

# サプライ・チェーン最適化とその周辺

東京商船大学 流通情報工学

久保 幹雄

## 1 はじめに

最近注目を浴びているサプライ・チェーン・マネジメントにおける意思決定支援システムの中身は、オペレーションズ・リサーチのテクニック（特に、最適化、シミュレーション、ゲームの理論）の集合体である。ここでは、サプライ・チェーン最適化に対する数理モデル、理論と実務の現状、今後の研究の方向性について概観する。

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。一般に、日本人は現場（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。これを「木を見て森を見ない症候群」とよぶ。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、本格的なサプライ・チェーン最適化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。

議論を明確化するために、ERP（Enterprise Resource Planning）について簡単に触れておく。ERPは処理的情報技術（IT）の範疇に含まれ、そこで行われるのはオペレーショナルレベルの自動処理を中心としたものである。ERP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、本稿で対象とするようなモデルを経由して最適化を行うアプローチは解析的ITの範疇に含まれ、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。我が国では、ITという手順の自動化の側面のみをみてしまう傾向がある。これを「神経だけで脳をもたない症候群」とよぶ。その一方、一部のオペレーションズ・リサーチの失敗例のように、脳（モデル）だけで神経（情報収集のための仕組み）をもたないことを「画餅症候群」とよぶ。これらの症候群に陥らないようにするには、神経と脳、さらには肉体（実際のロジスティクス活動）のバランスを上手にとることであるが、そのためには、理論家、応用家、実務家の共同体制が不可欠であると考えられる。

## 2 サプライ・チェーン最適化モデル

サプライ・チェーンを対象とした最適化モデルには、様々なものがある。ここで「モデル」とは、現実問題の典型例を抽象化したものである。同じ現実問題例を対象としていても、その抽象化のレベルによって、様々なモデルが作成できる。エンドユーザーが使用することを想定した場合には、実ロジスティクス・オブジェクト（トラックや機械などを指す造語）を用いたモデルが有効であり、一方、システムを作成するロジスティクス・エンジニアが使用することを想定した場合には、抽象ロジスティクス・オブジェクト（資源やネットワークなどを指す造語）を用いたモデルが有効である。また、同じ抽象モデルでも、グラフ・ネットワークなど高度に抽象化されたものから、時間枠付き配送計画や資源制約付きスケジューリングなど具体的なものまで様々な階層に分けることができ、それぞれ利点・弱点がある。（利点・弱点についての議論と使い分けについては、拙著「ロジスティクス工学」[1, pp.9-10]を参照されたい。）以下で提案する抽象モデルは、個々のモデル間の関係を明確化することを目的としたモデルであり、いわば研究者が議論のためのモデルである。このモデルは、抽象ロジスティクス・オブジェクトを用いたロジスティクス・ネットワーク設計問題に対するモデル [1, 第 11 章] と、（一般化）資源制約付きスケジューリングに対するモデル [2, 第 25 章] を基礎としている。

モデルについて論じる前に、サプライ・チェーンとは何かについて考えてみる。「サプライ・チェーン＝ロジスティクス＋情報技術」というのが、非専門家向けの講演での説明方式であるが、これは単なる標語であって「何か？」という問いに答えるものではない。ここでは、サプライ・チェーンとは、資源を時・空間内で生産・消費する活動の集合体であると考えられる。以下の抽象モデルでは、サプライ・チェーンを空間（点）、時間（期）、資源、活動の4つの基本要素とそれらの関係から構成されるものと捉える。

$N$ : 点の集合.

原料供給地点, 工場, 倉庫の配置可能地点, 顧客 (群), 作業工程, 在庫の一時保管場所など, サプライ・チェーンに関わるすべての地点を総称して点とよぶ. 点 (集合) 間には集約・非集約関係が定義できる. たとえば, 顧客を集約したものが顧客群となる.

$P$ : 期の集合.

期とは連続時間を離散化したものである. 1つの期集合は, 有限な正数  $T$ , 時刻の列  $0 = t_1 < t_2 < \dots < t_T$  を与えたとき, 区間  $(t_i, t_{i+1}]$  ( $i = 1, \dots, T-1$ ) の順序付き集合として生成される.  $t_{i+1} - t_i$  がすべて同じであるとき,  $t_{i+1} - t_i (= \delta)$  を期集合の幅とよぶ. サプライ・チェーンをモデル化する際には, 意思決定レベルの違いにより様々な幅をもつ期集合が定義される. ここでは, それらを集めたものを  $P$  と定義する. 期 (集合) に対しても, 点と同様に集約・非集約関係が定義できる. たとえば, 日を集約したものが週であり, 週を集約したものが月 (もしくは4半期や年) となる.

$R$ : 資源の集合.

サプライ・チェーンを構成する企業体は, 製品 (部品, 原材料, 中間製品, 完成品), 生産ライン, 機械, 輸送機器 (トラック, 船, 鉄道, 飛行機), 金 (財務資源), 人 (人的資源) などの資源から構成される. 資源 (集合) に対しても, 点と同様に集約・非集約関係が定義できる.

$A$ : 活動の集合.

サプライ・チェーンとは, 資源を時・空間内で消費・生成させることであると捉え, 資源を消費・生成する基本となる単位を活動 (activity) とよぶ.

$PRN$ : 資源  $r$  が期  $t$  に点  $i$  上に存在することが可能な3つ組  $(t, r, i)$  の集合.

$AP$ : 活動  $a$  が期  $t$  に行うことが可能な2つ組  $(a, t)$  の集合.

$PRN(a, t)$ : 活動  $a$  が期  $t$  に行われたとき, 期  $s$  における点  $i$  上の資源  $r$  が消費 (生成) される可能性がある3つ組  $(s, r, i)$  の集合.

$BR$ :  $AP \times AP$  の部分集合 (2項関係). たとえば, 「活動  $a$  が期  $t$  に行われれば, 活動  $a'$  も同じ期  $t$  に行われなければならない」などの活動間の依存関係を表現するために用いられる.

$A_{ari}^{st}$ : 期  $s$  に活動  $a$  を行ったとき, 期  $t$  に資源  $r$  が地点  $i$  上で消費される量. 負の値のときには, 生成される量を表す.

$U_{tri}(L_{tri})$ : 期  $t$  における地点  $i$  上での資源  $r$  の上限 (下限).

$x_{at}$  ( $\in \mathbf{Z}_+$  or  $\{0, 1\}$ ): 期  $t$  に活動  $a$  が行われる数を表す非負の整数変数 (もしくは0-1変数).

各  $(t, r, i) \in PRN$  に対して, 以下の式からの逸脱量のペナルティ付き和を最小とする.

$$L_{tri} \leq \sum_{(a,s):(t,r,i) \in PRN(a,s)} A_{ari}^{st} x_{as} \leq U_{tri}$$

上の制約と, 活動間の依存関係に対する制約を考える.

$$x_{as} \leq x_{a's'} \quad \forall (a, s, a', s') \in BR$$

実ロジスティクス・オブジェクトである施設やトラックなどは, 上の抽象ロジスティクス・オブジェクトから派生させて作成する. さらに, 輸送, 生産, 在庫, 調達, 販売などを表す活動のテンプレートを準備する.

たとえば, 点  $i$  から点  $j$  への移動時間  $T_{ij}$  (期) を要する輸送活動のテンプレート  $a$  に対する  $PRN(a, t)$  は, 以下の集合

$$\{(t, r, i) \mid r \text{ は } i, j \text{ 上を通過可能な製品資源}\}$$

$$\{(t + T_{ij}, r, j) \mid r \text{は } i, j \text{ 上を通過可能な製品資源}\}$$
$$\bigcup_{s=t}^{t+T_{ij}} \{(s, r, j) \mid r \text{は } (i, j) \text{ 上で使用可能な輸送資源}\}$$
$$\{(t_0, \text{財務資源}, i_0)\}$$

の和集合として定義できる。ここで、 $t_0$  はすべての期間  $(0, T]$  を表し、 $i_0$  は財務資源の保管場所を表すダミーの点である。

テンプレートの組み合わせによって、様々なモデルを構築できる。以下では、サプライ・チェーン最適化の代表的なモデルを上記の抽象モデルと関連づけながら解説する。

### 3 ロジスティクス・ネットワーク設計モデル

ロジスティクス・ネットワーク設計は、ストラテジックレベルの意思決定モデルであり、オペレーションズ・リサーチの世界では、古くから施設配置問題として研究が行われてきたが、最近では実務を意識した拡張モデルに対する研究も増えてきている。

上で述べた抽象モデルにおいては、活動は影響を与える資源が発生（消滅）する点によって位置的な情報を関連づけられる。たとえば、輸送を表す活動は、枝  $(i, j)$  と結びつけて考えることができる。資源の調達を表す活動が影響を与える期と、活動を行った期の差を、活動の継続期間（tenure）とよぶ。これらの用語を使うと、ロジスティクス・ネットワーク設計とは、継続期間が大きい調達活動を行うか否か、活動をどの枝上で（年間レベルなどの比較的長い幅をもつ期に）何単位行うか（これはネットワークの形状を定めることに相当する）を同時に決定するモデルであると考えられる。これは、具体的には、倉庫、工場、ならびに生産ラインの設置の是非と、点間の各製品群の総輸送量、生産ライン別の各製品の生産量を決定することに相当する。

今後の研究の課題となるのは、国もしくは国家群を跨いだサプライ・チェーンに対応するための、関税、関税控除、移転価格、為替の変動（不確実性）などを考慮したモデルの設計であり、そのためには広い範囲（たとえば金融工学、企業会計、税務などの諸分野）の専門家との共同研究が必要である。また、通常は定数として入力される顧客需要を、価格を変数とすることによって変化させるモデル（収益管理モデル）に対する研究も、今後の重要な課題である。

ロジスティクス・ネットワーク設計の多期間への拡張は比較的容易である。多期間ロジスティクス・ネットワーク設計モデルでは、資源を配置するおおよかな期も決定する。具体的には、単位期間を月（もしくは年や日）として考え、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。多期間のロジスティクス・ネットワーク設計モデルに、生産準備のための段取り活動を含めたものは、以下で述べる（大バケットの）ロットサイズ決定モデルとほぼ同じものになり、その境界は曖昧である。

### 4 ロットサイズ決定モデル

ロットサイズ決定は、タクティカルレベルの意思決定モデルであり、与えられた資源（機械や人）の下で、活動をどの程度まとめて行うかを決定する。研究者が主に対象としている狭義のロットサイズ決定は、需要量が期によって変動するときの各期の生産量ならびに在庫量を決定するモデルであり、生産を行う際の段取り費用と在庫費用のトレード・オフをとることを主眼においている。

一般に、生産や輸送は規模の経済性をもつ。これをモデル化する際には、生産や輸送のための諸活動を行うためには「段取り」とよばれる準備活動が必要になると考える。ロットサイズ決定とは、段取り活動を行う期を決定し、生産・輸送を表す諸活動をまとめて行うときの「量」を決定するモデルであると考えられる。

ロットサイズ決定問題は、オペレーションズ・リサーチの世界では古くから多くの研究が行われている問題であるが、国内での（特に実務家の間での）認知度は今ひとつのようである。適用可能な実務は、ERP、MRP（資材所要量計画）、APS（Advanced Planning and Scheduling）を導入しており、かつ段取りの意思決定が比較的重要な分野であり、処理的ITで自動化されていた部分に最適化を持ち込むことによって、より現実的かつ効率的な解を得ることができる。

ロットサイズ決定モデルは、扱う期間の幅によって大バケットと小バケットに大別される。小バケットとは、各期における段取り活動が高々2回以下に限定されたモデルを指し、それ以外を大バケットとよぶ。大バケットモデルは、多期間ロジスティクス・ネットワーク設計モデルとほぼ同じ構造をもち、小バケットモデルは、以下で述べるスケジューリングモデルに在庫の概念を付加したモデルになる。このように、ロットサイズ決定は、期の幅の取り方によって、意思決定の3つのレベルに跨る汎用性の高いモデルでなる。

理論面では、最近ではベンチマーク問題例の整備も進み、数理計画アプローチ（特に多面体構造の解明）、メタ解法によるアプローチの両者とも、実用規模の問題の求解までもう一步の段階にあると考えられるが、もう一段の努力が必要である。

## 5 スケジューリングモデル

スケジューリングは、オペレーショナルレベルの意思決定モデルであり、上位のロットサイズ決定モデルでまとめられた活動をいつ（どの期に）行うかを決定する。一度に行う活動の量は上位レベルで決められているので、スケジューリングにおいては、変数  $x_{at}$  は 0-1 変数として扱うことができる。ロットサイズ決定モデルによって集約された活動を、通常の活動と区別するために作業（ジョブ）とよぶ。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）の開始時刻を決定するモデルの総称であるが、工場内の資源（機械、人、原材料）の作業への割り振りや作業モードの選択も、同時に決定する場合が多い。

最近では、（問題ごとに特別に設計された）変数固定テストの洗練化によって、小規模問題例なら制約論理や分枝限定法を用いて厳密解を得ることができるようになってきている。また、大規模問題例に対しては、メタ解法の適用が推奨される。

スケジューリングのようなオペレーショナルレベルの意思決定支援システムの導入の際には、ユーザーごとのカスタマイズが必要になるケースが多い。現在、我が国の現場で使用されているシステムの多くは、古典的なディスパッチングルールのような one-pass のヒュースティクスである。これは、現場に応じた付加条件に応じるための開発時間（ならびに費用）を短縮するためであると推測されるが、one-pass のヒュースティクスに基づいたメタ解法 [3] も研究者側から提案されており、より高精度な近似解法を組み込んだ実用システムの普及が課題となっている。

## 6 配送計画モデル

配送計画は、タクティカルレベルとオペレーショナルレベルの両方で用いられる意思決定モデルであり、主にトラックや船舶などの移動する資源による顧客需要の補充活動の処理順序を決定する。

配送計画に対する最適化アプローチは、最近ではほとんどのソフトウェアで採用されており、ソフトウェアの種類も豊富である。十数年前には、「配送計画では実務的な付加条件が多いので最適化アプローチは不可能である」と我が国の実務家の間では評されていたのだが、最近では、テレビや新聞でも取り上げられるようになるほどに普及が進んでいる。

もちろん多くの研究課題が残されている。一般的には、大規模な問題例に対する解法を洗練させること、ユーザーごとのカスタム条件から新たな問題のクラスを抽出することなどが課題であり、個別では在庫計画と融合させた問題（VMI: Vender Managed Inventory）などのバリエーションに対するシステムの開発も課題である。

## 参考文献

- [1] 久保幹雄. ロジスティクス工学. 朝倉書店, 2001.
- [2] 久保幹雄, 田村明久, 松井知己. 応用数理計画ハンドブック. 朝倉書店, 2002.
- [3] 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.