

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～

奥ノ坊 直樹¹・柴田 宗典²・内山 久雄³・寺部 慎太郎⁴・葛西 誠⁵

¹正会員 社会システム(株) (〒153-0043 東京都目黒区東山1-5-4中目黒ビジネスセンタービル)

E-mail:n_okunobo@crp.co.jp

²正会員 (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:mshibata@rtri.or.jp

³フェロー会員 東京理科大学教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:uchiyama@rs.tus.noda.ac.jp

⁴正会員 東京理科大学准教授 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:terabe@rs.tus.noda.ac.jp

⁵正会員 東京理科大学助教 理工学部土木工学科 (〒278-8510 千葉県野田市山崎2641)

E-mail:kasai@rs.tus.noda.ac.jp

本研究は持続可能な幹線旅客交通ネットワークの構築に向けて、環境面からの評価と社会的な評価の2点を考慮した多目的最適化問題を解くことにより、将来の幹線旅客交通ネットワークにおけるサービス供給方法の在り方を検討することを目的としたものである。今後の交通サービス供給は費用や環境に対する制約を考えるとより多様性を持たせる必要があると考えられる。

そこでCO₂排出量削減目標を達成するためのサービス水準の組合せを求める問題を制約条件付き組み合わせ探索問題によって定式化し、遺伝的アルゴリズム (GA) を用いてシミュレーションを行なった。

シミュレーションの結果、地域ごとの需要量や交通条件を考慮しながら公共交通機関の運行頻度を柔軟に設定することが有効であるというサービス供給に関する知見が得ることができた。

Key Words : *inter-city transportation, CO₂, multi-objective optimization, genetic algorithms*

1. はじめに

近年、地球温暖化などの環境問題に対し、世界各国で取り組みが行なわれている。我が国では1997年に議決された京都議定書において、2008年から2012年までに温室効果ガス排出量を1990年比で6%削減することが義務付けられているが、現在の温室効果ガス排出量は2008年の速報値において基準年より1.6%増加している。また政府は2020年までに1990年比で温室効果ガスを25%削減するという新たな目標を立てている。

我が国におけるCO₂排出量のうち、約20%は運輸部門からの排出である。将来の地球環境の持続可能性を考える上で、運輸部門からの排出を削減することは必要不可欠である。交通機関からのCO₂排出量のうち約9割を自動車

が占めており、自動車から公共交通機関に旅客を移すモーダルシフトが進められている。しかし、都市と都市を結ぶ幹線交通の分野においては地域ごとの特性や交通網の発達

の程度により、一概に自動車から鉄道へ旅客を移すことはできず、地域ごとに適材適所の交通体系があると考えられる。本研究では、持続可能な交通ネットワークを考えるうえで、環境面からの評価と社会的な評価の二点を考慮して幹線旅客交通ネットワークの評価を行なうことにより、将来の交通ネットワークにおけるサービス供給方法のあり方と評価手法の二つについて検討することを目的とする。

2. 既往研究のレビューおよび本研究の目的

都市間交通研究の分野では、交通行動分析、交通ネットワーク評価ならびに環境への影響分析などの研究が行なわれてきた。ここでは本研究に関わりの深い交通ネットワーク評価、環境への影響分析についてレビューを行なう。

柁元らは複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークにおける機関選択モデルおよび重力モデルを構築することで、消費者余剰を評価指標としてシナリオごとの便益評価を行なっている¹⁾。村上らは柁元らの研究を元に運行頻度の最適化モデルを提案している²⁾。最適化モデルでは遺伝的アルゴリズムを用いて進化計算を行なうことにより、消費者余剰がより高くなる鉄道・航空ネットワークを求めることで、鉄道と航空を補完的に組み合わせるマルチモーダル化が重要であることを示唆している。

交通機関による環境負荷に関する研究ではライフサイクルアセスメント（以下、LCA）を用いた分析が多く行なわれている。加藤らは超伝導磁気浮上式鉄道を対象にLCAを行なっている³⁾。また柴原らは鉄道と航空を対象にLCAを行ない、各都道府県間を発着地とするODペアの一つひとつについて環境面で優位となる交通機関を示している⁴⁾。

都市間交通およびネットワーク評価と交通機関による環境負荷に関する研究はこれまでも行なわれてきたが、これらの研究はそれぞれが独立しており、例えば都市間交通ネットワークの評価を環境負荷によって行なうといった研究は今まで行なわれていなかった。

しかし最近になって交通ネットワーク評価の評価指標として環境負荷を用いる研究が行なわれ始めている。例えば、花岡らはタイの輸送機関を対象にエネルギー消費量を評価指標に加え最適化することにより、インターモーダル輸送の効果を示している⁵⁾。しかし、得られた結果からはトラック、鉄道および水運の機関分担率が得られているものの、交通機関のサービス水準のあり方は検討されていない。下原らは都市間旅客交通を対象に環境負荷の低減を目指して交通ネットワークの最適化を行なっているが、実際にCO₂排出量など環境負荷を表わす指標は用いられていない⁶⁾。

そこで本研究では、幹線旅客交通ネットワークを対象にCO₂排出量などの環境的評価指標と社会的な評価指標を同時に用いて評価を行なうことにより、環境的・社会的に持続可能な交通ネットワークのあり方を検討することを目的とする。

3. 多目的GAを用いたネットワーク評価システム

(1) 評価システムの目的

本章では、幹線旅客交通ネットワークの評価を行なう

ために構築した評価システムについて述べる。第1章でも述べた通り、本研究の目的は幹線旅客交通ネットワークについてCO₂排出量という環境面からの評価と移動活性度という社会的な観点からの評価を同時に行なうことである。本研究では、鉄道・航空・高速バス・乗用車の4交通機関のサービス水準（運行頻度など）を区間ごとに変化させシミュレーションを行なうため、得られる解候補は膨大な数となる。そこで本研究には膨大な解候補の中から組合せ探索問題の考え方をを用いて代替案を求めるために遺伝的アルゴリズムを導入する。本章では、ネットワーク評価システムに用いられる入力データ及び需要予測モデル、そして評価システムの構築に用いられる遺伝的アルゴリズムの流れについて述べる。

(2) 評価システムに用いる需要予測モデル

評価システムではシミュレーションによって新たに定めたサービス水準による交通機関選択、分布交通量の変化を表わすために、筆者らが先行研究で構築した需要予測モデルを用いる⁷⁾。モデルの概要ならびに推定されたパラメータは以下の通りである。

需要予測モデルは分布交通量モデルと交通機関選択モデルから構成される。分布交通量の推計に用いる発生・集中量は発ゾーン・ゾーンの人口を用いる。また、サービス水準の変化による誘発需要を表現するために分布交通量の説明変数に交通機関選択モデルによる効用値を用いたアクセシビリティ指標（Logsum変数）を導入する。

本研究ではケーススタディとして九州地方を対象に分析を行なう。九州地方は他の地域と異なり、九州という島の中で各交通機関のネットワークが完結しているためネットワークの設定をしやすいことが特徴である。

またパラメータ推計には第4回全国幹線旅客純流動調査から得られたトリップデータと流動表を用いる⁸⁾。

a) 交通機関選択モデル

鉄道・航空・バス・乗用車の4肢選択モデルを構築する(式(1), (2))。

$$P_{in} = \frac{\exp(V_{in})}{\sum_i \exp(V_{in})} \quad (1)$$

$$V_{in} = \beta^t T_{in} + \beta^c C_{in} + \beta^f F_{in} + \beta^i \quad (2)$$

P_{in} : 個人 n が交通機関 i ($=1, 2, 3, 4$) を選択する確率。

V_{in} : 個人 n が交通機関 i ($=1, 2, 3, 4$) から受ける効用のうちの確定項。

β : 未知のパラメータ（ただし、選択肢固有ダミー β は乗用車を除く3肢）。

T_{in} , C_{in} , F_{in} : それぞれ個人 n が交通機関を利用する際の所要時間、費用、運行頻度。

パラメータの推定結果を表-1に示す。モデルの適合度を表わす尤度比も十分な値を示しており、パラメータの符号も妥当であることから、このモデルは交通機関選択を高い精度で表わすことができていると言える。

b) 分布交通量モデル

分布交通量モデルにはグラビティモデルを適用する。グラビティモデルには OD 間の移動のしやすさを表わすアクセシビリティ指標 (Logsum 変数) を導入する。グラビティモデル, アクセシビリティ指標 (Logsum 変数) を式 (3), (4) に示す。

$$T_{OD} = \exp(\beta^0) \cdot (N_o)^{\beta^1} \cdot (N_D)^{\beta^2} \cdot \exp(\beta^3 A_{OD}) \quad (3)$$

$$A_{OD} = \ln \left\{ \sum_i \exp(V_i) \right\} \quad (4)$$

- T_{OD} : ある OD 間の分布交通量。
 N_o : 発ゾーン人口。
 N_D : 着ゾーン人口。
 A_{OD} : アクセシビリティ指標 (Logsum 変数)。
 V_i : ある OD 間の交通機関 i の効用のうちの確定項。
 β : 未知のパラメータ。

パラメータの推定結果を表-2に示す。モデルの適合度を表わす決定係数も高く有意な結果であると言える。またアクセシビリティ指標のパラメータが正となっていることから、OD間の移動がしやすくなれば分布交通量も増加するということが表現されている。

表-1 交通機関選択モデルのパラメータ推定結果

パラメータ	推定値	t値
所要時間[時間]	-0.58	(-16.29)
費用[万円]	-0.71	(-8.09)
運行頻度[Log(本/日)]	0.18	(-1.96)
鉄道定数項	-1.23	(-9.54)
航空定数項	-1.75	(-8.20)
バス定数項	-1.53	(-9.79)
サンプル数		3,278
自由度調整済尤度比		0.393
時間価値[円/分]		136.2

表-2 分布交通量モデルのパラメータ推定結果

パラメータ	推定値	t値
定数項	-12.93	(-501.77)
発ゾーン人口[万人]	1.45	(544.83)
着ゾーン人口[万人]	1.20	(445.43)
アクセシビリティ指標	0.77	(280.60)
対象 OD ペア数		398
決定係数		0.92

(3) 多目的CO₂ナップサック問題

筆者らの先行研究では、需要予測モデルを元に算出された分布交通量に交通機関ごとの CO₂排出原単位を掛け合わせることで交通機関ごとの CO₂排出量を算出し評価指標としている。また、運行頻度, CO₂サーチャージ制度などのサービス水準や新幹線の車両編成成長をいくつかのシナリオごとに設定し, CO₂排出量の削減と移動利便性の確保の両立が可能であることを示している。

ただし、この結果はある特定のシナリオのみでCO₂排出量の削減と移動利便性の確保が検討されたものであり、その他にも良いサービスレベルの組合せが考えられる可能性がある。そこで本研究では交通機関ごとのサービス水準を変化させCO₂排出量の削減と移動利便性の確保を検討する問題を組合せ探索問題と捉え、最適化手法による組合せの探索を行なうネットワーク評価システムを構築することを目的とする。

本研究で用いる組合せ探索は、“CO₂排出量削減目標値を超えないように”という条件の下“移動活性度が高い”サービス水準の組合せを求めるものであり、これ本研究では組み合わせ探索問題の一つであるナップサック問題を用いて評価システムを構築する。

筆者らはこのナップサック問題における制約条件をCO₂排出削減目標値とし目的関数を移動活性度の増加とすることにより“CO₂ナップサック問題”を提唱して分析を行なっている⁹⁾。

このCO₂ナップサック問題を用いた評価の結果、需要量と供給量との差を小さくするサービス供給方法の検討が課題とされている。そこで本研究で提案する評価システムでは上記の課題を解決するために、需給バランスを小さくするという目的を評価に加え、多目的CO₂ナップサック問題による評価システムの構築を行なう。

本研究で用いる多目的CO₂ナップサック問題を以下のように定式化する。

$$\left. \begin{aligned} \max_{F_b, N_b, Sur} \quad & TAC = \sum_{OD} (T_{OD} \cdot L_{OD}) \\ & = \sum_{OD} \left\{ \exp(\beta^0) \cdot (N_o)^{\beta^1} \cdot (N_D)^{\beta^2} \cdot \exp(\beta^3 A_{OD}) \cdot L_{OD} \right\} \\ A_{OD} = \ln \left\{ \sum_i \exp(\beta^t T_{iOD} + \beta^c C_{iOD} + \beta^f F_{iOD} + \beta^{iOD}) \right\} \\ \max_{F_b, N_b, Sur} \quad & SD = \frac{1}{sd_r + sd_a + sd_b} \\ & sd_i = \left| S_i - \sum_{OD} T_{iOD} \right| \\ \text{s.t.} \quad & E_n \leq E_g, 0 \leq F_{ri} \leq B_{ri}, 0 \leq F_{ai} \leq B_{ai}, \\ & 0 \leq F_{bi} \leq B_{bi}, 1 \leq N_i \leq N, 0 \leq Sur \leq S \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

- TAC : 移動活性度.
- L_{OD} : ある OD 間の区間距離.
- S_r, S_a, S_b : それぞれ鉄道, 航空およびバスの供給量.
- sd_r, sd_a, sd_b, sd : それぞれ鉄道, 航空, バスおよびネットワーク全体の需給バランス.
- $T_{rOD}, T_{aOD}, T_{bOD}$: それぞれ鉄道, 航空およびバスのある OD 間における交通量.
- SD : 評価指標【需給バランス】.
- E_r, E_a, E_b, E_c, E_n : それぞれ鉄道, 航空, バス, 乗用車およびネットワーク全体の CO_2 排出量.
- $F_{r_i}, F_{a_i}, F_{b_i}$: それぞれ区間別の鉄道, 航空およびバスの運行頻度.
- $B_{r_i}, B_{a_i}, B_{b_i}$: それぞれ鉄道, 航空およびバスの区間別供給制約.
- E_g : CO_2 排出量削減目標値.
- Sur : CO_2 サーチャージ料金.
- N_i : ある区間 i における鉄道車両編成長.
- N : 車両編成長の供給制約.
- S : CO_2 サーチャージ料金の供給制約.

(4) 多目的GAによるネットワーク評価システムの構築

定式化した CO_2 ナップサック問題は、複数の制御変数を持つ非線形最適化問題として考えることができるため、解析的に解くことは非常に困難であると考えられる。そこで本研究では遺伝的アルゴリズム（以下、GA）を用いてネットワーク評価システムを構築する。

GAでは遺伝子操作として、交叉、突然変異、エリート保存ならびにルーレット選択を行なうが、エリート保存の前に各個体の適合度を求めるためにパレートランキングを行なう。

シミュレーションでは集団数50、最大世代数10,000、エリート保存数5、交叉確率0.6、突然変異率0.07、 CO_2 排出削減目標値を20%削減として進化計算を行なった。シミュレーションの結果、10,000世代の進化計算に2時間49分43秒を要した（Windows Vista (32bit) , CPU : Core 2 Duo (2.27GHz) , メモリ2.00GB)。

4. シミュレーション結果と考察

(1) 進化計算結果

進化計算を行なった結果、図-1 に示すサービス水準の組合せの分布が得られた。多目的組合せ探索では複数の目的関数の重視度によって様々な解が考えられる。本章では得られたサービス水準の組合せの中で特徴的な2つの解を取り上げ考察を行なう。ここで取り上げるサービス水準の組合せは図-1において赤い丸で示したもの

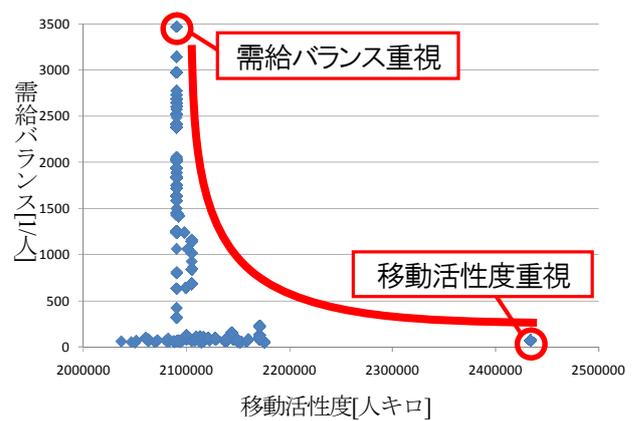


図-1 得られた解とパレート曲線

である。左上の需給バランスの評価値が高い解を“需給バランス重視”，右下の移動活性度の評価値が高い解を“移動活性度重視”の解とする。表-3 にそれぞれを重視した解の評価値を示す。

(2) サービス水準の組合せ

需給バランス重視解と移動活性度重視解の比較を行ない、望ましいサービス供給方法について検討する。ここでは鉄道ネットワークの比較を行なう。

図-2 に 2020 年における需給バランスと移動活性度を重視した場合の鉄道の運行頻度の比較を図示する。

需給バランス重視の場合、小倉～博多～鹿児島中央の新幹線区間で1日1往復、その他の区間においては鉄道運行なしという結果が得られた。評価指標に用いた需給バランスは交通サービスの供給量と需要量の差で求められるため、供給量が少なくなればそれに伴い需要量も減少し結果として需給バランスは良い、という結果となる。この結果は、環境負荷の少ない交通ネットワークに向けたサービス供給の極端な例を示していると考えられる。

移動活性度を重視したサービス水準の組合せでは、新幹線を中心に高い運行頻度を表わしており、環境負荷低減と移動活性度重視の交通ネットワークでは公共交通の運行頻度増加が有効であると示唆される。

航空、バスに関しても同様の結果が得られている。

表-3 シミュレーションから得られた評価指標

	需給バランス重視	移動活性度重視
CO_2 排出量 [t/日]	358	4,450
移動活性度 [万人km]	209.0	243.4
需給バランス [1/人]	3470×10^9	72×10^9

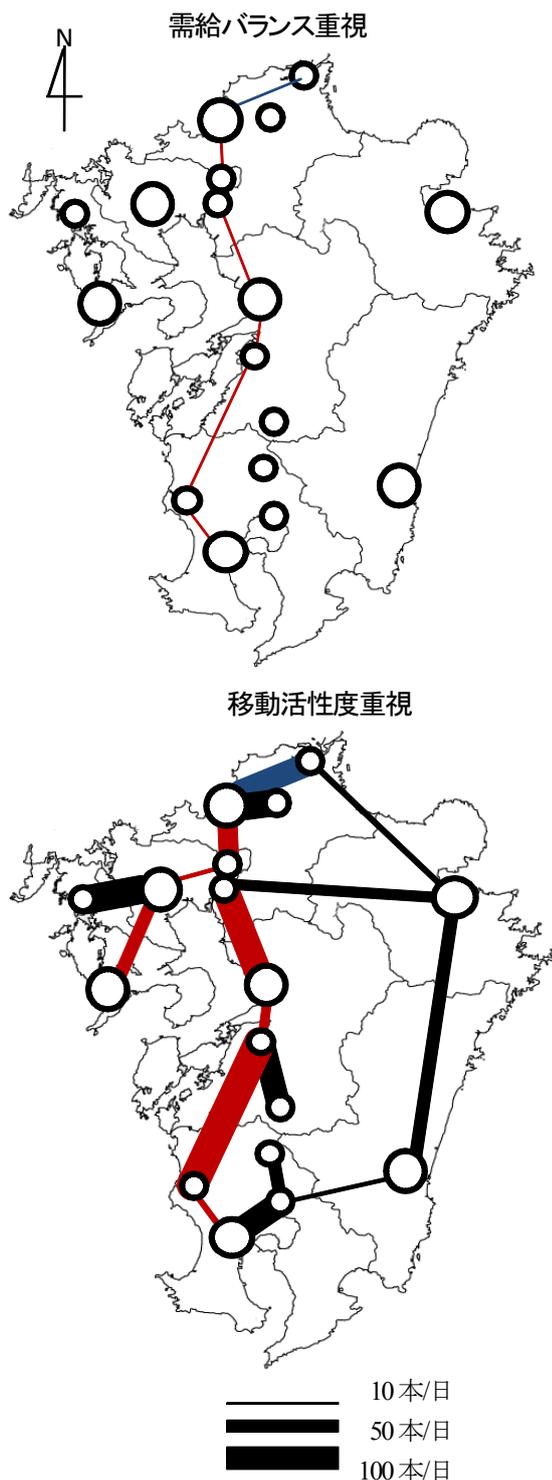


図-2 鉄道ネットワークの比較

5. おわりに

本研究では、CO₂排出量を制約条件として幹線旅客交通ネットワークにおけるサービス供給方法を複数の目的関数によって評価する手法を提案した。単目的、多目的なCO₂ナップサック問題によるネットワーク評価の結果、

公共交通の運行頻度や鉄道の車両編成を地域の需要に合わせてフレキシブルに設定することが環境負荷の少ない交通ネットワーク整備に有効である可能性が示唆された。本研究で提案したネットワーク評価手法は持続可能な幹線旅客交通ネットワークを検討する有用なツールとなり得ると考えられる。

参考文献

- 1) 栢元淳平・塚井誠人・奥村誠：複数経路を考慮した鉄道・航空ネットワークの評価，土木計画学研究・論文集，Vol.20，No.1，pp.255-260，2003.
- 2) 村上直樹・竹内太郎・奥村誠・塚井誠人：航空との補完的サービスを考慮した最適鉄道運行計画，土木計画学研究・論文集，Vol.23，No.3，pp.629-634，2006.
- 3) 加藤博和・柴原尚希：公共交通整備計画評価へのLCA適用—超伝導磁気浮上式鉄道を例として—，日本LCA学会誌，Vol.2，No.2，pp.166-175，2006.
- 4) 柴原尚希・加藤博和：地域間高速交通機関整備の地球環境負荷からみた優位性評価手法，土木計画学研究・講演集，Vol.37，CD-ROM，2008.
- 5) 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削減効果の計測—タイを事例として—，運輸政策研究，Vol.12，No.4，pp.24-31，2010.
- 6) 下原祥平・長谷部知行・金子雄一郎・島崎敏一：社会・環境の変化を考慮した都市間交通ネットワークの運用に関する研究，土木計画学研究・講演集，Vol.41，CD-ROM，2010.
- 7) 奥ノ坊直樹・柴田宗典・内山久雄・寺部慎太郎：低炭素社会に向けた幹線旅客交通ネットワークにおけるサービス供給に関するシナリオ分析，土木計画学研究・講演集，Vol.39，CD-ROM，2009.
- 8) 国土交通省政策統括官：平成18年度全国幹線旅客純流動調査報告書，2007.
- 9) Naoki OKUNOBO・Munenori SHIBATA・Hisao UCHIYAMA・Shintaro TERABE：A Study on Service Supply Planning of Inter-Regional Transportation Network with the Help of Multi-Objective Optimization Method，The General Proceedings of the 12th World Conference on Transport Research，2010.