

3306 C*-Logit モデルを適用した鉄道ネットワーク配分分析

—高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けて—

An Analysis on Network Assignment Applied C*-Logit Model on High Density Railway Network

学【士】 ○ 大石 洋也 (東京理科大学), 正【士】 日比野 直彦 (東京理科大学)

正【士】 内山 久雄 (東京理科大学)

Hiroya OISHI, Tokyo University of Science, 2641, Yamasaki, Noda-shi, Chiba #278-8510
Naohiko HIBINO, Tokyo University of Science, 2641, Yamasaki, Noda-shi, Chiba #278-8510
Hisao UCHIYAMA, Tokyo University of Science, 2641, Yamasaki, Noda-shi, Chiba #278-8510

Abstract: The railway network in Tokyo Metropolitan Area (hereinafter TMA) has been developed and improved with high density. The railway passengers are able to choose one route from among several alternative routes in consideration of the level of whole railway services from the origin to the destination. On the other hand, it is found that there is a similarity among the alternative routes. This study proposes railway network assignment system applied C*-Logit model which is non-IIA route choice model. In addition, the study examines the method of definition of the choice set in the railway network assignment system, in order to be applied on the high density railway network.

キーワード: C*-Logit モデル, 選択肢集合, ネットワーク配分システム

Key Words : C*-Logit model, choice set, network assignment system

1. はじめに

首都圏の鉄道ネットワークは、東京駅を中心に半径約70kmに及び、広範囲かつ高密度な鉄道ネットワークを形成している。このようにネットワークが高密度に整備された地域においては、同一発着地に対して複数の経路が存在し、その経路間に重複が数多く見られる。このような地域において、鉄道利用者の経路選択行動を分析するには、選択肢集合の独立性が必ずしも保証されていないことから、選択肢集合の類似性を表現できる非IIA型経路選択モデルが適しているとされている。非IIA型経路選択モデルにはC-Logitモデル¹⁾等、様々なモデルが提案されているが、筆者らはC-Logitモデルの同重複率・異所要時間が表現できないという欠点を改良したC*-Logitモデル²⁾を提案してきた。

また、近年我が国における高齢社会の進展、厳しい財政状況、国民のニーズの多様化から、今後の鉄道整備においては、限られた財源の中で効率的かつ重点的な整備を行なう必要があり、これに対応して各種サービスの様々な施策が考えられている³⁾。これらの施策を計画・評価していくには、乗換え駅施設整備等の鉄道整備に関するミクロな変化を正確に表現し、正しく施策を評価していかなければならない。そこで筆者らは、乗換え駅構造を中心にネットワークを詳細に設定したODベースの鉄道ネットワーク配分システムの開発に努めてきた。

そこで本論文では、これらの2つの成果をまとめ、首都圏鉄道ネットワークを分析対象に、鉄道経路選択行動

規範にC*-Logitモデルを用いたODベースの鉄道ネットワーク配分システムの提案を行なう。また、高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けて、配分結果の精度に大きな影響を与える選択肢集合の経路本数に関する吟味を行ない、本配分システムの首都圏鉄道ネットワークへの有用性を明らかにすることを目的とする。

2. 鉄道ネットワーク配分システムの開発

鉄道ネットワーク配分システムは、ネットワーク、経路選択行動規範となる効用関数、OD交通量の3つの要素で構成されている。以下にそれぞれの設定方法について述べる。

2.1 鉄道ネットワーク

鉄道ネットワークは、道路ネットワークと異なり次のような特徴がある。

- ① 列車が混雑しても所要時間の変化がほとんどない。
- ② 通常、同一路線に複数の列車種別が存在するため、同一路線内に複数のリンクが存在する。
- ③ 同一種別でも行き先の異なる列車が同一路線上を走っている。
- ④ 同一路線内の他種別の列車、あるいは他の路線への乗換えが可能であり、しかも乗換えに要する時間が場合によって異なる。

以上の特徴をふまえ、筆者ら^{4), 5)}は、図-1に示すようにネットワークを設定する。乗車部分においては、同一路線に様々な種類の列車が走る場合が存在するため、列車種別毎にノード、リンクを設ける。乗換え部分においては、乗換え駅施設構造を詳細に捉えるため、ホームノード、階段下ノード、階段上ノード、改札口ノードを設定し、階段リンクを設けることにより、エスカレータ設置の有無を表現可能にしている。また、同一会社内の路線の場合に限り、各路線のノードの他に出発ノードおよび到着ノードを設ける(図-2)。これはODデータとして用いる大都市交通センサスのデータが、同一駅であっても事業者が異なると別の駅として扱っているからである。

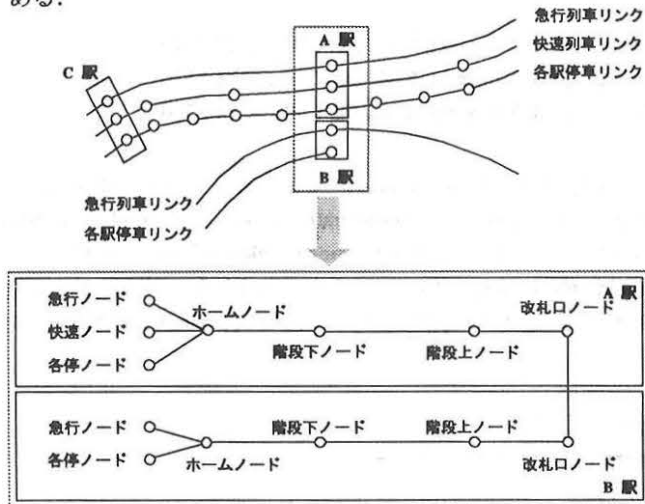


図-1 ノード・リンクの設定

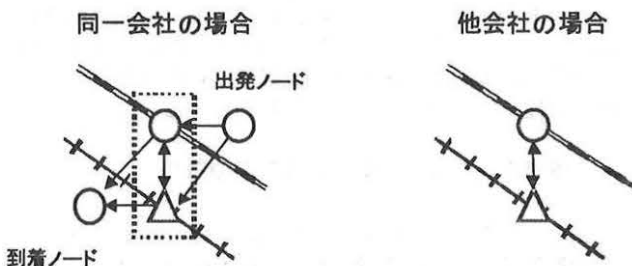


図-2 出発ノード・到着ノードの設定

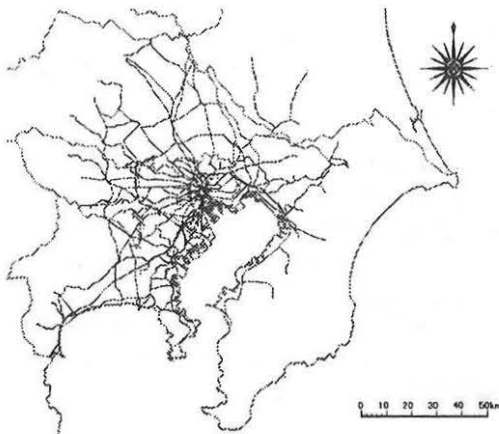


図-3 分析対象範囲

配分対象となる鉄道ネットワークは、首都圏全域(東京駅から約70km圏内)の在来線119路線を対象としている(図-3)。鉄道ネットワークは平成12年度のものに基づき作成し、列車乗車部と駅乗換え部を合わせた首都圏鉄道ネットワークのノード数は4,976個、リンク数は14,049本(乗車リンク4,594本、乗換えリンク9,455本)である。

2.2 効用関数

本研究では、鉄道利用者の経路選択行動規範は、筆者らが構築したC*-Logitモデル²⁾のパラメータより導出される効用関数を基にしている。

C*-Logitモデルは、C-Logitモデル¹⁾の確定項で類似性を表現するという特徴を残しつつ、問題とされていた同重複率・異所要時間が表現できないという点を改良したものである。式(1)~(5)にそのモデル式を示す。ここで、選択肢 r に関して、 U は効用、 V は確定効用、 CF^* は重複を表現する項、 P は選択確率、 T_0 は分析対象とする選択肢集合の所要時間の平均値、 d_{ij} は経路 i と経路 j の重複率、 T_i 、 T_j はそれぞれ経路 i 、経路 j の所要時間、 β' 、 θ は推計パラメータである。確定効用のパラメータおよび β' 、 θ を同時推計するモデルである。なお、 T_0 によってパラメータは決定されるため、適用においても、パラメータ推計した際の T_0 を用いる必要がある。

$$U_r = V_r - CF_r^* + \varepsilon_r \quad (1)$$

$$P_r = \frac{\exp(V_r - CF_r^*)}{\sum \exp(V_r - CF_r^*)} \quad (2)$$

$$CF_r^* = \beta' \ln \sum (d_{ij})^{\gamma'} \quad (0 \leq \beta' \leq 1, \gamma' > 0) \quad (3)$$

$$\gamma' = \frac{1}{10} (\exp(d_{ij}) - 1) (\beta' - 1) (\sqrt{T_i T_j} - T_0) + \gamma' \quad (4)$$

$$\gamma' = \exp(-\exp(\theta)) + 1 \quad (5)$$

P_r	: 選択確率
V_r	: 確定効用
CF_r^*	: Commonality Factor
β'	: 推計パラメータ
θ	: 推計パラメータ
T_i	: 経路 i の所要時間
T_j	: 経路 j の所要時間
T_0	: 選択肢集合の所要時間の平均値
d_{ij}	: 経路 i と経路 j の重複率

説明変数は、乗車時間(分)、6ヵ月定期運賃(千円)、初乗り駅の列車本数(本/時)、乗換え駅における水平移動時間(分)、上り方向移動時間(分)、下り方向移動時間(分)、乗換え待ち時間(分)、混雑率関数(分 $\times$ (%)²)、階段利用率の9変数である。なお混雑率指標とは、混雑率の2乗にその区間の所要時間を乗じたものである。階段利用率は、乗換え時の全上下方向移動時間に対する全階段移動時間の比である。これが大きいと階段利用が多く、小さいとエスカレータ利用が多いことを意味する。

表-1に鉄道経路選択モデルの推定結果を示す。尤度比、 t 値から統計的に有意なモデルであることが見て取れる。このパラメータの推定結果を用いて、効用関数とする。

表一 経路選択モデルのパラメータ推定結果

説明変数	パラメータ	t 値
乗車時間 (分)	-0.0809	-3.94
6 ヶ月定期運賃 (千円)	-0.0184	-1.97
乗換え時間	水平移動時間 (分)	-0.154
	上り方向所要時間 (分)	-0.576
	下り方向所要時間 (分)	-0.482
	待ち時間 (分)	-0.220
初乗り本数 (本/時)	0.0920	2.66
混雑指標 (分×%)	-0.0122	-1.97
階段利用率	-1.04	-15.9
β'	0.949	14.7
θ	3.71	57.1
尤度比	0.273	
的中率	72.4	
サンプル数	239	

2.3 OD交通量

配分システムに用いる OD 交通量は、平成 12 年大都市交通センサス資料編の初乗り・最終降車駅間移動人員表（初乗り駅別）をもとに作成する。このデータは、定期券利用者の往路方向について一日単位で集計されたものであるため、これを市区町村別のピーク 1 時間出発割合をかけあわせることによって、最混雑時間帯の OD 交通量とする。

2.4 配分手法

本配分システムは、上に述べてきたネットワーク、効用関数、OD 交通量を与件として確率的均衡配分を行なう。

配分手法の特徴としては、あらかじめ全 OD パターンに対して複数の経路を列挙し、確定的に経路を決定することによって、これを選択肢集合としている。そして経路ごとに効用関数より求められる効用値を計算し、その値を基準として確率的均衡配分を行なっている。図-4 に配分手法のフロー図を示す。

2.4.1 選択肢集合

道路ネットワークを対象とした確率的配分手法の代表的手法の 1 つに Dial のアルゴリズム⁶⁾が存在する。Dial のアルゴリズムは、ネットワークによって極めて不自然なフローパターンを生成する場合があるという欠点を有しているものの、経路の列挙をせずに、リンク交通量を効率的に計算できる手法であり、いわばリンクベースの確率的配分手法である。しかしながら、鉄道ネットワークにおいて、鉄道利用者の選択経路はある程度限られている。また、本配分システムでは、重複を考慮可能な C*-Logit モデルを鉄道利用者の経路選択行動規範として適用しており、経路選択要因においても乗換え行動を的確に捉えるため OD ベースの説明変数である階段利用率を採用している。また、運賃に関して、鉄道ネットワークにおける特徴として、異なる事業者を跨ぐ乗換え行動が生じる場合、初乗り運賃が発生するため、リンクベースの配分手法では扱いが困難である。

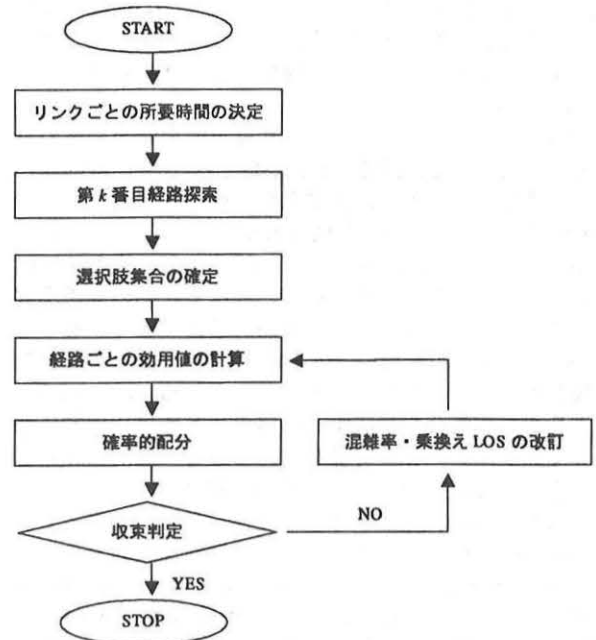


図-4 配分手法のフロー図

そこで本研究では、各リンクの所要時間を基に第 k 番目経路探索法^{7) 8)}を用い、OD 間の最短経路を含めた複数の代替経路を列挙する事により、選択肢集合を確定する。第 k 番目経路探索法のアルゴリズムは、①Dijkstra 法、②次善経路探索、③第 k 番目経路探索からなっており、OD 間の複数の経路を効率的に列挙することができる。また、経路を列挙するにあたって、屋井ら⁹⁾が提唱している選択肢集合の選別基準を用い、探索の上限として最短経路と比較して所要時間が 2 倍以上、もしくは 30 分以上かかる経路を除外している。また、第 k 番目経路探索法には、重複の多い経路が抽出されるという欠点が報告されている¹⁰⁾。そこで、同一 OD に関して重複率が 0.9 を超える経路に関しては、その中の最短時間経路を採用している。このような選別基準に基づき全 117,098 OD ペアに対し、第 k 番目経路まで列挙している。

2.4.2 確率的均衡配分

利用者均衡状態を理論値として求めるためには均衡配分を行なう必要がある。そこで本研究では、得られた選択肢集合より、経路ごとの効用値を表-1 のパラメータより導出される効用関数より求め、経路ごとの選択確率を計算し、OD ベースの確率的均衡配分を行なう。また、均衡状態に収束するまで、路線部の混雑率だけではなく、筆者ら¹¹⁾が算出した $K-V$ 式(密度-速度式)を用いて、混雑による影響を考慮した乗換え移動時間を算定し、乗換え LOS を改訂している。

3. 配分結果の検討

本研究では、確定的に OD 間の複数の経路を選択肢集合として与えた後に、効用関数に基づいて確率的配分を行なっている。しかし、選択肢集合の設定方法によっては、分析結果が大きく異なるという問題点を有している^{9) 12)}。よって本配分システムにおいて、選択肢集合の設定方法

による配分結果の精度の比較を行なう。1OD 間の経路本数を増加させた時の路線部における配分結果と平成 12 年度センサスデータの相関係数および RMS 誤差の変化を図-5 に示す。

図-5 より、経路 1 本つまり最短所要時間経路のみの選択肢集合でも、相関係数、RMS 誤差とも比較的高い精度を得ている。また、経路本数を増加させていくと、相関係数、RMS 誤差とも精度の向上が見られ、経路本数 10 本あたりで相関係数、RMS 誤差とも一定の値に収束していることが見て取れる。これは OD 間の経路本数が増えたことにより、正しい経路が抽出できていること、C*-Logit モデルを用い、IIA 特性を緩和したことにより、過剰推計を抑えられたことが考えられる。しかし、図-6 より選択肢集合を形成する経路の総本数は比例的に増加しており、データの容量を考慮すると一意的に経路を増やすことは、有効な手段とは言えない。

また、1OD 間の経路本数を 1 本、5 本、10 本とした時の路線毎の配分結果とピーク 1 時間断面交通量の比較を JR 横須賀線および小田急小田原線を例に挙げ、図-7、図-8 にそれぞれ示す。JR 横須賀線（図-7）は乗換え駅を多数通過し、平行して走る路線などが多いことから経路本数による影響が大きく、経路本数が増えるにつれ、センサス値の線形に近づくという傾向が見られる。一方、小田急小田原線（図-8）は他路線の影響を受けにくいため、ほとんど経路本数による影響が見られない。

以上より、本配分システムにおいて、1OD 間の経路を少なくとも 10 本程度を選択肢集合として設定することが、データ容量の面からも実用に耐えうる結果が得られ、かつ、配分結果としても相当の精度が得られる結果を明らかにした。

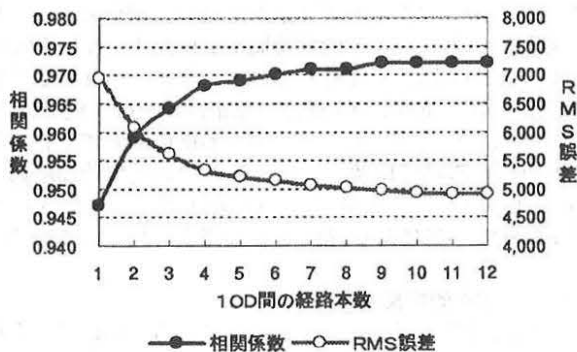


図-5 相関係数・RMS 誤差の比較

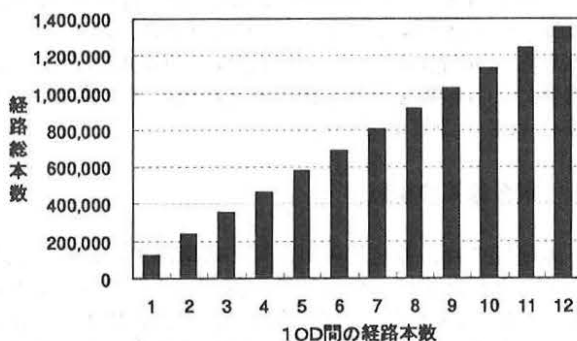


図-6 経路総本数

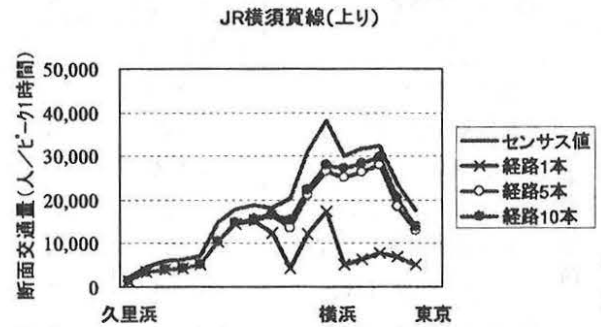


図-7 JR 横須賀線の断面交通量の比較

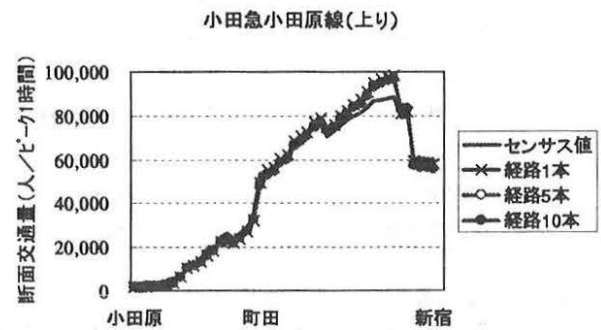


図-8 小田急小田原線の断面交通量の比較

4. おわりに

本研究では、筆者らが提案した C*-Logit モデルをネットワーク配分システムに適用し、再現性の高いネットワーク配分システムを開発した。また、選択肢集合の設定方法に対する吟味を行ない、データ容量を考慮しながらではあるが、精度の観点から少なくとも経路本数 10 本以上が必要であることを示した。

今後の展望として、現状のネットワークフローを高い精度で再現できたことから、本配分システムを用いて、今後の鉄道整備計画の提案、評価を行ない、首都圏鉄道ネットワークの有効活用に向けた提言を行なっていくことを考えている。

参考文献

- 1) Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. and Vitetta, A.: A Modified Logit Route Choice Model Overcoming Path Overlapping Problem. Specification and some Calibration Results for Interurban Networks, Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 13 International Symposium on Transportation and Traffic Theory, Elsevier Science, Oxford, pp.195-207, 1996
- 2) 日比野直彦, 兵藤哲朗, 内山久雄: 非 IIA 型経路選択モデル特性に関する研究 - 高密度な鉄道ネットワークへの実適用に向けて -, 土木学会論文集 (投稿中)
- 3) 東京圏鉄道整備研究会著: 東京圏の鉄道のあゆみと未来, 財団法人 運輸政策研究機構, 2000
- 4) 内山久雄, 星健一: 首都圏鉄道計画分析評価のための GIS の構築, 土木計画学研究・講演集, No.15, pp.705-712, 1998
- 5) 大石洋也, 日比野直彦, 飯島崎圭司, 内山久雄: 首都圏鉄道整備のためのネットワーク配分分析, 鉄道技術連合シンポジウム(J-RAIL2002)講演論文集, pp.155-158, 2002
- 6) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析 - 最新の理論と解法 -, 1998
- 7) Yen, J., Y.: Finding the k Shortest Loopless Paths in a Network, Management Science, Vol.17, No.11, pp.712-716, 1971
- 8) 加藤直樹, 茨木俊秀, 三根久: 無向グラフの第 K 最短単純路を求める $O(Kn^2)$ アルゴリズム, 電子通信学会論文誌, Vol.J61-A, No.12, 1978
- 9) 屋井鉄雄, 清水哲夫, 坂井康一, 小林亜紀子: 非 IIA 型選択モデルの選択肢集合とパラメータ特性, 土木学会論文集, No.702, pp.3-13, 2002
- 10) 小堀雅嗣, 朝倉康夫, 片平哲平: 交通ネットワークにおける経路選択肢集合生成アルゴリズムの改良, 土木学会第 58 回年次学術講演会要集第 IV 部, pp.353-354, 2003
- 11) 日比野直彦, 内山久雄, 篠原剛史: 混雑を考慮した乗換え時間の算出に関する研究, 土木学会第 54 回年次学術講演会要集第 IV 部, pp.250-251, 1999
- 12) 日比野直彦, 森田泰智, 内山久雄: 鉄道経路選択行動分析における選択肢集合の設定方法に関する考察, 土木計画学研究・講演集, Vol.27, 2003