

ロジスティクスネットワーク計画用 ヒューリスティクス手法の提案

石井 信明

A Heuristics Procedure for Logistics Network Planning

Nobuaki Ishii

要 約

サプライチェーン・マネジメント（SCM）において、複数生産拠点および複数物流センターを結ぶロジスティクスネットワークの計画は、サプライチェーンの生産コストおよび物流コストに影響する重要な意思決定事項である。本論文では、ロジスティクスネットワーク計画プロセスの構造を整理し、その一般的なフレームワークを示す。また、ロジスティクスネットワーク計画を実用レベルの問題規模で立案するためのヒューリスティクス手法を提案する。

キーワード

サプライチェーン・マネジメント ロジスティクスネットワーク計画
ヒューリスティクス手法 生産工場割振り

Abstract

The logistics network planning, which defines relations among multi-site production facilities and distribution centers, is a critical issue in the Supply Chain Management (SCM) because the plan effects the logistics cost consisting of manufacturing cost and distribution cost significantly. This paper studies the mechanism of the logistics network planning process, and describes a generalized framework of the planning process. In addition, this paper proposes a heuristics procedure in order to make logistics network plans for large scale planning problems in practice.

Key Words & Phrases : Supply Chain Management, Logistics network planning, Heuristics procedure, Production allocation plan

1. はじめに

製造業では、通常、市場の拡大に伴い、生産能力の増強に加えて物流費の低減を考慮し、拡大した各需要エリアの近隣に生産および物流拠点を配置する戦略を取る。すなわち、受注から需要エリアまでの間に、複数の生産工場、および、物流センターを配置するロジスティクスネットワークを形成する。(本論文では、図1 (1), (2) に示すように、複数の生産拠点、物流センター、および、需要エリアからなる生産・物流ネットワークをロジスティクスネットワークと呼ぶ。) とくに、生産規模が大きく、かつ、対売上高物流費率が高い産業においては、大需要エリアに隣接して生産拠点および物流拠点を配置する傾向がある。たとえば、ビール業界、清涼飲料業界、壺、缶、ペットボトルなどの容器製造業界などである。また、鮮度が重要な顧客サービスとなる食品業界でも、同様に複数の生産拠点と配送拠点からなるロジスティクスネットワークを形成する傾向がある。

複雑なロジスティクスネットワークであっても、需要が安定し、各需要エリアの需要と、それに隣接する生産拠点の供給能力がバランスしている場合は、図1 (1) のように、生産拠点と需要エリアの関係性を常時固定して考えればよい。生産計画、および、物流計画は予め決定した工場、および、物流センターを対象を絞って立案することになる。しかし需要に季節変動がある場合、あるいは、製品ライフサイクルが短く生産工場の役割が変化する場合などでは、各需要エリアの需要量と各生産拠点の供給可能量の状況に応じて、図1 (2) に示すようにロジスティクスネットワークの構成を動的に変更し、生産費と物流費のバランスを保つ必要がある。現在は生産のアウトソーシングも進んでおり、需給状況に合わせて、「自社工場生産」、または、「生産委託(外注工場) 先からの購入」の判断を含めた供給の最適化を実現する観点が必要である。すなわち、適時ロジスティクスネットワークを見直すことが、企業の競争力向上につながる。

本論文では、外注工場への生産委託を含めた生産工場、配送センター、および、需要エリアの配置、能力、費用、および、需要に関する条件が与えられる場合に、生産費と物流費のバランスの観点から、適時ロジスティクスネットワークの構成を変更するロジスティクスネットワーク計画のフレームワーク、および、ロジスティクスネットワーク計画立案のためのヒューリスティクス手法を提案する。(本論文では、ロジスティクスネットワークの構成を計画することを、ロジスティクスネットワーク計画と呼ぶ。)

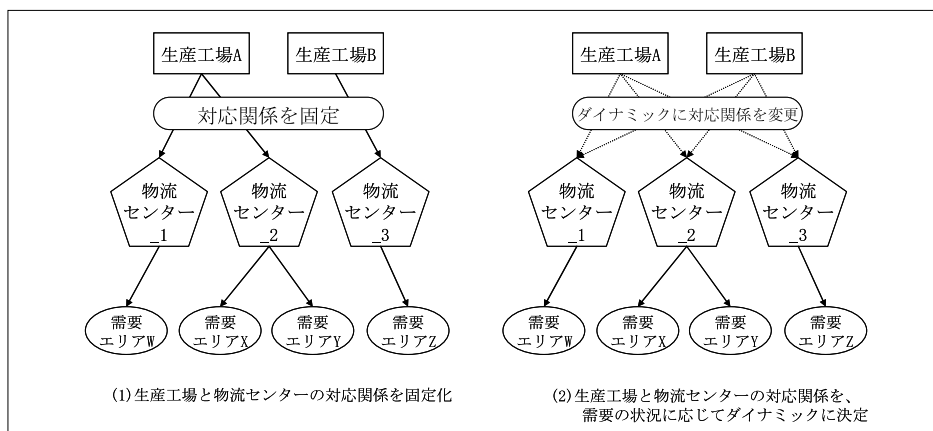


図1 (1), (2) ロジスティクスネットワーク構成の概要

2. 問題の背景

ロジスティクスネットワーク計画は、たとえば、企業戦略に基づく生産工場の立地、物流センターの立地など、長期サイクルで行う戦略的な意思決定から、生産スケジューリング、配車計画、配送ルート計画のような運用計画レベルでの日常的な意思決定に直接関係するものまで多岐にわたる〔1〕。ロジスティクスネットワーク計画を意思決定サイクルにより分類すると、表1のように分類できる。

表1 ロジスティクスネットワーク計画と各種意思決定

意思決定レベル	意思決定サイクル	意思決定対象の例
戦略レベル	1年～数年	①生産工場の配置設計，能力設計 ②物流センター配置設計，能力設計
戦術レベル	月～四半期	①生産工場と物流センターのネットワーク構造計画 ②生産工場能力計画
運用計画レベル	週～月	①各生産工場における各期別SKU別生産計画 ②原材料調達計画 ③製品配送計画

戦略レベルの意思決定により生産工場の立地、物流センターの立地が決定し、さらに、戦術レベルの意思決定により各生産拠点と物流拠点のロジスティクスネットワーク構造が決定している場合、ロジスティクスネットワーク計画は、運用計画レベルを中心とした図2に示す仕組みが基本となる。

すなわち、需要予測、販売実績、在庫実績、および、目標在庫水準から、販売部門、または、需給調整部門が行う「需給調整業務」により求まる各需要エリア別の生産オーダー（ある期間における生産品目および生産数量）に基づき、生産計画部門が、生産工場割振り計画において各生産工場へSKU（Stock Keeping Unit）単位で生産工場割振りを行う。（本論文では、SKUを「生産品目」と同等の意味とし、論文内で両者を使用する。）

生産工場割振り計画では、すでに決定している生産工場と物流センターとの対応関係から、各物流センターの需要量を満たす供給数量として、その供給元となる生産工場に対しSKU毎に生産量を割り当てる。基準日程計画〔2〕では、生産工場割振りに従い、各生産工場の生産計画を立案する。各生産工場、および、購買部門では、基準日程計画が立てた納期と数量を満たす生産スケジュール、および、生産に必要な原材料の購入計画を立案し、生産を実行することになる。また物流部門では、生産スケジュールと生産実行に基づき、各工場から各物流拠点および需要エリアへの輸送計画、配車計画を立案する。

このように運用計画レベルの問題の場合、戦術レベルの計画においてすでに生産拠点、物流拠点、および、需要エリアの対応関係が決まっており、生産オーダーが定まると、原材料購買コスト、生産コスト、物流コスト、さらには、生産から販売までのリードタイムの大枠が求まることになる。すなわち、市場の変化に合わせて生産コスト、物流コストの最適化を行うには、ロジスティクスネットワーク構成を状況に合わせて適時変更する戦術レベルの計画を含めた仕組みが必要となる。

たとえば各需要エリアと、その需要エリア近隣の生産工場が保有する供給能力がバランスする場合、各需要エリア要求量をその近隣の生産工場で生産することが、物流を含めたコストを最小にするとい

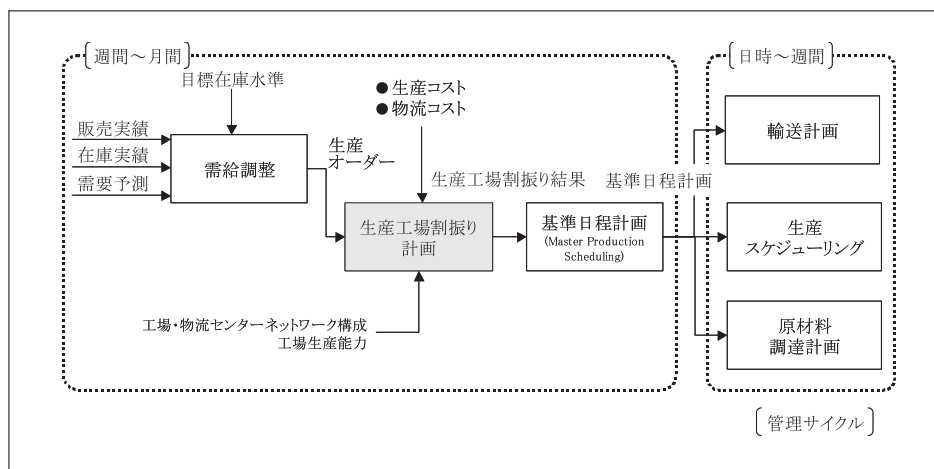


図2 運用計画レベルにおけるロジスティクスネットワーク計画の一般的な仕組み

える。これに対し、需要量が少なく生産工場の供給能力に余裕がある場合、多くの工場で小ロット生産を行うより、いくつかの生産性の高い生産工場に生産を集約し、各需要エリアまで製品を搬送した方が、物流費は高くとも、生産コストを含めた総コストの面からは有利な場合も考えられる。

しかしながら、戦略レベルおよび戦術レベルの中長期サイクルでの意思決定であるロジスティクスネットワーク構造の計画と、現状の変化を反映した短期サイクルの運用計画レベルで計画する生産工場割振り計画を実務において同時に扱うことは困難であり、これら時間軸の異なる計画を統合化する一般的な方法はこれまでのところ存在しない。すなわち、それぞれの事業の特性に合致するロジスティクスネットワーク計画の仕組みを設計するためのフレームワークが必要である。

3. 既往の研究

Simchi-Levi *et al.* [3] は、サプライチェーンマネジメント (SCM: Supply Chain Management) の重点課題として、“Distribution Network”, “Inventory Control”, “Distribution Strategies”, “Supply Chain Integration and Strategic Partnering”, “Product Design”, “Information Technology and Decision-Support Systems”をあげている。本論文において取り上げるロジスティクスネットワーク計画は、この内、“Distribution Network”, “Inventory Control”, “Distribution Strategies”, そして、“Information Technology and Decision-Support Systems”に関わるものであり、SCMの導入に欠かせない課題といえる。そのため、これまでに多くの研究者が、ロジスティクスネットワーク計画に関わる研究を行っている。

それらの研究は、「対象とする意思決定レベル」、および、「解法の基本的アプローチ」の観点から表2の様に分類できる。

生産拠点、物流センターのロケーションを新規に計画する戦略レベルの意思決定手法について、Ballou [1], 石井ら [4] は、ウェーバー問題 [5] を基本に、それぞれ各需要エリアの需要データから、生産拠点および物流センターの配置を決定するヒューリスティクス手法を示している。すなわち、各需要地域の地理的な関係と需要量から、輸送リードタイム条件を満たすエリアに分割し、そ

表2 既往の研究の分類

対象とする意思決定レベル	理想的なロジスティクスネットワークとなる生産拠点および物流拠点の新規計画手法の研究（戦略レベル）
	既設の生産拠点および物流拠点を前提とした最適ロジスティクスネットワークの計画手法の研究（戦術レベル，運用計画レベル）
解法の基本的アプローチ	数理計画手法による厳密解を求める手法の研究
	ヒューリスティクス手法により近似解を求める手法の研究

のエリアの中心座標データを基に，生産拠点，物流センターの配置を求める簡易手法を示している。

圓川〔6〕は，最適拠点を決定する戦略レベルの問題において，集中と分散の2つの異なるモデルの統合を検討している。すなわち，拠点分散による輸配送費用の削減およびサービスレベル向上と，拠点集約による在庫費用の削減とのトレードオフに注目し，拠点の役割の明確化による問題解決を提案している。

Tsiakis et al.〔7〕は，既往の研究が提案する様々なサプライチェーン・モデルを比較検討した上で，原料調達，生産，保管，そして顧客への配送までを含めた多段階ネットワークについて，需要の不確実性を考慮した最適ネットワーク設計のための戦術レベルの設計手法を提案している。すなわち，既に存在する複数の生産拠点，物流センターについて，原材料調達から，生産，物流をコストの視点から需要を満たす最適な拠点を選択する手法を提案している。提案手法では，問題をMILP（混合整数線形計画）に定式化し，分枝限定法により解いている。

石井ら〔8〕は，運用計画レベルの問題として，既存の生産拠点，物流拠点の配置および能力と，需要エリア別生産オーダー情報から，SKU単位で生産数量を各工場に割振る生産工場割振り計画用のヒューリスティクス手法を提案している。提案手法では，生産を割り付ける生産工場の優先度と需要エリア別の割付品目優先度の各パラメータを基に，各工場の供給能力を考慮した計画立案の仕組みを示している。しかしながら，計画立案に用いる各種パラメータの有効な設定方法は示しておらず，シミュレーションとGAを利用したパラメータ変更による代替案の自動生成〔9〕による解の段階的向上手法の適用可能性を示すに留まっている。

すなわちこれまでのロジスティクスネットワーク計画に関する研究は，各計画レベル単位の研究が中心であり，戦略レベルから運用計画レベルにまたがる計画立案プロセスの一般的フレームワークの提示は限られている。また，各計画の解法は，数理計画法を中心とした研究が多く，実用規模問題で短期間に繰り返し利用する柔軟な運用を考慮した計画手法の研究は限られている。

4. ロジスティクスネットワーク計画のフレームワーク

4.1 提案フレームワークの概要

本論文で提案するロジスティクスネットワーク計画のフレームワークを図3に示す。

ロジスティクスネットワーク計画は，「基準ロジスティクスネットワーク構成計画（MLNP：Master Logistics Network configuration Planning）」，および，「生産工場割振り計画」の2段階からなる。すなわち，ロジスティクスネットワーク計画では，長期販売計画に基づき，年または数年のサイクルで戦

略的視点から立案する「ロジスティクスネットワーク設計」の結果として決まる生産工場、物流センターの配置、および、能力を基に、長期生産オーダーに対し生産コストと物流コストを最小化する基準ロジスティクスネットワーク構成を計画する。生産工場割振り計画では、基準ロジスティクスネットワーク構成計画（MLNP）に基づいた各生産工場へのSKU別の生産数量を、短期生産オーダーに対して決定する。

MLNPでは、長期の生産オーダー情報に基づき、生産コスト、物流コストの最小化の視点から、生産工場、物流センターの対応関係、および、各生産工場の稼動時間を総生産数量を基に計画する。すなわち、MLNPにより、各生産工場、物流センター間の需要と供給のバランスが決まることになる。

生産工場割振り計画では、先にMLNPにより決定した生産工場と物流センターの関係に基づき、より短期サイクルで提示される生産オーダーについて、SKU単位で各生産工場に生産数量を割当てる。

なお、生産工場割振り計画では、基準日程計画段階での計画の実現可能性を高める目的で、次の生産制約条件を考慮したSKU、および、数量の割振りを行う。

＜生産工場割振り計画の主な制約条件＞

- ・設備条件による生産可否制約
- ・生産能力制約（上限，下限）
- ・最小生産ロット制約

基準日程計画（MPS）では、生産工場割振り計画の結果から、生産工場、物流センター、および、需要エリアに対応した生産計画を週間から月間でローリングを行い、MLNPおよび生産工場割振り計画が定めたコスト最小化の枠組みの中で、より詳細な実行計画を立案する。

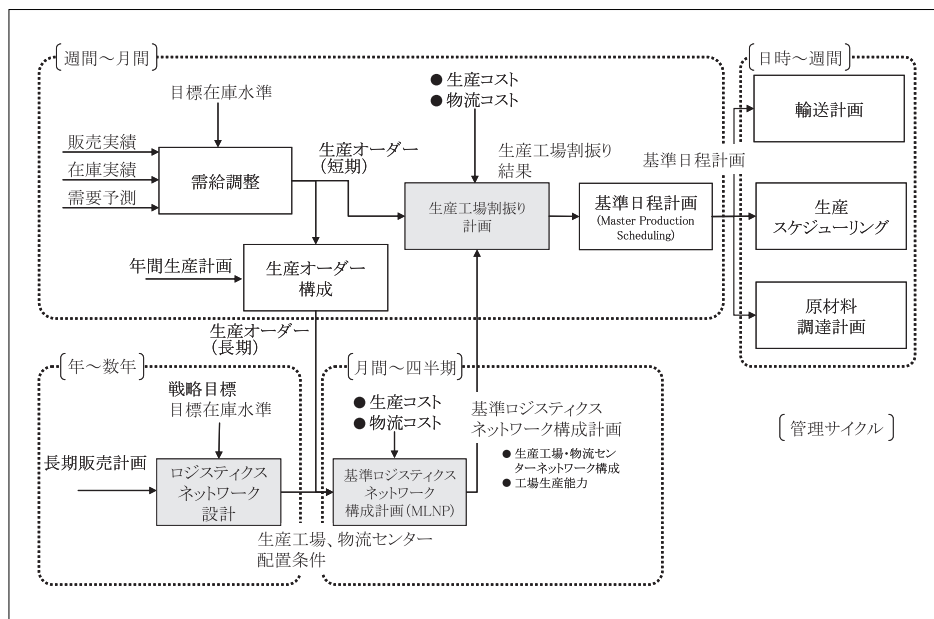


図3 ロジスティクスネットワーク計画のフレームワーク

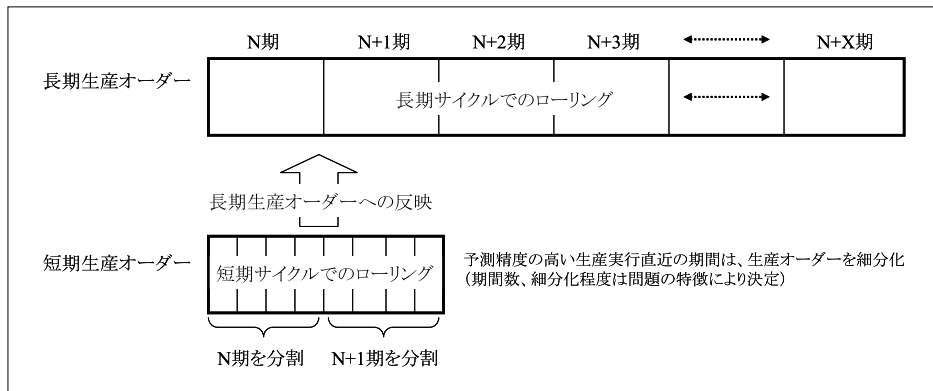


図4 長期生産オーダーと短期生産オーダーの関係

MLNP、および、生産工場割振り計画では、通常、基準となる計画サイクルが異なる。すなわち、MLNPの対象となる生産オーダーは、数ヶ月先までを考えた長期計画であり、たとえば、月度単位である。一方、生産工場割振り計画が対象とする生産オーダーは生産実行直近の期間であり、たとえば週間単位である。計画サイクルが異なる両計画間の整合性を保つために本フレームワークでは、図4に示すように、長期生産オーダーと短期生産オーダーの連続性を確保する方法を提案する。すなわち、MLNPに使用する長期生産オーダーに対し、オーダーの精度が向上する直近の計画は短期生産オーダーの値に置き換え、その部分は短期サイクルでローリングを行うことで、計画サイクルの異なる各計画の整合性を確保する。また、短期生産オーダーは、長期的な生産能力と在庫バランスを考えて作成する長期生産オーダーを参考に作成することで、長期計画との乖離を少なくする。

4.2 提案フレームワークの前提条件

提案フレームワーク、および、ヒューリスティクス手法では、次の条件が成り立つことを前提にしている。

- ① 需要エリアの在庫管理、および、配送を担当する物流センターは各需要エリアに一ヶ所
- ② 生産オーダーには、需要エリア、SKU、生産数量、生産時期の情報を含む
- ③ 各物流センターの在庫レベル調整は、図3に示す「需給調整」において、需要エリア別に実施する
- ④ 生産オーダーは、あらかじめ各需要エリアでの目標在庫水準を調整した数量として提示される

5. ロジスティクスネットワーク計画用ヒューリスティクス手法の概要

5.1 ヒューリスティクス手法の基本思想

5.1.1 提案ヒューリスティクス手法の視点

多くの市販SCMソフトウェア [10] が、ロジスティクスネットワーク計画に必要な機能を提供している。これら市販SCMソフトウェアが採用している手法の多くは、数理計画手法を用いた厳密解

を求めるものである。しかしながら、実務で扱う多くの問題は、生産委託先、購買先との取引条件など、定式化の難しい実務要件に沿った複雑な条件設定が必要となる。また、通常、大規模問題となるため多くのデータの設定が必要である上に、実用的な時間で厳密解を求めることが難しい場合がある。さらにシステムの回答を人間が判断して変更する場合には、変更判断のため情報が必要となり、厳密解の場合、その解が導かれた途中経過などを説明する情報提示の仕組みを別途用意することになる。

本論文では上記の点を考慮し、「基準ロジスティクスネットワーク構成計画 (MLNP)」および、「生産工場割振り計画」に関し、次の条件を考慮した実用的なヒューリスティクス手法を提案する。

<提案ヒューリスティクス手法の視点>

- ・大規模な問題について、業務運用に支障のない時間で近似解を得る
- ・計画立案条件を変えることで、解を段階的に成長できる仕組みを備える

5.1.2 提案ヒューリスティクス手法の要点

本論文では、次の基本思想に基づくロジスティクスネットワーク計画用ヒューリスティクス手法を提案する。

(1) 2段階による計画立案

提案手法は、戦術レベルと運用計画レベルの計画を対象とする。すなわち、戦術レベルの計画である「基準ロジスティクスネットワーク構成計画 (MLNP)」において、生産工場と各需要エリアに立地する物流センター間のロジスティクスネットワーク構成を決定し、その構成を基に、運用計画レベルの計画である「生産工場割振り計画」により、生産オーダーをSKU単位で各生産工場の能力を考慮しながら割り付ける。

(2) MLNPによる計画の枠組みの決定

提案手法では、線形計画法を利用して、需要エリア別、計画期別の長期生産オーダーが提示する生産数量を、各生産工場に割付け計画の枠組みを決定する。すなわち、生産工場毎の数量基準による生産能力を制約条件とし、長期生産オーダーを満たし、生産費用と物流費用の合計が最小となるロジスティクスネットワークを生産オーダーの指定する計画期の単位で立案する。ただし、割付ける数量はSKU単位の数値をまとめた総生産数量を分割して割付けるものとする。また、物流費用は、各生産工場と物流センター間の輸送費とする。

(3) 生産工場割振り計画によるSKU単位の実地工場への数量割振り

生産工場割振り計画では、各生産工場の視点に立ち、生産工場が優先的に生産したい生産品目と数量を選択する手法を提案する。すなわち、各生産工場が生産費と物流費の合計を最小化するように、SKU別の生産オーダーの中から生産品目と数量を取り合う方法を考える。ただし工場間の競合関係について、各工場の生産技術上の観点からの生産可能品目の選択、および、生産費と物流費の合計最小化の観点から各生産工場が生産品目を選択する優先順位、選択できる生産オーダーの需要エリアの範囲をパラメータとして予め設定する。これらパラメータの利用を含めた手法全体の構成については、「5.2.2 生産工場割振り計画立案手法の概要」で示す。以下では、提案する生産工場割振り計画手法が用いるパラメータおよび個別の計算方法の説明を行う。

①特定生産工場パラメータ

生産技術、生産設備などの条件から、生産工場が限定できる生産品目を「特定生産工場パラメータ」に登録し、はじめにその特定工場への生産品目の割振りをおこなう。

②生産工場グループパラメータ

生産品目ごとに、生産工場をいくつかの生産割振りグループに分類する（図5参照）。各グループには優先度を付け、優先度の高い生産工場グループ内の工場から生産品目を割り付ける。たとえば、生産コスト低減の観点から稼働率を確保したい自社工場、重要なアウトソーシング先などを優先度の高いグループにする。生産工場割振り計画立案手法では、「生産工場グループパラメータ」が示す優先度の高い工場から順次生産品目を割り当てることになる。

③需要エリアパラメータ

生産工場への数量割振りの単位として、需要エリアを設定する。需要エリアは、図6に示すように階層化したグループとして設定する。なお、生産割振り数量のデータである生産オーダーは、需要エリアの最小単位で構成するものとする。



図5 生産割振り工場グループの例

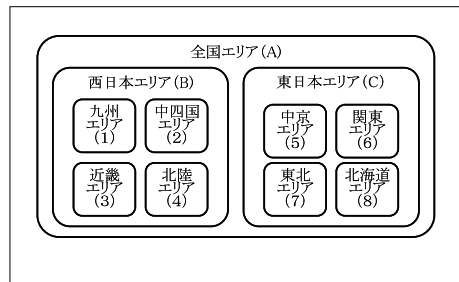


図6 需要エリアの概要

④需要エリア優先パラメータ

図7に示すように、生産工場ごとに各生産品目の需要エリアとその生産工場における優先度を設定する。（優先度は1以上の整数で表わし、指定する数値の小さい方を優先度が高い品目とする。）需要優先エリアを広くすると「生産工場グループパラメータ」が指定する生産コストに有利な工場から優先的に割振る数量が多くなるが、供給範囲が広がるために物流コストは高くなる傾向になると想定できる。すなわち、需要エリアの指定を変えることで、生産コストと物流コストのバランスする点を検討できる。

⑤生産数量計算

生産オーダーを生産工場に割振る際、生産数量は、次式を用いて算出する。

(a) 自社工場(i)への割振り生産数量(q_i)計算

自社工場における段取り時間については、当該時間を生産数量相当に変換して評価するものとする。式中の調整係数は、品目で異なる生産速度を数量に換算して評価するために用いる。

$$q_i = \sum_{j=1}^m (sq_{ij} \times ad_{ij}) + m_i \times SCO_i \times SPR_i$$

sq_{ij} : 工場 i における生産品目 j の割当数量 (数量)

ad_{ij} : 工場 i における生産品目 j の割当数量の調整係数

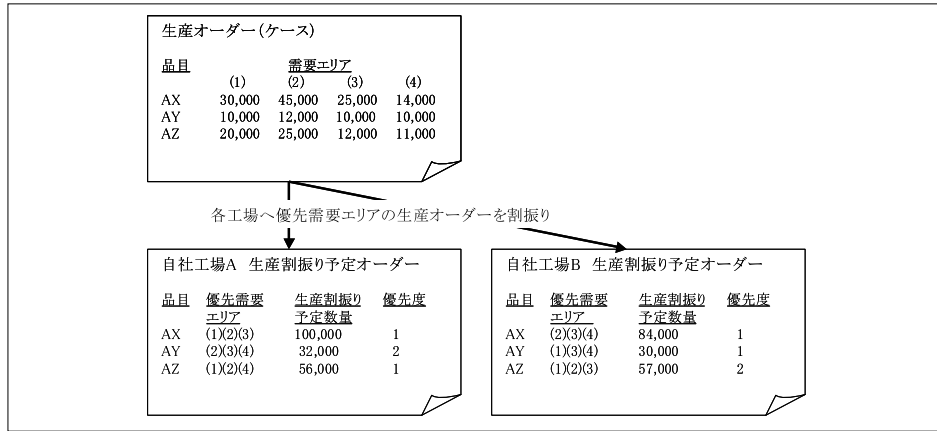


図7 需要エリア優先パラメータの例

m : 生産品目数 m_i : 工場 i における生産品目数
 SCO_i : 工場 i における標準段取り時間 (時間/回)
 SPR_i : 工場 i における標準生産能力 (数量/時間)

(b) 外注工場 (生産委託工場) への割振り生産数量 (q_i) 計算

外注工場への生産割振りの場合, 当該工場への割振り数量をそのまま生産割振り数量とする。すなわち, 段取り時間, 品目による数量の調整は考慮しない。

⑥費用評価

費用評価は, 次に示す生産費用 (PC) と物流費用 (DC) の総計で評価する。

(a) 生産費用: 自社工場および外注工場における生産費用の合計

生産費用 (PC) = 自社工場生産費用 ($PC0$) + 委託加工費 ($PC1$)

$$PC0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m p_{ij} \times q_{ij} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m CO_i \times q_{ij} / AL_{ij}$$

$$PC1 = \sum_{i=n+1}^{n+\ell} \sum_{j=1}^m sp_{ij} \times q_{ij}$$

ℓ : 外注工場数 n : 自社工場数 m : 生産品目数

p_{ij} : 自社工場 i における品目 j の単位当たり生産費用 (¥/数量)

q_{ij} : 工場 i における品目 j の生産数量 (数量)

CO_i : 自社工場 i における平均段取り替え費用 (¥/回)

AL_{ij} : 工場 i における生産品目 j の平均生産ロットサイズ (数量)

sp_{ij} : 外注工場 i における生産品目 j の委託加工単価 (¥/数量)

(b) 物流費用: 生産工場から物流センターへの移動コストの合計

$$DC = \sum_{i=1}^{l+n} \sum_{j=1}^{dc} C_{ij} \times Q_{ij}$$

ℓ : 外注工場数 n : 自社工場数 dc : 物流センター数

C_{ij} : 工場 i から物流センター j までの輸送単位量当たり物流費 (¥/数量)

Q_{ij} : 工場 i から物流センター j までの輸送数量 (数量)

5.2 ヒューリスティクス手法の概要

ロジスティクスネットワーク計画における, 基準ロジスティクスネットワーク構成計画 (MLNP) 立案手法, および, 生産工場割振り計画立案手法の概要を以下に示す。

5.2.1 基準ロジスティクスネットワーク構成計画 (MLNP) 立案手法の概要

MLNP立案手法では, 下記に示す線形計画モデルにより, 長期生産オーダーの提示する供給必要数量を各生産工場に割り付け, 各物流センターへの輸送数量を算出する。目的関数は, 生産費用と物流費用の合計とする。ただし, ここで用いるモデルは, その後の生産工場割振り計画に比べて簡略化している。(生産工場の能力は, 段取り替えを含めた標準能力で計算している。数量はSKU単位ではなく, 総数量としている。)

MLNPの結果は, 長期生産オーダーに基づく計画と, より精度の高い短期生産オーダーに基づく計画の整合性を取ることを目的に, MLNP実施後の生産工場割振り計画で使用する初期パラメータの決定に利用する。

$$\text{目的関数 } Z = \sum_{i=1}^{\ell+n} \sum_{j=1}^r (ap_i + C_{ij}) \times x_{ij} \longrightarrow \min$$

$$\text{制約条件 } \sum_{i=1}^{\ell+n} x_{ij} = d_j \quad (j = 1 \sim r)$$

$$\sum_{j=1}^r x_{ij} \leq cp_i \quad (i = 1 \sim m+n)$$

n : 自社工場数 ℓ : 外注工場数 r : 需要エリア数

x_{ij} : 工場 i から物流センター j への輸送量 (数量)

ap_i : 工場 i における基準生産費 (¥/数量)

C_{ij} : 工場 i から物流センター j への輸送単位量当たり物流費 (¥/数量)

d_j : 需要エリア j の総需要量 (数量)

cp_i : 生産工場 i の生産能力 (数量)

5.2.2 生産工場割振り計画立案手法の概要

生産工場割振り計画立案手法では, 短期生産オーダーが提示する需要エリア別, SKU別, 計画期別の需要量を, 次に示すステップにより各生産工場の生産能力を考慮し, SKU単位で生産数量を割振る。

<生産工場割振り計画のステップ>

(1) ステップ1 (初期パラメータ設定)

ステップ1では, MLNPの結果に基づき, 次の方法により, 「生産工場グループパラメータ」, 「需要エリアパラメータ」, 「需要エリア優先パラメータ」に対する初期パラメータを設定する。

①生産工場グループパラメータの設定

MLNPの結果から得られる各生産工場における生産量のシャドウ・プライス(潜在価格)は、その値が負の場合、当該工場への生産量を増加することで目的関数である費用が減少することを示している。

このことから、生産工場グループパラメータとして、MLNPの結果から各生産工場のシャドウ・プライスを昇順にソーティングし、その上位工場から生産割振りの優先度の高い生産工場にグループを分類し、初期パラメータとして設定する。いくつのグループに分類するかは、シャドウ・プライスの特定工場への偏りの状況、意図的に優先した工場の存在などにより異なるため、状況に応じた対応を行う。

②需要エリアパラメータ

需要エリアパラメータの初期値として、生産オーダーの需要エリアと同様の需要エリアを設定する。

③需要エリア優先パラメータ

各生産工場別に、SKU単位で需要エリア優先パラメータを設定する。各生産工場に対応する優先需要エリアの初期値は、MLNPの結果から得られる各工場と需要エリアの対応関係をSKU単位で設定する。ただし、工場により特に生産を優先したいSKUがある場合は、そのSKUの優先度を上げて設定する。たとえば、大量生産向き工場の場合、需要量の大きなSKUの優先度を高くする。また、生産ロットサイズを考慮し、生産数量の少ないSKUについては、対象とする需要エリアの範囲を大きく設定する。

(2)ステップ2(特定生産工場割振り)

ステップ2では、生産技術的な要件などの理由から生産工場を特定するSKUについて、特定工場に当該SKUの生産数量を割振る。割振った生産量に応じて、当該工場への生産数量を積み上げる。

(3)ステップ3(生産工場割振り)

ステップ3では、需要エリア優先パラメータ、および、生産工場グループパラメータから、同一の工場グループ内で、順次、生産工場、および、優先度の高い生産品目の組み合わせを一組選び、その数量を選択した生産工場に割振る。生産数量の算出は、「5.1.2(3)⑤ 生産数量計算」に示した方法により行う。選択した工場の生産能力をオーバーする、または、当該工場グループで割振り可能な生産品目がなくなった場合、次の優先度の工場グループに生産割り振りを行う。(生産能力をオーバーする品目までを、その生産工場に割振り可能とする。)生産割り振り可能な生産オーダーがなくなるか、割振り可能工場の最大生産数量(生産能力)を超えるまで、この操作を繰り返す。

(4)ステップ4(生産工場割振りチェックおよび調整)

ステップ4では、未割振りの生産オーダーの有無、各工場への割振り数量を確認し、必要な調整をマニュアルで行う。

(5)ステップ5(コスト評価)

ステップ5では、生産工場割振りの結果として算出する生産コスト、物流コストを評価する。再評価が必要な場合は、需要エリア優先パラメータの優先度、または、優先需要エリアを変更し、ステップ2に戻り、再度生産割振りを行う。生産割振り結果のコスト評価が満足する場合、一連のステップを終了する。

6. 数値計算例

以下では、本論文が提案するヒューリスティクス手法を食品製造会社に適応した数値計算例を示す。ただし、使用するデータは、実際の数値を簡略化したものを使用している。

6.1 数値計算例の条件

(1) 基本条件

- ・計画期間：1ヶ月間を基準とした1期間
- ・生産時間：400時間（25〔日/月〕×16〔時間/日〕）
- ・数量単位：ケース

(2) 需要エリア、生産工場および物流センター条件

需要エリアは、5つのエリアからなるものとする。また、生産工場は、自社工場および外注工場からなり、それぞれ、3工場,17とする。図8に示すように、各需要エリアには1つの物流センターがあり、それぞれのエリア内の顧客に配送を行う。各需要エリア内の物流センターには、図1（2）で示したようにどの生産工場からも製品を搬送できるが、物流費は、「6.1（4）費用データ」に示すように、生産工場と物流センターとの対応関係により決まる。

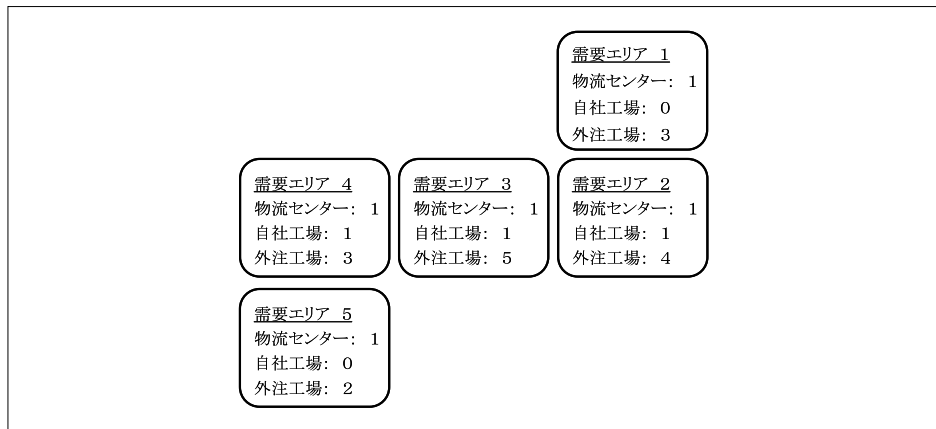


図8 需要エリア、生産工場および物流センターの配置

(3) SKU数および生産数量

表3に、数値計算例のSKU数、および、対象とする計画期間における生産量の条件を示す。生産量は、年間を通じた需要変動への対応から、対象とする計画期間により変化することが通常である。本数値計算例では、生産量の代表として通常期の数値を採用する。

また、各需要エリア別SKU別生産オーダー数（通常期）を表4に示す。表4では、各生産品目を、大量生産品（A品目グループ）、中量生産品（B品目グループ）、および、小量生産品（C品目グループ）に区分した上で、各生産品目グループに属する品目の平均生産オーダー数（ケース/SKU）を示している。

表3 生産品目の条件

	A品目	B品目	C品目	合計
品目数 (SKU)	3	6	21	30
生産オーダー数 (ケース/期) 通常期	2,800,000	800,000	400,000	4,000,000

表4 需要エリア別SKU別生産オーダー数 (通常期)

生産品目 グループ	品目数 (SKU)	需要エリア (ケース/SKU)				
		1	2	3	4	5
A品目グループ (A1～A3)	3	140,000	374,000	233,000	93,000	93,000
B品目グループ (B1～B6)	6	20,000	53,400	33,100	13,000	13,000
C品目グループ (C1～C21)	21	2,850	7,600	4,800	1,900	1,900
需要エリア毎全生産品目 小計 (ケース)		600,000	1,600,000	1,000,000	400,000	400,000
総計 (ケース)		4,000,000				

(4) 費用データ

表5に、自社工場、および、外注工場におけるケース当たりの生産費、SKU切替え費用に関わるデータを示す。ここで標準生産費とは、当該工場におけるSKU切替え費を含めたケース当たりの標準生産費用を指す。外注工場の場合、標準生産費は委託加工単価 (¥/ケース) に当たる。なお、標準生産費は、表6に示す工場別の基準生産能力 (ケース/月)、表5に示す生産費 (¥/ケース)、および、SKU切替え費 (¥/回) から、1ヶ月当たりのSKU切替え回数を25回と想定し、次の式から求めた。

$$\text{標準生産費} = \{\text{基準生産能力} \times \text{生産費} + 25 \times \text{SKU切替え費}\} / \text{基準生産能力}$$

さらに表5では、各生産工場から各需要エリアまでのケース当たり輸送費用データを合わせて示す。

(5) 生産 (供給) 能力データ

表6に、各自社工場、および、外注工場の生産能力に関する設定データを示す。ここで、基準供給能力とは、平均的なSKU切替え時間を考慮した、当該生産工場の基準生産能力 (ケース/月) を示すものとする。外注工場の生産能力は、基準供給能力で評価する。また、割当数量の調整係数はすべて1とする。

なお、外注工場については、外注政策上の観点から、必ず50,000 (ケース/月) 以上の生産を

割振るものと仮定する。

表 5 生産および物流費用データ

生産工場	工場立地 需要エリア	標準生産費 (¥/ケース)	生産費 (¥/ケース)	SKU 切替え費 (¥/回)	生産工場—物流センター間物流費 (¥/ケース)				
					需要エリア物流センター				
					1	2	3	4	5
自社工場A	2	830	800	1,200,000	100	50	100	150	200
自社工場B	3	880	820	1,400,000	150	75	50	100	150
自社工場C	4	870	840	1,000,000	200	150	100	50	100
外注工場1	1	1,050	1,050	———	50	75	125	175	225
外注工場2	1	1,030	1,030	———	50	100	125	175	225
外注工場3	1	1,010	1,010	———	50	100	150	200	250
外注工場4	2	1,100	1,100	———	75	50	75	125	175
外注工場5	2	1,080	1,080	———	100	50	75	125	175
外注工場6	2	1,060	1,060	———	100	50	100	150	200
外注工場7	2	1,040	1,040	———	100	50	100	150	200
外注工場8	3	1,100	1,100	———	125	75	50	75	125
外注工場9	3	1,080	1,080	———	125	75	50	75	125
外注工場10	3	1,060	1,060	———	150	100	50	100	150
外注工場11	3	1,040	1,040	———	150	100	50	100	150
外注工場12	3	1,020	1,020	———	150	100	50	100	150
外注工場13	4	1,000	1,000	———	175	125	75	50	125
外注工場14	4	980	980	———	200	150	100	50	100
外注工場15	4	960	960	———	225	150	100	50	100
外注工場16	5	1,050	1,050	———	225	175	125	75	50
外注工場17	5	1,030	1,030	———	250	200	150	100	50

6.2 数値計算結果と考察

(1) 基準ロジスティクスネットワーク構成計画の結果

表7に、「5.2.1 基準ロジスティクスネットワーク構成計画立案手法の概要」で示した線形計画モデルにより、「6.1 数値計算例の条件」を解いた結果を示す。さらに、表8に、各生産工場の供給能力に対するシャドウ・プライスを示す。ただし、線形計画モデルの制約条件の内、 cp_i には、表6に示す基準生産能力を用いた。また、 ap_i には、表5に示す標準生産費を用いた。

表7において、生産数量のある工場と需要エリアの組合せは、ロジスティクスネットワークのつながりのあることを示す。また、生産量がゼロの組合せは、ロジスティクスネットワークのつながりがないことを示す。なお、目的関数の値は、3,970,750,000 (¥/月) である。

表 6 生産能力データ

生産工場	工場立地 需要エリア	基準生産能力 (ケース/月)	生産速度 (ケース/時)	標準段取り時間 (時間/回)	最小生産ロットサイズ (ケース)
自社工場A	2	1,000,000	1,800	10	20,000
自社工場B	3	600,000	950	6	20,000
自社工場C	4	800,000	1,300	8	20,000
外注工場1	1	100,000	————	————	5,000
外注工場2	1	100,000	————	————	5,000
外注工場3	1	100,000	————	————	5,000
外注工場4	2	200,000	————	————	5,000
外注工場5	2	100,000	————	————	5,000
外注工場6	2	100,000	————	————	5,000
外注工場7	2	100,000	————	————	5,000
外注工場8	3	300,000	————	————	5,000
外注工場9	3	200,000	————	————	5,000
外注工場10	3	300,000	————	————	5,000
外注工場11	3	100,000	————	————	5,000
外注工場12	3	100,000	————	————	5,000
外注工場13	4	100,000	————	————	5,000
外注工場14	4	100,000	————	————	5,000
外注工場15	4	100,000	————	————	5,000
外注工場16	5	100,000	————	————	5,000
外注工場17	5	100,000	————	————	5,000

(2) 工場割振り計画の結果

工場割振り計画について、「初期パラメータ設定」、および、「生産工場割振り」の初期の結果を以下に示す。実際の運用では、生産工場割振りの結果を、各工場への割振り数量のバランス、生産工場割振り時点で考慮していない条件、あるいは、コストを含め多面的に評価し、適時パラメータを変更しながら「生産工場割振り」とその評価を繰り返すことになる。

表7 基準ロジスティクスネットワーク構成計画（MLNP）結果
（工場・需要エリア別生産量）

生産工場	工場立地 需要エリア	需要エリア別生産量（ケース/月）					生産数量合計 （ケース/月）	基準生産能力 （ケース/月）
		1	2	3	4	5		
自社工場 A	2	0	1,000,000	0	0	0	1,000,000	1,000,000
自社工場 B	3	0	350,000	250,000	0	25,000	600,000	600,000
自社工場 C	4	0	0	0	0	0	800,000	800,000
外注工場 1	1	100,000	0	0	0	0	100,000	100,000
外注工場 2	1	100,000	0	0	0	0	100,000	100,000
外注工場 3	1	100,000	0	0	0	0	100,000	100,000
外注工場 4	2	200,000	0	0	0	0	200,000	200,000
外注工場 5	2	0	50,000	0	0	0	50,000	100,000
外注工場 6	2	0	100,000	0	0	0	100,000	100,000
外注工場 7	2	100,000	0	0	0	0	100,000	100,000
外注工場 8	3	0	50,000	0	0	0	50,000	300,000
外注工場 9	3	0	50,000	0	0	0	50,000	200,000
外注工場10	3	0	0	50,000	0	0	50,000	300,000
外注工場11	3	0	0	100,000	0	0	100,000	100,000
外注工場12	3	0	0	100,000	0	0	100,000	100,000
外注工場13	4	0	0	0	0	100,000	100,000	100,000
外注工場14	4	0	0	0	100,000	0	100,000	100,000
外注工場15	4	0	0	0	100,000	0	100,000	100,000
外注工場16	5	0	0	0	0	100,000	100,000	100,000
外注工場17	5	0	0	0	0	100,000	100,000	100,000
合計（ケース/月）		600,000	1,600,000	1,000,000	400,000	400,000	4,000,000	4,700,000

①パラメータ設定

(a) 工場グループパラメータの初期設定

本論文に示す数値計算例では、図5に示した生産割振り工場グループパラメータについて、表8に示す基準ロジスティクスネットワーク構成計画結果のシャドウ・プライスから、次のルールにより、工場を3つのグループに分ける。すなわち、シャドウ・プライスは、各工場への生産割振り数量が増加することによるコスト低下の値を示しており、その値が小さい工場への生産数量の割振りを優先する。設定した工場グループパラメータを表9に示す。

- ・ $-100 \geq \text{シャドウ・プライス} \Rightarrow \text{割振りグループ1（割振り優先度大）}$
- ・ $0 > \text{シャドウ・プライス} > -100 \Rightarrow \text{割振りグループ2（割振り優先度中）}$

表 8 各生産工場の供給能力に対するシャドウ・プライス

生産工場	工場立地 需要エリア	シャドウ・プライス (¥/ケース)	生産数量合計 (ケース/月)
自社工場 A	2	-245	1,000,000
自社工場 B	3	-170	600,000
自社工場 C	4	-130	800,000
外注工場 1	1	-75	100,000
外注工場 2	1	-95	100,000
外注工場 3	1	-115	100,000
外注工場 4	2	0	200,000
外注工場 5	2	0	50,000
外注工場 6	2	-15	100,000
外注工場 7	2	-35	100,000
外注工場 8	3	0	50,000
外注工場 9	3	0	50,000
外注工場10	3	0	50,000
外注工場11	3	-10	100,000
外注工場12	3	-30	100,000
外注工場13	4	-25	100,000
外注工場14	4	-20	100,000
外注工場15	4	-40	100,000
外注工場16	4	0	100,000
外注工場17	4	-20	100,000

- ・ シャドウ・プライス ≥ 0 \Rightarrow 割振りグループ 3 (割振り優先度小)

(b) 需要エリア優先パラメータの初期設定

需要エリア優先パラメータでは、図 7 に示したように、生産工場ごとに品目単位で、「優先需要エリア」、「生産割振り予定数量」、「優先度」を指定する。この例では、次のルールにより需要エリア優先パラメータを設定する。

- ・ 表 4 に示した品目グループにおいて、A 品目グループのSKUを優先度 1，B 品目グループ

表9 初期工場グループパラメータ

割振りグループ	工 場
1	自社工場A, 自社工場B, 自社工場C, 外注工場3
2	外注工場1, 外注工場2, 外注工場6, 外注工場7, 外注工場11, 外注工場12, 外注工場13, 外注工場14, 外注工場15, 外注工場17
3	外注工場4, 外注工場5, 外注工場8, 外注工場9, 外注工場10, 外注工場16

プのSKUを優先度2, および, C品目グループのSKUを優先度3とする。

- ・ 各生産工場は, 「表7 基準ロジスティクスネットワーク構成計画 (MLNP) 結果」から, 各工場が供給する計画となっている需要エリアを「優先需要エリア」とし, そのエリアへの生産オーダー数量の合計を「生産割振り予定数量」とする。
- ・ 生産ロットサイズが小さく, 表6に示す最小生産ロットサイズを満たせないB品目グループ, および, C品目グループについては, 近隣の需要エリアの生産オーダー数を合わせて「優先需要エリア」, および, 「生産割振り予定数量」として設定する。

設定した「需要エリア優先パラメータ」の例として, 表9に示す初期工場グループ割振りパラメータにおける割振りグループ1の自社工場A, 自社工場B, 自社工場C, および, 外注工場3の場合を表10に示す。ただし, 品目については, 各品目グループA, B, および, Cからそれぞれ一つの品目A1, B1, および, C1を取り上げて示す。(表10において, 品目C1は, 各自社工場の最小生産ロットサイズである20,000 (ケース), および, 外注工場3の最小生産ロットサイズである5,000 (ケース) を優先需要エリアの数量のみでは満たさないため, 生産工場割振り対象の需要エリアを拡大している。

②生産工場割振り結果

生産工場割振りの初期結果について, 自社工場A, 自社工場B, 自社工場C, および, 外注工場3への生産割振りを表11に示す。

自社工場A, および, 自社工場Bでは, それぞれの月間基準生産能力である1,000,000ケース, および, 600,000ケースを品目A1, A2, および, A3の生産割振りでオーバーしているため, 大ロット生産品目であるA品目グループの生産を割振るに留まっている。また, 自社工場Bの優先需要エリアは, 本来需要エリア2および3であるが, 先に自社工場Aに需要エリア2の生産数量が割振られているため, 自社工場Bには, 残りの優先需要エリア3の生産数量を割振っている。

自社工場Cには, 月間基準生産能力800,000ケースに対し, 優先需要エリア3, 4, 5の生産量として, 優先度の高い品目A1~A3, および, B1~B4を割振っている。

また, 外注工場3は, 月間基準生産能力が100,000ケースであるため, 優先需要エリア1の品目A1の生産数量を割振るに留まっている。

表10 需要エリア優先パラメータの設定例
(自社工場A, 自社工場B, 自社工場C, 外注工場3の例)

生産工場	品目 (SKU)	優先需要エリア	生産割振り予定数量 (ケース/月)	優先度
自社工場A	A1	需要エリア2	374,000	1
	B1	需要エリア2	53,400	2
	C1	需要エリア1～5	19,050	3
自社工場B	A1	需要エリア2, 3	607,000	1
	B1	需要エリア2, 3	86,500	2
	C1	需要エリア1～5	19,050	3
自社工場C	A1	需要エリア3, 4, 5	419,000	1
	B1	需要エリア3, 4, 5	59,100	2
	C1	需要エリア1～5	19,050	3
外注工場3	A1	需要エリア1	140,000	1
	B1	需要エリア1	20,000	2
	C1	需要エリア1～2	10,450	3

③提案手法の適応効果

提案手法のうち、「生産工場割振り計画」について実際の運用に提案手法を適用したケースでは、生産コストと物流コストのバランスを意識した生産工場割振りが可能となり、それまでの生産効率主体の割振りを減らすことに一定の効果がみられた。また、コスト評価以外では、次の効果が得られた。

- ・ 生産工場割振り計画業務にかかる時間を短縮出来たため、それまで月間で行っていた生産工場割振りを、より短い周期で行うことが可能となり、サプライチェーンをより細かく管理できるインフラが構築出来た。
- ・ これまで担当者の経験と勘に基づいていた生産工場割振りの仕組みと評価方法が社内の関係部門間で共有することが可能になり、各種計画パラメータを事前に調整することで、各生産工場間での生産工場割振り後の生産調整作業が軽減した。

しかし、提案手法導入前後でのコスト低減効果の定量的な評価は今後の課題になっている。また、ロジスティクスネットワーク計画に関わる提案フレームワーク、および、MLNPの効果については、実務での適用による評価が今後必要である。

表11 生産割振り結果（自社工場 A，自社工場 B，自社工場 C，外注工場 3 の例）

生産工場	品目	優先需要エリア	生産割振り予定数量 (ケース/月)	段取り (ケース)
自社工場 A	A1	需要エリア 2	374,000	18,000
	A2	需要エリア 2	374,000	18,000
	A3	需要エリア 2	374,000	18,000
自社工場 B	A1	需要エリア 2, 3	233,000	5,700
	A2	需要エリア 2, 3	233,000	5,700
	A3	需要エリア 2, 3	233,000	5,700
自社工場 C	A1	需要エリア 3, 4, 5	186,000	10,400
	A2	需要エリア 3, 4, 5	186,000	10,400
	A3	需要エリア 3, 4, 5	186,000	10,400
	B1	需要エリア 3, 4, 5	59,100	10,400
	B2	需要エリア 3, 4, 5	59,100	10,400
	B3	需要エリア 3, 4, 5	59,100	10,400
	B4	需要エリア 3, 4, 5	59,100	10,400
外注工場 3	A1	需要エリア 1	140,000	———

7. 今後の研究課題

本論文では、ロジスティクスネットワーク計画のフレームワーク、および、そこで利用するヒューリスティクス手法を提案した。提案手法について、数値計算例を使用した説明を行った。

提案したフレームワークについて、次の項目を今後の課題と考える。

- ・ 物流センター間における製品の在庫移動計画を含めたロジスティクスネットワーク計画への拡張
- ・ 生産および出荷実績を取り込んだ計画変更への対応

また、提案したヒューリスティクス手法はあくまでも簡易な方法であり、その性能について今後評価を積み重ねる必要がある。また、ヒューリスティクス手法を実際の問題に適用するに当たっては、通常、その問題の特徴に応じた方法に修正して適応する必要があると考える。今後、提案したヒューリスティクス手法について、そのための基礎情報を整理する必要がある。

参考文献

- [1] Ballou, R. H., *Business Logistics Management: planning, organizing, and controlling the supply chain*, Prentice-Hall, New Jersey (1999).
- [2] Vollman, T. E., Berry, W. L., and Whybark D. C., *Manufacturing Planning and Control Systems*, McGraw-Hill, New York (1997).

- [3] Simchi-Levi, D., Kaminsky, P., and Simchi-Levi, E., *Designing and Managing the Supply Chain*, Irwin McGraw-Hill, New York (2000).
- [4] 石井信明, 玉川直明, 西出昌史, 「モノ作りの仕組み作り」, 工業調査会 (2004).
- [5] 日本オペレーションズ・リサーチ学会編, 「OR辞典2000」, 日科技連 (2001).
- [6] 圓川隆夫, 「トータル・ロジスティクス」, 工業調査会 (1995).
- [7] Tsiakis, P., Shah, N. and Pantelides, C. C., Design of Multi-echelon Supply Chain Networks under Demand Uncertainty, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 40, No. 16, pp.3585-3604 (2001).
- [8] 石井信明, 村上季史, 複数生産拠点における生産工場割振りの簡易手法の提案, 日本ロジスティクスシステム学会, 第7回全国大会予稿集, pp.35-38 (2004).
- [9] Boesel, J., Nelson, B.L., and Ishii, N., A Framework for Simulation-Optimization Software, *IIE Transactions*, Vol.35, No.3, 221-229 (2003).
- [10] SCM研究会編, 「サプライチェーン・マネジメントがわかる本」, 日本能率協会マネジメントセンター (1998).