

サプライ・チェーン最適化システムの 統合と連携について

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を一段上から眺めた抽象モデルを提案するとともに、理論と実務の現状の整理と問題点、今後の研究の方向性について考える。

2. サプライ・チェーン抽象モデル

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・エンジニアや研究者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応用を対象とした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）。

サプライ・チェーンの理論や実務については、様々

な場所で分野を超えた交流が成されているが、分野ごとに使用されている用語の意味や定義が異なるため、議論が噛み合わず、有益な交流ができていないとは言い難い。例えば、ある分野ではサプライ・チェーン最適化とは「在庫」を適正化するための手法として捉えられており、別の分野ではサプライ・チェーン最適化とは工場内のスケジューリングを指していたりする。異分野間の交流は、サプライ・チェーンのような複合的な学問体系にとっては必要不可欠なものであるが、これらの現象を目のあたりにし、研究者たちが同じ土俵で議論するためのモデルの必要性を痛切に感じた。これが、モデル間の関係を明確化するための抽象モデルを考えるに至った動機である。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、(一般化された)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。ここで提案する抽象モデルでは、サプライ・チェーンを空間(点)、時間(期)、資源、活動の四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。これらの構成要素の中心に活動(activity)を据え、活動を基準として、資源を時・空間内に移動させることがサプライ・チェーンの本質であり、目的であると考え(図1)。以下では、このモデルを活動基準サプライ・チェーン抽象モデルと呼ぶ。管理会計の分野には、活動基準原価計算(activity based costing)と呼ばれる手法があるが、この手法は、ここで提示するモデルにおいて、活動と財務資源の関係を定めるときに有効である。

N : 点の集合。

くほ 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

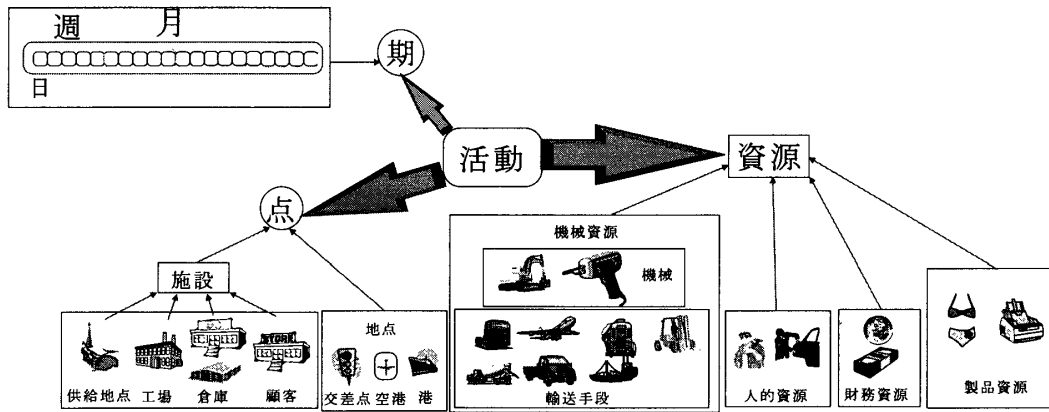


図1 活動基準サプライ・チェーン抽象モデル

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呼ぶ。点（集合）間には集約・非集約関係が定義できる。例えば，顧客を集約したものが顧客群となる。

\mathcal{P} ：期の集合。

期とは連続時間を離散化したものである。最も単純な期集合は，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， $t_{i+1} - t_i (= \delta)$ を期集合の幅と呼ぶ。サプライ・チェーンをモデル化するには，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 \mathcal{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。例えば，日を集約したものが週であり，週を集約したものが月（もしくは四半期や年）となる。

\mathcal{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。

\mathcal{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）と呼ぶ。活動（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。

\mathcal{PRN} ：資源 r が期 t に点 i 上に存在することが可能な三つ組 (t, r, i) の集合。

\mathcal{AD} ：活動 a が期 t に行うことが可能な二つ組 (a, t) の集合。

$\mathcal{PRN}(a, t)$ ：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三つ組 (s, r, i) の集合。

A_{ari}^{st} ：期 s に活動 a を行ったとき，期 t に資源 r が点 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} ：期 t における点 i 上での資源 r の上限（下限）。

$x_{at} (\in \mathbb{Z}_+ \text{ or } \{0, 1\})$ ：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）。

目的関数は，変数 x_{at} によって定まる分離可能な費用関数

$$\sum_{(a, t) \in \mathcal{AD}} f_{at}(x_{at})$$

と，各 $(t, r, i) \in \mathcal{PRN}$ に対して定まる資源制約の逸脱量のペナルティ付きの和を最小とするものとする。

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

この制約は，資源量の上下限や原材料の供給量上限，需要を満たすための条件などを表す。

その他の制約として，活動間の依存関係を考える。この制約は，「活動 a が期 t に行われると，活動 a' も同じ期 t に行われなければならない」などの形式で表現され，具体的には，スケジューリングにおける活動間の先行制約や，トラックを運行させる活動を行うためには運転手が移動するという活動を同時に行う必要があることなどを表す。

実ロジスティクス・オブジェクトである顧客，配送センタ，トラックなどは，上で定義した抽象ロジステ

ィクス・オブジェクト（点，資源）から派生させて作成する。

例えば，点を，ID，名称，位置情報（緯度・経度），郵便番号，電話番号，住所などの属性，点の集約・非集約関係を表すデータ構造，地図上への描画メソッドなどをもつクラスとして設計し，顧客クラスを，点クラスから派生させ，配送可能な配送センタの集合，配送センタ間の移動時間，入庫可能なトラック，配送可能な時間枠などの属性を付加して生成する。また，倉庫や配送センタは，点クラスに総床面積，高さなどの容量を表す情報，仕分けや加工などの可能な活動の集合を付加して生成する。

同じように，資源を，ID，名称，使用可能な期間の集合，購入の際の固定費用，継続期間，再生期間，集約・非集約関係を表すデータ構造をもつクラスとして設計し，輸送手段クラスを，資源クラスから派生させ，移動費用，平均時速，積載重量上限，積載量量上限，稼働時間上限，単位時間あたりの稼働費用，移動開始地点（デポ）などの属性を付加して生成する。

活動については，輸送，生産，在庫，調達，販売などを表すテンプレート（雛形）を準備する。

例えば，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 $\mathcal{P}RN(a, t)$ は，以下の集合

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

の和集合と定義できる。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グミーの点である。

より具体的には，輸送活動は，発地点，着地点，活動を開始することができる期の集合，終了しなければならない期の集合（これらは輸送を行う時間枠を規程する），開始時刻，終了時刻，サイクル時間，リード時間，輸送を行う製品の集合，使用する資源の集合（輸送手段，人的資源）などの属性と，活動に付随する発地，着地の情報から，輸送に要する移動時間，移動距離，移動費用（財務資源）を計算するためのメソッドから構成されるクラスとして定義される。

同様に，生産活動は，生産される製品資源の集合，

消費される原材料資源の集合，生産に必要な資源の集合（機械資源，人的資源）などの属性をもつクラスとして定義され，在庫活動は，在庫の開始期，終了期，在庫する製品（の集合），在庫保管費用などの属性をもつクラスとして定義される。

これらの活動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と関連づけることができる。例えば，輸送を表す活動は，点の対として定義される枝 (i, j) と結びつけて考えることができる。また，製品資源や財務資源を，より具体的に製品（品目），費用（収益）に置き換えることによって，やや抽象度の低いロジスティクス・ネットワーク設計モデルを設計することができる（図2）。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）と呼ぶ。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と，生産や輸送などの活動をどの枝上で（年間レベルなどの比較的長い幅をもつ期内に）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。具体的には，倉庫，工場，ならびに生産ラインの設置や輸送機器の購入の是非を決定すると同時に，新設した工場における各製品の生産量や点間の各製品群の総輸送量を決定する。

ここで，生産量や輸送量は，生産活動や輸送活動を単位期間（例えば年間）に何単位行うかによって定まる量であり，ネットワーク理論における枝上の製品の流量（フロー量）に相当する。実際の最適化を行う際には，固定費用付きの多品種流問題に対する適切なアルゴリズムを用いる必要がある。我々が準備しているのは，数理計画ソルバを用いるものと，大近傍局所探

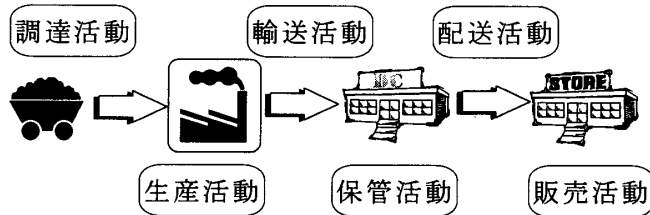
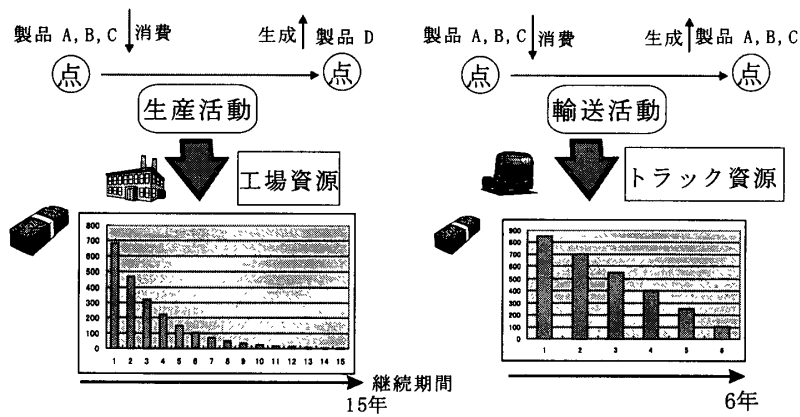


図2 ロジスティクス・ネットワーク設計モデル

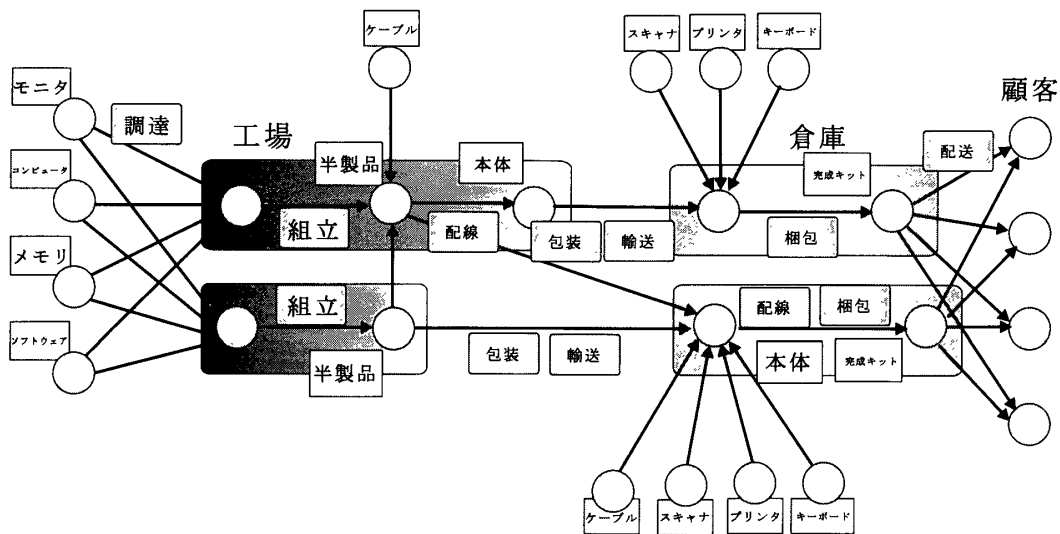


図3 ロジスティクス・ネットワーク最適化の適用例

素に基づくメタ解法であり、両者は基本的には同じモデルを対象とするが、その詳細度や解ける問題の規模が異なる。

具体性を出すために、ある業務用プリンタメーカーのサプライ・チェーンを例として示す(図3)。この例では、完成品を作るための製品・部品間の親子関係を表す部品展開表と、ロジスティクス・システム内に含まれる施設や地点を点とし、もの(製品)が移動する可能性がある点の対を枝としたネットワークを入力とすると、組立、配線、包装、輸送、梱包などの活動をどこで何単位行えばよいかを決定する。

サプライ・チェーン最適化モデルを作成するときに、

注意を払わなければならないのが「在庫」の概念である。一口に在庫といっても、その種類は様々であり、要因別に分析する必要がある。また、在庫は、複数の意思決定レベルに跨って存在するため、各レベル間の情報のやりとりを通じて、種類別の在庫量ならびに費用の辻褄が合うようにモデル化することが肝要である。ロジスティクス・ネットワーク設計モデルにおいて陽的に考慮する在庫は、サイクル在庫と安全在庫である。サイクル在庫とは、生産や発注の間隔(サイクル時間)に依存して定まる在庫であり、意思決定変数である輸送モード(これは枝上に配置される資源としてモデル化される)の選択に依存して決まる。安全在庫と

は、需要の不確実性に対処するための在庫であり、ある仮定（需要量と分散の比が顧客に依存せず一定）の下ではフロー量の凹費用関数としてモデル化できる。

ロジスティクス・ネットワーク設計モデル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。多期間ロジスティクス・ネットワーク設計モデルの意思決定レベルはタクティカルレベルである。次の期へ持ち越す在庫を明示的に変数として扱うので、期ごとに化する需要に対処するための在庫（作り置き在庫）を考慮することができる。具体的には、単位期間を月（もしくは年や日）としてを考え、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。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。

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。

4. 安全在庫配置モデル

安全在庫配置は、タクティカルレベルの意思決定で

あり、各点においてサービスレベルを満たすための安全在庫をどこにどれだけ配置すればよいかを決定する。これは、ストラテジックレベルのロジスティクス・ネットワーク設計モデルにおいて、近似的に扱われていた安全在庫を、より正確に表現したモデルであると考えられる。

安全在庫配置モデルでは、ロジスティクス・ネットワーク設計モデルにおいては定数であると仮定していたリード時間（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。

ロジスティクス・ネットワーク設計モデルと同様に、業務用プリンタメーカーのサプライ・チェーンを例として示す（図4）。この例では、ロジスティクス・ネットワーク設計問題を最適化することによって定められた生産地点と年間生産量の情報をもとに、安全在庫をどの地点に保持すればよいかを決定している。具体的には、本体の在庫を工場の生産終了地点（押し出し・引っ張りの境界）に置き、モニタ、コンピュータ、メモリを組立工程の前に適切な量だけ置くことによって、顧客需要のサービスレベルを満たし、かつ全体での安全在庫費用の合計を最小化している。本体在庫をバッファとすることにより、サプライ・チェーンは最終顧客の需要を満たす部分（後半）と本体の在庫を目標値に生産をする部分（前半）に分けられる。工場より上流のサプライ・チェーンでは、本体のエシェロン在庫ポジション（実在庫+下流の在庫+発注中の在庫）をエシェロン基在庫レベル（最適化された目標値）になるように生産を行えばよい。

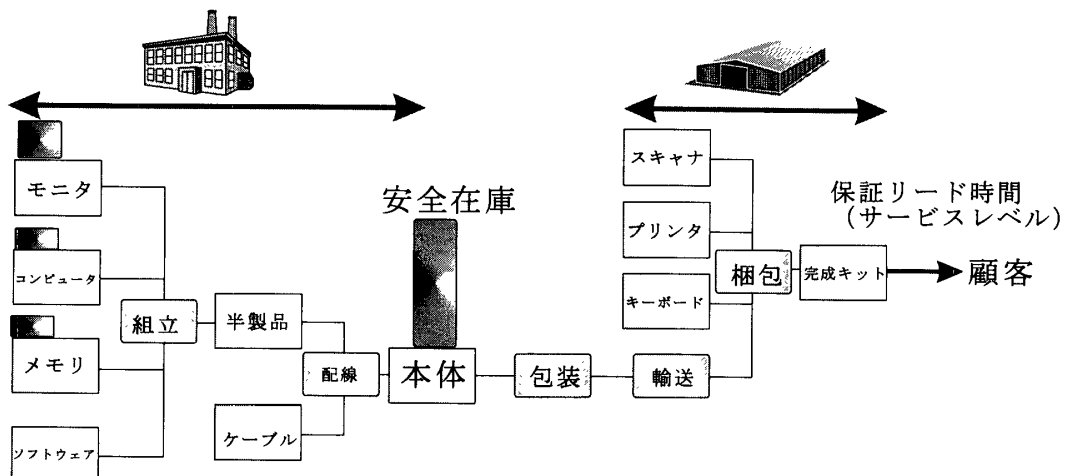


図4 安全在庫最適化の適用例

5. 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している。

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」と呼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。これは、ストラテジックレベルのロジスティクス・ネットワーク設計モデルにおいて、サイクル時間と呼ばれるパラメータを用いて定数として扱われていた生産や輸送の周期をより正確に表現したものと考えられる。

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）認知度はいま一つのようなのである。適用可能な実務は、ERP（Enterprise Resource Planning）やAPS（Advanced Planning and Scheduling）などを導入しており、かつ段取りの意思決定が比較的重要な分野である。そのような分野においては、ERPやAPSで単純なルール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たかだか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呼ぶ。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、様々な意思決定で用いることができる汎用性の高いモデルである。

前述の業務用プリンタメーカーのサプライ・チェーンの例においては、ロットサイズ決定と後述するスケジューリングは、安全在庫配置問題を最適化することによって分けられた部分問題に対して個別に適用される。サプライ・チェーンの前半部に対するロットサイズ決定の適用例を図5に、スケジューリングの適用例を図6に示す。

理論面では、最近ではロットサイズ決定問題のベンチマーク問題例の整備も進み、多面体構造の解明に基づく数理計画アプローチ、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、研究者側のさらなる努力が必要である。

6. 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

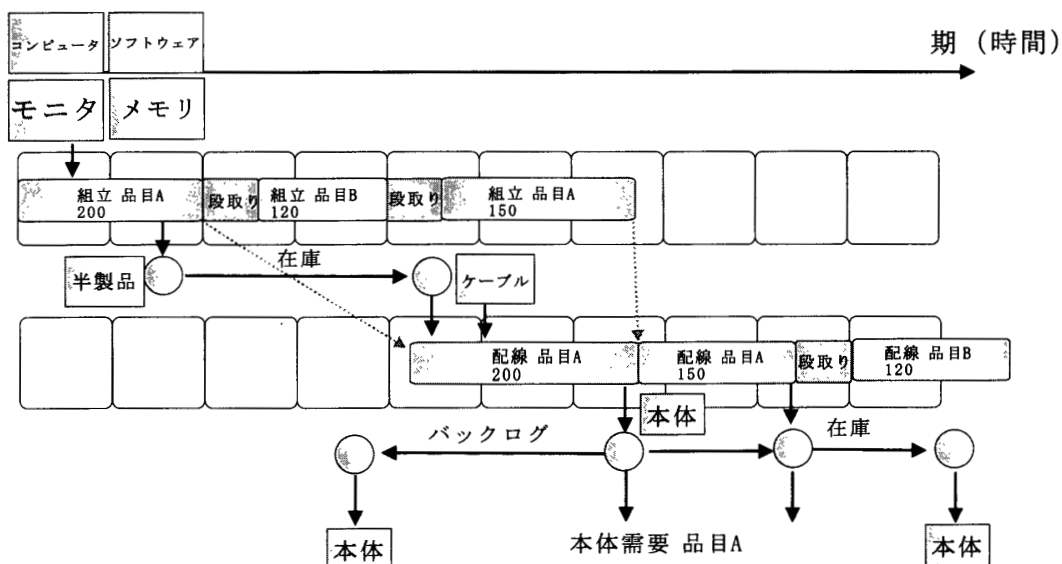


図5 ロットサイズ決定最適化の適用例

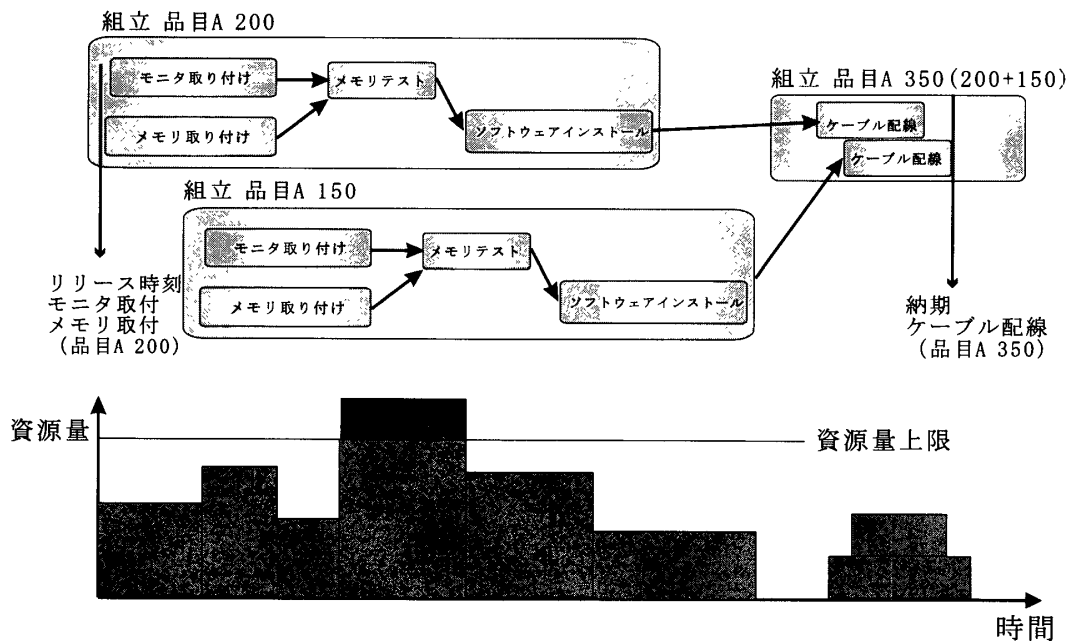


図6 スケジューリング最適化の適用例

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）と呼ぶ。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 のヒューリスティクスである。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 のヒューリ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。

7. 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空間内に散らばる活動の処理順序を決定する。ロジスティクス・ネットワーク設計モデルにおいては、移動資源の巡回順については、陽には考慮されていなかった。しかし、実際の輸送手段の移動は、空輸送を最小にするように工夫して運用されることが多い。したがって、配送計画モデルとロジスティクス・ネットワーク設計モデルは、相互にデータをやりとりしながら最適化を行うことが理想である。

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。ほんの十年位前には、「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¹でも頻繁に取り上げられるほどに普及が進んでいる。これは、他のオペレーションズ・リサーチ手法の普及のためのヒントを与えてくれる。手法の普及のためには、論文を

¹ 例えば、2003年1月16日付けの日経新聞夕刊「最速のルートを探せ」では、東芝物流への配送計画の導入事例が紹介されている。記事の一部は、日経のホームページにも掲載されている。

http://www.nikkei.co.jp/wte/20030115u261f001_15.html

書くだけでなく、現場の説得と教育、導入しない理由の調査、成功事例の蓄積、現場の声をもとにしたモデルの改良、非専門家向けの講演、共同研究、技術指導、システムの開発と低価格化、悪質な（売り逃げ）業者の排斥など地道な作業が重要なのである。

もちろん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。

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: 汎用スケジューラー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.