

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

今泉 孝章¹・羽藤 英二²

¹学生会員 東京大学大学院 工学系研究科都市工学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)
E-mail: imaizumi@bin.t.u-tokyo.ac.jp

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

本研究では道路維持管理の問題が重要性を増してくる中で、従前ではそれほど扱われなかった物流事業者の大型車の積載率の制御に焦点を当て、危険物配送の際に用いられる必ず通ることを義務付けられた点であるチェックポイントという概念を導入する。道路管理事業者は道路管理費用が最小となるようにチェックポイントの設置場所、数や罰金を変更し、物流事業者は割り当てられたチェックポイントを通過する条件で配送費用が最小となるように積載率と経路を決定する。これを2段階計画問題として定式化を行い、簡単なネットワークを用いてチェックポイント導入効果を検証した。

Key Words : checkpoints, overloading, bi-level modelling, freight transportation

1. はじめに

日本では高速道路、橋梁、トンネルなどの道路構造物の社会資本ストックが多く存在している。過去の高速道路における料金徴収は主に資本費用の回収が主目的であった。しかし、今後建設から一定期間以上経過する道路構造物が飛躍的に増加していくこと、少子高齢化社会により十分な資本金が得られる見込みが小さい¹⁾ことを考慮すると、道路構造物の維持管理の重要性がますます大きくなる。

現在の道路構造物の管理手法として(ア)維持管理費用の確保・削減、(イ)劣化速度の緩和、の二つに着目した制度、調査、分析が存在する。(ア)については、瀬木ら(2012)²⁾、田上ら(2013)³⁾の維持修繕費用を考慮し、道路に与えるダメージに応じて車種別に料金設定を行った研究や、インフラの劣化過程を予測するためにマルコフ推移確率モデルの推定を行った津田ら(2005)⁴⁾の研究がある。一方(イ)では舗装の劣化に着目した場合、舗装交通量と舗装交通重量に影響を受ける。舗装交通重量については舗装が受けるダメージは車両軸重の4乗に比例する”4乗ルール”が存在する。これは米国全州道路交通運輸行政官協会の(AASHTO)の試験によって導かれたもので、車両が舗装に与える道路ダメージは標準的な車両の単軸重(ここでは8.16トンとする)に対する比を4乗したものをすべての軸で足し合わせた

値であり式(1)のように表わされる⁵⁾。

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

ただし、 A_j は j 番目の単軸重を、 m は車両の軸数を表わす。4乗ルールから普通車の通行よりも物流事業者の大型車による配送行動が与える影響は大きいといえる。そこで物流事業者の行動原理についての既往研究の整理を行う。物流事業者の短期的な意思決定に注目すると、配送費用を最適化する配送計画問題、長期の意思決定では施設配置問題が最も重要な問題となる⁶⁾。前者については配送行動、配送経路選択などを対象とした研究で舗装交通量の制御の有益である。兵藤ら(2003)⁷⁾、古川ら(2006)⁸⁾は、コードン課金の範囲や課金額が変化したときの配送行動の変化について分析している。また兵藤ら(2007)⁹⁾は大型車の経路選択行動を実データをもとにモデル化し、田中ら(2004)¹⁰⁾はプローブデータをもとに配送時刻分布、配送順序に与える影響について考察を行っている。一方、舗装交通重量に着目した研究として、Moreno-Quintero et al.(2013)⁵⁾は道路管理事業者が過積載車両発見時の罰金額や、積載量検査ポイント数を変化させたときに物流事業者が積載率をどのように変化させるかを分析している。

本研究では舗装交通量、舗装交通重量を同時に制御するためにチェックポイントという概念を導入する。2章では本研究の基本的な立場を述べ、3章で本研究における2段階計画問題の定式化を行い、4章で簡単なネットワークを用いて数値計算を行いチェックポイント導入

の効果の検証を行う。

2. 本研究の基本的立場

(1) 積載率制御の必要性

ここでは、舗装交通重量、すなわち積載率の制御がなぜ必要なのか説明する。日本の物流において、ジャストインタイム輸送やマネジメントの高度化により多頻度小口輸送の需要が増し、物流交通量が増加してきた。また、産業構造のグローバル化により国際物流が増加し国際海上コンテナ貨物を輸送するコンテナトレーラの交通需要が大きくなってきた。こうした物流交通の変化に対し、苦瀬 (2002)¹¹⁾ や河野・長谷川 (2004)¹²⁾ は都市内物流交通の規制誘導施策を整理している。苦瀬 (2002)¹¹⁾ によれば規制誘導施策は (ア) 交通需要の調整、と (イ) 交通需要量の削減の2種類に分類される。以下にその概要を示す。

(ア) 交通需要の調整

□空間的な分散と集約

トラックバンとトラックルートなどが代表的。トラックバンは乗用車に道路利用を優先させトラックの通行規制を行うものである。トラックルートは市街地への進入を防ぐためにトラックの通行路を指定するものである。このとき同時に時間帯の規制も行われることが多い。

□時間的な分散と集約

都心部の道路混雑を避けるためにトラックの進入を特に通勤通学時間帯で規制する方法がある。一般には都心の環状道路から内部を進入規制することが多い。料金の支払いを条件に進入を許可すればプライシングになる。

(イ) 交通需要量の削減

□交通量の削減

トラックの台数を削減するために積載率の低いトラックの都心の通行を排除する方法がある。積載率に計測が個別の計測困難なときは会社単位で輸送実績から平均的な積載率を求め、規定以上の積載率の場合に限って、会社単位で通行を許可する方法もある。

□トリップの削減

積載率向上と台数削減を目的とした共同輸配送がある。輸送会社にもメリットがあり、民間部門での努力もなされているが、公共部門も交通対策の一環として検討している例は多い。

一方、柴崎ら (2005)¹³⁾ は国際海上貨物の効率的な配送のために海上コンテナ車両の通行上のボトルネックを

表-1 車両諸元の一般的制限値 (柴崎 (2005)¹³⁾ より)

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

整理し、それらを含んだネットワークを作成し、その解消効果の試算を行っている。柴崎ら (2005)¹³⁾ によれば車両の高さや重量などの制限については車両制限令により表 1(柴崎 (2005)¹³⁾ より) のように一般制限値が定められており、この一般的制限値をどれか一つでも超える車両は特殊車両とされ、特殊車両通行許可を受けなければならない。また例外もあり、一般制限値のうち総重量のみが基準を超えるなかで車長や最遠軸距に応じ定められた総重量の基準以下のものを新規格車といい高速自動車国道及び指定道路は自由に走行できるが、それ以外の道路については特殊車両として扱われ通行許可申請が必要となる。

物流交通に対しては以上のような規制施策がある。次に大型車の積載率や舗装に与えるダメージの現状を整理する。小塩¹⁴⁾ は通過車両の軸重を測定できる B-WIM(Bridge Weigh in Motion) を用いて過積載車両の混入実態を車種別に調査している。それによれば対象データのうち 19 %が過積載と判定され、車種によってはほとんどが過積載であるものもあった。小塩、山田 (2002)¹⁵⁾ は BWIM を用いて車両の種類や積載状態により道路橋の疲労損傷にどのような影響を与えているか分析を行っている。車種を最遠軸距によりトラック類、トレーラー類に分けそれぞれある総重量を持つ車両群が与える疲労損傷度の合計を算出している。それによれば疲労損傷の半分以上が大型車両全体の 1~2 割程度の数の「重量者」により生じることがわかっている。以上のことから積載率を制御することが道路の維持管理において重要であるにも関わらず実施されている施策が十分に機能していないといえる。そこで本研究ではチェックポイントを用いて積載率の制御を行う。

(2) チェックポイントの概念

ここではチェックポイントの概念と本研究におけるチェックポイントの枠組みを説明する。

(a) Gateway Location Problem

チェックポイントとは必ず通らなくてはならない場所

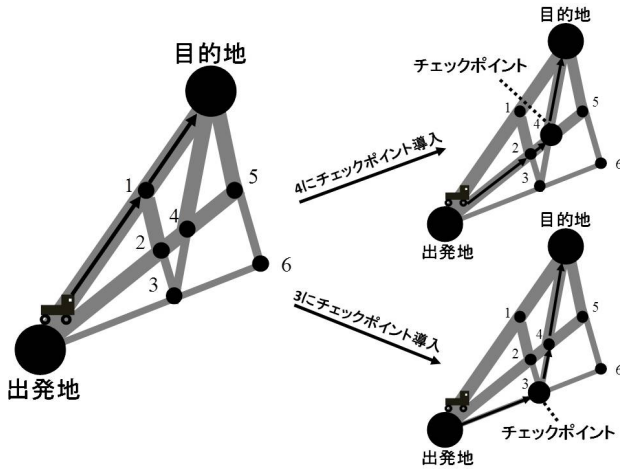


図-1 チェックポイント導入効果イメージ図

表-2 リンク別配送リスク

リンク	配送リスク
出発地-1	大
1-目的地	
出発地-2	中
2-4	
4-5	
2-1	
4-目的地	
5-目的地	小
出発地-3	
3-6	
3-2	
3-4	
6-5	

のことを指す。Bruglieri et al.(2011)¹⁶⁾ や Cappanera et al.(2013)¹⁷⁾ は危険物配送の際に配送リスクが最小となる場所にチェックポイントを設け、間接的に配送経路の制御する手法を提案している。ここで配送リスクとは例えばガソリントラックが事故を起こしたときの被害であり、そのリスクの大きさはリンク周辺の都市の規模や密度によって異なると考えられる。管理事業者がチェックポイントを決定すると配送業者は配送費用を最小化するように配送経路を決定する。ここでチェックポイントをどこに配置したときに最もリスクが最小となるか問題となってくる。これを Gateway Location Problem(GLP) という。図-1 にチェックポイント導入の効果イメージを示す。また図-1 のネットワーク上のリンクの配送リスクを表-2 に示す。

表-3 GLP における変数の定義

$G = (N, A)$	重み付き有効グラフのノード N , リンク A の集合.
$V = \{1, \dots, n\}$	配送に利用する車両.
$o(v)$	車両 $v \in V$ の出発ノード
$d(v)$	車両 $v \in V$ の到着ノード
d_v	車両 $v, \forall v \in V$ の配送量.
N^{GTW}	k 個のチェックポイント を割り当てる際の m 個の候補ノード. ただし $k < n, k \ll m, N^{GTW} \subseteq N$.
c_{ij}	リンク $(i, j) \in A$ の道路利用者にと つての正の係数.
r_{ij}	リンク $(i, j) \in A$ の管理事業者にと つての非負の係数.
y_h	$y_h = \begin{cases} 1 & \text{ノード } h(\in N^{GTW}) \\ & \text{にチェックポイントがある.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases}$
z_h^v	$z_h = \begin{cases} 1 & \text{車両 } v \text{ に割り当てられた} \\ & \text{チェックポイントが} \\ & \text{ノード } h(\in N^{GTW}) \text{ である.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases}$
$\bar{x}_{ij}^v$	出発地 $o(v)$ からチェックポイント h までの車両 v についてのリンク ij の フロー数.
$\underline{x}_{ij}^v$	ただし $\forall v \in V, (i, j) \in A, j \neq d(v)$ チェックポイント h から到着地 $d(v)$ までの車両 v についてのリンク ij の フロー数.
$\delta_i^+(\bar{x})$	ただし $\forall v \in V, (i, j) \in A, i \neq o(v)$ 出発地 $o(v)$ からチェックポイント までの経路上のノード i から出ていくフロー数の総和.
$\delta_i^-(\underline{x})$	チェックポイントから到着地 $d(v)$ までの経路上のノード i に入ってくるフロー数の総和.

図-1 の左図ではチェックポイント導入前の配送行動を表わしており、最短経路を移動することで配送リスクが大きいリンクを通過している。一方、図-1 の右はノード 4、ノード 3 にチェックポイントを導入したときの配送行動を表わしている。配送側がノード 4、ノード 3 を通る条件で最短経路を移動した結果チェックポイント導入前よりも配送リスクが小さいリンクを通過していることがわかる。

Bruglieri et al.(2011)¹⁶⁾ は GLP を複数の形で定式化を行っている。ここでは参考のために 2 段階計画問題として定式化されたものを示す。表-3 に変数の定義を記す。

配送業者が車両 v を使って出発地 $o(v)$ から到着地 $d(v)$ へ最短経路を利用して危険物配送を行うとする。このとき配送業者は配送費用 c_{ij} が利用した全リンク分かかる。一方管理事業者は配送リスク r_{ij} が配送事業者が利用した全リンク分かかる。このとき管理事業者は配送リスクが最小となるようにグラフ G 上の候補ノード N^{GTW} から k 個のチェックポイントを設置し、それを各車両に割り当てる。チェックポイントが設置されると

配送業者はチェックを通るような最短経路を用いて危険物配送を行うことになる。この問題は以下の 2 段階計画問題として定式化される。

上位問題～管理事業者のリスク最小化問題～

$$\sum_{v=1 \dots n} d_v \sum_{(i,j)} r_{ij} (\bar{\xi}_{ij}^v + \underline{\xi}_{ij}^v) \quad (2)$$

制約条件

$$\sum_{h=1, \dots, m} z_h^v = 1 \quad \forall v \in V \quad (3)$$

$$y_h \geq z_h^v \quad \forall h \in N^{GTW}, \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{h=1, \dots, m} y_h = k \quad (5)$$

$$z_h^v \in \{0, 1\} \quad \forall h \in N^{GTW}, \forall v \in V \quad (6)$$

$$y_h \in \{0, 1\} \quad \forall h \in N^{GTW} \quad (7)$$

下位問題～配送業者の配送費用最小化問題～

$$\sum_{v \in V} \sum_{(i,j) \in A} c_{ij} (\bar{x}_{ij}^v + \underline{x}_{ij}^v) \quad (8)$$

制約条件

$$\delta_{o(v)}^+ (\bar{x}^v) = 1 \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$\delta_h^- (\bar{x}^v) - \delta_h^+ (\bar{x}^v) = z_h^v \quad i \notin N^{GTW}, \forall v \in V \quad (10)$$

$$\delta_i^- (\bar{x}^v) - \delta_i^+ (\bar{x}^v) = 0 \quad (11)$$

$$\forall i \neq o(v), d(v), i \notin N^{GTW}, \forall v \in V$$

$$\bar{x}_{ij}^v \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, \forall v \in V \quad (12)$$

$$\delta_{d(v)}^- (\underline{x}^v) = 1 \quad \forall v \in V \quad (13)$$

$$\delta_h^+ (\underline{x}^v) - \delta_h^- (\underline{x}^v) = z_h^v \quad \forall h \in N^{GTW}, \forall v \in V \quad (14)$$

$$\delta_i^+ (\underline{x}^v) - \delta_i^- (\underline{x}^v) = 0 \quad (15)$$

$$\forall i \neq o(v), d(v), i \notin N^{GTW}, \forall v \in V$$

$$\underline{x}_{ij}^v \geq 0 \quad \forall (i,j) \in A, \forall v \in V \quad (16)$$

$\bar{\xi}_{ij}^v, \underline{\xi}_{ij}^v$ はそれぞれ下位問題を最小とする $\bar{x}_{ij}^v, \underline{x}_{ij}^v$ である。式 (2) の上位問題目的関数は各車両の出発地からチェックポイントまでとチェックポイントから到着地までの配送リスクの和を各車両ごとの需要量でかけてすべて足し合わせた値を最小化することを意味する。式 (3)～式 (7) はチェックポイントが各車両につき一つ割り当てられること、チェックポイントは k 個設置することを意味する制約式である。一方、式 (8) の下位問題目的関数は各車両の出発地からチェックポイントまでの距離とチェックポイントから到着地までの距離をすべて足し合わせた値を最小化することを意味する。式 (9)～式 (16) は各車両が一度通ったノードを二度と通らないことを意味する制約式である。この GLP を解くことによって最適なチェックポイントを設置し危険物配送リス

クを最小化することができる。

(b) チェックポイントの物流事業者配送行動への応用

チェックポイントを物流事業者の配送行動に応用する。道路管理事業者はチェックポイントを物流事業者に課すことで車両が道路に与えるダメージなど道路管理費用を最小化する。また物流事業者は割り当てられたチェックポイントを通過する条件で配送費用が最小となる経路を選択する。以下に本研究におけるチェックポイントの役割を記す。

- 一度デポを出てからを出てから顧客のもとへ配送を行い、再びデポに戻ってくる間に一度通らなくてはならない。従って 2 台の車両を利用して配送を行う場合、チェックポイントは各車両に付き 1 回、合計 2 回通過しなくてはならない。
- チェックポイント上には車両重量自動計測機器が存在し、車両が合法積載量をオーバーしている場合、過積載量に応じた罰金が物流事業者に課される。
- チェックポイントを通らなかった場合は通常よりも厳しい罰金が課されるものとし、チェックポイントを避けて通ることにはしないとする。

チェックポイントで積載率のチェックが行えるため、物流事業者は配送ルートだけでなく積載率も変更する。本研究では道路管理事業者がチェックポイントの数と場所、過積載時に課す罰金額を変更することで道路管理費用を最小化する。一方、物流事業者は与えられたチェックポイントを通る条件で配送費用が最小となるように積載率と配送経路を変更する。このような相互作用を表現するために本研究では定式化に際し 2 段階計画問題を用いる。

(3) 2 段階計画問題

ここでは本研究で用いる 2 段階計画問題について簡単に説明する。2 段階計画問題とはある問題の最適化が別の問題の最適化の制約条件になっている問題である。2 段階計画問題は一般的に式 (17)～(20) のように表わされる。

上位問題

$$\min_x F(x, y) \quad (17)$$

制約条件

$$\begin{aligned} G(x, y) &\leq 0 \\ H(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (18)$$

下位問題

$$\min_y f(x, y) \quad (19)$$

制約条件

$$\begin{aligned} g(x, y) &\leq 0 \\ h(x, y) &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

上位問題の目的関数 $F(x, y)$ の最適化の制約条件が式 (18) と下位問題最適化問題の式 (19), (20) となっている。土木分野においては下位問題に均衡制約問題が入った均衡制約付き最適化問題 (MPEC) として土地利用や、ネットワークデザインなど様々な応用例がある¹⁸⁾。2 段階計画問題の例として高木ら (2011)¹⁹⁾ はエリア課金の最適エリア決定問題において、上位問題に社会的総余剰最大化問題を、下位問題に需要変動型の利用者均衡条件を設定している。Taniguchi et al.(1999)²⁰⁾ は物流施設のサイズと位置の最適設計問題において、上位問題に配送費用、時間費用、CO2 排出量などの複数の最適化問題を、下位問題に物流事業者の施設選択問題を設定し、多目的計画法を用いて効率的なパレート最適解の解法手法を提案している。このように上位問題の主体が政策決定者、下位問題の主体が政策決定の影響を受け行動する人々とする、Stackelberg の follower-leader 問題として知られる経済行動モデルをとらえることができ、2 段階計画問題が本研究の道路管理事業者と物流事業者の行動を記述するのに適していると言える。

3. 2 段階計画問題の定式化

ここでは本研究における道路管理事業者と物流事業者の行動を 2 段階問題として定式化する。定式化は Moreno-Quintero et al.(2013)⁵⁾ を参考に行う。Moreno-Quintero et al.(2013)⁵⁾ は物流事業者の配送行動を配送距離のみで扱っているのに対し、本研究ではネットワーク上のリンクの移動として表現することで、積載率に応じた道路ダメージを評価する。上位問題では道路管理事業者が物流事業者の積載率、経路を予測し、道路管理費用が最小となるように罰金額、チェックポイントの設置場所や数を決定する。下位問題では物流事業者が道路管理事業者によって決定された罰金額、チェックポイントをもとに積載率を決定し顧客のもとへ最短経路を選択して配送する。なお本研究ではチェックポイント配置の際、GLP を解くのではなく適当な場所をあらかじめ与えチェックポイント配置場所の評価を行う。表-4 に定式化に用いる変数の定義を示す。

物流事業者はデポ 0 から合計 T トンの荷物を顧客 N のもとへ配送する。このときまず経路数 K 、それぞれの経路における初期積載率 l_k^0 を決定し最短経路を用いて M_k 個の顧客のもとへ配送する。利用経路上のリンクを移動する際、リンク間距離 c_{ij} とそのときの積載量 Ll_k^m に応じたオペレーティング費用 $c_{ij}Ll_k^mV(l_k^m)$ がかかる。ただし、空配送時はリンク間距離を車両オペレーティング費用とする。道路管理事業者からチェックポイントが割り当てられると各経路において少なくとも一

表-4 2 段階計画問題における変数の定義

$G = (N_0, A)$	無効グラフのノード N_0 , リンク A の集合.
0	デポを表わすノード.
n	配送顧客数.
N	顧客のノードの集合. ただし $N = \{1, \dots, n\}$.
N^{GTW}	$N^{GTW} \cap N = \emptyset$
N_0	デポ, 顧客, チェックポイント候補地を合わせたノード集合. ただし $N_0 = \{0, 1, \dots, n\}$, $N^{GTW} \subseteq N_0$.
c_{ij}	リンク ij の距離. ただし $i, j \in A$
T	顧客がもつ全需要
T_d	顧客 $d(d \in N)$ の需要量. ただし $\sum_{d=1}^n T_d = T$.
K	利用経路数. ただしデポを出発して再びデポに戻ってくることを経路とする.
k	経路番号. ただし $1 \leq k \leq K$
M_k	経路 k における配送顧客数. ただし $1 \leq M_k \leq n$, $\sum_{k=1}^K M_k = n$
L	合法最大積載量.
l_k^m	経路 k において m 番目の顧客に配送するときの積載率. ただし $1 \leq m \leq M_k + 1$. ($M_k + 1$ はデポ)
l_k^0	デポを出発する際の初期積載率.
x_{ij}^{km}	$x_{ij}^{km} = \begin{cases} 1 & \text{経路 } k \text{ の } m \text{ 番目の顧客へ配送する際にリンク } ij \text{ を用いている.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases}$
$V(l_k^m)$	積載率 l_k^m のときの単位距離, 単位重量当たりの車両オペレーティング費用.
F	罰金額
y_k^m	$y_k^m = \begin{cases} 1 & \text{経路 } k \text{ の } m \text{ 番目の顧客へ配送する際にチェックポイントを通る.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases}$
z_h	$z_h = \begin{cases} 1 & \text{チェックポイントがノード } h \in N^{GTW} \text{ にある.} \\ 0 & \text{それ以外.} \end{cases}$
U_{ij}	単位 ESAL(等価単軸荷重) 当たりの道路ダメージ.
$g(l_k^m)$	積載率 l_k^m のときの ESAL についての関数.
S	チェックポイント一つ当たりの管理費用
C	設置チェックポイント数.
C_o	道路管理事業者の目的関数.
C_i	物流事業者の目的関数.

回はチェックポイントを通らなくてはならず、チェックポイント通過の際に過積載していた場合、その過積載率に応じた罰金 $LFy_k^m \cdot \max\{l_k^m - 1, 0\}$ が配送費用としてかかる。ただし $\max\{a, b\}$ は a と b のうち小さい方を表わす。従って物流事業者の目的関数 C_i は (車両オペレーティング費用+罰金) となる。一方道路管理事業者は物流事業者の利用したリンクについて積載率に応じた道路ダメージ $U_{ij}g(l_k^m)$ を受ける。ただし、空配送の際の道路ダメージは過積載時のダメージに対し

て微小とみなし 0 とする．道路管理費用を最小化するためにチェックポイントを C 個設置し，そのときチェックポイント管理費用が SC かかる．チェックポイントにおいて物流事業者が過積載している場合過積載量に応じた罰金 $LFy_k^m \cdot \max\{l_k^m - 1, 0\}$ が得られこれは道路管理費用に充てられるとする．従って道路管理事業者の目的関数 C_o は (道路ダメージ-罰金収入+チェックポイント管理費用) となる．この道路管理事業者と物流事業者の行動を 2 段階計画問題として定式化すると以下のようになる．

上位問題～道路管理事業者の道路管理費用最小化問題～

$$C_o = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{m=1}^{M_k+1} \left[\sum_{i,j \in N_0, i \neq j} \{x_{ij}^{km} U_{ij} g(l_k^m)\} - (l_k^m - 1) LFy_k^m \right] \right] + SC \quad (21)$$

制約条件

$$\sum_{m=1}^{M_k+1} y_k^m = 1 \quad (22)$$

$$\sum_{h \in N^{GTH}} z_h = C \quad (23)$$

下位問題～物流事業者の配送費用最小化問題～

$$C_i = \sum_{k=1}^K \left[\sum_{m=1}^{M_k} \left[\sum_{i,j \in N_0, i \neq j} \{c_{ij} x_{ij}^{km} L l_k^m V(l_k^m)\} + (l_k^m - 1) LFy_k^m \right] + \sum_{i \in N} c_{i0} x_{i0}^{k(M_k+1)} \right] \quad (24)$$

制約条件

$$\sum_{k=1}^K L l_k^0 = T \quad (25)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k+1} \sum_{i \in N_0, i \neq j} x_{ij}^{km} = 1 \text{ for } \forall j \in N \quad (26)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k+1} \sum_{j \in N_0, i \neq j} x_{ij}^{km} = 1 \text{ for } \forall i \in N \quad (27)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k+1} \sum_{i \in N} x_{i0}^{km} = K \quad (28)$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{m=1}^{M_k+1} \sum_{i \in N} x_{0i}^{km} = K \quad (29)$$

上位問題目的関数を表わす式 (21) の右辺第一項は道路ダメージを，第二項は罰金収入を，第三項はチェックポイント管理費用を表わしている．また下位問題の目的関数を表わす式 (24) の右辺第一項は荷物を積載している状態での車両オペレーティング費用を，第二項は罰金を，第三項は空配送時のオペレーティング費用を表わしている．

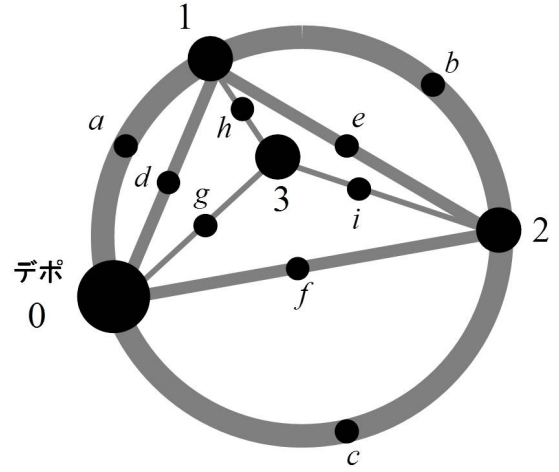


図-2 ネットワーク図

上位問題制約式 (22) は各経路において 1 度は必ずチェックポイントを通ることを意味する．また制約式 (23) は設置されたチェックポイントの数が C であることを意味する．一方下位問題制約式 (25) は各経路で配送する荷物の合計が T であることを意味する．また制約式 (26), (27) は一つの顧客に対しては車両が一回だけ出入りすること，制約式 (28), (29) はデポに出入りする車両数が利用する経路数 K と同じであることを意味する．

4. 数値計算によるチェックポイントの効果検証

ここでは簡単なネットワークを用いて定式化した上位下位問題の目的関数の計算を行い，チェックポイント導入の効果を検証する．用いるネットワークは図-2 のようになる．

図-2 において 0 はデポ，1～3 は配送先顧客， $a \sim i$ はチェックポイントの候補地を表わす．各顧客需要は $T_1 = 2, T_2 = 2, T_3 = 3$ で $T = 6$ ，合法最大積載量 $L = 3$ とする．またデポ，配送先を結ぶリンクの距離 c_{ij} ，リンクの道路ダメージ U_{ij} を表-5 に実ネットワークにおいて想定する道路を表-6 に示す．

各リンクはネットワーク中心部へいくほど道路ダメージを受けやすくなるように設定している．ここでは簡単のため車両オペレーティング費用が積載量によって変化しないとする．すなわち $L l_k^m V(l_k^m) = 1$ とし，車両オペレーティング費用＝配送距離であるとする．また関数 $g(l_k^m) = (l_k^m)^4$ とする．

以上の設定でデポ 0 から 1 台の車両用いて顧客のもとへ配送を行うとする．配送先顧客に時間枠制限はないものとし，物流事業者は最も配送費用が小さくなる

表-5 リンク距離と道路ダメージ

リンク	距離 c_{ij}	道路ダメージ U_{ij}
0-1	7	2
1-2	8	2
2-0	9	2
0-3	6	3
1-3	4	5
2-3	5	3
0-a-1	13	1
1-b-2	12	1
2-c-0	11	1

表-6 実ネットワークで想定する道路

リンク	想定する道路
0-1	環状線 (環 7 など)
1-2	環状線 (環 7 など)
2-0	環状線 (環 7 など)
0-3	都市内道路
1-3	橋梁, 陸橋など
2-3	都市内道路
0-a-1	都市高速道路 (首都高など)
1-b-2	都市高速道路 (首都高など)
2-c-0	都市高速道路 (首都高など)

ように経路を決定する。また配送の際に利用するリンクは一度しか通過できないとする。このとき以下の4つのシナリオにおける道路管理事業者と物流事業者の目的関数の値を比較する。

シナリオ 1: 無規制

物流事業者に対し通行規制, 重量制限などが全く課されていない。

シナリオ 2: 通行規制

シナリオ 1 の結果最も脆弱で道路ダメージの大きいと考えられるリンクの通行を禁止する。

シナリオ 3: 車両重量自動計測機器の設置と罰金の導入

適当な場所に車両重量自動計測機器を設置し, 過積載車両に対し罰金を課す。ただし, 車両重量自動計測機器はチェックポイントと異なり通過する義務はない。

シナリオ 4: チェックポイントの導入

チェックポイントを設置する。チェックポイントには車両重量自動計測機器が設置される。

(1) シナリオ 1

全く規制がない場合, 物流事業者は1台の車両で最短経路を使って配送を行う。このとき $0-a-1$, $1-b-2$, $2-c-0$ のリンクは用いられることはない。従って考えられる経路とそのときの物流事業者, 道路管理事業者の目的関数の値, C_i , C_o は表-7 のようになる。

表-7 経路別目的関数値: シナリオ 1

経路	C_i	C_o
0-1-3-2-0	25.0	47.8
0-2-3-1-0	25.0	56.1
0-1-2-3-0	26.0	41.3
0-3-2-1-0	26.0	51.4
0-2-1-3-0	27.0	52.4
0-3-1-2-0	27.0	53.1

このとき物流事業者は最も経路距離が小さい 0-1-3-2-0, 0-2-3-1-0 を選択することになる。従って道路管理事業者の道路管理費用は 47.8 か 56.1 となる。物流事業者の配送時間枠や積載率に応じた配送費用などを無視しているため配送順が異なっても利用した配送路が同じなら配送費用も同じとなり, どちらの経路を選ぶかは確率的になってしまう。道路管理費用を考慮すると道路事業者にとっては 0-1-3-2-0 の経路のほうが望ましいので配送順番を制御するための枠組みが有効であることがわかる。また道路管理事業者にとって最も道路管理費用が小さいのは 0-1-2-3-0 であるが, 配送費用が最も大きいので物流事業者はこの経路を用いることはない。

(2) シナリオ 2: 通行規制

通行を規制するのは都市内の橋梁など比較的走行距離が短い区間であると考えられるので 1-3, 2-3, 0-3 のみ規制が可能であるとする。シナリオ 1 の結果を受け道路管理事業者が最も脆弱な 1-3 の大型車の通行を規制したとする。このとき考えられる経路とその時の C_i , C_o はそれぞれ表-8 のようになる。規制前に経路

表-8 経路別目的関数値: シナリオ 2

経路	C_i	C_o
0-1-2-3-0	26.0	41.3
0-3-2-1-0	26.0	51.4

0-2-3-1-0 を用いていた場合, 1-3 の通行規制により道路管理費用を軽減できたことになる。一方で, 規制前に経路 0-1-3-2-0 を用いておりかつ規制によって 0-3-2-1-0

を用いた場合道路管理事業者の道路管理費用は増加する。0-3を規制した場合は無規制の場合と配送経路は変化せず、2-3を規制した場合0-2-1-3-0か0-3-1-2-0を利用することになりいずれも道路管理費用は大きくなる。従って通行規制を行う場合、物流事業者が迂回したときの経路における道路管理費用を評価しなければ、規制により道路管理費用が大きくなることもある。

(3) シナリオ 3: 車両重量自動計測機器の設置と罰金の導入

ここでは過積載車両に対し、過積載率に応じた罰金を課すことで物流事業者の行動を制御し道路管理費用を軽減させることを考える。積載量を計測するために車両重量自動計測機器を設置する。過積載の状態で行走したときの単位過積載量当たりの罰金額を $F = 5$ 、車両重量自動計測機器の管理コスト $C = 5$ とする。まず h に車両重量自動計測機器を設置した場合を考える。このとき各経路における C_i 、 C_o は表-9 のようになる。

表-9 経路別目的関数値: シナリオ 3-1

経路	C_i	C_o
0-1-3-2-0	31.7	46.2
0-2-3-1-0	25.0	61.1
0-1-2-3-0	26.0	46.3
0-3-2-1-0	26.0	56.4
0-2-1-3-0	27.0	57.4
0-3-1-2-0	35.3	58.1

シナリオ 1 において最も配送費用が小さかった経路 0-1-3-2-0、0-2-3-1-0 を比較すると、経路 0-1-3-2-0 のほうが罰金により配送費用が大きくなり、配送順番を制御することができていることがわかる。一方このとき無規制の場合より車両重量自動計測機器の管理費用の分が大きくなっていることがわかる。車両重量自動計測機器を一つだけしか設置しない場合配送順番を変えることで過積載をした状態でも検挙されずに配送を行える。また車両重量自動計測機器を二つした場合も同様であり、物流事業者の配送費用はほとんど変化しない一方道路管理事業者は車両重量自動計測機器の個数が増えたことにより道路管理費用が大きくなってしまう。そこで次に車両重量自動計測機器を三つ設置した場合を考える。0-a-1 あるいは 0-c-2 を使わなければ必ず過積載分の費用がかかるように d 、 g 、 f に設置する。この場合それぞれの経路における目的関数値は表-10 のようになる。道路管理事業者の道路管理費用が車両重量自動計測機器の数が一つの場合と変わっていないのがわかる。ここで物流事業者ができるだけ過積載によ

表-10 経路別目的関数値: シナリオ 3-2

経路	C_i	C_o
0-1-3-2-0	35.0	52.8
0-2-3-1-0	35.0	61.1
0-1-2-3-0	36.0	46.3
0-3-2-1-0	36.0	56.4
0-2-1-3-0	37.0	62.4
0-3-1-2-0	37.0	58.1

る罰金を避けて車両を複数台用いる場合の目的関数がどうなるか考える。3 台用いる場合と 2 台用いる場合がある。2 台用いる場合はどの二つの顧客を同時に配送するかで 3 通りある。このときの車両台数別目的関数値を表-11 に示す。表-10 と表-11 を比較すると車両

表-11 車両台数別目的関数値: シナリオ 3-3

車両台数	C_i	C_o
2 台 (顧客 1 と 2 を同時配送)	41	20.0 or 17.0
2 台 (顧客 2 と 3 を同時配送)	43.7	24.9 or 24.7
2 台 (顧客 3 と 1 を同時配送)	45.3	35.5 or 39.2
3 台	50	3.4

を複数使うよりも 1 台を使って配送したほうが配送費用が小さく、物流事業者が複数車両を用いるインセンティブは働かない。一方で道路管理事業者にとっては複数車両を用いて配送してもらうほうが道路管理費用が小さくなるのがわかる。以上から車両重量自動計測機器の導入による効果はそれほど大きくないことがわかる。

(4) シナリオ 4: チェックポイントの導入

ここでは車両重量自動計測機器を一回の配送の際に必ず通ることを義務づけるチェックポイントを導入する。チェックポイントも一つだけでは車両重量自動計測機器のように配送順番を変化させることで罰金を免れることができるのでチェックポイント一つと車両自動計測機器を一つ設置する場合を考える。ここではチェックポイントを b 、車両重量自動計測機器を g に設置する。このとき考えられる経路における C_i 、 C_o は表-12 のようになる。

表-12 によれば物流事業者は経路 0-1-b-2-3-0 を利用しその時の配送費用は 36.7 であり、道路管理事業者は 41.5 の道路管理費用がかかる。これをシナリオ 1、2、3 と比較すると道路管理事業者によって最も道路管理費用が小さいことが分かる。表-13 にそれぞれの

表-12 経路別目的関数値: シナリオ 4

経路	C_i	C_o
0-3-1-b-2-0	41.0	53.0
0-2-b-1-3-0	39.3	46.4
0-3-2-b-1-0	40.0	51.2
0-1-b-2-3-0	36.7	41.5

シナリオにおける C_o と C_i を示す。ただしシナリオ 1, 2 は利用される二つの経路の平均を, シナリオ 3 は車両重量自動計測機器を一つ設置した場合を示す。これはチェックポイントにより道路ダメージの小さい都市高速道路に誘導できたこと, 車両重量計測機器を g に設置したことで過積載の状態が道路ダメージの大きい都市内道路を走ることを防止できたことが要因と考えらる。

表-13 シナリオ別目的関数値比較

シナリオ	C_i	C_o
シナリオ 1	25.0	52.0
シナリオ 2	26.0	46.4
シナリオ 3	25.0	61.1
シナリオ 4	36.7	41.5

一方でこのチェックポイントの配置では複数車両を用いるインセンティブは働かず, チェックポイントの数や場所, 位置を変化させた場合の検討も必要となる。

5. まとめと今後の展望・課題

道路維持管理に関して従前の施策においては舗装交通量を制御するために通行規制, 車両重量自動計測機器による罰金などがなされてきたが, 本研究では舗装交通重量を制御するための枠組みとしてチェックポイントの概念を導入した。道路管理事業者の道路ダメージに対する道路管理費用の最小化と, 物流事業者の配送費用最小化問題の 2 段階計画問題として問題の定式化を行い, 簡単なネットワークを用いて計算を行った。その結果, 従前の通行規制や罰金施策に比べチェックポイント導入シナリオにおいてはリンクを走る車両の積載量と経路をうまく誘導することで最も道路管理費用が抑えられた。計算結果から脆弱な道路を過積載で通行することが最も道路ダメージが大きくなることがわかる。したがって, 過積載の状態が脆弱な道路を通行させないチェックポイントのおき方や罰金額などの工夫が必要である。また道路ダメージやオペレーティング費用を簡略化して計算を行ったが, 実際に適用を考える上ではチェックポイント設置によるチェックポイント付近で

の交通量の増加と, 積載量の適正化による道路ダメージの軽減の評価を行う必要がある。またその他課題としては 2 段階計画問題の計算アルゴリズムの確立がある。今回は簡単なネットワークを用いて計算を行ったが大規模ネットワークへの適用を考えると今回のような総当たり法では計算時間が膨大になることが考えられるためメタヒューリスティクスなどの利用を検討する必要がある。また時間枠や複数車両を考慮した配送計画問題として下位問題を解くことも必要となる。短期的な配送計画という意味決定のみならずデポの配置問題も考慮することができる。物流事業者の行動として長期的な視点に立った場合デポの立地問題も絡んでくると考えられる。デポの立地場所を考えた上でチェックポイントを配置するところが適切なのかといった問題を扱うことができる。

参考文献

- 1) 小澤隆: 道路維持管理の現状と課題, No.675, レファレンス, 2007.
- 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) 田上貴士, 瀬木俊輔, 小林潔司: 高速道路の維持修繕費用を考慮した効率的交通流配分-大規模ネットワークにおける検証, 第 47 回土木計画学研究発表会, CDROM, 2013.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) Mark S. Daskin: Logistics: An overview of the state of the art and perspectives on future research, Transportation Research Part A, Vol. 19, pp. 383-398, 1985.
- 7) 兵藤, 高橋, 清水, 坪井: ロードプライシングが物流配送行動に与える影響に関する基礎的考察, 交通工学研究発表会論文報告集, Vol.23, pp. 313-316, 2003.
- 8) 古川雄一, 円山琢也, 原田昇: ロードプライシング実施時の貨物輸送の変化に関する研究, 土木学会論文集, Vol. 807, pp. 11-20, 2006.
- 9) 兵藤哲朗, SCHREINER Sideney A. Jr, 高橋洋二: 東京都市圏物資流動調査を用いた大型貨物車走行経路のモデル分析, 土木計画学研究・論文集, Vol. 34, pp. 405-412, 2007.
- 10) 田中康仁, 小谷通泰, 中村賢一郎: プローブデータを用いた都心部の貨物車による配送活動の分析, 土木計画学研究・論文集 (CD-ROM), Vol. 30, P. IX(347), 2004.
- 11) 苦瀬博仁: 都市内物流における規制誘導対策の課題と今後の方向道路交通経済, pp.21-27, 2002.
- 12) 河野辰男, 長谷川金二: 物流交通対策の現状と課題土木技術資料, Vol.46, No. 4, pp. 20-25, 2004. 道路交通経済, pp.21-27, 2002.
- 13) 柴崎隆一, 渡部富博, 角野隆: 国際海上コンテナの国内輸送ネットワークにおける通行上の制約に関する分析と解消効果の試算, 季刊運輸政策研究, Vol. 7, pp.015-026, 2005.

- 14) 小塩達也: 実荷重データに基づく過積載車両の分析の試み, 土木学会第 65 回年次学術講演会概要集, 第Ⅱ部門, □ -522, 2010.
- 15) 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
- 16) Maurizio Bruglieri, Paola Cappanera, Alberto Colomi, Maddalena Nonato: Modeling the Gateway Location Problem for Multicommodity Flow Rerouting In proceeding of, Network Optimization - 5th International Conference, INOC 2011, pp. 262-276, 2011.
- 17) Paola Cappanera, Maddalena Nonato, Maurizio Bruglieri: Hazmat Routing by Compulsory Checkpoints: a New Risk Mitigation Policy, Tristan VIII, 2013.
- 18) 宮城俊彦, 朝倉康夫, 溝上章志, 鈴木崇児, 秋山孝正, 赤松隆, 藤田素弘, 上田孝行: 均衡付き最適化問題の土木計画への応用可能性, 土木計画学研究・講演集, Vol. 20, 1997.
- 19) 高木良大, 円山琢也, 溝上章志: エリア課金の最適設計問題: 課金領域・レベルの決定アルゴリズムの構築と適用, 土木計画学研究・論文集, Vol.28, ROMBUNNO.I-1233, 2011.
- 20) Eiichi Taniguchi, Michihiko Noritake, Tadashi Yamada, Toru Izumitani: Optimal size and location planning of public logistics terminals, Transportation Research Part E 35, Vol. Vol.35, pp.207-222, 1999.