

サプライ・チェーン最適化—現状と課題—

Supply Chain Optimization—recent progress and future direction—

東京海洋大学 久保幹雄

Mikio Kubo

Tokyo University of Marine Science and Technology

Abstract In this talk, I summarize recent progress in several optimization and related techniques in supply chain management and mention future direction of this area.

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 SCM 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。

サプライ・チェーンを図で説明すると図 1 のようになる。

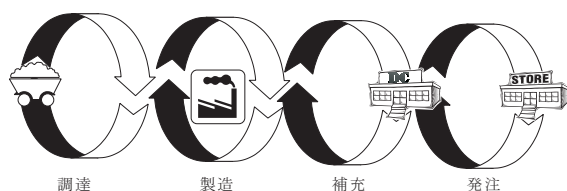


図 1: サプライ・チェーンの概念図。

この図中のサイクルは、「もの」の流れと「情報」の流れの循環を表しており、各サイクルは異なる企業 (もしくは部門) によって運営されている。たとえば、最初のサイクルは、調達部門によって行われる調達活動を表し、次のサイクルは、製造部門によって行われる製造活動を表し、その次のサイクルは、倉庫の管理部門によって行われる補充活動を表し、最後のサイクルは、顧客 (小売店) によって行われる発注活動を表す。

サプライ・チェーンでは、このように異なる部門による意思決定を明確化することによって、サイクルをどのように繋ぐかを正面から捉える点が、ロジスティクスと異なると考える。

以下では、サプライ・チェーン・マネジメントにおける様々な問題を解決するために設計された種々の最適化手法を紹介する。構成は次の通り。

2 節では、サプライ・チェーン最適化の難しさの原因を、複雑性、不確実性、ならびに他のプレーヤーの存在に分類し、一般的な対処法について考える。3 節から 6 節では、サプライ・チェーンの代表的なモデルについて、個別に、現状と課題についてまとめる。3 節では輸送関連の諸モデル、4 節ではスケジューリング関連の諸モデル、5 節では、在庫関連の諸モデル、6 節ではロジスティクス・ネットワーク設計モデルについて述べる。最後に、7 節では、まとめと将来の展望について述べる。

2 サプライ・チェーン最適化の難しさに対処法

サプライ・チェーンにおける最適化の難しさには幾つかの原因がある。ここでは、その原因と一般的な対処法について考える。

第 1 の理由として、問題の規模が非常に大きいことがあげられる。サプライ・チェーンに内在するほとんどの問題は、 NP -困難であり、問題の規模の増大とともに、それを解くための計算量が通常の計算機では実質上不可能になる。特に、オペレーショナルな (短期的視野の) 意思決定モデルである配送計画やスケジューリングモデルにおいては顕著である。 NP -困難な問題に対処するための万能薬としては、数理計画ソルバーとメタ解法がある。これらの利点・弱点や使い分け、さらには融合した手法については、解説 [2] を参照されたい。

第 2 の理由として、データが曖昧であることがあげられる。このデータの曖昧さを総称して不確実性とよぶことにする。不確実性は、データが確率的な情報を含んでいること、データが時間の経過とともに明らかになっていく (逆に言うと、遠い未来の情報は何も与えられていない) ことの 2 つに分けられる。前者を確率的とよび後者を動的とよぶ。もちろん、確率的で動的な場合もあり、サプライ・チェーンのほとんどの問題の本質は、確率的かつ動的である。

幾つかのモデルにおいては、確率的なモデルは、確定的なモデルに近似して扱われる。代表的なものはスケ

ジューリングや配送計画などのオペレーショナルな意思決定モデルである。これらのモデルは、比較的近い未来のみを扱うので、データを確定値と「近似」してもそれほど差し支えないからだ。また、確率的なモデルの近似として、データの（適当な範囲内の）変動に対する頑強性をもつ解を求めるロバスト最適化も、場合によっては有効である。

一方、動的なモデルは静的な（時間を止めた）モデルに帰着して扱われることが多い。たとえば、スケジューリング、動的ロットサイズ決定、多期間のロジスティクス・ネットワーク設計においては、ある将来の期までを考慮して、その先のデータは無視することによって、静的なモデルに帰着させて求解する。時間の経過とともに、新しいデータが入ってくると、再び（前回より未来の期まで考慮して）求解する。これは、ローリング・ホライズン方式とよばれ、動的な問題を現実的に解決するための常套手段である。確定的かつ静的なモデルへの帰着は、あくまでも近似であり、本来は不確実性を陽的に組み込んだモデルを作成すべきである。

不確実性に対処するための万能薬としては、シミュレーションがある。シミュレーション自身は最適化を含んでいないが、最近のシミュレーションのためのソフトウェア（シミュレータ）には、パラメータを最適化するためのオプションが含まれている。シミュレータは、変化させるパラメータの数が少ない場合には妥当な選択となるが、変数が多い場合には、膨大な計算時間を要するか、不完全な最適化で終了してしまう。その際には、シミュレーションの1試行で、すべての変数に対する微分値を計算するためのテクニック（たとえば無限小摂動解析）を併用する必要がある。また、モデル化だけで求解することを考えなければ、動的計画も不確実性に対する万能薬である。動的計画における次元の呪いを克服するためのテクニックとして、強化学習（ニューロ動的計画）がある。これも対象とするモデルの変数の数が限定されている場合には、1つの選択肢になる。

第3の理由として、他のプレイヤーの行動もモデルに組み込む必要があることがあげられる。敵対もしくは協力するプレイヤーが存在する場合には、ゲームの理論の枠組みで論じる必要がある。他のプレイヤーとしては、顧客が代表例である。顧客の行動は、価格や広告によって変化するものと考えられる。この際、顧客の需要をコントロールして、サプライ・チェーンの他の諸活動と同時に最適化を行う必要がある。これは、収益管理もしくは動的価格付けとよばれる。前者は、航空機の座席やホテルの部屋のような陳腐化資産（ある時点が来ると価値がなくなってしまう資産）を対象としたものであり、

後者は一般の商品に拡張したものである。他のプレイヤーが、同一のサプライ・チェーンで協力して製品を供給している会社の場合には、提携や価格の調節によって、協調を得るための条件についての研究が成されている。敵対するプレイヤーの場合には、ここで考える最適化モデルの範疇を超える問題になる。

NP -困難性、不確実性、価格の考慮は、サプライ・チェーン全体の最適化に対しては超えなければならない壁であるが、これらのうちの一部をモデルに組み込んで、解決法を考えているのが現状である。以下では、サプライ・チェーン最適化における代表的なモデルを示し、現状と今後の研究の方向性について考察する。

3 汎輸送モデル

ロジスティクスやサプライ・チェーンにおいては、物資の移動は基本であり、そのためには、輸送のためのネットワークの設計が重要な意思決定項目になる。ここで考えるモデルは、物資がネットワークの途中で在庫されることなく運ばれる際のネットワークを設計するモデルであり、これを総称して汎輸送モデルとよぶ。汎輸送モデルは、配送計画、ネットワーク設計、サービス・ネットワーク設計、運搬スケジューリングなどの諸モデルを含むが、ロジスティクス・ネットワーク設計は、生産による製品の変化や期をまたがる在庫を考慮するので、この範疇には含まれないものとする。ロジスティクス・ネットワーク設計モデルについては、6節で考える。

汎輸送モデルの代表格は、配送計画であり、国内のSCMに関連する市販の解析的ITの大半がこれにあたる。そのため、研究も膨大な数があり、不確実性を加味した問題も数多く提案されている。しかし、配送計画の難しさの本質は、その規模と問題の複雑さにある。単にトラックの配送順序を決めるだけでなく、顧客上の時間枠や進入禁止の時間帯の考慮、複数の異なる種類のトラックや複数の荷積み地点の存在など、様々な要因が実際問題には付加される。また、その規模は顧客数が数百から数千（応用によっては数万）に至るため、生半可なレベルの最適化手法では、たちまち限界がきてしまう。

配送計画に対する最適化手法では、実用上はメタ解法（特にタブー探索や誘導局所探索などの局所探索法を基礎としたもの）が推奨される。これらのメタ解法の特徴は、単に長時間回せば良好な解に至るということだけではなく、短時間でもある程度の性能の近似解を算出するという点にある。また、航空機や鉄道の乗務員スケジューリングなど、制約が極端にきついタイプの配送計画に対しては、集合被覆アプローチ（列生成法、分枝価

格法)とよばれる手法が有効になる。このアプローチでは、新たな列(ルート)を生成する部分に、問題依存の工夫を取り入れるだけで、集合被覆問題(左辺の係数が0または1, 右辺がすべて1で不等式が \geq の0-1整数計画問題)に帰着できるため、市販の数値計画ソルバーをもとにしたシステムが比較的容易に構築できるというメリットがある。

配送計画に対しても、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マイズ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実用化も課題である。在庫が絡んでくるので、この融合モデルは、動的かつ確率的な要因を考慮する必要があり、かつ多期間を扱うので、規模も大きくなる。

配送計画以外の汎輸送モデルに関する研究は、未だ不十分である。長距離輸送を想定した場合には、積み替えや輸送モード(頻度)の選択も同時に考慮しなければならず、さらに積み替え地点の選択も意思決定項目に入ってくる場合もある。これらの問題の意思決定レベルは、タクティカル以上になるので、動的かつ確率的な要因も考慮しなければならない。

価格の動的な変更を考慮したモデル将来の課題である。均一料金で輸送をしているために、帰り荷がなく空輸送している輸送機関は、動的価格付けの導入を検討すべきである。この際、問題になるのは、価格を変えると需要がどのように変化するのかを、定量的に分析することであるが、現状では、山勘による価格変更しか成されていない段階である。

4 汎スケジューリングモデル

サプライ・チェーンの本質は、活動を行う量(活動水準)とタイミングを決定し、資源を時・空間内に移動させることである。ここで、資源の移動に関する部分は制約として扱い、活動の水準とタイミングを決定するためのモデルを総称して汎スケジューリングモデルとよぶ。汎スケジューリングモデルは、スケジューリング、動的ロットサイズ決定などの諸モデルを含む。

スケジューリングに関する研究は膨大であり、最近では高性能のメタ解法の実用化が進んでいる。(まだ市販のスケジューリングシステムではディスパッチングルールに基づく簡易ヒューリスティクスの利用が大半であるが。)実際のスケジューリングは動的であるが、研究では時間を止めて、すべてのデータが与えられていると仮

定して最適化を試みるものが多い。将来のデータがまったく分からないという完全に動的な環境を想定した場合には、オンラインヒューリスティクスとよばれる一連の研究がある。これは、簡単なルールに基づくヒューリスティクスの性能を評価する理論的な研究であり、実際問題へのインパクトは洞察に限定される。確率的スケジューリングも同様で、簡単なヒューリスティクスに対する洞察を得るための理論的な研究の範疇を出ていない。

動的ロットサイズ決定とは、時間を複数の離散的な期に分割し、期内の需要量を集約することによって、段取りとよばれる準備活動をいつ行うかを決定するモデルである。多期間のモデルであることを強調するため「動的」という呼び名がついているが、実際には、ある一定の期以降のデータは無視した静的な問題を取り扱う。実際に、動的な環境に対処するためには、ローリング・ホライズン方式を用いる必要がある。期を細かくとれば、(在庫を考慮した)スケジューリングモデルになるので、スケジューリングよりも汎用的であるが、その分求解が困難になる。一般には、段取りを表す0-1変数と生産量を表す実数変数が混在するため、スケジューリングより解きにくい。推奨される解法は、小規模問題例なら数値計画ソルバーをもとにして、切除平面や強い定式化を駆使する方法で、中規模以上なら、数値計画ソルバーをもとにしたメタ解法[2]である。

実際には、確定された受注のデータと将来の不確実な予測需要が混在したモデルが理想である。そのためには、スケジューリングとロットサイズ決定を融合し、不確実性を含んだおおまかな生産量は、ロットサイズ決定モデルで決め、生産順序に関する細かい指示は、スケジューリングモデルで決めるといった枠組みが有効である。このようなアプローチは、混合整数計画/制約論理(MIP/CP)アプローチとよばれ、基礎的な適用事例が数例出ている。これをより洗練させ、汎用の解法とすることは、この分野の重要な課題である。

5 汎在庫モデル

サプライ・チェーン内を流れる物資が、時間が経過しても移動せずに滞留しているときに在庫は発生する。一般に、在庫は、サプライ・チェーン内では、潤滑油の働きをされると言われるが、実際には、在庫をもつ動機は様々である。現場に積み残されている商品の在庫を一緒に捉えていては、最適化は不可能である。在庫を最適化するには、在庫を要因別に分類し、在庫とトレードオフ関係にある要因を発見し、個別にモデルによって最適化を行う必要がある。ここでは、これらの個別の在庫モデルを

統合したものを汎在庫モデルとよぶ。

汎在庫モデルは、本質的に確率的かつ動的なモデルを取り扱う。古典的な在庫モデルは、在庫方策に基づくものであり、最適化は方策のパラメータ（基在庫レベルや発注量）を決める際に用いられる。最近では、単一の在庫地点だけでなく、サプライ・チェーン全体におけるパラメータの最適化も可能になってきた。需要を定常な確率過程とし、容量制約がない場合には動的計画によって最適解を得ることができる。容量制約付きで任意の需要データでも（近似）最適化が可能な手法として、無限小摂動解析に基づくものがあげられる。この手法は基本的には、シミュレーションをしながら最適化を行うものであり、適用範囲は広いが、計算時間が膨大になる。並列計算機による高速化ならびに実用的な付加条件の考慮が今後の課題である。

一方、タクティカル（中期）レベルの意思決定として、安全在庫をどこにどれだけ配置すれば良いかを決定する安全在庫配置モデルも最近注目を浴びている。安全在庫配置モデルでは、リード時間（発注から到着までの時間）を変数であると仮定し、その最適化を行う。このモデルを用いることによって、どの点に安全在庫によるバッファを設けて押し出し・引っ張りの境界とするかを定めることができる。解法としては、動的計画による多項式時間解法（ただし木ネットワークに限定）、数値計画ソルバーをもちいた分枝限定法、メタ解法が提案されているが、比較的楽に実用規模のモデルが解けるようである。今後の課題は、様々な付加条件をどのようにモデルに組み込んでいくかがあげられる。

6 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・ネットワーク設計モデルの目的は、単位期間ベースのデータをもとに、ロジスティクス・ネットワークの形状を決めることにある。モデルを求解することによって得られるのは、倉庫、工場、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である。複数の期にまたがる在庫を考慮した多期間モデルは、生産計画の一般化と捉えることもできる [1]。

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であり、長期的な視点に立った最適化を行う。この場合には、需要量、為替、ならびに災害（テロや地震や大雪）などの様々な不確実性要因を考慮して、ネットワークの形状を決める必要がある。また、他のプレーヤー（たとえば部品や原材料の供給会社）との契約や提携も重要であり、様々な不確実要因に対処できるよ

うに（不確実性に強いという意味で）頑強かつ（不確定要因の実現値に応じてネットワークの形状を変化させようという意味で）柔軟なネットワークを設計する必要がある。最適化の範疇としては、確率計画とよばれる手法を用いるが、不確定要因の数が増えるとシナリオ木が急速に増大するため、問題に応じた工夫や並列計算が実用のためには重要になる。

動的価格付けを多期間のロジスティクス・ネットワーク設計に組み込んだモデルも重要であるが、ほとんど研究がない。単に、需要を価格の変数としたモデル化をただけでは不十分であり、値下げによる顧客需要への影響を顧客細分ごとに、定量的に把握することなしに、単純なモデルで最適化をすることは危険である。実際に、GM や日本マクドナルドの一時的な低価格戦略は、短期的な需要の増大と利益の上昇をもたらしたが、長期的には負の結果だけを残した。顧客細分ごとの消費者行動を考慮した動的価格付けロジスティクス・ネットワーク設計モデルは、今後の課題である。マーケティングの分野でも、消費者行動のための数理モデルがあるので、それらとの融合モデルは容易に構築できるが、絵に描いた餅にならないように、詳細なアンケートやデータ分析に基づいた現実的なモデルを作成すべきである。

7 おわりに

ここで述べたモデルは、サプライ・チェーンに関連する最適化モデルの一部であり、さらなる実際問題は、実務家との共同作業によって掘り起こさなければならない。これは、継続して成すべき課題である。

一方、ある程度定型化されたモデルに対しては、適当な指針にしたがえば、適用可能な手法が選択できるようになってきた。現在、我々の研究グループでは、上で述べた様々な手法を組み込んだ Windows アプリケーションシステムと Web 経由での求解サービス（Web サービス）を構築している。また、並列計算機（Grid コンピューティング）を駆使した高速化ならびに頑強化も実験を重ねている。

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, 村岡秀紀. 数値計画ソルバーを用いたメタ解法. システム/制御/情報, 6(13), 2005. 掲載予定