には注意が必要である。

また、図5～図8の最適ネットワーク候補のグラフ価値はすべて既存のネットワークのグラフ価値を上回っている。最適ネットワーク候補のグラフには既存のネットワークに比べ、シミュレーションによる最適ネットワークは路線数が少ない傾向がある。それが顕著に見られるのが石垣空港に関する路線である。既存のネットワークでは本州の各空港と石垣空港の間に直行便



図5 $\delta_1 = 0.50, \delta_2 = 0.50$ の最適ネットワーク候補



図6 $\delta_1 = 0.50, \delta_2 = 0.90$ の最適ネットワーク候補

就航機材を考慮した航空ネットワークのシミュレーション分析

が存在するが、最適ネットワーク候補のグラフでは那覇空港を介した乗り継ぎ便しか存在しない。これは石垣空港と本州の空港間の距離が遠く、直行便をなくすことで費用削減が期待できることを示唆している。ただし、今回の実験は空港周辺の住民の数を利用して旅客数を推定しており、石垣島が観光地であることは考慮できていない。羽田 - 石垣空港間は搭乗率が高いこ



図7 $\delta_1 = 0.90, \delta_2 = 0.50$ の最適ネットワーク候補



図8 $\delta_1 = 0.90, \delta_2 = 0.90$ の最適ネットワーク候補

とで知られており、路線を廃止することは現実的ではないであろう。この点に関しては、費用関数に搭乗率を組み込み、路線毎に異なる搭乗率を持つようにするなどの改善が考えられる。

2) 就航機材を3種のうちから選択できる場合のシミュレーション

次に就航する機材を考慮したシミュレーションを試みる。路線の種類に0~3の4種類を考える。0:リンク無し, 1:小型機, 2:中型機, 3:大型機とする。路線の種類毎の使用機材のデータは表3に示す。シミュレーションの結果は図9~図12である。それぞれ点線は1:小型機, 破線は2:中型機, 実線は3:大型機を表す。

図9から図10への変化は乗り継ぎによる旅客の減少率 $(1-\delta_2)$ が小さくなった場合の変化である。図9から図11への変化は乗り継ぎによる価格の割引率 $(1-\delta_1)$ が小さくなった場合の変化である。本州から那覇空港への直行便が2本減少していることがわかる。さらに図9から図12への変化は乗り継ぎによる価格の割引率と旅客の減少率が共に小さくなった場合の変化である。このとき本州から那覇空港への直行便は1本減少しており、新千歳~福岡空港間など本州の空港間の直行便は減少している。

就航する機材を3種類のうちから選択可能なシミュレーションにおける共通の結果は、羽田空港に関わる路線のみ大型機・中型機が運行される路線が見られる点である。また、使用する機材を1種類のみとした場合と同じく、運賃割引率 $(1-\delta_1)$ と旅客減少率 $(1-\delta_2)$ が小さくなるほど、羽田空港に一極集中化することがわかる。ただし、使用する機材を1種類のみとした場合に比べ、減少する直行便の数は少ない。これは適切な機材を選ぶことにより運行コストが抑えられ、直行便で得られる利潤が増加したためと思われる。適切な機材による運行は航空会社の利潤の増加だけでなく、旅客にとっての利便性の向上にもつながると言えるだろう。

表3 路線の種類毎の使用機材

No.	1: 小型機		2: 中型機	3: 大型機		
機材名	マクドネル・ダグラス MD-90	ボーイング 737-800	エアバス A 300-600R	ボーイング 777-200	ボーイング 777-300	ボーイング 747-400D
座席数	160		231	458		
最大燃料積載量 (リットル)	24060		62000	168445		
最長航続距離 (km)	5027		6945	11427		
運用自重 (kg)	40350		89500	159667		

(出典: 日本航空機開発協会「平成21年度民間航空機関連データ集 別冊 主要民間輸送機の概要」より作成)

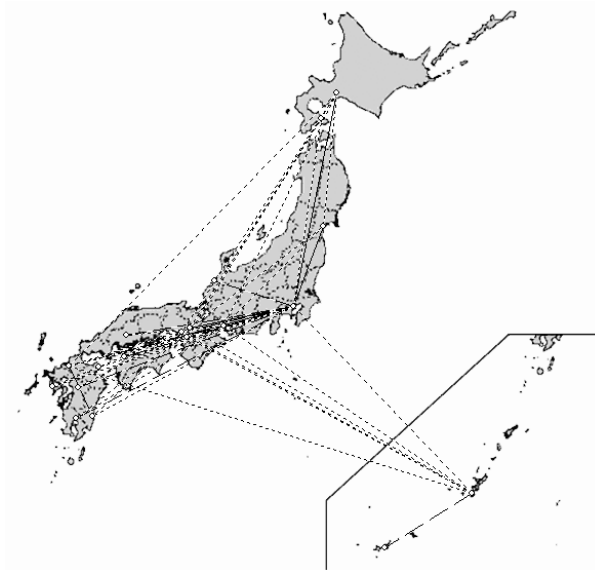


図9 $\delta_1 = 0.50$, $\delta_2 = 0.50$ の最適ネットワーク候補

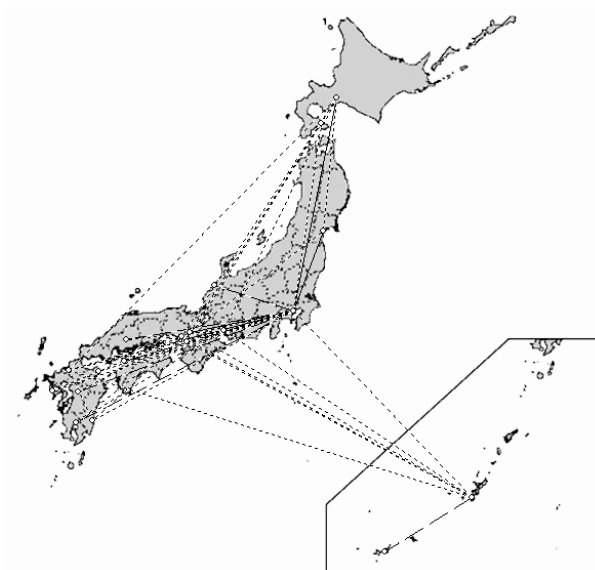


図10 $\delta_1 = 0.50$, $\delta_2 = 0.95$ の最適ネットワーク候補

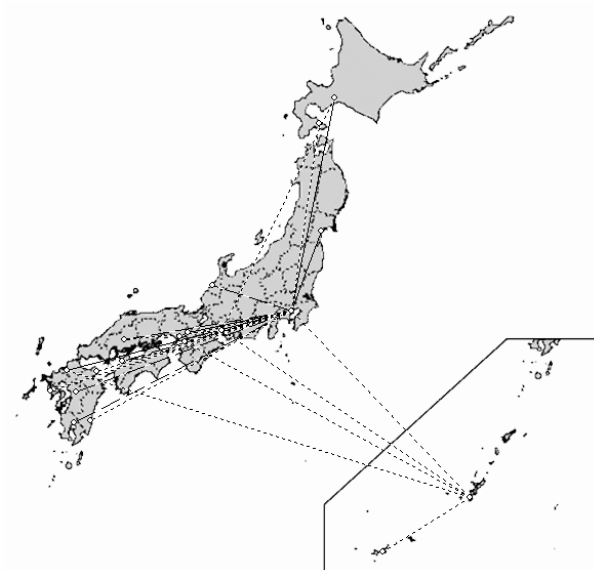


図 11 $\delta_1 = 0.90$, $\delta_2 = 0.50$ の最適ネットワーク候補



図 12 $\delta_1 = 0.90$, $\delta_2 = 0.95$ の最適ネットワーク候補

5. おわりに

本稿では Jackson and Wolinsky (1996) の connections model に基づいて航空ネットワークのモデル化を行った。さらに構築したモデルを用いて既存の航空路線における最適ネットワークを導出した。シミュレーションの結果、現実的なネットワークが導出されたことから connections model が航空路線網分析のためのフレームワークとして利用できる可能性が示された。Jackson は connections model が様々なネットワーク分析のフレームワークとして応用できると述べているが、実際に connections model を現実のネットワーク分析に応用した事例は少ない。したがって、本稿は connections model を用いた研究事例として貢献できたと思われる。航空ネットワークの最適化には PBIL を拡張した G-PBIL アルゴリズムを用い、既存のネットワークよりも価値の高いネットワークをシミュレーションによって導出することができ、運賃割引率と旅客減少率が小さくなるほど、羽田空港に一極集中化することがわかった。

今後の課題としてはシミュレーション対象とする範囲の拡大が挙げられる。G-PBIL アルゴリズムでは PBIL にローカルサーチを併用することによって探索性能の向上を図ることができたものの、同時に探索にかかる時間も増加してしまっている。ネットワーク規模が大きくなるほどローカルサーチによる探索時間は増え、シミュレーションを行うことが難しくなる。そのためシミュレーションの対象範囲拡大には、G-PBIL における進化計算とローカルサーチの適正なバランスを検討する必要である。また、今回は国内線のためのシミュレーションを行ったが、海外の主要空港を加えることで羽田空港の国際的な位置づけを明らかにすることができる。さらに、ポロノイ図と重力モデルによる各空港の旅客数の推定を応用し、既存空港を閉鎖または新空港を建設した時の最適航空路線網の分析も可能である。

参考文献

- [1] Bala, V., and S.Goyal, “A Non-cooperative Model of Network Formation”, *Econometrica*, Vol. 68, pp. 1181–1229, (2000a).
- [2] Bala, V., and S.Goyal, “A strategic analysis of network reliability”, *Review of Economic Design*, Vol. 5, pp. 205–228, (2000b).
- [3] Biggs, N., E.Lloyd, and R.Wilson, *Graph Theory 1736–1936*, Oxford University Press, (1986).
- [4] Baluja, S., “Population-Based Incremental Learning: A Method for Integrating Genetic

- Search Based Function Optimization and Competitive Learning”, Technical Report, CMU-CS-94-163, (1994).
- [5] Dijkstra, E. W., “A note on two problems in connexion with graphs”, *In Numerische Mathematik*, Vol. 1, pp. 269–271, (1959).
- [6] Freeman, L. C., “Centrality in Social Networks: I A Conceptual Clarification”, *Social Networks*, Vol. 1 pp. 215–239, (1979).
- [7] Galeotti, A., S. Goyal, and J. Kamphorst, “Network Formation with Heterogeneous Players”, *Games and Economic Behavior*, Vol. 54, pp. 353–372, (2006).
- [8] Goyal, S., and S. Joshi, “Bilateralism and Free Trade”, *International Economic Review*, Vol. 47, No. 3, pp. 749–778, (2006).
- [9] Haller, H., and S. Sarangi, “Nash networks with heterogeneous links”, *Mathematical Social Sciences*, Vol. 50, pp. 181–201, (2005).
- [10] Jackson, M. O., and A. Wolinsky, “A Strategic Model of Social and Economic Networks”, *Journal of Economic Theory*, Vol. 71, pp. 44–74, (1996).
- [11] Johnson, C., and R. P. Gilles, “Spatial Social Networks”, *Review of Economic Design*, Vol. 5, pp. 273–300, (2000).
- [12] Mishra, S. K., “Performance of Repulsive Particle Swarm Method in Global Optimization of Some Important Test Functions: A Fortran Program”, *Social Science Research Network (SSRN)*, Working Papers Series, <http://ssrn.com/abstract=924339>, (2006).
- [13] 『民力 2007 マーケティング必携の地域データベース』, 朝日新聞社, (2007).
- [14] 金光淳, 『社会ネットワーク分析の基礎 社会的関係資本論にむけて』, 勁草書房, (2003).
- [15] 坂上智哉, 加藤康彦, 宇野木広樹, 「九州の最適ネットワークについて ネットワーク形成ゲーム理論による自治体統合問題のモデリングとシミュレーション」, 『応用経済学研究』, Vol. 1, pp. 73-88, (2007).
- [16] 富川信太郎, 勝山大輔, 藤川裕晃, 「新規路線就航に向けた判断手法の研究～航空機就航コストの定式化～」, 日本経営工学会平成 22 年度春季大会予稿集, pp. 38–39, (2010).
- [17] 野本了三, 「ハブ・アンド・スポーク・ネットワーク」, *The Hiroshima economic studies*, Vol. 14, pp. 99–105, (1992).
- [18] 三浦英俊, 「都市間最短旅行時間に基づく国内新規空港の利用者数予測分析」, *Transactions of the Operations Research*, Vol. 49, pp. 89–105, (2006).
- [19] 村上英樹・加藤一誠・高橋望・榊原胖夫, 『航空の経済学』, ミネルヴァ書房, (2006).
- [20] 安田雪, 『実戦ネットワーク分析 関係を解く理論と技法』, 新曜社, (2001).

Summary

Simulation Analysis of Airline Network with Various Aircraft

In recent years, various networks have come to exist in our surroundings. Not only can the internet and airline routes be regarded as networks; protein interactions are also networks. A network is defined as a structure of nodes (points) and links (lines). An “economic network design problem” can be discussed by assuming that a node is an economic player and that a link represents some connection linking economic players. As examples, an economic player can represent an individual, an association, a city, a nation, etc. A connection linking economic players can signify a transport link, a telecommunication net, an economic regional alliance, etc.

As described in this paper, an airline network is used as an example of an “economic network design problem.” The airline network by which the profit of the entire airline industry is maximized can be clarified. For the airline network, modeled based on a connection model proposed by Jackson and Wolinsky, a utility function can be defined as the sum of profits obtained from each route. In “airline network optimization problems,” one purpose is to identify a network to maximize the network utility. However, it is difficult to find an optimal network theoretically in real-world problems. Therefore, a solution using an evolutionary computation for “airline network optimization problems” is proposed. Furthermore, an optimization simulation using the evolutionary computation is presented for a domestic airline in Japan.