

サプライ・チェーン最適化のモデルと事例

Supply Chain Optimization Models and Case Studies

久保 幹雄

Tokyo University of Marine Science and Technology,
Faculty of Marine Technology,
Department of Logistics and Information Engineering, 2-1-6 Etsujima, Koutou, Tokyo
JAPAN 135-8533

Abstract

We summarize recent progress in several optimization and related techniques in supply chain management. We also mention some case studies with some remarks for solving real problems.

Keywords: supply chain, optimization, case study.

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。

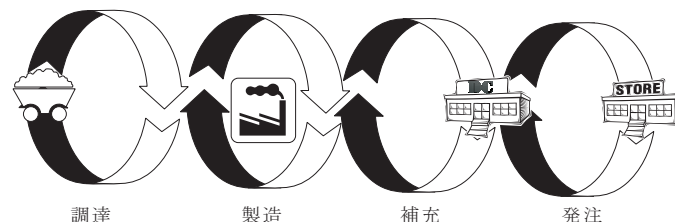


図 1: サプライ・チェーンの概念図。

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点と考える。

以下では、SCM 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モデルを分類・整理するとともに、筆者が手がけた幾つかの事例を紹介する。以下の構成は次の通り。

2 節から 5 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。2 節では、輸送関連の諸モデル、3 節では、スケジューリング関連の諸モデル、4 節では、在庫関連の諸モデル、5 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。6 節では、標準型のサプライ・チェーン最適化モデルに帰着できない幾つかの事例について述べる。最後に 7 節では、まとめと将来の展望について述べる。

2 汎輸送モデル

ここでは、物資の輸送に関連するモデルの分類について考える。

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。

汎輸送モデルを導入した動機付けを、簡潔に述べておく。我が国では、輸送や配送の名称が極めてあやふやに用いられている。そのため、現実問題と既存システムのマッチングがうまく行えず、システム導入が頓挫するケースが頻繁に発生している。輸送や配送の現実の問題は千差万別であるが、そのほとんどは幾つかの典型的なモデルに帰着可能であると考えられる。しかし、実務家にとって、自分の直面している問題が、どの典型モデルに帰着されるかを判断することは、用語の曖昧さのため極めて困難なのが現状である。たとえば、積み替えを必要とする長距離輸送の問題を解く必要があるのに、近距離輸送のための配送システムを導入することが典型である。ここでは、「輸送」に関するモデルを分類する基準を示し、幾つかの典型的なモデルを導くことによって、実務家が自分の直面する問題が、どのタイプの輸送モデルに帰着されるのかを判断できるようにすることを目標とする。

運ぶ必要のある物資を総称して荷とよぶ。荷には発地点と着地点が指定されており、荷量は分かっているものとする。荷を運ぶために必要な資源を総称して、運搬車とよぶ。運搬車には容量が指定されており、荷量の合計がそれを超えない範囲で、輸送可能であると考えられる。

汎輸送モデルは、荷と運搬車の 2 種類の資源のフローを扱うネットワーク最適化モデルと捉えることができる。5 節で考えるロジスティクス・ネットワーク設計モデルも、ネットワーク上を流れるフローを扱う。ロジスティクス・ネットワーク設計モデルでは、輸送だけでなく製品の生産・加工・保管も扱い、さらに倉庫や工場の設置の是非も同時に考える点が汎輸送モデルと異なる。また、ロジスティクス・ネットワーク設計モデルでは、需要の不確実性と顧客サービスに対処するための在庫（安全在庫）を保持することが前提であるが、汎輸送モデルでは、ネットワーク上での一時保管や待ちは考慮するが、安全在庫は含めない点が特徴である。

以下では、荷と運搬車の性質によって、汎輸送モデルの分類を行う。

2.1 分類基準

荷に関する分類基準としては、以下のものが考えられる。

1. 積み替えの可否

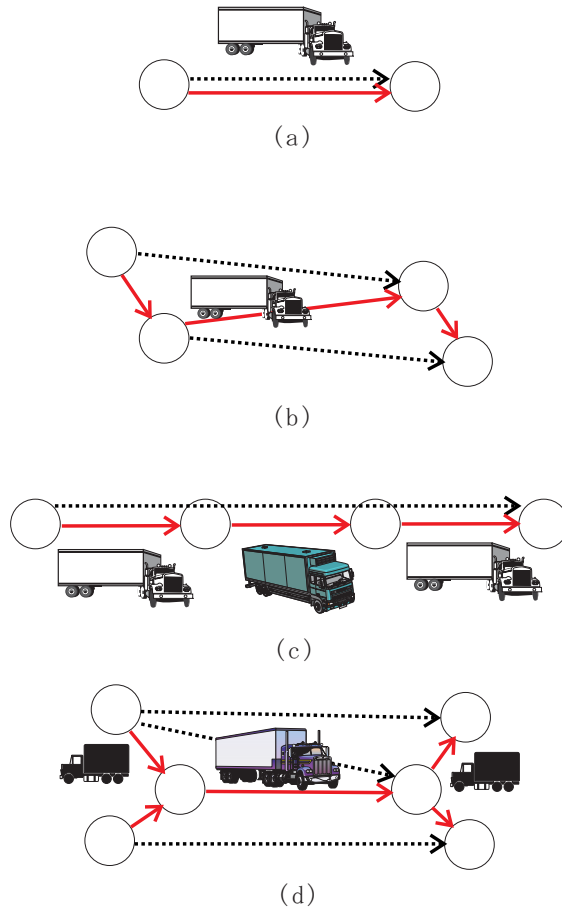


図 2: (a) 直接方式 . (b) 混載方式 . (c) リレー方式 . (d) 積み替え方式 (需要の発地と着地の対応は点線で、実際の荷の経路は実線で表している)

(a) 積み替え可能

荷を途中で別の運搬車に積み替えても良い場合 (図 2 (c),(d)) . 小口貨物を扱うときには、通常この方法が採用される . 当然、積み替えには時間と費用と積み替えを行う場所が必要であるが、これを行う利点は、荷を集めることによって、より大きな容量をもつ運搬車で運び、規模の経済性による費用の低減を図ることである .

(b) 積み替え不能

荷を発地から着地まで、積み替えを行うことなく運ぶ必要がある場合 (図 2(a),(b)) . 大口貨物を扱うときには、通常この方法が採用される . 1 つの発地・着地間の荷量が大きい場合の他にも、途中で積み替えることが難しい荷の場合にも、この方法が採用される . たとえば、冷凍食品を運ぶ場合に、途中で積み替えることによって、温度が上昇し、腐りやすくなってしまう場合が例である .

2. 混載の可否

荷を他の荷と同じ運搬車に積載することを混載とよぶ . この条件は、上の積み替えと混同されやすいが、以下の理由で区別すべきである . 配送計画モデルでは、1 つのデ

ポで積載した荷を複数の顧客へ運ぶので、混載可能であるが、荷は直接顧客へ運ばれるので積み替えは行っていない(図 2 (b) 参照)。逆に、コンテナを長距離トレーラーで運び、その日のうちに出発したデポに戻るために、別のトレーラーに積み替えてリレー方式で輸送する場合には、混載はしていないが、積み替えはしていることになる(図 2 (c) 参照)。

(a) 混載可能

異なる荷を同じ運搬車に同時に積載しても良い場合(図 2 (b),(d))。

(b) 混載不能

異なる荷を同じ運搬車に同時に積載することが禁止されている場合(図 2 (a),(c))。

(c) 混合型

特定の荷が別の荷と混載することが禁止されている場合。たとえば、臭いのつきやすい商品が、他の荷と混載することを禁止することが例である。

3. 分割の可否

(a) 分割可能

荷を複数の運搬車で分割して運んで良い場合。荷を分割することによって、運搬車の積載効率の向上が期待できるが、分割による荷の受け取りの煩雑さや、あとで1つの荷に集約する手間が増加する。1つの荷の荷量が、最大の運搬車の容量を超過している場合には、分割可能として扱わざるを得ないが、実務的には、適当な大きさに分割し、各々を分割不能として扱う場合が多い。

(b) 分割不能

荷を単一の運搬車で運ばなければならない場合。そもそも、荷が分割できない商品の場合や、荷を受け取る顧客が複数回に分けての荷の受け取りを拒否している場合が、これに相当する。

運搬車に関する分類基準としては、以下のものがある。

1. 経路

(a) 直送型

運搬車の発地から着地まで他の点を経由することなく移動する。これは、外部の輸送サービスを提供する事業者へ輸送を依頼する場合(俗に言う傭車)を想定している。

(b) 巡回型

発地を出発した運搬車が、複数の点を経由した後、再び発地へ戻ってくる場合。主に、自社内で保有するトラックで、比較的短距離の移動を想定している。

(c) パス型

発地を出発した運搬車が、複数の点を経由した後、発地とは異なる着地へ行く場合。自社内で保有するトラックで、比較的長距離の移動を想定している。

(d) 任意の枝の部分集合（オークション型）

これも直送型と同じく、外部の輸送サービスを提供する事業者に輸送を依頼する場合を想定しているが、輸送レーン（ネットワークの枝）の部分集合に対して費用が定められている。たとえば、東京から名古屋への輸送レーンと名古屋から東京への輸送レーンをセットにして、同程度の荷量を保証したときに、割り引き運賃で契約することがあげられる。

2. 料金体系

(a) 自社便

運搬車を自社もしくは関連会社で保持している場合であり、決められた稼働時間内ならば、ある程度自由に使うことができる。使わなくても、固定的に雇い入れている従業員の分の給料はかかるので、自社便を利用したときの費用は、一定の固定費用として表現される（図 3 (a)）。また、ドライバーの労働条件を考慮し、デポ（待機地点）に定期的に戻す必要がある。

(b) 車立て備車

輸送サービスの提供者に輸送を1日（もしくは数日単位で）外部の業者に委託する場合であり、自社便と同様に、決められた稼働時間内ならば、ある程度自由に使うことができる。他の荷と混載して運ぶのではなく、1台の運搬車を貸し切って満載輸送（FTL: full-truckload）を行う。運搬車の種類と距離によって決められた料率表が与えられている場合が多い。運ぶ荷の量によって運搬車の容量を選択できるので、輸送費用は、区分的に一定で段階的に上昇する関数（階段関数）として表現できる（図 3 (a)）。自社便と違って、着地で別の会社の荷を運びに行く可能性があるため、必ずしも発地点に戻してあげる必要がない場合もある。

(c) 積み合わせ便

輸送サービス提供者に、荷と混載して運ぶことを許して外注する場合であり、積み合わせ輸送（LTL: less-than-truckload）を行う。荷の重量や大きさ、運ぶ距離によって決められた料率表が与えられている場合が多い。荷量に応じて、運賃の割引が適用される。この際、ある荷量を超えると、超えた分だけに割り引きが適用される増分割引と、すべての量に対して割引が適用される総量割引がある（図 3 (b)）。

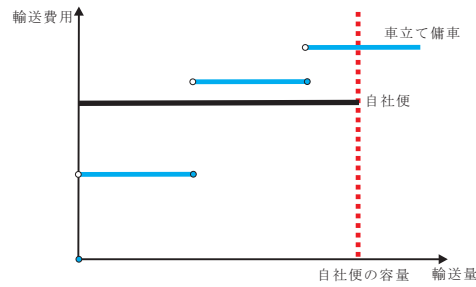
(d) 長期契約

輸送サービスの提供者と長期的な輸送契約を結ぶ場合であり、通常はオークションなどの競争入札によってサービス提供者を決める。積み合わせ便と同様に、数量割引が適用される場合もある。

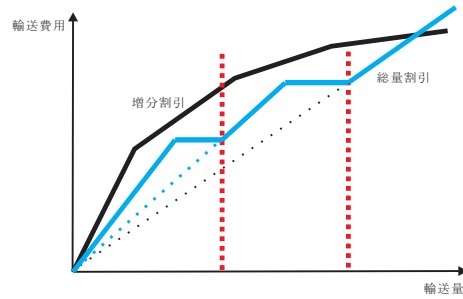
(e) 宅配便・郵便小包

小口貨物を路線便業者に外注する場合であり、荷の重量や大きさと発地・着地によって料率表が定められている。輸送費用は、区分的に一定の階段関数となる（図 3 (c)）。

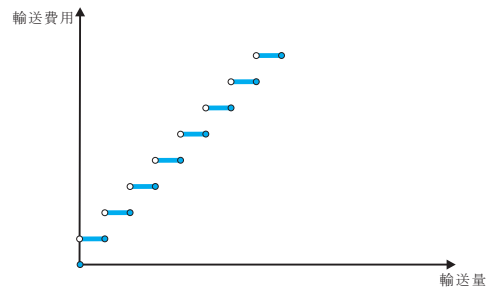
積み替えの可否と混載の可否の2つの切り口で分類すると、図 4 に示すように、直接方式、混載方式、リレー方式、積み替え方式の4つに分けることができる。



(a)



(b)



(c)

図 3: 輸送の料金体系による分類 . (a) 自社便と車立て備車 . (b) 積み合わせ便 (増分割引と総量割引) . (c) 宅配便・郵便小包 .

直接方式は、荷が積み替え不能かつ混載不能の場合であり、実務においては、満載輸送 (FTL: full-truckload) とよばれる輸送方式である。満載輸送では、実際に荷を満載して輸送する保証はなく、自社便もしくは1 台の運搬車を丸ごと借り受ける備車による大口貨物の輸送を行う。運搬スケジューリングモデルは、直送方式の代表例であり、詳細な分類では、荷は積み替え不能、混載不能、分割不能であり、運搬車はパス型で時間枠をもつ範疇に含まれる。

混載方式は、荷が積み替え不能で混載可能であるときに用いられる。配送計画モデルは、積み替え不能、運搬車は巡回路型の範疇に含まれる。

リレー方式は、荷が積み替え可能で混載不能である場合である。長距離のトレーラー輸送において、元のデポに戻るために幾つかのトレーラーに積み替えてコンテナを運ぶ場合が、これに相当するが、実際では稀である。

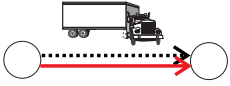
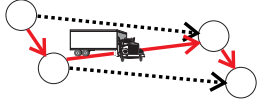
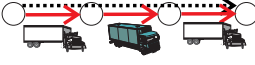
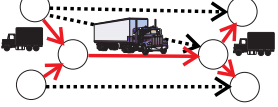
	混載不能	混載可能
積み替え不能	 <p>直接方式</p>	 <p>混載方式</p>
積み替え可能	 <p>リレー方式</p>	 <p>積み替え方式</p>

図 4: 積み替えと混載の可否による分類と輸送方式。(需要の発地と着地の対応は点線で、実際の荷の経路は実線で表している。)

積み替え方式は、荷が積み替え可能でかつ混載可能なときの輸送方式であり、ハブやターミナルとよばれる積み替え地点において、行き先別に荷を積み替える作業（ソーティング）が行われる。積み替え方式は、実務においては、積み合わせ輸送（LTL: less-than-truckload）とよばれ、宅配便や郵便小包に代表される小口貨物の輸送で現れる輸送方式である。

さらに分割の可否と直送・巡回によって分類することができる。図 5 に分類ごとの問題名と帰着関係を示す。

3 汎スケジューリングモデル

ここでは、活動の順序づけや資源への割当に関するモデルの分類について述べる。

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った。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の一般形を総称して汎スケジューリングモデルとよぶものとする。

ここでは、実際問題を分類するための大まかな基準によって、汎スケジューリングモデルを分類することを試みる。

分類の基準としては、以下のものを考える。

1. 活動水準を変数とするか否か

(a) 活動水準固定

通常、活動はまとめて行うと規模の経済が働き、安くかつ早く行うことができると仮定するのが自然である。活動を行う量（活動水準）を固定するとは、一度に製造する量（ロットサイズ）をあらかじめ決めておき、活動を行うタイミングだ

		混載不能		混載可能	
		分割不能	分割可能	分割不能	分割可能
積み替え不能	直送	荷と運搬車の割り当て問題	分割を考慮した荷と運搬車の割り当て問題	集積機配置	施設配置
	巡回	FTL型配送計画	分割FTL型配送計画	配送計画	分割配送
積み替え可能	直送	リレー方式		バス限定型ネットワーク設計	ネットワーク設計
	巡回			バス限定型サービス・ネットワーク設計	サービス・ネットワーク設計

図 5: 積み替え, 混載, 分割の可否と直送・巡回による分類と導かれた問題と帰着関係.

けに注目するモデルを, 活動水準固定とよぶ. 通常のスケジューリングモデルは, この範疇に含まれる.

(b) 活動水準可変

ロットサイズを同時に決定するモデルを活動水準可変とよぶ. 製造を行うための段取りなどを表現したモデルになるので, ロットサイズ決定モデルが, この範疇に含まれる.

2. 順序の考慮の有無

(a) 順序付けなし

活動を行う順序によって費用や時間が変化しないと仮定した場合には, 活動が行われる期を表す箱(バケット)に活動を割り振るモデルに帰着される. たとえば, 時間割作成や人員スケジューリングなどが, この範疇に含まれる. 順序依存の段取りを考慮しないロットサイズ決定モデルも, この分類に含まれる.

(b) 順序付けあり

活動を行う順序に依存して, 費用や時間が変化することを考慮したモデルを, 順序付けありとよぶ. 多くのスケジューリングモデルはこの範疇に含まれる. また, ロットサイズ決定モデルでも順序依存の段取りを考慮する場合もあり, 特にロットスケジューリングモデルとよばれる.

図 6 に, 上の分類基準に基づいた汎スケジュールリングモデルの分類を示す.

活動水準固定で順序付けなしの場合は, タスク(活動水準を決められた仕事の意)を, 期ごとに分けられた箱(バケット)に割り振る問題になる. これをタスク割り当てモデルと

	活動水準固定	活動水準可変
順序付けなし	スロット割当	ロットサイズ決定
順序付けあり	スケジューリング	ロットスケジューリング

図 6: 活動水準と順序付けに基づく汎スケジューリングモデルの分類。

よぶ。

たとえば、大学の時間割は、各時限というバケットに、講義というタスクを割り振るので、タスク割当モデルの一種と考えられる。この場合の資源は、教員と生徒と部屋であり、それぞれが重複しないような制約の下で割り当てを決める必要がある。実際には、教員が連続して講義を行うと疲れる教員もいたりするので、順序にも多少依存するが、その依存度は少ないので、この範疇に含まれると考える。

活動水準固定で順序付けを考慮した場合は（狭義の）スケジューリングもしくは順序付け（sequencing）とよばれるモデルになる。

活動水準可変のモデルで順序付けなしの場合は、ロットサイズ決定モデルになる。

活動水準可変のモデルで順序付けを考慮した場合は、ロットサイズ決定モデルに活動の順序依存の費用や時間を考慮したモデルになる。このようなモデルをロットスケジューリングモデルとよぶ。

4 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。たとえば、調達の責任者は、まとめ買いをすることで単価が下がるために、在庫を増やし、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する。一方、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する。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上げられていき、その合計として目に見える在庫となる。現場に積み上げられている商品の在庫を一緒にたに捉えていては、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ものとする．以下では，在庫の中でも最も重要な安全在庫を分類するための基準について考える．

分類基準としては，以下の2通りを考える．

1. 需要を固定とするか否か

(a) 需要固定

需要が，確定値もしくは確率変数（または確率過程）として与えられており，自由にコントロールできない場合を，需要固定とよぶ．通常の在庫モデルでは，この仮定の下で在庫のコントロールを行う．

(b) 需要可変

需要が価格などのパラメータによって変化する場合を需要可変とよぶ．収益管理や動的価格付けモデルでは，この仮定の下で，需要をコントロールすることによって在庫の適正化を行う．

2. リード時間を固定とするか否か

(a) リード時間固定

リード時間が，確定値もしくは確率変数として与えられており，自由にコントロールできない場合を，リード時間固定とよぶ．通常確率的在庫モデルや経済発注量モデルでは，この仮定の下でモデルを組み立てる．

(b) リード時間可変

サプライ・チェーン全体で，リード時間を調整することが可能である場合を，リード時間可変とよぶ．安全在庫配置モデルでは，この仮定の下で，在庫の適正配置を決定する．

図7に，上の分類基準に基づいた安全在庫モデルの分類を示す．以下では，この図にしたがい，分類ごとの個別問題について考える．

需要が固定でリード時間も固定の場合には，古典的な在庫方策に基づくモデルや経済発注量モデルに帰着される．需要とリード時間の両者が確定的で，かつ定常（時間によって変化しない）と仮定すると，経済発注量モデルになり，この場合にはリード時間は0と仮定できる．需要やリード時間が時間によって変化する場合は，多期間の生産計画，もしくは動的ロットサイズ決定モデルに帰着される．多期間の生産計画は，多期間のロジスティクス・ネットワーク設計モデルの特殊形と考えられる．需要が確率分布や確率過程にしたがい，リード時間が確定的なときには，古典的な確率的在庫モデルに帰着される．

リード時間が確率分布にしたがうモデルに関する研究は少ない．最近のビジネスでは，注文した商品をお届ける期日を明示的にする傾向があり，実際問題においては，リード時間は確定値として扱う方が現実的である．また，リード時間が適当な確率分布にしたがうと仮定すると，後に注文した商品が，先に注文した商品より前に届くという逆転現象が発生する危険性がある．このような現象を除外したモデルも幾つか提案されているが，やはり現実問題を巧く記述しているとは言えない．

	需要固定	需要可変
リード時間固定	在庫方策最適化	収益管理 動的価格付け
リード時間可変	安全在庫配置	価格を考慮した 安全在庫配置

図 7: 安全在庫モデルの分類 .

需要が固定でリード時間が可変の場合には、安全在庫配置モデルに帰着される。リード時間を変数として扱うので、サプライ・チェーン全体でリード時間の調整が行い、その結果、どの地点に安全在庫をまとめて置いておくか（配置するか）が決められるからだ。

需要に影響を与える要因としては、商品の価格、品揃え、棚に置いてある商品の量、宣伝効果など様々なものが考えられる。「需要が可変」とは、これらの要因となるパラメータをコントロール可能な変数としてとらえ、需要量をコントロールすることによって、在庫を適正化することを指す。通常は、需要に与える影響が最も大きく、かつある程度定量的に表すことのできる「価格」を意思決定変数とすることによって、需要をコントロールできると仮定する。

このようなモデルは（リード時間が固定のとき）収益管理モデルもしくは動的価格付けモデルとよばれる。収益管理モデルは、ある特定の時間がくるとその価値が 0（もしくは極めて小さく）になってしまう商品（これを陳腐化資産とよぶ）を対象としたモデルであり、動的価格付けモデルは、より一般的な商品を対象としたモデルである。

需要が可変（価格によってコントロール可能）でリード時間が可変の場合には、安全在庫配置モデルに価格を導入したモデルになるが、このようなモデルに関する研究は極めて少ない。リード時間の決定（安全在庫の配置）はタクティカルレベルの意思決定であるので、同じ意思決定レベルで価格の決定を行う実際問題があるならば、このようなモデルを研究する意義が出てくる。そういった問題を発掘することや、効率的な解法を設計することは、今後の課題と考えられる。

5 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 [3]．

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，様々な不確実性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．

6 事例

ここでは，標準型のサプライ・チェーン最適化モデルに帰着できない，問題依存の工夫を入れた事例について述べる．実際問題を解く際には，標準型のモデルに帰着させることも重要であるが，特殊事情を多く含んだ問題を解くためには（既存の手法に固執することなく）解法を一から設計する勇気も大事である．

6.1 スラブ最適設計

スラブとは鉄製品を生産するための中間製品である．工場の生産性向上のためには，スラブの重量を製造可能上限に近づけることが肝要である．近年の多品種少量化の流れの中で，スラブの重量を大きくするためには，類似の性質をもった（言い換えれば同じスラブから製造可能な）製品をうまく組み合わせることが重要になる．

この問題は汎スケジューリングモデルの分類では，コラム割り当てモデルに相当する．また，製品の需要量がある幅の中で柔軟に変更可能という特徴をもつので，ロットサイズ決定モデルに近い性質をもつ．開発したアルゴリズムは，タブーサーチを基礎としたものであり，近傍操作の度に，製品の需要量を変更するための連続型最適化問題を解く点に工夫が入っている．連続型最適化問題は，問題の構造を利用することにより，解析的に（ $O(1)$ 時間で）解けるので，全体のアルゴリズムは極めて高速に作動する．

これは、川崎製鉄（現 JFE スチール）との共同研究であり、すでに実システムで長期間運用され、特許第 3722763 号（スラブ単重の決定方法）で共同特許を得ている。

6.2 自動販売機のコラム割り当て

自動販売機には、コラムとよばれる保管場所がある。コラムに保管可能な製品数は、コラムの位置によって異なる（たとえば、上の方に受け口のあるコラムはたくさん保管可能であり、逆に下の方に受け口があるコラムは少量しか保管できない）。製品を 1 つ以上のコラムに割り当てることによって、保管可能な製品数の上限が定まるが、効率的な在庫の運用のためには、在庫方策と連動して考える必要がある。我々は、在庫費用と品切れ費用の和を最小にするように、コラムへ製品を割り当てる問題としてモデル化した。この問題は汎スケジューリングモデルの分類では、コラム割り当てモデルに相当する。

通常の割り当て問題のような定式化を行うと、同一の容量をもつコラムがあるため、解の対称性が生じ、分枝限定法を基礎とした数理計画ソルバーでは求解が困難になる。これは、上で述べたスラブ設計問題でも同様であり、同種のコラムを含む割り当てモデルを、市販の数理計画ソルバーで（割り当てを変数とした定式化を用いて）求解しても、十分な性能を得られない場合が多い。そこで、各製品のコラムへの割り当てパターンを生成し、集合被覆問題として定式化し、列生成法による解法を適用した。何でもメタ解法と言うのではなく、最適解が得られる規模の問題なら、多少の苦労はあっても厳密解法を設計しておくべきである。我々はタブーサーチによる近似解法も設計したが、厳密解法をもつことによって、精度の推定ができ、安心して使うことができるからである。

本研究は、富士電機との共同研究であり、成果の一部は [2] に掲載されている。

6.3 ピーク時間帯をもつ配送計画

時間枠付き配送計画問題に対しては多くの研究があり、標準的なモデルと考えられる。ベンチマーク問題例も顧客数 1000 程度までのものが整備されているが、そのほとんどはランダムに作成されたものであり、時間枠は計画期間の中に均一に分布している。しかし、実際問題では、時間枠のピーク時が存在し、そのため与えられた運搬車の台数で実行可能解を得ることが極めて難しい場合がある。たとえば、お弁当の配送は、お昼前に到着する時間枠を希望する顧客がほとんどを占める。

このような実際問題例を、研究用のベンチマーク問題例で高い性能を出している解法 [1] で解いたところ、実行可能解を得ることができなかった。この解法は、時間枠からの逸脱をペナルティ関数とした反復局所探索法であり、ペナルティの自動調節などの諸工夫が組み込まれている。しかし、前述のピーク時間帯を含む問題例は、実行可能解が目的関数を大幅に悪化させないと求まらないという性質をもつため、実行可能解の算出に失敗したものと推測される。

そこで我々は、意図的に時間枠からの逸脱を許した問題を定義し、逸脱量（納期遅れ）と移動費用の 2 目的をもつ問題として捉え、納期遅れの幅を徐々に小さくしていく探索法を開発した。探索は 2 つのフェイズを交互に適用することによって行われる。1 つは、通常の移動費用最小化の探索であり、このとき納期遅れの上限は制約として考慮される。もう 1 つは、納期遅れを削減するための探索であり、到着時刻が納期（最遅到着時刻）より前の場合

には、新たに納期を到着時刻に設定し直す。このフェイズでは、納期は単調減少であるが、移動費用は増加する傾向にある。

探索のための基礎となるメタ解法としては、停止することなく多様な解を探索するために誘導局所探索法を採用した。このように問題依存の工夫と、標準的な(十分に枯れた)技術であるメタ解法を組み合わせることによって、難しい問題例も解くことが可能になるケースが多い。本研究は、富士電機との共同研究を動機として行われたものである。

6.4 在庫配送計画

在庫配送計画とは、配送計画モデルと在庫モデルの両者を併せ持ったモデルであり、主にベンダー管理在庫を複数の運搬車で配送するときが発生する問題である。具体的には、自動販売機に対する商品の補充を念頭に置いたものである。

想定する計画期間は30日であり、1ヶ月後までの配送ルートを決める。問題は動的であるが、ローリング・ホライズン方式を用いて静的な問題に帰着させる。顧客(自動販売機)における複数の商品の在庫費用と品切れ費用、ならびに複数の運搬車の移動費用の和を最小化するような、ルートを求める。同時に、顧客を訪問する(商品の補充を行う)タイミングも決められる。

計画期間が30日と長いのは、季節の変わり目では需要が大きく変わり、さらに商品の入れ替えを行ったりするため、必須である。さらに、複数の期を考えない場合の配送計画でもさえ顧客数が数千レベルに達するので、高速な近似解法を開発する必要がある。商品ごとの需要データは日に依存した動的なものである。これは、場所によっては休日の需要がまったくなかったり、逆に需要が平日の数倍に達することもあるからである。アルゴリズムは、挿入法ベースの近似解法で初期解を求め、それを局所探索法で改善する方法を採用した。挿入法は、各顧客を適当な順序で複数の期ごとのルートに挿入するもので、ルートの巡回費用は挿入費用で近似される。このとき、訪問する期を決める問題は、動的ロットサイズ決定問題の変種になるので、動的計画によって最適な(近似されたルート費用、在庫費用、品切れ費用を最小化するような)訪問期を求めることができる。次に、局所探索法によって、同じ期に訪問する顧客同士の改善と、訪問期を変えることによる改善の両者を同時に行う。異なる期に顧客を移動させる際には、在庫費用と品切れ費用の差を計算する必要があるが、問題の構造を利用することによって、高速に計算できる。

現時点では、かなり粗い近似解法であるが、将来的には並列計算などを用いて実用化していく必要がある。これは、富士電機との共同研究であり、成果の一部は[4, 5]に掲載されている。

6.5 動的在庫レベル決定

通業における在庫管理は、小売店や倉庫ごとに適当な在庫方策を適用することによって運営されている場合が多い。筆者は、三井物産グループの関連会社との共同研究で、販売時点管理(POS)データを利用した複数拠点間の最適在庫システムを開発した。通常の在庫理論は、需要は定常であると仮定したものが多く、日本の小売業においては、平日と休日の需要の差が大きく、日に依存した動的なデータであると考えられる。そのため、適用する手法は旧来の在庫方策ではなく、動的な環境下における最適エシェロン在庫レベルの決定に

なり，これは一種の数理計画問題として定式化できる．このシステムは，推奨発注量算出エンジン Order Master として商品化されている．Order Master は，小売業の専用センター運営で利用され，実際に 12 % から 26 % (別の適用事例では 40 % から 50 %) の在庫削減に成功している．

7 おわりに

以上，サプライ・チェーン最適化のモデルの実務的な分類と事例について述べた．この分野の実務への応用はまだ未成熟であり，実務と理論の橋渡しが今後の課題である．

参考文献

- [1] 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. *Transportation Science*, 39(2):206–232, 2005.
- [2] Y. Miyamoto, M. Kubo, S. Itoh, and K. Murakami. Algorithms for the item assortment problem: an application to vending machine products. *Japan Journal of Industrial and Applied Mathematics*, 20(1):87–100, 2003.
- [3] 久保幹雄. ロジスティクス工学. 朝倉書店, 2001.
- [4] 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*, 49(9):481–486, 2001.
- [5] 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):378–389, 2001.