

# 効率性と公平性を考慮した冬期路面管理計画に関する研究\*

## A Study on Winter Road Management Planning Taking Efficiency and Equity into Account\*

内田賢悦\*\*・寺島令\*\*\*・加賀屋誠一\*\*\*\*・有村幹治\*\*\*\*\*

By Ken'etsu UCHIDA\*\*・Ryo Terashima・Seiichi KAGAYA\*\*\*・Mikiharu Arimura\*\*\*\*\*

### 1. はじめに

積雪寒冷地では、除雪や排雪作業等の冬期路面管理において、莫大な費用がかけられている。たとえば、札幌市の場合、年間約 150 億円もの予算が充てられているが、それでも市民からは多くの要望や苦情も寄せられており、十分な管理レベルにあるとはいいがたい状況にある。冬期路面管理を行わない場合を考えると、都市機能が麻痺することが想定され、冬期路面管理は積雪寒冷地における冬期の社会・経済活動を維持する上で不可欠な要素となっている。このように、冬期路面管理には莫大な費用が掛けられているが、全地域住民が満足する管理レベルを提供するには十分ではなく、冬期路面管理は、限られた予算の中で効率的に行われなければならない。一方では、効率性を追求した結果、冬期路面管理の恩恵を受けるのが一部の住民であるような場合、公共財として位置づけられる道路インフラを考えると、決して望ましい状態とはいえない。したがって、効率性が重要な視点ではあることには変わりはないが、公平性も視野に入れた運用を行う必要があると考えられる。こうした背景から、本研究では、効率性だけではなく、公平性も考慮に入れた冬期路面管理計画策定モデルを提案する。

### 2. 冬期路面管理計画策定モデル

#### (1) 仮定

本研究で提案する冬期路面管理計画策定モデルでは、効率性と公平性を導入するが、ここでは、自動車利用者を対象とし、ネットワーク性能の観点からの議論を展開することにする。したがって、たとえば、公平性の観点から、自宅周辺の除雪レベルが相対的に低いというような局所的な公平性の議論は行わない。これは、冒頭でも述べたように限られた予算の中では、こうした局所的な公平性の議論は適用困難と考えたためである。すなわち、こうした議論は、

不可能ではないが、予算が無尽蔵的にあり、ある程度すべての道路を等しく管理できるような状況でなければ適用できないと考えている。一方、歩行者を対象とした歩道除雪については、以下に示す同様な議論を適用可能であると考えられる。

#### (2) 効率性

冬期路面管理計画の効率性を計る指標として、費用便益費、純便益等、さまざまな指標が考えられるが、ここでは、旅行時間短縮による純便益を用いた指標を考えることにする。除雪前後の OD 間の旅行時間ベクトルをそれぞれ以下で与える。

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}_n) \equiv (c^1(\mathbf{i}_n), \dots, c^{rs}(\mathbf{i}_n), \dots, c^{|\Omega|}(\mathbf{i}_n))^T$$

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}) \equiv (c^1(\mathbf{i}), \dots, c^{rs}(\mathbf{i}), \dots, c^{|\Omega|}(\mathbf{i}))^T$$

$\mathbf{i} \equiv (i_1, \dots, i_a, \dots, i_{|A|})^T$ : 除雪リンクベクトルであり、 $i_a$  はリンク  $a$  を除雪する場合 1、それ以外に 0 をとる変数となり、特にすべての要素が 0 となる場合を  $\mathbf{i}_n$  とする。

$c^{rs}(\mathbf{i})$ : 除雪リンクベクトルが  $\mathbf{i}$  である場合の OD ペア  $rs$  間の旅行時間。

$\Omega$  ( $|\Omega|$ ): OD ペアの集合 (OD ペア数)。

$A$  ( $|A|$ ): リンク集合 (リンク数)。

$T$ : 行列の転置操作。

除雪による OD ペア間の旅行時間短縮ベクトルは以下で表される。

$$\mathbf{c}(\mathbf{i}_n) - \mathbf{c}(\mathbf{i}) \equiv (d^1(\mathbf{i}), \dots, d^{rs}(\mathbf{i}), \dots, d^{|\Omega|}(\mathbf{i}))^T = \mathbf{d}(\mathbf{i})$$

この場合、旅行時間短縮による純便益は以下で与えられる。

$$\mathbf{b}(\mathbf{i}) \equiv \sum_{rs \in \Omega} \tau^{rs} \cdot d^{rs}(\mathbf{i}) \cdot f^{rs}(\mathbf{i}) - \mathbf{i}^T \mathbf{r}$$

$\mathbf{r} \equiv (r_1, \dots, r_a, \dots, r_{|A|})^T$ : 除雪コストベクトルであり、 $r_a$  はリンク  $a$  の除雪コストを示す。

$f^{rs}(\mathbf{i}) \forall rs \in \Omega$ : OD ペア  $rs$  間の経路交通量。

$\tau^{rs}$ : OD ペア  $rs$  に関する時間価値。

#### (3) 公平性

ここでは、所得の公平性を評価するジニ係数を適用した指標を考えることにする。前節で示した旅行時間短縮ベクトルでは、OD ペアによっては、除雪後に旅行時間が増加する場合もあると考えられる。そのため、所得が負となるこ

\*キーワード 地域交通計画

\*\*正会員 博 (工) 北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北 13 条西 8 丁目, Tel 011-706-6211, Fax 011-706-6211)

\*\*\*正会員 JR 東日本

\*\*\*\*フェロー 学博 北海道大学大学院工学研究科

(札幌市北区北 13 条西 8 丁目, Tel 011-706-6210, Fax 011-706-6211)

\*\*\*\*\*正会員 博 (工) 株式会社ドーコン

とを想定しないジニ係数の適用を前提に、以下の処理を施した時間変化ベクトルを考える。

$$\hat{\mathbf{d}}(\mathbf{i}) \equiv (\hat{d}^1(\mathbf{i}), \dots, \hat{d}^{rs}(\mathbf{i}), \dots, \hat{d}^{|\Omega|}(\mathbf{i}))^T$$

where  $\hat{d}^{rs}(\mathbf{i}) = d^{rs}(\mathbf{i}) - d_{\min}(\mathbf{i})$  and  $d_{\min}(\mathbf{i}) \equiv \min_{rs \in \Omega} (d^{rs}(\mathbf{i}))$ .

ここで  $\hat{d}^{rs}(\mathbf{i}) \forall rs \in \Omega$  は、除雪によって最悪の影響を受ける（旅行時間短縮が最も小さい）ODペアの旅行時間変化が0となるように基準化した値である。さらに、公平性を考えるに当たり、除雪前の旅行時間と経路交通量による影響を考慮する必要があるため、以下で示される指標ベクトルを考えることにする。

$$\mathbf{s}(\mathbf{i}) \equiv (s^1(\mathbf{i}), \dots, s^{rs}(\mathbf{i}), \dots, s^{rs}(\mathbf{i}))^T$$

where  $s^{rs}(\mathbf{i}) = \frac{\tau^{rs} \cdot \hat{d}^{rs}(\mathbf{i}) \cdot f^{rs}(\mathbf{i})}{c^{rs}(\mathbf{i}_n)}$ .

ここで  $l^{rs} \forall rs \in \Omega$  は、ODペア  $rs$  間の距離である。このとき、公平性を表す指標はジニ係数を参考に以下で定義する。

$$\mathbf{g}(\mathbf{i}) = 1 - \sum_{rs=1}^{|\Omega|} \frac{1}{|\Omega|} \left( \frac{\sum_{rs_1=1}^{rs} s^{rs_1}(\mathbf{i})(1-w^{rs_1}) + \sum_{rs_2=1}^{rs-1} s^{rs_2}(\mathbf{i})(1-w^{rs_2})}{|\Omega| \cdot \mu(\mathbf{i})} \right)$$

where  $\mu(\mathbf{i}) \equiv \sum_{rs \in \Omega} s^{rs}(\mathbf{i})(1-w^{rs}) / |\Omega|$ .

ここで  $0 \leq w^{rs} < 1$  は、ODペア  $rs$  に対する補正係数であり、たとえば、小学校や福祉施設等、時間価値に反映するのは困難であるが、緊急性・公共性の高い交通目的を含むODペアに対して高い値をとるものとする。すなわち、緊急性・公共性の高いODペアの旅行時間短縮効果を意図的に過小評価した値を用いて、ジニ係数が計算されることになる。次節で示す最大化を目的とする関数においては、そうしたODペアの時間短縮効果が小さい場合、 $w^{rs}$  は、その値が高いほど目的関数の値を小さくする作用があり、ペナルティ関数的な役割を果たすことになる。一方、すべてのODペアを同等に扱う場合、 $w^{rs} = 0 \forall rs \in \Omega$  となり、この場合、通常用いられるジニ係数と同形式の定式化となる。また  $s^{rs}(\mathbf{i})(1-w^{rs}) (rs = 1, \dots, |\Omega|)$  は、昇順に並べ替えているものとする。 $\mathbf{g}(\mathbf{i})$  は、 $s^{rs}(\mathbf{i}) \forall rs \in \Omega$  を所得とみなした場合のジニ係数であり、最小で0（完全に公平性が保たれている状態）、最大で1（公平性が全く保たれていない状態）をとる指標である。

#### (4) 定式化

効率性と公平性を同時に考慮した問題は、たとえば、下位問題を利用者均衡とする以下に示す bi-level 問題として定式化できる。

[Upper Level Problem]

$$\begin{aligned} & \max (1 - \mathbf{g}(\mathbf{i})) \cdot \mathbf{b}(\mathbf{i}) \\ \text{s.t.} & \quad \mathbf{i} \equiv (i_1, \dots, i_a, \dots, i_{|A|})^T \\ \text{w.r.t.} & \quad \mathbf{i}^T \mathbf{r} \leq \pi \end{aligned}$$

$\pi$ : 除雪予算.

[Lower Level Problem]

$$\begin{aligned} & \min Z = \sum_{a \in A} \int_0^{q_a(\mathbf{i})} t_a(w) dw \\ \text{w.r.t.} & \quad \mathbf{q}(\mathbf{i}) = (q_1(\mathbf{i}), \dots, q_a(\mathbf{i}), \dots)^T \\ \text{s.t.} & \quad q_a(\mathbf{i}) = \sum_{rs \in \Omega} \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs}(\mathbf{i}) \delta_{a,k}^{rs}(\mathbf{i}) \forall a \\ & \quad \sum_{k \in K_{rs}} f_k^{rs}(\mathbf{i}) = f^{rs} \forall rs \\ & \quad f_k^{rs}(\mathbf{i}) \geq 0 \forall rs \forall k \end{aligned}$$

where  $t_a(q_a(\mathbf{i})) = t_a^0 \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{q_a(\mathbf{i})}{\kappa_a(i_a)} \right)^\beta \right\}$ .

$q_a(\mathbf{i})$ : 除雪リンクベクトルが  $\mathbf{i}$  の時のリンク  $a$  の交通量。  
 $t_a(q_a(\mathbf{i}))$ : リンク交通量が  $q_a(\mathbf{i})$  の時のリンク  $a$  の旅行時間。

$\kappa_a(i_a)$ : リンクの状態が  $i_a$  のときの交通容量であり、 $i_a=1$  のとき  $\kappa_a^*$ 、それ以外のとき  $\gamma \kappa_a^*$  となり、 $\kappa_a^*$ 、 $\gamma$  は、それぞれリンク  $a$  の除雪後の交通容量、容量低減率である。  
 $t_a^0$ : リンク  $a$  の自由走行時間。

$\alpha, \beta$ : パラメータ。

$f_k^{rs}(\mathbf{i})$ : 除雪リンクベクトルが  $\mathbf{i}$  であるとき、ODペア  $rs$  間の  $k$  番目経路の配分交通量。

$\delta_{a,k}^{rs}(\mathbf{i})$ : 除雪リンクベクトルが  $\mathbf{i}$  であるとき、ODペア  $rs$  間の  $k$  番目経路にリンク  $a$  が含まれれば1、そうでなければ0をとる変数。

ここで、除雪リンクベクトルが  $\mathbf{i}$  のときのODペア  $rs$  間の旅行時間は、 $k$  をODペア  $rs$  間の利用されている経路とすると、以下で与えられる。

$$c^{rs}(\mathbf{i}) = \sum_{a \in A} t_a(q_a(\mathbf{i})) \delta_{a,k}^{rs}(\mathbf{i}) \forall rs \in \Omega$$

目的関数は、旅行時間短縮による純便益（効率性評価値）と1からジニ係数を引いた値（公平性評価値）を掛け合わせたものである。

#### (5) 解法

上記のモデルは、道路ネットワークのリンクについて除雪を行うか否かを予算制約の下、目的関数を最大化するように決定する問題であり、一般的な道路ネットワークを想定した場合、除雪リンクの組み合わせは膨大な数になる。こうした点から、利用者均衡の解法とGAを組み合わせた解法を適用する。計算例については、発表時に示す。