

■ 研究論文 ■

動的交通流モデルを用いた電気自動車導入の環境影響評価

Environmental Evaluation of Introducing Electric Vehicles with Dynamic Traffic-Flow Model

工藤 祐揮*・石谷 久**・松橋 隆治***・吉田 好邦****

Yuki Kudoh Hisashi Ishitani Ryuji Matsuhashi Yoshikuni Yoshida

盛田 幸治*****・香月 伸一*****・小林 紀*****

Kouji Morita Shinichi Katsuki Osamu Kobayashi

(原稿受付日1999年4月26日, 受理日1999年10月19日)

Abstract

The dynamic traffic flow model is used in this study to evaluate the effectiveness of introducing electric vehicles (EVs) into the total traffic system as one of the alternative fuel vehicles. This model can simulate congested and non-congested traffic flow caused by changes in the traffic demand.

Environmental evaluation is carried out provided that all of the vehicles are substituted to EVs. Calculated result indicates that by introducing EVs the NO_x emissions and the CO₂ emissions can approximately be reduced by 25.7% and 14.4%, respectively. If the battery performance for EVs is improved, they can be reduced by 39.6% and 27.8%, respectively. Since the environmental emissions from heavy duty vehicles has a large impact compared with the other vehicles, it can be concluded that the following measures have to be taken for these vehicles to improve environment in the total traffic system drastically: (1) improvement in fuel efficiency and reduction of NO_x in exhaust gas (2) traffic demand management, such as modal shift.

1. はじめに

首都圏の自動車交通による都市環境の悪化は、様々な対策が講じられてきたにもかかわらず、依然として大きな社会問題として残されている。また現代の自動車社会にあって、運輸部門におけるエネルギー消費の拡大に伴い、温室効果ガスであるCO₂排出量も増加している。例えば、東京都全体のCO₂排出量のうち、運輸部門からの排出量は約45%と際立って大きく²⁾、しかもそのほとんどが自動車に起因するものである。地球温暖化防止京都会議(COP3)で決定された温室効果ガスの削減目標の国際公約を実現するためには、運輸部門においても地域性を考慮した上でのCO₂排出量削減対策が必要不可欠であり、こうした背景から、低環境排出物量かつ、高エネルギー効率・低CO₂排出量

の代替燃料車の開発が進められている。その一つである電気自動車(EV)は、走行性能は現行車にほぼ匹敵するものが達成できているが、普及は進んでいない。その原因の一つには、電池性能に起因する航続距離の制約が挙げられる。

自動車のエネルギー消費量や環境排出物量は、経済速度よりも走行速度が低下することにより増加する。走行速度の低下を及ぼす主な要因は交通集中に伴う渋滞の発生であり、こうした交通現象を考慮するためには交通流を動的に扱う必要がある。

交通流を考慮して首都圏の自動車交通における環境改善を評価した研究は数多く存在する^{3) 4)}が、これらの研究における交通流は静的な定常流の評価であり、動的に扱っていない。一方、交通工学の分野では交通流を動的に処理しているものがある^{5) 6)}が、これらは実際の交通流を再現するためのモデル構築に目的がおかれているため、対象地域が狭い範囲に限られており、また環境評価について言及されたものは少ない。

そこで筆者らは、時間変化に伴って変動する交通量と個々の車両の速度変化を再現できる動的交通流モデルを構築した。本研究では動的交通流モデルを用い、代替燃料車としてEVが東京近郊の交通ネットワークに導入された場合の環境影響評価を行った。

* 東京大学大学院工学系研究科地球システム工学専攻博士課程

** " " " 教授

*** " 新領域創成科学研究科環境学専攻助教授

**** " 工学系研究科地球システム工学専攻助手

〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1

***** 日産自動車(株)総合研究所動力環境研究所技師

***** " " " 主任研究員

〒237-8523 神奈川県横須賀市夏島町1

***** 日産自動車(株)総合研究所車両交通研究所シニアリサーチエンジニア

〒104-8023 東京都中央区銀座6-17-1

2. 動的交通流モデルの概要

本研究で構築したモデルはSOUNDモデル⁵⁾を基に、対象ネットワーク地域を東京23区とその周辺に拡大し、さらに自動車の走行に伴うNO_x排出量、エネルギー消費量とそれに伴うCO₂排出量を算定できるように改良した。このモデルは、リンク*¹上の車両個体の移動を評価する車両移動モデルと、各経路の目的地までの所要時間に応じて車両を配分する経路選択モデルから構成される。車両移動モデル内の車両は、経路選択モデルで求められる配分率に従いネットワーク上を移動する。

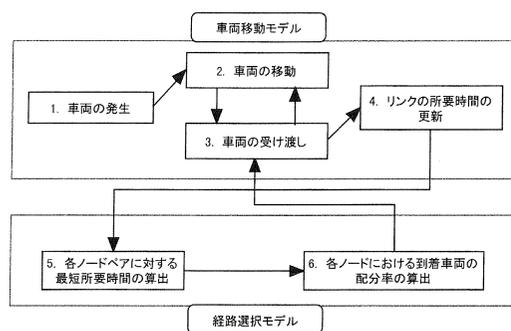


図1 動的交通流モデルの概要

2.1 車両移動モデル

SOUNDモデルは高速道路網を対象としたモデルであり、車両は1台ごとの追従に従ってリンク上を移動する。本稿で構築した動的交通流モデルのように、一般街路網を含むネットワークに対して同様の手法を適用すると、計算負荷が増大する。そこで⁶⁾を基に、一般街路網においても実際の交通現象の特徴を失わず、かつ計算時間を短縮できるように改良を加えた。以下にその詳細を示す。

2.1.1 車両の発生・消滅

車両は、交通量データ(3.2参照)によって各ゾーン*²に振り分けられた交通量に従い発生・消滅する。各ゾーンには1~24個のノードが存在し、車両のODごとに各ゾーン内でこれらのノード*³の1つをランダムに選択して発生・目的ノードを設定する。目的ノードに到着した車両は、トリップが終了したものとしてネットワーク上から消滅する。

注1) 交差点間を結ぶ道路

注2) 各行政区域ごと、あるいはそれらをさらに分割したエリア。これをBゾーンと呼ぶ。

注3) 交差点

2.1.2 車両の移動

各リンク上に存在する車両は、リンクに流入した順にリンクから流出するFIFO(First In First Out)を原則とし、各車両を1列に並ばせる。従って計算上は片側1車線とし、実際に車線数がn車線ある場合は、1車線の場合の1/nに間隔を詰めてリンク上に車両が存在するものとした。

車両は各リンクの制限速度 V_{max} [km/h]よりも早い速度では走行しないものとする。従って車両があるリンクを通過する際の所要時間は、そのリンクを V_{max} で走行したときの所要時間(自由走行時間) T_F [sec]よりも短くなることはない。

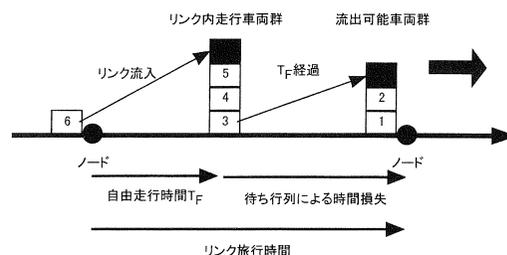


図2 リンク上での車両の扱い

ここで、リンク上の各車両を図2のようにリンク内走行車両群と流出可能車両群の2つのパケットに分ける。

①リンク内走行車両群

リンクに流入してからの経過時間がそのリンクの T_F に達しておらず、リンクから流出する可能性のない車両群

②流出可能車両群

リンクに流入してからの経過時間が T_F 以上経過している車両であり、流出可能条件を満たせばリンクから流出する可能性のある車両群

2.1.3 リンクからの流出

流出可能車両群は交差点での待ち行列であり、交差点の容量と次に進むリンクの容量に従って流出する。すなわち、1イベントスキャン*⁴(Δt 秒)あたりの流出可能台数よりも、そのリンクから流出した車両台数が同じかそれ以下で、かつ経路選択モデルにより決定される次に進むリンクにその車両を受け入れることができる容量がある場合に、流出可能車両群の先頭車両から順に次のリンクに流出する。

注4) モデル上の計算時間の間隔。タイムステップ

2.1.4 ブロッキング現象の回避

モデル上では車線の概念を取り入れていないので、流出可能車両群でFIFOを原則とすると、流出可能車両群の先頭車両がリンクから流出しない限り後続車両は流出できず、ブロッキング現象が起きてしまう。そこで、右左折レーンの存在なども配慮し、流出可能車両群の先頭車両以外の車両について、次のリンクに流出可能な場合には、その車両よりも前方に存在する車両を飛び越して流出させるようにする。つまり、同一リンクに進む車両についてはFIFOを原則とするが、他のリンクに進む車両については随時順番を入れ替える。

2.2 経路選択モデル

2.2.1 ノード間の最短所要時間の算出

経路選択モデルでは、まず車両移動モデルによって得られる各リンクの所要時間を用いて、各ノード間の最短所要時間を算出する。これには動的計画法の1つであるWarshall-Floyd法⁷⁾を用いて、最短経路問題を解くことによって算出する。Warshall-Floyd法は任意の2点間の最短経路を求める際に最も計算効率が高い方法であるといわれ、計算の繰り返し回数は(ノード数)³のオーダーである。

2.2.2 経路選択率の設定

各車両のドライバーは意志を持っているため、2.2.1で最短経路が決定されるが、経験的に最短経路より多少時間がかかっても他の経路を選択する可能性がある。そこで、このドライバーの意志を経路選択に反映させるため、交通工学の分野でしばしば用いられるDial配分を用いて定式化した。

Dial配分とは、経路が n 本あり、それぞれの経路 k の所要時間が t_k で与えられるとき、経路 k の選択確率 $P(k)$ が(1)で与えられる配分法である。この配分法により、所要時間が長い経路の選択率は、所要時間が短い経路の選択率よりも相対的に低くなる。

$$P(k) = \frac{\exp(-\theta \cdot t_k)}{\sum_{i=1}^n \exp(-\theta \cdot t_i)} \quad (1)$$

θ : Dial配分パラメータ [1/min]

また、 $P(k)$ はDial配分のイベントスキャン(1秒)ごとに更新する。

3. 使用データ・条件設定

3.1 道路ネットワークデータ

図3に対象ネットワーク地域を示す。ネットワーク

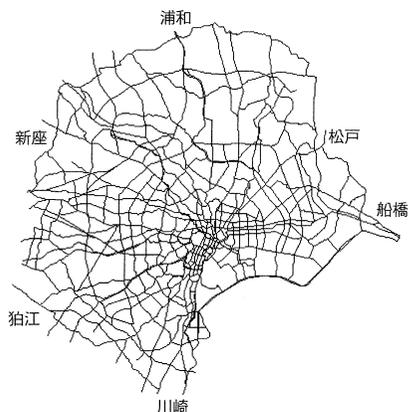


図3 対象ネットワーク地域

データは図3の地域内で、平成2年の道路マップに掲載されている高速道路、国道、都県道と主要道の一部を抽出して作成した。

ノード数 : 601

リンク数 : 2000 (上下線別)

(一般道 : 1690, 高速道路 : 188, 接続道 : 122)

3.2 交通量データ

建設省関東地方建設局平成2年度平日BゾーンODデータ⁶⁾を使用した。車種は、軽乗用車、乗用車、バス、軽貨物車、小型貨物車、貨客車、普通貨物車、特種車の8車種である。

対象ネットワーク圏外の交通量は、圏内の高速道路、国道、一部の一般道の端点を発着するものとした。圏外ODを¹²⁾より得られる各道路の24時間断面交通量とほぼ同じ値になるまで割り当てて作成した。また、1つのBゾーンに含まれるノードが4個以上のゾーンに対しては内々トリップを考慮した。

なお、データの制約上、通過交通に関しては考慮していない。

対象ネットワーク内Bゾーン数 : 102

対象ネットワーク外で、流入流出を考慮したBゾーン数 : 57

3.3 時間帯別交通需要の設定

8)、9)を参考に、都市部における一般的な時間帯別交通需要を作成した(図4)。地域を東京23区内とその他の地域の2つに分け、4つの組み合わせに対して3種類の時間帯別交通需要を与えた。

3.4 NO_x排出係数の設定

NO_x排出量は、各リンクから流出・消滅した各車両

注5) 車両の起点 (Origin), 終点 (Destination) がBゾーンごとに与えられているデータ

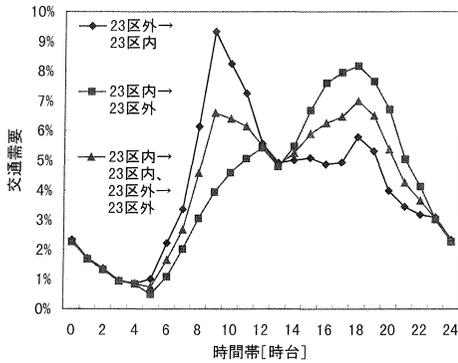


図4 時間帯別交通需要

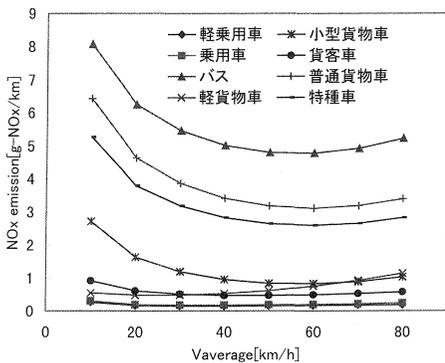


図5 NO_x 排出係数

のリンク内平均車速から定まるNO_x排出係数^④ (図5)とリンク長から求める。

平均車速が80km/h以上、または10km/h未満の場合は、それぞれ80km/h、10km/hのときと排出係数が等しいものとする。

3.5 エネルギー消費特性の設定

エネルギー消費量は、NO_x排出量と同様に各車種のエネルギー消費特性の設定とリンク長から求める。

乗用車、小型貨物車、バスのエネルギー消費特性は、別途作成した走行シミュレーションモデル (図6) を使用して算出した。

紙面の関係上、以下に特に乗用車のエネルギー消費特性について述べる。表1にEV用電池の諸元を、表2に乗用車の諸元を、図7に乗用車のエネルギー消費特性を示す。電池の種類としては、鉛酸 (LA) 電池と、高性能EV用2次電池として将来的に普及が期待されている、リチウムイオン (LI) 電池を選んだ。また、使用した走行データとしては都内での実走行データ¹⁾を使用した。

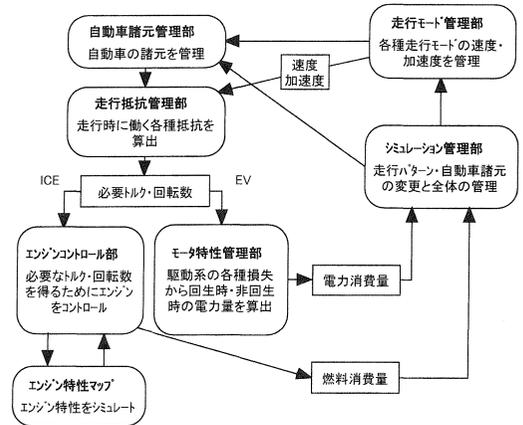


図6 走行シミュレーションモデルの概要

走行シミュレーションモデルでエネルギー消費特性を算出できない車種については、使用燃料別に最終需要値¹¹⁾と、実燃費の推計値から算出した換算係数を乗じることによって求めた。換算係数算出のためには、最終需要値、実燃費データを用いた。また、バス、普通貨物車、特種車についてはEVに代替できないものとした。

表1 EV用電池の諸元 (1モジュールあたり)

LA電池	容量 60Ah, 電圧 12V, 質量 20kg, エネルギー密度 36Wh/kg, 出力密度 200W/kg
LI電池	容量 100Ah, 電圧 28.8V, 質量 29kg, エネルギー密度 100Wh/kg, 出力密度 300W/kg

表2 乗用車の諸元

駆動装置出力	GV100kW, EV80kW
共通諸元	前面投影面積 1.98m ² , 空気抵抗係数 0.34, 転がり抵抗係数 0.01, タイヤ有効半径 0.292m
車両総重量	GV1369kg, EV(LA)1849kg, EV(LI)1717kg

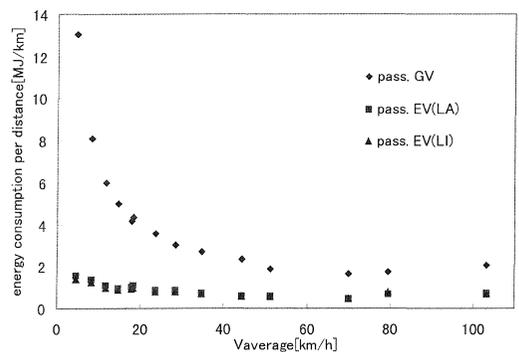


図7 乗用車のエネルギー消費特性

表3 各車種の換算係数 (MJ/kmベース)

車種	係数	対象	車種	係数	対象
軽乗用	0.73	乗用	EV軽乗用	0.73	EV乗用
軽貨物	0.82	乗用	EV軽貨物	0.79	EV乗用
貨客	1.00	乗用	EV貨客	1.00	EV乗用
普通貨物	0.88	バス			
特種	0.88	バス			

3.6 EV導入の制約条件

EV導入の制約条件としては、1回の充電でOD間を往復できることを想定し、(2)を満たす表4の車種のみが代替導入できるものとした。

$$OD間の直線距離 \times 3 < 航続距離 \quad (2)$$

(2)は、OD間を直線距離で結ぶリンクが常に存在するとは限らないため、OD間を最短距離で移動するリンクを選択することを考慮して、往復ではOD間の直線距離の高々3倍以内に最短距離が存在するものと仮定して定式化した。また、(2)を満たすトリップでは常に各のリンクの制限速度で走行できるとは限らないため、例えトリップの全行程が渋滞していても往復できることを必要とした。すなわち、図7の平均速度が一番低いモードでの航続距離などと、表3を用いて表4を算出した。

表4 EVの航続距離 [km]

	軽乗用	乗用	軽貨物	小型貨物	貨客
LA電池	55	40	51	28	40
LI電池	124	90	114	62	90

3.7 その他のパラメータの設定

- ・車両移動モデルイベントスキャン Δt : 3秒
- ・Dial配分イベントスキャン Δt_D : 360秒
- ・Dial配分パラメータ θ : 0.1 (4.1の分析により決定)
- ・リンクからの流出可能台数: 2,040台/hour/車線
- ・最低停止車両間隔: 普通車5.0m, 大型車8.5m
- ・料金時間換算価値: 6,000円/時間

4. 分析結果

動的交通流モデルによる分析結果を示す。シミュレーションでは、現行ケース、EVを導入するケース、また高性能電池が普及し、EVの航続距離が向上するケースの、3ケースを想定した。

case 1: 現行車の場合

case 2: EV導入の制約条件を満たす車種すべてを、

LA電池を搭載するEVに代替した場合

case 3: EV導入の制約条件を満たす車種すべてを、

LI電池を搭載するEVに代替した場合

4.1 実際の交通流との整合性の検証

ODデータを使用する動的交通流モデルによるシミュレーション結果と、実際の交通流との整合性を検証するため、シミュレーション結果の断面交通量とセンサス断面交通量¹²⁾*6との比較を行った。検証方法としては、東京23区内の各センサス断面交通量観測地点を行政区域(区)ごとに統合し、対応するモデル上での断面交通量の和との直線回帰分析を行った。決定係数は、12時間断面交通量(午前7時~午後7時)で0.78であった。

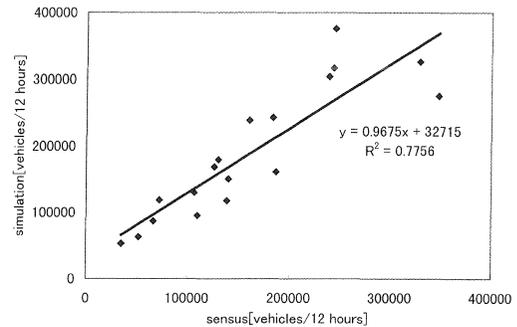
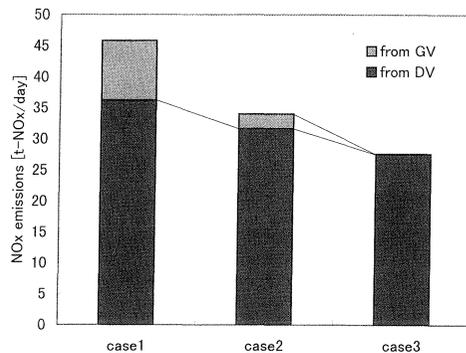


図8 実際の交通流との整合性の検証

4.2 移動発生源からのNOx排出量の比較

各caseの移動発生源からのNOx排出量の比較を図9に示す。

全体では、case 1と比べ、case 2, case 3ではそれぞれ25.7%, 39.6%減少している。特に、短距離需要の多いGV(軽乗用車, 乗用車, 軽貨物車, 貨客車)



(注) GV: ガソリン車, DV: ディーゼル車

図9 移動発生源からのNOx排出量の比較

注6) 断面交通量を定点観測したデータ

からのNO_x排出量は、EVに代替できるトリップの割合が高いことにより減少率も高く、case 2, case 3ではcase 1に比べ、それぞれ75.4%、98.9%減になっている。一方、DV（バス、小型貨物車、普通貨物車、特種車）からの減少率は低く、case 2, case 3ではcase 1に比べてそれぞれ12.7%、24.1%減にとどまっている。これは特に普通貨物車からのNO_x排出量が全体に与える影響が大きいためであり、その分担率はcase 1～case 3でそれぞれ全体の39.2%、52.8%、65.0%を占める。

図10にcase 1のNO_x排出量の分布を示す。各メッシュは3次メッシュを示し、ほぼ1 km²である。また、図11、図12にcase 2, case 3の、case 1に対する各メッシュごとのNO_x排出量の削減率分布をそれぞれ示す。分布図で、太線は高速道路と国道を示す。

図10で、NO_x排出量の多い地域は高速道路や国道沿線に存在することがわかる。また図11、図12で削減率が相対的に低い地域も、こうした地域と一致している。これは、都心部に企業の本社などが集中し、この地域を起点終点とする交通需要が多いという東京の都市構造と、都心外部を結ぶ環状道路が少ないという東京の道路事情によって、高速道路や国道への交通集中に伴い、渋滞の発生頻度が高くなることに起因するものである。

また、図11、図12で、東京湾岸のNO_x削減率が他の地域と比較して低いことがわかる。これは、東京湾岸に大規模工場が多く立地し、他地域からこの地域への交通需要が多く、また神奈川、千葉方面相互間の交通需要の多くがこの地域の高速道路、国道を利用するためであり、さらにこれらの交通需要の多くが普通貨物車であるためである。

4.3 CO₂排出量の比較

各ケースについて、走行によるCO₂排出量の比較を行った。

EV導入による電力需要増加はcase 2, case 3ではそれぞれ7.7GWh/day, 10.2GWh/dayであり、これは現在の発電設備で十分対応可能な電力量と推定される。CO₂排出量は、各case・各車種のエネルギー消費量および、表5のCO₂排出原単位と各プロセスのエネルギー変換効率から算出する。

EV導入による電力需要増加に伴う発電所からのCO₂排出量の増加分を考慮しても、case 2, case 3では全体としてのCO₂排出量は減少しており、case 1と比べ、それぞれ14.4%、27.8%減となる。移動発

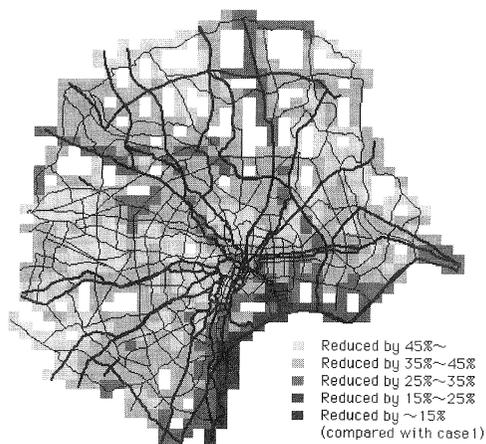


図12 case 3のメッシュごとのNO_x削減率分布

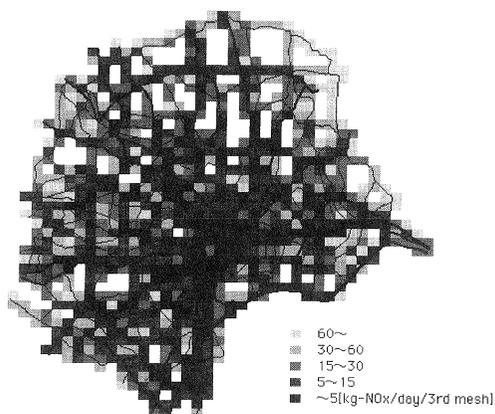


図10 case 1の移動発生源からのNO_x排出量分布

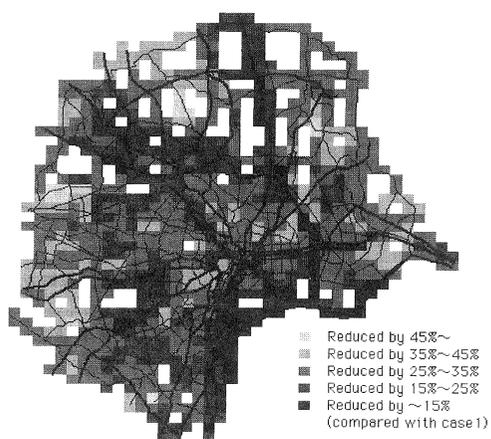
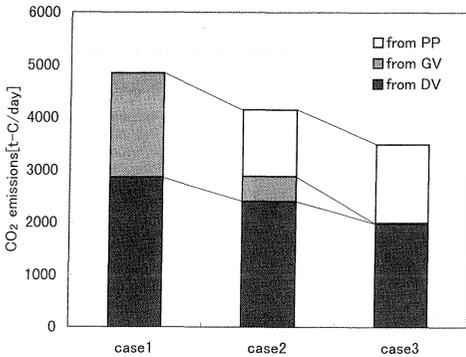


図11 case 2のメッシュごとのNO_x削減率分布

表5 CO₂排出量算出に用いた値

原油CO ₂ 排出原単位	20.89-C/MJ ¹³⁾	採掘・輸送・精製時のロスを含む
1990年電源構成CO ₂ 排出原単位	118.38g-C/kWh ¹³⁾	送電端の値
充電器効率	85.0%	
充放電効率	LA電池：85.0%，LI電池：95.0%	



(注) GV：ガソリン車，DV：ディーゼル車，PP：発電所

図13 CO₂排出量の比較

生源からのNO_x排出量と同様，CO₂排出量についてもDV，特に普通貨物車のエネルギー消費に伴うCO₂排出量が全体に大きな影響を与えており，その分担率はcase1～case3ではそれぞれ26.5%，31.0%，36.8%に及ぶ。

5. おわりに

本研究では，渋滞による速度低下を考慮することができる動的交通流モデルを構築し，このモデルを用いて，東京近郊の交通システム全体にEVを導入した場合の環境影響評価を行った。その結果，EVに代替可能な車両をすべてEVに代替することより，NO_x排出量は最低でも25.7%，CO₂排出量は最低でも14.4%削減可能であり，また大型車，特に普通貨物車からのNO_x排出量，CO₂排出量が全体に大きな影響を与えていることがわかった。

現在の技術では，EVの走行面での性能は現行の内

注7) 交通需要マネジメント，交通需要側に対する施策

燃機関自動車のそれとほぼ同じ性能が達成できているとされているが，EV用電池の性能，特にエネルギー密度と1モジュールあたりの重量により左右される航続距離の制約のため，大型車をEV化することは難しいとされている。

このことから，自動車部門の抜本的な環境改善のためには，現状では大型車の燃費・排気の改善などによる自動車単体技術の向上や，従来の道路整備により交通容量を拡大する供給側の施策だけではなく，例えばモーダルシフトのようなTDM施策⁷⁾の実施など，交通需要そのものの制御による交通流改善が必要であると結論づけられる。

今後筆者らは，TDM施策を実施した場合の，交通流改善による環境影響評価を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 工藤祐輝；東京大学大学院修士学位論文，1998
- 2) 吉田好邦ほか；LCA的な概念による地域活動に伴うCO₂総排出量の構造分析，日本エネルギー学会誌，第77巻第11号，1998
- 3) 森口祐一ほか；広域的な道路交通公害対策による環境改善効果の予測システムの開発，土木計画学研究・論文集，No.11，1993
- 4) 秋澤淳ほか；都市内エネルギー消費を考慮した交通流のエネルギー評価，第11回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集，1995
- 5) 吉井稔雄ほか；都市内高速道路における過飽和ネットワークシミュレーションモデルの開発，交通工学Vol.30，No.1，1995
- 6) 岡村寛明ほか；一般街路網シミュレーションモデルの開発と検証，第16回交通工学研究発表会論文報告集，1996
- 7) 伊理正夫，古林隆；ネットワーク理論，日科技連
- 8) 越正毅，明神証；土木学会編 新体系土木工学61道路(1)－交通流－，技報堂出版
- 9) 佐佐木綱；都市交通計画，国民科学社
- 10) 東京都環境保全局；都内自動車走行量及び自動車排出ガス量調査報告書(概要版)，1996
- 11) IEA Statistics；Energy Balance of OECD Countries 1990/1991
- 12) 建設省；平成2年度道路交通センサス一般交通量調査
- 13) 近藤美則ほか；電気自動車IZAとガソリン車とのライフサイクルCO₂量の比較，エネルギー・資源，第17巻5号，1996