

サプライ・チェーン最適化システム

久保 幹雄
大西 真人
土村 展之
朴 成浩

1. はじめに

昨今、サプライ・チェーン・マネジメント (Supply Chain Management:SCM) という言葉をよく耳にするようになってきた。そもそもSCMとは、昔からあるロジスティクス(もっと昔は物流とよばれていたもの)を情報技術 (Information Technology:IT) で武装したものに他ならない。最近ではサプライ・チェーン・マネジメントは学術用語として定着しているだけでなく、テレビの宣伝やニュースでも“SCM”が飛び交うようになってきている。

実は、SCMの中身は最適化(広く言えばOR)のテクニックの集合体である。こういうことを言うと、ORの教科書を持ち出してきて、そこに書いてある通りのシステムを設計してしまう虞があるので注意しておくが、いわゆる古典的なORの公式をそのまま適用するだけでは、大概の場合良いSCMシステムは設計できない。

本稿では、筆者らが開発した(もしくは現在開発している)最適化ベースのSCMシステムを紹介する。これらのシステムは、「国内の複数の企業からの問題抽出 ⇒ アルゴリズム工学の研究者らとの共同開発⇒ 実問題への適用とフィードバック」のサイクルを経て開発されたものである。

古くから経営(もしくは戦争)における意思決定のレベルを長期(ストラテジック)、中期(タクティカル)、短期(オペレーショナル)の3つの階層に分けて考えているのにならぬ、ここで紹介するSCMモデルも、意思決定レベルの違いによって、ストラテジック、タクティカル、オペレーショナルの3つに分けて考える。

SCMに関連した流行語であるERP (Enterprise Resource Planning) およびAPS (Advanced Planning and Scheduling) について簡単に触れておく。ERPやAPSは処理的ITとよばれ、そこで行われるのはオペレーショナル(業務、運用)レベルの自動処理を中心としたものである。これらのシステムは、古典的なMRP(資材所要量計画)の発展形であり、人間に例えると、神経網ならびに脳を経由しない自動処理(反射など)にあたる処理を行う。一方、本稿で対象とするSCMは解析的ITとよばれ、ストラテジック、タクティカル、オペレーショナルの各レベルの意思決定を支援し、人間に例えると、頭脳にあたる処理を行う。

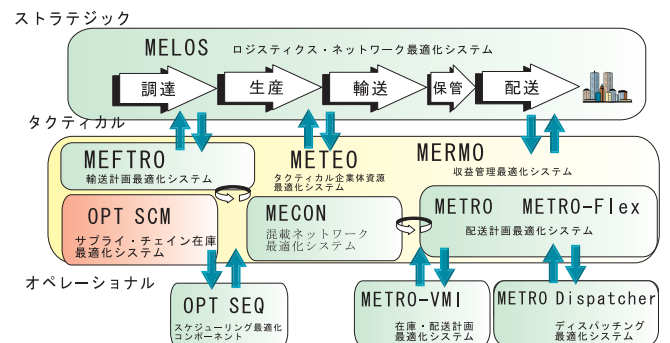


図 1: SCM最適化システムと意思決定レベル。

一般に、日本人は「木を見て森を見ない」タイプの人が多く、現場(オペレーショナルレベル)における改善には滅法強いが、タクティカルレベル、ストラテジックの視点でものを考えることが苦手なようである。そのため、ERPやAPSは我が国の実務家には比較的受け入れられやすいが、(ストラテジック、タクティカルレベルの)SCMはなかなか受け入れられないのが現状である。しかし、ある調査によると企業体の総費用の80%以上が、ストラテジックならびにタクティカルレベルの意思決定で確定してしまうと言われており、本格的なSCMシステムの導入による費用削減効果は、極めて大きいと推測される。

図 1 に、筆者らが開発した(もしくは現在開発し

ている) SCMシステムを、意思決定レベルごとに整理したものを示す。以下では、各システムごとに、その概要を紹介する。

2. ロジスティクス・ネットワーク最適化

ロジスティクス・ネットワーク設計システム MELOS (MEta Logistics Optimization System: メロス) は、ストラテジックレベルの意思決定項目であるロジスティクス・ネットワーク全体の最適設計を行うためのソフトウェアである。MELOS は、長期に影響を与える設備投資に関する意思決定を支援するものである。モデルを求解することによって得られるのは、倉庫、工場、ならびに生産ラインの設置の是非、地点間別の各製品群の単位期間内の総輸送量、生産ライン別の各製品群の単位期間内の総生産量、輸送モードの選択である。システムのコアとなる数理計画モデルは、リバー・ロジスティクス(回収、再製造、廃棄などを考慮したロジスティクス)にも対応できる柔軟なものである。国もしくは国家群を跨いだ輸送に対応するための、関税、関税控除、移転価格などを考慮したオプションも準備している。

また、富士通総研では、Java によるロジスティクス・ネットワーク設計システムを開発している(図2)。SCMにおけるストラテジックレベルの意思決定は、複数の異なる組織に属する意思決定者たちが連携して行う場合が多い。そのため、将来的には、インターネットを介して、複数の意思決定者が協調することを可能にするシステムに発展させるという構想もある。

タクティカルレベルの意思決定にも用いることができるように、多期間バージョン(METEO: メテオ)も開発している。タクティカルレベルの意思決定においては、単位期間を月(もしくは日や週)として多期間のロジスティクス・ネットワーク設計を考え、月別の需要量データの情報をもとに、各月における生産量、輸送量を決定する。これは、従来は工場内だけで用いられてきた機械容量などの資源制約を考慮した生産計画をサプライ・チェーン全体に拡張したものである。METEOでは、輸送機器(トラックや船など)をネットワーク上を移動する資源として捉えることができるので、輸送・在庫計画の最適化に対しても用いることができる。

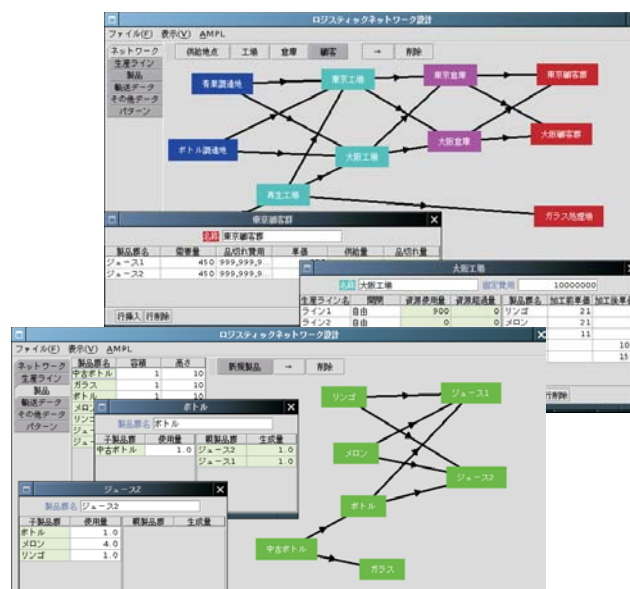


図 2: ロジスティクス・ネットワーク設計システムの GUI (Graphical User Interface) 画面。

3. 収益管理最適化

収益管理最適化システム MERMO (MEta Revenue Management Optimizer: メルモ) は、収益管理の意思決定を支援するためのソフトウェアである。ここで収益管理 (revenue management, yield management) とは、時間がくるとその価値が 0 に(もしくは極めて小さく)なってしまう企業体の資産(これを陳腐化資産とよぶ)に対して、適当な時期における適当な価格付けや資産の在庫への需要の割り当てを行い、顧客の需要を適切に管理(および創生)することによって、企業体の収益を向上させるためのテクニックである。

陳腐化資産の代表として、航空機の座席、列車や船の座席(寝台)、ホテルや旅館の部屋、レンタカー、相撲や野球の観戦券、テレビのコマーシャルの時間帯などがある。見方によっては、生鮮食料品なども期限がくると急速にその価値を失うので陳腐化資産と考えられるが、ほとんどの研究は、航空機や電車の座席、ホテルなどの部屋、レンタカーに代表されるレンタル商品など、長期的な観点における資産の所得の可否は固定されているものの、特定の時期におけるその利用が商品として販売されているものを対象としている。特に、航空機産業に対する収益管理の実務的なインパクトは極めて大きく、たとえば、アメリカン・エアラインは、1989 年から 1992 年の間に陳腐化資産に対する収益管理のテクニックを用いて、約 14 億ドルの経

費を節約したと言われている [5] .

収益管理の主な対象は、航空機の座席やホテルの部屋などの陳腐化資産であったが、最近では、インターネットによる直販の普及により、一般の商品に対しても収益管理のテクニックが適用可能になってきている。これは、製品の価格を動的に変化させることによって顧客需要を変化させ、サプライ・チェーン全体の資源の有効利用を狙いとするものである。従来のSCMでは、顧客需要を外部パラメータとして扱っていたが、需要を変化させることによる自由度によって、サプライ・チェーン全体での収益を、さらに増やせるのである。ちなみに、スーパーの食料品売り場でみられるような閉店間際の価格の引き下げや、デパートの服飾売り場における流行遅れの商品の値下げなども、昔から行われている収益管理の方法とも考えられる。

収益管理では、将来の顧客需要の確率分布（もしくは確率過程）、価格を変更したときの顧客需要の変化など、通常のSCMに必要なデータよりはるかに詳細なデータを必要とする。これらのデータは入手が極めて困難であったため、従来は主に定性的な議論が中心に成されてきた。しかし、最近の情報技術の急速な進歩によって、顧客需要の時系列的な変化の詳細な情報が、大規模なデータベース上に保持・管理され、その分析によって、ある程度のデータが入手可能になっている。これらの大量のデータを適切に用いることによって、定量的なアプローチが可能になるのである。おそらく、インターネットによる直販の拡大にしがって、より高度な収益管理の技術が必要となり、それはSCMが旧来の企業モデルの競争戦略であったように、次世代の企業の競争戦略になると考えられる。

4. 混載ネットワーク最適化

混載ネットワーク最適化システム MECON (MEta COnsolidation Newtwork design system : メコン) は、路線便業者、鉄道貨物事業、郵便事業、宅配便などの輸送サービスのための混載型輸送ネットワークの最適設計を支援するためのシステムである。

混載ネットワーク設計モデルは、3つの意思決定レベルのすべてに跨るものである。以下では、意思決定のレベルごとに意思決定項目を整理する。

混載ネットワーク設計モデルにおけるストラテジックレベルの意思決定項目としては、以下のものが考えられる。

- (鉄道貨物への応用における) 実際の鉄道網の敷設
- 中継地点の新設、廃止、ならびに移動
- 貨物列車、船、トラックなどの輸送手段(資源)の新規購入、ならびに廃棄
- 運賃体系の見直し
- 顧客サービスレベル(荷物の発地での受け取りから着地への配達への時間の保証など)の見直し

タクティカルレベルの意思決定は、中期的な視点に基づくものであり、ストラテジックレベルで設定された資源や施設の諸活動への割り当てを主に行う。もちろん、ストラテジックレベルの意思決定においても、資源の割り振りを多少は考慮しているが、タクティカルレベルにおいては、需要の季節変動などを考慮してより細かな割り振りを定める。タクティカルレベルの意思決定は非常に広範囲を扱うので、しばしば長期的な意思決定に近いストラテジック/タクティカルと、短期的な意思決定に近いタクティカル/オペレーショナルの2つに分けて考えることもある。混載ネットワーク設計モデルにおけるタクティカルな意思決定項目としては、以下のものが代表的である。

- 貨物列車、船、トラックなどの輸送手段(資源)のリース
- 輸送ルート of 決定
- 各輸送手段の輸送頻度の決定
- 各輸送手段の輸送スケジュールの決定; このレベルの輸送スケジュールは、通常大まかなものであり、何時何分発、何時何分着などの細かなスケジュールは、以下のオペレーショナルレベルで決定されることが多い。
- 輸送手段の再配置; これは、空輸送(回送: dead-head)を極力避けるために行われる。

オペレーショナルレベルの意思決定は、短期および即時に決めなければならないものである。即時に決定しなければならない意思決定の多くは、現場の判断にゆだねられる。

- 各輸送手段の詳細な輸送スケジュールの決定ならびに実施

- 乗務員の輸送手段への割り当て
- 保全や点検のスケジュールの決定およびその実施

5. 輸送計画最適化

輸送計画システムとは、主に工場から配送センターなどの拠点への輸送手段による輸送を計画するためのシステムである。輸送計画システムにおける意思決定項目としては、輸送モードの選択、輸送頻度の決定、ならびに輸送手段のスケジューリングがあげられる。

輸送モードの選択と輸送頻度の決定は、タクティカルレベルの意思決定項目である。輸送モードは、費用と輸送頻度のトレード・オフを考慮して決定される。輸送頻度は、顧客サービスに関連し、顧客サービスは企業体の政策として決定される場合が多い。そのため、輸送計画は上位の顧客サービスレベルの決定やロジスティクス・ネットワークの形状決定と関連してくる。

一方、輸送手段のスケジューリングを求める問題は、以下で述べる配送計画と類似の問題になる。しかし、工場から拠点への輸送では、輸送量が比較的大きく、かつ輸送距離が長いため、巡回順より空輸送の最小化に焦点がおかれる場合が多い。輸送スケジューリングにおける意思決定の範囲は、タクティカルレベルもしくはオペレーショナルレベルである。タクティカルレベルにおける輸送スケジューリングでは、数ヶ月間おきに見直しを行う定期便の計画を行い、オペレーショナルレベルにおける輸送スケジューリングでは、日々の輸送ルートを決定する。

運搬スケジューリングモデルをもとにしたシステムとして、輸送計画最適化システム MEFTR0 (MEta Full Truckload Routing Optimizer: メフトロ)を開発している。MEFTR0は、輸送スケジューリングだけでなく、航空機や鉄道の乗務員スケジューリングにも用いることができるように設計されている。

6. 配送計画最適化

配送計画システムは、おそらく我が国で最も普及している解析的情報システムであろう。配送計画とは、デポを出発した輸送手段(通常はトラック)によって、複数顧客への荷の配送ならびに集荷を行うためのルート(訪問順序)とスケジュール(訪問時刻)を決めることを指す。ORの世界では、配送計画は、古くか

ら多くの研究があり、最近でも活発に研究されている代表的な問題である。

我が国は、都市部が広い地域に跨り、そこにまんべんなく顧客が発生するという特性から、配送計画の実務は極めて大規模になる場合が多い。諸外国で研究されている配送計画問題の規模は、ほとんどが顧客数が200以下、最近作成された大規模な問題例でも顧客数が800程度のものであるが、我が国で発生する問題例では、顧客数が数千から数万のものがざらにある。

さらに、我が国の配送計画で発生する事例においては、欧米のそれとは比べものにならないほど、きめの細かいサービスが必要となる。時間枠(何時から何時の間に顧客サービスを行うこと)はもとより、時間枠を逸脱した場合のペナルティ(たとえば、あるコンビニでは、15分単位の時間枠を設定し、それから逸脱した場合には、配送業者にペナルティを課している)、複数の地点での荷の積み込みや積み降ろし、時間帯によるトラックの速度の設定など、様々な付加条件を考慮する必要がある。これらの問題を解決するためには、解決すべき問題に対する洞察、正しいデータ構造とアルゴリズムの選定、そして効率的な実装、使いやすいGUI(Graphical User Interface)の設計、実務家との信頼関係とコミュニケーションなどが不可欠な要因となる。

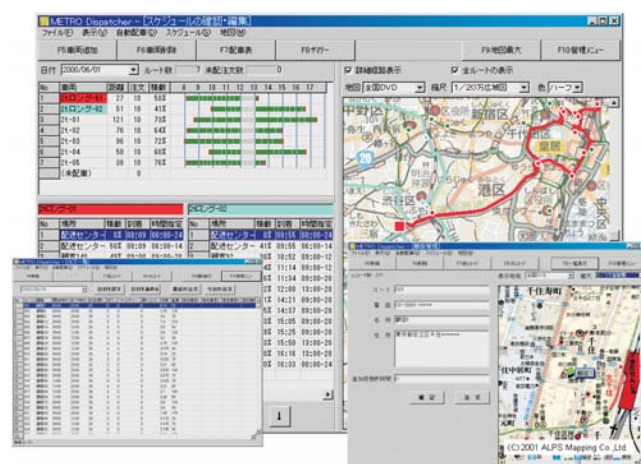


図 3: 配送計画最適化システム (METRO Dispatcher) の GUI 画面。

さらに、適用する事例ごとに細かな条件が異なるため、事例ごとのカスタマイズが必要になるになる場合が多い。我々は、経験した数多くの事例から共通部分を抽出することによって、できるだけ幅広い問題

の範囲をカバーできるように、幾つかの標準的なシステムを開発している。我々が開発している配送計画最適化システムとしては、計画系のための METRO (MEta Truck Routing Optimizer: メトロ)、運用系のための METRO Dispatcher、ソフト時間枠制約を考慮した METRO-Flex、在庫計画を考慮した METRO-VMI (Vender Managed Inventory) がある。どのシステムもメタ解法を駆使したソルバーを搭載し、実務的な付加条件を考慮した配送計画問題を高速に求解することができる。

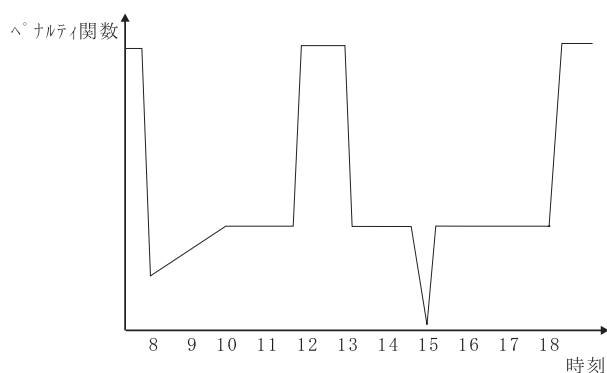


図 4: 到着時刻に対するペナルティ関数の例。

METRO-Flex では、我が国の顧客の間でしばしば発生する以下のような要望に対処することも可能である。

「できれば午後の 3 時くらいにもってきてちょうだい。もしそれが無理っていうのなら、朝一番でお願いね。他の時間帯でも一応は受け取るけど、お昼の間はご飯を食べに行っちゃうから注意してね。」

このような曖昧な条件で提示された配送時刻の指定に対して、METRO-Flex では、到着時刻に対する任意の区分的線形な費用（ペナルティ）関数を設定し（図 4）、運搬車の走行費用と各顧客への到着時刻に対するペナルティ関数の和を最小にするようなルートならびに顧客上での運搬車の待機時間を求める。メタ解法を配送計画問題に適用している多くの商用ソフトウェアでは、解を変化させるたびに目的関数値の評価値を再計算する方法を採用しているが、このようなナイーブなメタ解法の実装では、いかに高速な計算機を持ち込もうが、（顧客数が数百程度の）実際問題に対して実用的な時間で良好な解を算出することは不可能である。これを高速に実現するためには、データ構造ならびにアルゴリズムの詳細な設計が必要と

なる。詳細については、Ibaraki-Kubo-Masuda-Uno-Yagiura [6] を参照されたい。

METRO-VMI は、自動販売機への補充ルート最適化をターゲットとしたシステムであり、商品の在庫補充と配送のタイミングを同時に決める。詳細については、本誌に書いた解説 [1] ならびに論文誌に掲載された論文 [3] を参照されたい。

7. スケジューリング最適化

スケジューリングは、工場内での製品の加工順や段取り替えなどの意思決定を行う。一般にスケジューリングとは、製品を加工するための作業（ジョブ、活動）の開始時刻を決定するモデルの総称であるが、生産スケジューリングでは工場内の資源（機械、人、原材料）の作業への割り振りや、工場内で発生する在庫量の適正化も同時に決める。スケジューリングシステムが担当するのは、主に工場内のオペレーショナルレベルの意思決定である。生産する製品によってシステム構成が大きく変わるので、通常は、部品組み立て型、装置産業型、ジョブショップ型などに分けてシステムを開発する。単一の工場の中でも複数の型のシステムが混在することも珍しくない。

スケジューリングは、現場に応じたフレキシブルなシステム構成が必須である。そのため、我々はスケジューリングを行うためのシステムを提供するのではなく、ソルバー部だけを ActiveX¹ としてコンポーネント化したもの（OptSeq: オプトシーク）を作成した。OptSeq のソルバー部分は、野々部-茨木 [4, 7] の資源制約付きスケジューリング問題を解くためのメタ解法であり、多様な条件のついた実際問題を高速に求解することができる。

また、他のシステムに対しても同様に、ActiveX コンポーネントもしくは JavaBeans² としてソルバー部を提供する予定である。

8. 在庫最適化

我が国では、狭い国土や高度な顧客サービスのため、欧米にくらべて在庫に関する意思決定が重要になってくる。通常、在庫モデルは需要の確率的な仮定の下で構築される場合が多かったが、我々は最適化に重きを置いたアプローチをとっている。

¹Microsoft 社が開発したソフトウェアの部品化技術。

²Java 言語を使って再利用可能なソフトウェア部品を作成するためのフレームワーク。ActiveX の対抗馬。

輸送手段や生産の段取りに起因する在庫(サイクル在庫)は,ストラテジックレベルの意思決定に属するため,2.節のMELOSで対応する.また,季節的な需要の変動や製品のライフ・サイクルに対応するための在庫は,タクティカルレベルとストラテジックレベルの中間の意思決定に属するため,2.節のMETEOで対応する.

タクティカルレベルにおける安全在庫の適正配置は,顧客サービスとのトレード・オフ関係によって決められる.我々は,顧客に対するサービス時間(事前に保証したリード時間;保証リード時間)を変えることによって,サプライ・チェーン全体での安全在庫費用の合計を最小化するためのモデルを作成し,それをコアとするシステム(OptSCM:オプトスキーム)を開発した.

また,オペレーショナルレベルにおける在庫は,簡単なルールで運用される(すべきである)ので,最適化する対象とはならないが,曜日による需要の変動などを考慮した適切な運用ルールを作成することが肝要である.実際の運用にはPOS(Point Of Sales)情報を利用することが望ましく,そのためのシステムは,MBK流通パートナーズ(三井物産グループ)と共同で開発中である.

9. おわりに

最新の情報技術(IT)によって武装されたサプライ・チェーン・システムの設計のためには,ORのテクニックもそれに応じて進化したものをを用いる必要がある.そのためには,古典的モデルの変種に対する重箱の隅をつつくような研究ではなく,サプライ・チェーン・マネジメントの現場から抽出されたモデル,ならびにそのモデルに対する効率的な解法の設計を中心とした,新しい理論体系としてのORが必要になるのである.

ここで紹介した種々のシステムは,個別に用いられるだけでなく,お互いに情報を交換し合い,協調することによってサプライ・チェーン全体を最適化することが理想である.たとえば,配送計画や工場内のジョブのスケジューリングを最適化することによって得た情報は,サプライ・チェーン全体を最適化する際の重要なデータ(ある地域に対する配送費用,ラインの稼働率)を与え,逆に,サプライ・チェーン全体を(長期的な視点で)最適化した結果は,配送計画やスケジューリングに対する根幹のデータ(顧客をどの配送センターに割り振るか,どの工場でどの製品を作るか)

となるのである.

紙面の都合上,各システムの詳細については述べる事ができなかった.詳細ならびに背景にある理論については拙著「ロジスティクス工学」[2]および関連するホームページ

<http://www.lynalogics.com/>

<http://www.logopt.com/>

を参照されたい.

参考文献

- [1] 久保幹雄, 宮本裕一郎, 村上賢哉. VMIへの招待. オペレーションズ・リサーチ, 46 (9): 481-486, 2001.
- [2] 久保幹雄. ロジスティクス工学. 朝倉書店, 2001.
- [3] 宮本裕一郎, 久保幹雄. 自動販売機に対する在庫配送計画の事例. *Journal of Operations Research Society of Japan*, 44 (4): 掲載予定, 2001.
- [4] 野々部宏司, 茨木俊秀. 汎用スケジューラ-RCPSPによるアプローチ-. オペレーションズ・リサーチ, 45(3):18-124, 2000.
- [5] P. Davis. Airline Ties Profitability Yield to Management. *SIAM News*, 27 (5): May/June, 1994
- [6] T. Ibaraki, M. Kubo, T. Masuda, T. Uno, and M. Yagiura. Effective local search algorithms for the vehicle routing problem with general time window constraints, manuscript. 2001.
- [7] K. Nonobe and T. Ibaraki. Formulation and tabu search algorithm for the resource constrained project scheduling problem. In *Essays and Surveys in Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, 2001.