

石油精製工程スケジューリングへの 数理計画法の応用

伊倉 義郎, 名原 和弘

1. はじめに

石油精製業は、装置産業の中にあっても最も早い時期から数理計画法をその操業計画に導入した業種であろう。その初期のものはゲッティオイル、ハンブルオイル等で実用化されたガソリン混合最適化モデルであったと言われる。(現在に至るもガソリン混合最適化の主流はシプレックス法の応用であろうか?)

爾来、「数理計画法の応用」と言えば線形計画法を応用した「石油精製モデル」として、レオンチェフの産業連環モデルなどと並んで、数理計画法の解説書には欠かせない分野となってきた。現実問題としても石油会社のコンピュータ使用時間、いいかえれば科学技術計算の使用時間の分野別を比較すると、経営計画問題の解法に供される LP の使用時間は、トップのクラスに位置すると考えられる。

一般的には石油輸入・精製・販売業の一連の石油業としてのすべてのステップにおいて LP を中心とした「数理計画法」の応用が試みられている。

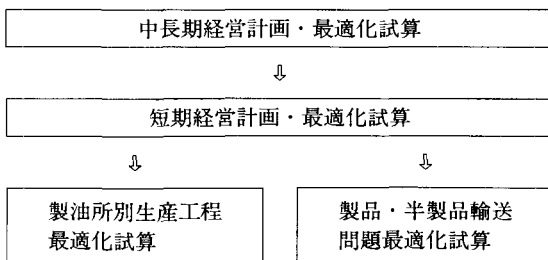


図1 石油業における最適化問題の階層例

左図に石油業における「最適化問題」の階層の一例を示したが、これらはすべて線形計画法の最も活躍する分野であって、さればこそ石油精製・流通問題に特化された多くの LP システムベンダー各社の活躍の場が確保され続けていることにもなるか。

この階層は上位に属するほど、そのコンストレインツは緩やかであり、逆に下位に行けばいくほど現実的な制約の数は増えてくることになる。しかしながら、こうした階層化において常に意図されているものとは、上位で得られた「最適性」の継承であり、その意図する方向性を現実的なコンストレインツが増える中で確認できる数少ない手法が、数理計画法の応用ということになる。

当然のことながら、この最下層には当該テーマの主題であるデイリーのスケジューリング問題が位置することになる。ところが(あえてここでこのテーマを選択した言いわけではないが)当該分野における数理計画法の応用は、きわめて低調であって、中には非常にネガティブにとらえている実業人も少なくない。そこで、本稿では、当該分野への数理計画法の応用の問題に、その必要性、採用可能なアルゴリズムの要件、等からアプローチし、具体的なプロダクトの提言につなげることを試みる。

2. 石油業におけるスケジューリング問題

いうまでもなく、石油産業はディスクリート型の産業とは異なり、連続性・連産品生産型の産業の代表例と言ってよい。むしろ、多くの産業が目的生産物以外の副製品をその製造工程の中では生じているので、数学的に考えて、とりわけ石油精製業のみが連産品生産型の産業であることを強調する理由は希薄であると言えないこともない。

こうした“連続性”は、複数のソースから原料である原油が選択されて、日本の製油所に輸送された後に

いくら よしろう SAITECH Inc.
1301 High Way 36, Hazlet, New Jersey 07730
なはら かずひろ 出光興産株式会社 製造部
〒100 千代田区丸の内3-1-1

スケジューリング問題の種類	問題の内容・意思決定項目
原油船配船スケジューリング	・自社船/契約庸船の積地から揚地（製油所）までの運行計画の設定、配送数量、油種類の設定、製油所から積地へのリターン。
原油通油スケジューリング	・製油所揚げタンク/原油種混合比率/装置への原油通油工程の設定、日程計画、および在庫コントロール、ローカル制約の設定等。 ・各原油種通油制約のコントロールと運転変数の最適化。
装置稼働スケジューリング	・蒸留装置の基本留分を各2次装置でさらに加工し製品生産との整合をとる。
製品混合スケジューリング 製品・半製品入出荷スケジューリング	・半製品の混合バランス（基材バランス）と、製品の入出荷計画および半製品の入出荷計画を同時に満足させる。装置稼働計画との連携が強い。
製品配送スケジューリング	・製油所の製品を各需要地へ配送するための最適ルートと最適輸送手段（輸送形態）を選択し、スケジューリングする。

図2 石油業におけるスケジューリング問題の種類（例）

プラントで需要に応じて製品生産割合を変化させながら（得率調整）、需要家に商品が配送されるまでの一連の石油エネルギーの流れが、絶えることなく継続されることを“保証”していることに等しい。

図2に、石油業で行なわれる一般的なスケジューリング問題の例を示したが、前述のとおり原油の搬送から末端への製品の輸送にいたるまで、すべてが数理計画法の観点から見て格好の題材と言ってもよい。多くの場合、上記の例に示す分野においては輸送手段、原料や処理工程といった資源配分問題に属する部分に大規模な最適化モデルが導入されているものの、スケジューリングに関する部分ではAIもしくはMMI的処理が主体であって、最適化を指向すると言うよりも資源配分問題の解で得られた「最適化」の方向性を目標達成思考にもとづいて、実行可能工程にブレークダウンしていくステップをとっていると言える。これには

いくつかの理由があると考えられるが、

- ・常識的にも大規模問題に属する石油関連問題の最適化モデルをさらにスケジューリング問題へと展開することの本質的な敬遠
- ・問題が複雑化することによって必然的に生じてくる計算機資源の確保の問題、およびモデルのメンテナンスの問題

等が代表的なものであろうか。確かに、船舶の運航スケジューリング問題へのOR的アプローチは（列車スケジューリング問題や乗員スケジューリング問題などの典型的な組合せ最適化モデルの例として）古くから実施されているが、気象・海象条件により毎日変動する石油タンカー運航計画に、OR的アプローチを強いるには若干の勇気が必要とされる。

一方で、ここで取り扱おうとする生産工程のスケジューリング問題は図3に簡略フローを示すような生

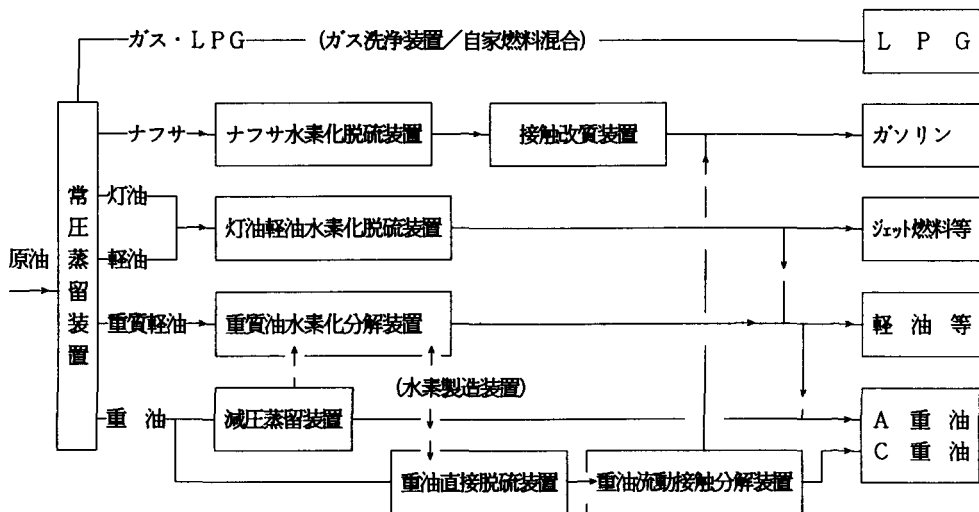


図3 モデル化される精製・混合工程の簡略フロー図

産計画最適化モデルの、「多期間 LP モデル版」として定義される。もちろん、これだけに止まらず

- ・ポンプ (or 回転機) の使用順序の問題
- ・貯油のためのタンクの使用の優先順位の問題
- ・各工程に必要な運転員 (作業員) 確保の問題
- ・混合時のラインの共用と優先順位の問題

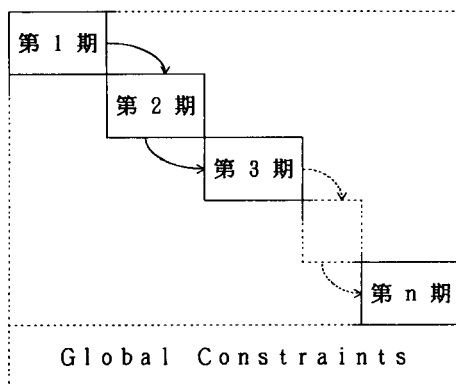
等々、生産現場のスケジューリングとして必須の項目は多数ある。しかしながら、石油精製業における生産スケジューリングは商品の生産計画 (出荷計画) と装置の稼働計画が (オイルフローから見て) 実行可能な形でデイリーベースに組み合わせることができるか否か、をすべての出発点としており、その問題を効率よく解くことがさらに細部のスケジューリングを容易にするとと言える。(誤解のないように注釈すれば、機器の使用順序や人員配置までも同時に解決しようとする生産スケジューリングは、その目的関数のとり方も含めてあまり現場経営者向きとは思えず、規模に応じたリターンが期待できるような見えない)

そこで、この生産スケジューリングの要件を見ながら具体的なプロダクトの提言へとつなげていく。

3. 生産スケジューリングの要件

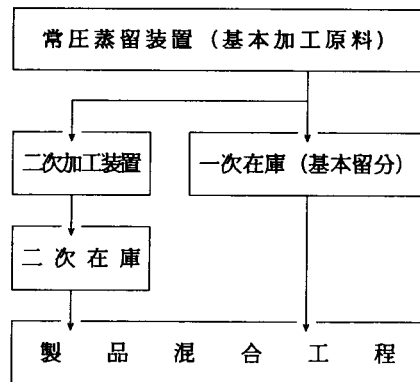
いかに多期間 LP のレベルでスケジューリングを論じようとも、依然 (すでに識者が多くの場で論じているとおり) 組合せ最適化の計算複雑さを考えると、数理計画法の応用がきわめて困難であることに変わりはない。^{1),2)} (ただ「…本質的に困難であることを数学的に証明する」とか「解ける方がむしろ例外的で、ほとんどの場合は解くことが困難な NP 困難問題」として、この業界の新人たちのやる気を削ぎ落とすことのないようにしたい)

多期間 LP 問題であるので、その構成は下の概念図に示すように、



のような形態となり、その形だけを見れば対角線上に延長された大規模線形計画法問題とも言えるが、これだけでは当該問題を解くことはできない。

石油精製工程では、図3に示したように、



といった工程の、それぞれが持つ制約を満足しつつ所期の目的関数を満足しなければならない。この個別制約は、(他業種同様に) 当該システムによって最適と定義されたスケジュールが、現場の専門家にとっての好ましいスケジュールとの間に極端な差を生じないように加工されたものである場合が多い。

これら制約 (もしくは設定条件) の代表的なものとしては、

- (1) 1つの生産工程 (精製装置または混合ライン) が2種類以上の物によって共有されているため、1期間内において同時に両者が起こりえない強い関係が存在する、(脱硫装置の2原料以上による共有化、1装置の2モード以上の運転パターン等)
- (2) 生産工程のうち、頻繁にそのパターンが変更されることが実際のでないものが存在する、(2次精製装置の原料変更等)
- (3) 休日等の特殊制約から、予め運転変動のないような考慮をしたい日が存在する、
- (4) 過不足の生じる基油を製油所間輸送で賄う場合には、船舶等の制約から整数ロットもしくはそれに準ずる輸送量の選択が必要となることがある、等が挙げられる。

さらには、製造業の多期間問題をつないでいるものは在庫の概念であり、

- (5) 1期間内に在庫が最大値となり、次期間に最小値となるような、FLIP-FLOPパターンは実際的でない場合が多い、

といった、大量の在庫を持つ製造業ならではの考慮すべきポイントがある。(一般的に、石油業界は90日近

くも在庫を持っているのだからスケジューリング問題にさほどシリアスである必要はないのではないか、という意見があるが、総在庫量を法的に確保していく問題と需要変動のパターンに併せて在庫引き取り計画を満足していく問題には、直接的な関係はない

こうした条件を整理していくと、多期間線形計画問題であって、混合整数計画法として設定される方式がこの条件を満たすモデルとなり得ると考え、次項に示す最適化モデルの開発に着手した。

4. 生産スケジューラとしてのMIPモデルの開発

ここで開発されるモデルは、単期間でも300~400式程度、規模の大きい製油所では700~800式となってしまう、さらに多期間問題(5~15日)となると常識的な最適化モデルの規模を大きく越えてしまうことが予想されたので、効率よく解くことのできるソフトウェアとハードウェアの整備が必須条件であった。

特に、この種のスケジューリング問題の解法として要求されるのは、きわめてサイズの大きな問題を専門

家が十分に耐えられるだけの短時間で解かなければならない、ということである。これを解決する明確な手段は限定されてくるが、ここではソフトウェアからのアプローチとして、点内法LPをさらに拡張させた手法である、PDNB (Primal Dual Newton Barrier) 法を採用するものとした。³⁾

また、精製工程のフローに従い以下のような基本構造を持つ石油精製プロセスの日次生産計画問題を、混合整数計画問題として定式化した。⁴⁾

このモデルは、各処理装置間の製品・半製品のフローを連続変数とし、一部の2次装置の切替え運転モードを0/1変数で表わしたものである。

当該モデルの特徴としては以下の点が挙げられる。

- 1) 装置や製品名を入力データの一部とし、変数や制約式の一部として自動的に組み込まれるようにしたため、プロセスの変更が入力データを通じて可能になり、ユーザーが自動的に定式化を行なえるように工夫してある。
- 2) 最適化の観点はコストミニマムではなく、日々の製品の生産量の平準化、2次装置の運転変更回数、外部からの購入留分の最小化等を加重平均したものとした。
- 3) 実行不可能解をなるべく避けるために、各留分フローに人工変数を加えペナルティを課すことにより実行不可能性の原因をユーザーに示唆するように工夫してある。

5. アルゴリズムおよびシステム上の考慮

すでに述べたように、実務用のスケジューラとしては10日~15日にわたる多期間問題を比較的短時間(10~15分程度)で解く必要がある。したがって、アルゴリズム上は次のような工夫がなされた。

- ・ベースのLP問題は内点法の拡張版で解き安定した性能を持たせる。
- ・整数変数については、通常の方岐限定法によらず発見的の近傍探索法(メタ・ヒューリスティック)を使用し短時間で実用的解を見つけるようにする。

基本のアルゴリズムであるPDNB (Primal-Dual Newton Barrier)法の採用により、総計算時間に占めるLP時間をせいぜい10~15%程度に抑えることに成功しており、安定した性能を発揮していると評価することができる。⁵⁾

さらにメタ・ヒューリスティックの使用は、最近盛んに行なわれている近似解法アルゴリズム⁶⁾の応用

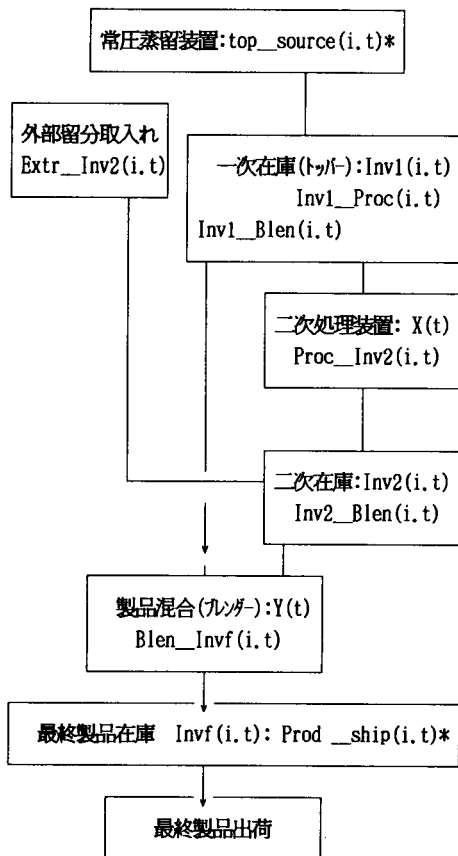


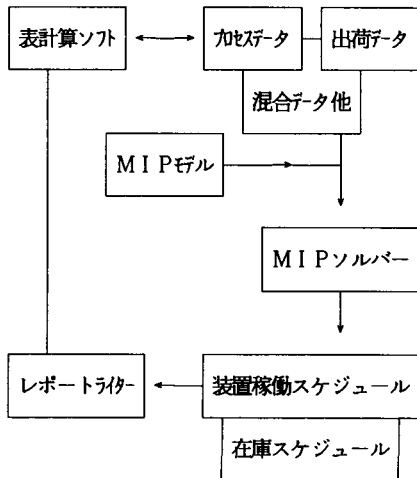
図4 精製モデルのノーメンクレイチュアの整備

と言えるが、ここでの一番の特徴は問題の特殊構造を仮定しない一般的な MIP 問題を高速で解く近傍探索法という点である。³⁾ 特に、上記に示したような加重平均された目的関数を厳密な意味で最適化することにはあまり意味がない、むしろこうした便宜上設定されている目的関数に対する最適値により近い値を高速で発見することのほうがより実用的であると言えよう。

(もちろん解の近似値は、どの程度間違ってもよいか、でその程度が決まってくることになるが、得られた解が実用的であるか否かは扱われている問題の内容や、その解の使用される環境によって決定せざるを得ない。)ここでは発見された解と LP 解の乖離は計算できるので、それをユーザーに示すことによって、一応の歯止めをかけることとしている。

さらに、こうした高速アルゴリズムの導入とともにユーザーの希望するモデルやシナリオを効率よく作成するためのモデル化方式の整備も実施した。⁴⁾ これによって MIP モデルを高速で生成するとともに、モデルの変更や拡張、および複数製油所への展開もユーザー自身の手で可能となるような考慮を行なった。

入出力データの管理と MIP モデルの生成、およびアルゴリズムへのインターフェースを考えた上で、全体のシステムイメージを下記のように設定し、処理フローが実務のフローイメージを妨げないものとした。⁴⁾



この中において、入力データは製油所のプロセスロジックに従った ASC II ファイルであるため、ユーザーによる編集が容易に行なえるため、既存のスケジューリングイメージを壊さないことが期待される。

また、モデルの生成と最適化の部分を分離することで必要に応じて各々の部分を実施可能のように配慮し

た。

6. プロトタイプの評価

こうして作成されたプロトタイプは、標準的なデスクトップ型 WS(主記憶容量 32 MB, Sun SPARC 20) 上でテスト運用されている。なお、当該モデルは単期間において、

制約式=400, 連続変数=500, 0/1変数=10程度となる規模でコーディングされている。

この典型的なテストケースとしては以下のような処理時間が記録されている。

日数	$M \times N \times Z$	LP-タイム	MIP-タイム
5	1698×2288×35	7.3	44.8
10	3458×4593×70	24.2	219.3
15	5218×6898×105	59.1	649.8

M : 制約式数, N : 総変数, Z : 整数変数
(時間単位: 秒)

計算時間としては一応当初の目標を達成しているが、さらにアルゴリズムをチューニングすることにより短縮することは可能と考えている。解の質に関しては、ベンチ評価として LP 解との乖離が 0 に近く、期待した解と言えるので、現場での実用性チェックのステップにおいて目的関数のパラメータのチューニングなどの作業に入ることになる。

7. CIM の OR の視点から

OR 手法を用いた問題解決は生産現場に大きなコストメリットをもたらすことはよく知られているが、一般的な PERT 等の手法に比べると数理計画法を応用したものの導入は比較的低調である。

これは前述したように、モデル構築の煩雑さに起因する問題やそのサイズ、および計算可能な機械資源の制約によるところが大きいのと思われる。ましてやスケジューリング問題となると数理計画法の入り込めるマージンは全くないかのごとき惨状と言ってもよい。

しかしながら製造業における OR 本来の持つ意味、すなわち問題を可能な限り大きくとらえて「工場」という 1 つの生産ボックス全体の最適化を指向することは言わば CIM の生産性、経済性を高める上で必須の要件であると考えられる。

確かに、スケジューリング問題のシステム化は複雑であり、確実に価値ある結果が得られるという保証も

ない上に一般的な（専門家による）力仕事に比べ、時には高価でさえある。ところが、OR的アプローチに（もちろん、それは厳密な意味で最適ではないかもしれないが、数学上の最適値は必ずしも製油所の最適値には一致しているわけではない）よって得られる解が、現場の専門家に与える価値ある情報というものを見逃すことはできない。とりまおさず、これら情報は

ア) “最適性の継承”という一連の経営情報の流れに切れ目がなく、ある目的関数に対応しつつ実行可能解を得るステップでのボトルネックが、各変数の情報として得られる、

イ) さらに、それら情報に“経済性”という情報を付加することが可能であり、コストメリットの規模をデジタルに表示可能である、

といった面であろうか。

たとえそれが近似解であっても、充分信頼に足るとするならば、そして十分に耐えられる時間内に専門家への提案ができるとするならば、それを見逃すことによって企業が被るダメージもまた、大きいと言わざるを得ない。コンピュータ・インテグレイティッド・マニファクチャリングが生産活動に革新をもたらすものであり続けるためには、経済的にもフィージブルなも

のでなければならず、その意味で未踏の領域であるスケジューリングの分野への数理計画法の応用はここに一石を投じるものでありたいと考える。

本検討は、未だに試用段階にあり、技術的な面でのブラッシュアップを企図しながら現実的なインストーラーの問題に対処していきたい。

参考文献

- 1) 茨木俊秀, スケジューリング問題の新解法
オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.10,
1994.
- 2) 木瀬 洋, スケジューリング問題の新解法
オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.11,
1994.
- 3) SAITECH 社, Smart Optimizer : User's Guide.
- 4) David M. Gay et al, AMPL
The Scientific Press, 1993.
- 5) R. J. Vanderbei et al, “Symmetric Indefinite
Systems for Interior Point Method” Mathematical
Programming 58, pp. 1-32
- 6) 久保幹雄, 巡回セールスマン問題への招待 1~3
オペレーションズ・リサーチ, Vol.39, No.1-3,
1994.

●電子メールサービスのご案内

ORソフトウェア研究部会
電子メールサービス分科会

ORソフトウェア研究部会では、その活動の一環として、ORに関連した各種研究とその普及に電子メールサービスがどのように役立つかの実験にとりこんでおります。この実験に参加して、電子メールサービスが、学会活動に有益であるとの立証に協力していただけませんか。今までもすでに大勢の方が参加してくださっていますし、多くの研究部会等が利用を試みて成功しています。利用法は下記のとおりになっております。どうか、その主旨をご理解のうえ、積極的にご活用ください。

1. 現在は実験の試行であり、学会の公的サービスではありません。
2. 研究会の案内や、報告あるいは広報などに用いてみてください。
3. 近日中に、研究発表会、シンポジウム、セミナー等の学会の行事に関する情報も入手できるようにする予定です。
4. メイリングリストへの登録方法、利用方法を次のようにとり寄せることができます。（電子メールを直接利用できない場合は、お近くの利用可能な方にご相談ください）

or-req@ise.chuo-u.ac.jp. 宛に本文が次の2行からなるメールをお送りください。

send :

help

折り返し、メールサービスの使い方を返送します。