

自動車排出ガス量低減のための車両巡回計画問題に関する研究*

The Study of Vehicle Routing Problem Considering Car Gas Emission*

平島浩一郎**, 古屋秀樹***, 川嶋弘尚****

By Kouichirou HIRASHIMA**, Hideki FURUYA*** and Hironao KAWASHIMA****

1. 背景および目的

近年の社会情勢の変化により自動車物流の輸送量は年々高まり続けている。しかし一方で自動車からの排出ガスによる環境への影響が深刻な問題となっており、特に都市部を中心に環境負荷を低減させるための様々な施策が検討されている。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ようという難しい課題に直面している。

自動車の排出ガス量には多くの要因が作用するが、そのなかの1つに道路勾配（縦断勾配）の存在が挙げられる。走行する路面の起伏によって排出ガス量に変化を受けることが容易に予想でき、文献1では排出物質のうち特にNO_xとの相関が高いことを指摘している。しかしながら道路勾配の緩急と自動車排出ガス量との関係について踏み込んだ研究例は少ない。

以上のことを踏まえ、本研究は次の2点を目的とした。第一に自動車排出物質のうち窒素酸化物(NO_x)に焦点を当て、道路勾配の緩急と自動車排出NO_x量の関係を表す数式モデルを定式化し、両者の間に成り立つ関連性を定量的

に評価すること。第二に自動車の経路選択問題において自動車排出ガス量の削減を試みるとともに車両巡回問題へ適用し、複数の立ち寄り地点を巡回する制約下において、その削減の可能性を明らかにすることである。NO_xの排出要因には様々なものが存在し、また交通状況や運転操作等の偶発的な変化によっても大きな影響を受ける。本研究では、車種の代替や排ガスフィルターのようなハード的な条件は一定とした上で、配送ルート変更というソフト的対策について道路勾配の存在を考慮したときの排出量削減効果を検討した。

2章では道路勾配を考慮したNO_x排出量算出モデルについて提案を行う。3章ではこのモデルを用い、1道路区間を走行するときのNO_x排出量を計算し、道路勾配との関連性を明らかにする。4章では1つの目的地に対し複数の経路が存在する状況を想定し、選択経路の違いによるNO_x排出量の差を考察する。5章では仮定の郵便物集配問題を想定し、巡回路決定問題をVRP (Vehicle Routing Problem) として定式化する。これを通じて一般的に用いられている巡回路解と、提案したNO_x排出量算出モデルを用いて計算した最小NO_x排出巡回路解との比較検討を行う。

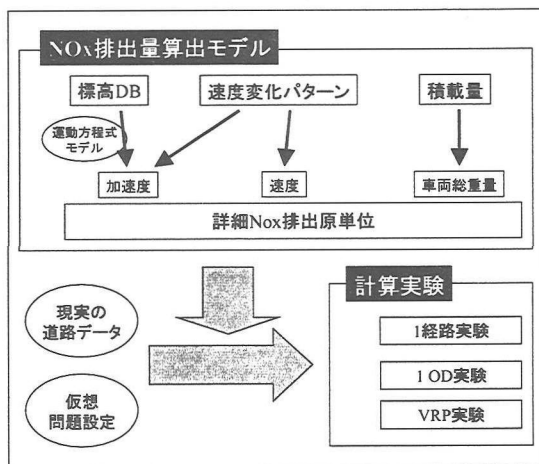


図1 研究概要

2. NO_x排出量算出方法について

(1) 基本的な算出フレーム

自動車個々1台の排出ガス量に与える影響として、以下の要因が主として挙げられる。

- 1) 自動車個体の特性
排気量、エンジン形式、燃料、車重・積載量など
- 2) 車両挙動、走行状況
速度、加速度、勾配など

本研究では、特に物資を配送する車両を考慮していることから、2)に含まれる道路の勾配に着目するものとする。また、1)の各要因についても仮想的な車両、配送状況を想定し、横浜市を中心としたケーススタディーエリアにおけるNO_x排出量を考える。

(2) 標高データベースからの勾配抽出

道路勾配は、自動車の移動エネルギーの増大に大きな影響を与え、特に物資を積載した車両を対象とした場合、

*キーワード：交通公害測量、経路選択、計画手法論、物流計画

**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, TEL:045-563-1151, Fax:045-566-1617)

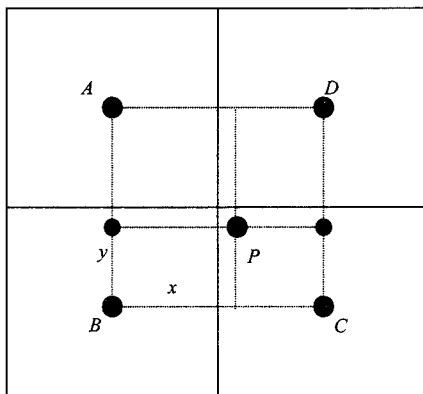
***正員、工博、筑波大学社会学系

****工博、慶應義塾大学理工学部

この要因を考慮することは重要と考えられる。本研究では、他地域への適用も考え道路の勾配情報に関して、対象路線の緯度経度座標情報と国土地理院発行の「数値地図50mメッシュ(標高)」を利用した。座標情報による折れ線上を一定間隔 Δx で辿り(図2)、その各地点の標高値を標高データベース(以下、DB)から算出した。ただし標高DBの値そのままではメッシュの境界で離散的であるため、図3に示すように、①標高DBの値をメッシュ中央地点(A,B,C,D)の標高値(h_A, h_B, h_C, h_D)とみなし、②メッシュ中央点間の傾きは一定とみなす、以上の2点を仮定することにより、Bからメッシュに並行に(x, y)離れた点Pの標高を加重平均によって算出した。

30	31	29	30	14	8	8	8	8	8
20	25	31	32	26	14	8	9	8	8
10	18	19	25	27	17	12	9	9	9
16	16	15	16	16	15	12	9	9	9
16	15	13	13	13	11	9	8	10	9
14	13	12	12	11	10	10	9	9	14
19	19	15	13	12	14	13	8	8	9
18	16	16	15	16	18	21	8	8	8
18	18	17	19	19	27	24	12	8	8

図2 標高DBと道路リンクの折れ線近似化



$$h_P = h_A(1-x)y + h_B(1-x)(1-y) + h_Cx(1-y) + h_Dxy$$

図3 標高値修正方法

(3)道路勾配とNOx排出量との関連性

最も一般的な排出量算出手法である平均旅行速度別走行km当たりの排出原単位(g/km/台)は、地点ごとの道路勾

配変化を考慮することができない。そこで矢島、古屋²⁾が提案した詳細NOx排出原単位(g/秒/台)を利用した。この手法はディーゼルエンジン車両に関して、速度、加速度ならびに積載量に応じた1秒毎のNOx排出量(g)を与えるモデルであり、式(1)のように加速度の指数関数モデルとなっている。

$$V_t = V(v_t, a_t, m_t) = \exp(\alpha_{v_t} v_t + \beta_{v_t} + \gamma(a_t m_t + \lambda_{v_t})) \quad \cdots(1)$$

ただし、 V_t 時刻tにおける原単位 (g/秒/台)
 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/s/s)
 m_t 時刻tにおける車両総重量(kg)
 γ 総抵抗力パラメータ
 $\alpha_{v_t}, \beta_{v_t}, \lambda_{v_t}$ 速度に応じたパラメータ

この詳細NOx排出原単位を用いて道路勾配を考慮するにあたって、図4に示す運動方程式モデルを用いて道路勾配を加速度へ変換した。

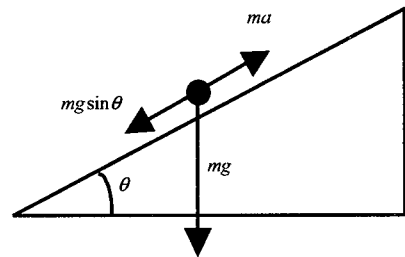


図4 運動方程式モデル

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。なお、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。

以上の計算手順を踏まえ、任意の道路区間 l を走行するときに排出されるNOxの量 G_l (g/台)を次式にて定義した。

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

ただし、 θ_i 時刻tにおける地点の縦断勾配(度)
 Δx 勾配評価小区間(m)
 その他は(1)式に準じる

(4)速度変化パターンの考慮

詳細NOx排出原単位では、1秒毎の速度および加速度の時系列データを取り込むことができる。厳密には道路区間の形状や起伏の存在が走行速度へ影響を与えと考えられるが、この関係を正確に計測することは現実的に困難であるため、道路の縦断形状とは無関係な一定の速度変化パターンを仮定した。この変化パターンは、本来時間帯や道路幾何構造、道路種別によって異なるものであるが、詳細な実測値が存在しない理由により、定速走行モードおよび燃費の測定において規定されている11モード、10モードを利用した。

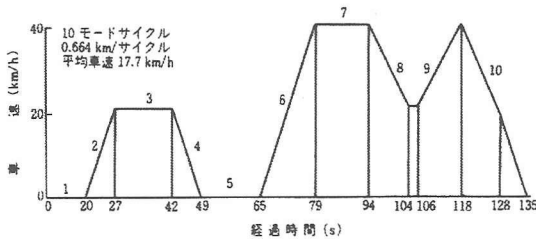


図5 10モードの速度変化パターン

これら定速走行モード以外は図5のようにそれぞれ速度変化パターンが定められている。この時間周期に影響されることなく、任意距離の区間でこのパターンに準じた走行を再現するため、下記のアルゴリズムにて、指定した道路区間走行時のNOx排出量を算出した。

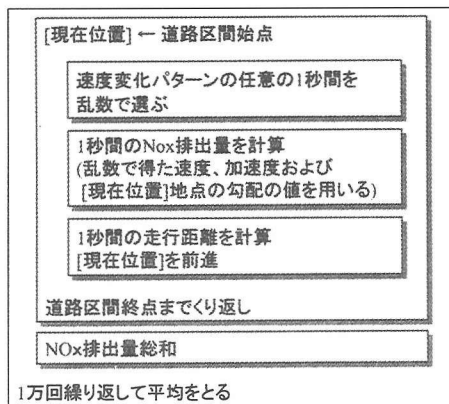


図6 速度変化パターン考慮の算出フロー

3. 1経路計算実験

ここでは1道路区間として図7に示す神奈川県道85号の一部区間、全長991mを対象とし、ここを自動車が走行す

るときに排出されるNOxの量を前章で述べたNOx排出量算出モデルを用いて計算を行った。この区間は勾配が比較的大きい区間であり、また路線バスの交通量が多く、道路構内がNOx排出に与える影響が大きいと考えられる区間である。標高DBより抽出したこの区間の勾配は図8のとおりである。

実験パラメータとして表1の要素を設定し、走行車両1台と仮定して各条件で計算を行った。



図7 対象経路

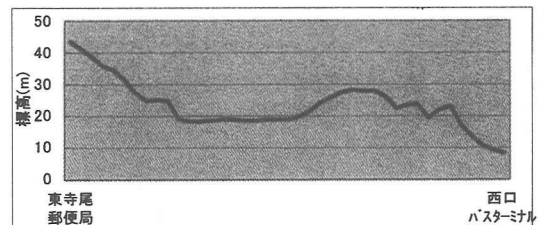


図8 対象経路の標高

表1 1経路実験における各種設定について

エンジン	ディーゼル車
勾配の扱い	登り方向に走行 下り方向に走行 考慮せず(平坦と見なす)
走行速度	17.7km等速 25km/h等速 35km/h等速 10モードパターン(平均速度17.7km/h) 11モードパターン(平均速度30.6km/h)
車両総重量	空車(7t) 半積載車(10t) 定積載車(15t)

(1)他の排出ガス原単位との比較

図9は平成6年度東京都調査による排出原単位³⁾(普通貨物車、10モード)を用いて算出した値と、2章で述べたNOx排出量算出手法による10モードパターン走行時の値との比較である。

この図から分かるように、本研究で提案したNOx排出量算出手法は既存研究と同程度の値を示しており、また今回対象とした区間では下りと平坦では排出量に大きな差異は存在しないが登りでは大きく差が出ていること、車両総重量が排出量に大きく寄与していることが推察される。

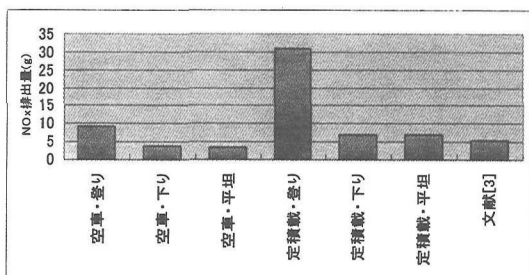


図9 他の算出手法との比較

(2) 条件設定別排出量特性について

図10～12は設定条件の差によるNOx排出量の変化を表したものである。これらのグラフより以下の点が示された。

- 平坦路と下り方向ではほとんど差が見られないが、登り方向では2～4倍となる。
- 等速走行の場合、その速度によらずほぼ一定である。

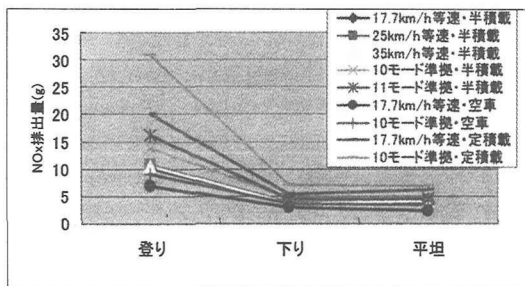


図10 1経路実験・勾配による排出量の変化

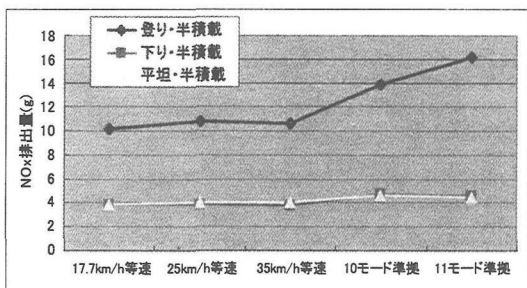


図11 1経路実験・速度パターンによる排出量の変化

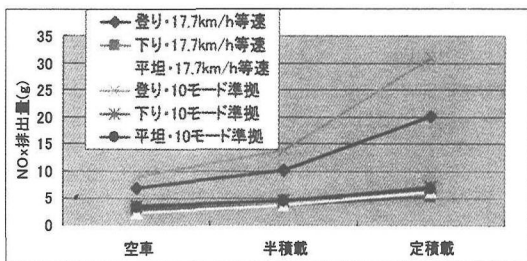


図12 1経路実験・車両総重量による排出量の変化

すなわち、等速走行の場合は速度の影響はほとんどない。

- 10モードと11モードでは、最高速度の高い11モードのほうが多い。
- 10モードと17.7km/h等速を比較すると、等速走行のほうが17～27%少ない。これは等速走行と仮定するとこれだけ過小評価されるといえる。
- 車両総重量が大きくなるほど排出量も増大。

(3) 速度変化パターンによる排出量の変動

速度変化パターンを考慮した排出量算出では、計算を1万回行い平均を取っている。この排出量のばらつきは、不確定な加減速による排出量分布を示していると考えることができる。そこでこのときの平均値および標準偏差を図示すると図13のようになった。

この図に示されているように、登り走行時と平坦あるいは下り走行時との排出量差は標準偏差よりも大きい。すなわち不確定な速度変化による排出量変動よりも、登り勾配の影響がはるかに大きいといえる。

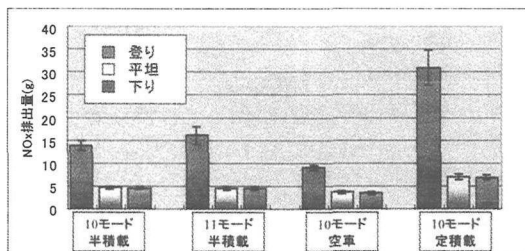


図13 1経路実験・速度変化パターン考慮時の分布

4. 10D計算実験

ここでは、目的地は1つだがそこへ向かう経路が複数存在するケースとして、横浜市内の日吉駅から横浜駅へ向かうときの経路選択問題を考えた。図14のとおり道路ネットワークをピックアップし、表2に示す6本の経路を設定した。この各経路について、距離と、それぞれを指定した速度パターンで走行する場合のNOx排出量を算出した。その結果を図15に示す。

この結果、最短距離経路（経路1）よりも0.9%距離の長い経路2において、NOx排出量が最大3.7%減となった。つまり、道路勾配を考慮したことにより排出量と走行距離が比例関係にはならず、最短距離経路よりもNOx排出が少なくて済む経路が存在することが示されたといえる。

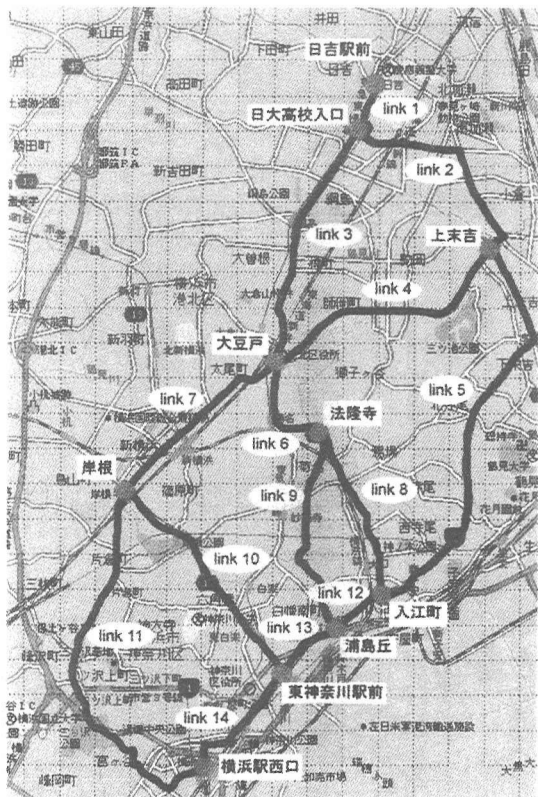


図14 1OD実験・対象地域

表2 設定経路

経路No.	通過リンク
1	1→3→6→9→13→14
2	1→3→6→8→12→13→14
3	1→3→7→10→14
4	1→3→7→11
5	1→2→5→12→13→14
6	1→2→4→6→9→13→14

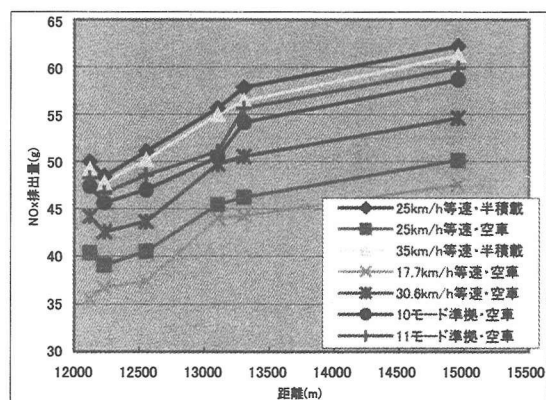


図15 1OD実験結果

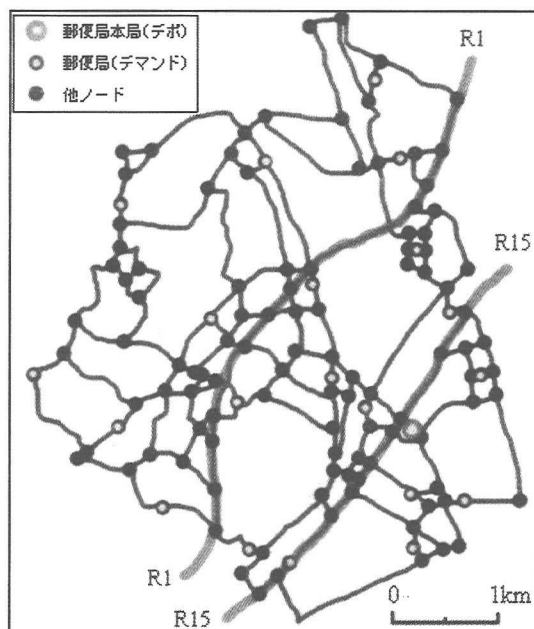


図16 VRP実験・対象道路ネットワーク

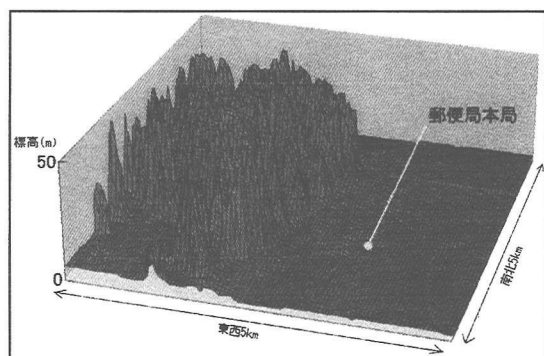


図17 対象地域の標高

5. VRP計算実験

(1)問題設定

前章で距離最短経路とNOx排出量最小経路との逆転が確認できたので、次に配送計画問題に関して同様の議論の適用を試みた。計算実験の対象として、横浜市鶴見区内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ヶ所立地している。この本局をデポ、一般郵便局をデマンドとみなし、デポを出発しすべてのデマンドを巡回してデポへ戻る最適巡回路を求めた。図17は標高DBによる対象地域の標高の俯瞰図であるが、東京湾に近い東側は平坦であるのに対し西側は起伏が激しいことが分かる。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16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) 定式化と解法

設定した配送計画問題は、VRPとして定式化を行った。一般的にVRPは、規模が大きくなり複雑に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。そこで最適解を短時間で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法)を用いて最適巡回路を探索した。解の表現については図18に示すストリングモデルを用いて、巡回デマンド順と車両使用を表現した。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。⁴⁾⁵⁾

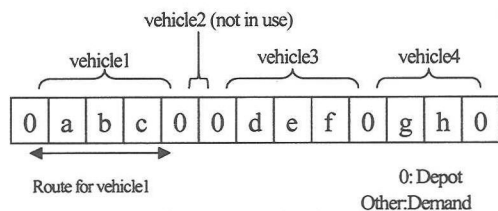


図18 スtringモデル

(3) 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の制約条件は今回考慮していない。

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総走行距離とともにNOx排出も小さく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アルゴリズム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。

(4) 計算実験結果

(a) 一定重量での走行 (シナリオ①)

上記の計算の結果、表3および図19の結果を得た。

表3 VRP 計算実験結果 (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

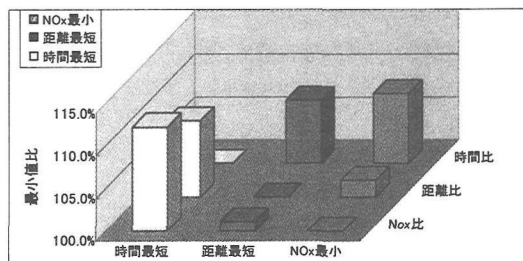


図19 VRP 計算実験結果

今回設定した配送計画問題について、距離最短巡回路より1.1%、時間最短巡回路より10.9%もNOx排出が少なくて済む巡回路の存在が示された。また、距離最短とNOx最小の各巡回路が比較的類似していることに対して時間最短の巡回路だけが乖離した値となっているが、これは1経路計算実験で示されたとおり等速走行と仮定した場合は速度の影響がほとんどなく、走行距離と相関が高いことの表れといえる。

(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4である。

表4 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	距離	106.72	26,794	4,651
	NOx	106.16	27,287	4,784
③	距離	110.09	26,794	4,651
	NOx	108.48	26,948	4,586
④	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%程度変化した。
- ・その結果、最小NOx排出巡回路が異なるものになる場合もある。

すなわち、勾配の存在に加えて積載量の変化をも考慮したことでより詳細にNOx排出量を算出することができ、考慮しない場合と比べて3%程度の評価差が生じた。しかし、このことによってNOx排出最少巡回路が変化するかどうかは一概には言えず、道路ネットワーク構造など他の要因

の影響を受けるといえる。

6. まとめ

(1) 結論

本研究では道路勾配を考慮した自動車NOx排出量の算出モデルを提案し、勾配とNOx排出量の関連性を定量的に評価した。この結果対象とした道路区間について、道路勾配の存在を仮定したことによって走行方向が大きな寄与を持つことが分かり、最大4倍の差が発生すること、また10モードパターンによる走行を等速走行であると仮定すると20%程度過小評価されることなどが明らかとなった。またこの算出モデルを経路選択問題へ適用したところ距離最短の解を走行する場合に比べ、出発地と異なる目的地へ向かう場合で最大3.7%、複数の目的地を巡回して出発地へ戻ってくる場合で1%程度のNOx排出量削減の余地が存在することが示された。

以上のことより、自動車NOx排出量の算出を行う場合においては道路勾配の影響が小さくないことが分かった。また、トリップの目的達成は維持したまま走行経路を見直すことで、NOx排出量を削減させる余地が存在することが示された。このように車両巡回計画問題の最小化基準としてNOx排出量を適用させたことは新しい試みであり、また今回の結果は今後、自動車排出物質の削減を狙う新たな施策として着目するに値する事実である。同様の議論は環境負荷軽減や省エネルギー化へも展開可能であり、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であろう。特に、燃費向上という基準はドライバーや物流業者にとって身近な課題であり、このような視点が実行に移される動機となるであろう。

(2) 今後の課題

配送ルート計画にあたっては、混雑する時間帯を考慮することも意義が大きい。本研究の手法ならば時刻による走行速度変化を容易に考慮することが可能である。ただしそのためには走行速度データの整備が課題となる。

本研究では道路勾配がNOx排出に少なからず影響があることを明らかにしたが、この影響は対象地域が平地か山地か、その地域の地形によって大きく異なることが予想される。今後の課題として、地形の違いによる勾配の影響の程度について興味が注がれる。

また、今回は排出物質のうちNOxについてのみ議論してきた。これはNOxは加速度との相関が高いことを利用したモデルを用いたためであり、CO₂など他の排出物質への議論の展開にはまた新たなモデルが必要である。

そのほか、今回提案したNOx排出量算出モデルは机上のモデルであることから実測調査を通じたモデルの精度向上や、また配達時間制約や需要変動下でのリンクパフォーマンスの設定を通じて、推計値の精度向上、より実務への適用可能性拡大が可能になると考えられる。

参考文献

- 1) 清水博ほか：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) 横田久司、舟島正直、田原茂樹、佐野藤治：エンジン始動時のNOx排出量・燃料消費量に関する基礎的研究、東京都環境科学研究所年報1999、pp.145-152、1999
- 4) 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
- 5) T.Hasama, H.Kokubugata, H.Kawashima: A Heuristic Approach Based on the String Model to Solve the Vehicle Routing Problem with Various Conditions, Preprint for 6th World Congress on ITS, Toronto, Canada, 1999

自動車排出ガス量低減のための車両巡回計画問題に関する研究

平島浩一郎・古屋秀樹・川嶋弘尚

本研究では道路勾配を考慮した自動車NOx排出量の算出モデルを提案し、勾配とNOx排出量の関連性を明らかにするとともに、経路選択問題におけるNOx排出量削減について検討した。この結果、道路勾配の存在を仮定したことによって走行方向が大きな寄与を持つこと、速度変化パターンに従った走行を等速走行であると仮定することでNOx排出量が過小評価されることなどが定量的に評価された。またこの算出モデルを経路選択問題へ適用したところ距離最短の解を走行する場合に比べ、出発地と異なる目的地へ向かう場合で最大3.7%、複数の目的地を巡回して出発地へ戻ってくる場合で1%程度のNOx排出量削減の余地が存在することが示された。

The Study of Vehicle Routing Problem Considering Car Gas Emission

By Kouichirou HIRASHIMA, Hideki FURUYA and Hironao KAWASHIMA

In this paper, a method for calculating the total amount of car gas emission in consideration of road gradient is proposed. The method examines the quantitative relationship between the road gradient and the amount of gas emission. Then this method is applied to Vehicle Routing Problem (VRP) and the strategies such as the minimum distance solution and the minimum gas emission solution are compared. As a result, a possibility of reducing gas emission by adopting the minimum gas emission strategy is demonstrated.
