事例研究

原料購買業務への線形計画法の適用

花井　宏巳

1. はじめに

当社の原料購入量は，鉄鉱石が年間1800万t，原料炭も1000万tに達し，そのほとんどを海外に依存している．

鉄鉱石，原料炭の輸入業務は

(1) シッパーとの売買契約

(2) 海運会社との用船契約

(3) 保険会社との海上輸送契約

(4) 商社との輸入実務委託契約

という形で進められている．

本社購買部門では年間生産計画をもとに，鉄鉱石，原料炭の銘柄別年間引取量を策定するとともに，千葉，水島各製鉄所の操業条件を踏まえ配分計画を策定する．

そして，港の受け入れ能力の違いや用船契約の違いなどさまざまな要素を織り込んで配船計画を練る．特に専用船の場合，鉱山のある港(積港)へ向かう往路の積み荷（オイル，石炭などで三国間カーゴとよぶ）をどこで手当するか，予定していた港でストなどのトラブルが発生しそうだ．その場合の代替港への転売をどうするかなど，長年の経験と勘がモノをいう分野である．

こうした海上輸送と製鉄所の個性に合わせた適正な配分が本社需給担当者の腕の見せどころであった．しかし，当社では経験と勘に頼るだけでなく，作業の標準化を進めるとともに，コンピュータを駆使した計画分野から日常事務処理分野までの総合オンラインデータベースシステムの構築をはかり，「操業の安定」「原料調達コストの削減」「業務の効率化，高度化」に効果を発揮している．

特に，購入計画，配船計画業務のシステム化に最適化手法の1つである線形計画法を採用し，最適購入，最適配船を追求したシステムを構築している．

本論文では，原料購買情報システムの概要とそのメインとなる購入計画，配船計画システムの内容をモデルを中心に紹介する．

2. 原料購買情報システムの概要

本システムは，鉄鉱石，原料炭を対象とする購入計画，配船計画，運航管理，原料全品種を対象とした契約，購入，支払などのシステムより構成された計画，契約から支払までの製鉄所も含めた総合一貫オンラインデータベースシステムである．

各システムの概要を表1，システム関連図を図1に示す．

特に，購入計画，配船計画のシステムには，最適化手法の1つである線形計画手法を採用したモデルを組み込み，担当者が対話形式でシミュレーションを行ない，最適な購買計画が追求できる仕

はない　ひろみ　川崎製鉄㈱　東京本社システム部
〒100　千代田区内幸町2－2－3

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

表 1　原料購買情報システムの概要

システム名	システムの概要
購入計画	銘柄購入単価，運賃単価，取引可能量，銘柄品位などの原料供給条件および操業条件をもとに，線形計画法により銑鉄コストが最小になるような鉄鉱石，原料炭の銘柄購入量を算出するとともに，銘柄別の評価額を求める．
配船計画	銘柄別鉄鉱石，原料炭の輸送量，船腹量および各船の運行速度，バンカーオイル価格などの諸条件をもとに，線形計画法により輸送コストが最小になるような船別航海数を算出するとともに，それを指標として船のスケジューリングを行なう．
運行管理	船会社からの船の運行位置，出帆実績などにもとづき運行スケジュールを見直すとともに製鉄所に最新の入船予定を伝送する．
契約購入支払	銘柄，傭船などの各種契約を蓄積し，注文書などの契約諸表を作成する．契約と製鉄所からの検収報告にもとづき買掛計上処理を行なう．買掛計上データと納入者からの請求書をもとに支払月，金額，金種を確定し財務部へ依頼する．
原料購買情報分析	上記各システムで蓄積されたデータをもとに，主に EUL (End User Language) 言語を用いて計画実績差異分析，計画要素の変化にともなう影響度分析，購入内容(単価，数量)，銘柄品位などの時系列分析などを行なう．

組みとなっている．

3. 計画システムの特徴

計画システムの要件として，重要なことは環境変化に対応して

(1) 容易かつタイムリーにケース・スタディが実行できる．

(2) 計画の評価指標を設定し，簡便にケース・スタディ結果が評価できる．

(3) システム(モデル)変更が容易かつ迅速にできることである．そこで

a．担当者が対話形式でケース・スタディができる．

b．データ・エントリー負荷を削減する．すな

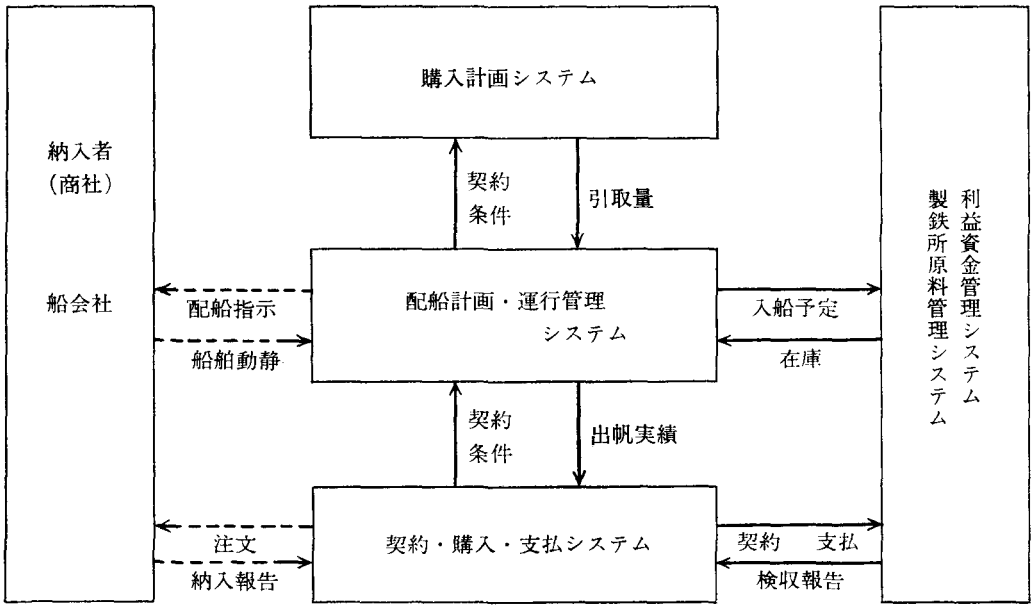

図 1　原料購買情報システム連関図
注) 矢印の実線はコンピュータによる自動授受，破線は伝票あるいは電話等による情報授受

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

わち

- 他システムのデータ（ex.契約データなど）を活用し，できるかぎり入力データを自動生成する．
- マスター的データとケース・スタディ的データを識別し，データベースを分けるとともに，ケース・スタディデータにはコピー機能をもたせ，変更したいデータのみ入力する．

c．アウトプットは極力一覧性を配慮した作図，作表とする．

d．数理計画法ソフトウエアパッケージであるMPSX（Mathematical Programming System Extended の略）用インターフェースルーチンを開発し，モデルの変更が容易迅速にできるとともに，他プログラムに影響をおよぼさないようにする．

などの要件を満足するシステム設計をしている．

特に，計画策定業務においてケース・スタディが容易に行なえることの意義は

(1) 代替案の提示
(2) ケースの検討を通してのよりよい代替案の発見
(3) 環境変化に適応性のある基本案の策定
(4) 計画実行への留意点の明確化
(5) 環境変化にともなう再検討

など充実した計画策定が行なえることである．

また，配船計画システムについては，基本構想段階において，パイロットモデルを作成し，最適化手法として線形計画法が有効であることを確認し，システム開発を実施した．現状の仕組みを改革する場合には，事前に十分その仕組みを検討評価することが重要であると考えたからである．

4. 購入計画モデルと配船計画モデル

ここでは，先に述べた購入計画，配船計画システムに組み込まれているＬＰモデルについて説明する．

4.1 購入計画モデル

当社においては，製鉄原料の購入計画策定をサポートするシステムとしては，原料炭を対象とするものが古く，その原形が線形計画法を利用して1963年に開発されている．その後，銑骸操業技術，コンピュータ利用方法，システム運用方法の進歩に歩調を合わせ，システムと情報提供の質を向上させつつ，今日まで効果的に活用されてきた．

原料購入計画モデルというのは

「銘柄別購入量制約，銑鉄生産量制約，各種操業制約条件のもとで，原料購入費用と操業費用の合計が最小になるように各銘柄の購入量を決定するモデル」

である．したがって，最適銘柄選択およびそれとの関連での操業条件の検討について有効な情報を提供する．

しかし，購入政策立案に当っては，もう１つの柱として価格契約交渉に当っての有効な情報が必要である．この価格契約交渉上必要な情報は２つの内容に分けられる．

１つは，原料の需給供給市場において各銘柄の客観的かつ妥当な購入価格はいくらかという情報すなわち銘柄評価価格情報である．

もう１つは，どうしてそういう評価価格になるかをその銘柄のもっている各種の品位，属性と関係づけて説明する要因分析情報である．

これらの価格契約交渉上必要な情報が購入量決定に関する情報とともに整合的に提供できてこそより充実した原料購入計画策定システムとなる．

当社では，銘柄価格評価問題を線形計画問題に対する双対形式を利用し解決した[1]．たとえば，以下に示すような購入計画モデルがあったとする．

(1) $x_i \geq L_i \qquad i=1,2,\cdots,n$

(2) $-x_i \geq -U_i$

(3) $\sum_{i=1}^{n} a_{ji}\, x_i \geq A_j \qquad j=1,2,\cdots,m$

(4) $\sum_{i=1}^{n} p_i\, x_i + \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n} d_j\, a_{ji}\, x_i \Rightarrow \mathrm{Min}$

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

ただし，i：銘柄識別番号　　x_i：銘柄別購入量

j：制約条件番号　　a_{ji}：制約条件に関する係数

U_i, L_i：銘柄別購入量の上下限値

A_j：生産量や品位に関する操業制約を表わす限界値

p_i：銘柄別購入単価

d_j：$(a_{ji}\,x_i)$の変動にともなう操業費用増加額

制約条件(1)(2)(3)のシャドウ・プライスをそれぞれπ_{Li}，π_{Ui}，π_{Aj}とすれば，双対定理より

$$(5)\quad \pi_{Li}-\pi_{Ui}+\sum_{j=1}^{m}a_{ji}\,\pi_{Aj}=p_i+\sum_{j=1}^{m}d_j\,a_{ji}$$

という関係式が成立する．

シャドウ・プライスというのは各制約式の定数項部分を1単位増加させたときの目的関数，この場合は原料購入操業費用であるが，この費用の増加額を表わす．

今，最適購入量が購入量下限に一致している銘柄iのシャドウ・プライスπ_{Li}はその銘柄の購入量下限を単位量増加させたときの原料購入操業費用の増加額を表わしている．したがって，この銘柄iの価格が購入量下限以上の部分についてもしπ_{Li}だけ安ければ，その銘柄の購入量を単位量増加させても，費用は増加しないことになる．すなわち，銘柄iはπ_{Li}という金額だけ割高な銘柄である．最適購入量が購入量上下限の間にあるときはシャドウ・プライスはθである．最適購入量が購入量上限に一致しているときは，シャドウ・プライスは負値になり，その絶対値は同様の意味でその銘柄の割安さを表わす．

$$(6)\quad \pi_{Li}-\pi_{Ui}=\begin{cases}\pi_{Li}\geq 0 & x_i=L_i\text{のとき}\\ -\pi_{Ui}\leq 0 & x_i=U_i\text{のとき}\end{cases}$$

一般的にシャドウ・プライスはその銘柄の割高さを表わす数値である．このことから銘柄の評価価格は購入価格p_iから購入量制約のシャドウ・プライス$(\pi_{Li}-\pi_{Ui})$を引いたものになる．そして，その評価価格は(5)式より

$$(7)\quad (\text{評価価格})_i=p_i-(\pi_{Li}-\pi_{Ui})$$

$$(8)\quad =\sum_{j=1}^{m}\pi_{Aj}\,a_{ji}-\sum_{j=1}^{m}d_j\,a_{ji}$$

と表現できる．

原料の需給市場を総合的に考慮したときの銘柄評価価格を銘柄選択問題の検討から得られる種々の情報を利用し，各銘柄のもっている各種属性により表現し，分析するための方法論を開発し，それを原料炭と鉄鉱石の購入計画システムに組み込み銘柄評価面，価格契約交渉面に対する質のよい情報を銘柄選択面の情報とともに提供し，効果的に活用している．

4.2 配船計画モデル

配船計画システムは，鉄鉱石と原料炭の輸送に関し

「どの船が，いつ，どの港で，何の銘柄を何トン積み，どんな航路を使えば輸送コストが最小になるか」

という案を作成することである．

そこで以下に示す要件を満足するＬＰモデルを作成した．

目的関数は，三国間カーゴ収支も含めて輸送コストを最小にする．

制約条件としては

(1) 各積港の輸送量は必ず輸送する．

(2) 専用船の稼動率は100％とする．

(3) ＣＯＡ船[1]は契約許容範囲内で履行する．

(4) 船腹量が輸送量に満たない場合は，スポット船でまかなう．

(5) 三国間カーゴ輸送量はある程度幅をもたせて履行する．

(6) 多港積[2]ＰＳＣトライアングル[3]など複雑な運用形態も対象とする．

注

1) Contract of Afreightment の略で，輸送契約のこと．

2) 多港積とは，一航海で二港以上の積港の荷物を運ぶ運用形態のこと．

3) ＰＳＣトライアングルとは，フィリピンにある焼結工場に鉄鉱石を輸送し，あわせてその工場で生産された焼結鉱を輸送する運用形態のこと．

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．

$$(9)\quad U_p \leq \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in S(p)} w_{ij} x_{ij} \quad p=1,2,\cdots,m$$

$$(10)\quad LV_i \leq \sum_{j \in S(i)} d_{ij} x_{ij} \leq UV_i \quad i=1,\cdots,n$$

$$(11)\quad LCU_k \leq \sum_{i=1}^{n} \sum_{j \in S(k)} cw_{ij} x_{ij} \leq UCU_k \quad k=1,2,\cdots,l$$

$$(12)\quad \sum_{i=1}^{n} \sum_{p=1}^{m} \sum_{j \in S(p)} f_{ij} w_{ij} x_{ij} + \sum_{i=1}^{n} \sum_{k=1}^{l} \sum_{j \in S(p)} cc_{ij} cw_{ij} x_{ij} \Rightarrow \mathrm{Min}$$

ただし，i：船識別番号　j：運用形態識別番号

p：積港識別番号　k：三国間カーゴ識別番号

x_{ij}：航海数　U_p：輸送量

LV_i, UV_i：船の使用制約上下限

LCU_k, UCU_k：三国間カーゴの輸送量上下限

w_{ij}, f_{ij}, d_{ij}：積高，運賃単価，航海日数

cw_{ij}, cc_{ij}：三国間カーゴの積高，収支単価

$S(p)$：積港pを経由する運用形態の集合

次号予告

特集　教育とOR

わが国における生涯教育の進展状況　瀬沼克彰

放送大学におけるシステム工学教育をめぐって　浅居喜代治

私のCAI事情　槻橋正見

教育のためのうまいグラフ表現　鈴木義一郎

建築工匠にみる教育訓練のおーあーる　荒木睦彦

事例研究

進路指導のOR　岡太彬訓

Logo と子供たち　戸塚滝登

研究レポート

システムダイナミックスと大学モデル　椎塚久雄

表 2　LPモデルの大きさ

LPモデル名 / 数	購入計画		配船計画	
	鉄鉱石	原料炭	鉄鉱石	原料炭
式	649	29	519	75
変数	476	171	1025	413

$f_{ij}, w_{ij}, d_{ij}, cw_{ij}, cc_{ij}$は運航速度，バンカーオイル価格，港の受け入れ能力の関数であり，システム設計上これらのデータはパラメータデータとして容易にケース・スタディができるようになっている．

すなわち，ケース・スタディにより輸送コストが最小になる各船の最も適切な航路，運航速度および補油港の選択が可能となる．

当システムのメリットは

(1) 各船の最も適切な航路の選択

(2) 空船，減載運航の削減

(3) バンカーオイルコストの削減

などが図れる．

当社の購入計画，配船計画のモデルの大きさを表2に示す．

5. おわりに

以上述べたように線形計画法を採用した購入計画モデル，配船計画モデルを総合オンラインデータベースシステムに組み込み，担当者が随意に銘柄契約，用船契約および積地品位，揚地品位などのデータを画面上に抽出展開して，ケース・スタディを実行し，総合的購買計画を随時にかつ短期間で立案できる仕組みを提供し，原料調達コストの削減などに大きく寄与している．

参考文献

[1] 伏見清和他：製鉄原料の銘柄価格評価分析法．川崎製鉄技報，Vol.11，No.3 (1979)，68-80.

[2] OR事典編集委員会編：OR事典．日科技連

© 日本オペレーションズ・リサーチ学会．無断複写・複製・転載を禁ず．