

◆特集：物流対策の新たな取り組み◆

環境時代にふさわしい総合的な都市圏物流施策評価システムの開発

家田 仁* 佐野可寸志**

1. はじめに

非常に多くの国民が都市に暮らす今日、都市圏の物流のあり方は単に経済活動や生活水準のみならず、都市の環境あるいは地球環境にも極めて大きな影響をもたらす。わが国の物流システムは、私企業による旺盛なイノバティブマインドの下、世界でも最高水準の「便利な」サービスを提供するに至っている。そして、この都市圏の物流システムは、わが国の豊かな消費と流通の根幹となっているのである。今や、こうした顧客志向の物流システムを措いては、大都市圏の便利で快適な都市生活を想像することすらできない。しかしながら、その便利さとは裏腹に、物流トラックによる交通量への負荷や荷捌きのための駐車が都市内道路交通の渋滞やひいては環境に少なからぬ負荷をかけていることにも注意が必要である。つまり私的経済における便利さと同時にこうした社会的費用への配慮が要請される時代となっているのである。実際問題として考えた場合、現時点の技術の範囲では、自動車交通以外の交通機関が都市内貨物交通の大勢を担うことは、率直に言って非現実的である。しかし、たとえ自動車交通の枠内ではあっても、各種の総合的な施策により現在の状況を社会的負荷を踏まえて改善することは可能であろうし、同時にまた必要不可欠な政策的方向性ともいえよう。

しかしながら、そうした視点に立った総合的な施策を能率的に立案し、そして効果的に推進するためには、次のような課題を乗り越えることが不可欠である。第一は、国民の物流に対する意識の改革である。人は、旅客交通については自らが直接的に体験できるため関心も高いが、物流の場合には、実は生活上極めて大きな影響を受けているにも拘わらず、自らが身をもって接することがないため、ともするとその重要性を看過しがちである。テーマとして一般受けしないため、政治家なども関心をもちず、酷い場合には交通政策上のしわ寄せが物流に押し付けられることも決して少なくない。第二は、物流に関する調査とデータの充

実である。物流現象は、その性質上旅客輸送に比べはるかに経済合理的に理解できることが少なくない。ところが、一方で品目が多いことに基づく多様性は旅客輸送の比ではなく、より緻密で充実したデータ類がない限り、効果的な物流施策の計画など到底おぼつかない。第三は、総合的な物流施策を責任を持って担当する組織である。いうまでもなく都市圏の物流は、極めて多くの機関が複雑に絡み合っており成り立っている。そうした中で、効果的な施策を選択的かつ統合的に推進するためには強力な実行力を持つ機関の存在が不可欠である。そして最後になるが、そうした総合的施策を私的経済のみならず、社会的負荷の視点から科学的に評価し、よりよい施策のデザインを能率的に実行するための工学的な道具立てが必要である。

前三者については、これまでも政策の場でたびたび指摘されているところでもあり、それなりに改善が行われつつある状況にある。そうした認識に立って、本研究では、最後の総合的物流施策の評価システムを現在得られるデータ類の存在を前提とし、また可能な限り実用的なものとして開発することを試みたものである。アカデミックには、いろいろな企業の行動原理を可能な限り明示的に取り込んだ点が特長的である。これは、各種主体の行動原理そのものを社会的なムーブメントを通じてよりよい方向へと誘導していこうという社会マネジメントの発想が定着しつつある今日、評価システムに要求される非常に重要なポイントとなっている。

2. 物流政策評価システム

2.1 交通量推計モデル

本研究の交通量推計モデルは図-1に示す東京都市圏を対象に、貨物車サイズ毎のゾーン間 OD 交通量を推計するものであり、その構造は図-2の通りである。この交通量予測モデルは4段階交通量推計法の考え方に従っているものの、個々の企業の物流行動を考慮するために、非集計モデルとマイクロシミュレーションを用いて企業および貨物自動車個々の行動を予測し、それらを集計することによって対象地域の貨物自動車交通量を算出している。

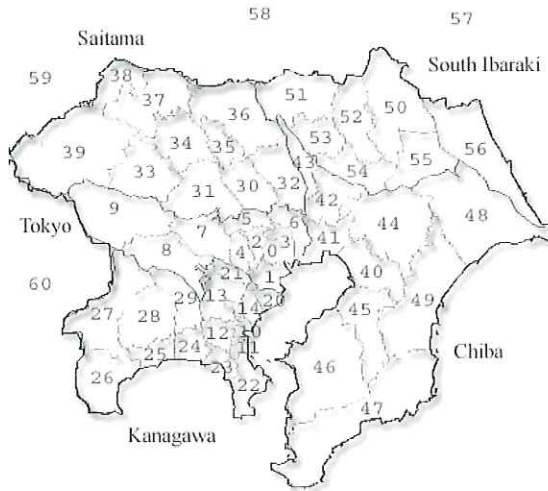


図-1 都市圏物流評価システム対象地域

同種の産業では、発生する貨物の品目、貨物発生量や配達頻度決定のパラメータなど、似通った物流特性を有しているはずである。従って本研究では、これらの特性を東京都市圏物流流動調査¹⁾(以下では「東京物流調査」という)の大分類業種である13業種別に分析する。

大型貨物車と小型貨物車では、窒素酸化物(NO_x)排出原単位や道路における占有面積に大きな差があるため、本研究では貨物自動車を最大積載量5トン以上の大型貨物車と5トン未満の小型貨物車の2種類に分けて扱う。

2.1.1 貨物発生量、顧客数と顧客位置

約4万6千台の貨物車サンプルを有する東京物流調査¹⁾結果より、企業の業種、従業員数、調査日に運搬された貨物の品目と重量などが得られる。従って、これらのデータを用いて各企業の1ヶ月あたり貨物発生量を、従業員数を説明変数とする回帰式により推定する。1企業の顧客数についても、従業員数を説明変数とする回帰式にて推定する。回帰式へ全数調査である事業所・企業統計²⁾より得られた研究対象地域の各企業の従業員数を代入して、貨物発生量および顧客数を推定する。

顧客位置については、道路交通センサス³⁾のBゾーンを用い、荷主ゾーン毎の現状顧客位置分布パターンに従った乱数を発生させて決定する。ここで配達貨物量は、1荷主から全ての顧客への配達量が同じとして算出する。

2.1.2 配達頻度とロットサイズ

配達頻度は、輸送コストと在庫コストからなる物流コストが最小になるように決定されると想定する。本研究では、物流コストは輸送コストや運転手コスト等のように配達頻度と旅行時間に比例するコストと、車両購入費や車両保険料といったロットサイズに比例するコストの二種類から構成されると仮定し、(1)式のようを表す。

$$C_{kj} = \beta \cdot F_{kj} \cdot T_{kj} + \gamma \cdot \frac{Q_{kj}}{F_{kj}} \quad (1)$$

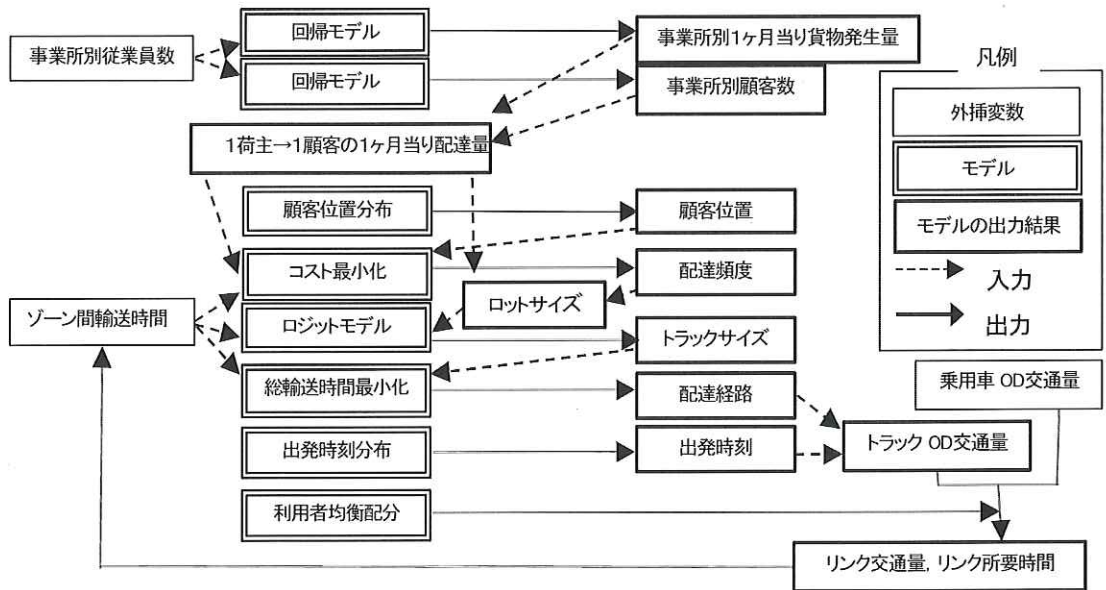


図-2 交通量推計モデルの計算の流れ

C_{kj} : 荷主 k から顧客 j への物流コスト [円]

β, γ : パラメータ

F_{kj} : 荷主 k から顧客 j への配達頻度 [回/月]

T_{kj} : 荷主 k から顧客 j への旅行時間 [時間]

Q_{kj} : 荷主 k から顧客 j への配達量 [kg/月]

(1) 式は F_{kj} に関して下に凸の関数であるため、 F_{kj} に関する 1 階微分がゼロになる点がコスト最小である。(1) 式の F_{kj} に関する 1 階微分をゼロとおくと、(2) 式となる。

$$\frac{Q_{kj}}{F_{kj}^2} = \frac{\beta}{\gamma} \cdot T_{kj} \quad (2)$$

ここで毎回の配達量が同量と仮定すると、荷主 k から顧客 j へのロットサイズ L_{kj} は Q_{kj}/F_{kj} で表され、さらに $\beta/\gamma = a$ と置くと、(2) 式は (3) 式のように書き換えられる。

$$\frac{L_{kj}}{F_{kj}} = a \cdot T_{kj} \quad (3)$$

パラメータ a は、東京物流調査¹²⁾ 結果を用いて回帰分析により推定される。ひとたびパラメータが推定されると、(4) 式により最適配達頻度が算出される。

$$F_{kj}^* = \frac{L_{kj}}{a \cdot T_{kj}} = \sqrt{\frac{Q_{kj}}{a \cdot T_{kj}}} \quad (4)$$

2.1.3 輸送主体、積替えの有無と貨物車サイズ

輸送主体として自社（自家用貨物車）と運送会社（営業用貨物車）の 2 つを考える。輸送主体は、ロットサイズ、従業員数、輸送時間をもとに合理的に選択されると仮定し、非集計二項ロジットモデルによって選択行動を表現した。自家用貨物車と営業用貨物車の効用差は、(5) 式のように表されると仮定した。

$$U_{0kj} - U_{bkj} = a_1 \cdot E_k + a_2 \cdot Nc_k + a_3 \cdot L_{kj} + a_4 \cdot T_{kj} + a_5 \quad (5)$$

U_{0kj}, U_{bkj} : 荷主 k から顧客 j へ荷物を配達する際の自家用貨物車の効用 (U_{0kj}) 及び営業用貨物車の効用 (U_{bkj})

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 : パラメータ

E_k : 荷主企業 k の従業員数 [人/企業]

Nc_k : 荷主企業 k の顧客数

L_k : 荷主 k から顧客 j へのロットサイズ [kg/回]

T_{kj} : 荷主 k から顧客 j への旅行時間 [時間]

同様に荷主から顧客への配達過程で積替えを行なうか否かという選択問題と貨物車サイズ選択についても、非集計二項ロジットモデルを適用した。積替えを行なうか否かの効用差は、(6) 式のよう

に表されると仮定した。

$$Ud_{kj} - Ut_{kj} = a_1 \cdot E_k + a_2 \cdot Nc_k + a_3 \cdot L_{kj} + a_4 \cdot T_{kj} + a_5 \cdot \delta_{kj} + a_6 \quad (6)$$

Ud_{kj}, Ut_{kj} : 荷主 k から顧客 j へ荷物を配達する際に荷物を積替えない効用 (Ud_{kj}) 及び積替える効用 (Ut_{kj})

$a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$: パラメータ

E_k : 荷主企業 k の従業員数 [人/企業]

Nc_k : 荷主企業 k の顧客数

L_{kj} : 荷主 k から顧客 j へのロットサイズ [kg/回]

T_{kj} : 荷主 k から顧客 j への旅行時間 [時間]

δ_{kj} : 荷主 k から顧客 j への配達に自家用貨物車を使用するなら 1、営業用貨物車を使用するなら 2。

大型貨物車と小型貨物車の効用差 Us_{kj} は (7) 式のように表されると仮定した。

$$Us_{kj} = a \cdot L_{kj} \cdot T_{kj} + \beta \cdot \sqrt{L_{kj}} + \gamma \quad (7)$$

a, β : パラメータ

L_{kj} : 荷主 k から顧客 j へのロットサイズ [kg/回]

T_{kj} : 荷主 k から顧客 j への旅行時間 [時間]

2.1.4 配達経路と貨物車出発時刻

配達経路とは、1 台の貨物車が複数の顧客へ配達しなければならない時の配達順序のことであり、総旅行時間最小化と、最大積載重量及び運転手の勤務時間制約によって決定されるものと考えた。また貨物車出発時刻は、東京物流調査¹⁾ をもとに現状の出発時刻分布に従う乱数を発生させ、シミュレーションにより求めた。ひとたび貨物車出発時刻が決定されると、各トリップの出発時刻は旅行時間と配達先での平均滞在時間より算出されるとした。

上記の結果から得られた時間帯別の貨物車 OD 交通量を、利用者均衡配分法を用いて配分する。得られたリンク旅行速度は、上位のモデルにフィードバックし、解が安定するまで繰り返し計算を行なう。

2.2 モデルの推定結果

貨物発生量や顧客数の回帰モデルの精度は業種により大きなばらつきがあった^{6) 7)}。製造業の精度は比較的高かったが、小売り業やサービス業ではあまりよい結果は得られなかった。輸送主体、積替えの有無と貨物車サイズに関するモデルは、尤度比、的中率とも満足のいくモデルが作成できた。しかし、配達頻度・ロットサイズの決定モデルの精度は十分ではなく、更なる改良が必要である。

2.3 モデルの有効性確認

以上のモデルを用いて推定される OD 交通量を道路交通センサス³⁾ および東京物流調査¹⁾ の値と比較した結果が表-1である。本研究のモデルは、東京物流調査データをもとにしていたため、モデル再現値はかなりの精度で元データと合致していることがわかる。なお、道路交通センサスと東京物流調査の値の相違は、サンプリングの違いによるものと推察される。

同様に、走行台キロについても再現性をチェックしたところ、既存調査データより過大となる傾向が見られた。これは、顧客位置分布を特定するとき、元データに荷主データがないゾーンについては、都県毎に集計した顧客位置分布を用いたことが原因の1つと考えられる。この補正については、今後の課題である。

表-1 研究対象地域より発生する交通量

単位:千トリップ/日	小型貨物車	大型貨物車	合計
モデルによる再現値	4,065	1,371	5,436
東京都市圏物資流動調査	3,879	1,285	5,164
道路交通センサス	5,320	2,580	7,900

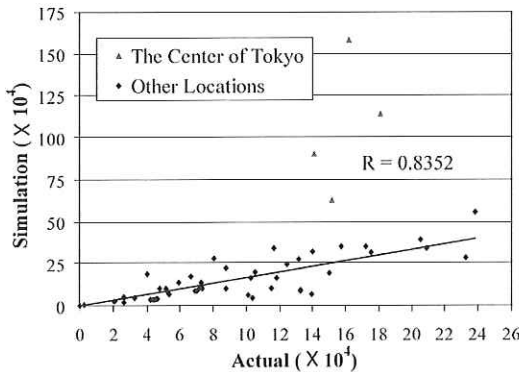


図-3 ゾーン別小型貨物車トリップ発生量

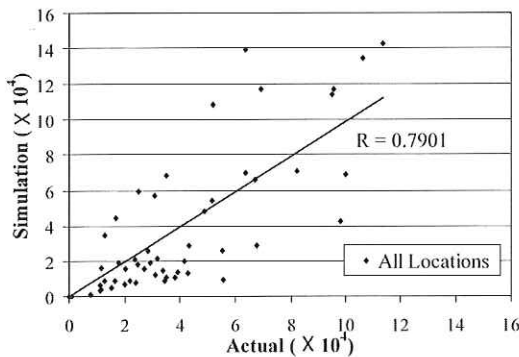


図-4 ゾーン別大型貨物車トリップ発生量

図-3にゾーン別の小型貨物車のトリップ発生量を、図-4にゾーン別の大型貨物車のトリップ発生量を示す。両者とも、観測値とシミュレーション値の間の相関係数が概ね0.8以上であるため、本シミュレーションは現況を比較的良好に再現しているといえる。小型貨物車に関しては、千代田区や中央区のような東京中心部ではシミュレーション値が道路交通センサスよりかなり高めの値を算出しているが、東京の都心には大企業の本社が集中しているため、大規模な事業所が多く存在している。この地域でのトリップ発生量が少ない理由としては、他の地域と比べると発生物流量自体が少ないことと、効率的に少ない貨物車で輸送されているためであると推察される。

3. 物流施策の評価

本研究では、物流施策を走行台キロ、NOx 排出量およびコストを指標として、物流施策を比較評価した。走行台キロはOD交通量にOD間距離を乗じた値の和で算出される。NOxの排出量は、OD交通量にOD間距離と走行速度の違いを考慮したNOx排出原単位⁵⁾を乗じて推計した。

物流施策により走行台キロやNOxが減少しても、その実施に莫大な費用がかかると、施策の実現は難しい。そこで、各物流施策を実施した場合の企業の費用増加分を推定し、物流施策によりNOx排出量を1kg減少させるための企業負担コストも施策の評価指標とした。

3.1 大型貨物車運行規制の導入効果分析

環状7号線の内側の地域を対象に、平日の午前7時から10時までの3時間にわたり大型貨物車運行規制を実施すると想定した。この施策の実施により各企業は、①配達時刻を変更、②1台の大型貨物車から2台の小型貨物車への変更、③1台の大型貨物車から1台の小型貨物車への変更、の3つの選択肢のうち最適なものを選択する。

規制対象となる各貨物車について費用最小となる選択肢を選択した結果、各選択肢の選択割合は既存の調査結果⁴⁾とほぼ近い以下の値となった。

- ・ 選択肢1 (配達時刻の変更) : 43%
- ・ 選択肢2 (大型貨物車1台→小型貨物車2台) : 54%
- ・ 選択肢3 (大型貨物車1台→小型貨物車1台) : 3%

この結果を用いて大型貨物車運行規制実施後の走行台キロとNOx排出量を試算した結果が、図-5と表-2である。大型貨物車については減少する傾向にあるものの、貨物車サイズ変更のために小型貨物車の値は増加していることがわかった。その結果、走行台キロの総量は34%増加したに

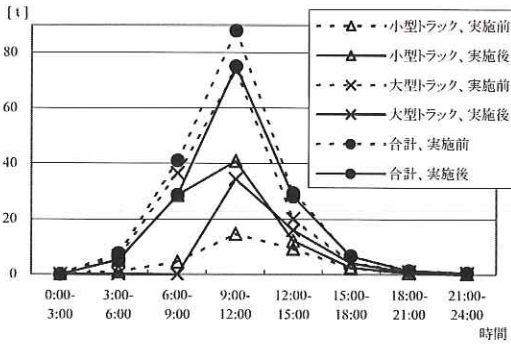


図-5 大型貨物車流入規制後のNOx 排出量

もかわらず、NOx 排出総量は17%減少した。これは大型貨物車のNOx 排出原単位が、小型貨物車のそれよりはるかに大きいためである。

規制時間を午前7時から午前10時までと設定しているため、午前10時以前には大型貨物車交通は発生しない結果となった。もし規制時間をさらに長く設定するならば、NOx 排出量はより減少すると期待される。

3.2 ロードプライシングの導入効果分析

平日の午前7時から午後7時の間に、環状7号線の内側に流入する貨物車にサイズに応じた課金を想定した。この施策の実施により各企業は、①現状のまま、②配達時刻の変更、③貨物車サイズの変更、の3つの選択肢のうち最適なものを選択する。既存調査⁴⁾ データをもとに各選択肢の選択割合を推定したところ、表-3のとおり調査結果をほぼ再現できる結果が得られた。ケース2およびケース4の小型貨物車1,000円、大型貨物車2,000円という課金額は、輸送形態を変更するにはやや低い金額といえる。

ロードプライシング実施によって大型貨物車による走行台キロとNOx 排出量は減少するが、貨物車サイズ変更の選択肢のために、小型貨物車の値は増加する。大型貨物車規制では「大型貨物車1台から小型貨物車2台への貨物車サイズ変更」という選択肢も設定しているのに対して、ロードプライシングでは「大型貨物車1台から小型貨物車1台への貨物車サイズ変更」のみである。このため走行台キロの総量は変化せず、NOx 排出総量はケース1で16%減少した。

3.3 物流センター整備の効果分析

本研究では現在積替えなしで荷主から顧客へ配達されているトリップを対象に、物流センターの建設・維持費が現状のまま(ケース1)、あるいは公的補助金等により75%(ケース2)、50%(ケース3)、25%(ケース4)へ減少した場合に、それぞれ何パーセントの企業が新たに物流センター

を利用するかを検討する。また、物流センターの位置は、既存のトラックターミナルや流通センターの位置を考慮して、足立区、江戸川区、板橋区、大田区に建設するものとした。なお既存調査⁴⁾より、物流センターの建設費と維持費は、搬出貨物1トンあたり10,000円/日、積替え費用は5,000円/トンとして計算した。

各選択肢の選択割合を推定したところ、表-4の結果が得られた。ケース1の結果は、現状では適切な位置に物流センターがない等の理由で物流センターを利用してないトリップが、本研究で想定した位置に物流センターが設置された場合には、1.7%のトリップが新たに物流センターを利用することを意味している。ケース4より、物流センターの建設維持費が4分の1まで減少した場合でも、ただか4.5%の企業しか新たに物流センターを利用しないと推定された。この利用率の低さはシミュレーションにおいて、物流センターを利用する場合も利用しない場合も同じ貨物車積載率を用いていることが原因の一つであると考えられる。従って物流センターを利用する場合の貨物車積載率を上げると、物流センター利用率も上がるはずである。物流センターの建設維持費負担割合が半分のケースにおいては、3.5%の企業しか新たに物流センターを利用しないため、走行台キロおよびNOx 排出量はわずかしこ減少しなかった。

3.4 環状道路の整備

東京外環道の整備が終了した場合の効果を計測した。図-6に整備後の各ゾーンにおける貨物車トリップの増減を、表-5に都市圏全体での平均

表-2 大型貨物車規制実施前後の走行台キロ

千台キロ/日	小型貨物車	大型貨物車	合計
実施前 (B)	31,459	51,134	82,593
実施後 (A)	90,389	19,994	110,383
(A) / (B)	2.87	0.39	1.34

表-3 ロードプライシング導入時の選択割合

検討 ケース	小型車 課金額	大型車 課金額	旅行時間 短縮率	選択肢		
				1	2	3
1	2,000円	4,000円	5%	61%	21%	18%
2	1,000円	2,000円	5%	94%	3%	3%
3	3,000円	6,000円	5%	26%	54%	20%
4	1,000円	2,000円	3%	87%	3%	10%
5	3,000円	6,000円	8%	32%	48%	20%

表-4 各選択肢の選択割合

企業が負担する物流センターの建設・維持費	物流センターを利用しない	物流センターを利用する
100% (ケース1)	98.3%	1.7%
75% (ケース2)	97.2%	2.8%
50% (ケース3)	96.6%	3.4%
25% (ケース4)	95.5%	4.5%

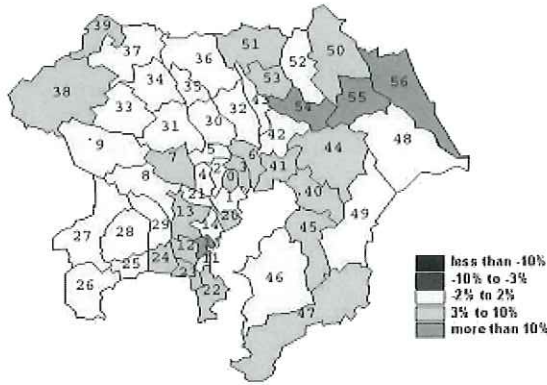


図-6 環状道路建設による貨物車トリップ

旅行速度、貨物車走行台キロ、NOx 排出量の変化を示す。

旅行速度の向上による交通費用の低下により、東京都市圏の広範囲のエリアでトリップ数の増加がみられる。また、貨物車の総走行距離は増加するが、渋滞緩和効果により、平均旅行速度の上昇による NOx の排出原単位の減少による効果の方が大きく、都市圏全体での NOx 排出量は減少する。

4. おわりに

本研究では首都圏を対象に、各企業の物流行動を考慮したいくつかの物流施策評価が可能なシミュレーションモデルを開発した。また推定モデル開発過程において、配達頻度や貨物車サイズの違いといった企業の物流行動特性を把握することができた。本研究は物流施策評価のための交通状況推定の枠組みを示すことに力点を置いたため、個々のサブモデルは実測値と推定値の間の相関係数が小さいモデルもあるなど精度に幾分か課題が残るものの、業種や搬出品目の細分化、変数の追加、回帰式の再検討などによりモデル精度の向上は可能である。また同時に、観測リンク交通量等の既存のデータを用いて、サブモデルの精度を向上していく手法の開発も必要であると考えている。

今後、二酸化炭素等、他の環境負荷要因の軽減効果についても同様に分析すると共に、ロードプライシングの課金徴収、物流センターへの補助などの施策実施時に行政が負担するコストも検討する必要がある。

参考文献

1) 建設省都市開発局：東京都市圏物流流動調査, 1982, 1994年

表-5 環状道路の建設効果

	単位	建設前	建設後	増減率
平均旅行速度	km/h	22.0	22.5	2.2%
走行台キロ				
小型車	1000台キロ/day	615,210	630,970	2.6%
大型車	1000台キロ/day	120,079	128,632	7.1%
合計	1000台キロ/day	735,289	759,603	3.3%
NOx 排出量				
小型車	1000kg/day	764	762	-0.2%
大型車	1000kg/day	434	434	0.1%
合計	1000kg/day	1,198	1,197	-0.1%

2) 総務省統計局：事業所・企業統計, 1999年
 3) 建設省道路局：道路交通センサス, 1999年
 4) 佐野可寸志、金子雄一郎、加藤浩徳、福田 敦、家田 仁：アンケート調査に基づく物流関連企業の行動メカニズムの把握, 土木計画学研究・講演集, No.24 (CD-ROM), 2001年
 5) (社) 交通工学研究会：交通工学ハンドブック 2001年
 6) 細谷涼子、佐野可寸志、加藤浩徳、家田 仁、福田 敦：企業行動構造を明示的に考慮した大都市圏物流施策評価モデルの構築, 土木計画学研究・論文集 Vol.20 No.3, pp.759-770, 2003年8月
 7) Wisinee Wisetjindawat, Kazushi Sano: Behavioral Modeling in Micro-Simulation for Urban Freight Movement Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp.2193-2208, 2003.10
 8) Ryoko Hosoya, Kazushi Sano, Hitoshi Ieda, Hironori Kato, Atushi Fukuda: Evaluation of Logistics Policies in the Tokyo Metropolitan Area Using a Micro-Simulation Model for Urban Goods Movement, Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, Vol.5, pp.3097-3110, 2003.10

家田 仁*



東京大学大学院工学研究
 科教授, 工博
 Dr. Hitoshi IEDA

佐野可寸志**



長岡技術科学大学環境・
 建設系助教授, 博(工)
 Dr. Kazushi SANO