

ロジスティクスに関する考察

錦 織 昭 峰

(2004年5月10日原稿受付) / (2004年5月13日原稿受理)

Considerations on Logistics

Akimine NISHIKORI

摘 要

近年、工場における生産過程においては、多品種少量生産を効率的に行うことができる生産方式が採用されるようになってきた。これに伴い、原材料や部品の輸送活動もまた生産ラインに合わせた同期化輸送が要求されている。一方、流過程程においても、消費者ニーズの多様化・個性化、量から質への変化、購入量の少量化などから、小売店への少量多頻度迅速配送が要求されるようになってきた。こうした同期化輸送と少量多頻度迅速配送を多数の企業が行うようになった結果、搬送積載率が低下して輸送コストが企業経営を圧迫するようになってきた。本論文では、企業活動における、施設配置、輸送・配送計画等において、従来研究されていた問題点に関して、異なった観点から考察している。すなわち、施設配置に関しては、倉庫の容量として複数の規模から一つを選択することを考慮している。配送計画に関しては、巡回セールスマン問題の定式化を明確に表している。

1. 序 論

物流が「第三の利潤」あるいは業務革新の「宝の山」と言われて久しい [18]。生産現場の省力化・合理化が一段落し、また、営業・販売部門の情報化が進行した現在、企業経営の高度化・統合化を図る次なる業務革新の場として、経営者が調達物流や製品物流に熱い眼差しを向けるのは自然の理である。

最近では「物流」[4,5,6,7]と言わずに、「ロジスティクス」[1,8,9]と言うようである。ロジスティクスと言い替えることで、単に「モノの運搬」と包装・荷役・保管等の付帯業務だけでなく、原料・資材の調達から生産、流通、販売に至る一連のプロセスを統合的にマネジメントする業務全般を指すことになった。いずれにしても「モノの空間的位置と時間的位置を変えることで付加価値を高める」活動がロジスティクスであり、物流はその中で「モノの流れと蓄え」を企画・設計し、実施、統制する狭義のロジスティクス活動を指す。こうした背景から、材料の調達から顧客への商品の納入まで、更にはリサイクルまでを範囲として、もの流れの全体最適化を図ろう

というロジスティクス、企業経営手法という位置づけから捉えようとするサプライチェーン・マネジメント [2,3,10,11] は近年注目されている [8]。

企業活動においては「消費者サービス」の旗印のもとで多品種・多頻度・少量・短納期納品を実現することによって、他社との差別化を図ろうとする企業独自の経営戦略がロジスティクスに大きく作用しており、物流部門のウエイトが高い企業では利益確保のために物流費用の削減が不可欠である [17]。そこで物流センターの新設やそれに伴うロジスティクス・ネットワークの改善が行われている。

本論文では、ロジスティクスを考察する際に、考慮すべき様々な問題点を各章毎に取り扱っている。以下に、各章の概要を述べる。

第2章では、配送計画を考察している [13,14,15,16,17,18,19,20,26]。実際業務における輸送・配送計画は、使用車種の制限や、配送時刻の指定、交通規制といった、様々な制約が複雑に関係しているので、配送先があらかじめ決まっている場合は、定時・定ルート配送を採用し、積荷量の平準化を行って配送効率を上げる方法をとっている。また、配送先があらかじめ決まっていな場合には、地域ごとに配送車を割当てておいて、不規則に発生する配送業務に対応している企業がほとんどである。この種の問題は、配送計画問題と呼ばれており、最小化するコスト及び考慮する条件によって様々なバリエーションが考えられる。

第3章では、輸送計画と施設配置を考察している [21,22,23,24,25]。物流費用はその性質の違いから、物流施設コストと輸送・配送コストに大きく分類できる [22]。ここで前者は物流施設を集約統合化したほうがコストを低減でき、それに対して後者は物流施設を多く分散したほうがコストを低減できるという相反する関係にある。最適な物流施設計画はその両者の和を最小化するものでなければならない。この内の一方のコストを最小化することは比較的簡単であるが、両者の和を最小化することは極めて難しい。

第4章では、本考察のまとめを記述している。

2. 配送計画

2.1 はじめに

配送 [13,14] とは、最終の顧客に必要な品物を、指定された日時までに安全・確実に届ける輸送活動である。輸送と配送の違いについて述べると、企業の物流活動をロジスティクス・ネットワークにおけるノードの活動とリンクの活動に分けた場合に、その最終のリンクの活動が配送であり、そのほかのリンクの活動は輸送である。すなわち、メーカーが工場から（一般にデポと呼ばれる）配送センターを経由して顧客に商品を届ける場合に、工場と配送センター間は輸送であり、配送センターから顧客までは配送と区別されている。

輸送・配送機関の種類としては、鉄道、自動車、船舶、航空、などが挙げられる。しかしながら、本考察で対象とするのは、輸送ルートが多数考えられる都市部における車輦による配送であり、しかもセンターを中心として複数台の車輦ですべての配送先に配送を行う場合を考察する。都市内で、各車輦がセンターを中心として巡回配送を行う場合に、実際には、所有車種、積載制限、配送時間制限、道路状況といった様々な条件がつく。主要な条件を以下に挙げておく [14]。

装備については、所有車輦、所有台数、運転手の人数、

顧客については、配送センターの位置、顧客の位置、配送指定時刻、

配送については、配送距離、配送時間、配送物量、荷役時間、運行コスト、道路状況については、道路の混雑状況、交通規制等がある。

ところで、特に、都市部における車輛による配送は、積載量の制限、配送時間の制限といった様々な制約によって、多数の配送先すべてを一台の車輛で巡回するのは不可能である。複数台の車輛で配送を行う場合には、企業はコストを削減するために、車輛の所有台数をできるだけ減らして一台当たりの運送効率をできるだけ上げたいであろう。

本考察では、複数車輛の巡回路を生成しなければならない場合の配送計画を取り扱う。この問題は組合せ最適化問題に属しており、考えられるすべての巡回路を調べて最適解を求めることは不可能である。

また配送活動の問題点として、物流システムの複雑化や輸送量の増大により、輸送機関の中でも機動性を誇るトラックへの依存度が拡大した結果、交通量が増大して、交通渋滞、排気ガスによる大気汚染、騒音の増加といった、様々な社会問題も引き起こされている。これらの問題を解決するためには、交通網の整備や輸送車輛の改良といったハードウェア面での対策では不十分であり、効率の良い輸送・配送計画を立てるといったソフトウェア面での対策が必要である。

2.2 解法

積載制限と稼働制限を持つ車輛を複数台使用して、センターからすべての配送先へ配送を行う巡回路を生成する場合において、決定すべき要素としては、次のことが挙げられる。

- (a) 配送に使用する車輛台数を決定する。
- (b) 各車輛がどの配送先へ配送を行うかを決定する。
- (c) 各車輛がどのような経路で配送を行うかを決定する。

このとき、(a)において、使用する車輛の積載制限が所与であるとしても、その積載制限が最大になるように各車輛を割当てると1台あたりの巡回経路が長くなり、稼働制限を違反してしまうし、(b)の各車輛への配送先の割当て方によって、(c)の配送ルートに影響して、車輛台数や総配送距離も変わってくるので、これらは密接に関連しているといえる。しかしながら、使用する車輛台数と各車輛がどの配送先へ配送するかが決まらなると、配送経路が決定できないという問題がある。

車輛台数と配送先の割当てと配送経路を一元的に決定する解法としては、セービング法が有名である [1]。この方法は、その単純さと若干の実用性から、配送計画の代名詞にもなっている近似解法である。アルゴリズムは、ある基準で計算した評価値により、良さそうなものから配送先として採用していく方法である。このアルゴリズムは、配送先がセンターを中心に円形状に広がっている場合は有効であるけれども、配送先が一様に分布している場合は、巡回路に隣接する配送先が多数あるので効率の良い巡回路を得ることは困難になる。これは、二点間の短縮距離のみを基準にしてルートを決めているからであり、この意味で、必ずしも得られた巡回路が効率の良い配送とはいえない。

本考察では、まず最初に、一般化割当て問題 [1] を解いて、運搬車輛毎に配送する顧客を決定する。次に、巡回セールスマン問題を解いて、顧客へ配送する順番を決定する。このアルゴリズムをステップで表すと、次のようになる。

ステップ1：費用が最小となるような顧客の割り当てを、一般化割当問題として設定する。設定した一般化割当問題を分枝限定法を用いて解く。

ステップ2：各運搬車の配送先である各顧客間の所用時間を求める。次に、各運搬車毎に選んだ配送先を最短経路で配送するルートを、巡回セールスマン問題を解いて求める。

ステップ3：各運搬車の配送時間を計算して求める。もし配送時間が制限時間内ならば終了する。さもなければ、次のステップへ。

ステップ4：制限時間の超えた運搬車の顧客を、配送時間の短い運搬車に割り当てる。ステップ2へ戻る。

2.3. 巡回セールスマン問題

巡回セールスマン問題 [27] は、ある都市を出発して、他のすべての都市を1度ずつ訪れて、最初の都市に戻ってこなければならない。この問題は、セールスマンは自分が巡る総距離が最小になるように訪れる都市の順番を決定することである。いま、都市の総数を n とする。任意の都市 i, j 間の距離を d_{ij} ($i \neq j$) とし、 x_{ij} ($i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j$) を次式で定義する。

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{セールスマンが都市 } i \text{ から } j \text{ へ移動する} \\ 0, & \text{セールスマンが都市 } i \text{ から } j \text{ へは移動しない} \end{cases} \quad (1)$$

このとき、本問題を以下のように定式化することができる。

$$\text{目的関数} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n d_{ij} x_{ij} \rightarrow \text{最小} \quad (2)$$

$$\text{制約条件} \quad \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n x_{ij} = 1, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n x_{ij} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$u_i - u_j + (n-1) x_{ij} \leq n-2, \quad i, j = 2, 3, \dots, n; i \neq j \quad (5)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ あるいは } 1, \quad i, j = 1, 2, \dots, n; i \neq j \quad (6)$$

ここで u_i ($i = 2, 3, \dots, n$) は実数値をとる変数である。(3)式は、セールスマンが各都市へ1度だけ、他の都市の一つから行くことを保証している。(4)式は、セールスマンが各都市を1度だけ出発して、他の都市の一つに行くことを保証している。

3. 輸送計画と施設配置

3.1 はじめに

本章では、まず最初に、輸送計画及び施設配置問題の定式化を示している。ここで施設とは、倉庫、配送センター、工場等が考えられる。次に、この定式化を、中国地方5県内の各都市への施設配置に適用している。最後に、施設の在庫量に関して、従来から知られている経済発注量 (EOQ 公式) の導出を考察している。

3.2 施設配置問題の定式化

某社では、経営活動を拡大するために、倉庫の賃借を行う計画を立てている [12]。賃借の候補となる倉庫は m ヶ所あり、第 i 地点の倉庫 W_i ($i = 1, 2, \dots, m$) の月間処理能力 (倉庫の容量) は a_{ik} (トン/月) ($k = 1, 2, 3$) であるとして、最大で3段階の中から選べるとする。ここで

$$a_{i1} \leq a_{i2} \leq a_{i3}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

である。その経費 (賃借料や維持費などの毎月の固定費) は d_{ik} (千円/月) である。また、消費地 D_j ($j = 1, 2, \dots, n$) の需要量 b_j (トン/月)、 W_i から D_j へのトン当りの輸送費 c_{ij} (千円) が与えられたとして、すべての需要を満たして、毎月の総費用 (倉庫経費と輸送費の和) を最小にする倉庫配置と輸送計画を求めることを考える。

0 - 1 整数変数 y_{ik} を、 $i = 1, 2, \dots, m$; $k = 1, 2, 3$ に対して、以下のように導入する。

$$y_{ik} = \begin{cases} 1, & i \text{ 地点において月間処理能力 } k \text{ 段階目を賃借するとき} \\ 0, & \text{そうでないとき} \end{cases} \quad (8)$$

W_i から D_j への月間輸送量を x_{ij} (トン) とし、 i 地点においての月間固定費は k 段階の中から選ぶので、月間総費用は

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^3 d_{ik} y_{ik} \quad (9)$$

と表すことができる。ここで、 y_{ik} ($k = 1, 2, 3$) はたかだか一つが1になるので、次式が必要である。

$$\sum_{k=1}^3 y_{ik} \leq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

また、 i 地点での k 番目の処理能力は a_{ik} だから、 x_{ij} は

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} \leq \sum_{k=1}^3 a_{ik} y_{ik}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

と表わせる。一方、 x_{ij} が D_j での需要量を満たすためには

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j, \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (12)$$

が成り立つ必要がある。

以上の事から、この問題は、(10)~(14)式の下で目的関数(9)式を最小化する混合整数計画問題となる。

$$x_{ij} \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$y_{ij} = 0 \text{ あるいは } 1, \quad i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, 3 \quad (14)$$

この問題は「施設配置問題」、または、「固定費付き輸送問題」と呼ばれている。特に

$$\sum_{j=1}^n b_j \leq a_{i1}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

が成り立つ場合、すなわち各倉庫の処理能力が十分大きく、1ヶ所でも倉庫を賃借すればすべての需要を賄うことができる場合には、「能力制約なし施設配置問題」とよぶ。これに対して、一般の場合を「能力制約つき施設配置問題」とよぶことがある。また、 a_{ik} , b_j , d_{ik} などはすべて正、 c_{ij} は非負であるとし、問題が実行可能解をもつように

$$\sum_{i=1}^m a_{i3} \geq \sum_{j=1}^n b_j, \quad (16)$$

が成り立っていることを仮定する。

3.3 中国5県都市への施設配置

本研究 [28] では、中国地方に本社を構える企業が企業活動を拡大し、中国地方内の各消費地に商品を配送するために、配送拠点として各都市に賃借する倉庫のコストと消費地への輸送費の最適化を考察している。すなわち、消費地であり、かつ、倉庫賃借の候補地である中国5県内の49都市の需要を満足させて、更に、輸送費と経費（倉庫の賃借料や維持費等）の和を最小にする問題を考える。ここで、決定すべき要素としては次のことが挙げられる。

- (a) 賃借する倉庫の位置の決定
- (b) 賃借する倉庫の数の決定
- (c) 各倉庫から、どこの消費地へ、どれだけの量を供給するかの決定

このとき、(a)においては、賃借する倉庫の位置により、消費地への輸送費が変動する。(b)においては、賃借する倉庫の数が多すぎると経費が増加するし、また、少なすぎると消費地への輸送費が増加する。(c)においては、(a)と(b)の他に、倉庫の処理能力、賃借する倉庫と消費地との距離などと密接に関係している。

本研究では、国道と県道等の一般道を用いた問題と、一般道・高速道併用した問題の二種類を対象としている。一般道を用いた問題は、賃借する倉庫と消費地との距離を、ガソリン1リット

ルで10km走る車輛が荷物を運搬するときに使用する燃料費を輸送費としている。一般道・高速道併用の問題は、高速道を使える場合には必ず高速道を用いるとして、賃借する倉庫と消費地との距離（高速道と一般道の距離）を、1リットルで10km走る車輛が荷物を運搬するときに使用する燃料費と、使用した高速道区間の高速料金を加えた金額を輸送費として問題を作成している。数理計画システム「XPRESS-MP」[29]を使用することによって、近似最適値を求めている。

3.4 在庫の経済発注量の導出

倉庫の在庫管理において、どれだけの量を1度にまとめて発注すべきかを決定する、最も一般的な概念として、経済発注量 EOQ (Economic Order Quantity) がある。この発注量を Q^* とすると、 Q^* の値は次式によって決定される [1]。

$$Q^* = \sqrt{\frac{2DA}{CI}} \quad (17)$$

ここで、

D : (年間の) 総需要量、

A : 1回当たりの発注費、

C : 商品の単価、

I : (年間の) 在庫維持費率 (保管費率)、

である。この Q^* の値は、次式のような年間の総費用を表す関数 $f(Q)$ の最小値である。

$$f(Q) = \frac{1}{2}CIQ + \frac{DA}{Q} \quad (18)$$

ここで、 $CI \times (Q/2)$ は (年間の) 在庫維持費用、 $A \times (D/Q)$ は (年間の) 発注費用である。

微分法を使わないで、(17)式の EOQ 公式を以下に証明する。一般に、任意の二つの非負の実数 X, Y に対して $(\sqrt{X} - \sqrt{Y})^2 \geq 0$ より

$$X + Y \geq 2\sqrt{XY} \quad (X \geq 0, Y \geq 0) \quad (19)$$

である。(これは相加平均と相乗平均の関係式である。) 従って、(18)式より

$$f(Q) \geq 2\sqrt{\frac{CIQ}{2} \times \frac{DA}{Q}} = \sqrt{2CIDA} \quad (20)$$

ここで等号が成り立つのは

$$\frac{CIQ}{2} = \frac{DA}{Q} \quad (21)$$

のときである。すなわち、 Q の値が(17)式のときに、 $f(Q)$ は最小値 $\sqrt{2CIDA}$ をとる。

4. 結 論

近年、工場における生産過程においては、多品種少量生産を効率的に行うことができるような JIT (Just in Time) 生産方式が採用されるようになってきた。これに伴い、原材料や部品の輸送活動もまた生産ラインに合わせた同期化輸送が要求されている。一方、流通過程においても、消費者ニーズの多様化・個性化、量から質への変化、購入量の少量化などから、小売店への少量多頻度迅速配送が要求されるようになってきた。こうした同期化輸送と少量多頻度迅速配送を多数の企業が行うようになった結果、搬送積載率が低下して輸送コストが企業経営を圧迫するようになってきた。こうした背景から、今日では、需要予測、生産スケジューリング、施設配置、輸送・配送計画等をきめ細かに行うことが重要視されている。

本論文では、このような様々な場面において、従来研究されていた問題点を異なった観点から考察している。第2章では、配送計画に関して、一般化割当問題及び巡回セールスマン問題の両方を解くアルゴリズムを提案している。また後者の問題において、都市数が $(n+1)$ 個ではなくて、 n 個の場合の定式化を明確に示している。第3章では、開設する施設が倉庫である場合に、倉庫容量が複数の中から一つ選択できることを考慮している。更に、この定式化を基にして、中国地方内の各消費地へ商品を配送するために、配送拠点とする都市に対して、賃借する倉庫を開設する都市の位置及びその容量を決定している。また、倉庫の在庫管理における経済発注量の公式を、微分法を使わずに求めている。

また、*CALS (Continuous Acquisition and Life-cycle Support)* (デジタル化された情報を組織間で共有して、企業活動全般の合理化、効率化を図ろうとするコンセプト) が重要となってきている [30]。これにより、全体として合理的で無駄のない企業社会、いわゆる、統合化された企業体 (*Enterprise Integration*) が実現されることになる。

参 考 文 献

- [1] 久保幹雄「経営科学のニューフロンティア 8 ロジスティクス工学」、朝倉書店、2001年。
- [2] 川上隆之「SCM最適化ツールSAP APOの紹介」、応用数理、第13巻、第1号、pp.30-39、2003年。
- [3] 久保幹雄「数理計画の理論と実装 サプライ・チェーン最適化システムの統合と連携について」、オペレーションズ・リサーチ、第48巻、第10号、pp.753-760、2003年。
- [4] 美濃順亮、山口裕人「物流インフラストラクチュアと数理計画」、オペレーションズ・リサーチ、第35巻、第5号、pp.280-285、1990年。
- [5] 宝崎隆祐、藤井進「物流システムにおけるスケジューリング」、システム/制御/情報、第37巻、第6号、pp.344-349、1993年。
- [6] 中川和正「国内分散工場向け調達物流体制の構築」、オペレーションズ・リサーチ、第42巻、第2号、pp.87-91、1997年。
- [7] 石田啓一「物流システム構築のための技法」、計測と制御、第37巻、第3号、pp.162-165、1998年。
- [8] 都島功、明石吉三「ロジスティクスの輸送路における計画・運用技術の現状と展望」、シミュレーション、第18巻、第3号、pp.18-23、1999年。
- [9] 栗山聡、細田高道、吉本一穂「ロジスティクスにおける輸送効率化手法とその事例」、オペ

- レーションズ・リサーチ、第42巻、第5号、pp.309-312、1997年。
- [10] 森田浩、Joe ZHU 「サプライチェーンの効率性の測定と最適化のためのモデル」、システム制御情報学会論文誌、第16巻、第8号、pp.388-396、2003年。
- [11] 西竜志、小西正躬 他 「単一工程生産システムのサプライチェーン計画問題に対する分散協調型最適化法」、システム制御情報学会論文誌、第16巻、第12号、pp.628-636、2003年。
- [12] 今野浩、鈴木久敏編 「整数計画法と組合せ最適化」、日科技連出版社、pp.210-235、1982年。
- [13] 中小企業庁取引流通課 編 「多頻度小口配送 - 現状と合理化の方向」、同友館、1992年。
- [14] 佐藤良明 「物流・配送センター 設置と効率化のポイント」、日刊工業新聞社、1993年。
- [15] 久保幹雄、毛利裕昭 「配送計画支援システムMETROとその適用事例」、オペレーションズ・リサーチ、第41巻、第8号、pp.429-435、1996年。
- [16] 山下慶子、浅野孝夫 「配送計画問題に対する近似アルゴリズムの実際的な性能評価」、情報処理学会アルゴリズム研究会、No.72-5、pp.33-40、2000年。
- [17] 山口裕人 「配送スケジューリングシステムの開発」、オペレーションズ・リサーチ、第39巻、第3号、pp.125-130、1994年。
- [18] 鈴木久敏 「特集 配送のOR 特集にあたって」、オペレーションズ・リサーチ、第39巻、第3号、p.124、1994年。
- [19] 久保貞也、栗山仙之助、能勢豊一 「配送車両の容量を考慮した相互供給システムの配送方式」、日本経営工学会論文誌、第50巻、第6号、pp.424-430、2000年。
- [20] 澤本潤 他 「配送計画問題における再計画処理方式の提案」、電気学会論文誌C分冊、第122巻、第5号、pp.832-842、2002年。
- [21] 久保幹雄、春日井博 「確率的巡回セールスマン問題と施設配置問題」、日本経営工学会誌、第45巻、第4号、pp.299-307、1994年。
- [22] 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、第28巻、第8号、pp.379-385、1983年。
- [23] 高田英幸、浅野孝夫 「施設配置問題に対する近似アルゴリズムの実際的な性能評価」、情報処理学会アルゴリズム研究会、No.72-6、pp.41-48、2000年。
- [24] 大山達雄 「高度医療機器配置に関する地域間格差分析と最適配置モデル分析」、オペレーションズ・リサーチ、第44巻、第7号、pp.361-364、1999年。
- [25] 岡田和義、佐藤康治、久保幹雄 「自動車部品の混載輸送における輸送計画モデル」、オペレーションズ・リサーチ、第42巻、第5号、pp.321-324、1997年。
- [26] Leslie E. Trotter、大山達雄 「数理計画の理論と実装 容量制約付き車輛経路選択問題の解法」、オペレーションズ・リサーチ、第48巻、第12号、pp.924-928、2003年。
- [27] 真鍋龍太郎 訳 「整数計画法」、培風館、1976年。
- [28] 新本修史 「中国5県都市の施設配置に関する研究」、日本経営工学会第26回卒業論文発表会予稿集 (広島会場)、2000年。
- [29] 株式会社ソーティス 「XPRESS-MP リファレンスマニュアル Release 8」、1994年。
- [30] 後藤龍男 「CALs : 21世紀における企業情報システムの国際標準確立と企業統合に向けて」、情報処理、第36巻、第1号、pp.1-7、1995年。