

# セメント産業における副産物の利用促進に関する研究

名古屋大学工学研究科土木工学専攻 学生会員 和田 光永

名古屋大学工学研究科土木工学専攻 正会員 ハンマード アミン

## 1. はじめに

セメント製造は焼成・粉砕工程で多量のエネルギーを消費するため、これに際して多量の  $\text{CO}_2$  が発生する。一方、石炭火力発電及び粗鋼生産の副産物として産出されるフライアッシュや高炉スラグを混合セメントの混合材として使用することにより、石灰石の使用量や、エネルギーの消費量を低減でき、それにより  $\text{CO}_2$  排出量を減らすことができる。ここで、混合セメントの生産拡大を考える上で鍵となるのがセメント工場への副産物輸送である。効率の悪い輸送はコストがかかり、その結果リサイクルが進まない。

本研究では、実際の状況をできる限り詳細に再現して、混合セメントの利用拡大による環境負荷低減効果を評価するために、副産物の各セメント工場への運搬量を考慮した副産物リサイクル計画モデルを確立する。本モデルは、地理情報システム (GIS) と最適化手法を用いて実行される。また環境税の導入により、環境汚染等の負の外部経済がセメント価格に反映された場合の、混合セメント拡大への影響についても評価する。

## 2. 副産物リサイクル計画モデル

ある地域に  $I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n$  といった複数の産業が存在し、この地域内の異なった場所に各産業  $I_i$  の工場である  $A_{i,1}, A_{i,2}, \dots, A_{i,j}, \dots, A_{i,m}$  が存在すると仮定すると、セメント産業における副産物リサイクルモデルは図 1 のように表される。ここで産業  $i$  の工場  $j$  からセメント工場  $k$  に運ばれる副産物量を  $x_{i,j,k}$ 、二つの工場間の距離を  $d_{i,j,k}$  と表す。副産物運搬量  $x_{i,j,k}$  はこのモデルを定式化することにより決定し、工場間の距離  $d_{i,j,k}$  は GIS を用いて検索する。

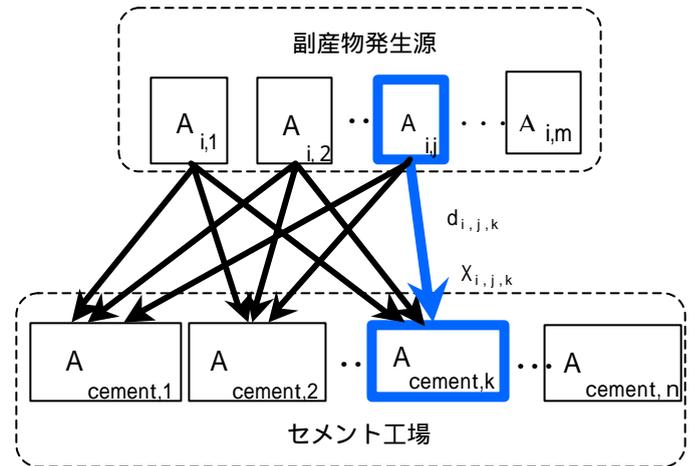


図1 産業間のリサイクル関係

モデルの定式化については、まずセメント工場のコストをポルトランドセメント、フライアッシュセメント、高炉セメントに関するコストの合計として定義する。セメントの販売による工場の利益は、マイナスのコストとして考える。ある種類のセメントを 1t 生産することによるコストは、石炭、電気、石灰石のコスト、副産物利用に伴うコスト (混合セメントの場合)、環境汚染に伴うコスト (環境税の導入を考えた場合) の合計から、このセメント 1t の価格をひいたものとする。混合セメントはどの工場でも、セメントに対してフライアッシュ及び高炉スラグをそれぞれ  $a$  及び  $b$  の比率で混合するものと仮定すると、セメント産業全体のコストを最小にするような副産物の最適運搬量  $x_{i,j,k}$  を決定する問題は、以下のような定式化で表すことができる。

目的関数:  $Minimize \sum_k C_k$

$$C_k = c_0 \left\{ K_k - \left( a \sum_j x_{1,j,k} + b \sum_j x_{2,j,k} \right) \right\} + \sum_j (ac_1 + ud_{1,j,k}) x_{1,j,k} + \sum_j (bc_2 + ud_{2,j,k}) x_{2,j,k}$$

制約条件:  $\sum_k x_{i,j,k} \leq W_{i,j}$  for all  $i,j$

$$a \sum_j x_{1,j,k} + b \sum_j x_{2,j,k} \leq K_k \quad \text{for all } k$$

ここで  $x_{i,j,k}$ : 産業  $i$  の工場  $j$  からセメント工場  $k$  に運ばれる副産物量,  $d_{i,j,k}$ : 産業  $i$  の工場  $j$  からセメント工場  $k$  までの距離,  $C_k$ : 工場  $k$  のコストの合計,  $c_0$ : ポルトランドセメント 1t の製造コスト,  $c_1, c_2$ : フライアッ

シュセメント，高炉セメント 1t の製造コスト（セメント工場までの運搬コストは含まない）， $K_k$ ：工場  $k$  のセメント製造能力， $\alpha_i$ ：セメントとフライアッシュ及び高炉スラグをそれぞれ

$\alpha_1$ ， $\alpha_2$  の割合で混合， $u$ ：副産物輸送  $t \cdot km$  当たりの輸送コスト， $W_{ij}$ ： $i$  産業の  $j$  工場における副産物産出量を表す．環境税が導入された場合， $c_0$ ， $c_1$ ， $c_2$ ， $u$  の値が変わってくる．

GIS による副産物輸送距離  $d_{i,j,k}$  の検索の手順は，まず既存の日本地図データを用いて，セメント工場と副産物が産出される工場の位置を日本地図上にポイントとして入力する．図 2 には，各石炭火力発電所の位置とそれぞれのフライアッシュ発生規模を示した．次にネットワーク解析により，既存の道路データを用いて副産物発生工場とセメント工場間の最短経路とその距離  $d_{i,j,k}$  を検索する．

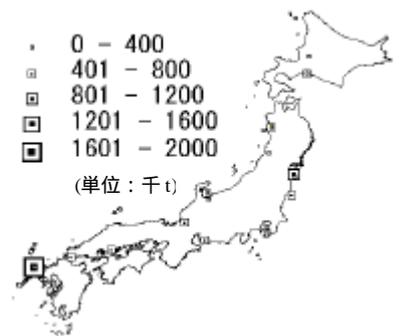


図 2 石炭火力発電所の位置とフライアッシュの発生規模

### 3. ケーススタディ

ここでは，日本のセメント産業を対象として副産物リサイクル計画モデルのケーススタディを行う．モデルの定式化により最適運搬量を求める際に用いた値は，統計資料<sup>1) 2)</sup>及び既往の文献<sup>3)</sup>を参考にした．セメントやその製造に必要な資材は，年間を通じて一定ではなく時期によって価格が異なる．特にセメント価格については国際価格に大きく左右される．しかし今回のケースでは，リサイクル計画に関して一年単位で考えたため，値を設定する際には年度平均値を参考にした．また環境税の設定は，他の環境税導入国の設定を参考にして 3,000 円/t-C，6,000 円/t-C と設定した．

図 3,4 は，現状における混合セメントの割合や CO<sub>2</sub> 排出量と，モデルの定式化によるシミュレーション結果を比較したものである．図 3 に示すように，現状では混合セメントの割合は約 20%程度であるが，モデルのシミュレーションの結果，環境税がない場合は混合セメントの割合が約 40%となり，環境税を 3,000 円/t-C，6,000 円/t-C とした場合，それぞれ約 50%と約 73%にまで増えた．このことから，環境税の導入によりセメント製造による外部不経済が価格に反映された場合，混合セメントは経済性の面でポルトランドセメントに比べて有利になり，その結果混合セメントの割合が増えるということが言える．

CO<sub>2</sub> 排出量に関しては，モデルのシミュレーションの結果，混合セメントの生産量が増えたため，現状と比べ少なくなっている．図 4 に示すように環境税がない場合に比べて，環境税が 3,000 円/t-C，6,000 円/t-C それぞれの場合で約 4.5%，12.4% 削減されるという結果となった．

### 4. まとめ

本研究では副産物リサイクル計画モデルを確立し，日本のセメント産業におけるケーススタディを通して，混合セメントの利用拡大による環境負荷低減効果を定量的に評価した．また環境税の導入を考慮した場合の，混合セメントの生産量拡大への影響，混合セメントの経済性について評価した．

【参考文献】1) セメント協会 (1999): セメントハンドブック 2) 日本フライアッシュ協会(1995): 石炭灰ハンドブック 3) 水口裕之・斉藤寛之 (1995): エネルギー量及び二酸化炭素排出量に注目した混合セメントの環境負荷低減効果に関する検討，自然環境との調和を考慮したエココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム論文報告集，pp.9-14

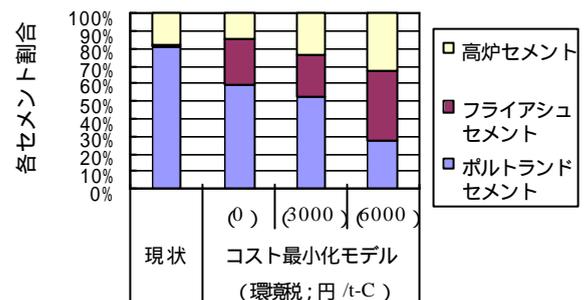


図 3 現状とコスト最小化モデルを実行した場合の各セメント割合

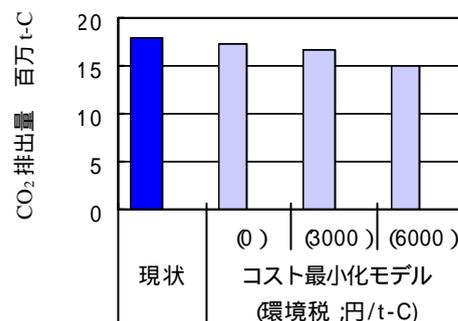


図 4 セメント産業全体の CO<sub>2</sub> 排出量