

生産・輸送計画モデルと その感度分析情報の戦略的利用

相沢 健実, 河野 高洋, 森 雅夫

はじめに

物流業界誌によれば[1]、ここ数年来「物流費対売上高比率上位(最悪)20社」にセメント数社が揃って名を連ねている。これは、セメントが(1)重量/価格比の高い商品である、(2)原料資源の偏在により、大消費地近傍の工場立地が困難である、(3)バルク輸送が主となるため、専用の輸送手段に頼らざるをえない、等の他に、旧弊的な商流と商習慣がその理由として挙げられる。何れにせよ、生産と流通の構造的見直しによる徹底した合理化効率化を抜きにしてはセメント産業の生き残りが困難であることは疑いない。筆者らは、この中において「どこで生産し、どこに運ぶか」を戦略的に検討するシステムを構築し、これが、提携/合併や市場の国際化といった企業を巡る環境の著しい変化に対処するに当たって特に有効に機能することを確認したので報告する。

1. セメント物流の特徴と課題

セメントは典型的な見込み生産型商品であり、その輸送は、工場から中継出荷基地(Service Station: 以下SS)に至る一次輸送と、SSから需要家に至る二次輸送とに分けられる。二次輸送は、陸上のトラック輸送が主体であるが、一次輸送の形態は地理的条件に左右され、海岸にある工場は専用タンカー、内陸工場は貨車による一次輸送となるのが通例である。また、全体では貨車輸送が減少し、タンカー及びトラック輸送の割合が増加しているのがここ四半世紀の傾向である[2]。

セメントの輸送は、このような一次輸送と二次輸送の組み合わせの形態が工場出荷の70%以上を占める[3]

あいざわ たけみ, かわの たかひろ

秩父小野田(株) 技術部制御

〒105 東京都港区西新橋 2-14-1

もり まさお 東京工業大学工学部経営システム工学科

〒152 東京都目黒区大岡山 2-12-1

受理 95. 5. 8 採択 96. 4. 15

が、工場から直接需要家へ渡るもの(直接輸送)や、臨海SSから更に内陸SSと中継され(SS間輸送)三段階で運ばれるケースもある。

一方、セメント需要には季節変動(年度末に増加等)があり、近年の多品種化と市場の国際化(輸出/輸入の増加と為替変動)の動きと相俟って、生産・輸送計画での大きな外乱要因となっている。

このセメント産業にとって負担の大きい物流費を削減するに当たっての基本方針としては、

- (1) 企業内で生産効率の高い工場へ生産を傾斜割付し、これと抱き合わせた最適物流構造を徹底的に追求すると同時に、
- (2) セメントの物流費低減の取組には一企業単位では限界があるとの認識の上で、提携/合併による共同配送や物流設備再配置を、M&Aの基礎戦略も絡めて検討する。
- (3) さらに、セメント市場の国際化に対応し、生産拠点の海外移転も睨んだ生産・物流体制の見直しを行う、

などが挙げられる。

2. 生産・輸送モデルとその定式化

以上の基本方針に従って、製造直接費と販売直接費の総和を最小にする生産・輸送計画を戦略的に検討するシステムを考える。図.1に示す他のシステム[4,5,6]との相互関連図が示すように、このシステムでは、期から年単位での生産配置と物流収支を決定し、在庫概念を含んだ日常のオペレーションは、より時間周期の短い下流のシステムで扱われる。

さて、問題を単純化し、図.2のような一次、二次輸送を基本にした物流モデルを考える。ここでPは工場(海外生産拠点を含む)であり、一つの工場では複数のキ

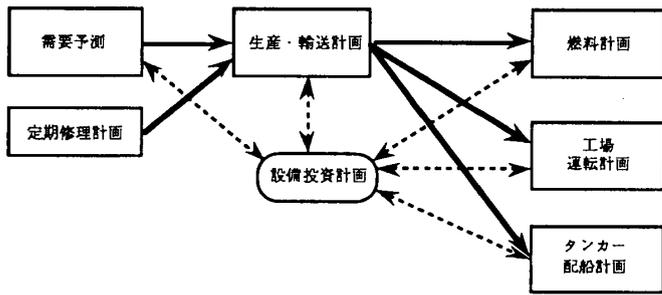


図 1: 最適化システム相互関連図

ルン(焼成炉)で、複数の品種のセメントが生産されている。SはSS、Dは需要地を表わす。また、 x は工場からSSへ、 y はSSから需要地への輸送を示し、 z は工場から需要地への直接輸送を、また、 w はSS間輸送を示す。そこで、各需要地の品種別需要予測値が与えられた場合に、生産費用と輸送費用の合計を最小にするような、工場への生産割付(休止も含む)と、SSの運転停止、及び各輸送ルートへの輸送量を決定するのがこの生産・輸送計画の目的である。

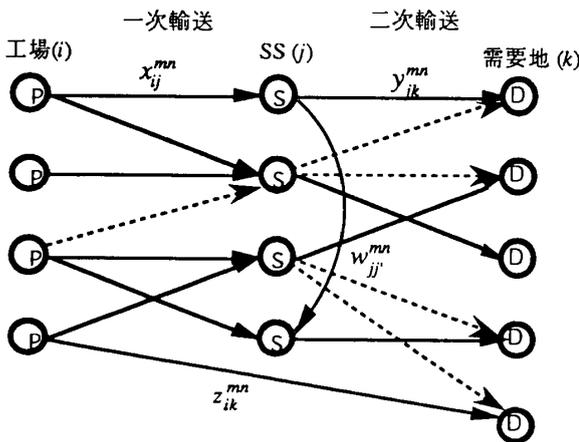


図 2: 生産・輸送モデル(線種は品種を表す)

そこで、定式化するために必要な変数、定数を次のように定める。

[添字]

i : 工場 j : SS k : 需要地 m : 輸送手段 n : 品種

[変数]

x_{ij}^{mn} : i -工場から j -SS への輸送量 (m 手段、 n 品種)

y_{jk}^{mn} : j -SS から k -需要地への輸送量 (同上)

z_{ik}^{mn} : i -工場から k -需要地への直接輸送量 (同上)

$w_{jj'}^{mn}$: j -SS から j' -SS への SS 間輸送量 (同上)

この他に、工場及びSSの運転に当たっての固定費を考慮する必要上、工場の運転停止を表現する次の0/1変数を導入する。

s_i^p : i -工場の運転 (0/1)

s_j^s : j -SS の運転 (0/1)

[定数]

CX_{ij}^{mn} : i -工場から j -SS への輸送単価 (m 手段、 n 品種)

CY_{jk}^{mn} : j -SS から k -需要地への輸送単価 (同上)

CZ_{ik}^{mn} : i -工場から k -需要地への直接輸送単価 (同上)

$CW_{jj'}^{mn}$: j -SS から j' -SS への SS 間輸送単価 (同上)

F_i^p : i -工場の運転固定費

F_j^s : j -SS の運転固定費

V_i^{pn} : i -工場の運転変動費 (n 品種)

V_j^s : j -SS の運転変動費 (SSの通過量に比例)

P_i : i -工場の生産能力

S_j^n : j -SS の設備能力 (n 品種)

D_k^n : k -需要地の需要量 (n 品種)

以上を用いて 図2のモデルを数式で表現する。まず、目的関数は(1)式のように、

$$\begin{aligned} \min z = & \sum_n \sum_m \left\{ \sum_i \sum_j CX_{ij}^{mn} x_{ij}^{mn} + \sum_j \sum_k CY_{jk}^{mn} y_{jk}^{mn} \right. \\ & + \sum_i \sum_k CZ_{ik}^{mn} z_{ik}^{mn} + \sum_j \sum_{j'} CW_{jj'}^{mn} w_{jj'}^{mn} \\ & + \sum_i V_i^{pn} \left(\sum_j x_{ij}^{mn} + \sum_k z_{ik}^{mn} \right) \\ & + \sum_j V_j^s \left(\sum_i x_{ij}^{mn} + \sum_{j'} w_{jj'}^{mn} \right) \\ & \left. + \sum_i F_i^p s_i^p + \sum_j F_j^s s_j^s \right\} \end{aligned} \quad (1)$$

一次輸送/二次輸送/直接輸送/SS間輸送の各費用と各工場/SSの運轉變動費とを全品種/輸送手段に関して足し合わせたものに、更に全工場/SSの固定費を加えた総費用であり、これを最小化する問題となる。

主な制約式としては以下のものがある。まず、各工場からの出荷量(一次輸送と直接輸送)は工場の生産能力を上回ることができない。

$$\sum_n \sum_m \left(\sum_j x_{ij}^{mn} + \sum_k z_{ik}^{mn} \right) \leq P_i s_i^p \quad \forall i \quad (2)$$

次に、各需要地への到達量(二次輸送と直接輸送)が品種毎の需要量を満たしていなければならない。

$$D_k^n \leq \sum_m \left(\sum_j y_{jk}^{mn} + \sum_i z_{ik}^{mn} \right) \quad \forall n, \forall k \quad (3)$$

また、各SSへの入荷量(一次輸送とSS間輸送の入側)と各SSからの出荷量(二次輸送とSS間輸送の出側)は等しく(在庫を考えない)、かつ、その量は各SSの設備能力以下である必要がある。

$$\begin{aligned} & \sum_m \left(\sum_i x_{ij}^{mn} + \sum_{j'} w_{j'j}^{mn} \right) \\ &= \sum_m \left(\sum_k y_{jk}^{mn} + \sum_{j'} w_{j'j}^{mn} \right) \leq S_j^n s_j^s \quad \forall n, \forall j \quad (4) \end{aligned}$$

輸出先も需要地として捉え、工場からの直接輸送のみを考える。ただし、直接輸送単価に代えて、 CZ_{ik}^{mn} にはFOB (Free On Board) の符号を負にした値を与えた上で、(3)式の当該部分を等式制約((3)'式と呼ぶ)に切り換える。

以上のように、目的関数と基本的な制約式は至って単純である。この外に、煩雑になるので、ここでは省略するが、工場での生産面の制約、輸送ルートに関する各種の制約等を考慮する必要がある。

このシステムでは、工場数8、SS数約150、需要地数約400、品種数4、輸送手段3、程度の規模の問題を扱っており、これをMIP (Mixed Integer Programming) で定式化すると、その概略規模は、連続変数の数4000、0/1整数変数の数100、制約式の数2500となる。最適化計算に要する時間は50MIPSのEWSで約5分である。

3. 最適解と関連情報のGUI

さて、担当者の便宜を考えると、最適計算の結果を少なくとも表の形で出力できることが望ましい。しかし、工場、SS、需要地の数が増えるにつれ、この表も加速度的に見難くなる。そこで、上述のEWS上に、図.3のような、全体及び地域別のGUI (Graphical User Interface) を作成し、担当者がLAN上のPC端末でも作業できるC/S(クライアント/サーバー)システムとした。

このGUIでは、ソースにより、矢印やエリアを色分けしたり、輸送量により矢印の太さを変化させるなど、輸送ルートと輸送量を地図上で一望できるようにした。また、該当する部分を選択すると、

- (1) 基礎情報(当該ルートの輸送単価や当該設備の能力 etc.)
- (2) 最適解(当該ルートの輸送量や当該工場の品種別生産量 etc.)
- (3) 感度分析情報(該当部分に関連するもの。次節で詳細に説明する)

等の数字が即座に参照できる仕組みとした。

ところで、この種のシステムの常として、MIPの最適解がそのまま受け入れられることは殆ど無いと言ってよい。何故なら、現実の決定に当たっては、MIPで定式化できないか、あるいは将来的には定式化可能でも未だシステムに組み込まれていない様々な条件を考慮しなければならないからである。従って、担当者はMIP最適解をベースに、解の一部を修正して目的関数の動きを見る等の単純なシミュレーション計算や、感度分析情報を見ながら、解の一部や解の動く範囲を固定したり、制約を変更して再度最適化計算を行なう、所謂What-If分析等を進めながら様々なケーススタディーを繰り返して行くことになる。このような作業を進める上で、この対話型で親しみやすいGUI機能が大変役立っている。

4. 感度分析情報の戦略的利用

感度分析は複雑に利害の絡んだ現実の意思決定の場での合意形成に非常に有効である。また、この感度分析を連続化したパラメトリック分析や上述のWhat-If分析は、将来予測に不確実性を伴うケースでの意思決定に有効である。このモデルでは例えば以下のような情報が

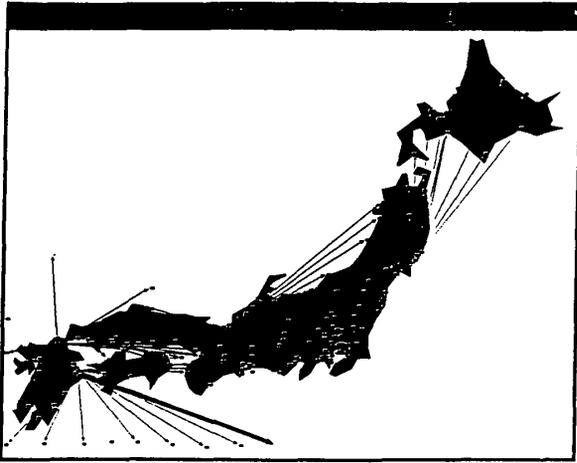


図 3: 最適生産輸送解とその GUI

計算されている。

4.1 感度分析の例

- (a) 需要が変動した場合には、どの工場で生産調整するのが正解か。またそれは、何万トンから何万トンまでの範囲で正しいか。
- (b) 特定の工場の生産能力の増強がどれだけのコスト効果をもたらすか。逆に装置のトラブル等による特定工場の生産能力低下がどれだけのコスト高をもたらすか。
- (c) 最適解と異なる供給元の指定がどれだけ割高に付くのか。
- (d) SS 設備能力の制約がどれだけのコスト高につながるか。
- (e) 最適解で生産割付のない工場の製造直接費がいくらまで下がると、その工場への生産割付が可能となるか。
- (f) 品種の統合、再配置のための設備投資は、どの規模までに抑える必要があるか。
- (g) 輸量の変化の影響はどうか。またその数字の有効範囲は。
- (h) 為替相場がどのラインまで来たら、生産/輸送構造の再検討が必要になるのか。

等々である。具体的には次のようにすればよい。

- (a) 物流費を考えなければ、製造直接費の高い工場から生産枠を絞って行けばよい(もっとも、固定費が

あるのでそう単純ではない)。輸送費用も考慮する本モデルでは、(2) 式で Shadow Price の付いていない工場から生産を絞って行き、その後は Range 情報を手掛かりに、パラメトリック解析をしながら、Shadow Price の低い順に手を付けてゆけばよい。

- (b) これは単純に当該工場の制約式(2) の Shadow Price を見ればよい。Range 情報を見ながら増産効果を計算すれば設備投資の採算評価が可能である。
- (c) これは一見、輸送費用と製造直接費とを加算して比較すれば出そうだが、全体最適化の中ではそう単純ではない。本システムの特徴はその目的や構成する機能それぞれのあいだにトレードオフ関係のあることである。これらを視点においた全体的な検討を通じて、関連する部門に潜在していた課題を提起することが不可欠となっている。局地的にしか見れないのが人間の判断の限界であり、物流担当者が最も興味を持った機能の一つでもある。具体的には $x_{ij}^{mn}, y_{jk}^{mn}, z_{ik}^{mn}, w_{jj'}^{mn}$ の Reduced Cost を見ればよく、営業政策等で割高なソースやルートに固執する場合の踏絵にできる。

以下同様に、

- (d) (4) 式の Shadow Price を見る。
- (e) x_{ij}^{mn}, z_{ik}^{mn} の Reduced Cost を参照する。
これについては、次節で改めて説明する。
- (f) (2) 式の Shadow Price を見る。
- (g) (3)(3)' 式の Shadow Price を見る。
- (h) これは目的関数の係数の変化の影響となるので感度分析というよりは What-If 分析となる。

4.2 感度分析情報の可視化

また、感度分析情報は数値を示すだけでなく、可視化して示したほうが理解しやすい場合も多い。上述の(e) のケースについて、その例を図4/図5に示す。ある域内に競合する2工場(図中AとB)があったとし、これまで2工場とも域内の需要地(図中○印)に自工場品を供給していたとする。検討の結果、図4のようにA工場の近傍まで、B工場が供給すべきであるとの最適輸送解が出たとする。A工場としては、できるだけ失地を回復してA工場の稼働率を高めたい。そのためには、(輸送費

は両工場とも距離で決まるとして)、A工場は製造直接費をいくらまで下げる努力をしなければならないのか。図.5の破線は図.4の最適解で割り付かなかったルート of Reduced Costであり、実曲線はその等高線である。このような絵を描くと、A工場とB工場の力関係が一望できる。例えば、需要地Dは最適解ではB工場からの供給になっているが、この地域までA工場の供給域を広げるには、A工場の製造直接費は17単位円だけ下げなければならないことがわかる。

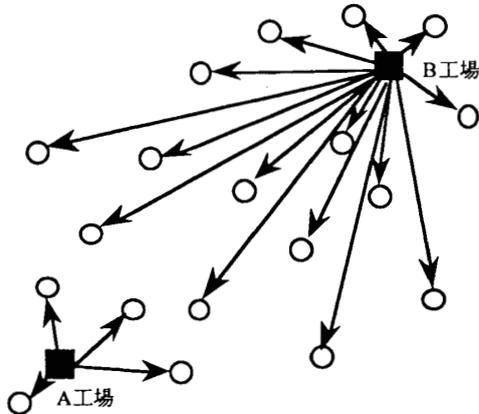


図 4: 最適生産・輸送解

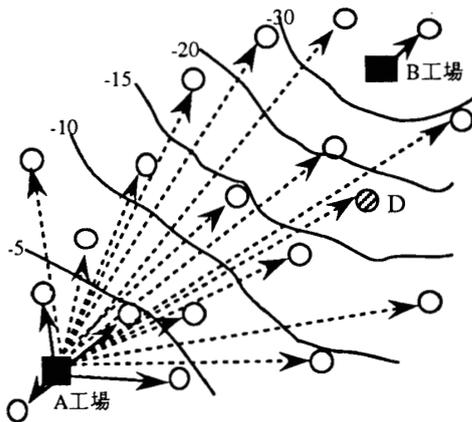


図 5: Reduced Cost とその等高線

ところで、この等高線は、ユークリッド距離空間上で、輸送費用が直線距離に比例する場合は双曲線となる[7,8]。簡単に説明すると、A、B両工場から需要地Dまでの距離がそれぞれ $d(A), d(B)$ とし、輸送単価を C^T 、A、B両工場の製造直接費を $C^P(A), C^P(B)$ とすると、両工場の供給領域の境界では次式が成り立ち、

$$C^P(A) + C^T \cdot d(A) = C^P(B) + C^T \cdot d(B) \quad (5)$$

これを变形すると次式となる。

$$\Delta d = d(A) - d(B) = \{C^P(A) - C^P(B)\} / C^T = \text{一定} \quad (6)$$

つまり、この等高線はA、B両工場からの距離の差が一定な需要地の集まり、すなわち双曲線となることが分かる。

実際には3工場以上で相互に影響し合っていること、輸送費が直線距離には比例せず、河川や道路事情による歪みがあること、また、需要地の行政区分の関係、等の理由により、きれいな曲線とはならないが、ほぼ双曲線に近い形となる。

4.3 感度分析の効用

このように、感度分析では、最適解がこれまでの輸送方法と異なった場合に、Reduced Costを見れば、その解が従来の経験による解と遜色ないものか、あるいは、大きな改善につながるのかを瞬時に判断できる。つまり、感度分析情報は、最適解に反した行動をとる場合の“解の重さ”を表しているといえる。自動車の世界で、パワーステアリング車が出始めの頃は事故が多発したという。現在のパワステ車にはタイヤが縁石に乗り上げた時、それをハンドルを通して運転者に伝えるバイラテラル制御[9]が組み込まれている。同様に、パワーシャベルにおいても掘削の負荷をレバーを通してオペレータに伝えることで操作性を格段に改善している。人間とマシンの協調を前提としたこのような仕組みを考えると、ORの世界でも、担当者にタイムリーに感度分析情報を陽に与えることの重要性が理解できる。計算機の高速度化とWindowsやMotif等をインフラとしたGUIの進歩が、漸くORにもその道具立てを与えてくれたとも解釈できよう。

5. 効果および今後の発展

本システムの開発にはスタッフ部門で12人月を要した。その労力の大半は、関連データベースの整備とGUIの構築に費やされたと言ってよい。SSの増減に伴うメンテナンス等は計画担当者でも行えるが、モデルの大幅な改造はスタッフ部門が担当している。

本システムによる効果を具体的な数字で定量的に示すことができないのが残念である。それは、機密上の理由の他に、物流問題では特に、例え最適解が求まった

としても、現実をそれに合わせるには、様々な現場サイドの課題を一つ一つ克服していかなければならないという事情にもよる。しかし、例え1%の改善でも数億のオーダーとなることから、効果の規模はおおよそ推測できると考える。また、去る94年10月の会社合併の際も、物流分野での合併効果の公表目標値40億円を実現する上で、本システムが不可欠な道具立ての一つになっていたことも特筆しておきたい。

以上の直接的効果の外に、上述の如く、単発的な最適解の提示から一步踏み込んで、What-If分析や感度分析による膨大なケーススタディーや関連情報の提示を、検討の進捗状況に合わせて迅速に行えることは、企業内外の複雑な利害関係を調整し合意形成に至る過程や、経営者の意思決定を正確かつ迅速化する上で重要な役割をはたすものと評価されている。

今後、更に、本システムの機能拡張を図っていくと同時に、関連する他の最適化システムとも合わせ、総合的な生産・物流最適化システムを構築していく予定である。

参考文献

- [1] 日経ロジスティックス, 日経BP社(1992-1994)
- [2] セメント協会編:『セメントの常識』(1992)
- [3] 山田順治:『セメントの実際知識』, 東洋経済新報社(1975)
- [4] T.Aizawa, T.Kawano: "Optimization Systems in Production and Distribution of the Cement Industry", Proceeding of the 37th IEEE Cement Industry Technical Conference(1995)
- [5] 相沢健実, 平良智寿: "セメント最適生産計画と整数計画法", 第5回RAMPシンポジウム論文集,(1993)
- [6] 相沢健実: "燃料購入計画への混合整数計画法の適用", 日本経営工学会誌, Vol.46, No.5, (1995)
- [7] 阿保栄司:『物流ソフトウェアの実際』, 日刊工業新聞社(1977)
- [8] 柳井浩: "工場の位置と配達区域", 高校生のためのOR研究部会資料, 4, 4(1995)
- [9] 新誠一: "バイラテラル制御", 省力と自動化, Vol.19, No.8, pp75-77(1988)