

# 空港-主要都市間の公共交通ネットワークにおける交通配分モデル

Allocation problems in public transportation networks between airports and major cities

北海道大学工学部 ○学生員 吉留壮真 (Soma Yoshitome)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 峪 龍一 (Ryuichi Tani)  
 北海道大学大学院工学研究院 正員 内田賢悦 (Kenetsu Uchida)

## 1. はじめに

北海道では毎年冬に大量の雪が降る。昨年は北海道大学の受験日前に降った大雪の影響で電車が止まり、全国各地から来た受験生が空港泊を余儀なくされた。令和4年2月23日の大雪では、JRが終日運休となる中、空港連絡バスが臨時の便を出して対応したものの、バスやタクシーを待つ人によって長い列ができ、最終的に4000人以上がターミナルにとどまった。それを踏まえ、北海道エアポートと北海道運輸局は対策を話し合い、JRが運休した場合にはバスを活用して輸送力を確保する改善策を取りまとめた。具体的な内容としては、大雪の災害があっても安心して移動できるようにするために、普段札幌市内各地との間で複数の路線が運行されている空港連絡バスを、新千歳空港-大谷地駅路線に絞って運行することで輸送力を維持するとしている。

受験生だけでなく、観光客や出張で北海道を訪れる人にとって札幌駅-新千歳空港間の移動は重要である。このような人々にとって、電車またはバスが利用できなくなり、ほかの交通手段を使うことになった際は、ルートの変化による不利益が少ない状態が望ましいと考える。また多くの人々が、運行本数の多さや移動時間のばらつきが小さいことから、札幌駅-新千歳空港間のアクセス交通およびイグレス交通に空港直結の電車を用いると考えられる。しかし、電車での移動には車内混雑問題を考慮する必要がある、山崎ら<sup>2)</sup>は、利便性・サービス向上を図る上で混雑を主要な要素の一つとし、混雑の度合いによる不効用を定式化している。飛行機の利用を予定する人は大きな荷物を抱えることが多く、また、イグレス交通として空港から主要都市に移動する場合は移動による疲れも大きいと考えられる。したがって空港利用者にとっては、車内混雑は重要な指標であり、一定の人数を超えた時点で他の移動手段のほうが、効用が高くなると考える。綾城ら<sup>3)</sup>は、空港アクセスにおいて、鉄道路線に比べてバス路線は快適性や直心性、早朝深夜においても運行が可能である点など多くの利点を含み、バスサービスの改善の必要性や、鉄道とバスの特性を踏まえた施策の検討の必要性について言及している。

本研究では、自然災害時の公共交通機関の運用方法の検討を念頭に置き、新千歳空港-札幌駅間のような、空港-主要都市間を対象とした車内混雑を考慮した交通配分モデルを提案する。

本研究では、Li et al.<sup>3)</sup>が提案した容量制約付き確率的利用者均衡モデルを用いて、公共交通機関を選択した際の不効用を定式化し、各交通機関の選択確率を推計す

る。本モデルはマルチモーダルネットワークにおける政策決定、あるいは災害によってリンクが途絶した場合における利用者行動・公共交通事業者の行動を分析するための基礎となるものである。

## 2. 仮定する状況と交通手段の関係

本研究における仮定と交通手段を以下に示す。

### 2.1 仮定

- ・ 主要都市から空港までは、その間を直接結ぶ電車を使うルートと地下鉄からバスに乗り継ぐルートが存在する。
- ・ 空港利用者は十分に多い。
- ・ 電車に定員（容量）は存在しない。
- ・ 道路の混雑状況はバスの移動時間に影響しないものとする。
- ・ 公共交通機関は一定の間隔で到着するものとし、利用客の待ち時間は運行頻度によって一定に定められるとする。
- ・ モード間の乗り換えがある場合、乗り換え時に待ち時間が発生する。
- ・ 電車の利用については車内混雑度によって座席に座れない、大きな荷物を抱えるなどの不快が生じるため、車内混雑度合いによって利用者の不効用が増大する。
- ・ バスの利用においては、乗客は必ず座ることができ、かつ荷物は専用のスペースがあると仮定し、車内混雑は利用者の不効用に影響を与えない。
- ・ 利用者の時間価値は公共交通機関によって変化しない。

### 2.2 交通モードと経路

本研究で想定する公共交通ネットワークを図1に示す。

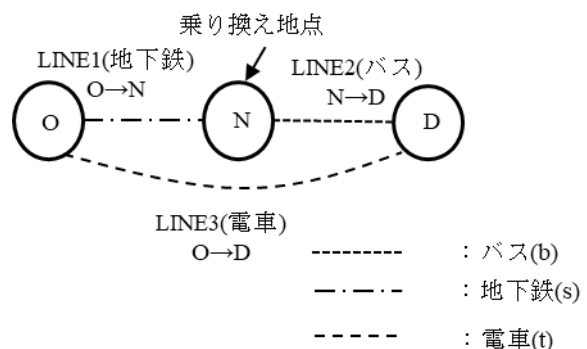


図1 公共交通ネットワーク

### 3. 定式化

#### 3.1 記号

本論文で用いる主な記号を以下に示す。

|                   |  |
|-------------------|--|
| $A_m$             | 交通モードが $m = \{s: \text{地下鉄}, b: \text{バス}, t: \text{電車}\}$ であるリンクの集合 |
| $A$               | $A_sUA_bUA_t$  |
| $C_a$             | リンク $a \in A$ の混雑関数  |
| $z_a$             | リンク $a$ 上の公共交通の待ち時間  |
| $W$               | OD ペアの集合   |
| $K_w$             | OD ペア $w$ のルートの集合  |
| $f_k^w$           | OD ペア $w$ のルート $k$ の交通量 (利用者数)                                       |
| $t_a$             | リンク $a \in A$ の移動時間  |
| $p_a$             | リンク $a \in A$ の金銭的コスト  |
| $\gamma$          | 時間価値   |
| $\theta$          | ロジットモデルにおける分散パラメータ   |
| $q_w$             | OD ペア $w$ の交通需要  |
| $u_b$             | バスの容量  |
| $h_a$             | リンク $a$ 上の公共交通の運行頻度  |
| $\mu$             | 待ち時間に関するパラメータ  |
| $\xi_{a,k}^w$     | OD ペア $w$ 上のルート $k$ がリンク $a$ を含む場合 1 となり、そうでない場合 0 となる変数             |
| $\delta_{a,k}^w$  | OD ペア $w$ 上のルート $k$ がリンク $a$ に関連している場合に 1、そうでない場合に 0 となる変数           |
| $\alpha_p, \beta$ | 地下鉄、電車の多項式関数に用いるパラメータ  |
| $\alpha_b$        | バスの車内混雑を表すパラメータ  |
| $g_k^w$           | OD ペア $w$ 上のルート $k$ の実際の不効用  |
| $G_k^w$           | OD ペア $w$ 上のルート $k$ の認知された不効用  |
| $d_a$             | リンク $a \in A_sUA_bUA_t$ の不効用   |
| $\varepsilon_k^w$ | OD ペア $w$ 上のルート $k$ の効用関数における利用者の認知誤差                                |

#### 3.2 不効用関数

Uchida et al.<sup>4)</sup>、Li et al.<sup>3)</sup>を参考に、OD ペア  $w$  間のルート  $k$  の不効用を式(1)によって表す。

$$g_k^w = \sum_{a \in A_m} \xi_{a,k}^w d_a, \forall w \in W, \forall k \in K_w, \forall a \in A \quad (1)$$

この式(1)によって表される不効用を「一般化コスト」と定義する。右辺は OD ペア  $w$  のルート  $k$  に含まれるリンクの不効用の合計を表している。ここで、リンク  $a$  の不効用  $d_a$  は式(2)で表すことにする。

$$d_a = \gamma(t_a + \lambda_a + z_a) + p_a + \gamma C_a, \forall a \in A \quad (2)$$

式(2)の右辺第1項は時間に関する不効用を表現している。 $\gamma$ は時間価値であり、括弧内の第1項、第3項はそれぞれ、移動時間、公共交通機関の待ち時間を表している。第2項は、リンク  $a \in A_b$  のみに存在する項である。これは、乗客数がバスの定員に達した場合、乗客は次のサービスを利用する必要がある。 $\lambda_a$ はこうした遅れを表し、詳細は後述するが、最適化問題として定式化される乗客の経路選択問題における定員制約に関する最適な

ラグランジュ乗数として表現される。また、公共交通機関の待ち時間  $z_a$  は運行頻度によって決まるため、Lam et al.<sup>5)</sup> に従い、式(3)で表現する。

$$z_a = \frac{\mu}{h_a}, \forall a \in A \quad (3)$$

ここで、 $\mu$ は待ち時間に関するパラメータ、 $h_a$ はリンク  $a$  の交通モードの運行頻度を表している。式(2)の右辺第2項は金銭的コスト、第3項は車内混雑に関する関数を表現している。地下鉄および電車の車内混雑は以下の式(4)で表現する。

$$C_a = t_a \left[ 1 + \alpha_p \left( \frac{x_a}{h_a} \right)^\beta \right], a \in A_sUA_t \quad (4)$$

こちらの式は多項式関数に基づいて表現した。バスの車内混雑は一定のため、以下の式(5)で定める。

$$C_a = t_a \alpha_a, \forall a \in A_b \quad (5)$$

#### 3.4 ネットワーク均衡モデルの定式化

Li et al.<sup>3)</sup>に基づいてネットワークの均衡モデルを定式化する。個々の利用者の交通モード、経路選択行動を考える。一般に旅客は実際のネットワークについて完全な情報を持っていないため、それぞれの手段に対する認識にばらつきが生じる。そのため、各経路における一般化コストの知覚は確率変数として扱われるべきであり、混雑したネットワークにおける旅客の経路選択行動をより現実的にするために有用である。本論文ではランダム効用理論に基づく離散選択モデルのうち、より実務でも利用されるロジットモデルを用いて確率項を表現する。そこで、以下の式(6)によって新たに、認知される不効用を定義する。

$$G_k^w = g_k^w + \varepsilon_k^w, \forall w \in W, \forall k \in K_w \quad (6)$$

上の式(6)を「認知された一般化コスト」と定義する。右辺の第1項は実際の一般化コスト(不効用)である。第2項は OD ペア  $w$  のルート  $k$  の利用者による認知誤差を表現する誤差項である。すべての誤差項についてはロジットモデルを想定し、互いに独立なガンベル分布に従うものとする。経路選択確率は以下の式(7)によって表すことができる。

$$P_k^w = \frac{\exp(-\theta g_k^w)}{\sum_{j \in K_w} \exp(-\theta g_j^w)}, k \in K_w, w \in W \quad (7)$$

ここで、 $\theta$ は認知された一般化コストの分散に関するパラメータである。以上のことからマルチモーダルネットワークにおける均衡問題の定式化は以下のようなになる。

$$\begin{aligned} \min_x \quad & \sum_{a \in A_sUA_t} \int_0^{x_a} C_a(w) dw \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_k^w \left\{ \sum_{a \in A_sUA_t} \delta_{a,k}^w \left( t_a + z_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{a \in A_b} \delta_{a,k}^w \left( t_a + z_a + C_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right\} \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \frac{1}{\theta} \frac{f_k^w}{\gamma} \ln(f_k^w) \end{aligned} \quad (8)$$

s. t.

$$\sum_{k \in K_w} f_k^w = q_w, \forall w \in W \quad (9)$$

$$x_a \leq u_a, \forall a \in A_b \quad (10)$$

$$x_a = \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \delta_{a,k}^w f_{a,k}^w, \forall a \in A \quad (11)$$

$$x_a \geq 0, f_k^w \geq 0, \forall a \in A, w \in W, \forall k \in K_w \quad (12)$$

式(8)の目的関数は大きく3つの部分に分けることができる。第1項はリンク交通量に依存する一般化コストの混雑を変数とした関数部分の積分を表す。第2項は全経路の利用者数に依存しない一般化コストの合計を計算するものである。各経路の金銭的なコストは時間価値で割ることで、時間に換算している。第3項はロジットモデルの定式化に伴うエントロピー項である。式(10)の制約条件はバスの座席数(定員)を踏まえた容量制約である。部分双対化により式(10)に示した制約条件を目的変数に取り込むと式(13)が得られる。

$$\begin{aligned} \min_x & \sum_{a \in A_s \cup A_t} \int_0^{x_a} C_a(w) dw \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_k^w \left\{ \sum_{a \in A_s \cup A_t} \delta_{a,k}^w \left( t_a + z_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{a \in A_b} \delta_{a,k}^w \left( t_a + z_a + C_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right\} \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \frac{1}{\theta} \frac{f_k^w}{\gamma} \ln(f_k^w) + \sum_{a \in A_b} \delta_{a,k}^w \lambda_a (x_a - u_a) \end{aligned} \quad (13)$$

ここで $\lambda_a$ は式(10)に関する非負のラグランジュ乗数である。ラグランジュ乗数の最適値を $\lambda_a^*(\forall a \in A_b)$ と表し、さらに式(13)における定数項を無視すると、式(14)が得られる。

$$\begin{aligned} \min_x & \sum_{a \in A_s \cup A_t} \int_0^{x_a} C_a(w) dw \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} f_k^w \left\{ \sum_{a \in A_s \cup A_t} \delta_{a,k}^w \left( t_a + z_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right. \\ & \left. + \sum_{a \in A_b} \delta_{a,k}^w \left( t_a + \lambda_a^* + z_a + C_a + \frac{p_a}{\gamma} \right) \right\} \\ & + \sum_{w \in W} \sum_{k \in K_w} \frac{1}{\theta} \frac{f_k^w}{\gamma} \ln(f_k^w) \end{aligned} \quad (14)$$

$\lambda_a^*$ は式(13)を $x$ について偏微分し、0に等しくなる

$\lambda_a(\forall a \in A_b)$ であり、バスの乗客数が定員に達した時の待ち時間になっていると解釈できる。さらにその値は、ラグランジュ緩和法により、容易に求めることができる。式(2)では、このようにして求められたラグランジュ乗数を単に $\lambda_a(\forall a \in A_b)$ と表現している。

#### 4. 数値計算

バスの容量制約についてラグランジュ緩和された後の式は変わらずロジットベースのSUE問題となる。利用者の配分を変えながら繰り返し計算を行い、空港-主要都市間の公共交通機関について、利用者にとってはどちらを選択しても認知された一般化コストが変化しないような配分を求める。

#### 5. まとめと今後の課題

本研究では空港-主要都市間の移動について、確率的利用者均衡モデルを構築したうえで、車内混雑を考慮した利用者の均衡状態を、繰り返し計算することによって求める。第3章で述べたラグランジュ緩和を実行した後、ロジットベースのSUE問題として割り当てモデルの解決を図る。

#### 6. 参考文献

- 1) 山崎翔平、森田泰智、窪田崇斗、山崎公之、家田仁：夜の都市鉄道利用における混雑不効用関数に関する研究。土木計画学研究・講演集(CD-ROM), Vol. 38, 2008.
- 2) 綾城本祐、久保田勤、小島建太、齊原潤：羽田空港アクセス交通需要予測モデルの構築と改善施策の検討に関する調査研究。運輸政策研究, 9(3), 002-013, 2006.
- 3) Xinyan, Li, Chi Xie, and Zhaoyao Bao: A multimodal multicommodity network equilibrium model with service capacity and bottleneck congestion for China-Europe containerized freight flows, *Transportation Research Part E*, Vol. 164, 102786, 2022.
- 4) Kenetsu Uchida, Agachai Sumalee, David Watling, and Richard Connors: Study on Optimal Frequency Design Problem for Multimodal Network Using Probit-Based User Equilibrium Assignment, *Transportation Research Record Journal of the transportation Research Board*, No. 1923, pp.236-245, 2005.
- 5) William H.K. Lam, Jing Zhou, Zhao-han Sheng: A capacity restraint transit assignment with elastic line frequency, *Transportation Research Part B*, Vol.36, No. 10, pp.919-938, 2022.