

小特集

「サプライチェーンマネジメントと人工知能」

サプライチェーンにおける分散協調型最適化技術

Distributed Optimization Technique for Supply Chain Management

西 竜志
Tatsushi Nishi岡山大学工学部電気電子工学科
Department of Electrical and Electronic Engineering, Okayama University.
nishi@cntr.elec.okayama-u.ac.jp, <http://www.cntr.elec.okayama-u.ac.jp/~nishi/index.html>**Keywords:** supply chain planning, distributed optimization, Lagrangian decomposition and coordination method, multi-companies, B to B.

1. はじめに

多くの産業では、企業間部門の統廃合による経営の効率化が行われている。そして、異業種間での原材料・資源の取引や在庫を融通することで、資材調達から生産、販売を効率的に行うSCM (Supply Chain Management) が注目されている。従来のSCMシステムは、全体を一つのシステムとしてモデル化し、それらを一括して最適化する方法が採用されてきた。集中管理システムによる意思決定は、単一目的に対しては有効であることが多いが、大規模かつ多目的な状況下での意思決定に対しては、迅速な意思決定が困難となることが少なくない。大規模な対象に対して、各部門が独自の評価指標に基づく意思決定を行うだけで全体が最適化されるシステムが実現できれば、システムの導入やメンテナンスが段階的に行えるとともに、さまざまな変動に対しても柔軟に対応することが可能となる。このようなシステムを実現するためには、分散環境下で限定された情報だけを利用して全体を最適化する技術（分散協調型最適化技術）が必要となる。現実世界における意思決定は、多種多様な意思決定者によって分散協調的に行われている。したがって、現実世界における意思決定プロセスをモデル化するためには、分散協調型のシステムとしてモデル化するほうが自然である。従来から、生産スケジューリングに関する分野では、分散人工知能や自律分散システム、エージェント指向の考え方をういたさまざまな分散型協調型システムに関して数多くの研究がなされてきた。本稿では、分散協調型の最適化技術の基礎となるラグランジュ分解・調整法と、そのサプライチェーン計画問題や企業間取引計画問題に対する適用例について、著者の最新の研究内容を中心に解説する。

2. サプライチェーン最適化の目的

サプライチェーンにおける意思決定の目的は、顧客満足度向上や在庫削減、企業間連携など多岐にわたる

[Chen 04]. 一般に、サプライチェーンにおける計画問題の最適化という観点に限定すれば、その主な目的は、生産から物流、在庫、販売に及ぶ複数部門の統合最適化による経営の効率化を図ることにある。図1にサプライチェーンにおける最適化の範囲を示す。企業や工場などの組織を一つのビジネスユニットと捉えると、一つのビジネスユニットに定義されるサプライチェーンを対象とした最適化の目的は、資材調達計画、生産計画、輸送計画、販売計画などの部門間の水平統合 (Horizontal integration) と年単位の長期的決定にかかわる戦略レベルから、月単位の中期計画、週単位、または時間単位の作業レベルで実行されるタイムスケールの異なる生産計画の垂直統合 (Vertical integration) に分類できる。また、従来は、工場や組織を単位として、各組織が個別に最適化を行ってきたが、統合最適化の対象は、単一装置から工場全体へ、単一工場から企業全体へ、単一企業から複数企業へと進展している。

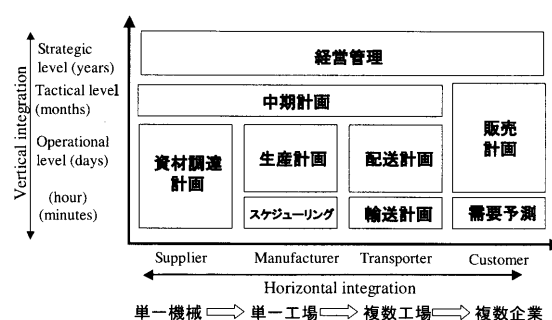


図1 サプライチェーンにおける統合最適化の範囲

3. サプライチェーン最適化に関する研究

サプライチェーンの最適化法として代表的な手法は、離散事象シミュレーション技法を組み合わせた最適化手法や混合整数計画問題に代表される数理計画手法による解法である。数理計画手法によるサプライチェーン計画問題のモデル化と解法の方法として、次の二つのアプローチが採用されている。一つは、計画問題全体を混合整

数計画問題 (MIP) として定式化し、一括して最適化するという統合的アプローチであり、もう一つは生産計画とスケジューリングを順次行うという階層的アプローチである。生産計画における垂直統合の例として、[Birewar 90]は、線形計画による生産計画問題に作業の処理順序までを考慮した最適化モデルを採用することにより、生産計画時に詳細な処理順序までを考慮した、より厳密な最適化を行うことで、大幅に利益を高めることができることを示した。しかしながら、計画問題の統合モデルによる最適化は、ロットサイジングとスケジューリングの同時最適化問題となり、離散変数の数の増加とともに、考慮すべき組合せの数が増加し、最適に近い解を得ることは極めて困難である。一般には、計画問題を複数の部分問題に分割し、階層的に意思決定を行うことにより全体の最適化を図る方法が採用される。階層的手法のアプローチは、最適性は劣るが、計算負荷が小さく、上位レベルの意思決定時に詳細なデータを必要としないなどの利点がある [Bitran 81]が、下位のシステムからのフィードバックが少ないため、変動に対する対処法が難しいなどの欠点を有する。水平統合モデルに関する研究としては、中期のサプライチェーン計画モデル [McDonald 97]や生産部門と物流部門の統合最適化モデル [Vidal 97]、複数企業間における計画問題の最適化、需要の不確定性に対する確率計画手法 [Gupta 00]、また最近では、戦略的意思決定モデルを組み込んだ生産計画の最適化に関する研究 [Shapiro 04]や制御理論を用いた在庫管理に関する研究 [Seferlis 04]が盛んに行われている。

4. 分散協調型最適化技術

本章では、分散協調型最適化技術の基礎となるラグランジュ分解・調整法について解説する。

4.1 ラグランジュ分解・調整法

ラグランジュ分解・調整法は、大規模問題をいくつかの部分問題に分解し、それらの解を調整して実行可能解を作成するという方法である。この方法は、非線形最適化における双対理論に基づいており、部分問題の解の調整は双対問題を解くことに相当する。ラグランジュ緩和法は長年にわたり研究されており [Fisher 81]、最近では組合せ最適化やスケジューリングへの応用が盛んに行われている [今泉 01, Reeves 97]。以下では、一般的な制約つき最適化問題 (原問題) について考える。

$$\min_x f(x) \quad \text{s.t. } g(x) \leq 0, x \in \mathcal{R}^n \quad (1)$$

x は n 次元ベクトル、 $g(x)$ は m 次元ベクトル関数とする。式 (1) で表される問題に対するラグランジュ関数

$$L(x, \lambda) = f(x) + \lambda' g(x) \quad (\lambda \geq 0) \quad (2)$$

を導入する。ここで、 λ は m 次元ベクトルである。 $f(x)$ 、 $g(x)$ が次式を満たすとき、分離可能 (separa-

ble) という。

$$f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n f_i(x_i) \quad (3)$$

$$g(x_1, \dots, x_n) = \sum_{i=1}^n g_i(x_i) \quad (4)$$

このとき、スカラー関数であるラグランジュ関数は

$$\begin{aligned} L(x, \lambda) &= \sum_{i=1}^n f_i(x_i) + \lambda' \sum_{i=1}^n g_i(x_i) \\ &= \sum_{i=1}^n (f_i(x_i) + \lambda' g_i(x_i)) \end{aligned} \quad (5)$$

であるから、ラグランジュ関数の最小化問題 (ラグランジュ緩和問題) は、以下のように記述できる。

$$\min L(x, \lambda) = \min \sum_{i=1}^n (f_i(x_i) + \lambda' g_i(x_i)) \quad (6)$$

ラグランジュ緩和問題では、 \min と \sum の演算の順序交換が可能であるから、 $L_i = f_i(x_i) + \lambda' g_i(x_i)$ とすると

$$\min_x L(x, \lambda) = \min_x \sum_i L_i = \sum_i \min_{x_i} L_i \quad (7)$$

と変形できる。式 (7) より、 $L(x, \lambda)$ の最小化は L_i ($i = 1, \dots, n$) の最小化に帰着し、ラグランジュ緩和問題における決定変数の探索空間の大きさを大幅に削減することが可能となる。

4.2 ラグランジュ分解・調整法のアルゴリズム

原問題の双対問題は $\lambda \geq 0$ の条件下で双対関数を最大化する問題として、以下のように記述できる。

$$\max q(\lambda), \quad q(\lambda) = \sum_{i=1}^n \min_{x_i} L_i \quad (8)$$

式 (8) で表される問題に対するラグランジュ双対理論に基づく解法は、以下のステップから構成される。

ステップ 1 ラグランジュ乗数の初期値 $\lambda^{(0)} \geq 0$ を与える。 $k = 0$ とおく。

ステップ 2 与えられた $\lambda^{(k)}$ に対して、 $\lambda^{(k)}$ を固定して、ラグランジュ関数を最小化する。具体的には、 i を 1 から n まで変え、以下の部分問題を解く。

$$\min_{x_i} L_i(x_i^{(k)}, \lambda^{(k)}) \quad (i = 1, \dots, n) \quad (9)$$

この解を $x_i^{(k)}$ とする。得られた解から双対関数 $q(\lambda) = \sum_{i=1}^n L_i(x_i^{(k)}, \lambda^{(k)})$ を計算する。

ステップ 3 $q(\lambda^{(k)})$ がこれ以上更新されず、 $q(\lambda)$ が最大値と判断されれば計算を終了する。最大値でなければ次のステップへ進む。

ステップ 4 ステップ 3 で得られた解 $x_i^{(k)}$ ($i = 1, \dots, n$) から適当なヒューリスティックルールに基づき実行可能解を生成する。これにより、上界値 L^* を更新する。

ステップ 5 $q(\lambda)$ を増加させる新しい λ の値、 $\lambda^{(k+1)} \geq 0$ を生成する。 $k = k + 1$ として、ステップ 2 へ戻る。

ステップ 5 におけるラグランジュ乗数の更新には、以下の式が用いられる。

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + t_k g(x^{(k)}) \quad (10)$$

$$t_k = \alpha \frac{L^* - \sum_{i=1}^n L_i(x_i^{(k)})}{\sum_{i=1}^n g_i(x_i^{(k)})^2} \quad (11)$$

この更新法は劣勾配方向 $g(x^{(k)})$ に行われる。この方向に双対変数を改訂する算法を劣勾配法という。ここで、 α は一般に $0 < \alpha \leq 2$ を満たすスカラー値である。

一般に関数 $f_i(x_i)$ 、および関数 $g_i(x_i)$ が連続凸関数であれば、上記のアルゴリズムにより、大域的最適解への漸近を保証することができるが、非凸問題に対しても局所的最適解を導出するためのアルゴリズムとして利用することができる。このアルゴリズムは古くから提案されている非線形連続関数に対する手法であるが、最近の研究では、整数計画問題に対する本手法の適用が検討されている。近年、この方法は、1 機械スケジューリング問題[Fisher 81]、ジョブショップ問題[Hoitomt 93]、ロットサイジング問題[Muramatsu 00]などさまざまな問題の解法として利用されている。

4.3 拡張ラグランジュ分解・調整法によるサブシステム (SS) の設計法

[Androulakis 03]は、分散環境における意思決定の方法と数理計画法との関連を示している。分散協調システムにおける意思決定は、複数のサブシステム (SS) のそれぞれが受け持つ決定変数を、サブシステム間で共通の探索空間における制約条件 (等式、もしくは不等式) を満たすように決定する。もし、探索空間に共通領域が存在しなければ、完全に独立した問題として解決することが可能であるが、実際には共通の変数に関する制約を有することが多い。それぞれの SS が個別に意思決定を行ったとしても、制約条件を満たし、全体の評価指標を最適とするためには、SS 間でどのような情報を交換し、どのように意思決定を行うかを決定することが分散協調システムを設計する際に重要となる。SS における個別の評価関数を f_i 、決定変数を $\{x_i\}$ 、 $\{u_i\}$ とする。ここで、 $\{x_i\}$ はほかの SS とは無関係の決定変数、 $\{u_i\}$ はほかの SS の意思決定によって制約される決定変数とする。このとき、一般に各 SS におけるローカルな意思決定問題は以下のように定式化される。

$$\min_{\{x_i, u_i\}} f_i(x_i, u_i) \quad (12)$$

$$s.t. \quad x_i \in X_i \subset \mathcal{R}^n, X_i \cap X_j = \emptyset \quad (13)$$

$$u_i \in U_i \subset \mathcal{R}^m, U_i \cap U_j \neq \emptyset \quad (14)$$

$$g_j^i(x_i, u) \leq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, J_i) \quad (15)$$

$$h_m^i(x_i) \leq 0 \quad (m = 1, 2, \dots, M_i) \quad (16)$$

X_i および X_j はそれぞれ変数 x_i, x_j によって張られる部分空間であり、式 (13) は、変数 x に関して SS*i* と SS*j* に関して共通要素がないことを表す。式 (14) は、変数 u_i の要素のうちいずれかは、変数 u_j の要素であることを表す。式 (15)、式 (16) はそれぞれ、SS*i* がほかの SS に関わる制約条件 g_j^i と、SS*i* のみに関わる制約条件 h_m^i を

表す。また、 J_i は SS*i* の制約でほかの SS と関係する制約条件式の数、 M_i は SS*i* が個別に有する制約式の数である。これらの制約や目的関数は SS で異なっても構わない。例として、以下では簡単な二つの部門間での分散協調問題を示す。

$$\min_{\{x_1, u_1\}} (f_1(x_1, u_1) + f_2(x_2, u_2)) \quad (17)$$

$$s.t. \quad u_1 - u_2 = 0 \quad (18)$$

SS 全体での最適化は上記の問題を解くことによってなされる。式 (18) を緩和した双対関数を導入することによって、二次の項を加えた拡張ラグランジュ関数 L_c が以下のように定義される (拡張ラグランジュ関数の必要性は 6.2 節で詳しく述べる)。

$$L_c = f_1(x_1, u_1) + f_2(x_2, u_2) + \lambda(u_1 - u_2) + C(u_1 - u_2)^2 \quad (19)$$

$$= f_1(x_1, u_1) + f_2(x_2, u_2) + \lambda(u_1 - u_2) + C\{(u_1)^2 + (u_2)^2 - 2u_1 \cdot u_2\} \quad (20)$$

この例では、非線形項 $u_1 \cdot u_2$ のため、問題を部分問題へ分解できない。そこで、暫定解 (\bar{u}_1, \bar{u}_2) の周りで一次の Taylor 展開で近似する方法が提案されている。 L_c は以下のように変形される。

$$L_c = f_1(x_1, u_1) + f_2(x_2, u_2) + \lambda(u_1 - u_2) + C(u_1^2 + u_2^2 - 2u_1 \cdot \bar{u}_2 - 2u_2 \cdot \bar{u}_1 + 2\bar{u}_1 \cdot \bar{u}_2) \quad (21)$$

このとき、 L_c を最小化する問題は、次に示す二つの部門での意思決定問題に分離可能となる。

$$\min_{\{x_1, u_1\}} f_1(x_1, u_1) + \lambda u_1 + C(u_1^2 - 2\bar{u}_2 u_1 + \bar{u}_1 \cdot \bar{u}_2) \quad (22)$$

$$s.t. \quad h_m^1(x_1) \leq 0$$

$$\min_{\{x_2, u_2\}} f_2(x_2, u_2) - \lambda u_2 + C(u_2^2 - 2\bar{u}_1 u_2 + \bar{u}_1 \cdot \bar{u}_2) \quad (23)$$

$$s.t. \quad h_m^2(x_2) \leq 0$$

上記で示した問題は、ローカルな意思決定問題に、ラグランジュ乗数を含むペナルティ項と決定変数 u を加えたのみであり、式 (12) で表される問題から容易に拡張することができる。すなわち、本手法は目的関数の形に依存せず有効である。また、本手法の最も望ましい性質は、双対問題を解くこと、すなわち部分問題を調整して全体最適解を得るためのラグランジュ乗数の更新方向は、部分問題を解くことによって得られた解を全体として管理しなくても、各要素の情報 $(u_1 - u_2)$ のみによって計算される。つまり、ラグランジュ乗数は次式で更新することができる。

$$\lambda^{(k+1)} = \lambda^{(k)} + t(\bar{u}_1 - \bar{u}_2) \quad (22)$$

t はステップ幅 (パラメータ) である。各部門でラグランジュ乗数を更新するためには、それぞれの部門間で \bar{u}_1, \bar{u}_2 の情報を交換するだけで双対問題の劣勾配を計算できるため、双対問題を部門間で分解して解くことができる。これは、前節で示した解法を用いることにより、分散環境において局所情報のみを利用しているにもかかわらず、全体として最適解に近い解を得ることができることを示している。

4.4 分散協調型最適化法のアルゴリズム

各サブシステムは、個々の目的関数とラグランジュ乗数の項、およびペナルティ関数の総和から構成される目的関数を最小とするように意思決定を行う。全体のアルゴリズムを図2に示す。各部門はまず、ラグランジュ乗数の初期化を行う。次に、情報交換を行い、サブシステム間で \bar{u}_1, \bar{u}_2 の情報を交換する。次に収束判定を行い、収束していなければ、ラグランジュ乗数を更新して、各部門の最適化問題を解く。各部分問題の解法としては、どのような最適化法でも採用可能である。分散協調型最適化法では、個々の分散要素が独立して最適化問題を解くことができるため、並列計算機での実装が向いている。

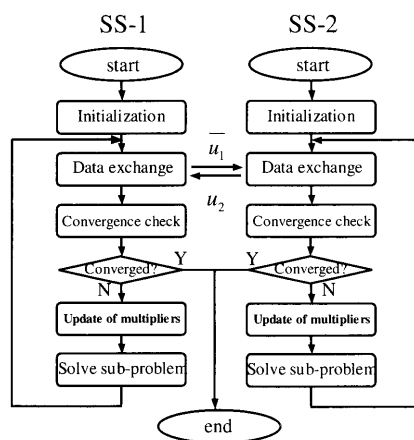


図2 サブシステム間の協調アルゴリズム

5. サプライチェーンの分散協調型最適化システム

従来の管理システムは、受注情報が与えられると、長期間を考慮した生産計画が作成され、作成された生産計画を設定値として、より詳細なスケジュールを作成するという階層構造を有している。そのようなシステムでは、種々の変動により、いったん作成された生産計画では、実行可能なスケジュールを作成することが困難となる場合も少なくない。多品種生産システムでは、需要の変動に対応するために、生産計画のスパンをより短くし、詳細なスケジュールまでを考慮した生産計画を立案することが強く望まれている。もし、受注管理や生産計画などのサブシステムを一つの分散要素とみなし、各サブシステムが互いに情報を交換することで全体の最適化を図ることができれば、資材の調達から生産、販売までを同時に考慮した生産システムの最適化が行えると同時に、さまざまな変更に対しても、サブシステムを変更するだけで柔軟に対処できることが期待される。以上のような観点から、これまでに分散協調型サプライチェーン最適化システム[西03]を提案し、システムの開発を進めている。

5.1 関連する研究分野、および本研究の特徴

分散型サプライチェーン管理システムに関して、階層

的マルチエージェントスケジューリング[Burke 90]やエージェントシミュレーション[Julka 02]などの数多くの研究がなされている。これまでに提案されている分散協調型システムの多くは、契約ネットプロトコル[Smith 80]やボトルネック法に基づくルール[Sycara 91]をサブシステムに組み込んだものが多く、解の最適性についてはあまり議論されていない。著者が開発するシステムの分散協調メカニズムは、ラグランジュ分解・調整法に基づく最適化理論を基本とし、ラグランジュ乗数を利用した大規模な最適化問題の下界値による最適性の評価や部分問題への分解可能性など、双対理論に基づく理論的解析が可能であることが大きな特徴の一つである。

5.2 サプライチェーン計画問題のモデル

資材調達先、生産サイト、顧客からなる生産システムのモデルを考える。ここで、資材調達先と生産サイト、および生産サイトと顧客間には、製品置場が存在し、最大保有量が制限されるものとする。決定変数、評価指標、および制約条件としては、以下の項目が考えられる。

決定変数：資材調達先、資材調達時期、資材購入量、資材在庫量、生産開始時刻、生産量、製品販売先、製品販売量

評価指標：資材コスト、資材在庫コスト、生産コスト、段取り替えコスト、製品在庫コスト、機会損失ペナルティ、販売利益

制約条件：資材調達時期に関する制約、装置の処理容量制約、在庫の保有量に関する制約、在庫収支制約

5.3 サプライチェーンの分散協調型解法

上記に示したサプライチェーン最適化問題は、スケジュールに関する離散変数と資材調達量や製品出荷量などの連続変数を含む大規模な混合整数計画問題となり、厳密な最適解を得ることは難しい。そこで、ラグランジュ分解・調整法を用いて、部分問題への分解を行う。サプライチェーン計画問題に対しては、式(18)に示されるように、資材調達、スケジューリング、出荷計画のそれぞれに対して在庫収支制約中に疑似生産量である変数 P (資材調達)、 P (スケジューリング)、 P (出荷計画) を組み込み、 P (資材調達) = P (スケジューリング) = P (出荷計画) の等式制約を緩和する。これにより、サプライチェーン計画問題は資材調達サブ問題、スケジューリングサブ問題、出荷計画サブ問題に分解できる[西03]。ここで、 P (資材調達)、 P (スケジューリング)、 P (出荷計画) はそれぞれ、資材調達、スケジューリング、出荷計画のサブ問題を解くことによって得られる暫定的な基準生産計画となり、これらの変数が一致するようにサブ問題の解を調整する。図3に提案している分散協調型サプライチェーン最適化システムの概要を示す。システムは、資材調達計画、スケジューリング、製品在庫管理の三つのサブシステムから構成される。各サブシステムは、

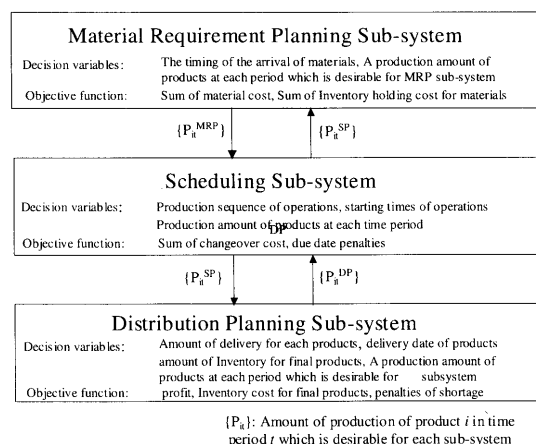


図3 分散協調型サプライチェーン最適化システムの構造

個々のサブシステム固有の決定変数と、各サブシステムとして望ましいスケジュールを基準生産計画（各期での各製品の生産量）として決定する。各サブシステムは、ほかのサブシステムから得られるスケジュールとのずれに対するペナルティを目的関数に組み込み、その重み係数を徐々に増加させていくことにより、実行可能な生産計画を導出する。提案したシステムが従来までの階層構造を有する生産計画システムと異なる点は、サブシステム間の情報の流れが一方方向ではなく、双方向の情報交換を行うという点である。このように、最適化システムを分散化させることにより、従来までに開発されたシステムを再利用することが可能であると同時に、種々のシステム変更に対しても、柔軟に対応することができる。

5.4 適用事例

1 装置のバッチプロセスを対象として生産計画を行う。対象としたプラントでは、2種類の原料から4種類の製品（A, B, C, D）が生産される。原料の調達月初めのみ可能であり、製品の出荷は1日に1回行われるものとする。装置では連続して処理する製品の銘柄により、切換えコストがかかる。需要は各月で最低需要量と最高需要量が与えられており、需要の下限値を下回ることに対しては、ペナルティを支払う必要がある。また、製品の出荷は月の途中であってもよいとする。プラントは1日24時間稼働するとし、原料貯留量、製品貯留量には制限がある。以上のような例題に対して、サプライチェーン全体の評価指標は、売上げ（Total sales）から原料コスト（Material cost）、原料在庫コスト、生産コスト（Production cost）、製品在庫コスト、切換えコスト（Changeover cost）の和を引いた利益（Total profit）であり、この評価を最大化する問題を考える。図4に、サブシステム間の情報交換回数に対する評価関数値の変化を示す。情報交換回数が少ない初期の段階では、各サブシステムが独自の評価に基づいて生産計画を立案するため、全体として見た場合、出荷量と生産量が一致せず実行不可能となる。これは、製品在庫管理システムは、販

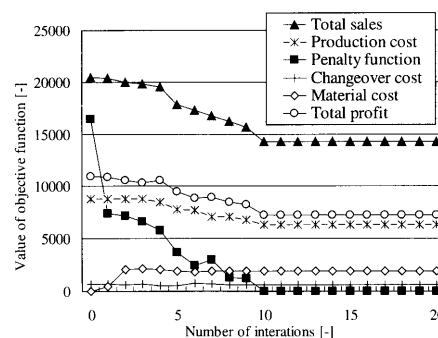


図4 評価関数値の推移

売利益の高いと予測される時期に製品を出荷しようとするが、スケジューリングシステムでは、切換えコストを安くするために、同一製品を連続して処理しようとするためである。このため、初期の段階では、利益（Total sales）は高いが、ペナルティ関数（Penalty function）の値が大きくなっている。資材調達計画では、資材在庫を抑えるように計画を作成しようとするため、資材購入量が小さい。情報交換回数が増えると、ペナルティ関数の重み係数が徐々に増加するとともに、各サブシステム間でスケジュールが伝達され、システム全体として適切な生産量が選択される。このような手順により、提案したシステムは、全体として最適に近い生産計画を得る。計算機実験により、提案したシステムは、処理する製品の処理順序によって、生産計画が大きく影響されるような単位スパンの短い生産計画問題に対して、従来までの階層構造を有する生産計画システムに比べて、良好な生産計画を導出できることが示されている。多工程プロセスに対しては、[Nishi 02]を参照されたい。

6. 機密情報制限環境下における複数企業間取引調整システム

以下では、分散協調型最適化法を利用した複数企業間取引の最適化システムについて解説する。近年、電力取引や企業間商取引に代表されるように取引の自由化が進展するとともに、多企業間における製品の授受、原材料の取引などによる企業間連携が頻繁に行われている。石油化学コンビナートにおいても、異業種での電力や蒸気などの共有化、資材の調達・物流の一体化による経営の効率化が行われつつある[種田 03]。しかしながら、このような多企業間における取引の調整は、現状では各企業の管理者間の交渉によって行われている。また、多企業間における製品取引の調整は複雑化しており、人どうしによる交渉のみでは迅速な意思決定が極めて困難である。したがって、これらの意思決定を容易にするため、多企業間における取引計画問題を計算機上にモデル化し、全体として最適な入出荷計画の作成を支援するSCMシステムを開発することが求められる[田辺 02]。多企業間に

おける取引計画の自動調整, もしくは最適化を実現するためには, 企業間の情報を交換し, それらを互いに共有する必要がある. しかしながら, 全体最適化に必要なすべての情報, すなわち, 稼働率や在庫コスト, 切換えコスト, 納期遅れペナルティなどの情報はできるかぎり競合企業間で非公開であったほうが望ましい. そこで, 以下では, 多企業間の入出荷計画問題に対して, 限られた情報のみを利用して全体を最適化するための枠組みとして, 各企業が局所情報と一部共有された情報のみを用いて最適化を行う分散型最適化手法を解説する.

6.1 複数企業間の取引計画問題のモデル

多企業間における入出荷取引計画問題のモデルを図5に示す. 出荷企業と入荷企業の取引について日単位の取引量を決定する問題を考える. 入荷, および出荷を行う複数の企業間には共有の移送設備が備えられているものとし, その設備では同時に一つの銘柄の製品のみ移送可能とする. 一日当たりの最大取引量は共有の移送設備の能力により制限される. 各社の与えられた期間内での取引量はあらかじめ定められており, その量は必ず取引を行う必要があるものとする. 一般に, 各社は一定量を連続して入出荷するほうが望ましい. すなわち, 入出荷量が連続する日によって異なる場合, 取引量の変化に対する準備コストとして, あらかじめ各社で定められたペナルティである取引分割コストがかかるものとする.

6.2 拡張ラグランジュ分解・調整法による入出荷計画問題の最適化

原問題は混合整数計画問題として記述できる. 他企業のコスト情報や目的関数などの他社の意思決定に関係するすべての情報を利用できれば, 原問題を分解する必然性はない. しかしながら, 全体を管理する機構をもたず, 情報を他社に公開できない環境下では, 分散型最適化手法を採用せざるを得ない. 以下では, まず, ラグランジュ分解調整法を用いた分散型最適化手法の枠組みを説明する. 入出荷取引計画問題の入出荷量のフローバランスに関する制約条件式をラグランジュ乗数を用いて緩和すると, ラグランジュ緩和問題は, 複数の部分問題に分解できる. ラグランジュ分解調整法を用いた最適化手順を以下に示す.

ステップ1 ラグランジュ乗数を初期化する.

ステップ2 ラグランジュ乗数を固定して, 各社の部分問題を解く.

ステップ3 ステップ2で得られた解を利用して, ヒューリスティックルールにより実行可能解を作成する.

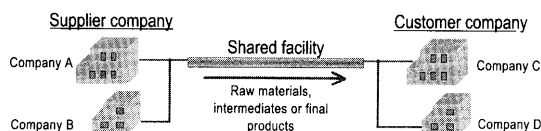


図5 複数企業間の取引計画問題のモデル

ステップ4 各社の取引計画を固定し, 双対山登り方向にラグランジュ乗数を更新する.

ステップ5 終了判定を行い, 実行可能解が得られれば終了する. ここで, 終了判定はすべての制約条件を満たす解が得られる, もしくは下界値の更新が規定回数以上行われないことである. 終了していなければステップ2へ戻る.

各社で得られた計画結果と他企業によって作成された計画結果から, 各社は個別にラグランジュ乗数を更新する. ここで, ラグランジュ乗数の更新幅は一定であり, 更新方向は, 各社の暫定計画量により定まる. したがって, 全体を調整する機構を設置することなく, 各社独自の意思決定により, 解を全体の最適解へ漸近させることが可能となる. 全体の調整は, 原問題の双対問題を解くこと, すなわちラグランジュ乗数を更新することによって行われるが, 通常のラグランジュ分解調整法では, 双対問題の解が必ずしも実行可能とはならないため, 双対問題の解をヒューリスティックルールにより実行可能解へ変換する必要がある. サブシステムの解を調整して, 実行可能解を生成する機能はコーディネータに相当する. しかしながら, 良質な解を得るためのヒューリスティックルール, すなわちコーディネータに相当する機能を構築することは容易ではなく, 全体の情報を利用できなければ, そのようなルールを構築することは難しい. そこで, 著者らはあくまでコーディネータを構築することなく, 分散環境で収束性を向上させる方法, すなわち, 通常のラグランジュ関数に二次のペナルティ項を加えた拡張ラグランジュ関数を採用した. 拡張ラグランジュ分解調整法を利用したとき, 実行可能性に対するペナルティが各サブシステムの目的関数に加わることにより, イタレーションを繰り返すごとに, 各サブシステムが実行可能性に重きを置いた探索を行うようにさせることで, 収束性を向上させることができる. このとき, 上述のアルゴリズム中のステップ3である実行可能解の作成, すなわちコーディネータに相当する部分は必要でなくなり, 各要素間のみで実行可能解に収束させることができることを数値実験により示している[西04].

6.3 システム構成

取引計画の最適自動調整システムの概要について説明する. 出荷1社(A)と入荷2社(B, C)からなる取引計画の最適自動調整システムの概要を図6に示す. システム

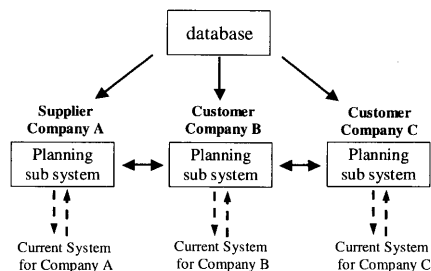


図6 企業間取引計画の分散型最適化システムの構成

ムはデータベースと各社の取引計画サブシステムから構成され、全体を管理するシステムは存在しない。また、各社のサブシステムには、既存システムの適用が可能である。

6・4 企業間取引計画の分散型最適化アルゴリズム

各社は図7の手順で取引の計画を行う。1) 各企業は、希望取引量を入力し、ラグランジュ乗数を初期化する。2) 各社は、それぞれの目的関数を最適化する初期入出荷計画を作成する。3) 他企業との情報交換を行い、暫定計画量の情報を授受する。4) 終了判定を行う。各社の入出荷計画量から入荷計画量と出荷計画量、および計画期間すべての入出荷計画量が一致すれば収束とみなし、終了する。5) 各社は、ラグランジュ乗数と、ペナルティ係数を更新する。6) 各社は分解された個々の目的関数に基づいて最適化し、入出荷計画を作成する。そして、3)に戻る。

混合整数計画法による解法を用いて全体最適化を行うためには、希望過不足ペナルティ、取引分割コスト、取引実施コスト、希望計画量といった各企業の経営に直接かわかる正確な情報が必要となるが、提案する分散型最適化アルゴリズムを採用することにより、企業間で共有する情報は、暫定計画量のみとなる。

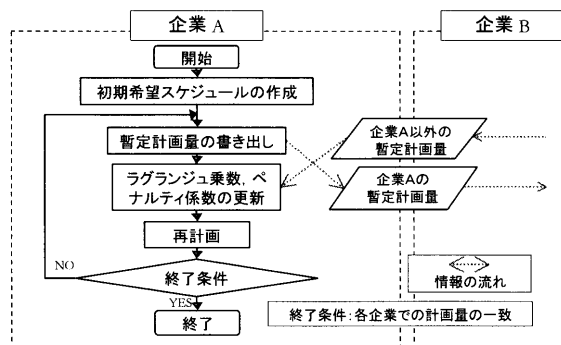


図7 機密情報利用制限環境下の分散型最適化アルゴリズム

6・5 適用例

出荷企業2社(A,B)と入荷企業3社(C,D,E)から構成され、1製品種の取引を扱う入出荷計画問題について考える。計画期間は30期とし、各社の取引要求量が図8で与えられるものとする。提案手法を用いて例題を解いた結果を図9に示す。図中の数字は入出荷量を表す。また、提案手法を用いたときの各イタレーションにおける拡張ラグランジュ関数の推移を図10に示す。

提案手法を用いることにより、157回の繰返し計算回数で収束し、評価関数値6625の解が得られた。図9より、全期間で実行可能な入出荷計画が得られていることがわかる。なお、混合整数計画法を用いて全体を一括して最適化した場合の最適値は6605であり、提案手法で得られた解の最適解からのずれは0.3%である。図10において、イタレーション回数が増加するにつれ、各社の計画システムが協調し、全体の目的関数が徐々に大きくなっていくことがわかる。提案手法では、解を実行可能解

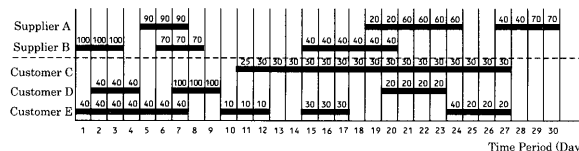


図8 初期入出荷計画 (2 出荷企業・3 入荷企業)

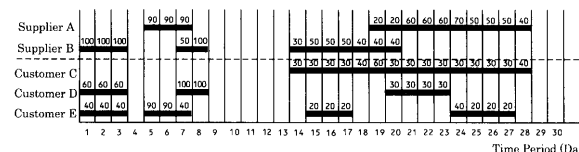


図9 提案手法による入出荷計画の最適化結果 (157 回の情報交換後)

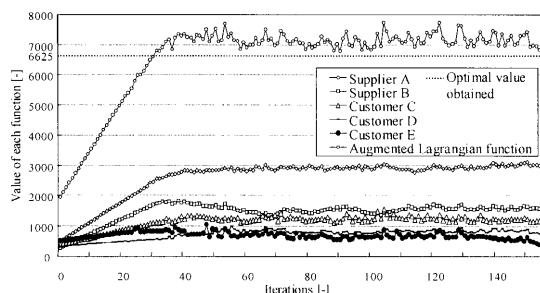


図10 評価関数値の推移

に収束させるため、拡張ラグランジュ関数を利用したが、ペナルティ項の重み係数を0と設定した場合には、通常のラグランジュ緩和法による解法となるため、厳密な下界値が得られる。本例題に対して、ラグランジュ緩和問題を解くことによって得られた下界値は6480であり、ほぼ最適解に近い値となった。提案手法はすべての問題に対して、従来のラグランジュ緩和法やペナルティ関数法に比べて計算時間は多少かかるが、最適性に優れた解を導出できる。なお、最適解を導出する際に用いた汎用パッケージであるCPLEX (iLOG社)を利用した混合整数計画法は、規模の小さい問題では、きわめて短時間で最適解を得ることが可能であるが、2 出荷企業対3 出荷企業の問題に対するMILP法は、約800秒以上の計算時間を必要とした。しかしながら、提案手法では、問題の規模が大きくなっても、計算時間を増加させることなく最適に近い解を導出している。以上の結果から、提案手法は、大規模な問題に対しても、有効であることが示されている。

7. おわりに

本稿では、サプライチェーンの分散協調型最適化技術として、ラグランジュ分解・調整法をベースとした、分散協調型サプライチェーン最適化システム、および複数企業間取引計画の調整システムを解説した。分散協調型システムでは、限られた情報のみを利用して、全体としての最適性を向上させることが可能であるが、交換する情報は正確でなければならない。複数企業間の取引調整では、

各企業が公開する情報に偽りがあれば、ある企業が利益を独占するケースも生じ得るという問題点も残されている。これらの問題を解決するためには、ゲーム理論やエージェント間の相互作用により協調のための仕組みを動的に変更するなど、人工知能技術のさらなる応用が求められるであろう。

◇ 参 考 文 献 ◇

- [Androulakis 03] Androulakis, I. P. and Reklaitis, G. V.: Approaches to Asynchronous Decentralized Decision Making, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 23, pp. 341-355 (1999)
- [Birewar 90] Birewar, D.B. and Grossmann, I. E.: Simultaneous Production Planning and Scheduling in Multiproduct Batch Plants, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 29, pp. 570-579 (1990)
- [Bitran 81] Bitran, G. R., Haas, E.A. and Hax, A. C.: Hierarchical Production Planning: A Single Stage System, *Operations Research*, Vol. 29, No. 4, pp. 717-743 (1981)
- [Burke 90] Burke, P. and Prosser, P.: Distributed Asynchronous Scheduling, *Application of Artificial Intelligence in Engineering V*, Vol. 2, pp. 503-522 (1990)
- [Chen 04] Chen, I. J. and Paulraj, A.: Towards a Theory of Supply Chain Management: The Constructs and Measurements, *Journal of Operations Management*, Vol. 22, pp. 119-150 (2004)
- [Fisher 81] Fisher, M. L.: The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems, *Management Science*, Vol. 27, No. 1, pp. 1-18 (1981)
- [Gupta 00] Gupta, A., Maranas, C. D. and McDonald, C. M.: Mid-term Supply Chain Planning under Demand Uncertainty: Customer Demand Satisfaction and Inventory Management, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 24, pp. 2613-2621 (2000)
- [Hoitomt 93] Hoitomt, D.J., Luh, P. B., Pattipati, K. R.: A Practical Approach to Job-Shop Scheduling Problems, *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 9, No. 1 (1993)
- [今泉 01] 今泉：ラグランジュ分解・調整法による生産スケジューリング, 経営学論集, Vol. 54, pp. 1-20, 東洋大学 (2001)
- [Julka 02] Julka, N., Karimi, I. and Srinivasan, R.: Agent-based Supply Chain Management, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 26, pp. 1755-1769 (2002)
- [McDonald 97] McDonald, C.M. and Karimi, I.A.: Planning and Scheduling of Parallel Semicontinuous Processes 1, *Ind. Eng. Chem. Res.*, Vol. 36, pp. 2691-2700 (1997)
- [Muramatsu 00] 村松健児：拡張ラグランジュ分解調整法による同時最適スケジューリング, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 45, No. 6, pp. 270-275 (2000)
- [Nishi 02] Nishi, T., Konishi, M., Hasebe, S. and Hashimoto, I.: Autonomous Decentralized Supply Chain Optimization System for Multi-Stage Production Processes, *Proceedings of Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation*, pp. 131-138 (2002)
- [西 03] 西 竜志, 小西正躬, 服部雄隆, 長谷部伸治：単一工程生産システムのサプライチェーン計画問題に対する分散協調型最適化法, システム制御情報学会論文誌, Vol. 47, No. 12, pp. 628-636 (2003)
- [西 04] 西 竜志, 篠崎竜一, 小西正躬：拡張ラグランジュ分解調整法を用いた多企業間における入出荷計画問題の分散型最適化システム, 計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 5, pp. 582-589 (2004)
- [Reeves 97] Reeves, C. R. 編：モダンヒューリスティクス—組合せ最適化の先端手法—, 日刊工業新聞社 (1997)
- [Seferlis 04] Seferlis, P. and Giannelos, N. F.: A Two-layered Optimization-based Control Strategy for Multi-echelon Supply Chain Networks, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 799-809 (2004)
- [Shapiro 04] Shapiro, J. F.: Challenges of Strategic Supply Chain Planning and Modeling, *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 28, pp. 855-861 (2004)
- [Smith 80] Smith, R.G.: The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver, *IEEE Transactions on Computers*, Vol. 29, No. 12, pp. 1104-1113 (1980)
- [Sycara 91] Sycara, K. P., Roth, S. F., Sadeh, N. and Fox, M. S.: Resource Allocation in Distributed Factory Scheduling, *IEEE Expert*, Vol. 6, No. 1, pp. 29-40 (1991)
- [田辺 02] 田辺孝夫：企業間のスケジューリング調停システム, オペレーションズ・リサーチ, Vol. 47, No. 1, pp. 27-31 (2002)
- [種田 03] 種田大介：コンビナート・ルネッサンス—国際競争力強化に向けた高度統合運営技術開発—, 化学工学, Vol. 67, No. 3, pp. 46-183 (2003)
- [Vidal 97] Vidal, C. J. and Goetschalckx, M.: Strategic Production - distribution Models: A Critical Review with Emphasis on Global Supply Chain Models, *European Journal of Operational Research*, Vol. 98, pp. 1-18 (1997)

2004年6月30日 受理

著 者 紹 介



西 竜志

2001年京都大学大学院工学研究科化学工学専攻博士後期課程修了。同年4月岡山大学工学部電気電子工学科助手となり、現在に至る。分散型サプライチェーン最適化システム、生産スケジューリング、搬送システムの設計と制御に関する研究に従事。博士(工学)、電気学会、システム制御情報学会、計測自動制御学会、スケジューリング学会、日本OR学会、IEEEなどの各会員。