

サプライ・チェーン最適化 —モデル，アルゴリズム，意思決定支援システム—

Supply Chain Optimization

—Model, Algorithm and Decision Support System—

久保幹雄

東京海洋大学 流通情報工学科 東京都江東区越中島 2-1-6

Mikio KUBO

Tokyo University of Marine Science and Technology

kubo@e.kaiyodai.ac.jp

Abstract Recently there has been much interest in the area of supply chain in both industry and academia. I have proposed new paradigms for modeling the supply chain, derived algorithms for solving these models, and developed decision support systems (DSSs) incorporating these algorithms. The developed DSSs include inventory policy optimization, safety stock allocation, vehicle routing, logistics network design, revenue management, forecasting, lot-sizing, and scheduling. All of them can be used via internet.

1 はじめに

最近，サプライ・チェーンに対する研究がさかんになってきましたが，実務と理論にはまだ大きなギャップがあります．このギャップを埋めるために，研究者側からできることは，旧来の理論的な研究対象であった古典モデルを，より実務に直結するように拡張すること，拡張されたモデルに対してアルゴリズム（解決法）を導き出すこと，さらにこれらのアルゴリズムを組み込んだ意思決定支援システムを構築することであると考えられます．

我々が開発したサプライ・チェーン最適化のための意思決定支援システムとしては，在庫方策最適化，安全在庫配置，配送計画，ロジスティクス・ネットワーク設計，収益管理，需要予測，ロットサイズ決定，スケジューリングなどがあります．これらの意思決定支援システムは，すべてWebアプリケーションであり，インターネット経由で使用することができます．

本稿では，これらの意思決定支援システムの概要（特にモデルについて）と各システム間の関係（情報のやりとり）について解説します．

2 モデルについて

情報技術（Information Technology: IT）というと，インターネットでパソコンの発注ができたり，携帯電話をかざすだけで自販機からジュースが買えたりすることを思い浮かべるでしょう．実は，これらのことはITの一方の側面だけをみたものなのです．企業体におけるITの利用法は，大きく分けて処理的ITと解析的ITに分類されます（図1）．

処理的ITとしては，販売時点管理（POS: Point-Of-Sales）システムや企業体資源管理（ERP: Enterprise Resource Planning）ソフトウェアに代表されるような，情報の自動処理を行うシステムがあげられます．これらのシステムは，エンドユーザーが直接データ入力などの処理を行うため，直感的に使いやすく，内容についても分かりやすいシステムになっています．

人間にたとえると，処理的ITは神経網みたいなものです．神経網があると指先に何が触れたか分かりませんが，神経網だけでできる処理は，膝をトンカチで叩くと足がピクリと反応するなどの反射的な処理に限定されます．これは，企業体においては，POSレジなどから必要の情報は得ること

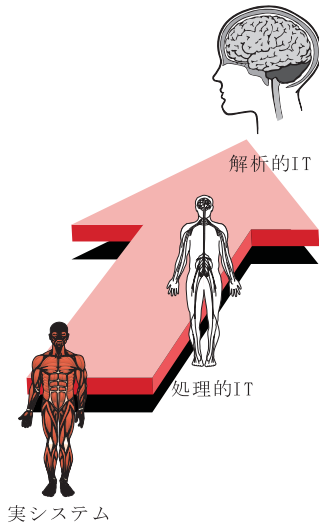


図 1: 実システム, 处理的IT, 解析的IT

ができて、それだけではせいぜい売れ線の商品を見つけること程度であることに相当します。

一方、解析的ITは意思決定を支援するために用いられます。处理的ITを人間を神経網に例えるなら、解析的ITは人間の頭脳にあたります。頭脳は、神経網によって集められた情報を分析し、それを活用して意思決定を行います。たとえば、POSレジ経由で集められた商品の需要は、予測システムによって将来の需要予測に変換され、生産計画システムによって工場内の生産指示に変換され、配送計画システムによって、トラックの配送指示に変換されます。さらに、蓄積された情報を用いて、工場の閉鎖や新設、調達先の変更などの長期的な意思決定を行うこともできます。解析的ITでは、実際問題を抽象化した「モデル」を作成し、そのモデルに対して最適化やシミュレーションを行うことによって、実際問題の解決の助けになる解や代替案の評価を行います。これらのシステムは、モデルという抽象化した世界を経由するため、対象となるモデルについての深い理解が必要になります。

我々が開発した最適化システムも解析的なソフトウェアの範疇に含まれます。そのため、これらのシステムを使いこなすには、システムに内在するモデルについて十分に理解する必要があります。

一般に、実際問題を解決するための手順は、図2のようなプロセスを経る必要があります。処

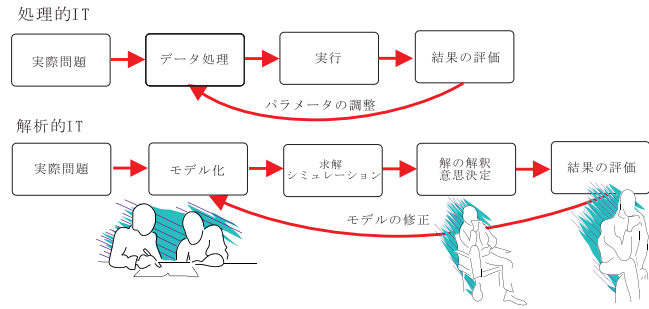


図 2: 处理的ITと解析的ITにおける処理手順

理的ITにおいては、データ処理から実行までがダイレクトに行われるのに対して、解析的ITのユーザーは、実際問題をモデルに翻訳する作業や、結果の解釈や、それをもとにした意思決定をしなければなりません。そのためには、現場で使われている用語をモデル内で使われている用語に翻訳したり、枝葉の条件を取り払ったり、条件を加工したりして、モデルに変換する必要があります。これには、モデルの理解だけでなく、問題の変形のセンスが必要になります。問題の変形は、「帰着」ともよばれ、画一的な手順で表すことのできない、問題に応じた職人芸（アート）が必要となります。

3 サプライ・チェーン最適化モデル

サプライ・チェーンを最適化の切り口から捉えてモデル化するには、意思決定のレベルで分類することが常套手段です。ここで意思決定レベルとは、簡単に言えば、その意思決定がどのくらいのスパンで行われるかを表します。大雑把に分類すると、年次以上の長期の視点で行われる意思決定をストラテジック（長期、戦略）レベル、週次や月次の中期の視点で行われる意思決定をタクティカル（中期、戦術）レベル、分、時間、日の短期の視点で行われる意思決定をオペレーショナル（短期、作戦、運用、業務）レベルとよびます。

ストラテジックレベルの意思決定は、一度決めると数年間は変更ができないものを扱います。たとえば、工場や配送センターの閉鎖や新設などが代表的です。これらの意思決定を支援するためのモデルとして、ロジスティクス・ネットワーク設計モデルがあります。このモデルは、ロジスティ

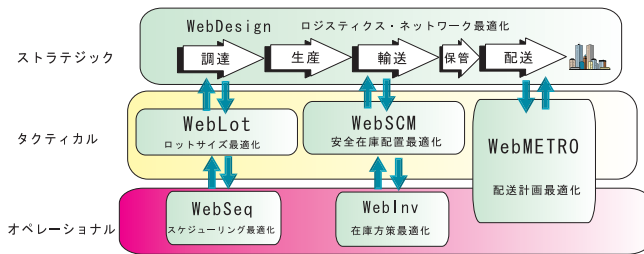


図 3: サプライ・チェーン最適化システム

クス・ネットワーク最適化システム WebDesign に組み込まれています。

タクティカルレベルの意思決定システムには、オペレーショナルレベルとストラテジックレベルをつなぐためのすべてのシステムが含まれます。

たとえば、月単位や週単位で決定される生産計画システムや輸送計画システムは、タクティカルレベルの意思決定支援システムの代表例です。月や週を単位期間とした多期間を考慮して、生産と輸送を同時に最適化するためには、多期間のロジスティクス・ネットワーク設計モデルを用います。このモデルも、ロジスティクス・ネットワーク最適化システム WebDesign で扱うことができます。

サプライ・チェーン内のどこに安全在庫を配置するかを決定するための意思決定もタクティカルレベルに属します。安全在庫の最適配置を決めるには、顧客サービスと在庫費用のトレードオフを考慮する必要があります。このトレードオフ関係を最適化するためのモデルが、安全在庫配置モデルです。このモデルは、安全在庫配置システム WebSCM に組み込まれています。

また、サプライ・チェーン内の諸活動をどれだけまとめて行うかを決める、いわゆるロットサイズの意思決定もタクティカルレベルに属します。実際にはオペレーショナルに近いタクティカルの意思決定なので、タクティカル・オペレーショナルレベルとよばれることもあります。生産や輸送の活動をどれだけまとめて行うかを決めるためには、活動に伴う段取り費用と在庫費用のトレードオフを考慮する必要があります。これを最適化するためのモデルは、ロットサイズ最適化モデルとよべれます。このモデルは、ロットサイズ最適化システム WebLot に組み込まれています。

オペレーショナルレベルの意思決定には、毎日繰り返し用いられる意思決定からリアルタイムで決定しなければならない意思決定が含まれます。

たとえば、工場内のスケジューリングの作成やトラックの配送計画などが代表例です。スケジューリングに関しては、スケジューリング最適化システム WebSeq で、配送計画に関しては、配送計画最適化システム WebMETRO で解説します。ちなみに、配送計画はタクティカルレベルの意思決定でも用いられます。たとえば、コンビニエンスストアにおける配送では、一度作成したトラックの巡回順は、商品の大幅な入れ替えが行われるまで変更しません。これは、日々の巡回順の変更による費用の削減よりも、毎日同じルートを通じるドライバーが巡回することによる安定性を重視するためです。

日々の需要の変動に応じた在庫のコントロール方策のためのパラメータ決定もオペレーショナルレベルの意思決定になります。これは、在庫方策最適化システム WebInv で扱います。

実際のコンサルティングでは、ストラテジック、タクティカル、オペレーショナルの境は厳密なものではなく、実際問題に応じて柔軟に視点を変化させることが重要になります。また、これらのシステムは、お互いに情報を交換しあい、協調してサプライ・チェーン全体を最適に運用することが理想です（図 4）。

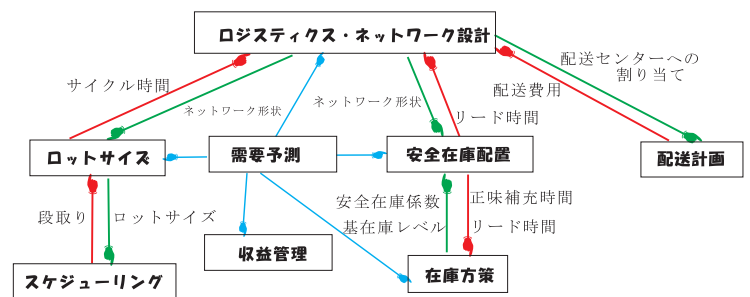


図 4: システム間の情報のやりとり

4 在庫の分類とモデル

サプライ・チェーンを考えると、在庫はあらゆるモデルで登場し、かつ幾つかのモデルにお

いては中心的な役割を果たします。一言で言うと、サプライ・チェーン内では、在庫は潤滑油の働きをします。しかし、実際には、在庫をもつ動機は様々です。たとえば、調達の責任者は、まとめ買いをすると単価が下がるために、在庫を増やします。販売責任者は、顧客が欲しいときに商品がないと困るので、十分な在庫をもつことを倉庫の責任者に要求します。生産責任者は、ピークの需要に生産が間に合わない困るので、空いた時間で生産をすることによって在庫を積み増しします。このように、現場の在庫は、色々な意思決定者の色々な動機によって積み重ねられているものなのです。そのため、現場に積み重ねられている商品の在庫を一緒に捉えていては、最適化は不可能です。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、個別撃破していかなければなりません。

以下では、在庫を動機別に分類するとともに、トレードオフ関係にある項目を抽出し、さらにトレードオフを最適化するためのモデルについてまとめておきます。

4.1 輸送中在庫

輸送中在庫は、サプライ・チェーン内を品目が移動しているときに必然的に発生する在庫で、パイプライン在庫ともよべれます。これを削減するためには、輸送時間が短い輸送モードで運ぶ必要がありますが、輸送時間の短縮にはそれなりの費用がかかります。すなわち、輸送中在庫費用は、輸送のスピードのための費用とトレードオフ関係があります。このトレードオフ関係は、ストラテジックレベルの意思決定であるロジスティクス・ネットワーク最適化システム WebDesign に組み込まれています。

4.2 サイクル在庫

サイクル在庫とは、輸送や生産が定期的に行われているときに発生する在庫です。たとえば、一週間に一度だけある港から別の港に輸送を行う船を考えたとき、両方の港では、最大で一週間分の需要量だけの在庫をもつこととなります。需要のスピードが一定であると考え、ちょうどその半分の平均在庫をもつこととなります。これがサ

イクル在庫です。サイクル在庫を減らすためには、輸送を頻繁に行えば良いのですが、輸送には固定費用がかかるので、そのための費用が増大します。すなわち、サイクル在庫費用は、輸送の固定費用の和とトレードオフ関係にあります。

同様に、生産ラインにおいても同じ品目だけずっと生産し続けるのではなく、定期的に別の品目に切り替える必要があります。生産の切り替えの際には、段取り費用とよばれる固定費用がかかりますが、生産におけるサイクル在庫は、この段取り費用の和とトレードオフ関係にあります。このトレードオフ関係は、ストラテジックレベルではロジスティクス・ネットワーク最適化システム WebDesign に、オペレーショナルレベルでは在庫方策最適化システム WebInv に組み込まれています。

4.3 ロットサイズ在庫

ロットサイズ在庫は、サイクル在庫の需要が一定のスピードでない場合の呼び名です。需要のスピードが一定でない場合には、輸送や生産の頻度もまちまちなります。このような場合には、輸送や生産をまとめて行う際に発生する在庫の意味で、ロットサイズ在庫とよべれます。ロットサイズ在庫も、サイクル在庫と同様に、輸送や生産の際の固定費用とトレードオフ関係があります。このトレードオフ関係は、ロットサイズ最適化システム WebLot を用いて適正化されます。

4.4 作り置き在庫

作り置き在庫は、季節変動をもつ需要に対して、限られた資源で対応するために発生する在庫です。たとえば、夏場に需要が集中する清涼飲料水の缶は、春先から製造を開始して、倉庫に保管をしておきますが、これは作り置き在庫になります。ジュースの原料の果物のように、供給側が季節変動するために発生する在庫も、作り置き在庫とよぶことにします。作り置き在庫は、ピーク時に対応できる生産資源があれば 0 にできるので、生産資源を確保するための固定費用や残業代などの資源超過費用とトレードオフ関係にあると考えられます。このトレードオフ関係は、ストラテジックレベルではロジスティクス・ネットワーク最適

化システム WebDesign で、タクティカルレベルではロットサイズ最適化システム WebLot で最適化することができます。

4.5 安全在庫

安全在庫は、需要の不確実性に対処するために保持する在庫です。将来における顧客需要の予測は「必ず」外れます。そのため、品切れをなくし、かつ顧客のニーズに迅速に対応するためには、ある程度の在庫を抱えておく必要があります。顧客サービスを定量化することは、一般には難しいことですが、いつでも、すぐに、確実に商品が手に入ることと定義しておきます。安全在庫は、このような顧客サービスとトレードオフ関係にあります。このトレードオフ関係は、ストラテジックレベルではロジスティクス・ネットワーク最適化システム WebDesign に、タクティカルレベルでは安全在庫配置システム WebSCM に、オペレーショナルレベルでは在庫方策最適化システム WebInv に組み込まれています。

5 システム概観

すでに開発済みのサプライ・チェーン最適化システムを簡単に紹介しておきます。

在庫方策最適化システム WebInv は、日々の需要の変動に応じた在庫のコントロール方策のためのパラメータを最適化します。通常の在庫管理では、単一の地点の安全在庫量を、勘で決められたサービス率によって決定する方法が多く用いられています。しかし、発注先（小売店では卸、卸ではメーカーなど）が在庫切れを起こした場合には、目標とするサービスが達成できなくなることから明らかのように、各在庫地点の適正在庫量は、サプライ・チェーン全体を考えて決めなければ全体最適にはなりません。WebInv を使うと、全体最適な基在庫レベル、ならびに発注点、発注量を求めることができます。WebInv に実装されているアルゴリズムは、動的計画とシミュレーションをしながら非線形最適化を行う方法です。前者は、連続補充方策を用いたときの基在庫レベルを算出し、後者は定期発注方策を用いたときの近似的な基在庫レベルを算出します。

安全在庫配置システム WebSCM は、サプライ・チェーン内のどこに安全在庫を配置するかを決定します。この意思決定は、WebInv よりやや上位のタクティカルレベルに属します。WebSCM では、サプライ・チェーン全体を通して、どこに安全在庫を配置するかを、戦略的に最適化することを目標とします。ある統計によると、日々の運用によって決まる在庫費用は、全体の 20 % 程度で、その他の 80 % は、戦略的な（中・長期的な）在庫の配置によって定まってしまうとされています。WebSCM の狙いは、この 80 % の部分を最適化を用いて削減することです。しかし、サプライ・チェーン全体を考えて在庫を削減することは、現実には簡単なことではありません。それぞれの在庫地点は、異なる意思決定者によって運営されている場合が多いので、全体を考えて最適化した結果を適用するためには、個々の意思決定者の利害関係を調整して、説得する必要があるからです。その際には、サプライ・チェーン全体を考えた定量的なモデルが必要不可欠となります。WebSCM は、そのための補助としての役割を果たします。安全在庫配置モデルは、サプライ・チェーン全体を最適化によって改善しようとする際の取っ掛かりとなるモデルです。そのため、サプライ・チェーン改善のプロジェクトの際には、まず主力の品目に対して WebSCM を適用して、最適化の効果を確認することをお薦めしています。WebSCM における最適化には、動的計画とメタ解法を用いたアルゴリズムを用いています。

ロジスティクス・ネットワーク最適化システム WebDesign は、サプライ・チェーン全体のネットワーク設計を行うときに用います。WebDesign の第一の目標は、サプライ・チェーン全体を通じたストラテジック（戦略的）な意思決定を包括的に支援することです。ストラテジックレベルの意思決定には、どこから原材料（もしくは部品）を調達するか、どの工場のどの生産ラインで生産するか、どの地点からどの地点にどのような輸送手段（モード）で輸送を行うか、どのような生産方式で生産を行うか、どこに工場もしくは倉庫を新設するか（もしくは移転するか、閉鎖するか）などがあります。これらの意思決定を、1 年以上、数年から数十年のスパンで計画するのが、ストラテジックレベルの意思決定です。

WebDesignの第二の目標は、サプライ・チェーン全体（もしくは一部）に対するタクティカル（戦術的）な意思決定を支援することです。タクティカルレベルの意思決定には、いつ、どこから原材料（もしくは部品）を調達するか、いつ、どの工場のどの生産ラインで、どれだけ生産するか、いつ、どの地点からどの地点にどのような輸送手段（モード）で輸送を行うか、短期的に賃貸が可能な施設をどのようなタイミングで利用するか、などがあります。これらの意思決定を、数ヶ月から数年のスパンで計画するのがタクティカルレベルの意思決定です。現在、WebDesignの最適化には、分枝限定法による厳密解法を用いていますが、将来的にはメタ解法の実装も考えています。

ロットサイズ最適化システム WebLot とスケジューリング最適化システム WebSeq は、ともに工場内における生産の意思決定の支援を行うためのシステムです。WebLot は主にタクティカルレベルで用いられ、WebSeq はオペレーショナルレベルで用いられます。

WebLot でロットサイズ（生産をどれだけまとめて行うか）を決めた後、まとめた生産を作業として登録して WebSeq を用いることによって、ロットサイズを考慮した作業の順序が決定できます。WebLot の基礎になるロットサイズ決定問題とは、複数の品目の最適な生産量を決定するモデルです。ロットサイズ決定問題には色々な解釈が可能です。従来の MRP（Material Requirement Planning；資材所要量計画）で近似的に扱っていた各工程別の資源制約を厳密に満たした生産スケジュールを求める問題と捉えたり、APS（Advanced Planning and Scheduling）では適当なルールによって決められていたロットサイズを、最適に決定する問題と捉えることができます。WebLot の最適化には、数理計画ベースのメタ解法を用いています。

WebSeq のソルバー部分は、野々部-茨木両先生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ヒューリスティクスです。このソルバーは、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ものですが、WebSeq は、実務家にとって分かりやすいモデルのみを抽出し、インターフェイスをつけたものです。

配送計画最適化システム WebMETRO は、トラックなどの輸送資源が、複数の需要地点（顧客）

に対して巡回輸送（配送）を行う際の巡回順（ルート）の最適化を行います。ほんの 15 年ほど前には、配送計画は人間の長年の勘と経験に基づく必要があるため、最適化は不可能であると言われていました。そのような日本の現状を打破するために開発したのが、配送計画最適化システム METRO（MEta Truck Routing Optimizer）です。METRO は、当時その有効性が認識されはじめていたメタ解法をベースとして、簡単なユーザーインターフェイスを付けたシステムですが、現在までに多くの企業で使用され、ソルバー部は数社の販売するシステムのコア部分として利用されています。

ここで紹介する WebMETRO は、METRO を簡略化して、Web アプリケーションに書き直したものです。配送計画の実際問題を解決するためには、現場に応じた様々な付加条件を考慮する必要が出てきますが、WebMETRO は、その第一刀として利用できると考えています。

需要予測システム WebForecast は、最適化を用いて需要予測を行うシステムです。需要予測は、他のシステムの基礎データを与えます。

収益管理最適化システム WebRM（Revenue Management）は、ホテルの部屋や航空機の座席など、ある時刻がくるとその価値が失われる資産（陳腐化資産）に対して、価格を動的に変更することによって収益を最大化するシステムです。現在のバージョンでは、主に宿泊業を想定して作成されています。

WebForecast ならびに WebRM は、まだ基礎的な部分を実装したプロトタイプのシステムです。

6 おわりに

ここで解説したシステムは、すべて以下の Web サイトで体験することができます。

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

詳細については、本として出版する予定です。また、現在、大規模問題に対する高速化のために、一部のシステムに対しては、PC クラスタを用いた並列アルゴリズムを設計中です。