

シティロジスティクス* City Logistics*

谷 口 栄 一**
By Eiichi TANIGUCHI**

1. はじめに

わが国の経済の発展に伴って、多様化・高度化する消費者のニーズに対応するため、物流システムも高度なものが要求されるようになってきた。特に都市内の集配送においては、時間指定が厳しくなり、いわゆるジャストインタイム輸送が普及しつつある。このような状況において、都市内物流は、ロジスティクスコストの削減を含めて、ますます効率化が求められている。また都市部における交通混雑は激化しており、大気汚染・騒音・振動などの交通環境悪化も大きな社会問題となっている。交通渋滞や交通環境悪化の一つの原因として、トラック交通があり、環境に優しいトラック交通が望まれている。さらに、都市内物流における省エネルギー・省労働力も重要な問題となっている。

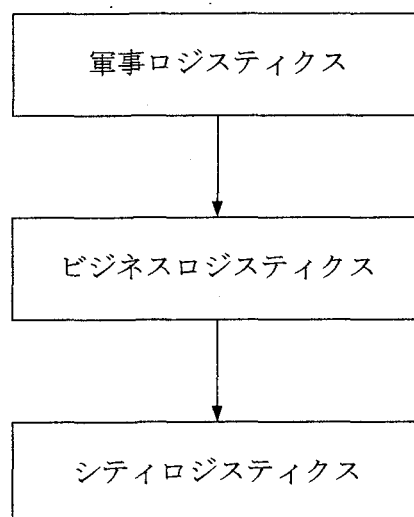
このような難しい問題を解決するために、筆者らを含めて何人かの研究者は、シティロジスティクスの考え方を提案してきた。^{1) - 6)} シティロジスティクスは、民間物流事業者のロジスティクスを尊重しながら、交通渋滞・環境などの公共的な問題の解決を目指す、地域マネジメント手法の一つである。また、世界中のいくつかの都市において、実際にシティロジスティクスの施策が実施されている。

しかしながら、シティロジスティクスは新しい方法であり、学術研究および実務においても、手探りで仕事を進めているのが現状である。一方で、日々進歩する ITS (高度道路交通システム) を活用した新しいシティロジスティクスの施策が試行されることも多くなってきている。

ビジネスの世界においては、近年ビジネスロジスティクスがかなり普及してきており、SCM (サプライチェーンマネジメント) や ERP (エンタープライズリソースプランニング) などの手法が日常の企業活動として取り入れられるようになってきた。本来、ロジスティクスは、軍事において用いられていたものであるが、その考え方をビジネスに応用したものである。しかしながらそのようなビジネスロジスティクスは企業活動の効率化には役立つとしても、必ずしも都市の交通渋滞緩和や交通環境改善の

ことを考慮しているわけではない。したがって、交通混雑や環境を考慮して地域全体としてのロジスティクスを最適化するためには、ビジネスロジスティクスをシティロジスティクスに進化させることが必要である。(図—1)

このような視点に立って、本論文においては、市場経済の枠組みのなかで、企業の自由なロジスティクス活動を尊重しながら、しかも交通渋滞緩和や交通環境改善を実現するためにはどうすればよいのかということについて、アプローチの方法、モデル化、評価、将来への展望を述べる。



図—1 ロジスティクスの変遷

筆者らは、1999年7月にオーストラリアのケアンズにおいて、シティロジスティクス研究会(Institute for City Logistics. <http://www.citylogistics.org>)主催により第1回シティロジスティクスに関する国際会議を開催した。この会議には、日本、欧州、アメリカ、オーストラリアなどの6カ国から22名の研究者が参加した。シティロジスティクス研究はスタートしたばかりである。しかし、筆者らは、シティロジスティクスが、21世紀において重要な役割を果たすであろうと考えている。その理由としては、人々の意識が変化して、競争しつつも協調し、より良い環境を作りたいという気持ちがますます強くなると予想されること、ならびに ITS や e—コマースの発達によって、効率的で環境に優しい都市内物流システムを作るための道具が比較的安いコストで手に入るようになることが挙げられる。

*キーワード：物流，環境，渋滞，モデル

**フェロー会員，工博，京都大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

TEL 075-753-5125, FAX 075-753-5907

E-mail: taniguchi@urbanfac.kuciv.kyoto-u.ac.jp

2. シティロジスティクスとは

(1) シティロジスティクスの定義

ビジネスロジスティクスについて、圓川⁷⁾は、「現在のロジスティクスには、生産・調達・物流・販売を一体化したトータルなシステムが求められている」と述べている。Bowersox ら⁸⁾も、ロジスティクスマネジメントは、ビジネス全体が一体化した戦略を実施するために、物の流れ、各プロセスにおける作業および最終製品の在庫を管理するシステムの設計と運営を含むと述べている。また、苦瀬⁹⁾は、生産・流通・消費まで含めた広い範囲の活動としてロジスティクスをとらえている。

いずれの考え方を採るにしても、ロジスティクスにおいて重要なことは、個々の要素の局所的な効率化を図るのではなく、全体システムとして最適なものにしようという戦略的意図が働いていることである。また、物のみではなく、サービスや情報も統合してマネジメントしようとするところにも特徴がある。

つぎに、シティロジスティクスがどのようなものであるかについて、考えてみよう。前述の第1回シティロジスティクスに関する国際会議において、Taniguchi ら¹⁰⁾は、次のような定義を与えている。

「シティロジスティクスとは、市場経済の枠組みのなかで、交通環境・交通渋滞・エネルギー消費を考慮しながら、都市部における民間企業のロジスティクスおよび輸送活動を、全体として最適化する過程である。」(City logistics is the process for totally optimising the logistics and transport activities by private companies in urban areas while considering the traffic environment, the traffic congestion and energy consumption within the framework of a market economy.)

本論文においては、シティロジスティクスの定義として、これを採用する。この定義において重要な点は、経済的な効率のみではなく、交通環境・交通渋滞・エネルギー消費を考慮しながら、全体としてロジスティクス活動を最適化しようとする点である。また「市場経済の枠組みのなかで」と、条件をつけているのは、公共側からの規制が過度に強化されて、自由な民間企業のロジスティクスおよび輸送活動が衰退することがないようにという意図で挿入されたものである。

この定義において、交通環境・交通渋滞・エネルギー消費を考慮するということは、たとえば、都市のある地区へのトラックの流入に関する時間規制あるいは車種規制、NO_xの排出や騒音に関する自動車単体に対する環境規制、物流ターミナルが立地できる場所に関する土地利用規制などを公共側が実施することを含む。また、企業側で自主的に交通環境・交通渋滞・エネルギー消費を考慮して、トラックの使用台数を削減することなども含まれる。

シティロジスティクスは、交通環境・交通渋滞・エネ

ルギー消費を考慮するという点において、ビジネスロジスティクスとは異なっている。また、シティロジスティクスは、主として都市内におけるロジスティクスを扱っており、都市間のロジスティクスとは異なっている。もちろん都市内と都市間のロジスティクスのつながりは、つねに考えるべきである。しかし、ここで都市内のロジスティクスに焦点をあてる理由は、都市内のほうが、都市間に比べて交通環境・交通渋滞・エネルギー消費について、問題が多いためである。

(2) シティロジスティクスの構成要素

シティロジスティクスには、次のような利害関係者(stakeholders)が存在し、図-2に示すように、それぞれが、相互に関連している。

- a) 荷主 (shippers)
- b) 物流事業者 (logistics service providers)
- c) 消費者 (consumers) (あるいは住民 (residents))
- d) 行政 (city planners) (市 (municipalities), 都道府県(prefectures)) および国 (national government)

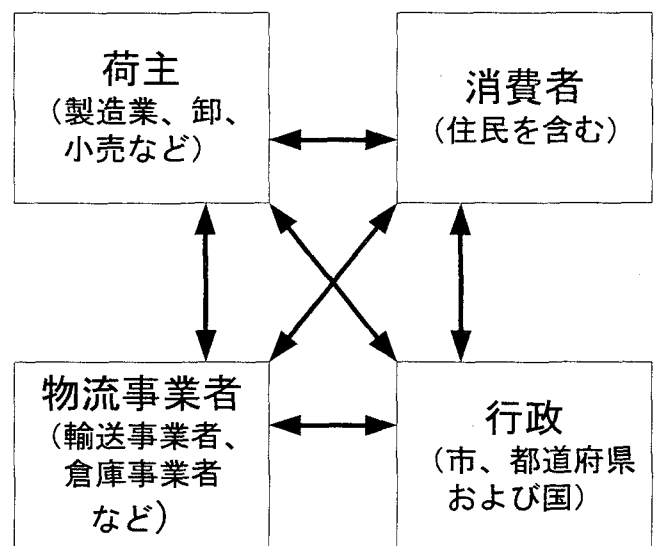


図-2 シティロジスティクスの利害関係者

荷主は、物流事業者の顧客であり、貨物を他者に送ったり、他者から受け取ったりする。荷主は、一般に、物流に関するコスト・集配の時間・輸送の信頼性・自分の貨物の現在位置情報などに関するサービスレベルを最大化しようとする。

物流事業者は、自らの利益を最大にするために、貨物集配のコストを最小化しようとする。1995年に実施された京阪神都市圏物流流動調査¹¹⁾によると、京阪神地域の事業者の貨物集配において、重量ベースで7.5%が特定時刻指定、30.6%が時間帯指定であった。都市内では交通混雑が激しいので、集配トラックは、このような時刻指定を守るために、デポを早めに出発し、顧客の所に早く到着した場合には、顧客の位置の近くで指定時刻まで待たなければならないことが多くなる。

消費者は、物価ができるだけ安くなることを望んでいる。また、地域の住民でもある消費者は、交通渋滞を緩和し、騒音や大気汚染などの公害を減らし、生活空間における交通事故を減らしたいと思っている。

市の行政官は、市の社会経済的発展や、雇用の確保に努める。また、彼らは、市全体の交通渋滞を緩和し、環境を改善し、交通事故を削減したいと望んでいる。

シティロジスティक्सの施策を考える場合、図2に示したように、この4者の関わりの中かで考える必要がある。実際、この4者が協力し合うことが、シティロジスティक्सの施策を立案し、実施するために非常に重要である。なお、この4者のうちで、市の行政官は、他の3者とは少し異なる役割を果たさなければならない。

その役割とは、環境基準・交通規制・土地利用規制などの規則を制定し、それを各企業・個人に遵守させることである。これは、企業間の公平な競争を確保するために、行政が果たすべき重要な役割である。また、道路などの公共財を整備することも行政の重要な役割である。

3. シティロジスティクス施策

(1) シティロジスティクス施策の分類

シティロジスティクス活動そのものは民間部門の荷主、物流事業者によって担われるが、公的部門には効率的で環境にやさしいシティロジスティक्सの実現のために、各種施策を展開することが期待されている。

シティロジスティクス施策は、その内容から「インフラ供給施策」「規制誘導施策」「経済的施策」に分類することができる。

主なシティロジスティクス施策を以下に挙げる。

a) インフラ供給施策

- ・ 共同化推進のための公共物流ターミナル
- ・ 効率的配車配送計画・車両運行管理支援のための道路交通情報システム、デジタル地図
- ・ 貨物専用駐車、荷さばき施設
- ・ 駐車場予約システム
- ・ 地下物流システム

b) 規制誘導施策

- ・ 物流施設の立地規制
- ・ トラックルート、トラックレーン
- ・ 都市内への流入の時間規制、車種規制
- ・ 排ガス、騒音、振動規制
- ・ 積載率規制
- ・ トラック用付置義務駐車場
- ・ 荷さばき時間規制
- ・ パレット、コンテナ、パレット、ICタグの標準化
- ・ 物流EDI、2次元バーコードの標準化

c) 経済的施策

- ・ ロードプライシング
- ・ 重量税、燃料税、環境税

- ・ 共同配送施設への補助金
- ・ インターモーダルターミナルへの補助金
- ・ 低公害車への補助金

(2) シティロジスティクス施策の例

シティロジスティクス施策として、いくつかのものは、実際に行われている。ここでは、実験として行われている最近の例を紹介する。

a) 電気トラックの共同利用システムに関する社会実験¹²⁾

この実験は、新エネルギー・産業技術総合開発機構(New Energy and Industrial Technology Development Organisation: NEDO)の公募事業として、(財)都市交通問題調査会および民間会社2社が行っているものであり、ITSに関係する5省庁(建設省、運輸省、通産省、郵政省、警察庁)および大阪府、大阪市も支援している。このシステムの基本的な概念は、以下のようなものである。

実験主体が、28台の小型電気トラックを、大阪の都心にある8か所の公共駐車場に用意し、利用したい会社は、事前にインターネットで予約をとってそれを利用する。公募により、現在79の会社が利用者として実験に参加している。79社は、さまざまな業種から、物資輸送を伴う業務を行っている会社で、8か所の公共駐車場へのアクセスの点で、特定の駐車場に集中しないように選んだ。

利用者は、電気トラックを公共駐車場で借りて貨物を顧客の所へ運んだ後は、顧客の位置から最も近い別の公共駐車場に電気トラックを返却し、地下鉄あるいはバスを利用して会社まで帰る。そうすることによって、空車でトラックを走行させるトリップが1回減ることになり、交通混雑緩和や環境改善に役立つ。(図-3)なお、返却する公共駐車場は、8か所であるが、途中で駐車に利用できる駐車場は、16か所用意されている。1999年12月から2000年3月までの427件の利用者のうち、24%に

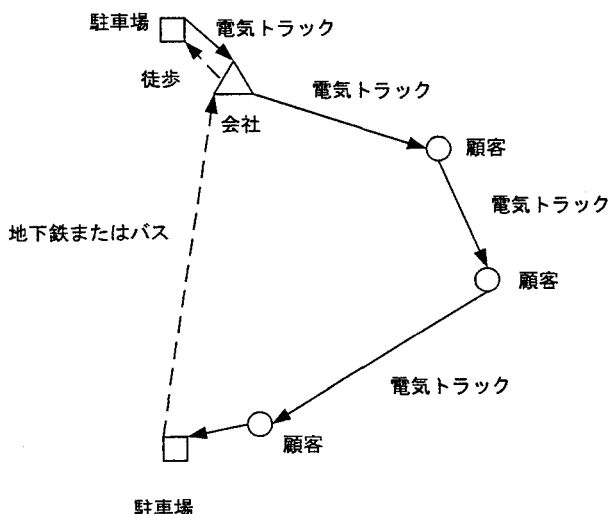


図-3 電気トラックの共同利用によるモード転換例

あたる 101 件が出発時と異なる駐車場に電気トラックを返却し、そのうちの 76%は、地下鉄を利用して帰社していた。

電気トラックの最大積載量は、約 200 kg である。この電気トラックは、1 回の充電で、10 - 15 モードで約 100 km 走行することができる。ただし、一般の市街地では、交通混雑があるので、走行距離は、およそ 50 km 程度になる。バッテリーは、完全放電状態からフルに充電するには、200 V の電圧で約 7 時間必要である。また、このシステムでは、電気トラックを利用するので、ディーゼルトラックに比べると、騒音はかなり低い。また CO₂ や NO_x などの廃棄ガスについては、走行中には排出されないの、沿道環境への影響はない。ただし、発電所における発電時には排出されているので、地球環境への影響については別途検討が必要である。さらに複数の企業が共同で利用するので、企業にとっても経費削減のメリットが得られる。この電気トラックには、PHS を利用した情報通信システムも装備されており、トラックの現在位置は、いつも運行管理センターがモニターできるようになっている。また、予約時に入力した顧客位置への経路誘導も行われている。

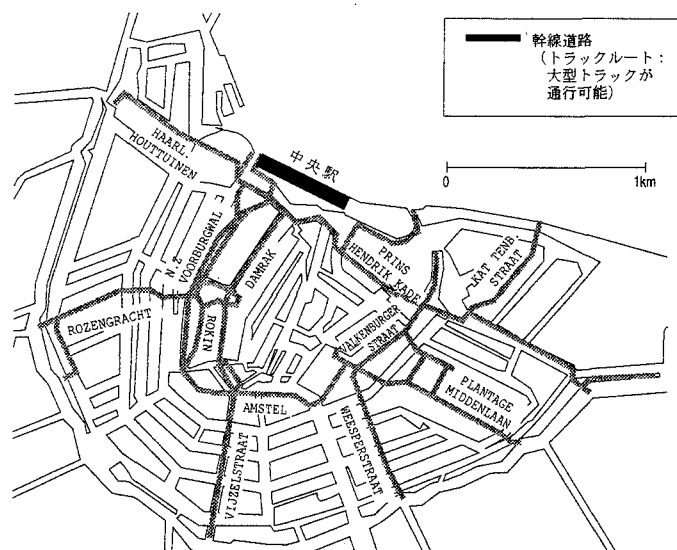
b) アムステルダム市の積載率規制¹³⁾

オランダのアムステルダム市においては、従来から、大型トラックの都市への流入を規制してきた。すなわち、図 4 に示すアムステルダム市の幹線道路においては、総重量が 7.5 トン以上（積載量は、3.5~4 トンに相当する）の大型トラックも走行可能であるが、幹線道路以外の街路においては、総重量が 7.5 トン以上の大型トラックは走行禁止となっていた。この交通規制に対し、輸送事業者からは幹線道路以外の街路においても大型トラックの走行を認めてほしいという要望がある一方、市民からは、大型車の規制および環境の改善が要望されていた。

このような状況において、アムステルダム市は、次のような条件を満たすような、総重量が 7.5 トン以上の大型トラックは、幹線道路以外の街路も走行できるような新しい施策を 1998 年 10 月 1 日より施行した。

- (1) 積載率が 80%以上
- (2) 車両の長さが 9m以下
- (3) エンジンがユーロ II の排ガス基準を満たす

この施策においては、上記の条件を満たす車両について、あらかじめ市に登録をし、市からイエローステッカーをもらう。登録の申請においては、過去 6 ヶ月におけるアムステルダム市の都心への貨物の配送あるいは集荷時のトラックの積載率が 80%以上であったことを示す書類を提出する必要がある。イエローステッカーをつけた大型トラックは、市内の幹線道路以外の街路も走行できる。この施策のねらいは、大型トラックの積載率を高めて物



図—4 アムステルダム市の幹線道路

流の効率化を図ると同時に、環境への負荷・交通渋滞も減少させることにある。違反車のチェックについては、路上で警察官が行うことになっている。アムステルダム市の調査によれば、この施策実施以前における大型トラックの積載率は、73~76%であり、80%という基準は、十分達成可能であると考えている。

このような施策が出てきた背景として、次のようなオランダにおけるシティロジスティクスの流れがある。即ち、オランダにおいては、都市内のトラック交通問題の対策として、1990 年代初めに都市周辺に都市配送センター(city distribution centre)を設置し、そこから共同配送を行うという構想があり、マースリヒト市等で試みようとしたが、ある一つの輸送事業者の独占になるという批判があり、実現しなかった。その後、大型トラックの都市への流入を規制しようという動きがあり、ユトレヒト市等で、総重量 7.5 トン以上のトラックの流入を規制したが、その結果小型トラックの台数が増えて交通渋滞が激化するという現象が見られた。そのような経験を踏まえて、アムステルダム市においては、幹線道路以外の街路への大型トラックの流入は、積載率が高いものに限って認めようということになった。オランダにおいては、交通・公共事業・水マネージメント省(Ministry of Transport, Public Works and Water Management)が中心となって都市内物流問題を検討する協議会が設置されており、その中でいろいろ議論されているが、地方分権が強い国柄を反映して、各自治体が独自に様々な施策を実施している。

4. シティロジスティクスのモデル化

(1) モデルの役割と限界

シティロジスティクスの施策を考える場合に、その施策を評価し、計画するために、その施策を実施した場合の影響を定量化する必要がある。さらに、定量化するた

めには、シティロジスティクスの施策をモデル化することが必要である。シティロジスティクスに関わる利害関係者のロジスティクス活動は、たいへん複雑なものであり、また、さまざまな評価基準が存在するので、シティロジスティクスのモデル化は、難しいと同時にやりがいのある仕事である。

したがって、モデル化を行う場合には、各利害関係者のどの活動をモデル化しようとしているのか、また、どのような評価基準で結果を評価しようとしているのかを、つねに明確にすることが重要である。さらに、シティロジスティクスのモデル化においては、道路ネットワークにおけるトラック交通をモデル化する必要がある。そのためには、道路交通を乗用車とトラックに分けて、OD (origin-destination) 表(旅行の起終点ごとの交通量を示した表)を作成し、ネットワーク上に配分しなければならない。

シティロジスティクスのモデルは、対象とする活動が調達・生産・流通・販売と多岐にわたっており、また利害関係者も多い。したがって、すべての要素を盛り込んだモデルを作成することは、非常に困難である。

通常作成されているモデルは、全体システムのなかの一部に焦点を当てており、その点において、モデルには限界があるといえる。また、シミュレーションや、最適化モデルにおいては、計算時間の制約から、簡略化せざるを得ない場合あるいは、近似解を求めざるを得ない場合がある。モデルによる解析結果を政策決定に用いる場合、このような限界があることを十分に認識していれば、モデルは、非常に有用な道具として用いることができる。また、モデルのキャリブレーションおよび適用性の検討は、重要なことであり、それを行うために、信頼できるデータを収集することが必要となる。

(2) モデルの分類

シティロジスティクスのモデルを大きく分けると、次の三つになる。

- a) 供給モデル (supply models)
- b) 需要モデル (demand models)
- c) インパクトモデル (impact models)

これら三つのモデルは互いに相関があり、実際にはこれらのモデルのいくつかを結合したモデルが用いられる。

供給モデルとしては、交通流モデル・渋滞モデル・コストモデルなどがある。交通流モデルとしては、マクロモデル¹⁴⁾とマイクロモデル¹⁵⁾があり、最近では、マクロとマイクロの両方の性質をもったメソモデルも開発されている。

渋滞モデルは、道路交通における需要とパフォーマンスの関係を表すものであり、一般には、交通量とコストの関係式が用いられる。例として、米国の連邦道路局 (Bureau of Public Roads, いまはこの組織は存在しない) によるBPR関数¹⁶⁾がある。

コストモデルは、主として道路の利用経路、物流ターミナル、トラックと関係づけられる。物資を輸送するときのコストは、一般に、輸送コストと施設コストからなる。輸送コストは、車両の運行時間に無関係の固定費(車両減価償却費、税金、保険料、人件費(固定給))および運行時間によって変動する変動費(燃料油脂費、修繕費、タイヤ・チューブ費、人件費(変動給))からなる。トラックの交通モデルにおいては、この固定費が明示的に表現される点が乗用車の交通モデルと異なっている。物流ターミナルのコストも固定費と変動費からなる。

需要モデルは、大きく二つのカテゴリーに分けられる。一つは、商品の流れに着目したモデルであり、もう一つは、トラック交通に着目したモデルである。両モデルに用いられるデータはたいへん異なっている。

物流システムのなかにおいて、さまざまな予測が行われるが、需要モデルは物流に関係する利害関係者の行動を予測することに主眼をおいている。すなわち、利害関係者の行動を予測することができれば、利害関係者の決断と利害関係者間の相互関係によって、物の動きを予測することができると仮定している。需要モデルとしては、計量経済モデル(econometric models)、空間価格均衡モデル(spatial price equilibrium models)、物流ネットワーク均衡モデル(freight network equilibrium models)などがある^{17),18)}。

また、車両の配車配送計画モデル(vehicle routing and scheduling models)¹⁹⁾や産業連関表(input-output tables)を用いた各種のモデルも開発されている。²⁰⁾

インパクトモデルは、シティロジスティクス施策を実行することによる、次のような社会経済的な影響を予測するモデルである：

- a) CO₂やNO_xの排出量、騒音レベル、振動レベルの変化などに関する環境への影響
- b) 物流の固定費用や運行費用の変化などに関する経済的な影響
- c) 交通混雑や交通事故などの変化に関する社会的な影響。

インパクトモデルは、シティロジスティクス施策の影響を事前に予測するために、非常に重要であり、いくつかの研究も行われている^{21),22)}。

以下に、シティロジスティクスのモデル化の例として、配車配送計画および物流ターミナルの最適配置について述べる。

5. 配車配送計画

(1) 基本的考え方

都市内の集配トラックの行動としては、何か所かの顧客を訪問する場合が多い。たとえば、商品を配送する場合、デポ (depot, 配送拠点) で商品をトラックに積み、何か所かの顧客を順に訪問して商品を届け、また同じデポにもどる。集荷の場合も同様であり、デポを出発して、

何か所かの顧客を順に訪問し、貨物を積んで同じデポにもどる。

このように配車配送計画とは、巡回型で配送する場合の車両別の経路、訪問順序を最適化するものである。前提条件は顧客の位置、道路ネットワークの状況、所要時間、交通規制情報などである。これらの基本情報に加え、毎日の配送に必要な顧客別の運送依頼情報、時刻指定情報、運転手指定情報などが入力され、車両別の経路が出力される。以前は、これらの仕事が手作業で行われていたが、熟練した配車係でも相当の時間を要した。最近ではコンピュータ化されることにより、短時間で総輸送費、車両別の配送距離累計値、配送時間累計値、積載効率などが出力できるようになり、定量的に配車配送計画の評価ができるようになった。

配車配送計画(Vehicle Routing and scheduling Problems: VRP)は、古くからオペレーションズリサーチ(Operations Research: OR)の分野において研究され、実際の問題に応用されている。配車配送計画の原問題は、巡回セールスマン問題(Travelling Salesman Problems: TSP)である。TSPについては、参考文献 23, 24)を参照されたい。

ある輸送事業者が1か所のデポをもっており、 m 台のトラックを保有している。そこから n か所の顧客に、複数のトラックを用いて貨物を配送する（あるいは、複数の顧客から貨物を集荷する）。このとき、1台のトラックは、デポを出発し、複数の顧客のところを訪問してまた同じデポにもどってくる。この場合の総費用を最小とするようなトラックの顧客への割り当ておよびトラックの訪問順序を決定したい。なお、ある顧客のところには、必ず1台のトラックが訪問し、また、その顧客への貨物の配送は、1回の訪問で終了すると仮定する。

このような基本的な配車配送計画問題を、さらに現実的な問題に近づけるためには、次のような点を追加する必要がある。

- a) 各顧客における時間指定が存在する
- b) デポが複数存在する
- c) 所要時間が時間的に変動する

これらを考慮した配車配送計画について以下に述べる。

(2) 時間指定付き確定論的配車配送計画

a) 問題の定式化

ここでは、前節で述べた配車配送計画に、各顧客における時間指定が存在する場合の定式化を行う^{25, 26)}。なお、デポと顧客間および顧客間の所要時間の値は、推定されたある一つの値が与えられるものとする。このような配車配送計画を、時間指定付き確定論的配車配送計画(Forecasted Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window: FVRP-TW)とよぶ。このFVRP-TWにおいては、目的関数として総費用をとり、これを最小化することを考える。

Minimise (最小化)

$$C(t_0, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^m c_{f,l} \cdot \delta_l(\mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) \quad (1)$$

ここに、

$$C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) = c_{t,l} \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (2)$$

$$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) = \sum_{i=0}^{N_l} \left[c_{d,n(i)} \cdot \max \left\{ 0, t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) - t_{n(i)}^e \right\} + c_{e,n(i)} \cdot \max \left\{ 0, t_{n(i)}^s - t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l) \right\} \right] \quad (3)$$

Subject to (制約条件)

$$n_0 \geq 2 \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^m N_l = N \quad (5)$$

$$\sum_{n(i) \in \mathbf{x}_l} D(n(i)) = W_l(\mathbf{x}_l) \quad (6)$$

$$W_l(\mathbf{x}_l) \leq W_{c,l} \quad (7)$$

$$t_s \leq t_{l,0} \quad (8)$$

$$t'_{l,0} \leq t_e \quad (9)$$

ここに、

$$t'_{l,0} = t_{l,0} + \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (10)$$

ただし、

$C(t_0, \mathbf{X})$: 総費用[円]

t_0 : トラック l がデポを出発する時刻を表すベクトル

$$t_0 = \{t_{l,0} | l=1, m\}$$

$\mathbf{X}$: 全トラックの配送ルートへの顧客の割り当てと訪問順序を示す数列 ($\mathbf{X}$ のなかには、すべての $n(i)$ が必ず含まれる。)

$$\mathbf{X}=\{\mathbf{x}_l | l=1, m\}$$

$\mathbf{x}_l$: トラック l の配送ルートへの顧客の割り当てと訪問順序を示す数列

$$\mathbf{x}_l = \{n(i), d(j) | i=1, N_l, j=1, n_0\}$$

$n(i)$: あるトラックが i 番目に訪問する顧客のノード番号

$d(j)$: あるトラックが j 番目に訪問するデポを表す番号(ここでは=0)

N_l : トラック l が訪問する顧客の総数

n_0 : 数列 $\mathbf{x}_l$ 中の $d(j)$ の個数

m : 使用可能なトラック台数の上限

$c_{f,l}$: トラック l の固定費用[円/台]

$\delta_l(\mathbf{x}_l) := 1$; トラック l を使用するとき
= 0; その他の場合

$C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l の運行費用[円]

$C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l のペナルティ[円]

$c_{t,l}$: トラック l の単位時間当りの運行費用[円/分]

$t_{l,n(i)}$: トラック l の顧客 $n(i)$ における出発時刻

$\bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1))$: トラック l の時刻 $\bar{t}_{l,n(i)}$ における顧客 $n(i)$ と顧客 $n(i+1)$ の間における平均所要時間

$t_{c,n(i)}$: 顧客 $n(i)$ における貨物の積み卸し時間

$c_{d,n(i)}(t)$: 顧客 $n(i)$ における単位時間当りの遅刻ペナルティ[円/分]

$c_{e,n(i)}(t)$: 顧客 $n(i)$ における単位時間当りの早着ペナルティ[円/分]

$t_{l,n(i)}^a(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)$: トラック l がデポを時刻 $t_{l,0}$ に出発したときのノード $n(i)$ への到着時刻

N : 顧客の総数

$D(n(i))$: 顧客 $n(i)$ の需要[kg]

$t'_{l,0}$: トラック l が最後にデポに到着する時刻

t_s : トラックの稼動可能時間の開始時刻

t_e : トラックの稼動可能時間の終了時刻

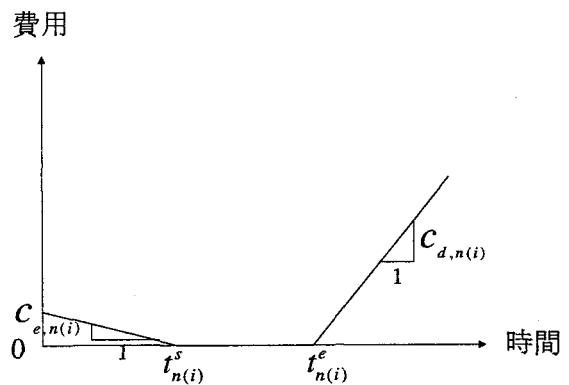
$W_l(\mathbf{x}_l)$: トラック l の積載量 (kg)

$W_{c,l}$: トラック l の積載容量 (kg).

式 (1) は、総費用を最小化することを示しており、右辺第1項はトラックの固定費用、第2項はトラックの運行費用、第3項は顧客の所への早着・遅刻ペナルティを表している。トラックの運行においては、運行時間に関係なく、必要となる固定費用と、運行時間によって変動する運行費用の2種類がある。

固定費用は、車両費、税金、保険などからなり、運行費用は、燃料油脂費、修繕費、タイヤ・チューブ費、人件費、有料道路料金などからなる。ペナルティは、トラックが顧客の所に決められた時間より早く到着して待つ場合の時間費用および遅く到着して支払う遅刻ペナルティからなる。

一般に、図—5 に示すようなペナルティ関数を用いることができる。図において、顧客が望んでいる訪問指定時間帯は、 $(t_{n(i)}^e - t_{n(i)}^s)$ で表される。早着ペナルティとし



図—5 早着・遅刻に対するペナルティ関数

ては、トラックが待つ費用であるので、運行費用を準用することができる。遅刻ペナルティは、実際には顧客、商品および配送の緊急度によって大きく異なる。また、実際にペナルティとして費用を支払っているケースはまれであり、取引停止になったり、次の取引のときに不利になるという形のペナルティが一般的である。したがっ

て遅刻ペナルティを数字で表す場合は、定性的な事柄を何らかの方法で数量化する必要がある。

b) 問題の解法

前節で述べた FVRP-TW は、NP - 困難(Non-deterministic Polynomial hard)²⁷⁾な組み合わせ最適化問題であり、厳密解を求めることは難しい。そこで、ヒューリスティクス(heuristics)手法を用いて近似解を求めざるを得ない。

ヒューリスティクス手法はさまざまなものがあるが、FVRP-TW の解法としてよく用いられるものとして、遺伝的アルゴリズム(Genetic Algorithms: GA)²⁸⁾、シミュレーテッドアニーリング(Simulated Annealing: SA)²⁹⁾、タブーサーチ(Tabu Search: TS)³⁰⁾ などがある。

c) 適用例

前節で述べたモデルおよび動的な交通シミュレーションを組み合わせたモデルを、谷口ら²⁵⁾は、仮想道路ネットワークに適用した。この仮想道路ネットワークは、ノード数 25、リンク数 40 の格子型のネットワークであり、このネットワーク上に、10 社の輸送事業者がそれぞれ一つずつのデポをもち、2 トン、4 トン、10 トンの集配トラックをそれぞれ 4 台ずつ、計 12 台を運行して、5~24 か所の顧客に貨物を配送すると仮定する。なお、デポの位置、顧客の位置は、ランダムに与えられている。各顧客は、配送指定時間の時間帯(タイムウインドウ, time window)をもっている。

このようなケースについて、各輸送事業者が式(1)で定義される総費用を最小化するような配送計画を実行した場合、従来型の配送計画に比べて輸送事業者の総費用が約 35% 減少し、乗用車も含めた総走行時間が約 20%、CO₂排出量が約 3% それぞれ減少することを明らかにした。

このような結果は、高度な配車配送計画を導入することによって、輸送事業者にとってコスト削減の効果があるばかりでなく、渋滞緩和や環境改善にも効果があることを示している。さらに、10 社のうちの 2 社が共同配送を実施した場合には、共同化を導入した企業において、コストが約 20% 減少し、乗用車も含めた総走行時間が約 5% 減少すると推定している。

(3) 時間指定付き確率論的配車配送計画

a) 定式化

前節における配車配送計画においては、道路ネットワークにおける各リンクの所要時間の推定値として、一つの値を用いていた。しかし実際には、所要時間は 1 日、1 週間、1 年のなかにおいて変動するものである。そこで、本節においては、リンク所要時間の変動を考慮した確率論的配車配送計画(Probabilistic Vehicle Routing and scheduling Problem with Time Window: PVRP-TW)を考える。前節の場合と同様に、総費用を

最小化するような定式化を行うと以下のように表現される。

Minimise (最小化)

$$C(t_0, \mathbf{X}) = \sum_{l=1}^m c_{f,l} \cdot \delta_l(\mathbf{x}_l) + \sum_{l=1}^m E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] + \sum_{l=1}^m E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] \quad (11)$$

ここに、

$$E[C_{t,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = c_{t,l} \sum_{i=0}^{N_l} \left\{ \bar{T}(\bar{t}_{l,n(i)}, n(i), n(i+1)) + t_{c,n(i+1)} \right\} \quad (12)$$

$$E[C_{p,l}(t_{l,0}, \mathbf{x}_l)] = \sum_{i=0}^{N_l} \int_0^{\infty} p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l) \left\{ c_{d,n(i)}(t) + c_{e,n(i)}(t) \right\} dt \quad (13)$$

制約条件は、確定論的配車配送計画と同じ。

ただし、

$p_{l,n(i)}(t_{l,0}, t, \mathbf{x}_l)$: デポを時刻 $t_{l,0}$ に出発したトラックが時

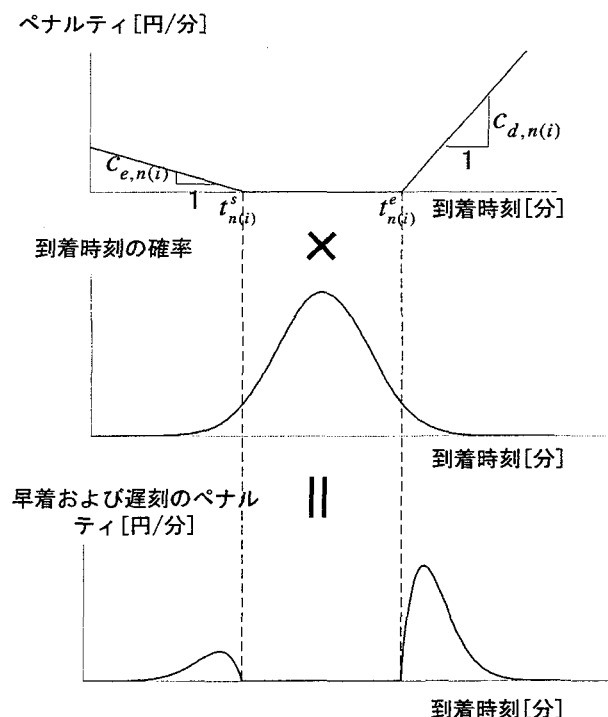
刻 t に顧客 $n(i)$ に到着する確率

他の記号は、式(1)~(10)のただし書きと同じ。

式(11)~(13)によって定式化された問題は、総費用が最小となるように、全トラックの配送ルートへの顧客の割り当ておよび訪問順序を示す $\mathbf{X}$ 、およびトラックがデポを出発する時刻 t_0 を決定する組み合わせ最適化問題である。

前述のように、上記の定式化においては、各顧客における早着・遅刻ペナルティを確率論的に表現している点だが、前節で述べた確定論的配車配送計画と異なる点である。具体的には、式(3)が式(13)に変更されている。式(12)によって表される運行時間についても、確率論的な取り扱いが可能であるが、そうした場合には、モデルがかなり煩雑になるので、ここでは早着・遅刻ペナルティのみを確率論的に取り扱っている。図—6に早着および遅刻ペナルティの考え方を示す。顧客が望む到着指定時間帯は $(t_{n(i)}^e - t_{n(i)}^s)$ で表される。もしトラックが時刻

$t_{n(i)}^s$ より早く顧客の所に到着した場合、指定時刻まで待つ必要がある。この待ち時間に対して、時間に比例した費用がかかると考える。また、トラックが遅刻した場合



図—6 確率論的配車配送計画におけるペナルティ

には、遅刻時間に比例したペナルティが課せられる。このペナルティ関数とトラックの到着時刻の確率を掛け合わせることによって、早着および遅刻ペナルティの確率を計算することができる。

b) 適用例

Taniguchi ら³¹⁾は、前節で定式化した、所要時間の変動を考慮した確率論的配車配送計画モデルを、前節と同様の仮想ネットワークに適用した。この仮想道路ネットワークは、ノード数 25、リンク数 40 の格子型のネットワークであり、このネットワーク上に、10 社の輸送事業者がそれぞれ一つずつのデポをもち、2 トン、4 トン、10 トンの集配トラックをそれぞれ 4 台ずつ、計 12 台を運行して、14~22 か所の顧客に貨物を配送すると仮定する。なお、デポの位置、顧客の位置は、ランダムに与えられている。

配車配送計画モデルと動的交通シミュレーションモデルを組み合わせ、10 回 (10 日間) の繰り返し計算を行う。このとき、日々の交通変動を考慮するため、非混雑な交通状況を表す発生交通量の値を基本として、交通需要を±10%の範囲内でランダムに変動させた。そして、11 回目の計算において、交通状況が急変するような場合も含めて計算ケースを設定し、確率論的配車配送計画モデルと確定論的配車配送計画モデルを、総費用や環境面で比較した。

その結果、交通があまり混まない場合 (平均速度=38 km/h) において、確率論的配車配送計画モデルを用いる場合、確定論的配車配送計画モデルを用いるよりも、

輸送事業者の総費用が約 11% 減少した。また、交通状況が混んでくる (平均速度=30 km/h) と、総費用が約 14% 減少した。

このように、確率論で考えたほうがコストが減少する理由は、図—6 に示すように、遅刻ペナルティを、早着のペナルティよりも高く設定しているために、確率論的配車配送計画においては、コスト最小化の過程において、できるだけ顧客の所に遅刻しないように、早めに到着する計画を策定する傾向がある。

そのために、交通混雑が発生して多少所要時間が増大した場合においても、顧客の指定時間帯内に収まってしまうために、遅刻ペナルティが発生しにくい。したがって、より交通混雑が激しい場合に、確率論的配車配送計画によるコスト削減効果が大きくなる。

また、環境面への影響について、確率論的配車配送計画と確定論的配車配送計画の CO₂ 排出量を比較すると、交通があまり混まない場合 (平均速度=38 km/h) においては、確率論的配車配送計画モデルのほうが、確定論的配車配送計画モデルよりも、6.3% 減少し、交通状況が混んでいる (平均速度=30 km/h) 場合には、6.5% 減少した。

したがって、所要時間の変動を考慮した確率論的配車配送計画モデルを適用したほうが、企業にとってコスト削減のメリットがあるばかりでなく、環境面において、CO₂ 排出量を削減できるという社会的なメリットもあることが明らかになった。

c) モデルの活用に必要な公共セクターの役割

このような高度な配車配送計画を適用して、ロジスティクスを効率化することは、荷主・物流事業者の仕事である。しかし、確率論的配車配送計画を実行するためには、リンク所要時間の履歴データが必要となる。このような交通情報を提供するのには、公共セクターの役割である。したがって、この場合に公共セクターが行うべきシティロジスティクス施策としては、荷主・物流事業者のニーズを満たすような、内容のリンク所要時間の履歴データを適切な価格で提供するような仕組みを作ることである。

また、必要な交通データが自由に安く入手できるという状況ができれば、ここに紹介した手法以外にも様々な有用な手法が開発される可能性がある。

6. 物流ターミナルの最適規模・配置の決定方法

(1) 概説

一般に施設の配置問題は古くから研究されており (たとえば Weber³²⁾, Beckman³³⁾, Drezner³⁴⁾), 主としてオペレーションズリサーチの手法が用いられている。Campbell³⁵⁾ は物流の需要の増大に対応したターミナルの再配置の問題について Continuous Approximation モデルを適用してい

る。Daganzo³⁶⁾はターミナルからの物資配送問題についてシステムズアナリシスの方法論をまとめている。小杉³⁷⁾は物流施設コストと輸送コストの和を最小化するような施設の最適立地モデルを提案している。Noritake ら³⁸⁾は海港の最適配置について Separable Programming を用いた解析を行っている。家田ら³⁹⁾は都市内の集配活動のモデル化において、集配ターミナルの配置行動を組み込んだモデルを構築している。徳永ら⁴⁰⁾は宅配システムにおけるベースへの集荷コストを最小にするセンターの配置と輸送経路を決定するモデルを提案している。また、Takahashi ら⁴¹⁾は、物流拠点の配置に関するシミュレーションモデルを構築している。

これらの研究におけるいくつかのモデルは物流ターミナルの配置とトラックの輸送経路の決定を同時に取り扱っているが、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮して物流ターミナルの最適配置を数理的に決定するモデルになっていない。谷口ら⁴²⁾は、物流ターミナルの配置およびトラックの輸送経路の決定モデルにおいて、道路ネットワークの混雑状況を明示的に考慮し、トラックのみならず乗用車交通も含めて交通配分を行うようなモデルを構築した。以下にその概要を示す。

ここでは、都市の周辺部における高速道路のインターチェンジに直結した物流ターミナルを建設する場合のターミナルの最適規模および配置を同時に決定するモデルを構築する。このモデルは上述のように道路ネットワークの交通条件を明示的に考慮しており、大規模な非線形計画法の問題として定式化される。したがって厳密な最適解を求めることは実際上不可能であり、ここでは遺伝的アルゴリズムを用いて近似解を求める。なおこのモデルの目的関数としては総費用と共に環境面における窒素酸化物 (NOx)、二酸化炭素 (CO₂) の排出量および総走行時間費用についても検討する。

ここで述べるモデルは物流ターミナルの最適規模および配置を同時に決定しようとするものである。このシステムでは貨物流動を都市間と都市内の二つの部分に分けて考える。

物流ターミナルは都市間と都市内の貨物流動の結節点であり、都市周辺の高速道路のインターチェンジに直結して計画されている。

(2) モデルの構造および定式化

このモデルは2段階の最適化問題となっている。上位問題は計画主体の行動を記述するものであり、次の4ケースの目的関数を最小化することを考える；

a) トラックの輸送費と物流ターミナルの施設費の和で表される総費用

b) NOx の総排出量

c) CO₂ の総排出量

d) トラックおよび乗用車の総走行時間費用。

このような目的関数を最小化するような物流ターミナ

ルの規模と配置が同時に決定される。

下位問題は輸送事業者およびトラックの運転手の行動を記述するものであり、交通条件に応じて最適な物流ターミナルおよび輸送経路を選択するような行動を表現している。下位問題においては集配車の交通を道路ネットワークに配分するが、その際に乗用車の交通も考慮している。

すなわち道路ネットワーク内の一般道路上を走行するのは、乗用車と集配車の2モードとし、乗用車のOD交通量と集配車の発生・集中交通量を既知として、利用者均衡配分原則に従って交通量配分を行う。ただし、高速道路上の各リンクの評価値は交通量と交通容量との関係の影響を受けないものとする。また、集配車に対するセントロイドと路線車に対するセントロイド間のOD貨物量は外生的に与えられているものとし、トラックの積載量はすべて同一であるとする。

交通量配分の結果、各物流ターミナルを利用する集配車の台数が決定される。集配車の利用台数を基にして、各物流ターミナルを利用する路線車の台数が求められる。各物流ターミナルの集配車と路線車の利用台数が決まると、バース数(規模)、および物流ターミナル費用が算出可能となる。なおここでは物流ターミナルの規模をトラックバース数で代表させている。

各リンクの所要時間は交通量配分の結果から求まるので、所要時間に単位時間あたりの走行費用を乗ずることにより、集配車・路線車の輸送費用(=走行時間費用)と乗用車の走行時間費用が算定される。また、各リンク上の走行速度を求めることにより、車種ごとのNOx、CO₂排出量が算定される。

このようなモデルを定式化すると以下ようになる。

a) 上位問題 たとえば、総費用最小化の場合の目的関数

Minimise (最小化)

$$f_1(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \sum_{\mathbf{x} \in \mathbf{X}, \mathbf{y} \in \mathbf{Y}} x_i \cdot C_i^{PD} + \sum_a C_i^{PD} \cdot t_a(V_a) V_a^{PD} + \sum_i x_i \cdot C_i^{LH} + \sum_b C_i^{LH} \cdot t_b(V_b) V_b^{LH} \quad (14)$$

ここに、

$\mathbf{x}$: 物流ターミナルの配置パターン

$\mathbf{y}$: 物流ターミナルのバース数

$\mathbf{X}$: 実行可能な $\mathbf{x}$ の集合

$\mathbf{Y}$: 実行可能な $\mathbf{y}$ の集合

x_i : 物流ターミナルが候補地 i に配置されるときは1,

そうでなければ0の0, 1変数

C_i^{PD} : 物流ターミナル i を利用する集配車が物流ターミ

ナルで要する費用[円]

C_i^{LH} : 物流ターミナル i を利用する路線車が物流ターミ

ナルで要する費用[円]

V_a : 一般道路リンク a を走行する車両の台数

V_a^{PD} : 一般道路リンク a を走行する集配車の台数

$t_a(V_a)$: 一般道路リンク a のパフォーマンス関数[時];

所与

V_b^{LH} : 高速道路リンク b を走行する路線車の台数

$t_b(V_b)$: 高速道路リンク b のパフォーマンス関数[時];

所与

b) 下位問題 下位問題は, 集配車と乗用車からなる 2 モードの利用者均衡配分問題に相当し, 目的関数は次のように表される.

Minimise (最小化)

$$\sum_a \int_0^{V_a} t_a(\omega) d\omega - \sum_{od} \int_0^{q_{od}^{PD}} W_{od}(\mu) d\mu \quad (15)$$

Subject to (制約条件)

$$f_{r,od}^{PD} = x_i f_{r,od}^{PD} \quad \forall r, od \quad (16)$$

$$q_{od}^{PD} = \sum_r f_{r,od}^{PD} \quad \forall od \quad (17)$$

$$q_{od}^{CAR} = \sum_r f_{r,od}^{CAR} \quad \forall od \quad (18)$$

$$V_a = \sum_{od} \sum_r \delta_{r,a}^{od} f_{r,od}^{PD} + \sum_{od} \sum_r \delta_{r,a}^{od} f_{r,od}^{CAR} \quad \forall a \quad (19)$$

$$\sum_i q_{oi}^{PD} = O_o \quad \forall o \quad (20)$$

$$\sum_i q_{id}^{PD} = D_d \quad \forall d \quad (21)$$

$$q_{oi}^{PD} \geq 0, q_{id}^{PD} \geq 0, q_{od}^{PD} \geq 0 \quad \forall oi, \forall id, \forall od \quad (22)$$

$$f_{r,od}^{PD} \geq 0 \quad \forall r, od \quad (23)$$

$$f_{r,od}^{CAR} \geq 0 \quad \forall r, od \quad (24)$$

ここに,

$W_{od}(\mu)$: od 間を走行する集配車の需要関数の逆関数

(時). ただし, o, d はノードを表し, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.; 所与

q_{od}^{PD} : 物流ターミナル～集配車に対するセントロイド間

を走行する集配車の OD 交通量. [台]ただし, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.

$f_{r,od}^{PD}$: 集配車に対するセントロイド～物流ターミナルを

結ぶパス r 上を走行する集配車の台数.ただし, o または d のいずれかが物流ターミナルに相当する.

q_{od}^{CAR} : 乗用車の OD 交通量 (台); 所与

$f_{r,od}^{CAR}$: od 間を結ぶパス r を走行する乗用車の台数

$\delta_{r,a}^{od}$: od 間を結ぶパス r がリンク a を通るとき 1, そう

でなければ 0 の 0, 1 変数

O_o : 集配車に対するセントロイド o の集配車の発生交通

量 (台); 所与

D_d : 集配車に対するセントロイド d の集配車の集中交

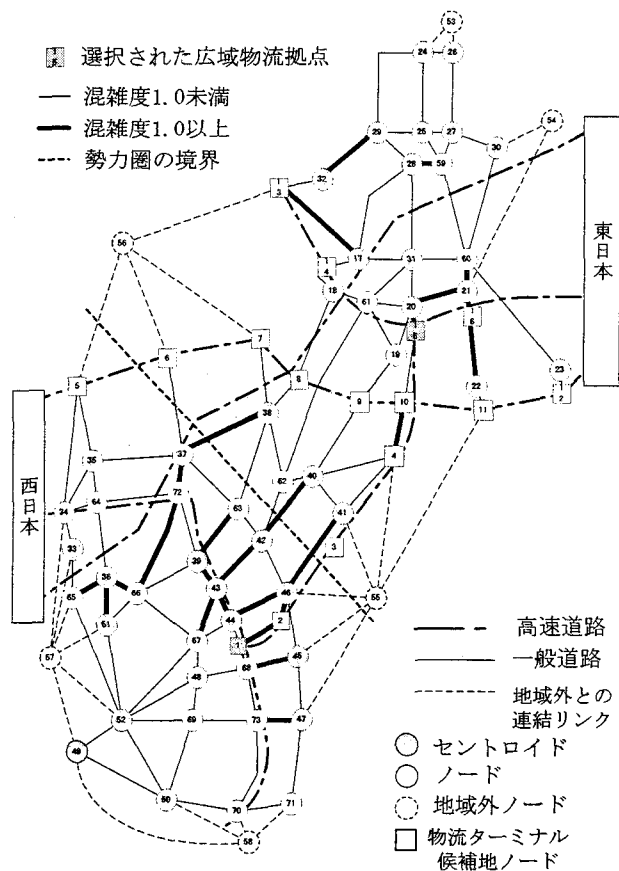
通量 (台); 所与

(3) 適用例

上述のモデルを, 京都・大阪地域 (以下では京阪地域と称する) の将来道路ネットワークに適用し, 物流ターミナルの最適配置を求めた. ⁴³⁾

図一7に, 目的関数が総物流費用の場合の計算結果を示す. この場合には, 最適解として No.1 と No.15 の二つの物流ターミナルが選択された. この2地点は, いずれも高速道路のジャンクションにあたり, しかも大阪・京都という物資需要の大きい都市に近い地点である. 従って, 大需要地に近いということと, 高速道路へのアクセスがよいということが, 物流ターミナルの立地の重要な要件であるといえる.

図一7において多くの一般道路, 特に大阪周辺の道路が混雑しており, そのために輸送コストが高くなる. 総物流費用最小化の場合, 輸送費とターミナル施設費のトレードオフで最適解が決定されるが, この場合には地価の高さよりも輸送費の高さのほうが大きく影響し, 大都市に近い地点の候補地が最適解として選ばれたものと思われる.



図一七 選択された物流ターミナルおよび各リンクの混雑度（目的関数：総物流費用）

7. 将来への展望

（1）総合物流施策大綱とシティロジスティクス

1997年に、わが国はじめての総合的な物流政策、「総合物流施策大綱」⁴⁴⁾が立案された。総合物流施策大綱においては、わが国の産業の国際競争力を高めるための物流の効率化と環境にやさしい物流が目標として掲げられた。

また、政府が総合物流施策大綱のフォローアップを毎年行っていることと、表一1に示すような数値目標を設けたことは特筆すべきことである。

表一1 総合物流施策大綱の数値目標

都市内物流	積載効率50% ピーク時旅行速度25km/時（3大都市圏人口集中地区）
地域間物流	内貿ターミナルへの陸上輸送半日 往復圏人口カバー率90%
国際物流	入港からコンテナヤードを出るまでの日数を2日に短縮 輸出入コンテナ陸上輸送費用を30%削減
標準化	パレタイズ比率90%

シティロジスティクスの立場からみると、総合物流施策大綱が存在し、そのフォローアップが行われることは、たいへん力強い支援になる。しかしながら、シティロジスティクスは、本来、各都市において行われるべきものであり、総合物流施策大綱の枠組みの中で、各都市が独自の目標をたて、施策を実施すべきである。

（2）効率的で環境にやさしいシティロジスティクスを

めざして

a) ロジスティクスの効率化と環境改善

ロジスティクスを効率化できれば、多くの場合、環境負荷も軽減される。たとえば、高度情報システムを活用し、車両の実車率、積載率を高めることができれば、当該物流事業者は競争上有利となるが、それに対応してトラックの走行台キロが削減され環境負荷も減るので、社会的にも好ましいといえる。

しかし、ある企業がロジスティクスを効率化できたとしても、必ずしも環境負荷が軽減されない場合もある。たとえば配送拠点を統合し、総物流コスト削減に成功したとしても、トラックの走行台キロが増加する場合もある。そのような場合は、共同化の推進あるいは、企業の合併によるさらなる効率化によって、最終的には環境負荷も軽減されることになる。

したがって、シティロジスティクス施策の実施にあたっては、各企業の競争条件下におけるロジスティクスの効率化を前提としながら、地域の環境改善を図る方向を探ることが重要である。

b) ITSを活用したシティロジスティクス

今後、ITSの発達・普及を基礎としてシティロジスティクスが実現できるものと期待される。たとえば、トラックの積載率規制は、アムステルダムやコペンハーゲンにおいて実験的に導入されているに過ぎないが、ITSの本格的な導入によって、容易に実施できるようになる。

また、交通情報の履歴データがITSを用いて容易に入手できるようになれば、それに基づいて配車配送計画を効率化することができるようになる。

ITSのなかの高度情報システムの機能として、次の3つがある。

- 1) 車両と交通マネジメントセンターの情報通信を行う
- 2) リアルタイムの交通情報を提供する
- 3) 車両の走行履歴を記録し、加工して活用できるようにする

これらの機能のうち、3番目の機能は、今まであまり注目されてこなかった。しかし、シティロジスティクスにおいては、この機能が重要となる。

トラック輸送においては、一般に、1つの輸送事業者

が数十～数百台のトラックの運行管理を行っている。したがって、たとえば所要時間の履歴データを入手した場合に、これを配車配送計画に活用し、必要トラック台数が100台であったとして、これを90台に削減することが可能である。この点、乗用車交通においては、個々のドライバーが別々であるので、1台の車両を効率化して0.9台にすることはできない。

さらに駐車・荷捌き施設の予約システムの導入は、配送システムの合理化に貢献するであろう。

このように、ITSの実用化は、シティロジスティクスの推進に必要不可欠であり、ITSを活用することによって、物流事業者にとって効率的であり、かつ交通渋滞の緩和や環境改善に役立つシステムを構築することができる。

シティロジスティクスにおいて、商品の流通量が増加しても、トラックの走行台キロやCO₂の排出量を減少させることは可能であるという考え方がある。これは、一見むずかしそうに見えるが、ITSが実現し、交通情報・工事情報などの情報が自由に安いコストで入手できるようになれば、実現可能であると思われる。

さらに、ITSに関連して、荷主や物流事業者が開発する独自の物流システムの基礎となる、「共通情報プラットフォーム」が重要である。共通情報プラットフォームは、各企業の個別システムの基本仕様を与えるとともに、個別システム間を結びつけるものである。また、交通情報、工事情報、気象情報、路面情報などをリアルタイムに提供するとともに、トラックの所要時間情報などを収集・蓄積し、履歴データを各企業にフィードバックする機能も有する。たとえば配車配送計画においては、この履歴データを活用してコスト削減に結びつけることができる。

さらに、共通情報プラットフォームは、今後サイバースペースで行われる商取引（eコマース）と、実際のリアルスペースで行われる物流を融合させる働きをするものと期待される。eコマースと物流がリアルタイムに融合するようになることが、今後のロジスティクスの大きな特徴になると考えられるが、それは、ITSなどの発展によってはじめて可能になることである。

c) 新物流システムの開発

新物流システムの必要性は多くの人々に認識されていると思われる。

たとえば東京に導入することが提案されている地下物流システムは、約300kmの延長をもち、電気駆動による自動運転、貨物の自動積み卸しの機能をもつシステムである。⁴⁶⁾ このシステムは、渋滞・環境・エネルギー・労働力不足の問題解決に貢献し、経済的にも十分な効果が見込まれる。

しかし、実際に都市内のシステムとして実現するためには、かなりの時間が必要であろう。その大きな理由は、いままでに提案されている新物流システムが、従来のシ

ステムとはかなり異なる革新的な先端システムであり、大きな初期投資が必要になるためである。

この点を克服するために、小さな地区に導入することから始めて、徐々に延伸することも可能であり、都市の再開発と一体となって建設できるようになれば実現の可能性が高まる。

また、新物流システムの採算性の検討結果によると⁴⁶⁾、インフラ部分について公的な補助がないと十分な採算がとれないようである。この点についても、地下鉄や新交通システムと同程度の補助を考える必要があるだろう。

また、新物流システムの建設は、シティロジスティクス施策のなかでも重要な位置をしめており、共同化やトラックの流入規制などの施策と一緒に行うことが有効であると考えられる。すなわち、ある地区へのトラックの流入規制を行うときの代替手段として新物流システムを建設できれば、ロジスティクスの効率化と環境の改善を同時になしとげることができる。

交通渋滞・環境・エネルギー・労働力不足などの都市内物流が直面する問題を抜本的に解決するためには、どのような形になるにせよ、新物流システムの導入が必要となってくる。したがって、21世紀のできるだけ早い時点で新物流システムが実現することを期待したい。

d) 各利害関係者が協議する場としてのプラットフォーム

シティロジスティクス施策を立案し、実施するにあたって、各利害関係者が協議する場としてのプラットフォームが重要な役割を果たす。

ドイツのカッセル市における共同配送を実施するにあたって、荷主、物流事業者、小売店、市の担当者、大学教授によるラウンドテーブル会議を頻繁に開催して調整を行った事が報告されている⁵⁾。

また、オランダにおいては、全国レベルおよび市レベルにおいて、荷主・物流事業者・行政が物流施策について協議するプラットフォームが設置されている。

このような協議の場が必要となる理由は、ロジスティクスがきわめて複雑な活動であり、行政が施策を検討する際に、各利害関係者の相反する目的をある程度達成できるように調整しなければならないためである。また、調整のためには、ITSなどの革新的な技術を活用するとともに、公共セクターによる経済的規制の緩和や交通規制の強化、補助金の交付等の施策も検討すべき重要項目となる。

しかしながら、最も大事なことは、各利害関係者の協調、パートナーシップである。その意味で、競争しながら協調するというCo-opetition⁴⁷⁾（協調争（筆者の試訳））の精神がシティロジスティクスの根幹とならなければならない。

シティロジスティクスにおいては、前述の共通情報システムのプラットフォームと、利害関係者の協議の場と

してプラットフォームがあり、この2つのプラットフォームが重要である。

e) シティロジスティクス研究の推進—シティロジスティクスのモデル化—

シティロジスティクスの施策を実施した場合の影響を事前に予測し、評価するために、シティロジスティクスのモデル化が必要である。前節までに述べたように、現在のところ、トラックの最適配車配送計画や物流ターミナルの最適配置などの問題について、さまざまなモデルが開発されている。

しかしながら、これらのモデル化の研究はまだ始まったばかりであり、実際の都市においてシティロジスティクスの施策を事前に評価するために用いられた例は少ない。したがって、今後種々のモデルを実際に適用して、その結果を評価し、モデルを改良することが重要である。

シティロジスティクスについて、今後次のような新しいモデルの開発が望まれる。

- 1) 複数の利害関係者の行動を取り入れたモデル
- 2) 交通モデルと商品の流通モデルを統合したモデル
- 3) リアルタイムな情報に対応できる動的なモデル
- 4) インターモーダル物流を記述できるモデル

第1に、いままでに開発されているシティロジスティクスに関するモデルは、荷主・物流事業者・住民・行政というすべての利害関係者の1者あるいは2者の関係者を取り扱っているものが多い。これら4者すべての行動および相互連関を記述するような multi-agent models は、開発されつつあるが⁴⁸⁾、まだ定性的なモデルにとどまっており、十分とはいえない。今後は、定量的かつさまざまな条件下で用いることができる multi-agent models の開発が望まれる。

また、シティロジスティクスに関するモデルは、複数の利害関係者を取り扱うので、多目的にならざるをえない。この点において、山田ら⁴⁹⁾が構築している多目的計画法を適用したモデルが有力となるであろう。

第2に、いままでのシティロジスティクスに関するモデルのなかで、交通ネットワークの解析に重点を置いたモデルにおいては、商品の調達・生産・在庫・販売・リサイクルという物流本来の流れが十分に反映されていない場合が多い。また、逆に商品の調達・生産・在庫・販売・リサイクルという物の流れをモデル化している場合には、交通ネットワークの解析にあまり注意をはらっていない場合が多い。したがって、道路交通と商品の流れをうまく統合したモデルの開発が必要である。

第3に、近年の ITS の発達によって、リアルタイムの交通情報や取引に関する情報が、通信ネットワークを通じて物流事業者やトラックの運転手に、瞬時に伝えられるようになってきた。そのような状況においては、トラックの配車配送計画や運行計画に、動的なモデルを適用する必要がある。リアルタイムの情報を活用した動的な

シティロジスティクスに関するモデルは、まだあまり開発が進んでいないのが現状であり、今後このようなモデルの開発が望まれる。

第4に、従来は、シティロジスティクスについてはほとんど道路輸送のみを取り扱ってきた。それは、現実には道路輸送が都市内物流の大半を担っていることと対応している。しかし、今後は、道路のみではなく、鉄道・船舶・航空機あるいは新物流システムによる輸送を含めたインターモーダル輸送に関するモデルが、必要となるであろう。

8. 終わりに

筆者は、21世紀において、シティロジスティクスが都市のマネージメント手法として、ますます重要になるだろうと考えている。その理由は、人々の意識のなかに、効率を重視しながらも交通混雑や環境にも配慮しなければいけないという気持ちが強くなると予想されたためである。また、21世紀の社会においてはますます競争が激しくなるであろうが、そうなればなるほど、競争者とも協調してゆかなければならないということが明らかになるものと思われる。

そのような人々の意識の変化を基礎として、ITSの実用化、eコマースの進展などの技術的な革新が加わることによって、シティロジスティクスは確かな都市マネージメント手法として、重要な位置を占めるものと予想される。

都市が経済的に発展するとともに快適な生活ができるための基本的な要素として、シティロジスティクスの果たすべき役割は大きい。21世紀において、シティロジスティクスによって効率的で環境にやさしい都市内物流システムが構築され、都市がより一層魅力的になることを希望してやまない。

謝辞：本論文に述べた研究を遂行するにあたり、貴重な助言をいただきました京都大学大学院工学研究科飯田恭敬教授に深く感謝の意を表します。また、シティロジスティクスの研究を共同で実施してきた関西大学工学部の山田忠史講師、一橋大学商学部の根本敏則教授ならびに関西大学工学部の故則武通彦教授の貴重な意見に対し心より感謝の意を表します。海外においては、The University of Melbourne の Russell G. Thompson 博士、Delft University of Technology の Rob van der Heijden 教授、Ron van Duin 博士、Johan Visser 博士との有意義な交流に対し深謝いたします。さらに、研究にご協力いただきました建設省をはじめとする関係機関の各位および京都大学の学生諸君に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 谷口栄一, 根本敏則: シティロジスティクス—効率的で環境にやさしい都市物流計画論, 森北出版, 2001.
- 2) Taniguchi, E., R.G. Thompson, T. Yamada, J.H.R. van Duin: *City Logistics---Network Modelling and Intelligent Transport Systems*, Pergamon, 2001.
- 3) Ruske, W. : City Logistics - Solutions for urban commercial transport by cooperative operation management. *OECD Seminar on Advanced Road Transport Technologies*, Omiya, Japan, 1994.
- 4) 谷口栄一: 地域ロジスティクス, 交通工学, Vol.30, No.6, pp.3-6, 1995.
- 5) Kohler, U.: An innovating concept for city-logistics. *Proceedings 4th World Congress on on Intelligent Transport Systems*, Berlin, CD-ROM, 1997.
- 6) Visser, J., van A. Binsbergen and T. Nemoto: Urban freight transport policy and planning. In: E. Taniguchi and R.G. Thompson (Eds.) *City logistics I*. Institute of Systems Science Research, pp.39-69, 1999.
- 7) 圓川隆夫: トータルロジスティクス—生販物統合化のキーポイント, 工業調査会, 1995.
- 8) Bowersox, D.J. and D.J. Closs: *Logistical management*. McGraw-Hill, New York, 1996.
- 9) 苦瀬博仁: 付加価値創造のロジスティクス, 税務経理協会, 1999.
- 10) Taniguchi, E., R.G. Thompson and T. Yamada: Modelling city logistics. In: E. Taniguchi and R.G. Thompson (Eds.) *City logistics I*. Institute of Systems Science Research, pp.3-37, 1999.
- 11) 京阪神都市圏交通計画協議会: 京阪神都市圏物流流動調査, 1996.
- 12) Taniguchi, E., S. Kawakatsu and H. Tsuji: New co-operative system using electric vans for urban freight transport, *Urban transport and the Environment for the 21st Century VI*, WIT Press, 2000.
- 13) 谷口栄一, 根本敏則: 欧州におけるシティロジスティクスの動向, 道路交通経済, No.86, pp.70-74, 1999.
- 14) 桑原雅夫: やさしい交通シミュレーション 2. 広域ネットワークシミュレーション, 交通工学, Vol.32, No.5, pp.25-31, 1997.
- 15) 尾崎晴男: やさしい交通シミュレーション 3. 交通流のミクロシミュレーション, 交通工学, Vol.32, No.6, pp.61-68, 1997.
- 16) Steenbrink, P.A. : *Optimization in transportation network*. Wiley, New York, 1974.
- 17) Harker, P.T. : The state of the art in the predictive analysis of freight transport systems. *Transport Reviews*, 5 (2), 143-164, 1985.
- 18) 土木学会: 交通ネットワークの均衡分析, 第11章 空間経済とネットワーク均衡分析, 1998.
- 19) Golden, B.L. and A.A. Assad (eds.): *Vehicle routing: Methods and studies*, Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland, New York, 1988.
- 20) Ogden, K.W. : *Urban goods movements: A guide to policy and planning*, Ashgate, 1992.
- 21) Taniguchi, E. and R.E.C.M. van der Heijden: An evaluation methodology for city logistics. *Transport Reviews*, 20(1), 65-90, 2000.
- 22) Kraus, S.: Estimating the length of trunk tours for environmental and cost evaluation of distribution systems. In B. Fleishmann et al. (eds.) *Advances in distribution logistics*, Springer, Berlin, pp. 319-339, 1998.
- 23) Lawler, E. L., J. K. Lenstra, A. H. G. Rinnooy Kan and D. B. Shmoys (eds.), *The travelling salesman problem---A guided tour of combinatorial optimization*, Wiley, New York, 1985.
- 24) 山本芳嗣, 久保幹雄: 巡回セールスマン問題への招待, 朝倉書店, 1997.
- 25) 谷口栄一, 山田忠史, 細川貴志: 都市内集配トラックの配車配送計画の高度化・共同化による道路交通への影響分析, 土木学会論文集, No.625/IV-44, pp.149-159, 1999.
- 26) Desrosiers, Y., Y. Dumas, M.M. Solomon and F. Soumis: Time constrained routing and scheduling, In M.O. Ball, T.L. Magnanti, C.L. Monma and G.L. Nemhauser (eds.) *Network routing*, North-Holland, Amsterdam, 1995.
- 27) Reeves, C.R.編, モダンヒューリスティクス—組み合わせ最適化の先端手法, 日刊工業新聞社, 1997.
- 28) Thangiah, S. R., Nygard, K. E. and Juell, P. L.: GIDEON: a genetic algorithm system for vehicle routing with time windows, *Seventh IEEE International Conference on Artificial Intelligence Applications*, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, pp.322-328, 1991.
- 29) Kokubugata, H., Itoyama, H. and Kawashima, H.: Vehicle routing methods for city logistics operations, *IFAC/IFIP/IFORS Symposium on Transportation Systems*, Chania, Greece, eds. M. Papageorgiou & A. Pouliezios, pp.755-760, 1997.
- 30) Potvin, J.-Y., Kervahut, T., Garcia, B.-L. and Rousseau, J.-M.: The vehicle routing problem with time windows; Part I: tabu search, *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 8, pp.158-164, 1996.
- 31) Taniguchi, E., T. Yamada and Y. Kakimoto: Probabilistic vehicle routing and scheduling with variable travel times. *9th IFAC Symposium Control in Transportation Systems 2000*, 2000.
- 32) Weber, A.: *On the location of industries (translation of Uber den Standort der Industrie, 1909)* Univ. of Chicago Press, 1929.

- 33) Beckman, M.: *Location theory*, Random House, 1968.
- 34) Drezner, Z.: *Facility location - A survey of applications and methods*, Springer, 1995
- 35) Campbell, J.: Locating transportation terminals to serve an expanding demand. *Transpn. Res.* Vol.24B(3), pp. 173-193, 1990.
- 36) Daganzo, C.F.: *Logistics systems analysis*. Springer, 1996.
- 37) 小杉雅敬：物流施設最適立地問題に関する研究，オペレーションズ・リサーチ No.8, pp.39-45, 1983.
- 38) Noritake, M. and Kimura, S.: Optimum allocation and size of seaports. *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng. ASCE* Vol. 116(2) pp. 287-299, 1990.
- 39) 家田仁，佐野可志，小林信司：積合わせトラック物流における都市内集配活動のモデル化とその推定，土木計画学研究・論文集 No.11, pp.215-222, 1993.
- 40) 徳永幸之，岡田龍二，須田熙：宅配輸送におけるセンター配置及び輸送経路決定モデル，土木計画学研究・論文集 No.12 pp.519-525, 1995.
- 41) Takahashi, Y. and T. Hyodo: A simulation study on the effects of physical distribution facilities in the Tokyo Metropolitan region, In: E. Taniguchi and R.G. Thompson (Eds.) *City logistics I*. Institute of Systems Science Research, pp.163-173, 1999.
- 42) 谷口栄一，則武通彦，山田忠史，泉谷透：物流ターミナルの最適規模および配置の決定法に関する研究，土木学会論文集，No.583，IV-38，pp.71-81，1998.
- 43) Taniguchi, E., M. Noritake, T. Yamada, and T. Izumitani: Optimal size and location planning of public logistics terminals. *Transportation Research*, 35E(3), 207-222, 1999.
- 44) 日本政府：総合物流施策大綱，1997.
- 45) 谷口栄一：新しい地下物流システム，交通工学，Vol.26 増刊号，pp.79-87，1991.
- 46) 大石龍太郎，谷口栄一：新物流システムの整備効果と採算性に関する考察，第16回交通工学研究発表会論文報告集，pp.241-244，1996.
- 47) Brandenburger, A.M. and B.J. Nalebuff: *Co-opetition*, Doubleday, 1996.
- 48) Duin, J.H.R. van, P.W.G. Bots and M.J.W. van Twist: Decision Support for Multi-Stakeholder Logistics, *Proceedings TRAIL conference*, Scheveningen, December 1998.
- 49) 山田忠史，則武通彦，谷口栄一，多賀慎：物流ターミナルの最適配置計画への多目的計画法の適用，土木学会論文集，No.632，IV-45，pp.41-50，1999

シティロジスティクス*

谷口栄一**

本論文は，都市において，環境，渋滞，エネルギー消費などを考慮しながら物流の効率化を図るための方策として，シティロジスティクスの考え方を提案している．ここでは，シティロジスティクスに関する基本的な概念，シティロジスティクスの施策およびその例について述べている．また，シティロジスティクス施策を評価するために，集配トラックの配車配送計画，物流ターミナルの最適配置などについてモデル化の手法を解説している．さらに，都市物流計画に関する将来展望を示している．

City Logistics*

By Eiichi Taniguchi**

This paper proposes an idea of city logistics for optimising urban freight transport by taking into account the environment, the congestion and energy consumption. The basic concepts of city logistics as well as some measures of city logistics with examples are presented. The paper also describes modelling the vehicle routing and scheduling of pickup/delivery trucks and the optimal location of logistics terminals for evaluating the city logistics schemes. Moreover, the future perspectives concerning urban freight transport planning are presented.
