

道路勾配を考慮した自動車排出ガス量算出手法と車両巡回計画問題*
The Estimation of Car Gas Emission Considering the Road Gradient
and Application to Vehicle Routing Problem

平島 浩一郎**, 古屋 秀樹***, 川嶋 弘尚****

by HIRASHIMA Kouichirou, FURUYA Hideki and KAWASHIMA Hironao

1. 研究概要

近年、小口多頻度輸送や物流の高度化などにより、自動車輸送の需要が大きく増大してきている。しかしその一方で、自動車の排気ガスによる環境への影響が危惧されている。すなわち、輸送需要は今後も増大していく一方、排出ガス量は現状よりも抑えなければならないという難しい課題を抱えている。

排出ガス量に影響を与える要因の1つとして、道路勾配(縦断勾配)の存在が挙げられる。勾配の緩急によって、排出ガス量の変化が予想でき、1)では排出物質のうち特にNO_xとの相関を指摘している。

本研究では、勾配を考慮したNO_x排出量算出手法を提案し、実際の標高データを用いて勾配がNO_x排出量に与える影響を考察するとともに、車両巡回問題(VRP:Vehicle Routing Problem)にこの算出手法を適用した。従来のVRPの最適化基準としては距離最短や時間最短が一般的だが、新たにNO_x排出量最小を考えることができる。これにより、例えば登り坂を避けるといったような配送路の設計によって

NO_x排出量の削減が可能かどうか、仮定の郵便物集配データを用いて試算を行った。本研究のフローは図1の通り図示できる。

2. 詳細 NO_x 排出原単位

自動車排出ガス量を算出するにあたっては、矢島らが提案した詳細NO_x排出原単位²⁾を用いた。この手法は、1秒単位の速度と加速度をもとにその1秒間に排出されるNO_x排出量を与えるものである。1秒ごとの速度を v_t (m/s)、加速度を a_t (m/s²)、また車両総重量を m_t (kg)としたとき、時刻 t におけるディーゼル車のNO_x排出原単位 V_t (g/s/台)は式(1)のように表すことができる。

$$V_t = V(v_t, a_t, m_t) \quad \dots (1)$$

ここで、 v_t :時刻 t における速度(m/s)

a_t :時刻 t における加速度(m/s²)

m_t :時刻 t における車両総重量(kg)

3. 道路勾配の抽出と加速度への換算

(1) 道路勾配の抽出

本研究では、標高データベースとして数値地図50mメッシュ(標高)を用い、道路形状の緯度経度データをもとに道路上を一定間隔 Δx でとりその地点ごとの標高値を求め、これらを標高値配列とする方法を採用した。標高値算出については、標高データベースが50mごとに設定されているため周辺メッシュ値の加重平均をとった。

なお Δx は、1メッシュの半分である25m程度で、

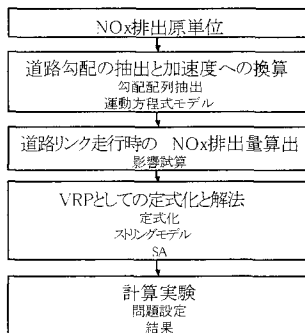


図1 本研究のフロー

*キーワード: 交通公害測定・計画手法論・配送問題

**学生員、慶應義塾大学大学院理工学研究科 横浜市港北区日吉3-14-1 Phone 045-563-1151 Fax.045-566-1617

***正会員、工博、筑波大学社会学系

****工博、慶應義塾大学理工学部

かつ対象道路リンクを整数個に分割できる値とした。 分かる。

(2) 勾配の加速度への換算

詳細NOx排出原単位で道路勾配を考慮するにあたって、図2の運動方程式モデルより道路勾配を加速度へ変換した。

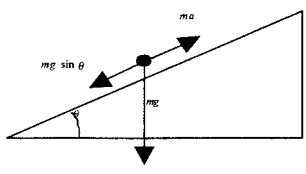


図2 運動方程式モデル

これは平坦地に比べて、勾配上の車両が等速走行するには坂下方向へ受ける力 $mg \sin \theta$ に釣り合う加速度 ma が必要であるという仮定による。このモデルではこの他に働く要素、例えば摩擦や空気抵抗等は考慮していない。

4. 道路リンク走行時のNOx排出量算出

(1) 算出式

標高配列、速度変化パターン、車両総重量を指定し、対象道路リンク l を始点から終点まで走行する際のNOx排出量 G_l を次式にて算出した。

$$G_l = \sum_i V(v_i, a_i + g \sin \theta_i, m_i) \times \frac{\Delta x}{v_i} \quad \dots (2)$$

(2) 影響の試算

上記のモデルにおける勾配の影響を調べるため、現在地より100m高い目的地へ向かうのに ①勾配10%の登り坂(水平距離1000m) ②勾配5%の登り坂(水平距離2000m) の2経路を想定し、総重量10tのディーゼル車が25km/h等速走行するときの原単位およびNOx排出量を試算した。

表1 坂道走行時のNOx原単位および排出量

	原単位(g/秒/台)	NOx 排出量(g/台)
経路①	0.1046	15.136
経路②	0.0629	18.126
参考:勾配0%	0.0167	

表1のとおり、原単位は勾配の急な①のほうが高いが、総排出量を見ると勾配は急でも走行距離の短い経路①が若干少ない結果となった。また勾配0%時と比較することで、勾配が与える寄与が大きいこと

5. VRP としての定式化と解法

(1) 定式化

対象地域の道路網をネットワーク表現し、拠点(デポ)を出発し複数の配送先(デマンド)を全て巡回してデポに戻るとしたときのコストが最小となる解を探すべく、VRPとして定式化した((3)式)。なお、コスト c_{ij} としては、走行する総距離、巡回にかかる総時間、走行時に排出される総NOx排出量のうちのいずれか1つを適用した。

$$\begin{aligned} & \text{Minimize} \quad \sum_{ijk} c_{ij} x_{ijk} \quad \dots (3) \\ & \text{s. t.} \quad \sum y_{ik} = \begin{cases} K & i=0 \\ i & i=1, \dots, K \end{cases} \\ & \quad \sum_i x_{ijk} = y_{jk} \quad j=0, \dots, N \quad k=1, \dots, K \\ & \quad \sum_j x_{ijk} = y_{ik} \quad i=0, \dots, N \quad k=1, \dots, K \\ & \quad \sum_{ij \in S \times S} x_{ijk} \leq |S| - 1 \\ & \quad S \subseteq \{1, \dots, N\} \quad i=0, \dots, N \quad j=0, \dots, N \\ & \quad 2 \leq |S| \leq N-1 \quad k=1, \dots, K \end{aligned}$$

ここで、

c_{ij} : デマンド i から j へ向かうときのコスト

K : 最大使用車両数

N : デマンド数 ただし、

$$\left. \begin{aligned} & i=1, 2, \dots, N \quad \text{デマンド } i \\ & i=0 \quad \text{デポ} \end{aligned} \right\} \text{を表すとする}$$

$$y_{ik} \begin{cases} 1 & \text{デマンド } i \text{ が車両 } k \text{ に割り当てられている} \\ 0 & \text{デマンド } i \text{ が車両 } k \text{ に割り当てられていない} \end{cases}$$

$$x_{ijk} \begin{cases} 1 & \text{車両 } k \text{ がデマンド } i \text{ の次に } j \text{ へ向かう} \\ 0 & \text{車両 } k \text{ がデマンド } i \text{ の次に } j \text{ へ向かわない} \end{cases}$$

(2) 解のモデリングとアルゴリズム

一般的にVRPは、規模が大きくなるにつれて計算量が飛躍的に増大し、最適解を求めることは困難となる。そこで最適解を効率よく探す近似解法の研究が進んでおり、本研究ではこのうち、試行変形を制御して最適解へ誘導するシミュレーテッド・アニーリング法(SA)を用いて最適解を探索した。

解の表現については図3に示すstringモデルを用いて、巡回デマンド順と車両使用を表した。このモデルは1次元配列であり、車両への割り当てと配送順序を同時に表現することができ、要素の入れ替えや部分反転によって容易に試行変形ができる特徴がある。³⁾

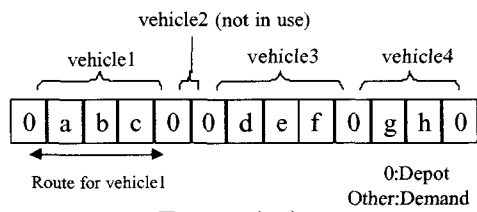


図3 stringモデル

6. 計算実験

(1) 実験対象

本研究では、計算実験の対象として、横浜市鶴見区の郵便局巡回問題を考えた。鶴見区内には郵便局本局が1ヶ所、一般郵便局が20ヶ所存在する。本局をデポ、一般郵便局をデマンドと見なし、最適巡回路を探索した。各デマンドおよびデポはネットワークのノードとして表現した

この地域の広さは南北、東西ともに約5kmである。図4は、標高データベースによる対象地域の標高データであるが、東京湾に近い東側は平坦である一方、西側は起伏が非常に激しいことがわかる。

鶴見区内の幹線道路および交通量の多い道路をピックアップし、図5のような道路ネットワークを設定した。このネットワークの規模は130ノード、377有向リンクである。

(2) パラメータ設定

走行速度については、実勢速度を考慮してリンクを5km/h、15km/h、25km/h、35km/hに分類し、各リンク内では指定速度で等速走行するものとした。

車両総重量については、①常に空車(7t)のまま走行する場合 ②空車で出発し、各デマンドで0.2tずつ荷を積んでいく場合 ③11tで出発し各デマンドで0.2tずつ荷を降ろしていく場合 ④9tのまま走行する場合(②③を平均しているものとする) の4シナリオを考えた。

なお、配達時間や最大積載量など他の制約は今回

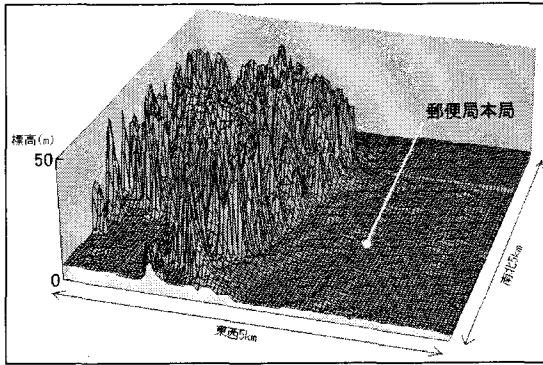


図4 横浜市鶴見区の標高データ

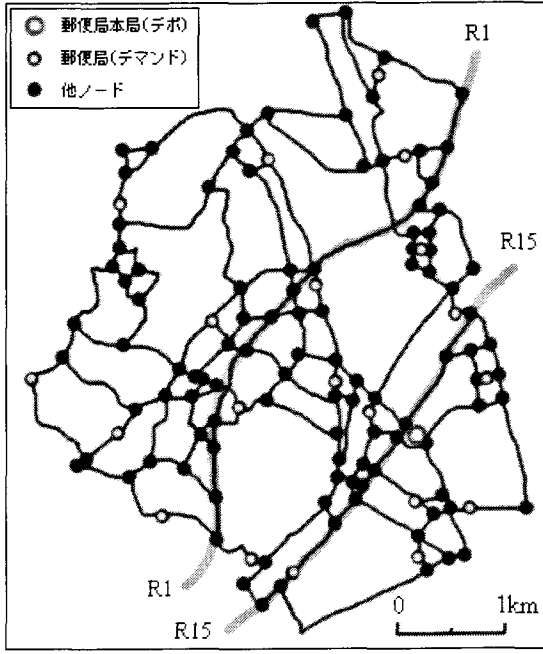


図5 対象道路ネットワーク

考慮していない。また車両使用数については、複数台使用できるものとして予備実験を行ったが、制約条件が少ないことから1台で巡回したほうが最適となる結果が得られたため、1台で巡回するものとした。

以上の各条件について、総走行距離が最小となる巡回路、総走行時間が最短となる巡回路、総NOx排出量が最小となる巡回路をそれぞれ求めた。リンク毎に走行距離、走行時間、NOx排出量を求めたのちフロイト法にて各デマンド間の最小コスト c_{ij} を求め、最適解を探索した。

(3) 結果

(a) 一定重量での走行(シナリオ①)

一定重量のまま走行としたときの解は表2のとおりとなった。

まず、時間最短巡回路よりも距離最短巡回路のほうがNOx排出が少ないという結果が得られた。すなわち走行時間よりも走行距離のほうがNOx排出量と相関が高いと言える。

そして、距離最短巡回路よりもNOx排出が少ない巡回路が得られたことが注目である。配送路設計時にNOx削減の余地が存在すると考えることができる。今回の結果では、距離最短巡回路から-1.1%、時間最短巡回路から-10.9%のNOx削減が示された。

表2 シナリオ①結果 (カッコ内は最小値との比)

最小化基準	総 NOx 量(g)	総距離(m)	総時間(秒)
NOx	88.17	27,314 (+1.9%)	4,686 (+8.1%)
距離	89.17 (+1.1%)	26,794	4,651 (+7.3%)
時間	98.94(+12.2%)	29,189 (+8.9%)	4,333

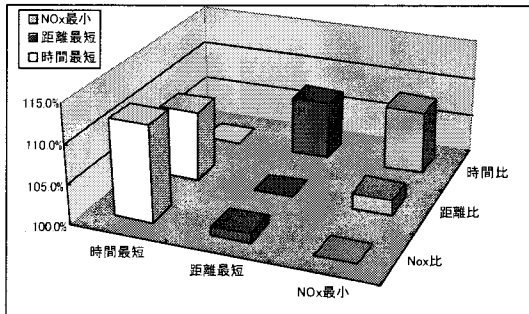


図6 シナリオ①結果

(b) 重量が変化する場合(シナリオ②③④)

シナリオ②③④の結果をまとめたものが表3である。

表3 重量変化する場合の比較

シナリオ		最小化基準	総 NOx 量(g)	総距離(m)	総時間(秒)
②	7t 出発 +各 0.2t	距離	106.72	26,794	4,651
		NOx	106.16	27,287	4,784
③	11t 出発 -各 0.2t	距離	110.09	26,794	4,651
		NOx	108.48	26,948	4,586
④	9t 一定	NOx	107.75	26,948	4,586

詳細な車両総重量変化を考慮したNOx排出量算出を行ったことで、以下の結果を得た。

- ・同じ巡回路を走行する場合でも排出量が3%程度変化する。
- ・その結果、最小NOx排出巡回路が異なるものになりうる。

すなわち勾配の存在に加えて車両総重量変化をも考慮することでより詳細にNOx排出量を算出することができ、その差により最小NOx排出巡回路が異なるものとなりうる。

7. 結論

本研究は勾配を考慮したNOx排出量算出手法を提案し、それをVRPへ適用した。この結果、走行距離や走行時間を最小とする巡回路とは別にNOx排出が最小となる巡回路が存在しうることが示され、最短距離巡回路よりもNOx排出を1.1%削減できるという結果が得られた。経路選択時にNOx排出削減という新たな基準の適用を提案し、その有意性を示せたことから、同様の議論を環境負荷軽減や省エネルギー化へも展開することが考えられ、これらは今後の地球環境を考える上で重要な視点となるだろう。

今後の課題として、本研究でのNOx排出量算出手法の精度向上が挙げられ、実測調査を通した運動方程式モデルの見直し等が考えられる。さらには車両挙動データの詳細化や時間常別所用時間の考慮などが挙げられる。

参考文献

- 1) 清水博他：道路環境、山海堂、1987
- 2) 矢島岳幸、古屋秀樹：車両挙動を考慮した自動車排出ガス総量の算出手法に関する研究、第27回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集第4部門、pp.662-663、2000
- 3) 糸山日出男、國府方久史、川嶋弘尚：配車配送計画問題(Vehicle Routing Problem)のモデリングとシミュレーテッドアニーリングによる解法、田辺國士編、最適化、モデリングとアルゴリズム7、統計数理研究所共同研究レポート77、1995
- 4) 平島浩一郎、古屋秀樹、川嶋弘尚：道路勾配と自動車排出ガス量との関連性分析、土木学会第56回年次講演会講演概要集(印刷中)、2001