

公共交通ネットワークにおける ボトルネック駅の抽出手法

渡邊 拓也* 柴田 宗典* 鈴木 崇正*

A Method of Extracting “Bottleneck” Stations on the Inter-Regional Public Transportation Network

Takuya WATANABE Munenori SHIBATA Takamasa SUZUKI

This study attempts to develop a method for extracting “bottleneck” stations on the inter-regional public transportation network. Investing in these bottleneck stations enables the network to be more convenient. First, a method of extracting the bottleneck stations on the network is formulated based on multi-objective optimization with the genetic algorithm. Second, a system is developed to extract the bottleneck stations automatically and visually. A network outlining the actual inter-regional network in Japan is constructed. The results of numerical experiments on this network suggest that bottleneck stations may be located not only in the metropolitan areas but also in the principal cities in the countryside.

キーワード：都市間交通，ネットワーク最適化，多目的最適化，遺伝的アルゴリズム，ボトルネック駅

1. はじめに

鉄道を利用する際には、駅にアクセスするための他の交通機関との乗継行動が発生する。その乗継の利便性を高めることは、公共交通ネットワーク全体の利便性向上に資する。鉄道総研では、ある一つの駅を対象とした乗継利便性を評価するシステム¹⁾により、乗継経路の改良を定量的に評価する手法を開発した。

しかし、都市間公共交通ネットワーク上で、何らかの要因により円滑な交通ネットワークの実現を阻害しているために乗継経路の改良を優先的に行うべき「ボトルネック駅」の存在を明らかにする手法は筆者らの知る限り存在していない。そのため、ボトルネックである駅と、その駅の旅客数を把握できれば、この駅の乗継利便性の向上を通して、都市間公共交通ネットワーク全体の利便性の向上に大きく寄与することが期待される。

そこで本研究では、都市間旅客交通ネットワークを対象としたボトルネック駅抽出手法を開発した。本稿ではこの手法について解説し、遺伝的アルゴリズムを実装したプログラムによって、ボトルネック駅の抽出を行った結果について考察する。

2. ボトルネック駅抽出手法の構築

2.1 ボトルネック駅抽出の考え方

幹線鉄道、航空、幹線バスなどによって構成される都市間の公共交通ネットワークについて考える。現状の

* 信号・情報技術研究部 交通計画研究室

サービス供給の水準（例えば、各区間の運行本数）を変化させることで、現状のネットワークよりも利用者利便性が高くなり、かつ環境負荷が減少するような理想的なネットワークが得られるとする。ここで、理想的な交通ネットワークにおける旅客流動量よりも現状の設備容量が小さいために、円滑な交通ネットワークの実現を阻害している駅をボトルネック駅と定義する。理想的なネットワークと現状のネットワークを比較したとき、ボトルネック駅では、乗換旅客数に大きな差があると考えられる。

そこで本研究では、公共交通ネットワークの最適化を通じて得られた最適ネットワークと現状のネットワークそれぞれについて、各駅の乗換旅客数を算出し、最適状態の旅客数が、現状の旅客数を大きく上回るボトルネック駅を抽出する。もし、このような駅に対して設備容量の拡大等の投資を行うことが出来れば、より円滑な公共交通ネットワークを実現することが出来るものとする。

2.2 ボトルネック駅抽出手法の定式化

ボトルネック駅を抽出するには、まず、ある評価指標を基にした都市間公共交通ネットワークの最適状態を定量的に算出する必要がある。この最適状態を求めるために、任意の2都市間の組合せについて経路を探索し、経路ごとの交通量を求め、ネットワークの評価指標を算出する。最終的に求めた最適ネットワークと初期ネットワークにおける乗換旅客数を比較することで、ボトルネック駅を抽出する。なお、計算負荷を抑えるため、各リンクにおけるOD（発駅(Origin)と着駅(Destination)の組合せ)交通量や運行本数は双方向で同一と仮定し、

特集：輸送計画・情報技術

上下線の平均値を計算に用いるものとする。本節では、図1に示すフローに従って、ボトルネック駅を抽出する手法の詳細を、順を追って説明する。

2.2.1 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、先行研究²⁾で構築した経路選択モデルにおける運賃・料金と所要時間に係るパラメータの比率を時間価値とする選好接近法³⁾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。

2.2.2 経路選択確率の算出

ネットワーク上の各経路には、複数の幹線交通機関を組合せて利用する混合経路も存在する。そこで、経路選択確率算出に通常用いられる非集計ロジットモデルよりも、混合経路を含むネットワーク上の経路選択において適切に経路選択確率を算出できる、改良型C-logitモデル²⁾を適用する。なお、各経路の効用算出に関する説明変数は、所要時間、運賃・料金、運行本数、乗換回数である。

2.2.3 分布交通量モデル

任意の2都市間の交通量は、2都市の人口、2都市間の移動の利便性を改良型C-logitモデルの効用関数により定量化した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を作成し、このモデルを用いて推定

する。各パラメータの推定結果を表1に示す。t値はパラメータの統計的有意性を示す指標であり、いずれのパラメータもこの値の絶対値が2.58を上回っているため、有意と判断できる。

アクセシビリティ指標により、ネットワーク変化に伴う交通量の増減も表現することが出来る。また、人口を説明変数に用いているため、将来の人口予測値をモデル式に代入することで、将来における需要推計が可能である。

2.2.4 ネットワークの評価基準

ネットワークの評価指標として、利便性向上効果を貨幣換算した指標である消費者余剰と二酸化炭素排出量の二つを設定し、多目的最適化により最適ネットワークの算出を目指す。

消費者余剰UB(円/日)は、消費者余剰法⁴⁾により、式(1)、(2)によって算出される。算出には、現状のネットワークと最適ネットワークにおける各ODの交通量および一般化費用を用いる。

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

$$C_{OD}^k = \log \left\{ \sum_i \exp(V_{OD_i}^k) \right\} / \alpha_{cost} \quad (2)$$

ここで、

T_{OD}^k : ネットワークkのOD間の分布交通量

OD_i : あるOD間におけるi番目の経路

$V_{OD_i}^k$: ネットワークkの経路 OD_i の効用

C_{OD}^k : ネットワークkのOD間の一般化費用

α_{cost} : 効用に関する運賃・料金のパラメータ

k: ネットワークの状態 (k=0 現状; k=1 最適)

二酸化炭素排出量 CO_2 (tCO₂/日)は、最適ネットワーク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であり、式(3)で表される。

$$CO_2 = \sum_e x_{e,freq}^1 \cdot x_{e,dist}^1 \cdot UCC_e \quad (3)$$

ここで、

$x_{e,freq}^1$: 最適ネットワークのリンクeの運行本数

$x_{e,dist}^1$: 最適ネットワークのリンク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

表1 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

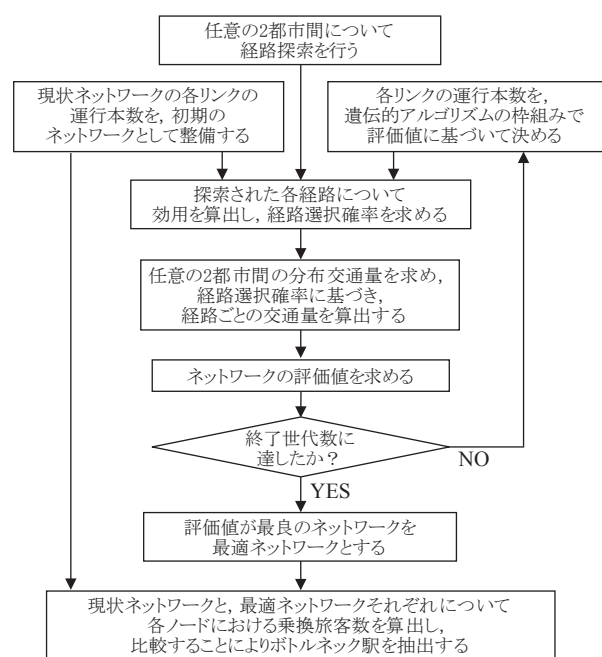


図1 ボトルネック駅抽出のフロー

2.2.5 制約条件と目的関数

前項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) 1リンクあたり運行本数の上限および下限
- (2) 各ノードを発着する運行本数の総和の上限
- (3) 運行キロ（列車キロ、飛行キロ等）の総和の上限
- (4) 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設定した（表2）。

これら4つの制約条件のうち、(4)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⁵⁾によって対応する。輸送量の上限を越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、式(4)、(5)のように最適化すべき目的関数をそれぞれ設定する。なお、両方の目的関数を最大化問題とするため、式(5)では二酸化炭素排出量CO₂の前に負号をつける。

$$eval_{UB} = UB - \lambda_{UB} \cdot \sum_e OF_e \quad (4)$$

$$eval_{CO_2} = -CO_2 - \lambda_{CO_2} \cdot \sum_e OF_e \quad (5)$$

ここで、

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_{CO₂}：積み残し1人あたりのCO₂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線特急列車の実際の指定席料金や座席指定に対する支払意志額の推計例⁶⁾を参考に、λ_{UB}=500（円/人）とする。CO₂排出量に関する罰則の値は、λ_{UB}に被害費用に基づくCO₂の貨幣価値³⁾を乗じ、λ_{CO₂}=1.29 × 10⁻²（tCO₂/人）とする。

2.2.6 ボトルネック駅の抽出

最適ネットワークと現状ネットワークについて、それ

表2 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 運行本数 (本)	1ノードあたり 発着回数 (回)	交通機関別 運行キロ (万km)	交通機関別 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

†：3.1.2で詳述

ぞれの駅sの乗換旅客数を、乗換前後の利用交通機関の組合せ別に算出する。現状と比較した、最適状態の組合せ別の乗換旅客数の超過分の総和ADT_sをとる。これをボトルネック駅の判定指標とする。すなわち、ADT_sが大きいほど、駅sが公共交通ネットワークにおいて、改善を検討すべきボトルネックとなっていることを意味する。

3. ボトルネック駅抽出システムの開発

前章で説明したボトルネック駅の抽出手法に基づいて、実際に、対象とする都市間公共交通ネットワークを設定し、ボトルネック駅を抽出するシステムを開発した。以下、システムの概要について述べる。

3.1 ネットワークの設定

対象とするネットワークは、駅などの交通結節点を表すノードと、ノード間を結ぶリンクで構成される。以下に、その設定方法についての詳細を述べる。

3.1.1 ノードの設定

日本全国を207生活圏⁷⁾に分割し、各生活圏を代表するターミナルとして、一生活圏に一つのノードを設定する。基準とするのは、各生活圏における最も代表的な市町村の中心的な駅とする。生活圏内に鉄道駅がない場合は、バスターミナルとする。また、ネットワーク上の重要な分岐駅にもノードを設定する。

3.1.2 リンクの設定

リンクは交通機関別に設定する。対象とする交通機関は、航空、新幹線、在来線特急列車、幹線バスといった全国幹線旅客純流動調査⁷⁾で対象となっている公共交通機関の路線とする。各リンクは交通機関別に、ノードを相互に結ぶように設定する。リンクごとに運行本数、所要時間、区間距離、運賃・料金の各サービス水準情報を設定する。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。これらは、基本的には、2010年に実施された第5回全国幹線旅客純流動調査⁷⁾の平日調査日である2010年12月1日を基準に設定する。

航空リンクでは、所要時間は、飛行機のフライト時間に、搭乗前の保安検査場通過や降機後の荷物受取りにかかる時間として80分を加えた時間とする。また、航空リンクと別の交通機関のリンクを乗り継ぐ場合には、空港から生活圏内の基準駅までのアクセス・イグレス交通の運賃・料金や所要時間も考慮する。

在来線特急リンクでは、経路探索の手法としてダイクストラ法を用いるため、各リンクの運賃・料金は区間距離に線形に依存する関数によって計算されるものとする。なお、その回帰係数は、乗り換えなしに一列車で行

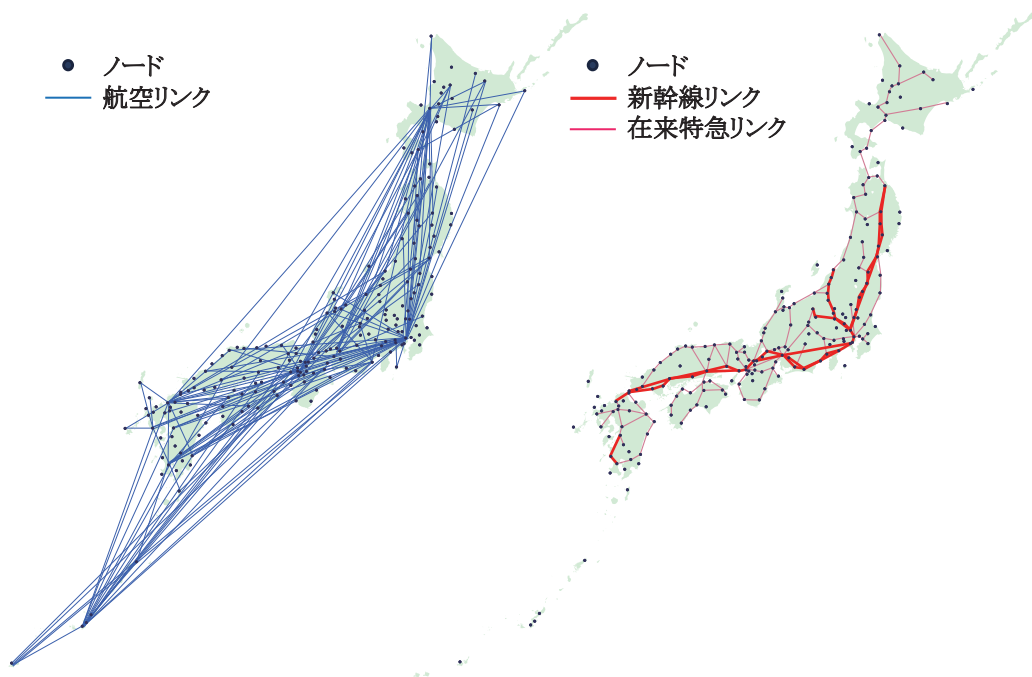


図2 構築した航空・幹線鉄道ネットワークのイメージ（2010年12月の状況に準拠）

き来することができる全ての都道府県代表所在地駅の組合せを発着地とした全 82 経路を対象に、最小二乗法に基づいて算出する。

新幹線リンクでは、停車駅の少ない速達タイプと各駅停車タイプを区別出来るように、別リンク（スーパーリンク）を設定する。また、新幹線の運賃・料金の設定でも、在来線特急と同様に、区間距離に線形に依存する関数によって計算されるものとする。回帰係数算出の対象とするのは、乗換なしに一列車で行き来することができる全ての都道府県代表所在地駅と九州新幹線の新八代～鹿児島中央の 85 経路とする。

幹線バスは、クローズドドアシステム（乗車または降車可能なバス停が制限されている制度）のため、乗り降りが可能な生活圈間の全ての組合せを反映させた経路探索に用いるネットワークと、運行本数決定に用いるネットワークを分けて設定する。また、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基準駅までのアクセス・イグレス交通の運賃・料金や所要時間も考慮する。

さらに、これまでに説明したどの交通機関でも、如何なるリンクも接続されない駅には、幹線鉄道（新幹線、在来線特急）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。

以上のように構築した航空ネットワークおよび幹線鉄道ネットワークのイメージを図2に示す。なお、幹線バスネットワークはリンク本数が非常に多く、図で表現すると煩雑になるため、ここでは省略する。

3.2 遺伝的アルゴリズムによるネットワーク最適化とボトルネック駅の抽出

式(4)、(5)で表した二つの目的関数を最適化するようなネットワーク上の運行本数の組合せを、多目的最適化によって求める。ただし、これら二つの目的関数の間にはトレードオフの関係が成立していると考えられるため、最良と言える解が必ず一つに定まるとは限らない。「自分より、全ての目的関数が優れている解は存在しない」解の集合を最適であるとし、これをパレート最適解と呼ぶ（図3）。本研究では、多目的遺伝的アルゴリズムを用いて、パレート最適解であ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4に示す。二つの目的関数値から、各解の適合度をパレートのランキング法とシェアリング手法⁸⁾を用いて算出する。そして、ルール選択によって、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す、予め設定した繰り返し計算の上限回数に達した場合に、その時点での最適ネットワークを出力する。こうして得られた最適ネット

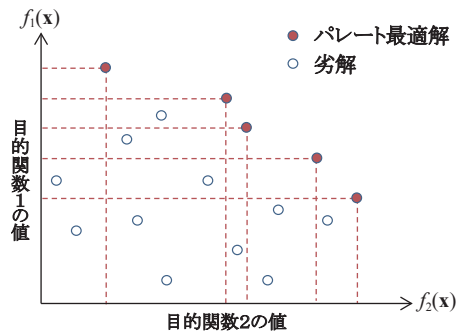


図3 パレート最適解

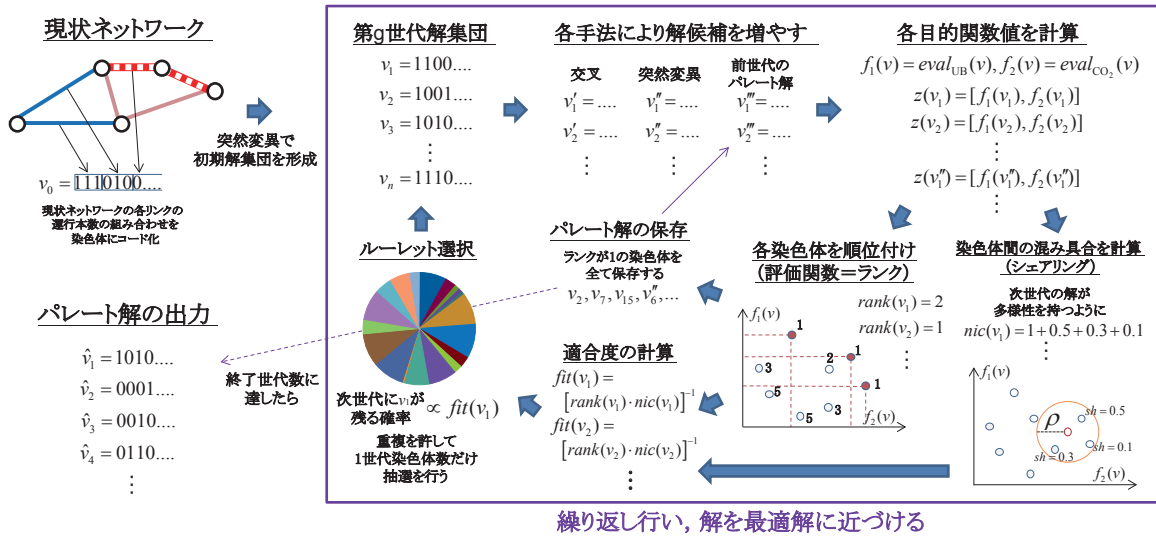


図4 多目的遺伝的アルゴリズムの計算フロー

ワークと現状のネットワークを比較することで、ボトルネック駅を抽出する。

3.3 システムの出力例

開発したシステムには、各リンクの断面交通量を表示する機能と、乗換旅客数の超過分の総和 ADT_c が設定値以上になった駅をボトルネック駅としてハイライトする機能が実装されている。また、選択したリンク・ノードの発着本数や乗換旅客数等の情報も表示される仕組みになっている。抽出されたボトルネック駅のハイライト表示画面イメージを図5に示す。

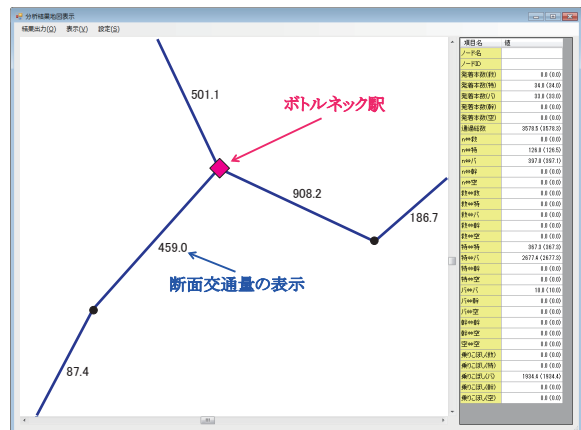


図5 ボトルネック駅のハイライト表示例

4. 開発したシステムによる分析例

開発したシステムを用いた分析例として、前章で構築したネットワークを対象に、ボトルネック駅の抽出を試みる。なお、遺伝的アルゴリズムの設定パラメータは、1世代あたりの個体数 50、世代数 1000、交叉率 0.1、突然変異率 0.9 とする。

最終世代におけるパレート解の分布を図6に示す。パレート解 34 個のうち、図中の緑の楕円で囲んだ 7 つの解は、消費者余剰と二酸化炭素排出量が共に改善されているネットワークである。今回はその中でも、消費者余剰に関する評価値が最大であるネットワーク (図6の青矢印で示す) を対象として考察を進める。実用上、このネットワークは、環境負荷が現状よりも小さくなるネットワークのなかで、最も利用者利便性向上の効果が高いネットワークと捉えることが出来る。パレート解による多目的最適化の枠組みを用いる以上、複数の最適ネットワークが結果として出力されるため、分析者は、分析の

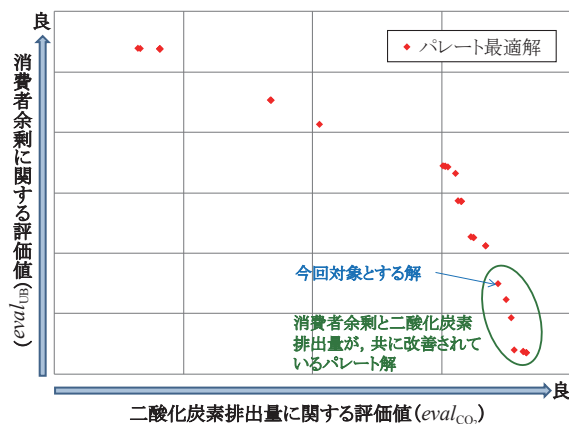


図6 分析結果におけるパレート解の分布

目的に最も合致した解を、評価指標の表示機能等を使用して選択することとなる。

続いて、このネットワーク上の各駅におけるボトル

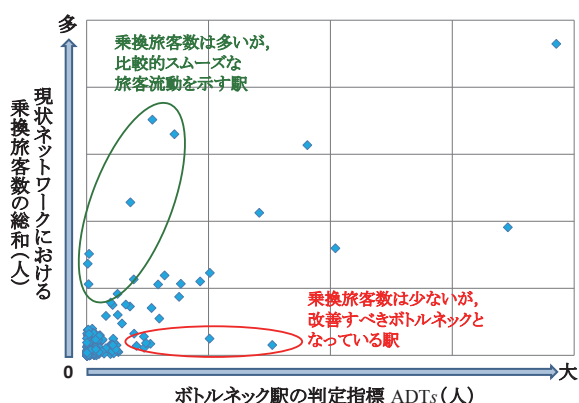


図7 駅の規模とADTの関係

ネック駅の判定指標ADT_iと、現状のネットワークにおける乗換旅客数の総和の関係を図7に示す。縦軸は駅の規模を表す指標であり、この値が大きいくほど、利用客数の多い大規模なターミナル駅であると解釈できる。

乗換旅客数そのものの差分をボトルネック駅の判定指標として用いているため、利用客数の多さに比例して、判定指標も大きくなる傾向が見受けられる。しかし、図7の緑の楕円で囲った範囲に位置する各駅のように、乗換旅客数に対して、ボトルネック駅の判定指標が相対的に小さい駅も存在していることがわかる。このような駅は大都市圏に位置している利用者数の多い駅であるが、比較的スムーズな旅客流動を示しており、ボトルネックの観点から言えば、それほど深刻な状況ではない駅であると考えられる。

一方、図7の赤の楕円で囲った範囲に位置する各駅は、乗換旅客数は少ないものの、ボトルネック駅の判定指標が大きい。これらは現状のネットワークにおいて、それほど乗降客数が多いとは言えない、地方都市における交通のターミナルとなっている駅である。大都市のターミナルに比べて注目されにくい小規模ターミナル駅でも、ネットワーク全体の円滑性を阻害する、改善すべきボトルネック駅である可能性を本分析結果は示唆している。

このようにしてボトルネック駅が抽出できれば、既存の手法¹⁾等を用いることによって、駅周辺の特性も考慮した、具体的な駅設備の改良案の検討を行うことが可能となる。

5. おわりに

本研究では、都市間の公共交通ネットワークの最適化を通じて、円滑な交通ネットワークの実現を阻害しているボトルネック駅を抽出する手法を開発した。具体的には、ネットワーク全体の消費者余剰と二酸化炭素排出量を評価指標として、多目的遺伝的アルゴリズムによって求めた最適ネットワークと、現状のネットワークにおける乗換旅客数の差が大きい駅をボトルネック駅として抽出するものである。また、このシステムを用いた分析を通じて、大都市圏に存在する駅だけでなく、乗換旅客数が比較的小さい地方都市の主要駅でも改善を検討すべきボトルネックが存在する可能性が示唆された。

今後は、本システムによって抽出されたボトルネック駅に対し、他交通機関との乗継利便性の定量的な評価¹⁾を行うことで、より具体的な駅ごとの乗継経路の改良が可能になることが期待される。

文献

- 1) 鈴木崇正, 武藤雅威, 松原広, 山本昌和: 駅周辺の特性を考慮した鉄道とバスの乗継利便性評価手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.9, pp.41-46, 2013
- 2) 柴田宗典, 奥田大樹, 鈴木崇正: 交通機関の乗継を考慮した幹線鉄道の需要予測モデル, 鉄道総研報告, Vol.28, No.4, pp.47-52, 2014
- 3) 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(共通編)
<http://www.mlit.go.jp/tec/hyokka/public/090601/0906012.html> (参照日: 2015年2月20日)
- 4) 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)
http://www.mlit.go.jp/tetudo/tetudo_fr1_000040.html (参照日: 2015年2月20日)
- 5) Colin, R. R.: 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, 横山隆一ら(訳), 日刊工業新聞社, 1997
- 6) 中川伸吾, 柴田宗典, 尾崎尚也, 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
- 7) 国土交通省: 全国幹線旅客純流動調査
http://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/soukou/sogoseisaku_soukou_fr_000016.html (参照日: 2015年2月20日)
- 8) 玄光男, 林林: ネットワークモデルと多目的GA, 共立出版, 2008