

経路選択に着目した地点制御による 道路維持管理手法と首都圏ネットワーク評価

今泉 孝章¹・羽藤 英二²

¹正会員 DHL サプライチェーン (株) (〒 140-0001 東京都品川区北品川 4-7-35 御殿山トラストタワー 8F)
E-mail: kurogoma7321@gmail.com

²正会員 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: hato@bin.t.u-tokyo.ac.jp

1. はじめに

道路の維持修繕の需要が今後 10 年の間に集中することが見込まれる中で、道路の維持管理の効率化の重要性が増している。瀬木ら (2012)²⁾ は大型車が道路の劣化に与える影響と普通車が道路の劣化に与える影響を差別化し、車種別の通行料金設定を試みている。また津田ら (2005)³⁾ は橋梁の劣化過程を予測することでライフサイクルコストが最小となるような補修戦略を考案する枠組みを提案している。一方、道路の劣化要因として大型車、とりわけ定められた重量を超過して輸送を行っている過積載車両の影響は極めて大きい⁴⁾。車両が道路に与えるダメージは式 (1) で示されるように車両の重量に対して指数的に大きくなる。但し、 A_j は車両の j 番目の軸重、 m は車両の軸数である。

$$\text{road damage} = \sum_{j=1}^m \left(\frac{A_j}{8.16} \right)^4 \quad (1)$$

このようなことを踏まえ、平成 26 年 11 月には国土交通省により過積載車両取り締まりの強化の方針が発表されている。一方で車両を利用して物資の輸送を行う物流事業者にとっては過積載を行うことで輸送費用を減少できることが知られている¹⁾ ため物流事業者の積載状態を制御することが重要となる。

また道路の劣化スピードはその道路規格により異なる。例えば細街路よりも高速道路の方が強度が高く、劣化しにくいと考えられる。従って大型車の積載状態を制御することに加え、高速道路のような規格の高い経路に誘導することも重要である。

以上を踏まえ本研究では地点制御の概念を導入した道路維持管理手法を提案する。2 章では従前の施策を整理する。3 章では 2 章を踏まえ、通過点制御の概念の説明を行う。4 章では問題の定式化を行い、5 章で首都圏ネットワークを対象とした数値計算例を示す。

表-1 車両諸元の一般的制限値

寸法	幅	2.5m
	長さ	12.0m
	高さ	3.8m
最小回転半径		12.0m
重量	総重量	20.0t
	軸重	10.0t
	軸荷重	5.0t
	隣接軸重	18.0~20.0t

2. 従前の施策の整理

道路維持管理を目的とする施策は (ア) 経路指定、(イ) 積載量チェックの二つに大きく分けることができる。まず (ア) 経路指定について説明する。表 1 に示すような車両諸元の一般的制限値のいずれかの項目を超過する車両を特殊車両と定義している。道路管理者はこの特殊車両が通行する道路をあらかじめ指定しており (重さ、高さ指定道路)、特殊車両は管理者に通行の申請を行わなければならない。またどうも 管理事業者は GPS 技術を利用して物流事業者の利用経路の把握を行っている。このとき指定された経路が物流事業者にとって大きく迂回する経路である場合物流事業者の遵守率が低下することが予想される。また遵守率の低下を抑える目的で GPS 技術を全ての車両に搭載することはコストの面から現実的ではないと考えられる。

次に (イ) 積載量チェックについてであるが、現状では警察と国土交通省が連携して車両を停止させて積載量をチェックする試みが行われている。また車両重量自動計測装置 (以下では固定スケールとする) を道路上に設置し、カメラと組み合わせて過積載車両に警告を出すと

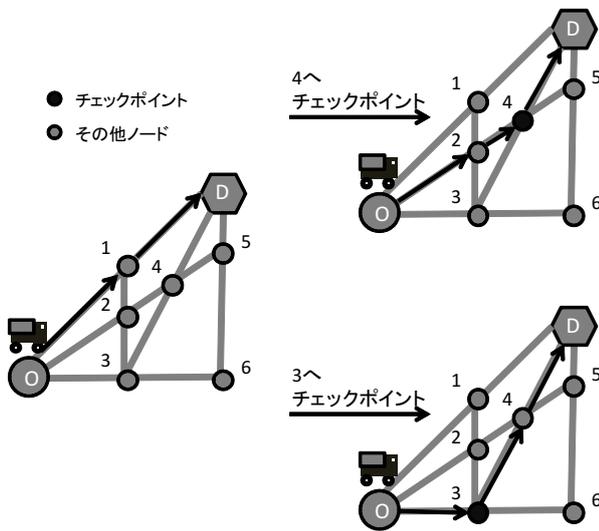


図-1 チェックポイント施策導入の概念図

いうことも行われている。しかし道路上に固定スケールを設置することで、過積載車両がその上を通過することを避けるような行動が観測されている⁵⁾。この場合道路管理事業者は固定スケールの設置個数を増加させることで、観測の精度を向上させることができるが、設置費用、管理費用が増加しかえって道路維持管理にかかる費用が増加する可能性がある。

以上を整理すると経路に関しては物流事業者の遵守率が低下しない程度の迂回率で、それでいて程度高規格の道路の割合が高い経路へ誘導する施策が必要である。また積載状態については、観測精度を向上させ過積載を適正に検挙する一方でそのためのコストはできるだけ抑えるような施策が必要であるといえる。本研究では次章においてこのような二つの特徴をもつ地点制御の概念を導入する。

3. 地点制御の概念

地点制御とは物流事業者が通過するポイントを制御する施策のことであり、1OD に対しあるノードあるいはリンクの通過を義務付ける施策である。今泉、羽藤(2013)⁶⁾で提案されているチェックポイント施策を本研究における地点制御とする。このチェックポイント施策では道路管理事業者は各物流事業者に対し通過するノード(チェックポイント)を義務付けている。図1にチェックポイント施策の導入概念図を示す。また図1の道路ネットワークのリンク別の道路規格を表2に示す。

図1の左図はチェックポイント導入前の物流事業者の輸送行動を表したものである。道路管理事業者から物流事業者に対していかなる制御施策も課されていない場合、物流事業者は最短経路を利用する。このとき最短経

表-2 リンクの道路規格

リンク	道路規格
O-1	高
1-D	
O-2	
2-4	
4-5	
2-1	中
4-D	
5-D	
O-3	
3-6	
3-2	低
3-4	
6-5	

路上のリンク、図1中ではリンク O-1, 1-D は道路規格が小さい。また過積載を行うことで輸送リスクを抑えることができる。そのため道路管理事業者は大きな道路ダメージを受ける。図1の右図のようにチェックポイントをノード3、ノード4へ設置した場合を考える。このとき物流事業者が利用する経路はそれぞれ O-3 → 3-4 → 4-D と O-2 → 2-4 → 4-D であり、これらは道路規格が中である。またチェックポイント上を通過する際に過積載車両に対して罰金を課すことで積載状態を適正化することができる。一方このとき、物流事業者はチェックポイントを通過することのみ制約として課されているため経路を自由に選択することができる。

以上のことから道路管理事業者はチェックポイント施策を実施することで過積載を確実に検挙できるため無駄に固定スケールを設置し管理費用を増加させることを防ぐことができる。一方、チェックポイントの通過を義務付けることで経路を間接的にコントロールし、高規格な道路を利用させるように誘導することができる。また物流事業者にとっても指定道路のように全ての経路が指定されているわけではないので経路選択の自由度が担保され、チェックポイント通過の遵守率の低下を防ぐことができる。次章でチェックポイント施策の問題の定式化を行う。

4. 二段階計画問題の定式化

道路管理事業者は物流事業者の最適な輸送行動(経路選択)を予想し最適なチェックポイント設置戦略を実行する。一方物流事業者は道路管理事業者によって設置されたチェックポイントを通過する条件で最適な輸送行

動を行う。これはシュタッケルベルグの leader-follower 問題であるので上位問題で道路管理事業者が、下位で物流事業者が意思決定を行う二段階計画問題として定式化を行う。

(1) チェックポイント最適配置問題～上位問題～

上位問題では道路管理事業者がチェックポイントの最適な配置を決定する。あるネットワーク G においてそのノード集合を N 、リンク集合を A とする。道路管理事業者はいくつかのチェックポイント配置候補ノード集合 $N'(\in N)$ の中から各 OD ペアに一つのチェックポイントを配置する。このときチェックポイント配置戦略 sc を戦略集合 SC の中から選択する。戦略 sc は OD ペア rs に対して割り付けるチェックポイントを表す変数 z_{rs}^{sc} のベクトルとして表される。また戦略 sc においてチェックポイント候補ノード n にチェックポイントが配置されていれば 1、そうでなければ 0 の変数を y_n^{sc} とすると戦略 sc において配置されたチェックポイント数は $\sum_{n \in N'} y_n^{sc}$ で表される。OD ペアの集合を Ω 、その数を Ω 、OD ペア $rs(\in \Omega)$ の発生交通量を q_{rs} とする。各 OD ペアごとに利用可能な経路のうち道路管理事業者によって課されたチェックポイントを通するものを選択する。道路管理事業者は物流事業者の物資輸送の結果道路ダメージを受ける。ここでは車両の違いによる道路ダメージの変化は考慮しないが、道路種別によるダメージの受けやすさは考慮する。リンク a が車両一台、単位距離当たりを受けるダメージの大きさを u_a としリンクごとにダメージの受けやすさが異なると仮定する。OD ペア rs においてリンク a が利用されていれば 1、そうでなければ 0 の変数を x_a^{rs} とする。チェックポイント一つ当たりの管理コストを mc とすると上位問題は式 (2) で表される。

$$\min_{sc \in SC} \alpha \sum_{rs \in \Omega} q_{rs} \left(\sum_{rs \in \Omega} \sum_{a \in A} u_a x_a^{rs} \right) + mc \sum_{n \in N'} y_n^{sc} \quad (2)$$

ここで α は重み付けパラメータである。以下の計算では 10^{-4} に設定している。また制約条件は式 (3)～(5) で表される。

$$\sum_{n \in N'} y_n^{sc} \geq 1 \quad (3)$$

$$y_n^{sc} \in \{0, 1\} \quad \forall n \in N', \quad sc \in SC \quad (4)$$

$$x_a^{rs} \in \{0, 1\} \quad \forall a \in A, \quad \forall rs \in \Omega \quad (5)$$

式 (3) はチェックポイントは少なくとも一つは配置されることを意味する。式 (4),(5) は整数制約条件である。

(2) 輸送最適戦略決定問題の再定式化

OD ペア rs の物流事業者はチェックポイント $z_{rs}^{sc}(\in N')$ を通過する中で最短となる経路を選択する。OD ペア

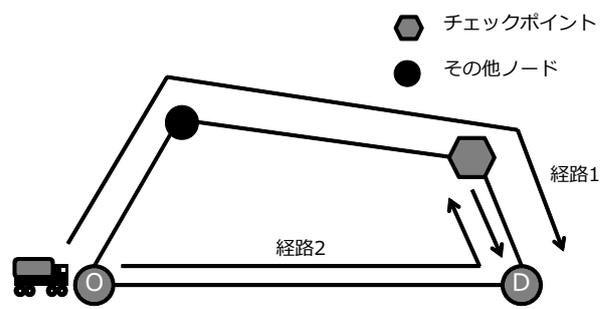


図-2 例外的な解の一例

ア rs に関してチェックポイント $z_{rs}^{sc}(\in N')$ を通過する経路集合を K_{rs}^{sc} とする。また OD ペア rs 間の経路 k にリンク a が含まれるとき 1、そうでなければ 0 の変数を $\delta_{rs}^{a,k}$ とする。このとき各 OD ペアは経路 K_{rs} を選択することで移動コストを最小化する。リンク a の一般化コストを c_a とすると下位問題は式 (6) で表される。

$$\min_{K \in K^{sc}} \sum_{rs \in \Omega} \sum_{a \in A} c_a \delta_{rs}^{a,k} x_a^{rs} \quad (6)$$

ここで K は各 OD ペアが選択する経路集合、 K^{sc} は各 OD ペアの戦略 sc の際のチェックポイントを通する経路集合であるとする。式 (6) には制約条件を設けていないが、この場合チェックポイントを通過し、かつ O から D へ向かう経路集合には図 2 の経路 2 ような経路も含まれる可能性がある。OD ペアと配置したチェックポイントの位置関係によってはこのような経路が最短となることが考えられるが、簡単のためここでは無視して解の一つとして認めることとする。

5. データ概要

(1) 物資流動調査データ

利用するデータは第 4 回物資流動調査 (平成 15～16 年) の輸送手段別地域間貨物車台数である。これは首都圏を図 3 で示される 17 地域のゾーンに分けた場合の手段別の貨物車台数に関するデータである。道路の維持管理に影響を与えるのは大型車両であることから計算には輸送手段のうち営業用トラック (一車貸切) と営業用トラック (宅配便等混載) に限定する。図 3 中の番号と各ゾーンの名称を表 3 に示す。この一車貸切と宅配便等混載の合計の交通量をそれぞれのゾーンのセントロイドから発生させる。図 4 に各ゾーンのセントロイドの位置を示す。図中の赤字で記された数字はノード番号を表す。

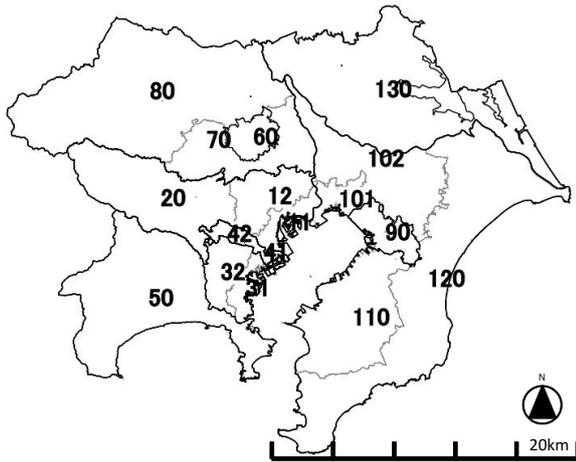


図-3 ゾーン区分

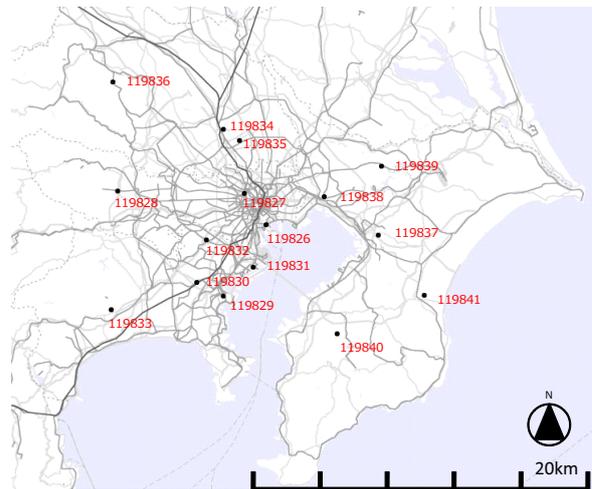


図-4 ゾーンセントロイド

表-3 ゾーン名称

ゾーン番号	ゾーン名
11	東京区部臨海
12	東京区部内陸
20	東京多摩部
31	横浜市臨海
32	横浜市内陸
41	川崎市臨海
42	川崎市内陸
50	神奈川
60	さいたま市
70	埼玉南部
80	埼玉北部
90	千葉市
101	千葉西北部臨海
102	千葉西北部内陸
110	千葉西北部内陸
120	千葉東部
130	茨城南部

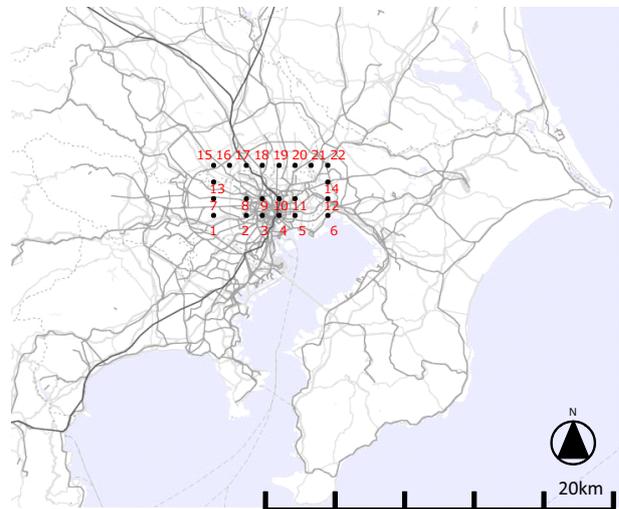


図-5 チェックポイント配置候補ノード

(2) ネットワークデータ

道路ネットワークはノード数 11,9841, リンク数 29,3976, OD ペアは 184 である。OD ペアは 17×17 の OD ペアから利用可能な道路ネットワークにおいて最短経路探索を行った結果、経路が繋がったもののみを利用するために間引いている。全ノード中チェックポイントの配置候補は 22 ある。図 5 にチェックポイント配置候補ノードの位置を示す。図中の赤字で記された数字はノード番号を表す。チェックポイント配置候補ノードと

ゾーンのセントロイドは全ノードの中から緯度、経度に基づいた距離計算を行い上位 5 番目までの最短ノードと双方向リンク (コネクター) で結んでいる。このコネクターの一般化コストは 0 としている。その他リンクの一般化コストはリンクの長さをもとに計算する。一般道は時速 60km/時、高速道路は 80km/時により旅行時間を計算し時間価値を 40 円/分として費用に換算を行う。また高速道路の利用料金は簡単のため初乗り料金は無視しており、対距離課金のみによって計算している。具体的には道路種別が「高速自動車道」のリンクは 24.6 円/km, 「都市高速道路は」のリンクは 16.6 円/km としている。

またチェックポイント一つあたりの管理コスト mc は

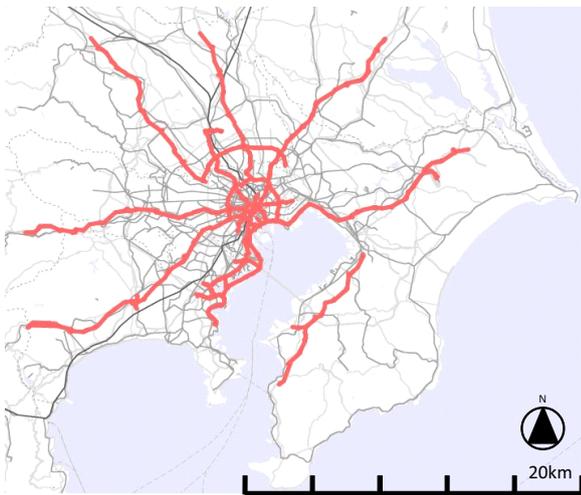


図-6 高速自動車道と都市高速道路リンク

表-4 道路種別の u_a の大きさ

リンク種別	u_a
高速自動車道	1
都市高速道路	1
一般国道	5
主要地方道(都道府県)	7
主要地方道(指定市道)	7
一般都道府県道	20
指定市の一般市道	20
その他の道路	20
未調査	20

500000 とし、各リンクの道路ダメージの大きさの変数 u_a はリンク種別に応じて表 4 のように定義する。

6. 計算アルゴリズム

下位問題は各 OD ペアごとに割り当てられたチェックポイントを通るような最短経路を求める問題である。これは通常の最短経路問題を拡張することで容易に求めることができる。具体的には各 OD ごとの O からチェックポイントまでの最短経路問題とチェックポイントから D までの最短経路問題を解きそれを合わせることで解とする。

上位問題については各 OD ペアごとにチェックポイント配置候補の中からどのチェックポイントを割り当てるかという組み合わせ最適化問題となり、各 OD ペアにつき 22 個のチェックポイント配置候補があるため、全ての OD ペアでは 184^{22} 通りの解の組み合わせがある。

従って全ての解を列挙することはできないため、なんらかのヒューリスティクス手法を用いる必要がある。本章ではクロスエントロピー法を用いて求解する。

(1) クロスエントロピー法

伏見、逆瀬川 (2014)⁷⁾ をもとにクロスエントロピー法を説明する。クロスエントロピー法は Rubinstein が希少事象確率を推定するための手法である分散減少法をさらに拡張したものである。クロスエントロピー法は推定、最適化の二つのタイプの問題に適用することができる。ここでは最適化に絞って説明を行う。

X 上の実数値性能評価関数を S とする。いま、 X 上で最大値を求めることとし、最大値を実現する状態を x^* とする。この最大値を γ^* とすると式 (7) を得ることができる。

$$S(x^*) = \gamma^* = \max_{x \in X} S(x) \quad (7)$$

式 (7) は S にマイナスをつけることで最小化問題となる。式 (7) の問題を $l = \Pr(S(\mathbf{x}) > \gamma)$ を推定する問題に関連づける。ここで \mathbf{x} が X 上のある確率密度関数 $f(\cdot; \mathbf{v})$ に従い、 γ はあるレベルであるとする。仮に γ が γ^* に近い値が選択されたとするとこの問題は希少事象確率となり、定義域が点 x^* に集中する重点抽出密度を見つけることができれば最適、あるいはほとんど最適な状態を生成することができる。最適化問題であれば確率密度関数が x^* の値だけとる 1 点分布に対応し、レベル γ が最適値 γ^* であるときに最適化解が求められることができたといえる。従ってクロスエントロピーは標本確率密度の参照パラメータ \mathbf{v} が 1 点分布となるように繰り返し解 γ を生成し、その値に基づいて標本確率密度を更新するアルゴリズムである。最適化のためのクロスエントロピーのアルゴリズムを以下に示す。

ステップ 1

初期パラメータベクトル $\hat{\mathbf{v}}_0$ を選ぶ(一様分布など)。生成する解の数 N に対し、どれくらいの割合の解を初期パラメータベクトルの更新に利用するか決定するパラメータ ρ を決定する。このとき $N^e = \lceil \sigma N \rceil$ としレベルカウンタを $t = 1$ に設定する。

ステップ 2

独立同一分布 $f(\cdot; \hat{\mathbf{v}}_{t-1})$ に従う状態(解) X_1, \dots, X_N を生成する。性能評価値 $S(X_i)$ を計算し、 $S_{(1)} \leq \dots \leq S_{(N)}$ のように小さい順に並べ替える。 $\hat{\gamma}_t$ を性能評価の標本 $(1 - \sigma)$ 分位点とし、 $\hat{\gamma}_t = S_{(N - N^e + 1)}$ とする

ステップ 3

同じ標本 X_1, \dots, X_N を用いて、標本の選り抜き集合 $\varepsilon_t = \{X_k : S(X_k) \geq \hat{\gamma}_t\}$ を決定し、式 (8) の確

率計画問題を解きその解を \hat{v}_t とする.

$$\max_v \sum_{X_k \in \varepsilon_t} \ln f(X_k; v) \quad (8)$$

ステップ 4

停止条件を満たしていれば終了, 満たしていなければ $t = t + 1$ としステップ 2 へ戻る.

クロスエントロピー法を組み合わせ最適化問題に適用する場合は確率密度関数が離散分布となる. 例えば状態空間 X が長さ n の 0-1 の整数計画問題であるとすれば $\mathbf{X} = (X_1, \dots, X_n)$ の初期生成法としては $X_i \sim \text{Ber}(p_i)$, $i = 1, \dots, n$ のように独立なベルヌーイ分布から決める方法が考えられる. サイズ N^e の選り抜き標本集合 ε が与えられると式 (9) に従って分布のパラメータが更新される.

$$\hat{p}_i = \frac{\sum_{X \in \varepsilon} X_i}{N^e}, \quad i = 1, \dots, n \quad (9)$$

(2) クロスエントロピー法を用いた上位問題の計算アルゴリズム

クロスエントロピー法をチェックポイント最適配置決定問題に適用する. 道路管理事業者は各 OD ペアごとにチェックポイント配置候補ノードから一つチェックポイントを割り当てる. 従ってクロスエントロピー法においては各 OD ごとにチェックポイントの割り当てる確率を更新しなければならない. このことに注意して以下にアルゴリズムを示す.

ステップ 1 初期チェックポイント配置確率の設定

第 t 回目の繰り返し計算の際の OD ペア rs においてチェックポイント配置候補ノード $n (n \in N')$ へチェックポイントを配置する確率を $p_{t,n}^{rs}$ とし, またそのベクトルを \mathbf{p}_t^{rs} とする. 第一回目の計算において全ての OD ペアについてチェックポイント配置候補ノードに対して同一の確率でチェックポイントを配置すると仮定し, 式 (10) 得る.

$$p_{0,n}^{rs} = \frac{1}{N'} \quad \forall rs \in \Omega, \quad \forall n \in N' \quad (10)$$

ここで N' はチェックポイント配置候補ノードの総数である. $t = 1$ とする.

ステップ 2 解の生成

全ての OD ペアに対して \mathbf{p}_{t-1}^{rs} に基づいてチェックポイントの配置を決定する. このとき 戦略の生成回数を I とする.

ステップ 3 選り抜き集合の生成

σ を用いて $I^e = \lceil \sigma I \rceil$ となる I^e を求め, 戦略 sc_i のときの性能評価関数となる式 (2) の値を計算し X_{sc_i} とする. 次に全ての X_{sc_i} を小さい順に並び変え, $X_{(1)} \leq \dots \leq X_{(N')}$ とし, \hat{X}_t を性能評価の標本 $1 - \sigma$ の分位点とし, $\hat{X}_t = X_{(I - I^e + 1)}$ とする.

\hat{X}_t に基づいてチェックポイント戦略選り抜き集合

$$\varepsilon_t = \{sc_i : X_{sc_i} \leq \hat{X}_t\}$$

ステップ 4 チェックポイント配置確率の更新

またある戦略 sc_i において OD ペア rs 間にチェックポイント配置候補ノード $n (n \in N')$ のチェックポイントが配置されていれば 1, そうでなければ 0 の変数を $y_{rs,n}^{sc_i}$ とする. このとき式 (11) に基づいて各 OD ペアごとにチェックポイント配置確率を更新する.

$$p_{t,n}^{rs} = \frac{\sum_{sc_i \in \varepsilon_t} y_{rs,n}^{sc_i}}{I^e} \quad (11)$$

停止条件を満たしていれば終了, 満たしていなければ $t = t + 1$ としステップ 2 へ

(3) 最短経路探索における例外処理

各 OD ペアは割り当てられたチェックポイントを通過するように最短経路 (一般化コスト最小経路) を移動する. このときネットワークの接続条件によっては O ノードからチェックポイント, あるいは D ノードからチェックポイントまでリンクが繋がっていない場合がある. この問題が発生した際は簡単のためにチェックポイントの配置を適当に変更することで対処する. 通常の計算アルゴリズムにおいてはチェックポイントは過去の計算結果から更新されたチェックポイント配置確率に基づいて配置されるが, この例外処理ではすべてのチェックポイントが等確率で再配置されるものとする. つまり $t = 0$ における状態と同様の計算を行いチェックポイントを再配置する. 二段階計画問題全体の計算フローを図 7 に示す.

7. 首都圏ネットワークにおける計算例

(1) 計算結果

結果を明確にするために OD1: 119828(東京多摩部) \rightarrow 119838(千葉市), OD2: 119828(東京多摩部) \rightarrow 119839(千葉西北部内陸), OD3: 119831(川崎市臨海) \rightarrow 119834(さいたま市), OD4: 119833(神奈川) \rightarrow 119834(さいたま市) の 4OD に絞って計算を行う. これら OD は OD ペアのうち比較的トリップ距離が長く, 首都圏の中心部を通過する可能性がある OD ペアを想定している. この 4 OD ペア間の交通量を表 5 に示す.

表-5 OD 間交通量

OD ペア	1	2	3	4
交通量	219	201	80	288

チェックポイントの配置によってどのように経路が変化し, 式 (2) で示される道路管理事業者の目的関数が変

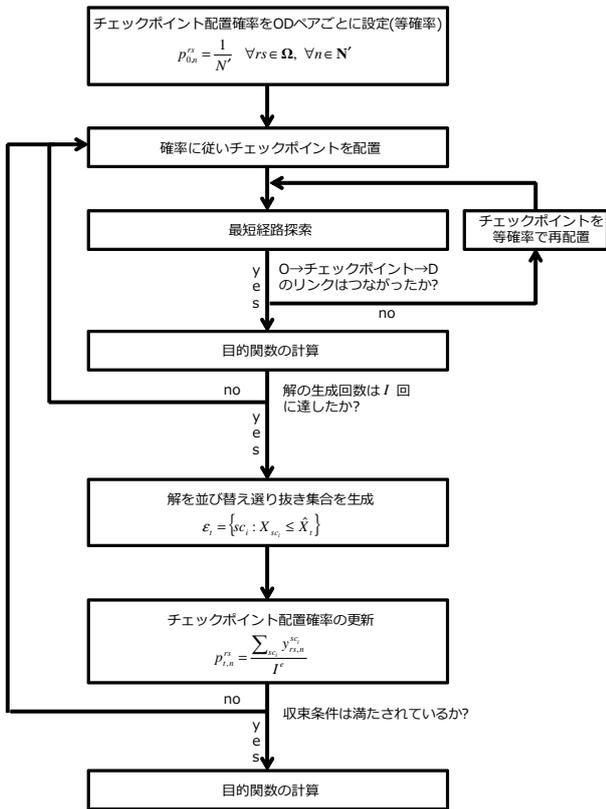


図-7 二段階計画問題計算フロー

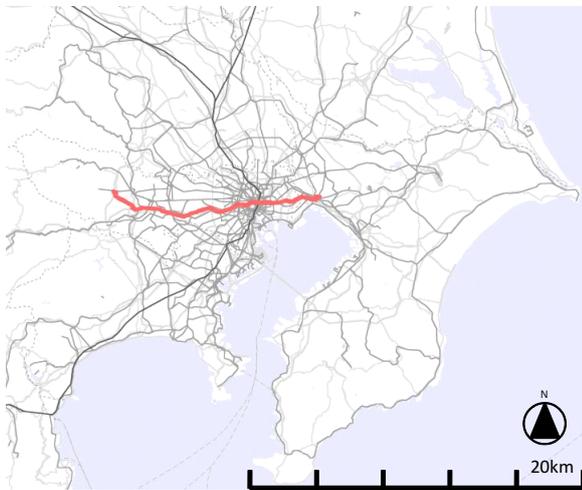


図-8 OD ペア 1 の最短経路

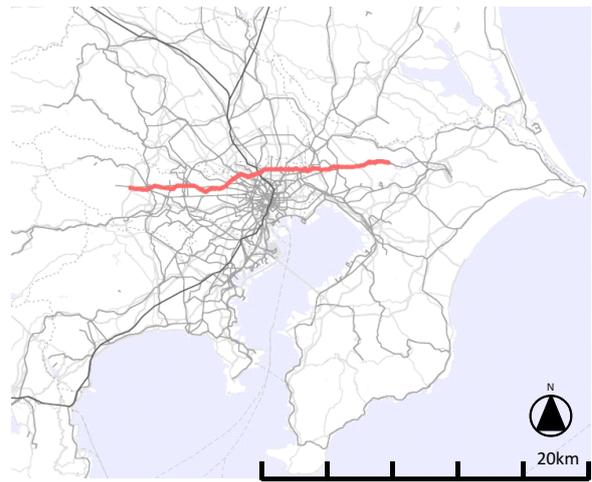


図-9 OD ペア 2 の最短経路



図-10 OD ペア 3 の最短経路

化するかを調べる. チェックポイントを配置しない場合に各 OD ペアで利用される経路を図 8~11 に示す.

図??に示した 22 個のチェックポイント配置候補ノードから各 OD ペアごとに一つのチェックポイントを配置する. 図??~15 にクロスエントロピー法を用いて各 OD ごとに最適なチェックポイントを配置したときの経

路を示す. またチェックポイントを配置しなかったときの道路管理事業者のコストとチェックポイントを配置したときのコストを図 16 に示す. チェックポイントが配置されていない場合各 OD ペアの物流事業者は図 8~11 のような最短経路を移動する. 一方道路管理事業者によって各 OD ペアにチェックポイントが配置された場合は図 12~15 のように物流事業者は経路を変更する. その結果図 16 のように道路管理事業者のコストは小さくなっている. 各 OD ペアごとに比較した場合, OD 間交通量が多いほど道路管理事業者のコストの減少のしかたは大きい. 一方で最も OD 間交通量が多い OD ペア 4 よりも OD ペア 2 の方がコストの減少のしかたが大きい. これは各 OD ペア間でチェックポイントが配置される前と後で利用する経路種別の違いの影響である



図-11 OD ペア 4 の最短経路

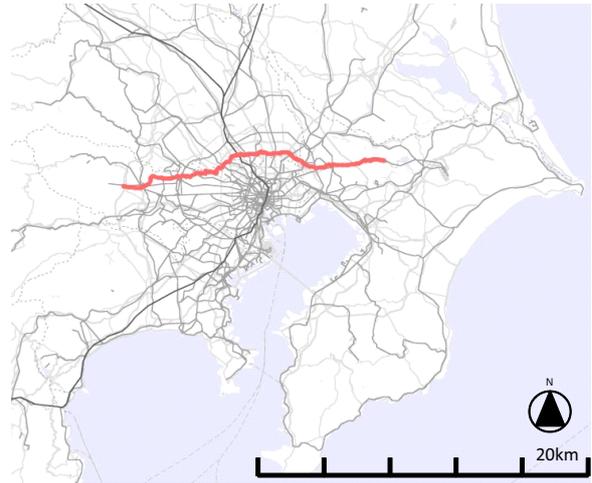


図-13 OD ペア 2 の最短経路 (チェックポイント 17)

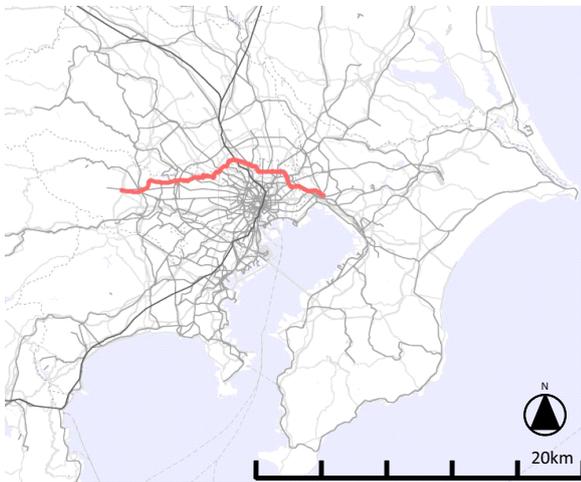


図-12 OD ペア 1 の最短経路 (チェックポイント 16)

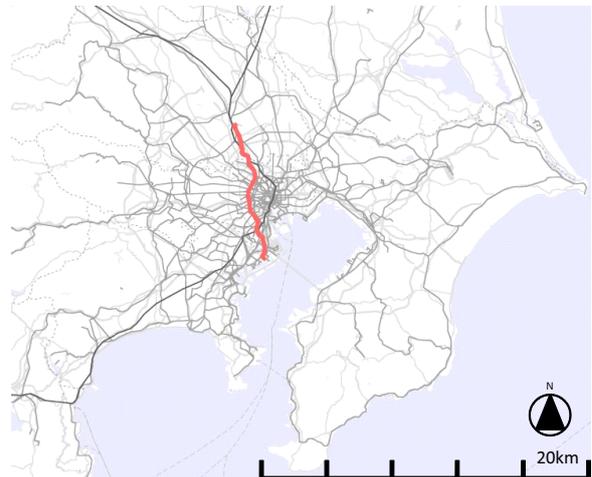


図-14 OD ペア 3 の最短経路 (チェックポイント 17)

と考えられる。図 17 に OD ペア別、チェックポイントの有無別の利用経路種別の構成を示す。

図 17 によればどの OD ペアにおいてもチェックポイントの有無に関わらず、高速自動車道の利用割合が高い。これは OD ペアの輸送距離が比較的長く、かつ初乗り料金を課していないためであると考えられる。またチェックポイントを配置した場合と配置していない場合を比較すると、どの OD ペアにおいても前者の場合の方が高速自動車道の利用割合が高い。これは図 8～15 からその傾向が読み取れる。例えば OD ペア 1 については図 8 では首都圏の中心部に近いリンクを走行していることがわかる。ここで高速自動車道以外の下道を利用している。一方 OD ペア 1 に対してチェックポイントを配置した後では、図 12 から首都圏の中心部を通

過するのを避けるような経路となっている。このような傾向が他の OD ペアからも同様に読み取れる。また図 16 ではチェックポイントを配置した場合はその管理コストも含まれている。計算結果ではチェックポイント候補ノードのうち 15, 16, 17 にチェックポイントを配置しているので 500000×3 の管理費用がかかる。今回のパラメータ設定においてはチェックポイントを 3 つ配置し迂回させるような経路に誘導してもなおその道路ダメージの減少の方がチェックポイント管理コストの総和よりも小さいため、チェックポイントを配置することでコストを抑えられている。



図-15 OD ペア 4 の最短経路 (チェックポイント 15)

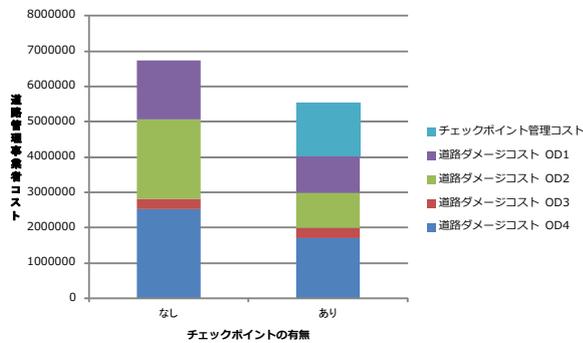


図-16 チェックポイントの有無別道路管理事業者コスト

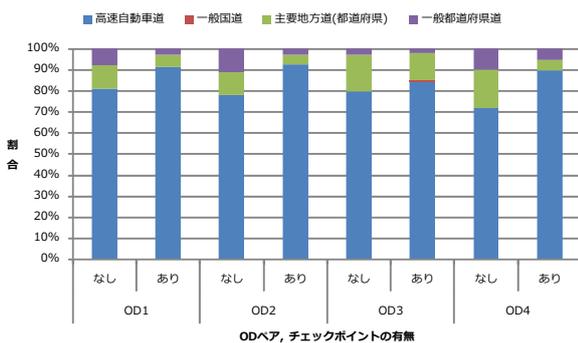


図-17 OD ペア, チェックポイントの有無別, 利用経路種別構成

(2) 複数 OD で計算を行うことの意味

前節では4つのODを対象に計算を行った。しかし実際にはより多くのODペアを想定する必要がある。そ

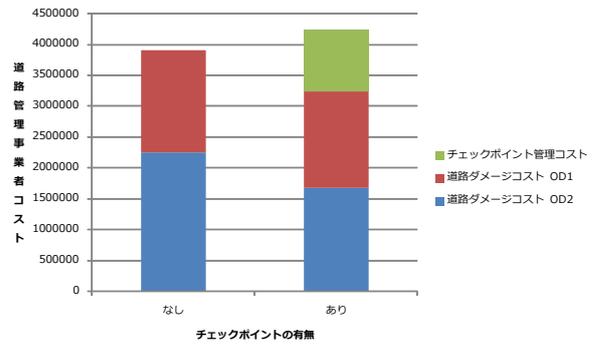


図-18 2ODにおけるチェックポイント配置例

ここで少ないODで計算を行う場合にどのような現象が起きているのかを考える。ここではODペア1, 2でのチェックポイントの配置を想定する。例えばODペア1にはチェックポイント配置候補ノード11に、ODペア2にはチェックポイント配置候補ノード12にチェックポイントを配置したとする。チェックポイント配置前と後の道路管理事業者のコストを図18に示す。図18によれば各ODペアごとの道路ダメージコストはチェックポイントを配置した場合の方が小さく抑えられている。一方合計コストはチェックポイント管理コストの分が上乗せされた結果チェックポイントを配置しない場合の方が小さい。このようにODペアが少ない場合はチェックポイント管理費用のコストの増大と経路誘導による道路ダメージコストの減少の大小関係がより重要となり複数のODペアでチェックポイントを共有することが必要となってくる。ここで共有とは同一チェックポイントを通過することを意味する。これはすなわち、ODペアが少ない場合は、チェックポイント管理コストの増加を考慮して単一ODペアでのチェックポイントの最適配置ではなく全体のコスト最小化を考え、チェックポイントを減らし、近くの別のチェックポイントを共同で利用することを意味する。この現象は4ODの場合にも見られ、ODペア3, 4は同一のチェックポイントを利用している。

8. まとめと今後の課題

道路維持管理に対するチェックポイント施策を首都圏ネットワークに適用した。組み合わせ数が膨大となることからクロスエントロピー手法を用いて計算を行った。その結果、チェックポイントを適正な場所に配置することで各ODペア間で利用する経路をより頑丈な高速自動車道に誘導し道路ダメージコストを抑えることができた。今後の課題は以下のつに整理した。

有料道路の料金設定

計算では高速自動車道路の料金は初乗り料金は考慮しておらず、距離に応じてのみ課金を行っている。しかし実際には初乗り料金が発生するため高速を降りたあとまたすぐ乗るといったような経路選択行動が発生する可能性がある。どの種別のリンクを選択するかは道路維持管理の観点から重要であるため有料道路の料金設定は正しく行う必要がある。

混雑の考慮

4章とは異なりリンクの旅行時間は交通量によらず一定であると仮定した。しかしチェックポイントは車両を集中させるため、混雑の影響は無視できない。一方で大型車のみでの配分では実際の道路の混入率を考えると現実的ではない。従って、チェックポイント付近では混雑を考えるといった形でボトルネックとなりそうな個所だけ混雑を考慮するという枠組みが必要である。

チェックポイントの割り当てアルゴリズムの改良

クロスエントロピーにおいて初期段階でチェックポイントを割り当てる際、全てのチェックポイントを同一確率で割り当てることとした。しかし、ODペアによっては、大きな迂回を強いられるチェックポイントが割り当てられる可能性がある。このようなチェックポイント配置は例え、道路管理事業者コストが抑えられたとしても現実的ではない。そこでOD間の最短経路からある値以上大きい経路になるチェックポイント配置が除去されるようにする。これは現実に則したチェックポイント配置を行うこと以外に、無駄なチェックポイント配置を行わないことによる計算時間の短縮も見込める。

参考文献

- 1) Eric Moreno-Quintero, Tony Fowkes, David Watling: Modelling planner-carrier interactions in road freight transport *Transportation Research Part E*, Vol.50, pp.68-83, 2013.
- 2) 瀬木俊輔, 田上貴士, 小林潔司: 高速道路の維持補修費用を考慮した最適料金に関する研究, 土木計画学研究・講演集, Vol. 46, ROMBUNNO. 232, 2012.
- 3) 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, Vol. 801, pp. 69-82, 2005.
- 4) 小塩達也, 山田健太郎: BWIMによる活荷重測定に基づく大型車両の疲労損傷寄与率の分析, 土木学会中部支部研究発表会講演概要集, pp. 113-114, 2002.
- 5) Strathman, J G, Theisen: WEIGHT ENFORCEMENT AND EVASION: OREGON CASE STUDY FHWA-OR-DF-02-12 SPR 304-101, Final Report, 2002.
- 6) 今泉, 羽藤: 過積載車両に着目したチェックポイント概念の適用と道路維持管理手法, 第48回土木計画学研究発表会, CDROM, 2013.
- 7) 伏見正則, 逆瀬川浩孝: モンテカルロ法ハンドブック, 朝倉書店, pp. 485-503, 2014.