

## VMIへの招待

久保 幹雄 東京商船大学 流通情報工学

宮本 裕一郎 東京商船大学 流通情報工学

村上 賢哉 富士電機(株)

### 1. はじめに

オペレーションズ・リサーチにおいて、最も古くかつ最も多くの研究が成されたモデルといたら皆さんは何を思い浮かべますか? 筆者らは最近ロジスティクス関連の仕事をしているためか、まず思いつくのは在庫モデルと配送計画モデルです。在庫モデルや配送計画モデルは個別でも大変多くの研究があるのですが、ここで紹介するのはそれらを合わせたモデルです。実は、最近ブームになっているサプライ・チェーン・マネジメントにおける最新の手法であるベンダー管理在庫(Vender Managed Inventory:略称 VMI)は、在庫モデルと配送計画モデルを融合したモデルを基礎としています。在庫モデルも配送計画モデルもそれぞれが星の数ほどのバリエーションをもつので、これらの融合モデルは、研究のネタに困っている研究者にとっては、大変魅力的にうつるかもしれません。(なぜって、融合したモデルのバリエーションは星の数の二乗個にもなるので、飯の種には当分(おそらく一生!)困らないからです。)しかし、「こんな応用もあるかもしれない、あればいいな、そのうちあるかもしれない、...」という安易な動機付けだけで、モデルのバリエーションを増やすのは賢明な方法とは言えません。このような安易なモデルの設定が、実務におけるオペレーションズ・リサーチの力を弱らせ、評判を落としてきた要因であると推測されるからです。星の数の二乗個にもおよぶバリエーションの中から有意義なモデルを見いだすための唯一の方法は、実際問題に対処するためのモデルを設計することです。ここでは、筆者らが直面した自動販売機に対するジュースの補充を念頭に置いた在庫・配送計画モデルとその解法について、背景となるVMIとあわせてご紹介しようと思います。

くぼ みきお, 東京商船大学 流通情報工学

〒135-8533 江東区越中島2-1-6

みやもと ゆういちろう 東京商船大学 流通情報工学

むらかみ けんや 富士電機(株)

受理 2001. 6. 4

### 2. ベンダー管理在庫(VMI)とは

通常、企業における費用の削減というと、リストラや賃金の引き下げ、もしくは納入先へのディスカウントの要求などを想像すると思いますが、サプライ・チェーンにおける費用削減はちょっと違います。サプライ・チェーンにおける費用削減は、システム全体の無駄を省くことによって、誰も損をすることなしに費用の削減を行うのです。その代表選手ともいえるのがベンダー管理在庫(VMI)です。

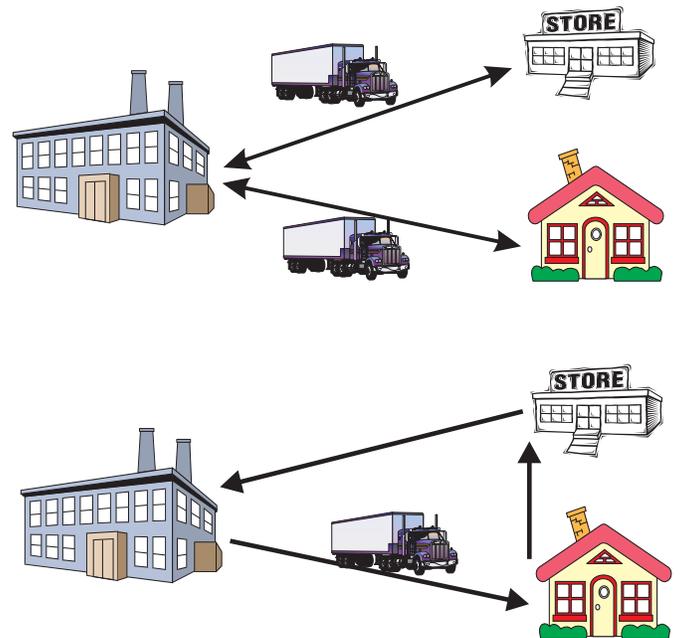


図 1: VMIの参考図

あるメーカー(これをベンダー(供給者)とよびます)が同じ地域にある2件の小売店に直接商品を供給しているものとします。旧来の方式では、小売店の店主が自分のお店の商品在庫を調べて、それがなくなりそうになるとメーカーに発注をかけていました(今でも、そうしているところがほとんどだと思います)。それぞれの小売店は相手側の発注に関する情報をもっていませんから、2件ともばらばらに発注をかけることとなります。1件目の小売店は、毎週月曜日に商品を運んでもらうように発注をかけ、別の小売店は、毎

週水曜日に商品を運んでもらうように発注をかけていて、それぞれが発注する量は、メーカーのもっているトラックの半分にも満たないものとします。このとき、メーカーは週に2回、工場から小売店のある地域に向かってトラックを出さなければなりません。工場が小売店から遠いところにあるときには、トラックの輸送費用はばかになりません。また、トラックの積載効率も50%に満たないので、この方式はとても非効率的です(図1上図)。

VMI方式は、最新の情報機器のたすけを借りて、小売店側の在庫の情報をメーカー(ベンダー)側が把握できることを前提とします。これは、残り在庫量を把握するためのセンサーを搭載した棚を小売店に置かせてもらったり、小売店のPOS(Point Of Sales)情報をメーカー側に定期的に伝えたりすることによって容易に達成できます。VMI方式では、メーカーが小売店の在庫をみて、在庫切れを起こさないように、独自の判断で商品の補充を行います。小売店側としては、面倒な発注作業をしなくてすむので通信費や事務処理費の節約になりますし、メーカー側としては、2件の小売店への輸送を同じ曜日に行うことによって、輸送費用を大幅に削減できます(図1下図)。すなわち、メーカー側も得をし、小売店側も得をするので、Win-Winの関係を構築したことになります。

筆者らが直面した自動販売機への補充は、VMI方式の典型例です。実は、最近の自動販売機には、携帯電話のような情報機器が取り付けられており、それを用いて売り上げや釣り銭の情報をいつでも好きなときに得ることができます。売り上げ情報を用いることによって、配送センター側では、過去の商品の売れ行きや残り在庫量を把握できます。これらの情報をもとに、効率的な配送経路と補充のタイミングを決めることが、在庫・配送計画問題の目的となります。

### 3. VMIの効果

簡単な封筒の裏の計算でVMIの効果をみてみましょう。今までの物流方式では、お客さん(上の例では小売店)が自分の好きなときに荷物を持ってくるように指定することができました。配送にかかる費用は商品の価格に組み込まれているため無料と考えます。また、古典的な在庫モデルである経済発注量モデルのように昔は発注に伴う費用がかかりましたが、最近ではインターネットを使えば発注費用は無料と考えることができます。したがって、当然1日あたりの使用分だ

けを注文することが、お客さんにとって(唯一の費用である在庫保管費用を最小化するという意味で)最適になります。しかし、これは、物流の観点からは最悪の結果になります。

面積が $A$ の円領域にランダムに分布している $n$ 人のお客さんが毎日発注をし、さらに簡単のためトラックの積載容量や稼働時間上限などは無視できると仮定します。巡回セールスマン問題に対する漸近的解析として有名なBHH定理を使うと、 $n$ がとても大きいときには、 $T$ 日ではおおよそ $\beta T\sqrt{An}$ だけの距離をトラックが走ることとなります。「巡回セールスマン問題って何?」という読者は[2]、もしくはOR学会誌のバックナンバー[1]をご参照下さい。ここで、 $\beta$ は巡回セールスマン定数とよばれる定数で、実験的に約0.72であることが知られています。このように、物流費用はタダとお客さんに思わせることはマーケティング的には効果があることですが、その結果として街中トラックが溢れかえり、渋滞や環境悪化などを引き起こす要因になってしまうのです。

今度は、お客さんに「物流費はタダではないですよ!」ということを理解していただき、 $T$ 日に1度の配達にしてもらったとします。 $T$ 日というのは商品の性質やお客さんの在庫保管能力によって決まる定数だと思ってください。たとえば、自動販売機へのジュースの補充の場合には、 $T$ はおおよそ7日くらいです。この場合には、お客さんがバラバラに注文を出し、それに毎日応じて配達をするので、1日あたりのお客さんの注文件数は(大数の法則より)だいたい $n/T$ 件となります。したがって、 $T$ 日の間にトラックが移動する距離は、 $\beta T\sqrt{An/T} = \beta\sqrt{AnT}$ となります。これは、お客さんの都合に合わせて毎日運んでいる場合の $\sqrt{T}$ 分の1となります。

ここまでの議論では、お客さんが好きなときに配達してもらおうという便利さを犠牲にして、そのかわりに配送費用を $\sqrt{T}$ 分の1に削減したことになります。これは、顧客サービスと配送費用が単純なトレード・オフ関係にあるという古い考え方に習ったもので、お客さん(荷主)のわがまま(過剰なサービス要求)が渋滞や配送費用上昇の原因である!という短絡的な結論に行き着きます。しかし、大抵の場合は、力関係で強いお客さん(荷主)の都合によって、再び毎日運ぶ旧来の方式に戻ってしまうのが関の山でしょう。

VMI方式を使うとさらなる削減が可能ただけでな

く、双方が得をすることができます。両者とも得をすることが、関係を長続きさせるためのコツなのです。円領域に住んでいる定常な需要のスピードをもつお客さんにVMI方式を適用してみましょう。お客さんにとっては在庫がきれなければ良いのですから、いつ運んできても良いはずで、いま、円領域を  $1/T$  に均等に分割し(図2)、毎日分割された領域内のお客さんに対してだけ配達をすることにします。 $T$  日たつと再び最初の領域に戻って配達をするので、すべてのお客さんは  $T$  日に1度配達されることになり、在庫切れは起きないこととなります。この場合には、1日あたりのお客さんの総数は  $n/T$ 、配達領域の面積は  $A/T$  ですから、 $T$  日の間にトラックが移動する距離は、 $\beta T \sqrt{A/T \cdot n/T} = \beta \sqrt{An}$  になります。これは、毎日運んでいる場合の  $T$  分の1、 $T$  日に1度配達した場合の  $\sqrt{T}$  分の1になります。

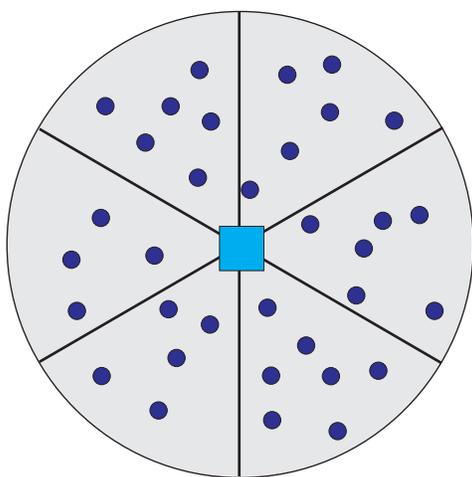


図2: 分割法の参考図 ( $T = 6$  の場合)

実際には、お客さんの需要のスピードは一定でないので、お客さんの在庫を監視することが必要になります。もちろん、上のような領域を分割してそれを順繰りに処理するといった簡便法も使うことができません。以下では、筆者らが自動販売機への補充計画のコア・システムとして作成したモデルとその解法について簡単に紹介したいと思います。

#### 4. モデルの構築

ここで紹介する自動販売機の補充モデルは、配送計画モデルと在庫モデルが基礎になります。まず、配送計画モデルと在庫モデルについて、実際問題への適用を中心に、簡単に触れておきましょう。

配送計画モデルでは、お客さんとデポの概念が重要です。我々の場合には、お客さんとは自動販売機が置いてある場所、もしくは自動販売機そのものを指します。対象とするお客さんの数は、ターゲットとする業界での最大の数を見込んでおきます。そうしないと、より大規模な問題をもつユーザーさんに使ってもらおうと思ったときに、再度一から作り直す羽目になる危険性があるからです。ここでは、お客さんの総数を1デポあたり5000件程度と想定することにします。デポとは、物流の分野の用語で、トラックが待機している場所を指します。朝、デポを出発したトラックが、何件かのお客さんを訪問して商品を補充し、夕方再びデポに戻ってきます。このときに、なるべく効率的なトラックの道順を求める問題が配送計画モデルです(図3)。

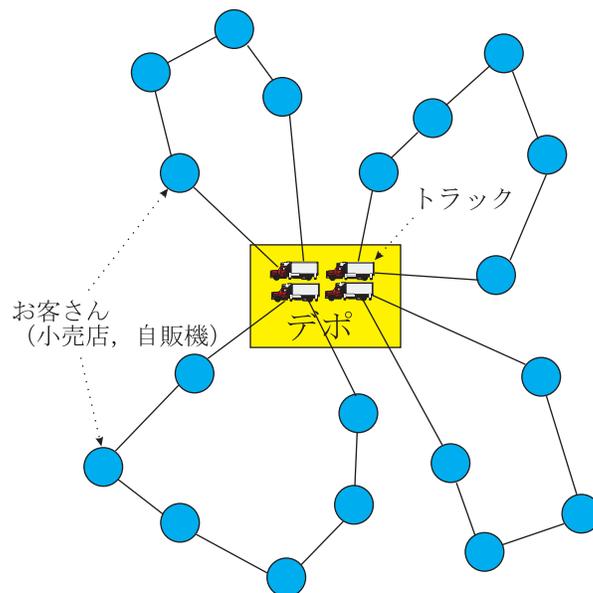


図3: 配送計画モデルの概念図

「なんだ、配送計画問題というのは巡回セールスマン問題のことなんだ」と思った読者もいると思います。実は、実際の配送計画問題は巡回セールスマン問題の百倍くらい(あくまで主観です。実測値ではありません。)難しい問題です。まず、トラックに積載できる重量には上限があります。これを超えると、カーブが曲がりづらくて危険なだけでなく、バレるとトラック屋さんは営業停止になってしまいます。もちろん、重量だけでなく容量も超えてはいけません(お中元の配達車でよく見かけるように、助手席に積むという手もありますが、運転手の視界が妨げられるのでやめて欲し

い裏技です)。

さらに、日本国内では、大きなトラックでは入ることのできない道路や橋がたくさんあります。自動販売機への補充の場合には、道にトラックを置いて歩いて運んでいけば良いのですが、一般には決められた荷さばき場で荷を降ろさなければなりません。日本(特に都市部)では、荷さばき場のスペースをあまりとれないので、お客さんごとに入れるトラックの大きさが制限されることが多々あります。これは、トラックの種類とお客さん間の相性の制約としてモデル上では処理されます。

時間枠も問題を難しくする一因です。ここで時間枠とは、お客さんを訪問することができる時間が、何時何分から何時何分までの間でなければならないことを表す制約です。指定された開始時刻よりも前に到着したトラックは、どこかで待っていなければなりません。よく、道路上で用もないのに待機しているトラックを見かけると思いますが、あれはサボっているのではなく、時間待ちをしているのです(もちろん単にサボっている場合もありますが)。海外の文献では、時間枠がない配送計画に関する論文が主流でした。しかし、日本の事例では、ほとんどの場合に時間枠が必要になります。まだまだ他にも条件がたくさんあり、それらの条件が適用する現場によって千差万別なのです。これが配送計画問題が巡回セールスマン問題の百倍くらい難しいと言った理由なのです。そのため、実際の配送計画のためのシステムには、単にベンチマーク問題例が上手に解けるというだけでなく(これは必要条件です)、様々な付加条件が追加されても決してコケないアルゴリズムが必要になるのです。

一方、在庫モデルでは、商品の概念が重要になります。我々の自動販売機の補充問題においては、商品は缶やボトルのジュースの他、コーヒーの粉や紙コップなどを表します。簡単のために缶ジュースを想定してください。缶ジュースの種類は数百あり、季節ごとにその品揃えが大きく変わります。また、新商品も続々登場し、そして消えていきます。そのため、古典的な在庫モデルにありがちな、商品の需要(のスピード)は一定であるとか、商品の需要は定常な確率分布にしたがう、といったモデルは使いものになりません。さらに、各日の需要量は、ライバル会社のキャンペーン、天候(特に気温)、さらには近所で運動会や人気歌手のコンサートなどの行事が行われるか否かなど、様々

な要因によって変動します。多くの在庫モデルでは、需要の確率分布を与えることによってモデル化を試みますが、我々は、確率的な変動より、日ごとの確定的な変動の方が、モデルの妥当性に与える影響がはるかに大きいと判断しました。休日のオフィスや大学内でのジュースの需要量を想像してみてください。おそらく確定的に0のはずです。我々は、数ある在庫モデルの仮定から、計画期間を有限の離散値(単位は日で30日間)とし、計画期間内の各日における各商品の需要量が確定値として与えられているという単純なものを採用しました。30日先まで考えて計画をたてるのは、季節による需要量の変化を表現するためです。日本は季節が急激に変わります。肌寒い冬から暖かい小春日和はあつという間にやってきます。それに つれて、ホットコーヒーの売り上げは急速に減少し、冷たいコーラの売れ行きが伸びるでしょう。これを考慮した補充計画をたてるためには、日ごとの各商品の需要量を与えるモデルは、大変都合がよいのです。

さて、本題の在庫・配送計画問題に入りましょう。問題の目的は、むこう30日分の計画を、商品の在庫をきらさないように、かつ在庫費用やトラックの移動費用があまりかからないように補充することです。我々は、商品の品切れは絶対にしてはいけないという制約を加えるのではなく、品切れしたときには、品切れ量に応じたペナルティ費用を支払うものとしてモデル化しました。これは、土曜、日曜に配送をしないという条件下では、どうしても品切れを余儀なくされるお客さんが出てきてしまう可能性があるためです。実務における最適化システムを設計する際には、「解がありません!」とって停止してしまうことはできるだけ避ける必要があります。理論家にとっては、実行不能であるというのは立派な答えなのですが、実務家にとっては、どのお客さんの、どの商品が、どれだけ品切れしなければならないか、という答えの方がはるかに有意義だからです。これは、品切れのペナルティ費用の推定が困難で、かつ設定が面倒だという不利益を補って余りあるものです。

同様に在庫費用の推定も、一般には困難です。しかし、ホットコーヒーの劣化とコーラやオレンジジュースなどの劣化のスピードが大きく異なることをモデル化するためには、在庫費用を商品ごとに設定できるという自由度が必須になるのです。しばしば、オペレーションズ・リサーチの専門家の間では、データが正確

に推定できるもの以外のパラメータをモデルに組み込むことはタブー視されてきました。しかし、これはモデル化の自由度を極端に狭めてしまう危険性があります。実務における最適化は、データを色々変えることによってシミュレーションを行う、いわゆる What If 分析のために使われる場合がほとんどです。したがって、直接の推定が難しいデータでも、データを色々変えることによって許容な解を模索できる最適化モデルが、実務的には必要とされているのです。

また、実際には計画期間は無限と考えなければなりません。上で述べたような 30 日分の計画をたてて、その計画通りに 30 日間配送を行うというのは、あまり現実的ではありません。自動販売機の売り上げ情報は、刻々と新しいものに置き換えられるので、新しく入ってきた情報をもとに再計画をたてることによって、より良い解を得ることができるからです。我々はローリング・ホライズン方式とよばれる静的な問題を用いて動的な問題を近似的に解決するための常套手段を採用することにしました。ローリング・ホライズン方式では、30 日分の計画をたてたら、その通りに運ぶのは翌日だけです。明日になったら新しい情報をもとに、2 日目から 31 日目の計画を（再び静的な在庫・配送計画問題を解くことによって）たてます。このように、30 日分の計画の最初の 1 日だけを順次用いて実施することによって、目先の情報に偏らない計画ができる訳です。

## 5. 解法

在庫・配送計画問題に対するアルゴリズムについても簡単に触れておきましょう。在庫・配送計画問題に対する過去の研究もたくさんあります。我々のプロジェクトも、従来の研究を入念に調べることから始めました。

Air Products & Chemical における実際問題を見事に解決した Bell ら [4] の研究では、1 台のトラックが経由する顧客数が少ない（多くて 3 件程度）ことから、必要なルートをあらかじめ生成しておく方法を採用しています。最近の事例に基づく Campbell ら [5] の研究でも、Bell らと同様に 1 台のトラックが経由する顧客数が少ないので、ルートを生成しておく方法を用いています。このように、ルートを生成しておくことによって「巡回」の部分の困難さを消してしまい、通常の数理計画アプローチに帰着させることは、配送計画問題の解法の常套手段ですが、残念ながら我々の直

面する自動販売機への補充問題には用いることはできませんでした（1 台のトラックが 1 日に 15 件以上の自動販売機を訪問することもあるからです）。他にも、3. 節で述べたような、単純な領域の分割に基づくヒューリスティクスの漸近的な振る舞いを調べることを主目的とした、やや理論的な研究もたくさんあります（サーベイ論文として [6] があります）。しかし、やはり実務的な観点からは、非現実的な仮定が多すぎ、採用することができませんでした。

我々が用いた在庫・配送計画問題のためのアルゴリズムは、決して目新しいものではありません。まず、問題の構造を分析するために、自動販売機が 1 台の場合を考えましょう。実は、自動販売機（お客さん）ごとの日別の配送固定費用が与えられたときに、最適な補充日を決定する問題は、古典的な動的ロットサイズ決定モデルである Wagner-Whitin モデル [7] と類似の問題になります。これは、動的計画法で（多項式時間内に）解くことができます。この動的計画アルゴリズムを順次用いることによって、在庫・配送計画問題の初期解を得るための挿入法が設計できます。さらに、初期解を改善するために、配送計画では定評のある Cross-opt 近傍を用いたローカルサーチを構築しました。

我々が直面した問題例は、非常に大規模なものです。1 つの配送センターから商品を運ぶ自動販売機の数は数千におよび、販売している商品の数は数百、計画期間の数は 30 日です。メモリ量の少ないコンピュータでは、データをオンメモリで保管することさえ困難です。したがって、最適化の計算を高速に実施するためには、適切なデータ構造やアルゴリズムの選択が必要になります。しばしば、大規模な実際問題を解く際に、すぐに目新しいメタヒューリスティクスを適用してしまう例をみかけますが、往々にして失敗に終わるようです。本事例のように大規模な組合せ最適化問題に対するアルゴリズムを設計する際に重要なことは、問題の構造に対する洞察と、問題にあったアルゴリズムおよびデータ構造を選択することなのです。我々が採用したのは、基本データ構造として  $K$ -d 木、ローカルサーチの近傍としては Cross-opt 近傍、ローカルサーチの高速化のための don't look bit など、配送計画や巡回セールスマン問題を例としてその効果が実証されたものばかりです。

## 6. 効果

昔のオペレーションズ・リサーチの失敗例として、手法を導入したのはいいが、削減された費用をはるかに上回る費用がかかってしまった、ということをよく耳にします。これは、最近のサプライ・チェーン関連のソフトウェアでも同様です。紙と鉛筆だけで管理でき、かつ削減費用も大したことない問題に、大規模かつ高価なソフトウェアを導入しても、元が取れるはずがありません。オペレーションズ・リサーチを実際問題に適用する際に最も重要なことは、それが論文になるか否かではなく、それを解くことによって現実にどれだけのインパクトを与えるかなのです。

自動販売機補充用の在庫・配送計画が実務的にどれだけインパクトがあるかを、再び封筒の裏の計算を用いて推定してみましょう。まず、日本の清涼飲料水の自動販売機の総数は約 265 万台です。また、補充に伴う費用は 1 回あたり約 7000 円程度と推定されています。釣り銭の回収や清掃などで、少なくとも週に 1 回は補充を行うので、年間の配送費用は、 $265 \text{ 万} \times 7000 \text{ 円} \times 365/7$  で約 1 兆円となります。実際問題例に対して予備的なシミュレーションをしたところ、システムの導入によって、トラック数と配送費用を 6 割程度に、品切れ回数を 5 分の 1 程度に減らせることが確認されました。したがって、日本国内だけをマーケットとした場合でも、年間 4000 億円以上の費用削減が期待され、さらにはトラックの走行距離の減少による環境の改善や渋滞の緩和を考えれば、十分に元が取れると考えられます。もちろん、導入費用が削減費用を上回ることには決まてないでしょう。

## 7. おわりに

ここでご紹介した自動販売機への補充を念頭に置いた在庫・配送計画問題のためのアルゴリズムは、他の分野にも拡張できるものと思われます。たとえば、ガスボンベの配送は、ボンベの残量の配送側での把握が義務化された現在では、比較的容易に適用できるものと思われます。また、在庫費用や品切れ費用が明確に定義できない分野（たとえば家庭ゴミの収集）も、訪問する頻度に制約を与えた多期間の配送計画問題として定式化できるので、我々が考えたアルゴリズムが適用できると考えられます。

いままでは、オペレーションズ・リサーチをサプライ・チェーン（ロジスティクス）の現実問題に適用し

ようとすると、データの収集に多大な時間と労力がかかってしまいました。しかし、最近の情報技術の進歩によって、全社的な情報のやりとりやデータの蓄積を行うための仕組み（いわゆる処理的情報技術）が急速に普及してきています。そのため、サプライ・チェーンにおけるオペレーションズ・リサーチ（これは解析的情報技術に位置づけられます）の適用は、以前とくらべると格段に敷居が下がってきています [3]。今後は、多くの研究者がこの分野に興味をもち、たくさん成功事例が出てくることを期待します。

## 参考文献

- [1] 久保幹雄. 巡回セールスマン問題への招待 (I),(II),(III). オペレーションズ・リサーチ, 39:25-31,91-96,156-162, 1994.
- [2] 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.
- [3] 久保 幹雄. ロジスティクス工学. 朝倉書店, 2001 (出版予定).
- [4] W. J. Bell, L. Dalberto, M. L. Fisher, A. J. Greenfield, R. Jaikumar, P. Kedia, R. G. Mack, and R. J. Prutzman. Improving the distribution of industrial gases with an on-line computerized routing and scheduling optimizer. *Interfaces*, 13:4-23, 1983.
- [5] A. Campbell, L. Clarke, A. Kleywegt, and M. Savelesbergh. The inventory routing problem. In T. G. Cranic and G. Laporte, editors, *Fleet Management and Logistics*, chapter 4, pages 95-113, Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [6] A. Federgruen and D. Simchi-Levi. Analyses of vehicle routing and inventory-routing problems. In M. Ball, T. Magnanti, C. Monma, and G. Nemhauser, editors, *Network routing*, chapter 4, pages 297-371, Elsevier Science Publishers, 1995.
- [7] H. M. Wagner and T. M. Whitin. Dynamic version of the economic lot sizing model. *Management Science*, 5:89-96, 1959.