

多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価手法に関する研究

渡邊 拓也¹・柴田 宗典²・鈴木 崇正³

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 交通計画研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:watanabe.takuya.42@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 信号・情報技術研究部 交通計画研究室
(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:shibata.munenori.51@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:suzuki.takamasa.91@rtri.or.jp

都市間交通ネットワークのより効率的な利用を検討するにあたっては、その適切な評価が不可欠である。交通ネットワークには、利用者利便性の向上や環境負荷の低減など相反する複数の社会的な要請があるため、複数の目標を同時に考慮可能な、数理最適化に基づくネットワーク評価を可能とする手法を開発した。

本研究では、日本全国の幹線旅客交通網を対象に、各区間の運行本数を決定変数として、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて最適な運行本数の組み合わせを導出した。分析結果から、複数の交通モードで連携してサービス供給を行うことが、都市間交通ネットワーク全体の最適性のために効率的であること等が示唆された。

Key Words : *inter-regional transportation network, multi-objective optimization, genetic algorithm*

1. はじめに

近年、我が国では少子高齢化や人口減少が進行しており、逼迫した財政状況が今後も続く予想されるため、従来のような需要追随型の社会基盤設備が継続可能であるという状況は考えにくい。ゆえに、交通政策の観点からは、既存の交通ネットワークを最大限活用し、交通サービスの利用の効率性を上げることが重要な課題となっている。都市間旅客交通ネットワークの分野においても、既存の交通ネットワークの利便性を高めることは、民営事業体である交通事業者の収益性を上げ、事業の持続可能性を高めることにつながる。このことは、結果的に社会全体の利益にもなる。

ところで、地球温暖化などの環境問題に対して、我が国でも政府主導で積極的に取り組みが行われている。公共性の高い交通分野でも、環境負荷の低減が求められている。そのため、利用者の利便性向上を目標としながらも、環境負荷の低減も考慮できるような、相反する複数の社会的な要請に応える交通ネットワークのあり方を検討することが求められている。

設定した目標を達成するような交通ネットワークのあり方を検討するには、定量的にネットワークの評価を行う必要がある。都市間の旅客交通におけるネットワークの評価を行う研究は、これまでも数々の成果を上げてきた。例えば、Tittomら(2014)¹⁾は、トルコの都市間旅客交通ネットワークを対象に、社会的費用を最小にするネットワーク構造を導出する問題を混合整数計画問題として定式化し、低炭素化政策が交通ネットワークの構造に与える影響についての分析を行った。波床・中川(2011)²⁾は、期待一般化費用を評価指標として用い、一定の費用制約下における幹線鉄道網の最適化を通して、幹線鉄道網整備のあり方の検討を行った。

このように、これまでの都市間旅客交通ネットワークの最適化に関する多くの研究においては、単独の指標からの最適性の評価に留まっている。その一方で花岡ら(2010)³⁾は、タイの貨物輸送ネットワークを対象に、エネルギー消費量、輸送料金、輸送時間の3つの目的関数の最適化に基づき、インターモーダル輸送のエネルギー削減効果の計測を行っており、本研究の着想や構築すべき方法論に対して多大なる示唆を与えている。

そこで本研究では、先行研究⁴⁾における知見を基礎として、複数のネットワークの評価軸を採用し、数理最適化に基づく、複数指標を同時に考慮したネットワークの評価を可能とする手法を開発する。具体的には、日本全国の幹線旅客交通網を対象に、各区間の運行本数を決定変数として、多目的遺伝的アルゴリズムを使って最適な運行本数の組み合わせ等を導出する。分析結果とその考察により、既存の都市間交通ネットワークの活用方法等に関する考察を行う。

2. 分析対象とするネットワークの構築

本章では、最適化するネットワークを構築するために必要なデータと、具体的な構築手法に関して説明する。

(1) 分析対象とするネットワークの概要

構築するネットワークは、全国の都市間公共交通ネットワークであり、航空、新幹線、在来線特急列車、幹線バスを対象とする。ノードとする地点は全国幹線旅客純流動調査⁹⁾（以下、純流動調査）で用いられている207生活圏を、ノード間のリンクは2010年に行われた第5回純流動調査で対象となった交通路線をベースに設定する。

なお、ネットワーク構築に使用するデータは、基本的に第5回純流動調査の平日実施日である2010年12月1日におけるデータに準拠する。

(2) ノードの設定

前節で述べたとおり、構築するネットワークにおけるノード配置を、純流動調査で用いられている207生活圏をベースに検討する。一つの生活圏に一つのノードを置くことを基本とする。

配分されたOD交通量は、構築したネットワーク上のみを移動し、各生活圏内の交通需要は全て、ある一地点から発生・集中するものとする。この地点を生活圏代表点と定義する。生活圏代表点は、地域内交通の拠点である地点に設定するのが相応しいと考え、各生活圏における最も中心的な都市の代表的な鉄道駅に設定する。生活圏内に駅が無い場合には、鉄道駅に代わる陸上交通の拠点として、一般乗合バスのバスターミナルを設定する。

また、実際の交通路線の分岐点が、各生活圏を代表するノードに選ばれていない場合、本研究で構築するネットワークと実際のネットワークに乖離が生じてしまうという問題が生じる。この場合には、生活圏代表ノードの他に分岐点ノードを設けることにより、構築するネットワークと実際のネットワークのトポロジーの整合性を保つことにする（図-1）。分岐点ノードが追加されても、あくまで交通需要は生活圏代表点のみから発生・集中するものとする。すなわち、分岐点ノードを起点・終点と

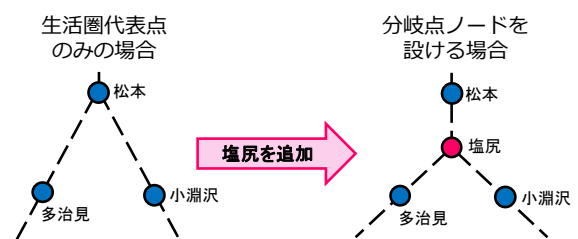


図-1 分岐点ノードの設定

した交通需要は無いものとする。

以上、生活圏代表点が207、分岐点が11、合計218ノードを設定する。

(3) リンクの設定

前節で設定したノード間をつなぐように、交通機関別にリンクを設定する。すなわち、同じノード間を結ぶリンクでも、交通機関によってサービス水準は異なって設定されるものとする。リンクごとに運行本数、所要時間、区間距離、運賃・料金といった、4つのサービス水準データを、リンクに接続する2つのノードの生活圏代表点間の移動を基準に整備する。各交通機関のリンクの設定方法について、以下に述べる。

a) 航空リンク

航空ネットワークの構築においては、第5回純流動調査の平日調査日に就航していた全ての航空路線を反映させる。航空路線の発着空港は、各空港から最も一般的なアクセス・イグレス対象である生活圏代表点のある生活圏にそれぞれ紐付ける。なお、一つの生活圏に複数の空港が紐付けられることもある。

運行本数の算出においては、コードシェア便は二重に計上しないものとする。一つの生活圏に複数の空港が紐付けられている場合、それらの全ての便を計上する。

所要時間は、飛行機のフライト時間と待ち時間に最低限必要な時間の和として考える。なお、便によってフライト時間が異なる場合には、対象となる全ての便のフライト時間を平均して算出する。待ち時間は、搭乗前のチェックイン・保安検査場通過等で60分、降機後の荷物受取り・イグレス交通の待ち時間で20分と考え、全ての便一律に80分とする。

運行会社ごとに運賃・料金が異なる場合には、会社ごとの運行本数によって按分した平均値を用いる。区間距離は、区間マイルに1.609を乗ずることで、単位をkmに変換して算出する。

また、本研究における生活圏間の移動は、生活圏代表点間の移動とみなすため、航空路線を利用した移動における所要時間や運賃・料金の算出には、さらに生活圏代表点から紐付け空港までのアクセス・イグレス交通の所要時間や運賃・料金を加算しなければならない（図-2）。ただし、航空リンクである空港に到着し、再び同じ空港

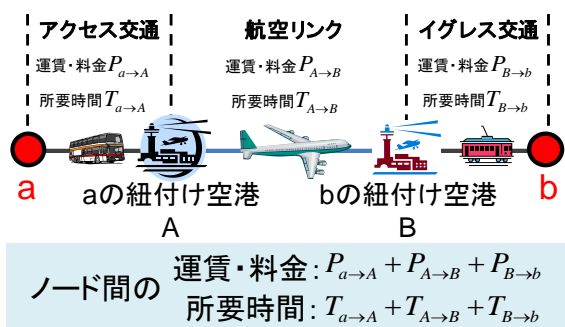


図-2 航空リンクのアクセス・イグレス交通に関するサービス水準の加算

から航空リンクで出発する経路をたどる場合には、経由空港でのアクセス・イグレス交通の所要時間や運賃・料金は計上しないことにする。

b) 在来線特急列車リンク

在来線特急列車ネットワークについては、第5回純流動調査で調査対象であった新幹線を除く鉄道路線をベースに構築する。なお、ミニ新幹線（秋田新幹線と山形新幹線）は、在来線特急列車として扱う。運行本数は、2010年12月1日に運行予定であった全ての便を計上して算出する。所要時間は、対象とする全ての列車の平均所要時間とする。区間距離は、営業キロを元に算出する。

続いて、運賃・料金の設定方法について述べる。本研究では、任意のノード間の経路探索アルゴリズムとして、リンクごとの所要時間と運賃・料金から算出する一般化費用をリンクコストとしたダイクストラ法を用いるため、複数のリンクを通過する場合の経路のサービス水準については、各リンクのサービス水準の足し合わせによって表現する必要がある。しかし、鉄道の運賃・料金は、乗車区間を複数に分割したときの単純和よりも、通しの運賃・料金の方が一般的に安くなる。そのため、経路の運賃・料金を、リンクごとの実際の運賃・料金の単純な足し合わせによって算出しようとすると、過大に計算され

てしまう。ただし、ダイクストラ法を用いた経路探索を行う以上、例えば三角表など、起終点のみに依存するような整備方法ではなく、リンクごとに運賃・料金を設定しなくてはならない。

そこで本研究では、リンクごとの運賃・料金はリンク距離に線形に依存する関数によって計算されるものとし、その回帰係数を最小二乗法で導き出すことを考える。まず、ある複数の経路を対象に、通しで乗車した場合の実際の運賃・料金と、線形関数に基づいてリンクごとに設定した値の足し合わせによる運賃・料金を算出する。次に、その二つの運賃・料金について差の二乗を経路ごとに算出する。次に、対象とした全ての経路における差の二乗の和を最も小さくするような回帰係数を求める。そして、算出した係数に基づき、リンクごとに運賃・料金を設定する（図-3）。この方法に基づいて算出されたリンクの運賃・料金を採用した場合、実際の旅行に必要な運賃・料金より若干低めに経路の運賃・料金が計算されるものの、図-4に示すように、リンクごとに実際の運賃・料金を設定した場合よりは、実際の運賃・料金に近い値を表現できていることがわかる。

なお、回帰係数算出の対象とする経路は、乗り換えなしに一列車で行き来することが出来る全ての都道府県庁所在地代表駅の組み合わせを発着地とした82経路とする。

c) 新幹線リンク

新幹線ネットワークの設定においては、「スーパーリンク」を導入する。これは速達列車の停車する主要駅のみをつないだリンクである。スーパーリンクを設定することによって、複数の種別の列車が運行されている区間についても、不都合が生じること無く、同様の枠組みで分析が可能になる。

運行本数は、2010年12月1日に運行予定であった全ての便を計上して算出する。所要時間は、対象とする全ての列車の平均所要時間とする。区間距離は、営業キロを元に算出する。

対象経路	① 実際に通しで乗車した場合の運賃・料金	本研究での考え方	②	①と②の差の二乗
札幌～旭川	4170円 (運賃2420・自特1750)	距離 $L_{11} \quad L_{12} \quad L_{13} \quad L_{14}$ 運賃 料金 札幌 $aL_{11}+b$ 岩見沢 $aL_{12}+b$ 滝川 $aL_{13}+b$ 深川 $aL_{14}+b$ 旭川	$a \sum_j L_{1j} + b$	$(4170 - a \sum_j L_{1j} - b)^2$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
宮崎～鹿児島中央	3790円 (運賃2420・自特1370)	距離 $L_{2,1} \quad L_{2,2}$ 運賃 料金 宮崎 $aL_{2,1}+b$ 都城 $aL_{2,2}+b$ 鹿児島中央	$a \sum_j L_{2,j} + b$	$(3790 - a \sum_j L_{2,j} - b)^2$

各リンク運賃料金を $(\hat{a}L + \hat{b})$ 円とする

和を最小化する a, b を求める $\rightarrow \hat{a}, \hat{b}$

図-3 在来線特急リンクの運賃・料金設定方法に関する考え方

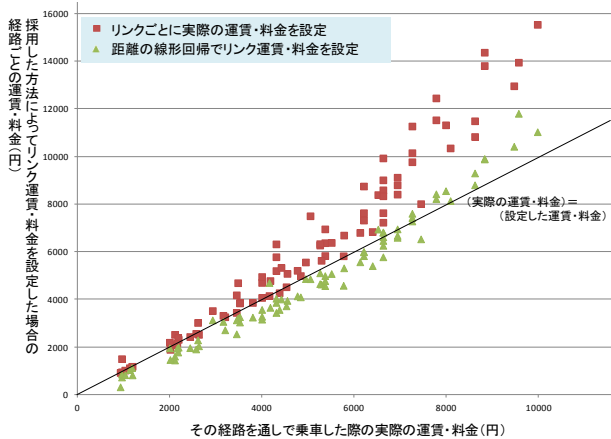


図4 提案手法を用いた場合と、リンクごとに実際の運賃・料金を設定した場合の、経路ごとの運賃・料金の差

運賃・料金の設定には、前項で説明した在来線特急列車における運賃・料金設定の枠組みを用いる。なお、回帰係数を算出する際に対象とする経路は、乗り換えなしに一列車で行き来することが可能な全ての都道府県庁所在地代表駅の組み合わせを発着地とした84経路に、九州新幹線の新八代～鹿児島中央の1経路を加えた85経路とする。

d) 幹線バスリンク

幹線バスは、他の交通機関とは異なり、一つの路線中で乗車専用や降車専用の停留所が存在しているため、これまでと同様の枠組みでネットワークを構築してしまうと、実際に利用できない区間での幹線バスの利用を許容してしまうことになる。また、計算されるネットワークの評価指標を過剰に計算してしまうなどの問題も生じてしまう。

そこで、幹線バスネットワークの設定においては、経路探索に用いるリンクと、運行本数が決定されるリンクで異なるネットワーク・データベースを用意することで、これらの問題の解決を図ることとする。この方式を図で表現したものが、図-5である。図では、「千葉（乗車のみ）－東京（乗車のみ）－静岡（乗車も降車も可能）－京都（乗車のみ）－大阪（降車のみ）」という仮の系統

を例にして、一便で行き来可能なノード間組み合わせを表現した経路探索用ネットワーク（図-5中①）と、乗り降りには不可能な組み合わせでも一つの系統中での通過区間を表現した運行本数決定用ネットワーク（図-5中②）を構築する方法を説明している。初期運行本数は、当該区間で利用可能な全ての系統の運行本数の合計をとって算出する。所要時間と運賃・料金は、全ての便の平均値を用いる。通過リンク集合は、同じ発着組み合わせのなかで、初期運行本数の最も多いパターンのもを採用する。純流動調査で対象であった453系統全てに対して、この操作を行い、各リンクにサービス水準の情報を整備する。

また、航空リンクの設定と同様に、幹線バスリンクと別の交通機関のリンクを乗り継ぐ場合には、幹線バス停から生活圏内の代表点までのアクセス・イグレス交通の所要時間や運賃・料金を考慮する。

e) 救済リンク

これまでに構築した、どの幹線交通機関のネットワークにも接続されていないノードを救済する意味で、救済リンクによるネットワークを設定する。

如何なるリンクも接続されていないノードに対し、幹線交通機関が利用可能な、最寄りのノードまでのアクセス手段として在来線普通列車、一般乗合バス、航路等の各交通機関を救済リンクとして設定する。また、航空リンクしか接続されていないノードについても、幹線交通機関以外の陸上交通機関（在来線普通列車や一般乗合バス等）で、近隣の別ノードに移動可能な場合、その交通機関についても救済リンクとして設定する。

3. 最適ネットワークの導出

本章では、各区間の運行本数を決定変数とし、多目的遺伝的アルゴリズムを使って最適な運行本数の組み合わせを導出する手法を構築する。パレート最適解の枠組み

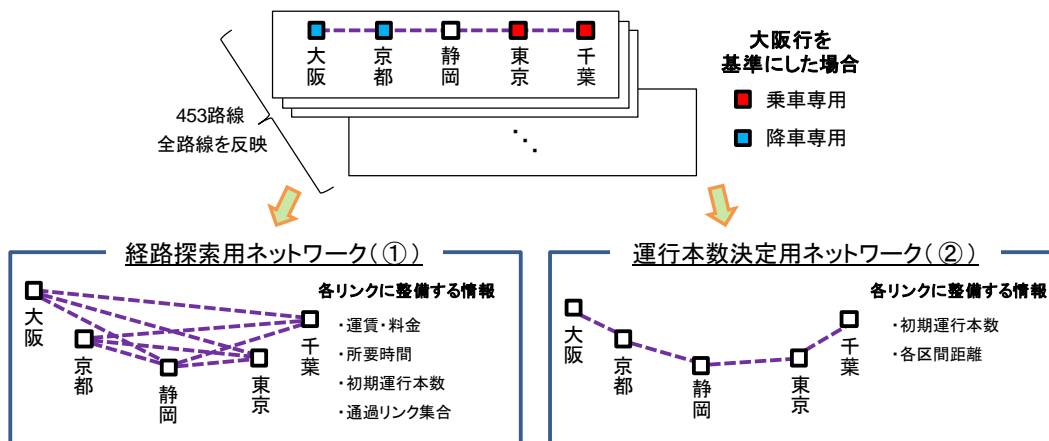


図-5 幹線バスにおける2つのネットワークの構築方法

を用いて多目的の最適化を行うため、複数の最適ネットワークを導出する。

なお今回は、既存の交通ネットワーク活用の観点から、ネットワークの構成は不変であり、路線設定は所与であるものとし、各リンクの運行本数を決定変数として、ネットワークの最適化を行う。しかし本手法は、路線の新規開業や廃止を意味する、リンクの新規設定や消去も踏まえたネットワークの最適化が可能な枠組みとなっている。

ここで、人口減少下であり、交通需要の増加を見込みがたい我が国の状況を想定した場合、経済成長下での社会資本整備のように全ての幹線交通モードに関する社会資本整備を進めることは難しい。むしろ、既存の交通基盤の適切に組み合わせた相互補完関係を構築し、全国交通サービスレベルを維持・向上させるかという視点が重要である⁹⁾。そのため幹線交通計画においても、これまでの幹線交通機関の競合から、幹線交通機関の組み合わせによる共存という観点へのパラダイムシフトが求められている。以上を踏まえ、本研究では需要予測の実務における幹線交通機関別の経路配分ではなく、幹線交通機関を区別しないネットワークでの経路配分を考える。

(1) 経路探索

任意の2都市間の経路探索には、ダイクストラ法に基づく第K番目経路探索法⁷⁾を用いる。所要時間は短いが高運賃は高い航空リンクを用いる経路から、所要時間は長いが高運賃は安い幹線バスを用いる経路まで、多様な経路を探索するために、コストには所要時間と時間価値の積に、運賃・料金を加えた一般化費用を用いる。なお、次節で詳述する改良型C-logitモデル⁸⁾における運賃・料金と所要時間に係るパラメータ(表-1)の比率を時間価値とする選好接近法⁹⁾に基づき、時間価値は46.28[円/分]とする。最適化計算にかかる時間を考慮した結果、一般化費用の小さい方から上位30経路までを探索する。

(2) 経路選択確率の算出

ネットワーク上で算出される各経路には、複数の幹線交通機関を組み合わせる混合経路も存在する。そのような経路においては各経路は重複するリンクを持つために、重複率が大きい経路同士の類似性が高い。通常用いられるロジットモデルを、このような経路選択問題に適用すると、類似性が高い経路の選択確率を過大推定する問題が発生することが広く知られている¹⁰⁾。

そこで、経路の重複率が経路選択確率に与える影響を考慮することで適切に経路選択確率を推定できる、改良型C-logitモデル⁸⁾を適用する。このとき、各経路の効用関数、選択確率、重複率は式(1)~(3)のように表される。

$$V_{OD_i} = \sum_p \alpha_p X_{OD_i,p} \quad (1)$$

$$P_{OD_i} = \frac{\exp(V_{OD_i} - CF_{OD_i})}{\sum_j \exp(V_{OD_j} - CF_{OD_j})} \quad (2)$$

$$CF_{OD_i} = \beta \log \left[1 + \sum_{j \neq i} \frac{l(OD_i, OD_j)}{\sqrt{L(OD_i) \cdot L(OD_j)}} \right]^\gamma \quad (3)$$

ここに、
 OD_i : ある OD 間における i 番目の経路
 V_{OD_i} : 経路 OD_i の効用値
 α_p : 属性 p に関するパラメータ
 $X_{OD_i,p}$: 経路 OD_i の属性 p の値
 P_{OD_i} : 経路 OD_i の選択確率
 CF_{OD_i} : 経路 OD_i の重複率
 $L(\cdot)$: 経路の距離
 $l(\cdot, \cdot)$: 2 経路のうち重複している距離
 β, γ : パラメータ

なお、各経路の効用算出に関する属性 p は、所要時間 ($time$)[分]、運賃・料金 ($cost$)[円]、運転間隔 (運行本数の逆数) ($freq$)[日/本]、乗換回数 ($trans$)[回] の4つとし、各パラメータ値は、表-1の通りとする。

(3) 分布交通量モデル

任意の2都市OD間の交通量 T_{OD} は、2都市の人口、アクセシビリティ指標、直線距離を説明変数とした重力モデルによって計算されるものとする。アクセシビリティ指標をモデルに組み込むことにより、ネットワーク変化に伴う交通量の増減を表現することが出来る。また、人口を説明変数に用いるため、将来の人口予測値をモデルに代入すれば、将来における旅客需要の推計が可能になる。

実績の分布交通量データとして、純流動調査の結果を用い、各パラメータを推定する。なお、任意の2都市を結ぶ両方向の交通量は、簡単のため同一であると仮定し、実績データの両方向の和の平均値を、両方向の実績値として用いる。また、実績の交通量が0であるようなOD間もパラメータ推定に用いることが出来るようにするため、左辺の対数項の真数が0になるのを防ぐ目的で、ゼロ補正值 δ_0 を導入する。本研究では、 T_{OD} の最小単位が0.5であ

表-1 経路選択モデルのパラメータ

パラメータ		値
所要時間	α_{cost}	-3.1777×10^{-2}
運賃・料金	α_{time}	-1.4707×10^{-4}
運転間隔	α_{freq}	-1.4783
乗換回数	α_{trans}	-0.5716
重複率の係数	β	0.9931
重複率のべき係数	γ	1.0195

ることから、 $t_0=0.25$ として計算を行う。さらに、実績データとモデルによる推定値の乖離を最小にする補正定数項を求め、以降では補正定数項をモデルに組み込む。これにより、現状のネットワークから人口やアクセシビリティ指標が変化した際のネットワークにおける交通量変化の差分が最適化されたモデルとなり、式(4)、(5)で表される。

$$\log(T_{OD} + t_0) = a_{0,OD} + a_1 \log N_{OD} + a_2 \log \Lambda_{OD} + a_3 \log d_{OD} \quad (4)$$

$$\Lambda_{OD} = \log \left[\sum_i \exp(V_{OD_i}) \right] \quad (5)$$

ここに、 N_{OD} : ODを構成する2都市の人口の積
 Λ_{OD} : OD間のアクセシビリティ指標
 d_{OD} : OD間の生活圏代表点間の距離
 t_0 : ゼロ補正値
 $a_{0,OD}$: 各ODの補正定数項
 a_1, a_2, a_3 : パラメータ

各パラメータの推定結果を表-2に示す。いずれのパラメータに符号にも矛盾は見られず、1%有意であるため、妥当なモデルであると判断できる。

(4) ネットワーク評価指標の設定

現状の都市間ネットワークから、サービス水準（運行本数）を変化させて得られた、変化後のネットワークの評価値に基づいて最適なネットワークを導出する。本節では、ネットワークの評価基準、制約条件等について説明する。

ネットワークの評価指標としては、交通政策や交通事業者の施策に応じて様々な指標が考えられるが、本研究ではイニシャルトライアルとして、我が国の交通政策上、両立すべき目標となっている利便性の向上を表現する消費者余剰の最大化と二酸化炭素排出量の最小化の2種類を取り扱う。

a) 消費者余剰の最大化

ネットワークにおける利用者の利便性を、消費者余剰法¹⁾を用いて評価する。ネットワークが初期状態（添え字0）から改善状態（添え字1）に変化したときの消費者余剰UB[円/日]は、式(6)、(7)で表される。

$$UB = \frac{1}{2} \sum_{OD} (T_{OD}^0 + T_{OD}^1) (C_{OD}^0 - C_{OD}^1) \quad (6)$$

$$C_{OD}^k = \log \left[\sum_i \exp(V_{OD_i}^k) \right] / \alpha_{cost} \quad (7)$$

ここに、 T_{OD}^k : 状態 k での OD 間の分布交通量
 C_{OD}^k : 状態 k での OD 間の一般化費用

表-2 分布交通量モデルの推定結果

説明変数	パラメータ推定値	t値
定数項	-22.427 **	-92.08
2都市の人口の積	8.057×10^{-1} **	122.78
アクセシビリティ指標	3.465×10^{-2} **	16.56
直線距離	2.052×10^{-1} **	10.76

サンプル数：20321 **：1%有意

表-3 制約条件についてのパラメータ設定

交通機関	1リンクあたり	1ノードあたり	交通機関別	交通機関別
	運行本数 (本)	発着回数 (回)	運行キロ (万km)	1便あたり 定員(人)
航空	1~90	1400	150	350
幹線バス	1~500	1500	120	50
新幹線	9~270	600	60	1200
在来線特急	1~100	400	40	500
救済	1~500	2000	20	2000

$V_{OD_i}^k$: 状態 k での経路 OD_i の効用値
 α_{cost} : 運賃・料金のパラメータ (表-1)
 k : ネットワークの状態
($k=0$ 初期状態; $k=1$ 改善状態)

b) 二酸化炭素排出量の最小化

ネットワークにおける環境負荷の程度を測るため、変化後のネットワークにおける二酸化炭素排出量を用いてネットワークを評価する。改善状態における全てのリンクで排出される二酸化炭素の合計量 CO_2 [CO_2 /日]は、以下の式(8)で表せる。

$$CO_2 = \sum_e x_{e,freq}^1 \cdot x_{e,dist}^1 \cdot UCC_e \quad (8)$$

ここに、 $x_{e,freq}^1$: 改善状態でのリンク e の運行本数
 $x_{e,dist}^1$: 改善状態でのリンク e の距離
 UCC_e : リンク e の交通機関の走行距離あたり二酸化炭素排出量^{12)~17)}

c) 制約条件と評価関数の設定

前項までで定義した二つの評価基準を最適化するようなネットワークを算出するにあたり、実際の交通状況に存在する設備容量や保安上の制約を反映させるため、以下の制約条件を交通機関別にそれぞれ設ける。

- ・1リンクあたり運行本数の上限および下限
- ・各ノードを発着する運行本数の総和の上限
- ・列車キロ（飛行キロ）の総和の上限
- ・各リンクにおける輸送量の上限

なお、各制約条件に関するパラメータは、現状のネットワークにおけるピーク時の運行密度や空港の発着枠に関する設定などを参考に、表-3のように設定する。

これら4つの制約条件のうち、4番目の条件については計算負荷を抑える目的で、目的関数に制約条件の一部を組み入れるラグランジュ緩和¹⁸⁾によって対応する。輸送量の上限を超えてそのリンクを通過しようとする旅客数(積み残し人数)に比例する罰則項(ラグランジュ乗数)を設けることにより、最適化すべき目的関数を式(9)、(10)のようにそれぞれ設定する。なお、両方の目的関数を最大化問題とするため、式(10)では二酸化炭素排出量CO₂の前に負号をつける。

$$eval_{UB} = UB - \lambda_{UB} \cdot \sum_e OF_e \quad (9)$$

$$eval_{CO_2} = -CO_2 - \lambda_{CO_2} \cdot \sum_e OF_e \quad (10)$$

ここに、 OF_e : リンク e における積み残し人数
 λ_{UB} : 積み残し1人あたりの消費者余剰に関する罰則
 λ_{CO_2} : 積み残し1人あたりの二酸化炭素排出量に関する罰則

消費者余剰に関する罰則の値は、着席出来ないことによる不効用と捉え、JR東日本首都圏地区のライナー券の料金や座席指定に対する支払意思額の推計例¹⁹⁾を参考に、 $\lambda_{UB}=500$ [円/人]とする。また、二酸化炭素排出量に関する罰則の値は、 λ_{CO_2} に被害費用に基づくCO₂の貨幣価値⁹⁾を乗じ、 $\lambda_{CO_2}=1.29 \times 10^2$ [tCO₂/人]とする。

(5) パレート最適解の導出

a) 解の優越関係によるパレート最適解の定義

様々に考え得る評価軸の中から複数の目的関数を同時に最適化することを考える。政策や施策の目標が複雑になればなるほど、考えるべき目的関数の数が増加するため、2つ以上の複数の目的関数に対する最適化に対応できるようにパレート最適の考え方を適用する。複数の目的関数の間にトレードオフの関係が成立している場合、最良といえる解が必ず一つに定まるとは限らない。この

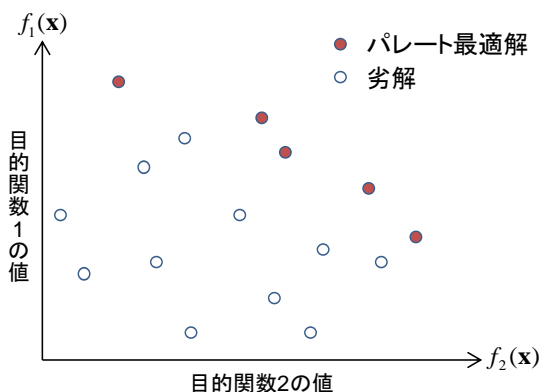


図-6 最大化問題におけるパレート最適解の例

場合、他のどの解にも劣っていない解の集合を得ることが出来る。これがパレート最適解である。

パレート最適解は多目的最適化問題における解の優越関係により定義される。 m 個の目的関数($f_1(\mathbf{x}), \dots, f_m(\mathbf{x})$)の最大化を目的とした多目的最適化問題において、

$$\forall k=1, \dots, m \quad f_k(\mathbf{x}_1) \leq f_k(\mathbf{x}_2) \quad (11)$$

のとき、 \mathbf{x}_2 は \mathbf{x}_1 に優越するという。なお、全く同一の解 \mathbf{x} はここでは存在しないものとする。

以降では、本研究で適用する式(9)、(10)で示した2つの目的関数の最適化問題について説明を行う。図-6は、2つの目的関数の最大化を目的とした最適化問題におけるパレート最適解を示したものである。すなわち、パレート最適解を優越する他の解(図中では右上の領域に存在する解)は存在しない。

ところで、パレート最適解を解析的に算出するのは困難であるため、メタ・ヒューリスティック手法による最適解の探索を行う必要がある。本研究では、遺伝的アルゴリズムを用いて、可能な解空間に対する多点探索を行い、パレート最適解の算出を行う。以下では、多目的遺伝的アルゴリズムにおける各解の染色体へのコード化や評価・選択方法、遺伝的パラメータの設定方法について説明する。

b) 染色体へのコード化

最適化問題に遺伝的アルゴリズムを適用するには、求めるべき解をコード化する必要がある。本問題の場合、全てのリンクの運行本数の組み合わせで一つの解を表現している。リンクごとの1日あたりの運行本数の上限は、表-3で示したように500[本/日]を想定しているため、2進数ならば9bitで表現できる。したがって、1リンクの運行本数を表現する9桁のビット列を全リンク本数分だけ連ねたものが、1つの解を表現した染色体ということになる(図-7)。

c) パレートランキング法による評価関数

各世代の解集合を、ここではFonsecaらのパレートラン

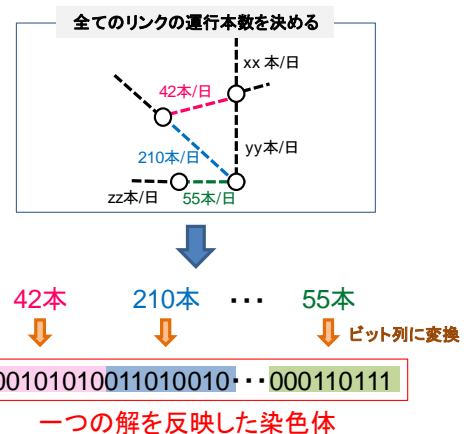


図-7 解のコード化

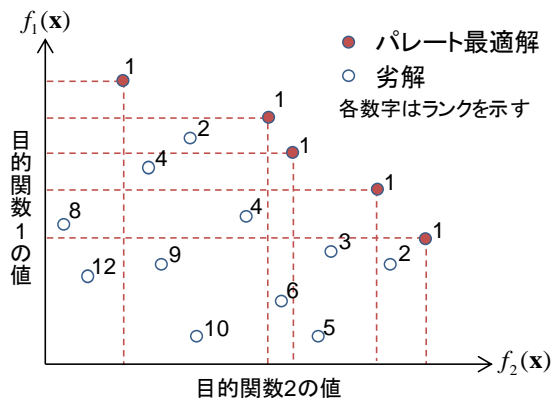


図-8 パレートランキング法によるパレートランク

キング法²⁰⁾を用いて評価する。この手法では、解の優越関係に着目する。各解のランクは、(自分よりも優越する解の個数)+1で定義される。図-6のような、二つの目的関数の最大化問題では(各解の右上方向(軸上含む)に存在する解の個数)+1で表されることになる。図-6における各解のランクを示したのが図-8である。

d) シェアリングと適合度

多目的最適化では、解空間に対してパレート最適解を広く分布させることが重要である。しかし、単純な多目的遺伝的アルゴリズムでは、一方の目的関数値でのみ極端に良い解が生成されやすく、二つの目的関数に対して、バランスよく解集合が得られないことがある。

そこで、個体間の集中度合いも考慮に入れて適合度を算出する目的で、シェアリング²⁰⁾を導入する。シェアリングは、得られたパレート最適解の適合度に対して、多くのパレート最適解が集中している部分での解には比較的小さい重みをかけ、孤立しているパレート最適解には相対的に大きい重みをかけることにより、パレート最適解の分布の相対的な均一化を図る操作である。

任意の染色体間のシェアリング距離 $d_{sh}(\cdot, \cdot)$ を算出する際には、値の平均や分散が全く異なる複数の目的関数の相対的な位置付けを決めるため、各世代の全ての染色体で、目的関数ごとに標準正規分布を仮定した場合の標準得点を用いる。例えば、第 g 世代の i 番目の染色体 $\chi_{g,i}$ と j 番目の染色体 $\chi_{g,j}$ のシェアリング距離 $d_{sh}(\chi_{g,i}, \chi_{g,j})$ は、 $eval_{UB}$ の標準得点と $eval_{CO_2}$ の標準得点をそれぞれ x 座標、 y 座標とした場合の2染色体間のユークリッド距離で定義される。

また、シェアリング関数 $sh(\cdot, \cdot)$ とニッチ数 $nic(\cdot)$ を式(12)、式(13)のように、それぞれ定義する。

$$sh(\chi_{g,i}, \chi_{g,j}) = \max \left[1 - \left(\frac{d_{sh}(\chi_{g,i}, \chi_{g,j})}{\rho_{sh}} \right)^{\alpha_{sh}}, 0 \right] \quad (12)$$

$$nic(\chi_{g,i}) = \sum_{k=\text{全染色体}} sh(\chi_{g,i}, \chi_{g,k}) \quad (13)$$

ここに、 α_{sh} : シェアリング重み

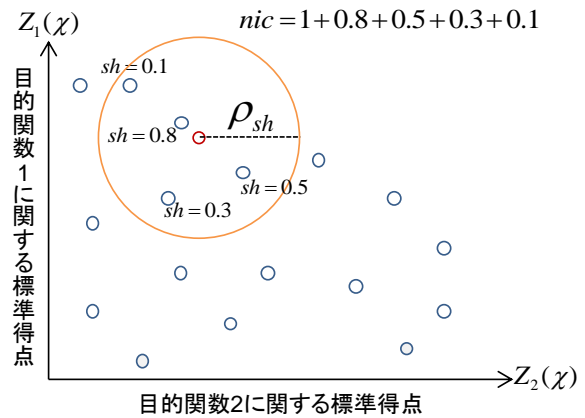


図-9 ニッチ数の概念図

ρ_{sh} : シェアリング半径(>0)

式(13)で与えられたニッチ数が、当該染色体の周囲に他の染色体がどれだけ集まっているかを定量化した数値である。バランスの良い解集合を得るために、ニッチ数が小さいほど、次世代に残すような適合度関数を定義すればよい。図-9はニッチ数の考え方を示したものである。

パレートランクとニッチ数によって算出される各染色体の適合度関数 $fit(\cdot)$ を式(14)のように定義する。

$$fit(\chi_{g,i}) = \frac{1}{[nic(\chi_{g,i})]^{b_1} \cdot [rank(\chi_{g,i})]^{b_2}} \quad (14)$$

ここに、 $rank(\cdot)$: 染色体のパレートランク
 b_1, b_2 : 重みづけパラメータ(>0)

e) 遺伝的アルゴリズムの計算フロー

式(14)で算出した各解の適合度に基づき、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて、パレート最適解となる複数の最適ネットワークを求める。その計算フローを図-10に示す。ルーレット選択によって、適合度の大きな解を優先的に次世代に残す。この手続きを繰り返し、予め設定した繰り返し計算の上限回数に達した時点での最適ネットワークを出力する。

4. 手法の適用と分析結果の考察

本研究では、前章で説明した多目的遺伝的アルゴリズムによるネットワークの最適化手法を実装したシステムを構築する。本章では、実際に第2章で構築した都市間交通ネットワークに対して、構築したシステムを適用した結果に対する考察を加える。

(1) パラメータの設定

遺伝的アルゴリズムによる最適化計算の性能は、設定

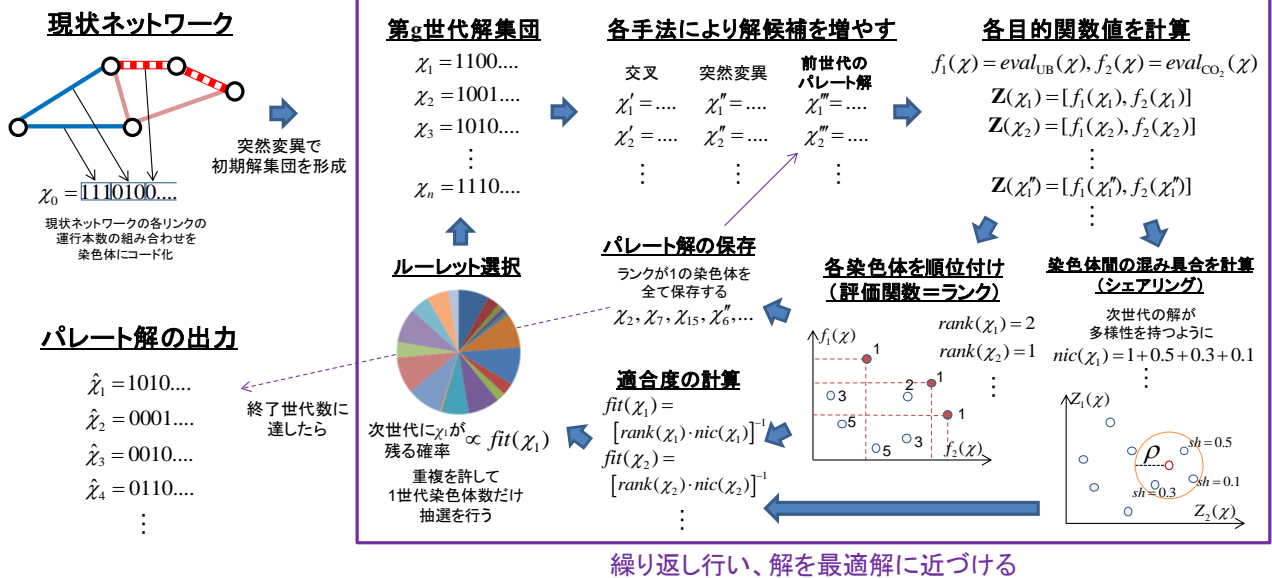


図-10 多目的遺伝的アルゴリズムの計算フロー

表-4 遺伝的パラメータの設定値

パラメータ	設定値
1世代あたりの個体数	50
世代数上限値	500
交叉率	0.1
突然変異率	0.9
シェアリング重み α_{sh}	0.5
シェアリング半径 ρ_{sh}	0.5
ニッチ数の重みづけパラメータ b_1	0.5
パレートランクの重みづけパラメータ b_2	0.5

するパラメータによって大きく左右されるが、効率的なパラメータ設定についての明確な指針はまだ提案されておらず、設定すべきパラメータは試行錯誤によって決めていくほかない²⁾。本研究では、複数回の試行的な分析結果や計算負荷の都合を鑑み、表-4のようにパラメータを設定する。なお、一般的な遺伝的アルゴリズムによる分析よりも、交叉率を低く、突然変異率を高く設定しているのは、今回の分析の決定変数である「全てのリンクの運行本数の組み合わせ」をコード化したときのコード長が非常に長く、交叉では良い解が得られる可能性が低いと考えられるためである。

(2) 複数のパレート最適解についての解釈

分析の結果、最終的に出力された24個のパレート解と現状のネットワークにおける解の分布を図-11に示す。これは、縦軸に消費者余剰に関する評価値 $eval_{UB}$ 、横軸に二酸化炭素排出量に関する評価値 $eval_{CO_2}$ をとって図示したものである。なお、評価軸は式(9)、式(10)で示したように、積み残し人数を加味した値であり、数値としての解釈が難しいため、軸に数値は表記していない。

パレート最適の枠組みで、ネットワークの評価を行っ

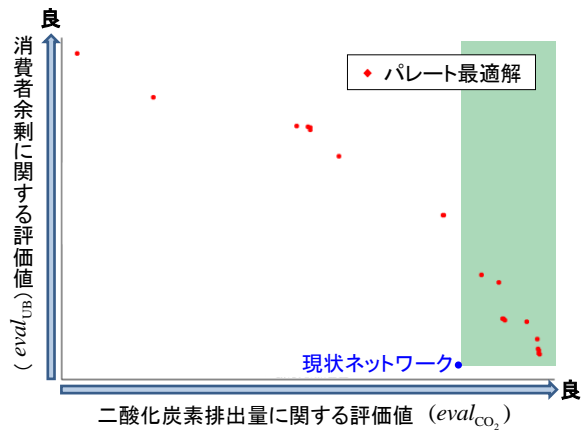


図-11 出力されたパレート最適解の分布

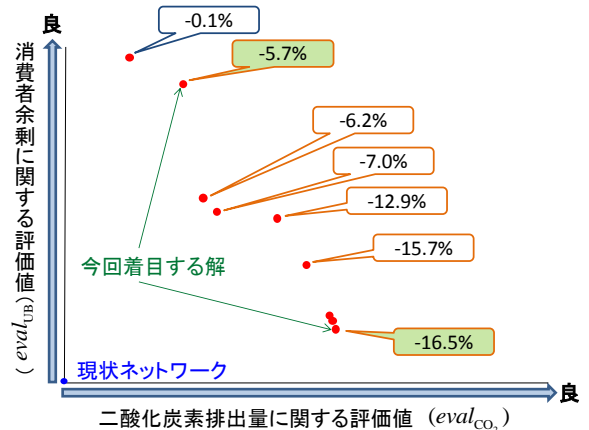


図-12 各パレート解の二酸化炭素排出量の変化率

ているため、「最適」とされるネットワークが複数出力されることになるが、分析者はその目的に応じて、適切な解に着目することが求められる。例えば、鉄道事業者は、近年、地球温暖化防止・環境保全の取り組みの一環として環境負荷低減に取り組むことが求められている。そこで、事業者として目標とする二酸化炭素排出量の削

減目標を設定した上で、その目標をクリアする中での利便性指標が最も高いネットワークを選択して分析を行うなどの方法が考えられる。

また、図-11中で緑色の網掛けをした領域に含まれる解は、現状のネットワークよりも、評価値が両方とも改善されているネットワークである。この領域に含まれていないネットワーク案に関しては、取り得る政策や施策の目標から逸脱していると考えられるため、図-12には図-11における緑色の網掛け領域のみに着目し、拡大した分布を示す。図中の吹き出しは、現状のネットワークに対する二酸化炭素排出量の変化率を示したものである。なお、この値は、積み残しの人数は加味しない、式(8)で示した二酸化炭素排出量CO₂のみから算出した値である。

ここで、例えば鉄道事業者が現在比5%以上の二酸化炭素排出量の削減を目標として設定したとしよう。このとき、この条件を満たすのは、図-12において、オレンジ色の吹き出しで示した各解であり、この中からネットワーク案を選択すればよい。

今回は、これらの中で最も利便性向上効果のあるネットワーク案と、消費者余剰に関する評価値はそれほど高くはないが二酸化炭素排出量の削減効果は非常に高いネットワーク案(図-12で緑色矢印で示した2つの解)に着目して考察することにする。

(3) 分析結果と考察

図-13には、それぞれの最適ネットワークにおける各リンクの運行本数と、現状ネットワークの各リンクの運行本数の差分を示した。図中左は、二酸化炭素排出量削減率5%以上を満たす解のなかで、最も利用者利便性向上の効果が高い解、図中右は、二酸化炭素排出量が最小であった解における結果を示している。

どちらのネットワークでも、鉄道リンクの運行本数は現状維持、もしくは増加傾向にあることが確認できる。航空リンクでは、特に飛行距離の長いリンクのうち、現状における運行本数が比較的多いリンクにおける運行本数が減少していることがわかる。

その一方で、直通する航空路線や幹線鉄道路線が無い都市間における幹線バスの運行本数は、増加していることが確認できる。また、航空リンクでも、需要の絶対数は決して多いとは言えないが、元々の運行本数が極端に少ないような、地方空港間を結ぶリンクに関しては運行本数を増加させている区間も見受けられる。

次に、より詳細な地域に着目して、2つのネットワークを比較したい。図-14は、図-13に示した2つの最適ネットワークにおける現状ネットワークとの各リンクの運行本数の差分について、北海道地区を拡大した結果である。この結果から、2つのネットワークは、大まかな傾向は類似しているが、消費者余剰の評価値が最大のネットワークは、二酸化炭素排出量を最小にするネットワークの結果に、運行本数を増加させるリンクを数本追加す

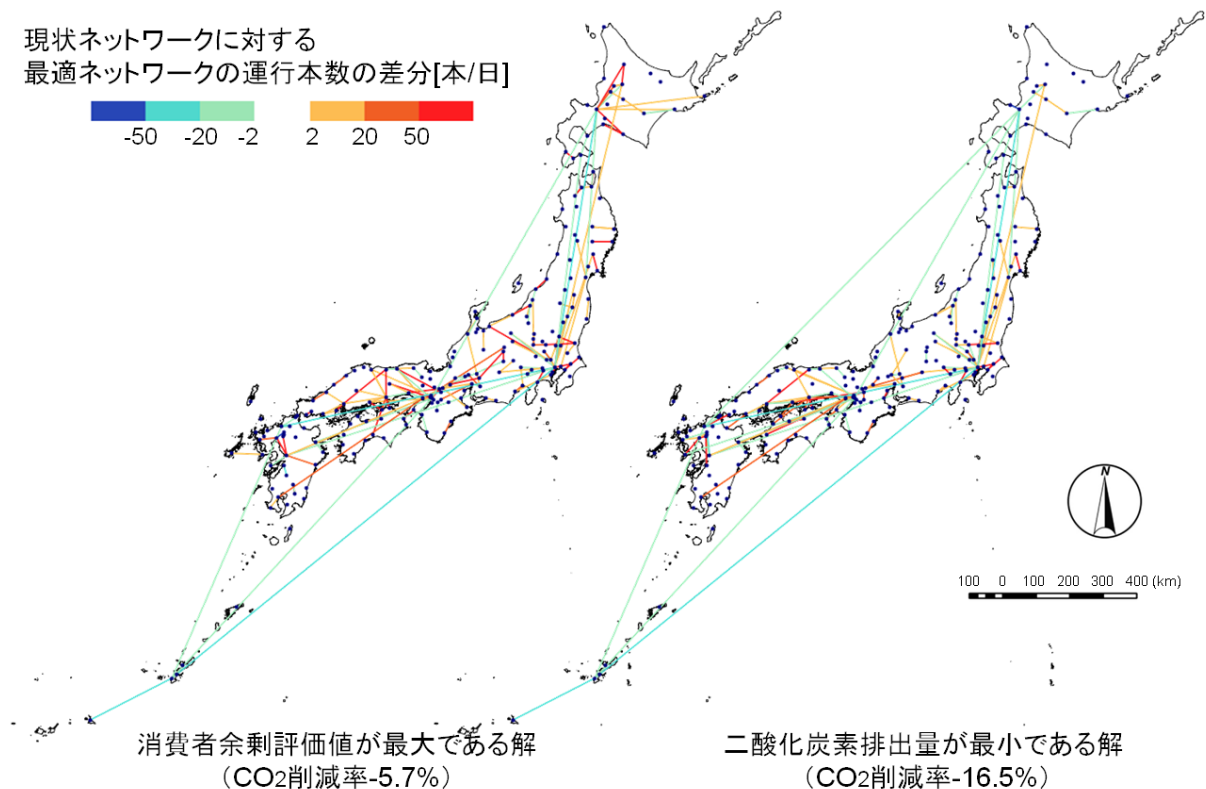


図-13 着目した2つの最適ネットワークにおける現状ネットワークとの各リンクの運行本数の差分

現状ネットワークに対する
最適ネットワークの運行本数の差分[本/日]

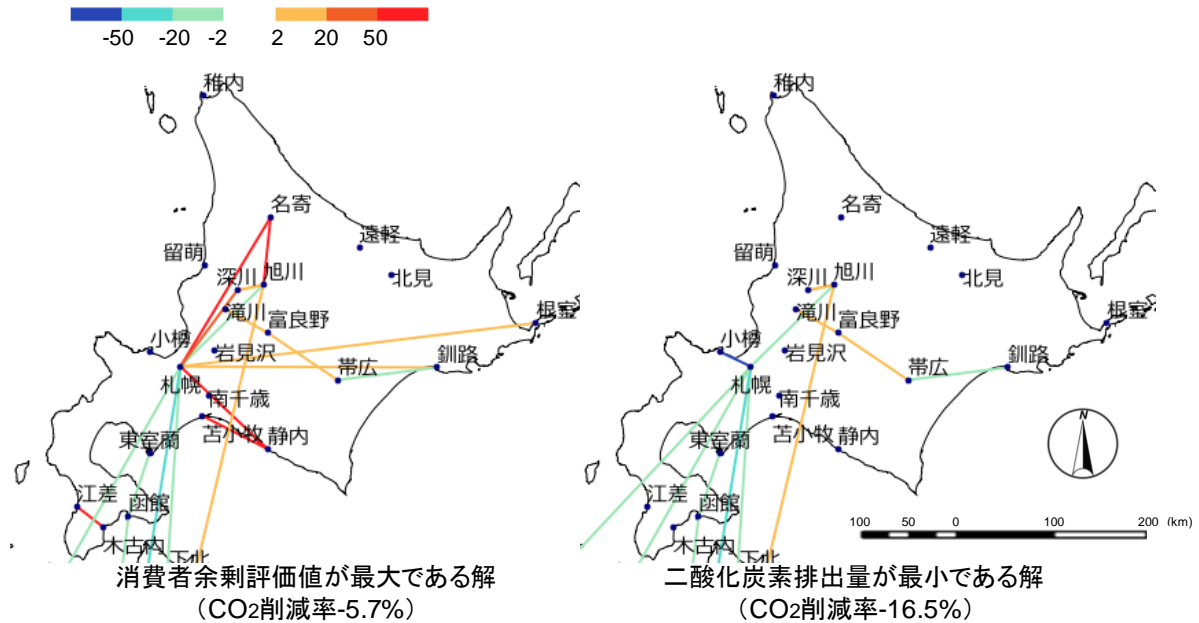


図-14 2つの最適ネットワークにおける現状ネットワークとの各リンクの運行本数の差分（北海道に着目）

るような結果になっていることがわかる。このとき、運行本数が増加しているリンクは、近隣の2都市を結ぶ鉄道や幹線バスのリンクであることが確認できる。

この結果は、二酸化炭素排出量が最小であるネットワークを基準として考えたときに、二酸化炭素排出量を大きく増加させずに、利用者利便性の向上効果が期待できるリンクの運行本数が増加する方向に変化することによって、得られたものと捉えることが出来る。

これらの結果から、鉄道については既存のネットワーク上で現状程度の運行本数を確保することや、幹線交通機関は複数モードで連携したサービス供給を行うことで、都市間交通ネットワーク全体の最適性のために重要であることが示唆された。以上は鉄道事業者の立場から展開した論であるが、日本全体の交通政策の検討を行う上でも、十分に示唆を与える結果となっている。

5. おわりに

本論文では、多目的最適化に基づく都市間交通ネットワークの評価手法の構築に向けて実施した、都市間交通ネットワークの構築方法、多目的遺伝的アルゴリズムの適用方法、実際に行った分析の適用結果とその考察について述べた。

まず、2010年に実施された全国幹線旅客純流動調査⁹⁾をベースに、航空、幹線バス、新幹線、在来線特急列車の各交通機関を反映させた日本全国の幹線旅客交通網のネットワークを構築した。次に、多目的遺伝的アルゴリ

ズムを用いて、消費者余剰最大化と二酸化炭素排出量最小化を同時に考慮する、最適な各リンクの運行本数の組み合わせを、パレート最適解の枠組みで複数提案する手法を構築した。最後に、構築したネットワークに最適化手法を適用し、分析結果を示した。鉄道については既存のネットワーク上で現状程度の運行本数を確保することや、幹線交通機関は複数モードで連携してサービス供給を行うことが、都市間交通ネットワーク全体の最適性のために効率的であること等が示唆された。

本研究では今後、自動車交通や純流動調査で対象外となっている都市内流動をも踏まえた需要モデルへの拡張等を行なうことで、より精緻な都市間交通ネットワークの評価手法の構築を目指す。また、遺伝的アルゴリズムに用いるパラメータのチューニングなど、より効率的に数理最適化を行うための方策についても検討を進めていく。

さらに本研究は、現状のネットワークのサービス供給水準の最適化だけでなく、他の目的に対しても適用可能性が十分にあると考えられる。例えば、各都市間の分布交通量を求める際の説明変数とした人口に将来推計値を用いることで、将来の都市間交通の検討に用いることが可能である。また、今後新設が検討されている路線を踏まえたネットワークを初期のネットワークとして分析することにより、路線の有無によるネットワークの評価値を比較することが可能になる。

このほか、本研究の成果は平常時の都市間交通を対象とした分析に留まらず、例えば、地方都市圏における交通機関の組み合わせの最適計画や、災害時に一部の交通

路線が利用不可能になった際のネットワーク評価など、様々な範囲で複数の交通機関からなる交通ネットワーク全体を定量的に評価する手法として展開可能であると考えられる。

参考文献

- 1) Tirtom, H., 山口裕通, 奥村誠, 金進英: 低炭素化政策が都市間旅客交通ネットワークの構造に与える影響, 土木計画学研究・講演集, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.70, No.5, pp.I_819-I_827, 2014.
- 2) 波床正敏, 中川大: 幹線鉄道網の最適化基準が路線網形成に与える影響の比較分析, 土木学会論文集 D3 (土木計画学), Vol.67, No.5, pp.I_957-I_966, 2011.
- 3) 花岡伸也, タクシム・ハスナイン, 川崎智也, ピシェ・クナダムラクス: インターモーダル輸送によるエネルギー節減効果の計測, 運輸政策研究, Vol.12, No.4, pp.24-31, 2010.
- 4) 奥ノ坊直樹, 柴田宗典, 内山久雄, 寺部慎太郎, 葛西誠: 多目的最適化による都市間交通ネットワークにおけるサービス供給の評価～環境的に持続可能な都市間交通サービスを目指して～, 土木計画学研究・講演集, Vol.43, CD-ROM, 2011
- 5) 国土交通省: 第5回全国幹線旅客純流動調査, 2013.
- 6) 奥村誠: 低密度地域の交通を考える (その2), Docon Report, Vol.187, 2010.
- 7) 加藤直樹, 茨木俊秀, 三根久: 無向グラフの第 K 最短路を求める $O(Kn^2)$ アルゴリズム, 電気情報通信学会論文誌 A, Vol.J61-A, No.12, pp.1199-1206, 1978.
- 8) 柴田宗典, 鈴木崇正, 奥田大樹: 混合経路の存在を考慮した幹線鉄道の需要シミュレーション, 電気学会論文誌 D (産業応用部門誌), Vol.135, No.4, pp.322-326, 2015.
- 9) 国土交通省: 公共事業評価の費用便益分析に関する技術指針, pp.11-23, 2009.
- 10) 土木学会土木計画学研究委員会: 非集計行動モデルの理論と実際, pp.22-32, 土木学会, 1995.
- 11) 国土交通省: 鉄道プロジェクトの評価手法マニュアル (2012年改訂版), pp.105-108, 2012.
- 12) 経済産業省, 環境省: 特定排出者の事業活動に伴う温室効果ガスの排出量の算定に関する省令, 経済産業省・環境省令第3号, 2006.
- 13) 環境省: 平成22年度の電気事業者ごとの実排出係数・調整後排出係数等の公表について (お知らせ), 報道発表資料, 2012.
- 14) 通商産業省: エネルギーの使用の合理化に関する法律施行規則, 通商産業省令第74号, 1979.
- 15) 国土交通省: 鉄道輸送統計年報 (平成22年度分), 2011.
- 16) 国土交通省: 航空輸送統計年報 (平成22年度分), 2011.
- 17) 国土交通省: 自動車輸送統計・自動車年表消費量統計年報 (平成22年度分), 2011.
- 18) Colin, R. R. (横山隆一ら訳): モダンヒューリスティックスー組合せ最適化の先端手法一, pp.249-312, 日刊工業新聞社, 1997.
- 19) 中川伸吾, 柴田宗典, 尾崎直也, 深澤紀子, 鈴木崇正: 優等列車の席種設定最適化に向けた旅客需要に関する研究, 鉄道工学シンポジウム論文集, Vol.18, pp.179-186, 2014.
- 20) 玄光男, 林林: ネットワークモデルと多目的 GA, pp.142-156, 共立出版, 2008.
- 21) 伊庭斉志: 遺伝的アルゴリズムの基礎—GA の謎を解く—, pp.93-104, オーム社, 1994.

(2015.?? 受付)

A STUDY ON THE EVALUATION METHODS OF INTER-REGIONAL TRANSPORTATION NETWORK BASED ON MULTI-OBJECTIVE OPTIMIZATION

Takuya WATANABE, Munenori SHIBATA and Takamasa SUZUKI

To realize more efficient utilization of inter-regional public transportation network, it is indispensable to evaluate the transportation network properly. The transportation network has multiple and contradicting social requirements, such as, the improvement of the convenience, the reduction of the environment load, and so on. Therefore, this study develops a method for inter-regional transportation network evaluation method, using mathematical multi-objective optimization. Subjecting to the inter-regional public transportation network in Japan, some optimized pareto solutions composed of frequency of service on each link are calculated by multi-objective genetic algorithm. The results imply that multi modal service supplying among railways, airplanes and express buses can be effective to improve the mobility of the whole inter-regional transportation network and to decrease CO2 emissions simultaneously.